

第 3 部 資料

資料 3－1 発表論文

[平成 29(2017)年]

- 2017-1) 寺田幸博・加藤照之 (2017) GPS津波計・波浪計・潮位計, *非破壊検査*, **66**(4), 178-182.
- 2017-2) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, and N. Koshikawa (2017) GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system, *Proceedings of the twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017, 777-782.
- 2017-3) Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2017) Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan, *Earth, Planets and Space*, 69:153, DOI 10.1186/s40623-017-0740-1.
- 2017-4) 滝沢賢一, 山本伸一, 豊嶋守生, 二村彰, 寺田幸博, 加藤照之 (2017) 海洋GNSSブイからの洋上・衛星間データ収集を想定した電波伝搬モデルの構築, *信学技報*, Vol.117, No.174, SAT2017-39, pp.99-102.

[平成30(2018)年]

- 2018-1) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, H. Seko, T. Iwasaki, and N. Koshikawa (2018) Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System, *Journal of Disaster Research*, **13** (3), 460-471, doi: 10.20965/jdr.2018.p0460.
- 2018-2) Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi (2018) Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS, *Journal of Disaster Research*, **13** (3), 535-545, doi: 10.20965/jdr.2018.p0535.
- 2018-3) 加藤照之・寺田幸博 (2018) GNSSを用いた総合防災ブイの開発, *地質工学*, **15**, 33-38.

[平成31/令和元(2019)年]

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

[令和2(2020)年]

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

Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurement of Seafloor Crustal Deformation, *Front. Earth Sci.*, 8:123, doi:10.3389/feart.2020.00123
2020-2) Kinugasa, N., K. Tadokoro, T. Kato and Y. Terada (2020) Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7:21, doi:10.1186/s40645-020-00331-5
2020-3) 田所敬一 (2020) リアルタイム・連続海域観測, 日本地震学会モノグラフ, **6**, 12-15.

[令和3(2021)年]

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

[令和4(2022)年]

2022-1) 加藤照之・寺田幸博・田所敬一・二村彰 (2022) GNSSを用いた地球科学・災害監視のための総合海洋アレイ, 月刊 地球, **44** (1), 44-51.
2022-2) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, and A. Futamura (2022) Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, **98**, 49-71.
2022-3) 加藤照之 (2022) 津波防災のためのGPS (GNSS) ブイの開発について, 大正大学地域構想研究所紀要「地域構想」, (印刷中)

水中での非破壊検査

GPS 津波計・波浪計・潮位計

高知工業高等専門学校 寺田 幸博

東京大学地震研究所 加藤 照之

Tsunami, Wave and Tide Meter

National Institute of Technology, Kochi College Yukihiro TERADA

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo Teruyuki KATO



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

1. はじめに

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

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

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

2. GPS 津波計のコンセプト

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

そこで、従来の計測手法とは全く異なる新しい発想に基づく海面変動計測装置の開発を行い、波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数cmの精度でドリフトなく計測でき、設置や維持管理が容易に実施できることを目指した。このための手段として、GPS (Global Positioning System) を用

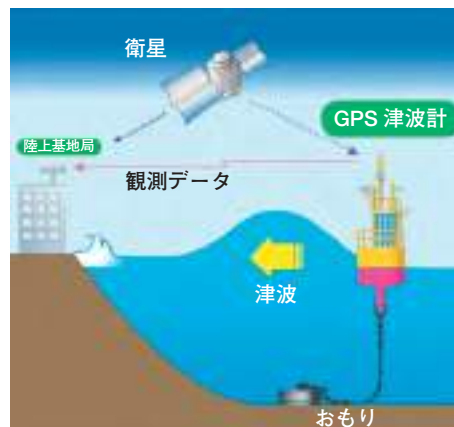


図1 GPS 津波計のコンセプト

海面の動揺に追従するように設計施工したブイの上下動をGPSを用いて精密 (cm オーダ) 測位を行い、その鉛直方向位置の時系列表示を海面変動表記とする

いることとした。システム構成の基本的概念を図1に示す。海上に浮かべたブイの最上部にGPSアンテナを取り付け、ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データに対してブイの傾きの補正をすれば、海面高の変位を計測することができる。波浪、津波及び潮汐の計測には、数cmの精度とリアルタイム性が必要であることから、当初は、RTK (Real Time Kinematic) 法を基本的な測位方式として採用してきた。現在では、基準点を設ける必要がない精密単独測位 (PPP-AR⁵⁾) 法によっているため、沖合展開における限界の問題が払拭され、大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている。

3. 開発の経緯とその意義

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

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



図2 GPS 津波計ブイ

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

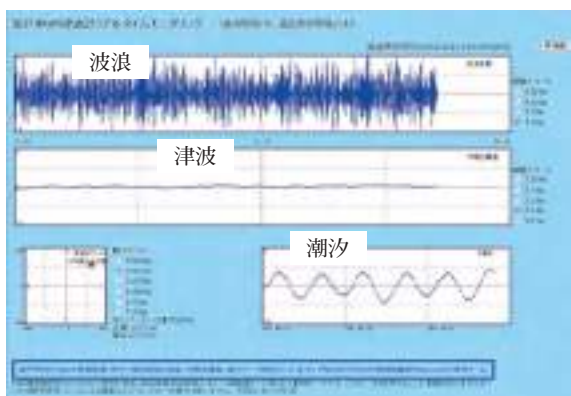


図3 リアルタイムデータ公開（室戸岬沖）

波浪、津波データの横軸はフルスケール1時間であり、潮汐の場合は3日である。縦軸は、いずれも海面高であり、それぞれのフルスケールは±2m, ±1m, ±2mである

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

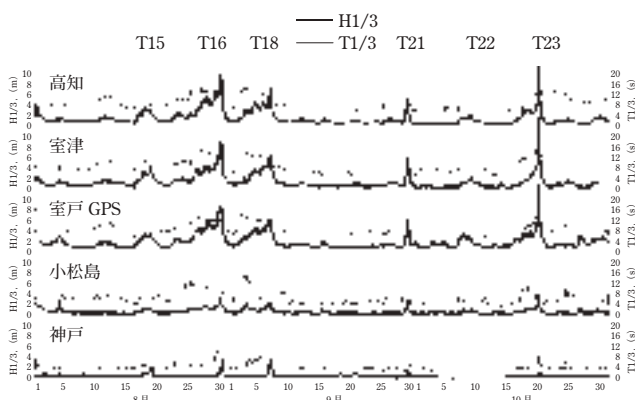


図4 2004年6月～10月に観測された有義波高

太線が有義波高を示し、細線が有義波周期を示している。横軸のフルスケールは3ヵ月であり、縦軸は、いずれもフルスケール10mである

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

- 沖合の観測データを監視し、沿岸の観測よりも早く、沖合における津波の観測値と沿岸での推定値を発表します。
- 予想よりも高い津波が推定されるときには、ただちに津波警報を更新します。

図5 新しい津波予報（気象庁パンフレット⁶⁾より）

4. 沖合における津波観測

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

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

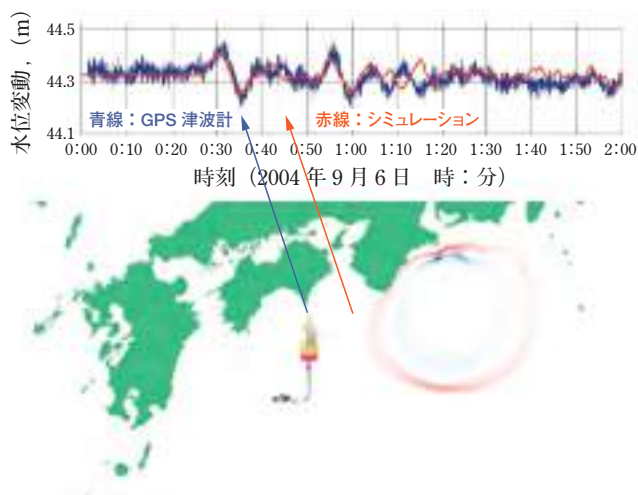


図6 2004年9月6日紀伊半島沖地震津波

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

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

5. 東北地方太平洋沖地震津波

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

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



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



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

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

6. さらなる沖合展開

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

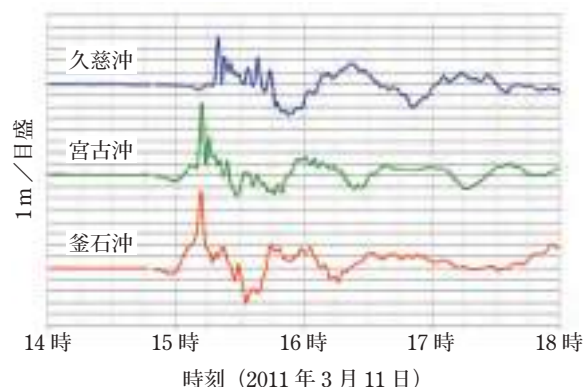


図 9 東北地方太平洋沖地震津波全波形
(国土交通省港湾局提供)

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

第 2 の技術課題である GPS 測位法については、RTK 法の改良に取り組んだ。図 12 (a) は、改良前の RTK 測位結果の一例である。短い周期で上下に変化している状態が波浪による海面変位を示しているが、安定した測位ができていない。これに

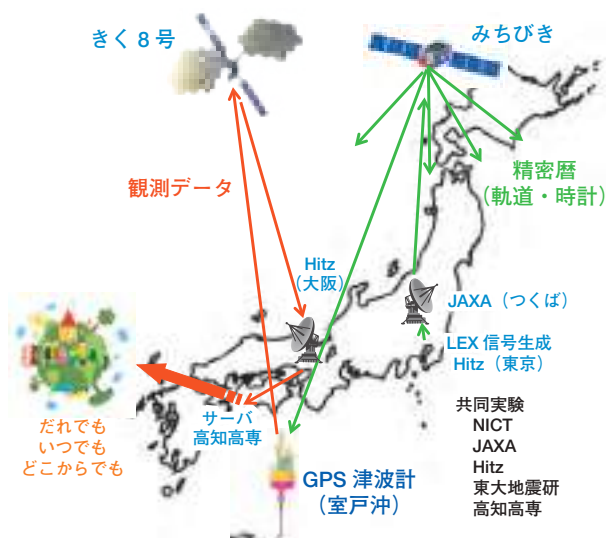


図 10 通信衛星の利用

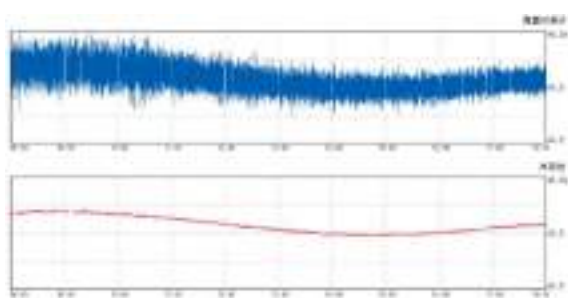


図 11 「みちびき」と「きく 8 号」を用いた GPS 津波計の情報発信実験
衛星通信実験時にリアルタイム公開した海面高変動の情報発信例。縦軸は海面の変位を示し、上図が短周期変動（波浪）と潮位、下図は長周期変動（津波はここに表示される）と潮位で、1 日盛 50cm。横軸は時間で 1 日盛 1 時間

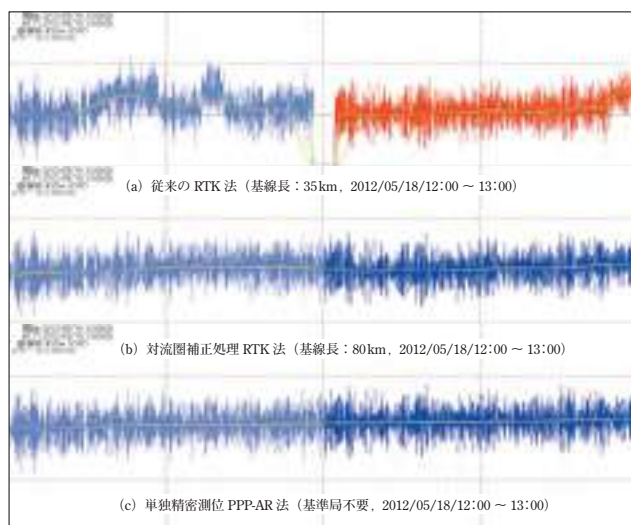


図 12 GPS 測位法の改良

横軸は、いずれもフルスケール 1 時間を示している。縦軸は、1m/目盛である

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

7. 今後の展開

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

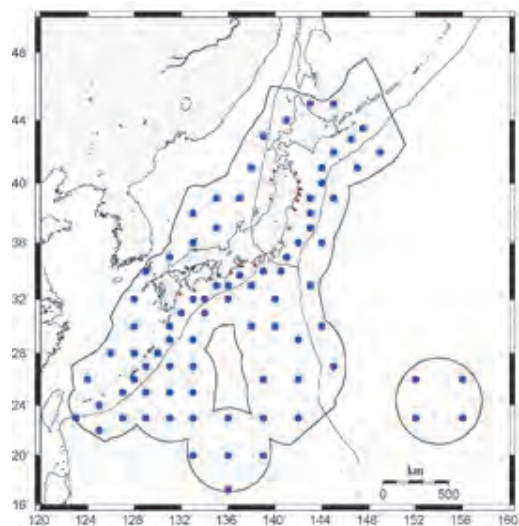


図 13 西太平洋への配備構想

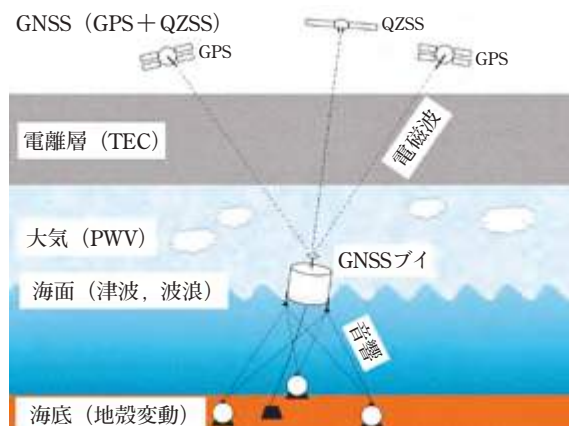


図 14 海洋 GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図

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

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

謝辞

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

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

参考文献

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



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



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

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

Teruyuki Kato

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
 Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Yukihiro Terada

National Institute of Technology, Kochi College
 Nankoku, Kochi, Japan

Keiichi Tadokoro

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
 Chikusa-ku, Nagoya, Japan

Akira Futamura

National Institute of Technology, Yuge College,
 Ochi, Ehime, Japan

Morio Toyoshima, Shin-ichi Yamamoto

Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology
 Koganei, Tokyo, Japan

Mamoru Ishii, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka

Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology,
 Koganei, Tokyo, Japan

Kenichi Takizawa

Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology,
 Yokosuka, Kanagawa, Japan

Yoshinori Shoji

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
 Tsukuba, Ibaraki, Japan

Tadahiro Iwasaki, Naokiyo Koshikawa

Satellite Applications and Operation Center, Japan Aerospace Exploration Agency,
 Tsukuba, Ibaraki, Japan

ABSTRACT

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

KEY WORDS: GNSS buoy; synthetic geohazards monitoring;

tsunami warning; ocean bottom crustal movements.

INTRODUCTION

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

Given the success of the experiments, the system has been

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

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



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

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

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

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

The lesson learned from this event is that GNSS buoy should be placed much farther from the coast, say, more than 100km offshore for more effective early warning. As far as we use the RTK algorithm which has distance limit of less than 20km for positioning accuracy of

about a few centimeters, we cannot attain this goal. Therefore, it is required for the system of employing other new algorithm for overcoming this difficulty. Precise Point Positioning algorithm that does not require baseline mode positioning would be a solution for such application. In addition, in case that the buoy is set much farther offshore, land-based radio system for data transmission, which is used in the conventional system, cannot be used any more. We may have to employ some other technique for such long distance data transmission. The most feasible way may be to use satellite data transmission. The following two sections describe the new algorithm and satellite data transmission for a new development of the GNSS buoy system.

IMPLEMENTATION OF PPP ALGORITHM

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

DATA TRANSMISSION USING SATELLITES

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

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

SYSTEM DESIGN

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

- 1: the Japanese GNSS Earth Observation Network System (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) is used to derive the precise orbits and clock correction parameters at the data center established by the Hitachi Zosen Corporation (Hitz) in Tokyo.
- 2: Obtained satellite orbits and clocks are then forwarded to the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Master control center located in Tsukuba, that operate the QZSS.
- 3&4: The data are transmitted to the buoy through JAXA and QZSS in a format called LEX (L-band experiment) signal.
- 5&6: GNSS data received on the buoy is analyzed to estimate coordinates together with precise orbits and clocks, and are transmitted from the buoy to the receiving station located in Hitz in Osaka through ETS-VIII satellite.
- 7: Received coordinates at the receiving station are sent to web

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

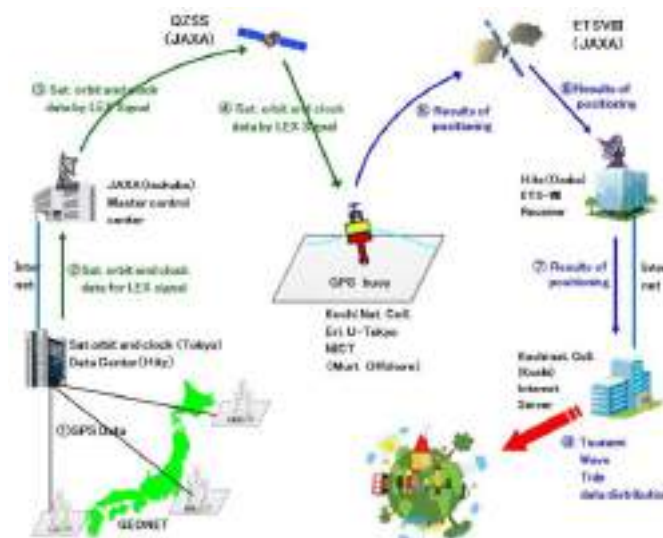


Fig. 2: System design for the data acquisition, analysis and dissemination using two satellites.

FIELD EXPERIMENTS

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



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



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

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

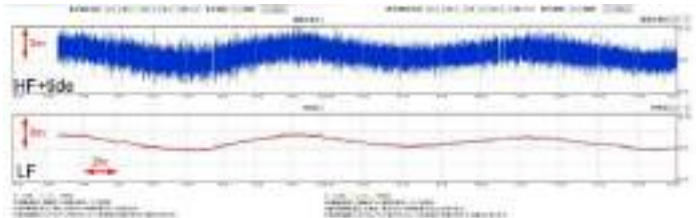


Fig. 4: Obtained time series of vertical components of GNSS buoy. Upper inset shows high frequency component with tide and the lower inset shows low-pass filtered time series.

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

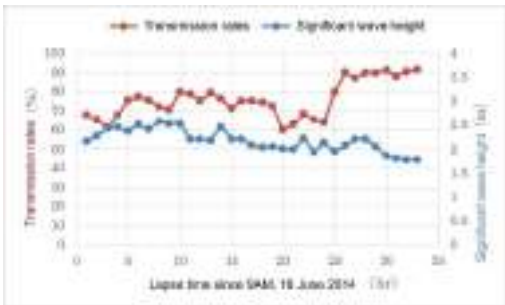


Fig. 5: Comparison of data transmission rates and significant wave height.

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

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

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

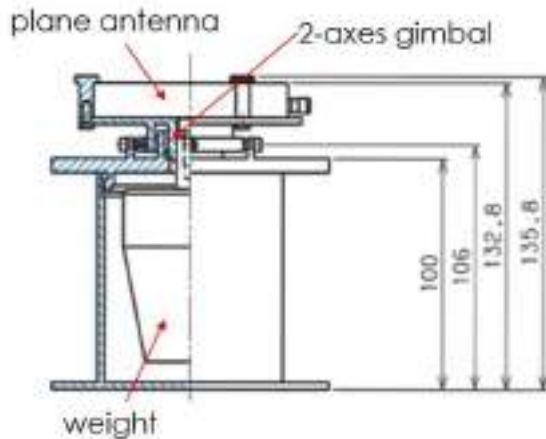


Fig. 6: Design of the gimbal for supporting a plane antenna. Unit:mm.



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

Fig. 7 shows a part of results comparing the signal power received from the satellite. Fig. 7a is for the Yuge-maru and Fig. 7b is for Hamakaze, and red line shows the case with gimbal apparatus and blue line is the case without it and the antenna was fixed to the deck of the ship, respectively. As is shown, the case with gimbal apparatus in Fig. 7a, case for Yuge-maru, shows significant reduction of fluctuation due to usage of gimbal apparatus. On the contrary, Fig. 7b that used Hamakaze does not show any significant reduction of fluctuation in received signal power. Since the size of two ships are different, the

different result might be due to different characteristics periods of ships. As the experiment is still premature, we may have to explore much further to improve the stable and secure signal transmission method between the continuously swinging buoy and the satellite.



Picture 3: Yuge-maru



Picture 4: Hamakaze

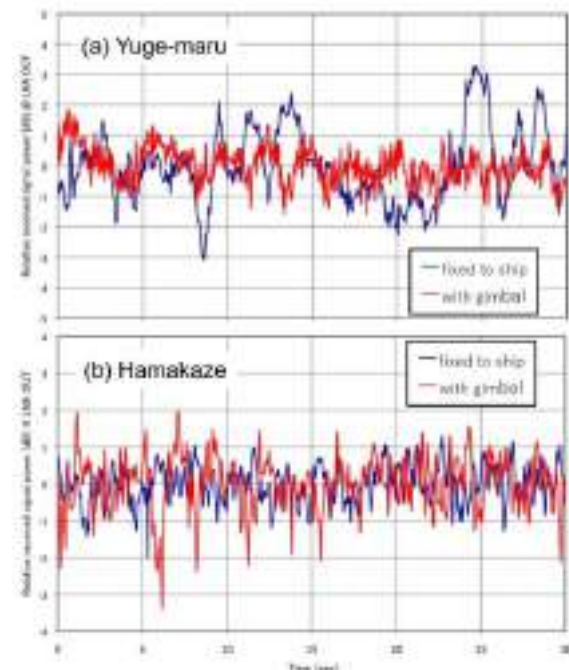


Fig. 7: Comparison of received signal power with a gimbal apparatus (red) and without it (blue), for the case of (a) Yuge-maru and (b) Hamakaze.

DISCUSSION

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

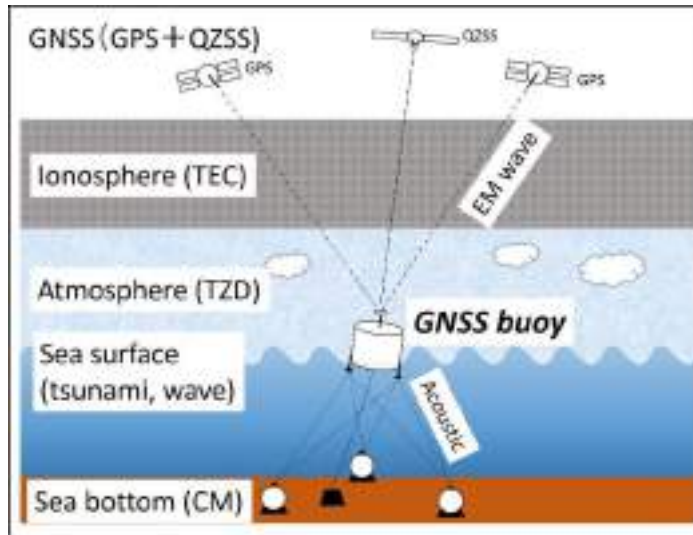


Fig. 8: Multi-purpose GNSS buoy for geohazards monitoring

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

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

Recent researches on atmospheric applications suggest that the atmospheric water vapor derived from TZD provide very important information on numerical weather forecast as well as atmospheric research (e.g., Rocken et al., 2005; Fujita et al., 2008; Shoji et al., 2016). Yet, these researches are only experimental and by using vessels.

Therefore, long-term fixed point observation using buoy would be an important step for operational use of water vapor content for atmospheric applications.

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

CONCLUDING REMARKS

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

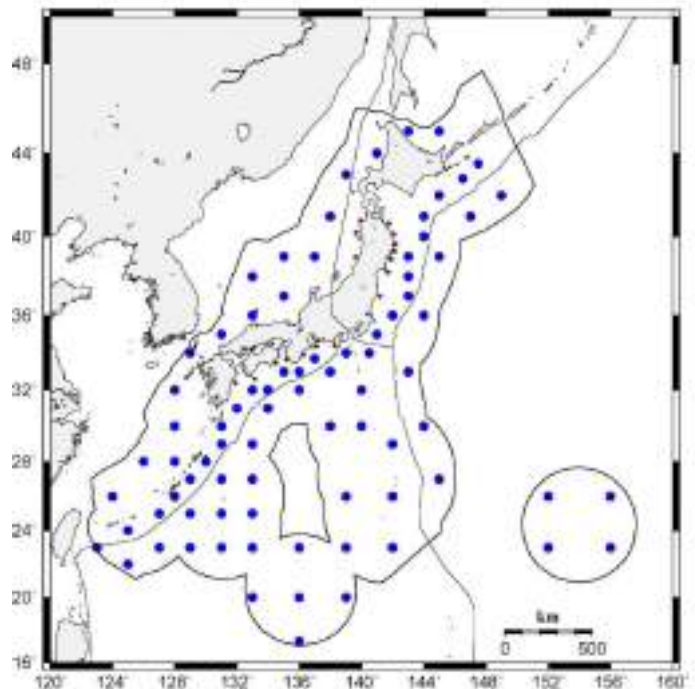


Fig. 9: A plan of GNSS buoy array in the western Pacific. Closed circles are the exclusive economic zone (EEZ) of Japan. Buoy sites are arbitrarily plotted as dots.

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

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310.

REFERENCES

- Calais, E., and J. B. Minster (1995). "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake" *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1045-1048.
- Choosakul, N., A. Saito, T. Iyemori, and M. Hashizume (2009). "Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004" *Geophys. Res. Lett.*, 114, A10313, doi:10.1029/2008JA013915.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006). "GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application" *Earth Planets Space*, 58, 265-276.
- Fujita, M., F. Kimura, K. Yoneyama, and M. Yoshizaki (2008). "Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements" *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13803, doi:10.1029/2008GL033764.
- Larson, K., P. Bodin, and J. Gomberg (2003). "Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali Fault earthquake" *Science*, 300, doi:10.1126/science.1084531.
- Ozaki, T. (2011) "Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) – Tsunami warnings/advisories and observations –" *Earth Planets Space*, 63, 827-830.
- Rocken, C., L. Mervart, Z. Lukes, J. Johnson, H. Kanzaki, M. Kakimoto, and Y. Iotake (2004). "Testing a new network RTK software system" *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, USA, 2831–2839.
- Rocken, C. J. Johnson, T. V. Hove, and T. Iwabuchi (2005). "Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS" *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12813, doi:10.1029/2005GL022573.
- Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki (1998). "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan" *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3079-3082.
- Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2016). "PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADOCA Real-Time Orbits" *SOLA*, 12, 265-271, doi:10.2151/sola.2016-052.
- Spiess, F. N. (1985). "Suboceanic geodetic measurements" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 502-510.
- Tsugawa, T., Nishioka, M., Shinagawa, H., Maruyama, T., Ogawa, T. Saito, A, Otsuka, Y. Matsumura, M. Nagatsuma, T., and Murata, K. T. (2012). "Tsunami induced ionospheric disturbances detected by GPS-TEC observation after the 2011 Tohoku earthquake" *Abstract of the Japan Geoscience Union Meeting 2012*, HDS26-09.
- Zumberge, J., M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, and F. Webb (1997). "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks" *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005–5017.

FULL PAPER

Open Access



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

Yoshinori Shoji^{1*} , Kazutoshi Sato², Masanori Yabuki³ and Toshitaka Tsuda³

Abstract

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

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

Introduction

Nowadays, global navigation satellite systems (GNSSs), such as the US Global Positioning System (GPS), are fundamental infrastructure for navigation, positioning, and timing. These systems also serve as an accurate continuous water vapor monitoring tool. In particular, multiple studies have been conducted to assess the accuracy of GNSS-derived vertically integrated water vapor in the atmosphere (precipitable water vapor: PWV) and have confirmed its practicality (e.g., Bevis et al. 1992; Shoji

et al. 2004; Benevides et al. 2015; Guerova et al. 2016). The GNSS Earth Observation Network (GEONET) of the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) covers the Japanese archipelago with more than 1300 GNSS antennas and is used as a precise crustal deformation monitoring network. Even though the primary purpose of GEONET is crustal deformation monitoring, it is a reliable source of PWV on the ground, so the Japan Meteorological Agency (JMA) started assimilation of the GEONET-derived PWV into their operational numerical weather prediction (NWP) system in 2009 (Ishikawa 2010).

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

*Correspondence: yshoji@mri-jma.go.jp

¹ Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

Full list of author information is available at the end of the article

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

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

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, several studies have been addressing this problem. Chadwell and Bock (2001) used a buoy-based GPS receiver to estimate the PWV compared to that obtained by nearby (within 10 km) radiosonde and ground fixed GPS stations and obtained root mean square (RMS) agreements of 1.5 and 1.8 mm, respectively. Rocken et al. (2005) installed two GPS antennas near the front mast of a 138,000-ton ship and executed two 1-week observation experiments. They compared PWV retrieved from GPS measurements and that obtained from a radiosonde observations and from a water vapor radiometer (WVR) measurements, and obtained good agreements (less than 2 mm RMS to radiosonde and at 2.8 mm RMS to the WVR). Fujita et al. (2008) introduced a choke ring-type GPS antenna on the 8678-ton research vessel MIRAI, analyzed PWV, and compared with more than 300 radiosonde observations in the equatorial Indian Ocean. The RMS was 2.27 mm and the mean difference was less than 1 mm at night. Boniface et al. (2012) compared PWV over the Mediterranean Sea determined from

the shipborne GPS, numerical weather prediction (NWP) model outputs, and MODIS retrieval. They found that most of the observation period, GPS and NWP outputs showed good agreement. They also discussed the possible cause of disagreements in two cases when large offsets occurred and attributed to NWP's excursions during transition between local Mediterranean weather conditions. Currently, beside GPS, the GNSS includes several satellite navigation systems (e.g., Russian GLONASS, Japanese Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)). Increased number of navigation satellites by utilizing multiple GNSSs resulted in higher accuracy of ocean platform GNSS water vapor measurements. Fujita et al. (2014) conducted PWV retrieval experiment using a multi-GNSS receiver installed on the 3991-ton research vessel HAKUHO MARU. Using GPS, GLONASS, and QZSS together for their PWV analysis resulted in much better agreement with radiosonde observations Shi-Jie et al. (2016) equipped a GPS receiver on a lightweight (300-ton) experimental ship, conducted GPS observations in the Chinese Bohai Sea, and compared the GPS-derived PWV and slant-path water vapor to that derived from the Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5). The RMS agreements were 1.5 mm and 3.9 mm, respectively.

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

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

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

Observation, data processing, and quality control

Observation

The vessel we used in this study is JMA's research vessel the RYOFU MARU, one of the vessels used in the study of Shoji et al. (2016). Figure 1 shows the locations of the two GNSS antennas on the vessel. A Trimble Zephyr II antenna connected to a Trimble NetR9 receiver was installed on the vessel radar mast (MAST), and a JAVAD GrAnt-G3T antenna was connected to a GNSS Technologies Inc. START-GS receiver on the left side of the upper deck (DECK). Here, "MAST" and "DECK" are abbreviations to briefly distinguish each multi-path environment feature in this RYOFU MARU experiment. The multi-path environment is specific to each vessel. The antenna–receiver pair of DECK was also used for the RYOFU MARU observations of Shoji et al. (2016); however, the location was moved 4 m backward to increase the

distance from the radar mast, which is regarded as one of the major multi-path sources. Because the observation systems of MAST and DECK are different, after the main experimental observation period (October 19, 2016–June 19, 2017), we relocated the MAST antenna to the DECK position and conducted additional observations from June 19 to August 6, 2017. We call this additional observation DECKt. All receivers observed GPS, GLONASS, and QZSS. Sampling interval and elevation cutoff angle were set as 1 Hz and zero degrees, respectively.

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

Data processing

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

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

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

$$\text{ZHD} = 0.002277 \times P \quad (1)$$

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

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

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

retrieved PWVs using JXF and MDC2 at the last paragraph of this section.

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

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

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

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

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



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

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

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

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

Figure 2 compares the time series of the PWV retrieved on the RYOFU MARU (c, d) and at a nearby GEONET station 3023 (Chiba Ichikawa) (a, b) from December 3, 2016, to December 5, 2016. During this period, the RYOFU

MARU was located at its homeport (Daiba, Minato Ward, Tokyo) and the sea surface was calm (wave height was less than 0.4 m) during the period. Figure 2a and b compares the results from static PPP and kinematic PPP for a fixed GNSS station. JXF is applied for Fig. 2a, while MDC2 is applied for Fig. 2b. In Fig. 2a, even at the fixed station, we see several millimeter PWV differences between static and kinematic procedures. In Fig. 2b, as a result of applying

Table 2 Main specifications of the GNSS analysis

Classification	Specification	Remarks
Software	RNX2RTKP (RTKLIB ver. 2.4.2, patch 12)	
Analysis procedure	Precise point positioning Kinematic (Shipborne GNSS) Static (GEONET station)	
Integer ambiguity	Not fixed (no PPP-AR applied)	
Ephemeris	MADOCa real-time product (MDC2)	https://ssl.tksj.jp/madoca/public/public_index_en.html
Mapping function	GMF (no gradient estimation)	Boehm et al. (2006)
Elevation cutoff angle	3°	
Antenna phase center variation	IGS08_1793.atx MAST (DECKt): "TRM55970.00 NONE" DECK: "JAV_GRANT-G3T NONE"	http://ftp.igs.org/pub/station/general/igs08.atx
Geoid model	EGM2008-SE (1") (Und min1 × 1 egm2008 is w = 82 WGS84 TideFree_SE)	http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html
Tidal effect	Solid earth tide: IERS Conventions 2010 Ocean Tidal Loading: Not applied	Petit and Luzum (2010) IERS Technical Note No.36, IERS Conventions (2010)
Ionosphere correction	Ionosphere-free linear combination	
ZHD	ZHD = $0.002277 \times P$ $P = 1013.25 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} / h)^{5.2568} P_0$ atmospheric pressure (hPa), h : geodetic height above mean sea level	Elgered et al. (1991)
Time-dependent parameters	Antenna coordinate Receiver clock ZWD random-walk variable with process noise of $0.1 \text{ mm/s}^{1/2}$	Updated every 1 s

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

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

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

Quality control

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

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

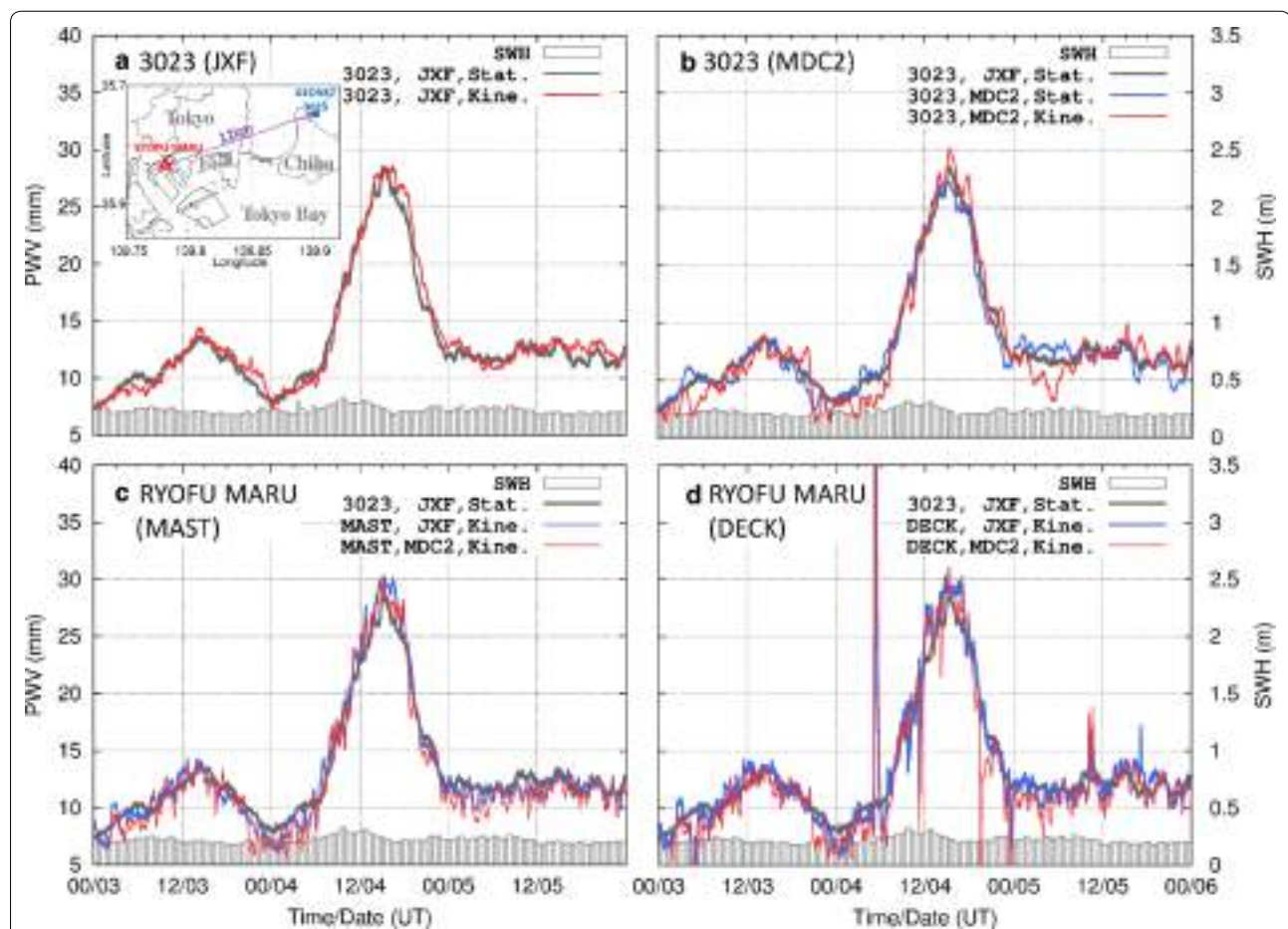
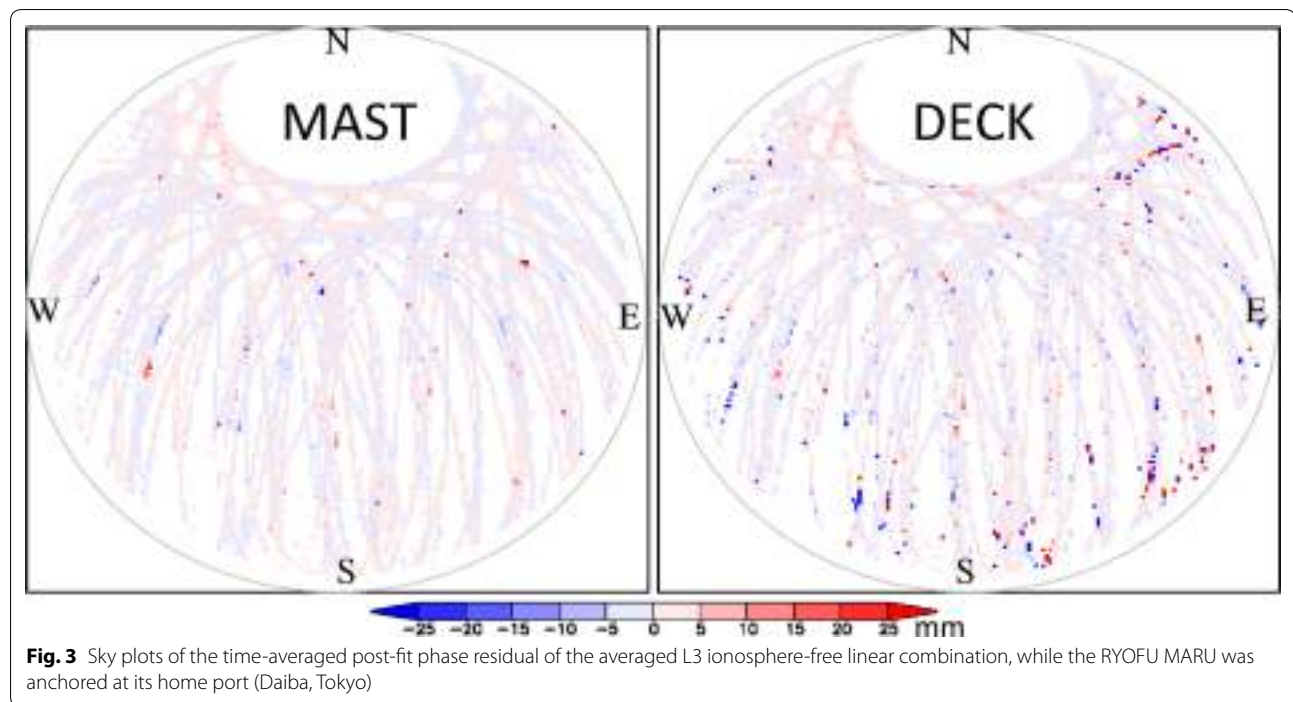


Fig. 2 Comparison of GNSS PWVs estimated at RYOBU MARU (c, d) and nearby GEONET station (a, b) for the 3 days from December 3, 2016, to December 5, 2016. The GEONET station 3023 (Chiba Ichikawa) locates approximately 12 km ENE from the RYOBU MARU. Results obtained using a final ephemeris (JXF) and a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



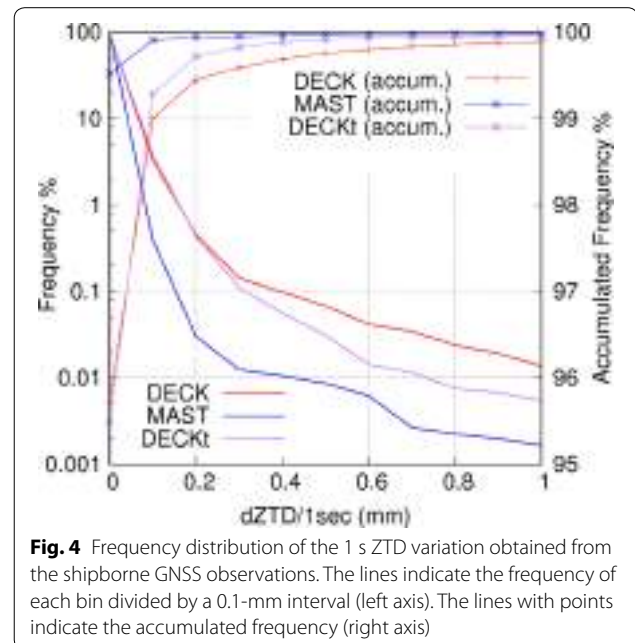
of the PWV. According to Shoji et al. (2016), the accumulated frequency of the less than 1-mm/min PWV variation was more than 99.5%. In this study, according to the statistical ZTD time variation frequency analysis shown in Fig. 4, we set a 0.1-mm/s ZTD variation as the threshold of the outliers. Figure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

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

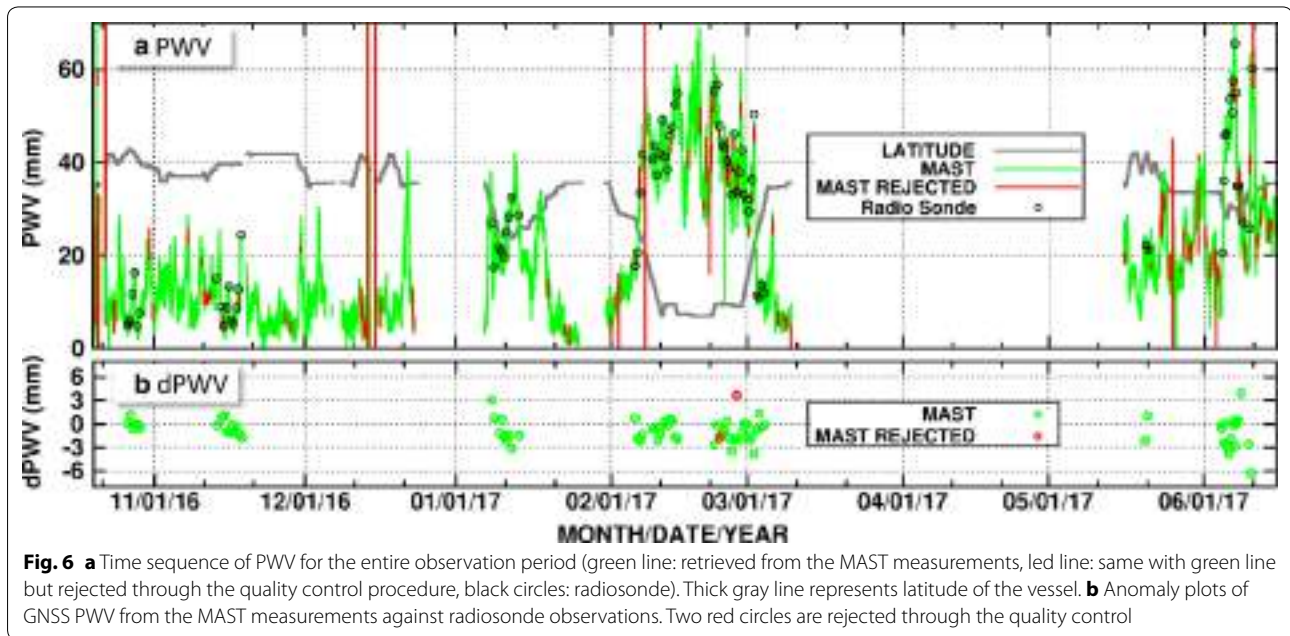
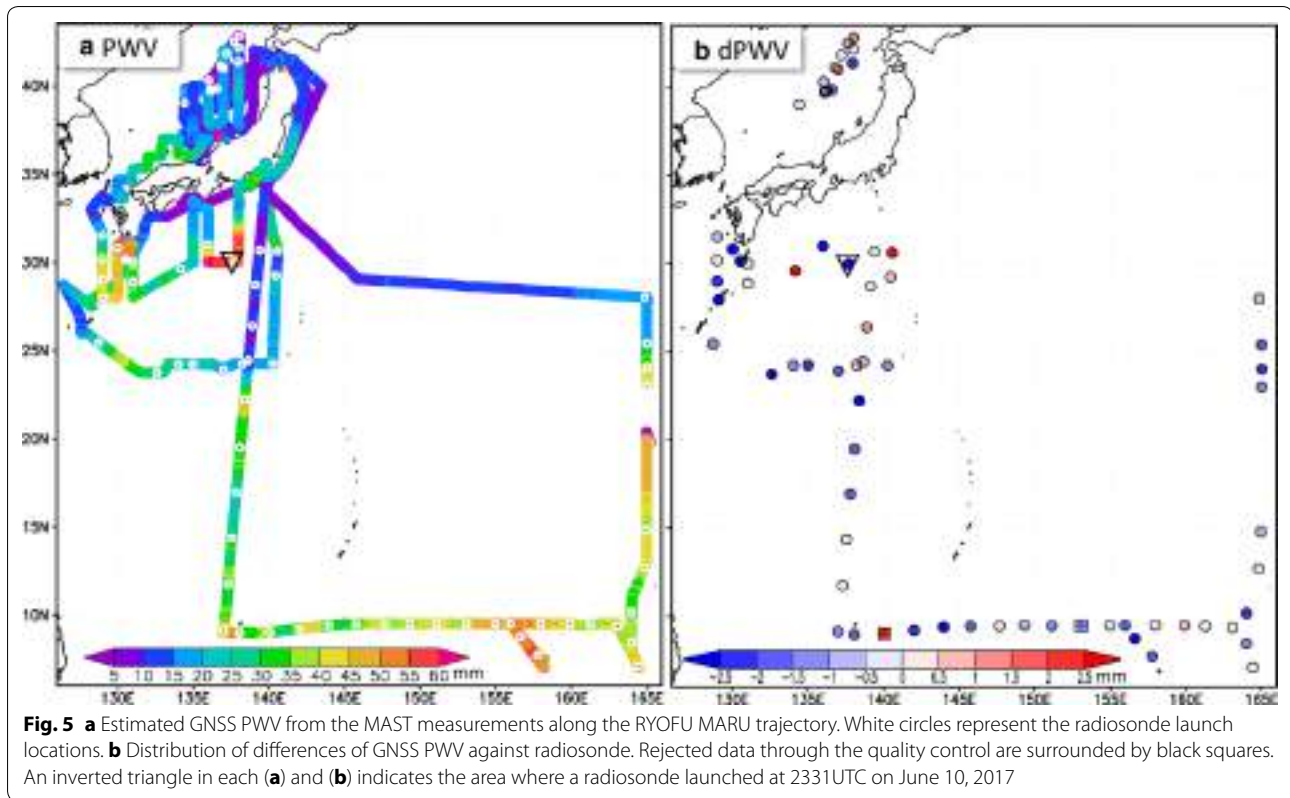
The data rejection rate (the number of rejected data divided by the total number of pairs) gives the quality of GNSS observations and the retrieved PWV.

Results of comparison with radiosonde observations

A radiosonde launching facility is equipped with the RYOFU MARU and upper air observations over the ocean are conducted. Through this study, the VAISALA RS92-SGP radiosonde was used. The GNSS antennas were set higher than the radiosonde base. Therefore, as



a height correction, the radiosonde observed water vapor amount between the radiosonde launching point to the GNSS antenna was removed from radiosonde observations. Figure 5 shows the GNSS PWV retrieved from the MAST observation and its difference from radiosonde observation plotted on the two-dimensional map along the RYOFU MARU trajectory, and Fig. 6 shows those plotted as time series. A total of 77 radiosondes were



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

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

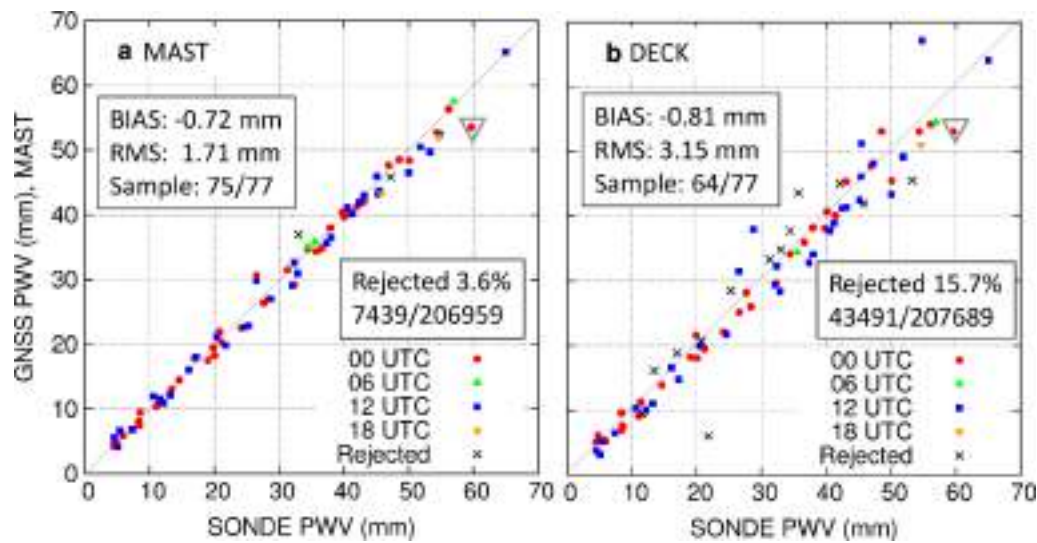


Fig. 7 Scatter diagrams of the differences in the GNSS PWV obtained from the MAST measurements versus the radiosonde observations. The red circle plot with the gray inverted triangle is a comparison with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017. The cause of the large difference is discussed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

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

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

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

Discussion and summary

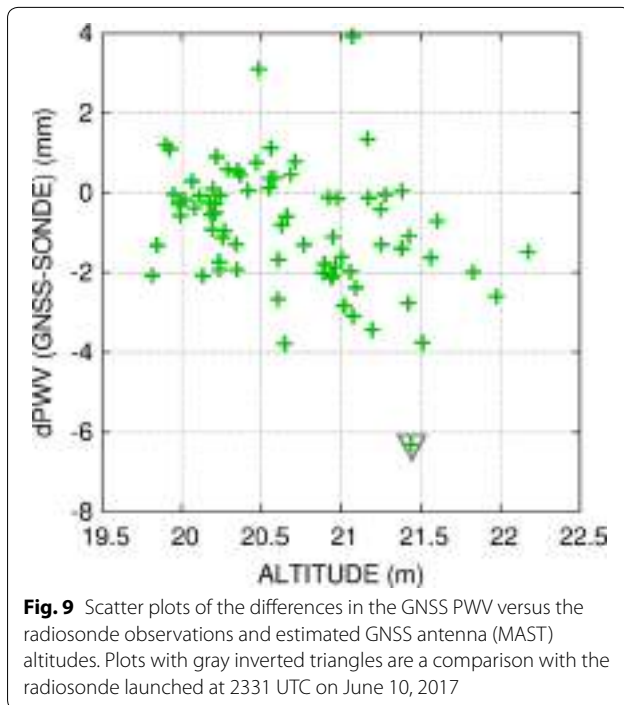
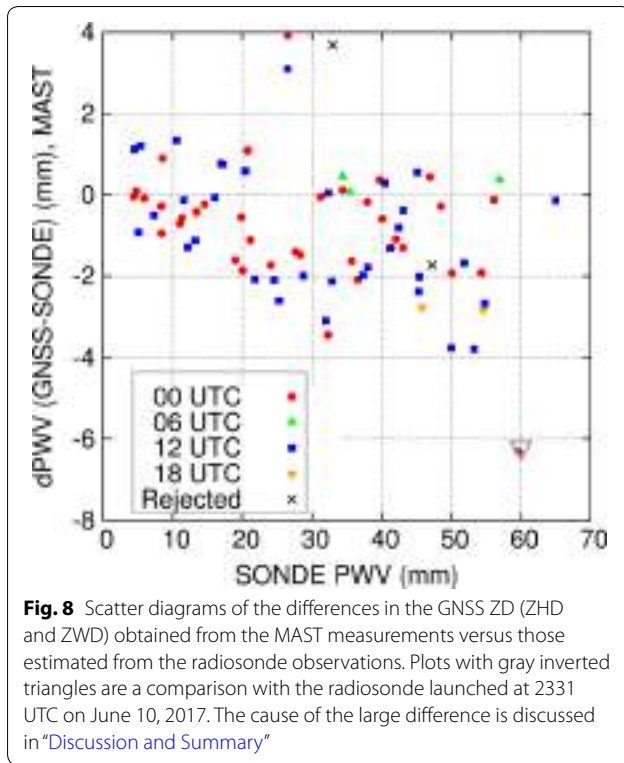
In this section, we discuss several possible sources of errors in the shipboard GNSS positioning and troposphere estimation.

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

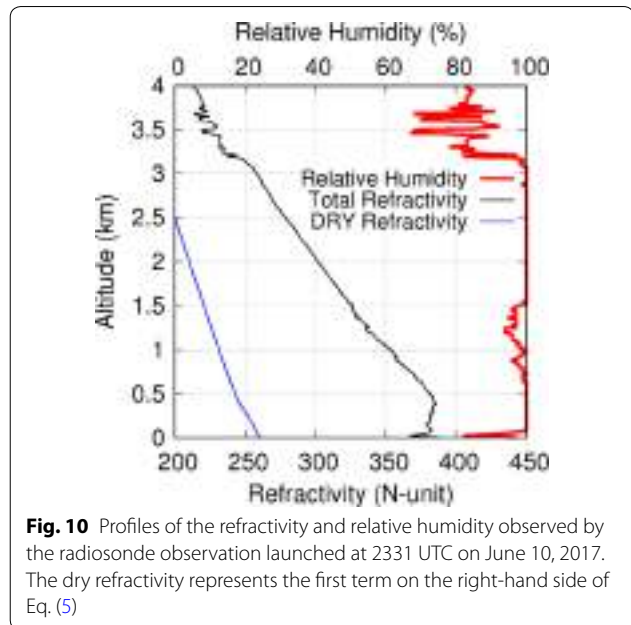
$$N = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right), \quad (5)$$

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

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



on GNSS observation, such as longer transform of microwave, formation of shadow zone, and reflect signal propagation loss. A vertical inversion layer caused by water



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

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

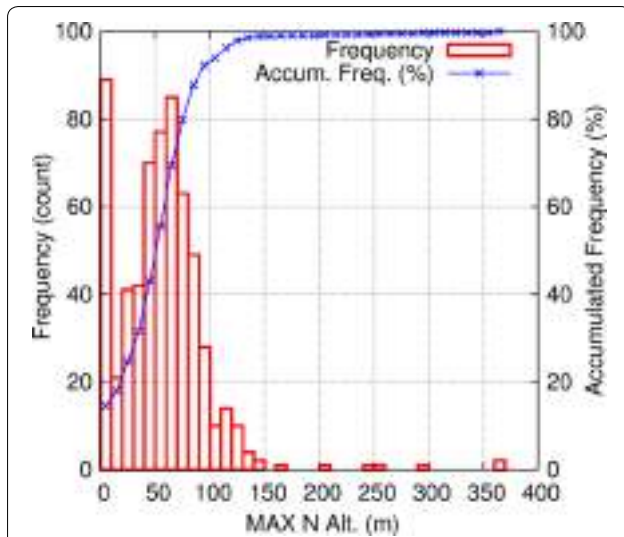


Fig. 11 Frequency of the height of the maximum refractivity of 612 RYOBU MARU radiosonde observations during the period of 2012–2017

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

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

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

Shoji et al. (2016) discussed real-time possibility of shipborne GNSS PWV measurement. However, the results obtained from RYOBU MARU were highly contaminated by outliers and more than 60% of estimated PWV was rejected. They supposed that multi-path affected the RYOBU MARU GNSS observation. In this paper, by comparing observations on DECK and on MAST on the RYOBU MARU, their hypothesis was confirmed by much smaller rejection rate on less multi-path affected MAST.

However, as shown in Fig. 2, GNSS PWV time series by kinematic PPP with real-time ephemeris show fluctuations of several-hour cycle with several-mm amplitude. It may be partly due to analyzing x , y , and z coordinates as time-dependent unknown parameters, and partly due to less accuracy of real-time ephemeris compared to final one. Increased number of high-quality observation could bring more stable analysis results. In this study, we used GPS, GLONASS, and QZSS. In the future, inclusion of other GNSS, such as BeiDou and GALILEO, should be investigated.

(b) The effects of the following conditions on the kinematic GNSS measurements are minor, if any:

- a relative wind speed of less than 20 m,
- a cruising speed of less than 8 m/s and
- a significant wave height of less than 5 m.

