

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20km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り令和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。研究代表者にとって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)	17,800,000	5,340,000	23,140,000
(内, 令和 3 年度への繰越分)	2,369,300	310,040	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	岩崎匡宏	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(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。

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

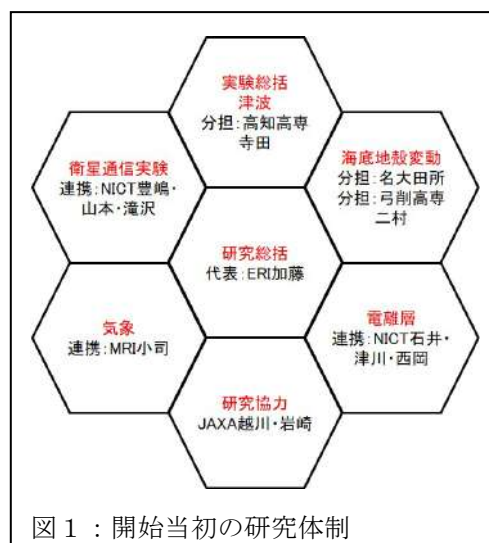


図1：開始当初の研究体制

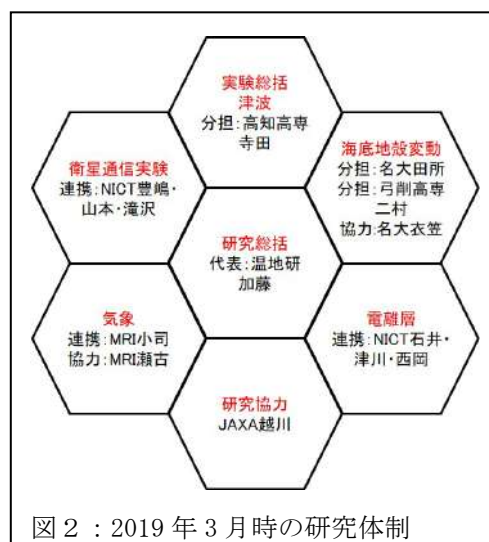


図2：2019年3月時の研究体制

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 km 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 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 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)。

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 (図 1-3)。この津波記録では数値シ

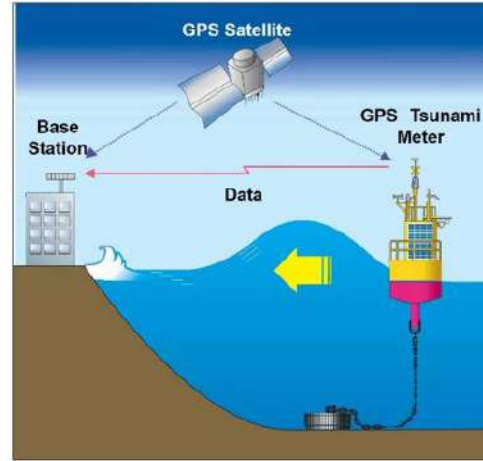


図 1-1 : GNSS ブイの概念図。GPS 衛星からのデータをブイと地上局で受信し、ブイの地上局に対する相対位置を推定する。

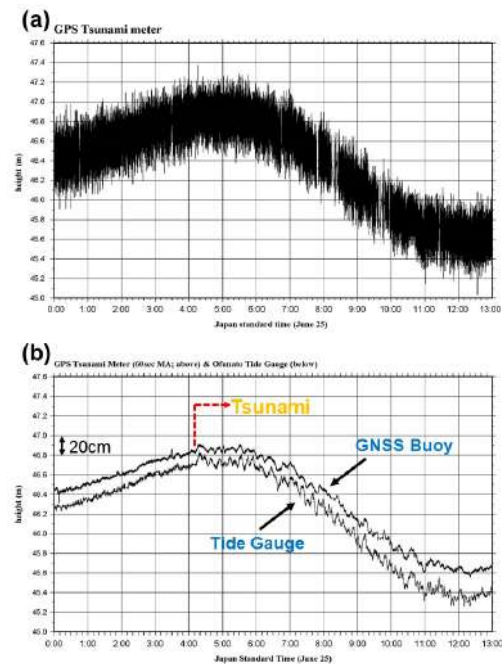


図 1-2 : 大船渡沖実験で得られたはじめての津波記録。(a)一秒サンプリングによる原記録、(b)原記録に 30 秒の移動平均を操作したグラフ (上) と近傍の大船渡検潮所で得られた記録。

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る、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).

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る、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).

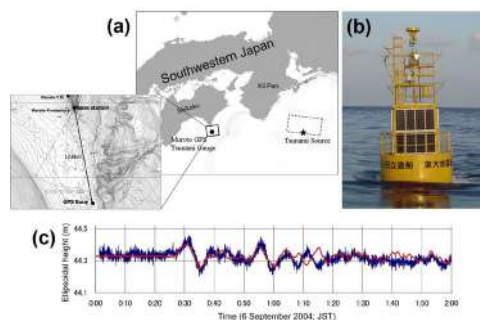


図 1-3 : (a)室戸岬沖に設置されたブイの位置と 2004 年 9 月 5 日紀伊半島沖地震の震源位置, (b)ブイの写真, 及び(c)地震に伴う津波の記録. 赤線は理論波形.

