

## 第 4 部 參考資料



#### 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—大船渡市沖実用化実験—, 信学技報, 2001-04, 45-52.

[平成 14(2002)年]

- 2002-1) 加藤照之, GPS 津波計—宇宙技術を用いた津波防災システム—, 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「なみふる」, 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にいくつかの条件が備わっていかなくてはならない。

1) 最低数cm程度の波高で長周期の波高異常を検出すること、

2) リアルタイムに波高を計測し、異常を自動的に検出する伝達システムを備えていること、

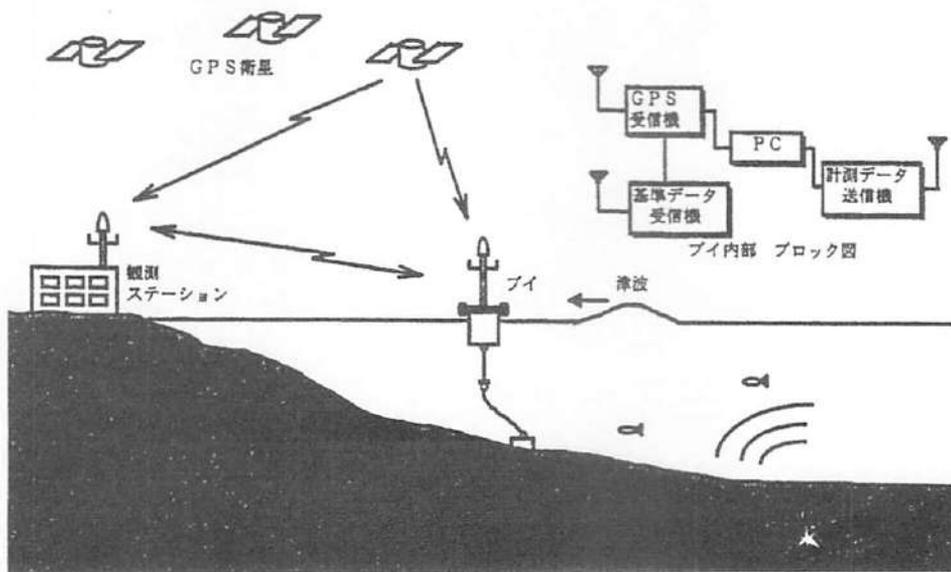
3) 陸から最低数km以上離れた場所に設置でき、津波の襲来を事前に察知できること、

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正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用に使われる。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造物の変形調査、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；

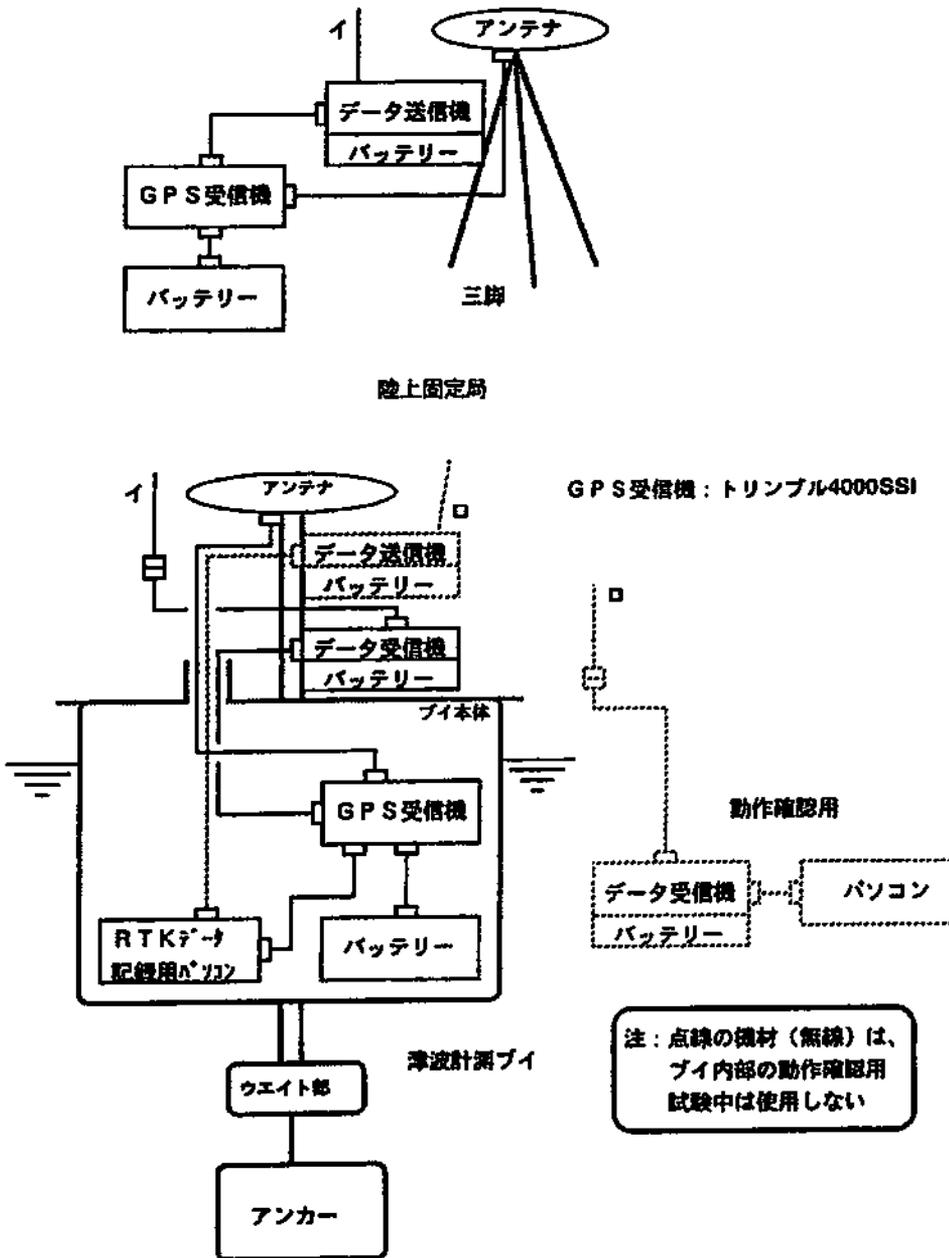
1) ブイ系：海上にブイを敷設しその上にGPS受信機、無線送信機及び電源等を搭載することになる。このため、ブイは長期観測に耐えうるもの

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

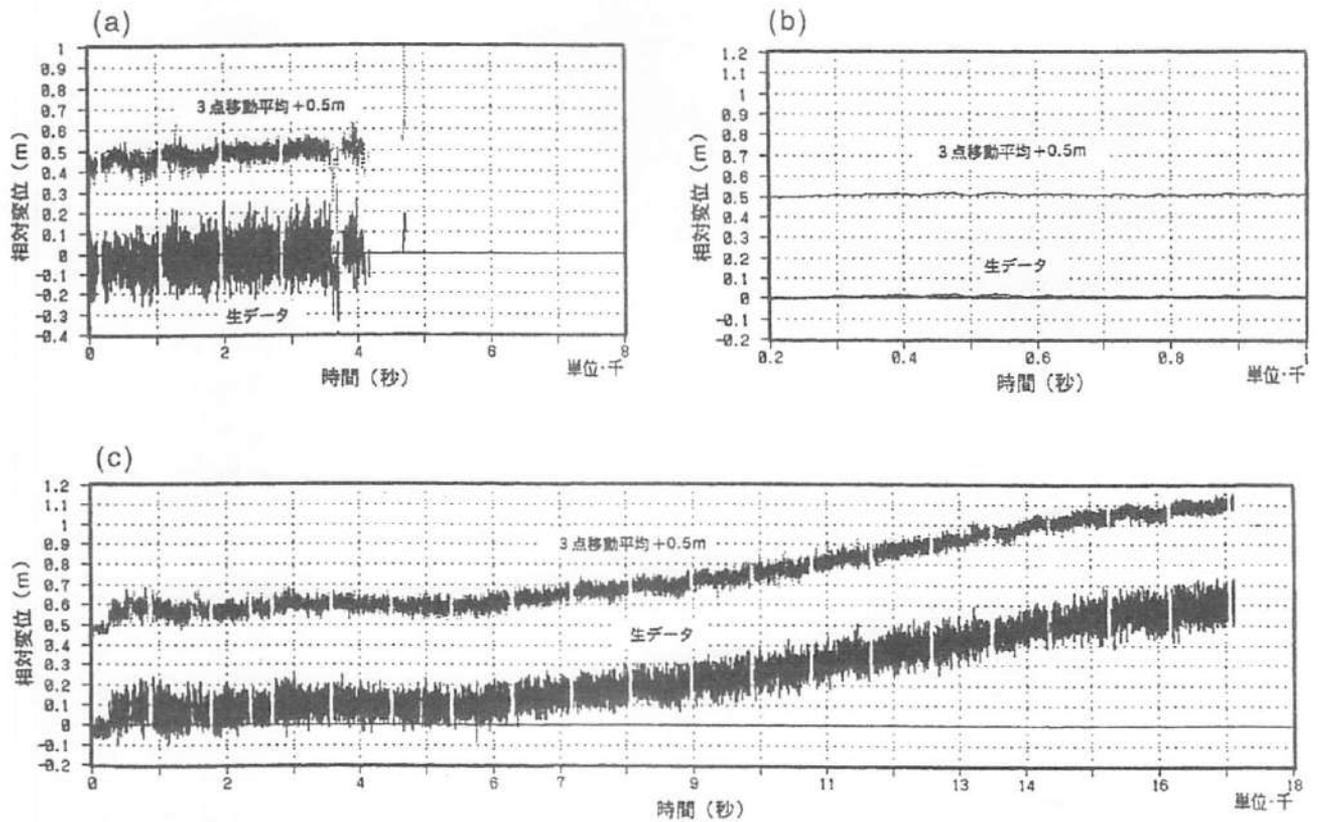


図3 垂直方向の変位。(a) 1月22日, (b) 1月23日; 陸上に静置, (c) 1月23日。

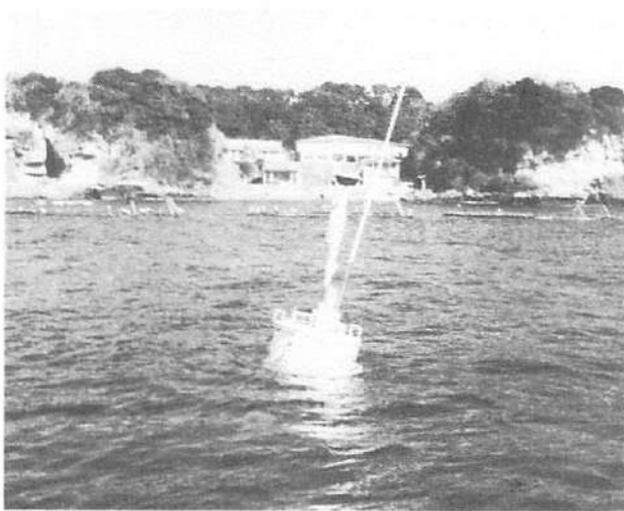


写真1 小網代湾におけるGPS津波計の実験風景。

(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プル社製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。

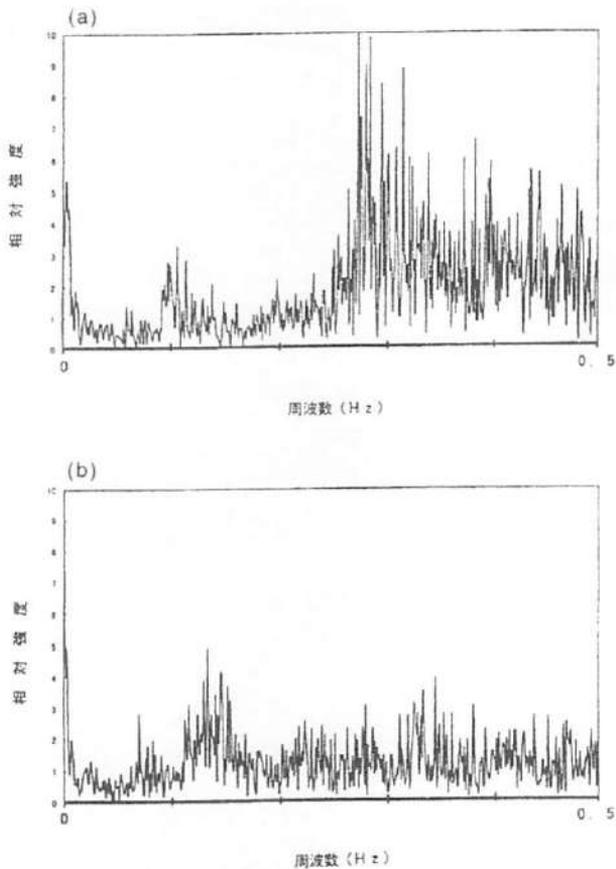


図4 FFTによるスペクトル。(a) 1月22日, (b) 1月23日。

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) とともに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従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。



**Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver**  
—PVD (Point precise Variance Detection) Method—

Hiroshi Isshiki<sup>1</sup>, Atsushi Tsuchiya<sup>2</sup>, Teruyuki Kato<sup>3</sup>, Yukihiro Terada<sup>1</sup>,  
Hideshi Kakimoto<sup>1</sup>, Masao Kinoshita<sup>1</sup>, Masayuki Kanzaki<sup>4</sup> and Takayuki Tanno<sup>4</sup>

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<sup>1</sup>・土屋 淳<sup>2</sup>・加藤 照之<sup>3</sup>・寺田 幸博<sup>1</sup>・柿本 英司<sup>1</sup>  
木下 正生<sup>1</sup>・神崎 政之<sup>4</sup>・丹野 貴之<sup>4</sup>

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。洋上プ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 (Tsuji *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 observation 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

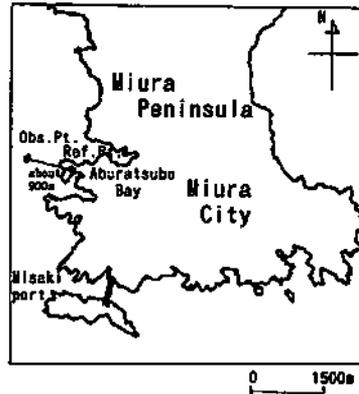


Fig. 1 Location of the reference and the observation receivers.

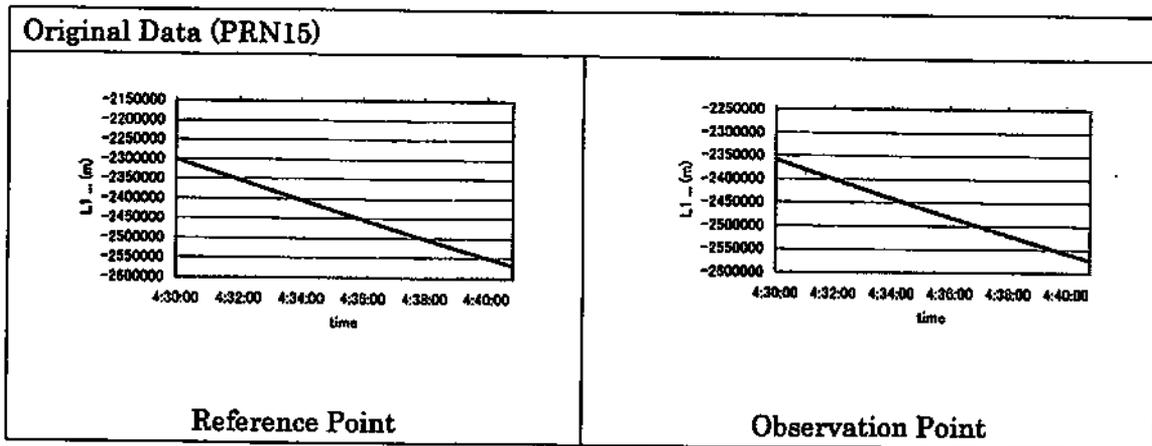


Fig. 2 One way phase data by L1.

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

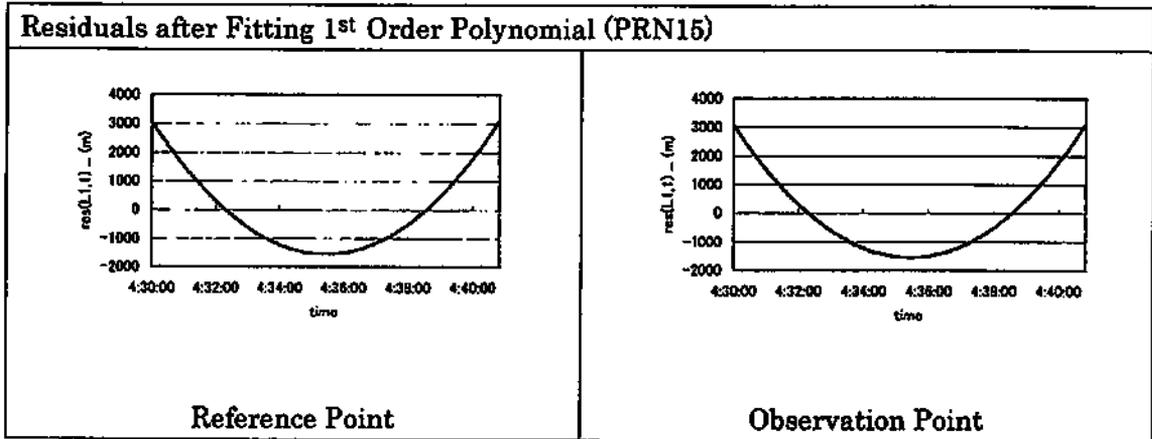


Fig. 3 Residual due to line fitting of the 1st order polynomial  $res(L1, 1)$ .

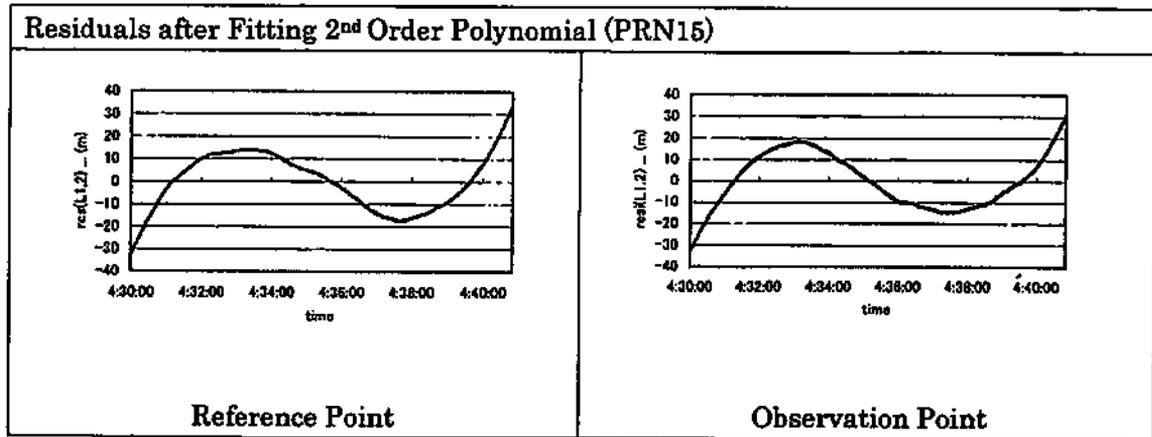


Fig. 4 Residual due to line fitting of the 2nd order polynomial  $res(L1, 2)$ .

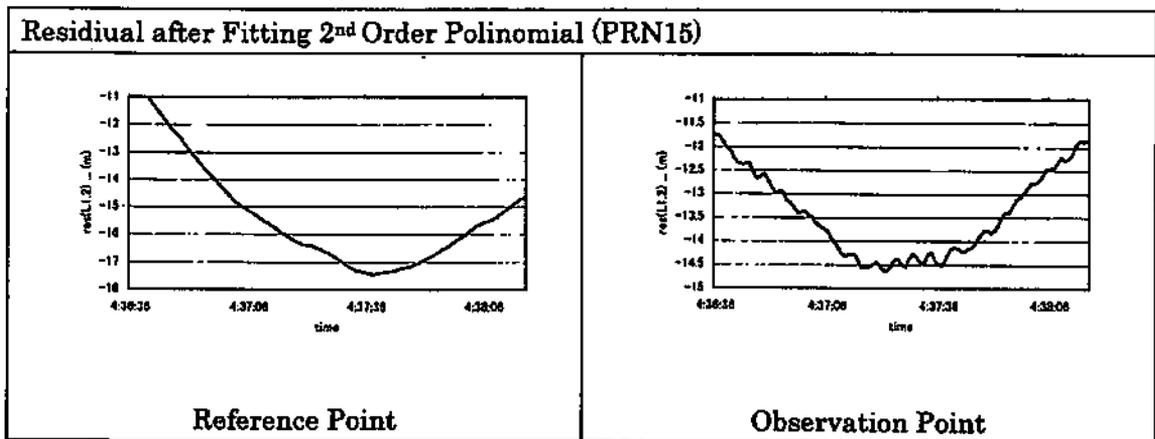


Fig. 5 Residual due to line fitting of the 2nd order polynomial  $res(L1, 2)$  (enlarged).

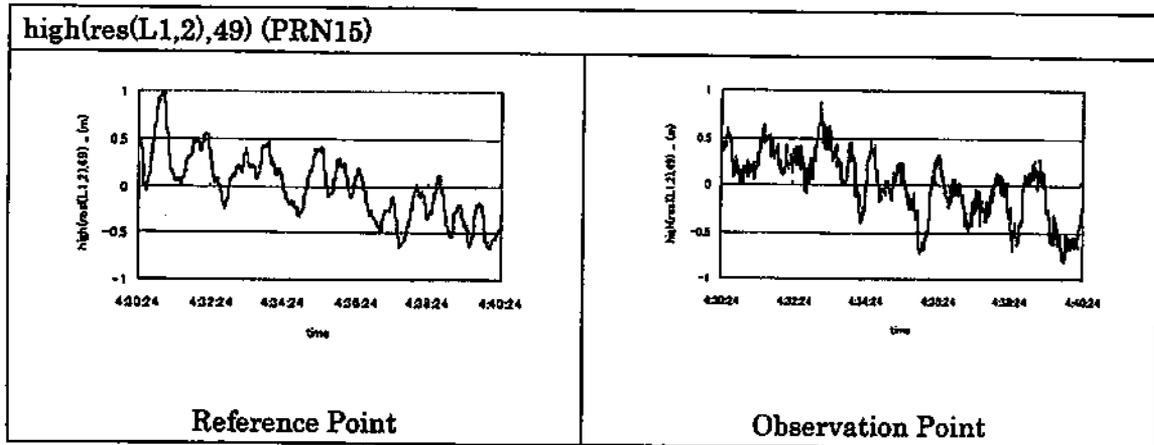


Fig. 6 High frequency component high(res(L1, 2), 49).

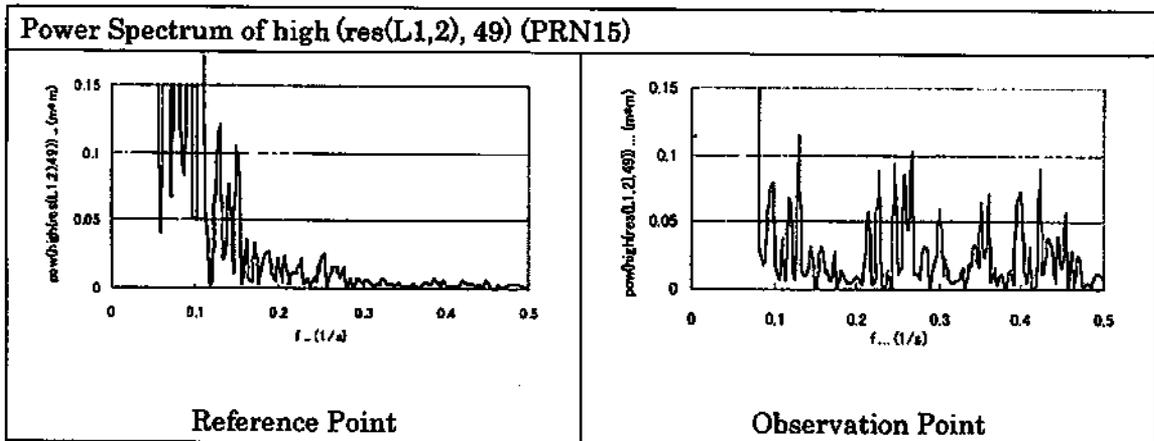


Fig. 7 Power spectrum of high component high(res(L1, 2), 49) in res(L1, 2) obtained by 49pts running average.

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),

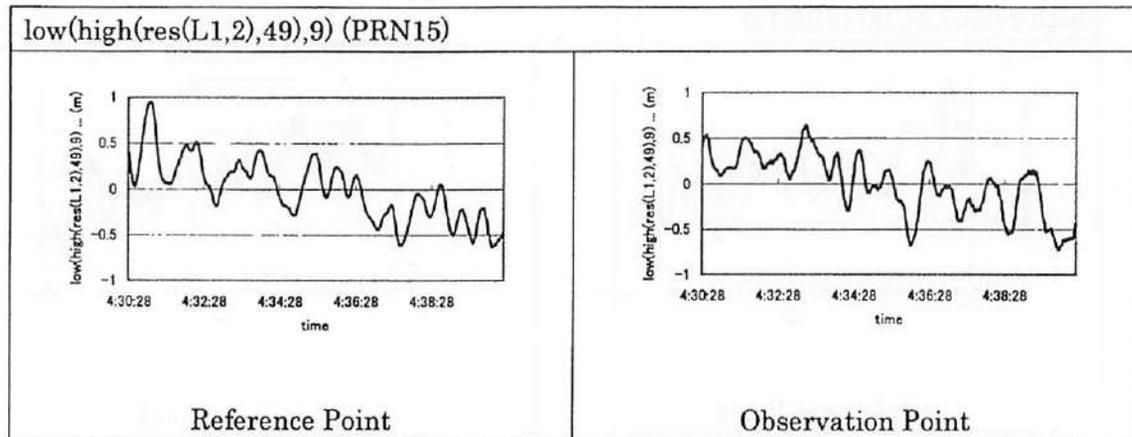


Fig. 8 Low component  $\text{low}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  in  $\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49)$  obtained by 9-point running average.

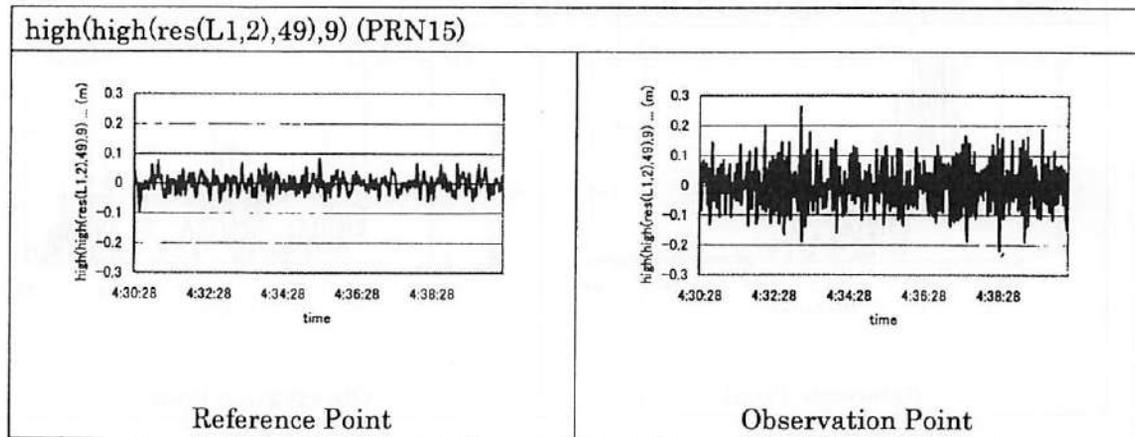


Fig. 9 High component  $\text{high}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  in  $\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49)$  obtained by 9-point running average.

$\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49)$  and  $\text{high}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  are obtained by processing  $\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49)$  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  $\text{low}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  of both the reference and the observation point data. On the other hand, the high frequency component  $\text{high}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  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  $\text{high}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  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  $\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49)$  obtained by 49-point running average of a residual of 2nd order line fitting  $\text{res}(\text{L1}, 2)$  and a high frequency component sequence  $\text{high}(\text{L1}, 49)$  obtained by taking directly 49-point running average of the original sequence L1.

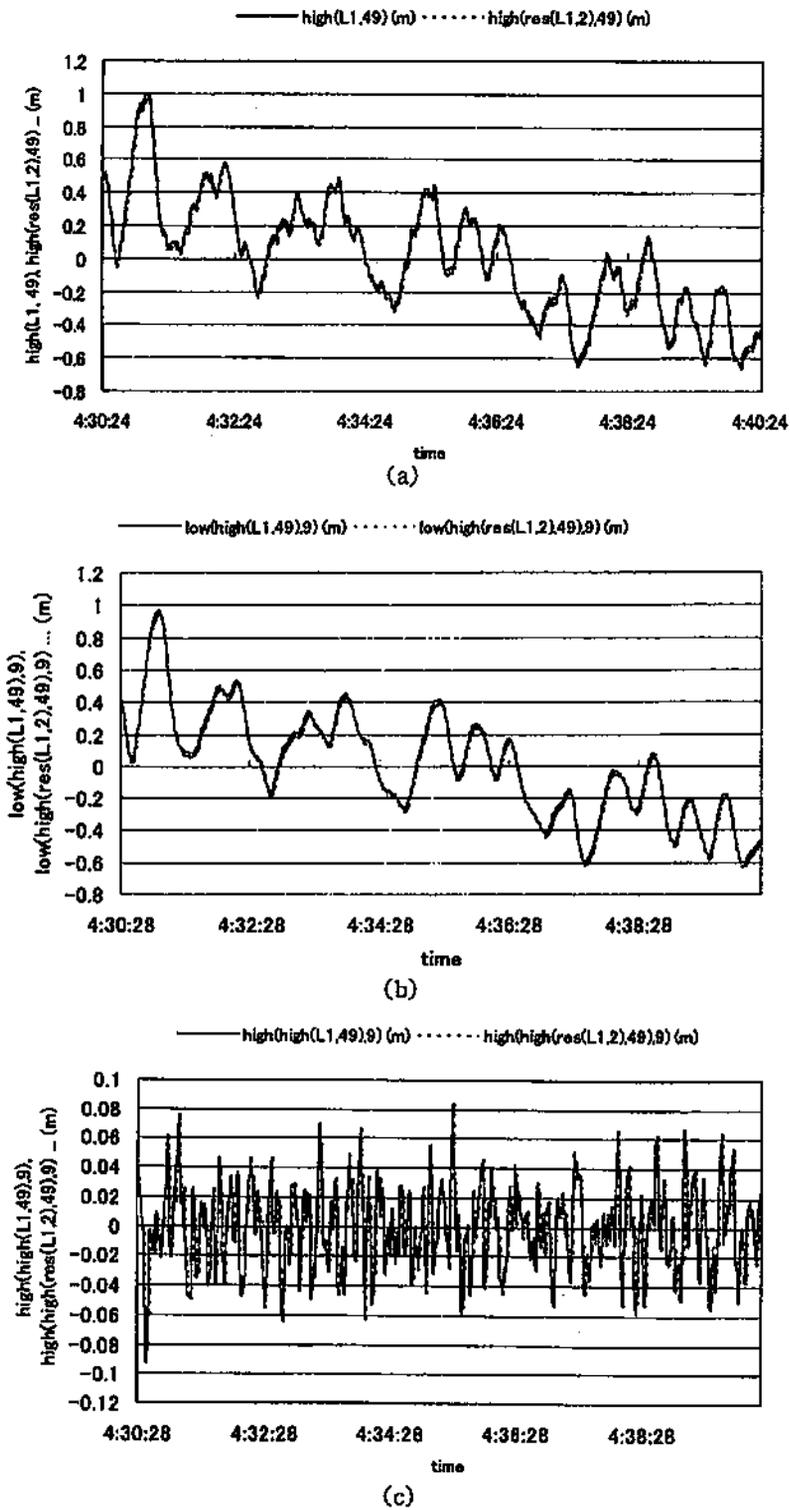


Fig. 10 Comparison between the results by running average after line fitting and those by running average alone (Reference point, PRN15).

Furthermore, the low and high frequency components  $\text{low}(\text{high}(\text{L1}, 49), 9)$  and  $\text{high}(\text{high}(\text{L1}, 49), 9)$  obtained by applying 9-point running average of  $\text{high}(\text{L1}, 49)$  are compared with  $\text{low}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  and  $\text{high}(\text{high}(\text{res}(\text{L1}, 2), 49), 9)$  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  $\text{high}(\text{high}(\text{L1}, 49), 9)$ .