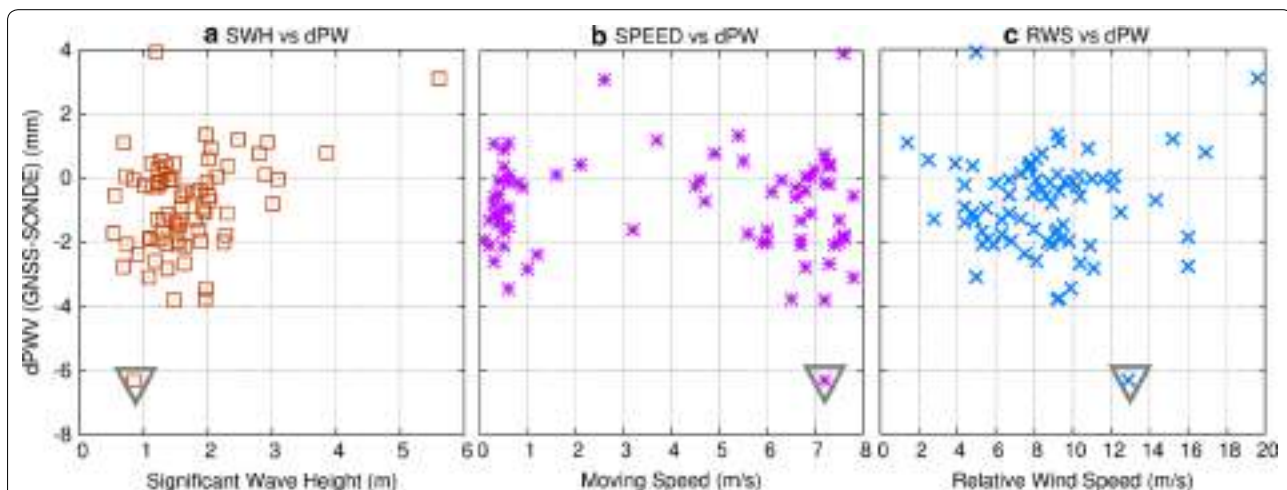
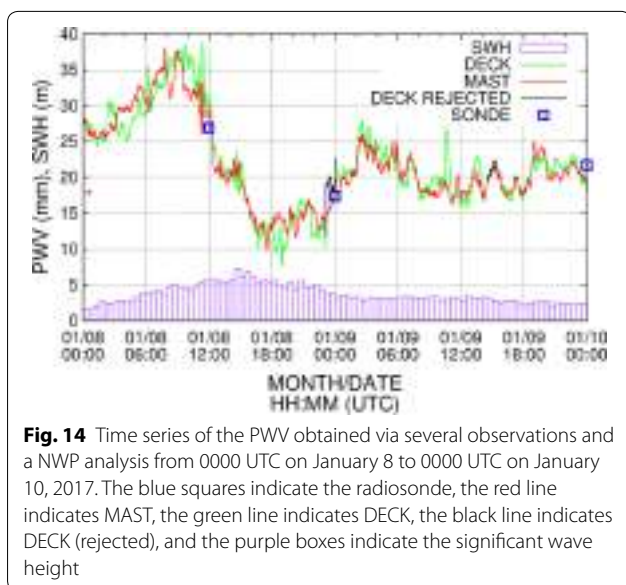
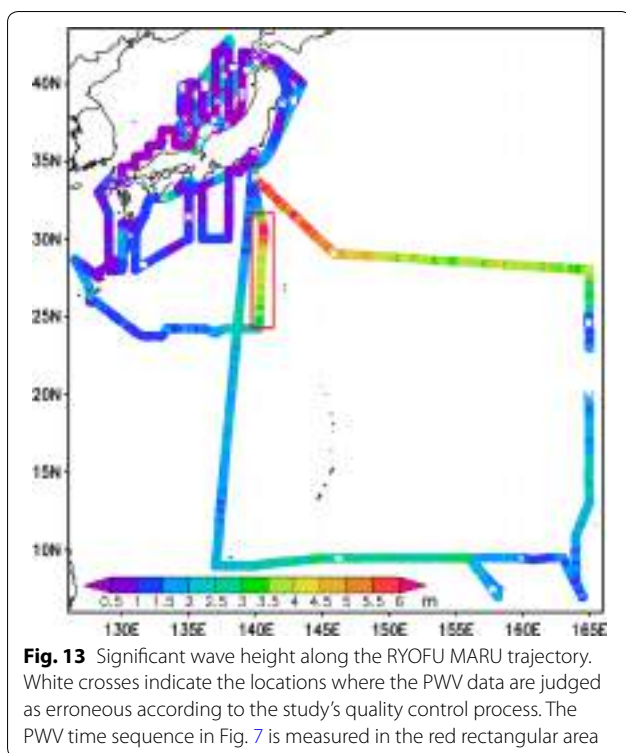


Fig. 12 Scatter plots of the differences in the GNSS PWV versus the radiosonde observations and **a** significant wave height, **b** vessel moving speed, and **c** relative wind speed. Plots with gray inverted triangles are comparisons with the radiosonde launched at 2331 UTC on June 10, 2017



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

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

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

(d) Radio wave ducting could cause large error.

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

Abbreviations

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

Authors' contributions

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

Author details

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

Acknowledgements

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

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Availability of data and materials

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

Ethics approval and consent to participate

Not applicable.

Consent for publication

Not applicable.

Funding

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

Publisher's Note

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

Received: 29 August 2017 Accepted: 25 October 2017

Published online: 13 November 2017

References

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

Submit your manuscript to a SpringerOpen[®] journal and benefit from:

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

Submit your next manuscript at ► springeropen.com

海洋 GNSS ブイからの洋上・衛星間データ収集を想定した 電波伝搬モデルの構築

滝沢 賢一[†] 山本 伸一^{††} 豊嶋 守生^{††} 二村 彰^{†††} 寺田 幸博^{††††}
加藤 照之^{††††}

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構 耐災害 ICT 研究センター 応用領域研究室

〒 980-0812 仙台市青葉区片平 2-1-3

^{††} 国立研究開発法人情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター 宇宙通信研究室

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

^{†††} 国立弓削商船高等専門学校 〒 794-2593 愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000

^{††††} 国立高知工業高等専門学校 〒 787-8508 高知県南国市物部乙 200-1

^{†††††} 東京大学地震研究所 〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

E-mail: [†]{takizawa,shin.yamamoto,morio}@nict.go.jp, ^{††}futamura@ship.yuge.ac.jp,

^{†††}terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ^{††††}teru@eri.u-tokyo.ac.jp

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

キーワード 洋上・衛星間通信, 海洋 GNSS ブイ, 電波伝搬モデル

Channel Modeling on Satellite Communications for GNSS Buoy in the Ocean

Kenichi TAKIZAWA[†], Shinichi YAMAMOTO^{††}, Morio TOYOSHIMA^{††}, Akira FUTAMURA^{†††},
Yukihiro TERADA^{††††}, and Teruyuki KATOH^{†††††}

[†] National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Katahira 2-1-3, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-0812 Japan

^{††} National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

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

^{†††} National Institute of Technology, Yuge College

Yuge-Shimoyuge 1000, Kamishima, Ehime, 794-2593 Japan

^{††††} National Institute of Technology, Kochi College

Monobe-otsu 200-1, Nangoku, Kochi, 787-8503 Japan

^{†††††} Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 Japan

E-mail: [†]{takizawa,shin.yamamoto,morio}@nict.go.jp, ^{††}futamura@ship.yuge.ac.jp,

^{†††}terada@ce.kochi-ct.ac.jp, ^{††††}teru@eri.u-tokyo.ac.jp

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

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

1. ま え が き

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

2. 洋上における測定

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

2.1 測定系の構成

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

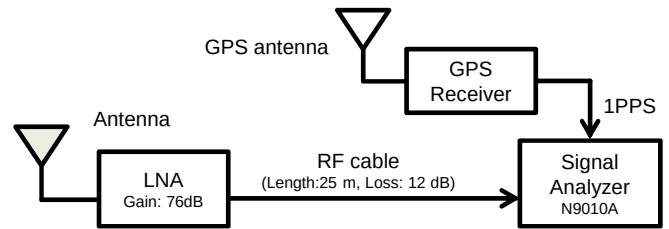


図 1 測定系の構成

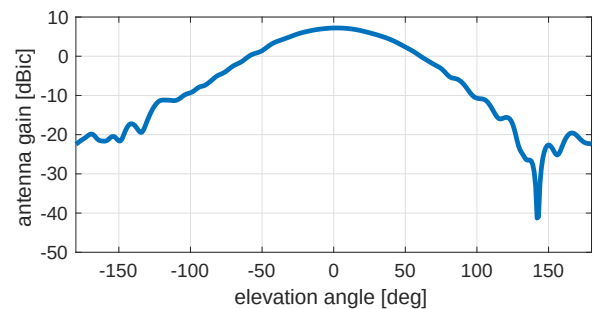


図 2 測定用アンテナのパターン



図 3 測定系設置の様子

2.2 測定結果

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

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

3. 電波伝搬モデルの構築

3.1 モデルの構成

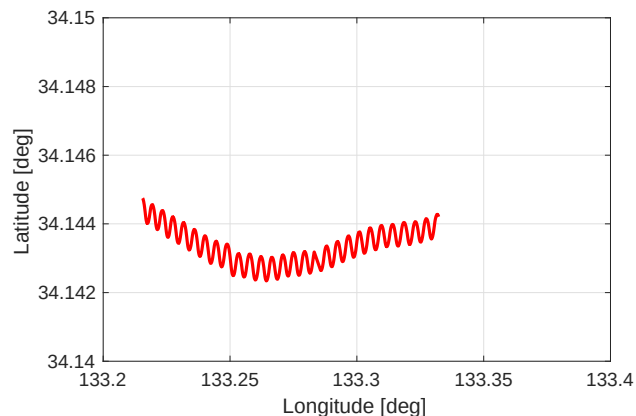
洋上・衛星間の電波伝搬特性を考慮した受信信号電力の変動モデルを考える。モデルとしては、式 (1) に示すように、海上ブイに設置されたアンテナ揺動及び衛星軌道情報をもとに幾何学的に決定される成分と、反射波等によって確率的に与えられる成分による構成とする。

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

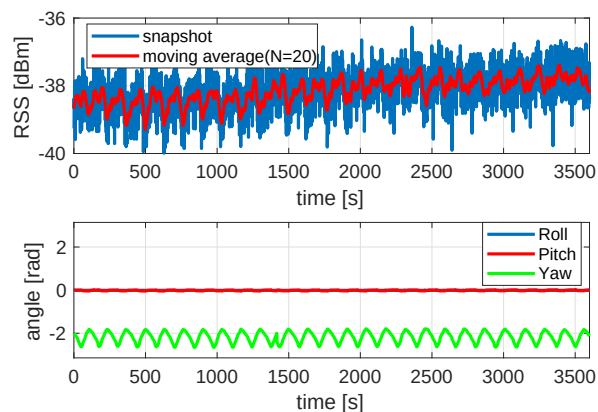
第一項の確定的な成分は、衛星に対する仰角及び方位角の変化から生じるアンテナ利得の変化と、衛星通信システムに含まれる固定的な要因が含まれる。気象条件による影響も本来はモデルに含むべきであるが、測定期間中の観測データからはモデル化に必要なデータが取得できていないことから、本稿におけるモデルでは明示しない。

3.2 測定データにもとづくモデルの構築

図 4 に示したデータをもとにモデルの構築を行う。傾斜計による計測データ及び衛星軌道情報から求めた衛星に対する仰角及び方位角をもとにして、洋上側のアンテナ利得変動を求めた結果を図 7 に示す。なお、アンテナ利得については、方



(a)



(b)

図 4 測定データの例（東から西へ向かって蛇行して航行）

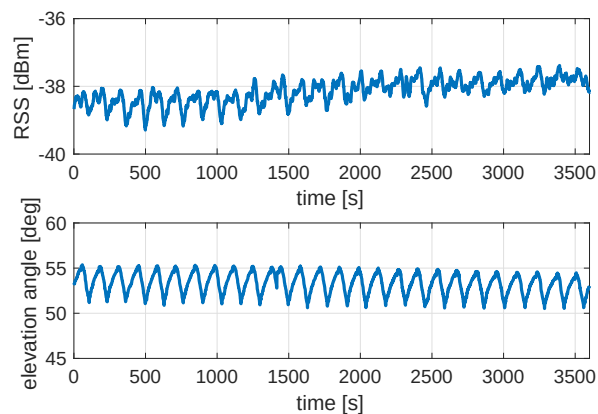
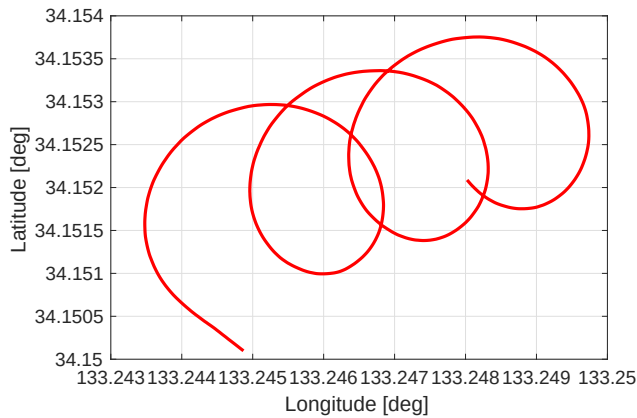
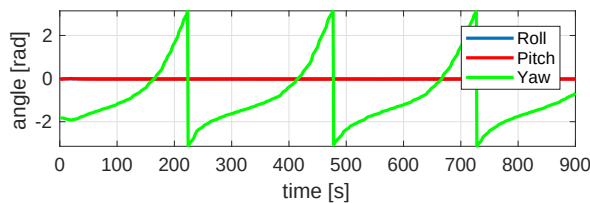
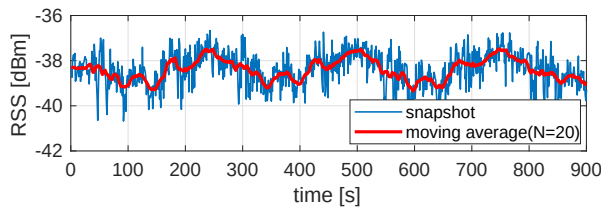


図 5 測定した受信信号強度と衛星仰角との比較

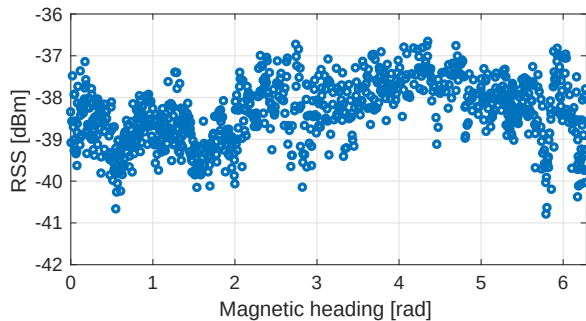
位角に対する変化はないものとした。衛星仰角の変動幅は 4.8 度である。このアンテナ利得変動をもとにして、受信信号強度を計算した結果を図 8 に示す。受信信号強度との RMS 誤差は 1.64×10^{-5} (-47.8 dBm) となる。次に、残差分 δ_{RSS} を確率的な成分とみなして、統計分布によるモデル化を行う。図 9 には残差分 δ_{RSS} に対して、陸上移動体衛星通信 [4] におけるモデルにおいても用いられる対数正規分布によってフィッティングした結果を示す。対数正規分布の平均値は -6.4×10^{-15} 、標準偏差は 0.46 であった。



(a)



(b)



(c)

図 6 周回軌跡によって得られた測定データ

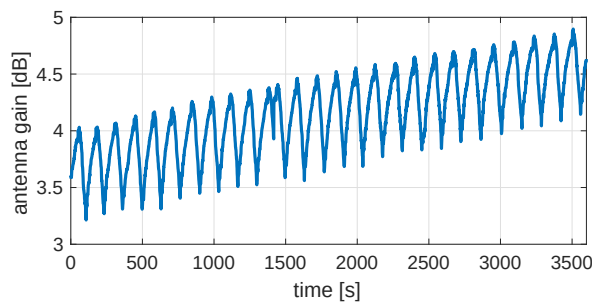


図 7 揺動及び衛星軌道変動に起因するアンテナ利得の計算結果

4. ま と め

本稿では、海洋 GNSS ブイにおけるデータ収集を目的とした

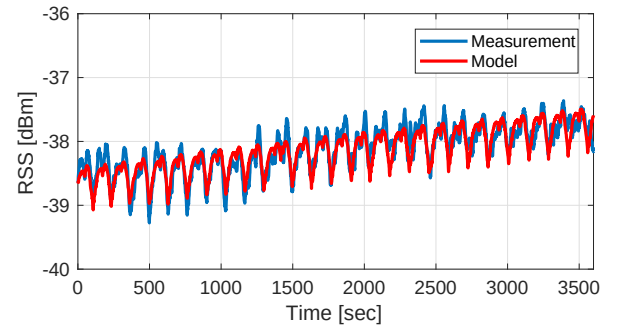


図 8 実測値（読み値）とモデルから求めた値との比較

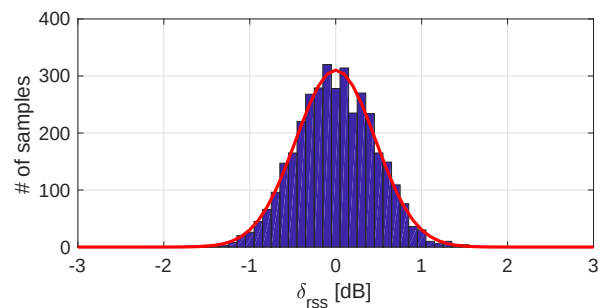


図 9 統計分布による残差成分のモデル化

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

謝 辞

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

文 献

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

Paper:

Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System

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

^{*1}Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

[†]Corresponding author, E-mail: ters@onken.odawara.kanagawa.jp

^{*2}National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan

^{*3}Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan

^{*4}National Institute of Technology, Yuge College, Ehime, Japan

^{*5}Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan

^{*6}Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan

^{*7}Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan

^{*8}Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan

[Received November 8, 2017; accepted January 29, 2018]

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

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



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

1. Introduction

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

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

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

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

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

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

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

The lesson learned from this event is that GNSS buoys should be placed much farther from the coast, perhaps more than 100 km offshore for more effective early warnings. As long as we use the RTK algorithm, which has distance limit of less than 20 km to have a positioning accuracy of about a few centimeters, we will not attain this goal. We must therefore employ a system with a new algorithm to overcome this difficulty. The Precise Point Positioning algorithm, which does not require baseline mode

positioning, would be a solution for such an application. In addition, if the buoys are set much farther offshore, the land-based radio system for data transmission used in the conventional system cannot be used any more. We may have to employ some other technique for such long distance data transmission. The most feasible way may be to use satellite data transmission. The following two sections describe the new algorithm and satellite data transmission for a new development of the GNSS buoy system.

3. Recent Developments of GNSS Buoys

3.1. Implementation of PPP Algorithm

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

3.2. Data Transmission Using Satellites

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

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

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

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

3.3. Design of a Buoy

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

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

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



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

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

3.4. System Design

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

- 1: Data from the Japanese GNSS Earth Observation Network System (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) are used to derive the precise orbits and clock correction parameters at the data center in Hitachi Zosen Corporation (Hitz), Tokyo.
- 2: Precise satellite orbits and clocks obtained are then forwarded to the ground base station located in the town of Niyodogawa, Kochi Prefecture, Japan (Fig. 3).
- 3: The data are transmitted to the buoy via a commercial communication satellite, Thuraya.
- 4: GNSS data received on the buoy are analyzed to estimate coordinates together with precise orbits and clocks. Then, the estimated coordinates are transmitted back from the buoy to the receiving station in Niyodogawa via the same satellite.

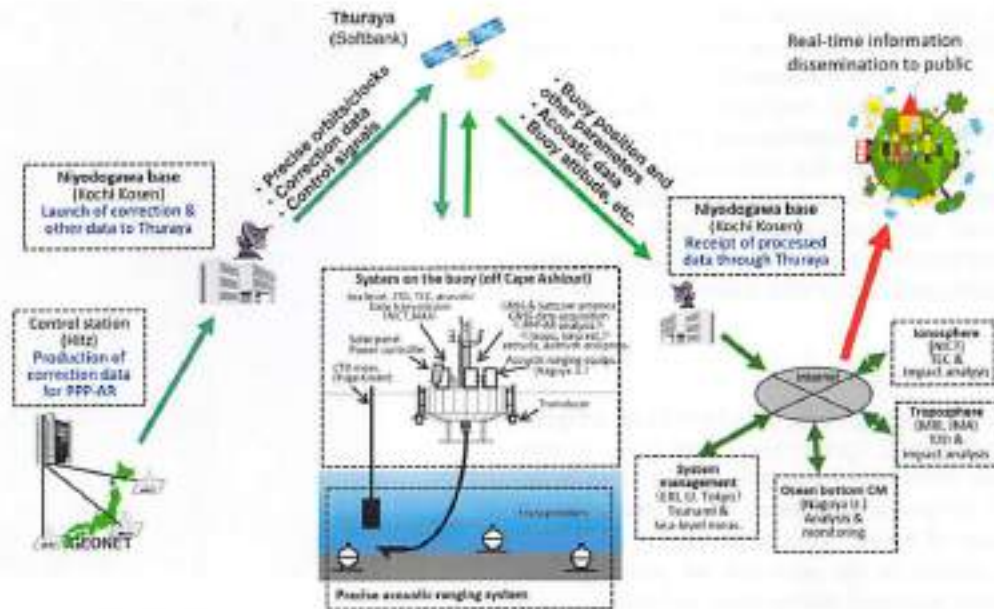


Fig. 3. Data flow for acquisition, analysis, and dissemination, using two satellites.

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

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

4. Field Experiments

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

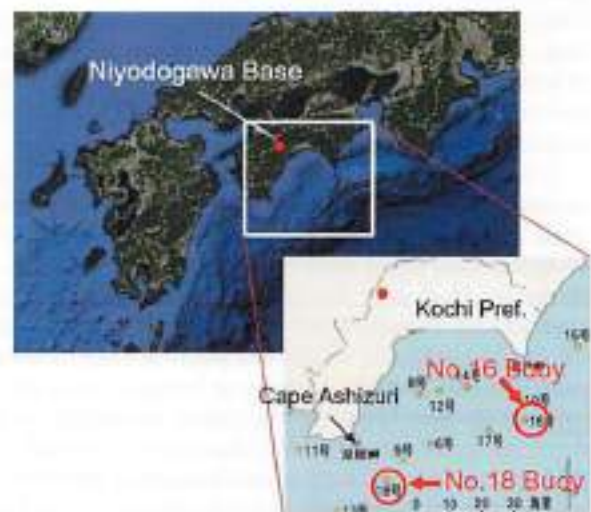


Fig. 4. Location of the buoys and the Niyodogawa Base, where the data server is located.

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



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

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

cision, if ambiguity is fixed, for vertical coordinate estimates. Thus, the upper and lower plots should look similar in the short period. It seems that this condition is well recognized in the plot.

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

5. Implementation of GNSS-Acoustic System

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

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

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

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

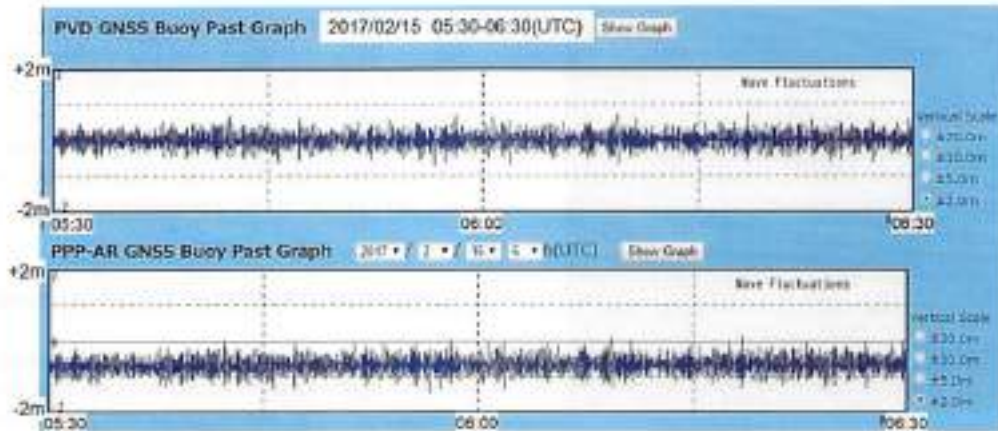


Fig. 6. Obtained time series of vertical components of GNSS buoy (05:30–06:30 UTC of 15th February 2017). Upper inset shows high frequency component using PVD method [8]. Lower inset shows time series using PPP-AR [5].

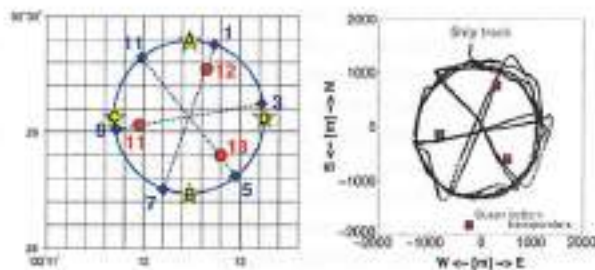


Fig. 7. (Left) Locations of three transponders (#11, #12, and #13). Stars mark (A–D) the locations of CTD observations. Center of the circle is the location of buoy. Planned ship tracks are shown by circles and dashed line in blue. Numbers indicate cross points. (Right) Ship tracks for acoustic ranging.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

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

CTD observations were conducted, first, to determine the precise positions of the transponders deployed on the ocean floor, as it is important to determine the geometry of the triangle made by the three transponders to continuously track the position changes in order to estimate crustal movements. CTD observations in February were conducted to estimate the sound-speed gradient. Observations in June were conducted together with acoustic ranging to determine the precise geometry of the transponders. We found that ignoring the sound-speed gradient with respect to depth leads to the biases of tens of centimeters in coordinate estimates. We then estimated the sound-speed gradient together with the ocean floor coordinates in analyzing data in the June experiment. The results showed that the difference in the estimated coordinates for two

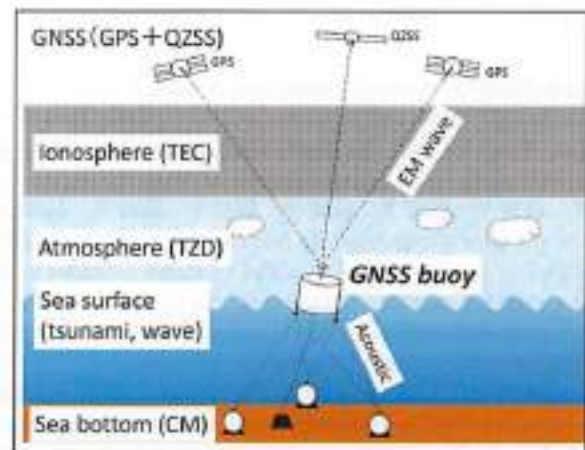


Fig. 8. Plan for GNSS buoy array in the western Pacific.

days of observations in September together with CTD observations only amounted to about two centimeters. It will therefore not be necessary to observe the sound-speed gradient using CTD in the future, although occasional observation would be beneficial in evaluating the data analyses. The data obtained are now under investigation to determine the precise transponder geometry.

6. Discussion

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

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

ther processing and monitoring (Fig. 8).

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

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

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

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

The Applied Electromagnetic Research Institute of the National Institute of Information and Communications Technology is collecting global GNSS data from more than 6,000 sites to monitor ionospheric fluctuations [33], and it is making its data available online. High-resolution TEC maps have become available for space weather and ionospheric research in Japan, North America, and Eu-

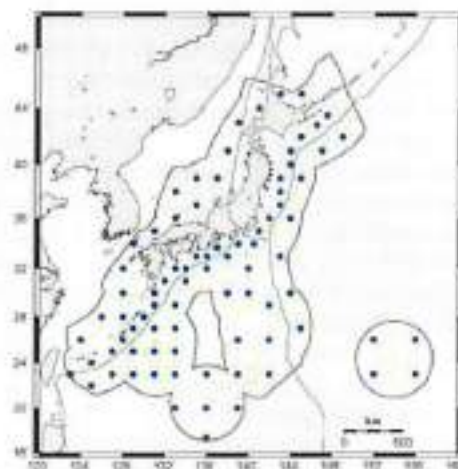


Fig. 9. Future scope of GNSS buoy array in the north-western Pacific. Small red dots represent the currently operational GNSS buoy array for wave monitoring by NOW-PHAS. Other blue dots are arbitrarily plotted for a hypothetical GNSS buoy array. Closed lines mark the extent of the Japanese Exclusive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

rope, where there are dense GNSS receiver networks. However, they insist that there are vast areas vacant of GNSS sites in the ocean. This situation should be improved by introducing GNSS buoy arrays in the ocean.

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

7. Concluding Remarks

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

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

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

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

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

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

monitoring as well as a step forward for basic Earth sciences.

Acknowledgements

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

References:

- [1] T. Kato, Y. Tanaka, K. Jia, R. Hinori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recounted by a new GPS buoy," *Earth Planets Space*, Vol.57, pp. 297-301, 2005.
- [2] http://www.mri.go.jp/viswaweb/npmpd/index_eng.html [accessed December 28, 2017]
- [3] T. Ozaki, "Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) - Tsunami warning/advocates and observations -," *Earth Planets Space*, Vol.63, pp. 827-830, 2011.
- [4] J. Zumberge, B. Hefflin, D. Jefferson, M. Workless, and F. Webb, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," *J. Geophys. Res.*, Vol.102, No.B3, pp. 5005-5017, 1997.
- [5] K. Larson, P. Boden, and J. Gamber, "Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the 2004 Indian Ocean earthquake," *Science*, Vol.300, 2003.
- [6] C. Rocken, L. Mervet, Z. Lukes, J. Johnson, H. Kanazaki, M. Kaki-mura, and Y. Iwaki, "Testing a new network RTK software system," *The Proc. of the 17th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, pp. 2831-2839, 2004.
- [7] M. Takaguchi, Y. Iguchi, S. Miyoshi, H. Yamada, T. Tsunaka, E. Miyojin, M. Kishimoto, and K. Kawne, "Efforts towards improvement of the precise orbit and clock determination for Multi-GNSS satellite and user positioning system," *Proc. of the 61st Space Sciences and Technology Conf.*, 3A13, 2017 (in Japanese with English abstract).
- [8] https://sl.ice.jaxa.jp/misocia/public/public_index_en.html [accessed December 27, 2017]
- [9] Y. Tanaka, T. Nagai, T. Kato, S. Koshimura, K. Kanaguchi, and Y. Maehata, "Long-term mooring chain systems durability of the GPS tsunami-wave meter," *J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.70, No.1, pp. 13-18, 2014 (in Japanese).
- [10] Y. Maehata, T. Kotoura, Y. Kanno, D. Yoshida, M. Sano, H. Yoneyama, and Y. Tanaka "The behavior of the GPS buoy and mooring line during the installation," *J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.71, No.2, pp. L1045-L1050, 2015 (in Japanese).
- [11] T. Kato, Y. Tanaka, K. Tadokoro, A. Furumura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishizaki, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, and N. Koshikawa, "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System," *The Proc. 27th Int. Ocean and Polar Engineering Conf.*, 2017.
- [12] H. Ishioka, A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Tanaka, H. Nakamura, M. Kinoshita, M. Kanazaki, and T. Tanno, "Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver - PVD (PPoint precise Variance Detection) Method -," *J. Geod. Soc. Japan*, Vol.46, No.4, pp. 233-267, 2000.
- [13] Y. Tanaka, T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, N. Inada, H. Sakurai, and K. Tadokoro, "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," *Proc. of the 1st Symp. on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GEMAC)*, IAG Symposium, Vol.145, 2015.
- [14] F. N. Spies, "Suboceanic geodesic measurements," *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23, pp. 502-510, 1985.
- [15] M. Fujita, T. Ebukawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Kanayama, K. Kamei, Y. Matsuura, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo, "GPS/Acoustic seafloor geodesic observation: method of data analysis and its application," *Earth Planets Space*, Vol.58, pp. 265-276, 2006.
- [16] M. Sato, T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, "Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake," *Science*, Vol.331, n. 5995, 2011.

- [17] T. Imama, R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Mima, "Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data," *J. Geophys. Res.*, Vol.117, B07409, 2012.
- [18] T. Sun, K. Wang, T. Imama, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Mima, Y. Ohia, and Y. Hu, "Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake," *Nature*, Vol.514, pp. 84-87, 2014.
- [19] Y. Yokota, T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, "Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone," *Nature*, 2016.
- [20] M. Imano, M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, H. Ochi, N. Takahashi, and R. Hino, "Improvement in the accuracy of real-time GPS/Acoustic measurements using a multi-purpose moored buoy system by removal of acoustic multipath," *IAG Symposia Series*, Springer, 2015.
- [21] N. Takahashi, Y. Ishihara, T. Fukuda, H. Ochi, J. Tahara, T. Moei, M. Deguchi, M. Kido, Y. Ohta, R. Hino, K. Mutoh, G. Hashimoto, O. Motohashi, and Y. Kaneda, "Buoy platform development for observation of tsunami and crustal deformation," *IAG Symposia Series*, Springer, 2015.
- [22] T. Kato and K. Aramaki, "Formation Factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving Model," *SOLA*, Vol.1, pp. 1-4, 2005.
- [23] Y. Shoji, M. Kunii, and K. Saito, "Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data for a Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan," *SOLA*, Vol.5, pp. 45-48, 2009.
- [24] C. D. Chadwell and Y. Bock, "Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp. 3701-3704, 2001.
- [25] C. Rocken, J. Johnson, T. Van Hove, and T. Iwabuchi, "Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, L12813, 2005.
- [26] M. Fujita, F. Kimura, K. Yoneyama, and M. Yoshizaki, "Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.35, L13803, 2008.
- [27] S.-J. Fan, J.-F. Zang, X.-Y. Peng, S.-Q. Wu, Y.-X. Liu, and K.-F. Zhong, "Validation of Atmospheric Water vapor Derived from Shipborne GPS Measurements in the Chinese Bohai Sea," *Terrestrial Atmos. Ocean Sci.*, Vol.27, pp. 213-220, 2016.
- [28] Y. Shoji, K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, "PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADCOA Real-Time Orbits," *SOLA*, Vol.12, pp. 268-271, 2016.
- [29] Y. Shoji, K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, "Comparison of Shipborne GNSS-derived Precipitable Water Vapor with Radiosonde in the Western North Pacific and in the Seas Adjacent to Japan," *Earth, Planets and Space*, Vol.69, pp. 153, 2017.
- [30] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp. 3079-3082, 1998.
- [31] E. Calais and J. B. Minster, "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.22, pp. 1045-1048, 1995.
- [32] Y. Otsuka, N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, E. Eftedy, S. Saito, M. Kawamura, T. Manuyama, N. Hemmickern, and T. Kamolmis, "GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake," *Earth Planets Space*, Vol.58, pp. 159-165, 2006.
- [33] T. Tsugawa, M. Nishioka, M. Ishii, K. Hosomi, S. Saito, A. Shinohara, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdallah, and P. Supnithi, "Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS," *J. Disaster Res.*, Vol.13, No.3, 2018.
- [34] http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_e.html [accessed December 28, 2017]

**Name:**

Tenyuki Kato

Affiliation:

Director, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Address:

586 Irioda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Brief Career:

1980- Research Associate, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1991- Associate Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2000- Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2018- Director, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Selected Publications:

- "Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp. 369-372, 1998.

- "Geodetic evidence of back-arc spreading in the Mariana Trough," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30, p. 1625, 2003.

- "Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy," *Earth Planets Space*, Vol.57, pp. 297-301, 2005.

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Geodetic Society of Japan (GSJ)

- Seismological Society of Japan (SSJ)

- Volcanological Society of Japan (VSI)

- Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)

- American Geophysical Union (AGU)

- Japan Geoscience Union (JpGU)

**Name:**

Yukihiko Terada

Affiliation:

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

Address:

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

Brief Career:

1972- Researcher, Technical Research Institute, Hitachiastec Corp.

2006- Professor, National Institute of Technology, Kochi College

2015- Honorary Professor and Visiting Professor, National Institute of Technology, Kochi College

Selected Publications:

- "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," *Proc. of the Int. Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*, IAG Symposia 145, pp. 145-153, 2015.

- "Long-term mooring chain system durability of the GPS tsunami-wave meter," *J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.70, No.1, pp. 13-18, 2014 (in Japanese).

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Japan Geoscience Union (JpGU)

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE)

- Japanese Society of Non-Destructive Inspection (JSNDI)



Name:
Keiichi Tadokoro

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

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

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Seismological Society of Japan (SSJ)
- Geodetic Society of Japan (GSJ)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Akira Futamura

Affiliation:
Associate Professor, National Institute of Tech-
nology, Yuge College

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

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

Selected Publications:

- "Current, Water Exchange and Heat Budget in the Stratified Region of Huchi-Nada," *Oceanography in Japan*, Vol.14, No.3, pp. 429-440, 2005.

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Oceanographic Society of Japan
- Japan Institute of Navigation (JIN)



Name:
Natsuki Kinugasa

Affiliation:
Researcher, Earthquake and Volcano Research
Center, Graduate School of Environmental Stud-
ies, Nagoya University

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

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
- Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)
- Japan Geoscience Union (JpGU)



Name:
Morio Toyoshima

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

Address:
4-2-1 Nakui-kin, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Optical Society of America (OSA)
- Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
- Japan Society for Aeronautical and Space Science (JSASS)



Name:
Shin-ichi Yamamoto

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

Address:

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

Brief Career:

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



Name:
Mamoru Ishii

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

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Takuya Tsugawa

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

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

- "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," *Earth, Planets, and Space*, Vol.63, pp. 873-879, 2011.
- "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, L22101, 2007.

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Michi Nishioka

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

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

- M. Nishioka, T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, "A new ionospheric storm scale based on TEC and f_oF_2 statistics," *Space Weather*, Vol.15, pp. 228-239, 2017.
- M. Nishioka, T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.40, pp. 5581-5586, 2013.

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Kenichi Takizawa

Affiliation:
National Institute of Information and Communi-
cations Technology (NICT)

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)



Name:
Hiroo Seko

Affiliation:
Head, Meteorological Research Institute, Japan
Meteorological Agency

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Meteorological Society of Japan (MSJ)
- American Meteorological Society (AMS)



Name:
Yoshinori Shoji

Affiliation:
Meteorological Research Institute

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Meteorological Society of Japan (MSJ)
- Geodetic Society of Japan (GSJ)
- Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan (IPNTJ)

Paper:

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

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

^{*1} Applied Electromagnetics Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology
4-2-1 Nubui-Kizumachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

[†] Corresponding author, E-mail: tsugawa@nict.ac.jp

^{*2} Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port, and Aviation Technology, Tokyo, Japan

^{*3} Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan

^{*4} Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan

^{*5} Geomatic Information Research Group, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia

^{*6} Space Science Centre (ANGKASA) & Department of Electrical, Electronic & Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

^{*7} Telecommunications Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

[Received November 29, 2017; accepted March 22, 2018]

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

banks related to Recommendation ITU-R P.311. Sharing the GTEX TEC data would be easier than sharing the GPS/GNSS data among those in the international ionospheric researcher community. The DRAWING-TEC project would promote studies of medium-scale ionospheric variations and their effect on GNSS.

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

1. Introduction

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

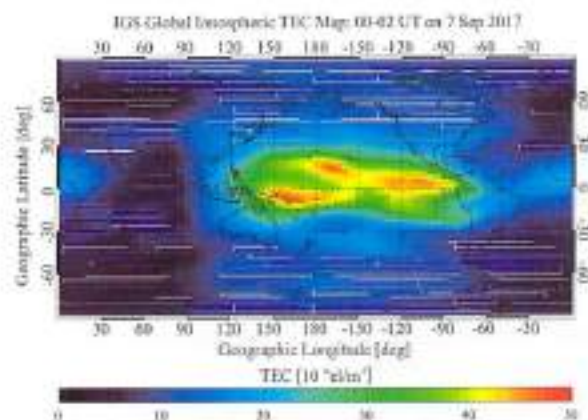


Fig. 1. An example IGS TEC map with spatial resolution of 5° in longitude and 2.5° in latitude, with a temporal resolution of 2 hours.

GNSS positioning.

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

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

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

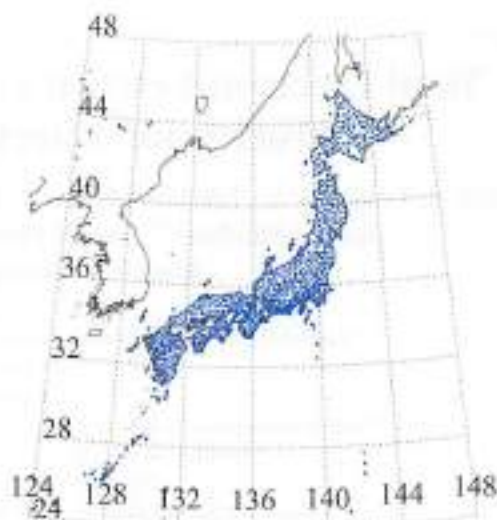


Fig. 2. Distribution of GPS stations of GEONET.

2. High-Resolution TEC Observations over Japan

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

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

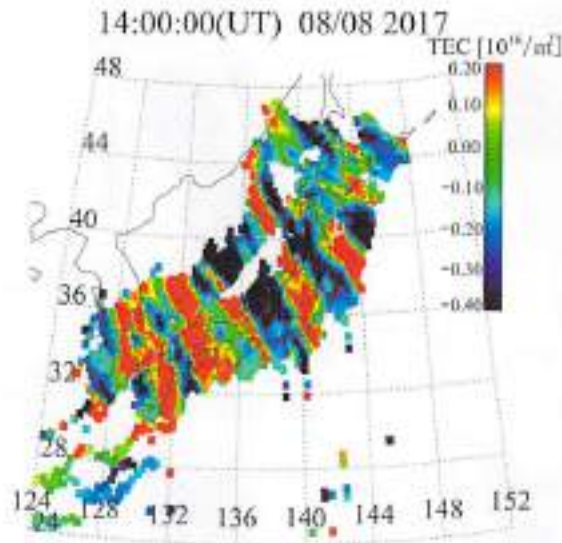


Fig. 3. High-resolution detrended TEC map with 60-min window derived using GEONET data. Typical nighttime medium-scale TIDs are captured over Japan.

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

In Fig. 4, background absolute TEC values at 12:20 UT (21:20 JST) are 60 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16}/\text{m}^2$) or more in southern Japan and decrease with latitude. This TEC level is more than double the normal level in this season. The arrows indicate TEC depletion regions that have a zonal scale of several 100 km and extend in the meridional direction. These TEC depletion regions move eastward at $\sim 50 \text{ m/s}$. Corresponding to the TEC deple-

tions, ROTI enhancements are seen in the same regions and move eastward at the same velocity. This indicates that ionospheric irregularities of several tens of kilometer scale exist in the TEC depletion regions. Similar to ROTI enhancements, LOL rate enhancements are seen in the same regions and move eastward at the same velocity. The LOL rate maps in Fig. 4 show that LOL occurs over a wide area, indicating that many receivers suffer LOL for a significant number of GPS satellites simultaneously. Therefore, it is reasonable to consider that these LOL rate enhancements are caused by GPS scintillations due to the ionospheric irregularities.

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

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

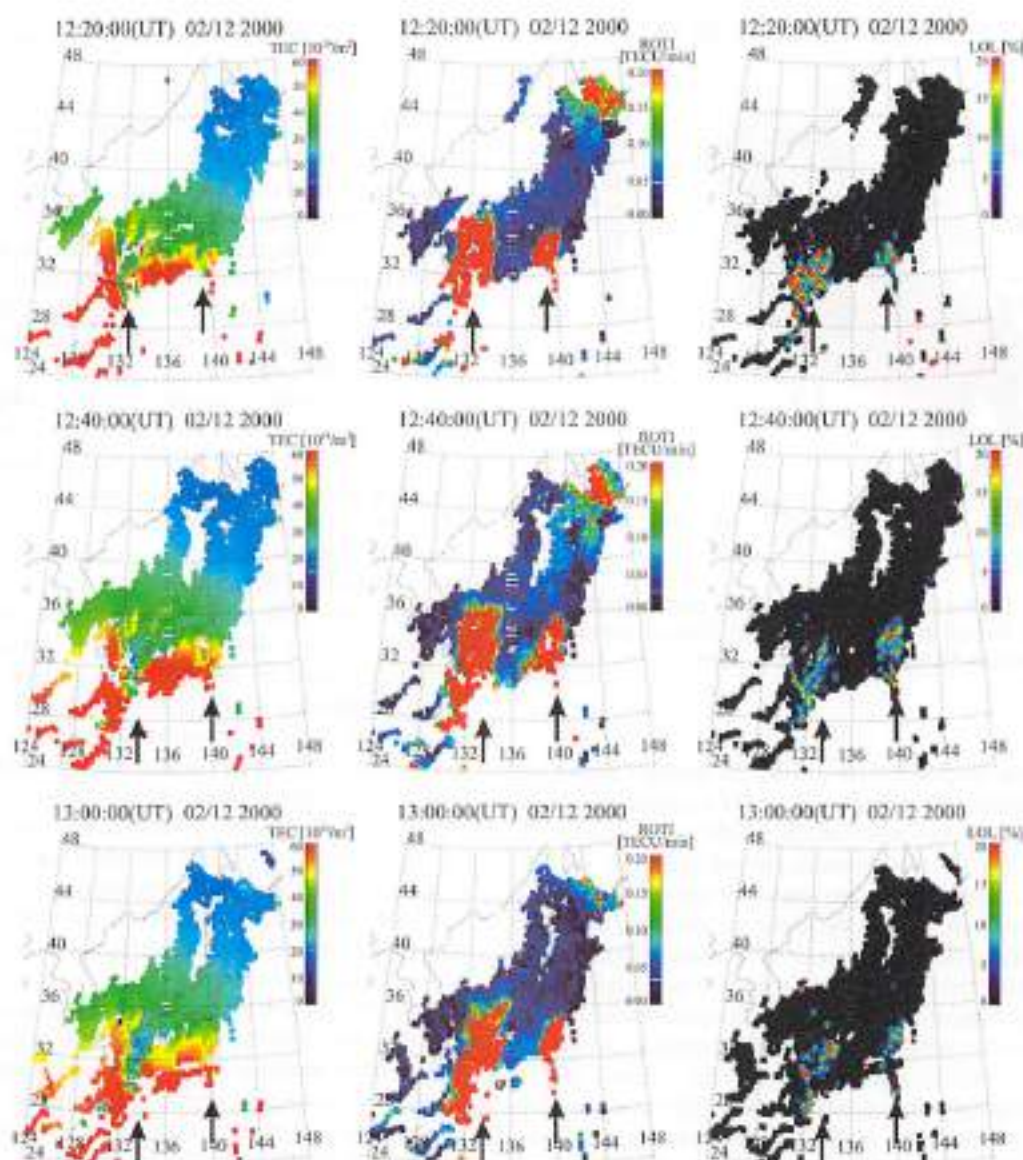


Fig. 4. Two-dimensional maps of absolute TEC (left), ROTI (middle), and loss-of-lock rate (right) 12:20–13:00 UT (21:20–22:00 JST) after the main phase of a strong geomagnetic storm on Feb. 12, 2000. Eastward moving plasma bubble structures designated by arrows were captured in absolute TEC maps.

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

3. DRAWING-TEC Project

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

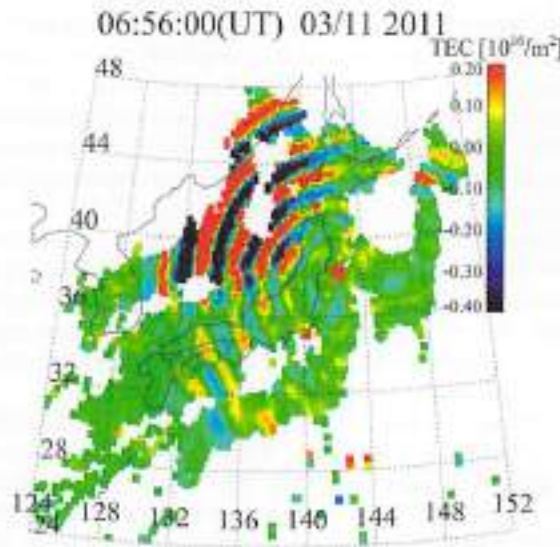


Fig. 5. Concentric waves detected by the detrended TEC map with 10-min window after the 2011 Tohoku earthquake. The star indicates the epicenter of the earthquake.

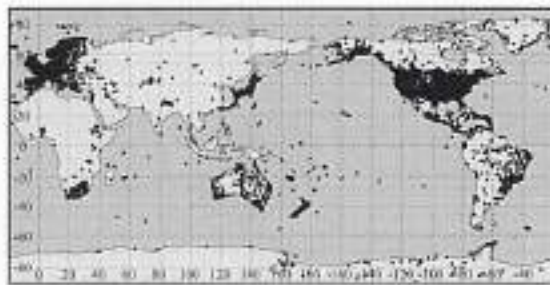


Fig. 6. Distribution of worldwide GNSS stations (more than 8000 stations as of 2017) whose data are routinely collected by NICT.

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

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

Figure 7(b) shows a typical daytime medium-scale TID (MSTID) observed in the 60-min detrended TEC map over Europe [15]. MSTID can generally be classified into two types, nighttime and daytime MSTIDs, according to their appearance time and propagation direc-

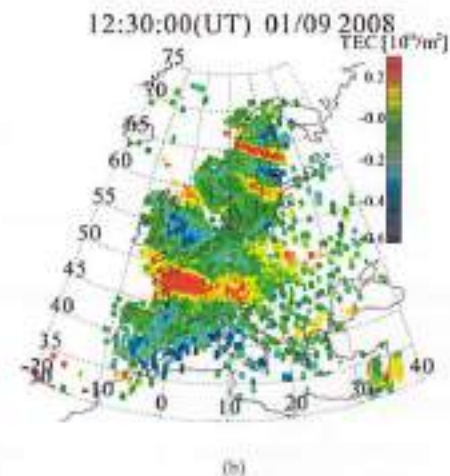
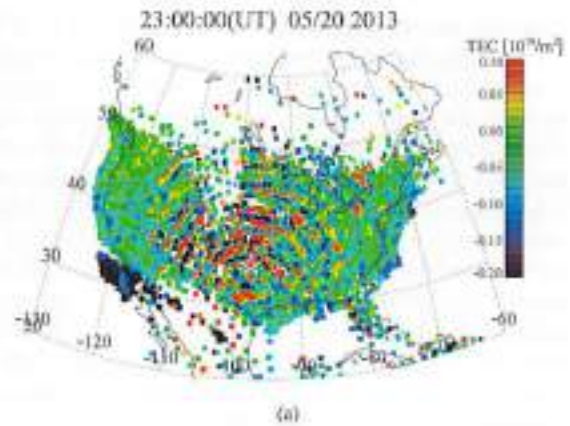


Fig. 7. (a) Concentric waves after the 2013 Moore EF5 Tornado over North America and (b) typical daytime MSTID over Europe, detected by the high-resolution detrended TEC maps.

tion. The typical nighttime MSTID shown in Fig. 2 has a wavefront in the northwest-southeast direction and propagates southwestward in the northern hemisphere. On the other hand, the typical daytime MSTID has a wavefront elongated almost zonally and propagates almost southward in the northern hemisphere. Several characteristics of these MSTIDs, such as preferred directions and appearance times, are not adequately explained by the classical theory proposed by Hines [17], in which MSTIDs are an ionospheric manifestation of atmospheric gravity waves with great amplitude neutral wind oscillation. Recent observational and numerical simulation studies have suggested that the nighttime MSTID could be generated by electrodynamic forces with coupling between ionospheric E- and F-regions [18, 19]. Comparing characteristics of MSTIDs among different longitudes and latitudes using these high-resolution TEC maps can contribute to studies of mechanisms for generating both nighttime and daytime MSTIDs.

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

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

The DRAWING-TEC project mainly consists of three subprojects:

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

Regarding item 1, one of the best-known standardized formats for GNSS-TEC data is the IONEX format [1]. Although the IONEX format data cover the global ionosphere, they describe only vertical TEC map data with a spatial resolution of 5° in longitude and 2.5° in latitude with a temporal resolution of 2 hours. Using the IONEX data, it is difficult to describe higher resolution TEC maps corresponding to the density of GPS/GNSS receiver networks. It is thus necessary to make a different format that could be applied in order to make the resolution of TEC maps flexible. We have developed a new standardized TEC format, GNSS-TEC EXchange (GTEX). The GTEX data format describes slant TEC for each GNSS satellite and is filed per day and per receiver, as is RINEX, the standardized GPS/GNSS format. The GTEX TEC format makes it possible to derive high-resolution TEC maps corresponding to the density of GNSS receiver networks, as shown in Figs. 2 and 6. Sharing the TEC data in the GTEX format would be easier than sharing the GPS/GNSS data among the members of the international ionospheric researcher community because the GTEX TEC data exclude information on GPS/GNSS data, except for information available as ionospheric observations. NICT, as a Japanese delegate to the International Telecommunication Union (ITU), first proposed the GTEX as a format for the international exchange and

sharing of GNSS-TEC data. NICT submitted a contribution paper to meetings of Working Party 3I. (ionospheric propagation and radio noise), Study Group 3 (SG3, radio-wave propagation) of ITU-R in Geneva, Switzerland in Jun. 2013. The GTEX format was successfully approved as one of the standard data formats for trans-ionospheric data and included in Recommendation ITU-R P311-16 Annex 1 in 2015 [20]. It was used by the Ionospheric Studies Task Force of the International Civil Aviation Organization (ICAO) Asia-Pacific Region as a standard format for sharing TEC data in the region to characterize the ionospheric behavior for aeronautical applications of GNSS [21].

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

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

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

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

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

4. Summary and Future Perspectives

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

Although we believe the DRAWING-TEC project will promote studies of medium-scale ionospheric variations and their effect on GNSS, there are still some challenges to their further promotion. The first one is upgrading the application to use multi-GNSS. In recent years, in addition to the United States' GPS, Japan's Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), Russia's GLONASS, the European Union's Galileo, China's BeiDou, etc., have been

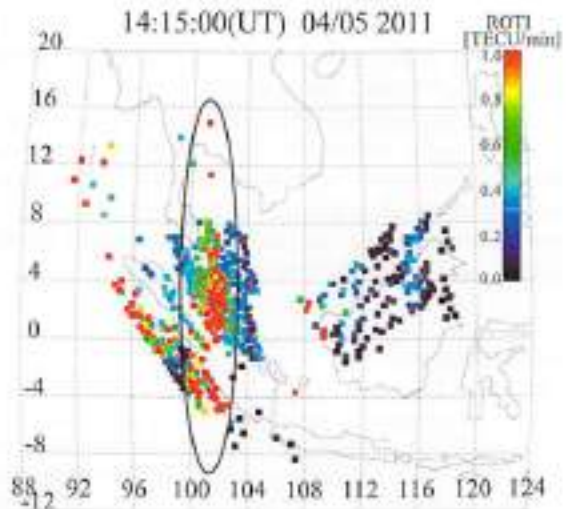


Fig. 8. A clear EPB structure (designated by an oval) detected in a two-dimensional ROTI map of Southeast Asia produced using 127 GNSS stations.

widely used as global satellite navigation systems. By using the data of all the available GNSS, it becomes possible to observe the ionosphere more broadly and more densely. Currently, however, the RNX2GTEX application only supports GPS data. It is necessary to upgrade it for multi-GNSS compatibility. The GTEX format for multi-GNSS data may also need to be optimized, though the current version of GTEX format can support multi-GNSS. One of the other challenges is the use of GNSS data over the ocean, which is a large area devoid of high-resolution ionospheric observations. Permanently operated GNSS receiver networks are generally limited to land areas with much social or crustal activity. Although there are a few GNSS buoy networks, such as the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS (NOWPHAS) [25], to monitor ocean waves, their distribution is limited to narrow coastal areas (less than 20 km from the coast), and their recorded data are currently limited to wave information. Reference [26] proposes the new idea of establishing a dense buoy network in the western Pacific by implementing multi-instrument buoys that include GNSS receivers far from the coast. If the GNSS observation data of such a wide-coverage, dense GNSS buoy network becomes available, it will be a breakthrough system not only for tsunami monitoring but also for ionospheric monitoring, which can contribute to the estimation of tsunami source areas and the forecasting of tsunami arrivals.

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

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

Acknowledgements

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

References:

- [1] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orús, A. García-Rigo, J. Feltens, A. Kojathy, S. C. Schaer, and A. Krawkowski, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," *J. of Geod.*, Vol.83, pp. 263-275, doi:10.1007/s00190-008-0266-1, 2009.
- [2] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A New technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," *Earth Planets and Space*, Vol.54, pp. 63-70, 2002.
- [3] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp. 3079-3082, 1998.
- [4] T. Tsugawa, N. Kotake, Y. Otsuka, and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review," *GPS Solit.*, Vol.11, pp. 39-144, doi:10.1007/s10291-006-0045-5, 2007.
- [5] G. Ma and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, L21103, doi:10.1029/2006GL027512, 2006.
- [6] T. L. Beach and P. M. Kintner, "Simultaneous Global Positioning System observations of equatorial scintillations and total electron content fluctuations," *J. of Geophys. Res.*, Vol.104, Issue A10, pp. 22553-22565, 1999.
- [7] M. Nishioka, A. Saito, and T. Tsugawa, "Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks," *J. of Geophys. Res.*, Vol.113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605, 2008.
- [8] B. G. Fejer and M. C. Kelley, "Ionospheric irregularities," *Rev. of Geophys.*, Vol.18, pp. 401-454, 1980.
- [9] S. M. Buhari, M. Abdullah, T. Yokoyama, Y. Otsuka, M. Nishioka, A. M. Hasbi, S. A. Buhari, and T. Tsugawa, "Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia," *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, Vol.122, doi:10.1002/2016JA023202, 2017.
- [10] T. Tsugawa, A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagasuma, and K. T. Murata, "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," *Earth Planets and Space*, Vol.63, pp. 875-879, 2011.
- [11] U. S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/> [accessed March 14, 2011].
- [12] Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, "Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," *Earth Planets and Space*, Vol.63, pp. 815-820, 2011.
- [13] Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/> [accessed November 27, 2017].
- [14] T. Tsugawa, Y. Otsuka, A. J. Coster, and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663, 2007.
- [15] Y. Otsuka, K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shikawa, and T. Tsugawa, "GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe," *Annales Geophysicae*, Vol.31, pp. 163-172, doi:10.5194/angeo-31-163-2013, 2013.
- [16] M. Nishioka, T. Tsugawa, M. Kubota, and M. Ishii, "Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.40, pp. 5581-5586, doi:10.1002/2013GL057963, 2013.
- [17] C. O. Hines, "Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights," *Can. J. of Phys.*, Vol.38, pp. 1441-1481, 1960.
- [18] Y. Otsuka, F. Onuma, K. Shikawa, T. Ogawa, M. Yamamoto, and S. Fukao, "Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E-region field-aligned irregularities at midlatitude," *J. of Geophys. Res.*, Vol.112, A06317, doi:10.1029/2005JA011548, 2007.
- [19] T. Yokoyama and D. L. Hysell, "A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): latitudinal dependence and propagation of medium-scale traveling ionospheric disturbances," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.37, L08105, doi:10.1029/2010GL042598, 2010.
- [20] Recommendation ITU-R P.311-16, ITU-R, 2016.
- [21] S. Saito, S. Sunda, J. Lee, S. Pullen, S. Supriadi, T. Yoshikawa, M. Terkildsen, F. Locat, and ICAO APAPPIRG Ionospheric Studies Task Force, "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," *GPS Solit.*, Vol.21, pp. 1937-1947, doi:10.1007/s10291-017-0662-1, 2017.
- [22] AOSWA, <http://aoswa.nict.go.jp/> [accessed November 27, 2017].
- [23] S. M. Buhari, M. Abdullah, A. M. Hasbi, Y. Otsuka, T. Yokoyama, M. Nishioka, and T. Tsugawa, "Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia," *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, Vol.119, doi:10.1002/2014JA020433, 2014.
- [24] K. Wathanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, R. Tsunoda, T. Yokoyama, P. Supnithi, M. Ishii, and C. Vitini, "Pre dawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia," *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, Vol.121, pp. 5868-5879, doi:10.1002/2015JA022069, 2016.
- [25] Real-Time NOWPHAS, http://www.mlit.go.jp/kowari/nwphas/index_eng.html [accessed November 27, 2017].
- [26] T. Kato, et al., *J. Disaster Res.* in this volume, 2018.



