文部科学省

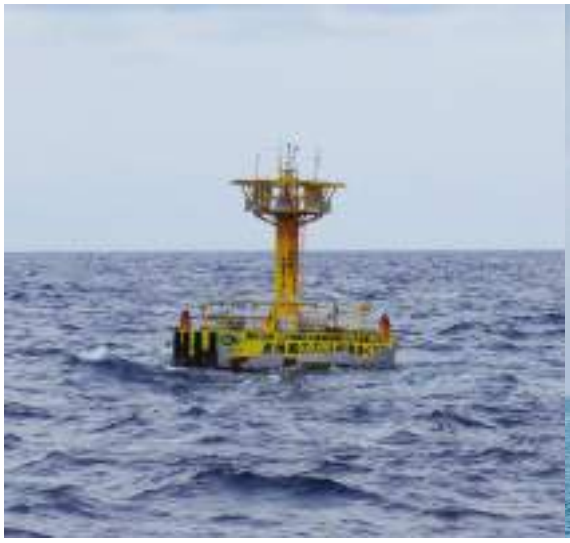
科学研究費補助金

基盤研究(S)

海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

課題番号：１６Ｈ０６３１０（平成２８年度～令和２年度）

研究成果報告書



令和４年３月

研究代表者　加藤照之
分担研究者　寺田幸博　田所敬一　二村彰

表紙写真：（左）高知県黒潮牧場 18 号ブイ
（右）弓削商船高専所属弓削丸（同高専 Web より）

文部科学省

科学研究費補助金

基盤研究(S)

海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

課題番号：１６Ｈ０６３１０（平成２８年度～令和２年度）

研究成果報告書

令和 4 年 3 月

研究代表者	加藤照之	大正大学地域構想研究所	特命教授
分担研究者	寺田幸博	高知工業高等専門学校	客員教授
	田所敬一	名古屋大学環境科学研究科	准教授
	二村彰	弓削商船高等専門学校	教授

Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
Grants-in-Aid for Scientific Research

Scientific Research (S)

A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements

Research Project Number : 16H06310

Project Report

March 2022

Principal Researcher

Teruyuki KATO　Institute of Regional Development, Taisho University, Appointed Professor

Shared Researcher

Yukihiro TERADA　National Institute of Technology, Kochi College, Visiting Professor

Keiichi TADOKORO　Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Associate Professor

Akira FUTAMURA　National Institute of Technology, Yuge College, Professor

目次

はじめに　2
研究経費　3
研究組織　3
研究者の役割分担　4
謝辞　5

第１部　研究開発の概要　7
１－１　研究開発の背景と研究目的　9
１－２　各年度の研究開発　１７
１－３　成果，残された課題と今後の可能性　３１

第２部　研究成果の発表状況　３５
２－１　原著論文リスト　３７
２―２　口頭・ポスター発表リスト　３９
２－３　研究成果の社会・国民への発信　４２
(1) メディアへの掲載（新聞・番組名、掲載年月日等）
(2) 公開行事（行事名、実施日、テーマ、参加者数等）

第３部　資料　４５
３－１　発表論文　４７
３－２　口頭・ポスター発表　１９７
３－３　ブイ上機器資料　２４７
３－４　弓削丸資料　３０３
３－５　メディアへの掲載（新聞・番組名、掲載年月日等）　３０７
３－６　写真　３１９

第４部　参考資料　３２５
４－１　GNSS ブイ開発に関する論文・解説等（1998-2015）　３２７
４－２　科学研究費補助金関係書類　４８９

はじめに

1996 年頃に開始した“GPS 津波計”の開発は順調に進み，幾度かの津波を正確に捉えることに成功した．このことから国の全国波浪観測網にも採用され，気象庁の監視業務にも取り入れられた．しかしながら，2011 年東北地方太平洋沖地震においては，気象庁の津波警報の更新に役立ったものの，結果として多くの人命が失われることとなった．この原因としては当初に用いられた RTK-GPS という手法のため，ブイの設置が沿岸から 20 ㎞以内程度と限られており，警報の更新が沿岸住民の避難に有効に役立てられなかったと考えられる．この反省に立って，沿岸からより遠方にブイを設置する手法の開発がすすめられた．GNSS ブイを沿岸から離れた遠洋に設置することが可能となればその応用範囲は津波の早期警戒にとどまらず気象学や電離層研究など多くの応用が期待できる．また，GNSS に音響測距を組み合わせることで海底の地殻変動連続観測への応用も可能となる．これらの応用も視野に入れた GNSS ブイの展開を図るために本計画が立案された．

文部省科学省の科学研究費助成事業には東京大学地震研究所の平成 27 年度所長裁量経費によって申請の準備が進められ，平成 28 年度からの研究計画として基盤研究(A)と基盤研究(S)への申請を行うこととした．平成 28 年 4 月にはまず基盤研究(A)の申請が採択され，基盤研究(S)に対するヒアリングを経て同年 6 月に基盤研究(S)の申請が採択され，令和 2 年度までの 5 年計画としてスタートした．この計画の後半は世界を覆ったコロナウィルスのパンデミックにより進捗の停滞を余儀なくされた．このため，最終年度の成果のとりまとめの部分に限って令和 3 年度に繰り越すこととなった．従って，ブイでの実験は令和 2 年度までで終了となったものの，本報告の出版は令和 3 年度ということになった．

本報告書は，次頁に研究経費，研究組織，研究者の役割分担と謝辞を記したあと，4 部構成となっており，第 1 部では研究開発の背景と研究目的，各年度の研究開発の実施内容，成果と今後の課題及び可能性について概略を記載した．第 2 部では，研究成果の発表状況について原著論文及び学会等での口頭・ポスター発表のリストを示し，成果の社会・国民への発信としてメディア記事及びアウトリーチ活動について記載した．第 3 部では資料として，発表論文全文と学会発表等の予稿を掲載し，さらにブイ上の機器，弓削丸資料及び新聞記事，並びに関連する写真などを収録した．最後に，第 4 部に参考資料として本課題以前に出版された GNSS ブイ開発に関する関連研究者による論文のリストとその中でも特に重要と考えられる論文の全文を採録した．また，本科研費による申請書等の関係書類を最後に収録した．

本研究の遂行は多くの方のご協力なしには実現ができなかったものである．これらの方々に深く感謝する次第である．研究代表者は本研究の完了をもって GNSS ブイの開発研究を一区切りとするが，今後の展開にはまだ多くの課題も残されており，興味をもってくださる研究者がこれらの課題を克服して，いずれの日にか GNSS ブイが世界の海洋に数多く展開される日が来ることを望んでいる．それは決して単なる夢物語ではなく，技術的に可能であることを，本報告書を読まれた方が感じていただければ幸いである．

令和 4 年 3 月

研究代表者　加藤照之

研究経費

単位：円

年度	直接費	間接費	合計
平成 28 年度(2016)	46,400,000	13,920,000	60,320,000
平成 29 年度(2017)	35,900,000	10,770,000	46,670,000
平成 30 年度(2018)	20,200,000	6,060,000	26,260,000
平成 31（令和元）年度(2019)	21,600,000	6,480,000	28,080,000
令和 2 年度(2020) *（内，令和 3 年度への繰越分）*	17,800,000 *2,369,300*	5,340,000 *310,040*	23,140,000 *2,679,340*
	141,900,000	42,570,000	184,470,000

研究組織

研究代表者	加藤照之	大正大学地域構想研究所	特命教授
研究分担者	寺田幸博	高知工業高等専門学校	客員教授
研究分担者	田所敬一	名古屋大学大学院環境学研究科	准教授
研究分担者	二村彰	弓削商船高等専門学校	教授
連携研究者/研究協力者	瀬古弘	気象研究所気象観測研究部	部長
連携研究者/研究協力者	小司禎教	気象研究所気象観測研究部	室長
連携研究者/研究協力者	石井守	情報通信研究機構電磁波研究所	研究センター長
連携研究者/研究協力者	津川卓也	情報通信研究機構電磁波研究所	室長
連携研究者/研究協力者	西岡未知	情報通信研究機構電磁波研究所	主任研究員
連携研究者/研究協力者	豊嶋守生	情報通信研究機構ネットワーク研究所	研究センター長
連携研究者/研究協力者	山本伸一	情報通信研究機構ネットワーク研究所	研究技術員
連携研究者/研究協力者	滝沢賢一	情報通信研究機構ネットワーク研究所	室長
研究協力者	衣笠菜月	名古屋大学大学院環境学研究科	研究員
研究協力者	岩﨑匡宏	宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門	主任研究員（2018 年 3 月まで）
研究協力者	越川尚清	宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門	主任開発員（2019 年 3 月まで）

（注：「連携研究者」は平成 30 年度から「研究協力者」に統合された．また参加期間中所属や職名が変わった者については最終年度の所属・職名を記載した．途中でプロジェクトから脱退された方は参加時の所属・職名を記載した）

研究者の役割分担

本研究は極めて学際性の高い研究であるため，多方面の専門家・研究者の連携が重要であった．研究開始当初の研究体制を図１に示す．研究代表者が研究全体を統括し，研究の進捗状況を把握すると共に，調整を行う．衛星通信実験，海底地殻変動，気象，電離層の各研究項目はそれぞれ情報通信研究機構（NICT），名大，気象研，NICT の専門家が研究分担者・連携研究者となり，それぞれ必要に応じて研究協力者を配置するという体制を組んだ．実験を統括する高知高専寺田は，研究代表者と十数年間にわたり共同研究を重ねてきており，実験全体の企画・調整について熟知していた．GPS 津波計の開発には日立造船と協働してきており，知識財産権は,研究代表者と日立造船が共有している。このことから、実験の実施にはこの日立造船関係者の研究支援が不可欠であった．本研究に必要なソフトウェア・ハードウェアの開発については研究代表者が分担者（寺田）と調整しつつ，業者発注を行う．本研究の一番肝要なところは衛星通信実験が計画通りに実施できるか，という点にある．このため，衛星通信の利用については研究協力者として JAXA のアドバイスを得ることとした（越川，岩﨑）．また衛星通信実験の地上（海上）系と GNSS ブイ用衛星通信即時多元接続技術の研究については NICT（豊嶋，山本，滝沢）が担当することになった．なお，衛星通信はソフトバンク社の協力を得て，Thuraya という衛星を用いて実施することとなった．

図１：開始当初の研究体制

図２：2019 年 3 月時の研究体制

本研究開始後，2 年目（平成 29（2017）年度）には本研究課題で最も重要な海底地殻変動観測が開始したことから，担当の名古屋大学において研究者（衣笠）を雇用した．平成 30（2018）年度（3 年目）終了後，研究代表者（加藤）は東大を定年退職したが，同年 4 月より神奈川県温泉地学研究所（略称：温地研）に就職し，引き続き研究代表者を務めた．その他，異動等により研究者が若干変更になっているが，基本的には当初の研究組織が研究協力体制を築いている．なお，2019 年度より連携研究者の制度がなくなって研究協力者に一本化されたため図２の連携となっている研究者は 2019 年 4 月からは研究協力者と読み替える必要がある．最終年度の令和 2（2020）年度はコロナウィルスが蔓延し，研究者の対面での打合せや出張が制限され，研究の進捗に困難が生じた．このことから，ブイでの計測は令和 2（2020）年度で終了するものの，経費の一部を令和 3（2021）年度に繰り越して，研究

の最終とりまとめや成果の公表を行うこととした．なお，研究代表者は令和 3（2021）年 4 月に温地研から大正大学に移籍したため，本報告書では所属を大正大学とした．

謝辞

本研究遂行のため，下記の方々には大変お世話になった．記して謝意を表する

名古屋大学全学技術センター　松廣健二郎，小池遥之

高知県水産振興部　仁淀川町　日立造船株式会社

関西設計株式会社　ソフトバンク株式会社　有限会社海洋技術

第１部　研究開発の概要

１－１　研究開発の背景と研究目的

1-1-1　はじめに

衛星測位システム GNSS（Global Navigation Satellite System：当初は GPS[Global Positioning System]と呼ばれたが，複数の衛星測位システムが登場したため一般的な GNSS という表記が用いられるようになった）の装置を海に浮かべたブイに搭載すれば津波が陸に到達する前に検知でき，津波災害の軽減に役立つであろうという考えは 1990 年代に生まれた（図 1-1）．1996 年頃に開発が開始され，社会的な期待もあって開発は順調に進み，2001 年には大船渡沖 1.6 ㎞に最初の本格的なブイが設置され連続観測が開始された（参考資料 1998-1, 2005-4）．ここで用いた手法は RTK (Real Time Kinematic)と呼ばれる相対測位の一手法を用いており，陸に置かれた GNSS 観測点との間で相対的な位置関係をリアルタイムに推定する手法である．ブイからのデータ伝送には海洋無線を用いた．この手法ではブイの高さ変化を推定する精度を数 cm 程度とすると沿岸から 20 km 以内という制約があるものの，比較的手軽に導入ができるシステムであった．幸い，設置後すぐの 2001 年 6 月に発生したペルー沖地震（Mw8.3）による振幅 10 ㎝程度の津波を明瞭に捉えることができ，GNSS 津波計が実用可能であることを検証できた（図 1-2）．また，2003 年 9 月に発生した十勝沖地震（Mw8.0）による津波も検出することができた（参考資料 2011-2）．

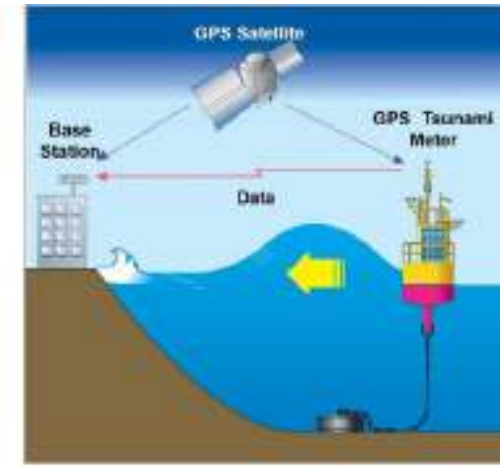


図 1-1 : GNSS ブイの概念図．GPS 衛星からのデータをブイと地上局で受信し，ブイの地上局に対する相対位置を推定する．

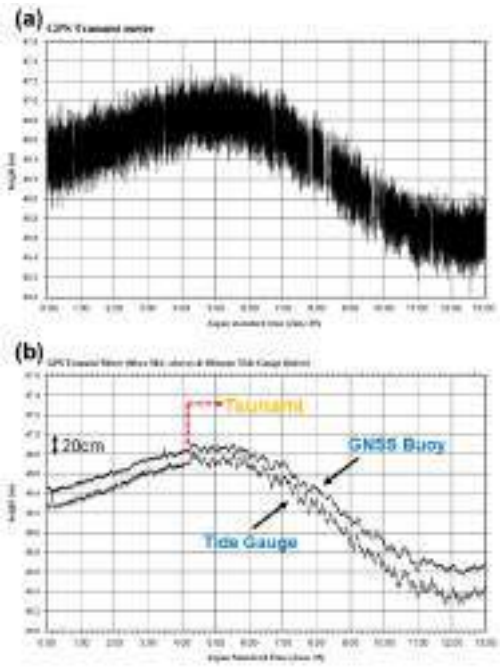


図 1-2：大船渡沖実験で得られたはじめての津波記録．(a)一秒サンプリングによる原記録，(b)原記録に 30 秒の移動平均を操作したグラフ（上）と近傍の大船渡検潮所で得られた記録．

大船渡沖の観測は 2003 年までで終了したが，次のステップとして高知県室戸岬沖約 13 ㎞のところで本格的な実用に向けた実験を行った．2004 年から観測を開始したが，ここでも幸いなことに開始すぐの 2004 年 9 月に紀伊半島南東沖で Mw7.6 の地震が発生し，この地震による数 cm 振幅の津波を観測することができた（図 1-3）．この津波記録では数値シ

ミュレーション結果とも比較され，これまでの検潮所での記録での比較などと比べても大変よい一致を示していて，津波を正確に記録できることが示された（図 1-3(c)）（参考資料 2005-2).

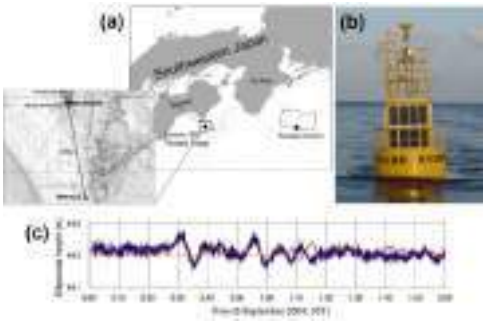


図 1-3 : (a)室戸岬沖に設置されたブイの位置と 2004 年 9 月 5 日紀伊半島沖地震の震源位置，(b)ブイの写真，及び(c)地震に伴う津波の記録．赤線は理論波形.

これらの実験の成功により，同システムは国土交通省港湾空港技術研究所が運用している全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS）の次世代機として 2007 年頃より三陸沿岸を手始めとして全国に設置された[1]. この観測網は波浪の監視を目的としていることから GPS 波浪計と命名されたが，津波も監視の対象に入れられている．また，気象庁も津波監視の対象として同年より用いられている.

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）では，気象庁から地震直後に宮城沖 6m，岩手沖 3m の津波警報が出されたものの，NOWPHAS の岩手沖 GPS 波浪計観測点から 6m を超える津波が観測されたことから，警報が宮城沖・岩手沖 10 m 以上に更新された（図 1-4）（論文 2017-1）[2]．しかしながら，この更新の直後に三陸沿岸に津波が襲来し，多くの人命が失われる結果となった.

この結果から得られる教訓としては，津波警報をより早く検出する必要があり，このためブイをより遠くの沖合に設置する必要がある，ということになる．また，この地震による津波の記録は最大波高を記録した直後に電源やインターネットの断のため遠隔監視のデータが途切れてしまった．図 1-4 の記録は，地震後に現地でバッテリーによって作動していた収録装置からリカバーして描画したものである. 従って，次のステップとして，ブイをより遠くの沖合に設置することと同時に基地局を震源近くの陸地に置くのではなく，地震の影響のない遠方に設置するようなシステムでなくてはならない. こうした仕様を目指したさらなる開発研究が始まった(参考資料 2015-1).

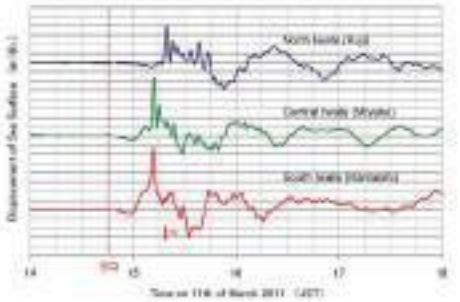


図 1-4 : NOWPHAS の GNSS 波浪計による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の記録例．EQ は発震時，矢印は津波が海岸に到達したおよその時刻(参考資料 2011-2).

1-1-2　東北沖地震の教訓からの改善策

RTK-GPS 方式という相対測位を用いることによる限界を突破するために取り入れたのは，2000 年頃より急速に発展していたいわゆる精密単独測位方式（Precise Point

Positioning）と呼ばれる測位方式を取り入れることである．それまではGNSS衛星からの信号のうちコードを用いる方式で単独測位を行い，コードを載せるために用いられる搬送波の位相を用いて相対測位を行う方式が主流であり，後者を行う際に衛星の精密な位置情報（精密暦と呼ぶ）を取り入れることにより，千kmを超えるような基線でもcm精度での相対測位が行われてきた．2000年頃を境に，衛星位置と時計の補正項（併せて精密暦と呼ぶ）を利用することにより，位相を用いた単独測位でcm精度での測位ができることが示され，急速に普及していった（例えば[3]）．ただ，当初は精密暦を取得するのに2週間ほどまたなくてはならなかったのであるが，暦の予測などを取り入れることにより，リアルタイムに取得できるようになってきた．また，位相を用いた測位の場合，衛星と受信点との距離を精密に測位するためには波数の整数部分を推定するのがよい（Ambiguity Resolutionという）が，これを含めた手法としてPPP-ARという方式が開発されたことから[4]，この方式を取り入れることとした．

また，沿岸から数十 km 以上離れるということになるとデータの伝送には衛星通信によることが必要になってくる．幸い，開発を始めた時点ではJAXAが打ち上げたETS-VIIIという試験衛星が使えることが判明したため，JAXAの協力も得ることとした．ブイという揺れが大きくなることが想定されるような場合の衛星通信がどこまで可能かを検証する必要があるが，これも考慮に入れた計画を作ることとなった（参考資料2015-1）．衛星通信を用いれば基地局を地震の影響のない遠方に設置することも可能となることから，衛星通信は次世代のGNSSブイデータの通信には必須のことであると考えられた．そこで，将来海洋ブイアレイを構築する際に必要な通信衛星の仕様についてJAXAと共同で調査を行うこととした（参考資料2015-2）．

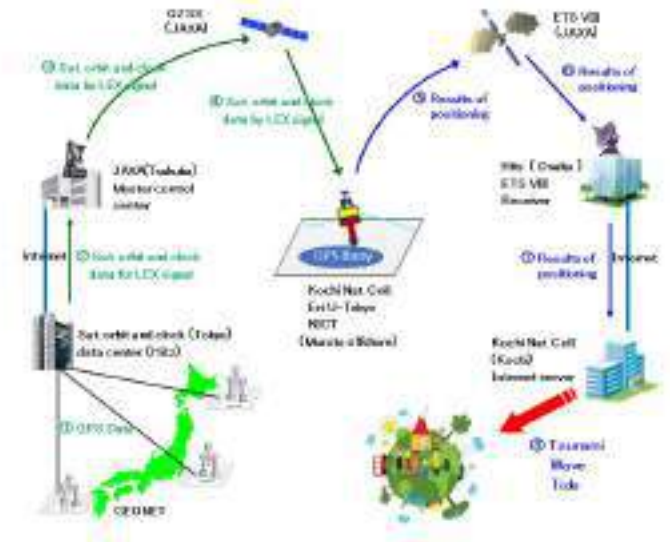


図1-5：QZSS（MICHIBIKI）とETS-VIIIの２つの衛星を用いた実験のデータの流れ（参考資料2015-1）．

1-1-3　新たな手法を取り入れた実験（2013～2015年）

これらの方式を取り入れた計測実験を2013～2014年に実施した．ここでは，ブイは自前のものではなく，高知県が土佐湾で行っている多数のブイを漁礁に見立てて漁を行う，黒潮牧場と呼ばれるプロジェクトのブイを借用することとした．いくつかあるブイのうち，室戸

沖約 35 ㎞のところにある黒潮牧場 16 号ブイを借用することとした．このブイ上に GNSS のアンテナ/受信機セット及び PPP-AR の解析を行う計算機，及び衛星通信用の送受信装置などを設置した．また，継続的観測を行うため，太陽光発電用のパネル及び蓄電池も設置した．

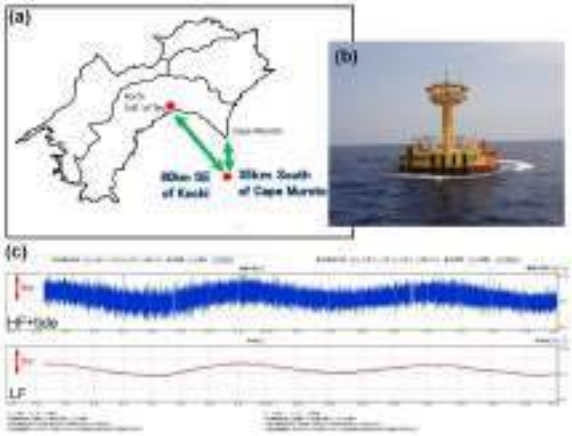


図 1-6 : (a)室戸沖実験のブイ及び地上局（高知高専）の位置，(b)黒潮牧場 No.16 ブイ，(c)実験で得られた記録 ;（上）短周期データ，（下）長周期データ．

全体システムを図 1-5 に示す．前節に述べたように，PPP-AR 解析に必要な精密暦の情報は GEONET のデータを用いて陸上のサーバで取得し，これを日本が打ち上げた測位衛星 QZSS（MICHIBIKI）を経由してブイに送り，ブイ上で PPP-AR 解析を実施してブイの位置を推定し，ブイから ETS-VIII（きく 8 号）を経由して地上局に送り返し，そこからインターネット上に情報を公開する，という方式をとった．

図 1-6(a),(b)にブイと地上局の位置及びブイの写真を示す．実験は 2013 年 12 月～2014 年 1 月にかけてと 2014 年 6 月に実施した．図 1-6(c)に得られた記録も示す．これはインターネット上で誰でも見られるようにした．この記録を子細に検討すると，データが必ずしも連続ではなく，しばしば欠落する部分があることがわかる．このデータの欠測率と波の高さにはよい相関があり，波が高いときにデータの欠測が多いことが判明した．この理由としては，ブイが傾くことにより通信衛星とブイ上の衛星通信用アンテナとの視線角度が変わり，信号強度の低下を招くことが原因と考えられた．揺動するブイの上での衛星通信を安定的に実施するためには例えば通信用のアンテナをジンバルの上に搭載してアンテナを常に水平保つようにする必要がある．このような治具を考案して，2015 年 12 月には瀬戸内海において船舶をブイに見立てた実験を行った．この結果，やはりジンバルの効果も明らかとなったが，一方，用いる船舶のサイズによっては固有周期の関係で必ずしもジンバルの効果が明らかでない場合もあることが判明した（論文 2017-2）．

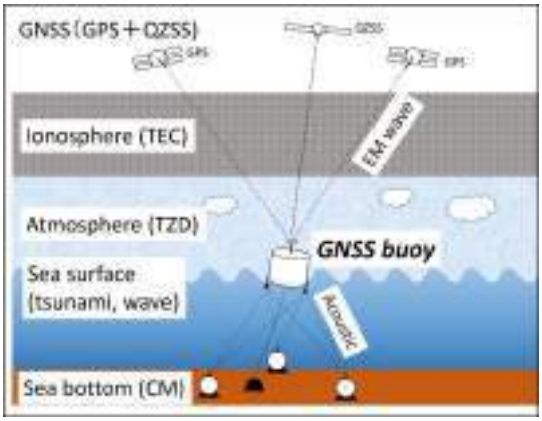


図 1-7 : GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図.

1-1-4　総合的な防災・地球科学応用を目指したブイの構築

これらの各種実験に基づき，新たな総合

的な応用が可能な GNSS ブイをデザインすることとなった．ここで新たに取り入れることとなったのは海底地殻変動計測への応用である．海洋での地殻変動計測は歴史が古いが，特に最近目覚ましく発展している技術にいわゆる GNSS-音響システムと呼ばれる方式がある[5]．詳細は他に譲るが，電磁波が海中を伝搬することができないため，船舶を GNSS で測位し，そこから海底の数台のトランスポンダーに向けて音響による測距を行い，トランスポンダーアレイの重心位置を推定しようとする方式である．米国の研究者によって提案された手法であるが，日本の研究者によって格段に開発が進み，海底位置の推定が数 cm 程度まで向上し，世界に誇る素晴らしい研究成果が続々と生まれている．

この方式では船舶を用いることが必須になり，観測は連続的に実施することは出来ない．海上保安庁では測量用の船舶を用いることで一年あたり 4 回程度にまで測定頻度を向上させているが，日本周辺でのプレート収束域での様々な固着の様態を解明するためには連続観測が望ましい（論文 2020-3）．このため，我々の開発している GNSS ブイを船舶の代わりに用いることができないか検討することとなった．なお，最近では船舶の代わりにウェーブグライダー等の無人艇を用いる試みもなされている．

また，海底地殻変動計測への応用の他，GNSS ブイで取得したデータは気象観測や電離層観測における重要な物理量を計測することが可能である．気象学においては GNSS 計測から得られる天頂遅延量から大気中の水蒸気量を知ることができ，可降水量を測定することが可能である．この可降水量データを気象予報のデータ同化に組み込むことにより天気予報の精度向上に役立てることができる．陸上では国土地理院の GEONET データがすでに気象庁のデータ同化に取り込まれているが，海洋のデータが乏しいため船舶による計測などを用いることも実験的に行われている[6]．我々のブイデータを用いることができれば定点観測によるデータとなるためより効率的なデータ同化に用いることができると考えられる．また，電離層観測では，GNSS の 2 周波データから衛星―地上局間の全電子数を得ることができ，地上に GNSS 観測アレイがあれば電離層の様々な現象を得ることができる．特に電離層擾乱は GNSS 測位精度に影響を及ぼす可能性もあり，航空機の位置推定に重要な情報を提供することができる．日本では情報通信研究機構（NICT）が中心となって世界的な GNSS データを用いた電離層監視プロジェクトも進行している（論文 2018-2）．我々の GNSS ブイデータをこれらの関連研究者にリアルタイムに提供することで防災にもまた地球科学的にも極めて重要かつ有効に利用が図られると考えられる（図 1-7）（参考資料 2015-1）．

以上のような各種の応用も念頭に，我々は新たな実験に乗り出すこととなった．

1-1-5　本科学研究費補助金を受けるまでの準備

GNSS ブイの研究はたとえブイを自作までしなくてもかなりの経費がかかることは明白であった．そのため，十分な準備が必要と考え，まず平成 27 年度の東大地震研究所所長裁量経費を応募することにした．この経費は大規模研究計画のシードマネーも応募要件を満たしていることから適切であった．この経費によって，同年 12 月に弓削商船高専保有の「は

まかぜ」と「弓削丸」を用いて，船の揺動による衛星通信の送信率低下を防ぐために考案したジンバルがどの程度有効であるかの実験を行った．ここでは衛星としては JAXA が打ち上げた技術試験衛星 ETS-VIII を使用した．ここでの実験結果は翌年の学会等で発表され，論文で印刷公表した（論文 2017-2）．またこの準備期間においては，翌年の科研費応募のため，ブイシステムの概念図や研究体制構築のためのコミュニティの創設などを行うことができた．図 1-8 に新しく設計したブイの概念図を示す．

大型の科研費申請においては，一番大きな経費が得られる基盤研究(S)をめざすこととしたが，この場合同時に基盤研究(A)にも応募して，両方が採択された場合は基盤研究(A)を辞退すること，となっていたため両方の科研費に応募することとした．平成 28 年（2016）年 4 月には基盤研究(A)の採択が決定され，4 月 22 日のヒアリングを経て 5 月末に基盤研究(S)の採択が決まり，基盤研究(A)は辞退することとなった．

1-1-6　本研究の目的

我々の研究グループは 2011 年東北地方太平洋沖地震での教訓をふまえ，海岸から 20 ㎞を超える遠方で津波を早期検知するため，PPP-AR と呼ばれる新たな精密単独測位の手法を導入すると共に，データ伝送方式としてはそれまでの無線をやめて衛星通信を用いた方式を導入し，精密単独測位法の精度評価と，ブイの動揺等による伝送率低減等の課題を解決して，信頼性の高い衛星通信を実現することを目的とする．

また，GNSS と音響システムを組み合わせた海底地殻変動観測の方式は，本研究では連続観測に取り組み，課題の抽出と解決を行って，同方式の可能性を検証する．

以上のように，本研究計画ではこれまで着実に進められてきた GNSS ブイを用いた津波

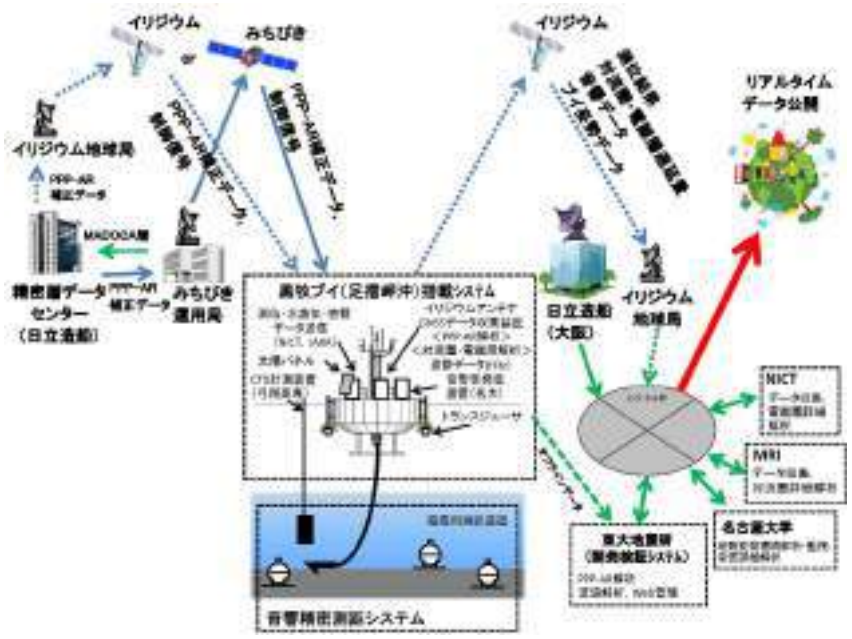


図 1-8：新しく設計した GNSS ブイシステムの概念図．通信衛星はみちびきとイリジウムを想定．

計測の機能向上に加えて海底地殻変動の精密計測手法の開発を行い，GNSS ブイの高機能化・多機能化によって費用対効果の高い地震・津波防災システムの構築の可能性を探る．なお，ここで得られたデータはさらに多くの応用が期待できる．GNSS 測位では電波の伝搬媒質（電離層と大気）の影響を正確に推定して補正することが重要であるが，これらの補正量はそのまま伝搬媒質に関する研究にとって重要な物理量となる．

気象学の分野では，陸上のインフラである GEONET を用いた“GPS 気象学”が発展してきた．また，GNSS 電波を用いた電離層の研究は既に多く行われている．しかしながら，これらはほとんどが陸上の観測点でのものであり，より均質な広域のデータを得るため，海上での可降水量・電離層データの取得が望まれている．本研究計画ではこうした応用技術への展開に資する基礎的な研究も行う．

本研究が成功裏に終われば，次の段階として GNSS ブイは津波・海底地殻変動に加え，大気及び電離層に起因する災害の軽減に役立つ総合的な観測を行うための総合的な防災システムが構築できる可能性も秘めている．GNSS ブイのこのような総合的な応用研究は，筆者が知る限り他では行われていない．

我々の研究では，５年間の研究期間に次のことを明らかにする；（１）GNSS 津波計に関しては，精密単独測位の精度向上のための精密な衛星位置と時計の補正情報のブイへの伝送方式を確立すること，また，商用衛星等を用いた場合のブイの揺動による伝送率低下の問題を解決し，通信衛星を用いた高精度で欠測の少ない連続通信方式を実験的に確立する．（２）GNSS ブイを用いた海底地殻変動連続観測システムによる cm 級の高精度音響測距，及び海底位置決定が可能であることを示すとともに，通信衛星を介して音響測距結果等のデータを連続的に送信するためのデータ量の圧縮方式を確立し，実際に連続的な観測を行って，海底地殻変動を実験的に明らかにする．（３）ブイに搭載した GNSS から水蒸気量及び電離層 TEC を抽出し，その精度評価とともに，気象予報や電離層研究へのインパクトを調査する．

参考文献

[1] 河合弘泰・佐藤真・川口浩二 (2010) 全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 2008），港湾空港技術研究所資料，No.1209，1-93.

[2] Ozaki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - Tsunami warnings/advisories and observations -. Earth Planets Space **63**, 827-830.

[3] Zumberge, J. F., M. B. Heftin, D.C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102(B3), 5005–5017.

[4] Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi, Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time (2008) In Proceedings of the 21st International

Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, 397-405.

[5] Spiess, F. N., C. D. Chadwell J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Purcell Jr., H. Dragert (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, Phys. Earth Planet Int., **108**, 101-112.

[6] Shoji Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2016) PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADOCA Real-Time Orbits, SOLA **12**, 265–271.

１－２　各年度の研究開発

本章では，各年度の研究開発の実施内容を記載する．各年度について，主要課題である遠洋での津波計測に関するデータ処理システムや将来の衛星通信に関する仕様の検討，海底地殻変動連続観測への応用，気象学・電離層研究等への応用，及び全体的な活動状況について概要を説明する．なお，様々な応用のうち，本研究課題名にあるように特に海底地殻変動計測への挑戦が重要な課題であることから，各年度の説明に特に節を設けて詳しく説明している．

1-2-1　2016 年度の研究開発

本年度は，まず衛星通信の方式について検討した．技術試験衛星が退役間近であることをふまえ商用衛星を使うこととしたが，検討の結果ソフトバンク社が提携している Thuraya 衛星を用いることとした．また PPP-AR の実施に当たっては MADOCA を準天頂衛星「みちびき」を利用したいと考えたが，研究開始時点ではその実施が困難であることが判明したことから，日立造船㈱で GEONET データを用いて生成した精密暦等を Thuraya 衛星を用いてブイに送り，ブイ上で PPP-AR 計算を実施することとした．以上から，本研究計画では図 2-1 に示すシステムで観測を行うこととなった．また，Thuraya を用いた衛星通信のシステムを図 2-2 に示す．ブイは高知県海洋牧場の No.18 を高知県から借用することとし，ブイ上のシステム設計と製作を日立造船に発生した（資料 3-2）．

これまでデータ伝送に活用してきた通信衛星 ETS-VIII（きく 8 号）が機能を近々停止

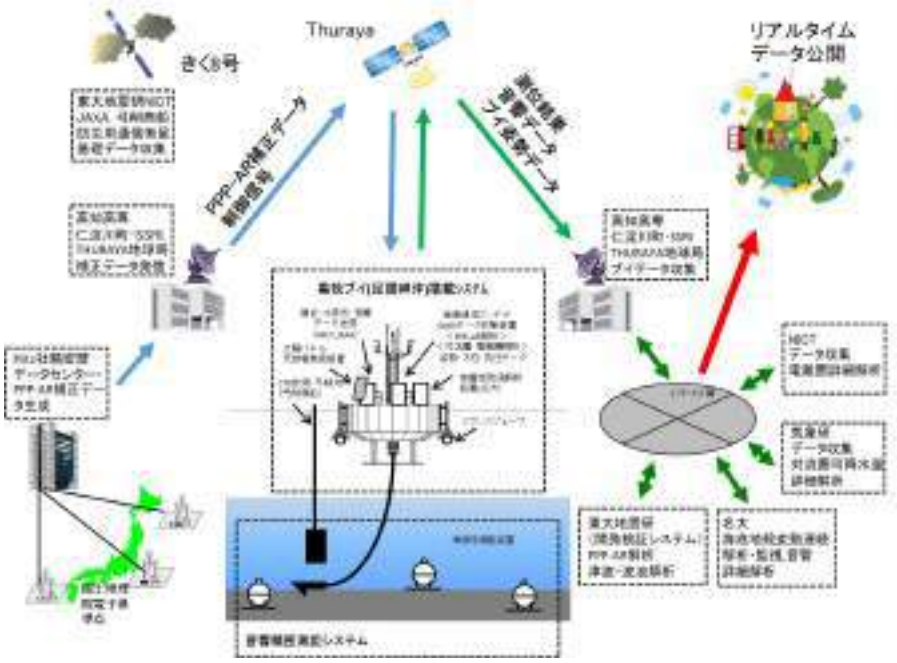


図 2-1：本研究で用いられたシステム．「きく 8 号」は 2016 年 8 月の実験にのみ用いられた．

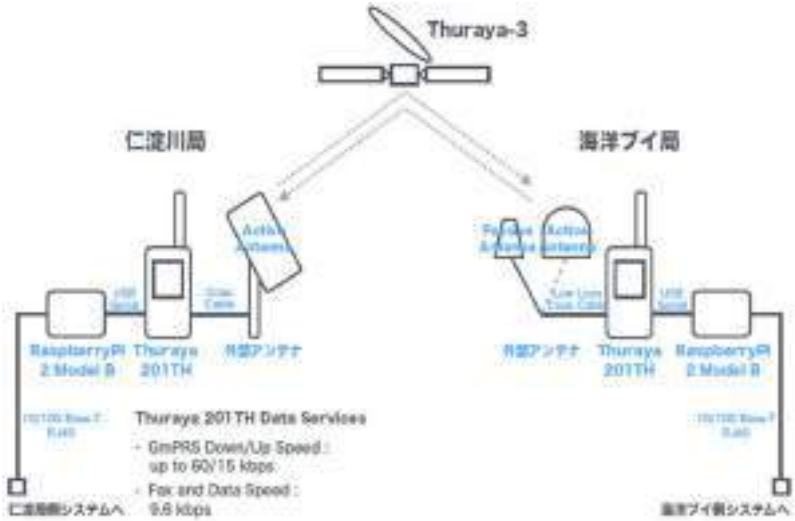


図 2-2 : 実験に用いられた衛星通信システム．アンテナは Active アンテナと Passive アンテナを状況に応じて使用した．

することが判明したことから，ブイの揺動に伴うフェージング調査のための資料を取得して将来の通信衛星の仕様策定を行うための実験を弓削商船高専所有の弓削丸（資料 3-4）を用いた実験を 8 月 25-26 日に瀬戸内海で実施することとした．船上に ETS-VIII との通信用に，ジンバル付きとジンバルなしの平面アンテナを設置した（図 2-3）．また，ETS-VIII 運用終了後に使用する商用衛星（Thuraya）との通信のための受動ならびに能動アンテナも設置した（図 2-4）．この実験によって船の揺動や船体によるアンテナ掩蔽，アンテナの型によるデータ取得効率などの効果を確認するための基礎資料を得た．なお，この機会を利用して弓削商船高専において記者発表会を実施した．

続いて，11 月にはデータ送受信のための基地局を高知県仁淀川町に，また高知県黒潮牧場 18 号ブイに GNSS 機器をはじめとする機材一式を搭載し，海面変動監視のための測位を開始した．本システムでは，単独で cm 測位精度を可能にする方式を採用しているため，地上局で GNSS 衛星位置と時計の補正情報を生成して，衛星を介してブイに送り，ブイ上

図 2-3 : 弓削丸に取り付けられた ETS-VIII 用平面アンテナ．（左）ジンバル付き，（右）ジンバル無し．

図 2-4 : 弓削丸による Thuraya 用パッシブアンテナの受信実験．（左）航跡図，（右）甲板上に取り付けられたアンテナ

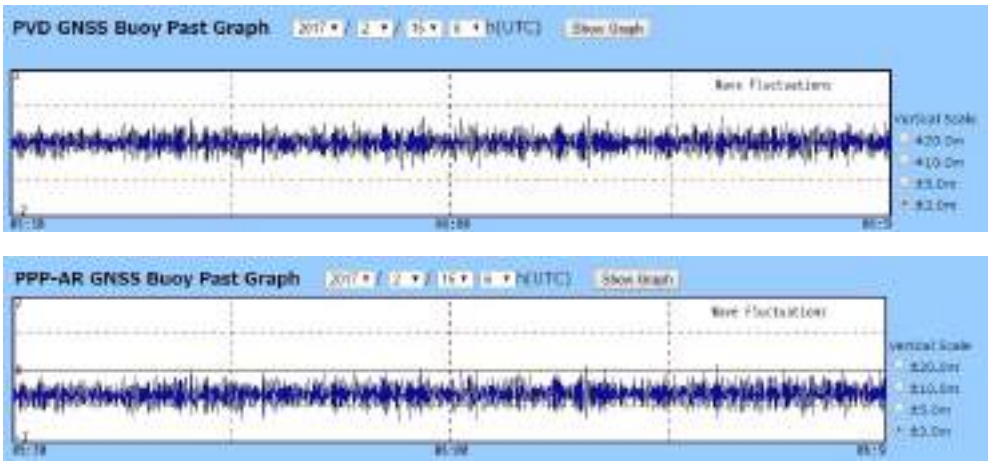


図 2-5：足摺岬沖に設置された GNSS ブイで取得したデータの解析結果の Web 表示.（上）PVD 解析による上下成分,（下）PPP-AR 解析による上下成分.

で精密単独測位を行ってその結果を陸側に伝送するという双方向の衛星通信を用いる．この時期にはすでに ETS-VIII が運用を停止していたため，商用衛星を用いてデータの通信を行った．しかしながら，開始からほどなくして記録が停止した．原因を調査したところ，通信衛星用のアンテナの消費電力が当初想定よりも大きいことが判明し，そのための電圧低下による機能停止と判断された．解決策としてブイ上の電力供給量を増やす必要があり，追加の太陽電池や蓄電池などを購入して，次年度の測位機能回復に備えることとなった．図 2-5 に取得できたデータを示す．図の上のプロットは Point precise Variance Detection 法（PVD）によるものであり（参考資料 2000-2），下のプロットは PPP-AR による解析結果の，いずれも上下変動成分を示す．両方がよく一致していることが見て取れる．津波は下の PPP-AR にローパスフィルターを作用させたものを使うことになる．

【海底地殻変動計測への応用】

ブイにおける音響測距データを衛星通信で陸上基地局に送信するにあたり，音響測距データの容量の圧縮アルゴリズムを構築し，これを実行するプログラムを作成するとともに，衛星通信モデムへのデータ送信プログラムを作成した．

音響測距海底局は，ブイに搭載した音響装置・トランスデューサから送信された測距信号を収録し，そのままブイへ返信する．従来の船舶による観測では，船舶で収録した音響測距波形を持ち帰り，観測後に処理を行って測距信号の走時を求めていた．音響測距波形の容量は 1 回あたり 64 KB（ヘッダ含む）であり，これをそのまま衛星経由で送信すると莫大な通信コストがかかる．そこで，測距信号の到達時刻に関する情報のみを衛星経由で送信することとした．測距信号のブイへの到着時刻は，基本的には音響装置内で生成した信号波形である基準波形との相互相関係数が最大になる時刻として認識することができる．音響測距に必要となるのは海底局からの直達波の走時であるが，測距信号が 14.322 ms の信号長を有する M 系列信号であるため，これまでの船舶による音響測距の経験上，この時間内に海面，海底，船舶（ブイ）本体からの反射波が直達波と重なった場合に，後続波の到着時刻で

相互相関係数が最大になる場合があった．そこで，反射波の到着時刻で相互相関係数が最大になっても極力正しい直達波を自動で認識し，その到着時刻を自動で決定できるアルゴリズムを構築した（論文 2020-1）．このアルゴリズムは，相互相関関数のピークを相互相関係数が大きいものから 3 つ抽出し，各ピーク時刻において直達波が到着しているかを相互相関係数のピーク値と信号のエネルギー比（当該時刻の前後 0.39 ms 間の二乗平均振幅の比）に閾値を設けて自動で判定するものである．これらの閾値は，ブイ上の音響装置内に保存した測距信号の生波形を用いて設定した．直達波の到着が判定されれば，その到着時刻を自動で決定することができる．上記のアルゴリズムを組み込んだプログラムは，相関処理 PC（PC Engines 社製 alix3d3）内で実行される．直達波の到着時刻が決定されたら直ちにその情報 1 行分（改行コードまで）をシリアル通信で衛星通信モデムへ送信するようにプログラムを作成した（論文 2020-1）．

平成 29 年 2 月 8 日に黒潮牧場 18 号ブイの周辺，半径約 0.75 海里の円周上の 4 ヵ所にて海中音速の測定を行った（図 2-6）．その結果，ほぼ東西に流れる黒潮による影響で，南北方向に最大で±3.6 m/s（0.24 %）の不均質があることが分かり，次年度以降の海底地殻変動精密測位の重要な基礎資料となった．

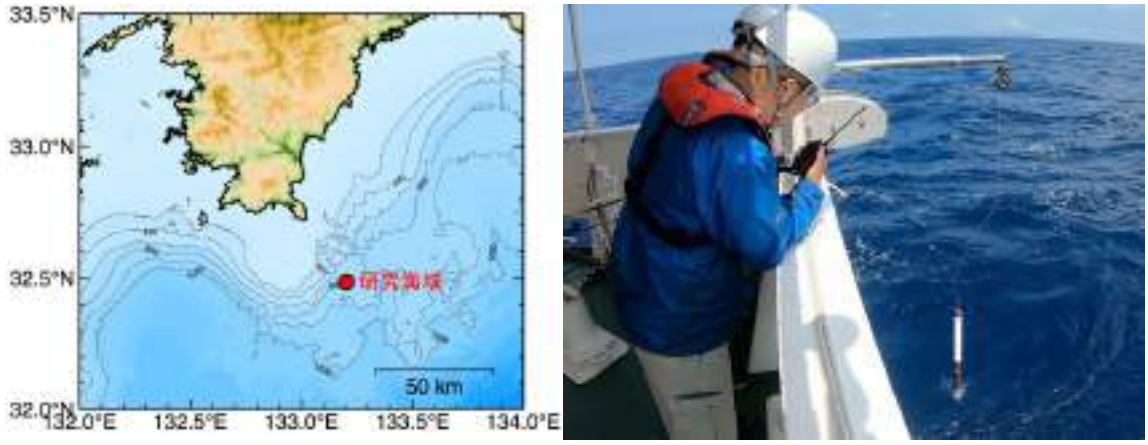


図 2-6：UCTD 観測の実験海域（左）とその様子（右）

1-2-2　2017 年度の研究開発

本年度は，まず6月に実験航海を行い，海底地殻変動観測用の海底局（図2-7）を設置するとともに船舶による音響測距観測およびCTD観測を実施した．これまでの進捗状況を踏まえ，同月には米国で開催された海洋工学の国際シンポジウムにおいて，また5月，7月および8月にはそれぞれ国内外での研究集会において，本研究プロジェクトに関する成果の報告を行った．海洋工学シンポジウムには査読付き論文を投稿・印刷した（論文2017-2）．また，9月には再度船舶を用いた音響測距およびCTD観測を実施した．これらの観測から得られた資料を解析し，良好な音響信号が得られていること，CTD観測によって海中の音速構造の季節変化などを得ることができ（論文2020-2），今後のブイによる音響計測に対する初期条

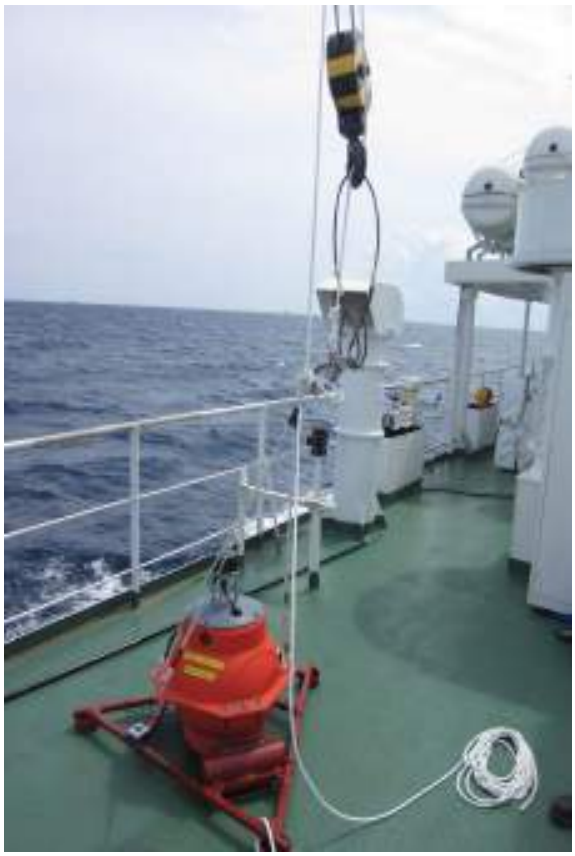


図2-7：設置直前の海底局．弓削丸の甲板上にて．

件を知ることができた．これらの結果は10月の測地学会等で発表した．

ブイにおけるGNSS観測については，諸般の事情により遅れが生じ，観測が年度当初より停止していた．11月にブイ上の機器を点検調査したところ，GNSS機器や電源部の不具合，台風等の影響等と思われるブイ上の機器格納箱等に変形が見られることが判明したため，GNSSアンテナの交換，電源部充放電制御装置の交換などを行った．また，台風等の悪天候による機器格納箱およびその固定部の変形等が見られたため，格納箱固定用の治具の再設計・再制作を行って再設置を行った．こうした作業にも関わらずデータ通信の状況が好転しなかったため，2018年2月には再度ブイ作業を行い，各種点検調整を行うとともに通信衛星用の機材の交換等を実施した．これによって，通信状況は格段の改善が図られた．

将来のGNSSブイ研究の展開に関して，文部科学省の大型研究計画に参画することを考え，固体地球科学の一分野として参画すべく，東大地震研小原一成教授が代表となっている「リアルタイム観測・超震度掘削・超高圧実験の統合による沈み込み帯４D描像」に参加を表明し，ヒアリングのための資料を提供した．ヒアリングは2018年3月28日に行われた．

【海底地殻変動計測への応用】

音響装置をブイに搭載する前に，音響装置の実機と相関処理 PC を接続して動作試験とバグ出しを行い，その結果をふまえて音響装置の改良を実施した．その後，ランニング試験を行った上で，音響測距関係の装置をブイへ搭載し，連続音響測距を開始した．

動作試験は 2017 年 5 月 17 日から 5 月 30 日にかけて行った．音響測距から直達波到着時刻の決定，直達波到着時刻データの衛星通信モデムへの送信までの一連の動作は問題なく行えることを確認した．ただし，停電が生じた際に音響装置が自動で再稼働する機構が備わっていないことが問題であるとの結論に至り，音響装置に復電時の再稼働機構を搭載するとともに，音響装置の再稼働状況をモニターして測距を再開できるプログラムを相関処

図 2-8：海底地殻変動観測開始時の黒潮牧場 18 号ブイ

理 PC 内に組み込んだ.

音響装置の改良終了後の 2017 年 10 月 10 日から 10 月 16 日にかけてランニング試験を実施し，音響装置の停電・復電時対策機構が正しく稼働していることに加え，音響測距に始まり衛星通信経由での地上局サーバへのデータ送信までの一連の動作は問題なく行えることを確認した.

以上の陸上試験を経て，2018 年 3 月 28 日にトランスデューサ，音響装置，相関処理 PC 等のブイへの搭載を行い，連続音響測距を開始した（図 2-8）．トランスデューサには，海面等からの反射波を防ぐ目的で，吸音材を内面に貼り付けた円錐状の反射防止カバーをトランスデューサの上方と側面を覆うように取り付けた．音響測距の間隔は 3 分とした．現場の海底に 3 機の海底局が設置されているため，1 海底局あたりの測距間隔は 9 分である．2018 年 3 月 31 日に太陽光パネルの故障によると思われる停電が発生し，その後の音響測距が継続不可能となった．海底地殻変動観測に関係するシステム開発については，その後の初期の試験結果と併せて 2018 年 10 月の測地学会で発表した.

1-2-3　2018 年度の研究開発

衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試みについては，前年度に引き続き商用衛星によるデータの通信を行った．しかしながら，前年度からの課題の電力不足が解決せず，追加の太陽電池や蓄電池などを購入した．その後も連続観測データは十分には取れていないが，課題を克服しながら 2018 年度末には昼間の時間帯は連続観測データが取れるようになっている．図 2-9 には比較的良好なデータがとれた 2018 年 11 月 23 日～29 日の Web 表示データを示す．プロットは上段が PVD による短周期の波浪，下段が PPP-AR にローパスフィルターをかけて短周期変動を除去した沖潮位を示している．津波が到来すると下段のグラフに表示されることが期待される．気象学・電離層研究への応用については連携研究者によって GNSS ブイで取得されたデータを日本列島における降雨予測の向上にどれだけ寄与できるかとの観測及びシミュレーションからのアプローチが行われた．電離層研究においても，GNSS ブイで取得されたデータが地上で取得されたデータと比較して十分活用に耐える精度が得られていることが検証された．これらの成果について検討するた

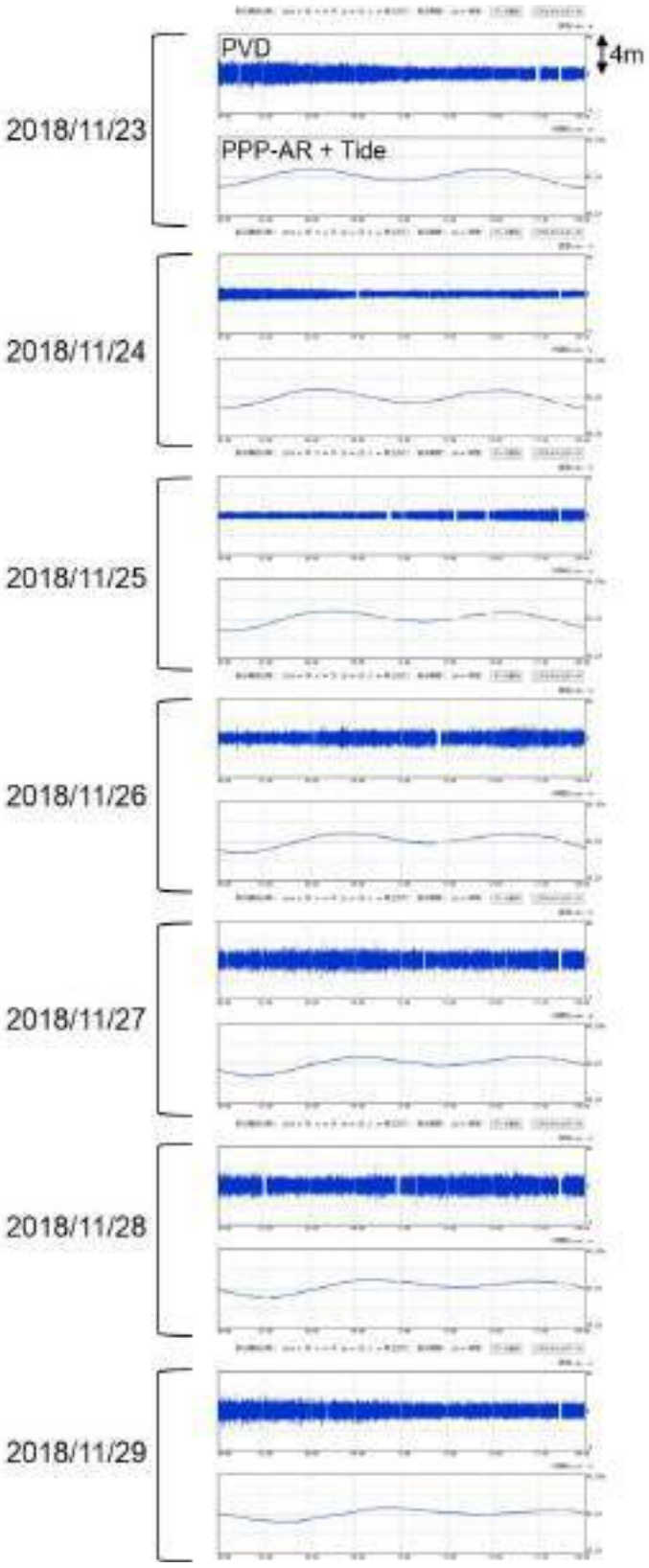


図 2-9：2018 年 11 月 23 日～29 日の Web 表示データ．各日とも上段が PVD 解析による波浪，下段が PPP-AR 解析にローパスフィルターをかけて短周期変動を除去した沖潮位を示す．

めの研究会を 11 月に実施した．図 2-10 にはブイで得られた可降水量（Precipitable Water

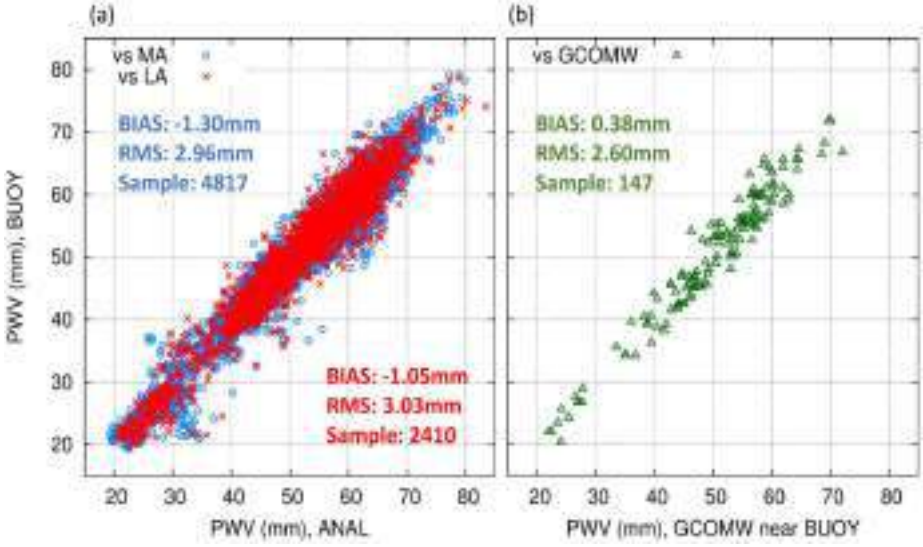


図 2-10：ブイで得られた可降水量推定値（縦軸）と(a)メソスケール（MA）とローカルスケール（LA）客観解析データ，及び(b)GCOM 衛星のラジオメータデータを横軸にプロットしたもの（小司氏提供）.

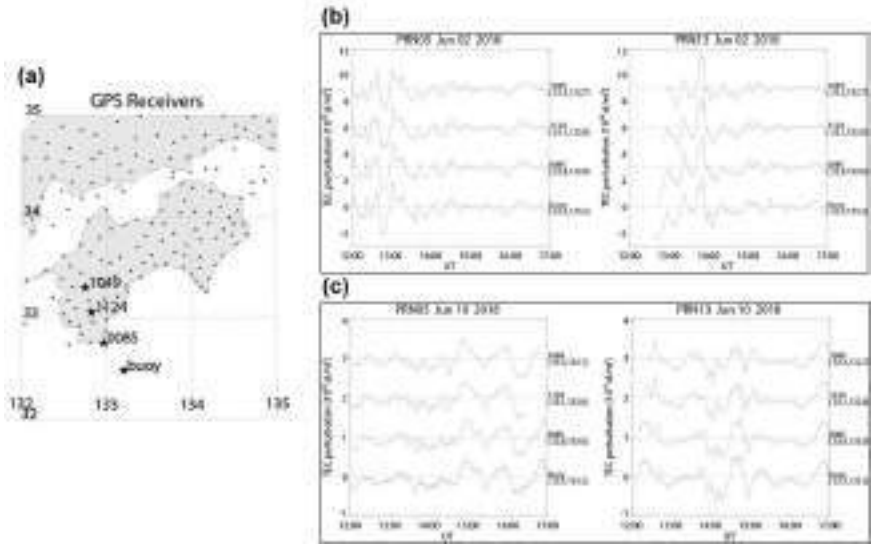


図 2-11：ブイで取得された電離層の全電子数（TEC）と近傍の GEONET 観測点における TEC の比較．PRN は衛星番号を示す．（津川氏提供）

Vapor; PWV）と客観解析データ及び衛星データを比較したグラフを示す．いずれもよい一致を示しており，ブイでの可降水量データが気象学的にも意義のあるものであることが示されている．また，図 2-11 はブイとその近傍の GEONET データで取得された GNSS データから電離層の全電子量（TEC）を示す．ブイで取得された TEC データは近傍の陸上観測とほぼ同等の精度で電離層変動を捉えており，ブイによる電離層観測が有効であることを示している．

これまで得られてきた成果について，国際学会・国内学会における成果報告，和文・英文による論文発表を行った（資料 3-1，3-2 参照）．また，Web を通じた海面高データのリアル

タイム表示や科研費研究の活動の紹介を行っている.

【海底地殻変動計測への応用】

前年度末に開始した連続音響測距を継続し，必要に応じてブイ上の保守作業を行った．また，現地収録データをもとにした測距信号の質の確認や，2016 年度に作成した直達波到着時刻の自動決定プログラムの性能評価を行った.

2018 年 3 月 31 日に発生した停電のために音響測距は継続不可能となったままであったため，6 月 2 日に故障した太陽光パネルの取替を行い，音響測距を再開した．6 月 10 日に衛星通信が不調に陥り，地上局へデータが送られて来なくなったが，その後も音響測距は継続していたことを後に現地収録データから確認した．7 月 12 日～11 月 15 日の期間は音響測距を一旦休止した.

この実験で得たデータも含めた解析により，海底局アレイの形状を±2 cm で決定することができた．また，前年度と今年度を合わせ実質 58 日間にわたって実施したブイ上からの連続音響測距試験の結果，音響信号の送受信は継続して実施可能であり，前年度までに開発していた自動的な音響データ処理システムが順調に稼働しており，音響信号に含まれる反射波の影響を除去することができ，全体の 99.5 %の測距信号に対して直達波の到着時刻を正しく決定できることを確認した.

この間，現地で収録していた測距信号の生波形を確認したところ，海底（走時差 0.7～0.8 ms 程度）やブイ本体（走時差 1～2 ms 程度）からの明瞭な反射波が見受けられた．しかし，これらは直達波到着時刻の自動決定プログラムでは反射波として正しく認識され，直達波の到着時刻が正しく決められていたことが確認できた．ところが，直達波から 0.3 ms（往復経路差 45 cm 相当）前後の走時遅れをもつ後続波も散見され，この後続波を直達波と認識しているケースが多く見られた．往復経路差をもとにすると，この後続波は反射防止カバーからの反射波であると推察された．そこで，音響測距再開後には反射防止カバーを外すことにした．以上の結果は 12 月の AGU Fall Meeting で発表した.

11 月 16 日に衛星通信に接続しないまま音響測距を再開したが，12 月に入り給電不足が顕著となり，12 月 17 日についに音響測距が停止した．3 月 24 日に衛星通信にも接続して音響測距を再開した.

1-2-4　2019 年度の研究開発

衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試みについては発電能力向上のため電源部の再設計を行い，太陽光パネル及び蓄電池の増強作業を 12 月と 3 月に実施した.「みちびき」と MADOCA を用いた精密単独測位の精度向上を検証するため，対応可能受信機を弓削丸に搭載し，10 月に実験を実施した．その結果新たな手法による精度は，水平方向 10 cm 以下，垂直方向 20~30 cm 程度となり，津波計に有効利用できることを確認した．また，GNSS ブイ・衛星間通信方式について，構築したシミュレーションを用いて将来想定されるブイの設置密度及びデータレートにもとづく性能評価を継続して行った.

気象学・電離層研究への応用についての前年度までの観測及びデータ同化実験等に基づ

く成果について関連する研究者が学会等で発表した（資料 3-1，3-2 参照）.

全体の活動としては，4 月 25 日に開催された地震調査研究推進本部地震調査会第 31 回津波評価部会において本研究の進捗状況の報告を行ったほか，6 月・9 月に研究者会議を開催し本年度の計画等について打ち合わせを行ったほか，国際・国内学会において成果発表，英文による論文報告を行った.

【海底地殻変動計測への応用】

前年度と同様に，連続音響測距を継続し，必要に応じてブイ上の保守作業を行うとともに，給電能力の抜本的な改良を行った．また，現地収録データをもとにした直達波到着時刻の自動決定プログラムの性能評価を行った.

2019 年 4 月 6 日から小規模な停電が発生し，この期間は音響測距が停止したが，2017 年度の改良で音響装置に装備した再稼働機構が働き，復電後の 4 月 10 日には音響測距が自動で再開された．ただし，衛星通信は，4 月 11 日に陸上へのデータ伝送が停止した後は再開されなかった．これは，衛星通信モデムがハングアップした際にリブートしないことが原因であるとの結論に至り，自動リブート機構を搭載するとともに，1 日 1 回の強制再起動をかけることにした.

4 月 25 日に相関処理 PC と音響装置との接続に不具合が生じたために音響測距を停止した．これに伴う保守を終えた 6 月 17 日からは，再度停電が発生した 12 月 12 日まで約 6 ヵ月間継続して音響測距が実施できた． この期間は衛星通信に接続していなかった.

図 2-12：太陽光パネル等増設後のブイの様子．マストの上から撮影．防水箱の内部も併せて示

2018 年 3 月 28 日の測距開始から 2019 年 4 月 25 日までに取得した 35316 個の音響測距生波形をもとに直達波到着時刻の自動決定プログラムの性能評価を行ったところ，全体の 99.6%にあたる 35180 回の音響測距について直達波の到着時刻が正しく判定されていた．この中には，反射波が含まれる波形（1127 個）や測距信号が記録されていない波形（1066 個）も含まれる．直達波の到着時刻の決定間違いは全体の 0.4 %（136 回）であった．これを 1 日あたりに換算すると 2 回程度であり，このプログラムは高い性能を有していることが確認された（論文 2020-1）．

前年度の冬季における停電を受け，その原因を追及したところ，5 枚の太陽光パネルの全てが直列に接続されており，一部が常にブイのマストの陰に入っていることが原因であろうとの結論に至った．そこで，従前は 12 V 系と 24 V 系の電源を 24 V 系の給電システム 1 系統から供給していたが，これらを分離することとし，陰に入る位置に設置されていた 12 V 系の太陽光パネルは並列接続とした．同時に，太陽光パネルを 4 枚×2 系統の計 8 枚に増設するとともに，蓄電池も増設することとした（図 2-12）．この改良に伴う治具，防水箱，充放電制御装置の設計・製作を経て，2020 年 3 月 12 日にブイ上での工事を終え，衛星通信にも接続して音響測距を再開した．以上の結果は 2020 年 7 月の日本地球惑星科学連合大会で発表した．

1-2-5　2020 年度の研究開発

本年度は折からの新型コロナウィルスの蔓延により研究が停滞することとなり，経費の

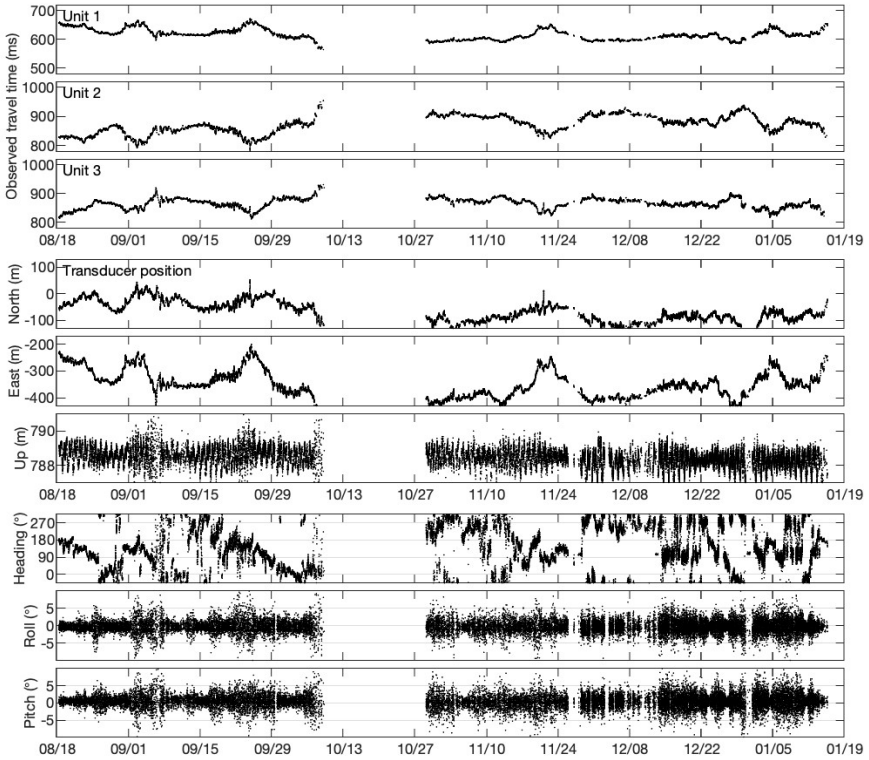


図 2-13：（上段）ブイ―海底局（Unit 1-3）間の走時，（中段）ブイに設置されたトランスデューサの位置，（下段）トランスデューサの姿勢（方位，回転及び傾斜）．

一部を 2021 年度に繰り越すこととなった．そのような中でもそれぞれの課題においていくつかの取組があった．

衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試みについては，前年度の 3 月頃よりブイデータが途絶する事態が発生し，その原因究明が行われた．衛星通信の問題か，ブイ上の機器類の問題や電源などいくつかの可能性が考えられた．7 月 2 日にブイ上作業を行った結果データの回復が見られた．2021 年度には将来の衛星通信の手法に関連して，IoT-NTN 方式を用いて多数のブイからの通信を効率的に実施できる新しい方法を提案することができ，国際学会で発表された．

全体の活動としては新型コロナウィルス感染拡大の影響で対面での会議などが困難となり，研究の進捗状況が当初計画より遅れることになった．このため成果の取りまとめを次年度に繰越すこととし，必要な手続きを行った．ブイ観測は当初予定通り 2021 年 2 月末で終了し，3 月には仁淀川町の基地局の通信装置を含め撤去作業を実施した．なお，地上基地局のサーバは次年度まで運用を延長することとした．

【海底地殻変動計測への応用】

連続音響測距を継続するとともに，得られたデータを解析し，ブイによる海底地殻変動観測についてのまとめを行った．

前年度に給電能力の抜本的な改良を行い，音響測距を再開した後は，2021 年 1 月 15 日まで約 10 ヶ月にわたって継続して音響測距が実施できた．2020 年 6 月 8 日に衛星通信モデムを交換し，音響測距データの地上局への送信を再開したが，データが送信されない場合もあった．データ不達が顕著となったため，ブイ上の状況を確認したところ，衛星通信アン

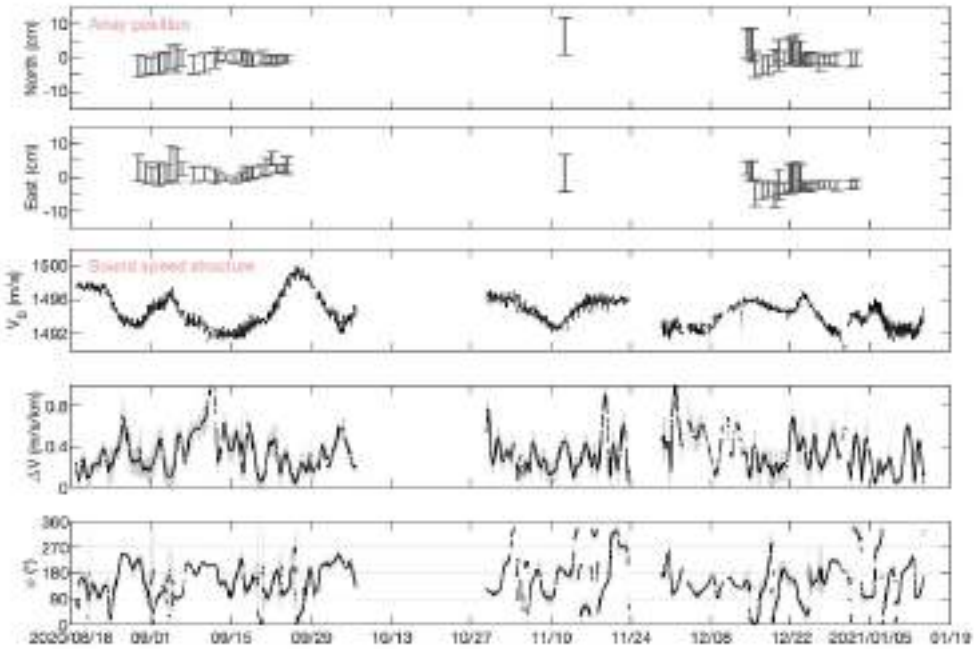


図 2-14：（上段）海底局アレイ位置（NS 及び EW），（下段）推定された音速構造：V_0 音速の平均値，ΔV と φ：音速の傾斜．

テナのケーブルに損傷が見られたため，11 月 26 日にケーブルの交換を行った．これによって状況は改善した．ブイ上の機器類の撤収を 3 月 17 日と 19 日に行った．

本研究期間内に海底局に向けて測距信号を送信した回数は合計で 272,276 回であった．このうち，測距に成功したのは 257,413 回（95 %）であった．残りの 14,863 回（5 %）は，ブイ上で測距信号が収録されなかったため，測距失敗と判定した．測距が成功した 257,413 回のうち，衛星通信経由で地上局へ送信されたデータの個数は 96,985 個であった．音響測距実施中に衛星通信に接続していない期間を除くと，音響測距の回数は 188,799 回であり，地上局へ送信されたデータの割合は 51 %であった．

2020 年 8 月 18 日～2021 年 1 月 15 日に取得したデータをもとに海底地殻変動の解析を行った．まず，船舶による観測で得られたデータから海底局アレイの形状を決定し，これを固定して，海底局アレイの変位，および海中音速の勾配とその時間変化をグリッドサーチによって求めた．推定された海中音速の勾配の大きさと方向が妥当な値に収まるとの制約をかけて海底局アレイの変位を推定し，28 日間の移動平均をとったところ，海底局アレイ位置のばらつきは 3cm 程度であり，ブイによる海底地殻変動観測が有効であることが示された．図 2-13 はこの期間に取得したデータを示す．上段はブイと海底局間の走時を示している．中段はブイに設置されたトランスデューサの推定位置，下段は GNSS ジャイロで測定したブイの姿勢である．これらをもとに上記のプロセスによって推定した海底局の水平位置（NS と EW）を図 2-14 上段に示す．下段の V_0は音速の平均値をΔVと ϕは音速の傾斜を示す．ここで示した海底局位置をプロットしたものが図 2-15 である（論文 2020-2）．

本研究期間内での実験によって，給電が保たれていれば音響測距は連続して実行可能で，測距信号の到着時刻が自動で決定されることが実証できた．ブイの GNSS 測位に使用している PPP-AR という手法では，衛星通信を通じて補正情報を受け取る必要がある．本実験では衛星通信が頻繁に途絶えたため，ブイの測位結果も含めた連続観測の長期実施には課題が残った．今後は，GNSS アンテナで補正情報が取得できるサービスを利用した高精度リアルタイム GNSS 測位の利用を検討する必要がある．

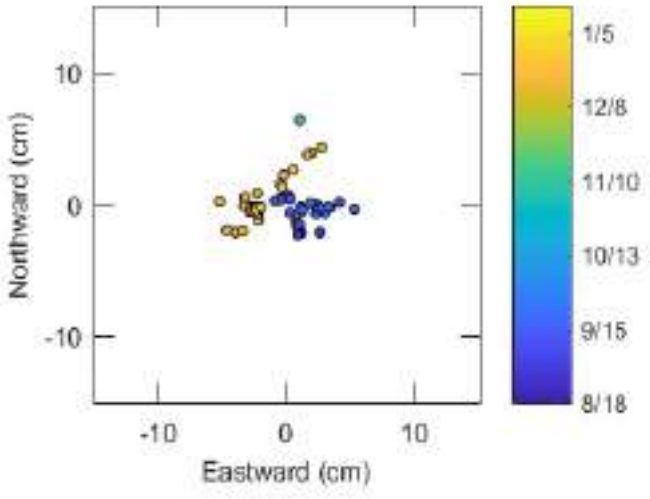


図 2-15：推定した 2020 年 8 月 18 日～2021 年 1 月 25 日間の海底局の位置．28 日毎の移動平均値を示す．

1-2-6　2021 年度の研究開発

GNSS ブイを多数海洋に配置した際に必要になると考えられる通信衛星の仕様の研究に関して, 端末の識別に関して複素直交系列を用いた新しい識別手法を開発し国際学会で発表を行った. この手法により多数のブイからの信号を効率よく識別できる可能性が示され将来期待されるブイアレイ用の専用衛星システムの仕様策定に重要な結果を得ることができた（図 2-16；論文 2021-1）.

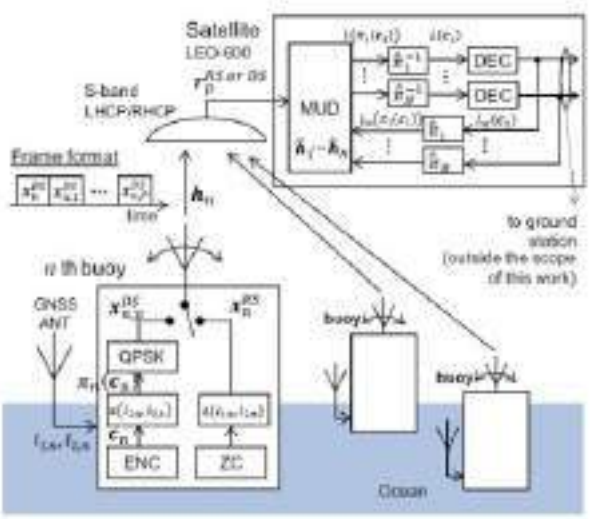


図 2-16 : 複数ブイから衛星への信号の新しい識別方式. 端末位置情報をもとに複素直交行列を用いて端末ごとに異なるインタリーバを選択できるようにすることでデータ分離を行う.

本年度は前年度までの研究開発の成果の取りまとめを行った. このため, 日本学士院紀要へのレビュー論文を投稿し印刷刊行した（論文 2022-2）. また, 月刊地球および大正大学紀要に和文で解説記事を執筆した（論文 2022-1, 2022-3）. 最後に 2022 年 3 月に本研究成果報告書を印刷し関係者に配布した.

【海底地殻変動計測への応用】

GNSS 測位の補正情報を GNSS アンテナから取得できるサービスのひとつである CenterPoint RTX の評価試験を陸上にアンテナを固定し, 2021 年 8 月 18 日～31 日に行った. 従来の船舶による海底地殻変動観測で使用している PPP 解析の結果と比較したところ, 測位結果のばらつきは PPP 解析よりも小さく, 水平成分で±1cm 程度であった. また PPP 解析結果に現れる約 1 日周期の系統的な測位結果の変動は見られなかった. ただし, fix 解が得られないことが試験期間中に 1 回あり, この時には水平方向に 10～20cm 程度の測位結果のずれがみられた. 今後は, 海域および移動中の船舶における試験を行い, リアルタイム海底地殻変動観測への有効性を評価する必要がある.

１－３　成果，残された課題と今後の可能性

本研究では，既に実用化した沿岸から 20 km 以内での海面高変動の計測・監視を脱却し，遠洋での計測・監視を可能にしようとする研究開発であった．この目標を達成するために，本研究開発では，以前の RTK ではなく高精度単独測位（PPP-AR）という測位方式を導入するとともに“衛星通信を用いた精密暦のブイ側への送付～ブイ上での測位解析～衛星通信を用いた測位結果の陸側への伝送～Web による結果の開示”という情報伝達システムを導入した．また，本研究では商用衛星を使うこととしたが，将来のための専用衛星を用いた通信方式を検討することとした．また，これらの本来の津波早期検知のみを目的とするのではなく，ブイでの GNSS 計測を多目的に展開するために，GNSS-音響計測に基づく海底地殻変動連続観測に挑戦するとともに，GNSS 測位解析に際して出力される大気遅延や電離層の全電子数を気象学や電離層研究に応用できるか，という検討を行うこととした．

結果として，これらについて，一定の成果を挙げることができたことは評価できると考えられるが，一方，研究開発は必ずしも順調にはいかない面もあり，今後に課題を残すこととなった．

まず，衛星通信に関する成果として，実験観測に基づくデータに基づきブイの揺動による信号のフェージングの影響評価を行い，揺動による受信信号の強度変化が対数正規分布で表現することを見出した（論文 2017-4）．さらに，多数のブイからの通信衛星へのデータ送信に関して効率的に信号を処理する新しい方式を提案した（論文 2021-1）．これらの成果は将来多数のブイが海洋に設置され運用されることが実現され際の仕様検討に大変重要な知見と言えるだろう．今回の開発では，商用衛星によるデータの伝送が行われたが，短期間のデータ取得はできたものの，数か月以上にわたって安定したデータ取得はできなかった．これについては電源不足などの影響もあってゲインの高い通信アンテナが使えないなどの制約も一因といえよう．また，データが取得できないことについて GNSS アンテナと衛星通信アンテナが干渉しているのではないかとの懸念もあった．電源についても当初の設計では数日間の日照不足に耐えられるような設計がなされていたが，ピラーの影の影響などもあって十分な発電量が得られなかった可能性も指摘された（論文 2020-1）．今後の課題としてはやはり専用のブイを用いて十分に余裕のある電源を用いることができるようにする必要があるだろう．

精密暦の利用に関しては，既に定評のあった PPP-AR 方式を用いることで，GNSS 信号が Fix されている時は大変良好な結果を得ることができた（論文 2018-1）．この方式では日立造船が独自に GEONET データから精密暦を作成してそれを伝送したが，今後の発展としては，現在みちびきで利用ができるようになっている JAXA が開発した MADOCA 暦を用いることが伝送負荷の低減のためには重要と考えられる．それは，MADOCA 暦がみちびきの通信機能により直接地上に伝送できるためである．本研究開発においてはこの方式を本格導入することはできなかったが，商用の MADOCA 暦対応可能な受信機が登場したことからマゼランジャパン社の好意によりこの受信機をお借りして瀬戸内海で実験的に受信

実験を行い船上でモニターすることに成功した．ただ，受信実験の途中で信号が途切れた場合，Fix 状態に戻るまでに数十分かかることなどがわかった．これは実用化においてかなりの問題となろう．MADOCA 暦を用いた測位実験はその後も多くの研究があり，近年は Fix までの時間が数分程度と大変短くなるような成果も出てきていることから，いずれこのような方式が海上での測位においても活用できるようになるだろう．みちびきからの MADOCA 暦の取得が可能となれば，ブイへの精密暦の伝送が独自に準備する必要がなくなるので，衛星通信費の低減など経費削減には朗報となるだろう．

海底地殻変動連続観測への挑戦については，これまでの船舶を用いた方式に比べ連続的な地殻変動の計測が可能となることから，期待が大きいと考えられた．開発は比較的順調に進められたが，例えば CTD 観測が連続的に行えるわけではないことなどから，海中の音速構造を測位と同時に推定するなど，新しいソフトウェアの開発なども行った（論文 2020-2）．ブイの電源不足の問題などもあって，実際の連続的な計測は最終年度になってやっと実現した．その結果，数か月の観測から海底局アレイの位置が数 cm 以内で決定できたことは世界初の成果として挙げられるだろう(論文 2022-1, 2022-2)．しかしながら，ブイを用いることの問題点として挙げられるのは，観測期間中にブイが海底局アレイの範囲を大きく振れ回らないと海底局位置と音速構造が精度よく分離することが困難であることが指摘され，これを回避するためにやや複雑な処理を実施しなくてはならなかった．また誤差低減のために 28 日という長い日数の観測からの平均位置を求めるなど，目的とした毎日程度の高頻度の測位を実現には至らなかった．今後ブイを用いた海底地殻変動の連続観測を実現するにはブイが海底局アレイの全体を振れ回るようななんらかの工夫が必要になるだろう．

気象学や電離層研究への応用に関しては，本研究開発で取得したデータを用いた精度評価により，今後十分な成果が期待できる結果が示された（論文 2022-2）．今後，本格的なブイを用いた長期連続観測が多くの地点で実施できるとなれば，単なる防災情報としてだけ

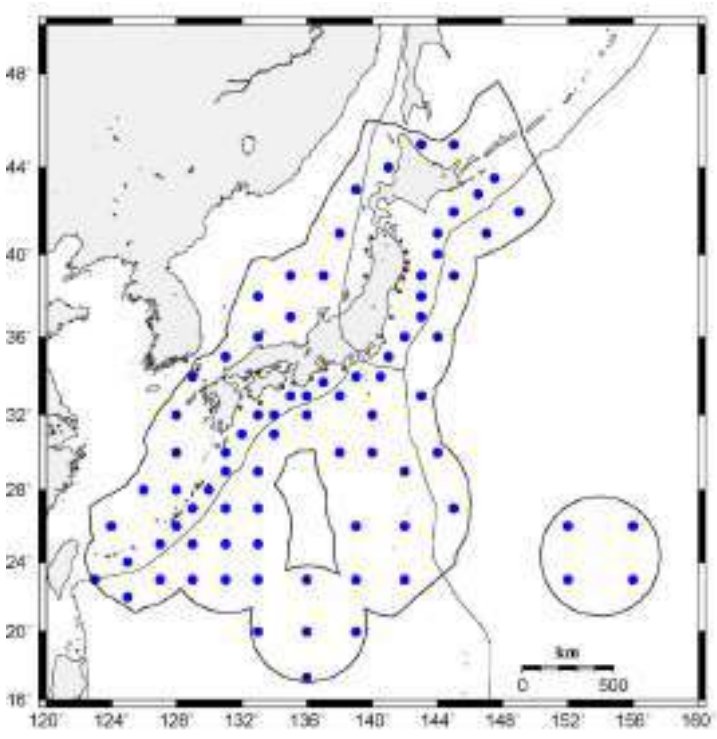


図 3-1：「海の GEONET」構想．丸印は GNSS ブイ観測点．

でなく，多くの地球科学研究に大きな寄与が期待できることが実感された．

以上の展望をふまえ，我々は北西太平洋に GNSS ブイアレイを設置して新たな地球科学インフラとしてのいわば「海の GEONET」を構築することを提案してきた（図 3-1）（論文 2018-1, 論文 2022-2）．このような大規模なブイアレイができると，これらのブイを活用することにより他の研究分野への波及効果も期待できる．例えば東京大学先端科学技術センターの中村尚教授からブイに様々な観測機器を搭載することで海洋学並びに海洋気象学へのインパクトが非常に大きいとの示唆を得ている．また，海洋研究開発機構の有吉慶介研究員からも彼らの「海底～海面を貫通する海域観測データの統合解析」プロジェクトへの参画を打診されるなど，大きな広がりを見せてきた．そこで，我々は以前より情報通信研究機構（NICT）が推進している「次世代安心・安全 ICT フォーラム」の海上ブイ WG を主導してきたが，これを拡大し，オールジャパンの北西太平洋 GNSS ブイネットワークを推進する研究者グループを構築した．このグループは本研究で目指している津波，海底地殻変動，大気，電離層だけでなく，海洋学や海底地震などまでをも含む多彩な研究者グループとなっている．また，本研究の出口戦略として，日本学術会議の大型研究計画（マスタープラン 2020）に参画することとしたが，他の大きな研究計画との競合を避けるため，東京大学平田直教授が PI となっている固体地球物理学が中心となっている「沈み込み学の新展開~２D から４D 科学への跳躍~」に参加した．

海洋 GNSS ブイは世界的に見ても競合することのない極めてユニークな研究計画であり，他国に類を見ない計画である．そのため，例えば米国 NOAA からも注目されていると聞く．また，津波被害をたびたび受けているインドネシアや南米諸国などからは特に津波警報システムとしての導入に関して多くの引き合いがある．ただ，残念なことに経費的な面で折り合いがつかず，我々のシステムがいまだ導入されていないことは残念である．

第２部　研究成果の発表状況

２－１　原著論文リスト

（論文：査読有）

1) Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto, Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Kenichi Takizawa, Yoshinori Shoji, Tadahiro Iwasaki, Naoyuki Koshikawa (2017) GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system *Proceedings of the twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.777-782, San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017, ISBN978-1-880653-97-5, ISSN 1098-6189.

2) Yoshinori Shoji, Kazutoshi Sato, Masanori Yabuki, Toshitaka Tsuda (2017) Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjascent to Japan, Earth, Planets and Space, 69:153 DOI 10.1186/s40623-017-0740-1

3) Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi (2018) Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS," Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, pp. 535-545, doi: 10.20965/jdr.2018.p0535.

4) Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Keiichi Tadokoro, Natsuki Kinugasa, Akira Futamura, Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto, Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Kenichi Takizawa, Yoshinori Shoji, Hiromu Seko, Tadahiro Iwasaki, and Naokiyo Koshikawa (2018) Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System," Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, 460-471.

5) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, and K. Matsuhiro, A Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurment of Seafloor Crustal Deformation, (2020) Front. Earth Sci., 8:123, doi:10.3389/feart.2020.00123

6) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, and A. Futamura (2022) Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, Proc. Jpn. Acad., Ser. B 98, 49-71.

（論文：査読無）

1) 寺田幸博・加藤照之 (2017) GPS津波計・波浪計・潮位計, *非破壊検査*, **66**(4), 178-182.

2) 滝沢賢一, 山本伸一, 豊嶋守生, 二村彰, 寺田幸博, 加藤照之 (2017) 海洋GNSSブイからの洋上・衛星間データ収集を想定した電波伝搬モデルの構築, 信学技報, Vol.117, No.174, SAT2017-39, 99-102.

3) 加藤照之・寺田幸博 (2018) GNSSを用いた総合防災ブイの開発, *地質工学*, **15**, 33-38.
4) 田所敬一 (2020) リアルタイム・連続海域観測, 日本地震学会モノグラフ, **6**, 12-15.
5) 加藤照之 (2020) GNSSを用いた総合防災ブイシステム, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 第70号, 11-20.
6) 加藤照之・寺田幸博・田所敬一・二村彰 (2022) GNSSを用いた地球科学・災害監視のための総合海洋アレイ, *月刊 地球*, Vol. 44, No.1, 44-51.
7) Takizawa, K., S. Yamamoto, Y. Terada, and T. Kato (2021) Non-orthogonal multiple access (NOMA) in IoT non-terrestrial network for GNSS buoy array in the ocean, IEEE VTC2021 Fall meeting (online), 27 September – 28 October, 2021.
8) 加藤照之 (2022) 津波防災のためのGPS (GNSS) ブイの開発について, 大正大学地域構想研究所紀要「地域構想」, (印刷中)

(その他)
1) 加藤照之 (2019) 第11回MGA会議及びUNESCAP会議出席報告, 測位航法学会ニューズレター, **10**(2), 6-7.

２－２　口頭・ポスター発表リスト

（招待講演）

1) Teruyuki Kato, GNSS buoy array in the Pacific for natural disaster mitigation, The First Pacific Regional Workshop on Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems by Using Space and GIS Applications, Nadi, Fiji, September 13, 2016.

2) 加藤照之, 寺田幸博, 田所敬一, 二村彰, 豊嶋守生, 山本伸一, 石井守, 津川卓也, 西岡未知, 滝沢賢一, 小司禎教, 岩崎匡宏, 越川尚清, 海洋GNSSブイを用いた総合防災システムの開発, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会,　東北大学, 2016年11月21日.

3) Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, MorioToyoshima, Shin-ichiYamamoto, Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Kenichi Takizawa, Yoshinori Shoji, Hiromu Seko, Tadahiro Iwasaki, Naokiyo Koshikawa, Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazards monitoring system, 12th Meeting of the ICG, Kyoto, Japan, December 3, 2017.

4) 木下正高、平田直、篠原雅尚、入舩徹男、鍵裕之、加藤照之、小野重明、道林克禎、阿部なつ江、稲垣史生、小村健太朗、小原一成, 2019, リアルタイム観測・大深度掘削・高圧実験の統合による沈み込み帯4D描像, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月27日.

5) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Multi GNSS Asia 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

6) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

7) 田所敬一，リアルタイム・連続海域観測，日本地震学会特別シンポジウム「南海トラフ地震臨時情報：科学的データや知見の活用」，京都，2019年9月15日.

（国際会議）

1) Teruyuki Kato, Yukihiro Terada , Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, Morio Toyoshima, Mr. Shin-ichi Yamamoto, Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Kenichi Takizawa, Yoshinori Shoji, Tadahiro Iwasaki, Naoyuki Koshikawa, "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System,"　IAG-IASPEI 2017, Kobe, Japan, August 3, 2017.

2) Keiichi Tadokoro, Natsuki Kinugasa, Teruyuki Kato and Yukihiro Terada, "Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement," San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting

2018.

3) Natsuki Kinugasa, Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, Yukihiro Terada, and Teruyuki Kato, Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy, San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting 2018.

4) Yoshinori Shoji, Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Toshitaka Tsuda, Masanori Yabuki, Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement, Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS) XIII, Naha, Japan, 6-8 March 2019

5) Shoji Y., Tsuda T., Kato T., Terada Y., Yabuki M., Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction," European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, Milan, Italy, 13-17 May 2019

6) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Multi GNSS Asia 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

7) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

8) Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, and T. Kato, Observation for seafloor crustal deformation using moored buoy by GNSS-A technique considering the heterogeneity of sound speed in ocean, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, December 2019.

9) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, MGA 2020 Online Seminar, August 2020.

10) Takizawa, K., S. Yamamoto, Y. Terada, and T. Kato, Non-orthogonal multiple access (NOMA) in IoT non-terrestrial network for GNSS buoy array in the ocean, IEEE VTC2021 Fall meeting (online), 27 September – 28 October, 2021.

（国内学会講演発表）

1) Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto, Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, Kenichi Takizawa, Yoshinori Shoji, Tadahiro Iwasaki, Naoyuki Koshikawa, "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System," JpGU, 幕張メッセ, 2017年5月19日.

2) 加藤照之, 寺田幸博, 田所敬一, 衣笠菜月, 二村彰, 多田光男, 小司禎教, 瀬古弘, 石井守, 津川卓也, 西岡未知, 豊嶋守生, 山本伸一, 滝沢賢一, 越川尚清, "新たな海洋総合防災GNSSブイアレイの開発," 測地学会第128回講演会, 岐阜県瑞浪市総合文化センター, 2017年10月5日.

3) 加藤照之, GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

4) 衣笠菜月, 田所敬一, 稲垣駿, 寺田幸博, 二村彰, 加藤照之, 海洋GNSSブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

5) 田所敬一, 衣笠菜月, 稲垣駿, 二村彰, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 海洋GNSSブイを活用した海底地殻変動観測システムの開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

6) 田所敬一, 衣笠菜月, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.

7) 衣笠菜月, 田所敬一,加藤照之, 寺田幸博, ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.

8) 瀬古弘, 小泉耕, 小司禎教, 加藤照之, 船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験（その１）, 気象学会2019年春季大会, 東京, 2019年5月15-19日

9) Yoshinori Shoji, Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Toshitaka Tsuda, Masanori Yabuki, Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月26-30日.

10) Keiichi Tadokoro, Natsuki Kinugasa, Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Akira Futamura and Kenjiro Matsuhiro, Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月26-30日.

11) Natsuki Kinugasa, Keiichi Tadokoro, Yukihiro Terada, Teruyuki Kato, Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月26-30日.

12) 加藤照之・寺田幸博, GNSSブイを用いた総合防災システムについて～現状と課題～, 測位航法学会　GPS/GNSSシンポジウム, 東京海洋大学, 2019年10月17日.

13) 田所 敬一・衣笠 菜月・加藤 照之・寺田 幸博・松廣 健二郎, Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020 年 7 月 12-16 日.

14) 衣笠 菜月・田所 敬一・加藤 照之・寺田 幸博, 係留ブイを用いた GNSS-A による海底地殻変動観測のための解析手法の開発, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020 年 7 月 12-16 日.

15) 衣笠菜月・田所敬一・加藤照之・寺田幸博, 係留ブイによる GNSS-A 海底地殻変動観測のための解析手法の研究, 日本測地学会第134回講演会, オンライン, 2020年10月21-23日.

16) 加藤照之, 海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦, 地球惑星科学連合大会, ハイブリッド, 2022年5月22日-6月3日

２－３　研究成果の社会・国民への発信

（1）メディアへの掲載（新聞・番組名、掲載年月日等）

日本経済新聞	2016 年 8 月 22 日
NHK 高知ローカルニュース	2016 年 8 月 24 日
愛媛新聞	2016 年 8 月 25 日
朝日新聞	2016 年 8 月 26 日
準天頂衛星	WebNews 2016 年 8 月 26 日
高知新聞	2016 年 11 月 22 日
高知新聞	2016 年 11 月 30 日
日本経済新聞	2016 年 12 月 25 日
NHK ニュース	2017 年 8 月 19 日（添付資料なし）
高知新聞	2017 年 12 月 16 日
日本経済新聞	2018 年 3 月 5 日
日刊工業新聞	2021 年 3 月 9 日

（2）公開行事（行事名、実施日、テーマ、参加者数等）

１．仁淀川町町民対象の講演会

（１）　実施日　平成 28(2016)年 11 月 23 日

（２）　テーマ　地震と津波を考える夕べ

（３）　講師　加藤照之　寺田幸博

（４）　参加者　仁淀川町長以下 66 名

（５）　参考　高知新聞記事（資料：2016/11/30）

２．仁淀川町池川小学校への出前授業

（１）　実施日　平成 28(2016)年 10 月 29 日

（２）　テーマ　津波について考える

（３）　講師　寺田幸博

（４）　参加者　池川小学校４～6 年生 21 名、教員 3 名、父兄 8 名

３．高知県吾川郡教育委員会連合会研修会での講演

（１）　実施日　平成 29(2017)年 2 月 24 日

（２）　テーマ　GPS 津波計の開発

（３）　講師　寺田幸博

（４） 参加者　高知県吾北地区教育長・教育委員　14 名

４．仁淀川町全中学校対象の出前授業

（１） 実施日　平成 29(2017)年 12 月 2 日

（２） テーマ　地震と津波について考える

（３） 講師　寺田幸博

（４） 参加者

仁淀中学校　１・2 年生 27 名、教員 6 名、父兄 11 名

池川中学校　２年生 11 名、教員 5 名

（５） 参考　高知新聞記事（資料３：2017/12/16）

5. 仁淀川町全中学校対象の出前授業

（１） 実施日　平成 30(2018)年 12 月 1 日

（２） テーマ　地震と津波について考える

（３） 講師　寺田幸博

（４） 参加者

仁淀中学校　14 名、教員 3 名

池川中学校　２年生 3 名、教員 4 名　近隣住民 2 名

6. 高知市立横浜中学校対象の出前授業

（１） 実施日　令和元(2019)年 9 月 14 日

（２） テーマ　地震と津波について考える

（３） 講師　寺田幸博

（４） 参加者

全校生徒 320 名、教員 30 名、近隣住民（校区防災組織）50 名

7. Multi GNSS Asia Rapid Prototype Development Challenge (MGA RPD) 2020 でのオンライン講義

（１） 実施日　令和 2（2020）年 8 月 11 日～

（２） テーマ Recent Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Disaster Mitigation System in the ocean

（３） 講師　加藤照之

（４） 参加者

アジア各国の学生・若手研究者

（参考）https://m.youtube.com/watch?v=4Bmth5sysuU

8. Multi GNSS Asia Rapid Prototype Development Challenge (MGA RPD) 2022 でのオンライン講義

（１） 実施日　令和 4 (2022) 年 2 月 14 日～

（２） テーマ　Analysis of GNSS buoy data

（３） 講師　加藤照之

（４） 参加者

アジア各国の学生・若手研究者

(参考) https://m.youtube.com/watch?v=0kUvbPSSp6c

第３部　資料

資料３－１　発表論文

[平成 29(2017)年]

2017-1) 寺田幸博・加藤照之（2017）GPS津波計・波浪計・潮位計，*非破壊検査*，**66**(4), 178-182.

2017-2) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, and N. Koshikawa (2017) GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system, Proceedings of the twenty-seventh （2017） International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, June 25-30,2017, 777-782.

2017-3) Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2017) Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan, Earth, Planets and Space, 69:153, DOI 10.1186/s40623-017-0740-1.

2017-4) 滝沢賢一，山本伸一，豊嶋守生，二村彰，寺田幸博，加藤照之（2017）海洋GNSSブイからの洋上・衛星間データ収集を想定した電波伝搬モデルの構築，信学技報, Vol.117, No.174, SAT2017-39, pp.99-102.

[平成30(2018)年]

2018-1) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, H. Seko, T. Iwasaki, and N. Koshikawa (2018) Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System, Journal of Disaster Research, **13** (3), 460-471, doi: 10.20965/jdr.2018.p0460.

2018-2) Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi (2018) Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS, Journal of Disaster Research, **13** (3), 535-545, doi: 10.20965/jdr.2018.p0535.

2018-3) 加藤照之・寺田幸博（2018）GNSSを用いた総合防災ブイの開発，*地質工学*，**15**, 33-38.

[平成31/令和元(2019)年]

2019-1) 加藤照之（2019）第11回MGA会議及びUNESCAP会議出席報告，測位航法学会ニューズレター，**10** (2)，6-7.

[令和2(2020)年]

2020-1) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, and K. Matsuhiro (2020) A

Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurment of Seafloor Crustal Deformation, Front. Earth Sci., 8:123, doi:10.3389/feart.2020.00123

2020-2) Kinugasa, N., K. Tadokoro, T. Kato and Y. Terada (2020) Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy, Prog. Earth Planet. Sci., 7:21, doi:10.1186/s40645-020-00331-5

2020-3) 田所敬一（2020）リアルタイム・連続海域観測，日本地震学会モノグラフ，**6**，12-15.

[令和3(2021)年]

2021-1) Takizawa, K., S. Yamamoto, Y. Terada, and T. Kato (2021) Non-orthogonal multiple access (NOMA) in IoT non-terrestrial network for GNSS buoy array in the ocean, IEEE VTC2021 Fall meeting (online).

［令和4(2022)年］

2022-1) 加藤照之・寺田幸博・田所敬一・二村彰 (2022) GNSSを用いた地球科学・災害監視のための総合海洋アレイ，月刊 地球， **44** (1), 44-51.

2022-2) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, and A. Futamura (2022) Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, Proc. Jpn. Acad., Ser. B, **98**, 49-71.

2022-3) 加藤照之 (2022) 津波防災のためのGPS（GNSS）ブイの開発について，大正大学地域構想研究所紀要「地域構想」，（印刷中）

解説

水中での非破壊検査

GPS 津波計・波浪計・潮位計

高知工業高等専門学校　寺田　幸博　　東京大学地震研究所　加藤　照之

Tsunami, Wave and Tide Meter

National Institute of Technology, Kochi College　Yukihiro TERADA
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo　Teruyuki KATO

キーワード　GPS 津波計，GPS 波浪計，防災，衛星通信，海底地殻変動観測，大気・電離層観測

1．　はじめに

2011 年 3 月 11 日，国土交通省によって釜石沖に設置されていた GPS 波浪計は，東北地方太平洋沖地震で発生した大津波の波高が 6.7m であることをリアルタイムに発信した。気象庁はこの情報を活用した[1)]。

この GPS 波浪計は，筆者らが 1997 年以来開発を続けてきた GPS 津波計の応用展開計測装置である。これは，開発した GPS 津波計が秒単位で変化する波浪から，分単位・時間単位で変化する津波，日・月・年単位で変化する潮汐に対して，同じ精度を保ったまま 1 つの測器で計測できる機能を有している[2)] ことから実現できたことである。このことは，津波のように数十年に 1 回程度のまれに起こる現象に対する計測器の在り方を提示することにもなった。つまり，日常的に役に立つ計測をしている測器であれば，そのデータの発信に関係機関や関係者が対応しやすく，その機器メンテナンスにも継続的な支援を受けることが容易になることが示された[3)]。

本稿においては，開発開始から 20 年を経過した中で，その開発の意義と達成された技術及び将来への展望について記述することとする。2003 年頃までに到達していた基本原理とその機能については，著者らが本誌の「海面計測技術特集」として執筆した解説[4)] に詳しく示されていることから，それ以降の開発成果を中心に示す。

2．　GPS 津波計のコンセプト

津波の被害は，襲来前に正確に計測し，その観測値に基づく沿岸への正確な到達時刻と高さの予測，及び情報の適切な伝達によって少なくできる。このような視点の津波防災システムが構築でき，正確な観測値に基づく津波の監視・検知・伝達によって避難・誘導に活用できるようになれば，津波被災の可能性がある住民に計り知れない安心感を与え，地域の発展基盤としての貢献も期待できる。これに向けた開発で目指すものは，「いつでも，だれでも，どこからでも」津波データにアクセスでき，防災の三助（自助，互助，公助）に役立つシステムとすることである。また，日本だけでなく世界の大洋上に多数設置してネットワークで結び，世界的な災害軽減への貢献をすることも視野に入れて開発を進めた。

そこで，従来の計測手法とは全く異なる新しい発想に基づく海面変動計測装置の開発を行い，波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度でドリフトなく計測でき，設置や維持管理が容易に実施できることを目指した。このための手段として，GPS（Global Positioning System）を用いることとした。システム構成の基本的概念を**図 1** に示す。海上に浮かべたブイの最上部に GPS アンテナを取り付け，ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データに対してブイの傾きの補正をすれば，海面高の変位を計測することができる。波浪，津波及び潮汐の計測には，数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから，当初は，RTK（Real Time Kinematic）法を基本的な測位方式として採用してきた。現在では，基準点を設ける必要がない精密単独測位（PPP-AR[5)]）法によっているため，沖合展開における限界の問題が払拭され，大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている。

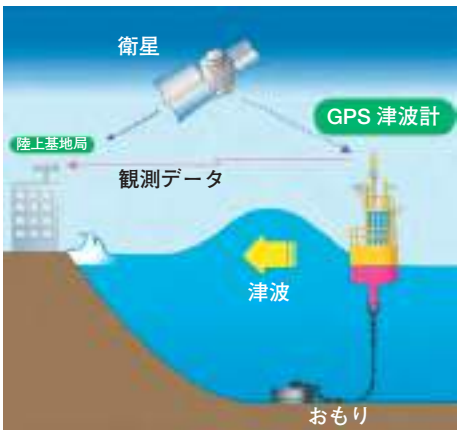


図 1　GPS 津波計のコンセプト
海面の動揺に追随するように設計施工したブイの上下動を GPS を用いて精密（cm オーダ）測位を行い，その鉛直方向位置の時系列表示を海面変動表記とする

3．　開発の経緯とその意義

1997 年に神奈川県相模湾にて実施した基礎実験において GPS 津波計が誕生した。この時の実験で，GPS 受信器や記録装置を積み込んだブイを**図 2** の左側に示す。続いて，1998 年に同地で基本機能実験を行い，波浪と潮汐を同時に cm オーダで観測できることを示した。次に，実用化実験として 2001 年から岩手県大船渡市沖に GPS 津波計を設置して 3 年間の連続計測を実施した。ここまでの成果は，前報[4)] に詳しく記している。

続いて，この技術の外洋対応の技術開発を進め，高知県室戸岬沖で実証実験を行ったときの海洋ブイを図 2 の右側に示す。計算結果はインターネットの VPN 接続でサーバ（室戸岬

図 2　GPS 津波計ブイ
写真左の白い缶体が 1997 年に試験的に製作したブイ。写真右が 2013 年に高知県室戸岬沖に設置したブイ

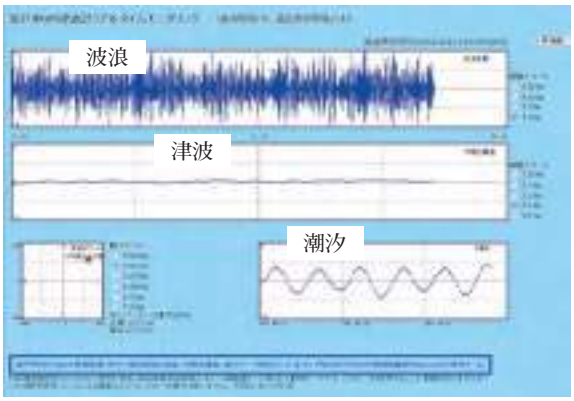


図 3　リアルタイムデータ公開（室戸岬沖）
波浪，津波データの横軸はフルスケール 1 時間であり，潮汐の場合は 3 日である。縦軸は，いずれも海面高であり，それぞれのフルスケールは ±2m，±1m，±2m である

では高知高専）に送り，ホームページで**図 3** に示す画像を表示してリアルタイムに市民へのデータ公開を行ってきた。図において，中段に示す津波データは秒単位で変化する波浪データをフィルタリングして，数分から数時間の周期で変化する成分を津波として示すようにしている。室戸岬沖の実証実験では，**図 4** に示すように波浪データの有義波高 H1/3（波高の高い方から 1/3 の平均値）と周期 T1/3（有義波高の計算対象

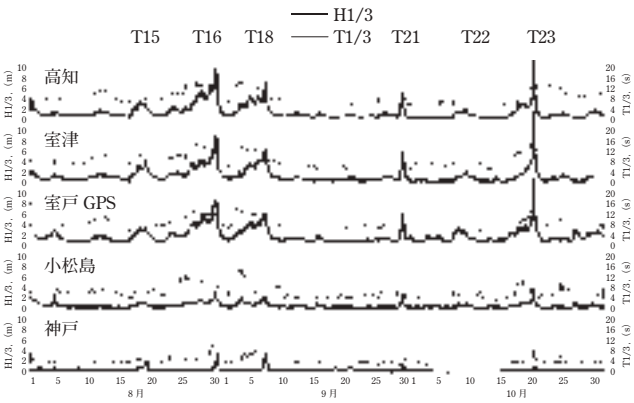


図 4　2004 年 6 月～10 月に観測された有義波高
太線が有義波高を示し，細線が有義波周期を示している。横軸のフルスケールは 3ヵ月であり，縦軸は，いずれもフルスケール 10m である

とした波の周期の平均値）が，近隣の海底超音波式波浪計で得られるものと同様の傾向を示すことが確認できた。さらに，潮汐，高潮，水温，洋上風などの情報を発信でき，漁業活動や海運などの海に関わる地域の経済活動の支えとなる海洋観測ステーションとしての機能も備え得ることを示してきた。これらのことから，国土交通省港湾局が GPS 波浪計として全国展開することになり，防波堤防や港湾施設の設計施工のために不可欠な波浪データの常時観測を行い，津波発生の非常時には気象庁によって**図 5** に示すように津波予報に利用されている[6]。

図 5　新しい津波予報（気象庁パンフレット[6]より）

4．沖合における津波観測

大船渡市沖に設置した GPS 津波計は，2001 年 6 月 25 日に初めて津波を捉えた。その前日に南米のペルー沖で発生した Mw7.9 の地震による津波が約 23 時間後に大船渡市沖に到達した[4]。続いて，2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震津波を捉えた。これらはいずれも波高 10cm 程度の津波であり，目標とした検出精度の確認ができた。

2004 年 9 月 6 日の紀伊半島沖地震津波では，室戸岬沖で**図 6** に示す津波が観測できた。図中に青線で示す GPS 津波計の観測値は，波高・周期共に赤線で示すシミュレーション結果と良い一致を示している。このことは，沖合で津波を計測することによって，震源域直上での波源を推測できる可能性を示唆している。実際，津波観測直後に波源を逆計算し津波伝播

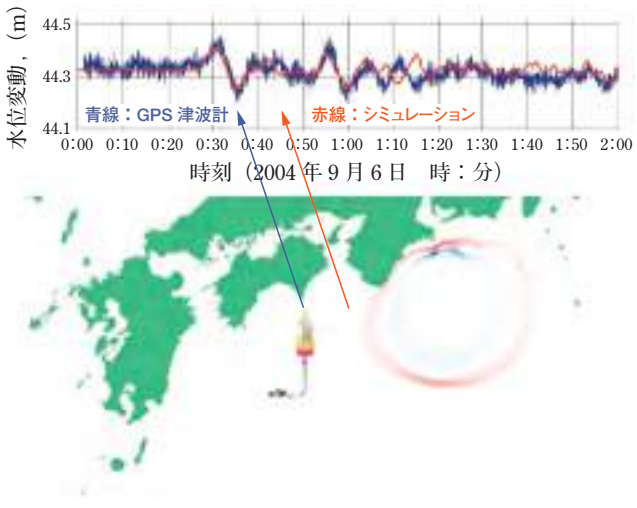


図 6　2004 年 9 月 6 日紀伊半島沖地震津波

シミュレーションの再計算を行うことによって，正確な津波高さや到達時間が得られるリアルタイム津波予測への道を切り開くことができた[7]。

沖合で津波を正確に計測できるようになれば，当然のことながら，津波をいち早く捉えて避難・誘導に活かすことができる。13km 沖合に設置した室戸岬沖 GPS 津波計で得られた図 6 の観測結果では，約 8 分のリードタイムが得られた。これらのことから，GPS 津波計の沖合展開への期待はさらに大きくなっていった。ただし，津波の伝播速度は，水深に重力加速度を乗じた値の平方根で与えられ，沖合への展開で水深が大きくなることによる伝播速度の増大で，リードタイムは単純な期待どおりに伸びないことに注意する必要がある。

5． 東北地方太平洋沖地震津波

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災発生時には，国土交通省港湾局によって GPS 波浪計として**図 7** に示すように全国に 15 基が配備され，リアルタイムにデータが公開されていた[8]。釜石沖に設置されていた GPS 波浪計のリアルタイム観測値を**図 8** に示す[9]。図中下部に平均水面高変位として表示されている津波高さは 6.7m を示し，気象庁はこのデータを含む複数のデータを根拠に大津波警報を最大級に引き上げた[1]。第 1 波の観測データを発信した後，被災地域の停電によって通信網は寸断され，それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなったが，観測データは高台に設置された基地局のバックアップ電源の下，**図 9** に示す完全な津波波形が保存できていた[10), 11)]。

2013 年 3 月に，気象庁は津波警報の発表方法を大幅に変更した。そのことを広報するリーフレット[6] の中で，図 5 に示したように今後の津波予報に沖合の圧力式海底津波計と GPS 波浪計のデータを活用するとしている。これらのことから，震源域を含む海域への GPS 津波計の設置が強く望まれ[12]，配置位置の離岸距離を伸ばすために，GPS 精密測位法のさらなる改良が喫緊の課題となった。この 2 つの課題を端的に表現すれば，「被災してもデータの続きを！」と「もっと沖合に！」となる。これらの克服には，洋上のブイからデータ伝送を行う方法と GPS 測位法の改善が必要であった。

図 7　GPS 波浪計設置状況（2011 年 3 月 11 日）
（http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf より）

図 8　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震津波
（http://nowphas.mlit.go.jp/index.html より）
津波発生当日にインターネット上で公開されていたリアルタイム画像である。横軸は，上下図共フルスケール 24 時間を示している。上図の縦軸はフルスケール 8m である。下図の縦軸は，±6.5m である。上図から潮汐成分をフィルタリングしたものが下図である。いずれも，15：00 過ぎから急激に立ち上がり，津波高 6.7m を記録している

6． さらなる沖合展開

第 1 の技術課題の通信機能面の改善に取り組み，今後の早期津波警報システムを飛躍的に機能向上させる技術を確立した。被災地域の通信網の寸断への対策の基本は，観測された津波データを，全世界に向けてリアルタイムに発信することが可能な被災のない地域に送ることである。これには，通信衛星の利用が最も有望である。しかし，揺れ動き回転する GPS 海洋ブイでは，太陽電池だけの自立的電力供給事情による省電力にも配慮する必要があり，無指向性のアンテナの使用を余儀なくされる。この場合，技術試験衛星Ⅷ型「きく 8 号」のもつ大型アンテナによる衛星側でのゲイン確保の考え方が魅力的である。以上のことから，室戸岬沖に設置した GPS 津波計実験機を用いて，**図 10** に示す構成で衛星通信実験を行った。ブイ上で精密単独測位計算を行うために必要な GPS 精密暦（正確な軌道と時計情報）を準天頂衛星初号機「みちびき」から放送的に送り，測位計算結果を「きく 8 号」の通信システムを用いて地上に送る方式とした。波浪，津波，潮汐の変

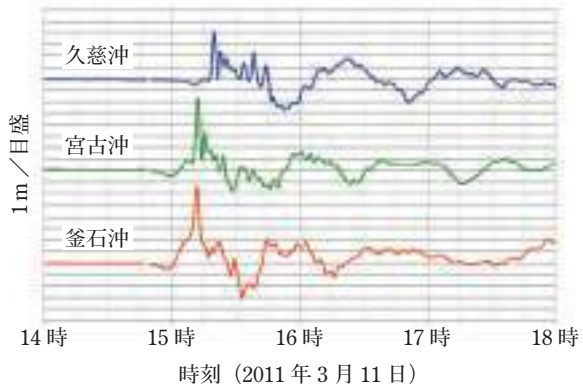


図 9　東北地方太平洋沖地震津波全波形
（国土交通省港湾局提供）

化をブイ上で計算し，得られた観測値を衛星通信で伝送した結果は，**図 11** に示すように良好な結果が得られた。

第 2 の技術課題である GPS 測位法については，RTK 法の改良に取り組んだ。**図 12** (a) は，改良前の RTK 測位結果の一例である。短い周期で上下に変化している状態が波浪による海面変位を示しているが，安定した測位ができていない。これに対して，搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって，図 12 (b) に示すように基線長 80 km でも安定的な測位が可能になった。また，洋上のブイの GPS 観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め，周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測（PVD）法[13]，周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位（PPP-AR）法[5]が有効であった。図 12 (c) は，PPP-AR を適用した結果である。図 12 (a) 及び (c) では，短周期の波浪に加えて，測位値全体が満潮に向かって単調に増加している様子を見ることができる。これらの新しい測位法は，室戸岬沖 GPS 津波計実験において，先に示したホームページでデータ公開を行った。このとき，図 3 に例示したような良好な結果がリアルタイムで継続的に得られた。

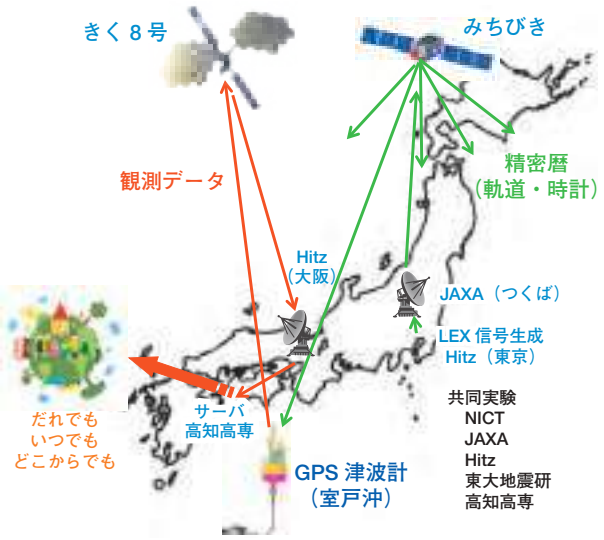


図 10　通信衛星の利用

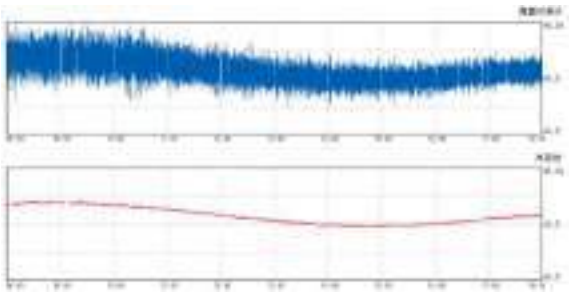


図 11　「みちびき」と「きく 8 号」を用いた GPS 津波計の情報発信実験
衛星通信実験時にリアルタイム公開した海面高変動の情報発信例。縦軸は海面の変位を示し，上図が短周期変動（波浪）と潮位，下図は長周期変動（津波はここに表示される）と潮位で，1 目盛 50 cm。横軸は時間で 1 目盛 1 時間

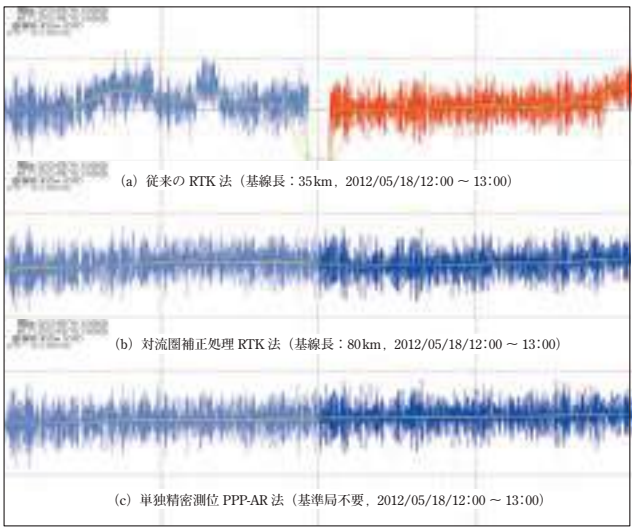


図 12　GPS 測位法の改良
横軸は，いずれもフルスケール 1 時間を示している。縦軸は，1 m ／目盛である

7．　今後の展開

非常時でもデータ伝送が途絶えない衛星通信の導入と GPS 精密測位法の更なる改良によって，大洋上のいかなる位置にでも設置ができる技術的条件が整った。**図 13** に示すような西太平洋全域への展開の技術的目処が立った段階にある。更なる社会実装を進めるには，津波・波浪の観測に加えて，**図 14** に示すように GPS と音響システムを組み合わせた海底地殻変動

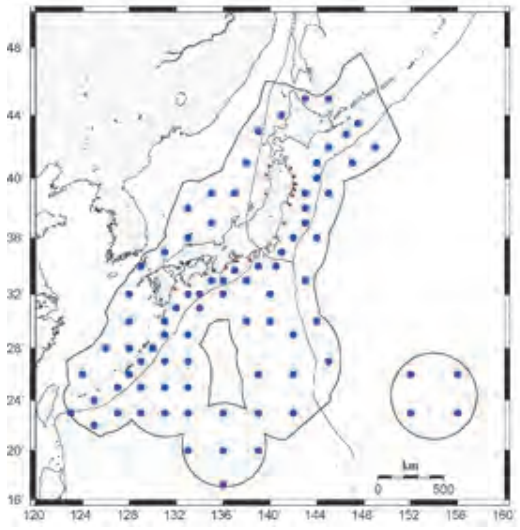


図 13　西太平洋への配備構想

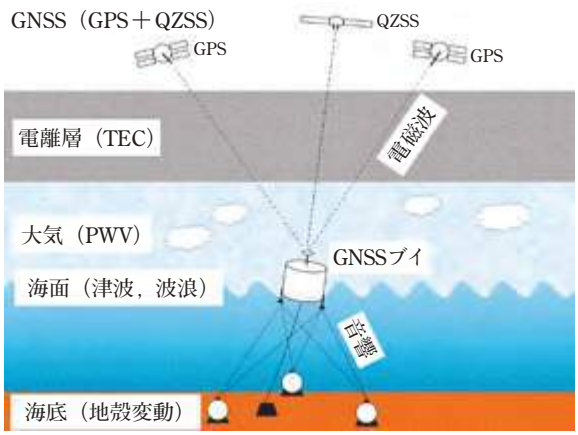


図 14　海洋 GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図

観測，GPS 搬送波による大気中の可降水量の測定及び海上電離圏の観測機能を持たせた総合的観測ステーションとして機能させることが重要であるとの考え方でこれらの開発にも着手した。

これらの実現には，単独精密測位のために必要とする精密暦を「みちびき」の LEX（L-band Experiment）信号に定常的に載せる必要がある。これによって，日本を取り巻く太平洋や日本海に今後設置が期待される GPS 海洋ブイに対して放送的に一斉のデータ供給を行い，沖合展開の距離に制限されることのない単独精密測位ができるようになる。また，「きく 8 号」と同等以上の性能を持つ防災に資する通信衛星を準備し，ブイ上の測位計算で取得できる津波の情報を含む観測結果を地震津波の被害のない地域に伝送することが必要である。これらの整備によって，大洋上の海面変位のリアルタイムデータを常時継続的に世界に公開できるシステムが完成する。その日が一刻も早く来ることを期待している。

謝辞

本研究開発に参画した（国研）港湾空港技術研究所，(国研) 宇宙航空研究開発機構，(国研）情報通信研究機構，気象庁気象研究所及び日立造船（株）に所属する研究者の方々に感謝します。また，実験サイトを提供された国，自治体，ご協力いただいた多くの市民の皆様に謝意を表します。

本研究開発は，現在実施中の科研費（基盤研究（S）：課題番号 16H01310）のほか，科研費 4 件に加えて，文部科学省革新的技術開発補助金，文部科学省地球観測技術等調査研究委託費で推進しました。

参 考 文 献

1）T. Ozaki：Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –, Earth Planets Space, 63, pp.827-830, (2011)
2）加藤照之，寺田幸博，木下正生，柿本英司，一色　浩：GPS 津波計の開発，月刊海洋，号外 15，pp.38-42,（1998）
3）高山知司監修・海象観測情報の解析・活用に関する研究会編集：波を観る，沿岸技術ライブラリー No.42（ISDN978-4-900302-89-1），沿岸技術研究センター，p.165,（2013）
4）寺田幸博，加藤照之：GPS 津波計，非破壊検査，52(7), pp.338-343,（2003）
5）L. Mervart, Z. Lukes, C. Rocken and T. Iwabuchi：Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), September, pp.397-405,（2008）
6）気象庁：津波警報が変わりました，http://www.jma. go.jp/ jma/kishou/books/tsunamikeihou/
7）D. Tatsumi and T. Tomita：Real-time Tsunami Inundation Prediction Using Offshore Tsunami Observation, Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering, currents.3, pp.1-10,（2010）
8）http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf
9）http://nowphas.mlit.go.jp/index.html
10）NHK 報道，2011 年 3 月 29 日おはよう日本
11）河合弘泰，佐藤　真，川口浩二，関　克己：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震津波の特性，港湾空港技術研究所報告，50(4),（2011）
12）例えば，朝日新聞朝刊，2011 年 8 月 17 日（水）
13）H. Ishiki, A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno：Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver – PVD (Point precise Variance Detection) Method –, 測地学会誌，46(4), pp.253-267,（2000）

寺田　幸博　高知工業高等専門学校
（783-8508 高知県南国市物部乙 200-1）　客員教授・名誉教授
1977 年大阪大学基礎工学部物性物理卒，博士（工学）。1977 年日立造船技術研究所入社，非破壊検査工学の研究開発に従事。2006 年から高知工業高等専門学校教授として赴任し、GPS 津波計の研究開発を加速
＜趣味＞テニス，ヨット

加藤　照之　東京大学地震研究所
（113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1）　教授
1980 年東京大学大学院理学系研究科修了，理学博士。同年地震研究所に採用。以後，GPS を用いた地殻変動の研究に従事。現在は地殻変動のほか GPS 津波計の応用研究を進める
＜趣味＞スポーツ（特にバレーボール，水泳，登山）

Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference **www.isope.org**
San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017
Copyright © 2017 by the International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)
ISBN 978-1-880653-97-5; ISSN 1098-6189

GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System

Teruyuki Kato
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
Yukihiro Terada
National Institute of Technology, Kochi College
Nankoku, Kochi, Japan
Keiichi Tadokoro
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Chikusa-ku, Nagoya, Japan
Akira Futamura
National Institute of Technology, Yuge College,
Ochi, Ehime, Japan
Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto
Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology
Koganei, Tokyo, Japan
Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka
Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology,
Koganei, Tokyo, Japan
Kenichi Takizawa
Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology,
Yokosuka, Kanagawa, Japan
Yoshinori Shoji
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
Tsukuba, Ibaraki, Japan
Tadahiro Iwasaki, Naokiyo Koshikawa
Satellite Applications and Operation Center, Japan Aerospace Exploration Agency,
Tsukuba, Ibaraki, Japan

ABSTRACT

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed. The system was used to update the tsunami warning at the 2011 Tohoku-oki earthquake. However, the buoys were placed only less than 20km from the coast, which was not far enough for effective evacuation of people. Thus, we are trying to improve the system for putting the buoy much farther from the coast. The present study shows recent results of a series of experiments to this end. Given the success of experiments, we will try to apply the GNSS buoy for various applications for geohazards monitoring and earth sciences. Examples are: application of GNSS-acoustic system for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements, monitoring ionosphere and atmosphere. Our current project will try to design a new challenging regional GNSS buoy array in the western Pacific for synthetic geohazards monitoring.

KEY WORDS: GNSS buoy; synthetic geohazards monitoring; tsunami warning; ocean bottom crustal movements.

INTRODUCTION

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed in Japan since around 1997. Its basic idea is simple in that a buoy equipped with a GNSS antenna may record a tsunami before its arrival to the coast and can be utilized for allowing coastal residents to evacuate for saving their lives if the data is transmitted in real-time to the land (Fig. 1). Experimental deployments of GNSS buoys were conducted off Ofunato, northeastern Japan, for the period 2001-2003 and off Muroto, southwestern Japan, for the period 2004-2006. The system used so-called real-time kinematic (RTK) in baseline mode and a land-based radio system was used for data transmission. This experimental GNSS buoy system was able to detect bigger than a few centimeter tsunamis nearby and distant tsunamis along the Japanese Island coasts.

Given the success of the experiments, the system has been

implemented as the national wave monitoring system called the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) (http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index_eng.html) for monitoring offshore wave and tsunami since around 2008. NOWPHAS was able to record the tsunami due to the 11 March 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) at many sites along the Pacific coast, and their records were used to update the tsunami warning after the earthquake (e.g., Ozaki, 2011). However, the update of warning was made only several minutes before its arrival to the nearby coast, thus, it is questionable if the information from the buoy was used effectively to save peoples' life.

The lessons learned in this experience was that the buoys are placed only less than 20km from the coast, which was not far enough for effective evacuation of people. We are thus trying to improve the system for putting the buoy much farther from the coast. In this article, we introduce some new ideas and methods for putting the buoy much farther from the coast and show some results from recent experiments. If we succeed implementing the buoy far from the coast, such buoy could be applied to other geophysical monitoring from upper atmosphere to the ocean bottom. We discuss such capabilities and a new idea of establishing a buoy array in the western Pacific.

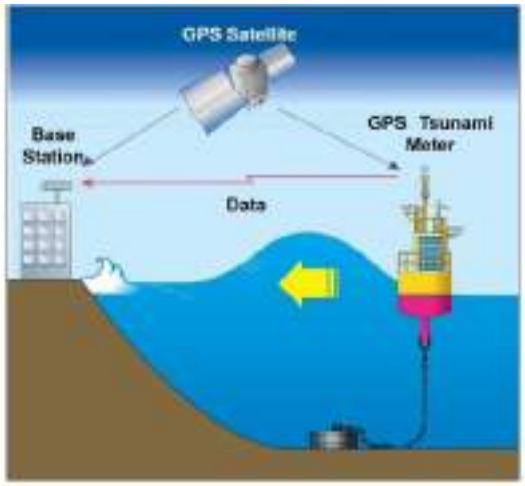


Fig. 1: Concept of GNSS buoy for tsunami early warning.

LESSONS FROM THE 11 MARCH 2011 TOHOKU-OKI EARTHQUAKE & TSUNAMI

GNSS buoys by NOWPHAS were established densely along the Sanriku coast as the coast is an area prone to frequent disastrous tsunamis. At the time of 2011 Tohoku-oki earthquake, the GNSS buoys along the coast detected tsunami before its arrival to the coast.

Japan Meteorological Agency first issued tsunami alert only four minutes after the onset of earthquake generation at 2:46PM of the day. The first alert of tsunami suggested 6m of tsunami in Iwate Prefecture and 3m in Miyagi Prefecture. After a while, staff of JMA was aware that the big tsunami is detected at the GNSS buoys and the tsunami alert was updated to more than 10meters along the coast at 3:14PM (Ozaki, 2011). However, it seems that the update of the alert was not effectively used for saving people's lives along the coast and, in consequence, nearly twenty thousand of people's lives were lost due to tsunami.

The lesson learned from this event is that GNSS buoy should be placed much farther from the coast, say, more than 100km offshore for more effective early warning. As far as we use the RTK algorithm which has distance limit of less than 20km for positioning accuracy of about a few centimeters, we cannot attain this goal. Therefore, it is required for the system of employing other new algorithm for overcoming this difficulty. Precise Point Positioning algorithm that does not require baseline mode positioning would be a solution for such application. In addition, in case that the buoy is set much farther offshore, land-based radio system for data transmission, which is used in the conventional system, cannot be used any more. We may have to employ some other technique for such long distance data transmission. The most feasible way may be to use satellite data transmission. The following two sections describe the new algorithm and satellite data transmission for a new development of the GNSS buoy system.

IMPLEMENTATION OF PPP ALGORITHM

Precise Point Positioning algorithm has been developed, first, for static positioning (e.g., Zumberge et al., 1997), and then developed for kinematic application (e.g.,Larson et al., 2003). One of latter application developed by Rocken et al. (2004) is called as Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR) and a software developed by Rocken et al. (2004), called as RTNet, is used in this study. A few centimeter's accuracy by this PPP-AR technique can attain a few centimeters of positioning accuracy without base station, so that we do not have to worry about accuracy degradation due to long baseline. However, on the other hand, centimeter accuracy by PPP requires precise orbits and clock parameters in real-time manner for obtaining the resultant coordinates in real-time. Therefore, data transmission for both land to buoy and vice versa are required. The original GNSS dual-frequency data is obtained on board of buoy and the data is analyzed using PPP-AR algorithm and the precise orbits and clocks transmitted from land. The obtained coordinates are transmitted back to land to disseminate through internet in graphical manner.

DATA TRANSMISSION USING SATELLITES

Land based radio system is quite easy to use for remote data transmission. Yet, if the distance is far, say more than several tens of kilometers, such radio becomes difficult due to the sphericity of the earth. Among other data transmission system, satellite data transmission would be most reliable and easy to access in recent years. Thus, we are trying to employ satellite data transmission system for the GNSS buoy system.

In our revised system, we used two Japanese satellites; Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII), called as Kiku-8, and the Quasi Zenith Satellite System (QZSS) called as Michibiki.

SYSTEM DESIGN

The overall system of data flow is shown in Fig. 2. Details are described in the following:

1: the Japanese GNSS Earth Observation Network System (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) is used to derive the precise orbits and clock correction parameters at the data center established by the Hitachi Zosen Corporation (Hitz) in Tokyo.

2: Obtained satellite orbits and clocks are then forwarded to the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Master control center located in Tsukuba, that operate the QZSS.

3&4: The data are transmitted to the buoy through JAXA and QZSS in a format called LEX (L-band experiment) signal.

5&6: GNSS data received on the buoy is analyzed to estimate coordinates together with precise orbits and clocks, and are transmitted from the buoy to the receiving station located in Hitz in Osaka through ETS-VIII satellite.

7: Received coordinates at the receiving station are sent to web

server placed at local web server placed in Kochi National College, Kochi, by internet.
8: Sent data are visualized in the web server and disseminated on the web.
Process shown here is procecuted in real-time manner, so that the people can also observe the motion of the sea-surface at the buoy in real-time.

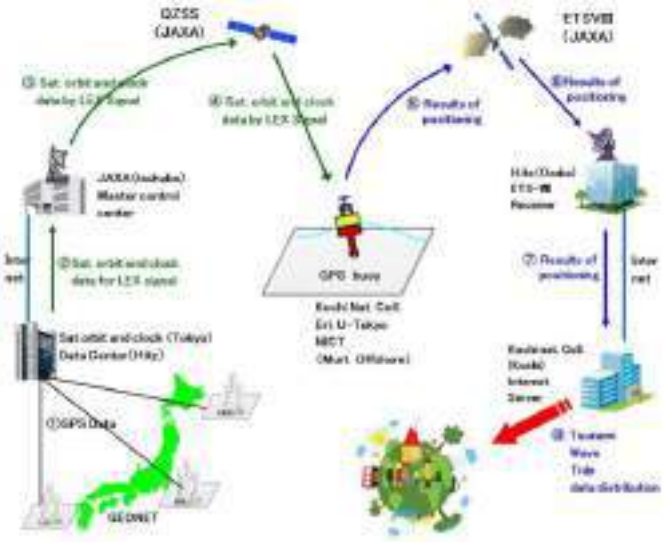


Fig. 2: System design for the data acquisition, analysis and dissemination using two satellites.

FIELD EXPERIMENTS

We have conducted a series of field experiments for testing the system from16 December 2013 to 5 January 2014, and from 1 to 15 of June in 2014. We borrowed one of fishery buoys operated by Kochi Prefecture, Japan, used as fish beds. The buoy is located about 40km south of the Cape Muroto, Kochi (Fig. 3 and Picture 1). GNSS antenna was set at the top of the pillar in the center of the buoy. A simple flat omnidirectional plane antenna was used for satellite data transmission considering rotation and tilting of the buoy. Other ancillary pieces of equipment were placed on the deck of the buoy. Solar panels and batteries were used for power supply. GNSS receiver sampled every second and the RTNet software that uses PPP-AR algorithm was used for real-time analysis together with precise orbits and clocks provided through LEX signal of Michibiki satellite. Obtained coordinates of every second was transmitted to land through the ETS-VIII satellite. The coordinates were further forwarded to the web server placed at the Kochi National College for dissemination.

Fig. 3: Location of the buoy and the Kochi National College, where a data server is placed.

Picture 1: Used buoy. GNSS antenna is set at the top of center pillar. Other equipment and solar panels are placed on the deck of the buoy.

Fig. 4 shows the two days of data obtained by the experiment. 1Hz data of 33hr from 18 to 19 of June 2014 is shown. The upper inset figure shows high-pass filtered data together with tide and the lower inset figure shows low-pass filtered data. If a tsunami is recorded, it will appear in the lower figure as tsunami has longer periods of several tens of minutes to hours, whereas wind waves have shorter periods of seconds to a few tens of seconds. Though some small spiky bumps may be seen in the lower inset of Fig. 4., these bumps can be easily judged as not tsunami because these bumps have much shorter duration of a few minutes compared with tsunami. As this result clearly shows, the GNSS buoy is capable of detecting tsunami if its vertical amplitude exceeds a few centimeters.

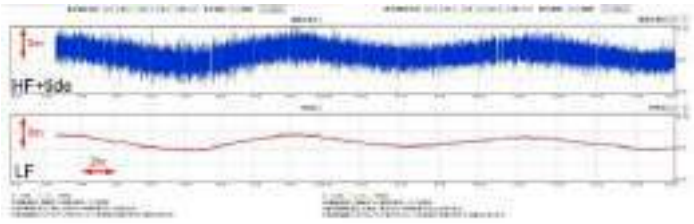


Fig. 4: Obtained time series of vertical components of GNSS buoy. Upper inset shows high frequency component with tide and the lower inset shows low-pass filtered time series.

However, a little problem seen in the time series is that there are occasional data gaps. It seems that data transmission is interrupted for some reasons. One of reasons could be unstable communication link between the buoy and the satellite due to tilting of the buoy.

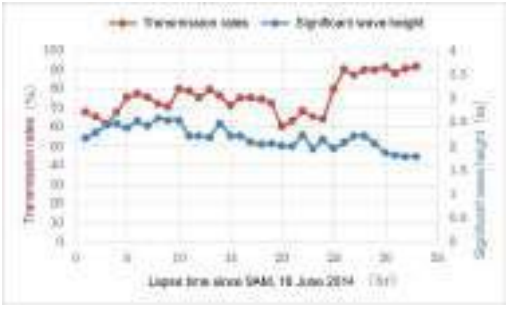


Fig. 5: Comparison of data transmission rates and significant wave height.

Fig. 5 shows comparison between transmission rates and significant wave height. Upper plot is transmission rates for which scale is shown on the left, and lower plot is significant wave height for which scale is

shown on the right. As is clearly seen, transmission rates decrease as the significant wave heights increase. This seems to suggest that the tilting at the time of high wave may degrade the gain of receiving signal either at the buoy or at the satellite.

Given that there is some data missing, we conducted another experiment in December 2015. As the antenna tilt is suspected to the cause of data failure, we employed a gimbal mechanism that stabilize the tilting of antenna on board of buoy. A simple gimbal apparatus that carry the plane antenna is devised (Fig. 6 and Picture 2). For comparison two antennas are put on the same vessel; one is put on the gimbal apparatus, and the other fixed to the deck. Two vessels, Yuge-maru, the school ship of Yuge National College of 240ton and Hamakaze, another small school boat (see Picture 3 & 4), were used for comparing the data.

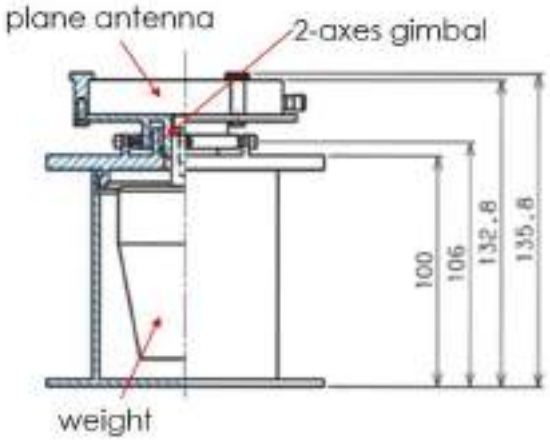
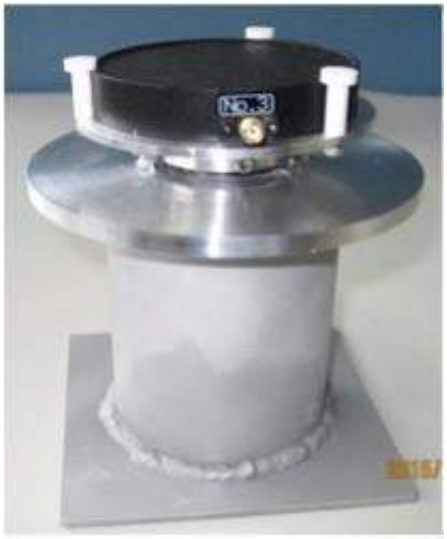


Fig. 6: Design of the gimbal for supporting a plane antenna. Unit:mm.



Picture 2: The antenna set on the manufactured gimbal apparatus.

Fig. 7 shows a part of results comparing the signal power received from the satellite. Fig. 7a is for the Yuge-maru and Fig. 7b is for Hamakaze, and red line shows the case with gimbal apparatus and blue line is the case without it and the antenna was fixed to the deck of the ship, respectively. As is shown, the case with gimbal apparatus in Fig. 7a, case for Yuge-maru, shows significant reduction of fluctuation due to usage of gimbal apparatus. On the contrary, Fig. 7b that used Hamakaze does not show any significant reduction of fluctuation in received signal power. Since the size of two ships are different, the different result might be due to different characteristics periods of ships. As the experiment is still premature, we may have to explore much further to improve the stable and secure signal transmission method between the continuously swinging buoy and the satellite.

Picture 3: Yuge-maru

Picture 4: Hamakaze

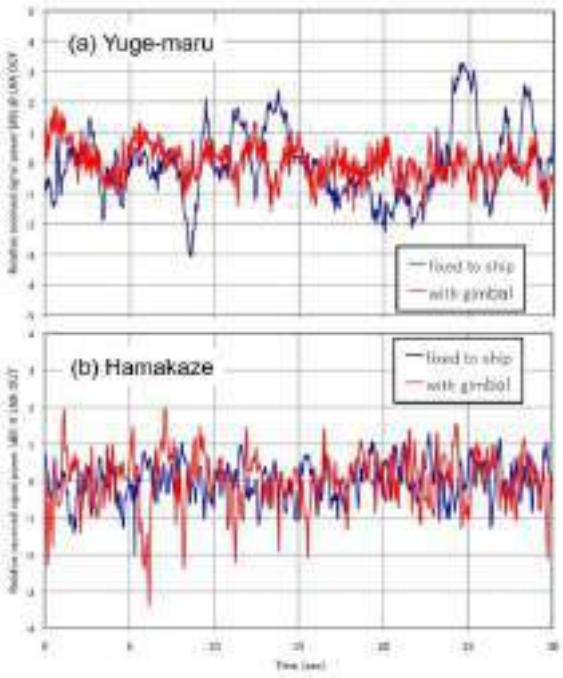


Fig. 7: Comparison of received signal power with a gimbal apparatus (red) and without it (blue), for the case of (a) Yuge-maru and (b) Hamakaze.

DISCUSSION

As has been shown in the previous sections, it seems that the detection of motion of buoy in a few centimeter's accuracy would be feasible at any location in the far offshore with some further improvements of data transmission. Given this success, we could expand the field of application of moving platform like GNSS buoy for multiple purposes for geohazard monitoring (Fig. 8).

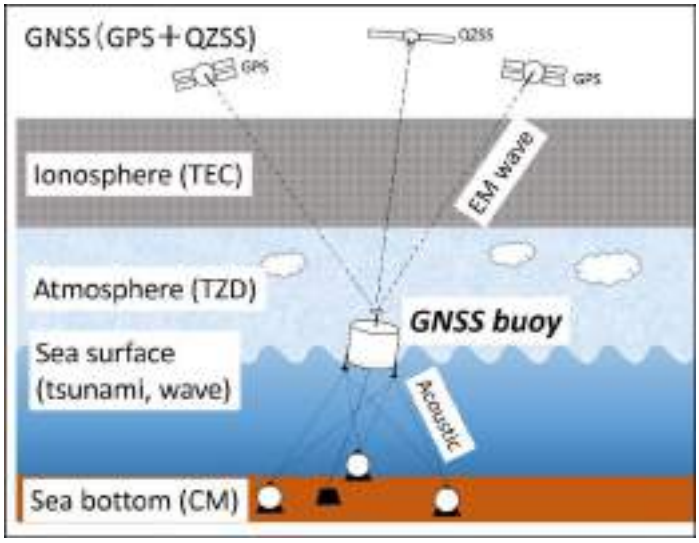


Fig. 8: Multi-purpose GNSS buoy for geohazards monitoring

First, our new challenge is application to the ocean bottom crustal movement observations. Detection of precise location of the ocean bottom can be made using the combination of GNSS with acoustic ranging (e.g., Spiess, 1985). This system was first conducted in the US and later the system has been much improved in Japan (e.g., Fujita et al., 2006). Japan Coast Guard, Tohoku University and Nagoya University are major institutes that have elaborated the system and a number of experimental and operational sites have been placed along the Pacific offshore of the Japanese Islands since early 21st century. They use vessels for locating the ocean surface position and the position of the center of the polygon made from multiple acoustic transponder placed at the sea bottom using acoustic ranging between the vessel and the ocean bottom transponders. As they use vessels for observations, they can measure the location of the sea bottom only several times in a year. Therefore, if the vessel is replaced with GNSS buoy, measurements can be done more frequently. Though it depends on the power capacity of the sea bottom transponders, the measurements can be done even every day. Such frequent measurements of ocean bottom positions in a few centimeter's accuracy enable us to examine detailed mechanism of, for example, subduction process including plate coupling, slow slip events and earthquakes along the plate interface.

Second, GNSS phase observations has also been used to monitor atmosphere and ionosphere through the estimation of tropospheric zenith delay TZD and ionospheric total electron content (TEC), respectively. These parameters can also be available in real time on the floating platform and be sent to the land base for further processing and monitoring atmosphere and ionosphere.

Recent researches on atmospheric applications suggest that the atmospheric water vapor derived from TZD provide very important information on numerical weather forecast as well as atmospheric research (e.g., Rocken et al., 2005; Fujita et al., 2008; Shoji et al., 2016). Yet, these researches are only experimental and by using vessels. Therefore, long-term fixed point observation using buoy would be an important step for operational use of water vapor content for atmospheric applications.

Application of TEC data obtained by dense GNSS array observations has been extensively conducted for ionospheric research since Saito et al. (1998) showed its capability. One of recent focuses of interest is TEC perturbation due to large earthquakes and tsunami; Calais and Minster (1995) first detected TEC anomaly after the 1994 Northridge earthquake (Mw6.7), California. Choosakul et al. (2009) indicated ionospheric variations due to the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake, Indonesia (Mw9.3) and a number of researchers discussed TEC variations due to the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0), Japan (see special volume of Earth Planets and Space, vol. 63, No. 7, 2011 for references). National Institute of Information and Communications Technology is collecting global GNSS data of more than 6,000 sites, for which data is available online, to monitor ionospheric fluctuations (Tsugawa et al., 2012). Although TEC can be widely monitored with the data over lands, there are still vast vacant areas of observation over oceans. GNSS buoy array would be a key to obtain better spatial coverage of ionospheric monitoring.

CONCLUDING REMARKS

Considering that the GNSS buoy array is imperative for monitoring crustal activity for mitigating natural disasters, we are now trying to conduct a developmental project of building up and trying multiple purpose of GNSS buoy in outer ocean and try to design a GNSS array in the western Pacific as is shown in Fig. 9. Similar, or denser, land-based GNSS array, GEONET in Japan, for example, is already available and demonstrate its powerful capability toward disaster monitoring tool. Therefore, if similar dense GNSS array is established in the wide ocean, it would be needless to say that data taken from such GNSS array provide a new and innovative data for multiple geohazards monitoring and natural disaster mitigation.

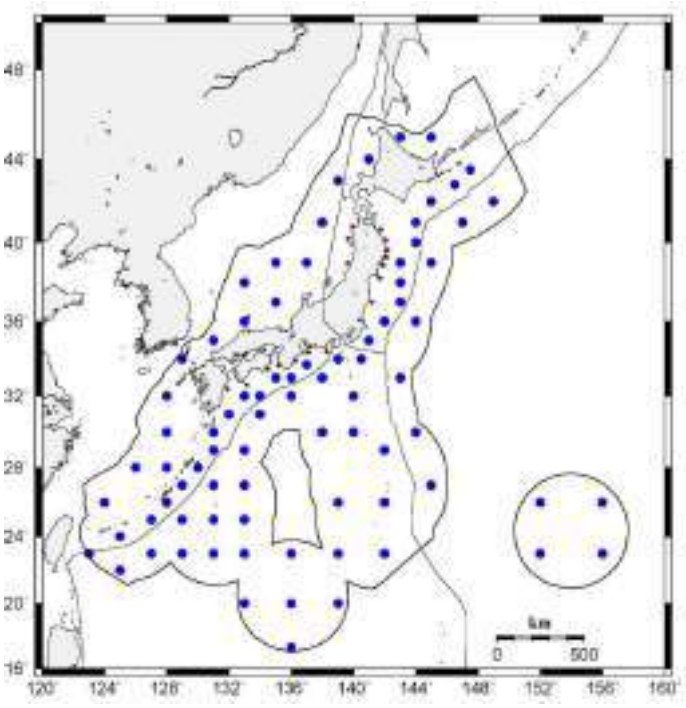


Fig. 9: A plan of GNSS buoy array in the western Pacific. Closed circles are the exclusive economic zone (EEZ) of Japan. Buoy sites are arbitrarily plotted as dots.

In order to materialize such GNSS buoy array in a wide ocean, we still need to overcome some important technological problems. First, reliable and inexpensive satellite data transmission system should be introduced. Currently inexpensive public or government-operating telecommunication satellite is not available and only commercial satellite system is available, which would be intolerantly expensive if many buoys are deployed. In case that many buoys are deployed, vast amount of data should be simultaneously transmitted in both-way between buoy and land. Therefore, some technological development may be necessary for such mass data communication system as well. In addition, highly functional buoy should be developed. The buoy to be used in outer ocean should be highly tolerant in severe weathers for a long time, say, 10 years or longer, without maintenance at very deep water of several thousand meters. Various recovery mechanism from machine failures may have to be prepared on board for autonomous operation. These problems should be tackled to overcome in the near future. Yet, we hope that the project is worth tackling toward a really innovative new era for geohazards monitoring as well as earth sciences.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310.

REFERENCES

Calais, E., and J. B. Minster (1995). "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake" *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1045-1048.

Choosakul, N., A. Saito, T. Iyemori, and M. Hashizume (2009). "Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004" *Geophys. Res. Lett.*, 114, A10313, doi:10.1029/2008JA013915.

Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006). "GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application" *Earth Planets Space*, 58, 265-276.

Fujita, M., F. Kimura, K. Yoneyama, and M. Yoshizaki (2008). "Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements" *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13803, doi:10.1029/2008GL033764.

Larson, K., P. Bodin, and J. Gomberg (2003). "Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali Fault earthquake" *Science*, 300, doi:10.1126/ science.1084531

Ozaki, T. (2011) "Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –" *Earth Planets Space*, 63, 827-830.

Rocken, C., L. Mervart, Z. Lukes, J. Johnson, H. Kanzaki, M. Kakimoto, and Y. Iotake (2004). "Testing a new network RTK software system" *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004), USA*, 2831–2839.

Rocken, C. J. Johnson, T. V. Hove, and T. Iwabuchi (2005). "Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS" *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12813, doi:10.1029/2005GL022573.

Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki (1998). "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan" *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3079-3082.

Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2016). "PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADOCA Real-Time Orbits" *SOLA*, 12, 265-271, doi:10.2151/sola.2016-052.

Spiess, F. N. (1985). "Suboceanic geodetic measurements" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 502-510.

Tsugawa, T., Nishioka, M., Shinagawa, H., Maruyama, T., Ogawa, T. Saito, A, Otsuka, Y. Matsumura, M. Nagatsuma, T., and Murata, K. T. (2012). "Tsunami induced ionospheric disturbances detected by GPS-TEC observation after the 2011 Tohoku earthquake" *Abstract of the Japan Geoscience Union Meeting 2012*, HDS26-09.

Zumberge, J., M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, and F. Webb (1997). "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks" *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005–5017

Shoji *et al. Earth, Planets and Space* (2017) 69:153
DOI 10.1186/s40623-017-0740-1

Earth, Planets and Space

FULL PAPER Open Access

Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan

Yoshinori Shoji[1*], Kazutoshi Sato[2], Masanori Yabuki[3] and Toshitaka Tsuda[3]

Abstract

We installed two global navigation satellite system (GNSS) antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency, and conducted experimental observations to assess the GNSS-derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. One antenna was set on the mast (MAST), while another antenna was set on the upper deck (DECK). The GNSS analysis was conducted using the precise point positioning procedure with a real-time GNSS orbit. A quality control (QC) procedure based on the amount of zenith tropospheric delay (ZTD) time variation was proposed. After the QC was applied, the retrieved PWVs were compared to 77 radiosonde observations. The PWVs of MAST agreed with the radiosonde observations with a 1.7 mm root mean square (RMS) difference, a − 0.7-mm bias, and 3.6% rejection rate, while that of DECK showed a 3.2, − 0.8 mm, and 15.7%. The larger RMS and higher rejection rate of DECK imply a stronger multi-path effect on the deck. The differences in the GNSS PWV versus radiosonde observations were compared to the atmospheric delay, the estimated altitude of the GNSS antenna, the vessel's moving speed, the wind speed, and the wave height. The atmospheric delay and GNSS antenna altitude showed moderate correlation with the differences. The results suggest the kinematic PPP's potential for practical water vapor monitoring over oceans worldwide. At the same time, from the growing negative biases with the PWV value and with estimated antenna altitude, it could be inferred that the difficulty grows in separating the signal delay from the vertical coordinate under high-humidity conditions.

Keywords: GNSS meteorology, Precipitable water vapor, Kinematic precise point positioning, Real-time orbits

Introduction

Nowadays, global navigation satellite systems (GNSSs), such as the US Global Positioning System (GPS), are fundamental infrastructure for navigation, positioning, and timing. These systems also serve as an accurate continuous water vapor monitoring tool. In particular, multiple studies have been conducted to assess the accuracy of GNSS-derived vertically integrated water vapor in the atmosphere (precipitable water vapor: PWV) and have confirmed its practicality (e.g., Bevis et al. 1992; Shoji et al. 2004; Benevides et al. 2015; Guerova et al. 2016). The GNSS Earth Observation Network (GEONET) of the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) covers the Japanese archipelago with more than 1300 GNSS antennas and is used as a precise crustal deformation monitoring network. Even though the primary purpose of GEONET is crustal deformation monitoring, it is a reliable source of PWV on the ground, so the Japan Meteorological Agency (JMA) started assimilation of the GEONET-derived PWV into their operational numerical weather prediction (NWP) system in 2009 (Ishikawa 2010).

Water vapor plays a crucial role for the development of hazardous cumulus convection. Via the condensation process, moisture releases latent heat which becomes an

*Correspondence: yshoji@mri-jma.go.jp
[1] Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan
Full list of author information is available at the end of the article

Springer Open

© The Author(s) 2017. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

energy source for the rapid development of cumulus convection. Because most of the atmospheric water vapor concentrates in lower troposphere, monitoring of water vapor in low level has received a lot of attention. For the island country such as Japan, low-level moisture often comes from ocean. Several studies of hazardous weather events have revealed that low-level moisture from the ocean plays an essential role in such weather cases (Kato and Aranami 2005; Shoji et al. 2009).

There are several satellite-borne water vapor sensors. Current and future meteorology-related satellite list is maintained by the World Meteorological Organization's space program (WMO 2017). Satellite-based microwave radiometers (e.g., SSM/I) and moderate-resolution imaging spectroradiometer near-infrared channels observe atmospheric water vapor distribution over the ocean. Atmospheric infrared sounder (AIRS) possesses ability to observe vertical water vapor structure. However, such space-borne microwave observations onboard polar orbiters do not provide continuous information, even though the observation density has been increasing year by year. Moreover, microwave observations are highly affected by the conditions of the clouds and the Earth's surface, and researches have been conducted to resolve the issues (e.g., Zhou et al. 2016). Geostationary meteorological satellites (Meteosat, Himawari, GOES) also equipped with water vapor channels to observe water vapor distribution in middle and/or upper troposphere. Currently, there is no continuous water vapor sensor which can observe water vapor amount over the ocean.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, several studies have been addressing this problem. Chadwell and Bock (2001) used a buoy-based GPS receiver to estimate the PWV compared to that obtained by nearby (within 10 km) radiosonde and ground fixed GPS stations and obtained root mean square (RMS) agreements of 1.5 and 1.8 mm, respectively. Rocken et al. (2005) installed two GPS antennas near the front mast of a 138,000-ton ship and executed two 1-week observation experiments. They compared PWV retrieved from GPS measurements and that obtained from a radiosonde observations and from a water vapor radiometer (WVR) measurements, and obtained good agreements (less than 2 mm RMS to radiosonde and at 2.8 mm RMS to the WVR). Fujita et al. (2008) introduced a choke ring-type GPS antenna on the 8678-ton research vessel MIRAI, analyzed PWV, and compared with more than 300 radiosonde observations in the equatorial Indian Ocean. The RMS was 2.27 mm and the mean difference was less than 1 mm at night. Boniface et al. (2012) compared PWV over the Mediterranean Sea determined from the shipborne GPS, numerical weather prediction (NWP) model outputs, and MODIS retrieval. They found that most of the observation period, GPS and NWP outputs showed good agreement. They also discussed the possible cause of disagreements in two cases when large offsets occurred and attributed to NWP's excursions during transition between local Mediterranean weather conditions. Currently, beside GPS, the GNSS includes several satellite navigation systems (e.g., Russian GLONASS, Japanese Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)). Increased number of navigation satellites by utilizing multiple GNSSs resulted in higher accuracy of ocean platform GNSS water vapor measurements. Fujita et al. (2014) conducted PWV retrieval experiment using a multi-GNSS receiver installed on the 3991-ton research vessel HAKUHO MARU. Using GPS, GLONASS, and QZSS together for their PWV analysis resulted in much better agreement with radiosonde observations Shi-Jie et al. (2016) equipped a GPS receiver on a lightweight (300-ton) experimental ship, conducted GPS observations in the Chinese Bohai Sea, and compared the GPS-derived PWV and slant-path water vapor to that derived from the Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5). The RMS agreements were 1.5 mm and 3.9 mm, respectively.

The above-mentioned previous studies are post-analysis with used final precise ephemerides or rapid ephemerides. Recently, real-time GNSS analysis technology has remarkably been improving. For example, on April 1, 2013, the International GNSS Service began official providing of real-time orbit and clock corrections. In September 2014, the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) started real-time service of providing ephemerides produced with a Multi-GNSS orbit and clock estimator called MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) (Takasu 2013). Shoji et al. (2016) conducted four shipborne (three research vessels and one passenger ferry) GNSS observations to evaluate the performance of the real-time ephemerides over the ocean. The MADOCA real-time ephemerides were applied to a kinematic precise point positioning (PPP) (Zumberge et al. 1997) procedure to find that the analyzed PWV time series was contaminated with occasionally occurring unrealistic sharp variations. The characteristics of the spiky variations (e.g., periodic occurrence with a cycle of one sidereal day, largely varying post-fit phase residuals distribution) insisted large negative impact of the reflected signals (the multi-path effect). In their study, a simple quality control (QC) procedure based on the amount of PWV time variation was introduced. As a result, the retrieved PWVs had 3.4–5.4 mm RMS differences compared to the radiosonde observations and 2.3–3.7 mm RMS to those analyzed at nearby fixed ground GNSS

sites. However, more than 60% of the retrieved PWV was rejected through the QC process on the research vessels, while 6–11% was rejected on the passenger ferry. The results imply a larger multi-path effect on the research vessels, where the GNSS antennas are surrounded by machines and equipment. However, there is a possibility that different vessel size (Passenger ferry was 16,187 ton and 162 m length, while research vessels were 1380–1629 ton and 66–82 m length.) The passenger ferry was about ten times heavier and size was about two times larger than research vessels. It is said that the pitching of a ship is smaller on the longer ship.

The purpose of this study is to prove multi-path is the cause of frequent occurrence of outliers in the research vessels. Also, in order to understand current performance and applicable limitations, we need to further investigate the error sources in retrieved PWV from shipborne GNSS observations. To examine the causes of the errors, we set two GNSS antennas at different locations on a research vessel, RYOFU MARU, which is one of the three research vessels used in the experiment of Shoji et al. (2016). One GNSS antenna was set upped near the Shoji et al. (2016), and another antenna was installed on top of the mast. PWVs obtained from two GNSS measurements are compared with the radiosonde observations launched from the RYOFU MARU. Then, differences in GNSS PWV against radiosonde are compared with the amount of PWV, estimated GNSS antenna altitude, the relative wind speed, the significant wave height, the cruising speed, and the water vapor profiles. The outline of this paper is as follows. In the next section, we outline the observation and analysis procedures. Next, we show the results of the comparison with the radiosonde observations. Finally, we discuss the error in the GNSS PWV and describe the conclusions of the study.

Observation, data processing, and quality control

Observation

The vessel we used in this study is JMA's research vessel the RYOFU MARU, one of the vessels used in the study of Shoji et al. (2016). Figure 1 shows the locations of the two GNSS antennas on the vessel. A Trimble Zephyr II antenna connected to a Trimble NetR9 receiver was installed on the vessel radar mast (MAST), and a JAVAD GrAnt-G3T antenna was connected to a GNSS Technologies Inc. START-GS receiver on the left side of the upper deck (DECK). Here, "MAST" and "DECK" are abbreviations to briefly distinguish each multi-path environment feature in this RYOFU MARU experiment. The multi-path environment is specific to each vessel. The antenna–receiver pair of DECK was also used for the RYOFU MARU observations of Shoji et al. (2016); however, the location was moved 4 m backward to increase the distance from the radar mast, which is regarded as one of the major multi-path sources. Because the observation systems of MAST and DECK are different, after the main experimental observation period (October 19, 2016–June 19, 2017), we relocated the MAST antenna to the DECK position and conducted additional observations from June 19 to August 6, 2017. We call this additional observation DECKt. All receivers observed GPS, GLONASS, and QZSS. Sampling interval and elevation cutoff angle were set as 1 Hz and zero degrees, respectively.

The RYOFU MARU is equipped with meteorological sensors, a radiosonde observation facility, and a microwave-type wave height meter (WM-2 developed by Tsurumi-Seiki Co., Ltd.). Table 1 summarizes the size and weight of the vessel and the height of the meteorological sensors and the GNSS antennas. WM-2 is an apparatus with an acceleration sensor and a microwave Doppler radar. The microwave Doppler radar measures the vessel's relative height against the sea surface at the bow, while the acceleration sensor estimates the vertical motion at the bow. The RYOFU MARU logs the 2 Hz sampled bow height and observed wave height. The actual wave height is calculated by subtracting the vertical displacement at the bow from the observed bow height from the sea surface measured by the microwave Doppler radar. The significant wave height is calculated twice an hour using 20-min consecutive observations from 5 to 25 min and from 35 to 55 min by averaging the wave height of the highest third of the actual wave heights.

Data processing

As listed in Table 2, the GNSS analysis procedure for this study follows Shoji et al. (2016) except for elevation cutoff angle. Shoji et al. (2016) used 5° as elevation cutoff angle. In this study, following Fujita et al. (2008) and Boniface et al. (2012), we set 3 degree as elevation cutoff angle. We processed the GNSS analyses for the shipborne observations using RNX2RTKP, a command-line application for post-GNSS processing of RTKLIB version 2.4.2 (Takasu 2013). We adopted the kinematic PPP method to estimate the coordinates, zenith wet delays (ZWDs) and zenith hydrostatic delay (ZHD) every second. The static PPP method was applied for a GEONET station (3023, Chiba Ichikawa), and 1-day averaged coordinates with every 30-s ZWDs were analyzed. The followings are the main analysis options which were set for both the shipborne and GEONET analyses:

1. A three-degree cutoff elevation angle;
2. The global mapping function (Boehm et al. 2006);
3. The ZWD was regarded as a random-walk variable with a process noise of 0.1 mm/s$^{1/2}$ (RTKLIB's default value); and

4. The ZHD was estimated using the geodetic height above sea level as

$$\mathrm{ZHD} = 0.002277 \times P \tag{1}$$

$$P = 1013.25 \times \left(1 - 2.2557 \times 10^{-5} h\right)^{5.2568}, \tag{2}$$

where P and h are the atmospheric pressure at the GNSS antenna and the height above sea level, respectively.

Precise orbit and clock information are required in the PPP procedure. We tested the MADOCA real-time product provided by JAXA. The goal for the MADOCA real-time orbit and clock accuracy is 6 cm and 0.1 ns, respectively, for GPS and 9 cm and 0.25 ns, respectively, for GLONASS and QZSS. To enhance system redundancy, there are two streams, MDC1 and 2, in MADOCA. In the experiment of Shoji et al. (2016), MDC2 showed a slightly better performance than MDC1. In this study, we used MDC2 for the GNSS analysis. JAXA also provides MADOCA final products (JXF) (orbit; every 5 min, clock; every 30 s) via the Internet (ftp://mgmds01.tksc.jaxa.jp/products/). We compare the retrieved PWVs using JXF and MDC2 at the last paragraph of this section.

Atmospheric pressure and temperature are needed to calculate the PWV from the zenith tropospheric delay (ZTD) (Bevis et al. 1992). The RYOFU MARU is equipped with surface meteorological sensors and observes the pressure, temperature, humidity, wind direction, and speed. We used a 1-min interval dataset provided by the JMA.

The temperature and atmospheric pressure at the GNSS antenna are estimated using the hydrostatic equilibrium:

$$P_{\mathrm{GNSS}} = P_{\mathrm{baro}} \left(\frac{T_{\mathrm{baro}} - \Gamma \times (Z_{\mathrm{GNSS}} - Z_{\mathrm{baro}})}{T_{\mathrm{baro}}} \right)^{\frac{g}{R_d}\Gamma}, \tag{3}$$

$$T_{\mathrm{baro}} = \Gamma \times (Z_{\mathrm{baro}} - Z_{\mathrm{thermo}}), \tag{4}$$

where P_{baro} and P_{GNSS} are the atmospheric pressures observed by the barometer and the estimated value at the GNSS antenna, respectively, T_{thermo} and T_{baro} are the temperatures observed by the thermometer and the estimated value at the barometer, respectively, Z_{GNSS} and Z_{baro} are the

Fig. 1 GNSS antennas installed on the top deck (DECK) and on the mast (MAST) of the RYOFU MARU on October 19, 2017. The MAST antenna was moved to the DECK location on June 19, 2017, and was used for additional observations as DECKt until August 6, 2017

Table 1 Weights and sizes of the RYOFU MARU, the height of the meteorological sensors, and the specifications of the GNSS observations

Vessel weight and size		Gross tonnage	Length	Breadth
		1380 t	82.0 m	13.0 m
Height of the meteorological sensors (above sea level)		**Barometer**	**Thermometer**	**Radiosonde base**
		2.8 m	13.3 m	8.0 m
GNSS	**Abbreviation**	**MAST**	**DECK**	**DECKt**
	Antenna	Zephyr 2 (Trimble)	GrAnt-G3T (JAVAD)	Zephyr 2 (Trimble)
	Receiver	NetR9 (Trimble)	START-GS (GNSS Technologies Inc.)	NetR9 (Trimble)
	Antenna height above sea level	20.7 m	13.8 m	13.8 m
	Duration	2016/10/19–2017/03/09 2017/04/25–2017/06/19		2017/06/19–2017/08/06

heights of the GNSS antenna and thermometer, respectively, and g, R_d, and Γ are the gravitational acceleration, the specific gas constant for dry air, and the temperature laps rate, respectively. In this study, we use $\Gamma = 0.0065$ K/m.

Figure 2 compares the time series of the PWV retrieved on the RYOFU MARU (c, d) and at a nearby GEONET station 3023 (Chiba Ichikawa) (a, b) from December 3, 2016, to December 5, 2016. During this period, the RYOFU MARU was located at its homeport (Daiba, Minato Ward, Tokyo) and the sea surface was calm (wave height was less than 0.4 m) during the period. Figure 2a and b compares the results from static PPP and kinematic PPP for a fixed GNSS station. JXF is applied for Fig. 2a, while MDC2 is applied for Fig. 2b. In Fig. 2a, even at the fixed station, we see several millimeter PWV differences between static and kinematic procedures. In Fig. 2b, as a result of applying

Table 2 Main specifications of the GNSS analysis

Classification	Specification	Remarks
Software	RNX2RTKP (RTKLIB ver. 2.4.2, patch 12)	
Analysis procedure	Precise point positioning	
	Kinematic (Shipborne GNSS)	
	Static (GEONET station)	
Integer ambiguity	Not fixed (no PPP-AR applied)	
Ephemeris	MADOCA real-time product (MDC2)	https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html
Mapping function	GMF (no gradient estimation)	Boehm et al. (2006)
Elevation cutoff angle	3°	
Antenna phase center variation	IGS08_1793.atx MAST (DECKt): "TRM55970. 00 NONE" DECK: "JAV_GRANT-G3T NONE"	http://ftp.igs.org/pub/station/general/igs08.atx
Geoid model	EGM2008-SE (1″) (Und min1 × 1 egm2008 is w = 82 WGS84 TideFree_SE)	http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html
Tidal effect	Solid earth tide: IERS Conventions 2010 Ocean Tidal Loading: Not applied	Petit and Luzum (2010) IERS Technical Note No.36, IERS Conventions (2010)
Ionosphere correction	Ionosphere-free linear combination	
ZHD	$ZHD = 0.002277 \times P$	Elgered et al. (1991)
	$P = 1013.25 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} / h)^{5.2568}$ P: atmospheric pressure (hPa), h: geodetic height above mean sea level	
Time-dependent parameters	Antenna coordinate	Updated every 1 s
	Receiver clock	
	ZWD random-walk variable with process noise of 0.1 mm/s$^{1/2}$	

less precise real-time ephemeris, fluctuations in PWV time sequence with a cycle of approximately several hours emerge and this fluctuation is more conspicuous in kinematic analysis with real-time ephemeris. The same characteristics can be seen for RYOFU MARU antennas (Fig. 2c, d). Several unrealistic spiky time variations are seen in DECK results regardless of ephemerides. We can summarize the results shown in Fig. 2 as follows.

1. Accuracy of ephemeris affects that of retrieved GNSS PWV, especially in kinematic PPP procedure.
2. In order to remove unrealistic spiky PWV time variation from meteorological use, certain quality control procedure is indispensable.

In the next section, we describe a simple quality control procedure in this study.

Quality control

The panels in Fig. 3 are sky maps of the post-fit phase residuals averaged over 16 days when the vessel was anchored at its home port Daiba. Large values are sporadically distributed in the sky maps of DECK, indicating a large multi-path influence. Comparatively, the sky map of MAST shows much smaller variations, indicating a smaller multi-path influence.

According to a theoretical consideration of the possible PWV time variation in 1 min and the statistical result of the GNSS PWV time variation, Shoji et al. (2016) set a 1-mm per minute PWV variation as the threshold for outliers. In this study, we follow Shoji et al. (2016) but adopt the ZTD time variation for the QC procedure because we estimated the ZTD every 1 s and the outliers tended to occur suddenly. Applying the ZTD 1-s time variation as the outlier detector, we likely found outliers slightly faster than when using the 1-min time variation

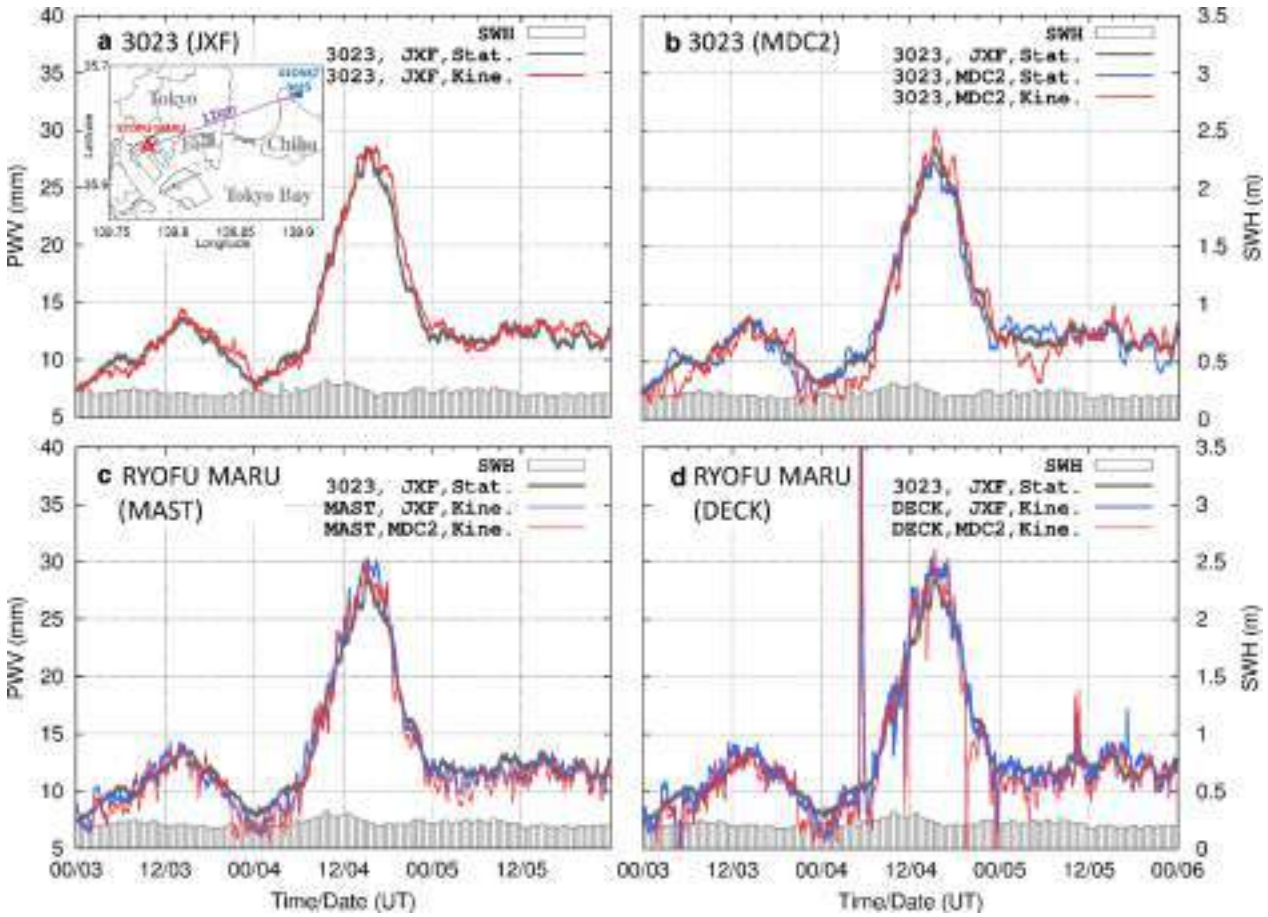


Fig. 2 Comparison of GNSS PWVs estimated at RYOFU MARU (**c**, **d**) and nearby GEONET station (**a**, **b**) for the 3 days from December 3, 2016, to December 5, 2016. The GEONET station 3023 (Chiba Ichikawa) locates approximately 12 km ENE from the RYOFU MARU. Results obtained using a final ephemeris (JXF) and a real-time ephemeris (MDC2) are compared. Both static and kinematic PPP procedures are conducted for GEONET station 3023, while only kinematic PPP is executed for RYOFU MARU stations. During this period, the RYOFU MARU was anchored at its home port (Daiba, Minato Ward, Tokyo). The gray boxes indicate the significant wave height observed by the RYOFU MARU (right axis)

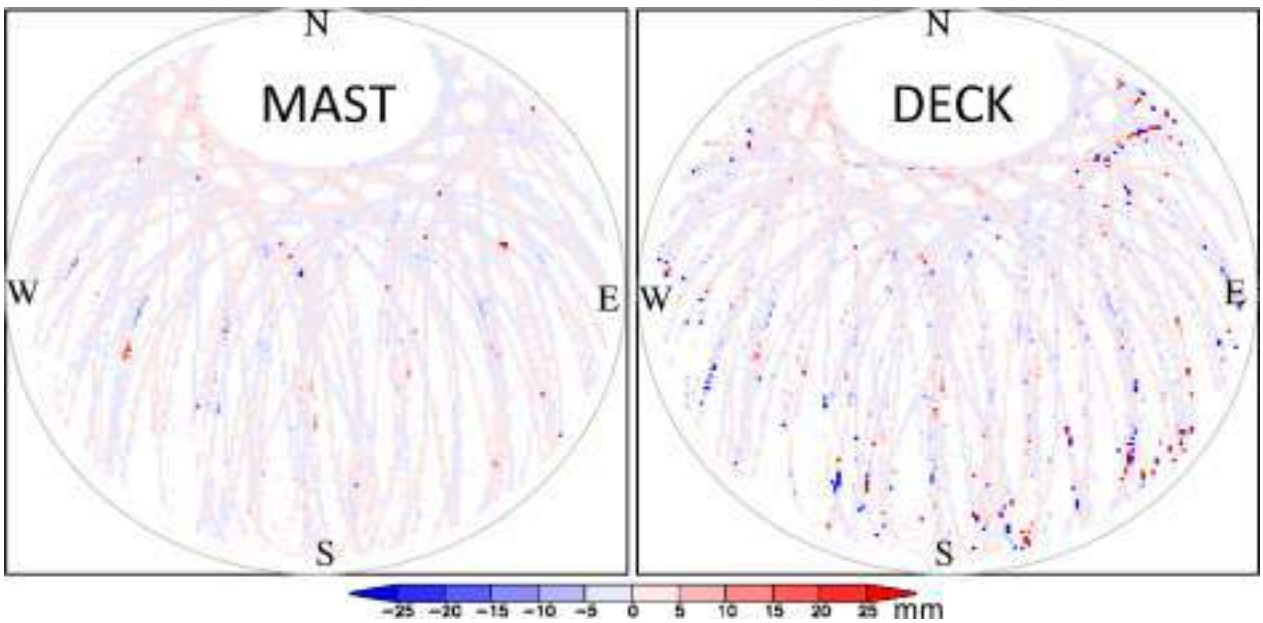


Fig. 3 Sky plots of the time-averaged post-fit phase residual of the averaged L3 ionosphere-free linear combination, while the RYOFU MARU was anchored at its home port (Daiba, Tokyo)

of the PWV. According to Shoji et al. (2016), the accumulated frequency of the less than 1-mm/min PWV variation was more than 99.5%. In this study, according to the statistical ZTD time variation frequency analysis shown in Fig. 4, we set a 0.1-mm/s ZTD variation as the threshold of the outliers. Figure 4 shows the frequency and accumulated frequency of the 1-s ZTD time variation of DECK, MAST, and DECKt. Because MAST and DECKt use the same antenna and receiver pair, the larger frequency of more than 0.1-mm/s ZTD time variations of DECK and DECKt implies a larger multi-path effect on the deck. The retrieved PWV was rejected as erroneous if the value met one of the following conditions:

1. Any of the ZTD time variations exceeded 0.1 mm/s within the previous hour;
2. The PWV value was less than or equal to 0 mm; or
3. The PWV value was greater than or equal to 90 mm.

The data rejection rate (the number of rejected data divided by the total number of pairs) gives the quality of GNSS observations and the retrieved PWV.

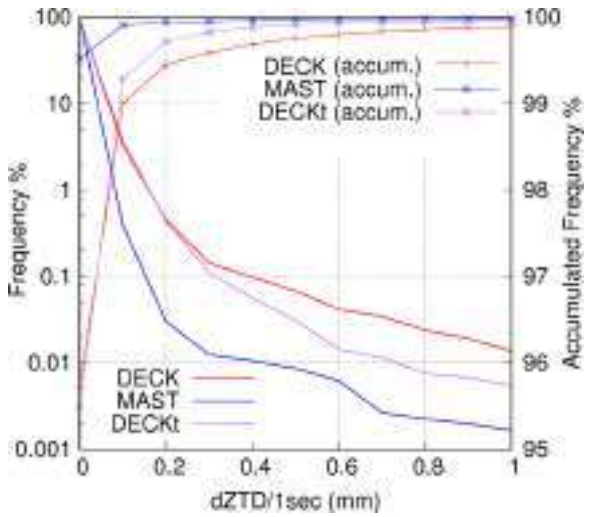


Fig. 4 Frequency distribution of the 1 s ZTD variation obtained from the shipborne GNSS observations. The lines indicate the frequency of each bin divided by a 0.1-mm interval (left axis). The lines with points indicate the accumulated frequency (right axis)

Results of comparison with radiosonde observations

A radiosonde launching facility is equipped with the RYOFU MARU and upper air observations over the ocean are conducted. Through this study, the VAISALA RS92-SGP radiosonde was used. The GNSS antennas were set higher than the radiosonde base. Therefore, as a height correction, the radiosonde observed water vapor amount between the radiosonde launching point to the GNSS antenna was removed from radiosonde observations. Figure 5 shows the GNSS PWV retrieved from the MAST observation and its difference from radiosonde observation plotted on the two-dimensional map along the RYOFU MARU trajectory, and Fig. 6 shows those plotted as time series. A total of 77 radiosondes were

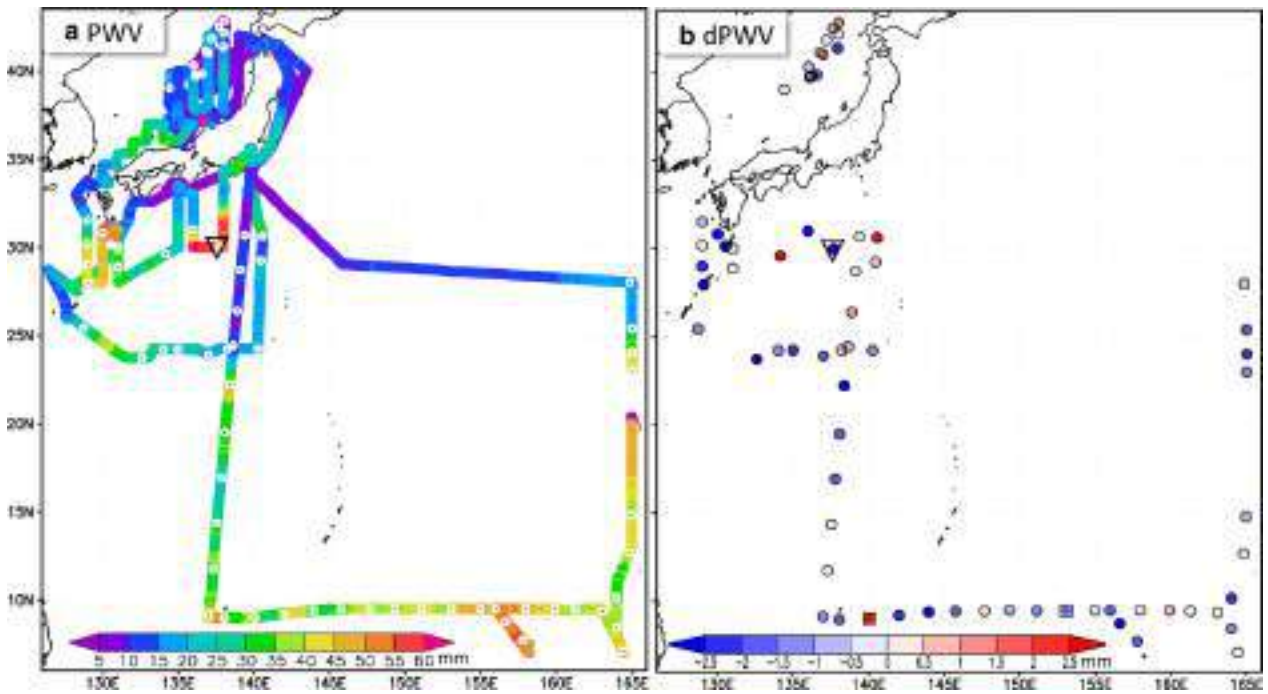


Fig. 5 **a** Estimated GNSS PWV from the MAST measurements along the RYOFU MARU trajectory. White circles represent the radiosonde launch locations. **b** Distribution of differences of GNSS PWV against radiosonde. Rejected data through the quality control are surrounded by black squares. An inverted triangle in each (**a**) and (**b**) indicates the area where a radiosonde launched at 2331UTC on June 10, 2017

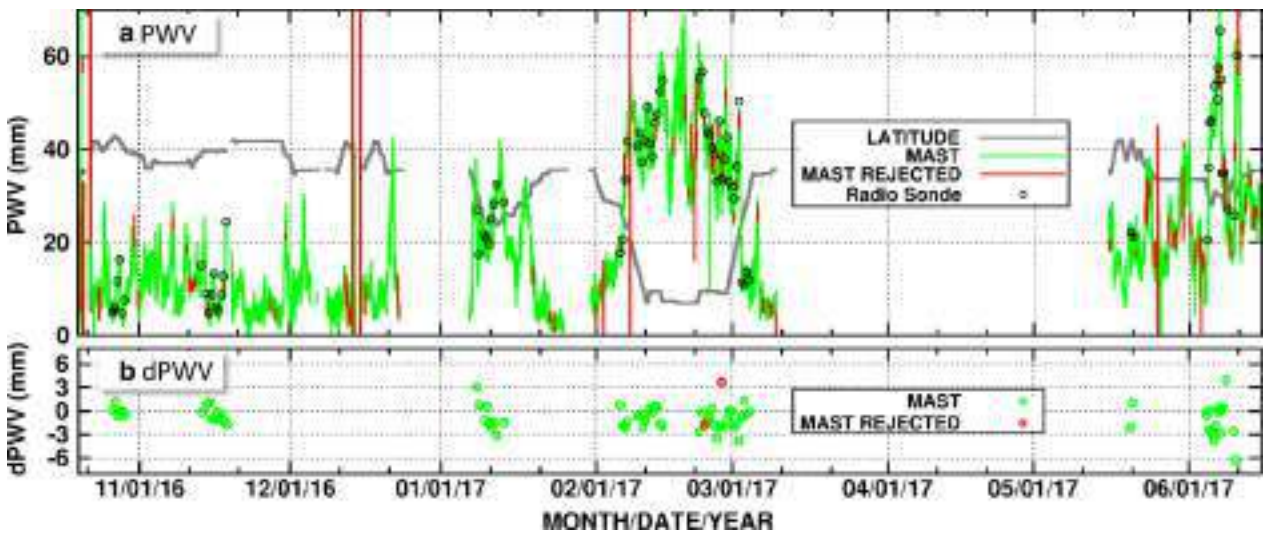


Fig. 6 **a** Time sequence of PWV for the entire observation period (green line: retrieved from the MAST measurements, led line: same with green line but rejected through the quality control procedure, black circles: radiosonde). Thick gray line represents latitude of the vessel. **b** Anomaly plots of GNSS PWV from the MAST measurements against radiosonde observations. Two red circles are rejected through the quality control

launched during the campaign. The launch locations are plotted with white circles in Fig. 5a. From Figs. 5 and 6, we can recognize that most of the differences are within 3 mm. Neither distinct geographical feature nor seasonal feature is recognized.

Figure 7 shows a comparison of the results of the GNSS PWV with the radiosonde observations. If radiosonde rises with a mean ascent rate of 5 m/s as Mateus et al. (2015) notes, it takes approximately half an hour for the radiosonde to travel up through the troposphere

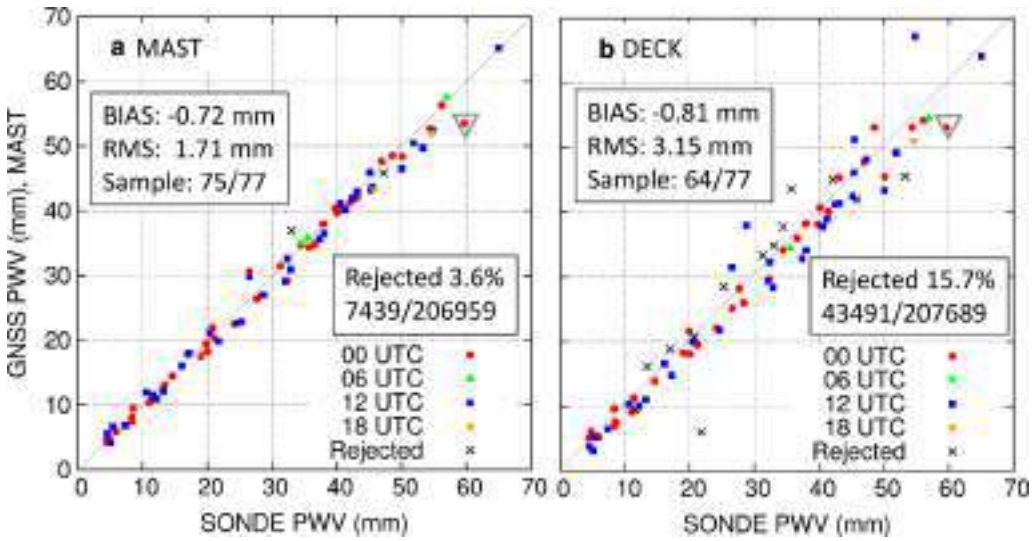


Fig. 7 Scatter diagrams of the differences in the GNSS PWV obtained from the MAST measurements versus the radiosonde observations. The red circle plot with the gray inverted triangle is a comparison with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017. The cause of the large difference is discussed in "Discussion and Summary"

where most of the water vapor exists. Therefore, the GNSS PWVs were time-averaged over 30 min beginning at each radiosonde launch time. The fact that the agreement of MAST (bias: − 0.72 mm, RMS: 1.71 mm, rejected rate: 3.6%) is much better than that of DECK (bias: − 0.81 mm, RMS: 3.15 mm, rejected rate: 15.7%) implies a larger multi-path effect on the DECK observations. From now on, we focus on the results of the MAST.

Figure 8 shows the relationship between the GNSS PWV differences and the radiosonde observed PWV. The GNSS PWV tends to be smaller than the radiosonde observations and the negative tendency increases with the PWV value. As previous studies have indicated (e.g., Beutler et al. 1998; Shoji et al. 2000), the error in the GNSS estimated vertical coordinate and the error in the GNSS PWV have a positive correlation. Figure 9 shows the certain relationship between the estimated vertical coordinate of the GNSS antenna and differences in the GNSS PWV. Of course, we don't have any evidence of the possibility of vertical coordinate error. There are several mechanisms which cause sea surface height changes, e.g., tidal effects, atmospheric pressure, and seawater density. The GNSS antenna altitude may reflect the actual ocean surface height. At least, the results shown in Figs. 8 and 9 indicate the need to closely evaluate the accuracy of the GNSS antenna altitude.

In addition to the error in estimated altitude there are several possible causes of the GNSS PWV error. In the next section, we discuss several possible causes associated with the kinematic PPP analysis.

Discussion and summary

In this section, we discuss several possible sources of errors in the shipboard GNSS positioning and troposphere estimation.

First, we discuss the largest difference case, which recorded in the comparison between radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017. Figure 10 shows profiles of the refractivity and relative humidity observed by the radiosonde. Here the refractivity is calculated according to the following equation using the radiosonde observed pressure, humidity and temperature:

$$N = k_1\left(\frac{P_d}{T}\right) + k_2\left(\frac{P_v}{T}\right) + k_3\left(\frac{P_v}{T^2}\right), \quad (5)$$

where T, P_d, and P_v are the temperature, dry pressure, and vapor pressure, respectively, and k_1, k_2, and k_3 are constants. We follow Boudouris (1963) and set $k_1 = 77.6$, $k_2 = 71.98$, and $k_3 = 375{,}400\ \mathrm{K}^2/\mathrm{hPa}$.

Refractivity inversion up to approximately 400 m is seen. There was no inversion for the dry part [the first term on the right-hand side of Eq. (5), the blue line in Fig. 10] of the refractivity. The inversion was caused by water vapor. Around this time, the RYOFU MARU was under a precipitation system. A total of 4.5 mm of precipitation was recorded in the 30 min from 2331 UTC on June 10 to 0000 UTC on June 11. The cruising speed was approximately 7.0 m/s, the relative wind speed was 12.6–13.2 m/s, and the significant wave height was 0.9 m. Li et al. (2010) studied the effect of radio wave propagation under ducting environment and found great effects

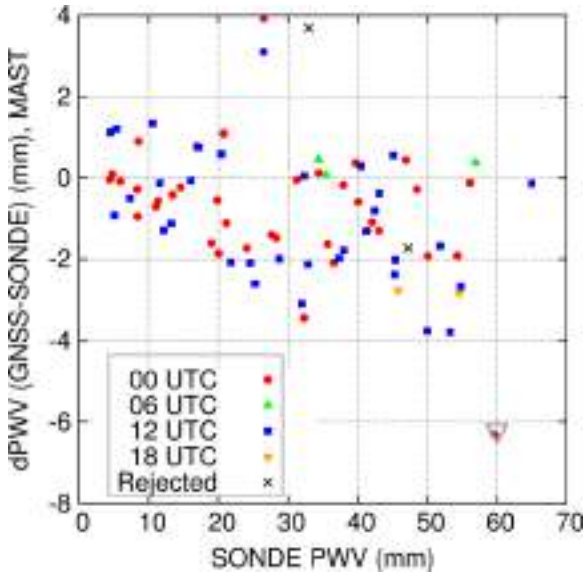


Fig. 8 Scatter diagrams of the differences in the GNSS ZD (ZHD and ZWD) obtained from the MAST measurements versus those estimated from the radiosonde observations. Plots with gray inverted triangles are a comparison with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017. The cause of the large difference is discussed in "Discussion and Summary"

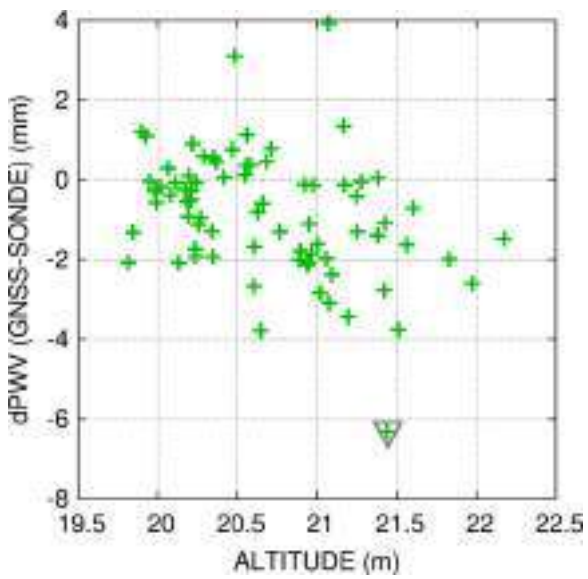


Fig. 9 Scatter plots of the differences in the GNSS PWV versus the radiosonde observations and estimated GNSS antenna (MAST) altitudes. Plots with gray inverted triangles are a comparison with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017

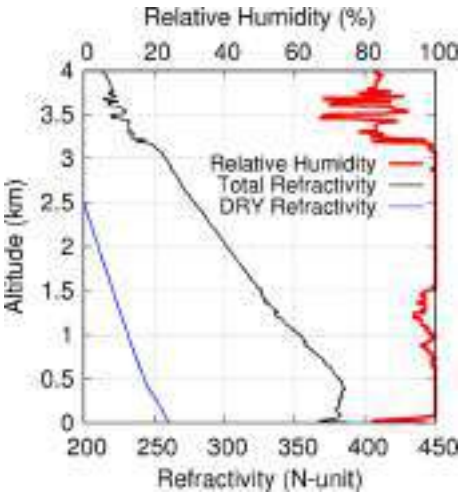


Fig. 10 Profiles of the refractivity and relative humidity observed by the radiosonde observation launched at 2331 UTC on June 10, 2017. The dry refractivity represents the first term on the right-hand side of Eq. (5)

on GNSS observation, such as longer transform of microwave, formation of shadow zone, and reflect signal propagation loss. A vertical inversion layer caused by water vapor causes surface ducting and might lead to the large negative bias in the GNSS PWV. Figure 11 represents the frequency of the refractivity inversion layer top height observed by the RYOFU MARU radiosonde during the period of six years from 2012 to 2017. The inversion top height is defined as the height at which maximum refractivity was observed from each radiosonde profile. Only two cases observe more than a 300-m inversion height out of 612 launches. Even though the frequency is small, this fact suggests that we should carefully investigate the atmospheric profile, especially the existence of an inversion layer.

In kinematic PPP, the antenna moving speed, direction, and their time variations might cause errors for both the positioning and atmospheric parameter estimations. In addition, dynamic pressure caused by strong wind might cause errors in the atmospheric pressure observation which leads to errors in ZHD estimation. Using wave height measurements and the meteorological observation data of the RYOFU MARU, we compared the PWV differences with the wave height, vessel speed, and wind speed relative to the vessel. As shown in Fig. 12, the correlation is not clear for vessel moving speed and relative wind speed. There seems a certain tendency of higher positive biases under higher significant wave height. Figure 13 shows significant wave heights along the RYOFU MARU trajectory. The white crosses represent the locations where the MAST data are rejected using the quality check procedure in this study. The relation between wave height and GNSS PWV error is not so clear, but, at least, we can conclude that spiky outliers are not caused by

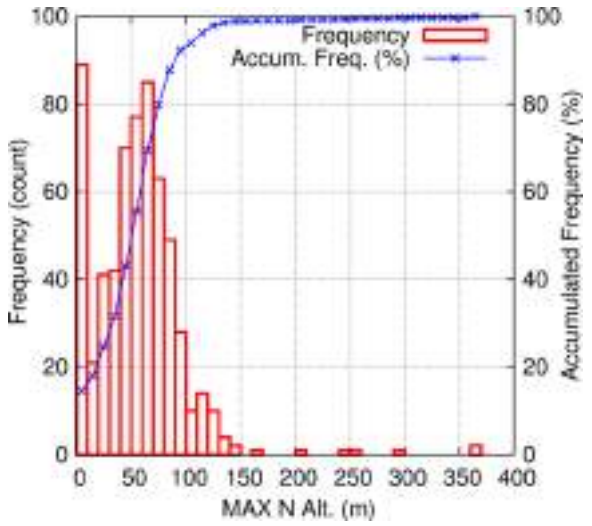


Fig. 11 Frequency of the height of the maximum refractivity of 612 RYOFU MARU radiosonde observations during the period of 2012–2017

the state of sea surface wind. Figure 14 shows the PWV time series estimated from the GNSS measurements and radiosonde during the highest wave period in the campaign (the red rectangle area in Fig. 13). Despite the relatively large waves (SWH 2–7 m), the GNSS PWV appears to agree well with the radiosonde observations. From Figs. 12, 13, 14, we may conclude that SWHs less than 5 m do not cause large errors in the shipborne GNSS PWV measurements.

The results and discussions in this study can be summarized as follows.

(a) The MADOCA real-time orbit has the potential to serve in practical PWV analyses over the ocean in real time (at least with a class of 1300-ton and 80-m-long observation vessels). However, careful consideration of the multi-path effect is essential for shipborne GNSS observations.

Shoji et al. (2016) discussed real-time possibility of shipborne GNSS PWV measurement. However, the results obtained from RYOFU MARU were highly contaminated by outliers and more than 60% of estimated PWV was rejected. They supposed that multi-path affected the RYOFU MARU GNSS observation. In this paper, by comparing observations on DECK and on MAST on the RYOFU MARU, their hypothesis was confirmed by much smaller rejection rate on less multi-path affected MAST. However, as shown in Fig. 2, GNSS PWV time series by kinematic PPP with real-time ephemeris show fluctuations of several-hour cycle with several-mm amplitude. It may be partly due to analyzing x, y, and z coordinates as time-dependent unknown parameters, and partly due to less accuracy of real-time ephemeris compared to final one. Increased number of high-quality observation could bring more stable analysis results. In this study, we used GPS, GLONASS, and QZSS. In the future, inclusion of other GNSS, such as BeiDou and GALILEO, should be investigated.

(b) The effects of the following conditions on the kinematic GNSS measurements are minor, if any:
a relative wind speed of less than 20 m,
a cruising speed of less than 8 m/s and
a significant wave height of less than 5 m.

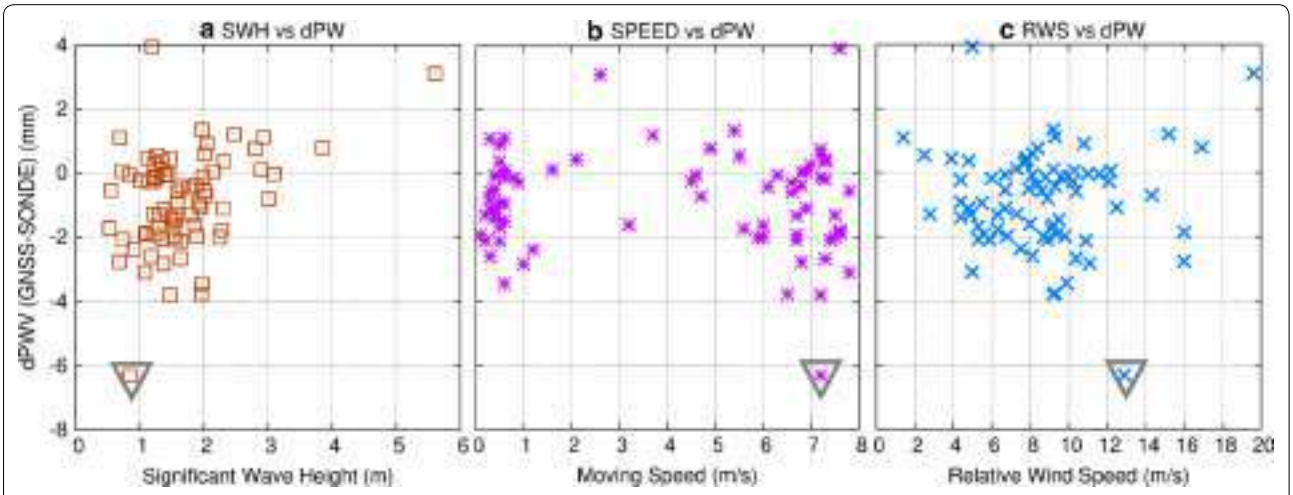


Fig. 12 Scatter plots of the differences in the GNSS PWV versus the radiosonde observations and **a** significant wave height, **b** vessel moving speed, and **c** relative wind speed. Plots with gray inverted triangles are comparisons with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017

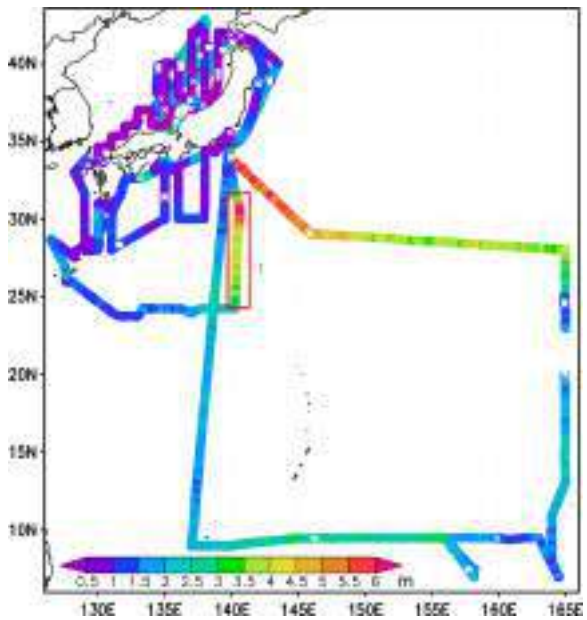


Fig. 13 Significant wave height along the RYOFU MARU trajectory. White crosses indicate the locations where the PWV data are judged as erroneous according to the study's quality control process. The PWV time sequence in Fig. 7 is measured in the red rectangular area

Fig. 14 Time series of the PWV obtained via several observations and a NWP analysis from 0000 UTC on January 8 to 0000 UTC on January 10, 2017. The blue squares indicate the radiosonde, the red line indicates MAST, the green line indicates DECK, the black line indicates DECK (rejected), and the purple boxes indicate the significant wave height

Further investigation is needed about the issues, but, at least, we have not found the evidences of effects of above elements. The above three conditions are related to the degree of three-dimensional antenna movement. Investigation on limitation of ocean platform GNSS measurement for PWV is one of the remaining issues.

(c) The relationship between the errors in the GNSS PWV and the estimated coordinates should be investigated in the future.

As shown in Fig. 9, GNSS PWV errors show a certain relation with estimated antenna altitude. Errors in estimated vertical coordinate affect GNSS PWV estimation (e.g., Beutler et al. 1998; Shoji et al. 2000). Figure 9 only shows estimated antenna altitude and does not show vertical coordinate error. In the future, we need to evaluate analyzed vertical coordinates by comparing other observations, such as satellite-borne sea surface altimeter.

(d) Radio wave ducting could cause large error.

Large under estimation of GNSS PWV compared to a radiosonde launched at 2331UTC on June 10, 2017, is discussed with relation to radio wave ducting. To avoid ducting effect, higher elevation cutoff angle might be one answer. We need to carefully investigate the optimum elevation cutoff for ocean platform GNSS observation avoiding multi-path and/or ducting effect while ensuring sufficient number of observation.

Abbreviations

GEONET: GNSS Earth Observation Network; GNSS: Global Navigation Satellite System; GPS: Global Positioning System; GSI: Geospatial Information Authority of Japan; JAXA: The Japan Aerospace Exploration Agency; JMA: Japan Meteorological Agency; MADOCA: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis; PCV: Phase Center Variation; PPP: Precise Point Positioning; PWV: Precipitable Water Vapor; WVR: Water Vapor Radiometer; ZHD: Zenith Hydrostatic Delay; ZTD: Zenith Tropospheric Delay; ZWD: Zenith Wet Delay.

Authors' contributions

Shoji Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda designed the study, developed the methodology, collected the data, performed the analysis, and wrote the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Author details

[1] Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan. [2] Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba, Japan. [3] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Kyoto, Japan.

Acknowledgements

We wish to express our gratitude to two anonymous referees for their important comments that enabled us to correct our misunderstandings and to improve the manuscript significantly. The campaign observation was funded by a research grant for Mission Research for Sustainable Humanosphere from the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) at Kyoto University, "Study on accuracy improvement of shipborne GNSS water vapor measurement." A part of the study was also supported by JSPS KAKENHI Grants 16H06310. RTKLIB version 2.4.2 (patch 12) was downloaded from the following link; https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB/archive/master.zip. The authors would like to express their sincere appreciation for Mr. Tomoji Takasu for his valuable comments and supports for the GNSS analysis. The GEONET observation data were acquired from the ftp server of the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) in RINEX format. MADOCA real-time product was provided by JAXA via the Internet (https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html).

Competing interests
The authors declare that they have no competing interests.

Availability of data and materials
The data and materials used in this research are available on request basis to the corresponding author, Dr. Yoshinori Shoji (yshoji@mri-jma.go.jp).

Ethics approval and consent to participate
Not applicable.

Consent for publication
Not applicable.

Funding
The campaign observation was funded by a research grant for Mission Research for Sustainable Humanosphere from the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) at Kyoto University, "Study on accuracy improvement of shipborne GNSS water vapor measurement."

Publisher's Note
Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Received: 29 August 2017 Accepted: 25 October 2017
[illegible]

References

Benevides P, Catalao J, Miranda PMA (2015) On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall. Nat Hazards Earth Syst Sci 15:2605–2616. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2605-2015
Beutler G, Bauersima I, Gurtner W, Rothacher M, Schildknecht T, Geiger A (1998) Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observation. In: Atmospheric effects on geodetic measurements, monograph, 12, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, pp 15–43
Bevis M, Businger S, Herring TA, Rocken C, Anthes RA, Ware RH (1992) GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J Geophys Res 97:15787–15801
Boehm J, Werl B, Schuh H (2006) Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. J Geophys Res 111:B02406. https://doi.org/10.1029/2005JB003629
Boniface K, Champollion C, Chery J, Ducrocq V, Rocken C, Doerfinger E, Collard P (2012) Potential of shipborne GPS atmospheric delay data for prediction of Mediterranean intense weather events. Atmos Sci Lett 13(4):250–256. https://doi.org/10.1002/asl.391
Boudouris G (1963) On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gasses. J Res Natl Bur Stand Sect 67D:631–684
Chadwell CD, Bock Y (2001) Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy. Geophys Res Lett 28:3701–3704. https://doi.org/10.1029/2001GL013280
Elgered G, Davis JL, Herring TA, Shapiro II (1991) Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry for estimation of the wet delay. J Geophys Res 96:6541–6555
Fujita M, Kimura F, Yoneyama K, Yoshizaki M (2008) Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements. Geophys Res Lett 35:L13803. https://doi.org/10.1029/2008GL033764
Fujita M, Wada A, Iwabuchi T, Rocken C (2014) Tropospheric monitoring over the ocean using a shipborne GNSS receiver. In: Proceedings of the 27th international technical meetings of the ION satellite division, pp 1085–1089
Guerova G, Jones J, Douša J, Dick G, de Haan S, Pottiaux E, Bock O, Pacione R, Elgered G, Vedel H, Bender M (2016) Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. Atmos Meas Tech 9:5385–5406. https://doi.org/10.5194/amt-9-5385-2016
Ishikawa Y (2010) The use of ground based GPS data tin mesoscale analysis. In: Additional volume of the annual report of numerical prediction division vol 56, pp 54–60 (in Japanese)
Kato T, Aranami K (2005) Formation factors of 2004 Niigata–Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving model. SOLA 1:1–4. https://doi.org/10.2151/sola.2005-001
Li G-C, Guo L-X, Liang Y (2010) Simulation modelling the GPS signal propagation in the tropospheric ducts. In: Proceedings of the 9th international symposium on antennas, propagation and EM theory, 592–595. https://doi.org/http://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696535
Mateus P, Giovanni N, João C (2015) Uncertainty assessment of the estimated atmospheric delay obtained by a numerical weather model (NMW). IEEE Trans Geosci Remote Sens 53(12):6710–6717
Petit G, Luzum B (eds.) (2010) IERS Technical Note No. 36, IERS Conventions (2010)
Rocken C, Johnson J, Van Hove T, Iwabuchi T (2005) Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS. Geophys Res Lett 32:L12813. https://doi.org/10.1029/2005GL022573
Shi-Jie F, Jian-Fei Z, Xiu-Ying P, Su-Qin W, Yan-Xiong L, Ke-Fei Z (2016) Validation of atmospheric water vapor derived from ship-borne GPS measurements in the Chinese Bohai Sea. Terr Atmos Ocean Sci 27:213–220. https://doi.org/10.3319/TAO.2015.11.04.01(A)
Shoji Y, Nakamura H, Aonashi K, Ichiki A, Seko H, Members of GPS, MET Japan summer Campaign (2000) Semi-diurnal and diurnal variation of errors in GPS precipitable water vapor at Tsukuba, Japan caused by site displacement due to ocean tidal loading. Earth Planets Space 52:685–690. https://doi.org/10.1186/BF03352264
Shoji Y, Nakamura H, Iwabuchi T, Aonashi K, Seko H, Mishima K, Itagaki A, Ichikawa R, Ohtani R (2004) Tsukuba GPS dense net campaign observation: improvement in GPS analysis of slant path delay by stacking one-way postfit phase residuals. J Meteor Soc Japan 82(1B):301–314
Shoji Y, Kunii M, Saito K (2009) Assimilation of nationwide and global GPS PWV Data fora heavy rain event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan. SOLA 5:045–048
Shoji Y, Sato K, Yabuki M, Tsuda T (2016) PWV Retrieval over the ocean using shipborne GNSS receivers with MADOCA real-time orbits. SOLA 12:265–271. https://doi.org/10.2151/sola.2016-052
Takasu T (2013) RTKLIB 2.4.2 manual. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. Accessed 5 October 2017
World Meteorological Organization (2017) Satellite status. http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php. Accessed on 5 October 2017
Zhou F-C, Song X, Leng P, Wu H, Tang B-H (2016) An algorithm for retrieving precipitable water vapor over land based on passive microwave satellite data. Adv Meteorol 2016:1–11. https://doi.org/10.1155/2016/4126393
Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Watkins MM (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J Geophys Res 102(B3):5005–5017

Submit your manuscript to a SpringerOpen journal and benefit from:

► Convenient online submission
► Rigorous peer review
► Open access: articles freely available online
► High visibility within the field
► Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► springeropen.com

社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

海洋GNSSブイからの洋上・衛星間データ収集を想定した電波伝搬モデルの構築

滝沢　賢一†　山本　伸一††　豊嶋　守生††　二村　彰†††　寺田　幸博††††
加藤　照之†††††

† 国立研究開発法人情報通信研究機構 耐災害ICT研究センター 応用領域研究室
〒980-0812　仙台市青葉区片平2-1-3
†† 国立研究開発法人情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター 宇宙通信研究室
〒184-8795　東京都小金井市貫井北町4–2–1
††† 国立弓削商船高等専門学校　〒794-2593　愛媛県越智郡上島町弓削下弓削1000
†††† 国立高知工業高等専門学校　〒787-8508　高知県南国市物部乙200–1
††††† 東京大学地震研究所　〒113-0032　東京都文京区弥生1–1–1
E-mail: †{takizawa,shin.yamamoto,morio}@nict.go.jp, ††futamura@ship.yuge.ac.jp,
†††terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ††††teru@eri.u-tokyo.ac.jp

あらまし　本稿では，海洋GNSSブイにおけるデータ収集を目的とした洋上・衛星間通信方式の設計に必要となる洋上・衛星間伝搬伝搬特性について，船舶を利用した洋上における電波伝搬測定結果を用いた電波伝搬モデルの構築を行い，揺動等に起因する衛星方向の洋上側アンテナ利得の変動と，反射波等による確率的な変動を記述する対数正規分布によって表現できることがわかった．

キーワード　洋上・衛星間通信，海洋GNSSブイ，電波伝搬モデル

Channel Modeling on Satellite Communications for GNSS Buoy in the Ocean

Kenichi TAKIZAWA†, Shinichi YAMAMOTO††, Morio TOYOSHIMA††, Akira FUTAMURA†††,
Yukihiro TERADA††††, and Teruyuki KATOH†††††

† National Institute of Information and Communications Technology (NICT)
Katahira 2–1–3, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980–0812 Japan
†† National Institute of Information and Communications Technology (NICT)
Nukui-Kitamachi 4–2–1, Koganei, Tokyo, 184–8795 Japan
††† National Institute of Technology, Yuge College
Yuge-Shimoyuge 1000, Kamishima, Ehime, 794–2593 Japan
†††† National Institute of Technology, Kochi College
Monobe-otsu 200–1, Nangoku, Kochi, 787–8503 Japan
††††† Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
Yayoi 1–1–1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113–0032 Japan
E-mail: †{takizawa,shin.yamamoto,morio}@nict.go.jp, ††futamura@ship.yuge.ac.jp,
†††terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ††††teru@eri.u-tokyo.ac.jp

Abstract　In this paper, channel modeling on satellite communications for GNSS buoy in the ocean is shown. A channel model is derived from measurement results, which is given by a combination of geometrical term and probabilistic (log-normal) term.