The coordinates of the observation point are decomposed into the mean, long and short period variance components  $(\bar{x}_{rcv1}, \bar{y}_{rcv1}, \bar{z}_{rcv1})$ ,  $(\hat{x}_{rcv1}(t), \hat{y}_{rcv1}(t), \hat{z}_{rcv1}(t))$  and  $(\tilde{x}_{rcv1}(t), \tilde{y}_{rcv1}(t), \tilde{z}_{rcv1}(t))$ . Namely,

$$\begin{aligned} x_{rcv1}(t) &= \bar{x}_{rcv1} + \hat{x}_{rcv1}(t) + \tilde{x}_{rcv1}(t) \\ y_{rcv1}(t) &= \bar{y}_{rcv1} + \hat{y}_{rcv1}(t) + \tilde{y}_{rcv1}(t) \\ z_{rcv1}(t) &= \bar{z}_{rcv1} + \hat{z}_{rcv1}(t) + \tilde{z}_{rcv1}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Since the long and short period variance components  $(\hat{x}_{rcv1}(t), \hat{y}_{rcv1}(t), \hat{z}_{rcv1}(t))$  and  $(\tilde{x}_{rcv1}(t), \tilde{y}_{rcv1}(t), \tilde{z}_{rcv1}(t))$  are much smaller than the distance  $\rho_i^0$  between mean position of the receiver 1 and the satellite  $i$ ,  $\rho_i^0$  can be written as

$$\begin{aligned} \rho_i^0(t) &= \sqrt{(\bar{x}_{rcv1} - x_{sat}^i + \hat{x}_{rcv1} + \tilde{x}_{rcv1})^2 + (\bar{y}_{rcv1} - y_{sat}^i + \hat{y}_{rcv1} + \tilde{y}_{rcv1})^2 + (\bar{z}_{rcv1} - z_{sat}^i + \hat{z}_{rcv1} + \tilde{z}_{rcv1})^2} \\ &\approx \sqrt{(\bar{x}_{rcv1} - x_{sat}^i)^2 + (\bar{y}_{rcv1} - y_{sat}^i)^2 + (\bar{z}_{rcv1} - z_{sat}^i)^2} \\ &\quad + 2(\bar{x}_{rcv1} - x_{sat}^i)(\hat{x}_{rcv1} + \tilde{x}_{rcv1}) + 2(\bar{y}_{rcv1} - y_{sat}^i)(\hat{y}_{rcv1} + \tilde{y}_{rcv1}) + 2(\bar{z}_{rcv1} - z_{sat}^i)(\hat{z}_{rcv1} + \tilde{z}_{rcv1}) \\ &\approx \rho_i^0(t) + \frac{(\bar{x}_{rcv1} - x_{sat}^i)}{\rho_i^0}(\hat{x}_{rcv1} + \tilde{x}_{rcv1}) + \frac{(\bar{y}_{rcv1} - y_{sat}^i)}{\rho_i^0}(\hat{y}_{rcv1} + \tilde{y}_{rcv1}) + \frac{(\bar{z}_{rcv1} - z_{sat}^i)}{\rho_i^0}(\hat{z}_{rcv1} + \tilde{z}_{rcv1}) \\ &= \rho_i^0(t) - e_{i,x}^0(\hat{x}_{rcv1}(t) + \tilde{x}_{rcv1}(t)) - e_{i,y}^0(\hat{y}_{rcv1}(t) + \tilde{y}_{rcv1}(t)) - e_{i,z}^0(\hat{z}_{rcv1}(t) + \tilde{z}_{rcv1}(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

where  $(e_{i,x}^0, e_{i,y}^0, e_{i,z}^0)$  are the unit vector directed from the mean observation point (receiver 1) to the satellite  $i$ .  $\rho_i^0(t)$  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  $\hat{\rho}_i^0$  and  $\tilde{\rho}_i^0$  of  $\rho_i^0$ . Namely,

$$\rho_i^0(t) = \rho_i^0(t) + \hat{\rho}_i^0(t) + \tilde{\rho}_i^0(t). \quad (3)$$

The elevation and azimuth of the satellite  $i$  viewed from the receiver 1 are denoted by  $\theta_{i,elv}$  and  $\theta_{i,azm}$ . The unit vector  $(e_{i,x}^0, e_{i,y}^0, e_{i,z}^0)$  can be written as

$$(e_{i,x}^0, e_{i,y}^0, e_{i,z}^0) = (\cos \theta_{i,elv} \cos \theta_{i,azm}, \cos \theta_{i,elv} \sin \theta_{i,azm}, \sin \theta_{i,elv}). \quad (4)$$

Since the altitude of the satellite is as high as 20,000 km, the elevation  $\theta_{i,elv}$  and azimuth  $\theta_{i,azm}$  may

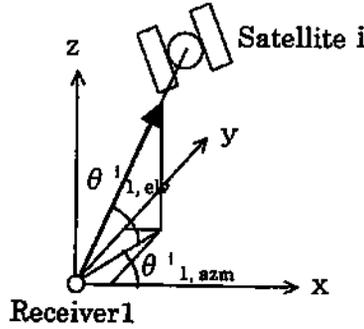


Fig. 11 Definition of elevation and azimuth.

be obtained accurately by using almanac.

On the other hand, the carrier wave phase  $\phi^i$  (in cycle) of the satellite  $i$  is decomposed into the “mean” component  $\bar{\phi}^i(t)$ , the long period component  $\hat{\phi}^i(t)$  and the short period component  $\check{\phi}^i(t)$  corresponding to  $\bar{\rho}^i(t)$ ,  $\hat{\rho}^i(t)$  and  $\check{\rho}^i(t)$  as

$$\phi^i = \bar{\phi}^i(t) + \hat{\phi}^i(t) + \check{\phi}^i(t). \tag{5}$$

Then,  $\bar{\rho}^i(t)$  may be approximated by

$$\bar{\rho}^i(t) \approx \lambda_i \bar{\phi}^i(t), \tag{6}$$

where  $\lambda_i$  is the wave length of L1 wave. From eqs.(2), (3) and (6),

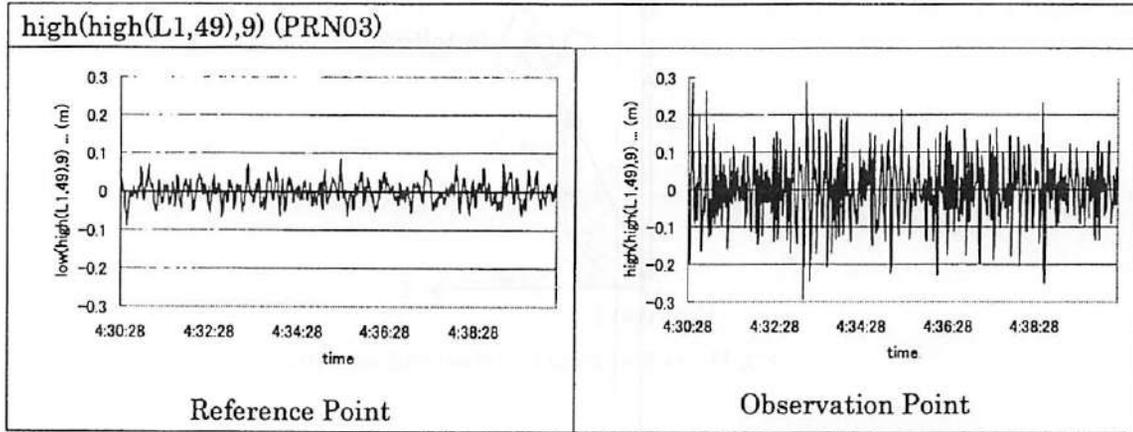
$$\lambda_i \bar{\phi}^i(t) \approx -e_{i,x} \bar{x}_{rev}(t) - e_{i,y} \bar{y}_{rev}(t) - e_{i,z} \bar{z}_{rev}(t) \tag{7}$$

is derived. If  $\bar{\phi}^i(t)$  is obtained for three or more satellites, the short period variance component  $(\bar{x}_{rev}(t), \bar{y}_{rev}(t), \bar{z}_{rev}(t))$  is determined.

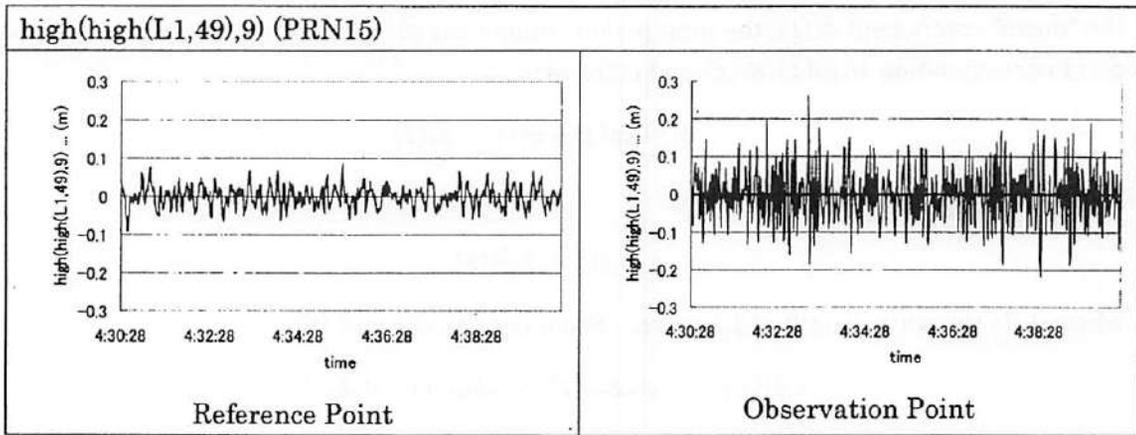
The short period variance component  $\check{\phi}^i(t)$  may be obtained by processing the raw data  $\phi^i(t)$  with an appropriate high-pass filter. In the following, the high frequency component high (high(L1, 49), 9) is used for  $\lambda_i \check{\phi}^i(t)$ .

A part of the data used in PVD method is shown in Figure 12.

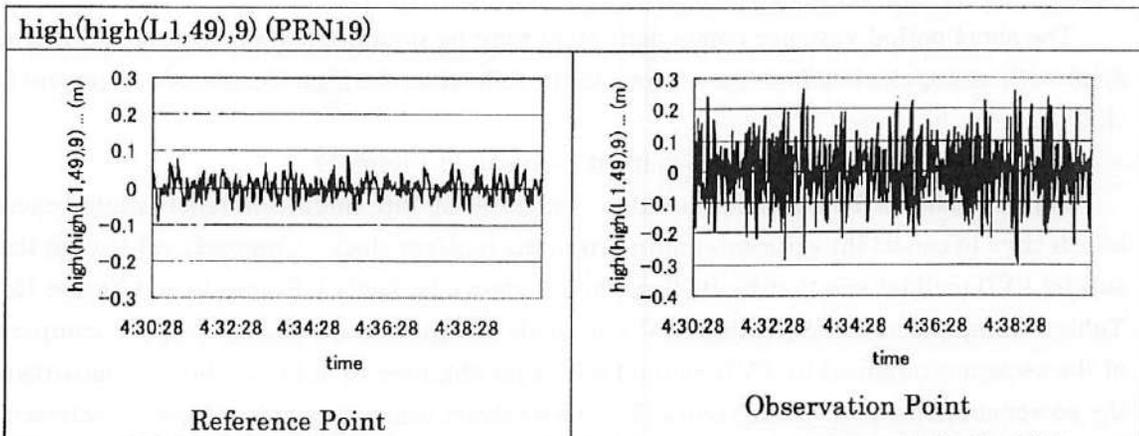
Figure 13 shows the flow of calculation. Satellite-satellite single difference would generally be effective to cancel the error originating from the receiver clock. Comparison between the result by PVD method and that by RTK method is shown in Table 1, Figure 14 and Figure 15. In Table 1, comparison 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)



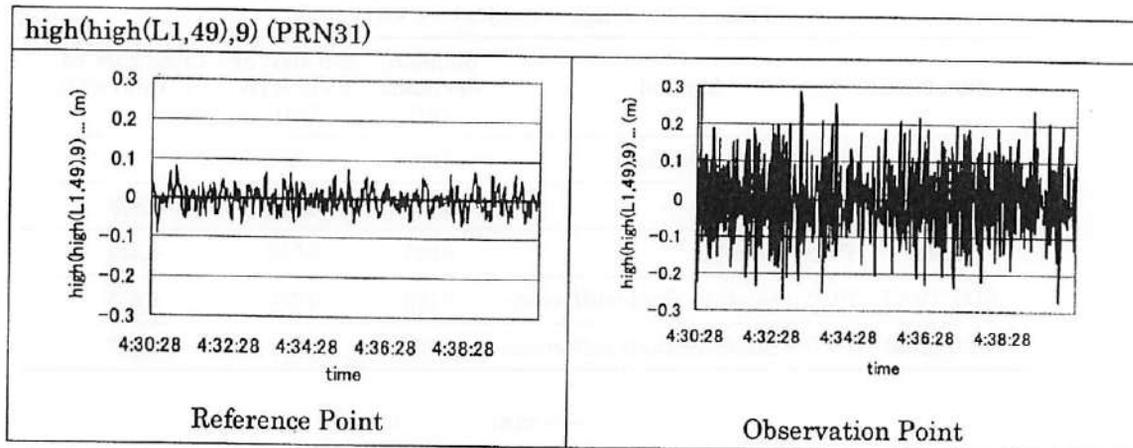
(b)



(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.

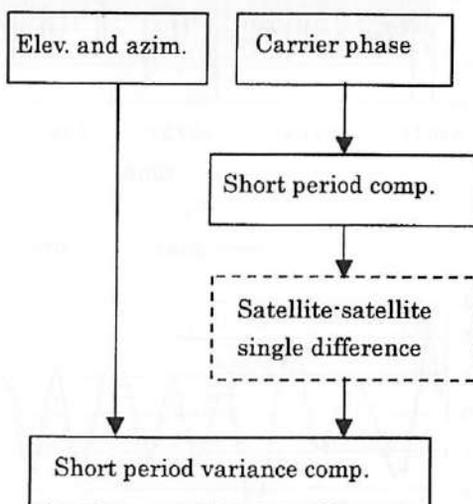


Fig. 13 Flow of calculation in PVD method.

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  $\pm 5$  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	0.827

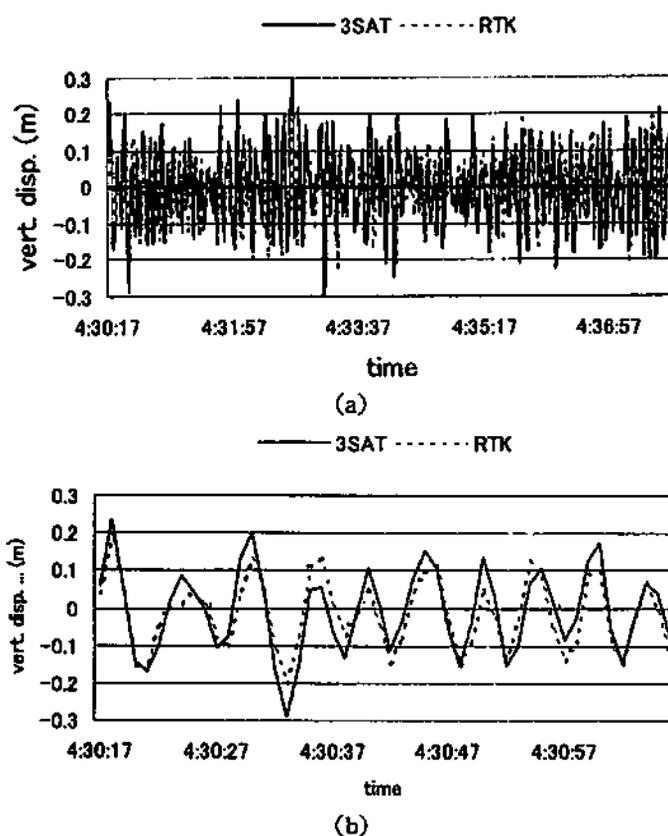


Fig. 14 (a) Comparison of sequence between 3SAT and RTK (about 500 sec). (b) Comparison of sequence between 3SAT and RTK (about 50 sec).

- (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

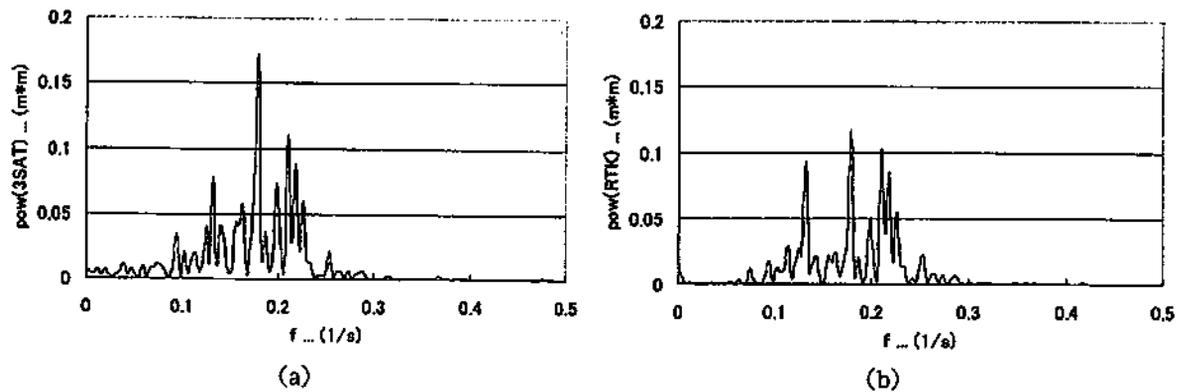


Fig. 15 (a) Power spectrum of 3SAT. (b) Power spectrum of RTK.

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 appreciate 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. Matsuiishi, A. Yokoyama and T. Tanno (2000): Realtime 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*, 89 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*, 89 p.
- Tsuji, 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.



## Real-time observation of tsunami by RTK-GPS

Teruyuki Kato<sup>1</sup>, Yukihiro Terada<sup>2</sup>, Masao Kinoshita<sup>2</sup>, Hideshi Kakimoto<sup>2</sup>, Hiroshi Isshiki<sup>2</sup>, Masakatsu Matsuishi<sup>3</sup>, Akira Yokoyama<sup>3</sup>, and Takayuki Tanno<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

<sup>2</sup>Hitachi Zosen Corporation, Taisho-ku, Osaka, Japan

<sup>3</sup>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

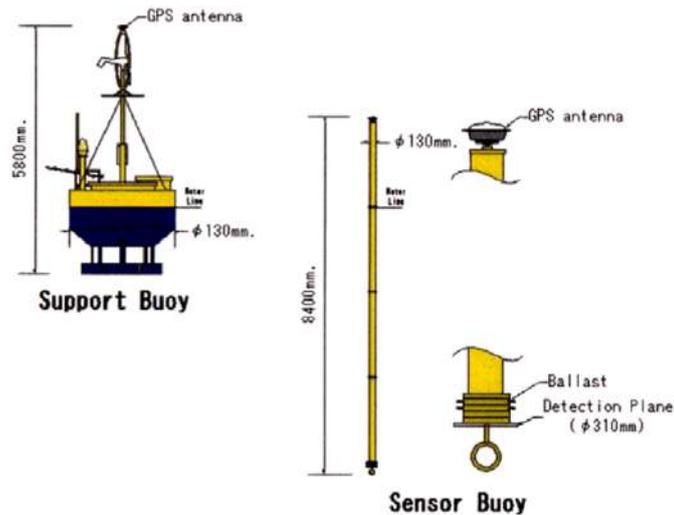


Fig. 1. Support-buoy (left) and Sensor-buoy (right). Sensor-buoy is insensitive to wind-waves compared to Support-buoy.

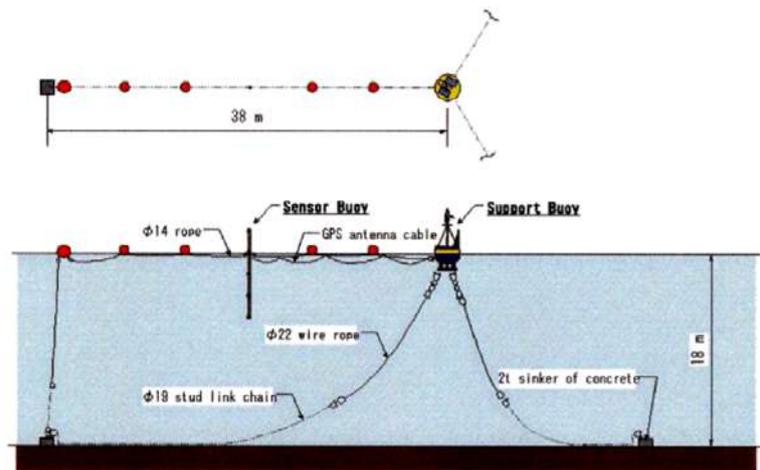


Fig. 2. Schematic design of the tsunami detection system. Wire is extended in both directions of the Sensor-buoy. The depth of water was about 18 m in the experiment.

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.

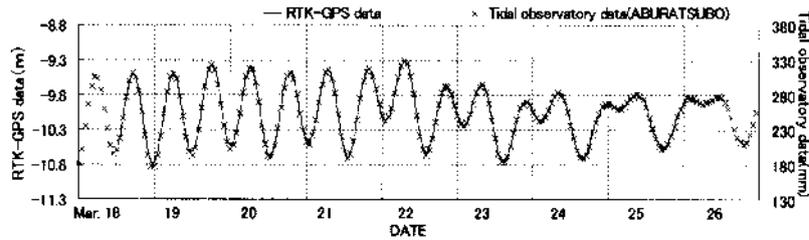


Fig. 3. Line drawing shows RTK-GPS data by Support-buoy, and cross marks show tidal observatory data at Aburatsubo tidal station.

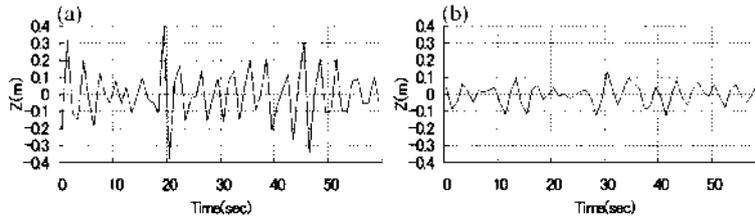


Fig. 4. A sample of observation data by (a) Support-buoy, and (b) Sensor-buoy at the same time period. Data were taken when the sea-surface was rough. Sampling interval is one second.

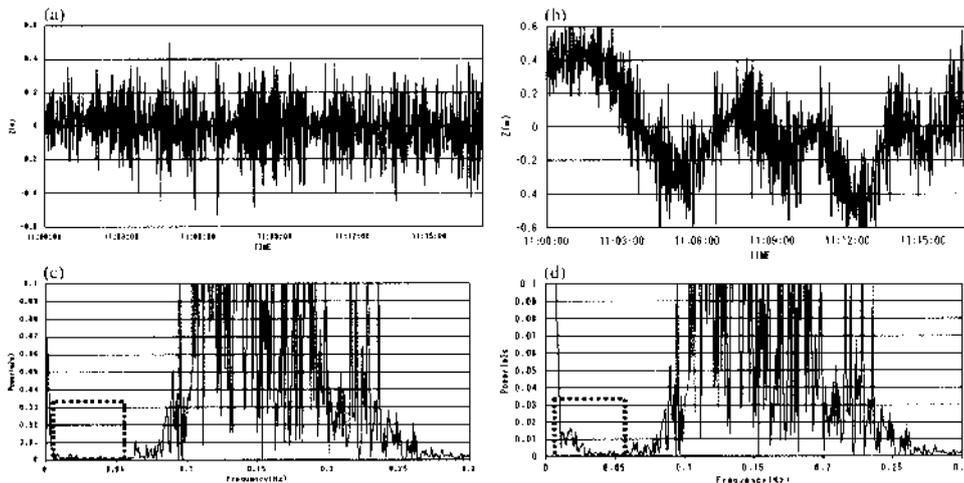


Fig. 5. (a) Measured data (b) Measured data + tsunami (c) FFT of measured data (d) FFT of tsunami data. Tsunami data were read manually from Nagai (1998).

## 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



## A new tsunami monitoring system using RTK-GPS

Teruyuki Kato<sup>1</sup>, Yukihiro Terada<sup>2</sup>, Masao Kinoshita<sup>2</sup>, Hideshi Kakimoto<sup>2</sup>, Hiroshi Isshiki<sup>2</sup>, Toshihisa Moriguchi<sup>2</sup>, Mitsuo Takada<sup>3</sup>, Takayuki Tanno<sup>4</sup>, Masayuki Kanzaki<sup>4</sup>, and James Johnson<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan*

<sup>2</sup>*Hitachi Zosen Corporation, Taisho-ku, Osaka, Japan*

<sup>3</sup>*Kansai Design Company Limited, Nishi-ku, Osaka, Japan*

<sup>4</sup>*Hitachi Zosen Information Systems Company Limited, Ohta-ku, Tokyo, Japan*

<sup>5</sup>*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.*, 1998) 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.

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1 Yayoi 1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan (teru@eri.u-tokyo.ac.jp)

<sup>2</sup>Hitachi Zosen Corporation, 2-11, Funamachi 2, Taisho-ku, Osaka 551-0022, Japan (terada@elec.lab.hitachizosen.co.jp, kinoshita@elec.lab.hitachizosen.co.jp, kakimoto@elec.lab.hitachizosen.co.jp, isschiki@fluid.lab.hitachizosen.co.jp)

<sup>3</sup>Kansai Design Company Ltd., Nichiei Bldg., 4-8, Tosabori 1, Nishi-ku, Osaka 550-0001, Japan (OSKkdc.TakadaMitsuo/osk\_kdc@omlab.lab.hitachizosen.co.jp)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>GPS Solutions Inc., 776 Morgan Drive, Boulder, CO 80303, U.S.A. (jjohnson@gps-solutions.com)

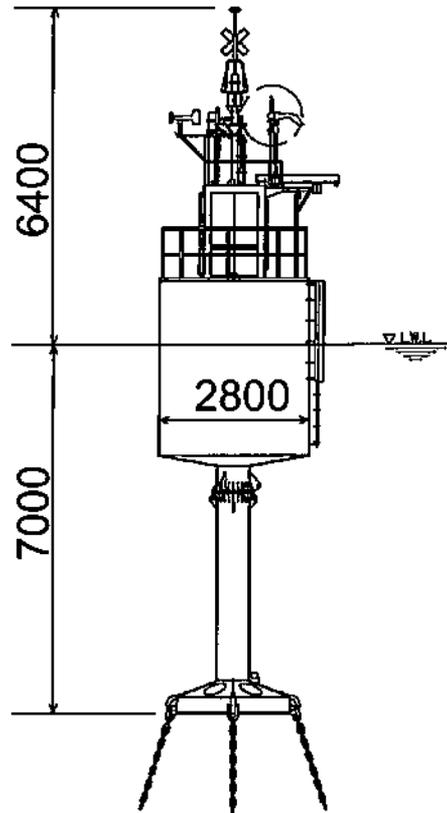


Figure 1: The design of the GPS buoy. GPS antenna is set at the top of the buoy. Unit: mm.

## 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

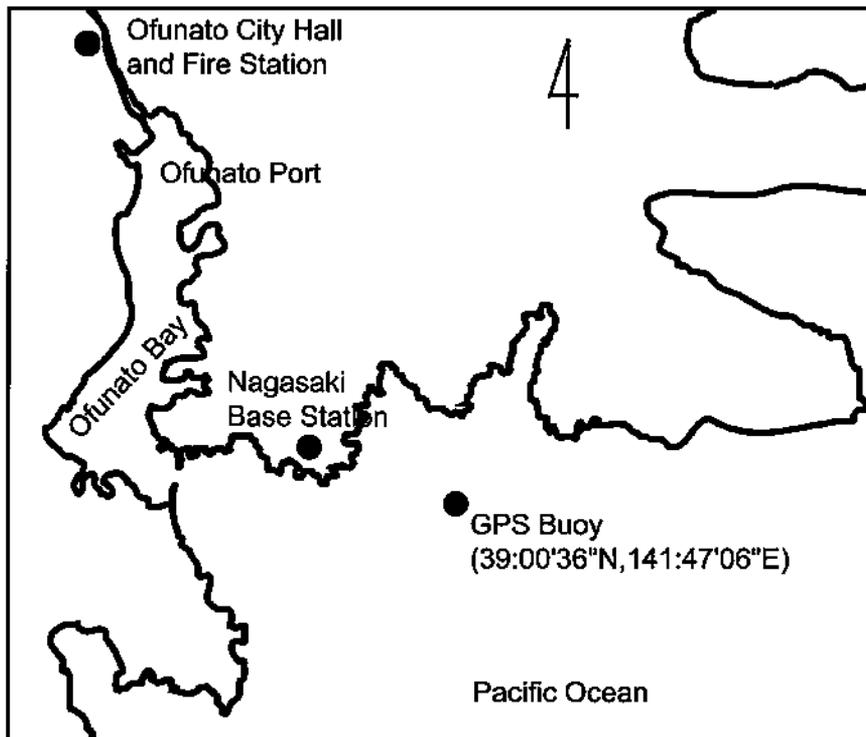


Figure 2: Location map of the GPS tsunami monitoring system.

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

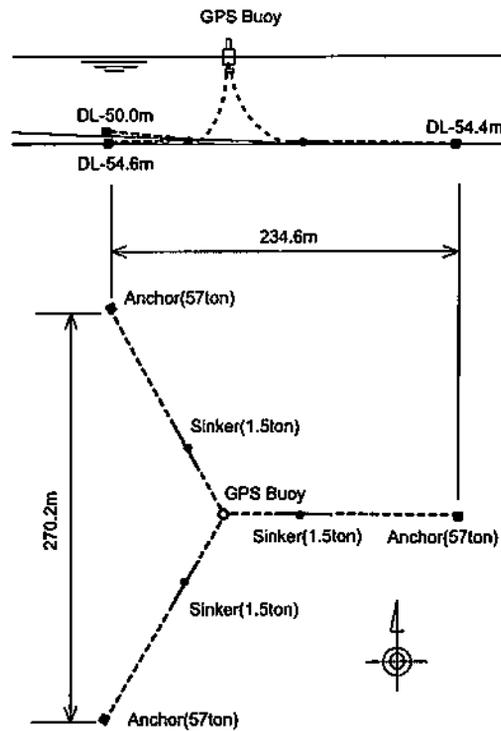


Figure 3: Layout of the buoy anchoring system.

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.

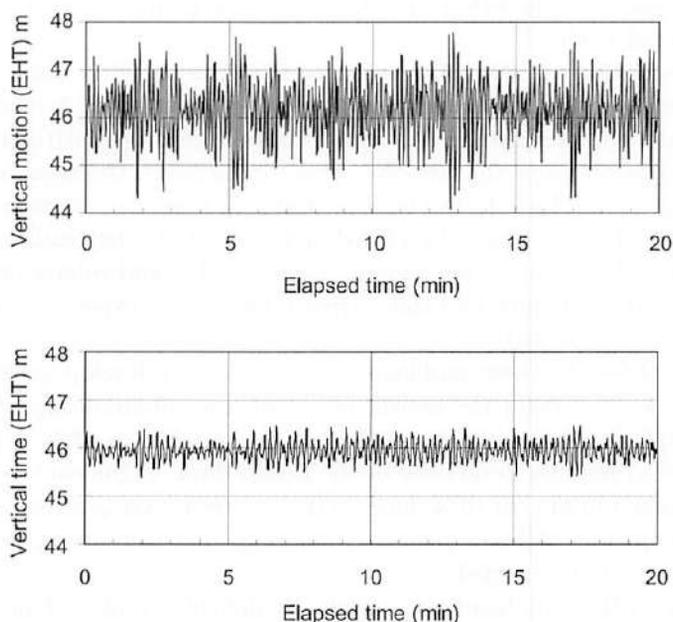


Figure 4: Samples of vertical motion of the buoy in the case of a rough sea (top), and in the case of a calm sea (bottom).

### 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. Mofjeld (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. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno (2000): Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, 52, 841-845.
- Tsuji, 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<sup>†a)</sup> 寺田 幸博<sup>††b)</sup> 木下 正生<sup>††</sup> 柿本 英司<sup>††</sup>  
 一色 浩<sup>††</sup> 森口 壽久<sup>††</sup> 神崎 政之<sup>†††</sup> 高田美津雄<sup>††††</sup>  
 James M. Johnson<sup>††††</sup>

A Development of Tsunami Observation System using RTK-GPS  
 ——Experimental Monitoring at Ofunato City Coast——

Teruyuki KATO<sup>†a)</sup>, Yukihiro TERADA<sup>††b)</sup>, Masao KINOSHITA<sup>††</sup>,  
 Hideshi KAKIMOTO<sup>††</sup>, Hiroshi ISSHIKI<sup>††</sup>, Toshihisa MORIGUCHI<sup>††</sup>,  
 Masayuki KANZAKI<sup>†††</sup>, Mitsuo TAKADA<sup>††††</sup>, and James M. JOHNSON<sup>††††</sup>

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2km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

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 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

<sup>†††</sup> 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

<sup>††††</sup> 関西設計 (株), 大阪市

Kansai Design Co., Ltd, Tosabori, Nishi-ku, Osaka-shi, 550-0001 Japan

<sup>†††††</sup> 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．

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出来る．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．以上のことが

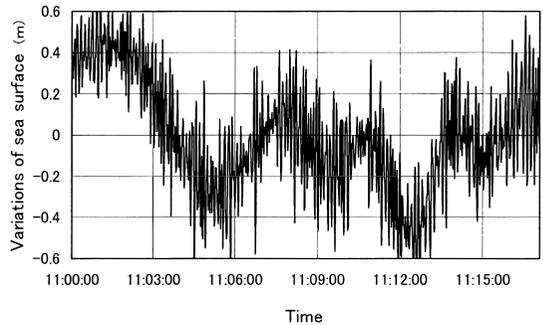


図 1 GPS 津波計で計測した風波に津波 [7] を加えた波形  
Fig.1 A tsunami data [7] was added to the wind wave data taken by RTK-GPS.

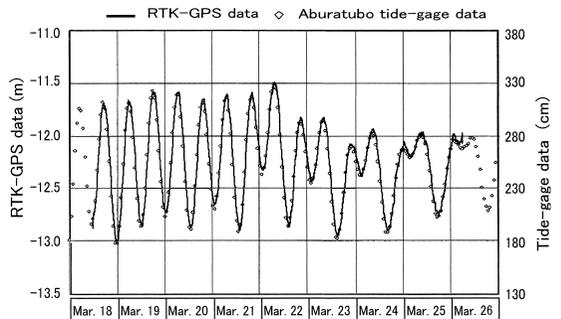


図 2 GPS 津波計で計測した潮汐データと検潮所記録との比較  
Fig.2 A comparison with the GPS tsunami meter data and the Aburatsubo tide-gage data.

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 algorithm (the accuracy are described on Ref. [5]).

Positioning algorithm	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

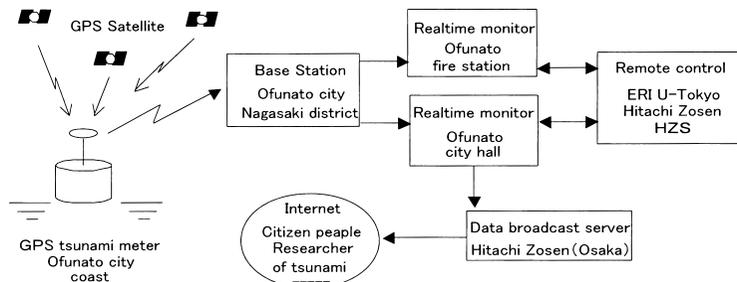


図 3 GPS 津波計大船渡市沖実験システム

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，キャリア周波数 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

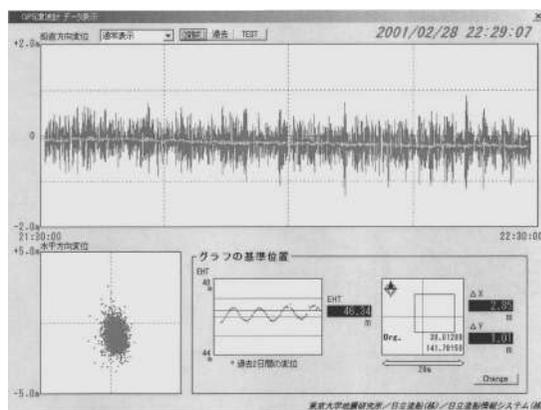


図 4 リアルタイム波高表示例

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 回のパ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

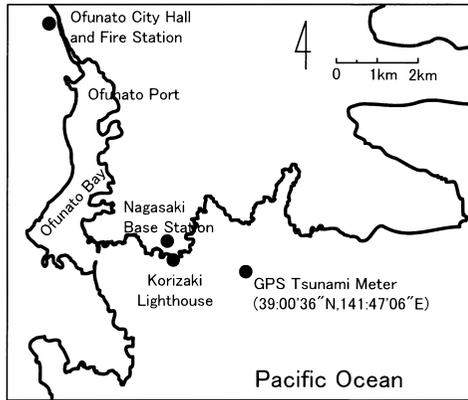


図 5 大船渡市沖 GPS 津波計投入位置

Fig. 5 Location map of the GPS tsunami monitoring system.