Name:
Takuya Tsugawa

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

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

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

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

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



Name:
Michi Nishioka

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

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

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

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

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



Name:
Komyantzi Horumi

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

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

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

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

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



Name:
Mamoru Ishii

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

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

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

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

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



Name:
Susumu Saito

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

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

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

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

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



Name:
Atsuki Shinbori

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

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)
- Japan Geoscience Union (JGU)



Name:
Yuichi Otsuka

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

Address:

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

Brief Career:

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Akinori Saito

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

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

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science (SGEPSS)
- Japan Geoscience Union (JPGU)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Suhaila M. Buhari

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

Address:
81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Japan Geoscience Union (JpGU)
- American Geophysical Union (AGU)



Name:
Mardina Abdullah

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

Address:
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Institution of Engineers, Malaysia (IEM)
- Institute of Navigation GPS (ION GPS)



Name:
Pornchai Supaithi

Affiliation:
Telecommunications Engineering Department,
Faculty of Engineering, King Mongkut's Insti-
tute of Technology Ladkrabang

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

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

Selected Publications:

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

Academic Societies & Scientific Organizations:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTIT)

GNSS を用いた総合防災ブイの開発

加藤 照之¹⁾・寺田 幸博²⁾

1) 東京大学 地震研究所

2) 高知工業高等専門学校

1. はじめに

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

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

2. GNSS 津波計の概念

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

そこで、従来の津波計測手法とは全く異なる GNSS を用いた海面変動計測装置の開発を行い、波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度でドリフト無く計測でき、設置や維持管理が容易に実施できる津波観測システムの実現を目指した。システム構成の基本的概念を図 1 に示す。海上に浮かべたブイの最上部に GNSS アンテナを取り付け、ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データから、海面高の変位を計測することができる。波浪、津波及び潮汐の計測には、数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから、当初は、RTK (Real Time Kinematic) 法を基本的な測位方式として採用した。この方法では、陸上に基地局を設けて同様の GNSS 観測をブイと同時にを行い、基線解算によってブイの位置を陸上

基地に対する相対位置として推定する。ブイで取得された GNSS 衛星からの 1 秒ごとの位相データは無線によって基地局に伝送され、基地局に置かれた計算機により基線解算が行われる。この手法では電波の伝搬媒質の影響が観測点間距離とともに急速に大きくなることから、精度保持のためブイの基地局からの距離を 20 km 以内程度としなくてはならないという制限がある。最近の技術の進展により、現在では、基準点を設ける必要が無い精密単独測位法によっているため、沖合展開における限界の問題が払拭され、大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている。



図 1 GNSS 津波計の概念。海面の動揺に追従するように設計されたブイの上下動を GPS を用いて精密 (cm オーダー) 測位を行い、その鉛直方向位置の時系列表示を海面変動表記とする。

3. 開発の経緯とその意義

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

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



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

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

5章に述べるように、このシステムは2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を観測し、気象庁の津波警報の更新に役立てられたものの、GNSS波浪計の設置場所が十分に沿岸から十分遠くに設置されていなかったこと、情報の伝達が十分でなかったことなどから、結果として大きな犠牲者を生むこととなった。こ

うした反省を踏まえ、システムを刷新してより効果的な津波・波浪計測システムを導入することとした。これについては6章に詳しく述べる。

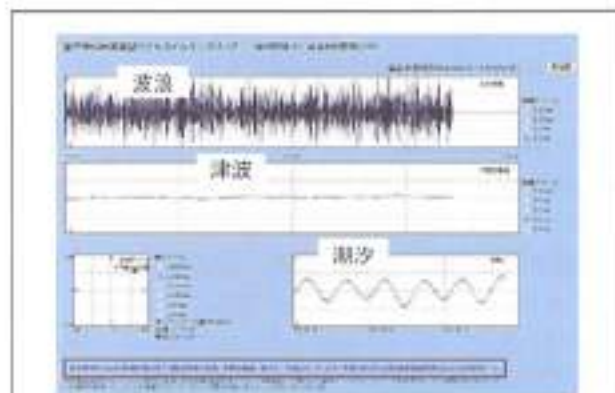


図3 リアルタイム公開中のデータ(室戸岬沖)。波浪、津波データの横軸はフルスケール1時間であり、潮汐の場合は3日である。縦軸は、いずれも海面高であり、それぞれのフルスケールは $\pm 2\text{m}$ 、 $\pm 1\text{m}$ 、 $\pm 2\text{m}$ である。

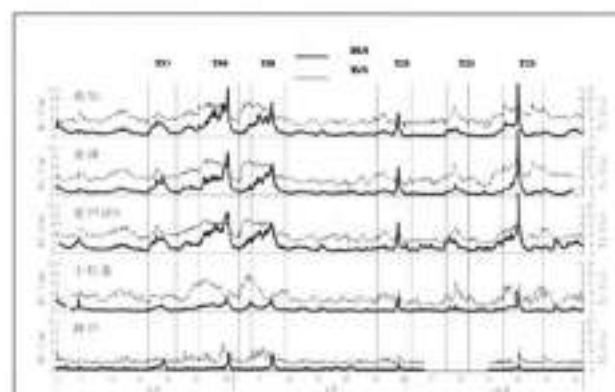


図4 2004年6月～10月に観測された有義波高。太線が有義波高を示し、細線が有義波周期を示している。横軸のフルスケールは3カ月であり、縦軸は、いずれもフルスケール10mである。

- 沖合の観測データを監視し、沿岸の観測よりも早く、沖合における津波の観測値と沿岸での推定値を発表します。
- 予想よりも高い津波が推定されるときには、ただちに津波警報を更新します。



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

4. 沖合における津波観測

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

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

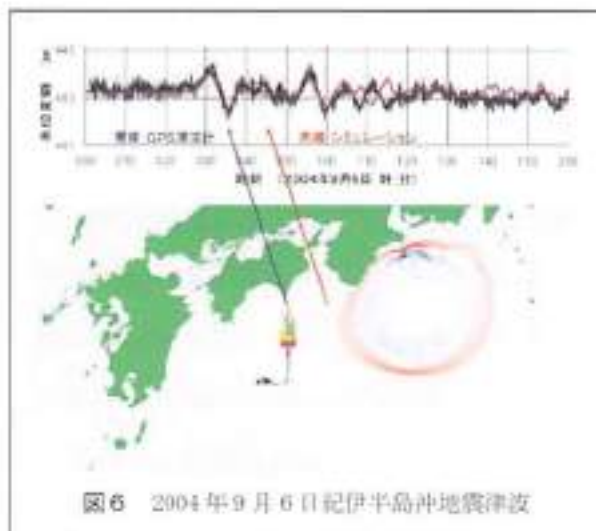


図6 2004年9月6日記伊半島沖地震津波

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

5. 東北地方太平洋沖地震津波

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

GNSS波浪計のリアルタイム観測値を図8に示す。



図7 GPS 波浪計設置状況 (2011年3月11日)

(<http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/khiran.pdf> より)

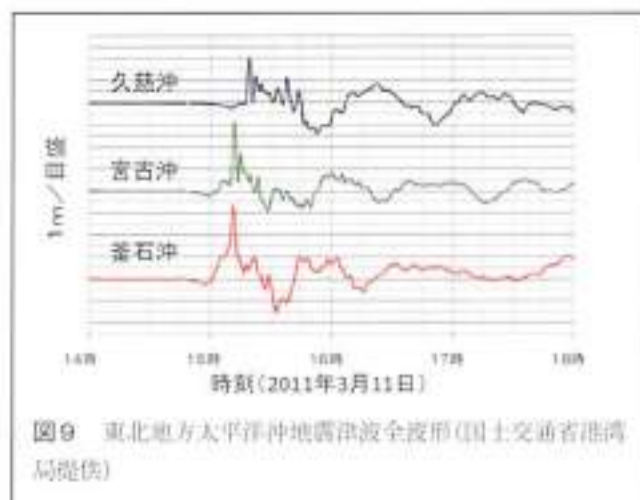


図8 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波
(<http://nowphos.mlit.go.jp/index.html> より)

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

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

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

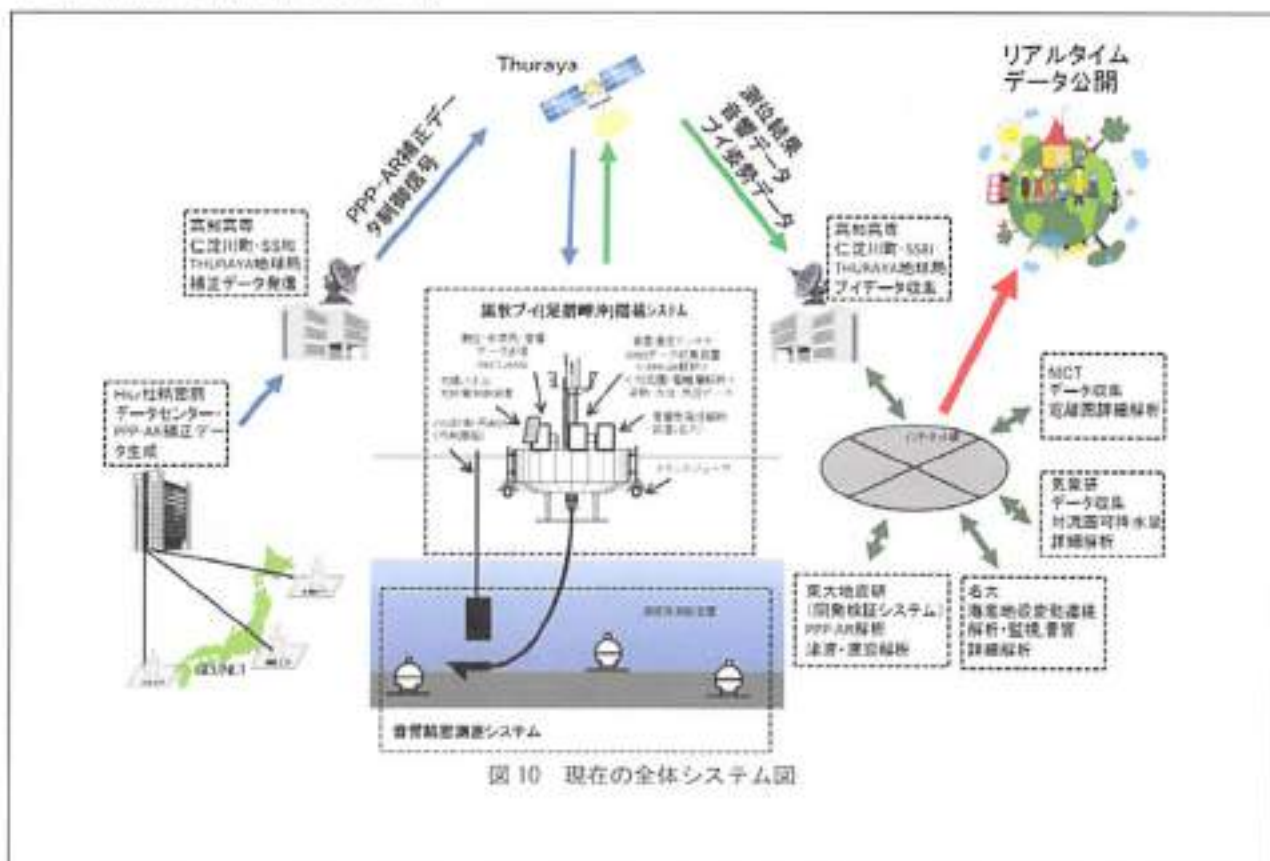


これらのことから、震源域を含む海域への GNSS 洋波計の設置が強く望まれ(例えば、朝日新聞, 2011)、配置位置の離岸距離を伸ばすために、GNSS 精密測位法のさらなる改良が喫緊の課題となった。この二つの課題を端的に表現すれば、「被災してもデータの続きを!」と「もっと沖合に!」となる。これらの克服には、洋上のブイからデータ伝送を行う方法と GNSS 測位法の改善が必要であった。

6. さらなる沖合展開に向けての開発

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

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



第2の技術課題であるGNSS測位法については、RTK法の改良に取り組んだ。図11(a)は、改良前のRTK測位結果の一例である。短い周期で上下に変化している状態が波浪による海面変動を示しているが、安定した測位ができていない。これに対して、搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって、図11(b)に示すように基線長80kmでも安定的な測位が可能になった。また、洋上のブイのGNSS観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め、周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測(PVD: Point precise Variance Detection)法(Isshiki et al., 2000)、周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位(PPP-AR: Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution)法(Mervert et al., 2008)が有効であった。図11(c)は、PPP-ARを適用した結果である。これらの新しい測位法は、室戸岬沖GNSS津波計実験において、先に示したホームページでデータ公開を行った。このとき、図9に例示したような良好な

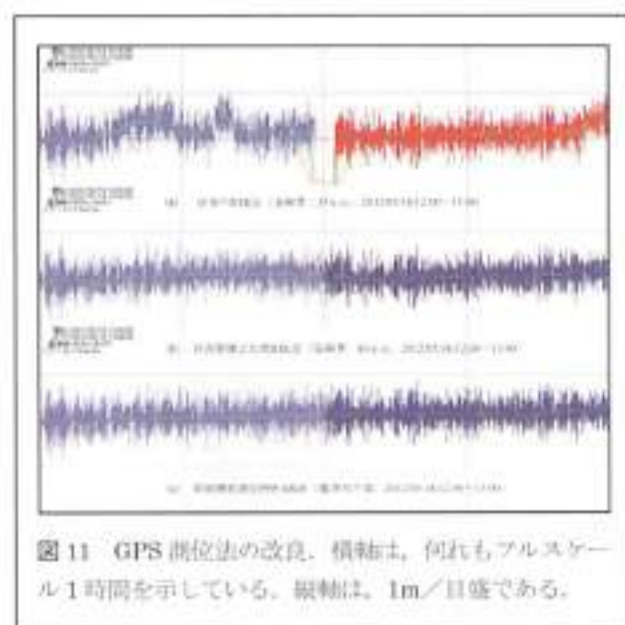


図11 GPS測位法の改良。横軸は、何れもフルスケール1時間を示している。縦軸は、1m/目盛である。

結果がリアルタイムで継続的に得られた。

以上のように技術的課題が克服できるとの見通しが得られたため、2016年度からは新たな実験を開始した。この実験では高知県の海洋牧場ブイ No.18 を借用させてもらい、ここにGNSS受信システム、衛星通信装置などを搭載している。これらに加え、GNSS-音響システムによる連続的な海底地殻変動計測を実現するために、ブイ直下に一辺が1.7kmの正三角形を構成するように音響トランスポンダーを投入した。なお、このブイ位置の水深はおよそ800m程度である。このトランスポンダーに対して音響を射出して反射波を受信するためのトランスデューサをブイの舷側に設置している。GNSS測位はブイ上

に設置された計算機によってPVD及びPPP-ARの出力を得るとともに、大気の大気遅延量や電離層の総電子数なども算出され、これらのデータはソフトバンク社製の衛星携帯テレメータ装置を介して地上局に送られる(図10)。地上局は高知県仁淀川町に設置されており、ここで受信データを点検・格納するとともに、Webサーバを介して測位データをリアルタイムで公開するほか、海底地殻変動、気象や電離層の研究のために提供される。現在これらのシステムをくみ上げているところであり、近い将来誰でもこれらのデータが見られるようになることを目指している。

7. 今後の展開

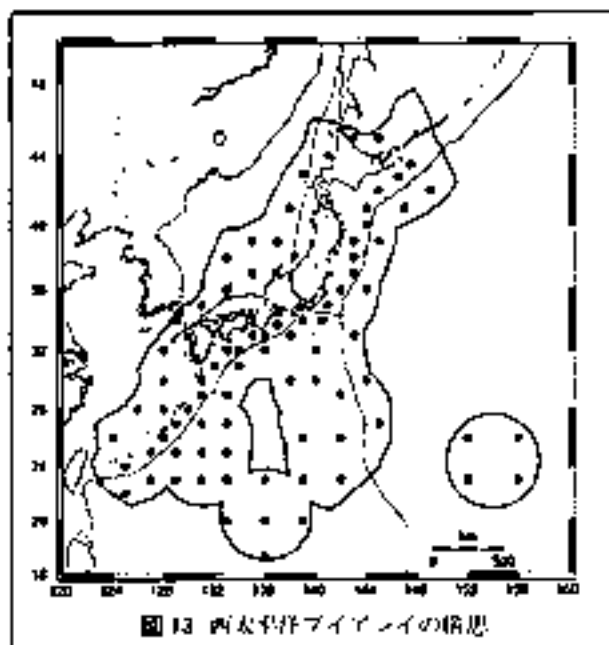
本稿では、GNSSブイによって津波や波浪などの海面高変化を計測する手法の開発について述べてきたが、この計測方式が海洋のどこでも可能となるとその応用分野は多岐にわたる。例えば、最近急速に注目が集められている分野にGNSSと音響を組み合わせた海底地殻変動の観測がある。その詳細は他書に譲るが(例えば, Spiess, 1985; Fujita et al., 2006)、現在は海上保安庁や大学グループが実施して重要な成果が得られている(例えば Yokota et al., 2016)。この計測には船舶が用いられているため常時行えるわけではなく、せいぜい年数回程度である。船舶をブイに置き換えることで計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



図12 海洋GNSSブイを用いた総合防災システムの概念図

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

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



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

謝辞

本研究開発に参画した徳島空港技術研究所、宇宙航空研究開発機構、情報通信研究機構、気象研究所及び日立造船に所属する研究者の方々に感謝します。また、実験サイトを提供された四国、自治体、ご協力いただいた多くの市民の皆様々に謝意を表します。

本研究開発は、現在実施中の科研費(基盤研究(S); 課題番号16H01310)のほか、科研費4件に加えて、文科省革新的技術開発補助金、文科省地球観測技術等調査研究費で進めました。

参考文献

- 朝日新聞, 2011年3月17日朝刊
- Fujita, K., T. Ishikawa, H. Mochizuki, M. Saito, S. Toriumi, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsunaga, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-276.
- Ishikawa, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kikunaga, M. Kawashita, M. Kamekura and T. Tamao (2000) Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PD (Point Variance Detection) Method ---, *J. Geod. Soc. Jpn.*, 46 (1), 253-267.
- 加藤昭之・寺田幸晴・木下正生・林本英司・一色浩 (1998) GPS測位法の開発, *月報海洋*, 号外15, 28-42
- 河合弘基・佐藤 真・川口啓二・関 克己 (2011) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性, *海洋学海洋学研究所報告*, 50(4), 3-61.
- Kervin, L. L., J. Lukes, L. Kocken, E. Imbuchi (2008) Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2008)*, September, 1091-1095.
- Danki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9.0) - Tsunami warning advisories and observations -, *Earth Planets Space*, 63, 827-830.
- Tatsumi, H., T. Tani (2010) Real-time Tsunami inundation Prediction Using Offshore Buoys Observation, *Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering*, currents, 3, 1-10.
- Spjess, P. V. (1985) Submarine geodetic measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 502-510.
- 寺田幸博・加藤昭之 (2006) GPS津波計, *地球物理学*, 52(7), 330-333.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Muranaka, T. Hashino, and A. Asada (2010) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Sanhai Trench megathrust zone, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2009GL012622.

NEWSLETTER OF IPNTJ

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



測位航法学会 ニューズレター 第X巻第3号

目次

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

GPS/GNSSシンポジウム2019

みちびき7機体制に向けて
ー測位精度の向上と更なる利用拡大を目指してー

日時：2019年10月16日（水）～18日（金）

場所：東京海洋大学越中島会館

研究発表・参加登録受付中



GNSS サマースクール2019にて重要文化財明治丸見学 8/2

特別法人会員



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

第11回MGA会議及びUNESCAP会議出席報告 神奈川県温泉地学研究所 加藤照之(本会副会長)

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



写真1: UNESCAP会場内の筆者

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

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

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

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

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



写真2: バスの屋根にGNSSアンテナを取り付ける



写真3: バスの中で学生に解説中のDineshさん

ないイベントは学生にとっても大変興味をひくものであったと思われる。

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



写真4: MGAのexhibition会場

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

29日、あっというまに最終日の感があったが、この日が一番忙しい。朝はまずMGAの会場に入りUNとの連携に関するセッションを聞く。これがMGAとしては新しいトレンドと言える。MGAはUNESCAPとMoUを結びこれから協働して活動をしていくということである。また、IGSからのUNを通じた協働の提案もあり、MGAの活動が賑やかになりそうであるとの印象。それにタイのGISTDAからの提案があって、MGAが今後しばらくはバンコクで開催されるということである。会場が固定されるのは運用上はやりやすいと思うが一方で各国の状況がかならずしもわからないようにも思うので良しあしであろう。午前後半はMGAのYoung Professional Forum。ブータンからの2件の高校生によるGNSS応用のアイデアが語られ、その後4件の提案がそれぞれの国の

学生から提案された、なかにはGNSSを使って有料道路の通行料を払えば料金所は不要になるという、すぐにでも実用化してほしいような素晴らしい提案もあって感心した。やはり若者の柔軟な頭脳には大人はかなわないとも感じた(写真5—裏表紙)。

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

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

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

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

イベントカレンダー

国内イベント

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

国外イベント

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

* 太字は本会主催イベント



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

Keiichi Tadokoro^{1*}, Natsuki Kinugasa¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³ and Kenjiro Matsui⁴

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

OPEN ACCESS

Edited by:

Takashi Nakagawa,
The University of Hong Kong,
Hong Kong

Reviewed by:

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

*Correspondence:

Keiichi Tadokoro
tad@seis.nagoya-u.ac.jp

Specialty section:

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

Received: 12 February 2020

Accepted: 31 March 2020

Published: 30 April 2020

Citation:

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

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

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

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

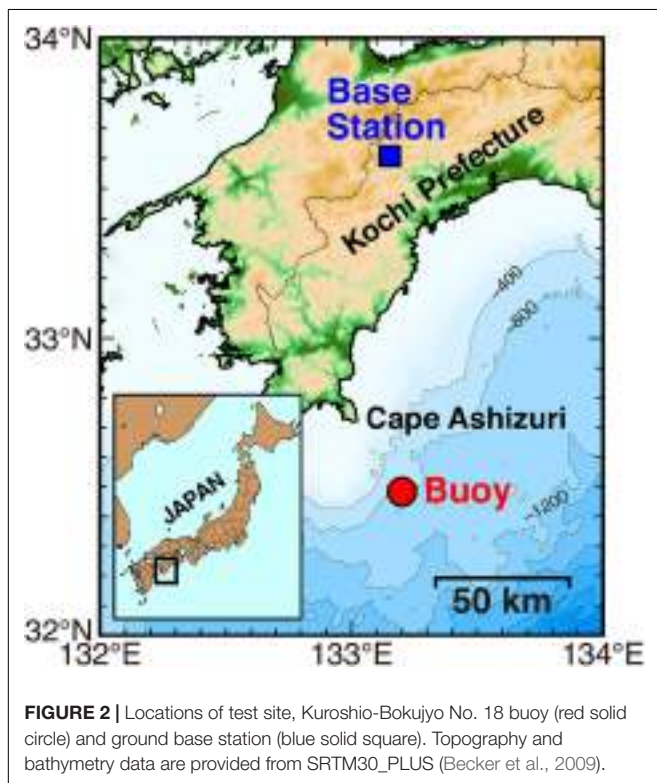
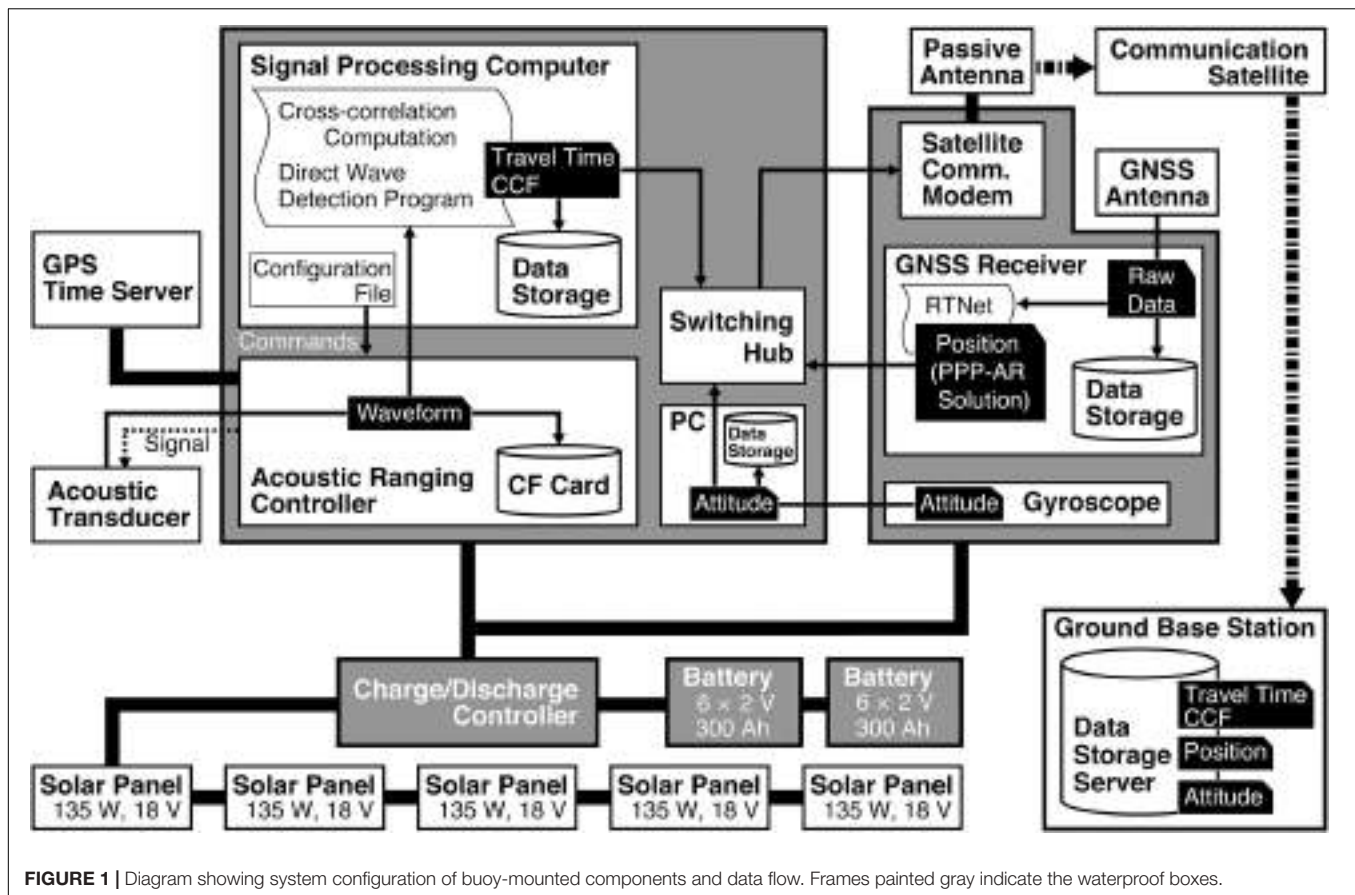
BUOY-MOUNTED ACOUSTIC RANGING SYSTEM

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

a switching hub and all the data are transmitted in real-time to a ground base station via a satellite link.

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

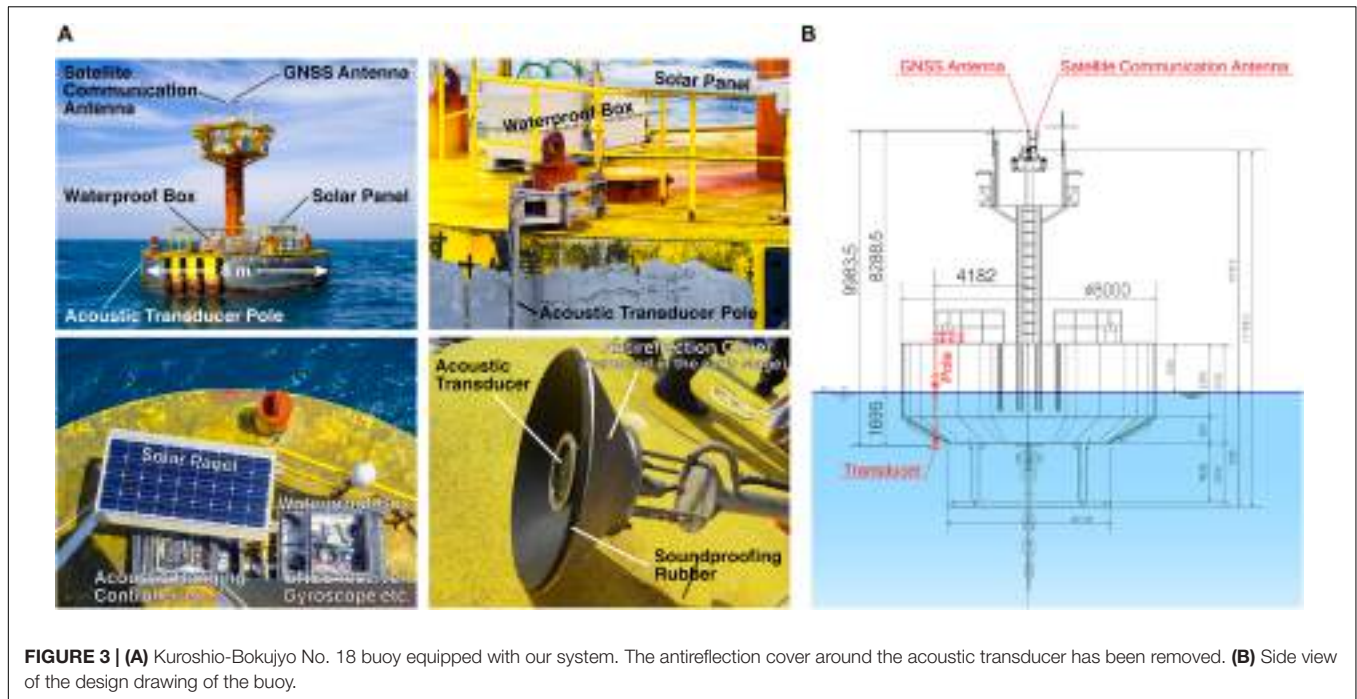
The buoy-mounted system was installed on a moored buoy which is anchored 32 km off Cape Ashizuri, Japan (**Figure 2**), on March 28, 2018 for an operational test. The water depth is about 800 m. The buoy, named Kuroshio-Bokujyo No. 18 (**Figure 3**), is operated by the Kochi Prefecture as a floating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



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

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

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



was stored in a data storage server. The ground base station was in the inland town of Niyodogawa, Kochi Prefecture (**Figure 2**), which is 30 km from the southern coast of Japan and is therefore

unlikely to be affected in the event of a tsunami due to a major subduction earthquake. The original acoustic waveform, raw GNSS, and gyroscope measurement data were also stored on-board for quality check and postprocess.

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

CONTINUOUS ACOUSTIC RANGING TESTS

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

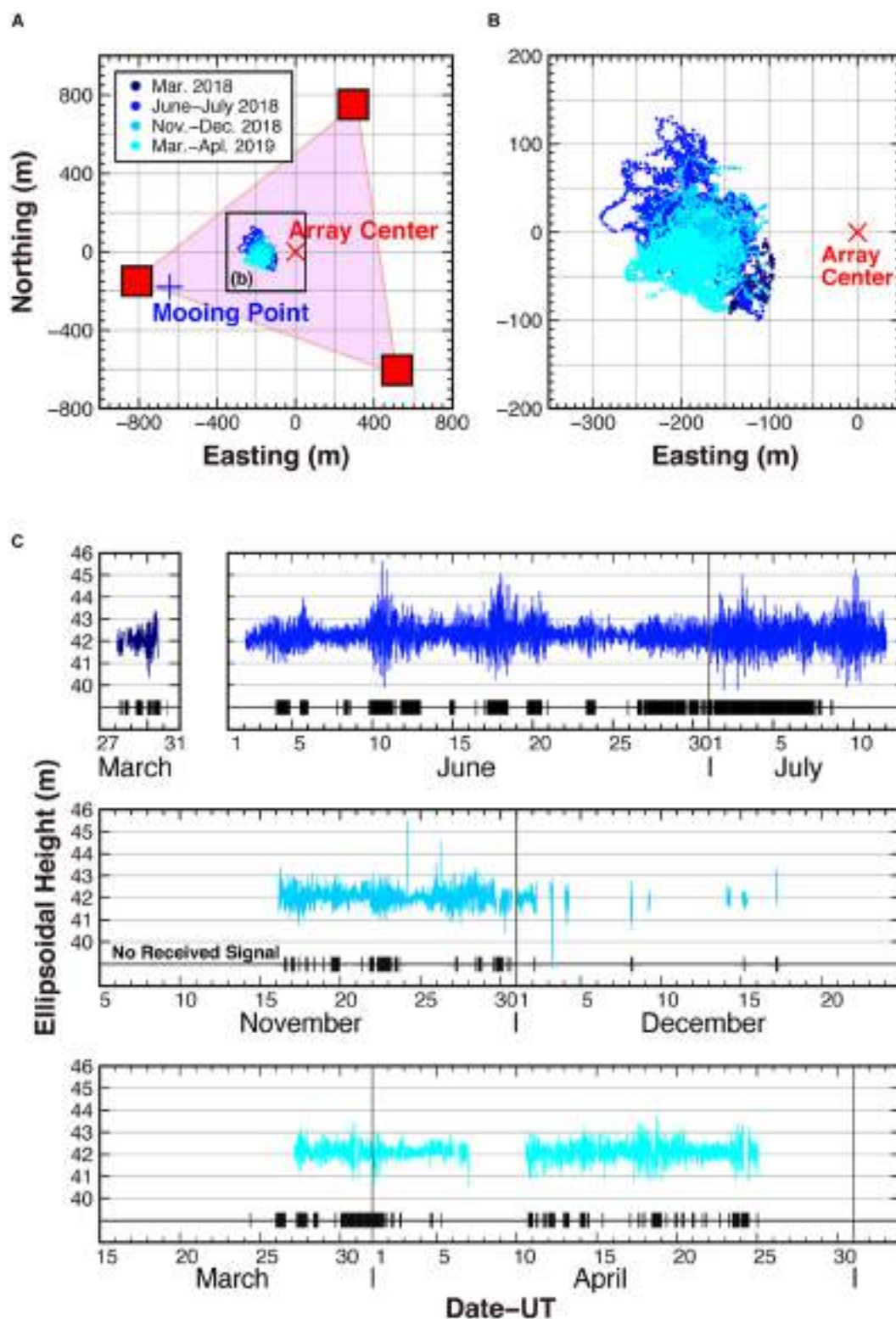


FIGURE 5 | Positions of the buoy-mounted GNSS antenna during the operational test period determined by post-processed PPP (until July) and PPP-AR (after November). **(A)** and **(B)** Horizontal positions (small dots). Different colors indicate differences in period shown by the legend in **(A)**. Red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

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

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

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

In the original configuration installed on the buoy in 2018, the signal processing computer was connected to the GNSS receiver as a temporary data server via an RS-232C communication interface. However, in an attempt to resolve the above issues and improve system reliability before restarting the test on March 24, 2019, the data flow and connections between components were reconfigured to use Ethernet. Although the test was restarted on March 24, 2019, the power supply continued to be a problem that

affected the data transfer to the ground base station until it finally terminated on April 11. The acoustic ranging was interrupted from April 6 to April 10, 2019.

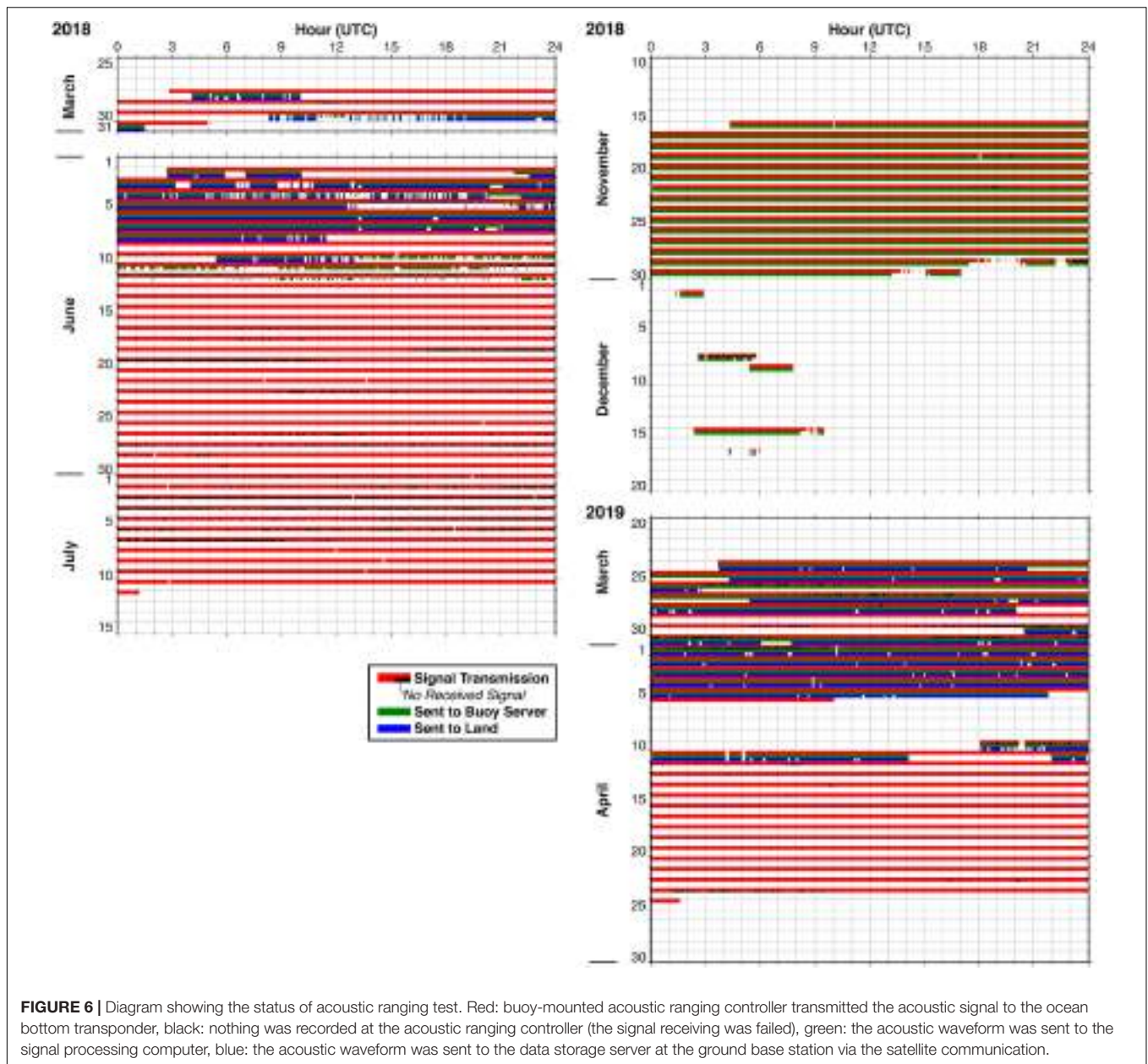
The results from the continuous acoustic ranging test are shown in **Figure 6**. The acoustic ranging itself successfully continued throughout the test period as long as power was supplied to the system, as indicated by the red bars in **Figure 6**, although data transfer to the ground base station was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

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

REDUCTION OF ACOUSTIC RANGING DATA SIZE

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

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



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

To address this, the energy ratio (ER) was introduced to aid in identifying the correct direct wave onset. The ER is defined as the

average wave energy within the time window just after a target time relative to that just before the same target time as follows (e.g., Han et al., 2008):

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

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

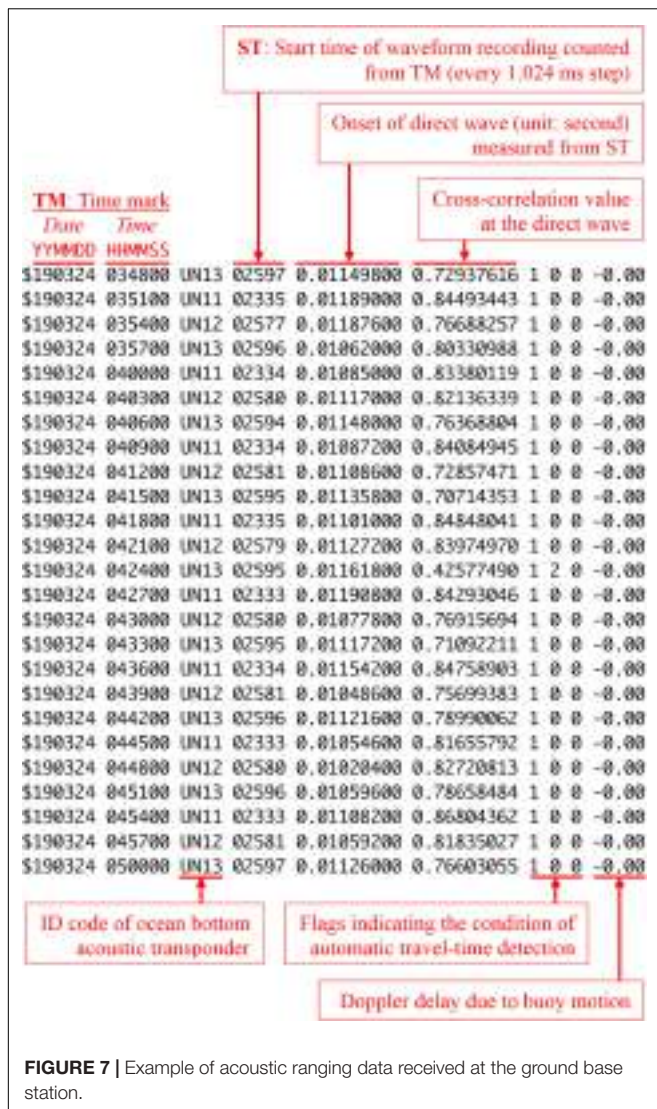


FIGURE 7 | Example of acoustic ranging data received at the ground base station.

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

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

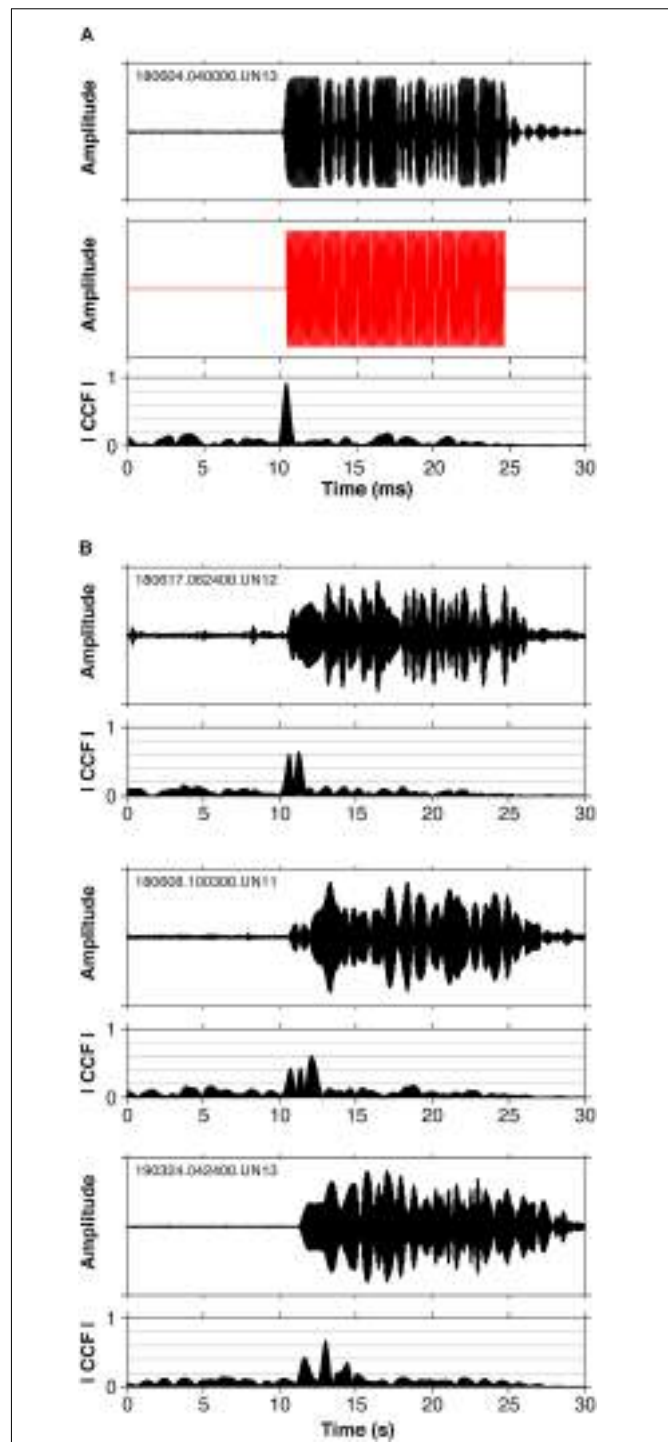
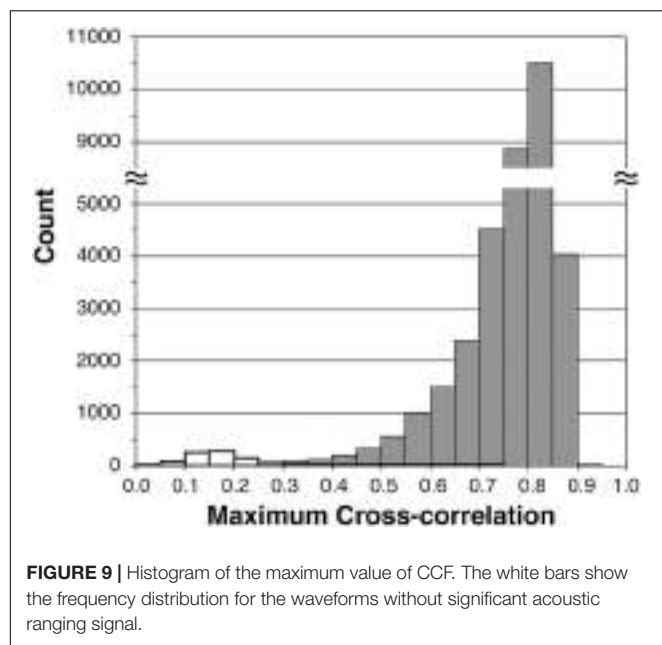


FIGURE 8 | Examples of received acoustic waveform on the buoy-mounted acoustic ranging controller. **(A)** Waveform with high signal-to-noise ratio. Top: received waveform middle: theoretical transmitted signal from the buoy mounted acoustic transducer, bottom: absolute cross-correlation function (CCF)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



three identified CCF peaks exceed the thresholds, the waveform is rejected as containing no clear return. However, if a CCF value is somewhat below the maximum, the CCF peak can still be

recognized as indicating a direct wave onset if the ER value is large enough at the peak (**Figure 10**). Note that the CCF values are rounded to two decimal places in our programming code, and the plots in **Figure 10** are discretely distributed. The algorithm was successful and only misrecognized direct wave onsets in 136 waveforms or 0.39% of the data (**Table 1**), which was equivalent to less than twice a day. Most of these cases (112 data) were misrecognized as direct wave onsets due to the extremely small path difference between the direct and reflected waves, which caused an overlap of the CCF peak corresponding to the reflected wave on the direct wave peak. This was identified as a limitation of the present algorithm.

DISCUSSION

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

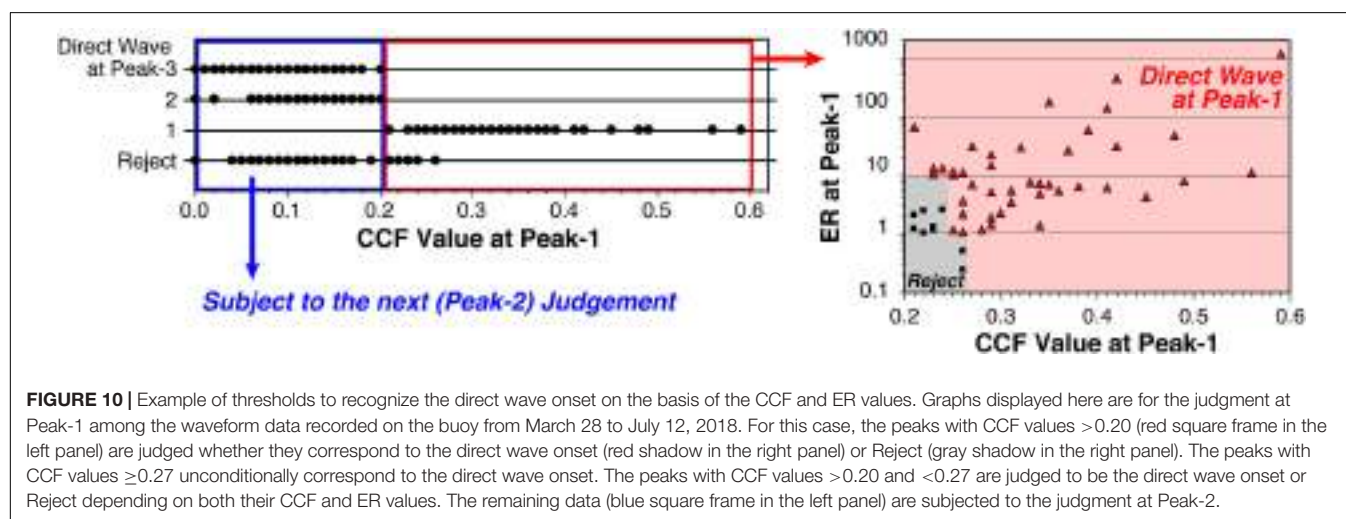


TABLE 1 | Result of the automatic recognition of the direct wave onset.

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

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

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

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

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

The purpose of our system is seafloor positioning. Our system is still in the testing phase, and we are developing a positioning algorithm for point survey specific to the present buoy measurement. It is desirable to measure the sound speed profile continuously because temporal and spatial variations in sound speed also directly affects the accuracy of seafloor positioning. Nevertheless, the continuous measurement of sound speed has not been realized in our system. Instead, we plan to estimate variations in sound speed, that appear in the time series of acoustic travel time (e.g., Kido et al., 2008), together with the seafloor positions as demonstrated in previous studies (Fujita

et al., 2006; Ikuta et al., 2008; Honsho and Kido, 2017). Average sound speed profiles should be measured with research vessel at some time interval, once a year for our case. Imano et al. (2019) reported accuracy of seafloor positioning from a smaller buoy than ours in the ocean with a depth of about 3000 m. Their buoy was slackly moored, and it drifted within a circle of 4000 m radius due to the strong Kuroshio ocean current. The extreme drifting effect caused decrease in positioning accuracy down to about 1 m. In contrast, the large and heavy buoy we used was moored more tightly. The buoy, therefore, drifted within the area of about only 150–200 m even under the strong Kuroshio current (Figure 5). We should demonstrate an advantage of our tightly-moored buoy on the basis of the seafloor positioning accuracy with the positioning algorithm that we are developing now.

CONCLUSION

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

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

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

DATA AVAILABILITY STATEMENT

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

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

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

FUNDING

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

REFERENCES

- Ali, H. B. (1993). Oceanic variability in shallow-water acoustics and the dual role of the sea bottom. *IEEE J. Ocean Eng.* 18, 31–41. doi: 10.1109/48.211498
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., et al. (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Mar. Geodesy* 32, 355–371. doi: 10.1080/01490410903297766
- Chadwell, C. D. (2013). “GPS-acoustic seafloor geodesy using a wave glider,” in *Proceedings of the Abstract G14A-01 presented at 2013 Fall Meeting*, (San Francisco, CA: AGU).
- Chadwell, C. D., and Spiess, F. N. (2008). Plate motion at the ridge-transform boundary of the south Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic data. *J. Geophys. Res.* 113:B04415. doi: 10.1029/2007JB004936
- Chen, H.-Y., Ikuta, R., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Kohmi, T., Wang, C.-C., et al. (2018). Back-arc opening in the western end of the Okinawa Trough revealed from GNSS/Acoustic Measurements. *Geophys. Res. Lett.* 45, 137–145. doi: 10.1002/2017GL075724
- Fujimoto, H. (2006). Ocean bottom crustal movement observation using GPS/Acoustic system by universities in Japan. *J. Geod. Soc. Jpn.* 52, 265–272. doi: 10.11366/sokuchi1954.52.265
- Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M., et al., (2006). GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planet. Space* 58, 265–275. doi: 10.1186/BF03351923
- Gagnon, K., Chadwell, C. D., and Norabuena, E. (2005). Measuring the onset of locking in the Peru–Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Nature* 434, 205–208. doi: 10.1038/nature03412
- Han, L., Wong, J., Bancroft, J. C., and Stewart, R. R. (2008). Automatic time picking and velocity determination on full waveform sonic well logs. *CREWES Res. Rep.* 20:5.1–5.13.
- Honsho, C., and Kido, M. (2017). Comprehensive analysis of traveltime data collected through GPS-acoustic observation of seafloor crustal movements. *J. Geophys. Res.* 122, 8583–8599. doi: 10.1002/2017JB014733
- Iinuma, T., Hino, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y., et al. (2012). Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.* 117:B07409. doi: 10.1029/2012JB009186
- Iinuma, T., Hino, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y., et al. (2016). Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nat. Commun.* 7:13506. doi: 10.1038/ncomms13506
- Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., et al. (2008). A new GPS-Acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai Trough. *J. Geophys. Res.* 113:B02401. doi: 10.1029/2006JB004875
- Imano, M., Kido, M., Honsho, C., Ohta, Y., Takahashi, N., Fukuda, T., et al. (2019). Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy. *Prog. Earth Planet. Sci.* 6:56. doi: 10.1186/s40645-019-0302-1
- Imano, M., Kido, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Ochi, H., Takahashi, N., et al. (2015). “Improvement in the accuracy of real-time GPS/Acoustic measurements using a multi-purpose moored buoy system by removal of acoustic multipath,” in *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and*

ACKNOWLEDGMENTS

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

- Natural Hazards (GENAH), IAG Symposia 145*, ed. M. Hashimoto (Berlin: Springer), 105–114. doi: 10.1007/1345_2015_192
- Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T., et al. (2005). Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake. Japan, recorded by a new GPS buoy. *Earth Planet. Space* 57, 297–301. doi: 10.1186/BF03352566
- Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Issiki, H., Moriguchi, T., et al. (2001). “A new tsunami monitoring system using RTK-GPS,” in *Proceedings of International Tsunami Symposium 2001 (ITS 2001)*, Seattle, WA, 645–651.
- Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S., et al. (2017). “GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system,” in *Proceedings of The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, CA.
- Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M., et al. (2018). Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. *J. Disaster Res.* 13, 460–471. doi: 10.20965/jdr.2018.p0460
- Kido, M., Fujimoto, H., Hino, R., Ohta, Y., Osada, Y., Iinuma, T., et al. (2015). “Progress in the project for development of GPS/Acoustic technique over the Last 4 years,” in *Proceeding of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 145, ed. M. Hashimoto (Cham: Springer), 3–10. doi: 10.1007/1345_2015_127
- Kido, M., Fujimoto, H., Miura, S., Osada, Y., Tsuka, K., and Tabei, T. (2006). Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys. *Earth Planet. Space* 58, 911–915. doi: 10.1186/BF03351996
- Kido, M., Imano, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Takahashi, N., Tsubone, S., et al. (2018). Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. *J. Disaster Res.* 13, 472–488. doi: 10.20965/jdr.2018.p0472
- Kido, M., Osada, Y., and Fujimoto, H. (2008). Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements. *Earth Planet. Space* 60, 229–234. doi: 10.1186/BF03352785
- Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R., and Ito, Y. (2011). Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 38:L24303. doi: 10.1029/2011GL050057
- Kimura, H., Tadokoro, K., and Ito, T. (2019). Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations. *J. Geophys. Res.* 124, 6140–6164. doi: 10.1029/2018JB016159
- Matsui, R., Kido, M., Niwa, Y., and Honsho, C. (2019). Effects of disturbance of seawater excited by internal wave on GNSS-acoustic positioning. *Mar. Geophys. Res.* 40, 541–555. doi: 10.1007/s11001-019-09394-6
- Matsumoto, K., Takanezawa, T., and Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *J. Oceanogr.* 56, 567–581. doi: 10.1023/A:1011157212596
- Matsumoto, Y., Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Yabuki, T., and Asada, A. (2006). Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planet. Space* 58, 1573–1576. doi: 10.1186/BF03352663
- Matsumoto, Y., Ishikawa, T., Fujita, M., Sato, M., Saito, H., Mochizuki, M., et al. (2008). Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planet. Space* 60:e9–e12. doi: 10.1186/BF03353114

- Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C., and Iwabuchi, T. (2008). "Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time," in *Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah, GA, 397–405.
- Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K., and Ochi, T. (2018). Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data. *Geosphere* 14, 535–551. doi: 10.1130/GES01529.1
- Ozaki, T. (2011). Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0): Tsunami warnings/advisories and observations. *Earth Planet. Space* 63, 827–830. doi: 10.5047/eps.2011.06.029
- Rocken, C., Mervart, L., Lukes, Z., Johnson, J., Kanzaki, H., Kakimoto, M., et al. (2004). "Testing a new network RTK software system," in *Proceedings of 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, CA, 2831–2839.
- Sathiakumar, S., Barbot, S., Hill, E., Peng, D., Zerucha, J., Suhaimee, S., et al. (2016). "Seafloor geodesy using wave gliders to study earthquake and tsunami hazards at subduction zones," in *Proceedings of the Abstract G31A-1046 presented at 2016 Fall Meeting*, (San Francisco, CA: AGU).
- Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M., et al. (2011a). Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science* 332:1395. doi: 10.1126/science.1207401
- Sato, M., Saito, H., Ishikawa, T., Matsumoto, Y., Fujita, M., Mochizuki, M., et al. (2011b). Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 38:L01312. doi: 10.1029/2010GL045689
- Spiess, F. N., Chadwell, C. D., Hildebrand, J. A., Young, L. E., Purcell, G. H. Jr., and Dragert, H. (1998). Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planet. Inter.* 108, 101–112. doi: 10.1016/S0031-9201(98)00089-2
- Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Besana, G. M., Sugimoto, S., et al. (2006). Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 33:L23306. doi: 10.1029/2006GL026742
- Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Ando, M., Okuda, T., Nagai, S., et al. (2012). Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 39:L10306. doi: 10.1029/2012GL051696
- Tadokoro, K., Nakamura, M., Ando, M., Kimura, H., Watanabe, T., and Matsuhiro, K. (2018). Interplate coupling state at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements. *Geophys. Res. Lett.* 45, 6869–6877. doi: 10.1029/2018GL078655
- Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koshimura, S., Imada, N., Sakaue, H., et al. (2015). "Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations," in *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 145, ed. M. Hashimoto (Cham: Springer), 145–153. doi: 10.1007/1345_2015_151
- Tomita, F., Kido, M., Ohta, Y., Iinuma, T., and Hino, R. (2017). Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. *Sci. Adv.* 3:e1700113. doi: 10.1126/sciadv.1700113
- Tomita, F., Kido, M., Osada, Y., Hino, R., Ohta, Y., and Iinuma, T. (2015). First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique. *Geophys. Res. Lett.* 42, 8391–8397. doi: 10.1002/2015GL065746
- Watanabe, S., Bock, Y., Melgar, D., and Tadokoro, K. (2018). Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy. *J. Geophys. Res.* 123, 2448–2461. doi: 10.1002/2017JB014799
- Watanabe, S., Sato, M., Fujita, M., Ishikawa, T., Yokota, Y., Ujihara, N., et al. (2014). Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5789–5796. doi: 10.1002/2014GL061134
- Yasuda, K., Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Nagai, S., Okuda, T., et al. (2014). Interplate locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost part of the Suruga Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 41, 5806–5812. doi: 10.1002/2014GL060945
- Yasuda, K., Tadokoro, K., Taniguchi, S., Kimura, H., and Matsuhiro, K. (2017). Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough. *Japan. Geophys. Res. Lett.* 44, 3572–3579. doi: 10.1002/2017GL072918
- Yokota, Y., and Ishikawa, T. (2020). Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A. *Sci. Adv.* 6:aay5786. doi: 10.1126/sciadv.aay5786
- Yokota, Y., Ishikawa, T., Sato, M., Watanabe, S., Saito, H., Ujihara, N., et al. (2015). Heterogeneous interplate coupling along the Nankai Trough, Japan, detected by GPS-acoustic seafloor geodetic observation. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2:10. doi: 10.1186/s40645-015-0040-y
- Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T., and Asada, A. (2016). Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature* 534, 374–377. doi: 10.1038/nature17632

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2020 Tadokoro, Kinugasa, Kato, Terada and Matsuhiro. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

METHODOLOGY

Open Access



Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy

Natsuki Kinugasa^{1*} , Keiichi Tadokoro¹, Teruyuki Kato² and Yukihiro Terada³

Abstract

Using Global Navigation Satellite System–Acoustic (GNSS-A) technique, we have been developing observation system on a moored buoy for continuous monitoring of seafloor crustal deformation. The sound speed structure near a warm current has heterogeneity, which is the main cause of a seafloor positioning error. Assuming a sloping structure, previous studies proposed sound speed model to reduce positioning error. We examined the validity of the model by comparing the estimated structure with the actual structure measured at multiple points around our observation site. The result shows that the gradient parameter estimated from GNSS-A data acquired by vessel is appropriate. The numerical examination indicates that modeling error caused by the misinterpretation of the depth of gradient layer occurs, and it can be suppressed by performing acoustic ranging at the point near the centroid of units. From the calculation of estimation error of sound speed variation, the predicted acoustic ranging error observed using the moored buoy staying near the centroid is 9.0 cm or below. Therefore, seafloor displacement can be detected with centimeter class via moored buoy in the basin of a warm current.