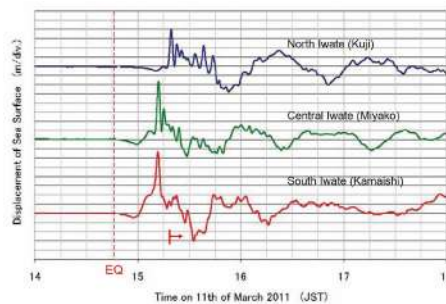


図 1-4 : NOWPHAS の GNSS 波浪計による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の記録例. EQ は発震時, 矢印は津波が海岸に到達したおよその時刻(参考資料 2011-2).

### 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の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)。

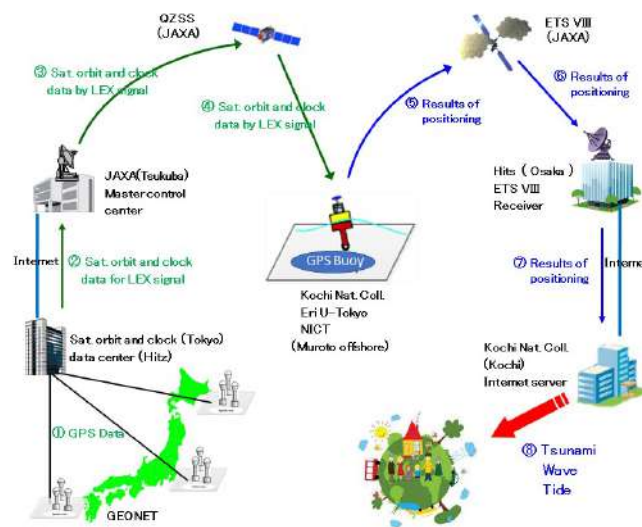


図 1-5 : QZSS (MICHIBIKI) と ETS-VIII の 2 つの衛星を用いた実験のデータの流れ (参考資料 2015-1)。

### 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 km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 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)。

#### 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

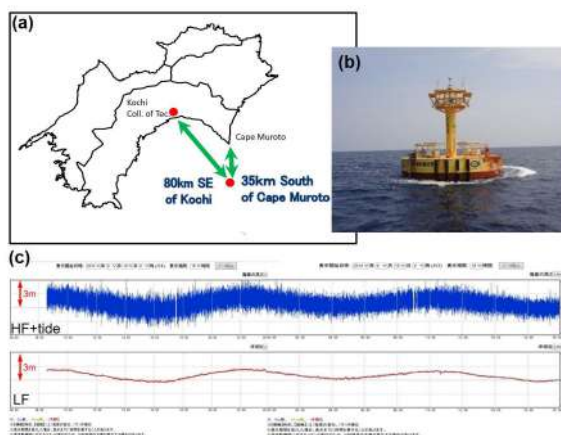


図 1-6 : (a)室戸沖実験のブイ及び地上局(高知高専)の位置, (b)黒潮牧場 No.16 ブイ, (c)実験で得られた記録; (上) 短周期データ, (下) 長周期データ。

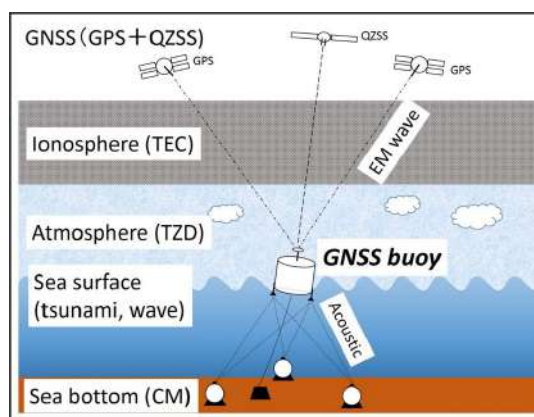


図 1-7 : GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図。

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 km 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