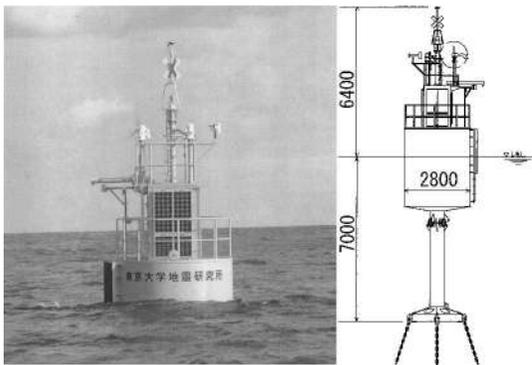


図 6 GPS 津波計ブイの外観及び形状

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従するように設計・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。

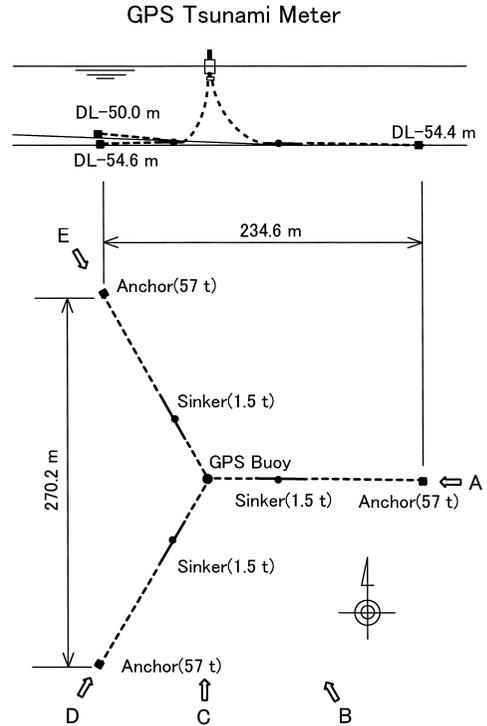


図 7 GPS ブイ係留図

Fig. 7 Layout of the buoy anchoring system.

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{ij} + A_{ij}) \ddot{X}_j + D_{ij} \dot{X}_j + N_{ij} \dot{X}_j |\dot{X}_j| + R_{ij} X_j \} = F a_i + F c_i + F w_i + F d_i + F m_i \quad (1)$$

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

$F a_i$  : 風圧力

$F c_i$  : 潮流力

$F w_i$  : 波浪強制力

$F d_i$  : 波漂流力

$F m_i$  : 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 9.0m、平均波周期 13.1s 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 2.0kt の潮流と平均風速 40.0m/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 9.07m 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 16.0m に対する上下揺振幅は 97.4%の値であった。

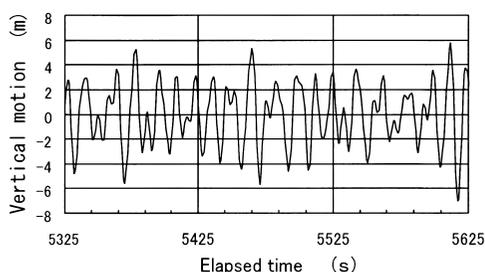


図 8 不規則波の例 (有義波高 9.0m、平均波周期 13.1s)  
 Fig. 8 An example of irregular wave (significant wave height: 9.0m, mean wave period: 13.1s).

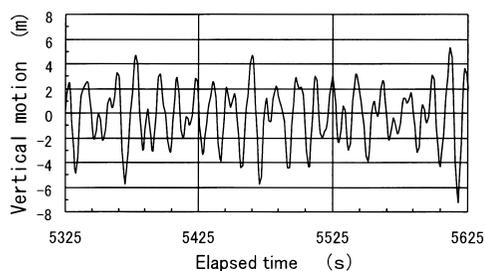


図 9 ブイの上下揺振幅予測値  
 Fig. 9 An estimated heave of the buoy.

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 13.1s)  
 Table 2 Reproducibility of the wave period and height (tide level: high, mean wave period: 13.1s).

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

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 9.0m と平均波周期 13.1s 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、2.25s 以下の平均波周期では、周期と波高ともに追従困難であり、2.25 ~ 5.0s の範囲ではブイの固有周期の影響が見られる。5.0s 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 35W 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 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。2001 年

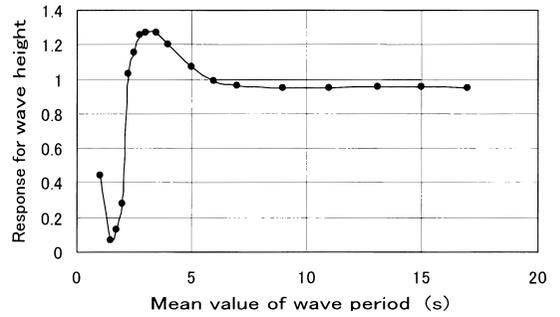


図 10 波高追従性 (波向き: 方位 D)  
Fig. 10 Reproducibility of the wave height (wave direction: D).

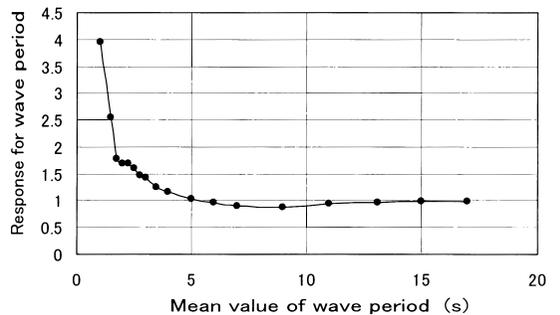


図 11 周期追従性 (波向き: 方位 D)  
Fig. 11 Reproducibility of the wave period (wave direction: D).

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度 [m/s] を求めることができる [15]。大船渡湾の平均水深を 15m と見積もれば、波の進行速度は約 12m/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	

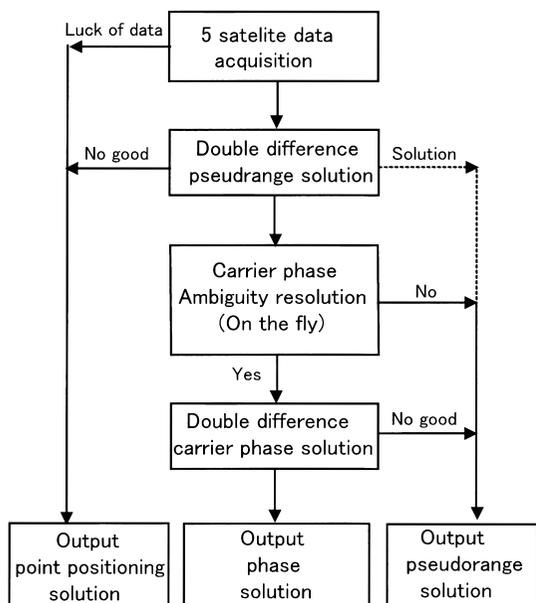


図 12 リバース RTK

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 ~ 4.0m 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 1m の波高で穏やかな海象条件を示して

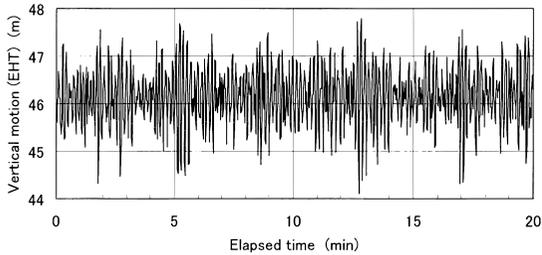


図 13 荒天時 (2:00, 28, Jan., 2001) の波高計測例

Fig. 13 An example of vertical motion of the buoy in the case of a rough sea (2:00, 28, Jan., 2001).

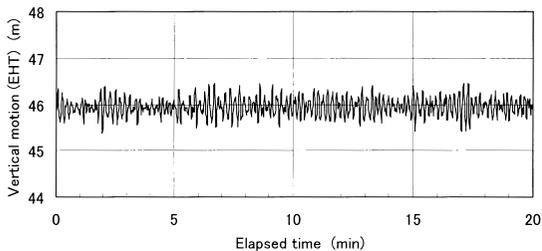


図 14 平静時 (2:00, 30, Jan., 2001) の波高計測例

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 10t 及び浮体部直径は 2.8m であり、海面上 6.4m 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、5.0s 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值を明らかにする。

(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 Planets 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长。

#### 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。

#### 高田美津雄

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。



## 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推算情報と比較し、その信頼性と適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、概ね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探知できることが、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 50 m 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、事実上不可能である。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、その信頼性と適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 53 m 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 WGS 84 測地系で 1 s 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 2.8 m のブイは、チェーンによって多点係留した。ブイの上端（海面上 6.4 m）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(株)技術研究所基礎技術研究室主席研究員  
\*\*\*\* 理博 東京大学地震研究所教授  
\*\*\*\*\* 正会員 (株)エコー 海象解析部長

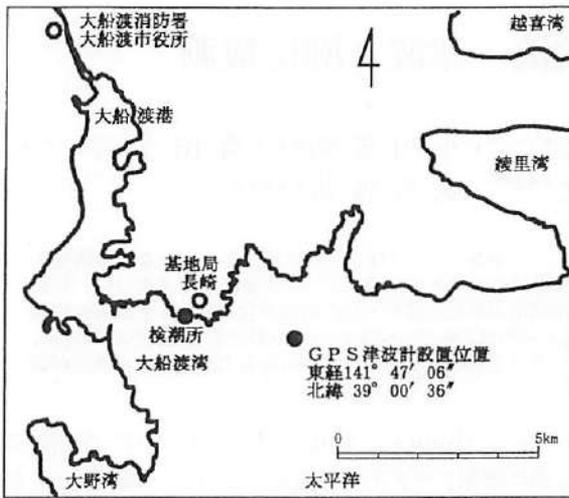


図-1 大船渡港沖合における観測位置

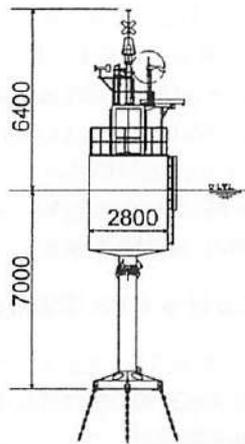


図-2 GPS ブイの概要 (mm 単位)

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出を試みた。

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

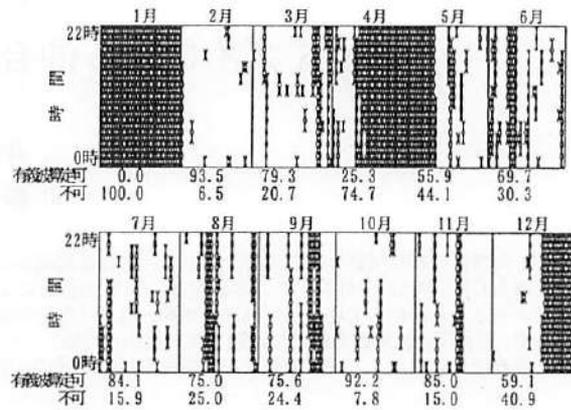


図-3 有義波観測データの取得状況 (2001年)

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。

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、および仙台南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)	4.06	3.66	3.30
	T1/3(s)	12.0	11.0	10.4
久慈	H1/3(m)	3.95	3.42	2.98
	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
仙台南港	H1/3(m)	3.59	3.95	3.18
	T1/3(s)	10.2	10.4	9.9

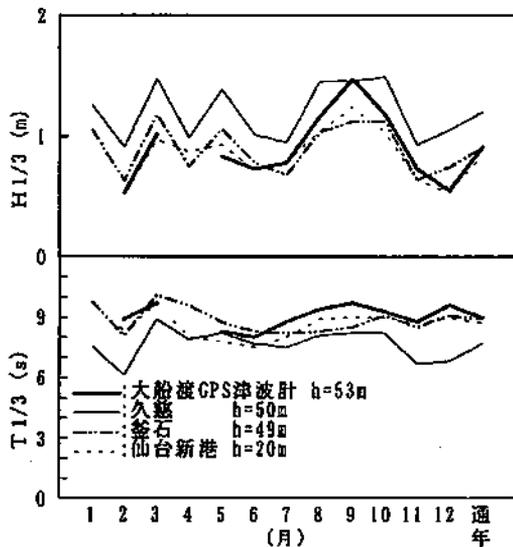


図-4 月平均有義波の比較 (2001年)

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、波候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港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

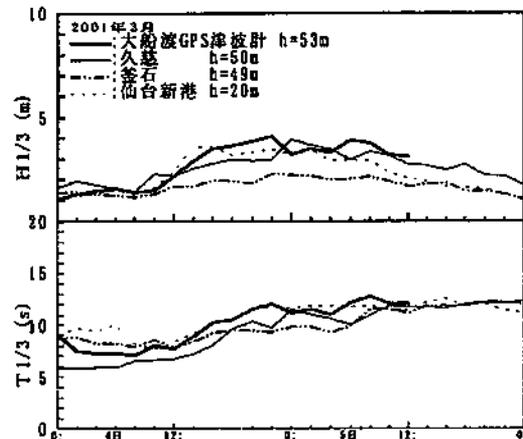


図-5 高波浪時の有義波高と周期

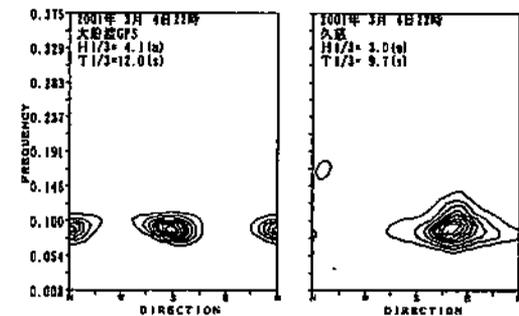


図-6 方向スペクトルの比較 (3月4日22時)

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M7.9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、ナウファス久慈港沖合の観測結果を併せて表示した(永井ら, 2001)。周

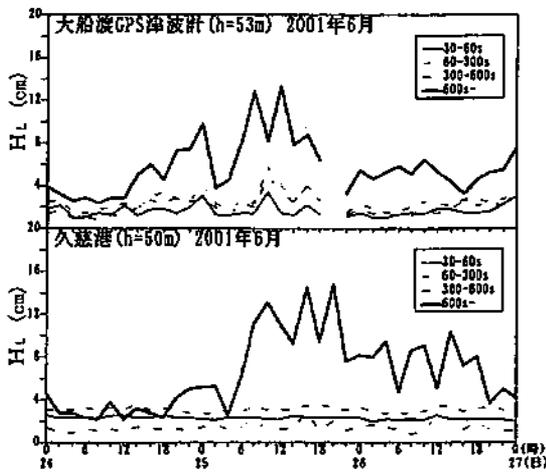


図-7 ペルー地震津波の検出

期 600 s 未満の比較的周期の短い周期帯では、6月24日から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あったが、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 プ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、いずれの分潮でも概ね港内推算値の 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られるべきであろうが、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合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

定数	振幅 (cm)			遅角 (°)			
	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	143.7	3.7	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偏差が、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。

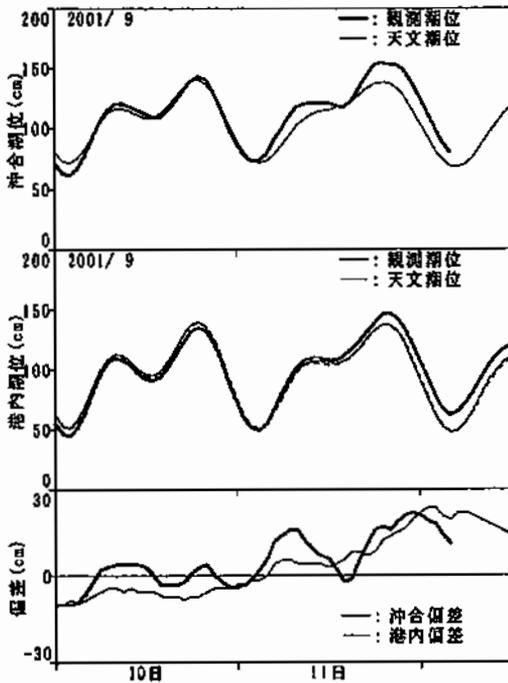


図-8 高潮の検出 (台風0115号)

## 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。

## 参考文献

海上保安庁水路部(1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 巻第 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, 188 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, 港湾技研資料 No. 842, 96 p.

永井紀彦 (1998): ナウファス (全国港湾海洋波浪情報網) 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, 港湾技研資料 No. 802, 97 p.

永井紀彦・菅原一男・渡邊弘・川口浩二 (1996): 久里浜湾における長期検潮記録解析, 港湾技術研究所報告第 35 巻, 第 4 号, pp. 3-35.

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, 港湾技研資料 No. 969, 47 p.

永井紀彦・富田孝史・佐藤和敏・額田恭史 (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): 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOW-PHAS 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.



## Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy

Teruyuki Kato<sup>1</sup>, Yukihiro Terada<sup>2</sup>, Keiji Ito<sup>2</sup>, Ryuji Hattori<sup>2</sup>, Takenori Abe<sup>2</sup>, Toshihide Miyake<sup>2</sup>, Shun'ichi Koshimura<sup>3</sup>, and Toshihiko Nagai<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

<sup>2</sup>Technical Research Institute, Hitachi Zosen Co. Ltd., Japan

<sup>3</sup>Disaster Reduction and Human Renovation Inst., Japan

<sup>4</sup>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).

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-

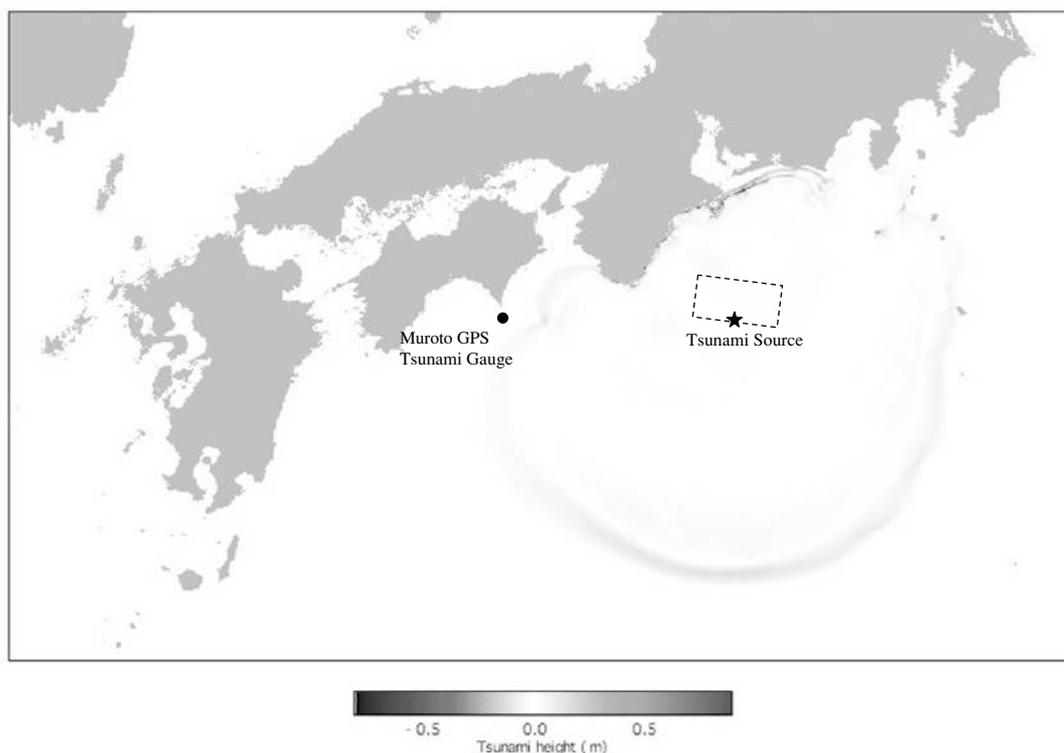


Fig. 1. Location of the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake and GPS buoy, southwestern Japan.

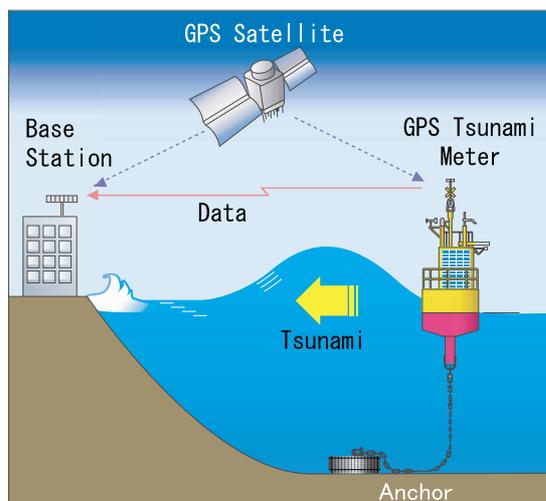


Fig. 2. Plan of GPS tsunami monitoring system.

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

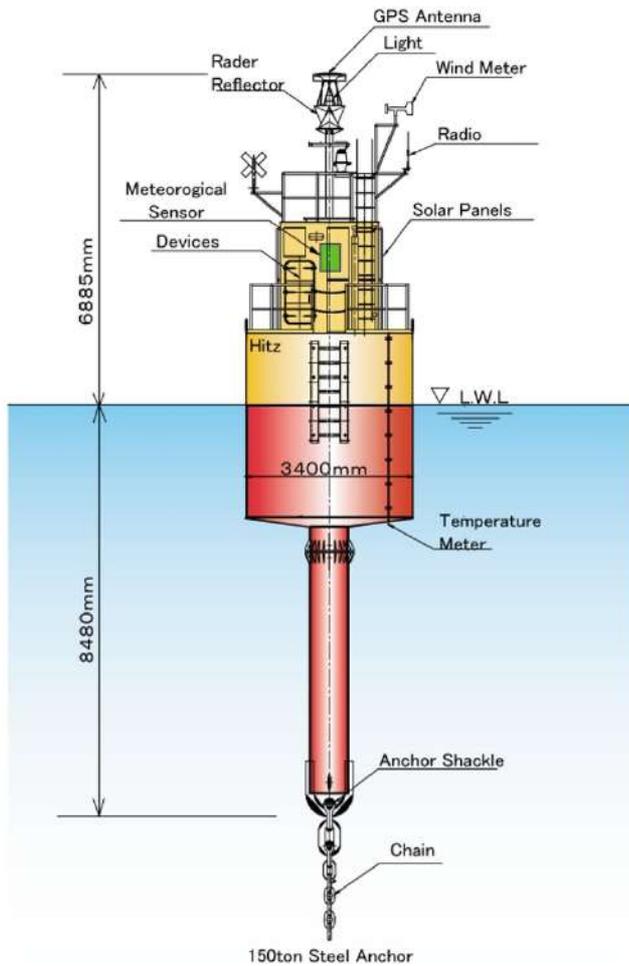


Fig. 3. Design of GPS buoy.

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

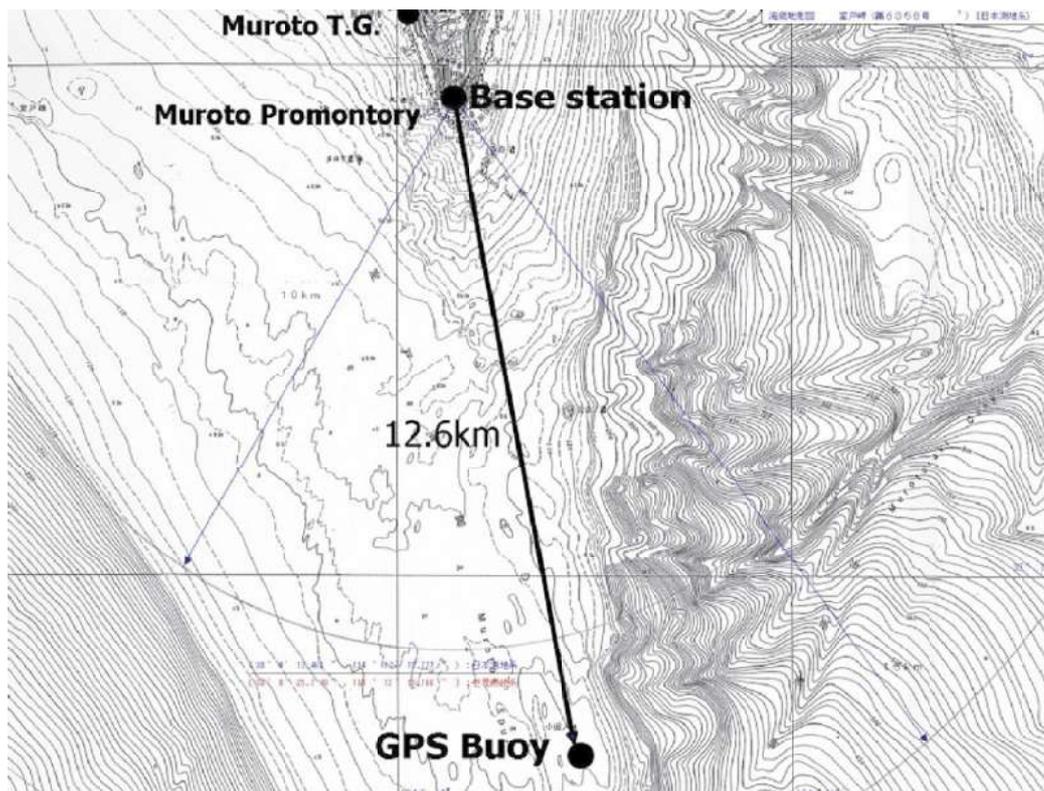


Fig. 4. Ocean bottom topography and the position of the GPS buoy. Topography map was taken from Division of Marine Information, Japan Coast Guard.

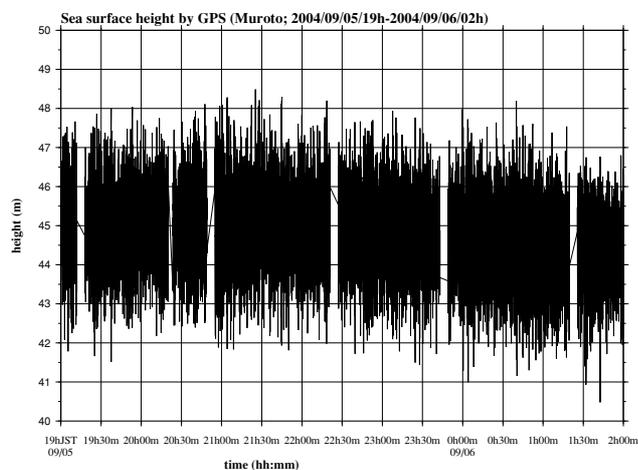


Fig. 5. Original record of sea surface height taken by GPS buoy. Vertical axis is ellipsoidal height in WGS84.

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

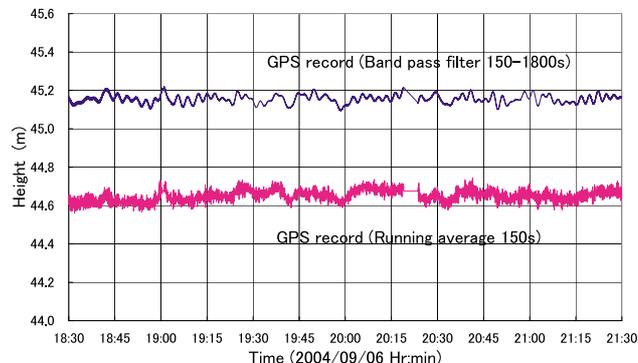


Fig. 6. Filtered vertical components of GPS record for the period 18:30 to 21:30. (Above) 150–1800 second band-pass filtered, and (Bottom) 150-second moving averaging applied. Vertical position of bottom record is arbitrarily offset for the sake of easy comparison.

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-

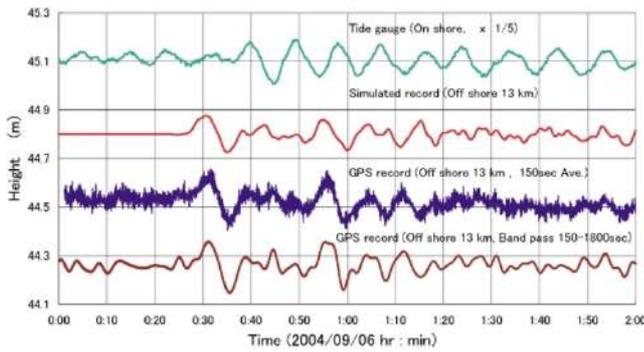


Fig. 7. Comparison of tsunami records for the period 0:00 to 2:00 of September 6th, 2004. (Uppermost) Tide gauge record at Muroto Port; (Second uppermost) Predicted record at GPS buoy; (Third uppermost) Vertical component of GPS record detrended and 150-sec moving average applied; (Lowest) GPS record 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](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC152e.html)), 2004.

T. Kato (e-mail: [teru@eri.u-tokyo.ac.jp](mailto:teru@eri.u-tokyo.ac.jp)), Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai



# 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<sup>1</sup>・加藤照之<sup>2</sup>・額田恭史<sup>3</sup>・泉 裕明<sup>4</sup>・寺田幸博<sup>5</sup>・三井正雄<sup>6</sup>  
Toshihiko NAGAI, Teruyuki KATO, Kyoshi NUKADA, Hiroaki IZUMI, Yukihiko Terada, and  
Masao MITSUI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>非会員: 工修 前 (財) 沿岸技術研究センター主任研究員 (〒102-0092 東京都千代田区準町3-16-6F)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>非会員: 工博 日立造船 (株) 技術研究所室長 (〒561-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>6</sup>正会員: 環修 (株) カイジョーソニック海象グループリーダー (〒205-8607 東京都羽村市柴町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 (DWD), 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は、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に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<sup>1)</sup>。海象計<sup>2)</sup>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<sup>3), 4)</sup>。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<sup>5)</sup>。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<sup>6), 7)</sup>。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フ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<sup>8)</sup>、あるいはオンサイト越波計<sup>9)</sup>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	追加的計測項目の課
大水深(50m以上)	GPSブイ	波浪・津波・高潮・潮位	
	海底水圧計	津波・(高潮)・(潮位)	気圧・水温等補正
浅海域(50m以下)	海底設置式または水圧計	波浪・津波・高潮・潮位	
沿岸(岸壁前面)	井戸内フロート	(津波)・高潮・潮位	井戸内波浪数値特性
	超音波または水圧計	前面波・津波・高潮・潮位	
陸域	浮標計またはスチーフ	越波・超上津波	

### 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、津波が沿岸に來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、一樣海底勾配を仮定した。波浪観測点毎に、丸印の大きさと、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<sup>10), 11)</sup>。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、紋別、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、東京湾に來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 分間早く観測した実績がある<sup>12)</sup>。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。

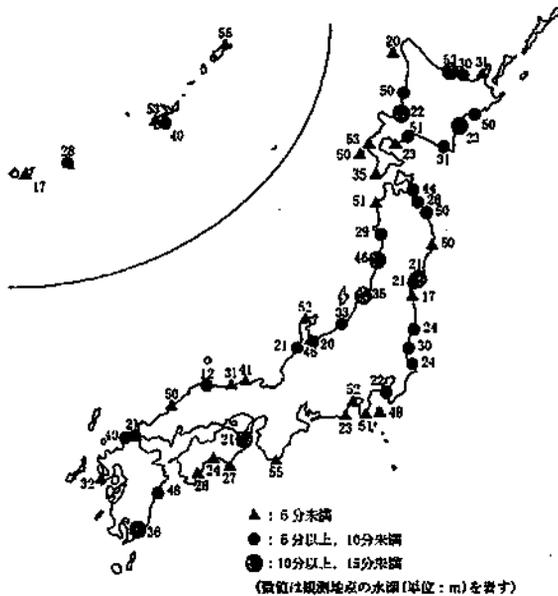


図-1 既設波浪観測点から沿岸への津波伝播時間

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潮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ため、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。

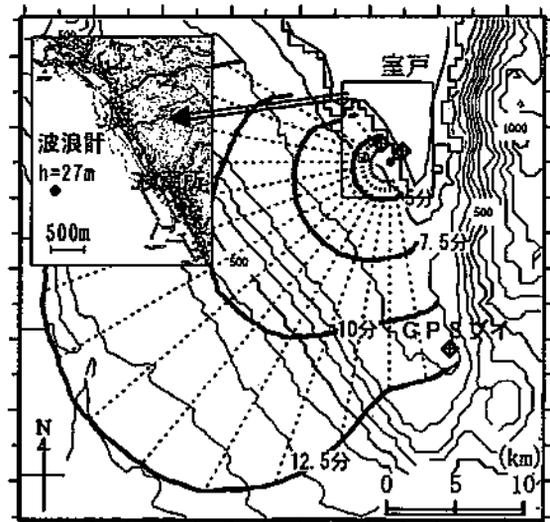


図-2 沿岸から沖合への津波逆伝播の検討例

#### 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來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 波の極大偏差を見ると、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 32cm 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-3 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。

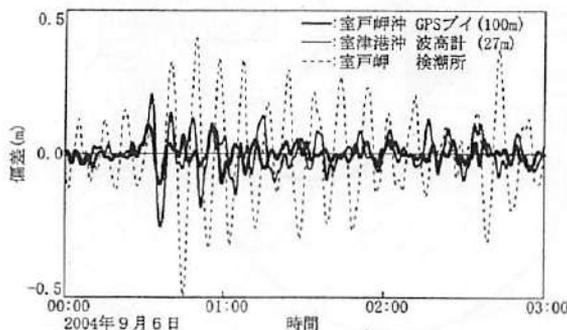


図-3 2004年東海道沖地震津波波形記録

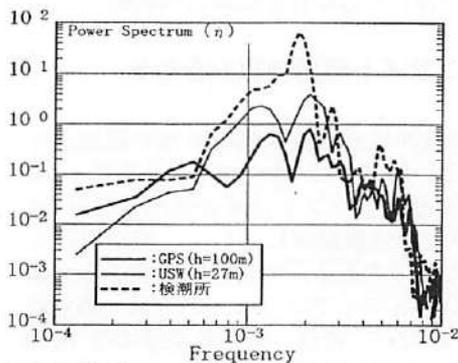


図-4 津波の周波数スペクトル応答

## 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<sup>13)</sup>。

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<sup>14)</sup>。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。

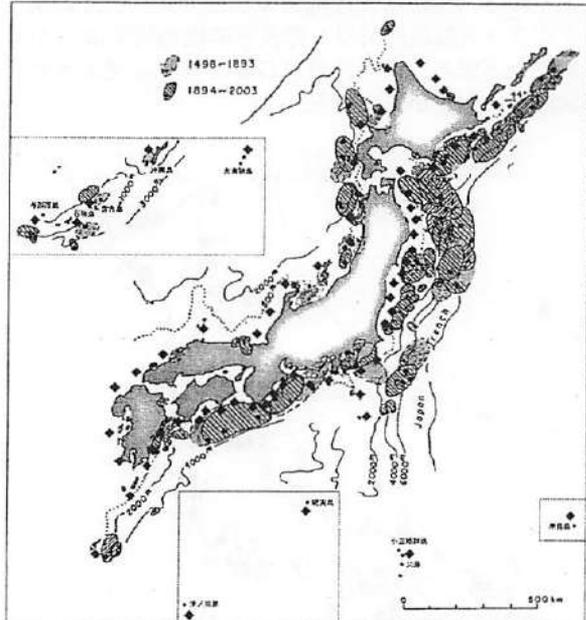


図-5 津波波源域を考慮した沖合津波観測網構想

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ため、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<sup>15)</sup>。