Keywords: GNSS-A, Seafloor crustal deformation, Buoy, Sound speed structure, CTD, Horizontal gradient

Introduction

Spiess et al. (1998) originally presented observation method for seafloor crustal deformation by combining Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning with acoustic ranging. It is difficult to estimate the absolute position on the seafloor using GNSS only because the electromagnetic wave propagates poorly in seawater. GNSS–Acoustic (GNSS-A) technique uses a vessel or buoy as a relay point and estimates the relative position on the seafloor by acoustic ranging. Although the estimation accuracy for stationary displacement has been enhanced by the previous studies (Fujita et al. 2006; Honsho et al. 2019; Ikuta et al. 2008; Kido et al. 2008;

Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019), it is still difficult to detect that for non-stationary displacement or separate with high-accuracy coseismic from postseismic one.

Yokota and Ishikawa (2019b) conducted an observation at frequent intervals and were successful to detect the displacement due to the slow slip event. From the results of this study, continuous monitoring is expected to increase the estimation accuracy. Recently, a buoy has been used as the continuous observation platform. Kido et al. (2018) developed the GNSS-A observation system on the moored buoy and had been operating it for almost 1 year. Kato et al. (2005) has utilized a buoy, named GNSS buoy, to observe tsunami. GNSS buoy was successful to detect tsunamis generated by the 2001 Peru earthquake, the 2004 off the Kii peninsula earthquake in Japan, and so on. Our research group then conducted experiments farther from the coast and extended the

* Correspondence: kinugasa@seis.nagoya-u.ac.jp

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s). 2020 **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

function of the GNSS buoy by introducing GNSS-A observation equipment. We previously reported the development of a comprehensive observation system for tsunami, ionospheric total electron content, precipitable water, and seafloor crustal deformation (Kato et al. 2018).

The moored buoy we used in this research is owned by Kochi Prefecture, Japan, which is located approximately 30 km off the coast of cape Ashizuri (Fig. 1). We installed three acoustic units on the seafloor around the buoy in 2017 and finished installing observation equipment, such as GNSS antenna and receiver, gyro sensor for attitude measuring, acoustic ranging equipment, computers for data processing, and satellite communication unit for data transfer, on the deck in 2018. The measurements of GNSS and gyro are acquired with 1 Hz sampling. The acoustic ranging at 3 min intervals for units one by one in sequence is continuously operated.

As shown by Yokota et al. (2019), from 2014 to 2016, water temperature at the surface layer around this region had gradient toward the southeast. The temperature gradient was generated by warm current called Kuroshio that flows northward in the Pacific Ocean along the eastern coast of Japan. Yokota and Ishikawa (2019a) also pointed out that sound speed structure has strong

gradient when the observation point is located at the edge of the Kuroshio. Kido (2007) presented sound speed model considering horizontal gradient because the heterogeneity in sound speed structure is the main cause of positioning error for GNSS-A technique. Assuming a sloping structure for sound speed to estimate the variation from reference sound speed profile, Yasuda et al. (2017), Honsho et al. (2019), and Yokota et al. (2019) developed an analytical method. They eventually demonstrated that the estimation for the time series of unit position was improved.

In our case, we needed to use the measured in the past for analysis because our buoy was not equipped with the function of measuring sound speed. Therefore, the estimation accuracy for sound speed variation has more direct effects on the positioning accuracy. Accordingly, this study aimed to evaluate estimation accuracy for its temporal and spatial variations. We then measured sound speed at multiple points around seafloor units in parallel with acoustic ranging and obtained its three-dimensional structure. We applied the sloping structure model to GNSS-A data acquired using vessel and obtained seafloor unit position and sound speed variations. Then, we compared the estimated horizontal gradient with the measured structure. We also calculated the anticipated

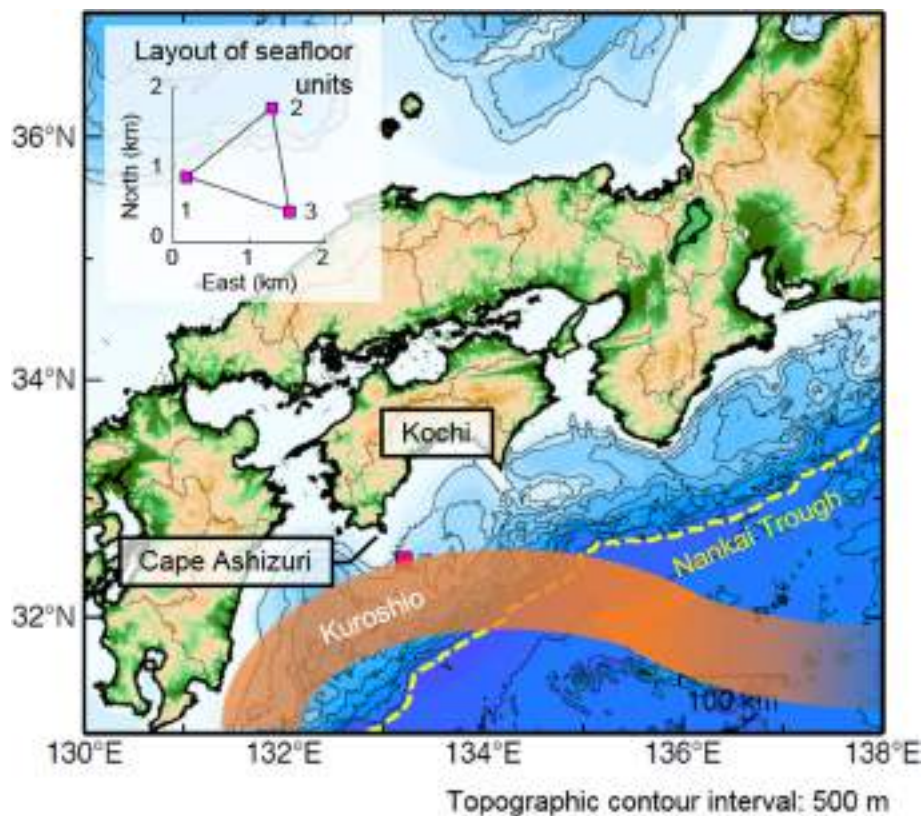


Fig. 1 LOCATION OF OUR OBSERVATION SITE (PINK SQUARE) WITH SCHEMATIC DIAGRAM OF THE KUROSHIO BASIN

ranging error observed using buoy to examine the capability of the buoy to detect the seafloor displacement.

First, we presented sound speed model and analytical method considering its sloping structure. Then, we showed the analytical results of array shape and horizontal gradient of sound speed by using GNSS-A data acquired using vessel. We discussed the estimated acoustic ranging error observed using buoy. The modeling error caused by misinterpretation of sound speed structure is also discussed.

Observation and data

GNSS-A observation using vessel

We conducted observation using research vessel Yugemaru from 2017 to 2019 to determine the initial position of seafloor units and survey the sound speed structure at the site. Figure 2a shows the track maps for six epochs. First, the vessel ran clockwise and counterclockwise around the unit array on the circular route in either case. The vessel also navigated along straight orbits passing both the vicinity of the center of the circular route

and the point right above each seafloor unit. The acoustic ranging was performed at intervals of 8 s for units one by one in sequence for about 5–6 h for each epoch. During acoustic ranging, the onboard GNSS receiver recorded satellite signal and the gyrocompass measured attitude of the vessel. The position of onboard transducer can be calculated from the measured attitude and the position of GNSS antenna placed on the vessel estimated using kinematic positioning. We also measured conductivity, temperature, and depth (CTD) of sea water in parallel with acoustic ranging.

Sound speed structure obtained from CTD measurements

We conducted underway CTD observations at the points as indicated by the star symbols on the circular route in Fig. 2a. We performed at multiple points to understand sound speed structure at our observation site. Figure 2b shows sound speed profiles at 1 m intervals of water depth for each epoch, which is calculated using the equation proposed by Del Grosso (1974). The similar variation patterns according to the depth were measured

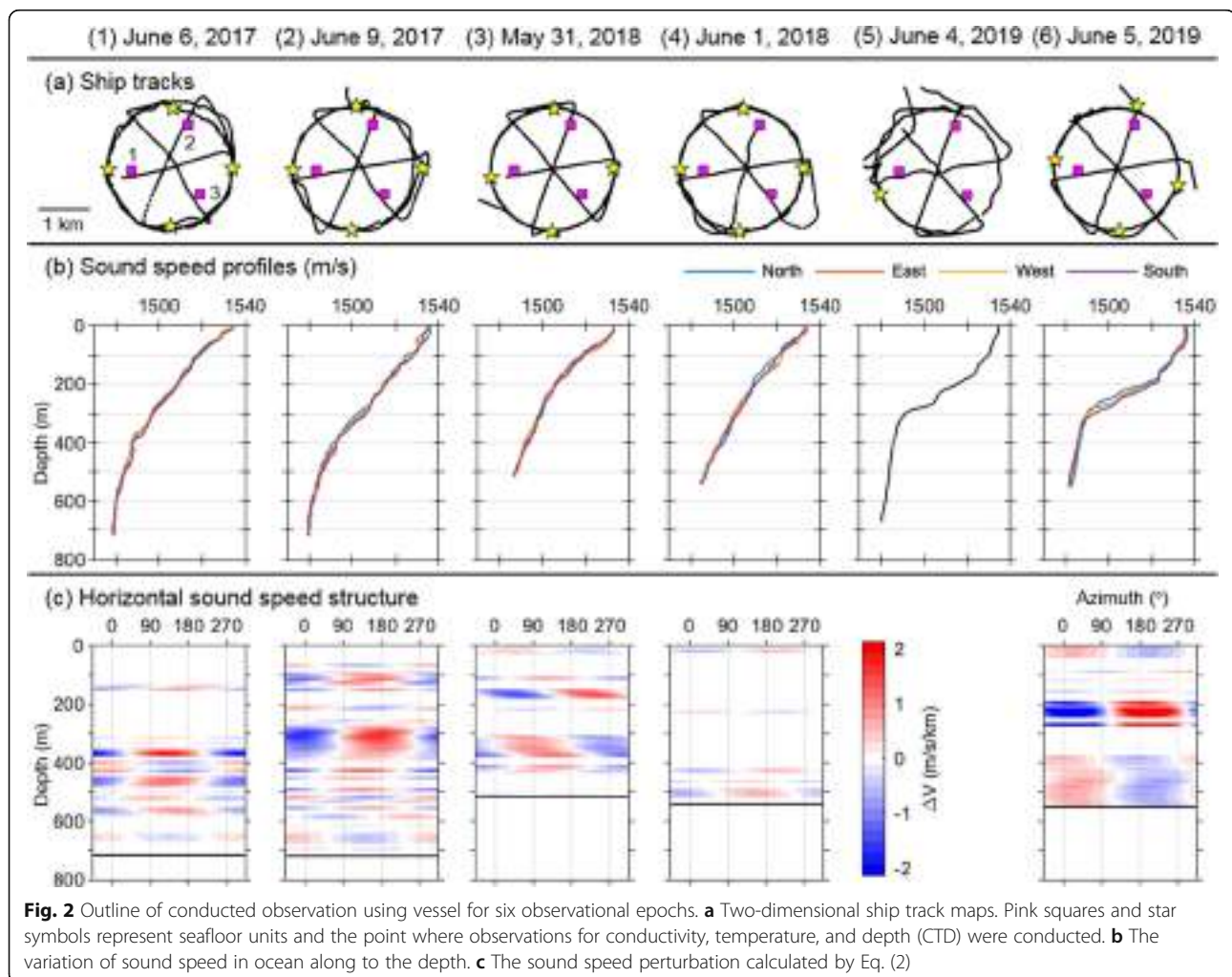


Fig. 2 Outline of conducted observation using vessel for six observational epochs. **a** Two-dimensional ship track maps. Pink squares and star symbols represent seafloor units and the point where observations for conductivity, temperature, and depth (CTD) were conducted. **b** The variation of sound speed in ocean along to the depth. **c** The sound speed perturbation calculated by Eq. (2)

in 2017 and 2018, whereas the vertical gradient at the depth 200–300 m measured in 2019 were extremely large.

The horizontal structure of sound speed has been generally considered to be sloping in the region near the Kuroshio basin (Kido 2007; Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019; Honsho et al. 2019). We applied this model to detect horizontal gradient of sound speed from CTD measurements. Then, sound speed at the point (x, y, z) is modeled by

$$V(x, y, z) = V_0(z) + \delta V_x(z) \cdot x + \delta V_y(z) \cdot y, \quad (1)$$

where $V_0(z)$ (m/s) is sound speed at the origin and δV_x and δV_y (m/s/m) are the constant gradients of east and south components, respectively. Using the least squares method, the parameters $V_0(z)$, $\delta V_x(z)$, and $\delta V_y(z)$ at 1 m intervals of the depth from multiple profiles (Fig. 2b) can be obtained. Figure 2c shows the perturbation from $V_0(z)$ calculated by

$$\Delta V(z, \phi) = \delta V_x(z) \cdot R \sin \phi + \delta V_y(z) \cdot R \cos \phi, \quad (2)$$

where R (m) is radius of circular route and ϕ (radian) is the direction of gradient axis from the true north. We considered that if the estimation errors of $\delta V_x(z)$ and $\delta V_y(z)$ are extremely large, the horizontal structure at a particular depth is not sloping. Then, the perturbation was not painted at the depth where the radius of error ellipse for $\Delta V(z, \phi)$ with 95% confidence probability was higher than its estimation value.

The results in 2017 and 2019 showed that a strong gradient mainly from southeast to south is generated at the depth 200–400 m. Contrarily, the structures in 2018 have weak gradient or complicated gradient field. Yokota and Ishikawa (2019a) categorized a structure in accordance with the relative position between observation site and the Kuroshio basin. The structure in shallow depth has weak gradient in the area inside the Kuroshio. On the edge of the Kuroshio, there is strong thick gradient layer. The unstable disturbance is likely to be generated because there is no strong current flow in the area outside the Kuroshio. According to this categorization, our observation site was considered to be on the edge for the epochs in 2017 and 2019 and outside the Kuroshio for the epochs in 2018.

Methods/experimental

Model definition for travel time of acoustic signal

Travel time between onboard transducer $\mathbf{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$ and seafloor unit $\mathbf{x}_u = (x_u, y_u, z_u)$ is defined as the integration of slowness S , which is an inverse of sound speed, along the propagation path:

$$T = \int_0^L S(x, y, z, t) dl, \quad (3)$$

where $L = |\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_u|$ is path length (m). To express the equation of travel time simply, we used S instead of sound speed. As shown in Eq. (1), several previous works considered that horizontal sound speed structure is sloping. We also assumed that horizontal structure consists of N layers, the thickness of each layer is H (m), and the gradient is uniform within each layer. Then, the slowness at the depth in n th layer at the time t is modeled by

$$S(x, y, z, t) = a(t)S_0(z) + \delta S_{x,n} \cdot x + \delta S_{y,n} \cdot y, \quad (4)$$

where $S_0(z)$ is slowness (s/m) at the origin and $\nabla S_n = (\delta S_{x,n}, \delta S_{y,n})$ are the east and north components of horizontal gradient (s/m/m) in n th layer, respectively. According to Ikuta et al. (2008), the temporal variation of slowness $a(t)$ is represented by a cubic B-spline curve:

$$a(t) = \sum_{i=0}^3 \alpha_i B_{i,4}(t), \quad (5)$$

where α_i is control points and $B_{i,4}(t)$ is basis function. We set 3 h for the knot interval in this study to detect long-term variation caused by the ocean tide. Assuming that acoustic signal propagates linearly as described in Fig. 3a, we obtained $dl = L/D dz$ ($D = z_s - z_u$). By substituting Eq. (4) into (3), the theoretical travel time can be written as

$$T_{\text{cal}} = L \cdot a(t) \bar{S}_0(z_s, z_u) + \frac{L}{D} \Delta T_{\text{grad}}, \quad (6)$$

where the average sound speed at the origin is expressed as

$$\bar{S}_0(z_s, z_u) = \frac{1}{D} \int_{z_u}^{z_s} S_0(z) dz, \quad (7)$$

and the contribution of horizontal gradient to travel time is

$$\Delta T_{\text{grad}} = \sum_{n=1}^N \int_{z_u+(n-1)H}^{z_u+nH} [\delta S_{x,n} \cdot x + \delta S_{y,n} \cdot y] dz. \quad (8)$$

By substituting the coordinate of the point on the path $x = x_u + \frac{z-z_u}{z_s-z_u}(x_s-x_u)$ into Eq. (8), the east component of ΔT_{grad} is given by

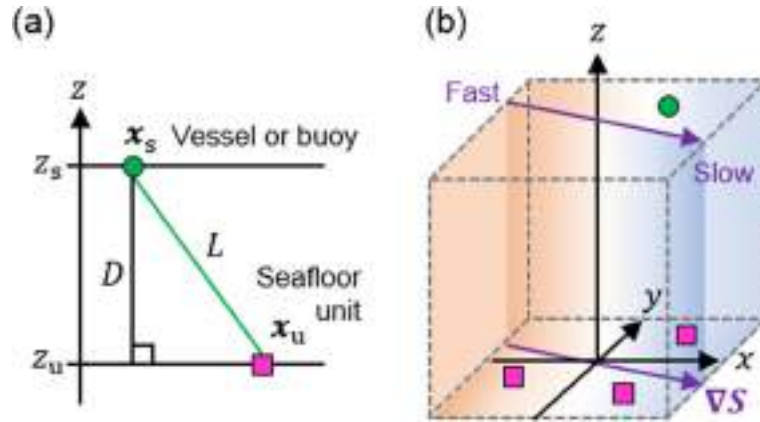


Fig. 3 Schematic diagram drawing **a** propagation path and **b** horizontal slowness model having constant gradient from seafloor to sea surface. It is assumed that acoustic signal transmitted from vessel or buoy $\mathbf{x}_s$ (green circle) propagates linearly to seafloor unit $\mathbf{x}_u$ (pink square)

$$Hx_u \sum_{n=1}^N \delta S_{x,n} + \frac{H^2}{D} (x_s - x_u) \sum_{n=1}^N (n - \frac{1}{2}) \cdot \delta S_{x,n} \quad (9)$$

The contributions of gradient to travel time are determined by its strength and thickness and depth of gradient layer. As suggested in Eq. (9), the parameters of strength $\delta S_{x,n}$ and thickness H are inseparable. Therefore, the previous works generally set H to 500–1000 m (Yasuda et al. (2017), Honsho et al. (2019)). Since the depth of our observation site is below 800 m (Fig. 1), this study assumed that strength and direction of gradient are constant from sea bottom to sea surface (Fig. 3b). Then, we obtained

$$\Delta T_{\text{grad}} = \frac{1}{2} D [\delta S_x (x_s + x_u) + \delta S_y (y_s + y_u)], \quad (10)$$

by substituting $N = 1$, $H = D$, and $\nabla S_n = \nabla S = (\delta S_x, \delta S_y)$ into Eqs. (8) and (9). ΔT_{grad} indicates a sum of product of gradient value and horizontal distance from the origin to the middle of path. Accordingly, theoretical travel time model applied in this study is

$$T_{\text{cal}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_s, S_0, a, \nabla S, t) = L \{ a(t) \bar{S}_0(z_s, z_u) + \frac{1}{2} [\delta S_x (x_s + x_u) + \delta S_y (y_s + y_u)] \}, \quad (11)$$

obtained from Eqs. (6) and (10).

Analytical process for detecting seafloor displacement

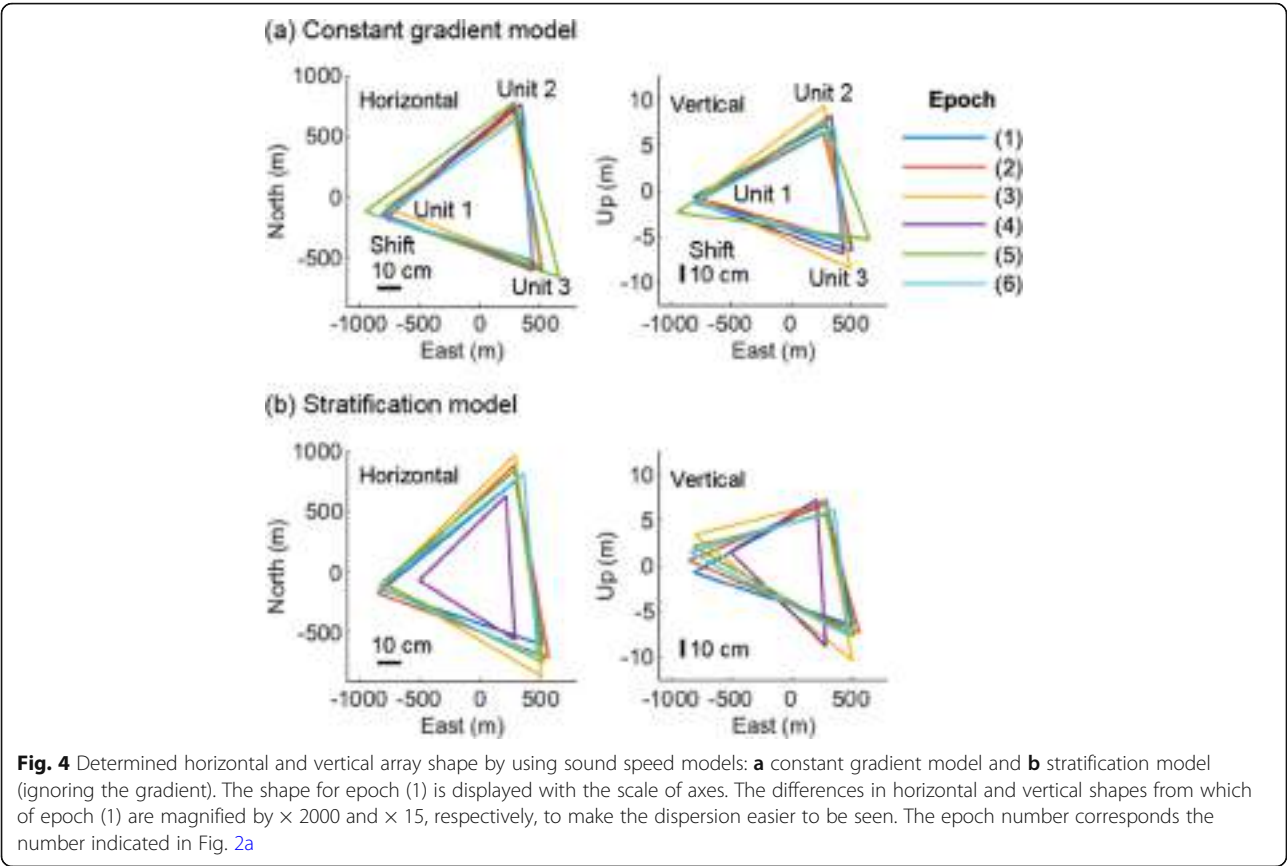
We need to determine the shape of seafloor unit array in advance for detecting precisely seafloor displacement observed using buoy. Then, first, we determine the array

shape using data acquired using vessel, and second, we estimate the displacement of array from the initial position with assumptions that every single unit moves in the same direction and also at the same speed due to the crustal deformation.

The theoretical travel time from the transducer of the vessel to the unit i for k th shot at time t_k is given by $T_{\text{cal}}(\mathbf{x}_{u,i} + \delta \mathbf{x}_m, \mathbf{x}_{s,k}, S_{0,m}, a, \nabla S_m, t_k)$ for m th epoch. The position of unit i for m th epoch is expressed as $\mathbf{x}_{u,i} + \delta \mathbf{x}_m$ where $\mathbf{x}_{u,i}$ is its initial position and $\delta \mathbf{x}_m$ is the vector of array displacement. To determine the array shape, the parameters to be estimated are $\mathbf{x}_{u,i}$, $\delta \mathbf{x}_m$, and temporal variation $a(t_k)$ and horizontal gradient ∇S_m from the slowness profile $S_{0,m}$. The average of their profiles was applied for $S_{0,m}$ since this analysis is performed without the information of horizontal sound speed structure obtained from multiple profiles (Fig. 2c).

As shown in Fig. 2c, the horizontal structure changes day by day. Although the time variation of ∇S should be considered, we treat ∇S as constant value during a certain time in accordance with Honsho et al. (2019). We assumed that ∇S is constant during observation for single epoch since the observation using vessel takes approximately 6 h for this site. For the observation using buoy, we were planning to divide observation period by a prescribed time interval and to consider ∇S constant within interval.

The theoretical travel time from the buoy is also given by $T_{\text{cal}}(\mathbf{x}_{u,i} + \delta \mathbf{x}_p, \mathbf{x}_{s,q}, S_0, a, \nabla S_q, t_k)$. $\delta \mathbf{x}_p$ and ∇S_q are those of the p th and q th divisions when observation period is divided by a prescribed time interval for each. For the determination of array displacement, the unknown parameters are $\delta \mathbf{x}_p$, $a(t_k)$, and ∇S_q . We need to use the profile measured by vessel in the past because our observation system on the buoy has no function for CTD measuring. Both analyses use the least squares



method and determine the unknown parameters that minimize the sum of residuals between observed and theoretical travel time.

Results

Array shape of seafloor units

First, we examined the effect of considering horizontal gradient of sound speed for array shape determination. For this purpose, we compared array shape determined using sound speed model considering and ignoring gradient. Here, the model considering gradient (Eq. (4)) is called constant gradient model, and model ignoring gradient is called stratification model. By conducting analysis for each single epoch, a set of six shapes was

obtained. Figure 4 compares the obtained array shapes for each sound speed model. The centroid position of each shape is arranged to the origin. For both horizontal and vertical shapes, the dispersion was suppressed by considering gradient. Table 1 also compares averaged distance between units with the standard deviation. The maximum dispersion of horizontal one between unit 1 and unit 3 was decreased from approximately 10 to 7 cm by considering gradient. The dispersions of vertical one were also decreased.

We also showed the positional shift of unit array between two models for each epoch in Fig. 5. Violet and blue vectors in Fig. 5a denote the estimated horizontal gradient and the centroid shift, respectively. Two arrows

Table 1 Averaged distances between seafloor units determined by using different sound speed models

		Horizontal sound speed model:			
		Stratification model		Constant gradient model	
		Mean (m)	STD (cm)	Mean (m)	STD (cm)
Horizontal distance	Unit 1, 2	1424.583	9.4	1424.565	3.6
	Unit 2, 3	1374.945	10.1	1374.973	4.5
	Unit 3, 1	1403.078	10.4	1403.153	6.9
Vertical distance	Unit 1, 2	7.735	7.8	7.798	5.5
	Unit 1, 3	5.807	12.2	5.935	7.2

Note: STD standard deviation

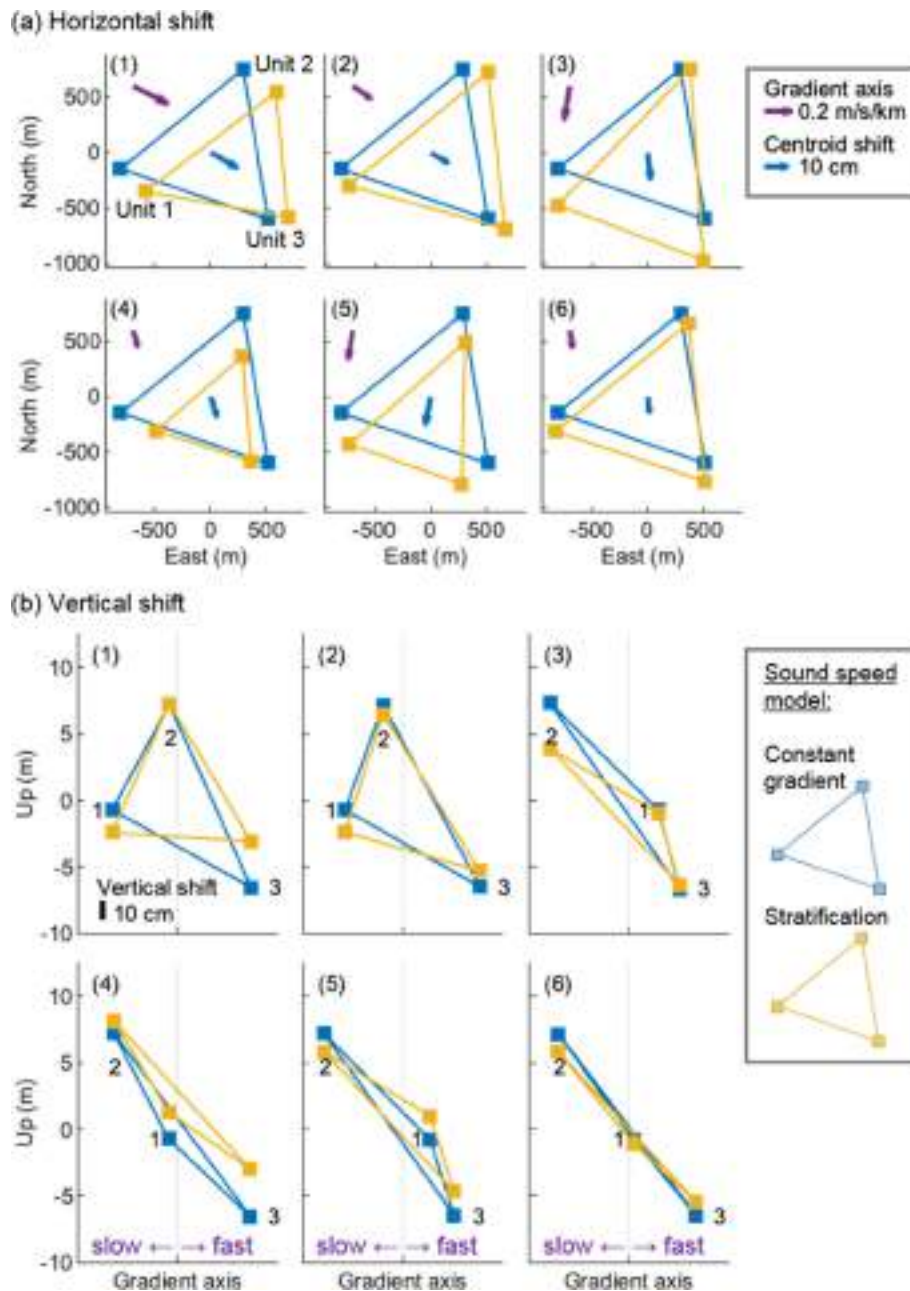


Fig. 5 The positional shift of determined array shape for each epoch using sound speed models: constant gradient (blue triangle) and stratification model (yellow triangle). The shape for constant gradient model is displayed with the scale of axes. **a** Horizontal shift amount of the shape for stratification model is magnified by $\times 2000$. Violet arrow denotes the estimated horizontal gradient vector and points in the direction of increasing sound speed. Blue arrow indicates the centroid shift. **b** Vertical shift amount is magnified by $\times 15$. Horizontal axis indicates gradient axis for each epoch

point in almost the same direction. Since violet arrow points in the direction of increasing sound speed, the estimated unit position is shifted toward faster sound speed by ignoring gradient. Moreover, the shift amount seems to be proportional to the quantity of gradient parameter. Vertical array shift in Fig. 5b suggests that the

depth of unit is estimated shallower than the true position for the unit where the sound speed is faster.

Second, we conducted analysis to determine common array shape for six epochs by using constant gradient model. Table 2 displays the determined position of sea-floor units expressed as the east–north–up coordinates centering the centroid of the array (latitude 32.48662

Table 2 Position of seafloor units estimated by using multiple campaign data

	ENU POSITION (m)			σ (CM)	
	EAST	NORTH	UP	HORIZONTAL	VERTICAL
UNIT 1	− 810.24	− 148.10	− 0.72	1.4	1.5
UNIT 2	293.57	752.42	7.23	1.4	1.5
UNIT 3	516.66	− 604.32	− 6.50	1.4	1.5

NOTE. ENU east-north-up, σ the major axial radius of error ellipse with 95% confidence probability

north, longitude 133.20850 east, and at ellipsoidal height − 756.15 m). From the calculated major axial radius of error ellipse with 95% confidence probability, the unit position was determined with 1.5 cm accuracy.

Horizontal sound speed structure

We also obtained horizontal gradient from the analysis to determine common array shape in the above section. The estimation results are summarized in the left column in Table 3. The magnitude of horizontal gradient ΔV (m/s/km) was converted from ∇S by $\Delta V \approx |\nabla S|/\bar{S}_0^2 \times 10^3$. The estimated direction of gradient axis ϕ is also displayed. The estimated ϕ s of epochs (1) and (2) in 2017 are southeast, which corresponds with the measured structure (Fig. 2c). The estimated ΔV value of epoch (3) is about half those of epoch (1). The effect of gradient on the observed travel time was canceled because the measured structure of epoch (3) is complicated. The estimated ΔV is smallest for epoch (4) because the structure has weak gradient. Although the structure of epoch (6) has large gradient at the depth 200–300 m, ΔV is smaller than those of epochs (1) and (2). It suggests that the effect of gradient is suppressed because the thickness of gradient layer is thin.

Table 3 Horizontal gradient of sound speed estimated from different profiles

Epoch	Reference sound speed profile observed on:								
	Each epoch			6 June 2017			5 June 2019		
	ΔV	ϕ	RMS	ΔV	ϕ	RMS	ΔV	ϕ	RMS
(1)	0.27	121	0.04	–	–	–	0.27	125	0.09
(2)	0.21	136	0.05	0.18	133	0.06	0.20	129	0.07
(3)	0.14	200	0.06	0.16	197	0.06	0.23	195	0.11
(4)	0.11	184	0.05	0.11	183	0.05	0.14	180	0.09
(5)	0.18	174	0.06	0.18	171	0.08	0.18	175	0.06
(6)	0.16	164	0.05	0.14	156	0.10	–	–	–

Note. ΔV magnitude of horizontal gradient (m/s/km), ϕ azimuth angle (degrees) RMS rms error of residual between observed and calculated travel time (ms)

Estimation error of sound speed variations

A comparison with actual structure demonstrated in the previous section that horizontal gradient estimated from GNSS-A data with sound speed profile obtained in parallel with acoustic ranging was appropriate. Although our buoy has no function for measuring sound speed, the profile measured in the past needs to be used. Accordingly, we examined the effect of substituting the profile obtained on other days on the estimation of sound speed variations. We applied the profiles measured on 6 June 2017, and 5 June 2019, to the calculation for other epochs and obtained temporal variation and horizontal gradient from those reference profiles.

Table 3 compares the horizontal gradient estimated using different profiles. The root-mean-square (rms) errors of residual between observed and calculated travel time are also shown. The rms error was 0.04–0.06 ms in the case of using profile obtained in each epoch. We then considered estimation using other profile to be validated when the rms error is less than 0.06 ms. Based on this index, the profile of epoch (1) should be selected for epochs (2)–(4) and that of epoch (6) should be selected for epoch (5). As shown in Fig. 2b, observed variation patterns along the depth for two epochs in 2019 were quite different from others. Thus, applying the profile markedly different from the actual pattern has adverse effect on the estimation. Even if the suitable one was selected as the reference, the estimation errors for ΔV and ϕ are maximum of 0.03 m/s/km and 3°, respectively.

Figure 6 also compares the estimated temporal variation of averaged sound speed ($1/a(t)\bar{S}_0$). As mentioned above, the profile of epoch (6) should not be selected as the reference for epoch (1)–(4). However, regardless of the used profile, the temporal variation patterns were successfully identified. The offset in the figures represents the average of the residual of estimation values between used profiles. The results of all epochs indicate that using suitable profile can suppress the offset and the maximum value is 0.11 m/s.

Discussion

Separability between array displacement and sound speed gradient

Honsho et al. (2019) discussed the requirements to detect array displacement separately from horizontal gradient. In two-dimensional example, they theoretically demonstrated that the measurements obtained from the point survey at the center of an equilateral triangle array have little information to separate them. The buoy we applied is in a similar situation as shown in Fig. 7 showing its movement for a month observed through GNSS. The position of buoy had been stable within a square of approximately 400 m × 400 m. Therefore, we also considered the separability with three-dimensional example for observation using buoy.

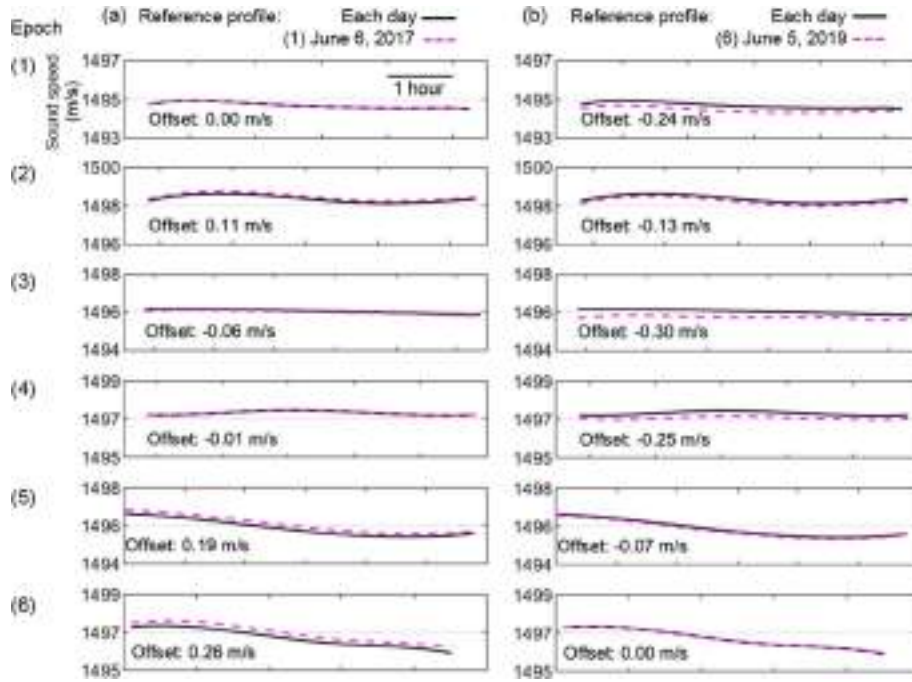


Fig. 6 Estimated temporal variation of averaged sound speed. Black lines indicate estimated variation from the profile observed on each day. Pink broken lines indicate estimated variation from the profile observed on **a** 6 June 2017, and **b** 5 June 2019, respectively. The offset was calculated by averaging the residual of value estimated from different profiles

According to Eq. (11), the observed travel time for unit i for k th shot is given by

$$T_{i,k} = L_{i,k} \{ \bar{S}_0 + \frac{1}{2} [\delta S_x(x_{u,i} + \delta x + x_{s,k}) + \delta S_y(y_{u,i} + \delta y + y_{s,k})] \}, \quad (12)$$

where $L_{i,k} = |\mathbf{x}_{s,k} - (\mathbf{x}_{u,i} + \delta \mathbf{x})|$. The quantity of travel time changes caused by the array displacement $\delta \mathbf{x}$ becomes

$$\delta T_{i,k}^{\text{disp}} = (L_{i,k} - L'_{i,k}) \bar{S}_0 \approx \frac{\bar{S}_0}{L'_{i,k}} [\delta x(x_{u,i} - x_{s,k}) + \delta y(y_{u,i} - y_{s,k})], \quad (13)$$

where $L'_{i,k} = |\mathbf{x}_{s,k} - \mathbf{x}_{u,i}|$. The temporal variation of $\bar{S}_0$ is ignored here for brevity. The contribution of horizontal gradient to travel time is

$$\delta T_{i,k}^{\text{grad}} \approx \frac{1}{2} L'_{i,k} [\delta S_x(x_{u,i} + x_{s,k}) + \delta S_y(y_{u,i} + y_{s,k})]. \quad (14)$$

The position of onboard transducer $\mathbf{x}_{s,k}$ is fixed at the origin if the buoy stops at the centroid of unit array. Assuming that the array shape is equilateral triangle and all units are at the same depth, the path length L and the incident angle of acoustic signal θ are independent of unit and shot (Fig. 8c). Then, the quantities of travel time changes in Eqs. (13) and (14) are rewritten as

$$\delta T_i^{\text{disp}} \approx \bar{S}_0 |\delta \mathbf{x}| \sin \theta \cos(\gamma - \psi_i), \quad (15)$$

and

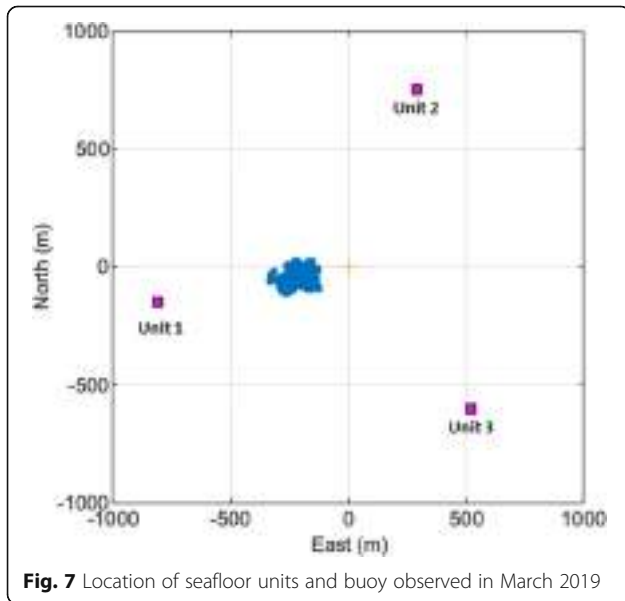


Fig. 7 Location of seafloor units and buoy observed in March 2019

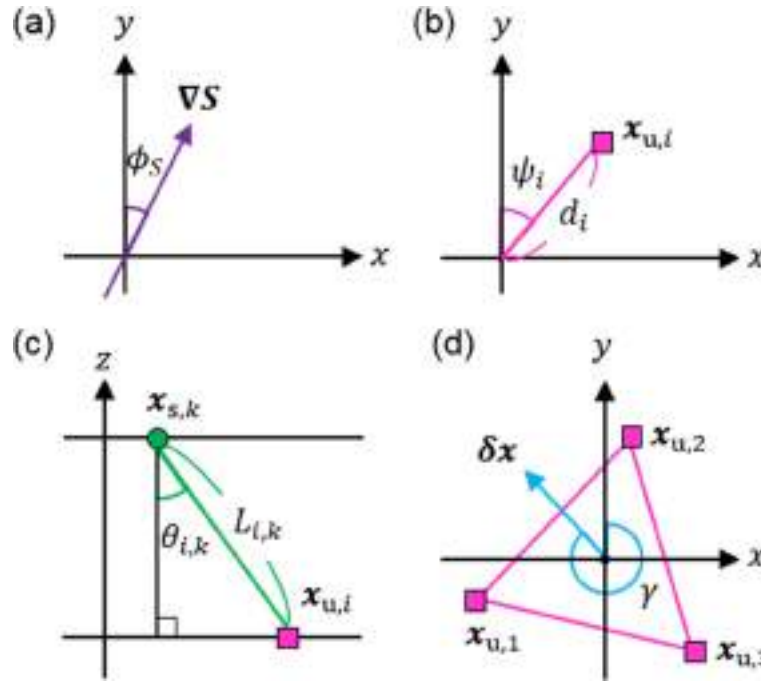


Fig. 8 Schematic diagrams drawing **a** azimuth angle ϕ of horizontal gradient of slowness; **b** azimuth angle ψ_i of unit position $x_{u,i}$; **c** incident angle $\theta_{i,k}$ of acoustic signal from buoy $x_{s,k}$ to seafloor unit $x_{u,i}$; **d** azimuth angle γ of displacement vector δx

$$\delta T_i^{\text{grad}} \approx \frac{1}{2} L^2 |\nabla S| \sin \theta \cos(\phi_S - \psi_i), \quad (16)$$

where the directions of array displacement and slowness gradient are γ and ϕ_S and $x_{u,i}$ is expressed by azimuth ψ_i (Figs. 8a, b, d). From these equations, the separation of two quantities is theoretically impossible when the buoy stops at the centroid.

Our buoy stays stable but actually moves 50–100 m a day. To show the separability in the actual condition, we performed the numerical calculation assuming that the buoy moves around the centroid. Synthetic travel time for 1 year was generated from Eq. (12) by setting array displacement $(\delta x, \delta y) = (-44.2, 35.7)$ mm/year and horizontal gradient $(|\nabla S| = 0.2 \text{ ns/m/m}, \phi_S = \gamma = 309^\circ)$. We examined the effect of the movement range of $x_{s,k}$ by giving the random value within squares of 10 m $\times$ 10 m and 50 m $\times$ 50 m according to the uniform distribution. Figure 9 compares the results of δx and ∇S estimated once a week and every 12 h, respectively. A comparison between two ranges of movement shows that the estimation accuracy becomes higher with wider movement range. Therefore, the actual condition for our buoy meets the requirement for determining array displacement correctly.

Acoustic ranging error caused by estimation error of sound speed

We examined the effect of substituting profile obtained on other days for the estimation of sound speed variation

(Table 3 and Fig. 6). To examine the capability of buoy to detect seafloor displacement, we discussed the estimated acoustic ranging error for observation using buoy in this section. From the positional relationship between buoy and seafloor units (Fig. 7), the average of observed travel time can be calculated and summarized in Table 4.

First, we consider ranging error due to the misinterpretation of sound speed average. As indicated in Fig. 6, the estimation error of averaged sound speed ϵ_V was maximum of 0.11 m/s. Since the maximum of T_{obs} is 0.82 s for unit 3 (Table 4), the maximum ranging error given by $\epsilon_V T_{\text{obs}}$ is 9.0 cm. As indicated in Table 3, estimation error of horizontal gradient $\epsilon_{\Delta V}$ was less than 0.03 m/s/km. ϵ_V caused by $\epsilon_{\Delta V}$ is also given by $\epsilon_V = x_{\text{grad}} \epsilon_{\Delta V}$, where x_{grad} is horizontal distance from the origin to the middle of path along the gradient axis. Since the maximum of x_{grad} is approximately 521 m for unit 1 (Table 4), the ranging error due to the estimation error of horizontal gradient becomes 1.0 cm as a maximum.

We demonstrated that acoustic ranging from buoy without CTD measuring parallelly will probably be performed with under 10 cm accuracy. Consequently, proposed analytical method can achieve seafloor positioning with accuracy of several centimeters class, which is sufficient for detecting seafloor displacement.

Validity of proposed sound speed model

The quantities of contribution of horizontal gradient to travel time is determined by its strength, thickness, and

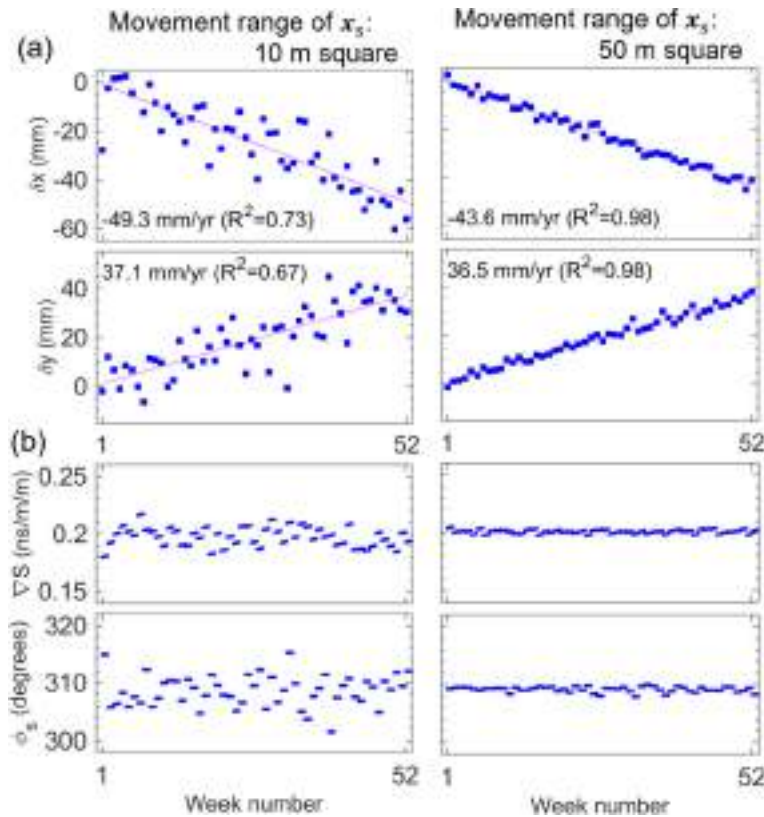


Fig. 9 Results of the numerical experiment with different movement ranges of buoy: estimated **a** array displacement and **b** horizontal gradient of slowness. Pink lines indicate the regression lines derived from the estimated δx and δy .

depth of gradient layer, as well as signal route passing through the layer, as indicated in Eq. (8). Particularly, the depth of layer determines the ratio of the contributions between x_u and x_s into the change of travel time. Assuming that sound speed structure has constant gradient from seafloor to sea surface, the ratio is fixed to 1:1, as shown by the coefficients of x_u and x_s in Eq. (10). However, the actual structures are not so simple (Fig. 2c). Then, modeling error can occur, which can cause seafloor positioning error.

In this section, we demonstrated the contribution of horizontal gradient to observed travel time by numerical calculation and verify the validity of the assumption for sound speed model. We examined five types of structure shown in the left column in Fig. 10. The contribution of gradient ΔT_{grad} was calculated for each structure by using Eq. (8) assuming that acoustic ranging is performed from the point in the displayed area. The distribution of ΔT_{grad} for each unit is described by the color scale.

Type A is the structure having constant gradient from sea surface to seafloor, which is the same as the introduced model in this study. The distribution of ΔT_{grad} suggests that if the gradient is ignored, the estimated

position for every single unit can be shifted into the direction of gradient axis. Additionally, the unit where sound speed is faster can be estimated to be shallower. This result completely corresponds to that in Fig. 5.

The structure of type B has gradient layer in the middle depth and the thickness of layer is set to 100 m. The distribution of ΔT_{grad} is nearly the same as type A. Accordingly, even if the thickness of actual gradient layer is thinner than the assumed, the effect of gradient can be removed when the middle depth of actual layer corresponds to that of the assumed.

Type C has gradient layer in the depth of 200–300 m. In this case, the signal propagates through the layer near from the ranging position x_s . Then, the contribution ratio of x_u becomes small. Contrarily, if the structure has gradient layer near the seafloor, ΔT_{grad} is almost independent of x_s .

Type D simply reproduces the measured structure of epoch (3), which consists of two layers. The distribution of ΔT_{grad} shows that major effect of gradient is cancelled because the direction of gradient axis is opposite. For this reason, the estimation value of ΔV was small (Table 3). Lastly, type E reproducing the structure of epoch (6) also consists of two layers, and the gradient of upper layer is

Table 4 Observed travel time from buoy to each unit and horizontal distance

	T_{obs} (s)	x_{grad} (m)
Unit 1	0.67	520.619
Unit 2	0.82	346.831
Unit 3	0.82	342.849

much stronger. The effect of strong layer is dominant, and the distribution of ΔT_{grad} is similar to that of type C because the depth of layer is shallower than middle.

The numerical calculation suggests that modeling error occurs if the true depth of gradient layer is shallower or deeper than that of the assumed, such as types C and E. It

makes the error increase at the point far from the origin. If the buoy stays stable near the array centroid, the modeling error hardly occurs because the contribution of x_s can be ignored. In this case, the estimated value as the gradient parameter includes the information of depth and thickness of layer. Therefore, the assumption for sound speed structure in this study is basically appropriate for observation near the array centroid. If the buoy stays stable at the point far from the centroid, the modeling error could be proven fatal. Yokota and Ishikawa (2019a) proposed estimating the contributions of x_u and x_s to ΔT_{grad} separately. This method can reduce the modeling error irrespective of the ranging position. If we intended to introduce their idea for a point survey, we would be faced with another problem:

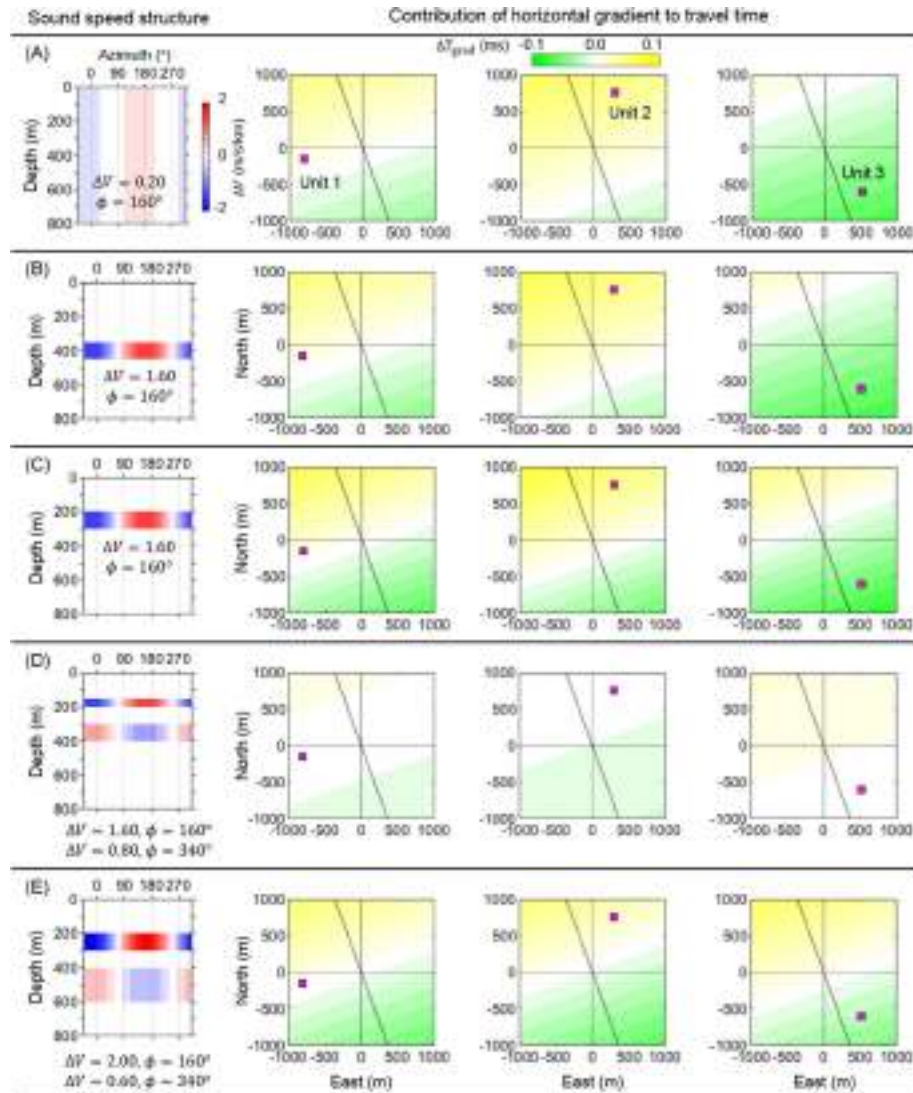


Fig. 10 Numerical calculation for the contribution of horizontal gradient of sound speed for five types of structure to observed travel time, which is denoted by ΔT_{grad} in Eq. (10). The magnitude ΔV and azimuth ϕ , of sound speed gradient were given by the displayed value. The color scale in three right figures shows the distributions of ΔT_{grad} calculated for each unit by setting ranging position (x_s, y_s) within a range of -1000 to 1000 m

insufficient number of observation data because we have only three units. Accordingly, the depth of gradient layer is required to be determined by using the Monte Carlo method or some other calculation techniques in the case of point survey far from the array centroid.

Conclusions

We have been developing GNSS-A observation system on the moored buoy to monitor seafloor crustal deformation continuously. The sound speed structure in the near a warm current has heterogeneity that is main cause of seafloor positioning error. Some previous works proposed sound speed model assuming a sloping structure. We applied this model to our analysis using data acquired through vessel and obtained horizontal gradient of sound speed with seafloor unit position. To validate the estimated gradient, we measured sound speed at multiple points around the unit array and obtained the three-dimensional structure. A comparison with measured structure showed that the estimated gradient was appropriate.

Since the buoy we applied in this research is not equipped with the function of measuring sound speed, we needed to use the profile measured in the past. Then, we also compared the estimation result for sound speed variations using profile observed on other days. The maximum estimation error for averaged sound speed and magnitude of horizontal gradient were 0.11 m/s and 0.03 m/s/km, respectively. Therefore, the estimated ranging error for observation using buoy will be less than 9.0 cm. This suggests that the presented analytical method can detect seafloor displacement within a required accuracy.

We indicated that it is difficult to separate array displacement from horizontal gradient of sound speed when the buoy completely stops at the unit array centroid. We also suggested that the misinterpretation of the gradient layer depth causes modeling error, and it possibly affects array displacement determination when the moored buoy stays stable at the point far from the array centroid.

Abbreviations

CTD: conductivity, temperature, depth; ENU: east–north–up; GNSS: Global navigation satellite system; GNSS-A: GNSS-acoustic; rms: root mean square; STD: standard deviation

Acknowledgements

The authors are grateful to Kochi Prefecture giving permission to use the moored buoy for this survey. We also thank Dr. Akira Futamura and the crew of the research vessel “Yugemaru” owned by the National Institute of technology, Yuge College.

Authors' contributions

All authors participated in observation to obtain data used for analysis. NK developed the analytical software and performed analysis. The sound speed structure model used for analysis was designed by KT and NK. TK and YT

contributed to the development and improvement of observation system. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310: “A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements.”

Availability of data and materials

The datasets used and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan. ²Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 586 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan. ³National Institute of Technology, Kochi College, 200-1 Monobeotsu, Nankoku, Kochi 783-8508, Japan.