Key words　Satellite communications, GNSS buoy in the ocean, Radio propagation modeling

1. まえがき

プレート型地震に伴う津波の早期検知・到来予測精度の向上を目的として，海洋 GNSS ブイ群を用いた津波検知に関する研究を行っている [1]．EEZ 内に設置された海洋 GNSS ブイ群からの計測データをリアルタイムで収集するためには，我が国の陸域・海域を問わずに広い通信範囲を提供する衛星通信の利用が期待される．このことから，国立研究開発法人情報通信研究機構では，これまでに技術試験衛星（ETS VIII）を用いた洋上ブイからのデータ伝送実験を行っている [2]．海洋ブイから衛星へのデータ伝送においては，波浪によるブイの揺動に伴って衛星方向に対するアンテナ利得の変化が生じ，これが通信性能に影響を与える．海洋 GNSS ブイ群からのデータ収集を目的とした洋上・衛星間通信には，揺動が生じてもデータ収集が確実に行える方式が求められる．本稿では，海洋 GNSS ブイにおけるデータ収集を目的とした洋上・衛星間通信方式の設計に必要となる洋上・衛星間伝搬伝搬特性について，船舶を利用した洋上測定結果を用いた電波伝搬モデルの構築について述べる．

2. 洋上における測定

洋上・衛星間通信方式の設計に資する電波伝搬モデルの構築を目的として，船上に測定系を搭載して電波伝搬特性の測定を行った．

2.1 測定系の構成

測定系の構成を図 1 に示す．本測定では，技術試験衛星（ETS-VIII）から送信される信号（S 帯）を観測対象として，船舶の揺動に対する受信信号強度の変化を計測する．測定系は弓削商船高専が所有する練習船「弓削丸」（240 t）に設置した．対象とする周波数帯は，中心周波数を 2502.5 MHz として帯域幅は約 1 MHz とした．計測用アンテナには，小型平面アンテナ（直径 84 mm m，高さ 14.8 mm，重量 150 g）[3] を用いた．アンテナパターンを図 2 に示す．最大利得は約 7.5 dBic（鉛直方向）である．アンテナ端から低雑音増幅器（LNA）までは甲板に設置し，受信信号電力を計測するシグナルアナライザ（キーサイトテクノロジー社製・N9010A）は船室内に設置した（写真を図 3 に示す）．甲板上の LNA と船室内のシグナルアナライザは，長さ 25m の低損失 RF ケーブルを用いて接続した．結果，アンテナ端からシグナルアナライザまでの利得は 64 dB（LNA による利得は 76 dB，RF ケーブルによる損失は 12dB）である．アンテナを設置した板の上には，船舶の揺動を計測するために傾斜計（Microstrain 社 3DM-GX4-45SK1，GPS 受信機付）を設置した．傾斜計を用いて，船舶の揺動としてロール角・ピッチ角・ヨー角を計測する他，船首磁気方位角，船舶位置（緯度・経度）等のデータを取得する．測定において，受信信号強度と揺動データとの時刻同期を得ることを目的として，シグナルアナライザは GPS 受信機を用いて 1PPS に同期して受信信号強度の計測を行い，傾斜計についても 1PPS に同期して計測データを記録することにした．なお，甲板に設置した測定系は，船橋（せんきょう）から約 5m の距離に設置したものの，船橋による反射および遮蔽の影響を受けることが予想される．

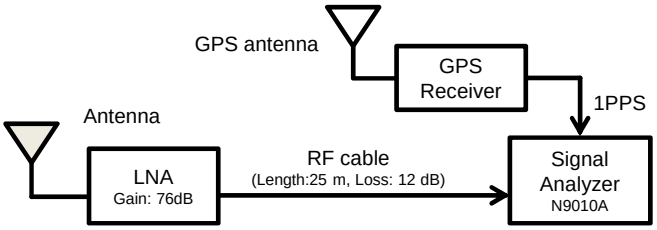


図 1　測定系の構成

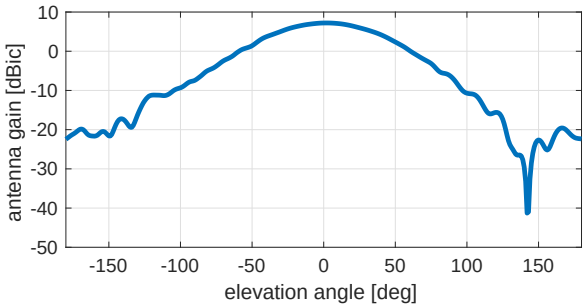


図 2　測定用アンテナのパターン

図 3　測定系設置の様子

2.2 測定結果

測定は 2016 年 8 月 25 日～26 日に瀬戸内海燧灘において実施した．図 4 には，船の揺動に対する受信信号強度（シグナルアナライザにおける読み値．アンテナ端での値は読み値から 64dB を減算した値．以降，本稿では読み値で示す．）の変化の

例を示す．船舶の航行軌跡，船舶（アンテナ）揺動としてロール角・ピッチ角・ヨー角の時間変化，受信信号強度の時間変化を示す．計測中において，技術試験衛星軌道は方位角で約 0.3 度（155.5 度から 155.8 度），約 0.7 度（53.3 度から 52.6 度）の変化が生じている．計測時間は約 60 分である．計測時の天候は晴れ，波は静穏であった．波浪による揺動の代わりに，航行軌跡に示すように船舶を蛇行させることで揺動を生じさせて受信信号強度の変動を計測した．図に示した計測においては，揺動の最大角度は，ロール角は 1.0 度，ピッチ角は 2.9 度，ヨー角における変動幅は 49.6 度であった．各姿勢角及び衛星軌道位置から求めた衛星仰角と，計測した受信信号強度を図 5 に示す．この結果から，衛星仰角と受信信号強度間の相関は高いことが確認される．また，船橋等による受信信号強度への影響を確認するため，周回軌跡による計測結果を用いた考察を行う．図 6 に，航行軌跡，受信信号電力及び揺動，船首磁気方位角に対する受信信号強度を示す．測定時における衛星方向は，仰角は約 51.0 度，方位角は約 156.7 度である．1 周に要する時間は約 260 秒であって，1 周回内における衛星方向角度の変化は 0.1 度以下であることから，衛星位置による受信信号強度への影響はほぼ無視できる．船首磁気方位角に対する受信信号強度の変化から，船首方位角が 330 度付近（5.58 ラジアン付近）において受信信号強度が低下することがわかる．この方位に船首が向いている場合，衛星は船橋の背後方向になることから，受信信号強度の低下は船橋による遮蔽を受けるためと考えられる．図 4 に示した蛇行軌跡時の測定においては，船首磁気方位角の範囲は 233 度から 310 度（4.1 から 5.4 ラジアン）であることから，船橋による遮蔽の影響を低減できる．このことから，図 4 に示したデータを用いて，洋上・衛星間の電波伝搬モデルの構築を行う．

3. 電波伝搬モデルの構築

3.1 モデルの構成

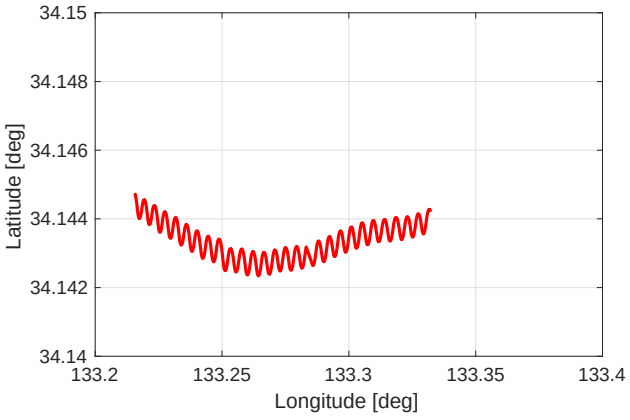
洋上・衛星間の電波伝搬特性を考慮した受信信号電力の変動モデルを考える．モデルとしては，式 (1) に示すように，海上ブイに設置されたアンテナ揺動及び衛星軌道情報をもとに幾何学的に決定される成分と，反射波等によって確率的に与えられる成分による構成とする．

$$\text{受信信号強度} = \text{確定的な成分} + \text{確率的な成分} \tag{1}$$

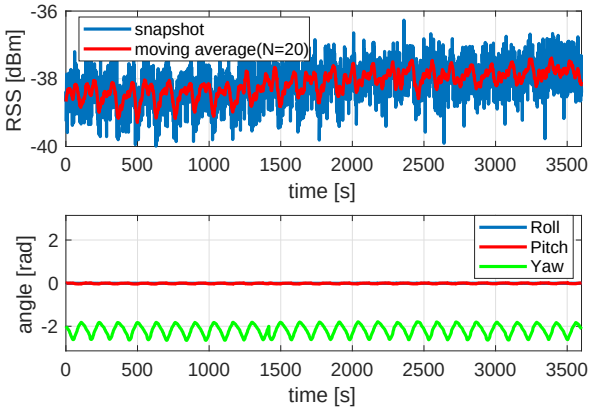
第一項の確定的な成分は，衛星に対する仰角及び方位角の変化から生じるアンテナ利得の変化と，衛星通信システムに含まれる固定的な要因が含まれる．気象条件による影響も本来はモデルに含むべきであるが，測定期間中の観測データからはモデル化に必要なデータが取得できていないことから，本稿におけるモデルでは明示しない．

3.2 測定データにもとづくモデルの構築

図 4 に示したデータをもとにモデルの構築を行う．傾斜計による計測データ及び衛星軌道情報から求めた衛星に対する仰角及び方位角をもとにして，洋上側のアンテナ利得変動を求めた結果を図 7 に示す．なお，アンテナ利得については，方位角に対する変化はないものとした．衛星仰角の変動幅は 4.8 度である．このアンテナ利得変動をもとにして，受信信号強度を計算した結果を図 8 に示す．受信信号強度との RMS 誤差は 1.64×10^{-5}（-47.8 dBm）となる．次に，残差分 δ_{RSS} を確率的な成分とみなして，統計分布によるモデル化を行う．図 9 には残差分 δ_{RSS} に対して，陸上移動体衛星通信 [4] におけるモデルにおいても用いられる対数正規分布によってフィッティングした結果を示す．対数正規分布の平均値は -6.4×10^{-15}，標準偏差は 0.46 であった．



(a)



(b)

図 4　測定データの例（東から西へ向かって蛇行して航行）

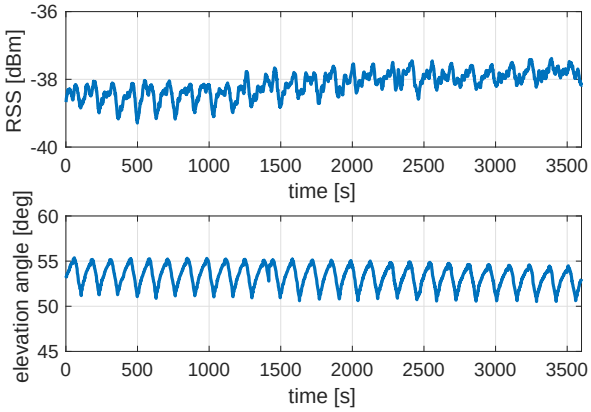
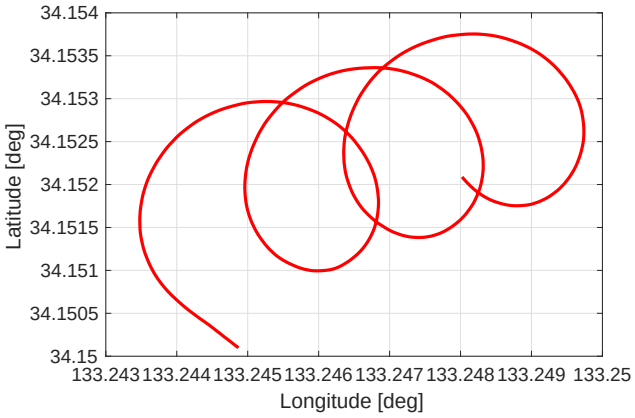
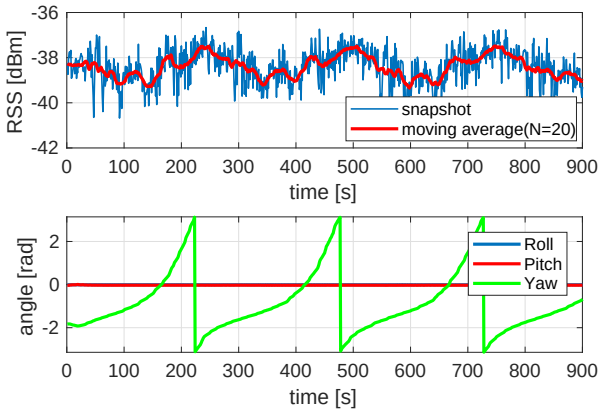


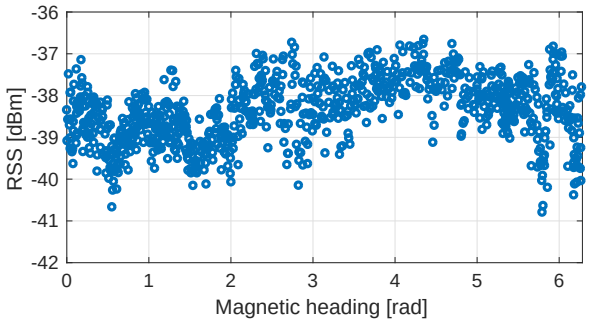
図 5　測定した受信信号強度と衛星仰角との比較



(a)



(b)



(c)

図 6　周回軌跡によって得られた測定データ

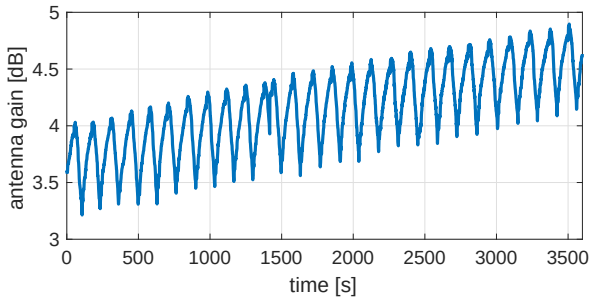


図 7　揺動及び衛星軌道変動に起因するアンテナ利得の計算結果

4. ま と め

本稿では，海洋 GNSS ブイにおけるデータ収集を目的とした

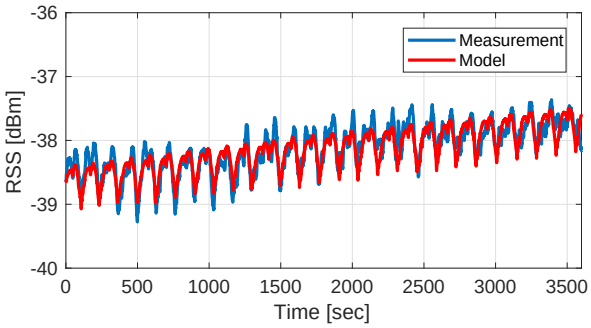


図 8　実測値（読み値）とモデルから求めた値との比較

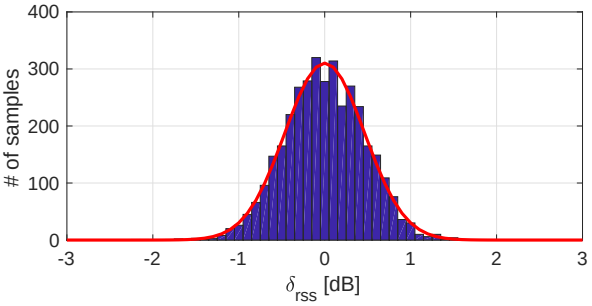


図 9　統計分布による残差成分のモデル化

洋上・衛星間通信方式の設計に必要となる洋上・衛星間伝搬伝搬特性について，船舶を利用した洋上測定結果を用いた電波伝搬モデルの構築について述べた．受信信号強度の変動は，揺動等に起因する衛星方向のアンテナ利得変動によって，反射波等による確率的な変動については対数正規分布によって表現することができることがわかった．今後，実際の海洋ブイの揺動特性を用いて，本モデルによる受信信号電力変動の解析と通信方式の設計を行う予定である．

謝　　辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H06310 の助成を受けたものです．本実験を行うにあたり，船舶の運航等で多大なご協力を頂きました国立弓削商船高等専門学校の皆様に感謝いたします．

文　　献

[1] T. Kato, et al, “GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System,” ISOPE-2017, 2017.
[2] 山本，川崎，寺田，加藤，橋本，本橋，齊田，松澤，“技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験～津波の早期検出を目指して～,” 信学技報 SAT2014-26, vol. 114, no. 179, pp. 5-?10, 2014 年.
[3] 山本，岩切，寺田，岩崎，越川，和田，加藤，多田，“海上ブイに適した衛星データ通信用アンテナ設置機構,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2016 年.
[4] 細矢, 電波伝搬ハンドブック, 2004 年.

Paper:

Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System

Teruyuki Kato*1,†, Yukihiro Terada*2, Keiichi Tadokoro*3, Natsuki Kinugasa*3, Akira Futamura*4, Morio Toyoshima*5, Shin-ichi Yamamoto*5, Mamoru Ishii*6, Takuya Tsugawa*6, Michi Nishioka*6, Kenichi Takizawa*7, Yoshinori Shoji*8, and Hiromu Seko*8

*1Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan
†Corresponding author, E-mail: tera@eri.u-tokyo.ac.jp
*2National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan
*3Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan
*4National Institute of Technology, Yuge College, Ehime, Japan
*5Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan
*6Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan
*7Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan
*8Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan
[Received November 8, 2017; accepted January 29, 2018]

The GNSS buoy system for early tsunami warnings has been under development for about 20 years. A small prototype buoy was first deployed in Sagami Bay, Japan, in 1997. Then, after a series of experiments aiming for operational use, the system was implemented as a part of national wave monitoring system NOWPHAS. The NOWPHAS system had set up more than 10 GNSS buoys around Japan by 2011, and it recorded the tsunami caused by the 11 March 2011 Tohoku-oki earthquake. The records were used to update the tsunami warning at the time of the 2011 Tohoku-oki earthquake. However, the buoys were placed less than 20 km from the coast, as the system used the baseline mode RTK-GPS algorithm, which was not far enough for effective evacuation of people. Thus, we began trying to improve the system by putting the buoys much farther from the coast. The new system employs a newly developed positioning algorithm, Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR), together with satellite data transmission. A series of experiments involving the new system successfully indicated changes in sea level with an accuracy of a few centimeters. Given the success of the experiments, we are trying to use the GNSS buoys not only to provide early tsunami warnings but also to monitor various other geohazards. For example, we are trying to use the GNSS-Acoustic system to continuously monitor crustal movements on the ocean floor, to monitor the ionosphere, and to monitor the atmosphere. Ancillary sensors on the buoys will be utilized for oceanographic monitoring as well.

Keywords: GNSS buoy, synthetic geohazard monitoring, tsunami early warning, ocean bottom crustal movements

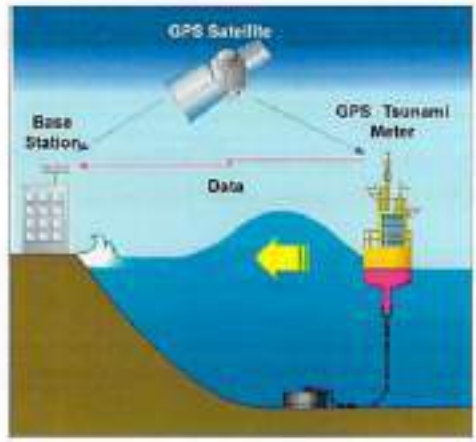


Fig. 1. Concept of GNSS buoy for tsunami early warning [1].

1. Introduction

The GNSS buoy system for early tsunami warnings has been under development in Japan since around 1997. Its basic idea is simple; a buoy equipped with a GNSS antenna may record a tsunami before it reaches land and can be used to save the lives of coastal residents by giving them time to evacuate if the data are transmitted in real time to the mainland (**Fig. 1**). Experimental deployments of GNSS buoys were conducted off Ofunato in northeastern Japan during the period 2001–2003 and off Muroto in southwestern Japan during the period 2004–2006. The system used so-called real-time kinematic (RTK) GNSS in baseline mode, and a land-based radio system was used for data transmission. These experimental GNSS buoy systems along the coastline of Japan were able to detect

tsunamis larger than a few centimeters in size nearby as well as distant tsunamis [1].

As the experiments were successful, the system was implemented as the national wave monitoring system, the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) [2] to monitor offshore waves and tsunamis around 2008. NOWPHAS was able to record the tsunami caused by the 11 March 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) at many sites along the Pacific coast, and the records from these were used to update the tsunami warning after the earthquake [3]. However, the update of the warning was made only some minutes before it struck the coast nearby, so it is questionable if the information from the buoy was used effectively to save lives.

The lesson learned in this experience was that the buoys placed less than 20 km from the coast were not far enough out to sea to enable people to evacuate. We are thus trying to improve the system by putting the buoys much farther out. In this article, we present some new ideas and methods for putting the buoys much farther from the coast and show some results from recent experiments. If we succeed in implementing the buoys far out to sea, they could be applied to the monitoring of other geohazards from the upper atmosphere to the ocean floor. We add some discussion of such capabilities and a new idea for establishing a buoy array in the western Pacific.

2. Lessons from the 11 March 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami

GNSS buoys by NOWPHAS were set up around 2008. They were spaced particularly close together along the Sanriku coast, as that is an area of Japan that is prone to frequent disastrous tsunamis. At the time of the 2011 Tohoku-oki earthquake, the GNSS buoys along the coast detected the tsunami before it reached land.

The Japan Meteorological Agency first issued a tsunami alert only four minutes after the onset of earthquake generation at 2:46 PM (JST) on that day. The first alert of the tsunami suggested a height of 6 m in Miyagi Prefecture and 3 m in Iwate Prefecture. After a while, the JMA staff was aware that a big tsunami had been detected at the GNSS buoys, and the tsunami alert was updated to more than 10 m in Miyagi and 6 m in Iwate along the coast at 3:14 PM [3]. However, the update of the alert was not effectively used to save people's lives along the coast, and nearly twenty thousand people lost their lives in the tsunami as a consequence.

The lesson learned from this event is that GNSS buoys should be placed much farther from the coast, perhaps more than 100 km offshore for more effective early warnings. As long as we use the RTK algorithm, which has distance limit of less than 20 km to have a positioning accuracy of about a few centimeters, we will not attain this goal. We must therefore employ a system with a new algorithm to overcome this difficulty. The Precise Point Positioning algorithm, which does not require baseline mode positioning, would be a solution for such an application. In addition, if the buoys are set much farther offshore, the land-based radio system for data transmission used in the conventional system cannot be used any more. We may have to employ some other technique for such long distance data transmission. The most feasible way may be to use satellite data transmission. The following two sections describe the new algorithm and satellite data transmission for a new development of the GNSS buoy system.

3. Recent Developments of GNSS Buoys

3.1. Implementation of PPP Algorithm

The Precise Point Positioning algorithm was first developed for static positioning [4] and then developed for kinematic applications [5]. One of latter applications developed by [6] is called Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR), and software developed by [6], RTNet, is used in this study. The PPP-AR technique can attain a few centimeters of positioning accuracy without a base station, so we do not have to worry about accuracy degradation due to a long baseline. However, on the other hand, centimeter accuracy by PPP-AR requires precise orbits and clock parameters in real-time to obtain the resultant coordinates in real-time. Therefore, data transmission for both land to buoys and vice versa is required. The original GNSS dual-frequency data are obtained on board the buoys, and the data is analyzed using the PPP-AR algorithm together with the precise orbits and clocks transmitted from land. The coordinates obtained are transmitted back to land to be disseminated graphically over the Internet.

3.2. Data Transmission Using Satellites

A land-based radio system is rather easy to use for remote continuous data transmission in real time. However, if the distance is long, more than several tens of kilometers, radio transmission becomes difficult due to the spherical nature of the Earth's surface. Among other data transmission systems, satellite data transmission has become the most reliable and easiest to access in recent years. Thus, we are trying to employ a satellite data transmission system for the GNSS buoy system.

In our revised system, we first used two Japanese satellites: Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII), or Kiku-8, and the Quasi Zenith Satellite System (QZSS), or Michibiki. However, as ETS-VIII terminated its operation in 2016 and QZSS also terminated its operation of experimental data transmission in 2016, we are currently using a commercial satellite, Thuraya, for this purpose.

Recently, JAXA developed a new system of estimating precise GNSS orbits and clocks, called Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) [7] (also see [8]). The products are sent to the ground users through the L-band Experimental (LEX) channel of QZSS. If we use this channel, an uplink of correction data is not required, so the cost of operation of

GNSS buoys will be significantly reduced. Given that the correction data can be obtained on board a GNSS buoy, the amount of data to be transmitted is significantly reduced. This is because the original phase data must be transmitted to land in the conventional RTK, whereas the new system requires only that estimated coordinates be transmitted to land. As this condition is favorable for cutting costs further using commercial satellites, we are considering replacing the current system that uses GEONET for precise orbits and clocks with those by MADOCA in the future.

3.3. Design of a Buoy

The buoy, as a floating body, may have to be designed so that it continues to operate for a long time, at least 10 years. The NOWPHAS uses this specification in designing their buoys for monitoring waves and tsunamis along the coast of Japan. Two major engineering problems buoys present in the open sea are securing them in water several thousand meters deep and making their moorings durable. Our recent trial experiences verify that it is possible for a buoy to remain buoyant against the gravitational force of its mooring up to a depth of about 2500 meters. If we consider deploying a buoy in the Pacific, we need to design the buoy so that it can be used in water 4000 meters deep or more. To do this, we might have to use an intermediate buoy between the buoy and its anchor on the sea bottom.

In order to investigate the sustainability of the buoy and mooring, we obtained data when we removed, after three years and seven months of experiment of the system, the buoy that was being used off Cape Muroto [9]. **Fig. 2** shows the buoy after the experiment. Naturally, it was covered with barnacles, but they did not cause any trouble or add significant weight that might change its buoyancy or cause it to tilt. There were barnacles only down to about 20–30 m below the sea surface, depending on the depth reached by sunlight. We also suspect that many of the barnacles might have become unattached due to shaking movements of the buoy in harsh weather, and that the number attached may have reached close to the point of saturation.

As for the durability of the buoy, we investigated two possible problems. The first was the ablation of the iron chain due to friction, and the second was the development of the mooring chain. In our experiments, we designed the chain assuming about 10 mm/yr of ablation at the bottom of the buoy. However, the chain at the bottom of the buoy did not show any visible ablation, though the shackle down below the chain caused 1.40–1.67 mm/yr of ablation. Thus, there was actually much less ablation than we had assumed. The most serious ablation was observed on the chain just above the sea bottom, where it struck the sea bed every time the buoy bobbed up and down. The amount of ablation in this part was 1.95 mm/yr, not 5 mm/yr as was assumed. One small problem was found in this part: some studs that were set up to guard the chain had dropped out. It seems that this part of the chain would the most delicate part of the buoy to design.

Fig. 2. Buoy after three years and seven months of operation off Cape Muroto, Japan [9].

Another problem was found regarding the laying operation of the mooring chain. Ideally, the chain should be much longer than the depth of water so that the chain makes a catenary with some deepest parts lying on the sea bottom. However, the chain gets coiled up on the sea bottom if it is laid incorrectly, causing much more friction on the chain as the buoy moves around. In the worst case, the chain might become unattached from its mooring and be carried away by the current. This actually occurred one time in the case of a NOWPHAS buoy. Reference [10] investigated this kind of problem based on experiments and suggested countermeasures. We are implementing in our project the countermeasures proposed as a result of this accident.

3.4. System Design

The overall system of data flow is shown in **Fig. 3**. Details are preseated below.

1: Data from the Japanese GNSS Earth Observation Network System (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) are used to derive the precise orbits and clock correction parameters at the data center in Hitachi Zosen Corporation (Hitz), Tokyo.

2: Precise satellite orbits and clocks obtained are then forwarded to the ground base station located in the town of Niyodogawa, Kochi Prefecture, Japan (**Fig. 3**).

3: The data are transmitted to the buoy via a commercial communication satellite, Thuraya.

4: GNSS data received on the buoy are analyzed to estimate coordinates together with precise orbits and clocks. Then, the estimated coordinates are transmitted back from the buoy to the receiving station in Niyodogawa via the same satellite.

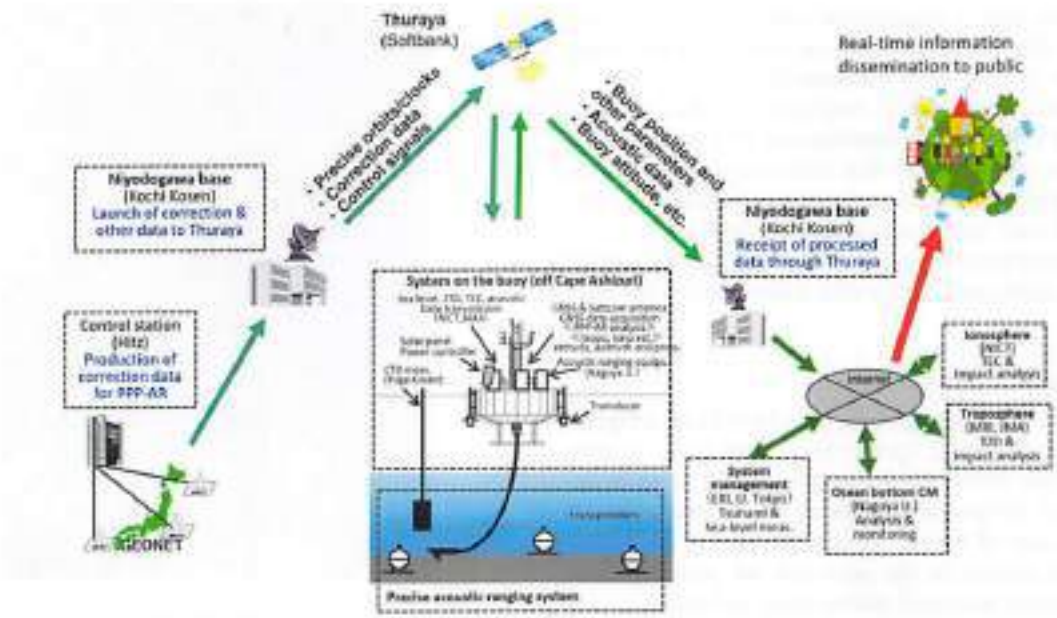


Fig. 3. Data flow for acquisition, analysis, and dissemination, using two satellites.

5: Coordinates received at the receiving station are represented graphically in the web server and disseminated to the public over the Internet.

The process shown here is carried out so that the public can also observe the motion of the sea surface at the buoy in real time.

4. Field Experiments

In our previous system using ETS-VIII (Kiku-8) and QZSS (Michibiki), we conducted a series of field experiments. These were from 16 December 2013 to 5 January 2014, from 1 June 2014 to 15 June 2014, and from 18 June to 19 June 2014. For the experiments, we borrowed fishery buoy No.16, operated by Kochi Prefecture, Japan, which is used as a fish bed. These buoys shown in **Fig. 4** are set for fishing using a habit of migratory fishes coming around floating materials like buoys. The buoy is located about 40 km south of Cape Muroto, Kochi Prefecture. There was a GNSS antenna set up on the top of the pillar in the center of the buoy. A simple flat, omnidirectional plane antenna was used for satellite data transmission. Other ancillary pieces of equipment were placed on the deck of the buoy. Solar panels and batteries were used as the power supply. The GNSS receiver had a 1-second sample rate, and RTNet software, which uses the PPP-AR algorithm, was used for real-time analysis, together with precise orbits and clocks provided through LEX signal of the Michibiki satellite. Coordinates obtained every second were transmitted to land via the Kiku-8 satellite. The coordinates were further forwarded to the web server at the Kochi National College for dissemination. This experiment went well, although there were occasional data gaps. We suspected

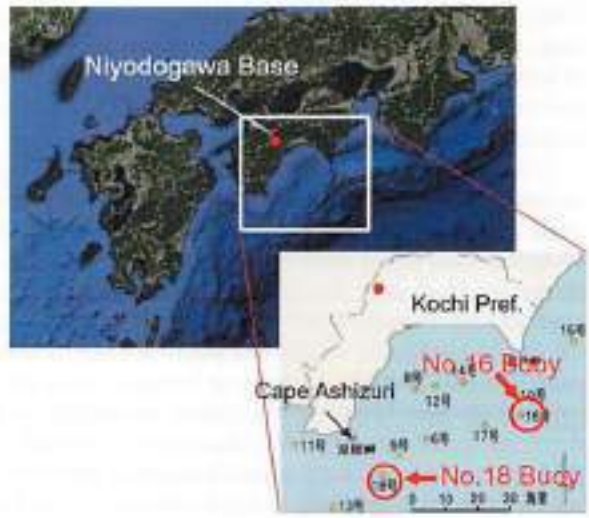


Fig. 4. Location of the buoys and the Niyodogawa Base, where the data server is located.

that the data gaps might have stemmed from the loss of the communication link between the buoy and the satellite due to degradation of signal gain caused by tilting of the buoy. Since some data were missing, we conducted another experiment in December 2015, implementing a gimbal mechanism to stabilize the antenna on board the buoy. See [11] for details of these experiments. Following these preliminary experiments, we began a new series of experiments in April 2016 with the financial support of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT) as a five-year project. We again borrowed fishery buoy No. 18 of Kochi Prefecture (**Fig. 5**). The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan (**Fig. 4**). Since the operation of ETS-VIII (Kiku-8) was set to be terminated in 2016, we

Fig. 5. Fishery buoy No.18, operated by Kochi Prefecture and used for the present study. On the top of the center pillar is the GNSS antenna. On the deck of the buoy are solar panels and other apparatuses.

first did a short comparative test of data acquisition between ETS-VIII and a commercial communication satellite, Thuraya. We did these tests during 24–26 August 2016, using Yuge-maru, a vessel of Yuge College's National Institute of Technology. We started to use the buoy for the new experiment in November 2016. In this experiment, we used a commercial satellite, Thuraya, for the satellite communication link. As is shown in **Fig. 3**, precise orbits and clocks used for PPP-AR analysis were first generated at the Data Center of Hitachi Zosen Corporation using GEONET data. Then the correction data was sent to the ground base station in Niyodogawa, Kochi Prefecture, Japan, where a PC server for data processing and archive was set up together with the satellite communication apparatus. The ground station can be placed at any arbitrary location, as long as an Internet connection is available and the Thuraya satellite is visible. In order to avoid the threat of earthquake and tsunami, such a ground base may have to be established far from the coast and from expected epicentral areas of large earthquakes. The town of Niyodogawa was selected considering a possible future mega earthquake, known as the Nankai Trough earthquake. **Figure 6** shows a sample plot of an obtained real-time web display of 1 Hz sea surface fluctuations for the hour 05:30–06:30 UTC on 15 February 2017. The upper plot shows the results using the Point precise Variance Detection (PVD) method [12], which uses signal phase change to detect coordinate change, whereas the lower plot shows the results using the PPP-AR method implemented in the present system. The former method is simple and can attain about ±5 cm precision in detecting vertical fluctuations, but it cannot delineate fluctuations of longer than a few minutes because the method uses a filtering technique to remove long period term, so that it is used for wave monitoring. On the other hand, the latter method can trace the wave from any period of fluctuations, including tsunamis and other long periods of waves [6]. Reference [13] indicates that our previous ground experiment of PPP-AR showed about ±3 cm precision, if ambiguity is fixed, for vertical coordinate estimates. Thus, the upper and lower plots should look similar in the short period. It seems that this condition is well recognized in the plot.

Unfortunately, the system stopped acquiring data soon after 15 February 2017 due to a problem in the power unit. We plan to restore the operation as soon as we can.

5. Implementation of GNSS-Acoustic System

One of our new challenges in developing GNSS buoys is their application to ocean bottom crustal movement observations. The detection of the precise location of the ocean floor can be made using the combination of GNSS and acoustic ranging [14]. This system was first conducted in the US; later the system was greatly improved in Japan [15]. The Japan Coast Guard, Tohoku University, and Nagoya University are major institutes that have elaborated the system, and a number of experimental and operational sites have been set up along the Pacific coast of Japan since early in the 21st century.

Accumulated position data from these ocean bottom sites have been used to delineate the detailed distribution of crustal movements off the coast of Japan. Based on such analyses, co-seismic offsets and post-seismic deformations due to earthquakes, as well as the distribution of plate coupling, have been clarified and have been discussed to obtain new insights into the mechanism of tectonic loading and strain release along the subducting plates along the islands of Japan [16–19].

The current GNSS-acoustic system for measuring the ocean bottom crustal movements uses vessels to locate the sea surface position and the position of the center of the figure made from at least three acoustic transponders placed on the sea bed using acoustic ranging between the vessel and the transponders. As vessels are used for observations, the location of the sea bottom can be measured only a few times a year at most. Therefore, if the vessel is replaced with a GNSS buoy, measurements can be taken more frequently. Though it depends on the electric power capacity of the transponders on the ocean floor, the measurements can even be taken daily. Such frequent measurements of the ocean bed positions with an accuracy of just a few centimeters would enable us to examine the detailed mechanism of subduction processes, including plate coupling, slow slip events, and earthquakes along the plate interface. Rapid detection of anomalous changes of plate coupling based on continuous monitoring of the crustal movements on the sea floor may be crucial for the evaluation of elevated earthquake risk for the society. A similar experiment has been conducted by another research group [20, 21].

For this purpose, we deployed three transponders around the buoy in June 2017 by using the Yuge-maru (**Fig. 7**). This experiment was done in the same configuration as was the experiment in February 2017 (see also **Figs. 3** and **4**). The distance between the transponders was 1.4 km, and the water depth was about 800 m. We con-

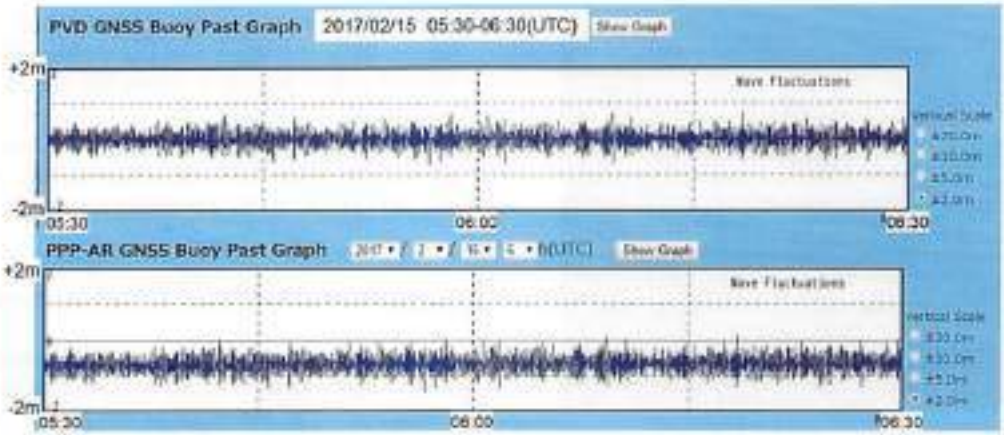


Fig. 6. Obtained time series of vertical components of GNSS buoy (05:30–06:30 UTC of 15th February 2017). Upper inset shows high frequency component using PVD method [8]. Lower inset shows time series using PPP-AR [5].

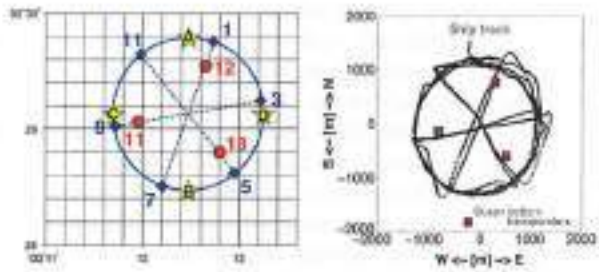


Fig. 7. (Left) Locations of three transponders (#11, #12, and #13). Stars mark (A-D) the locations of CTD observations. Center of the circle is the location of buoy. Planned ship tracks are shown by circles and dashed line in blue. Numbers indicate cross points. (Right) Ship tracks for acoustic ranging. Each dot shows the ranging point.

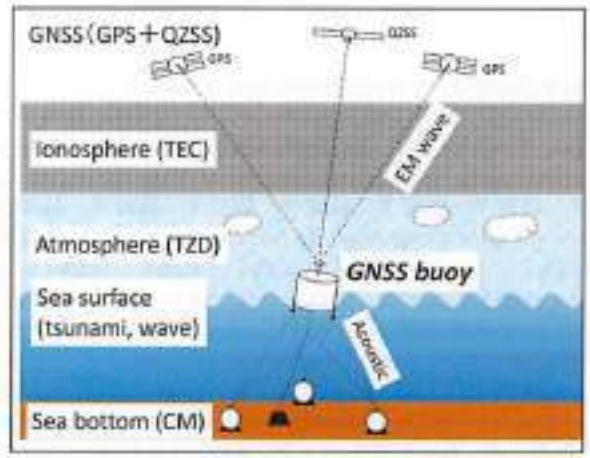


Fig. 8. Plan for GNSS buoy array in the western Pacific.

ducted acoustic ranging after establishing the transponders. The left of **Fig. 7** shows the points of acoustic ranging. Transducers for sending and receiving the acoustic signal were set up on the side of the Yuge-maru. In September, acoustic ranging was conducted again. Profile observations of conductivity, temperature, and depth were conducted in February and June 2017 using underway CTD (UCTD) and in September 2017 using CTD.

CTD observations were conducted, first, to determine the precise positions of the transponders deployed on the ocean floor, as it is important to determine the geometry of the triangle made by the three transponders to continuously track the position changes in order to estimate crustal movements. CTD observations in February were conducted to estimate the sound-speed gradient. Observations in June were conducted together with acoustic ranging to determine the precise geometry of the transponders. We found that ignoring the sound-speed gradient with respect to depth leads to the biases of tens of centimeters in coordinate estimates. We then estimated the sound-speed gradient together with the ocean floor coordinates in analyzing data in the June experiment. The results showed that the difference in the estimated coordinates for two days of observations in September together with CTD observations only amounted to about two centimeters. It will therefore not be necessary to observe the sound-speed gradient using CTD in the future, although occasional observation would be beneficial in evaluating the data analyses. The data obtained are now under investigation to determine the precise transponder geometry.

6. Discussion

As was shown in the previous sections, it seems that the detection of the movements of a buoy to the accuracy of a few centimeters would be feasible at any location far offshore. Given this success, we could expand the field of application of moving platforms such as GNSS buoys for multiple types of geohazard monitoring (**Fig. 8**).

Ground-based GNSS phase observations have been used to monitor the atmosphere and ionosphere through the estimation of tropospheric zenith delay (TZD) and ionospheric total electron content (TEC), respectively. These parameters can also be available in real time on the floating platform and can be sent to the land base for fur-

ther processing and monitoring (**Fig. 8**).

Water vapor plays a crucial role in the development of hazardous cumulus convection. Through the condensation process, moisture releases latent heat, which becomes an energy source for the rapid development of cumulus convection. Because most of atmospheric water vapor concentrates in the lower troposphere, the monitoring of low-level water vapor has received a lot of attention. For island countries such as Japan, low-level moisture often comes from the ocean and plays an essential role in hazardous weather events [22, 23].

Unlike fixed, ground-based GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna positions simultaneously with the atmospheric delays. However, several studies have addressed this problem [24–28]. Recent progress in GNSS technologies and an increase in the number of GNSS satellites have enabled real-time applicability in real-time water vapor sensing by using ocean platform GNSS measurements. Reference [29] installed GNSS antennas on a research vessel and conducted experimental observations to assess the GNSS-derived precipitable water vapor (PWV). The results showed good agreement (1.7 mm root mean square difference) with radiosonde observations. Nevertheless, these studies were only experimental and used vessels. Therefore, long-term point observations using GNSS buoys, together with atmospheric pressure sensors, would be an important step toward the operational use of water vapor content for atmospheric applications.

Ionospheric application of TEC based on GNSS array observations has been extensively conducted since [30] showed its capability. One recent focus of interest is TEC perturbation due to large earthquakes; [31] first detected TEC anomaly after the 1994 Northridge earthquake (Mw6.7) in California. Reference [32] indicated ionospheric variations due to the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake in Indonesia (Mw9.3), and a number of researchers discussed TEC variations due to the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) in Japan (see special volume of Earth Planets and Space, Vol.63, No.7, 2011 for references).

Ionospheric disturbance, caused by the activity of the sun, affects our lives in various ways. Bursts, for example, cause the degradation of GNSS positioning itself and jam radio telecommunications. These are particularly hazardous to the secure operation of aircraft. The autonomous operation of vehicles, which is now developing rapidly, will also be hampered. These inconvenient phenomena could result in serious human disasters. Observations and the real-time dissemination of the TEC map worldwide is therefore imperative for disaster mitigation.

The Applied Electromagnetic Research Institute of the National Institute of Information and Communications Technology is collecting global GNSS data from more than 6,000 sites to monitor ionospheric fluctuations [33], and it is making its data available online. High-resolution TEC maps have become available for space weather and ionospheric research in Japan, North America, and Europe, where there are dense GNSS receiver networks. However, they insist that there are vast areas vacant of GNSS sites in the ocean. This situation should be improved by introducing GNSS buoy arrays in the ocean.

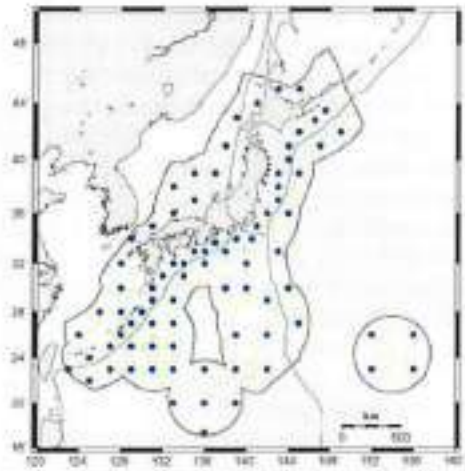


Fig. 9. Future scope of GNSS buoy array in the northwestern Pacific. Small red dots represent the currently operational GNSS buoy array for wave monitoring by NOWPHAS. Other blue dots are arbitrarily plotted for a hypothetical GNSS buoy array. Closed lines mark the extent of the Japanese Exclusive Economic Zone.

Finally, ancillary sensors attached to the GNSS buoys, such as sensors for sea surface temperature, ocean currents, sea surface salinity, etc., would provide invaluable data for ocean sciences. Currently, data for monitoring wide ocean areas come mostly from satellites and ARGO [34]. If buoys were set up in many places in the ocean, they would provide another type of data for monitoring the ocean surface in real-time and continuously at fixed positions. Beyond contributing to science, data from the ocean could be commercially beneficial, enabling the safe and secure operation of vessels, various types of ocean bottom resource excavations, etc. However, such applications are beyond the scope of this study and will be left for other occasions.

7. Concluding Remarks

Currently, continuous crustal movement observations on the sea floor are conducted mostly using pressure sensors. S-net and DONET of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) use cabled pressure sensors along the Japan Trench and the Nankai Trough. These sensors are much more sensitive than the GNSS acoustic system. Horizontally, however, the latter system has better resolution. Therefore, a combination of the two techniques would provide us with perfect information of the crustal movements of the sea floor.

Considering that the GNSS buoy array is imperative for monitoring crustal activity to mitigate damage from natural disasters, we are now trying to conduct a develop-

mental project aimed at building up a multiple purpose GNSS buoy in the open ocean and trying to design a GNSS buoy array in the northwestern Pacific, as shown in **Fig. 9**. Similar, though much denser, land-based GNSS arrays, GEONET in Japan, for example, are already available and demonstrating their powerful capabilities as hazard monitoring tools. Therefore, if a similar dense GNSS array is established in the open ocean, data taken from such a GNSS array will provide new and innovative types of information for the monitoring of multiple natural geohazards for disaster mitigation.

Like the ground-based GNSS array, a GNSS buoy array in the ocean could monitor plate motion and resultant crustal movements on the ocean floor on the continental side of the Chishima-Japan Trench and Suruga-Nankai Trough, enabling us to see if plate coupling is continuing or releasing crustal strain in more detail. Precipitable water vapor could be used for better numerical ocean weather forecasts. If, for example, GNSS buoys were placed west of Kyushu or in the Japan Sea, PWV data from the buoys would be used for better monitoring of torrential rains, which cause severe weather disasters especially in western Japan, through more precise monitoring of the progress of storm fronts. For the ionospheric geohazard monitoring, as was stated in the previous section, denser distribution of a global TEC map would provide significant improvements in the mitigation of disasters related to ionospheric disturbances.

To realize such a GNSS buoy array in the open ocean, we still need to overcome some important technological problems. First, there should be a reliable and inexpensive satellite data transmission system. Currently, there is no inexpensive public or government-operated telecommunication satellite available, only a commercial satellite system, which would be overly expensive if many buoys were deployed. If many buoys were deployed, a vast amount of data would be simultaneously transmitted in both directions between the buoys and land. Therefore, some technological developments may be necessary for such a mass data communication system as well. If the test operation of MADOCA transmission from QZSS to the ground becomes operational, it would drastically reduce the cost of satellite communication links.

In addition, in order to deploy such highly functional buoys in the open ocean, they should be highly tolerant of severe weather conditions and autonomously operable for at least 10 years or more without maintenance. For autonomous operation, there may have to be various automatic recovery mechanisms on board for mechanical failures. These problems should be overcome. Moreover, since this project has been successful, we have to consider how to operate this kind of GNSS buoy array. Which or what kind of organization should maintain the system? How should we avoid or monitor vandalism and/or accidents involving buoys? These operational problems may have to be discussed. Although these problems should be discussed before the system is designed, at this moment, we humbly hope that the project is deemed worth implementing as a step toward an innovative new era in hazard monitoring as well as a step forward for basic Earth sciences.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to Kochi Prefecture, Japan, for allowing the authors to use a fishery buoy for the present study. The authors are also indebted to the National Institute of Technology of Yuge College in Ehime, Japan for their help and cooperation in allowing the authors to use their vessel, the Yuge-maru, for the present study. This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310

References:

[1] T. Kato, Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy," Earth Planets Space, Vol.57, pp. 297-301, 2005.

[2] http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index_eng.html (accessed December 28, 2017)

[3] T. Ozaki, "Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –," Earth Planets Space, Vol.63, pp. 827-830, 2011.

[4] J. Zumberge, M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, and F. Webb, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," J. Geophys. Res., Vol.102, No.B3, pp. 5005-5017, 1997.

[5] K. Larson, P. Bodin, and J. Gomberg, "Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali Fault earthquake," Science, Vol.300, 2003.

[6] C. Rocken, L. Mervart, Z. Lukes, J. Johnson, H. Kanzaki, M. Kakimoto, and Y. Iwake, "Testing a new network RTK software system," The Proc. of the 17th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004), pp. 2831-2839, 2004.

[7] H. Takiguchi, Y. Igarashi, S. Miyoshi, H. Yamada, T. Tsuruta, E. Myojin, M. Kishimoto, and K. Kawate, "Efforts towards improvement of the precise orbit and clock determination for Multi-GNSS satellite and user positioning system," Proc. of the 61th Space Sciences and Technology Conf., 3A13, 2017 (in Japanese with English abstract).

[8] https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html (accessed December 27, 2017)

[9] Y. Terada, T. Nagai, T. Kato, S. Koshimura, K. Kawaguchi, and Y. Matsushita, "Long-term mooring chain system durability of the GPS tsunami-wave meter," J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol.70, No.1, pp. 13-18, 2014 (in Japanese).

[10] Y. Iwatsuka, T. Kotoura, Y. Kanno, D. Yoshida, M. Sano, H. Yoneyama, and Y. Terada "The behavior of the GPS buoy and mooring line during the installation," J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol.71, No2, pp. I_1045-I_1050, 2015 (in Japanese).

[11] T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, and N. Koshikawa, "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System," The Proc. 27th Int. Ocean and Polar Engineering Conf., 2017.

[12] H. Isshiki, A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki, and T. Tanno, "Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver – PVD (Point precise Variance Detection) Method –," J. Geod. Soc. Japan, Vol.46, No.4, pp. 253-267, 2000.

[13] Y. Terada, T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, and K. Tadokoro, "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," Proc. of the Int. Symp. on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), IAG Symposia, Vol.145, 2015.

[14] F. N. Spiess, "Suboceanic geodetic measurements," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol.GE-23, pp. 502-510, 1985.

[15] M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo, "GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application," Earth Planets Space, Vol.58, pp. 265-275, 2006.

[16] M. Sato, T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, "Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake," Science, Vol.332, p. 1395, 2011.

[17] T. Iinuma, R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, "Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data," J. Geophys. Res., Vol.117, B07409, 2012.
[18] T. Sun, K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, Y. Ohta, and Y. Hu, "Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake," Nature, Vol.514, pp. 84-87, 2014.
[19] Y. Yokota, T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, "Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone," Nature, 2016.
[20] M. Imano, M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, H. Ochi, N. Takahashi, and R. Hino, "Improvement in the accuracy of real-time GPS/Acoustic measurements using a multi-purpose moored buoy system by removal of acoustic multipath," IAG Symposia Series, Springer, 2015.
[21] N. Takahashi, Y. Ishihara, T. Fukada, H. Ochi, J. Tahara, T. Mori, M. Deguchi, M. Kido, Y. Ohta, R. Hino, K. Mutoh, G. Hashimoto, O. Matobashi, and Y. Kaneda, "Buoy platform development for observation of tsunami and crustal deformation," IAG Symposia Series, Springer, 2015.
[22] T. Kato and K. Aranami, "Formation Factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving Model," SOLA, Vol.1, pp. 1-4, 2005.
[23] Y. Shoji, M. Kunii, and K. Saito, "Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data for a Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan," SOLA, Vol.5, pp. 45-48, 2009.
[24] C. D. Chadwell and Y. Bock, "Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy," Geophys. Res. Lett., Vol.28, pp. 3701-3704, 2001.
[25] C. Rocken, J. Johnson, T. Van Hove, and T. Iwabuchi, "Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS," Geophys. Res. Lett., Vol.32, L12813, 2005.
[26] M. Fujita, F. Kimura, K. Yoneyama, and M. Yoshizaki, "Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements," Geophys. Res. Lett., Vol.35, L13803, 2008.
[27] S.-J. Fan, J.-F. Zang, X.-Y. Peng, S.-Q. Wu, Y.-X. Liu, and K.-F. Zhang, "Validation of Atmospheric Water vapor Derived from Ship-Borne GPS Measurements in the Chinese Bohai Sea," Terr. Atmos. Ocean Sci., Vol.27, pp. 213-220, 2016.
[28] Y. Shoji, K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, "PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADOCA Real-Time Orbits," SOLA, Vol.12, pp. 265-271, 2016.
[29] Y. Shoji, K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, "Comparison of Shipborne GNSS-derived Precipitable Water Vapor with Radiosonde in the Western North Pacific and in the Seas Adjacent to Japan," Earth, Planets and Space, Vol.69, pp. 153, 2017.
[30] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan," Geophys. Res. Lett., Vol.25, pp. 3079-3082, 1998.
[31] E. Calais and J. B. Minster, "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake," Geophys. Res. Lett., Vol.22, pp. 1045-1048, 1995.
[32] Y. Otsuka, N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, Effendy, S. Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, "GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake," Earth Planets Space, Vol.58, pp. 159-165, 2006.
[33] T. Tsugawa, M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi, "Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS," J. Disaster Res., Vol.13, No.3, 2018.
[34] http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_e.html [accessed December 28, 2017]

Name:
Tetsuyuki Kato

Affiliation:
Director, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Address:
586 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Brief Career:
1980- Research Associate, Earthquake Research Institute, University of Tokyo
1991- Associate Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo
2000- Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo
2018- Director, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Selected Publications:
- "Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area," Geophys. Res. Lett., Vol.25, pp. 369-372, 1998.
- "Geodetic evidence of back-arc spreading in the Mariana Trough," Geophys. Res. Lett., Vol.30, p. 1625, 2003.
- "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy," Earth Planets Space, Vol.57, pp. 297-301, 2005.

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Geodetic Society of Japan (GSJ)
- Seismological Society of Japan (SSJ)
- Volcanological Society of Japan (VSJ)
- Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)
- American Geophysical Union (AGU)
- Japan Geoscience Union (JpGU)

Name:
Yukihiro Terada

Affiliation:
Honorary Professor and Visiting Professor, National Institute of Technology, Kochi College

Address:
200-1 Monobe-otsu, Nankoku, Kochi 783-8508, Japan

Brief Career:
1972- Researcher, Technical Research Institute, Hitachizosen Corp.
2006- Professor, National Institute of Technology, Kochi College
2015- Honorary Professor and Visiting Professor, National Institute of Technology, Kochi College

Selected Publications:
- "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," Proc. of the Int. Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), IAG Symposia 145, pp. 145-153, 2015.
- "Long-term mooring chain system durability of the GPS tsunami-wave meter," J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol.70, No.1, pp. 13-18, 2014 (in Japanese).

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Japan Geoscience Union (JpGU)
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE)
- Japanese Society of Non-Destructive Inspection (JSNDI)

Name:
Keiichi Tadokoro

Affiliation:
Associate Professor, Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Address:
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Brief Career:
2000-2006 Research Associate, Nagoya University
2006- Associate Professor, Nagoya University

Selected Publications:
• K. Tadokoro, R. Ikuta, T. Watanabe, M. Ando, T. Okuda, S. Nagai, K. Yasuda, and T. Sakata, "Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan," Geophys. Res. Lett., Vol.39, L10306, 2012.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Seismological Society of Japan (SSJ)
• Geodetic Society of Japan (GSJ)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Natsuki Kinugasa

Affiliation:
Researcher, Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Address:
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Brief Career:
2017- Researcher, Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University

Selected Publications:
• "Mitigation of Ionospheric Effect on Multi-GNSS Positioning with Ionosphere Delay Estimation Using Single-Frequency Measurements of Selected Satellites," J. of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Vol.49, No.2, pp. 93-100, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
• Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)
• Japan Geoscience Union (JpGU)

Name:
Akira Futamura

Affiliation:
Associate Professor, National Institute of Technology, Yuge College

Address:
1000 Yugeshimoyuge, Kamijima-cho, Ochi-gun, Ehime 794-2593, Japan

Brief Career:
2000 Research Associate, National Institute of Technology, Yuge College
2005 D.Sc., Received from Ehime University
2008 Associate Professor, National Institute of Technology, Yuge College

Selected Publications:
• "Current, Water Exchange and Heat Budget in the Stratified Region of Hiuchi-Nada," Oceanography in Japan, Vol.14, No.3, pp. 429-440, 2005.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Oceanographic Society of Japan
• Japan Institute of Navigation (JIN)

Name:
Morio Toyoshima

Affiliation:
Space Communications Laboratory, Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Address:
4-2-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
1994 Joined Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications
1999-2003 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
2004-2005 Guest Scientist, Vienna University of Technology, Austria
2011- Director of Space Communications Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
• "Far-field pattern measurement of an onboard laser transmitter by use of a space-to-ground optical link," Applied Optics, Vol.37, No.10, pp. 1720-1730, 1998.
• "Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.53, No.2, pp. 842-850, 2005.
• "Atmospheric turbulence-induced fading channel model for space-to-ground laser communications links," Optics Express, Vol.19, No.17, pp. 15965-15975, 2011.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
• Optical Society of America (OSA)
• Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
• Japan Society for Aeronautical and Space Science (JSASS)

Name:
Shin-ichi Yamamoto

Affiliation:
Technical Expert, Space Communications Laboratory, Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
1975 Radio Research Laboratory Ministry of Posts and Telecommunications (now, National Institute of Information and Communications Technology: NICT)
1990- Engaged in research on mobile satellite communications using ETS-V, ETS-IV, COMETS and ETS-VIII satellite.

Name:
Mamoru Ishii

Affiliation:
Space Environment Laboratory, Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
1993 Graduated Geophysical Institute, Kyoto University
1993-1994 Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Max-Planck Institute for Aeronomy
1994 Joined Communications Research Laboratory (former National Institute of Information and Communications Technology)
2013 Director, Space Environment Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
- "Japanese space weather research activities," Space Weather, Vol.15, pp. 26-35, 2017.
- "Extreme Space Weather Research in Japan," Extreme Events in Geospace 1st Edition, Elsevier, 9780128127018, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)

Name:
Takuya Tsugawa

Affiliation:
Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
2004 Post Doctoral Research Fellow, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Research Fellow, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2006 Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Research Fellow, Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology
2007 Joined National Institute of Information and Communications Technology
2016 Research Manager, National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
- "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth, Planets, and Space, Vol.63, pp. 875-879, 2011.
- "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," Geophys. Res. Lett., Vol.34, L22101, 2007.

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)

Name:
Michi Nishioka

Affiliation:
Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
2009 Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Research Fellow
2009 Visiting Scholar, Institute for Scientific Research, Boston College
2010 Researcher, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2011 Joined National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
- M. Nishioka, T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and f_0F_2 statistics," Space Weather, Vol.15, pp. 228-239, 2017.
- M. Nishioka, T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado," Geophys. Res. Lett., Vol.40, pp. 5581-5586, 2013.

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)

Name:
Kenichi Takizawa

Affiliation:
National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Address:
3-4 Hikarino-oka, Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

Brief Career:
2003 Joined National Institute of Information and Communications Technology
2016- Research Manager, Wireless System Laboratory, Wireless Research Institute

Selected Publications:
• "Detection Capability of Downlink Signals in Mobile WiMAX and 3GPP LTE with an FFT-Based UWB Receiver," IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E96-A, No.1, pp. 285-292, 2013.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Name:
Yoshinori Shoji

Affiliation:
Meteorological Research Institute

Address:
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

Brief Career:
1986 Graduated from Meteorological College
1986- Becoming Employed by Japan Meteorological Agency
1997- Assigned to Meteorological Research Institute

Selected Publications:
• "Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan," Earth, Planets and Space, Vol.69, Article No.153, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Meteorological Society of Japan (MSJ)
• Geodetic Society of Japan (GSJ)
• Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)

Name:
Hiromu Seko

Affiliation:
Head, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Address:
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

Brief Career:
1989 Researcher, Meteorological Research Institute (MRI), Japan Meteorological Agency (JMA)
2000 Senior Researcher, MRI, JMA
2013 Head, MRI, JMA

Selected Publications:
• "Data Assimilation Experiments of Precipitable Water Vapor using the LETKF system -An intense rainfall event over Japan 28 July 2008," Tellus A, Vol.63, pp. 402-412, 2011.
• "Improvement of rainfall forecast by assimilations of ground-based GPS data and radio Occultation data," SOLA, Vol.6, pp. 81-84, 2010.
• "Impacts of GPS-derived water vapor and radial wind measured by Doppler radar on numerical Prediction of Precipitation," J. Meteor. Soc. Japan, Vol.82, pp. 473-489, 2004.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Meteorological Society of Japan (MSJ)
• American Meteorological Society (AMS)

Paper:

Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS

Takuya Tsugawa*1,†, Michi Nishioka*1, Mamoru Ishii*1, Koruyanai Hozumi*1, Susumu Saito*2, Atsuki Shinbori*3, Yuichi Otsuka*3, Akinori Saito*4, Suhaila M. Buhari*5, Mardina Abdullah*6, and Pornchai Supnithi*7

*1Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan
†Corresponding author, E-mail: tsugawa@nict.go.jp
*2Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port, and Aviation Technology, Tokyo, Japan
*3Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan
*4Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan
*5Geomatic Information Research Group, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia
*6Space Science Centre (ANGKASA) & Department of Electrical, Electronic & Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia
*7Telecommunications Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
[Received November 29, 2017; accepted March 22, 2018]

Two-dimensional ionospheric total electron content (TEC) maps have been derived from ground-based Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver networks and applied to studies of various ionospheric disturbances since the mid-1990s. For the purpose of monitoring and researching ionospheric conditions and ionospheric space weather phenomena, we have developed TEC maps of areas over Japan using the dense GNSS network, GNSS Earth Observation NETwork (GEONET), which consists of about 1300 stations and is operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). Currently, we are providing high-resolution, two-dimensional maps of absolute TEC, detrended TEC, rate of TEC change index (ROTI), and loss-of-lock on GPS signal over Japan on a real-time basis. Such high-resolution TEC maps using dense GNSS receiver networks are one of the most effective ways to observe, on a scale of several 100 km to 1000 km, ionospheric variations caused by traveling ionospheric disturbances and/or equatorial plasma bubbles, which can degrade single-frequency and differential GNSS positioning/navigation. We have collected all the available GNSS receiver data in the world to expand the TEC observation area. Currently, however, dense GNSS receiver networks are available in only limited areas, such as Japan, North America, and Europe. To expand the two-dimensional TEC observation with high resolution, we have conducted the Dense Regional and Worldwide International GNSS TEC observation (DRAWING-TEC) project, which is engaged in three activities: (1) standardizing GNSS-TEC data, (2) developing a new high-resolution TEC mapping technique, and (3) sharing the standardized TEC data or the information of GNSS receiver network. We have developed a new standardized TEC format, GNSS-TEC EXchange (GTEX), which is included in the Formatted Tables of ITU-R SG 3 Databanks related to Recommendation ITU-R P.311. Sharing the GTEX TEC data would be easier than sharing the GPS/GNSS data among those in the international ionospheric researcher community. The DRAWING-TEC project would promote studies of medium-scale ionospheric variations and their effect on GNSS.

Keywords: GNSS, ionosphere, total electron content, TEC, loss-of-lock

1. Introduction

The Earth's atmosphere at an altitude of 60 km or higher is partially ionized by solar EUV and a part of it is present as ionized gas (plasma). This plasma-rich region in the atmosphere is called the ionosphere. The electron density in the ionosphere is generally highest at an altitude of about 300 km. The ionosphere is well known to affect trans-ionospheric transmissions with satellites for communications, positioning, and navigation purposes. The ionosphere varies greatly under the influence of the activities of the sun, the magnetosphere, and the lower atmosphere, and it sometimes interferes with satellite communications and degrades precise satellite positioning. It is known that errors in the Global Navigation Satellite System (GNSS), including GPS, are caused by several factors, including satellite clock error, trajectory error, or multi-path effects, but the most significant factor is the propagation delay of GNSS signals in the ionosphere. Recently, in the multi-GNSS era, considerable efforts have been directed toward research on the ionospheric variations and their effects on precise GNSS positioning and navigation. A precise ionospheric total electron content (TEC) map or model is required to study ionospheric variations and to improve the ionospheric delay correction for

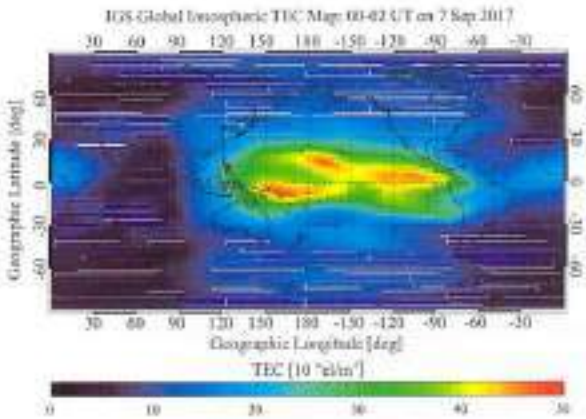


Fig. 1. An example IGS TEC map with spatial resolution of 5° in longitude and 2.5° in latitude, with a temporal resolution of 2 hours.

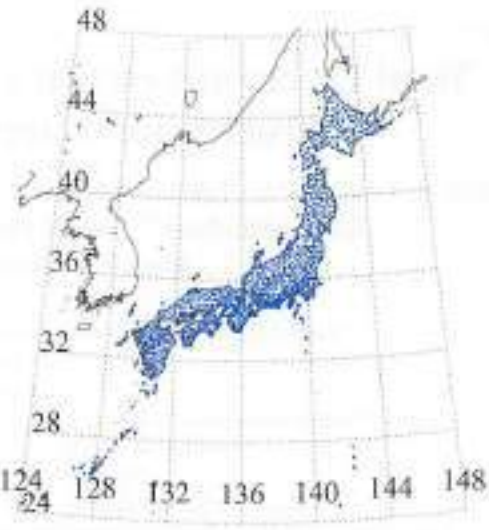


Fig. 2. Distribution of GPS stations of GEONET.

GNSS positioning.

Figure 1 is an example of the ionospheric TEC maps that are generally used, the Global Ionospheric Map (GIM) in the IONosphere map EXchange (IONEX) format, provided by the International GNSS Service (IGS) [1]. GIM TEC data cover the global ionosphere with a spatial resolution of 5° in longitude and 2.5° in latitude, with a temporal resolution of 2 hours. GIM is useful to study ionospheric variations with 1000 km to global scale (hereinafter referred to as "large-scale"), variations such as diurnal variation and the equatorial ionization anomaly, which is electron density enhancement located away from the magnetic equator.

Ionospheric variations on a scale of several 100 km to 1000 km (hereinafter referred to as "medium-scale"), caused by travelling ionospheric disturbances (TIDs) and/or equatorial plasma bubbles (EPBs) frequently observed at mid- and low-latitudes, can degrade single-frequency and differential GNSS positioning/navigation. The GIM does not have sufficient spatial and temporal resolution to reproduce these medium-scale ionospheric variations. To clarify generation and propagation mechanisms of medium-scale ionospheric phenomena and to investigate their effects on GNSS positioning, dense and wide-coverage ionospheric observations and the corresponding TEC mapping techniques are needed.

We have developed high-resolution, two-dimensional TEC observation systems using a dense GNSS receiver network in Japan, and we have conducted a project to expand their observation area using all the available GNSS receiver networks with the collaboration of space weather researchers in the world since 2011. In this paper, we introduce our high-resolution ionospheric TEC observations using dense GNSS receiver networks, including an outline of the project, named Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS-TEC observation (DRAWING-TEC).

2. High-Resolution TEC Observations over Japan

We have observed ionospheric disturbances using two-dimensional maps of TEC derived from the dense GNSS network, GNSS Earth Observation Network System (GEONET), which consists of about 1300 GPS receivers and is operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). The distribution of GNSS stations of GEONET is shown in **Fig. 2**. Currently, using only GPS data, we routinely provide two-dimensional maps of absolute TEC and detrended TEC with 60-, 30-, and 15-minute windows over Japan. The maps have a spatial resolution of 0.15° in longitude and 0.15° in latitude, with a temporal resolution of 30 seconds. The absolute TEC values were derived by applying a technique in which a weighted-least-square fitting is used to determine unknown instrumental biases, assuming that the hourly TEC average is uniform within the area covered by a given GPS receiver [2]. Detrended TEC data are derived from the perturbation components of TEC data by subtracting the running average of the corresponding time window for each line-of-sight (LOS) between satellite and receiver. Such a TEC mapping is the direct measure of ionospheric structures and useful to reveal spatial structures and temporal evolutions of medium-scale ionospheric phenomena such as TID, as shown in **Fig. 3** [3,4]. These data and quick-look maps from 1997 to the present are available on the NICT website (http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/).

Figure 4 shows two-dimensional maps of absolute TEC (left), rate of TEC change index (ROTI) (middle), and loss-of-lock on GPS signal (LOL) rate during the time period 12:20–13:00 UT (21:20–22:00 JST) on Feb. 12, 2000, just after the main phase of a strong geomagnetic storm [5]. ROTI is the standard deviation of time differential TEC in five minutes, often used as the index of

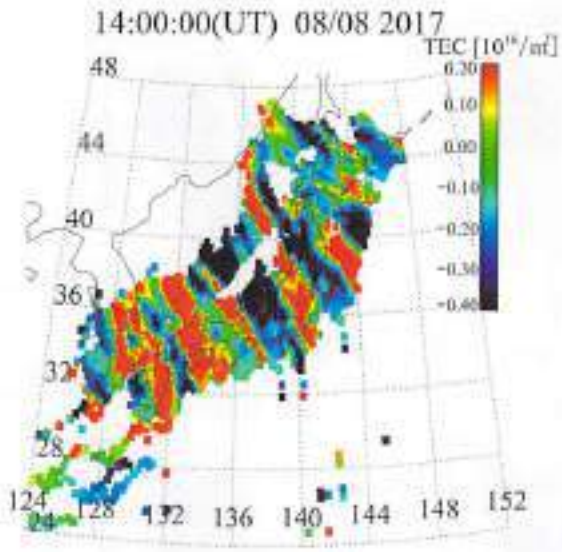


Fig. 3. High-resolution detrended TEC map with 60-min window derived using GEONET data. Typical nighttime medium-scale TIDs are captured over Japan.

ionospheric irregularity on a scale of several tens of km and considering the velocity of a LOS ionospheric pierce point at an assumed ionospheric height at 300 km [6, 7]. The LOL rate is the occurrence rate of cycle slip in GPS L1 or L2 signals for 5 minutes and derived using the loss of lock indicator in the Receiver INdependent EXchange format (RINEX) data of GPS. Fresnel-scale ionospheric irregularities, that is, several 100-m scale for GPS L1 and L2 signals, could cause GPS scintillation and, in the worst case, result in LOL on GPS signals. Although the LOL could be caused not only by several 100-m scale ionospheric irregularities but also by the multi-path effect or performance of the GPS receiver/antenna system, an increase in LOL rate occurring simultaneously in many receivers could be a proxy of the ~100-m scale ionospheric irregularity. Small-scale structures, such as ionospheric irregularities with spatial scale from several tens of km down to several meters, may be generated by the nonlinear cascading process from the medium-scale and/or large-scale ionospheric structures. These small-scale structures are associated with a localized but intense ionospheric plasma-density gradient and can scintillate the GNSS radio wave. The small-scale structures can be monitored by the indices of GNSS data fluctuations, such as the ROTI and LOL rate. The dense GNSS network is helpful to monitor the location and motion of areas of the enhanced small-scale irregularities as well.

In **Fig. 4**, background absolute TEC values at 12:20 UT (21:20 JST) are 60 TECU (1 TECU = 10^{16}/m^2) or more in southern Japan and decrease with latitude. This TEC level is more than double the normal level in this season. The arrows indicate TEC depletion regions that have a zonal scale of several 100 km and extend in the meridional direction. These TEC depletion regions move eastward at ~50 m/s. Corresponding to the TEC depletions, ROTI enhancements are seen in the same regions and move eastward at the same velocity. This indicates that ionospheric irregularities of several tens of kilometer scale exist in the TEC depletion regions. Similar to ROTI enhancements, LOL rate enhancements are seen in the same regions and move eastward at the same velocity. The LOL rate maps in **Fig. 4** show that LOL occurs over a wide area, indicating that many receivers suffer LOL for a significant number of GPS satellites simultaneously. Therefore, it is reasonable to consider that these LOL rate enhancements are caused by GPS scintillations due to the ionospheric irregularities.

Summarizing the ionospheric events in **Fig. 4**, TEC depletions with zonal widths of several 100 km and extend in the meridional direction are seen to move eastward in southern Japan. Ionospheric irregularities of both several tens of km scale and several 100-m scale occurred in these TEC depletion regions. These features are consistent with that of EPB frequently observed at low latitudes after sunset. EPBs are low density plasma "bubbles" in the ambient high density ionospheric plasma. They are basically caused by the nonlinear growth of Rayleigh-Taylor instability, which is enhanced after sunset due to local uplift of the bottomside ionosphere resulting from the dynamo effect by F-region neutral winds and the effect of rapid changes in E-region electric conductivity at sunset [8]. These bubbles intrude into the topside ionosphere, extending over several 1000 km along the magnetic field line. The plasma bubbles generally drift eastward with the background neutral wind. Although there is no strong relationship between the occurrence of EPB and geomagnetic storms in the climatology of EPB [9], the ionospheric disturbances observed in Japan and seen in **Fig. 4** are the EPB that developed to high altitude/latitude and reached southern Japan when the background ionosphere was extremely uplifted at medium and low latitudes due to the intense enhancement of an eastward electric field during the geomagnetic storms.

In addition to TID and EPB, high-resolution TEC maps can reveal ionospheric variations induced by lower atmospheric waves that are triggered by intense earthquakes. **Fig. 5** shows concentric waves detected in the detrended TEC map with a 10-min window about 70 minutes after the 2011 Tohoku earthquake [10]. These concentric waves in the ionosphere began to appear about 7 minutes after the onset of the earthquake at 14:46 JST (05:46 UT). The center of the concentric waves is located about 170 km to the southeast of the epicenter [11] (indicated by a star in **Fig. 5**) and near the estimated tsunami source [12]. Although the estimated extent of the focal region of the mainshock, a region of at least 450 km north-south and 200 km east-west [13], makes it necessary to consider the spatial scale of the mainshock and the tsunami source to reveal their precise positional relationship, it would be valid to consider the center of the ionospheric variation to be located southeast of the starting point of the rupture and located closer to the center of the estimated tsunami source area. This event helps to clarify the relationship between the ionosphere and the lower

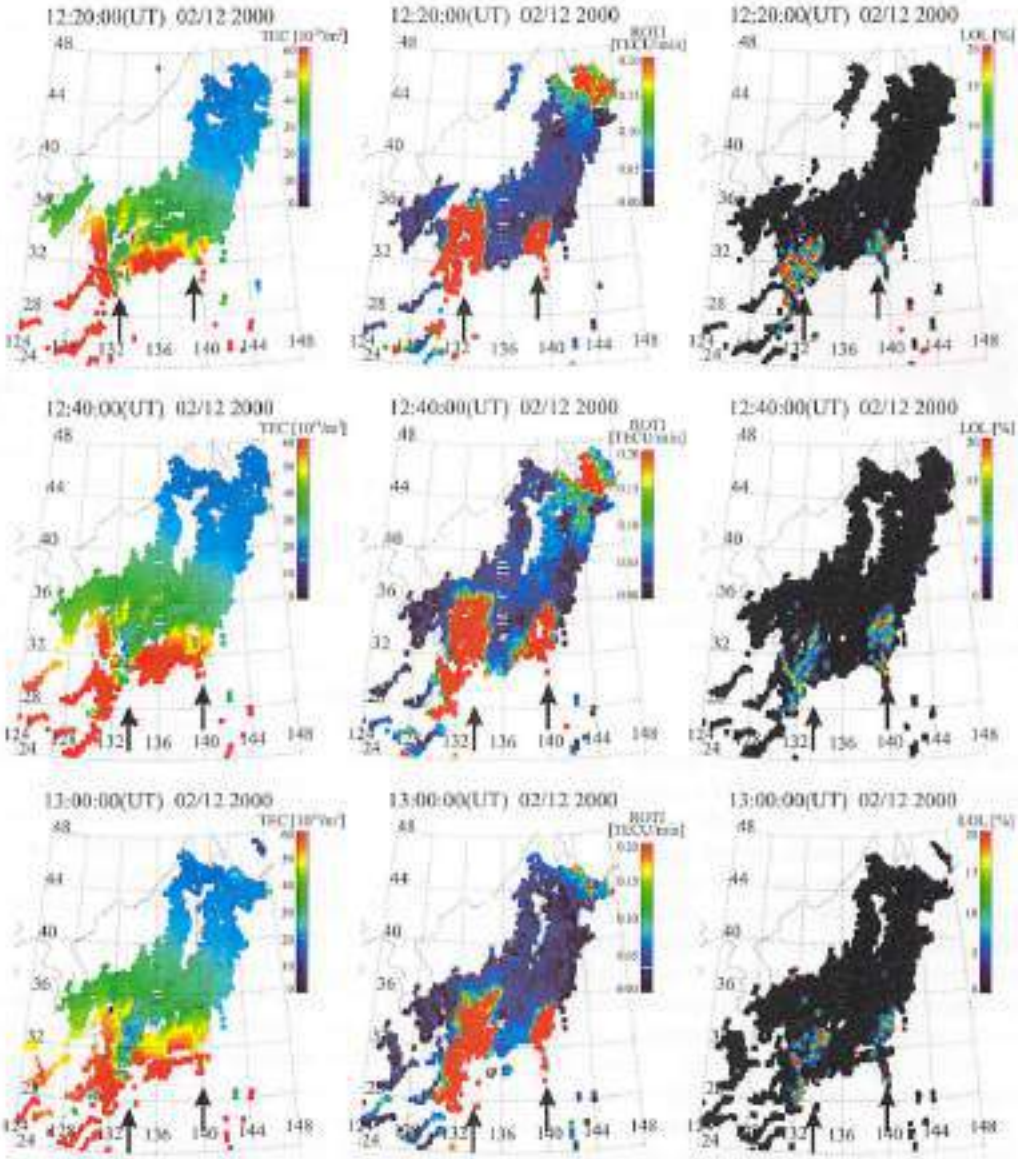


Fig. 4. Two-dimensional maps of absolute TEC (left), ROTI (middle), and loss-of-lock rate (right) 12:20–13:00 UT (21:20–22:00 JST) after the main phase of a strong geomagnetic storm on Feb. 12, 2000. Eastward moving plasma bubble structures designated by arrows were captured in absolute TEC maps.

atmosphere because of the clear causal connection. In addition, considering the fact that the ionosphere started to fluctuate about 7 minutes after the earthquake and that the center of the ionospheric variations corresponds closely to the tsunami source, further development of real-time ionospheric observation could allow us to monitor the tsunami arrival over a wide area. In order to clarify the quantitative relationship between a tsunami and ionosphere variation, it is necessary to research the generation and propagation mechanism of atmospheric waves while taking account of the spatial scale of the tsunami source.

3. DRAWING-TEC Project

As mentioned in the previous section, high-resolution, two-dimensional ionospheric density mapping using dense GNSS receiver networks is a powerful tool for monitoring medium-scale ionospheric variations, such as EPB and TIDs. We have collected all the available GNSS receiver data in the world to expand their observation area. **Fig. 6** shows the distribution of the GNSS stations as of 2017, more than 8000 stations whose data are collected by NICT. These GNSS data are provided by the International Geoscience Services (IGS), the University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), and other global and regional data centers, totaling more than 50 data providers in all.

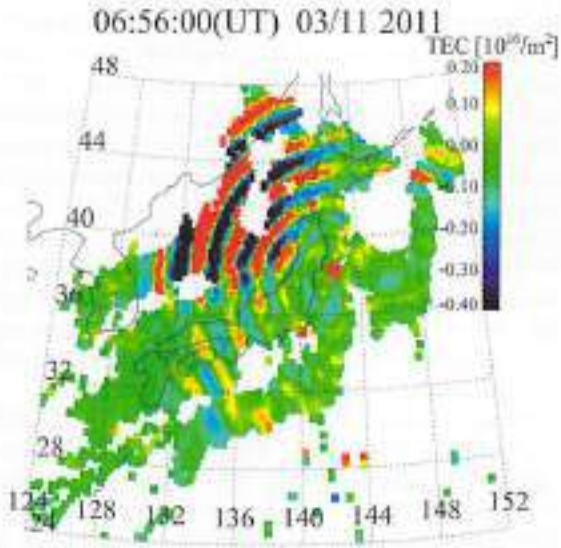


Fig. 5. Concentric waves detected by the detrended TEC map with 10-min window after the 2011 Tohoku earthquake. The star indicates the epicenter of the earthquake.

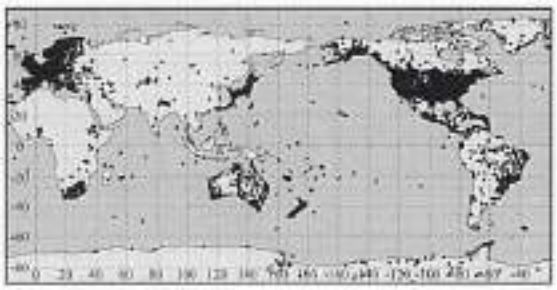


Fig. 6. Distribution of worldwide GNSS stations (more than 8000 stations as of 2017) whose data are routinely collected by NICT.

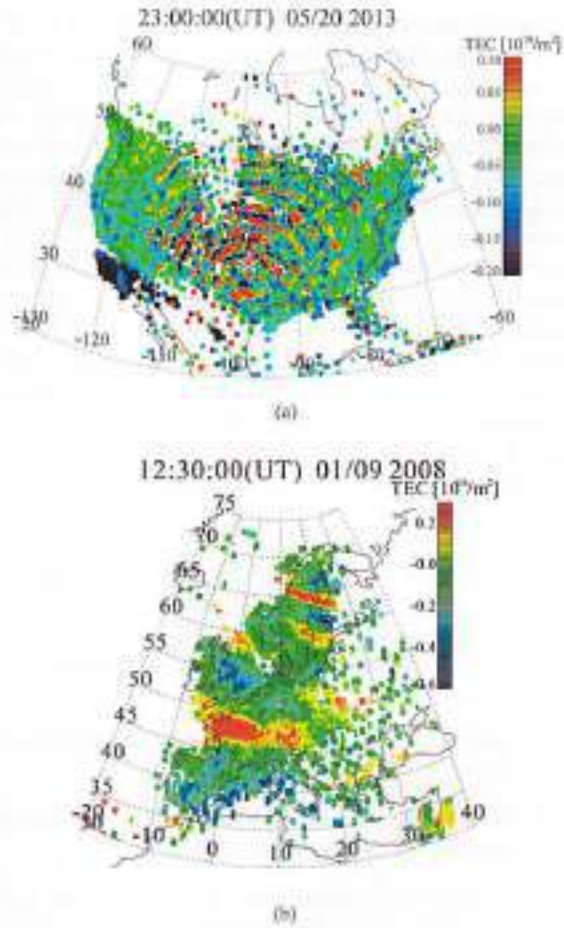


Fig. 7. (a) Concentric waves after the 2013 Moore EF5 Tornado over North America and (b) typical daytime MSTID over Europe, detected by the high-resolution detrended TEC maps.

In addition to Japan, dense regional GNSS receiver networks are available in North America and Europe. We have also provided high-resolution TEC maps of North America [14] and Europe [15].

Figure 7(a) shows concentric waves observed in the 20-min detrended TEC map over North America after the 2013 Moore EF5 tornado [16]. They were observed for more than 7 hours throughout North America. A comparison of the TEC observations and infrared cloud image from the GOES satellite indicates that the concentric waves are caused by supercell-induced atmospheric gravity waves. This observation is the first clear evidence of a severe meteorological event causing atmospheric waves propagating upward in the upper atmosphere and reaching the ionosphere.

Figure 7(b) shows a typical daytime medium-scale TID (MSTID) observed in the 60-min detrended TEC map over Europe [15]. MSTID can generally be classified into two types, nighttime and daytime MSTIDs, according to their appearance time and propagation direction. The typical nighttime MSTID shown in **Fig. 2** has a wavefront in the northwest-southeast direction and propagates southwestward in the northern hemisphere. On the other hand, the typical daytime MSTID has a wavefront elongated almost zonally and propagates almost southward in the northern hemisphere. Several characteristics of these MSTIDs, such as preferred directions and appearance times, are not adequately explained by the classical theory proposed by Hines [17], in which MSTIDs are an ionospheric manifestation of atmospheric gravity waves with great amplitude neutral wind oscillation. Recent observational and numerical simulation studies have suggested that the nighttime MSTID could be generated by electrodynamical forces with coupling between ionospheric E- and F-regions [18, 19]. Comparing characteristics of MSTIDs among different longitudes and latitudes using these high-resolution TEC maps can contribute to studies of mechanisms for generating both nighttime and daytime MSTIDs.

Currently, however, dense GNSS receiver networks are available only at limited areas, such as Japan, North

America, and Europe, as shown in Fig. 6. More GNSS receiver data are needed, especially in the sparse regions, namely, Asia, Africa, and the equatorial and polar regions, to study the overall spatial structure and temporal evolution of medium-scale ionospheric variations such as EPB and TID. The difficulty in collecting GNSS receiver network data in these regions may be attributed mainly to two reasons: one is a lack of information sharing of domestic GNSS receiver networks in the international ionospheric researcher community and the other is government and/or data provider policies to provide GNSS data only to domestic users. The second reason would be because GNSS receiver data include phase and pseudorange information that is quite valuable both commercially and militarily for various applications, such as precise positioning/navigation, meteorological observation, and ionospheric observation. In order to overcome this difficulty and to expand the high-resolution TEC observation area, we started a project, the Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS TEC Observation (DRAWING-TEC) in 2011.

The DRAWING-TEC project mainly consists of three subprojects:

1. Standardizing the GNSS-TEC data format for high-resolution TEC maps
2. Developing a new high-resolution TEC mapping technique using the standardized TEC data
3. Sharing the standardized TEC data and the data or information of GNSS receiver networks among the international ionosphere and GNSS researcher community.

Regarding item 1, one of the best-known standardized formats for GNSS-TEC data is the IONEX format [1]. Although the IONEX format data cover the global ionosphere, they describe only vertical TEC map data with a spatial resolution of 5° in longitude and 2.5° in latitude with a temporal resolution of 2 hours. Using the IONEX data, it is difficult to describe higher resolution TEC maps corresponding to the density of GPS/GNSS receiver networks. It is thus necessary to make a different format that could be applied in order to make the resolution of TEC maps flexible. We have developed a new standardized TEC format, GNSS-TEC EXchange (GTEX). The GTEX data format describes slant TEC for each GNSS satellite and is filed per day and per receiver, as is RINEX, the standardized GPS/GNSS format. The GTEX TEC format makes it possible to derive high-resolution TEC maps corresponding to the density of GNSS receiver networks, as shown in Figs. 2 and 6. Sharing the TEC data in the GTEX format would be easier than sharing the GPS/GNSS data among the members of the international ionospheric researcher community because the GTEX TEC data exclude information on GPS/GNSS data, except for information available as ionospheric observations. NICT, as a Japanese delegate to the International Telecommunication Union (ITU), first proposed the GTEX as a format for the international exchange and sharing of GNSS-TEC data. NICT submitted a contribution paper to meetings of Working Party 3J (ionospheric propagation and radio noise), Study Group 3 (SG3, radiowave propagation) of ITU-R in Geneva, Switzerland in Jun. 2013. The GTEX format was successfully approved as one of the standard data formats for trans-ionospheric data and included in Recommendation ITU-R P.311-16 Annex 1 in 2015 [20]. It was used by the Ionospheric Studies Task Force of the International Civil Aviation Organization (ICAO) Asia-Pacific Region as a standard format for sharing TEC data in the region to characterize the ionospheric behavior for aeronautical applications of GNSS [21].

Regarding item 2, we have developed the RNX2GTEX application in Linux and Windows versions to convert GPS/GNSS data to GTEX TEC data. Such applications are necessary to increase the numbers of GTEX-TEC users and data and to promote ionospheric studies. RNX2GTEX for Linux/Unix consists of a set of programs written in Fortran 77 and a shell script. RNX2GTEX for Windows is an application for creating GTEX data files from RINEX data using an Explorer-like GUI. These applications are open to the public and are available on the DRAWING-TEC website: http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC.

Item 3 would be the most important to expand the TEC observation area and to promote studies of medium-scale ionospheric variations and their effect on GNSS. We have developed the GTEX database (ver. 1.0), which was derived from all the available online GNSS receiver data from 2000 to the present. This database is available via the DRAWING-TEC website on a request basis. NICT first conducted to form the Asia-Oceania Space Weather Alliance (AOSWA) [22] to share data and other information related to space weather in the Asia and Oceania regions. The 1st AOSWA workshop was held in Chiang Mai, Thailand in February 2012, hosted by NICT and Chiang Mai University. In this workshop, 76 space weather researchers from 30 organizations in 10 countries in the Asia-Oceania region discussed data and information of TEC and GNSS receiver networks. Since the first AOSWA workshop, we have started GTEX data sharing with some foreign institutes, such as King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in Thailand and the Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) in Malaysia, to develop dense wide-coverage TEC maps, especially of the Asia-Oceania region.

One successful outcome of the DRAWING-TEC project has been the detection of EPB structures in two-dimensional TEC and ROTI maps in the Southeast Asia region. These maps were produced using 127 GNSS stations from the Malaysia Real-Time Kinematics GNSS Network (MyRTKnet), the Sumatran GPS Array (SuGAr), and the IGS International GNSS Service (IGS) networks, as shown in Fig. 8 [23]. Although the equatorial region is one of the regions where it is difficult to use dense GNSS receiver network data for ionospheric research, reference [23] utilized these dense GNSS receiver networks in Southeast Asia to study the

two-dimensional structure of ionospheric plasma irregularities and revealed latitudinal/longitudinal variations of EPBs, including the spatial periodicity of the EPBs, which could be associated with a wavelength of the quasiperiodic structures on the bottom side of the ionosphere seeding the Rayleigh-Taylor instability.

KMITL plays an important role in collecting GNSS data from different networks in Thailand. Currently, there are 22 GNSS stations operated by Japanese partners, including NICT, Kyoto University, and the Electronic Navigation Research Institute (ENRI) as well as Thai partners including KMITL, Chulalongkorn University, Chiang Mai University, the Department of Public Works and Town and Country Planning (DPT), and Aerothai. GNSS and GTEX data are available on the Thai Space Weather Information Center website: http://iono-gnss.kmitl.ac.th. By employing the TEC data in Thailand, the predawn plasma bubble cluster was detected after the reported disappearance of plasma bubbles [24].

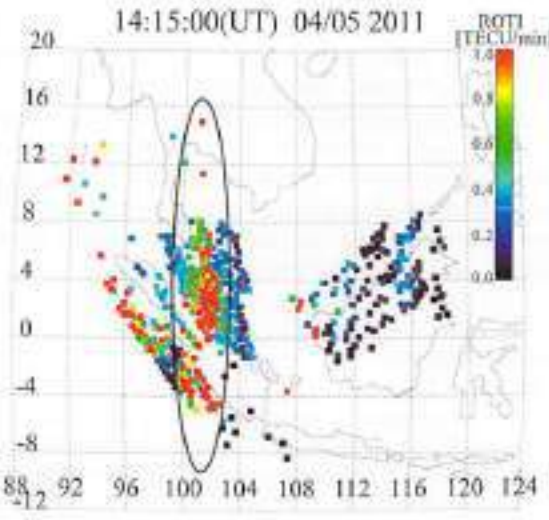


Fig. 8. A clear EPB structure (designated by an oval) detected in a two-dimensional ROTI map of Southeast Asia produced using 127 GNSS stations.

4. Summary and Future Perspectives

Several medium-scale (100 km to 1,000 km scale) ionospheric variations caused by TID and EPB can degrade GNSS positioning/navigation. Medium-scale concentric waves have recently been detected after huge earthquakes and severe meteorological events. However, these medium-scale ionospheric variations have not been sufficiently studied due to the lack of dense, wide-area ionospheric observations. We have developed a high-resolution, two-dimensional TEC observation system using dense regional GNSS receiver networks and studied the medium-scale ionospheric variations. It is necessary to expand the observation area for the study of the overall spatial structure and temporal evolution of ionospheric variation and their effects on GNSS positioning and navigation. We are conducting the DRAWING-TEC project to expand the observation area using all the available GNSS receiver networks through the collaboration of ionosphere and GNSS researchers in the world. This project consists of (1) standardizing GNSS-TEC data, (2) developing dense TEC mapping techniques, and (3) sharing the standardized TEC or GNSS receiver data throughout the world. We have developed a new TEC data format, GTEX, as well as a RINEX-to-GTEX data conversion application, RNX2GTEX. GTEX has been included in Recommendation ITU-R P.311-16 Annex 1. GTEX and/or GNSS receiver data sharing has expanded in some regions, such as Southeast Asia, and has revealed new characteristics of EPB.

Although we believe the DRAWING-TEC project will promote studies of medium-scale ionospheric variations and their effect on GNSS, there are still some challenges to their further promotion. The first one is upgrading the application to use multi-GNSS. In recent years, in addition to the United States' GPS, Japan's Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), Russia's GLONASS, the European Union's Galileo, China's BeiDou, etc., have been widely used as global satellite navigation systems. By using the data of all the available GNSS, it becomes possible to observe the ionosphere more broadly and more densely. Currently, however, the RNX2GTEX application only supports GPS data. It is necessary to upgrade it for multi-GNSS compatibility. The GTEX format for multi-GNSS data may also need to be optimized, though the current version of GTEX format can support multi-GNSS. One of the other challenges is the use of GNSS data over the ocean, which is a large area devoid of high-resolution ionospheric observations. Permanently operated GNSS receiver networks are generally limited to land areas with much social or crustal activity. Although there are a few GNSS buoy networks, such as the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) [25], to monitor ocean waves, their distribution is limited to narrow coastal areas (less than 20 km from the coast), and their recorded data are currently limited to wave information. Reference [26] proposes the new idea of establishing a dense buoy network in the western Pacific by implementing multi-instrument buoys that include GNSS receivers far from the coast. If the GNSS observation data of such a wide-coverage, dense GNSS buoy network becomes available, it will be a breakthrough system not only for tsunami monitoring but also for ionospheric monitoring, which can contribute to the estimation of tsunami source areas and the forecasting of tsunami arrivals.

GNSS positioning/navigation has become an indispensable infrastructure not only for military and aeronautical applications but also for public use in recent years, as car navigation systems and smartphones have become popular. In addition, more precise and uninterrupted GNSS navigation is required in the fields of agriculture, construction, mining, and self-driving cars. Frequently observed medium-scale ionospheric variations

can degrade GNSS positioning/navigation and, in the worst case, make it unusable due to loss-of-lock on GNSS signals. For the safe use of GNSS positioning/navigation and the improvement of its precision and availability, it is necessary to monitor the ionospheric variations more precisely over a wider area and produce more adequate augmentation information. The DRAWING-TEC project can contribute to the safe and advanced use of GNSS in society now and in the future.

Acknowledgements

TEC and ROTI maps in this paper were derived using GNSS receiver data provided by GSI, UNAVCO, IGS, SOPAC, CORS, EPN, BKGE, OLG, IGNE, DUT, ASI, ITACYL, ESEAS, SWEPOS, NMA, BIGF, MyRTKnet, and SuGAr. The GNSS data collection and processing were performed with the NICT Science Cloud. This work was partially supported by JSPS KAKENHI Grants Number JP16H06310, JP15H05813, and JP16H06286.

References:

[1] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. García-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. C. Schaer, and A. Krankowski, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," J. of Geod., Vol.83, pp. 263-275, doi:10.1007/s00190-008-0266-1, 2009.

[2] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A New technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," Earth Planets and Space, Vol.54, pp. 63-70, 2002.

[3] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan," Geophys. Res. Lett., Vol.25, pp. 3079-3082, 1998.

[4] T. Tsugawa, N. Kotake, Y. Otsuka, and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review," GPS Solut, Vol.11, pp. 39-144, doi:10.1007/s10291-006-0045-5, 2007.

[5] G. Ma and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes," Geophys. Res. Lett., Vol.33, L21103, doi:10.1029/2006GL027512, 2006.

[6] T. L. Beach and P. M. Kintner, "Simultaneous Global Positioning System observations of equatorial scintillations and total electron content fluctuations," J. of Geophys. Res., Vol.104, Issue A10, pp. 22553-22565, 1999.

[7] M. Nishioka, A. Saito, and T. Tsugawa, "Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global groundbased GPS receiver networks," J. of Geophys. Res., Vol.113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605, 2008.

[8] B. G. Fejer and M. C. Kelley, "Ionospheric irregularities," Rev. of Geophys., Vol.18, pp. 401-454, 1980.

[9] S. M. Buhari, M. Abdullah, T. Yokoyama, Y. Otsuka, M. Nishioka, A. M. Hasbi, S. A. Buhari, and T. Tsugawa, "Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.122, doi:10.1002/2016JA023202, 2017.

[10] T. Tsugawa, A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, and K. T. Murata, "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, Vol.63, pp. 875-879, 2011.

[11] U. S. Geological Survey, http://earthquake.usgs.gov/ [accessed March 14, 2011]

[12] Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, "Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, Vol.63, pp. 815-820, 2011.

[13] Japan Meteorological Agency, http://www.jma.go.jp/ [accessed November 27, 2017]

[14] T. Tsugawa, Y. Otsuka, A. J. Coster, and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," Geophys. Res. Lett., Vol.34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663, 2007.

[15] Y. Otsuka, K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, "GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe," Annales Geophysicae, Vol.31, pp. 163-172, doi:10.5194/angeo-31-163-2013, 2013.

[16] M. Nishioka, T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado," Geophys. Res. Lett., Vol.40, pp. 5581-5586, doi:10.1002/2013GL057963, 2013.

[17] C. O. Hines, "Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights," Can. J. of Phys., Vol.38, pp. 1441-1481, 1960.

[18] Y. Otsuka, F. Ono, K. Shiokawa, T. Ogawa, M. Yamamoto, and S. Fukao, "Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E-region field-aligned irregularities at midlatitude," J. of Geophys. Res., Vol.112, A06317, doi:10.1029/2005JA011548, 2007.

[19] T. Yokoyama and D. L. Hysell, "A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): latitudinal dependence and propagation of mediumscale traveling ionospheric disturbances," Geophys. Res. Lett., Vol.37, L08105, doi:10.1029/2010GL042598, 2010.

[20] Recommendation ITU-R P.311-16, ITU-R, 2016.

[21] S. Saito, S. Sunda, J. Lee, S. Pullen, S. Suprihadi, T. Yoshihara, M. Terkildsen, F. Locat, and ICAO APAPPIRG Ionospheric Studies Task Force, "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," GPS Solut., Vol.21, pp. 1937-1947, doi:10.1007/s/10291-017-0662-1, 2017.

[22] AOSWA, http://aoswa.nict.go.jp/ [accessed November 27, 2017]

[23] S. M. Buhari, M. Abdullah, A. M. Hasbi, Y. Otsuka, T. Yokoyama, M. Nishioka, and T. Tsugawa, "Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.119, doi:10.1002/2014JA020433, 2014.

[24] K. Watthanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, R. Tsunoda, T. Yokoyama, P. Supnithi, M. Ishii, and C. Yatini, "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.121, pp. 5868-5879, doi:10.1002/2015JA022069, 2016.

[25] Real-Time NOWPHAS, http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index_eng.html [accessed November 27, 2017]

[26] T. Kato, et al., J. Disaster Res. in this volume, 2018.

Name:
Takuya Tsugawa

Affiliation:
Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
2004 Post Doctoral Research Fellow, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Research Fellow, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2006 JSPS Research Fellow, Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology
2007- Joined National Institute of Information and Communications Technology
2016- Research Manager, National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
- "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, Vol.63, pp. 875-879, 2011.
- "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," Geophys. Res. Lett., Vol.34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663, 2007.

Academic Societies & Scientific Organizations:
- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- Japan Geoscience Union (JPGU)
- American Geophysical Union (AGU)

Name:
Michi Nishioka

Affiliation:
Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
2009 JSPS Research Fellow, Visiting Scholar, Institute for Scientific Research, Boston College
2010- Researcher, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2011- Joined National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
• M. Nishioka, T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," Space Weather, Vol.15, pp. 228-239, doi:10.1002/2016SW001536, 2017.
• M. Nishioka, T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado," Geophys. Res. Lett., Vol.40, pp. 5581-5586, 2013.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Mamoru Ishii

Affiliation:
Space Environment Laboratory, Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
1993 Graduated Geophysical Institute, Kyoto University
1993-1994 JSPS Research Fellow, Max-Planck Institute fuer Aeronomy
1994- Joined Communications Research Laboratory (former National Institute of Information and Communications Technology)
2013- Director, Space Environment Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology.

Selected Publications:
• "Japanese space weather research activities," Space Weather, Vol.15, pp. 26-35, doi:10.1002/2016SW001531, 2017.
• "Extreme Space Weather Research in Japan," N. Buzulukova ed., Extreme Events in Geospace, 1st Edition, Elsevier, 9780128127018, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Komyamat Hozumi

Affiliation:
Space Environment Laboratory, Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

Address:
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

Brief Career:
2015 Researcher, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
2015 Joined National Institute of Information and Communications Technology

Selected Publications:
• "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.121, Issue 6, pp. 5868-5879, doi:10.1002/2015JA022069, 2016.
• "Temporal change of EIA asymmetry revealed by a beacon receiver network in Southeast Asia," Earth, Planet and Space, Vol.67, No.75, doi:10.1186/s40623-015-0252-9, 2015.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• Japan Geoscience Union (JpGU)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Susumu Saito

Affiliation:
Navigation Systems Department, Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port, and Aviation Technology

Address:
7-42-23 Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo 182-0012, Japan

Brief Career:
2000 Norwegian Government Scholarship Fellow, University of Tromso
2001 Ph.D. in Physics, Nagoya University
2001-2002 COE Researcher, Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University
2003-2007 Communications Research Laboratory (From 2004, National Institute of Information and Communications Technology)
2008 Joined Electronic Navigation Research Institute (From 2016, National Institute of Maritime, Port, and Aviation Technology)
2017 Principal Researcher, Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port, and Aviation Technology

Selected Publications:
• "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," GPS Solut., Vol.21, pp. 1937-1947, doi:10.1007/s10291-017-0662-1, 2017.
• "Real-Time Ionosphere Monitoring by Three- Dimensional Tomography over Japan," J. of Institute of Navigation, Vol.64, pp. 495-504, doi:10.1002/navi.213, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• American Geophysical Union (AGU)
• Institute of Navigation (ION)
• Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)

Name:
Atsuki Shinbori

Affiliation:
Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Address:
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Brief Career:
2006 Graduate School of Geophysics, Tohoku University
2006-2009 JSPS Research Fellow, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2009-2010 Researcher, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2010-2016 Researcher, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
2016 Joined Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University
2017- Designated Assistant Professor, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Selected Publications:
• A. Shinbori, Y. Koyama, M. Nose, T. Hori, and Y. Otsuka, "Characteristics of seasonal variation and solar activity dependence of the geomagnetic solar quiet daily variation," J. of Geophys. Res., Vol.122, pp. 10796-10810, doi:10.1002/2017JA024342, 2017.
• A. Shinbori, Y. Koyama, M. Nose, T. Hori, Y. Otsuka, and A. Yutagai, "Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation," Earth Planets and Space, Vol.66, doi:10.1186/s40623-014-0155-1, 2014.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• American Geophysical Union (AGU)
• Japan Geoscience Union (JGU)

Name:
Yuichi Otsuka

Affiliation:
Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Address:
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Brief Career:
1999 COE (Center of Excellence) Researcher at Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University
1999-2011 Assistant Professor at Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2011-2015 Associate Professor at Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
2015- Associate Professor at Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Selected Publications:
• Y. Otsuka, K. Suzuki, S. Nakagawa, K. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, "GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe," Ann. Geophys., Vol.31, pp. 163-172, doi:10.5194/angeo-31-163-2013, 2013.
• Y. Otsuka, N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, Effendy, S. Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, "GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake," Earth Planets and Space, Vol.58, pp. 159-165, 2006.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Akinori Saito

Affiliation:
Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

Address:
Kitashirakawa-Oiwake-Cho, Kyoto 606-8502, Japan

Brief Career:
1995 JSPS Research Fellow, Graduate School of Science, Kyoto University
1997 COE Research Fellow, Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University
1999 Research Associate, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University
2011 Associate Professor, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

Selected Publications:
• A. Saito, T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Iyemori, M. Matsumura, S. Saito, C. H. Chen, Y. Goi, and N. Choosakul, "Acoustic resonance and plasma depletion detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," Earth Planets and Space, Vol.63, pp. 863-867, doi:10.5047/eps.2011.06.034, 2011
• Y. Hozumi, A. Saito, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, G. Murakami, K. Yoshioka, and C. H. Chen, "Global distribution of the He^+ column density observed by Extreme Ultra Violet Imager on the International Space Station," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.122, doi:10.1002/2016JA023534, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
• Japan Geoscience Union (JPGU)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Suhaila M. Buhari

Affiliation:
Geomatic Innovation Research Group, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia

Address:
81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

Brief Career:
2016 Ph.D. in Space Science, Universiti Kebangsaan Malaysia
2017 Senior Lecturer, Universiti Teknologi Malaysia

Selected Publications:
• "Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.122, doi:10.1002/2016JA023202, 2017.
• "Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia," J. of Geophys. Res.: Space Physics, Vol.119, doi:10.1002/2014JA020433, 2014.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Japan Geoscience Union (JpGU)
• American Geophysical Union (AGU)

Name:
Mardina Abdullah

Affiliation:
Space Science Centre (ANGKASA), Institute of Climate Change, Centre of Advanced Electronic and Communication Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)

Address:
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Brief Career:
1991 Engineer, Hitachi Electronics Ltd.
2006 Senior Lecturer, UKM
2007 Associate Professor, UKM
2012 Professor, UKM
2013 Head, Space Science Centre, Institute of Climate Change

Selected Publications:
• "Improving ambiguity resolution rate with an accurate ionospheric differential correction," J. of Navigation, Vol.62, pp. 151-166, 2009.
• "Comparison of GPS TEC variations with Holt-Winter method and IRI-2012 over Langkawi, Malaysia," Advances in Space Research, Vol.60, pp. 276-285, 2017.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Institution of Engineers, Malaysia (IEM)
• Institute of Navigation GPS (ION GPS)

Name:
Pornchai Supaithi

Affiliation:
Telecommunications Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Address:
No.1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

Brief Career:
2002 Graduated from Georgia Institute of Technology
2011 Mid-career Scholar, Thailand Research Fund
2015 Professorship, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
2015 Committee Member, International Reference Ionosphere (IRI) Committee
2016 Committee Member in Energy and IT, National Research Council of Thailand

Selected Publications:
• "A comparison of neural network-based predictions of foF2 with the IRI-2012 model at conjugate points in Southeast Asia," Advances in Space Research, Vol.59, Issue 12, 2017.
• "A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand," Advances in Space Research, Vol.60, Issue 2, 2016.
• "Ionospheric delay gradient monitoring for ground-based augmentation system (GBAS) by GPS stations near Suvarnabhumi airport, Thailand," Radio Science, Vol.50, Issue 10, 2015.

Academic Societies & Scientific Organizations:
• Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
• Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
• Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI)

地質工学，Vol.15，33-38

GNSS を用いた総合防災ブイの開発

加藤　照之[1]・寺田　幸博[2]
1)　東京大学　地震研究所
2)　高知工業高等専門学校

1. はじめに

GNSS（Global Navigation Satellite System）とはGPS（Global Positioning System）をはじめとするいくつかの衛星測位システムの総称である．GNSSは米国が開発・運用しているものであるが，安全保障の観点からロシア，中国，EUなども独自に開発・運用を行っている．日本も準天頂衛星「みちびき」を打ち上げ，GNSSを自前で保有して運用する国々の仲間入りをしている．

我々はこのGNSS受信システムをブイに取り付けて津波を計測するGNSS津波計（開発当初の呼称はGPS津波計）を約20年にわたって開発してきた．最近の技術の進展に伴い，GNSSブイは多様な応用に役立てられることがわかり，現在ではGNSSブイを海洋にアレイ展開して総合的な防災ブイとして活用できるようなシステムを開発中である．本稿では，我々のGNSSブイの開発の歴史を振り返り，今後の見通しについて触れてみたい．

2. GNSS津波計の概念

津波の被害は，襲来前に正確に計測し，その観測値に基づく沿岸への正確な到達時刻と津波高の予測，及び情報の適切な伝達によって少なくできる．このような視点の津波防災システムが構築でき，正確な観測値に基づく津波の監視・検知・伝達によって避難・誘導に活用できるようになれば，津波被災の可能性がある住民に計り知れない安心感を与え，地域の発展基盤としての貢献も期待できる．

そこで，従来の津波計測手法とは全く異なるGNSSを用いた海面変動計測装置の開発を行い，波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数cmの精度でドリフト無く計測でき，設置や維持管理が容易に実施できる津波観測システムの実現を目指した．システム構成の基本的概念を図1に示す．海上に浮かべたブイの最上部にGNSSアンテナを取り付け，ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データから，海面高の変位を計測することができる．波浪，津波及び潮汐の計測には，数cmの精度とリアルタイム性が必要であることから，当初は，RTK(Real Time Kinematic)法を基本的な測位方式として採用した．この方法では，陸上に基地局を設けて同様のGNSS観測をブイと同時に行い，基線解析によってブイの位置を陸上基地に対する相対位置として推定する．ブイで取得されたGNSS衛星からの1秒ごとの位相データは無線によって基地局に伝送され，基地局に置かれた計算機により基線解析が行われる．この手法では電波の伝搬媒質の影響が観測点間距離とともに急速に大きくなることから，精度保持のためブイの基地局からの距離を20 km以内程度としなくてはならないという制限がある．最近の技術の進展により，現在では，基準点を設ける必要が無い精密単独測位法によっているため，海合展開における限界の問題が払拭され，大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている．

図1　GPS津波計の概念．海面の動揺に追随するように設計製作したブイの上下動をGPSを用いて精密（cmオーダー）測位を行い，その鉛直方向位置の時系列表示を海面変動表記とする．

3. 開発の経緯とその意義

1997年に神奈川県相模湾にて実施した基礎実験においてGNSS津波計が誕生した（加藤他，1998）．この時の実験で，GNSS受信器や記録装置を積み込んだブイを図2の左側に示す．続いて，1998年に同地で基本機能実験を行い，波浪と潮汐を同時にcmオーダーで観測できることを示した．次に，実用化実験として2001年から岩手県大船渡市沖にGNSS津波計を設置して3年間の連続計測を実施した．ここまでの成果は，寺田・加藤（2003）に詳しく記している．

続いて，この技術の外洋対応の技術開発を進め，高知県室戸岬沖で実証実験を行ったときの海洋ブイを図2の右側に示す．計算結果はインターネットのVPN接続でサーバー（室戸岬では高知高専）に送り，ホームページで図3に示す画像を表示してリアルタイムに市民へのデータ公開を行ってきた．通常の波浪は数秒から数十秒程度の周期であるのに対し，津波は数分以上の長い周期を持っているので，フィルタリング操作によって容易に識別が可能である．図3において，上段は周期の短い波浪を示しており，中段に示す津波データは，数分から数時間の周期で変化する成分を示すようにしている．室戸岬沖の実証実験では，図4に示すように波浪データの有義波高 H1/3（波高の高い方から1/3の平均値）と周期 T1/3（有義波高の計算対象とした波の周期の平均値）が，近隣の海底超音波式波浪計で得られるものと同様の傾向を示すことが確認できた．さらに，潮汐，高潮などの情報も測位データから得られるほか，多様のセンサーを搭載することにより水温，洋上風などの情報を発信でき，漁業活動や海運などの海に係わる地域の経済活動の支えとなる海洋観測ステーションとしての機能も備え得ることを示してきた．ここまでの実績によって，国土交通省港湾局が GNSS 波浪計（正式名称は GPS 波浪計）として全国展開することになり，防波堤や港湾施設の設計施工のために不可欠な波浪データの常時観測を行い，津波発生の非常時には気象庁によって図5に示すように津波予報に利用されている．

5章に述べるように，このシステムは2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を観測し，気象庁の津波警報の更新に役立てられたものの，GNSS波浪計の設置場所が十分に沿岸から十分遠くに設置されていなかったことと，情報の伝達が十分でなかったことなどから，結果としてたくさんの犠牲者を生むこととなった．このような反省を踏まえ，システムを刷新してより効果的な津波・波浪計測システムを導入することとした．これについては6章に詳しく述べる．

図2　GPS 津波計ブイ．（左）白い缶体が 1997 年に試験的に製作したブイ，（右）2013 年に高知室戸岬沖に設置したブイ．

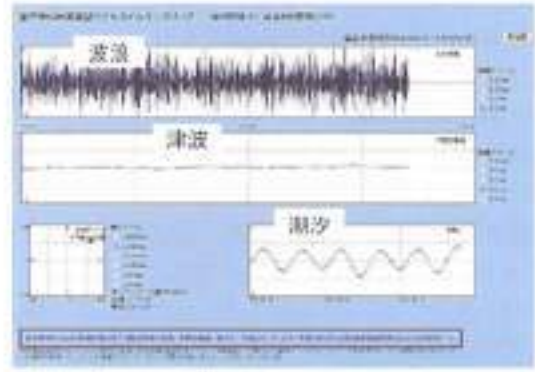


図3　リアルタイム公開中のデータ（室戸岬沖），波浪，津波データの横軸はフルスケール1時間であり，潮汐の場合は3日である．縦軸は，いずれも海面高であり，それぞれのフルスケールは±2m，±1m，±2m である．

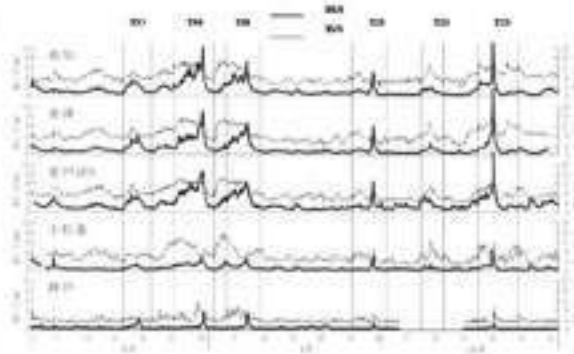


図4　2004 年 6 月～10 月に観測された有義波高．太線が有義波高を示し，細線が有義波周期を示している．横軸のフルスケールは 3 カ月であり，縦軸は，何れもフルスケール 10m である．

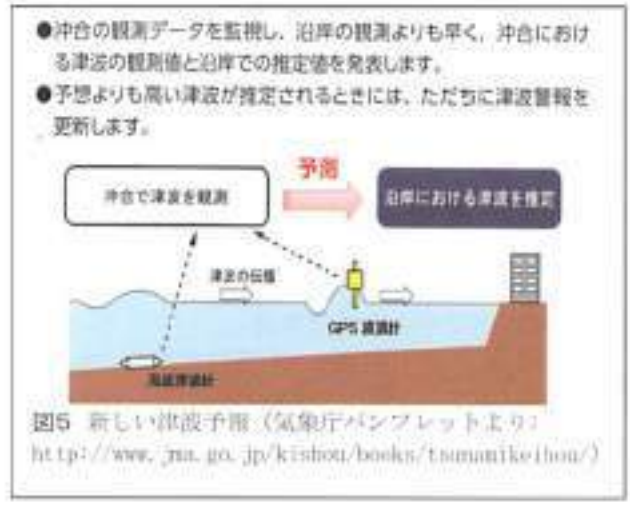


図5　新しい津波予報（気象庁パンフレットより）
http://www.jma.go.jp/kishou/books/tsunamikouhou/）

4. 沖合における津波観測

大船渡市沖に設置したGNSS津波計は，2001年6月25日に初めて津波を捉えた．その前日に南米のペルー沖で発生したMw7.9の地震による津波が約23時間後に大船渡市沖に到達した（寺田・加藤，2003）．続いて，2003年9月26日の十勝沖地震津波を捉えた．これらは何れも波高10cm程度の津波であり，目標とした検出精度の確認が出来た．

2004年9月6日の紀伊半島沖地震津波では，室戸岬沖で図6に示す津波が観測できた．図中に青線で示すGNSS津波計の観測値は，波高・周期共に赤線で示すシミュレーション結果と良い一致を示している．このことは，沖合で津波を計測することによって，震源域直上での波源を推測できる可能性を示唆している．実際，津波観測直後に波源を逆計算し津波伝播シミュレーションの再計算を行うことによって，正確な津波高さや到達時間が得られるリアルタイム津波予測への道を切り開くことができた（Tatsumi and Tomita, 2010）．

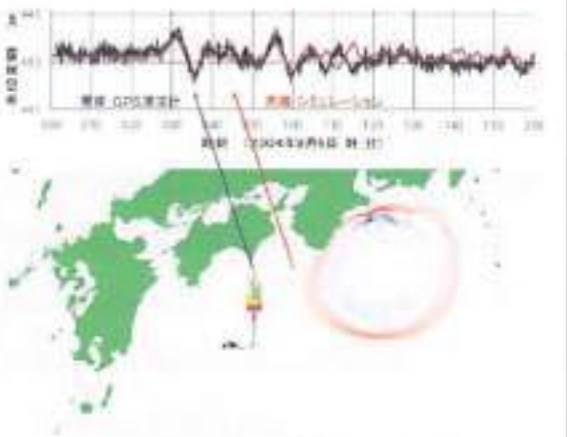


図6　2004年9月6日紀伊半島沖地震津波

沖合で津波を正確に計測できるようになれば，当然のことながら，津波をいち早く捉えて避難・誘導に活かすことができる．13km沖合に設置した室戸岬沖GNSS津波計で得られた図6の観測結果では，約8分のリードタイムが得られた．これらのことから，GNSS津波計の沖合展開への期待はさらに大きくなっていった．ただし，津波の伝播速度は，水深に重力加速度を乗じた値の平方根で与えられ，沖合への展開で水深が大きくなることによる伝播速度の増大で，リードタイムは単純な期待どおりに伸びないことに注意する必要がある．

5. 東北地方太平洋沖地震津波

2011年3月11日の東日本大震災発生時には，国土交通省港湾局によってGNSS波浪計として図7に示すように全国に15基が配備され，リアルタイムにデータが公開されていた．釜石沖に設置されていたGNSS波浪計のリアルタイム観測値を図8に示す．

図7　GPS波浪計設置状況（2011年3月11日）
（http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf より）

図8　2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波
（http://nowphas.mlit.go.jp/index.html より）

津波発生当日にインターネット上で公開されていたリアルタイム画像である．横軸は，上下図共フルスケール24時間を示している．上図の縦軸はフルスケール8mである．下図の縦軸は，±6.5mである．上図から潮汐成分をフィルタリングしたものが下図である．何れも，15:00過ぎから急激に立ち上がり，津波高6.7mを記録している．

図中下部に平均水面高変位として表示されている津波高さは6.7mを示し，気象庁はこのデータを含む複数のデータを根拠に大津波警報を最大級に引き上げた（Ozaki, 2011）．第1波の観測データを発信した後，被災地域の停電によって通信網は寸断され，それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなったが，観測データは高台に設置された基地局のバックアップ電源の下，図9に示す完全な津波波形が保存出来ていた（河合他，2011）．

2013年3月に，気象庁は津波警報の発表方法を大幅に変更した．そのことを広報するリーフレットの中で，図5に示したように今後の津波予報に沖合の圧力式海底津波計とGNSS波浪計のデータを活用するとしている．

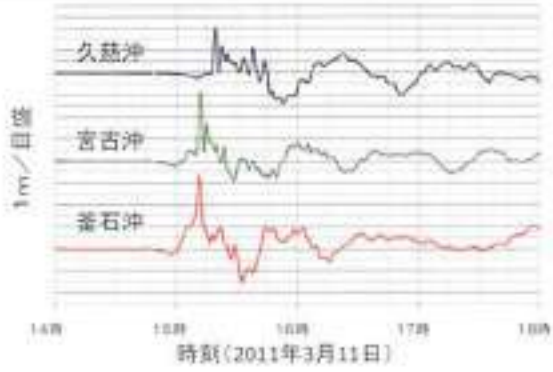


図9　東北地方太平洋沖地震津波全波形（国土交通省港湾局提供）

これらのことから，震源域を含む海域へのGNSS津波計の設置が強く望まれ（例えば，朝日新聞，2011），配信位置の離岸距離を伸ばすために，GNSS精密測位法のさらなる改良が喫緊の課題となった．この二つの課題を端的に表現すれば，「被災してもデータの続きを！」と「もっと沖合に！」となる．これらの克服には，洋上のブイからデータ伝送を行う方法とGNSS測位法の改善が必要であった．

6　さらなる沖合展開に向けての開発

第1の技術課題である通信機能面の改善に取り組み，今後の早期津波警報システムを飛躍的に機能向上させる技術を確立した．被災地域の通信網の寸断への対策の基本は，観測された津波データを，全世界に向けてリアルタイムに発信することが可能な被災の無い地域に送ることである．これには，通信衛星の利用が最も有望である．しかし，揺れ動き回転するGNSS海洋ブイでは，太陽電池だけの自立的電力供給事情による省電力にも配慮する必要があり，無指向性のアンテナの使用を余儀なくされる．我々はまず2013年時点で利用可能であった通信衛星の技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」を使い，室戸岬沖に設置したGNSS津波計実験機を用いて，衛星通信実験を行うこととした．ブイ上で精密単独測位計算を行うために必要なGNSS精密暦（正確な軌道と時計情報）を準天頂衛星初号機「みちびき」から送信し，測位計算結果を「きく8号」の通信システムを用いて地上に送り返す方式とした．波浪，津波，潮汐の変化をブイ上で計算し，得られた観測値を衛星通信で伝送して良好な結果が得られた．

その後2016年に「きく8号」は運用を停止することになったため，現在は商用衛星のスラヤを用いたソフトバンクの衛星携帯用通信装置を用いた実験に切り替えている．図10に現在使用しているシステムの全体図を示す．

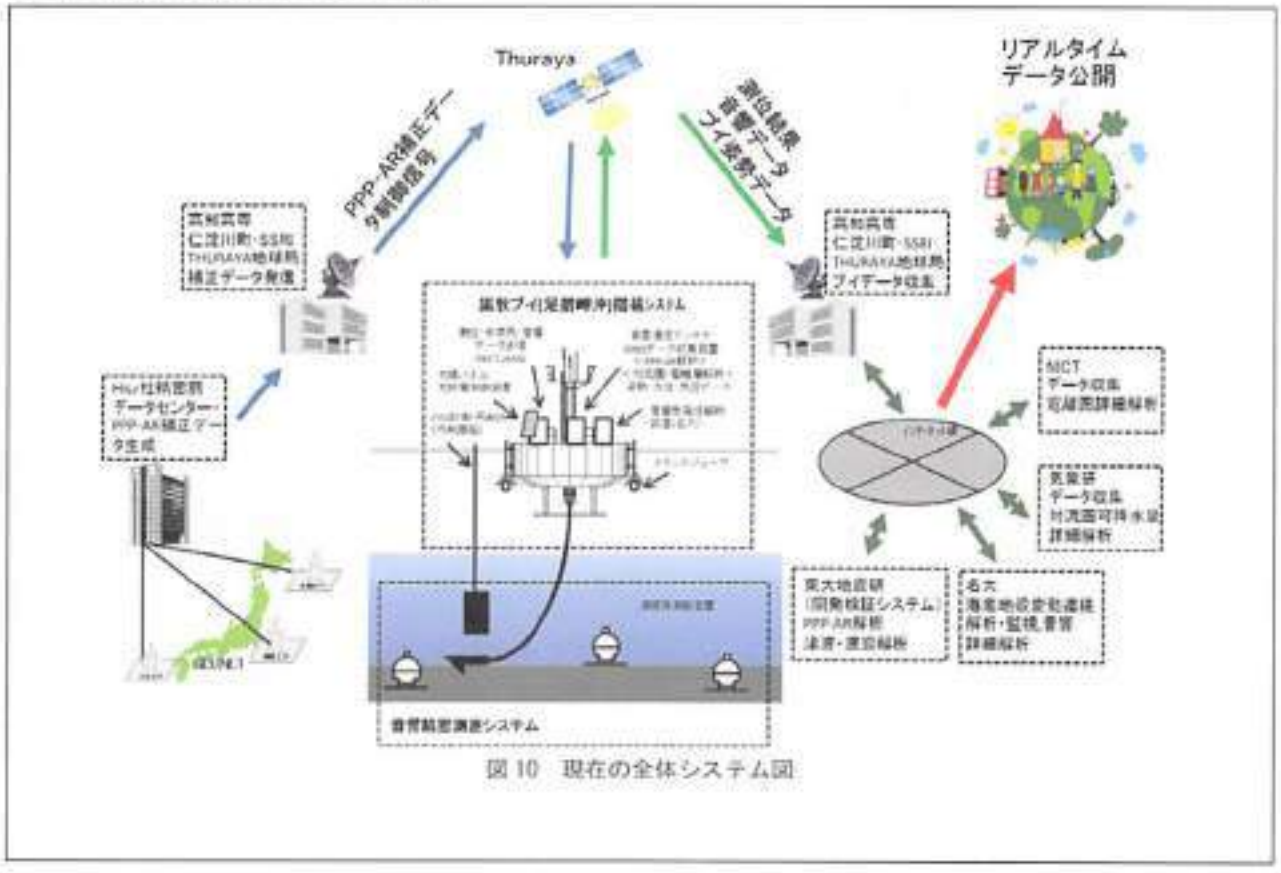


図10　現在の全体システム図

第2の技術課題であるGNSS測位法については，RTK法の改良に取り組んだ．図11(a)は，改良前のRTK測位結果の一例である．短い周期で上下に変化している状態が波浪による海面変位を示しているが，安定した測位ができていない．これに対して，搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって，図11(b)に示すように基線長80knでも安定的な測位が可能になった．また，洋上のブイのGNSS観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め，周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測（PVD：Point precise Variance Detection）法（Isshiki et al., 2000），周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位（PPP-AR：Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution）法（Mervert et al., 2008）が有効であった．図11(c)は，PPP-ARを適用した結果である．これらの新しい測位法は，室戸岬沖GNSS津波計実験において，先に示したホームページでデータ公開を行った．このとき，図3に例示したような良好な結果がリアルタイムで継続的に得られた．

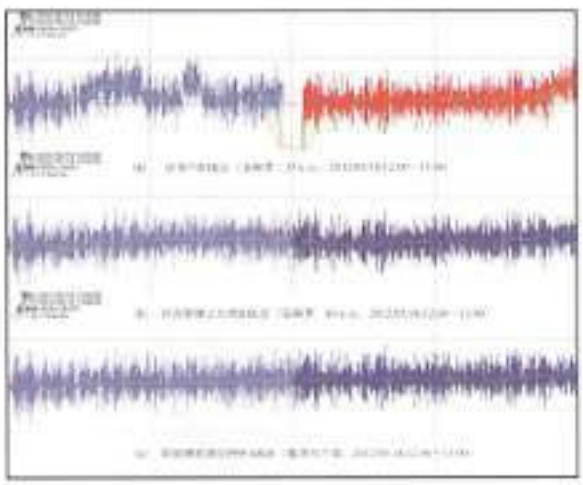


図11　GPS測位法の改良．横軸は，何れもフルスケール1時間を示している．縦軸は，1m／目盛である．

以上のように技術的課題が克服できるとの見通しが得られたため，2016年度からは新たな実験を開始した．この実験では高知県の海洋牧場ブイNo.18を借用させてもらい，ここにGNSS受信システム，衛星通信装置などを搭載している．これらに加え，GNSS－音響システムによる連続的な海底地殻変動計測を実現するために，ブイ直下に一辺が1.7kmの正三角形を構成するように音響トランスポンダーを投入した．なお，このブイ位置の水深はおよそ800m程度である．このトランスポンダーに対して音響を射出して反射波を受信するためのトランスデューサをブイの船側に設置している．GNSS測位はブイ上に設置された計算機によってPVD及びPPP-ARの出力を得るとともに，大気の天頂遅延量や電離層の総電子数なども算出され，これらのデータはソフトバンク社製の衛星携帯テレメータ装置を介して地上局に送られる（図10），地上局は高知県仁淀川町に設置されており，ここで受信データを点検・格納するとともに，Webサーバを介して測位データをリアルタイムで公開するほか，海底地殻変動，気象や電離層の研究のために提供される．現在これらのシステムをくみ上げているところであり，近い将来誰でもこれらのデータが見られるようになることを目指している．

7. 今後の展開

本稿では，GNSSブイによって津波や波浪などの海面高変化を計測する手法の開発について述べてきたが，この計測方式が海洋のどこでも可能となるとその応用分野は多岐にわたる．例えば，最近急速に注目が集められている分野にGNSSと音響を組み合わせた海底地殻変動の観測がある．その詳細は他書に譲るが（例えば，Spiess, 1985; Fujita et al., 2006），現在は海上保安庁や大学グループが実施して重要な成果が得られている（例えばYokota et al., 2016）．この計測には船舶が用いられているため常時行えるわけではなく，せいぜい年数回程度である．船舶をブイに置き換えることで計測はほぼ常時に行えることになり，海底地殻変動を連続的に監視することが可能となる．日本列島を襲う巨大地震の多くが海底下で発生し，それが津波を発生させることを考えるとこの応用分野は日本の地震・津波防災には極めて重要と考えられる．

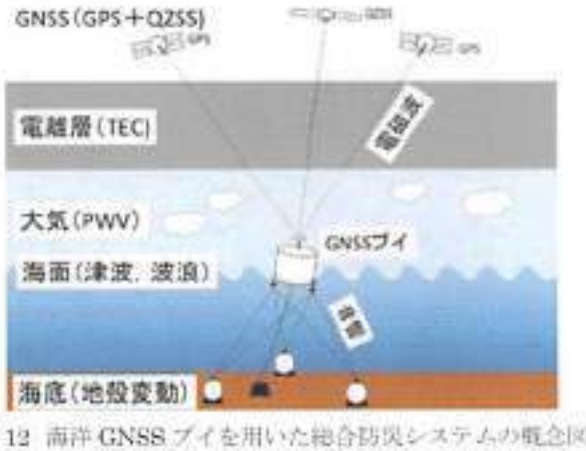


図12　海洋GNSSブイを用いた総合防災システムの概念図

また，GNSSを用いた精密測位では大気（水蒸気）や電離層の影響が誤差因となるが，一方ではこれらを補正するパラメータは気象学や電離層研究にとっては大変重要な物理量を提供することになる．例えば日本の西方海域にGNSSブイを投入して，得られる水蒸気量を気象の数値予測解析に取り込んでいく

ことによって最近多くみられる集中豪雨の予測などに役立てることができると期待される．また，電離層の擾乱はいわゆる宇宙天気予報にとって重要な情報と考えられる．GNSSブイは海底下の地殻変動から津波・波浪，海洋気象，電離層など地球の表層部で発生する多様な現象に関するデータを提供してくれる（図12）．

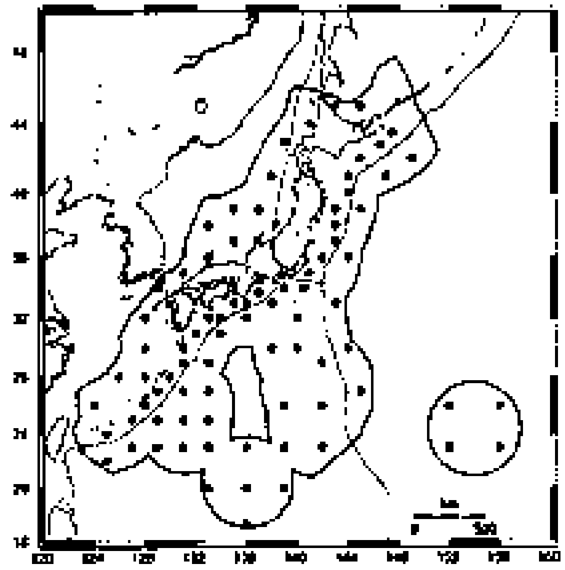


図13　西太平洋ブイアレイの構想

もし，海洋にGNSSブイが多数設置されれば地球表層で発生する災害要因となる地震，台風，電離層擾乱など多くの災害に関する新たなデータをこれまでになく精確かつ即時・連続的に取得することが可能となるだろう．現在，我々はGNSSブイを図13に示したような北西太平洋地域に展開することを考えている．このようなアレイを様々な災害予測やその軽減に生かす総合防災ブイアレイとして構築したいと考えている．このようなアレイはまた，基礎的な地球科学の研究に新たなデータを提供し，それが我が国の地球科学の推進に役立てられることを期待している．

謝辞

本研究開発に参画した港湾空港技術研究所，宇宙航空研究開発機構，情報通信研究機構，気象研究所及び日立造船に所属する研究者の方々に感謝します．また，実験サイトを提供された国，自治体，ご協力いただいた多くの市民の皆様に謝意を表します．

本研究開発は，現在実施中の科研費（基盤研究(S)：課題番号16H01310）のほか，科研費4件に加えて，文科省革新的技術開発補助金，文科省地球観測技術等調査研究委託費で推進しました．

参考文献

1）朝日新聞，2011年8月17日朝刊

2）Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planets Space*, 58, 265-275.

3）Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno (2000) Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method ---, *J. Geod. Soc. Jpn.*, 46 (4), 251-267.

4）加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩（1998）GPS津波計の開発，*月刊海洋*，号外15，36-42

5）河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己（2011）平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性，*港湾空港技術研究所報告*，50(4)，3-63.

6）Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi (2008) Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution In Real-Time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, September, 397-405.

7）Ozaki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –, *Earth Planets Space*, 63, 827-830.

8）Tatsumi, D., T. Tomita (2010) Real-time Tsunami Inundation Prediction Using Offshore Tsunami Observation, *Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering*, currents.3, 1-10.

9）Spiess, F. N. (1985) Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 502-510.

10）寺田幸博・加藤照之（2006）GPS津波計，*非破壊検査*，55(7)，338-343.

11）Yokota Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada (2016) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632.

NEWSLETTER OF IPNTJ

測位航法学会ニューズレター　Vol.X No.2　　2019年9月30日　IPNTJ

測位航法学会ニューズレター第X巻第３号

目　次

P.2　準天頂衛星システム CLAS の利活用の紹介　曽根　久雄
P.3　準天頂衛星受信機の動向ーその2ー　松岡　繁
P.5　Countering Disturbances and Disturbances to Satellite GNSS/Position, Navigation and Timing Signals　Kentaro Yoshikawa
P.6　第11回MGA会議及びUNESCAP会議出席報告　加藤　照之
P.7　イベントカレンダー
P.8　GNSSサマースクール開催報告「GNSS Positioning Program」クラス実施報告　斎藤　詠子
P.9　サマースクール報告-SDR　鈴木　太郎　System Design Workshop　慶応義塾大学SDMグループ
P.11 ECDISの紹介と船上デモンストレーション　戸枝　賢吾
編集後記
P.12　イベント写真　法人会員

GPS/GNSSシンポジウム2019

みちびき7機体制に向けて
ー測位精度の向上と更なる利用拡大を目指してー

日時：2019年10月16日（水）～18日（金）
場所：東京海洋大学越中島会館

研究発表・参加登録受付中

GNSS サマースクール2019にて重要文化財明治丸見学　8/2

特別法人会員

GNSS サマースクール 2019 集合写真 2019 年 7 月 29 日　P.8～

第11回MGA会議及びUNESCAP会議出席報告

神奈川県温泉地学研究所　加藤照之（本会副会長）

第11回MGA会議が2019年8月27-29日にタイのバンコクで開催された．MGAは毎年実施されているが，今回はタイのSpace Weekと呼ばれるタイの宇宙機関（タイ地理情報・宇宙技術開発機関；Geo-Informatics and Space Technology Development Agency（GISTDA））主催のイベントの一環として実施した．同時にやはりSpace Weekの１イベントとして実施したUNESCAP（国連アジア太平洋経済社会委員会；UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific）の会議も実施され，MGAはESCAP会議とも連携して実施された．私は，公式にはESCAPに招へいされる形で出席することになり，両方の会議に出席することができた．個人的にはMGAでここ数年来発表してきているGNSSブイの開発の現状紹介が主目的であったのだが，招へい先のESCAPから旅費の支援を受けたこともあって，そちらからの様々な依頼に応じることになった．あいにく，MGAの会場はIMPACTと名付けられた展示場（東京ビッグサイトのような大きな展示場）の一角で行われた一方，ESCAPはバンコクにあるUNESCAPの本部にある会議場で実施され（写真１），双方は車で1時間くらいかかる離れたところにあることから，移動が大変なことになってしまった．この顛末も含め，時間を追って行動した内容について報告する．

写真１：UNESCAP会場内の筆者

私自身の国内の予定から前日26日の渡航ができず8月27日0時40分羽田発の飛行機で出発．同日4時30分バンコク着．5時30分頃にバンコク市内の宿に到着して仮眠をとった．7時にロビーに集合し，まずはESCAP側のKeran Wang氏と事務局のPatricia Budiyantoさんと共にESCAPの会場へ向かった．同日午前のEarly Warningに関するExpert Dialogのセッションに出てくれとの要請で出席したのだが，このセッションは“洪水と干ばつ”に焦点が当てられていて自分の専門である地震や津波とはかなり異なる趣で，正直のところいささか面食らうこととなった．ただ，議論自体はデータの不確実性の問題や住民への警報の出し方に関する議論があって勉強にもなり有益であった．しばらくしてPatriciaが別のセッションも見てはどうか，と言ってきたのでそちらに移動したが，そちらはKeranが共同議長を務めていて，アジア各国の防災についての報告が行われていたところであった．バングラデシュとブータンの報告が終わったところでPatriciaから，手配の車が来たのでそれに乗ってMGAに行ってくれということになり，あわただしくESCAPを離れてIMPACTへ向かった．IMPACTに到着した時はちょうど午前のMGA開会式が行われていて，集合写真の撮影に加わることができた．

午後は前半のセッションが小暮氏司会によるGNSSプロバイダからの現状報告であった．GPSに関しては次世代の衛星システムの紹介，Galileoはやっと実用化しつつあるとの報告があったが，やはり圧巻は中国のBDSであろう．すでに多くの衛星が打ち上げられて世界を席巻しつつある．すぐ次にQZSSの発表があったが，現状4機，将来7機ではさすがにちょっと他に比べると存在感の薄さを感じざるを得ないところである．ただ，QZSSのMADOCAメッセージ機能は他と異なる有利さを感じることができた．これをどう活用するかに日本の存在意義がかかっているのではないかと感じた．

午後の後半は私が司会を務めたEarly Warning: Disaster Prevention and Mitigation Using GNSSと題するセッションがあり5件の報告があった．このうち2件はメッセージシステムの紹介，2件が地理院のREGARDと私からのGNSSブイという技術開発の紹介，残りの一件はIGSからのEarly Warningのシステム構築に関するgeodesyからのサポート体制の提案，というように個人的には大変有益な情報を得ることができた．技術開発によって得られた監視データをどのように防災関係者や一般住民へのメッセージに変換するのかという課題はあるものの，それをクリアしてIGSや「みちびき」のメッセージサービスを通じて迅速に届けるというシステムを作るのがあるべき姿として提示されたように思う．ただ，自然災害は国境とは無関係に発生するからIGSのような国際的組織がそれを監視することは可能だろうが，防災のシステムはそれぞれの国に固有のものであるから，防災情報をそれぞれの国にうまく適合するように届ける必要があり，その壁は高いように思われた．

セッション終了後はMGAのレセプション．同じIMPACTの別棟にあるレストランで実施した．タイの民族舞踊やドローンのシンクロナイズドフライングとでもいうような出し物があった．

28日午前は再びESCAPへ赴き，Dinesh Manandhar氏らが企画したYoung Professional Sessionを覗いた．10名ほどの学生とKeranとDineshが参加していた．セッションがなかなか始まらなかったのでちょっと会議室を抜けて旅費の支給やその換金などを行っているうちにいつの間にかセッションが始まっていた．KeranとDineshがあまり関係のない話題で学生を置き去りにして議論していたが，そのうちKeranがどこかに行ってしまったので，Dineshが困って私にコメントを求めてきたので，他で報告する予定であったGNSSブイの話をさせてもらった．このセッションの本番はむしろそのあとで，バスでMGA会場に移動する際に，バスの屋上にGNSSアンテナを複数設置して，RTK-PPPやMADOCA－PPPなどのデータを取得して比較しようとするものであった（写真2，3）．このよう

写真２：バスの屋根にGNSSアンテナを取り付ける

写真3：バスの中で学生に解説中のDineshさん

なイベントは学生にとっても大変興味をひくものであったと思われる.

午後はIMPACTに戻ってMGAに出席，産業応用や先端的な研究開発の様々な発表があった．セッションを少し抜け出してExhibitionを見たのだが，最初に述べたようにタイのSpace Weekと共同開催ということでMGAだけでなく様々な企業の展示があり，MGA分は隅っこの方に追いやられている感があった（写真4）．同じ展示場では宇宙技術とは関係のない別のExhibitionもあり（そちらのほうが規模が大きい）なかなか賑やかであった．

写真4：MGAのexhibition会場

終了後は宿の近くのレストランでの会食．20名ほどであったが，となりにカンボジアの科学技術省の事務局長さんがいて，カンボジアの話でかなり盛り上がった．散会して宿に帰ろうとしたところ車の運転手がおらず，30分ほど待ちぼうけを食わされた．ホテルを帰ったら9時を過ぎておりそのまま就寝.

29日，あっというまに最終日の感があったが，この日が一番忙しい．朝はまずMGAの会場に入りUNとの連携に関するセッションを聞く．これがMGAとしては新しいトレンドと言える．MGAはUNESCAPとMoUを結びこれから協働して活動をしていくということである．また，IGSからのUNを通じた協働の提案もあり，MGAの活動が賑やかになりそうであるとの印象．それにタイのGISTDAからの提案があって，MGAが今後しばらくはバンコクで開催されるということである．会場が固定されるのは運用上はやりやすいと思うが一方で各国の状況がかならずしもわからないようにも思うので良しあしであろう．午前後半はMGAのYoung Professional Forum．ブータンからの2件の高校生によるGNSS応用のアイデアが語られ，その後4件の提案がそれぞれの国の学生から提案された，なかにはGNSSを使って有料道路の通行料を払えれば料金所は不要になるという，すぐにでも実用化してほしいような素晴らしい提案もあって感心した．やはり若者の柔軟な頭脳には大人はかなわないとも感じた（写真5－裏表紙）.

そのあと，MGAの閉会式があり小暮氏からの活動報告，次年度の活動予定の紹介があった．特に来年からはRegional Workshopと題する小規模な会議も開催され，第一回はシンガポールで2月に開催されるとのことである．今後，MGAは年2回の研究集会を持つことになる．予算がちゃんと確保できるか心配ではあるが，なんとか頑張ってほしいと期待する.

午後には，まずASEAN Roundtableと称する，GISTDA主催の会合が開かれる．トップバッターで私が日本でのGNSSによるREGARDとGNSSブイの紹介を行い，直ちに会場を離れてESCAPに赴き，その会場でやはり同じGNSSブイの紹介を行った．この会場はESCAPの開会式を行った会場で，我々が良くTV等で見るニューヨークの国連本部の会場を思わせる（といってもそれよりもかなり小規模だが）格調の高い会議場であったのでいささか面食らったが，そこで話をさせてもらえたのは，Keranの手配によるものであるが，すごく嬉しい思いがした．わたしにとってはここでの発表（わずか10分以内であったが）がハイライトと言えるものになった.

会議は3時頃終了し，手配のハイヤーによって空港へ向かい，今回の旅行が終わりを告げた．帰国便も深夜便となったが，現在は日本とタイを結ぶ便がたくさんあり，効率的な反面帰ってくるとそれなりに（年齢のせいもあるかもしれないが）疲労感があった.

今回のMGAでは，UNESCAPとのMoU，会議開催地の固定化，地域ワークショップの開催など，これまでと違った方向性の見える大会となった．ただ，学術セッションの会場がさびしく，せいぜい20～30名程度の出席者であったのは，残念である．たぶん宣伝の期間が短かったのかと思われるが，来年からは会場も固定されるとのことなのでより多くの学術関係の出席者があることを期待したい.

イベントカレンダー

国内イベント

- **2019.10.16-18　GPS/GNSS シンポジウム（東京海洋大学）**
- 2019.10.25-26　日本航海学会講演会（海峡メッセ下関）
- 2019.10.29-31　EIWAC 2019 （中野セントラルパーク）
  https://www.enri.go.jp/eiwac/
- **2019.11.3　ロボットカーコンテスト（東京海洋大学）**
  https://robot-car.jimdo.com/
- 2019.28-30　G 空間 EXPO　日本科学未来館

国外イベント

- 2019.9.30-10.3　IPIN 2019 (Pisa, Italy)
- 2019.10.30-11.2　IS-GNSS 2019 (Jeju, Korea)
- 2020.01.21-24 International Technical Meeting (San Diego)
- 2020.02.05-07　IGNSS 2020 （Sydney, Australia）
- 2020.03.16-18 Munich Satellite Navigation Summit

＊太字は本会主催イベント

frontiers in Earth Science

TECHNOLOGY AND CODE
published: 30 April 2020
doi: 10.3389/feart.2020.00123

A Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurment of Seafloor Crustal Deformation

Keiichi Tadokoro[1], Natsuki Kinugasa[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3] and Kenjiro Matsuhiro[4]*

[1] Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, [2] Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Odawara, Japan, [3] National Institute of Technology, Kochi College, Nankoku, Japan, [4] Technical Center, Nagoya University, Nagoya, Japan

In this paper, we describe the development of a continuous real-time system capable of measuring seafloor crustal deformation using the global satellite navigation system (GNSS)/Acoustic technique and a moored buoy. A program developed was implemented on the buoy to automatically distinguish the onset of a direct acoustic wave even if that wave had been contaminated with reflected waves and to detect the true travel-times by onboard processing rather transferring raw waveforms to the ground base station. This onboard procedure contributed to reduce the data size over a satellite communication. We conducted an operations test for a total of 106 days and found that the acoustic ranging and data transmissions were frequently interrupted by an unstable power supply, resulting in only 21% of the transmitted data being received at the ground base station. Nevertheless, we did not find any problem with continuous acoustic ranging measurement except for the above-mentioned power supply failure.

Keywords: GNSS buoy, GNSS/Acoustic, seafloor crustal deformation, acoustic ranging, technical development

OPEN ACCESS

Edited by:
Takashi Nakagawa, The University of Hong Kong, Hong Kong

Reviewed by:
Motoyuki Kido, Tohoku University, Japan
Pierre Sakic, GFZ German Research Centre for Geosciences, Germany

****Correspondence:***
Keiichi Tadokoro
tad@seis.nagoya-u.ac.jp

Specialty section:
This article was submitted to Solid Earth Geophysics, a section of the journal Frontiers in Earth Science

Received: *12 February 2020*
Accepted: *31 March 2020*
Published: *30 April 2020*

Citation:
Tadokoro K, Kinugasa N, Kato T, Terada Y and Matsuhiro K (2020) A Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurment of Seafloor Crustal Deformation. Front. Earth Sci. 8:123. doi: 10.3389/feart.2020.00123

INTRODUCTION

A system for seafloor crustal deformation measurement using the global satellite navigation system (GNSS) and acoustic techniques has been developed over the last 20 years (e.g., Spiess et al., 1998; Fujimoto, 2006; Fujita et al., 2006; Tadokoro et al., 2006; Ikuta et al., 2008). The system measures seafloor crustal deformations by making repeated measurements of the positions of several acoustic transponders placed on the seafloor. The system has contributed much to the understanding of various geophysical and seismological phenomena, such as the motions of plates or blocks (Spiess et al., 1998; Chadwell and Spiess, 2008; Yasuda et al., 2017; Chen et al., 2018), plate convergence and interplate coupling (Gagnon et al., 2005; Fujita et al., 2006; Matsumoto et al., 2008; Tadokoro et al., 2012, 2018; Watanabe et al., 2014, 2018; Yasuda et al., 2014; Yokota et al., 2015, 2016; Nishimura et al., 2018; Kimura et al., 2019), co-seismic displacements (Kido et al., 2006, 2011; Tadokoro et al., 2006; Sato et al., 2011a; Iinuma et al., 2012), and post-seismic deformations (Matsumoto et al., 2006; Sato et al., 2011b; Tomita et al., 2015, 2017; Iinuma et al., 2016).

The next objective is to add continuous real-time measurement capability to the system to detect transient events, such as slow slips, and to provide quick response for geodetical events. As

currently implemented, the GNSS/Acoustic measurements are performed using research vessels, which restricts observations during a campaign to long time intervals of more than several months. Recently, the Japan Coast Guard made a significant effort to obtain high frequency measurements with vessels, and successfully detected an off-shore slow slip event with seafloor displacements of about 5–10 cm (Yokota and Ishikawa, 2020). Nevertheless, the observation frequency was still limited to 6–8 times a year. Thus, to achieve the above stated objective, it is essential to develop techniques using alternative sea-surface platforms instead of vessels. Kido et al. (2015, 2018) and Imano et al. (2019) reported the development and operational tests of a GNSS/Acoustic measurement system using a small moored buoy and an autonomous surface vehicle. Other researchers have evaluated the use of the Wave Glider (Liquid Robotics, Inc.) as a novel platform for GNSS/Acoustic measurements (Chadwell, 2013; Sathiakumar et al., 2016).

Our research group was tasked with developing a system capable of continuous real-time measurement of seafloor crustal deformations using the GNSS/Acoustic technique. In this development, a moored buoy was employed as a sea-surface platform as the plan is to eventually integrate the developed system into existing GNSS buoys to enhance their function (Kato et al., 2018). The GNSS buoy system was developed in around 1997 for tsunami early warning purposes, and the particular GNSS buoys under successfully recorded tsunamis generated by the 2001 Peru earthquake, the 2003 Tokachi-Oki earthquake in Japan (Kato et al., 2001), and an earthquake that occurred off the southern coast of Japan in 2004 (Kato et al., 2005). The developed GNSS buoy system has been employed in the nationwide ocean wave information network for ports and harbors (NOWPHAS) wave monitoring system installed along the Japanese coast from approximately 2008. The NOWPHAS provided real-time records of the tsunamis after the *Mw* 9.0 Tohoku-oki earthquake, which were used to significantly upgrade the tsunami warning level after the earthquake (Ozaki, 2011).

In this paper, we describe the developed observation system that was installed on a moored buoy and report the results of acoustic ranging tests.

BUOY-MOUNTED ACOUSTIC RANGING SYSTEM

The buoy-mounted system for the GNSS/Acoustic measurement is composed of the following five components (**Figure 1**): (1) an acoustic ranging controller (developed by Kaiyo Denshi Co., Ltd.) and an acoustic transducer; (2) a signal processing computer (PC Engines alix3d3) running a Linux OS; (3) a GNSS receiver (Hitachi Zosen) equipped with a network solution module (RTNet, GPS Solutions Inc.; Rocken et al., 2004) that employs the precise point positioning with ambiguity resolution (PPP-AR) algorithm (Mervart et al., 2008); (4) a gyroscope (SBG Systems Ellipse-N); and 5) a satellite communications modem. The signal processing computer, GNSS receiver, gyroscope data storage, and satellite modem are all connected in a single Ethernet network via a switching hub and all the data are transmitted in real-time to a ground base station via a satellite link.

The acoustic ranging controller transmits an ultrasonic wave with a signal length of 14.322 ms in the form of a fifth-order *M*-sequence wave with six-cycle carrier waves per unit digit on carrier wave frequency of 12.987 kHz (Tadokoro et al., 2006). The signal timing is synchronized to the 1 PPS (Pulse Per Second) signal and the National Marine Electronics Association (NMEA) recommended minimum (RMC) sentence from a GPS time server (Garmin GPS 19x HVS). The acoustic ranging controller works by receiving commands from the signal processing computer. Once the acoustic ranging controller has received a wake-up command, it starts and automatically continues signal transmission with a fixed interval written in a configuration file in the signal processing computer. It is possible in principle to remotely manage the acoustic ranging controller, including the pinging interval, by modifying the configuration file via satellite communication. The signal processing computer can automatically restart the acoustic ranging controller in the event the power has been temporarily interrupted. The transmitted acoustic signal is received at a pre-installed seafloor transponder. The transponder once records the acoustic signal and returns it to the buoy-mounted acoustic ranging controller after a turn-around-time of 1.024 s to avoid reverberations in the sea. The acoustic ranging controller samples the received signal at 16-bits at a frequency of 500 kHz, then stores the waveform for 64.512 ms before sending the associated data to the USB 2.0 connected signal processing computer at 230,400 bps. After the computer receives the signal, it automatically detects the onset of the returned acoustic signal within about 20 ms using our original programming code described later. The position of the buoy is computed as per the PPP-AR algorithm once per second in real-time by the network module in the GNSS receiver. Note that the PPP-AR positioning in the system relies on precise orbits and clock correction parameters obtained from the regional data of the GNSS Earth Observation Network System (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (Kato et al., 2017). When tested, the accuracy of our PPP-AR positioning is within a few centimeters for all dimensions including the vertical component in the presence of fixed carrier phase ambiguity (Terada et al., 2015; Kato et al., 2018). As we are more interested in the position of the acoustic transducer rather than that of the GNSS antenna itself, the attitude of buoy is measured using the gyroscope (SBG Systems Ellipse-N) once per second.

The buoy-mounted system was installed on a moored buoy which is anchored 32 km off Cape Ashizuri, Japan (**Figure 2**), on March 28, 2018 for an operational test. The water depth is about 800 m. The buoy, named Kuroshio-Bokujyo No. 18 (**Figure 3**), is operated by the Kochi Prefecture as a floating fish aggregation device and had a diameter of 8 m and a height of more than 8 m above sea level. The system components were installed in waterproof boxes and affixed to the deck of the buoy. The necessary power was generated using five 135-Watt 18-Volt solar panels connected in a series and is stored in 24 V (12 × 2 V) valve-regulated stationary lead-acid batteries with a capacity of 300 Ah (10-h rate). The acoustic ranging controller and GPS time

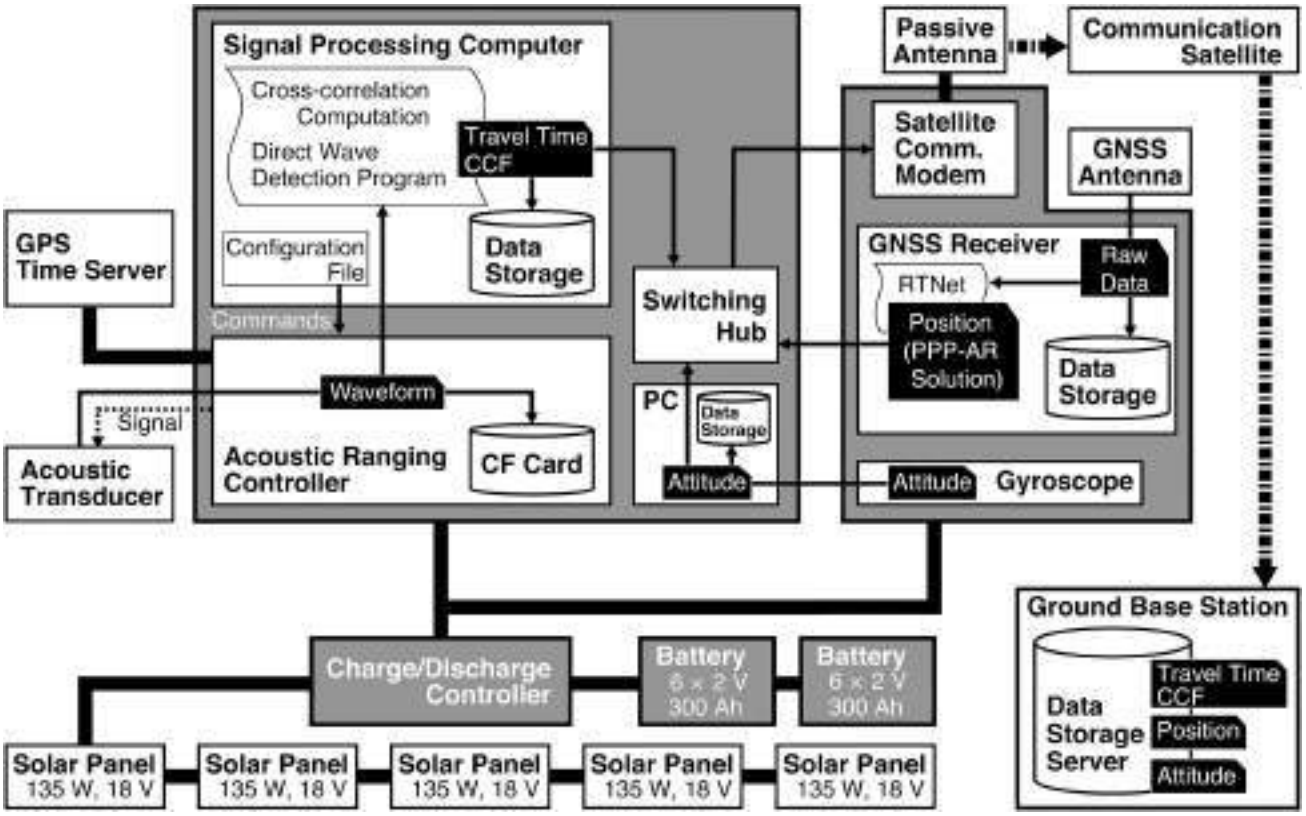


FIGURE 1 | Diagram showing system configuration of buoy-mounted components and data flow. Frames painted gray indicate the waterproof boxes.

FIGURE 2 | Locations of test site, Kuroshio-Bokujyo No. 18 buoy (red solid circle) and ground base station (blue solid square). Topography and bathymetry data are provided from SRTM30_PLUS (Becker et al., 2009).

server operated at 24 VDC while the other instruments operated at 12 VDC, converted from 24 V using a DC/DC converter. Antennas for the GNSS, Trimble Zephyr 2 Geodetic, and satellite communications were mounted on the top of the buoy. The precise relative position between the acoustic transducer and GNSS antenna was 9.98 m vertically and 4.18 m horizontally in the coordinate system fixed on the buoy.

The acoustic transducer was mounted at about 1.7 m below sea level with a stainless pole rigidly attached to the buoy (**Figure 3B**). To eliminate interference from acoustic waves reflected from the surface of the sea, the acoustic transducer was initially installed in a conical antireflection cover with soundproofing rubber. However, even with these precautions, multiple reflections inside of the cover were frequently detected because the soundproofing rubber became detached probably due to wave vibrations, and this made it difficult to distinguish the onset of the direct wave. To overcome this, the antireflective cover was removed as it was found to significantly reduce the confusion effects of the multiple reflections. The travel-time differences between the direct and sea-surface reflected waves were estimated to be almost 1.3–1.8 ms, which was sufficient to ensure that the direct wave could be easily distinguished even if the acoustic wave was contaminated by sea-surface reflections.

The data recorded on the buoy were transmitted to a ground base station through a commercial communications satellite operated by Thuraya Telecommunications Company where it

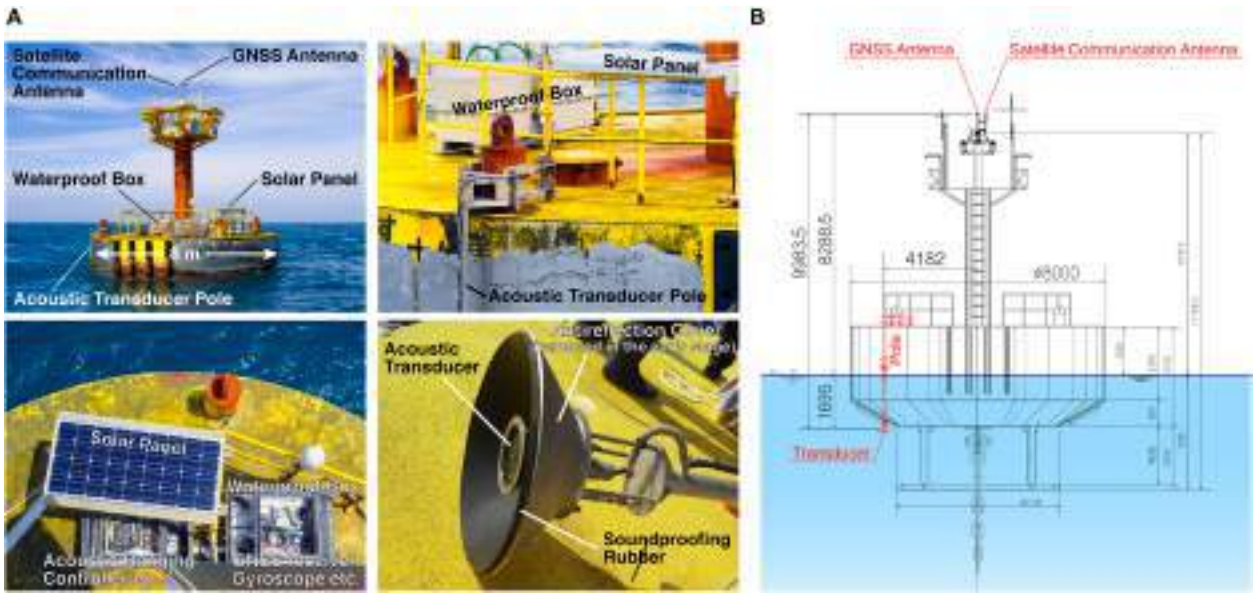


FIGURE 3 | (A) Kuroshio-Bokujyo No. 18 buoy equipped with our system. The antireflection cover around the acoustic transducer has been removed. **(B)** Side view of the design drawing of the buoy.

FIGURE 4 | Photo of an ocean bottom acoustic transponder installed in the test site. The black device fixed on the top is the acoustic transducer.

was stored in a data storage server. The ground base station was in the inland town of Niyodogawa, Kochi Prefecture (**Figure 2**), which is 30 km from the southern coast of Japan and is therefore unlikely to be affected in the event of a tsunami due to a major subduction earthquake. The original acoustic waveform, raw GNSS, and gyroscope measurement data were also stored on-board for quality check and postprocess.

The ocean bottom acoustic transponders (**Figure 4**) were equipped with batteries with a planned life span of 5 years and electronic circuit boards mounted in a 17-inch diameter glass sphere along with an acoustic transducer. The seafloor benchmark, which consisted of three ocean bottom acoustic transponders, was installed on June 5, 2017 by the vessel Yuge Maru of the National Institute of Technology, Yuge College. The triangular configuration of the three transponders covered the area under the drifting sea surface buoy (**Figure 5A**). The locations of the transponders were selected based on the anchoring point of the buoy, the mooring chain length, and the dominant direction of the ocean current.

CONTINUOUS ACOUSTIC RANGING TESTS

Continuous acoustic ranging tests were performed for a total of 106 days during the following four periods: March 28–31, June 2–July 12, and November 16–December 17 in 2018; and March 24–April 25, 2019. The buoy position (i.e., the positions of the buoy-mounted GNSS antenna) every 10 min is shown in **Figure 5**. Note that the positions from March to July, 2018 were obtained via a post-processed PPP analysis conducted using commercial software (GrafNav of NovAtel, Inc.) as PPP-AR solutions from the system on the buoy were intermittently unavailable during this period. The positions after November, 2018 were computed by the PPP-AR algorithm on the buoy. The

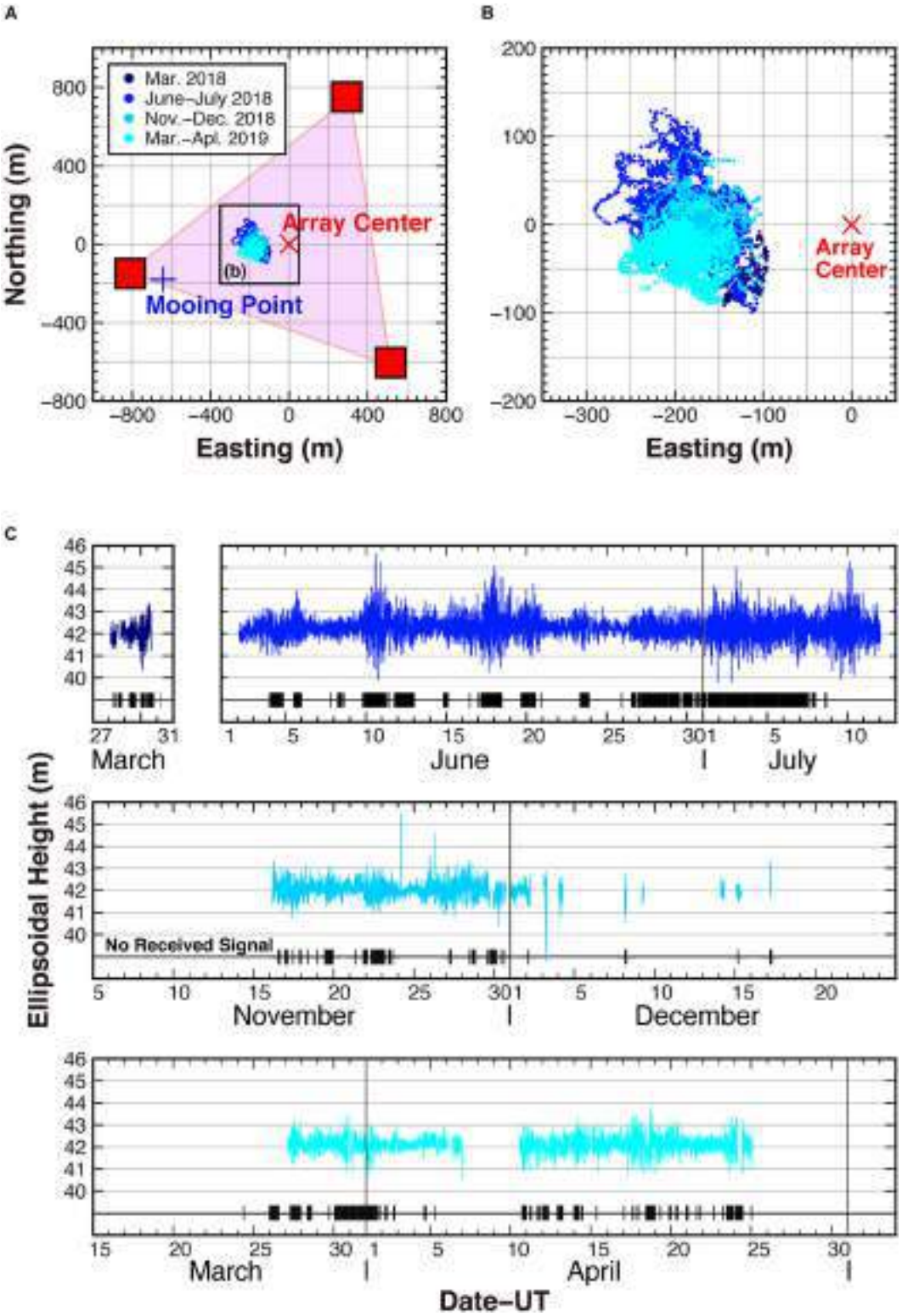


FIGURE 5 | Positions of the buoy-mounted GNSS antenna during the operational test period determined by post-processed PPP (until July) and PPP-AR (after November). **(A)** and **(B)** Horizontal positions (small dots). Different colors indicate differences in period shown by the legend in **(A)**. Red squares, red cross, and blue plus indicate the positions of ocean bottom acoustic transponders, center of the triangular transponder array, and anchored point of the buoy, respectively. **(C)** Ellipsoidal height after the tidal correction on the basis of NAO.99b model (Matsumoto et al., 2000). Black ticks indicate timings of no acoustic signal is recorded at the buoy-mounted acoustic ranging controller.

fluctuations in the ellipsoidal height due to the ocean tide were corrected using the NAO.99b model (Matsumoto et al., 2000). The test site was in an area of the strong east-northeastward Kuroshio ocean current, and the buoy drifted in the east-northeast direction from the anchored point and remained there for the entire period. The buoy drifted almost 100–250 m to the west of the array center, that is, the center of the triangle formed by the three ocean bottom acoustic transponders, which was the desired buoy position relative to the transponder formation (Kido et al., 2018; Imano et al., 2019). As the buoy well followed the movement of the sea-surface, the effects of heavy waves and/or swells due to cold and stagnant fronts (March 30 and July 5–7, 2018), low pressures (June 6, 18–21, and 24, 2018), and severe tropical storms or typhoons (June 11, July 2–4, and July 9–11, 2018) can all be seen in the time series of the ellipsoidal height.

It is known that temporal variations in the speed of sound in the ocean directly affect the accuracy of acoustic ranging, and short-period internal waves are one of the phenomena contributing to temporal variations in the speed of sound. In addition, the time scale of internal waves is known to be tens of minutes at a minimum (e.g., Ali, 1993). Matsui et al. (2019) reported that short-period, less than 1 h, internal waves arises fluctuations of sound-speed in the shallow layer causing large uncertainty of seafloor position. With this in mind, acoustic signals were transmitted sequentially to the three ocean bottom transponders at 3-min intervals; thus, each transponder received a signal every 9 min. This interval was chosen to balance the power consumption and keeping up the temporal variation in the sound speed associated with the internal wave.

A number of problems were encountered during the time the test was underway. The test unexpectedly terminated on March 28, 2018 when the circuit breaker in the battery charge controller forced to cut the power. The data transfer to the ground base station stopped on June 10, 2018 when the satellite modem disconnected. To prevent future occurrences of these situations, we implemented disconnection monitoring and a self-rebooting algorithm to the satellite modem. The data storage on the buoy terminated on June 13, 2018, probably due to high CPU load in the buoy-mounted server along with a communication port error. After this time, the devices handling the acoustic ranging data were no longer connected to the satellite communication modem, and no acoustic data were sent to the ground base station from November to December, 2018. Also, after November 29 or so, the acoustic ranging was frequently interrupted by unstable power, which was thought to be due to the lack of sunshine in the winter season.

In the original configuration installed on the buoy in 2018, the signal processing computer was connected to the GNSS receiver as a temporary data server via an RS-232C communication interface. However, in an attempt to resolve the above issues and improve system reliability before restarting the test on March 24, 2019, the data flow and connections between components were reconfigured to use Ethernet. Although the test was restarted on March 24, 2019, the power supply continued to be a problem that affected the data transfer to the ground base station until it finally terminated on April 11. The acoustic ranging was interrupted from April 6 to April 10, 2019.

The results from the continuous acoustic ranging test are shown in **Figure 6**. The acoustic ranging itself successfully continued throughout the test period as long as power was supplied to the system, as indicated by the red bars in **Figure 6**, although data transfer to the ground base station was intermittent. A total of 41,083 acoustic signals were transmitted from the buoy while the buoy-mounted acoustic ranging controller successfully received a total of 35,316 waveforms (86%) from the ocean bottom transponders. Nothing was recorded in the remaining 5767 files (14%), as indicated by the black bars in **Figure 6**, due to failures in automatic header detection by the acoustic ranging controller (**Figure 5C**). The ocean bottom transponders transmit a header signal prior to the main signal for the acoustic ranging to notify the buoy-mounted acoustic ranging controller the signal transmission. The acoustic ranging controller start the waveform recording after detecting the header signal. If the acoustic ranging controller fails to detect the header signal, nothing is recorded in the file. After the waveform data was manually reviewed, no clear returned signal was recognized in 1073 additional waveforms. A total of only 7553 signals (21% of the total number of successfully recorded signals) were transmitted to the ground base station through the satellite link, as indicated by the blue bars in **Figure 6**. Examples of acoustic ranging data received at the ground base station over the period of an hour are shown in **Figure 7**. The transmission time stamps of the acoustic signal transmissions are shown in the second column in **Figure 7**. In this example, the acoustic ranging data was successively transferred to the ground base station at 3-min intervals.

Examples of the acoustic waveform recorded in the buoy-mounted acoustic ranging controller are shown in **Figure 8**, where it can be seen that the buoy-based acoustic ranging system provided high quality waveforms based on the high maximum value of the absolute cross-correlation function (CCF) between the received and transmitted (reference) signals (**Figure 9**). This situation is different from those of conventional observations made using moving vessels with acoustic transducers mounted on a rod.

REDUCTION OF ACOUSTIC RANGING DATA SIZE

The raw acoustic ranging waveform data from the developed system was 64 KB (=64.512 ms $\times$ 500 kHz $\times$ 2 byte + 1024 byte of header information and spare areas) in size. If this were to be transmitted without modification over a satellite link, it would cost more than $200,000 USD per year. Thus, we reduced the data down to a final size of 60 bytes, which is less than 1/1000 the size of the raw data. The data transferred to the ground base station only contained information related to the travel time of the direct wave as shown in **Figure 7**.

It is necessary to use the travel time of direct wave for the accurate acoustic ranging. The recorded waveforms were

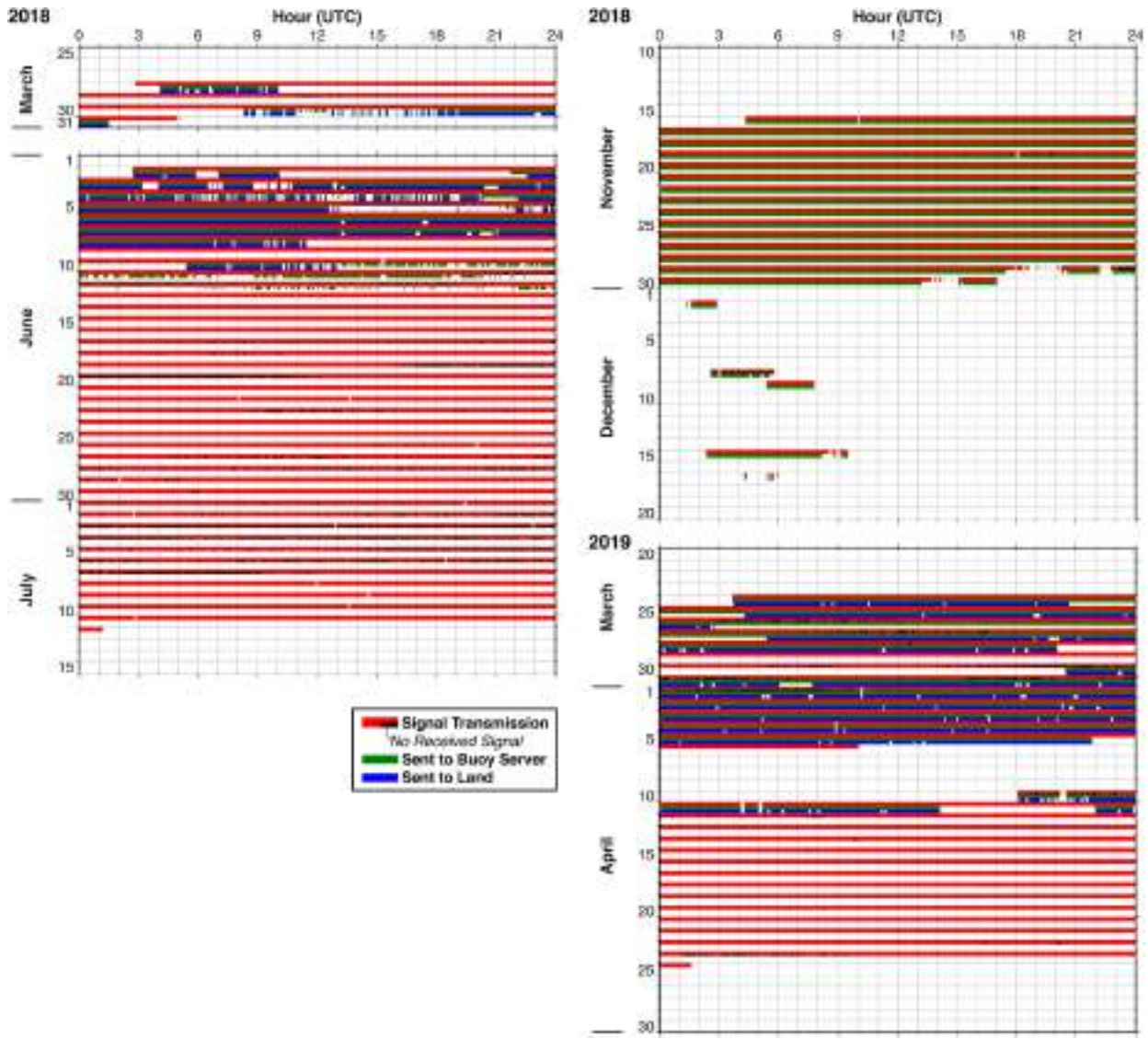


FIGURE 6 | Diagram showing the status of acoustic ranging test. Red: buoy-mounted acoustic ranging controller transmitted the acoustic signal to the ocean bottom transponder, black: nothing was recorded at the acoustic ranging controller (the signal receiving was failed), green: the acoustic waveform was sent to the signal processing computer, blue: the acoustic waveform was sent to the data storage server at the ground base station via the satellite communication.

frequently contaminated by waves reflected from the sea-surface, buoy body, and seafloor (**Figure 8B**), which was also reported by Imano et al. (2015). The onset of a direct wave is determined based on the timing of the maximum CCF value. However, it has been empirically known that reflected waves exhibit multiple CCF peaks, and that the maximum CCF value is sometimes attained during the onset of the subsequent reflected wave (**Figure 8B**), resulting in the direct wave onset being misrecognized (Tadokoro et al., 2012). In this study, it was found that the maximum CCF value was attained at the time of the reflected wave onset for 1250 of the total 35,316 waveforms over the course of the entire test period.

To address this, the energy ratio (ER) was introduced to aid in identifying the correct direct wave onset. The ER is defined as the average wave energy within the time window just after a target time relative to that just before the same target time as follows (e.g., Han et al., 2008):

$$\gamma_i = \frac{1}{W_a}\sum_{j=i}^{i+W_a}(s_j)^2 \Big/ \frac{1}{W_b}\sum_{j=i-d-W_b}^{i-d}(s_j)^2 \qquad (1)$$

where γ_i is the energy ratio at the i-th sample, s_j is the amplitude of the acoustic wave at the j-th sample ($j \geq 1$), d (≥ 1) is the time shift, and W_a (≥ 1) and W_b (≥ 1) are the lengths of the following and preceding windows at the target sample, respectively. Originally, the two windows W_a and W_b were defined as having the same length. Here, the windows had a length of 195 samples (0.390 ms), which corresponded to 5 cycles

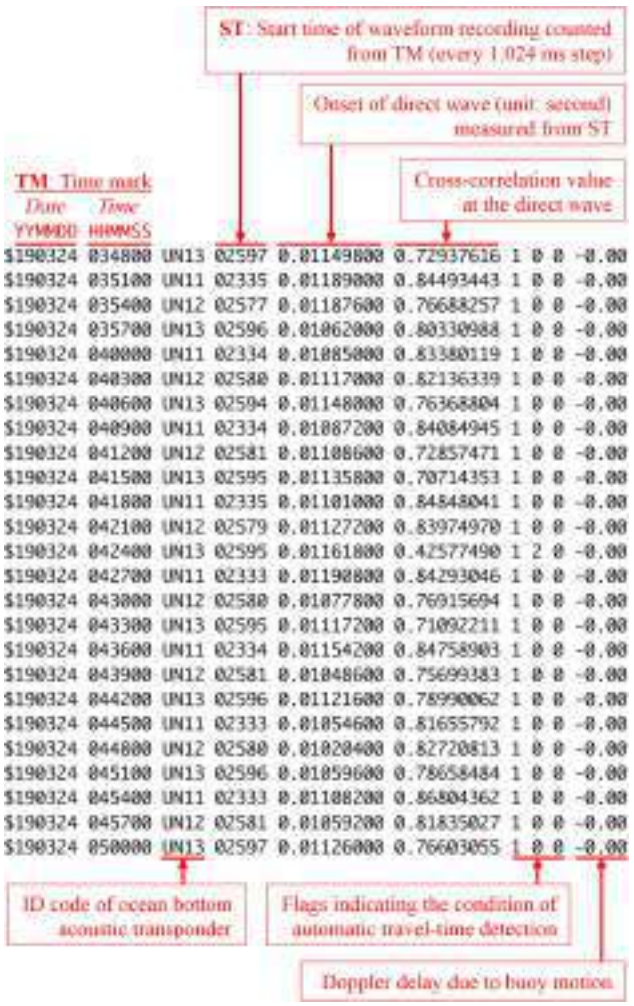


FIGURE 7 | Example of acoustic ranging data received at the ground base station.

of the acoustic signal. Because the wave sample started at $j = 1$, W_b was reset at $i - d - 1$ for the case of $i - d - W_b < 1$. The time shift d was set at 117 (0.234 ms), which corresponded to three cycles, to avoid the transitional vibration of the element inside the acoustic transducer. The direct wave onset could then be detected from a relatively high CCF peak accompanied by a high ER value.

An algorithm was developed to automatically recognize the correct direct wave onset in the buoy-mounted signal processing computer. First, the CCF peak with the maximum value throughout the waveform was identified as Peak-3. Next, Peak-2, the highest peak in the second largest envelope of CCF prior to Peak-3 and Peak-1, the highest peak in the third largest envelope of CCF prior to Peak-2 were identified as each are candidates for the direct wave onset. Finally, the algorithm evaluates whether or not each peak corresponds to the direct wave in order of the peak number on the basis of thresholds set using the CCF and ER values. In essence, relatively high CCF peaks are unconditionally identified as indicators of the direct wave onset. In contrast, low CCF peaks indicate no direct wave is present. If none of the

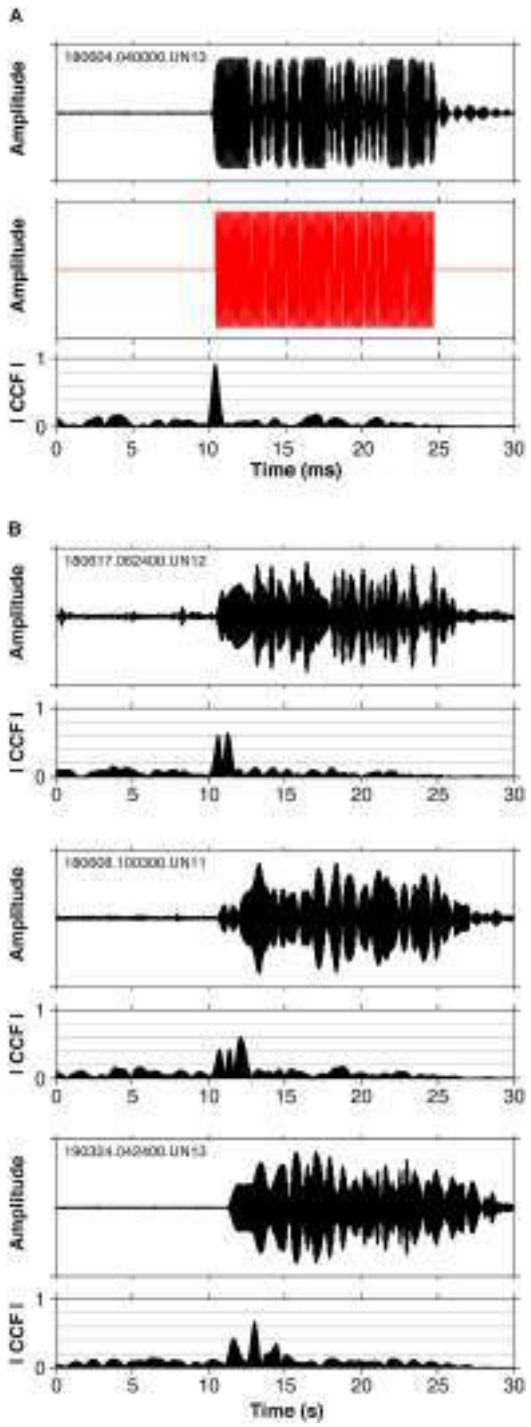


FIGURE 8 | Examples of received acoustic waveform on the buoy-mounted acoustic ranging controller. **(A)** Waveform with high signal-to-noise ratio. Top: received waveform middle: theoretical transmitted signal from the buoy mounted acoustic transducer, bottom: absolute cross-correlation function (CCF) between the received and transmitted (reference) signals. The maximum value of the cross-correlation function is 0.92. **(B)** Waveforms with obvious reflected waves. Each noticeable peak of CCF corresponds to the onset of the direct or the reflected waves. Top and middle: reflected waves from the buoy body or the sea bottom are included, bottom: reflected waves from the sea surface are included.

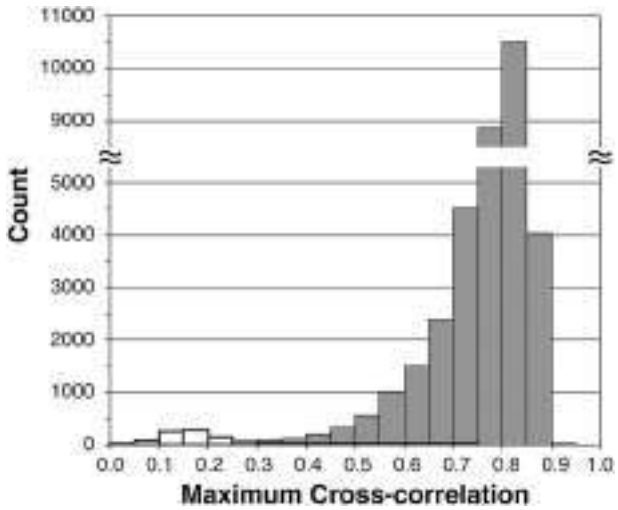


FIGURE 9 | Histogram of the maximum value of CCF. The white bars show the frequency distribution for the waveforms without significant acoustic ranging signal.

three identified CCF peaks exceed the thresholds, the waveform is rejected as containing no clear return. However, if a CCF value is somewhat below the maximum, the CCF peak can still be recognized as indicating a direct wave onset if the ER value is large enough at the peak (**Figure 10**). Note that the CCF values are rounded to two decimal places in our programming code, and the plots in **Figure 10** are discretely distributed. The algorithm was successful and only misrecognized direct wave onsets in 136 waveforms or 0.39% of the data (**Table 1**), which was equivalent to less than twice a day. Most of these cases (112 data) were misrecognized as direct wave onsets due to the extremely small path difference between the direct and reflected waves, which caused an overlap of the CCF peak corresponding to the reflected wave on the direct wave peak. This was identified as a limitation of the present algorithm.

DISCUSSION

In general, our primary purpose was achieved as the acoustic ranging every 3 min continued successfully throughout the test periods. However, the acoustic ranging controller frequently experienced power failures, especially during the winter season. The power delivery for satellite communications did not fully recover even in April, and completely stopped on April 11 (**Figure 6**). The total electric power consumption amounted to 624 Wh (=26 W × 24 h) per day for all components on the buoy, and theoretically, the buoy-mounted system continued to work for an assumed non-sunshine period of about 11.5 days

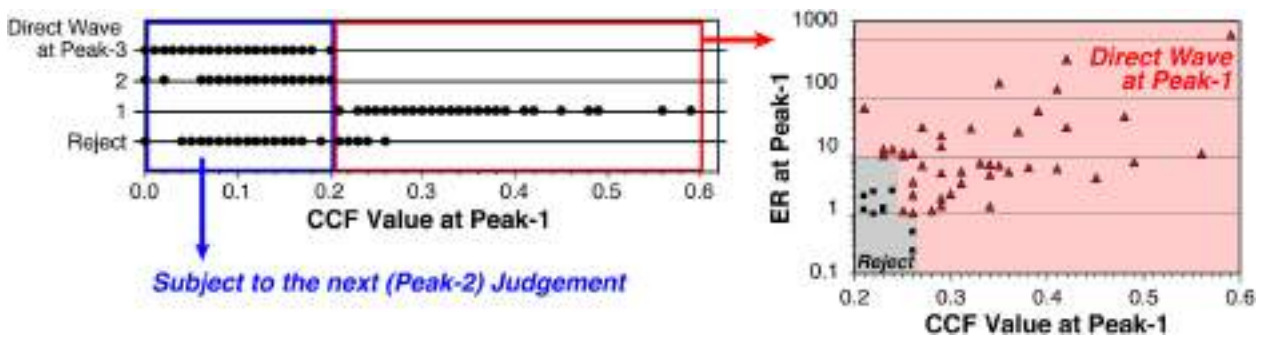


FIGURE 10 | Example of thresholds to recognize the direct wave onset on the basis of the CCF and ER values. Graphs displayed here are for the judgment at Peak-1 among the waveform data recorded on the buoy from March 28 to July 12, 2018. For this case, the peaks with CCF values >0.20 (red square frame in the left panel) are judged whether they correspond to the direct wave onset (red shadow in the right panel) or Reject (gray shadow in the right panel). The peaks with CCF values ≥0.27 unconditionally correspond to the direct wave onset. The peaks with CCF values >0.20 and <0.27 are judged to be the direct wave onset or Reject depending on both their CCF and ER values. The remaining data (blue square frame in the left panel) are subjected to the judgment at Peak-2.

TABLE 1 | Result of the automatic recognition of the direct wave onset.

		Actual (manually checked) Direct wave onset at:				Total
		Peak-1	Peak-2	Peak-3	Reject	
Judged (automatically picked) Direct wave onset at:	Peak-1	**83**	0	1	1	85
	Peak-2	1	**1044**	1	3	1,049
	Peak-3	0	3	**32,987**	3	32,993
	Reject	1	6	4	**1066**	1077
Inseparable peak*		5	107			112
Total		90	1160	32,993	1073	**35,316**

**The CCF peaks overlapped due to extremely short path difference between the direct and the reflected waves. The colored values indicate the number of data.*

(=300 Ah × 24 V/624 Wh). The power supply system on the buoy was conservatively designed to operate for 5 days without any sunshine. Approximately 5–6 days were required to recover the power. Thus, it is assumed that chronic power delivery shortages caused excess electric power consumption relative to the charging power even when there was enough sunshine until the batteries were fully depleted.

This is thought to have occurred for the following reasons. A center pillar with a diameter of 8 m and a height of more than 4 m was constructed on the deck of the buoy (**Figure 3**), and a structure with an area of 2.4 m × 2.4 m was positioned on the top of the center pillar. As the solar panels were mounted 1 m above the deck and connected in series (**Figure 1**), it is likely that some portion of the solar panel modules fell into the shadow of the above-mentioned objects. When this happened, the designed power-generation voltage may have not been acquired even under daylight conditions because of the series connection. The power problems are a critical issue that must be resolved for continuous operation. In the future, we plan to redesign the system so that the solar panels are connected in parallel to ensure adequate power delivery. In addition, the power supply lines for the 12 VDC and 24 VDC systems will be separated.

All electronic components and batteries were stored in five waterproof boxes mounted on the deck of the buoy. The boxes were 102 cm (W) × 74 cm (D) × 50 cm (H) size and weighted 85 kg in aggregate. The present buoy has enough space (8 m in diameter) and buoyancy force (1.45×10^6 N) to support the installation of this equipment. However, when this system is applied in practical applications, it is not realistic to deploy many huge platforms similar to the current setup. Thus, it will be necessary to reduce the size and weight of the equipment to allow installation on platforms with limited payload capacity. To accomplish this, it will be necessary to reduce the power consumption of each electronic component in order to reduce the size of the batteries and solar charge/discharge controller, which occupy three waterproof boxes in total (**Figure 1**). In other words, more than half of the boxes are used to store electric power supply components. Reducing the power consumption will also contribute to solving the insufficient power delivery problem. In the present system, three independent processors were used to process the acoustic ranging data, gyroscope measurement data, and PPP-AR positioning of GNSS data. In the future, this could be reduced by using a single compact PC with multiple functions, which would also simplify the signal transmission lines and wiring.

The purpose of our system is seafloor positioning. Our system is still in the testing phase, and we are developing a positioning algorithm for point survey specific to the present buoy measurement. It is desirable to measure the sound speed profile continuously because temporal and spatial variations in sound speed also directly affects the accuracy of seafloor positioning. Nevertheless, the continuous measurement of sound speed has not been realized in our system. Instead, we plan to estimate variations in sound speed, that appear in the time series of acoustic travel time (e.g., Kido et al., 2008), together with the seafloor positions as demonstrated in previous studies (Fujita et al., 2006; Ikuta et al., 2008; Honsho and Kido, 2017). Average sound speed profiles should be measured with research vessel at some time interval, once a year for our case. Imano et al. (2019) reported accuracy of seafloor positioning from a smaller buoy than ours in the ocean with a depth of about 3000 m. Their buoy was slackly moored, and it drifted within a circle of 4000 m radius due to the strong Kuroshio ocean current. The extreme drifting effect caused decrease in positioning accuracy down to about 1 m. In contrast, the large and heavy buoy we used was moored more tightly. The buoy, therefore, drifted within the area of about only 150–200 m even under the strong Kuroshio current (**Figure 5**). We should demonstrate an advantage of our tightly-moored buoy on the basis of the seafloor positioning accuracy with the positioning algorithm that we are developing now.

CONCLUSION

In this study, we developed a system capable of continuous and real-time measurement to measure seafloor crustal deformation using the GNSS/Acoustic technique. The following summarizes our findings after conducting operational tests using a moored buoy for 106 days:

1. If sufficient electrical power is supplied, the developed system can continuously transmit acoustic ranging to the on-land station via the satellite link;
2. The system on the buoy was able to acquire high-quality acoustic waveforms;
3. More than 99% of the direct acoustic wave onsets at the buoy were correctly distinguished based on the energy ratio factor as well as the cross-correlation value even if those waveforms had been corrupted with reflected waves; and
4. The system on the buoy successfully contributed to reduce the data size over a satellite communication.

In terms of future work, we plan to resolve the identified problems in the electrical system so that the project can advance to the operational stage.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The datasets generated for this study are available on request to the corresponding author. We are preparing a website distributing the archived data at http://www.tsunamigps.com.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

KT designed the entire system, coded the programs that implemented the cross-correlation computation and automatic detection of the onset of direct the acoustic wave, analyzed the acoustic ranging data, and conducted GNSS positioning. NK contributed by revising the system and programs, testing the system prior to installation, retrieving the data, and organizing the database. TK and YT conceived and promoted this study.

KM provided technical support and advice on the configuration of the system, and fabricated the metal parts.

FUNDING

KT, NK, TK, and YT acknowledge financial support from JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310: "A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements."

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank reviewers for their constructive comments. We thank Kochi Prefecture, Japan, for allowing us to use one of their fishery buoys for this study. We are grateful to the captain and crew of the vessel Yuge Maru of the National Institute of Technology, Yuge College, for their support during the installation of the ocean bottom acoustic transponders.

REFERENCES

Ali, H. B. (1993). Oceanic variability in shallow-water acoustics and the dual role of the sea bottom. *IEEE J. Ocean Eng.* 18, 31–41. doi: 10.1109/48.211498

Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., et al. (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Mar. Geodesy* 32, 355–371. doi: 10.1080/01490410903297766

Chadwell, C. D. (2013). "GPS-acoustic seafloor geodesy using a wave glider," in *Proceedings of the Abstract G14A-01 presented at 2013 Fall Meeting*, (San Francisco, CA: AGU).

Chadwell, C. D., and Spiess, F. N. (2008). Plate motion at the ridge-transform boundary of the south Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic data. *J. Geophys. Res.* 113:B04415. doi: 10.1029/2007JB004936

Chen, H.-Y., Ikuta, R., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Kohmi, T., Wang, C.-C., et al. (2018). Back-arc opening in the western end of the Okinawa Trough revealed from GNSS/Acoustic Measurements. *Geophys. Res. Lett.* 45, 137–145. doi: 10.1002/2017GL075724

Fujimoto, H. (2006). Ocean bottom crustal movement observation using GPS/Acoustic system by universities in Japan. *J. Geod. Soc. Jpn.* 52, 265–272. doi: 10.11366/sokuchi1954.52.265

Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M., et al., (2006). GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planet. Space* 58, 265–275. doi: 10.1186/BF03351923

Gagnon, K., Chadwell, C. D., and Norabuena, E. (2005). Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Nature* 434, 205–208. doi: 10.1038/nature03412

Han, L., Wong, J., Bancroft, J. C., and Stewart, R. R. (2008). Automatic time picking and velocity determination on full waveform sonic well logs. *CREWES Res. Rep.* 20:5.1–5.13.

Honsho, C., and Kido, M. (2017). Comprehensive analysis of traveltime data collected through GPS-acoustic observation of seafloor crustal movements. *J. Geophys. Res.* 122, 8583–8599. doi: 10.1002/2017JB014733

Iinuma, T., Hino, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y., et al. (2012). Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.* 117:B07409. doi: 10.1029/2012JB009186

Iinuma, T., Hino, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y., et al. (2016). Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nat. Commun.* 7:13506. doi: 10.1038/ncomms13506

Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., et al. (2008). A new GPS-Acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai Trough. *J. Geophys. Res.* 113:B02401. doi: 10.1029/2006JB004875

Imano, M., Kido, M., Honsho, C., Ohta, Y., Takahashi, N., Fukuda, T., et al. (2019). Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy. *Prog. Earth Planet. Sci.* 6:56. doi: 10.1186/s40645-019-0302-1

Imano, M., Kido, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Ochi, H., Takahashi, N., et al. (2015). "Improvement in the accuracy of real-time GPS/Acoustic measurements using a multi-purpose moored buoy system by removal of acoustic multipath," in *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), IAG Symposia 145*, ed. M. Hashimoto (Berlin: Springer), 105–114. doi: 10.1007/1345_2015_192

Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T., et al. (2005). Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake. Japan, recorded by a new GPS buoy. *Earth Planet. Space* 57, 297–301. doi: 10.1186/BF03352566

Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Issiki, H., Moriguchi, T., et al. (2001). "A new tsunami monitoring system using RTK-GPS," in *Proceedings of International Tsunami Symposium 2001 (ITS 2001)*, Seattle, WA, 645–651.

Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S., et al. (2017). "GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system," in *Proceedings of The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, CA.

Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M., et al. (2018). Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. *J. Disaster Res.* 13, 460–471. doi: 10.20965/jdr.2018.p0460

Kido, M., Fujimoto, H., Hino, R., Ohta, Y., Osada, Y., Iinuma, T., et al. (2015). "Progress in the project for development of GPS/Acoustic technique over the Last 4 years," in *Prceeding of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 145, ed. M. Hashimoto (Cham: Springer), 3–10. doi: 10.1007/1345_2015_127

Kido, M., Fujimoto, H., Miura, S., Osada, Y., Tsuka, K., and Tabei, T. (2006). Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys. *Earth Planet. Space* 58, 911–915. doi: 10.1186/BF03351996

Kido, M., Imano, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Takahashi, N., Tsubone, S., et al. (2018). Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. *J. Disaster Res.* 13, 472–488. doi: 10.20965/jdr.2018.p0472

Kido, M., Osada, Y., and Fujimoto, H. (2008). Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements. *Earth Planet. Space* 60, 229–234. doi: 10.1186/BF03352785

Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R., and Ito, Y. (2011). Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 38:L24303. doi: 10.1029/2011GL050057

Kimura, H., Tadokoro, K., and Ito, T. (2019). Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations. *J. Geophys. Res.* 124, 6140–6164. doi: 10.1029/2018JB016159

Matsui, R., Kido, M., Niwa, Y., and Honsho, C. (2019). Effects of disturbance of seawater excited by internal wave on GNSS-acoustic positioning. *Mar. Geophys. Res.* 40, 541–555. doi: 10.1007/s11001-019-09394-6

Matsumoto, K., Takanezawa, T., and Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *J. Oceanogr.* 56, 567–581. doi: 10.1023/A:1011157212596

Matsumoto, Y., Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Yabuki, T., and Asada, A. (2006). Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planet. Space* 58, 1573–1576. doi: 10.1186/BF03352663

Matsumoto, Y., Ishikawa, T., Fujita, M., Sato, M., Saito, H., Mochizuki, M., et al. (2008). Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planet. Space* 60:e9–e12. doi: 10.1186/BF03353114

Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C., and Iwabuchi, T. (2008). "Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time," in *Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah, GA, 397–405.

Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K., and Ochi, T. (2018). Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data. *Geosphere* 14, 535–551. doi: 10.1130/GES01529.1

Ozaki, T. (2011). Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0): Tsunami warnings/advisories and observations. *Earth Planet. Space* 63, 827–830. doi: 10.5047/eps.2011.06.029

Rocken, C., Mervart, L., Lukes, Z., Johnson, J., Kanzaki, H., Kakimoto, M., et al. (2004). "Testing a new network RTK software system," in *Proceedings of 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, CA, 2831–2839.

Sathiakumar, S., Barbot, S., Hill, E., Peng, D., Zerucha, J., Suhaimee, S., et al. (2016). "Seafloor geodesy using wave gliders to study earthquake and tsunami hazards at subduction zones," in *Proceedings of the Abstract G31A-1046 presented at 2016 Fall Meeting*, (San Francisco, CA: AGU).

Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M., et al. (2011a). Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science* 332:1395. doi: 10.1126/science.1207401

Sato, M., Saito, H., Ishikawa, T., Matsumoto, Y., Fujita, M., Mochizuki, M., et al. (2011b). Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 38:L01312. doi: 10.1029/2010GL045689

Spiess, F. N., Chadwell, C. D., Hildebrand, J. A., Young, L. E., Purcell, G. H. Jr., and Dragert, H. (1998). Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planet. Inter.* 108, 101–112. doi: 10.1016/S0031-9201(98)00089-2

Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Besana, G. M., Sugimoto, S., et al. (2006). Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 33:L23306. doi: 10.1029/2006GL026742

Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Ando, M., Okuda, T., Nagai, S., et al. (2012). Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 39:L10306. doi: 10.1029/2012GL051696

Tadokoro, K., Nakamura, M., Ando, M., Kimura, H., Watanabe, T., and Matsuhiro, K. (2018). Interplate coupling state at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements. *Geophys. Res. Lett.* 45, 6869–6877. doi: 10.1029/2018GL078655

Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koshimura, S., Imada, N., Sakaue, H., et al. (2015). "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," in *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 145, ed. M. Hashimoto (Cham: Springer), 145–153. doi: 10.1007/1345_2015_151

Tomita, F., Kido, M., Ohta, Y., Iinuma, T., and Hino, R. (2017). Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. *Sci. Adv.* 3:e1700113. doi: 10.1126/sciadv.1700113

Tomita, F., Kido, M., Osada, Y., Hino, R., Ohta, Y., and Iinuma, T. (2015). First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique. *Geophys. Res. Lett.* 42, 8391–8397. doi: 10.1002/2015GL065746

Watanabe, S., Bock, Y., Melgar, D., and Tadokoro, K. (2018). Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy. *J. Geophys. Res.* 123, 2448–2461. doi: 10.1002/2017JB014799

Watanabe, S., Sato, M., Fujita, M., Ishikawa, T., Yokota, Y., Ujihara, N., et al. (2014). Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5789–5796. doi: 10.1002/2014GL061134

Yasuda, K., Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Nagai, S., Okuda, T., et al. (2014). Interplate locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost part of the Suruga Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 41, 5806–5812. doi: 10.1002/2014GL060945

Yasuda, K., Tadokoro, K., Taniguchi, S., Kimura, H., and Matsuhiro, K. (2017). Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 44, 3572–3579. doi: 10.1002/2017GL072918

Yokota, Y., and Ishikawa, T. (2020). Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A. *Sci. Adv.* 6:aay5786. doi: 10.1126/sciadv.aay5786

Yokota, Y., Ishikawa, T., Sato, M., Watanabe, S., Saito, H., Ujihara, N., et al. (2015). Heterogeneous interplate coupling along the Nankai Trough. Japan, detected by GPS-acoustic seafloor geodetic observation. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2:10. doi: 10.1186/s40645-015-0040-y

Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T., and Asada, A. (2016). Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature* 534, 374–377. doi: 10.1038/nature17632

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2020 Tadokoro, Kinugasa, Kato, Terada and Matsuhiro. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Kinugasa et al. Progress in Earth and Planetary Science (2020) 7:21
https://doi.org/10.1186/s40645-020-00331-5

Progress in Earth and Planetary Science

METHODOLOGY Open Access

Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy

Natsuki Kinugasa[1*], Keiichi Tadokoro[1], Teruyuki Kato[2] and Yukihiro Terada[3]

Abstract

Using Global Navigation Satellite System–Acoustic (GNSS-A) technique, we have been developing observation system on a moored buoy for continuous monitoring of seafloor crustal deformation. The sound speed structure near a warm current has heterogeneity, which is the main cause of a seafloor positioning error. Assuming a sloping structure, previous studies proposed sound speed model to reduce positioning error. We examined the validity of the model by comparing the estimated structure with the actual structure measured at multiple points around our observation site. The result shows that the gradient parameter estimated from GNSS-A data acquired by vessel is appropriate. The numerical examination indicates that modeling error caused by the misinterpretation of the depth of gradient layer occurs, and it can be suppressed by performing acoustic ranging at the point near the centroid of units. From the calculation of estimation error of sound speed variation, the predicted acoustic ranging error observed using the moored buoy staying near the centroid is 9.0 cm or below. Therefore, seafloor displacement can be detected with centimeter class via moored buoy in the basin of a warm current.

Keywords: GNSS-A, Seafloor crustal deformation, Buoy, Sound speed structure, CTD, Horizontal gradient

Introduction

Spiess et al. (1998) originally presented observation method for seafloor crustal deformation by combining Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning with acoustic ranging. It is difficult to estimate the absolute position on the seafloor using GNSS only because the electromagnetic wave propagates poorly in seawater. GNSS–Acoustic (GNSS-A) technique uses a vessel or buoy as a relay point and estimates the relative position on the seafloor by acoustic ranging. Although the estimation accuracy for stationary displacement has been enhanced by the previous studies (Fujita et al. 2006; Honsho et al. 2019; Ikuta et al. 2008; Kido et al. 2008; Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019), it is still difficult to detect that for non-stationary displacement or separate with high-accuracy coseismic from postseismic one.

Yokota and Ishikawa (2019b) conducted an observation at frequent intervals and were successful to detect the displacement due to the slow slip event. From the results of this study, continuous monitoring is expected to increase the estimation accuracy. Recently, a buoy has been used as the continuous observation platform. Kido et al. (2018) developed the GNSS-A observation system on the moored buoy and had been operating it for almost 1 year. Kato et al. (2005) has utilized a buoy, named GNSS buoy, to observe tsunami. GNSS buoy was successful to detect tsunamis generated by the 2001 Peru earthquake, the 2004 off the Kii peninsula earthquake in Japan, and so on. Our research group then conducted experiments farther from the coast and extended the

* Correspondence: kinugasa@seis.nagoya-u.ac.jp
[1]Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan
Full list of author information is available at the end of the article

Springer Open

© The Author(s). 2020 **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

function of the GNSS buoy by introducing GNSS-A observation equipment. We previously reported the development of a comprehensive observation system for tsunami, ionospheric total electron content, precipitable water, and seafloor crustal deformation (Kato et al. 2018).

The moored buoy we used in this research is owned by Kochi Prefecture, Japan, which is located approximately 30 km off the coast of cape Ashizuri (Fig. 1). We installed three acoustic units on the seafloor around the buoy in 2017 and finished installing observation equipment, such as GNSS antenna and receiver, gyro sensor for attitude measuring, acoustic ranging equipment, computers for data processing, and satellite communication unit for data transfer, on the deck in 2018. The measurements of GNSS and gyro are acquired with 1 Hz sampling. The acoustic ranging at 3 min intervals for units one by one in sequence is continuously operated.

As shown by Yokota et al. (2019), from 2014 to 2016, water temperature at the surface layer around this region had gradient toward the southeast. The temperature gradient was generated by warm current called Kuroshio that flows northward in the Pacific Ocean along the eastern coast of Japan. Yokota end Ishikawa (2019a) also pointed out that sound speed structure has strong gradient when the observation point is located at the edge of the Kuroshio. Kido (2007) presented sound speed model considering horizontal gradient because the heterogeneity in sound speed structure is the main cause of positioning error for GNSS-A technique. Assuming a sloping structure for sound speed to estimate the variation from reference sound speed profile, Yasuda et al. (2017), Honsho et al. (2019), and Yokota et al. (2019) developed an analytical method. They eventually demonstrated that the estimation for the time series of unit position was improved.

In our case, we needed to use the measured in the past for analysis because our buoy was not equipped with the function of measuring sound speed. Therefore, the estimation accuracy for sound speed variation has more direct effects on the positioning accuracy. Accordingly, this study aimed to evaluate estimation accuracy for its temporal and spatial variations. We then measured sound speed at multiple points around seafloor units in parallel with acoustic ranging and obtained its three-dimensional structure. We applied the sloping structure model to GNSS-A data acquired using vessel and obtained seafloor unit position and sound speed variations. Then, we compared the estimated horizontal gradient with the measured structure. We also calculated the anticipated

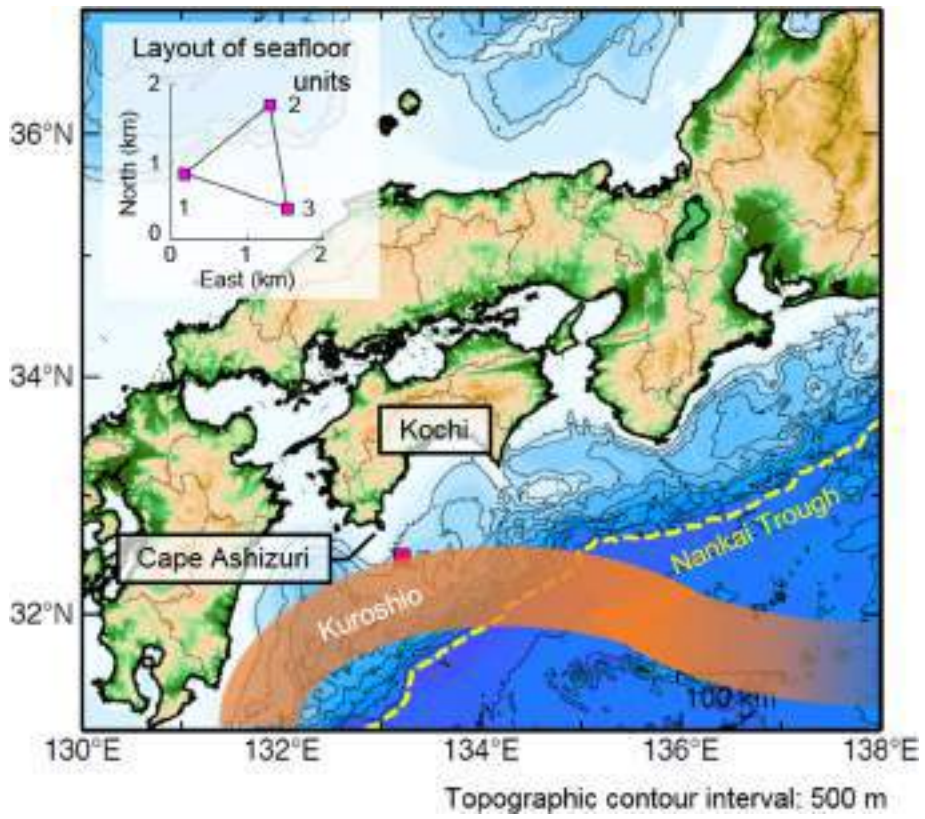


Fig. 1 Location of our observation site (pink square) with schematic diagram of the Kuroshio basin

ranging error observed using buoy to examine the capability of the buoy to detect the seafloor displacement.

First, we presented sound speed model and analytical method considering its sloping structure. Then, we showed the analytical results of array shape and horizontal gradient of sound speed by using GNSS-A data acquired using vessel. We discussed the estimated acoustic ranging error observed using buoy. The modeling error caused by misinterpretation of sound speed structure is also discussed.

Observation and data

GNSS-A observation using vessel

We conducted observation using research vessel Yugemaru from 2017 to 2019 to determine the initial position of seafloor units and survey the sound speed structure at the site. Figure 2a shows the track maps for six epochs. First, the vessel ran clockwise and counterclockwise around the unit array on the circular route in either case. The vessel also navigated along straight orbits passing both the vicinity of the center of the circular route and the point right above each seafloor unit. The acoustic ranging was performed at intervals of 8 s for units one by one in sequence for about 5–6 h for each epoch. During acoustic ranging, the onboard GNSS receiver recorded satellite signal and the gyrocompass measured attitude of the vessel. The position of onboard transducer can be calculated from the measured attitude and the position of GNSS antenna placed on the vessel estimated using kinematic positioning. We also measured conductivity, temperature, and depth (CTD) of sea water in parallel with acoustic ranging.

Sound speed structure obtained from CTD measurements

We conducted underway CTD observations at the points as indicated by the star symbols on the circular route in Fig. 2a. We performed at multiple points to understand sound speed structure at our observation site. Figure 2b shows sound speed profiles at 1 m intervals of water depth for each epoch, which is calculated using the equation proposed by Del Grosso (1974). The similar variation patterns according to the depth were measured

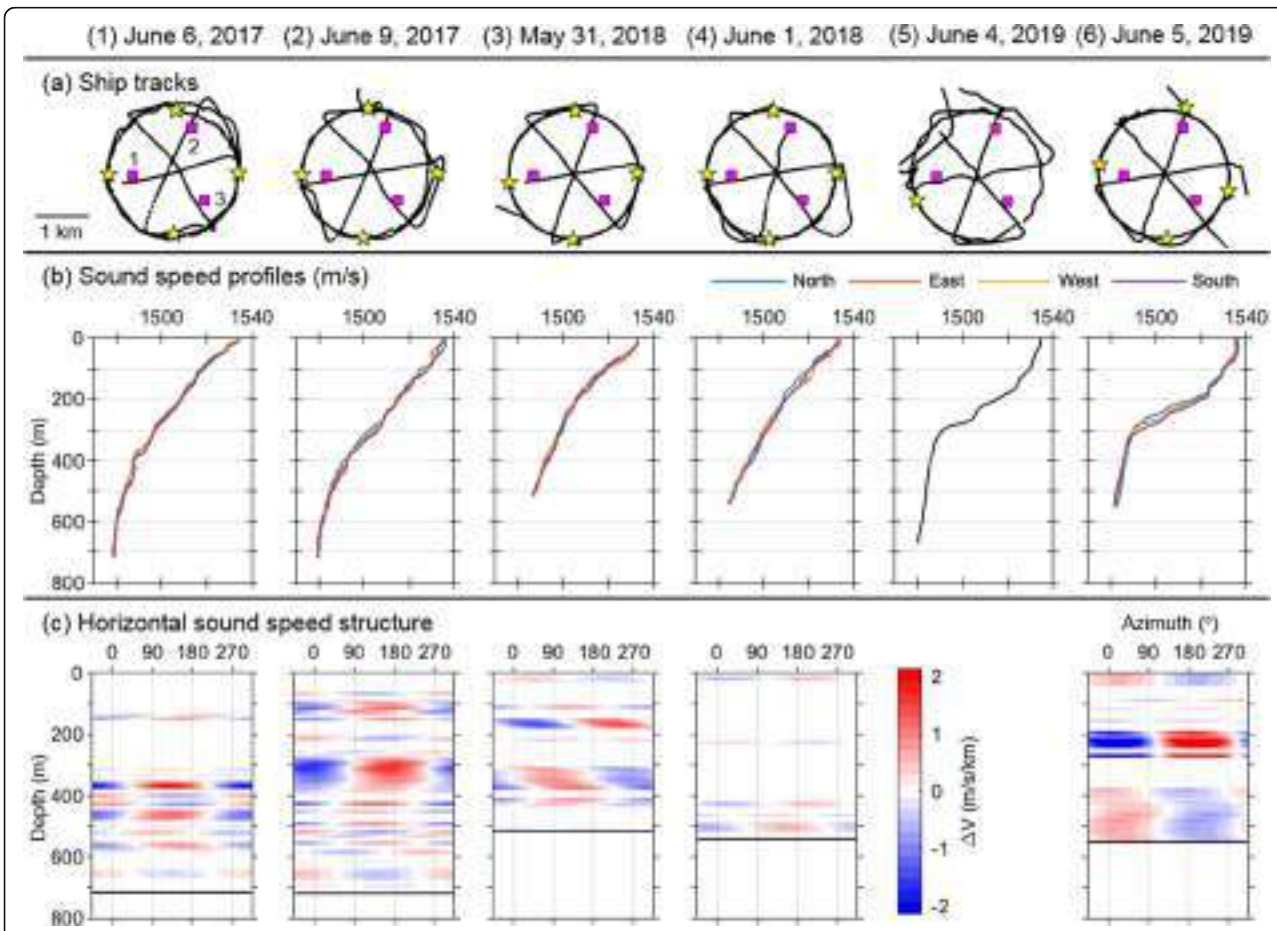


Fig. 2 Outline of conducted observation using vessel for six observational epochs. **a** Two-dimensional ship track maps. Pink squares and star symbols represent seafloor units and the point where observations for conductivity, temperature, and depth (CTD) were conducted. **b** The variation of sound speed in ocean along to the depth. **c** The sound speed perturbation calculated by Eq. (2)

in 2017 and 2018, whereas the vertical gradient at the depth 200–300 m measured in 2019 were extremely large.