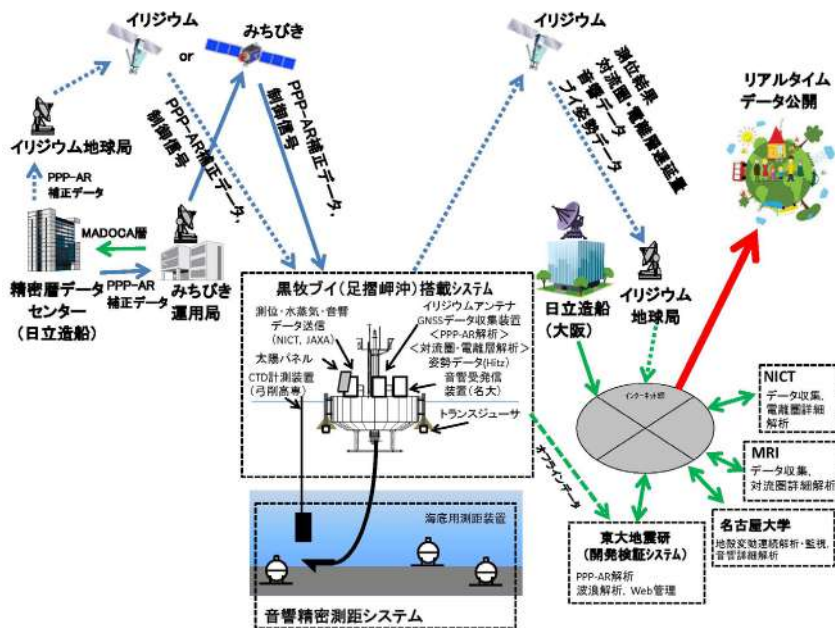


図 1-8：新しく設計した GNSS ブイシステムの概念図。通信衛星はみちびきとイリジウムを想定。

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注した（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

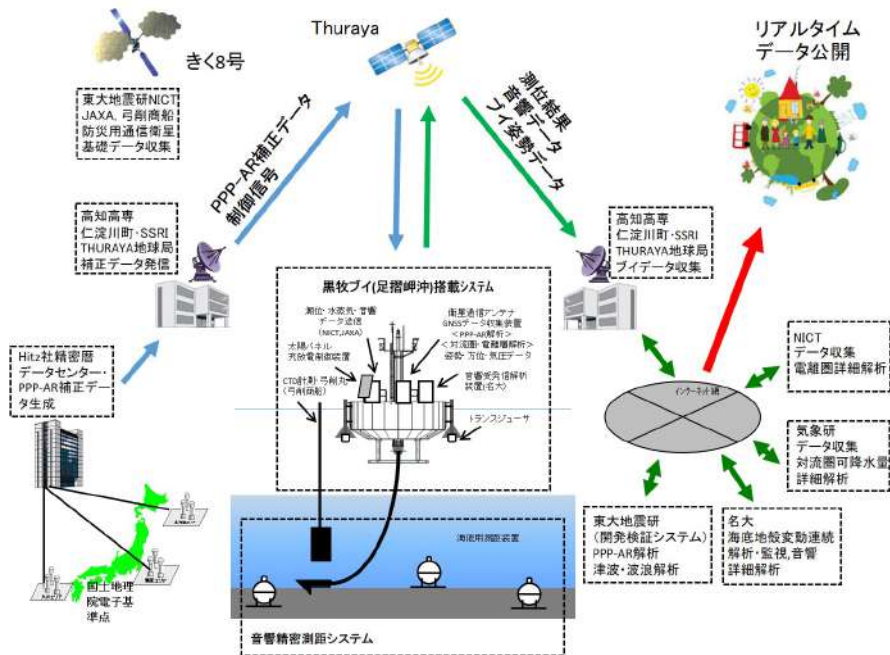


図 2-1：本研究で用いられたシステム。「きく 8 号」は 2016 年 8 月の実験にのみ用いられた。

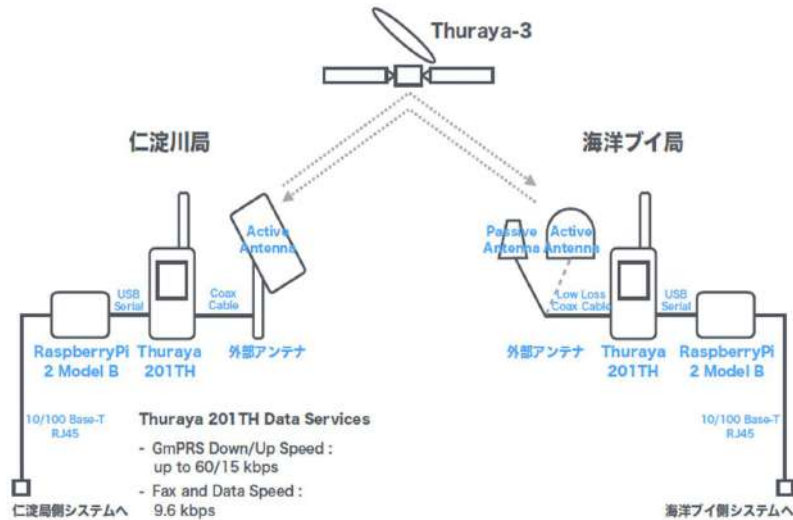


図 2-2: 実験に用いられた衛星通信システム. アンテナは Active アンテナと Passive アンテナを状況に応じて使用した.