Received: 31 October 2019 Accepted: 22 April 2020

Published online: 13 May 2020

References

- Del Grosso VA (1974) New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *J Acoust Soc Am* 56(4):1084–1091. <https://doi.org/10.1121/1.1903388>
- Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, Sato M, Toyama S, Katayama M, Kawai K, Matsumoto Y, Yabuki T, Asada A, Colombo OL (2006) GPS/acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planet Sp* 58(3):265–275. <https://doi.org/10.1186/BF03351923>
- Honsho C, Kido M, Tomita F, Uchida N (2019) Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake revisited: application of an improved GPS-acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure. *J Geophys Res Solid Earth* 124(6):5990–6009. <https://doi.org/10.1029/2018JB017135>
- Ikuta R, Tadokoro K, Ando M, Okuda T, Sugimoto S, Takatani K, Yada K, Besana GM (2008) A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai trough. *J Geophys Res Solid Earth* 113(B2). <https://doi.org/10.1029/2006JB004875>
- Kato T, Terada Y, Ito K, Hattori R, Abe T, Miyake T, Koshimura S, Nagai T (2005) Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. *Earth Planet Sp* 57(4):297–301. <https://doi.org/10.1186/BF03352566>
- Kato T, Terada Y, Tadokoro K, Kinugasa N, Futamura A, Toyoshima M, Yamamoto S, Ishii M, Tsugawa T, Nishioka M, Takizawa K, Shoji Y, Seko H (2018) Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. *J Disaster Res* 13(3):460–471. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0460>
- Kido M (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean. *Earth Planet Sp* 59(8):e33–e36. <https://doi.org/10.1186/BF03352027>
- Kido M, Imano M, Ohta Y, Fukuda T, Takahashi N, Tsubone S, Ishihara Y, Ochi H, Imai K, Honsho C, Hino R (2018) Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. *J disaster res* 13(3):472–488. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0472>
- Kido M, Osada Y, Fujimoto H (2008) Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements. *Earth Planet Sp* 60(3):229–234. <https://doi.org/10.1186/BF03352785>
- Spiess FN, Chadwell CD, Hildebrand JA, Young LE, Purcell GH Jr, Dragert H (1998) Precise GPS/acoustic positioning of seafloor reference points for tectonics studies. *Phys Earth Planet Inter* 108(2):101–112. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(98\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00089-2)
- Yasuda K, Tadokoro K, Taniguchi S, Kimura H, Matsuhiro K (2017) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the central Nankai trough, Japan. *Geophys Res Lett* 44(8):3572–3579. <https://doi.org/10.1002/2017GL072918>
- Yokota Y, Ishikawa T (2019a) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography: GNSS-A as a sensor for detecting sound speed gradient. *SN Appl Sci* 1:693. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0699-6>

- Yokota Y, Ishikawa T (2019b) Shallow slow slip events along the Nankai trough detected by GNSS-A. *Sci Adv* 6(3):eaay5786. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5786>
- Yokota Y, Ishikawa T, Watanabe S (2019) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography. *Mar Geophys Res* 40: 493–504. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9362-7>

Publisher's Note

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

Submit your manuscript to a SpringerOpen[®] journal and benefit from:

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

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)

リアルタイム・連続海域観測

名古屋大学大学院環境学研究科 田所敬一

南海トラフ域に展開されている海域の基盤・準基盤観測網等で取得されたデータは、プレート間固着状態の空間分布や海域で発生した地震の実体の解明、さらには浅部スロースリップの検出など、様々な研究に役立てられている。これらの観測（網）は南海トラフ地震臨時情報に基づく防災対応のあらゆるケース、全ての段階において貢献が期待されるが、そのためには、最新の観測データをいつでも、すぐに、そして誰でも見ることができる体制、すなわち連続・リアルタイム観測の実現が不可欠である。本稿では、海域の基盤・準基盤観測網等による連続・リアルタイム観測の実力と現状、さらに展望についてまとめる。

1. 海底諸観測の「南海トラフ地震臨時情報」への貢献

南海トラフ沿いで発生した現象が異常かどうかの調査を行う、あるいは調査結果を公表するにあたり、「南海トラフ地震臨時情報」が発表されることになった。これに基づく防災対応のあらゆるケース（半割れ・一部割れ・ゆっくりすべり）に対し、全ての段階（防災対応期間突入時・期間中・終了時、さらにその後）において、海域諸観測の貢献が期待される。

「半割れ」（巨大地震警戒）と「一部割れ」（巨大地震注意）のケースでは、防災対応実施期間（以下「対応期間」という）突入時には、その決定の判断材料となる現象の規模（空間スケール）等の情報を提供する役目を担うことになろう。一部割れのケースでは、調査対象となった破壊の規模がMw7.0以上であったことの判断には、海域諸観測の結果が重要な役割を担うことになる。半割れと一部割れのケースでは、対応期間は自動的に1週間を基本とすることとなっている。しかしながら、その期間中に何の情報も出さないというわけにはいかない。対応期間突入後の状況の推移等について「南海トラフ地震関連解説情報」として発表する必要があるばかりではなく、特にまだ被害を受けていない地域等（社会）からの要請で、現状に対する観測に基づいた理学的解釈が逐次求められることは想像に難くない。

「ゆっくりすべり」のケースでは、防災対応期間突入にあたり、「プレート間の固着状態が明らかに変化したか」を判断する必要がある。そのため、ゆっくりすべりが特にトラフ軸の近くで発生した場合は、海域での観測結果が決定的に重要となる。同ケースでは、防災対応の期間は「すべりが変化していた期間と概ね同程度」とされているため、海域諸観測データを中心に、すべりの収束時期やすべりの範囲の拡大または移動の有無といった状況把握を行い、対応期間の終了を決めることになろう。また、ゆっくりすべりが収まったと判断された後も、その後の状況を注視する必要がある。このことは、「半割れ」と「一部割れ」のケースでも同じである。

異常な現象についての調査は、概ね30分後には開始され、約2時間後には判断結果が発表される。よって、最新の観測データをいつでも、すぐに、そして誰でも見ることができる必要がある。また、異常であるとの判断を下すには、平時において正常な状態を知っておかなくてはならない。このとき、状態の「平均値」だけではなく、観測・推定精度や手法に起因する観測の限界も加味した上でその「ゆらぎ」も知っておく必要があることに注意しなければならない。そうすると、リアルタイムでの連続観測（モニタリング）が不可欠との結論に至るのは必定である。モニタリングとは連続観測に基づいた常時監視であるが、それだけでは不十分であり、リアルタイム性も要求される。南海トラフの地震に向けてこれからプレート境界の状態がどんどん変わってゆく中、特に正常な状態の把握のためのデータ蓄積に時間がかかる測地観測においては、南海トラフ全域を密にカバーするリアルタイム・連続観測の早期実現が望まれる。

2. 南海トラフにおける基盤・準基盤海底観測網の現状と現象検知の実力

地震調査研究推進本部において、ケーブル式による海底地震・津波観測は基盤的観測として、GNSS/音響方式の海底地殻変動観測は準基盤的調査観測としてそれぞれ位置づけられている。海底ケーブル観測網は、気象庁のケーブル式常時海底地震観測システム、および防災科学技術研究所の地震・津波観測監視システム（DONET1, DONET2）が既に運用されている（図1左）。観測網の空白域となっている土佐湾から西の海域には、新たにケーブル式の「南海トラフ海底地震津波観測網」（N-net）の構築が始まっており、南海トラフ全域をカバーする海底地震・津波観測網は完成間近である。一方、GNSS/音響方式の海底地殻変動観測網は、海上保安庁と大学との協力の下、南海トラフ域全域に観測網が展開されている（図1右）。海上保安庁では、観測点密度が不足しているトラフ軸近傍を中心に観測網の拡充が開始されている。

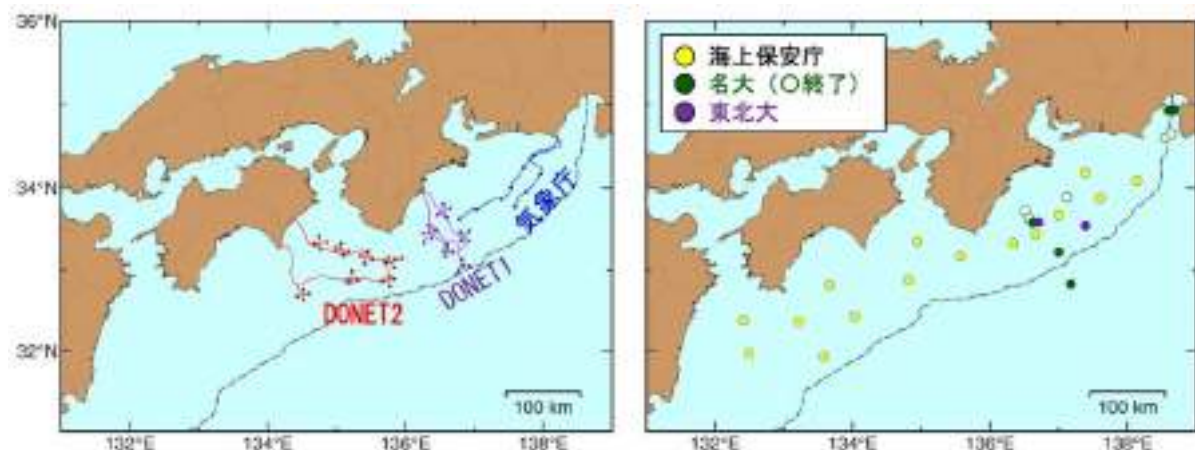


図1 現在の南海トラフ域における（左）ケーブル式海底地震・津波観測網，および（右）GNSS/音響方式による海底地殻変動観測網（平成31年4月現在）．地震調査研究推進本部のまとめによる資料「地震観測施設一覧」をもとに作成．

海底ケーブル式の観測では，すでにリアルタイム・連続観測が実現されており，データの流通や公開も行われている．一部では自治体や民間企業でのデータの活用による社会実装も進んでいる．一方，海底地殻変動観測では，データ公開の試みが始まっている[Yokota *et al.*, 2018]ものの，リアルタイム・連続観測については後述の通り未だ技術開発の途上であり，ケーブル式の観測に比べて遅れをとっている．

DONET1に装備されている地震計では，2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震(Mw5.8)の地震がプレート境界で発生したことが明らかになった．また，この地震では，DONET1に装備または接続されている水圧計によって1~2cm程度の上下変動も検出された[Wallace *et al.*, 2016]．このように比較的小規模な地震であっても，その実体解明に役立つデータがケーブル式海底観測網で得られることが実証され，臨時情報への貢献でもケーブル式海底観測網が大きな戦力となることは間違いない．

GNSS/音響方式による海底地殻変動観測では，実海域観測が開始された直後の2004年9月4日に発生した紀伊半島南東沖の地震(Mw7.3, 7.5)による20~30cm程度の水平変位が観測された[Kido *et al.*, 2006; Tadokoro *et al.*, 2006]．M8級以上の地震による1mを超える変位は本方式で容易に観測することができるが，M7級の地震による数十cm規模の変位が観測できるようになったのは技術開発の成果によるところが大きい．しかし，2009年8月11日に駿河湾内で発生したMw6.3の地震では，少なく見積もっても2cm程度の水平変位が認められたものの[名古屋大学環境学研究科, 2010]，M6程度の地震による数cm規模の変位を明確に捉えるためにはさらなる高精度化が必要である．また，プレート境界地震が観測点直下で発生した場合，その規模がMw6.8であったかー

部割れの閾値に相当するMw7.0であったかの区別は，現状の実力（水平変位の検出能力）でも可能である．しかし，地震時の変位は断層の外側では急激に小さくなるため，現在よりも狭い（理想は対象とする地震の断層長さ以下の）間隔で観測点を設置することが望ましい．

海底観測による最近の顕著な成果として特筆すべきは，浅部スロースリップの検出である．DONET1に接続されている孔内水圧計では，数日~数週間にわたる浅部スロースリップが観測された[Araki *et al.*, 2017]．水圧計で長期の地殻変動を捉えるには，海洋変動の補正と水圧センサのドリフト問題の解決が不可欠である．センサドリフトについては，小型水圧計での現場校正[Chadwick *et al.*, 2006]や室内での加圧試験による挙動の解明が進められている．海上保安庁による海底地殻変動観測では，紀伊水道沖のトラフ軸近傍でのスロースリップ(Mw6.6程度)が観測された．これには観測時間の短縮のための技術開発によって高頻度観測が実現したことが大きく寄与している．

3. 海底地殻変動の連続観測に向けて

近年，国土地理院のGEONETの観測結果のみならず，2005年前後から継続されてきたGNSS/音響方式による海底地殻変動観測の結果を加えることにより，プレート間固着状態の空間分布の詳細が明らかになってきた[Yokota *et al.*, 2016; Nishimura *et al.*, 2018; Kimura *et al.*, 2019]．これらは津波想定等の高度化[例えばWatanabe *et al.*, 2018]に活用されるべき重要な成果ではあるが，現段階では長期間の平均的な固着状態を見ているに過ぎない．Ochi[2015]は，GEONETの観測データをもとに，14年間にわたるプレート間固着状態のゆらぎを報告している．東北地方太平洋沖地震[Ito *et al.*, 2013]や2014年にチリ沖で発生

したイキケ地震 (Mw8.2) [Ruiz *et al.*, 2014] の前には、プレート間固着の剥がれとも言えるべきイベントが発生していたことが報告されている。このような平均的な固着状態を乱す「ゆらぎ」を海底地殻変動観測で捉えるためには、時間分解能の向上、すなわち連続観測の実現が不可欠である。時間分解能の向上は、測位誤差と非定常的変動の分離のみならず、地震時変動と余効変動の分離、さらには定常的地殻変動の推定精度の担保のためにも必須である。海上保安庁では高頻度観測が実現しているが、それでも今のところ1観測点あたりの観測回数は年に6~8回程度が限度であり、現行の船舶を用いた有人での観測スタイルが連続観測実現のネックとなっている。したがって、船舶に依存せず新たな海上プラットフォームを用いた無人での観測方式を開発しなければならない。

海底地殻変動の連続観測に利用できる海上プラットフォームとしては、自律航行できる無人艇とブイが挙げられ、それぞれ移動観測と定点観測に活用することができる。無人艇の運用については、平成31/令和元年になって法整備等が進んだ。無人艇は「船舶安全法」の改正によって特殊船として明確に位置づけられるとともに、「船舶職員及び小型船舶操縦者法」の改正によって無人での運航が可能となった。また、国土交通省から「遠隔操縦小型船舶に関する安全ガイドライン」が公表された。これらの法整備等によって、我が国で無人艇を運用するにあたっての法的な障壁は一切なくなった。米国やシンガポールでは、無人艇の海底地殻変動観測への導入が始まっており、我が国はすでに周回遅れの状況であると言わざるを得ない。ブイを用いた観測については、我が国でも開発や試験的観測が始まっている [Kido *et al.*, 2015, 2018; Kato *et al.*, 2018] (図2)。ブイを用いてリアルタイムでの連続観測を行うにあたっての要素技術、例えばブイ上での音響データの自動処理、地上からの遠隔操作による観測頻度の変更を行うオンデマンド観測の技術などは着々と開発が進んでいる。しかしながら、未だシステム全体としての実用化には至っていない。さらに、リアルタイム観測を行うためには、海域と陸との安定的な通信手段の確保が必須である。現在は商用の衛星通信を利用しているが、今後はIoT時代を見据えて開発されようとしている通信衛星の活用なども視野に入れる必要がある。

4. おわりに

本稿では、南海トラフ域の海域で行われている基盤・準基盤観測の実力と、特に海底地殻変動の連続・リアルタイム観測の必要性について述べてきた。連続・リアルタイム観測が実現した後は、肝心なイベントが発生した際に観測網が役立てられるよう、基地局 (サーバ)、通信、電源の安

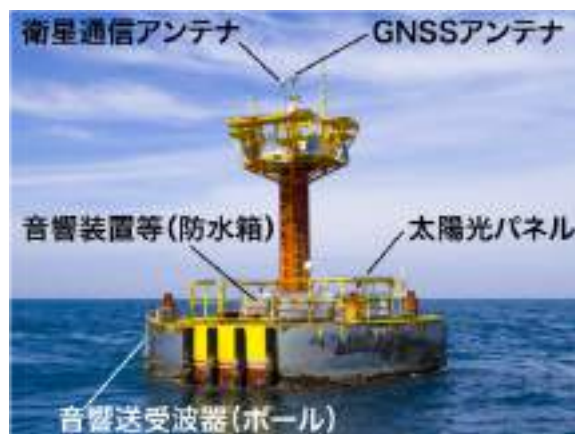


図2 著者らがリアルタイム海底地殻変動連続観測システムの開発に用いている係留ブイ

定的な運用と運用体制の整備による持続可能性の担保を視野に入れておかなければならない。

最後に、南海トラフ地震臨時情報をはじめとする国の実践的防災に実観測が貢献するためには、次の3つの協調が重要であることを述べておきたい。まず一つ目は、地震と測地、測地の中でも上下変動、水平変動、傾斜、ひずみなど、観測項目間の協調である。水圧計は上下変動の観測に対して圧倒的に優れたポテンシャルを有しており、海底地殻変動観測は水平変動の観測に優れている。南海トラフ域では相補的なデータが取得できる基盤・準基盤観測網による観測や、これらに付随する観測技術をフル活用して多項目観測を継続的に推進することが重要である。二つ目は海陸観測の協調である。南海トラフの想定震源域は海陸に跨がっているため、海陸に展開されている様々な基盤・準基盤観測網等を一つの大きな観測網と捉えてモニタリングを推進していくとの考え方が必要である。三つ目はシミュレーションとモニタリングとの協調である。これまでの海溝型地震の予測は、主に統計的手法に基づく時間依存を考慮しない手法に依っていたが、物理モデルに基づくシミュレーションとこれによる推移予測に移行してゆくことにより、その高度化が果たされる。このことは、地震調査研究推進本部の「第3期総合基本施策」に明確に記されている。地震発生予測研究の高度化にも観測が不可欠であることは言うまでも無い。これら3つの協調こそが、本当に役に立つ観測・観測網の未来を拓くことになると信じて疑わない。

参考文献

- Araki, E., *et al.*, 2017, Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science*, **356**, 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120
Chadwick, W. W., *et al.*, 2006, Vertical deformation monitoring at Axial Seamount since its 1998 eruption

- using deep-sea pressure sensors, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **150**, 313–327, doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.07.006.
- Ito, Y., et al., 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, **600**, 14–26, doi: 10.1016/j.tecto.2012.08.022
- Kato, T., et al., 2018, Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, *J. Disaster Res.*, **13**, 460–471, doi: 10.20965/jdr.2018.p0460
- Kido, M., et al., 2006, Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planet. Space*, **58**, 911–915, doi:10.1186/BF03351996
- Kido, M., et al., 2015, Progress in the Project for Development of GPS/Acoustic Technique Over the Last 4 Years, In: Hashimoto M. (eds) *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*, *International Association of Geodesy Symposia*, vol 145, Springer, Cham, 3–10. doi: 10.1007/1345_2015_127
- Kido, M., et al., 2018, Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation, *J. Disaster Res.*, **13**, 472–488, doi: 10.20965/jdr.2018.p0472
- Kimura, H., Tadokoro, K., and Ito, T., 2019, Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations, *J. Geophys. Res.*, **124**, 6140–6164, doi: 10.1029/2018JB016159
- 名古屋大学環境学研究科, 2010, 2009年8月11日に発生した駿河湾の地震による海底地殻変動観測, 地震予知連絡会会報, **83**, 383–385.
- Nishimura, T., 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, **14** (2), 535–551, doi:10.1130/GES01529.1
- Ochi, T., 2015, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **431**, 8–14, doi:10.1016/j.epsl.2015.09.012
- Ruiz, S., et al., 2014, Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake, *Science*, **345**, 1165–1169, doi:10.1126/science.1256074
- Tadokoro, K., et al., 2006, Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23306, doi:10.1029/2006GL026742
- Wallace, L. M., et al., 2016, Near-field observations of an offshore Mw 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, **121**, 8338–8351, doi:10.1002/2016JB013417
- Watanabe, S., Bock, Y., Melgar, D., and Tadokoro, K., 2018, Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy, *J. Geophys. Res.*, **123**, 2448–2461. doi: 10.1002/2017JB014799
- Yokota, Y., 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, **534**, 374–377, doi:10.1038/nature17632
- Yokota, Y., Ishikawa, T., and Watanabe, S., 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data*, **5**:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182

GNSS を用いた総合防災ブイシステム

加藤照之

(神奈川県温泉地学研究所)

■ はじめに

「GPS 津波計」という名前を聞いたことがあるでしょうか。海に GPS 受信機を搭載したブイを浮かべておいて、津波が沿岸に襲来する前に検知して住民の早期避難に役立てようとする装置です。これは私が 20 年以上前にアイデアを思いつき、共同研究者と共に開発してきたものです。本稿ではこの装置の開発の歴史を振り返り、今後どのような可能性があるのか、検討したいと思います。GPS は Global Positioning System の略で、米国で開発された、衛星を用いて地上の位置を精度よく決める装置です。1970 年代から開発が始められ、日本でも 1980 年代に入って受信機の導入が進みました。その後、ロシアや EU、中国なども安全保障の観点からそれぞれ独自の衛星測位システムが開発され、日本でも「みちびき」という名称で知られる衛星測位システムが導入されています。そこで、これらの衛星測位システムを総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) という名称が改めて付けられました。タイトル及び次節以下では GPS と GNSS を混在させていますが、同じものと考えてください。

■ 「GPS 津波計」開発の歴史 ～三崎市での実験～

私は 2018 年 4 月から温泉地学研究所に在籍していますが、それまでは東京大学地震研究所で GPS を用いた地殻変動の研究を行っていました。最初は津波のことは考えておらず、地上に置いた GPS 受信機の

位置を cm 精度で計測し、それを繰り返すことで地面の動きを知ることが研究課題としていました。これは研究を始めた 1980 年代の当時としては大変新しい技術で、日本列島やプレートが日々計測できるということで大変注目されてきました。

そんな研究をしていたある日、この GPS 受信機を海に浮かべたブイに搭載すれば海面の動きがわかるだろう、それなら津波が来たらそれを検出して海岸にいる人々にデータをリアルタイムに伝送すれば津波からの避難に役立てられるのではないかと、思い立ちました。ですが、自力でブイを設置するなど思いもよらないことだったので、このアイデアは単なる思い付きですぐに忘れしてしまうくらいのものでした。それから何年かたった 1996 年頃のある日、日立造船株式会社技術研究所の方が私の研究室を訪ねてこられて、GPS を

使った応用研究をやりたいのだから何か良い考えはないか、と相談を持ちかけられました。造船会社とえば海で使うものがよい、と考えその時ふと上記のアイデアを思い出して提案してみました。この時訪ねてこられた方は現在に至るまで私と共同で研究が続けられている寺田幸博さんという方です。

大変良いアイデアと賛同していただき、すぐに実験に取り掛かりました。また開発の体制として会社内で数名の方のチームが発足しました。このような機動力は大学ではなかなか実現できません。こうして、まず試作機が作られ、神奈川県三崎市にある東大の臨海実験場敷地内の地震研観測所を基地として小網代湾にブイを浮かべました。図 1 がその時の写真です。数名で持ち上げられるくらいの大きさです。小さいながらもこのブイに GPS 受信機・アンテナ、



図 1 1997 年 1 月小網代湾で最初に使われた GPS ブイ。左：陸上で調整しているところ。右：湾内に浮かべたブイ。長い棒は無線送信アンテナ。短い棒の先についている平たい物体は GPS アンテナ。

バッテリー、無線機などを搭載しています。このブイを湾内に浮かべて、ブイから送られてくるデータを観測所で受けてパソコン上で海面変動をモニターすることに成功しました。この成功で、我々は大いに自信がわいてきました。

～採用されなかったブイ～

図1で示したようなブイですと、海面の変動に伴ってブイが揺れます。ブイの上にGPSのアンテナが設置されているとブイの揺れに伴ってアンテナの位置も揺れてしまいます。津波の計測で最も重要なのは海面の上下変動です（横方向の流れも重要なのですが、ここではとりあえず考えません）が、ブイの揺れが上下動の誤差になってしまえば困ります。そこで、考えられたのはスパー型のブイと言って、縦長の形状を持つものです。これは釣り好きの方ならわかると思いますが、縦長の形状を持つブイで重心位置が海面下のなるべく深いところにあるとブイの先端だけが海面上に出ていることになり、海面が揺れてもブイはそれほど揺れません。釣りであれば、魚の微妙な食いつきがわかるようにするために浮きがそのような形状になっています。ところが、ブイを細長い縦長にしてしまうと受信機や無線機を搭載

するスペースがとれません。そこで、これらを搭載するブイを別途用意し、2つのブイを少し離して設置する、というシステムを考えました。図2がそれです。アンテナを搭載した縦長のブイをセンサーブイ、その他の機材を搭載したブイをサポートブイと呼び、これらをケーブルと浮きで保持しています。これを用いた実験も同じく小網代湾で行い、成功を収めました（Kato et al., 2000）。個人的にはこれでよいと思ったのですが、他の方に言わせると、このシステムは複雑すぎ、これを外洋などに設置すると高波などであつという間にダメージを受けてしまうと言われ、あえなく却下となりました。

～最初の本格的な実験と最初の津波計測～

そこで、単独のブイシステムで開発を進めることにしましたが、機器開発のためには資金が必要です。そこで文部科学省科学研究費補助金の支援を受けることになりました。幸い申請が採択されて、はじめて自前の本格的なブイシステムを作ることができました。同時に、これを用いた試験観測をどこで実施するかということで考えましたが、たまたま日立造船OBの方で大船渡市出身の方がおいでになりました。大船渡市を

含む三陸沿岸一帯は津波の常襲地域です。地元の方々も津波の災害対策に対する意識は大変高く、早速大船渡市の協力の下、大船渡市沖で試験観測をすることとなりました。津波をいち早くとらえて沿岸住民の避難に役立てるためにはできるだけ沖合に設置する必要がありますが、まだ試験観測ということもあり、海岸から1.6km程度のところに設置することとしました。

ところで、データ解析の方法ですが、いわゆるRTK（リアルタイムキネマティック）と呼ばれる方式を採用しました。これは、カーナビなどで使われている単独測位とよばれる方法と異なり、地上でもブイ上と同時にGPS観測を実施し、データをリアルタイムで比較することにより、地上の位置に対するブイの相対的な位置を決定するというやり方です。このような方法によってブイの3次元的な位置、特に上下成分を1秒ごとに数cmの精度で決定することができます。

図3は大船渡に設置されたブイの写真です。全高は8mくらいあり、ブイの直径は2.8mで重さ12tonと、図1のプロトタイプのブイと比べたらはるかに大きなブイになっています。外洋ではこのくらいの大きさでないとだめなのということがわか

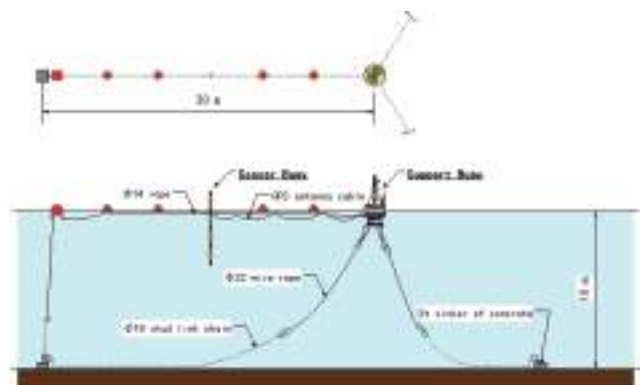


図2a 1999年3月の実験で用いられたGPSブイシステム。センサーブイ（Sensor Buoy）の先端にGPSアンテナが装着され、サポートブイ（Support Buoy）にGPS受信機や無線送信装置が搭載されている。（Kato et al., 2000）



図2b 小網代湾に浮かべた図2aの実験機。



図 3 2001 年 1 月に大船渡湾に設置された GPS 津波計。

ります。当然のことですが、海は沖に行くほど深くなります。海底に大きなコンクリートブロックを置いて錨とし、鉄製のチェーンによってブイを係留することになります。係留索が短すぎると、海流によって引っ張られたブイが傾いてしまうことも考えられます。ある程度の長さをもってブイと結び、係留索がゆるやかなカテナリー（懸垂線）を描くようにします。こうすることによりブイが直立するようになります。浮力があるとはいえ、鎖は重いのでブイ＋係留索の重心はかなり海面より低いところに來ますので、大きな波が來てもブイはほとんど傾かないことがわかりました。

ブイは 2001 年 1 月に設置されました。ブイからは 1 秒ごとにデータが無線地上局に送られ、地上局で同時に観測されたデータと比較することで、毎秒のブイの位置が計測されます。このデータは誰でも見ることができるよう Web 上で公開されました。地元大船渡市にもご協力いただき、市役所や消防署にもモニターを設置して見ていただくこと

としました。こうして、はじめての外洋実験がはじまりましたが、たまたま同年 6 月にペルーで発生した地震による津波を捉えることに成功しました。図 4 にその時のデータを示します。図 4a は計測されたブイ上のアンテナ変位データの上下成分です。ブイは津波だけでなく通常の風による波（波浪）によっても動きますから、両方の影響が含まれています。なお、ゆるやかに一日に 2 回程度変動する成分は月や太陽による潮汐成分です。この時、ペルー地震による津波の振幅は 10cm 程度でしたが、波浪による変動成分は 1m 近くにもなっているの元データでは津波を目視することができま

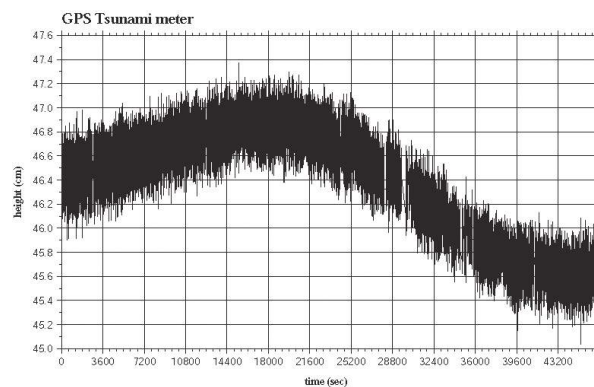


図 4a 大船渡実験で得られた 2001 年 6 月ペルー沖地震に伴う、地震による津波の変動を含んだ時間の GPS 津波計の原記録。大きくて緩やかな変動は潮汐、ぎざぎざとした細かい変動は風などによる波浪。

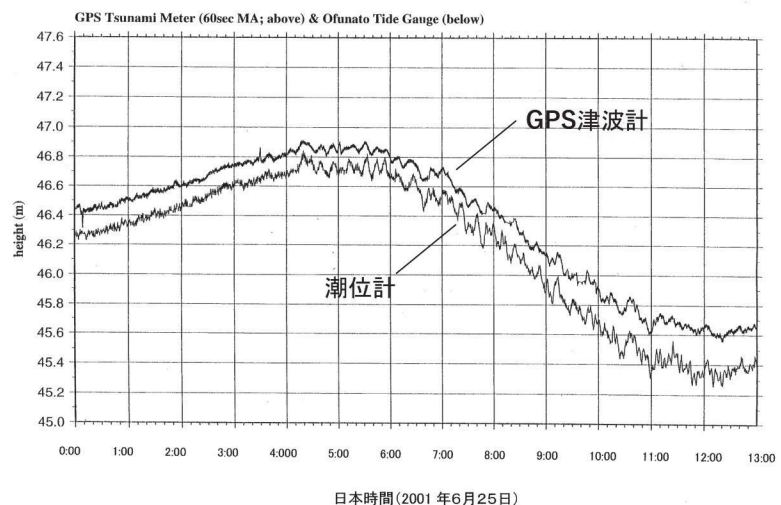


図 4b (上) 図 4a の記録から 60 秒移動平均をとることによって風による波浪の成分を取り除いた記録。(下) 大船渡検潮場で得られた海面変動記録。日本時間 2001 年 6 月 25 日 4 時 10 分頃に津波の到着が見て取れる。

せん。しかしながら、波浪と津波では波の周期が異なります。津波の周期は数分から長いもので1時間以上の周期帯を持っています。一方、波浪の周期はせいぜい数十秒程度です。そこで、得られた上下動成分のデータに短周期をカットするようなフィルターを作用させたものを図4bに示します。同図にはブイの近くの大船渡港に設置されている潮位計の記録も示してあります。この図を見ると、振幅が10cm程度の波が明瞭に見て取れます。また、その波形は潮位計の記録とよく似ていることがわかります。これがブイに搭載したGPS装置によって計測されたはじめての津波記録となりました。“GPS津波計”の誕生です。

～“GPS津波計”の実用化へ～

大船渡市沖での成功によって、我々は大いに勇気づけられました。この実験は3年程度で終了し、その間に発生した2003年十勝沖地震による津波なども検出することができました。そこで、我々は次のステップとして、より遠くの沖合に設置したブイでの実用化に向けた試験観測

を行うことになりました。場所も、三陸と同じように大きな津波被害を受けてきた四国の室戸岬沖に設置することとしました。ここでも、地元室戸市の多大なる協力をいただくことができました。ブイの設置場所としては室戸岬の沖合13km程度としました。これによって、より早い津波検出が期待され、有効な津波災害軽減効果が期待されました。なお、この実験から、我々のプロジェクトに波浪観測の立場から大きな興味を持ってくださった港湾空港技術研究所の永井紀彦さんにも研究チームに加わっていただきました。

図5aが室戸沖に設置したGPS津波計です。全高16.0m、全幅3.4m、重量16tonと大船渡のブイから一回り大きくなっています。2004年から観測が始まったのですが、早速その年の9月4日に紀伊半島沖で発生した地震による津波を捉えることができました(Kato et al., 2005)。図5bにその時の記録を示します。この時系列には数値シミュレーションによる結果も示されていますが、両者がよく合っていることが見て取れると思います。津波の発生原因な

どを探るために数値シミュレーションが使われます。計算がうまく行っているかどうかを検証するために、それまでは港に設置されている潮位計を主に使っていましたが、このような海岸付近の観測データには津波が海底の摩擦によって減衰するなど、数値計算に使われていた線形長波近似では表しきれない誤差や複雑な海岸線の影響などが含まれてうまくいきません。一方、沖合で津波を計測すると、そのような影響を受けずに済みますので発生原因として与えたモデルがよいものであれば計算値と観測値がよく一致するということがわかった、ということになります。こうして、我々のGPS津波計が学術的にも意義のある計測データを提供できるということが認識されるようになりました。また、最上段には室戸港の検潮記録が示されていますが、津波の到来時刻がブイの記録よりも10分程度遅れていることがわかります。これでブイの記録を津波の早期警戒に使えるそうだとことがわかりました。

このような成功を受けて永井紀彦さんのご尽力により国土交通省の



図5a 2004年4月年室戸岬沖に設置されたGPS津波計。

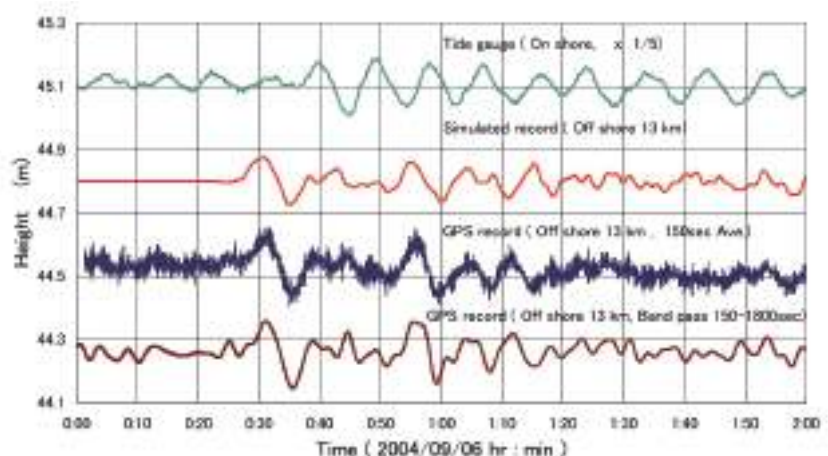


図5b 室戸岬沖で取得された紀伊水道沖地震による津波記録。上から、室戸験潮場で得られた海面変動記録、数値シミュレーションで予測されたGPSブイ位置の海面変動推測値、GPSブイで取得された上下変位記録（原記録に150秒の移動平均操作後のデータ）、及び前記の原記録に150～1800秒のバンドパスフィルターをかけたデータ。

全国港湾海洋波浪情報網ナウファス（英語名 NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS）に取り入れてくださることとなりました。このシステムは我が国の沿岸の波浪を観測してリアルタイムで情報を発信するシステムです。それまでは主として海底に置かれて機器によって超音波を用いて波高等を計測していましたが、保守の容易さ等から GPS ブイを一部に導入することになりました。設置は 2008 年頃より開始されました。但し、その目的は波浪監視にありましたので名称は“GPS 波浪計”と呼ばれることとなりました。前節で紹介したように、ブイで計測される海面高変化は波浪も当然含まれます。むしろ波浪は常に観測されていて、津波は波浪に比べれば極めて稀に観測されるだけですから、両方を兼ね備えたシステムとして活用できれば費用対効果が大きくなると期待されるところです。

このようにして、GPS 津波計、いや、GPS 波浪計は 2011 年頃までに全国の沿岸に 15 点程度まで設置されました。そして、このナウファスによって配信されるデータは気象庁による津波の監視にも取り入れられることとなりました。なお、この GPS 波浪計はほとんどの場合沿岸から十数 km 程度のところに設置されています。これには理由があります。前に述べられていますが、このシステムで用いられているのは RTK と呼ばれるシステムです。これは陸地におかれた基準局に対するブイの位置をリアルタイムかつ相対的に決定する方式ですが、リアルタイムで解析を行うため誤差や雑音の影響を取り除くことが十分には行えません。そのため、位置の決定精度は基準局からの距離に依存し、高精度で位置を推定するためにはブイを陸の基準

局からあまり遠くにおけない、という制限が出てきます。cm 精度で海面高さを決定するにはブイの陸からの距離はせいぜい十数 km に設置する必要があります。もちろん、これでも津波がブイを通過してから陸に到達するまで 10 分くらいはかかりますので、情報が効率的に伝達できれば沿岸の人の避難には役に立つと考えられました。また、波浪を測る目的なので、沿岸で漁業や工事などを営む方への情報としては十分遠い沖合だということも考慮に入れていると考えられます。

■ 2011 年東北地方太平洋沖地震・津波の教訓

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の太平洋沿岸を巨大な津波が襲い 1 万 8000 人を超える多くの死者・行方不明者を出すことになりました。このことは GPS ブイを使えば津波の被害を防げるだろうと考えていた私にとってはとてつもないショックでした。役に立てると思っていたものが実は全然役に立てなかったのだ、

という事実はあまりにも重いものでした。しかし、ここで立ち止まってはいけなかったのか、を検証し、本当に役に立つものに改良していかななくてはなりません。

図 6 はこの時取得された三陸沖の GPS 波浪計データの一部です。データは津波が沿岸に到達するかなり前に捉えられていたことがわかります。地震が発生したのが 14 時 46 分、津波警報の第一報が出たのが 14 時 50 分でこの時は宮城 6m、岩手 3m というものでした。ところが、15 時過ぎになって沖合の GPS 波浪計に津波が到達し、数 m を超えるような津波が観測され始めました。津波を監視していた気象庁の職員が 15 時 10 分に気づくことになり、15 時 14 分に津波警報が宮城 10m 以上、岩手 6m に更新されました。岩手県の沿岸に津波が到達したのは 15 時 18 分です。しかしながら時すでに遅く、1 万 8 千人を超える多くの方の命が失われました。確かに、津波は海岸への到達よりかなり前に捉えられていたのですが、それが沿

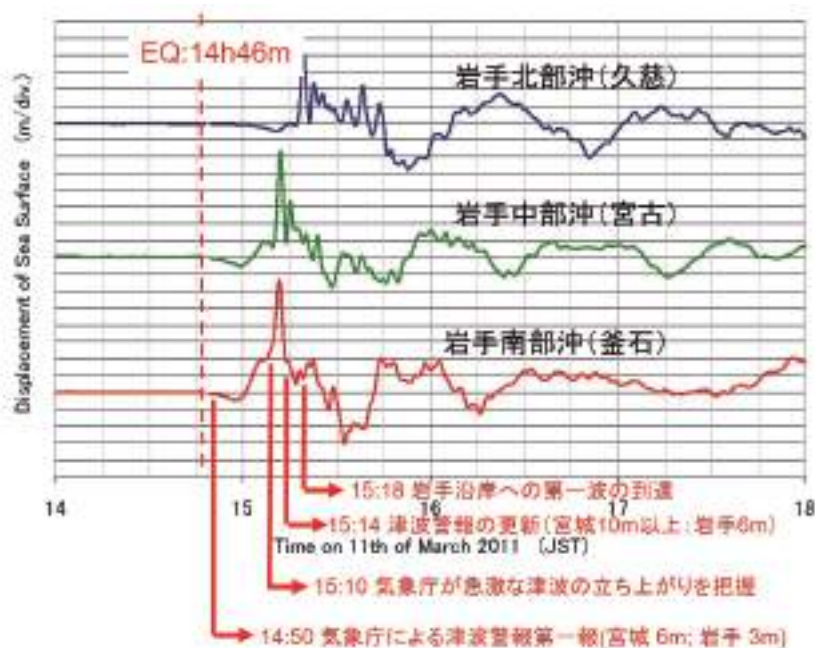


図 6 三陸沖の GNSS 波浪計で記録された 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による津波。

岸住民の避難行動にはつなげられなかったのです。

この原因は、ブイが沿岸から十数 km 程度と十分沖合には設置していなかったことが挙げられます。もっと沖合にブイが設置されていればそれだけ早く津波が捉えられ、より早い避難行動につなげられた可能性があります。なお、ここでは示していませんが、実はもう一つの問題がありました。それはリアルタイムでモニターしていたデータが最初の津波のブイへの到来を記録した直後に途切れてしまいました。これは多分、データ伝送の経路上の電源あるいはインターネット回線が切れたことによるのではないかと思います。というのも、現地では観測が続けられており、後日データを現地から回収して図 6 のように津波記録を復元できたのです。

これらのことから、2つの教訓を得ることができました。一つはブイを沿岸からもっと遠くに、例えば 50km 以上に、離さないといけない、ということです。また、海上からのデータを受ける地上局が震源の近くで電源断の影響を受けてはならない、ということです。これらのことから、2つの改善点が考えられました。

まず、測位の方式をそれまでの相対測位から精密単独測位に替えることです。GPS で精密な測位をする方

式としてはそれまで相対測位方式が主流だったのですが、1990 年代の終わりころから単独測位でも cm の精度で測位ができるようになってきました。この方式では、衛星の精密な位置と時計のデータ(精密暦と呼ぶ)が必要になります。それを即時的に入手することは難しかったのですが、衛星データを即時的に解析することやそこから求められた衛星の位置と時計のデータをインターネットから即時的にユーザが入手することが次第に可能になってきました。そこで、我々はこれらのことが可能な、米国で開発された PPP-AR という手法を用いることにしました。

また、沿岸からの距離が遠くなると、データの伝送のために地上の無線を使うことができません。そこで衛星通信を導入することにしました。衛星通信を用いれば震源からの影響を受けない遠くの場所で受けることが可能になり、データ断の恐れがなくなります。測位はブイ上で行うのが良いか、生データを陸上にとってそこで測位を行うのが良いか、という問題がありますが、ブイで取得した生データを 24 時間リアルタイムで陸に送って解析するとすると商用衛星ではデータ通信料が極めて高価になります。そこで、我々はまず陸上で精密測位に必要な衛星の位置と時計のデータを生成し、それを衛星

通信を介してブイ上の計算機に送り、ブイ上の GPS 機器から出力される生データを精密暦を用いて解析し、結果のブイ位置データのみを衛星通信で陸に送り返す、という方式をとることにしました。これですと、双方向の衛星通信が必要になるものの、通信データの量は GPS の生データを送るよりもはるかに少なく済むのです。

実験は、当時使われていた技術試験衛星「きく 8 号」という通信用の衛星を使わせていただくことにしました。これは JAXA が打ち上げた衛星通信用の試験衛星でそろそろ退役しようとしていたものです。この最後のミッションとして我々の GPS 津波計の双方向データ通信の実験を行ったのです。図 7 がその時に取得できたデータです。多少の遅れ(多分 1 秒以内程度)はあるものの、比較的安定して解を得ることができ、この結果をホームページ上でも公開することができました。この実験の成功に力を得て、我々は次のステップに進むこととしました。

■ 新たな展開と総合防災ブイへの挑戦

幸いなことに我々はふたたび科研費の採択を得て平成 28 年度(2016 年)から 5 か年計画で開発を進めることになりました。あいにくこの

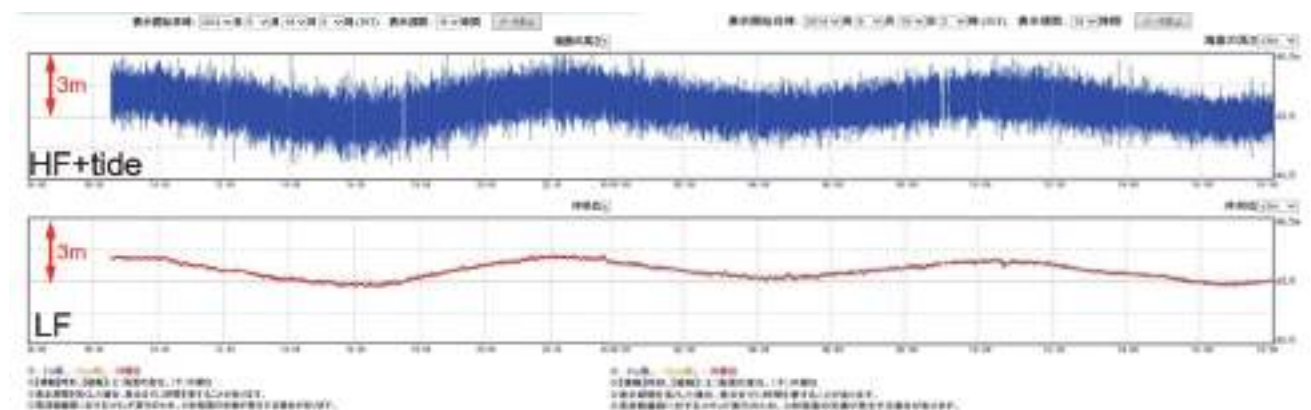


図 7 技術試験衛星「きく 8 号」で取得された GNSS ブイの記録(2014 年 6 月 18 日 6 時から 36 時間)。上段:高周波成分+潮汐。下段:低周波成分+潮汐。

技術試験衛星は最初の年度で基礎的な実験を行った後、軌道を離れて退役することとなりました。そこで、商用衛星による衛星通信を導入することとしました。幸い、Softbank 社には大変なご協力をいただき、格安での衛星通信を提供していただくことになりました。この新たな実験では、高知県のご協力を得て、県が高知県沖に設置している漁礁用のブイである海洋牧場と呼ばれるいくつかのブイのうち一基をお借りすることになりました。最近、海上にブイを設置するとそこに魚が集まってくるという習性を利用して、外洋にいくつかのブイを敷設しその周囲で漁業を行う方式が沿岸漁業のために自治体で次第に導入されつつあるようです。これらのブイに GPS 装置を搭載すれば、日本沿岸に相当高密度な GPS 津波計測網ができあがりそうに思うのですがどうでしょうか。

ともあれ、我々は足摺岬沖約 40 km のところに敷設されている海洋牧場 No.18 のブイを科研費の期間中借用することとなりました。このブイに GPS 装置一式と衛星通信用の設備及び太陽電池と蓄電池を入れた箱などを搭載し、2018 年の 11 月からこのシステムを稼働しはじめました。ところが、開始してすぐにデータが止まってしまいました。どうやら電力不足であったようです。狭いブイの上に GNSS 機器の他、解析用の小型計算機、衛星通信のための装置などを搭載したため、電力が不足したようです。このあと、我々のプロジェクトはいろいろな悪状況が生じてなかなか進まなくなりました。例えば、ブイの周辺の潮流が思いのほか速く、作業しようとしてもなかなか船をつけることができません。そのために数か月も待つてしまうようなこともありました。また、太陽電池を増設したり、充放電制御装置

を入れ替えたりなど様々な手を尽くしましたが、本質的な解決に至りませんでした。どうやら太陽電池が当初の想定通りの発電ができていないのではないか、ということになりました。そこで、再度電源部分を再検討し、太陽光パネルをさらに増強するなどの対策をとりました。ようやく、観測が順調にいくようになったようです。

ところで、これまでは GNSS ブイを用いた津波早期警戒の可能性だけを検討してきたのですが、もし、その観測が海洋のどこでも可能になるとしたらもっと多くの応用技術につながっていくのではないかと考えるようになりました。その第一の応用というのは、海底地殻変動観測への応用です。

これには少し説明が要るようです。1980 年代の初めころ、米国の大学研究者が開発した手法ですが (Spiess et al., 1998)、海底に音響を送受信できる装置 (トランスポンダーなどと呼びます) を 3 基、だいたい正三角形になるように配置します。海上の船からトランスデューサと呼ばれる送受波装置で音波を送出し、海底の 3 基のトランスポン

ダーから戻ってくる音波を記録します。それぞれのトランスポンダーへの音波の送信時刻と受信時刻の差から、船からトランスポンダーまでの距離が計測できます。この計測値からトランスポンダー 3 個で構成される三角形の形が決まります (図 8)。なお、船の位置を正確に決めておく必要がありますがこれは GNSS を使えばできます。ただ、音響を用いた距離の計測では海中の水温や塩分などが時間的に変わることによって見かけの距離がメートルの桁で大きく変わります。そうすると、海面から海底を見た場合、距離が長く計測されれば、トランスポンダーで構成される三角形がより遠くに大きく見え、距離が短く計測されれば、三角形は近くに小さく見えることになります。ですが、海中の水温や塩分がその領域内でそれほど大きく変わらなければ大きい三角形でも小さい三角形でもその重心の位置は変わりません。このような手法を繰り返し観測することで三角形の水平位置の変化を cm 精度で計測することができるのです。GNSS と音響を組み合わせる方式なので、このような手法を GNSS- 音響結合による海底地殻変動

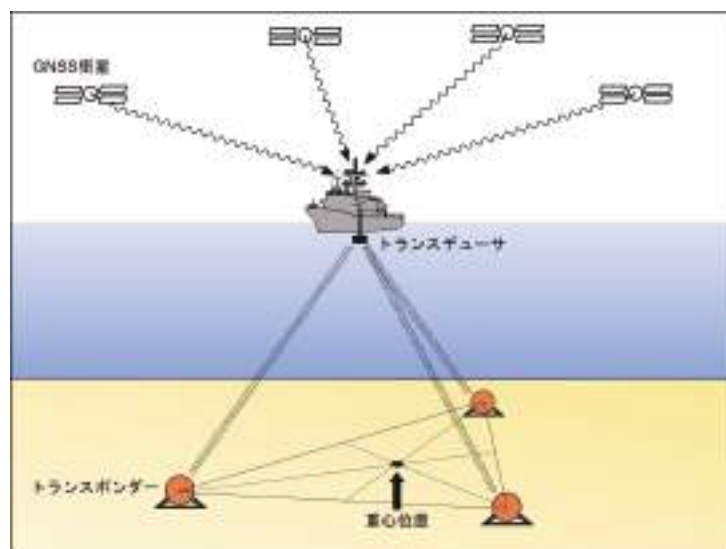


図 8 GNSS-音響システムによる海底地殻変動観測の原理。船の位置を GNSS で計測し、船の位置を基準にして海底に置かれたトランスポンダー 3 基で構成される三角形の重心位置を音波を用いて計測する。

観測などと呼ぶことがあります。この方式の応用について次の節で説明します。

～海底地殻変動連続観測への挑戦～

日本列島ではよく知られているように、太平洋沿岸の沖合いでプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生します。震源域は海底ですので、海底での観測はプレート間固着の状態や地震時あるいは地震後の地殻変動を推定するのに極めて重要です。これまで海底での地殻変動観測は水圧観測による上下変動など極めて限られたものしかありませんでした。一方、陸では国土地理院による GNSS 観測網が全国に 1200 点以上はめぐらされていて詳細な地殻変動が日々監視されています。このような陸と海の観測網の違いは大きな問題となってきました。

そこに登場したのが前節の GNSS-

音響結合による海底地殻変動観測です。原理は米国で開発されたのですが、日本の海上保安庁海洋情報部や東北大学、東京大学、名古屋大学などの研究者が大変な努力を重ねて精度が向上し、プレート境界地震の地震時変動や地震の余効変動を検出することに成功しました。このようなことから、日本列島の太平洋沿岸では既に 60 箇所の GNSS- 音響システムを用いた海底地殻変動観測点ができています。2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震の際にはこのシステムで海底の 30m を超える変位が観測されました。陸の観測網では最大で 6m 程度の変位でしたので（これでも大変大きいですが）、海底にある震源域直上のデータが得られたことで地震の震源の姿がこれまでになく詳しく明らかにされました。これだけでも、もちろん世界に誇れる素晴らしい観測網だと思いますが、一つの問題点があります。そ

れは、海上でのデータ収集には船舶が用いられていることです。このため、船がその場所に行く場合にだけ観測が行われますので、年間でせいぜい数回しか（最近では頑張って 10 回程度まで）観測ができない、という点です。もし、観測を連続的に（例えば毎日）行うことができれば、より詳細な地殻変動のデータを得ることができ、プレート間で発生する地震やゆっくりすべる現象などが詳しく明らかになるに違いありません。そこで、もし船でなくブイを海上のデータ収集基地に用いることができればこのような連続観測が可能になるのではないのでしょうか。

もちろん、これを可能にするためには技術的にも解決しなくてはならない点が多々あります。現在我々は、足摺岬沖のブイを用いてこのような応用研究も進めています。

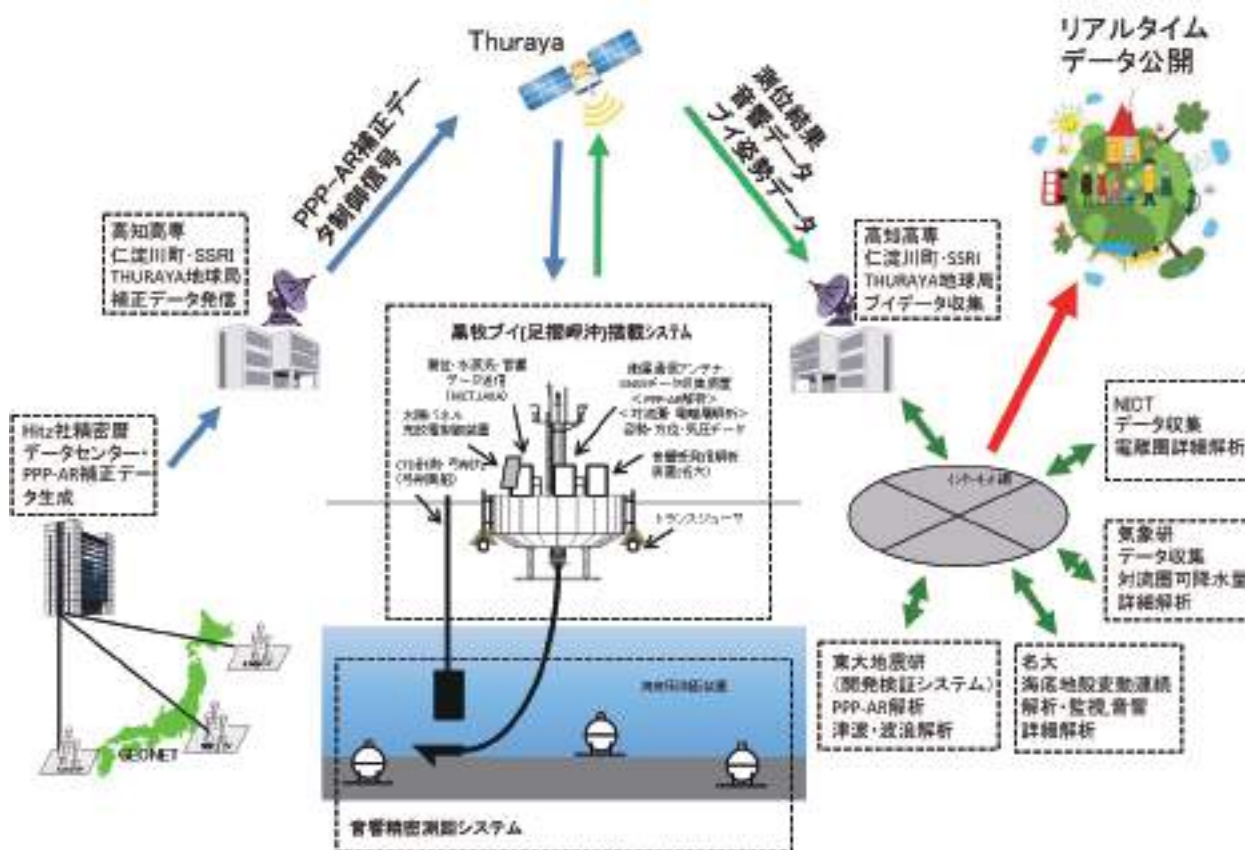


図 9 2016 年から開始した足摺岬沖の GNSS ブイを用いた実験のシステム。衛星通信には Thuraya という衛星を用いている。

～その他の応用～

前節にあげた海底地殻変動の連続観測への応用にとどまらず他にも様々な応用が期待されます。例えば、GNSS 衛星と受信機間の電波の伝搬媒質、すなわち大気と電離層に関する応用です。GNSS による測位においては衛星と受信機間の距離を正確に計測することが重要ですが、距離を正確に測るための誤差要因として伝搬媒質の影響があります。電磁波は光の速度で進みますが、伝搬媒質すなわち大気と電離層の影響で遅延します。これが距離の計測の誤差となります。

大気の影響は電磁波の行路上の水蒸気量に比例します。従ってこれを補正する必要がありますが、逆にそのために求めた水蒸気量は気象学にとって大変重要な量である可降水量 (PWV; Precipitable Water Vapor) に変換することができます。日本列島の GEONET ではこの可降水量をリアルタイムに計測して気象庁に送り、天気予報の精度向上に役立てられています (小司他, 2009)。もし海上で可降水量を計測できれば天気予報の精度向上に寄与することと思えます。特に西方海上に起因する線状降水帯の発生予想や夏季の台風の降水予測などにも役立てられるのではないのでしょうか。

電離層での遅延量は GNSS が用いる電磁波の周波数によって異なります。そこで GNSS では 2 つの周波数の電磁波を用いることで遅延量を推定して補正しています。この遅延量は電波が伝播してくる行路上の電子の総数 (TEC; Total Electron Content) に比例します。こうして GNSS を用いて TEC が計測できることになります。これまでの研究で大きな地震が発生すると電離層に乱れが生じそれが上空に向かって伝播していく様子が捉えられるなど、大変

興味深い研究結果が出ています。日本では情報通信研究機構が世界の GNSS 観測局からインターネットを通じて取得できるすべてのデータを用いた TEC を算出して電離層の擾乱を監視する事業を行っています (Tsugawa et al., 2018)。ところが、これも大気の場合と同じように、観測点が地上にしかないので、太平洋などの上空の電離層の状況がよくわかりません。海上に GNSS 観測局が多数あれば海洋の上空の電離層の状況もよくわかるようになりますと期待されます。

以上のようなことから、我々の GNSS ブイのプロジェクトでも気象の研究者や電離層の研究者の協力も得ながら研究を進めています。課題はブイ上のデータをいかにリアルタイムに精度の良い可降水量や総電子数を推定して研究者の元に遅延なく届けられるか、ということにあります。こうしたことを考えながら、今我々は図 9 に示すようなシステムを構築して研究を進めています。まず、陸上のデータセンターで GNSS 解析に必要な GNSS 衛星の精密暦を生成します。それを通信衛星経由でブイに送ります。ブイでは GNSS 観測が行われているのでそのデータに精密暦を適用してブイの精密な位置を決定します。その際の副産物としてブイ上空の可降水量 (PWV) や総電子数 (TEC) も推定します。一方、ブイに取付けられた音響送受信機 (トランスデューサ) から海底に置かれた 3 台のトランスポンダーに音響を送出して返ってくる音波を捉え、ブイとトランスポンダーの距離を推定します。以上のデータを再度通信衛星を用いて陸上の基地局に送ります。陸上の基地局からは海面変化データをリアルタイムで Web 表示して津波の早期検出を行うと共に、その他のデータは必

要な研究者等に伝達されて応用研究に使われます。

もし、このプロジェクトがうまくいけば、海底地殻変動から津波を含む海面の変動、大気、電離層といった、様々な地球科学的なデータを算出することができます (図 10)。これまで取得することの難しかった海上で多くの新しいデータが地球科学者に提供できると期待できます。

■ 解決すべき課題と将来像

これまで述べてきた技術については、既にその原理がわかっていて解決することはそう難しいことではないと楽観しています。ただ、それでもまだ多くの課題がのこっています。とりわけ、ブイを長い間海面上で安定に保持して各種の機器を運用することにはいろいろな困難が伴います。例えば電力は太陽電池を用いて発電した電気をブイ上の蓄電池に貯めて使いますが、多くの電子機器を搭載したブイ上で余裕をもった電力確保が大変困難です。電力供給システムのどこかに不具合が発生すれば観測やデータ伝送ができなくなります。より効率の高い太陽電池が望まれますが、これはブイだけでなく世界的にも開発が進められていますので遠くない将来には解決ができることを期待しています。また、電子機器にとって厳しい環境での連続稼働が必要とされますので、機器の故障への対応も課題です。機器が故障しても遠い海上にあるものをすぐ



図 10 GNSS ブイを用いた応用研究の事例。

に修理することはできないので、欠測が長く続くことになります。そのため、例えば故障したとしても自律的に修復できるシステムが必要になります。また、ブイそのものも耐久性の問題や海賊、盗難、船舶等の衝突などによるブイの破壊・亡失からの安全性保持などの課題もあると思います。一方、このようなブイを海上に多数設置して運用する場合には衛星通信の費用をどうするのか、また、陸上で集めたデータをどう処理して国民に対する情報提供を行うのか、等の運用体制についても考えておかなければなりません。我々は基礎的な技術開発を行っていますので、これを社会に役立つようにするためには別途システム全体の安定的運用を実現する体制を整える必要があります。すぐには解決できない課題が多いと思いますが、これらを少しずつ解決していけば日本を取り巻く広大な海洋に多数のブイを配置することでこれまでにない優れた地球科学インフラになるのではないのでしょうか。例えば図 11 に示すような西太平洋の日本の排他的経済水域に多数のブイを並べてデータをリアルタイムに必要な人に提供できるようなシステムを構築してはどうでしょうか (Kato et al., 2018)。我々はこれを、陸の GEONET になぞらえて“海の GEONET”と呼んでいます。今はまだ夢物語の世界ですが、いつかこのようなシステムができ、我々の安全・安心な社会の構築の一助になることを願っています。

■ 謝辞

高知工業高等専門学校の寺田幸博客員教授と名古屋大学大学院環境学研究科の田所敬一准教授には本稿を呼んでいただき有益なコメントをいただきました。本稿を執筆するにあたっては科学研究費補助金（課題番

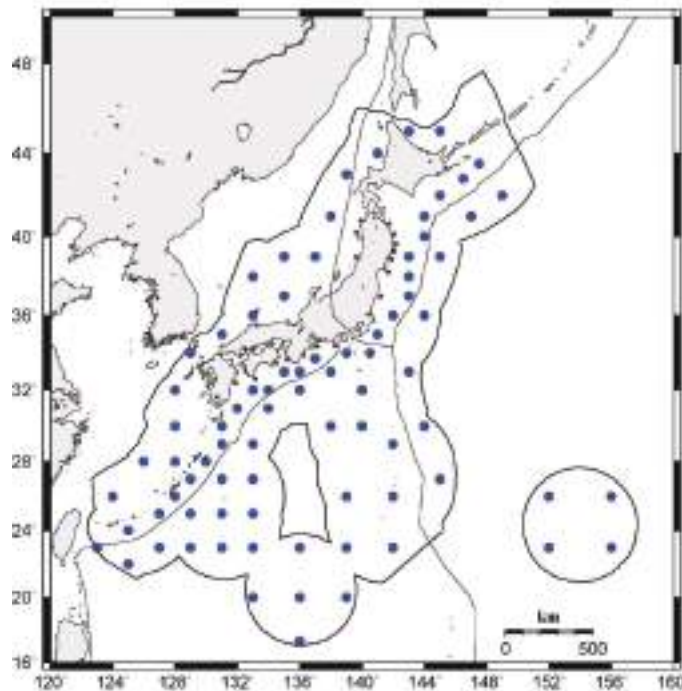


図 11 西太平洋の日本の排他的経済水域に設置する GNSS ブイアレイの概念図。

号 16H06310) の支援を受けました。

■ 参考文献

- Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real Time Observation of Tsunami by RTK-GPS, *Earth, Planets and Space*, 52(10), 841-845, 2000
- Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, *Earth Planets Space*, 57, 297-301, 2005.
- Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018, Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, 2018, *J. Disaster Res.*, 13 (3), 460-471.
- 小司 禎教・岩淵 哲也・畑中 雄樹・瀬古 弘・市川 隆一・大谷 竜・萬納寺 信崇, GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究, *測地学会誌*, 55(1), 17-38, 2009.
- Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Purcell Jr., and H. Dragert, Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Pys. Earth Planet. Inter.*, 108, 101-112, 1998.
- Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi, Total Electron Content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS, *J. Disaster Res.*, 13(3), 535-545, 2018.