The horizontal structure of sound speed has been generally considered to be sloping in the region near the Kuroshio basin (Kido 2007; Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019; Honsho et al. 2019). We applied this model to detect horizontal gradient of sound speed from CTD measurements. Then, sound speed at the point (x, y, z) is modeled by

$$V(x, y, z) = V_0(z) + \delta V_x(z) \cdot x + \delta V_y(z) \cdot y, \quad (1)$$

where $V_0(z)$ (m/s) is sound speed at the origin and δV_x and δV_y (m/s/m) are the constant gradients of east and south components, respectively. Using the least squares method, the parameters $V_0(z)$, $\delta V_x(z)$, and $\delta V_y(z)$ at 1 m intervals of the depth from multiple profiles (Fig. 2b) can be obtained. Figure 2c shows the perturbation from $V_0(z)$ calculated by

$$\Delta V(z, \phi) = \delta V_x(z) \cdot R \ \sin\phi + \delta V_y(z) \cdot R \ \cos\phi, \quad (2)$$

where R (m) is radius of circular route and ϕ (radian) is the direction of gradient axis from the true north. We considered that if the estimation errors of $\delta V_x(z)$ and $\delta V_y(z)$ are extremely large, the horizontal structure at a particular depth is not sloping. Then, the perturbation was not painted at the depth where the radius of error ellipse for $\Delta V(z, \phi)$ with 95% confidence probability was higher than its estimation value.

The results in 2017 and 2019 showed that a strong gradient mainly from southeast to south is generated at the depth 200–400 m. Contrarily, the structures in 2018 have weak gradient or complicated gradient field. Yokota and Ishikawa (2019a) categorized a structure in accordance with the relative position between observation site and the Kuroshio basin. The structure in shallow depth has weak gradient in the area inside the Kuroshio. On the edge of the Kuroshio, there is strong thick gradient layer. The unstable disturbance is likely to be generated because there is no strong current flow in the area outside the Kuroshio. According to this categorization, our observation site was considered to be on the edge for the epochs in 2017 and 2019 and outside the Kuroshio for the epochs in 2018.

Methods/experimental

Model definition for travel time of acoustic signal

Travel time between onboard transducer $\boldsymbol{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$ and seafloor unit $\boldsymbol{x}_u = (x_u, y_u, z_u)$ is defined as the integration of slowness S, which is an inverse of sound speed, along the propagation path:

$$T = \int_0^L S(x, y, z, t)\mathrm{dl}, \quad (3)$$

where $L = |\boldsymbol{x}_s - \boldsymbol{x}_u|$ is path length (m). To express the equation of travel time simply, we used S instead of sound speed. As shown in Eq. (1), several previous works considered that horizontal sound speed structure is sloping. We also assumed that horizontal structure consists of N layers, the thickness of each layer is H (m), and the gradient is uniform within each layer. Then, the slowness at the depth in nth layer at the time t is modeled by

$$S(x, y, z, t) = a(t)S_0(z) + \delta S_{x,n} \cdot x + \delta S_{y,n} \cdot y, \quad (4)$$

where $S_0(z)$ is slowness (s/m) at the origin and$\nabla \boldsymbol{S}_n = (\delta S_{x,n}, \delta S_{y,\ n})$ are the east and north components of horizontal gradient (s/m/m) in nth layer, respectively. According to Ikuta et al. (2008), the temporal variation of slowness $a(t)$ is represented by a cubic B-spline curve:

$$a(t) = \sum_{i=0}^{3} \alpha_i B_{i,4}(t), \quad (5)$$

where α_i is control points and $B_{i,4}(t)$ is basis function. We set 3 h for the knot interval in this study to detect long-term variation caused by the ocean tide. Assuming that acoustic signal propagates linearly as described in Fig. 3a, we obtained $\mathrm{dl} = \mathrm{L}/D \ \mathrm{dz}$ ($D = z_s - z_u$). By substituting Eq. (4) into (3), the theoretical travel time can be written as

$$T_{\mathrm{cal}} = L \cdot a(t)\overline{S}_0(z_s, z_u) + \frac{L}{D}\Delta T_{\ \mathrm{grad}}, \quad (6)$$

where the average sound speed at the origin is expressed as

$$\bar{S}_0(z_s, z_u) = \frac{1}{D}\int_{z_u}^{z_s} S_0(z)\mathrm{dz}, \quad (7)$$

and the contribution of horizontal gradient to travel time is

$$\Delta T_{\mathrm{grad}} = \sum_{n=1}^{N} \int_{z_u+(n-1)H}^{z_u+nH} [\delta S_{x,n} \cdot x + \delta S_{y,n} \cdot y] \ \mathrm{dz}. \quad (8)$$

By substituting the coordinate of the point on the path $x = x_u + \frac{z-z_u}{z_s-z_u}(x_s - x_u)$ into Eq. (8), the east component of ΔT_{grad} is given by

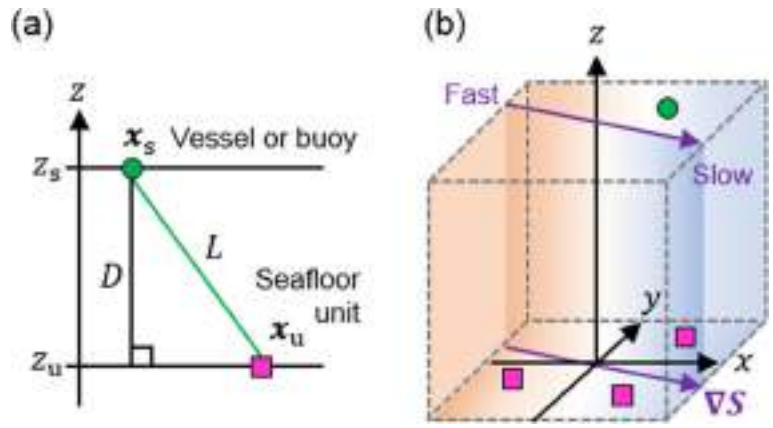


Fig. 3 Schematic diagram drawing **a** propagation path and **b** horizontal slowness model having constant gradient from seafloor to sea surface. It is assumed that acoustic signal transmitted from vessel or buoy $\boldsymbol{x}_s$ (green circle) propagates linearly to seafloor unit $\boldsymbol{x}_u$ (pink square)

$$Hx_u \sum_{n=1}^{N} \delta S_{x,n} + \frac{H^2}{D}(x_s - x_u) \sum_{n=1}^{N} (n - \frac{1}{2}) \cdot \delta S_{x,n} \tag{9}$$

The contributions of gradient to travel time are determined by its strength and thickness and depth of gradient layer. As suggested in Eq. (9), the parameters of strength $\delta S_{x,n}$ and thickness H are inseparable. Therefore, the previous works generally set H to 500–1000 m (Yasuda et al. (2017), Honsho et al. (2019)). Since the depth of our observation site is below 800 m (Fig. 1), this study assumed that strength and direction of gradient are constant from sea bottom to sea surface (Fig. 3b). Then, we obtained

$$\Delta T_{\mathrm{grad}} = \frac{1}{2} D[\delta S_x(x_s + x_u) + \delta S_y(y_s + y_u)], \tag{10}$$

by substituting $N = 1$, $H = D$, and $\nabla \boldsymbol{S}_n = \nabla \boldsymbol{S} = (\delta S_x, \delta S_y)$ into Eqs. (8) and (9). ΔT_{grad} indicates a sum of product of gradient value and horizontal distance from the origin to the middle of path. Accordingly, theoretical travel time model applied in this study is

$$\begin{aligned} T_{\mathrm{cal}}(\boldsymbol{x}_u, \boldsymbol{x}_s, S_0, a, \nabla \boldsymbol{S}, t) = L\{a(t)\bar{S}_0(z_s, z_u) \\ + \frac{1}{2}[\delta S_x(x_s + x_u) \\ + \delta S_y(y_s + y_u)]\}, \end{aligned} \tag{11}$$

obtained from Eqs. (6) and (10).

Analytical process for detecting seafloor displacement

We need to determine the shape of seafloor unit array in advance for detecting precisely seafloor displacement observed using buoy. Then, first, we determine the array shape using data acquired using vessel, and second, we estimate the displacement of array from the initial position with assumptions that every single unit moves in the same direction and also at the same speed due to the crustal deformation.

The theoretical travel time from the transducer of the vessel to the unit i for kth shot at time t_k is given by $T_{\mathrm{cal}}(\boldsymbol{x}_{u,i} + \boldsymbol{\delta x}_m, \boldsymbol{x}_{s,k}, S_{0,m}, a, \nabla \boldsymbol{S}_m, t_k)$ for mth epoch. The position of unit i for mth epoch is expressed as $\boldsymbol{x}_{u,i} + \boldsymbol{\delta x}_m$, where $\boldsymbol{x}_{u,i}$ is its initial position and $\boldsymbol{\delta x}_m$ is the vector of array displacement. To determine the array shape, the parameters to be estimated are $\boldsymbol{x}_{u,i}$, $\boldsymbol{\delta x}_m$, and temporal variation $a(t_k)$ and horizontal gradient $\nabla \boldsymbol{S}_m$ from the slowness profile $S_{0,m}$. The average of their profiles was applied for $S_{0,m}$, since this analysis is performed without the information of horizontal sound speed structure obtained from multiple profiles (Fig. 2c).

As shown in Fig. 2c, the horizontal structure changes day by day. Although the time variation of $\nabla \boldsymbol{S}$ should be considered, we treat $\nabla \boldsymbol{S}$ as constant value during a certain time in accordance with Honsho et al. (2019). We assumed that $\nabla \boldsymbol{S}$ is constant during observation for single epoch since the observation using vessel takes approximately 6 h for this site. For the observation using buoy, we were planning to divide observation period by a prescribed time interval and to consider $\nabla \boldsymbol{S}$ constant within interval.

The theoretical travel time from the buoy is also given by $T_{\mathrm{cal}}(\boldsymbol{x}_{u,i} + \boldsymbol{\delta x}_p, \boldsymbol{x}_{s,k}, S_0, a, \nabla \boldsymbol{S}_q, t_k)$. $\boldsymbol{\delta x}_p$ and $\nabla \boldsymbol{S}_q$ are those of the pth and qth divisions when observation period is divided by a prescribed time interval for each. For the determination of array displacement, the unknown parameters are $\boldsymbol{\delta x}_p$, $a(t_k)$, and $\nabla \boldsymbol{S}_q$. We need to use the profile measured by vessel in the past because our observation system on the buoy has no function for CTD measuring. Both analyses use the least squares

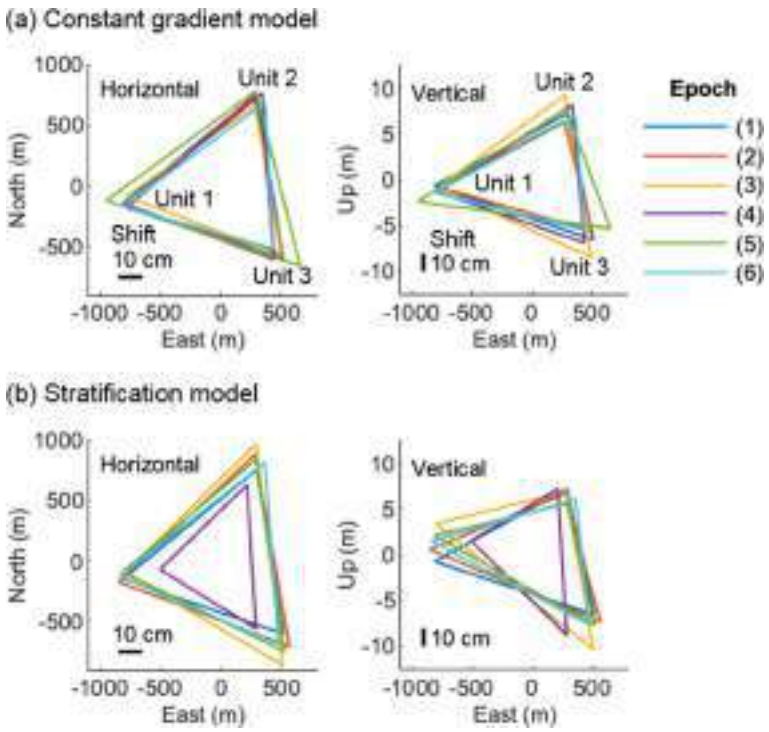


Fig. 4 Determined horizontal and vertical array shape by using sound speed models: **a** constant gradient model and **b** stratification model (ignoring the gradient). The shape for epoch (1) is displayed with the scale of axes. The differences in horizontal and vertical shapes from which of epoch (1) are magnified by × 2000 and × 15, respectively, to make the dispersion easier to be seen. The epoch number corresponds the number indicated in Fig. 2a

method and determine the unknown parameters that minimize the sum of residuals between observed and theoretical travel time.

Results

Array shape of seafloor units

First, we examined the effect of considering horizontal gradient of sound speed for array shape determination. For this purpose, we compared array shape determined using sound speed model considering and ignoring gradient. Here, the model considering gradient (Eq. (4)) is called constant gradient model, and model ignoring gradient is called stratification model. By conducting analysis for each single epoch, a set of six shapes was obtained. Figure 4 compares the obtained array shapes for each sound speed model. The centroid position of each shape is arranged to the origin. For both horizontal and vertical shapes, the dispersion was suppressed by considering gradient. Table 1 also compares averaged distance between units with the standard deviation. The maximum dispersion of horizontal one between unit 1 and unit 3 was decreased from approximately 10 to 7 cm by considering gradient. The dispersions of vertical one were also decreased.

We also showed the positional shift of unit array between two models for each epoch in Fig. 5. Violet and blue vectors in Fig. 5a denote the estimated horizontal gradient and the centroid shift, respectively. Two arrows

Table 1 Averaged distances between seafloor units determined by using different sound speed models

		Horizontal sound speed model:			
		Stratification model		Constant gradient model	
		Mean (m)	STD (cm)	Mean (m)	STD (cm)
Horizontal distance	Unit 1, 2	1424.583	9.4	1424.565	3.6
	Unit 2, 3	1374.945	10.1	1374.973	4.5
	Unit 3, 1	1403.078	10.4	1403.153	6.9
Vertical distance	Unit 1, 2	7.735	7.8	7.798	5.5
	Unit 1, 3	5.807	12.2	5.935	7.2

Note: *STD* standard deviation

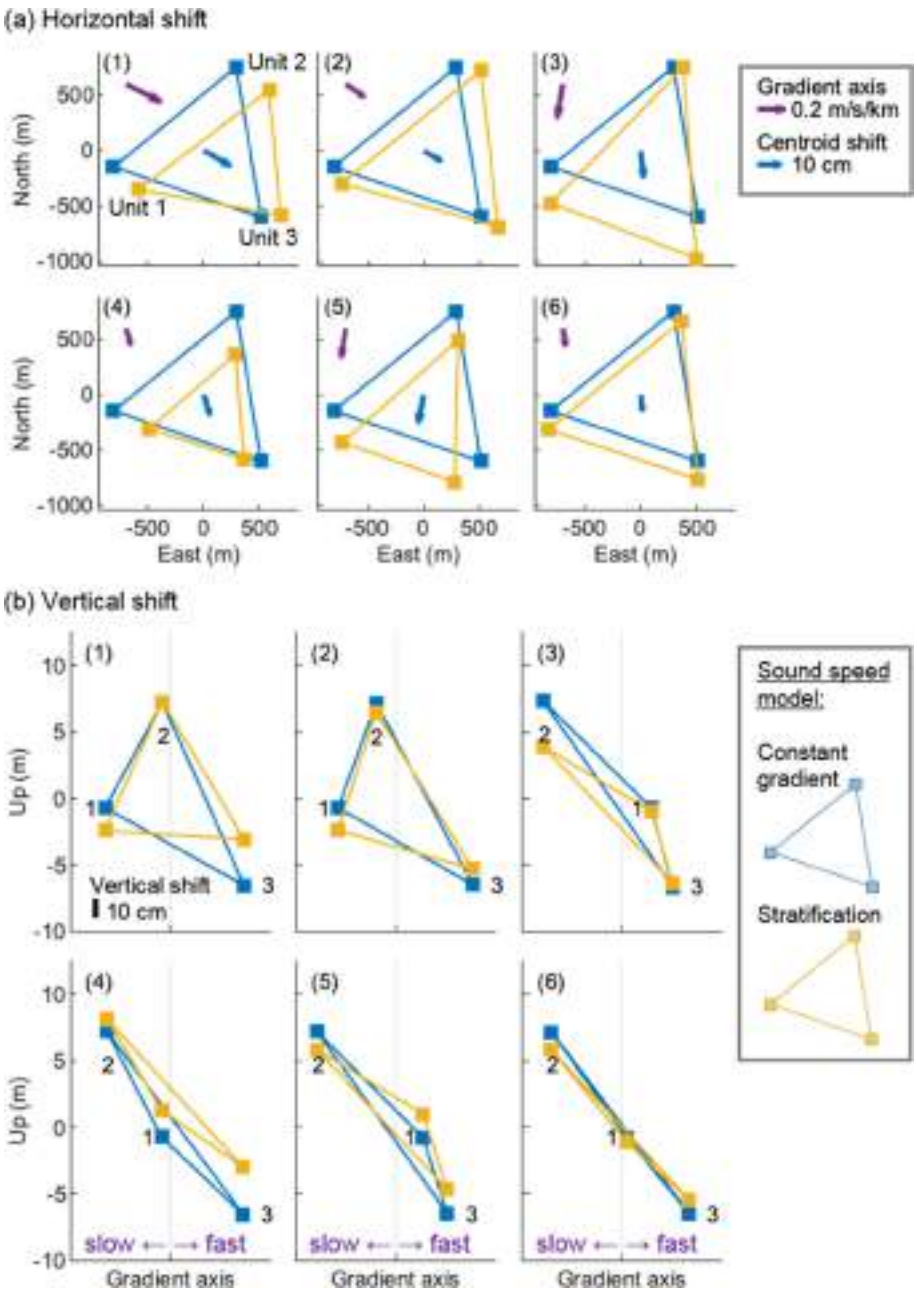


Fig. 5 The positional shift of determined array shape for each epoch using sound speed models: constant gradient (blue triangle) and stratification model (yellow triangle). The shape for constant gradient model is displayed with the scale of axes. **a** Horizontal shift amount of the shape for stratification model is magnified by × 2000. Violet arrow denotes the estimated horizontal gradient vector and points in the direction of increasing sound speed. Blue arrow indicates the centroid shift. **b** Vertical shift amount is magnified by × 15. Horizontal axis indicates gradient axis for each epoch

point in almost the same direction. Since violet arrow points in the direction of increasing sound speed, the estimated unit position is shifted toward faster sound speed by ignoring gradient. Moreover, the shift amount seems to be proportional to the quantity of gradient parameter. Vertical array shift in Fig. 5b suggests that the depth of unit is estimated shallower than the true position for the unit where the sound speed is faster.

Second, we conducted analysis to determine common array shape for six epochs by using constant gradient model. Table 2 displays the determined position of seafloor units expressed as the east–north–up coordinates centering the centroid of the array (latitude 32.48662

Table 2 Position of seafloor units estimated by using multiple campaign data

	ENU Position (m)			σ (cm)	
	East	North	Up	Horizontal	Vertical
Unit 1	− 810.24	− 148.10	− 0.72	1.4	1.5
Unit 2	293.57	752.42	7.23	1.4	1.5
Unit 3	516.66	− 604.32	− 6.50	1.4	1.5

Note. ENU east-north-up, σ the major axial radius of error ellipse with 95% confidence probability

north, longitude 133.20850 east, and at ellipsoidal height − 756.15 m). From the calculated major axial radius of error ellipse with 95% confidence probability, the unit position was determined with 1.5 cm accuracy.

Horizontal sound speed structure

We also obtained horizontal gradient from the analysis to determine common array shape in the above section. The estimation results are summarized in the left column in Table 3. The magnitude of horizontal gradient ΔV (m/s/km) was converted from $\nabla \boldsymbol{S}$ by $\Delta V \approx |\nabla \boldsymbol{S}|/\overline{S_0}^2 \times 10^3$. The estimated direction of gradient axis ϕ is also displayed. The estimated ϕs of epochs (1) and (2) in 2017 are southeast, which corresponds with the measured structure (Fig. 2c). The estimated ΔV value of epoch (3) is about half those of epoch (1). The effect of gradient on the observed travel time was canceled because the measured structure of epoch (3) is complicated. The estimated ΔV is smallest for epoch (4) because the structure has weak gradient. Although the structure of epoch (6) has large gradient at the depth 200–300 m, ΔV is smaller than those of epochs (1) and (2). It suggests that the effect of gradient is suppressed because the thickness of gradient layer is thin.

Table 3 Horizontal gradient of sound speed estimated from different profiles

	Reference sound speed profile observed on:								
	Each epoch			6 June 2017			5 June 2019		
Epoch	ΔV	φ	RMS	ΔV	φ	RMS	ΔV	φ	RMS
(1)	0.27	121	0.04	–	–	–	0.27	125	0.09
(2)	0.21	136	0.05	0.18	133	0.06	0.20	129	0.07
(3)	0.14	200	0.06	0.16	197	0.06	0.23	195	0.11
(4)	0.11	184	0.05	0.11	183	0.05	0.14	180	0.09
(5)	0.18	174	0.06	0.18	171	0.08	0.18	175	0.06
(6)	0.16	164	0.05	0.14	156	0.10	–	–	–

Note. ΔV magnitude of horizontal gradient (m/s/km), ϕ azimuth angle (degrees) *RMS* rms error of residual between observed and calculated travel time (ms)

Estimation error of sound speed variations

A comparison with actual structure demonstrated in the previous section that horizontal gradient estimated from GNSS-A data with sound speed profile obtained in parallel with acoustic ranging was appropriate. Although our buoy has no function for measuring sound speed, the profile measured in the past needs to be used. Accordingly, we examined the effect of substituting the profile obtained on other days on the estimation of sound speed variations. We applied the profiles measured on 6 June 2017, and 5 June 2019, to the calculation for other epochs and obtained temporal variation and horizontal gradient from those reference profiles.

Table 3 compares the horizontal gradient estimated using different profiles. The root-mean-square (rms) errors of residual between observed and calculated travel time are also shown. The rms error was 0.04–0.06 ms in the case of using profile obtained in each epoch. We then considered estimation using other profile to be validated when the rms error is less than 0.06 ms. Based on this index, the profile of epoch (1) should be selected for epochs (2)–(4) and that of epoch (6) should be selected for epoch (5). As shown in Fig. 2b, observed variation patterns along the depth for two epochs in 2019 were quite different from others. Thus, applying the profile markedly different from the actual pattern has adverse effect on the estimation. Even if the suitable one was selected as the reference, the estimation errors for ΔV and ϕ are maximum of 0.03 m/s/km and 3°, respectively.

Figure 6 also compares the estimated temporal variation of averaged sound speed ($1/a(t)\overline{S_0}$). As mentioned above, the profile of epoch (6) should not be selected as the reference for epoch (1)–(4). However, regardless of the used profile, the temporal variation patterns were successfully identified. The offset in the figures represents the average of the residual of estimation values between used profiles. The results of all epochs indicate that using suitable profile can suppress the offset and the maximum value is 0.11 m/s.

Discussion

Separability between array displacement and sound speed gradient

Honsho et al. (2019) discussed the requirements to detect array displacement separately from horizontal gradient. In two-dimensional example, they theoretically demonstrated that the measurements obtained from the point survey at the center of an equilateral triangle array have little information to separate them. The buoy we applied is in a similar situation as shown in Fig. 7 showing its movement for a month observed through GNSS. The position of buoy had been stable within a square of approximately 400 m × 400 m. Therefore, we also considered the separability with three-dimensional example for observation using buoy.

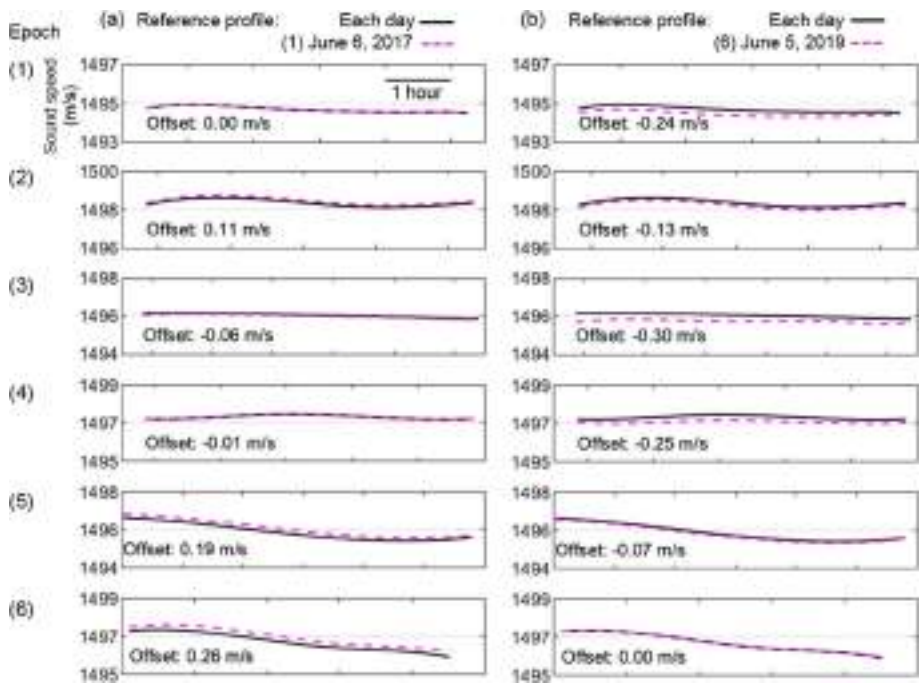


Fig. 6 Estimated temporal variation of averaged sound speed. Black lines indicate estimated variation from the profile observed on each day. Pink broken lines indicate estimated variation from the profile observed on **a** 6 June 2017, and **b** 5 June 2019, respectively. The offset was calculated by averaging the residual of value estimated from different profiles

According to Eq. (11), the observed travel time for unit i for kth shot is given by

$$T_{i,k} = L_{i,k}\{\bar{S}_0 + \frac{1}{2}[\delta S_x(x_{\mathrm{u},i} + \delta x + x_{\mathrm{s},k}) + \delta S_y(y_{\mathrm{u},i} + \delta y + y_{\mathrm{s},k})]\}, \quad (12)$$

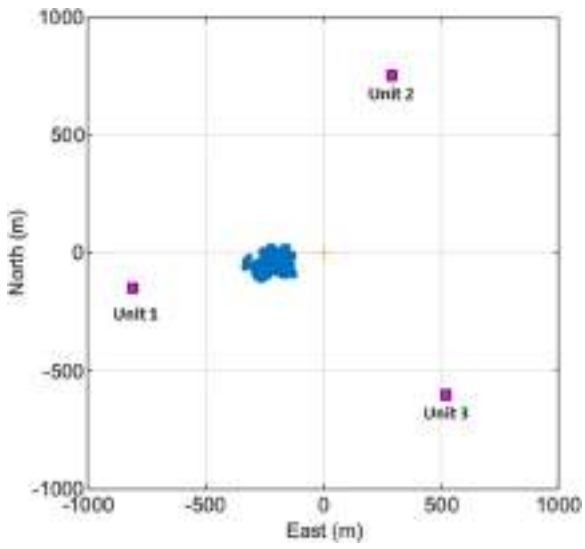


Fig. 7 Location of seafloor units and buoy observed in March 2019

where $L_{i,k} = |\boldsymbol{x}_{\mathrm{s},k} - (\boldsymbol{x}_{\mathrm{u},i} + \boldsymbol{\delta x})|$. The quantity of travel time changes caused by the array displacement $\boldsymbol{\delta x}$ becomes

$$\delta T_{i,k}^{\mathrm{disp}} = (L_{i,k} - L_{i,k}^{'})\bar{S}_0 \approx \frac{\bar{S}_0}{L_{i,k}^{'}}[\delta x(x_{\mathrm{u},i} - x_{\mathrm{s},k}) + \delta y(y_{\mathrm{u},i} - y_{\mathrm{s},k})], \quad (13)$$

where $L_{i,k}^{'} = |\boldsymbol{x}_{\mathrm{s},k} - \boldsymbol{x}_{\mathrm{u},i}|$. The temporal variation of $\bar{S}_0$ is ignored here for brevity. The contribution of horizontal gradient to travel time is

$$\delta T_{i,k}^{\mathrm{grad}} \approx \frac{1}{2} L_{i,k}^{'}[\delta S_x(x_{\mathrm{u},i} + x_{\mathrm{s},k}) + \delta S_y(y_{\mathrm{u},i} + y_{\mathrm{s},k})]. \quad (14)$$

The position of onboard transducer $\boldsymbol{x}_{\mathrm{s},k}$ is fixed at the origin if the buoy stops at the centroid of unit array. Assuming that the array shape is equilateral triangle and all units are at the same depth, the path length L and the incident angle of acoustic signal θ are independent of unit and shot (Fig. 8c). Then, the quantities of travel time changes in Eqs. (13) and (14) are rewritten as

$$\delta T_i^{\mathrm{disp}} \approx \bar{S}_0 |\boldsymbol{\delta x}| \sin\theta \cos(\gamma - \psi_i), \quad (15)$$

and

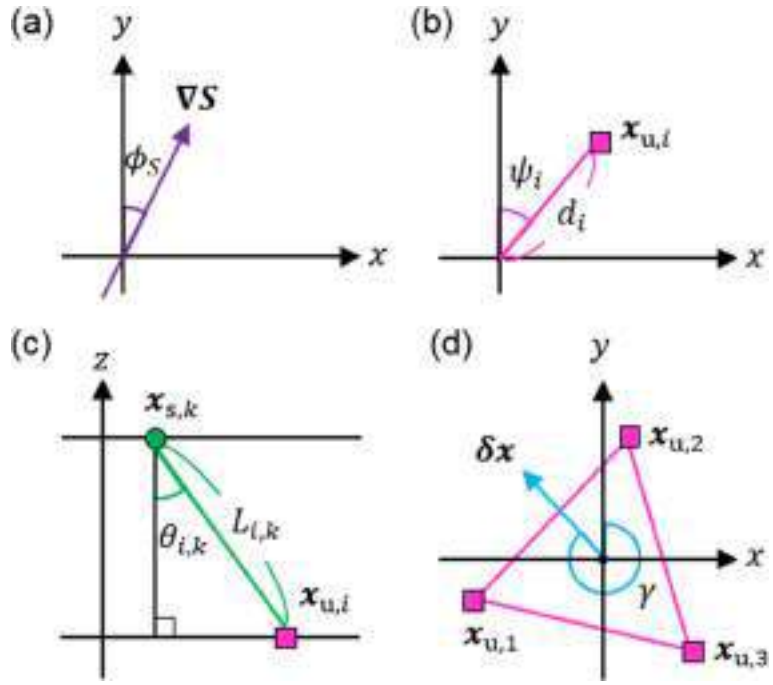


Fig. 8 Schematic diagrams drawing **a** azimuth angle φ of horizontal gradient of slowness; **b** azimuth angle ψ_i of unit position $\boldsymbol{x}_{u,i}$; **c** incident angle $\theta_{i,k}$ of acoustic signal from buoy $\boldsymbol{x}_{s,k}$ to seafloor unit $\boldsymbol{x}_{u,i}$; **d** azimuth angle γ of displacement vector $\boldsymbol{\delta x}$

$$\delta T_i^{\mathrm{grad}} \approx \frac{1}{2} L^2 |\nabla \boldsymbol{S}| \sin\theta \cos(\phi_S - \psi_i), \tag{16}$$

where the directions of array displacement and slowness gradient are γ and ϕ_S and $\boldsymbol{x}_{u,i}$ is expressed by azimuth ψ_i (Figs. 8a, b, d). From these equations, the separation of two quantities is theoretically impossible when the buoy stops at the centroid.

Our buoy stays stable but actually moves 50–100 m a day. To show the separability in the actual condition, we performed the numerical calculation assuming that the buoy moves around the centroid. Synthetic travel time for 1 year was generated from Eq. (12) by setting array displacement $(\delta x, \delta y) = (-44.2, 35.7)$ mm/year and horizontal gradient ($|\nabla \boldsymbol{S}| = 0.2$ ns/m/m, $\phi_S = \gamma = 309°$). We examined the effect of the movement range of $\boldsymbol{x}_{s,k}$ by giving the random value within squares of 10 m × 10 m and 50 m × 50 m according to the uniform distribution. Figure 9 compares the results of $\boldsymbol{\delta x}$ and $\nabla \boldsymbol{S}$ estimated once a week and every 12 h, respectively. A comparison between two ranges of movement shows that the estimation accuracy becomes higher with wider movement range. Therefore, the actual condition for our buoy meets the requirement for determining array displacement correctly.

Acoustic ranging error caused by estimation error of sound speed

We examined the effect of substituting profile obtained on other days for the estimation of sound speed variation (Table 3 and Fig. 6). To examine the capability of buoy to detect seafloor displacement, we discussed the estimated acoustic ranging error for observation using buoy in this section. From the positional relationship between buoy and seafloor units (Fig. 7), the average of observed travel time can be calculated and summarized in Table 4.

First, we consider ranging error due to the misinterpretation of sound speed average. As indicated in Fig. 6, the estimation error of averaged sound speed ϵ_V was maximum of 0.11 m/s. Since the maximum of T_{obs} is 0.82 s for unit 3 (Table 4), the maximum ranging error given by $\epsilon_V T_{\mathrm{obs}}$ is 9.0 cm. As indicated in Table 3, estimation error of horizontal gradient $\epsilon_{\Delta V}$ was less than 0.03 m/s/km. ϵ_V caused by $\epsilon_{\Delta V}$ is also given by $\epsilon_V = x_{\mathrm{grad}} \epsilon_{\Delta V}$, where x_{grad} is horizontal distance from the origin to the middle of path along the gradient axis. Since the maximum of x_{grad} is approximately 521 m for unit 1 (Table 4), the ranging error due to the estimation error of horizontal gradient becomes 1.0 cm as a maximum.

We demonstrated that acoustic ranging from buoy without CTD measuring parallelly will probably be performed with under 10 cm accuracy. Consequently, proposed analytical method can achieve seafloor positioning with accuracy of several centimeters class, which is sufficient for detecting seafloor displacement.

Validity of proposed sound speed model

The quantities of contribution of horizontal gradient to travel time is determined by its strength, thickness, and

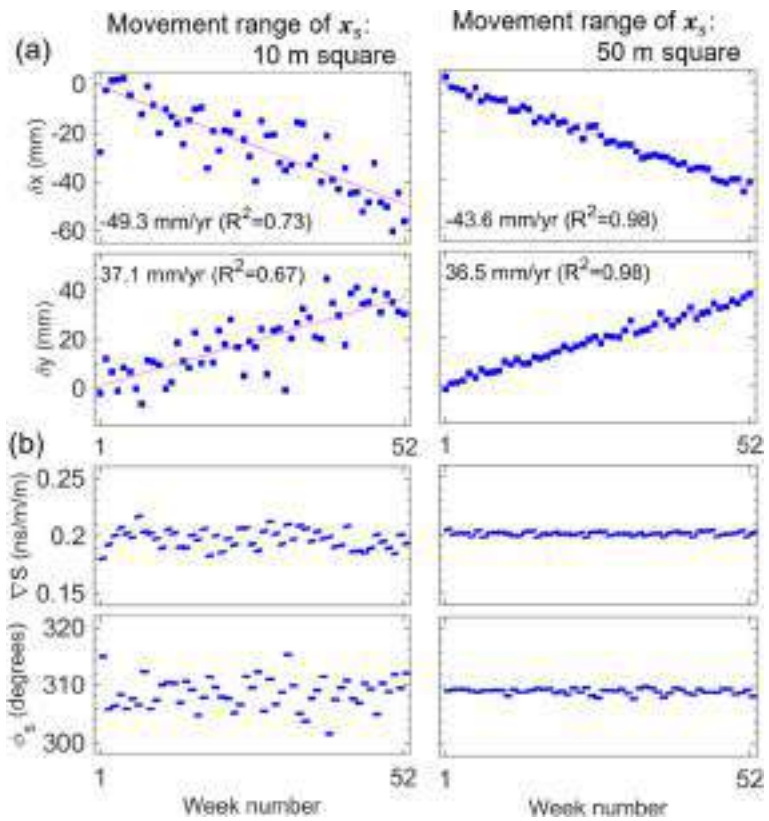


Fig. 9 Results of the numerical experiment with different movement ranges of buoy: estimated **a** array displacement and **b** horizontal gradient of slowness. Pink lines indicate the regression lines derived from the estimated *δx* and *δy*.

depth of gradient layer, as well as signal route passing through the layer, as indicated in Eq. (8). Particularly, the depth of layer determines the ratio of the contributions between $\boldsymbol{x}_u$ and $\boldsymbol{x}_s$ into the change of travel time. Assuming that sound speed structure has constant gradient from seafloor to sea surface, the ratio is fixed to 1: 1, as shown by the coefficients of $\boldsymbol{x}_u$ and $\boldsymbol{x}_s$ in Eq. (10). However, the actual structures are not so simple (Fig. 2c). Then, modeling error can occur, which can cause seafloor positioning error.

In this section, we demonstrated the contribution of horizontal gradient to observed travel time by numerical calculation and verify the validity of the assumption for sound speed model. We examined five types of structure shown in the left column in Fig. 10. The contribution of gradient ΔT_{grad} was calculated for each structure by using Eq. (8) assuming that acoustic ranging is performed from the point in the displayed area. The distribution of ΔT_{grad} for each unit is described by the color scale.

Type A is the structure having constant gradient from sea surface to seafloor, which is the same as the introduced model in this study. The distribution of ΔT_{grad} suggests that if the gradient is ignored, the estimated position for every single unit can be shifted into the direction of gradient axis. Additionally, the unit where sound speed is faster can be estimated to be shallower. This result completely corresponds to that in Fig. 5.

The structure of type B has gradient layer in the middle depth and the thickness of layer is set to 100 m. The distribution of ΔT_{grad} is nearly the same as type A. Accordingly, even if the thickness of actual gradient layer is thinner than the assumed, the effect of gradient can be removed when the middle depth of actual layer corresponds to that of the assumed.

Type C has gradient layer in the depth of 200–300 m. In this case, the signal propagates through the layer near from the ranging position $\boldsymbol{x}_s$. Then, the contribution ratio of $\boldsymbol{x}_u$ becomes small. Contrarily, if the structure has gradient layer near the seafloor, ΔT_{grad} is almost independent of $\boldsymbol{x}_s$.

Type D simply reproduces the measured structure of epoch (3), which consists of two layers. The distribution of ΔT_{grad} shows that major effect of gradient is cancelled because the direction of gradient axis is opposite. For this reason, the estimation value of ΔV was small (Table 3). Lastly, type E reproducing the structure of epoch (6) also consists of two layers, and the gradient of upper layer is

Table 4 Observed travel time from buoy to each unit and horizontal distance

	T_{obs} (s)	x_{grad} (m)
Unit 1	0.67	520.619
Unit 2	0.82	346.831
Unit 3	0.82	342.849

much stronger. The effect of strong layer is dominant, and the distribution of ΔT_{grad} is similar to that of type C because the depth of layer is shallower than middle.

The numerical calculation suggests that modeling error occurs if the true depth of gradient layer is shallower or deeper than that of the assumed, such as types C and E. It makes the error increase at the point far from the origin. If the buoy stays stable near the array centroid, the modeling error hardly occurs because the contribution of $\boldsymbol{x}_s$ can be ignored. In this case, the estimated value as the gradient parameter includes the information of depth and thickness of layer. Therefore, the assumption for sound speed structure in this study is basically appropriate for observation near the array centroid. If the buoy stays stable at the point far from the centroid, the modeling error could be proven fatal. Yokota and Ishikawa (2019a) proposed estimating the contributions of $\boldsymbol{x}_u$ and $\boldsymbol{x}_s$ to ΔT_{grad} separately. This method can reduce the modeling error irrespective of the ranging position. If we intended to introduce their idea for a point survey, we would be faced with another problem:

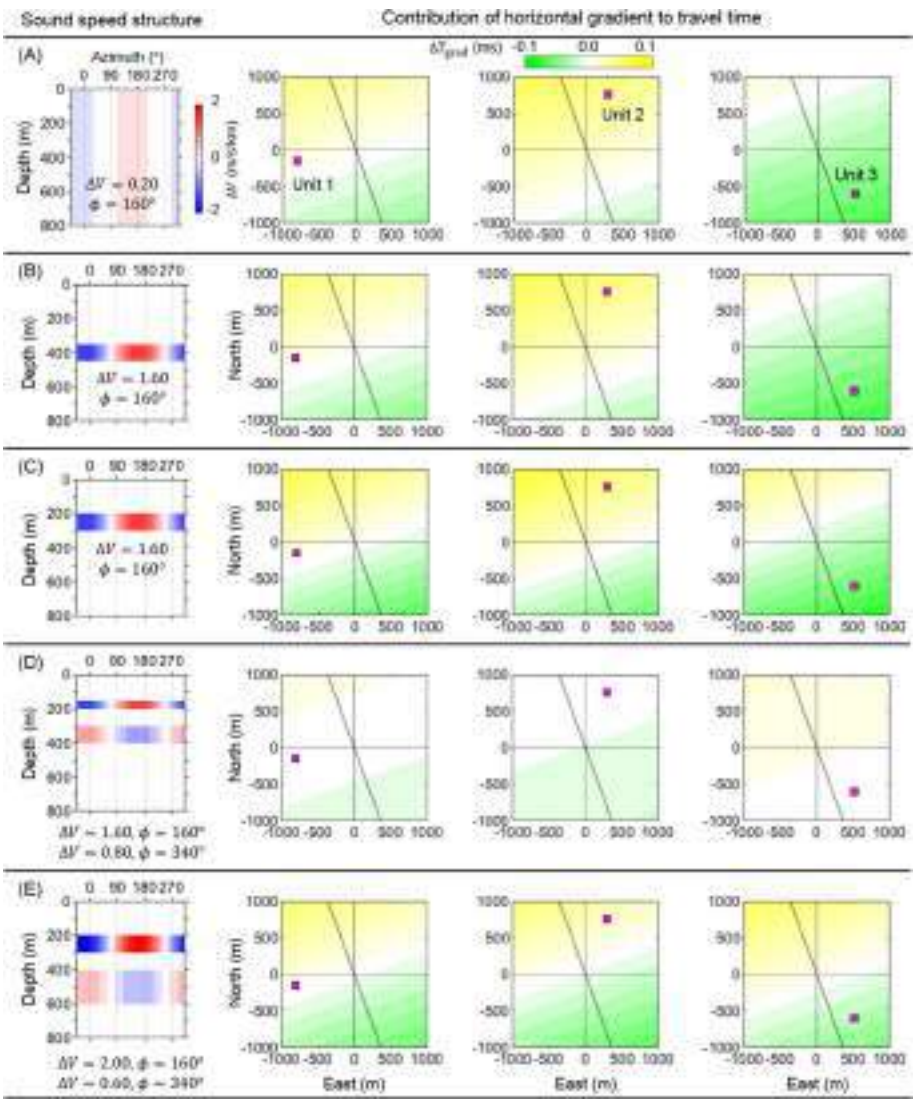


Fig. 10 Numerical calculation for the contribution of horizontal gradient of sound speed for five types of structure to observed travel time, which is denoted by ΔT_{grad} in Eq. (10). The magnitude ΔV and azimuth φ_V of sound speed gradient were given by the displayed value. The color scale in three right figures shows the distributions of ΔT_{grad} calculated for each unit by setting ranging position (x_s, y_s) within a range of − 1000 to 1000 m

insufficient number of observation data because we have only three units. Accordingly, the depth of gradient layer is required to be determined by using the Monte Carlo method or some other calculation techniques in the case of point survey far from the array centroid.

Conclusions

We have been developing GNSS-A observation system on the moored buoy to monitor seafloor crustal deformation continuously. The sound speed structure in the near a warm current has heterogeneity that is main cause of seafloor positioning error. Some previous works proposed sound speed model assuming a sloping structure. We applied this model to our analysis using data acquired through vessel and obtained horizontal gradient of sound speed with seafloor unit position. To validate the estimated gradient, we measured sound speed at multiple points around the unit array and obtained the three-dimensional structure. A comparison with measured structure showed that the estimated gradient was appropriate.

Since the buoy we applied in this research is not equipped with the function of measuring sound speed, we needed to use the profile measured in the past. Then, we also compared the estimation result for sound speed variations using profile observed on other days. The maximum estimation error for averaged sound speed and magnitude of horizontal gradient were 0.11 m/s and 0.03 m/s/km, respectively. Therefore, the estimated ranging error for observation using buoy will be less than 9.0 cm. This suggests that the presented analytical method can detect seafloor displacement within a required accuracy.

We indicated that it is difficult to separate array displacement from horizontal gradient of sound speed when the buoy completely stops at the unit array centroid. We also suggested that the misinterpretation of the gradient layer depth causes modeling error, and it possibly affects array displacement determination when the moored buoy stays stable at the point far from the array centroid.

Abbreviations

CTD: conductivity, temperature, depth: ENU: east–north–upGNSS: Global navigation satellite systemGNSS-A: GNSS-acousticrms: root mean squareSTD: standard deviation

Acknowledgements

The authors are grateful to Kochi Prefecture giving permission to use the moored buoy for this survey. We also thank Dr. Akira Futamura and the crew of the research vessel "Yugemaru" owned by the National Institute of technology, Yuge College.

Authors' contributions

All authors participated in observation to obtain data used for analysis. NK developed the analytical software and performed analysis. The sound speed structure model used for analysis was designed by KT and NK. TK and YT contributed to the development and improvement of observation system. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310: "A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements."

Availability of data and materials

The datasets used and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

[1]Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan. [2]Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 586 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan. [3]National Institute of Technology, Kochi College, 200-1 Monobeotsu, Nankoku, Kochi 783-8508, Japan.

Received: 31 October 2019 Accepted: 22 April 2020
Published online: 07 May 2020

References

Del Grosso VA (1974) New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). J Acoust Soc Am 56(4):1084–1091. https://doi.org/10.1121/1.1903388

Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, Sato M, Toyama S, Katayama M, Kawai K, Matsumoto Y, Yabuki T, Asada A, Colombo OL (2006) GPS/acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. Earth Planet Sp 58(3):265–275. https://doi.org/10.1186/BF03351923

Honsho C, Kido M, Tomita F, Uchida N (2019) Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake revisited: application of an improved GPS-acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure. J Geophys Res Solid Earth 124(6):5990–6009. https://doi.org/10.1029/2018JB017135

Ikuta R, Tadokoro K, Ando M, Okuda T, Sugimoto S, Takatani K, Yada K, Besana GM (2008) A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai trough. J Geophys Res Solid Earth 113(B2). https://doi.org/10.1029/2006JB004875

Kato T, Terada Y, Ito K, Hattori R, Abe T, Miyake T, Koshimura S, Nagai T (2005) Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. Earth Planet Sp 57(4):297–301. https://doi.org/10.1186/BF03352566

Kato T, Terada Y, Tadokoro K, Kinugasa N, Futamura A, Toyoshima M, Yamamoto S, Ishii M, Tsugawa T, Nishioka M, Takizawa K, Shoji Y, Seko H (2018) Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. J Disaster Res 13(3):460–471. https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0460

Kido M (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean. Earth Planet Sp 59(8):e33–e36. https://doi.org/10.1186/BF03352027

Kido M, Imano M, Ohta Y, Fukuda T, Takahashi N, Tsubone S, Ishihara Y, Ochi H, Imai K, Honsho C, Hino R (2018) Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. J disaster res 13(3):472–488. https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0472

Kido M, Osada Y, Fujimoto H (2008) Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements. Earth Planet Sp 60(3):229–234. https://doi.org/10.1186/BF03352785

Spiess FN, Chadwell CD, Hildebrand JA, Young LE, Purcell GH Jr, Dragert H (1998) Precise GPS/acoustic positioning of seafloor reference points for tectonics studies. Phys Earth Planet Inter 108(2):101–112. https://doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00089-2

Yasuda K, Tadokoro K, Taniguchi S, Kimura H, Matsuhiro K (2017) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the central Nankai trough, Japan. Geophys Res Lett 44(8):3572–3579. https://doi.org/10.1002/2017GL072918

Yokota Y, Ishikawa T (2019a) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography: GNSS-A as a sensor for detecting sound speed gradient. SN Appl Sci 1:693. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0699-6

Yokota Y, Ishikawa T (2019b) Shallow slow slip events along the Nankai trough detected by GNSS-A. Sci Adv 6(3):eaay5786. https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5786

Yokota Y, Ishikawa T, Watanabe S (2019) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography. Mar Geophys Res 40: 493–504. https://doi.org/10.1007/s11001-018-9362-7

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen journal and benefit from:

► Convenient online submission
► Rigorous peer review
► Open access: articles freely available online
► High visibility within the field
► Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► springeropen.com

リアルタイム・連続海域観測

名古屋大学大学院環境学研究科　　田所敬一

南海トラフ域に展開されている海域の基盤・準基盤観測網等で取得されたデータは，プレート間固着状態の空間分布や海域で発生した地震の実体の解明，さらには浅部スロースリップの検出など，様々な研究に役立てられている．これらの観測（網）は南海トラフ地震臨時情報に基づく防災対応のあらゆるケース，全ての段階において貢献が期待されるが，そのためには，最新の観測データをいつでも，すぐに，そして誰でも見ることができる体制，すなわち連続・リアルタイム観測の実現が不可欠である．本稿では，海域の基盤・準基盤観測網等による連続・リアルタイム観測の実力と現状，さらに展望についてまとめる．

１．海底諸観測の「南海トラフ地震臨時情報」への貢献

南海トラフ沿いで発生した現象が異常かどうかの調査を行う，あるいは調査結果を公表するにあたり，「南海トラフ地震臨時情報」が発表されることになった．これに基づく防災対応のあらゆるケース（半割れ・一部割れ・ゆっくりすべり）に対し，全ての段階（防災対応期間突入時・期間中・終了時，さらにその後）において，海域諸観測の貢献が期待される．

「半割れ」（巨大地震警戒）と「一部割れ」（巨大地震注意）のケースでは，防災対応実施期間（以下「対応期間」という）突入時には，その決定の判断材料となる現象の規模（空間スケール）等の情報を提供する役目を担うことになろう．一部割れのケースでは，調査対象となった破壊の規模が*Mw*7.0以上であったことの判断には，海域諸観測の結果が重要な役割を担うことになる．半割れと一部割れのケースでは，対応期間は自動的に1週間を基本とすることとなっている．しかしながら，その期間中に何の情報も出さないというわけにはいかない．対応期間突入後の状況の推移等について「南海トラフ地震関連解説情報」として発表する必要があるばかりではなく，特にまだ被害を受けていない地域等（社会）からの要請で，現状に対する観測に基づいた理学的解釈が逐次求められることは想像に難くない．

「ゆっくりすべり」のケースでは，防災対応期間突入にあたり，「プレート間の固着状態が明らかに変化したか」を判断する必要がある．そのため，ゆっくりすべりが特にトラフ軸の近くで発生した場合は，海域での観測結果が決定的に重要となる．同ケースでは，防災対応の期間は「すべりが変化していた期間と概ね同程度」とされているため，海域諸観測データを中心に，すべりの収束時期やすべりの範囲の拡大または移動の有無といった状況把握を行い，対応期間の終了を決めることになろう．また，ゆっくりすべりが収まったと判断された後も，その後の状況を注視する必要がある．このことは，「半割れ」と「一部割れ」のケースでも同じである．

異常な現象についての調査は，概ね30分後には開始され，約2時間後には判断結果が発表される．よって，最新の観測データをいつでも，すぐに，そして誰でも見ることができる必要がある．また，異常であるとの判断を下すには，平時において正常な状態を知っておかなくてはならない．このとき，状態の「平均値」だけではなく，観測・推定精度や手法に起因する観測の限界も加味した上でその「ゆらぎ」も知っておく必要があることに注意しなければならない．そうすると，リアルタイムでの連続観測（モニタリング）が不可欠との結論に至るのは必定である．モニタリングとは連続観測に基づいた常時監視であるが，それだけでは不充分であり，リアルタイム性も要求される．南海トラフの地震に向けてこれからプレート境界の状態がどんどん変わってゆく中，特に正常な状態の把握のためのデータ蓄積に時間がかかる測地観測においては，南海トラフ全域を密にカバーするリアルタイム・連続観測の早期実現が望まれる．

２．南海トラフにおける基盤・準基盤海底観測網の現状と現象検知の実力

地震調査研究推進本部において，ケーブル式による海底地震・津波観測は基盤的観測として，GNSS/音響方式の海底地殻変動観測は準基盤的調査観測としてそれぞれ位置づけられている．海底ケーブル観測網は，気象庁のケーブル式常時海底地震観測システム，および防災科学技術研究所の地震・津波観測監視システム（DONET1，DONET2）が既に運用されている（図１左）．観測網の空白域となっている土佐湾から西の海域には，新たにケーブル式の「南海トラフ海底地震津波観測網」（N-net）の構築が始まっており，南海トラフ全域をカバーする海底地震・津波観測網は完成間近である．一方，GNSS/音響方式の海底地殻変動観測網は，海上保安庁と大学との協力の下，南海トラフ域全域に観測網が展開されている（図１右）．海上保安庁では，観測点密度が不足しているトラフ軸近傍を中心に観測網の拡充が開始されている．

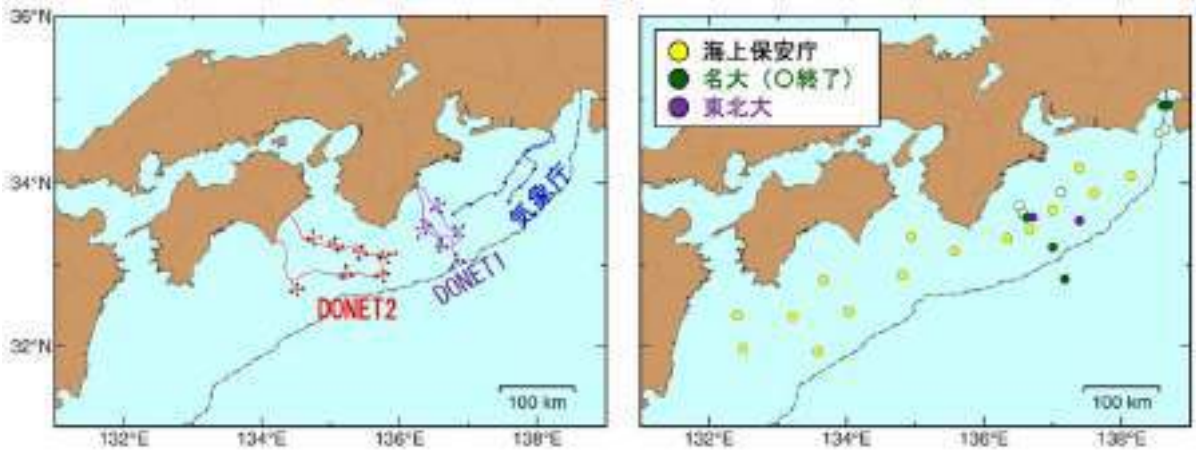


図１　現在の南海トラフ域における（左）ケーブル式海底地震・津波観測網，および（右）GNSS/音響方式による海底地殻変動観測網（平成31年4月現在）．地震調査研究推進本部のまとめによる資料「地震観測施設一覧」をもとに作成．

海底ケーブル式の観測では，すでにリアルタイム・連続観測が実現されており，データの流通や公開も行われている．一部では自治体や民間企業でのデータの活用による社会実装も進んでいる．一方，海底地殻変動観測では，データ公開の試みが始まっている［Yokota *et al.*, 2018］ものの，リアルタイム・連続観測については後述の通り未だ技術開発の途上であり，ケーブル式の観測に比べて遅れをとっている．

DONET1に装備されている地震計では，2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震（*Mw*5.8）の地震がプレート境界で発生したことが明らかになった．また，この地震では，DONET1に装備または接続されている水圧計によって1〜2cm程度の上下変動も検出された［Wallace *et al.*, 2016］．このように比較的小規模な地震であっても，その実体解明に役立つデータがケーブル式海底観測網で得られることが実証され，臨時情報への貢献でもケーブル式海底観測網が大きな戦力となることは間違いない．

GNSS/音響方式による海底地殻変動観測では，実海域観測が開始された直後の2004年9月4日に発生した紀伊半島南東沖の地震（*Mw*7.3，7.5）による20〜30cm程度の水平変位が観測された［Kido *et al.*, 2006；Tadokoro *et al.*, 2006］．*M*8級以上の地震による1mを超える変位は本方式で容易に観測することができるが，*M*7級の地震による数十cm規模の変位が観測できるようになったのは技術開発の成果によるところが大きい．しかし，2009年8月11日に駿河湾内で発生した*Mw*6.3の地震では，少なく見積もっても2cm程度の水平変位が認められたものの［名古屋大学環境学研究科，2010］，*M*6程度の地震による数cm規模の変位を明確に捉えるためにはさらなる高精度化が必要である．また，プレート境界地震が観測点直下で発生した場合，その規模が*Mw*6.8であったか一部割れの閾値に相当する*Mw*7.0であったかの区別は，現状の実力（水平変位の検出能力）でも可能である．しかし，地震時の変位は断層の外側では急激に小さくなるため，現在よりも狭い（理想は対象とする地震の断層長さ以下の）間隔で観測点を設置することが望ましい．

海底観測による最近の顕著な成果として特筆すべきは，浅部スロースリップの検出である．DONET1に接続されている孔内水圧計では，数日〜数週間にわたる浅部スロースリップが観測された［Araki *et al.*, 2017］．水圧計で長期の地殻変動を捉えるには，海洋変動の補正と水圧センサのドリフト問題の解決が不可欠である．センサドリフトについては，小型水圧計での現場較正［Chadwick *et al.*, 2006］や室内での加圧試験による挙動の解明が進められている．海上保安庁による海底地殻変動観測では，紀伊水道沖のトラフ軸近傍でのスロースリップ（*Mw*6.6程度）が観測された．これには観測時間の短縮のための技術開発によって高頻度観測が実現したことが大きく寄与している．

３．海底地殻変動の連続観測に向けて

近年，国土地理院のGEONETの観測結果のみならず，2005年前後から継続されてきたGNSS/音響方式による海底地殻変動観測の結果を加えることにより，プレート間固着状態の空間分布の詳細が明らかになってきた［Yokota *et al.*, 2016；Nishimura *et al.*, 2018；Kimura *et al.*, 2019］．これらは津波想定等の高度化［例えばWatanabe *et al.*, 2018］に活用されるべき重要な成果ではあるが，現段階では長期間の平均的な固着状態を見ているに過ぎない．Ochi［2015］は，GEONETの観測データをもとに，14年間にわたるプレート間固着状態のゆらぎを報告している．東北地方太平洋沖地震［Ito *et al.*, 2013］や2014年にチリ沖で発生

したイキケ地震（*Mw*8.2）［Ruiz *et al*., 2014］の前には，プレート間固着の剥がれとも言うべきイベントが発生していたことが報告されている．このような平均的な固着状態を乱す「ゆらぎ」を海底地殻変動観測で捉えるためには，時間分解能の向上，すなわち連続観測の実現が不可欠である．時間分解能の向上は，測位誤差と非定常的変動の分離のみならず，地震時変動と余効変動の分離，さらには定常的地殻変動の推定精度の担保のためにも必須である．海上保安庁では高頻度観測が実現しているが，それでも今のところ１観測点あたりの観測回数は年に6～8回程度が限度であり，現行の船舶を用いた有人での観測スタイルが連続観測実現のネックとなっている．したがって，船舶に依存せず新たな海上プラットフォームを用いた無人での観測方式を開発しなければならない．

海底地殻変動の連続観測に利用できる海上プラットフォームとしては，自律航行できる無人艇とブイが挙げられ，それぞれ移動観測と定点観測に活用することができる．無人艇の運用については，平成31／令和元年になって法整備等が進んだ．無人艇は「船舶安全法」の改正によって特殊船として明確に位置づけられるとともに，「船舶職員及び小型船舶操縦者法」の改正によって無人での運航が可能となった．また，国土交通省から「遠隔操縦小型船舶に関する安全ガイドライン」が公表された．これらの法整備等によって，我が国で無人艇を運用するにあたっての法的な障壁は一切なくなった．米国やシンガポールでは，無人艇の海底地殻変動観測への導入が始まっており，我が国はすでに周回遅れの状況であると言わざるを得ない．ブイを用いた観測については，我が国でも開発や試験的観測が始まっている［Kido *et al*., 2015, 2018; Kato *et al*., 2018］（図２）．ブイを用いてリアルタイムでの連続観測を行うにあたっての要素技術，例えばブイ上での音響データの自動処理，地上からの遠隔操作による観測頻度の変更を行うオンデマンド観測の技術などは着々と開発が進んでいる．しかしながら，未だシステム全体としての実用化には至っていない．さらに，リアルタイム観測を行うためには，海域と陸との安定的な通信手段の確保が必須である．現在は商用の衛星通信を利用しているが，今後はIoT時代を見据えて開発されようとしている通信衛星の活用なども視野に入れる必要がある．

４．おわりに

本稿では，南海トラフ域の海域で行われている基盤・準基盤観測の実力と，特に海底地殻変動の連続・リアルタイム観測の必要性について述べてきた．連続・リアルタイム観測が実現した後は，肝心なイベントが発生した際に観測網が役立てられるよう，基地局（サーバ），通信，電源の安定的な運用と運用体制の整備による持続可能性の担保を視野に入れておかなければならない．

図２　著者らがリアルタイム海底地殻変動連続観測システムの開発に用いている係留ブイ

最後に，南海トラフ地震臨時情報をはじめとする国の実践的防災に実観測が貢献するためには，次の3つの協調が重要であることを述べておきたい．まず一つ目は，地震と測地，測地の中でも上下変動，水平変動，傾斜，ひずみなど，観測項目間の協調である．水圧計は上下変動の観測に対して圧倒的に優れたポテンシャルを有しており，海底地殻変動観測は水平変動の観測に優れている．南海トラフ域では相補的なデータが取得できる基盤・準基盤観測網による観測や，これらに付随する観測技術をフル活用して多項目観測を継続的に推進することが重要である．二つ目は海陸観測の協調である．南海トラフの想定震源域は海陸に跨がっているため，海陸に展開されている様々な基盤・準基盤観測網等を一つの大きな観測網と捉えてモニタリングを推進していくとの考え方が必要である．三つ目はシミュレーションとモニタリングとの協調である．これまでの海溝型地震の予測は，主に統計的手法に基づく時間依存を考慮しない手法に依っていたが，物理モデルに基づくシミュレーションとこれによる推移予測に移行してゆくことにより，その高度化が果たされる．このことは，地震調査研究推進本部の「第３期総合基本施策」に明確に記されている．地震発生予測研究の高度化にも観測が不可欠であることは言うまでも無い．これら3つの協調こそが，本当に役に立つ観測・観測網の未来を拓くことになると信じて疑わない．

参考文献

Araki, E., et al., 2017, Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science*, **356**, 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120

Chadwick, W. W., et al., 2006, Vertical deformation monitoring at Axial Seamount since its 1998 eruption

using deep-sea pressure sensors, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **150**, 313–327, doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.07.006.
Ito, Y., et al., 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, **600**, 14–26, doi: 10.1016/j.tecto.2012.08.022
Kato, T., et al., 2018, Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, *J. Disaster Res.*, **13**, 460–471, doi: 10.20965/jdr.2018.p0460
Kido, M., et al., 2006, Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planet. Space*, **58**, 911–915, doi:10.1186/BF03351996
Kido, M., et al., 2015, Progress in the Project for Development of GPS/Acoustic Technique Over the Last 4 Years, In: Hashimoto M. (eds) *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), International Association of Geodesy Symposia*, vol 145, Springer, Cham, 3–10. doi: 10.1007/1345_2015_127
Kido, M., et al., 2018, Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation, *J. Disaster Res.*, **13**, 472–488, doi: 10.20965/jdr.2018.p0472
Kimura, H., Tadokoro, K., and Ito, T., 2019, Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations, *J. Geophys. Res.*, **124**, 6140–6164, doi: 10.1029/2018JB016159
名古屋大学環境学研究科，2010，2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾の地震による海底地殻変動観測，地震予知連絡会会報，**83**，383–385.
Nishimura, T., 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, **14** (2), 535–551, doi:10.1130/GES01529.1
Ochi, T., 2015, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **431**, 8–14, doi:10.1016/j.epsl.2015.09.012
Ruiz, S., et al., 2014, Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique *M*w 8.1 earthquake, *Science*, **345,** 1165–1169, doi:10.1126/science.1256074
Tadokoro, K., et al., 2006, Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23306, doi:10.1029/2006GL026742
Wallace, L. M., et al., 2016, Near-field observations of an offshore *Mw* 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, **121**, 8338–8351, doi:10.1002/2016JB013417
Watanabe, S., Bock, Y., Melgar, D., and Tadokoro, K., 2018, Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy, *J. Geophys. Res.*, **123**, 2448–2461. doi: 10.1002/2017JB014799
Yokota, Y., 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, **534**, 374–377, doi:10.1038/nature17632
Yokota, Y., Ishikawa, T., and Watanabe, S., 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data*, **5**:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182

GNSS を用いた総合防災ブイシステム

加藤照之
（神奈川県温泉地学研究所）

■はじめに

「GPS 津波計」という名前を聞いたことがあるでしょうか。海に GPS 受信機を搭載したブイを浮かべておいて、津波が沿岸に襲来する前に検知して住民の早期避難に役立てようとする装置です。これは私が 20 年以上前にアイデアを思いつき、共同研究者と共に開発してきたものです。本稿ではこの装置の開発の歴史を振り返り、今後どのような可能性があるのか、検討したいと思います。GPS は Global Positioning System の略で、米国で開発された、衛星を用いて地上の位置を精度よく決める装置です。1970 年代から開発が始められ、日本でも 1980 年代に入って受信機の導入が進みました。その後、ロシアや EU、中国なども安全保障の観点からそれぞれ独自の衛星測位システムが開発され、日本でも「みちびき」という名称で知られる衛星測位システムが導入されています。そこで、これらの衛星測位システムを総称して GNSS（Global Navigation Satellite System）という名称が改めて付けられました。タイトル及び次節以下では GPS と GNSS を混在させていますが、同じものと考えてください。

■「GPS 津波計」開発の歴史 ～三崎市での実験～

私は 2018 年 4 月から温泉地学研究所に在籍していますが、それまでは東京大学地震研究所で GPS を用いた地殻変動の研究を行っていました。最初は津波のことは考えておらず、地上に置いた GPS 受信機の位置を㎝精度で計測し、それを繰り返すことで地面の動きを知ることを研究課題としていました。これは研究を始めた 1980 年代の当時としては大変新しい技術で、日本列島やプレートの動きが日々計測できるということで大変注目されてきました。

そんな研究をしていたある日、この GPS 受信機を海に浮かべたブイに搭載すれば海面の動きがわかるだろう、それなら津波が来たらそれを検出して海岸にいる人々にデータをリアルタイムに伝送すれば津波からの避難に役立てられるのではないか、と思い立ちました。ですが、自力でブイを設置するなど思いもよらないことだったので、このアイデアは単なる思い付きですぐに忘れしてしまうくらいのものでした。それから何年かたった 1996 年頃のある日、日立造船株式会社技術研究所の方が私の研究室を訪ねてこられて、GPS を使った応用研究をやりたいのだが何か良い考えはないか、と相談を持ちかけられました。造船会社と言えば海で使うものがよい、と考えその時ふと上記のアイデアを思い出して提案してみました。この時訪ねてこられた方は現在に至るまで私と共同で研究を続けられている寺田幸博さんという方です。

大変良いアイデアと賛同していただき、すぐに実験に取り掛かりました。また開発の体制として会社内で数名の方のチームが発足しました。このような機動力は大学ではなかなか実現できません。こうして、まず試作機が作られ、神奈川県三崎市にある東大の臨海実験場敷地内の地震研観測所を基地として小網代湾にブイを浮かべました。図 1 がその時の写真です。数名で持ち上げられるくらいの大きさです。小さいながらもこのブイに GPS 受信機・アンテナ、

図 1　1997 年 1 月小網代湾で最初に使われた GPS ブイ。左：陸上で調整しているところ。右：湾内に浮かべたブイ。長い棒は無線送信アンテナ。短い棒の先についている平たい物体は GPS アンテナ。

バッテリー、無線機などを搭載しています。このブイを湾内に浮かべて、ブイから送られてくるデータを観測所で受けてパソコン上で海面変動をモニターすることに成功しました。この成功で、我々は大いに自信がわいてきました。

～採用されなかったブイ～

図１で示したようなブイですと、海面の変動に伴ってブイが揺れます。ブイの上に GPS のアンテナが設置されているとブイの揺れに伴ってアンテナの位置も揺れてしまいます。津波の計測で最も重要なのは海面の上下変動です（横方向の流れも重要なのですが、ここではとりあえず考えません）が、ブイの揺れが上下動の誤差になってしまっては困ります。そこで、考えられたのはスパー型のブイと言って、縦長の形状を持つものです。これは釣り好きの方ならわかると思いますが、縦長の形状を持つブイで重心位置が海面下のなるべく深いところにあるとブイの先端だけが海面上に出ていることになり、海面が揺れてもブイはそれほど揺れません。釣りであれば、魚の微妙な食いつきがわかるようにするために浮きがそのような形状になっています。ところが、ブイを細長い縦長にしてしまうと受信機や無線機を搭載するスペースがとれません。そこで、これらを搭載するブイを別途用意し、２つのブイを少し離して設置する、というシステムを考えました。図２がそれです。アンテナを搭載した縦長のブイをセンサーブイ、その他の機材を搭載したブイをサポートブイと呼び、これらをケーブルと浮きで保持しています。これを用いた実験も同じく小網代湾で行い、成功を収めました（Kato et al., 2000）。個人的にはこれでよいと思ったのですが、他の方に言わせると、このシステムは複雑すぎ、これを外洋などに設置すると高波などであっという間にダメージを受けてしまうと言われ、あえなく却下となりました。

～最初の本格的な実験と最初の津波計測～

そこで、単独のブイシステムで開発を進めることにしましたが、機器開発のためには資金が必要です。そこで文部科学省科学研究費補助金の支援を受けることになりました。幸い申請が採択されて、はじめて自前の本格的なブイシステムを作ることができました。同時に、これを用いた試験観測をどこで実施するかということで考えましたが、たまたま日立造船 OB の方で大船渡市出身の方がおいでになりました。大船渡市を含む三陸沿岸一帯は津波の常襲地域です。地元の方々も津波の災害対策に対する意識は大変高く、早速大船渡市の協力の下、大船渡市沖で試験観測をすることとなりました。津波をいち早くとらえて沿岸住民の避難に役立てるためにはできるだけ沖合に設置する必要がありますが、まだ試験観測ということもあり、海岸から 1.6㎞程度のところに設置することとしました。

ところで、データ解析の方法ですが、いわゆる RTK（リアルタイムキネマティック）と呼ばれる方式を採用しました。これは、カーナビなどで使われている単独測位とよばれる方法と異なり、地上でもブイ上と同時に GPS 観測を実施し、データをリアルタイムで比較することにより、地上の位置に対するブイの相対的な位置を決定するというやり方です。このような方法によってブイの３次元的な位置、特に上下成分を１秒ごとに数㎝の精度で決定することができます。

図３は大船渡に設置されたブイの写真です。全高は８ｍくらいあり、ブイの直径は 2.8m で重さ 12ton と、図１のプロトタイプのブイと比べたらはるかに大きなブイになっています。外洋ではこのくらいの大きさでないとだめなのだということがわか

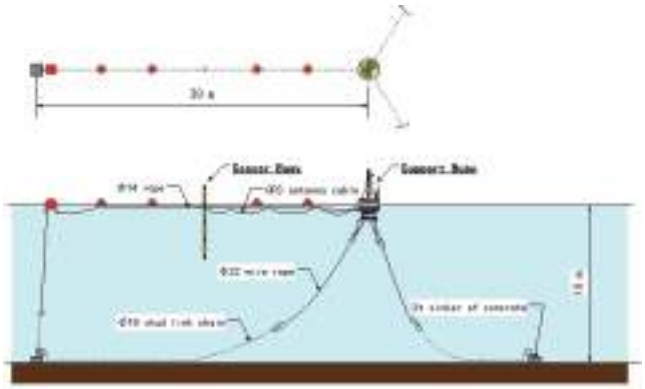


図 2a　1999 年 3 月の実験で用いられた GPS ブイシステム。センサーブイ（Sensor Buoy）の先端に GPS アンテナが装着され、サポートブイ（Support Buoy）に GPS 受信機や無線送信装置が搭載されている。（Kato et al., 2000）

図 2b　小網代湾に浮かべた図 2a の実験機。

図 3　2001 年 1 月に大船渡湾に設置された GPS 津波計。

ります。当然のことですが、海は沖に行くほど深くなります。海底に大きなコンクリートブロックを置いて錨とし、鉄製のチェーンによってブイを係留することになります。係留索が短すぎると、海流によって引っ張られたブイが傾いてしまうことも考えられます。ある程度の長さをもってブイと結び、係留索がゆるやかなカテナリー（懸垂線）を描くようにします。こうすることによりブイが直立するようになります。浮力があるとはいえ、鎖は重いのでブイ＋係留索の重心はかなり海面より低いところに来ますので、大きな波が来てもブイはほとんど傾かないことがわかりました。

ブイは 2001 年 1 月に設置されました。ブイからは 1 秒ごとにデータが無線で地上局に送られ、地上局で同時に観測されたデータと比較することで、毎秒のブイの位置が計測されます。このデータは誰でも見ることができるように Web 上で公開されました。地元大船渡市にもご協力いただき、市役所や消防署にもモニターを設置して見ていただくことにしました。こうして、はじめての外洋実験がはじまりましたが、たまたま同年 6 月にペルーで発生した地震による津波を捉えることに成功しました。図 4 にその時のデータを示します。図 4 a は計測されたブイ上のアンテナ変位データの上下成分です。ブイは津波だけでなく通常の風による波（波浪）によっても動きますから、両方の影響が含まれています。なお、ゆるやかに一日に 2 回程度変動する成分は月や太陽による潮汐成分です。この時、ペルー地震による津波の振幅は 10cm 程度でしたが、波浪による変動成分は 1m 近くにもなっているので元のデータでは津波を目視することができま

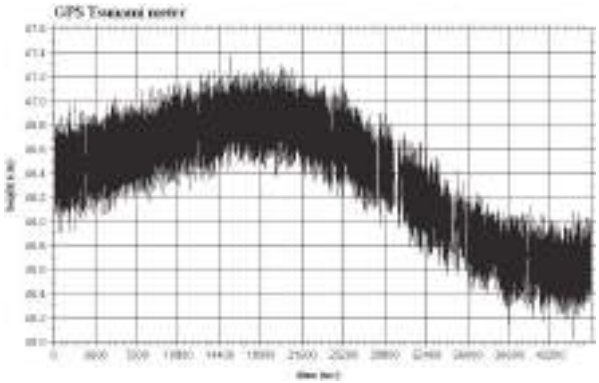


図 4a　大船渡実験で得られた 2001 年 6 月ペルー沖地震に伴う、地震による津波の変動を含んだ時間の GPS 津波計の原記録。大きくて緩やかな変動は潮汐、ぎざぎざとした細かい変動は風などによる波浪。

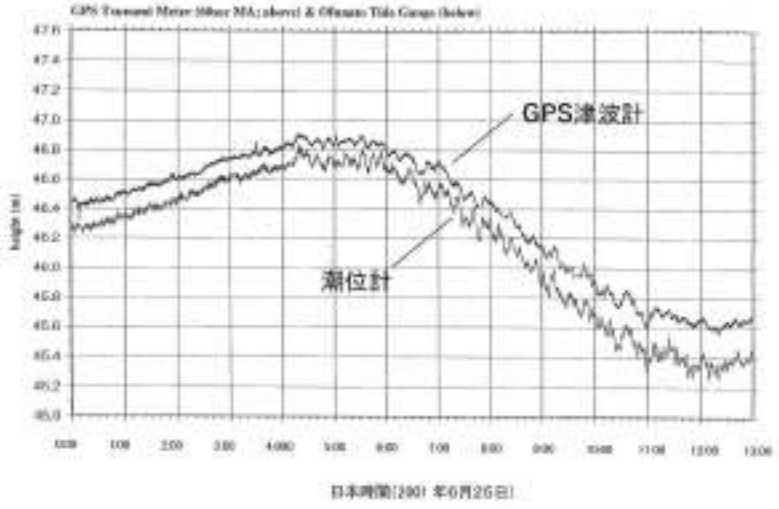


図 4b　（上）図 4a の記録から 60 秒移動平均をとることによって風による波浪の成分を取り除いた記録。（下）大船渡検潮場で得られた海面変動記録。日本時間 2001 年 6 月 25 日 4 時 10 分頃に津波の到着が見て取れる。

せん。しかしながら、波浪と津波では波の周期が異なります。津波の周期は数分から長いもので1時間以上の周期帯を持っています。一方、波浪の周期はせいぜい数十秒程度です。そこで、得られた上下動成分のデータに短周期をカットするようなフィルターを作用させたものを図4bに示します。同図にはブイの近くの大船渡港に設置されている潮位計の記録も示してあります。この図を見ると、振幅が10cm程度の波が明瞭に見て取れます。また、その波形は潮位計の記録とよく似ていることがわかります。これがブイに搭載したGPS装置によって計測されたはじめての津波記録となりました。“GPS津波計”の誕生です。

～“GPS津波計”の実用化へ～

大船渡市沖での成功によって、我々は大いに勇気づけられました。この実験は3年程度で終了し、その間に発生した2003年十勝沖地震による津波なども検出することができました。そこで、我々は次のステップとして、より遠くの沖合に設置したブイでの実用化に向けた試験観測を行うことになりました。場所も、三陸と同じように大きな津波被害を受けてきた四国の室戸岬沖に設置することとしました。ここでも、地元の室戸市の多大なる協力をいただくことができました。ブイの設置場所としては室戸岬の沖合13㎞程度としました。これによって、より早い津波検出が期待され、有効な津波災害軽減効果が期待されました。なお、この実験から、我々のプロジェクトに波浪観測の立場から大きな興味を持ってくださった港湾空港技術研究所の永井紀彦さんにも研究チームに加わっていただきました。

図5aが室戸沖に設置したGPS津波計です。全高16.0m、全幅3.4m、重量16tonと大船渡のブイから一回り大きくなっています。2004年から観測が始まったのですが、早速その年の9月4日に紀伊半島沖で発生した地震による津波を捉えることができました（Kato et al., 2005）。図5bにその時の記録を示します。この時系列には数値シミュレーションによる結果も示されていますが、両者がよく合っていることが見て取れると思います。津波の発生原因などを探るために数値シミュレーションが使われます。計算がうまく行っているかどうかを検証するために、それまでは港に設置されている潮位計を主に使っていましたが、このような海岸付近の観測データには津波が海底の摩擦によって減衰するなど、数値計算に使われていた線形長波近似では表しきれない誤差や複雑な海岸線の影響などが含まれてうまくいきません。一方、沖合で津波を計測すると、そのような影響を受けずに済みますので発生原因として与えたモデルがよいものであれば計算値と観測値がよく一致するということがわかった、ということになります。こうして、我々のGPS津波計が学術的にも意義のある計測データを提供できるということが認識されるようになりました。また、最上段には室戸港の検潮記録が示されていますが、津波の到来時刻がブイの記録よりも10分程度遅れていることがわかります。これでブイの記録を津波の早期警戒に使えそうだということがわかりました。

このような成功を受けて永井紀彦さんのご尽力により国土交通省の

図5a　2004年4月年室戸岬沖に設置されたGPS津波計。

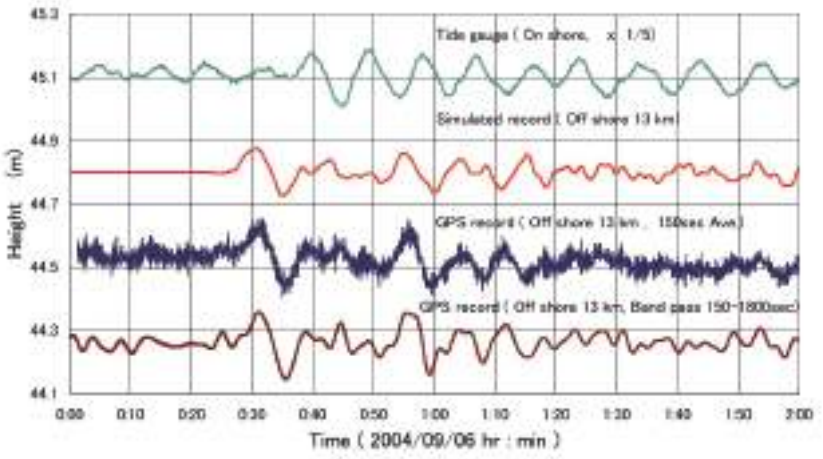


図5b　室戸岬沖で取得された紀伊水道沖地震による津波記録。上から、室戸験潮場で得られた海面変動記録、数値シミュレーションで予測されたGPSブイ位置の海面変動推測値、GPSブイで取得された上下変位記録（原記録に150秒の移動平均操作後のデータ）、及び前記の原記録に150～1800秒のバンドパスフィルターをかけたデータ。

全国港湾海洋波浪情報網ナウファス（英語名 NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS）に取り入れてくださることとなりました。このシステムは我が国の沿岸の波浪を観測してリアルタイムで情報を発信するシステムです。それまでは主として海底に置かれて機器によって超音波を用いて波高等を計測していましたが、保守の容易さ等から GPS ブイを一部に導入することになりました。設置は 2008 年頃より開始されました。但し、その目的は波浪監視にありましたので名称は “GPS 波浪計 ” と呼ばれることとなりました。前節で紹介したように、ブイで計測される海面高変化は波浪も当然含まれます。むしろ波浪は常に観測されていて、津波は波浪に比べれば極めて稀に観測されるだけですから、両方を兼ね備えたシステムとして活用できれば費用対効果が大きくなると期待されるところです。

このようにして、GPS 津波計、いや、GPS 波浪計は 2011 年頃までに全国の沿岸に 15 点程度まで設置されました。そして、このナウファスによって配信されるデータは気象庁による津波の監視にも取り入れられることとなりました。なお、この GPS 波浪計はほとんどの場合沿岸から十数㎞程度のところに設置されています。これには理由があります。前に述べられていますが、このシステムで用いられているのは RTK と呼ばれるシステムです。これは陸地におかれた基準局に対するブイの位置をリアルタイムかつ相対的に決定する方式ですが、リアルタイムで解析を行うため誤差や雑音の影響を取り除くことが十分には行えません。そのため、位置の決定精度は基準局からの距離に依存し、高精度で位置を推定するためにはブイを陸の基準局からあまり遠くにおけない、という制限が出てきます。㎝精度で海面高さを決定するにはブイの陸からの距離はせいぜい十数㎞に設置する必要があります。もちろん、これでも津波がブイを通過してから陸に到達するまで 10 分くらいはかかりますので、情報が効率的に伝達できれば沿岸の人の避難には役に立つと考えられました。また、波浪を測る目的なので、沿岸で漁業や工事などを営む方への情報としては十分遠い沖合だということも考慮に入れられていると考えられます。

■ 2011 年東北地方太平洋沖地震・津波の教訓

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の太平洋沿岸を巨大な津波が襲い 1 万 8000 人を超える多くの死者・行方不明者を出すことになりました。このことは GPS ブイを使えば津波の被害を防げるだろうと考えていた私にとってはとてつもないショックでした．役に立てると思っていたものが実は全然役に立てなかったのだ、という事実はあまりにも重いものでした。しかし、ここで立ち止まってはいけないと思いました。なぜうまくいかなかったのか、を検証し、本当に役に立つものに改良していかなくてはなりません。

図 6 はこの時取得された三陸沖の GPS 波浪計データの一部です。データは津波が沿岸に到達するかなり前に捉えられていたことがわかります。地震が発生したのが 14 時 46 分、津波警報の第一報が出たのが 14 時 50 分でこの時は宮城 6m、岩手 3m というものでした。ところが、15 時過ぎになって沖合の GPS 波浪計に津波が到達し、数 m を超えるような津波が観測され始めました。津波を監視していた気象庁の職員が 15 時 10 分に気づくことになり、15 時 14 分に津波警報が宮城 10m 以上、岩手 6m に更新されました。岩手県の沿岸に津波が到達したのは 15 時 18 分です。しかしながら時すでに遅く、1 万 8 千人を超える多くの方の命が失われました。確かに、津波は海岸への到達よりかなり前に捉えられていたのですが、それが沿

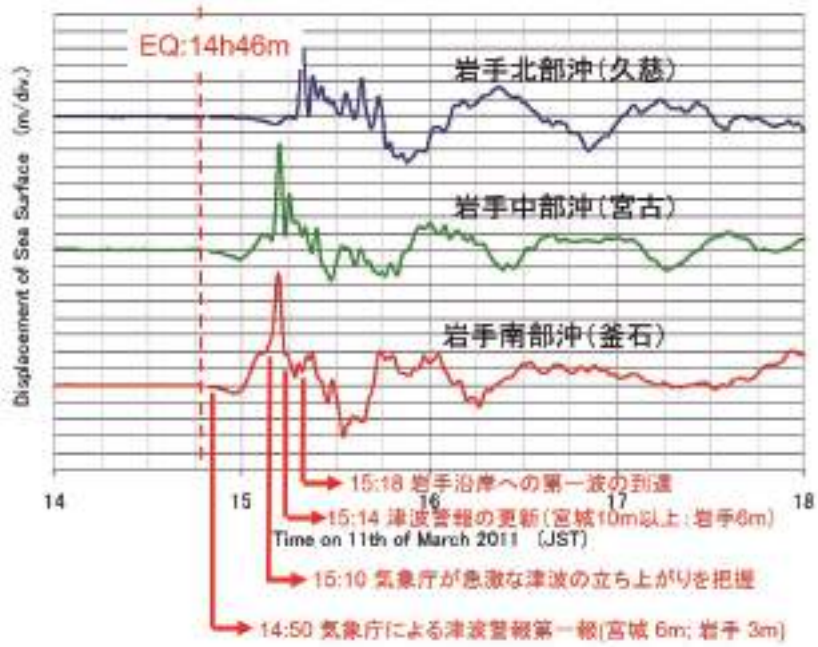


図 6　三陸沖の GNSS 波浪計で記録された 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による津波。

岸住民の避難行動にはつなげられなかったのです。

この原因は、ブイが沿岸から十数㎞程度と十分沖合には設置していなかったことが挙げられます。もっと沖合にブイが設置されていればそれだけ早く津波が捉えられ、より早い避難行動につなげられた可能性があります。なお、ここでは示していませんが、実はもう一つの問題がありました。それはリアルタイムでモニターしていたデータが最初の津波のブイへの到来を記録した直後に途切れてしまいました。これは多分、データ伝送の経路上の電源かあるいはインターネット回線が切れたことによるのではないかと思います。というのも、現地では観測が続けられており、後日データを現地から回収して図６のように津波記録を復元できたのです。

これらのことから、２つの教訓を得ることができました。一つはブイを沿岸からもっと遠くに、例えば50㎞以上に、離さないといけない、ということです。また、海上からのデータを受ける地上局が震源の近くで電源断の影響を受けてはならない、ということです。これらのことから、２つの改善点が考えられました。

まず、測位の方式をそれまでの相対測位から精密単独測位に替えることです。GPS で精密な測位をする方式としてはそれまで相対測位方式が主流だったのですが、1990 年代の終わりころから単独測位でも㎝の精度で測位ができるようになってきました。この方式では、衛星の精密な位置と時計のデータ（精密暦と呼ぶ）が必要になります。それを即時的に入手することは難しかったのですが、衛星データを即時的に解析することやそこから求められた衛星の位置と時計のデータをインターネットから即時的にユーザが入手することが次第に可能になってきました。そこで、我々はこれらのことが可能な、米国で開発された PPP-AR という手法を用いることにしました。

また、沿岸からの距離が遠くなると、データの伝送のために地上の無線を使うことができません。そこで衛星通信を導入することにしました。衛星通信を用いれば震源からの影響を受けない遠くの場所で受けることが可能になり、データ断の恐れがなくなります。測位はブイ上で行うのが良いか、生データを陸上に送ってそこで測位を行うのが良いか、という問題がありますが、ブイで取得した生データを 24 時間リアルタイムで陸に送って解析するとなると商用衛星ではデータ通信料が極めて高価になります。そこで、我々はまず陸上で精密測位に必要な衛星の位置と時計のデータを生成し、それを衛星通信を介してブイ上の計算機に送り、ブイ上の GPS 機器から出力される生データを精密暦を用いて解析し、結果のブイ位置データのみを衛星通信で陸に送り返す、という方式をとることにしました。これですと、双方向の衛星通信が必要になるものの、通信データの量は GPS の生データを送るよりもはるかに少なくて済むのです。

実験は、当時使われていた技術試験衛星「きく８号」という通信用の衛星を使わせていただくことにしました。これは JAXA が打ち上げた衛星通信用の試験衛星でそろそろ退役しようとしていたものです。この最後のミッションとして我々の GPS 津波計の双方向データ通信の実験を行ったのです。図７がその時に取得できたデータです。多少の遅れ（多分１秒以内程度）はあるものの、比較的安定して解を得ることができ、この結果をホームページ上でも公開することができました。この実験の成功に力を得て、我々は次のステップに進むこととしました。

■新たな展開と総合防災ブイへの挑戦

幸いなことに我々はふたたび科研費の採択を得て平成 28 年度（2016 年）から５か年計画で開発を進めることになりました。あいにくこの

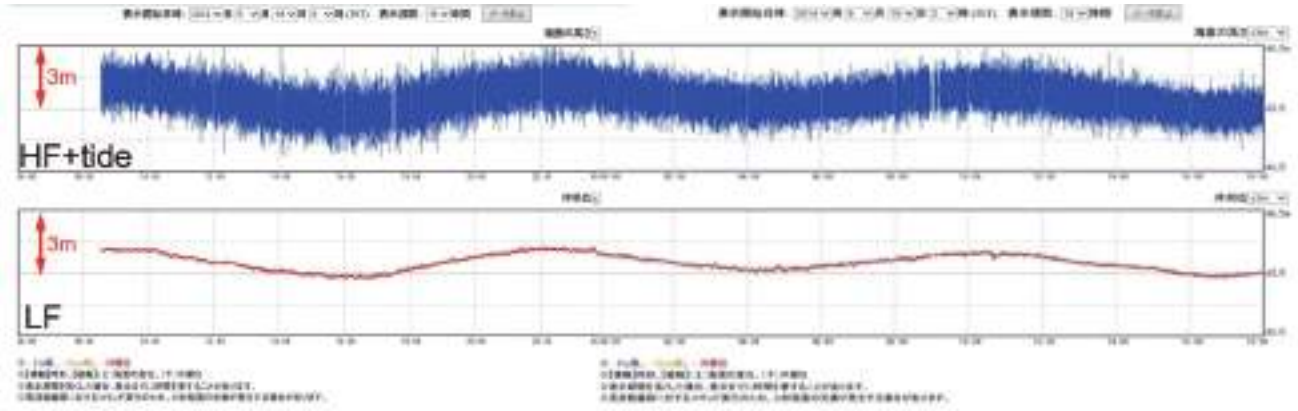


図７　技術試験衛星「きく８号」で取得された GNSS ブイの記録（2014 年６月 18 日６時から 36 時間）。上段：高周波成分＋潮汐。下段：低周波成分＋潮汐。

技術試験衛星は最初の年度で基礎的な実験を行った後、軌道を離れて退役することとなりました。そこで、商用衛星による衛星通信を導入することとしました。幸い、Softbank 社には大変なご協力をいただき、格安での衛星通信を提供していただくことになりました。この新たな実験では、高知県のご協力を得て、県が高知県沖に設置している漁礁用のブイである海洋牧場と呼ばれるいくつかのブイのうち一基をお借りすることになりました。最近、海上にブイを設置するとそこに魚が集まってくるという習性を利用して、外洋にいくつかのブイを敷設しその周囲で漁業を行う方式が沿岸漁業のために自治体で次第に導入されつつあるようです。これらのブイに GPS 装置を搭載すれば、日本沿岸に相当高密度な GPS 津波計測網ができあがりそうに思うのですがどうでしょうか。

ともあれ、我々は足摺岬沖約 40 ㎞のところに敷設されている海洋牧場 No.18 のブイを科研費の期間中借用することとなりました。このブイに GPS 装置一式と衛星通信用の設備及び太陽電池と蓄電池を入れた箱などを搭載し、2018 年の 11 月からこのシステムを稼働しはじめました。ところが、開始してすぐにデータが止まってしまいました。どうやら電力不足であったようです。狭いブイの上に GNSS 機器の他、解析用の小型計算機、衛星通信のための装置などを搭載したため、電力が不足したようです。このあと、我々のプロジェクトはいろいろな悪状況が生じてなかなか進まなくなりました。例えば、ブイの周辺の潮流が思いのほか速く、作業しようとしてもなかなか船をつけることができません。そのために数か月も待ってしまうようなこともありました。また、太陽電池を増設したり、充放電制御装置を入れ替えたりなど様々な手を尽くしましたが、本質的な解決に至りませんでした。どうやら太陽電池が当初の想定通りの発電ができていないのではないか、ということになりました。そこで、再度電源部分を再検討し、太陽光パネルをさらに増強するなどの対策をとりました。ようやく、観測が順調にいくようになったようです。

ところで、これまでは GNSS ブイを用いた津波早期警戒の可能性だけを検討してきたのですが、もし、その観測が海洋のどこでも可能になるとしたらもっと多くの応用技術につながっていくのではないか、と考えるようになりました。その第一の応用というのは、海底地殻変動観測への応用です。

これには少し説明が要るようです。1980 年代の初めころ、米国の大学研究者が開発した手法ですが (Spiess et al.、1998)、海底に音響を送受信できる装置（トランスポンダーなどと呼びます）を 3 基、だいたい正三角形になるように配置します。海上の船からトランスデューサと呼ばれる送受波装置で音波を送出し、海底の 3 基のトランスポンダーから戻ってくる音波を記録します。それぞれのトランスポンダーへの音波の送信時刻と受信時刻の差から、船からトランスポンダーまでの距離が計測できます。この計測値からトランスポンダー 3 個で構成される三角形の形が決まります（図 8）。なお、船の位置を正確に決めておくことが必要ですがこれは GNSS を使えばできます。ただ、音響を用いた距離の計測では海中の水温や塩分などが時間的に変わることによって見かけの距離がメートルの桁で大きく変わります。そうすると、海面から海底を見た場合、距離が長く計測されれば、トランスポンダーで構成される三角形がより遠くに大きく見え、距離が短く計測されれば、三角形は近くに小さく見えることになります。ですが、海中の水温や塩分がその領域内でそれほど大きく変わらなければ大きい三角形でも小さい三角形でもその重心の位置は変わりません。このような手法を繰り返し観測することで三角形の水平位置の変化を cm 精度で計測することができるのです。GNSS と音響を組み合わせる方式なので、このような手法を GNSS- 音響結合による海底地殻変動

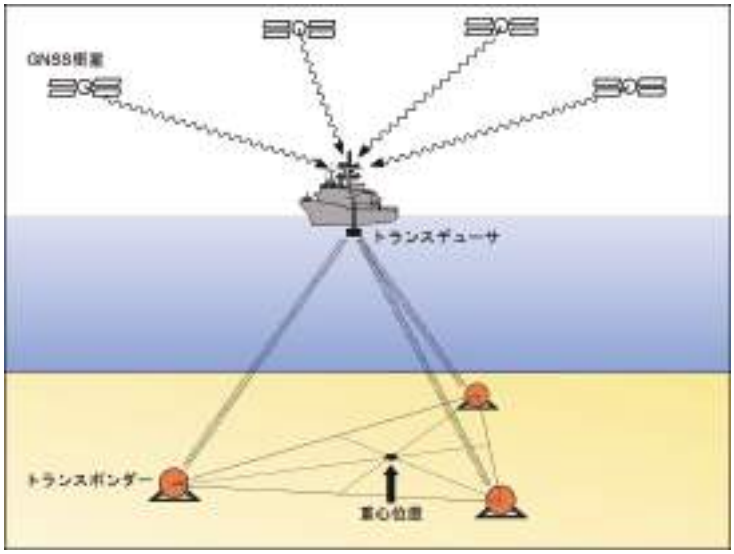


図 8　GNSS －音響システムによる海底地殻変動観測の原理。船の位置を GNSS で計測し、船の位置を基準にして海底に置かれたトランスポンダー 3 基で構成される三角形の重心位置を音波を用いて計測する。

観測などと呼ぶことがあります。この方式の応用について次の節で説明します。

～海底地殻変動連続観測への挑戦～

日本列島ではよく知られているように、太平洋沿岸の沖合いでプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生します。震源域は海底ですので、海底での観測はプレート間固着の状態や地震時あるいは地震後の地殻変動を推定するのに極めて重要です。これまで海底での地殻変動観測は水圧観測による上下変動など極めて限られたものしかありませんでした。一方、陸では国土地理院による GNSS 観測網が全国に１２００点以上はりめぐらされていて詳細な地殻変動が日々監視されています。このような陸と海の観測網の違いは大きな問題となってきました。

そこに登場したのが前節の GNSS-音響結合による海底地殻変動観測です。原理は米国で開発されたのですが、日本の海上保安庁海洋情報部や東北大学、東京大学、名古屋大学などの研究者が大変な努力を重ねて精度が向上し、プレート境界地震の地震時変動や地震の余効変動を検出することに成功しました。このようなことから、日本列島の太平洋沿岸では既に 60 箇所の GNSS- 音響システムを用いた海底地殻変動観測点ができています。2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震の際にはこのシステムで海底の 30m を超える変位が観測されました。陸の観測網では最大で 6m 程度の変位でしたので（これでも大変大きいですが）、海底にある震源域直上のデータが得られたことで地震の震源の姿がこれまでになく詳しく明らかにされました。これだけでも、もちろん世界に誇れる素晴らしい観測網だと思いますが、一つの問題点があります。それは、海上でのデータ収集には船舶が用いられていることです。このため、船がその場所に行く場合にだけ観測が行われますので、年間でせいぜい数回しか（最近では頑張って 10 回程度まで）観測ができない、という点です。もし、観測を連続的に（例えば毎日）行うことができれば、より詳細な地殻変動のデータを得ることができ、プレート間で発生する地震やゆっくりすべる現象などが詳しく明らかになるに違いありません。そこで、もし船でなくブイを海上のデータ収集基地に用いることができればこのような連続観測が可能になるのではないでしょうか。

もちろん、これを可能にするためには技術的にも解決しなくてはならない点が多々あります。現在我々は、足摺岬沖のブイを用いてこのような応用研究も進めています。

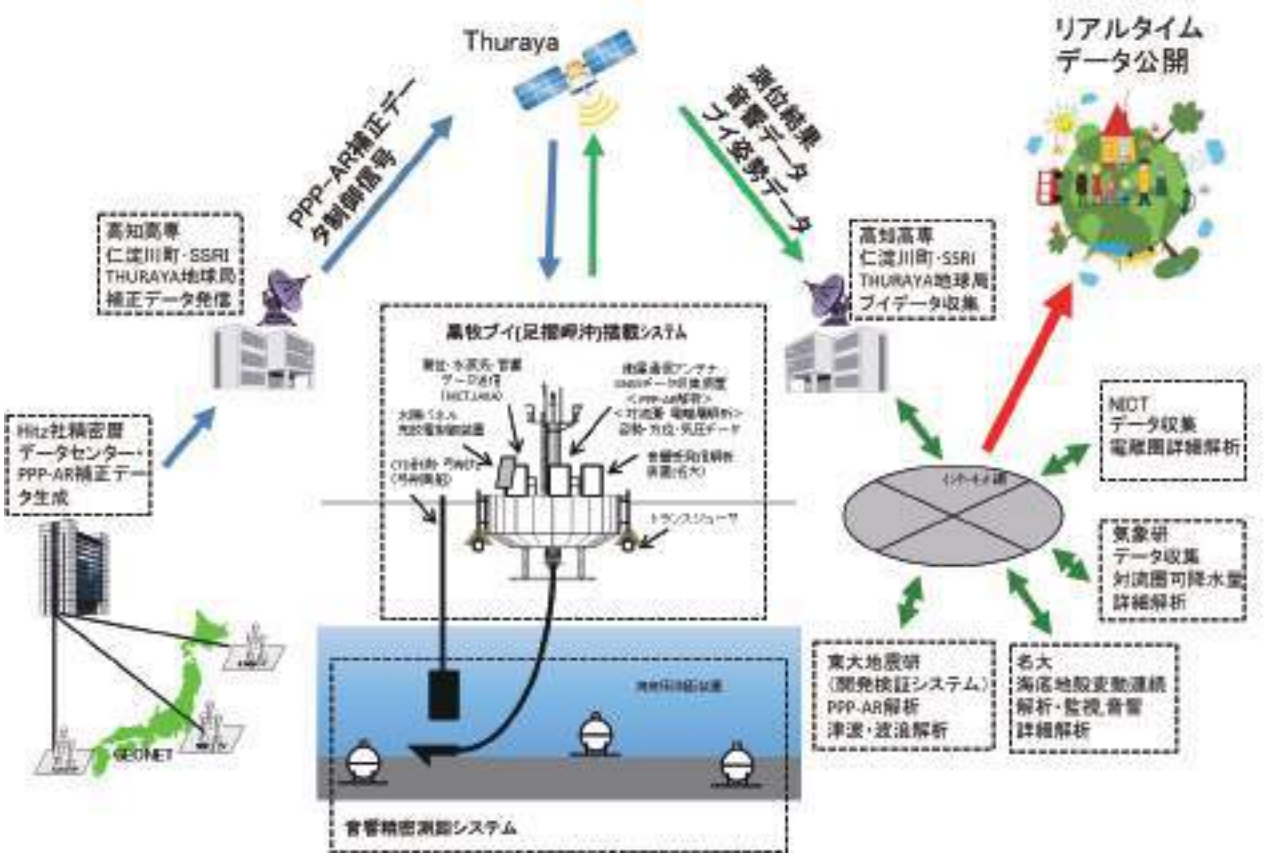


図 9　2016 年から開始した足摺岬沖の GNSS ブイを用いた実験のシステム。衛星通信には Thuraya という衛星を用いている。

～その他の応用～

前節にあげた海底地殻変動の連続観測への応用にとどまらず他にも様々な応用が期待されます。例えば、GNSS 衛星と受信機の間の電波の伝搬媒質、すなわち大気と電離層に関する応用です。GNSS による測位においては衛星と受信機の間の距離を正確に計測することが重要ですが、距離を正確に測るための誤差要因として伝搬媒質の影響があります。電磁波は光の速度で進みますが、伝搬媒質すなわち大気と電離層の影響で遅延します。これが距離の計測の誤差となります。

大気の影響は電磁波の行路上の水蒸気量に比例します。従ってこれを補正する必要がありますが、逆にそのために求めた水蒸気量は気象学にとって大変重要な量である可降水量（PWV; Precipitable Water Vapor）に変換することができます。日本列島の GEONET ではこの可降水量をリアルタイムに計測して気象庁に送り、天気予報の精度向上に役立てられています（小司他、2009）。もし海上で可降水量を計測できれば天気予報の精度向上に寄与することと思います。特に西方海上に起因する線状降水帯の発生予想や夏季の台風の降水予測などにも役立てられるのではないでしょうか。

電離層での遅延量は GNSS が用いる電磁波の周波数によって異なります。そこで GNSS では２つの周波数の電磁波を用いることで遅延量を推定して補正しています。この遅延量は電波が伝播してくる行路上の電子の総数（TEC; Total Electron Content）に比例します。こうして GNSS を用いて TEC が計測できることになります。これまでの研究で大きな地震が発生すると電離層に乱れが生じそれが上空に向かって伝播していく様子が捉えられるなど、大変興味深い研究結果が出ています。日本では情報通信研究機構が世界の GNSS 観測局からインターネットを通じて取得できるすべてのデータを用いた TEC を算出して電離層の擾乱を監視する事業を行っています（Tsugawa et al.、2018）。ところが、これも大気の場合と同じように、観測点が地上にしかないので、太平洋などの上空の電離層の状況がよくわかりません。海上に GNSS 観測局が多数あれば海洋の上空の電離層の状況もよくわかるようになると期待されます。

以上のようなことから、我々の GNSS ブイのプロジェクトでも気象の研究者や電離層の研究者の協力も得ながら研究を進めています。課題はブイ上のデータをいかにリアルタイムに精度の良い可降水量や総電子数を推定して研究者の元に遅延なく届けられるか、というところにあります。こうしたことを考えながら、今我々は図９に示すようなシステムを構築して研究を進めています。まず、陸上のデータセンターで GNSS 解析に必要な GNSS 衛星の精密暦を生成します。それを通信衛星経由でブイに送ります。ブイでは GNSS 観測が行われていますのでそのデータに精密暦を適用してブイの精密な位置を決定します。その際の副産物としてブイ上空の可降水量（PWV）や総電子数（TEC）も推定します。一方、ブイに取付けられた音響送受信機（トランスデューサ）から海底に置かれた３台のトランスポンダーに音響を送出して返ってくる音波を捉え、ブイとトランスポンダーの距離を推定します。以上のデータを再度通信衛星を用いて陸上の基地局に送ります。陸上の基地局からは海面変化データをリアルタイムで Web 表示して津波の早期検出を行うと共に、その他のデータは必要な研究者等に伝達されて応用研究に使われます。

もし、このプロジェクトがうまくいけば、海底地殻変動から津波を含む海面の変動、大気、電離層といった、様々な地球科学的なデータを算出することができます（図 10）。これまで取得することの難しかった海上で多くの新しいデータが地球科学者に提供できると期待できます。

■ 解決すべき課題と将来像

これまで述べてきた技術については、既にその原理がわかっていて解決することはそう難しいことではないと楽観しています。ただ、それでもまだ多くの課題がのこっています。とりわけ、ブイを長い間海面上で安定に保持して各種の機器を運用することにはいろいろな困難が伴います。例えば電力は太陽電池を用いて発電した電気をブイ上の蓄電池に貯めて使いますが、多くの電子機器を搭載したブイ上で余裕をもった電力確保が大変困難です。電力供給システムのどこかに不具合が発生すれば観測やデータ伝送ができなくなります。より効率の高い太陽電池が望まれますが、これはブイだけでなく世界的にも開発が進められていますので遠くない将来には解決ができることを期待しています。また、電子機器にとって厳しい環境での連続稼働が必要とされますので、機器の故障への対応も課題です。機器が故障しても遠い海上にあるものをすぐ

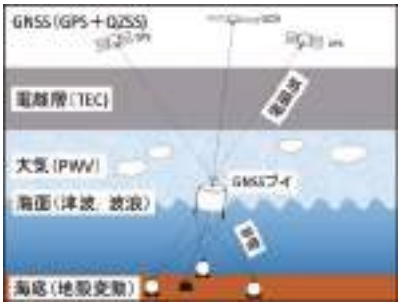


図 10　GNSS ブイを用いた応用研究の事例。

に修理することはできないので、欠測が長く続くことになります。そのため、例え故障したとしても自律的に修復できるシステムが必要になります。また、ブイそのものも耐久性の問題や海賊、盗難、船舶等の衝突などによるブイの破壊・亡失からの安全性保持などの課題もあると思います。一方、このようなブイを海上に多数設置して運用する場合には衛星通信の費用をどうするのか、また、陸上で集めたデータをどう処理して国民に対する情報提供を行うのか、等の運用体制についても考えておかなくてはなりません。我々は基礎的な技術開発を行っていますので、これを社会に役立つようにするためには別途システム全体の安定的運用を実現する体制を整える必要があります。すぐには解決できない課題が多いと思いますが、これらを少しずつ解決していけば日本を取り巻く広大な海洋に多数のブイを配置することでこれまでにない優れた地球科学インフラになるのではないでしょうか。例えば図 11 に示すような西太平洋の日本の排他的経済水域に多数のブイを並べてデータをリアルタイムに必要な人に提供できるようなシステムを構築してはどうでしょうか（Kato et al., 2018）。我々はこれを、陸の GEONET になぞらえて“海の GEONET”と呼んでいます。今はまだ夢物語の世界ですが、いつかこのようなシステムができ、我々の安全・安心な社会の構築の一助になることを願っています。

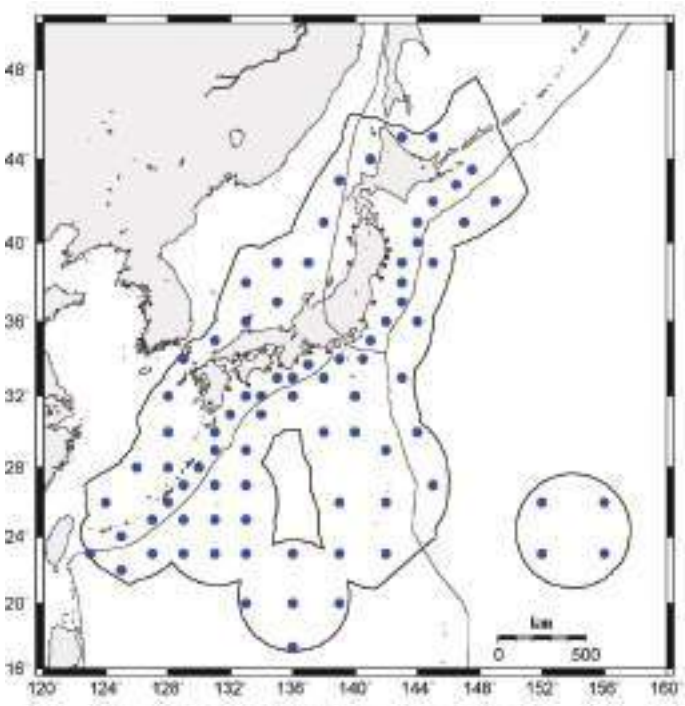


図 11　西太平洋の日本の排他的経済水域に設置する GNSS ブイアレイの概念図。

■ 謝辞

高知工業高等専門学校の寺田幸博客員教授と名古屋大学大学院環境学研究科の田所敬一准教授には本稿を呼んでいただき有益なコメントをいただきました。本稿を執筆するにあたっては科学研究費補助金（課題番号 16H06310）の支援を受けました。

■ 参考文献

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real Time Observation of Tsunami by RTK-GPS, Earth, Planets and Space, 52(10), 841-845, 2000

Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, 57, 297-301, 2005.

Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018, Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, 2018, J. Disaster Res., 13 (3), 460-471.

小司 禎教・岩淵 哲也・畑中 雄樹・瀬古 弘・市川 隆一・大谷 竜・萬納寺 信崇，GPS 気象学：GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究，測地学会誌，55(1)，17-38, 2009.

Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Purcell Jr., and H. Dragert, Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, Pys. Earth Planet. Inter., 108, 101-112, 1998.

Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi, Total Electron Content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS, J. Disaster Res., 13(3), 535-545, 2018.

［論文2021-1］

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in IoT Non-Terrestrial Network for GNSS Buoy Array in the Ocean

Kenichi Takizawa
Resilient ICT Research Center, NICT
Katahira 2-1-3, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, JAPAN
Email: takizawa@nict.go.jp

Shinichi Yamamoto
Wireless Network Research Center, NICT
Nukuikitamachi 4-2-1, Koganei, Tokyo, JAPAN
Email: shin.yamamoto@nict.go.jp

Yukihiro Terada
National Institute of Technology, Kochi College
Monobe-otsu 200-1, Nangoku, Kochi, JAPAN

Teruyuki Kato
Taisho University
Nishi-sugamo 3-20-1, Toshima-ku, Tokyo, JAPAN

I. Introduction

Deployment of global navigation satellite system (GNSS) buoy system as an array in a wide ocean is expected as a powerful tool for monitoring tsunami and ocean bottom crustal deformation in the region [1]. IoT non-terrestrial network (NTN) [2] is crucial to realize the system since the buoys are deployed in the ocean. In the GNSS buoy array, although data size sent from each buoy is small, it requires to accommodate more than 10 buoys while the satellite link in available. In this case, grant-free access, which brings advantages of low latency and small signaling overhead, is expected. In this work, the use of uplink based on non-orthogonal multiple access (UL-NOMA) [3] is evaluated as grant-free access in the GNSS buoy array. We propose a method of generating a low-density signature for NOMA from buoy's location (latitude and longitude) for reduction of the signaling overhead.

II. IoT NTN using NOMA for GNSS buoy array

A. System model

Figure 1 shows a system model. As shown, UL-NOMA using the interleave pattern π_n is introduced. GNSS buoys are deployed in the ocean with a distance of more than 10 km. In this paper, we treat only UL, in which each GNSS buoy sends measured data in S-band with satellite-orbit of LEO-600. Assuming that frame synchronization is established among the buoys and the satellite, and the n th buoy is aware with its location by longitude $l_{1,n}$ and latitude $l_{2,n}$. As the UL-NOMA, a method is proposed to determine its interleave pattern π_n for data signals $\mathbf{x}_{n,p}^{\mathrm{DS}}$ and cyclic shift Δ_n for reference signal $\mathbf{x}_n^{\mathrm{RS}}$ by using $(l_{1,n}, l_{2,n})$. In this method, reference points represented by (l_1, l_2) are pre-determined as each buoy selects unique π_n and Δ_n in the beam spot. The simplest way is to set the distance of the reference points as less than the half of the distance between GNSS buoys. As shown in the frame format, each buoy sends $\mathbf{x}_{n,p}^{\mathrm{DS}}$ with repetition of P times followed by $\mathbf{x}_n^{\mathrm{RS}}$. Received signal at the satellite is given by $\mathbf{r}^{\mathrm{RS\ or\ DS}} = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{h}_n \cdot \mathbf{x}_n^{\mathrm{RS\ or\ DS}}$, where N is the number of the buoys in the beam spot, and $\mathbf{h}_n$ denotes a channel coefficient between the n th buoy and the satellite. At the receiver, first, π_n and estimates on the channel coefficients $\hat{\mathbf{h}}_n$ are derived by $\mathbf{r}^{\mathrm{RS}}$ by calculating the channel impulse responses. Then, $\mathbf{r}_p^{\mathrm{DS}}$ is processed in iterative way between multiuser detector (MUD) and channel decoder (DEC) in log-likelihood ratio. Finally, information data sent from the N buoys are recovered.

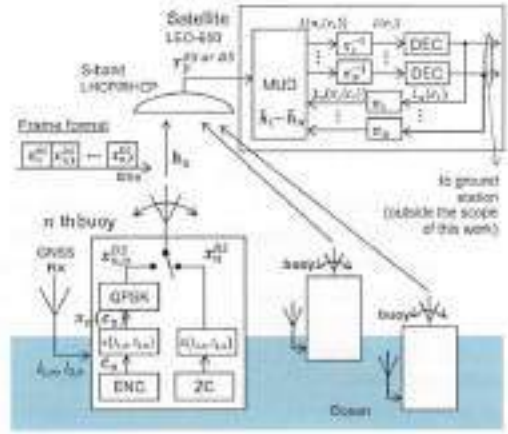


Fig. 1. System model of UL-NOMA in IoT NTN for the GNSS buoy array.

B. Channel characterization

Since GNSS buoys are deployed in the ocean, fluctuation on the antenna gain due to rolling of the buoy caused by waves is occurred. In order to characterize the fluctuation, measurement campaign has been conducted by using ETS VIII (S-band) and a ship, in Seto Inland Sea, Ehime, Japan in 2016. Measurement setup is shown in Fig. 2. IQ waveforms received at the patch antenna and antenna's angles (rollϕ, pitchθ, and yawψ)

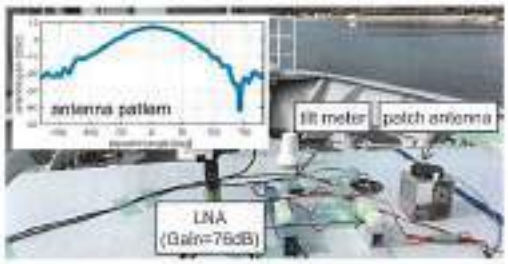


Fig. 2. Setup for characterizing radio propagation in S-band.

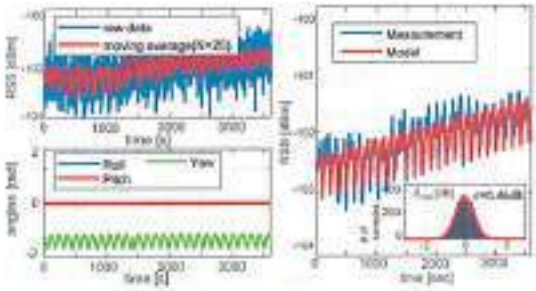


Fig. 3. Measurement results (left) and a derived propagation model (right).

are recorded by a signal analyzer (Keysight technologies N9010A) and a tilt meter (Microstrain 3DM-GX4-45SK1), respectively. Synchronization on the measurement of the IQ waveforms and angles are established by GNSS 1PPS. Fig. 3 shows measured results and comparison on RSS between the measured results and realization by a model, which is given by $P_{\mathrm{rx},0}+G_{\mathrm{ant}}(\phi,\theta,\psi)$ where $P_{\mathrm{rx},0}$ is reference received power and $G_{\mathrm{ant}}(\phi,\theta,\psi)$ stands for antenna gain towards the satellite. The difference between the measured results and the model δ_{RSS} is given by log-normal distribution with σ of 0.46 dB.

C. Evaluation

A link budget based on study case 9 in [5] is shown in Table I, in which diameter of the beam is 50 km. The model derived from our measurement campaign is included. Here, transmit power error at the buoy given by uniform distribution ± 3 dB is taken into account, in which the transmit power is decided by RSS of the beacon from the satellite. Specifications of the UL-NOMA is summarized in Table II. 80 reference points are pre-determined with distance of 5 km in the beam spot. The Δ is given by multiples of 3, which is equivalent to 8.33 μs. And, the set of π is generated by uniform random patterns. In MUD, chip-by-chip detection [6] is introduced, and the number of iterations between MUD and DEC is 32. Simulation results are shown in Fig. 4. As antenna's angles (ϕ,θ,ψ), measured angles at a buoy deployed in ocean are used. As shown, frame error rate (FER) of $\leq 10^{-3}$ is achieved with repetitions P of 8 and 9 for N of 12 and 14, respectively. In these conditions, the ratio of successfully decoded all the N buoys P_{suc} of $\geq 99.9\%$ are achieved. Thus, the number of required slots is successfully reduced to less than 2/3 by introducing the UL-NOMA.

TABLE I
LINK BUDGET ON UL IN S-BAND BASED ON 3GPP TR38.821[5]

Parameters	Values
Transmit power in EIRP	23.0 dBm (max)
G/T	1.1 dB/K
Bandwidth	400 kHz
Free space pathloss	159.1 dB
Atmospheric/Scintillation loss	0.1dB / 2.2 dB
Polarization loss	3.0 dB
Shadowing component	0 dB (log-normal, σ =0.46 dB)
Average CNR	$2.8+G_{\mathrm{ant}}(\phi,\theta,\psi)$ dB

TABLE II
SPECIFICATIONS ON UL-NOMA FOR SIMULATIONS.

Parameters	Values
Data signal (DS)	single-carrier QPSK (with CP of 8.33(μs)
Reference signal (RS)	251-chip Zadoff-Chu (ZC) sequence [4]
Error correction coding	Turbo code ($[33, 15]_8$, coding rate = 1/3)
DS and RS	symbol rate = 360 kHz, 270 symbols (750 μs)
# of ref. points	80 (distance between the ref. points : 5 km)

III. CONCLUSIONS

UL-NOMA applicable into IoT-NTN for the GNSS buoy array in the ocean has been evaluated by simulations, in which the fluctuation of RSS due to the waves is modeled by measurement results. For reducing signaling overhead, a method for assigning a low-density signature in UL-NOMA is proposed by location of the buoy. The results show that the ratio of successfully decoded of $\geq 99.9\%$ has been achieved.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310.

REFERENCES

[1] T. Kato, et al., "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System," Proc. of IAG-IASPEI, 2017.
[2] 3GPP TR36.763, "Study on NB-IoT/eMTC support for NTN," May 2021.
[3] 3GPP TR38.812, "Study on NOMA for NR," Dec. 2018.
[4] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, "4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G," third edition, Elsevier, 2016.
[5] 3GPP TR 38.821, "Solutions for NR to support NTN," Dec. 2019.
[6] L. Ping et al., "Interleave division multiple-access," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 5, no. 4, April 2006.

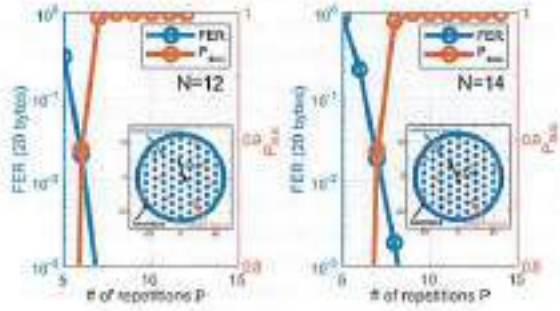


Fig. 4. Simulation results on the UL-NOMA for the GNSS buoy array.

広域観測・微視的実験連携による
沈み込み帯地震研究の新展開

GNSSブイを用いた地球科学・災害監視のための総合海洋アレイ

加藤照之
寺田幸博
田所敬一
二村彰

Synthetic oceanic GNSS buoy array for earth science and geohazard monitoring

Teruyuki Kato・Yukihiro Terada・Keiichi Tadokoro・Akira Futamura

かとう てるゆき　：大正大学地域構想研究所
てらだ ゆきひろ　：高知工業高等専門学校
たどころ けいいち：名古屋大学大学院環境学研究科
ふたむら あきら　：弓削商船高等専門学校

GNSS津波計の開発に関する新たな展開について解説する．2011年東北沖地震における経験をふまえ，より沖合への設置を可能にするために新たな技術を導入し，GNSS―音響システムを用いた海底地殻変動の連続観測及び大気・電離層の研究への応用も視野に入れた海洋アレイへの可能性を探るための開発を行った．

1. はじめに

衛星測位システムGNSS（Global Navigation Satellite System：当初はGPS[Global Positioning System]と呼ばれたが，複数の衛星測位システムが登場したため一般的なGNSSという表記が用いられるようになった）の装置を海に浮かべたブイに登載すれば津波が陸に到達する前に検知でき，津波災害の軽減に役立つであろうという考えは1990年代頃に生まれた（図1）．1996年に開発が開始され[1,2]，社会的な期待もあって開発は順調に進み，2001年には大船渡沖1.6 kmで最初の本格的な連続観測が開始された．ここで用いた手法はRTK（real time kinematic）と呼ばれる相対測位の一手法を用いており，陸に置かれたGNSS観測点との間で相対的な位置関係をリアルタイムに推定する手法である．ブイからのデータ伝送には海洋無線を用いた．この手法ではブイの高さ変化を推定する精度を数cm程度とすると沿岸から20km以内という制約があるものの，比較的手軽に導入ができるシステムであった．幸い，設置後すぐの2001年6月に発生したペルー沖地震（Mw8.3）による振幅10 cm程度の津波を明瞭に捉えることができ，GNSS津波計が実用可能であることを検証できた（図2）．

大船渡沖の観測は2003年までで終了したが，次のステップとして高知県室戸岬沖約13 kmのところで本格的な実用に向けた実験を行った．2004年から観測を開始したが，ここでも幸いなことに開始すぐの2004年9月に紀伊半島南東沖でMw7.6の地震が発生し，この地震による数cm振幅の津波を観測することができた．

これらの実験の成功により，同システムは国土交通省港湾空港技術研究所が運用している全国港

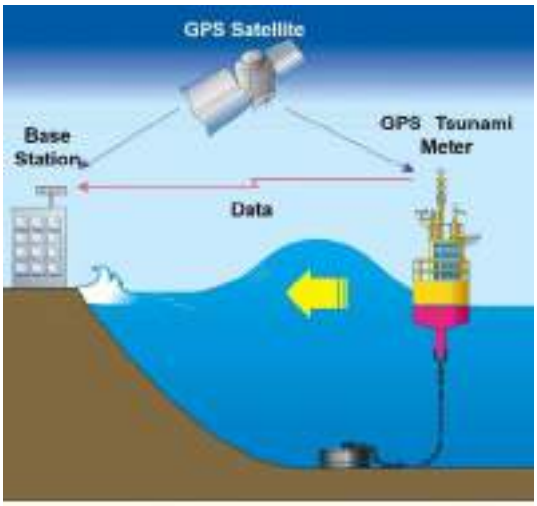


図 1　GNSSブイの概念図. GPS衛星からのデータをブイと地上局で受信し, ブイの地上局に対する相対位置を推定する.

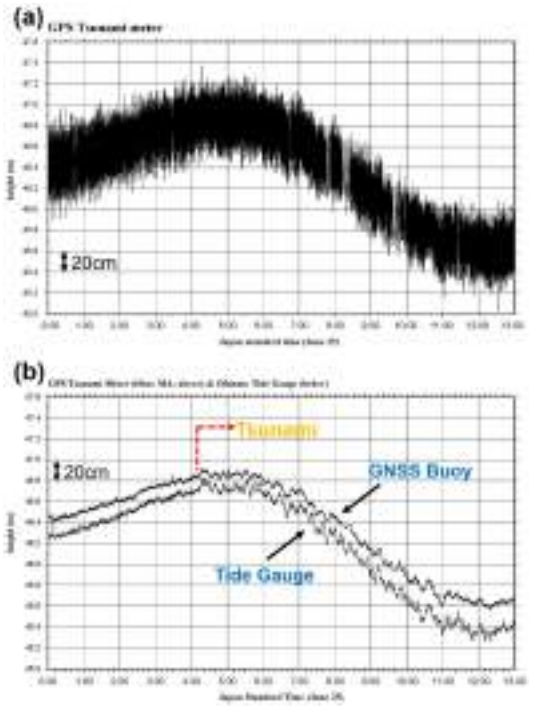


図 2　大船渡沖実験で得られたはじめての津波記録. (a) 一秒サンプリングによる原記録, (b) 原記録に 60 秒の移動平均を操作したグラフ (上) と近傍の大船渡検潮所で得られた記録.

湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）の次世代機として 2008 年頃より三陸沿岸を手始めとして全国に展開された．この観測網は波浪の監視を目的としていることから GPS 波浪計と命名されたが，津波も監視の対象に入れられている．また，気象庁でも津波監視の対象として同年より用いられている．

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）では，気象庁から地震直後に宮城沖 6m，岩手沖 3m の津波警報が出されたものの，NOWPHAS の岩手沖観測点等から 3m を超える津波が観測されたことから，警報が 10 m 以上に更新された．しかしながら，この更新の直後に三陸沿岸に津波が襲来し，多くの人命が失われる結果となった．

この結果から得られる教訓としては，ブイをより遠くの沖合に設置する必要がある，ということになる．より遠くの沖合での設置を目指したさらなる開発研究が始まった．

2. 東北沖地震の教訓からの改善策

RTK-GPS 方式という相対測位を用いることによる限界を突破するために取り入れたのは，2000 年頃より急速に発展していたいわゆる精密単独測位方式（Precise Point Positioning）と呼ばれる測位方式である．それまでは GNSS 衛星からの信号のうちコードを用いる方式で単独測位を行い，コードを載せるために用いられる搬送波の位相を用いて相対測位を行う方式が主流であり，後者を行う際に衛星の精密な位置情報（精密暦と呼ぶ）を取り入れることにより，千 km を超えるような基線でも cm 精度での相対測位が行われてきた．2000 年頃を境に，衛星位置と時計の補正項（併せて精密暦と呼ぶ）を利用することにより，位相を用いた単独測位で cm 精度での測位ができることが示され，急速に普及していった（例えば [3]）．ただ，当初は精密暦を取得するのに 2 週間ほど待たなくてはならなかったのであるが，暦の予測などを取り入れることにより，リアルタイムに取得できるようになってきた．また，位相を用いた測位の場合，衛星と受信点との距離を精密に測位するため

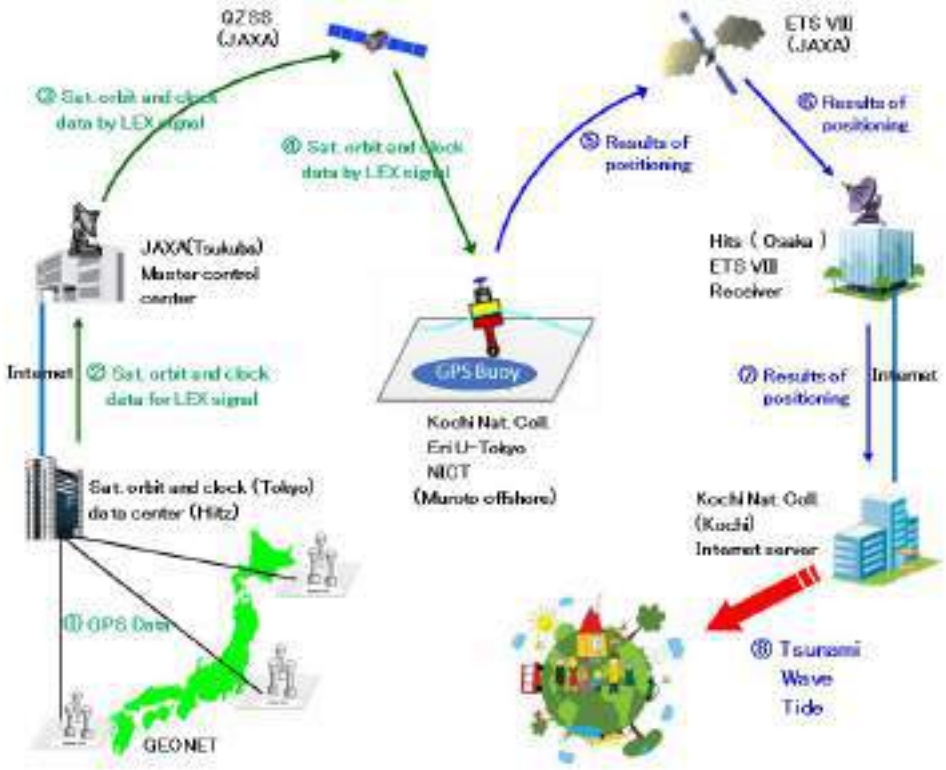


図 3　QZSSとETS-VIIIの 2 つの衛星を用いた実験のデータの流れ.

には波数の整数部分を推定するのがよい（Ambiguity Resolutionという）が，これを含めた手法としてPPP-ARという方式が開発されたことから[4]，この方式を取り入れることとした.

また，沿岸から数十 km 以上離れるということになるとデータの伝送には衛星通信によることが必要になってくる．幸い，開発を始めた時点ではJAXAが打ち上げたETS-VIIIという試験衛星が使えることが判明したため，JAXAの協力も得ることとした．ブイという揺れが大きくなることが想定されるような場合の衛星通信がどこまで可能かを検証する必要があるが，これも考慮に入れた計画を作ることとなった.

3. 新たな手法を取り入れた実験（2013～2015年）

これらの方式を取り入れた計測実験を 2013～2014 年に実施した．ここでは，ブイは自前のものではなく，高知県が土佐湾で行っている多数のブイを漁礁に見立てて漁を行う，黒潮牧場と呼ばれるプロジェクトのブイを借用することとした．いくつかあるブイのうち，室戸沖約 35km のところにある黒潮牧場 16 号ブイを借用することとした．このブイ上に GNSS のアンテナ / 受信機セット及び PPP-AR の解析を行う計算機，及び衛星通信用の送受信装置などを設置した．また，継続的観測を行うため，太陽光発電用のパネル及び蓄電池も設置した.

全体システムを図 3 に示す．前節に述べたように，PPP-AR 解析に必要な精密暦の情報は GEONET のデータを用いて陸上のサーバで取得し，これを日本が打ち上げた測位衛星 QZSS を経由してブイに送り，ブイ上で PPP-AR 解析を実施してブイの位置を推定し，ブイから ETS-VIII を経由して地上局

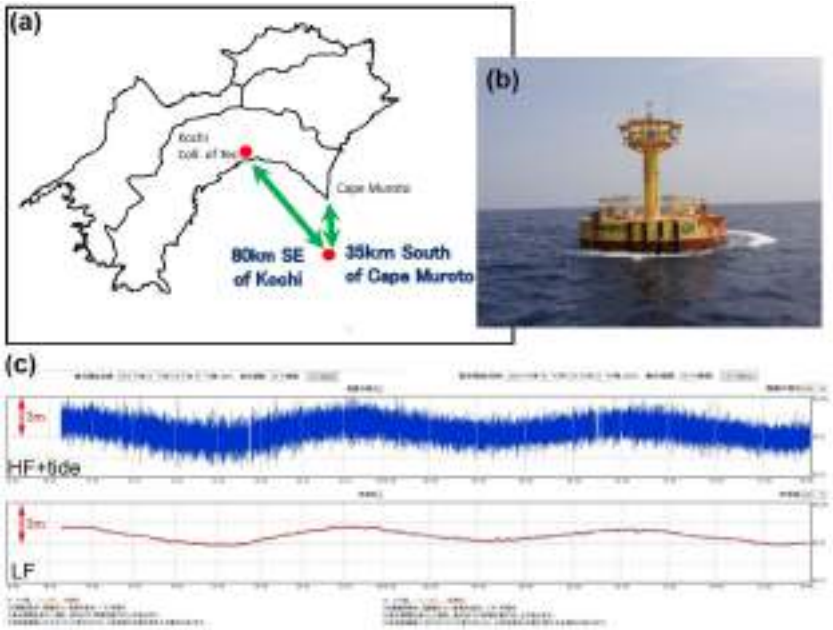


図 4　(a) 室戸沖実験のブイ及び地上局 (高知高専) の位置, (b) 黒潮牧場 16 号ブイ, (c) 実験で得られた記録；(上) 短周期データ，(下) 長周期データ.

に送り返し，そこからインターネット上に情報を公開する，という方式をとった.

図 4 にブイと地上局の位置及びブイの写真を示す．実験は 2013 年 12 月～2014 年 1 月にかけてと 2014 年 6 月に実施した．図 4 に得られた記録も示す．これはインターネット上で誰でも見られるようにした．この記録を子細に検討すると，データが必ずしも連続ではなく，しばしば欠落する部分があることがわかる．このデータの欠測率と波の高さにはよい相関があり，波が高いときにデータの欠測が多いことが判明した．この理由としては，ブイが傾くことにより通信衛星とブイ上の衛星通信用アンテナとの視線角度が変わり，信号強度の低下を招くことが原因と考えられた．揺動するブイの上での衛星通信を安定的に実施するためには例えば通信用のアンテナをジンバルの上に搭載してアンテナを常に水平保つようにする必要がある．このような治具を考案して，2015 年 12 月には瀬戸内海において船舶をブイに見立てた実験を行った.

4. 総合的な防災・地球科学応用を目指したブイの構築

これらの各種実験に基づき，新たな総合的な応用が可能な GNSS ブイをデザインすることとなった．ここで新たに取り入れることとなったのは海底地殻変動計測への応用である．海洋での地殻変動計測は歴史が古いが，特に最近目覚ましく発展している技術にいわゆる GNSS-音響システムと呼ばれる方式がある [5]．詳細は他に譲るが，電磁波が海中を伝搬することができないため，船舶を GNSS で測位し，そこから海底の数台のトランスポンダーに向けて音響による測距を行い，トランスポンダーアレイの重心位置を推定しようとする方式である．米国の研究者によって提案された手法であるが，日本の研究者によって格段に開発が進み，海底位置の推定が数 cm 程度まで向上し，世界に誇る素晴らしい研究成果が続々と生まれている.

この方式では船舶を用いることが必須になり，観測は連続的に実施することは出来ない．海上保

安庁では測量用の船舶を用いることで一年あたり4回程度にまで測定頻度を向上させているが，日本周辺でのプレート収束域での様々な固着の様態を解明するためには連続観測が望ましい．このため，我々の開発しているGNSSブイを船舶の代わりに用いることができないか検討することとなった．なお，最近では船舶の代わりにウェーブグライダー等の無人艇を用いる試みもなされている．

また，海底地殻変動計測への応用の他，GNSSブイで取得したデータは気象観測や電離層観測における重要な物理量を計測することが可能である．気象学においてはGNSS計測から得られる天頂遅延量から大気中の水蒸気量を知ることができ，可降水量を測定することが可能である．この可降水量データを気象予報のデータ同化に組み込むことにより天気予報の精度向上に役立てることができる．陸上では国土地理院のGEONETデータがすでに気象庁のデータ同化に取り込まれているが，海洋のデータが乏しいため船舶による計測などを用いることも実験的に行われている[6]．我々のブイデータを用いることができれば定点観測によるデータとなるためより効率的なデータ同化に用いることができると考えられる．また，電離層観測では，GNSSの2周波データから衛星―地上局間の総電子数を得ることができ，地上にGNSS観測アレイがあれば電離層の様々な現象を得ることができる．特に電離層擾乱はGNSS測位精度に影響を及ぼす可能性もあり，航空機の位置推定に重要な情報を提供することができる．日本では情報通信研究機構（NICT）が中心となって世界的なGNSSデータを用いた電離層監視プロジェクトも進行している[7]．我々のGNSSブイデータをこれらの関連研究者にリアルタイムに提供することで防災にもまた地球科学的にも極めて重要かつ有効に利用が図られると考えられる（図5）．

以上のような各種の応用も念頭に，我々は新たな実験に乗り出すこととなった．幸い2016年度から5年間の科研費を得ることができて，これらの応用をめざした実験に取り掛かることとなった．図6に新たに構築した全体システムを示す．

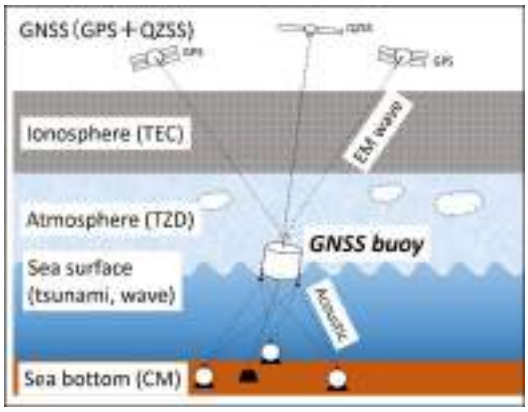


図5　GNSSブイを用いた総合防災システムの概念図．

この実験を開始する時点ではETS-VIIIはすでに退役していたことから，商用衛星（Thuraya）を衛星通信に用いることとした．また，精密暦の送信についても同じ衛星を用いることとした．ブイは室戸沖と同じ高知県の海洋牧場のブイを使用することとしたが，今回は足摺岬沖の18号ブイを用いることとした．また，地上局としては高知県仁淀川町の施設を利用することとした．もちろん，地上局はどこでもよいのであるが，津波による被災をさけるためと研究者のアクセスなど実験が便利なように設定することとした．図7にこれらの位置とブイの写真を示す．

実験は2016年11月頃より開始したが，開始早々様々なトラブルに見舞われることとなった．まず，電源の発電量が十分でなく，開始後比較的早くに電源が落ちてしまった．また，他所でのブイの事故などもあるなど，様々な設計の変更を強いられることとなった．海上作業においても，ブイを設置した海域が黒潮に近かったためなのか，海流が速く作業船がブイに近づくことが困難なことも多く，計画はなかなか進まなかった．また，地上で取得したデータが欠測になることが多く，この原因がブイ上でのGNSSデータ受信・解析装置に問題があるのか，衛星通信に問題があるのか原因をなかなか特定できないなどの問題も発生した．一方，これとは別に，海底地殻変動計測に関

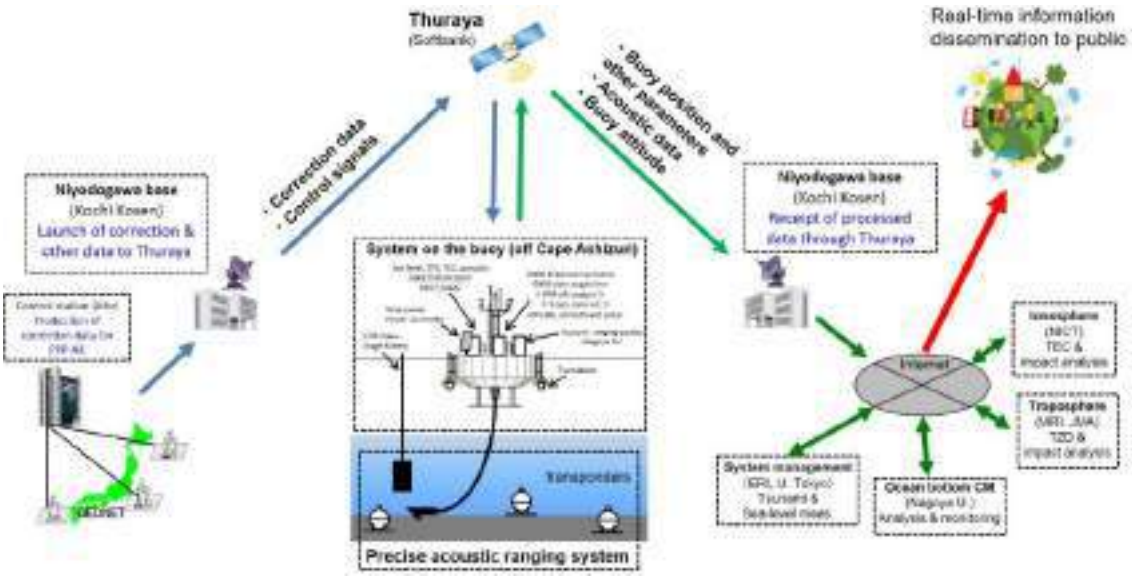


図 6　2016-2020 実験で用いられたシステムとデータの流れ. 衛星にはThurayaを利用. ブイにはGNSSのほか, 衛星通信及び海底地殻変動観測用機材を搭載. ブイにトランスデューサ, 海底にトランスポンダーを設置. ブイ周辺でCTD観測を実施する.

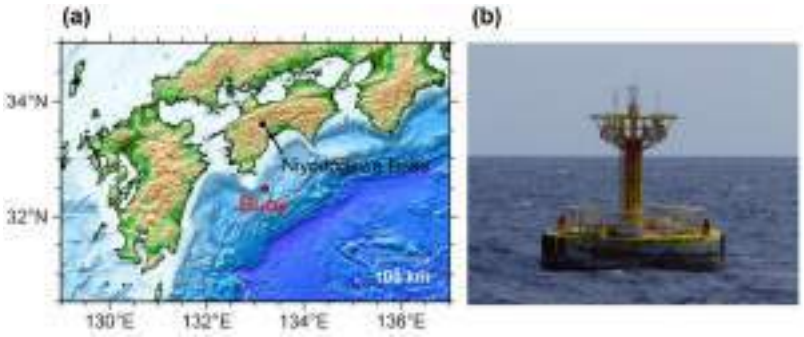


図 7　(a) 2016-2020 実験におけるブイ (足摺岬沖) と地上局 (仁淀川) の位置, (b) 海洋牧場 18 号ブイ.

しては比較的順調に計画が進み，初年度の各種ソフト開発や次年度のブイ周辺へのトランスポンダー設置とその位置決めのための船舶による GNSS ―音響観測，船舶を用いた CTD 観測などを実施していった.

こうした様々な作業を行い，5 年間を通じて切れ切れではあるがブイ上での GNSS データを蓄積すると同時に最終年度には海底地殻変動のはじめての連続観測データを取得することができた．図 8 に，海面高変動データの一部を示す．この実験では短周期の海面変動については，PVD と呼ばれる，GNSS 位相データの変動成分から推定できるブイ位置変化の上下成分を示している [8]．また，PPP-AR による記録も示す．両者がよい一致をしていることがわかる.

一方，海底地殻変動の連続観測結果を図 9 に示す [9]．短期間ではあるが，海底局の位置が数 cm 程度のばらつきで推定されていることがわかる．この解析の詳細は他の報告に準備中である．気象学，電離層研究への応用については，実験で

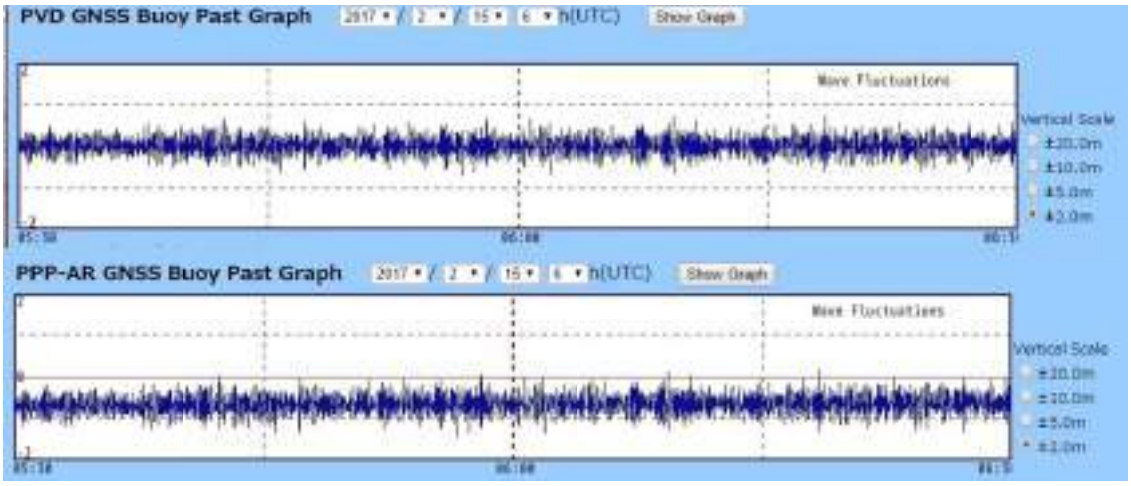


図 8　2016-2020 実験で得られた記録の一例. (上) PVD, (下) PPP-ARによる解析結果.

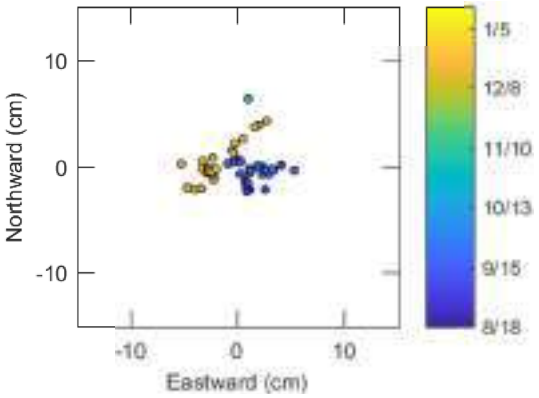


図 9　2020 年 8 月~2021 年 1 月に得られた海底地殻変動連続観測による海底トランスポンダーアレイの重心の水平位置変化.

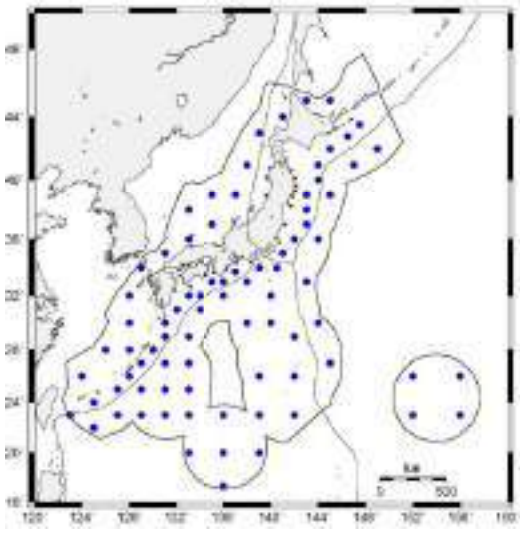


図 10　西太平洋地域に展開したGNSSブイアレイの仮想図. 曲線は日本の排他的経済水域を示す. 点は任意の位置にプロット.

取得したデータを関係研究者に送付して検討していただいているところである.

5. 将来展望と課題

GNSS を用いた，津波をはじめとする総合防災ブイの開発の経緯と最近の展開について紹介してきた．図 5 に示すように，一つのブイで上は電離層から下は固体地球まで幅広い分野の防災に活用することができる．それだけでなく，地球科学の様々な分野の基礎的な研究にもこれまで取得できなかった海洋での定点観測データがとれることになる．ブイ上や周辺に各種の観測機器を設置できれば海洋学にも大変役に立つツールとなるだろう.

このようなブイを例えば西太平洋の広い地域に設置することにより革新的な地球科学観測のためのブイアレイができると考えられる（図 10）.

陸の GEONET にちなんで我々はこれを OCEAN GEONET と呼んでみたい．もちろん，このような大規模ブイアレイを実現するにはいくつかの重要な技術的ブレイクスルーが必要になる．例えば，データの伝送には専用の衛星が必要であろうし，ブイの電源確保やブイ自身の耐久性，遠洋での観測のための自律的な運用システムなど，多くの課題が残されている．これらのことについては別途執筆中の論文を参照されたい [10]．いつの日かこのような海洋の大規模アレイが実現することを夢見ている．

謝辞：本研究は文科省地球観測技術等調査研究委託事業（平成 25-26 年度），平成 27 年度東大地震研所長裁量経費及び日本学術振興会科学研究費補助金 JP16H06310（平成 28 年度～令和 2 年度）の助成を受けたものです．研究の実施に当たっては気象研究所，情報通信研究機構，宇宙航空研究開発機構の関係の皆様に大変なご協力をいただきました．

参考文献

[1] 加藤照之, 他 (1998), 月刊「海洋」, 号外 15, 38-42.
[2] 加藤照之 (2005) 月刊「地球」, 37, 179-183.
[3] Zumberge *et al*., J. Geophys. Res., 102 (B3), 5005-5017, 1997.
[4] Mervart, L., *et al*. (2008) In Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, 397-405.
[5] Spiess, F. N., *et al*. (1998) Phys. Earth Planet Int., 108, 101-112.
[6] Shoji Y., *et al*. (2016) SOLA 12, 265?271
[7] Tsugawa, T., *et al*. (2018) J. Disaster Res., 13, 535-545.
[8] Isshiki, H., *et al*. (2000) J. Geod. Soc. Japan, 46, 239-251.
[9] Tadokoro, K., *et al*. (2021) presented at the JpGU-AGU2021 meeting, July 2021.
[10] Kato, T., *et al*. (2022) Proc. Jpn. Acad., Ser. B, submitted.

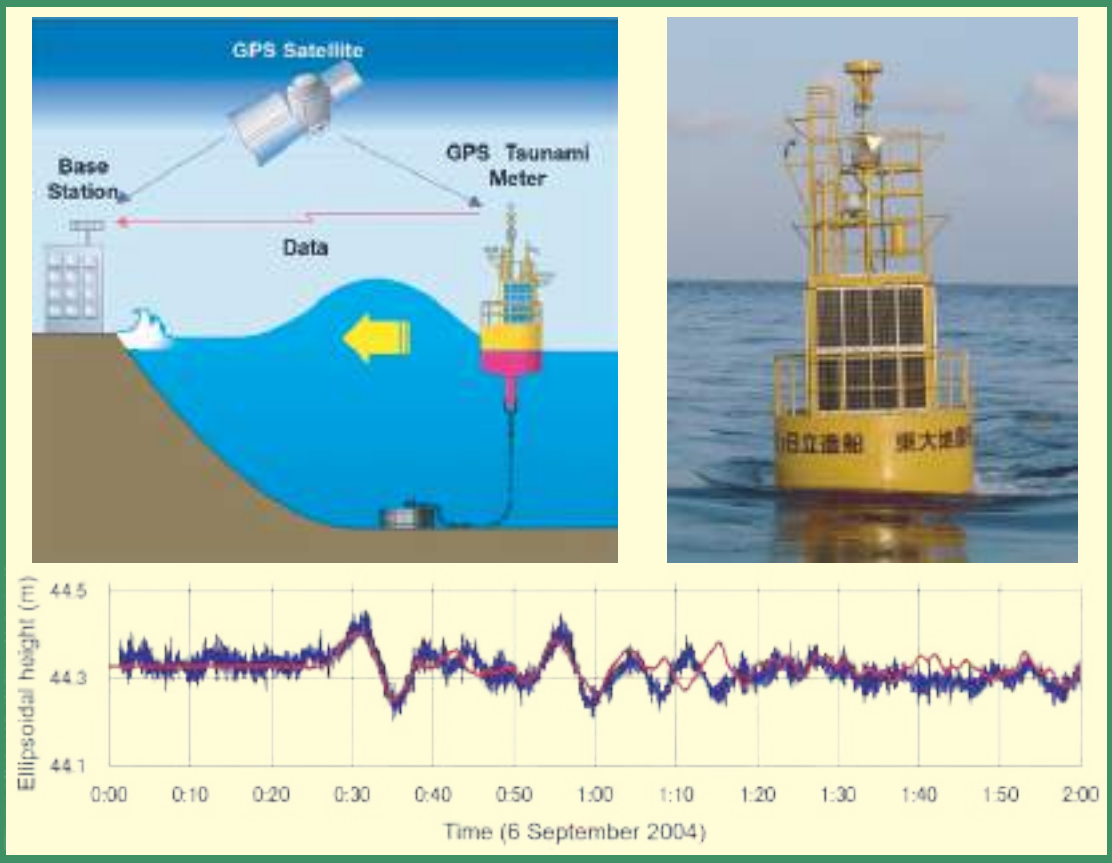
February 2022
Vol.98
No.2
pp.49–71
PJABDW
ISSN 0386-2208

［論文2022-2］

https://www.japan-acad.go.jp/pjab

Proceedings of the Japan Academy Series B

Physical and Biological Sciences



GNSS (GPS) buoy can be used for early tsunami detection and other scientific studies

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF: Kunihiko SUZUKI
EXECUTIVE EDITORS: Yoshio FUKAO, Shigekazu NAGATA COVER EDITOR: Takao SEKIYA

Shizuo AKIRA (*Immunology*)
Yoshio FUKAO (*Geophysics*)
Makoto KOBAYASHI (*Physics*)
Tsuneyoshi KUROIWA (*Biological Science*)
Shigekazu NAGATA (*Molecular Biology, Biochemistry*)
Takao SEKIYA (*Pharmaceutical Science, Nucleic Acid Chemistry*)
Kunihiko SUZUKI (*Neurochemistry, Neurology*)
Koichi TANAKA (*Mass Spectrometry*)
Kazuyuki TATSUMI (*Inorganic Chemistry*)
Toshimitsu YAMAZAKI (*Physics*)
Takeshi YASUMOTO (*Fisheries Chemistry*)

EDITORIAL MEMBERS

Tsuneya ANDO
Teruhiko BEPPU
Leo ESAKI
Yoshinori FUJIYOSHI
Kenji FUKAYA
Nobutaka HIROKAWA
Heisuke HIRONAKA
Tasuku HONJO
Yukio HORI
Kiyoshi HORIKAWA
Sumio IIJIMA
Hiroo IMURA
Tadashi INAGAMI
Akihisa INOUE
Akira IRITANI
Shun-ichi IWASAKI
Masanori IYE
Takaaki KAJITA
Tadao KAKIZOE
Takeo KANADE
Masaki KASHIWARA
Maki KAWAI
Hiroshi KIDA
Tadamitsu KISHIMOTO
Susumu KITAGAWA
Jun KONDO
Ikuo KUSHIRO
Hiroyuki MANO
Toshisuke MARUYAMA
Taroh MATSUNO
Yasushi MIYASHITA
Kohei MIYAZONO
Shigefumi MORI
Junko NAKANISHI
Shigetada NAKANISHI
Atsuhiro NISHIDA
Naoko NISHIZAWA
Ryoji NOYORI
Yoshinori OHSUMI
Eiko OHTSUKA
Satoshi ŌMURA
Masanori OTSUKA
Hiroyuki SAKAKI
Satohiko SASAKI
Takehiko SASAZUKI
Katsuhiko SATO
Eishiro SHIKATA
Koichi SHIMODA
Hideki SHIRAKAWA
Tatsuo SUDA
Akira SUZUKI
Keisuke SUZUKI
Masatoshi TAKEICHI
Kumao TOYOSHIMA
Koichiro TSUNEWAKI
Seiya UYEDA
Eitaro WADA
Koji WADA
Shinya YAMANAKA
Toshio YANAGIDA
Izumi YOKOYAMA
Hiroyuki YOSHIKAWA
Akira YOSHINO

Cover Illustration: GNSS (GPS) buoy can be used for early tsunami detection and other scientific studies

A global navigation satellite system (GNSS), which was known as the Global Positioning System (GPS), is a technology for estimating the position of a receiver placed on the earth's surface using satellites. The precise application of the technique can provide a few centimeters' accuracy for the positioning; therefore, it has been widely used in crustal deformation research over the globe since the late 1980s. Dr. Teruyuki Kato and colleagues first applied the technique to detect tsunami by putting the GNSS receiver on an ocean buoy and continued the developments for more than 20 years (see the review article in this issue pp. 49–71). The top-left figure of the front page shows the first concept of the GNSS (GPS) buoy, for which the position of the buoy was estimated relative to that of the base station placed on the land. This early GNSS buoy system was established near Ofunato City, Northeast Japan, and could detect tsunamis that had amplitudes of several centimeters of height for the 2001 Peru earthquake (Mw8.4) and the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw7.9). The second buoy established off Cape Muroto, Shikoku, southwest Japan, (top right) detected a tsunami for the 2004 Kii-Hanto Oki earthquake (Mw7.3). The plot shown below the figure is the obtained record of the tsunami and the simulated theoretical record has been added, which shows a clear consistency between them. Then, the system was implemented in the nationwide ocean wave monitoring system (called NOWPHAS in Japan) in 2008 and fifteen GNSS buoys had been established around the Japanese coasts until 2011. The records of NOWPHAS buoys were used to update tsunami alerts by the Japan Meteorological Agency, owing to the tsunami caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). However, the system used a relative positioning and had a distance limit between the land base and buoy as less than 20 km. A new system was designed by introducing a new positioning algorithm that enables point positioning using a single receiver and satellite data transmission to place the buoy much farther from the coast. It may be placed at any place in the ocean. A new technique for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements was also implemented in the new system. The new buoy system can be used for other fields in earth sciences, such as weather forecasting and ionospheric monitoring, using the byproducts of the GNSS positioning analyses.

Yoshio Fukao
Member of the Japan Academy

©The Japan Academy 2022

Review

Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system

By Teruyuki KATO,[*1,†] Yukihiro TERADA,[*2] Kenichi TADOKORO[*3] and Akira FUTAMURA[*4]

(Edited by Yoshio FUKAO, M.J.A.)

Abstract: A global navigation satellite system (GNSS) buoy system for early tsunami warnings has been developed for more than 20 years. The first GNSS buoy system using a real-time kinematic algorithm (RTK) was implemented in the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) wave monitoring system in Japan in 2006. The records of NOWPHAS were used to update the tsunami alert by the Japan Meteorological Agency (JMA), owing to the tsunami generated by the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). However, considering that the distance limit is less than 20 km for the RTK algorithm, a new system was designed by introducing a new positioning algorithm and satellite data transmission to place the buoy much farther from the coast. A new technique for the continuous monitoring of ocean-bottom crustal movements was also implemented in the new system. The new buoy system can be used for weather forecasting and ionospheric monitoring as well.

Keywords: GNSS buoy, tsunami, tsunami early warning, GNSS-Acoustic measurements, geohazard monitoring

1. Introduction

The Japanese Islands have been attacked by frequent large earthquakes and resultant tsunamis. Along the northeastern Pacific coast, the 1896 Meiji Sanriku earthquake (Mw8.4), 1933 Showa Sanriku earthquake (Mw8.4), and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0) (hereinafter called the Tohoku-oki earthquake) are eminent examples. In southwestern Japan, numerous tsunamigenic earthquakes have occurred along the coast, including the 1946 Nankai earthquake (Mw8.4) as the recent case. These earthquakes occurred along the plate interface between the subducting oceanic plate and the overriding continental plate. There are less frequent but significant tsunamigenic earthquakes along the Japan Sea coasts as well. The 1983 Nihonkai-Chubu earthquake (Mw7.7) and the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake (Mw7.7) are recent examples.

Though there are few cases where volcanic eruptions or large landslides in the ocean cause tsunamis, most tsunamis are generated by crustal movements caused by large earthquakes at ocean floors. As water is incompressible, the sea water above the ocean-bottom crustal deformation is vertically displaced according to the crustal motion at the ocean floor, generating a tsunami. If the magnitude of the earthquake exceeds 8, the generated wave has meters in height amplitude and tens to hundreds of kilometers in wavelength. Moreover, the tsunami heights are amplified as they move toward the shallower coastal area, causing casualties and destroying properties. Mitigating such disasters is a crucial and socially important element in Japan and other threatened areas worldwide.

To reduce disasters due to tsunamis, various countermeasures against tsunamis should be developed. For example, a tsunami alert is issued as

[*1] Institute of Regional Development, Taisho University, Tokyo, Japan.
[*2] National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan.
[*3] Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan.
[*4] National Institute of Technology, Yuge College, Ehime, Japan.
[†] Correspondence should be addressed: T. Kato, Institute of Regional Development, Taisho University, 3-20-1 Nishi-Sugamo, Toshima-ku, Tokyo 170-8470, Japan (e-mail: t_kato@mail.tais.ac.jp).

doi: 10.2183/pjab.98.004
©2022 The Author(s). Published under the terms of the CC BY-NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

quickly as possible after the occurrence of a large earthquake at the ocean floor. In Japan, the Japan Meteorological Agency (JMA) is responsible for issuing early tsunami warnings for such large earthquakes, and the JMA issued the first tsunami alert in 1941.[1] Currently, they attempt to issue such alerts within a few minutes after the onset of an earthquake. The decision to issue alerts is made based on the earthquake source parameters, such as its location and magnitude. The JMA utilizes a database of possible tsunamis due to various earthquake mechanisms for the quick issuance of tsunami alerts. The JMA later revises the issuance process based on the observed tsunami at the coast and the offshore monitoring apparatus.[2]

Thus, techniques for monitoring tsunamis are very important. Installation of coastal tide gauges at ports is an authentic way of monitoring tsunamis. However, tide gauges cannot be used to monitor tsunamis before their arrival at the coast. Offshore tsunami monitoring is necessary to facilitate the evacuation of people near the coast.

Most offshore systems continue to use pressure sensors. The Pacific Marine Environmental Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the U.S.A. established and has been operating a global distribution of the Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis system that uses ocean-bottom pressure sensors and buoys to send data through satellites (for details, see https://nctr.pmel.noaa.gov/Durt/).[3] The stations are installed in the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans. In Japan, two pressure sensors were installed offshore of the Pacific coast of the Hokkaido (191–250 km from the coast) and Tohoku (45–75 km from the coast) regions using ocean-bottom cables; records as large as 1 cm or smaller were used for the investigation of tsunamis caused by nearby earthquakes.[4,5] A large tsunami of approximately 5 m height was detected at the ocean-bottom cables placed in the Tohoku region due to the 2011 Tohoku-oki earthquake.[6] After the 2011 Tohoku-oki earthquake, a large national ocean-bottom array of seismograms and pressure sensors were established along the Pacific coast of the Japanese Islands and was named S-net (Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench). The network uses ocean-bottom cables of 5,500 km and consists of 150 sites of seismometers and pressure sensors (the network was integrated to the nationwide seismic array called Monitoring of Waves on Land and Seafloor [MOWLAS]; for details, see https://www.bosai.go.jp/e/).

Additionally, ultrasonic sensors have been used to detect sea wave heights for the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) operated by the Port and Airport Research Institute of the National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology of Japan. The system monitors the wind wave height and can be used to monitor tsunamis. NOWPHAS sensors require that the distance from the coast be less than 10 km in shallow areas with depths of less than 50 m, considering maintenance (for details, see https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index_eng.html).

In contrast to these pressure sensors, a global navigation satellite system (GNSS) buoy would be one of such offshore sensors for detecting tsunamis before its arrival to the coast. The development of the GNSS buoy began in 1996.[7,8] In contrast to pressure sensors that measure sea level change indirectly and require a conversion coefficient, GNSS measures changes in sea level height directly, which is meritorious relative to pressure sensors as it does not require a calibration process. Pressure sensors typically have a small but significant drift, which does not affect instant displacements such as earthquakes or tsunamis, but long-term drift may cause false recognition of seafloor vertical displacement. Moreover, for the detection of tsunamis, GNSS buoys can instantly detect sea surface changes if they are placed within a tsunami source region, while pressure sensors cannot detect changes in sea surface height as the water column height above these sensors placed at the sea bottom does not change its length because the water is incompressible. However, a pressure sensor has a much higher sensitivity at the millimeter-level scale for detecting a change in height compared with a GNSS, which is less sensitive and has a scale of a few centimeters or worse for detecting a change in height. These two types of sensors have complementary characteristics for detecting changes in sea-surface height.

This article briefly reviews the history of the development of the GNSS buoy system and its use in detecting tsunamis. GPS buoys have been used in different applications. A GPS buoy was once used to calibrate the TOPography EXperiment (TOPEX)/Poseidon satellite radar altimeter.[9] The GNSS buoy system for monitoring tsunamis was also introduced in Indonesia.[10] However, these buoys were lost after a few years because of some unknown reasons. To the best of our knowledge, the development of a

GNSS buoy for tsunami monitoring introduced in this article is a unique project.

Finally, we will discuss how GNSS data obtained from the buoy can be utilized for other applications such as atmospheric and ionospheric research. Land-based GNSS observations have already been applied to these types of studies. For example, the Japanese GNSS nationwide continuous observation network, also called the GNSS Earth Observation Network System (GEONET), which is operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI), consists of approximately 1,300 sites that have been extensively used for atmospheric and ionospheric research. However, if the present GNSS buoy project goes forward, the GNSS data obtained from the buoy can also be utilized for atmospheric and ionospheric research along with the data collected on land. As the GNSS continuous observation network over the globe has been mostly limited to land thus far, the establishment of a GNSS buoy array in the open ocean will fill the wide gap of continuous GNSS networks over the Earth's surface. This will be discussed in Section 10. In addition, a new attempt to apply a GNSS buoy for the crustal deformation occurring at the ocean floor has been done in our recent experiment, and it will be discussed in Sections 7 and 9.

2. Early developments of the GNSS buoy system

A GNSS buoy was called a GPS buoy in its early stage of development. Figure 1 shows the system: the GPS signal transmitted from the GPS satellite is received at the GPS receiver placed on the board of the buoy. The dual signals (L1 and L2 phases) of GPS are then transmitted to the land base. Another GPS receiver placed at the land base station receives the same GPS signals simultaneously, and the signals on land are compared with those sent from the buoy. As the phase differences between the two signals at the land base and the buoy are a function of the relative position between the two, the position of the buoy can be estimated relative to the position of the land base station. This technique is called the real-time kinematic (RTK) algorithm, which can monitor the position of the buoy relative to the position of the ground base station in real time.

One limitation of this technique is that the maximum distance between the buoy and the base station along the coast for assuring a few centimeters of accuracy would be less than 20 km. Although the noise contamination along the signal path from the satellite to the ground station can be canceled by considering the signal differences, the noise cannot be canceled as the distance between the two antennas increases. Consequently, the estimation error of the relative position between the buoy and the land base increases as the distance of the buoy is farther from the base station.

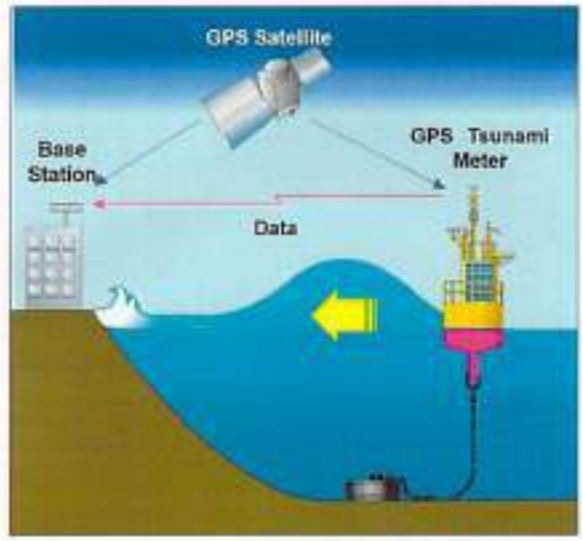


Fig. 1. (Color online) Principle of GNSS buoy for measuring tsunami.[11]

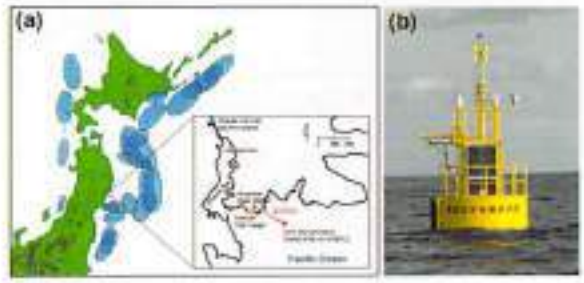


Fig. 2. (Color online) (a) Location of GNSS buoy experiment off Ofunato City, Northeast Japan. The map with hypocentral regions of large earthquakes (shown in blue) is taken from The Headquarter of Earthquake Research Promotion (1999).[12] (b) Picture of the GNSS buoy off Ofunato City, Northeast Japan.[13]

After a few preliminary short-period experiments[7,8] the first long-term experiment was conducted off Ofunato City, along the Sanriku Coast, northeastern Japan (Fig. 2). The buoy was placed approximately 2.3 km from the land base station, and the experiment was conducted from January 2001 to January 2004.

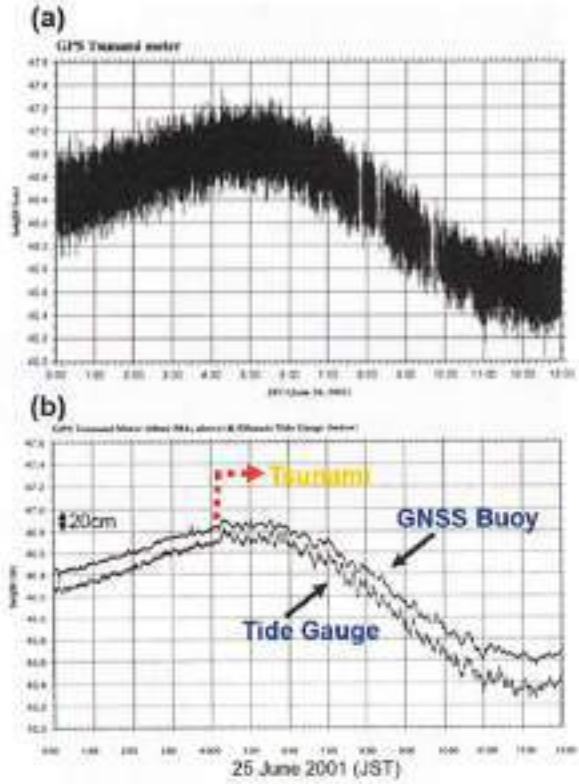


Fig. 3. (Color online) (a) Data obtained on June 25, 2001, that include tsunami caused by the South Peru earthquake. (b) Filtered GNSS record from Fig. 3a (above) and the tide gauge record at Ofunato (below).[13),14)]

Figure 3 presents the first tsunami data obtained during the experiment. The data were collected approximately 1 day after the 2001 southern Peru earthquake (Mw8.4).[14)] Figure 3a shows a plot of the vertical position of the GNSS receiver equipped on the buoy. The figure shows 13 h of data with 1-s sampling interval. The original record includes high-frequency vertical motion of the buoy due to the wind waves, which often have an amplitude larger than that of the tsunami. However, as the tsunami has a longer period of longer than 10 min or even longer than 1 h, the effects of high-frequency wind waves can be easily filtered out by applying a high-cut filter. We used a moving average method with 60 s of data length on the original record of position. Figure 3b shows that the high-frequency components were filtered out. The figure also includes the record of a nearby tide gauge at Ofunato, located approximately 2 km from the buoy, and shows that the record clearly shows the effect of the tsunami at and after approximately 04:00 JST. Although the

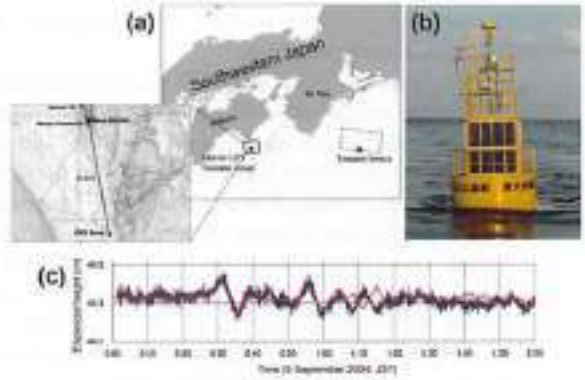


Fig. 4. (a) Location of the experiment off Cape Muroto and the source region of the 2004 Kii Hanto-oki earthquake. (b) picture of the buoy, and (c) low-pass-filtered record of the GNSS buoy on September 6, 2004 (blue), and the simulated record (red).[11)]

height of the tsunami was only 10 cm above the regular sea-surface height, the tsunami waveform could be easily recognized. This suggests that the precision of the vertical coordinates of the buoy is estimated to be several centimeters. The Ofunato buoy was also able to detect a tsunami with an amplitude of approximately 10 cm caused by the 2003 Tokachi Oki earthquake (Mw7.9).

After this successful experiment, another buoy was placed offshore Cape Muroto, southwestern Japan, for the period of 2004–2006. In this experiment, the buoy was set approximately 13 km south of the tip of the peninsula (Fig. 4a), and another tsunami caused by the 2004 Kii-Hanto Oki earthquake (Mw7.3) was observed.[11)] The experiment aimed to disseminate observed data to the public through the Internet. The obtained data were separated into two terms: long- and short-wavelength data that might include tsunamis and wind waves, respectively. The latter is important not for tsunamis but rather for daily monitoring of offshore wave heights. This is especially useful for daily life activities, such as those of fishery people, to monitor wave heights offshore. As tsunamis are highly rare, wave monitoring tools are especially welcomed by coastal residents and fishermen.

Another examination was conducted to determine how the obtained record matches the simulated record. Figure 4c shows that both records are consistent, suggesting that the observed tsunami record can be used to estimate the characteristics of the tsunami source. Conversely, it was found that the tsunami generated by the 2010 Chile earthquake (Mw8.8) occurred 26 min after the simulated tsuna-

mi.[15] The difference in the arrival time for the distant tsunami was investigated, and it was suggested that the effects of compression and dilatation of seawater, elastic tsunami loadings on the solid Earth, and the geopotential variations associated with the motion of mass during tsunami propagation were responsible for the travel time delays.[16]

After these successful experiments, the GNSS buoy was adopted as part of the NOWPHAS. The NOWPHAS is aimed at monitoring offshore wind waves for fisheries and other coastal industries, and the buoy is called "GPS wave meter", though it is also used for monitoring tsunami. The first operational buoys in NOWPHAS were installed offshore in southern Iwate Prefecture and central Miyagi Prefecture.[17] These regions are along the Sanriku Coast of Japan, where the tsunami risk is high.

Because of the technical limitations of the RTK method described above, the GNSS buoys for NOWPHAS have been deployed within 20 km from the coast. This distance from the coast maintains a lead time of approximately 10 min for tsunami arrival at the nearest coast. From the disaster mitigation perspective, determining how quickly the alert can be issued after the detection of tsunami arrival at the buoy is important.

The data of NOWPHAS are disseminated through webpages in real time. In 2008, the JMA decided to monitor the NOWPHAS buoy data and since then have used these data to provide people with tsunami information in their tsunami alert.

3. The 2011 Tohoku-oki earthquake

The Port and Airport Research Institute deployed 15 GNSS buoys around the Japanese Islands for NOWPHAS before the 2011 Tohoku-oki earthquake (Fig. 5). Seven sites were located offshore of the Sanriku coast, considering that the area has historically been a risky area for tsunami disasters.

A few minutes after the mainshock of the Tohoku-oki earthquake occurred at 14:46 JST of March 11, 2011, the JMA issued the first tsunami alert using their predetermined procedure.[2] However, the issued alert indicated that the tsunami heights would be 6 m along the Miyagi Prefecture coast and 3 m along Iwate Prefecture. These were significantly smaller than the resultant tsunami, which was higher than 10 m, along these coasts. The estimation was small because of the underestimated magnitude of the earthquake. This occurred because many seismograms for earthquake early warning alerts were clipped instrumentally, as the ground shaking intensity was much larger than the instrumental limit.[2]

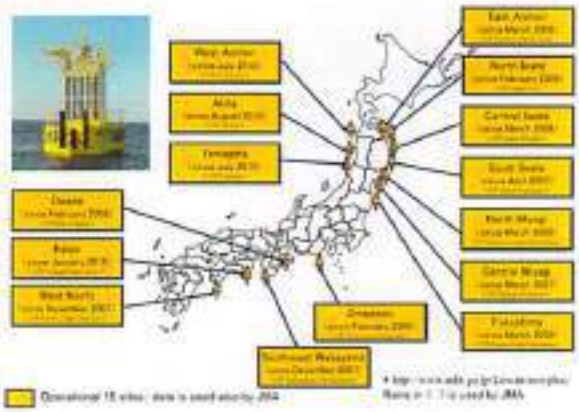


Fig. 5. (Color online) GNSS buoy established before the 2011 Tohoku-oki earthquake by NOWPHAS. Modified from Terada *et al.* (2011).[10]

A JMA staff who was monitoring the NOWPHAS records recognized that a GNSS buoy showed an acute sea-level rise of more than a few meters and judged that the tsunami would be much larger than the height of the first tsunami alert, knowing that the tsunami at a far offshore magnifies toward the shallower part of the coast and thus would be several times larger than that at the far offshore. The JMA revised the height in the tsunami alert along the Sanriku coast from 6 m to more than 10 m in Miyagi at 15:14 JST.[2] Just after its revision, the first tsunami arrived at the Sanriku coast. However, the alert was received too late, and the tsunami claimed more than 18,000 lives.

Figure 6 shows the records of tsunamis taken at three NOWPHAS sites along the Sanriku coast.[12),18] The sites near the epicentral area stopped sending the data to the server immediately after the maximum height of the tsunami was recorded at the buoy. This occurred because of malfunction of the data communication link or because of either the unavailability of the Internet or the loss of power after the earthquake. However, the recording was continued at the site with the use of a backup battery, and the obtained coordinates were stored in the storage at the sites even after the failure, so that the record could be recovered afterwards, as shown in Fig. 6.

4. Lessons from the Tohoku-oki earthquake

The lead time of approximately 10 min from the

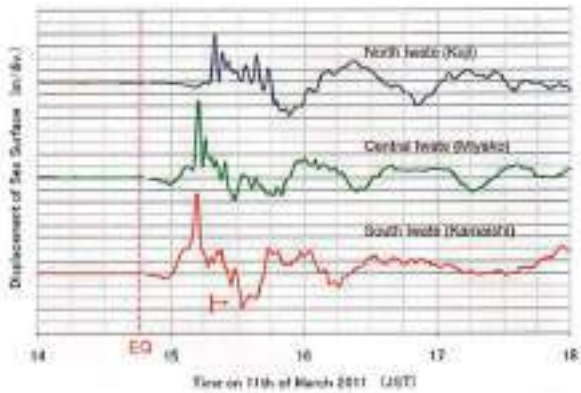


Fig. 6. Recovered records of tsunami data from the 2011 Tohoku-oki earthquake. EQ is the time of the earthquake. The red arrow roughly shows the timing of the tsunami arrival.[17]

detection of the tsunami at the buoy to the arrival of the tsunami to the coast was too short to facilitate evacuation. Extending the lead time requires buoy deployments much farther from the coast. Although there is no linear relationship between the distance to the coast and the lead time, farther deployments of buoy to, for example, 50 km or more than 100 km, will substantially improve the lead time.

The amplitude of the tsunami decreasing with the water depth is a disadvantage of placing a buoy far from the coast. Contrarily, the height of the tsunami far offshore would be amplified a few times as it approaches the coast. Although this may not be troublesome considering that a hazardous tsunami may be tens of centimeters in height even at a deep ocean, an accuracy of few centimeters would still be one of the requirements for measuring sea-level changes accurately.

5. New developments of the GNSS buoy after the Tohoku-oki earthquake

Considering the lessons from the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, we designed a new GNSS buoy to overcome the problems that the old system showed during the Tohoku-oki earthquake. The required specification of the buoy is to deploy it farther offshore from the coast. Because the new developments have already been documented in our previous paper,[19] we briefly review the new system and present our recent results from this new system.

5.1. Introduction of the PPP-AR algorithm. Considering that a distance limitation of less than 20 km is required when the RTK algorithm in our old system is used, we had to introduce a better algorithm for positioning the buoy far offshore. For this purpose, we employed a new algorithm called precise point positioning with ambiguity resolution (PPP-AR) or PPP-RTK.[20],[21] As PPP-AR uses a single point positioning algorithm, it does not require the base station on land to make a baseline. The precise point positioning (PPP) approach has been widely used for crustal deformation research since around 2000.[22] Although it is a convenient positioning method, it is necessary to use precise orbits and satellite clock information, estimated from integrated analysis using global data, which can be available only a few weeks after the observation. Therefore, PPP was limited to offline analysis during its early stages of development. However, recent developments in rapid data analysis and communication technologies have allowed us to obtain precise orbits and clocks in real time. This allowed us to introduce the PPP algorithm for buoy positioning. There are two ways to use PPP, with or without fixing ambiguity, inherent in using the phase of the GNSS signal for positioning analysis. We used PPP-AR as it provides us with better resolution and accuracy.[21] We used commercial software called RT-Net, which was developed based on the PPP-AR algorithm.

As PPP-AR requires precise orbits and clocks in real time on the buoy for real-time monitoring, the information should be sent to the buoy in real time. For this purpose, we first obtained the necessary information through the Hitz Data Center operated by the Hitachi Zosen Corporation, where GEONET data are used to obtain precise orbits and clocks in real time.

Hitachi Zosen Co. examined the accuracy of PPP-AR using GEONET data. The coordinates of the Shimokawa GEONET site were estimated using the precise orbits and clocks generated by three regional networks of GEONET for distances of 150, 1,000 and 1,500 km. Figure 7 shows the results. The three coordinate components (N–S, E–W, and up) were estimated during 9 days of data acquisition, and short-term variability was obtained for each component. Although the vertical component, which is important for tsunami detection, is less precise than the horizontal components, the standard deviation (SD) for 1,500 km is still less than 30 mm. Therefore, PPP-AR may have a high enough precision to detect significant tsunamis greater than a few centimeters at locations far from the Japanese Islands.

5.2. Introduction of satellite telemetry. We employed a satellite data transmission system for data telemetry. Until the Tohoku-oki earthquake in 2011, a GNSS buoy system such as NOWPHAS, used

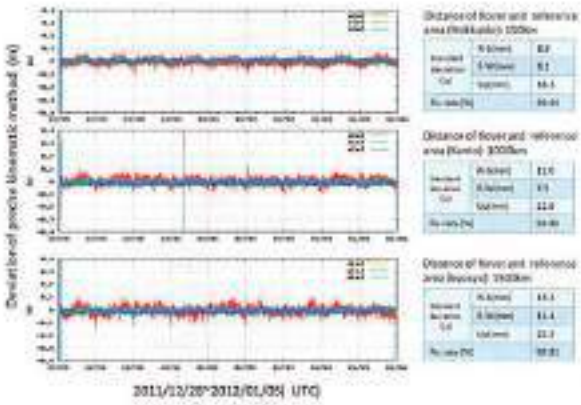


Fig. 7. (Color online) Results of PPP-AR at the Shimokawa GEONET site for different distances of reference networks that generate precise orbits and clocks: (top) 150 km, (middle) 1,000 km, and (bottom) 1,500 km. The observation period is from December 28, 2011, to January 5, 2012. Courtesy of Hitachi Zosen Co. 2012.

a marine radio system as the distance between land and the buoy was less than 20 km. As the distance exceeds 20 km, land-based radio systems get less reliable to use because the buoy cannot be seen from land owing to the Earth's sphericity. Therefore, using satellite telemetry is mandatory if the GNSS buoy is placed farther than 20 km.

If we apply the PPP-AR algorithm, the distance from land to the buoy can be 1,000 km or more from the Japanese coasts, if the precise orbits and clocks are obtained from the GEONET regional array. Thus, if precise orbits and clocks can be obtained through the satellite system, the position of the buoy can be anywhere in the ocean.

As a preliminary experiment for satellite telemetry systems, we first used the Japanese Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII) and the Quazi-Zenith Satellite System (QZSS, also known as Michibiki), a Japanese GNSS satellite. The buoy used in our experiment was operated off from Muroto. The system is shown in Fig. 8. First, the precise orbits and clock parameters were generated by the Hitz Data Center utilizing real-time obtained GEONET 1 Hz data. These orbits and clocks were transmitted through the Michibiki satellite to the buoy. The GNSS phase data obtained on the board of the buoy were analyzed using telemetered precise orbits and clocks. The resultant position of the buoy was then sent back to the land base using ETS-VIII, and the data were visualized on the web and disseminated to users.

6. Field test experiments for the new system (2013–2016)

To test the new PPP-AR algorithm and satellite telemetry in the ocean, we conducted a series of field experiments from December 16, 2013, to January 5, 2014, and from June 1, 2014, to June 21, 2014. We borrowed one of the fishery buoys operated by Kochi Prefecture, Japan. Kochi Prefecture operates a number of fishery buoys, including Kuroshio Bokujyo (Kuroshio Ranch, or Kuroboku for short), offshore of Kochi Prefecture, as some species of migratory fish tend to come around floating materials such as buoys, which help fishermen to catch these fishes easily. We borrowed the Kuroboku No. 16 buoy. The buoy is located approximately 35 km south of Cape Muroto, Kochi (Figs. 9a and 9b). The GNSS antenna was set at the top of the pillar at the center of the buoy. A simple flat omnidirectional plane antenna was used for satellite data transmission, considering the buoy rotation and tilt. Other ancillary pieces of equipment were placed on the buoy deck. Solar panels and batteries were used as the power supplies. The GNSS receiver was sampled every second. The precise orbits and clocks necessary for data analysis on the buoy were provided through the LEX signal of the Michibiki satellite. The coordinates obtained every second were transmitted to land through the ETS-VIII satellite. The coordinates were forwarded to the web server placed at Kochi National College for dissemination.

Figure 9c shows the 2 days of data obtained from the experiment. Data of 1 Hz for 33 h from June 18, 2014, to June 19, 2014, are shown. Figure 9c (top) shows high-pass-filtered data together with tidal component data, and Fig. 9c (bottom) shows low-pass filtered data. If a tsunami is recorded, it will appear in Fig. 9c (bottom). It should be noted that occasional data gaps are minor problems in the time series, where data transmission is interrupted. The unstable communication link between the buoy and the satellite due to the tilting of the buoy could be a potential reason. Figure 10 shows a comparison between the transmission rates and the significant wave height. The upper plot shows the transmission rates for which the scale is shown on the left, and the lower plot is the significant wave height for which the scale is shown on the right. The transmission rates decrease as the significant wave heights increase. This suggests that the tilt of the buoy due to high waves reduces the gain in the satellite direction of the

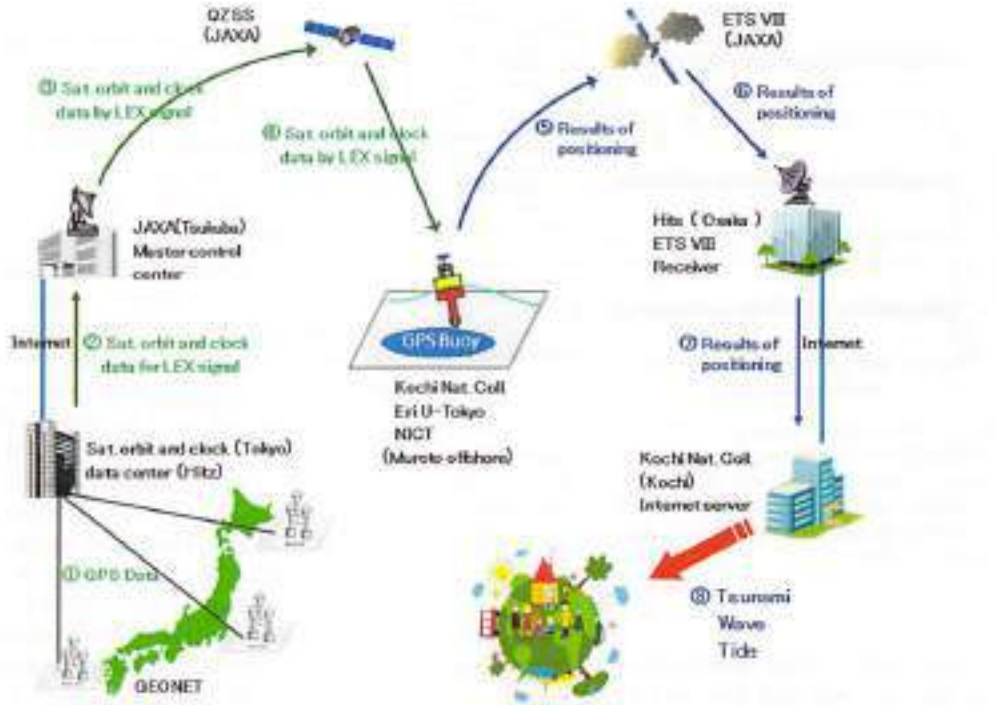


Fig. 8. (Color online) System design for the data acquisition, analysis, and dissemination using two satellites: ETS-VIII and QZSS.[21]

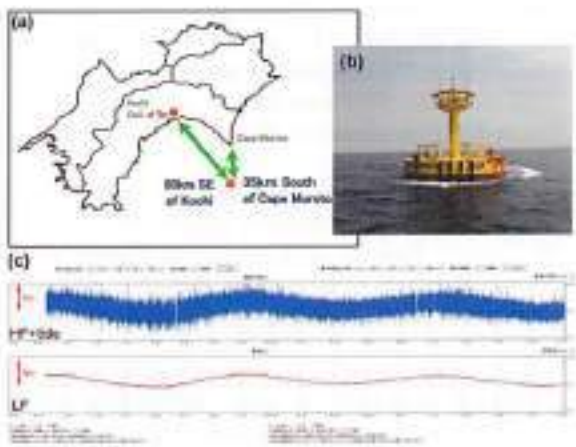


Fig. 9. (Color online) (a) Location of the buoy and Kochi National College, where a data server is placed, (b) Kuroshio No. 16 buoy used for the experiment, and (c) a part of the obtained data.[21]

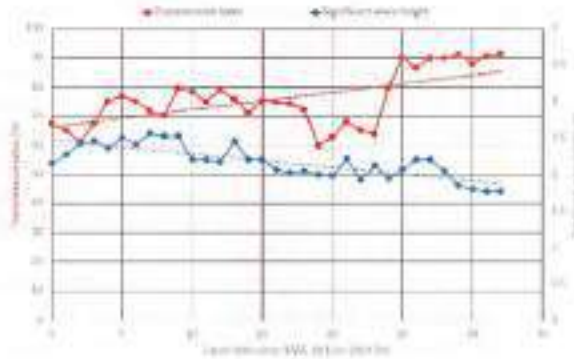


Fig. 10. (Color online) Comparison of data transmission rates and significant wave height.[21]

antenna for satellite communication mounted on the buoy.[21]

Considering that some data were missing, we conducted another experiment on December 8–10, 2015. As the antenna tilt is suspected to be the cause of data failure, we employed a gimbal mechanism that stabilizes the tilting of the antenna on the board of the buoy. A simple gimbal apparatus carrying the plane antenna was devised (Fig. 11). Two antennas were placed on the same vessel for comparison: one was placed on the gimbal apparatus, and the other was fixed to the deck. Two vessels, Yuge-maru, the school ship of Yuge College of 240 tons, and Hamakaze, another small school boat (see Fig. 12), were used to compare the data.

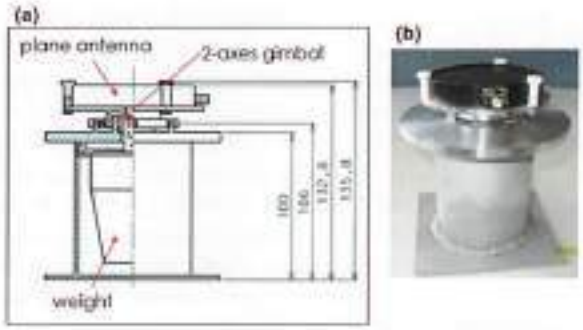


Fig. 11. (Color online) (a) Design of the gimbal for supporting a plane antenna. Unit: mm. (b) Picture of the gimbal and the plane antenna.[24]

Fig. 12. (Color online) (top) Yuge-maru and (bottom) Hamakaze, both operated by Yuge College.[24]

Figure 13 shows a part of the results comparing the signal power received from the satellite.[24),26)] Figure 13a is for the Yuge-maru, and Fig. 13b is for Hamakaze, the red line shows the case with the gimbal apparatus, the blue line shows the case without it, and the antenna was fixed to the deck of the ship. The case with the gimbal apparatus in Fig. 13a, the case for Yuge-maru, shows a significant reduction in fluctuation owing to the usage of the

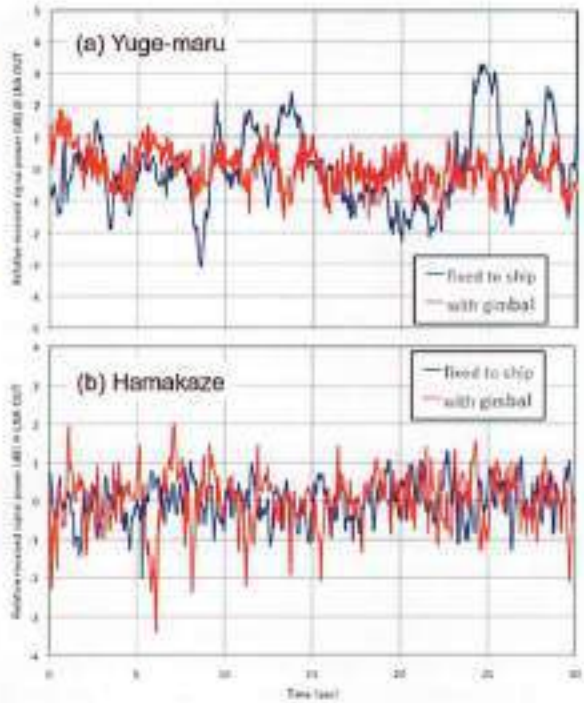


Fig. 13. (Color online) Comparison of received signal power with a gimbal apparatus (red) and without it (blue), for the case of (a) Yuge-maru and (b) Hamakaze.[24]

gimbal apparatus. However, Fig. 13b, which used Hamakaze, does not show any significant reduction in the fluctuation of the received signal power. Because the sizes of the two ships were different, the different results might be due to the different characteristics of the ship sway period.

In the ocean, tilting oscillation of the buoy at the sea surface changes the antenna gain. Therefore, knowledge of the radio propagation characteristics due to the tilting oscillation for the satellite communication link is very important for the future development of the system. Hence, developing a radio propagation model for signal transmission between the sea surface and the satellite based on the data obtained from the ocean is necessary. We conducted another experiment on August 25–26, 2016, in Hiuchi-Nada of the Seto Inland Sea, Southwest Japan. In the experiment, Yuge-maru was used as the floating body in the ocean, and two plane antennas, one fixed to the ship and the other placed on the gimbal, were used again, together with a gimbal. A tilt meter and GNSS were also used to measure tilt oscillation and ship position. The results from the obtained data suggest that the change in

the strength of the signal can be expressed as the summation of the deterministic and stochastic parts, for which the former part is due to the change in antenna gain owing to the tilting of the antenna and the latter part can be shown as a log-normal distribution.[27] These results will be considered to design a new buoy system in the future.

7. A new challenge for the ocean floor crustal deformation measurement

Monitoring of ocean floor crustal deformation based on the combined use of acoustic ranging and GNSS positioning has been a recent challenge in earthquake observation. This idea was first published by a U.S. researcher in 1985,[28] but later the technology was developed mainly by Japanese researchers.[29)–32] The technique, called the GNSS-Acoustic (or simply GNSS-A) system, for ocean floor positioning is such that the acoustic ranging from the transducer, attached to the vessel, to the ocean floor transponders is used for estimating the position of the centroid of the geometry of the array of transponders and the position of the vessel is estimated by GNSS (Fig. 14). The position of the centroid of the array geometry at the ocean floor can be estimated with an accuracy of a few centimeters. Repeated measurements of the position of the centroid of the geometry can provide information on the crustal movement of the ocean floor.

This method has led to a new understanding of crustal movements at the ocean floor, for example, the motions of plates or blocks,[33)–36] plate convergence and interplate coupling,[37)–48] co-seismic displacements,[49)–51] and post-seismic deformations.[52)–56] Its unprecedented magnificent result was shown during the 2011 Tohoku-oki earthquake,[57] in that displacements larger than 30 m were observed at the ocean floor near the epicenter, and the results were used for precise estimation of earthquake slip distribution.[58] Thus, the GNSS-Acoustic technique has become one of the most important tools for monitoring ocean floor displacements and even for providing unprecedented important information on understanding the coupling mechanism of subducting oceanic plates against the overriding plate and the mechanisms of interplate earthquakes that occur along their boundaries.

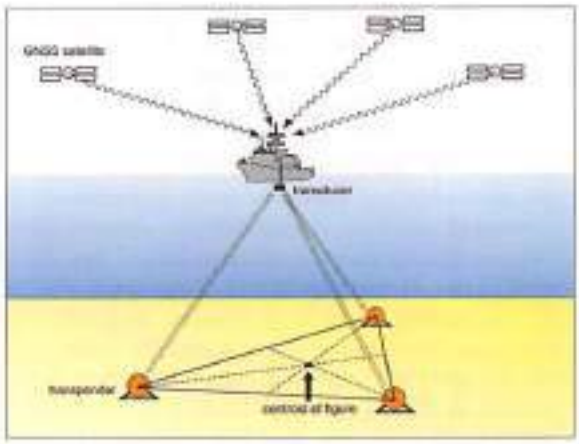


Fig. 14. (Color online) Concept of the GNSS-Acoustic system.

One problem with the current GNSS-Acoustic system is that the system uses a vessel for GNSS positioning, so that the measurements are not continuous but are in limited numbers annually. The Japan Coast Guard largely oversees observation, using a survey vessel for GNSS-Acoustic observation. This method limits the observation frequency to several times annually at a site. Although the frequency is enough to delineate steady plate motion, it may not be enough for finding important short-term events such as slow slip events for a few weeks or shorter. In order to establish frequent observations, one possibility would be to use our GNSS buoy instead of a vessel for the GNSS-Acoustic system.

In addition to using PPP-AR and satellite data transmission for the GNSS buoy in our new experiment, we incorporated the challenge of observing the ocean-bottom crustal movement in our next experiment on the GNSS buoy. A similar buoy system for GNSS-A was developed by another research group, who used a loosely moored buoy.[59)–61] Other researchers have evaluated the use of the Wave Glider (Liquid Robotics, Inc., Sunnyvale, CA 94089, U.S.A.) as a novel platform for GNSS and acoustic measurements.[62)–65]

Although the principle is similar, continuous measurements using a buoy instead of a vessel require some technical developments. First, the signals sent and received at the transponder attached to the buoy should be picked automatically and precisely. Sometimes, the received signal is contaminated by various noises, especially by the reflected waves from the buoy itself and/or the sea surface. We developed an algorithm to select the correct arrival time of the direct signal. Test experiments of the algorithm, conducted in the buoy experiments in June and September 2017, showed that the automatic algorithm judged with 99.5% success for the correct signal and rejected 90.9% success for the incorrect signal, considering the visual decision is true.[66] Second, to estimate the travel time of the acoustic

signal between the transponder and the transducer precisely, the distribution of acoustic velocity along the travel path should be precisely known. Although a simple model based on the vertical profile of conductivity and temperature could be used, it was asserted that the introduction of the horizontal gradient estimation of the acoustic velocity is necessary to improve the precision of position estimation of the ocean floor.[57] As it is difficult to make conductivity, temperature, and depth (CTD) observations in each acoustic ranging, as can be performed for a vessel observation, we decided to estimate the horizontal gradient together with the position of the transponder array. The horizontal gradient is introduced as an unknown parameter because the horizontal gradient and the position of the array are in a trade-off relationship. The estimation of these parameters simultaneously requires that the buoy widely move around the array area. However, as we cannot control the position of the buoy, it is sometimes difficult to precisely estimate the horizontal gradient, which results in a large position error of the array.

We then decided to make the process slightly different. First, we precisely estimated the array configuration by using a vessel. Then, assuming that the configuration does not change from time to time, the position of the ocean floor is estimated by the summation of the predetermined array position and the time-variable displacement of the array.

To precisely estimate the array configuration, we used six acoustic and CTD observations between June 2017 and June 2019 using a vessel. From these observations, we estimated the array positions by the least square method so that the root-mean-square (RMS) between the observed travel times and theoretical travel times becomes minimum.[58] The results showed that the RMS of estimating the horizontal gradient of the sound speed was 0.04–0.06 among the six observations (Tables 1 and 2), suggesting that the array position is estimated with an accuracy of approximately 5 cm.

Finally, based on these results, we decided to use a grid search method to estimate the change in the position of the array from the travel time observations.

8. The new GNSS buoy system experiment (2016–2021)

Figure 15 shows the system design for the new experiment that started in November 2016. As neither the ETS-VIII nor Michibiki was available for the experiment, we employed a commercially available satellite called Thuraya for data transmission between the buoy and the ground base. We borrowed the Kurobuku No. 18 buoy from Kochi Prefecture. This buoy is located approximately 82 km south of the Cape Ashizuri (Fig. 16).

Table 1 Estimated position of the ocean bottom array

	Latitude	Longitude	Ellipsoidal height (m)
Unit 1	32.4652881317°N	133.1908794487°E	−756.814
Unit 2	32.4934099865°N	133.2118247531°E	−748.868
Unit 3	32.4811738867°N	133.2339979017°E	−762.696

Table 2 Estimated results of the horizontal gradient of sound speed

Date (yyyy-mm-dd)	ΔV (m/s/km)	ϕ (°)	RMS (ms)
2017-06-06	0.27	121	0.04
2017-09-09	0.21	136	0.05
2018-05-31	0.14	209	0.06
2018-08-01	0.11	184	0.05
2019-06-04	0.18	174	0.06
2019-08-05	0.16	164	0.05

We set the ground base station at Niyodogawa-cho in Kochi Prefecture, and a server to operate the system was set at this base (Fig. 16). The precise orbits and clocks for PPP-AR were generated at the Hitz Data Center and sent to the Niyodogawa base, and the data were transmitted from the base to the buoy through the Thuraya satellite.

The GNSS data obtained on the board of the buoy were analyzed using PPP-AR. We also used the point precise variance detection (PVD) positioning algorithm.[59] This method uses the received carrier phase signal of GNSS and estimates the change in antenna position using the phase change. As it does not estimate the absolute coordinates of the antenna position but only estimates the "change" of position occasionally, we do not require fixing integer ambiguity of the line-of-site length between the satellite and the antenna; the results are robustly obtained as long as the satellite signal is locked. However, unlike PPP-AR, PVD requires low-cut filtering of the data, which reduces the sensitivity to a long wavelength. Consequently, PVD is effectively used for monitoring wind waves but not long waves such as tsunamis. PVD is effectively used to monitor daily oceanic conditions for fisheries and other ocean

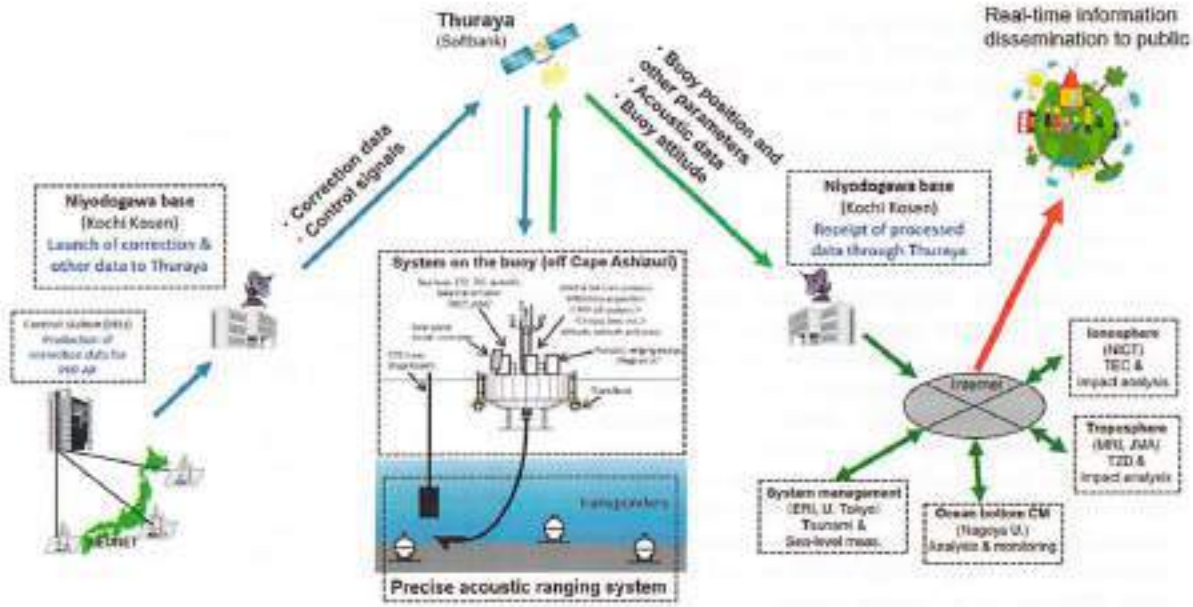


Fig. 15. System design for the recent experiment from 2016 to 2021.[19]

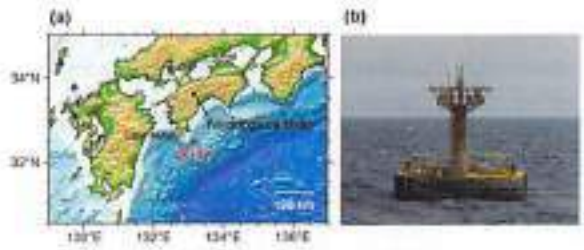


Fig. 16. (Color online) (a) Locations of (bottom) the buoy used for the experiment and (top) the ground base station in Niyodogawa-cho. Bathymetry data were taken from SRTM30_plus.[20] (b) Buoy No. 18 of the Kuroshio Bokujyo (Kuroboku).[19]

Fig. 17. (Color online) Sample data of (top) PVD and (bottom) PPP-AR.[19]

activities. Considering that we obtain two kinds of sea surface changes using two algorithms, PPP-AR for long wavelengths and PVD for short wavelengths, the obtained precise position of the buoy is sent back to the base through the same satellite.

The system was first established in November 2016, and the experiment continued until February 2021. Figure 17 shows the sample data of the estimated vertical displacements of the buoy. Figure 17 (top) shows the plot by the PVD method, and Fig. 17 (bottom) shows the plot by the PPP-AR method. For PPP-AR, the daily and sub-daily tidal components were removed. The PPP-AR and PVD records appear the same when the tsunami is excluded. Only when a tsunami is coming can PPP-AR draw the curve due to the tsunami. These results are expected to be obtained from our previous experiments.

We expected that the system would be continuously used if every part worked well. However, owing to various problems, continuous observations were suspended numerous times during the experiment. It is occasionally difficult to resolve the central cause of such suspension; disruption of power supply on the buoy, malfunction of the PC on the buoy, and suspension of the satellite communication link are all possible causes. For example, we designed a power system consisting of solar panels and batteries, so that sufficient power is generated even if several days of loss of sunshine occur. However, it seems that the generated power was insufficient, and as a result, the system stopped, especially during the winter season

when sunshine decreased. Power generation was estimated assuming that the solar panel was horizontal. However, tilting of the buoy may have decreased the efficiency of power generation. It was suggested that the center pillar at the buoy may create a shade on the panel and reduce the production of electricity.[71] To overcome this problem, we added solar panels in 2019–2020. The breakdown of machines is another major source of data loss. In harsh environments in the outer ocean, some delicate electric parts are always threatened with failure. Additionally, the loss of communication links was a problem. It was difficult to clarify whether the loss of data occurred from the failure of the communication link or malfunction of any part of the buoy. We had to check the data and hardware cautiously for this purpose and had to ask supporting companies to check and adjust the parameters of the system, which was cumbersome and time-consuming. Frequent maintenance trips are thus required to ensure the entire system on the buoy works well. However, the strong current of the Kuroshio and strong winds due to typhoons and low pressures often prevented us from reaching the buoy. These are some of the problems to be solved in future developments of the system.

Figure 18 shows the recorded period of the results for PVD and the daily fixed rates for PPP-AR on the buoy (Fig. 18a), and both records are stored at the Niyodogawa base (Fig. 18b). Although the experiment started in November 2016, it stopped for a short time period and was unable to resume rapidly. The system was restarted in February 2018 after it was redesigned. Figure 18 shows the records since then. As can be seen in the figure, there are periods in which both the buoy and the base have records, but there are also periods in which records either from the buoy or from the base, or both, are missing. In the case of a power failure on the buoy, none of the data can be stored on the buoy or at the base. On the buoy, PVD has recorded data over longer periods of time as it uses a simple algorithm that uses received phase data, whereas PPP-AR requires precise orbits and clocks separately sent from the satellite. Therefore, once the satellite communication link from the land to the buoy has been suspended, PPP-AR cannot be performed on the buoy. Even if the data are stored on the buoy, the data cannot be sent to the land if the satellite communication link is lost, as there is no time of failure at the base station server. There were some cases where the data were stored on the server at

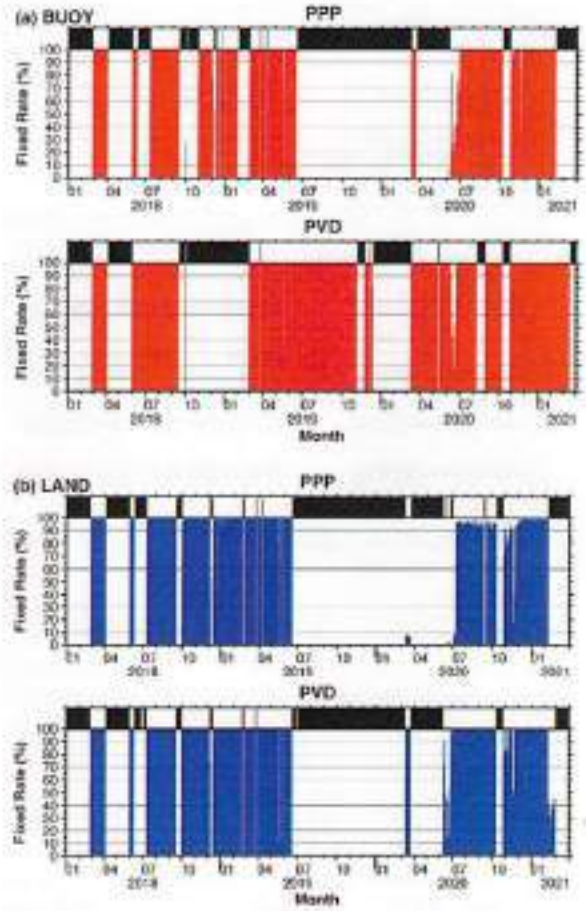


Fig. 18. (Color online) Periods of obtained record of (a) a fixed rate of PPP-AR and PVD record on the buoy and (b) both records that are stored at the Niyodogawa base.

Niyodogawa base, although the data on the buoy were missing, probably because the buoy data were lost from a locally recorded logger. Further examination of these periods of missing data is warranted in future studies.

9. Results of continuous observation of ocean floor crustal movements

Figure 19 shows the data obtained during the period from August 18, 2020, to January 15, 2021. The top three plots (Units 1–3) show the observed travel times from the transducer at the buoy to the three sea-bottom transponders estimated using the algorithm developed by the present project.[71]

The middle three plots represent the positions of the transducer at the buoy. The positions of the transducer until November 25, 2020, were obtained by offline analysis using the PPP algorithm with

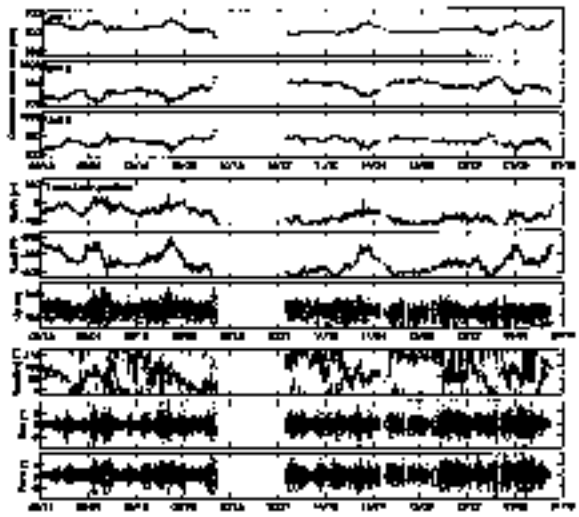


Fig. 19. GNSS-Acoustic observation data from August 18, 2020, to January 15, 2021. (top) Travel times between buoy and transponders (Units 1–3), (middle) Transponder position at the buoy (North, East and Up) and (bottom) direction and tilting angles of the transducer (Heading, Roll and Pitch). Position of the transducer is measured from the centroid of the transponder array geometry. Position was obtained by PPP before November 25, 2020, and PPP-AR after November 26, 2020.

precise orbits and clocks called as MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis), which was developed by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). The positions after November 26, 2020, were obtained using PPP-AR analyzed on the buoy and sent by the real-time satellite transmission. The position of the transducer was shown by placing the origin of the coordinates at the center of the triangle made by the three transponders at the ocean floor.

The bottom three plots are the heading, roll, and pitch of the buoy measured by a gyro installed on the buoy, assuming that the direction of the transducer attached to the buoy is the direction of the bow.

The height of the GNSS antenna and the tilting (pitch and roll) intermittently showed a large amplitude during the end of August to early October 2020. This is due to the passage of typhoons near the buoy. Because the typhoon passed around October 10, 2020, the GNSS observation stopped because of the GNSS antenna breaking. This was restored on October 28, 2020.

Figure 20 shows the results. The top two plots of the figure are the averaged central positions of the ocean-bottom transponder array. The bottom three plots are the estimated sound speed structure. V_0 is the average sound speed, and ΔV and φ are the horizontal gradients. The position of the center of the array was estimated using data collected over 28 days. The positions in Fig. 19 are plotted in the center of the 28-day time window. The averaged data provide a much smoother change in the position of the transponder array. However, it can be readily seen that there is an acute jump in position around December 14, 2020, which is due to a change in the positioning algorithm from PPP to PPP-AR on November 26. Note that the change in algorithm occurred in order to choose the best method at the time of positioning. The possible areas narrowed by the grid search are shown by vertical bars called the RMS. Figure 21 shows the horizontal plots of the estimated centroid positions of the array. The RMS error of the estimated centroid position of the array was 3.0 cm. This suggests that the position of the ocean floor based on our developed system can be estimated with an accuracy of a few centimeters. This may be the first system to record a continuous change in the position of the ocean floor with such unprecedented accuracy.