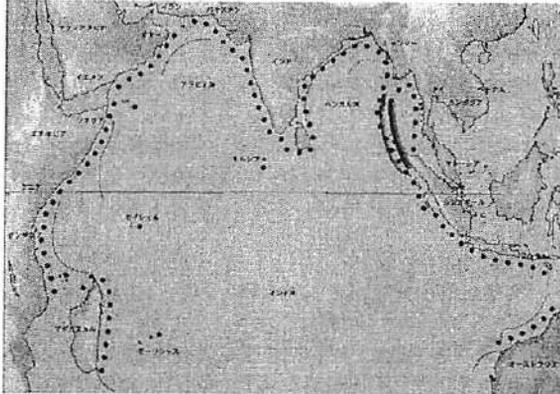


図-6 環インド洋における沖合津波観測網構想

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<sup>1)</sup>。

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

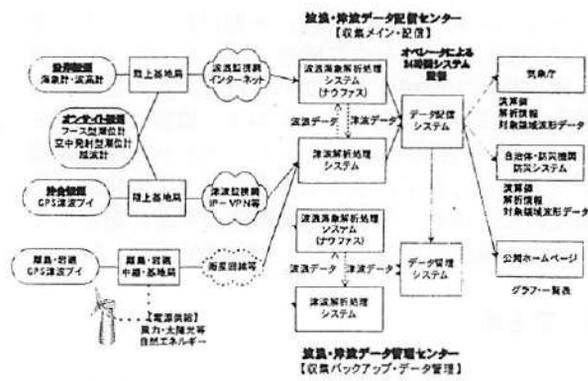


図-7 津波データセンターのシステム

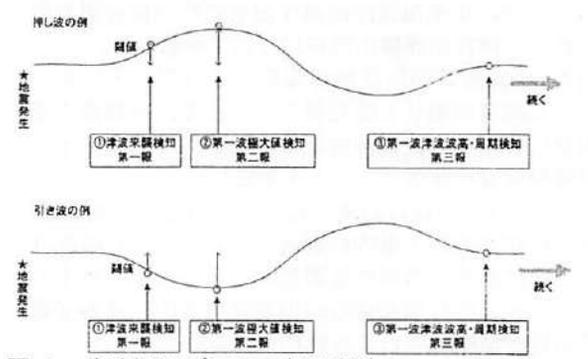


図-8 津波観測データの処理判定フロー

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・オンサイト越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。何も無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應用する方が、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・額田恭史・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，海洋開発論文集第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・磯部憲雄・鈴木敏夫：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. Gonzalez・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・小園みちる：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・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕：オンサイト越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：全国港湾海洋海象観測施設台帳(ナウファス施設台帳Ⅲ)，港湾技研資料 No.941, 49p. (付録333P.)，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・根本泰行・川西和昭・額田恭史・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照明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。



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 • Yukihiko 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(株)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(株)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<sup>[1]</sup>。

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従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<sup>[2]</sup>。

以上の基礎実験を通じて、GPS ブイが津波を検知する十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

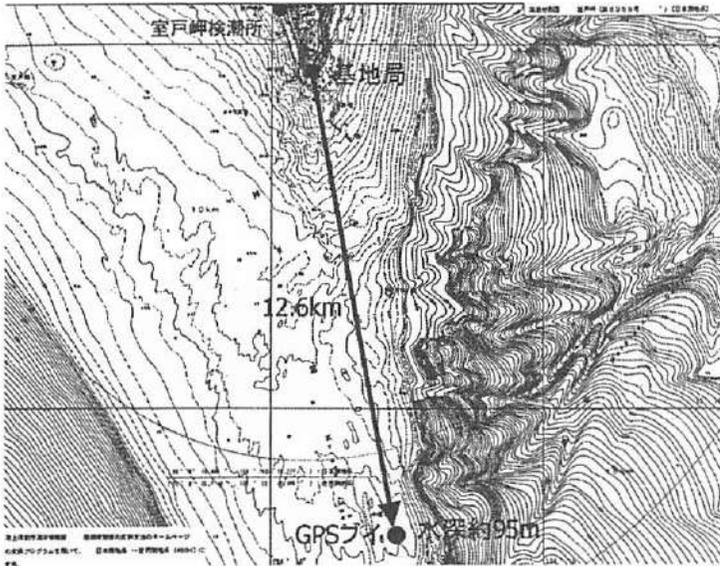


図1 GPS津波計を設置した地点。

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、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・受信機一体型のもとし、ブイ駆体の直径は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弱のところで行われたが、GPS津波計を防災に生かすためにはなるべく

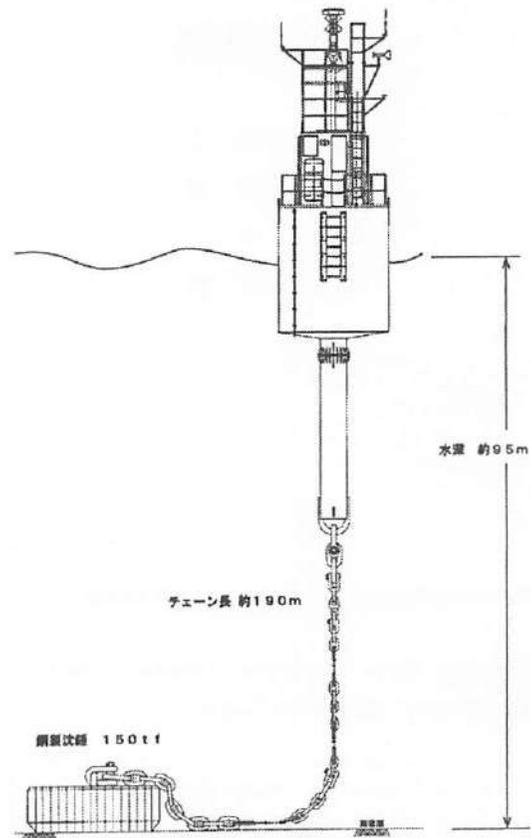


図2 室戸岬沖に設置したGPSブイシステム。

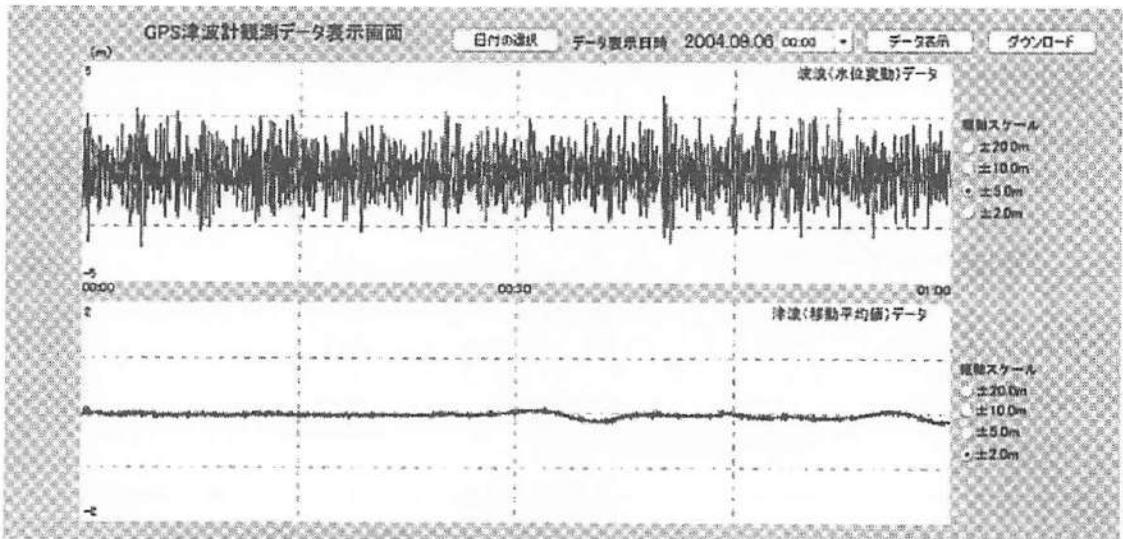


図3 2004年9月5日23時57分(JST)東海道沖地震に伴うGPS津波計のリアルタイムモニタ画面。

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十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にしなければならない。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「港湾空港技術研究所」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

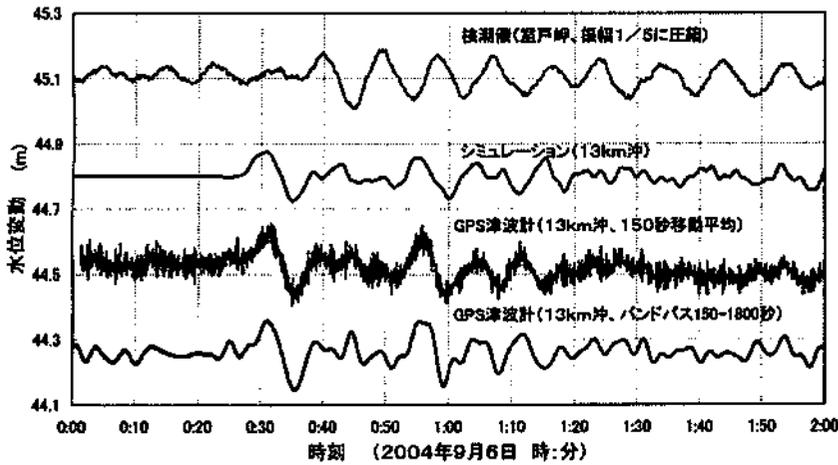


図4 (最上段) 室戸岬換潮所記録. 振幅を1/5に縮小してある. (上から2段目) 数値シミュレーションによる波形. (上から3段目) GPS津波計記録. 150秒の移動平均処理後. (下段) GPS津波計記録. 150~1500秒のバンドパスフィルター処理後.

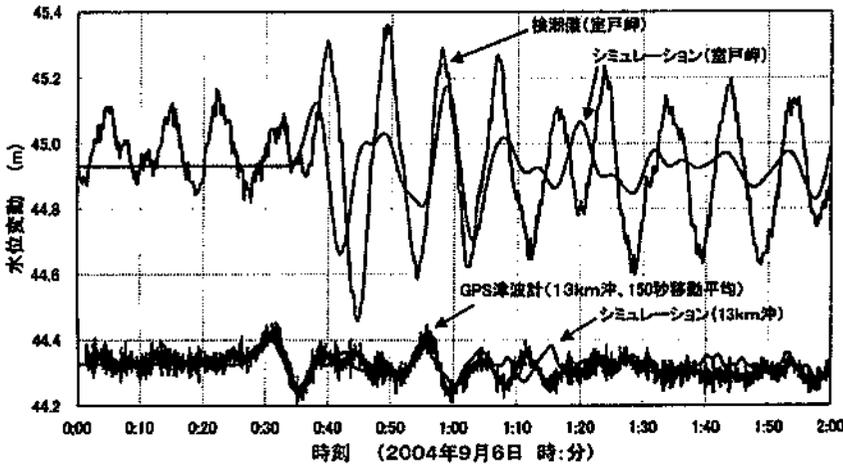


図5 潮位記録とシミュレーション結果の比較. (上段) 室戸岬換潮所. (下段) GPSブイ.

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換潮所においても0.5mの津波を観測した。図3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。下段の記録は風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。最上段は室戸岬換潮所の記録(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示す。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8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を含めておけば、より大きな津波が予想される場合にも迅速な避難誘導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。港湾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摩擦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拘束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、引き続き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、より速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たとえば衛星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覚しいが、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、津波の沖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(1998): GPS津波計の開発, 月刊海洋, 号外, No. 15, 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) <sup>1)</sup> 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 次元的水粒子運動を測る機能を付加した、図-1 に示す海象計

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。

## 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。

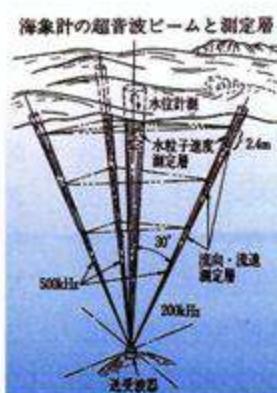


図-1 海象計の海底設置センサー(左)と測定原理(右)

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

(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

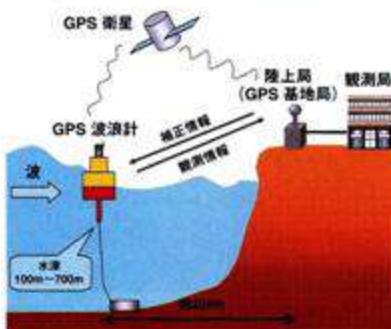


図-3 GPS波浪計の概念

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測位を每秒実施し、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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

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

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。

## 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



図-4 平成18年度GPS波浪計設置予定場所

**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 wide 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.

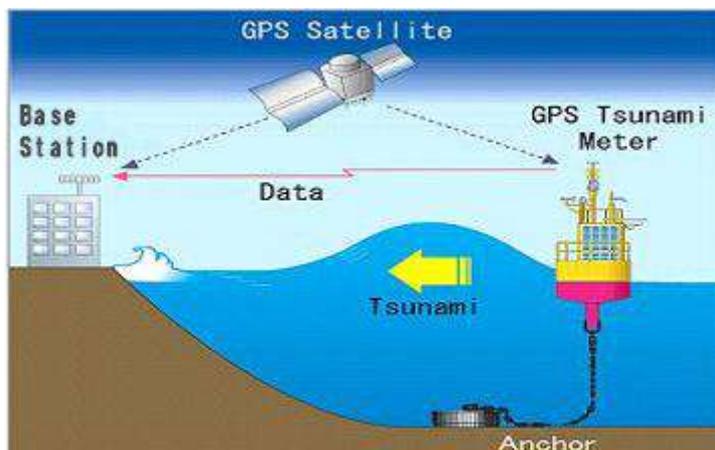


Figure 1. GPS Tsunami Detection System

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.

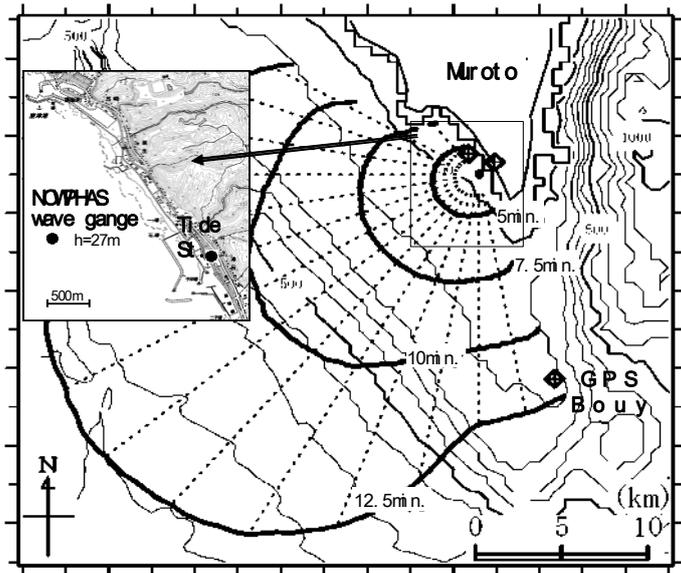


Figure 2. Example of Tsunami Transmission Time Estimation

**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.

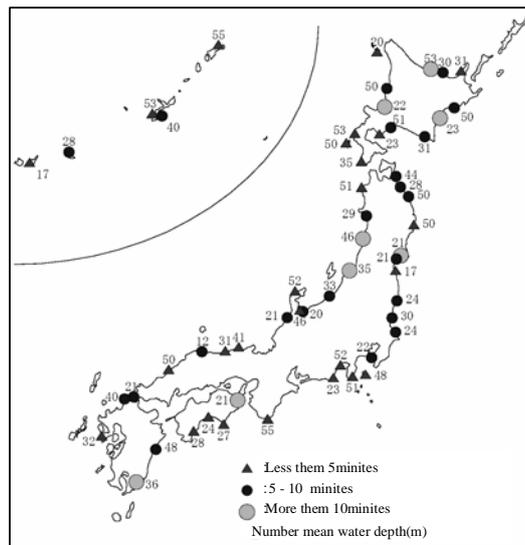


Figure 3. Estimated Tsunami Detection Time at NOWPHAS Wave Stations

#### 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-Peninsula 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.

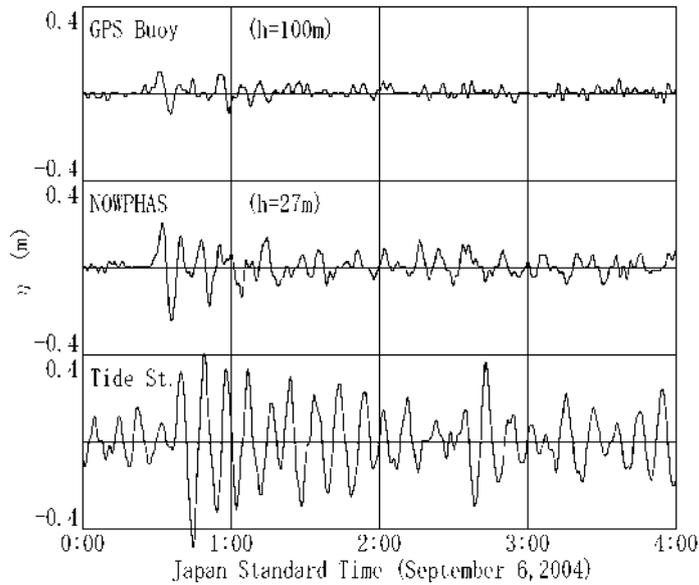


Figure 4. Observed 2004 Tokaido-Off Earthquake Tsunami Profile

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.

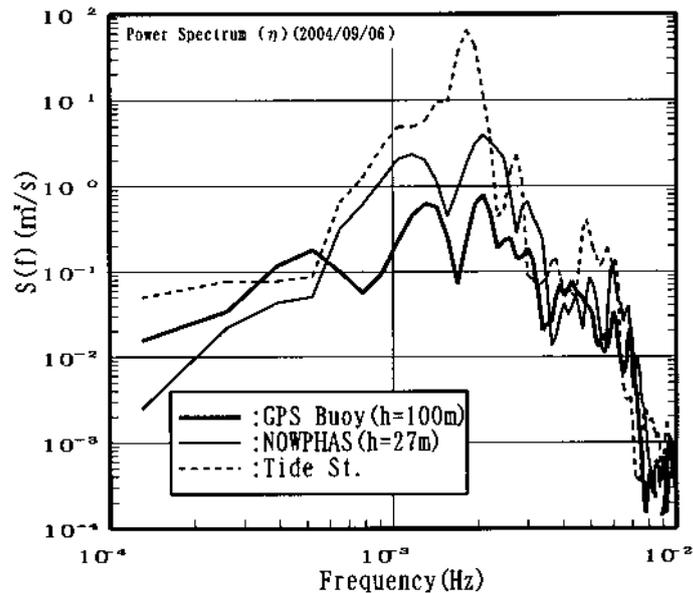


Figure 5. 2004 Tokaido-Off Earthquake Tsunami Spectrum Analysis

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 lack 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.

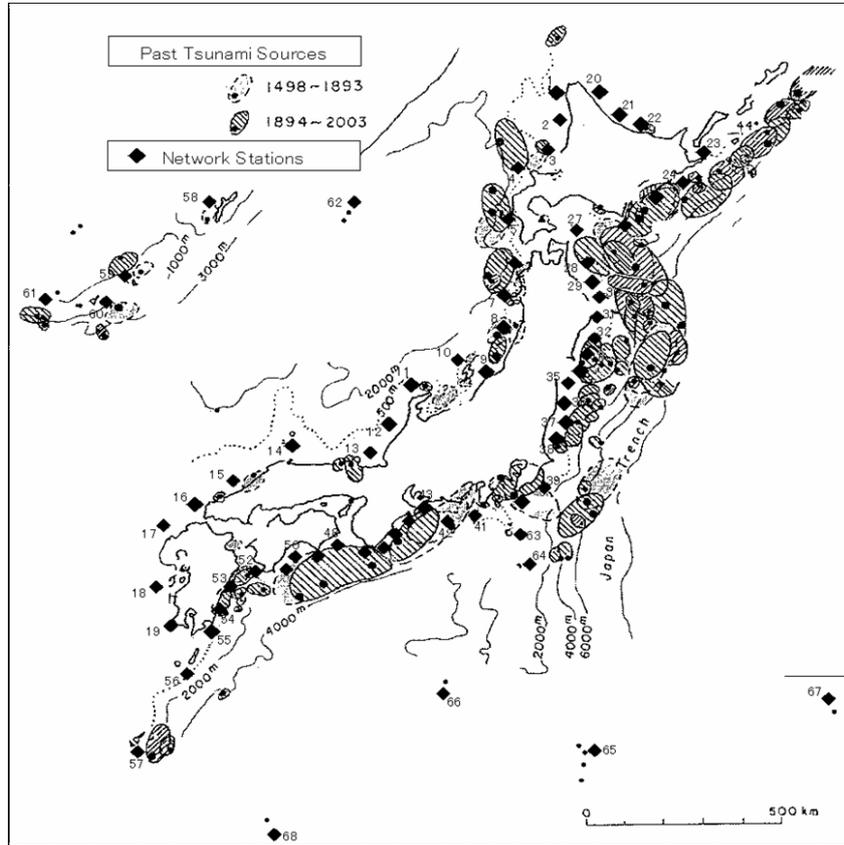


Figure 6. Plan of the Round Japan Tsunami Monitoring Network

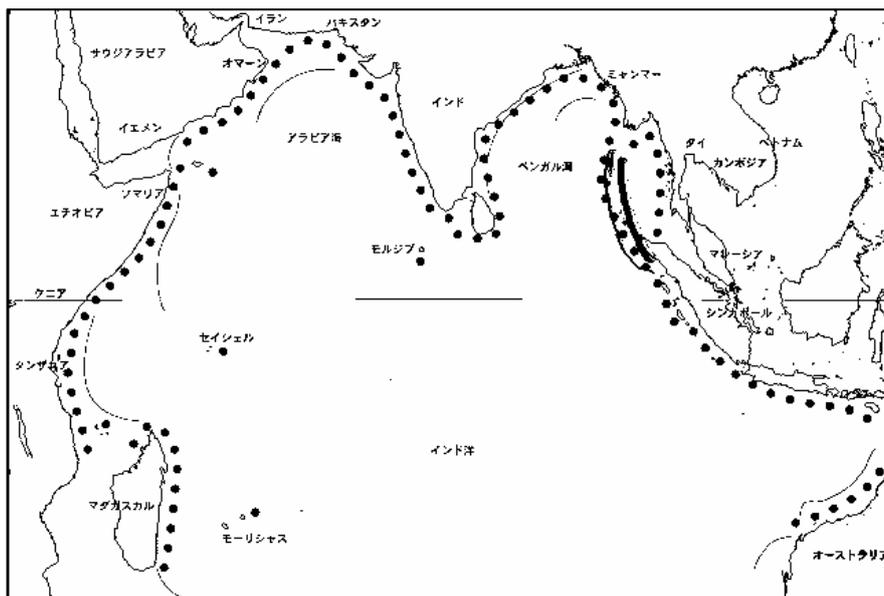


Figure 7. Plan of the Round Indian Ocean Tsunami Monitoring Network

## 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.

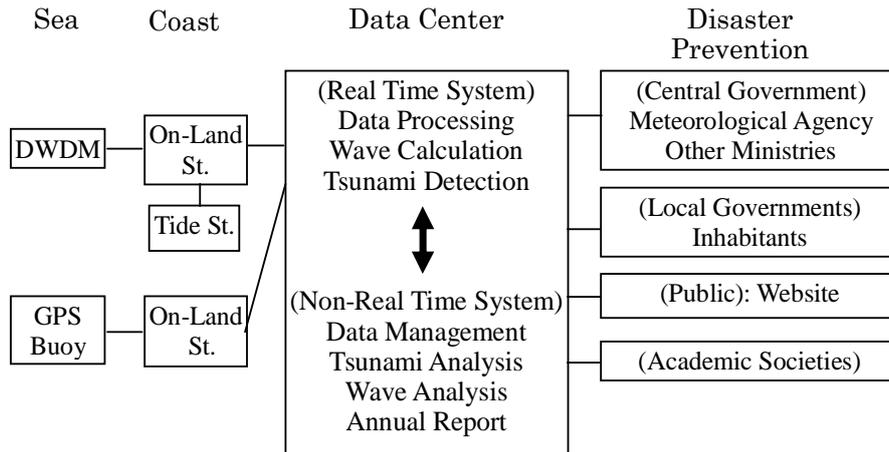


Figure 8. Wave, Tsunami and Tide Data System

**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.

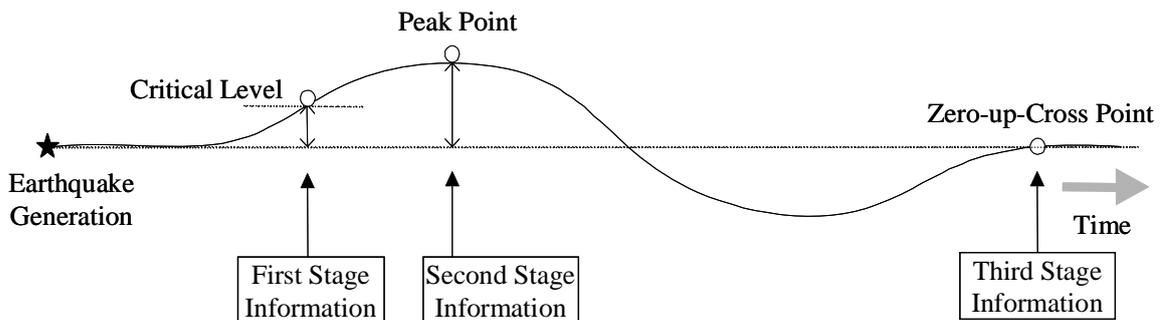


Figure 9. Time Series of Tsunami Detection Information

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 Symposium 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", Chikyū 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", Chikyū 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", Chikyū 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 Coastal 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 [↗](#)

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  
teru@eri.u-tokyo.ac.jp*

**NOBUO MORITANI**

*Coastal Development Institute of Technology,  
6F, 3-16, Hayabusa-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0092, 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@sonic.kaijo.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

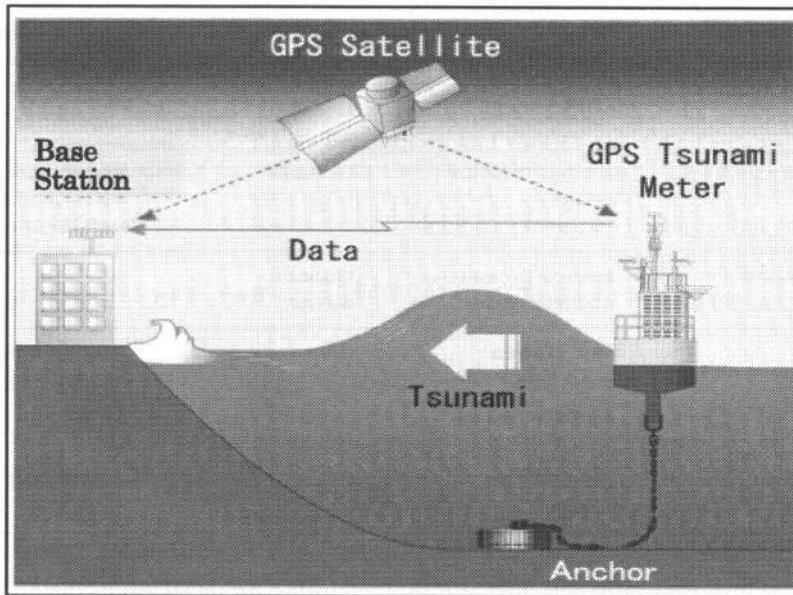


Fig. 1. GPS buoy tsunami detection system.

tsunami wave components may be under-estimated, which gives us incorrect tsunami information. For the on-site tsunami detection, on-air acoustic type tide gauge [Goda *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  $(gh)^{1/2}$ , where  $g$  is the gravity acceleration ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) 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

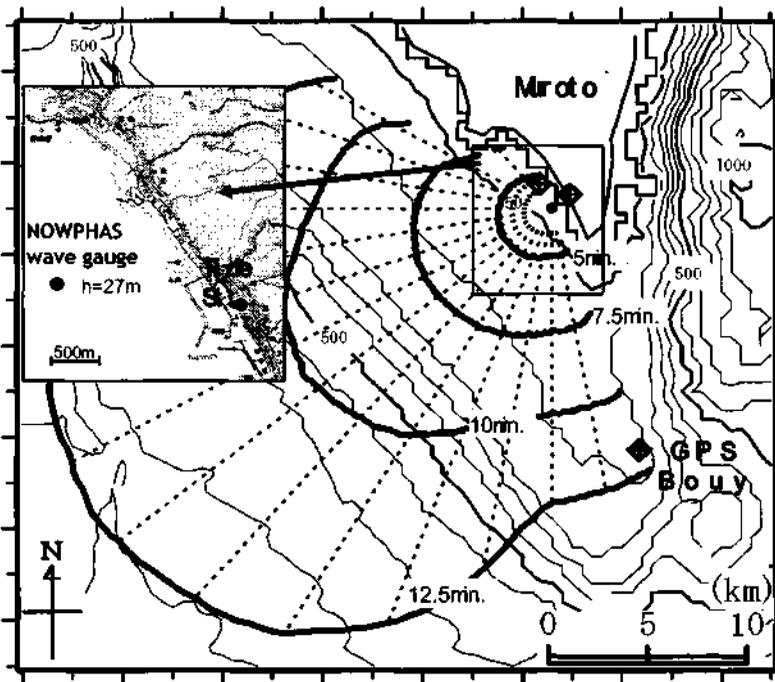


Fig. 2. Example of tsunami transmission time estimation.

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 seabed 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.

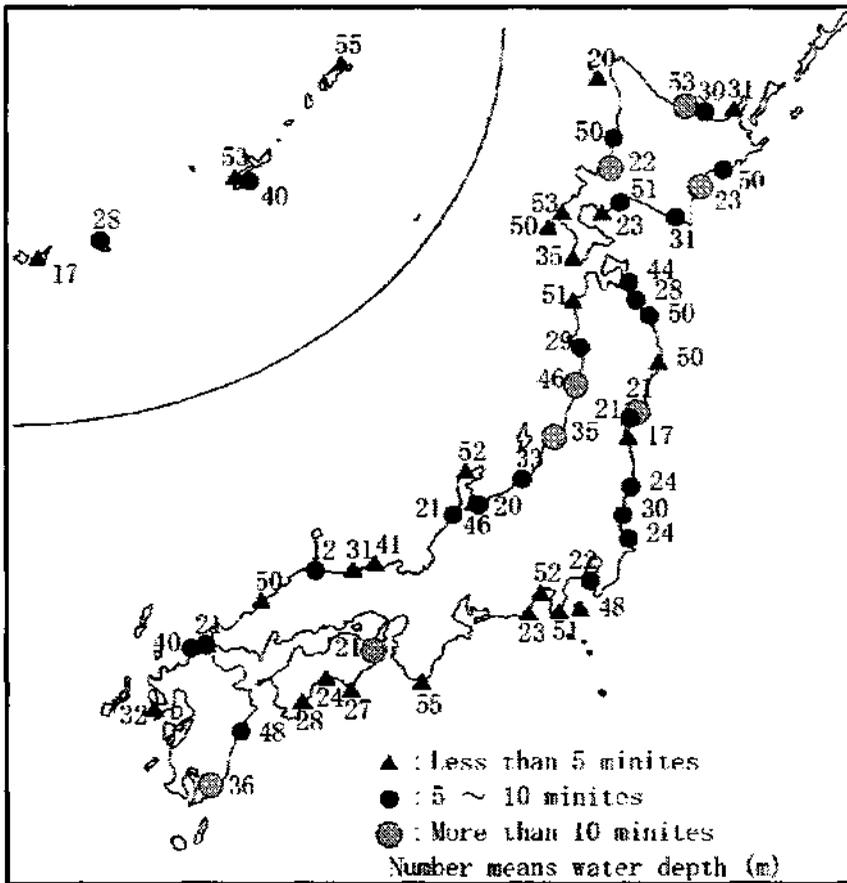


Fig. 3. Estimated tsunami detection time at NOWPHAS wave stations.

#### 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 Kisei-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. Those three stations observed the tsunami profile clearly. Due to the pre-event tsunami effect, low-frequency water level oscillation with periods around 8 minutes

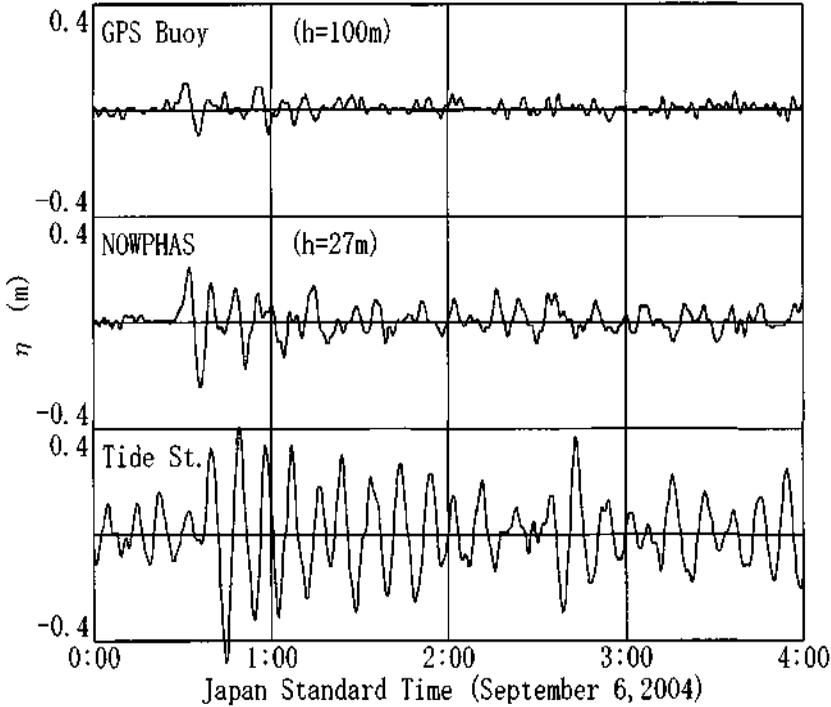


Fig. 4. Observed 2004 Tokaido-Off-Earthquake-Tsunami profile.

continued 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

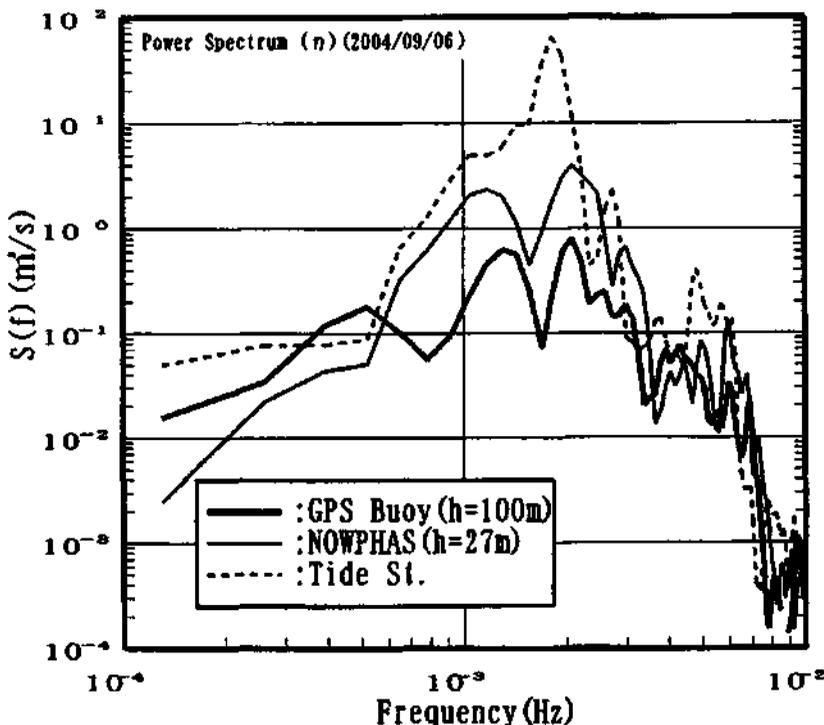


Fig. 5. 2004 Tokaido-Off-Earthquake-Tsunami spectrum analysis.