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in IoT Non-Terrestrial Network for GNSS Buoy Array in the Ocean

Kenichi Takizawa

Resilient ICT Research Center, NICT
Katahira 2-1-3, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, JAPAN
Email: takizawa@nict.go.jp

Yukihiro Terada

National Institute of Technology, Kochi College
Monobe-otsu 200-1, Nangoku, Kochi, JAPAN

Shinichi Yamamoto

Wireless Network Research Center, NICT
Nukuikitamachi 4-2-1, Koganei, Tokyo, JAPAN
Email: shin.yamamoto@nict.go.jp

Teruyuki Kato

Taisho University
Nishi-sugamo 3-20-1, Toshima-ku, Tokyo, JAPAN

I. INTRODUCTION

Deployment of global navigation satellite system (GNSS) buoy system as an array in a wide ocean is expected as a powerful tool for monitoring tsunami and ocean bottom crustal deformation in the region [1]. IoT non-terrestrial network (NTN) [2] is crucial to realize the system since the buoys are deployed in the ocean. In the GNSS buoy array, although data size sent from each buoy is small, it requires to accommodate more than 10 buoys while the satellite link is available. In this case, grant-free access, which brings advantages of low latency and small signaling overhead, is expected. In this work, the use of uplink based on non-orthogonal multiple access (UL-NOMA) [3] is evaluated as grant-free access in the GNSS buoy array. We propose a method of generating a low-density signature for NOMA from buoy's location (latitude and longitude) for reduction of the signaling overhead.

II. IoT NTN USING NOMA FOR GNSS BUOY ARRAY

A. System model

Figure 1 shows a system model. As shown, UL-NOMA using the interleave pattern π_n is introduced. GNSS buoys are deployed in the ocean with a distance of more than 10 km. In this paper, we treat only UL, in which each GNSS buoy sends measured data in S-band with satellite-orbit of LEO-600. Assuming that frame synchronization is established among the buoys and the satellite, and the n th buoy is aware with its location by longitude $l_{1,n}$ and latitude $l_{2,n}$. As the UL-NOMA, a method is proposed to determine its interleave pattern π_n for data signals $x_{n,p}^{DS}$ and cyclic shift Δ_n for reference signal x_n^{RS} by using $(l_{1,n}, l_{2,n})$. In this method, reference points represented by (l_1, l_2) are pre-determined as each buoy selects unique π_n and Δ_n in the beam spot. The simplest way is to set the distance of the reference points as less than the half of the distance between GNSS buoys. As shown in the frame format, each buoy sends $x_{n,p}^{DS}$ with repetition of P times

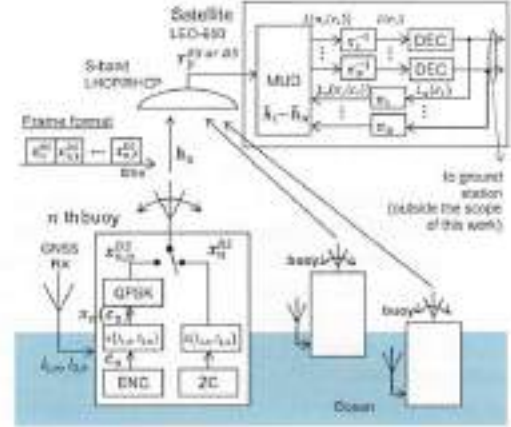


Fig. 1. System model of UL-NOMA in IoT NTN for the GNSS buoy array.

followed by x_n^{RS} . Received signal at the satellite is given by $r^{RS \text{ or } DS} = \sum_{n=1}^N h_n \cdot x_n^{RS \text{ or } DS}$, where N is the number of the buoys in the beam spot, and h_n denotes a channel coefficient between the n th buoy and the satellite. At the receiver, first, π_n and estimates on the channel coefficients $\hat{h}_n$ are derived by r^{RS} by calculating the channel impulse responses. Then, r_p^{DS} is processed in iterative way between multiuser detector (MUD) and channel decoder (DEC) in log-likelihood ratio. Finally, information data sent from the N buoys are recovered.

B. Channel characterization

Since GNSS buoys are deployed in the ocean, fluctuation on the antenna gain due to rolling of the buoy caused by waves is occurred. In order to characterize the fluctuation, measurement campaign has been conducted by using ETS VIII (S-band) and a ship, in Seto Inland Sea, Ehime, Japan in 2016. Measurement setup is shown in Fig. 2. IQ waveforms received at the patch antenna and antenna's angles (roll ϕ , pitch θ , and yaw ψ)

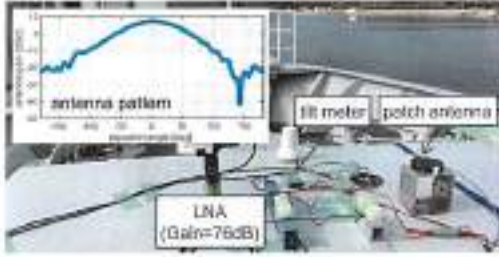


Fig. 2. Setup for characterizing radio propagation in S-band.

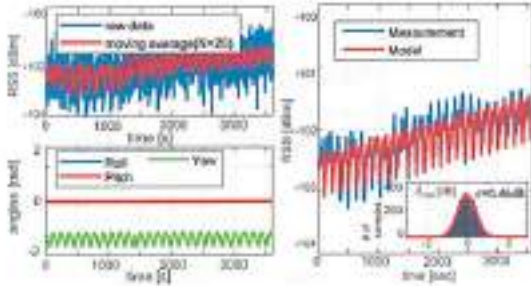


Fig. 3. Measurement results (left) and a derived propagation model (right).

are recorded by a signal analyzer (Keysight technologies N9010A) and a tilt meter (Microstrain 3DM-GX4-45SK1), respectively. Synchronization on the measurement of the IQ waveforms and angles are established by GNSS 1PPS. Fig. 3 shows measured results and comparison on RSS between the measured results and realization by a model, which is given by $P_{rx,\theta} + G_{ant}(\phi, \theta, \psi)$ where $P_{rx,\theta}$ is reference received power and $G_{ant}(\phi, \theta, \psi)$ stands for antenna gain towards the satellite. The difference between the measured results and the model δ_{RSS} is given by log-normal distribution with σ of 0.46 dB.

C. Evaluation

A link budget based on study case 9 in [5] is shown in Table I, in which diameter of the beam is 50 km. The model derived from our measurement campaign is included. Here, transmit power error at the buoy given by uniform distribution ± 3 dB is taken into account, in which the transmit power is decided by RSS of the beacon from the satellite. Specifications of the UL-NOMA is summarized in Table II. 80 reference points are pre-determined with distance of 5 km in the beam spot. The Δ is given by multiples of 3, which is equivalent to $8.33 \mu s$. And, the set of π is generated by uniform random patterns. In MUD, chip-by-chip detection [6] is introduced, and the number of iterations between MUD and DEC is 32. Simulation results are shown in Fig. 4. As antenna's angles (ϕ, θ, ψ) , measured angles at a buoy deployed in ocean are used. As shown, frame error rate (FER) of $\leq 10^{-3}$ is achieved with repetitions P of 8 and 9 for N of 12 and 14, respectively. In these conditions, the ratio of successfully decoded all the N buoys P_{dec} of $\geq 99.9\%$ are achieved. Thus, the number of required slots is successfully reduced to less than 2/3 by introducing the UL-NOMA.

TABLE I
LINK BUDGET ON UL IN S-BAND BASED ON 3GPP TR38.821[5]

Parameters	Values
Transmit power in EIRP	23.0 dBm (max)
G/T	1.1 dB/K
Bandwidth	400 kHz
Free space pathloss	159.1 dB
Atmospheric/Scintillation loss	0.1 dB / 2.2 dB
Polarization loss	3.0 dB
Shadowing component	0 dB (log-normal, $\sigma = 0.46$ dB)
Average CNR	$2.8 + G_{ant}(\phi, \theta, \psi)$ dB

TABLE II
SPECIFICATIONS ON UL-NOMA FOR SIMULATIONS.

Parameters	Values
Data signal (DS)	single-carrier QPSK (with CP of $8.33 \mu s$)
Reference signal (RS)	251-chip Zadoff-Chu (ZC) sequence [4]
Error correction coding	Turbo code ([13, 15], coding rate = 1/3)
DS and RS	symbol rate = 360 kHz, 270 symbols ($750 \mu s$)
# of ref. points	80 (distance between the ref. points : 5 km)

III. CONCLUSIONS

UL-NOMA applicable into IoT-NTN for the GNSS buoy array in the ocean has been evaluated by simulations, in which the fluctuation of RSS due to the waves is modeled by measurement results. For reducing signaling overhead, a method for assigning a low-density signature in UL-NOMA is proposed by location of the buoy. The results show that the ratio of successfully decoded of $\geq 99.9\%$ has been achieved.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06310.

REFERENCES

- [1] T. Kato, et al., "GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geostatics Monitoring System," Proc. of IAG-IASPEL 2017.
- [2] 3GPP TR36.763, "Study on NB-IoT/eMTC support for NTN," May 2021.
- [3] 3GPP TR38.812, "Study on NOMA for NR," Dec. 2018.
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, "4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G," third edition, Elsevier, 2016.
- [5] 3GPP TR 38.821, "Solutions for NR to support NTN," Dec. 2019.
- [6] L. Ping et al., "Interleave division multiple-access," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 5, no. 4, April 2006.

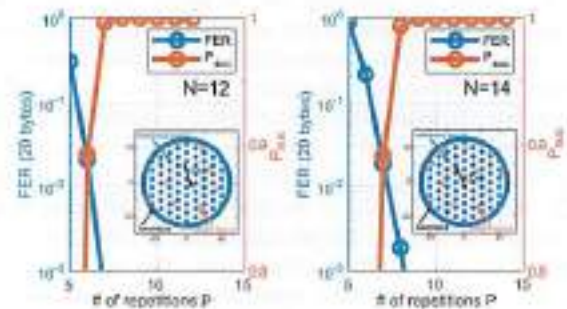


Fig. 4. Simulation results on the UL-NOMA for the GNSS buoy array.



広域観測・微視的実験連携による
沈み込み帯地震研究の新展開

GNSS ブイを用いた 地球科学・災害監視の ための総合海洋アレイ

加 藤 照 之
寺 田 幸 博
田 所 敬 一
二 村 彰

Synthetic oceanic GNSS buoy array for earth
science and geohazard monitoring

Teruyuki Kato • Yukihiro Terada • Keiichi
Tadokoro • Akira Futamura

かとう てるゆき : 大正大学地域構想研究所
てらだ ゆきひろ : 高知工業高等専門学校
たどころ けいいち : 名古屋大学大学院環境学研究科
ふたむら あきら : 弓削商船高等専門学校

GNSS 津波計の開発に関する新たな展開について解説する。2011 年東北沖地震における経験をふまえ、より沖合への設置を可能にするために新たな技術を導入し、GNSS—音響システムを用いた海底地殻変動の連続観測及び大気・電離層の研究への応用も視野に入れた海洋アレイへの可能性を探るための開発を行った。

1. はじめに

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

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

これらの実験の成功により、同システムは国土交通省港湾空港技術研究所が運用している全国港

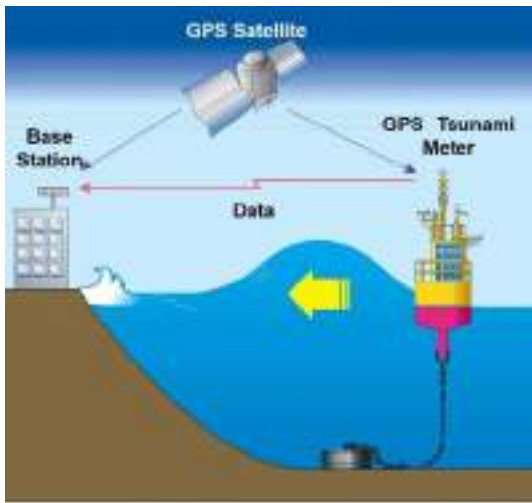


図1 GNSSブイの概念図。GPS衛星からのデータをブイと地上局で受信し、ブイの地上局に対する相対位置を推定する。

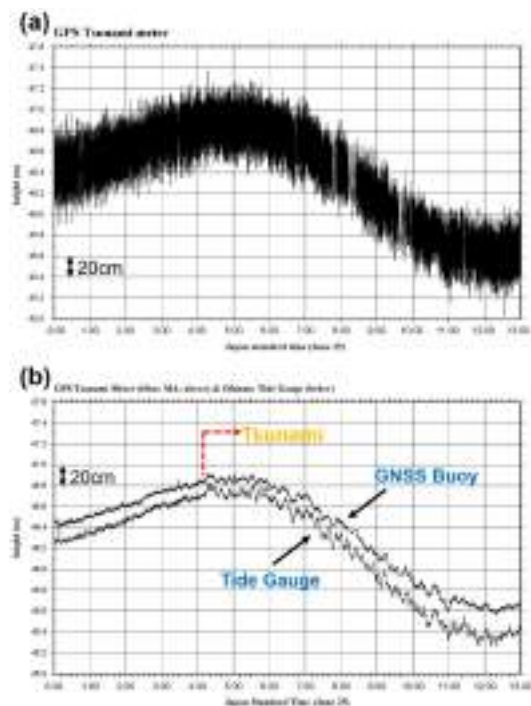


図2 大船渡沖実験で得られたのはじめの津波記録。(a) 一秒サンプリングによる原記録、(b) 原記録に60秒の移動平均を操作したグラフ(上)と近傍の大船渡検潮所で得られた記録。

湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の次世代機として2008年頃より三陸沿岸を手始めとして全国に展開された。この観測網は波浪の監視を目的としていることからGPS波浪計と命名されたが、津波も監視の対象に入れられている。また、気象庁でも津波監視の対象として同年より用いられている。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、気象庁から地震直後に宮城沖60m、岩手沖35mの津波警報が出されたものの、NOWPHASの岩手沖観測点等から35mを超える津波が観測されたことから、警報が10m以上に更新された。しかしながら、この更新の直後に三陸沿岸に津波が襲来し、多くの人命が失われる結果となった。

この結果から得られる教訓としては、ブイをより遠くの沖合に設置する必要がある、ということになる。より遠くの沖合での設置を目指したさらなる開発研究が始まった。

2. 東北沖地震の教訓からの改善策

RTK-GPS方式という相対測位を用いることによる限界を突破するために取り入れたのは、2000年頃より急速に発展していったいわゆる精密単独測位方式 (Precise Point Positioning) と呼ばれる測位方式である。それまではGNSS衛星からの信号のうちコードを用いる方式で単独測位を行い、コードを載せるために用いられる搬送波の位相を用いて相対測位を行う方式が主流であり、後者を行う際に衛星の精密な位置情報 (精密暦と呼ぶ) を取り入れることにより、千kmを超えるような基線でもcm精度での相対測位が行われてきた。2000年頃を境に、衛星位置と時計の補正項 (併せて精密暦と呼ぶ) を利用することにより、位相を用いた単独測位でcm精度での測位ができることが示され、急速に普及していった (例えば [3])。ただ、当初は精密暦を取得するのに2週間ほど待たなくてはならなかったのであるが、暦の予測などを取り入れることにより、リアルタイムに取得できるようになってきた。また、位相を用いた測位の場合、衛星と受信点との距離を精密に測位するため

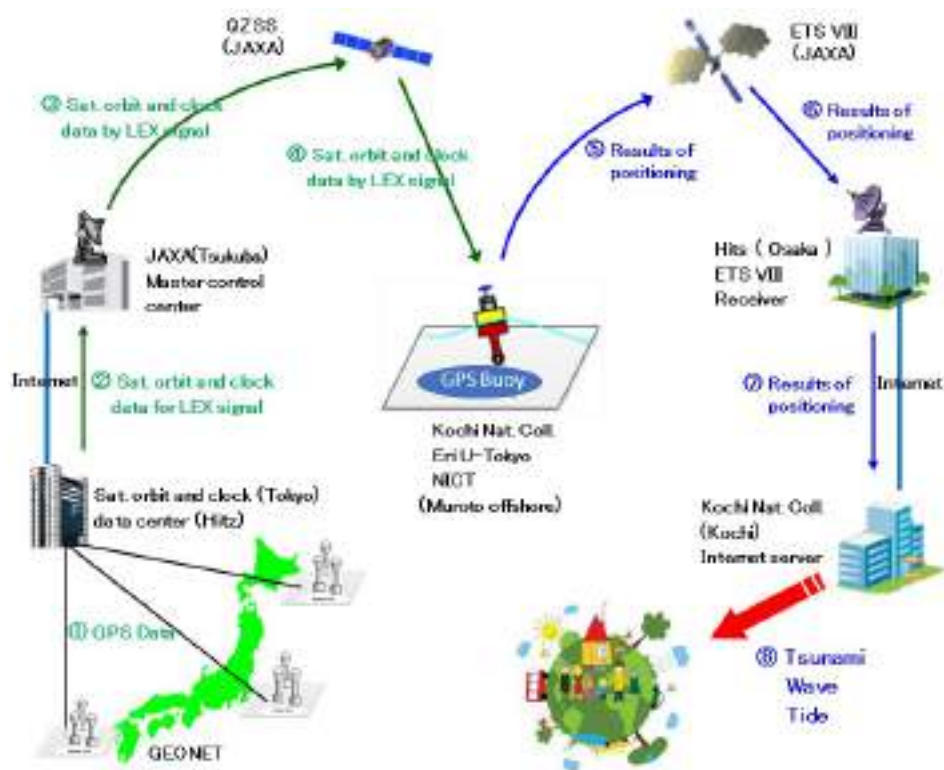


図3 QZSSとETS-VIIIの2つの衛星を用いた実験のデータの流れ。

には波数の整数部分を推定するのがよい (Ambiguity Resolution という) が、これを含めた手法として PPP-AR という方式が開発されたことから [4]、この方式を取り入れることとした。

また、沿岸から数十 km 以上離れるということになるとデータの伝送には衛星通信による必要がある。幸い、開発を始めた時点では JAXA が打ち上げた ETS-VIII という試験衛星が使えることが判明したため、JAXA の協力も得ることとした。ブイという揺れが大きくなることが想定されるような場合の衛星通信がどこまで可能かを検証する必要があるが、これも考慮に入れた計画を作ることとなった。

3. 新たな手法を取り入れた実験 (2013 ~ 2015 年)

これらの方式を取り入れた計測実験を 2013 ~

2014 年に実施した。ここでは、ブイは自前のものではなく、高知県が土佐湾で行っている多数のブイを漁礁に見立てて漁を行う、黒潮牧場と呼ばれるプロジェクトのブイを借用することとした。いくつかあるブイのうち、室戸沖約 35km のところにある黒潮牧場 16 号ブイを借用することとした。このブイ上に GNSS のアンテナ / 受信機セット及び PPP-AR の解析を行う計算機、及び衛星通信用の送受信装置などを設置した。また、継続的観測を行うため、太陽光発電用のパネル及び蓄電池も設置した。

全体システムを図3に示す。前節に述べたように、PPP-AR 解析に必要な精密暦の情報は GEONET のデータを用いて陸上のサーバで取得し、これを日本が打ち上げた測位衛星 QZSS を経由してブイに送り、ブイ上で PPP-AR 解析を実施してブイの位置を推定し、ブイから ETS-VIII を経由して地上局

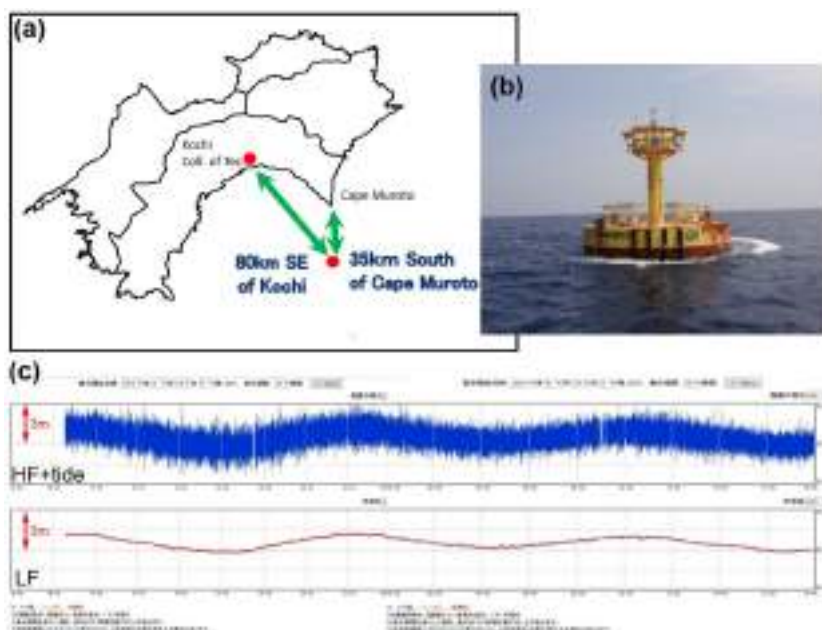


図4 (a) 室戸沖実験のブイ及び地上局 (高知高専) の位置, (b) 黒潮牧場 16 号ブイ, (c) 実験で得られた記録: (上) 短周期データ, (下) 長周期データ.

に送り返し, そこからインターネット上に情報を公開する, という方式をとった.

図4にブイと地上局の位置及びブイの写真を示す. 実験は2013年12月~2014年1月にかけてと2014年6月に実施した. 図4に得られた記録も示す. これはインターネット上で誰でも見られるようにした. この記録を子細に検討すると, データが必ずしも連続ではなく, しばしば欠落する部分があることがわかる. このデータの欠測率と波の高さにはよい相関があり, 波が高いときにデータの欠測が多いことが判明した. この理由としては, ブイが傾くことにより通信衛星とブイ上の衛星通信用アンテナとの視線角度が変わり, 信号強度の低下を招くことが原因と考えられた. 揺動するブイの上での衛星通信を安定的に実施するためには例えば通信用のアンテナをジンバルの上に搭載してアンテナを常に水平保つようにする必要がある. このような治具を考案して, 2015年12月には瀬戸内海において船舶をブイに見立てた実験を行った.

4. 総合的な防災・地球科学応用を目指したブイの構築

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

この方式では船舶を用いることが必須になり, 観測は連続的に実施することは出来ない. 海上保

安庁では測量用の船舶を用いることで一年あたり4回程度にまで測定頻度を向上させているが、日本周辺でのプレート収束域での様々な固着の様態を解明するためには連続観測が望ましい。このため、我々の開発している GNSS ブイを船舶の代わりに用いることができないか検討することとなった。なお、最近では船舶の代わりにウェーブライダー等の無人艇を用いる試みもなされている。

また、海底地殻変動計測への応用の他、GNSS ブイで取得したデータは気象観測や電離層観測における重要な物理量を計測することが可能である。気象学においては GNSS 計測から得られる天頂遅延量から大気中の水蒸気量を知ることができ、可降水量を測定することが可能である。この可降水量データを気象予報のデータ同化に組み込むことにより天気予報の精度向上に役立てることができる。陸上では国土地理院の GEONET データがすでに気象庁のデータ同化に取り込まれているが、海洋のデータが乏しいため船舶による計測などを用いることも実験的に行われている^[6]。我々のブイデータを用いることができれば定点観測によるデータとなるためより効率的なデータ同化に用いることができると考えられる。また、電離層観測では、GNSS の2周波データから衛星-地上局間の総電子数を得ることができ、地上に GNSS 観測アレイがあれば電離層の様々な現象を得ることができる。特に電離層擾乱は GNSS 測位精度に影響を及ぼす可能性もあり、航空機の位置推定に重要な情報を提供することができる。日本では情報通信研究機構 (NICT) が中心となって世界的な GNSS データを用いた電離層監視プロジェクトも進行している^[7]。我々の GNSS ブイデータをこれらの関連研究者にリアルタイムに提供することで防災にもまた地球科学的にも極めて重要かつ有効に利用が図られると考えられる (図5)。

以上のような各種の応用も念頭に、我々は新たな実験に乗り出すこととなった。幸い2016年度から5年間の科研費を得ることができて、これらの応用をめざした実験に取り掛かることとなった。図6に新たに構築した全体システムを示す。

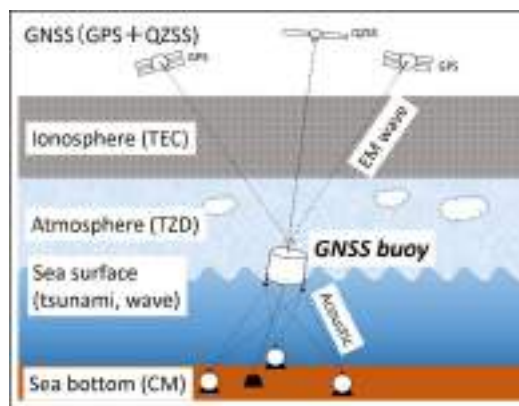


図5 GNSSブイを用いた総合防災システムの概念図。

この実験を開始する時点では ETS-VIII はすでに退役していたことから、商用衛星 (Thuraya) を衛星通信に用いることとした。また、精密暦の送信についても同じ衛星を用いることとした。ブイは室戸沖と同じ高知県の海洋牧場のブイを使用することとしたが、今回は足摺岬沖の18号ブイを用いることとした。また、地上局としては高知県仁淀川町の施設を利用することとした。もちろん、地上局はどこでもよいのであるが、津波による被災をさけるためと研究者のアクセスなど実験が便利にように設定することとした。図7にこれらの位置とブイの写真を示す。

実験は2016年11月頃より開始したが、開始早々様々なトラブルに見舞われることとなった。まず、電源の発電量が十分でなく、開始後比較的早くに電源が落ちてしまった。また、他所でのブイの事故などもあるなど、様々な設計の変更を強いられることとなった。海上作業においても、ブイを設置した海域が黒潮に近かったためなのか、海流が速く作業船がブイに近づくことが困難なことも多く、計画はなかなか進まなかった。また、地上で取得したデータが欠測になることが多く、この原因がブイ上での GNSS データ受信・解析装置に問題があるのか、衛星通信に問題があるのか原因をなかなか特定できないなどの問題も発生した。一方、これとは別に、海底地殻変動計測に関

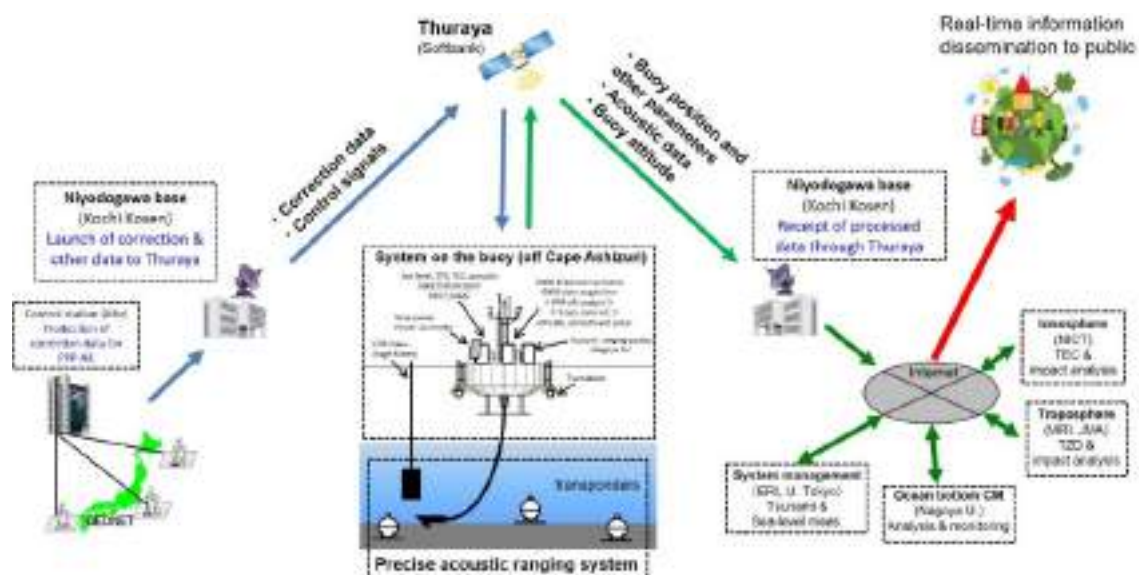


図6 2016-2020 実験で用いられたシステムとデータの流れ。衛星にはThurayaを利用。ブイにはGNSSのほか、衛星通信及び海底地殻変動観測用機材を搭載。ブイにトランスデューサ、海底にトランスポンダーを設置。ブイ周辺でCTD観測を実施する。

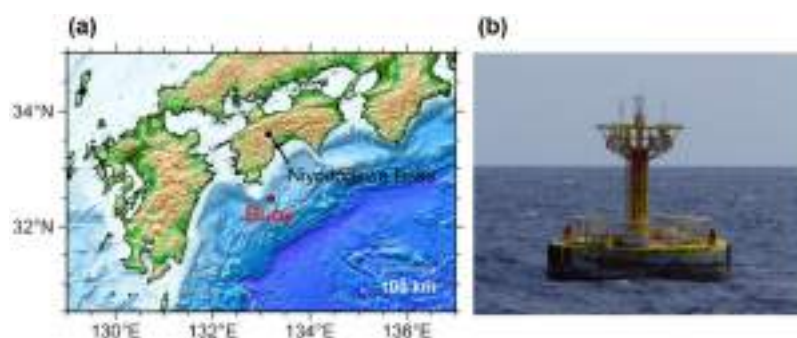


図7 (a) 2016-2020 実験におけるブイ(足摺岬沖)と地上局(仁淀川)の位置, (b) 海洋牧場18号ブイ。

しては比較的順調に計画が進み、初年度の各種ソフト開発や次年度のブイ周辺へのトランスポンダー設置とその位置決めのための船舶によるGNSS一音響観測、船舶を用いたCTD観測などを実施していった。

こうした様々な作業を行い、5年間を通じて切れ切れではあるがブイ上でのGNSSデータを蓄積すると同時に最終年度には海底地殻変動のはじめの連続観測データを取得することができた。図8に、海面高変動データの一部を示す。この実験で

は短周期の海面変動については、PVDと呼ばれる、GNSS位相データの変動成分から推定できるブイ位置変化の上下成分を示している^[8]。また、PPP-ARによる記録も示す。両者がよい一致をしていることがわかる。

一方、海底地殻変動の連続観測結果を図9に示す^[9]。短期間ではあるが、海底局の位置が数cm程度のばらつきで推定されていることがわかる。この解析の詳細は他の報告に準備中である。気象学、電離層研究への応用については、実験で

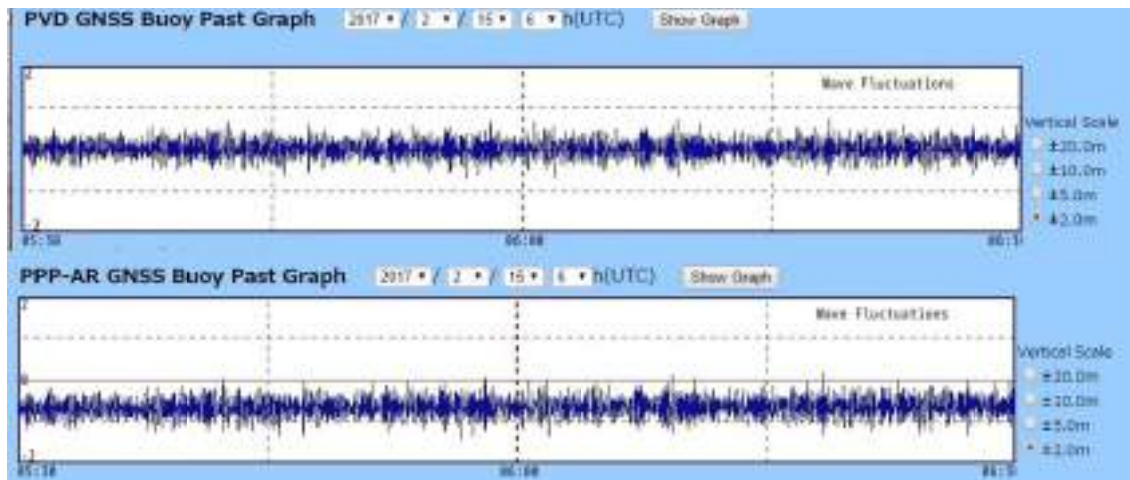


図8 2016-2020 実験で得られた記録の一例. (上) PVD, (下) PPP-ARによる解析結果.

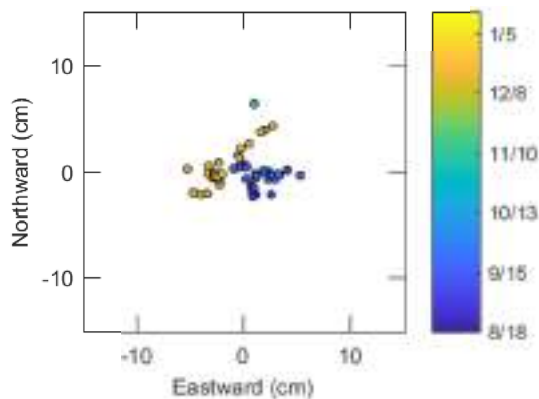


図9 2020年8月~2021年1月に得られた海底地殻変動連続観測による海底トランスポンダーアレイの重心の水平位置変化.

取得したデータを関係研究者に送付して検討していただいているところである.

5. 将来展望と課題

GNSSを用いた、津波をはじめとする総合防災ブイの開発の経緯と最近の展開について紹介してきた. 図5に示すように, 一つのブイで上は電離層から下は固体地球まで幅広い分野の防災に活用することができる. それだけでなく, 地球科学の様々な分野の基礎的な研究にもこれまで取得でき

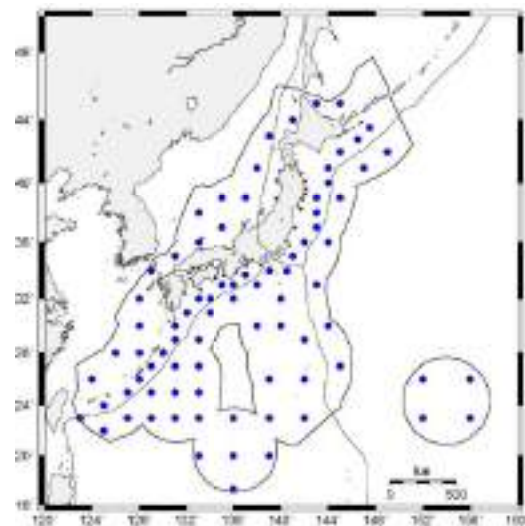


図10 西太平洋地域に展開したGNSSブイアレイの仮想図. 曲線は日本の排他的経済水域を示す. 点は任意の位置にプロット.

なかった海洋での定点観測データがとれることになる. ブイ上や周辺に各種の観測機器を設置できれば海洋学にも大変役に立つツールとなるだろう.

このようなブイを例えば西太平洋の広い地域に設置することにより革新的な地球科学観測のためのブイアレイができると考えられる (図10).

陸の GEONET にちなんで我々はこれを OCEAN GEONET と呼んでみたい。もちろん、このような大規模ブイアレイを実現するにはいくつかの重要な技術的ブレイクスルーが必要になる。例えば、データの伝送には専用の衛星が必要であろうし、ブイの電源確保やブイ自身の耐久性、遠洋での観測のための自律的な運用システムなど、多くの課題が残されている。これらのことについては別途執筆中の論文を参照されたい^[10]。いつの日かこのような海洋の大規模アレイが実現することを夢見ている。

謝辞：本研究は文科省地球観測技術等調査研究委託事業（平成 25-26 年度）、平成 27 年度東大地震研所長裁量経費及び日本学術振興会科学研究費補助金 JP16H06310（平成 28 年度～令和 2 年度）の助成を受けたものです。研究の実施に当たっては気象研究所、情報通信研究機構、宇宙航空研究開発機構の関係の皆様にご協力をいただきました。

参考文献

- [1] 加藤照之, 他 (1998), 月刊「海洋」, 号外 15, 38-42.
- [2] 加藤照之 (2005) 月刊「地球」, 37, 179-183.
- [3] Zumberge *et al.*, J. Geophys. Res., 102 (B3), 5005-5017, 1997.
- [4] Mervart, L., *et al.* (2008) In Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, 397-405.
- [5] Spiess, F. N., *et al.* (1998) Phys. Earth Planet Int., 108, 101-112.
- [6] Shoji Y., *et al.* (2016) SOLA 12, 265?271
- [7] Tsugawa, T., *et al.* (2018) J. Disaster Res., 13, 535-545.
- [8] Isshiki, H., *et al.* (2000) J. Geod. Soc. Japan, 46, 239-251.
- [9] Tadokoro, K., *et al.* (2021) presented at the JpGU-AGU2021 meeting, July 2021.
- [10] Kato, T., *et al.* (2022) Proc. Jpn. Acad., Ser. B, submitted.



February 2022

Vol.98

No.2

pp.49–71

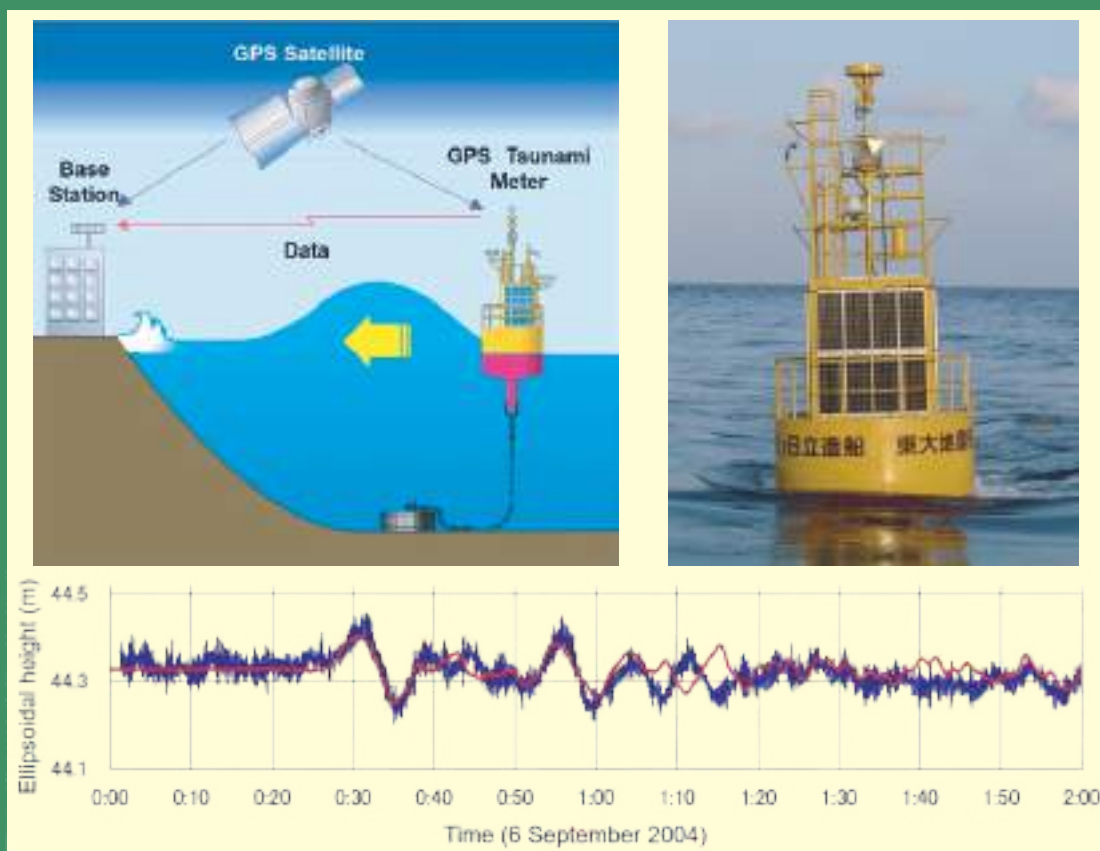
PJABDW
ISSN 0386-2208

[論文2022-2]

<https://www.japan-acad.go.jp/pjab>

PROCEEDINGS OF THE JAPAN ACADEMY SERIES B

PHYSICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES



*GNSS (GPS) buoy can be used for early tsunami detection
and other scientific studies*



EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF: Kunihiro SUZUKI

EXECUTIVE EDITORS: Yoshio FUKAO, Shigekazu NAGATA COVER EDITOR: Takao SEKIYA

Shizuo AKIRA (<i>Immunology</i>)	Kunihiro SUZUKI (<i>Neurochemistry, Neurology</i>)
Yoshio FUKAO (<i>Geophysics</i>)	Koichi TANAKA (<i>Mass Spectrometry</i>)
Makoto KOBAYASHI (<i>Physics</i>)	Kazuyuki TATSUMI (<i>Inorganic Chemistry</i>)
Tsuneyoshi KUROIWA (<i>Biological Science</i>)	Toshimitsu YAMAZAKI (<i>Physics</i>)
Shigekazu NAGATA (<i>Molecular Biology, Biochemistry</i>)	Takeshi YASUMOTO (<i>Fisheries Chemistry</i>)
Takao SEKIYA (<i>Pharmaceutical Science, Nucleic Acid Chemistry</i>)	

EDITORIAL MEMBERS

Tsuneya ANDO	Takaaki KAJITA	Shigetada NAKANISHI	Keisuke SUZUKI
Teruhiko BEPPU	Tadao KAKIZOE	Atsuhiro NISHIDA	Masatoshi TAKEICHI
Leo ESAKI	Takeo KANADE	Naoko NISHIZAWA	Kumao TOYOSHIMA
Yoshinori FUJIYOSHI	Masaki KASHIWARA	Ryoji NOYORI	Koichiro TSUNEWAKI
Kenji FUKAYA	Maki KAWAI	Yoshinori OHSUMI	Seiya UYEDA
Nobutaka HIROKAWA	Hiroshi KIDA	Eiko OHTSUKA	Eitaro WADA
Heisuke HIRONAKA	Tadamitsu KISHIMOTO	Satoshi ŌMURA	Koji WADA
Tasuku HONJO	Susumu KITAGAWA	Masanori OTSUKA	Shinya YAMANAKA
Yukio HORI	Jun KONDO	Hiroyuki SAKAKI	Toshio YANAGIDA
Kiyoshi HORIKAWA	Ikuo KUSHIRO	Satohiko SASAKI	Izumi YOKOYAMA
Sumio IJIMA	Hiroyuki MANO	Takehiko SASAZUKI	Hiroyuki YOSHIKAWA
Hiroo IMURA	Toshisuke MARUYAMA	Katsuhiko SATO	Akira YOSHINO
Tadashi INAGAMI	Taroh MATSUNO	Eishiro SHIKATA	
Akihisa INOUE	Yasushi MIYASHITA	Koichi SHIMODA	
Akira IRITANI	Kohei MIYAZONO	Hideki SHIRAKAWA	
Shun-ichi IWASAKI	Shigefumi MORI	Tatsuo SUDA	
Masanori IYE	Junko NAKANISHI	Akira SUZUKI	

Cover Illustration: GNSS (GPS) buoy can be used for early tsunami detection and other scientific studies

A global navigation satellite system (GNSS), which was known as the Global Positioning System (GPS), is a technology for estimating the position of a receiver placed on the earth's surface using satellites. The precise application of the technique can provide a few centimeters' accuracy for the positioning; therefore, it has been widely used in crustal deformation research over the globe since the late 1980s. Dr. Teruyuki Kato and colleagues first applied the technique to detect tsunami by putting the GNSS receiver on an ocean buoy and continued the developments for more than 20 years (see the review article in this issue pp. 49–71). The top-left figure of the front page shows the first concept of the GNSS (GPS) buoy, for which the position of the buoy was estimated relative to that of the base station placed on the land. This early GNSS buoy system was established near Ofunato City, Northeast Japan, and could detect tsunamis that had amplitudes of several centimeters of height for the 2001 Peru earthquake (Mw8.4) and the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw7.9). The second buoy established off Cape Muroto, Shikoku, southwest Japan, (top right) detected a tsunami for the 2004 Kii-Hanto Oki earthquake (Mw7.3). The plot shown below the figure is the obtained record of the tsunami and the simulated theoretical record has been added, which shows a clear consistency between them. Then, the system was implemented in the nationwide ocean wave monitoring system (called NOWPHAS in Japan) in 2008 and fifteen GNSS buoys had been established around the Japanese coasts until 2011. The records of NOWPHAS buoys were used to update tsunami alerts by the Japan Meteorological Agency, owing to the tsunami caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). However, the system used a relative positioning and had a distance limit between the land base and buoy as less than 20 km. A new system was designed by introducing a new positioning algorithm that enables point positioning using a single receiver and satellite data transmission to place the buoy much farther from the coast. It may be placed at any place in the ocean. A new technique for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements was also implemented in the new system. The new buoy system can be used for other fields in earth sciences, such as weather forecasting and ionospheric monitoring, using the byproducts of the GNSS positioning analyses.

Yoshio Fukao
Member of the Japan Academy

Review

Developments of GNSS buoy for a synthetic
geohazard monitoring systemBy Teruyuki KATO,^{*1,†} Yukihito TERADA,^{*2} Keiichi TADOKORO^{*3} and Akira FITAMURA^{*1}

(Edited by Yoshio FUKAO, M.I.A.)

Abstract: A global navigation satellite system (GNSS) buoy system for early tsunami warnings has been developed for more than 20 years. The first GNSS buoy system using a real-time kinematic algorithm (RTK) was implemented in the Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbours (NOWPHAS) wave monitoring system in Japan in 2008. The records of NOWPHAS were used to update the tsunami alert by the Japan Meteorological Agency (JMA), owing to the tsunami generated by the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). However, considering that the distance limit is less than 20 km for the RTK algorithm, a new system was designed by introducing a new positioning algorithm and satellite data transmission to place the buoy much farther from the coast. A new technique for the continuous monitoring of ocean-bottom crustal movements was also implemented in the new system. The new buoy system can be used for weather forecasting and ionospheric monitoring as well.

Keywords: GNSS buoy, tsunami, tsunami early warning, GNSS-Acoustic measurements, geohazard monitoring

1. Introduction

The Japanese Islands have been attacked by frequent large earthquakes and resultant tsunamis. Along the northeastern Pacific coast, the 1896 Meiji Sanriku earthquake (Mw8.4), 1933 Showa Sanriku earthquake (Mw8.4), and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0) (hereinafter called the Tohoku-oki earthquake) are eminent examples. In southwestern Japan, numerous tsunami-mogenic earthquakes have occurred along the coast, including the 1946 Nankai earthquake (Mw8.4) as the recent case. These earthquakes occurred along the plate interface between the subducting oceanic

plate and the overriding continental plate. There are less frequent but significant tsunami-mogenic earthquakes along the Japan Sea coasts as well. The 1983 Nihonkai-Chubu earthquake (Mw7.7) and the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake (Mw7.7) are recent examples.

Though there are few cases where volcanic eruptions or large landslides in the ocean cause tsunamis, most tsunamis are generated by crustal movements caused by large earthquakes at ocean floors. As water is incompressible, the sea water above the ocean-bottom crustal deformation is vertically displaced according to the crustal motion at the ocean floor, generating a tsunami. If the magnitude of the earthquake exceeds 8, the generated wave has meters in height amplitude and tens to hundreds of kilometers in wavelength. Moreover, the tsunami heights are amplified as they move toward the shallower coastal area, causing casualties and destroying properties. Mitigating such disasters is a crucial and socially important element in Japan and other threatened areas worldwide.

To reduce disasters due to tsunamis, various countermeasures against tsunamis should be developed. For example, a tsunami alert is issued as

^{*1} Institute of Regional Development, Taiho University, Tokyo, Japan

^{*2} National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan

^{*3} Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan

^{*4} National Institute of Technology, Yaga College, Ehime, Japan

[†] Correspondence should be addressed to T. Kato, Institute of Regional Development, Taiho University, 3-20-1 Nishi-Shuzama, Toshima-ku, Tokyo 170-8470, Japan (e-mail: t.kato@mail.taiho.ac.jp).

quickly as possible after the occurrence of a large earthquake at the ocean floor. In Japan, the Japan Meteorological Agency (JMA) is responsible for issuing early tsunami warnings for such large earthquakes, and the JMA issued the first tsunami alert in 1941.¹⁾ Currently, they attempt to issue such alerts within a few minutes after the onset of an earthquake. The decision to issue alerts is made based on the earthquake source parameters, such as its location and magnitude. The JMA utilizes a database of possible tsunamis due to various earthquake mechanisms for the quick issuance of tsunami alerts. The JMA later revises the issuance process based on the observed tsunami at the coast and the offshore monitoring apparatus.²⁾

Thus, techniques for monitoring tsunamis are very important. Installation of coastal tide gauges at ports is an alternative way of monitoring tsunamis. However, tide gauges cannot be used to monitor tsunamis before their arrival at the coast. Offshore tsunami monitoring is necessary to facilitate the evacuation of people near the coast.

Most offshore systems continue to use pressure sensors. The Pacific Marine Environmental Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the U.S.A. established and has been operating a global distribution of the Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis system that uses ocean-bottom pressure sensors and buoys to send data through satellites (for details, see <https://ncf.pmel.noaa.gov/DART/>).³⁾ The stations are installed in the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans. In Japan, two pressure sensors were installed offshore of the Pacific coast of the Hokkaido (190–250 km from the coast) and Tohoku (45–75 km from the coast) regions using ocean-bottom cables; records as large as 1 cm or smaller were used for the investigation of tsunamis caused by nearby earthquakes.^{4),5)} A large tsunami of approximately 5 m height was detected at the ocean-bottom cables placed in the Tohoku region due to the 2011 Tohoku-oki earthquake.⁶⁾ After the 2011 Tohoku-oki earthquake, a large national ocean-bottom array of seismograms and pressure sensors were established along the Pacific coast of the Japanese Islands and was named S-net (Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench). The network uses ocean-bottom cables of 5,500 km and consists of 150 sites of seismometers and pressure sensors (the network was integrated to the nationwide seismic array called Monitoring of Waves on Land and Seafloor

[MOWLAS]; for details, see <https://www.hosai.go.jp/e/>).

Additionally, ultrasonic sensors have been used to detect sea wave heights for the Nationwide Ocean Wave Information network for Ports and Harbours (NOWPHAS) operated by the Port and Airport Research Institute of the National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology of Japan. The system monitors the wind wave height and can be used to monitor tsunamis. NOWPHAS sensors require that the distance from the coast be less than 10 km in shallow areas with depths of less than 50 m, considering maintenance (for details, see https://www.ndl.go.jp/kowan/nowphas/index_eng.html).

In contrast to these pressure sensors, a global navigation satellite system (GNSS) buoy would be one of such offshore sensors for detecting tsunamis before its arrival to the coast. The development of the GNSS buoy began in 1996.^{7),8)} In contrast to pressure sensors that measure sea level change indirectly and require a conversion coefficient, GNSS measures changes in sea level height directly, which is more accurate relative to pressure sensors as it does not require a calibration process. Pressure sensors typically have a small but significant drift, which does not affect instant displacements such as earthquakes or tsunamis, but long-term drift may cause false recognition of seafloor vertical displacement. Moreover, for the detection of tsunamis, GNSS buoys can instantly detect sea surface changes if they are placed within a tsunami source region, while pressure sensors cannot detect changes in sea surface height as the water column height above these sensors placed at the sea bottom does not change its length because the water is incompressible. However, a pressure sensor has a much higher sensitivity at the millimeter-level scale for detecting a change in height compared with a GNSS, which is less sensitive and has a scale of a few centimeters or worse for detecting a change in height. These two types of sensors have complementary characteristics for detecting changes in sea-surface height.

This article briefly reviews the history of the development of the GNSS buoy system and its use in detecting tsunamis. GPS buoys have been used in different applications. A GPS buoy was once used to calibrate the TOPOgraphy EXperiment (TOPEX)/Poseidon satellite radar altimeter.⁹⁾ The GNSS buoy system for monitoring tsunamis was also introduced in Indonesia.¹⁰⁾ However, these buoys were lost after a few years because of some unknown reasons. To the best of our knowledge, the development of a

GNSS buoy for tsunami monitoring introduced in this article is a unique project.

Finally, we will discuss how GNSS data obtained from the buoy can be utilized for other applications such as atmospheric and ionospheric research. Land-based GNSS observations have already been applied to these types of studies. For example, the Japanese GNSS nationwide continuous observation network, also called the GNSS Earth Observation Network System (GEONET), which is operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI), consists of approximately 1,300 sites that have been extensively used for atmospheric and ionospheric research. However, if the present GNSS buoy project goes forward, the GNSS data obtained from the buoy can also be utilized for atmospheric and ionospheric research along with the data collected on land. As the GNSS continuous observation network over the globe has been mostly limited to land thus far, the establishment of a GNSS buoy array in the open ocean will fill the wide gap of continuous GNSS networks over the Earth's surface. This will be discussed in Section 10. In addition, a new attempt to apply a GNSS buoy for the crustal deformation occurring at the ocean floor has been done in our recent experiment, and it will be discussed in Sections 7 and 9.

2. Early developments of the GNSS buoy system

A GNSS buoy was called a GPS buoy in its early stage of development. Figure 1 shows the system: the GPS signal transmitted from the GPS satellite is received at the GPS receiver placed on the board of the buoy. The dual signals (L1 and L2 phases) of GPS are then transmitted to the land base. Another GPS receiver placed at the land base station receives the same GPS signals simultaneously, and the signals on land are compared with those sent from the buoy. As the phase differences between the two signals at the land base and the buoy are a function of the relative position between the two, the position of the buoy can be estimated relative to the position of the land base station. This technique is called the real-time kinematic (RTK) algorithm, which can monitor the position of the buoy relative to the position of the ground base station in real time.

One limitation of this technique is that the maximum distance between the buoy and the base station along the coast for assuring a few centimeters of accuracy would be less than 20 km. Although the noise contamination along the signal path from the



Fig. 1. [Coke online] Principle of GNSS buoy for measuring tsunamis.^[1]

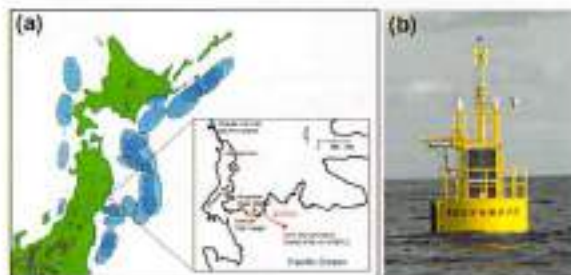


Fig. 2. [Coke online] (a) Location of GNSS buoy experiment off Ofunato City, Northeast Japan. The map with hypocentral regions of large earthquakes (shown in blue) is taken from The Headquarter of Earthquake Research Promotion (1999).^[2] (b) Picture of the GNSS buoy off Ofunato City, Northeast Japan.^[3]

satellite to the ground station can be canceled by considering the signal differences, the noise cannot be canceled as the distance between the two antennas increases. Consequently, the estimation error of the relative position between the buoy and the land base increases as the distance of the buoy is farther from the base station.

After a few preliminary short-period experiments^{[7],[8]} the first long-term experiment was conducted off Ofunato City, along the Sanriku Coast, northeastern Japan (Fig. 2). The buoy was placed approximately 2.3 km from the land base station, and the experiment was conducted from January 2001 to January 2004.