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

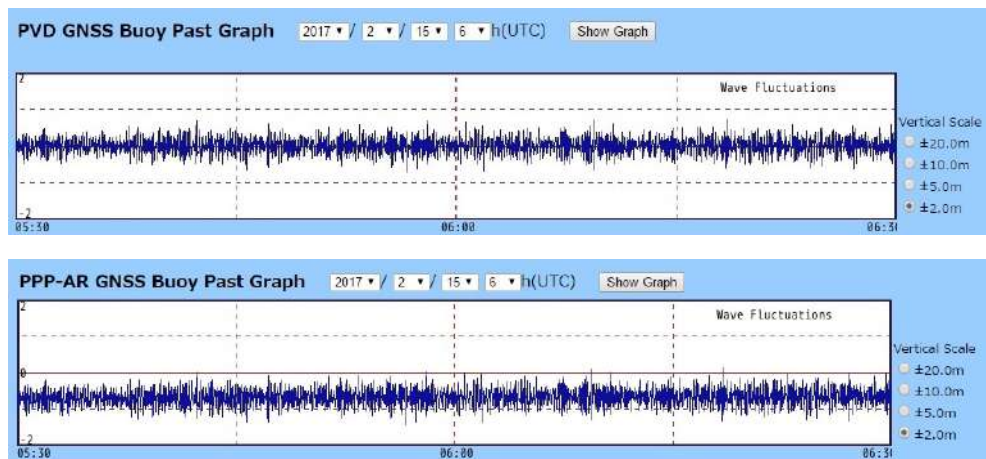


図 2-5：足摺岬沖に設置された GNSS ブイで取得したデータの解析結果の Web 表示。(上) PVD 解析による上下成分，(下) PPP-AR 解析による上下成分。

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。音響測距に必要な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、相互相関係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 ヲ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 $\pm 3.6$  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。

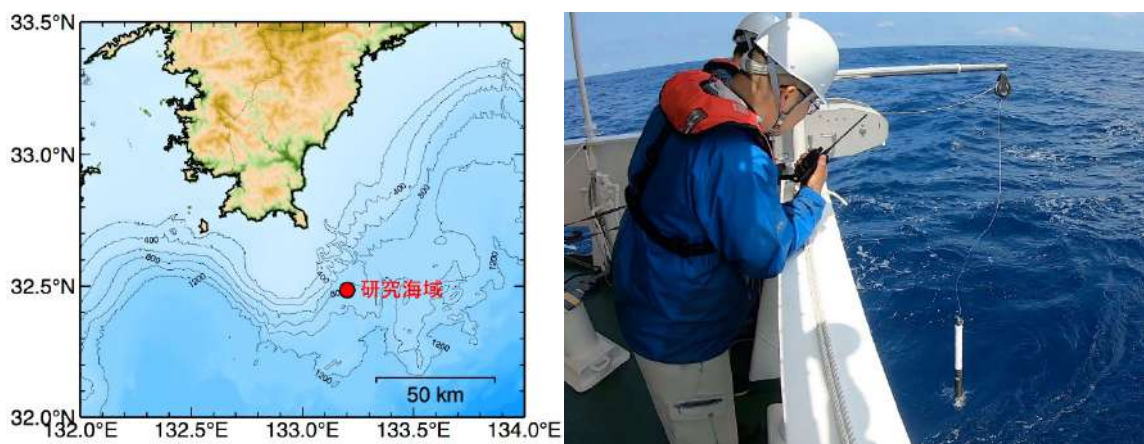


図 2-6 : UCTD 観測の実験海域（左）とその様子（右）

### 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

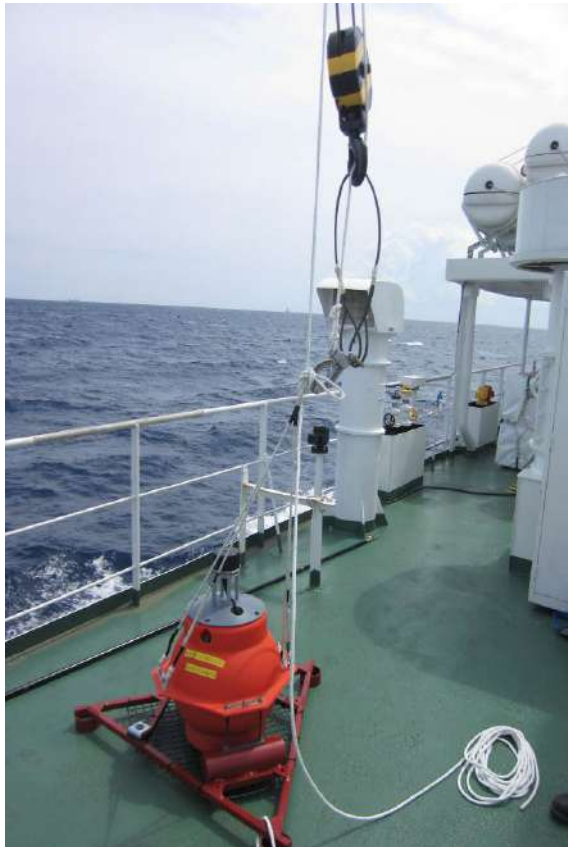


図2-7：設置直前の海底局。弓削丸の甲板上にて。

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・超高压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