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.*, 2005c].

### 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, 2004], 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

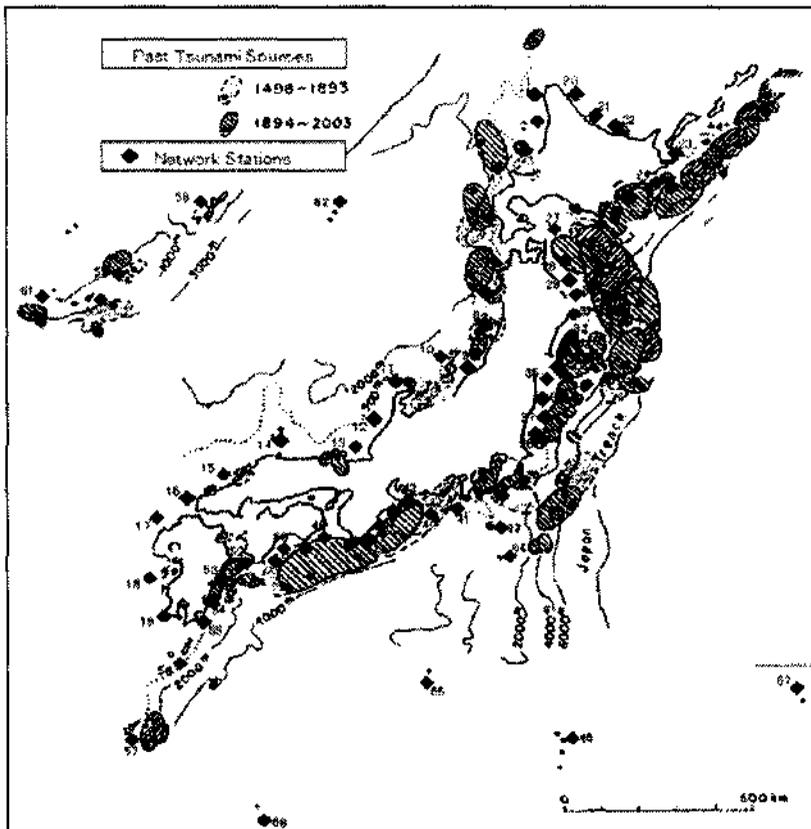


Fig. 6. Plan of the round Japan tsunami monitoring network.

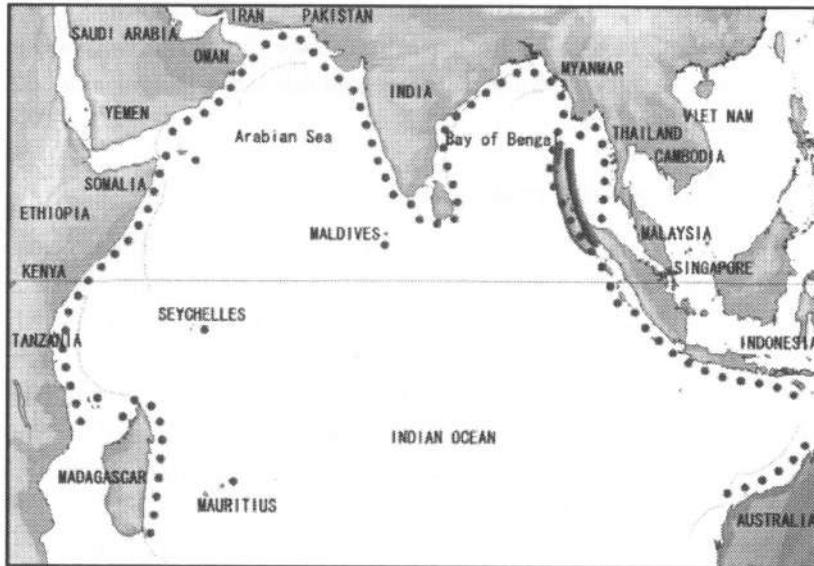


Fig. 7. Plan of the round Indian Ocean tsunami monitoring network.

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 500–1,000 km, tsunami detection stations should be installed at intervals of about 300 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

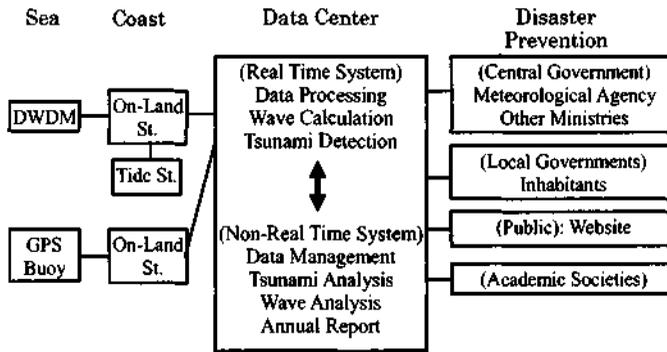


Fig. 8. Wave, tsunami and tide data system.

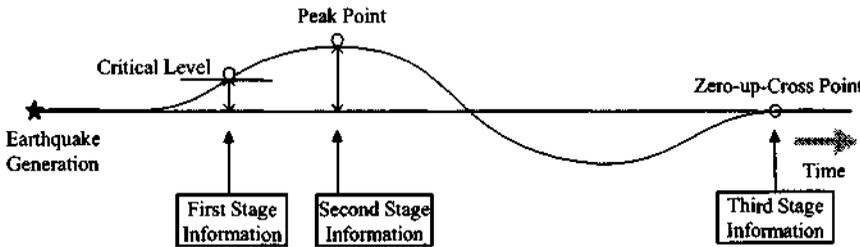


Fig. 9. Time series of tsunami detection information.

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 bouy 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., Meining, 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. 97-108.
- Bernard, E. N., Gonzales, F. I. & Vasily, V. T. translated by Satake, K. & Hirata, K. [2005] "The tsunameter 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., Hattori, 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.
- Hirata, 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., Isshiki, H., Moriguchi, T., Takada, 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-TI-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. 1465-1477.
- Nagai, T., Ogawa, H., Nukada, K. & Kudaka, M. [2004a] "Characteristics of the observed 2003 Tokachi-off earthquake tsunami profile," *Coastal Engineering Journal* 46(3), 315-327.
- 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).



[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<sup>(1)(2)</sup>。

つまり、海面高に追従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 年間は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<sup>(3)</sup>。

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。

## 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揺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。

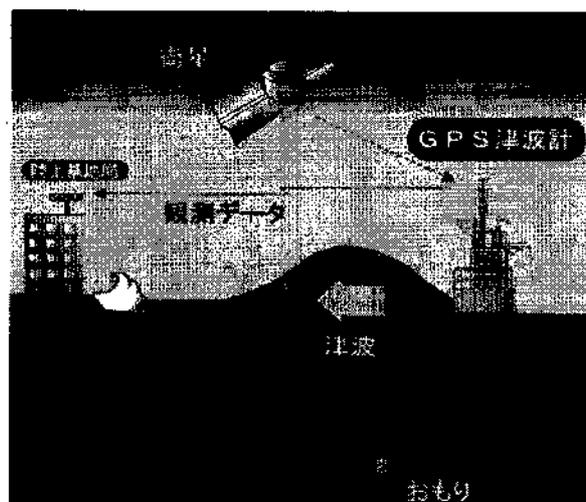


図1 GPS津波・波浪計の概念図

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<sup>(2)(4)</sup>。

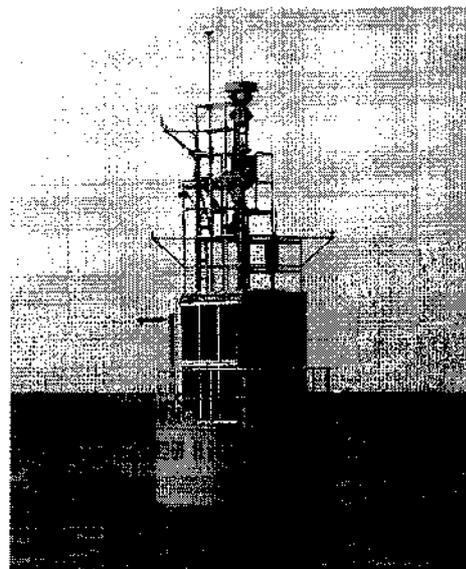


写真1 室戸岬沖に設置されたGPS津波・波浪計

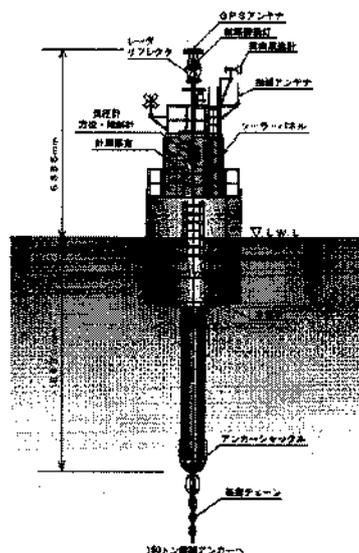


図2 ブイの形状・寸法

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。

### 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<sup>(3)</sup>。

観測点の座標  $(x, y, z)$  を、長周期変動成分  $(\hat{\phantom{x}})$  と短周期変動成分  $(\tilde{\phantom{x}})$  に分け、(1)~(3)式のように定義する。

$$x_{rcvl}(t) = \hat{x}_{rcvl}(t) + \tilde{x}_{rcvl}(t) \quad (1)$$

$$y_{rcvl}(t) = \hat{y}_{rcvl}(t) + \tilde{y}_{rcvl}(t) \quad (2)$$

$$z_{rcvl}(t) = \hat{z}_{rcvl}(t) + \tilde{z}_{rcvl}(t) \quad (3)$$

短周期変動成分  $(\tilde{\phantom{x}})$  は、通常は GPS 受信機 1 と衛星  $i$  間の距離  $\rho_i^i$  に比べて十分に小さいので、(4)式のように記述できる。

$$\begin{aligned} \rho_i^i &= \sqrt{(\hat{x}_{rcvl} - x_{sat}^i + \tilde{x}_{rcvl})^2 + (\hat{y}_{rcvl} - y_{sat}^i + \tilde{y}_{rcvl})^2 + (\hat{z}_{rcvl} - z_{sat}^i + \tilde{z}_{rcvl})^2} \\ &\approx \hat{\rho}_i^i(t) + \frac{(\hat{x}_{rcvl} - x_{sat}^i) \tilde{x}_{rcvl}}{\hat{\rho}_i^i} + \frac{(\hat{y}_{rcvl} - y_{sat}^i) \tilde{y}_{rcvl}}{\hat{\rho}_i^i} + \frac{(\hat{z}_{rcvl} - z_{sat}^i) \tilde{z}_{rcvl}}{\hat{\rho}_i^i} \\ &= \hat{\rho}_i^i(t) - e'_{1,x} \tilde{x}_{rcvl}(t) - e'_{1,y} \tilde{y}_{rcvl}(t) - e'_{1,z} \tilde{z}_{rcvl}(t) \quad (4) \end{aligned}$$

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  $\theta'_{1,elv}$  および方位角  $\theta'_{1,azm}$  を用いれば(5)式のように表せる。

$$(e'_{1,x}, e'_{1,y}, e'_{1,z}) = (\cos \theta'_{1,elv} \sin \theta'_{1,azm}, \cos \theta'_{1,elv} \cos \theta'_{1,azm}, \sin \theta'_{1,elv}) \quad (5)$$

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  $(\tilde{\phantom{x}})$  を得ることができる。

$$\tilde{\rho}_i^i(t) = -e'_{1,x} \tilde{x}_{rcvl}(t) - e'_{1,y} \tilde{y}_{rcvl}(t) - e'_{1,z} \tilde{z}_{rcvl}(t) \quad (6)$$

(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。

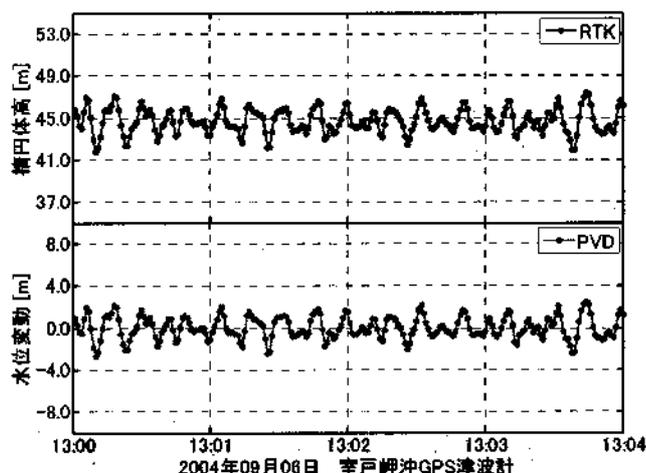


図 3 通常時の波浪観測データ

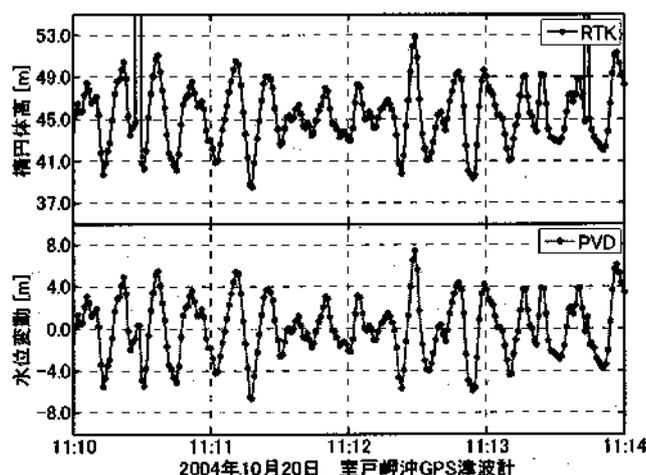


図 4 台風接近時の波浪観測データ

## 4. 異常値検出への PVD 法の実用

### 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 オフセットする可能性がある。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<sup>(5)</sup>。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。

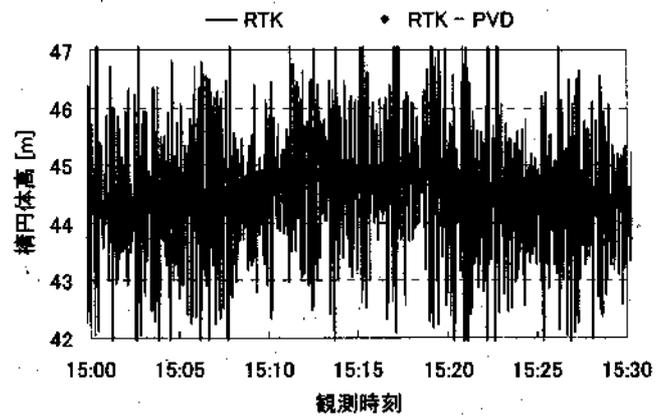


図 5 RTK 測位値と RTK-PVD の比較

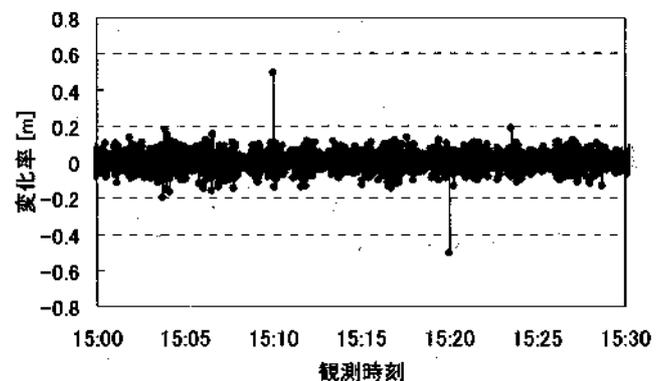


図 6 RTK-PVD の変化率

## 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

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いきたい。

## 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 プ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



**三宅寿英**

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\_t@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)  
teru@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



## Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan

Teruyuki Kato<sup>1</sup>, Yukihiro Terada<sup>2</sup>, Hitoyoshi Nishimura<sup>2</sup>, Toshihiko Nagai<sup>3</sup>, and Shun'ichi Koshimura<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<sup>2</sup>Kochi National College of Technology

<sup>3</sup>Port and Airport Research Institute

<sup>4</sup>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, southwestern 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.

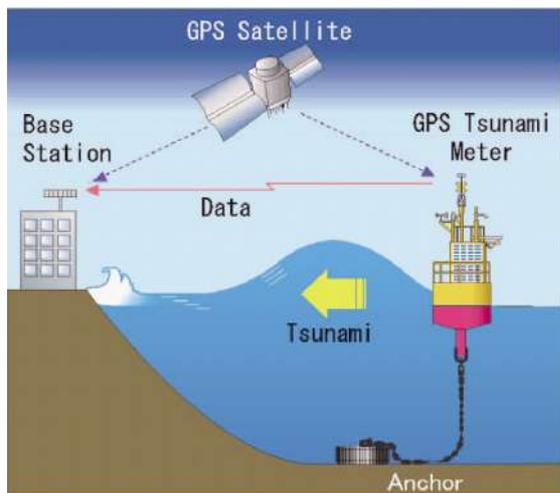


Fig. 1. GPS buoy system for detecting tsunami. RTK-GPS is employed together with radio transmission and an internet dissemination system, so that anyone can observe tsunami in real time.

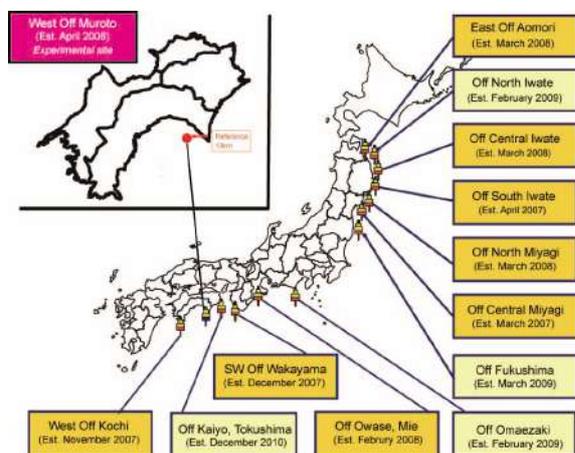


Fig. 2. Location of the GPS buoy established about 10 km west of the Cape Muroto (upper left inset). Stations colored in dark brown are used for Fig. 5.

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

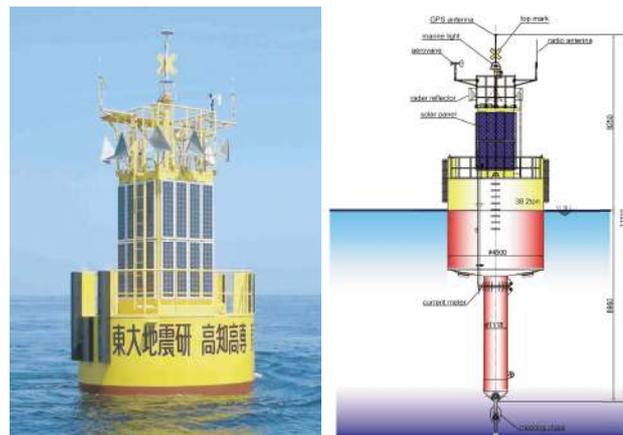


Fig. 3. GPS buoy established west of Cape Muroto, southwest Japan. The system has been operational since April 2008. (left) photo, (right) plan (unit: mm).

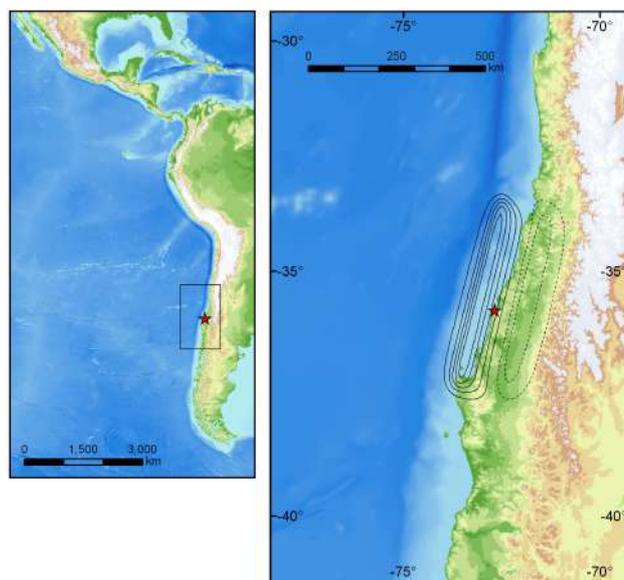


Fig. 4. Location of the 2010 Chile Earthquake shown by an asterisk and the estimated vertical displacements. See text for the source parameters.

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

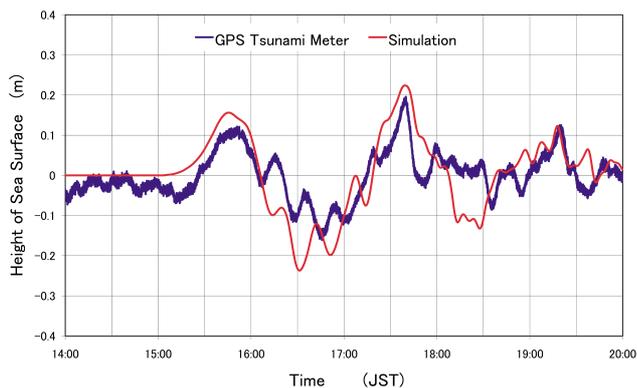


Fig. 5. Recorded vertical motion of the GPS buoy during the tsunami (black) and simulated record (red). The simulated record is offset forward by 26 minutes.

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.

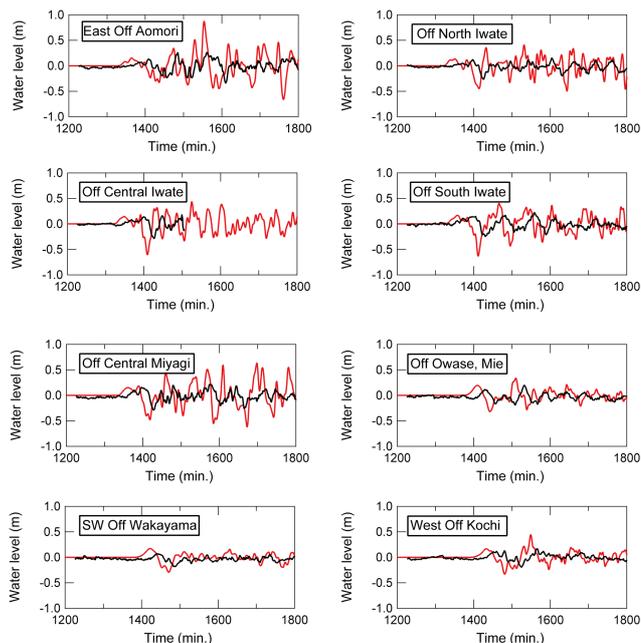


Fig. 6. Comparison between observed (black) and simulated tsunami (red). About 30 minutes of offset may be seen for all of the stations. The reason for this offset is under investigation.

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 Ministry 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

**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

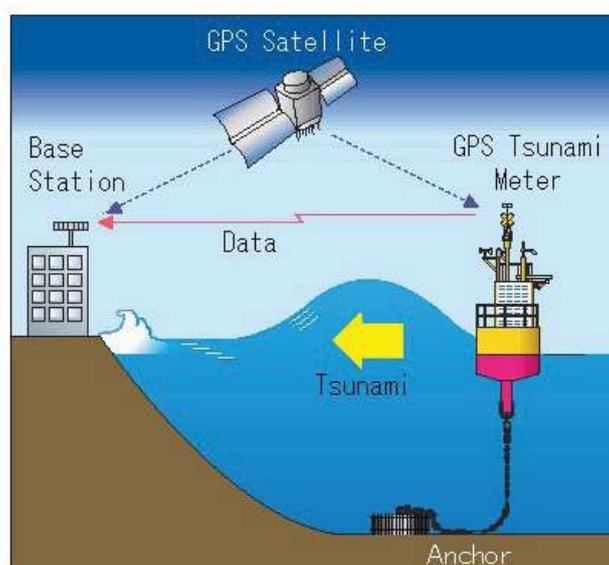
established off Cape Muroto, Southwest Japan, is continuously operating until now. These systems also succeeded to detect 28th February 2010 Chile earthquake and 11th March 2011 Tohoku-Off earthquake tsunamis.

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.



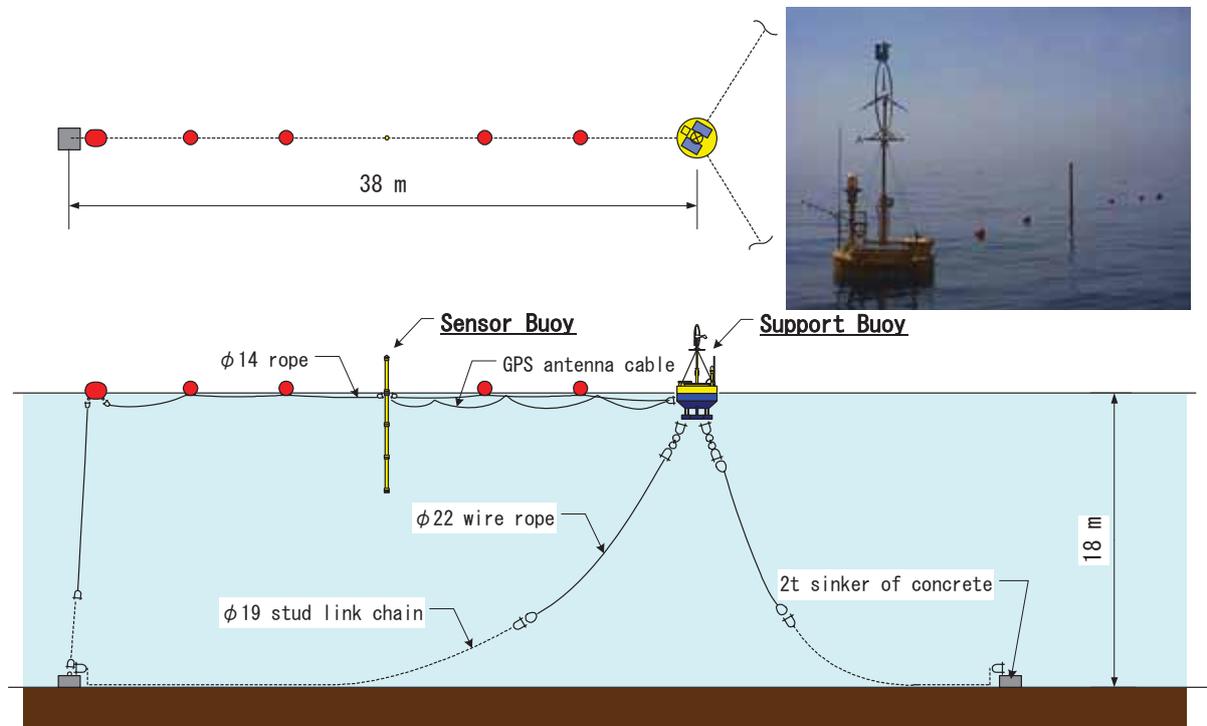
**Figure 1.** Concept of GPS tsunami monitoring system.

## 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.

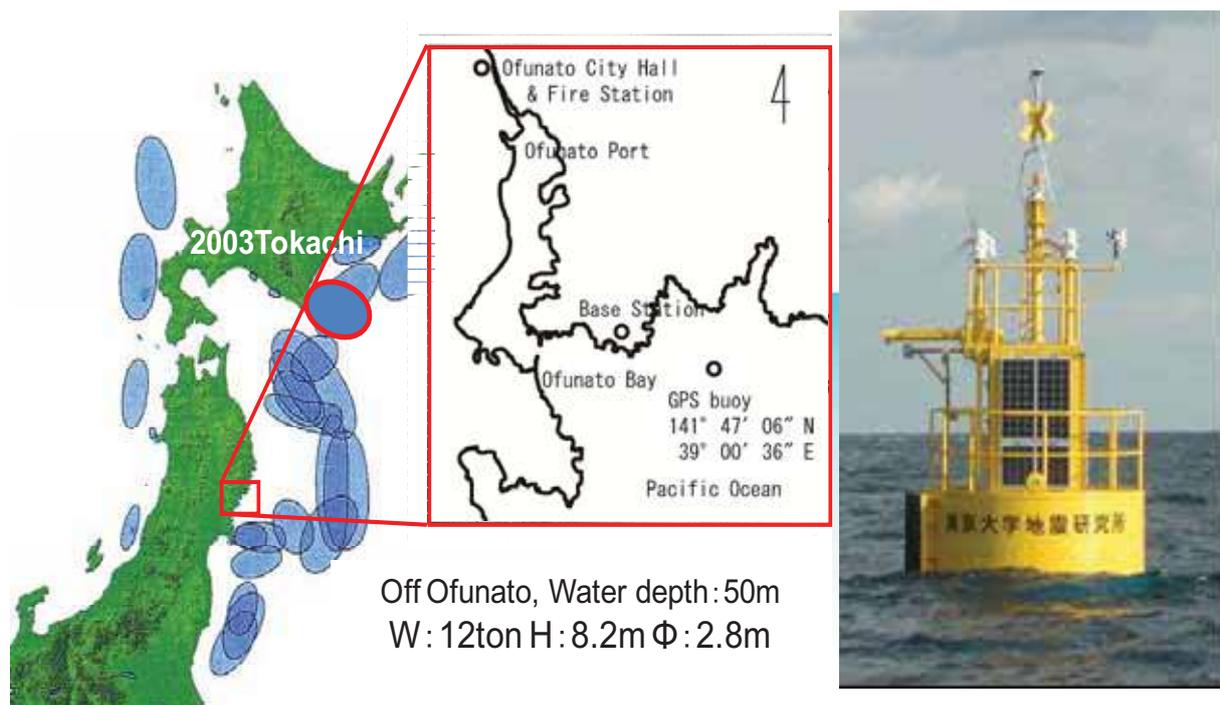
In order for the Support-buoy not to float away or rotate, it has to be anchored by tri-directional sinkers. On the other hand, the Sensor-buoy although connected to the Support-buoy with an antenna cable should be free from any tension as much as possible, other than sea-surface displacement. Thus, 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 ( $39^{\circ}00'36''$  N,  $141^{\circ}47'06''$  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.

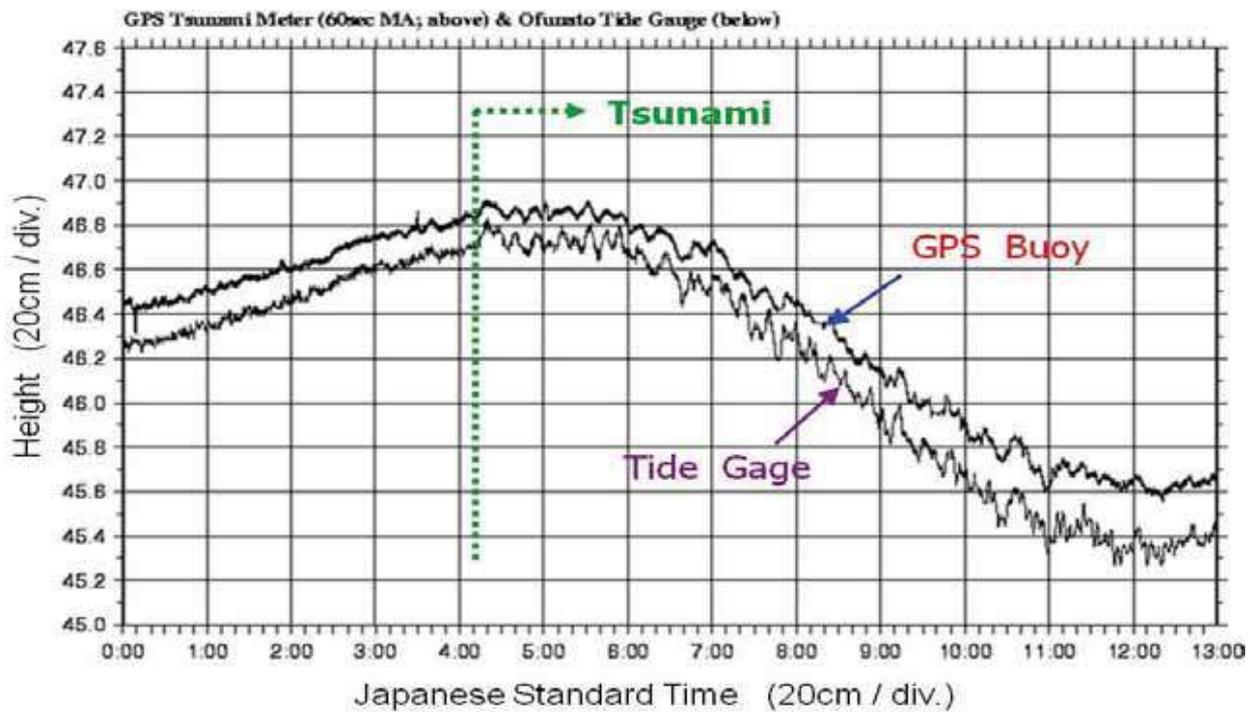


Figure 4. Peru earthquake tsunami on 23rd June 2001.