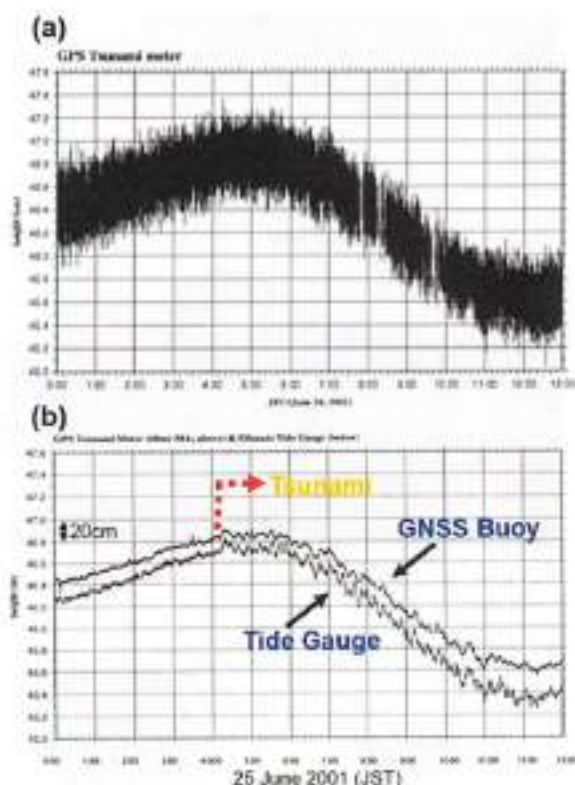


Fig. 3. (Color online) (a) Data obtained on June 25, 2001, that include tsunami caused by the South Peru earthquake. (b) Filtered GNSS record from Fig. 3a (above) and the tide gauge record at Ofunato (below).^{13),14)}

Figure 3 presents the first tsunami data obtained during the experiment. The data were collected approximately 1 day after the 2001 southern Peru earthquake (Mw8.4).¹⁴⁾ Figure 3a shows a plot of the vertical position of the GNSS receiver equipped on the buoy. The figure shows 13 h of data with 1-s sampling interval. The original record includes high-frequency vertical motion of the buoy due to the wind waves, which often have an amplitude larger than that of the tsunami. However, as the tsunami has a longer period of longer than 10 min or even longer than 1 h, the effects of high-frequency wind waves can be easily filtered out by applying a high-cut filter. We used a moving average method with 60 s of data length on the original record of position. Figure 3b shows that the high-frequency components were filtered out. The figure also includes the record of a nearby tide gauge at Ofunato, located approximately 2 km from the buoy, and shows that the record clearly shows the effect of the tsunami at and after approximately 04:00 JST. Although the

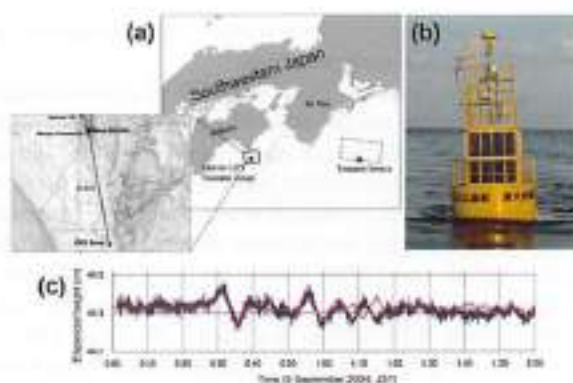


Fig. 4. (a) Location of the experiment off Cape Muroto and the source region of the 2004 Kii Hanto-oki earthquake. (b) picture of the buoy, and (c) low-pass-filtered record of the GNSS buoy on September 6, 2004 (blue), and the simulated record (red).¹³⁾

height of the tsunami was only 10 cm above the regular sea-surface height, the tsunami waveform could be easily recognized. This suggests that the precision of the vertical coordinates of the buoy is estimated to be several centimeters. The Ofunato buoy was also able to detect a tsunami with an amplitude of approximately 10 cm caused by the 2003 Tokachi Oki earthquake (Mw7.9).

After this successful experiment, another buoy was placed offshore Cape Muroto, southwestern Japan, for the period of 2004–2006. In this experiment, the buoy was set approximately 13 km south of the tip of the peninsula (Fig. 4a), and another tsunami caused by the 2004 Kii-Hanto Oki earthquake (Mw7.3) was observed.¹¹⁾ The experiment aimed to disseminate observed data to the public through the Internet. The obtained data were separated into two terms: long- and short-wavelength data that might include tsunamis and wind waves, respectively. The latter is important not for tsunamis but rather for daily monitoring of offshore wave heights. This is especially useful for daily life activities, such as those of fishery people, to monitor wave heights offshore. As tsunamis are highly rare, wave monitoring tools are especially welcomed by coastal residents and fishermen.

Another examination was conducted to determine how the obtained record matches the simulated record. Figure 4c shows that both records are consistent, suggesting that the observed tsunami record can be used to estimate the characteristics of the tsunami source. Conversely, it was found that the tsunami generated by the 2010 Chile earthquake (Mw8.8) occurred 26 min after the simulated tsunami.

mi.¹⁵⁾ The difference in the arrival time for the distant tsunami was investigated, and it was suggested that the effects of compression and dilatation of seawater, elastic tsunami loadings on the solid Earth, and the geopotential variations associated with the motion of mass during tsunami propagation were responsible for the travel time delays.¹⁶⁾

After these successful experiments, the GNSS buoy was adopted as part of the NOWPHAS. The NOWPHAS is aimed at monitoring offshore wind waves for fisheries and other coastal industries, and the buoy is called "GPS wave meter", though it is also used for monitoring tsunami. The first operational buoys in NOWPHAS were installed offshore in southern Iwate Prefecture and central Miyagi Prefecture.¹⁷⁾ These regions are along the Sanriku Coast of Japan, where the tsunami risk is high.

Because of the technical limitations of the RTK method described above, the GNSS buoys for NOWPHAS have been deployed within 20 km from the coast. This distance from the coast maintains a lead time of approximately 10 min for tsunami arrival at the nearest coast. From the disaster mitigation perspective, determining how quickly the alert can be issued after the detection of tsunami arrival at the buoy is important.

The data of NOWPHAS are disseminated through webpages in real time. In 2008, the JMA decided to monitor the NOWPHAS buoy data and since then have used these data to provide people with tsunami information in their tsunami alert.

3. The 2011 Tohoku-oki earthquake

The Port and Airport Research Institute deployed 15 GNSS buoys around the Japanese Islands for NOWPHAS before the 2011 Tohoku-oki earthquake (Fig. 5). Seven sites were located offshore of the Sanriku coast, considering that the area has historically been a risky area for tsunami disasters.

A few minutes after the mainshock of the Tohoku-oki earthquake occurred at 14:46 JST of March 11, 2011, the JMA issued the first tsunami alert using their predetermined procedure.²⁾ However, the issued alert indicated that the tsunami heights would be 6 m along the Miyagi Prefecture coast and 3 m along Iwate Prefecture. These were significantly smaller than the resultant tsunami, which was higher than 10 m, along these coasts. The estimation was small because of the underestimated magnitude of the earthquake. This occurred because many seismograms for earthquake

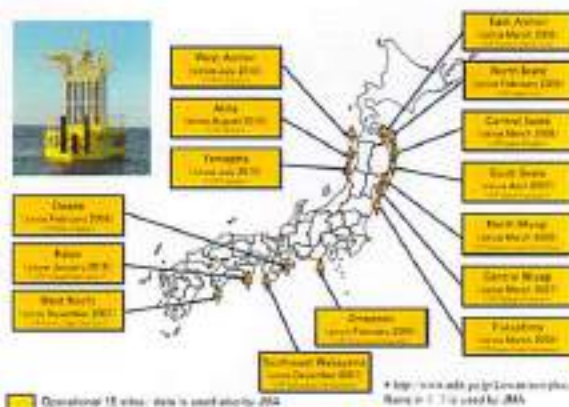


Fig. 5. (Color online) GNSS buoy established before the 2011 Tohoku-oki earthquake by NOWPHAS. Modified from Terada *et al.* (2011).¹⁸⁾

early warning alerts were clipped instrumentally, as the ground shaking intensity was much larger than the instrumental limit.²⁾

A JMA staff who was monitoring the NOWPHAS records recognized that a GNSS buoy showed an acute sea-level rise of more than a few meters and judged that the tsunami would be much larger than the height of the first tsunami alert, knowing that the tsunami at a far offshore magnifies toward the shallower part of the coast and thus would be several times larger than that at the far offshore. The JMA revised the height in the tsunami alert along the Sanriku coast from 6 m to more than 10 m in Miyagi at 15:14 JST.²⁾ Just after its revision, the first tsunami arrived at the Sanriku coast. However, the alert was received too late, and the tsunami claimed more than 18,000 lives.

Figure 6 shows the records of tsunamis taken at three NOWPHAS sites along the Sanriku coast.^{13),18)} The sites near the epicentral area stopped sending the data to the server immediately after the maximum height of the tsunami was recorded at the buoy. This occurred because of malfunction of the data communication link or because of either the unavailability of the Internet or the loss of power after the earthquake. However, the recording was continued at the site with the use of a backup battery, and the obtained coordinates were stored in the storage at the sites even after the failure, so that the record could be recovered afterwards, as shown in Fig. 6.

4. Lessons from the Tohoku-oki earthquake

The lead time of approximately 10 min from the

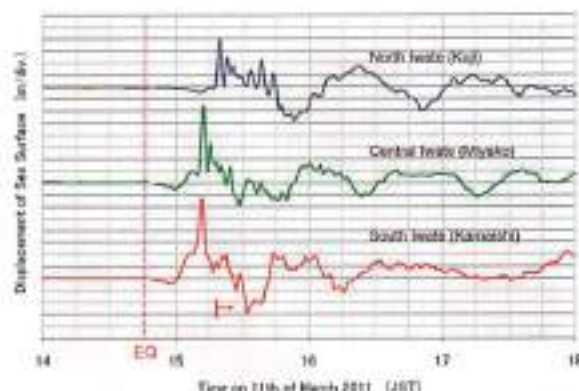


Fig. 6. Recovered records of tsunami data from the 2011 Tohoku-oki earthquake. EQ is the time of the earthquake. The red arrow roughly shows the timing of the tsunami arrival.¹³⁾

detection of the tsunami at the buoy to the arrival of the tsunami to the coast was too short to facilitate evacuation. Extending the lead time requires buoy deployments much farther from the coast. Although there is no linear relationship between the distance to the coast and the lead time, farther deployments of buoy to, for example, 50 km or more than 100 km, will substantially improve the lead time.

The amplitude of the tsunami decreasing with the water depth is a disadvantage of placing a buoy far from the coast. Contrarily, the height of the tsunami far offshore would be amplified a few times as it approaches the coast. Although this may not be troublesome considering that a hazardous tsunami may be tens of centimeters in height even at a deep ocean, an accuracy of few centimeters would still be one of the requirements for measuring sea-level changes accurately.

5. New developments of the GNSS buoy after the Tohoku-oki earthquake

Considering the lessons from the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, we designed a new GNSS buoy to overcome the problems that the old system showed during the Tohoku-oki earthquake. The required specification of the buoy is to deploy it farther offshore from the coast. Because the new developments have already been documented in our previous paper,¹⁹⁾ we briefly review the new system and present our recent results from this new system.

5.1. Introduction of the PPP-AR algorithm.

Considering that a distance limitation of less than 20 km is required when the RTK algorithm in our old system is used, we had to introduce a better algorithm for positioning the buoy far offshore. For

this purpose, we employed a new algorithm called precise point positioning with ambiguity resolution (PPP-AR) or PPP-RTK.^{20),21)} As PPP-AR uses a single point positioning algorithm, it does not require the base station on land to make a baseline. The precise point positioning (PPP) approach has been widely used for crustal deformation research since around 2000.²²⁾ Although it is a convenient positioning method, it is necessary to use precise orbits and satellite clock information, estimated from integrated analysis using global data, which can be available only a few weeks after the observation. Therefore, PPP was limited to offline analysis during its early stages of development. However, recent developments in rapid data analysis and communication technologies have allowed us to obtain precise orbits and clocks in real time. This allowed us to introduce the PPP algorithm for buoy positioning. There are two ways to use PPP, with or without fixing ambiguity, inherent in using the phase of the GNSS signal for positioning analysis. We used PPP-AR as it provides us with better resolution and accuracy.²¹⁾ We used commercial software called RT-Net, which was developed based on the PPP-AR algorithm.

As PPP-AR requires precise orbits and clocks in real time on the buoy for real-time monitoring, the information should be sent to the buoy in real time. For this purpose, we first obtained the necessary information through the Hitz Data Center operated by the Hitachi Zosen Corporation, where GEONET data are used to obtain precise orbits and clocks in real time.

Hitachi Zosen Co. examined the accuracy of PPP-AR using GEONET data. The coordinates of the Shimokawa GEONET site were estimated using the precise orbits and clocks generated by three regional networks of GEONET for distances of 150, 1,000 and 1,500 km. Figure 7 shows the results. The three coordinate components (N-S, E-W, and up) were estimated during 9 days of data acquisition, and short-term variability was obtained for each component. Although the vertical component, which is important for tsunami detection, is less precise than the horizontal components, the standard deviation (SD) for 1,500 km is still less than 30 mm. Therefore, PPP-AR may have a high enough precision to detect significant tsunamis greater than a few centimeters at locations far from the Japanese Islands.

5.2. Introduction of satellite telemetry. We employed a satellite data transmission system for data telemetry. Until the Tohoku-oki earthquake in 2011, a GNSS buoy system such as NOWPHAS, used

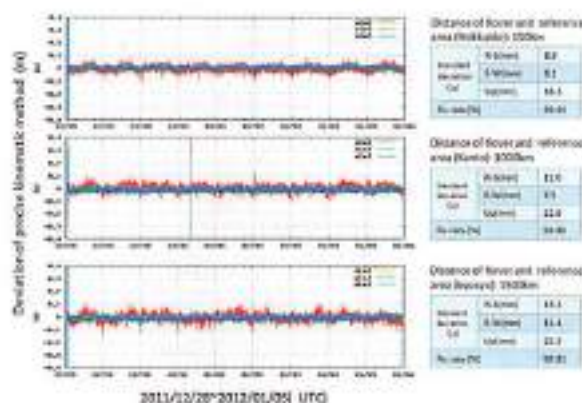


Fig. 7. (Color online) Results of PPP-AR at the Shimoda-GEONET site for different distances of reference networks that generate precise orbits and clocks: (top) 100km, (middle) 1,000km, and (bottom) 1,500km. The observation period is from December 28, 2011, to January 5, 2012. Courtesy of Hitachi Zosen Co. 2012.

a marine radio system as the distance between land and the buoy was less than 20km. As the distance exceeds 20km, land-based radio systems get less reliable to use because the buoy cannot be seen from land owing to the Earth's sphericity. Therefore, using satellite telemetry is mandatory if the GNSS buoy is placed farther than 20km.

If we apply the PPP-AR algorithm, the distance from land to the buoy can be 1,000km or more from the Japanese coasts, if the precise orbits and clocks are obtained from the GEONET regional array. Thus, if precise orbits and clocks can be obtained through the satellite system, the position of the buoy can be anywhere in the ocean.

As a preliminary experiment for satellite telemetry systems, we first used the Japanese Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII) and the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS, also known as Michibiki), a Japanese GNSS satellite. The buoy used in our experiment was operated off from Muroto. The system is shown in Fig. 8. First, the precise orbits and clock parameters were generated by the Hitz Data Center utilizing real-time obtained GEONET 1 Hz data. These orbits and clocks were transmitted through the Michibiki satellite to the buoy. The GNSS phase data obtained on the board of the buoy were analyzed using telemetered precise orbits and clocks. The resultant position of the buoy was then sent back to the land base using ETS-VIII, and the data were visualized on the web and disseminated to users.

6. Field test experiments for the new system (2013–2016)

To test the new PPP-AR algorithm and satellite telemetry in the ocean, we conducted a series of field experiments from December 16, 2013, to January 5, 2014, and from June 1, 2014, to June 21, 2014. We borrowed one of the fishery buoys operated by Kochi Prefecture, Japan. Kochi Prefecture operates a number of fishery buoys, including Kuroshio Bokujyo (Kuroshio Ranch, or Kuroboku for short), offshore of Kochi Prefecture, as some species of migratory fish tend to come around floating materials such as buoys, which help fishermen to catch these fishes easily. We borrowed the Kuroboku No. 16 buoy. The buoy is located approximately 35km south of Cape Muroto, Kochi (Figs. 9a and 9b). The GNSS antenna was set at the top of the pillar at the center of the buoy. A simple flat omnidirectional plane antenna was used for satellite data transmission, considering the buoy rotation and tilt. Other ancillary pieces of equipment were placed on the buoy deck. Solar panels and batteries were used as the power supplies. The GNSS receiver was sampled every second. The precise orbits and clocks necessary for data analysis on the buoy were provided through the LEX signal of the Michibiki satellite. The coordinates obtained every second were transmitted to land through the ETS-VIII satellite. The coordinates were forwarded to the web server placed at Kochi National College for dissemination.

Figure 9c shows the 2 days of data obtained from the experiment. Data of 1 Hz for 33 h from June 18, 2014, to June 19, 2014, are shown. Figure 9c (top) shows high-pass-filtered data together with tidal component data, and Fig. 9c (bottom) shows low-pass filtered data. If a tsunami is recorded, it will appear in Fig. 9c (bottom). It should be noted that occasional data gaps are minor problems in the time series, where data transmission is interrupted. The unstable communication link between the buoy and the satellite due to the tilting of the buoy could be a potential reason. Figure 10 shows a comparison between the transmission rates and the significant wave height. The upper plot shows the transmission rates for which the scale is shown on the left, and the lower plot is the significant wave height for which the scale is shown on the right. The transmission rates decrease as the significant wave heights increase. This suggests that the tilt of the buoy due to high waves reduces the gain in the satellite direction of the

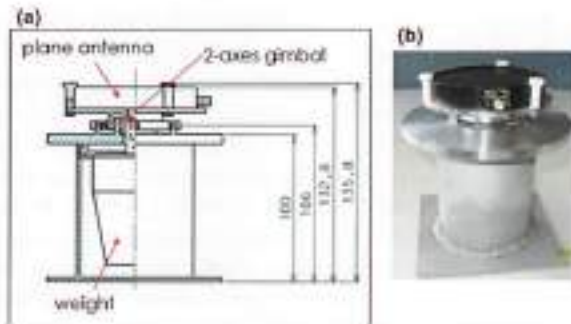


Fig. 11. (Color online) (a) Design of the gimbal for supporting a plane antenna. Unit: mm. (b) Picture of the gimbal and the plane antenna.²⁴⁾



Fig. 12. (Color online) (top) Yuge-maru and (bottom) Hamakaze, both operated by Yuge College.²⁴⁾

Figure 13 shows a part of the results comparing the signal power received from the satellite.^{24),25)} Figure 13a is for the Yuge-maru, and Fig. 13b is for Hamakaze, the red line shows the case with the gimbal apparatus, the blue line shows the case without it, and the antenna was fixed to the deck of the ship. The case with the gimbal apparatus in Fig. 13a, the case for Yuge-maru, shows a significant reduction in fluctuation owing to the usage of the

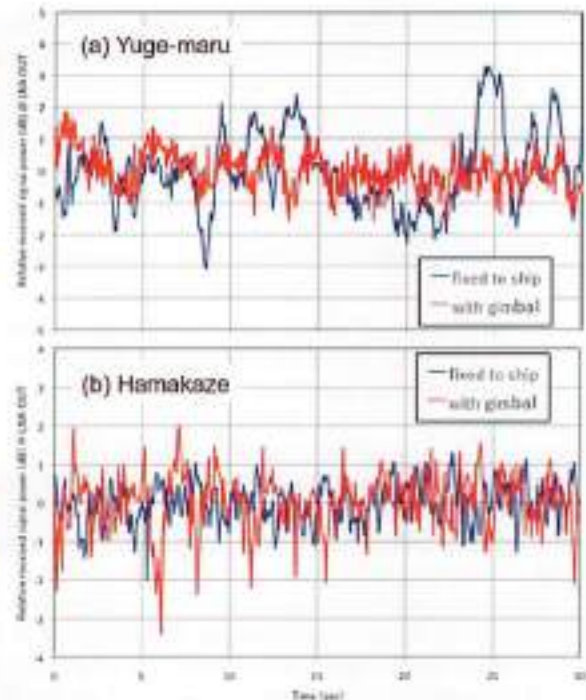


Fig. 13. (Color online) Comparison of received signal power with a gimbal apparatus (red) and without it (blue), for the case of (a) Yuge-maru and (b) Hamakaze.²⁵⁾

gimbal apparatus. However, Fig. 13b, which used Hamakaze, does not show any significant reduction in the fluctuation of the received signal power. Because the sizes of the two ships were different, the different results might be due to the different characteristics of the ship sway period.

In the ocean, tilting oscillation of the buoy at the sea surface changes the antenna gain. Therefore, knowledge of the radio propagation characteristics due to the tilting oscillation for the satellite communication link is very important for the future development of the system. Hence, developing a radio propagation model for signal transmission between the sea surface and the satellite based on the data obtained from the ocean is necessary. We conducted another experiment on August 25–26, 2016, in Hiuchi-Nada of the Seto Inland Sea, Southwest Japan. In the experiment, Yuge-maru was used as the floating body in the ocean, and two plane antennas, one fixed to the ship and the other placed on the gimbal, were used again, together with a gimbal. A tilt meter and GNSS were also used to measure tilt oscillation and ship position. The results from the obtained data suggest that the change in

the strength of the signal can be expressed as the summation of the deterministic and stochastic parts, for which the former part is due to the change in antenna gain owing to the tilting of the antenna and the latter part can be shown as a log-normal distribution.³⁷⁾ These results will be considered to design a new buoy system in the future.

7. A new challenge for the ocean floor crustal deformation measurement

Monitoring of ocean floor crustal deformation based on the combined use of acoustic ranging and GNSS positioning has been a recent challenge in earthquake observation. This idea was first published by a U.S. researcher in 1985,²⁹⁾ but later the technology was developed mainly by Japanese researchers.^{29)–33)} The technique, called the GNSS-Acoustic (or simply GNSS-A) system, for ocean floor positioning is such that the acoustic ranging from the transducer, attached to the vessel, to the ocean floor transponders is used for estimating the position of the centroid of the geometry of the array of transponders and the position of the vessel is estimated by GNSS (Fig. 14). The position of the centroid of the array geometry at the ocean floor can be estimated with an accuracy of a few centimeters. Repeated measurements of the position of the centroid of the geometry can provide information on the crustal movement of the ocean floor.

This method has led to a new understanding of crustal movements at the ocean floor, for example, the motions of plates or blocks,^{33)–38)} plate convergence and interplate coupling,^{37)–48)} co-seismic displacements,^{49)–51)} and post-seismic deformations.^{52)–56)} Its unprecedented magnificent result was shown during

the 2011 Tohoku-oki earthquake,⁴⁷⁾ in that displacements larger than 30 m were observed at the ocean floor near the epicenter, and the results were used for precise estimation of earthquake slip distribution.⁵⁸⁾ Thus, the GNSS-Acoustic technique has become one of the most important tools for monitoring ocean floor displacements and even for providing unprecedented important information on understanding the coupling mechanism of subducting oceanic plates against the overriding plate and the mechanisms of interplate earthquakes that occur along their boundaries.

One problem with the current GNSS-Acoustic system is that the system uses a vessel for GNSS positioning, so that the measurements are not continuous but are in limited numbers annually. The Japan Coast Guard largely oversees observation, using a survey vessel for GNSS-Acoustic observation. This method limits the observation frequency to several times annually at a site. Although the frequency is enough to delineate steady plate motion, it may not be enough for finding important short-term events such as slow slip events for a few weeks or shorter. In order to establish frequent observations, one possibility would be to use our GNSS buoy instead of a vessel for the GNSS-Acoustic system.

In addition to using PPP-AR and satellite data transmission for the GNSS buoy in our new experiment, we incorporated the challenge of observing the ocean-bottom crustal movement in our next experiment on the GNSS buoy. A similar buoy system for GNSS-A was developed by another research group, who used a loosely moored buoy.^{58)–61)} Other researchers have evaluated the use of the Wave Glider (Liquid Robotics, Inc., Sunnyvale, CA 94089, U.S.A.) as a novel platform for GNSS and acoustic measurements.^{62)–65)}

Although the principle is similar, continuous measurements using a buoy instead of a vessel require some technical developments. First, the signals sent and received at the transponder attached to the buoy should be picked automatically and precisely. Sometimes, the received signal is contaminated by various noises, especially by the reflected waves from the buoy itself and/or the sea surface. We developed an algorithm to select the correct arrival time of the direct signal. Test experiments of the algorithm, conducted in the buoy experiments in June and September 2017, showed that the automatic algorithm judged with 99.5% success for the correct signal and rejected 90.9% success for the incorrect signal, considering the visual decision is true.⁶⁶⁾ Second, to estimate the travel time of the acoustic

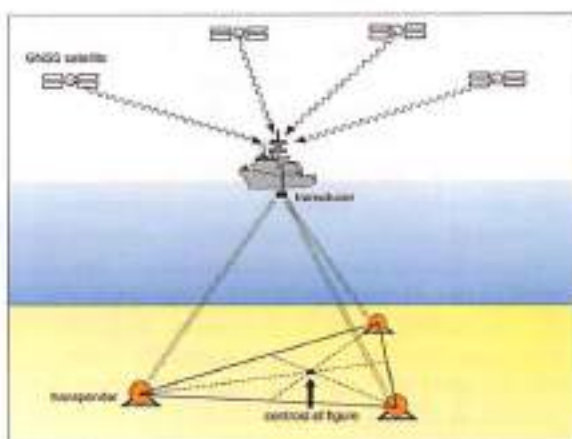


Fig. 14. (Color online) Concept of the GNSS-Acoustic system.

signal between the transponder and the transducer precisely, the distribution of acoustic velocity along the travel path should be precisely known. Although a simple model based on the vertical profile of conductivity and temperature could be used, it was asserted that the introduction of the horizontal gradient estimation of the acoustic velocity is necessary to improve the precision of position estimation of the ocean floor.⁶⁷⁾ As it is difficult to make conductivity, temperature, and depth (CTD) observations in each acoustic ranging, as can be performed for a vessel observation, we decided to estimate the horizontal gradient together with the position of the transponder array. The horizontal gradient is introduced as an unknown parameter because the horizontal gradient and the position of the array are in a trade-off relationship. The estimation of these parameters simultaneously requires that the buoy widely move around the array area. However, as we cannot control the position of the buoy, it is sometimes difficult to precisely estimate the horizontal gradient, which results in a large position error of the array.

We then decided to make the process slightly different. First, we precisely estimated the array configuration by using a vessel. Then, assuming that the configuration does not change from time to time, the position of the ocean floor is estimated by the summation of the predetermined array position and the time-variable displacement of the array.

To precisely estimate the array configuration, we used six acoustic and CTD observations between June 2017 and June 2019 using a vessel. From these observations, we estimated the array positions by the least square method so that the root-mean-square (RMS) between the observed travel times and theoretical travel times becomes minimum.⁶⁸⁾ The results showed that the RMS of estimating the horizontal gradient of the sound speed was 0.04–0.06 among the six observations (Tables 1 and 2), suggesting that the array position is estimated with an accuracy of approximately 5 cm.

Finally, based on these results, we decided to use a grid search method to estimate the change in the position of the array from the travel time observations.

8. The new GNSS buoy system experiment (2010–2021)

Figure 15 shows the system design for the new experiment that started in November 2016. As neither the ETS-VIII nor Michibiki was available

Table 1 Estimated position of the ocean bottom array

	Latitude	Longitude	Ellipsoidal height (m)
Unit 1	32.465283131°N	133.190879148°E	−756.814
Unit 2	32.483409865°N	133.211824751°E	−748.868
Unit 3	32.481173867°N	133.233997907°E	−762.168

Table 2 Estimated results of the horizontal gradient of sound speed

Date (yyyy-mm-dd)	ΔV (m/s/km)	ϕ (°)	RMS (ms)
2017-06-06	0.27	121	0.04
2017-09-08	0.21	136	0.05
2018-05-31	0.14	200	0.06
2018-08-01	0.11	184	0.05
2019-06-04	0.18	174	0.06
2019-08-05	0.16	164	0.05

for the experiment, we employed a commercially available satellite called Thuraya for data transmission between the buoy and the ground base. We borrowed the Kurabaku No. 18 buoy from Kochi Prefecture. This buoy is located approximately 82 km south of the Cape Ashizuri (Fig. 16).

We set the ground base station at Niyodogawa-cho in Kochi Prefecture, and a server to operate the system was set at this base (Fig. 16). The precise orbits and clocks for PPP-AR were generated at the Hltz Data Center and sent to the Niyodogawa base, and the data were transmitted from the base to the buoy through the Thuraya satellite.

The GNSS data obtained on the board of the buoy were analyzed using PPP-AR. We also used the point precise variance detection (PVD) positioning algorithm.⁶⁹⁾ This method uses the received carrier phase signal of GNSS and estimates the change in antenna position using the phase change. As it does not estimate the absolute coordinates of the antenna position but only estimates the “change” of position occasionally, we do not require fixing integer ambiguity of the line-of-sight length between the satellite and the antenna; the results are robustly obtained as long as the satellite signal is locked. However, unlike PPP-AR, PVD requires low-cut filtering of the data, which reduces the sensitivity to a long wavelength. Consequently, PVD is effectively used for monitoring wind waves but not long waves such as tsunamis. PVD is effectively used to monitor daily oceanic conditions for fisheries and other ocean

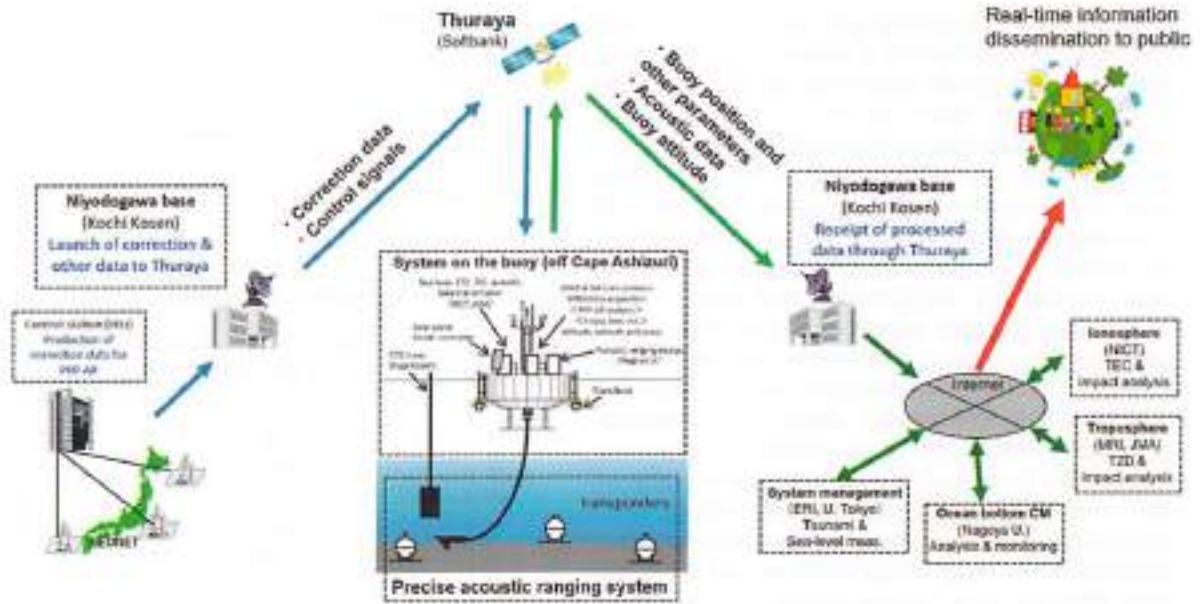


Fig. 15. System design for the recent experiment from 2016 to 2021.¹³⁾

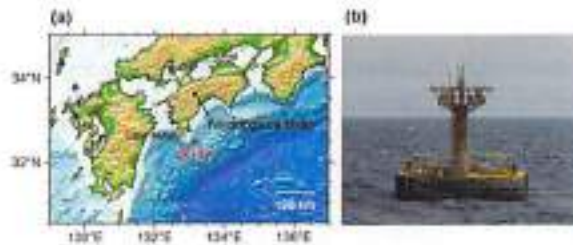


Fig. 16. (Color online) (a) Locations of (bottom) the buoy used for the experiment and (top) the ground base station in Niyodogawa-cho. Bathymetry data were taken from SRTM30-plus.⁷⁹⁾ (b) Buoy No. 18 of the Kuroshio Bokujo (Kuroboku).⁸⁰⁾

activities. Considering that we obtain two kinds of sea surface changes using two algorithms, PPP-AR for long wavelengths and PVD for short wavelengths, the obtained precise position of the buoy is sent back to the base through the same satellite.

The system was first established in November 2016, and the experiment continued until February 2021. Figure 17 shows the sample data of the estimated vertical displacements of the buoy. Figure 17 (top) shows the plot by the PVD method, and Fig. 17 (bottom) shows the plot by the PPP-AR method. For PPP-AR, the daily and sub-daily tidal components were removed. The PPP-AR and PVD records appear the same when the tsunami is excluded. Only when a tsunami is coming can PPP-



Fig. 17. (Color online) Sample data of (top) PVD and (bottom) PPP-AR.¹³⁾

AR draw the curve due to the tsunami. These results are expected to be obtained from our previous experiments.

We expected that the system would be continuously used if every part worked well. However, owing to various problems, continuous observations were suspended numerous times during the experiment. It is occasionally difficult to resolve the central cause of such suspension; disruption of power supply on the buoy, malfunction of the PC on the buoy, and suspension of the satellite communication link are all possible causes. For example, we designed a power system consisting of solar panels and batteries, so that sufficient power is generated even if several days of loss of sunshine occur. However, it seems that the generated power was insufficient, and as a result, the system stopped, especially during the winter season

when sunshine decreased. Power generation was estimated assuming that the solar panel was horizontal. However, tilting of the buoy may have decreased the efficiency of power generation. It was suggested that the center pillar at the buoy may create a shade on the panel and reduce the production of electricity.⁷¹⁾ To overcome this problem, we added solar panels in 2019–2020. The breakdown of machines is another major source of data loss. In harsh environments in the outer ocean, some delicate electric parts are always threatened with failure. Additionally, the loss of communication links was a problem. It was difficult to clarify whether the loss of data occurred from the failure of the communication link or malfunction of any part of the buoy. We had to check the data and hardware cautiously for this purpose and had to ask supporting companies to check and adjust the parameters of the system, which was cumbersome and time-consuming. Frequent maintenance trips are thus required to ensure the entire system on the buoy works well. However, the strong current of the Kuroshio and strong winds due to typhoons and low pressures often prevented us from reaching the buoy. These are some of the problems to be solved in future developments of the system.

Figure 18 shows the recorded period of the results for PVD and the daily fixed rates for PPP-AR on the buoy (Fig. 18a), and both records are stored at the Niyodogawa base (Fig. 18b). Although the experiment started in November 2016, it stopped for a short time period and was unable to resume rapidly. The system was restarted in February 2018 after it was redesigned. Figure 18 shows the records since then. As can be seen in the figure, there are periods in which both the buoy and the base have records, but there are also periods in which records either from the buoy or from the base, or both, are missing. In the case of a power failure on the buoy, none of the data can be stored on the buoy or at the base. On the buoy, PVD has recorded data over longer periods of time as it uses a simple algorithm that uses received phase data, whereas PPP-AR requires precise orbits and clocks separately sent from the satellite. Therefore, once the satellite communication link from the land to the buoy has been suspended, PPP-AR cannot be performed on the buoy. Even if the data are stored on the buoy, the data cannot be sent to the land if the satellite communication link is lost, as there is no time of failure at the base station server. There were some cases where the data were stored on the server at

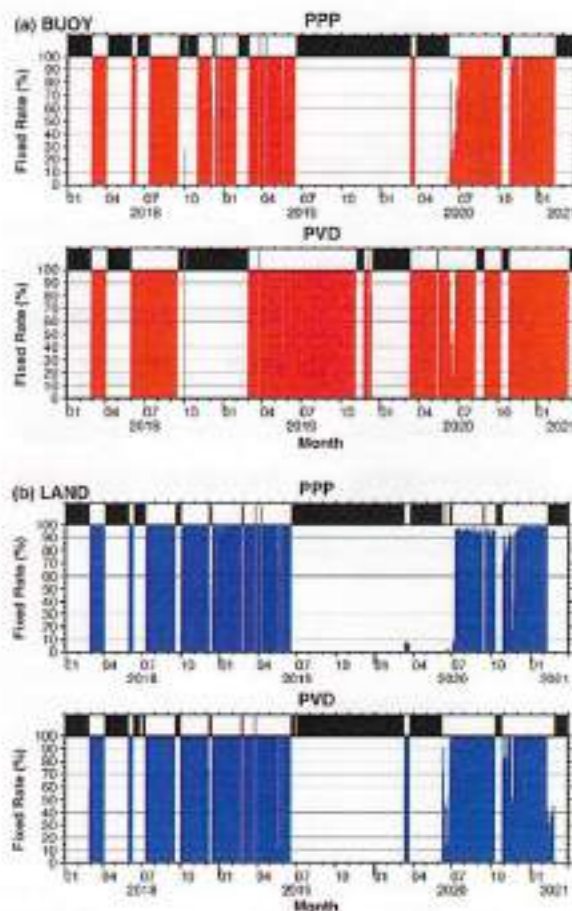


Fig. 18. (Color online) Periods of obtained record of (a) a fixed rate of PPP-AR and PVD record on the buoy and (b) both records that are stored at the Niyodogawa base.

Niyodogawa base, although the data on the buoy were missing, probably because the buoy data were lost from a locally recorded logger. Further examination of these periods of missing data is warranted in future studies.

9. Results of continuous observation of ocean floor crustal movements

Figure 19 shows the data obtained during the period from August 18, 2020, to January 15, 2021. The top three plots (Units 1–3) show the observed travel times from the transducer at the buoy to the three sea-bottom transponders estimated using the algorithm developed by the present project.⁷¹⁾

The middle three plots represent the positions of the transducer at the buoy. The positions of the transducer until November 25, 2020, were obtained by offline analysis using the PPP algorithm with

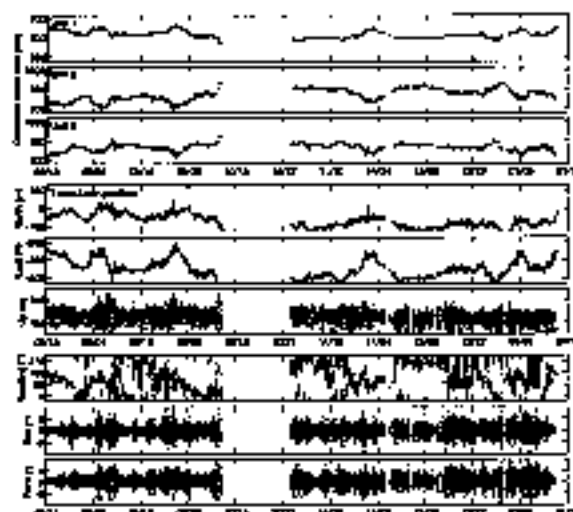


Fig. 19. GNSS-Acoustic observation data from August 18, 2020, to January 15, 2021. (top) Travel times between buoy and transponders (Units 1–3), (middle) Transponder position at the buoy (North, East and Up) and (bottom) direction and tilting angles of the transducer (Heading, Roll and Pitch). Position of the transducer is measured from the centroid of the transponder array geometry. Position was obtained by PPP before November 25, 2020, and PPP-AR after November 25, 2020.

precise orbits and clocks called as MADUCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis), which was developed by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). The positions after November 25, 2020, were obtained using PPP-AR analyzed on the buoy and sent by the real-time satellite transmission. The position of the transducer was shown by placing the origin of the coordinates at the center of the triangle made by the three transponders at the ocean floor.

The bottom three plots are the heading, roll, and pitch of the buoy measured by a gyro installed on the buoy, assuming that the direction of the transducer attached to the buoy is the direction of the bow.

The height of the GNSS antenna and the tilting (pitch and roll) intermittently showed a large amplitude during the end of August to early October 2010. This is due to the passage of typhoons near the buoy. Because the typhoon passed around October 10, 2010, the GNSS observation stopped because of the GNSS antenna breaking. This was restored on October 28, 2020.

Figure 20 shows the results. The top two plots of the figure are the averaged central positions of the ocean-bottom transponder array. The bottom three plots are the estimated sound speed structure. V_0

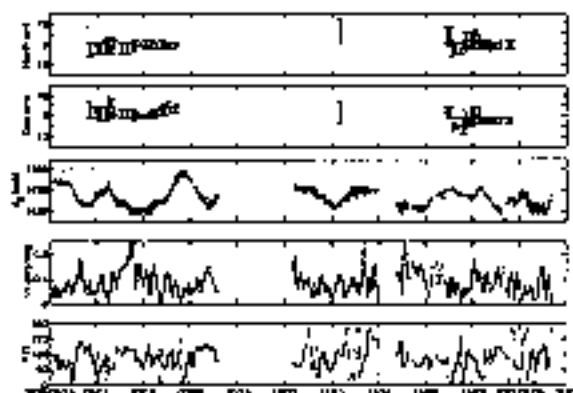


Fig. 20. (Color online) (top) Centroid of the ocean bottom transponder array (North and East) and (bottom) the analyzed results of the sound speed structure (V_0 , ΔV , and ϕ).²²

is the average sound speed, and ΔV and ϕ are the horizontal gradients. The position of the center of the array was estimated using data collected over 28 days. The positions in Fig. 19 are plotted in the center of the 28-day time window. The averaged data provide a much smoother change in the position of the transponder array. However, it can be readily seen that there is an acute jump in position around December 14, 2020, which is due to a change in the positioning algorithm from PPP to PPP-AR on November 25. Note that the change in algorithm occurred in order to choose the best method at the time of positioning. The possible areas narrowed by the grid search are shown by vertical bars called the RMS. Figure 21 shows the horizontal plots of the estimated centroid positions of the array. The RMS error of the estimated centroid position of the array was 3.0 cm. This suggests that the position of the ocean floor based on our developed system can be estimated with an accuracy of a few centimeters. This may be the first system to record a continuous change in the position of the ocean floor with such unprecedented accuracy.

In principle, acoustic measurements can be collected and analyzed in a short duration (i.e., less than 1 day). However, in the present experiment, the conditions in which acoustic measurements were obtained were not ideal: 1) the site is in an area where the Kuroshio Current is strong and the temporal change in the spatial gradient of the speed of sound was large, and 2) as the water depth was shallow (approximately 800 m), the temporal change in the speed of sound degrades the accuracy of estimating the position of the array. Therefore, we used a longer dataset consisting of 28 days to average

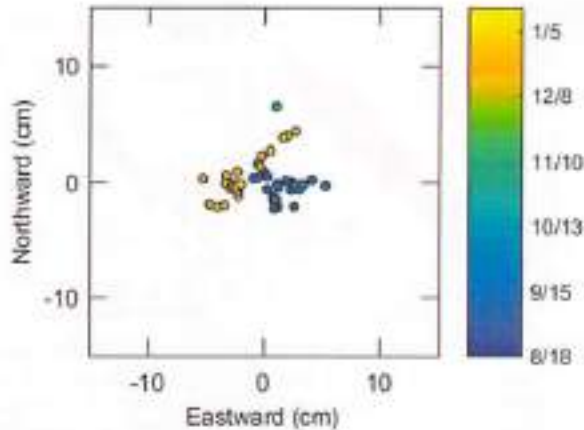


Fig. 21. Centroid of the geometry made by the three transponders at the ocean floor.

out a highly variable sound speed gradient and its temporal change to suppress the temporal variation of the estimated seafloor position. When the length of data was shorter, the variation in the estimated position was larger; for example, if the data length was 14 days, then the SD of the estimated centroid position of the array was larger than 10 cm. If we use the recently proposed method for the estimation of sound speed structure,⁷³⁾ a better estimation using a shorter data length could be attained, which is being attempted in further studies.

10. Discussion

In our series of GNSS buoy experiments for tsunami monitoring, we showed that it is worth pursuing their development for far offshore operations. However, some operational problems remain to be solved.

First, buoys may have to be operated autonomously. Although maintenance of the buoy is crucial for the long-term operation of the system, it is costly and workers sometimes find it difficult to reach and work on the buoy when the sea is rough. Therefore, some devices on board buoys, such as PCs, satellite communication systems, and power systems, should be maintained without manning. Dual or triple settings of devices or alternative ways of operation in case of failure of one system would be a solution. Such autonomous systems should be developed for actual operation of the GNSS buoy system.

Second, the mechanical strength and stability of the buoy body should be maintained for a long time (e.g., 10 years or more). This problem was discussed based on the 3-years and 7-months experiment

between 2013 and 2016 in Cape Muroto described in Section 6; for example, barnacles attached to the body of the buoy were examined to find out if they cause the changes in buoyancy or tilt. It was concluded, however, that there were no effects on the buoyancy or tilt of the buoy after the operation.¹⁹⁾ Additionally, in the above experiment, an examination was conducted to find out if ablation of the iron chain, which was used for mooring of the buoy to the anchor at the ocean floor, would lead to breakage out of friction caused by continuous swings of the chain because of the sea waves. However, the experiment showed that cautious design of the chain would prevent the chain from breaking even if the operation will be for 10 years or beyond. Lastly, an experiment was performed to find out if salty wind and water would cause earlier breakage of metallic material, but such problems may have to be solved using ocean civil engineering technologies. Considering these problems, it was concluded that it is possible to design a buoy sustainable over the long term even at the deep outer ocean at a depth of thousands of meters.¹⁹⁾

Some care may have to be taken for loss of the buoy by, for example, crash with a vessel or vandalism. If the buoy drifts away from the original position, tracking the position of the buoy as it carries the GNSS is possible and can send messages of its coordinates.

A sufficient and stable power supply is a problem for the reliable long-term operation of the system. We designed the power system cautiously so that the system would work without sunshine for several days. However, the system stopped soon after our first deployment in November 2016. As discussed in Section 8, it was suspected that the shadow of the center pillar on the buoy, which is used for setting antennas of GNSS and satellite communication, would reduce the efficiency of electricity production of solar panels.⁷⁴⁾ Tilting of the buoy due to waves might also reduce the efficiency of power generation. Careful design of the electric power supply with sufficient allowance is indispensable for long-term power supply on the buoy.

Another important factor for the reliable operation of GNSS buoys is the satellite communication link. In our previous experiments using Japanese Engineering Test Satellites (ETS-VIII), no serious problems were encountered, but the record indicated a correlation of frame-rate error, which means data loss, and wave height. This suggested that changes in the elevation angle between the antenna and the

satellite might affect the reliability of the data communication link. Careful examination of the cause of failure of the communication link is needed, as there are many causes for fading owing to the moving platform of the satellite antenna, as described in Section 6.²⁷⁾

When GNSS was developed for positioning in the 1970s, the required accuracy was at the level of meters by using the code of the GNSS signal. As a result of technical developments later, using the GNSS signal phase allowed positioning accuracy to be a few centimeters, and they can now be available in real time. Considering these new developments of GNSS technology together with satellite communication technology, we would be able to deploy GNSS buoys in any area of the ocean. Considering that the ocean has been considered as an area where data are difficult to be recorded, our GNSS buoy could serve as a significant change in fulfilling the gap in data distribution over the Earth's surface. Although our primary aim was to apply the technique for early tsunami detection, the recent development of our experiments added the GNSS buoy technique for observing ocean floor crustal movements. In addition to these applications, buoys placed in the ocean can be used for more applications. For example, the GNSS data can estimate precipitable water vapor (PWV) and total electron content (TEC) in the atmosphere and ionosphere, respectively, which are both important geophysical parameters.¹⁸⁾

The PWV in the oceanic area is crucial for numerical weather forecasting through a four-dimensional data assimilation approach. Most of the data for the simulation have been taken on land. Considering that 70% of the Earth's surface is covered by the ocean, it is very important to include atmospheric parameters in the ocean area for data assimilation toward better weather forecasts. In Japan, PWV derived from GEONET of the GSI has already been used in numerical weather simulations. Inclusion of data from the surrounding oceanic region may improve the weather prediction by the simulation. GNSS PWV can be used with sufficient accuracy by placing GNSS on the ship. GNSS buoy could possess some merits compared with a ship as the buoy provides a fixed-point continuous data, relative to a moving irregularly observed shipborne data.^{74),75)}

GNSS data recorded at a previous GNSS buoy station from Cape Muroto, southwest Japan, were used to show the tropospheric zenith delay; this was used to derive PWV, which can be used in atmospheric studies.⁷⁶⁾ Shoji *et al.* (2018, unpub-

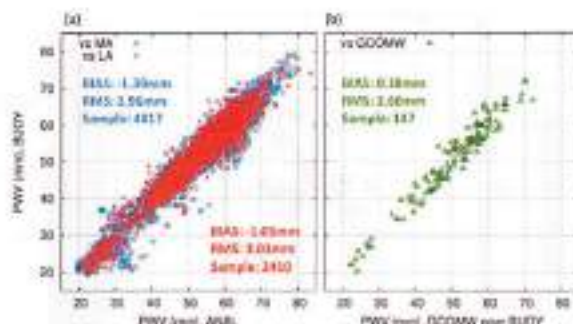


Fig. 22. (Color online) Precipitable water vapor (PWV) estimated at the buoy compared with (a) JMA objective analyses (MA: mesoscale analysis, LA: local analysis) and (b) Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMS2) on board the Global Change Observation Mission 1st Water (GCOM-W1) (Shoji *et al.*, 2018, unpublished data).

lished data) examined how buoy-derived PWV is compatible with otherwise obtained PWV, using the data obtained between June 4 and September 15, 2018, in the present experiment. Figure 22 shows the comparison between the buoy PWV and (a) JMA's operational objective analyses (mesoscale analysis (MA) and local analysis) and (b) Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMS2) on board the Global Change Observation Mission 1st Water (GCOM-W1) satellite data. These comparisons, in terms of their SDs showed that the differences between the buoy PWV and MA, LA, and GCOM-W1 were 2.96, 3.03, and 2.60 mm, respectively. The differences between the different methods were approximately 3 mm, suggesting that the inclusion of GNSS buoy data for data assimilation in weather forecasting could improve early warning systems of heavy rain such as linear rain bands and the prediction of typhoon paths.

The application of GNSS buoy data can also contribute to ionospheric research. For example, the National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT) is conducting the Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS-TEC observation (DRAWING-TEC) project to develop high-resolution ionospheric TEC observations by collecting TEC data from dense GNSS array data.⁷⁷⁾ They showed that such dense GNSS array data make it possible for ionospheric researchers to study medium-scale (100–1,000 km) ionospheric disturbances such as traveling ionospheric disturbances and equatorial plasma bubbles that are frequently observed in the mid- and low-latitude ionosphere. Moreover, high-resolution TEC maps

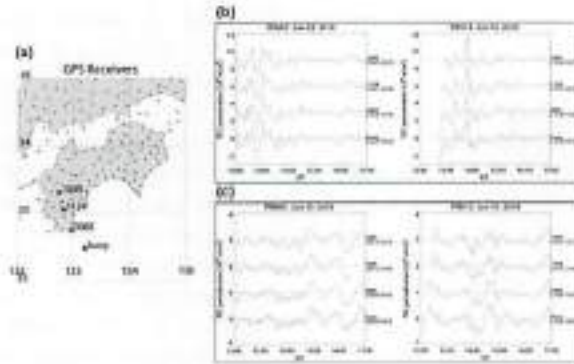


Fig. 23. Comparison of TEC variation. (a) Used sites of GEONET (1049, 1124, 0085) and GNSS buoy (buoy), estimated TEC variation for (b) PRN05 and PRN13 at UTC12-17 of June 2, 2018, and (c) PRN05 and PRN13 at UTC12-17 of June 10, 2018. Cases for (b) calm weather and (c) harsh weather (Tsugawa *et al.*, 2018; unpublished data).

can reveal ionospheric variations due to large earthquakes such as the 2011 Tohoku-oki earthquake.⁷⁸⁾ Conversely, the ionospheric disturbances shown above may decrease position and navigation accuracy and hence lead to problems in land and air traffic. Thus, monitoring these ionospheric disturbances, known as a space weather phenomenon, is crucial for the integrity of GNSS system operation. GEONET is used to monitor ionospheric conditions in Japan during the operation of space weather forecasting services. However, the dense GNSS networks worldwide, which are used in their DRAWING-TEC project, are restricted to land, and more GNSS stations are needed in sparse areas, especially in the oceanic region.⁷⁷⁾ Our efforts to develop GNSS buoys would help ionospheric research and space weather monitoring. Tsugawa *et al.* (2018, unpublished data) used a part of the data obtained in our buoy experiment in 2018 to derive ionospheric TEC values and showed that the ionospheric TEC variations have almost the same accuracy as that obtained by nearby GEONET sites (Fig. 23).

In studies on GNSS-TEC, both absolute and relative TEC values are used. The absolute TEC for the integrated electron density along the entire line of site (LOS) between the receiver and satellite was obtained using both the carrier phase and the GNSS code with corrections of satellite and receiver biases. The accuracy of the absolute TEC was expected to be several TECU (1 TECU = ~ 54 ns = 16.2 cm).^{79),80)} The relative TEC is the perturbation component of absolute TEC by detrending it with a 1-h running average for each LOS. The accuracy of the relative

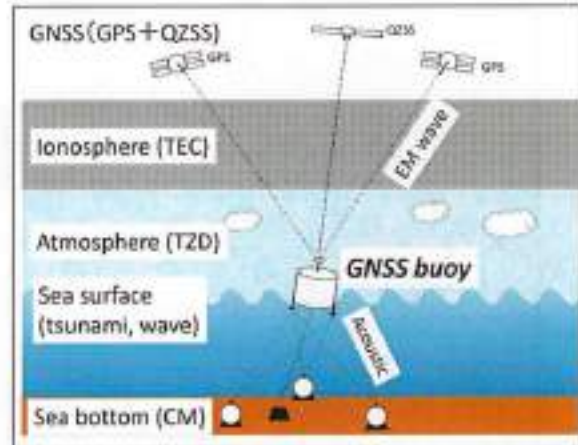


Fig. 24. (Color online) Multipurpose GNSS buoy for synthetic geohazard monitoring, from ionosphere to ocean floor.¹⁹⁾

TEC ranged from 0.01 to 0.02 TECU, which corresponds to $\sim 1\%$ of the wavelength of GPS signals L1 (0.19 m) and L2 (0.24 m).^{81),82)} Hence, relative TEC is widely used for monitoring ionospheric disturbances. Monitoring ionospheric disturbances for societal impact requires an accuracy of approximately 0.1 TECU (Tsugawa, 2021, personal communication). As shown in Fig. 23, the TEC perturbation of the buoy data clearly satisfies this requirement.

Summing up the possible applications of the GNSS buoy, a single buoy has a large potential for observing wide areas, covering from the ocean floor to the ionosphere. Geohazards related to space weather, atmospheric weather, sea surface waves, and crustal movements at the ocean floor can also be monitored using a single GNSS buoy. Thus, such a synthetic geohazard monitoring system using a GNSS buoy can be used as a monitoring tool (Fig. 24), and deployments of the array of GNSS buoys to a wide area in the northwestern Pacific area could serve as an important national infrastructure for geohazard monitoring systems and as a system of a new observation network for earth sciences (Fig. 25).¹⁹⁾ This hypothetical network is called as OCEAN GEONET, as compared with the GEONET, which has been widely used on land and has been operated by the GSI of Japan.¹⁹⁾

If the construction of a GNSS buoy array in the ocean is adopted as a national project, many buoys should be placed around the Japanese coast, as shown in Fig. 24. The system may require a dedicated satellite that may have to be operated by

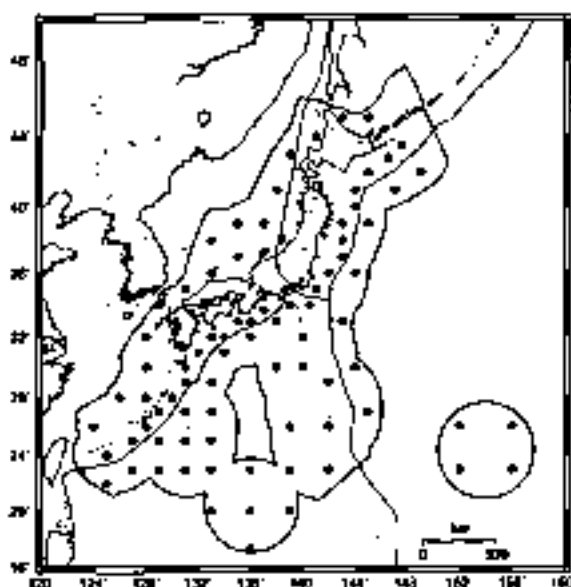


Fig. 25 (Color online) Future scope of GNSS buoy array in the northwestern Pacific. Small red dots are the currently operational GNSS buoy array for wave monitoring by KOWPHAS. Blue dots are arbitrarily plotted for a hypothetical GNSS buoy array. Solid lines indicate the Japanese Exclusive Economic Zone.⁽³⁾

the government, in which we might have to develop a new method for more effective satellite transmission technology. Recent technological development using the Internet of Things (IoT) Non-Terrestrial Network would be applicable for oceanic GNSS buoy arrays.⁽³⁾

Finally, we also discussed the cost of building and maintaining the entire system of the ocean array. The largest cost was attributed to the construction of the buoys. Constructing a buoy system will require several million U.S. dollars, although the price would be less if the number of buoys are increased, for example, more than 80 buoys, as shown in Fig. 25. The cost of the satellite communication link is also a major component of the total cost. If a commercial satellite with 1 kbps is used, it may be possible to send buoy coordinates every second together with GNSS-A data for every 15 min, including other ancillary data such as temperature and gyro data. This may cost more than U.S.\$ 100,000 per year for a buoy. Ideally, the Japanese government should design a dedicated satellite system for sending and receiving data between the ground base and the buoys. In our experiment, we used a bidirectional data communication link. However, the cost of satellite communication could be much reduced if

the positioning satellite can send its precise orbit and clock. As the Japanese QZSS system is now in operational mode to send MADOCA, receiving and using MADOCA from QZSS on a buoy would significantly reduce the cost of data communication link. Operation of the ground station requires a high-performance computer and a large amount of storage with a backup system for sustainable operation. Therefore, given that 80 buoys will be constructed for OCEAN GEONET, construction of the total system would amount approximately to a few hundred million U.S. dollars for the buoys and an additional U.S.\$ 8 million per year for the data communication links. Including other ancillary devices and maintenance fees, the total cost for 10 years of operation is approximately several hundred million U.S. dollars.

11. Concluding remarks

Although OCEAN GEONET is still in the early stages of development, we hope it will materialize in the future. Although the construction of a buoy array in the ocean requires hundreds of millions of U.S. dollars, we would like to emphasize that it can provide a wide variety of earth scientists with unprecedented data of the ionosphere, atmosphere, sea-surface changes including tsunamis, and ocean-floor crustal deformations. Therefore, a GNSS buoy system will offer a highly cost-effective approach compared with other single-purpose-oriented projects to obtain new innovative data globally, thus beginning a new scientific innovation in the fields of solid earth, ocean, atmospheric, and ionospheric science.

Acknowledgements

This research was supported by the MEXT Coordination Funds for Promoting Aerospace Utilization (2013–2014), the discretionary budget of the Director of ERI in 2015 and JSPS KAKENHI Grant Number 16H06310 (2016–2021). The research project was coordinated by the following researchers, and the authors would like to express sincere gratitude to all of them (listed in an alphabetical order of family names in each research organization):

Dr. Natsuki Kikugasa, Mr. Haruno Koike, and Mr. Kenjiro Matsukuro of Nagoya University,

Dr. Hiromu Seko and Dr. Yoshinori Shoji of the Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,

Dr. Masoru Ishii, Dr. Michi Nishioka, and Dr. Takuya Tsugawa of Radio Research Institute, the National Institute of Information and Communications Technology (NICT),

Dr. Ken'ichi Takizawa, Dr. Morio Toyoshima, and Mr. Shin'ichi Yamamoto, of Network Research Institute, NICT.