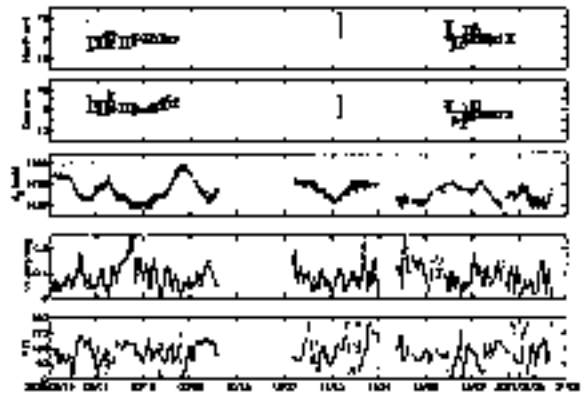


Fig. 20. (Color online) (top) Centroid of the ocean bottom transponder array (North and East) and (below) the analyzed results of the sound speed structure (V_0, ΔV, and ϕ).[20]

In principle, acoustic measurements can be collected and analyzed in a short duration (*i.e.*, less than 1 day). However, in the present experiment, the conditions in which acoustic measurements were obtained were not ideal: 1) the site is in an area where the Kuroshio Current is strong and the temporal change in the spatial gradient of the speed of sound was large, and 2) as the water depth was shallow (approximately 800 m), the temporal change in the speed of sound degrades the accuracy of estimating the position of the array. Therefore, we used a longer dataset consisting of 28 days to average

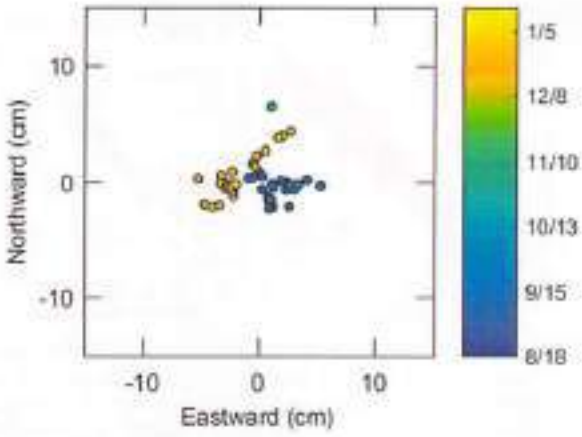


Fig. 21. Centroid of the geometry made by the three transponders at the ocean floor.

out a highly variable sound speed gradient and its temporal change to suppress the temporal variation of the estimated seafloor position. When the length of data was shorter, the variation in the estimated position was larger; for example, if the data length was 14 days, then the SD of the estimated centroid position of the array was larger than 10 cm. If we use the recently proposed method for the estimation of sound speed structure,[73] a better estimation using a shorter data length could be attained, which is being attempted in further studies.

10. Discussion

In our series of GNSS buoy experiments for tsunami monitoring, we showed that it is worth pursuing their development for far offshore operations. However, some operational problems remain to be solved.

First, buoys may have to be operated autonomously. Although maintenance of the buoy is crucial for the long-term operation of the system, it is costly and workers sometimes find it difficult to reach and work on the buoy when the sea is rough. Therefore, some devices on board buoys, such as PCs, satellite communication systems, and power systems, should be maintained without manning. Dual or triple settings of devices or alternative ways of operation in case of failure of one system would be a solution. Such autonomous systems should be developed for actual operation of the GNSS buoy system.

Second, the mechanical strength and stability of the buoy body should be maintained for a long time (*e.g.*, 10 years or more). This problem was discussed based on the 3-years and 7-months experiment between 2013 and 2016 in Cape Muroto described in Section 6: for example, barnacles attached to the body of the buoy were examined to find out if they cause the changes in buoyancy or tilt. It was concluded, however, that there were no effects on the buoyancy or tilt of the buoy after the operation.[19] Additionally, in the above experiment, an examination was conducted to find out if ablation of the iron chain, which was used for mooring of the buoy to the anchor at the ocean floor, would lead to breakage out of friction caused by continuous swings of the chain because of the sea waves. However, the experiment showed that cautious design of the chain would prevent the chain from breaking even if the operation will be for 10 years or beyond. Lastly, an experiment was performed to find out if salty wind and water would cause earlier breakage of metallic material, but such problems may have to be solved using ocean civil engineering technologies. Considering these problems, it was concluded that it is possible to design a buoy sustainable over the long term even at the deep outer ocean at a depth of thousands of meters.[19]

Some care may have to be taken for loss of the buoy by, for example, crash with a vessel or vandalism. If the buoy drifts away from the original position, tracking the position of the buoy as it carries the GNSS is possible and can send messages of its coordinates.

A sufficient and stable power supply is a problem for the reliable long-term operation of the system. We designed the power system cautiously so that the system would work without sunshine for several days. However, the system stopped soon after our first deployment in November 2016. As discussed in Section 8, it was suspected that the shadow of the center pillar on the buoy, which is used for setting antennas of GNSS and satellite communication, would reduce the efficiency of electricity production of solar panels.[71] Tilting of the buoy due to waves might also reduce the efficiency of power generation. Careful design of the electric power supply with sufficient allowance is indispensable for long-term power supply on the buoy.

Another important factor for the reliable operation of GNSS buoys is the satellite communication link. In our previous experiments using Japanese Engineering Test Satellites (ETS-VIII), no serious problems were encountered, but the record indicated a correlation of frame-rate error, which means data loss, and wave height. This suggested that changes in the elevation angle between the antenna and the

satellite might affect the reliability of the data communication link. Careful examination of the cause of failure of the communication link is needed, as there are many causes for fading owing to the moving platform of the satellite antenna, as described in Section 6.[27]

When GNSS was developed for positioning in the 1970s, the required accuracy was at the level of meters by using the code of the GNSS signal. As a result of technical developments later, using the GNSS signal phase allowed positioning accuracy to be a few centimeters, and they can now be available in real time. Considering these new developments of GNSS technology together with satellite communication technology, we would be able to deploy GNSS buoys in any area of the ocean. Considering that the ocean has been considered as an area where data are difficult to be recorded, our GNSS buoy could serve as a significant change in fulfilling the gap in data distribution over the Earth's surface. Although our primary aim was to apply the technique for early tsunami detection, the recent development of our experiments added the GNSS buoy technique for observing ocean floor crustal movements. In addition to these applications, buoys placed in the ocean can be used for more applications. For example, the GNSS data can estimate precipitable water vapor (PWV) and total electron content (TEC) in the atmosphere and ionosphere, respectively, which are both important geophysical parameters.[19]

The PWV in the oceanic area is crucial for numerical weather forecasting through a four-dimensional data assimilation approach. Most of the data for the simulation have been taken on land. Considering that 70% of the Earth's surface is covered by the ocean, it is very important to include atmospheric parameters in the ocean area for data assimilation toward better weather forecasts. In Japan, PWV derived from GEONET of the GSI has already been used in numerical weather simulations. Inclusion of data from the surrounding oceanic region may improve the weather prediction by the simulation. GNSS PWV can be used with sufficient accuracy by placing GNSS on the ship. GNSS buoy could possess some merits compared with a ship as the buoy provides a fixed-point continuous data, relative to a moving irregularly observed shipborne data.[74),75]

GNSS data recorded at a previous GNSS buoy station from Cape Muroto, southwest Japan, were used to show the tropospheric zenith delay; this was used to derive PWV, which can be used in atmospheric studies.[76] Shoji *et al.* (2018, unpublished data) examined how buoy-derived PWV is compatible with otherwise obtained PWV, using the data obtained between June 4 and September 15, 2018, in the present experiment. Figure 22 shows the comparison between the buoy PWV and (a) JMA's operational objective analyses (mesoscale analysis (MA) and local analysis) and (b) Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) on board the Global Change Observation Mission 1st Water (GCOM-W1) satellite data. These comparisons, in terms of their SDs showed that the differences between the buoy PWV and MA, LA, and GCOM-W1 were 2.96, 3.03, and 2.60 mm, respectively. The differences between the different methods were approximately 3 mm, suggesting that the inclusion of GNSS buoy data for data assimilation in weather forecasting could improve early warning systems of heavy rain such as linear rain bands and the prediction of typhoon paths.

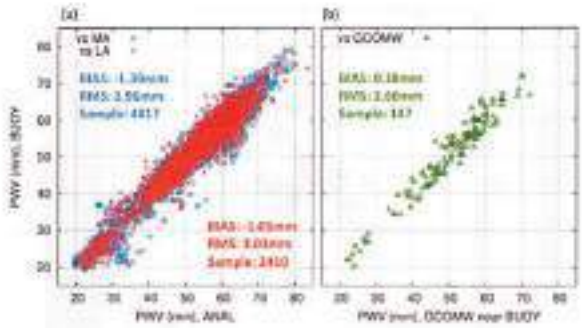


Fig. 22. (Color online) Precipitable water vapor (PWV) estimated at the buoy compared with (a) JMA objective analyses (MA: mesoscale analysis, LA: local analysis) and (b) Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) on board the Global Change Observation Mission 1st Water (GCOM-W1) (Shoji *et al.*, 2018, unpublished data).

The application of GNSS buoy data can also contribute to ionospheric research. For example, the National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT) is conducting the Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS-TEC observation (DRAWING-TEC) project to develop high-resolution ionospheric TEC observations by collecting TEC data from dense GNSS array data.[77] They showed that such dense GNSS array data make it possible for ionospheric researchers to study medium-scale (100–1,000 km) ionospheric disturbances such as traveling ionospheric disturbances and equatorial plasma bubbles that are frequently observed in the mid- and low-latitude ionosphere. Moreover, high-resolution TEC maps

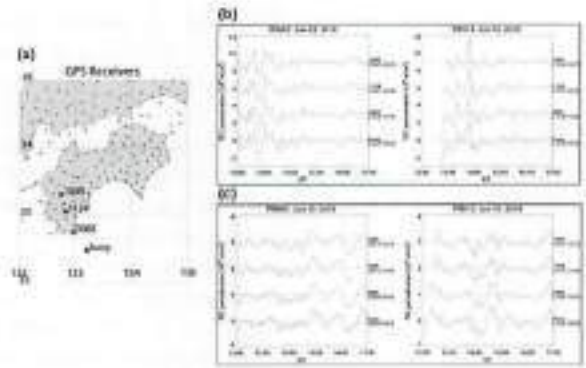


Fig. 23. Comparison of TEC variation. (a) Used sites of GEONET (1049, 1124, 0085) and GNSS buoy (buoy), estimated TEC variation for (b) PRN05 and PRN13 at UTC12-17 of June 2, 2018, and (c) PRN05 and PRN13 at UTC12-17 of June 10, 2018. Cases for (b) calm weather and (c) harsh weather (Tsugawa *et al.*, 2018; unpublished data).

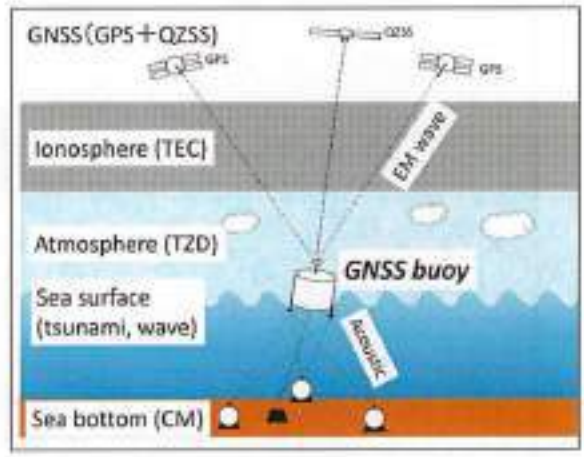


Fig. 24. (Color online) Multipurpose GNSS buoy for synthetic geohazard monitoring, from ionosphere to ocean floor.[19]

can reveal ionospheric variations due to large earthquakes such as the 2011 Tohoku-oki earthquake.[78] Conversely, the ionospheric disturbances shown above may decrease position and navigation accuracy and hence lead to problems in land and air traffic. Thus, monitoring these ionospheric disturbances, known as a space weather phenomenon, is crucial for the integrity of GNSS system operation. GEONET is used to monitor ionospheric conditions in Japan during the operation of space weather forecasting services. However, the dense GNSS networks worldwide, which are used in their DRAWING-TEC project, are restricted to land, and more GNSS stations are needed in sparse areas, especially in the oceanic region.[77] Our efforts to develop GNSS buoys would help ionospheric research and space weather monitoring. Tsugawa *et al.* (2018, unpublished data) used a part of the data obtained in our buoy experiment in 2018 to derive ionospheric TEC values and showed that the ionospheric TEC variations have almost the same accuracy as that obtained by nearby GEONET sites (Fig. 23).

In studies on GNSS-TEC, both absolute and relative TEC values are used. The absolute TEC for the integrated electron density along the entire line of site (LOS) between the receiver and satellite was obtained using both the carrier phase and the GNSS code with corrections of satellite and receiver biases. The accuracy of the absolute TEC was expected to be several TECU (1 TECU = ~54 ns = 16.2 cm).[79,80] The relative TEC is the perturbation component of absolute TEC by detrending it with a 1-h running average for each LOS. The accuracy of the relative TEC ranged from 0.01 to 0.02 TECU, which corresponds to ~1% of the wavelength of GPS signals L1 (0.19 m) and L2 (0.24 m).[81,82] Hence, relative TEC is widely used for monitoring ionospheric disturbances. Monitoring ionospheric disturbances for societal impact requires an accuracy of approximately 0.1 TECU (Tsugawa, 2021, personal communication). As shown in Fig. 23, the TEC perturbation of the buoy data clearly satisfies this requirement.

Summing up the possible applications of the GNSS buoy, a single buoy has a large potential for observing wide areas, covering from the ocean floor to the ionosphere. Geohazards related to space weather, atmospheric weather, sea surface waves, and crustal movements at the ocean floor can also be monitored using a single GNSS buoy. Thus, such a synthetic geohazard monitoring system using a GNSS buoy can be used as a monitoring tool (Fig. 24), and deployments of the array of GNSS buoys to a wide area in the northwestern Pacific area could serve as an important national infrastructure for geohazard monitoring systems and as a system of a new observation network for earth sciences (Fig. 25).[19] This hypothetical network is called as OCEAN GEONET, as compared with the GEONET, which has been widely used on land and has been operated by the GSI of Japan.[19]

If the construction of a GNSS buoy array in the ocean is adopted as a national project, many buoys should be placed around the Japanese coast, as shown in Fig. 24. The system may require a dedicated satellite that may have to be operated by

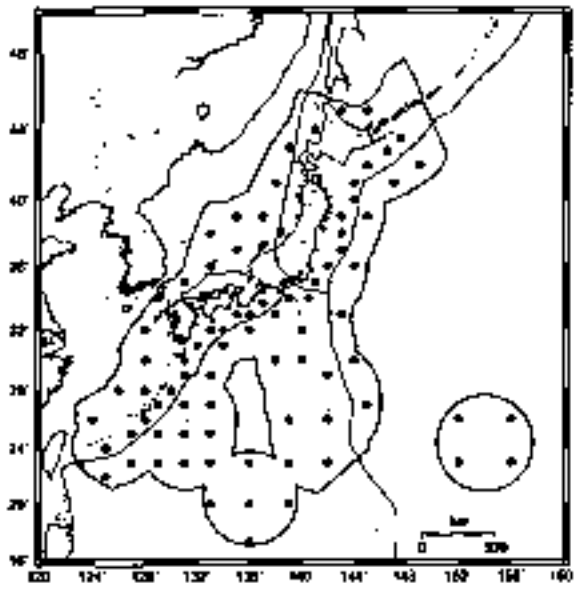


Fig. 25. [Color online] Future scope of GNSS buoy array in the northwestern Pacific. Small red dots are the currently operational GNSS buoy array for wave monitoring by NOWPHAS. Blue dots are arbitrarily plotted for a hypothetical GNSS buoy array. Solid lines indicate the Japanese Exclusive Economic Zone.[31]

the government, in which we might have to develop a new method for more effective satellite transmission technology. Recent technological development using the Internet of Things (IoT) Non-Terrestrial Network would be applicable for oceanic GNSS buoy arrays.[53]

Finally, we also discussed the cost of building and maintaining the entire system of the ocean array. The largest cost was attributed to the construction of the buoys. Constructing a buoy system will require several million U.S. dollars, although the price would be less if the number of orders are increased, for example, more than 80 buoys, as shown in Fig. 25. The cost of the satellite communication link is also a major component of the total cost. If a commercial satellite with 1 kbps is used, it may be possible to send buoy coordinates every second together with GNSS-A data for every 15 min, including other ancillary data such as temperature and gyro data. This may cost more than U.S.$ 100,000 per year for a buoy. Ideally, the Japanese government should design a dedicated satellite system for sending and receiving data between the ground base and the buoys. In our experiment, we used a bidirectional data communication link. However, the cost of satellite communication could be much reduced if the positioning satellite can send its precise orbit and clock. As the Japanese QZSS system is now in operational mode to send MADOCA, receiving and using MADOCA from QZSS on a buoy would significantly reduce the cost of data communication link. Operation of the ground station requires a high-performance computer and a large amount of storage with a backup system for sustainable operation. Therefore, given that 80 buoys will be constructed for OCEAN GEONET, construction of the total system would amount approximately to a few hundred million U.S. dollars for the buoys and an additional U.S.$ 8 million per year for the data communication links. Including other ancillary devices and maintenance fees, the total cost for 10 years of operation is approximately several hundred million U.S. dollars.

11. Concluding remarks

Although OCEAN GEONET is still in the early stages of development, we hope it will materialize in the future. Although the construction of a buoy array in the ocean requires hundreds of millions of U.S. dollars, we would like to emphasize that it can provide a wide variety of earth scientists with unprecedented data of the ionosphere, atmosphere, sea-surface changes including tsunamis, and ocean-floor crustal deformations. Therefore, a GNSS buoy system will offer a highly cost-effective approach compared with other single-purpose-oriented projects to obtain new innovative data globally, thus beginning a new scientific innovation in the fields of solid earth, ocean, atmospheric, and ionospheric science.

Acknowledgements

This research was supported by the MEXT Coordination Funds for Promoting AeroSpace Utilization (2013–2014), the discretionary budget of the Director of ERI in 2015 and JSPS KAKENHI Grant Number 16H06310 (2016–2021). The research project was coordinated by the following researchers, and the authors would like to express sincere gratitude to all of them (listed in an alphabetical order of family names in each research organization):

Dr. Natsuki Kinugasa, Mr. Haruno Koike, and Mr. Kenjiro Matsuhiro of Nagoya University,

Dr. Hiromu Seko and Dr. Yoshinori Shoji of the Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,

Dr. Mamoru Ishii, Dr. Michi Nishioka, and Dr. Takuya Tsugawa of Radio Research Institute, the National Institute of Information and Communications Technology (NICT),

Dr. Ken'ichi Takizawa, Dr. Morio Toyoshima, and Mr. Shin'ichi Yamamoto, of Network Research Institute, NICT,

Mr. Tadahiro Iwasaki and Mr. Naokiyo Koshikawa of JAXA

The authors are indebted to members of the Fisheries Promotion Department in Kochi Prefecture for their assistance in using the Kuroboku buoys and to the staff members of Yuge-maru and Hamakaze of the National Institute of Technology, Yuge College, for their assistance during ship operations. The authors thank the staff of Hitachi Zosen Corporation, Softbank Corporation, and Kaiyo Gijutsu Co. Ltd. for their assistance during the course of this research. The authors are indebted to two anonymous reviewers and a handling editor who provided valuable comments to significantly improve the manuscript.

References

1) Kusano, F. and Yokota, T. (2011) History of tsunami warning services in Japan. Quart. J. Seismol. 74, 35–91 (in Japanese).
2) Ozaki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) — Tsunami warnings/advisories and observations —. Earth Planets Space 63, 827–830.
3) Bernard, E.N., Gonzalez, F.I., Meinig, C. and Milburn, H.C. (2001) Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis. In Proceedings of the International Tsunami Symposium 2001 (ITS 2001) (on CD-ROM), NTHMP Review Session, R-6, Seattle, WA, 7–10 August 2001, 97–108.
4) Hino, R., Tanioka, Y., Kanazawa, T., Sakai, S., Nishino, M. and Suyehiro, K. (2001) Micro-tsunami from a local interplate earthquake detected by cabled offshore tsunami observation in northeastern Japan. Geophys. Res. Lett. 28, 3533–3536.
5) Hirata, K., Takahashi, H., Geist, E., Satake, K., Tanioka, Y., Sugioka, H. et al. (2003) Source depth dependence of micro-tsunamis recorded with ocean-bottom pressure gauges: the January 28, 2000 Mw 6.8 earthquake off Nemuro Peninsula, Japan. Earth Planet. Sci. Lett. 208, 305–318.
6) Maeda, T., Furumura, T., Sakai, S. and Shinohara, M. (2011) Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Earth Planets Space 63, 803–808.
7) Kato, T., Terada, M., Kimashita, M., Ishiki, H. and Yokoyama, A. (1998) A development of GPS tsunami meter. Gekkan Kaiyo 15 (Special Volume), 38–42 (in Japanese).
8) Kato, T., Terada, Y., Kimashita, M., Kakimoto, H., Iseiki, H., Matsushi, M. et al. (2000) Real time observation of Tsunami by RTK-GPS. Earth Planets Space 52, 841–845.
9) Born, G.H., Parke, M.E., Axelrad, P., Gold, K.L., Johnson, J., Key, K.W. et al. (1994) Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy. J. Geophys. Res. 99, 24517–24526.
10) Shône, T., Pandoe, W., Mudita, I., Roemer, S., Illigner, J., Zech, C. et al. (2011) GPS water level measurements for Indonesia's Tsunami Early Warning System. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 741–749.
11) Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T. et al. (2006) Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. Earth Planets Space 57, 297–301.
12) The Headquarters for Earthquake Research Promotion (1999) The Earthquake Activities of Japan, 391pp. (in Japanese).
13) Terada, Y., Kato, T., Nagai, S., Koshimura, S., Miyake, T., Nishimiute, H. et al. (2011) Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy. In Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2011, 411–422.
14) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Isshiki, H., Matsushi, T. et al. (2001) A new tsunami monitoring system using RTK-GPS. In ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12, pp. 645–653.
15) Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T. and Koshimura, S. (2011) Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan. Earth Planets Space 63, e5–e8.
16) Watada, S. (2013) Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans. Geophys. Res. Lett. 40, 4001–4006.
17) Kawai, H., Satoh, M. and Kawaguchi, K. (2010) Annual report on Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbours (NOWPHAS 2009). Tech. Note Port. Airport Res. Inst. No. 1209, pp. 1–93 (in Japanese with English abstract).
18) Kawai, H., Satoh, M., Kawaguchi, K. and Seki, K. (2011) Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake tsunami. Rep. PARI 50, 3–63 (in Japanese).
19) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M. et al. (2013) Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. J. Disaster Res. 13, 460–471.
20) Rocken, C., Mervart, L., Lukes, Z., Johnson, J., Kanzaki, H., Kakimoto, M. et al. (2004) Testing a new network RTK software system. In Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004), U.S.A., pp. 2631–2639.
21) Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C. and Iwabuchi, T. (2008) Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time. In Proceedings of the

21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 397–405.

22) Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M. and Webb, F. (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J. Geophys. Res. 102, 5005–5017.

23) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koshimura, S., Imada, N., Sakaue, H. *et al.* (2015) Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations. *In* Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH) (ed. Hashimoto, M.) International Association of Geodesy Symposia, Springer, Cham, Vol. 145, pp. 145–153.

24) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S. *et al.* (2017) GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system. In Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, U.S.A., June 25–30, 2017, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), ISOPE-I-17-213.

25) Yamamoto, S., Kawasaki, K., Terada, Y., Kato, T., Hashimoto, C., Motobashi, O. *et al.* (2014) Data transmission experiment from the buoy using the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII)—The aim of early detection of Tsunami-. IEICE Tech. Rep. 114, 5–10 (in Japanese).

26) Terada, Y., Yamamoto, S., Iwakiri, N., Iwasaki, K., Koshikawa, N., Tada, M. *et al.* (2016) An improvement of the antenna installation mechanism for satellite communication of the GPS tsunami meter. Presented at the JpGU 2016 Meeting, Chiba, May 2016, HDS19-24 (in Japanese).

27) Takizawa, K., Yamamoto, S., Toyoshima, M., Futamura, A., Terada, Y. and T. Kato (2017) Channel modeling on satellite communications for GNSS buoy in the ocean. IEICE Tech. Rep. 117, 99–102 (in Japanese).

28) Spiess, F.N. (1985) Suboceanic geodetic measurements. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. GE-23, 502–510.

29) Fujimoto, H. (2006) Ocean bottom crustal movement observation using GPS/Acoustic system by universities in Japan. J. Geod. Soc. Jpn. 52, 265–272.

30) Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M. *et al.* (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. Earth Planets Space 58, 265–275.

31) Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Besana, G.M., Sugimoto, S. *et al.* (2006) Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes. Geophys. Res. Lett. 33, L23306.

32) Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K. *et al.* (2008) A new GPS-Acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai Trough. J. Geophys. Res. 113, B02401.

33) Spiess, F.N., Chadwell, C.D., Hildebrand, J.A., Young, L.E., Purcell, G.H., Jr. and Dragert, H. (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. Phys. Earth Planet. Inter. 108, 101–112.

34) Chadwell, C.D. and Spiess, F.N. (2008) Plate motion at the ridge-transform 326 boundary of the south Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic data. J. Geophys. Res. 113, B04415.

35) Yasuda, K., Tadokoro, K., Taniguchi, S., Kimura, H. and Matsuhiro, K. (2017) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough, Japan. Geophys. Res. Lett. 44, 3572–3579.

36) Chen, H.-Y., Ikuta, R., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Kohin, T., Wang, C.-C. *et al.* (2019) Back-arc opening in the western end of the Okinawa Trough revealed from GNSS/Acoustic Measurements. Geophys. Res. Lett. 46, 137–145.

37) Gagnon, K., Chadwell, C.D. and Normandeau, E. (2005) Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. Nature 434, 205–208.

38) Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M. *et al.* (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. Earth Planets Space 58, 265–275.

39) Matsumoto, Y., Ishikawa, T., Fujita, M., Sato, M., Saito, H., Mochizuki, M. *et al.* (2008) Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observations. Earth Planets Space 60, e9–e12.

40) Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Ando, M., Okuda, T., Nagai, S. *et al.* (2012) Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan. Geophys. Res. Lett. 39, L00G06.

41) Tadokoro, K., Nakamura, M., Ando, M., Kimura, H., Watanabe, T. and Matsuhiro, K. (2018) Interplate coupling state at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements. Geophys. Res. Lett. 45, 6869–6877.

42) Watanabe, S., Sato, M., Fujita, M., Ishikawa, T., Yokota, Y., Ujihara, N. *et al.* (2014) Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation. Geophys. Res. Lett. 41, 5789–5796.

43) Watanabe, S., Bork, Y., Melgar, D. and Tadokoro, K. (2018) Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy. J. Geophys. Res. 123, 2449–2461.

44) Yasuda, K., Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Nagai, S., Okuda, T. *et al.* (2014) Interplate

locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost part of the Suruga Trough, Japan. Geophys. Res. Lett. 41, 5906–5912.

45) Yokota, Y., Ishikawa, T., Sato, M., Watanabe, S., Saito, H., Ujihara, N. *et al.* (2015) Heterogeneous interplate coupling along the Nankai Trough, Japan, detected by GPS-acoustic seafloor geodetic observation. Prog. Earth Planet. Sci. 2, 10.

46) Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T. and Asada, A. (2016) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature* 534, 374–377.

47) Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K. and Ochi, T. (2018) Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data. Geosphere 14, 535–551.

48) Kimura, H., Tadokoro, K. and Ito, T. (2019) Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations. J. Geophys. Res. **124**, 6140–6164.

49) Kido, M., Fujimoto, H., Miura, S., Osada, Y., Tsuka, K. and Tabei, T. (2006) Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys. Earth Planets Space 58, 911–915.

50) Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R. and Ito, Y. (2011) Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Geophys. Res. Lett. 38, L24303.

51) Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Besana, G.M., Sugimoto, S. *et al.* (2006) Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to *M*7 class offshore earthquakes. Geophys. Res. Lett. 33, L23306.

52) Matsumoto, Y., Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Yabuki, T. and Asada, A. (2006) Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. Earth Planets Space 58, 1573–1576.

53) Sato, M., Saito, H., Ishikawa, T., Matsumoto, Y., Fujita, M., Mochizuki, M. *et al.* (2011) Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. Geophys. Res. Lett. 38, L01312.

54) Tomita, F., Kido, M., Osada, Y., Hino, R., Ohta, Y. and Iinuma, T. (2015) First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique. Geophys. Res. Lett. 42, 8391–8397.

55) Tomita, F., Kido, M., Ohta, Y., Iinuma, T. and Hino, R. (2017) Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. Sci. Adv. 3, e1700113.

56) Iinuma, T., Hino, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y. *et al.* (2016) Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. Nat. Commun. 7, 13506.

57) Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M. *et al.* (2011) Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. Science 332, 1395.

58) Iinuma, T., Hino, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y. *et al.* (2012) Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. J. Geophys. Res. 117, B07409.

59) Kido, M., Fujimoto, H., Hino, R., Ohta, Y., Osada, Y., Iinuma, T. *et al.* (2015) Progress in the project for development of GPS/Acoustic technique over the last 4 years. *In* Proceeding of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH) (ed. Hashimoto, M.). International Association of Geodesy Symposia, Springer, Cham, Vol. 145, pp. 3–10.

60) Kido, M., Imano, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Takahashi, N., Tsubone, S. *et al.* (2018) Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. J. Disaster Res. 13, 472–488.

61) Imano, M., Kido, M., Honsho, C., Ohta, Y., Takahashi, N., Fukuda, T. *et al.* (2019) Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy. Prog. Earth Planet. Sci. 6, 56.

62) Chadwell, C.D. (2013) GPS-Acoustic Seafloor Geodesy using a Wave Glider. Abstract G14A-01 presented at 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9–13 Dec. 2013.

63) Sathiakumar, S., Barbot, S., Hill, E., Peng, D., Zerucha, J., Suhaimee, S. *et al.* (2016) Seafloor geodesy using wave gliders to study earthquake and tsunami hazards at subduction zones. Abstract G31A-1046 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 11–15 Dec. 2016.

64) Iinuma, T., Kido, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Tomita, F. and Ueki, I. (2021) GNSS-Acoustic observations of seafloor crustal deformation using a wave glider. Front. Earth Sci. 9, 600946.

65) Cruz-Atienza, V.M., Ito, Y., Kostoglodov, V., Hjörleifsdóttir, Iglesias, A., Tago, J. *et al.* (2018) A seismogeodetic amphibious network in the Guerrero seismic gap, Mexico. Seismol. Res. Lett. 89, 1435–1449.

66) Kinugasa, N., Tadokoro, K., Inagaki, S., Terada, Y., Futamura, A. and Kato, T. (2018) Development of acoustic signal processing unit for continuous observation of ocean bottom crustal deformation using marine GNSS buoy. Presented at the JpGU 2018 Meeting, SCG57-P08.

67) Kido, M. (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean. Earth Planets Space 59, e33–e36.

68) Kinugasa, N., Tadokoro, K., Kato, T. and Terada, Y.

(2020) Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy. Prog. Earth Planet. Sci. **7**, 21.

69) Ishiki, H., Tsuchiya, A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M. *et al.* (2000) Precise variance detection by a single GPS receiver — PVD (Point precise Variance Detection) Method —. J. Geod. Soc. Jpn. **46**, 239–251.

70) Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J. *et al.* (2009) Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. Mar. Geod. **32**, 355–371.

71) Tadokoro, K., Kinugasa, N., Kato, T., Terada, Y. and Matsuhiro, K. (2020) A marine-buoy-mounted system for continuous and real-time measurement of seafloor crustal deformation. Front. Earth Sci. **8**, 123.

72) Tadokoro, K., Kinugasa, N., Kato, T., Terada, Y. and Matsuhiro, K. (2021) Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements. Presented at the JpGU-AGU2020 meeting, July 2021.

73) Watanabe, S., Ishikawa, T., Yokota, Y. and Nakamura, Y. (2020) GARPOS: Analysis Software for the GNSS—A seafloor positioning with simultaneous estimation of sound speed structure. Front. Earth Sci. **8**, 597532.

74) Shoji, Y., Sato, K., Yabuki, M. and Tsuda, T. (2016) PWV Retrieval over the ocean using shipborne GNSS receivers with MADOCA real-time orbits. Sci. Online Lett. Atmos. **12**, 265–271.

75) Shoji, Y., Sato, K., Yabuki, M. and Tsuda, T. (2017) Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the sea adjacent to Japan. Earth Planets Space **69**, 153.

76) Shoji, Y. (2010) The experiment of the tropospheric zenith delay analysis using the GPS tsunami buoy off Cape Muroto, Japan. Presented at the 2010 Spring Meeting of the Meteorological Society of Japan, 23rd May 2010, Tokyo, Japan.

77) Tsugawa, T., Nishioka, M., Ishii, M., Hozumi, K., Saito, S., Shinbori, A. *et al.* (2018) Total Electron Content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS. J. Disaster Res. **13**, 535–545.

78) Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., Nishioka, M., Maruyama, T., Kato, H. *et al.* (2011) Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Earth Planets Space **63**, 875–879.

79) Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S. and Miyazaki, S. (2002) A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. Earth Planets Space **54**, 63–70.

80) Sekido, M., Kondo, T. and Kawai, E. (2003) Evaluation of GPS-based ionospheric TEC map by comparing with VLBI data. Raido Sci. **38**, 1069.

81) Tsugawa, T., Otsuka, Y., Coster, A.J. and Saito, A. (2007) Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. Geophys. Res. Lett. **34**, L22101.

82) Spilker, J., Jr. and Parkinson, B.W. (1996) Overview of GPS operation and design. *In* Global Positioning System: Theory and Applications (eds. Parkinson, B.W. and Spilker, J., Jr.). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Va. Vol. 1, pp. 29–55.

83) Takizawa, K., Yamamoto, S., Terada, Y. and Kato, T. (2021) Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in IoT Non-Terrestrial-Network for GNSS buoy array in the ocean. Presented at the IEEE VTC2021-Fall meeting, 27–30 September 2021.

(Received Sep. 8, 2021; accepted Nov. 16, 2021)

Profile

Teruyuki Kato was born in Kanagawa Prefecture in 1952. He received his M.S. and Ph.D. in 1977 and 1980, respectively, from the University of Tokyo. He started his research career as a Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Postdoctoral Research Fellow at the Earthquake Research Institute (ERI), the University of Tokyo, and was soon hired as an assistant professor at ERI in 1980. He was promoted to associate professor in 1991 and then to a professor in 2000 at the same institute. His research field is geodesy, and he is studying the application of the Global Navigation Satellite System (GNSS) for crustal deformation research and for developing a GNSS buoy for early tsunami warning. After retirement from the University of Tokyo in 2018, he worked as the Director at the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture from 2018 to 2021.

He is a specially appointed professor at Taisho University, Tokyo, Japan.

Profile

Yukihiro Terada was born in Ehime Prefecture in 1949 and graduated from Osaka University in 1972. He started his research career as an engineer at the Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation. He was engaged in developing non-destructive examination method and apparatus for the material and welded joints of steel structures. For these achievements, he was granted a Ph.D. by the Kyushu Institute of Technology in 1995. He started to develop a tsunami meter using GNSS technology after the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake. He was commended by the Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism for the development of a GNSS tsunami monitoring system in 2004.

Yukihiro Terada was invited to the National Institute of Technology, Kochi College, as a professor in 2006. He has been an honorary professor and visiting professor there since 2015.

Profile

Keiichi Tadokoro was born in Hyogo Prefecture in 1973. He received his M.S. and Ph.D. degrees from Kyoto University in 1997 and 2000, respectively. In his doctoral thesis, he investigated temporal variations in the structure and physical properties of a fault zone from seismic wave analyses. He became a research associate (assistant professor) at the Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, in 2000. He was promoted to associate professor in 2006. He has contributed to the development of a measurement system for sea-floor crustal deformation using the GNSS-Acoustic technique. His current research topic is the interplate coupling along the Nankai Trough and the Ryukyu Trench derived from sea-floor crustal deformation. He is also developing an advanced system for GNSS-Acoustic measurements.

Profile

Akira Futamura was born in Aichi Prefecture in 1974. He received his M.S. from the Tokyo University of Mercantile Marine in 2000. His Ph.D. was obtained from Ehime University in 2005. He started his research career as a research associate at the National Institute of Technology, Yuge College, in 2000. He was promoted to associate professor in 2008 and a professor in 2020 at the National Institute of Technology, Yuge College. He has conducted research on the marine environment in the Seto Inland Sea in the field of coastal oceanography. In addition, he is conducting research in the field of seafarer education.

［論文2022-3］

津波防災のためのGPS（GNSS）ブイの開発について

加藤照之[1]

[1]大正大学 地域構想研究所 特命教授

（要旨） 衛星を用いた精密測位システムGPS（Global Positioning System）を海洋に浮かぶブイに設置してその位置をリアルタイムで監視することにより津波の監視や、住民の早期避難に役立てることができる。この考えをもとにGPSブイの開発を四半世紀にわたって進めてきた。本年でその事業が終結することから、本事業のこれまでの開発経過を振り返るとともにその到達点、成功事例・失敗事例などをふまえ今後の課題や地域への貢献の可能性などについて考察する。

キーワード: GPS、GNSS、GNSS 津波計、津波防災、津波早期警戒

1. はじめに

GPS（Global Positioning System）は米国で開発された地球上の位置を正確に計測する衛星を用いた測位システムである。GPSは衛星セグメント、コントロールセグメント、地上セグメントの３つのセグメントから構成される。衛星セグメントは地球を周回する30機以上の衛星から構成され、地球上のどこからでも数機以上の衛星が見えるように配置されている（図－１）。衛星には極めて精度の高い時計も搭載されている。コントロールセグメントは衛星の状態を管理する地上施設で、GPS衛星の位置や搭載している時計の誤差などを監視し、衛星から自身の位置や時刻の補正情報あるいは測位の誤差要因となる電離層の影響などの情報を地上の受信機に向けて放送させる機能を持っている。地上セグメントは地上の利用者が用いる機器で、基本的にはGPS衛星からの信号を受信するアンテナと、取得した信号を解析する受信機から構成されている。衛星から受信した信号を解析すると衛星の位置と衛星－受信アンテナ間の距離が求められる。4機以上の衛星からの距離がわかるとア

図－１：GPS の衛星セグメント。30 機以上の衛星から構成される。

図－２：GPS 津波計の概念図。

ンテナの中心位置の緯度、経度、高さと時刻が算出される。地上セグメント（アンテナと受信機）は、測量機器として基本的な位置情報を算出するものから、地図データと組み合わせて自動車に搭載するカーナビやスマホに搭載している地図アプリや位置を使うゲームソフトなど、広い分野で用いられている。

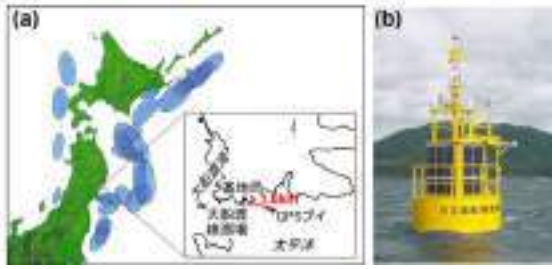
GPS の受信システムを海岸から離れた沖合の海洋に浮かべたブイに搭載してその位置を精密に計測することにより海面高の変化を監視することができる。もし津波が発生してブイを通過すれば、津波が海岸に到達する前に検知することができるだろう（図－２）。このようなアイデアを実現しようと 1996 年頃から“GPS 津波計”の開発をはじめた。私個人ではアイデアはあっても実際に実験を行うのは大変である。幸い日立造船株式会社という大手企業が協力を申し出てくださったので、実験を行うことができた。最初は手で持てるくらいの簡単なブイに機器を搭載して、当時著者が所属していた東京大学地震研究所の油壷地殻変動観測所の置かれている三浦半島先端の小網代湾で実験を行った（図―３）[1)]。

幸い実験はうまくいき、ブイからの信号を無線を使って油壷観測所に置かれた計算機に取り込み、観測所に置かれた同じGPS受信装置を基準としたブイの相対位置をモニターすることに成功した。このように、地上に置かれた観測点を基準として動く物体の動きを測定する方法を即時キネマティック方式（Real-time kinematic）と呼ぶ。この方式で海面高の変化が数cm程度の精度で測定することが可能であるが、これは陸の基地局との間の相対的な位置を計測することで測位の誤差原因となるGPS衛星からの電磁波が通ってくる電離層や大気の影響を差し引くことで誤差を低減できるからである。一方、そのため、基地局とブイが遠く離れてしまうと電磁波の伝搬経路が離れてしまって差し引く効果が薄れてしまい精度よく測位をすることができなくなる。そのため、この方式では数cmという高精度で測位するためにはブイと基地局の距離は20km以内程度とされている。それでも、ブイを沿岸から10km以上遠くに置けばブイが津波を検知してから海岸に到達するまで10分程度以上は時間がかせげるので住民避難に役立つであろうと考えた。

図－３：油壷実験で使われた最初の GPS ブイ。円筒形のブイの中に GPS 受信機と蓄電池が格納されている。ブイから鉛直に立てたピラーの上に水平に GPS アンテナが装着されている。斜めに取り付けられているのは無線通信用のアンテナ。

2.“GPS津波計”開発の展開

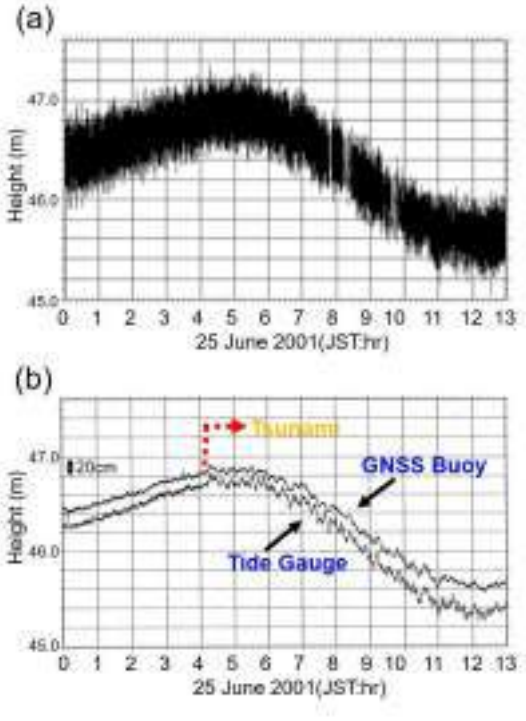
最初の予備的実験がうまくいったので、次により本格的な実験を行うこととした。本格的な実験を行うにあたっては、実際の津波を想定し日本列島の津波の常襲地域である三陸海岸を設置場所に考えた。大船渡市に協力をお願いしたところ快諾を得たので、大船渡市沖にブイを設置することになった。



図―４：大船渡に設置された GPS 津波計。(a)設置場所を示す。青い楕円は東北日本周辺の大地震の震源域を示す[2)]。(b)ブイの写真。ブイで取得されたデータは無線により遠方に見える陸上に設置された基地局で受信される.

しかしながら、外洋にある程度長期にわたって設置するとなるとかなりブイが大型になる。このためのブイの製作や設置・運用にはかなり経費が必要となる。そこで我々は文科省の科学研究費補助金への申請を行い、幸い採択された。

こうして、2000年～2003年の3年間にわたって大船渡沖1.6 kmくらいのところにブイを設置して観測を行うことができた。図－４(a)にブイの設置位置とブイの写真を示す。ブイの大きさは直径が2.8m, 高さは海中部を含めると13mを超える。重量は約10トンである。大変幸いなことにこの期間に小規模な津波を計測することに成功し、大きな自信となった[3]。まず、2000年6月23日にペルーで発生した地震による津波が24日に日本に襲来した。この時のデータを図―５に示す。同図上段は得られた原記録の上下成分を示す(GPSの解析では南北、東西、上下の３成分が得られるが、津波では特に上下成分が重要なのでこれだけを示す）。この図では緩やかに変化する潮汐成分(一日約2回の潮の満ち引き）を示しているがそれに振幅が数十cm程度の早い周期の成分が重複しているのがわかる。これは風によって海面が変動する通常の波による変動を示している。このような波の周期は数秒程度である。この図では津波がどれかはわからない。



図－５：20006 月 24 日に取得されたペルー地震による津波。(a)原データ。風波が卓越していて津波は判別できない。(b)上側の波形は(a)の波形にローパスフィルターを作用させたもの。下側の波形は大船渡検潮場の記録。いずれも 10cm 程度の小さい振幅の津波波形が見て取れる。

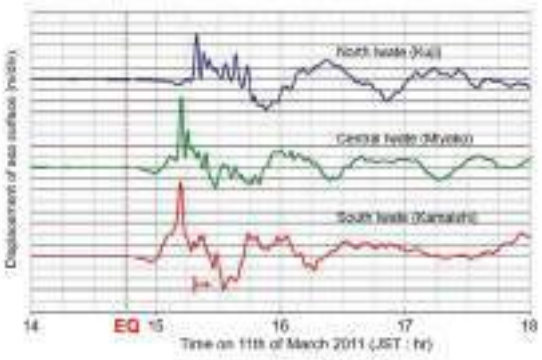
津波というのは風波よりはるかに長い周期をもっていて数十分から一時間程度の周期で潮が満ちたり引いたりする。そこで、この原記録にフィルターを施して、長周期の成分だけを取り出してみると図―５の下図のようになる。ここには2つのグラフが描かれているが、この上側が上記で記した、フィルターをかけた上下成分のグラフである。そのすぐ下に示されているのは大船渡の検潮場の潮位記録である。まず、これら２つの波の形がよく似ていることがわかるだろう。そうして、この図の中で赤い矢印で示したあたりから海面の上下動の振幅が大きくなっているのがわかるだろう。これが津波である。

大船渡ではペルー地震だけでなく2003年9月に北海道十勝沖で発生した地震による津波の検知にも成功した。続いて四国の室戸岬沖約13km付近に同様にGPS津波計を設置しそこでは2004年9月の紀伊半島沖地震による津波を検知することができた[4]。これらの成功により、我々が開発した津波計は国土交通省の港湾空港技術研究所が日本列島周辺に設置しているNOWPHASと呼ばれる近海の波浪の高さを計測するために多数設置されている超音波式の波高計と共に“GPS波浪計”として波浪を計測する目的で設置されることとなった[5]。システム自体は同じものなのだが、図－５に示しているようにこのシステムは津波だけでなく風による波浪の高さを計測することもできるのである。同じブイで取得されるデータをうまく利用することにより、普段我々が見る波浪もまれに発生する津波も同時に計測できることは費用対効果の面でも有益である。こうして、NOWPHASは現在までに20機近いGPS波浪系を日本列島周辺に展開しており、データは気象庁でも監視され、津波の監視にも役立てられている。

3. 2011年東北沖地震の教訓

NOWPHASのGPS波浪計は2011年3月までには三陸海岸沿いを中心に全国に15か所設置された。沿岸からの距離はいずれも十数kmである。そこへ世界でもまれなマグニチュード９の巨大な地震が三陸沖に発生し巨大な津波を生起した。地震は3月11日14時46分頃に発生し、同時に津波が発生した。気象庁が津波警報を発令したのは地震発生の3分後であった。その内容は“宮城6m、岩手3m”であった。発生した津波がGPS波浪計に到達したのは15時10分頃のことであるがその時の高さはすでに高いところで6 mに達していた（図－６）[6]。津波の特性としてその速度は海岸の浅いところに近づくにつれて遅くなる。そのため、後ろの波が前の波に次第に近づいていき、津波の高さが増幅されて高くなるという現象が知られている。陸から十ｋｍ以上離れたところで6mを超える津波が観測されたということはそれが海岸に到達する頃には10mを優に超える可能性があることを示している。このため、これを監視していた気象庁は直ちにそれまで出されていた津波警報を15時14分頃に“宮城・岩手10m以上”と変更した[7]。しかしながら、津波の第一波が沿岸に押し寄せたのはそのわずか数分後のことであった。結果として一万八千人以上の死者行方不明者を出す結果となった。更新後の津波警報を聞いていた人もいてそれによって命が助かった方もいないことはないかもしれないが、結果として多くの命が失われたことは痛恨の極みであった。

もし津波が自動的に検知されてそれが瞬時に警報の更新につながれば犠牲者はもっと少なく済んだ可能性もあるだろう。しかしながら、津波の到来を風などの他の原因による波と精度よくかつ短時間（例えば1分以内程度）のうちに判別することは大変困難と考えられる。仮にそのような判別ができたとしても、海岸からの距離が十数km以内であると波が海岸に到達するまでに10分程度であるから、避難のためにはより長いリードタイムが必要のように思われる。津波警報の更新が間に合わなかったのはブイが沿岸に近すぎたことによると考えることもできるだろう。当時使われていた技術が陸上の基地局とブイの距離が20km以内というように限定されていたことがこのような結果を生んだのだと考えられる。

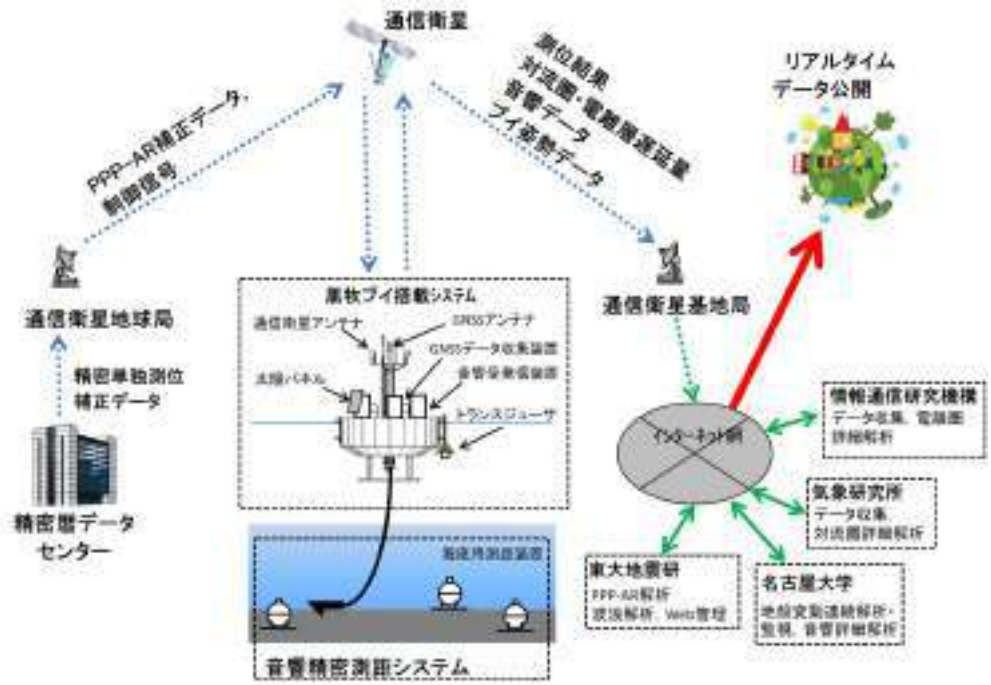


図－６：2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の際に発生した津波の GPS 波浪計による記録。上から岩手北部（久慈）、岩手中部（宮古）、岩手南部（釜石）。EQ が地震発生時刻、15 時 18 分頃の矢印はおよその津波の沿岸への到来時刻を示す。縦軸は一目盛りが 1m。

4. 新たな発展

このような反省に立って、GPSブイをより遠洋に設置できないかと考えた。これまでの技術は第一章でも述べたように陸上の基地局に対するブイの位置を相対的に決定するものであった。この方式のためにブイを海岸から20km以上の遠洋には設置できなかったのであるが、幸いなことに2000年を過ぎるころから、GPS受信機の位置を単独でかつ数cmの精度で位置を決める技術（これを精密単独測位と呼ぶ）が急速に発展してきた。そこでこの方式を取り入れることとした。ただし、この方式ではGPS受信機で取得したデータをPC等に取り込んで解析する際にGPS衛星の精密な位置や時刻の情報を別途必要とする。このようなデータを一括して精密暦と呼ぶが、このデータは別途陸上のGPSデータを多くの観測点で受信してそこから推定することができるので、そのようにしてできた精密暦をブイ上の計算機に送る必要がある。

ところで、GPSという言葉は米国が開発・運用してきたシステムであるが、安全保障の観点からロシアや中国、ヨーロッパ（EU）などがそれぞれで

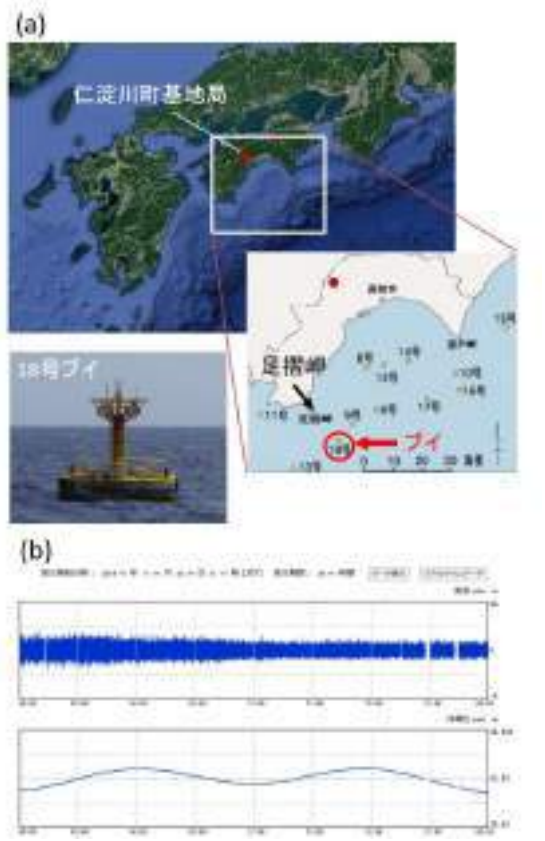


図－７：新しく開発した遠洋用 GNSS ブイシステム。

独自の衛星測位システムを導入するようになり、いずれも我々のような民間でも利用が可能になってきた。ロシアのシステムはGLONASS、中国のシステムはBeiDou、ヨーロッパのシステムはGALILEOなどとそれぞれの名称で呼ばれている。なお、日本でも近年GPSと互換のシステムであるMICHIBIKIと呼ばれる衛星測位システムを導入しつつある。そこで、これらを総称してGlobal Navigation Satellite System (GNSS)と呼ぶことが急速に普及してきた。そこで、本論でもここからはGPSブイではなくGNSSブイと記述することとする。使える衛星の数が格段に増えるほかは原理的に変わったことはない。

閑話休題。このようにしてGNSSシステムを用いた津波計測システムの開発を進めることとなった。解析手法について精密単独測位法を導入することになったが、もう一つの問題はデータの伝送である。以前のシステムではブイが沿岸よりそう遠くないところに設置されているので通常使われている海上無線で十分であったが遠洋になると無線は使えない。そこで衛星通信を導入することとなった。上に述べたように、まずは陸上のデータセンターで精密暦を生成し、それを衛星通信を用いてブイ上の計算機に送る。送られた精密暦を用いて、ブイ上で取得したGNSSデータに対して精密単独測位解析を行い、得られたブイの位置座標（東西、南北、上下の３成分）をふたたび衛星通信を用いて地上の基地局に送る。データは一般的に1秒に1回の取得・計算を行う。得られたブイ位置を受信した基地局において、フィルター操作などを行って、風波による短周期成分と、それを除去した長周期成分に分離し、これらをWeb上で表示できるようにする。

以上のような作業の流れを示したのが図－７である。なお、本システムでは海面変動を検出するGNSS装置だけでなく海底の位置も音響を使って測位するための装置も装着されている。GNSSでは衛星から受信装置までの距離を電磁波を用いて計測するのであるが、電磁波は水中を伝わることができないため、音波を使ってブイと海底におかれた音波の送受波装置の間の距離を計測し、海底の位置を推定するのである。海底の位置計測は名古屋大学の研究者が担当している。さらには得られたGNSSのデータを用いることで大気中の水蒸気量や電離層の電子数なども推定することができるため、気象学や電離層研究などにも利用が可能であるため、気象研究所や情報通信研究機構の協力をいただいている。このため、このGNSSブイは様々な災



図－８：(a)GNSS ブイの位置と仁淀川町に設置された基地局の位置を示す。左下は実験に用いられた高知県海洋牧場 No.18 号ブイの写真。(b)取得されたデータの Web 上の記録。2018 年 11 月 23 日 24 時間のブイの上下変動データを示す。（上）波浪を示す短周期データ、（下）短周期データを除去したデータ。

害の軽減のために寄与することが期待されるため、我々はこのブイを総合防災ブイと呼んでいる[8]。

実験は2016年11月頃から始められ2021年2月まで続けられた。ブイが設置されたのは高知県の足摺岬沖約40㎞のところに設置されている高知県が設置運用している海洋牧場ブイNo.18を借用した。図８(a)にブイの設置場所、ブイの写真及び基地局の位置を示す。衛星通信によって基地局に送られたデータが短周期データと長周期データに分離してWeb上に表示された画面の例も図－８(b)に示す。図８(b)の長周期のデータに現れている一日2回の緩やかな上下変動は潮汐である。津波がブイを通過するとこの長周期の記録に現れるはずである。

5. 課題と今後の展開に向けて

このように、実験は順調に進んだかに見えるが、実際には様々な問題によってデータが途切れることとなった。なかでも問題だったのは電源である。ブイ上にはGNSS受信機や衛星通信用の機器のほかにもデータ収集や解析のための小型計算機や海底地殻変動計測用の各種機器などが設置されている。このため十分な電源を確保するために大型のソーラーパネルと蓄電池をブイ上に搭載する必要がある。設計上は数日間の無日照にも耐えられる十分な電源を設置したはずなのであるが、太陽電池にブイのポール(図－８(a)参照)の影ができるなど、設計通りの電力が得られなかったようである。そのため、設置間もなく電力不足でデータ伝送が停止した。その後太陽電池を増設するなどで回復したもののかなりぎりぎりでの運用を強いられてしまった。そのほかにも外洋での厳しい環境のためケーブルの腐食などで機器が故障するなどの問題が発生した。こうした課題は想定内のことでもあり、これらを改善して長期の運用に耐えられるブイを設計する必要があると考えられる。我々はこの研究のために文部科学省科学研究費補助金のうち基盤研究(S)というカテゴリーの研究費をいただいていたのだが、最大でも5年間で1.5億円までという経費であり、自前のブイを設計・製作するとなるとそれだけで優に一億円を超える経費が必要となったのでやむを得ず既存のブイを借用することになったわけである。また、ブイ上のトラブルが発生した場合、小型の船舶をチャーターしてブイに渡って修理をする必要が生じるが、海流や気象の影響でなかなか船が出せないなどの困難もあった。我々の研究は基礎的な開発研究であり、実現の可能性を示すと同時に課題を抽出し、将来の発展につなげるのが趣旨であるので、これらの課題をいずれ解決して遠洋でのGNSSブイが多数設置され、津波防災だけでなく様々な自然災害の低減のためのインフラとしての海洋GNSSブイアレイが実現することを心から願っている[9]。

6. GNSSブイの地域における活用の可能性

今回利用したブイは図－８(a)で示すように高

知県の水産振興部で設置・運用されている黒潮牧場と呼ばれる漁礁用のブイのうちの一つであるNo.18のブイである。この漁礁用のブイというのは魚が浮遊物のあるところに寄ってくるという習性を利用してブイ周辺で漁をしようというものである。図－８(a)でわかるように高知県では土佐湾およびその周辺に多数のブイを設置している。我々はそのうちの一つを借用して実験を行ったわけであるが、もしこれらのうちのいくつかにでもGNSS受信装置を設置すれば大変有効な津波監視システムができるに違いない。ブイ上の電力確保が一番の課題ではあるが、それが十分確保されるということになればブイに様々な観測装置、例えば海水温や海流のなどのセンサーが付帯できれば漁業者にとっては大変重要な情報が得られるのではないだろうか。海流の流向・流速は貨物船等の航路の設定のためにも重要な情報である。また、我々がWeb公開をおこなった波高データのうち短周期の波浪データはそれだけでも、釣り客やサーファーなどにとっては有用なデータになるのではないだろうか。沖合の海洋情報を沿岸住民や観光客等が利用することで海洋のより効率的で安全な利用ができることが期待される。陸上でのGNSSデータは様々な方面に利活用が進んでいるが、海洋のGNSSデータはまだほとんど利用が進んでいない。観測点がないのでそれは当たり前のことと言えるが、ブイ設置やデータ伝送の費用がネックであるが防災だけでなく漁業、海上輸送、観光等に役立つ情報が提供できるとなれば費用対効果の観点からも有用になるのではないだろうか。技術的な革新と、設置数を増やすことによる単価の低減が実現できれば海洋に面する自治体にとっては新たな地域活性の資源になるのではないかと期待される。海洋におけるGNSSの活用による地域おこしが今後増進されることを期待したい。

参考文献

1) 加藤照之，寺田幸博，木下正生，一色浩，横山昭 : GPS津波計の開発，月刊海洋，号外15，38-42, 1998.

2) 文部科学省地震調査研究推進本部，日本の地震活動，391pp，1999.

3) Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, T. Miyake, H. Nishimura, S. Kunihiro : Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy, In Proceedings of the International Global Navigation Satellite Systems Society (IGNSS) Symposium 2011, 15-17 November 2011, 411-422, 2011.

4) Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai : Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, 57, 297-301, 2005.

5) 永井紀彦 : 波浪観測網の強化による海の安全の確保－ＧＰＳ波浪計 2006年度より配備開始！－，土木学会，土木学会誌 第91巻第９号（2006.9.号）, pp.78-79, 2006.

6) 寺田幸博・加藤照之 : GPS津波計・波浪計・潮位計，非破壊検査，**66**(4), 178-182, 2017.

7) Ozaki, T. : Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - Tsunami warnings/advisories and observations -. Earth Planets Space **63**, 827-830, 2011.

8) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S., Ishii, M., Tsugawa, T., Nishioka, M., Takizawa, K., Shoji, Y., Seko, H., Iwasaki, T., and Koshikawa. N. : Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System, J. Disast. Res., **13** (3), 460-471, 2018.

9) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, and A. Futamura : Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, Proc. Jpn. Acad., Ser. B, **98**, 49-71, 2022.

資料３－２　口頭・ポスター発表

[平成 28(2016)年]

2016-1p) Kato, T., GNSS buoy array in the Pacific for natural disaster mitigation, The First Pacific Regional Workshop on Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems by Using Space and GIS Applications, Nadi, Fiji, September 13, 2016.

2016-2p) 加藤照之, 寺田幸博, 田所敬一, 二村彰, 豊嶋守夫, 山本伸一, 石井守, 津川卓也, 西岡未知, 滝沢賢一, 小司禎教, 岩崎匡宏, 越川尚清, 海洋GNSSブイを用いた総合防災システムの開発, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会, 東北大学, 2016年11月21日.

[平成 29(2017)年]

2017-1p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, N. Koshikawa, GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System, JpGU, 幕張メッセ, 2017年5月19日.

2017-2p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, N. Koshikawa, GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System, IAG-IASPEI 2017, Kobe, Japan, August 3, 2017.

2017-3p) 加藤照之, 寺田幸博, 田所敬一, 衣笠菜月, 二村彰, 多田光男, 小司禎教, 瀬古弘, 石井守, 津川卓也, 西岡未知, 豊嶋守生, 山本伸一, 滝沢賢一, 越川尚清, "新たな海洋総合防災GNSSブイアレイの開発," 測地学会第128回講演会, 岐阜県瑞浪市総合文化センター, 2017年10月5日.

2017-4p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, H. Seko, T., Iwasaki, N., Koshikawa, N., Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazards monitoring system, 12th Meeting of the ICG, Kyoto, Japan, December 3, 2017.

[平成 30(2018)年]

2018-1p) 加藤照之, GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

2018-2p) 田所敬一, 衣笠菜月, 稲垣駿, 二村彰, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 海洋GNSSブイを活用した海底地殻変動観測システムの開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

2018-3p) 衣笠菜月, 田所敬一, 稲垣駿, 寺田幸博, 二村彰, 加藤照之, 海洋GNSSブイを用

いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

2018-4p) 田所敬一, 衣笠菜月, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.

2018-5p) 衣笠菜月, 田所敬一,加藤照之, 寺田幸博, ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.

2018-6p) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato and Y. Terada, Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement, San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting 2018.

2018-7p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, A. Futamura, Y. Terada, and T. Kato, Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy, San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting 2018.

[平成 31/令和元(2019)年]

2019-1p) Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, M. Yabuki, Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement, Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS) XIII, Naha, Japan, 6-8 March 2019

2019-2p) Shoji Y., T. Tsuda, T. Kato, Y. Terada, M. Yabuki, Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction, European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, Milan, Italy, 13-17 May 2019

2019-3p) 瀬古弘，小泉耕，小司禎教，加藤照之，船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験（その１），気象学会2019年春季大会，東京，2019年5月15-19日

2019-4p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, T. Kato, Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月26日.

2019-5p) Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, M. Yabuki, Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月27日.

2019-6p) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, A. Futamura and K. Matsuhiro, Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月27日.

2019-7p) 木下正高、平田直、篠原雅尚、入舩徹男、鍵裕之、加藤照之、小野重明、道林克禎、阿部なつ江、稲垣史生、小村健太朗、小原一成, 2019, リアルタイム観測・大深度掘削・高圧実験の統合による沈み込み帯4D描像, JpGU, 幕張メッセ,

2019年5月27日.

2019-8p) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Multi GNSS Asia 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

2019-9p) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019 （論文2019-1参照）

2019-10p) 加藤照之・寺田幸博, GNSSブイを用いた総合防災システムについて～現状と課題～, 測位航法学会 GPS/GNSSシンポジウム, 2019年10月17日.

2019-11p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, and T. Kato, Observation for seafloor crustal deformation using moored buoy by GNSS-A technique considering the heterogeneity of sound speed in ocean, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, December 2019.

[令和 2(2020)年]

2020-1p) 衣笠 菜月・田所 敬一・加藤 照之・寺田 幸博, 係留ブイを用いたGNSS-Aによる海底地殻変動観測のための解析手法の開発, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020年7月12-16日.

2020-2p) 田所 敬一・衣笠 菜月・加藤 照之・寺田 幸博・松廣 健二郎, Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020年7月12-16日.

2020-3p) 衣笠菜月・田所敬一・加藤照之・寺田幸博, 係留ブイによる GNSS-A 海底地殻変動観測のための解析手法の研究, 日本測地学会第134回講演会, オンライン, 2020年10月21-23日.

[令和 3(2021)年]

2021-1p) Takizawa, K., S. Yamamoto, Y. Terada, and T. Kato, Non-orthogonal multiple access (NOMA) in IoT non-terrestrial network for GNSS buoy array in the ocean, IEEE VTC2021 Fall meeting (online), 27 September – 28 October, 2021.（論文2022-1参照）

[令和 4(2022)年]

2022-1p) 加藤照之, 海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦, 地球惑星科学連合大会, ハイブリッド, 2022年5月22日-6月3日

［発表2016-1p］

The First Pacific Regional Workshop on Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems by Using Space and GIS Applications
Nadi, Fiji, 13 – 15 September 2016

Tentative Programme

DAY 1 - Tuesday, 13 September 2016	
08:30 - 09:00	Registration
09:00 - 10:00	**SESSION 1: Opening Session** (Facilitator: Mr. Tae Hyung Kim, Economic Affairs Officer, ESCAP) ▪ Welcome address by H.E. Inia Seruiratu (Mr.), Minister for Agriculture, Rural and Maritime Development and National Disaster Management ▪ Opening speech by H.E. Takuji Hanatani (Mr.), Japanese Ambassador to Fiji ▪ Opening speech by Dr. Andi Eka Sakya (Mr.), Head, Indonesian Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics, Indonesia ▪ Opening speech by Mr. Iosefa Maiava, Head, ESCAP Pacific Office
10:00 - 10:20	Group Photo / BREAK
10:20 - 12:30	**SESSION 2: Gap and Needs Analysis on Multi-Hazard Early Warning Systems by Using Applications of Space Technology and GIS in the Pacific** (Facilitator: Mr. Malakai Finau, Permanent Secretary, Ministry of Lands and Mineral Resources, Fiji) ▪ Key objectives, activities, and outcomes of the project on "Strengthening Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems with Applications of Space and Geographic Information Systems", by Mr. Tae Hyung Kim, Economic Affairs Officer, ESCAP. ▪ Remote sensing and GIS for multi-hazard risk assessments in the coastal zone: recent applications and challenges in the Pacific, by Mr. Jens Kruger, Manager, Ocean and Coastal Geoscience, SPC. ▪ Remote sensing data and application for Pacific island countries, by Dr. Wolf Forstreuter (Mr.), GIS & RS Team Leader, SPC. ▪ Status, progress and challenges in the application of space technology and GIS for disaster risk reduction in the Pacific, by Mr. Sunny Kamuta Seuseu, Climate Prediction Services Coordinator, SPREP. ▪ Findings and suggestions on multi-hazard risk and early warning systems in the Pacific, by Dr. Mr. Andi Eka Sakya (Mr.), Head, BMKG. ▪ Findings and suggestions on geo-portal and geo-database for disaster risk reduction

	and Sustainable Development Goals in the Pacific, by Dr. Ramesh De Silva (Mr.), Systems Administrator, Geoinformatics Center, School of Engineering and Technology, AIT. ▪ Space Technology and Geospatial Information Systems for Sustainable Development Goals, by Dr. Teruyuki Kato (Mr.), Earthquake Research Institute, University of Tokyo.
12:30 - 14:00	LUNCH
14:00 - 15:30	**SESSION 3: Pacific Initiatives for Multi-Hazard Early Warning Systems** (Facilitator: Dr. Lal Samarakoon (Mr.), Director, Geoinformatics Center, School of Engineering and Technology, AIT) ▪ GIS and Digital Earth Technologies for Disaster Management - from case studies in Sentinel Asia and others, by Prof. Hiromichi Fukui (Mr.), Chubu University. ▪ Disaster early warning services in the Republic of Korea, by Dr. Hae Kyong Kang (Ms.), Associate Research Fellow, Open GIS Research Program Manager, Geospatial Information Research Division, KRIHS. ▪ Japan's experiences, by Dr. Masanobu Tsuji (Mr.), Director, JAXA Bangkok Office, JAXA. ▪ Drone-based disaster waste management, by Mr. Hyung Taeck Yoo, Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University.
15:30 - 15:45	BREAK
15:45 - 17:00	**SESSION 4: Pacific Country Presentations on Multi-hazard Warning System, and Geospatial Information System** (Facilitator: SPC) ▪ Cook Island: Urban Planner, Infrastructure Cook Islands, by Mr. Timoti Tangiruaine, Urban Planner, Infrastructure Cook Islands. ▪ Fiji: *(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)* ▪ Kiribati: *(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)* ▪ Micronesia: Kosrae Disaster Risk Management and Early Warning Processes, by Mr. Nema Maragfoou William, State Disaster Coordination Officer. ▪ Papua New Guinea: *(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)* ▪ Samoa: Status of Disaster Risk Management in Samoa, by Mr. Mafutaga Leiofi, Principal Environmental Engineering Officer, Ministry of Natural Resources and Environment. ▪ Solomon Islands: *(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)*

DAY 2 - Wednesday, 14 September 2016		
	Policy-maker Group	**Technical officer Group**

09:00 - 10:00	**SESSION 4: Pacific Country Presentations on Multi-hazard Warning System, Geo-portal and Geo-database** (Facilitator: SPREP) ▪ Tonga: Early Warning System in Tonga, by Mr. Paula Finau, Communication Officer, National Emergency Management Office. ▪ Vanuatu: Vanuatu Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning System, by Mr. Davidson Gibson, Director, Vanuatu Meteorology and Geo-Hazards Department, and Mr. Peter Korisa Kamil, Operation Manager, National Disaster Management Office.	
10:00 - 12:30	**SESSION 5: Disaster and Geospatial Information Systems for SDGs (Sub-group discussions) –** (Facilitators: ESCAP and AIT) ▪ How space technology and GIS can contribute to Pacific disaster management and SDGs? ▪ Two sub-group discussions consisting of Pacific country representatives and experts from SPREP, SPC, AIT, and BMKG, Japan and the Republic of Korea.	**SESSION 5: Technical Training 1, by Dr. Ramesh De Silva (Mr), AIT** ▪ Theory of space technology for disaster risk reduction. ▪ Use of geospatial data and management. ▪ Geo-portal and geo-database.
12:30 - 14:00	LUNCH	
14:00 - 17:00	**SESSION 5: Continues** ▪ Presentations by chairpersons of the two sub-groups.	**SESSION 5: Technical Training 2, by BMKG** ▪ Theory on multi-hazard risk. assessment and early warning system. ▪ Applications of early warning system for multi-hazard risk management.

DAY 3 - Thursday, 15 September 2016	
09:00 - 11:40	**SESSION 8: Future Plan for Pacific Actions on Space Technology towards Disaster Risk Reduction (DRR) and Sustainable Development Goals (SDGs)** ▪ Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by Mr. Tae Hyung Kim, ESCAP. ▪ Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by AIT. ▪ Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by Mr. Makelesi Gonelevu, SPREP. ▪ Brief presentation on SDGs mapping proposal from digital earth perspective, by Prof. Hiromichi Fukui (Mr.), Chubu University, on:

	- How to develop mid-term action plans of Pacific countries for strengthening space technology applications for DRR and SDGs in the Pacific?
	- Key stakeholders' meeting in early 2017 to develop the Pacific voice on DRR and SDGs at the big events:
	  - Ministerial Conference on DRR in India, November 2016 with Space Leaders Forum (side event);
	  - Ministerial Conference on Space in China, mid 2018;
	  - Other SDG-related UNGGIM / international / regional meetings.

11:40 - 12:00	**SESSION 9: Closing Session** ▪ Closing remarks by ESCAP and Fiji.

List of Acronym:

AIT: Asian Institute of Technology
BMKG: Indonesian Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics
ESCAP: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
KRIHS: Korea Research Institute for Human Settlements
SPC: Geoscience Division, Pacific Community
SPREP: Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme
GIS: Geospatial Information Systems

［発表2016-2p］

海洋 GNSS ブイを用いた総合防災システムの開発

#加藤照之[1], 寺田幸博[2], 田所敬一[3], 二村彰[4], 豊嶋守夫[5], 山本伸一[5], 石井守[5],
津川卓也[5], 西岡未知[5], 滝沢賢一[5], 小司禎教[6], 岩崎匡宏[7], 越川尚清[7]
1: 東大地震研; 2: 高知工業高専;3:名大環境;4:弓削商船高専;5:情報通信研究機構
6:気象庁気象研;7:宇宙航空研究開発機構

はじめに

我々は20年近くGNSSブイを用いた津波計を開発してきた. 従来のシステムではRTK-GPS方式が用いられていることと, データ通信を地上無線によって伝送する方式を採用しており, ブイの設置位置が沿岸から20㎞以内程度と限界があったが, 精密単独測位法と衛星通信システムを導入することで, 遠洋でのGNSSブイの運用が可能となった. これを活用して, 海洋にGNSSブイアレイを展開すると広範な地球科学と防災に役立つことが期待される.

研究の現状と今後の予定

GNSSブイが期待される分野の一つにGNSS-音響を用いた海底地殻変動観測の連続化がある. この試みは既に東北大・JAMSTECによって実験が行われているが, せっかくGNSSを搭載しているブイであるから津波と海底地殻変動の両用が可能となれば費用対効果によい影響を及ぼすと考えられる.

GNSSブイの応用可能性はこれにとどまらない. すでに陸の観測網GEONETの応用として, GNSSから得られる天頂遅延量を気象予測の精度向上に役立てること, 電離層の伝搬経路上の総電子数TECが得られることから電離層のモニターなども行われてきた. GNSSブイが海洋のどこにでも設置できれば, これらの観測を海洋の領域に広げることが可能になる. このように広範な地球科学的応用及び防災に資するブイアレイを, 例えば日本が保有する広大なEEZ(排他的経済水域)に多数展開すれば, 関係する研究分野に計り知れない新しい展開を切り開くことができるのではないだろうか. このような考え方から, 我々は新たな研究計画を立案し, 科学研究費補助金を獲得して本年度より研究をスタートさせた.

講演ではこれまでのGNSSブイの開発の歴史を振り返りつつ, 目指している研究の内容や課題, および今後の予定について述べたい.

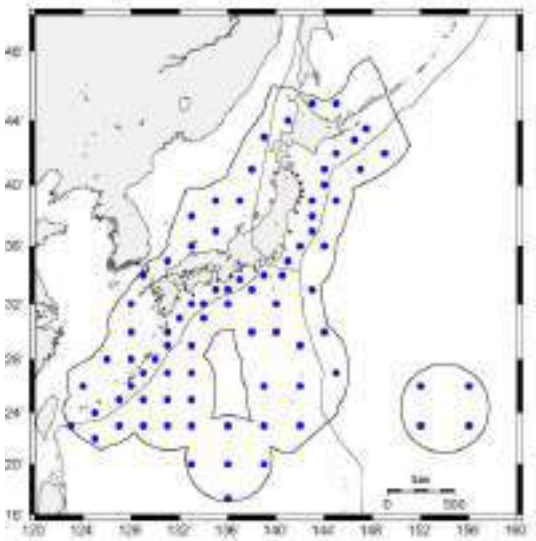


図 1: 西太平洋の GNSS ブイアレイ構想. EEZ 内に 81 点（青点）を仮置き. 小さな赤点は既設の GNSS ブイを用いた波浪観測網の観測点.

[発表2017-1p]

GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System

*Teruyuki Kato1, Yukihiro Terada[2], Keiichi Tadokoro[3], Akira Futamura[4], Morio Toyoshima[5], Shin-ichi Yamamoto[5], Mamoru Ishii[5], Takuya Tsugawa[5], Michi Nishioka[5], Kenichi Takizawa[5], Yoshinori Shoji[6], Tadahiro Iwasaki[7], Naoyuki Koshikawa[7]

1. ERi, Univ. Tokyo, 2. Nat. Inst. Tech., Kochi Col., 3. Nagoya Univ., 4. Nat. Inst. Tech., Yuge Col., 5. NICT, 6. MRI, JMA, 7. JAXA

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed in Japan and has been implemented as the national wave monitoring system since around 2008. Its record was used to update the tsunami warning at the 11 March 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, Japan. Yet, the buoys are placed only less than 20km from the coast and are not far enough for effective evacuation of people. We are thus trying to improve the system for putting the buoys much farther from the coast. For this purpose, we employ a new PPP-AR analysis algorithm, instead of conventional RTK-GPS, for positioning. In addition, we use a two-way satellite data transmission in contrast with current surface radio system. We have conducted a series of experiments using this new system in 2013 and 2014, using a buoy used for a fish bed located about 40km south of Cape Muroto, Shikoku, southwest Japan. GEONET data were used to obtain precise orbits and clocks of satellites. Then, the information was transferred to the GNSS buoy using a satellite communication system of the Japanese positioning satellite called Michibiki. The received information on the buoy were used for real-time PPP-AR analysis for every second. The obtained buoy position was then transmitted back to the ground base through a geostationary satellite called ETS-VIII. The received data was then disseminated to public through the internet. The success of these experiments indicate that the GNSS buoy can be placed at nearly anywhere in the ocean. Given this success, we made up a new research plan in which we test a commercially available satellite communication system and try to develop a new GPS-acoustic system for monitoring ocean bottom crustal movements nearly continuously. Moreover, we seek for further application of GNSS data for ionospheric and atmospheric researches. Deployment of such GNSS buoy system as an array in a wide ocean will be a powerful tool for monitoring geohazards in the region as well as for other basic research on earth sciences. The new project started in June 2016 and we are now designing a regional GNSS buoy array in the western Pacific. The first newly designed GNSS system is established at another buoy for fish bed, located about 40km south of Cape Ashizuri, southwest Japan. The system is now under testing. We are planning to implement a GNSS-acoustic system for monitoring crustal movements of the sea floor in early 2017 fiscal year at the same buoy.

Keywords: GNSS buoy, geohazard monitoring, tsunami, ocean bottom crustal movement, GNSS meteorology, ionosphere

［発表2017-2p］

IAG Symposium / IAG05. IAG Joint / G07. Global Geodetic Observing System (GGOS) and Earth monitoring services

GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System

* Prof. Teruyuki Kato [1)] , Prof. Yukihiro Terada [2)] , Prof. Keiichi Tadokoro [3)] , Prof. Akira Futamura [4)] , Dr. Morio Toyoshima [5)] , Mr. Shin-ichi Yamamoto [5)] , Dr. Mamoru Ishii [6)] , Dr. Takuya Tsugawa [6)] , Dr. Michi Nishioka [6)] , Dr. Kenichi Takizawa [7)] , Dr. Yoshinori Shoji [8)] , Dr. Tadahiro Iwasaki [9)] , Dr. Naoyuki Koshikawa [9)]
Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan [1)] , National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan [2)] , Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan [3)] , National Institute of Technology, Yuge College, Ehime, Japan [4)] , Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan [5)] , Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan [6)] , Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan [7)] , Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency [8)] , Satellite Applications and Operation Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Ibaraki, Japan [9)]

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed and is now operational as a national wave monitoring system since 2008 in Japan. It was used to update the tsunami warning at the 2011 Tohoku-oki tsunami, Japan. Yet, the buoys are placed less than 20km from the coast and are not far enough for effective evacuation. We are thus trying to improve the system for putting the buoys much farther from the coast. For this purpose, we employ a new PPP-AR analysis algorithm, instead of conventional RTK-GPS, for positioning. In addition, a two-way satellite data transmission in contrast with current surface radio system is introduced. We have conducted a series of experiments using the upgraded system in 2013 and 2014, using a buoy located about 40km south of Cape Muroto, southwest Japan. GEONET data were used to obtain precise orbits and clocks of satellites, and the information was sent to the buoy using a satellite. The information was used for real-time PPP-AR analysis for every second. The estimated buoy position was then sent back to the ground base through another satellite. The received data was disseminated to public through internet. These experiments indicate that the GNSS buoy can be placed at nearly anywhere in the ocean. Given this success, we made up a new research plan in which we test a commercially available satellite communication system and try to develop a new GNSS-acoustic system for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements. Moreover, we are trying further applications of GNSS data for ionospheric and atmospheric researches. A new project started in June 2016 which tries to establish a GNSS buoy array in the western Pacific, which will be a powerful tool for monitoring geohazards in the region. The newly designed GNSS system is deployed at another buoy located about 40km south of Cape Ashizuri, southwest Japan. The system is now under testing. We are adding a GNSS-acoustic system in 2017 to the same buoy.

[発表2017-3p]

34 新たな海洋総合防災 GNSS ブイアレイの開発

Development of a new ocean GNSS buoy array for a synthetic disaster mitigation

#加藤照之[1], 寺田幸博[2], 田所敬一[3], 衣笠菜月[3], 二村彰[4], 多田光男[4],
小司禎教[5], 瀬古弘[5], 石井守[6], 津川卓也[6], 西岡未知[6],
豊嶋守生[6], 山本伸一[6], 滝沢賢一[6], 越川尚清[7]
1: 東大地震研; 2: 高知工業高専; 3: 名大環境; 4: 弓削商船高専; 5: 気象研; 6: NICT; 7: JAXA
#T. Kato[1], Y. Terada[2], K. Tadokoro[3], N. Kinugasa[3], A. Futamura[4], M. Tada[4],
Y. Shoji[5], H. Seko[5], M. Ishii[6], T. Tsugawa[6], M. Nishioka[6],
M. Toyoshima[6], S. Yamamoto[6], M. Ishii[6], K. Takizawa[6], N. Koshikawa[7]
1: Earthquake Research Institute, the University of Tokyo;
2: National Institute of Technology, Kochi College;
3: Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University;
4: National Institute of Technology, Yuge College;
5: Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency;
6: National Institute of Information and Communications Technology;
7: Japan Aerospace Exploration Agency

はじめに

津波の早期検知をめざしたGNSSブイの研究は1997年頃より行ってきた. 当初はRTK-GPSと呼ばれる, 陸に基地局を置いて基線による相対測位の方式をとってきた. このため, 沿岸からの距離は20km以内に制限されていた. この方式は全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASに取り入れられ, 現在までに20基程度のブイが設置・稼働している. 2011年東北地方太平洋沖地震に際しては三陸沖に設置されたブイが津波を捉えたことから, 津波警報の更新に用いられたが, 有効性は十分でなく多くの人命が失われた. この教訓から, より沖合へのブイの展開が重要と考えられ, より効果的な津波早期警戒のためのブイの開発を行ってきた.

新しいブイシステムの開発

新たなブイは, より沖合への展開が必要であることから, 精密単独測位方式と衛星通信を用いたデータ伝送を取り入れることとした. 我々のシステムでは, 精密単独測位には日立造船がGPSSolutionsと共同開発したPPP-AR方式を採用し, それを組み込んだRTNetソフトウェアを使用することとした. また, データ伝送には, 本プロジェクト開始当初は準天頂衛星初号機(みちびき)と技術試験衛星VIII号(きく8号)を用いたが, きく8号が2016年に運用を停止したことから, 商用衛星に切り替えている.

また, もう一つの大きな挑戦として, GNSS-音響方式による海底地殻変動の連続的な観測に挑戦することとした. このためにブイと海底に音響の送受波装置を設置することとした. 現状ではまだ全体の装置の設置が完了していないが, 完成した際のデータの流れを略述すると下記のようになる.

① 地上局においてMADOCA等の暦・時刻補正パラメータとGEONETデータを取得し，PPP-AR用の補正情報を作成する.

② 補正情報を他の制御用データとともに衛星を経由してブイに伝送する.

③ ブイではGNSS観測のほか，音響による海底局との測距を行う. また，温度・気圧等のデータ取得も行う. これらの観測データをブイ上に置かれた小型計算機を用いて測位およびその他の処理を実施する.

④ ブイから衛星経由で地上局に測位データと海底地殻変動観測等の処理済みデータを伝送する.

⑤ 地上局において最終処理とチェックを行い．インターネット等を介して測位解等を公開する．音響測距データについては別途解析を行い，海底位置を算出して公開する.

以上のデータフローを下に示す．本プロジェクトは科研費基盤研究Sによって平成28年度から5年計画で実施している．平成28年度は，きく8号の運用中にブイと衛星の間の衛星通信に関する将来の衛星通信の仕様策定のために必要なデータを取得した．また，本年2月には海底地殻変動の予備調査としてブイ周辺でCTD観測を実施し，6月に海底局の設置と船舶を用いた音響測距観測を実施した．これらの船上観測や機器設置には練習船弓削丸を用いた．精密単独測位においては同時に天頂遅延量と電離層TECを同時に推定しており，これらをそれぞれの分野で活用することも検討している．これらが実現すれば，海洋にGNSSブイをアレイ展開することで総合的な防災への応用が可能となり，また新たな地球科学の発展が期待できる．現在，ブイでのGNSS観測が事情により停止しており，本年11月ころには復帰させたいと考えている.

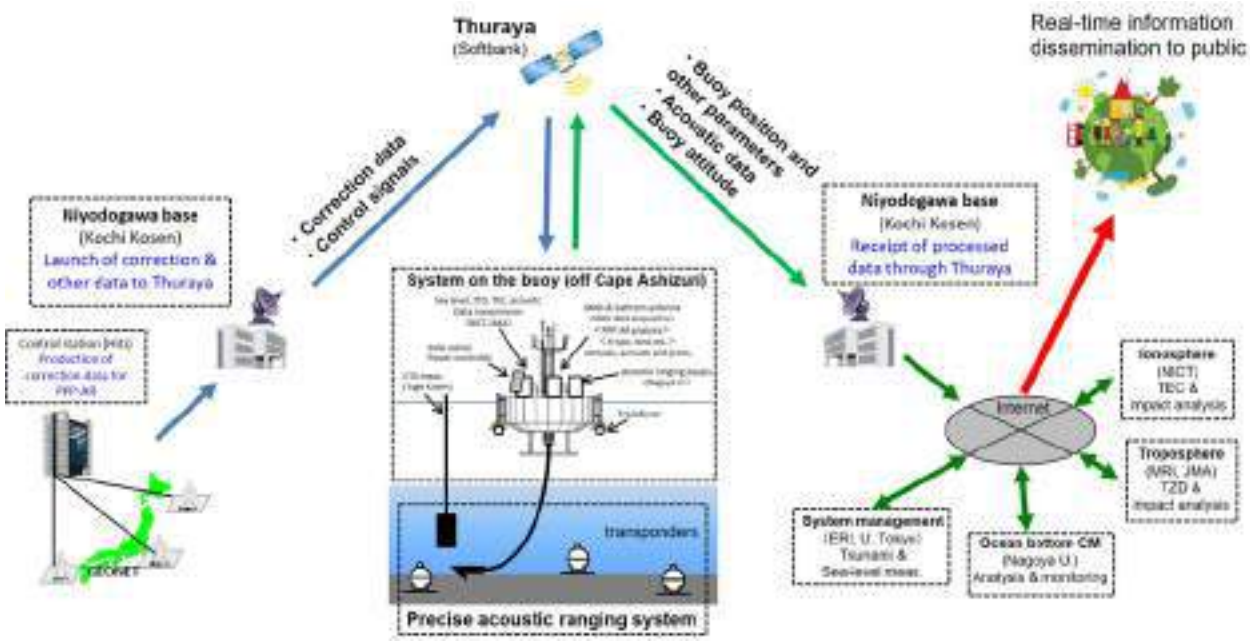


図 1: 新しい GNSS ブイシステムのデータフロー図

[発表2017-4p]

UNITED NATIONS
Office for Outer Space Affairs

Search

About Us · Our Work · Space4SDGs · Information for... · Events · Space Object Register · Documents · COPUOS 2022 ·

Our Work > International Committee on GNSS > ICG Annual Meetings

Twelfth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), Kyoto, Japan, 3 - 7 December 2017

AVAILABLE ONLINE RESOURCES

- Meeting Agenda
- ICG Meetings web-page
- Nineteenth Meeting of the Providers' Forum , 2 and 6 December 2017, Kyoto, Japan
- Working Groups web-page

ONLINE PRESENTATIONS

Note: The views expressed in the presentations and papers below are those of the authors and do not reflect the policies or views of the United Nations Office for Outer Space Affairs. The presentations and papers are provided solely for informational purposes.

Providers' Systems and Service Updates

Status Update on the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) - *Go TAKIZAWA, QZSS Strategy Office, national Space Policy Secretariat, Japan*

Global Positioning System (GPS) Programme and Advisory Board Update - *Harold MARTIN, National Coordination Office for Space Based Positioning Navigation and Timing, and John BETZ, United States Positioning, Navigation and Timing Advisory Board Representative, United States of America*

Global Navigation Satellite System (GLONASS) Status Update - *Ivan REVNIVYKH, Roscosmos Space Corporation, Russian Federation*

Status Update on the European Satellite Navigation System (GALILEO) - *Christoph KAUTZ, European Commission*

Update on the BeiDou Satellite Navigation System - *JiaDong MA, China Satellite Navigation Office, China*

Presentations by Members, Associate Members, Observers and Invited Observers on Matters of Interest to the ICG

GNSS contribution to the new ITRF - *Chris RIZOS, International Association of Geodesy (IAG)*

United Nations Global Geospatial Information Management (UN-GGIM) Subcommittee on Geodesy - *Mikael LILJE, International Federation of Surveyors (FIG)*

Civil GPS Service Interface Committee - *Russell HOLMES, Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC)*

The Cyber threat impact on aviation - *Bernard SMITH, Federation Aeronautique Internationale*

Perspectives of GNSS applications Infoty: Rail/Road synergy as selected example - *Alberto TUCCI and Alessandro NERI, Italian Space Agency*

Fostering GNSS Science Galileo satellite metrology - *Javier VENTURA-TRAVESET and Daniel BLONSKI, European Space Agency (ESA)*

Update on ICG-IVG-B achievements on interoperable GNSS Space Service Volume (SSV) - *Werner ENDEMLE, Stefan WALLNER, European Space Agency*

EUREF Activities - *Markku POUTANEN, IAG Reference Frame Sub-commission for Europe (EUREF)*

GNSS activities by the Joint Research Centre of the European Commission - *Matteo PAONNI, Joint Research Centre, European Commission*

GNSS: The systems providers versus the non-providers - *Rafaat RASHAD, Arab Institute of Navigation (AIN)*

Our Work
Secretariat of COPUOS
Programme on Space Applications
UN-SPIDER
International Committee on GNSS
Overview
Members
ICG Terms of Reference
Providers' Forum
Working Groups
ICG Annual Meetings
Current Meeting
Past Meetings
ICG Programme on GNSS Applications
Resources
ICG Documents
Other Events
ICG Timeline
UN Space
UNISPACE+50
Space Law
Benefits of Space
Space4Health
Access to Space for All
Space for Persons with Disabilities
Space4Youth
Space4Water
Space4Women
World Space Forum
Worldwide Space Agencies
Capacity Building Activities

Australia's Programme on GNSS – John DAWSON, Australia

Applications and Experts Seminar

Water vapor analysis over the ocean using shipborne GNSS measurements for the mitigation of weather disaster - Yoshinori SHOJI, Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency, Japan

Variations of water vapor observed with a hyper-dense GNSS network - Toshiaka TSUDA, Research Organization of Information and Systems (ROIS), Japan

Earth Remote Sensing using surface-reflected GNSS signals - Steve LOWE, JPL/Caltech, United States

Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazards monitoring system - Teruyuki KATO, earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

How the real-time GNSS can contribute to near field tsunami early warning ? - Yusaku OHTA, Research Centre for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan

Real-time GNSS earthquake and tsunami early warning - Gerald BAWDEN, National Aeronautics and Space Administration, United States

Comprehensive application of RNSS + RDSS - Gang HU, BDStar Navigation, China

Early Warning Services via GNSS signals - Frederic DOMPS, European Commission and Yasuhiko KAWAZU, Cabinet Office, Japan

Latest

[illegible]

Links

VIC Online

UNIS Vienna

UN-SPIDER

United Nations

Contact us

United Nations Office for Outer Space Affairs

United Nations Office at Vienna
Vienna International Centre,
Wagramerstrasse 5,
A-1220 Vienna
AUSTRIA

Telephone: +43-1-260 60 4950
Fax: +43-1-260 60 5830

Send us a message!

GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望
Present status and future scope of the GNSS buoy array project for synthetic disaster mitigation

*加藤 照之[1]
*Teruyuki Kato[1]

1. 東京大学地震研究所
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

我々は20年以上，GNSSブイを開発してきた．本講演では最近のGNSSブイ開発の現状と将来の可能性，また見えてきた課題などについて報告する．当初はRTK-GPSを用いたいわゆるGPS津波計として開発してきた．このシステムで数㎝程度の波高の津波を観測することに成功して実績をあげ，波浪観測のための観測網であるNOWPHASに組み込まれる形で実用化することができた．また，気象庁の津波観測の一部としても採用された．2011年東北地方太平洋沖地震による津波も沿岸到達前に捉えられ，津波警報の更新に生かされたが，リードタイムが短かったため効果は十分ではなく，結果として多くの人命が津波によって失われた．このことから，津波をより早く検知するために，いくつかの改善を行っている．当初のシステムでは基線を用いた相対測位を実施するため，沿岸からの距離が約20㎞未満と短かった．そこで，相対測位によらない精密単独測位方式を導入することとした．また，データの送信を，従来の地上波を用いた無線から，衛星通信に切り替えることとした．現在このシステムでの稼働実験を行っている．このシステムが順調に稼働することとなれば，GNSSブイの応用範囲は格段に広くなる．まずは，現在船舶を用いて実施しているGNSS－音響方式による海底測位を，ブイによって置き換えることにより，より高頻度の観測が可能となる．これによって海底地殻変動をこれまでになく詳細にとらえられることとなり，例えば海溝付近で短期的スローイベントが発生するようなことがあれば，そのような現象も捉えられると期待される．GNSS観測を陸から遠い海洋で実施することにより，気象や電離層の研究に新たなデータが提供されると共に各種防災のための応用が可能となる．このようなGNSSブイを例えば日本の排他的経済水域のような領域にアレイとして実装することにより，総合的な防災ブイアレイとして機能することになろう．また，その他の各種センサーを搭載することで海洋学等にも寄与することができると考えられる．なお，まだこの計画は構想段階であり，さまざまな技術的課題や運用上の問題を解決する必要があることも付け加えておく必要がある．技術的課題としては，まずは安定したリアルタイム高速多チャンネルの衛星通信が必要であり，できれば専用の通信衛星が必要である．また，「みちびき」を利用した衛星の精密暦配信を利用した精密単独測位の精度評価，深海に設置するブイ缶体の耐久性，電源確保の問題など，多くの課題がある．また，このような大規模な海洋アレイをどの機関がどのような体制で運用し，また必要な資金を確保していくかなどについても多面的に検討していかなくてはならない．こうした問題を少しずつクリアしていくことにより，いつの日か日本周辺海域にGNSSブイアレイが構築される日が来ることを期待したい．

キーワード：GNSS ブイ、ブイアレイ、海底地殻変動観測
Keywords: GNSS buoy, buoy array, ocean bottom crustal movement observation

©2018. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

SCG67-06 日本地球惑星科学連合2018年大会

海洋GNSSブイを活用した海底地殻変動観測システムの開発
Development of observation system for ocean bottom crustal deformation measurement utilizing marine GNSS buoy

*田所 敬一[1]、衣笠 菜月[1]、稲垣 駿[1]、二村 彰[2]、加藤 照之[3]、寺田 幸博[4]、松廣 健二郎[1]
*Keiichi Tadokoro[1], Natsuki Kinugasa[1], Shun Inagaki[1], Akira Futamura[2], Teruyuki Kato[3], Yukihiro Terada[4], Kenjiro Matsuhiro[1]

1. 名古屋大学、2. 弓削商船高等専門学校、3. 東京大学地震研究所、4. 高知工業高等専門学校
1. Nagoya University, 2. National Institute of Technology, Yuge College, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Kochi National College of Technology

GNSS/音響方式による海底地殻変動観測の課題のひとつは、時間分解能の向上である。これは、海上局として船舶を用いているためであり、時間分解能の向上のためには船舶に替わる海上プラットフォームが必要である。そこで、平成28年度から科学研究費補助金の基盤研究（Ｓ）の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」（研究代表者：加藤照之）において、海洋GNSSブイの機能拡張の一環として係留ブイを用いた海底地殻変動観測システムの開発を行っている。

ブイにはGNSS測位アンテナと受信機のほかに、音響測距海上装置と送受波センサ、ジャイロセンサを搭載する。これらの機器による測定データは、アラブ首長国連邦のThuraya Telecommunications Companyが提供している衛星電話サービスを利用して高知県仁淀川町の地上局に送信され、サーバに蓄積される。衛星経由の通信容量の削減のため、送信する音響測距データは、１測距あたり64キロバイトの信号波形そのものではなく、同60バイトの信号到達時刻に関する数値のみとした。このために、音響信号到達時刻は、基本的には受信波形と基準波形との相互相関係数が最大値をとる時刻として認識される。ところが、海面反射波の到達時刻での相互相関係数が最大となる場合が少なくないため、複数の相互相関係数のピークを抽出し、S/N比も併用して正しい直達波の到達時刻を自動的に判定するプログラムを作成した。観測船から行った音響測距波形にこの方法を適用して試験を行ったところ、正しい直達波到達時刻が99%以上の割合で判定できた。

本研究プロジェクトでは、海上プラットフォームとして足摺岬の南東約40kmに係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイを借用することとしており、このブイの設置地点に３台の海底局（トランスポンダ）からなる一辺約1400mの正三角形状の海底局アレイを設置した。ブイからの連続的音響測距の準備として、2017年6月6日と9日に弓削商船高専の「弓削丸」で、9月20日に海洋エンジニアリング（株）の「第三開洋丸」で現行の観測・解析方法によって海底局アレイ形状（各海底局位置）の決定を行った。各観測日の音響測距データ数は、それぞれ2000個程度であった。本海域は黒潮強流域に近く、海中音速の水平勾配が大きいが、現行の解析方法でもこの水平勾配は良く推定されており、3回の位置決定で三角形状の海底局アレイの各頂点の座標が水平各成分とも2～3cmの誤差で決定できた。

平成30年度以降に黒潮牧場18号ブイからの連続的音響測距を行うとともに、観測船からも並行して音響測距を行い、ブイ方式の観測精度の評価を行う予定である。

©2018. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

SCG67-P06 日本地球惑星科学連合2018年大会

海洋GNSSブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発

Development of acoustic signal processing unit for continuous observation of ocean bottom crustal deformation using marine GNSS buoy

*衣笠 菜月[1]、田所 敬一[1]、稲垣 駿[1]、寺田 幸博[3]、二村 彰[4]、加藤 照之[2]
*Natsuki Kinugasa[1], Keiichi Tadokoro[1], Shun Inagaki[1], Yukihiro Terada[3], Akira Futamura[4], Teruyuki Kato[2]

1. 名古屋大学環境学研究科、2. 東京大学地震研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 弓削商船高等専門学校
1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. National Institute of Technology, Kochi College, 4. National Institute of Technology, Yuge College

GNSS/音響方式 (global navigation satellite system) による海底地殻変動観測とは, 海底に固定された海底局座標の長期的な変化を観察することである. 海底局座標は海上局と海底局間を伝播する音響信号の往復走時から推定される. 船による観測は年間数回が限度で時間分解能が低いことが, 沈み込むプレート境界の固着強度の時間変化をモニタリングする上での課題となっている. 連続観測ができるようになれば, プレート境界のスロースリップイベントの機構解明につながると期待されている. そこで, 我々は海洋ブイを活用することで海底地殻変動連続観測の実現を目指している.

平成28年度に始動した科学研究費補助金の基盤研究 (S) の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」（研究代表者：加藤照之）では, 高知県足摺沖に係留されているブイを利用し開発に取り組んでいる. ブイにGNSSアンテナと受信機, 音響測距装置, 衛星通信装置を搭載し, 音響測距結果と精密単独測位によって得られるブイの座標を, 衛星電話サービスを利用して地上局に伝送する計画である. 音響測距システムは音響測距装置と信号処理装置から構成される. 信号処理装置に音響信号が入力されると相関処理を行い, 信号送信時刻や往復走時などを含むメッセージを衛星通信装置に出力する仕様となっている.

往復走時を正確に得るには, 受信信号とレプリカ信号との相関処理を行う必要がある. 音響信号が海面で反射した場合, 相関ピークが複数個出現する. これまでの船による観測でも直接波よりも海面反射波の方が, 相関係数が大きくなる場合が見られている. 直接波が先に到達し, 後から反射波が到達するため, この場合, 最大相関ピークより前に出現するピークの中に直接波によるものが紛れていることになる. また, 直接波が到来したタイミングで受信信号の振幅が急激に大きくなると考えられる. 以上のことから, 相関係数の値と受信信号の振幅の2つの指標から直接波到来を判定することを提案する. 評価指標に閾値を設けることで, 直接波による相関ピークを自動的に認識し, 正確な往復走時が得られると考えた. 提案するアルゴリズムでは, 相関の高い3個のピークを到達時刻が最も早いものから順番に, それが直接波によるものなのかを条件をもとに判定していくことにした. 2017年6月と9月に実施した高知県足摺沖の船による観測データを用いて, 目視で直接波のピークを判定し, 閾値の検討を行った. 当該海域での直接波の判定条件を, 相関係数の値が0.25以上でかつ信号対雑音比が5.0以上とすることにした. 直接波判定の精度は99% 以上が見込まれる.

©2018. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

ブイは太陽光発電を採用しているため,電力供給が不安定であることが予想される.そこで,電源復旧後に信号処理装置から音響測距装置に計測開始コマンドを送り,自動で再起動する機能を持たせて停電時の対策を 行った.開発した音響測距システムをブイに設置する前に,2017年10月にブ_ルにて一連の動作確認を行った. 相関結果の衛星通信ユニットへの伝送も問題なくなされ,1週間途切れることなく連続的に運用できることを確認した. 平成30年度中に足摺岬沖のブイに機材を設置し, 連続観測の安定的運用を目指す.

キーワード：海底地殻変動、GPS/音響方式、海洋GNSSブイ
Keywords: Ocean bottom crustal deformation, GPS/Acoustic method, Marine GNSS buoy

©2018. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール,
2018年10月17日

044 係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験

Acoustic ranging test for continuous measurement of seafloor crustal deformation using mooring buoy

#田所敬一[1], 衣笠菜月[1], 加藤照之[2], 寺田幸博[3], 松廣健二郎[4]

1: 名古屋大学環境学研究科; 2: 神奈川県温泉地学研究所; 3: 高知工業高等専門学校;
4: 名古屋大学全学技術センター

1: Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University;
2: Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government;
3: National Institute of Technology, Kochi College;
4: Technical Center of Nagoya University

はじめに

GNSS/音響方式の海底地殻変動観測結果は、地震時の地殻変動の検出やプレート間の固着状態の推定など、地震サイクルにおける様々な研究に対して大きな成果を挙げ続けている。この方式の当面の技術的な課題は、連続的観測の実施による時間分解能の向上であり、そのためには、船舶の代替となる無人海上プラットフォームが必要である。そこで、平成28年度から科学研究費補助金の基盤研究(S)の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」(研究代表者:加藤照之)において、海洋GNSSブイの機能拡張の一環として係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測システムの開発を行っている。本講演では、ブイ上から実施した音響測距試験の結果について報告する。

ブイを用いた海底地殻変動連続観測システム

本研究プロジェクトでは、足摺岬の南東32kmに係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイを海上プラットフォームとして借用し、システムの構築と試験を実施している。GNSSアンテナはブイの頭頂部に、トランスデューサはブイの外板に固定した長さ約3.6mのポールの先端(海面下約3m)にそれぞれ取り付けた。GNSS受信機、音響測距装置、ジャイロセンサは、ブイの甲板上に固定された防水箱に格納した。これらの機器への給電は、135Wの太陽電池パネル4台に接続された2V−300Ahの蓄電池12個から行う。ブイの座標は、GNSS受信機内で1秒ごとにPPP-AR測位法によって決定する。

音響測距海底局は、ブイの予想漂流範囲を囲むように3台を2017年6月5日に弓削商船高等専門学校の「弓削丸」で設置した。音響測距は、内部波による海中音速構造の時間変化の周期よりも充分短い3分間隔で順次3つの海底局に対して実施することとした。

ブイ上に設置した機器による測定データは、アラブ首長国連邦のThuraya Telecommunications Companyが提供している衛星通信サービスを利用して送信し、高知県仁淀川町の地上局サーバに収録する。測距信号の生波形は、後処理も可能なようにブイ上の音響測距装置内に保存することとした。

連続的音響測距試験

連続的音響測距試験は、2018年3月28日から3月31日までと6月2日から7月12日までの計45日間にわたって実施した。この期間中、音響測距は継続して実施することができた。音響測距の回数は、3月が1485回、6月が19158回の計20643回であった。これらのうち海底局からの返信がなかった測距を除くと、ブイで収録された波形は3月が1295個、6月が15111個の計16406個であった。

前述の通り、音響測距データを含むブイでの測定データは衛星通信によって陸へ送信しているが、予期せぬ通信ポートの切断が度々発生したため、地上局サーバへ送信されたデータ数はブイで収録された波形のわずか17%（2841個）に留まった。

音響測距信号の自動読取り

測距波形の生データの容量は64 KB（ヘッダ含む）であり、これをそのまま衛星経由で送信すると莫大な通信コストがかかる。そこで、測距信号の到達時刻に関する情報のみを衛星経由で送信することとし、通信容量を60バイト（約1,000分の1）に圧縮した。

音響測距海底局は、ブイから送信された測距信号を収録し、そのまま返信する。そのため、測距信号のブイへの到着時刻は、音響装置内で生成した信号波形である基準波形との相互相関係数が最大になる時刻として認識することができる。音響測距に必要となるのは海底局からの直達波の走時であるが、測距信号が14.322 msの信号長を有するM系列信号であるため、これまでの船からの音響測距の経験上、この時間内に反射波等の後続波が直達波に重なった場合に、後続波の到着時刻で相互相関係数が最大になる場合がある。そのため、海面やブイ本体からの反射波を防ぐ目的で、吸音材を内面に貼り付けた反射防止カバーをトランスデューサの上方と側面を覆うように取り付けたところ、海面やブイ本体からの反射波の混入は防ぐことができた。しかし、測距波形には直達波と0.3 ms（往復経路差45cm相当）前後の走時差をもつ後続波が散見され、この後続波の到着時刻で相互相関係数が最大になるケースが見られた。往復経路差をもとにすると、この後続波は反射防止カバーからの反射波であると推察される。このことから、カバーに取り付けた吸音材がその効果を充分に発揮しなかったと考えられる。

そこで、反射波の到着時刻で相互相関係数が最大になっても極力正しい直達波の到着時刻を自動で認識できるアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムは、相互相関係数のピークを3つ抽出し、各ピーク時刻において直達波が到着しているかを相互相関係数のピーク値と信号のエネルギー比（当該時刻の前後0.39ms間の二乗平均振幅の比）に閾値を設けて判定するものである。これらの閾値は、ブイ上の音響測距装置内に保存した測距信号の生波形を用いて設定した。設定した閾値をもとに自動で認識した直達波の到着時刻と目視で認識した直達波の到着時刻を比較したところ、直達波の到着時刻の認識間違いは全体の0.8%（130個）であった。これを1日あたりに換算すると4個程度である。このアルゴリズムは相互相関係数のピークを基にしているため、特に直達波と反射波の往復行路差が極めて小さいために反射波の相互相関関数のサイドローブが直達波の相互相関係数の最大値に被っている場合には、原理的に直達波の到着時刻が認識できないという問題点がある。したがって、今後、アルゴリズムの高度化が不可欠である。

測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール,
2018年10月17日

045 ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発

Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy

#衣笠菜月[1], 田所敬一[1], 二村 彰[2], 寺田幸博[3], 加藤照之[4]

1: 名古屋大学大学院環境学研究科; 2: 弓削商船高等専門学校; 3: 高知工業高等専門学校;
4: 神奈川県温泉地学研究所

#Natsuki Kin ugasa, Keiichi Tadokoro[1], AkiraFutamura[2], Yukihiro Terada[3], Teruyuki Kato[4]

1: Graduate School of Environments, Nagoya University;
2: National Institute of Technology, Yuge College;
3: National Institute of Technology, Kochi College;
4: Hot Springs Research Institute of Kanagawa

研究背景と研究目的

GNSS (global navigation satellite sy stem)/ 音響方式による海底地殻変動観測では,海底に固定された海底局の位置の長期的な変化を観察する. 海底局位置は海上局と海底局間を伝播する音響信号の伝播時間から推定できる. 船舶による観測は年間数回程度しか行えないため, プレート境界の固着強度の時間変化をモニタリングするには時間分解能が低い. そこで我々は海洋ブイを用いて海底地殻変動連続観測の実現を目指し, 科学研究費補助金の基盤研究 (S) の研究プロジェクト「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」を始動させた.

高知県足摺沖に係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイに GNSS アンテナと受信機, ジャイロ計, 音響測距装置を搭載し, 衛星電話サービスを利用して音響測距結果とブイの座標と姿勢データを地上局に伝送している. ブイの座標は日立造船が開発した PPP-AR 方式により測位される. 船による観測と比べて音響測距の間隔を長くしていることや, リアルタイム測位のためブイの位置の測位精度が低いことから, 海底局位置の推定がより難しくなると予想される. また音響測距と並行して UCTD (underway conducti vity -temperature-depth)観測が行えないため, 古い海中音速プロファイルを使用しなければならない. 本研究は船観測と同等の精度で海底地殻変動解析を実現することを目標に, 解析手法の開発に取り組んでいる.

海底地殻変動解析

海中音速の水平構造に一定の勾配があると仮定し, また音響信号は直線的に伝播すると仮定すると, 海上局と海底局間の片道走時 T は次式で表現される.

$$T = |\boldsymbol{P}|C(t)\bar{S}_0 + \frac{1}{2}|\boldsymbol{P}|\{(r_x + u_x)S_x + (r_y + u_y)S_y\}$$

$\boldsymbol{r} = (r_x, r_y, r_z)$: ブイの位置 (m), $\boldsymbol{u} = (u_x, u_y, u_z)$: 海底局の位置 (m), $\bar{S}_0$: アレイ重心におけるスローネスの平均値 (s/m), $C(t)$: スローネスの時間変化係数, S_x, S_y: スローネスの水平勾配 (s/m/m), $\boldsymbol{P} =$

$\boldsymbol{r-u}$. このときブイと海底局の位置は海底局アレイの重心を基準とした ENU (east-north-up) 座標系で表現する.

本研究では2段階の解析プロセスを経て海底地殻変動を推定する. (1) 船舶による観測データを使用した海底局アレイ形状推定; (2) ブイによる観測データを使用した地殻変動量推定. 海底局はアレイ形状を保ったまま地殻変動すると仮定し, 最小二乗推定を再帰的に行うことで未知パラメータの推定を行う.

結果と考察

2017年6月に足摺沖約 40 kmの係留ブイを取り囲むようにして3個の海底局の設置を行った. 2017年の6月及び9月と2018年の6月に弓削商船高専の弓削丸と海洋エンジニアリングの第三開洋丸を使用して音響測距観測を実施した. ブイでの本格的な音響測距観測は2018年6月から開始し, 同6月3日には船舶とブイによる並行観測を実施した.

船舶による観測データを使用し推定した海底局アレイ形状を図1に示す. 海底局座標の推定標準誤差約 1 cm 程度で決定された. ブイによる地殻変動解析を船と同等の精度で実現するには, より正確にアレイ形状を決定することが必要不可欠である. 今後はブイによる観測データを長期間蓄積し, 解析手法の評価を行う.

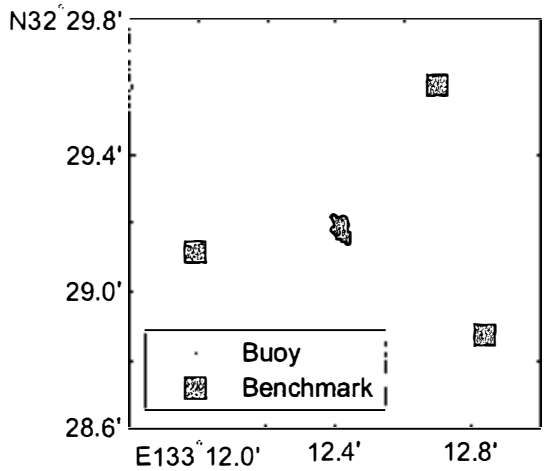


図1: 係留ブイと海底局の座標.
ブイの位置は2018年6月2日から10日の期間を示す.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H06310 の助成を受けたものです.

AGU 100 FALL MEETING
Washington, D.C. | 10-14 Dec 2018

T41F-0361: Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement

Thursday, 13 December 2018
08:00 - 12:20
Walter E Washington Convention Center - Hall A-C (Poster Hall)

- AGU_B0.pdf
  ePoster

The next challenge of the measurement system of the seafloor crustal deformation through the GNSS/acoustic method is the continuous measurement of seafloor crustal deformation using this method. Then we started to develop a measurement system on a buoymoored 32 km off Cape Ashizuri, Japan, named as Kuroshio-Bokujyo buoy No. 18, operated by Kochi prefecture.An acoustic transducer was fixed at about 3 m under the sea surface with a pole mounted on the buoy.Three ocean bottom acoustic transponders had been installed around the moored point of the buoy. The acoustic signals are sequentially transmitted to these three transponders every three minutes. The recorded data on the buoy are transmitted to a ground base station through a commercial communication satellite operated by Thuraya Telecommunications Company.

We performed a test for the continuous acoustic ranging between the buoy and the ocean bottom transponders from March 28 to 31 and June 2 to July 12, 2018. We succeded to perform the acoustic ranging throughout the above periods. The acoustic signals were transmitted 20643 times in total, and the buoy-mounted acoustic ranging unit received 16406 signals from the ocean bottom transponders. However, the acoustic data sent to the ground base station was only 17 % because of unexpected trouble of the communication port of the satellite modem.

The arrival time of the acoustic signal is usually recognized by the cross-correlation computation with the transmitted waveform. When the acoustic signal is contaminated by high amplitude reflected waves from the sea-surface and/or the buoy's body, the cross-correlation coefficient attains maximum at the timing of the reflected wave arrival; then we set an antireflection cover to the transducer. Nevertheless, subsequent waves with the maximum cross-correlation coefficient are found after about 0.3 ms from the direct wave. These subsequent waves are arisen from the reflection at the antireflection cover. We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio (the ratio of the squared amplitudes preceding and following a test point). The program successfully picked the correct direct wave onset for 99 % of the recorded waveforms.

First Author

Keiichi Tadokoro
Nagoya University

Authors

Natsuki Kinugasa
Nagoya University

Teruyuki Kato
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

Yukihiro Terada
National Institute of Technology, Kochi College

Day: Thursday, 13 December 2018

AGU 100 FALL MEETING
Washington, D.C. | 10-14 Dec 2018

T41F-0362: Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy

Thursday, 13 December 2018
08:00 - 12:20
Walter E Washington Convention Center - Hall A-C (Poster Hall)

Observation for ocean bottom crustal deformation by global navigation satellite system (GNSS)/acoustic method is monitoring long-term movements of transponders fixed on seafloor, which can be estimated from the travel time of acoustic signal between onboard transducer and transponder. Observation method using vessel and its analysis method have been established. However, it is incapable of monitoring the temporal variation of fixing strength of plate boundary because observation can be performed only several times a year.

We aim to realize continuous observation by using marine buoy, which helps to clarify the mechanisms of slow slip events in more detailed. The Grant-in-Aid for Scientific Research (S) project "A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements" which has been started from 2016 utilizes the mooring buoy off the coast of Ashizuri, Japan. Observation data are transferred from buoy to ground station using mobile satellite service. In comparison with observation using vessel, it has difficulties in analysis caused by: low frequency of acoustic ranging; lower GNSS positioning precision; and use of old sound speed profile. Our purpose of this work is to develop analysis method which reduces their influences to the estimation of crustal movements and achieves precision equivalent to that of observation using vessel.

Our strategies to estimate ocean bottom crustal deformation precisely includes following steps: 1) estimating shape of array of transponders using data observed by vessel; and 2) estimating displacement vector using data observed by buoy assuming that the array moves while keeping its shape determined in step 1. In both steps, we propose estimating both temporal variation and horizontal gradient of sound speed in ocean for highly precise estimation.

We used data obtained by six times observations during the period from 2017 to estimate array shape. The estimated standard errors of coordinates of transponders were about 1 cm. We discovered that it is essential to have correct array shape and position of buoy for highly precise estimation of displacement. We just started observing by buoy since June in 2018 and then will evaluate our proposed analysis method by using long-term accumulated data.

First Author

Natsuki Kinugasa
Nagoya University

Authors

Keiichi Tadokoro
Nagoya Univ.

Teruyuki Kato
The University of Tokyo

Yukihiro Terada
National Institute of Technology, Kochi College

Akira Futamura
National Institute of Technology, Yuge College

Day: Thursday, 13 December 2018

［発表2019-1p］

Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement

Yoshinori Shoji
(Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency, yshoji@mri-jma.go.jp)
Teruyuki Kato
(Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government,
teru@onken.odawara.kanagawa.jp)
Yukihiro Terada
(Natinal Institute of Technology, Kochi College, terada@ce.kochi-ct.ac.jp)
Toshitaka Tsuda
(Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto Unversity, tsuda@rish.kyoto-u.ac.jp)
Masanori Yabuki
(Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto University, yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp)

Japan is an island country located in the easternmost of East Asia and influenced by the East Asian monsoon. Moist air inflow coming from ocean often causes heavy rainfall (Kato 2006, Tsuguchi and Kato 2014). In early July 2018, extreme rainfall events occurred in western Japan to the Tokai region. During the event (28 June – 8 July), more than 1,000 mm precipitation was recorded in several regions with at the maximum of 1,852.5 mm. A press release of Japan Meteorological Agency (JMA) (JMA, 2018) attributes the event to concentration of two massively moist air streams over western Japan and persistent upward flow. With the increase of extreme precipitation events, water vapor monitoring over the ocean is one of the important issues in Japan. Shoji et al. 2009 showed improvement of a heavy rainfall prediction by assimilating precipitable water vapor (PWV) estimated at Global Positioning System (GPS) observation network in East Asia as well as Japan's nationwide dense GPS network. The result insists the importance of water vapor monitoring in upstream.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, −0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate).

Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring.

The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the "BAIU" seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that, compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA's objective analysis is larger over the ocean.

Taking these results, in the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA's research vessel).

Reference

Japan Meteorological Agency, 2018: Primary Factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the Subsequent Heatwave in Japan from Mid-July Onward, press release, available at http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/press_20180822.pdf (accessed on 2 December, 2018).

Kato, T., 2006: Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over northern Kyushu, Japan on 29 June 1999, J. Meteor. Soc. Japan, 84, 129-153.

Kato T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa,A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018:Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, Journal of Disaster Research Vol.13 No.3, 460-471.

Shoji, Y., Kunii, M., Saito, K. (2009) Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data fora Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan, SOLA 5: 045–048.

Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. Earth Planets Space. 69, 153.

Tsuguti, H. and T. Kato, 2014: Contributing Factors of the Heavy Rainfall Event at Amami-Oshima Island, Japan, on 20 October 2010, J. Meteor. Soc. Japan, 92, 163-183.

Acknowledgements

The shipborne GNSS campaign observation was funded by a research grant for Mission Research for Sustainable Humanosphere from the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) at Kyoto University, "Study on accuracy improvement of shipborne GNSS water vapor measurement."

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310.

A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, Milan, Italy, 13-17 May 2019

European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, 13-17 May 2019,
MiCo - Milano Congressi, Milan, Italy

Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction

Shoji Y. [1] , Tsuda T. [2] , Kato T. [3] ,Terada Y. [4] , Yabuki M. [2]

[1] Meteorological Research Institute, Tsukuba Ibaraki, Japan
[2] Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto Unversity, Uji Kyoto, Japan
[3] Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government, Odawara Kanagawa, Japan
[4] National Institute of Technology, Kochi College, Kochi Kochi, Japan

Water vapor plays a crucial role for the development of hazardous cumulus convection. Via the condensation process, moisture releases latent heat which becomes an energy source for the rapid development of cumulus convection. Because most of atmospheric water vapor concentrates in lower troposphere, monitoring of water vapor in low-level has received a lot of attention. For the island country like Japan, low-level moisture often come from ocean. Several studies of hazardous weather events have revealed that low-level moisture from the ocean plays an essential role in such weather cases (Kato and Aranami 2005, Shoji et al. 2009). However, currently, there is no continuous water vapor sensor which can observe water vapor amount over the ocean.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, −0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate). Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring. The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the “BAIU” seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that,

compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA's objective analysis is larger over the ocean.

Taking these results, in the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA's research vessel).

Reference

Kato, T., Aranami, K. (2005) Formation Factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving Model, SOLA 1: 1–4. doi:10.2151/sola.2005-001

Kato T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa,A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018:Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, Journal of Disaster Research Vol.13 No.3, 460-471.

Shoji, Y., Kunii, M., Saito, K. (2009) Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data fora Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan, SOLA 5: 045–048.

Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. Earth Planets Space. 69, 153.

Acknowledgements

The shipborne GNSS campaign observation was funded by a research grant for Mission Research for Sustainable Humanosphere from the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) at Kyoto University, "Study on accuracy improvement of shipborne GNSS water vapor measurement."

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310.

A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

［発表2019-3p］

気象学会2019年春季大会，東京，
2019年5月15-19日

船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験（その1）

*瀬古弘（気象研究所・海洋研究開発機構）、小泉耕・小司禎教（気象研究所）
加藤照之（神奈川県温泉地学研究所）

1. はじめに 近年、毎年のように豪雨が発生し、豪雨の予測精度向上は喫緊の課題である。たとえば、平成 29 年九州北部豪雨では東シナ海の下層の水蒸気量のわずかな差が予測降水量に大きく影響を及ぼしていたことが示唆されている。海上の水蒸気量は降水量に大きく影響を及ぼすがデータ数は少ないため、船舶等を用いた海洋上の観測が必要である。ここでは、船舶やブイで観測した GNSS で観測した可降水量をデータ同化した結果について報告する。

2. 船舶 GNSS の同化実験の結果 2017 年 6 月 5 日から 9 日に低気圧が西日本を通過した。この期間に GNSS を設置した凌風丸が九州の西から奄美大島へ、さらに四国沖に移動した。その期間の船舶 GNSS データ（Shoji et al 2016, 2017）を、気象研に移植したメソ NAPEX を用いて同化すると、凌風丸が東シナ海を南下しているときの 850hPa の T-Td 解析値の差（船舶 GNSS 同化あり－同化なし）は、凌風丸の通過位置で水蒸気量が大きく変化し、その領域が時間とともに九州に接近していた（図 1）。この事例では降水域に大きな差は無いが、水蒸気量のインクリメントは期待通りの様相を示した。

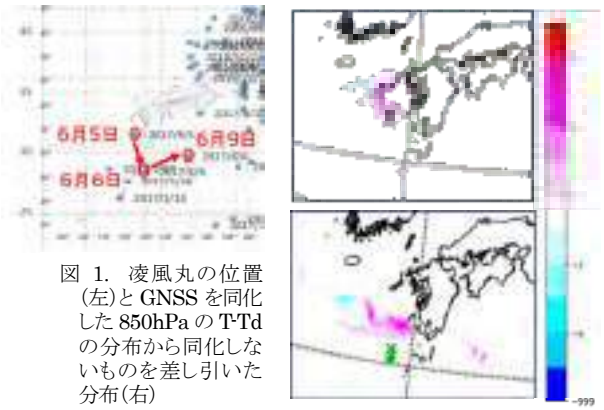


図 1. 凌風丸の位置（左）と GNSS を同化した 850hPa の T-Td の分布から同化しないものを差し引いた分布（右）

3. ブイ GNSS の同化実験の結果 ブイは足摺岬先端から約 30km 南東にあり、南から四国に供給される水蒸気量の監視に適した位置にある。解析した GNSS 可降水量（Shoji et al 2019, 投稿中）とメソ解析を比較すると、メソ解析の方が大きいバイアスがあるものの、対応が良いことがわかっている。

この可降水量も気象研に移植したメソ NAPEX を用いて同化した。同化すると、四国の東部分で下層の水蒸気量が減少、四国の西部分から九州で増加していて、降水域もより南北に伸びる形状になった（図 2 左）。観測値にバイアスを補正して同化すると、インクリメントは小さくなるものの、同様な傾向がみられた（図 2 右）。これらから、ブイ GNSS は 1 地点のみでも降水域の位置や強度に影響を与えることがわかった。

今後は、船舶とブイの両方について、事例数を増やし、インパクトを与える条件等を調べる予定である。

謝辞：本研究の一部は，科研費「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」より支援を受けました．

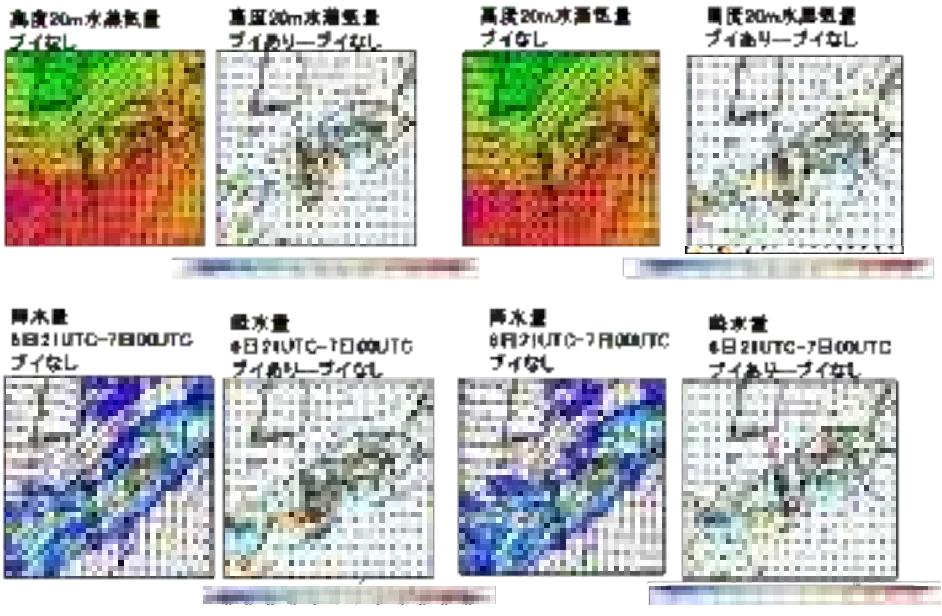


図 2. 足摺岬先端から約 30km 南東にあるブイを入れたデータ同化実験と入れない同化実験の水蒸気量と降水量分布。左はバイアス補正なし、右はバイアス補正あり。

海中音速構造の不均質性を考慮したGNSS/音響方式による海底地殻変動解析

Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean

*衾笠 葉月[1]、田所 敬一[1]、寺田 幸博[2]、加藤 照之[3]
*Natsuki Kinugasa[1], Keiichi Tadokoro[1], Yukihiro Terada[2], Teruyuki Kato[3]

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. 高知工業高等専門学校、3. 神奈川県温泉地学研究所
1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

GNSS (global navigation satellite system) 音響方式による海底地殻変動観測では，船舶やブイから海底に設置された海底局までの距離を音響信号で測距し，解析から得られる海底局位置の長期的な変化を観察する．1つの観測点に複数の海底局を設置してあるため，船舶による観測の場合海底局アレイの周りと各局の真上から測距している．解析では海底局間の相対位置，つまりアレイ形状は，時間的に変化しないものと仮定し，船舶による観測ごとに海底局アレイ位置を推定する手法をとっている．したがって，地殻変動を精度よく推定するには，まず正しいアレイ形状を推定することが必要となる．

海底局位置の推定誤差の主要な原因は，海中での音波の伝播速度が時間的にまた空間的に変化することにある．音速は，潮汐により半日から1日周期で変化し，また内部重力波により10分から1時間程度の周期で時間変化すると考えられている．1回の観測の間は海底局位置が変化しないと仮定して解析することで，長周期の時間変化は容易に推定できる．また短周期の変化は観測座時に含まれる雑音と見なせば，海底局位置のバイアス誤差の原因とはならないと考えられる．一方，空間勾配は音速が海水の温度と圧力，塩分によって変化することによって生じる．垂直方向の速度勾配は，音響測距と並行して行うCTD (conductivity, temperature, depth profiler) 測定でプロファイルが得られる．水平方向の空間勾配は主に温度勾配によって生じる．特に黒潮流域に設置された観測点では顕著な温度勾配が観測されている．我々は音速の水平勾配が海底局位置のバイアス誤差の最大の原因となると考えた．そこで本研究は海底局アレイ形状を高精度に推定することを目的として，海中音速の時空間変化を考慮した解析手法の開発を行った．

黒潮流域に設置された足摺沖と熊野灘沖の名古屋大学の観測点について，水平方向に一定の勾配を仮定した音速構造を推定する解析手法を開発し，適用した．その結果から水平勾配を考慮しない場合，音速の速い場所に位置する海底局は浅く，音速の遅い場所に位置する海底局は深く推定されることが分かった．音速の速い場所に位置する海底局の理論走時を小さくするには，定義上伝播距離を短くしなければならない．海底局アレイを囲むように円周航路で測距しているため、海底局の水平位置をずらしても観測中の走時残差の平均値を小さくする効果は小さい．以上から，海底局が浅く推定された理由が説明できる．以上の結果から，黒潮流域に設置された海底局位置を高精度に推定するには，音速構造の水平方向の不均質性を考慮することが不可欠であるといえる．また測距する際の船舶の航跡も解析精度に影響することが分かった．

キーワード：海底地殻変動、GNSS/音響、時空間変化、黒潮
Keywords: Ocean bottom crustal deformation, GNSS/acoustic, Temporal and spatial variation, the Kuroshio current

©2019. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning

*小司 禎教[1]、加藤 照之[2]、寺田 幸博[3]、津田 敏隆[4]、矢吹 正教[4]
*Yoshinori Shoji[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3], Toshitaka Tsuda[4], Masanori Yabuki[4]

1. 気象研究所気象衛星・観測システム研究部第２研究室、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 京都大学生存圏研究所
1. The Second Laboratory of Meteorological Satellite and Observation System Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government, 3. Natinal Institute of Technology, Kochi College, 4. Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto Universty

Japan is an archipelago located easternmost of East Asia and influenced by the East Asian monsoon, which is characterized by moist air inflow coming from the ocean that often causes heavy rainfall (Kato 2006, Tsuguti and Kato 2014, Kato 2018). From June 28 to July 8, 2018, extreme rainfall frequented western Japan to the Tokai region, wherein more than 1,000 mm, at the maximum of 1,852.5 mm, precipitation was recorded in several regions (Tsuguti et al. 2018). A press release of Japan Meteorological Agency (JMA) (JMA, 2018) attributed the event to the concentration of two massively moist air streams over western Japan and persistent upward flow. With the frequency of extreme precipitation events, water vapor monitoring over the ocean becomes one of the important issues in Japan. Shoji et al. 2009 exhibited the improvement of a heavy rainfall prediction method by assimilating precipitable water vapor (PWV) estimated via the Global Positioning System (GPS) observation network in East Asia, as well as Japan's nationwide dense GPS network. The result insisted the importance of water vapor monitoring upstream.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, −0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate).

Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring. The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the "BAIU" seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that, compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA's objective analysis is larger over the ocean (Shoji et al. 2019).

In the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA's research vessel). The purpose of this study is to assess the impact of water vapor monitoring in upward of west Japan on heavy rainfall prediction. Preliminary PWV analyses show about 3 mm rms with about -1 mm bias against JMA's operational regional objective analysis.

©2019. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

Acknowledgements

The shipborne GNSS campaign observation was funded by a research grant for Mission Research for Sustainable Humanosphere from the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) at Kyoto University, “Study on accuracy improvement of shipborne GNSS water vapor measurement.”

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310. A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

キーワード：水蒸気、豪雨、GNSS
Keywords: Water Vapor, Heavy rainfall, GNSS

©2019. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

新たな海底地殻変動観測手法のためのGNSSブイからの連続音響測距
Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements

*田所 敬一[1]、衣笠 菜月[1]、加藤 照之[2]、寺田 幸博[3]、二村 彰[4]、松廣 健二郎[1]
*Keiichi Tadokoro[1], Natsuki Kinugasa[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3], Akira Futamura[4], Kenjiro Matsuhiro[1]

1. 名古屋大学地震火山研究センター、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 弓削商船高等専門学校
1. Research Center for Seismology, Volcanology and Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3. Kochi National College of Technology, 4. National Institute of Technology, Yuge College

Our research group has been testing a measurement system for the continuous seafloor crustal deformation at a moored buoysite operated by Kochi prefecture, located 32 km off Cape Ashizuri, Japan.An acoustic transducer was fixed at about 1.7 m beneath the sea surface with a pole mounted on the buoy body.Three ocean bottom acoustic transponders had been installed around the moored point of the buoy. The acoustic signals are sequentially transmitted to these three transponders every three minutes. The recorded data on the buoy are planned to transmitted to a ground base station through a commercial communication satellite operated by Thuraya Telecommunications Company.
We performed a test for the continuous acoustic ranging between the buoy and the ocean bottom transponders from March 28 to 31 and from June 2 to July 12 (1st period), and from November 16to December 17 (2nd period) in 2018. The acoustic ranging was continuously possible throughout the above periods when power was supplied whereas it was unexpectedly terminated because of power failure during the winter season. The acoustic signals were transmitted 27,856 times in total, and the buoy-mounted acoustic ranging unit received 23,342 signals from the ocean bottom transponders. However, the acoustic data sent to the ground base station was only 12 % because of some trouble of the satellite communication modem.
The reflected signals from the buoy body and/or the seafloor sometimes contaminated the received acoustic signals; also multiple reflections inside of an anti-reflection cover attached to the buoy-mounted transducer, whose purpose is to cut off the reflection from the sea surface, were remarkable during the 1st period. The multiple reflections caused the misidentification of the direct wave from the sea-bottom units. We, therefore, removed the anti-reflection cover during the 2nd period, which remarkably reduced the confused reflections.
We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio (the ratio of the squared amplitudes preceding and following a test point) to reduce the capacity of data transferred via satellite communication using the acoustic waveform recorded during the 1st period. The program successfully picked the correct direct wave onset for more than 99 % of the waveforms recorded during the 2nd period.

©2019. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

U05-09 日本地球惑星科学連合2019年大会

リアルタイム観測・大深度掘削・高圧実験の統合による沈み込み帯4D描像

Innovative 4D imaging of subduction-zones through real-time observatories, ultra-deep drilling and high-pressure experiments

*木下 正高[1]、平田 直[1]、篠原 雅尚[1]、入舩 徹男[2]、鍵 裕之[7]、加藤 照之[3]、小野 重明[4]、道林 克禎[6]、阿部 なつ江[4]、稲垣 史生[4]、小村 健太朗[5]、小原 一成[1]
*Masataka Kinoshita[1], Naoshi Hirata[1], Masanao Shinohara[1], Tetsuo Irifune[2], Hiroyuki Kagi[7], Teruyuki Kato[3], Shigeaki Ono[4], Katsuyoshi Michibayashi[6], Natsue Abe[4], Fumio Inagaki[4], Kentaro Omura[5], Kazushige Obara[1]

1. 東京大学地震研究所、2. 愛媛大学、3. 温泉地学研究所、4. 海洋研究開発機構、5. 防災科学技術研究所、6. 名古屋大学、7. 東京大学地殻化学実験施設
1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Ehime University, 3. Hot Springs Research Institute, 4. JAMSTEC, 5. NIED, 6. Nagoya Univ., 7. Geochemical Research Center, Univ. Tokyo

我々は，2014年に「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」として提出した「海底・陸域での地震・地殻変動観測網整備」と「超深度掘削による地下圏孔内観測」を，2017年の小改訂により統合し，「海陸・掘削統合観測による革新的地震・噴火予測科学 ー沈み込み帯の時空間情報科学の挑戦ー」として提出した．2020年の改訂にあたっては，2017年の改訂提案に，新たに海洋ブイ測地観測研究，およびマントルまでの超高圧再現実験研究を加えて，沈み込み帯周辺の諸現象を時空間解読し、地震・噴火からマントル構造，そして地球の遠未来を予測する革新的情報科学を創立する。このため，日本列島～西太平洋の海域をカバーするケーブル・ブイ統合リアルタイム地震・地殻変動観測網（大気・電離層・海洋観測含む）を整備し，超深度掘削による試料採取と超高圧実験による地球内部の再現を行う。地球科学者の叡智を結集し，30年以内の発生確率が70-80%に及ぶ南海トラフ地震発生帯等の深部構造を含めた４D描像を行うとともに，その原動力である沈み込みの力学を理解する鍵となるマントル粘性率を，温度構造や揮発性成分からこれまでにない精度で評価する．さらにマントルへの水・エネルギー移動を捉え，地球・海洋の数億年後の将来までを予測することに挑戦する．

キーワード：Seafloor cable network、Ultra-deep drilling、High pressure experiments、GNSS buoy、Subduction zone、Mantle rheology
Keywords: Seafloor cable network, Ultra-deep drilling, High pressure experiments, GNSS buoy, Subduction zone, Mantle rheology

©2019. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

Multi GNSS Asia 2019, Bangkok, Thailand,
27 August 2019

［発表2019-8p］

" Recent Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Disaster Mitigation System in the ocean "

Teruyuki Kato*, Yukihiro Terada**, Keiichi Tadokoro***, and Akira Futamura****
**Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Japan, teru@onken.odawara.kanagawa.jp*
***National Institute of Technology, Kochi College, Japan*
****Graduate School of Environmental Science, Nagoya University, Japan*
*****National Institute of Technology, Yuge College, Japan*

Abstract:
This presentation introduces the recent development and discusses future scope and problems to be solved for a GNSS buoy system as a synthetic disaster mitigation system in the ocean. The buoy was developed originally aiming at the tsunami early warning apparatus. The system was able to detect the high tsunami of the 2011 Tohoku-oki tsunami before its arrival to the coast and was used for updating the tsunami alert. Yet, because the system used RTK baseline measurements, distances of buoys from the base station are limited only less than twenty kilometers. Consequently, the lead time of tsunami alert to the tsunami arrival was only a few minutes and consequently lots of people's lives were lost.

This motivated us to upgrade the system, introducing a precise point positioning system so that we do not require any onshore base station and the buoy can be put much farther away from the coast. We also introduced a satellite communication for data acquisition. Currently, we are conducting the experiments borrowing a fishery buoy of Kochi Prefecture off the Cape Ashizuri, southwest Japan. Given that the system is evaluated as feasible, the area of application fields will get much wider.

One of the most challenging application is to use the buoy for the GNSS-Acoustic system for continuous ocean bottom crustal movement measurements. Continuous measurements of ocean bottom crustal movements observations might discover new phenomena such as slow slip events nearby oceanic subduction zones. Buoys can be used for other applications such as atmospheric and ionospheric researches including their applications to the geohazards monitoring. Moreover, ancillary sensors on, above and below the buoys can be used for ocean researches. If such buoys are established many places in the ocean, say, northwestern Pacific, such system will be a powerful infrastructure for synthetic geohazards monitoring.

Keywords (3-5 words):
GNSS buoy, tsunami early warning, synthetic disaster mitigation

［発表2019-10p］

6.3　GNSS ブイを用いた総合防災システムについて～現状と課題～

加藤照之（温泉地学研究所）・寺田幸博（高知工業高等専門学校）
teru@onken.odawara.kanagawa.jp
terada@ce.kochi-ct.ac.jp

6.3.1　はじめに

我々は GNSS 受信システムをブイに取り付けて津波を計測する GNSS 津波計（開発当初の呼称は GPS 津波計）を 1990 年代の終わりころから約 20 年にわたって開発してきた．最近の技術の進展に伴い，GNSS ブイは多様な応用に役立てられることがわかり，現在では GNSS ブイを海洋にアレイ展開して総合的な防災ブイとして活用できるようなシステムを開発中である．本稿では，我々の GNSS ブイの開発の歴史を振り返り，現状と今後の課題や見通しについて触れてみたい．

6.3.2 GNSS 津波計の概念

津波を，その襲来前に正確に計測し，その観測値に基づく沿岸への正確な到達時刻と津波高の予測，及び情報の適切な伝達によって沿岸住民の避難・誘導に活用できれば，津波による被害は大幅に軽減できるだろう．

このような考えに基づき，従来の津波計測手法とは全く異なる GNSS を用いた海面変動計測装置の開発を行い，波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度で計測でき，設置や維持管理が容易に実施できる津波観測システムの実現を目指している．システム構成の基本的概念を図 1 に示す．海上に浮かべたブイの最上部に GNSS アンテナを取り付け，ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データから，海面高の変位を計測することができる．波浪，津波及び潮汐の計測には，数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから，当初は，RTK(Real Time Kinematic)法を基本的な測位方式として採用した．この方法では，陸上に基地局を設けて GNSS 観測をブイと同時に行い，ブイで取得された 1 秒ごとの位相データは無線によって基地局に伝送され，基地局に置かれた計算機により即時に基線解析が行われ，ブイの位置を陸上基地局に対する相対位置として推定する．この手法では電波の伝搬媒質の影響が観測点間距離とともに急速に大きくなることから，精度保持のためブイの基地局からの距離を 20 ㎞以内程度としなくてはならいという制限がある．後節で述べるように，最近の技術の進展により，現在では，基準点を設ける必要が無い精密単独測位法によっているため，沖合展開における限界の問題が払拭され，大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている．

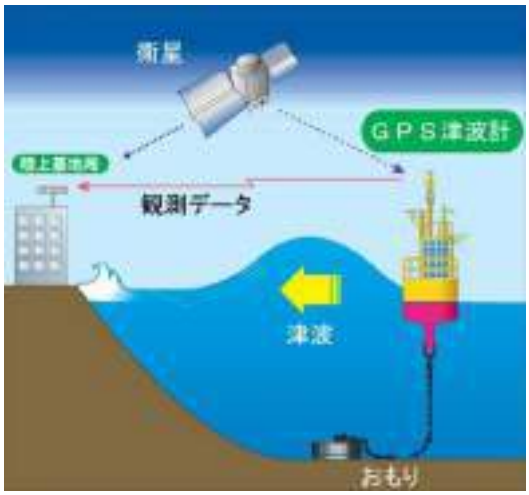


図 1　GPS 津波計の概念．

6.3.3 開発の経緯とその意義

1997 年に神奈川県相模湾にて実施した基礎実験において GNSS 津波計が誕生した（加藤他，1998）．この時の GNSS 受信器や記録装置を積み込んだブイを図 2 の左側に示す．続いて，1998 年に同地で基本機能実験を行い，波浪と潮汐を同時に cm オーダーで観測できることを示した．次に，実用化実験として 2001 年から岩手県大船渡

市沖に GNSS 津波計を設置して 3 年間の連続計測を実施した．ここまでの成果は，寺田・加藤（2003）に詳しく記している．

図２　GPS 津波計ブイ．（左）白い缶体が 1997 年に試験的に製作したブイ．（右）2013 年に高知室戸岬沖に設置したブイ．

続いて，この技術の外洋対応の技術開発を進め，高知県室戸岬沖で実証実験を行ったときの海洋ブイを図２の右側に示す．計算結果はインターネットの VPN 接続でサーバー（室戸岬では高知高専）に送り，ホームページで図３に示す画像を表示してリアルタイムに市民へのデータ公開を行った．通常の波浪は数秒から数十秒程度の周期であるのに対し，津波は数分以上の長い周期を持っているので，フィルタリング操作によって容易に識別が可能である．図において，上段は周期の短い波浪を示しており，中段に示す津波データは，数分から数時間の周期で変化する成分を示すようにしている．

室戸岬沖の実証実験では，図４に示すように波浪データの有義波高 H1/3（波高の高い方から 1/3 の平均値）と周期 T1/3（有義波高の計算対象とした波の周期の平均値）が，近隣の海底超音波

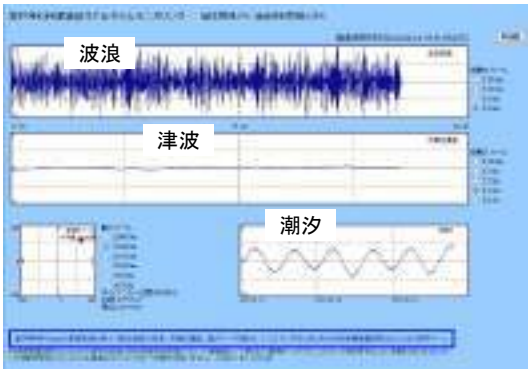


図３　リアルタイム公開したデータ（室戸岬沖）．波浪，津波データの横軸はフルスケール１時間であり，潮汐の場合は３日である，縦軸は，いずれも海面高であり，それぞれのフルスケールは±2m，±1m，±2m である．

式波浪計で得られるものと同様の傾向を示すことが確認できた．さらに，潮汐，高潮などの情報も測位データから得られるほか，多種のセンサーを搭載することにより水温，洋上風などの情報を発信でき，漁業活動や海運などの海に係わる地域の経済活動の支えとなる海洋観測ステーションとしての機能も備え得ることを示してきた．

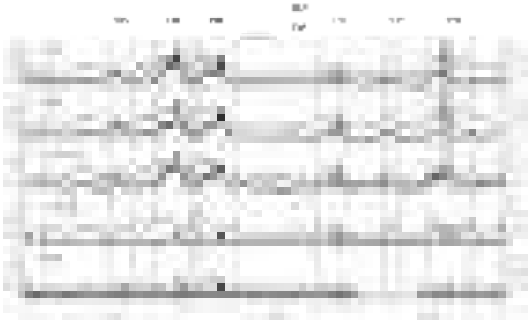


図４　2004 年 6 月～10 月に観測された有義波高．太線が有義波高を示し，細線が有義波周期を示している．横軸のフルスケールは 3 カ月であり，縦軸は，何れもフルスケール 10m である．

ここまでの実績によって，国土交通省港湾局が GNSS 波浪計（正式名称は GPS 波浪計）として全国展開することになり，防波堤や港湾施設の設計施工のために不可欠な波浪データの常時観測を行い，津波発生の非常時には気象庁によって津波予報に利用されている．

6.3.5章に述べるように，このシステムは2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を観測し，気象庁の津波警報の更新に役立てられたものの，GNSS波浪計の設置場所が十分に沿岸から十分遠くに設置されていなかったことと，情報の伝達が十分でなかったことなどから，結果として大きな犠牲者を生むこととなった．こうした反省を踏まえ，システムを刷新してより効果的な津波・波浪計測システムを導入することとした．これについては6.3.6章に詳しく述べる．

6.3.4 沖合における津波観測

大船渡市沖に設置したGNSS津波計は，2001年6月25日に初めて津波を捉えた．その前日に南米のペルー沖で発生したMw7.9の地震による津波が約23時間後に大船渡市沖に到達した（寺田・加藤，2003）．続いて，2003年9月26日の十勝沖地震津波を捉えた．これらは何れも波高10cm程度の津波であり，目標とした検出精度の確認が出来た．

2004年9月6日の紀伊半島沖地震津波では，室戸岬沖で図５に示す津波が観測できた．図中に青線で示すGNSS津波計の観測値は，波高・周期共に赤線で示すシミュレーション結果と良い一致を示している．このことは，沖合で津波を計測することによって，震源域直上での波源を推測できる可能性を示唆している．実際，津波観測直後に波源を逆計算し津波伝播シミュレーションの再計算を行うことによって，正確な津波高さや到達時間が得られるリアルタイム津波予測への道を切り開くことができた（Tatsumi and Tomita, 2010）．

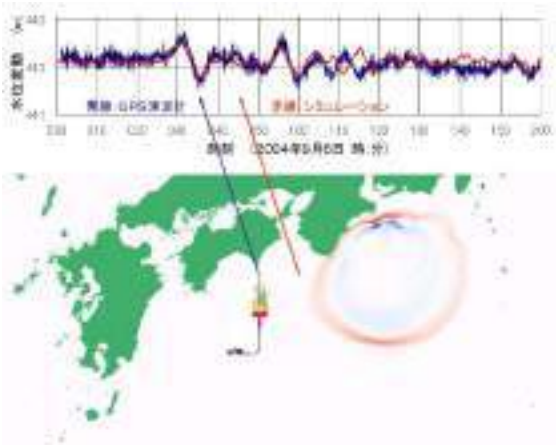


図５　2004 年 9 月 6 日紀伊半島沖地震津波．（青線）GPS 津波計による記録．（赤線）数値シミュレーションによる計算値．

沖合で津波を正確に計測できるようになれば，当然のことながら，津波をいち早く捉えて避難・誘導に活かすことができる．13km沖合に設置した室戸岬沖GNSS津波計で得られた図５の観測結果では，約8分のリードタイムが得られた．これらのことから，GNSS津波計の沖合展開への期待はさらに大きくなっていった．ただし，津波の伝播速度は，水深に重力加速度を乗じた値の平方根で与えられ，沖合への展開で水深が大きくなることによる伝播速度の増大で，リードタイムは単純な期待どおりに伸びないことに注意する必要がある．

6.3.5 東北地方太平洋沖地震津波

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災発生時には，国土交通省港湾局によって GNSS 波浪計として図６に示すように全国に 15 基が配備され，リアルタイムにデータが公開されていた．釜石沖に設置されていた GNSS 波浪計のリアルタイム観測値を図７に示す．図中下部に平均水面高変位として表示されている津波高さは 6.7m を示し，気象庁はこのデータを含む複数のデータを根拠に大津波警報を最大級に引き上げた（Ozaki, 2011）．

第１波の観測データを発信した後，被災地域の停電によって通信網は寸断され，それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなったが，観測データは高台に設置された基地局のバックアップ電源の下，図８に示す完全な津波波形が保存出来ていた（河合他，2011）．

図６　GPS 波浪計設置状況（2011 年 3 月 11 日）（http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf より）

図７　ナウファスで捉えた 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震津波．（横軸）フルスケール 24 時間．（縦軸）上図はフルスケール 6.5m，下図の縦軸は，±5.5m である．上図から潮汐成分をフィルタリングしたものが下図である．

2013 年 3 月に，気象庁は津波警報の発表方法を大幅に変更し，今後の津波予報に沖合の圧力式海底津波計と GNSS 波浪計のデータを活用するとしている．これらのことから，震源域を含む海

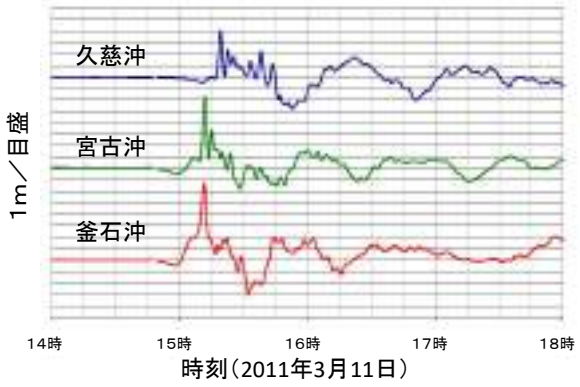


図８　東北地方太平洋沖地震津波全波形（国土交通省港湾局提供）

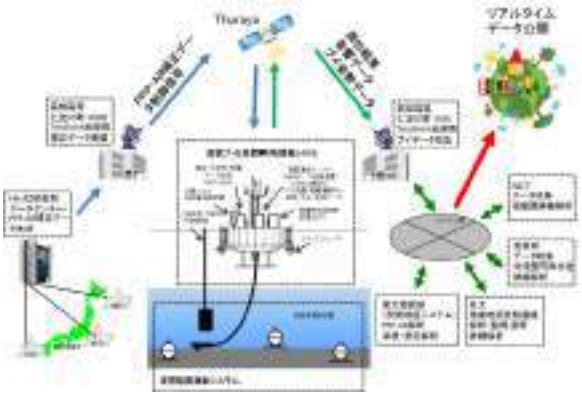


図９　現在の全体システム図

域への GNSS 津波計の設置が強く望まれ（例えば，朝日新聞，2011），配置位置の離岸距離を伸ばすために，GNSS 精密測位法のさらなる改良が喫緊の課題となった．この二つの課題を端的に表現すれば，「被災してもデータの続きを！」と「もっと沖合に！」となる．これらの克服には，洋上のブイからデータ伝送を行う方法と GNSS 測位法の改善が必要であった．

6.3.6 さらなる沖合展開に向けての開発

第一の課題である被災地域の通信網の寸断への対策の基本は，観測された津波データを，被災の無い遠方の地域に送ることである．これには，通信衛星の利用が最も有望である．しかし，揺れ動き回転するGNSS海洋ブイでは，太陽電池だけの自立的電力供給事情による省電力にも配慮する必要があり，無指向性のアンテナの使用を余儀なくされる．我々はまず2013年時点で利用可能であった通信衛星の技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」を使い，室戸岬沖に設置したGNSS津波計実験機を用いて，衛星通信実験を行った．ブイ上で精密単独測位計算を行うために必要なGNSS精密暦を準天頂衛星「みちびき」から送信し，測位計算結果を「きく８号」の通信システムを用いて地上に送り返す方式とした．波浪，津波，潮汐の変化をブイ上で計算し，得られた観測値を衛星通信で伝送して良好な結果が得られた．その後2016年に「きく8号」は運用を停止することになったため，現在は商用衛星のスラヤを用いたソフトバンクの衛星携帯用通信装置を用いた実験に切り替えている．図９に現在使用しているシステムの全体図を示す．

第二の技術課題であるより沖合でのGNSS測位法については，　RTK法の改良に取り組んだ．図 10(a)は，改良前の RTK 測位結果の一例である．波浪による海面変位を示しているが，安定した測位ができていない．これに対して，搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって，図 10(b)に示すように基線長 80km でも安定的な測位が可能になった．また，洋上のブイの GNSS 観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め，周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測（PVD）法（Isshiki et al., 2000），周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位（PPP-AR）法（Mervert et al., 2008）が有効であった．図 10(c)は，PPP-AR を適用した結果である．これらの新しい測位法は，室戸岬沖 GNSS 津波計実験において，先に示したホームページでデータ公開を行った．このとき，図 3 に例示したような良好な結果がリアルタイムで継続的に得られた．

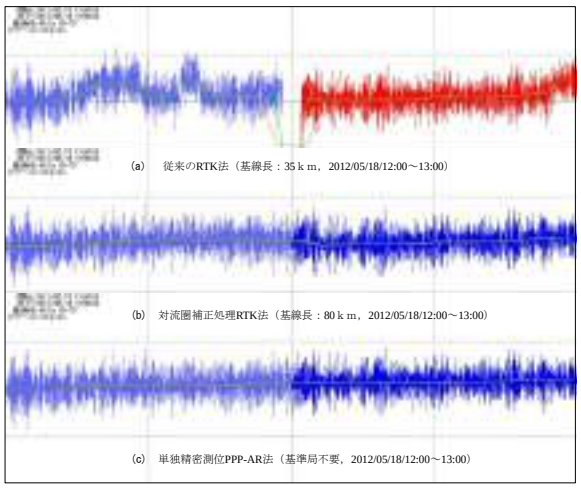


図１０　GPS 測位法の改良．横軸は，何れもフルスケール 1 時間を示している．縦軸は，1m／目盛である．

以上のように技術的課題が克服できるとの見通しが得られたため，2016 年度からは新たな実験を開始した．この実験では高知県の海洋牧場ブイ No.18 を借用させてもらい，ここに GNSS 受信システム，衛星通信装置などを搭載している．これらに加え，GNSS－音響システムによる連続的な海底地殻変動計測を実現するために，ブイ直下に一辺が 1.7km の正三角形を構成するように音響トランスポンダーを投入した．なお，このブイ位置の水深はおよそ 800m 程度である．このトランスポンダーに対して音響を射出して反射波を受信するためのトランスデューサをブイの舷側に設置している．

GNSS 測位はブイ上に設置された計算機によって PVD 及び PPP-AR の出力を得るとともに，大気の天頂遅延量や電離層の総電子数なども算出され，これらのデータはソフトバンク社製の衛星携帯テレメータ装置を介して地上局に送られる（図９）．地上局は高知県仁淀川町に設置されており，ここで受信データを点検・格納するとともに，Web サーバを介して測位データをリアルタイムで公開するほか，海底地殻変動，気象や電離層の研究のために提供される．

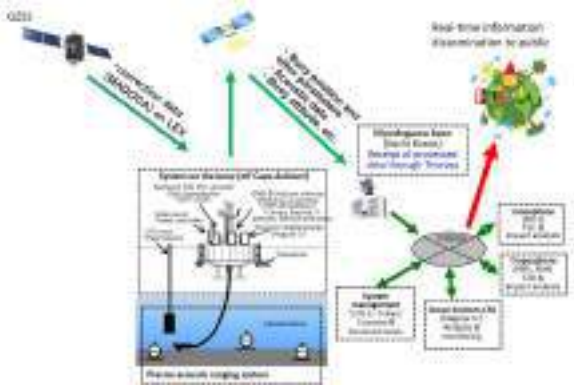


図１１　将来の全体システム図

しかしながら，このような商用の衛星通信は一般的に極めて高額になり，多数のブイを運用するとなると経費が大きな問題になる．これを回避する方法として，陸上からブイに送る精密暦を準天頂衛星経由で送信する方法が考えられる．準天頂衛星からは L6 信号の２チャンネルがこのようなメッセージ送信に使われており，１チャンネルは国内向けであるが，もう一つのチャンネルからは MADOCA と呼ばれるシステムによる精密暦が放送されている．これをブイ上で受信することにより，片側の衛星通信は不要になる．図 11 はこれを考慮に入れたシステムであり，我々も今後この方式を取り入れて行きたいとかんがえている．

6.3.7 今後の展開

本稿では，GNSS ブイによって津波や波浪などの海面高変化を計測する手法の開発について述べてきたが，この計測方式が海洋のどこでも可能となるとその応用分野は多岐にわたる．例えば，最近急速に注目が集められている分野に GNSS と音響を組み合わせた海底地殻変動の観測がある．その詳細は他書に譲るが（例えば，Spiess, 1985; Fujita et al., 2006），現在は海上保安庁や大学グループが実施して重要な成果が得られている（例えば Yokota et al., 2016）．この計測には船舶が用いられているため常時行えるわけではなく，せいぜい年数回程度である．船舶をブイに置き換えることで計測はほぼ常時に行えることになり，海底地殻変動を連続的に監視することが可能となる．日本列島を襲う巨大地震の多くが海底下で発生し，それが津波を発生させることを考えるとこの応用分野は日本の地震・津波防災には極めて重要と考えられる．また，GNSS を用いた精密測位では大気（水蒸気）や電離層の影響が誤差因となるが，一方ではこれらを補正するパラメータは気象学や電離層研究にとっては大変重要な物理量を提供することになる．例えば日本の西方海域に GNSS ブイを投入して，得られる水蒸気量を気象の数値予測解析に取り込んでいくことによって最近多くみられる集中豪雨の予測などに役立てることができると期待される．また，電離層の擾乱はいわゆる宇宙天気予報にとって重要な情報と考えられる．GNSS ブイは海底下の地殻変動から津波・波浪，海洋気象，電離層など地球の表層部で発生する多様な現象に関するデータを提供してくれる（図 12）．

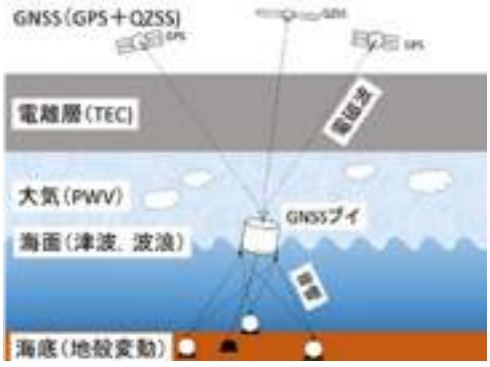


図 12　GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図

6.3.8 取り組むべき課題

今後このような総合防災ブイが実利用化されるためには, まだ様々な課題を克服する必要がある.

6.3.8.1 ブイ上の電力の確保

現在使用されているブイは直径が数m程度である. ここに 50W 程度の太陽光パネルと蓄電池を数枚置いているが, GNSS,衛星通信および海底地殻変動計測機器を設置すると電力が極めてひっ迫した状況になる. 今後, さらにさまざまな機器を搭載する要求が出てくると考えられるので, 十分な電力確保は喫緊の課題と言える. ただ, 太陽光パネルにしても蓄電池にしても昨今は技術革新が目覚ましく, それほど心配することはないかもしれない,

6.3.8.2 自律的に運用できるブイの構築

ブイを陸から離れた海洋上で安定的に作動させるためには自律的なシステムを構築する必要がある. 計測器が故障等で作動しなくなった場合の自動リセットが必要だろう. 衛星等を用いた陸側からのリモート操作ができればよいが, 必ずしもそれが可能とは限らない. 陸との通信が途切れた時にも最低限データがブイ上で収集できるようになっている必要もある. また, そのような場合にどのように陸―ブイ間の通信を再開できるようにするのか, 技術的な開発が必要であろう.

6.3.8.3 盗難・流出・衝突などへの対応

少なくとも既に実用化しているナウファスシステムでは 20 機近いブイが 10 年以上運用されていて大きな支障は出ていないと聞いている. 盗難や流出の場合は GNSS を搭載しているわけなのでその位置をトラッキングすれば対策はとれるであろう. 衝突を防ぐためには現在でも海上保安庁に灯浮標の申請を行っており, 船舶にはその存在を知られるようになっているので, 基本的な問題はないと考えられる. ただ, 広大な海上に浮遊しているブイであるので, 想定外のことはありうるだろう.

6.3.8.4 高速かつ安価な衛星通信システム

以前使われていた技術試験衛星が運用停止となり, 現在は商用衛星が使われているためデータ通信が極めて高額になっている. 是非とも専用の防災衛星とでもよばれる衛星が欲しいところである. 我々のチームにも衛星関係の研究者が協力してくれており, 将来の衛星打ち上げに向けて必要な仕様を研究中である. 是非とも実現したいと考えている.

6.3.8.5 システム全体を運用する運用体制の構築

もしこのようなブイを多数並べてデータを収集する場合には, ブイの運用だけでなく, データ収集・配布, 防災への貢献を考慮したデータの作成と関係機関・住民との共有などを運用する組織が必要になる. このような運用体制を作り上げるためには, その必要性を政府等に働きかけて国の組織として位置付けることが必要であろう. こうした努力が必要であろう.

6.3.9 おわりに

もし, 海洋に GNSS ブイが多数設置されれば地球表層で発生する災害要因となる地震, 台風, 電離層擾乱など多くの災害に関する新たなデータをこれまでになく精確かつ即時・連続的に取得することが可能となるだろう. 現在, 我々は GNSS ブイを図 13 に示したような北西太平洋地域に展開することを考えている. このようなアレイを様々な災害予測やその軽減に生かす総合防災ブイアレイとして構築したいと考えている. このようなアレイはまた, 基礎的な地球科学の研究に新たなデータを提供し, それが我が国の地球科学の推進に役立てられることを期待している.

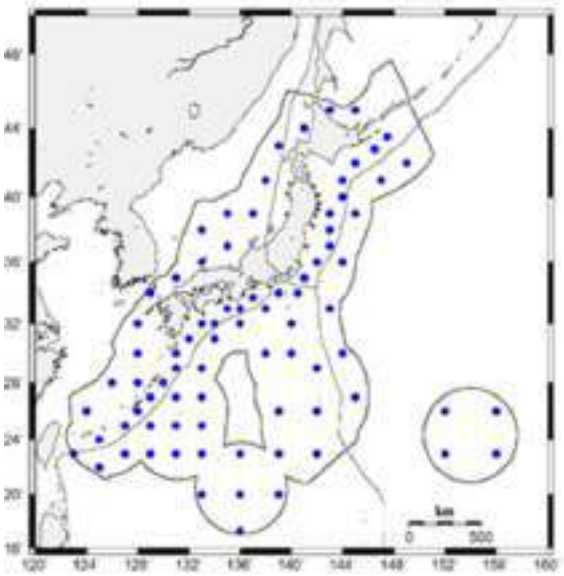


図13 西太平洋ブイアレイの構想.

謝辞

本研究開発に参画した港湾空港技術研究所, 宇宙航空研究開発機構, 情報通信研究機構, 気象研究所及び日立造船に所属する研究者の方々に感

謝します．また，実験サイトを提供された国，自治体，ご協力いただいた多くの市民の皆様に謝意を表します．

本研究開発は，現在実施中の科研費（基盤研究（S）:課題番号 16H01310）のほか科研費 4 件に加えて，文科省革新的技術開発補助金，文科省地球観測技術等調査研究委託費で推進しました．

本原稿は土質工学（2018）への寄稿に加筆しました．

参照文献

/1/ 朝日新聞， 2011年8月17日朝刊.

/2/ Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo, GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-276, 2006.

/3/ Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method ---, *J. Geod. Soc. Jap.*, **46** (4), 253-267, 2000.

/4/ 加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩，GPS津波計の開発，*月刊海洋*，号外 **15**，38-42，1998.

/5/ 加藤照之・寺田幸博， GNSSを用いた総合防災ブイの開発，地質工学，15，33-38，2018.

/6/ 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己，平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性，*港湾空港技術研究所報告*，**50**(4)，3-63，2011.

/7/ Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi, Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, September, 397-405, 2008.

/8/ Ozaki, T., Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –, *Earth Planets Space*, **63**, 827-830, 2011.

/9/ Tatsumi, D., T. Tomita, Real-time Tsunami Inundation Prediction Using Offshore Tsunami Observation, *Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering, currents.3*, 1-10, 2010.

/10/ Spiess, F. N., Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-23**, 502-510, 1985.

/11/ 寺田幸博・加藤照之，GPS津波計，*非破壊検査*，**52**(7)，338-343，2003.

/12/ Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, Seafloor geodetic constraints on interpolate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632, 2016.

［発表2019-11p］

G34A-08 - Observation for Seafloor Crustal Deformation Using Moored Buoy by GNSS-A Technique Considering the Heterogeneity of Sound Speed in Ocean

Thursday, 12 December 2019
10:45 - 11:00
Moscone South - 160, Upper Mezz

Abstract

We started using the moored buoy off the coast of Ashizuri, Japan to observe seafloor crustal deformation continuously by GNSS-acoustic technique. The position of transponders set on the seafloor can be estimated by the acoustic ranging measurements.
The main factor of positioning error is temporal and spatial variation of sound speed in ocean. Temporal variation is caused by the tide with a cycle of 12-24 hours and by the inertial gravity wave with a cycle of several 10 minutes. The spatial variation caused by the temperature, pressure, and salinity has large effect on the positioning in the area near the Kuroshio current because the temperature gradient is generated. Then, we introduced the sound speed structure model considering its temporal and spatial variation into the analysis.
Proposed analytical method firstly determines the relative position of transponders using measurements of vessel and secondly estimates the displacement of transponders from initial position by using data observed by buoy with assumption that every single transponder moves in the same vector due to the crustal deformation.
We applied this method to data observed by buoy for two weeks in April 2019 and discovered that the positioning accuracy has been greatly improved. The dispersion in the estimated position was within 2 cm, while it was 30 cm in the case of using sound speed model not considering its horizontal gradient. Thus, the proposed method is efficient in removing the effect of heterogeneity of sound speed in the analysis using short term observation data. We will evaluate it after accumulating long-term observation data.

Authors

K
Natsuki Kinugasa
Nagoya University

T
Keiichi Tadokoro
Nagoya Univ.

T
Yukihiro Tanada
National Institute of Technology, Kochi College

K
Teruyuki Kato
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

係留ブイを用いたGNSS-Aによる海底地殻変動観測のための解析手法の開発

Development of analytical method for detecting seafloor crustal deformation from GNSS-A data acquired by moored buoy

*衣笠 菜月[1]、田所 敬一[1]、加藤 照之[2]、寺田 幸博[3]
*Natsuki Kinugasa[1], Keiichi Tadokoro[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3]

1. 名古屋大学　地震火山研究センター、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校
1. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government, 3. National Institute of Technology, Kochi College

We have been developing observation system on moored buoy off the coast of Ashizuri for monitoring seafloor crustal deformation by global navigation satellite system-acoustic (GNSS-A) technique. The purpose of this work is to develop analytical method for detecting seafloor displacement from the GNSS-A data acquired by moored buoy.
Main cause of an error for seafloor positioning is the misinterpretation of sound speed variation. Sound speed structure in the near from the Kuroshio current has heterogeneity because the temperature gradient is generated by a warm current. Some previous works proposed sound speed model assuming a sloping structure. We also applied this model to analysis using data for two weeks in April 2019 acquired by buoy and obtained position of the seafloor units. The dispersion in the estimated position was within 2 cm, while it was within 30 cm in the case of ignoring horizontal gradient of sound speed.
The buoy we use for this research barely moves around, but stays near from the centroid of units. Generally, it is difficult to estimate seafloor displacement separately from horizontal gradient due to the insufficiency of information for sound speed structure. The theoretical travel time indicates that the displacement can be detected if the direction of displacement is different from azimuth of horizontal gradient. We also obtained the same result by performing simulation using synthetic data. However, the misinterpretation of displacement possibly occurs caused by the positioning error of onboard acoustic transducer and the modeling error for sound speed structure. Then, we will summarize practical issues for analysis using longer term observation data acquired by buoy.

キーワード：GNSS-A、音速構造、海底地殻変動、水平勾配、ブイ
Keywords: GNSS-A, sound speed structure, seafloor crustal deformation, horizontal gradient, buoy

©2020. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements

*田所 敬一[1]、衣笠 菜月[1]、加藤 照之[2]、寺田 幸博[3]、松廣 健二郎[4]
*Keiichi Tadokoro[1], Natsuki Kinugasa[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3], Kenjiro Matsuhiro[4]

1. 名古屋大学地震火山研究センター、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 名古屋大学全学技術センター
1. Research Center for Seismology, Volcanology and Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government, 3. National Institute of Technology, Kochi College, 4. Technical Center, Nagoya University

Our research group has been testing a measurement system for the continuous seafloor crustal deformation at a moored buoy site operated by Kochi prefecture from March 2018. We performed continuous acoustic ranging tests for a total of 106 days during the following four periods: March 28–31, June 2–July 12, and November 16–December 17 in 2018; and March 24–April 25, 2019. The tests revealed that the developed system can continuously transmit the acoustic ranging signals and send the acquired data to the on-land station via the satellite link, if sufficient electrical power is supplied. The system on the buoy was able to acquire high-quality acoustic waveforms with extremely high maximum cross-correlation coefficients. We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio to reduce the capacity of data transferred via satellite communication. More than 99 % of the direct acoustic wave onsets at the buoy were correctly distinguished using our program code even if those waveforms had been corrupted with reflected waves. The above experimental studies show that our software system is capable of continuous real-time measurement of seafloor crustal deformation. However, the acoustic ranging controller and the satellite communication modem frequently experienced power failures during the test phase, and we re-designed the power supply part. We found that some of the solar panels were under the shadow of the mast, constructed on the center of the buoy, due to the stable yaw angle of the buoy. The original system was equipped with five 135-Watt solar panels connected in a series and 24 V valve-regulated stationary lead-acid batteries with a capacity of 300 Ah (10-hour rate). In the newly designed system is equipped with additional three (eight in total) solar panels which are separated to two parallel circuits. The power storage is also reinforced with additional two batteries. The re-installation of the new system was started in December 2019; the establishment is planned to be finished by the end of March, 2020. We report the present status of the continuous measurement using the newly designed system.

©2020. Japan Geoscience Union. All Right Reserved.

日本測地学会第134回講演会，オンライン，
2020年10月21-23日．

［発表2020-3p］

049 係留ブイによるGNSS-A海底地殻変動観測のための解析手法の研究

Study on analytical method for GNSS-A seafloor crustal deformation observation using moored buoy

#衣笠菜月[1]，田所敬一[1]，加藤照之[2]，寺田幸博[3]

1: 名古屋大学地震火山研究センター; 2: 神奈川県温泉地学研究所; 3: 高知工業高等専門学校

Natsuki Kinugasa[1], Keiichi Tadokoro[1], Teruyuki Kato[2], Yukihiro Terada[3]

1: Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University;

2: Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

3: National Institute of Technology, Kochi College

はじめに

GNSS-A（Global Navigation Satellite System-Acoustic）方式による海底地殻変動観測とは，船やブイなどに搭載された音響トランスデューサと海底に設置された海底局間を伝播する音響信号の走時と，信号送信時の座標などから海底局位置を推定し，その長期的な位置の変化をモニタリングする観測手法である．1年に5~6回程度の船舶による観測を実施することで，スロースリップの検出に成功した先行研究があることから，私たちの研究グループでは長期連続観測の実現を目指し，2016年から高知県足摺岬沖の漁業用ブイを利用した観測システムの開発を行った．ブイには太陽光発電システムを備えて，音響測距装置やGNSS受信機，ジャイロ計などの観測機器や地上へデータ転送するための衛星通信機器に給電する仕組みとなっている．またブイの周辺に3個の海底局を設置した．

解析手法の開発

GNSS-Aデータによる海底局位置解析では，海中音速をいかに正しく推定できるかが解析精度を決定する．観測点の近くを黒潮が流れているため，海水温度に勾配が作られ，付近の音速構造が不均質となる．先行研究で水平に一定の勾配を仮定する音速モデルが提案され，海底局位置の推定誤差の低減効果が示されたことから，本研究でもこのモデルを導入して解析することとした．また，海底局位置を高精度に推定するために，船舶による観測を実施し，予め海底局のアレイ形状を決定しておき，係留ブイで取得した観測データから海底局アレイの変位を推定することにした．

船舶による観測を2017年から2019年に計4回実施し，解析した結果，海底局アレイの形状を約1.5 cm の推定精度で決定した．また推定された音速構造と，GNSS-A観測と並行して実施した音速測定から得られた構造とを比較したところ，整合的であることが分かった．したがって，音速モデルおよび解析手法が適切であると示された．

係留ブイを用いた観測と船舶による観測の大きな違いは，ブイの位置を制御できない点である．そのため，観測データに含まれる音速構造を決定するための情報量が不足することが懸念さ

れる．そこで，ブイの実環境を想定した数値実験を行ったところ，本研究の観測方式と解析手法で海底地殻変動を理論的には検出可能であることが確認された．

係留ブイによる観測

ブイから地上サーバに転送している観測データは，観測走時，ブイの加速度と方位角，ブイの座標である．ブイ上サーバには各観測データの生データが保存されている．これまで係留ブイで取得した観測データを分析したところ，次のようなことが分かった．ブイ上トランスデューサが受信した音響波形の内，96%が正常な波形であり，高品質のデータが取得できていることが分かった．ブイ上GNSS受信機は，衛星通信経由で届いた補正情報を使用してリアルタイムに瀬光単独測位解を算出している．しかしながら，度々通信が途切れることがあるため，安定的に精密な測位解が得られていないことが分かった．よって，アレイ変位解析には，ブイ上サーバに保存された搬送波位相測定値を回収し，後処理でブイの座標を計算して使用することにした．したがって，海底局アレイ変位のリアルタイム解析には課題があるといえる．

これまで発電不足などが原因で，長期の連続観測が実現していなかったため，2020 年 3 月にソーラーパネルやバッテリーの増設工事を行い，安定的に運用できるようになった．発表では，これまで取得したデータから分かった，解析手法の課題と解決方法について議論する．

謝辞

本研究はJSPS科研費16H06310の助成を受けたものです．また，観測システムの開発には高知県所有の黒潮牧場18号ブイを利用しています．船舶による観測は弓削商船高等専門学校にご協力いただきました．

地球惑星科学連合大会，ハイブリッド，
2022年5月22日-6月3日

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦～レビューと今後の課題～

A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements –a review and future problems -

*加藤 照之[1]、寺田 幸博[2]、田所 敬一[3]、二村 彰[4]
*Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Keiichi Tadokoro[3], Akira Futamura[4]

1. 大正大学地域構想研究所、2. 高知工業高等専門学校、3. 名古屋大学環境科学研究科，4. 弓削商船高等専門学校
1. Institute of Regional Development, Taisho University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. National Institute of Technology, Yuge College

我々は2016～2020年の5年間に亘り，科研費基盤研究（S）によって標題を課題名とする新たなGNSSブイシステムの開発を行った．本発表ではこの研究開発の経緯と成果，及び残された課題や今後の可能性について述べる．2011年東北沖地震における教訓をもとに、海岸からより遠く離れた遠洋での運用を可能とするための改良を行い，同時に，GNSS一台将システムを用いた海底地殻変動の連続観測に挑戦しようとするものであった．また，GNSSブイを遠洋に設置できればGNSSデータから得られる可降水量（PWV）や電離層の総電子数（TEC）を用いることで気象学や電離層研究など応用できる領域が格段に広く及ぶ．これらの目的を実現するため，精密単独測位方式PPP-ARを導入し，測位解析がブイ上で可能な受信機を用い，解析に必要な精密暦と得られた測位結果を双方向とも衛星通信で送信することとした．衛星通信には商用衛星であるThurayaを用いた．また，海底地殻変動連続観測のため、海底位置と水中音速構造を同時に推定する新たな解析アルゴリズムを開発して適用した．ブイは高知県が運用する海洋牧場ブイのうち足摺岬沖約40kmにあるブイを借用することとした．実験は足掛け4年以上に及び，一定の成果を挙げることができた．測位手法として導入したPPP-ARは信号がFixされている限りはブイの位置を数cm程度の精度で推定でき．短周期の変動に用いられるPoint-Variance-Detection (PVD)法とあわせて長周期と短周期の海面変動を分離してリアルタイムに監視できることを明らかにした．また，GNSSデータから得られた大気の可降水量や電離層の総電子数がそれぞれの分野で有効に活用できることも示唆された．また，ブイの揺動による衛星通信のデータ欠測率の増加についてそれを克服するための基礎的な資料を取得することができ，将来期待される多数のブイからの衛星通信に関する新たな効率的な伝送方式が提示された．一方で多くの課題も見出された．ブイ上の電源不足等による機器の停止やデータ断などがたびたび発生した．海底地殻変動連続観測についてははじめての連続的な海底測位の成果を得ることができた．一方，ブイが大きく振れ回らないと海底アレイの位置推定と水中の音速構造パラメータの分離が難しいなどの課題が残った．これらの課題について検討し，改良を重ねて時間を克服し，遠洋においてGNSSブイが長期に安定的に運用できれば，海洋のブイアレイを構築することにより単に津波早期検知だけでなく様々な防災応用や新たな地球科学の展開ができると期待される．

キーワード：GNSSブイ、防災、津波、海底地殻変動
Keywords: GNSS buoy, disaster mitigation, tsunami, ocean bottom crustal movements

A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements –a review and future problems -

*Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Keiichi Tadokoro[3], Akira Futamura[4]

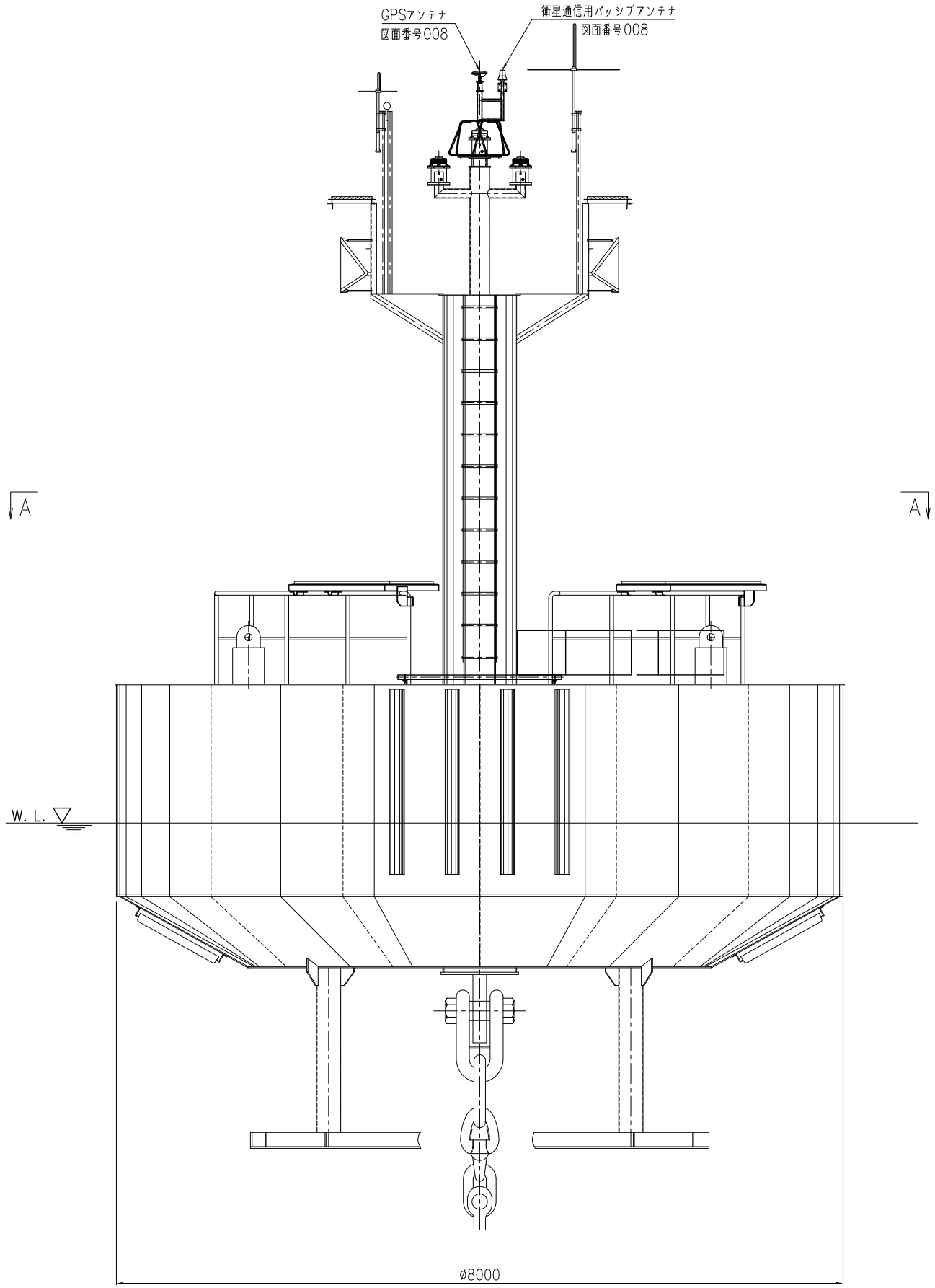
1. Institute of Regional Development, Taisho University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. National Institute of Technology, Yuge College

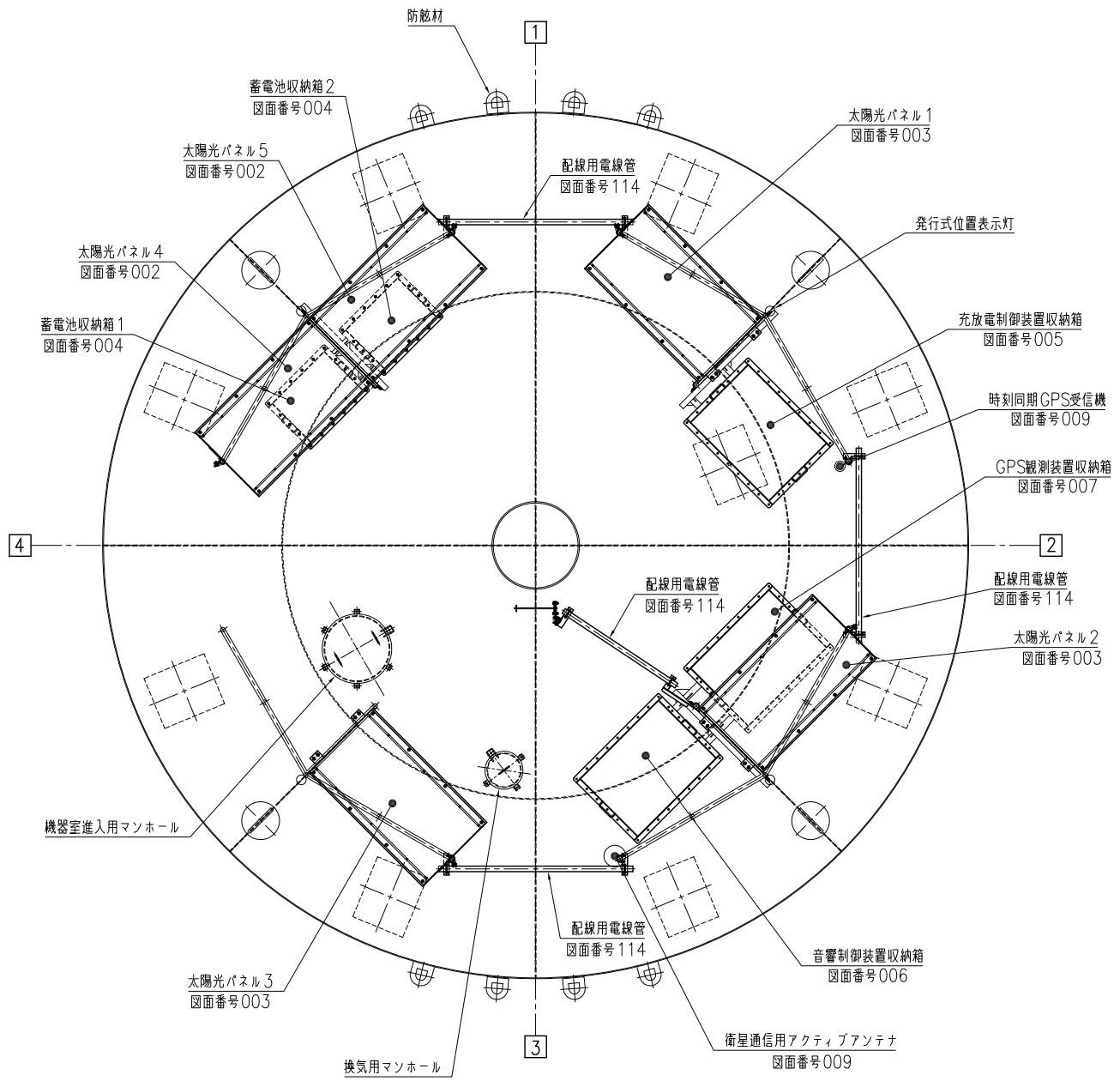
We have developed a new GNSS buoy system for tsunami early detection and continuous monitoring of sea bottom crustal movements. The presentation reviews this five-year project conducted by a JSPS Kakenhi grant. Based on the lessons learnt from the case of the 2011 Tohoku-Oki tsunami, we decided to put the buoy much farther from the coast. For this purpose, we employed two new technologies. First, we introduced Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR) algorithm for the estimation of the buoy coordinates without using baseline mode analysis. Second, we used a satellite data transmission for sending precise orbits and clocks for PPP-AR analysis on the buoy and also sending back the obtained precise position of the buoy to land, together with other ancillary data taken on the buoy. We used the commercially available Thuraya satellite for data transmission. In order to estimate the position of the transponder array at the sea bottom, we used the GNSS-acoustic system and developed a new algorithm for the simultaneous estimation of the coordinates of the transponder array at the sea bottom and the velocity structure of the sea water. We borrowed a buoy that is used for fishery by Kochi Prefecture. The buoy is placed about 40km south of Cape Ashizuri, Japan. The experiment continued for more than four years and obtained significant results for the future applications. PPP-AR enabled the positioning of the buoy with a few centimeters' accuracy as far as the signal is fixed. Together with Point Variance Detection (PVD) analysis for a shorter period of wind waves, we were able to monitor long and short periods of waves separately in real time mode. The precipitable water vapor (PWV) and total electron content (TEC) data obtained from GNSS data were evaluated for their accuracy if they can be used for their own research field. TEC data showed that they were accurate enough for monitoring ionospheric disturbances. PWV data seems also valuable for monitoring water vapor variations over the ocean and they could be used in the objective analysis for weather prediction. Moreover, an experiment was conducted to get the data for improving the satellite data transmission rate due to tilting of buoy. Based on the data, a new algorithm using IoT was proposed for improving the efficiency of data transmission from many buoys to the dedicated satellite for a buoy array. On the other hand, a number of problems occurred during the experiment; for example, frequent power failures occurred mainly due to power shortages due to insufficient solar panels or unknown reasons, though some of them were suspicious of problems in satellite transmission system. For the GNSS-acoustic system, separation of parameters between array coordinates and acoustic velocity structures were found difficult unless buoy swings widely enough around the transponder array area. Examinations and overcoming of these problems will make it possible for a long-term GNSS buoy operation at far offshore and it will bring us a new powerful tool not only for disaster mitigation but also for applications in the various fields of earth science.

Keywords: GNSS buoy, disaster mitigation, tsunami, ocean bottom crustal movements

資料３－３　ブイ上機器資料

１．当初（2016/10）の配置図
２．設置当初（2016/10）の浮体安全性・安定性計算書
３．浮体動揺特性（周波数応答）計算書
４．ブイ上計測システムの改良フロー
５．電源改良（2019/9）後の安定計算・係留計算に基づく配置
６．電源改良（2019/9）後の機器材
７．電源改良後（2019/9）の配置図
８．電源改良後（2019/9）の浮体安全性・安定性計算書





A–A

1．当初（2016/10)の配置図

年　度	平成28年度	図面番号	001
工事名	海洋ブイへの機器取付		
図面名称	全体配置図		
縮　尺	1/60	単　位	mm
設計年月日	H28.10.25	組　数	-
日立造船株式会社			

2016年10月14日
Hitz日立造船株式会社

観測装置設置後の浮体安全性・安定性に関する検討

1. 概要

本書は、東京大学地震研究所が行う「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究（研究代表者 加藤照之）において必要である「黒牧ブイ用観測装置」の設置に関わる検討である。装置の搭載による影響を考慮し、浮体の安定性等に関する検討を行う。

なお、観測装置は浮魚礁「土佐黒潮牧場18号ブイ」への搭載を前提とし、GPSによる津波観測、音響による地殻変動観測を連続的に行うことを目的としている。

2. 検討項目

土佐黒潮牧場18号の設計条件に基づき、装置搭載によって設計計算結果に影響が生じる下記の設計項目について再検討を行う。

1） 係留環
2） 係留索
3） 浮体の安定性

3. 観測装置諸元

・重量

1,174.8kg　　※観測装置および取付金具の全重量

・重心高さ

デッキ上0m（喫水面から約1.5m）地点　　※水平面位置の偏心は0とする。

4. 検討結果

観測装置の設置による重量増加と重心位置の変化を考慮し、設計計算を行った。2に示した検討項目について、装置の設置前と設置後の計算値比較表を以下に示す。

1） 係留環

照 査 対 象	計 算 値		許 容 値
	装置設置前	装置設置後	
支圧応力度の照査	1309kN	1322kN	3474kN
はし抜け強度の照査	74.0N/mm^2	74.7N/mm^2	150N/mm^2
応力集中部の照査	90.3N/mm^2	91.2N/mm^2	263N/mm^2

2） 係留索

照 査 対 象	計 算 値				許容値（安全率）
	装置設置前		装置設置後		
	設計外力	安全率	設計外力	安全率	
係留環接続部ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙ	1309kN	3.23	1322kN	3.20	3.0以上
上部チェーン	1309kN	3.05	1322kN	3.02	
ケーブル	1290kN	3.42	1303kN	3.38	
下部補強チェｰﾝ（上部）	1187kN	3.04	1200kN	3.01	
下部補強チェｰﾝ（中部）	1162kN	3.24	1176kN	3.21	
下部補強チェｰﾝ（下部）	1032kN	3.50	1046kN	3.45	
下部一般鎖	1013kN	3.12	1027kN	3.08	
アンカー	593kN	1.218	596kN	1.210	1.2以上

3） 浮体の安定性

照 査 対 象	計 算 値		許容値
	装置設置前	装置設置後	
最大引込力時乾舷（最大波高時）	0.431m	0.404m	0以上
最大引込力時メタセンター高さ	2.42m	2.38m	0以上
最大傾斜角	41.0deg	43.0deg	50.0deg

以上の検討結果より、全項目において許容値を満たしており、観測装置の設置後も浮体安定性、強度等に問題はない。（詳細計算については添付資料3参照）

以上

[添付資料]

1. 設計総括表（装置設置前）
2. 設計総括表（装置設置後）
3. 設計計算書（装置設置後） ※検討項目該当箇所のみ

添付資料１

＜設計総括表（装置設置前）＞

設計条件						
設置位置	北緯:32° 29′ 06″　東経:133° 12′ 09″（世界測地系）				設計耐用年数	10年
水深	795m	風速 U_{10}	61.0m/s	波浪	有義波高 $H_{1/3}$	12.5m
底質	粘土	海水流速	2.06m/s		最大波高 H_{MAX}	25.0m
付着生物	80N/㎡				有義波周期 $T_{1/3}$	16.0s
適用基準	・漁港・漁場の施設の設計の手引　2003年版　(社)全国漁港漁場協会 ・浮魚礁設計・施工技術基準　平成4年3月　MF21					

設計強度の許容値						
許容応力度[N/mm²]	材質		SS400		SM490	
	荷重状態		常　時	一時的な荷重	常　時	一時的な荷重
	割増係数		1.0	1.5	1.0	1.5
	垂直応力度　（引張り、圧縮、曲げ）	t≦40	140	210	185	278
		t＞40	125	188	175	263
	せん断応力度	t≦40	80	120	105	158
		t＞40	75	113	100	150
二軸応力度の許容値	1.2					
係留部の安全率	3.0					
アンカーの安全率	1.2					

設計結果					
浮体諸元	浮　体　径	8.0m	浮体本体高	3.10m	
	全　高	11.0m	全　浮　力	1450kN	
	照査対象	断面／材質	照査項目	照査結果	
	1. 甲板部〔デッキ部〕	PL-9（SS400）	四辺固定板としての照査	202.6N/mm2 ＜	210N/mm2
	2. 側板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	121.7N/mm2 ＜	210N/mm2
	3. 斜底板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	114.0N/mm2 ＜	210N/mm2
	4. 底板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	80.2N/mm2 ＜	210N/mm2
	5. 係留環（尾筒部）	PL-150（SM490）	支圧応力度の照査	1309kN ＜	3474kN
			はし抜け強度の照査	74.0N/mm2 ＜	150N/mm2
			応力集中部の照査	90.3N/mm2 ＜	263N/mm2

係留部諸元	照査対象		設計外力	安全率
	係留環接続部ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙ	φ97mm	1309kN	3.23 ＞ 3.0
	上部チェーン	φ81mm x 25m	1309kN	3.05 ＞ 3.0
	ケーブル	素線φ7mm×73本（ｹｰﾌﾞﾙ径 92mm） x 710m	1290kN	3.42 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（上部）	φ81mm x 25m	1187kN	3.04 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（中部）	φ111mm x 80m	1162kN	3.24 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（下部）	φ81mm x 25m	1032kN	3.50 ＞ 3.0
	下部一般鎖	φ70mm x 410m	1013kN	3.12 ＞ 3.0
	アンカー	ダンフォース型 17t	593kN	1.218 ＞ 1.2

浮体の安定性		
最大引込力時乾舷（最大波高時）	0.431m ＞ 0	
	水没しない	
最大引込力時メタセンター高さ	2.42m ＞ 0	
	安定	
最大傾斜角	41.0deg	
	装置・機器が水没しない	

添付資料２

＜設計総括表（装置設置後）＞

設　計　条　件						
設置位置	北緯:32° 29′ 06″　東経:133° 12′ 09″（世界測地系）				設計耐用年数	10年
水深	795m	風速 U_{10}	61.0m/s	波浪	有義波高 $H_{1/3}$	12.5m
底質	粘土	海水流速	2.06m/s		最大波高 H_{MAX}	25.0m
付着生物	80N/㎡				有義波周期 $T_{1/3}$	16.0s
適用基準	・漁港・漁場の施設の設計の手引　2003年版　(社)全国漁港漁場協会 ・浮魚礁設計・施工技術基準　平成4年3月　MF21					

設計強度の許容値						
許容応力度[N/mm²]	材質		SS400		SM490	
	荷重状態		常　時	一時的な荷重	常　時	一時的な荷重
	割増係数		1.0	1.5	1.0	1.5
	垂直応力度　（引張り、圧縮、曲げ）	t≦40	140	210	185	278
		t＞40	125	188	175	263
	せん断応力度	t≦40	80	120	105	158
		t＞40	75	113	100	150
二軸応力度の許容値	1.2					
係留部の安全率	3.0					
アンカーの安全率	1.2					

設　計　結　果					
浮体諸元	浮　体　径	8.0m	浮体本体高	3.10m	
	全　高	11.0m	全　浮　力	1450kN	
	照査対象	断面／材質	照査項目	照査結果	
	1. 甲板部〔デッキ部〕	PL-9（SS400）	四辺固定板としての照査	202.6N/mm2	＜ 210N/mm2
	2. 側板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	121.7N/mm2	＜ 210N/mm2
	3. 斜底板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	114.0N/mm2	＜ 210N/mm2
	4. 底板部	PL-12（SS400）	四辺固定板としての照査	80.2N/mm2	＜ 210N/mm2
	5. 係留環（尾筒部）	PL-150（SM490）	支圧応力度の照査	1322kN	＜ 3474kN
			はし抜け強度の照査	74.7N/mm2	＜ 150N/mm2
			応力集中部の照査	91.2N/mm2	＜ 263N/mm2

	照査対象		設計外力	安全率
係留部諸元	係留環接続部アンカーシャックル	φ97mm	1322kN	3.20 ＞ 3.0
	上部チェーン	φ81mm　x 25m	1322kN	3.02 ＞ 3.0
	ケーブル	素線φ7mm×73本（ケーブル径 92mm）x 710m	1303kN	3.38 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（上部）	φ81mm　x 25m	1200kN	3.01 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（中部）	φ111mm　x 80m	1176kN	3.21 ＞ 3.0
	下部補強チェーン（下部）	φ81mm　x 25m	1046kN	3.45 ＞ 3.0
	下部一般鎖	φ70mm　x 410m	1027kN	3.08 ＞ 3.0
	アンカー	ダンフォース型　17t	596kN	1.210 ＞ 1.2

浮体の安定性		
最大引込力時乾舷（最大波高時）	0.404m ＞ 0	※既存の設計計算書と値が異なる箇所を赤字で示す。
	水没しない	
最大引込力時メタセンター高さ	2.38m ＞ 0	
	安定	
最大傾斜角	43.0deg	
	装置・機器が水没しない	

添付資料３

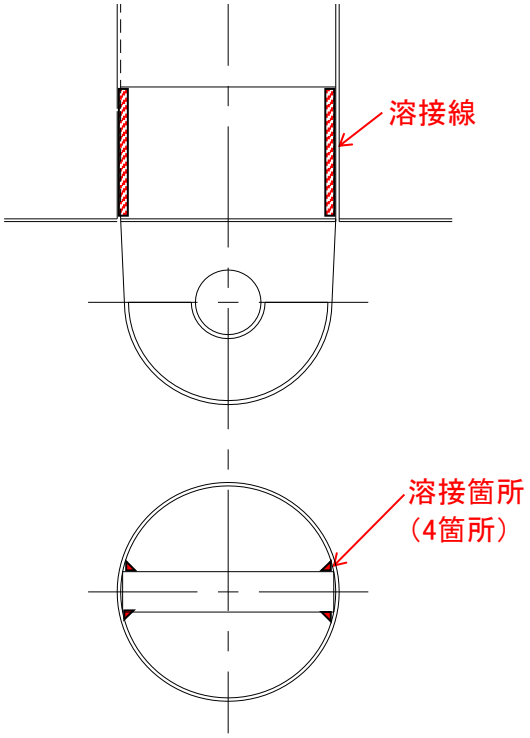
（7）係留環

1）設計条件

係留索最大張力：T = 1322.0 kN

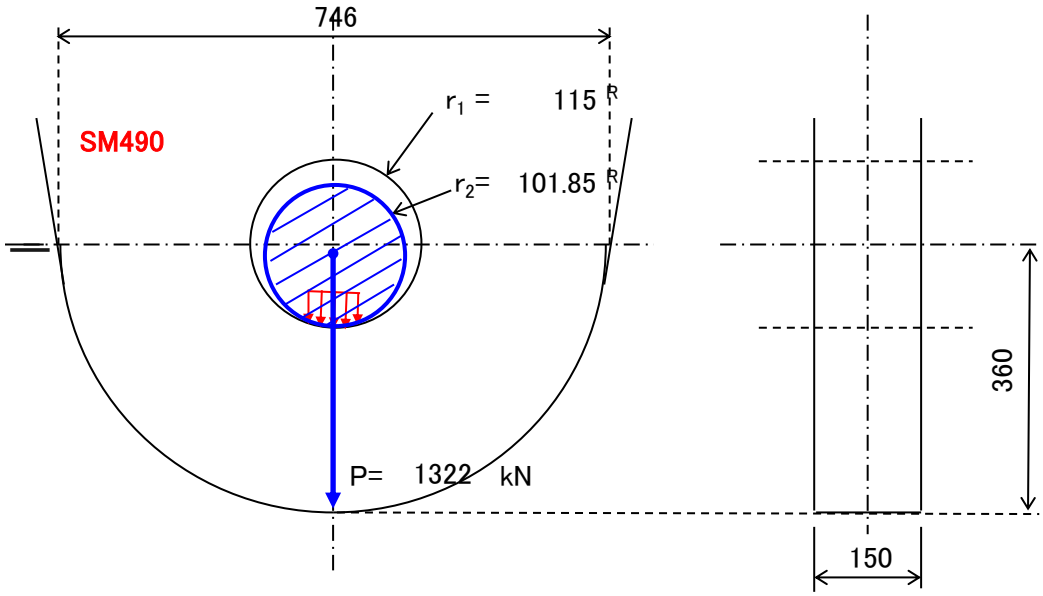
係留環腐食・磨耗代： 186 mm

係留環材質 ： SM490



2）ピン周りの照査

① 支圧



$$P_a = K_2 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 - r_2} \cdot t$$:許容荷重〔*-11〕

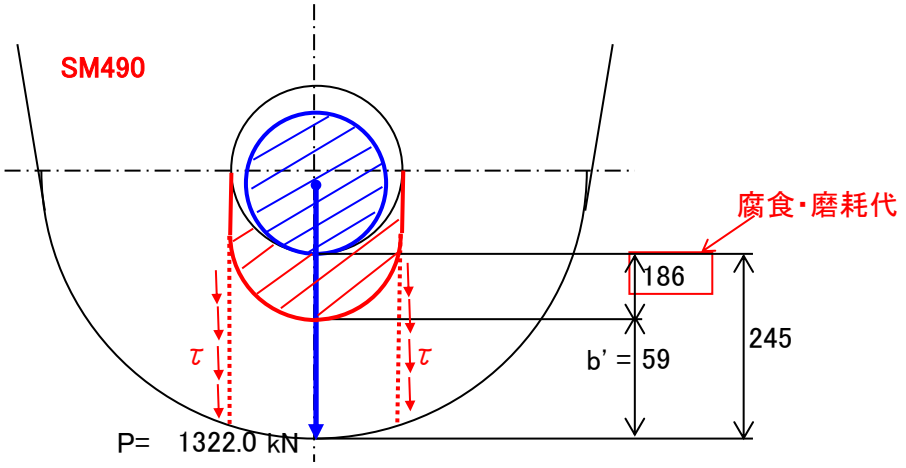
= 3474 kN ＞ P= 1322 kN OK

r_1/r_2= 1.13 ≧1.02

K_2 = 26 N/mm^2 :許容荷重係数（SM490）

※ヘルツの許容荷重係数の2倍とする〔*-12〕。

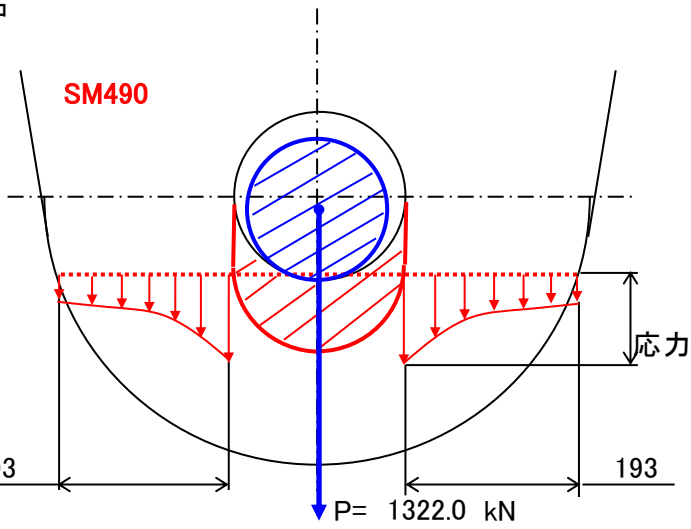
② はし抜け



$$\tau = \frac{P}{2 \cdot b' \cdot t}$$

$= 74.7\ N/mm^2 < \tau_a = 150\ N/mm^2$ (SM490-t>40)

③ 応力集中



応力集中率: $\alpha = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 4$ 〔*-12〕

$$\sigma = \alpha \times \frac{P}{2 \cdot b \cdot t}$$

$= 91.2\ N/mm^2 < \sigma_a = 263\ N/mm^2$ (SM490-t>40)

3)溶接部の照査

すみ肉サイズ 12 mm → 有効のど厚 a_e = 8.5 mm

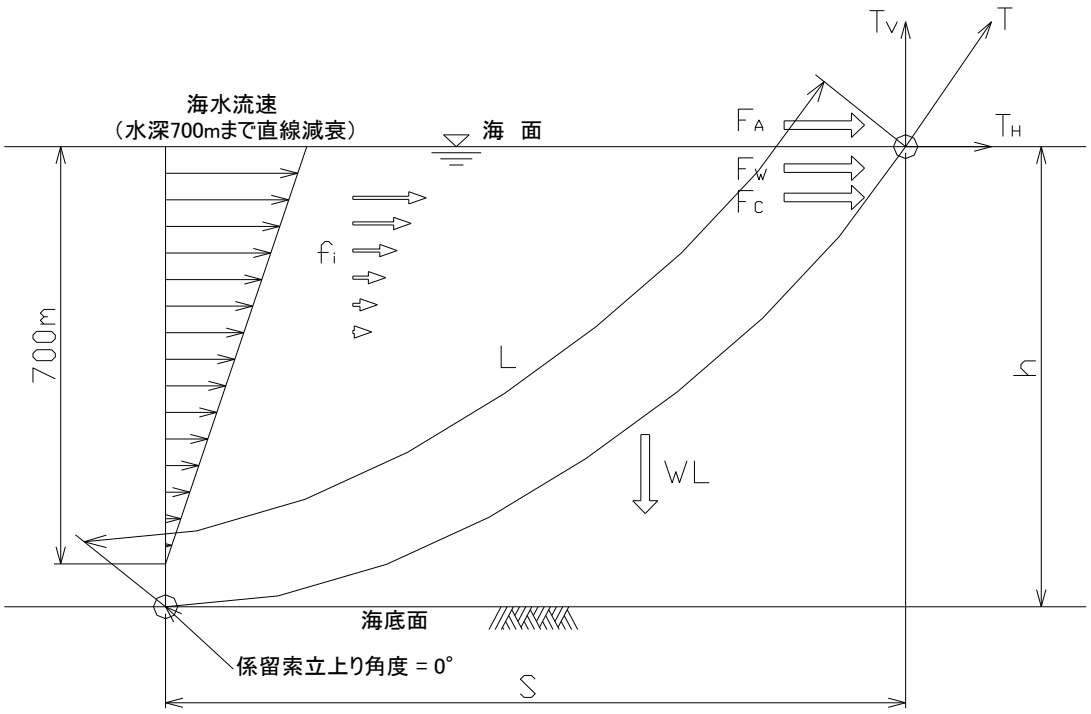
作用応力度 τ = P／(n・a_e・L) = 1322.0 × 10^3／(4・ 8.5 ・ 500)

= 77.9 N/mm^2 < τ a = 120 N/mm^2

ここで、n:4箇所(溶接箇所数)、L:500mm(溶接線長)

4. 係留索の設計

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして、作用外力を算出する。



h ： 水深

T ： 係留索張力

T_H ： 係留索上端に作用する水平力

T_V ： 係留索引揚力（=引込力）

L ： 係留索上端～着底点間の係留索長

S ： 同上部分の水平長

W ： 係留索の単位長さ当たりの水中重量

F_A ： 浮体本体に作用する風荷重

F_C ： 浮体本体に作用する海水流速圧力

F_W ： 浮体本体に作用する波力

f_i ： 係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力

各種荷重が作用した場合の係留索に対して、カテナリー計算を実施する。Wが不均一で、係留索に海水流速圧力が作用するため、簡単な関数で表現することはできない。よって、数値解析を用いてカテナリー計算を実施するものとする。

（1）係留索の構成

係留索の構成と実際の長さ〔接続用シャックル類を含んだ長さ〕は以下のとおりとする。

〔浮体本体〕～上側鎖（25m）～ケーブル（710m）～下側鎖（540m）～〔アンカー〕

1）係留索全長：L

L = 25 + 710 +(25 + 80 + 25 + 410)= 1275 m

2）係留索各部諸元

名　称	種　　類	仕　　様
上側鎖	電気溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ	JIS ﾌﾗｯｼｭﾊﾞｯﾄ溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ第3種　呼び径φ81mm
ｹｰﾌﾞﾙ	高耐食型　被覆平行線ｹｰﾌﾞﾙ	素線φ7mm×73本（ｹｰﾌﾞﾙ径 92mm）
下側鎖	電気溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ	JIS ﾌﾗｯｼｭﾊﾞｯﾄ溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ第3種 補強部：呼び径φ81mm/111mm/81mm 一般部：呼び径φ70mm

3）係留索各部重量

名　称	呼び径 (mm)	気中重量 (kN/m)	水中重量 (kN/m)
上部チェーン	φ81	1.504	1.307
ケーブル	φ7mm x 73本	0.300	0.230
下部補強チェーン（上部）	φ81	1.504	1.307
下部補強チェーン（中部）	φ111	2.824	2.454
下部補強チェーン（下部）	φ81	1.504	1.307
下側チェーン　一般部	φ70	1.123	0.976

※1. 表中の重量はJIS F 3303 p.7の1mあたりの質量算定式に、シャックル等の取り付けによる割増を考慮して求めたものである。

※2. 上表より、計算で想定した係留索重量（気中）は1012.2kN = 103.3ton、数量計算による重量は102.4tonで、誤差は1%未満である。

（2）作用外力

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして検討を行う。その時の乾舷は、　0.404　m であると仮定する。

1）風荷重F_A

浮体本体が受ける風荷重　Fa_1

$Fa_1 = (\rho/2g)\cdot V^2\cdot A\cdot C_d =$　9.1　kN

ρ：空気密度 (=　12.3　N/m^3)

g：重力加速度 (=　9.8　m/s^2)

V：風　速 (=　61.0　m/s)

A：受風面積 (=　8　×　0.404　=　3.2　m^2 ;本体)

C_d：抗力係数 (=　1.2　)　〔適用基準① P83 表2-6-2〕

マストが受ける風荷重　Fa_2

$Fa_2 = (\rho/2g)\cdot V^2\cdot A\cdot C_d =$　17.3　kN

各部の受圧面積および抗力係数

	受圧面積A(m^2)	抗力係数C_d	$A\cdot C_d$	Fa_2
(a)標識	0.47	1.8	0.85	2.0
(b)踊り場(ﾚｰﾀﾞｰﾚﾌ)	1.32	1.8	2.38	5.5
(c)マスト	3.50	1.2	4.19	9.8
合　計			7.42	17.3

※抗力係数は適用図書① P83 表2-6-2より決定

風荷重の合計

F_A　=　Fa_1　+　Fa_2　=　26.4　kN

2）海水流速圧力F_C

海水流速　$V_c = v + v_b$ =　3.80　m/s

v：潮流速（=　2.06　m/s）

v_b：吹送流速（= 0.03 × U_{60} =　1.74　m/s）

受圧面積A と抗力係数C_d

部　位	受圧面積		抗力係数
	算出式	A(m^2)	C_d
ブイ本体※	8.0 x (3.1 − 0.404) − 0.8 x 1.45 + 0.07 x 10.03	21.1	1.0
支柱※	(0.2674 + 0.07 x 2) x (2.0 − 0.175) x 4	3.0	1.0
ダンパー	0.175 x 4.70	0.8	2.0
合　計		24.9	

※付着生物厚さを考慮

浮体に作用する海水流速圧力

$F_C = (\gamma/2g) \cdot V_c^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d)$ =　191.3　kN

γ：海水の単位体積重量（=　10.1　kN/m^3）

g：重力加速度（=　9.8　m/s^2）

3）波力F_W

$F_W = (\gamma/2g) \cdot u_m^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d)$ =　319.5　kN

u_m：最大波による水粒子の水平流速（= $\pi H_m / T$ =　4.91　m/s）

H_m：最大波高（=　25　m）

T：波周期（=　16.0　s）

4）浮体本体に作用する外力の合計 F

$F = F_A + F_C + F_W$ =　537.1　kN

5）係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力f_i

$f_i = (\gamma/2g)\cdot V_Z^2 \cdot A \cdot C_d$

C_d: 抗力係数 (= 1.0) 〔適用基準② P36 3.2.5〕

Vz ： 海底面から高さzにおける潮流の流速 (=v･(1−(z−h))/700) (m/s)

z ： 海底面からの高さ

A ： 係留索の単位長さ当たりの受圧面積

係留索各部に作用する海水流速圧力は、数値解析にて求める。

（3）係留索の張力

1）各部での最大張力〔解析結果〕

･浮体から着底点までの係留索長	L =	1275	m
･浮体から着底点までの係留索水平長	S =	935	m
･係留環接続部に発生する係留索張力	T_1 =	1014	kN
･ワイヤーケーブル上端に発生する係留索張力	T_2 =	996	kN
･下部補強チェーン（上部）上端に発生する係留索張力	T_3 =	892	kN
･下部補強チェーン（中部）上端に発生する係留索張力	T_4 =	868	kN
･下部補強チェーン（下部）上端に発生する係留索張力	T_5 =	738	kN
･下部チェーン 一般部上端に発生する係留索張力	T_6 =	719	kN
･係留索着底部において係留索に発生する水平張力	T_H =	596	kN
･ブイに作用する係留索の引き込み力	T_V =	861	kN
･係留索に作用する海水流速圧力	F_K =	59	kN

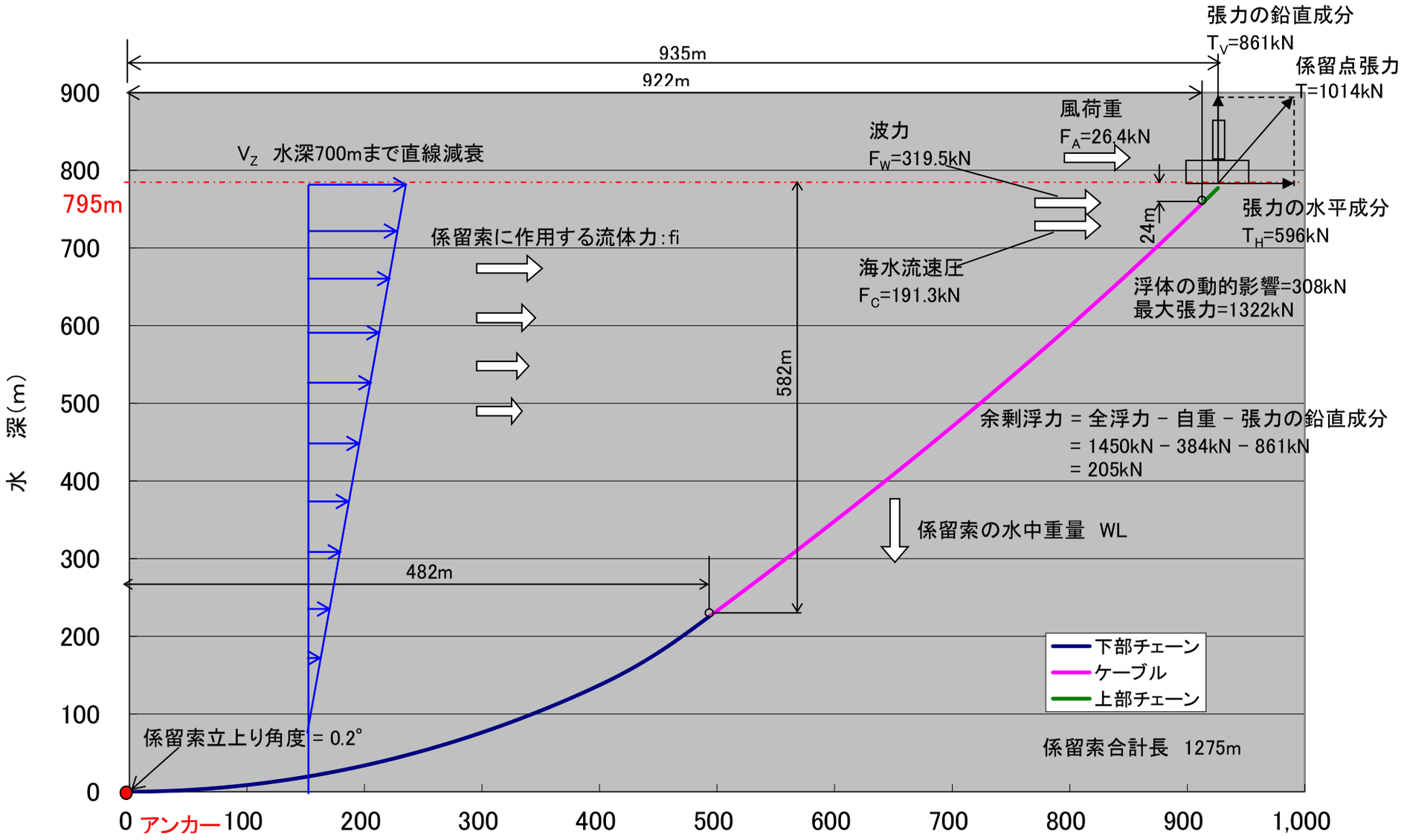
2）余剰浮力

･余剰浮力 = 浮体全浮力 − 浮体自重 − T_V = 1450 − 384 − 861 = 205 kN

3）乾舷

･乾 舷 = 余剰浮力／（浮体断面×海水の単位体積重量） = 0.404 m （仮定した値と等しい）

浮体断面 = 8.0 ^{2} × $\pi/4$ = 50.3 m^2



最大張力時のカテナリー形状

（4）係留索の強度検討

1）係留索各部での所要安全率

係留索の強度検討に用いる最大張力は、（3）の静的解析で求めた値に、浮体の動的な影響による変動外力を加えた値とする。変動外力は、浮体が　0.8　G〔*-10〕の加速度で上下動した場合の慣性力に等しいとみなす。

ΔT ＝　0.8　x　384　（浮体自重）＝　308　kN

最大張力

$T_{max1} = T_1 + \Delta T =$ 1322 kN
$T_{max2} = T_2 + \Delta T =$ 1303 kN
$T_{max3} = T_3 + \Delta T =$ 1200 kN
$T_{max4} = T_4 + \Delta T =$ 1176 kN
$T_{max5} = T_5 + \Delta T =$ 1046 kN
$T_{max6} = T_6 + \Delta T =$ 1027 kN

		呼び径 (mm)	最大張力 (kN)	破断強度 (kN)	安全率
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾋﾟﾝ		φ97	1322	4227	3.20 ＞ 3.0
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ		φ97	1322	4050	3.06 ＞ 3.0
上部ﾁｪｰﾝ	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（上部）	φ102	1322	4051	3.06 ＞ 3.0
	ｽｲﾍﾞﾙ	φ102	1322	6465	4.89 ＞ 3.0
	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（下部）	φ102	1322	4115	3.11 ＞ 3.0
	ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ	φ97	1322	4066	3.08 ＞ 3.0
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（上部）	φ81	1322	3986	3.02 ＞ 3.0
	一般部	φ81	1322	4246	3.21 ＞ 3.0
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（下部）	φ81	1322	4347	3.29 ＞ 3.0
ワイヤーケーブル		φ7mm x 73本	1303	4410	3.38 ＞ 3.0
接続部チェーン（スイベル）		φ87	1303	4958	3.80 ＞ 3.0
下部補強ﾁｪｰﾝ（上部）		φ81	1200	3610	3.01 ＞ 3.0
下部補強ﾁｪｰﾝ（中部）		φ111	1176	3769	3.21 ＞ 3.0
下部補強ﾁｪｰﾝ（下部）		φ81	1046	3610	3.45 ＞ 3.0
下部ﾁｪｰﾝ　一般部		φ70	1027	3165	3.08 ＞ 3.0

2）アンカーの照査

アンカー仕様	17 ton ダンフォースアンカー		
アンカー重量	167 kN（気中）	145 kN（水中）	
アンカー点張力	596 kN		
海底傾斜	無し	＋ 1 ／ 80	－ 1 ／ 80
アンカー傾斜荷重	0.0 kN	−1.8 kN	1.8 kN
アンカー点荷重	596.3 kN	594.5 kN	598.2 kN
アンカー把駐力係数K	5.0		
アンカーの把駐力	724 kN		
安全率（＞1.2）	1.21	1.22	1.21

※把駐力係数は、係留システム設計指針（（財）日本海事協会）〔*−13〕よりK=5.0とする。

3）腐食/磨耗後の呼び径D’及び破断強度の算出

チェーンは、想定した腐食・磨耗量だけ減耗した楕円形になると仮定し、その断面積と等価な円断面として評価し、破断強度を推定する。

		使用前		腐食・	10年後	破断強度
		呼び径	実径	磨耗量	呼び径	
		D(mm)	d(mm)	F(mm)	D'(mm)	T(kN)
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾋﾟﾝ		97	203.7	100	75.4	4227
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ		97	158	80	73.6	4050
上部ﾁｪｰﾝ	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（上部）	102	178	119	73.6	4051
	ｽｲﾍﾞﾙ	102	114.8	14	95.2	6465
	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（下部）	102	122	51	74.3	4115
	ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ	97	136	51	73.8	4066
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（上部）	81	97.2	17	73.0	3986
	一般部	81	81	10	75.5	4246
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ（下部）	81	97.2	10	76.5	4347
接続部チェーン（ｽｲﾍﾞﾙ）		87	97.9	10	82.2	4958
下部補強ﾁｪｰﾝ（上部）		81	81	20	69.2	3610
下部補強ﾁｪｰﾝ（中部）		111	111	58	70.8	3769
下部補強ﾁｪｰﾝ（下部）		81	81	20	69.2	3610
下部ﾁｪｰﾝ　一般部		70	70	10	64.5	3165

（5）ケーブルソケットの強度検討

ケーブル間の接続は、ソケットおよびチェーンを介して行うものとし、ケーブルと同等の強度を有するものとして設計する。（最大引張力； 1303 kN）

ソケット（ピン含む）の材質および強度は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.2、3.2.3〔*-14、15〕に従い下表のとおりとする。

				ソケット部（ピン部含む）	備　考
材　　質				S45CN	
許容応力度	ソケット	引張･圧縮	σ_a	210	道示Ⅱ3.2.2
		せん断	τ_a	120	道示Ⅱ3.2.2
		支　圧	τ_p	310	道示Ⅱ3.2.2
	ピン	せん断	σ_s	150	道示Ⅱ3.2.3
		曲　げ	σ_{bp}	290	道示Ⅱ3.2.3
		支　圧	σ_{ps}	155	道示Ⅱ3.2.3

耐用期間中の腐食･磨耗代は、他の部材と接触が無い一般部と、常に他の部材と接触している部分に分けて設定する。

一般部　：　0.15　mm/年　･･･ 適用基準①p166の表3-2-8を参考に0.15mm/年と設定

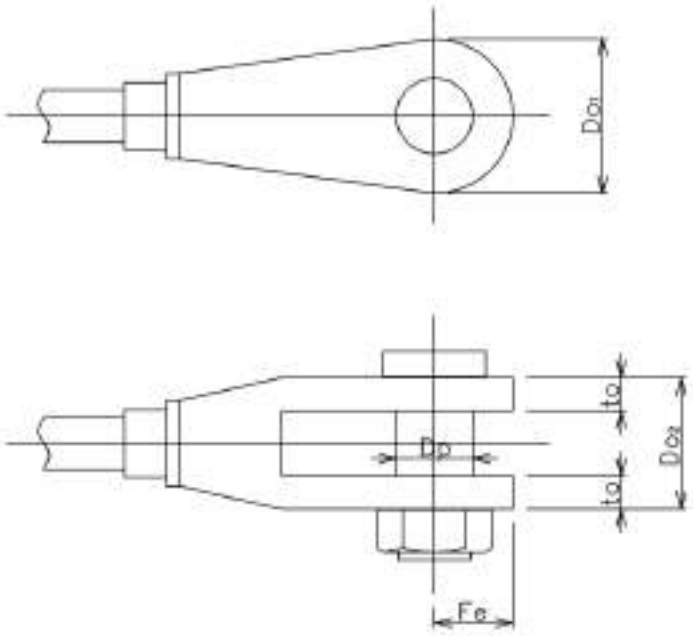
接触部（ピンとピン穴、ピン端部のフランジおよびナットとソケットフランジ部）

：　1.5　mm/年　･･･ 適用基準①p689ではチェーンの磨耗速度は1mm/年であるが、ソケットの材料（S45C）と比べ、チェーンの材料（SBC690）の方が硬いため、硬度差分より、磨耗量の割増（1.5倍）を設定した。

（a）ケーブルソケット形状

（単位：mm）

			使用前	10年後	備　考
ソケットフランジ部	横　幅	Do_1	370	367	
	縦　幅	Do_2	315	312	
	厚　さ	to	80	77	
	縁 開 き	Fe	185	183.5	
	ピン孔半径	Rh	91.5		
		rh_1		93	一般部
		rh_2		106.5	接触部
ピン	直　径	Dp	180	163.5	
	半　径	Rp	90		
		rp_1		88.5	一般部
		rp_2		75	接触部



(b)ケーブルソケットの強度検討

① ピン孔近傍の引張応力度　σ_1

ピン孔を通る横断面の応力照査は、応力集中係数 α = 4 を考慮する。

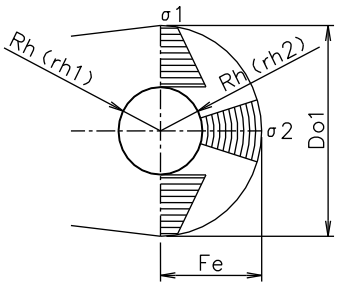
使用開始から10年後に腐食代が完全に消失した場合のピンとピン穴の関係を右下図に示す。

【当　初】σ_1 = 4Pmax／{(Do$_1$−2Rh)×to×2}

= 174.3 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_1' = 4Pmax／{(Do$_1$'−2rh$_1$)×to'×2}

= 187.0 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK



② ピン孔近傍の引張応力度　σ_2

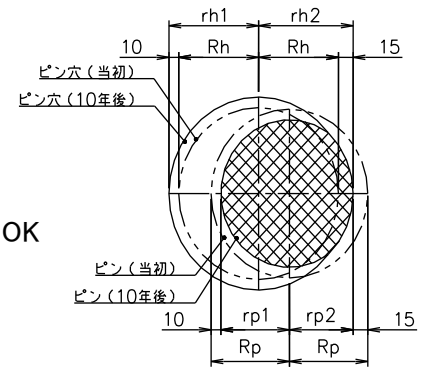
【当　初】σ_2 = Pmax／{(Fe−Rh)×to×2}

= 87.1 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_2' = Pmax／{(Fe'−rh$_2$)×to'×2}

109.9 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

(c)ピンの強度検討



① ピンの支圧応力度　σ_3

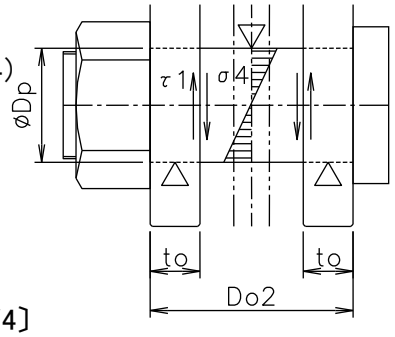
【当　初】σ_3 = Pmax／(2Rp × to × 2)

= 45.3 N/mm^2 ＜ 155 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_3' = Pmax／(2rp_2 × to' × 2)

= 56.4 N/mm^2 ＜ 155 N/mm^2 → OK

② ピンの曲げ応力度　σ_4



【当　初】σ_4 = Mp／Z = {Pmax × (Do_2−to)／4}／(π・Rp^3／4)

= 76574481 ／ 572555

= 133.7 N/mm^2 ＜ 290 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_4' = Mp／Z = {Pmax × (Do_2'−to')／4}／〔π・rp_2^3／4〕

= 76574481 ／ 331340

= 231.1 N/mm^2 ＜ 290 N/mm^2 → OK

③ ピンのせん断応力度　τ_1

【当　初】τ_1 = Pmax／(Rp^2 × π × 2)

= 25.6 N/mm^2 ＜ 150 N/mm^2 → OK

【10年後】τ_1' = Pmax／(rp_2^2 × π × 2)

= 36.9 N/mm^2 ＜ 150 N/mm^2 → OK

5. 浮体の安定性検討

(1)浮体の浮力と乾舷(喫水)

1)全浮力　1450kN

円柱部	1167kN	= 4.0 ^{2} x π x 2.3 x 1.03 x 9.8
円錐部	277kN	= πx 1 / 3 x (4.0 ^{2} + 4.0 x 2.550 + 2.550 ^{2})x1.03*9.8
係留環部	1kN	= 0.15 x 0.66 x 0.88 x 1 x 1.03 x 9.8
ダンパーステー	5kN	= 0.1337 ^{2} x π x 2.0 x 4 x 1.03 x 9.8
ダンパー	1kN	= 1.051 /7.85 x 1.03 x 9.8

2) 乾舷(係留索なし)　2.10m = (1450 - 384)/(4.0 ^{2} x π)/ 1.03/ 9.8

〔(全浮力-自重)/(ブイ半径^{2}xπ)/1.03/9.8〕

3) 乾舷　1.49m = (1450 -(384 + 310.2))/(4.0 ^{2} x π)/ 1.03/ 9.8

(係留索あり;静水時)　(全浮力-(自重+係留索))/(ブイ半径^{2}xπ)/1.03/9.8

※海底までのチェーンおよびケーブル重量を考慮

海底までのチェーンおよびケーブル重量

名称	水中重量 (kN/m)	長さ (m)	重量(kN)	
			本体	付着物
上部ﾁｪｰﾝ	1.307	25	32.7	0.7
ﾜｲﾔｰｹｰﾌﾞﾙ	0.230	710	163.4	---
下部補強ﾁｪｰﾝ(上部)	1.307	25	32.7	---
下部補強ﾁｪｰﾝ(中部)	2.454	32.89	80.7	---
合　計			309.4	0.7

（2）浮体の安定性

1）静的安定性

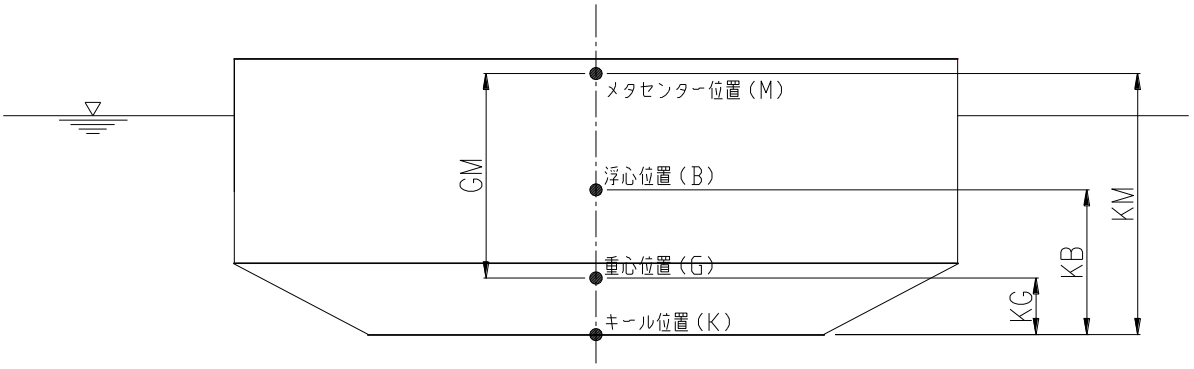
適用基準①（P685　第11編3.3.2）に従いメタセンター高さ（GM）が正であることを確認する。

浮体状態	GMが最も小さくなる状態
喫水	2.70m
喫水面の断面二次モーメント（I）	201m
排水量	1245 kN
排水容積（V）	123m3
重心高さ（KG）	0.70m
浮心高さ（KB）	1.45m

GM　＝　I/V−BG ＝ I/V−(KG−KB)

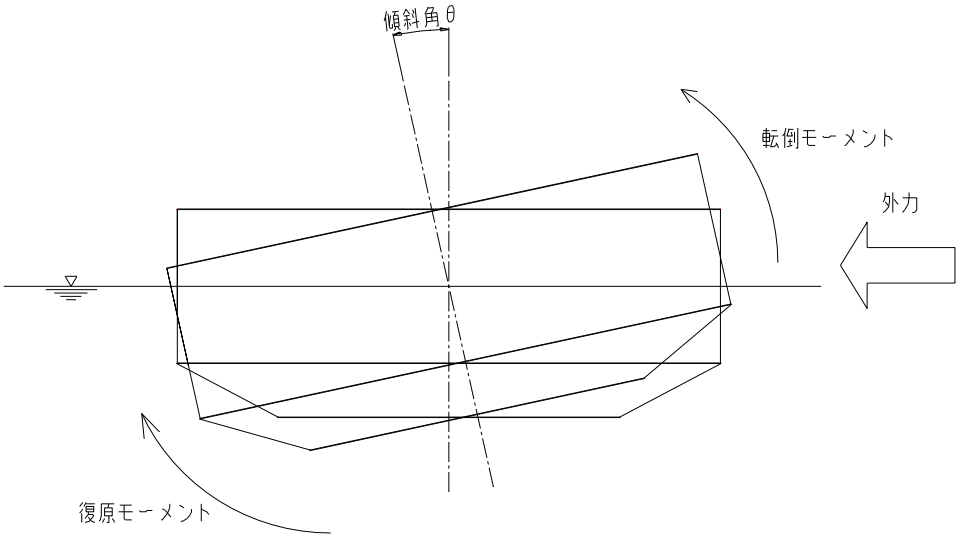
＝　201　／　123　−　（　0.70　−　1.45　）

＝　2.38　＞ 0m



2）動的安定性

適用基準①（P685 第11編3.3.2）に従い動的安定性について検討を行う。



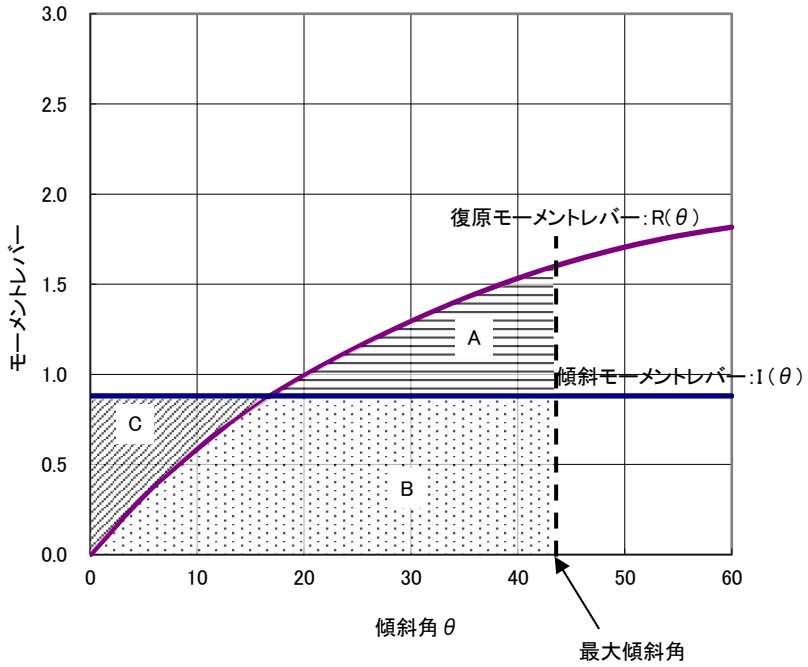
傾斜モーメント

項目	荷重(kN)	浮体係留点からの高さ(m)	傾斜モーメント(kN*m)
浮体本体が受ける風荷重	9.1	3.40	30.8
マストが受ける風荷重	17.3	7.02	121.5
波・海水流速による流体力	510.8	1.85	943.9
合計	537.1	2.04	1096.2

傾斜モーメントレバー　　I(θ) =　0.88m　　(傾斜モーメント/排水量)

復原モーメントレバー

deg	R(θ)(m)
0	0.00
5	0.32
10	0.59
15	0.81
20	0.99
25	1.15
30	1.29
35	1.42
40	1.53
45	1.63
50	1.71
55	1.77
60	1.82



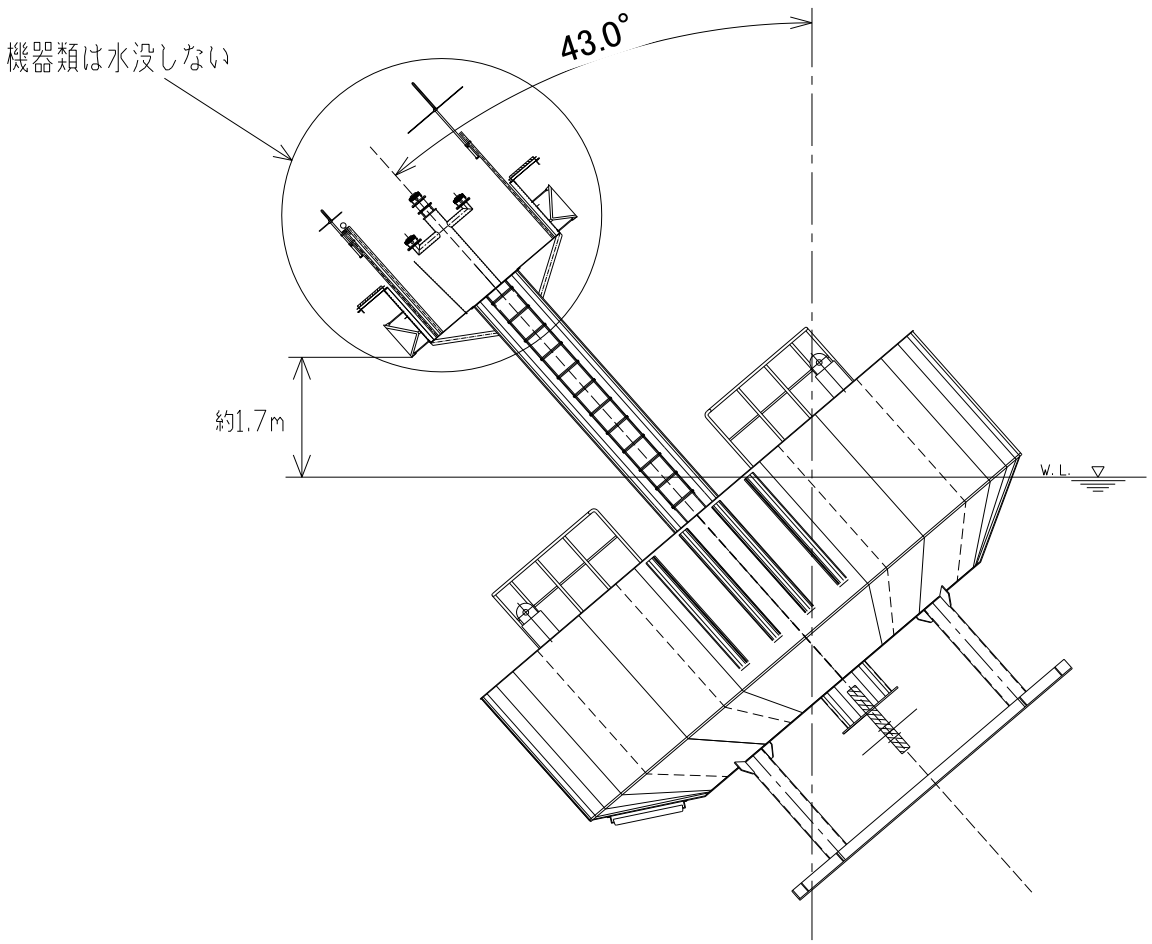
R(θ)　:復原モーメントレバー(m)　(復原モーメント/排水量)

動的安定性能の判定は適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い、下式により行なう。

$$\int_0^{\theta 1} R(\theta)d\theta \quad = \text{面積(A + B)} \quad > \quad 1.1\int_0^{\theta 1} I(\theta)d\theta \quad = 1.1 \times \text{面積(B + C)}$$

上式の右辺と左辺が一致するθ1(最大傾斜角)は、θ1 = 43.0 deg である。

下図より、43.0° 傾斜しても装置、機器類は水没しない。



2016 年 10 月 18 日

Hitz 日立造船株式会社

観測装置設置後の浮体動揺特性(周波数応答)に関する検討

1. 概要

本書は，東京大学地震研究所が行う「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究（研究代表者 加藤照之）において必要である「黒牧ブイ用観測装置」の設置に関わる検討である。「土佐黒潮牧場１８号ブイ」への観測装置の搭載による影響を考慮し，上下揺の動揺特性（周波数応答）を求め，観測精度の向上を図るものとする．

GPS 波浪計などの小型ブイの鉛直方向動揺（上下揺）では，4～5 秒程度に固有周期を有する場合が多く，周期 8 秒以上の波浪に対しては良く追従し，観測には問題ないが，周期 6 秒以下の波浪に対しては上下揺の動揺特性が影響し，観測値に誤差を生じることが知られている．このため，従来の浮体動揺解析を用いて，上下揺の動揺特性（周波数応答）を求めておき，GPS 測位で得られたブイの鉛直運動にこの周波数特性を考慮することによって，周期 6 秒以下の波浪観測精度を向上させる方法が考案されている．

2. 動揺解析手順

係留動揺シミュレーションに，単一周期・単一波高（規則波）を外力として入力し，ブイの鉛直運動の波に対する応答を求める．外力としては，規則波のみとし，風や潮流，波漂流力は考慮しない．鉛直運動の応答値を必要な周波数間隔で順次求めれば，周波数応答関数と固有周期を算出することができる.これらの計算手順を図１に示す.