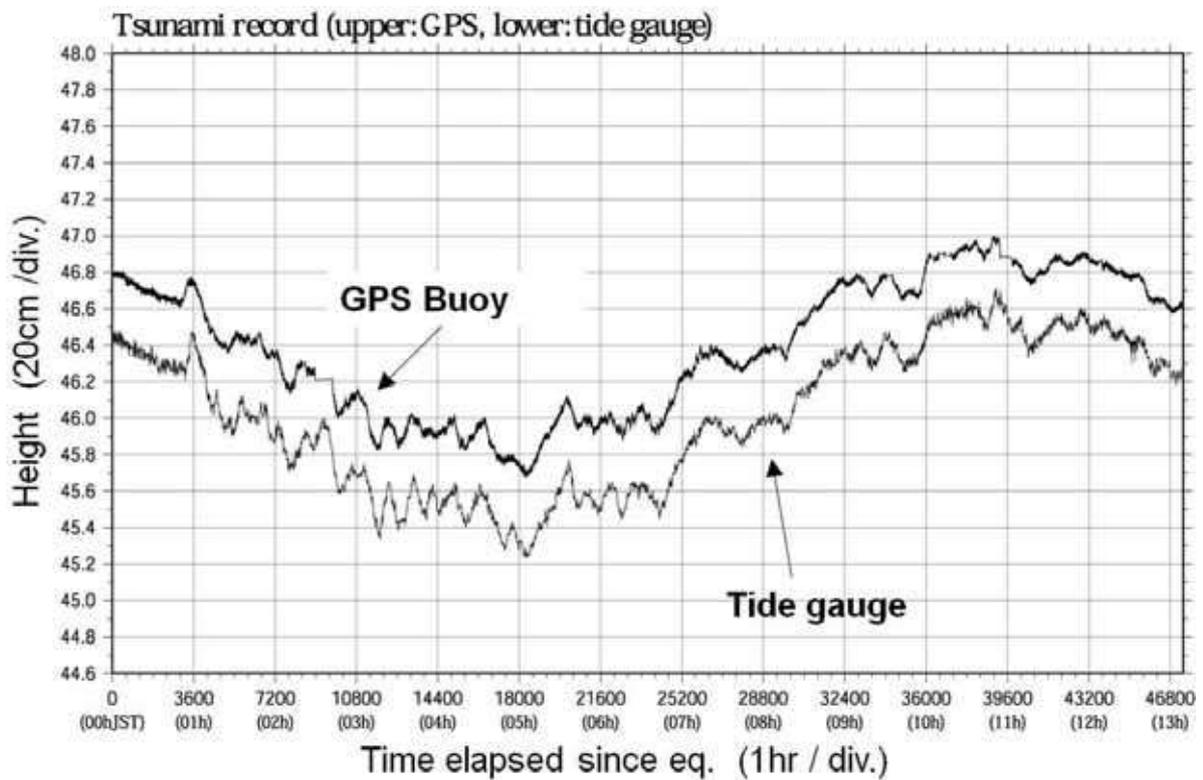


Figure 5. Tsunami due to Tokachi-Oki earthquake on 26th September 2003.

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 seabed 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.

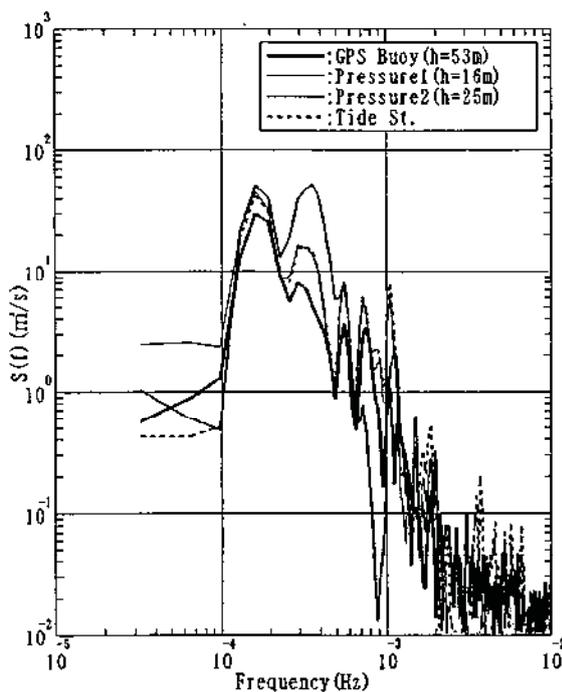


Figure 6. Tsunami spectrum analysis.

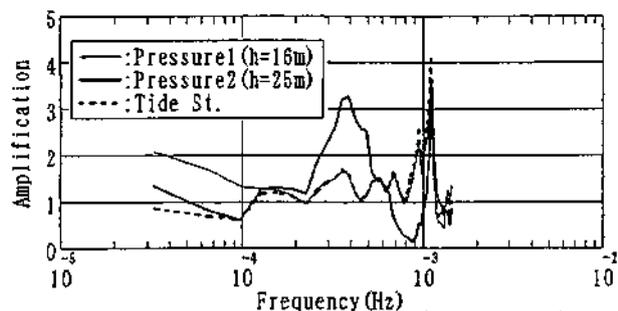
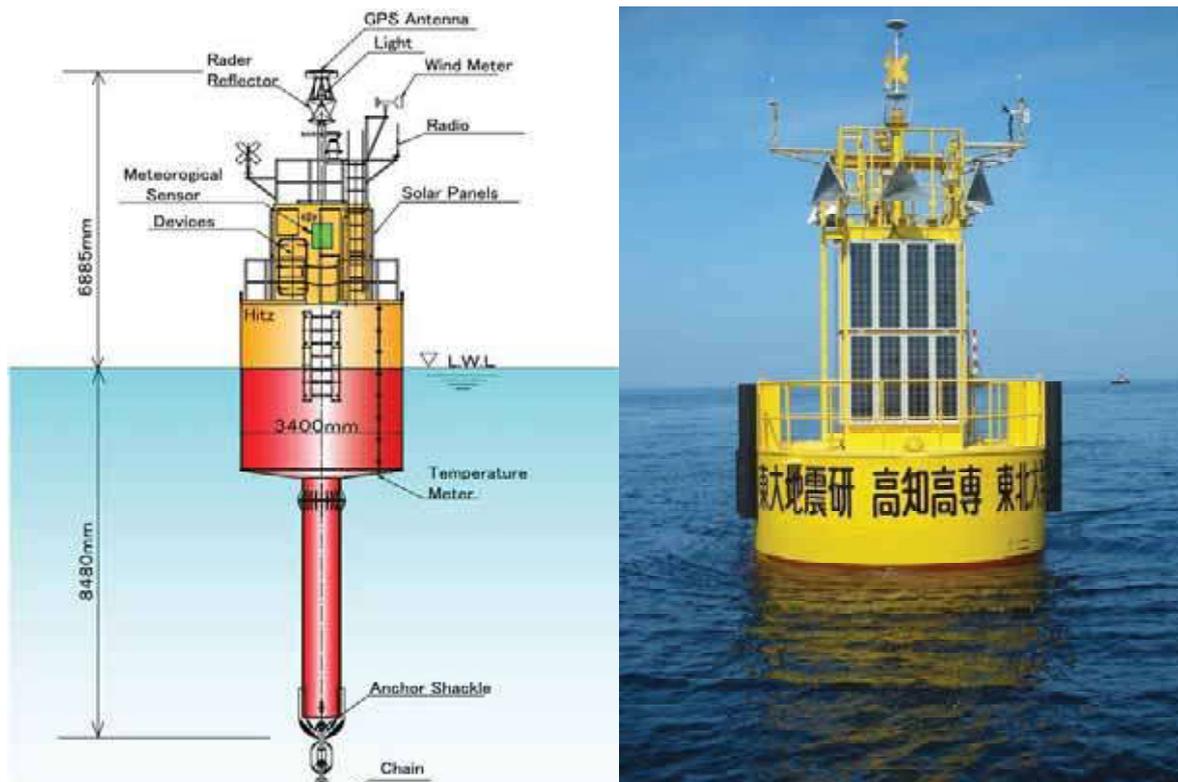


Figure 7. Tsunami spectrum response analysis

### 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.

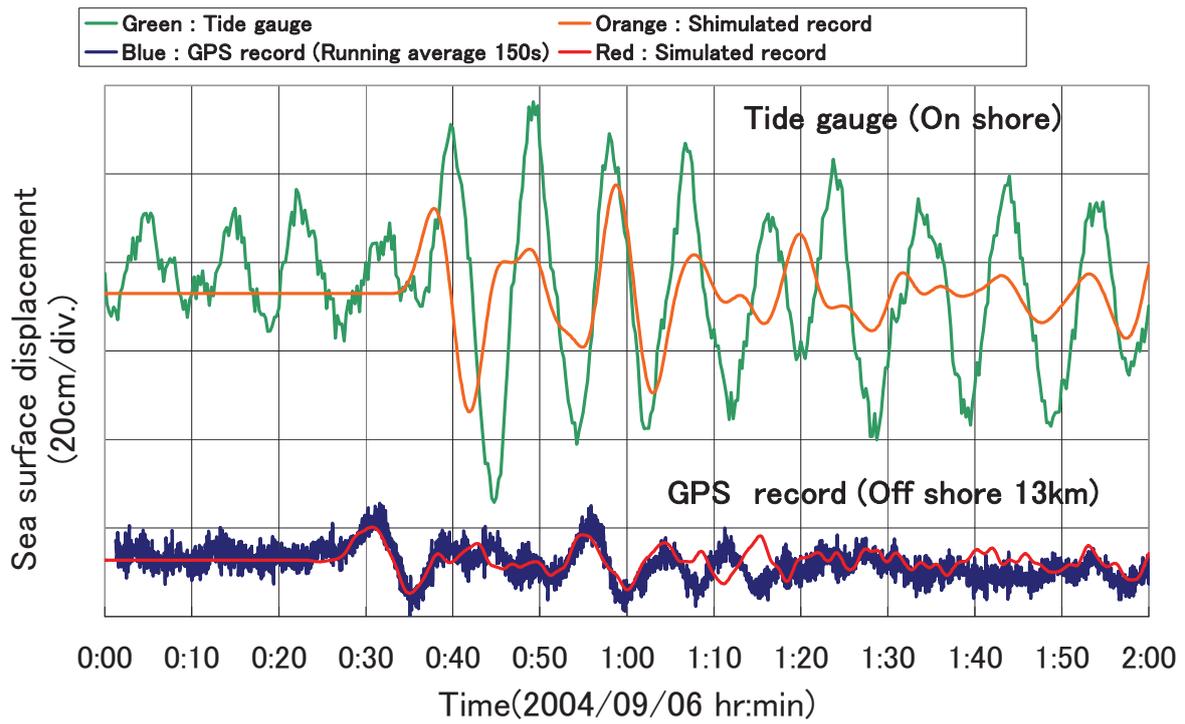


(a) 1st stage GPS Buoy

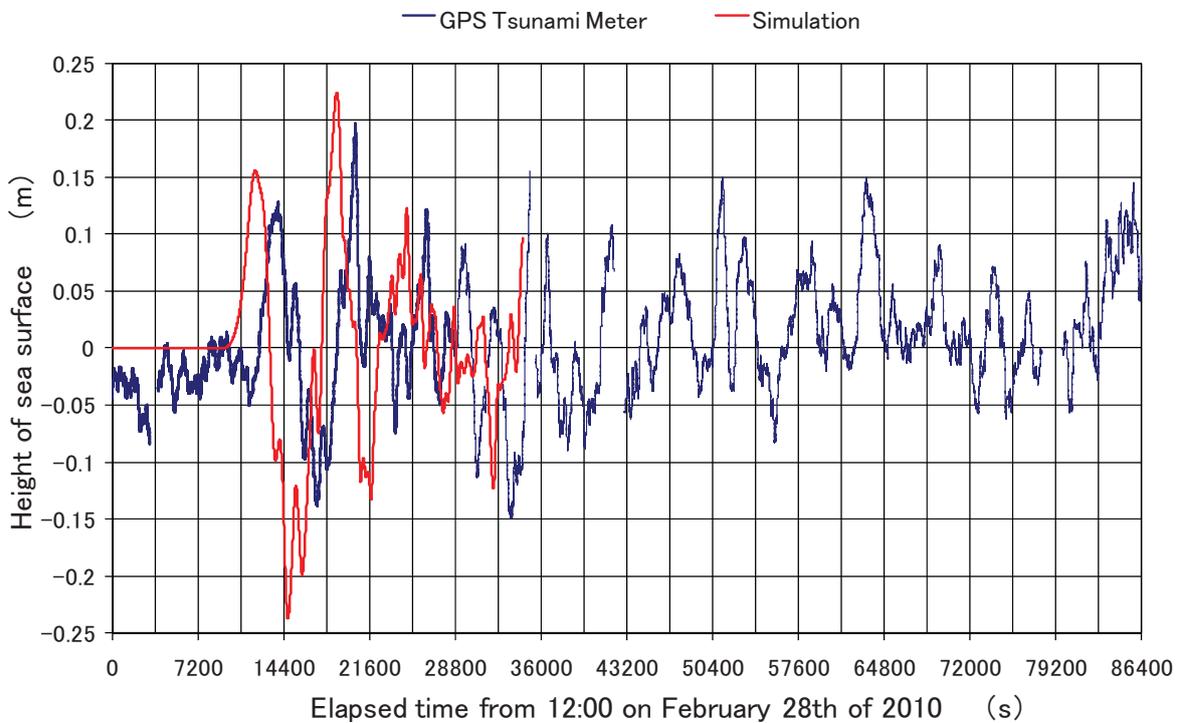
(b) 2nd stage GPS Buoy

**Figure 8.** GPS Tsunami Meter at Off-Muroto (<http://www.tsunamigps.com>)

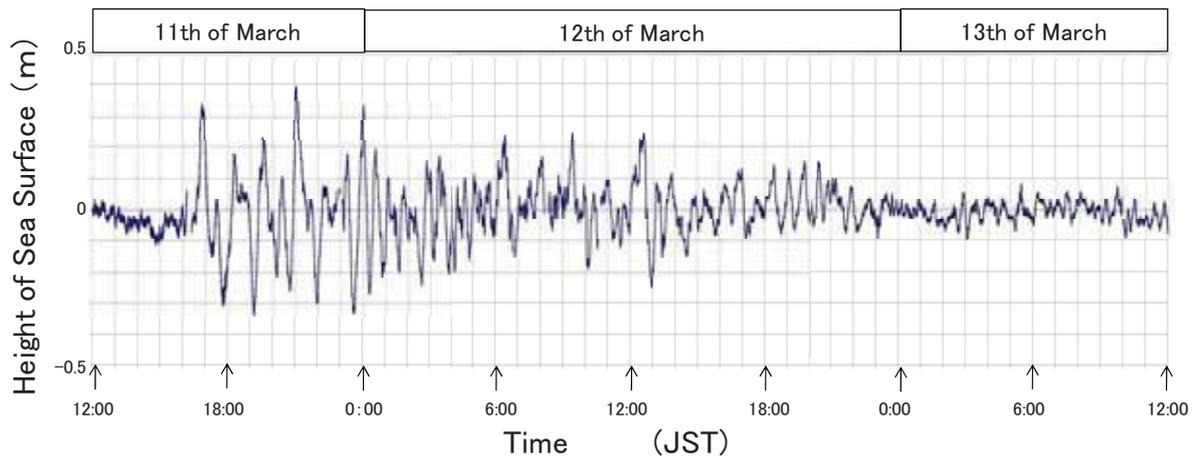
The buoy has experienced nearby passages of several typhoons with the maximum wave of about 20 meter in height and has shown a total integrity for an operational use. On September 5th 2004, a large earthquake of Mw7.4 occurred about 200km east of the buoy and generated significant tsunami. As shown in 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.



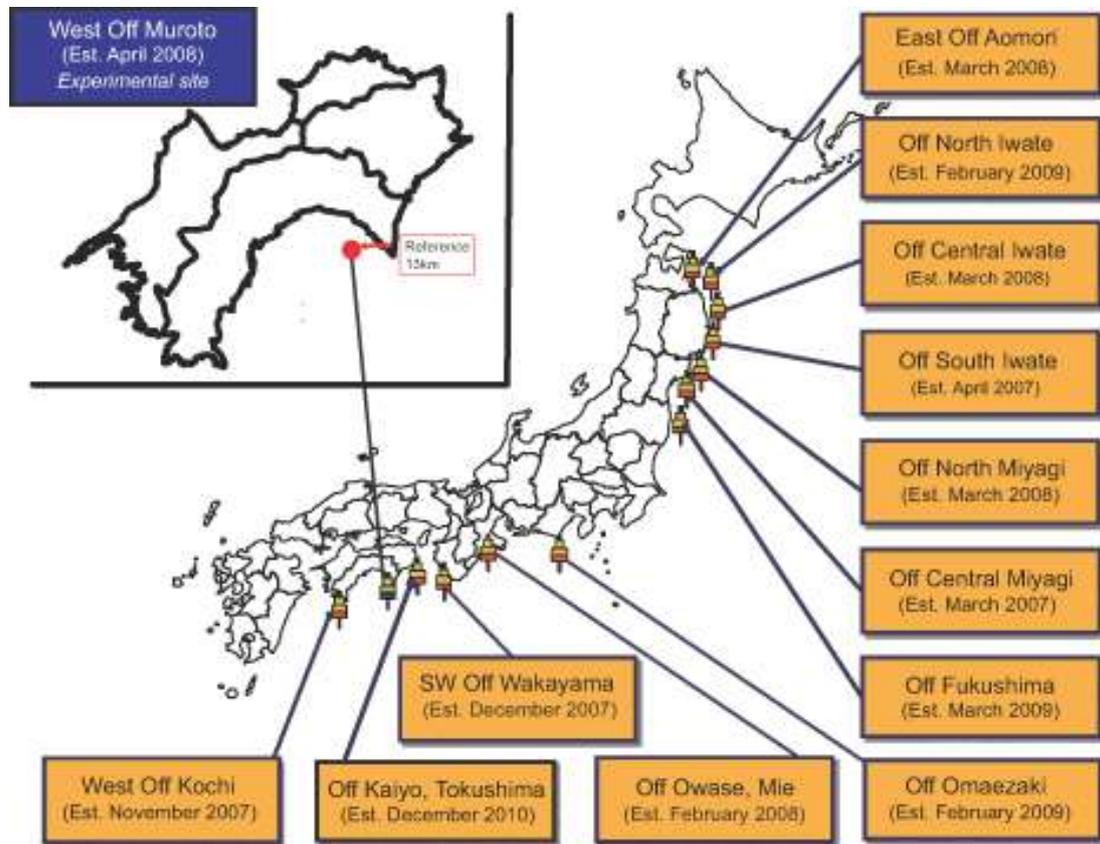
**Figure 9.** Tsunami due to Off Kii Peninsula earthquake on 5th September 2004.



**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,

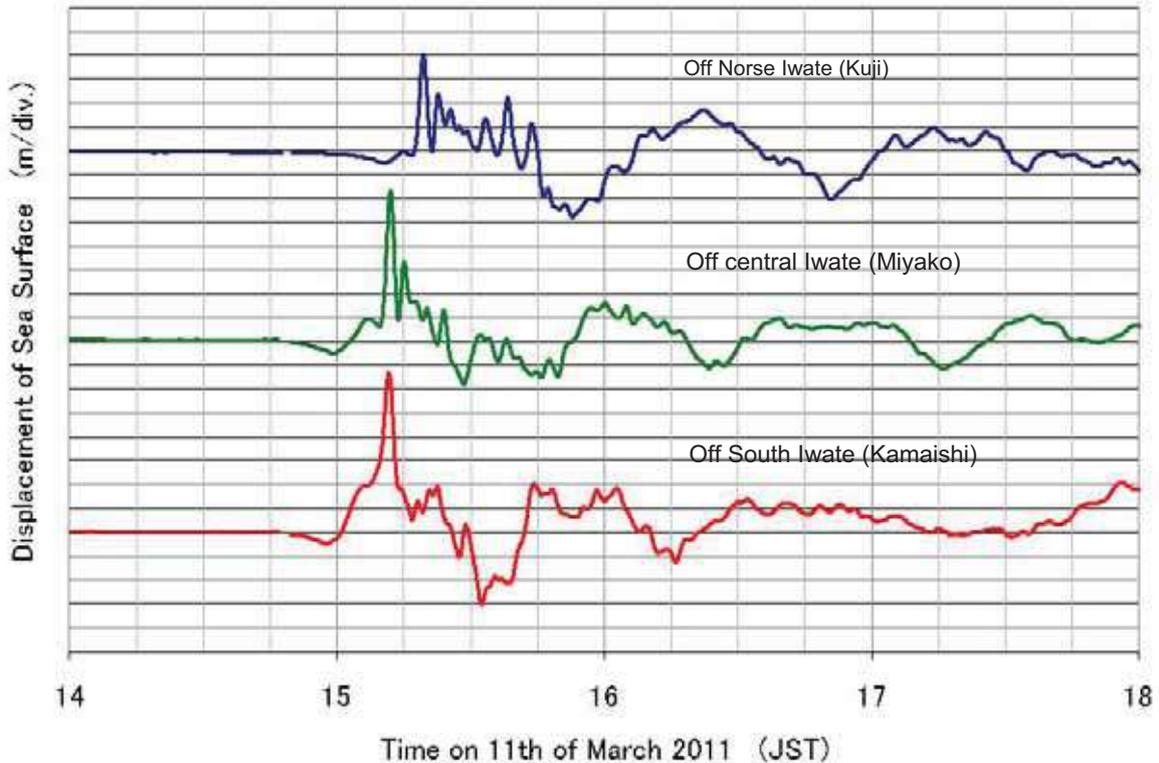
Infrastructure, Transport and Tourism of Japan (MLIT). As shown in Fig.12 they have established more than twelve GPS buoys along the Japanese coasts and the system has been operated by the Port and Airport Research Institute. These GPS buoys along the coast of the Pacific Ocean also detected tsunamis 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. Cliteensen, 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 kaihatu, *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. Geophys. 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.

## GPS : 次の “夢” に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～

加藤 照之<sup>1)</sup>

1) 東京大学地震研究所

(2013 年 5 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<sup>1)</sup>

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. 筆者は長年「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か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。Councilman 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。

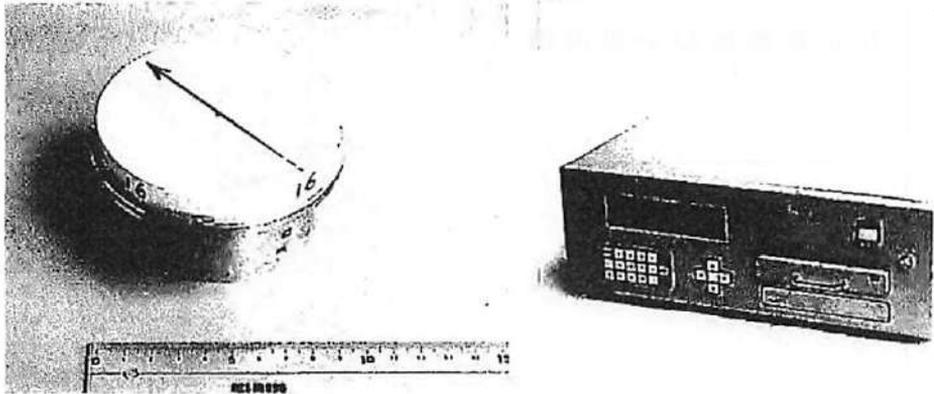


Figure 2: The first GPS receiving apparatus that was introduced in Japan (SONY GTT4000). (Left) antenna, and (Right) receiver. (Murata *et al.*, 1990)



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

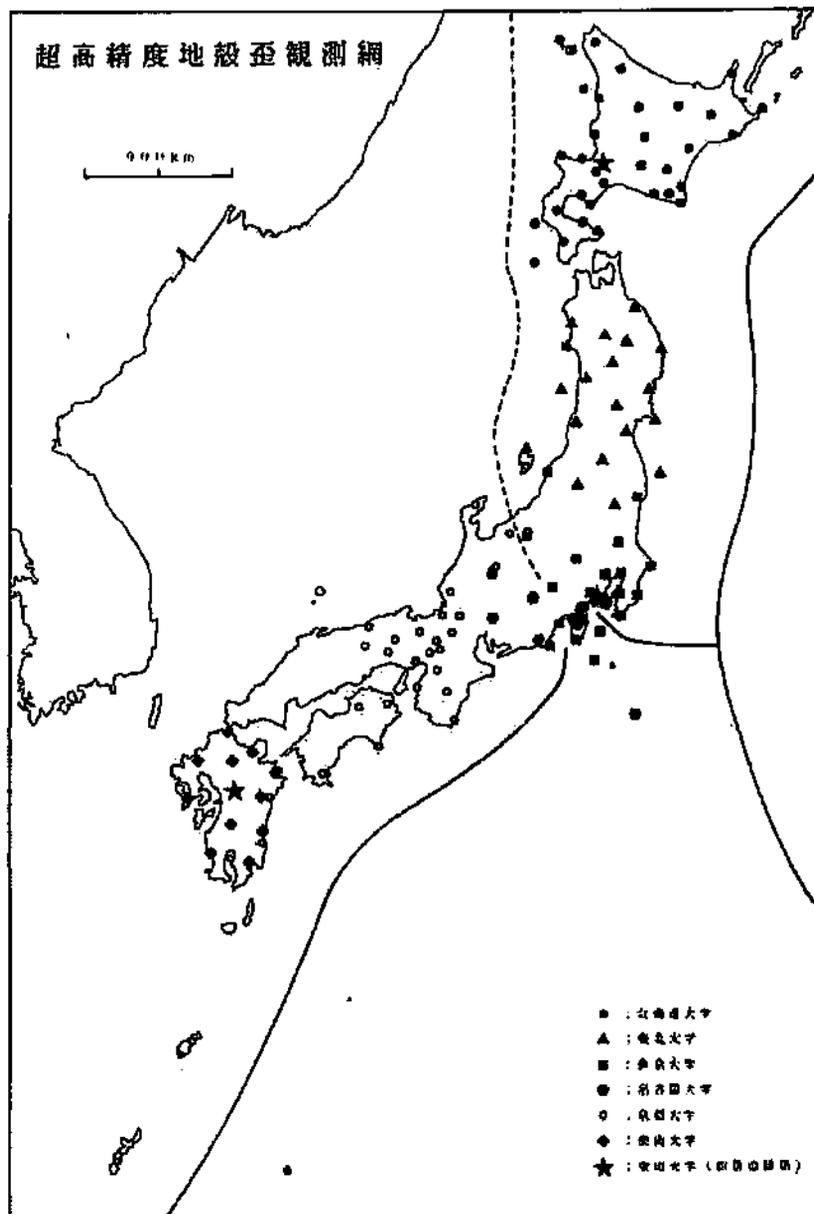


Figure 3: The first nationwide GPS array proposed by JUNCO.

*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稠密 GPS 観測が実施されたことがあげられる。伊東市周辺では 1975 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調査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的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 受信機のデモ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格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、その集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検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。まだ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企画・立案・運営していくのはかなりの困難であったと言える。

「GPS 大学連合」の英語名称は Japanese University Consortium for GPS Research (略称: JUNCO) としたが、これは当時筆者が米国に渡航した際に米国に 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、彼等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徹底しておらず、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-G2) 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稠密な GPS の連続観測網となった (Miyazaki *et al.*, 1997, 1998)。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、1 Hz 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放モーメント量も準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

待できるだろう (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しことになった。

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極稠密アレイ観測に基づいて局所的な大気擾乱への研究に寄与することとなった (小司他, 2009)。また、電離層研究の分野でも 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層研究は世界的にも飛躍的な展開をもたらしこととなった。

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。M8 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., 内海他, 2005; Ohta *et al.*, 2008; 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、伊東周辺における 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、一方悪条件下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き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.*, 1996; 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き群発活動 (Kimata *et al.*, 2000; 坂東他, 2005)、同年の鳥取県西部地震 (橋本他, 2001; Tabei *et al.*, 2001)、2003 年十勝沖地震 (GPS 大学連合・笠原稔, 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には 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.*, 1998; 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 (仲江川他, 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総数の時間変化に前兆的变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 サンプルングやさらに高頻度サンプル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ル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 の開発の一番の恩恵はキネマティック 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。筆者らも GNSS 受信機をブイに搭載して津波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可降水量や電離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と思われる。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手の育成など、研究以外の苦勞も多いのであるが、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 GEODYSSEA 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けていけるであろう。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研究：すでにわが国ではこのよう

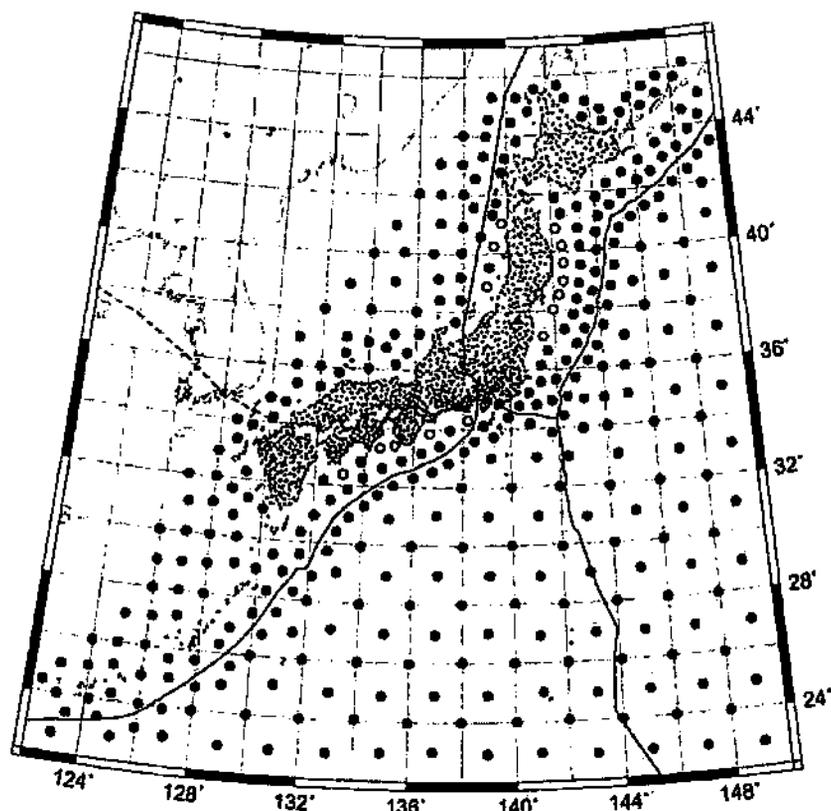


Figure 4: Proposed GPS array surrounding Japanese islands and in the western Pacific. (open circles) operational buoys established by the Port and Airport Research Institute as a part of the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours (NOWPHAS) system, (closed circles) proposed GPS 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“夢”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 が登場したとき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」の活動を越えた日本の 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貌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ないと感じられる。読まれた方には不満足の間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、鷲谷威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、飯沼卓史の各氏から重要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. Kosuga, E. Kurashimo, T. Kurosawa, S. Matsumoto, T. Matsushima, R. Miyajima, K. Miyashita, I. Murata, H. Nakai, T. Nakano, S. Nakao, M. Ohtsu, T. Okuda, E. N. Oware, T. Saishoji, M. Satomura, M. Shibata, C. Shiota, M. Suzuki, T. Tabei, M. Tanaka, H. Takahashi, T. Takahashi, and T. Wakasugi (1994): First Ito GPS campaign for crustal movement studies (Part1: Preliminary Report), *Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1994)*, 177-179.
- 坂東信人・飯屋新一・木股文昭・中尾茂・及川純・渡辺秀文・鶴川元雄・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.
- Councilman, 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*, A41-05.
- 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・細義信・大谷文夫・原田昌武・西村宗・田部井隆雄・大庭健太郎・恵口泰秀・近添裕司・寛楽磨・石橋克彦・原田智也・三好崇之・土井英寛・井瀧陽平・山内麻記子・田川繭子・高橋浩晃・平原和朗・木股文昭・宮島力雄・中野健秀・大井隆一・中尾茂・平田安廣・加藤愛太郎 (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 梅田康弘）, 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・尾上謙介・細義信・梶島洋・大谷文夫・中村佳重郎・高橋浩晃・笠原稔・本多亮・一柳昌義・山口照寛・前田宜浩・道家涼介・柳井啓広・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*, 53-54.
- Heki, K., S. Miyazaki, and H. Tsuji (1997): Silent fault slip following an interpolate thrust earthquake at the Japan

- Trench, *Nature*, **386**, 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: 鷲谷威) (2009): 日本海東縁歪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・萬納寺信崇・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.
- 飯沼卓史・太田雄策・三浦哲・立花憲司・長谷川昭・宮尾佳世・松島健・平尾暁彦・高橋浩晃・前田宜浩・山口照寛・高田真秀・宮崎真一・岩園真紀子・落唯史・鷲谷威・伊藤武男・イルワン メイラノ・道家涼介・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 (1988): "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. Terashima, 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**, 287-299.
- 加藤照之・J. P. L. Catane・茶珍俊一・藤森邦夫・平原和朗・平田安廣・細善信・市川隆一・井口博夫・伊勢崎修弘・岩淵哲也・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・徳山明・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**, 132-135.
- 川元智司・伊藤武男・平原和朗・鷲谷威・橋本学・田部井隆雄 (2004): FEM による多孔質媒質中での流体移動により生ずる地震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・緒田辰吾・三浦哲・立花憲司・中尾茂・仁田文市・金沢敏彦・矢吹哲一朗・芝崎文一郎・里村幹夫・佐々木祐治・臼井和平・藤井陽一郎・長坂健一・川合栄治・河合晃治 (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**, 155-167.
- 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 V52-08.
- 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 (2005): 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, **75**, 553-554.
- MacDoran, P. F. (1979): Satellite emission radio interferometric earth surveying SERIES— GPS geodetic system, *Bulletin Géodésique*, **58** (2), 117-138.
- 松島健・高橋浩晃・加藤照之・竹内章・山口照寛・河野裕希・福田淳一・畠本和也・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, S101-P012.
- 松村正三・里村幹夫・内海さや香 (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. Reinhard, 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・綿田辰吾・平田安廣・井筒屋貞勝・土屋淳・伊賀章 (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・藤井隆一郎・長坂健一・金沢敏彦・脇田宏・矢吹哲一・芝崎文一郎・加藤照之・大久保修平・綿田辰吾・川合栄治・石井紘・松本滋夫・平田安廣・里村幹夫・佐々木祐治・臼井和平・木股文昭・角野由夫・奥田隆・宮島力男・中村勝・中村佳重郎・伊藤潔・越山豊・藤原智・田中寅夫・平原和朗・細善信・小泉誠・田部井隆雄 (1990b): 相模湾周辺における GPS 観測 (概論), *測地学会誌*, **36**, 23-36.
- 仲江川敏之・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. Ichiyangi (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・宮崎真一・鷲谷威・伊藤武男・道家涼介・竹内章・宮尾佳世・平尾暁彦・前田宣浩・山口照寛・高田真秀・岩園真紀子・落唯史・イルワン メイラノ (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 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 (1996): 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・岩瀬哲也・畑中雄樹・瀬古弘・市川隆一・大谷寛・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. Ooba, M. Hashimoto, T. Ito, and Y. Hosoi (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・森清・松島健・渡辺篤志・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.
- 内海さや香・清水寧子・長尾邦弘・福谷一孝・原田靖・里村幹夫・加藤照之・熊元淳美・烏田誠一・木股文昭・松島健・長尾年恭・佐柳敬造・楠本成寿 (2005): 東海地域の稠密 GPS 観測網の構築, *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会*, D008-003.
- 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.