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

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

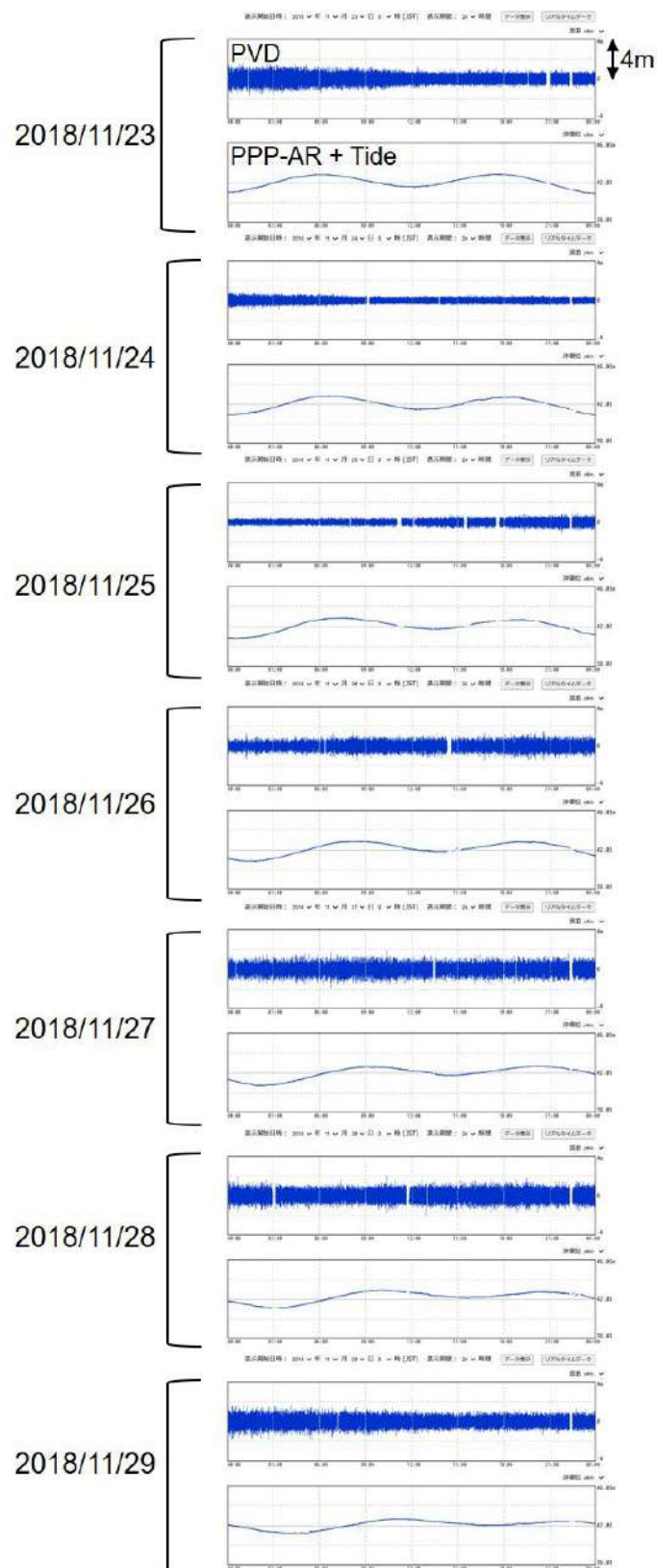


図 2-9 : 2018 年 11 月 23 日～29 日の Web 表示データ。各日とも上段が PVD 解析による波浪，下段が PPP-AR 解析にローパスフィルターをかけて短周期変動を除去した沖潮位を示す。

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

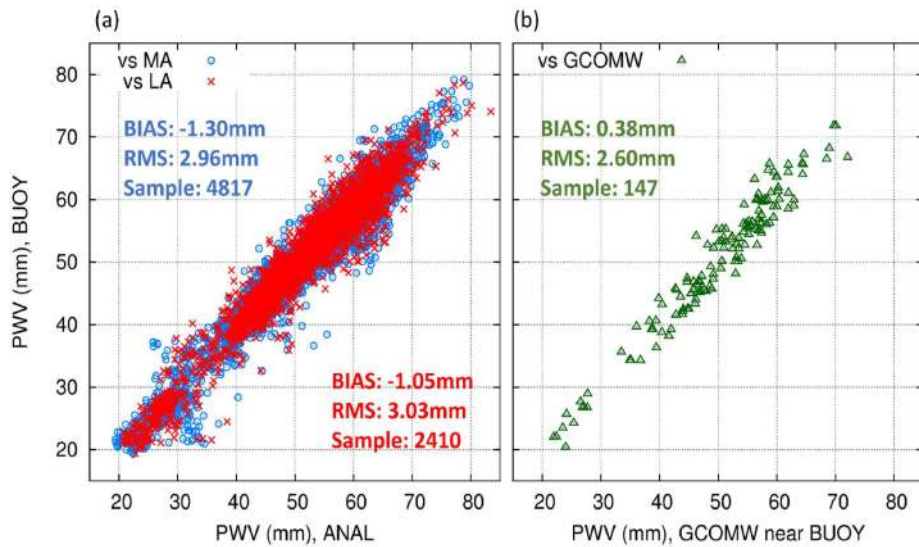


図 2-10：ブイで得られた可降水量推定値（縦軸）と(a)メソスケール (MA) とローカスケール (LA) 客観解析データ，及び(b)GCOM 衛星のラジオメータデータを横軸にプロットしたもの（小司氏提供）。