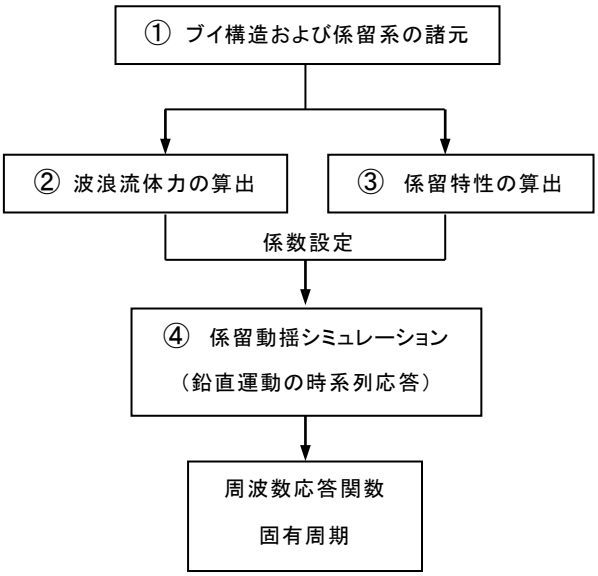


図1 ブイ上下揺に関する周波数応答関数算定手順

①ブイ構造および係留系の諸元

黒牧 18 号の浮体，係留索の諸元を下表および図２に示す．これらの諸元を④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いる．

表１ 浮体諸元

	黒牧18号
ブイ径(m)	8.00
浮体高さ(m)	3.10
喫水(m)	1.61
乾舷(m)	1.49
斜面高さ(m)	0.80
底板径(m)	5.10

表２ 係留索諸元

	黒牧18号	
	呼び径(mm)	長さ(m)
上部鎖	81	25
ケーブル	92	710
下部補強鎖／上	81	25
下部補強鎖／中	111	80
下部補強鎖／下	81	25
下部一般鎖	70	410

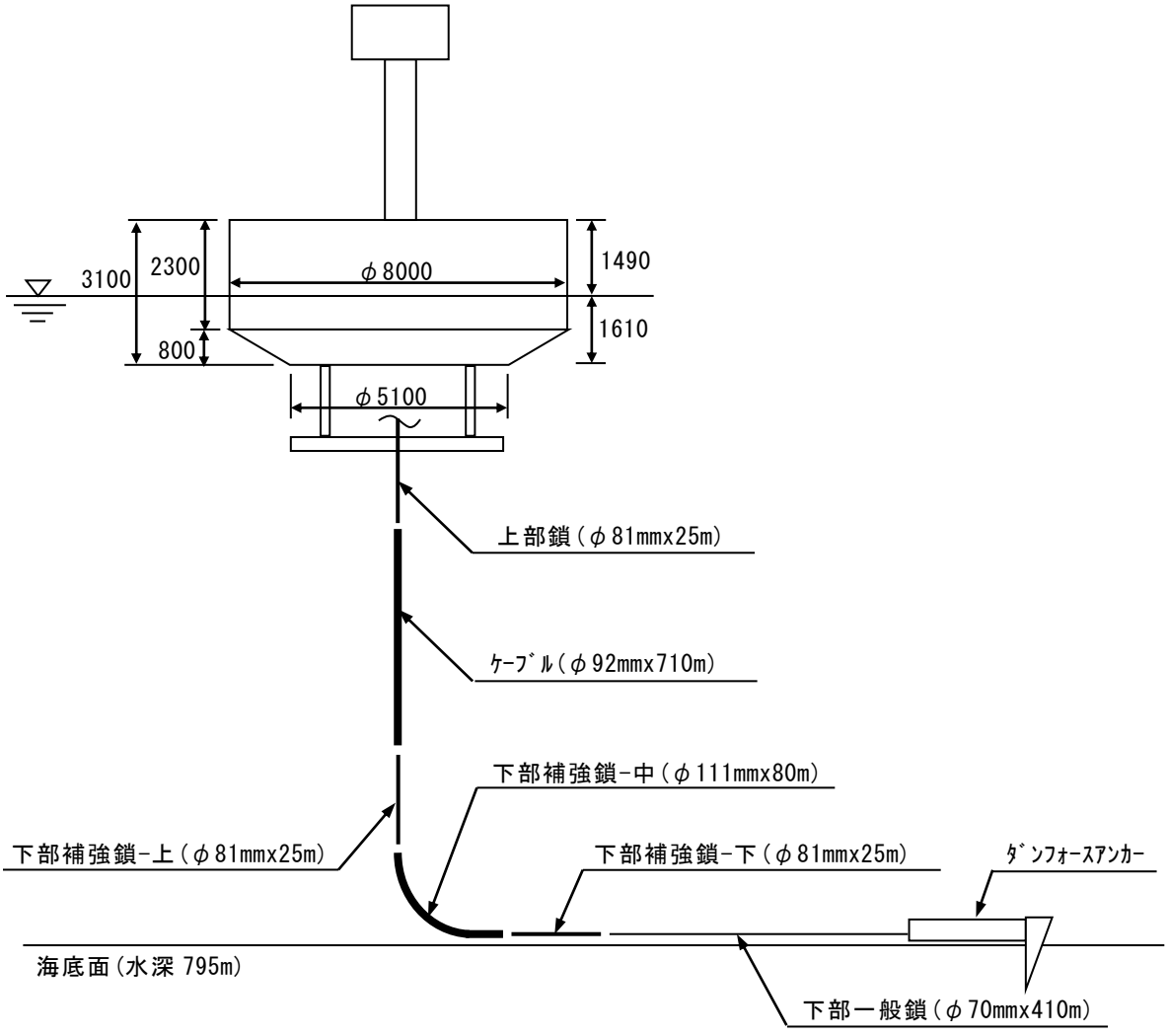


図２ 黒牧 18 号浮体形状及び係留索構成図

②波浪流体力の算出

三次元の特異点分布法により，付加質量などの波浪流体力を算出する．三次元特異点分布法に用いる計算メッシュの分割例を図３に示す．この計算結果は④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いられる．

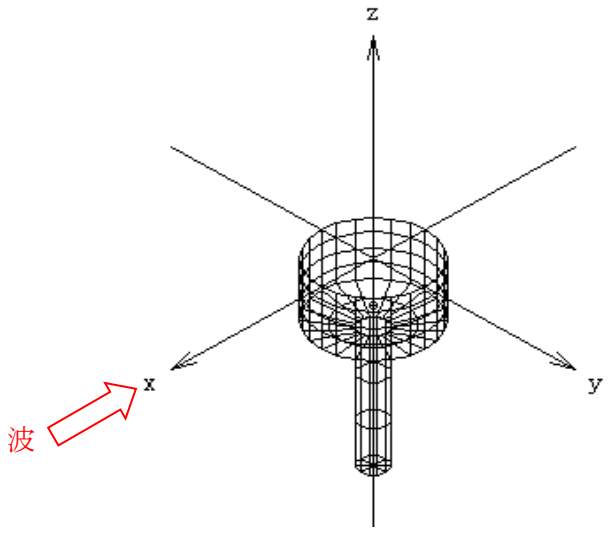


図３　数値計算メッシュの一例

③係留特性の算出

ブイの移動に伴う係留反力を算出する．図４に示すカテナリーモデルより，ブイの変位と係留張力の関係を求める．この計算結果は④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いられる．

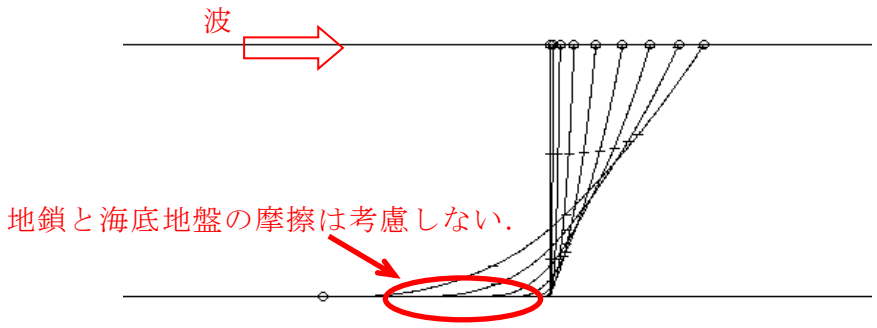


図４　係留索カテナリーモデル

④係留動揺シミュレーション

算出された波浪流体力および外力データを用いて，係留ブイの動揺シミュレーションを実施する．基本的には，次式に示す運動方程式を解き，ブイ動揺変位について時刻歴応答を出力する．

$$\sum_{j=1}^{6}\left[\left(M_{ij}+A_{ij}\right)\ddot{X}_i(t)+B_{ij}\dot{X}_i(t)+N_{ij}\left|\dot{X}_i(t)\right|\dot{X}_i(t)+C_{ij}X_i(t)\right]=F_i(t)$$

$$(i=1,2,\cdots,6)$$

ここで，

X_i：ブイの変位

M_{ij}：ブイの質量もしくは慣性モーメント

A_{ij}：付加質量もしくは付加慣性モーメント

B_{ij}：造波減衰係数

N_{ij}：粘性減衰係数

C_{ij}：静的復原力

$F_i(t)$：外力（波強制力，係留力）

3. 動揺解析結果

黒牧 18 号の上下揺周波数応答を算出した．その結果を図５及び表３に示す．図の縦軸は，ブイの上下揺の応答値を入射波振幅で除したもの，横軸は，周期を示す．

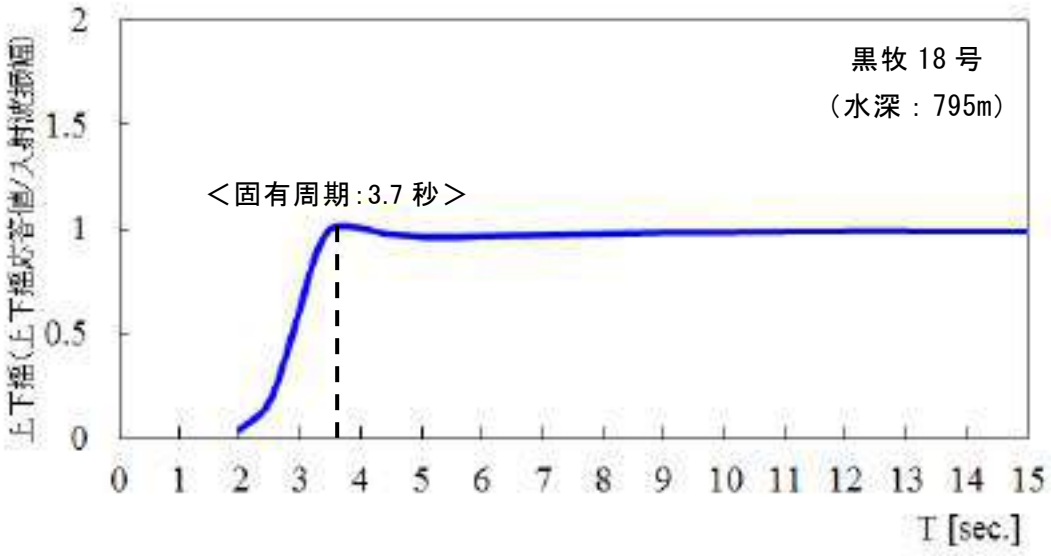


図5 黒牧 18 号の上下揺周波数応答

表3 上下揺周波数応答の数値データ

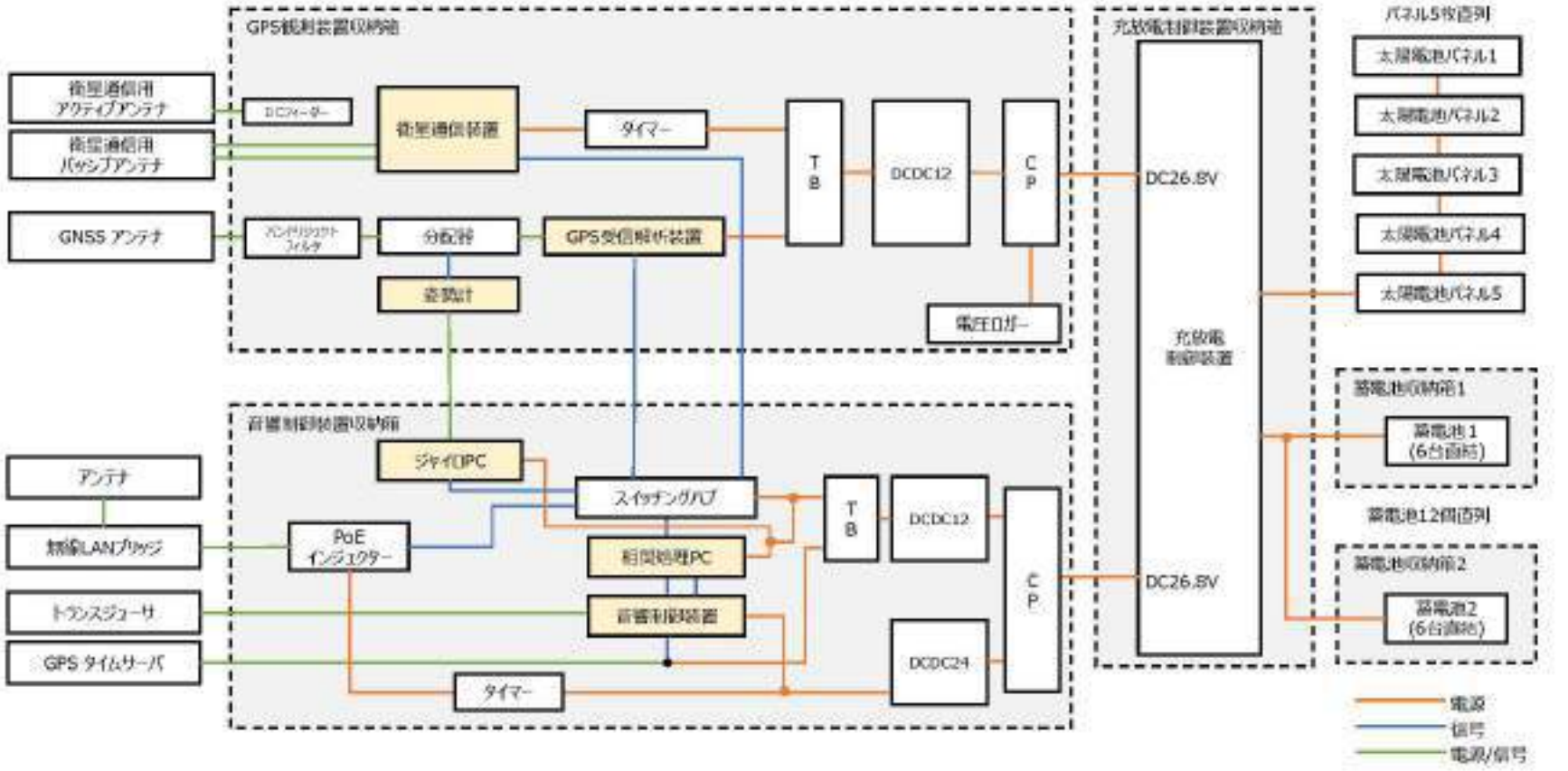
波周期T [sec.]	上下揺 [m/m]
2.0	0.04
2.5	0.18
3.0	0.62
3.1	0.73
3.2	0.83
3.3	0.91
3.4	0.97
3.5	1.00
3.6	1.02
3.7	1.02
3.8	1.02
3.9	1.01
4.0	1.01
4.1	1.00
4.2	0.99
4.3	0.99
4.4	0.98
4.5	0.98

波周期T [sec.]	上下揺 [m/m]
5.0	0.96
5.5	0.96
6.0	0.97
7.0	0.97
8.0	0.98
9.0	0.99
10.0	0.99
12.0	0.99
15.0	0.99
20.0	0.99
25.0	0.99

２．ブイ上システムの改良フロー

当初のブイ上計測システム

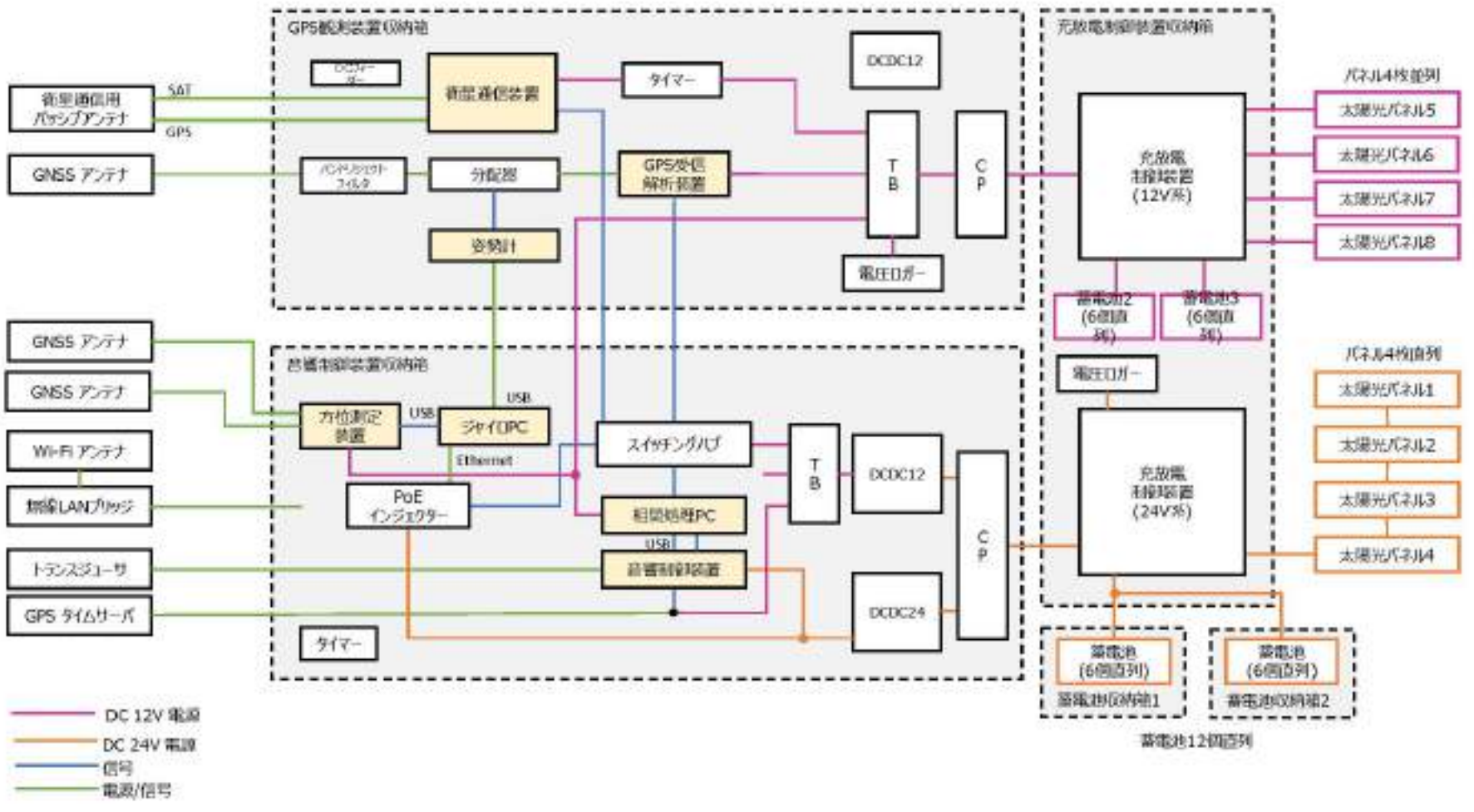
	消費電力
24V系	30.68 W

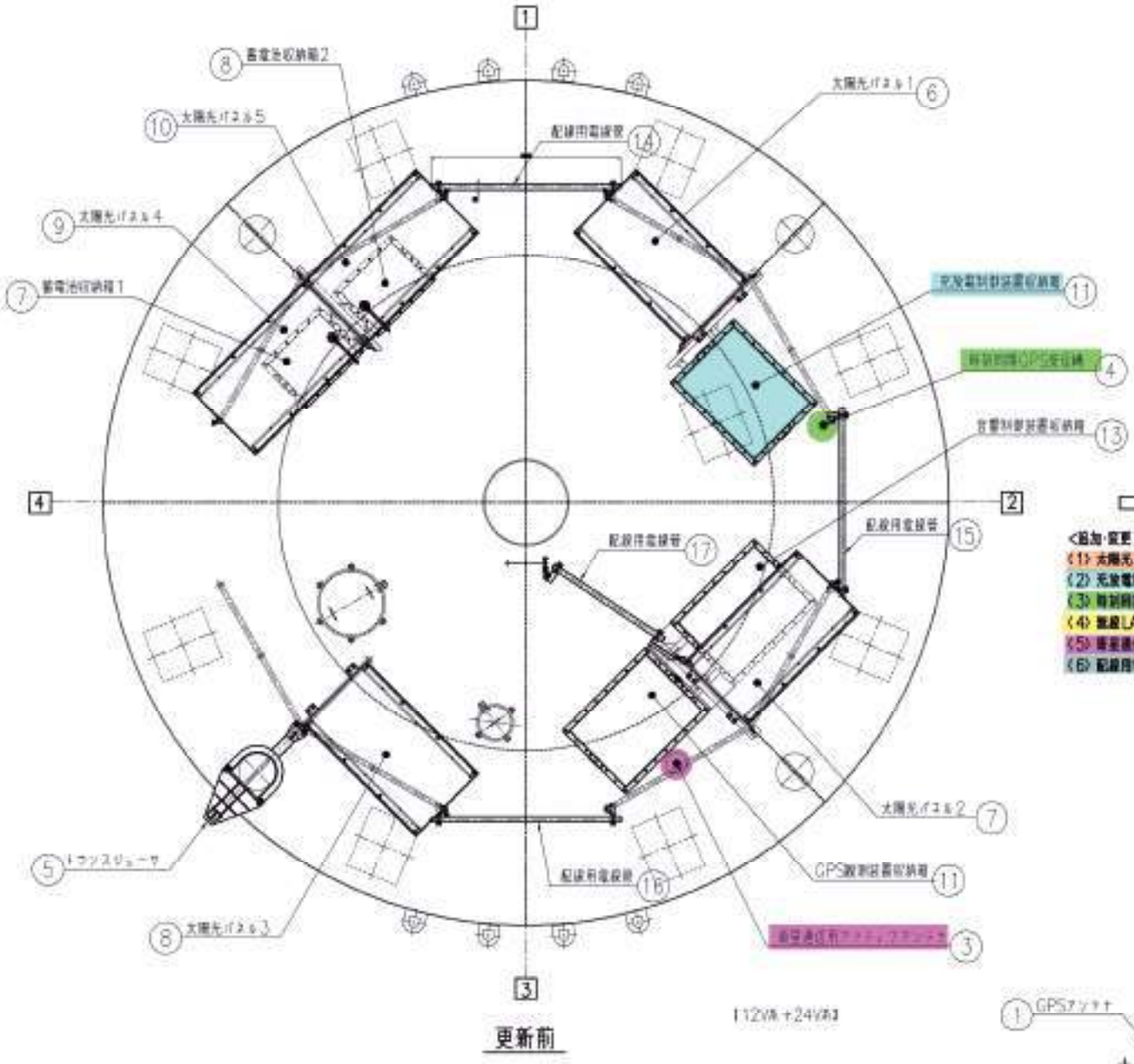


ブイ上計測システムの改良

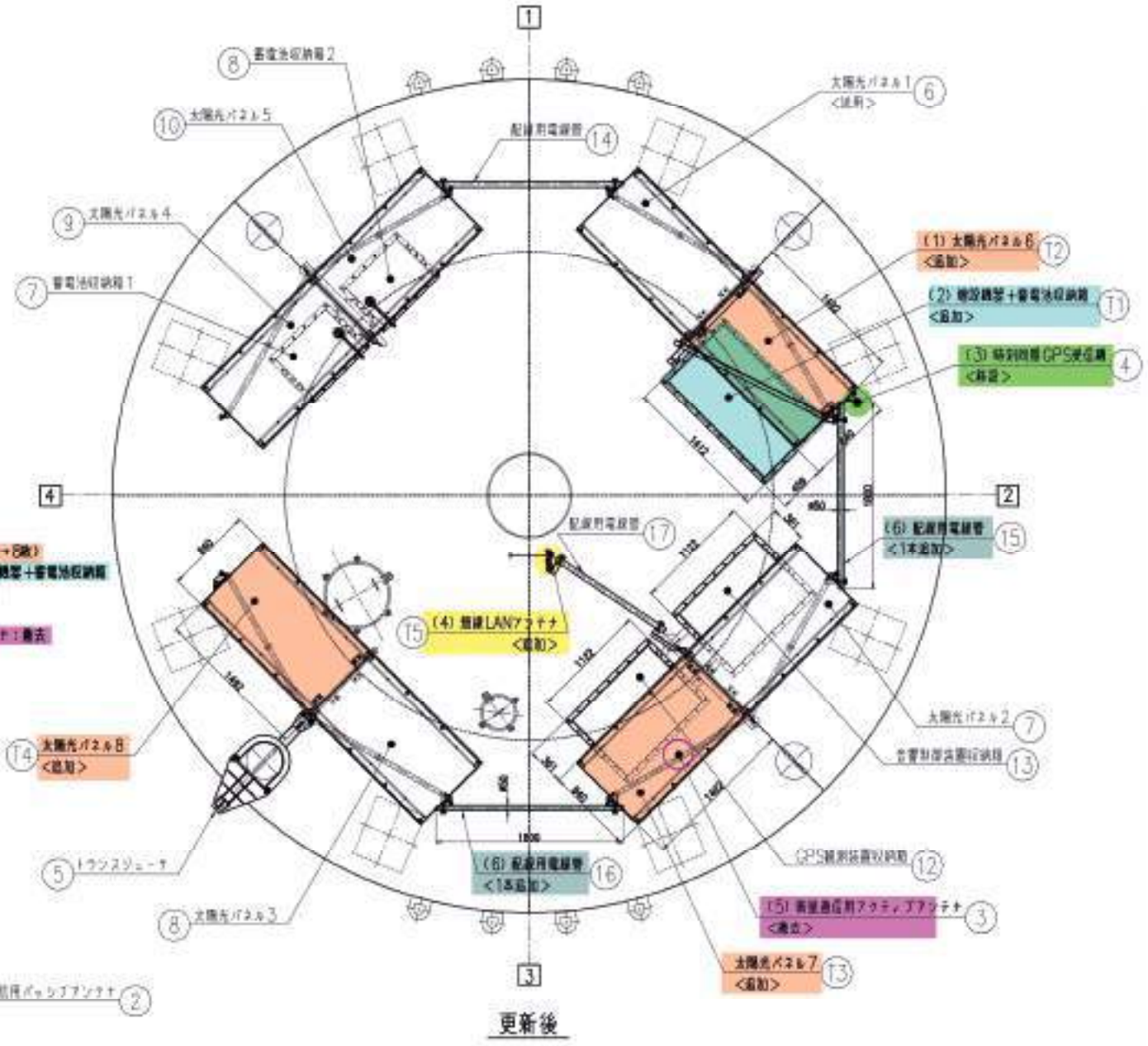
電源改良後のブイ上計測システム

	消費電力
12V系	16.59 W
24V系	14.29 W





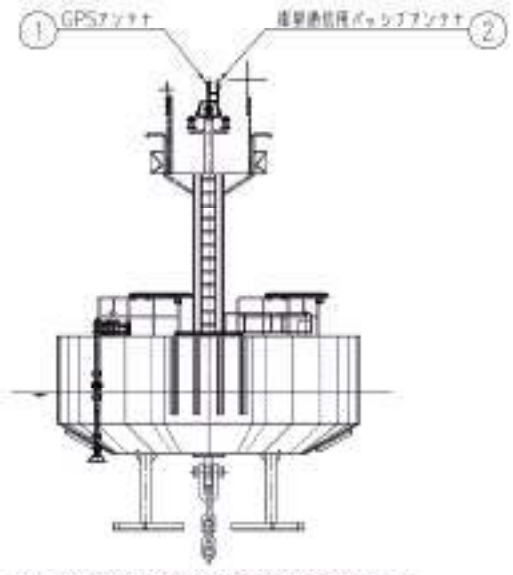
更新前



更新後

<追加・変更>
(1) 太陽光パネル 3枚追加（5枚→8枚）
(2) 充放電制御装置収納箱→機器収納架＋蓄電池収納箱
(3) 時刻同期GPS受信機：移設
(4) 無線LANアンテナ：追加
(5) 指向通信用アクティブアンテナ：撤去
(6) 配線用電線管（2本追加）

112VA＋24VA3



アンテナ取付位置（更新前後変更無し）
縮尺：1/200

3．電源改良（2019/9)後の安定計算・係留計算に基く配置

年　度	2019年度	図面番号	K001
工事名	足摺沖GNSSブイの給電増強		
図面名称	機器配置図（1／2）		
縮　尺	1/60	単　位	mm
設計年月日	2019.09.17	組　数	－
関西設計株式会社			

足摺沖GNSSブイの給電増強工事

4．電源改良（2019/9)後の機器材

2019年9月17日

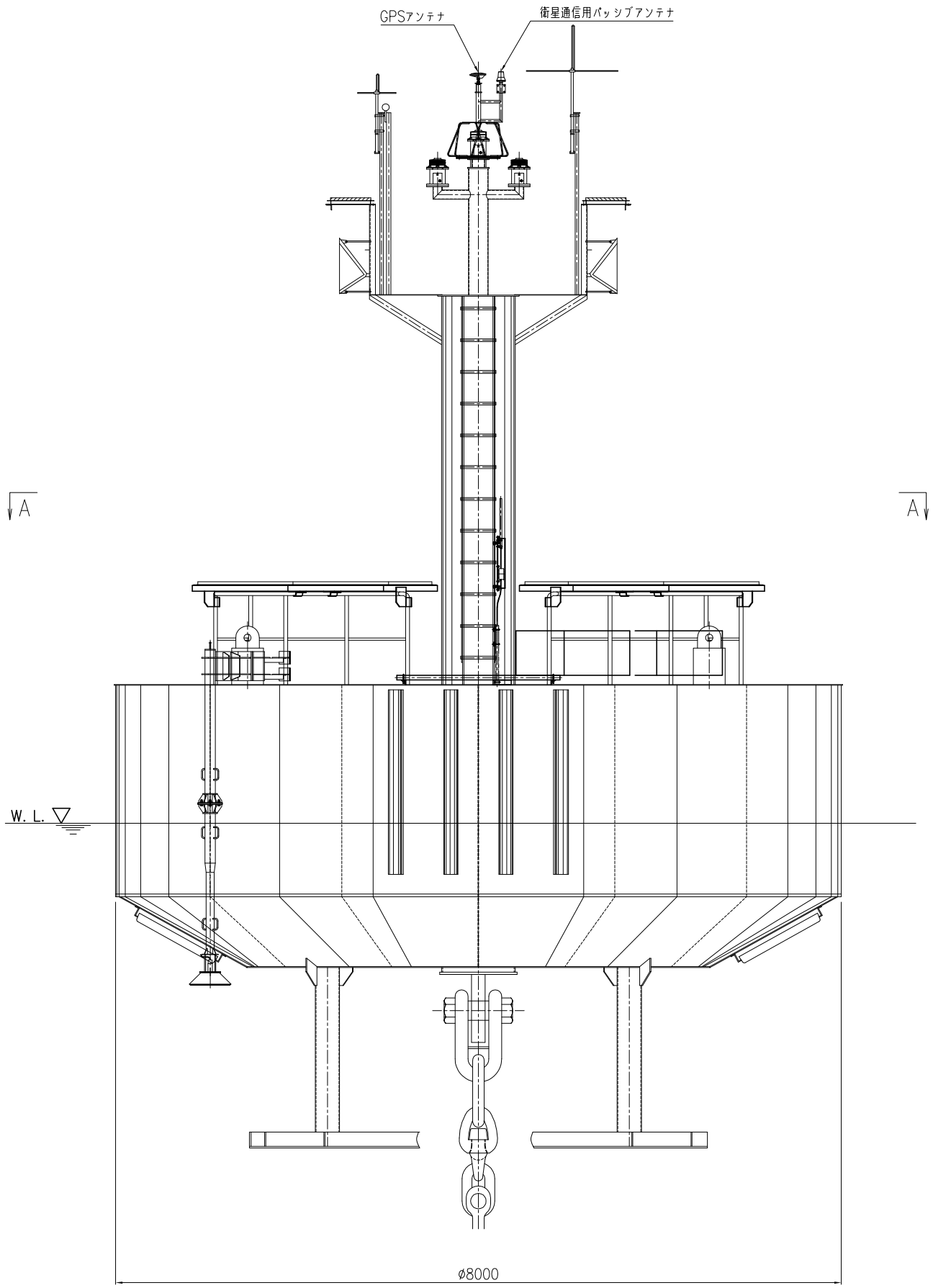
観測装置による占有面積

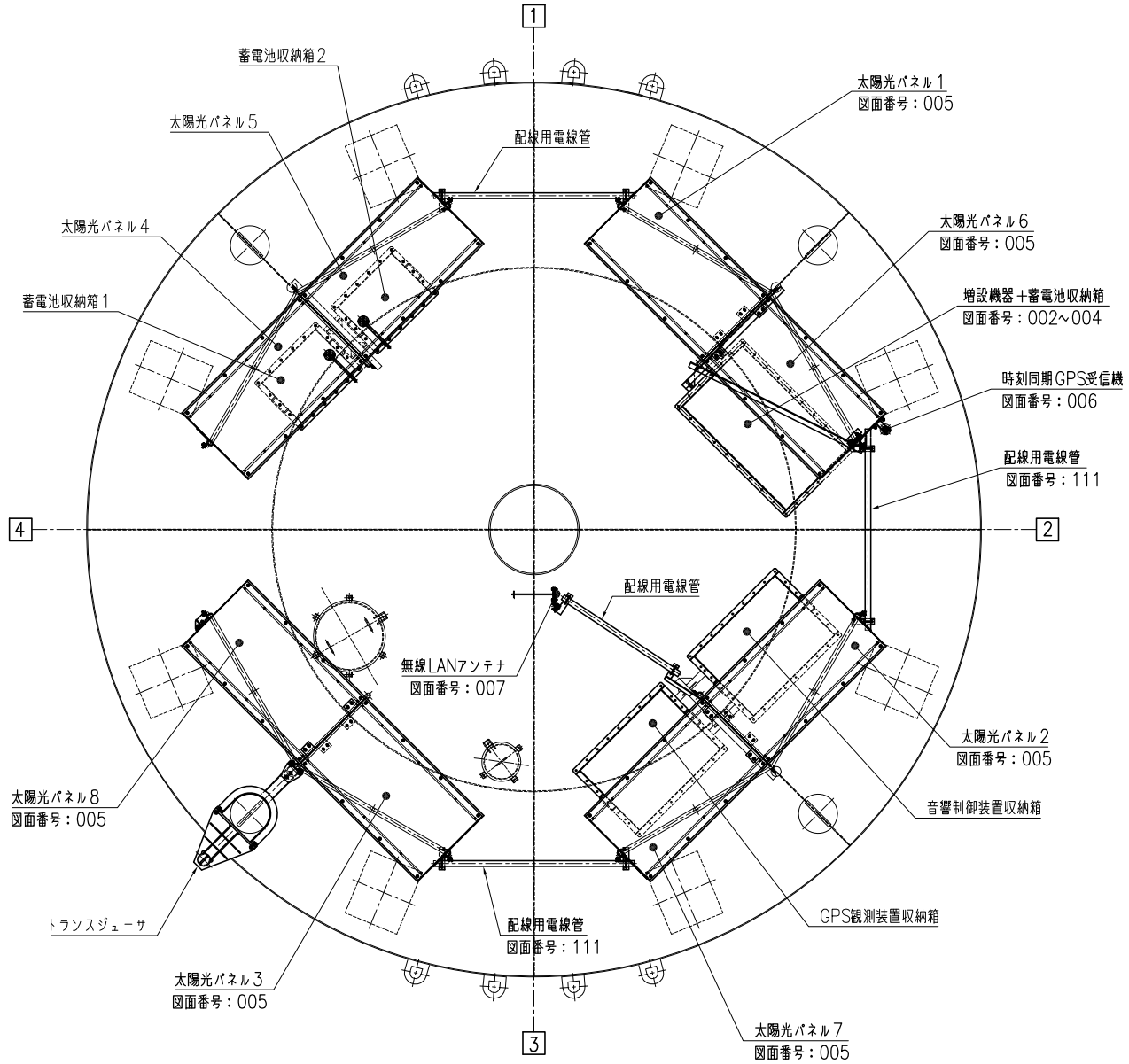
【更新後】

番号	占有物	占有範囲[mm]	面積[m^2]
①	GPSアンテナ	φ480	0.18
②	衛星通信用パッシブアンテナ	φ94	0.01
③	衛星通信用アクティブアンテナ	【撤去】	0
④	時刻同期GPS受信機	【移設】148×140	0.02
⑤	トランスジューサ	1,291×500	0.65
⑥	太陽光パネル1	1,492×840	1.25
⑦	太陽光パネル2 （一部、増設機器+蓄電池収納箱を含む）	1,492×840	1.25
⑧	太陽光パネル3	1,492×840	1.25
⑨	太陽光パネル4 （蓄電池収納箱1を含む）	1,492×840	1.25
⑩	太陽光パネル5 （蓄電池収納箱2を含む）	1,492×840	1.25
⑪	充放電制御装置収納箱	【撤去】	0
⑫	音響制御装置収納箱 （一部は太陽光パネル2に含まれる）	1,122×361	0.41
⑬	GPS観測装置収納箱 （一部は太陽光パネル7に含まれる）	1,122×361	0.41
⑭	配線用電線管1	φ50×1,800	0.09
⑮	配線用電線管2 （配線用電線管[追加分]を含む）	φ50×1,800	0.09
⑯	配線用電線管3 （配線用電線管[追加分]を含む）	φ50×1,800	0.09
⑰	配線用電線管4	φ50×1,250	0.06
	今回追加分		
T1	増設機器+蓄電池収納箱 （一部は太陽光パネル6に含まれる）	1,412×459	0.41
T2	太陽光パネル6	1,492×840	1.25
T3	太陽光パネル7	1,492×840	1.25
T4	太陽光パネル8	1,492×840	1.25
T5	無線LANアンテナ	150×130	0.02
		合計	12.45

【更新前】

番号	占有物	占有範囲[mm]	面積[m^2]
①	GPSアンテナ	φ480	0.18
②	衛星通信用パッシブアンテナ	φ94	0.01
③	衛星通信用アクティブアンテナ	φ201	0.03
④	時刻同期GPS受信機	162×160	0.03
⑤	トランスジューサ	1,291×500	0.65
⑥	太陽光パネル1	1,492×840	1.25
⑦	太陽光パネル2 （一部、GPS観測装置収納箱を含む）	1,492×840	1.25
⑧	太陽光パネル3	1,492×840	1.25
⑨	太陽光パネル4 （蓄電池収納箱1を含む）	1,492×840	1.25
⑩	太陽光パネル5 （蓄電池収納箱2を含む）	1,492×840	1.25
⑪	充放電制御装置収納箱	1,122×852	0.96
⑫	音響制御装置収納箱 （一部は太陽光パネル2に含まれる）	1,122×361	0.41
⑬	GPS観測装置収納箱	1,122×852	0.96
⑭	配線用電線管1	φ50×1,800	0.09
⑮	配線用電線管2	φ50×1,800	0.09
⑯	配線用電線管3	φ50×1,800	0.09
⑰	配線用電線管4	φ50×1,250	0.06
		合計	9.81





A–A

5．電源改良後（2019/9)の配置図

年　度	2019年度	図面番号	001
工事名			
図面名称	全体配置図		
縮　尺	1/60	単　位	mm
設計年月日	2019.09.13	組　数	-
関西設計株式会社			

2019年9月17日
神奈川県温泉地学研究所

観測措置設置後の浮体の安全性・安定性に関する検討

1. はじめに

2011年11月において、高知県土佐清水市足摺岬沖に設置された表層型浮漁礁「土佐黒潮牧場18号」(以下、黒牧18号)は、2016年より「津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究で活用されている。今年度に、本研究に資する観測装置の追加が実施される予定であるため、黒牧18号の浮体の全重量が変更となる。
このため本報では、それに伴う「1)浮体の安定性」と「2)係留設備の安全性」に関する検討結果を報告する。

なお，追加される観測装置は2021年2月末に撤去予定である。そのため，本検討は耐用年数9.25年(9年3ヶ月)にて実施する。撤去後(9.25年～10年)における浮体の安全性・安定性は装置追加前と同等となる。

黒牧18号設置	:	2011年11月25日
追加装置撤去	:	2021年 2月25日 (予定)
期間	:	9年3ヶ月(9.25年)

2. 検討項目

観測装置の追加に伴い表層型浮漁礁の設計計算に変更が生じる箇所は、以下の通りである。

1) 係留環
2) 係留索
3) 浮体の安定性

3. 観測装置諸元

Table-1に観測装置の据付位置と重量を示す。表中の座標は、甲板上面の中心を原点としたときのものである。観測装置の追加により、重量は現状から532kg増加していることが分かる。

Table-1 観測装置の据付位置と重量

No.	名称	座標※			重量	備考
		X	Y	Z	(kg)	
1	太陽光パネル1	1276	2331	1021	39	2枚タイプ
2	太陽光パネル2	2331	-1276	1021	39	2枚タイプ
3	太陽光パネル3	-1276	-2331	1021	39	2枚タイプ
4	太陽光パネル4	-2331	1276	1021	39	2枚タイプ
5	太陽光パネル5	-1276	2331	1021	39	2枚タイプ
6	太陽光パネル6	2331	1276	1021	39	2枚タイプ(追加)
7	太陽光パネル7	1276	-2331	1021	39	2枚タイプ(追加)
8	太陽光パネル8	-2321	-1276	1021	39	2枚タイプ(追加)
9	蓄電池収納箱1	-2020	1374	346	200	既設
10	蓄電池収納箱2	-1340	2054	346	200	既設
11	増設機器 + 蓄電池収納箱	2063	907	415	467	追加
12	音響制御装置収納箱	2064	-1040	346	111	既設
13	GPS観測装置収納箱	1041	-2063	346	108	既設
14	GPSアンテナ	0	0	6744	14	既設
15	衛星通信用アクティブアンテナ	-	-	-	0	撤去
16	衛星通信用パッシブアンテナ	250	0	6759	3	既設
17	時刻同期用GPS受信機	3148	897	1021	2	既設
18	トランスジューサ	-2957	-2957	203	214	既設
19	無線LANアンテナ	249	-581	1335	8	既設+追加
20	配線用電線管・固定金具等	0	0	500	68	既設+追加
				合計	1707	
				前回	1175 kg	
				今回増加分	532 kg	

※ 座標について

X,Y：ブイ中心を原点とする

Z　：デッキ上0m(喫水面から約1.5m)地点

4. 検討結果

2章で述べた各検討項目に対し、観測装置の追加前後における設計計算値の比較をTable-2～Table-4に示す。

1）係留環

Table-2 係留環に関わる照査

照査対象	計算値		許容値
	装置追加前	装置追加後	
支圧応力度の照査	1322 kN	1327 kN	3474 kN
はし抜け強度の照査	74.7 N/mm²	75.0 N/mm²	150 N/mm²
応力集中部の照査	91.2 N/mm²	91.6 N/mm²	263 N/mm²

2）係留索

Table-3 係留索に係る照査

照査対象		計算値				許容値（安全率）
		装置追加前		装置設置後※		
		設計外力	安全率	設計外力	安全率	
係留環接続部アンカーシャックル		1322 kN	3.198	1327 kN	3.185	3.0 以上
上部チェーン		1322 kN	3.016	1327 kN	3.004	
ケーブル		1303 kN	3.383	1308 kN	3.372	
下部補強チェーン	（上部）	1200 kN	3.008	1205 kN	3.077	
	（中部）	1176 kN	3.205	1181 kN	3.517	
	（下部）	1046 kN	3.452	1051 kN	3.528	
下部一般鎖		1027 kN	3.082	1032 kN	3.107	
アンカー		596 kN	1.210	598 kN	1.207	1.2 以上

※装置設置後のチェーンに関しては耐用年数9.25年にて検討

3）浮体の安定性

Table-4 浮体の安定性に係る照査

照査対象	計算値		許容値
	装置追加前	装置設置後	
最大引込力時乾舷（最大波高時）	0.404 m	0.394 m	0 以上
最大引込力時（最大波高時）	2.380 m	2.340 m	0 以上
最大傾斜角	43.0 deg.	44.2 deg.	50.0 deg.

5. おわりに（留意事項）

以上の検討結果より、観測装置の追加後において浮体の安全性・安定性に問題はないことが確認された。

添付資料

(1) 設計総括表(装置追加前)
(2) 設計総括表(装置追加後)
(3) 設計計算書(装置設置後)　※ 検討項目該当箇所のみ

・設計総括表

〈装置追加前〉

設計条件						
設置位置	北緯：32° 29′ 06″		東経：133° 12′ 09″	（世界測地系）	設計耐用年数	10年
水深	795 m	風速 U_{10}	61.0 m/s	波浪	有義波高 $H_{1/3}$	12.5 m
底質	粘土	海水流速	2.06 m/s		最大波高 H_{MAX}	25.0 m
付着生物	80 N/m²				有義波周期 $T_{1/3}$	16.0 s
適用基準	・ 漁港・漁場の施工の設計の手引き　2003年版　㈳全国漁港漁場協会					
	・ 浮漁礁設計・施工技術基準　平成4年3月　MF21					

設計強度の許容値					
許容応力度　[N/mm²]	材質	SS400		SM490	
	荷重状態	常時	一般的な荷重	常時	一般的な荷重
	割増係数	1.0	1.5	1.0	1.5
	鉛直応力度　t ≦ 40	140	210	185	278
	(引張,圧縮,曲げ)　t ＞ 40	125	188	175	263
	せん断応力度　t ≦ 40	80	120	105	158
	t ＞ 40	75	113	100	150
二軸応力度の許容値	1.2				
係留部の安全率	3.0				
アンカーの安全率	1.2				

設計結果					
浮体諸元	浮体径	8.0 m	浮体本体高	3.1 m	
	全高	11.0 m	全浮力	1450 kN	
	照査対象	断面/材質	照査項目	照査結果	
	1.甲板部[デッキ部]	PL-9　(SS400)	四辺固定板としての照査	202.6 N/mm² ＜ 210 N/mm²	
	2.側板部	PL-12　(SS400)	四辺固定板としての照査	121.7 N/mm² ＜ 210 N/mm²	
	3.斜底板部	PL-12　(SS400)	四辺固定板としての照査	114.0 N/mm² ＜ 210 N/mm²	
	4.底板部	PL-12　(SS400)	四辺固定板としての照査	80.2 N/mm² ＜ 210 N/mm²	
	5.係留環(尾筒部)	PL-150　(SM490)	支圧応力度の照査	1322 kN ＜ 3474 kN	
			はし抜け強度の照査	74.7 N/mm² ＜ 150 N/mm²	
			応力集中部の照査	91.2 N/mm² ＜ 263 N/mm²	
係留部諸元	照査対象			設計外力	安全率
	係留環接続部ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙ	Φ97mm		1322 kN	3.198 ＞ 3.0
	上部チェーン	Φ81mm × 25m		1322 kN	3.016 ＞ 3.0
	ケーブル	素線Φ7mm × 73本 (ｹｰﾌﾞﾙ径 92mm) × 710m		1303 kN	3.383 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (上部)	Φ81mm × 25m		1200 kN	3.008 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (中部)	Φ111mm × 80m		1176 kN	3.205 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (下部)	Φ81mm × 25m		1046 kN	3.452 ＞ 3.0
	下部一般鎖	Φ70mm × 410m		1027 kN	3.082 ＞ 3.0
	アンカー	ダンフォース型　17t		596 kN	1.210 ＞ 1.2
浮体の安定性	最大引込力時乾舷	0.404 m ＞ 0			
	(最大波高時)	水没しない			
	最大引込力時	2.380 m ＞ 0			
	メタセンター高さ	安定			
	最大傾斜角	43.0 deg.			
		装置・機器が水没しない			

・設計総括表

〈装置追加後〉

設計条件						
設置位置	北緯：32° 29′ 06″		東経：133° 12′ 09″	（世界測地系）	設計耐用年数	10年
水深	795 m	風速 U_{10}	61.0 m/s	波浪	有義波高 $H_{1/3}$	12.5 m
底質	粘土	海水流速	2.06 m/s		最大波高 H_{MAX}	25.0 m
付着生物	80 N/m²				有義波周期 $T_{1/3}$	16.0 s
適用基準	・ 漁港・漁場の施工の設計の手引き 2003年版 ㈳全国漁港漁場協会 ・ 浮漁礁設計・施工技術基準 平成4年3月 MF21					

設計強度の許容値					
許容応力度 [N/mm²]	材質	SS400		SM490	
	荷重状態	常時	一般的な荷重	常時	一般的な荷重
	割増係数	1.0	1.5	1.0	1.5
	鉛直応力度 t ≦ 40	140	210	185	278
	(引張, 圧縮, 曲げ) t ＞ 40	125	188	175	263
	せん断応力度 t ≦ 40	80	120	105	158
	t ＞ 40	75	113	100	150
二軸応力度の許容値	1.2				
係留部の安全率	3.0				
アンカーの安全率	1.2				

設計結果				
浮体諸元	浮体径	8.0 m	浮体本体高	3.1 m
	全高	11.0 m	全浮力	1450 kN
	照査対象	断面/材質	照査項目	照査結果
	1.甲板部[デッキ部]	PL-9 (SS400)	四辺固定板としての照査	202.6 N/mm² ＜ 210 N/mm²
	2.側板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	121.7 N/mm² ＜ 210 N/mm²
	3.斜底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	114.0 N/mm² ＜ 210 N/mm²
	4.底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	80.2 N/mm² ＜ 210 N/mm²
	5.係留環(尾筒部)	PL-150 (SM490)	支圧応力度の照査	1374 kN ＜ 3474 kN
			はし抜け強度の照査	75.0 N/mm² ＜ 150 N/mm²
			応力集中部の照査	91.6 N/mm² ＜ 263 N/mm²

	照査対象		設計外力	安全率
係留部諸元	係留環接続部ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙ	Φ97mm	1327 kN	3.185 ＞ 3.0
	上部チェーン	Φ81mm × 25m	1327 kN	3.004 ＞ 3.0
	ケーブル	素線Φ7mm × 73本 (ｹｰﾌﾞﾙ径 92mm) × 710m	1308 kN	3.372 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (上部)	Φ81mm × 25m	1205 kN	3.077 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (中部)	Φ111mm × 80m	1181 kN	3.517 ＞ 3.0
	下部補強チェーン (下部)	Φ81mm × 25m	1051 kN	3.528 ＞ 3.0
	下部一般鎖	Φ70mm × 410m	1032 kN	3.107 ＞ 3.0
	アンカー	ダンフォース型 17t	598 kN	1.207 ＞ 1.2

浮体の安定性		
最大引込力時乾舷 (最大波高時)	0.394 m ＞ 0	水没しない
最大引込力時メタセンター高さ	2.340 m ＞ 0	安定
最大傾斜角	44.2 deg.	装置・機器が水没しない

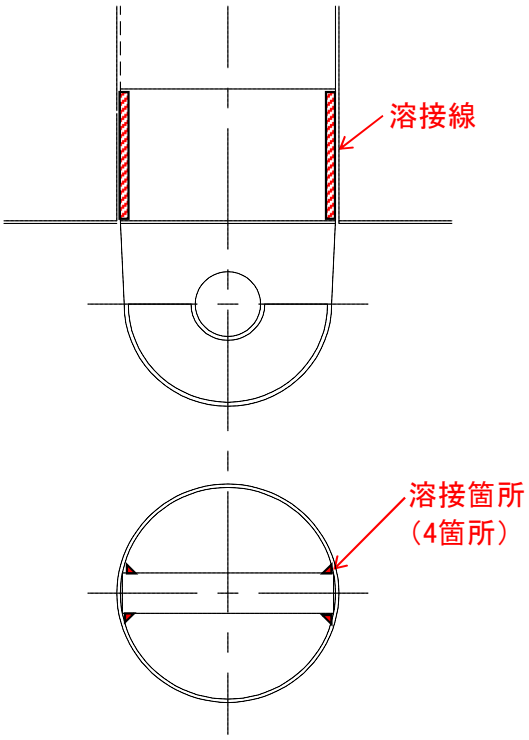
(7)係留環

1)設計条件

係留索最大張力:T = 1326.9 kN

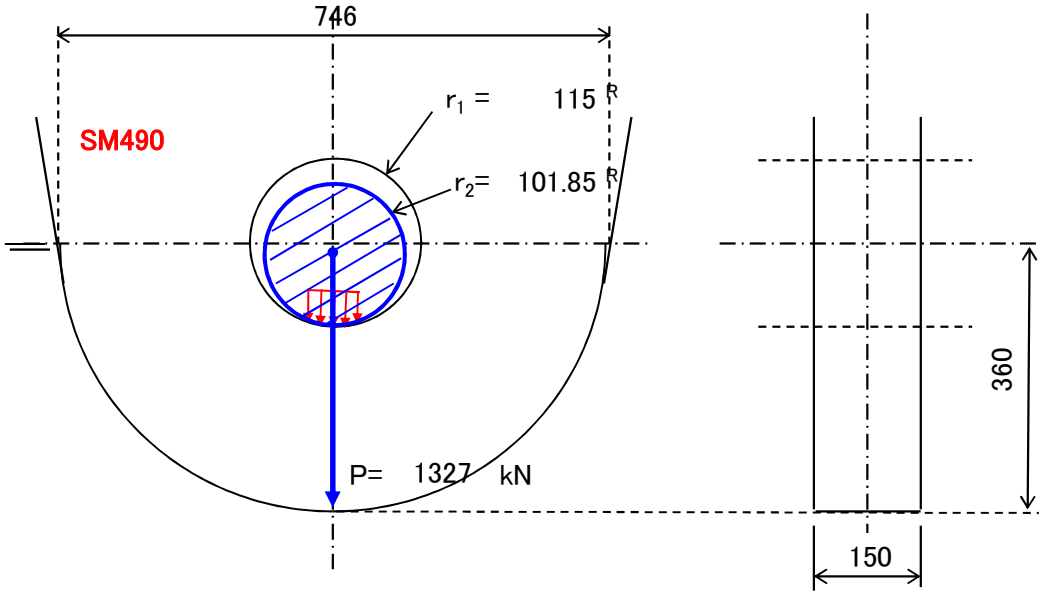
係留環腐食・磨耗代: 186 mm

係留環材質 : SM490



2)ピン周りの照査

① 支圧



$$P_a = K_2 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 - r_2} \cdot t$$:許容荷重〔*-11〕

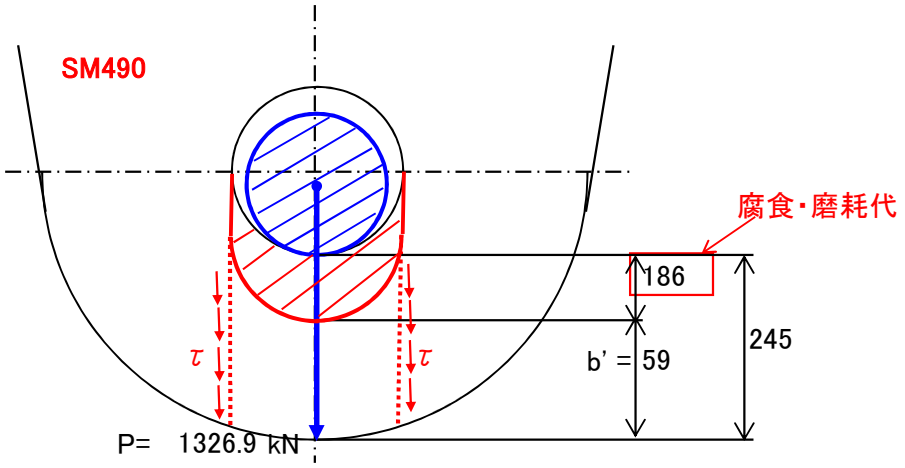
= 3474 kN ＞ P= 1327 kN OK

r_1/r_2= 1.13 ≧1.02

K_2 = 26 N/mm^2 :許容荷重係数(SM490)

※ヘルツの許容荷重係数の2倍とする〔*-12〕。

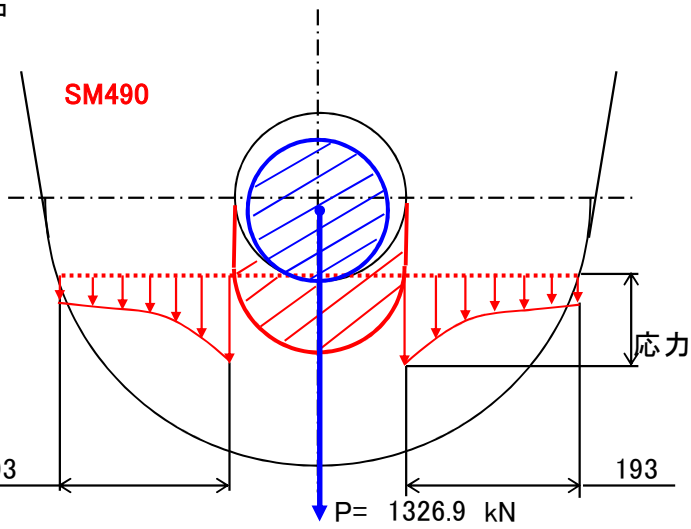
② はし抜け



$$\tau = \frac{P}{2 \cdot b' \cdot t}$$

$$= 75.0 \ N/mm^2 \ < \ \tau_a = 150 \ N/mm^2 \ (SM490\text{-}t>40)$$

③ 応力集中



応力集中率: $\alpha = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 4$ 〔*-12〕

$$\sigma = \alpha \times \frac{P}{2 \cdot b \cdot t}$$

$$= 91.6 \ N/mm^2 \ < \ \sigma_a = 263 \ N/mm^2 \ (SM490\text{-}t>40)$$

3）溶接部の照査

すみ肉サイズ 12 mm → 有効のど厚 a_e = 8.5 mm

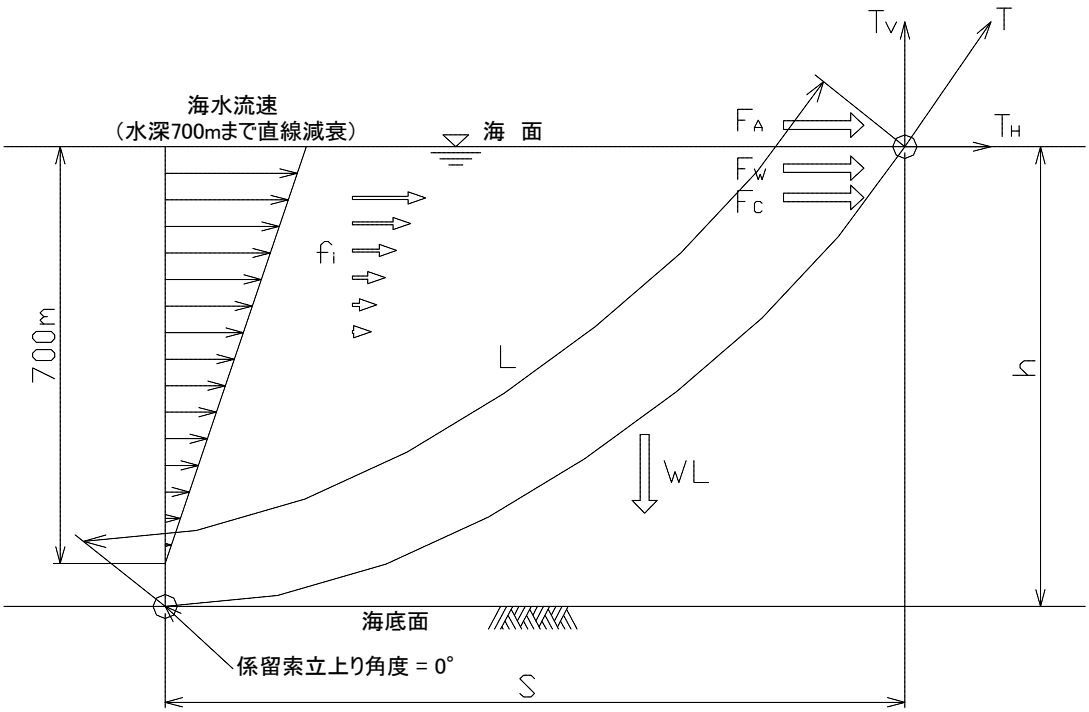
作用応力度 τ = P／(n・a_e・L) = 1326.9 × 10^3／(4・ 8.5 ・ 500)

= 78.2 N/mm^2 < τ a = 120 N/mm^2

ここで、n:4箇所（溶接箇所数）、L:500mm（溶接線長）

4. 係留索の設計

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして、作用外力を算出する。



h ： 水深

T ： 係留索張力

T_H ： 係留索上端に作用する水平力

T_V ： 係留索引揚力（=引込力）

L ： 係留索上端～着底点間の係留索長

S ： 同上部分の水平長

W ： 係留索の単位長さ当たりの水中重量

F_A ： 浮体本体に作用する風荷重

F_C ： 浮体本体に作用する海水流速圧力

F_W ： 浮体本体に作用する波力

f_i ： 係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力

各種荷重が作用した場合の係留索に対して、カテナリー計算を実施する。Wが不均一で、係留索に海水流速圧力が作用するため、簡単な関数で表現することはできない。よって、数値解析を用いてカテナリー計算を実施するものとする。

（1）係留索の構成

係留索の構成と実際の長さ〔接続用シャックル類を含んだ長さ〕は以下のとおりとする。

〔浮体本体〕～上側鎖（25m）～ケーブル（710m）～下側鎖（540m）～〔アンカー〕

1）係留索全長：L

L = 25 + 710 +(25 + 80 + 25 + 410)= 1275 m

2）係留索各部諸元

名　称	種　　類	仕　　様
上側鎖	電気溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ	JIS ﾌﾗｯｼｭﾊﾞｯﾄ溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ第3種　呼び径φ81mm
ｹｰﾌﾞﾙ	高耐食型　被覆平行線ｹｰﾌﾞﾙ	素線φ7mm×73本（ｹｰﾌﾞﾙ径 92mm）
下側鎖	電気溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ	JIS ﾌﾗｯｼｭﾊﾞｯﾄ溶接ｱﾝｶｰﾁｪｰﾝ第3種 補強部：呼び径φ81mm/111mm/81mm 一般部：呼び径φ70mm

3）係留索各部重量

名　称	呼び径 (mm)	気中重量 (kN/m)	水中重量 (kN/m)
上部チェーン	φ81	1.504	1.307
ケーブル	φ7mm x 73本	0.300	0.230
下部補強チェーン（上部）	φ81	1.504	1.307
下部補強チェーン（中部）	φ111	2.824	2.454
下部補強チェーン（下部）	φ81	1.504	1.307
下側チェーン　一般部	φ70	1.123	0.976

※1. 表中の重量はJIS F 3303 p.7の1mあたりの質量算定式に、シャックル等の取り付けによる割増を考慮して求めたものである。

※2. 上表より、計算で想定した係留索重量（気中）は1012.2kN = 103.3ton、数量計算による重量は102.4tonで、誤差は1%未満である。

（2）作用外力

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして検討を行う。その時の乾舷は、　0.394　m であると仮定する。

1）風荷重F_A

浮体本体が受ける風荷重　Fa_1

$Fa_1 = (\rho/2g)\cdot V^2\cdot A\cdot C_d =$　8.8　kN

ρ：空気密度 (=　12.3　N/m^3)

g：重力加速度 (=　9.8　m/s^2)

V：風　速 (=　61.0　m/s)

A：受風面積 (=　8　×　0.394　=　3.2　m^2 ;本体)

C_d：抗力係数 (=　1.2　)　〔適用基準① P83 表2-6-2〕

マストが受ける風荷重　Fa_2

$Fa_2 = (\rho/2g)\cdot V^2\cdot A\cdot C_d =$　17.3　kN

各部の受圧面積および抗力係数

	受圧面積A(m^2)	抗力係数C_d	$A\cdot C_d$	Fa_2
(a)標識	0.47	1.8	0.85	2.0
(b)踊り場(ﾚｰﾀﾞｰﾚﾌ)	1.32	1.8	2.38	5.5
(c)マスト	3.50	1.2	4.19	9.8
合　計			7.42	17.3

※抗力係数は適用図書① P83 表2-6-2より決定

風荷重の合計

F_A　=　Fa_1　+　Fa_2　=　26.1　kN

2）海水流速圧力F_C

海水流速　$V_c = v + v_b$ =　3.80　m/s

v：潮流速（=　2.06　m/s）

v_b：吹送流速（= 0.03 × U_{60} =　1.74　m/s）

受圧面積A と抗力係数C_d

部　位	受圧面積		抗力係数
	算出式	A(m^2)	C_d
ブイ本体※	8.0 x (3.1 − 0.394) − 0.8 x 1.45 + 0.07 x 10.05	21.2	1.0
支柱※	(0.2674 + 0.07 x 2) x (2.0 − 0.175) x 4	3.0	1.0
ダンパー	0.175 x 4.70	0.8	2.0
合　計		25.0	

※付着生物厚さを考慮

浮体に作用する海水流速圧力

$F_C = (\gamma/2g) \cdot V_c^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d)$ =　191.9　kN

γ：海水の単位体積重量（=　10.1　kN/m^3）

g：重力加速度（=　9.8　m/s^2）

3）波力F_W

$F_W = (\gamma/2g) \cdot u_m^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d)$ =　320.5　kN

u_m：最大波による水粒子の水平流速（= $\pi H_m / T$ =　4.91　m/s）

H_m：最大波高（=　25　m）

T：波周期（=　16.0　s）

4）浮体本体に作用する外力の合計 F

$F = F_A + F_C + F_W$ =　538.5　kN

5）係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力f_i

$f_i = (\gamma/2g)\cdot V_Z^2 \cdot A \cdot C_d$

C_d: 抗力係数 (= 1.0) 〔適用基準② P36 3.2.5〕

Vz ： 海底面から高さzにおける潮流の流速 (=v･(1−(z−h))/700) (m/s)

z ： 海底面からの高さ

A ： 係留索の単位長さ当たりの受圧面積

係留索各部に作用する海水流速圧力は、数値解析にて求める。

（3）係留索の張力

1）各部での最大張力〔解析結果〕

･浮体から着底点までの係留索長	L =	1275	m
･浮体から着底点までの係留索水平長	S =	936	m
･係留環接続部に発生する係留索張力	T_1 =	1015	kN
･ワイヤーケーブル上端に発生する係留索張力	T_2 =	997	kN
･下部補強チェーン（上部）上端に発生する係留索張力	T_3 =	893	kN
･下部補強チェーン（中部）上端に発生する係留索張力	T_4 =	869	kN
･下部補強チェーン（下部）上端に発生する係留索張力	T_5 =	739	kN
･下部チェーン 一般部上端に発生する係留索張力	T_6 =	720	kN
･係留索着底部において係留索に発生する水平張力	T_H =	598	kN
･ブイに作用する係留索の引き込み力	T_V =	861	kN
･係留索に作用する海水流速圧力	F_K =	59	kN

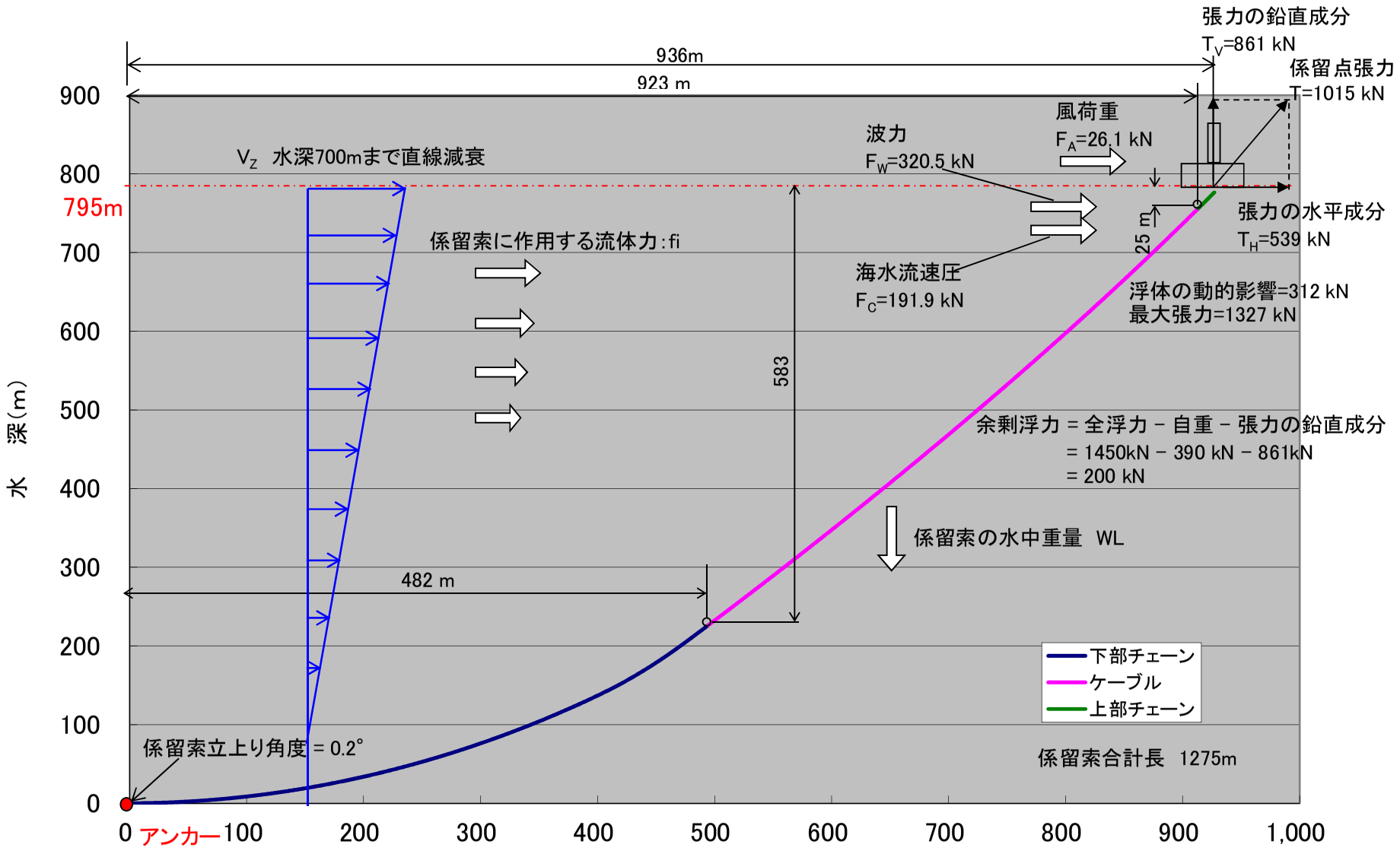
2）余剰浮力

･余剰浮力 = 浮体全浮力 − 浮体自重 − T_V = 1450 − 390 − 861 = 200 kN

3）乾舷

･乾 舷 = 余剰浮力／（浮体断面×海水の単位体積重量） = 0.394 m （仮定した値と等しい）

浮体断面 = 8.0 ^{2} × $\pi/4$ = 50.3 m^2



最大張力時のカテナリー形状

(4) 係留索の強度検討

1) 係留索各部での所要安全率

係留索の強度検討に用いる最大張力は、静的解析で求めた値に浮体の動的な影響による変動外力を加えた値とする。変動外力は、浮体が0.8G[*-10]の加速度で上下動した場合の慣性力に等しいとみなす。

$$\Delta T = 0.8 \times 390 \text{（浮体自重）} = 312 \text{ kN}$$

最大張力

$$T_{max1} = T_1 + \Delta T = 1327 \text{ kN}$$
$$T_{max2} = T_2 + \Delta T = 1308 \text{ kN}$$
$$T_{max3} = T_3 + \Delta T = 1205 \text{ kN}$$
$$T_{max4} = T_4 + \Delta T = 1181 \text{ kN}$$
$$T_{max5} = T_5 + \Delta T = 1051 \text{ kN}$$
$$T_{max6} = T_6 + \Delta T = 1032 \text{ kN}$$

		呼び径 (mm)	最大張力 (kN)	破断強度 (kN)	安全率
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾋﾟﾝ		φ97	1327	4227	3.185 ＞ 3.0
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ		φ97	1327	4050	3.052 ＞ 3.0
上部ﾁｪｰﾝ	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(上部)	φ102	1327	4051	3.053 ＞ 3.0
	ｽｲﾍﾞﾙ	φ102	1327	6465	4.872 ＞ 3.0
	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(下部)	φ102	1327	4115	3.101 ＞ 3.0
	ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ	φ97	1327	4066	3.064 ＞ 3.0
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(上部)	φ81	1327	3986	3.004 ＞ 3.0
	一般部	φ81	1327	4291	3.234 ＞ 3.0
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(下部)	φ81	1327	4347	3.276 ＞ 3.0
ワイヤーケーブル		φ7×73本	1308	4410	3.372 ＞ 3.0
接続部チェーン(ｽｲﾍﾞﾙ)		φ87	1308	4958	3.791 ＞ 3.0
下部補強チェーン	(上部)	φ81	1205	3708	3.077 ＞ 3.0
	(中部)	φ111	1181	4154	3.517 ＞ 3.0
	(下部)	φ81	1051	3708	3.528 ＞ 3.0
下部チェーン 一般部		φ70	1032	3206	3.107 ＞ 3.0

2) アンカーの照査

アンカー仕様	17tonダンフォースアンカー		
アンカー重量	167 kN(気中)	145kN(水中)	
アンカー点張力	598 kN		
海底傾斜	無し	＋1／80	－1／80
アンカー傾斜荷重	0.0 kN	-1.8 kN	1.8 kN
アンカー点荷重	597.7 kN	595.9 kN	599.5 kN
アンカー把駐力係数 K	5.0		
アンカー把駐力	724 kN		
安全率 （＞ 1.2）	1.21	1.21	1.21

※ アンカー把駐力係数は、係留システム設計指針(財)日本海事協会)[*-13]よりK=5.0とする。

3) 腐食/磨耗後の呼び径D'及び破断強度算出

チェーンは想定した腐食・磨耗量だけ減耗した楕円形になると仮定し、その断面積と等価な円断面として評価し、破断強度を推定する。

		使用前		腐食	10年後	破断強度
		呼び径 D (mm)	実径 d (mm)	磨耗量 F※ (mm)	呼び径 D'※ (mm)	T (kN)
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾋﾟﾝ		97	203.7	100.00	75.4	4227
係留環接続ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ		97	158.0	80.00	73.6	4050
上部ﾁｪｰﾝ	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(上部)	102	178.0	119.00	73.6	4051
	ｽｲﾍﾞﾙ	102	114.8	14.00	95.2	6465
	ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(下部)	102	122.0	51.00	74.3	4115
	ｱﾝｶｰｼｬｯｸﾙﾎﾞﾃﾞｨ	97	136.0	51.00	73.8	4066
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(上部)	81	97.2	17.00	73.0	3986
	一般部	81	81.0	9.25	76.0	4291
	一般部ｴﾝﾄﾞﾘﾝｸ(下部)	81	97.2	10.00	76.5	4347
接続部チェーン(ｽｲﾍﾞﾙ)		87	97.9	10.00	82.2	4958
下部補強チェーン	(上部)	81	81.0	18.50	70.2	3708
	(中部)	111	111.0	53.65	74.7	4154
	(下部)	81	81.0	18.50	70.2	3708
下部チェーン 一般部		70	70.0	9.25	64.9	3206

※チェーンに関しては腐食・磨耗後における破断強度の算出法が示されているため，設置期間を考慮した，9.25年後の強度を算出する。その他は保守側に10年後の強度とする。

（5）ケーブルソケットの強度検討

ケーブル間の接続は、ソケットおよびチェーンを介して行うものとし、ケーブルと同等の強度を有するものとして設計する。（最大引張力； 1308 kN）

ソケット（ピン含む）の材質および強度は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.2、3.2.3〔*-14、15〕に従い下表のとおりとする。

				ソケット部（ピン部含む）	備　考
材　　質				S45CN	
許容応力度	ソケット	引張･圧縮	σ_a	210	道示Ⅱ3.2.2
		せん断	τ_a	120	道示Ⅱ3.2.2
		支　圧	τ_p	310	道示Ⅱ3.2.2
	ピン	せん断	σ_s	150	道示Ⅱ3.2.3
		曲　げ	σ_{bp}	290	道示Ⅱ3.2.3
		支　圧	σ_{ps}	155	道示Ⅱ3.2.3

耐用期間中の腐食・磨耗代は、他の部材と接触が無い一般部と、常に他の部材と接触している部分に分けて設定する。

一般部　：　0.15　mm/年　・・・ 適用基準①p166の表3-2-8を参考に0.15mm/年と設定

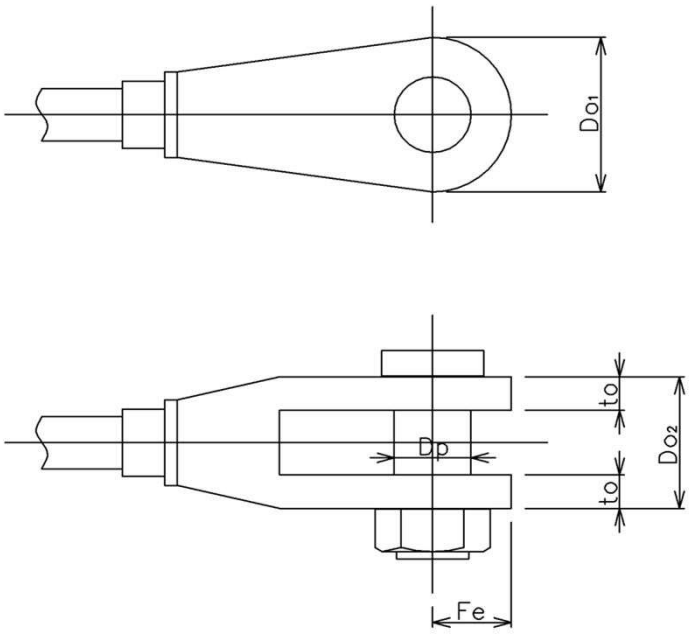
接触部（ピンとピン穴、ピン端部のフランジおよびナットとソケットフランジ部）

：　1.5　mm/年　・・・ 適用基準①p689ではチェーンの磨耗速度は1mm/年であるが、ソケットの材料（S45C）と比べ、チェーンの材料（SBC690）の方が硬いため、硬度差分より、磨耗量の割増（1.5倍）を設定した。

（a）ケーブルソケット形状

（単位：mm）

			使用前	10年後	備　考
ソケットフランジ部	横　幅	Do_1	370	367	
	縦　幅	Do_2	315	312	
	厚　さ	to	80	77	
	縁 開き	Fe	185	183.5	
	ピン孔半径	Rh	91.5		
		rh_1		93	一般部
		rh_2		106.5	接触部
ピン	直　径	Dp	180	163.5	
	半　径	Rp	90		
		rp_1		88.5	一般部
		rp_2		75	接触部



(b)ケーブルソケットの強度検討

① ピン孔近傍の引張応力度　σ_1

ピン孔を通る横断面の応力照査は、応力集中係数 α = 4 を考慮する。

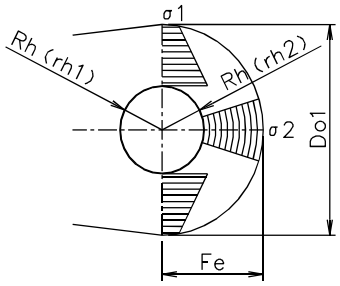
使用開始から10年後に腐食代が完全に消失した場合のピンとピン穴の関係を右下図に示す。

【当　初】σ_1 = 4Pmax／{(Do$_1$−2Rh)×to×2}

= 174.9 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_1' = 4Pmax／{(Do$_1$'−2rh$_1$)×to'×2}

= 187.8 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK



② ピン孔近傍の引張応力度　σ_2

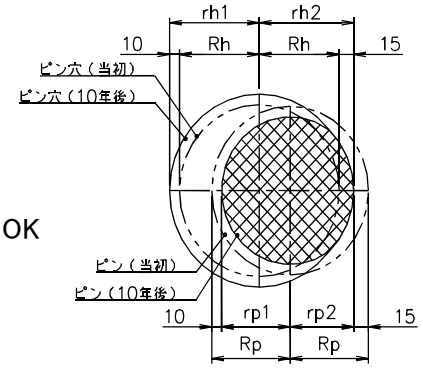
【当　初】σ_2 = Pmax／{(Fe−Rh)×to×2}

= 87.5 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_2' = Pmax／{(Fe'−rh$_2$)×to'×2}

110.3 N/mm^2 ＜ 210 N/mm^2 → OK

(c)ピンの強度検討



① ピンの支圧応力度　σ_3

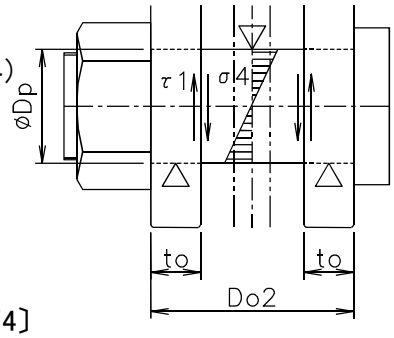
【当　初】σ_3 = Pmax／(2Rp×to×2)

= 45.4 N/mm^2 ＜ 155 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_3' = Pmax／(2rp_2×to'×2)

= 56.6 N/mm^2 ＜ 155 N/mm^2 → OK

② ピンの曲げ応力度　σ_4



【当　初】σ_4 = Mp／Z = {Pmax×(Do_2−to)／4}／(π·Rp^3／4)

= 76866349 ／ 572555

= 134.3 N/mm^2 ＜ 290 N/mm^2 → OK

【10年後】σ_4' = Mp／Z = {Pmax×(Do_2'−to')／4}／〔π·rp_2^3／4〕

= 76866349 ／ 331340

= 232 N/mm^2 ＜ 290 N/mm^2 → OK

③ ピンのせん断応力度　τ_1

【当　初】τ_1 = Pmax／(Rp^2×π×2)

= 25.7 N/mm^2 ＜ 150 N/mm^2 → OK

【10年後】τ_1' = Pmax／(rp_2^2×π×2)

= 37 N/mm^2 ＜ 150 N/mm^2 → OK

5. 浮体の安定性検討

(1)浮体の浮力と乾舷(喫水)

1)全浮力　1450kN

円柱部	1167kN	= 4.0 ^{2} x π x 2.3 x 1.03 x 9.8
円錐部	277kN	= πx 1 / 3 x (4.0 ^{2} + 4.0 x 2.550 + 2.550 ^{2})x1.03*9.8
係留環部	1kN	= 0.15 x 0.66 x 0.88 x 1 x 1.03 x 9.8
ダンパーステー	5kN	= 0.1337 ^{2} x π x 2.0 x 4 x 1.03 x 9.8
ダンパー	1kN	= 1.051 /7.85 x 1.03 x 9.8

2) 乾舷(係留索なし)　2.09m = (1450 - 390)/(4.0 ^{2} x π)/ 1.03/ 9.8

〔(全浮力-自重)/(ブイ半径^{2}xπ)/1.03/9.8〕

3) 乾舷　1.48m = (1450 -(390 + 310.1))/(4.0 ^{2} x π)/ 1.03/ 9.8

(係留索あり;静水時)　(全浮力-(自重+係留索))/(ブイ半径^{2}xπ)/1.03/9.8

※海底までのチェーンおよびケーブル重量を考慮

海底までのチェーンおよびケーブル重量

名称	水中重量 (kN/m)	長さ (m)	重量(kN)	
			本体	付着物
上部ﾁｪｰﾝ	1.307	25	32.7	0.7
ﾜｲﾔｰｹｰﾌﾞﾙ	0.230	710	163.4	---
下部補強ﾁｪｰﾝ(上部)	1.307	25	32.7	---
下部補強ﾁｪｰﾝ(中部)	2.454	32.88	80.7	---
合　計			309.4	0.7

（2）浮体の安定性

1）静的安定性

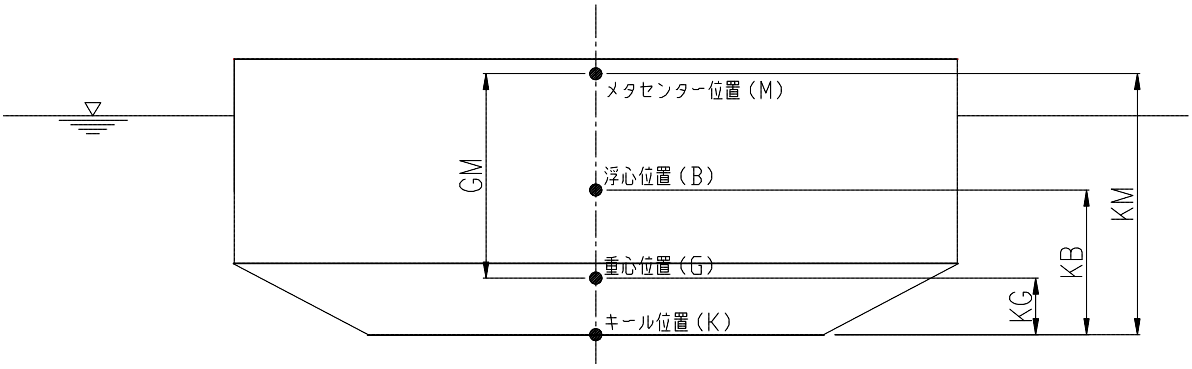
適用基準①（P685　第11編3.3.2）に従いメタセンター高さ（GM）が正であることを確認する。

浮体状態	GMが最も小さくなる状態
喫水	2.71m
喫水面の断面二次モーメント（I）	201m
排水量	1250 kN
排水容積（V）	124m3
重心高さ（KG）	0.73m
浮心高さ（KB）	1.45m

GM　＝　I/V-BG ＝ I/V-(KG-KB)

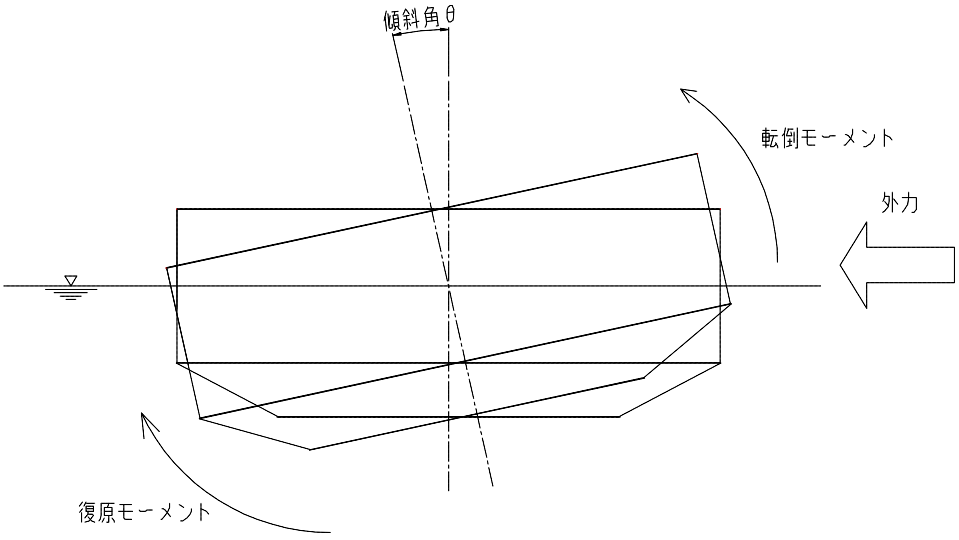
＝　201　／　124　－　（　0.73　－　1.45　）

＝　2.34　＞ 0m



2）動的安定性

適用基準①（P685 第11編3.3.2）に従い動的安定性について検討を行う。



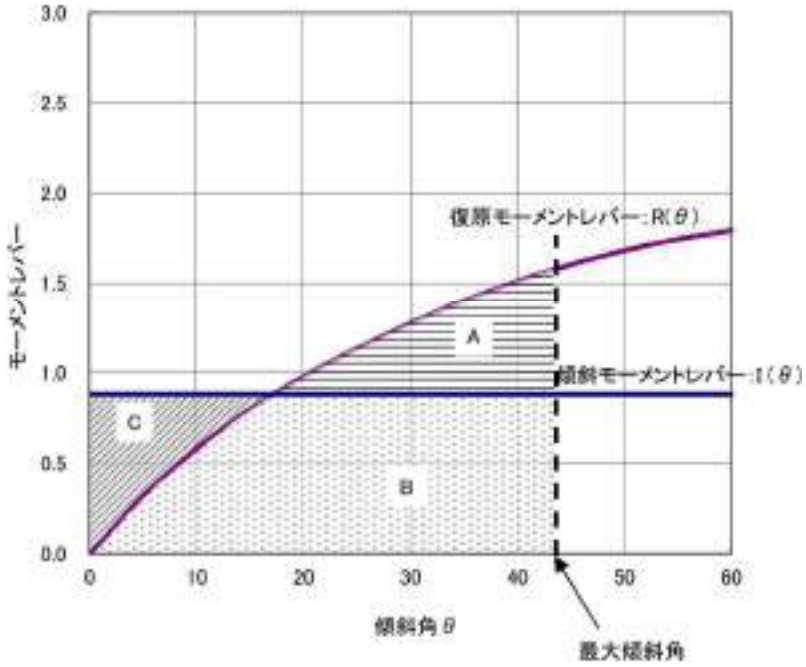
傾斜モーメント

項目	荷重(kN)	浮体係留点からの高さ(m)	傾斜モーメント(kN*m)
浮体本体が受ける風荷重	8.8	3.40	30.1
マストが受ける風荷重	17.3	7.02	121.5
波・海水流速による流体力	512.4	1.85	949.5
合計	538.5	2.04	1101.0

傾斜モーメントレバー　　I(θ) =　0.88m　　(傾斜モーメント/排水量)

復原モーメントレバー

deg	R(θ)(m)
0	0.00
5	0.32
10	0.58
15	0.80
20	0.98
25	1.13
30	1.27
35	1.40
40	1.51
45	1.60
50	1.68
55	1.74
60	1.79



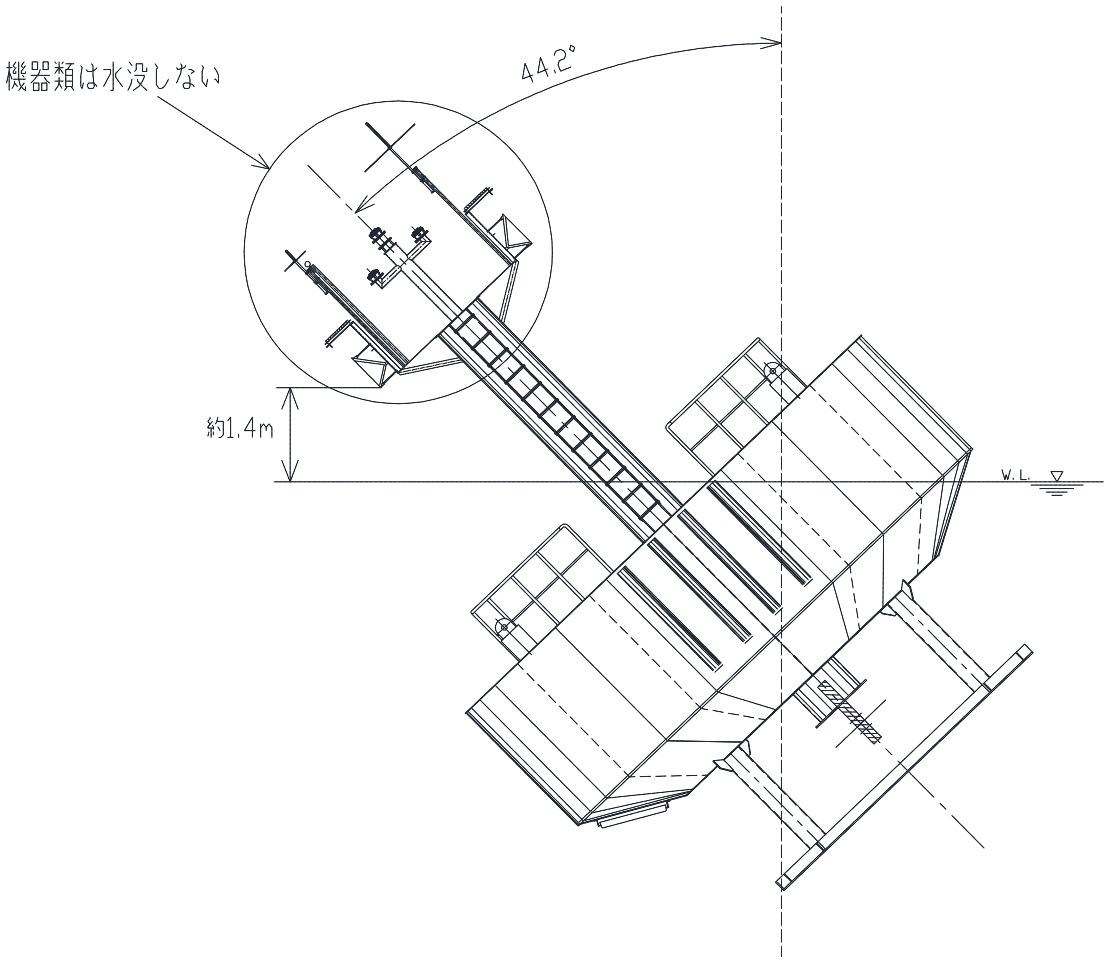
R(θ)　:復原モーメントレバー(m)　(復原モーメント/排水量)

動的安定性能の判定は適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い、下式により行なう。

$$\int_0^{\theta 1} R(\theta)d\theta \quad = \text{面積(A + B)} \quad > \quad 1.1\int_0^{\theta 1} I(\theta)d\theta \quad = 1.1 \times \text{面積(B + C)}$$

上式の右辺と左辺が一致するθ1(最大傾斜角)は、θ1 = 44.2 deg である。

下図より、44.2° 傾斜しても装置、機器類は水没しない。



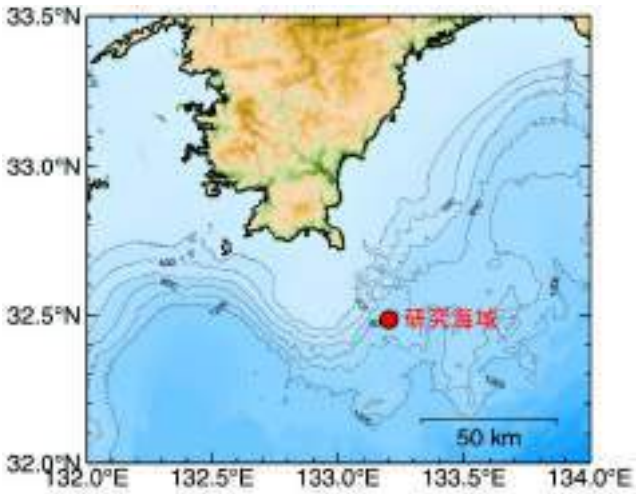
資料３－４　弓削丸資料

資格	近海区域（非国際航海）
長さ（全長）	40.00 m
長さ（垂線間）	35.00 m
幅（型）	8.00 m
深さ（型）	3.30 m
満載吃水（型）	2.80 m
総トン数	240 t
主機関	1,300 psx750 rpmx1 台
試運転最大速力	13.75 ノット
航続距離	約 2,300 マイル
定員	乗組員 9 名，教官 3 名，学生 44 名，計 56 名
竣工	1994 年 3 月 30 日

（弓削商船高専 Web より）

研究航海記録

日程	研究海域	目的	内容
2017 年 2 月 8 日～10 日	高知県足摺岬から沖合約 20 km の黒潮牧場 18 号ブイ設置地点付近（図 1、32° 29.1′ N、133° 12.1′ E）。水深約 800m。	海底地殻変動観測	・水温、塩分濃度の調査。
2017 年 6 月 5 日～9 日	同上。	海底地殻変動観測	・海底局測定器設置の実施。 ・船上局測定器による音響調査。 ・水温、塩分濃度の調査。
2018 年 5 月 30 日～6 月 3 日	同上。	海底地殻変動観測	・船上局測定器による音響調査。 ・水温、塩分濃度の調査。
2019 年 6 月 3 日～6 日	同上。	海底地殻変動観測	・船上局測定器による音響調査。 ・水温、塩分濃度の調査。



（等深線：1200mまで200m間隔）

図 1　高知県足摺岬沖の研究海域

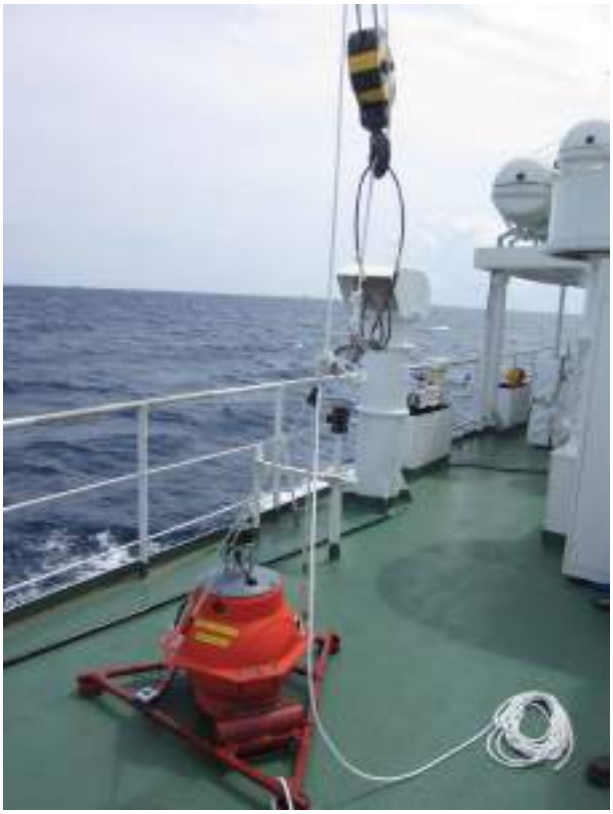


写真１　海底局測定器

写真２　船上局測定器による音響調査

写真３　船上からの水温、塩分調査

写真４　高知県あしずり港へ寄港

資料３−５ メディアへの掲載（新聞・番組名、掲載年月日、タイトル）

	メディア名	日付	タイトル
1	日本経済新聞	2016 年 8 月 22 日	海底地殻変動 常に監視
2	NHK 高知ﾛｰｶﾙﾆｭｰｽ	2016 年 8 月 24 日	海底の地殻変動 常時監視へ
3	愛媛新聞	2016 年 8 月 25 日	ＧＰＳで海底地殻調査
4	朝日新聞	2016 年 8 月 26 日	地殻 連続観測挑む
5	準天頂衛星 WebNews	2016 年 8 月 26 日	東大地震研らの研究グループ、「海の GEONET」をめざす研究開発を開始
6	高知新聞	2016 年 11 月 22 日	「仁淀川町に津波観測拠点
7	高知新聞	2016 年 11 月 30 日	地震の正確な知識を
8	日本経済新聞	2016 年 12 月 25 日	海底にも監視網
9	NHK ニュース	2017 年 8 月 19 日	（ビデオのみのため添付資料なし）
１０	高知新聞	2017 年 12 月 16 日	移住研究者が津波授業
１１	日本経済新聞	2018 年 3 月 5 日	地震 海底の動きで解明
１２	日刊工業新聞	2021 年 3 月 9 日	津波の早期検出目指す

1. 日本経済新聞　2016年8月22日

海底地殻変動 常に監視

東大など、海上のブイ活用

東京大学の加藤際之教授らは2017年度から、海上のブイを使って海底の地殻変動の常時監視を始める。プレート（岩板）が沈み込んで起きる海溝型地震の対策に役立てる。精密な観測網が整う陸上と異なり、海底の地殻変動を常時把握するのは難しかった。南海トラフ巨大地震などの発生が懸念されており、観測技術の確立を急ぐ。

研究チームには名古屋大学、情報通信研究機構、気象庁気象研究所、高知工業高等専門学校、弓削商船高等専門学校（愛媛県）なども加わる。

高知県足摺岬沖に設置されたブイを使う。海底の観測機器との間で音波をやりとりして地殻変動をつかむ。集めたデータは衛星通信を介して取得する。ブイには津波の監視や豪雨の発生にかかわる海上の水蒸気量などを測る機能も持たせる。

まず今年11月に津波などの観測実験を始め、17年度から地殻変動を常時監視する。日本周辺では海のプレートがゆっくり動き、陸のプレートの下に沈み込んでいる。発生したひずみが限界に達すると地震が起きる。

地殻変動の常時監視からプレートの動きが把握できれば、プレート同士が固着したりゆっくり滑ったりする様子など、海溝型地震の詳しい仕組みの解明に役立つ可能性がある。従来は研究者が乗船して地殻変動を観測しており、年間数回にとどまっていた。

2. NHK高知ローカルニュース　2016年8月24日

ニュース詳細

海底の地殻変動　常時観測へ

08 月 24 日　19 時 24 分

8004999841_20160824192906.mp4

東京大学地震研究所などで作る研究グループは、高知県沖で、これまで行われていなかった海底の地殻変動の状況を常時観測する研究を始めることになり、海溝型の巨大地震が発生するメカニズムの解明につながることが期待されます。

これは、24日、東京大学地震研究所や愛媛県上島町にある弓削商船高等専門学校など、6つの機関で作る研究グループが上島町で記者会見して発表しました。

研究では、高知県の足摺岬沖およそ35キロにあるブイに、超音波で海底に取り付けた機器との距離などを測る装置を搭載して、海底の地殻変動の状況を常時、観測し、得られたデータを衛星通信で送る実験を行うということです。

海底の地殻変動の観測は、これまでは海上保安庁などが船で年に数回、行うのに限られていて、常時観測は行われておらず、今回の実験が成功すれば、最新の観測データを常に得られることになり、海溝型の巨大地震が発生するメカニズムの解明につながることが期待されるということです。

また、ブイには、GPSなどで津波の発生状況などを観測する装置も搭載されますが、これまで波によってブイが揺れることで衛星との通信が一時的に途切れ、データが欠けることがあったのを、新たな装置を搭載することで改善を目指すことにしています。

研究は、平成32年度までの5年間で行われ、得られたデータは、今後、インターネットで公開することにしています。

研究グループのリーダーで、東京大学地震研究所の加藤照之教授は、「このような装置を日本列島の周辺に展開できれば地震の前兆が捉えられる可能性につながるなど、総合的な防災に役立つと思う」と話していました。

愛　媛　新　聞

(3)　総　合　　2016年(平成28年)8月25日　木曜日　　愛

GPSで海底地殻調査

津波検知や地震メカニズム解明

弓削商船高専など　高知沖ブイ搭載

地震などによる海底の地殻変動の継続的な観測と津波の迅速な検知を目的に、東京大地震研究所や弓削商船高等専門学校（上島町）など国内6研究機関は24日、高知県足摺岬沖で衛星利用測位システム（GPS）などを搭載したブイによる研究を始めたと発表した。

海底地殻変動は、海底に複数の装置を置き、ブイまでの音の速さとGPSを組み合わせて計測する。これまで行っていた船舶での調査は年に数回が限度だったが、ブイの利用で連続観測が可能となる。南海トラフなどから沈み込む海洋プレートの研究など地震の発生メカニズムの解明につながる可能性もあるという。

津波観測では、東京大などがブイを利用したGPS津波計で海面の高さを計測する研究を継続している。2013、14年の衛星通信などを利用した実験では、沖合20キロ程度に限られていた設置範囲が遠洋に広がった。

今回の研究では、さらなる高精度化を目的に、ブイの揺れなどによる欠測を抑えるためのデータを収集。将来的に西太平洋全域に多数のブイを置くケースを想定し、衛星の仕様も研究する。

研究の概要を説明する東京大地震研究所の加藤照之教授＝24日午前、上島町弓削下弓削

海底地殻変動、津波計のデータは、衛星経由で高知県に設置した淀川町の基地局に送られ、インターネットでリアルタイムで公開する予定。

弓削商船高専は、練習船弓削丸を活用し、ブイの揺れに関する船上実験や海底地殻変動観測に必要な海水の温度や塩分濃度などのデータを収集する。研究は20年度まで5年間実施。ブイは高知県が設置しているものを借り受ける。

弓削商船高専で会見した東京大地震研究所の加藤照之教授は「研究が成功すれば、総合的な防災システムの構築が期待できる」としている。（月岡岳）

地殻 連続観測挑む

弓削商船高専や東大

地震解明・防災貢献 狙う

国立弓削商船高専（上島町）や東大地震研究所、国立高知工業高専（高知県南国市）などの研究グループが、全地球測位システム（GPS）技術を用いて海底の地殻の動きを連続して観測するシステムの開発を進めている。今年度から5年間、高知県沖の太平洋に浮かぶブイに観測機器を設置し、実証実験する。既に実績がある津波計測も、より精度を高める。南海トラフ地震などの巨大地震のメカニズム解明や防災に寄与したいという。

GPSを用いた津波の計測は高知高専の寺田幸博客員教授、東大地震研究所の加藤照之教授らが約20年前から研究している。海上のブイに観測機器を設置。東日本大震災では、岩手県釜石市沖で約6㍍の津波を観測し、気象庁が観測結果を受け、津波警報のレベルを引き上げた実績がある。

従来のシステムでは沖合20㌔が設置の限界だったが、測定方法や観測結果を人工衛星経由で陸上に送るなどの改良を重ね、より遠方に設置できるようになってきた。今回は高知県の足摺岬沖約35㌔にある同県の海洋牧場のブイに設置する。また、波でブイが揺れる影響で衛星への送信が途切れることがあり、途切れなくデータを送れる研究にも取り組む。

海底の地殻変動は、海底に音波を送受信する機器を置き、船から位置を測る方法で観測している。船を用いるため、年に数回の観測が限界だったという。ブイに機器を設置して観測することで、連続しての観測が可能になり、地震直前直後などの地殻の動きを詳しく把握することにつながるという。

観測結果は11月以降、インターネットで公開する予定だ。GPSは大気中の水蒸気量を測るのにも使え、加藤教授は「気象予報の精度向上にも応用できる。将来は西太平洋に広がる総合防災システム構築を目指したい」と話す。

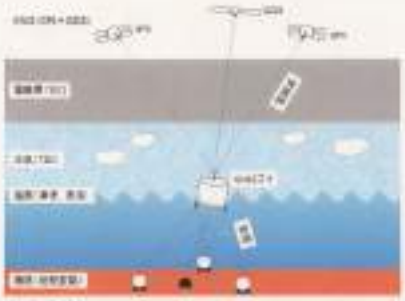
弓削商船高専は高知高専とのつながりで研究に参加。海水温や塩分濃度などの基礎データ収集のために練習船・弓削丸を出す同高専の木村隆一校長は「クレーンなど様々な装備を備えた船を持ち、操船技術もある商船高専の特色を生かし、南海トラフ地震などの防災に貢献したい」と述べた。（前田晋）

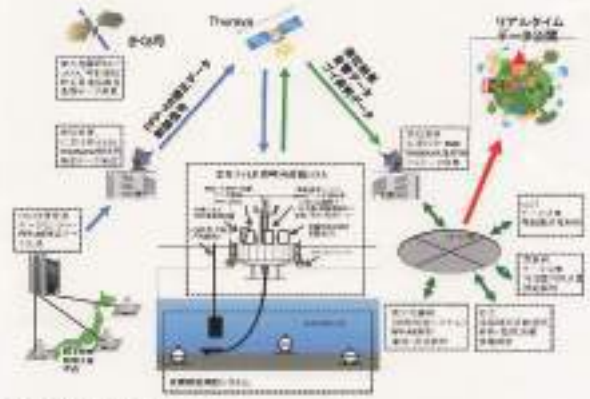
上 実証実験で航海する練習船「弓削丸」＝弓削商船高専提供
下 研究内容を発表する、東大地震研究所の加藤照之教授＝上島町の弓削商船高専

準天頂衛星システム

内閣府

東大地震研らの研究グループ、「海のGEONET」をめざす研究開発を開始





仁淀川町に津波観測拠点

【佐川】衛星利用測位システム（GPS）を使った津波計で観測を行っている高知高専客員教授の寺田幸博さん（66）が東大地震研究所などと共同で、土佐清水市沖に音響システムを組み合わせた機器を設置し、新たな研究に取り組んでいる。寺田さんは観測データの集積や情報発信を行う基地局をこのほど、移住先の吾川郡仁淀川町に開設。「津波防災に備える態勢を山間部でつくりたい」と意気込んでいる。（吉川博之）

GPS津波計はこれまで日本沿岸に18基設置され、東日本大震災時には岩手県釜石市沖の機器が潮位変動を観測し、気象庁の津波予測改善につながった。

今回のプロジェクトでは、GPS観測に加えて音響システムによる海底地殻観測なども行い、巨大地震の発生メカニズムを探る資料とする。高知高専、東大地震研、宇宙航空研究開発機構（JAXA）など7機関が参加して8月、足摺岬沖にある高知県の黒潮牧場ブイに新たな機器を設置した。

一方、通信衛星を介して観測データを送受信する基地局について、寺田さんは東日本大震災時に沿岸部の停電でデータが十分に利用できなかった経験を踏まえ、津波が来ない場所に開設を検討。昨春の定年退官以来、仁淀川町竹ノ谷の移住交流施設「山茶小屋」に住んでいたことから、施設を借りて基地局を設置した。

同町は光ケーブル網が未整備だったため、町費で専用回線を竹ノ谷地区まで敷設。工事は今月初めに完了し、近日中のデータ送受信開始を予定している。

寺田さんは施設内に防災情報の発信などを行う「安全安心科学研究所」も設立しており「山間地ならではの津波災害時の後方支援機能があると思う。地域への還元も図りつつ、それらの方策を探りたい」と話している。

あす関係者講演

山茶小屋では23日午後4時から、寺田さんや元日本地震学会会長の加藤照之・東大地震研教授の講演会が開かれる。問い合わせは山茶小屋（0889・34・3004）へ。

「山間部で津波災害へのバックアップ態勢を構築したい」と話す寺田幸博さん（仁淀川町竹ノ谷）

高知高専客員教授が基地局

足摺沖GPSデータ受信

山間部から後方支援

6．高知新聞　2016年11月22日

7．高知新聞　2016年11月30日

高　知　新　聞

2016年（平成28年）11月30日（水曜日）

地震の正確な知識を

仁淀川町　東大研教授らが講演

【佐川】吉川郡仁淀川町竹ノ谷の移住交流施設「山茶小屋」に今秋、衛星利用測位システム（GPS）を使った津波観測プロジェクトの基地局を開設した研究者がこのほど、施設内で「地震と津波を考えるタベ」と題した講演会を行った。正確な地震の知識を持った上で、素早い避難を呼び掛ける話を住民ら約60人が熱心に聞いた。

プロジェクトには高知高専や東大地震研究所など7機関が参加。GPSや音響観測システムなどを備えた土佐清水市の足摺岬沖の観測ブイで海底調査を行い、巨大地震発生のメカニズムを探る。高知高専の寺田幸博客員教授が、移住先の仁淀川町にデータを送受信する基地局を開設した。

講演は、元日本地震学会会長で東大地震研の加藤照之教授や寺田客員教授が、地震研究の現状やGPSによる津波観測などをテーマに行った。

地震や津波について、専門家が行った講演会（仁淀川町竹ノ谷）

地震予知について加藤教授は、詳しい地殻活動の観測に基づいた明確な前兆現象の把握が必要とし、「現状では正確な科学的予知は難しい」と説明した。

また南海トラフ地震について「30年以内の発生確率が60～70％で、発生パターンも多い。地震が起きた時にどう行動するか、今から対策を」と訴えた。

寺田客員教授はGPS観測の経緯を説明。仁淀川町への基地局開設について「（津波被害を受けない）山間部の通信インフラなら多数の接続ルートを使える可能性がある。新たな防災拠点にしたい」と話した。

（吉川博之）

日本経済新聞　2016年（平成28年）12月25日（日曜日）

海底にも監視網

南海トラフ地震に迫る（下）

プレート 常時追跡に挑戦

巨大地震が想定される南海トラフで、海底の地殻の動きを観測しようという研究が進んでいる。深い海の底は計測が難しいが、船を介して音波で位置を測る手法が確立。陸上の観測から推測する従来のやり方に比べて、海底の動きが詳しくわかるようになってきた。「常時観測」への挑戦も始まった。次の地震の予測や防災に役立てようという動きも出ている。

6㌢ずつ陸のプレートの下に沈み込んでいる。それが限界に達すると、跳ね返って巨大地震や大きな津波を起こす。固着部は地震の起点になりやすい。

海上保安庁は5月、南海トラフの震源域で、プレート間の固着状態を分析した結果を英科学誌「ネイチャー」に発表した。海底に観測装置を設置し、2006～15年度の地殻の動きを分析した。静岡県や愛知県の沖、四国沖などで強く固着している領域があった。1946年に起きた南海地震の震源域からさらに南西側に広がっていた。

陸上では全地球測位システム（GPS）などで、1300カ所の観測点で連続的に地殻変動がとらえられる。そのデータから推定した固着状況よりも、海底を測定した方が精度が高いといわれる。

海底には衛星からの電波が届かないため、GPSで位置を特定した船から海底の観測装置へ音波を発信。戻ってくるまでの時間から、観測装置の正確な位置を割り出す。その動きを追跡することで固着の強さを推定する。

南海トラフ地震を知るうえで重要なのは固着が強い場所だけではない。同庁の石川直史火山調査官は「固着が弱い場所の存在も重要だ」と指摘する。海のプレートの上にある海山が沈み込んでいる場所などで固着が弱くなる傾向があるという。プレート境界がゆっくりずれる「スロー地震」が起こりやすい。

スロー地震が起こる領域は巨大地震の震源の周辺に分布する。その場所のひずみを解消する一方で、付近でひずみを増やすとされる。東日本大震災の前にも起き、引き金になった可能性がある。

海底の情報を集めれば、次の巨大地震につながる異変や発生場所をつかんだり、震源域が複数に分かれる南海トラフ地震の発生パターンを解き明かしたりするのに役立つ。

だが、船では数カ月に1回のペースでしか観測できず、データが足りない。船の手配や人手の確保に費用と手間がかかるからだ。南海トラフ周辺に設置されている観測装置は22カ所にとどまる。地震本部の報告書では、新手法開発の必要性が指摘された。

いくつか候補が出てきた。ひとつは船の代わりにブイを使うやり方だ。東京大学の加藤照之教授らは17年度から、高知県足摺岬沖でブイを使った観測を始める。ブイから音波を出して観測装置の位置を測る。無人ボートを使う方法もある。設定した航路を巡回して観測する。名古屋大学の田所敬一准教授は「試す価値はある」と話す。

これらの手法が確立すれば、頻度や地点数を現状より大幅に増やせる。スロー地震と巨大地震の関連についてもみえてくるだろう。東大の加藤教授は「大地震の前に前兆的なすべりがあるならば、つかめる可能性はある」とみる。

海底ケーブルで構築した観測網を活用する取り組みも進む。海洋研究開発機構は紀伊半島や高知県室戸岬の沖合に設置した観測網「DONET」を改良し、海底の変動を3次元的に捉える計画だ。小平秀一センター長は「大気圏で気圧や低気圧の動きを読めるように海底が動く様子をつかみたい」と語る。

南海トラフの地震や津波は甚大な損害をもたらす恐れがある。被害の軽減に向け、取り組むべき課題は多い。

（生川暁、越川智琰）

グラフィックス 内藤 悠

敷設作業の様子（海洋機構提供）

キーワード　プレート境界の固着

強い場所ほど震源に

2つのプレート（岩板）の境界が摩擦によってくっついたようになること。南海トラフではこの作用によって、沈み込む海のプレートに引きずられて陸のプレートが変形し、地震のエネルギーをため込んでいる。固着の強さは岩石の性質や温度・圧力、沈み込むプレートの地形などに左右される。

固着の強い場所ほど陸のプレートの変形は大きく、地震や津波の発生源になりやすいと考えられる。これに対し、固着の弱い場所ではプレート境界が時間をかけてずれる「スロー地震」が起きやすい。スロー地震はその場所のひずみを解放する一方で、周囲のひずみを増大させ、地震の引き金になる可能性が指摘されている。

2017年（平成29年）12月16日（土曜日）　高　知　新　聞

移住研究者が津波授業

高知高専 寺田客員教授

仁淀川町の中学生に

【佐川】吾川郡仁淀川町に移住した高知高専客員教授の寺田幸博さん(68)＝写真左端＝がこのほど、同町竹ノ谷の移住交流施設「山茶小屋」で、池川、仁淀両中学校の生徒ら約50人を前に地震や津波について講演し、巨大地震の発生メカニズムや、同町で行っている津波観測システムなどについて説明した。

衛星利用測位システム(GPS)を使った津波観測に携わってきた寺田さんは、定年退官後に移住。新たに音響システムも組み合わせた津波観測のデータ集積拠点を移住施設に設け、研究を続けている。

講演会は、地域貢献を考えた寺田さんが町教委に持ち掛け、2日に開かれた。寺田さんは、海底変動で水が動く津波は、スピードが速く、エネルギーも大きく、なかなか収まらないことなどを紹介。「地震や津波に対する正しい知識を備え、避難路の確認などの備えをして」と訴えた。

池川中2年の竹崎海星さん(14)は「南海トラフ地震のことがよく分かった。しっかり対策をして、生き延びたい」と話していた。

（吉川博之）

2018年（平成30年）3月5日（月曜日）　日経　'18.3.5

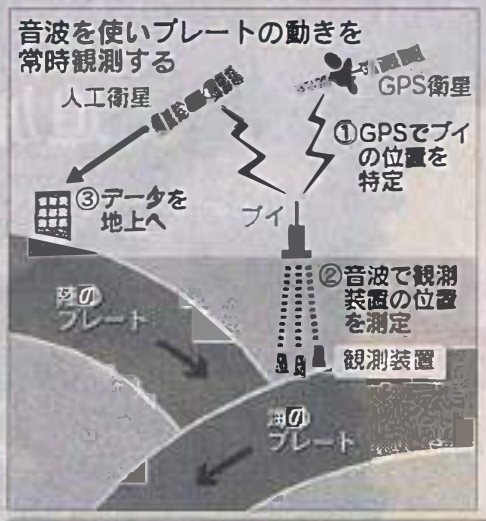
地震 海底の動きで解明

海洋機構や東大 ブイで常時観測

ひずみ蓄積 詳細に分析

巨大な岩板（プレート）の動きで引き起こされる海溝型地震のメカニズム解明に向けて、海底の動きを常時観測する技術の開発が進む。海洋研究開発機構は海上のブイを使い海底の動きを調べる実証実験をして、データの連続取得に成功した。東京大学や名古屋大学なども同様の手法の実証試験を今春にも始める。地震研究には陸上の観測だけでは足らず、海底の詳細な観測が不可欠だ。

観測には通信装置や太陽光パネルなどを取り付けたブイを使う（東京大学の加藤照之教授提供）



海洋機構の常時観測では、全地球測位システム（GPS）で位置を特定できるブイを海上に浮かべる。海底に音波を出す装置を複数点設置し、ブイと音波をやりとりして測量し、海底の動いた距離を測る。データは人工衛星を介して集める。

海洋機構はこれまでに、和歌山沖で約1年間の実証試験を3回行い、データの連続取得に成功した。実用化に向けて、ブイの固定方法や衝突物への対策などに課題があることも分かった。今後運用しやすいように改良する方針だ。

東京大学や名古屋大学、高知工業高等専門学校なども同様の手法の実証試験を高知県足摺岬沖で今春にも始める。ブイは津波の監視にも利用できる。まずは津波観測から始めて、その後プレートの動きの常時監視に使う。

7年前に起きた東日本大震災などの巨大地震は、海のプレートが陸のプレートの下に潜り込む境界で起こる。例えば南海トラフでは海のプレートが1年に約6㌢ずつ陸のプレートの下に沈み込んでいる。

境界にはプレート同士がくっつく「固着部」や、ゆっくりと滑って動く場所がある。滑るとひずみが解消されるが、周囲の固着部にはひずみがたまる。それが限界を超えると地震が起きる。

地殻変動の常時監視からプレートの動きが詳細に把握できれば、固着部やゆっくり滑る場所が分かり、海溝型地震の詳しい仕組みの解明につながる。

東北大学などは日本海溝沿いに20点設置した観測装置でプレートの動きを観測した。2012年から約4年間のデータをみると、陸のプレートが福島沖では東、宮城沖から岩手沖では西に動いていた。福島沖ではゆっくりとプレートが動いて、震災でたまったひずみを解消していた。宮城沖ではプレートの下にあるマントルが動く現象が起きていた。

青森沖ではほとんど動いていなかったが、その理由は分かっていない。解明にはプレートの固着部などを詳細に調べる海底観測が必要だという。

防災科学技術研究所の浦田優美特別研究員らは、海上保安庁が南海トラフ沖に置いた観測装置の動きから、プレートの固着の強さの分布を計算した。把握した状況をもとに地震を再現する数値実験ができるようになった。震源の場所や動く範囲などを変えて約1000通りも再現できる。同研究所の斉藤竜彦主任研究員は「津波による浸水領域のシミュレーションなど、防災対策につながる」と強調する。

現状の海底観測は、東北大や名古屋大、海上保安庁などが日本海溝沿いなどに観測装置を設けた約60地点で実施している。だが、ブイの代わりに船が現地まで行かなくては測定できない。コストや手間がかかり、年1～2回しか行けないため取得するデータは限られており、海溝型地震の研究には少ない。

海底への地震計や津波計などの設置は進んだが、地殻変動を測る観測網の整備は予算不足を背景に遅れている。ブイは1カ所1億～2億円かかるが、データを常時入手できる。

23　3月9日・火曜日　2021年（令和3年）　日刊

科学技術・大学

情報通信研究機構

NICT 先端研究

津波の早期検出 目指す

2011年3月11日に発生した東日本大震災、[illegible]の津波によって甚大な被害を受け、多くの人命が失われた。津波の第1波は国土交通省港湾局が設置したGPS（全地球測位システム）波浪計によって観測され、そのデータは津波予報の更新に大きく貢献したが、課題も明らかになった。

一つはGPS波浪計のデータを伝送する基地局や地上通信網が被災した場合、データ伝送処理ができなくなること。もう一つはGPS波浪計の観測方法による制約で、海上に設置したブイ上で精密な測位を行うには陸上基準局から20㌔程度しか距離を離すことができないため、津波の検出から到来までの時間が短いことである。

当時、情報通信研究機構（NICT）は技術試験衛星Ⅷ型（ETS-Ⅷ）を用いて衛星センサーネットワークの研究を行っており、その一環としてGPS津波計の研究開発を行っていた東京大学地震研究所、高知工業高等専門学校および日立造船とともにブイからGPS波浪計のデータをETS-Ⅷを経由して遠隔地まで伝送する実験を行った。GPS津波計を高知県室戸岬の沖合約35㌔に係留されている黒潮牧場16号に接続し、このブイで観測した波浪情報を茨城県鹿嶋市のNICT鹿島宇宙技術センターに伝送した。消費電力の制約や波の影響もあったが、一つ目の課題である遠方の基地局に安定してデータ伝送ができることを実証した。

二つ目の課題には新たな精密単独測位法「PPP-AR」を導入した。GPS衛星の補強信号を宇宙航空研究開発機構（JAXA）の協力により準天頂衛星「みちびき」のLEX信号を用いてブイのGPS津波計に送り、ブイ上でセンチメートルオーダーの精密単独測位を可能にした。これをETS-Ⅷによるデータ伝送と合わせることで、図のデータをリアルタイムで収集でき、津波の早期検出に大きく前進する成果を得た。

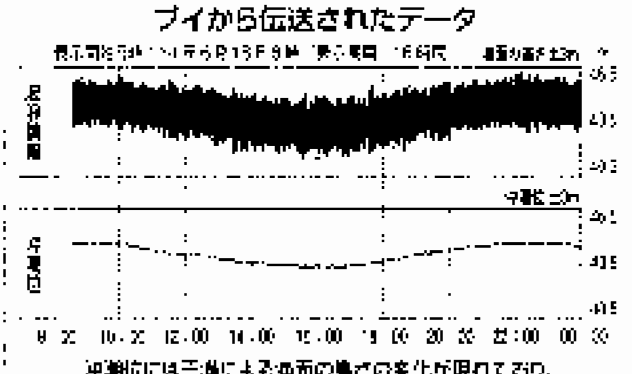
現在、ブイ上で海底地殻変動や海上気象などの観測を行い、データを衛星通信によって収集し、地震やゲリラ豪雨などの災害の早期検出につなげる研究を続けている。

（火曜日に掲載）

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室 研究技術員
山本 伸一

1975年4月、郵政省電波研究所（現NICT）入所。技術試験衛星Ⅴ型、Ⅵ型、Ⅷ型およびCOMETS衛星を用いた移動体衛星通信、海洋センサーネットワークの研究に従事。

ブイから伝送されたデータ

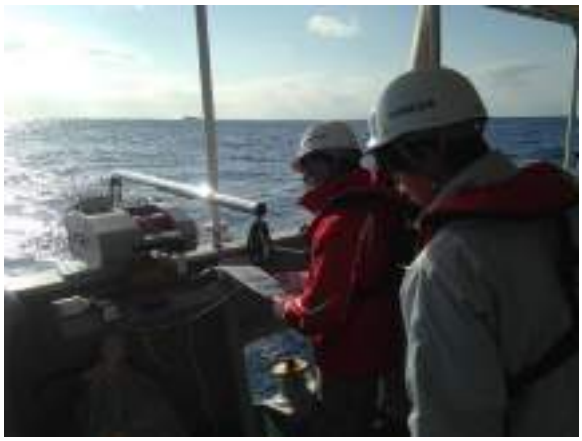


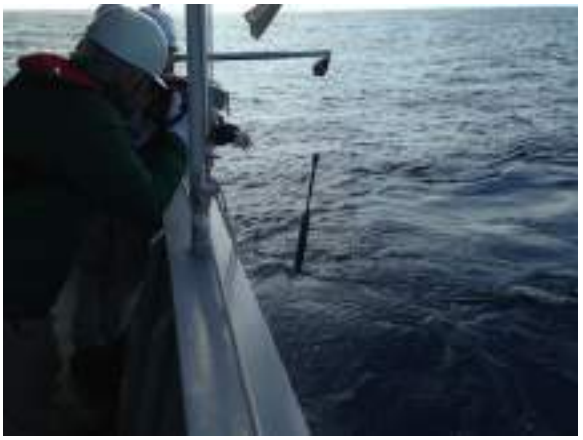
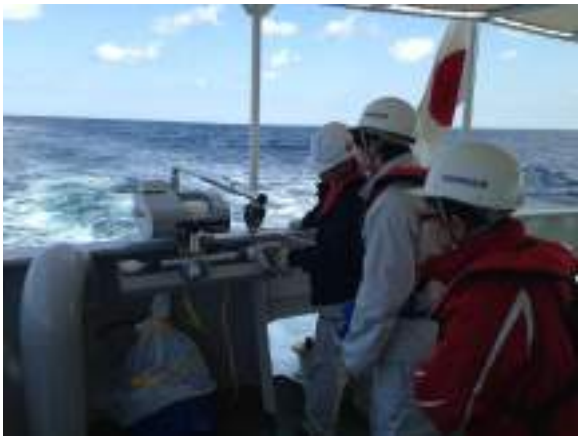
沖潮位には干満による海面の高さの変化が現れており、津波が発生するとここに現れ、高さを検出することができる

資料３－６　写真

2016年8月23-24日　衛星通信実験

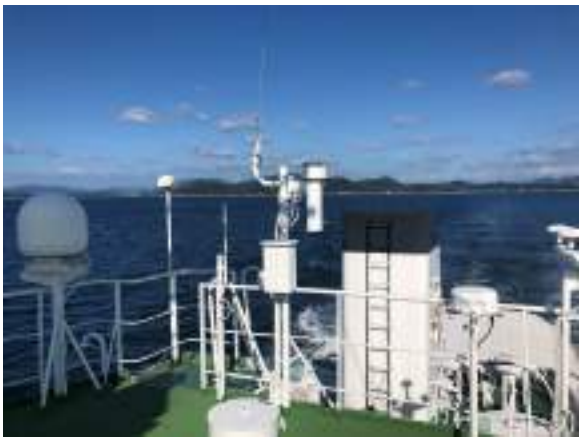
2017年2月7日　CTD観測



2017年6月5日　海底局設置

2019年10月4日　MADOCA受信実験



第４部　参考資料

参考資料４－１　GNSS ブイ開発に関する論文・解説等　(1998～2015)
（以下，○印については全文を採録）

［平成 10(1998)年］

○1998-1) 加藤照之，寺田幸博，木下正生，一色浩，横山昭，1998，GPS 津波計の開発，月刊海洋，号外 15，38-42.

［平成 12(2000)年］

2000-1) Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise variance detection by simplified kinematic GPS measurements - KVD (Kinematics for precise Variance Detection) Method -, J. Geod. Soc. Japan, 46 (4), 253-267, 2000.

○2000-2) Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise variance detection by a single GPS receiver - PVD (Point precise Variance Detection) Method -, J. Geod. Soc. Japan, 46 (4), 239-251, 2000.

○2000-3) Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real Time Observation of Tsunami by RTK-GPS, Earth, Planets and Space, 52(10), 841-845, 2000

［平成 13(2001)年］

○2001-1) Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, T. Moriguchi, M. Takada, T. Tanno, M. Kanzaki, and J. Johnson, A new tsunami monitoring system using RTK-GPS, in the Proceedings of International Tsunami Symposium 2001, Session 5, Number 5-12, 645-651, 2001.

○2001-2) 加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩・森口壽久・神崎政之・高田美津雄，James Johnson，2001，GPS 津波計の開発－大船渡市沖実用化実験－電子情報通信学会論文誌 B，J84-B(12)，2227-2235.

2001-3) 加藤照之，寺田幸博，木下正生，柿本英司，一色浩，森口壽久，神崎政之，高田美津雄，James Johnson，2001，GPS 津波計の開発ー大船渡市沖実用化実験ー，信学技報，2001-04，45-52.

［平成 14(2002)年］

2002-1) 加藤照之，GPS 津波計ー宇宙技術を用いた津波防災システムー，検査技術，Vol. 7,

No. 7 (2002 年 7 月号）, 52-57, 2002

2002-2) 加藤照之・寺田幸博・一色浩・木下正生・柿本英司・神崎政之，GPS 津波計測システムを用いた津波防災システムの構築（課題番号：11792031），平成 11～13 年度科学研究費補助金（地域連携推進研究費）研究成果報告書），191pp，2002.

［平成 15(2003)年］

○2003-1) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信，GPS ブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集（土木学会），50，1411-1415，2003.

2003-2) 寺田幸博・加藤照之，GPS 津波計，非破壊検査，52 (7), 338-343, 2003.

［平成 17(2005)年］

2005-1) Satake, K., T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki, T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka, and Y. Terada, Tsunami source of the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes inferred from offshore tsunami and coastal tide gauges, Earth Planets Space, 57, 173-178, 2005.

○2005-2) Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, 57, 297-301, 2005.

○2005-3) 永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・三井正雄，沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言，海洋開発論文集，21(7)，61-66，2005.

○2005-4) 加藤照之・寺田幸博・越村俊一・永井紀彦，GPS 津波計による津波観測，月刊「地球」，37(3)，179-183，2005.

2005-5) 永井紀彦・加藤照之・寺田幸博・越村俊一，GPS 津波計測システムを活用した津波監視情報網をめざして，土木施工，46(8)，29-35，2005.

2005-6) 永井紀彦・加藤照之・寺田幸博・越村俊一，GPS 津波計測システムの開発と今後の展開，港湾，82(6)，40-42，2005.

2005-7) 寺田幸博，GPS 津波・波浪・潮位計，2005，返仁，No.97，5-10.

［平成 18(2006)年］

○2006-1) 永井紀彦，2006，波浪観測網の強化による海の安全の確保－ＧＰＳ波浪計 2006 年度より配備開始！－，土木学会，土木学会誌 第 91 巻第９号（2006.9.号）, pp.78-79.

○2006-2) Nagai, T., T.Kato, K.Nukada, H.Izumi, Y.Terada and M.Mitsui, 2006, Design of the Tsunami Monitoring Network System based on the Offshore Wave

Observation Techniques, PIANC, Proc. the 31st PIANC Congress Paper No.29, 2006.
2006-3) Nagai, T., T.Kato, N.Moritani, H.Izumi, Y.Terada, M.Mitsui : Offshore Tsunami Monitoring Network Design using GPS Buoys and Coastal on-site Sensors, ASCE, Proc. of the 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'06) vol.2, pp.1529-1540, 2006.

［平成 19(2007)年］

○2007-1) Nagai, T., T. Kato, N. Moritani, H. Izumi, Y. Terada and M. Mitsui, Proposal of hybrid tsunami monitoring network system consisted of offshore, coastal and on-site wave sensors, Coastal Engineering Journal, 49, 1, 63-76, 2007.

［平成 20(2008)年］

○2008-1) 三宅寿英・吉田晴彦・寺田幸博・加藤照之・永井紀彦，GPS 単独精密変動検出法を用いた洋上波浪観測，日本航海学会誌「Navigation」，No.168，26-30, 2008.
2008-2) Kato, T., Y. Terada, T. Nagai, K. Shimizu, T. Tomida, and S, Koshimura, Development of a new tsunami monitoring system using a GPS buoy, Proc. Int. Symp. on GPS/GNSS 2008, 846-851, 2008
2008-3) 加藤照之，GPS 津波計，日本地震学会広報誌「なゐふる」，68，2，2008.

［平成 21(2009)年］

2009-1) 加藤照之・寺田幸博・永井紀彦・越村俊一・清水勝義・富田孝史・河合弘泰，GPS ブイを用いた津波・波浪防災システムの総合的研究（課題番号：17201038）平成 17 年度～平成 20 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)）研究成果報告書，2009

［平成 22(2010)年］

2010-1) 加藤照之，GPS 津波計で観測された 2010 年 2 月チリ地震に伴う津波，測位航法学会ニュースレター，1(2)，3，2010.

［平成 23(2011)年］

○2011-1) Kato, T., Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura, Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, Earth Planets Space, 63, e5-e8, 2011.
○2011-2) Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, T. Miyake, H. Nishimura, S.

Kunihiro, Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy, In Proceedings of the International Global Navigation Satellite Systems Society (IGNSS) Symposium 2011, 15-17 November 2011, 411-422, 2011.

［平成 25(2013)年］

○2013-1) 加藤照之，GPS : 次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～，測地学会誌，59(3), 87-97, 2013.

［平成 26(2014)年］

○2014-1) 山本伸一・川崎和義・寺田幸博・加藤照之・橋本剛正・本橋修・齊田優一・松澤亮，技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験―津波の早期検出を目指して―，信学技報，2014-8, 5-10, 2014.

○2014-2) 寺田幸博・永井紀彦・加藤照之・越村俊一・川口浩二・松下泰弘 : GPS 海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する実証調査，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.70, No.1，pp.13-18，2014.

［平成 27(2015)年］

○2015-1) Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, K. Tadokoro, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, In Hashimoto (ed.) Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), IAG Symposia 145, DOI 10.1007/1345_2015_151, 2015

○2015-2) 川崎和義・山本伸一・寺田幸博・加藤照之・本橋修・橋本剛正・齊田優一・松澤亮, 海上からの衛星データ伝送と今後の展望～災害の早期検出を目指して～, 信学技報, 2015-08，71-76, 2015.

2015-3) 寺田幸博,「みちびき」と「きく 8 号」を用いた GPS 津波計による早期津波警戒システム，2015，平成 25 年度・平成 26 年度地球観測技術等調査研究委託事業成果報告書，平成 27 年 3 月 31 日，93pp.

［平成 28(2016)年］

2016-1) 寺田幸博・加藤照之，GPS 津波計～防災技術のフロントランナー～，電波技術協会報 FORN，2016, 30-33.

津波研究の最前線

GPS津波計の開発

加藤照之
かとう てるゆき
寺田幸博
てらだ ゆきひろ
木下正生
きのした まさお
一色浩
いっしき ひろし
横山昭
よこやま あきら

編集部
筆者：
東京大学地震研究所 助教授
日立造船(株)技術研究所 主管研究員
日立造船(株)技術研究所 主任研究員
日立造船(株)技術研究所 主席研究員
日立造船情報システム(株)GPS-GIS事業部 課長

リアルタイムキネマティック（RTK）GPSを用いた津波計測システムを紹介する．津波に襲われる危険性のある沿岸にこのようなシステムを多数配置することにより，津波災害の軽減に役立つことが期待される．

1. はじめに

比較的手軽に波高をリアルタイムに計測して津波を検出するシステムができれば，これを日本あるいは世界の津波災害のおそれのある沿岸に多数設置して津波による災害を軽減することに役立てられるだろう．これまでにも海底に圧力センサーを設置する方法や超音波を用いる方法が提唱されてきたが，ここではGPSを用いる新しい方法を提案したい．

2. GPS津波計測システムの概要

津波を検出して防災に役立てるには下記のようないくつかの条件が備わっていなくてはならない．

1）最低数cm程度の波高で長周期の波高異常を検出しうること，

2）リアルタイムに波高を計測し，異常を自動的に検出しうる伝達システムを備えていること，

3）陸から最低数km以上離れた場所に設置できて，津波の襲来を事前に察知できること，

4）長期の使用に耐える（あるいは保守の容易な）システムであること，

5）廉価であること（1式数千万円以下が目安），

ここで提唱するGPS津波計は，開発が進めばこれらの条件を満たすことが可能なシステムと考えられる．

GPS（Global Positioning System；全地球測位システム）は，地球を周回する24個のGPS衛星からの電波を地上で受信して受信点の位置を精確に計測するシステムとして既に広く応用されている．GPSを用いて位置を計測する方法には要求仕様によっていくつかあるが，ここで用いるのはいわゆるリアルタイムキネマティック（RTK）GPSと呼ばれるものである．これはカーナビなどに用いられる単独測位とは異なる相対測位方式の一種

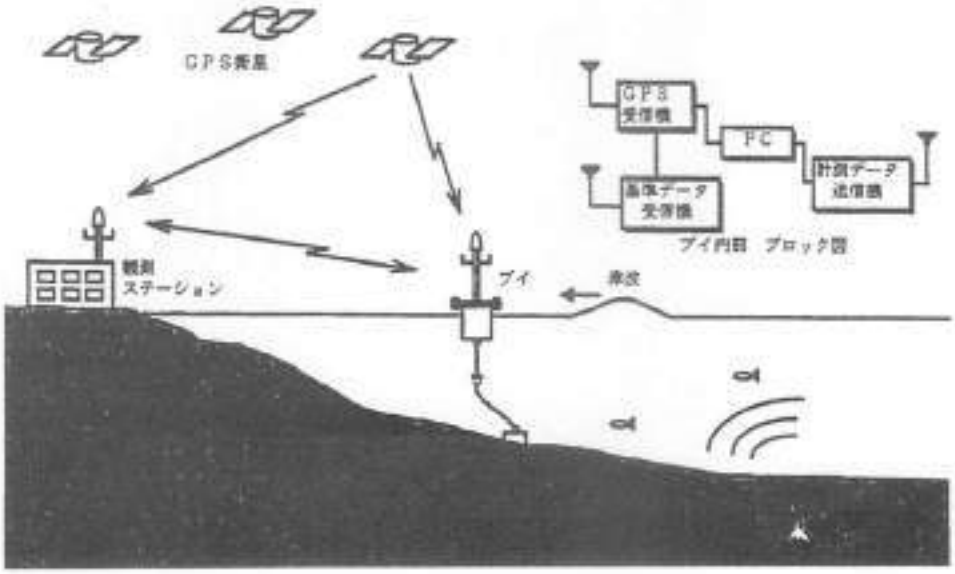


図1 GPS津波計測システム概念図.

であり，移動する物体の高精度位置決めに用いられる．この方式では1台のGPS受信機を位置のよくわかっている場所に設置して固定基準局とし，もう1台を移動する物体に搭載して，2つの点で同時にGPS衛星からの電波を受信する．固定基準局から無線等で搬送波位相データ等を移動局にリアルタイム伝送し（あるいは逆方向でもよい），移動体の固定基準局に対する位置を逐次高精度に推定することによって移動局の位置を決定することができる．この方式は既に大規模構築物の変形調査，危険地帯における作業者の自動無人運用などに応用されているほか，航空機の自動運航への応用にも研究が進められつつある．

海上に設置されたブイにこのGPS受信機を搭載し，陸上におかれた固定基準局に対するブイの位置を高精度に計測しようというのが本システムの基本である．図1にその概念図を示す．

3. 開発の経緯

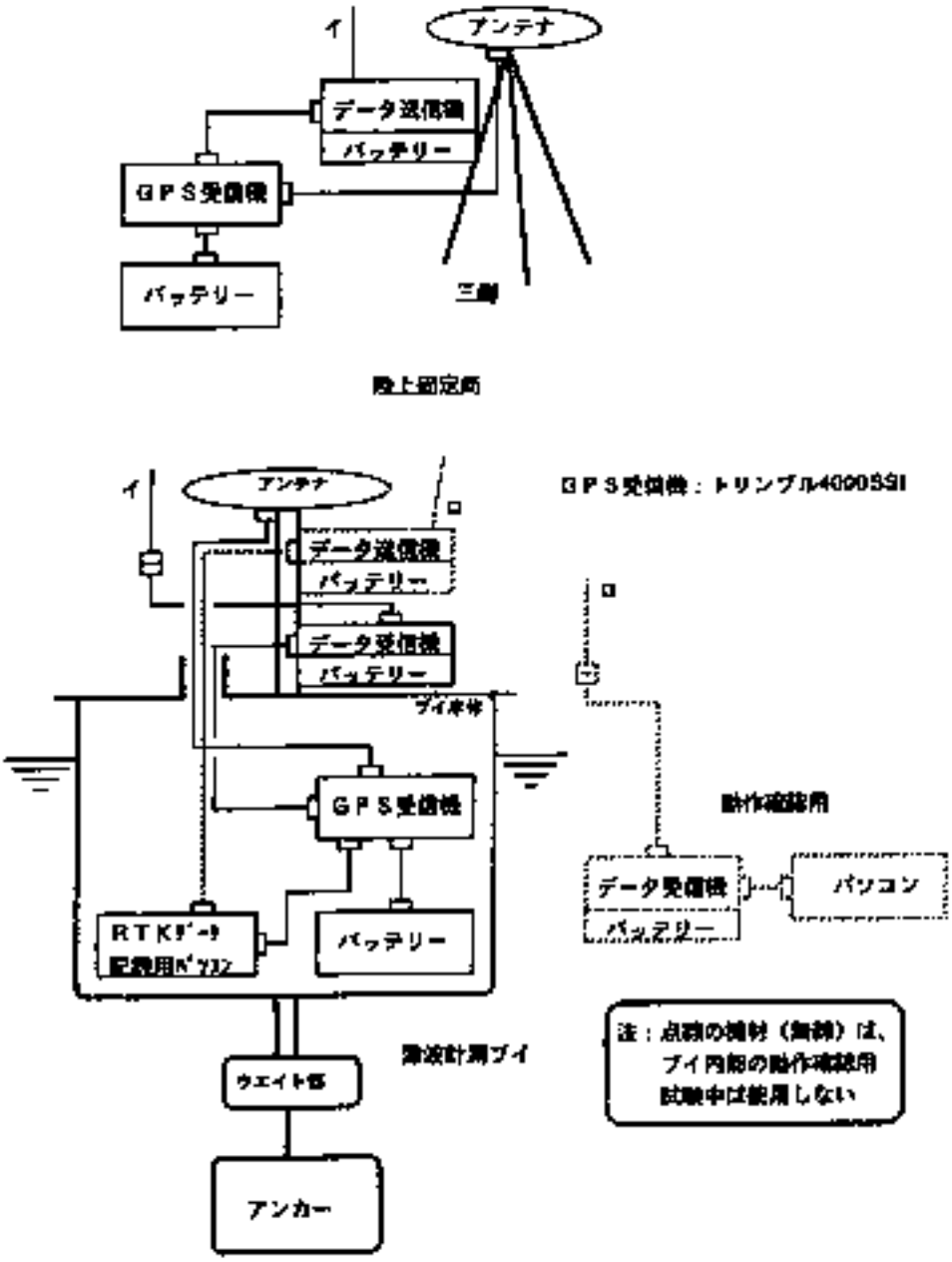
我々はこのような考え方に基づき平成8年頃よりGPS津波計の開発を進めて来た．RTK-GPSを津波計測システムとして開発するにあたって，我々は以下の3つの部分に分けて開発を進めている；

1) ブイ系：海上にブイを敷設しその上にGPS受信機，無線送信機及び電源等を搭載することになる．このため，ブイは長期観測に耐えうるものでなくてはならない．また，基本的なこととして海面の上下変動にGPSアンテナがよく追随するものでなくてはならない．後述するように，我々は既にプロトタイプのブイを作成したが，現在なお実用化に向けたブイの改良を行っている．また，電源についても長期の運用に耐えられるように太陽電池パネルなどを用いる必要があるが，波浪発電などの方式も今後考えられてよい．

2) 伝送系：RTK-GPSの場合，固定基準局からのデータをリアルタイムに移動局に（あるいはその逆でもよい）伝送して瞬時に処理を行って海面高をリアルタイムに計測する必要がある．最近市販されている高精度GPS受信機にはこのようなRTKオプションのついているものがあり，これに無線送信機を搭載することでリアルタイム計測が可能となる．RTK-GPSで数cm程度の精度の計測を実現するには今のところ基線長が10km以内程度と限られる．それでも前節の要求仕様は満たすが，極力基線はのばしたいところである．無線（あるいは衛星通信）も信頼度の高いものが要求される．

3) 計測系：GPS衛星からの信号を受信してリアルタイム位置決めを行うところまではGPS受信機の内部で可能であるが，そのデータを地上に送り，津波の検出を行って，できれば警報システムに連動させたいところである．ここまでを一貫し

図2　GPS津波計基本デザイン.



て完成させないと実用的な津波計測システムにはならない.

以上のことを考えているが，とりあえずGPS津波計のプロトタイプを平成8年度に作成しいくつかの基礎的な実験を行った．図2にシステムの概要を示す.

4. 津波計の実験

実験はまず開発部隊のある日立造船（株）技術研究所の近くの大阪湾において平成8年10月に行った．ここでの経験を踏まえ，平成9年1月には相模湾で本格的な基礎実験を行った．ここでは相模湾で実施した実験結果に基づいて報告する.

実験は東大地震研油壺地殻変動観測所を拠点とし，ここに設置されている東大地震研のGPS観測点を基準局とし，ブイを小網代湾に浮かべて実験を行った．実施したのは平成9年1月22日と23日の2日間で，それぞれ午前10時頃から午後4時頃までの数時間程度観測を行った.

実験では作業船を使用してブイを小網代湾口

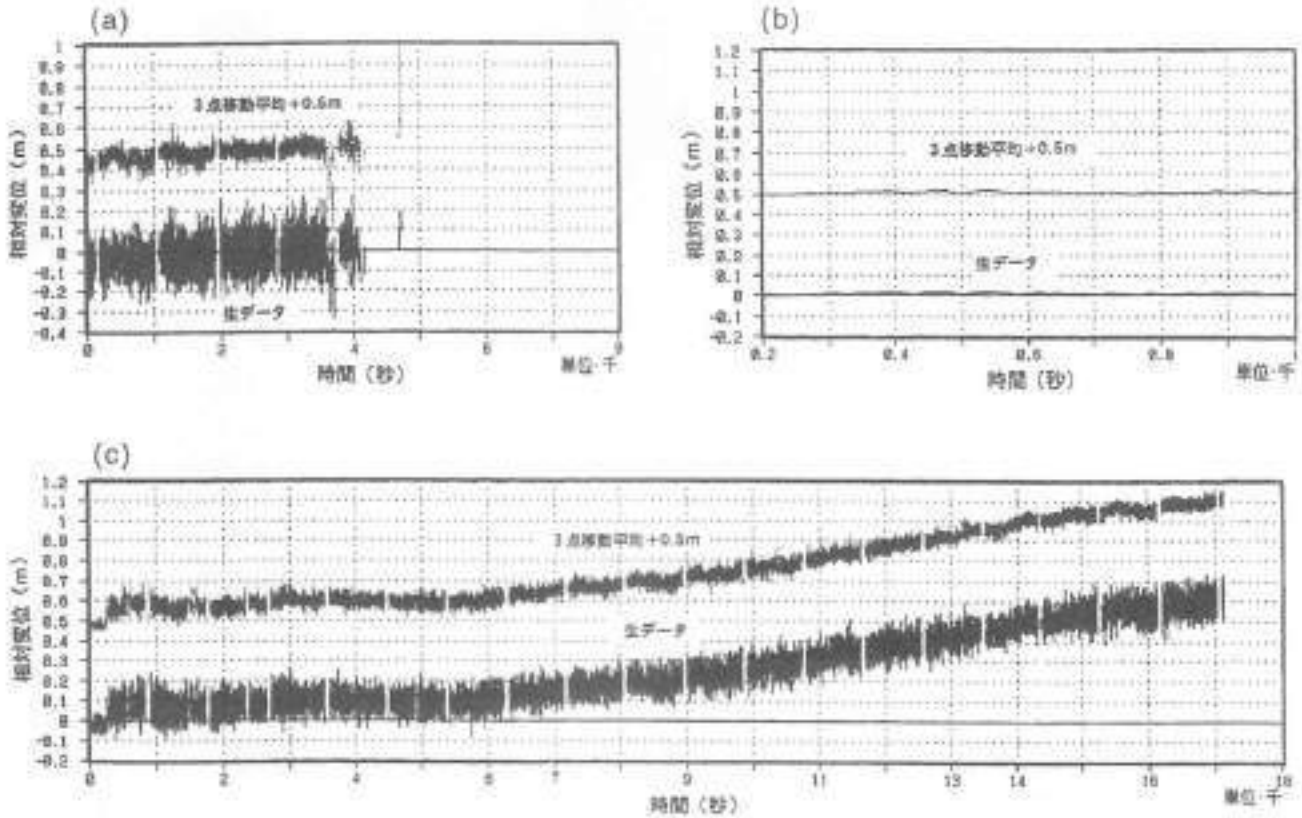


図3　垂直方向の変位. (a) 1月22日, (b) 1月23日：陸上に静置, (c) 1月23日.

写真1　小網代湾におけるGPS津波計の実験風景.

（深さ10m程度）に投入し，流れないようにアンカーで海底に固定した．写真1はその時の様子である．

用いた受信機はトリンブル社製Trimble 4000 SSE（RTKオプション付）である．このタイプの受信機は移動体側でのみリアルタイム計測ができるシステムであるので，データ伝送を双方向に行う必要がある．固定基準局とブイの間の距離は数百m程度であり，見通しがよければ特定小電力無線を用いることのできる程度の距離であったのでこれを使用した．しかしながら，双方向通信は伝送障害のおそれがあるため，今回の実験では実施せず，陸上固定局からブイへの片方向伝送とし，ブイに搭載された受信機でRTK処理するとともに処理データ及び後処理用の位相データをブイ内部に設置した小型計算機に収録することとした．サンプリングは1秒毎とした．

1月22日は風が強くて波が荒かったため，小網代湾口にある防波堤のやや内側にブイを投入した．固定局からの距離は500m程度であった．RTKデータは，ブイ投入直後30分程度のみでほとんど収録できなかった．これは，データ記録用パソコンの不調により，電源が予期せず停止してしまったためである．図3 (a) にこの時のRTKデータの垂直成分の変化を示す．

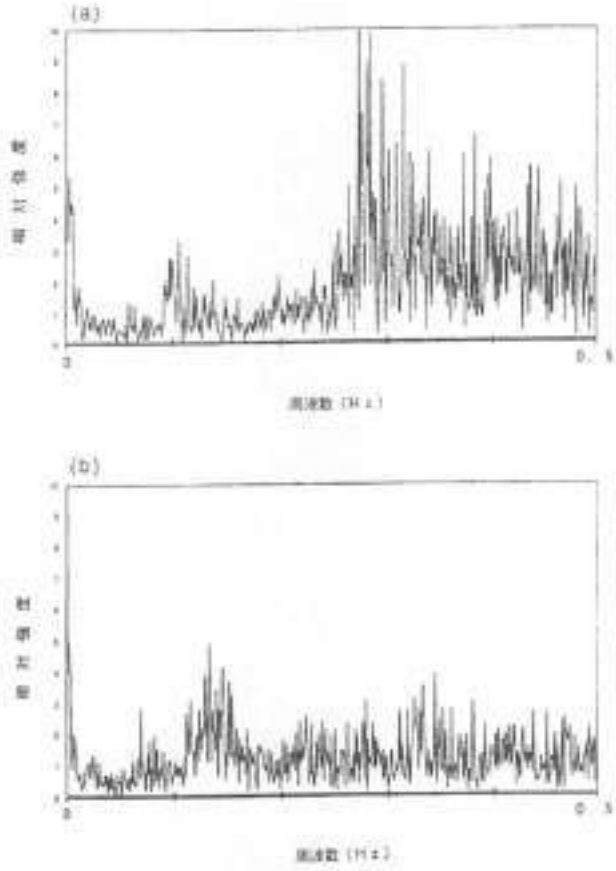


図4　FFTによるスペクトル. (a) 1月22日, (b) 1月23日.

1月23日には，まず陸上にブイを置いて静置してRTKデータを取得し，引き続き海面にブイを設置した．この時は風もなく波も穏やかであったため小網代湾口の防波堤の外側にブイを投入した．海面投入前の静止RTKデータを図3 (b) に，海面投入後のRTKデータを図3 (c) に示す．15分毎にデータの欠落があるのはデータ収録用プログラムのバグによるものである．結果的には適当なタイムマーカーとなっている．また，図3 (a)，(c) をFFT解析をおこなってスペクトルをとったものを図4 (a)，(b) に示す．

5. 考察

図3のグラフには2本のプロットがあるが，上は3点（すなわち3秒）の移動平均をとったものである．図3 (b) から，ブイを静止しているときにはRTKによる変位は1cm以内に収まっていることがわかる．これがRTKの精度を示すものと考えられる．これと図3 (a)，(c) を比較すると，波浪を有意に捕らえていることがわかる．1月22日の場合，その振幅は1秒毎の値で両振幅が30cm程度である．これにはうねりによる上下変動のほかブイの傾きによるものが相当程度含まれていると考えられる．3点の移動平均をとるとこの振幅が10cm程度と大幅に小さくなっていることがわかる．23日は波がかなり小さくなっており生データでも両振幅で20cm程度であり，3点移動平均でも10cm以内程度に収まっている．また潮汐による海面高の変位も顕著に見られる．

図4のスペクトルを見ると波浪の高かった1月22日は周波数が0.3Hz（周期約3秒）付近のところに大きなピークが，0.1Hzのところに小さなピークが見られる．これらはそれぞれ波浪とうねりをあらわしているものと思われる．また穏やかだった1月23日は0.13Hz（周期約7～8秒）前後のところにピークが見られる．図4 (a)，(b) ともゼロに近いところにピークがあるのは潮汐によるものと思われる．津波は波浪よりもはるかに長い周期をもっており，このように長周期成分をとりだすことで津波を分離して検出することが可能であると考えられる．

6. まとめと今後の課題

RTK-GPSを用いた津波計測システムを考案し，プロトタイプのブイを作成して基礎的な実験を行った．この結果，海面高変動を±5cm程度の精度で検出することができた．今後ブイのデザインを改良するなどして海面高変化によく追随できるようにすることが重要である．また，伝送システムについてはより長距離で安定して信号を送ることのできるシステムが必要である．津波を波浪などと分離することは比較的容易と思われるが，警報発令までも考慮した自動システムとなるとそう簡単ではないだろう．計測システムも含め津波計測システムの改良をすすめ，一日も早く実用化できることを願っている．

[参考資料2000-2]

測地学会誌，第46巻，第4号
(2000)，239−251頁

Journal of the Geodetic Society of Japan
Vol. 46, No. 4, (2000), pp. 239−251

Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver
—PVD (Point precise Variance Detection) Method—

Hiroshi Isshiki [1], Atsushi Tsuchiya[2], Teruyuki Kato[3], Yukihiro Terada[1], Hideshi Kakimoto[1], Masao Kinoshita[1], Masayuki Kanzaki[4] and Takayuki Tanno[4]

1) Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation

2) The Survey Technique Center, Japanese Association of Surveyors

3) Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

4) Hitachi Zosen Information Systems Company, Limited

(Received July 13, 2000; Revised November 9, 2000; Accepted November 15, 2000)

GPS 単独精密変動検出法
— PVD: Point precise Variance Detection —

一色　浩[1]・土屋　淳[2]・加藤　照之[3]・寺田　幸博[1]・柿本　英司[1]
木下　正生[1]・神崎　政之[4]・丹野　貴之[4]

1) 日立造船(株)技術研究所
2) (社)日本測量協会
3) 東京大学地震研究所
4) 日立造船情報システム(株)

(2000年7月13日受付，2000年11月9日改訂，2000年11月15日受理)

要　旨

GPS単独計測により，観測点座標の変動成分を計測する新しい方法（PVD法）を提案している．単独計測であるので，基準点を設置する必要がないため，どこでも計測可能な簡便低コストの計測システムの構築を可能とする．搬送波位相を用いると，高精度の計測が可能であるが，本法では変動成分のみを対象とするので，波数アンビギュティを解く必要がなく，計算負荷も大きくない．したがって，準リアルタイムでの高周波数の計測を可能とするであろう．しかし，現時点では，単独測位であるため衛星に起因する誤差を除去できないので，座標変動の振幅が小さなときには，低周波数域での誤差除去が十分でない．洋上ブイによる波浪観測や地震の計測などに応用可能であると考えられ，大きな可能性を有している．

Abstract

A new positioning method (PVD) by a single point GPS receiver is proposed. Since it is a point measurement, a reference point is not required, and it would make possible to build a simple and low-cost measuring system. Carrier wave phases make a high precision measure-

ment possible, but the initial phase ambiguities are not required to solve, when the variation component of the observation point coordinates is the target of the measurement as in the present method. The load of the calculation is not heavy. Hence, it would make a quasi-real-time measurement of high frequency variation possible. However, errors due to satellites are not eliminated at present since PVD is a point measurement, and errors in low frequency regions may not be negligible, when the variation of the coordinates is small. Applications to wave measurements by an ocean buoy and earthquake measurements are expected.

1. Introduction

When a GPS antenna is attached to a buoy, movements of water surface can be measured, if the relationship between the movement of water surface and that of buoy is known.

Current kinematic GPS survey assures high precision measurements in centimeter order, but a reference point on land is necessary. Especially in RTK (Real-Time Kinematic) measurements, the distance between the reference and the observation points can't be taken long. Even when dual frequency method is used, the distance can't be taken longer than about 100 km (Tsujii *et al.*, 1998). In addition, large amounts of data must be sent from the observation point to the reference point (or vice versa). Furthermore, the kinematic method requires heavy computation loads. So, a high speed sampling measurement is difficult conventionally.

There is a strong need for measurements of waves in the middle of ocean in meteorology, fishery, mining and sea transportation. A high precision measurement without a reference point would be very useful for these purposes. In this report, such kind of measurement is proposed, and the authors would like to refer it as PVD (Point precise Variance Detection) method.

2. The algorithm of PVD method

The idea of PVD method is simple. "If the antenna oscillates, the range between the satellite and the observatbion point may change. If the variation in the signal is detected by any means, the antenna oscillation may be known. If the carrier wave is used, high precision may be expected."

This report explains the method based on the data of vertical motion of a buoy floating on sea. The vertical motion of the buoy is due to tidal and wind waves. The experiment was conducted off the Aburatsubo Bay of Miura Peninsula from 4:30:00 (UT) on March 19, 1999 for about six hours (Kato *et al.*, 2000). Trimble 4000SSi GPS receivers were used for measurements. The position of the buoy is (N35°09′39″, E139°36′30″) in WGS-84. In the present paper, the measurement of the antenna movement due to wind waves (4, 5 seconds in period) is discussed. Another antenna (for the reference receiver) was placed on the roof of Aburatsubo Geophysical Observatory, Earthquake Research Institute, University of Tokyo. The data at the reference point are not required by PVD method, but the point is referred as the reference point and the data are used for comparisons with those at the observation point. The distance between the reference and the observation points is about 900 m. Sampling rate is 1 sec. The L1 wave is used. Since the distance between the reference and the observation points is short, the

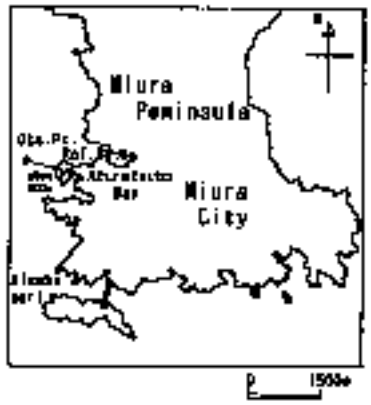


Fig. 1 Location of the reference and the observation receivers.

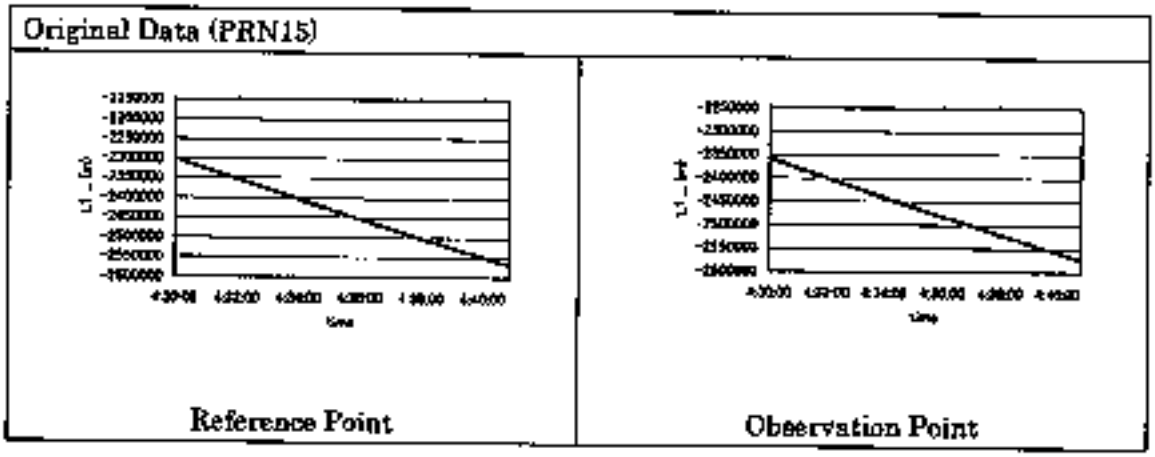


Fig. 2 One way phase data by L1.

ionospheric correction by L2 wave is not necessary.

One way phase data L1 at the reference and the observation points are shown in Figure 2.

In Figure 3 are given the residuals res(L1, 1) obtained by line fitting of the 1st order polynomial. Furthermore, the residuals res(L1, 2) obtained by line fitting of the 2nd order polynomial are shown in Figure 4, and parts of the curves are enlarged in Figure 5. Variation of short period can be seen clearly in the data of the observation point. This reflects the movement of the antenna due to wind waves. No such short period variation can be seen in the data of the reference point.

Next, the residuals res(L1, 2) are processed by 49-point running average, and the two new sequence are generated, one the running average itself and the other the difference between the original data and running average. The former corresponds to a low-pass filter and gives a low frequency component low(res(L1, 2), 49), and the latter corresponds to a high-pass filter and gives a high frequency component high(res(L1, 2), 49). The high frequency component obtained by 49-point running average contains the component whose period is shorter than 49 seconds. For the purpose of measuring wind waves, signals whose periods are between 1 and 18 seconds are important. From this respect, 49-point moving average covers wider frequency

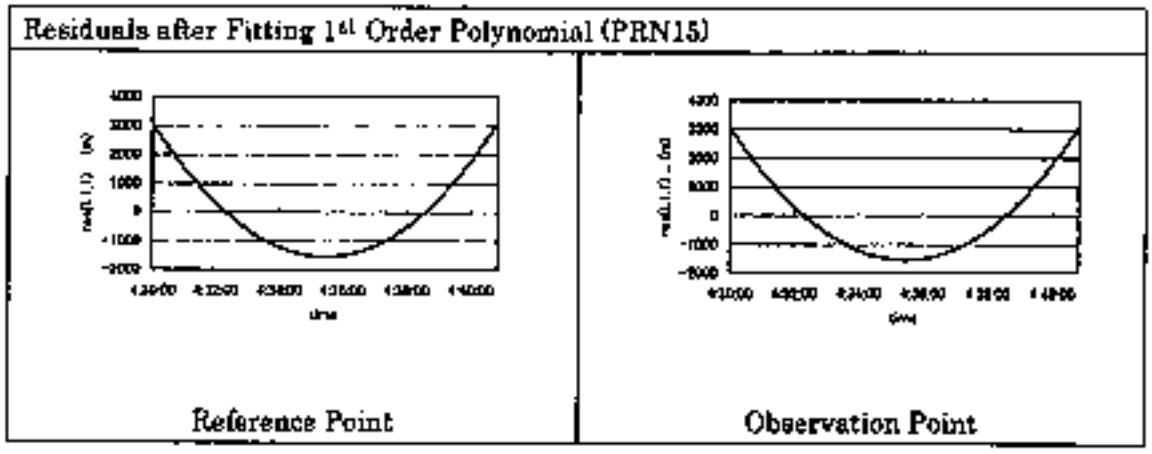


Fig. 3 Residual due to line fitting of the 1st order polynomial res(L1, 1).

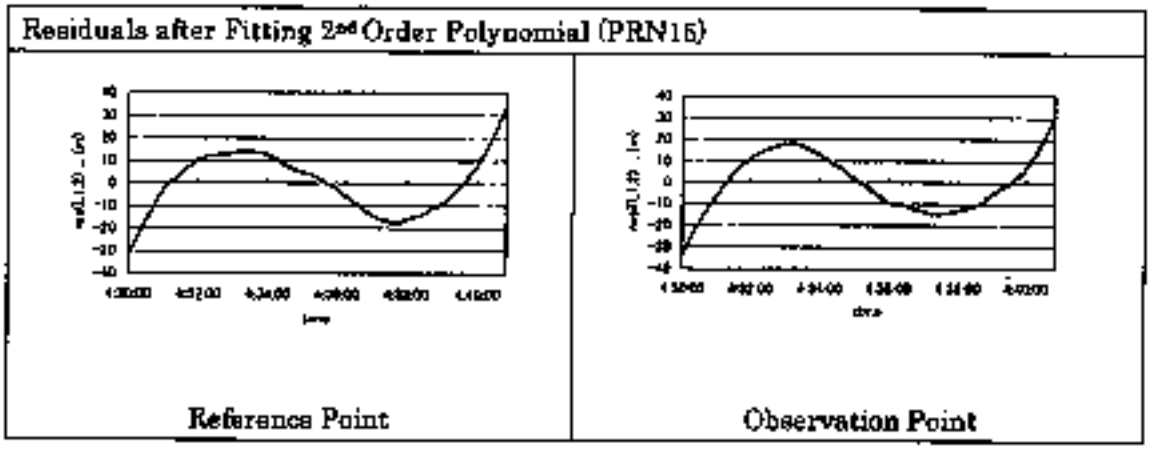


Fig. 4 Residual due to line fitting of the 2nd order polynomial res(L1, 2).

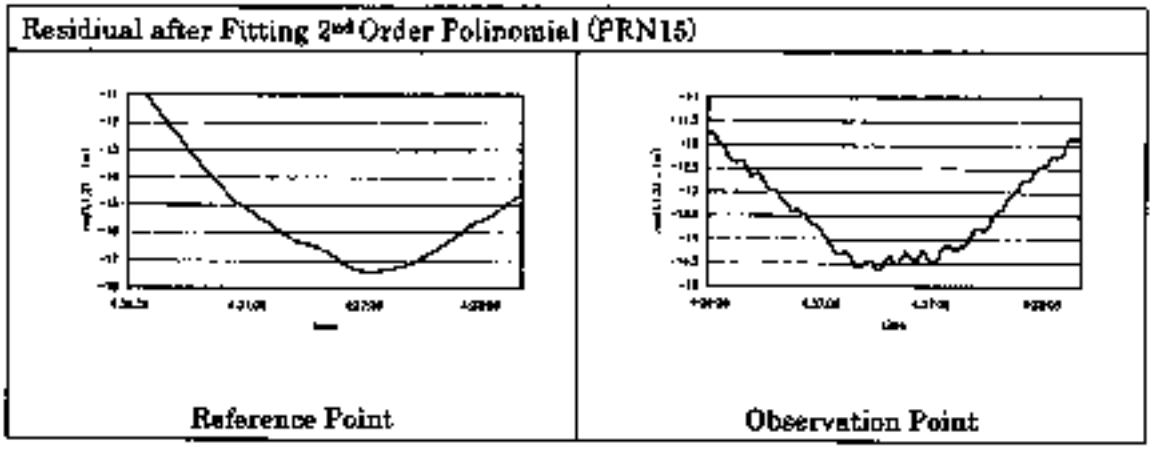


Fig 5 Residual due to line fitting of the 2nd order polynomial res(L1, 2) (enlarged).

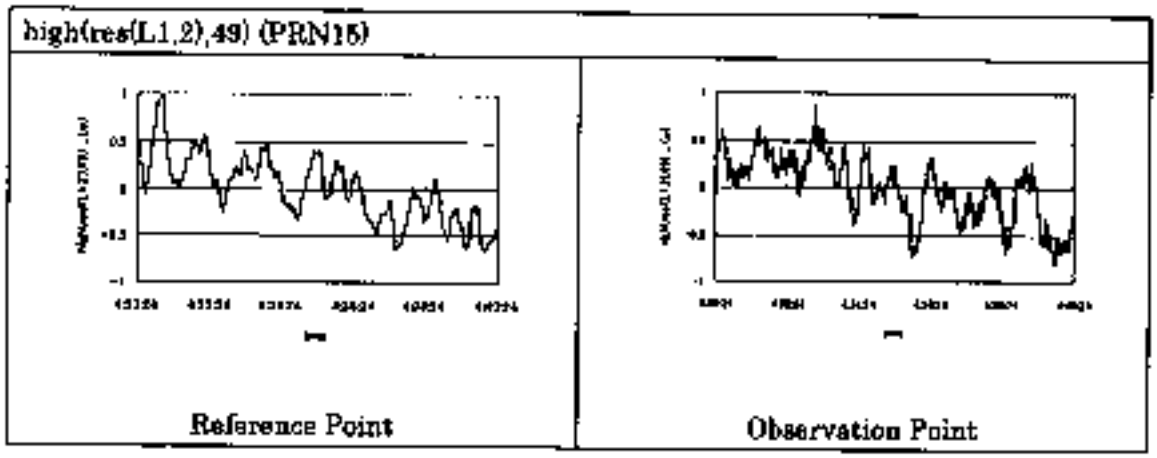


Fig. 6 High frequency component high(res(L1, 2), 49).

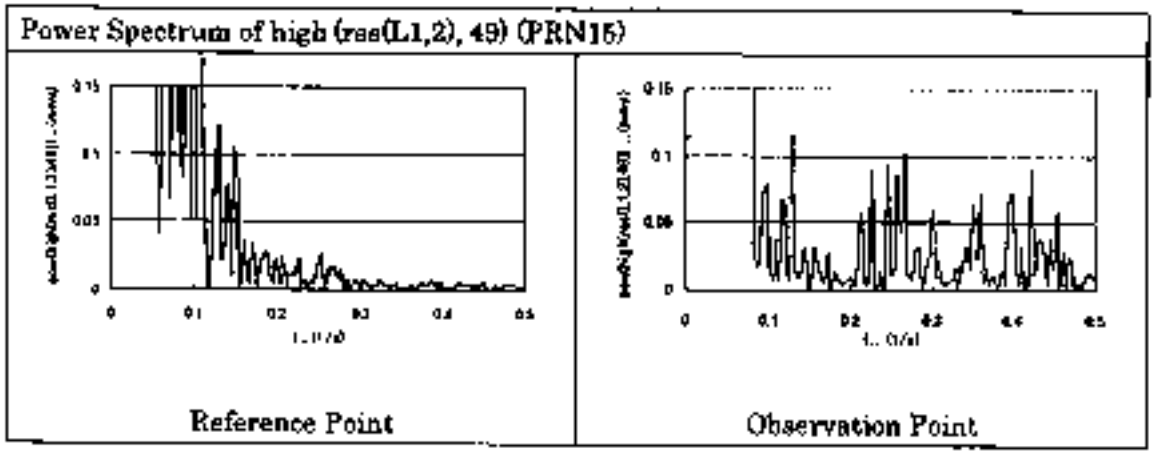


Fig. 7 Power spectrum of high component high(res(L1, 2), 49) in res(L1, 2) obtained by 49pts running average.

range required for the present purpose. The reason is that the authors are also interested in the nature of the noise in low frequency region for different applications. The results are shown in Figure 6.

Since the reference point is fixed, the high frequency component high(res(L1, 2), 49) by 49-point running average should be zero, but not zero. This is because of noises due to the satellite, transmission path of the electro-magnetic wave and receiver clock fluctuation. Naturally, the same kind of noises should be added on the high frequency component high(res(L1, 2), 49) of the observation point. The power spectrum of high(res(L1, 2), 49) is obtained by using FFT and is shown in Figure 7. In the data of the observation point is found a signal component in the high frequency region. The data of the reference point shows that the noise is in the low frequency region.

According to the results obtained by RTK method (supplied as a firmware of a Trimble 4000SSi receiver using an algorithm unknown to the users), wind waves whose period is longer than 9 sec do not exist on the day. Hence, the low and high components low(high(res(L1, 2),

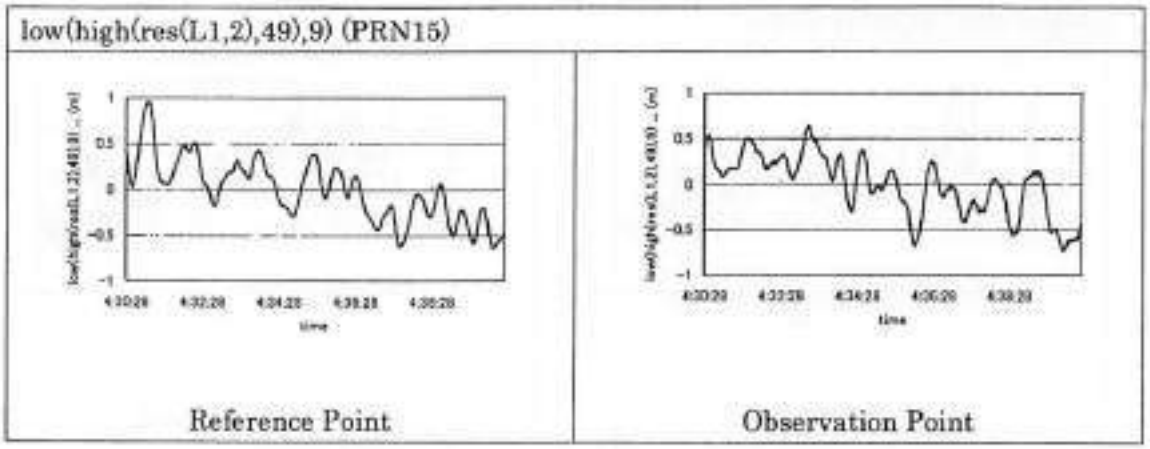


Fig. 8 Low component low(high(res(L1, 2), 49), 9) in high(res(L1, 2), 49) obtained by 9-point running average.

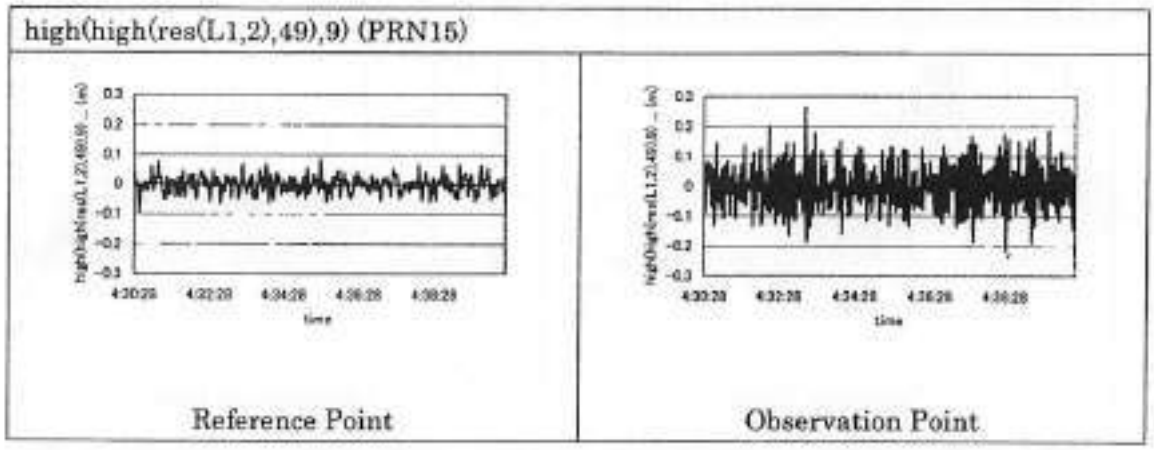


Fig. 9 High component high(high(res(L1, 2), 49), 9) in high(res(L1, 2), 49) obtained by 9-point running average.

49), 9) and high(high(res (L1, 2), 49), 9) are obtained by processing high(res(L1, 2), 49) by 9-point running average. These are shown in Figures 8 and 9. The almost same amount of noise can be seen on the low frequency components low(high(res(L1, 2), 49), 9) of both the reference and the observation point data. On the other hand, the high frequency component high(high (res(L1, 2), 49), 9) at the observation point gives a signal which can be considered clearly due to wind wave. The high frequency component at the reference point gives the noise. The similar noise should exist on the data at the observation points too. So, the data at the reference point gives a measure of noise in high(high(res(L1, 2), 49), 9) at the observation point.

In the discussions mentioned above, both line fitting of polynomials and running average are used, but the process can be realized by running average alone. In Figure 10a are shown a high frequency component sequence high(res(L1, 2), 49) obtained by 49-point running average of a residual of 2nd order line fitting res(L1, 2) and a high frequency component sequence high (L1, 49) obtained by taking directly 49-point running average of the original sequence L1.

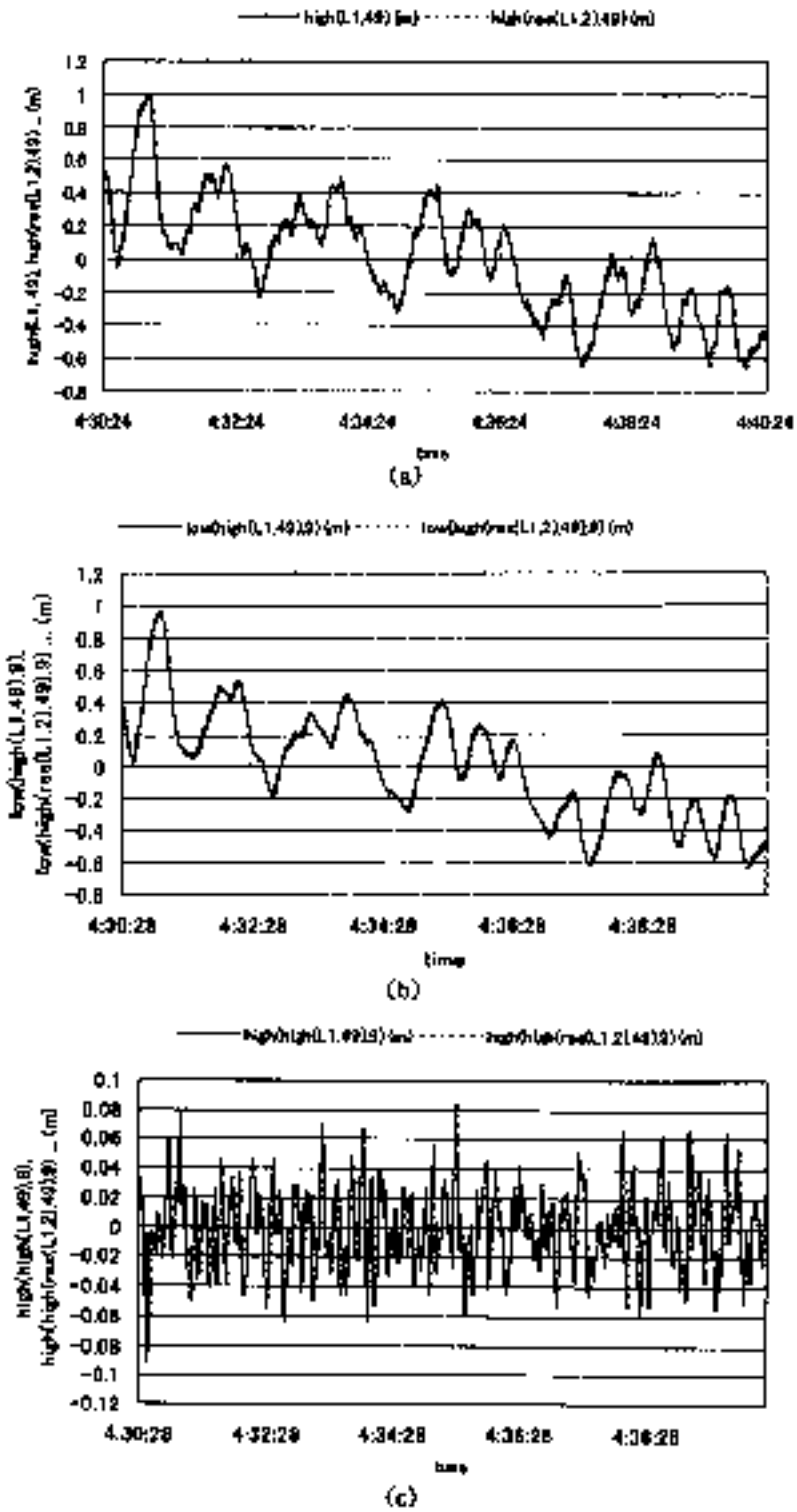


Fig. 10 Comparison between the results by running average after line fitting and those by running average alone (Reference point, PRN15).

Furthermore, the low and high frequency components low(high(L1, 49), 9) and high(high(L1, 49), 9) obtained by applying 9-point running average of high(L1, 49) are compared with low (high(res(L1, 2), 49), 9) and high(high(res(L1, 2), 49), 9) in Figures 10b and 10c.

In the present study, the filters are used in two stages, that is, the 49- and 9-point running averages. Actually for the purpose of obtaining the final results, the 49-point running average would be unnecessary. To clarify the basic idea of PVD method and the nature of the noises, the two stage filters are used.

3. Numerical results of variance components calculated by PVD method

The surface coordinate system (x, y, z) is shown in Figure 11. The x- and the y-axes are directed east and north, and the z-axis vertically upward. The x, y and z components of the antenna movement are calculated from the high frequency component high(high(L1, 49), 9).

The coordinates of the observation point are decomposed into the mean, long and short period variance components $(\bar{x}_{m1}, \bar{y}_{m1}, \bar{z}_{m1})$, $(\hat{x}_{m1}(t), \hat{y}_{m1}(t), \hat{z}_{m1}(t))$ and $(\tilde{x}_{m1}(t), \tilde{y}_{m1}(t), \tilde{z}_{m1}(t))$. Namely,

$$\begin{aligned} x_{m1}(t) &= \bar{x}_{m1} + \hat{x}_{m1}(t) + \tilde{x}_{m1}(t) \\ y_{m1}(t) &= \bar{y}_{m1} + \hat{y}_{m1}(t) + \tilde{y}_{m1}(t) \\ z_{m1}(t) &= \bar{z}_{m1} + \hat{z}_{m1}(t) + \tilde{z}_{m1}(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Since the long and short period variance components $(\hat{x}_{m1}(t), \hat{y}_{m1}(t), \hat{z}_{m1}(t))$ and $(\tilde{x}_{m1}(t), \tilde{y}_{m1}(t), \tilde{z}_{m1}(t))$ are much smaller than the distance $\bar{\rho}^i_1$ between mean position of the receiver 1 and the satellite i, ρ^i_1 can be written as

$$\begin{aligned} \rho^i_1(t) &= \sqrt{(\bar{x}_{m1} - \bar{x}^i_{s0} + \hat{x}_{m1} + \tilde{x}_{m1})^2 + (\bar{y}_{m1} - \bar{y}^i_{s0} + \hat{y}_{m1} + \tilde{y}_{m1})^2 + (\bar{z}_{m1} - \bar{z}^i_{s0} + \hat{z}_{m1} + \tilde{z}_{m1})^2} \\ &\approx \sqrt{\begin{array}{l}(\bar{x}_{m1} - \bar{x}^i_{s0})^2 + (\bar{y}_{m1} - \bar{y}^i_{s0})^2 + (\bar{z}_{m1} - \bar{z}^i_{s0})^2 \\ +2(\bar{x}_{m1} - \bar{x}^i_{s0})(\hat{x}_{m1} + \tilde{x}_{m1}) + 2(\bar{y}_{m1} - \bar{y}^i_{s0})(\hat{y}_{m1} + \tilde{y}_{m1}) + 2(\bar{z}_{m1} - \bar{z}^i_{s0})(\hat{z}_{m1} + \tilde{z}_{m1})\end{array}} \\ &\approx \bar{\rho}^i_1(t) + \frac{(\bar{x}_{m1} - \bar{x}^i_{s0})}{\bar{\rho}^i_1}(\hat{x}_{m1} + \tilde{x}_{m1}) + \frac{(\bar{y}_{m1} - \bar{y}^i_{s0})}{\bar{\rho}^i_1}(\hat{y}_{m1} + \tilde{y}_{m1}) + \frac{(\bar{z}_{m1} - \bar{z}^i_{s0})}{\bar{\rho}^i_1}(\hat{z}_{m1} + \tilde{z}_{m1}) \\ &= \bar{\rho}^i_1(t) - e^i_{1x}(\hat{x}_{m1}(t) + \tilde{x}_{m1}(t)) - e^i_{1y}(\hat{y}_{m1}(t) + \tilde{y}_{m1}(t)) - e^i_{1z}(\hat{z}_{m1}(t) + \tilde{z}_{m1}(t)), \end{aligned} \tag{2}$$

where $(e^i_{1x}, e^i_{1y}, e^i_{1z})$ are the unit vector directed from the mean observation point (receiver 1) to the satellite i. $\bar{\rho}^i_1(t)$ changes slowly with time, and the rest of the terms on the right-hand side of eq.(2) is the long and short period variance components $\hat{\rho}^i_1$ and $\tilde{\rho}^i_1$ of ρ^i_1. Namely,

$$\rho^i_1(t) = \bar{\rho}^i_1(t) + \hat{\rho}^i_1(t) + \tilde{\rho}^i_1(t). \tag{3}$$

The elevation and azimuth of the satellite i viewed from the receiver 1 are denoted by θ^i_{s0} and θ^i_{s0}. The unit vector $(e^i_{1x}, e^i_{1y}, e^i_{1z})$ can be written as

$$(e^i_{1x}, e^i_{1y}, e^i_{1z}) = (\cos\theta^i_{s0}\cos\theta^i_{s0},\ \cos\theta^i_{s0}\sin\theta^i_{s0},\ \sin\theta^i_{s0}). \tag{4}$$

Since the altitude of the satellite is as high as 20,000 km, the elevation θ^i_{s0} and azimuth θ^i_{s0} may

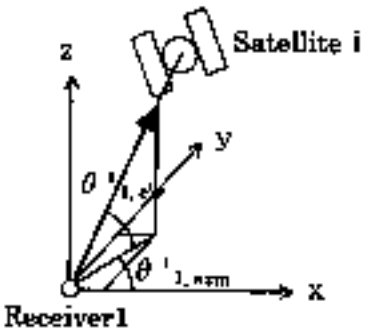


Fig. 11 Definition of elevation and azimuth.

be obtained accurately by using almanac.

On the other hand, the carrier wave phase ϕ_i (in cycle) of the satellite i is decomposed into the "mean" component $\bar{\phi}_i(t)$, the long period component $\tilde{\phi}_i(t)$ and the short period component $\hat{\phi}_i(t)$ corresponding to $\rho_i(t)$, $\tilde{\rho}_i(t)$ and $\hat{\rho}_i(t)$ as

$$\phi_i = \bar{\phi}_i(t) + \tilde{\phi}_i(t) + \hat{\phi}_i(t). \tag{5}$$

Then, $\hat{\rho}_i(t)$ may be approximated by

$$\hat{\rho}_i(t) \simeq \lambda_1 \hat{\phi}_i(t), \tag{6}$$

where λ_1 is the wave length of L1 wave. From eqs.(2), (3) and (6),

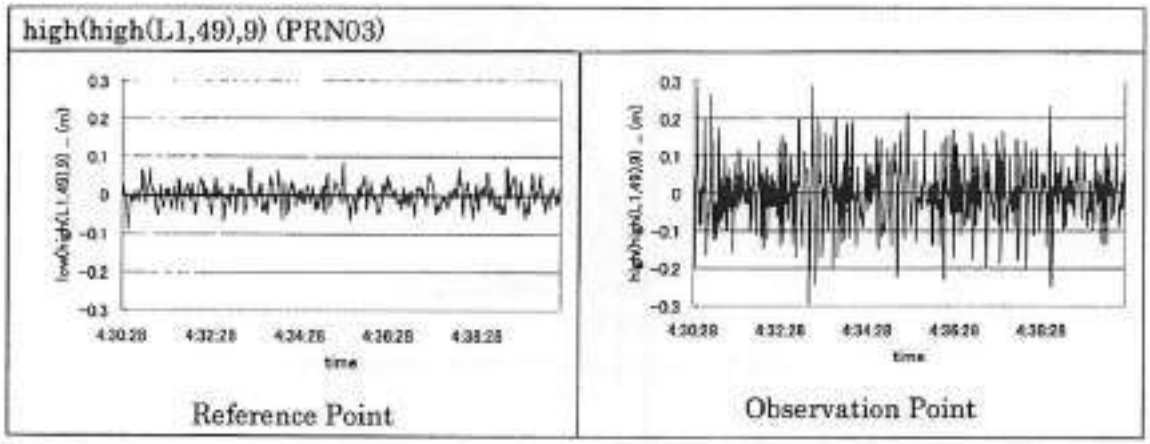
$$\lambda_1 \hat{\phi}_i(t) \simeq -e_{i,x} x_{sm}(t) - e_{i,y} y_{sm}(t) - e_{i,z} z_{sm}(t) \tag{7}$$

is derived. If $\hat{\phi}_i(t)$ is obtained for three or more satellites, the short period variance component $(x_{sm}(t), y_{sm}(t), z_{sm}(t))$ is determined.

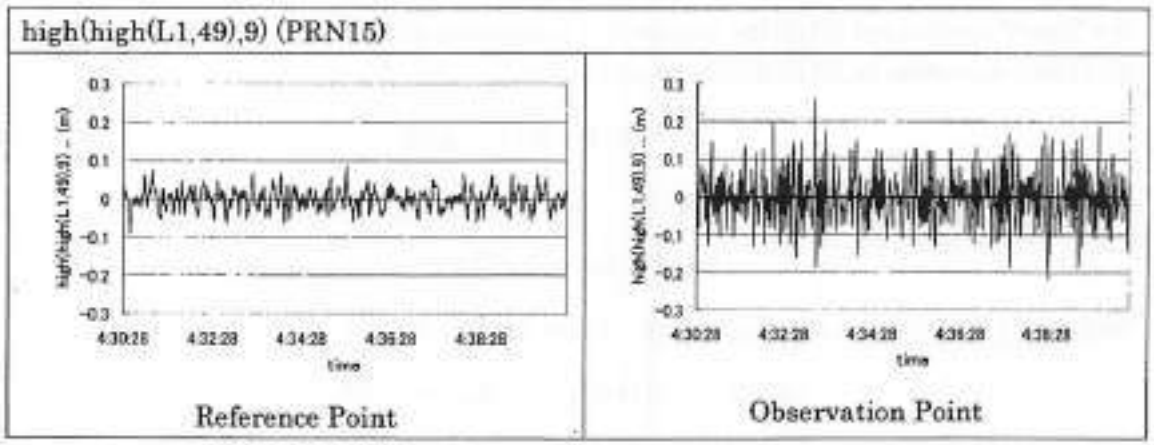
The short period variance component $\hat{\phi}_i(t)$ may be obtained by processing the raw data $\phi_i(t)$ with an appropriate high-pass filter. In the following, the high frequency component high (high(L1, 49), 9) is used for $\lambda_1 \hat{\phi}_i(t)$.