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<sup>†</sup> 川崎和義<sup>†</sup> 寺田幸博<sup>‡</sup> 加藤照之<sup>††</sup> 橋本剛正<sup>‡‡</sup> 本橋 修<sup>‡‡</sup> 齊田優一<sup>†††</sup> 松澤 亮<sup>†††</sup><sup>†</sup> 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<sup>‡</sup> 高知工業高等専門学校 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1<sup>††</sup> 東京大学 地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1<sup>‡‡</sup> 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1<sup>†††</sup> 日立造船株式会社 〒559-8559 大阪府大阪市住之江区南港北 1-7-89E-mail: <sup>†</sup> {yamamoto, k.kawasaki}@nict.go.jp, <sup>‡</sup> terada@ce.kochi-ct.ac.jp, <sup>††</sup> teru@eri.u-tokyo.ac.jp,<sup>‡‡</sup> {hashimoto.gousei, motohashi.osamu}@jaxa.jp, <sup>†††</sup> {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<sup>†</sup> Kazuyoshi KAWASAKI<sup>†</sup> Yukihiro TERADA<sup>‡</sup> Teruyuki KATO<sup>††</sup> Gousei  
HASHIMOTO<sup>‡‡</sup> Osamu MOTOHASHI<sup>‡‡</sup> Yuichi SAIDA<sup>†††</sup> Ryo MATSUZAWA<sup>†††</sup><sup>†</sup> Kashima Space Technology Center, NICT 893-1 Hirai, Kashima-shi, Ibaraki, 314-8501 Japan<sup>‡</sup> Kochi National College of Technology 200-1 Otsu mononobe, Nankoku-shi, Kochi, 783-8508 Japan<sup>††</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 JAPAN<sup>‡‡</sup> Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 JAPAN<sup>†††</sup> Hitachi Zosen Corporation 7-89 Nankoukita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka, 559-8559 JAPANE-mail: <sup>†</sup> {yamamoto, k.kawasaki}@nict.go.jp, <sup>‡</sup> terada@ce.kochi-ct.ac.jp, <sup>††</sup> teru@eri.u-tokyo.ac.jp,<sup>‡‡</sup> {hashimoto.gousei, motohashi.osamu}@jaxa.jp, <sup>†††</sup> {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、

「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従できるように設計・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、その前日に南米のパ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  $1 \times 10^{-2}$  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られる。

### 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)

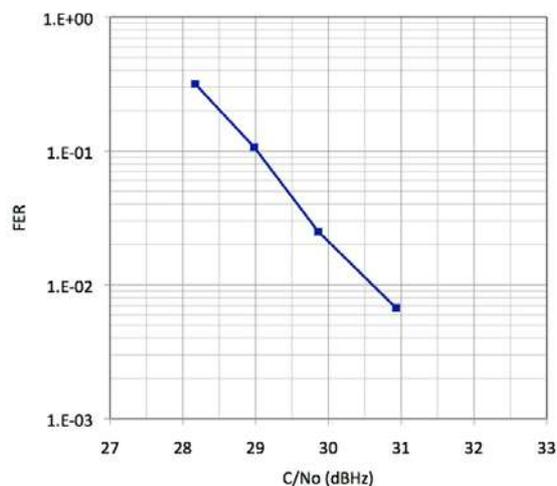


図 2 小型地球局から基地局への伝送特性

表 2 回線計算例

Satellite: ETS-VIII	小型地球局→基地局	
	小型地球局 → ETS-VIII	ETS-VIII → 基地局
	Uplink	Down Link
Frequency (GHz)	2.65	2.50
Transmission 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  $2 \times 10^{-1}$  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

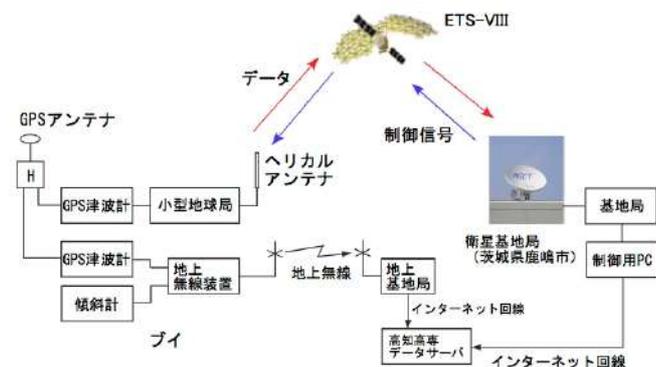


図 3 実験構成図

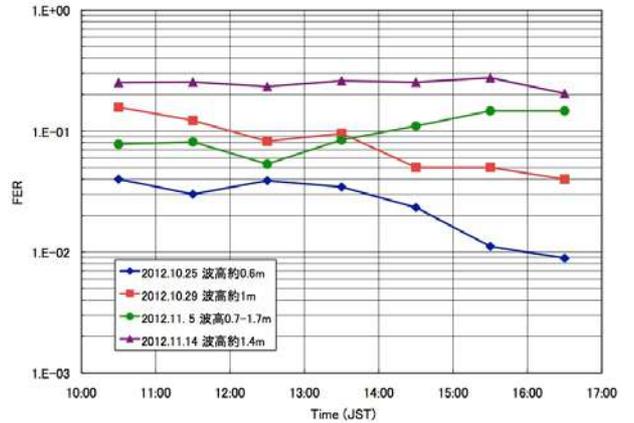


図 4 基地局受信 FER の時間変化

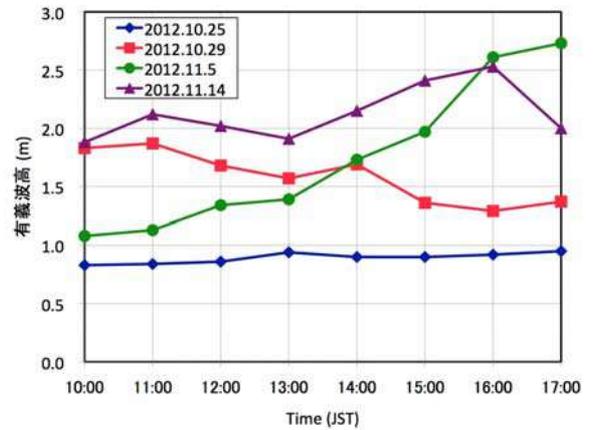


図 5 有義波高の時間変化

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，

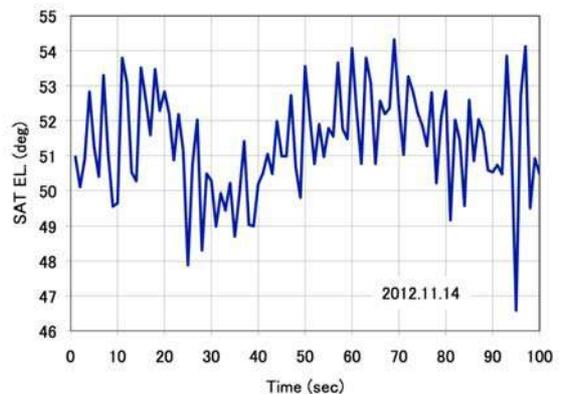


図 6 ブイから見た衛星の仰角方向の角度時間変化

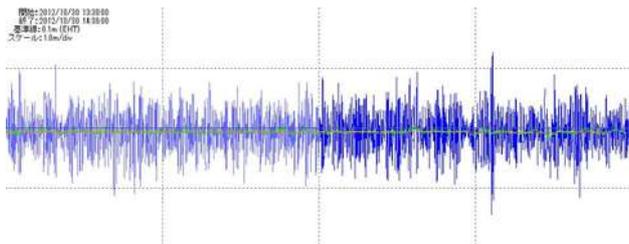


図7 基地局に伝送された波浪情報の一例

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

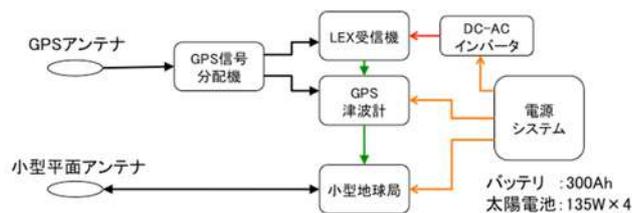


図9 ブイの装置構成図

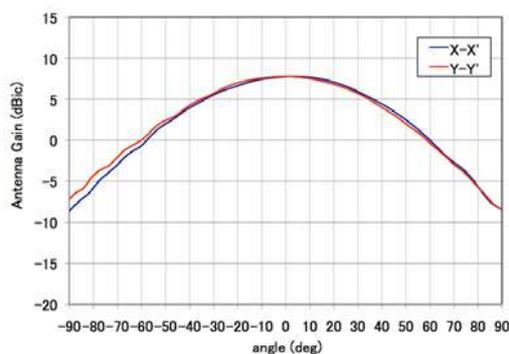
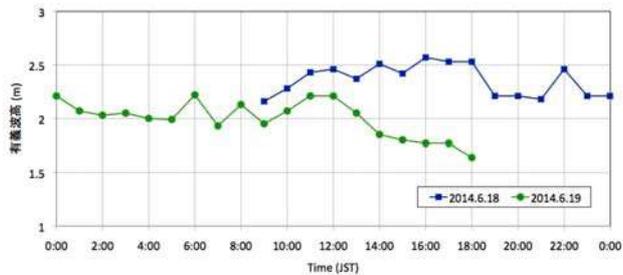
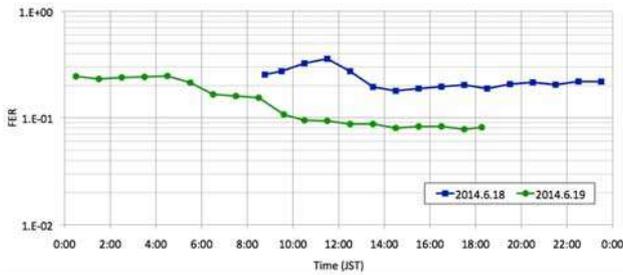


図10 小型平面アンテナ送信パターン

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 $3 \times 10^{-1}$ 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

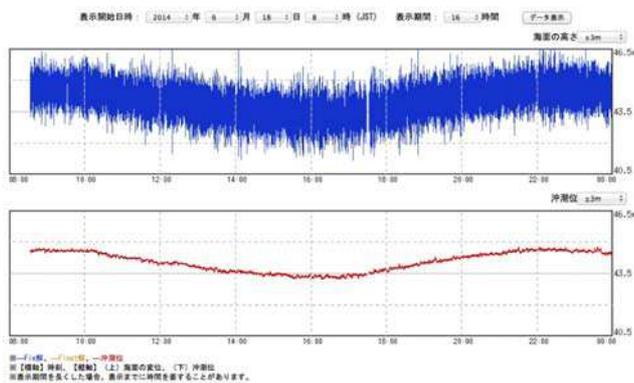


図 12 伝送データを可視化した一例 (2014.06.18)

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  $2 \times 10^{-1}$  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.

# 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<sup>1</sup>・永井 紀彦<sup>2</sup>・加藤 照之<sup>3</sup>・越村 俊一<sup>4</sup>・川口 浩二<sup>5</sup>・松下 泰弘<sup>6</sup>

<sup>1</sup>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@ce.kochi-ct.ac.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>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

<sup>6</sup>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海洋ブイに対する揚収実験を実施した。このブイの係留系摩耗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、ブイ尾筒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、想定のおおりに、年当たり数百万回におよぶ海底との離着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<sup>1)2)</sup>。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<sup>3)4)</sup>。

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<sup>5)</sup>。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<sup>6)</sup>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<sup>9, 10)</sup>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タ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。

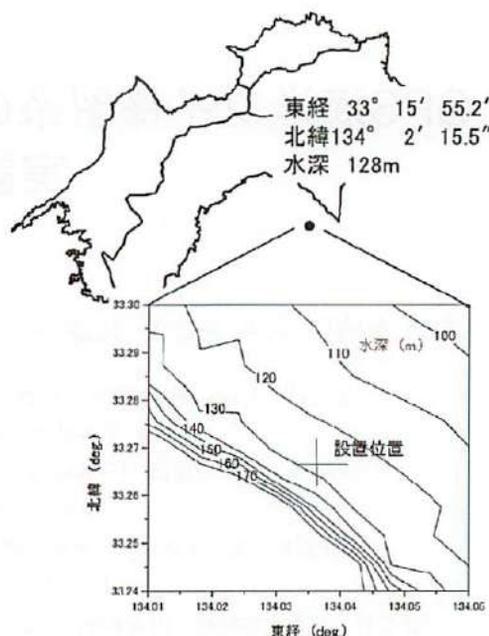


図-1 室戸沖実証実験サイト



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<sup>9,10)</sup>。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<sup>10,11)</sup>。この場合は、120 sの単純な移動

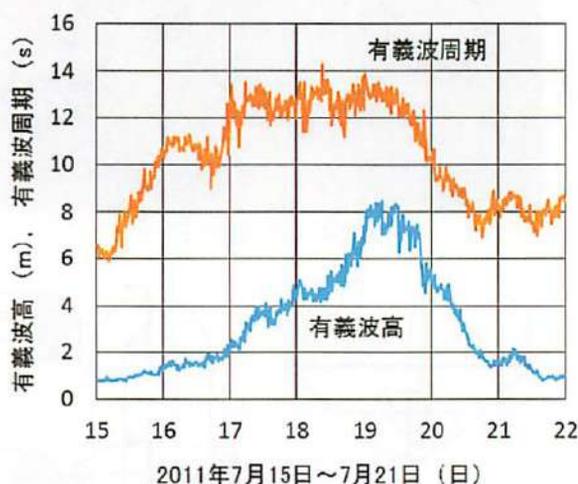


図-2 台風1106号来襲時の観測有義波高の経時変化

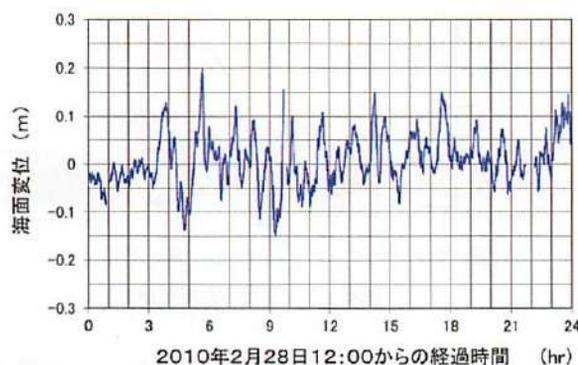


図-3 2010年チリ地震津波波形の観測記録

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。

#### 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のチェーンを用い、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。

海底常時接地の地鎖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

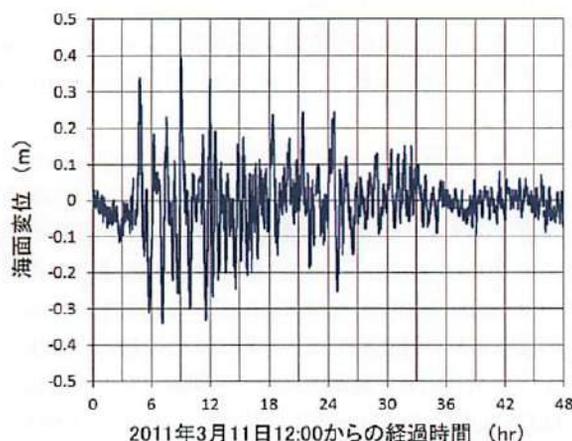


図-4 2011年東北太平洋沖地震津波波形の観測記録

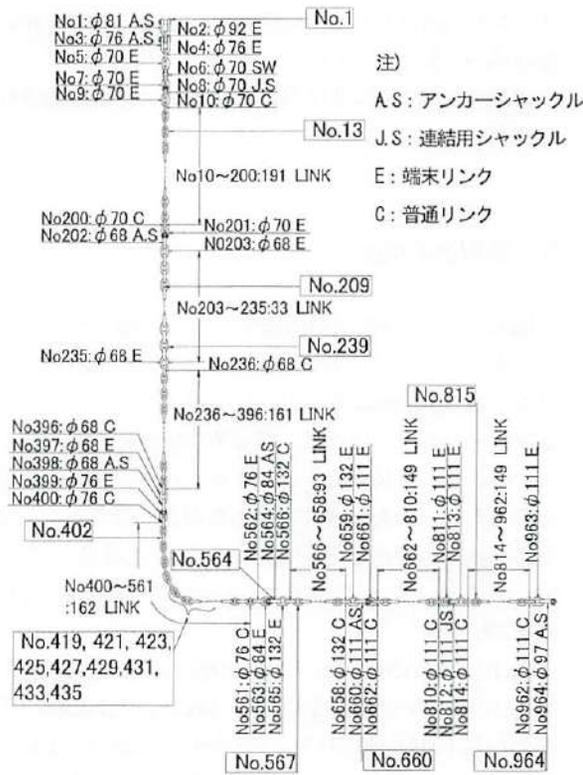


図5 係留チェーンの構成図

慮であり、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、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近傍の約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



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

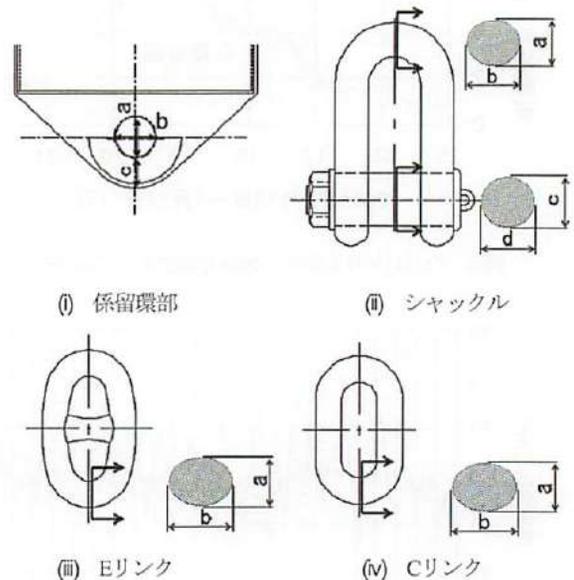


図6 リンク径の計測位置

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、計測箇所全ての計測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(ii)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

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

だけを溶接で取り付けている。被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<sup>12)</sup>(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-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	摩	年間	年間
		a	b	a	b	耗	耗	摩	摩
						量	量	耗	耗
						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

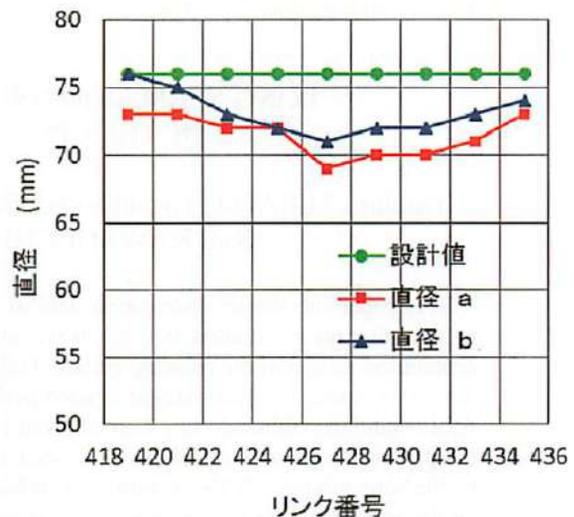


図-7 海底面への離着がある立ち上がり部の実測摩耗量

## 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か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、ブイ下端の係留環部においても、海底面との着離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、海底面との着離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、科研費基礎研究(S)21221007で実施した。港湾空港技術研究所 富田孝史氏、河合弘泰氏、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、三宅寿英氏、阿部知宏氏、西村史陸氏、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 ブイによる沖合の波浪・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 Mitsui, 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 波浪計による沖合の波浪の観測, 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) 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, 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. IGNS 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.

## 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

Y. Terada (✉)

Kochi National College of Technology, Kochi, Japan  
e-mail: [terada@ce.kochi-ct.ac.jp](mailto:terada@ce.kochi-ct.ac.jp)

T. Kato

The University of Tokyo, Tokyo, Japan  
e-mail: [teru@eri.u-tokyo.ac.jp](mailto:teru@eri.u-tokyo.ac.jp)

T. Nagai

Echo Corporation, Tokyo, Japan  
e-mail: [t-nagai@ecoh.co.jp](mailto:t-nagai@ecoh.co.jp)

S. Koshimura

Tohoku University, Sendai, Japan  
e-mail: [koshimura@irides.tohoku.ac.jp](mailto:koshimura@irides.tohoku.ac.jp)

N. Imada

Hitachi Zosen Corporation, Osaka, Japan  
e-mail: [imada\\_n@hitachizosen.co.jp](mailto:imada_n@hitachizosen.co.jp)

## 1 Introduction

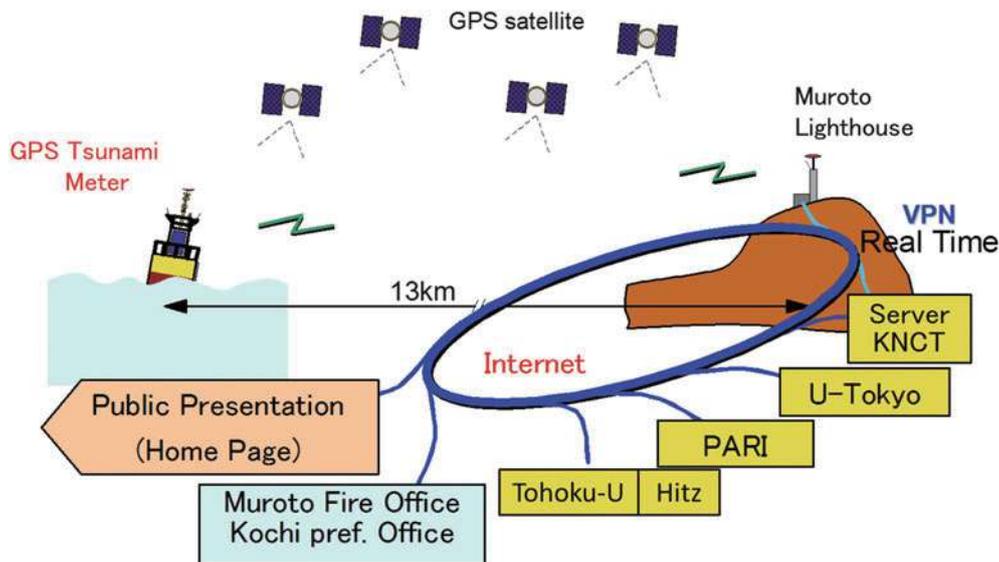
If a buoy with a sensor for detecting sea surface height change is set offshore distant enough from the coast and data are transmitted in real-time, detection of a tsunami can be effectively used for disaster mitigation. We have developed a GPS buoy system for this purpose, equipped

H. Sakaue

Non, Tokyo, Japan  
e-mail: [say22hero@gmail.com](mailto:say22hero@gmail.com)

K. Tadokoro

Nagoya University, Nagoya, Japan  
e-mail: [tad@seis.nagoya-u.ac.jp](mailto:tad@seis.nagoya-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.

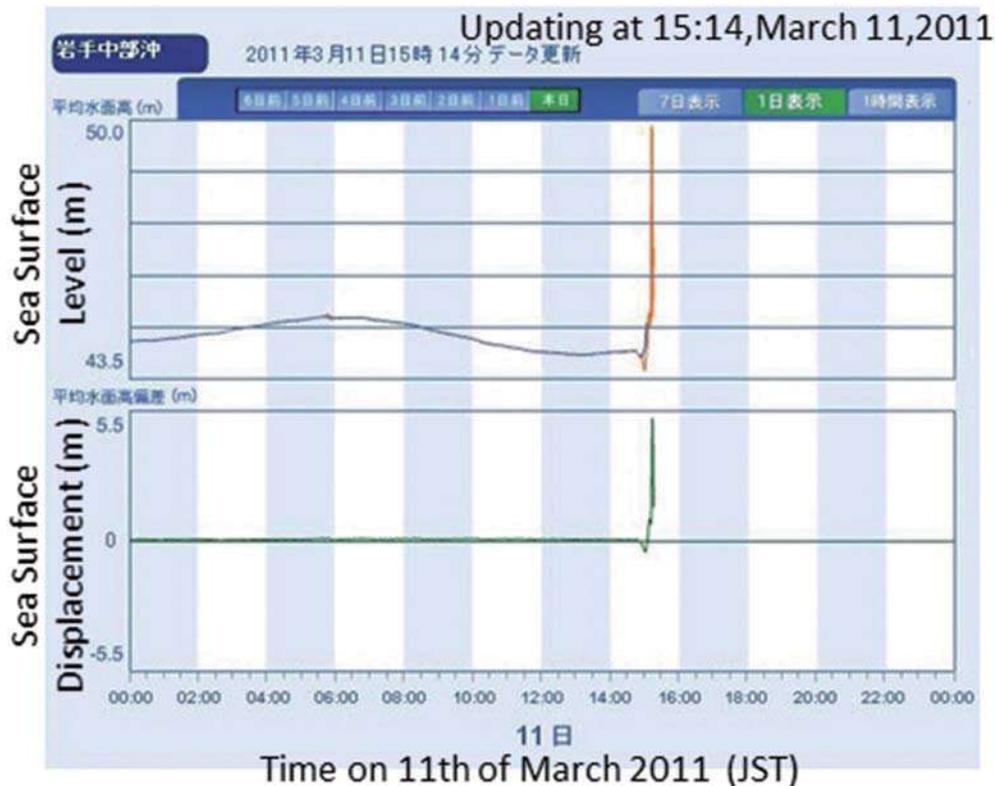
Following the success of our GPS buoy experiments, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) of Japan has established the GPS buoy system for monitoring sea waves at 19 sites around the Japanese coast since 2007 as a part of the nationwide wave monitoring system called Nationwide 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



**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.

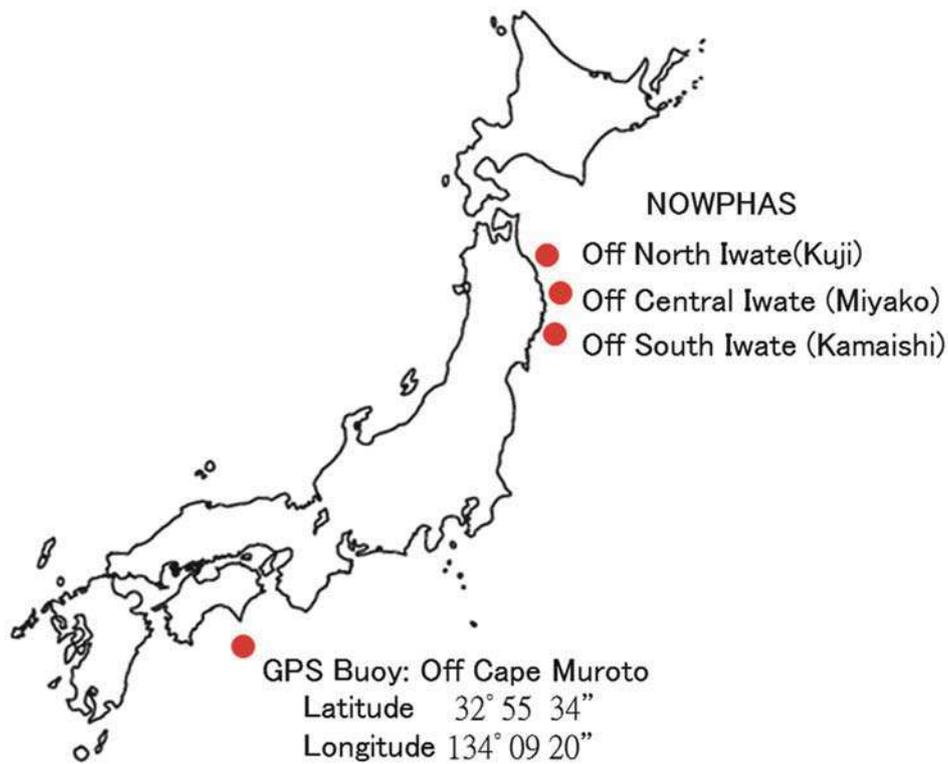
The second problem is that the data stopped recording due to power and/or Internet failure soon after the earthquake. Though we secured recordings even after power failure by preparing an uninterruptible-power-supply (UPS) for a while, which enabled us to recover the record after the earthquake, the 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 algorithm and a satellite communication system for more robust data transmission to farther distance to avoid power/internet interruptions.

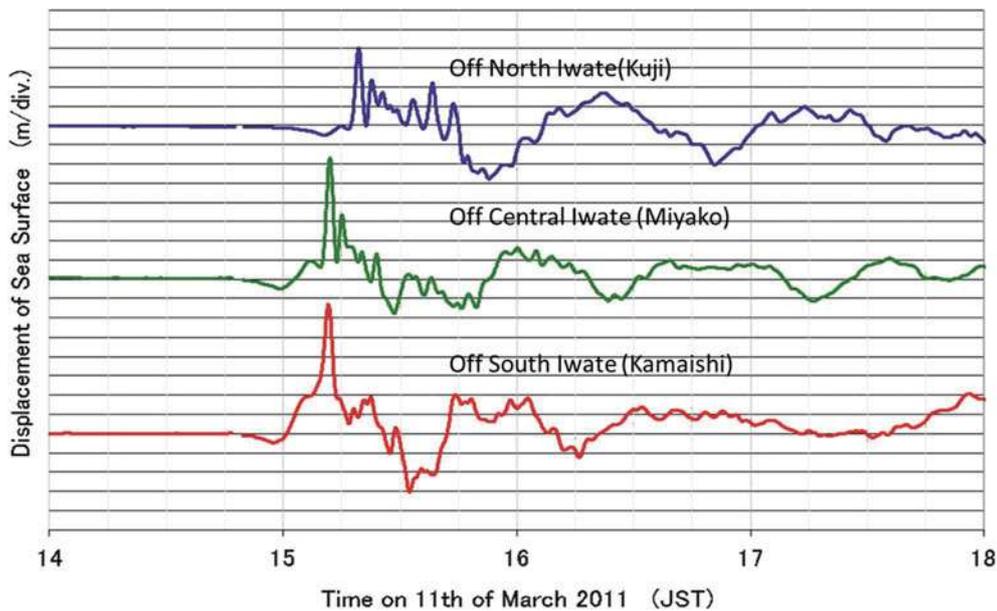
### 3 Improvements of Positioning Strategy

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



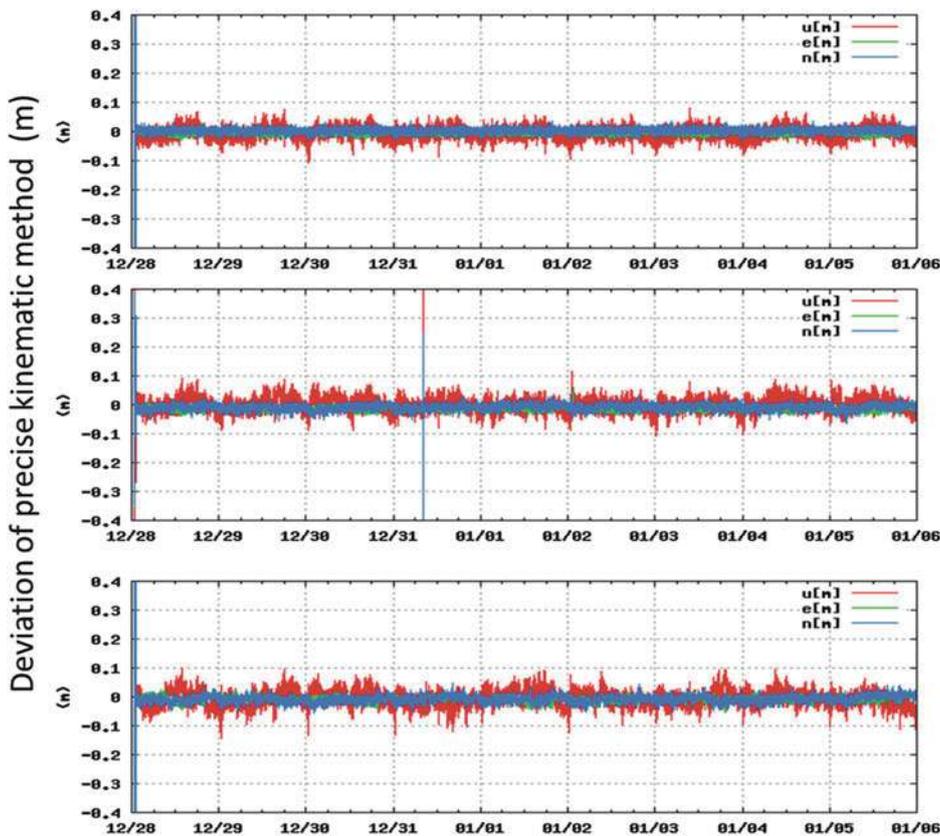
**Fig. 3** GPS buoy locations used in this study



**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



2011/12/28~2012/01/05( UTC)

**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.

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

Distance of Rover and reference area (Hokkaido): 150km

Standard deviation ( $\sigma$ )	N-S(mm)	8.9
	E-W(mm)	8.1
	Up(mm)	18.3
Fix rate (%)		99.95

Distance of Rover and reference area (Kanto): 1000km

Standard deviation ( $\sigma$ )	N-S(mm)	11.0
	E-W(mm)	7.5
	Up(mm)	22.6
Fix rate (%)		99.80

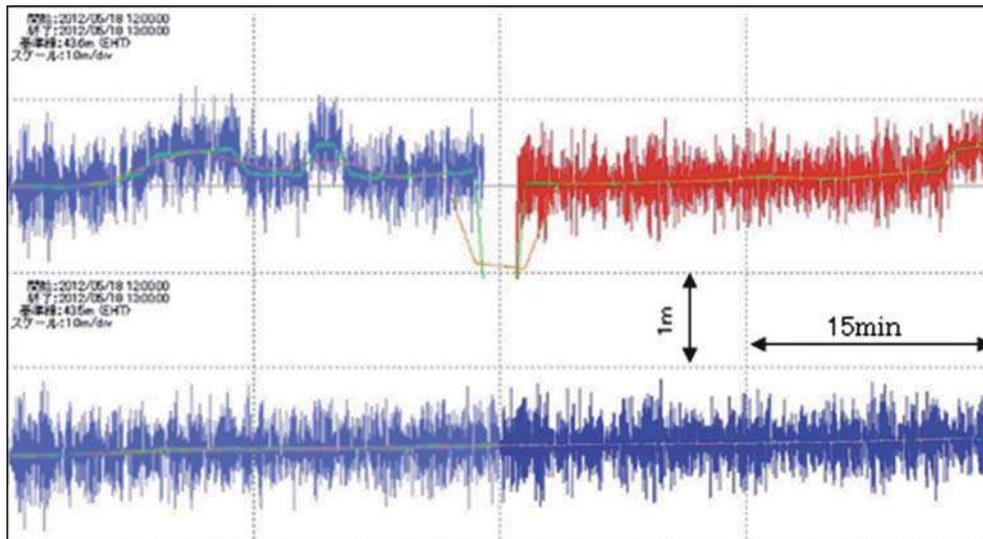
Distance of Rover and reference area (kyusyu): 1500km

Standard deviation ( $\sigma$ )	N-S(mm)	13.2
	E-W(mm)	11.4
	Up(mm)	26.3
Fix rate (%)		99.81

Observation period is from 28 December 2011 to 5 January 2012 (Courtesy by Hitachizosen Corporation 2012)