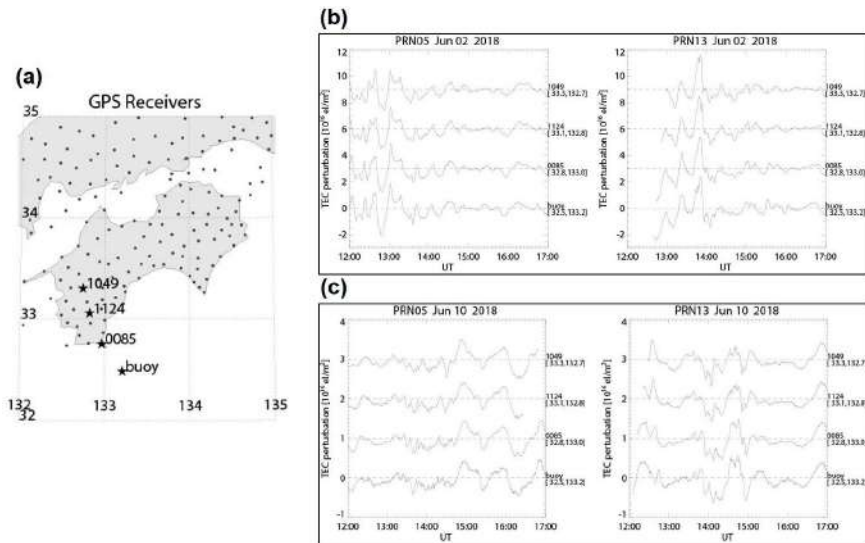


図 2-11：ブイで取得された電離層の全電子数 (TEC) と近傍の GEONET 観測点における TEC の比較。PRN は衛星番号を示す。（津川氏提供）

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日について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MADCOCA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ポートしないことが原因であるとの結論に至り、自動リポ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。

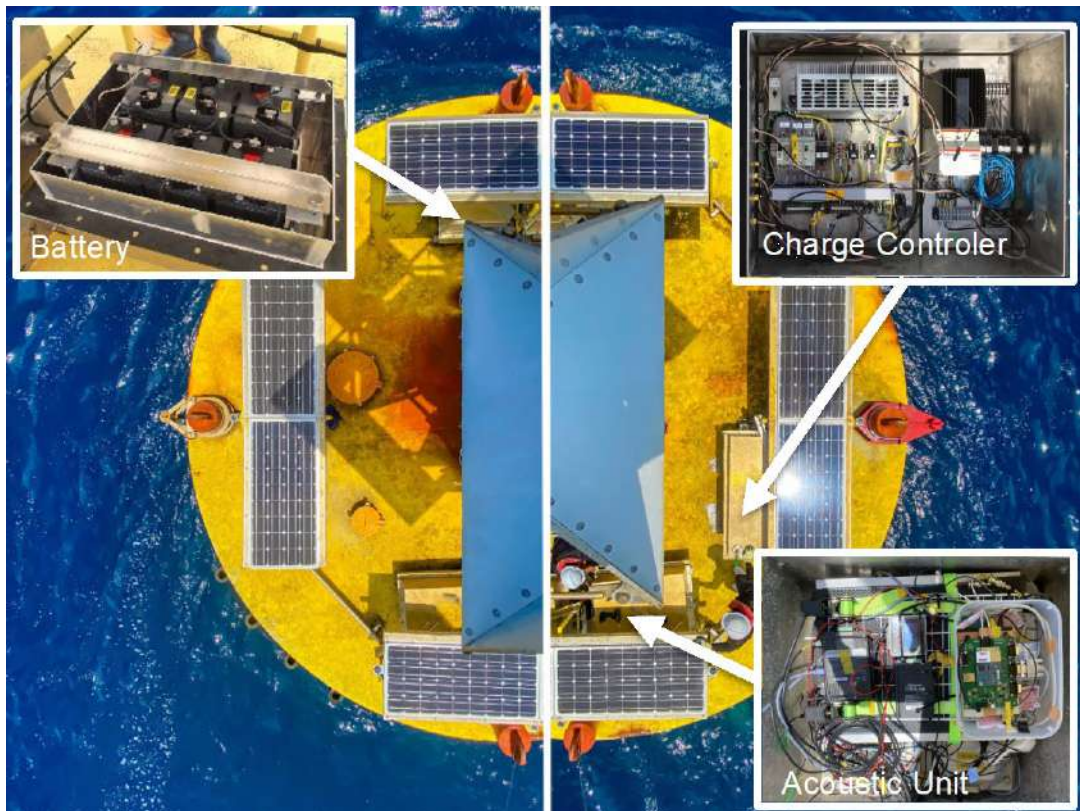


図 2-12：太陽光パネル等増設後のブイの様子。マストの上から撮影。防水箱の内部も併せて示

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12V系と24V系の電源を24V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12V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イルスの蔓延により研究が停滞することとなり、経費の