A part of the data used in PVD method is shown in Figure 12.

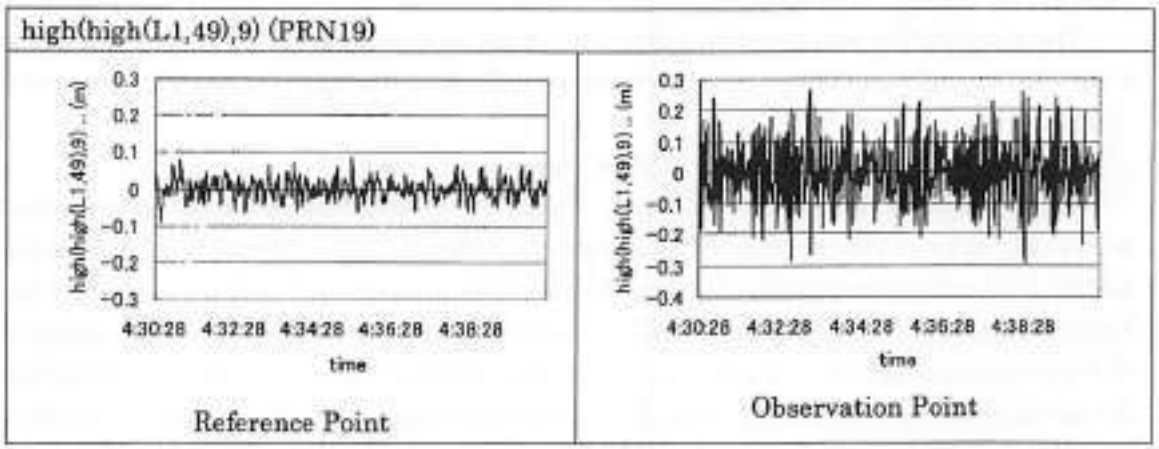
Figure 13 shows the flow of calculation. Satellite-satellite single difference would generally be effective to cancel the error originating from the receiver clock. Comparison between the result by PVD method and that by RTK method is shown in Table 1, Figure 14 and Figure 15. In Table 1, comparison among various PVD methods is also shown. Figure 14 gives comparison of the sequence obtained by PVD method with that obtained by RTK method. Comparison of the power spectrum is given in Figure 15. The methods using the single difference between the satellites give the accuracies lower than 3SAT. The reason is not clear now but will be clarified in the near future. The least square method does not improve the accuracy of the result. When the number of satellites used is increased, satellites of low elevation must be included in the calculation. In the present case, the elevations of the four satellites are higher than 40 deg and those of the rest about 20 deg. The transmission delay related to the low elevation satellites may affect the results. The elevations of the satellites used in 3SAT are higher than 40 deg.



(a)



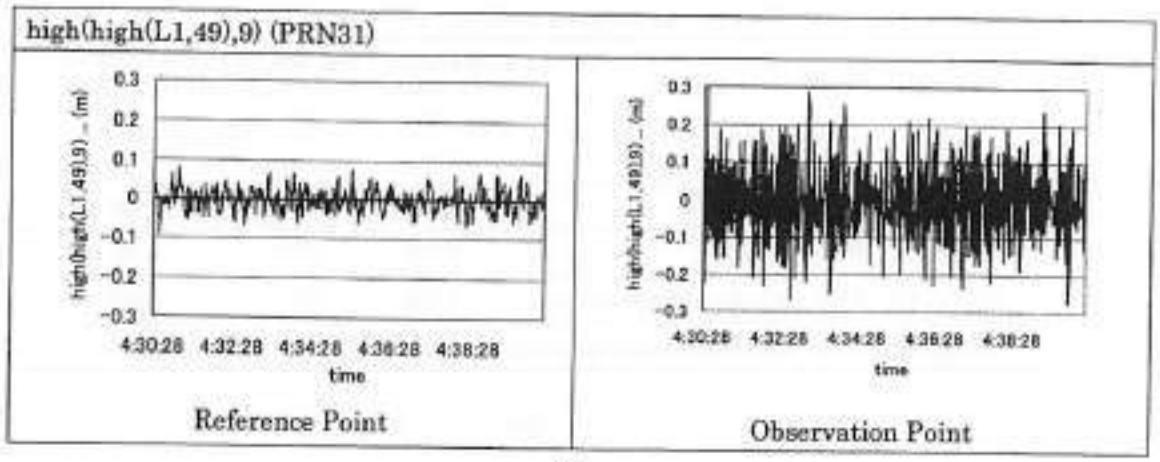
(b)



(c)

Fig. 12

According to the results mentioned above, the high frequency components such as wind wave components may be measured accurately even by a point positioning (Tsuchiya *et al.*, 2000a). The noise in the low frequency component such as low(high(L1, 49), 9) in Figure 10



(d)

Fig. 12 Data used for calculation of PVD method. (a) PRN03. (b) PRN15. (c) PRN19. (d) PRN31.

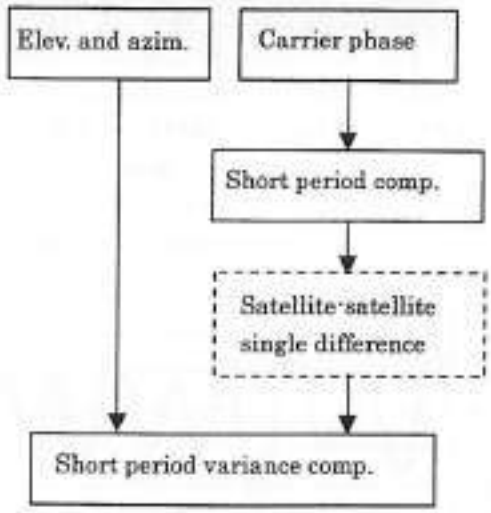


Fig. 13 Flow of calculation in PVD method.

include the components due to satellite and receiver clocks and wave transmission path. These noises except the one due to receiver clocks can't be eliminated by the present PVD method.

Precise evaluation of PVD method is not discussed fully in this paper. It should be done based on data obtained by an experiment where the receiver antenna of the observation point is moved precisely by a mechanical oscillator. The results will be published in the near future.

4. Conclusions

(1) The relatively high frequency components with small noise due to the satellite and receiver clocks and transmission path of electro-magnetic wave can be measured as precisely as ± 5 cm by point measurements.

Table 1 Calculation results by PVD method.

Notation	Method	Standard deviation (m)	Std. dev. of PVD-RTK (m)	Cross corr. of PVD and RTK
RTK	Real time kinematics	0.089	0	1
3SAT	PVD, 3 satellite	0.105	0.046	0.899
LSM	PVD, 7 satellite	0.085	0.048	0.849
SDS_4SAT	PVD, 4 satellite, single difference	0.126	0.071	0.836
SDS_LSM	PVD, 7 satellite, single difference	0.059	0.052	0.927

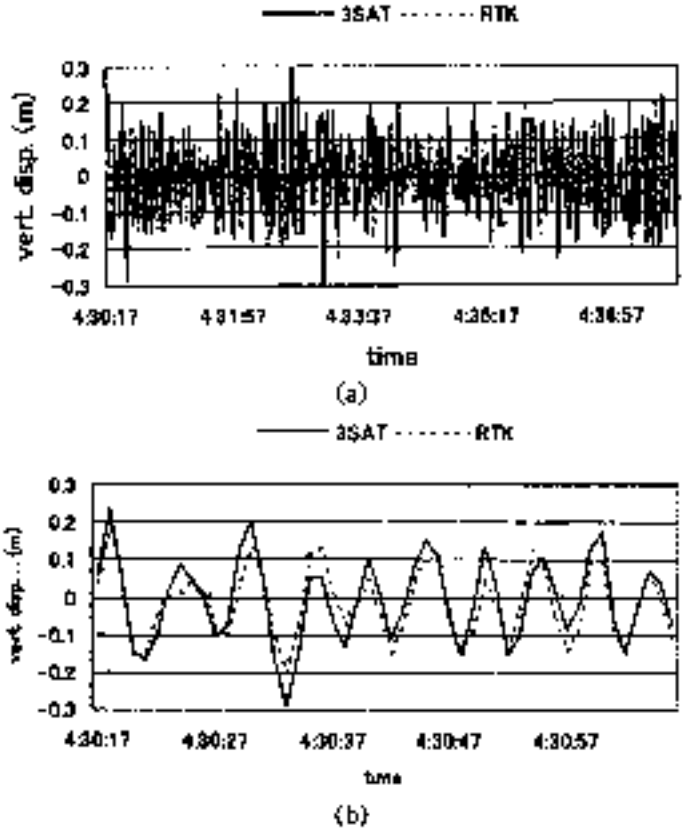


Fig. 14 (a) Comparison of sequence between 3SAT and RTK (about 500 sec). (b) Comparison of sequence between 3SAT and RTK (about 50 sec).

(2) The satellite position is not required to be calculated at each epoch. The azimuth and elevation are used for calculation, but they don't need to be renewed frequently and can be calculated from almanac with sufficient accuracy.

(3) Since PVD method introduced in the present paper requires small computational loads, it will make possible the quasi-real-time rapid measurements of the high frequency variation components.

(4) In low frequency region, present method is not effective because of the large noise. A

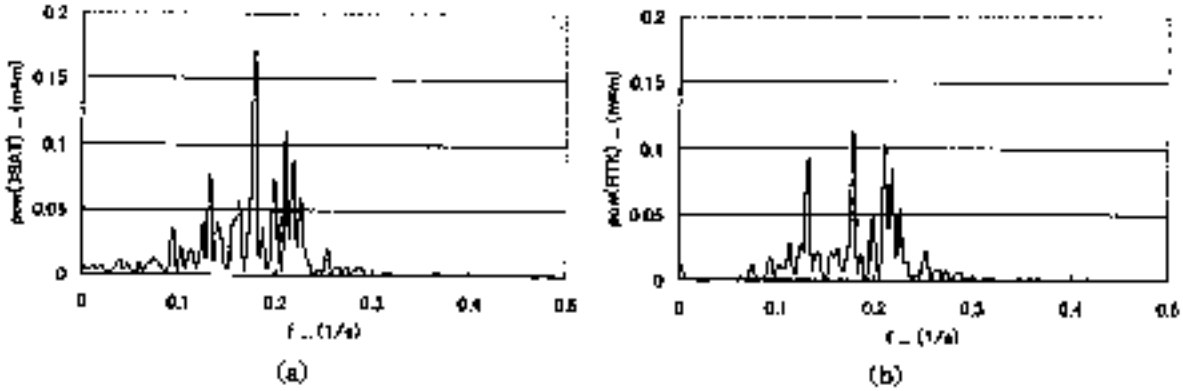


Fig. 15 (a) Power spectrum of 3SAT. (b) Power spectrum of RTK.

countermeasure is discussed by Tsuchiya *et al.* (2000b) and Isshiki *et al.* (2000).

(5) If the low frequency components including the direct current is required, a hybrid method which combines the conventional Kinematic method and the PVD method will be effective. The former samples data at a low rate and the latter at a high rate.

Acknowledgement

The authors appreciates Mr. Tatsutoshi Takahashi, assistant of Aburatsubo Geophysical Observatory, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, for his cooperation at the time of measuring. Dr. T. Asada, former Director of Technical Research Institute of Hitachi Zosen Corporation is also appreciated sincerely for his advices and encouragements given to the authors on the course of the research.

References

Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno (2000): Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements—KVD (Kinematics for precise Variance Detection) Method, J. Geod. Soc. Japan, 46, 4, 253–267.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsushi, A. Yokoyama and T. Tanno (2000): Real-time Observation of Tsunamis by RTK-GPS, Earth Planets Space, 52, 841–845.

Tsuchiya, A., H. Isshiki, Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, M. Kanzaki, T. Tanno and T. Kato (2000a): Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver—PVD, Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, 88 p.

Tsuchiya, A., H. Isshiki, Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, M. Kanzaki, T. Tanno and T. Kato (2000b): Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements—KVD, Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, 80 p.

Tsujii, T., M. Murata, M. Harigae, T. Ono and T. Inagaki (1998): Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and Flight Test Evaluation, National Aerospace Laboratory, TR-1357T.

LETTER *Earth Planets Space*, **52**, 841–845, 2000

Real-time observation of tsunami by RTK-GPS

Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Masao Kinoshita[2], Hideshi Kakimoto[2], Hiroshi Isshiki[2], Masakatsu Matsuishi[3], Akira Yokoyama[3], and Takayuki Tanno[3]

[1]*Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan*
[2]*Hitachi Zosen Corporation, Taisho-ku, Osaka, Japan*
[3]*Hitachi Zosen Information Systems Co., Ltd., Ohta-ku, Tokyo, Japan*

(Received January 6, 2000; Revised July 21, 2000; Accepted July 21, 2000)

A new tsunami observation system has been developed, which employs the RTK-GPS technique to detect a tsunami before it reaches the coast. The system consists of dual-buoys: the Support-buoy, which is sensitive to wind-waves, and the Sensor-buoy, which is of a spar-type and is insensitive to wind-waves. Both buoys are equipped with a GPS antenna. An experiment using this system was carried out for about nine days in March 1999. Observation data were monitored at the onshore base station. The results showed that hourly averaged data is consistent with ocean tides for both buoys. The Sensor-buoy was found not to respond much to wind-waves compared to the Support-buoy. Thus, it may be preferable to use a spar-type buoy for detecting a tsunami efficiently. Furthermore, a simple frequency analysis showed that a tsunami could be easily separated from higher frequency wind waves if a tsunami is superimposed on regular wind waves.

1. Introduction

If a large tsunami is detected offshore and a warning is announced before its arrival at the nearby coast, the disastrous effects of the tsunami may be significantly reduced. A number of offshore tsunami detection systems have been developed which mostly use ocean bottom pressure gauges, from which data are transmitted through an ocean-bottom cable (e.g. Hino *et al.*, 1998), or by satellite via acoustic transmission from the ocean bottom to the buoy (e.g. Gonzalez *et al.*, 1999). We are developing a new tsunami detection system which employs a real-time kinematic (RTK) GPS system installed on a buoy, and is much more cost effective and robust relative to the alternative techniques.

The authors started the project in 1997 using a simple prototype buoy (Kato *et al.*, 1998). Then a new experimental system was developed and an experiment using the new system in the open sea was carried out in March 1999. This paper briefly describes the system and the results of the experiments. A brief discussion is added concerning future possibilities for operational use and the problems that would need to be solved in such a case.

2. Hardware System

The current tsunami detection system employs real-time kinematic-GPS technology which monitors a moving platform in real-time with an accuracy of a few centimeters by relative positioning. If a GPS antenna is placed on top of a stable buoy at sea, the variations of the sea surface relative to a stable location on land can be monitored. Only the buoy's vertical motion is important for tsunami detection as well as other short period wind waves.

In the present experimental system dual GPS receiving systems are used: two GPS antennas on land and two on buoys. At the onshore base station, two GPS antennas are placed for reference purposes, and the base station has the function of real-time monitoring of the buoys. Sea level is measured by two buoy systems. Kelecy *et al.* (1994) and Born *et al.* (1994) used GPS buoys to detect sea level height, but their experiments were not designed to detect tsunamis, but to calibrate the ERS-1 and TOPEX/POSEIDON altimeter, respectively, for a short period of time. The present system aims to directly detect tsunamis and is required to operate for a long time.

In this experimental system, two kinds of buoy are tested: the Support-buoy and the Sensor-buoy. Designs for these buoys are shown in Fig. 1. GPS antennas are mounted at the top of each buoy. The Support-buoy is designed to move with wind-waves and is equipped with GPS receivers, a number of sealed lead batteries, a wind generator, solar panels for power supply, and a pair of radio receiver and transmitter devices. The Sensor-buoy is a spar-type buoy about 8 m long designed to be resistant to wind wave motion (e.g., Kelecy *et al.*, 1994; Born *et al.*, 1994). The center of mass of this spar-type buoy is located at several meters below the sea surface, so that the buoy reacts more to long frequency waves compared to the Support-buoy.

A schematic design of the deployment of the buoys at sea is shown in Fig. 2. In order for the Support-buoy not to float away or rotate, it has to be anchored by tri-directional sinkers. On the other hand, the Sensor-buoy, although connected to the Support-buoy with an antenna cable, should be free from any tension as much as possible, other than sea-surface displacement. Thus, the Sensor-buoy is loosely tied

Copy right© The Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS); The Seismological Society of Japan; The Volcanological Society of Japan; The Geodetic Society of Japan; The Japanese Society for Planetary Sciences.

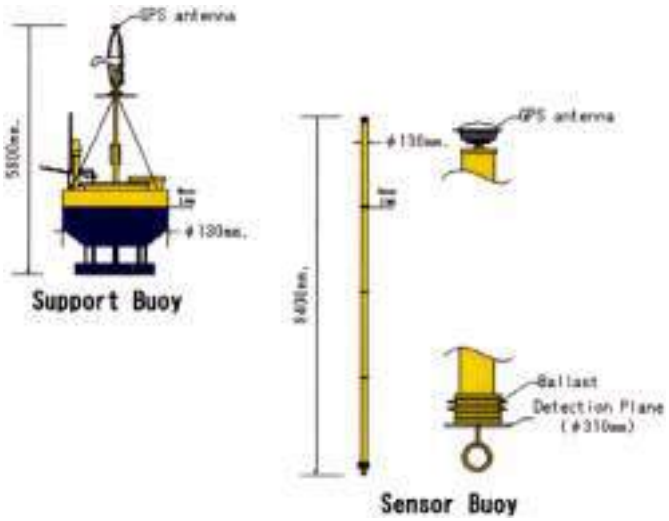


Fig. 1. Support-buoy (left) and Sensor-buoy (right). Sensor-buoy is insensitive to wind-waves compared to Support-buoy.

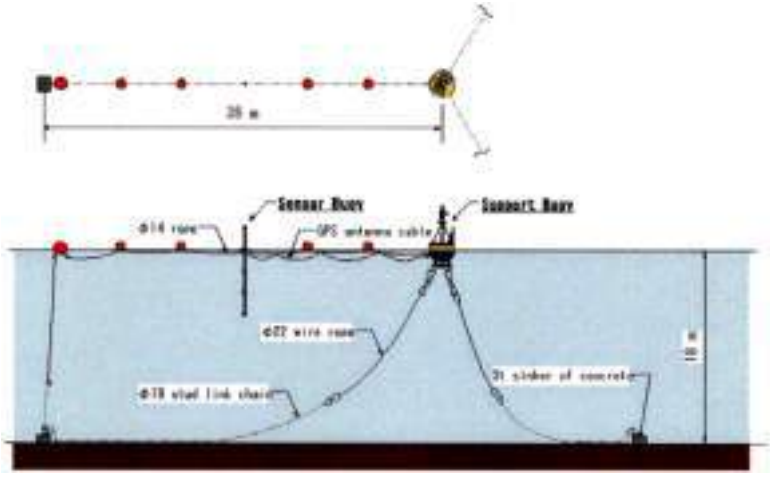


Fig. 2. Schematic design of the tsunami detection system. Wire is extended in both directions of the Sensor-buoy. The depth of water was about 18 m in the experiment.

to the supporting ropes. The float at the farthest end from the Support-buoy is anchored by a single sinker.

The data taken at the Support-buoy and the Sensor-buoy are first stored and processed in GPS receivers installed on the Support-buoy. Then the processed data are transmitted to the land base by 429 MHz radio transmissions. The transmitted data (position of the GPS sensors) are monitored and stored in the PC at the base station.

Because the data is processed using the RTK software within the receiver, no correction for tropospheric or ionospheric effects could be applied. Thus, in this experiment, several kilometers would be the practical limit for distance from buoy to base station in order to achieve an accuracy of several centimeters.

This system is still experimental and no integrity monitoring is performed, as would be required during operational use. The improved system we are now preparing is planned to deploy such a monitor system for operational applications.

3. Experiment

The experiment was performed over nine days (March 18–26, 1999) offshore of the Miura Peninsula, in the Sagami Bay, in central Japan. The buoy system was installed, as shown in Fig. 2, about 900 m from the land base and about 500 m offshore at a water depth of about 25 m. GPS satellites were tracked every second.

The season was early spring and there were both calm and rough sea conditions. When the wind was strong, at about 30 m/s, and the surface was rough, the Support-buoy swayed heavily but the data were obtained without difficulty, and there were no radio transmission failures throughout the period of the experiment. A combination of wind generator and solar batteries was sufficient to charge the lead batteries in the Support-buoy. Thus real-time monitoring during the period was entirely successful.

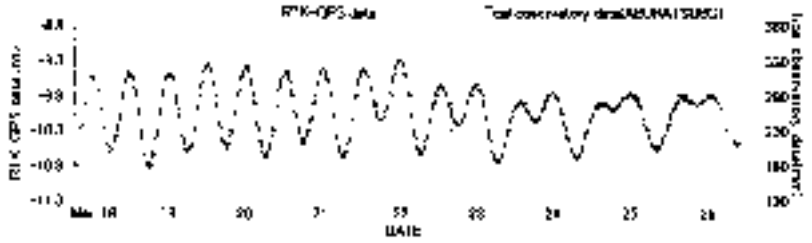


Fig. 3. Line drawing shows RTK-GPS data by Support-buoy, and cross marks show tidal observatory data at Aburatsubo tidal station.

Fig. 4. A sample of observation data by (a) Support-buoy, and (b) Sensor-buoy at the same time period. Data were taken when the sea-surface was rough. Sampling interval is one second.

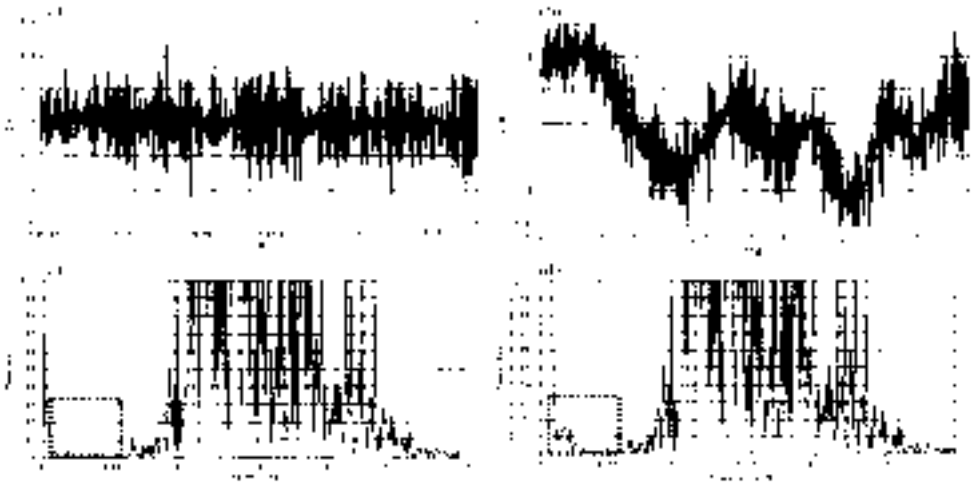


Fig. 5. (a) Measured data (b) Measured data + tsunami (c) FFT of measured data (d) FFT of tsunami data. Tsunami data were read manually from Nagai (1998).

4. Results

4.1 Measurement of tide and wind-waves

First, the data was examined in order to determine if it accurately traced the ocean tide variability. For this purpose, the sampled data from the tsunami meter were compared with data at the Aburatsubo tide-gauge station located about 1 km from the buoy. Figure 3 shows a comparison with hourly data at the Aburatsubo tide gauge shown by cross marks, whereas the line shows height change of the sea surface observed with the Support-buoy. Plot interval is 1 minute averaged for 60 points with a one second sampling, to average out wind-waves. There is no visible shift or offsets in the plots. Thus the data collected by the buoy system seems to track the change of sea-surface.

Figure 4 shows an example of a plot for a short period of data (10 minutes) observed at each buoy in the same time window. Plot interval is one second. As readily seen, the variability of the Sensor-buoy is significantly smaller than the wind-waves. Although a closer examination may have to be made, the Sensor-buoy seems not to respond to surface ripples and wind-waves, and reacts instead to the deeper part of the water mass, which is preferable for tsunami detection.

4.2 Simulation for detection of tsunamis

The present system demonstrated that it could track the sea-surface quite well. However, an important consideration is if the system would be able to detect a tsunami. Because tsunamis are not generated frequently, the authors have had to examine them by experimental means . One method is to simulate a real tsunami record and apply to a mathematical procedure to check if the tsunami signal could be detected embedded in the data for non-tsunami surface waves.

Data was taken for the Nihonkai-Chubu earthquake at Oga (Nagai, 1998). A record of tsunami data was added to the data under rough sea-surface circumstances. Figure 5(a)

shows measured sea-surface changes for the Sensor-buoy. Figure 5(b) shows data added to simulate the tsunami, which is manually extracted from a publication of Nagai (1998). The real record of the present tsunami detection system may look like Fig. 5(b). As is readily seen in Fig. 5, a tsunami has a much longer period than wind waves, although there might be large variations in its period. Thus, differentiating tsunamis from wind waves may not be so difficult if applying some filtering technique such as the Fast Fourier Transformation (FFT) to the RTK directly, or in post-RTK results processing.

Figure 5(c) shows the frequency analysis (FFT) of the measured record in Fig. 5(a). There are no waves or noise in the frequency spectrum lower than 0.06 Hz, which has a period of about 17 seconds (shown by the part surrounded by the square). Figure 5(d) shows the result of the FFT from Fig. 5(b), and includes both wind-wave and tsunami. It can be readily seen that energy appears in the lower frequency bands (in the dashed square). Thus, detection of tsunamis might be possible, if other energy sources of different causes do not contaminate the record.

5. Discussion

The goal is to detect tsunamis as far offshore as possible in order to provide an early warning system. To realize this goal, the system should be placed at least 10 km from the coast and the accuracy of height change measurements should be smaller than several centimeters.

When the characteristic wavelength of a tsunami is longer than the water depth, the tsunami propagates approximately with a velocity of $\sqrt{gh}$ where g is gravity at the surface and h is the depth of water, which gives about 100 km/h at a water depth of 100 m and 200 km/h at 300 m depth. Suppose the present system is placed 10 km from the nearest coast and the tsunami proceeds perpendicular to the coast, the tsunami may reach the coast several minutes after the tsunami passes the tsunami-meter. Because it may take at least a few minutes for the present system to detect the arrival of a tsunami, allowance of several minutes is marginal. Therefore, ideally the tsunami-meter needs to be placed more than 20 to 30 kilometers from the coast. If we use the so-called on-the-fly (OTF) technique in RTK-GPS, however, it has a distance limit of about 10 km (or less) because the positioning accuracy becomes much worse if the baseline length exceeds this distance. Because the OTF technique uses combinations of satellite pairs for ambiguity fixing, the conditions of fixing ambiguities become much worse when the baseline exceeds 10 km, because the path of a GPS signal propagates in different parts of the ionosphere and the troposphere. Colombo (1996) states that the positioning accuracy could be within several centimeters, even if the baseline exceeds 1000 km in length. His technique does not fix cycle ambiguities, and only a 'floating' solution is used with ionosphere-free observables. However, his technique has not yet been developed for real-time use (Colombo, personal communication). Tsujii *et al.* (1997), on the other hand, developed computer software for RTK-GPS that could be applied for several tens of kilometers in baseline length using a revised OTF algorithm. It will be necessary to implement one of the new ambiguity resolution algorithms in this system in the near future.

Another question that must be answered is what accuracy level is necessary for detecting tsunamis. The height of a tsunami, which may cause serious damage, may be only 10 cm high or so in the deep ocean. Tsunami height is greatly exaggerated when it approaches the coast due to the shallower water depth, and also due to the geometry of coastline. Therefore, it may be necessary to detect a tsunami that is not outstanding in the record but is hidden in the wind-waves if the sea surface is rough. If the present system is used for a short baseline of several kilometers, it would not be so difficult to reach this accuracy. However, the condition is more serious if the system is far from land, for example, several tens of kilometers.

The authors tested whether the current system could detect tsunamis using a manually extracted record of a real tsunami. This kind of simulation may not be sufficient to check the sensitivity of the system. Further experimental testing may have to be conducted to check the sensitivity of the system, in which the buoy is placed on a vibrating bed and the obtained record can be calibrated using an independent sensor attached to the bed. At an experiment in the sea, other independent sensors to measure the position of the buoy may have to be employed to compare the results, at least during the development phase. These kinds of experiments are being prepared for the future tests.

In addition to these requirements, the operational system should have *integrity* so that the system runs without human interaction for a long time, in the open sea, for example, for at least one year. Power supply reliability for long period operations, durability under bad weather and salt corrosion conditions, stability of radio transmissions, etc., are thus important. To overcome these problems, the authors are now conducting a long-term experiment of the system in Osaka Bay, in which the system floats and is tied to a harbor wall, so as to investigate problems and improve the design of the system.

Furthermore, if the system is to be used as an early warning system, an automatic detection algorithm should be developed. Currently, the Japan Meteorological Agency has a tsunami warning system based on the location and magnitude of earthquakes. If JMA judges an earthquake might cause a tsunami, an announcement is made to the local government through satellite transmissions. However, it is not sufficient to rely on this kind of detection system. There are cases of a tsunami striking without warning, as was experienced in the Chile earthquake in 1960. The best way to protect local residents against tsunamis is to directly observe anomalous changes in sea-level height.

Summing up, further studies should be made in order to make the system reliable and trustworthy. The current system is not a conclusive tsunami detection system. Not only hardware, but also the integrity monitor system and data transmission system, should be much improved. In addition, the algorithm for detecting a tsunami should be developed, based on real-time time series analysis techniques. Moreover, considering that tsunamis have a wide variety of periods, from about ten minutes to more than one hour depending on earthquake sources, propagation path and geographical conditions, extensive numerical simulations will need to be made in order to ensure that a reliable algorithm for automatic tsunami de-

tection is developed. These studies are, however, left for the future.

6. Conclusion

The present article introduces a design for a tsunami detection system using real-time kinematic GPS. The system employs dual buoys. One is the Support-buoy, which carries two GPS receivers, power supply, wind generator, solar panels, radio receiving and transmitting equipment, as well as a GPS antenna. The other is the Sensor-buoy, which is a spar-type with a GPS antenna at the top and connected to the Support-buoy with an antenna cable.

Nine days of experimental data demonstrated that the system precisely tracks sea-level, when compared to tide-gauge data. The Sensor-buoy does not respond to short period wind-waves compared to the Support-buoy, suggesting that a spar-type buoy is preferable for detecting long period waves such as tsunami. Frequency analysis of the data after adding a real tsunami record to the observed RTK data suggests that it is feasible to detect a tsunami, because a tsunami has, in general, much lower frequency than wind-waves.

Although there are many other problems to be examined and solved, it would be desirable to develop this type of tsunami detection system, and implement it within an early warning system for residents of nearby coasts from the standpoint of tsunami disaster mitigation.

Acknowledgments. Mr. Tatsutoshi Takahashi, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, assisted the authors during the experiment at Aburatsubo. Personnel of the Geographical Survey Institute kindly provided tide-gauge data at the Aburatsubo tide-gauge station. Dr. JingPing Duan of Leica Geosystems and an anonymous reviewer gave useful comments to the authors to improve the manuscript. The research was supported by a Grant-In-Aid of the Ministry of Education, Sports and Culture (#10354006 and #11792031).

References

Born, G. H., M. E. Parke, P. Axelrad, K. L. Gold, J. Johnson, K. W. Key, D. G. Kubitschek, and E. J. Christensen, Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy, *J. Geophys. Res.*, **99**, 24517–24526, 1994.

Colombo, O., Long-distance kinematic GPS, Chapter 13, in *GPS for Geodesy* (2nd edition), edited by P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, pp. 537–567, Springer, 1996.

Gonzalez, F. I., E. N. Bernard, H. B. Milburn, and H. O. Mofjeld, Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis, Abstracts of IUGG99 in Birmingham, B.127, 1999.

Hino, R., T. Kanazawa, S. Sakai, Y. Tanioka, and K. Suyehiro, Tsunamis from an off-Sanriku and the Papua New Guinea earthquakes observed by ocean bottom tsunami measurement, Programme and Abstracts The Seismological Society of Japan, 1998, Fall Meeting P23, 1998 (in Japanese).

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Isshiki, and A. Yokoyama, GPS Tsunami-kei no kaihatsu, Gekkan Kaiyo, Special Vol. 15, 38–42, 1998 (in Japanese).

Kelecy, T. M., G. H. Born, M. E. Parke, and C. Rocken, Precise mean sea-level measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **99**, 7951–7959, 1994.

Nagai, T., Okiai harou kansoku network ni yoru tsunami hakei kansoku, Gekkan Kaiyo, Special Vol. 15, 1998 (in Japanese).

Tsujii, T., M. Harigae, and M. Murata, The development of kinematic GPS software, KINGS, and its application to observations of the crustal movements in the Izu-islands area, *J. Geod. Soc. Japan*, **43**(2), 91–105, 1997 (in Japanese with English abstract).

Teruyuki Kato (e-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp), Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno

[参考資料2001-1]

A new tsunami monitoring system using RTK-GPS

Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Masao Kinoshita[2], Hideshi Kakimoto[2], Hiroshi Isshiki[2], Toshihisa Moriguchi[2], Mitsuo Takada[3], Takayuki Tanno[4], Masayuki Kanzaki[4], and James Johnson[5]

[1]*Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan*
[2]*Hitachi Zosen Corporation, Taisho-ku, Osaka, Japan*
[3]*Kansai Design Company Limited, Nishi-ku, Osaka, Japan*
[4]*Hitachi Zosen Information Systems Company Limited, Ohta-ku, Tokyo, Japan*
[5]*GPS Solutions Inc., Boulder, Colorado, U.S.A.*

Abstract. A new tsunami observation system has been developed which employs a real-time kinematic GPS technique to detect tsunamis in the open ocean before they reach coastal areas. The system consists of a GPS buoy, fixed GPS base station, data acquisition system, RTK data processing system, and a buoy position monitoring system. The new system utilizes a buoy equipped with an autonomous electrical power supply, tiltmeter, ultrasonic distance measurement system for draught line monitoring, ancillary data collection system, and a data telemetry system, as well as a GPS sensor. The buoy has been anchored approximately 2 km off the northeastern coast of Japan near the city of Ofunato since 23 January 2001. Every second GPS data from the buoy and base station are collected and processed using Reverse RTK processing software and the estimated position of the buoy is further transmitted to the city hall and the fire station of the city for real-time monitoring. Data can also be viewed and downloaded through a web page with a delay of about 30 min. The experiment will continue until January 2002 and various tests will be performed to determine the overall accuracy of the buoy positions, performance of the system using long-distance RTK, and the feasibility of detecting tsunamis.

1. Introduction

Detection and warning of a tsunami before its arrival at the coast may mitigate disasters due to its attack. A number of systems have been developed for this purpose such as pressure sensors (e.g., González *et al.*, 1999) and super sonic sensors (e.g., Hino *et al.*, 1995) placed at the sea bottom.

In the present study, we have developed a new tsunami observation system that employs the real-time kinematic (RTK)-GPS technique. The system presented in this study is the improved model from our prior ones that were successfully tested in the sea (Kato *et al.*, 2000). It is now deployed in the open ocean for a long-term experiment. This article briefly introduces the system and the experiment.

[1]Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1 Yayoi 1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan (teru@eri.u-tokyo.ac.jp)
[2]Hitachi Zosen Corporation, 2-11, Funamachi 2, Taisho-ku, Osaka 551-0022, Japan (terada@elec.lab.hitachizosen.co.jp, kinosita@elec.lab.hitachizosen.co.jp, kakimoto@elec.lab.hitachizosen.co.jp, isshiki@fluid.lab.hitachizosen.co.jp)
[3]Kansai Design Company Ltd., Nichiei Bldg., 4-8, Tosabori 1, Nishi-ku, Osaka 550-0001, Japan (OSKkdc.TakadaMitsuo/uek.kdc@oulab.lab.hitachizosen.co.jp)
[4]Hitachi Zosen Information Systems Co., Ltd., 37-10, Nishikamata 7, Ohta-ku, Tokyo 144-8601, Japan (tanno@gps.hzs.co.jp; kanzaki@gps.hzs.co.jp)
[5]GPS Solutions Inc., 776 Morgan Drive, Boulder, CO 80303, U.S.A (jjohnson@gps-solutions.com)

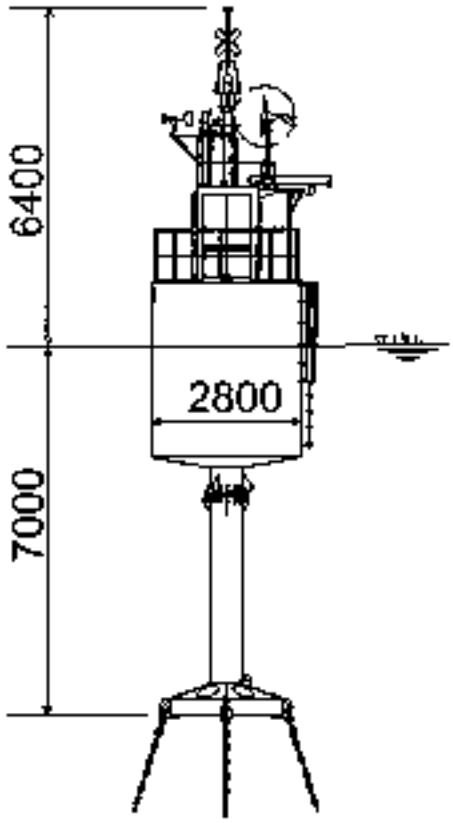


Figure 1: The design of the GPS buoy. GPS antenna is set at the top of the buoy. Unit: mm.

2. The System

The new tsunami monitoring system consists of a GPS equipped buoy and a GPS base station. The buoy is a self-contained GPS data collection station and is designed to be deployable as an autonomous platform. Electrical power is provided by a solar/wind/battery system and data from the buoy is transmitted to a base site by one-way radio transmission. Figure 1 shows the design of the buoy. The height of the buoy is more than 13 m and the weight is about 10 tons

At the base station, the data from the buoy is combined with data collected by a fixed land-based GPS receiver in real time using RTK processing software. The resulting buoy positions are then transmitted by telephone modems to the Ofunato City office and fire department.

The positions generated by the current system relate to the position of the GPS antenna of the buoy, which is located at the top of the buoy. In order to study the relation of this position to the actual surface height of the ocean we have equipped the buoy with additional sensors: a vertical accelerometer to evaluate the vertical motion of the buoy, a tiltmeter to measure the buoy

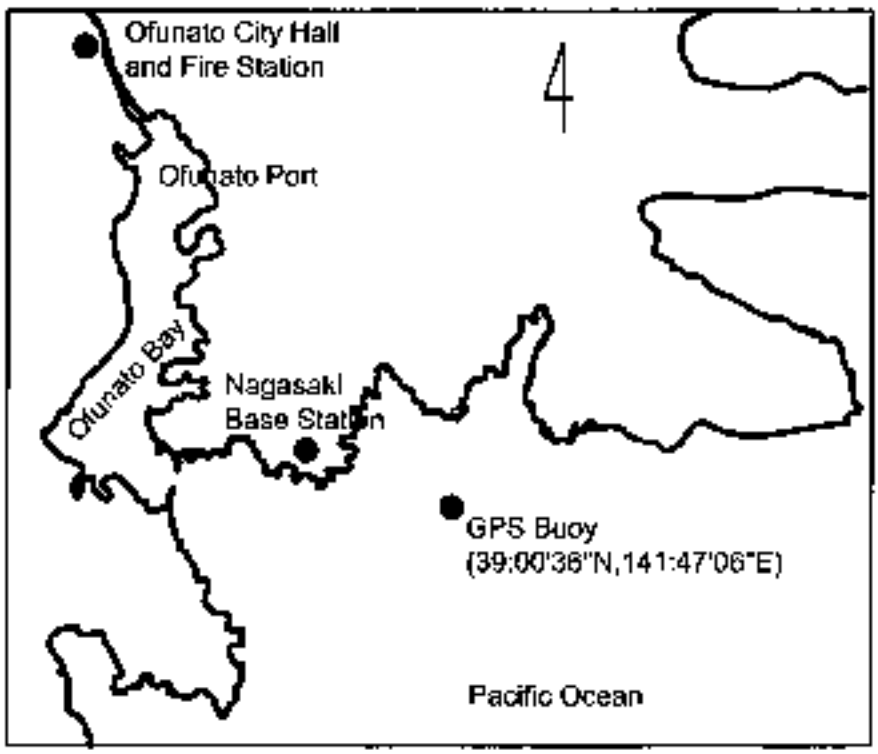


Figure 2: Location map of the GPS tsunami monitoring system.

inclination and an ultrasonic distance measurement system to monitor the draught line, and finally a meteorological sensor to detect wind direction and velocity.

A radio transmission system of small electric power consumption is used for data transmission. Since the transmission rate is limited to 4800 bps, only GPS data is transmitted to the base station, while other data are stored in the data logger equipped in the buoy.

In the last buoy system (Kato *et al.*, 2000), we used dual buoys, one a spar type about 8 m long equipped with only a GPS antenna, and the other a larger buoy containing the GPS receiver, lead batteries, solar panels, etc. on board. These buoys were tethered with a cable. However, the system was thought to be too complicated to keep stable in the open ocean for the long term. So, in the present model, we decided to use a single buoy, which embarks all necessary equipment for operation on board.

3. Experiment

The buoy has been anchored at (39°00′36″N, 141°47′06″E), which is about 2 km away from the coast of Ofunato city, along the Sanriku coast, north-eastern Japan, since 23 January 2001 (Fig. 2). The water depth at the buoy is about 50 m and the buoy is anchored with tri-directional anchors with an

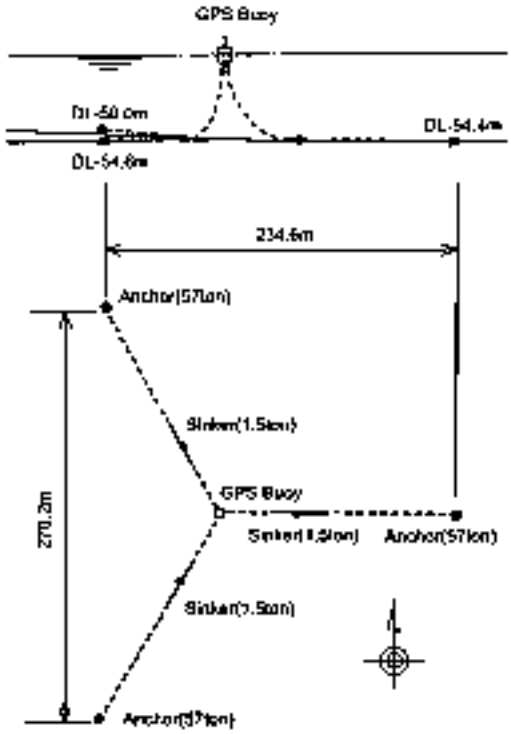


Figure 3. Layout of the buoy anchoring system.

intermittent depth sinker (Fig. 3). The horizontal movement of the buoy is thus limited to within the circle of about 20 m of diameter. Numerical simulation of the buoy's ability to track vertical displacements of the sea surface long wave shows that almost any possible sea surface displacement will be reflected by the vertical position of the buoy. Therefore, the buoy may move sufficiently freely to detect a considerable tsunami, though a small correction may have to be made for accurate estimation of wave height changes.

Reverse RTK processing for 1-s sampling data is conducted at the base station and the estimated position of the buoy is further transmitted to the city hall and the fire station of the city for real-time viewing. Data can also be monitored and downloaded through a web page (`http://tsunami.ekankyo21.com/`) with about 30 min of delay. An example snapshot of a page is shown in Fig. 4.

Our ultimate goal is to be able to detect a tsunami in the open ocean to provide as much warning time as possible. The current experimental buoy is located only 2 km off the shore and would provide little warning time. In future deployments will require the buoy to be located much further from the coast, which will require longer kinematic baselines to be processed. We plan to operate temporary base stations located as far as 100 km from the buoy in order to test the performance of the system for long baselines.

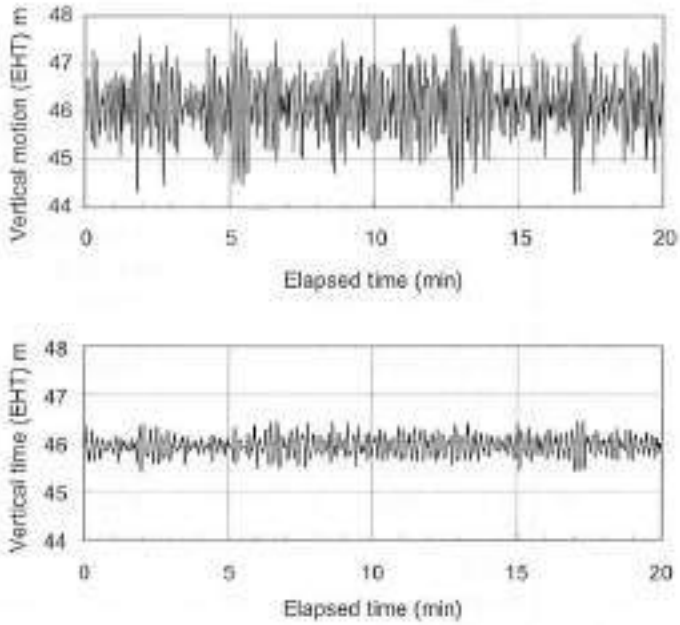


Figure 4: Samples of vertical motion of the buoy in the case of a rough sea (top), and in the case of a calm sea (bottom).

3.1 Discussion and Remarks

So far the system is running without any serious trouble except intermittent losses of fix of the RTK-processing and data transmission errors. When the software fails to fix ambiguities, it outputs DGPS solution. We examined 1-day data at 16 March 2001, and found that more than 97% of data is normally analyzed and only less than 3% of data suffered from miss-fixing ambiguity. Data transmission errors have occurred intermittently, probably because of the problems of modem and telephone line, both of which are not essential for the buoy system.

Since the buoy is floating in the open ocean, its integrity and reliability is very important for a long-term operation. Moreover, it is important to place the buoy far enough from the coast, say, at least 10 km, so that an effective tsunami warning can be made before its arrival at the coast. In order to realize this, three key factors must be considered: 1) long distance RTK GPS with a few centimeter accuracy, 2) a cost effective data transmission system, and 3) long-term operability of the buoy at the deep ocean.

The present system uses a single frequency RTK so that the feasible baseline distance is only several kilometers from the coast. Highly accurate long-distance kinematic processing is necessary. Such an application is already studied by a number of researchers as an off-line non-real-time processing (e.g., Tsujii *et al.*, 1998; Colombo, 2000; Isshiki *et al.*, 2000a, 2000b,

2001). Such an algorithm may have to be implemented in the real-time operational mode

Second, the present radio transmission system allows for a maximum distance of 5 or 6 km between the buoy and base station. A much stronger radio system or satellite telemetry should be considered. Although technological developments should solve these problems in the near future, cost effectiveness will have to be considered among available techniques.

Third, the buoy has to be placed and moored at a particular location in the sea for long-term monitoring. A more reliable and robust buoy system may have to be designed for this purpose. Our 1-year experiment will clarify problems to be solved.

In addition to these problems, we will have to develop an effective algorithm for detecting the arrival of a tsunami automatically. So far, we have applied a moving average algorithm of long-term (300 s) and short-term (30 s) periods to sections of the height data. Significant departure of the averaged height for these long- and short-term averages may allow us to detect tsunamis. More extensive simulations and tests using real tsunami records are clearly needed.

None of these problems are principally difficult to solve. Thus, overcoming these problems, we will be able to deploy operational tsunami monitoring system (or, more generally, wave monitoring system for wider applications) in the near future. An array of such tsunami monitoring systems along the coast will significantly contribute to the mitigation of tsunami disasters.

Acknowledgments. The authors would like to express their sincere gratitude for the assistance provided by the people in Ofunato City, Iwate, Japan. The present research was conducted under the Grant-in-Aid of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (#11792031)

4. References

Colombo, O. (1996): Long-distance kinematic GPS, Chapter 13. In *GPS for Geodesy* (2nd edition), edited by P.J.G. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, 537–567.

González, F.I., E.N. Bernard, H.B. Milburn, and H.O Mofield (1999): Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis *Abstracts of IUGG99 in Birmingham*, B.127.

Hino, R., T. Kanazawa, S. Sakai, Y. Tanioka, and K. Suyehiro (1998): Tsunamis from an off-Sanriku and the Papua New Guinea earthquakes observed by ocean bottom tsunami measurement. *Programme and Abstracts, The Seismological Society of Japan*, 1998, Fall Meeting P23 (in Japanese).

Isshiki, H., A Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki, and T Tanno (2000a) Precise variance detection by a single GPS receiver—PVD (Point precise Variance Detection) Method. *J. Geod. Soc. Japan*, *46*, 239–251.

Isshiki, H., A Tsuchiya, T Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki, and T. Tanno (2000b): Precise variance detection by simplified kinematic GPS measurements - KVD (Kinematics precise Variance Detection) Method. *J. Geod. Soc. Japan*, *46*, 253–267.

Isshiki, H., Y Terada, K. Ito, A. Tsuchiya, and T. Kato (2001): Variation mea-

surements by VD/GPS method over very long baseline. *Proc. ION NTM2001*, The Institute of Navigation.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsushi, A. Yokoyama, and T. Tanno (2000): Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, *52*, 841-845.

Tsujii, T., M. Murata, M. Harigae, T. Ono, and T. Inagaki (1998): Development of kinematic GPS software, KINGS, and flight test evaluation. National Aerospace Laboratory, TR-1357T.

論　文

GPS 津波計の開発——大船渡市沖実用化実験——

加藤　照之[†a)]　寺田　幸博[††b)]　木下　正生[††]　柿本　英司[††]
一色　浩[††]　森口　壽久[††]　神崎　政之[†††]　高田美津雄[††††]
James M. Johnson[†††††]

A Development of Tsunami Observation System using RTK-GPS
——Experimental Monitoring at Ofunato City Coast——

Teruyuki KATO[†a)], Yukihiro TERADA[††b)], Masao KINOSHITA[††],
Hideshi KAKIMOTO[††], Hiroshi ISSHIKI[††], Toshihisa MORIGUCHI[††],
Masayuki KANZAKI[†††], Mitsuo TAKADA[††††], and James M. JOHNSON[†††††]

あらまし　海上に浮かべたブイの最上部に GPS（Global Positioning System）アンテナを取り付け，海面高とともに変化するブイの位置を RTK-GPS（Real Time Kinematic GPS）方式で測位し，この時系列データによって波浪や津波を検出するシステムを開発した．1998 年に相模湾で実施した基本機能確認実験に続き，2001 年 1 月 23 日から大船渡市沖約 2 km で実用化実験を開始した．1 秒間隔で採取する波高のデータは，大船渡市役所及び大船渡消防署でリアルタイムにモニタしている．また，防災データの伝達システム構築の観点からホームページ（http://tsunami.ekankyo21.com）を立ち上げ，市民へのデータ公開を行っている．ここでは，これまでに明らかになった基本機能実験結果及び大船渡市沖での実験システムと初期の計測データについて報告する．

キーワード　GPS，RTK，潮汐，津波，波浪

1. まえがき

津波の発生を止めることはできないが，その襲来の予測と情報の適切な伝達によって，被害を最小限にすることができる．気象庁では，半世紀の実績のある津波予報を 1999 年春から大幅に改善し，全国を 66 箇所に区分して精度の高い量的津波予報システムの運用を開始した．これは，地震のマグニチュード及び位置などから，発生する津波を予測して海底地形などを考慮しながら，その伝搬をシミュレーションし，対象位置への到達時刻と津波の高さを予報するシステムである [1].

この新しい津波予報システムは，地震の発生を前提とした予報であり，地震の検出が必須である．しかし，長周期のゆっくりとした地震には，地震計そのものが感度をもたない場合もある．これらは津波地震とも呼ばれ，地上で生活している住民は何らの揺れも感じることなく，突然津波に襲われることになる．津波を起こす地震の 10%は，この津波地震であるとの報告 [2] もある．やはり，発生した津波は計測することが，その性状をとらえるうえで最も良い方法である．現状でも，全国の検潮所で井戸式の検潮儀で計測をしている．また，国土交通省港湾技術研究所が日本近海に展開している圧力式の波浪計による計測網及び自治体の設置した超音波式の波高計などがある．

本開発では，新しい発想に基づく津波計を開発して，津波を確実に検出することをめざしている．すなわち，広い周波数範囲の波高を数 cm の精度でドリフトなく計測でき，設置や維持管理が容易に実施できる津波計

† 東京大学地震研究所，東京都
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1–1, Yayoi 1, Bunkyo-ku, Tokyo 113–0032 Japan
†† 日立造船（株）技術研究所，大阪市
Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation, 2–11, Funamachi 2, Taisho-ku, Osaka-shi, 551–0022 Japan
††† 日立造船情報システム（株），東京都
Hitachi Zosen Information Systems Co., Ltd, Ohta-ku, Tokyo 114–8601 Japan
†††† 関西設計（株），大阪市
Kansai Design Co., Ltd, Tosabori, Nishi-ku, Osaka-shi, 550–0001 Japan
††††† GPS Solutions Inc., Boulder, Colorado, USA
a) E-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp
b) E-mail: terada_y@hitachizosen.co.jp

の開発である．このための基本的手段として，GPS（Global Positioning System）を用いることとした．既に，1998 年 3 月に神奈川県相模湾にて基本機能実験 [3], [4] を終えている．実用化実験として，2001 年 1 月 23 日から岩手県大船渡市沖に GPS 津波計を設置して 1 年間の連続計測を開始した．ここでは，これまでに明らかになった基本機能実験結果，及び大船渡市沖での実験システムと初期の計測データについて報告する．

2. GPS 津波計の基本機能

GPS は，米国が軍事用に計画し，運用している全地球測位システムである．地上高 2 万 km の 6 軌道に 4 個ずつ配置した計 24 個の衛星を用いて，地球上の緯度，経度及び標高を計測できる．その測位における精度は，表 1 [5] に示すように測位アルゴリズムによって大きく異なっている．GPS 測位方式の基本になる単独測位方式は，30 m の精度である．2000 年 5 月までは，100 m の精度であった．これは，米国の軍事上の配慮から，意識的にその測位精度を悪くしていたためである．測位精度が 1 cm 以下になるスタティック測位は，国土地理院が全国に約 1,000 点の観測点を展開している GPS 連続観測システム [6] で実用されている．

開発中の GPS 津波計の基本原理は，海上に浮かべたブイの最上部に GPS アンテナを取り付け，アンテナ位置の精密測位結果の時系列データを，海面高の変位として風波や津波のデータとすることにある．津波の計測には，数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから，表 1 に示す RTK（Real Time Kinematic）方式を採用している．RTK 方式で測位をするには，搬送波位相の計測値を用いるため，衛星間の時計の差，受信機間の時計の差及び GPS 衛星から受信機までの伝搬路における電離層，及び大気中の水蒸気等に起因する誤差要因を除去する必要がある．これには緯度，経度，標高が既知の基準局を設け，この計測データを参照値として用いる．この基準局と GPS 津波計設置位置との距離は，相模湾での基本機能実験では 0.9 km とした．

表 1　種々の GPS 測位法（文献 [5] に掲載されている表の一部を転載）
Table 1　Positioning algorism (the accuracy are described on Ref. [5]).

Positioning algorism	Measurement quantity	Accuracy
Point positioning	C/A code	～30 m
DGPS	C/A code	～3 m
RTK	Carrier phase	～3 cm
Static positioning	Carrier phase	～1 cm

GPS 津波計のデータサンプリング周期を 1 秒にして相模湾の実験海域の風波を計測したデータに対して，北海道南西沖地震（1993 年）の際に国土交通省港湾技術研究所がとらえた津波波形 [7] を加算した結果を図 1 [4] に示す．数秒から十秒周期の風波に加えて，数分の周期の津波を見ることができる．一方，図 2 [4] は実験期間中の潮汐を油壺検潮所のデータと比較したものである．検潮所の計測値は毎正時の計測値である．GPS 津波計の海面高データは 1 秒ごとに計測できているが，風波による影響を除去するために対応する時刻直前の 9 秒間移動平均値を GPS 津波計による計測値とした．3 月 19 日午前 0 時～3 月 26 日午前 0 時までの 7 日間について，毎正時の 169 回分の比較を実施した．両計測値においてその差の最大値は 5.2 mm であり，標準偏差値は 2.0 mm であった．以上のことか

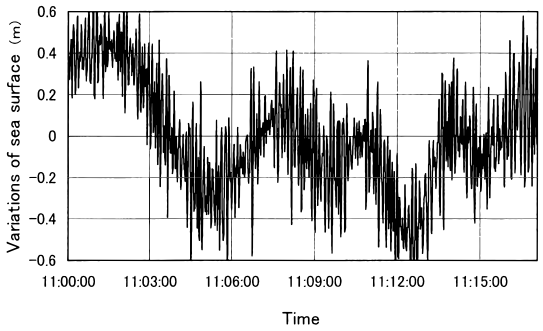


図 1　GPS 津波計で計測した風波に津波 [7] を加えた波形
Fig. 1　A tsunami data [7] was added to the wind wave data taken by RTK-GPS.

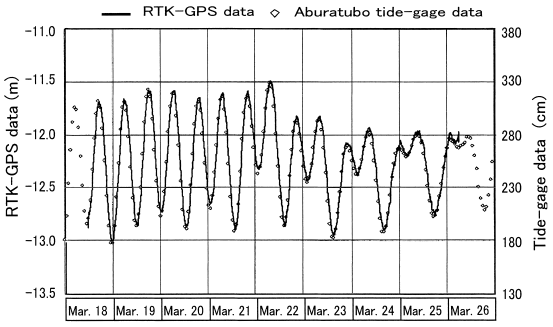


図 2　GPS 津波計で計測した潮汐データと検潮所記録との比較
Fig. 2　A comparison with the GPS tsunami meter data and the Aburatsubo tide-gage data.

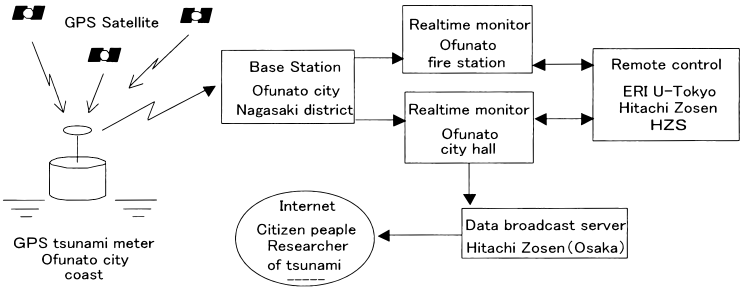


図 3　GPS 津波計大船渡市沖実験システム
Fig. 3　An experimental system of GPS tsunami meter at Ofunato city coast.

ら，GPS 津波計は秒単位の周期から，日単位の周期までの広い周波数領域に対応できる海面変位計として利用できることが明らかとなった．

3.　大船渡市沖実用化実験

相模湾での基本機能実験において，GPS 津波計が海面変位の検出に有効であると確認できたことから，風波と津波の弁別アルゴリズム，システムに負荷の少ない測位方式，外洋に対応できるブイシステム及び防災システムとのリンクなどを開発課題として，大船渡市沖の実用化実験を開始した．

3.1　計測システム

大船渡市沖に設置した GPS 津波計の実験システム概念図を図 3 に示す．海上で計測した L1 及び L2 搬送波位相等のすべての受信機出力は，キャリヤ周波数 429 kHz 帯の特定小電力無線を用いて，伝送速度 4,800 bps で陸上基準局に伝送する．別途基地局で計測したそれぞれの周波数の疑似距離及び L1 波の搬送波位相データを用いて，基地局で RTK 計算を実施する．測位結果の緯度，経度及び標高データは，帯域 3.4 kHz のアナログ専用電話回線 2 系統で大船渡市役所総務課防災部門と大船渡消防署司令室にそれぞれリアルタイムデータとして送付する．

リアルタイムモニタの表示例を図 4 に示す．図中上側に示すデータは，GPS アンテナの標高測位値の時系列データである．データのサンプリングピッチは 1 秒であり，1 時間分のデータを表示するようにしている．図中下中央には，2 日分のデータを表示し，潮汐の動向を確認できるようにしている．図中左下は水平位置の表示であり，毎秒の計測位置をドット表示している．この状況は，30 分ごとに ISDN 回線でインターネットサーバに送り，http://tsunami.ekankyo21.com で

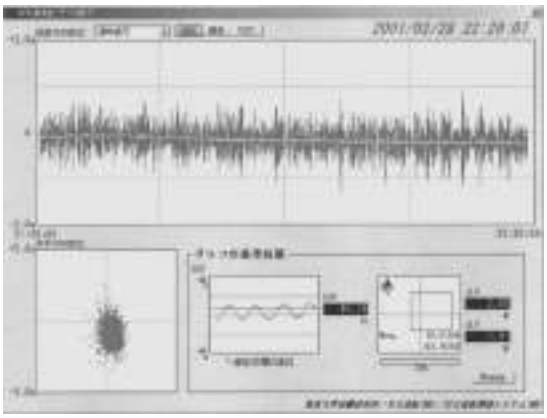


図 4　リアルタイム波高表示例
Fig. 4　An example of real time monitor display.

市民に公開している．市民への防災情報伝達の観点からは，市役所や消防署同様のリアルタイム公開が必要であり，30 分 1 回のバッチ処理は開発予算面での暫定措置である．

3.2　ブイシステム

大船渡市沖への GPS 津波計用ブイ投入位置を図 5 に示す．コオリ埼灯台東南東 2.1 km の地点（東経 141°47′06″，北緯 39°00′36″）で，水深 53 m である．陸上基準局を設置した担い手センタからは，2.3 km 離れている．この地点の 50 年再現荒天時の気象・海象条件 [8] として，風速 40.0 m/s，潮流 2.0 kt，有義波高 9.0 m 及び平均波周期 13.1 s を設定した．ブイの形状と外観を図 6 に示す．また，係留要領を図 7 に示す．ブイは，浮体部直径 2.8 m，海面から最上部までの寸法 6.4 m 及び海面から尾筒最下端部までの寸法 7.0 m で，重量約 10 t である．係留設備は，ブイの方位維持及び振れ回り範囲の制限から 3 点係留方式とした．係

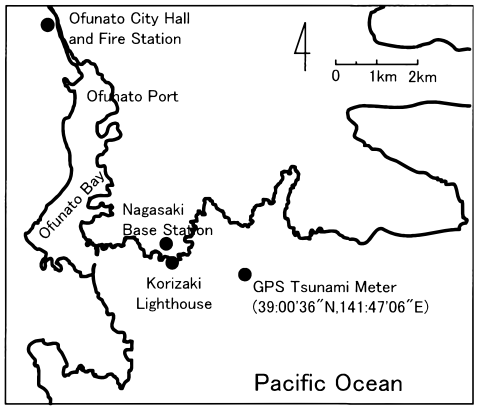


図 5 大船渡市沖 GPS 津波計投入位置
Fig. 5 Location map of the GPS tsunami monitoring system.

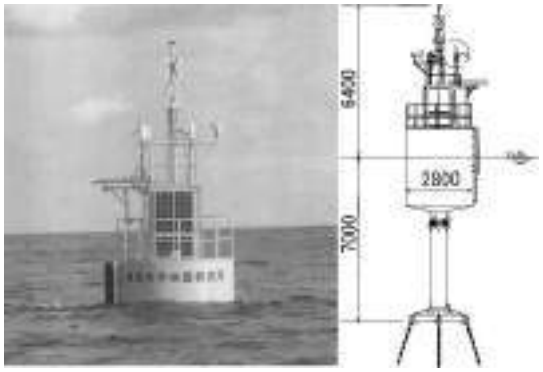


図 6 GPS 津波計ブイの外観及び形状
Fig. 6 The Buoy for GPS tsunami meter.

留索は直径 34 mm 及び長さ 180 m のチェーンとし，アンカは 57 t のコンクリートブロックとした．チェーン張力の緩和を目的として，各係留索のほぼ中央に 1.5 t の中間シンカーを設置した．これらによって，ブイの振れ回り範囲は，設計条件として設定した荒天時においても，半径約 20 m におさえることができる．

ブイの動揺固有周期は，上下揺約 4.0 s，縦・横揺約 5.2 s である．ブイの動揺性能面に関しては，津波や潮汐のような超長周期成分に対して，上下動がむりなく追随するように設計・製作した．

3.3 ブイの動揺特性

係留力を考慮した浮体の動揺は，次式の運動方程式を時間領域で積分するシミュレーションによって求めることができる．

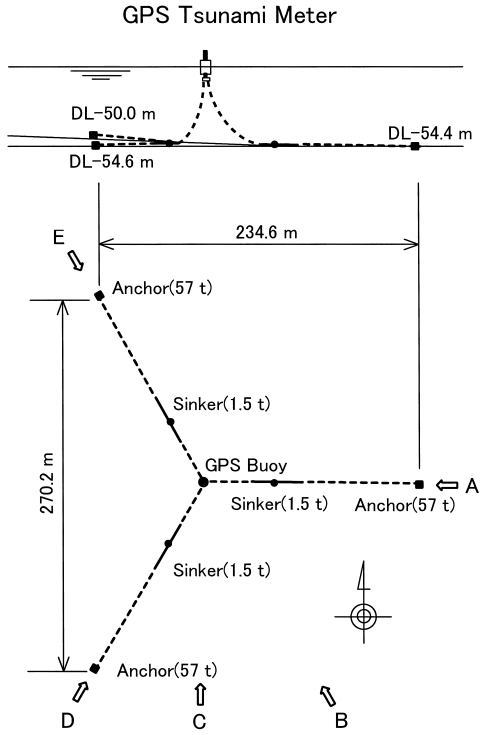


図 7 GPS ブイ係留図
Fig. 7 Layout of the buoy anchoring system.

$$\sum_{j=1}^{6}\{(M_{ij}+A_{ij})\ddot{X}_j+D_{ij}\dot{X}_j+N_{ij}\dot{X}_j|\dot{X}_j|+R_{ij}X_j\} = Fa_i+Fc_i+Fw_i+Fd_i+Fm_i \quad (1)$$

ここで，

M_{ij}：質量
A_{ij}：付加質量
D_{ij}：造波減衰力係数
N_{ij}：粘性減衰力係数
R_{ij}：静的復原力係数
Fa_i：風圧力
Fc_i：潮流力
Fw_i：波浪強制力
Fd_i：波漂流力
Fm_i：係留拘束力
X_j：動揺変位
i,j：浮体動揺モード
$i,j=1$：前後揺，2：左右揺，3：上下揺，4：横揺，5：縦揺，6：船首揺

ブレットシュナイダー・光易型の波スペクトル [9] に

基づいて，有義波高値 9.0 m，平均波周期 13.1 s の不規則波を生成させた一例を図 8 に示す．この波浪が図 7 に示す D 方位から作用し，加えて 2.0 kt の潮流と平均風速 40.0 m/s の変動風が波浪と同方向から作用した場合について，ブイの上下揺シミュレーションを実施した結果の一例を図 9 に示す．図 8 との比較から明らかなように，両者は良い対応を示している．図 8 及び図 9 に示した波浪条件では，1/3 期待値での波高 9.07 m に対して得られる上下揺振幅は 95.6%の値を示した．また，1/1,000 期待値での波高 16.0 m に対する上下揺振幅は 97.4%の値であった．

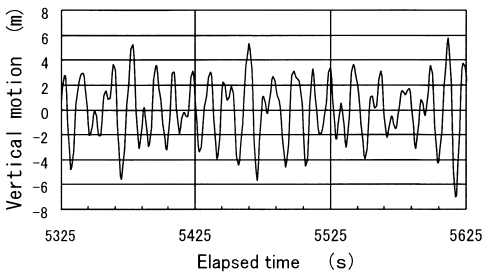


図 8　不規則波の例（有義波高 9.0 m，平均波周期 13.1 s）
Fig. 8　An example of irregular wave (significant wave height: 9.0 m, mean wave period: 13.1 s).

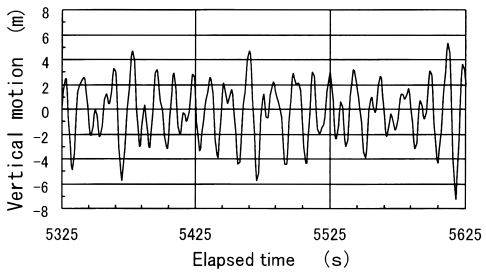


図 9　ブイの上下揺振幅予測値
Fig. 9　An estimated heave of the buoy.

同様の気象・海象条件と計算方法で，図 7 における A～E の 5 方位について，ブイの上下揺シミュレーションを実施した．ただし，方位 E については陸側であることから，風と潮流は E 方向として，波浪は対向する B 方向から打ち寄せることとしている．シミュレーション結果から，有義波高 9.0 m と平均波周期 13.1 s に対する上下揺振幅の波高追随性と波周期追随性を求めた結果を表 2 に示す．表 2 から，GPS によるブイの上下揺振幅の計測値は若干小さい値を示すが，波高にほぼ近い値の計測が可能であることを示している．

更に，表 3 に示す種々の平均波周期の場合についてシミュレーション計算を実施し，表 2 で定義した波高追随性指標と波周期追随性指標を求めた結果を図 10 及び図 11 に示す．図から明らかなように，2.25 s 以下の平均波周期では，周期と波高ともに追随困難であり，2.25～5.0 s の範囲ではブイの固有周期の影響が見られる．5.0 s より長い平均波周期の場合には，補正をほとんど必要としない追随性の良い波浪計としても機能することが期待できる．

3.4　搭載機器

津波計用ブイには，GPS 受信機とデータ伝送用無線機のほかに，GPS による海面高検出データの検証を行うため，表 4 に示す参照用機器を搭載している．GPS 受信機系を含めたこれらの機器の所要電力はブイ全体で 35 W と見積もった．これを維持するために鉛蓄電池をベースにし，太陽電池パネルと風力発電装置を用いたハイブリッド型の発電設備を装備した．1 月 23 日～2 月 27 日までの 35 日間での消費電力の計測値は 2,388 AH であり，太陽電池 2,764 AH 及び風力発電 85 AH の発電によって，当初の計画どおり推移している．

3.5　GPS 測位法

海面高の変位は，海上に設置したブイの最上部のア

表 2　海面高の変化に対するブイの追随性（高潮位時，平均波周期 13.1 s）
Table 2　Reproducibility of the wave period and height (tide level: high, mean wave period: 13.1 s).

Wave direction	A	B	C	D*)	E
Mean value of zero cross up period　A (s)	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04
Mean value of vertical motion period of buoy　B (s)	11.67	11.65	11.72	11.67	11.95
Reproducibility of wave period　B/A (%)	96.9	96.8	97.3	96.9	99.3
1/3 maximum expected wave height　C (m)	9.07	9.07	9.07	9.07	9.07
1/3 maximum expected vertical motion of buoy　D (m)	8.67	8.41	8.55	8.67	9.18
Reproducibility of wave height　D/C (%)	95.6	92.7	94.3	95.6	101.2

*) Design condition

表 3　計算条件（波向き：方位 D）
Table 3　Simulation condition (wave direction: D).

Mean value of wave period (s)	Zero cross up period (s)	Significant wave height (m)	Maximum wave height (m)
1	0.9	0.1	0.2
1.5	1.4	0.3	0.6
1.75	1.6	0.4	0.7
2	1.8	0.5	0.9
2.25	2.1	0.7	1.3
2.5	2.3	0.8	1.5
2.75	2.5	1	1.9
3	2.8	1.2	2.2
3.5	3.2	1.6	3
4	3.7	2.1	3.9
5	4.6	3.3	6.1
6	5.5	4.7	8.7
7	6.4	6.3	11.7
9	8.3	9	16.7
11	10.1	9	16.7
13.1	12.1	9	16.7
15	13.8	9	16.7
17	15.6	9	16.7

ンテナ位置の時系列データとして取得する．このとき，使用した GPS 受信機に装備している RTK 測位法では，図 3 に示した担い手センタの基準局から測位に必要なデータを海上のブイに送り，ブイに搭載した GPS 受信機でアンテナ位置を計算し，基地局に送り返す双方向の通信をする必要がある．現状では，海上でのデータ伝送が特定小電力無線に限定されていることから，伝送上のトラブル発生の可能性が大きい．このため，海上のデータを陸上の基地局に送る片方向だけの伝送にして，基地局側でブイに設置したアンテナの測位を行うリバース方式とした．すなわち，海上の移動局の搬送波位相出力と陸上の基準局の搬送波位相出力をともにシリアルで陸上基準局の計算機に取り込み，測位計算を行う方式である．

陸上基地局での測位計算の流れを図 12 に示す．測位計算を行うには，GPS 衛星が 5 基以上必要である．まず，5 基の衛星を捕捉し，これに対して疑似距離二重差 DGPS 解を求める．続いて，搬送波位相の二重位相差アンビュギュイティを解き [10]〜[12]，これに一定の評価 [13] をした後に，搬送波位相二重位相差測位を行う方式である．したがって，(1)単独測位解，(2)疑似距離二重差 DGPS 解，及び，(3)搬送波位相二重位相差 RTK-FIX 解の 3 種類の出力となる．20001 年

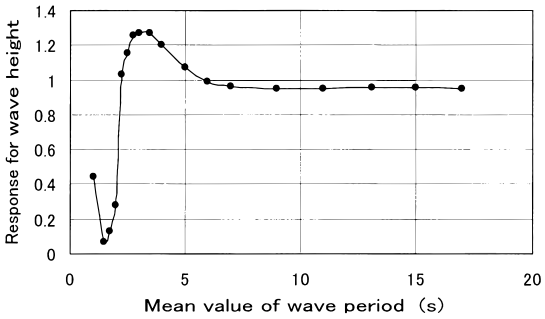


図 10　波高追随性（波向き：方位 D）
Fig. 10　Reproducibility of the wave height (wave direction: D).

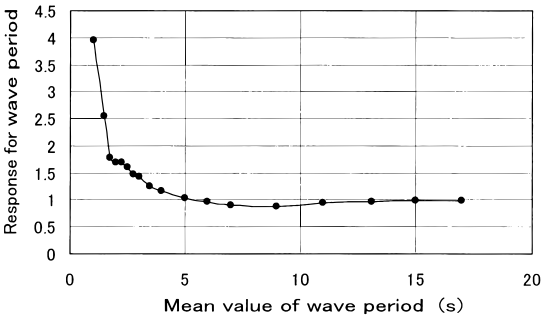


図 11　周期追随性（波向き：方位 D）
Fig. 11　Reproducibility of the wave period (wave direction: D).

3 月 16 日の 1 日間の結果では，(1) 0.1%，(2) 2.2%，(3) 97.7%になっている．

3.6　津波弁別アルゴリズム

大船渡市が策定した 2001 年度の防災（津波）訓練計画 [14] では，訓練地震発生後直ちに市役所防災担当と消防署司令室で GPS 津波計モニタの監視を行う設定としている．この設定においては，GPS 津波計によって津波の到達の検知とその波高の計測を実施し，防災体制の発動とその体制の効果的な機能化をめざしている．図 1 に例示する津波であれば，防災担当者による監視によって 1〜2 分内にその兆候をとらえることができる．

非常に浅い海における波の速度は水深のみの関数となり，水深 [m] の平方根を 3.13 倍すれば波の進行速さ [m/s] を求めることができる [15]．大船渡湾の平均水深を 15 m と見積もれば，波の進行速さは約 12 m/s となる．したがって，監視員が津波を検出した段階では，津波の先端は基地局を設置した海岸線に到達直前

表 4　各種計測器
Table 4　Additional sensors.

Measured items	Type of devices	Specifications	Remarks
GPS receiver	Trimble MS－750	2 frequency	Add back up device
Vertical accelerometer to evaluate vertical motion of buoy	Kyowa ASQ-BL VAQ-500A	DC ～ 10 Range : 2G	
Tilt meter for buoy inclination	Omron D5R	±60° Response : under 1s	North-South East-West
Ultrasonic distance meter to monitor draught line	Keyence UD360	0.8 ～ 6.0m Resolution : 1cm	
Metrological sensor to detect wind direction and velocity	Kona KADEC-KAZE	10min measurement at every hour, 0～355°	
GPS timing system	Hakusan DATA-MARKLS-20K	s, min, h	

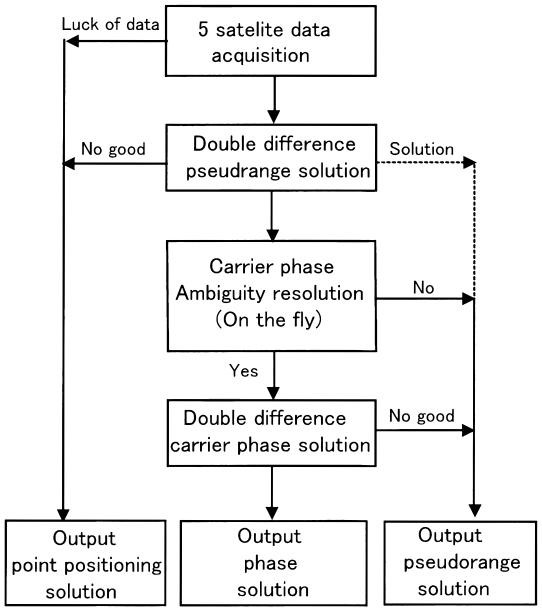


図 12　リバース RTK
Fig. 12　Data processing flow chart of reverse RTK.

であり，約 10 分後に大船渡湾の最奥部に到達すると考えられる．津波計のない場合の防災体制の発動が，消防団員による海面変位観察とその結果の報告後になされる状況から大きく前進している．

一方，地震計が十分に機能しない長周期の津波地震及びチリ地震津波のような遠地地震津波に対しては，津波の自動検出とアラームが必要になる．風波と津波の弁別については，これまでの開発研究でブイの形状に着目して弁別する方法及び周波数に着目して弁別する方法の有効性を示してきた [4]．大船渡市沖実用化実験では，周波数に着目する方法を採用している．

一般に，風波の周期はたかだか数十秒とされている．この風波の影響を除去するには，この周期より長い周期の海面変位を検出できる低域フィルタを必要とする．更に，図 1 に見られるような数分の周期の津波を観測するには，この周期より短い周期の海面変位を検出できる高域フィルタを必要とする．このようにして得られる帯域フィルタを通過した海面変位を検出して風波と津波を弁別することとしている．

これらは，30 秒の移動平均値と 300 秒の移動平均値との差として具体化し，大船渡市役所と大船渡消防署のリアルタイムモニタにインストールしている．当地における風波に対する 1 年間の連続計測を通じて，このフィルタとして機能させる移動平均の設定の最適値を明らかにすることが，今回の実用化実験の目標の一つである．

4.　大船渡市沖実験データ速報

これまでに得られた風波のデータの一例を図 13 に示す．大船渡市沖に GPS 津波計を投入直後の 1 月 28 日未明の午前 2 時を起点とする 20 分間のデータである．このときの気象条件として，1 月 27 日の同時刻に紀伊半島の南海上にあった 1,000 hPa の低気圧が，発達しながら北東進し，1 日後の観測時刻頃に大船渡市の東海上で中心気圧が 980 hPa の低気圧になっている．図中の大きい振幅として，3.5～4.0 m の波高が観測できている．一方，更に 2 日経過後の 1 月 30 日未明の午前 2 時を起点とする 20 分間のデータである図 14 では，約 1 m の波高で穏やかな海象条件を示して

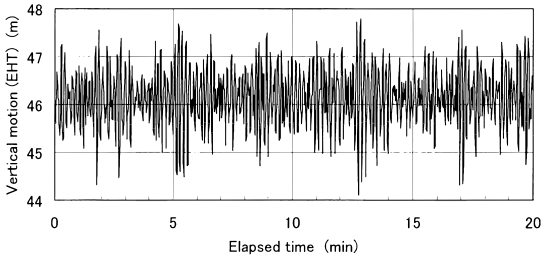


図 13 荒天時（2:00, 28, Jan., 2001）の波高計測例
Fig. 13 An example of vertical motion of the buoy in the case of a rough sea (2:00, 28, Jan., 2001).

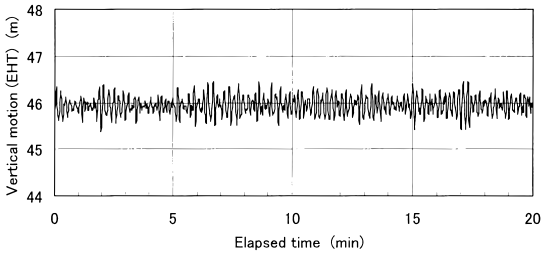


図 14 平静時（2:00, 30, Jan., 2001）の波高計測例
Fig. 14 An example of vertical motion of the buoy in the case of a calm sea (2:00, 30, Jan., 2001).

いる．この時点では，荒天をもたらした低気圧ははるか東海上に去り，日本近辺の天気図からその姿を消している．

以上のように，大船渡市沖で連続計測実験に供している GPS 津波計は，波浪計としての機能を十分果たしている．今後の 1 年間の連続計測を通じて，この海域の海象条件を把握することができ，津波弁別アルゴリズムの改善に貢献できるデータ収集ができることを期待している．

5. むすび

RTK 方式を用いた GPS 津波計の開発の現状は，次のとおりである．

（1） 海上に浮かべたブイの最上部に GPS アンテナを設置し，GPS アンテナの動揺の時系列データを計測することによって，広い周波数範囲の海面変位を検出できる．

（2） 上記の機能を備えた GPS 津波計を大船渡市沖に設置して連続計測を開始した．ブイは重量約 10 t 及び浮体部直径は 2.8 m であり，海面上 6.4 m の最上部に GPS アンテナを設置している．

（3） 当地の気象・海象条件の調査結果に基づくブイの設計条件における動揺特性解析によって，5.0 s より長い平均波周期の海面変位において，設置した GPS 津波計用ブイの上下揺の波高追随性は 0.927〜1.075 の範囲内であることが明らかになった．

（4） GPS 測位方式として，観測側の GPS データを陸上の基準局に伝送して測位するリバース RTK を開発して適用した．3 月 16 日の例では，この測位法によって 24 時間中の 97.7%で RTK-FIX 解が得られた．

（5） 津波計測アルゴリズムとして，周波数域での弁別をめざしている．大船渡市沖の連続実験において，年間を通じての波浪計測を実施し，津波弁別のための周波数フィルタの適正値を明らかにする．

（6） 防災システムとしての機能化を図るため，大船渡市役所及び大船渡消防署でのリアルタイムモニタに加えて，インターネットでの準リアルタイムデータ公開を試行中である．

謝辞 本 GPS 津波計の開発は，大船渡市役所及び大船渡消防署の支援を得て遂行中である．また，津波計の設置において，赤崎漁業協同組合，末崎漁業協同組合，大船渡漁業協同組合及び綾里漁業協同組合には，実験の意義を御理解頂き種々の御協力を得ている．本実験の準備段階では，日立造船（株）及び日立造船情報システム（株）の関係各位の支援を受けている．ここに，深甚の謝意を表する．

文　献

[1] 館畑香衛，“津波数値計算技術の津波予報への応用，” 月刊海洋，号外 15，pp.23–30, 1998.
[2] 岩崎伸一，“低周波まで計測できるハイドロホンによる多目的津波監視システム，” 月刊海洋，号外 15，pp.61–65, 1998.
[3] 加藤照之，寺田幸博，木下正生，一色　浩，横山　昭，“GPS 津波計の開発，” 月刊海洋，号外 15，pp.38–42, 1998.
[4] T. Kato, Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, and T. Tanno, “Real-time observation of tsunami by RTK-GPS,” Earth Plants Space, vol.52, pp.841–845, 2000.
[5] 土屋　淳，辻　宏道，GPS 測量の基礎，p.13，（社）日本測量協会，1995.
[6] 畑中勇樹，宮崎真一，日下正明，“GPS 連続観測システムとその応用，” 非破壊検査，vol.47, no.3, pp.165–172, 1989.
[7] 永井紀彦，“沖合波浪観測ネットワークによる津波波形観測，” 月刊海洋，号外 15，pp.49–54, 1998.
[8] 岩手県沿岸における沖波推算業務委託報告書（大船渡市提供）
[9] 合田良實，港湾構造物の耐波設計，p.19，鹿島出版会，1980.
[10] R. Hatch, “Instantaneous Ambiguity Resolution,”

Proc. of IAG International Symposium 107 on Kinematic System in Geodesy, Surveying and Remote Sensing, pp.299–308, Springer Verlag, Sept. 10-13, New York, 1991.
[11] B. Hoffman-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS Theory and Practice, 2nd edition, Springer-Verlag Wien, New York, 1992.
[12] A. Leick, GPS Satellite Surveying, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
[13] G.L. Mader, “Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements,” Manuscripta Geodaetica, vol.11, pp.272–277, 1986.
[14] 大船渡市・大船渡地区消防組合，平成 13 年度大船渡市防災（津波）訓練計画，p.2, 2001.
[15] 長尾義三，港湾工学，p.77, 共立出版，1978.

（平成 13 年 4 月 2 日受付，7 月 11 日再受付）

加藤　照之

昭 55 東大大学院理学系研究科了．同年同大地震研究所に採用，現在，同教授．以来，測地測量を用いた地殻変動の研究に従事．現在，GPS を用いた地殻変動の研究を進める．理博.

寺田　幸博

昭 47 阪大基礎工学部物性物理卒．同年日立造船（株）入社，以来，非破壊検査工学及び計測システムに関する研究開発に従事．近年は，GPS 津波計の開発を推進．現在，技術研究所主席研究員．工博.

木下　正生

昭 56 鳥取大大学院電子工学専攻了．同年日立造船（株）入社．艦船ギ装設計に従事．宇宙開発事業団出向を経て，現在に至る．通信，GPS 応用システム開発などに従事．現在は，ディジタル画像記録装置開発も手掛ける．現在，技術研究所主管研究員.

柿本　英司

平 7 阪大・工・電子卒．同年日立造船（株）入社．以来，GPS に関する研究及びシステム開発に従事．現在，技術研究所研究員.

一色　浩

昭 47 東大大学院船舶工学研究科了．昭 49 日立造船（株）入社．流体力学を中心にした研究に従事．近年は，GPS 測位アルゴリズムの開発などに従事．現在，技術研究所主席研究員.

森口　壽久

昭 50 阪大大学院基礎工学研究科修士課程了．同年日立造船（株）入社．以来，製鉄プラントの計算機システムや社内の情報システムの構築に従事．現在，環境・プラント事業本部システム開発部部長.

神崎　政之

日立造船情報システム（株）GPS ソリューション部事業企画グループ課長．昭 61 より GPS を利用した精密測位システムの開発・運用に従事．大学及び研究機関における測地及び大気研究向け GPS ネットワーク構築に参画．現在，リアルタイム環境での精密測位システムの開発を推進.

髙田美津雄

昭 46 阪府大・工・船舶工学卒．同年日立造船（株）入社．昭 62 関西設計（株）．海洋構造物の設計，開発に従事．現在，海洋プロジェクト室部長.

James M.　Johnson

GPS Solutions 社（米国コロラド州）に所属．GPS 精密測位システム開発に従事.

［参考資料2003-1］

海岸工学論文集，第50巻（2003）
土木学会，[411]-[415]

GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測

永井紀彦*　・小川英明**・寺田幸博***・
加藤照之****・久高将信*****

海底部の維持補修作業が不要な新たな沖合海象観測システムとして，小型ブイ上のGPS受信部の3次元的な変位情報を得るGPS津波計を開発した．本研究は，GPS津波計による大船渡港沖における通年観測データのとりまとめを行い，観測データから解析して得られた波浪・津波・高潮（潮位）情報を，港湾局の久慈・釜石・仙台新港沖合の各沿岸波浪観測情報や，気象庁の大船渡港内の潮汐観測検潮記録と比較し，その信頼性と運用性の検証評価を行ったものである．GPS津波計は，津波ばかりでなく，波浪や潮位・高潮をも，極めて適切に観測していることが判明し，今後のさらなる大水深域への展望が開けた．

1. はじめに

津波・潮位などの海象情報をいち早く観測探知することは，沿岸域の防災上きわめて重要である．かつては，こうした長周期の海面変動は，港内に設置された井戸内の水位変動を計測するフロート式検潮器（合田，2002）が，唯一の測定手段であり，沿岸に到達した後でなければ高潮や津波の把握は困難であるとされていた．しかし，1993年北海道南西沖地震津波を契機として，沿岸波浪観測のための海底設置式波浪計が，沖合における津波の波形を正確に察知できることが，実測データをもとに明らかにされ，その後の数例の津波に関して，沖合における周波数スペクトルなどの基本的な特性が，明らかにされつつある（合田，2001；永井ら，1993，1995，2001；小舟ら，1996）．

しかし，長周期海面変動を定常的に観測することのできる海底設置式沿岸波浪計の設置は，維持補修の必要上，一般的に水深50m以下の浅海域に限定されているため，津波波形を観測探知してから実際の沿岸への津波の来襲までの時間差は数分間程度しかなく，十分な防災対策をとることは極めて困難であった．他方，海底部の維持補修作業が不要で大水深海域への設置が可能なブイの運動加速度計測を行うブイ式波浪計は，津波や潮位などの加速度の小さい長周期変動成分を捉えることは，原理上不可能である．このため，海底部の維持補修作業が不要な，新たな沖合海象観測システムの開発が望まれていた．

著者らは，小型ブイ上のGPS受信部の3次元的な変位情報を得て沖合の津波を観測するGPS津波計を開発し，長期間にわたる現地実証実験を大船渡港沖合海域で実施している（Katoら，2001）．本研究は，GPS津波計による通年観測データのとりまとめを行い，観測データから解析して得られた波浪・津波・高潮（潮位）情報を，周辺沿岸域の波浪・潮位観測結果と比較し，その信頼性と運用性の検証評価を行ったものである．

観測結果の検証にあたっては，国土交通省港湾局および港湾空港技術研究所を含むその関係機関によって構築・運営されている全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS）の久慈・釜石・仙台新港沖合の各沿岸波浪観測情報（永井，1998）や，気象庁の大船渡港内の潮位観測情報を用いた．

2. 大船渡におけるGPS津波計の現地実験

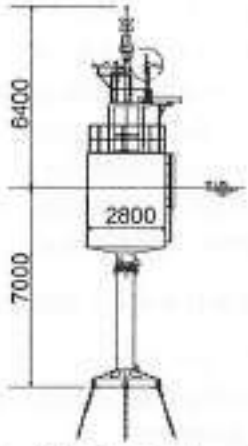
大船渡港沖合の水深53m地点に2001年1月末にブイを設置し，現地実証観測を継続実施中であるが，本稿では，2001年の通年観測データをもとに検討を行った．陸上基地局を用いるGPS測位法のRTK（Real Time Kinematic）法によって，小型ブイ上に設置したGPSアンテナ位置をWGS84測地系で1s毎に測位し，XYZ座標をcm精度で計測した．検討対象期間中には，低気圧や台風による高波浪期間や，ペルー地震津波の来襲が含まれている．

図－1は，観測位置を示したものである．GPSブイには，ENEからSWにかけての外洋波浪が入射する地形条件となっている．陸上基地局は，気象庁によって観測が実施されている港内検潮所の近くで，ブイを見渡すことのできる位置に設けられた．

図－2は，GPSブイの諸元を示したものである．直径2.8mのブイは，チェーンによって多点係留した．ブイの上部（海面上6.4m）にはGPS受信アンテナを設置している．GPS受信アンテナは水没すると必要な位置検出が困難になるため，水面上のある程度の高さが必要である．しかしながら，図からわかるように受信アンテナの位置とブイの重心が一致していないため，GPSで検出されるブイ変位には，ブイの重心位置の変位とブイの回転によ

* 正会員　工博　（独法）港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室長
** （独法）港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室
*** 工博　日立造船㈱技術研究所基盤技術開発室主幹研究員
**** 理博　東京大学地震研究所教授
***** 正会員　㈱ネコー　測量解析担当

図—1　大船渡沖合における観測位置



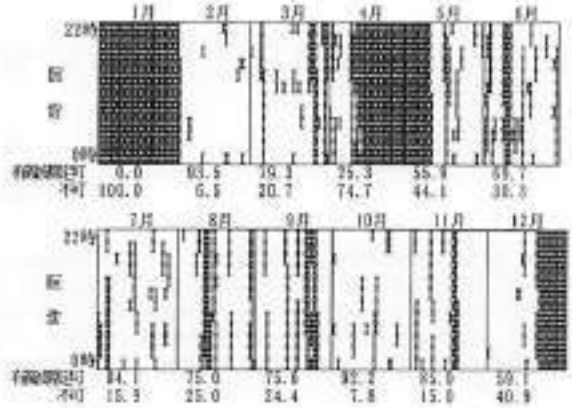
図—2　GPSブイの概要（mm単位）

るアンテナ位置の変位とが，合成されたものとなっていることには，注意が必要である．

3.　波浪の観測

1s間隔で測得されるGPSアンテナの変位情報は，通信障害等によって一部に異常値が含まれるものであった．異常データのパターンとしては，データの欠落やとびはねなどが多かった．しかしながら，たとえ一部の観測情報に異常値が含まれていたとしても，異常部分のデータを採用しないことによって，ブイの鉛直変位から求めた海面変動記録をもととしたゼロアップクロス法による有義波諸元の算出は可能である（合田，2001）．ここでは，ナウファスによる波浪データ処理の基準に倣って，毎偶数正時前後10分づつの，すなわち，2時間毎に20分間の，観測データをもとに有義波諸元の算定を試みた．

図—3は，検討対象期間中のデータの測得状況を示したものである．横軸は，2001年の1月1日から12月31日に至る365日間を2段（6か月づつ）に分けて表示し，縦軸は，毎日の0時から22時までの12観測を表示したものである．空白部分は有義波諸元の算定が可能であった観測を，×印は異常データが多く有義波諸元の算定が不可能であった観測をそれぞれ意味している．検討対象期間中，観測開始前の1月の1か月間と，システム障害による4月から5月にかけての約1か月間および12月下旬の約半月間の，合計3回の長期欠測があった．しかしながら，こうした長期欠測を含めても年間のデータ測得率は66%であり，長期欠測期間を除外すれば82%であった．高波浪時に特に欠測が多くなることもなかったため，最初の実用化試験としては比較的良好な測得率が得られたものと考えられる．



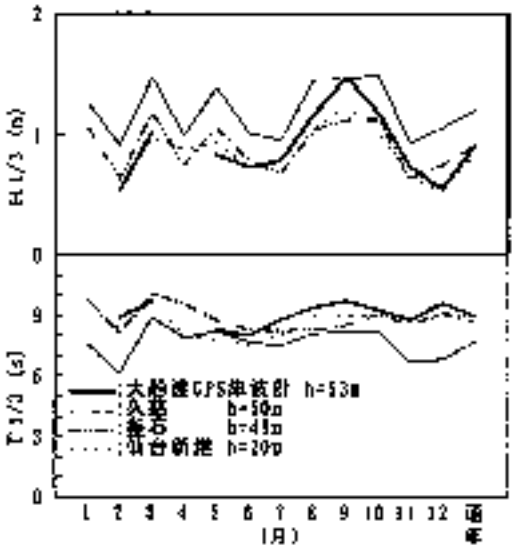
図—3　有義波観測データの取得状況（2001年）

表—1は，年間を通じた観測の結果抽出された上位3ケースの高波について，その起時と気象要因を示すとともに，算定された有義波高と周期を，近傍のナウファス沿岸波浪観測記録（永井ら，2003）と比較したものである．3月4日22時および10月11日18時のそれぞれの二つ玉低気圧による高波発生時，および8月23日6時の台風0111号来襲による高波発生時には，久慈港，釜石港，および仙台新港沖合の海底設置式沿岸波浪計も同様な高波を観測しており，観測された有義波高や周期は，同じ程度の値となっていることがわかる．

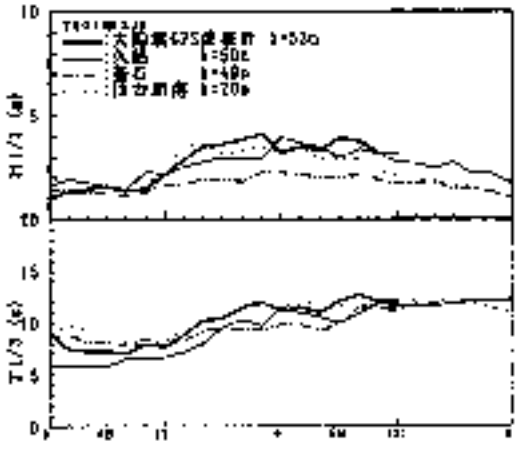
図—4は，有義波高と有義波周期の月平均値を，各観測

表—1　観測された高波記録

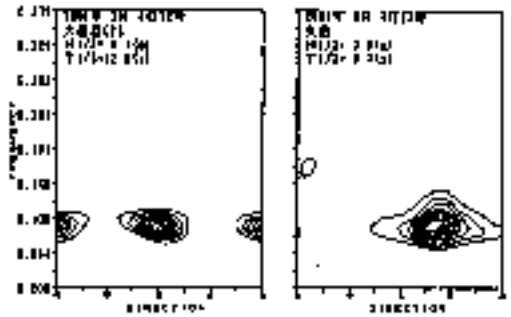
最大有義波の起時		2001年 3月4日22時	2001年 10月11日18時	2001年 8月23日6時
気象要因		二つ玉低気圧	二つ玉低気圧	台風0111号
大船渡ブイ	H1/3(m)	4.66	3.66	3.30
	T1/3(s)	12.0	11.0	10.4
久慈	H1/3(m)	3.95	3.42	2.96
	T1/3(s)	11.5	10.5	9.8
釜石	H1/3(m)	2.26	3.45	1.71
	T1/3(s)	9.3	10.1	8.6
仙台新港	H1/3(m)	3.59	3.56	3.18
	T1/3(s)	10.2	10.4	9.9



図―4　月平均有義波の比較（2001年）



図―5　高波浪時の有義波高と周期



図―6　方向スペクトルの比較（3月4日22時）

点で比較したものである．月平均有義波高・周期とも，大船渡港沖のGPSブイで観測された値は，近傍のナウファス沿岸波浪観測点に近い値となっている．また，月平均有義波高が3月と10月頃に極大値を示し，7月頃と12月頃に極小値を示す変化傾向も，各観測点に共通している．GPSブイによって観測された情報は，波浪統計を概ね正確に示しているようである．

図―5は，年間を通じて最も高い有義波高を記録した3月4日から5日にかけての有義波高と有義波周期を，経時変化として比較したものである．二点鎖線で示される釜石沖合の波浪観測点は，地形の影響によって東方向以外からの来襲波は遮蔽されるため，若干，波高が低くなっているようであるが，大船渡港沖のGPSブイを含む他の観測点における経時変化は，概ね一致している．このことも，また，GPSブイの高波浪時における有義波観測値の妥当性を示すものである．

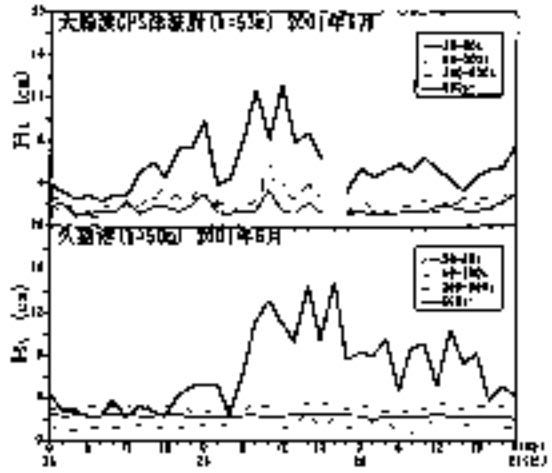
図―6は，GPSブイアンテナの3成分の位置変動をもとに算定した方向スペクトルを，同時刻の久慈港沖合の海象計で得られた方向スペクトル（永井ら，2003）と比較したものである．北から東を経て南に至るまで，ほぼ180度の外洋波浪の来襲を受ける地形条件の久慈港沖では，ESEを主方向とするピークが見られる．これに対して，大船渡港沖のGPSブイでは，N方向とS方向との二つの周波数のほぼ等しいピークが見られる．すなわち，久慈港沖と大船渡港沖では，ピーク周波数はほぼ等しいスペクトルになっているものの，波浪エネルギーの方向分布特性がまったく異なっている．図―1に示される周辺地形から考えて，大船渡港沖ブイに北からの波浪エネルギーが来襲することは，極めて考えにくく，GPSブイによる波向（方向スペクトル）の算定結果が，必ずしも適切でないと判断される事例である．

こうした観測例は，他にも多く見られた．これは，ブイ重心と計測点の位置のずれによるものと推定される．すなわち，ブイの回転運動によって，アンテナ上部の変位は，ブイ重心位置付近の波による水粒子運動変位とは大きく異なったものとなっているものと思われる．ブイの動揺を考慮した解析ソフトの開発が今後の課題である．

4. 津波の観測

GPS津波計は，本来，沖合における津波波形の検出を開発目的としたものである．しかし，津波は極めて希に来襲する事象であるため，実際の津波波形を実証実験中に観測することは困難であると考えられていた．しかし，たまたま，日本時間2001年6月24日にペルーでM 7.9の巨大地震が発生し，翌25日未明に我が国の太平洋沿岸に津波が来襲する事象が，検討対象期間中に生じた．

図―7は，この津波来襲前後の，長周期成分の波浪観測結果を，ナウファスで採用されている手法に倣って，2時間毎にスペクトル解析し周期帯換算波高で表示したものである（永井，2000）．図の下段には，ナウファス久慈沖合の観測結果を併せて表示した（永井ら，2001）．周



図―7　ペルー地震津波の検出

期600 s未満の比較的周期の短い周期帯では，6月24から26日にかけての3日間にわたって，換算成分波高は数cm以下の低い値を保ったままでむったが，周期600 s以上の長い周期帯に限って，25日未明から半日間程度にわたり換算波高10 cm強の長周期エネルギーが明確に現れている．久慈港沖の海底設置式波浪計でも，同様の事象が観測されているため，これは津波の来襲に伴うものであると考えられる．

すなわち，GPS津波計は，海底設置式沿岸波浪計と同様に，沖合の津波波形を捉えることができることが，実測データから検証された．

5. 潮汐と高潮の観測

GPS津波計は，直接GPSアンテナの変位を計測するため，より周期の長い沖合の潮位変動を測定することが理論的には可能である．ここでは，1 s間隔の通年観測データをもとに，数値フィルターによって毎時値に変換し，調和分解計算等によって潮位変動成分の抽出を試みることとした．なお，毎時値への変換にあたっては，ナウファスデータ処理による手法に準じて（合田，2002），カットオフ周期60 sと209分との2段階の数値フィルター処理を行った．

表―2は，GPSブイによる年間観測データを毎時値に変換し調和分解計算した結果を，気象庁による港内潮位観測結果からやはり調和分解計算によって求められた調和定数と比較したものである．なお，大船渡港の港内潮位推算結果は，海上保安庁によって算定された調和定数表（海上保安庁，1992）を用いて計算することも可能であるし，潮位表（気象庁，2000）を用いて求めることも可能である．しかし，潮位変動の調和定数は，実は定数ではなく，年によって若干の変動があることが知られており（永井ら，1996），この変動分が天文潮位成分の評価に当たって誤差となることが懸念されたため，ここでは，気象庁からご提供いただいた2001年間の1年間の港内潮位観測記録から直接計算して，港内の調和定数を算定した．

沖合で得られた主要4分潮の振幅は，いずれの分潮でもほぼ港内推算値の80-85%程度である．これは沖合から港内への潮位変動の増幅が示されたものと考えられる．すなわち，潮位変動は，沖合から港内にかけて20%程度増幅されていることがわかる．遅角に注目すると，沖合の位相角は，いずれの分潮に関しても，港内の位相角よりも数度ほど大きい値を示し，位相が進んでいることがわかる．この位相角度差にそれぞれの分潮の周期を乗じたものが，各分潮の沖合と港内との時間差を意味する．毎時データをもとに解析した結果であるため，算定結果には分潮毎に異なった誤差が含まれていると考えるべきであろうが，すべての分潮で時間差は9－18分の間となっている．この時間差は，潮位変動のような長周期海面変動の沖から港内への伝播時間差に対応するものであり，大船渡港港口部における高潮や津波の伝播特性として重要な値であると考えられる．

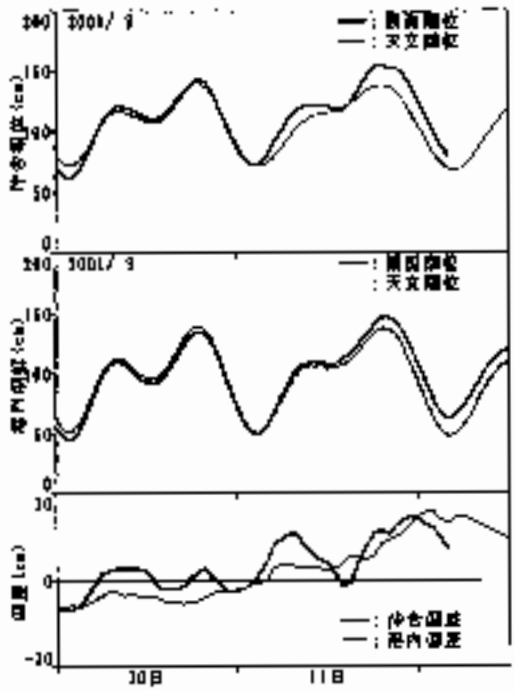
表―2　主要分潮の振幅

変数	振幅（cm）			遅角（°）			
地点	沖合	港内	比	沖合	港内	角度差	時間差
M_2	24.4	30.5	0.80	104.7	97.8	6.9	14.3分
S_2	11.9	14.0	0.85	138.3	133.7	4.6	9.2分
K_1	19.7	23.5	0.84	164.5	160.2	4.3	17.2分
O_1	15.7	18.5	0.85	147.4	142.7	4.7	15.9分
Z_0	71.7	86.5	0.83	－	－	－	－

図―8は，台風0115号来襲時における港内および沖合の推算潮位（調和定数から逆算）とこの時の観測波形（長周期成分）とを比較したものである．図は，上から順に，沖合における観測潮位と推算潮位，港内における観測潮位と推算潮位，および偏差（観測潮位と推算潮位の差）を示している．推算潮位は天文潮位と考えることができるので，偏差は，台風による気圧低下や風による海水の吹き寄せによる海面上昇分（いわゆる高潮）を示すと考えられる（永井ら，2000）．

台風近接前の9月10日にはほとんど現れなかった副振動が，11日には顕著に現れていることが注目される．偏差の極大値は，沖合の方が港内よりも若干早く出現し，港内は沖合よりも若干増幅されているようであるが，いずれも，11日深夜から12日未明にかけて30 cm弱の偏差が現れている．

すなわち，GPS津波計は，沖合における潮位変動や高潮偏差を検出するためにも有効であることが示された．



図—8 高潮の検出（台風0115号）

6. まとめ

以上の結果，GPS津波計は，津波ばかりでなく，波浪や潮位・高潮をも，概ね適切に観測していると考えられ，今後のさらなる大水深域への展開が期待される。

最後に，本研究は，文部科学省による補助研究（産学官連携イノベーション創出事業費補助金：独創的革新技術開発研究提案公募制度：課題番号14401：GPS津波計の沖合展開技術に関する研究）の一環として行われたものであることを述べ，ここに謝意を表する。

参考文献

海上保安庁水路部(1992)：日本沿岸潮汐調和定数表，書誌第742号，267 p.

気象庁（2000）：平成13年潮位表，290 p.

合田良実監修，海象観測データの解析・活用に関する研究会編集(2001)：波を測る（沿岸波浪観測の手引き），(財) 沿岸開発技術研究センター，212 p.

合田良実監修，海象観測データの解析・活用に関する研究会編集(2002)：潮位を測る（潮位観測の手引き），(財) 沿岸開発技術研究センター，182 p.

小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義（1996）：1996年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技術資料 No. 842, 96 p.

永井紀彦（1998）：ナウファス（全国港湾海岸波浪情報網）の現況と今後の課題，土木学会論文集巻頭論文，第609号，VI-41，pp. 1-14.

永井紀彦（2000）：スペクトル解析に基づく波向と長周期波の観測情報の高度化，平成12年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 103-118.

永井紀彦・橋本典明・浅井正（1993）：平成5年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報，港湾技術研究所報告第32巻，第4号，pp. 51-97.

永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義（1995）：平成6年（1994年）北海道東方沖地震津波の特性，港湾技術資料 No. 802, 97 p.

永井紀彦・菅原一晃・渡辺弘・川口浩二（1996）：久里浜湾における長期波浪記録解析，港湾技術研究所報告第35巻，第4号，pp. 5-35.

永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏（2000）：台風9918号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性，港湾技術資料 No. 969, 47 p.

永井紀彦・留田孝史・佐藤和敏・細田恭史（2001）：我が国沿岸の沖合波高計と港内潮位計が捉えた2001年ペルー地震津波，第13回研究成果発表会講演要旨集，海洋調査技術学会，pp. 16-17.

永井紀彦・小川英明（2003）：全国港湾海岸波浪観測年報（NOWPHAS 2001），港湾空港技術研究所資料 No. 1041, 86 p.（各港波浪観測統計図表はCD ROM化）

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, T. Moriguchi, M. Takada, T. Tanno, M. Kanzaki and James Johnson (2001). A New Tsunami Monitoring System using RTK-GPS. ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12, pp.645-651.

［参考資料2005-2］

LETTER *Earth Planets Space*, **57**, 297–301, 2005

Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy

Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Keiji Ito[2], Ryuji Hattori[2], Takenori Abe[2], Toshihide Miyake[2], Shun'ichi Koshimura[3], and Toshihiko Nagai[4]

[1]*Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan*
[2]*Technical Research Institute, Hitachi Zosen Co. Ltd., Japan*
[3]*Disaster Reduction and Human Renovation Inst., Japan*
[4]*Port and Airport Research Institute, Japan*

(Received December 20, 2004; Revised April 5, 2005; Accepted April 6, 2005)

A tsunami due to the 2004 M7.4 September 5th earthquake off of the Kii peninsula, Japan, was recorded at the GPS buoy newly designed and established in April 2004, about 13 km off of the Muroto Promontory, southwestern Japan. The tsunami arrived at the buoy about 8 minutes before its arrival to the nearest tide gauge station at the tip of the Muroto Promontory. The predicted tsunami record based on preliminary source model shows excellent agreement (rms 2.7 cm) with the observed GPS record. This demonstrates that GPS buoy observations can be used not only for a tsunami warning system, but also for precise determination of the tsunami source.

Key words: The 2004 off of the Kii peninsula earthquake, GPS buoy, Tsunami.

1. Introduction

Two successive earthquakes of M7.1 (foreshock) and M7.4 (main shock) occurred off of Kii Peninsula, Japan, on September 5th, 2004. They generated significant tsunamis along the southern coast of Japan. According to Japan Meteorological Agency (JMA, 2004), the maximum tsunami height due to the main shock reached 0.9 m at Kozushima tide gauge station and created significant hazards at ports along the southern coast of Japan (Fig. 1). The maximum run-up height of the tsunami due to the main shock registered 4.6 m at Kiho-cho, Mie (Koike *et al*., 2005).

Offshore of southwestern Japan are the areas of repeated historical large interplate earthquakes named as Nankai and Tonankai earthquakes, of which the 1944 Tonankai (M8.1) and 1946 Nankai (M8.0) earthquakes are the most recent. These earthquakes caused tremendous hazards due to tsunamis as well as due to ground shaking. Governmental investigation suggests a 40–50% probability that the next earthquake of the same type will occur within 30 years. Therefore, it is important to establish an effective countermeasure for the tsunami hazard, in order to protect the local population.

One such system may be real-time monitoring of changes in sea-surface heights. A number of tsunami monitoring systems have been developed. Gonzalez *et al*. (1999) for example used ocean bottom pressure gauges, with data transmitted through satellites. In Japan, ocean bottom pressure gauge data are transmitted through ocean bottom cables (e.g., Hino *et al*., 1998).

Copy right© The Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS); The Seismological Society of Japan; The Volcanological Society of Japan; The Geodetic Society of Japan; The Japanese Society for Planetary Sciences; TERRAPUB.

If the buoy is set offshore distant enough and the data are transmitted in a real-time manner, detection of the tsunami can be used for disaster mitigation. We have developed a GPS buoy for this purpose. We have operated a GPS buoy system offshore Ofunato, northeastern Japan, for about three years and have succeeded to detect two tsunami events; 2001 Peru earthquake and 2003 Tokachi-Oki earthquake (Kato *et al*., 2001). The present article introduces a newly designed GPS buoy, deployed offshore of the Muroto Promontory, which detected the tsunami generated by the September 5, 2004 earthquake.

2. A New GPS Buoy System

We have developed a tsunami monitoring system, which uses Real-Time Kinematic (RTK) GPS technology to position a GPS receiver mounted on top of a buoy floating at the sea surface, relative to a land-based GPS receiver. The data are transmitted from buoy to shore using radio transmission. The GPS phase data are processed on a PC placed at the land-based station (Fig. 2). The newly designed system is similar to that used offshore Ofunato (e.g., Kato *et al*., 2001). However, considering more practical application to tsunami disaster mitigation, it is designed to survive for more harsh oceanic environments far offshore than the case of Ofunato. Design of the buoy is shown in Fig. 3. Total height is more than 15 m; height above the sea surface is 6.9 m and the weight is 17 ton. The buoy is tethered to the bottom anchor, weighing about 150 tons, by an iron chain.

The data are acquired on board the buoy at a one-second sampling interval and are transmitted in real time by radio to the ground base. The base station is placed in the field of the Muroto Meteorological station, Japan Meteorological Agency. The ground base also has a GPS in-

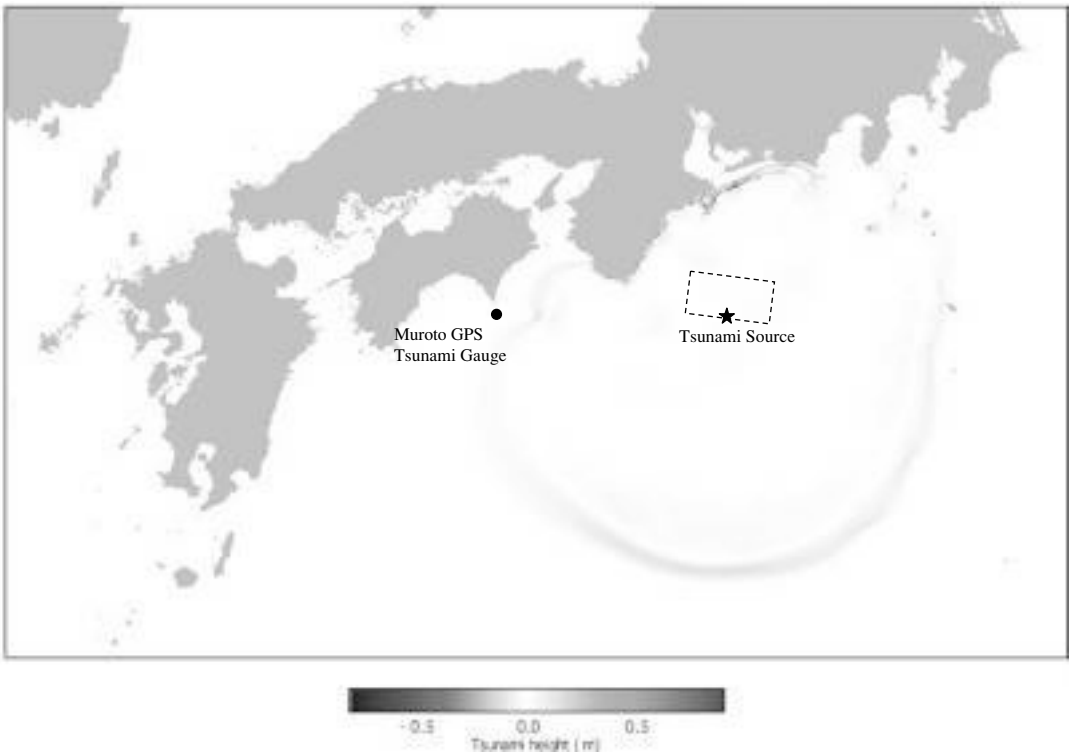


Fig. 1. Location of the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake and GPS buoy, southwestern Japan.

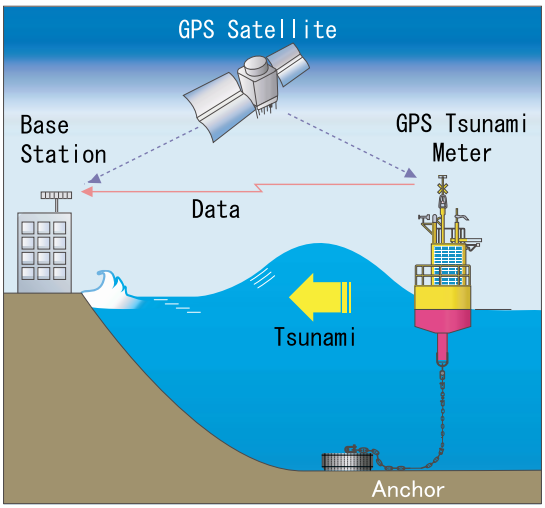


Fig. 2. Plan of GPS tsunami monitoring system.

strument and RTK processing is done at the ground base. RTK-processed positions of the buoy are first applied by a low-pass filtering using a simple moving average technique and are then forwarded to a web server for real-time monitoring of the change of sea-surface using VPN (Virtual Private Network) technology. Latency due to such processing mostly comes from the length of data used for filtering. If we use 60seconds of moving average, observer should wait at least 30 seconds to get the filtered position. Due to some other technical limitations, the web page is redrawn every 30 seconds. As a result, anyone can view the sea surface with about a 30-second delay at the web page (http://www.tsunamigps.com/).

The buoy and other equipment were deployed in the middle of April 2004 at about 12 km nearly south from the tip of the Muroto Promontory, Shikoku, southwestern Japan. The water depth of the site is about 95 m (Fig. 4). The position of the anchor is (33:08:25.748N, 134:12:10.166E) in WGS84. The baseline length to the base at the Muroto Meteorological Observatory is about 12.6 km.

After some tests, the buoy system became operational in May 2004. Since then, there have been anomalously many typhoons that hit the Japanese islands in the summer of 2004, which have been excellent for testing sustainability of the system. The system survived those typhoons with maximum peak-to-peak wave heights of more than 20 meters.

3. Tsunami Detected for the 2004 Off Kii Peninsula Earthquake

The 2004 Off Kii Peninsula earthquakes (M7.1 and 7.4) occurred at 19:07:7.5 (Japan Standard Time, +9 GMT; 33°1.7′N, 136°48.0′E, depth 38 km) and at 23:57:16.9 (JST; 33°8.6′N, 137°8.5′E, depth 44 km) , respectively (Fig. 1). Both of earthquakes generated marked tsunamis.

Figure 5 shows the original record of sea surface height for that day. Since the sea water was rather rough and the peak-to-peak amplitude of wind waves were several meters high.

We applied low-pass filtering to extract the long-period waves, including the tsunami. Figure 6 shows the filtered record for the period from 18:30 to 20:30 that should include the tsunami for the foreshock. Two types of filtering were applied; 150–1800 sec digital band-pass filter and 150

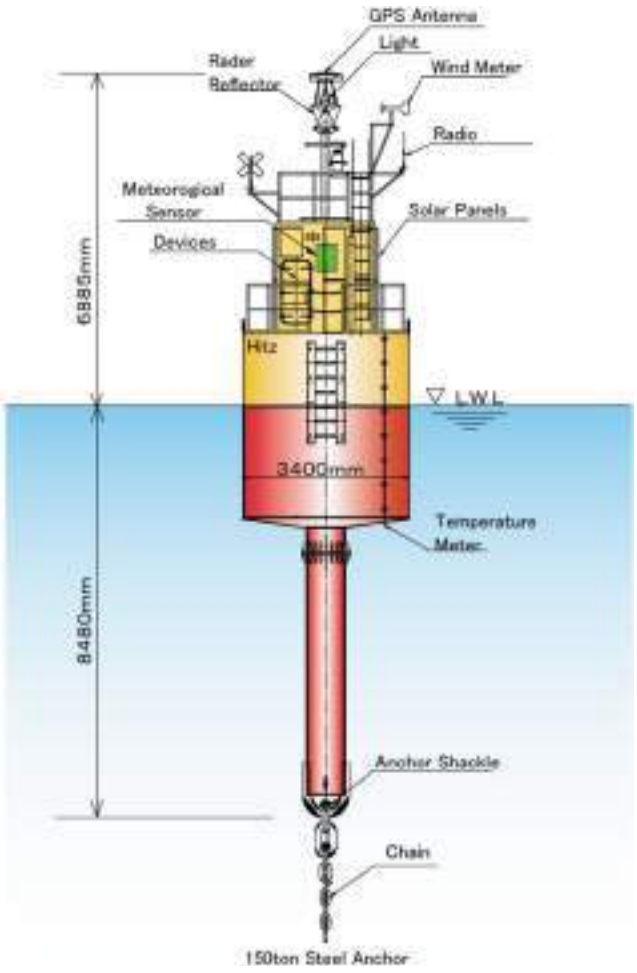


Fig. 3. Design of GPS buoy.

sec moving average after removing the astronomical tides (Matsumoto *et al*., 2000). The tsunami should have arrived at the buoy around 19:30. However, a significant tsunami cannot be seen in the record, though a possible characteristic wave could be seen around 7:30 (see Satake *et al*., 2005).

The main shock generated the largest tsunami of this earthquake sequence. Figure 7 is the comparison of the time series for the period of 00 h to 02 h (JST) of September 6, 2004. The uppermost record is the tide gauge record taken at Muroto Port, about 15 km north of the GPS buoy (Fig. 1). Since the amplitude of tsunami is much exaggerated when it approaches the coast, the tide gauge record is multiplied by 1/5. The second time series of Fig. 7 is the predicted record at the GPS buoy. Source parameter of Yamanaka (2004) was used for this purpose. The third time series is the position record of the GPS buoy after astronomical tides were removed and a moving average of 150 seconds was applied. Matsumoto *et al*. (2000) was used for estimating astronomical tides. The bottom time series is the same record but after a 150–1800-second band-pass filter was applied.

The filtered GPS position record closely resembles the predicted record, with a rms of 2.7 cm if we take the first 30 minutes from the onset of tsunami, indicating that the GPS buoy is capable of detecting this size of tsunami. Peak-to-peak amplitude of the largest wave is about 20 cm. Although numerical simulation suggests a small retarding phase at around 0:25 JST, it cannot be discerned in the GPS record. The first tsunami wave measured at 00:32 at the buoy reached the Muroto tide gauge about 10 minutes later.

4. Discussion

Most striking in the record (Fig. 7) is the similarity between the observed and predicted record of the tsunami. Non-linear effects that may prevail in shallow water might be negligible at the ocean depth of this buoy (about 100 m). Also, effects of coarse grid for approximating the coast line geometry may also degrade the prediction if the site is too close to the coast (not the case here). Hence, GPS records in the deep outer ocean far from the coast may be helpful for estimating the source effects more directly for numerical simulation studies compared with tide gauge records (Matsumoto and Mikada, 2005; Baba *et al*., 2005; Satake *et al*., 2005). The similarity of the simulated and observed records suggest that the accuracy of RTK GPS is enough to detect a tsunami wave of several cm or greater amplitude.

There are several questions to be raised as to the effective use of GPS buoys for disaster mitigation. First, it should be examined if 13 km offshore is far enough for early detection of tsunami. As was indicated above, tsunami detection at the GPS buoy preceded by about 8 minutes detection at the Muroto tide gauge. This may be rather marginal for the residents who are living at the tip of Muroto Peninsula. Residents may require much earlier warning, say 20 minutes or more would be necessary for effective evacuation. For a more effective system, the buoy may have to be placed much farther from the coast, say more than 50 km. It should be noted, however, that the present location may be effective enough for the people who are living in locations at greater distances, such as Kochi or Osaka, Kobe area.

Data latency in the present system is about 30 second at maximum due both to low-pass filtering and technical limitation in web operation. This is far shorter than the expected lead time of 8 to 10 minutes of early detection of tsunami in the present case. Therefore, the impact of data latency would be negligible even in the present system.

There are advantages and disadvantages to locating the buoy farther from the coast. Since, generally, the water depth is much larger if you go farther from the coast. Then the tsunami amplitudes become much smaller and more difficult to detect. Also, tethering would be problematical in deeper ocean for the depth more than 1000 m. Also, we would need to improve the accuracy of RTK-GPS positioning, particularly the vertical component in case of longer baselines.

There are some other challenging technologies for the outer ocean, such as real-time continuous data transmission, long-term sustainability of the buoy itself. Satellite data transmission shall be investigated for data transmission. For a long-term operation of the buoy system, say 10 years or more, a secure and autonomous buoy system will have to be designed.

In the course of revising this article, a giant earthquake of M9.3 occurred offshore Sumatra Island, Indonesia, and devastated the whole area surrounding the Indian Ocean. An enormous tsunami generated by the earthquake caused

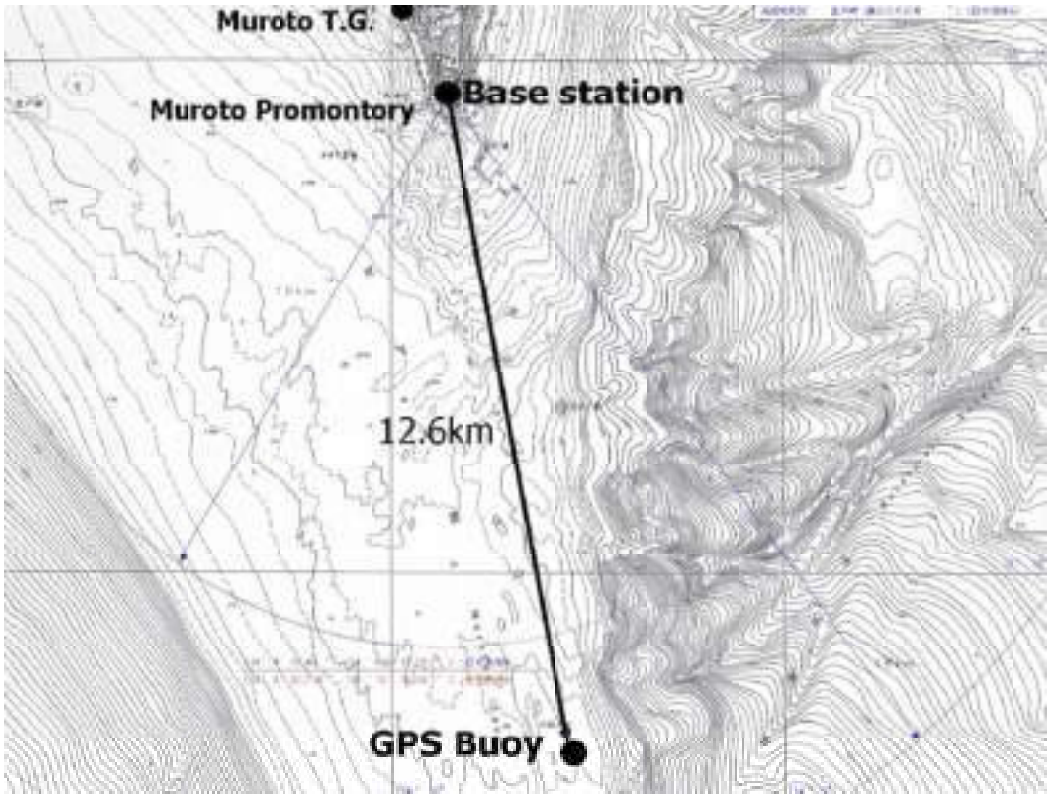


Fig. 4. Ocean bottom topography and the position of the GPS buoy. Topography map was taken from Division of Marine Information, Japan Coast Guard.

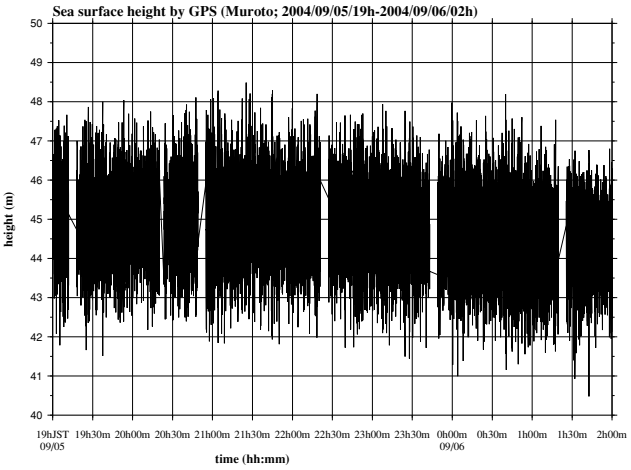


Fig. 5. Original record of sea surface height taken by GPS buoy. Vertical axis is ellipsoidal height in WGS84.

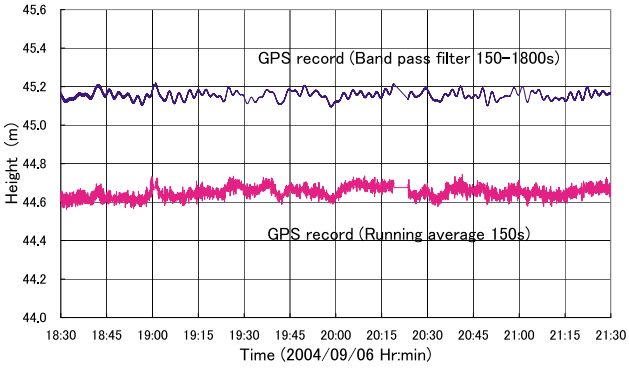


Fig. 6. Filtered vertical components of GPS record for the period 18:30 to 21:30. (Above) 150–1800 second band-pass filtered, and (Bottom) 150-second moving averaging applied. Vertical position of bottom record is arbitrarily offset for the sake of easy comparison.

more than 300,000 people of deaths and missing in the area. Many of countries as well as United Nation asserted necessity of implementing a tsunami early warning system in the Indian Ocean as has been operational in the Pacific Ocean. The present system of GPS buoy would be one of powerful tools for monitoring sea-surface and detecting tsunami before its arrival to the coast.

The GPS buoy is much inexpensive compared with the ocean bottom pressure gauge with cable as has been introduced surrounding Japanese Islands. Array deployments of GPS buoys may contribute to reduce costs. On the other hand, current accuracy of RTK-GPS is still inferior to pressure sensor if the distance from the ground base exceeds 20 or 30 km. Combination of GPS buoy with ocean bottom sensors would be an ideal combination for the most effective monitoring system of sea surface.

5. Conclusion

A newly designed GPS tsunami monitoring system was established about 13 km south of the tip of Muroto Promontory. The system was able to detect the tsunami that was generated by the main shock of the 2004 Kii Peninsula earthquake. The maximum peak-to-peak amplitude of the tsunami was about 20 cm and was consistent with numeri-

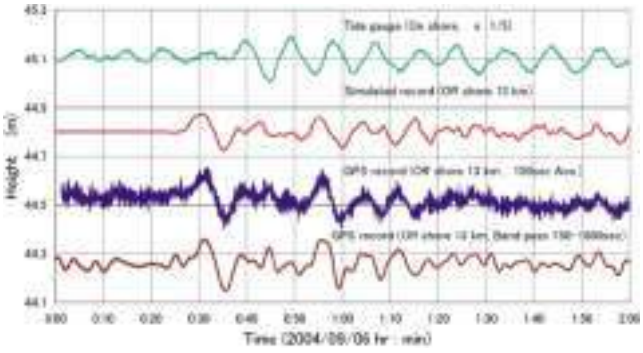


Fig. 7. Comparison of tsunami records for the period 0:00 to 2:00 of September 6th, 2004. (Uppermost) Tide gauge record at Muroto Port; (Second uppermost) Predicted record at GPS buoy; (Third uppermost) Vertical component of GPS record detrended and 150-sec moving average applied; (Lowest) GPS record after band-passed for 150–1800 seconds. Arbitrary offsets for the vertical position records are given for the sake of easy comparison, except the third record from above.

cal prediction. The arrival of the first maximum wave was about 8 minutes prior to the arrival to the Muroto tide gauge located at the tip of the Promontory. Although deployment farther away from the coast would be ideal, the present system may be served as a powerful tool for monitoring tsunami as a part of the countermeasure for tsunami disaster mitigation.

Acknowledgments. Mr. Sakai of Kochi Prefecture and Mr. Takei, the Mayor of Muroto City, helped the authors for establishing and operation of the GPS tsunami monitoring system. Muroto Meteorological Station kindly permitted us to use their facility as the base station of the system. Reviews by Dr. Yehuda Bock and Dr. Michael A. Fisher helped the authors to improve the manuscript.

Development of the system was supported by the grant of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2002–2004).

References

Baba, T., P. R. Cummins, and T. Hori, Compound fault rupture during the 2004 off the Kii Peninsula earthquake (M7.4) inferred from highly resolved coseismic sea-surface deformation, *Earth Planets Space*, **57**, 162–172, 2005.

Gonzalez, F. I., E. N. Bernard, H. B. Milburn, and H. O. Mofjeld, Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis, Abstracts of IUGG99 in Birmingham, B.127, 1999.

Hino, R., T. Kanazawa, S. Sakai, Y. Tanioka, and K. Suyehiro, Tsunamis from an off-Sanriku and the Papua New Guinea earthquakes observed by ocean bottom tsunami measurement, Programme and Abstracts The Seismological Society of Japan, 1998, Fall Meeting P23, 1998 (in Japanese).

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, T. Moriguchi, M. Takada, T. Tanno, M. Kanzaki, and J. Johnson, A new tsunami monitoring system using RTK-GPS, in *Proceedings of the International Tsunami Symposium 2001*, Session 5, Number 5–12, 645–651, 2001.

Koike, N., T. Takahashi, K. Imai, Y. Tanioka, Y. Nishimura, K. Harada, S. Suzuki, K. Fujima, Y. Shigihara, Y. Namegaya, and S. Koshimura, Tsunami run-up heights of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, *Earth Planets Space*, **57**, 157–160, 2005.

Matsumoto, H. and H. Mikada, Fault geometry of the 2004 off the Kii peninsula earthquake inferred from offshore pressure waveforms, *Earth Planets Space*, **57**, 161–166, 2005.

Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, **56**, 567–581, 2000.

Satake, K., T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki, T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka, and Y. Terada, Tsunami source of the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes inferred from offshore tsunami and coastal tide gauges, *Earth Planets Space*, **57**, 173–178, 2005.

Yamanaka, Y., ERI Seismological Note: No. 152 (http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC152e.html), 2004.

T. Kato (e-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp), Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai

海洋開発論文集，第21巻，2005年7月

沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言

PROPOSAL OF COASTAL TSUNAMI INFORMATION SYSTEM WITH OFFSHORE, NEARSHORE AND ON-SITE NETWORK OBSERVATION EQUIPMENTS

永井紀彦[1]・加藤照之[2]・鵜田恭史[3]・泉　裕明[4]・寺田幸博[5]・三井正雄[6]
Toshihiko NAGAI, Teruyuki KATO, Kyoshi NUKADA, Hiroaki IZUMI, Yukihiro Terada, and Masao MITSUI

[1]フェロー　工博　(独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
[2]非会員：理博　東京大学地震研究所教授（〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1）
[3]非会員：工修　前（財）沿岸技術研究センター主任研究員（〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16-4F）
[4]非会員：環修　(財)日本気象協会首都圏支社主任技師（〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1-55F）
[5]非会員：工博　日立造船（株）技術研究所室長（〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11）
[6]正会員：理修　(株)カイジョーソニック海象グループリーダ（〒205-8607 東京都羽村市栄町3-1-5）

This paper introduces the Japanese experience of the offshore tsunami profile observation. For the tsunami profile detection sensors, newly developed two systems are introduced: one is seabed installed Doppler-typed Wave Directional Meter (DWDM), and the other is the GPS Buoy Tsunami Gauge. Plan of the Round-Japanese-Coasts and Round-Indian-Sea Offshore Tsunami Monitoring Network is also introduced in the paper. Real-time data processing will be conducted at the Data Center. Satellite data communication system with self electric energy supply by the coastal wind-power-generators and battery should be applied to keep the continuous data communication without interruption in case where stable electric power is difficult to be obtained.

Key Words: Tsunami, Observation, Information, Real-time System, NOWPHAS, GPS Buoy

1. はじめに

スマトラ沖地震津波を契機に津波監視網の構築の必要性が強く認識されている。地震波の伝播速度は津波より速いので、津波発生の可能性に関する第1報は地震観測データによらざるを得ない。しかし、地震の揺れと津波とは1:1に対応しないため、いわゆる空振り警報が多く発令され、実際の避難を促しにくい状況が生じているのが現状である。このため、直接観測された津波波形記録を活用し、情報の信頼性を高めることが重要となる。警報解除の判断にあたっても、観測データに基づく合理的な根拠が求められる。本研究は、沖合・沿岸・オンサイトといったさまざまな津波観測機器の特徴を、実際の津波観測データを本に紹介するとともに、これらの観測機器を組み合わせた総合的な津波観測網の構築にあたっての、システムの基本設計を試みるものである。

2. 既存津波観測機器の特徴

巨大津波は、特定海岸に限って考えれば，数十年あるいは数百年といった長い時間間隔をおいて来襲する現象である。このため、津波観測網や情報システムが緊急時に有効に機能するためには、長期間にわたる日常を通じた良好なシステムの運用・維持・管理が必要となる。すなわち，常時においても観測システムが提供する情報が有効に社会に発信され、社会からのシステムに対する正当な認知が継続することが、不可欠となる。従って、津波観測機器は、津波を観測するばかりではなく、波浪・潮汐・高潮などの、津波よりもより頻繁に発生する海象の観測監視にも機能することが必須要件となる。津波観測だけをターゲットとした観測網の維持管理は，長年にわたって継続することは困難である。

表-1 は，観測ポイント毎に想定される津波波形

観測機器の分類を示したものである。津波の観測機器は、水深 50m を超える大水深海域、水深 50m 以下の沿岸浅海域および海岸線近傍のオンサイトポイント（岸壁前面または陸域）といった、観測ポイントによって分類可能である。ここで、水深 50m という基準は、人間による海底作業限界水深であり、定期的に清掃を要する海底設置センサーの設置限界と考えられている水深である。

全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）は、沿岸浅海域における海底設置式波浪計ネットワークとして構築され、近年発生した津波に関して沖合の波形記録の観測に成功している[1]。海象計[2]は、常時波浪の方向スペクトル観測や沖合での潮位観測を単一の海底設置式センサーで実現した、ナウファスネットワークにおける中心的な計測機器である。

大水深海域における津波観測は、かつては困難であると考えられていた。しかし、津波を沖合でいち早く捉えるためには、水深 50m 以下に限定される海底設置式波浪計だけでは、十分とは言えない。このため、1993 年北海道南西沖地震津波の後、海底設置式水圧式津波計が、十勝沖・三陸沖・駿河湾沖などの大水深海域に設置された[3),4)]。これらは、数十 km にも及ぶ海底ケーブル工事を伴う高価なシステムである。アメリカ合衆国では、ツナメータと呼ばれる大水深海底の水圧変動計測を行うシステムを開発・展開中である[5)]。ツナメータは、長大な海底ケーブルの敷設のかわりに、海底設置水圧計から超音波水中伝送技術を用いて洋上ブイにデータを回収し、無線で陸上基地局にデータ伝送するものであるが、こうした水中における切れ目のない連続的なデータ伝送システムの長期安定性は、まだ十分に示されていない。いずれにしても、大水深海域では常時の波浪による水圧変動は海底まで到達しないので、大水深海底水圧式津波計は、常時波浪観測機能を有しない問題がある。また、気圧・水温・塩分濃度等による圧力変動の影響も大きいので、津波による水位変動を正しく抽出することは容易ではない。このためリアルタイムでの津波監視には、実用上適用が困難である。水圧センサーが老朽化した場合、センサーのメンテナンスや交換ができないため、海底ケーブルを含めてシステム全体の更新が必要となる問題点も残されている。

こうした海底設置式水圧式津波計の問題点を解消したシステムが、ＧＰＳ津波計測システムである。ＲＴＫ法を用いた陸上基地局との比較観測によって、ＧＰＳブイが陸上基地局から 20km 以内に設置されれば、1cm の精度で、毎秒のブイの上下変動を計測することができるので、適切な数値ローパスフィルターによって波浪による短周期成分を除去すれば、リアルタイムで周期数分から数十分の津波波形を検出することが可能であり、大水深海域でのリアルタイム津波監視を可能としたシステムである。潮汐による沖合水位変動や、比較的周期の長い波浪観測にも有効に機能することが、大船渡沖や室戸沖の観測結果から明らかにされている[6),7)]。ただし、係留系やブイ動揺の影響補正が困難なため、周期５秒未満の短周期波浪成分や、波浪の方向スペクトル（波向）観測への適用技術は、まだ確立されていない。

岸壁前面または陸域のオンサイト津波観測は、センサーの設置や維持が沖合観測に比べて簡易かつ安価であり、かつ直接的な津波の影響把握ができる長所を有しているため、沖合津波観測に併設して津波監視ネットワークを構築することが望ましい。オンサイト観測の典型的なものは、全国の主要港湾に展開設置されている検潮所である。多くの検潮所では、井戸内のフロートの上下変動を記録するワース型検潮器が採用されている。しかし、検潮井戸は、もともと周期 12 時間以上のゆっくりとした海面変動を捉えることを目的に建設されたものであり、周期の短い波浪による変動成分を取り除くため、細い導水管によって井戸内の海水と外海の海水がつながる仕組みになっている。津波の周期は、波浪と天文潮汐の間に位置するため、検潮所によっては津波による海面変動に応答しきれずに、津波を過小に評価してしまう問題が残されている。こうした問題を解決し、オンサイトにおける津波や津波に伴う越流を直接測定することができるシステムが、空中発射型超音波式潮位計[8)]、あるいはオンサイト越波計[9)]である。

表-1　想定される津波波形観測機器の分類

設置位置	センサー	計測項目	設置[illegible]
大水深（10m以上）	ＧＰＳブイ	波浪・水温・風速・潮位	
	海底水圧計	津波・（周期）・（潮位）	気圧・水温等補正
浅海域（10m以下）	海底設置型または水圧計	波浪・津波・風速・潮位	
岸壁（岸壁前面）	井戸内フロート	（津波）・高潮・潮位	井戸[illegible]
	海底設置または水圧計	波浪波・波浪・風速・潮位	
陸域	水圧計型または[illegible]	波浪・陸上波浪	

3. ナウファスによる沖合津波観測

我が国沿岸の津波観測ネットワークのあり方を検討する際、既存観測網の評価が第一歩となる。ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）として運用されている、既存沿岸波浪観測網の適用性と限界を明らかにし、どのような観測網の増強が必要かを明らかにすることが、必要最小限の予算で津波観測網を構築するために、きわめて重要である。

図-1 は、既存の沿岸波浪計が、津波が沿岸に来襲する何分前に沖合での津波波形を捉えることが可能かを、試算した結果である。試算にあたっては、各波浪計の設置水深と離岸距離をもとに、一様海底勾配を仮定した。波浪観測点毎に、丸印の大きさで、波浪計から沿岸に至る津波伝播時間を、5 分未満、5 分以上 10 分未満、10 分以上の 3 段階表示した。

沿岸波浪計の設置水深は 20～50m の範囲に多く、離岸距離（海底ケーブル延長）は 2～5km の範囲が多い[10),11)]。こうした、比較的浅海域における波浪観測点においても、遠浅の海岸地形が見られる、敷別、石狩、十勝、酒田、新潟、石巻、小松島、志布

志などでは，既存波浪計で 10 分以上前における津波検知が可能である。また，北関東から福島に至る鹿島港沖（水深 24m），常陸那珂港沖（水深 30m），小名浜港沖（水深 24m）の波浪計でも，若干の海底ケーブル延長による沖合へのセンサー移設によって，やはり，既存システムの改良で 10 分以上前における津波検知が可能である。また，東京湾に来襲する津波を考えると，伊豆大島波浮港沖の波浪計は，1996 年イリアンジャヤ地震津波を東京湾口久里浜検潮所よりも 30 分余り早く観測した実績がある [10]。離島に陸上観測局を置く津波観測は，津波の事前検知にあたって重要である。

これに対して，急勾配な海底地形を有する北海道南西海岸，三陸沿岸，東海沿岸，紀伊半島沿岸，四国太平洋岸，南西諸島沖縄沿岸などでは，多くの既存ナウファス波浪計では，津波事前検知時間は 5 分未満にとどまり，より沖合にＧＰＳブイなどの大水深津波計の配置が望まれる。

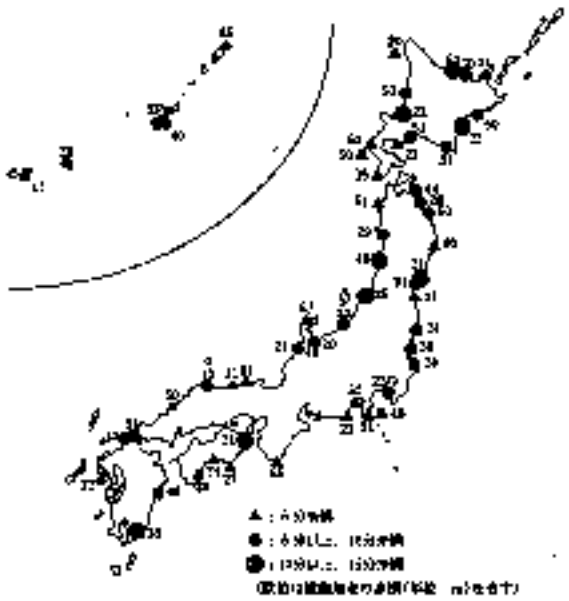


図-1　既設波浪観測点から沿岸への津波伝播時間

図-2 は，高知県室津港を例として，津波の伝播時間を計算し，図-1 より詳しい検討を試みたものである。沿岸の計算起点（ここでは室戸岬検潮所）から各方向に直線を引き，100m 毎の各区間の津波伝播時間を求め，区間伝播時間の和として 5 分前検知線，7.5 分前検知線，10 分前検知線および 12.5 分前検知線を求めたものである。海図をもとに作成した 500m 格子水深データを線形補間した水深を用い，100m の区間内は一様勾配を仮定し，長波の伝播時間を試算した。但し，既設検潮所と室戸岬漁港港口の間約 500m 区間は，水深 5m の一定水深を仮定した。図には，等深線によって海底地形形状を示すとともに，既設ＧＰＳブイやナウファス波浪計および気象庁検潮所の位置をあわせて示している。

2004 年 4 月に設置され，ナウファスの一環として沖合での波浪・津波観測に活用されているＧＰＳ津波計は，10 分前と 12.5 分前の津波検知線の間に位置していることがわかる。ＧＰＳブイは，陸上基地局アンテナから 20km 以内に設置されれば，設置水深には制約がなく 1cm 精度で海面昇降を計測することができるので，室戸岬沖のような急勾配大水深ポイントにおいても，沖合でのいち早い津波波形記録の捕捉が可能である。他方，ナウファス波浪計は，5 分前検知線上に位置している。ただし，この図は津波の伝播経路を直線として仮定したものであるので，平面的に屈折する津波の伝播特性を再現しているものではない。

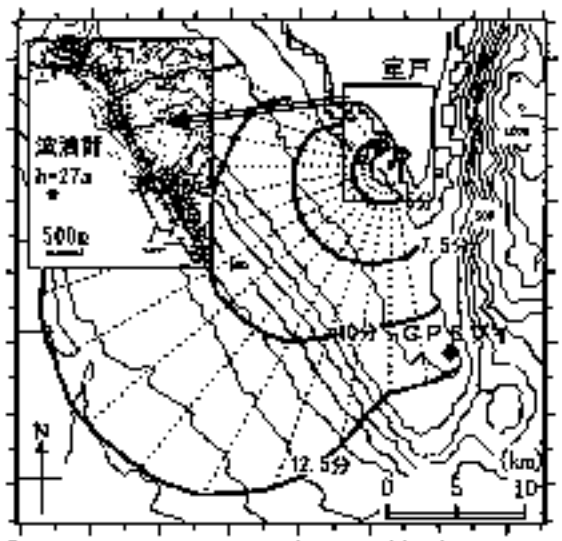


図-2　沿岸から沖合への津波逆伝播の検討例

4. 沿岸・オンサイト観測の組み合わせ

2004 年東海道沖地震津波来襲時の複合観測例を以下に例示する。図-3 は，室戸岬沖ＧＰＳブイ（水深 100m），室津港沖ナウファス超音波式波高計（水深 27m）および室戸岬検潮所における，波形記録を，あわせて示したものである。津波の第 1 波の極大値差を見ると，ＧＰＳブイでは 0:31 に 10cm，海底設置波浪計では 0:32 に 22cm，港内検潮器では 0:40 に 82cm を示し，沖合では港内より 8～10 分程度早く津波を観測することが改めて実測データから示されるとともに，沖合から港内にかけての津波の増幅も明らかにされた。

ただし，試算された時刻差と実測とは，完全に一致しなかった。沿岸波浪計と港内検潮所との津波到達時刻差は，図-2 では 5 分程度と試算されたのに対し，図-1 では 8 分の時刻差があった。他方，ＧＰＳブイと港内検潮所との津波到達時刻差は，図-2 では 11 分程度と試算されたのに対し，図-3 では 9 分であった。こうした，津波到達の推定時刻差と実測との相違の原因は，必ずしも明らかではない。図-2 では，直線的な津波伝播を仮定し，屈折などによる津波伝播方向変化を考慮していないことも，

誤差要因の一つになっていると思われる。今後の数値シミュレーションによる詳細な検討が望まれる。

図-4 は、3 観測点の周波数スペクトルを比較したものである。沖合では双峰型のスペクトル形状が見られたが、検潮所では周期の短い（0.013Hz：約 8 分周期）ピークの増幅が著しく、スペクトルは単峰型となっている。このことは、室戸岬漁港内においては、周期 8 分程度の海面変動が増幅されやすい共振周期となっていることを意味している。**図-4** は、沖合津波観測波形記録から沿岸に来襲する津波を、周波数応答特性を用いて推定できることを意味しているものでもある。沖合・沿岸・オンサイトの観測を組み合わせることによって、津波の特性をより精緻に把握することができることを示す一例である。ただし、既存検潮記録は、固有の井戸周波数応答特性を有しており、周期の短い津波高を過小評価する恐れがあることには注意が必要である。

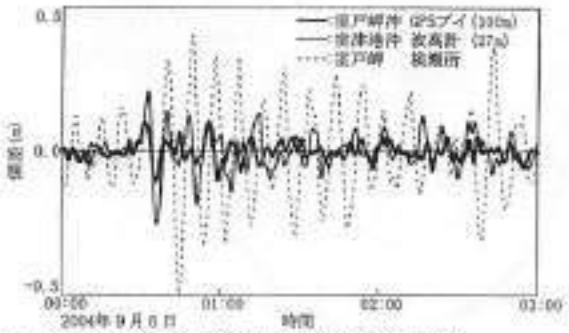


図-3 2004 年東海道沖地震津波波形記録

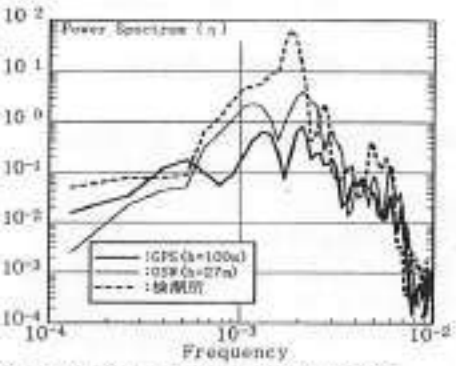


図-4 津波の周波数スペクトル応答

5. 日本沿岸と環インド洋津波監視システム

図-5 は、日本沿岸における沖合津波観測点ネットワークの構想を示したものである。図中には、過去に日本列島を襲った近海地震による津波の初期波源域をあわせて表示している[13]。

津波観測点における観測情報は、ネットワークとしての活用が重要である。例えば、2003 年 9 月 26 日 4:50 に発生した十勝沖地震の津波第 1 波最大偏差は、十勝港沖の海象計では 5:14 に観測されたが、その後、久慈港沖の海象計では 5:31 に、大船渡港沖のＧＰＳブイでは 5:50 に、石巻港沖の海象計では 6:20 になって観測されている[14]。すなわち、ある港の沖合津波観測情報が、速やかに全国情報として伝達されることによって、沿岸全域の津波防災に貢献することが可能である。こうした観点からも、沿岸津波観測網はなるべく密に設置されるべきである。観測点の沿岸配置間隔は、想定波源域の 1/2 程度の空間スケールを、めざすこととした。

沿岸を襲う津波には遠地津波もあるので、離島沖合海域は、有効な遠地津波を捉える観測点である。日本近海で大津波が発生すれば、津波は国内沿岸ばかりではなく、周辺諸国の沿岸をも襲うことが懸念される。国際的な防災活動の一環として、離島や岩礁の新たな観測地点としての活用は、21 世紀における国際協力の新しい形態となりうるものである。

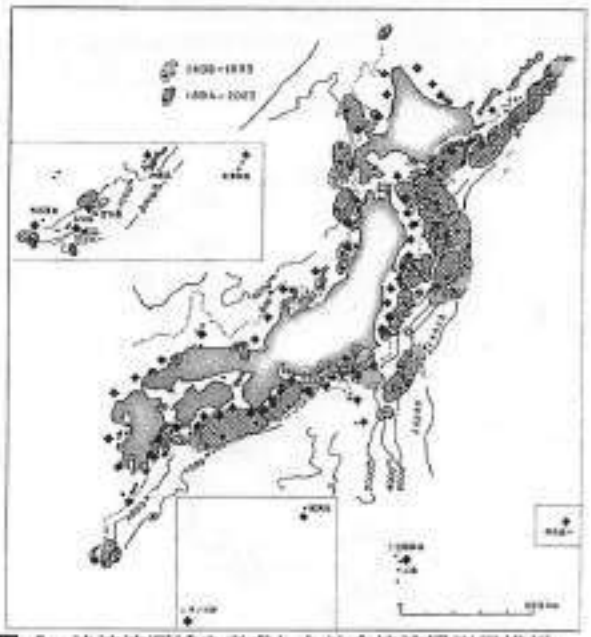


図-5 津波波源域を考慮した沖合津波観測網構想

図-6 は、インド洋沿岸に、こうした考えをあてはめ、沖合津波観測網の提言を試みたものである。2004 年スマトラ沖地震津波は、多くのインド洋沿岸諸国に多大な被害をもたらした。この津波の初期波源域は、1000km にも及ぶと推定されているが、複数の津波波源に波源域が分かれているとの説もある。適切な空間スケールの把握は困難であったが、200－300km 程度の間隔を仮に設定した。

津波情報網の基本設計にあたっては、観測情報の処理・解析・発表に係わる、ハードおよびソフト両面のシステム作りも、また重要である。

図-7 は、津波データセンターのシステムを試設計したものである。**図-5** あるいは**図-6** で示した各データモニタリング地点には、沖合・沿岸およびオンサイトの津波観測機器が配置される。常時においても波浪や潮汐などのモニタリングとして、データセンターでは 24 時間のデータ監視・管理・配信が行なわれなければならない。商用電源の安定供給が困難な離島や岩礁を活用した観測ポイントでは、風

力や太陽光を活用した、二酸化炭素を排出しない自前による電力供給が望まれる。こうした自然エネルギーは、供給における時間変動が大きいので、蓄電システムと一体として、安定的電源供給がなされる設計をしなければならない[15]。

図-6 環インド洋における沖合津波観測網構想

データセンターは、収集とデータ配信を行なうリアルタイム運用を行なう部分と、データバックアップと管理を行なうノンリアルタイム運用を行なう部分とに大別される。前者にはオペレータによる 24 時間システム監視体制の構築が不可欠である。

データセンターから配信されるリアルタイム情報は、ホームページで一般に公開される他、気象庁や自治体等の防災機関には、より確実な専用端末への配信が必要となる。この際、専用端末では、防災機関担当者が瞬時に観測情報を的確に判断し、いち早く警報発令の有無を判断できるような、わかりやすい情報表示が重要となる。

図-8 は、津波波形記録の観測と情報表示の時間的な経過概念を示したものである。図中の波形観測記録は、数値的なローパスフィルターによって波浪等の短周期成分を除去し、あらかじめ予測可能な天文潮汐成分を除去した、いわゆる潮位偏差成分を示した沖合水位経時変化図を意味している[1]。

津波の周期は、初期波源域の空間スケールによって決まるが、マグニチュード 8 クラスの大型地震の場合、40 分を超えることも多い。津波観測波形を完全に把握してからの情報発信では、防災情報としては、遅くなりすぎる。このため、津波データセンターからの津波観測情報の発信は、①偏差が閾値を超えた場合の津波観測第 1 報、②はじめの極大水位（引き波から始まる津波の場合は極小水位）を検出した時点での第 2 報、津波波形の第 1 波の山と谷を捉え、③第 1 波の波高と周期が明らかになった時点での第 3 報、というように時間を追って、段階的に精度が高まっていく情報発信法を提案する。

第 1 報は、言うまでもなく、住民にいち早く危険を知らせるための情報である。津波の高さは正確にはわからなくても、閾値以上の偏差が観測された場

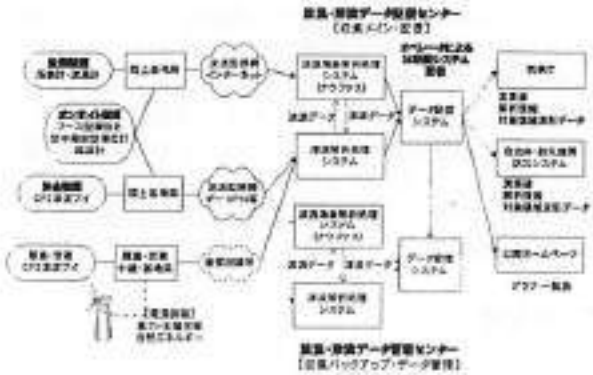


図-7 津波データセンターのシステム

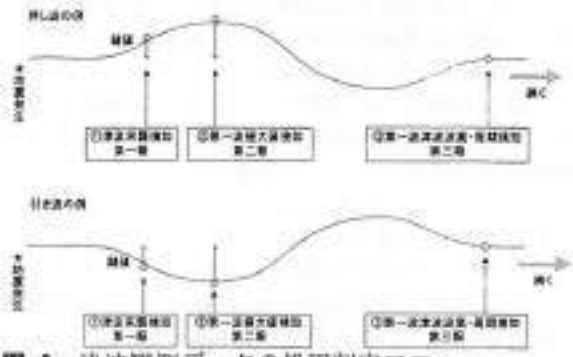


図-8 津波観測データの処理判定フロー

合には、速やかな情報発信が必要である。閾値の設定は、本来は、図-3 や図-4 で示した観測事例からわかるように、沖と沿岸の応答関数を根拠にするべきである。しかし、応答関数は周波数によって異なるため、津波の周期がわかる前には、推定が困難である。このため、この時点では、津波高は水深 1/4 乗に逆比例する断面近似を用いて設定せざるを得ない。津波高が水深の 1/2 を超えた時点で砕波すると仮定し、沿岸における最大津波高が 1m を超えると予想される場合（すなわち水深 2m で津波偏差が 1m を超えると予想される沖合での偏差閾値とする場合）に第 1 報を発信するとすれば、

- 津波計水深が 10m なら　偏差 65cm を閾値
- 津波計水深が 20m なら　偏差 55cm を閾値
- 津波計水深が 50m なら　偏差 45cm を閾値
- 津波計水深が 100m なら　偏差 35cm を閾値
- 津波計水深が 200m なら　偏差 30cm を閾値

とするような設定が考えられる。ただし、津波伝播過程における屈折等の影響で、津波高は局所的な変化が大きい。このため、上記の閾値は、観測点位置毎に適切な値を検討しなければならない。

第 2 報の段階でも、やはり、津波の周期はまだわからないが、津波高は水深 1/4 乗に逆比例する断面近似を行なうことによって、沿岸での最大津波偏差の予測が一応可能となる時点である。第 1 報によって避難を始めた避難者が、どの程度の高所まで避難すればよいかを判断する目安となる情報として、第 2 報も重要である。

第3報の時点では、津波の周期がわかるので、事前に予測されている応答関数を用いて、沿岸における津波高の予測精度が、高められる。このため、遅滞なく第3報を発信することもまた重要である。さらに、第3報の時点では、オンサイトの津波観測データも得られているであろうから、より精度と信頼性の高い情報となる。避難解除の判断にあたっては、第3報以降のモニタリング情報が重要である。

6. まとめ

(1) 各種津波波形観測機器の特徴と適用範囲をとりまとめた。
(2) 2004 年東海道沖地震津波来襲時の複合観測例を述べ、津波到達検出時刻について考察した。
(3) 全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）のシステム運営の現状と改良構想をふまえ、多観測点多項目にわたる津波観測情報の合理的なリアルタイム収集解析表示発信システムを考察した。
(4) これらの検討結果を総合し、沖合大水深津波計・沿岸波浪計・港内検潮機器・オンサイト超波計などを併設する合理的な観測網のあり方をとりまとめた。安定的な電源供給が困難な場合の、風力発電等の独立電源についても言及した。
(5) 観測網から得られる津波波形情報を、いち早く活用するための情報伝達体制について、システムの基本的な要件を整理し、試設計を試みた。

7. おわりに

津波観測網が津波来襲時に有効に機能するためには、データセンターから日常の波浪や潮位などの海象観測情報が有効に発信され、かつ日常の情報が多くの関係者に有効に活用されていることが重要である。日常的に人々の目に触れていないシステムが、緊急を要する津波来襲時にただちに有効に機能するようになることは、きわめて困難であろう。

本稿では、こうした観点から、現存する波浪観測情報提供システムであるナウファスの機能強化という観点から、津波観測網の改良的構築を提言した。何もないところから新しいシステムを構築するよりは、既に存在するシステムを津波観測に応用する方が、はるかに、予算的にも人員的にも少ない投入によって、必要とされる津波観測情報網を構築できるからである。

本稿のとりまとめにあたっては、(財) 沿岸技術研究センターの日本沿岸津波観測網の構築に関する基礎調査検討委員会の委員各位から貴重なご指導およびご助言をいただいた。また、ナウファスは、長年にわたる運輸省（現国土交通省）港湾局関係機関の相互協力の下に構築・運営されてきたシステムである。さらに、ここで紹介したＧＰＳブイシステムは、(独) 港湾空港技術研究所が東京大学地震研究所・(財) 人と防災未来センターおよび日立造船（株）とともに、文部科学省の補助金を受け、気象庁・大船渡市・室戸市のご協力を得て、開発したものである。関係各位に改めて謝意を表する。

参考文献

1) 永井紀彦・小川英明・福田若史・久高将信：波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用，土木学会，海岸開発論文集第 20 巻，pp.173-178，2004.
2) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・服部康雄・鈴木敬夫：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海岸工学論文集第 42 巻，土木学会，pp.1081-1085，1995.
3) 平田賢治：津波予測－リアルタイム津波予測を中心に－，月刊地球 Vol.27，No.3，(通巻 309) 号，海洋出版 (株)，pp.159-165，2005.
4) 馬場俊孝・平田賢治：沖合での海底水圧観測による沿岸津波高の予測，月刊地球 Vol.27，No.3，(通巻 309) 号，海洋出版 (株)，pp.197-201，2005.
5) E. N. Bernard・Frank I. Gonsalez・Vasily V. Titov (佐竹健治・平田賢治訳)：ツナメータと米国におけるリアルタイム津波予測，月刊地球 Vol.27，No.3，(通巻 309) 号，海洋出版 (株)，pp.210-215，2005.
6) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：ＧＰＳブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集第 50 巻，土木学会，pp.1411-1415，2003
7) 加藤照之・寺田幸博・越村俊一・永井紀彦：ＧＰＳ津波計による津波観測，月刊地球 Vol.27，No.3，(通巻 309) 号，海洋出版 (株)，pp.179-183，2005.
8) 永井紀彦・菅原一晃・清水康男・高山俊裕・小淵みちる：超音波空中発射式潮位計の開発，港湾技研資料 No.998，17p.，2001.
9) 永井紀彦・平石哲也・高部百樹・安田誠宏・高山俊裕：オンサイト超波計の開発と現地適用性，海岸工学論文集第 50 巻，土木学会，pp.626-630，2003.
10) 菅原一晃・永井紀彦・佐藤和敏・川口浩二：全国港湾海洋波浪観測施設台帳（ナウファス施設台帳Ⅲ），港湾技研資料 No.961，49p.（付録 339P.），1999.
11) 永井紀彦・里見茂：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2003)，港湾空港技術研究所資料 No.1094，89p.，2005.（1970 年版から 2002 年版までの各年の波浪観測年報も港湾（空港）技研資料として既刊）
12) 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：1996 年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技研資料 No.842，96p.，1996.
13) 羽鳥徳太郎：日本沿岸における津波波源，津波エネルギー分布，月刊地球 Vol.27，No.3，(通巻 309) 号，海洋出版 (株)，pp.166-170，2005.
14) 永井紀彦・小川英明：平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震津波波形の特性，港湾空港技術研究所資料 No.1070，92p.，2004.
15) 永井紀彦・牛山泉・根本卓行・川西和昭・福田若史・鈴木靖・乙津孝之：現地実証試験と風況シミュレーションに基づく沿岸風力開発システムの合理的構築：自然エネルギー利用総合セミナーテキスト，足利工業大学総合研究センター，pp.1-10，2004.

［参考資料2005-4］

津波予測

GPS津波計による津波観測

加藤照之
寺田幸博
越村俊一
永井紀彦

Tsunami observation using a GPS buoy

Teruyuki Kato・Yukihiro Terada・Shunichi Koshimura・Toshihiko Nagai

かとう てるゆき　：東京大学地震研究所
てらだ ゆきひろ　：日立造船㈱技術研究所
こしむら しゅんいち：人と防災未来センター
ながい としひこ　：港湾空港技術研究所

大船渡実験の成功をふまえて新たなGPS津波計を2004年4月に室戸岬の12km南方に設置し，2004年9月5日東海道沖地震に伴う津波を検出することに成功した．GPS津波計の開発の経緯を概観し，今後の可能性と課題を探る．

1. 開発の経緯

GPS測位技術の中でも，リアルタイムに移動体の位置を1cm程度の精度で推定できる技術をRTK-GPSと呼ぶ．GPSアンテナを海洋に浮かべたブイに搭載して海面高変化をリアルタイム監視すれば，津波を海岸への襲来前に検知することが可能であり，津波防災に役立たせることが可能であろう．このようなアイデアをもとに，日立造船㈱技術研究所と東京大学地震研究所は平成8年(1996年)頃からGPS津波計の開発を進めてきた．

まずはRTK-GPSで海面変動が検出できるかどうかを検討するために，手で持てる程度の小さなブイを作り東大地震研油壺地殻変動観測所の近くの海にブイを浮かべた．データ伝送はいわゆる特小無線を用い，陸上の基地にリアルタイム伝送した．実験は1997年1月に2日間程度実施され，実際に海面の状況を基地局で確認することに成功した[1]．

この成功を受け，本格的なブイの作成にとりかかった．単一のブイにアンテナを載せた場合，風波によるブイの動揺が海面高度計測に雑音となるため，GPSアンテナを搭載するブイは縦に長いいわゆるスパー型のブイとし，受信機や伝送装置などを搭載したブイと離して設置する方式を採用して実験を行った．実験は同じく東大地震研油壺地殻変動観測所近傍の相模湾内で1999年3月に行った．2週間ほどの実験であったが，ブイの海面高への追随性能や強風時のデータ伝送の信頼性等について，性能を確かめることができた[1]．

以上の基礎実験を通じて，GPSブイが津波を検知する充分な能力を有することが確認できたため，続いて本格的な実用化を目指した実験を行うこととした．GPSブイの設計はブイの設置場所に大きく依存する．このためまず設置のための適地を検討したが，津波の常襲地域である三陸沿岸の

図1　GPS津波計を設置した地点

岩手県大船渡市沖に設置することとなった．設置海域は大船渡湾を出てすぐのところで，陸上の基地局からは 1.6km 離れた海域である．ブイはアンテナ・受信機一体型のものとし，ブイ躯体の直径は 2.8m，水面上高さ 6.4m，重さ 9.7t とかなり大きなものとなった．水深は約 50m で係留方式は 3 点係留とし，伝送には油壺と同じ特小無線を用いた．大船渡市には市役所と消防署にモニターを置いて常時監視をして頂くなどの協力を得た．実験期間は 2001 年 1 月から 2004 年 1 月までの 3 年間であり，この間 2001 年 6 月のペルー沖地震や 2003 年 9 月十勝沖地震に伴う津波の検知に成功した．

これらの基礎的な実験を通じ，RTK-GPS によって津波を 1～2cm の精度で検出することが可能なこと，厳しい気象海象条件の中でも安定して長期にシステムを運用できること，などを検証し，様々なノウハウを蓄積してきた．

2. 室戸岬沖の GPS 津波計

以上の基礎的な実験を経て，2002 年度から文部科学省補助金（独創的革新技術開発研究）によって本格的な実用化実験を開始した．大船渡沖実験は沿岸からわずか 2km 弱のところで実施されたが，GPS 津波計を防災に生かすためにはなるべく

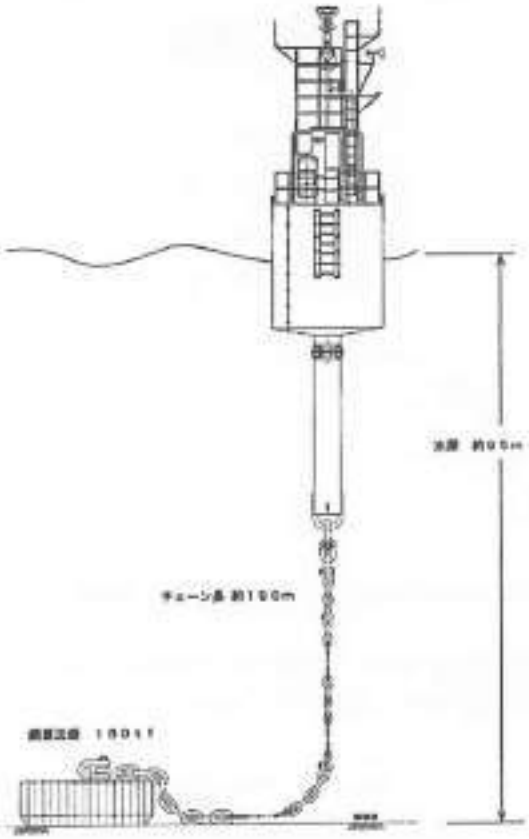


図2　室戸岬沖に設置したGPSブイシステム．

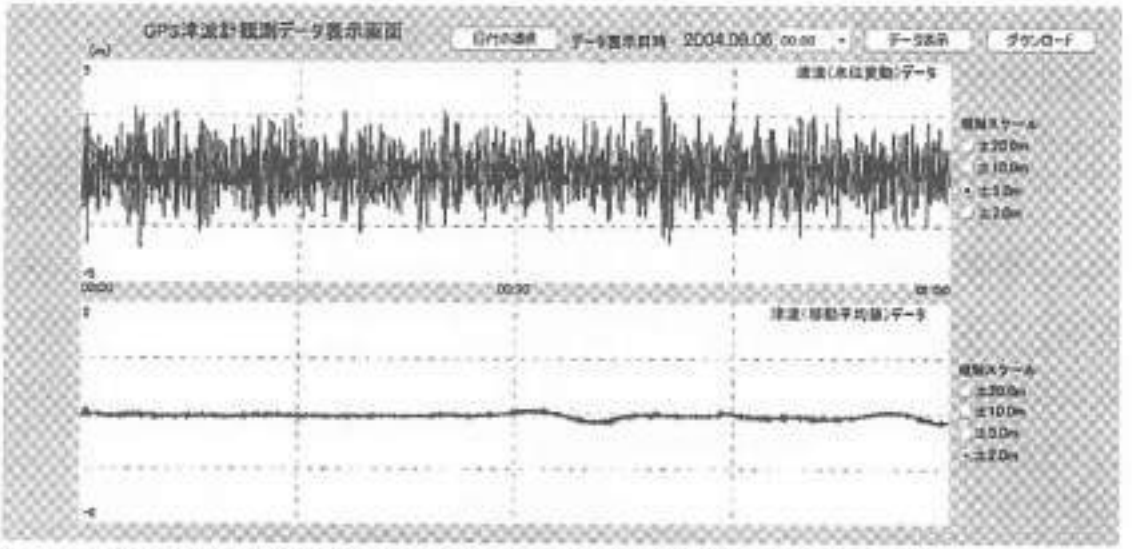


図3　2004年9月5日23時57分(JST)東海道沖地震に伴うGPS津波計のリアルタイムモニタ画面.

陸から離れた沖合いで観測し，津波の検知から海岸への襲来まで充分な時間間隔を確保しなくてはならない．一方，あまり沖合いの大水深のところでは津波波高が小さすぎて検出が困難になる．また，本格的な津波計というからには様々な機能が，様々な環境条件下で十分に発揮できるようでなければならない．さらには，せっかくの海洋ブイであるから海洋情報や海洋気象情報が常時伝送できれば様々なことに役立つであろう．また，効果的な津波防災を実現するためには津波の計測（監視）と数値シミュレーション（予測）を併用することが望ましい．これらのことを考慮し，この研究では日立造船㈱と東大地震研のほか，津波や波浪の研究でこれまで実績のある「人と防災未来センター」と「海洋空間技術研究所」の研究者を加えた4機関の共同研究とすることとした．

前述のような要請を満たす高機能ブイを新たに設計し，高知県室戸岬沖約12kmの地点に設置することとした（図1）．GPSブイは大船渡に設置したブイより一回り大きい直径3.4m，海面高6.9m，重量17tonとなり，水深が約95mと深いことから1点係留とした（図2）．また，GPSデータを受信するための基地局は気象庁室戸岬測候所構内の高さ約40mの測風塔とした．この塔の先端に基地局用のGPSアンテナと無線装置を設置し，階下に処理装置等を設置して，ここからVPN技術を用いて海面高変動をインターネット上で公開することとした．2004年4月11日にGPSブイを設置し，同年5月からデータをインターネットを通じて配信した（http://www.tsunamigps.com/）．

2004年は日本列島を襲う台風の数が多く，特に同年6月21日には台風6号が，室戸岬付近に上陸した．この際には両振幅で最大20m近い波高を記録したが，データはほぼ完全に取得することができた．その後，2004年夏季に近傍を通過したいくつかの台風にも，一度も重大なトラブルなくデータを取り続けており，耐候性については初期の目的をクリアしている．

3. 2004年9月5日東海道沖地震に伴う津波記録

大船渡沖での観測では，すでに2001年ペルー沖地震津波と2003年十勝沖地震津波の2回の津波の検出に成功しているが，2004年9月5日に東海道沖で発生した地震（M7.4）に伴う津波も問題なく検出することに成功した．この9月5日にはまず

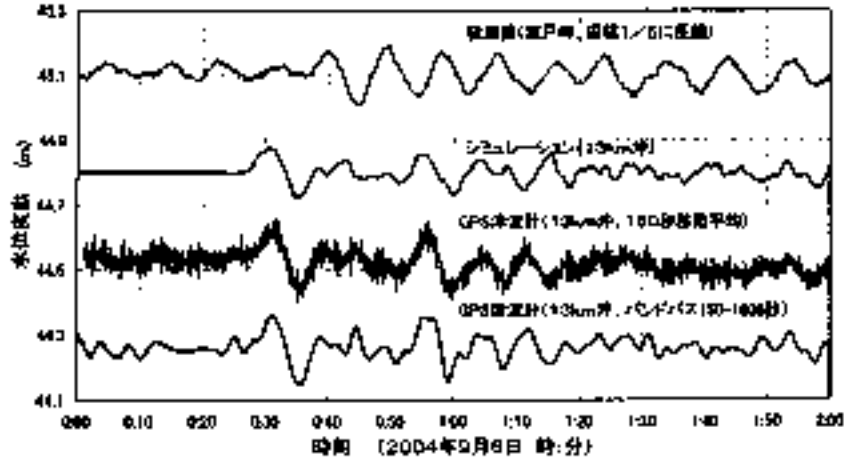


図4　(最上段) 室戸岬検潮所記録. 振幅を 1/5 に縮小してある. (上から2段目) 数値シミュレーションによる波形 (上から3段目) GPS津波計記録, 150 秒の移動平均処理波. (下段) GPS津波計記録, 150–1500 秒のバンドパスフィルター処理後.

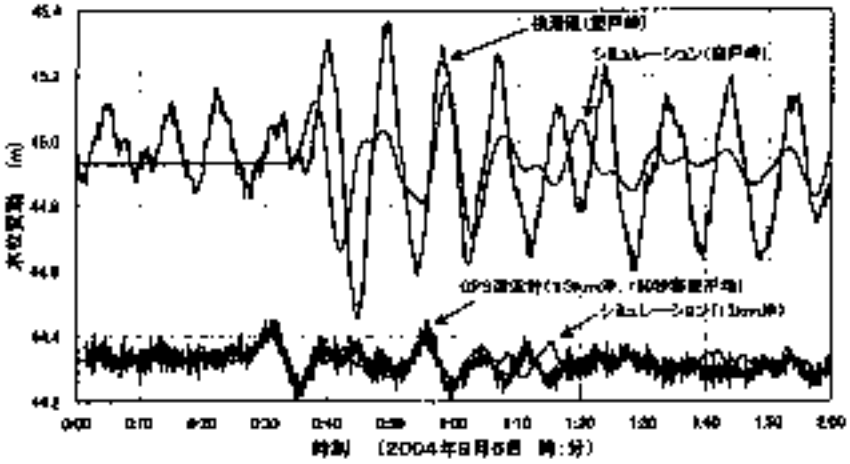


図5　潮位記録とシミュレーション結果の比較. (上段) 室戸岬検潮所, (下段) GPSブイ.

日本時間午後7時7分に1回目の比較的大きな地震が紀伊半島南東沖に発生した. この地震においても西南日本の太平洋沿岸に津波注意報が発令された. あいにくこの日は台風の余波で室戸沖は波高が両振幅で数 m 程度と高く, フィルター処理後もこの7時7分の地震による津波は, 検出が難しい. 続いて同日の日本時間午後 11 時 57 分に最初の地震の東側で本震と思われる地震が発生した. この地震では串本で最大 0.9m, 神津島でも最大 0.8cm の津波を記録したほか室戸岬検潮所においても 0.5m の津波を観測した. 図5はこの時の GPS 津波計の Web 上の記録を示す. 上段は比較的短周期の波を描いており, 振幅が数 m に達していることを示している. 一方下段は, 同じ時刻の記録であるが, 60 秒の移動平均をとったものを示している. 下段の記録は周波がほとんど取り除かれてかなり平滑化しており, 振幅が小さいものの津波と思われる潮位の変化を描いていることがわかる.

図4はこの地震の直後の 2004 年 9 月 6 日 00 時～02 時 (JST) の 2 時間の海面変動についての時系列を並べて比較したものである. 最上段は室戸岬検潮所の記録 (15 秒毎) であり, 振幅を 1/5 に縮小してある. 上から3段目が GPS 津波計による記録であり, 150 秒の移動平均をとったものである. リアルタイム表示画面よりは長いフィルターをかけて短周期の雑音を充分除去している. どの程度の周期のフィルターが最適か, を見出すのは今後の課題であろう. また, 上から2段目には数

値シミュレーションによる津波予測波形である．シミュレーション結果では0時24分頃からわずかな引き波で始まり続いて波高約10cmの押し波が来る．観測波形では最初の引き波は雑音に埋もれて判別はできないがその後の押し波から，引き続く第二，第三の波も大変良くシミュレーションと調和している．なお，最下段には150－1800秒のバンドパスフィルター操作後の波形をみず，いずれにせよ，今回観測された津波波計はシミュレーション結果と長時間にわたってほぼ一致するという成果を得ることができた．

また，検潮所と津波計の津波到達時刻を比較すると，津波計のほうが3分程度早く到達していることがわかる．これもシミュレーションなどからの推定とほぼ調和的である．10分程度の時間差をどのように評価するかが難しいが，あらかじめ地域の津波防災計画の中にこのような情報を事前に含めておけば，より大きな津波が予想される場合にも迅速な避難勧告には有効なのではないだろうか．

一方，図5は室戸岬検潮所における潮位記録とシミュレーション結果を比較した図である．定性的での比較では必ずしもよくあっているとはいえない．前述したようにこの日は台風の余波で海が荒れており，津波襲来前から土佐湾には固有振動と思える10分程度の周期の波が観測されている．津波とこの固有振動が共鳴を起こしたようにも見えるが，原因はともかく，計算結果による予測よりもかなり振幅の大きな波が観測されていることがわかる．検潮所のような海岸近くでは海底の地形やメッシュマップには表現できない小さな地形による影響などシミュレーションでは再現が難しい要素があるが，沿岸からかなり離れた地点ではこうした影響がないため，シミュレーション結果との比較が容易である．このような良好な記録が得られれば逆に地震断層モデルの推定にも役立つかもしれない．

4. 今後の課題と可能性

本研究により，室戸岬の10km以上沖合いでGPS観測を実施することにより地震による津波を精確に捕らえることができることを実証した．また，引き続く台風の襲来にもほぼ問題なくデータの取得ができたことは，GPS津波計が実用機として利用できることを示すことができたといえよう．しかしながら，より遠くに設置するとなると格段の困難が予想される．水深が深くなるとブイが巨大化しコストがかさむ他，データ伝送が通常の無線ではできずにたとえば海底通信を導入することが必要となる．また，津波波高も小さくなるため，津波検知は一層難しくなる．大水深・遠洋でのリアルタイム津波観測には海底水圧式のような別の手法が適当であるかもしれない．

シミュレーション結果との整合性は目立しいが，一方で検潮所での記録との整合性はまだ充分ではない．今後，津波の神合い観測とシミュレーションの結合により精密な津波予測を行おうとするにはシミュレーション手法の高度化が課題となるだろう．双方の技術を向上させると共に，効果的な津波防災システムの構築のためにこれらを総合的にかつ手軽に扱えるシステムの開発が必要であろう．

本研究ではもっぱらGPSブイの津波観測への適用に目的を絞っているが，GPSブイには各種の海洋・気象計測センサーを搭載しており，実質的に海洋観測の総合ステーションとなっている．津波監視ばかりでなく，多くの海洋，気象，水産研究への応用が期待される．

室戸岬検潮所の潮位記録は気象庁気候・海洋気象部海洋気象情報室から提供していただいた．

参考文献

[1] 加藤照之他 (1996)：GPS津波計の開発，月刊海洋，号外，No. 13, 38-42.
[2] Kato, T. *et al.* (2000)：Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, EPS, 52, 841-845.

［参考資料2006-1］

波浪観測網の強化による海の安全の確保
― GPS波浪計　2006年度より配備開始！―

永井紀彦
NAGAI Toshihiko
フェロー会員
(独)港湾空港技術研究所
海洋・水工部長

波浪観測の必要性

わが国は、四方を海に囲まれて海象条件が厳しいため、海洋および沿岸域の開発・利用さらに防災にあたっては、波浪や潮位などの条件を適切に評価しなければならない。このため、国土交通省は、港湾整備などを効率的に実施することを目的として波浪観測を実施してきた。

本稿では、国土交通省が実施している現在の波浪観測の状況と課題を紹介するとともに、今年度から配備を予定しているGPS波浪計について、その概要を紹介する。

ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）

1970年以来、国土交通省（旧運輸省）港湾局では、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS）[1]を構築し、日本全国の沿岸域における波浪観測の実施を通じて、沿岸波浪特性の把握に努めている。波浪の観測装置としては、波高と周期を測る超音波式波高計に海中超音波のドップラー効果を応用して3次元的な水粒子運動を測る機能を付加した、図-1に示す海象計が、標準的に採用されている。ナウファスは、図-2に示す60観測点（2006年4月）を有している。観測情報は、(独)港湾空港技術研究所で収集・分析され、港湾事業の計画・調査・設計・施工をはじめとした沿岸域の開発・利用・防災に幅広く活用されている。また、気象庁による波浪予測にも活用され、海の安全に貢献している。

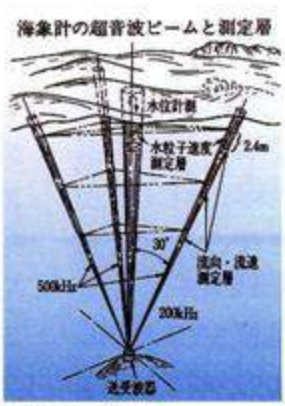


図-1　海象計の海底設置センサー（左）と測定原理（右）

GPS波浪計の開発と配備

海象計は、海底に設置されたセンサーを定期的に維持管理しなければならないので、潜水作業が可能な水深50m以浅の海底に設置する必要がある。水深50mでは、8秒よりも周期の長い波に対しては水深波長比が1/2以下となるため、海底地形による浅水変形や屈折の影響を受ける局所的な浅海波を観測することとなり、港湾技術者が設計などで必要とする海域を代表する沖波を、直接観測することはできない。このため、海底部の維持管理が不要で、より大水深海域における波浪観測が可能な、新たなシステムの開発が望まれていた。

(独)港湾空港技術研究所は、東

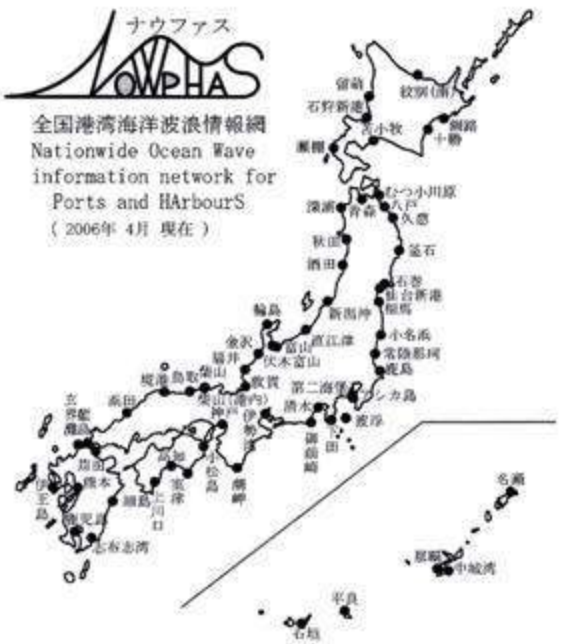


図-2　ナウファス波浪観測網（2006 年 4 月時点）

京大学地震研究所などとともに、GPS を活用することにより波浪・潮位・津波を観測できる沖合波浪計の実用化に向けた開発研究を進めてきた。図-3 に、GPS 波浪計の概念を示す。GPS 波浪計は、洋上ブイに設置された GPS アンテナの位置座標を正確に測って波浪や津波観測情報を得るため、海底での維持管理作業は不要であり、設置水深の制約はない。GPS 波浪計の実証試験機は、2004 年 4 月に高知県室戸沖 13km、水深 100m 地点に据え付けられた。この試験機は、全長 16m、直径 3.4m であり、上部 7.5m が海上に出ている巨大なブイであった。洋上ブイと陸上局での同時 GPS 測位を毎秒実施し、瞬時瞬時のブイ鉛直位置を cm 精度で測定することにより、大水深沖合海域における長周期から短周期に至る幅広い周波数帯の海面上下変動の計測を可能とした本システムは、2004 年国土技術開発賞最優秀賞および 2005 年日本産業技術大賞特別賞を受賞している。

この実証試験では、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島・東海道沖地震の際に、室戸岬検潮所で観測する 10 分前に津波を観測した[2]。また、同年 10 月 20 日の台風 23 号来襲時には、同ブイにより観測史上最高の有義波高（14.21m）が観測されており、大水深海域で正確な沖波情報の取得が可能な波浪計としての活用が可能であることが実証された[3]。

これらの実績を踏まえて、GPS 波浪計の設置を望む自治体は多い。また、港湾整備においても沖合における波浪情報の取得が有効である。このため、国土交通省港湾局では、GPS 波浪計を計画的に配備することとしており、平成 18 年度には、図-4 に示す地点に設置を予定している。

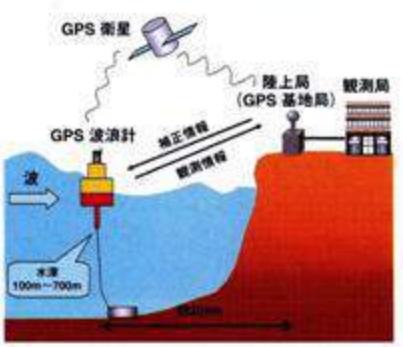


図-3　GPS 波浪計の概念

図-4　平成 18 年度 GPS 波浪計設置予定場所

GPS 波浪計の可能性

GPS 波浪計の全国配備は、沖合波浪観測情報の収集・分析・提供を通じたより効率的な港湾整備に資するものである。同時に、地震発生時には、長周期波である津波を、港湾への到達の数分から十数分程度前に観測することを可能とするため、関係機関と連携することにより、港湾を含む沿岸域での津波対策における迅速な対応にも活用できるものである。

参考文献

1) 永井紀彦・里見茂：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 2004）、港湾空港技術研究所資料 No.1118、pp89、2006、（各港波浪観測統計図表は CD-ROM 化）1970 年版から 2003 年版までの毎年の波浪観測年報も既刊
2) 永井紀彦・里見茂：2004 年東海道沖地震津波の観測結果、港湾空港技術研究所資料、No.1096、pp22、2005
3) 永井紀彦・里見茂：2004 年台風による高波の観測結果（NOWPHAS 2004 特別号）、港湾空港技術研究所資料 No.1100、pp65、2005

［参考資料2006-2］

DESIGN OF THE TSUNAMI MONITORING NETWORK SYSTEM BASED ON THE OFFSHORE WAVE OBSERVATION TECHNIQUES

Toshihiko Nagai, Port and Airport Research Institute, Kanagawa, Japan, nagai@pari.go.jp
Teruyuki Kato, University of Tokyo, Tokyo, Japan, teru@eri.u-tokyo.ac.jp
Kyoshi Nukada, Coastal Development Institute of Technology, Tokyo, Japan, nukada.cdit@k4.dion.ne.jp
Hiroyuki Izumi, Japan Weather Association, Tokyo, Japan, h_izumi@jwa.or.jp
Yukihiro Terada, Hitachi Zosen Corp., Osaka, Japan, terada_y@hitachizosen.co.jp
Masao Mitsui, Kaijo-Sonic Corp., Tokyo, Japan, m.mitsui@sonic.kaijo.co.jp

ABSTRACT

Development and improvement of the International Tsunami Monitoring System is getting its importance after the 2004 Sumatra-Off-Earthquake Tsunami disaster. This paper introduces the Japanese experience of the offshore tsunami profile observation. For the tsunami profile detection sensors, newly developed two systems are introduced, one is seabed installed Doppler-typed Wave Directional Meter (DWDM), and the other is the GPS Buoy Tsunami Gauge. Observed recent offshore tsunami profiles are introduced in the paper. These observation data proved that offshore tsunami observation is able to catch the exact tsunami characteristics several minutes before the coastal arrival. Plan of the Round Japan and Round Indian Sea Offshore Tsunami Monitoring Network is also introduced in the paper. Real-time tsunami profile detection data processing should be conducted at the Data Center.

KEYWORDS: NOWPHAS, Offshore Tsunami, Observation, DWDM, GPS Buoy, Data Center

1. INTRODUCTION

Establishment of the offshore tsunami monitoring network system is an urgent task for countries facing ocean. Nevertheless, as a huge disastrous tsunami is a rare event, it is difficult to make understand the importance of maintaining and operating the network system, if the system is applicable only for tsunami events. Therefore, the network system needs to be applied to monitoring not only tsunami but also daily sea conditions such as coastal waves and tides. This paper introduces a basic design of Japanese nationwide tsunami monitoring system, by improving the NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS) system (Nagai, 2002), and by using the newly developed GPS buoy system (Nagai et al., 2005a).

2. DWDM, GPS BUOY AND ON-SITE SENSORS

Table 1. Existing Tsunami Monitoring Sensors

Observation Site	Sensor Type	Observation Items	Note
Deep Sea (deeper than 50m)	GPS Buoy	Tsunami Waves,Tides	
	Seabed Pressure Gauge	Tsunami	Air Pressure and Water Temperature Correction
Shallow Sea (less than 50m)	Seabed Pressure or Acoustic Gauge	Tsunami Waves	
On the Coast	Tide Station with Tide Well	Tides,(Tsunami)	Filtering Effects Correction
	Acoustic Gauge	Tsunami (Waves,Tides)	On-Site Wave
	Overtopping Gauge	Tsunami Flow	On-site Flow

Table 1 shows various monitoring sensors for tsunami profiles in the different water depth areas.

Deep-sea zone is defined as the water depth 50m or deeper where routine maintenance work is not possible for the seabed installed sensors. Deep-sea sensors can detect tsunami profiles several minutes before its arrival on the coast. That is very important to prevent tsunami disasters. The earlier deep-sea tsunami sensor was seabed installed pressure typed one installed at water depth 1000m or deeper with seabed cable of several 10s km length connecting the seabed sensor and on-land station which enables real-time data acquisition. Seven pressure sensors were installed around Japan in between 1980 and 2000 (Hirata, 2005). Although such seabed sensor installation was very expensive for the seabed cable connection, once the seabed pressure sensor got out of use, it was impossible to repair the system. In addition, existing seabed- installed pressure gauge is not applicable for monitoring of waves and swells, for deep-sea wave actions do not reach the seabed. USA NOAA research group

recently developed Tsuna-meter system consisted of deep-sea seabed pressure sensor and a deep-sea data transmission buoy. It was reported that the wireless acoustic data transmission test between the seabed sensor and the surface was successfully conducted (Bernard et al., 2001 ; Bernard et al., 2005). Nevertheless, the Tsuna-meter system was applicable only for tsunami events and not for routine waves and tides. And the tsunami events are very rare, actual offshore tsunami observation data obtained by the Tsuna-meter system has not yet been reported.

On the other hand, Japanese coastal wave observation network, named as NOWPHAS consists of seabed installed shallow water acoustic wave gauges, successfully reported to observe offshore tsunami profiles (Nagai et al., 1996 ; Goda et al., 2001 ; Nagai et al., 2004a). **Photo 1** shows seabed installed Doppler-typed Wave Directional Meter (DWDM), which is a principal wave sensor of the Japanese NOWPHAS system (Takayama et al., 1994; Hashimoro et al., 1996). DWDM is able to observe wade frequency range of sea waves from short period wind waves to long period astronomical tides, storm surges and tsunamis, by using the ultrasonic acoustic waves.

Photo 1. DWDM Seabed Installed Sensor

Nevertheless, seabed acoustic wave gauge is applicable only for shallow water area with water depth 50m or less, for its routine maintenance necessity. From the point of view of earlier tsunami detection, such restriction is not favorable. A new wave, tide and tsunami meter for deep-sea area was desired.

Recently, GPS buoy tsunami detection system shown in the **Figure 1**, was newly developed (Kato, et al., 2001). And the field experiment of the GPS buoy system proved its applicability to offshore waves, tides and tsunami observation (Nagai, et al., 2004b). Real-Time-Kinematic method is used in the system with on-land reference GPS station within 20km from the buoy, which is further offshore area than the existing NOWPHAS seabed installed sensor stations. The first deep-sea GPS buoy system was installed in April 2004 100m deep and 13km off the cape (Kato et al., 2005). **Photo 2** shows the offshore installed GPS buoy.

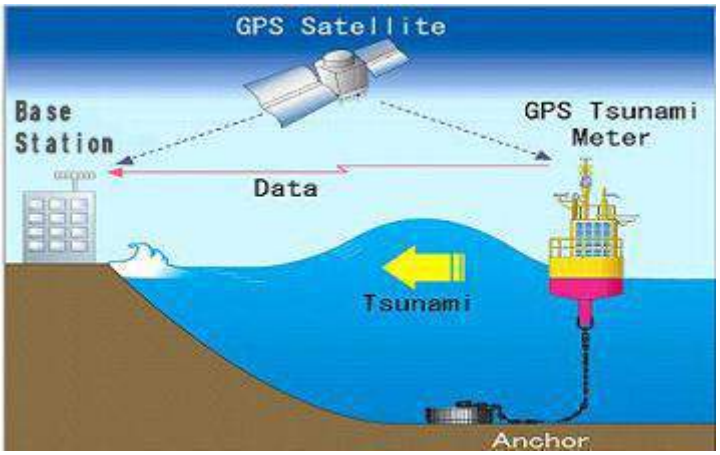


Figure 1. GPS Tsunami Detection System

Although GPS buoy system is able to detect offshore tsunami profile several minutes before arriving the coast, on-site tsunami observation is also important, for the need to understand the actual coastal situation. Therefore, it is recommendable that on-site tsunami sensors at the coast such as tide gauges and wave-overtopping sensors are to be installed together with the GPS buoys. For the coastal on-site observation, existing Fuse typed tide gauge is not recommended for the tsunami observation for its low-pass-filtered characteristics. In order to eliminate the high frequency components of sea waves, tide well water is connected to the sea with small pipe, which gives the

low-pass-filtered effects. Therefore, high frequency tsunami wave components may under-estimated, which gives us incorrect tsunami information. For the on-site tsunami detection, on-air acoustic typed tide gauge (Goda et al., 2002) or on-site wave-overtopping sensors (Hiraishi et al., 2004) are more recommendable.

Photo.2 Muroto-off GPS buoy

3. EVALUATION OF NOWPHAS FOR OFFSHORE TSUNAMI DETECTION

Figure 2 shows an example of tsunami transmission time estimation around the Muroto-Misaki area faced to the Pacific Ocean. In the area, the first deep-sea GPS buoy system was installed in April 2004, 100m deep and 13km off the cape (Kato et al., 2005). The on-land station of the station was located at the wind measurement tower of the Muroto-Misaki weather station of the Japan Meteorological Agency (JMA). In the area, also exist NOWPHAS seabed acoustic wave station 27m deep and the JMA tide station inside the Muroto-Misaki fishery port. Tsunami transmission time from the offshore station to the coast is roughly estimated by assuming that tsunami velocity is $(gh)^{1/2}$, where g is the gravity acceleration $(9.8m/s^2)$ and the h is the local depth. In the **Figure 2**, tsunami transmission time was estimated from the JMA tide station by the inverse calculation, supposing that the water depth is constant (5m) inside the fishery port during the length of 500m from the entrance to the tide station, and the inverse tsunami travel line is linear from the port entrance by neglecting the wave diffraction effects. As shown in the figure, estimated tsunami transmission time between the NOWPHAS wave gauge and the tide station is about 5 minutes, and one between the GPS buoy and the tide station is about 11 minutes.

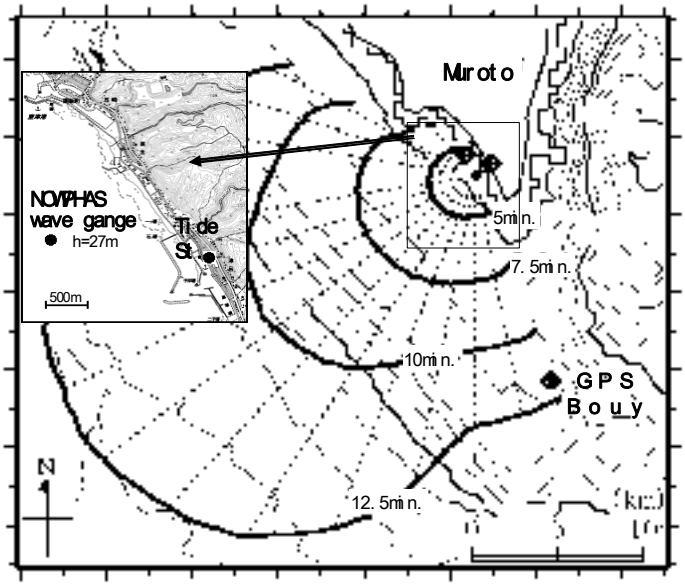


Figure 2. Example of Tsunami Transmission Time Estimation

Figure 3 indicates the estimated tsunami detection time at the existing NOWPHAS wave stations. Time estimation at each station was conducted in the same method shown in the **Figure 2**. Nevertheless, at some stations where detailed seabed topography data was difficult to be obtained, more simplified estimation was conducted from the information of the seabed sensor depth h_0 and seabed cable length l of each station. Tsunami transmission time can be calculated by assuming the topographical inclination i is constant $(i = h_0/l)$. In the **Figure 3**, water depth at each NOWPHAS station is shown in meter unit.

Three category of the tsunami transmission time is indicated in the **Figure 3**. At some existing NOWPHAS station, tsunami attack can be detected 10 minutes or more before arriving at the coast, which indicates some of the existing NOWPHAS stations are possible to use the real-time tsunami information system. Such stations are seen where the seabed slope is gentle and shallow water area is spreading to the offshore direction. On the other hand, some of the NOWPHAS stations will observe tsunami 5 minutes or less before its arrival to the coast, where bottom slope is relatively steep. At such case, existing NOWPHAS stations are not deep enough for the earlier tsunami detection purpose. At such area, deeper tsunami sensors with GPS buoys are to be installed.

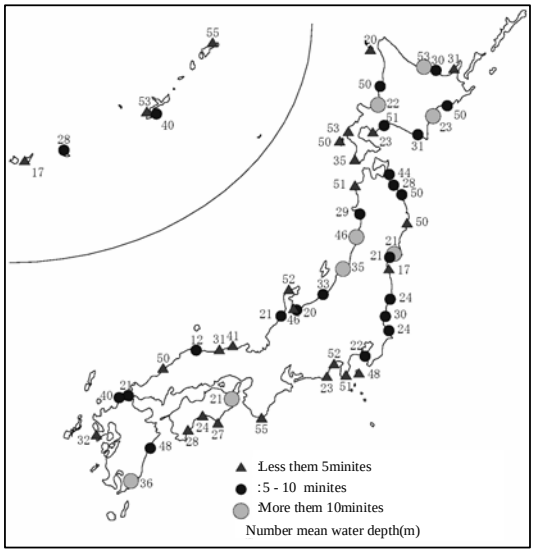


Figure 3. Estimated Tsunami Detection Time at NOWPHAS Wave Stations

4. EXAMPLES OF THE HYBRID OBSERVATIONS

2004 Tokaido-Off-Earthquake was generated at 23:57 JST on September 5, 2004, just five months after the Murotsu-Port-Off GPS buoy's installment. The magnitude of the earthquake was reported as 7.4, and the hypocenter of the earthquake was off the Kisei-Penisula Pacific coast about 400km northeast from the GPS buoy. Before the main earthquake pre-event with magnitude 6.9 was also reported about five hours before, which caused relatively smaller tsunami.

Figure 4 shows the observed tsunami profile, eliminating high frequency wind wave effects and low frequency astronomical tide effects by a numerical band-pass filter (Kato, et al., 2005). Three observation stations existed at the Murotsu Port area, one GPS buoy at 100m deep, one NOWPHAS seabed installed typed acoustic wave gauge 27m deep, and one JMA coastal tide station inside the port at the shore. Those three stations observed the tsunami profile clearly, although the coastal tide station showed the pre-event caused week tsunami profile effect before the arrival of the main tsunami.

The tsunami wave started from the sea level rise around 0:26 JST. Peak time of the first tsunami wave was 0:31, 0:32 and 0:40 respectively at each station, and the first tsunami height (deviation) was 10cm, 22cm and 41cm respectively. GPS buoy 100m deep detected the tsunami profile 9 minutes before the coastal tide station, which proved the high possibility of the deep water GPS's contribution of the tsunami disaster prevention for inhabitants' rapid evacuation, if the real-time warning information system was put into practical use (Nagai, et al., 2005b).

Slight differences were seen in the expected and observed tsunami detection time by comparing the **Figure 2** and **Figure 4**. **Figure 2** indicated that the offshore GPS buoy is expected to observe the tsunami profile 11 minutes before its coastal arrival, while the **Figure 4** observed 9 minutes arrival time difference. And **Figure 2** indicated that the offshore NOWPHAS wave gauge is expected to observe the tsunami profile 5 minutes before its coastal arrival, while the **Figure 4** observed 8 minutes arrival time difference. Several reasons of the difference can be considered. **Figure 2** neglected the three dimensional effects of the tsunami propagation. Tsunami waves were supposed to propagate in one single direction without receiving diffraction. **Figure 2** also neglected of the tri-dimensional multi-passes of the tsunami propagation. For the further discussion to explain the tsunami propagation time difference between the **Figure 2** and **Figure 4**, future detailed tri-dimensional numerical simulation will be desirable.

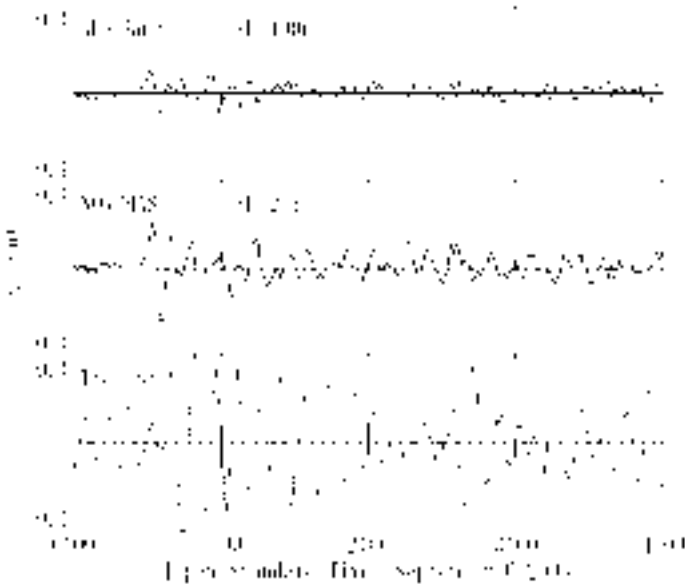


Figure 4. Observed 2004 Tokaido-Off Earthquake Tsuanmi Profile

Figure 5 shows the result of spectrum analysis of the Murotsu-Port 2004-Tokaido-Off-Earthquake-Tsunami record. **Figure 5** indicated coastal tsunami transmission characteristics due to the seabed topography effect. At water depth 100m, the tsunami frequency spectrum was double peaked shape with one peak 0.0013Hz of corresponding period 13 minutes and the other peak 0.002Hz of corresponding period 8 minutes. Both peaks were almost equivalent in the spectrum power. At the 27m deep observation station, both of the two peaks showed amplification almost in the same rate. Therefore, tsunami profiles 100m deep and 27m deep showed very similar shapes, although amplification was observed due to the long wave shoaling effect. On the other hand, coastal tide station spectrum showed single peaked figure, for amplification of the higher frequency peak was much more obvious than the lower frequency one. Obvious peak was seen at the tide station at the frequency 0.002Hz. It was supposed to be the natural resonance frequency inside the port.

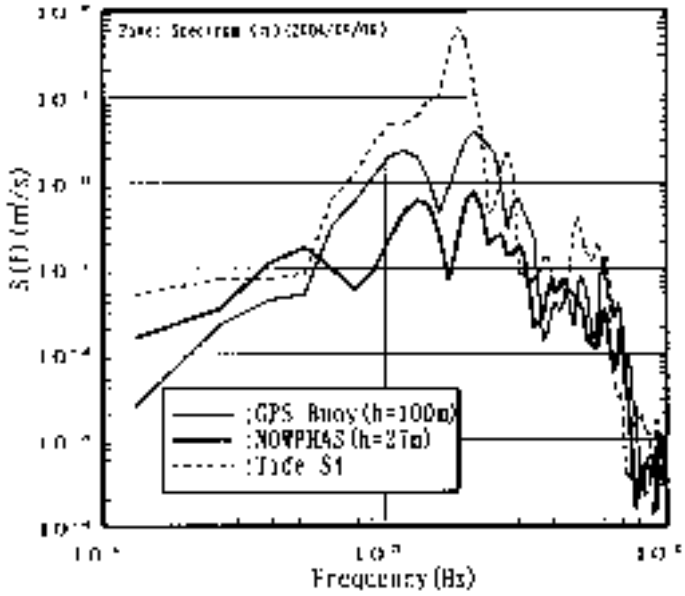


Figure 5. 2004 Tokaido-Off Earthquake Tsuanmi Spectrum Analysis

Applicability of the GPS buoy to typhoon induced abnormal sea waves observation was also verified for high wave condition due to the typhoon No.0423 attack. Peak significant wave height was obtained as 14.21m with significant period 16.3s at 14:20 (JST) on October 20, 2004. Simultaneous wave record by the same seabed installed acoustic wave gauge at 27m deep showed significant wave height 13.55m with significant period 15.8s. As both wave records showed fairly good agreement, it can be concluded that both wave data are reliable ones.

5. PROPOSAL OF THE TSUNAMI OBSERVATION NETWORK

Horizontal allocation of the sensors was also discussed in the paper. **Figure 6** is the proposed Round Japan offshore observation network. Considering a possible horizontal scale of near-coast tsunami generating earthquakes, tsunami detection stations should be installed at intervals of 50-100km along the coast, taking into consideration of the possible tsunami sources around Japan (Hatori, 2005). Small islands on the ocean are suitable points for long-distance tsunami detection. **Figure 7** is the proposed Round Indian Ocean offshore observation network. As the Indian Ocean area is luck of possible tsunami sources data, authors proposed the interval of the offshore tsunami detection sensors to be about 300km along the coast supposing the 2004 Sumatra-Earthquake tsunami source size.

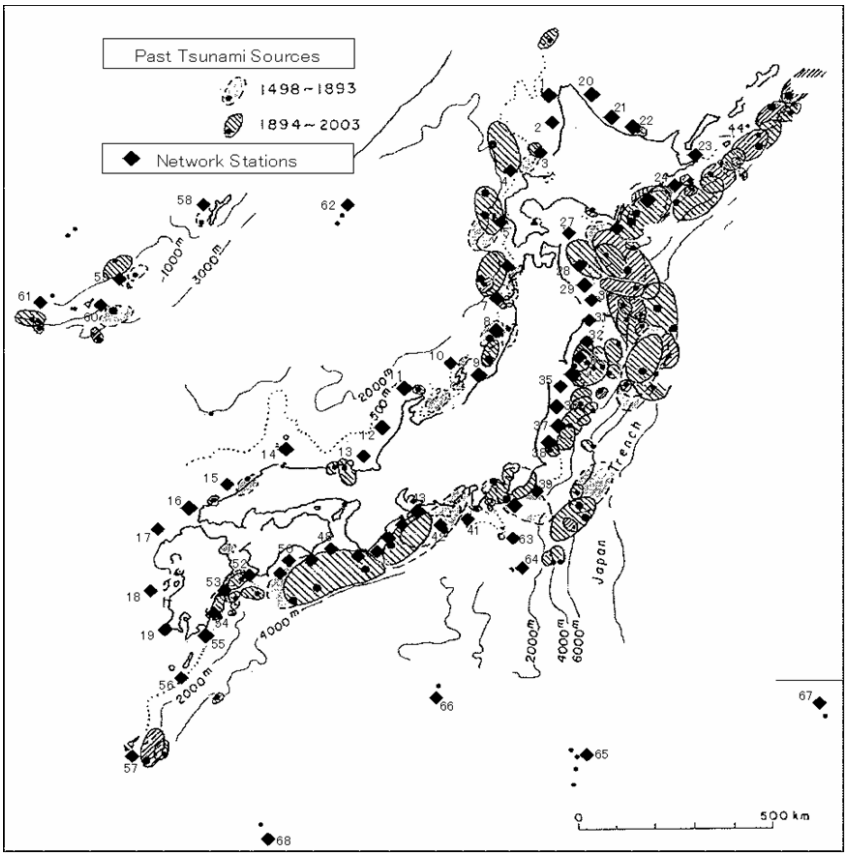


Figure 6. Plan of the Round Japan Tsunami Monitoring Network

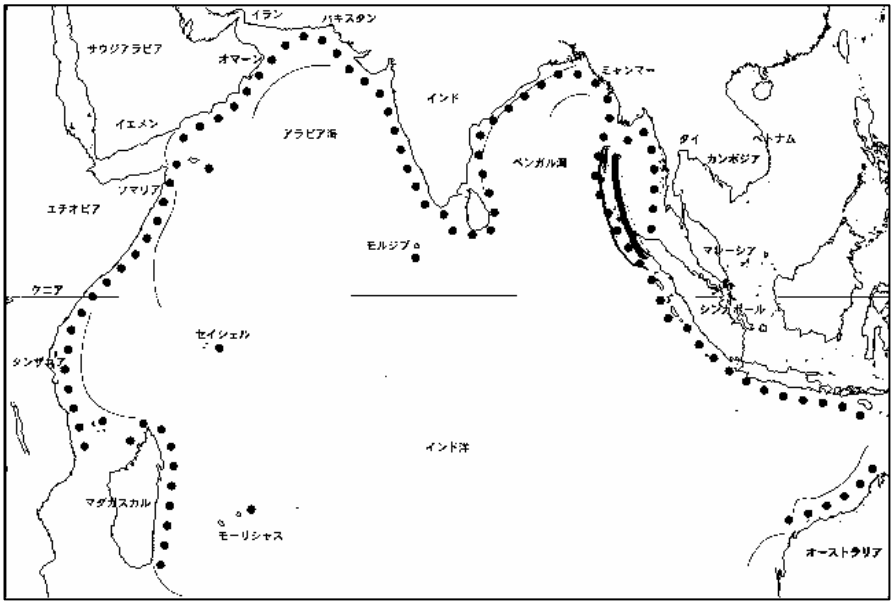


Figure 7. Plan of the Round Indian Ocean Tsunami Monitoring Network

6. TSUNAMI DATA CENTER DESIGN

How to design the data center is also important, because the data center has two important functions; one is real-time data service and the other is non-real-time data management, analysis and research. Time-stepped real-time tsunami detection system is proposed in the paper in consideration that tsunami periods are generally very large like several tens of minutes and tsunami warning is necessary before knowing the first wave height and period of tsunami.

Figure 8 shows the data flow of the Data Center for observed tsunami, waves and tides. The Data Center should cover two important functions together in order to realize the cost efficiency of the system: real-time data processing and non-real-time data management of information obtained by (1) the deep-sea GPS buoys, (2) the coastal acoustic wave gauges (DWDM: Doppler-typed Wave Directional Meter) already installed as a nationwide network , and (3) the existing coastal tide stations network.

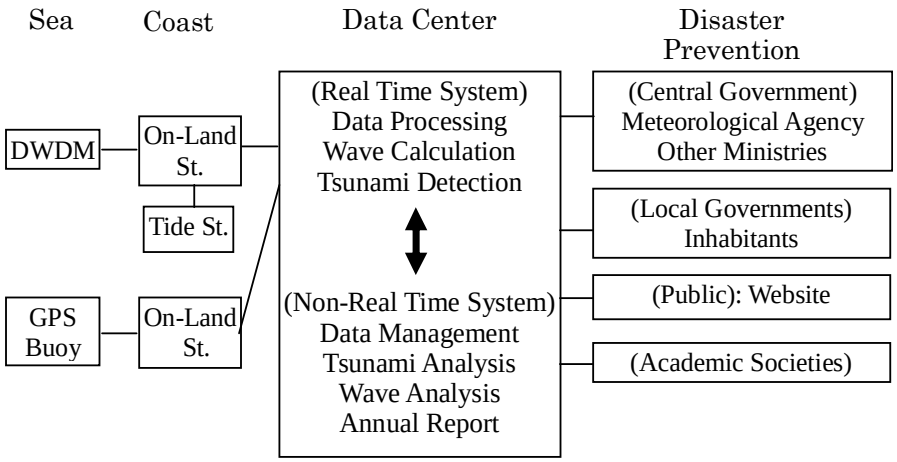


Figure 8. Wave, Tsunami and Tide Data System

Figure 9 shows the basic design of the tsunami detection time steps. Tsunami information should be issued by time series, for tsunami periods are several tens minutes. In order to make maximum use of the offshore tsunami sensors advantage, capable to observe tsunami profile about 10 minutes before at the coast, offshore tsunami information data service cannot wait until the offshore sensor finishes to observe the complete figure of the first tsunami wave with its height and period. Here authors propose the three time stages of the offshore tsunami data service.

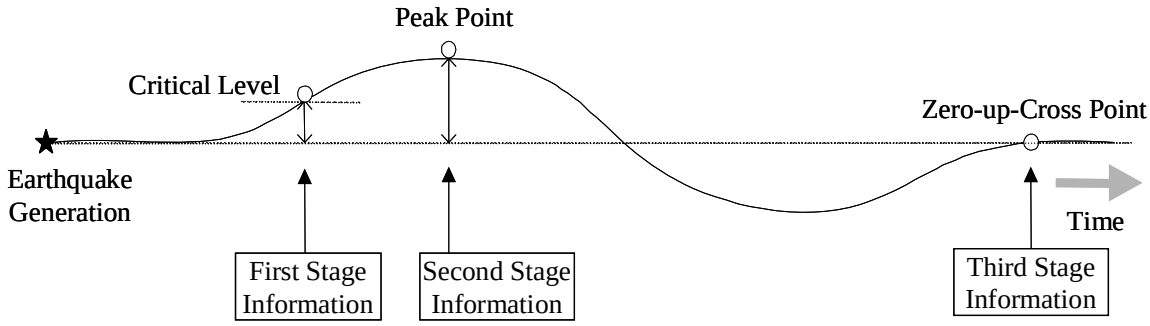


Figure 9. Time Series of Tsunami Detection Information

Table 2. Proposed Critical Offshore Sea Level Deviation Values

GPS Bouy Depth(m)	Critical Water Level Deviation(cm)
10	65
20	55
50	45
100	35
200	30

The first stage information is when the low-pass-filtered water level exceeds some critical value from the estimated astronomical tide level. At the first stage information, offshore tsunami height and tsunami period are not yet known. It is the warning information that abnormal low frequency wave, possible tsunami wave, is identified. At the first stage, exact tsunami amplification rate from the offshore station to the coast is not also known, for the amplification rate depends on the tsunami period. **Table 2** is the proposed critical values, supposing that tsunami wave height is proportional to the inverse of 1/4 exponent of the water depth. In addition tsunami waves are supposed to break when the tsunami wave height is greater than half of the water depth, and the critical tsunami height at the coast is supposed to be 1m. It means that the critical water deviation shown in the **Table 2** is equivalent to the tsunami deviation of 1m at the water depth 2m.
Therefore, in order to avoid the miss-judge of tsunami arrival warning, the deviation errors of the numerical tsunami-filtered profiles should be less than the critical values shown in the **Table 2,** which is a very important given condition for the filter profile determination. In addition, as the tsunami detection is a very urgent task, tsunami-filter's time profile (impulsive function) should be short enough compared to the estimated tsunami travel time from offshore observation point to the coasts, which is about 5-20 minutes, which is another important given condition.