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



**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  $3 \times 10^{-1}$  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

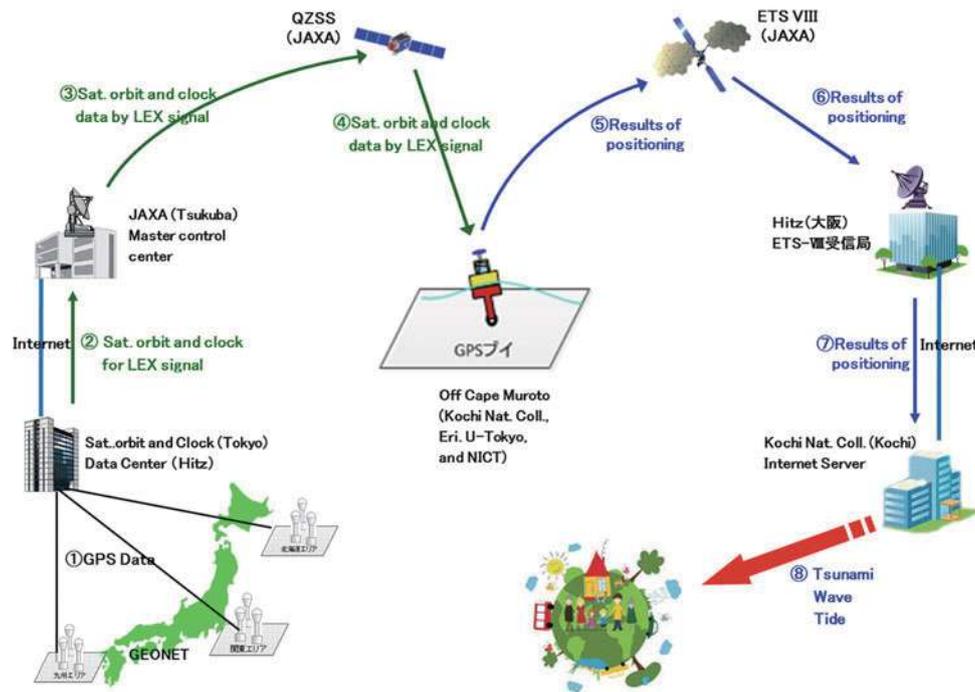


Fig. 7 Plan of data transmission test via satellite communication systems of QZSS and ETSVIII (Yamamoto et al. 2014)

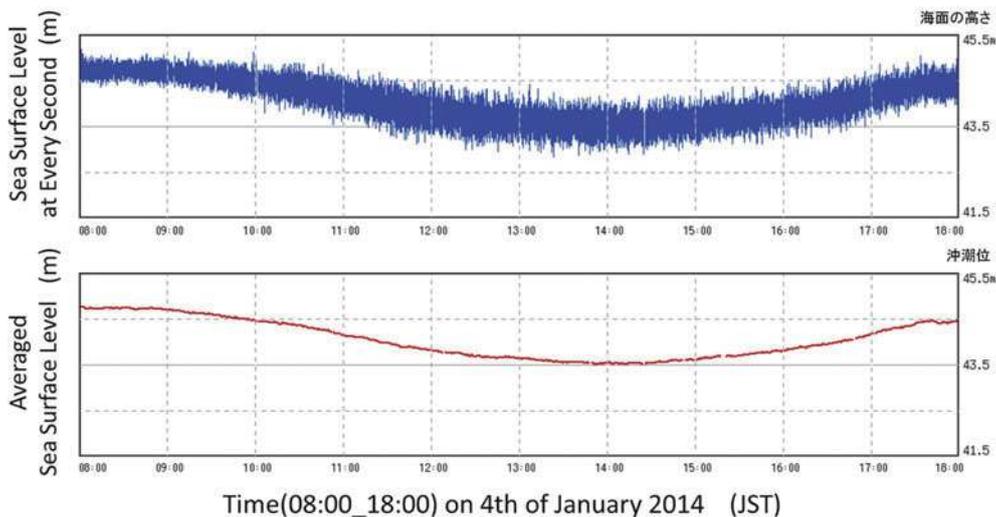
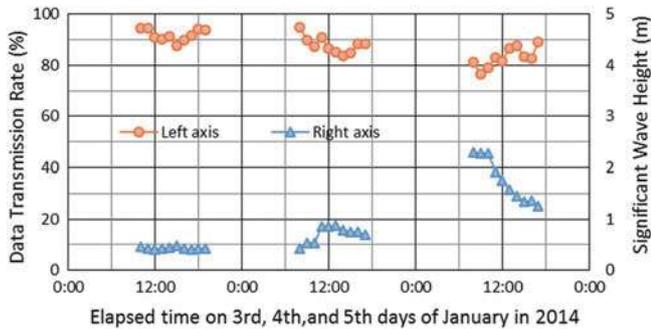


Fig. 8 Results of data transmission by satellite communication system of QZSS and ETSVIII (Upper: raw data, Lower: low-pass filtered data). Unit: (horizontal) hour in Japan Standard Time, (vertical) meter

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



**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

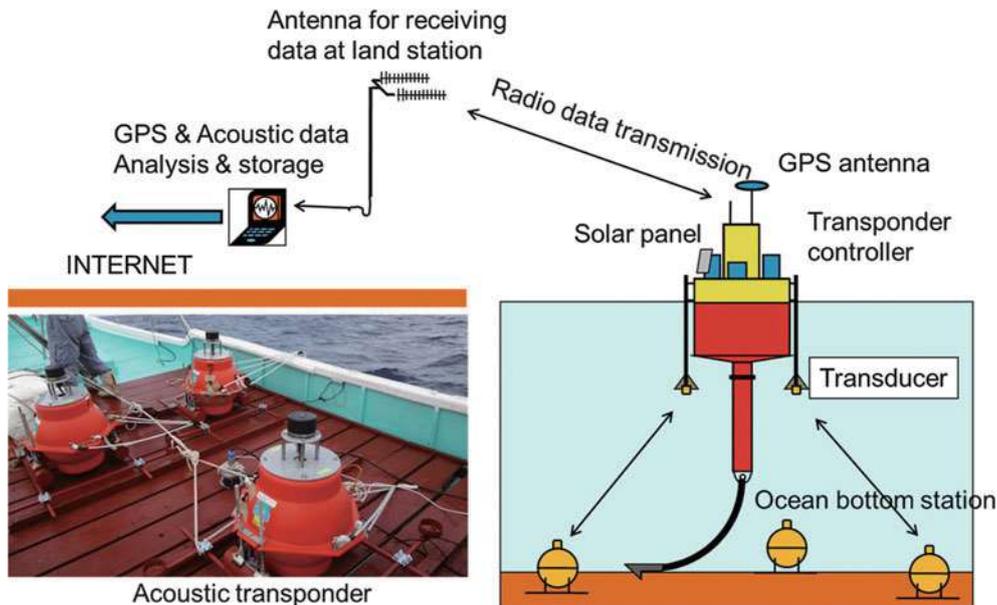
ocean bottom sensors (more than three) does not change much. Thus we take its position as the position of the seafloor.

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.



**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
- Spies FN, Chadwell CD, Hildebrand JA, Young LE, Purecell GH Jr, Dragat 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, Hefflin 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



## [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<sup>†</sup> 山本伸一<sup>†</sup> 寺田幸博<sup>††</sup> 加藤照之<sup>††</sup> 本橋 修<sup>†††</sup> 橋本剛正<sup>†††</sup> 齊田優一<sup>††††</sup> 松澤 亮<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>‡</sup> 元情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター

<sup>††</sup> 高知工業高等専門学校 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1

<sup>†††</sup> 東京大学 地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

<sup>††††</sup> 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

<sup>†††††</sup> 宇宙技術開発株式会社 〒164-0001 東京都中野区中野 5-62-1

<sup>††††††</sup> 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: <sup>†</sup> k.kawasaki@nict.go.jp, <sup>††</sup> terada@ce.kochi-ct.ac.jp, <sup>†††</sup> teru@eri.u-tokyo.ac.jp, <sup>††††</sup> motohashi.osamu@jaxa.jp,  
<sup>†††††</sup> hashimoto.gousei@sed.co.jp, <sup>††††††</sup> {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<sup>†</sup> Shin-ichi YAMAMOTO<sup>†</sup> Yukihiko TERADA<sup>††</sup> Teruyuki KATO<sup>††</sup>  
 Osamu MOTOHASHI<sup>†††</sup> Gousei HASHIMOTO<sup>†††</sup> Yuichi SAIDA<sup>††††</sup> Ryo MATSUZAWA<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> Kashima Space Technology Center, NICT 893-1 Hirai, Kashima-shi, Ibaraki, 314-8501 Japan

<sup>‡</sup> Ex- Kashima Space Technology Center, NICT

<sup>††</sup> Kochi National College of Technology 200-1 Monobe-otsu, Nankoku-shi, Kochi, 783-8508 Japan

<sup>†††</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 Japan

<sup>††††</sup> Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 JAPAN

<sup>†††††</sup> SPACE ENGINEERING DEVELOPMENT Co., Ltd. 5-62-1 Nakano, Nakano-ku, Tokyo, 164-0001 Japan

<sup>††††††</sup> Hitachi Zosen Corporation 7-89 Nankoukita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka, 559-8559 Japan

E-mail: <sup>†</sup> k.kawasaki@nict.go.jp, <sup>††</sup> terada@ce.kochi-ct.ac.jp, <sup>†††</sup> teru@eri.u-tokyo.ac.jp, <sup>††††</sup> motohashi.osamu@jaxa.jp,  
<sup>†††††</sup> hashimoto.gousei@sed.co.jp, <sup>††††††</sup> {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 mitigation.

**Keywords** Satellite data communication, Early detection of disasters, GPS tsunami meter, GNSS buoy

## 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、海上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従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、-潮汐計と名付けた[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、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概説する。

## 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、電離層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上げるためには図 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・波浪・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。

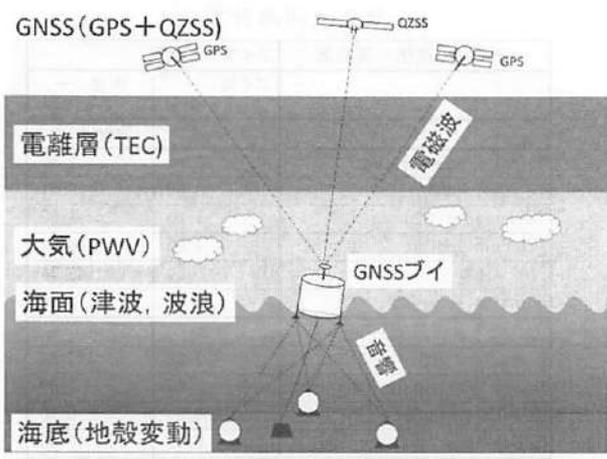


図1 海洋ブイを用いた観測の一例

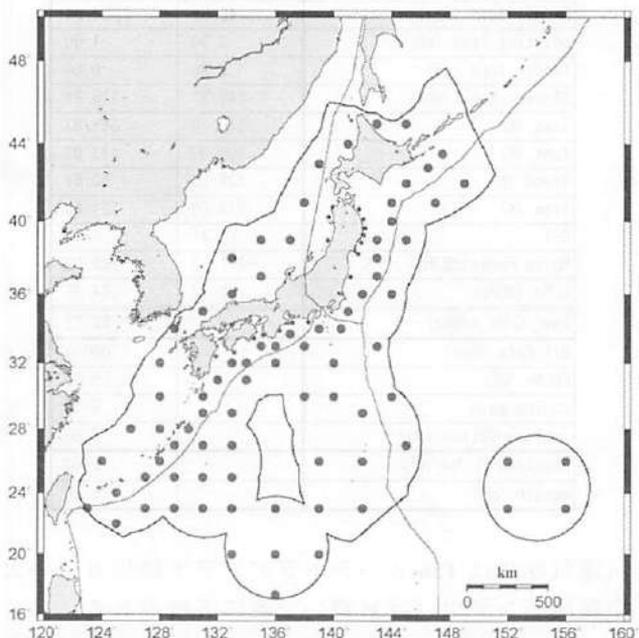


図2 ブイアレイの構想

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になることが必要となる。

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) も小さくなるのが理由である。搭載する装置の電力はバッテリー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。

これまでの実験結果から、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

ブイ局の送信: 連続波	ブイ局-基地局	
	ブイ局-衛星	衛星-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	46.93
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)	0.30	0.30
Fading loss (dB)	0.00	0.00
Receive level/total (dBW)	-190.18	-150.95
RX ANT Gain (dBi)	46.59	34.54
pointing loss (dB)	3.00	1.00
feeder loss (dB)	2.80	0.80
RXpower/total (dBW)	-149.39	-118.21
Tsys (K)	510.70	361.83
Tant (K)	300.00	113.01
Tfeed (K)	139.20	50.47
Trec (K)	214.00	221.60
G/T	13.71	8.10
Noise Power (dB/Hz)	-201.52	-203.02
C/No (dBHz)	52.13	84.75
2way C/No (dBHz)		52.12
Bit Rate (bps)		15000.0
Eb/No (dB)		10.36
coding gain		5.10
implementation loss		3.50
Required Eb/No (dB)		9.60
margin (dB)		2.36

(電気性能は13mφ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

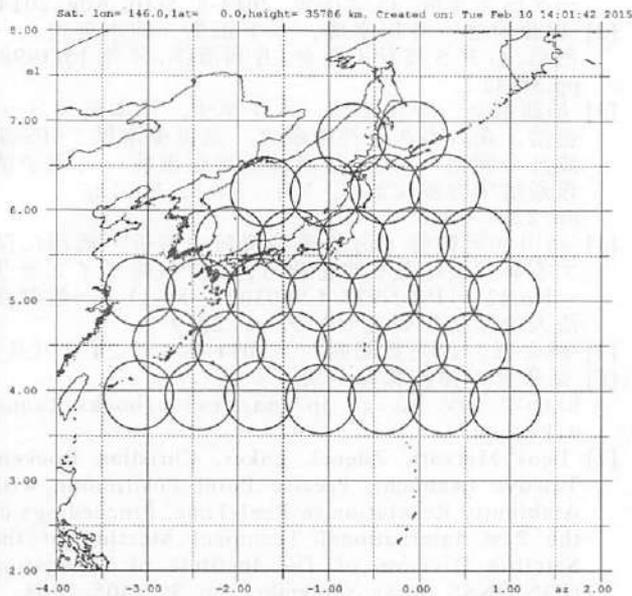


図3 想定されるビーム配置

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



図4 新型ブイ外観

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。海上での位置決めは 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。

##### 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層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がた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、このようなブイレイが実現することを願っている。

## 謝辞

電離層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, 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, 信学技報, 2014-8, 5-10, Aug. 2014.

[2] 加藤照之, 寺田幸博, 木下正生, 柿本英司, 一色浩; GPS波計の開発, 月刊海洋, 号外15(1998), pp.38-42

[3] 加藤照之, 寺田幸博, 木下正生, 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

[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 (ISDN978-4-900302-89-1), 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/tsunamiikeihou/>

[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, 安藤雅幸, 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）	エフオ 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イクス研究室  （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 7 5 頁参照)を参考にしてください。)

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進展させる場合にはその内容等)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

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

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 プ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 プ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 プ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。

**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) をプ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。

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プ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、プ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 プ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 プイを用いた 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。

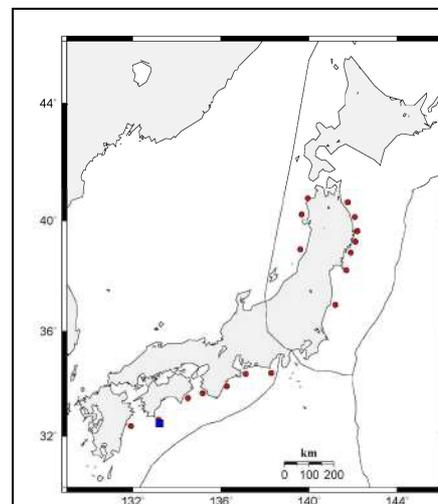


図 1: 印は日本列島周辺に設置されている GPS 波浪計(2014 年 10 月現在)。印は本研究の実験場所

## 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。

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。

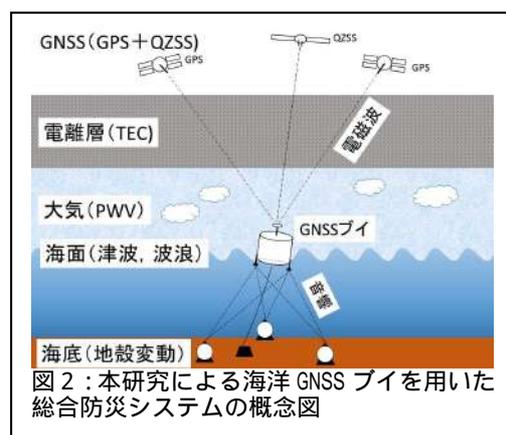
(3) ブイに搭載した GNSS から水蒸気量及び電離層 TEC を抽出し、その精度評価とともに、気象予報や電離層研究へのインパクトを調査する。

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。

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ェ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。

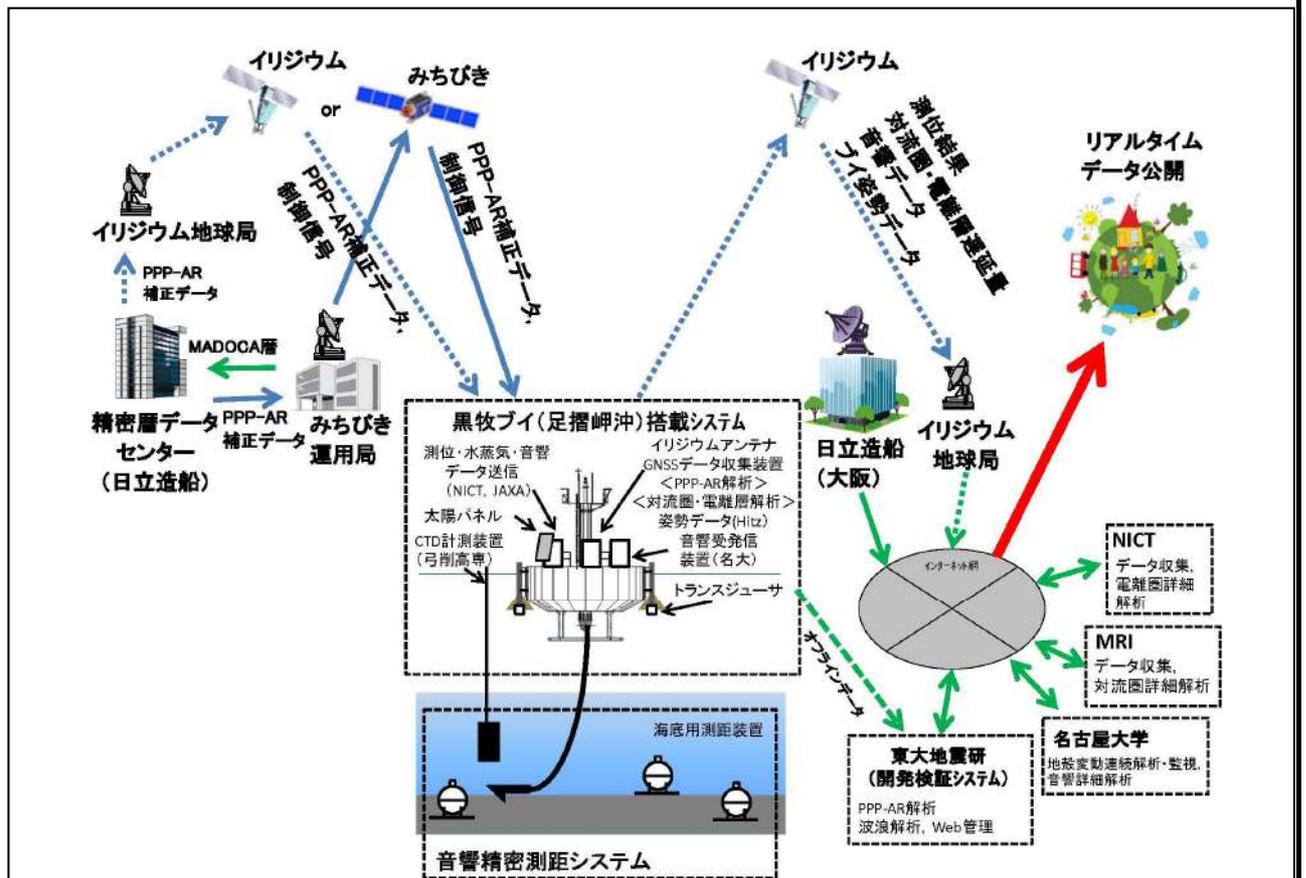


図3：実験全体の詳細図。

## 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[Issiki 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。

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。

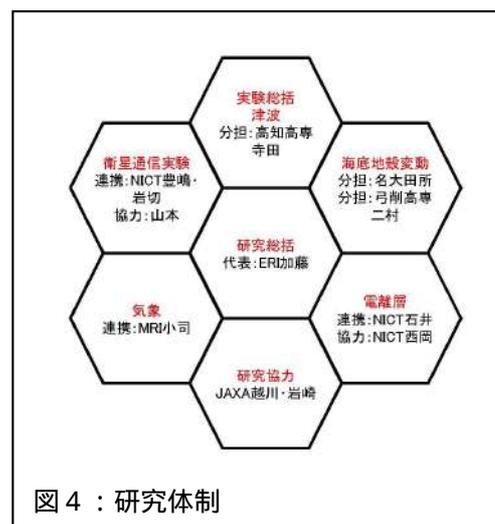


図 4：研究体制

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。

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。

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

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。）

本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等

本研究では高知県の黒潮牧場のパ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、パ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。

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パ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。

GNSSパ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。

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。）。

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 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, 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, 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 km 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 10cm 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ができる. また, 2003 年 9 月 26 日未明の波高約 15cm 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 13km 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, キャリアスミングなどの手法を自在に組み込めるようにして, 45 km 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 35km 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：40km）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 80km 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术開発補助金（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 km 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 2km から 10km 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 1cm 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 5cm まで低下する可能性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 1cm 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。それ以降も計測スキ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。

<b>主な現有設備</b> 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	練習船 実習船	
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		
弓削商船高専	はまかぜ	小型船舶	共同	H6		
<b>設備備品費の明細</b> 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）・Hitze 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・クレークト製	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・Hitze 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・Hitze 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（ダビット滑車）	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）・Hitze 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/HDD等)	420	(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	バイ機器設置 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 バイ借用・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
	同軸ケーブル	20	(外国) 分担研究者3 名×2回	2,400				
	LAN/WAN 機器	30						
GEONET データ	500							
バッテリー	1,000							
衛星通信実験 用部品	1,000							
	計	2,970	計	5,200	計	4,000	計	18,008
平成29年度	記録媒体 (SD/SSD/HDD等)	420	(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	バイ調整保守 GNSS 観測継続 HP アップグレード フェージングシミュレータ 開発 バイ借用・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
	GEONET データ	500	(外国) 分担研究者3 名×2回	2,400				
	衛星通信実験 用部品	1,000						
	計	1,920	計	4,760	計	4,000	計	12,908
平成30年度	記録媒体 (SD/SSD/HDD等)	420	(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 アップデート バイ調整保守 GNSS 観測継続 HP アップグレード みちびき通信 バイ借用・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
	同軸ケーブル	20	(外国) 分担研究者3 名×2回	2,400				
	LAN/WAN 機器	30						
GEONET データ	500							
バッテリー	500							
衛星通信実験 用部品	1,000							
	計	2,470	計	5,100	計	4,000	計	13,208
平成31年度	記録媒体 (SD/SSD/HDD等)	420	(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 バイ調整保守 PPP-ARソフト改造 GNSS 観測継続 HP アップグレード みちびき通信 バイ借用・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
	GEONET データ	500	(外国) 分担研究者3 名×2回	2,400				
	バッテリー	500						
衛星通信実験 用部品	1,000							
	計	2,420	計	5,100	計	4,000	計	14,908
平成32年度	記録媒体 (SD/SSD/HDD等)	420	(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 バイ調整保守 GNSS 観測継続 HP アップグレード みちびき通信 バイ借用・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
	GEONET データ	500	(外国) 分担研究者3 名×2回	2,400				
	衛星通信実験 用部品	1,000						
	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。

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。

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、その頁数と、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)を用いた海上パ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「なみふる」, **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 「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.

研究者氏名		加藤照之			
<p><b>研究費の応募・受入等の状況・エフォート</b></p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>「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。</p> <p>「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。</p> <p>科研費の「新学術領域研究(研究領域提案型)」にあつては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>					
<b>(1) 応募中の研究費</b>					
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 プ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 GNSS プ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。
<b>(3) その他の活動</b> 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	
<b>合計</b> 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)研究者調査書

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
<b>研究業績</b>						
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>						
(論文)						
<p>[1] <u>Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, and K. Tadokoro</u>, Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations, Proc. GENAH 2014, IAG Symposia 145, 2015, in press (査読有)</p> <p>[2] 三宅寿英・田部井隆雄, <u>加藤照之, 寺田幸博</u>; 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)</p> <p>[3] 岩塚雄大, 琴浦毅, 菅野泰雅, 吉田大吾, 佐野正佳, 米山治男, <u>寺田幸博</u>; 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 71(2015) No. 2 印刷中(査読有)</p> <p>[4] 川崎和義, 山本伸一, <u>寺田幸博, 加藤照之</u>, 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)</p> <p>[5] 寺田幸博, 永井紀彦, <u>加藤照之</u>, 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)</p> <p>[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)</p> <p>[7] 山本伸一・川崎和義・<u>寺田幸博・加藤照之</u>・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)</p> <p>[8] 寺田幸博, 山本伸一, <u>加藤照之</u>, 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)</p> <p>[9] 山本伸一, <u>寺田幸博</u>, 橋本剛正, <u>加藤照之</u>, 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)</p> <p>[10] 山本伸一, 川崎和義, <u>寺田幸博</u>, 今田成之, 橋本剛正, <u>加藤照之</u>, 林稔, ETS ETS- 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)</p> <p>[11] <u>Kato, T., Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai, and S. Koshimura</u>; 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)</p> <p>[12] <u>Y. Terada, T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, T. Miyake, H. Nishimura, S. Kunihiro</u>; Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy, Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium 2011, Peer Reviewed Paper 14, pp.1-14 (査読有)</p> <p>[13] <u>Teruyuki Kato, Yukihiro Terada, Toshihiko Nagai, Shunichi Koshimura</u>; 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)</p> <p>[14] 三宅寿英, 吉田晴彦, 寺田幸博, <u>加藤照之</u>, 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)</p> <p>[15] T. Nagai, <u>T. Kato</u>, N. moritani, H. Izumi, <u>Y. Terada</u>, 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)</p>						

## 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 PIANC 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, 大和桂子, 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, 高田美津雄; 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

研究者氏名		寺田幸博			
<p><b>研究費の応募・受入等の状況・エフォート</b></p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>「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。</p> <p>「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。</p> <p>科研費の「新学術領域研究(研究領域提案型)」にあつては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>					
<b>(1) 応募中の研究費</b>					
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パ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GNSSパ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)
<b>(3) その他の活動</b>				10	
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。					
<b>合 計</b>				100	
上記(1)(2)(3)のエフォートの合計				(%)	

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
<b>研究業績</b>						
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>						
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) <u>Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Imada, H. Sakaue, and K. Tadokoro</u>, Recent Developments of GPS Tsunami Meter for a Far Offshore Observations, in to International Association of Geodesy Symposia (2014), 2015. (査読有)</li> <li>2) Yasuda, K., <u>K. Tadokoro</u>, 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)</li> <li>3) <u>田所敬一</u>, 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)</li> <li>4) <u>田所敬一</u>, 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)</li> <li>5) <u>田所敬一</u>, 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. &lt;招待講演&gt;</li> <li>6) Nihara, Y., <u>K. Tadokoro</u>, 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)</li> <li>7) Sato, M., M. Kido, <u>K. Tadokoro</u>, and H. Fujimoto, GPS/acoustic seafloor geodetic observation in the subduction zone around Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 2013. &lt;招待講演&gt;</li> <li>8) 渡部 豪・<u>田所敬一</u>・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)</li> <li>9) <u>Tadokoro, K.</u>, 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)</li> <li>10) Fujimoto, H., M. Kido, Y. Osada, <u>K. Tadokoro</u>, 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)</li> <li>11) Ando, M., M. Nakamura, T. Matsumoto, M. Furukawa, <u>K. Tadokoro</u>, 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)</li> <li>12) 渡部 豪・<u>田所敬一</u>・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)</li> </ol>						

## 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>

研究者氏名 田所敬一					
<p><b>研究費の応募・受入等の状況・エフォート</b></p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>「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。</p> <p>「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。</p> <p>科研費の「新学術領域研究(研究領域提案型)」にあつては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>					
<b>(1) 応募中の研究費</b>					
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 プ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 GNSS プ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。
<b>(3) その他の活動</b> 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	/
<b>合 計</b> 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
<b>研究業績</b>						
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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、その頁数と、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。</p>						
<p>【2015年度】</p> <p>(1) <u>二村 彰</u>・蛭間 拓也・向井利夫・栗本裕和、"学校棧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)</p> <p>【2010年度以前】</p> <p>(2) <u>二村 彰</u>・杉本統一、"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)</p> <p>(3) <u>二村 彰</u>・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)</p> <p>(4) Guo, X., <u>A. Futamura</u>, 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)</p> <p>(5) 奥村継一・<u>二村 彰</u>・岩坂直人・大塚清敏、"オホーツク海とベーリング海の海水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)</p> <p>(6) 多田光男、<u>二村 彰</u>、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)</p> <p>(7) Guo, X., <u>A. Futamura</u>, 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)</p> <p>(8) 清田耕司、世登順三、多田光男、塚本秀史、<u>二村 彰</u>、"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)</p> <p>(9) <u>二村 彰</u>、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)</p>						

研究業績(つづき)

研究者氏名		二村 彰				
<b>研究費の応募・受入等の状況・エフォート</b>						
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>「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。</p> <p>「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。</p> <p>科研費の「新学術領域研究(研究領域提案型)」にあつては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>						
<b>(1) 応募中の研究費</b>						
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 プ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 GNSS プ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)
<b>(3) その他の活動</b>					
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	
<b>合 計</b>				100	
上記(1)(2)(3)のエフォートの合計				(%)	

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カ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。

## 10. キーワード

(1) 津波	(2) 海底地殻変動	(3) GNSSパイ	(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年度はパイ観測の準備・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パイに搭載した。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。

パ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パ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パ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。

パ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、パ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、パイ作業を請け負っていた業者が、別の箇所を設置していたGNSS波浪計パ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パ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見つかり見込みであり、それを待ってパ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、パイ直下の海底に設置する。パ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、音響測距結果とパイの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。音響データはパイ上に置かれた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パイアレイ展開の留意事項を明確にしていく予定である。

## 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-0ki 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	2 0 1 6	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	国内・外国の別
				出願年月日	

## 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.tsunamignps.com/>  
現在、新たなWebへの移行を準備中

平成28年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)(基礎研究(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パ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	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 23,393,000	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・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・FDU-XT, 他	1	518,400	518,400	東京大学
アンテナ、通信機器 (衛星パイ局)	ソフトバンク社製・KI-MSK, 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
UCTDセンサーブローブ	(株)イーエムエス・UC-PRO	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 譲渡額	備 考
所属研究機関 ・ 部局・ 職名	氏 名	研究者番号	交付申請書に 記載の補助金額	実支出額		
東京大学・地盤研究所・教授	加藤 照之	80134633	35,967,000 円	35,967,000 円	10,790,100 円	
高知工業高等専門学校・ 客員教授	寺田 幸博	30442479	1,200,000	1,200,000	360,000	
名古屋大学・環境学研究所・ 准教授	田所 敬一	70324390	6,534,000	6,534,000	1,960,200	
与那国商船高等専門学校・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）

所属研究機関名称		東京大学	機関番号	12601
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变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变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。

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

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

1 1. 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)

1 2. 科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

1 3. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

-

1 版

1 4 . 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/>

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	1 2 6 0 1
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 1 6 H 0 6 3 1 03. 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 ボール回転軸・軸受け	特注	1	744,336	744,336	弓削商船高等専門学校

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	

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）

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所	機関番号	82716
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±2cm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、作業効率にはなほだしく低下している。海況の好転が望まれる。

2 版

## 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」を用いた精密層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

2 版

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

1 1 . 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）

1 2 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

1 3 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

-

1 4 . 備考

-

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 1 6 H 0 6 3 1 0

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

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）

所属研究機関名称		神奈川県温泉地学研究所	機関番号	82716
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。  
 (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。

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、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 Measurement 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

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 版

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 Commission 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

1 1 . 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)

1 2 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

計0件

1 3 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

-

1 4 . 備考

-

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 1 6 H 0 6 3 1 0

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）

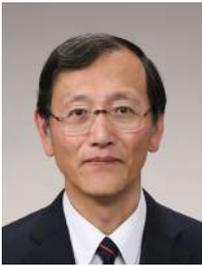
品名	仕様（型・性能等）	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関
免税軽油	弓削丸燃料（実験航海用）	1	617,679	617,679	弓削商船高等専門学校
GNSS OEMボード（共用）	Trimble社製・マルチGNSS受信可能型	1	1,398,000	1,398,000 (1,060,760)	神奈川県温泉地学研究所

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.

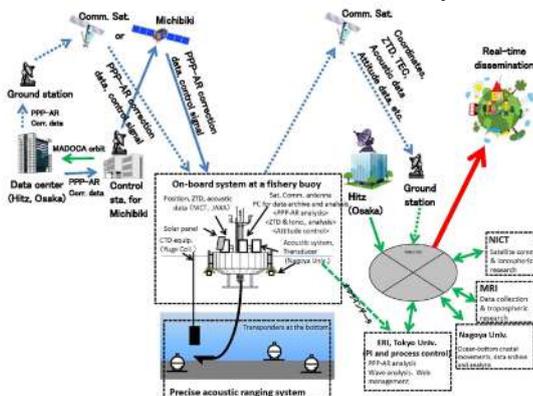


Fig. 1 Detailed design of experiment.

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】**

## 【基盤研究(S)】

### 総合系(複合領域)



## 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 **かとう てるゆき**  
**加藤 照之**

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 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認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。

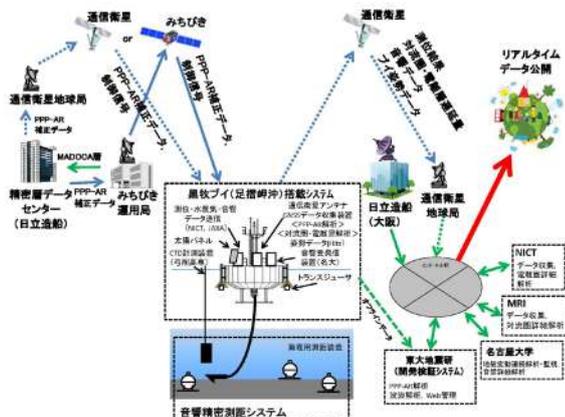


図1 実験全体の詳細図

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】