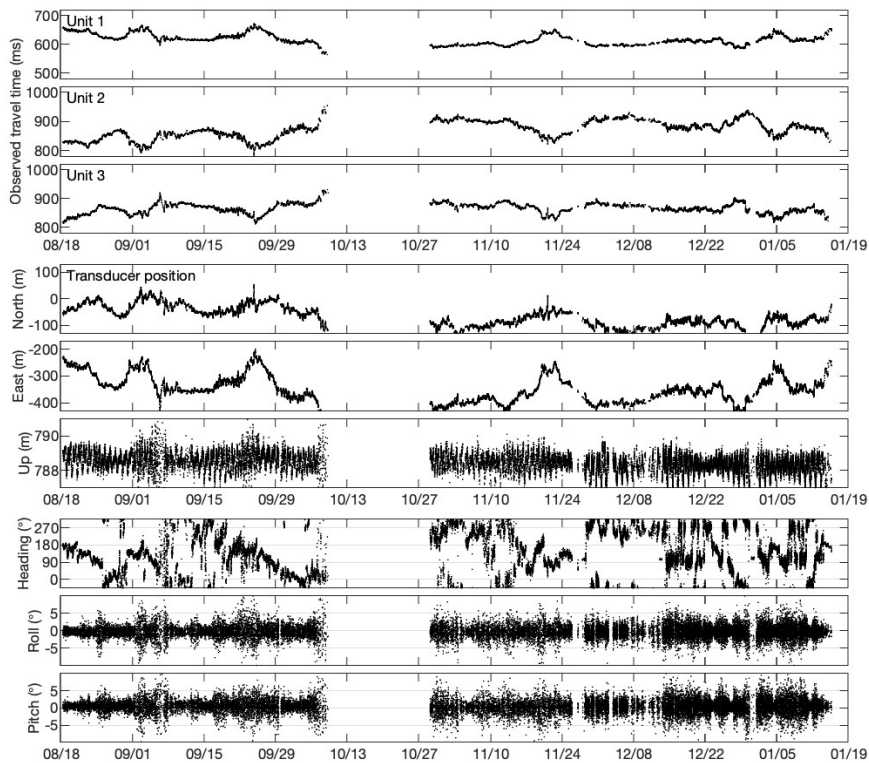


図 2-13 : (上段) ブイー海底局 (Unit 1-3) 間の走時, (中段) ブイに設置されたトランスデューサの位置, (下段) トランスデューサの姿勢 (方位, 回転及び傾斜)。

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イ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り越すこととし、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

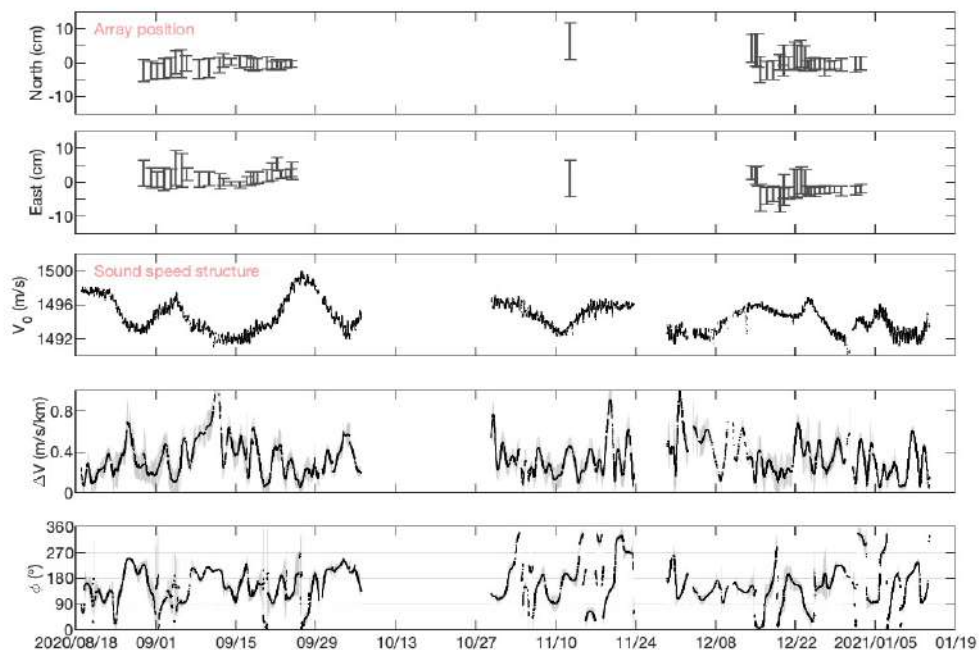


図 2-14 : (上段) 海底局アレイ位置 (NS 及び EW), (下段) 推定された音速構造 :  $V_0$  音速の平均値,  $\Delta V$  と  $\phi$  : 音速の傾斜。