7. CONCLUDING REMARKS

Development and improvement of the International Tsunami Monitoring System is getting its importance after the 2004 Sumatra-Off-Earthquake Tsunami disaster. Up to now, tsunami warning system was developed and established based on earthquake vibration observation data only. Nevertheless, earthquake vibration data may give us incorrect tsunami forecasting, for the strength of the earthquake vibration and the tsunami energy are not exactly proportional. Therefore, offshore and coastal tsunami-wave profile observation system should be included in the tsunami monitoring system. This paper intended to contribute to the international efforts to prevent tsunami disasters by using our experiences in offshore tsunami, wave, and tide observation and network data analysis.
Plans of the Round Japan and Indian Sea Offshore Tsunami Monitoring Networks were also introduced in the paper. Real-time data processing will be conducted, taking into consideration that tsunami information should be issued by time series, for tsunami periods are several tens minutes.

ACKNOWLEDGEMENT

Authors received coastal tide data of Ofunato Port and Muroto-Misaki Fishing Port from Japan Meteorological Agency. Coastal acoustic wave gauges data were successful results of the development, improvement and maintenance of the Japanese Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours (NOWPHAS) operated by associated agencies of the Ports and Harbors Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), including the Port and Airport Research Institute (PARI).
Authors have to express sincere gratitude to those concerned persons.

REFERENCES

Bernard, E. N.,, Gonzales, F. I., Meining C., and Milburn H. B.,"Early Detection and Real-time Reporting of Deep Ocean Tsunamis", Proceedings of the International Tsunami Sympojium 2001 (ITS 2001), NTHMP Review Session, R-6, pp.97-108.,2001.

Bernard, E. N.,, Gonzales, F. I. and Vasily V. T. translated by Satake, K. and Hirata, K.,"The Tsunameter and Real-time Tsunami Forecasting", Chikyu Monthly, Vol.27, No.3, Kaiyo-Syuppan Co., pp.210-215.,2005. (in Japanese)

Goda, Y. and Research Group of Marine Observation Data Analysis and Application,"Coastal Wave Observation", Coastal Development Institute of Technology, 212p.,2001. (in Japanese, Korean Translated textbook was published by KORDI in 2002.)

Goda, Y. and Research Group of Marine Observation Data Analysis and Application,"Tide Observation", Coastal Development Institute of Technology, 188p.,2002. (in Japanese, Korean Translated textbook was published by KORDI in 2003.)

Hashimoto, N., Mitsui, M., Goda, Y., Nagai, T. and Takahashi, T.,"Improvement of Submerged Doppler-Type Directional Wave Meter and its Application to Field Observation", Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'96), pp.629-642.,1996.

Hatori, T.,"Tsunami Source and Wave Energy Distribution along the Coast of Japan", Chikyu Monthly, Vol.27, No.3, Kaiyo-Syuppan Co., pp.166-170.,2005. (in Japanese)

Hiraishi, T., Hattori, M., Hirayama, K., Nagai, T. and Yasuda, Y.,"Applicability of On-Site Wave Overtopping Sensor", Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'04), vol.4, pp.4341-4353.

Hirata, K. (2005). "A Review of Tsunami Forecast, Prediction and Countermeasure", Chikyu Monthly, Vol.27, No.3, Kaiyo-Syuppan Co., pp.159-165., 2004. (in Japanese)

Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Isshiki, H., Moriguchi, T., Takada, M., Tanno, T., Kanzaki, M. and James Johnson,"A New Tsunami Monitoring System using RTK-GPS", ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12, pp.645-651., 2001.

Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T., Koshimura, S., and Nagai, T., "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy", Earth Planets Space, Vol.57, pp.297-301.,2005.

Nagai, T.,"Development and Improvement of the Nationwide Coastal Wave Observation Network", Techno-Ocean'2002, Paper-TI-1-2, 4p.,2002.

Nagai, T., Hashimoto, N., Shimizu, K. and Kitamura, F., "Offshore Tsunami Profiles Observed at the Coasatal Wave Stations", Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'96), pp.1465-1477. ,1996.

Nagai, T., Ogawa, H., Nukada, K. and Kudaka, M., "Characteristics of the Observed 2003 Tokachi-Off Earthquake Tsunami Profile", Coastal Engineering Journal, Vol.46, No.3, Japan Society of Civil Engineers, pp.315-327., 2004a.

Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato,T., and Kudaka, M., "GPS Buoy Application to Offshore Wave, Tsunami and Tide Observation", Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'04), vol.1, pp.1093-1105., 2004b.

Nagai, T., Kato,T., Nukada, K., Izumi, Y., Terada, Y., and Mitsui, M.,"Proposal of Coastal Tsunami Information System with Offshore, Nearshore and On-site Network Observation Equipments", Proceedings of the Ocean Vol.21, Japan Society of Civil Engineers, pp.61-66., 2005a. (in Japanese)

Nagai, T., Satomi, S., Terada, Y., Kato,T., Nukada, K. and Kudaka, M., "GPS Buoy and Seabed Installed Wave Gauge Application to Offshore Tsunami Observation", Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.3, pp.292-299., 2005b.

Takayama, T., Hashimoto, N., Nagai, T., Takahashi, T., Sasaki, H. and Ito, Y.,"Development of Submerged Doppler-type Directional Wave Meter", Proc. of the 24th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'94), vol.1, pp.624-634., 1994.

[参考資料2007-1]
Coastal Engineering Journal

ISSN: 2166-4250 (Print) 1793-6292 (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/tcej20

Proposal of Hybrid Tsunami Monitoring Network System Consisted of Offshore, Coastal and On-Site Wave Sensors

Toshihiko Nagai, Teruyuki Kato, Nobuo Moritani, Hiroaki Izumi, Yukihiro Terada & Masao Mitsui

To cite this article: Toshihiko Nagai, Teruyuki Kato, Nobuo Moritani, Hiroaki Izumi, Yukihiro Terada & Masao Mitsui (2007) Proposal of Hybrid Tsunami Monitoring Network System Consisted of Offshore, Coastal and On-Site Wave Sensors, Coastal Engineering Journal, 49:1, 63-76, DOI: 10.1142/S0578563407001496

To link to this article: https://doi.org/10.1142/S0578563407001496

Published online: 10 Jan 2018.

Submit your article to this journal

Article views: 6

View related articles

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcej20

World Scientific
www.worldscientific.com

JSCE
JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS
COASTAL ENGINEERING COMMITTEE

Coastal Engineering Journal, Vol. 49, No. 1 (2007) 63–76
© World Scientific Publishing Company and Japan Society of Civil Engineers

PROPOSAL OF HYBRID TSUNAMI MONITORING NETWORK SYSTEM CONSISTED OF OFFSHORE, COASTAL AND ON-SITE WAVE SENSORS

TOSHIHIKO NAGAI

Marine Information Division, Port and Airport Research Institute,
3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan
nagai@pari.go.jp

TERUYUKI KATO

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan
tera@eri.u-tokyo.ac.jp

NOBUO MORITANI

Coastal Development Institute of Technology,
6F, 3-16, Hamabusa-cho, Chigoda-ku, Tokyo 102-0093, Japan
moritani@cdit.or.jp

HIROAKI IZUMI

Solution Division, Japan Weather Association,
55F, 3-1-1, Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 170-6055, Japan
h_izumi@jwa.or.jp

YUKIHIRO TERADA

Production Technology Laboratory, Technical Research Institute,
Hitachi Zosen Corp. 2-2-11, Funamachi Taisho-ku, Osaka 551-0022, Japan
terada_y@hitachizosen.co.jp

MASAO MITSUI

Field Observation Groupe, Kaijo-Sonic Corp.,
3-1-5, Sakae-machi Hamura, 205-8607, Japan
m-mitsui@kaijo-sonic.co.jp

Received 29 August 2005
Revised 15 August 2006

Development and improvement of the International Tsunami Monitoring System is getting more important after the 2004 Sumatra-Off-Earthquake Tsunami disaster. Till now, tsunami monitoring system has been developed and established based on observation network of strong ground motion only. Nevertheless, earthquake vibration data may give us incorrect tsunami forecasting, for the strength of the vibration and the tsunami energy are not exactly proportional. Therefore, offshore and coastal direct tsunami-wave profile observation system should be included in the monitoring system. This paper introduces basic design of the future tsunami monitoring system using newly developed GPS buoy system and other coastal and on-site sensors. Method of real-time tsunami data processing system is also introduced.

Keywords: Tsunami; wave observation, NOWPHAS, GPS Buoy, data center.

1. Introduction

Establishment of the offshore tsunami monitoring network system is an urgent task for countries facing the ocean. Nevertheless, as a huge disastrous tsunami is a rare event, it is difficult to understand the importance of maintaining and operating the network system, if the system is applicable only for tsunami events. Therefore, the network system needs to be applied to monitoring not only tsunami but also daily sea conditions such as coastal waves and tides. This paper introduces a basic design of Japanese nationwide tsunami monitoring system, by improving the NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS) system [Nagai, 2002], and by using the newly developed GPS buoy system [Nagai *et al.*, 2005a].

2. GPS Buoy and On-Site Sensors

Table 1 shows various monitoring sensors for tsunami detection in the different water depth areas.

Deep-sea zone is defined as the water depth 50 m or deeper where routine maintenance work is not possible for the seabed installed sensors. Deep sea sensors can detect tsunami profiles several minutes before its arrival on the coast. That is very important to prevent tsunami disasters. The earlier deep-sea tsunami sensor was seabed installed pressure typed one installed at water depth 1,000 m or deeper with seabed cable with several tens of km in length connecting the seabed sensor and on-land station which enables real-time data acquisition. Seven pressure sensors have already been installed around Japan between 1980 and 2000 [Hirata, 2005]. Although such seabed sensor installation was very expensive for the seabed cable connection, once the seabed pressure sensor got out of use, it was impossible to repair the system. In addition, existing seabed-installed pressure gauge is not applicable for the monitoring of waves and swells, for deep-sea wave actions do not reach the seabed. USA NOAA research group recently developed Tsuna-meter system consisted of deep-sea seabed pressure sensor and a deep-sea data transmission buoy. It was reported that the wireless acoustic data transmission test between the seabed sensor and the surface was successfully conducted [Bernard *et al.*, 2001; Bernard

Table 1 Existing tsunami monitoring sensors

Observation site	Sensor type	Observation items	Note
Deep sea (deeper than 50 m)	GPS buoy	tsunami waves, tides	
	seabed pressure gauge	tsunami	air pressure and water temperature correction
Shallow sea (less than 50 m)	seabed pressure or acoustic gauge	tsunami waves	
On the coast	tide station with tide well	tides (tsunami)	filtering effects correction
	acoustic gauge	tsunami (waves, tides)	on-site wave
	overtopping gauge	tsunami flow	on-site flow

et al., 2005]. Nevertheless, the Tsuna-meter system was applicable only for tsunami events and not for routine waves and tides. And the tsunami events are very rare, and actual offshore tsunami observation data obtained by the Tsuna-meter system has not yet been reported.

On the other hand, Japanese coastal wave observation network, named as NOWPHAS consists of seabed installed shallow water acoustic wave gauges, successfully reported to observe offshore tsunami profiles [Nagai *et al.*, 1996; Goda *et al.*, 2001; Nagai *et al.*, 2004a]. Nevertheless, seabed acoustic wave gauge is applicable only for shallow water area with water depth 50 m or less, for its routine maintenance necessity. From the point of view of earlier tsunami detection, such restriction is not favorable. A new wave, tide and tsunami meter for deep-sea area was desired.

Recently, GPS buoy tsunami detection system has newly been developed [Kato, *et al.*, 2001]. And the field experiment of the GPS buoy system proved its applicability to offshore waves, tides and tsunami observation [Nagai *et al.*, 2004b]. Real-Time-Kinematic (RTK) method is used in the system with on-land reference GPS station within 20 km from the buoy, which is a further offshore area than the existing NOWPHAS seabed installed sensor stations.

Although GPS buoy system is able to detect offshore tsunami profile several minutes before arriving the coast, on-site tsunami observation is also important, for the need to understand the actual coastal situation. Therefore, it is recommendable that on-site tsunami sensors at the coast such as tide gauges and wave-overtopping sensors are to be installed together with the GPS buoys. For the coastal on-site observation, existing fuse typed tide gauge is not recommended for the tsunami observation for its low-pass-filtered characteristics. In order to eliminate the high frequency components of sea waves, tide well water is connected to the sea with small pipe, which gives the low-pass-filtered effects. Therefore, high frequency

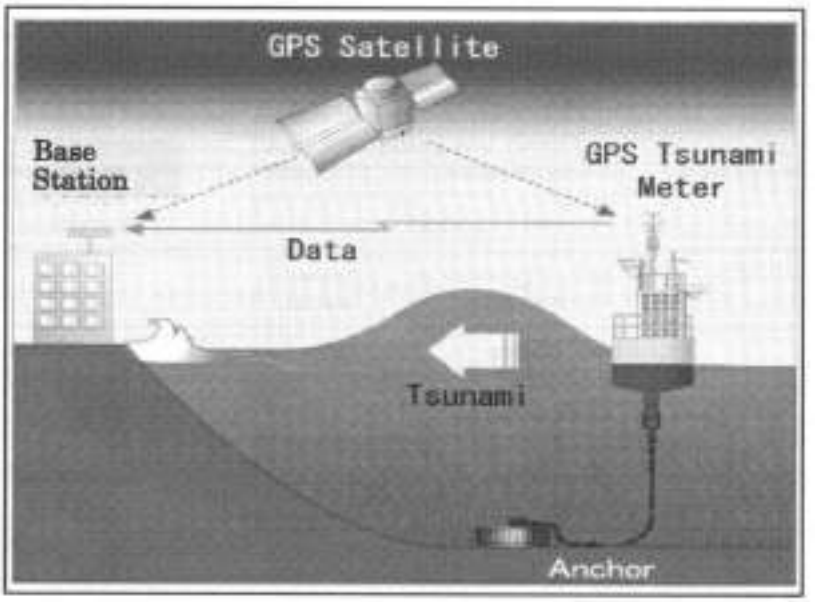


Fig. 1 GPS buoy tsunami detection system.

tsunami wave components may under-estimated, which gives us incorrect tsunami information. For the on-site tsunami detection, on-air acoustic typed tide gauge [Gusta *et al.*, 2002] or on-site wave-overtopping sensors [Hiraishi *et al.*, 2004] are more recommendable. Figure 1 shows a concept of the GPS buoy tsunami detection system.

3. Evaluation of NOWPHAS for Offshore Tsunami Detection

Figure 2 shows an example of tsunami transmission time estimation around the Muroto-Misaki area facing the Pacific Ocean. In the area, the first deep-sea GPS buoy system was installed in April 2004, 100 m deep and 13 km off the cape [Kato *et al.*, 2005]. The on-land station of the station was located at the wind measurement tower of the Muroto-Misaki weather station of the Japan Meteorological Agency (JMA). In the area, there also exists NOWPHAS seabed acoustic wave station 27 m deep and the JMA tide station inside the Muroto-Misaki fishery port. Tsunami transmission time from the offshore station to the coast is roughly estimated by assuming that tsunami wave celerity is $(gh)^{-/2}$, where g is the gravity acceleration (9.8 m/s^2) and h is the local depth. In Fig. 2, tsunami transmission time was estimated from the JMA tide station by the inverse calculation, supposing that the water depth is constant (5 m) inside the fishery port during the length of 500 m from the entrance to the tide station, and the inverse tsunami travel line is linear from the port entrance by neglecting the wave diffraction effects. As shown in the figure, estimated tsunami transmission time between the NOWPHAS wave gauge and the

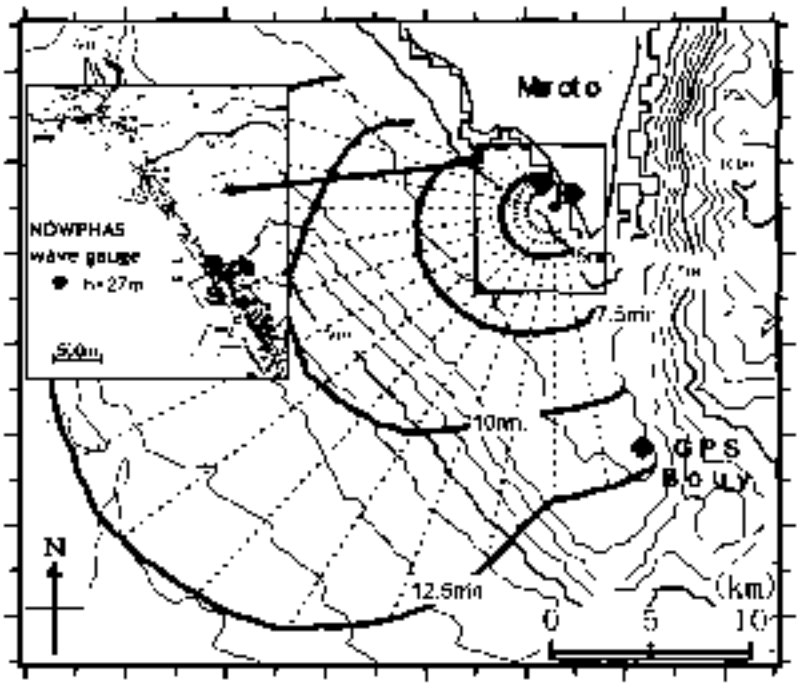


Fig. 2. Example of tsunami transmission time estimation

tide station is about 5 minutes, and one between the GPS buoy and the tide station is about 11 minutes.

Figure 3 indicates the estimated tsunami detection time at the existing NOWPHAS wave stations. Time estimation at each station was conducted in the same method shown in Fig. 2. Nevertheless, at some stations where detailed seabed topography data was difficult to be obtained, more simplified estimation was conducted from the information of the seabed sensor depth h_o and sealed cable length l of each station. Tsunami transmission time can be calculated by assuming the topographical inclination i is constant ($i = h_o/l$). In Fig. 3, water depth at each NOWPHAS station is shown in meter unit.

Three category of the tsunami transmission time is indicated in Fig. 3. At some existing NOWPHAS station, tsunami attack can be detected 10 minutes or more before arriving at the coast, which indicates that some of the existing NOWPHAS stations are possible to use the real-time tsunami information system. Such stations are seen where the seabed slope is mild and shallow water area is spreading to the offshore direction. On the other hand, some of the NOWPHAS stations will observe tsunami 5 minutes or less before its arrival to the coast, where bottom slope is relatively steep. Such existing NOWPHAS stations are not deep enough for the earlier tsunami detection purpose. At such area, deeper GPS buoys are to be installed.

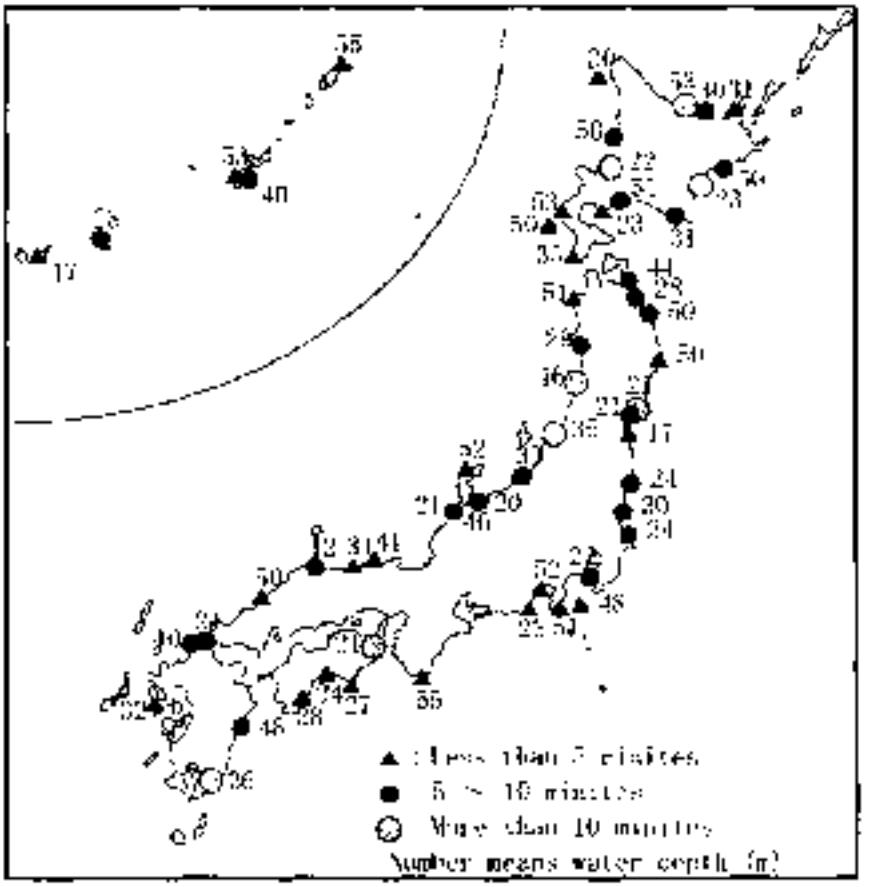


Fig. 3. Estimated tsunami detection time at NOWPHAS wave stations

4. Examples of Hybrid Observations

2004 Tokaido-Off-Earthquake was generated at 23:57 JST on September 5, 2004, just five months after the Muroto-Misaki-Off GPS buoy's installment. The magnitude of the earthquake was reported as 7.4, and the hypocenter of the earthquake was off the Kii-Peninsula Pacific coast about 400 km northeast from the GPS buoy. Before the main earthquake, pre-event with magnitude 6.9 was also reported about five hours before. The pre-event earthquake also caused a smaller tsunami.

Figure 4 shows the observed tsunami profile, eliminating high frequency wind wave effects and low frequency astronomical tide effects by a numerical band-pass filter (Kato *et al.*, 2005). Three observation stations exist at the Muroto-Misaki area, one GPS buoy at 100 m deep, one NOWPHAS seabed installed typed acoustic wave gauge 27 m deep, and one JMA coastal tide station inside the port at the shore. These three stations observed the tsunami profile clearly. Due to the pre-event tsunami effect, low-frequency water level oscillation with periods around 8 minutes

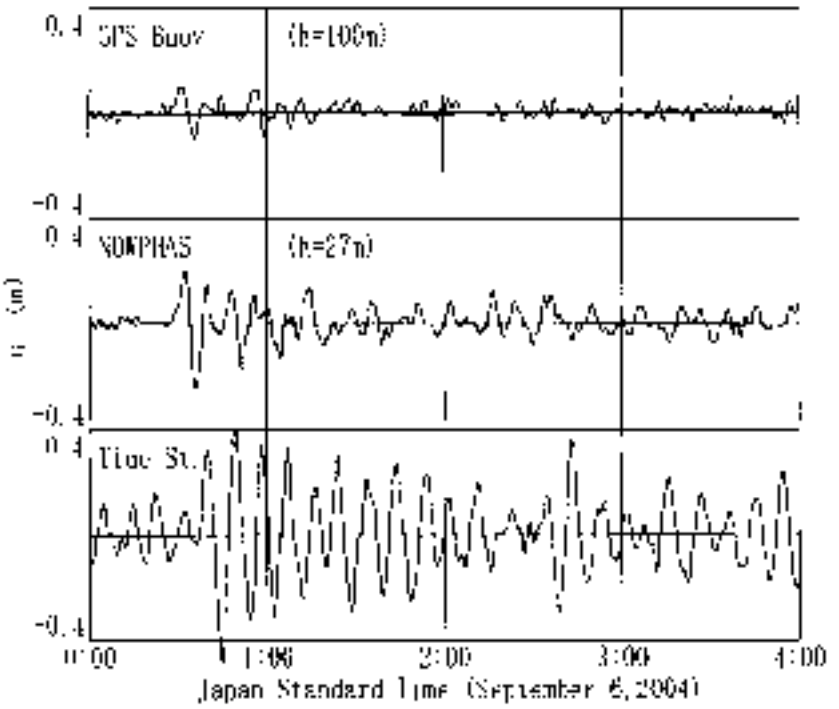


Fig. 4. Observed 2004 Tokachi-Off-Earthquake-Tsunami profile

consumed at the coastal tide station inside the port until the station observed the main tsunami profiles.

The tsunami wave started from the sea level rise around 0:26 JST at the GPS buoy. Peak time of the first tsunami wave was 0:31, 0:32 and 0:40 respectively at each station, and the first tsunami height (deviation) was 10 cm, 22 cm and 41 cm respectively. GPS buoy 100 *m* deep detected the tsunami profile 9 minutes before the coastal tide station, which proved the high possibility of the deep water GPS's contribution of the tsunami disaster prevention for inhabitants' rapid evacuation, if the real-time warning information system was put into practical use [Nagai *et al.*, 2005b].

Slight differences are seen in the expected and observed tsunami detection time by comparing Figs. 2 and 4. Figure 2 indicates that the offshore GPS buoy is expected to observe the tsunami profile 11 minutes before its coastal arrival, while Fig. 4 shows 9 minutes arrival time difference. And Fig. 2 indicates that the offshore NOWPHAS wave gauge is expected to observe the tsunami profile 5 minutes before its coastal arrival, while Fig. 4 shows 8 minutes arrival time difference. Several reasons of the difference can be considered. Figure 2 neglects the three-dimensional effects of the tsunami propagation. Tsunami waves are supposed to propagate in one single direction without receiving diffraction. Figure 2 also neglects the tri-dimensional multi-passes of the tsunami propagation. For further discussion

to explain the tsunami propagation time difference between Figs. 2 and 4, future detailed tri-dimensional numerical simulation will be desirable.

Figure 5 shows the result of spectrum analysis of the Muroto-Misaki 2004-Tokaido-Off-Earthquake-Tsunami record. Figure 5 indicates coastal tsunami transmission characteristics due to the seabed topography effect. At water depth 100 m the tsunami frequency spectrum was double peaked shape with one peak 0.0013 Hz of corresponding period 13 minutes and the other peak 0.002 Hz of corresponding period 8 minutes. Both peaks were almost equivalent in the spectrum power. At the 27 m deep observation station, both of the two peaks showed amplification almost in the same rate. Therefore, tsunami profiles 100 m deep and 27 m deep showed very similar shapes, although amplification was observed due to the long wave shoaling effect. On the other hand, coastal tide station spectrum showed single peaked figure, for amplification of the higher frequency peak was much more obvious than the lower frequency one. Obvious peak was seen at the tide station at the frequency of 0.002 Hz. It was supposed to be the natural resonance frequency inside the port.

Applicability of the GPS buoy to typhoon induced high sea waves observation was also verified for high wave condition due to the typhoon No. 0423 attack. Peak significant wave height was obtained as 14.21 m with significant period 16.3 s at 14:20 (JST) on October 20, 2004. Simultaneous wave record by the same seabed

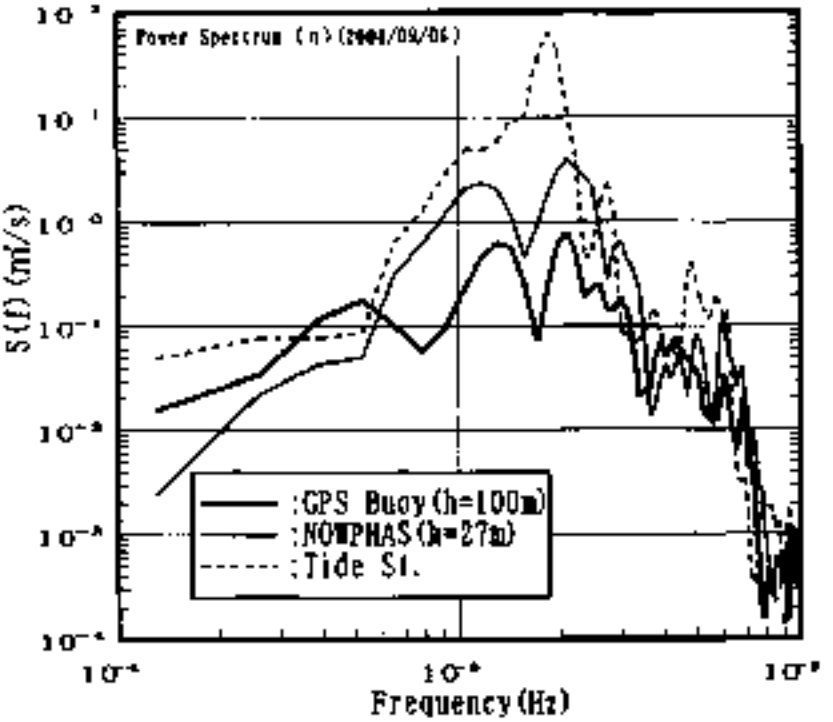


Fig. 5 2004 Tokaido-Off-Earthquake-Tsunami spectrum analysis

installed acoustic wave gauge at 27 m deep showed significant wave height 13.55 m with significant period 15.8 s. As both wave records showed fairly good agreement, it can be concluded that both wave data are reliable ones [Nagai *et al.*, 2005a].

5. Proposal Tsunami Observation Network

Horizontal allocation of the sensors is also proposed. Figure 6 is the proposed offshore observation network. Offshore tsunami sensors are to be installed with intervals of about half-length of the tsunami wave source zone in order not to miss the tsunami data. Therefore, considering a possible horizontal scale of near-coast tsunami generating earthquakes [Hatori, 2001], tsunami detection stations should be installed at intervals of 50–100 km along the Pacific coast as shown in Fig. 6. Small islands on the ocean are suitable points for long-distance tsunami detection, which will be helpful for international tsunami disaster reduction.

Figure 7 is the applied plan of the Round-Indian-Ocean tsunami monitoring network. In the area of Indian-Ocean, past tsunami records are not so clear like the

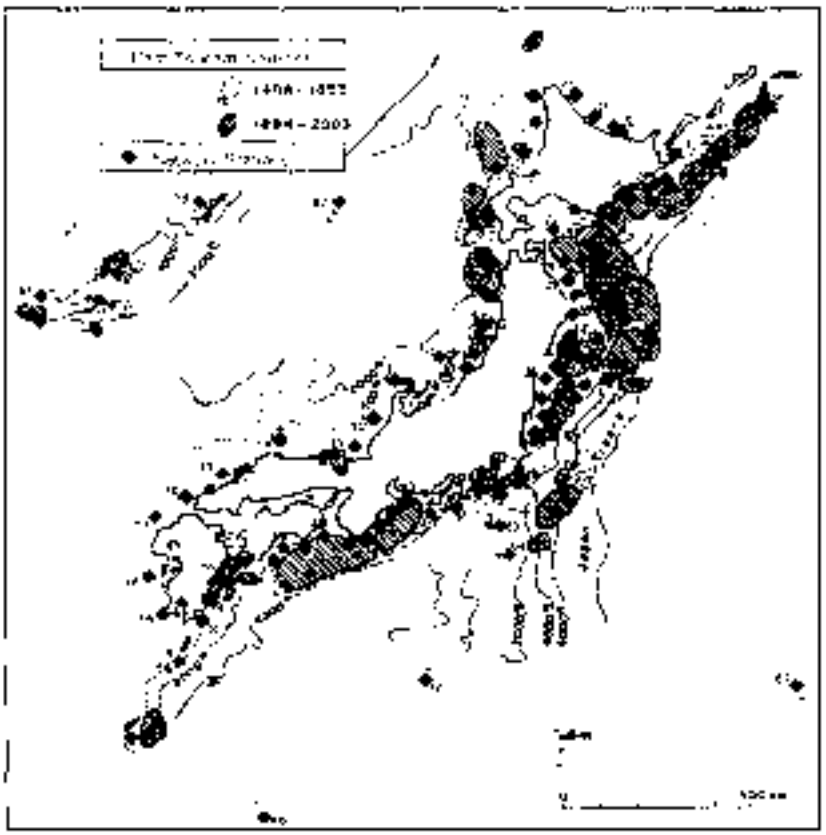


Fig. 6. Plan of the round Japan tsunami monitoring network

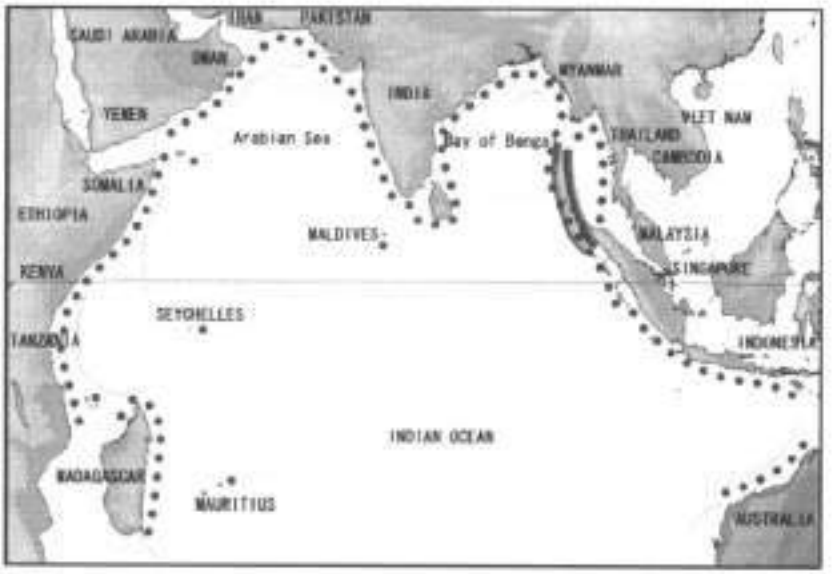


Fig. 7. Plan of the tsunami Indian Ocean tsunami monitoring network

Japanese coasts. Therefore, possible tsunami source scale is more difficult to be set. Here, considering that the source scale of the 2004 Sumatra-Off-Earthquake tsunami was 500–1000 km, tsunami detection stations should be installed at intervals of about 200 km along the coast as shown in Fig. 7.

6. Tsunami Data Center Design

How to design the data center is also important because the data center has two important functions: one is real-time data service and the other is non-real-time data management, analysis and research. Time-stepped real-time tsunami detection system is proposed in consideration that tsunami periods are generally very large like several tens of minutes and tsunami warning is necessary before knowing the first wave height and period of tsunami.

Figure 8 shows the data flow of the Data Center for observed tsunami, waves and tides. The Data Center should cover two important functions together in order to realize the cost efficiency of the system: real-time data processing and non-real-time data management of information obtained by (1) the deep-sea GPS buoys [Kato *et al.*, 2001; Nagai *et al.*, 2004b], (2) the coastal acoustic wave gauges (DWDM: Doppler-typed Wave Directional Meter) already installed as a nationwide network [Nagai, 2002], and (3) on-site coastal sensors network such as the existing fuse-type or acoustic-type coastal tide stations [Goda *et al.*, 2002], or on-site wave overtopping meter [Hiraishi *et al.*, 2004].

Figure 9 shows three steps of the tsunami information time history. Tsunami information should be issued by time series, for tsunami periods are several tens

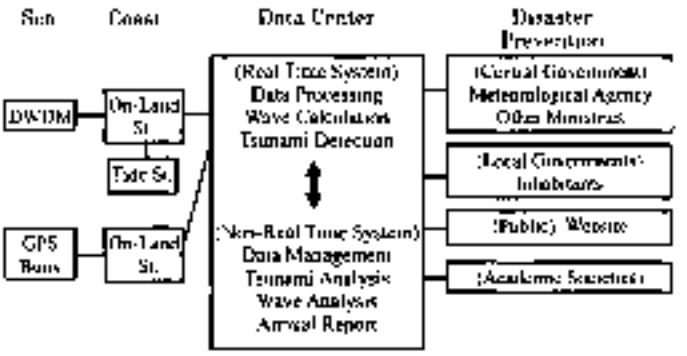


Fig. 8. Wave, tsunami and tide data system.

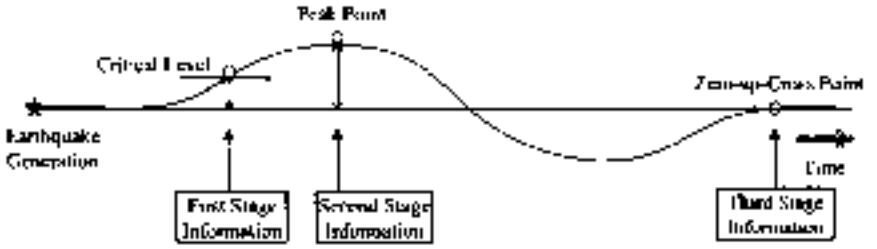


Fig. 9. Time series of tsunami detection information.

minutes. In order to make maximum use of the offshore tsunami sensors advantage, capable to observe tsunami profile about 10 minutes before at the coast, offshore tsunami information data service cannot wait until the offshore sensor finishes to observe the complete figure of the first tsunami wave with its height and period. Here authors propose the three time stages of the offshore tsunami data service.

The first stage information is when the low-pass-filtered water level exceeds some critical value from the estimated astronomical tide level. At the first stage information, offshore tsunami height and tsunami period are not yet known. It is the warning information about abnormal low frequency wave and possible tsunami wave, is identified. At the first stage, exact tsunami amplification rate from the offshore station to the coast is not also known, for the amplification rate depends on the tsunami period. Table 2 is the proposed critical values, supposing that tsunami wave height is proportional to the inverse of 1/4 exponent of the water depth. In addition tsunami waves are supposed to break when the tsunami wave height is greater than half of the water depth, and the critical tsunami height at the coast is supposed to be 1 m. It means that the critical water deviation shown in Table 2 is equivalent to the tsunami deviation of 1 m at the water depth 2 m. The superposition of the critical tsunami height 1 m at the coast may not be sufficient value for the complete tsunami disaster prevention, for the lower tsunami may also cause human damage. On the contrary, the superposition demands very accurate data processing in order

Table 2. Proposed critical offshore sea level deviation values

GPS buoy depth (m)	Critical water level deviation (cm)
10	65
20	55
50	45
100	35
200	30

to avoid incorrect tsunami information. If the offshore GPS buoy is installed at a depth of 200 m, critical value of the low-pass filtered deviation should be only 30 cm, even in the rough sea states with high frequency wind wave heights of several meters. Therefore, Table 2 also shows the demanded precision of the tsunami wave detection filtering techniques.

The second stage information in Fig. 9 is when the offshore sensor observed the peak value of the low-pass-filtered water level. It means when 1/4 of the first tsunami wave period was supposed to be observed. By receiving the second stage information, it will be possible to roughly estimate the tsunami first wave's period and deviation along the coast. Tsunami amplification rate from the offshore sensor to the coast should be calculated with the help of numerical simulation in advance. If the offshore GPS buoy is able to detect the tsunami profiles 10 minutes before the tsunami arrival to the coast, offshore GPS buoy is also able to obtain the information 10 minutes before the time when on-shore tsunami exceeds that of the critical sea level and records the maximum sea level, respectively. Therefore, proper design of immediate warning information system is very important at each time stage shown in Fig. 9.

The third stage information in Fig. 9 is when the offshore sensor observes the total first tsunami wave defined by the zero-cross wave analysis. If the tsunami wave starts from the positive water level (starts from the onshore current), zero-up-cross analysis should be applied assuming that the first zero-up-cross point is when the low-pass-filtered water level begins rising. On the other hand, if the tsunami wave starts from the negative water level (starts from the offshore current), zero-down-cross analysis should be applied assuming that the first zero-down-cross point is when the low-pass-filtered water level begins to sink. The third stage information will give us the complete offshore first tsunami wave height and period.

7. Concluding Remarks

Development and improvement of the International Tsunami Monitoring System is getting more important after the 2004 Sumatra-Off-Earthquake Tsunami disaster. This paper intends to contribute to the international efforts to prevent tsunami disasters by using our experiences in offshore tsunami, wave, and tide observation and

network data analysis. Till now, tsunami monitoring system was developed and established based on earthquake vibration observation data only. Nevertheless, earthquake vibration data may give us incorrect tsunami forecasting, for the strength of the vibration and the tsunami energy are not exactly proportional. Therefore, offshore and coastal tsunami-wave profile observation system should be included in the monitoring system. This paper introduced basic design of the future tsunami monitoring system using newly developed GPS buoy system and other coastal and on-site sensors. A new method of tsunami data processing system was also introduced.

Acknowledgment

Authors received coastal tide data of Muroto-Misaki Fishing Port from Japan Meteorological Agency. Coastal acoustic wave gauges data were successful results of the development, improvement and maintenance of the Japanese Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors (NOWPHAS) operated by associated agencies of the Ports and Harbors Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), including the Port and Airport Research Institute (PARI). The GPS buoy tsunami detection system off the Muroto-Misaki was developed by the cooperative research among the Earthquake Research Institute of University of Tokyo, Hitachi Zosen Corp., Disaster Reduction and Human Renovation Institute, and PARI, with financial assistance by the Ministry of Education and Science. Authors have expressed sincere gratitude to those concerned persons.

References

Bernard, E. N., Gonzales, F. I., Meinig, C. & Milburn, H. B. [2001] "Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis," in *Proc. Int. Tsunami Symposium 2001 (ITS 2001)*, NTHMP Review Session R-6, pp. 97–109.

Bernard, E. N., Gonzales, F. I. & Vasily, V. T. translated by Satake, K. & Hirata, K. [2005] "The tsunamometer and real-time tsunami forecasting," *Chikyu Monthly* **27**(3), 210–215 (in Japanese).

Goda, Y. and Research Group of Marine Observation Data Analysis and Application [2001] "Coastal wave observation," Coastal Development Institute of Technology, 212p. (in Japanese, Korean Translated textbook was published by KORDI in 2002).

Goda, Y. and Research Group of Marine Observation Data Analysis and Application [2002] "Tide observation," Coastal Development Institute of Technology, 188p. (in Japanese, Korean Translated textbook was published by KORDI in 2003).

Hatori, T. [2005] "Tsunami source and wave energy distribution along the coast of Japan," *Chikyu Monthly* **27**(3), 166–170 (in Japanese).

Hiraishi, T., Hatori, M., Hirayama, K., Nagai, T. & Yasuda, Y. [2004] "Applicability of on-site wave overtopping sensor," in *Proc. 29th Int. Conf. Coastal Engineering (ICCE'04)*, Vol. 4, pp. 4341–4353.

Ibata, K. [2005] "A review of tsunami forecast, prediction and countermeasure," *Chikyu Monthly* **27**(3), 159–165 (in Japanese).

Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Ishiki, H., Moriguchi, T., Tukuda, M., Tanno, T., Kanzaki, M. & James, J. [2001] "A new tsunami monitoring system using RTK-GPS," in *ITS 2001 Proceedings*, Session 5, Number 5-12, pp. 645–651.

Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T., Koshimura, S. & Nagai, T. [2005] "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy," *Earth Planets Space*, Vol. 57, pp. 297–301.

Nagai, T. [2002] "Development and improvement of the nationwide coastal wave observation network," Techno-Ocean'2002 Paper-TJ-1-2, 4p.

Nagai, T., Hashimoto, N., Shimizu, K. & Kitamura, F. [1996] "Offshore tsunami profiles observed at the coastal wave stations," in *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engineering (ICCE'96)*, pp. 1466–1477.

Nagai, T., Ogawa, H., Nukada, K. & Kudaka, M. [2004a] "Characteristics of the observed 2003 Tokachi-oki earthquake tsunami profile," *Coastal Engineering Journal* 46(3), 313–327.

Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato, T. & Kudaka, M. [2004b] "GPS buoy application to offshore wave, tsunami and tide observation," in *Proc. 29th Int. Conf. Coastal Engineering (ICCE'04)*, Vol. 1, pp. 1093–1105.

Nagai, T., Kato, T., Nukada, K., Izumi, Y., Terada, Y. & Mitsui, M. [2005a] "Proposal of coastal tsunami information system with offshore, nearshore and on-site network observation equipments," in *Proc. Ocean*, Vol. 21, Japan Society of Civil Engineers, pp. 61–66 (in Japanese).

Nagai, T., Satomi, S., Terada, Y., Kato, T., Nukada, K. & Kudaka, M. [2005b] "GPS buoy and seabed installed wave gauge application to offshore tsunami observation," in *Proc. 15th Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 3, pp. 292–299.

Nagai, T. & Satomi, S. [2005c] "Characteristics of abnormal waves caused by the 2004 typhoons observed by the nationwide ocean wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS 2004 Special)," Technical Note of the Port and Airport Research Institute No. 1096, 65p. (in Japanese).

Japan Institute of Navigation

［参考資料2008-1］

GPS単独精密変動検出法を用いた洋上波浪観測

三宅寿英・吉田晴彦・寺田幸博
加藤照之・永井紀彦

Offshore Wave Observation Using Precise Variance Detection Method by a Single GPS Receiver

Toshihide MIYAKE, Haruhiko YOSHIDA, Yukihiro TERADA,
Teruyuki KATO and Toshihiko NAGAI

キーワード：GPSブイ，波浪観測，津波，PVD，単独測位

1. はじめに

GPS（Global Positioning System：全地球測位システム）による測位技術の中で、リアルタイムに移動体の3次元位置を誤差数cmの精度で得られる手法があり、これはRTK（Real Time Kinematic）法と呼ばれる。海洋に浮かべたブイの最上部にGPSアンテナを搭載し，RTK法によって海面高の変化をリアルタイムに観測すれば、津波を海岸への襲来前に検知することが可能であろう。このようなアイデアをもとに開発されたのがGPS津波・波浪計である[1][2]。

つまり、海面高に追随して変化するブイの鉛直方向位置の時系列データによって、波浪、津波および潮汐といった海象状況を観測するシステムとなっている。ここで、津波や潮汐を抽出するには、得られた時系列データに対して適切なバンドパスフィルタを適用する必要がある。

1998年に相模湾で実施した基本機能確認実験に続き、2001年1月から2004年1月までの約3年間に岩手県大船渡市沖約2km地点、2004年4月から2006年3月までの約2年間は高知県室戸岬沖約13km地点にGPS搭載ブイを設置して連続観測を実施した。

この間に、2001年6月25日に来襲したペルー沖地震津波，2003年9月26日の十勝沖地震津波、2004年9月6日の紀伊半島沖地震津波の観測に成功し、その実用性を大いに証明できた。

また，前述の室戸岬沖での実証実験においては、短周期の波浪成分の観測に、独自に開発した単独精密変動検出法、通称PVD（Point precise Variance Detection）法を使用した。

PVD法は搬送波位相にもとづく単独測位法であり、RTK法と同等の精度で波浪観測を行うことができる。PVD法のアイデアは簡単であり，「観測点のGPSアンテナが揺れれば、必ず搬送波位相データにもその変動が乗るはずなので、これを抽出すれば良い。搬送波位相を用いるので、高精度の解が得られる。」というものである。PVD法は、単独測位方式であるため基線長に制限が無く、陸上基準局が不要といったメリットがある[3]。

本稿では、GPS津波・波浪計の概要を説明した後、PVD法の原理および実証実験結果を報告する。また、RTK法の誤ったFIX解を検出するためにPVD法を利用する可能性についても述べる。

NII-Electronic Library Service

Japan Institute of Navigation

2. GPS 津波・波浪計の概要

近年、東南海地震および南海地震などの極めて高い発生確率が示され、これらの海溝型地震に伴って発生する津波に対し、防災システムを拡充することが緊急課題となっている。津波の発生は止められないが、その襲来をなるべく早期に検知して、情報伝達および避難勧告を行えば、被害を最小限に抑えることが期待される。つまり、発生した津波を大水深沖合海域で計測し、その性状を検知・分析することが望ましい。

ところが、従来から波浪観測で多く用いられる加速度計方式では、津波のような数十分から数時間にわたる長周期波の計測は原理上困難である。また、超音波あるいは水圧計測による海底設置式波浪計は、海底センサーの定期的なメンテナンスが必要であることや、海底ケーブルの敷設に多額の費用が必要となるといった問題点があった。

そこで、GPS による精密測位技術に着目し、図 1 に示すような GPS 津波・波浪計測システムを構築した。

陸上基地局で計測された補正データと GPS 搭載ブイで計測された GPS データを用い、RTK 法によってブイの上下運動をリアルタイムで計測する。得られた時系列データに対して適切なバンドパスフィルタを適用し、短周期の波浪成分と長周期の潮汐成分を除去すれば、リアルタイムで周期数十分から数時間の津波を検出することが可能である。

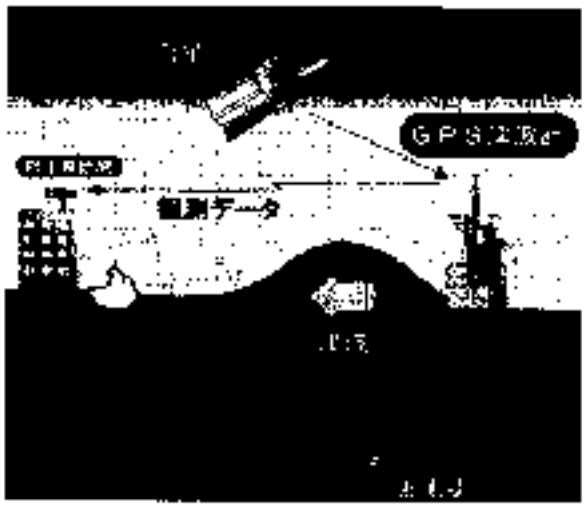


図 1　GPS 津波・波浪計の概念図

2004 年 4 月から 2006 年 3 月までの約 2 年間、高知県室戸岬沖約 13km 地点にて連続計測を実施した。写真 1 に、室戸岬沖に設置された GPS 津波・波浪計の様子を示す。また、図 2 にブイの形状および寸法を示す。

室戸岬沖のシステムでは、2004 年 9 月 6 日の紀伊半島沖地震津波の観測に成功した。GPS 搭載ブイの方が、港内に設置された超音波式波高計よりも 8～10 分程度早く津波を検出できたという結果が得られ、本システムの有効性が文献等で報告されている[2][3]。

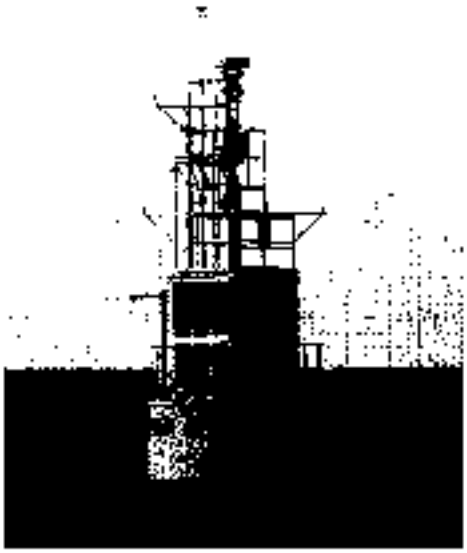


写真 1　室戸岬沖に設置された GPS 津波・波浪計

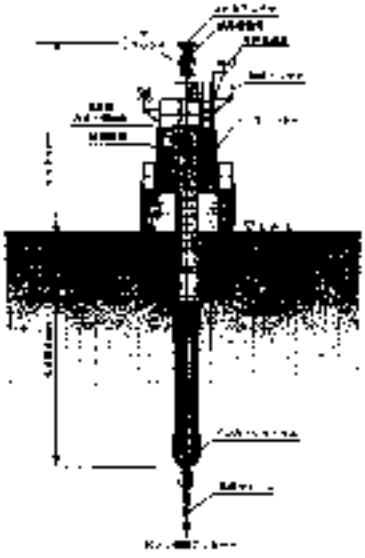


図 2　ブイの形状・寸法

ここで、室戸岬沖のシステムでは、周期数分以上の津波や潮汐の計測には RTK 法、周期数 10 秒以下の波浪成分の計測には PVD 法と呼ぶ独自の単独精密変動検出法を使用している。PVD 法の詳細は 3 章に記述する。

NII-Electronic Library Service

Japan Institute of Navigation

3. PVD 法による波浪観測

3.1 PVD 法の原理

PVD 法は、GPS 受信機で計測された各衛星の搬送波位相距離データから、計測対象物の短周期変動成分のみをフィルタ処理によって抽出し、3 個以上の衛星データから変動成分の測位演算を行う手法である。搬送波位相を用いた手法であるため、RTK 法と同等の精度が得られる。

以下に、PVD 法の詳細を説明する[3]。

観測点の座標 (x,y,z) を、長周期変動成分 ($\bar{}$) と短周期変動成分 ($\tilde{}$) に分け、(1)～(3)式のように定義する。

$$x_{rcv}(t) = \bar{x}_{rcv}(t) + \tilde{x}_{rcv}(t) \tag{1}$$

$$y_{rcv}(t) = \bar{y}_{rcv}(t) + \tilde{y}_{rcv}(t) \tag{2}$$

$$z_{rcv}(t) = \bar{z}_{rcv}(t) + \tilde{z}_{rcv}(t) \tag{3}$$

短周期変動成分 ($\tilde{}$) は、通常は GPS 受信機 1 と衛星 i 間の距離 ρ_i に比べて十分に小さいので、(4) 式のように記述できる。

$$\rho_i = \sqrt{(\bar{x}_{sat} - x_{rcv} + \tilde{x}_{sat})^2 + (\bar{y}_{sat} - y_{rcv} + \tilde{y}_{sat})^2 + (\bar{z}_{sat} - z_{rcv} + \tilde{z}_{sat})^2}$$

$$\approx \bar{\rho}_i(t) - \frac{(\bar{x}_{sat} - x_{rcv})\tilde{x}_{sat}}{\bar{\rho}_i} + \frac{(\bar{y}_{sat} - y_{rcv})\tilde{y}_{sat}}{\bar{\rho}_i} + \frac{(\bar{z}_{sat} - z_{rcv})\tilde{z}_{sat}}{\bar{\rho}_i}$$

$$= \bar{\rho}_i(t) - e'_{ix}\tilde{x}_{rcv}(t) - e'_{iy}\tilde{y}_{rcv}(t) - e'_{iz}\tilde{z}_{rcv}(t) \tag{4}$$

ここで、(4) 式の e は、観測点から衛星 i を結ぶ方向の単位ベクトルであり、仰角 α_{rcv} および方位角 θ_{rcv} を用いれば(5)式のように表せる。

$$(e'_{ix}, e'_{iy}, e'_{iz}) = (\cos\alpha_{rcv}\sin\theta_{rcv}, \cos\alpha_{rcv}\cos\theta_{rcv}, \sin\alpha_{rcv}) \tag{5}$$

つまり、変動成分は(6)式のように表せるので、3 個以上の衛星について(6)式が求まれば、(1)～(3)式の短周期変動成分 ($\tilde{}$) を得ることができる。

$$\tilde{\rho}_i(t) = -e'_{ix}\tilde{x}_{rcv}(t) - e'_{iy}\tilde{y}_{rcv}(t) - e'_{iz}\tilde{z}_{rcv}(t) \tag{6}$$

(6)式の左辺を求めるためには、GPS 受信機で計測される生の搬送波位相距離データにバンドパスフィルタを適用する必要がある。この時、計測対象物の変動周期に応じてカットオフ周波数を決定するよう注意しなければならない。

3.2 実証実験の結果

図 3 および図 4 は、実際に室戸岬沖に設置された GPS 搭載ブイで計測されたデータであり、上段に RTK 法で測位された楕円体高の時系列データ、下段に PVD 法で測位された水位変動の時系列データを示している。ここで、図 3 は通常時、図 4 は台風接近時（高波）の観測データである。

図 3 と図 4 について、各々上下段のグラフを比較すると両者は酷似しており、PVD 法は RTK 法と同等の測位精度を有していることが分かる。

また、図 4 では RTK 法の結果に欠測が見られるが、これは陸上基地局とブイ間の無線データ伝送における不具合に起因しており、補正データが欠落したため RTK 法の演算が行えなかったためである。対して、PVD 法は単独測位方式であるため、測位計算に陸上基準局の補正データを使用しないので、RTK 法で欠測した時間帯にも解が得られており、PVD 法の優位性が示されている。

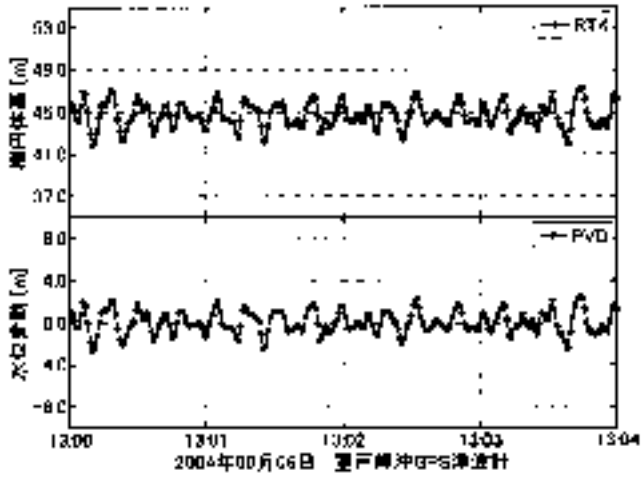


図 3 通常時の波浪観測データ

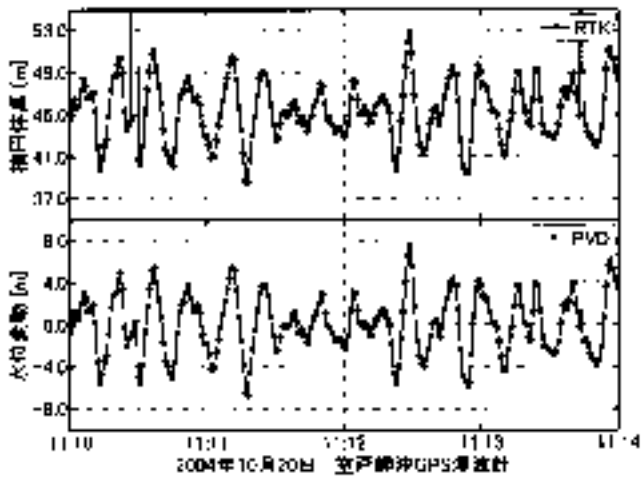


図 4 台風接近時の波浪観測データ

NII-Electronic Library Service

Japan Institute of Navigation

4. 異常値検出への PVD 法の応用

4.1　異常値検出の考え方

RTK 法は、計測対象の 3 次元位置をリアルタイムに決定できる測位方式であり、計測誤差も通常時は数 cm 程度と極めて高精度である。しかし、電離層や対流圏の影響を強く受けた場合などには、整数値アンビギュイティの確定ミスが発生し、計測値が数 10cm～数 m オフセットする場合がある。つまり、RTK 法で得られた解が誤った FIX 解となっている状態である

GPS 津波・波浪計において、津波をリアルタイムモニタするためには、RTK 法で得られた楕円体高に対して、短周期の波浪成分と長周期の潮汐成分を除去するようなバンドパスフィルタを適用する必要がある[5]。しかし、前述のオフセット（異常値）を含んだままの楕円体高データにフィルタを適用すれば、さも津波が到来したかのような波形となり、全くの平静時に津波の誤報を発令してしまう可能性がある。

従って、RTK 法の解が誤った FIX 解となり、楕円体高の時系列データにオフセットが生じた場合に、その異常状態をなるべく早期に検出して異常値の除去を行い、誤報の発令を回避することは大変重要である。

前述の異常値を検出する方法として、RTK 法での測位結果から PVD 法での測位結果を差し引けば、波浪成分を除去できることになり、RTK 法で生じるオフセットを検出しやすくなる効果が期待される。RTK 法では、電離層遅延や対流圏遅延といった誤差の影響を受けて誤った FIX 解となるが、PVD 法ではこれらの誤差がバンドパスフィルタによって除去される。従って、RTK 法の解が異常値となっている状態でも、PVD 法では精度良く測位できる可能性が高い。

4.2　実測データを用いた評価

図 5 では、RTK 法での測位データと RTK－PVD のデータを比較している。ここで、RTK 法の測位データには 15:10 頃から 10 分間程度約 50cm 上方にオフセットが生じている。しかし、生の楕円体高の時系列データだけを眺めても、オフセットが生じているか否か判断するのは極めて困難である。しかし、RTK 法と PVD 法の測位結果で差分をとり、なおかつ差分値の変化率を計算すれば、図 6 に示すようにオフセットが生じているか否か容易に判断できる。

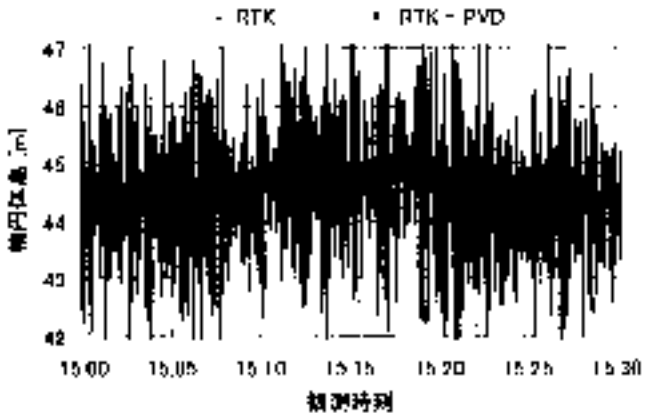


図 5　RTK 測位値と RTK－PVD の比較

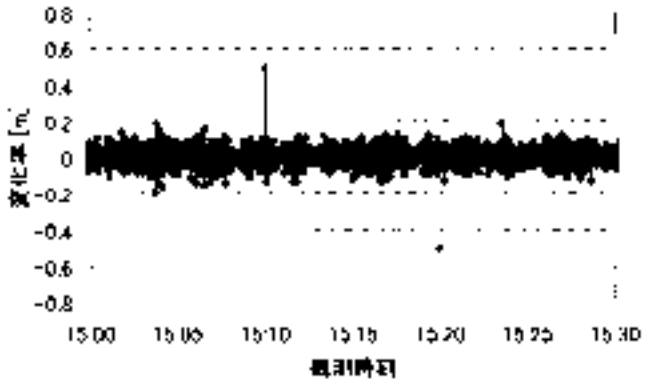


図 6　RTK　PVD の変化率

5. おわりに

GPS 津波・波浪計は、2004 年 9 月 6 日の紀伊半島沖地震津波などのリアルタイム観測に成功し、多くのマスコミにも取り上げられ反響を呼んだ。近年、東南海および南海沖地震の極めて高い発生確率も示され、国民の防災意識が高まっていることもあり、本システムが注目を浴びつつある。

本稿で紹介した PVD 法は、高知県室戸岬沖に設置した GPS 津波・波浪計に適用され、約 2 年間の連続計測に成功した。陸上基地局側のシステムに不具合が生じた場合やメンテナンスによる停止時、もしくは陸上基地局とブイ間の無線伝送が遮蔽された場合など、通常 RTK 法では計算不能となるようなケースでも、PVD 法は単独測位方式であるため測位計算が可能であった。精度も RTK 法と同等であり、基線長にも制限が無い、ブイ側で PVD 演算を行えば無線伝送すべきデータ量も極めて少なくて済むといったメリットがある。

また、RTK 法の整数値アンビギュイティ確定ミスによって発生する津波の誤報を、PVD 法の解を

NII-Electronic Library Service

Japan Institute of Navigation

用いた検出手法によって回避できる可能性も、本稿で示した通りである。

今後も、PVD法の精度向上および応用技術の開発に鋭意取り組んで行きたい。

謝辞

本稿で紹介したGPS津波計・波浪計は、文部科学省独創的革新技術開発研究課題番号 14401、同省科学研究費補助金課題番号(10354006,11792031, 17201038) 及び (財) シップ・アンド・オーシャン財団の技術開発基金補助金を受けて開発しました。また、研究遂行には、大船渡市、室戸市などの自治体をはじめとする関係各機関の多大のご援助・ご協力を得ています。ここに記し、深甚の謝意を表します。

参考文献

(1) 寺田幸博：GPS 津波計・波浪計の開発、日立造船技報, Vol.63, No.3, pp.2-7, 2003.

(2) 加藤照之・寺田幸博・越村俊一・永井紀彦：GPS 津波計による津波観測、月刊 海洋, Vol.37, No.3, pp.179-183, 2005.

(3) H Isshiki, A.Tsuchida, T.Kato, Y.Terada, H.Kakimoto, M.Kinoshita, M.Kanzaki and T Tanno : Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver –PVD(Point Precise Variance Detection) Method, 測地学会誌, Vol.46, No.4, pp.239-251, 2000.

(4) 永井紀彦：GPS ブイおよび海底設置式波浪計による津波観測，日本航海学会誌 NAVIGATION, No.165, pp 25-32, 2006.12.

(5) 清水勝義・永井紀彦・李在炯・泉裕明・岩崎峯夫・藤田孝：沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究，海洋開発論文集, Vol.22, pp 523-528, 2006.

平成20年3月1日投稿

三宅野英
非会員 Hitz日立造船株式会社 事業・製品開発センター
（〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11）
miyake_h@hitachizosen.co.jp

吉田晴彦
非会員 Hitz日立造船株式会社 事業・製品開発センター
（〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11）
yoshida_ha@hitachizosen.co.jp

寺田幸博
非会員 高知工業高等専門学校 建設システム工学科 教授
（〒783-8508 高知県南国市物部200-1）
terada@ce.kochi-ct.ac.jp

加藤照之
非会員 東京大学地震研究所 地震予知研究推進センター 教授
（〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1）
tero@eri.u-tokyo.ac.jp

永井紀彦
非会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部長
（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）
nagai@pari.go.jp

NII-Electronic Library Service

［参考資料2011-1］

Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan

Teruyuki Kato[1], Yukihiro Terada[2], Hitoyoshi Nishimura[2], Toshihiko Nagai[3], and Shun'ichi Koshimura[4]

[1]*Earthquake Research Institute, The University of Tokyo*
[2]*Kochi National College of Technology*
[3]*Port and Airport Research Institute*
[4]*Graduate School of Engineering, Tohoku University*

(Received February 8, 2011; Revised May 3, 2011; Accepted May 6, 2011; Online published August 15, 2011)

A GPS buoy operating about 10 km west of Cape Muroto, southwest Japan, recorded the tsunami due to the 2010 Central Chile Earthquake (M_w 8.8) that occurred on 27 February, 2010. The tsunami due to the Chile Earthquake arrived at the GPS buoy almost one day after the earthquake. The first peak of the tsunami was about 12 cm above the mean sea level. The second peak arrived about one hour and 46 minutes later and was about 20 cm higher than the mean sea level, which was the highest peak among the series of the tsunami waves. The later phases of recognizable tsunami waves continued for about one day after the first arrival of the tsunami. Comparison of these tsunami records with numerically-predicted tsunami suggests that the observed tsunami arrived about 30 minutes later than the arrival time predicted by the numerical simulation. If we manually shift the record on the time series, we find that a longer term of about 1 hour period components fit very well whereas a shorter term of 10–30 minutes of tsunami components shows significant phase shifts. This difference of phase shifts might be due to the effect of dispersion of the tsunami wave.

Key words: GPS, RTK, tsunami, GPS buoy, Chile tsunami, numerical simulation.

1. Introduction

A large interplate earthquake of M_w 8.8 occurred along the Chile trench at 06:34:14, 27 February, 2010 (UTC), according to USGS, which is at 15:34:14 on the same day by Japanese Standard Time (JST). A significant tsunami was generated by the earthquake and travelled across the Pacific Ocean arriving at the Pacific coast of the Japanese Islands almost one day after the earthquake. The tsunami was recorded by a number of sea-level measuring instruments that have been deployed in the whole area of the Pacific. Here, we show the record obtained at the GPS buoy sited near Cape Muroto, southwestern Japan, and we compare the observed record with the record estimated by a numerical simulation.

2. History of the Development of the GPS Buoy

For over 12 years we have developed the GPS buoy for detecting tsunami given that the early detection of tsunamis contributes to mitigating tsunami disasters (e.g., Kato *et al.*, 2000, 2008). The system employs a real-time kinematic (RTK) GPS in which a GPS antenna is situated at the top of a buoy floating on the offshore ocean surface, while another antenna is situated at a ground base station near the coast (Fig. 1). A sampling frequency of 1 Hz is used to monitor the sea surface changes. The data obtained at the buoy is transmitted to the ground base station using radio and a baseline analysis is made in real-time by a PC using both the buoy data and the data taken at the base station. Assuming that the coordinate of the base station is known, the precise position of the buoy can be determined to better than a few centimeters of accuracy.

The determined positions of the buoy applies not only to the case of a tsunami but also for all kinds of sea surface changes including wind waves, tides, etc. In order to extract the relevant components of a tsunami, the record is applied with a low pass filter using a simple moving average of 120 seconds. Tides are also removed by subtracting a tidal component calculated using harmonic analysis of 90 days of data at the position of the buoy. Since the accuracy of such a harmonic analysis would be a few centimeters if no anomalous sea surface deviation occurs such as that due to the passage of low pressure or variations of current, tsunami data can be extracted with a certain accuracy if the tsunami perturbation exceeds a few centimeters (e.g., Shimizu *et al.*, 2006). Both long period and shorter period waves are communicated via the dedicated webpage (http://www.tsunamigps.com/gpsreal.php).

The operational system was first deployed off Ofunato, northeastern Japan, in 2001. This system successfully recorded two tsunamis due to the June 23 (UTC) 2001 Peru earthquake (M_w 8.4) and the September 25 (UTC) 2003 Tokachi-Oki earthquake (M_w 8.3). Both records showed clear tsunami wave traces with about 10 cm of maximum height. After three years of operation, the system was abolished and a new GPS buoy was established about 10 km south off Cape Muroto, southewestern Shikoku, Japan, on

Copy right© The Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS); The Seismological Society of Japan; The Volcanological Society of Japan; The Geodetic Society of Japan; The Japanese Society for Planetary Sciences; TERRAPUB.

doi:10.5047/eps.2011.05.001

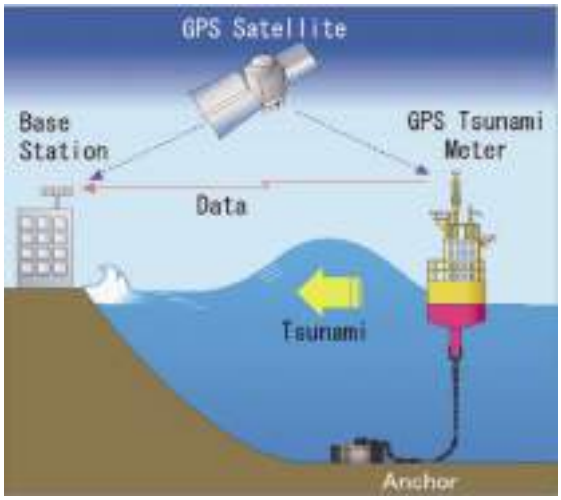


Fig. 1. GPS buoy system for detecting tsunami. RTK-GPS is employed together with radio transmission and an internet dissemination system, so that anyone can observe tsunami in real time.

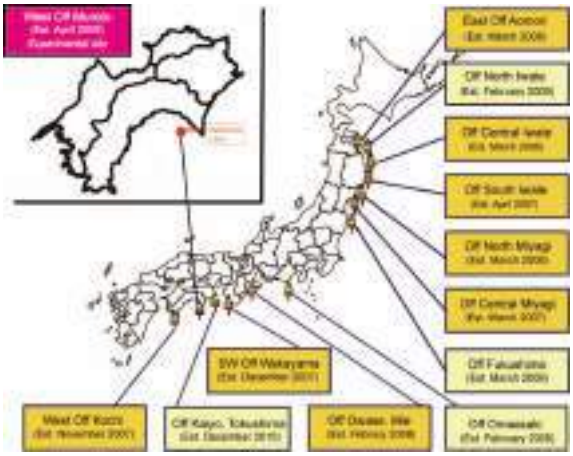


Fig. 2. Location of the GPS buoy established about 10 km west of the Cape Muroto (upper left inset). Stations colored in dark brown are used for Fig. 5.

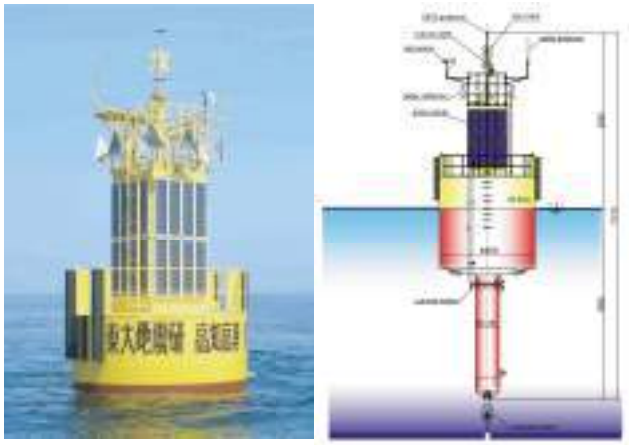


Fig. 3. GPS buoy established west of Cape Muroto, southwest Japan. The system has been operational since April 2008. (left) photo, (right) plan (unit: mm).

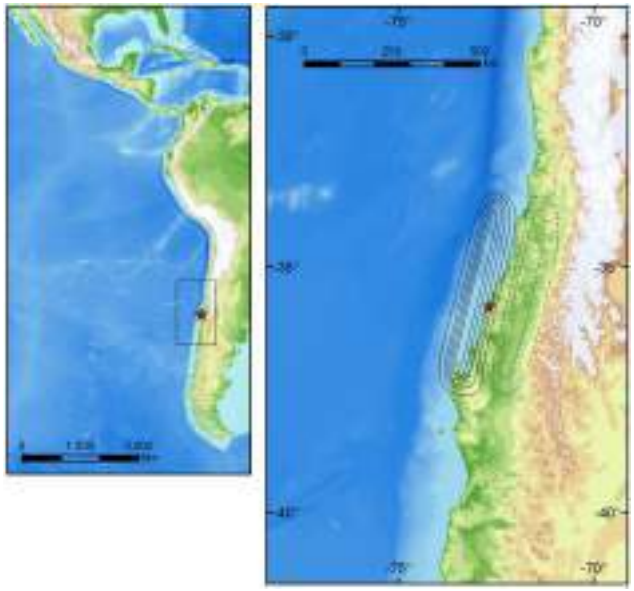


Fig. 4. Location of the 2010 Chile Earthquake shown by an asterisk and the estimated vertical displacements. See text for the source parameters.

April 11 2004. The buoy recorded the tsunami due to the September 5 (UTC) 2004 Off Kii Peninsula earthquake (M_w 7.4) (Kato *et al.*, 2005). This system sank as a result of an accident in March 2006 and a new GPS buoy was established in April 2008. The current GPS buoy is now operational at about 10 km west of Cape Muroto, southwestern Japan. The location of the buoy is shown in the inset of Fig. 2 and the design of the buoy is shown in Fig. 3. The distance between the buoy and the land base station is about 13 km.

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has established a GPS buoy system for monitoring sea waves, with eleven GPS buoys along the Pacific coast of Japan, since the year 2008 as a part of the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) system (http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/). All of these GPS buoys are located within 20 km from the coast. More than 14 GPS buoys have been established in this project, of which twelve buoys are in place and in operation along the pacific coast of the Japanese Islands as of February 2011 (Fig. 2).

3. Tsunami Record due to the 2010 Chile Earthquake

The 2010 Central Chile earthquake generated a significant tsunami. In order to make numerical simulations, we employed the USGS source model and assumed the following fault parameters: source dimension ($L \times W$) (450 km $\times$ 100 km), dislocation (15 m, uniform), mechanism (Strike, Dip, Rake) = (16, 14, 104) referenced to the USGS model. Figure 4 shows the source location and the vertical deformations due to the earthquake, which was used for the numerical simulation of the tsunami propagation.

Figure 5 shows the observed tsunami record of the low-pass filtered component of the vertical sea surface change at the Muroto GPS buoy. The effect of tide is also removed from the filtered record. It is readily visible that the tsunami

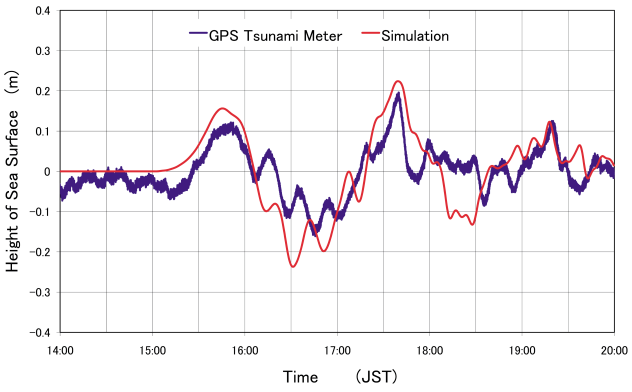


Fig. 5. Recorded vertical motion of the GPS buoy during the tsunami (black) and simulated record (red). The simulated record is offset forward by 26 minutes.

due to the Chile Earthquake arrived at the GPS buoy at around 15:22 on 28 February (JST), which is nearly one day after the earthquake occurred. The first peak of tsunami is about 12 centimeter above the mean sea surface height. The second peak arrived about one hour and 46 minutes later with about 20 cm height, which was the highest peak among the series of tsunami waves. The later phases of recognizable tsunami waves continued for about one day after the first arrival of the tsunami.

4. Comparison with Numerically Simulated Data

The tsunami record was compared with a numerically-simulated tsunami after removing shorter and longer periods of waves. The numerical modeling of mid-ocean tsunami propagation was carried out using the finite difference method of the linear shallow-water wave theory with a Coriolis force in a spherical co-ordinate system (Nagano *et al.*, 1991). For tsunami modeling, we used the digital bathymetry data (GEBCO; Monahan, 2008) to resample and created a 5 arc-min grid. The modeled tsunami waveform at the GPS buoy is shown in Fig. 5 with the plot of the observed record after tide and wind-wave components have been removed.

Note that the modeled tsunami waveform has been manually shifted by 26 minutes to fit to the observed one, because a direct comparison suggested that the observed tsunami arrived about 26 minutes later than the arrival time predicted by the numerical modeling. We find that the longer period components of the tsunami of about 1 hour fit very well whereas the components of a shorter period of 10–30 minutes show significant phase shifts. The difference in arrival times of about 30 minutes is under investigation by considering various factors such as the sea bottom topography features on the path of the tsunami propagation, the spatial resolution of gridding, modeling errors, etc. The reason that the longer wave fits well with 30 minutes of phase shift while a shorter wave does not may be due to the effect of dispersion of the tsunami wave resulting in the longer wave propagating more rapidly than a shorter wave. Slip heterogeneity of the source might also be responsible for such dispersion, though the examination of these effects are left for future studies.

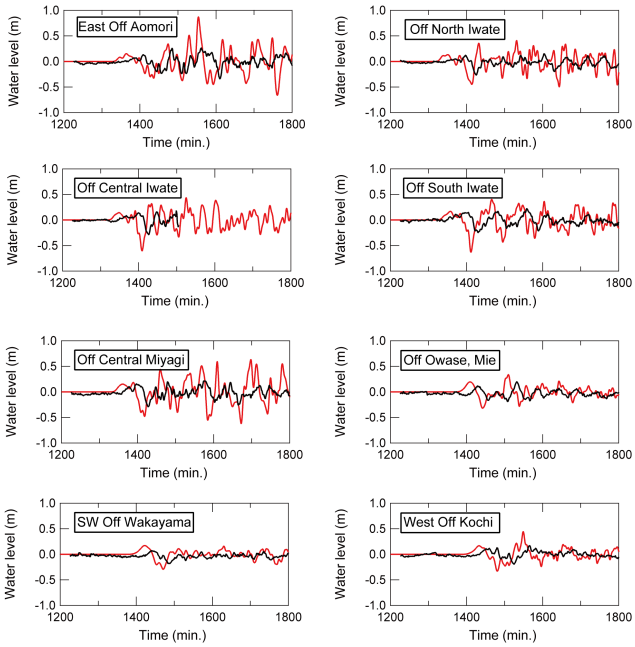


Fig. 6. Comparison between observed (black) and simulated tsunami (red). About 30 minutes of offset may be seen for all of the stations. The reason for this offset is under investigation.

The GPS buoys of the NOWPHAS system at eleven sites also recorded tsunamis with 20 to 30 centimeters of maximum height (see also: http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/). The tsunami record is processed similarly as the record taken at the Muroto GPS buoy (Kawai *et al.*, 2010). Comparisons of the NOWPHAS records with the numerical model are conducted at eight NOWPHAS buoy stations: East Off Aomori, Off Central Iwate, Off South Iwate, Off North Miyagi, Off Central Miyagi, Off Owase, SW Off Wakayama, and West Off Kochi. The results are shown in Fig. 6. These results indicate a similar tendency as the record at the Muroto GPS buoy shown in Fig. 5.

5. Discussion

The GPS buoy system introduced in this study successfully detected the tsunami due to the 2010 Chilean Earthquake. Its amplitude and phase are generally consistent with the predicted tsunami waveform. However, there are some inconsistencies with the simulated data. First of all, the arrival time of the tsunami was about 30 minutes later than the predicted arrival time. This difference was unanimously observed at all GPS buoys that are established along the Japanese coast. Comparisons by other studies (e.g., Satake *et al.*, 2010) show similar results.

The difference of arrival times of about 30 minutes may have to be investigated by considering various factors such as the water depth model, the spatial resolution of gridding, modeling errors, as well as the source location. The prediction of tsunami heights is fairly consistent with observed heights, suggesting that the prediction of inundation height at the coast may be made with considerable precision. Further improvements of the numerical simulation may be necessary for a better prediction of tsunami arrival time and

the differential effects of arrival times due to dispersion between long period and short period sea waves.

When a comparison between a numerical simulation and observation is being carried out, one significant advantage of a GPS buoy compared with a coastal monitoring system such as tide gauges is that the GPS buoy is less affected than tide gauges by local geomorphological effects or non-linear effects due to basal friction, etc. Moreover, a GPS buoy can record not only tsunami but also wind waves. Therefore, a GPS buoy can be utilized for daily sea surface monitoring, and not just for tsunami.

Currently, the GPS buoy system uses RTK-GPS which requires a land base for the precise positioning of the buoy. This limits the distance of the buoy from the coast to, at most, 20 km. Establishment of the buoy further from the coast is truly important to achieve a longer lead-time for evacuating nearby coasts. There are two problems to be solved in this regard; one concerns accuracy and the other data transmission. Since tsunami amplitudes decrease as water depths become larger, the detectability requirement of a GPS buoy is more demanding in deeper ocean. If the distance of a GPS buoy from the coast is larger, currently used RTK-GPS may not achieve centimeter accuracy. We are trying to introduce another algorithm for solving this problem. One possibility is the so-called precise point positioning algorithm in which a baseline is not used for estimating the position, but only a single station is used (Geng *et al.*, 2010a, b). We are now testing if such an algorithm can achieve centimeter accuracy in the current GPS buoy system.

Another problem of deployment further from the coast would be data transmission. Currently, we are using radio for data transmission. Since we use a dual radio band, data transmission is very reliable; data have been acquired without loss of lock in rough water, even close-by the passage of a typhoon. However, radio transmission would not be feasible, if the distance of the GPS buoy is far from the coast, say more than 50 km. Satellite data transmission would be more reliable in such a situation. However, such satellite data transmission is still not cost-effective. Future cost reduction of satellite data transmission is truly needed for earlier tsunami detection.

6. Conclusion and Remarks

The GPS buoy that has been operated nearby Cape Muroto, southwest Japan, successfully detected a tsunami due to the February 2010 Chile Earthquake. The maximum amplitude of the tsunami was about 20 cm from crest to zero in height. The tsunami had also been recorded at all the other GPS buoys established as part of the NOWPHAS system along the Japanese coast.

In order to use a GPS buoy for tsunami disaster mitigation, however, there are still some problems to be solved. One such problem is that the numerically simulated record predicted tsunami arrived about 30 minutes earlier than the observed tsunami. The causes of such a difference require clarifying and numerical simulation modeling should be improved. Also, the deployment of buoys further from the coast is indispensable for earlier detection and the evacuation of people. When such problems are solved, an array of GPS buoys for monitoring tsunami will provide us a powerful tool for mitigating disasters due to tsunami.

Finally, a very large earthquake of M_w 9.0 occurred offshore of the northeastern part—known as Tohoku—of Japan and a huge tsunami of more than 30 meters of run-up heights devastated the whole area along the Pacific coast of Tohoku. The earthquake and tsunami caused more than 20,000 people to be accounted as dead or missing. The GPS buoys that were deployed a few years before the earthquake by the Minstry of Land, Infrastructure and Tourism (MLIT) recorded significant tsunami higher than 6 m at the offshore South Iwate (near Kamaishi City) before its arrival at the coast (Takahashi *et al.*, 2011). The records at the GPS buoys were monitored at the Japan Meteorological Agency and led to an updated tsunami early warning of more than 10 meters at the coast. Detailed investigations of the tsunami and the effectiveness of the GPS buoys are still underway and will be reported elsewhere.

Acknowledgments. The authors are indebted to Dr. Daisuke Tatsumi and Dr. Hiroyasu Kawai of the Port and Airport Research Institute for a discussion of the data of NOWPHAS GPS buoys. The observed data of Fig. 6 was provided by the Ministry of Land, Infrastructure and Tourism (MLIT). This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (S) 21221007.

References

Geng, J., X. Meng, A. H. Dodson, M. Ge, and F. N. Teferle, Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning, *J. Geod.*, **84**(12), 705–714, 2010a.

Geng, J., F. N. Teferle, X. Meng, and A. H. Dodson, Towards PPP-RTK: ambiguity resolution in real-time precise point positioning, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2010.03.030, 2010b.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, **52**(10), 841–845, 2000.

Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, *Earth Planets Space*, **57**, 297–301, 2005.

Kato, T., Y. Terada, T. Nagai, K. Shimizu, T. Tomida, and S. Koshimura, Development of a new tsunami monitoring system using a GPS buoy, *Proc. Int. Symp. on GPS/GNSS 2008*, 846–851, 2008.

Kawai, H., M. Satoh, T. Nagai, and K. Kawaguchi, Analysis on shallow-water transformation of the 2010 Chilean tsunami on the Japanese coast by GPS buoy network, *Rep. Port Airport Res. Inst.*, **49**(4), 2010 (in Japanese with English abstract).

Monahan, D., Mapping the floor of the entire world ocean: the General Bathymetric Chart of the Oceans, *J. Ocean Tech.*, **3**, 108, 2008.

Nagano, O., F. Imamura, and N. Shuto, A numerical model for far-field tsunamis and its application to predict damages done to aquaculture, *Nat. Hazards*, **4**, 235–255, 1991.

Satake, K., S. Sakai, T. Kanazawa, Y. Fujii, T. Saito, and T. Ozaki, The February 2010 Chilean tsunami recorded on bottom pressure gauges, presented at the JpGU 2010 meeting (May 23–28 2010 at Makuhari, Chiba, Japan), MIS050-P05, 2010.

Shimizu, K., T. Nagai, J. H. Lee, H. Izumi, M. Iwasaki, and T. Fujita, Research on realtime tsunami detection system using offshore water surface elevation data, *Ann. J. Civil Eng. Ocean*, **22**, 523–528, 2006 (in Japanese with English abstract).

Takahashi, S. and other 33 co-authors, Urgent survey for 2011 Great East Japan earthquake and tsunami disaster in ports and coasts, *Technical Note of the Port and Airport Research Institute*, No. 1231, 200 pp., 2011 (in Japanese with English abstract).

T. Kato (e-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp), Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura

［参考資料2011-2］

International Global Navigation Satellite Systems Society
IGNSS Symposium 2011

University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia
15 – 17 November 2011

Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy

Yukihiro Terada (1)
Kochi National College of Technology, Japan
Phone: +81-88-864-5586, Email: terada@ce.kochi-ct.ac.jp
Teruyuki Kato (2)
Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan
Phone: +81-3-5841-5730, Email: teru@eri.u-tokyo.ac.jp
Toshihiko Nagai (3)
Port and Airport Research Institute, Japan
Phone: +81-46-844-5010, Fax: +81-46-841-8307, Email: nagai@pari.go.jp
Shunichi Koshimura (4)
Graduate School of Engineering, Tohoku University, Japan
Phone: +81-22-795-7516, koshimura@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp
Toshihide Miyake (5)
Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation, Japan
Phone: +81-6-6551-9312, Email: miyake_t@hitachizosen.co.jp
Hitoyoshi Nishimura (6)
Machinery & Infrastructure H.Q., Hitachi Zosen Corporation, Japan
Phone: +81-3-6404-0813, Email: nishimura_h@hitachizosen.co.jp
Satoshi Kunihiro (7)
Kochi National College of Technology, Japan
Phone: +81-88-864-5586, Email: s1218@gm.kochi-ct.jp

ABSTRACT

A new tsunami observation system has been developed, which employs an RTK-GPS technique to detect and monitor a tsunami in real-time manner before it reaches the coast. The GPS antenna attached on the top of a buoy floating at the sea surface is one of the important apparatus in this system. The estimated positions of the antenna includes not only tsunami but also all kinds of sea surface changes including wind waves, tides etc. The low pass filter is used for extracting tsunami.

After a series of preliminary experimental studies, the operation-oriented experiments were conducted at two offshore sites. These systems succeeded to detect three tsunamis whose amplitudes are nearly 10cm. They are 23rd June 2001 Peru earthquake, 26th September 2003 Tokachi earthquake and 5th September 2004 Kii earthquake. These results showed that the GPS buoy is useful for early detection of tsunami. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has established the GPS buoy system for monitoring sea waves with twelve GPS buoys along the Pacific coast of Japan since the year of 2007. The experimental GPS buoy that was

established off Cape Muroto, Southwest Japan, is continuously operating until now. These systems also succeeded to detect 28th February 2010 Chile earthquake and 11th March 2011 Tohoku-Off earthquake tsunamis.

Currently, the GPS buoy system uses a RTK-GPS which requires a land base for precise positioning of the buoy. This limits the distance of the buoy from the coast to, at most, 20km. There are two problems to be solved to deploy the buoy for farther distance from the coast: one is that positioning accuracy decreases as the distance increases and the data transmission by radio becomes difficult for a long distance. The improved RTK method and 400MHz radio system for 50km long baseline in the Muroto GPS buoy are under examination. Moreover; introducing a new algorithm of precise point positioning with ambiguity resolution method is also planned for 100 km offshore observation.

KEYWORDS: GPS, Tsunami, Precise positioning, Real-time monitoring

1. INTRODUCTION

If a buoy with a sensor for detecting the sea surface height change is set offshore distant enough from the coast and the data are transmitted in real-time, detection of a tsunami can be effectively used for disaster mitigation. We have developed a GPS buoy for this purpose, in which a GPS antenna is equipped at the top of a buoy floating at the sea surface (Kato et al., 2000). Real-time kinematic (RTK) GPS technology has been used for dissemination of data. A GPS antenna is placed on top of a stable buoy at sea, and the variations of the sea surface relative to a stable location on land can be monitored as shown in Fig. 1. The vertical motion of the buoy is most important for tsunami detection and some detection algorithm is required to effectively detect tsunami among other components of wind waves. Since the wavelength of tsunami is much longer than wind waves, detection of tsunami is rather easy by applying simple low-pass filter such as 60-sec or longer than 100 seconds of moving average. Remaining short period waves are also to be used for monitoring wind waves of sea surface, which is also very important for monitoring daily sea surface.

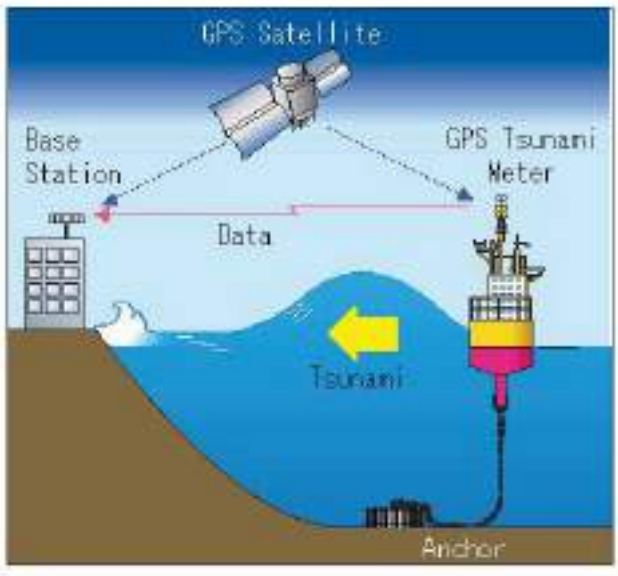


Figure 1. Concept of GPS tsunami monitoring system.

2. GPS TSUNAMI METER

2.1 Sagami Bay Experiment

The first prototype GPS buoy was made in 1997 and a basic experiment was successfully conducted nearby Aburatsubo in the Sagami Bay, about 50km south of Tokyo, Japan (Kato et

al., 1998). We employed a RTK GPS technique in this case such that the obtained carrier phase data were first sent from the base station to the buoy to be processed in the buoy and the obtained results were then transmitted backward from the buoy to the base station. The experiment showed that this tsunami detection system could measure the displacement of sea level in the accuracy of several centimetres.

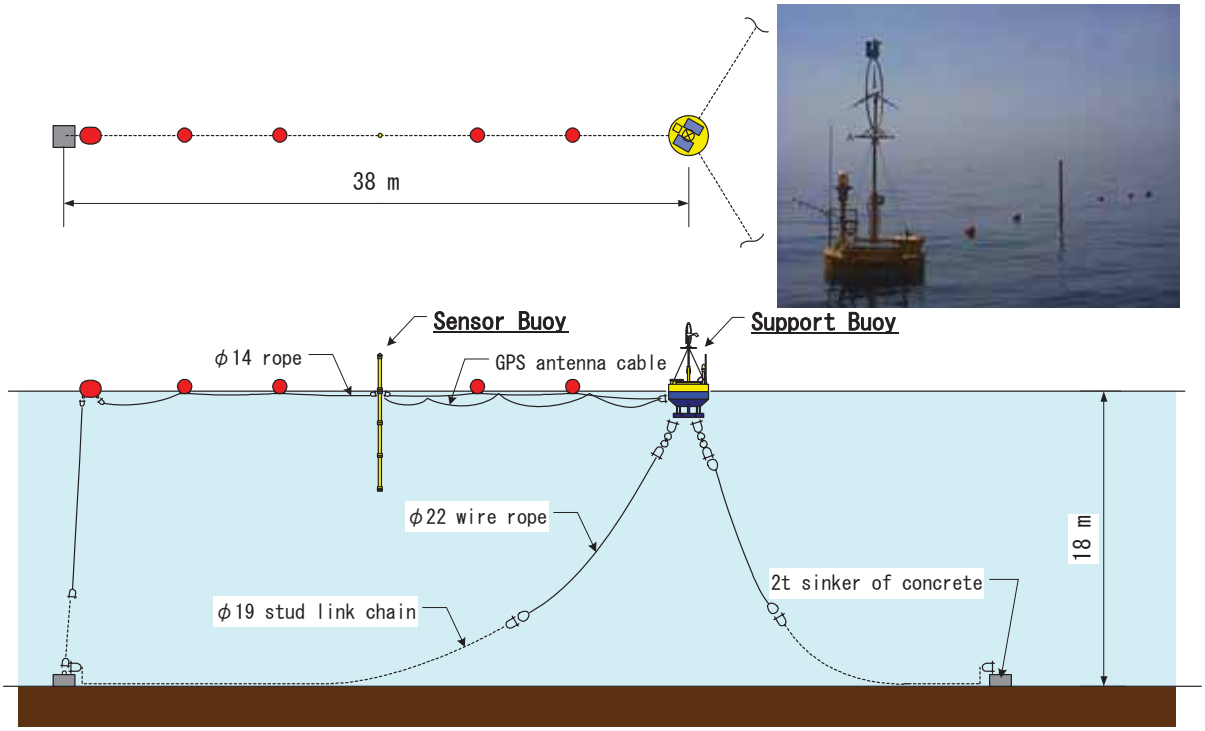


Figure 2. Experimental set up at Sagami Bay.

Then, we developed the second buoy system in which dual buoy system as shown in Fig. 2 - a spur type buoy for GPS sensor and a larger buoy for a receiver and other equipments - was employed (Kato et al., 2000). GPS antennas are mounted at the top of each buoy. The Support-buoy is designed to move with wind-wave and is equipped with GPS receivers, a number of sealed lead batteries, a wind generator, solar panels for power supply, and a pair of rand receiver and transmitter devices. The sensor buoy is a spar-type buoy about 8 m long designed to be resistant to wind wave motion (kelecy et al., 1994; Born et al., 1994). The center of mass of this spar-type buoy is located at several meters below the sea surface, so that the buoy react more to long frequency waves compared to the Support-buoy.

In order for the Support-buoy not to float away or rotate, it has to be anchored by tri-directional sinkers. On the other hand, the Sensor-buoy although connected to the Support-buoy with an antenna cable should be free from any tension as much as possible, other than sea-surface displacement. Thus, the Sensor-buoy is loosely tied to the supporting ropes The float at the farthest end from the Support-buoy is anchored by a single sinker.

The data taken at the Support-buoy and the Sensor-buoy are first stored and processed in GPS receivers installed on the Support-buoy. Then the processed data are transmitted to the land base by 429MHz radio transmissions. The transmitted data (position of GPS sensors) are monitored and stored in the PC at the base station. Although the experiment of this type was successful, we decided that we would not use the system considering that such complicated system may not survive in the rough water in an outer ocean.

2.2 Ofunato Experiment

After a series of preliminary experimental studies, an operation-oriented experiment was conducted offshore Ofunato city, northern Tohoku, Japan, from 2001 to 2003. Fig. 3 shows the GPS buoy system (Kato et al, 2001). The buoy has been anchored at (39°00′36″ N, 141°47′06″ E), which is 1.6 km away from the coast of Ofunato city. The water depth at the buoy is about 50 m and the buoy is anchored with tri-directional 57 ton anchors with an intermittent depth sinker. The horizontal movement of the buoy is thus limited to within the circle of about 20 m of diameter. Numerical simulation of the buoy's ability to track vertical displacements of the sea surface long wave shows that almost any possible sea surface displacement will be reflected by the vertical position of the buoy. Therefore, the buoy may move sufficiently freely to detect a considerable tsunami, though a small correction may have to be made for accurate estimation of wave height changes.

GPS antenna was set at the top of a buoy and 1-sec sampling data were transmitted to the ground base of about 1.6km distance. The data was processed at the ground base and the estimated 3D positions were disseminated through internet. In this experiment, a simple low-pass filter that uses 60-second moving average was first applied to the data. As our ultimate goal is to be able to detect a tsunami and establish the tsunami warning system, the estimated position of the buoy is further transmitted to the city hall and the fire station of the city for real-time viewing. Data can also be monitored and downloaded through a web page.

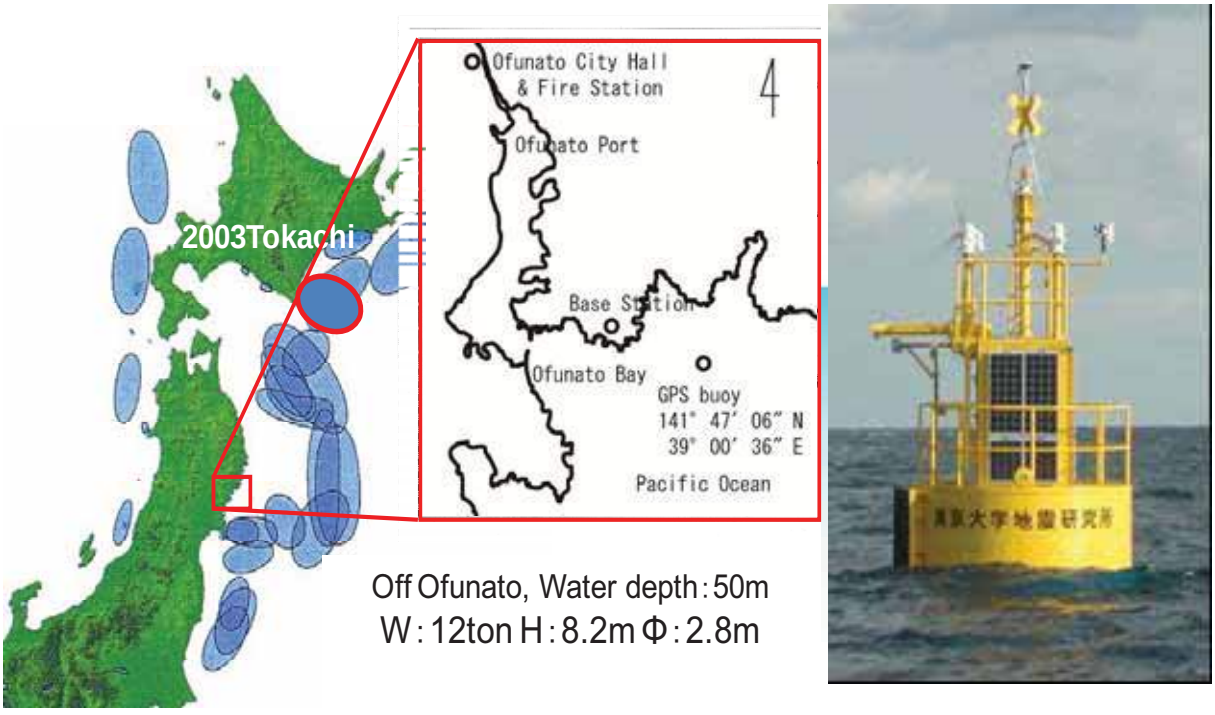


Figure 3. GPS Tsunami Meter at Off-Ofunato.

This system succeeded to detect two tsunamis of about 10cm in vertical amplitude: 23rd June 2001 Peru earthquake (Mw8.4) and 26th September 2003 Tokachi earthquake (Mw8.3) as shown in Fig.4 and Fig.5 respectively. The GPS observation data and the fuse -typed tide gage data operated by Japan Meteorological Agency (JMA) are shown in both figures. And, these tide gage data are plotted under 20 cm of the GPS observation data for comparison easy. Both records showed good agreement in the tsunami profile and the GPS tsunami meter has detected tsunami several minute earlier than a tide gauge.

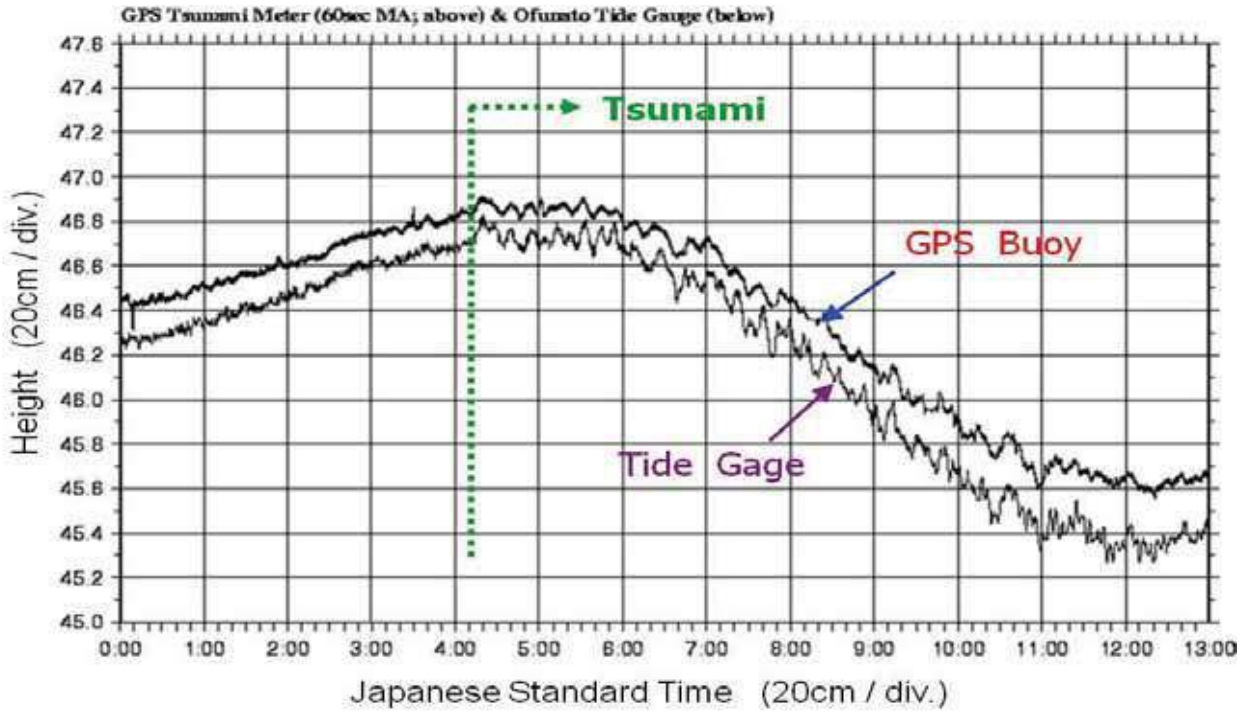


Figure 4. Peru earthquake tsunami on 23rd June 2001.

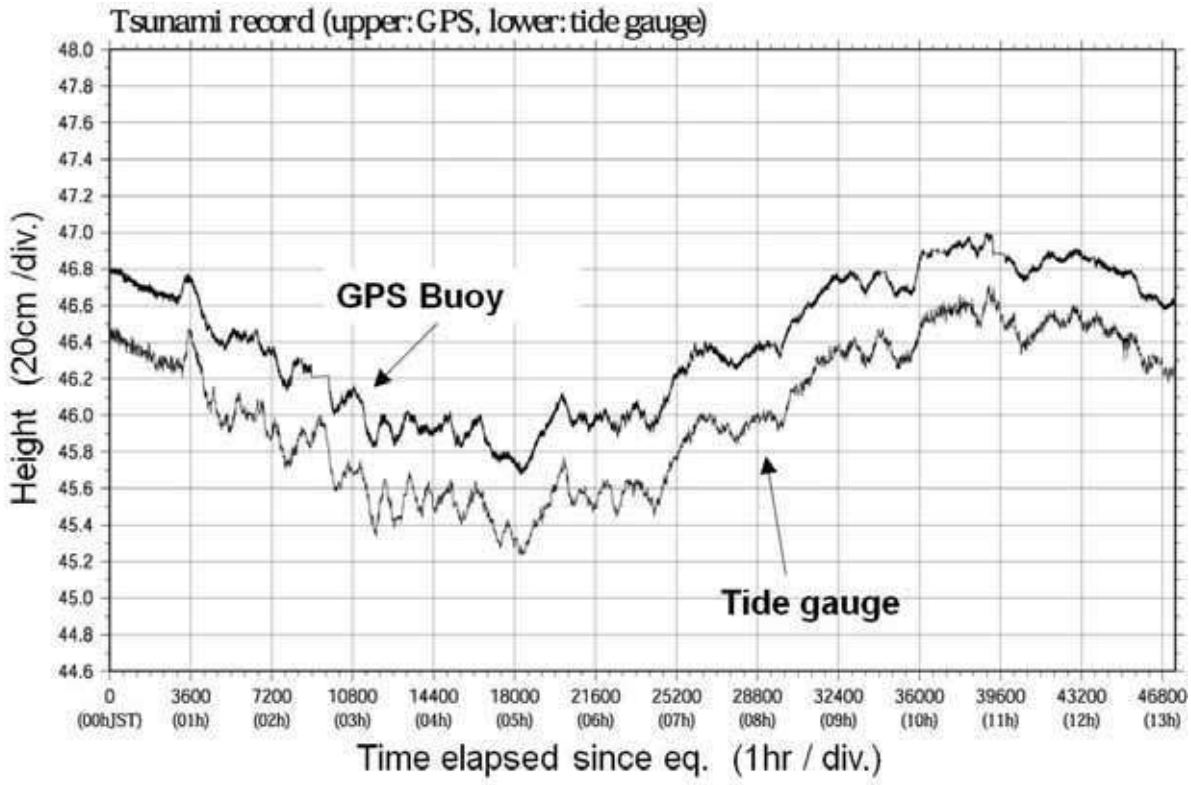


Figure 5. Tsunami due to Tokachi-Oki earthquake on 26th September 2003.

Also, observed Ofunato-off GPS buoy data were compared with nationwide coastal wave observation network data. Fig.6 shows the results of spectrum analysis of the Ofunato-port 2003 Tokachi earthquake tsunami (Nagai et al, 2005). Four different simultaneous tsunami records were compared in the figure. Fig.7 shows frequency response function based on the offshore GPS buoy, obtained from the Fig.6. Frequency response function was defined as the power spectrum ratio, meaning that tsunami amplification ratio between offshore station and costal tide station. Frequency response function varied due to seabet topography induced natural frequency (Nagai et al., 2004a). Pressure gauge-2 shows obvious amplification at the frequency 0.0004 Hz, corresponding to 42 minutes wave period, which was supposed to the harbor natural frequency inside the breakwater. It was concluded that GPS buoy successfully observed ocean waves with wide frequency ranges from wind waves with a few seconds period to astronomical tides with one or half day period, including tsunamis and storm surges.

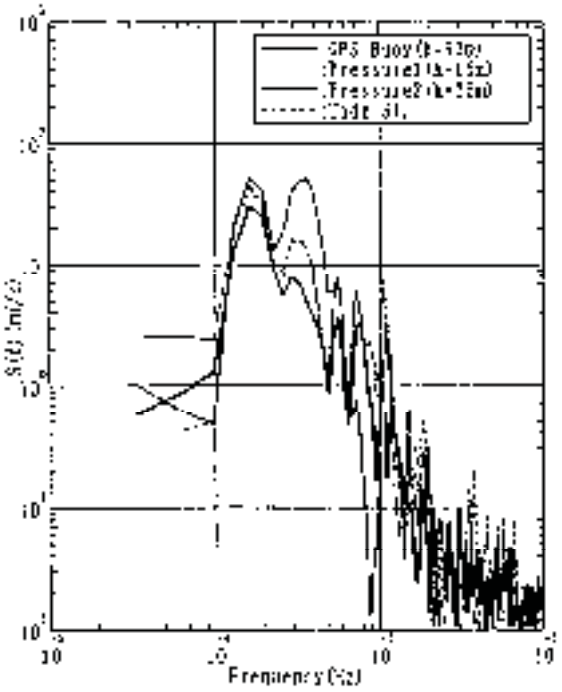


Figure 6. Tsunami spectrum analysis.

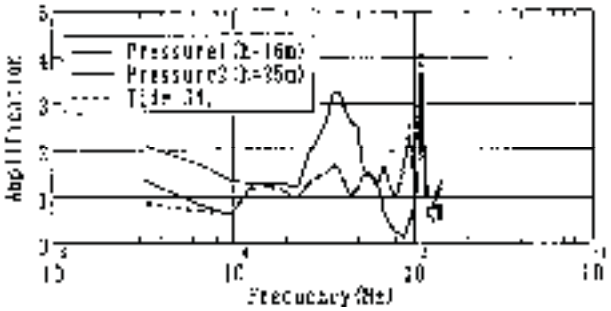
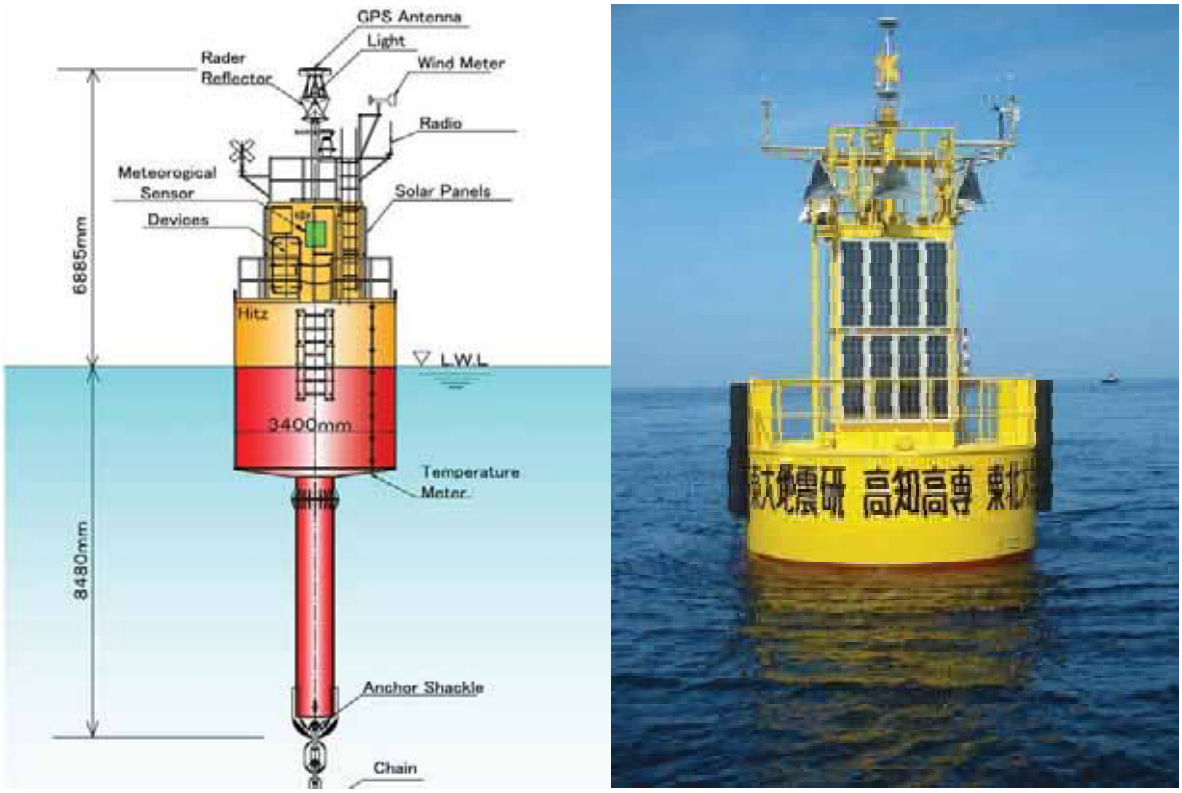


Figure 7. Tsunami spectrum response analysis

2.3 Muroto Experiment

After the successful experiment in Ofunato, a newly designed system was established about 12.6 km south of Cape Muroto, southwestern Japan in early April 2004 as shown in Fig. 8(a). The water depth is about 95m. The GPS buoy system is similar to that used offshore Ofunato. However, considering more practical application to tsunami disaster mitigation, it is designed to survive for more harsh oceanic environments for offshore than the case of Ofunato. The data are acquired on board the buoy at a one second sampling interval and are transmitted in real time by radio to the ground base. The ground base also has a GPS instrument and RTK processing is done at the ground base. RTK processed positions of the buoy are first applied by low-pass filtering using a simple moving average technique and are then forward to web server for real time monitoring of the change of sea-surface using VPN (Virtual Private Network) technology. The web page was redrawn every 30 seconds.



(a) 1st stage GPS Buoy (b) 2nd stage GPS Buoy

Figure 8. GPS Tsunami Meter at Off-Muroto (http://www.tsunamigps.com)

The buoy has experienced nearby passages of several typhoons with the maximum wave of about 20 meter in height and has shown a total integrity for an operational use. On September 5th 2004, a large earthquake of Mw7.4 occurred about 200km east of the buoy and generated significant tsunami. As shown in Fig. 9, the GPS buoy successfully recorded the tsunami with about 10cm of vertical amplitude at the first peak arrival of about 10 minutes before its arrival at the nearest coast of Cape Muroto (Kato et.al, 2005). Fig.9 also indicate that the simulated record has shown excellent consistency with the observed tsunami, suggesting high potential for predicting tsunami height at the coast before its arrival, if the record is efficiently implemented in the tsunami warning system. The research and development are continuously performing at Muroto experimental site. The newly developed buoy and other equipments were deployed in the middle of April 2008 to the west from the tip of the Muroto Promontory as shown in Fig. 8(b). The water depth of the site is about 136 m. The ground base was set at 50 km distant from GPS buoy to develop a new GPS positioning method for long baselines. Moreover, a ground base at 13km distances is operating for real-time tsunami data observation on internet web site (http://www.tsunamigps.com). The system also succeeded to detect tsunamis due to 28th February 2010 Chile earthquake (Kato et. al, 2011) and 11th March 2011 Tohoku-Oki earthquake. The observation tsunamis were shown in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

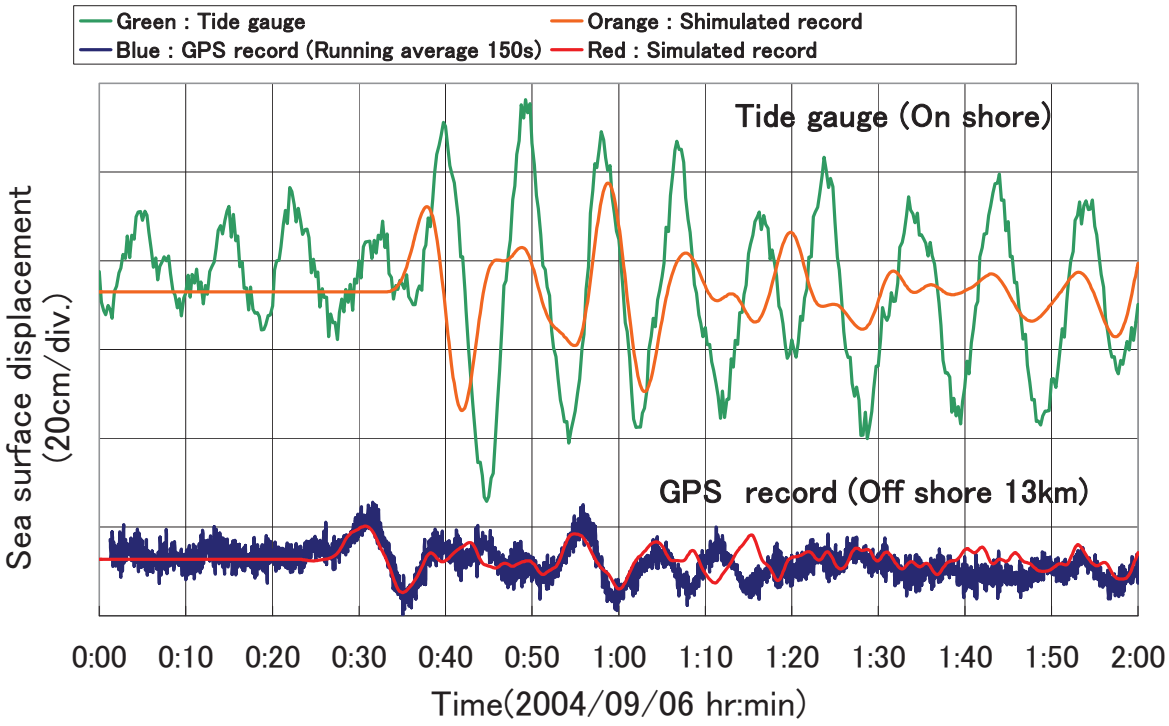


Figure 9. Tsunami due to Off Kii Peninsula earthquake on 5th September 2004.

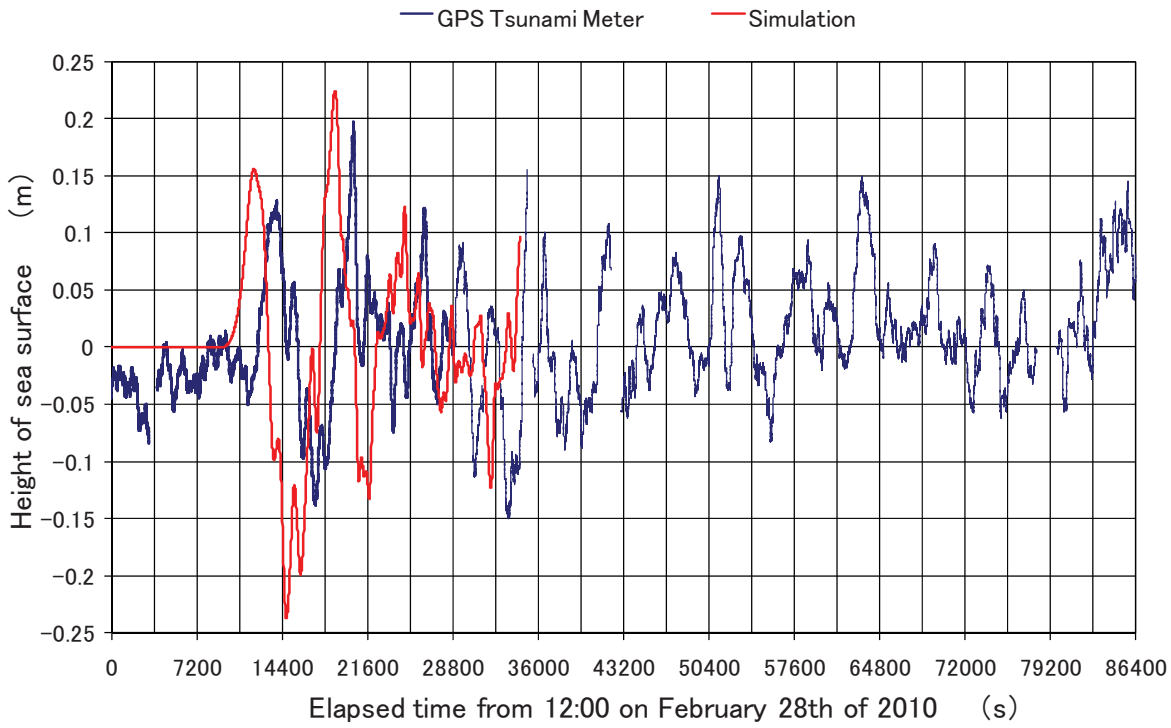


Figure 10. Tsunami due to Chile coast earthquake on 27th February 2010.

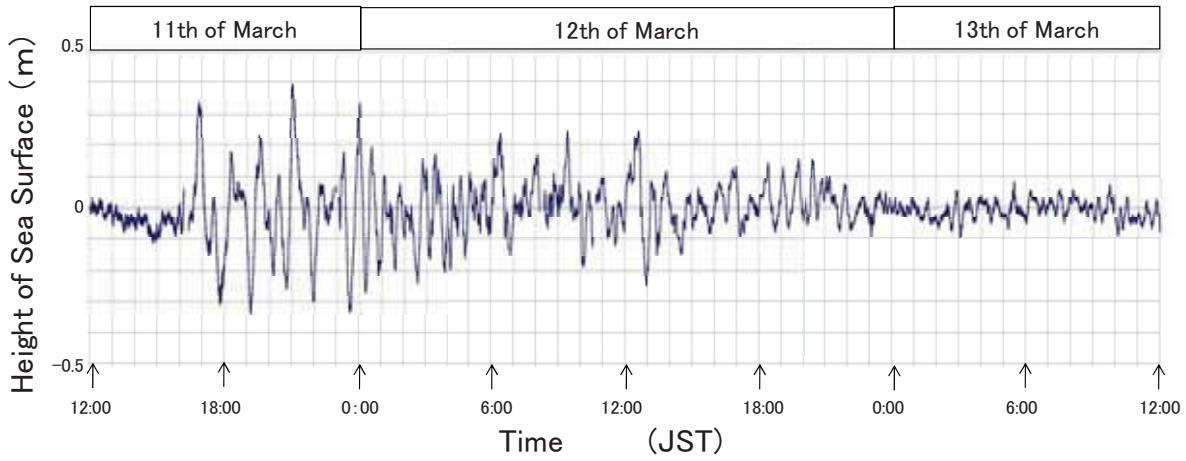


Figure 11. Tsunami due to Tohoku-Oki earthquake on 11th March 2011 (Muroto GPS buoy).

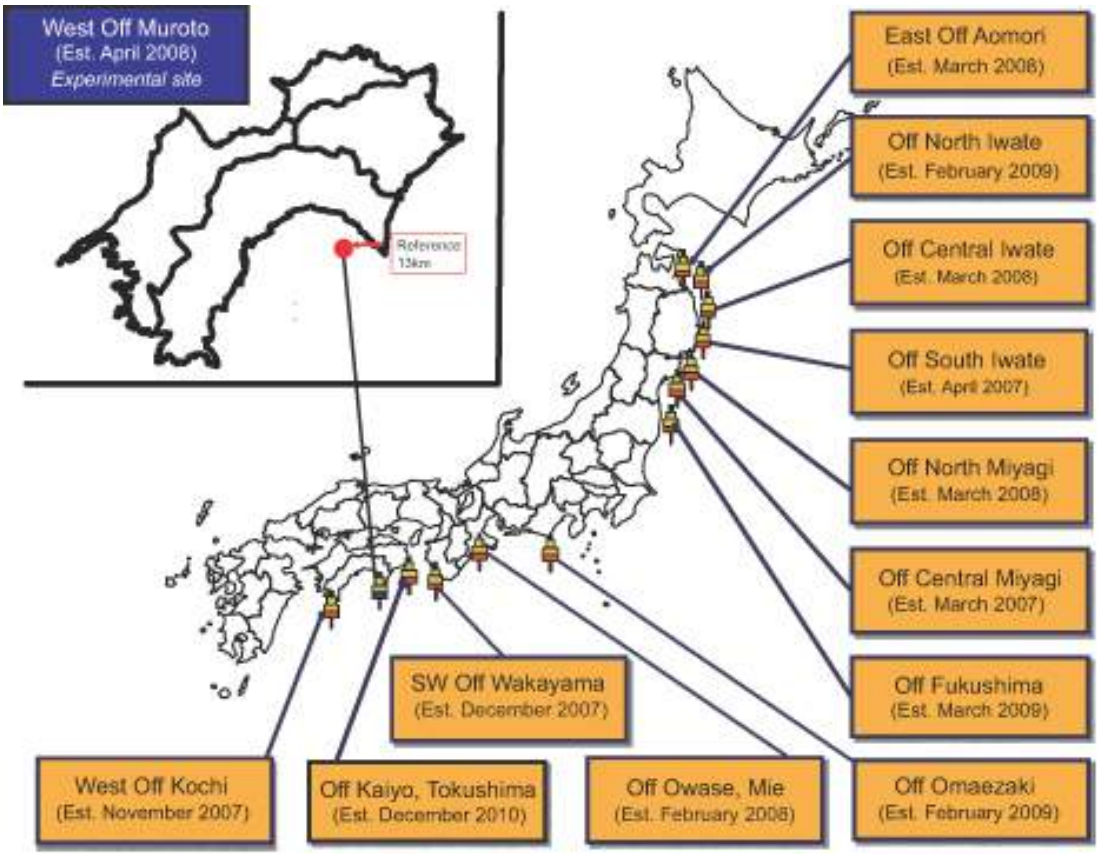


Figure 12. Locations of NOWPHAS GPS Buoys established by MLIT.

2.4 Implementation NOWPHAS

The developed GPS buoy system is also capable of monitoring sea waves that are mainly caused by winds. Only the difference between tsunami and sea waves is their frequency range and can be segregated each other by a simple filtering technique. Given the success of GPS buoy experiments, the system has been adopted as a part of the Nationwide Ocean Wave information system for Port and HArborS (NOWPHAS) by the Ministry of Land,

Infrastructure, Transport and Tourism of Japan (MLIT). As shown in Fig.12 they have established more than twelve GPS buoys along the Japanese coasts and the system has been operated by the Port and Airport Research Institute. These GPS buoys along the coast of the Pacific Ocean also detected tsunamis due to Chile earthquake (Kato et.al, 2011) and Tohoku-Oki earthquake.

Figure 13. Tsunami due to Tohoku-Oki earthquake on 11th March 2011 by a GPS buoy.
Real time 24hr data of GPS buoy at Off South Iwate (Kamaishi)
(http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/)

3. TOHOKU-OKI EARTHQUAKE TSUNAMI

A giant earthquake of Mw9.0 occurred offshore Tohoku District, northeast Japan, and devastated the whole area surrounding the Pacific Ocean. An enormous tsunami generated by the earthquake caused more than 20,000 people of deaths and missing in the area. Fig. 13 shows the real-time tsunami records of 11th March 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami observed by GPS buoy of NOWPHAS at the Off South Iwate (Kamaishi). Over 6 m tsunami height is observed. The Japan Meteorological Agency which observed this data updated the level of the tsunami warning to the greatest value, as the height of the tsunami at the coast will be much exaggerated to the observed tsunami in the offshore. After the highest wave was observed, real-time distribution of the tsunami data stopped suddenly. Since the data of all GPS buoys installed in this area stopped at once, it was anticipated that the cause is interception of a communication network by electric power loss. However, as the backup power supply worked effectively at the each land base stations, recordings of the tsunami were continued. Fig. 14 shows the examples of full wave form recordings of Tohoku-Oki earthquake. Almost all of the observation sites of NOWPHAS successfully recorded the full wave form of tsunamis.

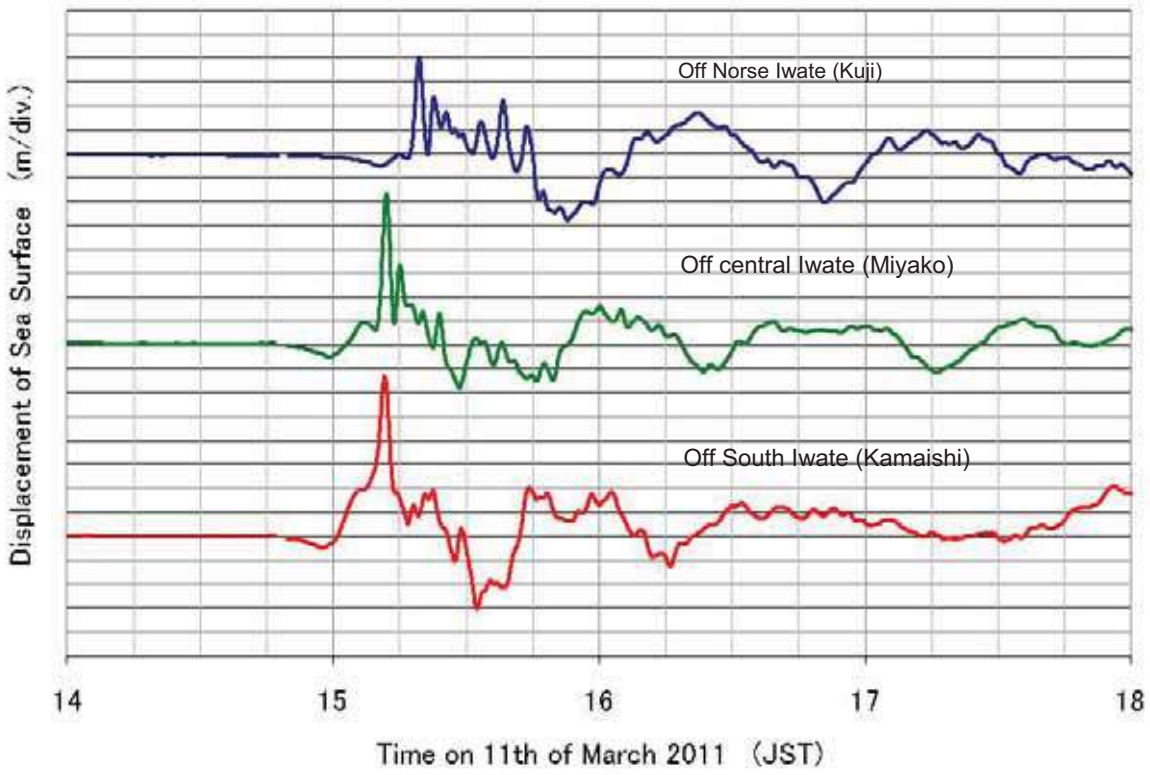


Figure 14. Tsunamis due to Tohoku-Oki earthquake on 11th March 2011 by GPS buoys.

4. CONCLUSION AND REMARKS

A tsunami monitoring system using a GPS buoy has been developed for more than fourteen years. This system provides that tsunami can be measured in the accuracy of several centimetres. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) is promoting a national project of establishing GPS buoys along the Japanese coast. The real-time tsunami data of 11th March 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami was observed by these GPS buoys. The Japan Meteorological Agency utilized the data to update the tsunami early warning before land communication was destroyed. And, the complete tsunami wave form was obtained by using backup power supply at the land base. However, failure of the communication network on land left a problem for the system to be solved in the future. In order to solve this problem, for example, it may be necessary to use a satellite communication. Robust system against power failure is essential for earthquake and tsunami disaster prevention.

Currently, the GPS buoy system uses a RTK-GPS which requires a land base for precise positioning of the buoy. This limits the distance of the buoy from the coast to, at most, 20km. There are two problems to be solved to deploy the buoy for farther distance from the coast. One is that positioning accuracy decreases as the distance increases and the data transmission by radio becomes difficult for a long distance.

The improved RTK method and 400MHz radio system for 50km long baseline in the Muroto GPS buoy are under examination. Moreover, introducing a new algorithm of GPS data analysis - precise point positioning with ambiguity resolution method - is also planned for a 100 km offshore observation (Geng et.al., 2010a,b). We are now testing if such an algorithm can achieve centimetre accuracy in the current GPS buoy system.

Since we use a dual radio band, data have been acquired without loss of lock in rough water, even close-by the passage of a typhoon. However, radio transmission would not be feasible, if the distance of the GPS buoy is far from the coast, say more than 50km. Satellite data transmission would be more reliable in such a situation. However, such satellite data transmission is still not cost-effective. Future cost reduction of satellite data transmission is truly needed for earlier tsunami detection.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express deepest thanks to many people for their support to this research. The data shown in the Fig. 12, Fig.13 and Fig.14 were provided by the Ports and Harbors Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure and Tourism (MLIT). This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (S) 21221007.

REFERENCES

Born, G. H., M. E. Parke, P. Axelrad, K. L. Gold, J. Johnson, K. W. Key, D. G. Kubitschek, and E. J. Clisteensen, Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy, J. Geophys., Res., 99 24517-24526,1994.

Geng. J., X. Meng, A. H. Dodson, M. Ge, and F. N. Teferle, Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning, J. Geod., 84(12), 705-714, 2010a.

Geng. J., F. N. Teferle, X. Meng, and A. H. Dodson, Towards PPP-RTK: ambiguity resolution in real-time precise point positioning, Adv. Space Res., doi:10.1016/j.asr.2010.03.030, 2010b.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, and A. Yokoyama, GPS tsunamikei no kaihatsu, Gekkan Kaiyo, Special Vol. 15, 38-42, 1998 (in Japanese).

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real time observation of tsunami by RTKGPS, Earth Planets Space, 52(10), 841–845, 2000.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, T. Moriguchi, M. Takada, T. Tanno, M. Kanzaki, and J. Johnson, A new tsunami monitoring system using RTK-GPS, in Proceedings of the International tsunami Symposium 2001, Session 5,number 5-12, 645-651,2001.

Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, 57, 297-301, 2005

Kato, T, Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura, Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, Earth Planets Space, doi:10.5047/eps.2011.05.001, 63, e5–e8, 2011.

Kelecy, T.M., G.H. Born, M.E.Parke, and C. Rocken, precise mean sea level measurements using the Global Positioning System, J. Geopys. Res., 99, 7951-7959, 1994.

Nagai, T., H. Ogawa, K. Nukada, and M. Kudaka, Characteristics of the observed 2003 Tokachi off earthquake tsunami profile, Coastal Engineering Journal, Vol.46, No.3, Japan Society of Civil Engineers, pp.315-327, 2004a.

Nagai, T., S. Satomi, Y. Terada, T. Kato, and M. Kudaka, GPS buoy application to offshore wave, tsunami and tide observation, proceedings of the 29 the International Conference on Coastal Engineering, ICCE2004, 1093-1105, 2004.

Nagai, T., S. Satomi, Y. Terada, T. Kato, K. Nukada, and M. Kudaka, (2005b). “GPS Buoy and Seabed Installed Wave Gauge Application to Offshore Tsunami Observation,” Proc 15th (2005) Int Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Vol 3, pp 292-299, 2005.

［参考資料2013-1］

測地学会誌，第59巻 第3号
(2013)，87-97 頁

Journal of the Geodetic Society of Japan
Vol. 59, No. 3, (2013), pp. 87-97

GPS：次の“夢”に向けて～「GPS大学連合」の視点から～

加 藤 照 之[1)]
1) 東京大学地震研究所

(2013年6月1日受付，2013年8月10日改訂，2013年8月12日受理)

Global Positioning System: Toward the Next Dream – From the View Point of the Japanese University Consortium for GPS Research (JUNCO) –

Teruyuki Kato[1)]
1) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
1-1, Yayoi 1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

(Received May 1, 2013; Revised August 10, 2013; Accepted August 12, 2013)

Abstract

Progress of GPS application to crustal deformation researches has been reviewed from the stand point of "Japanese University Consortium for GPS Research" (JUNCO). JUNCO was established in 1987 when a lot of dual frequency GPS receivers were introduced abruptly under the national projects of earthquake prediction and volcanic eruption prediction. The consortium aimed to exchange information on GPS research and to promote joint observational researches in Japan. Thus, a number of cooperative observational studies have been conducted under the name of JUNCO since its establishment. Such studies include not only domestic nationwide and local dense array campaign observations but also international projects in Asian and Pacific regions. Later, as the Geographical Survey Institute (now, Geospatial Information Authority of Japan) established the nationwide GPS observation network (GEONET), edge cutting researches have been made using GEONET data. The GPS technology is now becoming a fully-fledged technology. Due to the developments of other satellite navigation systems other than GPS, these systems are collectively called as Global Navigation Satellite System (GNSS). Given this new trend of technology, we may have to seek for a new trend of applications of the technology. Some possible innovative applications to earth science are discussed.

1. はじめに

GPS（Global Positioning System）は米国を中心として1970年頃から開発された，衛星を用いた測位航法技術であり，長らく世界をリードする航法技術であった．最近では類似の様々なシステムが開発され，衛星を用いた測位航法技術を，より一般的にGNSS（Global Navigation Satellite System）と称するようになってきた．しかし，本稿では歴史的な経緯に多く触れることになるので，特に断らない限りGPSと呼ぶこととする．筆者は歴年「GPS大学連合」に関わってきたこともあるので，その視点から日本におけるGPSを用いた地殻変動の研究の歴史を概観し，今後の可能性を探ってみたい．但し，ここで述べることは「GPS大学連合」のメンバーによる総意などではなく，あくまでも個人的なレビューに類するものである．

GPSが初めてその姿を地球科学者の前に姿を現したのは1980年前後であろう．当時姿を現したのはJPLによっ

て開発されていたSERIESと呼ばれるシステムである（Figure 1：e.g., Parkinson, 1979; MacDoran, 1979）．まだ現在のような小さなものではなく，自動車に搭載するようなかなり大掛かりなものであったが，それでも，その頃宇宙測地技術として急速に発展してきたVLBIやSLRなどよりははるかに小型で，個人研究者でも扱えそうなものであった．1980年台の宇宙測地技術はVLBIとSLRの全盛期であると言ってよい．1970年台に"作業仮説"として地質学の分野で完成したプレートテクトニクスを測地の手法によって実証して見せたのがこれらの技術である．NASAがCDP（Crustal Dynamics Project）を開始したのが1978年のことであり，まさに仮説としてのプレートテクトニクスを，宇宙測地技術を用いて検証しようとしたプロジェクトである．

Figure 1: GPS signal receiving system that had been developed by JPL（Parkinson, 1979）

一方，GPSにとっては，1980年代は導入の10年であったといえる．Counselman and Gourevich（1981）によっていわゆる干渉測位方式が提唱されてcm精度で基線推定が可能であることが示唆されたことから地殻変動研究への応用の可能性に大いに期待が高まってきた．日本では，東大地震研・国立天文台のグループによる研究がその始まりであったと言ってよいだろう．このグループにより国内初の2周波用受信機GTT4000型（SONY社製）が作成された（Figure 2）．この受信機によって試験観測が実施され，10 km程度の基線で2，3 cmの繰り返し精度が確認された（村田他，1990a）．少し遅れて電波研究所（現通信総合研究機構）でもPRESTARと呼ばれる新しいGPS受信機が試作されるなどの動きもあった（Sugimoto *et al.*, 1989）．日本ではしばらく基礎的な研究にとどまっていたものの，1987年頃，次世代の測量方式として地震予知・火山噴火予知研究計画の中で突然大規模に導入された．当時の日米貿易摩擦を解消するためであったらしいが，日本の大学・研究機関に一度に100機近いGPS受信機が導入されることとなった．主として導入されたのはWM102（当初は1周波用のWM101：Wild-Magnavox社製），4000SD（Trimble社製），Mini-Mac 2816（AeroService社製）の3種類の2周波受信機であった．それぞれの写真をPhotograph 1に示す．

この受信機の大量導入は日本のGPS研究者にとって極めて重要な転機となった．まだGPSの高精度解析の手法もマスターできている研究者がおらず，当時Bern大学に在籍していたBernese softwareの開発者でもあるMarkus RothacherとWerner Gurtnerの両氏を招いてBernese softwareの使用法の説明会兼実習を開催した．これによって多くの大学で精度の高い基線解析ができることとなった．

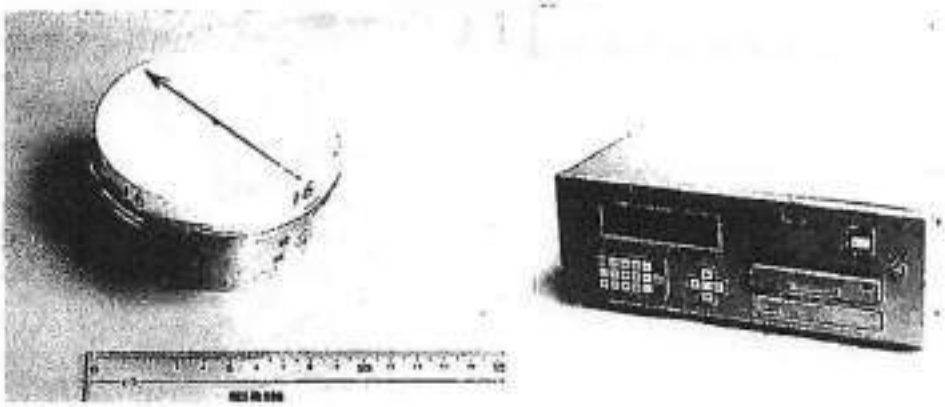


Figure 2: The first GPS receiving apparatus that was introduced in Japan (SONY GTT4000). (Left) antenna, and (Right) receiver. (Murata *et al.*, 1990)

Photograph 1: GPS receiving sets that JUNCO initially introduced: (left) WM101 – picture of WM102 antenna is inserted -, (center) 4000SD, (right) MiniMac 2816.

2. 「GPS大学連合」による合同観測

前記の受信機大量導入に2年ほど先立つ1985年に，GPS研究を推進しようとまず立ち上げられたのが「GPS検討会」である．この組織は大学だけでなく，関係する国立試験研究機関を含む全日本の組織であり，情報交換のため「GPSニュースレター」(第0号(1985)～第99号(1993))を刊行したり，「GPS研究会」を主宰するなどの活動を行った．1987年の受信機大量導入を受けて，これらを有効活用するために「GPS検討会」の中でも大学の関係者を中心に組織されたのが「GPS大学連合」である．「GPS大学連合」では全国の研究者のゆるやかな連携組織として情報交換をしつつ，科研費や地震予知計画・火山噴火予知計画によって，様々な合同観測を行った．相模湾周辺におけるGPS観測（村田他，1990b；木股他，1990）や全国観測（GPS JAPAN：1990～1994）(e.g., The Research Group for "GPS JAPAN '90", 1990)などである．このような活動の延長として超高精度地殻歪観測網計画(約100点)も立案したが日の目をみることはなかった（Japanese University's GPS Consortium, 1988; Figure 3)．しかし，このような全国観測網は国土地理院が現実のものとし，いまや1200点を超える観測網として世界に誇る地殻変動研究のインフラとなった．

GPS JAPAN計画には国際的な観測網の側面があり，台湾や中国・韓国の研究者と共同してGPS観測を実施することとなった．これがのちのWING（Western Pacific Integrated Network of GPS）となって発展していく（Kato

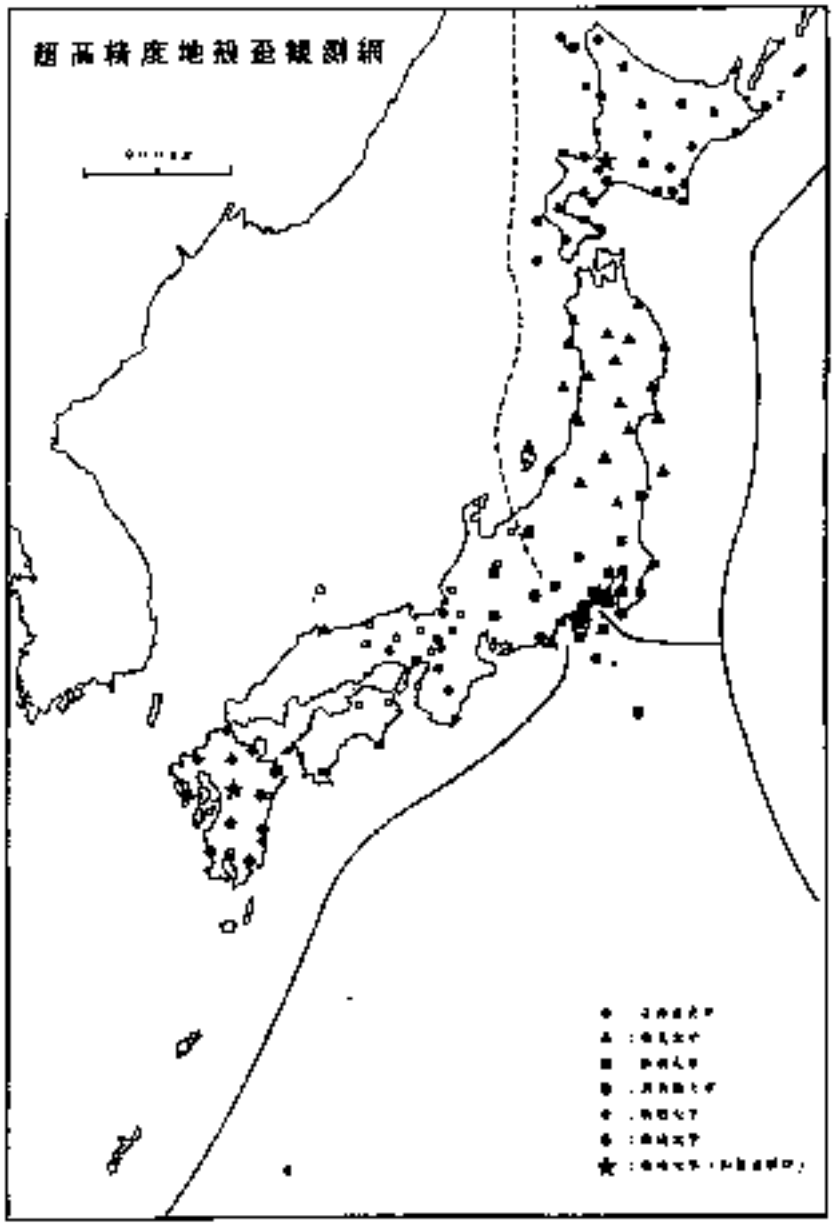


Figure 3: The first nationwide GPS array proposed by JUNCO.

et al., 1998). また，もう一つの「GPS 大学連合」の主たる活動としては伊東市周辺において毎年一回程度の頻密 GPS 観測が実施されたことがあげられる．伊東市周辺では 1976 年頃のいわゆる冷川峠を中心とする異常隆起に引き続いて群発活動がはじまり，1978 年の伊豆大島近海地震（Mw6.6）を契機として群発活動が活発化した．この地震活動による地殻変動を観測するために大学関係者が伊東市に集合して GPS のキャンペーン観測を開始した．1994 年頃から始められたが主として三脚を用いた観測であることから，教員だけでなく多くの学生が参加するところとなり若手育成の場としても用いられることとなった（Asanuma et al., 1994; Japan University Consortium for GPS Research, 1994; GPS 大学連合，1995）．GPS キャンペーン観測では観測機材をセットしてしまうと設置場所の状況によって見張り役が必要な場合を除き，撤収の時まで比較的自由な時間を過ごすことも可能である．そこでこのような時間を利用してセミナーなどの勉強会を開催したり，学生の発表練習を行ったり，あるいは地元自治体の防災施設

を見学したり，さらにはそのような施設を利用させていただいて新しいGPS受信機のテストなどを行うなどの活動を実施した．学生などの若手研究者にとってはこのような場はよい教育の場でもあり，また他大学の学生との交流の場ともなった．このキャンペーンに参加した学生の中には現在各大学で職を得てGPS（GNSS）研究を行っている研究者が何名かいる他，関係する民間会社で活躍している者も多くいる．伊東の群発活動がダイクの貫入と推定されたことから，Segall and Matthews（1997）によって提唱された時間発展インバージョンの手法を用いてAoki et al.（1999）はダイクの貫入プロセスを可視化することに成功した．なお，この時のデータはGPSだけでなく傾斜データも使われている．この手法はそれまでの静的な逆解析手法に比べ時間発展する断層過程を明らかにできることから，断層すべり過程を明らかにする手法としてその後各段に研究が進展するきっかけとなった．伊東での合同集中観測は群発活動の収束と共に2006年までで途絶えているが，その後もひずみ集中帯の観測等でGPS大学連合を母体とする研究グループによって，合同集中観測が実施されている（e.g., ひずみ集中帯GPS観測グループ，2009）

これらの合同観測などによる研究者間の交流は，観測に直接関係する研究成果にとどまらず，GPSの基礎研究の推進をもたらした．1987年から1994年にかけては，ほぼ毎年「GPS研究会（GPSシンポジウム）」が開催され，その議録には様々なその後の進展を予感させるような萌芽的な研究が所収されている．例えば1993年，1994年の研究集会ではその後のGPS気象学へとつながる発表がされているし（市川他，1993; 市川，1994），Hirahara et al.（1994）は1 Hzサンプリングによる地震波抽出の可能性を論じている．

一方，このような大学関係者・学生が多数参加して実施する観測研究においては特有の問題もあった．特にデータの扱いについて様々なタイプの受信機が混じるうえ，キャンペーン観測では記録方式の不統一によって"アンテナ高"の補正が意外と難しいこともあった．またパソコンのデータベースソフトが充実していない中で，このような大規模キャンペーン観測を全国・立案・運営していくのはかなりの困難であったと言えよう．

「GPS大学連合」の英語名称はJapanese University Consortium for GPS Research（略称：JUNCO）としたが，これは当時発者が米国に滞在した際に米国にUNAVCO（University NAVstar Consortium：創設者 Randolph Ware氏）という組織ができておりそれを参考に作ったものである．その後UNAVCOは米国のNational Science Foundation（NSF）などの資金を得て極めて強力な研究組織として発展し，現在でも世界のGPS研究の中心的組織として活動しているのに比べ，日本の「GPS大学連合」がそのような強力な組織となり得ていないのはなぜなのか，後我の研究推進のための組織のあり方の違いについて考えてみるのも一興ではないかと思われる．なお，「GPS大学連合」の英文表記は導入当初は必ずしも統一されておらず，本論文中に引用した関連論文の英語タイトルにいくつかの異なる表記があるがご容赦願いたい．

3. GEONETと日本のGPS研究

国土地理院は1990年代に入ると全国連続観測網（GRAPES）と関東・東海地方の連続観測網（COSMOS-GZ）を構築した（Sagiya *et al.*, 1995; Miyazaki *et al.*, 1996）．これらの観測網は1996年に統合・拡張されてGPS Observation Network（GEONET）と呼ばれる世界に類を見ないほど大規模かつ綿密なGPSの連続観測網となった（Miyazaki *et al.*, 1997, 1999）．国土地理院による全国観測網の構築は大学の研究においても大きな転換点となった．GEONETの完成によって，日本列島で発生する大きな地震の地殻変動を漏れなく観測できることとなり，GPSを用いた地殻変動の研究は多少の研究費があれば"だれでも，どこでも"できる研究となった．少なくとも国内においては「GPS大学連合」として多数の機材を持ち寄って全国観測を行うという必要性は少なくなった．

GEONETによってもたらされた新たな地球科学的な進展としては，スロースイベントの発見（e.g., Heki *et al.*, 1997; Hirose *et al.*, 1999），時間発展インバージョンの適用と発展（Aoki *et al.*, 1999; Ozawa *et al.*, 2002; Miyazaki *et al.*, 2004a; Fukuda *et al.*, 2008）などがあげられるだろう．また，特筆すべきはGEONET観測点が，それまでの世界標準である30秒サンプリングに加えて1 Hzサンプリングによるデータ取得がなされてきたことから，1Hzサンプリングに基づくダイナミックなすべりの解明などが世界に先駆けて行われたことがあげられよう（e.g., Miyazaki *et al.*, 2004b）．GEONETの1 Hzデータをリアルタイムに処理することにより断層の解析モーメント量もほぼリアルタイムで推定することが可能になる．この方式を海溝型巨大地震に適用することにより津波警報の高度化が期

得できるだろう（Ohta *et al.*, 2012）．このようにGPSの高頻度サンプリングは計算技術の発展とあいまって新たな分野への展開をもたらすことになった．

GPSの他分野への応用研究としては，GPS気象学が科学技術振興調整費のプロジェクトとして実施され，気象学の分野の発展にも寄与したことが特筆されるだろう．GPS気象学への展開はGEONETのデータに基づく全国の可降水量推定の準リアルタイム推定を気象データと共にデータ同化し，気象予報の精度向上に役立てることが主たる目的であったが，このプロジェクトの中で大学研究者も独自にアレイ観測に基づいて局所的な大気擾乱への研究に着手することとなった（小司他，2009）．また，電離圏研究の分野でもSaito *et al.*（1998）がGEONETデータを活用して日本列島上空の電離層の擾乱を詳細にマッピングするという先駆的な業績を残しており，この後GPSのアレイを利用した電離圏研究は世界的にも飛躍的な展開をもたらすこととなった．

研究者が日本国内で大量のデータを自由に使えるようになったことから，数理科学的な手法開発とその応用が進んだことがこれらの優れた研究を可能にしたともいえるだろう．その一方で，GEONETでカバーできない部分にも光が当てられ始めた．GEONETは平均して約20 km程度の基線長を持つ，M6クラスの地震であればこのような観測網で十分な地殻変動分布を得ることができるがM7クラスだと詳細な断層面上のすべり分布を得るには不足する．そこで，GEONETの観測網を補完するようなさらに稠密なアレイによる観測が要求される．東北地方や東海地方に展開されている大学による観測網はこのような例である（e.g., 内藤他，2005；Ohta *et al.*, 2006; 松村他，2008）．これらは連続観測が主体であるが，キャンペーン観測によるものもある．前節に述べた，伊東沖辺におけるGPS観測がその例である．さらに，国内で大きな地震が発生した際にも震源断層近傍での余効変動観測を「GPS大学連合」として実施した．特に大がかりであったのは1995年兵庫県南部地震（Mw6.9）に伴う観測であろう．この地震はGPSが導入されて以来，はじめて発生した大規模地震でもあり，多くの大学関係者が観測に参加した．地震に伴う緊急観測の経験がないなかで観測に参加した者は多くの困難を強いられたが，一方要素技術での観測について多くの教訓を得たともいえる．これらの経験不足からくる問題は，例えば現地に入る際の警察や役場との交渉，被災地における食料や宿の確保などのロジスティックス，学校など避難住民がいる中での交渉・観測や被災者に対するふるまい，神戸大学など被災地のGPS観測仲間との連携，通信手段が乏しい中での観測者間の連絡や後方支援にあたっている大学スタッフとの連携などがあげられよう．ここで得た経験はその後引き続く地震に伴う緊急観測において大いに役に立ったように思われる．兵庫県南部地震に伴うGPS観測は約1年半続き，現地での臨時観測の他，連続観測やテレメータ観測が試みられた．得られた余効変動の時系列解析が行われ，断層すべりに摩擦構成則を適用するなどの試みも行われた（Kato *et al.*, 1998; 加藤他，1997）．この経験をきっかけとして，その後2000年の有珠火山噴火（高橋他，2002），同年三宅島噴火と引き続く群発活動（Kimata *et al.*, 2000; 坂東他，2005），同年の鳥取県西部地震（筒井他，2001; Tabei *et al.*, 2001），2003年十勝沖地震（GPS大学連合・笠原他，2004），2004年新潟県中越地震（松島他，2005），2005年福岡県西方沖地震（九州大学他，2005, Nakao *et al.*, 2006），2007年能登半島沖地震（橋本他，2007），2007年新潟県中越沖地震（太田他，2007; 飯沼他，2007）などでも「GPS大学連合」の名前を用いたあるいは複数の大学による合同の集中観測を実施している．橋本（2004）及び川元他（2004）は，2000年鳥取県西部地震の観測で得られた余効変動を，地震時の急激な間隙水圧の変化がひきおこす間隙水の拡散による緩和の過程によるものであるとする考え方で説明しようとする先駆的な研究を行っている．

一方，「GPS大学連合」によって実施された全国観測を足掛かりとして，周辺諸国におけるGPS観測も実施されることとなった．海外における観測の最初のものは1989年に行われたインドネシアにおける観測であろう．この観測はUCSDのYehuda Bockによる参加依頼によって日本から多くの研究者が参加して行われたものである（Bock *et al.*, 1990; Prawirodirdjo *et al.*, 2000）．一方，東大地震研を中心とするグループでは「海半球」プロジェクトなどに参加することにより，西太平洋からアジアにかけての地域で固定連続観測のネットワーク観測を実施した（Kato *et al.*, 1995; 加藤・GPS大学連合，1999）．これらにつづいて，フィリピン，インドネシア，マリアナ等で複数の大学関係者が連携してテクトニックな変位速度場を推定する観測研究が数多く行われた．また，GPS気象学から発展してモンスーン研究などに関連するプロジェクトとしてタイで実施された観測によってタイの変位速度場を算出する試みも行われ（伊江川他，2002; Iwakuni *et al.*, 2004），これを契機として水文学と測地のグループの共同研究として中国大陸から東南アジアにおける様々な地域でのGPS観測が展開されることとなった．

4. 将来に向けた新たな展開の可能性

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.1）はGPSを用いた研究にまた新しい展開をもたらす可能性を秘めているように思われる．この地震によって日本列島全体に大きな地殻変動を生じた（例えばOzawa *et al.*, 2011）．地震時変動だけでなく，大規模な余効変動は今でも続いており，今後永い年月にわたって有意な地殻変動が継続するだろう．このような余効変動から断層面上の物性や地殻・上部マントルの流動特性が明らかにされる可能性が高い．また，GPSから求められた電離層の電子数密度の時間変化に前兆的変化が見られたことも報告されている（Heki *et al.*, 2011）．この地震は人間社会に計り知れない被害をもたらしたが，科学的には稀有の研究機会をもたらしているとも言えよう．

このほかにも，西南日本において繰り返すスロー・イベントの観測は地殻変動データから断層すべりのより根元的な理解を我々に提供してくれる可能性もある．技術的な面で1Hzサンプリングやさらに高頻度サンプリングによるデータが地震波形解析に新しい知見をもたらす可能性もある（e.g., Ebinuma and Kato, 2012）．

さらに，GPSを超えたGNSSの世界における測地学的応用研究の可能性についても新たな展開がはじまった．21世紀に入り，GPS以外の衛星測位技術が急速に開発されるようになった．ロシアによるGLONASSをはじめとして欧州連合によるGALILEO，中国によるCOMPASS（現在はBEIDOU（北斗））などがその例である．このような衛星測位技術は国家の安全保障に関わるため，GPSへの依存を脱却しようとする国家体制がこのような動きを加速したこともその理由であろう．わが国でも，GPSと同時運用可能性をもつ準天頂衛星QZSS（Quasi Zenith Satellite System）が導入され，将来は単独のシステムとしても測位可能なシステムができる可能性がある．これら複数のGNSSシステムの導入及び応用が日本の測地研究をどのように発展させていけるのか大きな期待がもたれている．特にキネマティック応用や高頻度サンプリングによる一段と高いレベルの位置座標推定および伝搬媒質のモニタはどのような新たな地球科学観測の新展開をもたらすだろうか．

GNSSの開発の一番の起源はキネマティックGNSSが受けるのではないだろうか．工業分野におけるキネマティックGNSSの開発研究は加速度的に進みつつあるが，地球科学のフロンティアとして大きな期待が寄せられるのは海洋におけるGNSS観測であろう．既存のGNSS受信機をブイに搭載して波浪をいち早くとらえる津波早期警戒システムを開発しつつあるが，応用はこれにとどまらない．ブイに搭載したGNSSにより海洋での大気の可降水量や高緯層擾乱の観測が可能となるだろう．また，もちろん，音響測距と結合した海底地殻変動観測においても連続観測が可能となるであろう．これらの応用のためには精密単独測位の精度向上や衛星通信を用いたデータ伝送システムの高機能化などの技術開発が必要であるが，これらの課題を解決することにより海洋での測地・地球科学観測が大きく進展するように思われる．日本は島国であるが，そのためにこそかえって海洋（特に西太平洋）における観測によりこれらの分野における貢献が期待できる．Figure 4にこのようなGPSブイアレイ観測網の西太平洋への展開を一例としてあげておく．

このほかにも以下の2点については特に考慮すべきこととして掲げておく：

1）国際的な（物的・人的）ネットワークに基づく観測研究：これまでの国際観測研究の展開によって，多くの国で国際共同観測研究が行われてきた．特にアジアにおいてはアムールプレートやオホーツクプレートあるいはスンダブロック周辺など，さらに目を転じれば中南米やアフリカなど，魅力的な観測フィールドはまだ多く残されているように思われる．相手国との折衝やその地域の若干の育成など，研究以外の苦労も多いのであるが，やはり今後も積極的に挑戦していく必要があるように思う．しかしながら，欧米各国もこれらの地域にはかなり積極的に進出している．それも，単独の国というよりは国際的なチームを作って連携しているように思われる．例えば，東南アジアでのGPODYSSEAプロジェクト（e.g., Michel *et al.*, 2001），中南米におけるプロジェクト（e.g., Vigny *et al.*, 2011）など，多くの事例があげられるだろう．日本が乏しいバックアップ体制でこれら諸外国に出て行って対等の規模でキャンペーン観測を行うのは容易ではない．このような場合小規模でも現地の受け入れ機関や大学との協力体制があるとなんとかやっていけるであろう．このような協力関係は一朝一夕には作れないので息の長い協力体制を普段から心がけておく必要がある．とりわけ，その地域に大きな地震が発生した時などはこのような協力体制が心強いのである．

2）他の測地観測（地上・衛星重力，InSAR等）との融合による地球内部変形の解明：すでにわが国ではこのよう

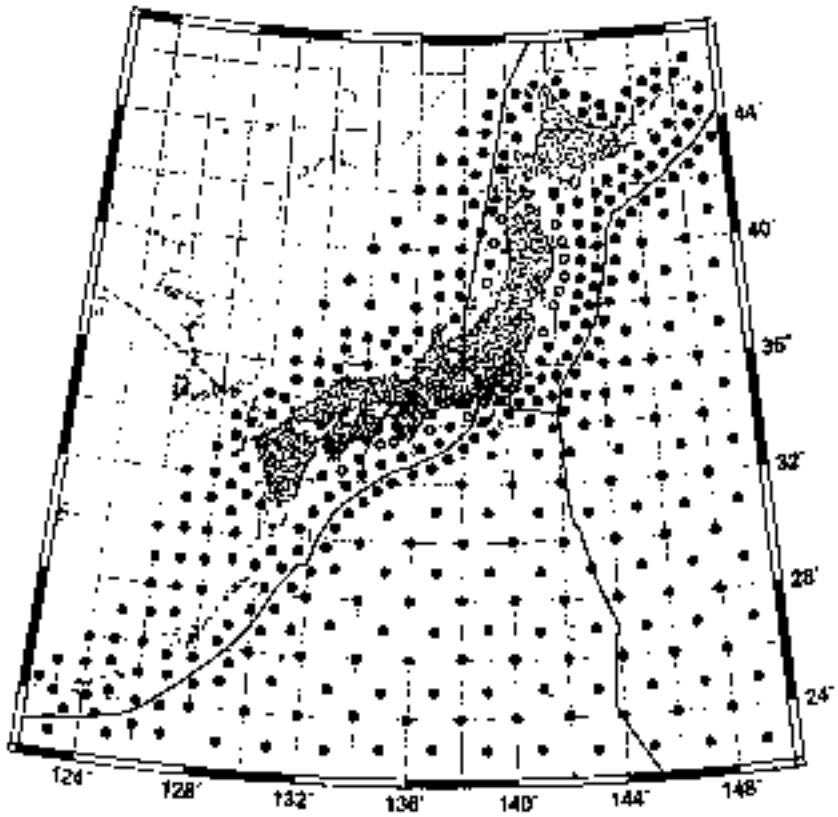


Figure 4: Proposed GPS array surrounding Japanese islands and in the western Pacific. (open circles) operational buoys established by the Port and Airport Research Institute as a part of the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours (NOWPHAS) system. (closed circles) proposed GPS buoys along the Japanese coasts and in the western Pacific, for the purpose of ocean bottom crustal deformation observations, and for the oceanic, atmospheric and ionospheric researches. All GPS buoys are also intended to monitor tsunamis that attack the area. Onshore dots are GEONET sites

な数理科学的手段のさらなる展開が進んでおり，例えば時間発展インバージョン手法の開発や粘弾性変形シミュレーションプログラムの開発など，世界をリードする分野が切り開かれつつある．こうしたツールを多くの研究者が活用できるような環境が整備されれば，この分野における新たな研究の展開が期待される．これらの新たな数理解析技術をこれまで取得されたデータに適用しようとする場合に，これまでのデータが多くの研究者に使いやすいようにアーカイブされ公開されている必要がある．とかく観測に重点をおいていると数理解析に到達する前に力尽きたり，別のプロジェクトが多忙になってせっかくの有益なデータが取り残されたりする場合が多い．取得したデータがそのまま埋もれてしまわないよう，これまでに取得したデータを後世に残すためにグループとしての努力が必要に思われる．このようなデータアーカイブの努力は直接的な研究成果に結びつきにくいので研究者には敬遠されがちなのであるが，近年開発が著しい高度なデータベースソフトウェアなどをうまく利用すれば最小限の努力でデータアーカイブができるように思われる．このような試みは大学だけでなく国土地理院を中心とした日本のGPS（GNSS）関係者が連携して取り組むべき課題と考えられる．

5. おわりに

地殻変動研究における“参”は単に地面の揺れや動きを計測するだけではなく，計測されたデータから，地下で起こっていることを明らかにし，なぜそのような地面の動きがおこるのか，その原因や地殻・上部マントルの物性・流

動特性などを明らかにし，また特に地震発生との関係を導き出すことであろう．筆者が地殻変動研究をはじめた頃は測地測量とひずみ・傾斜観測を相補的に使うことを余儀なくされていたが，GPSの登場によってはじめてそのような"夢"が達成されたように思われる．GPSが登場したころの驚きとそこから膨らんだ夢が実現した今，次の"夢"は何であろうか．ここでは一つの考えを示したが，まだ議論が深まっているとは言い難い．さらに議論を進めて新たな"夢"を育むことを次の世代にゆだねたい．

本論ではGPSの創生期からの「GPS大学連合」を中心とした取り組みについて紹介したが，GEONETが構築された頃から，大学の活動も多岐にわたるようになった．本論も後半では「GPS大学連合」の活動を超えた日本のGPS研究に視点を広げざるを得なかったが，さりとて筆者の不勉強もあって全般をくまなく紹介することはとても不可能であり，多くの重要な研究を紹介しきれていないと感じられる．読まれた方には不満足の点が多々あるかもしれないがご容赦願いたい．

謝　辞

本稿を執筆することができたのは「GPS大学連合」やその他GPS(GNSS)関係者のこれまでの長年にわたる努力の賜物である．関係の方々に感謝の意を表したい．本稿の執筆に当たっては，松島健，橋本学，大谷文夫の各氏より貴重なご意見をいただいた他，査読していただいた平原和朗，松澤暢史の各氏から貴重な指摘をいただいた．これらの諸氏に感謝する次第である．

本論文の一部は科学研究費補助金（基盤研究（B），課題番号：21340125）を用いた．また，一部の図の作成にはGMT ver.4.5.5（Wessel and Smith, 1991）を用いた．

引 用 文 献

Aoki, Y., P. Segall, T. Kato, P. Cervelli, and S. Shimada (1999): Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm off the Izu Peninsula, Japan, Science, 286, 927-930.

Asanuma, T., K. Hirahara, Y. Hirata, M. Imanishi, T. Iwabuchi, L. Jianxin, S. Kariya, T. kato, M. Kawanaka, T. Kikuchi, F. Kimata, M. Kasuga, E. Kurashima, T. Kurosawa, S. Matsumoto, T. Matsushima, R. Miyajima, K. Miyoshita, I. Murata, H. Nakai, T. Nakano, S. Nakao, M. Ohtsu, T. Okuda, R. N. Owada, T. Saishoji, M. Satomura, M. Shibata, C. Shiota, M. Suzuki, T. Tabei, M. Tanaka, H. Takahashi, T. Takahashi, and T. Wakasugi (1994): First Izu GPS campaign for crustal movement studies (Part1: Preliminary Report), Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1994), 177-179.

坂東信人・根岸新一・木股文昭・中尾茂・及川純・渡辺秀文・鶴川元美・藤田英輔・河合晃司・松島健・宮島力雄・奥田隆 (2005)：GPS観測による2000年7月14日三宅島火山噴火に伴う地殻変動，火山，50，173-182.

Bock, Y., R. McCaffrey, J. Rais, and I. Murata (1990): Geodetic studies of oblique plate convergence in Sumatra, Eos Trans. AGU, 71, West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract G52A-2.

Counselman, C. C., and S. A. Gourevitch (1981): Miniature interferometer terminals for Earth surveying: ambiguity and multipath with Global Positioning System, IEEE trans. Geosci. and Remote Sens., GE-19, 244-252.

Ebinuma, T., and T. Kato (2012): Dynamic characteristics of very-high-rate GPS observations for seismology, Earth Planets Space, 64, 369-377.

Fukuda, J., S. Miyazaki, T. Higuchi, and T. Kato (2008): Geodetic inversion for space-time distribution of fault slip with time-varying smoothing regularization, Geophys. J. Int., 173, 25-48.

GPS大学連合（発表者：木股文昭）(1995)：伊東市周辺域における稠密GPS観測（その1：序報），地球惑星関連学会1995年合同大会予稿集，A41-06.

GPS大学連合（十勝沖地震関連）・笠原稔 (2004)：平成15年（2003年）十勝沖地震におけるGPS観測，地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集，D007-009.

橋本学・細善信・大谷文夫・尾田良武・西村卓也・田部井隆雄・大坂優太郎・坂口宏秀・近渡裕司・見掛寛・石橋克彦・原田智也・三好崇之・上井英樹・井尻浩平・山内麻里子・田川典子・高橋浩晃・平原和朗・木股文昭・宮島力雄・中野健秀・大井昌一・中尾茂・里田安啓・加藤照之 (2001)：鳥取県西部地震震源域における稠密GPS観測（全体の概要），2000年10月鳥取県西部地震による災害に関する調査研究（課題番号12800013）平成12年度科学研究費補助金（特別研究促進費）研究成果報告書（研究代表者　岡田篤正），55-63.

橋本学 (2004)：余効変動への間隙弾性反発の寄与：鳥取県西部地震を例として，地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集，D007-P010.

橋本学・福島洋介・細善信・伊藤武男・大谷文夫・中村佳重郎・高橋浩晃・笠原稔・木股文昭・一柳昌義・山口照寛・前田宜浩・鷺谷威・飛田幹男・竹内章・平松良浩 (2007)：稠密GPS連続観測による2007年能登半島地震の余効変動，日本測地学会第108回講演会要旨集，63-64

Heki, K., S. Miyazaki, and H. Tsuji (1997): Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan

Trench, Nature, 598, 595-598.

Heki, K. (2011): Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 38, L17312.

Hirahara, K., T. Nakano, Y. Hoso, S. Matsuo, and K. Obana (1994): An experiment for GPS strain seismometer. Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1994), 67-75.

Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki (1999): A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada Earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, Geophys. Res. Lett., 26, 3237-3240.

ひずみ集中帯GPS観測グループ（代表：鷺谷威）(2009)：日本海東縁ひずみ集中帯の地殻変動：これまでの知見と新たな稠密GPS観測．日本地球惑星科学連合2009年大会予稿集，J245-003.

市川隆一・笠原稔・高橋幸弘・内藤勲夫 (1993)：大気伝播遅延量に起因するGPS測位誤差の評価—3次元格子点気象データと球対称大気モデルとの比較—, GPS研究会（GPSシンポジウム1993）集録, 114-121.

市川隆一 (1994)：GPS気象学：その現状と期待される測地学への寄与, GPS研究会（GPSシンポジウム1994）集録, 7-15.

西村卓也・太田雄策・三浦哲・立花憲司・長谷川昭・宮崎佳典・松島健・平原和朗・高橋浩晃・前田宜浩・山口照寛・高田真秀・宮崎真一・岩國真紀子・福井史・鷺谷威・伊藤武男・イルワン メイラノ・酒井慎介・竹内章 (2007)：稠密GPS観測網による2007年中越沖地震の余効変動観測 その2 余効変動の時空間変化推定．日本測地学会第108回講演会要旨集，49-50

Iwakuni, M., T. Kato, H. Takiguchi, T. Nakaegawa, and M. Satomura (2004): Crustal deformation in Thailand and tectonics of Indochina peninsula as seen from GPS observations, Geophys. Res. Lett., 31, L11612.

Japanese University's GPS Consortium (1998): "Super Precision GPS Network" Project, in the Proceedings of the Japanese Symposium on GPS, 280-283.

Japan University Consortium for GPS Research (1994): First Ito GPS campaign for crustal deformation studies (Site coordinates and their precision), Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1994), 181-184.

Kato, T., Y. Kotake, S. Nakao, J. Beavan, K. Hirahara, M. Okada, M. Hoshiba, O. Kamigaichi, R. B. Feir, P. H. Park, M. D. Gerasimenko, and M. Kasahara (1998): Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area, Geophys. Res. Lett., 25, 369-372.

Kato, T., Y. Kotake, S. Nakao, Y. Hirata, T. Chachin, F. Kimata, K. Yamaoka, T. Okuda, H. Kumagai, K. Hirahara, T. Nakano, A. Torashima, J. P. L. Catane, A. Kubo, T. Tabei, T. Iwabuchi, and T. Matsushima (1996): Post-seismic crustal deformation associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake derived from GPS observation -preliminary analysis of Trimble data-, J. Phys. Earth, 44, 287-289.

加藤照之・J. P. L. Catane・茶屋俊・・藤森邦夫・平原和朗・平田安廣・里村幹夫・市川隆一・井口博夫・伊藤潔・岩國真紀子・笠原稔・木股文昭・小竹美子・久保篤規・熊谷博之・松島健・三浦哲・中村佳重郎・中野健秀・中尾茂・奥田隆・大塚成昭・田部井隆雄・田所敬一・高橋浩晃・寺島敦・鷹山明・山本剛靖・山岡耕春 (1997)．兵庫県南部地震（1995年1月17日）におけるGPS観測, 測地学会誌, 43, 181-207.

加藤照之・GPS大学連合 (1999)：WINGの現状と今後の展開, 月刊地球号外, 25, 132-136.

川元智司・伊藤武男・平原和朗・鷺谷威・橋本学・福島洋 (2004)：FEMによる多孔質弾性体中での流体移動により生ずる地殻の余効変動シミュレーション—2000年鳥取県西部地震を例にして—, 地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集, D007-017.

木股文昭・角野由夫・宮島力雄・奥田隆・石井紘・村田一郎・加藤照之・大久保修平・松本滋夫・平田安廣・島田誠一・三浦哲・立花憲司・中尾茂・仁田交市・金沢敏彦・矢吹哲一朗・芝崎文一郎・里村幹夫・佐々木嘉三・臼井和平・藤井陽一郎・長坂秀・・川合栄治・河合晃司 (1990)：相模湾GPS合同集中観測（1988, 1989）—Trimble 4000SDによる観測と解析—, 測地学会誌, 36, 165-187.

Kimata, F., T. Okuda, K. Yamaoka, N. Fujii, T. Kato, S. Nakao, S. Sakai, C.D. Reddy, T. Tabei, and Y. Eguchi (2000): Crustal deformations observed in the volcano-swarm activity in the Izu Islands, central Japan using GPS, Eos Trans. AGU, 81, Fall Meet. Suppl., Abstract V62-08.

九州大学地震火山観測研究センター・鹿児島大学理学部・北海道大学地震火山研究観測センター (2006)：GPS観測から得られた福岡県西方沖地震発生後の地殻変動（序報）, 地震予知連絡会会報, 76, 563-564

MacDoran, P. F. (1979): Satellite emission radio interferometric earth surveying SERIES—GPS geodetic system, Bulletin Géodésique, 53 (2), 117-133.

松島健・高橋浩晃・加藤照之・竹内章・山口照寛・河野裕希・福田洋一・岡本拓也・道家涼介・松浦友紀・笠原稔 (2005)：新潟県中越地震の臨時GPS観測による余効変動と11月8日の余震（M5.9）の断層モデル, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集, S104-P012.

松村正三・里村幹夫・内海ミナ寿 (2008)：東海地震のアスペリティの推定（東海地域の地震活動変化と地殻変動：その5）, 地震II, 60, 267-277.

Michel, G. W., Y. Q. Yu, S. Y. Zhu, C. Reigber, M. Becker, E. Reinhart, W. Simons, B. Ambrosius, C. Vigny, N. Chamot-Rooke, X. Le Pichon, P. Morgan, and S. Matheussen (2001): Crustal motion and block behavior in SE-Asia from GPS measurements, Earth Planet. Sci. Lett., 187, 239-244.

Miyazaki, S., H. Tsuji, Y. Hatanaka, Y. Abe, A. Yoshimura, K. Kamada, K. Kobayashi, H. Morishita, and Y. Iimura (1996): Establishment of the Nationwide GPS array (GRAPES) and its initial results on the crustal deformation of Japan, Bull. Geogr. Surv. Inst., 42, 27-41.

Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka, and Y. Iimura (1997): Expansion of GSI's nationwide GPS array, Bull. Geogr. Surv. Inst., 43, 23-34.

Miyazaki, S., Y. Hatanaka, T. Sagiya and T. Tada (1998): The nationwide GPS array as an Earth observation system, Bull. Geogr. Surv. Inst., 44, 11-22.

Miyazaki, S., P. Segall, J. Fukuda, and T. Kato (2004a): Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties, Geophys. Res. Lett., 31, L06623.

Miyazaki, S., K. M. Larson, K. Choi, K. Hikima, K. Koketsu, P. Bodin, J. Haase, G. Emore, and A. Yamagiwa (2004b): Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data, Geophys. Res. Lett., 31, L21603.

村田一郎・加藤照之・鷺谷威・平田安廣・川崎一朗・木股文昭・伊藤潔 (1990a)：GPS干渉測位法による基礎実験，地震研究所彙報，65, 277-287.

村田一郎・笠原稔・山本明彦・市川隆一・三浦哲・立花憲司・中尾茂・仁田交市・藤井陽一郎・長坂陽一・金沢敏彦・島田誠一・矢吹哲一朗・五島文一郎・加藤照之・大久保修平・織田和夫・川合栄治・石井紘・松本滋夫・平田安廣・里村幹夫・佐々木稔治・臼井和平・木股文昭・角野由夫・関田康・高島勲男・中村佳重郎・中村佐次郎・伊藤潔・森山豊・藤森啓・田中寅夫・平原和朗・瀬野徹三・小泉誠・田部井隆雄 (1990b)：箱根周辺におけるGPS観測（序報），測地学会誌，36, 23-36.

[illegible]川敏之・加藤照之・里村幹夫 (2002)：可降水量からみたタイ国内の季節進行と日変化，気象研究ノート，「東南アジアのモンスーン気候学」，202, 131-142.

Nakao, S., H. Takahashi, T. Matsushima, Y. Kohno, and M. Ichiyanagi (2006): Postseismic deformation following the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake (M7.0) derived by GPS observation, Earth Planets Space, 58, 1617-1620.

太田雄策・三浦哲・立花憲司・飯沼卓史・松島健・高橋浩晃・岡崎紀俊・鷺谷威・伊藤武男・道家涼介・竹内章・河野信志・平松良浩・前田宜浩・山口照寛・高田真秀・岩國真紀子・海野徳仁・イルナン・メイラノ (2007)：稠密GPS観測網による2007年能登半島地震の余効変動観測 その1－GPS臨時観測の成果－，日本測地学会第108回講演会要旨集，47-48.

Ohta, Y., M. Ohzono, S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, K. Takatsuka, K. Miyao, T. Sato, and N. Umino (2008): Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced by a dense GPS network, Earth Planets Space, 60, 1197-1201.

Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino (2012): Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), J. Geophys. Res., 117, B02311.

Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura (2002): Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, Science, 298, 1009-1012.

Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2011): Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, Nature, 475, 373-376.

Parkinson, B. W. (1979): The Global Positioning System (NAVSTAR), Bulletin Géodésique, 53, 89-108.

Prawirodirdjo, L., Y. Bock, J. F. Genrich, S. S. O. Puntodewo, J. Rais, C. Subarya, and S. Sutisna (2000): One century of tectonic deformation along the Sumatran fault from triangulation and Global Positioning System surveys, J. Geophys. Res., 105, 28343-28361.

The Research Group for "GPS JAPAN '90" (1991): The nationwide GPS campaign in Japan "GPS JAPAN '90" (General Report), Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1991), 226-234.

Sagiya, T., A. Yoshimura, E. Iwata, K. Abe, I. Kimura, K. Uemura, and T. Tada (1995): Establishment of permanent GPS observation network and crustal deformation monitoring in the southern Kanto and Tokai areas, Bull. Geogr. Surv. Inst., 41, 105-118.

Saito, A., S. Fukao, S. Miyazaki (1998): High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, Geophys. Res. Lett., 25, 3079-3082.

Segall, P., and M. Matthews (1997): Time dependent inversion of geodetic data, J. Geophys. Res., 102, 22391-22409.

小司禎教・岩淵哲也・瀬古弘・市川隆一・大谷竜・萬納寺信崇 (2009)：GPS気象学：GPS水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究，測地学会誌，55, 17-38.

Sugimoto, Y., N. Kurihara, H. Kiuchi, A. Kaneko, F. Sawada, T. Shirado, and Y. Saburi (1989): Development of GPS positioning system "PRESTAR", IEEE Trans. Instrum. Meas., 38, 644-647.

Tabei, T., K. Onoue, M. Hashimoto, T. Ito, and Y. Hoso (2001): Postseismic deformations following the 2000 Western Tottori earthquake detected by dense GPS observations, Eos Trans. AGU, 82, Fall Meet. Suppl., Abstract G22D-03.

高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸聡・森済・松島健・渡辺秀文・三浦哲・中尾茂・加藤照之・木股文昭・笠原稔 (2002)：2周波GPS受信機による2000年有珠山噴火前後の地殻変動観測，火山，47, 161-166.

内海さやか・清水理子・長尾邦弘・鷲谷一孝・原田靖・里村幹夫・加藤照之・飯沼卓史・[illegible]・木股文昭・松島健・松尾平吾・佐藤俊造・橋本京幸 (2006)：東海地域の稠密GPS観測網の構築，日本地球惑星科学連合2006年合同大会，D098-P009.

Vigny, C., A. Socquet, S. Peyrat, J.-C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, S. Morvan, M. Lancieri, R. Lacassin, J. Campos, D. Carrizo, M. Bejar-Pizarro, S. Barrientos, R. Armijo, C. Aranda, M.-C. Valderas-Bermejo, I. Ortega, F. Bondoux, S. Baize, H. Lyon-Caen, A. Pavez, J. P. Vilotte, M. Bevis, B. Brooks, R. Smalley, H. Parra, J.-C. Baez, M. Blanco, S. Cimbaro, and E. Kendrick (2011): The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of Central Chile, monitored by GPS, Science, 332, 1417-1421.

Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991): Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441.

［参考資料2014-1］
一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS
信学技報
IEICE Technical Report

技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験
－津波の早期検出を目指して－

山本伸一† 川崎和義† 寺田幸博‡ 加藤照之†† 橋本剛正‡‡ 本橋 修‡‡ 齊田優一††† 松澤 亮†††

† 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 〒314-8501 茨城県鹿嶋市平井 893-1
‡ 高知工業高等専門学校 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1
†† 東京大学 地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
‡‡ 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
††† 日立造船株式会社 〒559-8559 大阪府大阪市住之江区南港北 1-7-89

E-mail: † {yamamoto, k.kawasaki}@nict.go.jp, ‡ terada@ce.kochi-ct.ac.jp, †† teru@eri.u-tokyo.ac.jp,
‡‡ {hashimoto.gousei, motohashi.osamu} @jaxa.jp, ††† {saida, matsuzawa_r}@hitachizosen.co.jp

あらまし 津波を早期に検出することで人的被害を軽減することを目指し，海上に設置されたブイから津波の情報を衛星経由で伝送する実験を行った．実験は，準天頂衛星「みちびき」を用いてブイ上のGPS津波計に補強情報を伝送し，ブイ上で津波の検出が可能な精度で精密単独測位を行い，技術試験衛星Ⅷ型（ETS-VIII）「きく8号」を用いて地上の基地局に測位結果を伝送する．本実験で，データの伝送に衛星を用いることで岸から遠く離れた沖合から津波情報を収集することができ，津波の早期検出が可能となることを実証した．
キーワード GPS 津波計，衛星データ通信，津波の早期検出

Data transmission experiment from the buoy
using the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII)
－The aim of early detection of TSUNAMI－

Shin-ichi YAMAMOTO† Kazuyoshi KAWASAKI† Yukihiro TERADA‡ Teruyuki KATO†† Gousei HASHIMOTO‡‡ Osamu MOTOHASHI‡‡ Yuichi SAIDA††† Ryo MATSUZAWA†††

† Kashima Space Technology Center, NICT 893-1 Hirai, Kashima-shi, Ibaraki, 314-8501 Japan
‡ Kochi National College of Technology 200-1 Otsu mononobe, Nankoku-shi, Kochi, 783-8508 Japan
†† Earthquake Research Institute,The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 JAPAN
‡‡ Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 JAPAN
††† Hitachi Zosen Corporation 7-89 Nankoukita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka, 559-8559 JAPAN

E-mail: † {yamamoto, k.kawasaki}@nict.go.jp, ‡ terada@ce.kochi-ct.ac.jp, †† teru@eri.u-tokyo.ac.jp,
‡‡ {hashimoto.gousei, motohashi.osamu}@jaxa.jp, ††† {saida, matsuzawa_r}@hitachizosen.co.jp

Abstract The experiments were performed with the aim of to reducing the human damage by tsunami early detecting, transmit a tsunami information via satellite from the buoy which was installed in offshore. In experiment, transmit the correction information to the GPS tsunami meter which was placed on the buoy, using quasi-zenith satellite "MICHIBIKI", and carried out the precise positioning, and transmit the positioning results to the base station using Engineering Test Satellite VIII "KIKU No.8", and detect the tsunami. By performing a data transmission by using satellite, it can collect information of tsunami from the offshore, and early detection of the tsunami is possible.

Keywords GPS tsunami meter, Satellite data communication, Early detection of TSUNAMI

1. はじめに

津波災害は，その襲来の予測と情報の適切な伝達によって被害を少なくできる．この視点の津波防災システムの構築に向けた開発の基本コンセプトは，

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

Copyright ©20●● by IEICE

「いつでも，だれでも，どこからでも」津波データにアクセスできるシステムにすることである.また，世界の大洋上に多数設置してネットワークで結び，世界的な災害軽減に貢献することも視野に入れる必要がある．この視点で、新しい発想に基づく海面変動計測装置の開発を行ってきた．開発では，波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度でドリフト無く計測でき，設置や維持管理が容易なことを目指し，基本的手段として，GPS（Global Positioning System）を用いた，GPS 波浪計・津波計・潮位計（以降，GPS 津波計と略記する）と名付けて開発を推進してきた[1]. これまでに実用化してきた GPS 津波計は，測位法とデータ通信方法による制限から，沖合 20km までを設置限界としてきた[2]. この制約下でも東日本大震災では，気象庁の津波予報値の変更に一定の貢献[3]が出来たが，さらなる沖合への展開と災害時にも途切れない通信システムの確立が解決すべき技術課題として投げかけられた．これらを解決するために，陸上基準局を不要とする精密単独測位法の実用化と，衛星通信による被害の受けない地域へのデータ伝送による情報発信の 2 つの課題を克服する必要がある．本報告では，沖合展開における距離制限のない GPS 津波計システム開発における衛星データ伝送システムについて示す.

2. GPS 津波計について

GPS 津波計の基本は，海面の変動に良く追随できるように設計・製作した浮体（ブイ）の位置を GPS によって数 cm の精度で測位し，鉛直方向変位の時系列データを海面変動とすることにある．海面変動データは，適切な数値フィルタによって，波浪，津波，潮汐に弁別する.

2.1. GPS 津波計の開発

1997 年 1 月に神奈川県相模湾で実施した基礎実験が GPS 津波計の誕生日である．続いて，1998 年 3 月に同地で基本機能実験を行い，波浪と潮汐を同時に cm オーダーで観測できることを示した．実用化実験として 2001 年 1 月 23 日から岩手県大船渡市沖に GPS 津波計を設置して 3 年間の連続計測を実施した[4][5]. さらに，この技術の沖合展開技術開発を進め，室戸岬沖で実証実験を行った.

大船渡市沖に設置した GPS 津波計は，2001 年 6 月 25 日に,その前日に南米のペルー沖で発生した地震による津波を初めて捉えた．続いて，2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震津波を捉えた．この二例の津波観測によって，GPS 津波計は，10cm 程度の津波でも計測可能であることが確認できた.

GPS 津波計で計測した海面変動データは，秒単位で変化する波浪をフィルタリングして取り出すことができる．また，数分から数時間の周期で変化する成分の津波も高精度に抽出することができる．これは，GPS 津波計が波浪から潮汐に至る幅広い周波数帯域をもつ海面高の変化を一つの測器で精度良く観測できることを意味し，開発目標とした機能を満足している. 開発した GPS 津波計は日常的な波浪観測及び数百年に数回起こる可能性のある津波の観測にも備えることができることが注目された．これらの開発成果は，GPS 波浪計として，国土交通省港湾局が導入するに至った[6]. 採用されたシステムは，防波堤防や港湾施設の設計施工に不可欠な波浪データの常時観測を主にしているが，観測データを気象庁に送ることによって津波発生の非常時にも機能させている．この GPS 波浪計のうち，東北地方太平洋岸に設置されていた数基のデータが，気象庁の津波予報値の引き上げに貢献した結果となった[3].

2.2. ブイ上での GPS 測位法

開発当初に適用した測位法は，数 cm の精度を確保するため，RTK 法（Real Time Kinematic）を基本的な測位法として採用した.この場合の課題は,種々の誤差要因をキャンセルするための陸上基準局との離岸距離が 20km 程度までに制限されることである.

PVD 法（Point precise Variance Detection method）[7]は，座標値を求めるのではなく，観測を行う度に前回の計測位置との変化量を直接求める方法である. これには，観測点と複数個の GPS 衛星との間の距離と方角のデータを用い，この中に含まれる衛星軌道成分,誤差要因などを数値フィルタで除去するため，基準局のデータが不要となる．現在，実用性が確認されているのは,周期 30 秒程度以下の波浪観測である. 2012 年に実施したブイからのデータ伝送実験[8]では，この PVD 法で求めた波浪データを伝送した.

PPP-AR 法（Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution）[9]は，GPS 衛星の精密暦（時計と位置と初期位相バイアス）があれば，ブイ上の GPS 観測データだけでブイの座標値を計算することが出来る精密単独測位法である. 精密暦のうち,時計と位置は宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した MADOCA（Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis）暦を基にし,国土地理院の電子基準点データを利用し，初期位相バイアスを求めている. 2013 年 12 月及び 2014 年 6 月のデータ伝送実験では,本測位法を用いて取得したデータを伝送した.

3. 衛星を用いたブイからのデータ伝送

ブイからのデータ伝送に用いた ETS-VIII は，搭載している大型展開アンテナにより，S 帯の送受信性

能が大きく向上している．このため，本実験で用いた簡易な小型地球局との通信に適している．しかし，受信部の低雑音増幅器の不具合[10]が確認され，実験では衛星の受信アンテナに 1mφパラボラアンテナを用いており，大型展開アンテナと比較し，約 15dB 程度受信性能が低下している．

実験に用いたブイは，直径 8m の円形で，係留場所は室戸岬の沖合約 35km の地点である．図 2 の左側にブイの外観を示す．本来の目的は魚礁である．

図 1　実験に用いたブイの外観及び小型地球局

3.1. ブイに搭載する衛星通信システム

実験に用いた小型地球局の主要諸元を表 1 に示す．この小型地球局は，衛星センサネットワーク実験[8]に用いたもので，地上において気象センサ等のデータ伝送実験及び伝送特性等の基礎データを取得している．表 1 で示すように小型地球局からの送信信号の伝送速度は非常に低速である．これは，衛星の大型展開アンテナが使用できなくなったことが理由である．このため，伝送速度を低速にし，送信フレーム長を 2 秒として，データの領域を確保している．

図 1 右側は小型地球局の外観である．アンテナは，衛星追尾の必要の無い無指向性アンテナを用いた．

図 2 は，地上試験で取得した小型地球局から基地局への伝送特性である．伝送特性は，フレーム誤り率（Frame Error Rate：FER）で表しており，基地局で受信したデータにビット誤りがあった場合及び受信できなかった場合をフレームエラーとしている．表 2 は小型地球局から基地局へ信号を伝送したときの回線計算例である．小型地球局の送信アンテナにはヘリカルアンテナを用いた．回線計算では，基地局で受信する信号の信号対雑音密度比（C/No）は約 30.5dBHz となり，地上実験で得られた結果とほぼ一致している．本システムを地上に設置してデータ伝送を行った場合，FER は約 1×10^{-2} が得られ，センサ情報の伝送に十分な性能を有していると考える．

3.2. 衛星を用いたデータ(波浪情報)伝送

2012 年 10 月 24 日～11 月 15 日に 1 回目のデータ伝送実験を実施した．図 3 に実験構成図を示す．基地局は NICT 鹿島宇宙技術センター（茨城県鹿嶋市）に設置した．これは，本実験の目的の一つである，センサ情報を被災していない地域にデータを伝送し，情報の発信を継続的に行えることを実証するためである．ブイには GPS 津波計を 2 台設置しており，1 台は ETS-VIII を用いてデータを伝送する．アンテナはヘリカルアンテナを用いた．もう 1 台は地上の無線回線を用いてデータを伝送した．

表 1　小型地球局の主要諸元

使用周波数	送信 2.6GHz 帯／受信 2.5GHz 帯
送信電力	0.8W
変調方式	BPSK+SS (32kcps)
変調速度	250bps
情報速度	約 50bps
通信方式	TDMA (2 多重／キャリア)
誤り訂正方式	畳み込み符号化 （符号化率 R=1/2，拘束長=9） ビタビ復号
送信フレーム長	２秒
電源	DC 12V（蓄電池+太陽電池）
消費電流	送信時：約 0.6A 受信時：約 0.24A
大きさ	160×240×100（mm）
重量	約 1.5kg（アンテナを除く）
アンテナ	１．ヘリカルアンテナ 利得：送信：6.9dBi 受信：6.5dBi 指向性：水平面内無指向性 偏波：左旋円偏波（送受共） ２．小型平面アンテナ 利得：送信：7.8dBi (約 4dBi) 受信：7.2dBi（約 4dBi） （括弧内は衛星方向の利得） 指向性：水平面内無指向性 偏波　：左旋円偏波（送受共）

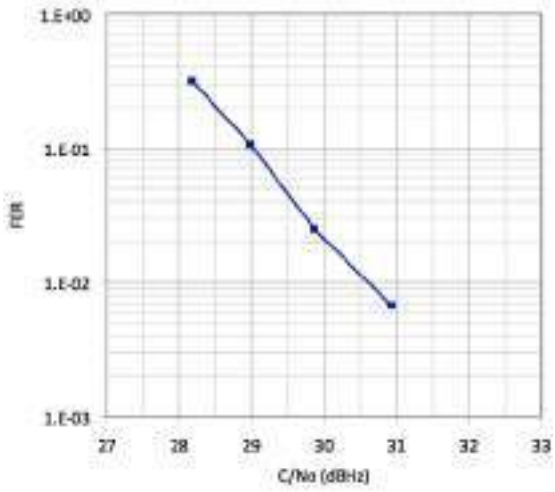


図 2　小型地球局から基地局への伝送特性

表 2　回線計算例

Satellite: ETS-VIII	小型地球局ー基地局	
	小型地球局 → ETS-VIII	ETS-VIII → 基地局
	Uplink	Down Link
Frequency (GHz)	2.65	2.50
Transmisson power (dBW)	-0.97	-20.95
feed loss (dB)	2.20	1.80
TX Antenna Gain (dBi)	6.90	43.80
EIRP (dBW)	3.73	21.05
pointing loss (dB)	3.00	3.00
Propagation loss (dB)	192.38	192.38
Polization loss (dB)	1.00	0.00
Rain Margin (dB)	0.30	0.30
Fading loss (dB)	0.00	0.00
RX Antenna Gain (dBi)	24.80	34.54
pointing loss (dB)	0.00	1.00
feed loss (dB)	2.80	0.80
RX Power (LNA in) (dBW)	-170.95	-141.89
System noise temp. (K)	510.70	361.83
System G/T (dBK)	-5.08	8.10
C/No (dBHz)	30.57	61.07
2way C/No (dBHz)		30.56

衛星回線及び地上回線，それぞれの基地局で受信したデータはインターネット回線を用いてデータサーバに転送する．ブイの傾き及び方位を測定するために、傾斜計及び磁気方位計がブイに設置されており，これらのデータは地上無線回線で伝送される．

図 4 は衛星回線でデータを伝送した時の 1 時間毎の FER の時間変化である．図 5 は図 4 の FER を取得した日の波の高さ(有義波高)の時間変化である．図 5 緑線の 11 月 5 日のデータでは、12 時くらいから波が高くなっていく様子が示されており，図 4 でも FER が劣化していく様子が示されている．また，図 5 紫線の 11 月 14 日のデータでは波の高さが終日ほぼ 2m 以上で，このときの FER は図 4 から終日 2×10^{-1} 以上と悪くなっており，海上の波が高いときは，FER が劣化する傾向が強く現れている．

図 6 はブイに搭載した傾斜計及び磁気方位計のデータを基に計算したブイから見た衛星の仰角方向の

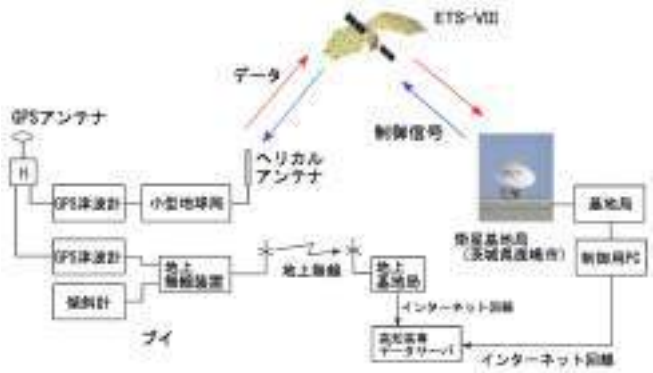


図 3　実験構成図

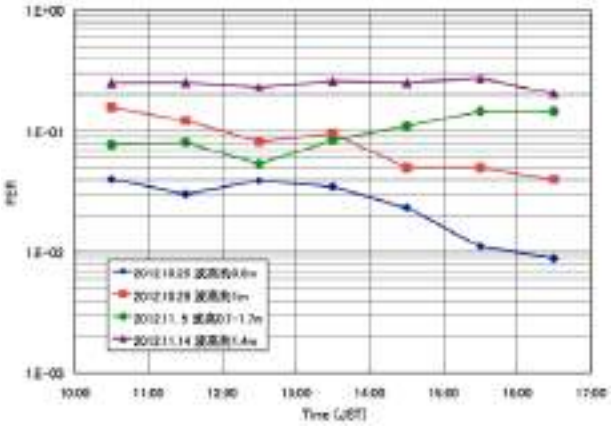


図 4　基地局受信 FER の時間変化

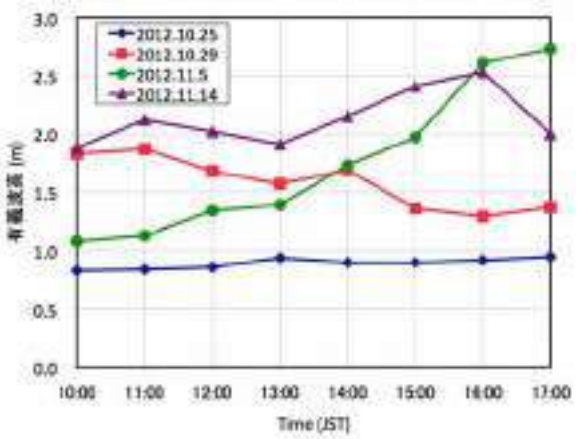


図 5　有義波高の時間変化

角度変化の一例である．データは 11 月 14 日（図 4, 5 の紫線と同じ日）に取得したものである．短い周期の変動は，ブイの動揺による傾きと考えられ，これに長い周期の変動が重畳している．動揺の周期は基本的にブイの形状によって決まるが，それに波の周期，設置場所の潮流及びブイの係留方法などによる影響が加わると考えられる．FER の劣化の原因は，

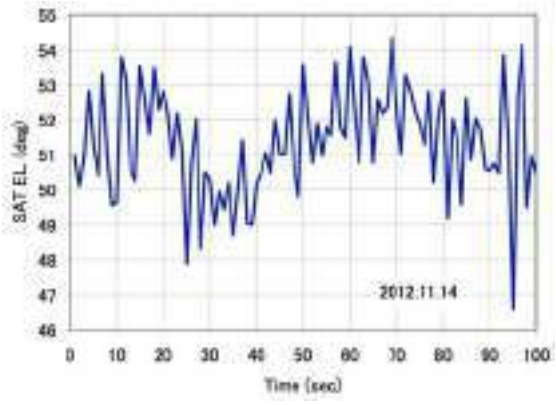


図 6　ブイから見た衛星の仰角方向の角度時間変化

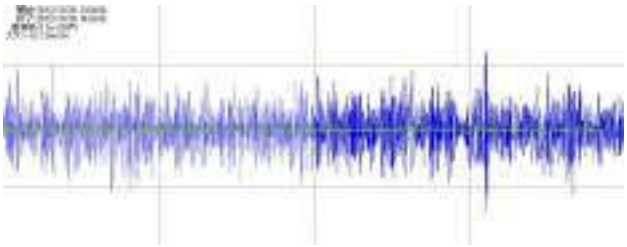


図 7　基地局に伝送された波浪情報の一例

主に図 6 に示すブイから見た衛星方向の角度変動と送信アンテナパターンによるもので，11 月 14 日に取得した角度の変動とアンテナパターンのデータから衛星方向の等価等方放射電力（Equivalent Isotropically Radiated Power：EIRP）の変動は地上でアンテナを固定した場合の EIRP に対して約±2.5dB 程度となる．図 4 では FER が時間の経過とともに低くなる傾向が見られる．これは，ETS-VIII は軌道制御を一部行っていないため，衛星が仰角方向に動くことが原因である．実験時間の 10 時～17 時は衛星仰角が徐々に低くなり，アンテナの垂直面のビーム方向に近づき，衛星方向の EIRP が大きくなる．

図 7 は本実験で基地局が取得した波浪情報の一例である．（2012 年 10 月 30 日 13:30～14:30，縦軸スケール：1m/div.）

3.3. 衛星を用いたデータ(津波情報)伝送

2014 年 1 月 3 日～5 日及び 6 月 1 日～21 日に，2 回目及び 3 回目のデータ伝送実験を実施した．1 回目の実験では波浪情報を伝送したが，この情報から津波を検出することは出来ない．本実験では，ブイ上で精密測位（PPP-AR 法）を行い，津波の検出が可能なデータを取得し，それを ETS-VIII を用いて伝送した．実験構成図を図 8 に示す．

ブイ上で精密測位を行うための補強情報（精密暦）は「みちびき」の LEX（L-band Experiment）信号を用いてブイへ伝送する．ETS-VIII を用いたデータ伝送部分は基本的に 1 回目の実験と同じ構成であるが，本実験では基地局は大阪市に設置し，ブイの送受信アンテナに小型平面アンテナを用いた．図 9 にブイに設置した装置の構成，図 10 に小型平面アンテナの送信パターンを示す．ヘリカルアンテナと比較してアンテナパターンがブロードであるため，ブイの動揺による衛星方向の利得変動が小さくなることが期待できる．1 回目の実験と同等の動揺がブイに発生した場合，衛星方向の送信 EIRP の変動は約 3dB と推定できる．

小型平面アンテナを用いた地上試験では，アンテナを天頂に向けて設置したとき，基地局で受信した信号の C/No は約 31.2dBHz が得られた．

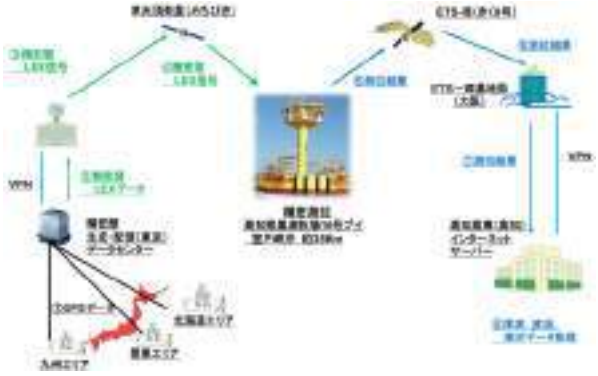


図 8　実験構成図

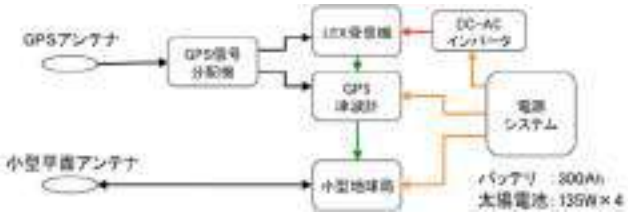


図 9　ブイの装置構成図

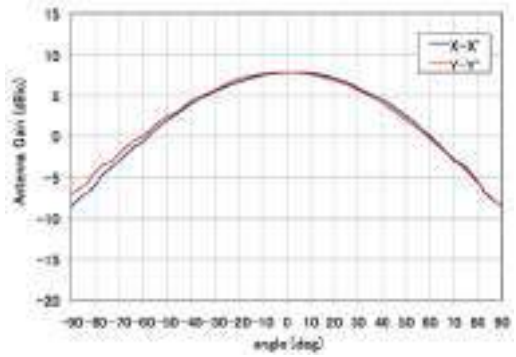
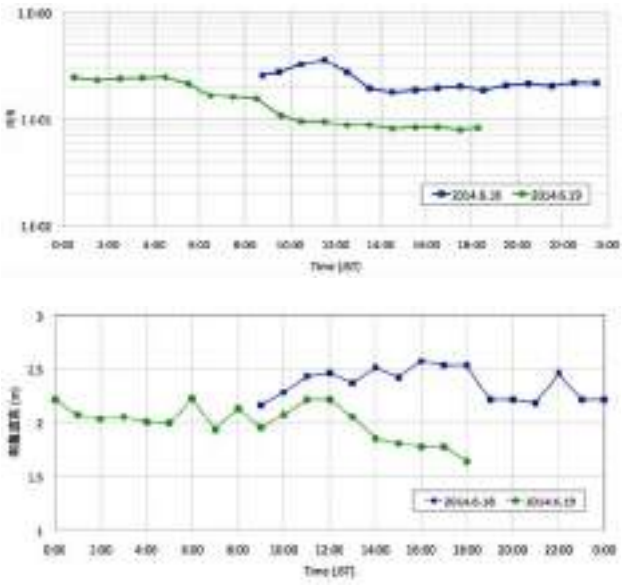


図 10　小型平面アンテナ送信パターン

図 11 は 6 月 18 日～19 日で，32 時間以上連続してブイからデータ伝送を実施した結果である．このとき、大阪市と JAXA 筑波宇宙センター(茨城県つくば市)の 2 か所に基地局を設置し、時間帯で切り替えて連続したデータを受信した。これは被災していない地域にデータを伝送することに加えて、基地局の複数化を図り、非常時への対応力の強化を試行するためである．図の上段は FER，下段は波の高さの時間変化である．基地局で受信される信号の FER とブイを設置している海上の波の高さには，1 回目の実験と同様に有意な相関が見られる．波の高さは両日とも多くの時間で 2m を超えており， FER は約 3×10^{-1} 程度まで悪くなっている．図 12 は本実験で基地局に伝送された 6 月 18 日のデータを基に波浪及び潮汐の変化を可視化したものである．上段は沖潮位を含んだ波浪情報で，青線の幅が波の高さを示す．下段は



上段：FER　　下段：有義波高

図 11　データ伝送実験結果の一例

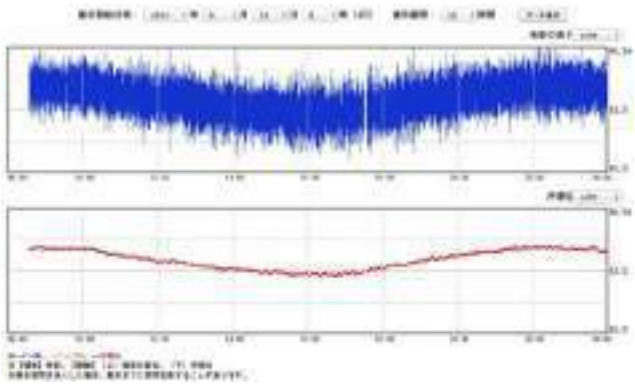


図 12　伝送データを可視化した一例 (2014.06.18)

周期の短い波浪を FIR フィルタで除去したもので，潮位の変化が得られる．津波が発生した場合はここに現れる．6 月 18 日の FER は約 2×10^{-1} 程度と悪いが，津波の検出が可能であることを確認した．

実験期間中は，図 12 に示す可視化した情報をインターネット上でリアルタイムに公開した．

4. 今後の展望

本研究が示すように，遠洋に設置された GPS 津波計のデータ伝送には衛星通信が不可欠であり，伝送特性の改善などの技術的な課題に取り組むことで，津波の早期警戒システムの機能向上に極めて重要な貢献ができると期待される．システムの機能向上も重要であるが，新たな防災専用のデータ通信衛星を国家的なインフラ事業として整備することが必要である．このようなデータ通信が実現すれば，津波データだけでなく多くの遠洋観測データをリアルタイムで陸から監視することができ，宇宙・海洋・海底の学術研究に寄与するほか，さまざまな海洋開発のための基礎的な資料として産業応用にも有効な活用が図れると期待できる．

5. おわりに

GPS 津波計の概要と海上ブイからのデータ伝送実験について報告した．実験では GPS 津波計，小型地球局及び無指向性アンテナを用いたシステムで，海上に設置したブイから津波の検出に有効なデータが伝送できることを実証した．東南海トラフを震源とする大地震に伴う津波の被害想定は甚大であり，津波の早期検出は緊急の課題である．

文　献

[1] 加藤照之，寺田幸博，木下正生，柿本英司，一色浩；GPS 津波計の開発，月刊海洋，号外 15(1998)，pp.38-42

[2] Toshihiko Nagai, Shigeru Satomi, Yukihiro Terada, Teruyuki Kato, Kyoshi Nukada and Masanobu Kudaka; GPS Buoy and Seabed Installed Wave Gauge Application to Offshore Tsunami Observation, Proc. 15th (2005) Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol.3, pp. 292-299

[3] 例えば，読売新聞朝刊，2011 年 4 月 24 日（日）

[4] 加藤照之，寺田幸博，木下正生，柿本英司，一色浩，森口寿久，神崎政之，高田美津雄；GPS 津波計の開発･･･大船渡市沖実用化実験･･･，電子情報通信学会論文誌 B，Vol. 84-B, No.12, pp.2227-2235

[5] Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Masao Kinoshita, Hideshi Kakimoto, Hiroshi Isshiki, Msakatsu Matsuishi, Akira Yokoyama and Takayuki. Tanno; Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, Earth Planets Space, 52(10), pp. 841–845, 2000

[6] 永井紀彦，清水勝義，佐々木誠；太平洋北東岸 GPS 波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性，港湾空港技術研究所報告，第 47 巻，第 2 号，　p.86, 2008

[7] Hiroshi Ishiki, Astushi Tsuchiya, Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Hideshi Kakimoto, Masao Kinoshita, Masayuki Kanzaki and Takayuki Tanno; Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method ---, 測地学会誌，Vol. 46, No.4, pp.253-267, 2000

[8] 山本伸一，寺田幸博，橋本剛正，加藤照之，林稔；衛星センサネットワーク――災害の早期検出を目指して――，第 57 回宇宙科学技術連合講演会，3D09，2013.

[9] Leos Mervart, Zdenek Lukes, Christian Rocken, Tetsuya Iwabuchi; Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), September, pp. 397-405, 2008.

[10] 田中正人，浜本直和，平良真一，鈴木良昭，大森慎吾，“ETS-VIII 受信給電部の不具合，”第 51 回宇宙科学技術連合講演会，1J13，2007.

土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 70, No. 1, 13-18, 2014.