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 $\Delta V$ と $\phi$ 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。

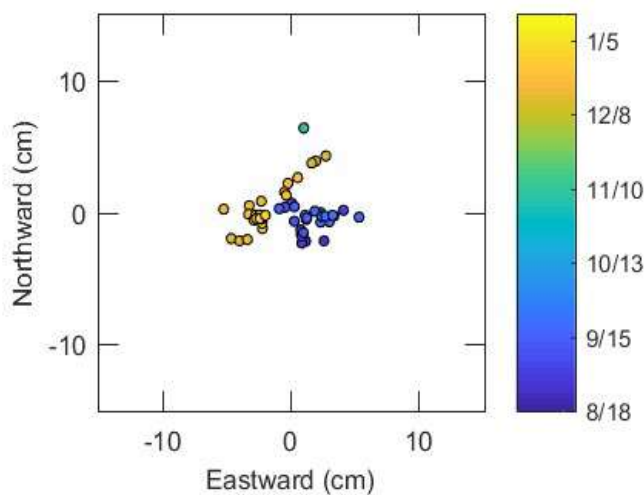


図2-15：推定した2020年8月18日～2021年1月25日間の海底局の位置。28日毎の移動平均値を示す。

### 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）。

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。

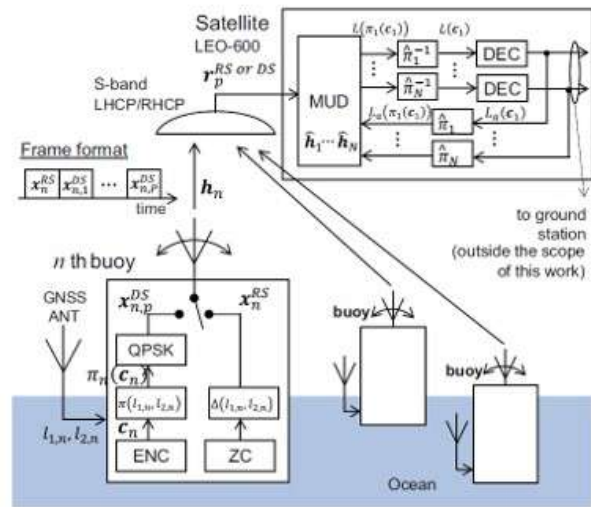


図 2-16：複数ブイから衛星への信号の新しい識別方式。端末位置情報をもとに複素直交行列を用いて端末ごとに異なるインターリーブを選択できるようにすることでデータ分離を行う。

### 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

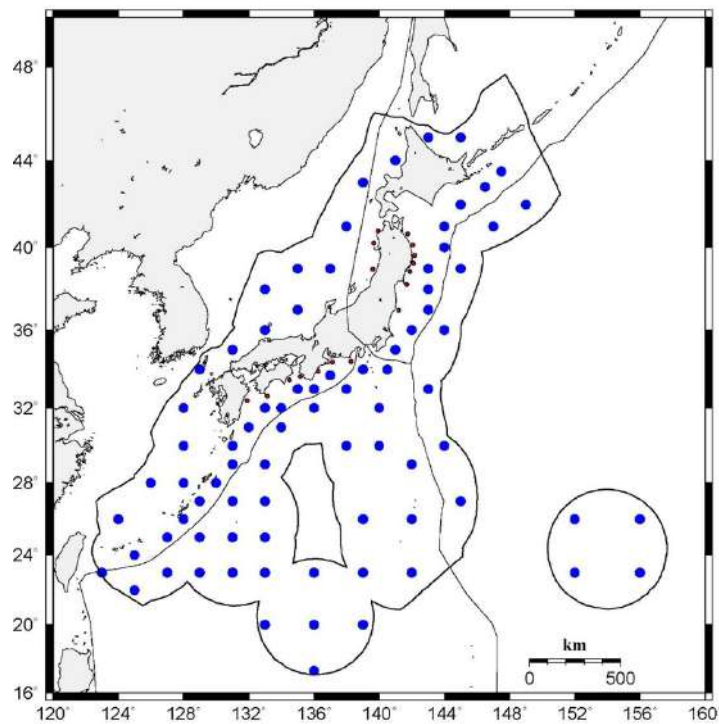


図 3-1 : 「海の GEONET」構想。丸印は GNSS ブイ観測点。

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 プ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プイアレイができると、これらのプ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プ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」の海上プイ 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 プ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 プ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 adjacent 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. Matsuhira, A Marine-Buoy Mounted System for Continuous and Real-Time Measurement 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, Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto, 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, 小村健太郎, 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 Matsuhira, 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>