GPS海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する実証調査

寺田 幸博[1]・水井 紀彦[2]・加藤 照之[3]・越村 俊一[4]・川口 浩二[5]・松下 泰弘[6]

[1]正会員　高知工業高等専門学校教授（〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1）
E-mail: terada@ee.kochi-ct.ac.jp

[2]フェロー　(株)エコー取締役（〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4）
E-mail: t-nagai@ecoh.co.jp

[3]非会員　東京大学教授　地震研究所（〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1）
E-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp

[4]正会員　東北大学教授　災害科学国際研究所（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-4）
E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

[5]正会員　(独法)港湾空港技術研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail: kawaguchi@pari.go.jp

[6]非会員　日立造船(株)　機械・インフラ本部（〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89）
E-mail: matsushita_ya@hitachizosen.co.jp

室戸岬西方沖13 km水深128 m地点に設置し，3年7カ月間にわたって波浪・津波・潮汐の観測に供した実証試験用GPS海洋ブイに対する損収実験を実施した．このブイの係留系曝露損傷状況の調査結果を報告する．実証試験期間中に台風1106号に伴う有義波高8.4 mの高波などの来襲を受けたものの，ブイ底面下端の係留環と係留チェーンとの連結のためのシャックルの最大摩耗量は，6 mm（1.67 mm／年）であった．これは当初想定していた10 mm／年より，はるかに小さい値であった．摩耗量が最も大きかったのは，想定のとおり，年当たり数百万回におよぶ海底との接触をする係留索立ち上がり部のリンクであり，その摩耗量は最大7 mm（1.95 mm／年）であった．この場合も5 mm／年の設計想定摩耗量より小さい値であった．

Key Words : GPS buoy, wave observation, tsunami, mooring, chain, durability

1. はじめに

大水深海域に設置された海面変動センサーは，津波が沿岸に到達する前に津波波形を検知することができることから，沿岸域における津波防災上，非常に有用であることがこれまでに報告されてきた[1][2][3]．しかし，津波は，人間社会の時間尺から見ると極めて稀な事象であるため，津波の観測だけをターゲットとした観測システムを，長期間にわたって良好な状態に維持管理し続けることは実務上は困難である．言葉を変えると，リアルタイム津波モニタリングを長期間にわたって継続的に実施していくためには，大水深津波センサーは，波浪やうねりなどの日常的な事象を観測し続けることによって，常時，人々が観測情報を活用し続けていることが重要となる[4][5]．

また，常時において誰も見ていない観測情報が，極めて稀に発生する津波来襲時にだけリアルタイムで有効に活用されるのは，事実上は難しいと言わざるを得ない[6]．このような観点からすれば，大水深海底上に設置される水圧センサーは，津波観測には有効であるものの，通常の波浪に伴う周期の短い水圧変動は大水深海底には届かないため，波浪やうねりなどの日常の海象情報の提供には難点がある．こうした事情によって，2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大津波が来襲した際には，国土交通省港湾局によって全国沿岸に展開されていたGPS波浪計[7]ネットワークだけが，リアルタイムで気象庁による大津波警報の数値更新に貢献することができたものと思われる．

GPS海洋ブイは，一般に，波浪条件を考慮して大水深海域に設置しなければならないため，係留系が重要となる．本稿は，GPS海洋ブイ係留系の設計にあたっての基礎的な参考情報を提供することを目的としている．このために，GPS海洋ブイを3年7カ月間にわたって波浪・津

波・潮汐の観測等に供した後に，観測システムの設計・施工の基礎データを収集することを目指して実施した揚収実験結果の中から，係留索の摩耗損傷状況を調査した結果を報告する．

2. GPS海洋ブイの係留系の特徴

一般の海洋構造物の係留設計は，その構造物の性能を十分に発揮させるため，波浪に伴う動揺をいかに軽減させるかが重要となっている．これに反して，GPS海洋ブイは，津波波形を早期に把握することができるようにするため，大水深海域に設置する必要があるとともに，できる限り波浪に追随させ海面の上下変動を正しくフォローするようにしなければならない．このため，GPS海洋ブイでは，チェーンによる一点係留カテナリー方式が採用されている．現在に至るまで，この係留方式による係留チェーンの長期的な摩耗損傷に関する実証データがほとんど得られていなかったため，GPS海洋ブイの係留系の合理的な設計法はいまだに確立されておらず，将来に向けての技術課題となっている．これまでの現存するGPS海洋ブイにおいては，ブイ直下のチェーンについては，10 mm／年，波浪の影響を受けて海底面との離着が繰り返される係留索立ち上がり部については5 mm／年といった摩耗を仮定し，暫定的な係留系の設計が行われていたが，こうした仮定の妥当性についての根拠は必ずしも十分とは言えなかった．

3. 室戸沖実証実験サイト

本稿で検討対象としたGPS海洋ブイは，室戸岬西方沖13 kmに設置されていたブイであり，水深128 m地点に2008年4月21日に設置されたものである．**図-1**は，このブイの設置位置を示す．この海域における自然条件として，風速60 m/s，流速（表層）2.6 m/s，有義波高14.9 m，有義波周期16.5 sを設計条件としている．

設置直前の作業台船上の状況を**写真-1**に示す．総延長348 mの係留チェーン，重量265 kN（水中重量230 kN）のダンフォース型アンカー，直径4.5 mで重量343 kN（排水量477 kN）のGPS海洋ブイ缶体を展開・配置した全景である．ブイに塗装した黄と赤の境界線が喫水であり，GPSアンテナは海面上8.3 mに位置することになる．

このブイの揚収実験を2011年11月25日に実施し，3年7カ月間の摩耗損傷状況を確認することができた．**写真-2**は，ブイを回収した際の状況を示すものである．このようにして回収したブイの係留系の観察とリンク径の測定を行って，定量的に摩耗損傷状況を把握した．

図-1 室戸沖実証試験サイト

写真-1 設置前のGPS海洋ブイ

写真-2 揚収されたブイの状況

4. 実証実験中の海象

一般に，GPS海洋ブイは波浪条件を考慮して大水深海域に設置されるが，検討対象期間中に得られた室戸沖実証試験ブイで観測された最大有義波は，2011年の台風6号のものであった．台風が襲来した7月19日の前後数日間の有義波高と有義波周期を図-2に示す．図から明らかなように，有義波高は8.4 mが最大値であり，この時の有義波周期は12.7 sであった．50年確率波をもとに設定されたブイの設計有義波高は14.9 mであったため，設計波高の56.4%の波浪が期間中にあったことになる．

これに加えて，2つの津波を運用実験中に観測している．一つは，2010年3月28日（JST）に来襲した2010年チリ地震津波であり，図-3に示すように観測津波高は約20 cmであった[9,10]．図中のデータは，波浪などの高周波成分を除去するために±60 sのFIRフィルタを適用している．他の一つは，2011年3月11日（JST）に来襲した東北地方太平洋沖地震津波であり，図-4に示すように観測津波高は約40 cmであった[10,11]．この場合は，120 sの単純な移動平均をローパスフィルタとして用いている．両図共，過去1週間の観測値の調和分解計算による予測値を用いて潮汐成分を除去している．

本稿の検討対象期間の海況は，このような海象条件であった．

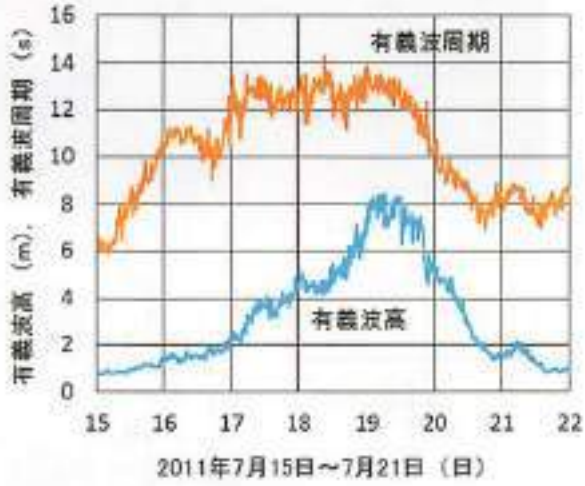


図-2 台風1106号来襲時の観測有義波高の経時変化

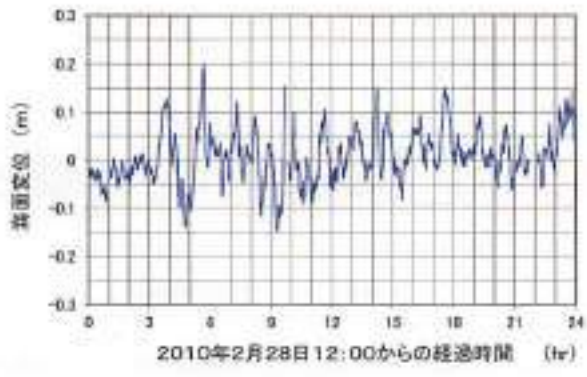


図-3 2010年チリ地震津波波形の観測記録

5. 係留系の構成

図-5は，全長348 mの係留チェーンの構成を示したものである．ここで，リンクNo.1はブイとの接続であり，リンクNo.964は海底アンカーに接続するものである．係留チェーンのリンク径は，係留索の位置によって異なっている．リンクNo.1はシャックルであり，ブイの係留環と係留チェーンを接続する最も重要な部分である．摩耗を10 mm／年であると想定して設計した結果，リンクNo.1のシャックルの直径は139 mmで，ピン長径は170 mmであった．

No.10からNo.200の191リンクの径は70 mm，No.203からNo.235の33リンクの径は82 mm，No.236からNo.396（平均海面から下119.6 m）のリンクの径は68 mmの一定値とした．これらのチェーンは，設計で想定した最大波浪によるブイの上下運動時にも海底に接することはないと考えられるため，係留系全体のバランスを維持する中で可能な限り軽量なチェーンを用い，ブイや係留系全体の軽量化をはかった．

海底面との頻繁な着離が発生すると考えられる係留索立ち上がり部のNo.400からNo.562（平均海面からの長さ169.8 m）の間では，リンクの径を76 mmとし，5 mm／年の摩耗を見込んでも，必要な引張強度を確保できるようにした．

海底常時接地の地損部分に比較的重量の大きなリンクを配置したのは，チェーンの浮き上がりを極力避ける配

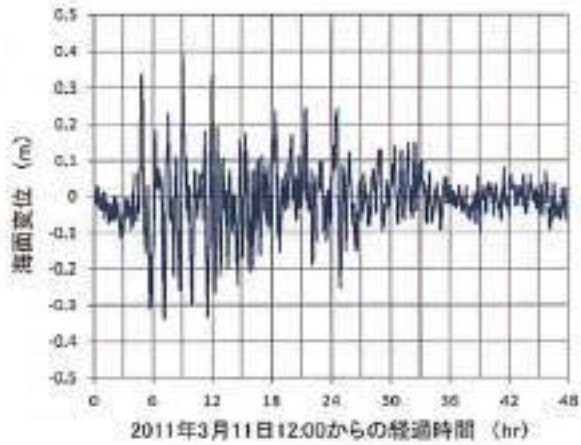


図-4 2011年東北太平洋沖地震津波波形の観測記録

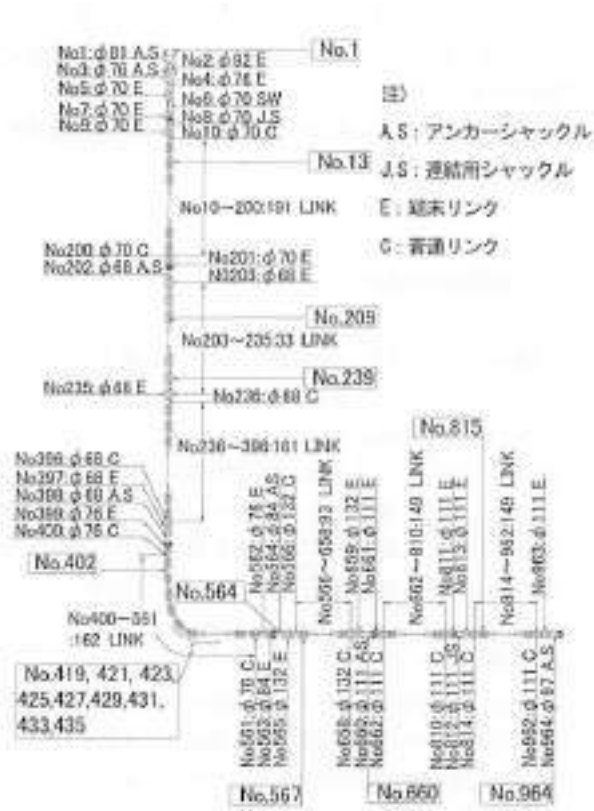


図-5 係留チェーンの構成図

写真-3 係留環部とリンクNo.1（回収後）

写真-4 回収後のチェーン

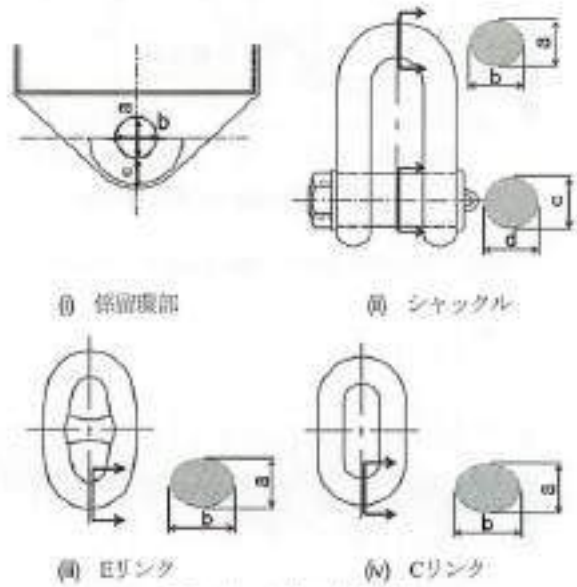


図-6 リンク径の計測位置

盧であり，No.566からNo.658との間のリンクの径は132 mmの一定値とし，No.662とNo.962との間のNo.811からNo.813のコネクタ部分以外のリンクの径は111 mmの一定値とした．この地鎖部では，安全をみて3 mm／年の摩耗を見込んでいる．

6. 回収した係留チェーンの状況

写真-3は，10 mm／年の摩耗を設計上の想定値としていたリンクNo.1と係留環部の状況である．この写真からわかるように，貝殻や海藻が係留環とシャックルに取りついている状況を見ることができるが，大きい損傷は見受けられない．

また，**写真-4**は，回収後の係留チェーンを作業台船上に確保した状態である．チェーンの回収は，GPS海洋ブイ直下のチェーンから順番に台船クレーンの揚程の範囲で繰り返し引き揚げる方法で行った．海面下30 m程度までは，海洋生物の付着が多かった．これらを含む海底との接触が無い懸垂部では，写真のような塗装のままのチェーンが台船上に確保出来た．係留索立ち上がり部の海底128 m近傍の半20 m程度の範囲は，海底との接触によって磨かれた金属光沢のチェーンが揚がってきた．それ以降の地鎖部では，塗装のままのチェーンが再度確認された．目視による係留索全体の観察において，強度劣化を示すような状況は見られず，係留系は健全性を保っている状況が確認できた．

揚収したチェーンは，図-5に示した番号の各リンクに対して，それぞれの形状ごとに図-6に示すリンク径を大型ディバイダを用いて計測した．

まず，係留環部については，計測箇所の全てにおいて摩耗がほとんど認められなかった．リンクNo.1のシャックルは，図-6(i)に示す直径 a 及び直径 c を計測した結果，それぞれ6 mmと5 mmの摩耗量であった．年あたりに換算すると1.67 mm／年と1.40 mm／年である．この係留環部，リンクNo.1及び特殊形状のリンクについての摩耗量計測結果を表-1に示す．GPS海洋ブイ設置前に全数の計測は実施していないが，抜取検査でプラス側の公差があることを確認している．このため，摩耗量はこれより大きい可能性がある．測定値の方が大きい場合は摩耗量 0 と表示している．表-1の結果から，ブイ下端部において実測された摩耗量は，設計想定値を大きく下回っていることが明らかとなった．

次に，リンクNo.420からNo.423の間の状況を写真-5に示す．このようにNo.421からNo.439の19 リンクの間で，16 個のリンクについてスタッドの脱落が見られた．リンクのスタッドはチェーンのキンク防止用であり，片側だけを溶接で取り付けている．破断強度はリンク部だけで確保しており，海底からの立ち上がり部におけるスタッド脱落は想定範囲内であった．

また，係留チェーンの代表的なリンクの摩耗量の計測結果を表-2に示す．データの表記は表-1の場合と同様に行っている．リンクNo.419からNo.435の係留索立ち上がり部の実測摩耗量分布を図-7に示す．係留チェーン摩耗量は，類似の浮体構造物である表層浮魚礁の摩耗量調査実績[3]（既往調査の摩耗最大値）等を参考に設定しており，係留索立ち上がり部は，5 mm／年を設計想定摩耗量としていた．測定された最大の摩耗は，リンクNo.427で見られた7 mmであり，年あたりに換算すると1.95 mm／年であった．

表-1 係留環及びシャックルの摩耗量測定結果

単位：mm

番号	呼び径	計測部位	a	b	c	d
係留環部	—	設計値	190	190	145	−
		計測値	191	191	144	−
		摩耗量	0	0	1	−
		年摩耗量	0	0	0.28	−
1	Φ81AS	設計値	139	113	170	113
		計測値	133	116	165	113
		摩耗量	6	0	5	0
		年摩耗量	1.67	0	1.40	0
564	Φ84AS	設計値	118	118	176	118
		計測値	117	121	173	116
		摩耗量	1	0	3	2
		年摩耗量	0.28	0	0.84	0.56
660	Φ111AS	設計値	155	155	233	155
		計測値	155	155	230	156
		摩耗量	0	0	3	0
		年摩耗量	0	0	0.84	0
964	Φ97AS	設計値	136	136	204	136
		計測値	133	133	201	135
		摩耗量	3	3	3	1
		年摩耗量	0.84	0.84	0.84	0.28

写真-5 リンクNo.420からNo.423の状況

表-2 代表的なリンクの摩耗量測定結果

単位：mm

番号	呼び径	設計値		測定値		摩耗量	摩耗量	年間摩耗量	年間摩耗量
		a	b	a	b	a	b	a	b
13	Φ70C	70	70	70	73	0	0	0	0
209	Φ68E	82	82	82	83	0	0	0	0
239	Φ68C	68	68	68	70	0	0	0	0
402	Φ76C	76	76	73	78	3	0	0.84	0
419	Φ76C	76	76	73	76	3	0	0.84	0
421	Φ76C	76	76	73	75	3	1	0.84	0.28
423	Φ76C	76	76	72	73	4	3	1.12	0.84
425	Φ76C	76	76	72	72	4	4	1.12	1.12
427	Φ76C	76	76	69	71	7	5	1.95	1.40
429	Φ76C	76	76	70	72	6	4	1.67	1.12
431	Φ76C	76	76	70	72	6	4	1.67	1.12
433	Φ76C	76	76	71	73	5	3	1.40	0.84
435	Φ76C	76	76	73	74	3	2	0.84	0.56
567	Φ132C	132	132	130	135	2	0	0.56	0
815	Φ111C	111	111	112	115	0	0	0	0

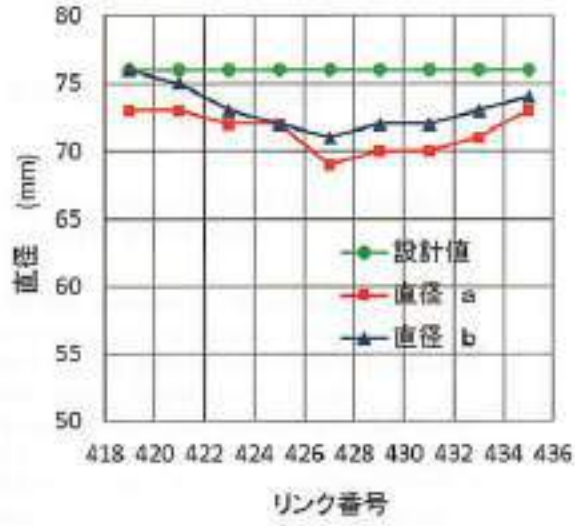


図-7 海底面への堆積がある立ち上がり部の実測摩耗量

7. まとめ

GPS海洋ブイの係留チェーンについて，摩耗調査を行った結果を要約すると，次のとおりである．
(1) 3年7カ月にわたって係留されていたGPS海洋ブイの係留チェーンは，貝殻や海藻の付着は見られたものの，係留チェーンの強度劣化を示すような状況は見られず，係留系は健全性を保っている状況が確認された．
(2) 実測されたチェーンの摩耗量は，ブイ下端の係留鎖部においても，海底面との衝撃が発生する係留索立ち上がり部においても，設計上想定した摩耗量より小さかったことから，安全率緩和の可能性が示唆された．
(3) 最大の摩耗量が発生したリンクは，海底面との衝撃が最も頻繁に発生すると考えられる係留索の立ち上がり部にあることが明らかにされた．

謝辞：本研究は，科研費基盤研究(S)21221007で実施した．港湾空港技術研究所　寺田幸史氏，柯合弘憲氏，高川智博氏，国交省港湾局　辰巳大介氏，日立造船(株)　吉田晴彦氏，三宅将英氏，阿部知宏氏，西村史睦氏，今田成之氏らの共同研究者に感謝します．また，高知高専の協力学生及びGPS海洋ブイの設置・揚収作業に従事した日立造船(株)の数多くのご担当者に感謝いたします．

参考文献

1) 永井紀彦，小川英明，寺田幸博，加藤照之，久高将信：GPS ブイによる神合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 1411-1415, 2003.
2) Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato, T. and Kudaka, M.: GPS Buoy Application to Offshore Wave Tsunami and Tide Observation, ASCE, *Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering* (ICCE'04), Vol. 1, pp. 1093-1105, 2004.
3) Nagai, T., Kato, T., Moritani, N., Izumi, H., Terada, Y. and Matsui, M.: Offshore Tsunami Monitoring Network Design using GPS Buoys and Coastal on-site Sensors, ASCE, *Proc. of the 30th International Conference on Coastal Engineering* (ICCE'06), Vol. 2, pp. 1529-1540, 2006.
4) 永井紀彦：波浪観測網の強化による海の安全の確保 ―GPS 波浪計 2006 年度より配備開始！―，土木学会誌（2006 年 9 月号），pp. 78-79, 2006.
5) 永井紀彦：GPS 波浪計による神合の波浪の観測，土木学会誌（2009 年 4 月号），pp. 50-53, 2009.
6) Nagai, T., Shimizu, K., Lee, J. H., Iwasaki, M., Fujita, T. and Kudaka, M.: Development Of Multi-Purpose Offshore Observation System Using GPS Buoy, *Proceedings of Coastal Structures 2007 International Conference*, Vol. 1, pp. 669-680, 2007.
7) 島山知司 監修・海象観測情報の解析・活用に関する研究会 編集：波を観る，合併技術ライブラリーNo.42, 一般財団法人沿岸技術研究センター，p. 152, 2013.
8) Terada, Y., Kato, T., Koshimura, S. and Yoshida, H.: A development of tsunami monitoring system using GPS buoy, 3rd International Tsunami Field Symposium, Tohoku University, 2010.
9) Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T. and Koshimura, S.: Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. e5-e8, 2011.
10) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koshimura, S., Miyake, T., Nishimura, H. and Kunihiro, S.: Development of a tsunami monitoring system using a GPS Buoy, *Proc. IGNSS 2011*, International Global Navigation Satellite Systems Society, Paper No. 14, pp. 1-12 (CD-ROM), 2011.
11) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Kawaguchi, K., Koshimura, S. and Matsushita Y.: An improvement of the GPS buoy system for detecting tsunami at far offshore, *Book of Abstract, the International Association of Geodesy (IAG) Scientific Assembly*, p. 409, 2013.
12) 例えば，高知県：平成 21 年度広域漁場第 1 号，室戸東地区（室戸岬沖 16 工区）広域漁場整備工事，表層型浮魚礁（黒牧 16 号）性能仕様書，p. 9, 2009.

(2013. 10. 28 受付)

LONG-TERM MOORING CHAIN SYSTEM DURABILITY OF THE GPS TSUNAMI-WAVE METER

Yukihiro TERADA, Toshihiko NAGAI, Teruyuki KATO, Shunichi KOSHIMURA, Koji KAWAGUCHI and Yasuhiro MATSUSHITA

This paper introduced observation data of proto-type GPS buoy's mooring chain at 3 years and 7 months after the installation, in order to provide information for practical design of future safer and more economical design of the mooring system. Following findings may be important for the future GPS buoy design. (1) Mooring chains stayed in good performance even after 3 years and 7 months of severe ocean field conditions, although they were covered by large amount of sea plants like shells and several studs disappeared from some of the chains located at frequently suffering from landing and dis-landing action by the buoy motion. (2) The quantity of real frictional wear was considerably smaller than assumed one at all the part of the mooring system. (3) Maximum real frictional wear was observed at chains located at frequently suffering from landing and dis-landing action by the buoy motion.

[参考資料2015-1]

Recent Developments of GPS Tsunami Meter for a Far Offshore Observations

Yukihiro Terada, Teruyuki Kato, Toshihiko Nagai, Shunichi Koshimura, Naruyuki Imada, Hiromu Sakaue, and Keiichi Tadokoro

Abstract

A new tsunami observation system using GPS buoys has been developed, which employs the RTK-GPS technique to detect and monitor tsunamis in real-time before they reach the coast. A series of experimental GPS buoys succeeded in detecting three tsunamis with amplitudes of about 10 cm. Following this success, since 2007, the Japanese government has established GPS buoy systems for monitoring sea waves at 19 sites around the Japanese coast. These systems succeeded to detect 11th March 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami. Through these experiences, we recognized two problems that need to be solved in order to deploy buoys at farther distances from the coast: one is that positioning accuracy decreases as the distance increases and the data transmission by radio becomes difficult for a long distance. In order to overcome these difficulties, first, a new algorithm of PPP-AR for real-time application was employed. The test analysis showed that the positioning accuracy may attain a few centimeters even if the reference GPS network that generates precise orbits and clocks is farther than 1,000 km. Then, a satellite communication system was experimentally used to send data in both directions between the land base and buoy. The data that was obtained on the buoy was transmitted to the land base and was shown on a webpage in real-time, successfully. This kind of system may have further applications of earth science; for example, we are trying to implement GPS/acoustic apparatus for continuous monitoring of ocean floor crustal deformations.

Keywords

GPS • GPS buoy • Precise point positioning • Satellite communication • Tsunami

1 Introduction

If a buoy with a sensor for detecting sea surface height change is set offshore distant enough from the coast and data are transmitted in real-time, detection of a tsunami can be effectively used for disaster mitigation. We have developed a GPS buoy system for this purpose, equipped

Y. Terada (✉)
Kochi National College of Technology, Kochi, Japan
e-mail: terada@ce.kochi-ct.ac.jp

T. Kato
The University of Tokyo, Tokyo, Japan
e-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp

T. Nagai
Echo Corporation, Tokyo, Japan
e-mail: t-nagai@ecoh.co.jp

S. Koshimura
Tohoku University, Sendai, Japan
e-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

N. Imada
Hitachi Zosen Corporation, Osaka, Japan
e-mail: imada_n@hitachizosen.co.jp

H. Sakaue
Non, Tokyo, Japan
e-mail: say22hero@gmail.com

K. Tadokoro
Nagoya University, Nagoya, Japan
e-mail: tad@seis.nagoya-u.ac.jp

© Springer International Publishing Switzerland 2015

M. Hashimoto (ed.), *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*, International Association of Geodesy Symposia 145, DOI 10.1007/1345_2015_151

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

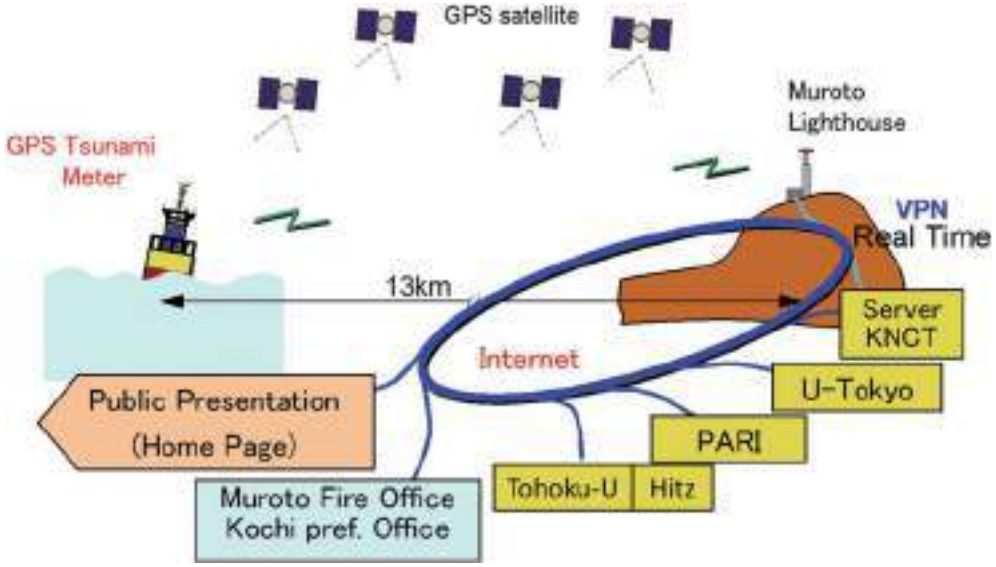


Fig. 1 Layout of the experimental GPS tsunami observation system

with a GPS antenna at the top of the buoy floating at the sea surface (Kato et al. 2000). Data taken on the buoy was transmitted to the land base where another GPS set was placed and the baseline mode real-time kinematic (RTK) GPS technology was used for data analysis. The estimated position of the sea surface relative to a stable location on land were monitored at the local governmental offices and the data were disseminated through internet in real-time as well. Figure 1 shows the GPS tsunami observation system we have used.

This system was first deployed off Ofunato city, northeast Japan, for the period between 2001 and 2003, and then moved to off Cape Muroto, southwest Japan, for the period between 2004 and 2007 and between 2008 and 2012. These buoys succeeded in detecting three tsunamis whose amplitudes were nearly 10 cm. They are the 23rd June 2001 Peru earthquake, the 26th September 2003 Tokachi earthquake and the 5th September 2004 Kii earthquake (Nagai et al. 2003; Kato et al. 2005). These results showed that the GPS buoys are useful for early detection of tsunamis. See Kato et al. (2000, 2005, 2011), and Terada et al. (2011) for other details of developments.

Following the success of our GPS buoy experiments, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) of Japan has established the GPS buoy system for monitoring sea waves at 19 sites around the Japanese coast since 2007 as a part of the nationwide wave monitoring system called Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS) system. These systems also succeeded in detecting the 28th February 2010 Chile earthquake. Then, a giant earthquake of Mw9.0 occurred offshore Tohoku district, northeast Japan, on 11th March 2011 and the generated tsunami devastated the whole area along the Pacific coast of the district, which caused about 18,000 people of deaths and missing in the area. Figure 2 shows the real-time tsunami records by this earthquake, observed at the Off South Iwate (Kamaishi) station of NOWPHAS system (see Fig. 3 for the location). The tsunami measured over 6 m in height and was observed about 15 min after the earthquake. The Japan Meteorological Agency used the data for updating the level of the tsunami warning to the greatest value. After the highest wave was observed, real-time monitoring of the tsunami data stopped suddenly. Since the data of all GPS buoys installed in this area stopped at once, it was thought that the cause was interception of the communication network by electric power loss. However, as the backup power supplies worked effectively at the each land base stations, recordings of the tsunami were continued and the data were retrieved later. Figure 4 shows thus obtained examples of full wave form recordings of the Tohoku-Oki earthquake including the later part of retrieved records. Almost all of the observation sites of NOWPHAS successfully recorded the full wave form of the tsunamis.

2 Problems Found in Case of 2011 Tohoku-Oki Earthquake Tsunami

Through these experiences of GPS buoys for detecting tsunamis, we have recognized two problems that need to be solved for more effective use of GPS buoy for disaster mitigation.

The first problem is that the buoys established at less than 20 km from the coast is not far enough for disaster mitigation. In case of Tohoku-oki earthquake on 11th March

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

Fig. 2 The tsunami record due to the Tohoku-Oki earthquake of 11th March 2011. Figure is captured from real-time web display of NOWPHAS at Off South Iwate (Kamaishi) site. (http://www.milit.go.jp/kowan/nowphas/) *Horizontal axis* is shown as Japan Standard Time (UTC + 9 h) of 11th March 2011

2011, the update of tsunami alert was conducted probably only a few minutes before it reaches the coast. At that time, it was probable that electric power was already shut down and updated tsunami alert might have not reached to all of the relevant people. Though this latency could be improved by much closer, ideally automatic, monitoring of offshore buoys, farther placement of the buoy from the shore would provide a longer lead time for more effective evacuation.

The second problem is that the data stopped recording due to power and/or Internet failure soon after the earthquake. Though we secured recordings even after power failure by preparing an uninterruptible-power-supply (UPS) for a while, which enabled us to recover the record after the earthquake, the real-time dissemination of the record was not attained.

Thus, in this study, we tried to overcome these problems to deploy GPS buoys at, say, farther than 100 km, at least, from the coast, by introducing a new positioning algorism and a satellite communication system for more robust data transmission to farther distance to avoid power/internet interruptions.

3 Improvements of Positioning Strategy

The system has had a limit of distance up to about 20 km from the coast as it employs a conventional baseline mode kinematic algorithm called RTK GPS. The system used broadcasted satellite orbits and clocks for real-time applications, so that the positioning accuracy decreases rapidly as the distance exceeds 20 km. In order to improve the distance limit, in this study, we employed a new algorithm called PPP-AR (precise point positioning with ambiguity resolution) for real-time kinematic applications (Mervart et al. 2008).

Precise Point Positioning (PPP) technology was first introduced for static analysis (e.g., Zumberge et al. 1997) and the technology has been widely used for geodetic applications due to its superior characteristics of less computational burden and easier interpretations of crustal displacement as it does not require any prior information of the motion of referenced stations, as compared with the baseline mode analysis. The most precise estimation of position is obtained by resolving ambiguities inherent to the phase observation

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

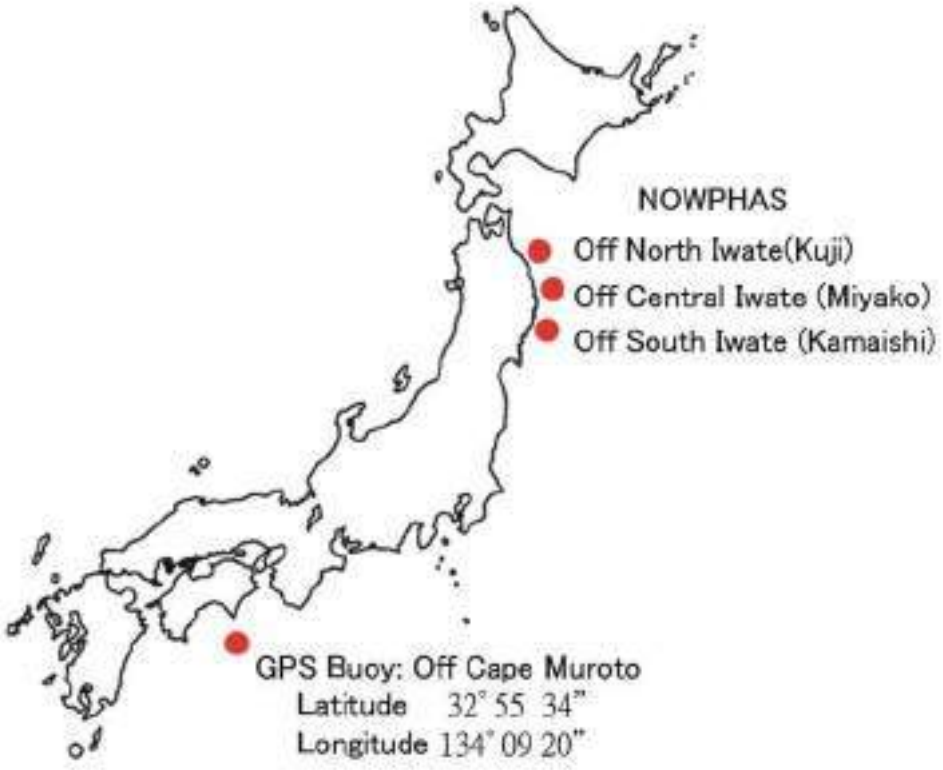


Fig. 3 GPS buoy locations used in this study

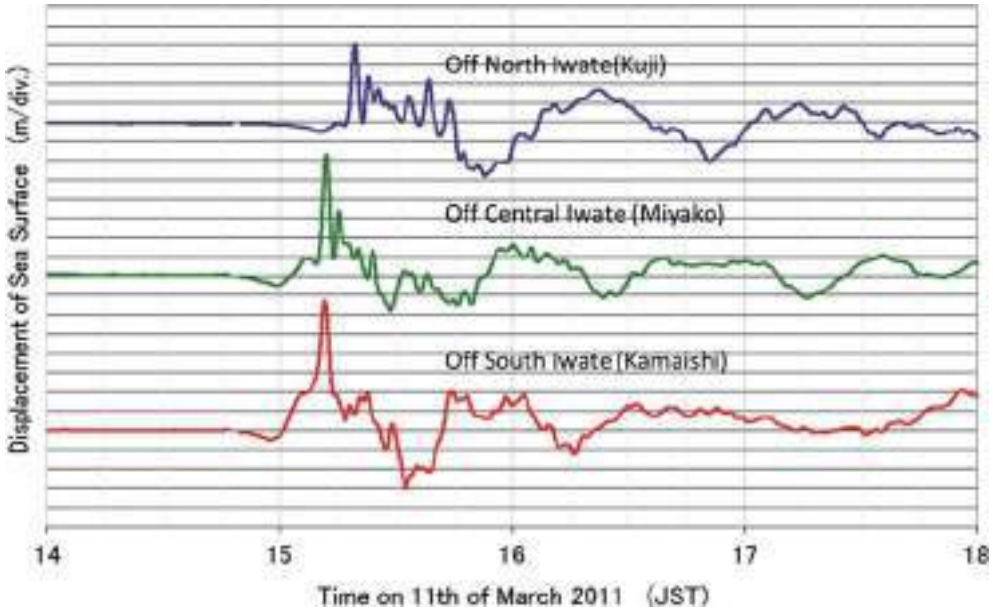


Fig. 4 Full wave form of Tohoku-Oki earthquake tsunami observed by NOWPHAS (Observed by MLIT and Analyzed by PARI: Kawai et al. 2011). Only the first onset was monitored in real-time as shown in Fig. 2. Later part of records were retrieved afterwards

of GPS. Resolving ambiguity for PPP can be achieved by obtaining precise orbits and clocks of GPS satellites from IGS after the observation. Then, the technology of PPP has been developed for the real-time kinematic applications. Mervart et al. (2008) for example used satellite single differenced data of phase and code observations to estimate corrections for RTK PPP. By employing precise orbits and clocks, it can then resolve ambiguities, which we call PPP-AR

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

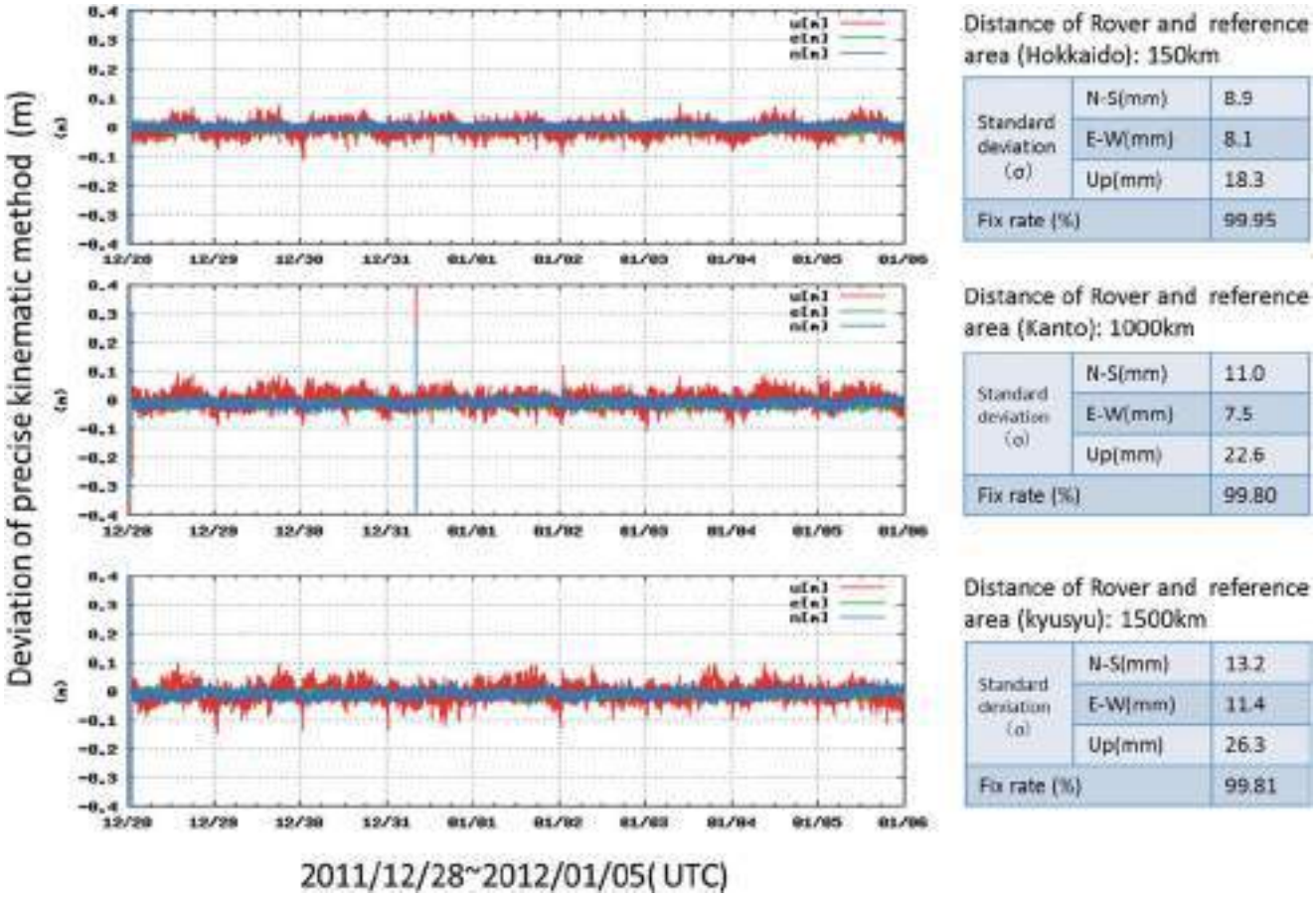


Fig. 5 Results of PPP-AR at Shimokawa GEONET site for different distances of reference networks that generates precise orbits and clocks: (*upper*) 150 km, (*middle*) 1,000 km, and (*lower*) 1,500 km, respectively. Observation period is from 28 December 2011 to 5 January 2012 (Courtesy by Hitachizosen Corporation 2012)

RTK. This algorithm was implemented in the software called RTNet developed by GPS Solutions Inc., which we used in this study. The advantage of the software is that it can provide precise orbits and clocks from regional reference networks like GEONET (GNSS Earth Observation Network System) of Japan. In addition the RTNet tool allows a real-time analysis capability, which is favorable for our purpose.

First, we examined the accuracy of PPP-AR using RTNet software with post-processed high-accuracy baseline analysis. Figure 5 shows the estimated time series of a GEONET site at Shimokawa, with different distances from the reference network for generating precise orbits and clocks for corrections. The figure clearly shows that the variability is only a few centimeters, at most, for even more than 1,000 km distance from the regional reference network. These results are encouraging to us that GPS buoys could be put at farther offshore, say, more than 100 km or even more than 1,000 km from the coast.

We then implemented the RTNet system to our experimental buoy system off Cape Muroto (see Fig. 3 for the location). Figure 6 shows a comparison of coordinates obtained with conventional RTK GPS (upper inset) and PPP-AR (lower inset). In this case, the buoy is set about 35 km south off Cape Muroto. The sample data is taken for 1 h from 12:00 to 13:00 on 18th May in 2012. 1 Hz sampled data of vertical components of the buoy position is plotted. The upper record is obtained by the conventional RTK-GPS, while the lower is obtained by the PPP-AR algorithm. It is readily seen that the short term fluctuations in both records looks highly correlated, suggesting that both records could precisely recover the higher frequency wind waves of the sea-level heights. However, RTK-GPS records show significant fluctuations for the longer period of several minutes and even sudden offsets and faulty data, probably due to mis-fix of ambiguity, intermittently, which is not seen in the record of PPP-AR (lower plots of Fig. 6). Clearly the sea surface fluctuations during this time period is only several tens of centimeters which suggest calm weather, so that we cannot expect any sudden offsets or long-period of fluctuations with periods of several minutes or longer.

Since we do not see such bad record in RTK-GPS if the distance is less than 20 km, we judge that the reason of

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

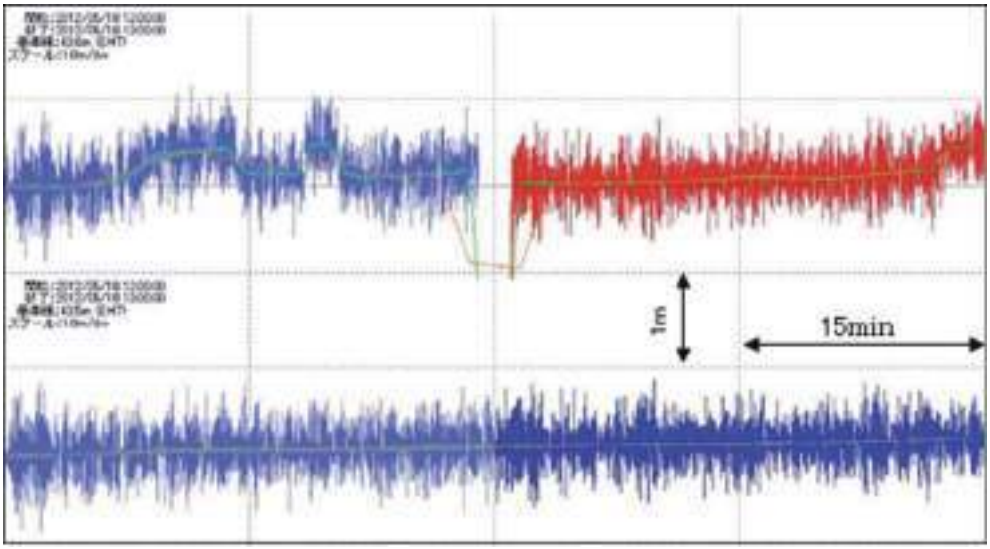


Fig. 6 Comparison between RTK-GPS (Upper) and PPP-AR (Lower) GPS data: Muroto experimental site (Fig. 3)

such result stems from long distance environments of RTK-GPS. In such circumstances, there occurs frequent mis-fix of ambiguities and cause jumps in the estimated positions. The stability of PPP-AR suggests that the ambiguity in phase is totally resolved to give correct estimation of position. These situations clearly show the effectiveness of PPP-AR positioning method relative to conventional RTK GPS, in particular, for the far offshore deployments of GPS buoys.

4 Utilization of Satellite Communication System

Given that above new system is feasible and is established far offshore from the coast, then another problem is how the data obtained at the buoy can be transmitted to land. The ground based radio transmission system that is currently used, cannot be used for such long distance of more than 100 km. Then, a satellite data transmission will be the solution. If satellite data transmission is possible, the data have not to be sent to the area nearest to the coast, which allows us that the data can be safely recorded without interruptions due to earthquakes and/or tsunamis. Thus, data transmission using satellites may solve the second problem of unexpected interruption of data at the critical time when tsunamis approach the coast.

Experiments for such satellite data transmission from the buoy to the ground data management center were conducted under another independent cooperative research project with Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), National Institute of Information and Communications Technology (NICT) and Hitachizosen Corporation (Yamamoto et al. 2014). The first preliminary experiment was conducted from 24th October to 6th November in 2012. The Japanese engineering test satellite (ETS VIII) was used for the purpose of data transmission. In this experiment unidirectional data transmission from the buoy to the land base was conducted. The result showed about 10^{-2} to 3×10^{-1} of Frame Error Rate (FER) depending on wave height. This result was thought satisfactory for continuous monitoring of sea surface height changes, though some more improvements could be made.

Then, we conducted another experiment for bi-directional data transmission for testing PPP-AR. Figure 7 shows the flow of data in this experiment. In this experiment, Japanese Quasi Zenith Satellite System (QZSS) was used to transmit correction information for PPP-AR from the ground to the buoy. The data transmission from buoy back to land was carried out using ETS VIII as is shown in Fig. 7. The experiment was conducted from 3rd to 5th of January and from 1st to 21st of June in 2014. Figure 8 shows the obtained data by this experimental system; the upper inset is non filtered sea surface height which shows wind waves and tide, while lower data is low pass filtered data which is mostly tidal component. First, the upper time series includes all of sea surface waves. During this time period, it is readily seen that the vertical motion of the buoy has amplitude (peak-to-peak) of about 0.6 m, quite calm environments. Then, the amplitude of short period waves was getting bigger to about 1.3 m toward noon in Japan time, which is a little rough water. If tsunami of a few centimeter in amplitude is overlapped on the wave, it may not be visible in the record. However, as the periods of tsunami are from several minutes to longer than one hour, the wave form of tsunami can be extracted if a low pass filter is applied as shown in the lower plot of Fig. 8. Tsunami, if superimposed on a smooth curve

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

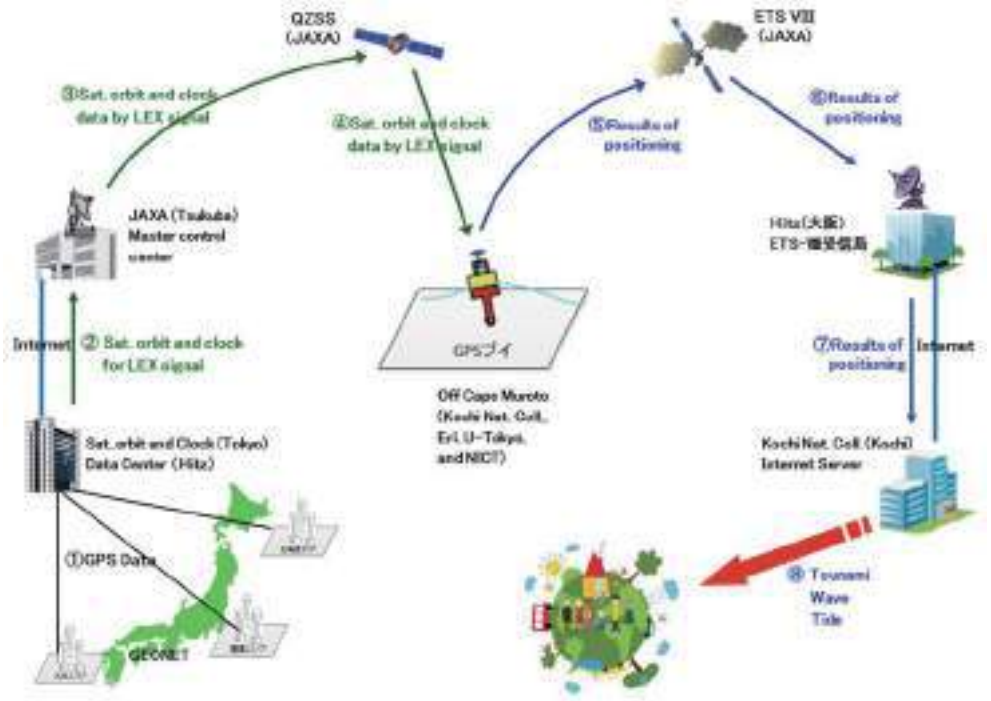


Fig. 7 Plan of data transmission test via satellite communication systems of QZSS and ETSVIII (Yamamoto et al. 2014)

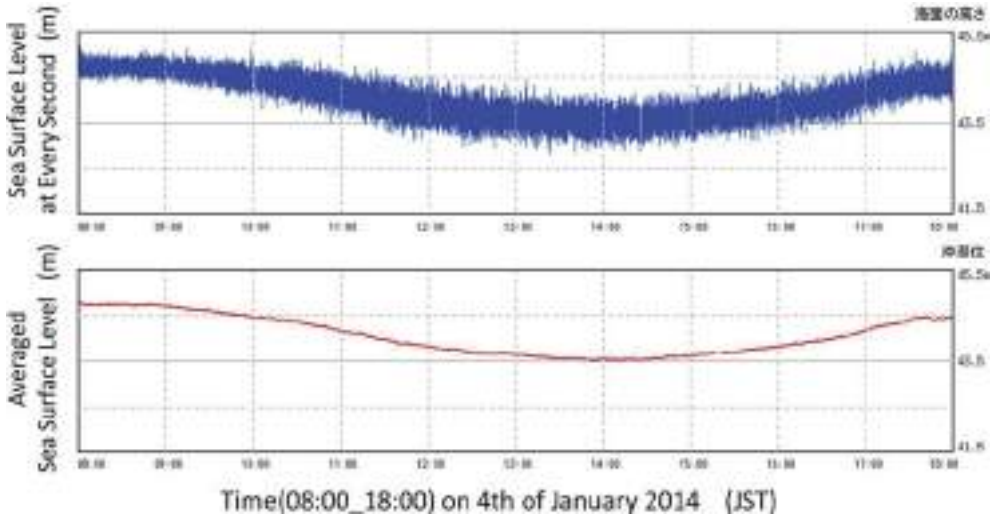


Fig. 8 Results of data transmission by satellite communication system of QZSS and ETSVIII (*Upper*: raw data, *Lower*: low-pass filtered data). Unit: (*horizontal*) hour in Japan Standard Time, (*vertical*) meter

of tidal change of the lower figure, may not be overlooked if its amplitude is larger than a few centimeters.

However, the data transmission capability is still a problem as it varies depending on the wave height. Figure 9 shows the relation of data transmission rates and significant wave heights in the case of the first experiment in 2014. The wave height was very low on the first day of experiment, less than 50 cm. That became higher and higher on the 2nd day, for which all the observed data are shown in Fig. 8. The significant wave height became about 2.3 m. The maximum wave height at this time was 4.6 m. On the contrary, data transmission rate is getting worse as the significant wave height was getting higher and it became better when the wave height became lower during the last day. This result is the same as that obtained at the preliminary experiment in 2012. Thus, it seems clear that there is a reverse correlation between significant wave height and data transmission rate. It seems that the rate of data transmission error changes due to

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

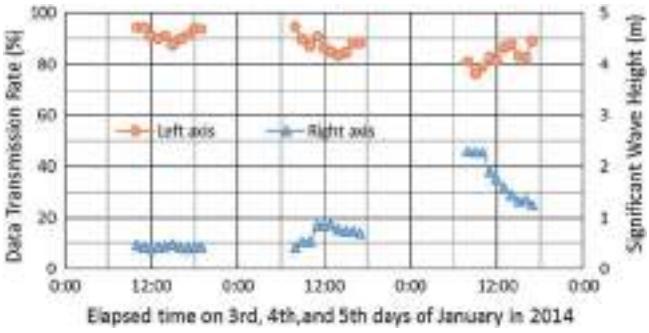


Fig. 9 Relation between data transmission rate (*circle* and *left hand axis*) and significant wave height (*triangle* and *right hand axis*)

the tilting of buoy due to sea surface variations. As we used a planer antenna for signal transmission and acquisition, it has a directional property depending on zenith angle. If the buoy inclines larger, the gain of signal gets lower and the frame error rate increases. This characteristics may be improved by better designing the antenna for data transmission and/or hardware settings. (see Yamamoto et al. (2014) for further details of experiments).

Given that a satellite communication link is feasible, the data loss that we experienced at the time of the 2011 Tohoku-Oki earthquake may be resolved by putting the reference network much farther from the epicentral area. In this study, we used three regional network areas for reference as is shown in Fig. 5. We could run the routine in parallel at any time and use the most effective reference network when any of them has a problem as it is hard to imagine that all of Japanese GEONET could suffer from a blackout.

5 Further Applications of GPS Buoy for Continuous Monitoring of Ocean Bottom Crustal Movements

In addition to the above developments, we are trying to apply our buoy system for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements. Many previous researchers have developed the GPS-acoustic system for this purpose (e.g., Spiess et al. 1998; Kido et al. 2006; Fujita et al. 2006; Sato et al. 2011a, b; Tadokoro et al. 2012). The basic idea of a GPS-acoustic system combines GPS and acoustic ranging to estimate the position of the seafloor. Figure 10 illustrates a plan of GPS-acoustic system for monitoring ocean floor crustal movements. First, GPS is used to estimate the position of the floating body (such as vessel or buoy), and then, the lengths between the floating body and the ocean bottom positions are measured by acoustic ranging. Though the estimated lengths between the sea surface and the sea bottom changes greatly, the position of the center of the multiple ocean bottom sensors (more than three) does not change much. Thus we take its position as the position of the seafloor.

As the previous systems have used vessels to measure the position of the ocean surface, the measurements have been only intermittent. GPS buoys could be used for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements, if the GPS buoy is equipped with an acoustic system. Based on this idea, we started experiments using our GPS buoy off Cape Muroto in 2013. A similar idea with slightly different system design was introduced by Takahashi (2014). Our approach, different from their approach, is the integration of GPS buoys for multiple use of GPS technology for better cost effectiveness and wider contributions to earth science, not only for tsunami and seafloor crustal deformation but also for atmospheric and ionospheric research. The experimental observation system in this study, shown in Fig. 10, continuously received acoustic data at the land base station from 3rd of August to 23rd of November. The data acquisition rate is 96% during the first 10 days. Moreover, the acoustic data obtained at the buoy showed clear signal suggesting high signal-to-noise ratio, probably because there was no disturbing engine noise in case of using a ship. Although the detailed examination of data is left for future studies, it was shown that a clear waveform can be observed if we use a buoy for a floating platform. We will try to continue experiments for tackling the problem.

6 Conclusion and Remarks

The tsunami monitoring system using a GPS buoy has been developed for more than eighteen years. This system clearly showed that tsunamis can be measured within the accuracy of several centimeters. After the 11th March 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami, the GPS buoy system has been improved to solve two problems to deploy the buoys at distances farther offshore:

1. Introduction of a new algorithm for GPS data analysis, precise point positioning with ambiguity resolution method (PPP-AR), greatly improved the distance limitation from the coast to GPS buoys to more than 1,000 km.
2. Satellite data transmission between buoys and ground data management centers using ETS VIII and QZSS was successfully implemented for tsunami observation in the outer ocean, which enables avoiding data loss due to power failures right after large earthquakes.
3. Integration of the system with a GPS/acoustic system for continuous monitoring of sea-floor crustal movements, together with wider applications for earth science, will make the system much more cost effective for ocean geophysical exploration.

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

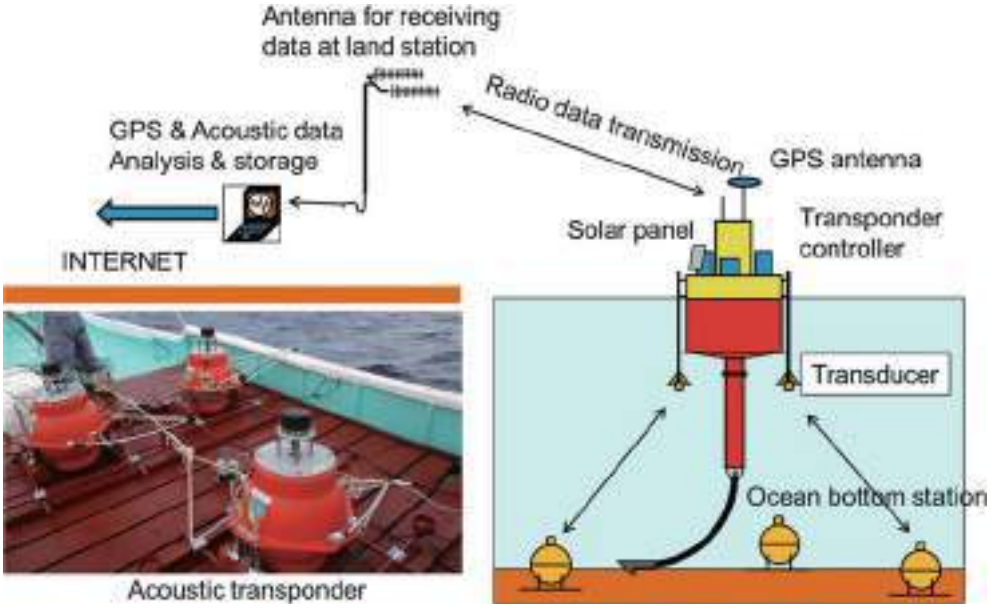


Fig. 10 Plan of continuous monitoring system of crustal movements at the ocean floor

Acknowledgments The authors would like to express deepest thanks to Mr. G. Hashimoto of and Mr. O. Motohashi of JAXA, Mr. S. Yamamoto of NICT, Mr. A. Wada of Hitachizosen Corporation and many other people for their support to this research. The authors also would like to express sincere thanks to three reviews whose comments significantly improved the manuscript. This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (S) 21221007 and the contracted research of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

References

Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, Sato M, Toyama S, Katayama M, Kawai K, Matsumoto Y, Yabuki T, Asada A, Colombo OL (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. Earth Planets Space 58:265–275

Kato T, Terada Y, Kinoshita M, Kakimoto H, Issiki H, Matsuishi M, Yokoyama A, Tanno T (2000) Real time observation of tsunami by RTKGPS. Earth Planets Space 52(10):841–845

Kato T, Terada Y, Ito K, Hattori R, Abe T, Miyake T, Koshimura S, Nagai T (2005) Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. Earth Planets Space 57:297–301

Kato T, Terada Y, Nishimura H, Nagai T, Koshimura S (2011) Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan. Earth Planets Space 63:e5–e8

Kawai H, Satoh M, Kawaguchi K, Seki K (2011) Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami. Report of the Port and Airport Research Institute, vol 50. pp 3–64

Kido M, Fujimoto H, Miura S, Osada Y, Tsuka K, Tabei T (2006) Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys. Earth Planets Space 58:911–915

Mervart L, Lukes Z, Rocken C, Iwabuchi T (2008) Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time. In: Proceedings of the 21st international technical meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, pp 397–405

Nagai T, Ogawa H, Nukada K, Kudaka M (2004) Characteristics of the observed 2003 Tokachi off earthquake tsunami profile. Coast Eng J 46(3):315–327

Sato M, Ishikawa T, Ujihara N, Yoshida S, Fujita M, Mochizuki M, Asada A (2011a) Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. Science 332:1395

Sato M, Saito H, Ishikawa T, Matsumoto Y, Fujita M, Mochizuki M, Asada A (2011b) Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. Geophys Res Lett 38, L01312. doi:10.1029/2010GL045689

Spiess FN, Chadwell CD, Hildebrand JA, Young LE, Purecell GH Jr, Dragart H (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. Phys Earth Planet Int 108:101–112

Tadokoro K, Ikuta R, Watanabe T, Ando M, Okuda T, Nagai S, Yasuda K, Sakata T (2012) Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan. Geophys Res Lett 39, L10306. doi:10.1029/2012GL051696

Takahashi N, Ishihara Y, Ochi H, Fukuda T, Tahara J, Maeda Y, Kido M, Ohta Y, Mutoh K, Hashimoto G, Kaneda Y (2014) New buoy observation system for tsunami and crustal deformation. Mar Geophys Res 35(3):243–253. doi:10.1007/s11001-014-9235-7

Terada Y, Kato T, Nagai T, Koshimura S, Miyake T, Nishimura H, Kunihiro S (2011) Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy. In: Proceedings of the international global navigation satellite systems society (IGNSS) symposium, Peer Reviewed Paper, vol 14. pp 1–14

Yamamoto S, Kawasaki K, Terada Y, Kato T, Hashimoto G, Motohashi O, Saida Y, Matsuzawa R (2014) Data transmission experiment from the buoy using the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII) – the aim of early detection of TSUNAMI. IEICE Technical Report, 2014-8, pp 5–10. (in Japanese with English abstract)

Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Watkins MM, Webb FH (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J Geophys Res 102:5005–5017

hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
SAT2015-23(2015-08)

［奨励講演］ 海上からの衛星データ伝送と今後の展望
～ 災害の早期検出を目指して ～

川崎和義† 山本伸一‡ 寺田幸博†† 加藤照之‡‡ 本橋 修††† 橋本剛正‡‡‡ 寺田優一†††† 松澤 亮††††

† 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 〒314-8501 茨城県鹿嶋市平井 893-1
‡ 元情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター
†† 高知工業高等専門学校 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1
‡‡ 東京大学 地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
††† 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
‡‡‡ 宇宙技術開発株式会社 〒164-0001 東京都中野区中野 5-62-1
†††† 日立造船株式会社 〒559-8559 大阪府大阪市住之江区南港北 1-7-89

E-mail: † k.kawasaki@nict.go.jp, †† terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ‡‡ teru@eri.u-tokyo.ac.jp, ††† motohashi.osamu@jaxa.jp,
‡‡‡ hashimoto.gousei@sed.co.jp, †††† {saida, matsuzawa_r}@hitachizosen.co.jp

あらまし 技術試験衛星VIII型（ETS-VIII）を用いて高知県室戸岬沖の海上ブイからGPS津波計のデータ伝送実験を行ってきた．これまでの実験結果を基に，津波の早期警戒をはじめとして，将来的には海上気象，海底地殻変動，大気中の水蒸気量及び電離層の全電子数の観測結果など，様々な情報を収集し，災害の早期検出及び軽減等のための監視に活用できるシステムの検討を進めている．

キーワード 衛星データ通信，災害の早期検出，GPS 津波計，GNSS ブイ

The satellite data transmission from marine and the future outlook
– With the aim of early detection of disaster --

Kazuyoshi KAWASAKI† Shin-ichi YAMAMOTO‡ Yukihiro TERADA†† Teruyuki KATO‡‡
Osamu MOTOHASHI††† Gousei HASHIMOTO‡‡‡ Yuichi SAIDA†††† Ryo MATSUZAWA††††

† Kashima Space Technology Center, NICT 893-1 Hirai, Kashima-shi, Ibaraki, 314-8501 Japan
‡ Ex- Kashima Space Technology Center, NICT
†† Kochi National College of Technology 200-1 Monobe-otsu, Nankoku-shi, Kochi, 783-8508 Japan
‡‡ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 Japan
††† Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 JAPAN
‡‡‡ SPACE ENGINEERING DEVELOPMENT Co., Ltd. 5-62-1 Nakano, Nakano-ku, Tokyo, 164-0001 Japan
†††† Hitachi Zosen Corporation 7-89 Nankoukita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka, 559-8559 Japan

E-mail: † k.kawasaki@nict.go.jp, †† terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ‡‡ teru@eri.u-tokyo.ac.jp, ††† motohashi.osamu@jaxa.jp,
‡‡‡ hashimoto.gousei@sed.co.jp, †††† {saida, matsuzawa_r}@hitachizosen.co.jp

Abstract We carried out the data transmission experiment for GPS tsunami meter from marine buoy which is installed in offshore of Cape Muroto of Kochi Prefecture using the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII). Based on the experimental results so far, in the future, to collect a information of variety of observations, such as the maritime weather, the ocean bottom crustal deformation, the water vapor content in atmosphere and the total electron content of ionosphere including the early detection of the tsunami, and studying a system that can be utilized in monitoring for the disaster early detection and miligation.

Keywords Satellite data communication, Early detection of disasters, GPS tsunami meter, GNSS buoy

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2015 by IEICE

1. はじめに

津波の早期検出を目的として，高知県室戸岬の沖合に設置された海上ブイから GPS 津波計のデータを技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いて陸上の基地局に伝送する実験を行ってきた[1].

海面変動は，海下を吹く風に起因する波浪，地震に伴う津波及び月と太陽の引力に関係する潮汐が基本的な事象であり，これまでの波浪観測は沿岸域では海底に設置した超音波波高計を用いて，外洋では船舶乗組員による目視計測に頼っていた．津波は，周期が数分から数時間であり，その波高は深海域では低く，浅海域では高くなる傾向がある．津波のエネルギーは大きく，浅海域において後続の波が重畳するなどのことから，打ち上げ高さが数十mになる場合がある．この津波や潮汐の正式記録は，港内などに設置されている井戸式の検潮儀で計測していた．

これまでの実験で用いた GPS 津波計は，これらの計測手法とは全く異なる新しい発想に基づく海面変動計測装置であり，波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度でドリフト無く計測でき，装置の設置や維持管理が容易に実施できることを目指して開発された．装置は海面の変化に追随できるように設計施工したブイの最上部に GPS アンテナを設置し，その位置を GPS（Global Positioning System）を用いて精密に測位し，上下方向の時系列変化を求める方法となっており，その用途によって GPS 波浪計，-津波計，-潮位計と名付けた[2][3].

近年では，GLONASS (Global Navigation Satellite System)や QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)などの測位システムも運用され，これらを利用できる GNSS (Global Navigation Satellite System)ブイとして，新たな海洋観測機能を付加して開発を継続している．

GPS 津波計を用いた津波早期検出システムの持つべき機能として，「いつでも，だれでも，どこからでも」津波データにアクセスでき，防災の三助（自助，互助，公助）に役立てられること，すなわち，リアルタイムに正確な津波情報を伝達することによって被害を少なくできる視点が重要であると考えている．GPS 波浪計は，国土交通省港湾局によって全国展開が行われ，現在，19 基（ナウファス波浪観測システム[4]の一部として）が設置され，運用中である．東日本大震災においては，そのリアルタイム観測結果が気象庁の津波予報値の引き上げに一定の貢献をした[5]．また，2013 年 3 月に改正された新しい津波警報の中で活用されている[6]．一方，東日本大震災時には以下の二つの課題が提起された．

(1) 第 1 波の観測データを発信した後，被災地域の停電によって通信網は寸断され，それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなった．

(2) 数 cm の GPS 測位精度と安定的な測位の継続を確保するために，ブイの設置位置が陸上から 20km 程度に制限されていたことから，避難のためのリードタイムが十分に確保できなかった．

この二つの課題を端的に表現すれば，「被災してもデータの続きを！」と「もっと沖合に！」となる．これらの課題については，衛星回線を使って海上のブイからデータ伝送を行い，データを受信する基地局を被災していない場所にすること，そして GPS 津波計の測位方式を陸上の基準局を必要としない単独精密測位法である PPP-AR（precise point positioning with ambiguity resolution）[7]を用いることで解決することができ，その適用性について実験によって技術的に克服できることを確認した．しかし，これらの課題の克服には衛星通信が不可欠である．

本稿ではこれらの研究開発の中から，海上からのデータ伝送に関わる衛星通信技術と将来の社会実装に向けた展望について紹介する．

2. GNSS ブイアレイ構想

もし，海上に設置される GNSS ブイ（以後，単に GNSS ブイと呼ぶ）が沿岸からの距離に拘束されることなく大洋のどこでも設置できることが可能となれば，その応用の可能性は格段に広範なものとなる．

詳細は後述するが，GNSS を搭載したブイの応用としては，まず，電離圏や大気などの伝搬媒質に関する応用研究が挙げられる．これらはすでに国土地理院 GPS 連続観測システム（GEONET）など陸の観測網によって実施されているものであるが，これを海洋に拡張することが可能とある．また，最近，特に日本で開発が進んでいる GPS-音響システムを利用した海底地殻変動観測への応用が考えられる．遠洋すなわち深海に設置して長期間にわたって観測を継続する場合には大型で堅牢なブイが必要になるが，そのようなブイを設置するには経費も掛かることになる．したがって，少しでも費用対効果を挙げるためには図 1 に示す様な多機能ブイが必要であろう．もし，このような GNSS ブイを日本の周辺海域，例えば排他的経済水域に多数展開できれば，日本の関連分野の学術研究に新たなデータが提供されることになり，地球科学的に大きな進展が期待できよう．そればかりでなく，気象予測や電離層擾乱予測など，津波・高潮・海底地殻変動などと相俟って総合的な防災システムのインフラとして活用できるのではないだろうか．

図 2 はこのような仮想的な西太平洋上の GNSS ブイアレイを描いてみたものである．

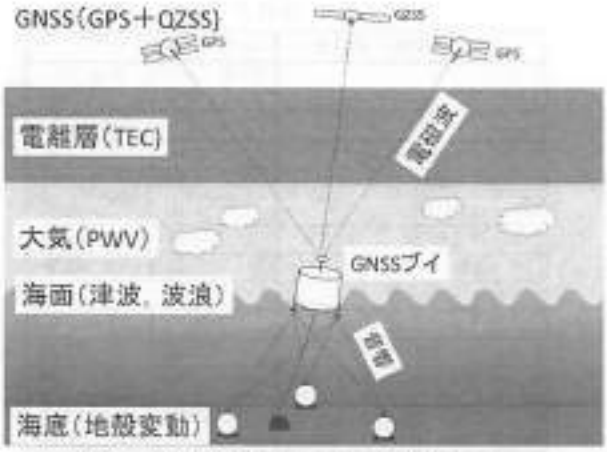


図１　海洋ブイを用いた観測の一例

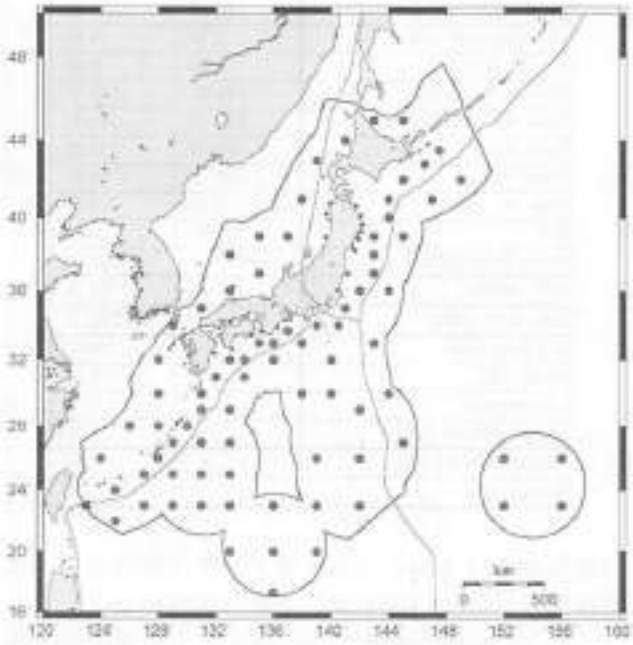


図２　ブイアレイの構想

なお，このようなブイアレイは海洋研究開発機構のトライトンプロジェクトでも赤道を中心とする地域に多数のブイを展開しているがこちらは海洋観測に特化したものであり，本研究によってはじめてGNSS を用いたブイアレイによる総合的な地球科学観測の可能性が開けたことになる．これは様々な災害監視に役立てられることから総合的な防災システムと言って良いだろう．

次項では，この様なブイアレイを実現するための衛星通信システム及び GNSS ブイについて考察する．

3. 海上からのデータ伝送

陸から遠く離れた海上に GNSS ブイを設置する場合，データの伝送手段には衛星回線を用いることが適しており，さらに，津波検出ではリアルタイム性が要求されることから，静止衛星による観測データの常時伝送が可能なことが必要となる．

ここでは，津波の早期検出及び前項で述べた様々な観測データを衛星回線で伝送するシステムについて検討する．

3.1. 衛星通信システムの検討

これまでの実験で用いた衛星通信システムは参考文献[1]に詳細を記載しているので参照されたい．

大きな課題はデータを送信するブイ側の衛星通信装置の電気的性能を高くできないことにある．この理由は主に消費電力の制限にあり，このために送信電力（消費電力）が制限される．また，ブイが波によって動揺し，さらに左右に回転することから送受信アンテナに無指向性アンテナを用いることが必要であり，衛星方向の EIRP（Equivalent Isotropically Radiated Power）も小さくなることが理由である．搭載する装置の電力はバッテリと太陽電池から供給されており，これを大きく改善することは困難である．

これまの実験結果から，波によるブイの動揺によって，衛星方向のアンテナ利得が数 dB 変動することが通信品質を劣化させる要因の一つとなっている．

この対策として，ブイの動揺をキャンセルし，衛星方向の利得変動を軽減するアンテナ水平維持機構（ジンバル）を試作した．写真１にその外観を示す．

上部に小型平面アンテナ（黒い部分）を乗せる構造となっており，ジンバルは±10°の揺れに対応し，電力を使わないことを前提としている．波の有義波周期は短くても５秒程度と緩やかであるため，下部の筒の中に重りと粘度の高い液体を封入し，重力によって概ね水平を維持する構造になっている．今年度の実験で効果を検証する予定である．

写真１　アンテナ水平維持機構外観

これまでの実験では，衛星側の受信系の不具合で，非常に低速な通信となったため，変調方式には二位相偏移変調（BPSK）及び拡散変調を用いている．将来のシステムでは伝送速度と衛星の受信性能を考慮した変調方式及び通信方式を検討する必要がある．さらに，使用周波数は防災情報を伝送することから，降雨による減衰を受けない周波数帯を用いることが必要であるが，S 帯は十分な周波数帯域を確保することが難しく，多数のブイからの信号を衛星回線に収容するためには１波あたりの周波数占有帯域幅及び回線制御技術を含めて検討を行う必要がある．また，伝送する情報量が増えるため，送信電力は可能な限り確保することも必要である．

3.2. 衛星の要求仕様

GNSS ブイアレイに用いる衛星の仕様を検討している．ブイから伝送するデータから，津波（波浪），海底地殻変動（測距データ），電離層の全電子数及び大気の水蒸気量などの情報を得ることを想定した．表１に想定するデータについて示す．

これらのデータを１秒当たりのビットにすると，約 20kbps，海底地殻変動の測距データを解析が可能な直達波付近の 5ms とした場合は約 12kbps となる．

これらのデータを衛星回線を用いて伝送する場合の回線計算例を表２に示す．使用周波数帯は S バンド，情報レートを 12kbps，誤り訂正は符号化率 1/2 の畳み込み符号化とし，衛星局の基本的なパラメータは ETS-VIII を参考にした．また，ブイに設置する地球局の送信電力はこれまでの実験では 0.8W であるが，ここでは装置の省電力化を進めることを前提に 2W とした．表２から，サービスエリア内で 2dB 程度の回線マージンを得るためには，衛星に搭載する受信アンテナの利得は約 46dBi が必要になる．これは直径約 11m のパラボラアンテナに相当する．このときのアンテナのビーム半値幅は約 0.76° となり，このビーム幅で地表に照射されるエリア，すなわちサービスエリアを地表にマッピングすると図３に示すようになる．衛星位置は ETS-VIII の軌道位置である東経 146° の赤道上とした．この様な大型アンテナを衛星に搭載する技術は，ETS-VIII で 19m×17m

表１　伝送する情報

データ	情報量	備考
海底地殻変動（測距データ）	64KB/min	信号長 64ms
	5KB/min	直達波付近 5ms
GPS 情報（RAW DATA）	1.2KB/sec	マルチ GNSS マルチ周波数
ブイ情報	200B/sec	ブイの姿勢，設置位置の気象などの環境情報

表２　回線計算例

ブイ局の通信　運用波	ブイ局ー基地局	
	ブイ局　ー　衛星	衛星　ー　基地局
	Uplink	Down Link
Uplink Frequency (GHz)	2.65	2.50
TX power (dBW)	3.00	0.61
feeder loss (dB)	1.50	1.80
ANT Gain (dBi)	4.00	46.43
EIRP (dBW)	5.50	45.74
pointing loss (dB)	2.00	3.00
Propa. loss (dB)	192.38	192.38
Absorp./Polization loss (dB)	1.00	1.00
Rain Margin (dB)	0.20	0.20
Fading loss (dB)	0.00	0.00
Receive level/total (dBW)	-190.18	-150.95
RX ANT Gain (dBi)	40.69	34.54
pointing loss (dB)	1.00	1.00
feeder loss (dB)	2.00	0.80
RX power/total (dBW)	-148.28	-118.21
Tsys (K)	516.70	361.83
Tant (K)	300.00	193.91
TFeed (K)	130.20	90.43
Treq (K)	214.00	221.60
G/T	13.71	8.10
Noise Power (dB/Hz)	-201.52	-203.02
C/No (dBHz)	62.13	84.75
Deay C/No (dBHz)		52.12
Bit Rate (bps)		12000
Eb/No (dB)		10.36
coding gain		5.10
Implemenatation loss		3.50
Required Eb/No (dB)		9.60
margin (dB)		2.36

（電気性能は 13m φ パラボラアンテナに相当）の大型展開アンテナ（反射鏡）で既に実績がある．

一方，この様に多数のビームによってサービスを行うには，ビームフォーミングネットワーク（BFN）によって同時に複数のビームを形成し，データを効率よく収集することが必要となる．しかし，衛星に搭載する中継器は形成するビーム数と同数が必要となるため，衛星の搭載能力，消費電力などを考慮し，今後も検討を進めていく必要がある．

防災を目的とする衛星では，GNSS ブイに限らず，陸上に設置した局からも情報を収集することも考えなくてはならないため，衛星回線に収容する局数も非常に多くなると考える．このため，多数の局から効率良くデータを収集する通信方式及び回線制御技術も重要となる[8]．今後，構築すべきシステムの全体像を見据えながら，さらに検討を進めていく．

3.3. 新型 GNSS ブイの開発

今後の GPS ブイの普及及び展開に対応するため，新型の GNSS ブイの開発を行っている．外観を図４に示す．従来の GPS ブイからの主な変更点は，ブイ

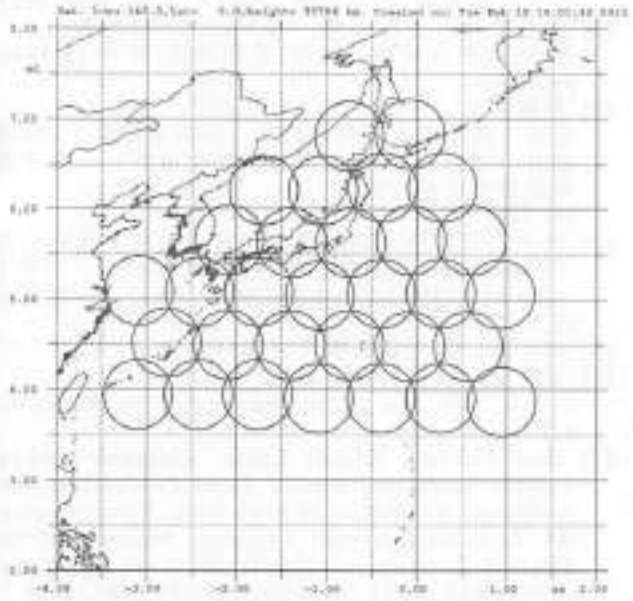


図3　想定されるビーム配置

本体に使用される主要材質を構造用鋼材からポリエチレン樹脂に，係留索を繊維ロープに変更することで，ブイ本体の小型化および軽量化がなされている．これらの利点は，建造コストの削減，ブイ本体の設置地点への運搬の容易さが挙げられる．また，測位方式に PPP-AR，通信手段に衛星回線を採用することで，RTK-GPS の精度上の距離制約が回避され，ブイのさらなる沖合展開が可能になった．さらに，RTK-GPS の陸上基地局が不要となるため，運用性及びコスト面で優位である．現在は，新型 GNSS ブイを和歌山県沖に設置し，実証実験を進めている．

4. 多機能ブイの応用について

4.1. 海底地殻変動観測への応用

海底の地殻変動観測は沈み込む海洋プレートが引き起こす海溝型巨大地震のメカニズム解明には極めて重要であり，近年急速に開発・導入が進んできた観測手法に GPS—音響システムがある[9][10]．これは，海底に音響の送受波装置（トランスポンダー）を3局以上設置し，船舶などからの音響信号で海面と海底局との間の距離を計測する手法である．船舶の位置は GNSS で精度よく決めておく．音響による海底局との距離は海水の温度や塩分濃度等によって大きく変動するが，海面から見た海底局の位置関係は相似形でしか変動しないためその重心位置は海底の地殻変動がない限り動かない，言い換えれば，重心位置の時間変化は海底の地殻変動を表していることになる．日本においては海上保安庁海洋情報部及び大学のグループがこの手法の開発を行い，日本海溝から南海トラフに至る海底の地殻変動の解明に大きな成果を挙げてきた[11][12][13]．しかし，これまでの観測では海面の位置計測に船舶を用いているため，観測は連続的には行えず，年間数回の観測にとどまってきた．海上での位置決めに GNSS ブイを用いることで海底の地殻変動観測が連続的に行える可能性が出てきた．海底地殻変動を連続的に観測することが可能であれば，時間分解能が飛躍的に向上し，これまでよりも微細な地殻変動を観測することが可能となり，沈み込むプレートの固着状況の変化などの監視能力が格段に向上されると期待される．

図4　新型ブイ外観

4.2. 伝搬媒質に関する応用研究

GNSS ブイにおいて精密単独測位を行うには，GNSS 衛星から送信される電波の伝搬路の電離層や中性大気の影響を精密に推定し，その影響を除去することが重要である．一方，電離層や中性大気に関する情報は，それぞれ電離層研究や気象予報に重要なデータとなる．大気に関しては天頂遅延量パラメータの推定から，ブイ直上の可降水量が計測できる．またモデルによってはその可降水量分布の空間変化もある程度得ることができる．小司らは室戸岬沖に設置されたブイのデータを用いて天頂遅延量と近傍の GEONET 観測点のデータから推定された天頂遅延量を比較検討している[14]．ブイで取得されたデータに基づく推定値は陸上データに比較して時折大きくばらつくことがあるものの，全体として両者は良く一致しているとの結果を得ている．また，衛星数が多いほど両者の一致は良くなるとの結果を得ており，今後のマルチ GNSS の時代に展望が持てる結果となっている．

また，電離層に関しては，受信する2周波の伝搬遅延差から伝搬路の全電子数（TEC）を計測することになり，その時間変化から電離層の擾乱を計測し，

あるいは予測するための研究に用いることが可能となる．2011 年の東北地方太平洋沖地震に伴う電離圏擾乱のデータも得られており，このようなデータを用いることで津波の監視にも役立てられると考えられる[15]．情報通信研究機構（NICT）では世界の GNSS 観測網からリアルタイムに GNSS データを収集して TEC の世界分布を計測して公表している[16]．これまでのところ収集しているデータは陸上 GNSS 観測点だけであるので，海上でのデータが得られればこのような世界的プロジェクトにも大きな貢献が期待される[17]．

これらの他，ブイに様々な気象センサ等を搭載することにより，遠洋での海象・気象データが得られ，GNSS ブイを広範囲に設置すること様々な地球科学関連情報が得られることになる．

5. おわりに

我々の GNSS ブイの開発研究は当初より津波の早期検知が目的であり，同時に波浪の観測も実用に供されてきた．2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波では，GNSS ブイは予想通り津波の沿岸への到達前に大きな津波を観測し，それを監視していた気象庁によって津波警報の更新に役立てられた．しかしながら，警報の更新は津波の沿岸への到達のわずか数分前であり，どれだけ有効に人命を救うことができたのか，と考えると，住民の期待にこたえられたとは言い難いと言わざるを得ない．また，関係の多くの方から，もっと沖合に展開してほしいという要望も出されてきた．その後の本研究を含む様々な努力により，その目途はついたと言えるだろう．

もちろん，まだその実現には多数の海上ブイの設置及びこれらのブイとのデータ通信を可能とする衛星の開発・打ち上げなどが必要になるが，技術的な課題については，これまでの実験の成果及び多くの知見を得て，検討が進められている．近い将来，できれば日本によって，このようなブイアレイが実現することを願っている．

謝辞

電離圏研究への応用に関しては情報通信研究機構の石井守氏に，また気象研究への応用に関しては気象庁気象研究所の小司禎教氏にご教示をいただいた．ここに記して謝意を表する．

文　献

[1] 山本伸一，川崎和義，寺田幸博，加藤照之，橋本剛正，木寺豊，斉田優一，松澤亮；技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験，信学技報，2014-8，5-10，Aug. 2014．

[2] 加藤照之，寺田幸博，木下正生，楠本英司，一色浩；ＧＰＳ波浪計の開発，月刊海洋，号外 15(1998)，pp.38-42

[3] 加藤照之，寺田幸博，木下正生，楠本英司，一色浩，森山寿久，神崎政之，高田英津雄；GPS 津波計の開発 ―大船渡市沖実用化実験―，電子情報通信学会論文誌 B，Vol. 84-B，No.12．pp.2227-2235

[4] 高山知司監修，海象観測情報の解析・活用に関する研究会編集　波を観る，沿岸技術ライブラリーNo.42　（ISBN978-4-900302-　89-1），一般財団法人沿岸技術研究センター，2013

[5] 例えば，読売新聞朝刊，2011 年 4 月 24 日（日）

[6] 気象庁，津波警報が変わりました，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/tsunamikeihou/

[7] Leos Mervart, Zdenek Lukes, Christian Rocken, Tetsuya Iwabuchi; Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), September, pp. 397-405, 2008.

[8] Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Nei kato, Shin-ichi Yamamoto, Naoko Yoshimura and Naoto Kadowaki; A Centralized Multiple Access Scheme for Data Gathering in Satellite-Routed Sensor System (SRSS), IEEE GLOBECOM 2013

[9] Spiess, F. N.; Suboceanic geodetic measurements, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 23, 502–510, 1985

[10] Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, Earth Planets Space, 58, 265–275, 2006

[11] 佐藤まりこ，藤田雅；GPS／音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展―この１０年の歩み―，海洋情報部研究報告，第 48 号，26-40，2012．

[12] Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino and Y. Ito; Trench – normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku–Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 38, L24303, doi: 10.1029/2011GL050057, 2011

[13] 田所敬一，杉本慎吾，武藤大介，渡部豪，生田領野，安藤雅孝，奥田隆，木元章典，佐柳敬造，久野正博；駿河－南海トラフにおける海底地殻変動繰り返し観測，測地学会誌，54，127-139，2008

[14] Shoji Y., Y. Terada, and T. Kato, 2010: A Retrieval Experiment of Zenith Total Delay using GPS Buoy System, Proceedings of the 2010 spring meeting of the Meteorological Society of Japan, D102

[15] Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, and K. T. Murata; Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth, Planets, and Space, 63, 875-879, 2011.

[16] NICT; DRAWING-TEC, http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/

[17] 津川卓也，西岡未知，石井守；電離圏における宇宙天気現象と衛星通信，電子情報通信学会総合大会講演論文集，2014 年_通信(1)，"SS-76"-"SS-77"，2014-03-04，一般社団法人電子情報通信学会，2012．

参考資料４－２　科学研究費補助金関係資料

42-1 H28 年度基盤研究(S)研究計画調書
42-2 H28 年度研究実績報告書
42-3 H28 年度収支決算報告書
42-4 H29 年度研究実績報告書
42-5 H29 年度収支決算報告書
42-6 H30 年度研究実績報告書
42-7 H30 年度収支決算報告書
42-8 H31 年度研究実績報告書
42-9 H31 年度収支決算報告書
42-10 H28 公表用資料（英文）
42-11 H28 公表用資料（和文）

機関番号	研究種目番号	審査区分番号	細目番号	分割番号	整理番号
12601	03	—	2202	A	0001

平成28年度 (2016年度) 基盤研究（Ｓ）研究計画調書

平成 27 年10月23日
1版

新規

研究種目	基盤研究(S)	
分　野	複合領域	
分　科	社会・安全システム科学	
細　目	自然災害科学・防災学	
細目表キーワード	津波	
細目表以外のキーワード	海底地殻変動	
研究代表者氏名	(フリガナ)	カトウ テルユキ
	(漢字等)	加藤 照之
所属研究機関	東京大学	
部　局	地震研究所	
職	教授	
研究課題名	海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦	

研究経費（千円未満の端数は切り捨てる）	年　度	研究経費(千円)	使用内訳（千円）				
			設備備品費	消耗品費	旅費	人件費･謝金	その他
	平成28年度	53,706	23,528	2,970	5,200	4,000	18,008
	平成29年度	58,088	34,500	1,920	4,760	4,000	12,908
	平成30年度	31,778	7,000	2,470	5,100	4,000	13,208
	平成31年度	29,428	3,000	2,420	5,100	4,000	14,908
	平成32年度	26,328	0	1,920	4,900	4,000	15,508
	総計	199,328	68,028	11,700	25,060	20,000	74,540

開示希望の有無	審査結果の開示を希望する
研究計画最終年度前年度応募	--

研究組織（研究代表者、研究分担者及び連携研究者）

	氏名（年齢）	所属研究機関 部局 職	現在の専門 学位 役割分担	平成28年度 研究経費 （千円）	エフォート （%）
研究代表者	80134633　（63） カトウ　テルユキ 加藤　照之	（12601）東京大学 （817）地震研究所 （20）教授	固体地球物理学 東京大学博士（理学） 研究総括	45,290	30
研究分担者	30442479　（65） テラダ　ユキヒロ 寺田　幸博	（56401）高知工業高等専門学校 （999）環境都市デザイン工学科 （25）客員教授	海岸工学 九州工業大学博士（工学） 実験総括，津波計測システム、衛星通信	1,260	30
研究分担者	70324390　（43） タドコロ　ケイイチ 田所　敬一	（13901）名古屋大学 （977）環境学研究科 （27）准教授	地震学 京都大学博士（理学） 海底地殻変動観測システム開発	1,360	10
研究分担者	90332080　（41） フタムラ　アキラ 二村　彰	（56302）弓削商船高等専門学校 （999）商船学科 （27）准教授	沿岸海洋物理学 愛媛大学博士（工学） CTD観測	5,796	15
連携研究者	70354446　（54） ショウジ　ヨシノリ 小司　禎教	（82109）気象庁気象研究所 （999）気象衛星・観測システム研究部 （25）室長	GPS/GNSS気象学 京都大学博士（理学） ブイ観測データを用いた水蒸気量解析手法開発	-	-
連携研究者	20359003　（52） イシイ　マモル 石井　守	（82636）国立研究開発法人情報通信研究機構 （999）電磁波計測研究所　宇宙環境インフォマティクス研究室 （25）室長	超高層大気物理学 理博 GNSSブイデータに基づく電離層擾乱の研究	-	-
連携研究者	70572668　（53） イワキリ　ナオヒコ 岩切　直彦	（82636）国立研究開発法人情報通信研究機構 （999）ワイヤレスネットワーク研究所 （25）主任研究員	無線通信 東京電機大学博士（工学） 衛星通信によるデータ伝送	-	-
合計　7 名			研究経費合計	53,706	

研　究　目　的

本欄には、研究の全体構想及びその中での本研究の具体的な目的について、冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述した上で、適宜文献を引用しつつ記述し、特に次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください（記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」（公募要領７５頁参照）を参考にしてください。）。

① 研究の学術的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）
② 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか
③ 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義
④ 基盤研究（Ａ）に、本研究と関連する研究課題を応募している場合には、到達目標等の相違点、また、関連のない研究課題を応募している場合には、研究内容等の相違点（該当者は必ず記述してください。）

研　究　目　的（概要）※ 当該研究計画の目的について、簡潔にまとめて記述してください。

研究代表者を中心とする研究グループは GNSS ブイを用いた津波計の開発研究を実施してきたが，沿岸から 100 km以上離れた海域での基礎的な実験が成功したことから，本研究においては GNSS ブイを用いた遠洋での高精度リアルタイム GNSS 津波計の実証実験を行うと共に新たに GNSS―音響システムを用いた海底地殻変動計測実験を実施し，これまで船舶による繰り返し観測となっていた海底地殻変動観測から，連続的な海底地殻変動計測への新たな展開を切り開き，日本列島の海溝沿いに発生するプレート間巨大地震に関して重要なプレート間固着及びスローイベント等の実態の解明に資する基礎技術を確立することを目的とする．さらに，GNSS ブイを大気遅延推定や電離層擾乱の研究にも資する総合的な防災技術として展開するための基礎資料を得る．

①　研究の学術的背景

研究代表者と研究分担者（寺田）を中心とする研究グループは 15 年以上にわたって GNSS（Global Navigation Satellite System）をブイに設置して津波を早期検知するシステムの開発を行ってきた．このシステムは実用化され，GPS 波浪計として，全国に 17 点以上設置されてきた（図１）．このシステムによって 2001 年 6 月のペルー地震津波をはじめ多くの津波を検出することができ[e.g.,Kato et al., 2000，2005]，2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震に伴う津波は，本システムによって事前に捉えられて気象庁の津波警報の更新に役立てられた．

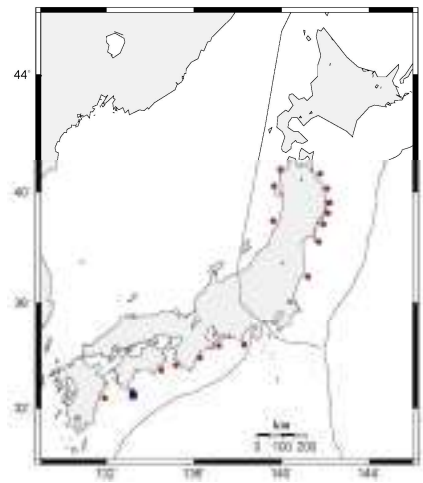


図１：●印は日本列島周辺に設置されている GPS 波浪計（2014 年 10 月現在）．■印は本研究の実験場所

しかし，これまでの手法では RTK-GPS 方式を用いており地上におかれた基準局との基線距離が高々20 kmと制限されていた．そのため，この制限をはずしてより遠方で津波を早期検知する努力が行われてきた[寺田，2013]．これまでの研究で，測位解析の手法として基線を用いない精密単独測位とよばれる新たな解析手法 PPP-AR を導入すると共に，データ伝送方式としてはそれまで用いられてきた地上の無線ではなく，衛星通信を用いた方式を導入する基礎的な実験を行いデータの連続的な伝送に成功した[寺田，2014]．しかしながら，PPP-AR 手法による精度評価や動揺するブイからのデータの取得率については課題を残している．本研究では，これらの方式について実験をさらに進め，精密単独測位法 PPP-AR の精度評価と，ブイの動揺等による伝送率低減等の課題を克服して，衛星通信の信頼性を上げることを目的とする．

一方，GNSS と音響システムを組み合わせた海底地殻変動観測の方式は，米国研究者によって発案され，日本の海上保安庁や大学の研究者によって開発が進められ，2011 年東北地方太平洋沖地震の際に 30m を超える海底の地殻変動を検出するのに役立てられ，海底地殻変動観測の重要性が深く認識された．しかしながら，これまでの方法では海上の測位観測は船舶によるものに限られており，一年あたり数回の観測が限度であり，連続的な観測は不可能であった．そのため，地震直前直後の変動など詳細な海底地殻変動の様相を明らかにすることはできていない．もし海底地殻変動の計測が連続的に行えれば，沈み込むプレート境界の固着強度の時間変化や最近注目を集めているプレート境界のスロースリップイベントの機構解明に重要なデータを提供できることになる．我々は，一昨年度までの科研費等により，GNSS ブイ方式による海底地殻変動の初歩的な実験を行った．そこで，本研究では GNSS ブイを用いた GNSS-音響による海底地殻変動の長期連続観測に取り組み，課題の抽出と解決を行って，同方式の可能性を検証する．

研　究　目　的（つづき）

以上のように，本研究計画ではこれまで着実に進められてきた GNSS ブイを用いた津波計測の機能向上に加えて海底地殻変動の精密計測手法の開発を行う．これにより GNSS ブイの多機能化によって費用対効果の高い地震・津波防災システムの構築が期待される．なお，本研究が順調に進められれば，ここで得られたデータはさらに多くの応用が期待できる．GNSS 測位は衛星と地表や海上に設置された受信器の間の距離を精密に計測することが基礎になる。このためには電波の伝搬媒質（電離層と大気）の影響を正確に推定して補正することが重要であるが，これらの補正量はそのまま伝搬媒質に関する研究にとって重要な物理量となる．

気象学の分野では，陸上のインフラである国土地理院の GEONET を用いた“GPS 気象学”が発展してきた[小司他，2009]．　また，GNSS 電波を用いた電離層の研究は既に多く行われている[例えば，Saito et al., 2001]．しかしながら，これらはほとんどが地上の観測点でのものであり．より均質のデータを得るため，海上での可降水量・電離層データの取得が望まれている．本研究計画ではこうした応用技術への展開に資する基礎的な研究も行う．

本研究が成功裏に終われば，次のステップとして GNSS ブイは津波・海底地殻変動観測に加え，大気及び電離層に起因する災害の軽減に役立つ総合的な観測を行うための総合的な防災システムが構築できる可能性も秘めていると言えよう（図２）．仮に，西太平洋に GNSS ブイアレイが設置できれば，陸の GEONET と共に日本の防災力向上のための総合的なシステムを構築することが可能であろう [加藤他，2013]．海洋 GNSS ブイアレイは防災だけでなく総合的な地球科学観測研究のインフラとなることも期待される．我々の究極のゴールは“海の GEONET”とでもいうべき観測網を作り上げることにある．GNSS ブイのこのような総合的な応用研究は，筆者が知る限り他では行われていない．

図２：本研究による海洋 GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図

② 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするか

５年間の研究期間に次のことを明らかにする．

（１）GNSS 津波計に関しては，PPP-AR の精度向上のための精密な衛星位置と時計の補正情報のブイへの伝送方式を確立すること，また，商用衛星等を用いた場合のブイの動揺による伝送率低下の問題を解決するため，フェージングシミュレータを開発して実験を行い，将来のブイアレイによる衛星データ伝送のための高精度で欠測の少ない連続通信方式を実験的に確立する．

（２）GNSS ブイを用いた海底地殻変動連続観測システムによる cm 級の高精度音響測距，及び海底位置決定が可能であることを示すとともに，通信衛星を介して音響測距結果等のデータを連続的に送信するためのデータ量の圧縮方式を確立し．実際に連続的な観測を行って，海底地殻変動を実験的に明らかにする．

（３）ブイに搭載した GNSS から水蒸気量及び電離層 TEC を抽出し、その精度評価とともに，気象予報や電離層研究へのインパクトを調査する．

③ 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

多項目観測を実現するための GNSS ブイを用いた研究はほとんど行われておらず，学術的に極めて独創的である．もし我々の研究成果が成功裏に終了すれば，海洋における津波・波浪の研究が格段に向上すると共に海底地殻変動の連続観測への道が開けることになる．また，将来は気象学・電離層研究など地球科学の基礎・応用研究において格段の進展が期待できると共に，津波の早期検知，海底地殻変動の連続監視，天気予報や豪雨予測の精度向上，電離層擾乱の通報による航空機の安全運航など，日本の防災力向上において実用上の意義は計り知れないものと考えている．

④ 別途申請している基盤研究（Ａ）との相違点

本研究計画では津波計測の高機能化と海底地殻変動連続観測の実現に向けた実証実験を行うことが主目的であり，このために研究資源を集中投入する．一方基盤研究（A）においては，実験は基礎的なものとして短期間にとどめ，気象学・電離層研究への応用も含め，総合的な海洋防災システムとしてのフィージビリティスタディを行うことを主眼とする．このための課題の抽出と衛星通信の必要な仕様等の作成を主目的とする．

研究計画・方法

本欄には、研究目的を達成するための具体的な研究計画・方法について、冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述した上で、平成２８年度の計画と平成２９年度以降の計画に分けて、適宜文献を引用しつつ、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。ここでは、研究が当初計画どおりに進まない時の対応など、多方面からの検討状況について述べるとともに、研究計画を遂行するための研究体制について、研究分担者とともに行う研究計画である場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割（図表を用いる等）、学術的観点からの研究組織の必要性・妥当性及び研究目的との関連性についても述べてください。また、研究体制の全体像を明らかにするために、連携研究者及び研究協力者（海外共同研究者、科研費への応募資格を有しない企業の研究者、その他技術者や知財専門家等の研究支援を行う者、大学院生等（氏名、員数を記入することも可））の役割についても記述してください。

なお、研究期間の途中で異動や退職等により研究環境が大きく変わる場合は、研究実施場所の確保や研究実施方法等についても記述してください。

研 究 計 画 ・ 方 法（概要）※ 研究目的を達成するための研究計画・方法について、簡潔にまとめて記述してください。

実験場所は高知県の黒潮牧場ブイを借用して実施する．ブイに GNSS システムと音響送受装置及び関連する各種センサーと衛星通信用機材を，海底 3 か所に音響送受波装置を設置し，GNSS 及び音響を用いた計測を行う．データはブイ上で収録するほか，商用衛星を用いた伝送実験も実施する．衛星通信に関しては欠測率の改善を，津波計測に関しては PPP-AR 解析手法の確度向上を図る．海底地殻変動は連続観測における新たな解析手法の開発と得られたデータの精度評価を行い，海底地殻変動が有意に抽出できていることを確認する．ブイデータから得られる可降水量と総電子数は精度評価を行い，海上でのデータ取得の有効性と既存の研究に対するインパクトを検証する．最後に，GNSS ブイアレイ展開の最終形とその実現に必要な衛星通信の仕様を作成する．

本研究の第一に重要な点は衛星と動揺するブイとの間のデータ送受信が長期にわたって安定して行われ，かつ，ブイ上でのデータ解析処理による測位，音響，大気遅延量並びに電離層 TEC データを圧縮処理し，少ない伝送量でデータを陸側に伝送でき，それが各種の防災研究に役立つデータとなりうるか，という点を検証することにある．また，海底地殻変動連続観測は新たな自動解析アルゴリズムの開発など，革新的な開発を行う計画である．実験場所は高知県足摺岬の数十ｋｍ沖合にある黒潮牧場ブイを借用して実施する．高知県のブイについては既に使用実績があり協力体制を構築済みである．：

計画は 5 年間とし，各年度ごとに以下の研究を実施する．実験全体の概念を図３に示す．

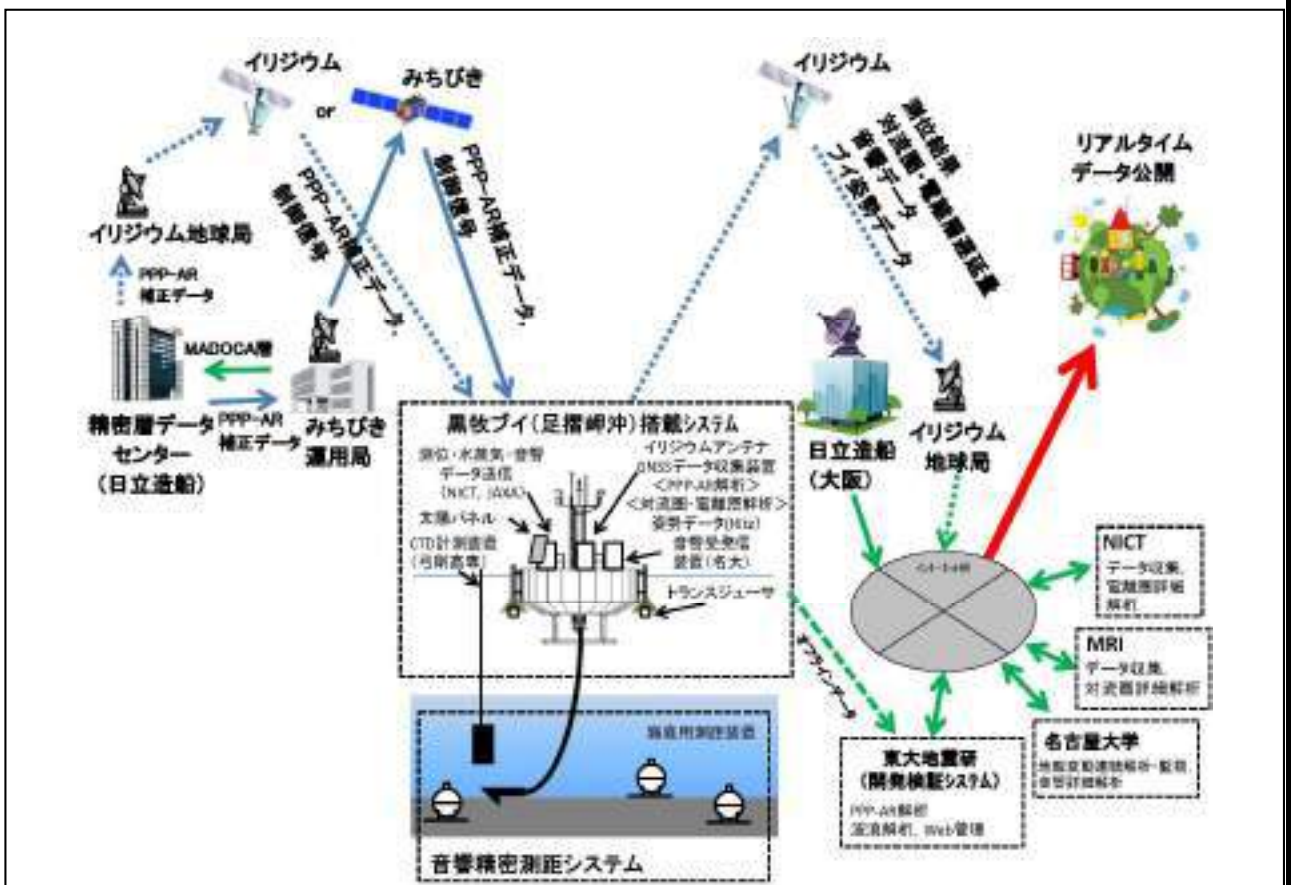


図３：実験全体の詳細図.

研究計画・方法（つづき）

◆平成 28 年度：ブイ観測の準備・開始と衛星通信の高機能化が最重要課題である.

（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）

・GNSS 受信機システムは精密単独測位や PVD 法[Isshiki et al.,]を組み込んだ特別仕様のものを導入すると共に，防水性を確保した電源・計測システムを設計製作し，ブイに搭載する.

・衛星通信の信頼度向上のため，ブイの揺動と電波伝搬測定データを関連付けて模擬したフェージング特性をパラメータ化して電波伝搬モデルを作成し、計算機シミュレーションで評価を行う.

（海底地殻変動連続観測への応用）

・通信衛星によるデータ伝送ではデータ量の圧縮が不可欠である．そこで音響測距による音波の伝播時間を自動計算する手法を開発し，音響波形ではなく測距結果の数値のみを通信衛星伝送できる方式を確立する．音響測距波形には海面等での反射波が含まれるため，新たなアルゴリズムを開発する必要がある．開発にあたっては，過去に取得した音響測距波形等を利用する.

・実験開始前の CTD 観測を実施し，海水温・塩分濃度の音響観測への影響度を明らかにする.

（気象学・電離層研究への応用）

・海洋での GNSS 観測の気象学・電離層研究へのインパクトを検証するため， GNSS ブイのデータを用いて可降水量及び電離圏 TEC の推定を行い、地上観測データとの比較による検証を行う。

（全体）

・参加研究者による打ち合わせを年 3 回程度実施し，実験計画の調整等を行う.

・研究の構想・成果について国際学会・国内学会等で発表を行う.

・成果を公開するための Web を整備すると共に，研究成果について論文発表を行う.

◆平成 29 年度：海底地殻変動連続観測実験が最重要課題である.

（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）

・前年度評価した電波伝搬モデルをもとにフェージングシミュレータを開発する.これは波の揺動データを入力するとフェージングを推定して発生できるようにし、本実験で測定する揺動データを統計処理することでフェージング推定精度の向上を図る．ブイの揺動と電波伝搬測定データを関連付けて模擬したフェージング特性をパラメータ化して電波伝搬モデルを作成し、計算機シミュレーションで評価を行う.

（海底地殻変動連続観測への応用）

・音響測距用の海底局３台を新たに導入し，ブイ直下の海底に設置する.

・ブイ上からの音響測距試験を実施し，音響測距が可能であること，前年度に開発したアルゴリズムが正常に働くことを実証する．また，音響測距結果とブイの GPS 測位と姿勢測定結果を統合して自動で海底局位置を決定する新たなアルゴリズムを開発し，海底局の位置決定が可能であることを実証する．音響データはブイ上に置かれた PC にも格納し，オフラインでデータを収集して後処理を行い，従来の手法での解析も行って精度を比較検討する.

・実施時には CTD プロファイル観測も合わせて実施し，海底測位の高精度化を図る（弓削丸使用）.

（気象学・電離層研究への応用）

・GNSS データから可降水量を抽出する解析を行い、周囲の地上 GNSS 観測点、衛星搭載マイクロ波放射計による観測との比較を行う。

・GNSS データから TEC の値を抽出し全球モデルへ入力することで、海上 TEC 情報がどの程度モデル精度の向上に寄与するかを検討する。

（全体）・参加研究者による打ち合わせを年１回実施し，実験計画の調整等を行う.

・研究成果について国際学会・国内学会等で発表を行う.

・Web を逐次更新すると共に，研究成果について論文発表を行う.

◆平成 30 年度～平成 31 年度：観測の継続と課題の抽出・解決が最重要課題である.

（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）

・前年度に引き続き商用衛星を用いた海面高の長期高精度連続観測を実施すると共に海上ブイ用疑似衛星通信システムにフェージングシミュレータを組み込み，ブイの揺動などによる精度劣化原因を克服するための最適パラメータ（多元接続方式，変調方式等），を実験的に評価する.

・準天頂衛星「みちびき」を利用したメッセージ通信によるデータ伝送の可能性を検討する.

・測位データ処理に伴う課題を抽出し，欠測データ補間技術の向上など信頼度向上のための方策

研究計画・方法（つづき）

を検討する．また，技術開発の進捗に応じて GNSS 機器の更新を行う．

（海底地殻変動連続観測への応用）

・継続して音響測距及び CTD 観測を実施し，新たに開発した手法のアルゴリズムの問題点を把握して改良を行う．音響データは衛星とブイ上において取得し，両方の解析結果を比較検討する．

（気象学・電離層研究への応用）

・引き続きデータの取得・解析を実施し，問題点を抽出すると共に精度向上への可能性を探る．また，気象予報や電離層擾乱研究へのインパクトについて考察を行う．

（全体）

・前年度と同様の活動を実施する．

◆平成 32 年度：最終年度であることから研究成果の確認ととりまとめが最重要課題である．

（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）

・商用衛星を用いた海面高の長期高精度連続観測が可能であることを示すと共に，次のステップとして次期静止衛星を用いた GNSS ブイアレイ多元接続データ伝送技術の仕様を作成する．

（海底地殻変動連続観測への応用）

・音響測距試験・CTD 観測を実施し，昨年度の結果と合わせて海底局位置の差を決定し，年間 6cm 程度の変化が検出できることを明らかにし，海底地殻変動連続観測のシステム全体を完成させる．

（気象学・電離層研究への応用）

・引き続きブイ搭載 GNSS から得られたデータの解析を行い，気象現象の解明に対する有効性を評価すると共に，5 年間のまとめを行う。

・GNSS ブイのデータから推定された TEC を全球モデルに導入し，データ同化を試験的に行う。更に、地上観測データとの比較による結果をまとめる。

（全体）

・当該年度が最終年度にあたることから，とりまとめに向けての議論を行うと共に，西太平洋におけるアレイ展開への可能性・意義・体制・経費等について意見を交換し，提言としてまとめる．

・研究の成果について研究分担者は国際学会・国内学会等で発表を行うとともに論文発表を行う．

・成果の社会への発信のため Web を逐次更新する．最終的な報告は冊子体で印刷公表する．

◆研究体制について

本研究は極めて学際性の高い研究であるため，多方面の専門家・研究者の連携が重要である．研究体制を図４に示す．研究代表者が研究全体を統括し，研究の進捗状況を把握すると共に，調整を行う．全体の業務の整理と総合的な研究を実施し，プロジェクト終了後引き続き本プロジェクトの究極の目的に発展させていくため研究員を雇用する．衛星通信実験，海底地殻変動，気象，電離層の各研究項目はそれぞれ情報通信研究機構（NICT），名大，気象研，NICT の専門家が研究分担者・連携研究者となり，それぞれ必要に応じて研究協力者を配置するという体制を組んでいる．実験を統括する高知高専寺田は，研究代表者と十数年間にわたり共同研究を重ねてきており，実験全体の企画・調整について熟知している．GPS 津波計の開発には日立造船と協働してきており，知識財産権は，研究代表者と日立造船が共有している。このことから、実験の実施にはこの日立造船関係者の研究支援が不可欠である．本研究の一番肝要なところは衛星通信実験が計画通りに実施できるか，という点にある．このため，衛星通信の利用については研究協力者として JAXA のアドバイスを得ることとしている（越川，岩崎）．また衛星通信実験の地上（海上）系と GNSS ブイ用衛星通信即時多元接続技術の研究については NICT（岩切，山本）については NICT が担当することになる．研究がうまく行かない場合は，これらの研究者に加えて，各関連機関で研究をバックアップする．

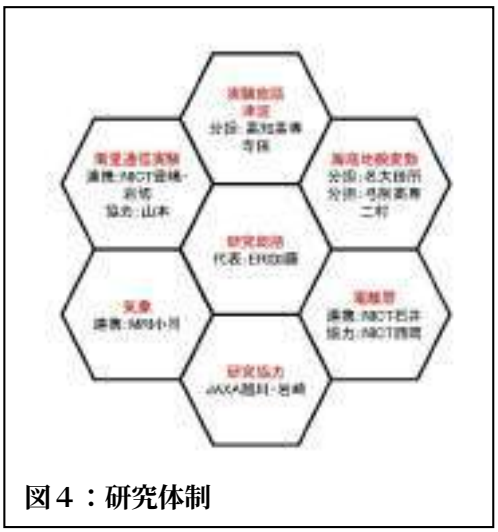


図４：研究体制

研究代表者（加藤）は研究期間途中で定年退職するが，引き続き特任研究員として同所において研究を継続することとしている．実験総括担当の寺田は高知高専の客員教授の立場で研究開発に取り組むと共に東大地震研外来研究員として研究を実施することとしている．

今回の研究計画を実施するに当たっての準備状況及び研究成果を社会・国民に発信する方法

本欄には、次の点について、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。
① 本研究を実施するために使用する研究施設・設備・研究資料等、現在の研究環境の状況
② 研究分担者がいる場合には、その者との連絡調整の状況など、研究着手に向けての状況（連携研究者及び研究協力者がいる場合についても必要に応じて記述してください。）
③ 本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等

① 本研究では高知県の黒潮牧場のブイを借用することとしている．既に借用の実績もあり，高知県からも格段の協力を得ている．本科研費による借用についても問題ないことを確認済みである．衛星通信は，準天頂衛星を使うことを計画しているが，これらの使用についても，JAXA，NICT と共に既に共同研究実績があり，問題ない．商用衛星イリジウムを実験に取り入れることを計画に入れている．研究代表者加藤，研究分担者寺田・田所との間では，ブイを用いた海底地殻変動を行う場合のハードウェアおよびソフトウェアについて， 2010 年頃から議論を重ねている．

② 研究着手に向けての状況本研究における研究分担者と連携研究者はすでに何度も会合とメールによる議論を重ねてきている．GPS 津波計の知識財産権は，研究代表者と日立造船が共有している。このことから、実験の実施にはこの日立造船関係者の協力が必須であるが，日立造船とは GNSS ブイの開発当初より既に十数年に及ぶ研究協力体制ができており，全く問題ない．

③ GNSS ブイを用いた津波計については長い間その観測データを Web 公開してきた実績があり本研究でも活用する．また，社会的にもたいへん期待がもたれていることはたびたびのメディア取材によっても感じているところであり，我々の側からも研究成果・観測成果について必要に応じてプレスリリースや記者会見を施している．本研究でも今まで同様に積極的に行う．

研究計画最終年度前年度の応募を行う場合の記入事項（該当者は必ず記入してください（公募要領２１頁参照））

※該当しない場合は記入欄を削除することなく、空欄のまま提出すること。

本欄には、研究代表者として行っている平成 28 年度が最終年度に当たる継続研究課題の当初研究計画、その研究によって得られた新たな知見等の研究成果を記述するとともに、当該研究の進展を踏まえ、今回再構築して本研究を応募する理由（研究の展開状況、経費の必要性等）を記述してください（なお、本欄に記述する継続研究課題の研究成果等は、基盤Ｓ－７の「これまでに受けた研究費とその成果等」欄には記述しないでください。）。

研究種目名	課題番号	研　究　課　題　名	研究期間
			平成　年度～ 平成 28 年度

当初研究計画及び研究成果等

応募する理由

これまでに受けた研究費とその成果等

本欄には、研究代表者及び研究分担者がこれまでに受けた研究費（科研費、所属研究機関より措置された研究費、府省・地方公共団体・研究助成法人・民間企業等からの研究費等。なお、現在受けている研究費も含む。）による研究成果等のうち、本研究の立案に生かされているものを選定し、科研費とそれ以外の研究費に分けて、次の点に留意し記述してください。

① それぞれの研究費毎に、研究種目名（科研費以外の研究費については資金制度名）、期間（年度）、研究課題名、研究代表者又は研究分担者の別、研究経費（直接経費）を記入の上、研究成果及び中間・事後評価（当該研究費の配分機関が行うものに限る。）結果を簡潔に記述してください（平成２６年度又は平成２７年度の科研費の研究進捗評価結果がある場合には、基盤Ｓ－９「研究計画と研究進捗評価を受けた研究課題の関連性」欄に記述してください。）。

② 科研費とそれ以外の研究費は線を引いて区別して記述ください。

（科研費による研究費）

(1)科研費基盤研究(A)「一般」(H10-12), RTK-GPS を用いた津波検知システムの開発, 研究代表者：加藤照之, 研究分担者：寺田幸博, 26,400 千円；本研究では, 要素技術として①耐久性, 耐行性を備えた高機能海洋ブイに GPS 受信機を搭載した GPS 津波計ブイ, ②データのリアルタイム伝送及び即時処理による海面高リアルタイムモニタシステム, ③時系列処理による津波検出手法の開発を実施した. これによって, その後の GPS 津波計の基本形を明らかにした. 1999 年 3 月に実施した相模湾での基礎実験において, これらの要素技術を装備した GPS 津波計の機能を確認するとともに, 潮汐, 波浪の計測についても, 高いパフォーマンスを示すことを明らかにした. それらの内容は, 同年 4 月 20 日夕方７時の NHK ニュースで放送されたことをはじめとして, 社会的な多くの注目を集めた.

(2)科研費地域連携推進（H11-H13), GPS 津波計測システムを用いた津波防災システムの構築, 研究代表者：加藤照之, 研究分担者：寺田幸博, 63,000 千円；津波常襲地域である三陸沿岸の岩手県大船渡市の協力の下に, 相模湾の基礎実験をベースにして離岸距離 2 ㎞の外洋にブイを設置し、３年間の長期運用の実用化実験を実施した. 大船渡市では, 例年、1960 年のチリ地震津波被害を想定した津波防災訓練を大規模に実施していた. この訓練の発動に,「大船渡市沖に設置した GPS 津波計が津波を捉えた」との想定を用いていたことに象徴されるように, 消防署司令室での 24 時間監視体制の適用など, 津波防災のツールとして多くの期待と協力が得られた. この期待は, 平成 19 年度から始まった国土交通省港湾局による GPS 波浪計の設置によって, 実用的に達成された. 本研究の学術的成果として, 2001 年 6 月 24 日（日本時間）にペルー沖で発生した地震津波を約 23 時間後に波高約 10㎝ で捉え, 約１日に及ぶ擾乱の継続的な観測に成功したことを挙げることができる。また, 2003 年 9 月 26 日未明の波高約 15㎝ の十勝沖地震津波もインターネット上でリアルタイムに観測することが出来た. これについて多くのマスコミ報道がなされ, これを通じて地域住民の支持が得られた.

(3)科研費基盤研究（A)「一般」(H17～H20), GPS ブイを用いた津波・波浪防災システムの総合研究, 研究代表者：加藤照之, 研究分担者：寺田幸博, 38,000 千円；2004 年 4 月 11 日に室戸岬沖 13㎞ に設置した GPS 津波計の観測を継続しながら, GPS 測位法の長距離化, 地域住民へのきめ細かな津波情報の提供, ブイシステムの維持管理方法の確確立を目標として研究開発を推進した. 測位法の長距離化については, RTK 法による測位ソフトを書き下ろし, ワイドレーン, ナローレーン, キャリアスムージングなどの手法を自在に組み込めるようにして, 45 ㎞ の離岸距離で 9 割程度の FIX 率を確保できるレベルを達成した. 本研究開始後約１年目後の 2006 年 3 月に大型フェリーボートが, 研究設備である室戸沖 GPS 津波計に衝突し, 約 10 日後に沈没するというアクシデントに見舞われた（誤解を生じないための付記：当該 GPS 津波計は, 津波観測用灯浮標として航路標識の機能を備え, 管轄の海上保安部から設置を許可されて最新の海図にその設置が記載されている）. これに対して, 困難な補償交渉を終え, 2008 年 4 月に再設置を完了し, 順調に観測を再開した. 観測再開後は, 防災システムの基本コンセプトである「だれでも, いつでも, どこからでも」津波についての必要な情報にアクセスできる環境づくりとして, 従来のインターネットによる情報発信に加えて, ミニＦＭ局を利用した地域住民への情報発信の可能性を試行した. 加えて, 海象情報の産業利用の視点から携帯電話による情報発信のシステムを組み込み, 漁業に必要な水温, 流向流速についての情報を提供し, 日頃から GPS 津波計の情報に接することができる環境も整えた. これらの成果は, 国土交通省港湾局が GPS 波浪計として全国展開を開始することの推進力となった. また, 第 34 回日本産業技術大賞特別賞を受賞し, 防災技術の産業としての成立性が示された.

(4)科研費基盤研究（S)「一般」(H21～H25), GPS 海洋ブイを用いた革新的海洋・海底総合防災観測システムの開発, 研究代表者：寺田幸博, 研究分担者：加藤照之, 直接経費 165,200 千円；本研究は, 二つのステージで研究を推進した. 第１ステージは, 上記(3)の科研費研究から引き継いだ室戸岬の GPS 津波計(2008 年 4 月～2011 年 11 月)を用いた研究である. これを用いて, 更なる沖合展開のために必要とする GPS 測位法とデータ伝送方法の基礎的研究を進めた. また, GPS ブイの維持管理方法, 係留索の耐久性などの調査のために、GPS ブイの揚収実験を実施し,

これまでに受けた研究費とその成果等（つづき）

外洋で長期間の運用するブイの設計・製作のための基礎データを収集した．第 2 ステージでは，第 1 ステージで得られた知見を活用して沖合展開の実証実験を実施した．これには，室戸岬南方沖 35㎞ に設置されている黒潮牧場 16 号ブイ（高知県所有）と国立室戸青少年自然の家の屋上(基線長：40㎞)を借用して実験システムを構築(2012 年 4 月～2014 年 3 月)した．加えて，陸上基準局を高知高専に設置し，実質的な離岸距離 80㎞ での長距離対応 RTK 法の実証実験を行って良好な結果を得た．この間に東北地方太平洋沖地震津波が発生し、釜石沖に設置していた国交省の GPS 波浪計の観測値が津波予報値の更新に貢献できた．また，RTK 法から精密単独測位方法(PPP-AR)の有用性を確認した．さらに，距離制限の無い沖合展開をめざして衛星通信による伝送実験を試験的に実施した．平成 22 年には全国発明表彰発明賞が授与された。

（科研費以外の研究費）

(1)S&O 財団技術開発基金（H13），新方式 GPS 計測法による津波計の開発，研究代表者：寺田幸博，研究分担者：加藤照之，12,500 千円；現在，波浪計測に実用されている精密単独計測法である PVD 法の基礎を固めた．

(2)文部科学省独創的革新技術開発補助金（H14～H16），GPS 津波計の沖合展開技術に関する研究，研究代表者：寺田幸博，研究分担者：加藤照之，150,000 千円；室戸岬沖 13 ㎞で本格的な実証実験を行った．研究の目標は，それまでの離岸距離 2㎞ から 10㎞ 超えに挑戦し，外洋での本格的観測の実証をすることであった．実験海域として，国内で最も厳しい気象海象条件にさらされる室戸岬沖を選定し，室戸市の協力を得ながら推進した．実験観測期間中に有義波高 14m の過去最大波高観測及び 2004 年 9 月 5 日の紀伊半島沖地震の観測に成功した．この津波観測結果と津波伝播解析との見事な一致は多くの反響を呼んだ．また，黒潮の流れる海域での設置工事，台風などの荒天への耐久性を実証するとともに，気温，気圧，風向風速，水温，流向流速など利用の可能性も示し，「日常的活用の中で非常に備えることが出来る GPS 津波計」のコンセプトを実証した．これらを通じて，国土交通省港湾局が GPS 波浪計の全国展開を開始する技術的基礎を提供できたことも大きい成果である．この技術に対する社会的関心は高く，マスコミ報道ばかりではなく，第６回国土技術開発賞最優秀賞（国土交通大臣表彰）が贈呈されるに至った．

(3)文部科学省科学技術試験研究委託事業（H22～H25），「海底地殻変動観測技術の高度化」サブテーマ「移動観測における高精度かつ高効率な海底地殻変動観測・解析技術の開発」，研究代表者：田所敬一，158,207 千円；海底地殻変動観測・解析の高精度化・効率化，解析の迅速化のための技術開発を実施した．このため，複数の海上局を用いた観測システムの開発，新たな音響信号および海底局位置解析アルゴリズムの開発を実施した．また，迅速な GPS 測位解析のための手法を評価した．

(4)文部科学省委託事業（H18～H21），「地震・津波観測監視システムの構築」サブテーマ「海底 GPS 観測システムにおける繰り返し測位精度の向上と広域多点観測の推進」，H18 年度研究分担者（田所敬一），H19～21 年度研究代表者（田所敬一），193,543 千円；熊野灘および駿河湾において海底地殻変動の広域多点観測を実施し，条件が良い場合は 1㎝ の測位精度を達成した．ただし，海中音速構造の不均質性の影響を受けて測位精度が 5㎝ まで低下する場合があることが分かり，その解決法については以後の課題として残された．プレートの沈み込みによる地殻変動を年間約 1㎝ の精度で測定することに成功した．

(5)文科省宇宙科学技術推進調整委託費（H25～H26），「みちびき」と「きく 8 号」を用いた GPS 津波計による早期津波警戒システム，研究代表者：寺田幸博，研究分担者：加藤照之，22,902 千円；東北地方太平洋沖地震津波の際に提示された GPS 津波計の機能改善を要する課題は，離岸距離制限のない技術の確立であった．離岸距離制限の克服には，GPS 測位法とデータ伝送方法の抜本的改善が必要であった．測位法については，ブイ上で解析をする精密単独測位法の適用が有用であることの確証が得られた．本研究では JAXA と NICT の協力を得て，沖合展開時のデータ伝送方法の課題解決手段として、衛星通信を利用することの有用性を二つの側面から検討した．まず、精密単独測位法の適用には，GPS 衛星の精密歴（軌道と時計）を必要とすることから，「みちびき」の LEX(L-band experiment)信号にこの精密歴を載せ，放送的に外洋に浮かぶ GPS 津波計ブイに向けて発信することとした．また，ブイ上での精密測位計算の結果として得られる波浪・津波のデータは，発生した地震・津波の被害が無い地域に「きく 8 号」を用いて送り，インターネットで全世界に発信するシステムの実証を行った．本研究成果は、電子情報通信学会 2014 年度衛星通信研究賞及び平成 27 年度総務省四国総合通信局長表彰を受賞した．

(6)戦略的イノベーション創造プログラム（H26～H30），レジリエントな防災・減災機能の強化，研究分担者：田所敬一，197,225 千円；余震や連動性地震を適切に評価するための海底地殻変動観測システムを開発している．

研究計画と研究進捗評価を受けた研究課題の関連性

・本欄には、本応募の研究代表者が、平成２６年度又は平成２７年度に、「特別推進研究」、「基盤研究（Ｓ）」又は「若手研究（Ｓ）」の研究代表者として、研究進捗評価を受けた場合に記述してください。
・本欄には、研究計画と研究進捗評価を受けた研究課題の関連性（どのような関係にあるのか、研究進捗評価を受けた研究を具体的にどのように発展させるのか等）について記述してください。

該当しない

人権の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領４頁参照）

本欄には、研究計画を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続が必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。

例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、組換えＤＮＡ実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となります。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

該当しない

研究経費の妥当性・必要性

本欄には、「研究計画・方法」欄で述べた研究規模、研究体制等を踏まえ、次頁以降に記入する研究経費の妥当性・必要性・積算根拠について記述してください。また、研究計画のいずれかの年度において、各費目（設備備品費、旅費、人件費・謝金）が全体の研究経費の９０％を超える場合及びその他の費目で、特に大きな割合を占める経費がある場合には、当該経費の必要性（内訳等）を記述してください。

本研究計画で全体の研究経費の 90%を超える費目はない．主要な経費は次のとおりである。

・使用するブイは高知県が足摺岬沖に設置している漁礁用のブイを借用する．また，衛星通信においては商用衛星イリジウムを利用する。これらの定常的なブイ借用・利用料が必要である．
・借用した黒潮牧場ブイのデッキ上に装備する計測機器として、特別仕様の GNSS,衛星通信機器、傾斜計、方位計、ソーラーシステムが必要であり，耐水性を備えた収納箱含めて購入する．
・ブイへの機材設置については，H28 に「ブイへの機器設置・調整費」を計上している．それ以降も計測ききのメンテナンスが必要であり，このための渡航費を含めて保守管理費としている．
・海底地殻変動観測用の音響機器として，海底とブイに設置するトランスデューサを購入する．この音響計測の精度確保に不可欠の CTD 計測装置と温度計は、これまでの科研費で入手したものを活用する．また，観測作業には弓削商船高専共同利用設備の弓削丸・はまかぜを用いることから，計測器の海中への繰り出しのためのウインチの購入と船舶の運行費を計上している．
・衛星通信においては，GNSS ブイアレイ用リアルタイム多元接続技術の確立に必要なフェージングシミュレータを新たに開発する．このために必要な開発費を計上する．将来的な利用を希望している「みちびき」のメッセージ通信機能を確認するための実験機器を購入する．
・取得したデータは、リアルタイムデータ公開を行う。このためのHP の原型はこれまでの研究で用いたものを活用するが，研究の進捗状況に応じたアップグレードの経費が必要となる。
・各年度に研究打ち合わせ，ブイ点検等のための国内出張旅費，学会等での成果発表のための内外旅費等を計上しているほか，論文投稿費を含めて報告書印刷代を計上している．
・研究代表者のもと，研究全体の業務調整を行いつつ，個別の課題を統合した総括的な研究を実施し，将来の研究発展に備えるために研究員を雇用することとしており，そのための給与を計上する．また，データ解析補助のため学生に「謝金」を支出する．
・最終年度の H32 年度には最終の衛星通信実験を実施するほか，機材の撤収を行う．そのための用船を含む装置撤収作業費を計上する．撤収時点での CTD 計測も計上している．

主な現有設備 記入に当たっては、基盤研究（Ｓ）研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。

研究機関	設　備　名	仕様（形式・性能）	専用・共同利用の別	設置年度	備　考
東大地震研	CTD	米国シーバード社製 SEACAT profiler モデル BE-19plus	専用	H23	
東大地震研	温度計	米国シーバード社製 SBE-39	専用	H23	
弓削商船高専	弓削丸	全長：40m.長さ：35m, 幅：8.00m, 240 トン	共同	H6	練習船
弓削商船高専	はまかぜ	小型船舶	共同	H6	実習船

設備備品費の明細 記入に当たっては、基盤研究（Ｓ）研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。（金額単位：千円）

年度	品名・仕様	数量	単価	金額	主として使用する研究者及び設置機関名	購入予定時期
２８	GNSS 受信機（特別仕様）・Hitz 製	1	7,000	7,000	加藤照之・東大地震研	H28/10 月
	イリジウム通信機器・大洋無線製	1	800	800	加藤照之・東大地震研	H28/11 月
	傾斜計・クレアクト製	1	300	300	加藤照之・東大地震研	H28/12 月
	磁気方位計・クリマテック製	1	130	130	加藤照之・東大地震研	H28/12 月
	バンドリジェクトフィルタ・アムテックス製	1	140	140	加藤照之・東大地震研	H28/12 月
	防水機器収納箱，取付金具・赤井鉄工製	1	3,000	3,000	加藤照之・東大地震研	H29/1 月
	ソーラーシステム・Hitz 製	1	5,230	5,230	加藤照之・東大地震研	H29/1 月
	信号ケーブル収納箱・Hitz 製	1	900	900	加藤照之・東大地震研	H29/1 月
	CTD 用ウインチ	1	4,814	4,814	二村彰・弓削商船高専	H28/12 月
	TS-8 号線長計（ﾀﾞﾋﾞｯﾄ滑車）	1	214	214	二村彰・弓削商船高専	H28/12 月
	ﾘｱﾙﾀｲﾑ公開データサーバ	1	1,000	1,000	加藤照之・東大地震研	H29/1 月
小計				23,528		
２９	海底音響測距器・海洋電子	3	6,300	18,900	田所敬一・名古屋大学	H29/5 月
	トランスデューサ（ブイ用）・海洋電子	2	6,300	12,600	田所敬一・名古屋大学	
	みちびき通信機器・富士通製	1	3,000	3,000	加藤照之・東大地震研	
小計				34,500		
３０	GNSS 受信機（特別仕様）・Hitz 製	1	7,000	7,000	加藤照之・東大地震研	H30/7 月
小計				7,000		
３１	みちびき通信機器・富士通製	1	3,000	3,000	加藤照之・東大地震研	H31/7 月
小計				3,000		
３２	（なし）					
小計				0		
合計				68,028		

消耗品費等の明細

記入に当たっては、基盤研究（Ｓ）研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。　（金額単位：千円）

年度	消耗品費		旅　費		人件費・謝金		その他	
	事　項	金額	事　項	金額	事　項	金額	事　項	金額
平成28年度	記録媒体(SD/SSD/HD等) 同軸ケーブル LAN/WAN機器 GEONETデータ バッテリー 衛星通信実験用部品	420 20 30 500 1,000 1,000	(国内) 全研究者の学会・研究者会議参加	2,800	東大地震研(研究員) 学生謝金（TA）	3,600 400	ブイ機器設置調整作業 公開サーバー設置調整 GNSS解析ソフト作成 CTD計測 ブイ借用・商用衛星通信料 みちびき通信 成果報告印刷	6,000 3,000 5,000 408 2,000 1,000 600
			(外国) 分担研究者3名x2回	2,400				
	計	2,970	計	5,200	計	4,000	計	18,008
平成29年度	記録媒体(SD/SSD/HD等) GEONETデータ 衛星通信実験用部品	420 500 1,000	(国内) 全研究者の学会・研究者会議参加	2,360	東大地震研(研究員) 学生謝金（TA）	3,600 400	ブイ調整保守 GNSS観測継続 HPアプグレード フェージングシミュレータ開発 ブイ借用・商用衛星通信料 CTD計測 海底地殻変動計測・解析 弓削丸運航費 成果報告印刷	1,000 1,000 500 2,000 4,100 408 2,000 500 1,400
			(外国) 分担研究者3名x2回	2,400				
	計	1,920	計	4,760	計	4,000	計	12,908
平成30年度	記録媒体(SD/SSD/HD等) 同軸ケーブル LAN/WAN機器 GEONETデータ バッテリー 衛星通信実験用部品	420 20 30 500 500 1,000	(国内) 全研究者の学会・研究者会議参加	2,700	東大地震研(研究員) 学生謝金（TA）	3,600 400	GNSS解析ソフトアプデート ブイ調整保守 GNSS観測継続 HPアプグレード みちびき通信 ブイ借用・商用衛星通信料 CTD計測 海底地殻変動計測・解析 弓削丸運航費 成果報告印刷	2,100 1,000 1,000 500 1,000 4,100 408 2,000 500 600
			(外国) 分担研究者3名x2回	2,400				
	計	2,470	計	5,100	計	4,000	計	13,208
平成31年度	記録媒体(SD/SSD/HD等) GEONETデータ バッテリー 衛星通信実験用部品	420 500 500 1,000	(国内) 全研究者の学会・研究者会議参加	2,700	東大地震研(研究員) 学生謝金（TA）	3,600 400	バッテリー交換 ブイ調整保守 PPP-ARソフト改造 GNSS観測継続 HPアプグレード みちびき通信 ブイ借用・商用衛星通信料 CTD計測 海底地殻変動計測・解析 弓削丸運航費 成果報告印刷	1,000 1,000 2,000 1,000 500 2,000 4,100 408 2,000 500 400
			(外国) 分担研究者3名x2回	2,400				
	計	2,420	計	5,100	計	4,000	計	14,908
平成32年度	記録媒体(SD/SSD/HD等) GEONETデータ 衛星通信実験用部品	420 500 1,000	(国内) 全研究者の学会・研究者会議参加	2,500	東大地震研(研究員) 学生謝金（TA）	3,600 400	装置撤収作業 ブイ調整保守 GNSS観測継続 HPアプグレード みちびき通信 ブイ借用・商用衛星通信料 CTD計測 海底地殻変動計測・解析 弓削丸運航費 成果報告印刷 最終報告印刷	5,000 1,000 1,000 500 1,000 2,000 408 2,000 500 1,600 500
			(外国) 分担研究者3名x2回	2,400				
	計	1,920	計	4,900	計	4,000	計	15,508

平成２８年度基盤研究（Ｓ）研究者調書

研究者	（ふりがな） 氏　名	（かとう　てるゆき） 加藤　照之		生年月日 （年齢）	1952年　11月　21日 （63歳）
	所属研究機関 ・部局・職	東京大学・地震研究所・教授	学位	理博	現在の専門	固体地球物理学

研究業績

本欄には、これまでに発表した論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く。）、産業財産権、招待講演のうち、主要なものを選定し、現在から順に発表年次を過去にさかのぼり、通し番号を付して記入してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

① 例えば発表論文の場合、論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）について記入してください。

② 以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し以下を省略（省略する場合、その員数と、掲載されている順番を○番目と記入）しても可。なお、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付してください。

（論文）

[1] Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, K. Tadokoro, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, in Proceedings of the IAG Symposium GENAH2014, vol. 145, 2015 (in press)（査読有）

[2] 川崎和義・山本伸一・寺田幸博・加藤照之・本橋修・橋本剛正・齊田優一・松澤亮，海上からの衛星データ伝送と今後の展望～災害の早期検出を目指して～，信学技報，2015-08，71-76, 2015.（査読無）

[3] Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato (2014), Imaging of the early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7493-7500, doi:10.1002/2014GL061550.（査読有）

[4] 山本伸一・川崎和義・寺田幸博・加藤照之・橋本剛正・本橋修・齊田優一・松澤亮，技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験―津波の早期検出を目指して―，信学技報，2014-8, 5-10, 2014.（査読無）

[5] 加藤照之，GPS：次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～，測地学会誌，59(3), 87-97, 2013.（査読有）

[6] Ebinuma, T., and T. Kato, Dynamic characteristics of high-rate GPS observations for seismology, *Earth Planets Space*, 64, 369-377, 2012.（査読有）

[7] 加藤照之，沈降か隆起か―過去 100 年と過去 10 万年の矛盾する挙動，ミルシル，Vol.5，No. 5, 10-13，2012.（査読無）

[8] Kato, T., Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura, Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, *Earth Planets Space*, **63**, e5-e8, 2011.（査読有）

[9] 加藤照之，GPS 津波計で観測された 2010 年 2 月チリ地震に伴う津波，測位航法学会ニュースレター，1(2)，3，2010.（査読無）

[10] Kato, T., Y. Terada, T. Nagai, K. Shimizu, T. Tomida, and S, Koshimura, Development of a new tsunami monitoring system using a GPS buoy, Proc. Int. Symp. on GPS/GNSS 2008, 846-851, 2008（査読有）

[11] 三宅寿英・吉田晴彦・寺田幸博・加藤照之・永井紀彦，GPS 単独精密変動検出法を用いた洋上波浪観測，日本航海学会誌「Navigation」，No.168，26-30，2008．（査読有）

[12] Fukuda, J., S. Miyazaki, T. Higuchi and T. Kato, Geodetic inversion for space-time distribution of fault slip with time-varying smoothing regularization, *Geophys. J. Int.*, 173 (1), 25-48, 2008.（査読有）

[13] 加藤照之，GPS 津波計，日本地震学会広報誌「なゐふる」，68，2，2008.（査読無）

[14] Kato, T., K. Satake, F. Imamura, Restoration programme from giant earthquakes and tsunamis, RISK WISE, 37-40, 2008.（査読無）

[15] Kato, T., T. Ito, H. Z. Abidin, and Agustan, Preliminary report on crustal deformation surveys and tsunami measurements caused by the July 17, 2006 Java Earthquake and Tsunami, Indonesia, *Earth Planets Space*, 59, 1055-1059, 2007.（査読有）

[16] Nagai, T., T. Kato, N. Moritani, H. Izumi, Y. Terada and M. Mitsui, Proposal of hybrid tsunami monitoring network system consisted of offshore, coastal and on-site wave sensors, *Coastal Engineering Journal*, 49, 1, 63-76, 2007.（査読有）

[17] Kato, T. and A. Kubo, Present-day tectonics of four active island arcs based on GPS observations and forearc stress fields, in Back-arc spreading systems: geological, biological, chemical, and physical interactions, *AGU Geophysical Monograph Series* 166, 31-42, 2006.（査読有）

[18] Satake, K., T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki, T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka, and Y. Terada, Tsunami source of the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes inferred from offshore tsunami and coastal tide gauges, Earth Planets Space, 57, 173-178, 2005.（査読有）

研究業績（つづき）

[19] **加藤照之，** GPS **津波計による津波観測，***月刊「地球」*，**37**(3)，179-183，2005**.（査読無）**

[20] Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, *Earth Planets Space*, **57**, 297-301, 2005. **（査読有）**

[21] Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise variance detection by simplified kinematic GPS measurements - KVD (Kinematics for precise Variance Detection) Method -, *J. Geod. Soc. Japan*, **46** (4), 253-267, 2000. **（査読有）**

[22] Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise variance detection by a single GPS receiver - PVD (Point precise Variance Detection) Method -, *J. Geod. Soc. Japan*, **46** (4), 239-251, 2000. **（査読有）**

[23] Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real Time Observation of Tsunami by RTK-GPS, *Earth, Planets and Space*, 52(10), 841-845, 2000**（査読有）**

（著書）

[1] Kato, T., Slow earthquake, in *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (ed. Harsh K. Gupta), Springer, 1374-1382, 2011.

[2] **加藤照之，地球科学の新展開②「地殻ダイナミクスと地震発生」（菊地正幸編）東京大学地震研究所　第** 3 **章地殻は変動する，朝倉書店，** 2002

[3] **加藤照之，地震の事典**(2001)　**朝倉書店**
７章３節　地殻変動 304-328pp. **及び　９章３節　前兆的地殻変動** 488-500pp.

[4] **加藤照之，新訂版ＧＰＳ−人工衛星による精密測位システム−**(1989)　**日本測量協会**
第１０章　高精度ＧＰＳ測位方式の応用 239-254pp.

[5] **加藤照之，ＧＰＳ−人工衛星による精密測位システム−**(1986)　**日本測量協会**
第３章　ＧＰＳの精度と将来の展望 49-68pp.

(産業財産権)

[1] Method for measuring sea waves by means of ultrasonic waves, as well as sea wave measuring system, (US: 8971150B2), T. Kato and 3 others, 3 March 2015

[2] RTK **異常測位データ処理を伴う** GPS **による変位計測装置および変位計測方法（第** 5386732 **号），加藤照之他** 4 **名，** 2013 **年** 10 **月** 18 **日**

[3] **超音波による波浪計測方法および波浪計測システム（第** 5229500 **号），加藤照之他** 3 **名，** 2013 **年** 3 **月** 29 **日**

[4] **海面変位計測装置（第** 3803901 **号），加藤照之他** 5 **名，** 2006 **年** 5 **月** 19 **日**

[5] **津波検知システム（第** 3803177 **号），加藤照之他** 5 **名，** 2006 **年** 5 **月** 12 **日**

[6] GPS **による物体の変位計測方法及び変位計測装置（第** 3758917 **号），加藤照之他** 5 **名，** 2006 **年** 1 **月** 13 **日**

[7] GPS **による物体の変位計測方法（第** 3727219 **号），加藤照之他** 5 **名，** 2005 **年** 10 **月** 7 **日**

[8] Method and apparatus for measuring displacement of object using GPS (Canada: 2312170), T. Kato and 5 others, September 13, 2003

[9] Method and apparatus for measuring displacement of object using GPS (Canada: 2312017), T. Kato and 5 others, December 31, 2002

[10] Method and apparatus for measuring displacement of object using GPS (US: 6434509B1), T. Kato and 5 others, August 13, 2002

[11] Method and apparatus for measuring displacement of object using GPS (US: 6366854B1), T. Kato and 5 others, April 2, 2002

（招待講演）

[1] **加藤照之，** GPS**：次の“夢”に向けて〜「**GPS **大学連合」の視点から，日本測地学会第** 118 **回講演会，** 118-52**，** 2012 **年** 11 **月** 2 **日**

[2] Kato, T., Y. Aoki, J. Fukuda and Y. Tanaka, Crustal deformations due to the Great 11 March 2011 Tohoku-Oki earthquake and their tectonic implications, AGU Fall Meeting 2011, U34-01, San Francisco, 07 Dec. 2011.

[3] Kato, T., Crustal deformation and tsunami due to the 2011 Tohoku earthquake and its tectonic implications, EGU General Assembly 2011, EGU2011-14226, Vienna, 08 Apr. 2011.

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

基盤Ｓ－１５

研究者氏名	加藤照之

研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、合議審査において、「研究資金の不合理な重複や過度の集中にならず、研究課題が十分に遂行し得るかどうか」を判断する際に参照するところですので、本人が受け入れ自ら使用する研究費を正しく記載していただく必要があります。

本応募課題の研究代表者又は研究分担者の応募時点における、（１）応募中の研究費、（２）受入予定の研究費、（３）その他の活動について、次の点に留意し記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、線を引いて区別して記入してください。具体的な記載方法等については、研究計画調書作成・記入要領を確認してください。

① 「エフォート」欄には、年間の全仕事時間を１００％とした場合、そのうち当該研究の実施等に必要となる時間の配分率（％）を記入してください。
② 「応募中の研究費」欄の先頭には、本応募研究課題を記入してください。
③ 科研費の「新学術領域研究（研究領域提案型）」にあっては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。
④ 所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。
⑤ 所属研究機関の特定の目的（ミッション）に沿って行われるプロジェクト研究に参加している場合に、配分される研究費についても記入してください。なお、個人へ配分される研究費が明確でない場合は、その旨を「研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由」欄に記入してください。

（１）応募中の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役　割（代表・分担の別）	平成 28 年度の研究経費（期間全体の額）（千円）	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由（科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
【本応募研究課題】 基盤研究（Ｓ） （H28～H32　）	海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦 （加藤照之）	代表	45,290 (135,200)	30	（総額 199,328 千円）
基盤研究（Ａ） （H28～H30）	海洋 GNNS ブイを用いた総合防災システムの開発 （加藤照之）	代表	17,764 (36,073)	20	総合防災システムのフィージビリティスタディを行う研究であり，本応募課題と目的が全く異なる． （総額 49,997 千円）
基盤研究（Ａ）（海外学術調査） (H28～H30)	インドネシアにおける津波早期警戒システム （寺田幸博）	分担	1,000 (3,000)	10	2004 年インド洋地震津波の大被害後に各国援助で構築された予報システムの不調原因を調査し、提案者らの開発したGPS津波計の導入効果について調査するものであり，本応募課題と目的が異なる。

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究費の応募・受入等の状況・エフォート（つづき）

（２）受入予定の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割(代表･分担の別)	平成 28 年度の研究経費 (期間全体の額) (千円)	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 （科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
建議に基づく文部科学省経費･災害軽減に貢献するための地震火山観測研究経費（H26～H30）	プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明（小原一成）	分担	1,600 (7,600)	10	この研究課題は東海地方に発生するゆっくりすべりの発生機構を解明しようとするものであり,応募研究課題とは目的・実施内容が異なる.
（３）その他の活動 上記の応募中及び受入予定の研究費による研究活動以外の職務として行う研究活動や教育活動等のエフォートを記入してください。				30	
合　　計 上記（1）、（2）、（3）のエフォートの合計				100 (%)	

平成２８年度基盤研究（Ｓ）研究者調書

研究者	（ふりがな） 氏　名	てらだ　ゆきひろ 寺田　幸博		生年月日 （年齢）	1949年12月　9日 （65歳）
	所属研究機関 ・部局・職	高知工業高等専門学校・環境都市デザイン工学科・客員教授	学位	博士(工学)	現在の専門	海岸工学

研究業績

本欄には、これまでに発表した論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く。）、産業財産権、招待講演のうち、主要なものを選定し、現在から順に発表年次を過去にさかのぼり、通し番号を付して記入してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

① 例えば発表論文の場合、論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）について記入してください。

② 以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し以下を省略（省略する場合、その員数と、掲載されている順番を○番目と記入）しても可。なお、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付してください。

（論文）

[1] Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, and K. Tadokoro, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, Proc. GENAH 2014, IAG Symposia 145, 2015, in press（査読有）

[2] 三宅寿英. 田部井隆雄, 加藤照之, 寺田幸博；GPS単独精密変動検出法PVDの実用化研究, 測地学会, 印刷中（査読有）

[3] 岩塚雄大, 琴浦毅, 菅野泰雅, 吉田大吾, 佐野正佳, 米山治男, 寺田幸博；土木学会論文集B2(海岸工学) Vol. 71(2015) No. 2　印刷中（査読有）

[4] 川崎和義, 山本伸一, 寺田幸博, 加藤照之, 本橋修, 橋本剛正, 齊田優一, 松澤亮；海上からの衛星データ伝送と今後の展望　～ 災害の早期検出を目指して ～, 信学技報, Vol.115, No. 180, SAT2015-23, PP. 71-76, 2015（査読無）

[5] 寺田幸博, 永井紀彦, 加藤照之, 越村俊一, 川口浩二, 松下泰弘；GPS海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する実証調査, 土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol. 70, No.1, pp. 13-18, 2014（査読有）

[6] 寺田幸博；GPS 津波計・波浪計を用いた防災システム, 計測と制御, 53(6), 488-493, 2014（査読無）

[7] 山本伸一・川崎和義・寺田幸博・加藤照之・橋本剛正・本橋修・齊田優一・松澤亮, 技術試験衛星VIII型（ETS-VIII）を用いた海上ブイからのデータ伝送実験―津波の早期検出を目指して―, 信学技報, 2014-8, 5-10, 2014.（電子情報通信学会　2014年度衛星通信研究賞授賞論文）

[8] 寺田幸博, 山本伸一, 加藤照之, 中尾正博, 林稔, 永井紀彦；沖合展開距離制限のないGPS津波計の開発, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3D10　2013（査読無）

[9] 山本伸一, 寺田幸博, 橋本剛正, 加藤照之, 林稔；衛星センサネットワーク　―災害の早期検出を目指して―, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3D09　2013（査読無）

[10]山本伸一、川崎和義、寺田幸博、今田成之、橋本剛正、加藤照之、林稔, ETS ETS-Ⅷを用いた海上ブイからのデータ伝送実験, 電子情報通信学会, 総合大会講演論文集 講演番号 B-3-8, 2013（査読無）

[11] Kato, T., Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura; Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, Earth Planets Space, Vol. 63,2011, pp.e5-e8（査読有）

[12] Y. Terada, T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, T. Miyake, H. Nishimura, S. Kunihiro; Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy, Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2011, Peer Reviewed Paper 14, pp.1-14（査読有）

[13] Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Toshihiko Nagai, Shunichi Koshimura; TSUNAMI MONITORING SYSTEM USING GPS BUOY – PRESENT STATUS AND OUTLOOK, Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 978-1-4244-9566-5, 2010, pp.3043-3046（査読有）

[14] 三宅寿英, 吉田晴彦, 寺田幸博, 加藤照之, 永井紀彦；GPS 単独精密変動検出法を用いた洋上波浪観測, 日本航海学会, 日本航海学会誌「NAVIGATION」, Vol.168, pp.26-30, 2008（査読無）

[15] T. Nagai, T. Kato, N. moritani, H.Izumi, Y.Terada, M.Mitsui; Proposal of Hybrid Tsunami Monitoring Network System consisted of Pffshore, Costal and On-Site Wave Sensors, JSCE, Coastal Engineering Journal Vol.49, No.1 pp.63-76,2007（査読有）

研究業績（つづき）

[16]T.Nagai, T. Kato, N.moritani, H.Izumi, Y.Terada, M. Mitsui; Offshore Tsunami Monitoring Network Design using GPS Buoys and Coastal on-site Sensors, ASCE, Proc.of the 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'06) vol.2, pp.1529-1540,2006（査読有）

[17]T.Nagai, T. Kato, K.Nukada, H.Izumi, Y.Terada, M. Mitsui; Design of the Tsunami Monitoring Network System based on the Offshore Wave Observation Techniques, PIANC, Proc. 31 PLANC Congress Paper No.29, 2006（査読有）

[18]T. Kato, Y. Terada, K. Ito, R. Hattori,T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, T. Nagai; Tsunami due to the 2004 September 5th Off Kii Peninsula Earthquake, Japan, Recorded by a New GPS Buoy, Earth, Planets and Space, Vol.57, pp.297-301, 2005（査読有）

[19]永井紀彦, 加藤照之, 額田恭史, 泉裕明, 寺田幸博, 三井正雄；沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言, 土木学会海洋開発論文集, Vol.21, pp.61-66, 2005（査読有）

[20] T. Nagai, S. Satomi, Y. Terada, T. Kato, K. Nukada, M. Kudaka; GPS Buoy and Seabed Installed Wave Gauge Application to Offshore Tsunami Observation, Proc. of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, (ISOPE2005), pp.292-299, 2005（査読有）

[21]K. Satake, T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki,T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka, Y. Terada; Tsunami Source of the 2004 Off Kii-Peninsula Earthquakes Inferred from Offshore Tsunami and Coastal Tide Gauges, Earth, Planets and Space, Vol.57, pp.173-178, 2005（査読有）

[22] T. Nagai, H. Ogawa, Y. Terada, T. Kato, M. Kudaka; GPS Buoy Application to Offshore Wave Tsunami and Tide Observation, Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE2004), Vol.1, pp.1093-1105（査読有）

[23]越村俊一, 鈴木進吾, 大利桂子, 村田行泰, 寺田幸博, 河田恵昭, 加藤照之, 今村文彦；東南海・南海地震津波対策に向けての広域連携情報ネットワークの提案, 地域安全学会論文集, Vol.6, pp.139-148, 2004（査読有）

[24]永井紀彦, 小川英明, 寺田幸博, 加藤照之, 久高将伸；GPS ブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 土木学会海岸工学論文集, Vol.50, PP.1411-1415,2003（査読有）

[25]加藤照之, 寺田幸博, 松岡幸文, 髙田美津雄；実海域における GPS 波浪計・津波計の性能確認実験, 土木学会海洋開発論文集, Vol.19, PP.839-844, 2003（査読有）

[26] T. Kato, Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, T. Moriguchi, M. Tanno, M. Kanzaki, J. Johnson; A new tsunami monitoring system using RTK-GPS, ITS 2001 Number 5-12, 645-651, 2001

[27]加藤照之, 寺田幸博, 木下正生, 柿本英司, 一色浩, 森口壽久, 神崎雅之, 高田美津雄, James Johnson; GPS 津波計の開発－大船渡市沖実用化実験－, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.12, pp.2227-2235, 2001（査読有）

[28] H. Isshiki, A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki, T. Tanno; Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements - KVD (Kinematics for precise Variance Detection method)-, Journal of Geodetic Society of Japan, Vol.46, No,4, 253-267, 2000（有）

[29] H. Isshiki, A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki, T. Tanno; Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver -PVD (Point precise Variance Detection Method) -, Journal of Geodetic Society of Japan, Vol.46, No.4, pp.239-251, 2000（査読有）

[30] T. Kato, Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, T. Tanno; Real-time Observation of Tsunami by RTK-GPS, Earth, Planets and Space, Vol.52, pp.841-845, 1999（査読有）

（著書）

[1] 高山知司監修, 寺田幸博（共著）；波を観る－波浪・高潮・津波・GPS 海洋ブイ・沿岸波浪計－, 沿岸技術研究センター, 2013

[2] 寺田幸博（共著）；知識ベース 11 群 社会情報システム, 2 編 電子航法ナビゲーションシステム, 2 章 海洋システム 2-4-1, GPS 津波計, 電子情報通信学会, 2011

(産業財産権: 日本、米国、カナダにおいて登録された特許)

特許第 5777049 号, 特許第 5386732 号, 特許第 5229500 号, 特許第 4780285 号, 特許第 4588065 号,
特許第 3803901 号, 特許第 3803177 号, 特許第 3758917 号, 特許第 3727219 号, 特許第 3512330 号
US 8,971,150 B2, US 6,434,509 B1, US 6,366,854 B1, CA 02312017, CA 023120170

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

基盤Ｓ－１９

研究者氏名	寺田幸博

研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、合議審査において、「研究資金の不合理な重複や過度の集中にならず、研究課題が十分に遂行し得るかどうか」を判断する際に参照するところですので、本人が受け入れ自ら使用する研究費を正しく記載していただく必要があります。

本応募課題の研究代表者又は研究分担者の応募時点における、（１）応募中の研究費、（２）受入予定の研究費、（３）その他の活動について、次の点に留意し記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、線を引いて区別して記入してください。具体的な記載方法等については、研究計画調書作成・記入要領を確認してください。

① 「エフォート」欄には、年間の全仕事時間を１００％とした場合、そのうち当該研究の実施等に必要となる時間の配分率（％）を記入してください。
② 「応募中の研究費」欄の先頭には、本応募研究課題を記入してください。
③ 科研費の「新学術領域研究（研究領域提案型）」にあっては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。
④ 所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。
⑤ 所属研究機関の特定の目的（ミッション）に沿って行われるプロジェクト研究に参加している場合に、配分される研究費についても記入してください。なお、個人へ配分される研究費が明確でない場合は、その旨を「研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由」欄に記入してください。

（１）応募中の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割（代表・分担の別）	平成 28 年度の研究経費 (期間全体の額) （千円）	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 （科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
【本応募研究課題】 基盤研究（Ｓ） （H28～H32　）	海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦 （加藤照之）	分担	1,260 (6,700)	30	
基盤研究（Ａ） （H28～H30）	海洋 GNNS ブイを用いた総合防災システムの開発 （加藤照之）	分担	760 (2,444)	30	総合防災システムのフィージビリティスタディを行う研究であり，本応募課題と目的が全く異なる．
基盤研究（Ａ）（海外学術調査）	インドネシアにおける津波早期警戒システム （寺田幸博）	代表	35,000 (50,000)	30	2004 年インド洋地震津波の大被害後に各国援助で構築された予報システムの不調原因を調査し、提案者らの開発した GPS 津波計の導入効果について調査するものであり、本応募課題と目的が異なる。（総額 50,000 千円）

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究費の応募・受入等の状況・エフォート（つづき）

（２）受入予定の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割(代表･分担の別)	平成 28 年度の研究経費 (期間全体の額) (千円)	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 （科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
（３）その他の活動 上記の応募中及び受入予定の研究費による研究活動以外の職務として行う研究活動や教育活動等のエフォートを記入してください。				10	
合　　計 上記（1）、（2）、（3）のエフォートの合計				100 (%)	

平成２８年度基盤研究（S）研究者調書

研究者	(ふりがな) 氏　名	たどころ　けいいち 田所　敬一		生年月日 （年齢）	1973年　3月　8日 （４３歳）
	所属研究機関 ・部局・職	名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授	学位	博士(理学)	現在の専門	地震学

研究業績

本欄には、これまでに発表した論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く。）、産業財産権、招待講演のうち、主要なものを選定し、現在から順に発表年次を過去にさかのぼり、通し番号を付して記入してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

① 例えば発表論文の場合、論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）について記入してください。

② 以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し以下を省略（省略する場合、その員数と、掲載されている順番を○番目と記入）しても可。なお、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付してください。

1) Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, and K. Tadokoro, Recent Developments of GPS Tsunami Meter for a Far Offshore Observations, in to International Association of Geodesy Symposia (2014), 2015. （査読有）
2) Yasuda, K., K. Tadokoro, R. Ikuta, T. Watanabe, S. Nagai, T. Okuda, C. Fujii, and K. Sayanagi, Interplate locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost of the Suruga trough, Japan, Geophys. Res. Lett., 41, 5806-5812, doi:10.1002/2014GL060945, 2014. （査読有）
3) 田所敬一, GPS／音響結合方式による海底地殻変動観測, 計測と制御, 53, 473-476, 2014.（査読無）
4) 田所敬一, GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測結果, 東日本大震災合同調査報告　共通編１　地震・地震動, 日本地震工学会, 206p., 2014.（査読無）
5) 田所敬一, 日本地震学会における東日本大震災対応と学界の災害・環境対応のあり方, 地球惑星科学連合大会, 横浜, 2014年5月. ＜招待講演＞
6) Nihara, Y., K. Tadokoro, Y. Yukutake, R. Honda, and H. Ito, Spatial distribution of crack structure in the focal area of a volcanic earthquake swarm at the Hakone volcano, Japan, Earth Planet Space, 65, 51-55, doi:10.5047/eps.2012.05.005, 2013. （査読有）
7) Sato, M., M. Kido, K. Tadokoro, and H. Fujimoto, GPS/acoustic seafloor geodetic observation in the subduction zone around Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 2013. ＜招待講演＞
8) 渡部　豪・田所敬一・生田領野・杉本慎吾・奥田　隆・永井　悟・江藤周平・久野正博, 衛星軌道暦の違いに基づくキネマティック GPS 解析の精度評価, 測地学会誌, 58, 61-76, 2012.（査読有）
9) Tadokoro, K., R. Ikuta, T. Watanabe, M. Ando, T. Okuda, S. Nagai, K. Yasuda, and T. Sakata, Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan, Geophys. Res. Lett., 39, L10306, doi:10.1029/2012GL051696, 2012. （査読有）
10) Fujimoto, H., M. Kido, Y. Osada, K. Tadokoro, T. Okuda, Y. Matsumoto, and K. Kurihara, Long-term stability of acoustic benchmarks deployed on thick sediment for GPS/Acoustic seafloor positioning, in "Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin", Springer, 2011. （査読有）
11) Ando, M., M. Nakamura, T. Matsumoto, M. Furukawa, K. Tadokoro, and M. Furumoto, Is the Ryukyu Subduction Zone in Japan coupled or decoupled?: The necessity of seafloor crustal deformation observation, Earth Planet Space, 61, 1-9, 2009. （査読有）
12) 渡部　豪・田所敬一・杉本慎吾・奥田　隆・生田領野・安藤雅孝・武藤大介・木元章典・久野正博, 熊野灘での海底地殻変動観測によるプレート固着状態推定：現状と展望, 測地学会誌, 55, 39-51, 2009.（査読有）

研究業績（つづき）

13) 杉本慎吾・田所敬一・生田領野・渡部　豪・奥田　隆・佐柳敬造・武藤大介・木元章典・安藤雅孝, 制約音速による海底測位手法の改良とその評価, 測地学会誌, 55, 53-61, 2009.（査読有）

14) 杉本慎吾・長田幸仁・石川直史・浅倉宜矢・田所敬一・渡部　豪・奥田　隆・高谷和典・生田領野・安藤雅孝, 基線長別移動体測位実験によるキネマティック GPS ソフトウェアの評価, 測地学会誌, 55, 65-85, 2009.（査読有）

15) Ikuta, R., K. Tadokoro, M. Ando, T. Okuda, S. Sugimoto, K. Takatani, K. Yada, and G. M. Besana, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough, J. Geophys. Res., 113, doi:10.1029/2006JB004875, 2008.（査読有）

16) 田所敬一・杉本慎吾・武藤大介・渡部　豪・生田領野・安藤雅孝・奥田　隆・木元章典・佐柳敬造・久野正博, 駿河–南海トラフにおける海底地殻変動繰り返し観測, 測地学会誌, 54, 127-139, 2008.（査読有）

17) 佐藤まりこ・木戸元之・田所敬一, GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測：観測成果と新たな取り組み, 測地学会誌, 54, 113-125, 2008.（査読有）

18) 武藤大介・田所敬一・杉本慎吾・奥田　隆・渡部　豪・木元章典・生田領野・安藤雅孝, 海底ベンチマーク位置決定精度における海中音速構造の時空間変化の影響に関する数値実験, 測地学会誌, 54, 153-162, 2008.（査読有）

19) 杉本慎吾・田所敬一・佐柳敬造・生田領野・奥田 隆・長尾年恭・安藤雅孝, 海底地殻変動観測における温度・圧力連続計測, 東海大学海洋研究所研究報告, 28, 37-48, 2007.（査読有）

20) 田所敬一・杉本慎吾・渡部　豪・奥田　隆・木元章典・武藤大介・久野雅博, 佐柳敬造:海域における地殻変動モニタリングに向けて：広域多点観測とリアルタイム観測, 日本地震学会秋季大会, 仙台, 2007 年 10 月.＜招待講演＞

21) Tadokoro, K., M. Ando, T. Okuda, S. Sugimoto, T. Watanabe, Y. Aizawa, J. Yasuda, and M. Kuno, Observation of Seafloor Crustal Deformation at the Nankai Margin, Japan, Proceedings of Underwater Technology, 2007.（査読無）

22) Tadokoro, K., M. Ando, R. Ikuta, T. Okuda, G. M. Besana, S. Sugimoto, and M. Kuno, Observation of Coseismic Seafloor Crustal Deformation due to M7 Class Offshore Earthquakes, Geophys. Res. Lett., 33, doi:10.1029/2006GL026742, 2006.（査読有）

23) 安藤雅孝・田所敬一・林　能成・木村玲欧編著,「いま活断層が危ない」, 中日新聞社, 219p., 2006.（編集および分担執筆）

24) Xu, P., M. Ando, and K. Tadokoro, Precise, three-dimensional seafloor geodetic deformation measurements using difference techniques, Earth Planets Space, 57, 795-808, 2005.（査読有）

25) Nishimura, S., M. Ando, and K. Tadokoro, An application of numerical simulation techniques to improve the resolution of offshore fault kinematics using seafloor geodetic methods, Phys. Earth Planet. Inter., 151, 181-193, 2005.（査読有）

26) Tadokoro, K., Structure and Physical Properties of Fracture Zone Derived From Seismic Observations at the Nojima Fault and the Western Tottori Earthquake Fault, Japan, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 78, 67-74, 2003.（査読有）

27) Yamada, T., M. Ando, K. Tadokoro, K. Sato, T. Okuda, and K. Oike, Error Evaluation for Acoustic Positioning in the Sea Associated with the Observation of Seafloor Crustal Deformation, Earth Planets Space, 54, 871-881, 2002.（査読有）

28) 田所敬一・安藤雅孝・佐藤一敏・山田卓司・奥田　隆・片尾　浩・岸本清行：音響測距–GPS リンクによる海底地殻変動観測システムの開発, 地学雑誌, 110, 521-528, 2001.（査読有）

29) Tadokoro, K., and M. Ando, Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 2000.＜招待講演＞

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究者氏名	田所敬一

研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、合議審査において、「研究資金の不合理な重複や過度の集中にならず、研究課題が十分に遂行し得るかどうか」を判断する際に参照するところですので、本人が受け入れ自ら使用する研究費を正しく記載していただく必要があります。

本応募課題の研究代表者又は研究分担者の応募時点における、（１）応募中の研究費、（２）受入予定の研究費、（３）その他の活動について、次の点に留意し記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、線を引いて区別して記入してください。具体的な記載方法等については、研究計画調書作成・記入要領を確認してください。

① 「エフォート」欄には、年間の全仕事時間を１００％とした場合、そのうち当該研究の実施等に必要となる時間の配分率（％）を記入してください。
② 「応募中の研究費」欄の先頭には、本応募研究課題を記入してください。
③ 科研費の「新学術領域研究（研究領域提案型）」にあっては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。
④ 所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。
⑤ 所属研究機関の特定の目的（ミッション）に沿って行われるプロジェクト研究に参加している場合に、配分される研究費についても記入してください。なお、個人へ配分される研究費が明確でない場合は、その旨を「研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由」欄に記入してください。

（１）応募中の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役　割（代表・分担の別）	平成28年度の研究経費（期間全体の額）（千円）	エフォート(%)	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由（科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
【本応募研究課題】 基盤研究（Ｓ） （H28～H32）	海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦（加藤照之）	分担	1,360 (46,030)	10	
基盤研究（A） （H28～H30）	海洋 GNNS ブイを用いた総合防災システムの開発(加藤照之)	分担	660 (9,860)	10	総合防災システムの開発にかかる研究であり、本応募課題と目的が全く異なる。

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究費の応募・受入等の状況・エフォート（つづき）

（２）受入予定の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割(代表･分担の別)	平成 28 年度の研究経費 (期間全体の額) (千円)	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 （科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
戦略的イノベーション創造プログラム（H26～H30・防災科学技術研究所）	津波被害軽減のための基盤的研究（青井真）	分担	40,900 (176,283)	50	係留ブイを用いた海底地殻変動観測システムを設置する場合の観測点の選定を行う研究であり、本応募課題と目的が全く異なる。
（３）その他の活動 上記の応募中及び受入予定の研究費による研究活動以外の職務として行う研究活動や教育活動等のエフォートを記入してください。				30	
合　　計 上記（1）、（2）、（3）のエフォートの合計				100 (%)	

平成２８年度基盤研究（Ｓ）研究者調書

研究者	（ふりがな） 氏　名	（ふたむら　あきら） 二村　彰		生年月日 （年齢）	1974年　4月19日 （　41歳）
	所属研究機関 ・部局・職	弓削商船高等専門学校・商船学科・准教授	学位	博士 (工学)	現在の専門	沿岸海洋物理

研究業績

本欄には、これまでに発表した論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く。）、産業財産権、招待講演のうち、主要なものを選定し、現在から順に発表年次を過去にさかのぼり、通し番号を付して記入してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

① 例えば発表論文の場合、論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）について記入してください。

② 以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し以下を省略（省略する場合、その員数と、掲載されている順番を○番目と記入）しても可。なお、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付してください。

【2015年度】

(1) 二村　彰・蛭間　拓也・向井利夫・栗本裕和、”学校桟橋における強風の特徴”、弓削商船高専紀要、37号、7-12、2015、（査読なし）

【2010年度以前】

(2) 二村　彰・杉本紘一、“成層期における燧灘の海洋構造に関する研究”、弓削商船高等専門学校紀要、31号、1-5，2009、（査読なし）

(3) 二村　彰・武岡英隆・郭　新宇、"燧灘成層域における流動・海水交換と熱収支"、海の研究、14(3)、429-440、2005、（査読あり）

(4) Guo, X., A. Futamura, and H. Takeoka, "Residual currents in a semi-enclosed bay of the Seto Inland Sea, Japan", Journal of Geophysical Research, Vol.109, C12008, 2004、（査読あり）

(5) 奥村継一・二村　彰・岩坂直人・大塚清敏、” オホーツク海とベーリング海の海氷分布についての研究“、日本航海学会論文集，108号、85-96，2003、（査読あり）

(6) 多田光男、二村　彰、塚本秀史、“来島海峡南東部潮汐フロント周辺海域の定点連続観測結果について”、Navigation，152号、83-88，2002、（査読あり）

(7) Guo, X., A. Futamura, and H. Takeoka, " Role of straits in transport processes in the Seto Inland Seas, Japan“、Extended Abstracts of 11th International Biennial Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas, pp.465-468、2002、（査読あり）

(8) 清田耕司、世登順三、多田光男、塚本秀史、二村　彰、“2000年夏季における燧灘の水温・塩分・ＤＯおよび潮流の観測”、広島商船高等専門学校紀要，23号，111-114，2001、（査読なし）

(9) 二村　彰、塚本秀史、多田光男、世登順三、清田耕司、武岡英隆、“燧灘の密度構造の調査”、弓削商船高等専門学校紀要，23号、9-14，2001、（査読なし）

研究業績（つづき）

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究者氏名	二村　彰

研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、合議審査において、「研究資金の不合理な重複や過度の集中にならず、研究課題が十分に遂行し得るかどうか」を判断する際に参照するところですので、本人が受け入れ自ら使用する研究費を正しく記載していただく必要があります。

本応募課題の研究代表者又は研究分担者の応募時点における、（１）応募中の研究費、（２）受入予定の研究費、（３）その他の活動について、次の点に留意し記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、線を引いて区別して記入してください。具体的な記載方法等については、研究計画調書作成・記入要領を確認してください。

① 「エフォート」欄には、年間の全仕事時間を１００％とした場合、そのうち当該研究の実施等に必要となる時間の配分率（％）を記入してください。
② 「応募中の研究費」欄の先頭には、本応募研究課題を記入してください。
③ 科研費の「新学術領域研究（研究領域提案型）」にあっては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。
④ 所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。
⑤ 所属研究機関の特定の目的（ミッション）に沿って行われるプロジェクト研究に参加している場合に、配分される研究費についても記入してください。なお、個人へ配分される研究費が明確でない場合は、その旨を「研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由」欄に記入してください。

（１）応募中の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役　割（代表・分担の別）	平成28年度の研究経費（期間全体の額）（千円）	エフォート(%)	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由（科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
【本応募研究課題】 基盤研究（Ｓ） （H28～H32）	海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦 （加藤照之）	分担	5,796 (11,398)	15	
基盤研究（A） （H28～H30）	海洋 GNNS ブイを用いた総合防災システムの開発 （加藤照之）	分担	560 (1,620)	20	総合防災システムの開発にかかる研究であり、本応募課題と目的が全く異なる。
挑戦的萌芽研究 （H28～H30）	マイクロバブル水産養殖のための再生可能エネルギーの可能性（二村　彰）	代表	2,800 (3,000)	30	本応募研究内容は,マイクロバブル水産養殖における再生可能エネルギーの可能性を明らかにすることである.一方,他応募研究内容は,津波観測および地殻変動観測を目的としている.これらは異なる研究内容である. （総額　　5000 千円）

研究代表者・研究分担者毎の研究者調書に作成・添付

研究費の応募・受入等の状況・エフォート（つづき）

（２）受入予定の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割(代表･分担の別)	平成 28 年度の研究経費 (期間全体の額) (千円)	エフォート（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 （科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額を記入すること）
（３）その他の活動 上記の応募中及び受入予定の研究費による研究活動以外の職務として行う研究活動や教育活動等のエフォートを記入してください。				35	
合　　計 上記（1）、（2）、（3）のエフォートの合計				100 (%)	

様　式　Ｃ－７－１

平成２８年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（研究実績報告書）

1．機関番号　1 2 6 0 1　　2．研究機関名　東京大学

3．研究種目名　基盤研究(S)　　4．研究期間　平成２８年度～平成３２年度

5．課題番号　1 6 H 0 6 3 1 0

6．研究課題名　海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

7．研究代表者

研究者番号	研究代表者名	所属部局名	職名
8 0 1 3 4 6 3 3	カトウ　テルユキ 加藤　照之	地震研究所	教授

8．研究分担者

研究者番号	研究分担者名	所属研究機関名・部局名	職名
3 0 4 4 2 4 7 9	テラダ　ユキヒロ 寺田　幸博	高知工業高等専門学校・	客員教授
7 0 3 2 4 3 9 0	タドコロ　ケイイチ 田所　敬一	名古屋大学・環境学研究科	准教授
9 0 3 3 2 0 8 0	フタムラ　アキラ 二村　彰	弓削商船高等専門学校・商船学科	准教授

9．研究実績の概要

要素技術開発のための実験から開始した．実験は8月下旬に弓削商船高専所有の弓削丸を用いて行った．船上にETS-VIII（きく8号）との通信用に，ジンバル付きとジンバルなしの平面アンテナを設置した．また，ETS-VIII運用終了後に使用する商用衛星（Thuraya）との通信のための受動ならびに能動アンテナも設置した．これらによって船の動揺や船体によるアンテナ掩蔽，データ取得効率などの効果を確認するための基礎資料を得た．加えて，船の動揺に伴うフェージング調査のデータを取得し，将来の通信衛星の仕様策定を行う準備をした．続いて，2月上旬に黒潮牧場18号ブイの周辺，半径約0.75海里の円周上４ヵ所にて海中音速の測定を行った．その結果，ほぼ東西に流れる黒潮による影響で，南北方向に最大で±3.6m/sの不均質があることが分かり，次年度以降の海底地殻変動精密測位の重要な基礎資料が得られた．

観測システムは，データ送受信のための基地局を高知県仁淀川町に，また高知県黒潮牧場18号ブイにGNSS機器等の機材一式を搭載して構築し，海面変動監視のための測位を開始した．地上局で補正情報を生成して，衛星を介してブイに送り，ブイ上で精密単独測位を行って結果を陸側に伝送するという双方向の衛星通信には商用衛星を用いた．しかし，開始からほどなくして記録が停止した．原因を調査したところ，通信衛星用のアンテナの消費電力が当初想定よりも大きく，電圧低下による機能停止と判断された．解決策としてブイ上の電力供給量を増やす必要があり，追加のソーラーシステムを整えて次年度の測位機能回復に備えることとなった．

本研究に協力いただいている地域への研究成果の還元を意識して，仁淀川町町民向けに「地震と津波を考える夕べ」と題した講演会を仁淀川町の協力の下に開催した．これらの活動や研究内容について，新聞で7回，NHKで1回の報道があった．

（注）・印刷に当たっては、Ａ４判（縦長）・両面印刷すること。　（1／6）

10.キーワード

(1) 津波	(2) 海底地殻変動	(3) GNSSブイ	(4) 防災
(5)	(6)	(7)	(8)

11.現在までの進捗状況

(区分)(3)やや遅れている。

(理由)

平成28年度はブイ観測の準備・開始と衛星通信の高機能化が最重要課題であった．このため，GNSS受信機システムは精密単独測位やPVD法を組み込んだ特別仕様のものを製作し，防水性を確保した電源・計測システムと共に高知県足摺岬沖のブイに搭載した．また，データ公開用サーバは災害発生時に津波被害を受けない山間部の仁淀川町に設置し，データ伝送用衛星通信システムとして商用の通信衛星（Thuraya）を利用した．

ブイを用いた観測システムの構築に加えて，弓削商船高専の練習船弓削丸を用いて通信アンテナの機能向上のための要素実験，将来の課題として複数ブイを運用する場合に必須と考えられる回線制御技術について検討するためのETS-VIIIを用いた基礎データの収集，及び海底地殻変動観測のために不可欠の塩分濃度と温度分布の計測実験を行った．

平成29年度の最重要課題になる海底地殻変動観測のための準備調整として，通信衛星経由でデータ伝送を行う場合のデータ量の圧縮技術及び音響測距による音波の伝播時間を自動計算する手法の新たなアルゴリズムの開発を行った．また，GNSSブイの多機能化に向けて気象学・電離層研究への応用の検討を行った．

ブイへの観測機器搭載と弓削丸を用いた要素実験は順調に推移した．しかしながら，ブイ搭載機器の電力見積に誤りがあり，蓄電池能力に不足が生じた．このため，追加の太陽電池，蓄電池を購入して，電力不足を解消しようとしていたところ，ブイ作業を請け負わせていた業者が，別の箇所で設置していたGNSS波浪計ブイの点検作業中に作業員一名が亡くなるという事故を引き起こした．このため，業者が原因究明と再発防止策をとるまで業務を自粛することとなり，本プロジェクトも海上作業ができない事態となっている．このため，当初予定であった，当該年度中のGNSSブイの精密測位の連続運転ができない状況となっている．

12.今後の研究の推進方策

(今後の推進方策)

前年度に発生した事故の余波が今年度も継続しているが，6月頃には何らかのめどがつく見込みであり，それを待ってブイ作業を再開する予定である．もし，当該業務を請け負っている業者が作業を開始できないときに備え，別の業者に作業を依頼するなど，本研究への影響を最小限にとどめることを考えている．なお，今年度の当初作業は海底地殻変動関係の機器設置など，事故とは関係のない作業が予定されているので，研究全体への事故の影響はそれほど大きなものではないと考えている．

海底地殻変動観測実験では，音響測距用の海底局３台を新たに導入し，ブイ直下の海底に設置する．ブイ上からの音響測距試験を実施し，音響測距が可能であること，前年度に開発したアルゴリズムが正常に働くことを実証する．また，音響測距結果とブイのGPS測位と姿勢測定結果を統合して自動で海底局位置を決定する新たなアルゴリズムを開発し，海底局の位置決定が可能であることを実証する．音響データはブイ上に置かれたPCにも格納し，オフラインでデータを収集して後処理を行い，従来の手法での解析も行って精度を比較検討する．これには弓削丸を用い，CTDプロファイル観測も合わせて実施することによって，海底測位の高精度化を図る予定である．

気象学・電離層研究への応用においては，GNSSデータから可降水量を抽出する解析を行い，周囲の地上GNSS観測点，衛星搭載マイクロ波放射計による観測との比較を行う．また，GNSSデータからTECの値を抽出し全球モデルへ入力することで，海上TEC情報がどの程度モデル精度の向上に寄与するかを検討する．

平成30年度～平成32年度においては，構築した観測システムの継続的運用と長期利用における課題の抽出・解決を行う．また，最終年度には，研究成果をとりまとめ，西太平洋におけるGNSSブイアレイ展開の留意事項を明確にしていく予定である．

（注）・印刷に当たっては、Ａ４判（縦長）・両面印刷すること。

13.研究発表（平成２８年度の研究成果）

〔雑誌論文〕　計（４）件／うち査読付論文　計（２）件／うち国際共著論文　計（１）件／うちオープンアクセス　計（１）件

著者名	論文標題
寺田幸博・加藤照之	GPS津波計・波浪計・潮位計

雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	国際共著
非破壊検査	有	66	2017	178-182	－

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
なし

オープンアクセス
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難

著者名	論文標題
加藤照之・田村和夫	東京圏の地震にどう備えるか

雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	国際共著
学術の動向	無	21	2016	28-31	－

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
なし

オープンアクセス
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難

著者名	論文標題
加藤照之	2016年熊本地震発生の地学的背景と地殻変動

雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	国際共著
科学	無	86	2016	899-902	－

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
なし

オープンアクセス
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難

著者名	論文標題
Wang, Z., T. Kato, X. Zhou, and J. Fukuda	Source process with heterogeneous rupture velocity for the 2011Tohoku-Oki earthquake based on 1-Hz GPS data

雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	国際共著
Earth, Planets and Space	有	68:193	2016	1-17	該当する

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
10.1186/s40623-016-0572-4

オープンアクセス
オープンアクセスとしている（また、その予定である）

〔学会発表〕　計（3）件／うち招待講演　計（2）件／うち国際学会　計（2）件

発表者名	発表標題
Teruyuki Kato	GNSS buoy array in the Pacific for natural disaster mitigation

学会等名	発表年月日	発表場所
The First Pacific Regional Workshop on Multi-Hazard Risk Assessment and（招待講演）（国際学会）	2016年09月13日～2016年09月15日	Nandi (Fiji)

発表者名	発表標題
加藤照之	海洋GNSSブイを用いた総合防災システムの開発

学会等名	発表年月日	発表場所
リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会（招待講演）	2016年11月21日	東北大学（宮城県・仙台）

発表者名	発表標題
Teruyuki Kato	Update of the project of development of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system

学会等名	発表年月日	発表場所
8th Multi-GNSS Asia (MGA) Conference（国際学会）	2016年11月14日～2016年11月16日	Manila (Philippines)

〔図書〕　計（0）件

著　者　名	出　版　社		
書　　名		発行年	総ページ数

14.研究成果による産業財産権の出願・取得状況

〔出願〕　計（0）件

産業財産権の名称	発明者	権利者	産業財産権の種類、番号	出願年月日	国内・外国の別

〔取得〕　計（0）件

産業財産権の名称	発明者	権利者	産業財産権の種類、番号	取得年月日 出願年月日	国内・外国の別

15.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計（0）件

国際研究集会名	開催年月日	開催場所

16.本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

（1）国際共同研究：－

17.備考

平成28年度基盤研究（Ｓ）海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続計測への挑戦」
http://www.tsunamigps.com/
現在，新たなWebへの移行を準備中

様　式　C－6　　1版

平成２８年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）（　基盤研究(S)　）実績報告書（収支決算報告書）

独立行政法人
日本学術振興会理事長　殿

平成２９年　４月２４日

研究代表者	所属研究機関の本部の所在地	〒113－8654 東京都文京区本郷７－３－１
	所属研究機関・部局・職名	東京大学・地震研究所・教授
	フリガナ	カトウ　テルユキ
	氏　名	加藤　照之

研究課題名	海洋GNSSブイを用いた津波観測の真機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦	交付を受けた補助金	60,320,000 円
		直接経費	46,400,000 円
		間接経費	13,920,000 円

費目別収支決算表

	合計	直接経費					間接経費
		計	物品費	旅費	人件費・謝金	その他	
実支出額の使用内訳	円 60,320,000	円 46,400,000	円 22,689,397	円 2,119,482	円 0	円 21,591,121	円 13,920,000
交付申請書に記載の補助金の使用内訳	円 60,320,000	円 46,400,000	円 23,360,000	円 3,200,000	円 400,000	円 19,407,000	円 13,920,000
備考欄							

主要な物品明細書　（一品又は一組若しくは一式の価格が50万円以上のもの）

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関名
傾斜計測センサー	クレアクト社製・3DM-GX4-45SK1	1	592,920	592,920	東京大学
アンテナ、通信機器（仁淀川地上局）	ソフトバンク社製・HDU-XT、他	1	518,400	518,400	東京大学
アンテナ、通信機器（衛星ブイ局）	ソフトバンク社製・KI-4SK、他	1	624,240	624,240	東京大学
ＧＮＳＳ津波計測システム	日立造船社製・特注品	1	9,720,000	9,720,000	東京大学
船上装置用トランスジューサ	海洋電子社製・TJC1-S2017	1	648,000	648,000	東京大学
トランスデューサ取付用ポール	内海造船社製・特注品	1	667,440	667,400	東京大学
HTTDセンサープローブ	㈱イーエムエス・UC-P80	2	2,626,560	5,253,120	名古屋大学

課題番号	16H06310	機関番号	12601

（注）・印刷に当たっては、Ａ４判（縦長）・両面印刷すること。　（1／2）

補助事業者

研究代表者及び研究分担者			直接経費		間接経費の直接額	備考
所属研究機関・部局・職名	氏名	研究者番号	交付申請額に記載の補助金額	実支出額		
			円	円	円	
東京大学・地震研究所・教授	加藤 照之	80134633	35,967,000	35,967,000	10,790,100	
高知工業高等専門学校・客員教授	寺田 清輝	30442479	1,200,000	1,200,000	360,000	
名古屋大学・環境学研究科・准教授	田附 敏一	70324390	6,534,000	6,534,000	1,960,200	
山形県福島高等専門学校・商船学科・准教授	二村 彰	90332080	2,699,000	2,699,000	809,700	
計（小計）	4 名		46,400,000円	46,400,000円	13,920,000円	
			課題番号	16H06310	機関番号	12601

（注）・印刷に当たっては、Ａ４判（縦長）・両面印刷すること。

（2／2）

様　式　Ｃ－７－１

平成２９年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（研究実績報告書）

機関番号	１２６０１

所属研究機関名称		東京大学
研究代表者	部局	地震研究所
	職	教授
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)　　２．課題番号　16H06310

３．研究課題名　海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．研究期間　平成２８年度～平成３２年度　　５．領域番号・区分　－

６．研究実績の概要

本年度は，まず6月に実験航海を行い，海底地殻変動観測用の海底局を設置するとともに船舶による音響測距観測およびCTD観測を実施した．これまでの進捗状況を踏まえ，同月には米国で開催された海洋工学の国際シンポジウムにおいて，また7月および8月にはそれぞれ国内外での研究集会において，本研究プロジェクトに関する成果の報告を行った．海洋工学シンポジウムには査読付き論文を投稿・印刷した．また，9月には再度船舶を用いた音響測距およびCTD観測を実施した．これらの観測から得られた資料を解析し，良好な音響信号が得られていること，CTD観測によって海中の音速構造の季節変化などを得ることができ，今後のブイによる音響計測に対する初期条件を知ることができた．これらの結果は10月の測地学会等で発表した．
ブイにおけるGNSS観測については，諸般の事情により遅れが生じ，観測が年度当初より停止していた．11月にブイ上の機器を点検調査したところ，GNSS機器や電源部の不具合，台風等の影響等と思われるブイ上の機器格納箱等に変形が見られることが判明したため，GNSSアンテナの交換，電源部充放電制御装置の交換などを行った．また，台風等の悪天候による機器格納箱およびその固定部の変形等が見られたため，格納箱固定用の治具の再設計・再制作を行って再設置を行った．
こうした作業にも関わらずデータ通信の状況が好転しなかったため，2018年2月には再度ブイ作業を行い，各種点検調整を行うとともに通信衛星用の機材の交換等を実施した．これによって，通信状況は格段の改善が図られた．また，海況の好転により，2018年3月末に海底地殻変動観測に必要なトランスデューサのブイへの取り付けが完了し，海底地殻変動の連続観測に向けた準備が整えられた．

７．キーワード

津波　海底地殻変動　GNSSブイ　防災

８．現在までの進捗状況

区分　(3) やや遅れている。

理由

本年度は，ブイ作業依頼業者の都合や海況の悪化等の理由により，研究の一部について進捗が著しく遅れることとなった．前年度に発生したGNSS波浪計での事故により，ブイ作業を委託している業者の作業が一時停止を余儀なくされたため，ブイ上の機器，特に電源部の作業が長期にわたって停止せざるを得なくなった．また，夏ころに発生した黒潮大蛇行の影響と思われる海流の変化により，船舶のブイへの接岸が困難な状況が続き，ブイ作業のうち特に慎重を要する海底地殻変動観測用トランスデューサの設置に大幅な遅延が生じた．また，GNSS観測においてはブイからのデータの衛星通信がしばしばとだえるなどの問題が生じたが，各種の機器の交換や調整等により年度末にかけ次第に状況は改善している．

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1版

９．今後の研究の推進方策

本年度は研究の進捗が進まない面があったが，多くの問題の発生とその克服を経験したことから，次年度においては順調にデータ取得と解析が進むものと期待している．プロジェクトの基本的な手法やその手順等に変更を要することはないものの，夏場の台風シーズンを考えると，海底地殻変動計測用のトランスデューサは大きな波浪が予想される悪天候下での運用は危険とも考えられるので，ブイの側面に取り付けられている海底地殻変動観測観測用トランスデューサは台風シーズンを除いた期間の運用とすることを考えている．一方，GNSS観測による海面高変化の測定は，比較的安定して実施できるものと考えられるが，引き続き，測位の高精度化，衛星通信の安定度の向上などに取り組んでいくこととする．また，これらが順調に行えれば，当初より計画している気象・電離層研究への応用研究や，次世代通信衛星の仕様策定への取り組みなども実施できると考えている．

１０．研究発表（平成２９年度の研究成果）

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著論文　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, N. Koshikawa	**４．巻** -
２．論文標題 GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System	**５．発行年** 2017年
３．雑誌名 Proc. Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco	**６．最初と最後の頁** 777-782
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	**査読の有無** 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	**国際共著** －

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　1件／うち国際学会　4件）

１．発表者名 T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki and N. Koshikawa
２．発表標題 GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system
３．学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017（国際学会）
４．発表年 2017年

１．発表者名 T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki and N. Koshikawa
２．発表標題 GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System
３．学会等名 International Ocean and Polar Engineering Conference（国際学会）
４．発表年 2017年

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

１．発表者名 T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki and N. Koshikawa
２．発表標題 GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System
３．学会等名 IAG-IASPEI 2017（国際学会）
４．発表年 2017年

１．発表者名 加藤照之・寺田幸博・田所敬一・衣笠菜月・二村彰・多田光男・小司禎教・瀬古弘・石井守・津川卓也・西岡未知・豊嶋守生・山本伸一・滝沢賢一・越川尚清
２．発表標題 新たな海洋総合防災GNSSブイアレイの開発
３．学会等名 日本測地学会第１２８回講演会
４．発表年 2017年

１．発表者名 T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki and N. Koshikawa
２．発表標題 Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System
３．学会等名 Twelfth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite System（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2017年

〔図書〕　計0件

１１．研究成果による産業財産権の出願・取得状況

計0件（うち出願0件／うち取得0件）

１２．科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

１３．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

―

【研究代表者・所属研究機関控】

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1版

１４．備考

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続計測への挑戦
http://www.tsunamigps.com/

[参考資料42-5]　**日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。**

1版

様　式　C－6

平成２９年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（収支決算報告書）

平成３０年　４月２３日

独立行政法人日本学術振興会理事長　殿

機関番号	１２６０１

所属研究機関名称		東京大学
研究代表者	部局	地震研究所
	職	教授
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)

２．課題番号　１６Ｈ０６３１０

３．研究課題名

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．交付を受けた補助金　（円）

合計	46,670,000
直接経費	35,900,000
間接経費	10,770,000

５．研究期間　平成２８年度～平成３２年度

６．領域番号・区分　－

７．費目別収支決算表　（円）

	合計	直接経費					間接経費
		計	物品費	旅費	人件費・謝金	その他	
実支出額の使用内訳	46,670,000	35,900,000	16,199,453	1,325,408	4,209,593	14,165,546	10,770,000
交付申請書に記載の補助金の使用内訳	46,670,000	35,900,000	19,472,000	2,150,000	4,500,000	9,778,000	10,770,000

備考	

８．主要な物品明細書（１品又は１組若しくは１式の価格が５０万円以上のもの）

品名	仕様（型・性能等）	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関
音響測距海上局	NAA-190　海洋電子製	1	2,592,000	2,592,000	名古屋大学
音響測距海底局	NAB-190　海洋電子製	3	3,628,800	10,886,400	名古屋大学
練習船「弓削丸」トランスデューサーポール回転軸・軸受け	特注	1	744,336	744,336	弓削商船高等専門学校

【研究代表者・所属研究機関控】

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1版

9．補助事業者

区分	氏名 （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	直接経費（円）		間接経費の譲渡額（円）	備考
			交付申請書等に記載の補助金額	実支出額		
研究代表者	加藤　照之 （80134633）	東京大学・地震研究所・教授 （12601）	8,660,000	8,660,000	2,598,000	
研究分担者	寺田　幸博 （30442479）	高知工業高等専門学校・　・客員教授 （56401）	750,000	750,000	225,000	
研究分担者	田所　敬一 （70324390）	名古屋大学・環境学研究科・准教授 （13901）	24,000,000	24,000,000	7,200,000	
研究分担者	二村　彰 （90332080）	弓削商船高等専門学校・商船学科・准教授 （56302）	2,490,000	2,490,000	747,000	
	合計（小計）	4 名	35,900,000	35,900,000	10,770,000	

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

【研究代表者・所属研究機関控】

2版

様　式　Ｃ－７－１

平成３０年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（研究実績報告書）

機関番号	８２７１６

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所
研究代表者	部局	その他部局等
	職	所長
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)　　２．課題番号　16H06310

３．研究課題名　海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．研究期間　平成２８年度～令和２年度　　５．領域番号・区分　－

６．研究実績の概要

本研究は下記に示す３つの課題と全体活動から構成されており、それぞれについて本年度の進捗状況を記載する。
（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）前年度に引き続き商用衛星によるデータの通信を行った。しかしながら、前年度からの課題の電力不足が解決せず、追加の太陽電池や蓄電池などを購入した。その後も連続観測データは十分には取れていないが、課題を克服しながら2018年度末には昼間の時間帯は連続観測データが取れるようになっている。
（海底地殻変動連続観測への応用）5月末から6月はじめにかけて弓削丸による並行観測実験を行った。この実験で得たデータも含めた解析により、海底局アレイの形状を±2㎝で決定することができた。また、前年度と今年度を合わせ実質58日間にわたってブイ上からの連続音響測距試験を実施した。この試験の結果、音響信号の送受信は継続して実施可能であり、前年度までに開発していた自動的な音響データ処理システムが順調に稼働しており、音響信号に含まれる反射波の影響を除去することができ、全体の99.5%の測距信号に対して直達波の到着時刻を正しく決定できることを確認した。
（気象学・電離層研究への応用）連携研究者によってGNSSブイで取得されたデータを日本列島における降雨予測の向上にどれだけ寄与できるかとの観測及びシミュレーションからのアプローチが行われ、その一部について成果が印刷・公表されている。電離層研究においても、GNSSブイで取得されたデータが地上で取得されたデータと比較して十分活用に耐える精度が得られていることが検証された。
（全体）関連研究者が一堂に会して進捗状況の報告を行ったほか、国際学会・国内学会における成果報告、和文・英文による論文発表が行われている。また、Webを通じた海面高データのリアルタイム表示や科研費研究の活動の紹介が行われている。

７．キーワード

津波　海底地殻変動　GNSSブイ　防災

８．現在までの進捗状況

区分　(3) やや遅れている。

理由

ブイ上の電力不足が引き続き解決されていない。設計上は十分なはずであるが、太陽電池からの蓄電池への充電が不足気味である。特に冬期は充電不足が顕著になっている。このため、太陽電池を一枚増やす、蓄電池の予備を購入し適時交換する、などの対応を取っており、年度末にはかなりの改善を見た。次年度にはかなりのパーフォーマンスの改善が図られると期待している。また，前年度に発生した黒潮大蛇行の影響が続いており、ブイ周辺では強い海流によって渡船やブイへの乗り移りが困難な状況がしばしば発生し、作業効率がはなはだしく低下している。海況の好転が望まれる。

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

９．今後の研究の推進方策

前年度までにあらわになったさまざまな問題点を克服して、精度のよい海面変動計測を継続実施できることを確認するほか、下記の各課題に取り組む。
（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）（１）洋上ブイで実測した揺動特性データから電波伝搬の時間変動を計算機を用いてシミュレーションし、年間時間率において99%以上の確率で要件を満たす通信システムを設計する。（２）将来の展開として日本が打ち上げた準天頂衛星「みちびき」を用いた精密暦配信システムの適用可能性を検討するために、「みちびき」とL6波の受信可能な受信システムを購入し、基礎的な実験を行う。
（海底地殻変動連続観測への応用）（１）連続的な海底地殻変動の観測実験を開始する。数か月程度以上の連続観測を試み、観測期間中に発生した課題の抽出とその解決方法を明らかにする。（２）ブイ上からの音響測位と並行して船舶からの音響測距とCTDプロファイル観測も実施し、従来法による海底測位との精度比較を行うとともに高精度化を図る。
（気象学・電離層研究への応用）（１）GNSSデータから可降水量を抽出し、ブイで取得した可降水量データを陸上データと混合してデータ同化を行い、気象予報精度の向上へのインパクトを検証する。（２）GNSSデータからTECの値を抽出し、全球モデルへ入力することで、海上TEC情報がどの程度モデル精度の向上に寄与するかの検証を行う。
（全体）（１）参加研究者による打ち合わせを年一回実施し、実験計画の調整等を行う。（２）研究成果について国内外の学会等で発表を行うと共に論文発表を行う。（３）Webを逐次更新して成果を社会に還元する。

１０．研究発表（平成３０年度の研究成果）

〔雑誌論文〕　計2件（うち査読付論文　1件／うち国際共著論文　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 加藤照之・寺田幸博	４．巻 15
２．論文標題 GNSSを用いた総合防災ブイの開発	５．発行年 2018年
３．雑誌名 地質工学	６．最初と最後の頁 33-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 T. Kato, Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, H. Seko, T. Iwasaki, and N. Koshikawa	４．巻 13
２．論文標題 Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System	５．発行年 2018年
３．雑誌名 Journal of Disaster Research	６．最初と最後の頁 460-471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2018.p0460	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計9件（うち招待講演　2件／うち国際学会　4件）

１．発表者名 Shoji Y., Tsuda T., Kato T. ,Terada Y., Yabuki M.
２．発表標題 Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction
３．学会等名 European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2019年

1．発表者名
Yoshinori Shoji, Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Toshitaka Tsuda, Masanori Yabuki

2．発表標題
Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement

3．学会等名
Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS) XIII（招待講演）（国際学会）

4．発表年
2019年

1．発表者名
Natsuki Kinugasa, Keiichi Tadokoro, Akira Futamura, Yukihiro Terada, and Teruyuki Kato

2．発表標題
Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy

3．学会等名
AGU Fall Meeting 2018（国際学会）

4．発表年
2018年

1．発表者名
Keiichi Tadokoro, Natsuki Kinugasa, Teruyuki Kato and Yukihiro Terada

2．発表標題
Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement

3．学会等名
AGU Fall Meeting 2018（国際学会）

4．発表年
2018年

1．発表者名
瀬古弘，小泉耕，小司禎教，加藤照之

2．発表標題
船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験（その１）

3．学会等名
気象学会2019年春季大会

4．発表年
2019年

1．発表者名
衣笠菜月，田所敬一,加藤照之，寺田幸博

2．発表標題
ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発

3．学会等名
測地学会第130回講演会

4．発表年
2018年

1．発表者名
田所敬一，衣笠菜月，加藤照之，寺田幸博，松廣健二郎

2．発表標題
係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験

3．学会等名
測地学会第130回講演会

4．発表年
2018年

1．発表者名
衣笠菜月，田所敬一，稲垣駿，寺田幸博，二村彰，加藤照之

2．発表標題
海洋GNSSブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発

3．学会等名
日本地球惑星科学連合2018年大会

4．発表年
2018年

1．発表者名
加藤照之

2．発表標題
GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望

3．学会等名
日本地球惑星科学連合2018年大会

4．発表年
2018年

〔図書〕　計0件

１１．研究成果による産業財産権の出願・取得状況

計0件（うち出願0件／うち取得0件）

１２．科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

１３．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

―

１４．備考

―

［参考資料42-7］ **日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。**

2版

様　式　C－6

平成３０年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（収支決算報告書）

令和元年　5月２３日

独立行政法人日本学術振興会理事長　殿

機関番号	8 2 7 1 6

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所
研究代表者	部局	その他部局等
	職	所長
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)

２．課題番号　１６Ｈ０６３１０

３．研究課題名

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．交付を受けた補助金　（円）

合計	26,260,000
直接経費	20,200,000
間接経費	6,060,000

５．研究期間　平成２８年度～　令和２年度

６．領域番号・区分　－

７．費目別収支決算表　（円）

	合計	直接経費					間接経費
		計	物品費	旅費	人件費・謝金	その他	
実支出額の使用内訳	26,260,000	20,200,000	3,264,016	2,783,335	3,892,962	10,259,687	6,060,000
交付申請書に記載の補助金の使用内訳	26,260,000	20,200,000	2,024,000	2,740,000	4,500,000	10,936,000	6,060,000

備考	

８．主要な物品明細書（１品又は１組若しくは１式の価格が５０万円以上のもの）

品名	仕様（型・性能等）	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関
免税軽油	弓削丸燃料（高知沖実験航海用）	1	742,810	742,810	弓削商船高専
蓄電池	制御弁式据置鉛蓄電池	12	68,234	818,812	温泉地学研究所

【研究代表者・所属研究機関控】

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

2版

9．補助事業者

区分	氏名 （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	直接経費（円）		間接経費の譲渡額（円）	備考
			交付申請書等に記載の補助金額	実支出額		
研究代表者	加藤　照之 （80134633）	神奈川県温泉地学研究所・その他部局等・所長 （82716）	11,810,000	11,810,000	3,543,000	
研究分担者	寺田　幸博 （30442479）	高知工業高等専門学校・その他部局等・客員教授 （56401）	840,000	840,000	252,000	
研究分担者	田所　敬一 （70324390）	名古屋大学・環境学研究科・准教授 （13901）	6,000,000	6,000,000	1,800,000	
研究分担者	二村　彰 （90332080）	弓削商船高等専門学校・商船学科・准教授 （56302）	1,550,000	1,550,000	465,000	
	合計（小計）	4 名	20,200,000	20,200,000	6,060,000	

様　式　Ｃ－７－１

令和元年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（研究実績報告書）

機関番号	８２７１６

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所
研究代表者	部局	その他部局等
	職	所長
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)　　２．課題番号　16H06310

３．研究課題名　海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．研究期間　平成２８年度～令和２年度　　５．領域番号・区分　－

６．研究実績の概要

本研究が構成する３課題と全体活動の各々について進捗状況を記載する。
（衛星通信実験による海面高の長期高精度連続観測の試み）発電能力向上のため電源部の再設計を行い、太陽光パネル及び蓄電池の増強作業を12月と3月に実施した。「みちびき」とMADOCAを用いた精密単独測位の精度向上を検証するため、対応可能受信機を弓削丸に搭載し、10月に実験を実施した。その結果新たな手法による精度は、水平方向 10 cm 以下、垂直方向 20~30 cm 程度となり、津波計に有効利用できることを確認した。また，GNSSブイ・衛星間通信方式について、構築したシミュレーションを用いて将来想定されるブイの設置密度及びデータレートにもとづく性能評価を継続して行った。
（海底地殻変動連続観測への応用）6月に弓削丸による観測実験を実施した。海底測位の誤差因である音速水平構造の不均質性を考慮した新モデルを適用し、海底局位置解析を行った結果、1.5cm の精度で海底局アレイ形状を決定することができた。また、ブイの観測データを用いた解析の精度について数値実験を行った結果、海底地殻変動をcm精度で検出できる条件を満たしていることを確認した。ブイ観測システムによる音響測距試験を6月から12月まで実施した。途中で発電不足による停電が起こったが、約半年間に亘って音響測距とデータ処理システムの連続的な稼働を実現した。音響測距試験は上記の電源部増強作業が完了した3月12日から再開している。測位機能向上を図るため位置・方位出力機能を備えたGNSSボードを購入した。
（気象学・電離層研究への応用）連携研究者による前年度までの観測及びデータ同化実験等に基づく成果を学会等で発表した。
（全体）6月・9月に研究者会議を開催し本年度の計画等について打ち合わせを行ったほか、国際・国内学会において成果発表、英文による論文報告を行った。

７．キーワード

津波　海底地殻変動　GNSSブイ　防災

８．現在までの進捗状況

区分　(4) 遅れている。

理由
前年度までに電力不足が解決して海底地殻変動観測等が順調にいくはずであったが，電力不足は解決できず，電力需給システムの抜本的な計画変更を行い，新しいシステムを構築した．このため，データのリアルタイム伝送の計画が約１年後ろ倒しとなり，計画に遅れをきたした．年度末にはほぼこの修復が完了したため，今年度は遅れをとりもどして計画の主要部分を達成できると考えている．

【研究代表者・所属研究機関控】

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1版

９．今後の研究の推進方策

前年度までに、電力不足の問題を解決できたと考えるが、衛星通信が必ずしも順調には作動していないことから、まず衛星通信の動作改善を検討・対処する。これが順調にいけば，連続した観測データが取得できるので，海面高変化の継続監視のほか，可降水量やTECデータを関連研究者に依頼してそのインパクトの検証を行う．一方，海底地殻変動については、ブイ姿勢の制御のためのGNSSジャイロを前年度末に購入できたことから，これをブイに実装して本格的な海底地殻変動連続観測に挑戦する．以上のデータ及び解析結果を総括し，研究成果をとりまとめて学会等で発表するとともに印刷公表する．

１０．研究発表（令和元年度の研究成果）

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著論文　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, K. Matsuhiro	４．巻 14
２．論文標題 A Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurment of Seafloor Crustal Deformation	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Frontiers in Earth Science	６．最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計9件（うち招待講演　2件／うち国際学会　4件）

１．発表者名 瀬古弘，小泉耕，小司禎教，加藤照之
２．発表標題 船舶やブイで観測したGNSSデータを用いた同化実験
３．学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, T. Kato
２．発表標題 Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean
３．学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
４．発表年 2019年

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1．発表者名 Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, A. Futamura and K. Matsuhiro
2．発表標題 Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements
3．学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 Shoji Y., Tsuda T., Kato T. ,Terada Y., Yabuki M.
2．発表標題 Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction
3．学会等名 European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, Milan, Italy（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, M. Yabuki
2．発表標題 Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning
3．学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 Kato, T.
2．発表標題 Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation
3．学会等名 Multi GNSS Asia 2019（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 Kato, T.
2．発表標題 Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean
3．学会等名 Economic and Social Comission for Asia and the Pacific 2019（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 加藤照之・寺田幸博
2．発表標題 GNSSブイを用いた総合防災システムについて～現状と課題～
3．学会等名 測位航法学会　GPS/GNSSシンポジウム
4．発表年 2019年

1．発表者名 Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, T. Kato
2．発表標題 Observation for seafloor crustal deformation using moored buoy by GNSS-A technique considering the heterogeneity of sound speed in ocean
3．学会等名 AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA（国際学会）
4．発表年 2019年

〔図書〕　計0件

１１．研究成果による産業財産権の出願・取得状況

計0件（うち出願0件／うち取得0件）

１２．科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

１３．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

―

１４．備考

―

[参考資料42-9]　**日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。**

1版

様　式　C－6

令和元 年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）実績報告書（収支決算報告書）

令和２年　５月２５日

独立行政法人日本学術振興会理事長　殿

機関番号	8 2 7 1 6

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所
研究代表者	部局	その他部局等
	職	所長
	氏名	加藤　照之

１．研究種目名　基盤研究(S)

２．課題番号　１６Ｈ０６３１０

３．研究課題名

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

４．交付を受けた補助金　（円）

合計		28,080,000
	直接経費	21,600,000
	間接経費	6,480,000

５．研究期間　平成２８年度～　令和２年度

６．領域番号・区分　－

７．費目別収支決算表　（円）

	合計	直接経費					間接経費
		計	物品費	旅費	人件費・謝金	その他	
実支出額の使用内訳	28,080,000	21,600,000	3,742,907	2,263,148	4,188,342	11,405,603	6,480,000
交付申請書に記載の補助金の使用内訳	28,080,000	21,600,000	4,012,000	3,530,000	4,300,000	9,758,000	6,480,000

備考	

８．主要な物品明細書（１品又は１組若しくは１式の価格が５０万円以上のもの）

品名	仕様（型・性能等）	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関
免税軽油	弓削丸燃料（実験航海用）	1	617,679	617,679	弓削商船高等専門学校
GNSS　OEMボード(共用)	Trimble社製・マルチGNSS受信可能型	1	1,398,000	1,398,000 (1,060,760)	神奈川県温泉地学研究所

【研究代表者・所属研究機関控】

日本学術振興会に紙媒体で提出する必要はありません。

1版

9．補助事業者

区分	氏名 （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	直接経費（円）		間接経費の譲渡額（円）	備考
			交付申請書等に記載の補助金額	実支出額		
研究代表者	加藤　照之 （80134633）	神奈川県温泉地学研究所・その他部局等・所長 （82716）	6,468,000	6,468,000	1,940,400	
研究分担者	寺田　幸博 （30442479）	高知工業高等専門学校・その他部局等・客員教授 （56401）	1,150,000	1,150,000	345,000	
研究分担者	田所　敬一 （70324390）	名古屋大学・環境学研究科・准教授 （13901）	11,892,000	11,892,000	3,567,600	
研究分担者	二村　彰 （90332080）	弓削商船高等専門学校・商船学科・教授 （56302）	2,090,000	2,090,000	627,000	
	合計（小計）	4 名	21,600,000	21,600,000	6,480,000	

【Grant-in-Aid for Scientific Research (S)】

Integrated Disciplines (Complex Systems)

Title of Project : A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements

Teruyuki Kato
(The University of Tokyo, Earthquake Research Institute, Professor)

Research Project Number : 16H06310 Researcher Number : 80134633
Research Area : Tsunami, ocean-bottom crustal movements
Keyword : Tsunami, ocean-bottom crustal movements

【Purpose and Background of the Research】

The research team lead by the Project Leader of this proposal have developed GNSS buoy for monitoring tsunami at coastal area. Given the success of preliminary experiment of precise measurements of sea-surface heights at far offshore, this research plan is proposed, in which we try to conduct operational experiments for high accurate real-time monitoring of sea-surface height measurements at far offshore. In addition, we tackle a new experiment of continuous measurements of ocean-bottom crustal movements using GNSS-acoustic system using the same GNSS buoy. If this experiment is successful, the GNSS buoy system will open a new era of exploring continuous observation of ocean-floor, which will lead to bring us detailed information on inter-plate coupling and its temporal change, process of slow slip events, etc. Moreover, as the GNSS buoy data will be utilized to monitoring troposphere and ionosphere, deployments of GNSS buoy array in the ocean will be a powerful infrastructure for a synthetic disaster mitigation technology.

【Research Methods】

We will rent a fishery buoy off Kochi Prefecture for our experiments. A GNSS system and acoustic transducer, together with apparatus for satellite transmission, will be set on the buoy.

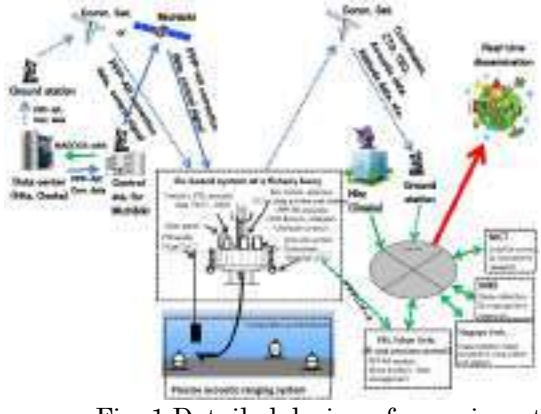


Fig. 1 Detailed design of experiment.

We conduct continuous experiments using satellite communication link. Precise orbits are transmitted from the ground and precise positioning and estimation of ZTD and TEC are conducted on-board of the buoy. Continuous acoustic ranging between buoy and ocean-bottom will also be conducted. Evaluation of data quality will be made as well. Quality of ZTD and TEC data are examined and their impact to the atmospheric and ionospheric researches will be evaluated. Finally, the final plan of GNSS buoy array in outer ocean and the specification for necessary communication satellite will be documented.

【Expected Research Achievements and Scientific Significance】

A new research developments utilizing the GNSS buoy or buoy array will be expected in the following fields; tsunami including sea-waves, ocean-bottom crustal movements – in particular, related to inter-plate coupling and slow slip events -, atmospheric and ionospheric researches. Moreover, the GNSS buoy array, if it is realized in the future, will be a powerful infrastructure for a synthetic disaster mitigation technology related to the field stated above.

【Publications Relevant to the Project】

Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, K. Tadokoro, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, in Proceedings of the IAG Symposium GENAH2014, vol. 145, 2015 (in press)

Kato, T., Global Positioning System: Toward the next dream – from the view point of the Japanese University Consortium for GPS Research (JUNCO) -, 59(3), 87-97, 2013. (in Japanese)

【Term of Project】 FY2016-2020

【Budget Allocation】 141,900 Thousand Yen

【Homepage Address and Other Contact Information】

研究課題名　海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦

東京大学・地震研究所・教授　加藤（かとう）　照之（てるゆき）

研究課題番号：16H06310　研究者番号：80134633
研究分野：津波、地殻変動
キーワード：津波、海底地殻変動

【研究の背景・目的】

研究代表者を中心とする研究グループは GNSS ブイを用いた津波計の開発研究を実施してきたが，沿岸から 100 ㎞以上離れた海域での基礎的な実験が成功したことから，本研究においては GNSS ブイを用いた遠洋での高精度リアルタイム GNSS 津波計の実証実験を行うと共に新たに GNSS―音響システムを用いた海底地殻変動計測実験を実施し，これまで船舶による繰り返し観測となっていた海底地殻変動観測から，連続的な海底地殻変動計測への新たな展開を切り開き，日本列島の海溝沿いに発生するプレート間巨大地震に関して重要なプレート間固着及びスローイベント等の実態の解明に資する基礎技術を確立することを目的とする．さらに，GNSS ブイアレイを太平洋に構築すれば，大気遅延推定や電離層擾乱の研究にも資する総合的な防災技術として展開することが可能となろう．そのために基礎技術を習得することを目的とする．

【研究の方法】

実験場所は高知県の黒潮牧場ブイを借用して実施する．ブイに GNSS システムと音響送受装置及び関連する各種センサーと衛星通信用機材を，海底 3 か所に音響送受波装置を設置し，GNSS 及び音響を用いた計測を行う．データはブイ上で収録するほか，商用衛星を用いた伝送実験も実施する．

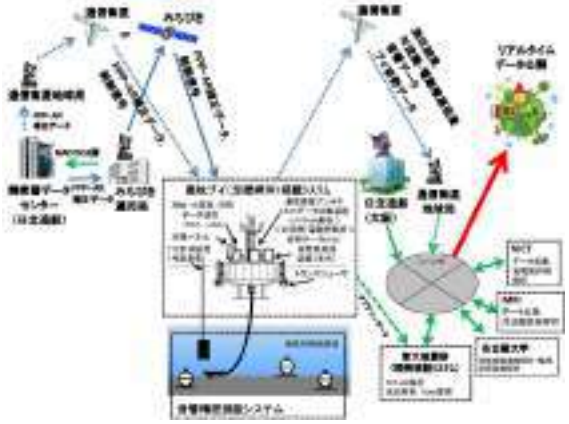


図１　実験全体の詳細図

衛星通信に関しては欠測率の改善を，津波計測に関しては PPP-AR 解析手法の確度向上を図る．海底地殻変動は連続観測における新たな解析手法の開発と得られたデータの精度評価を行い，海底地殻変動が有意に抽出できていることを確認する．ブイデータから得られる可降水量と総電子数は精度評価を行い，海上でのデータ取得の有効性と既存の研究に対するインパクトを検証する．最後に，GNSS ブイアレイ展開の最終形とその実現に必要な衛星通信の仕様を作成する．

【期待される成果と意義】

海洋における津波・波浪の研究が格段に向上すると共に海底地殻変動の連続観測への道が開けることになる．また，将来は気象学・電離層研究など地球科学の基礎・応用研究において格段の進展が期待できると共に，津波の早期検知，海底地殻変動の連続監視，天気予報や豪雨予測の精度向上，電離層擾乱の通報による航空機の安全運航など，日本の防災力向上において実用上の意義は計り知れないと考えられる．

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, K. Tadokoro, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, in Proceedings of the IAG Symposium GENAH2014, vol. 145, 2015 (in press)
・加藤照之，GPS：次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～，測地学会誌，59(3), 87-97, 2013.

【研究期間と研究経費】

平成２８年度－３２年度　141,900 千円

【ホームページ等】