Mr. Tadahiro Iwasaki and Mr. Naokiyo Koshikawa of JAXA

The authors are indebted to members of the Fisheries Promotion Department in Kochi Prefecture for their assistance in using the Kuroboku buoys and to the staff members of Yuge-maru and Hamakaze of the National Institute of Technology, Yuge College, for their assistance during ship operations. The authors thank the staff of Hitachi Zosen Corporation, Softbank Corporation, and Kaiyo Gijyutsu Co. Ltd. for their assistance during the course of this research. The authors are indebted to two anonymous reviewers and a handling editor who provided valuable comments to significantly improve the manuscript.

References

- 1) Kusano, F. and Yokota, T. (2011) History of tsunami warning services in Japan. *Quart. J. Seismol.* 74, 35–91 (in Japanese).
- 2) Ozaki, T. (2011) Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0)—Tsunami warnings/advisories and observations— *Earth Planets Space* 63, 827–830.
- 3) Bernard, E.N., Gonzalez, F.I., Meinig, C. and Mithum, H.C. (2001) Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis. In *Proceedings of the International Tsunami Symposium 2001 (ITS 2001)* (on CD-ROM), NTHMP Review Session, R-6, Seattle, WA, 7–10 August 2001, 97–108.
- 4) Hiro, R., Tanioka, Y., Kanazawa, T., Sakai, S., Nishino, M. and Suyehiro, K. (2001) Micro-tsunamis from a local interplate earthquake detected by cabled offshore tsunami observation in northeastern Japan. *Geophys. Res. Lett.* 28, 3533–3538.
- 5) Hirata, K., Takahashi, H., Grist, E., Satake, K., Tanioka, Y., Sugioka, H. et al. (2003) Source depth dependence of micro-tsunamis recorded with ocean-bottom pressure gauges: the January 28, 2000 Mw 6.8 earthquake off Nemuro Peninsula, Japan. *Earth Planets Space* 55, 305–318.
- 6) Maeda, T., Furumura, T., Sakai, S. and Shinohara, M. (2011) Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space* 63, 803–808.
- 7) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Ishiki, H. and Yokoyama, A. (1998) A development of GPS tsunami meter. *Gekkan Kaiyo* 15 (Special Volume), 38–42 (in Japanese).
- 8) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Ishiki, H., Matsubashi, M. et al. (2009) Real time observation of Tsunami by RTK-GPS. *Earth Planets Space* 62, 841–845.
- 9) Born, G.H., Parke, M.E., Axelrad, P., Gold, K.L., Johnson, J., Key, R.W. et al. (1984) Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy. *J. Geophys. Res.* 89, 24517–24526.
- 10) Shono, T., Pandoe, W., Mudita, I., Roemer, S., Illigier, J., Zech, C. et al. (2011) GPS water level measurements for Indonesia's Tsunami Early Warning System. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 741–749.
- 11) Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T. et al. (2006) Tsunami due to the 2004 September 26th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. *Earth Planets Space* 57, 297–301.
- 12) The Headquarters for Earthquake Research Promotion (1989) *The Earthquake Activities of Japan*, 391pp (in Japanese).
- 13) Terada, Y., Kato, T., Nagai, S., Koshimura, S., Miyake, T., Nishimura, H. et al. (2011) Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy. In *Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2011*, 411–422.
- 14) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Ishiki, H., Moriguchi, T. et al. (2001) A new tsunami monitoring system using RTK-GPS. In *ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12*, pp. 645–651.
- 15) Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T. and Koshimura, S. (2011) Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan. *Earth Planets Space* 63, e5–e8.
- 16) Watanabe, S. (2013) Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans. *Geophys. Res. Lett.* 40, 4001–4006.
- 17) Kawai, H., Satoh, M. and Kawaguchi, K. (2010) Annual report on Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbours (NOWPHAS 2009). *Tech. Note Port Airport Res. Inst.* No. 1209, pp. 1–93 (in Japanese with English abstract).
- 18) Kawai, H., Satoh, M., Kawaguchi, K. and Seki, K. (2011) Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake tsunami. *Rep. PARU* 60, 3–63 (in Japanese).
- 19) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M. et al. (2018) Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. *J. Disaster Res.* 13, 460–471.
- 20) Rocken, C., Mervart, L., Lukes, Z., Johnson, J., Kanazaki, H., Kakimoto, M. et al. (2004) Testing a new network RTK software system. In *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, U.S.A., pp. 2831–2839.
- 21) Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C. and Iwabuchi, T. (2008) Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time. In *Proceedings of the*

- 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 397–405.
- 22) Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Wnuckius, M. and Webb, F. (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.* 102, 5005–5017.
 - 23) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koehimura, S., Imada, N., Sakano, T. *et al.* (2015) Recent developments of GPS tsunami meter for a far offshore observations. In *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)* (ed. Hashimoto, M.) International Association of Geodesy Symposia, Springer, Cham, Vol. 145, pp. 145–153.
 - 24) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S. *et al.* (2017) GNSS buoy array in the ocean for a synthetic geohazards monitoring system. In *Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, CA, U.S.A., June 25–30, 2017, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), ISOPE-I-17-213.
 - 25) Yamamoto, S., Kawasaki, K., Terada, Y., Kato, T., Hashimoto, C., Motobaghi, O. *et al.* (2014) Data transmission experiment from the buoy using the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII)—The aim of early detection of Tsunami. IEICE Tech. Rep. 114, 6–10 (in Japanese).
 - 26) Terada, Y., Yamamoto, S., Iwakiri, N., Iwasaki, K., Koshikawa, N., Tada, M. *et al.* (2016) An improvement of the antenna installation mechanism for satellite communication of the GPS tsunami meter. Presented at the JpGU 2016 Meeting, Chiba, May 2016, HDS19-24 (in Japanese).
 - 27) Takizawa, K., Yamamoto, S., Toyoshima, M., Futamura, A., Terada, Y. and T. Kato (2017) Channel modeling on satellite communications for GNSS buoy in the ocean. IEICE Tech. Rep. 117, 90–102 (in Japanese).
 - 28) Spiess, F.N. (1985) Suboceanic geodetic measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. GE-23*, 502–510.
 - 29) Fujimoto, H. (2006) Ocean bottom crustal movement observation using GPS/Acoustic system by universities in Japan. *J. Geod. Soc. Jpn.* 52, 265–272.
 - 30) Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M. *et al.* (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planets Space* 58, 265–275.
 - 31) Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Bezaire, G.M., Sugimoto, S. *et al.* (2006) Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 33, L23306.
 - 32) Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takahashi, K. *et al.* (2008) A new GPS-Acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai Trough. *J. Geophys. Res.* 113, B02401.
 - 33) Spiess, F.N., Chadwell, C.D., Hildebrand, J.A., Young, L.E., Purcell, G.H., Jr. and Dragert, H. (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planet. Inter.* 108, 101–112.
 - 34) Chadwell, C.D. and Spiess, F.N. (2008) Plate motion at the ridge-transform 326 boundary of the south Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic data. *J. Geophys. Res.* 113, B04415.
 - 35) Yasuda, K., Tadokoro, K., Taniguchi, S., Kimura, H. and Matsuhiro, K. (2017) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 44, 3572–3579.
 - 36) Chen, H.-Y., Ikuta, R., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Kohmi, T., Wang, C.-C. *et al.* (2019) Back-arc opening in the western end of the Okinawa Trough revealed from GNSS/Acoustic Measurements. *Geophys. Res. Lett.* 46, 137–145.
 - 37) Gagnon, K., Chadwell, C.D. and Norikawa, E. (2005) Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Nature* 434, 205–208.
 - 38) Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M. *et al.* (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planets Space* 58, 265–275.
 - 39) Matsumoto, Y., Ishikawa, T., Fujita, M., Sato, M., Sato, H., Mochizuki, M. *et al.* (2008) Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima NE Japan, inferred from GPS/Acoustic seafloor geodetic observations. *Earth Planets Space* 60, e9–e12.
 - 40) Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Ando, M., Okuda, T., Nagai, S. *et al.* (2012) Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 39, L10306.
 - 41) Tadokoro, K., Nakamura, M., Ando, M., Kimura, H., Watanabe, T. and Matsuhiro, K. (2018) Interplate coupling state at the Nankai-Shoto (Hyakuryu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements. *Geophys. Res. Lett.* 45, 6869–6877.
 - 42) Watanabe, S., Sato, M., Fujita, M., Ishikawa, T., Yokota, Y., Ujihara, N. *et al.* (2014) Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5789–5796.
 - 43) Watanabe, S., Bonk, Y., Melgar, D. and Tadokoro, K. (2018) Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai trough, Japan, from seafloor and onshore geodesy. *J. Geophys. Res.* 123, 2443–2461.
 - 44) Yasuda, K., Tadokoro, K., Ikuta, R., Watanabe, T., Nagai, S., Okuda, T. *et al.* (2014) Interplate

- locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost part of the Suruga Trough, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5806–5812.
- 45) Yokota, Y., Ishikawa, T., Sato, M., Watanabe, S., Saito, H., Ujihara, N. et al. (2015) Heterogeneous interplate coupling along the Nankai Trough, Japan, detected by GPS-acoustic seafloor geodetic observation. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2, 10.
 - 46) Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T. and Asada, A. (2016) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature* 534, 374–377.
 - 47) Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K. and Ochi, T. (2018) Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data. *Geosphere* 14, 535–551.
 - 48) Kinura, H., Tadokoro, K. and Ito, T. (2019) Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations. *J. Geophys. Res.* 124, 6140–6164.
 - 49) Kido, M., Fujimoto, H., Miura, S., Osada, Y., Tsuka, K. and Tabei, T. (2006) Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquake, detected through repeated GPS/Acoustic surveys. *Earth Planets Space* 58, 911–915.
 - 50) Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hirao, R. and Ito, Y. (2011) Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 38, L24303.
 - 51) Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Beaman, G.M., Sugimoto, S. et al. (2006) Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 33, L23305.
 - 52) Matsumoto, Y., Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Yabuki, T. and Asada, A. (2006) Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planets Space* 58, 1573–1576.
 - 53) Sato, M., Saito, H., Ishikawa, T., Matsumoto, Y., Fujita, M., Mochizuki, M. et al. (2011) Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.* 38, L01312.
 - 54) Tomita, F., Kido, M., Osada, Y., Hirao, R., Ohta, Y. and Iinuma, T. (2015) First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique. *Geophys. Res. Lett.* 42, 8391–8397.
 - 55) Tomita, F., Kido, M., Ohta, Y., Iinuma, T. and Hirao, R. (2017) Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. *Sci. Adv.* 3, e1700113.
 - 56) Iinuma, T., Hirao, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y. et al. (2016) Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nat. Commun.* 7, 13506.
 - 57) Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M. et al. (2011) Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science* 332, 1395.
 - 58) Iinuma, T., Hirao, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y. et al. (2012) Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.* 117, B07409.
 - 59) Kido, M., Fujimoto, H., Hirao, R., Ohta, Y., Osada, Y., Iinuma, T. et al. (2015) Progress in the project for development of GPS/Acoustic technique over the last 4 years. In *Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)* (ed. Hashimoto, M.). International Association of Geodesy Symposia, Springer, Cham, Vol. 145, pp. 3–10.
 - 60) Kido, M., Inazu, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Takahashi, N., Tanabe, S. et al. (2018) Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation. *J. Disaster Res.* 13, 472–488.
 - 61) Inazu, M., Kido, M., Honcho, C., Ohta, Y., Takahashi, N., Fukuda, T. et al. (2019) Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slowly moored buoy. *Prog. Earth Planet. Sci.* 6, 56.
 - 62) Chantach, C.D. (2013) GPS-Acoustic Seafloor Geodesy using a Wave Glider. Abstract G14A-01 presented at 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif. 9–13 Dec. 2013.
 - 63) Sathikumar, S., Barbot, S., Hill, E., Peng, D., Zornik, J., Suhaimi, S. et al. (2016) Seafloor geodesy using wave gliders to study earthquake and tsunami hazards at subduction zones. Abstract G31A-1046 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 11–15 Dec. 2016.
 - 64) Iinuma, T., Kido, M., Ohta, Y., Fukuda, T., Tomita, F. and Ueki, J. (2021) GNSS-Acoustic observations of seafloor crustal deformation using a wave glider. *Front. Earth Sci.* 9, 603945.
 - 65) Cruz-Atencio, V.M., Ito, Y., Kostoglodov, V., Hjörleifsdóttir, Iglesias, A., Tago, J. et al. (2018) A geoscientific amphibious network in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Seismol. Res. Lett.* 89, 1436–1449.
 - 66) Kinugasa, N., Tadokoro, K., Iseaki, S., Terada, Y., Putamura, A. and Kato, T. (2018) Development of acoustic signal processing unit for continuous observation of ocean bottom crustal deformation using marine GNSS buoys. Presented at the JyGU 2018 Meeting, SC367-P08.
 - 67) Kido, M. (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean. *Earth Planets Space* 59, e33–e35.
 - 68) Kinugasa, N., Tadokoro, K., Kato, T. and Terada, Y.

- (2020) Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy. *Prog. Earth Planet. Sci.* **7**, 21.
- 69) Ishiki, H., Tsuchiya, A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M. et al. (2000) Precise variance detection by a single GPS receiver—PVD (Point precise Variance Detection) Method—. *J. Geod. Soc. Jpn.* **46**, 239–251.
- 70) Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J. et al. (2009) Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30 PLUS. *Mar. Geod.* **32**, 355–371.
- 71) Tadokoro, K., Kinugasa, N., Kato, T., Terada, Y. and Matsuhira, K. (2020) A marine-buoy-mounted system for continuous and real-time measurement of seafloor crustal deformation. *Front. Earth Sci.* **8**, 123.
- 72) Tadokoro, K., Kinugasa, N., Kato, T., Terada, Y. and Matsuhira, K. (2021) Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements. Presented at the JpGU-AGU2020 meeting, July 2021.
- 73) Watanabe, S., Ishikawa, T., Yokota, Y. and Nakamura, Y. (2020) GARPOS: Analysis Software for the GNSS—A seafloor positioning with simultaneous estimation of sound speed structure. *Front. Earth Sci.* **8**, 597532.
- 74) Shoji, Y., Sato, K., Yabuki, M. and Tsuda, T. (2016) PWV Retrieval over the ocean using shipborne GNSS receivers with MADOCA real-time orbits. *Sci. Online Lett. Atmos.* **12**, 265–271.
- 75) Shoji, Y., Sato, K., Yabuki, M. and Tsuda, T. (2017) Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the sea adjacent to Japan. *Earth Planets Space* **69**, 153.
- 76) Shoji, Y. (2010) The experiment of the tropospheric zenith delay analysis using the GPS tsunami buoy off Cape Muroto, Japan. Presented at the 2010 Spring Meeting of the Meteorological Society of Japan, 23rd May 2010, Tokyo, Japan.
- 77) Tsugawa, T., Nishioka, M., Ishii, M., Hosomi, K., Saito, S., Shinburi, A. et al. (2018) Total Electron Content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS. *J. Disaster Res.* **13**, 535–545.
- 78) Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., Nishioka, M., Maruyama, T., Kato, H. et al. (2011) Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space* **63**, 875–879.
- 79) Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S. and Miyazaki, S. (2002) A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. *Earth Planets Space* **54**, 63–70.
- 80) Sekido, M., Kondo, T. and Kawai, E. (2003) Evaluation of GPS-based ionospheric TEC map by comparing with VLBI data. *Raido Sci.* **38**, 1009.
- 81) Tsugawa, T., Otsuka, Y., Coster, A.J. and Saito, A. (2007) Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L22101.
- 82) Spilker, J., Jr. and Parkinson, B.W. (1996) Overview of GPS operation and design. In *Global Positioning System: Theory and Applications* (eds. Parkinson, B.W. and Spilker, J., Jr.). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Va, Vol. 1, pp. 29–55.
- 83) Takizawa, K., Yamamoto, S., Terada, Y. and Kato, T. (2021) Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in IoT Non-Terrestrial-Network for GNSS buoy array in the ocean. Presented at the IEEE VTC2021-Fall meeting, 27–30 September 2021.

(Received Sep. 8, 2021; accepted Nov. 16, 2021)

Profile

Tetsuyuki Kato was born in Kanagawa Prefecture in 1952. He received his M.S. and Ph.D. in 1977 and 1980, respectively, from the University of Tokyo. He started his research career as a Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Postdoctoral Research Fellow at the Earthquake Research Institute (ERI), the University of Tokyo, and was soon hired as an assistant professor at ERI in 1980. He was promoted to associate professor in 1991 and then to a professor in 2000 at the same institute. His research field is geodesy, and he is studying the application of the Global Navigation Satellite System (GNSS) for crustal deformation research and for developing a GNSS buoy for early tsunami warning. After retirement from the University of Tokyo in 2018, he worked as the Director at the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture from 2018 to 2021.

He is a specially appointed professor at Taiho University, Tokyo, Japan.



Profile

Yukihiko Terada was born in Ehime Prefecture in 1949 and graduated from Osaka University in 1972. He started his research career as an engineer at the Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corporation. He was engaged in developing non-destructive examination method and apparatus for the material and welded joints of steel structures. For these achievements, he was granted a Ph.D. by the Kyushu Institute of Technology in 1995. He started to develop a tsunami meter using GNSS technology after the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake. He was commended by the Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism for the development of a GNSS tsunami monitoring system in 2004.

Yukihiko Terada was invited to the National Institute of Technology, Kochi College, as a professor in 2006. He has been an honorary professor and visiting professor there since 2015.



Profile

Keiichi Tadokoro was born in Hyogo Prefecture in 1973. He received his M.S. and Ph.D. degrees from Kyoto University in 1997 and 2000, respectively. In his doctoral thesis, he investigated temporal variations in the structure and physical properties of a fault zone from seismic wave analyses. He became a research associate (assistant professor) at the Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, in 2000. He was promoted to associate professor in 2006. He has contributed to the development of a measurement system for sea-floor crustal deformation using the GNSS-Acoustic technique. His current research topic is the interplate coupling along the Nankai Trough and the Ryukyu Trench derived from sea-floor crustal deformation. He is also developing an advanced system for GNSS-Acoustic measurements.



Profile

Akira Futamura was born in Aichi Prefecture in 1974. He received his M.S. from the Tokyo University of Mercantile Marine in 2000. His Ph.D. was obtained from Ehime University in 2005. He started his research career as a research associate at the National Institute of Technology, Yuge College, in 2000. He was promoted to associate professor in 2008 and a professor in 2020 at the National Institute of Technology, Yuge College. He has conducted research on the marine environment in the Seto Inland Sea in the field of coastal oceanography. In addition, he is conducting research in the field of seafarer education.



津波防災のためのGPS(GNSS)ブイの開発について

加藤照之¹

¹大正大学 地域構想研究所 特命教授

(要旨) 衛星を用いた精密測位システムGPS (Global Positioning System) を海洋に浮かぶブイに設置してその位置をリアルタイムで監視することにより津波の監視や、住民の早期避難に役立てることができる。この考えをもとにGPSブイの開発を四半世紀にわたって進めてきた。本年でその事業が終結することから、本事業のこれまでの開発経過を振り返るとともにその到達点、成功事例・失敗事例などをふまえ今後の課題や地域への貢献の可能性などについて考察する。

キーワード: GPS、GNSS、GNSS 津波計、津波防災、津波早期警戒

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) は米国で開発された地球上の位置を正確に計測する衛星を用いた測位システムである。GPSは衛星セグメント、コントロールセグメント、地上セグメントの3つのセグメントから構成される。衛星セグメントは地球を周回する30機以上の衛星から構成され、地球上のどこからでも数機以上の衛星が見えるように配置されている(図-1)。衛星には極めて精度の高い時計も搭載されている。コントロールセ

グメントは衛星の状態を管理する地上施設で、GPS衛星の位置や搭載している時計の誤差などを監視し、衛星から自身の位置や時刻の補正情報あるいは測位の誤差要因となる電離層の影響などの情報を地上の受信機に向けて放送させる機能を持っている。地上セグメントは地上の利用者が用いる機器で、基本的にはGPS衛星からの信号を受信するアンテナと、取得した信号を解析する受信機から構成されている。衛星から受信した信号を解析すると衛星の位置と衛星-受信アンテナ間の距離が求められる。4機以上の衛星からの距離がわかるとア



図-1 : GPS の衛星セグメント。30 機以上の衛星から構成される。

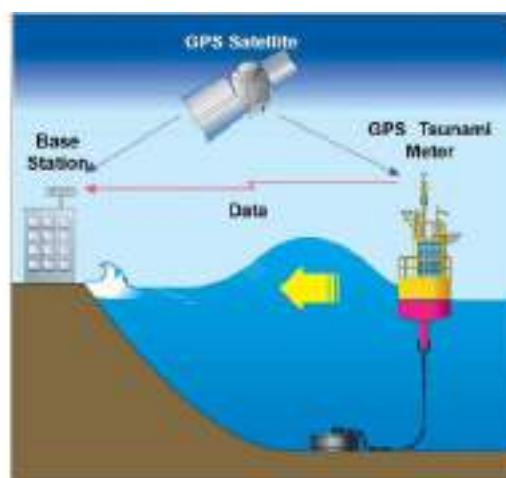


図-2 : GPS 津波計の概念図。

ンテナの中心位置の緯度、経度、高さ与时刻が算出される。地上セグメント（アンテナと受信機）は、測量機器として基本的な位置情報を算出するものから、地図データと組み合わせて自動車に搭載するカーナビやスマホに搭載している地図アプリや位置を使うゲームソフトなど、広い分野で用いられている。

GPS の受信システムを海岸から離れた沖合の海洋に浮かべたブイに搭載してその位置を精密に計測することにより海面高の変化を監視することができる。もし津波が発生してブイを通過すれば、津波が海岸に到達する前に検知することができるだろう（図－2）。このようなアイデアを実現しようと 1996 年頃から“GPS 津波計”の開発をはじめた。私個人ではアイデアはあっても実際に実験を行うのは大変である。幸い日立造船株式会社という大手企業が協力を申し出てくださったので、実験を行うことができた。最初は手で持てるくらいの簡単なブイに機器を搭載して、当時著者が所属していた東京大学地震研究所の油壺地殻変動観測所の置かれている三浦半島先端の小網代湾で実験を行った（図－3）¹⁾。

幸い実験はうまくいき、ブイからの信号を無線を使って油壺観測所に置かれた計算機に取り込み、



図－3：油壺実験で使われた最初の GPS ブイ。円筒形のブイの中に GPS 受信機と蓄電池が格納されている。ブイから鉛直に立てたビラーの上に水平に GPS アンテナが装着されている。斜めに取り付けられているのは無線通信用のアンテナ。

観測所に置かれた同じGPS受信装置を基準としたブイの相対位置をモニターすることに成功した。このように、地上に置かれた観測点を基準として動く物体の動きを測定する方法を即時キネマティック方式（Real-time kinematic）と呼ぶ。この方式で海面高の変化が数cm程度の精度で測定することが可能であるが、これは陸の基地局との間の相対的な位置を計測することで測位の誤差原因となるGPS衛星からの電磁波が通ってくる電離層や大気の影響を差し引くことで誤差を低減できるからである。一方、そのため、基地局とブイが遠く離れてしまうと電磁波の伝搬経路が離れてしまって差し引く効果が薄れてしまい精度よく測位をすることができなくなる。そのため、この方式では数cmという高精度で測位するためにはブイと基地局の距離は20km以内程度とされている。それでも、ブイを沿岸から10km以上遠くに置けばブイが津波を検知してから海岸に到達するまで10分程度以上は時間がかせげるので住民避難に役立つであろうと考えた。

2. “GPS津波計”開発の展開

最初の予備的実験がうまくいったので、次により本格的な実験を行うこととした。本格的な実験を行うにあたっては、実際の津波を想定し日本列島の津波の常襲地域である三陸海岸を設置場所に考えた。大船渡市に協力をお願いしたところ快諾を得たので、大船渡市沖にブイを設置することになった。



図－4：大船渡に設置された GPS 津波計。(a) 設置場所を示す。青い楕円は東北日本周辺の大地震の震源域を示す²⁾。(b) ブイの写真。ブイで取得されたデータは無線により遠方に見える陸上に設置された基地局で受信される。

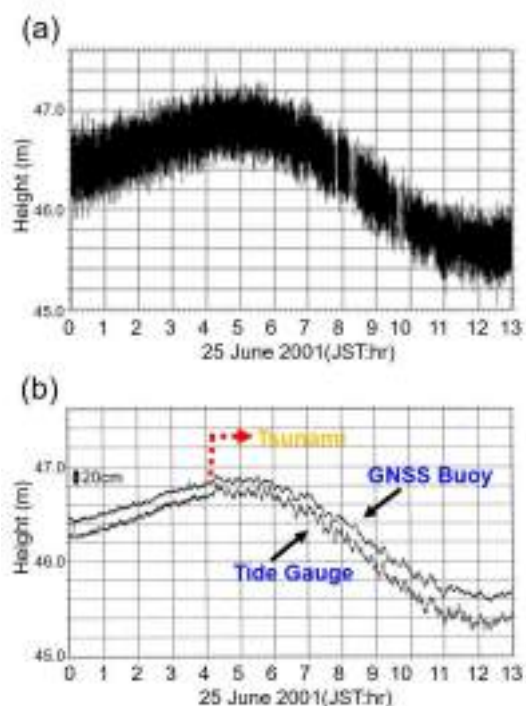
しかしながら、外洋にある程度長期にわたって設置するとなるとかなりブイが大型になる。このためのブイの製作や設置・運用にはかなり経費が必要となる。そこで我々は文科省の科学研究費補助金への申請を行い、幸い採択された。

こうして、2000年～2003年の3年間にわたって大船渡沖1.6 kmくらいのところにブイを設置して観測を行うことができた。図－4 (a)にブイの設置位置とブイの写真を示す。ブイの大きさは直径が2.8m, 高さは海中部を含めると13mを超える。重量は約10トンである。大変幸いなことにこの期間に小規模な津波を計測することに成功し、大きな自信となった³⁾。まず、2000年6月23日にペルーで発生した地震による津波が24日に日本に襲来した。この時のデータを図－5に示す。同図上段は得られた原記録の上下成分を示す(GPSの解析では南北、東西、上下の3成分が得られるが、津波では特に上下成分が重要なのでこれだけを示す)。この図

では緩やかに変化する潮汐成分(一日約2回の潮の満ち引き)を示しているがそれに振幅が数十cm程度の早い周期の成分が重複しているのがわかる。これは風によって海面が変動する通常の波による変動を示している。このような波の周期は数秒程度である。この図では津波がどれかはわからない。

津波というのは風波よりはるかに長い周期をもっていて数十分から一時間程度の周期で潮が満ちたり引いたりする。そこで、この原記録にフィルターを施して、長周期の成分だけを取り出してみると図－5の下図のようになる。ここには2つのグラフが描かれているが、この上側が上記で記した、フィルターをかけた上下成分のグラフである。そのすぐ下に示されているのは大船渡の検潮場の潮位記録である。まず、これら2つの波の形がよく似ていることがわかるだろう。そうして、この図の中で赤い矢印で示したあたりから海面の上下動の振幅が大きくなっているのがわかるだろう。これが津波である。

大船渡ではペルー地震だけでなく2003年9月に北海道十勝沖で発生した地震による津波の検知にも成功した。続いて四国の室戸岬沖約13km付近に同様にGPS津波計を設置しそこでは2004年9月の紀伊半島沖地震による津波を検知することができた⁴⁾。これらの成功により、我々が開発した津波計は国土交通省の港湾空港技術研究所が日本列島周辺に設置しているNOWPHASと呼ばれる近海の波浪の高さを計測するために多数設置されている超音波式の波高計と共に“GPS波浪計”として波浪を計測する目的で設置されることとなった⁵⁾。システム自体は同じものなのだが、図－5に示しているようにこのシステムは津波だけでなく風による波浪の高さを計測することもできるのである。同じブイで取得されるデータをうまく利用することにより、普段我々が見る波浪もまれに発生する津波も同時に計測できることは費用対効果の面でも有益である。こうして、NOWPHASは現在までに20機近いGPS波浪系を日本列島周辺に展開しており、データは気象庁でも監視され、津波の監視にも役立てられている。

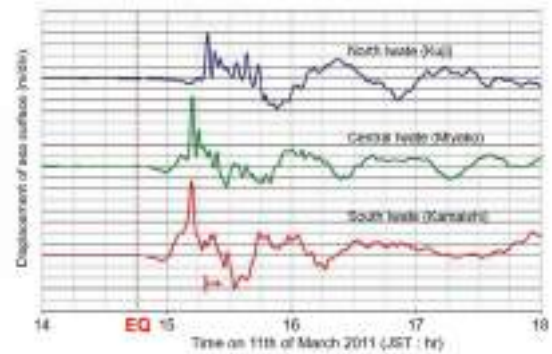


図－5：2000年6月24日に取得されたペルー地震による津波。(a)原データ。風波が卓越していて津波は判別できない。(b)上側の波形は(a)の波形にローパスフィルターを作用させたもの。下側の波形は大船渡検潮場の記録。いずれも10cm程度の小さい振幅の津波波形が見て取れる。

3. 2011年東北沖地震の教訓

NOWPHASのGPS波浪計は2011年3月までには三陸海岸沿いを中心に全国に15か所設置された。沿岸からの距離はいずれも十数kmである。そこへ世界でもまれなマグニチュード9の巨大な地震が三陸沖に発生し巨大な津波を生起した。地震は3月11日14時46分頃に発生し、同時に津波が発生した。気象庁が津波警報を発令したのは地震発生後の3分後であった。その内容は“宮城6m、岩手3m”であった。発生した津波がGPS波浪計に到達したのは15時10分頃のことであるがその時の高さはすでに高いところで6 mに達していた（図－6）⁶⁾。津波の特性としてその速度は海岸の浅いところに近づくにつれて遅くなる。そのため、後ろの波が前の波に次第に近づいていき、津波の高さが増幅されて高くなるという現象が知られている。陸から十km以上離れたところで6mを超える津波が観測されたということはそれが海岸に到達する頃には10mを優に超える可能性があることを示している。このため、これを監視していた気象庁は直ちにそれまで出されていた津波警報を15時14分頃に“宮城・岩手10m以上”と変更した⁷⁾。しかしながら、津波の第一波が沿岸に押し寄せたのはそのわずか数分後のことであった。結果として一万八千人以上の死者行方不明者を出す結果となった。更新後の津波警報を聞いていた人もいてそれによって命が助かった方もいないことはないかもしれないが、結果として多くの命が失われたことは痛恨の極みであった。

もし津波が自動的に検知されてそれが瞬時に警報の更新につながれば犠牲者はもっと少なく済んだ可能性もあるだろう。しかしながら、津波の到来を風などの他の原因による波と精度よくかつ短時間（例えば1分以内程度）のうちに判別することは大変困難と考えられる。仮にそのような判別ができたとしても、海岸からの距離が十数km以内であると波が海岸に到達するまでに10分程度であるから、避難のためにはより長いリードタイムが必要のように思われる。津波警報の更新が間に合わなかったのはブイが沿岸に近すぎたことによると考えることもできるだろう。当時使われていた技



図－6：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に発生した津波のGPS波浪計による記録。上から岩手北部（久慈）、岩手中部（宮古）、岩手南部（釜石）。EQが地震発生時刻、15時18分頃の矢印はおよその津波の沿岸への到来時刻を示す。縦軸は一目盛りが1m。

術が陸上の基地局とブイの距離が20km以内というように限定されていたことがこのような結果を生んだのだと考えられる。

4. 新たな発展

このような反省に立って、GPSブイをより遠洋に設置できないかと考えた。これまでの技術は第一章でも述べたように陸上の基地局に対するブイの位置を相対的に決定するものであった。この方式のためにブイを海岸から20km以上の遠洋には設置できなかったのであるが、幸いなことに2000年を過ぎるころから、GPS受信機の位置を単独でかつ数cmの精度で位置を決める技術（これを精密単独測位と呼ぶ）が急速に発展してきた。そこでこの方式を取り入れることとした。ただし、この方式ではGPS受信機で取得したデータをPC等に取り込んで解析する際にGPS衛星の精密な位置や時刻の情報を別途必要とする。このようなデータを一括して精密暦と呼ぶが、このデータは別途陸上のGPSデータを多くの観測点で受信してそこから推定することができるので、そのようにしてできた精密暦をブイ上の計算機に送る必要がある。

ところで、GPSという言葉は米国が開発・運用してきたシステムであるが、安全保障の観点からロシアや中国、ヨーロッパ（EU）などがそれぞれで

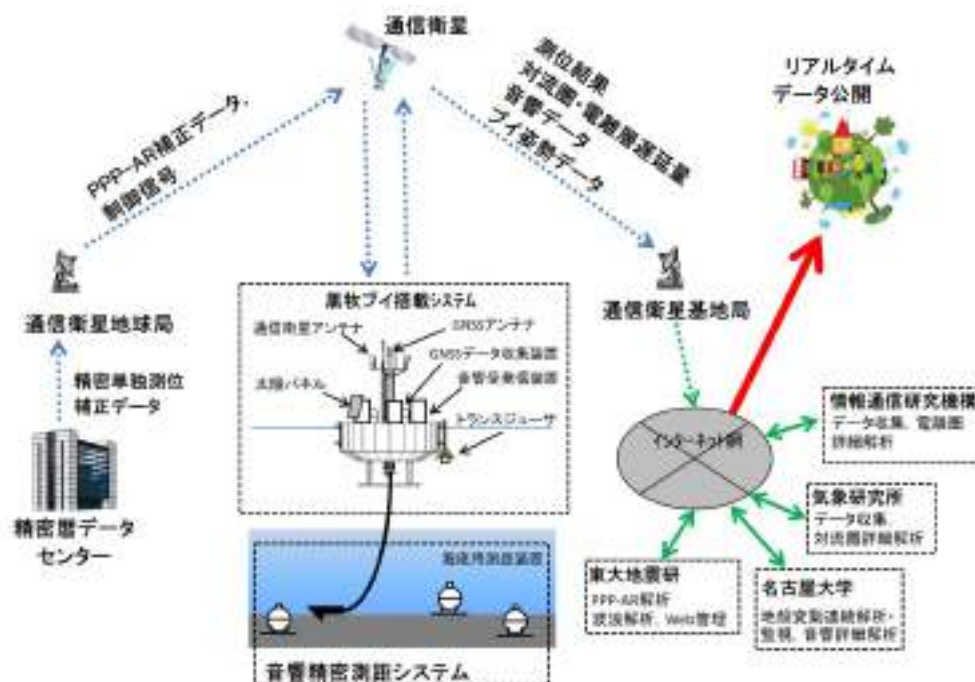


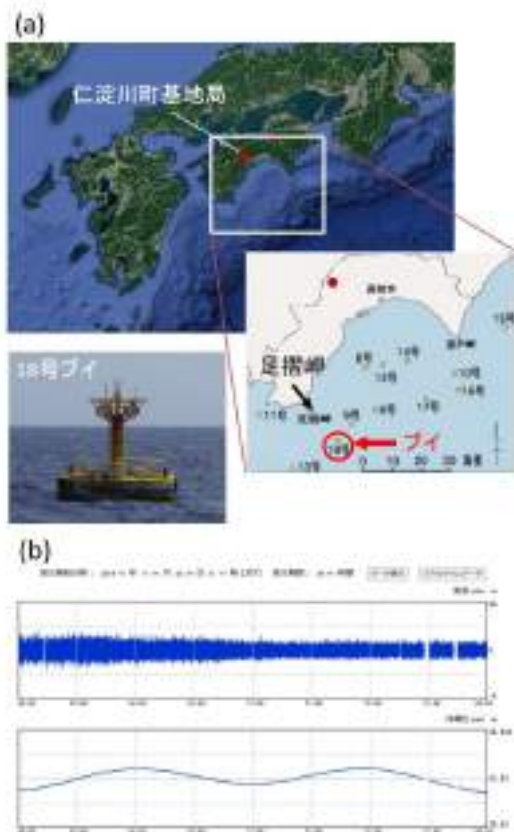
図-7：新しく開発した遠洋用GNSS ブイシステム。

独自の衛星測位システムを導入するようになり、いずれも我々のような民間でも利用が可能になってきた。ロシアのシステムはGLONASS、中国のシステムはBeiDou、ヨーロッパのシステムはGALILEOなどとそれぞれの名称で呼ばれている。なお、日本でも近年GPSと互換のシステムであるMICHIBIKIと呼ばれる衛星測位システムを導入しつつある。そこで、これらを総称してGlobal Navigation Satellite System (GNSS)と呼ぶことが急速に普及してきた。そこで、本論でもここからはGPSブイではなくGNSSブイと記述することとする。使える衛星の数が格段に増えるほかは原理的に変わったことはない。

閑話休題。このようにしてGNSSシステムを用いた津波計測システムの開発を進めることとなった。解析手法について精密単独測位法を導入することになったが、もう一つの問題はデータの伝送である。以前のシステムではブイが沿岸よりそう遠くないところに設置されているので通常使われている海上無線で十分であったが遠洋になると無線は使えない。そこで衛星通信を導入することとなった。上に述べたように、まずは陸上のデータセンターで精密暦を生成し、それを衛星通信を用いてブイ上の計算機に送る。送られた精密暦を用いて、

ブイ上で取得したGNSSデータに対して精密単独測位解析を行い、得られたブイの位置座標（東西、南北、上下の3成分）をふたたび衛星通信を用いて地上の基地局に送る。データは一般的に1秒に1回の取得・計算を行う。得られたブイ位置を受信した基地局において、フィルター操作などを行って、風波による短周期成分と、それを除去した長周期成分に分離し、これらをWeb上で表示できるようにする。

以上のような作業の流れを示したのが図-7である。なお、本システムでは海面変動を検出するGNSS装置だけでなく海底の位置も音響を使って測位するための装置も装着されている。GNSSでは衛星から受信装置までの距離を電磁波を用いて計測するのであるが、電磁波は水中を伝わるのができないため、音波を使ってブイと海底におかれた音波の送受波装置の間の距離を計測し、海底の位置を推定するのである。海底の位置計測は名古屋大学の研究者が担当している。さらには得られたGNSSのデータを用いることで大気中の水蒸気量や電離層の電子数なども推定することができるため、気象学や電離層研究などにも利用が可能であるため、気象研究所や情報通信研究機構の協力をいただいている。このため、このGNSSブイは様々な災



図－8：(a)GNSS ブイの位置と仁淀川町に設置された基地局の位置を示す。左下は実験に用いられた高知県海洋牧場 No. 18 号ブイの写真。(b)取得されたデータの Web 上の記録。2018 年 11 月 23 日 24 時間のブイの上下変動データを示す。(上) 波浪を示す短周期データ、(下) 短周期データを除去したデータ。

害の軽減のために寄与することが期待されるため、我々はこのブイを総合防災ブイと呼んでいる⁸⁾。

実験は2016年11月頃から始められ2021年2月まで続けられた。ブイが設置されたのは高知県の足摺岬沖約40kmのところに設置されている高知県が設置運用している海洋牧場ブイNo. 18を借用した。図8 (a)にブイの設置場所、ブイの写真及び基地局の位置を示す。衛星通信によって基地局に送られたデータが短周期データと長周期データに分離してWeb上に表示された画面の例も図－8 (b)に示す。図8 (b)の長周期のデータに現れている一日2回の緩やかな上下変動は潮汐である。津波がブイを通過するとこの長周期の記録に現れるはずである。

5. 課題と今後の展開に向けて

このように、実験は順調に進んだかに見えるが、実際には様々な問題によってデータが途切れることとなった。なかでも問題だったのは電源である。ブイ上にはGNSS受信機や衛星通信用の機器のほかにもデータ収集や解析のための小型計算機や海底地殻変動計測用の各種機器などが設置されている。このため十分な電源を確保するために大型のソーラーパネルと蓄電池をブイ上に搭載する必要がある。設計上は数日間の無日照にも耐えられる十分な電源を設置したはずなのであるが、太陽電池にブイのポール(図－8 (a) 参照)の影ができるなど、設計通りの電力が得られなかったようである。そのため、設置間もなく電力不足でデータ伝送が停止した。その後太陽電池を増設するなどで回復したもののかなりぎりぎりでの運用を強いられてしまった。そのほかにも外洋での厳しい環境のためケーブルの腐食などで機器が故障するなどの問題が発生した。こうした課題は想定内のことでもあり、これらを改善して長期の運用に耐えられるブイを設計する必要があると考えられる。我々はこの研究のために文部科学省科学研究費補助金のうち基盤研究(S)というカテゴリーの研究費をいただいていたのだが、最大でも5年間で1.5億円までという経費であり、自前のブイを設計・製作するとなるとそれだけで優に一億円を超える経費が必要となったのでやむを得ず既存のブイを借用することになったわけである。また、ブイ上のトラブルが発生した場合、小型の船舶をチャーターしてブイに渡って修理をする必要が生じるが、海流や気象の影響でなかなか船が出せないなどの困難もあった。我々の研究は基礎的な開発研究であり、実現の可能性を示すと同時に課題を抽出し、将来の発展につなげるのが趣旨であるので、これらの課題をいずれ解決して遠洋でのGNSSブイが多数設置され、津波防災だけでなく様々な自然災害の低減のためのインフラとしての海洋GNSSブイアレイが実現することを心から願っている⁹⁾。

6. GNSSブイの地域における活用の可能性

今回利用したブイは図－8 (a) で示すように高

知県の水産振興部で設置・運用されている黒潮牧場と呼ばれる漁礁用のブイのうちの一つであるNo. 18のブイである。この漁礁用のブイというのは魚が浮遊物のあるところに寄ってくるという習性を利用してブイ周辺で漁をしようというものである。図－8 (a)でわかるように高知県では土佐湾およびその周辺に多数のブイを設置している。我々はそのうちの一つを借用して実験を行ったわけであるが、もしこれらのうちのいくつかにでもGNSS受信装置を設置すれば大変有効な津波監視システムができるに違いない。ブイ上の電力確保が一番の課題ではあるが、それが十分確保されるということになればブイに様々な観測装置、例えば海水温や海流などのセンサーが付帯できれば漁業者にとっては大変重要な情報が得られるのではないだろうか。海流の流向・流速は貨物船等の航路の設定のためにも重要な情報である。また、我々がWeb公開をおこなった波高データのうち短周期の

波浪データはそれだけでも、釣り客やサーファーなどにとっては有用なデータになるのではないだろうか。沖合の海洋情報を沿岸住民や観光客等が利用することで海洋のより効率的で安全な利用ができることが期待される。陸上でのGNSSデータは様々な方面に利活用が進んでいるが、海洋のGNSSデータはまだほとんど利用が進んでいない。観測点がないのでそれは当たり前のことと言えるが、ブイ設置やデータ伝送の費用がネックであるが防災だけでなく漁業、海上輸送、観光等に役立つ情報が提供できるとなれば費用対効果の観点からも有用になるのではないだろうか。技術的な革新と、設置数を増やすことによる単価の低減が実現できれば海洋に面する自治体にとっては新たな地域活性の資源になるのではないかと期待される。海洋におけるGNSSの活用による地域おこしが今後増進されることを期待したい。

参考文献

- 1) 加藤照之, 寺田幸博, 木下正生, 一色浩, 横山昭 : GPS津波計の開発, 月刊海洋, 号外15, 38-42, 1998.
- 2) 文部科学省地震調査研究推進本部, 日本の地震活動, 391pp, 1999.
- 3) Terada, Y., T. Kato, T. Nagai, S. Koshimura, T. Miyake, H. Nishimura, S. Kunihiro : Development of a tsunami monitoring system using a GPS buoy, In Proceedings of the International Global Navigation Satellite Systems Society (IGNSS) Symposium 2011, 15-17 November 2011, 411-422, 2011.
- 4) Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai : Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, 57, 297-301, 2005.
- 5) 永井紀彦 : 波浪観測網の強化による海の安全の確保－GPS波浪計 2006年度より配備開始！－, 土木学会, 土木学会誌 第91巻第9号 (2006.9.号), pp.78-79, 2006.
- 6) 寺田幸博・加藤照之 : GPS津波計・波浪計・潮位計, 非破壊検査, **66**(4), 178-182, 2017.
- 7) Ozaki, T. : Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - Tsunami warnings/advisories and observations -. Earth Planets Space **63**, 827-830, 2011.
- 8) Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K., Kinugasa, N., Futamura, A., Toyoshima, M., Yamamoto, S., Ishii, M., Tsugawa, T., Nishioka, M., Takizawa, K., Shoji, Y., Seko, H., Iwasaki, T., and Koshikawa, N. : Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System, J. Disast. Res., **13** (3), 460-471, 2018.
- 9) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, and A. Futamura : Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system, Proc. Jpn. Acad., Ser. B, **98**, 49-71, 2022.

資料 3 - 2 口頭・ポスター発表

[平成 28(2016)年]

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

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

[平成 29(2017)年]

2017-1p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, N. Koshikawa, GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System, JpGU, 幕張メッセ, 2017年5月19日.

2017-2p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, T. Iwasaki, N. Koshikawa, GNSS Buoy Array in the Ocean for a Synthetic Geohazards Monitoring System, IAG-IASPEI 2017, Kobe, Japan, August 3, 2017.

2017-3p) 加藤照之, 寺田幸博, 田所敬一, 衣笠菜月, 二村彰, 多田光男, 小司禎教, 瀬古弘, 石井守, 津川卓也, 西岡未知, 豊嶋守生, 山本伸一, 滝沢賢一, 越川尚清, "新たな海洋総合防災GNSSブイアレイの開発," 測地学会第128回講演会, 岐阜県瑞浪市総合文化センター, 2017年10月5日.

2017-4p) Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, H. Seko, T., Iwasaki, N., Koshikawa, N., Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazards monitoring system, 12th Meeting of the ICG, Kyoto, Japan, December 3, 2017.

[平成 30(2018)年]

2018-1p) 加藤照之, GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

2018-2p) 田所敬一, 衣笠菜月, 稲垣駿, 二村彰, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 海洋GNSSブイを活用した海底地殻変動観測システムの開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.

2018-3p) 衣笠菜月, 田所敬一, 稲垣駿, 寺田幸博, 二村彰, 加藤照之, 海洋GNSSブイを用

- いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発, JpGU, 幕張メッセ, 2018年5月24日.
- 2018-4p) 田所敬一, 衣笠菜月, 加藤照之, 寺田幸博, 松廣健二郎, 係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.
- 2018-5p) 衣笠菜月, 田所敬一, 加藤照之, 寺田幸博, ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発, 測地学会第130回講演会, 高知県立県民文化ホール, 2018年10月17日.
- 2018-6p) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato and Y. Terada, Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement, San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting 2018.
- 2018-7p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, A. Futamura, Y. Terada, and T. Kato, Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy, San Francisco, USA, December 13, AGU Fall Meeting 2018.

[平成 31/令和元(2019)年]

- 2019-1p) Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, M. Yabuki, Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement, Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS) XIII, Naha, Japan, 6-8 March 2019
- 2019-2p) Shoji Y., T. Tsuda, T. Kato, Y. Terada, M. Yabuki, Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction, European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, Milan, Italy, 13-17 May 2019
- 2019-3p) 瀬古弘, 小泉耕, 小司禎教, 加藤照之, 船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験 (その 1), 気象学会2019年春季大会, 東京, 2019年5月15-19日
- 2019-4p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, T. Kato, Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月26日.
- 2019-5p) Shoji, Y., T. Kato, Y. Terada, T. Tsuda, M. Yabuki, Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月27日.
- 2019-6p) Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, A. Futamura and K. Matsuhira, Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements, JpGU, 幕張メッセ, 2019年5月27日.
- 2019-7p) 木下正高、平田直、篠原雅尚、入船徹男、鍵裕之、加藤照之、小野重明、道林克禎、阿部なつ江、稲垣史生、小村健太郎、小原一成, 2019, リアルタイム観測・大深度掘削・高圧実験の統合による沈み込み帯4D描像, JpGU, 幕張メッセ,

2019年5月27日.

2019-8p) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Multi GNSS Asia 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019

2019-9p) Kato, T., Recent developments of GNSS buoy for a synthetic disaster mitigation system in the ocean, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific 2019, Bangkok, Thailand, 27 August 2019 (論文2019-1参照)

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

2019-11p) Kinugasa, N., K. Tadokoro, Y. Terada, and T. Kato, Observation for seafloor crustal deformation using moored buoy by GNSS-A technique considering the heterogeneity of sound speed in ocean, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, December 2019.

[令和 2(2020)年]

2020-1p) 衣笠 菜月・田所 敬一・加藤 照之・寺田 幸博, 係留ブイを用いたGNSS-Aによる海底地殻変動観測のための解析手法の開発, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020年7月12-16日.

2020-2p) 田所 敬一・衣笠 菜月・加藤 照之・寺田 幸博・松廣 健二郎, Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements, 地球惑星科学連合大会, オンライン, 2020年7月12-16日.

2020-3p) 衣笠菜月・田所敬一・加藤照之・寺田幸博, 係留ブイによる GNSS-A 海底地殻変動観測のための解析手法の研究, 日本測地学会第134回講演会, オンライン, 2020年10月21-23日.

[令和 3(2021)年]

2021-1p) Takizawa, K., S. Yamamoto, Y. Terada, and T. Kato, Non-orthogonal multiple access (NOMA) in IoT non-terrestrial network for GNSS buoy array in the ocean, IEEE VTC2021 Fall meeting (online), 27 September – 28 October, 2021. (論文2022-1参照)

[令和 4(2022)年]

2022-1p) 加藤照之, 海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦, 地球惑星科学連合大会, ハイブリッド, 2022年5月22日-6月3日



The First Pacific Regional Workshop on Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems by Using Space and GIS Applications
Nadi, Fiji, 13 – 15 September 2016

Tentative Programme

DAY 1 - Tuesday, 13 September 2016	
08:30 - 09:00	Registration
09:00 - 10:00	SESSION 1: Opening Session (Facilitator: Mr. Tae Hyung Kim, Economic Affairs Officer, ESCAP) ▪ Welcome address by H.E. Inia Seruiratu (Mr.), Minister for Agriculture, Rural and Maritime Development and National Disaster Management ▪ Opening speech by H.E. Takuji Hanatani (Mr.), Japanese Ambassador to Fiji ▪ Opening speech by Dr. Andi Eka Sakya (Mr.), Head, Indonesian Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics, Indonesia ▪ Opening speech by Mr. Iosefa Maiava, Head, ESCAP Pacific Office
10:00 - 10:20	Group Photo / BREAK
10:20 - 12:30	SESSION 2: Gap and Needs Analysis on Multi-Hazard Early Warning Systems by Using Applications of Space Technology and GIS in the Pacific (Facilitator: Mr. Malakai Finau, Permanent Secretary, Ministry of Lands and Mineral Resources, Fiji) ▪ Key objectives, activities, and outcomes of the project on “Strengthening Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning Systems with Applications of Space and Geographic Information Systems”, by Mr. Tae Hyung Kim, Economic Affairs Officer, ESCAP. ▪ Remote sensing and GIS for multi-hazard risk assessments in the coastal zone: recent applications and challenges in the Pacific, by Mr. Jens Kruger, Manager, Ocean and Coastal Geoscience, SPC. ▪ Remote sensing data and application for Pacific island countries, by Dr. Wolf Forstreuter (Mr.), GIS & RS Team Leader, SPC. ▪ Status, progress and challenges in the application of space technology and GIS for disaster risk reduction in the Pacific, by Mr. Sunny Kamuta Seuseu, Climate Prediction Services Coordinator, SPREP. ▪ Findings and suggestions on multi-hazard risk and early warning systems in the Pacific, by Dr. Mr. Andi Eka Sakya (Mr.), Head, BMKG. ▪ Findings and suggestions on geo-portal and geo-database for disaster risk reduction

	and Sustainable Development Goals in the Pacific, by Dr. Ramesh De Silva (Mr.), Systems Administrator, Geoinformatics Center, School of Engineering and Technology, AIT. Space Technology and Geospatial Information Systems for Sustainable Development Goals, by Dr. Teruyuki Kato (Mr.), Earthquake Research Institute, University of Tokyo.
12:30 - 14:00	LUNCH
14:00 - 15:30	SESSION 3: Pacific Initiatives for Multi-Hazard Early Warning Systems (Facilitator: Dr. Lal Samarakoon (Mr.), Director, Geoinformatics Center, School of Engineering and Technology, AIT) - GIS and Digital Earth Technologies for Disaster Management - from case studies in Sentinel Asia and others, by Prof. Hiromichi Fukui (Mr.), Chubu University. - Disaster early warning services in the Republic of Korea, by Dr. Hae Kyong Kang (Ms.), Associate Research Fellow, Open GIS Research Program Manager, Geospatial Information Research Division, KRIHS. - Japan's experiences, by Dr. Masanobu Tsuji (Mr.), Director, JAXA Bangkok Office, JAXA. - Drone-based disaster waste management, by Mr. Hyung Taek Yoo, Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University.
15:30 - 15:45	BREAK
15:45 - 17:00	SESSION 4: Pacific Country Presentations on Multi-hazard Warning System, and Geospatial Information System (Facilitator: SPC) - Cook Island: Urban Planner, Infrastructure Cook Islands, by Mr. Timoti Tangiruaine, Urban Planner, Infrastructure Cook Islands. - Fiji: <i>(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)</i> - Kiribati: <i>(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)</i> - Micronesia: Kosrae Disaster Risk Management and Early Warning Processes, by Mr. Nema Maragfoou William, State Disaster Coordination Officer. - Papua New Guinea: <i>(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)</i> - Samoa: Status of Disaster Risk Management in Samoa, by Mr. Mafutaga Leiofi, Principal Environmental Engineering Officer, Ministry of Natural Resources and Environment. - Solomon Islands: <i>(Pending receipt of presentation title and name of presenter.)</i>

DAY 2 - Wednesday, 14 September 2016		
	Policy-maker Group	Technical officer Group

09:00 - 10:00	SESSION 4: Pacific Country Presentations on Multi-hazard Warning System, Geo-portal and Geo-database (Facilitator: SPREP) - Tonga: Early Warning System in Tonga, by Mr. Paula Finau, Communication Officer, National Emergency Management Office. - Vanuatu: Vanuatu Multi-Hazard Risk Assessment and Early Warning System, by Mr. Davidson Gibson, Director, Vanuatu Meteorology and Geo-Hazards Department, and Mr. Peter Korisa Kamil, Operation Manager, National Disaster Management Office.	
10:00 - 12:30	SESSION 5: Disaster and Geospatial Information Systems for SDGs (Sub-group discussions) – (Facilitators: ESCAP and AIT) - How space technology and GIS can contribute to Pacific disaster management and SDGs? - Two sub-group discussions consisting of Pacific country representatives and experts from SPREP, SPC, AIT, and BMKG, Japan and the Republic of Korea.	SESSION 5: Technical Training 1, by Dr. Ramesh De Silva (Mr), AIT - Theory of space technology for disaster risk reduction. - Use of geospatial data and management. - Geo-portal and geo-database.
12:30 - 14:00	LUNCH	
14:00 - 17:00	SESSION 5: Continues Presentations by chairpersons of the two sub-groups.	SESSION 5: Technical Training 2, by BMKG - Theory on multi-hazard risk assessment and early warning system. - Applications of early warning system for multi-hazard risk management.

DAY 3 - Thursday, 15 September 2016

09:00 - 11:40	SESSION 8: Future Plan for Pacific Actions on Space Technology towards Disaster Risk Reduction (DRR) and Sustainable Development Goals (SDGs) - Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by Mr. Tae Hyung Kim, ESCAP. - Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by AIT. - Brief presentation on space technology for DRR and SDGs, by Mr. Makelesi Gonelevu, SPREP. - Brief presentation on SDGs mapping proposal from digital earth perspective, by Prof. Hiromichi Fukui (Mr.), Chubu University, on:
---------------	--

	- How to develop mid-term action plans of Pacific countries for strengthening space technology applications for DRR and SDGs in the Pacific? - Key stakeholders' meeting in early 2017 to develop the Pacific voice on DRR and SDGs at the big events: - Ministerial Conference on DRR in India, November 2016 with Space Leaders Forum (side event); - Ministerial Conference on Space in China, mid 2018; - Other SDG-related UNGGIM / international / regional meetings.
11:40 - 12:00	SESSION 9: Closing Session ▪ Closing remarks by ESCAP and Fiji.

List of Acronym:

AIT: Asian Institute of Technology

BMKG: Indonesian Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics

ESCAP: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency

KRIHS: Korea Research Institute for Human Settlements

SPC: Geoscience Division, Pacific Community

SPREP: Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme

GIS: Geospatial Information Systems

[発表2016-2p]

海洋 GNSS ブイを用いた総合防災システムの開発

#加藤照之¹, 寺田幸博², 田所敬一³, 二村彰⁴, 豊嶋守夫⁵, 山本伸一⁵, 石井守⁵,
津川卓也⁵, 西岡未知⁵, 滝沢賢一⁵, 小司禎教⁶, 岩崎匡宏⁷, 越川尚清⁷

1: 東大地震研; 2: 高知工業高専; 3: 名大環境; 4: 弓削商船高専; 5: 情報通信研究機構

6: 気象庁気象研; 7: 宇宙航空研究開発機構

はじめに

我々は20年近くGNSSブイを用いた津波計を開発してきた。従来のシステムではRTK-GPS方式が用いられていることと、データ通信を地上無線によって伝送する方式を採用しており、ブイの設置位置が沿岸から20km以内程度と限界があったが、精密単独測位法と衛星通信システムを導入することで、遠洋でのGNSSブイの運用が可能となった。これを活用して、海洋にGNSSブイアレイを展開すると広範な地球科学と防災に役立つことが期待される。

研究の現状と今後の予定

GNSSブイが期待される分野の一つにGNSS-音響を用いた海底地殻変動観測の連続化がある。この試みは既に東北大・JAMSTECによって実験が行われているが、せっかくGNSSを搭載しているブイであるから津波と海底地殻変動の両用が可能となれば費用対効果により影響を及ぼすと考えられる。

GNSSブイの応用可能性はこれにとどまらない。すでに陸の観測網GEONETの応用として、GNSSから得られる天頂遅延量を気象予測の精度向上に役立てること、電離層の伝搬経路上の総電子数TECが得られることから電離層のモニターなども行われてきた。GNSSブイが海洋のどこにでも設置できれば、これらの観測を海洋の領域に広げることが可能になる。このように広範な地球科学的応用及び防災に資するブイアレイを、例えば日本が保有する広大なEEZ(排他的経済水域)に多数展開すれば、関係する研究分野に計り知れない新しい展開を切り開くことができるのではないだろうか。このような考え方から、我々は新たな研究計画を立案し、科学研究費補助金を獲得して本年度より研究をスタートさせた。

講演ではこれまでのGNSSブイの開発の歴史を振り返りつつ、目指している研究の内容や課題、および今後の予定について述べたい。

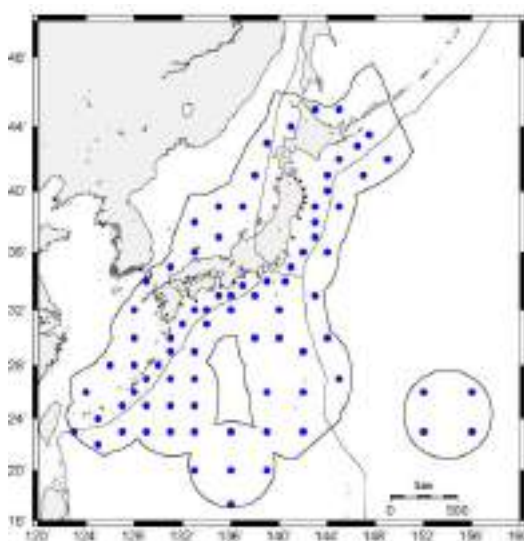


図 1: 西太平洋の GNSS ブイアレイ構想。EEZ 内に 81 点 (青点) を仮置き、小さな赤点は既設の GNSS ブイを用いた波浪観測網の観測点。

[発表2017-1p]

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

***Teruyuki Kato¹, Yukihiro Terada², Keiichi Tadokoro³, Akira Futamura⁴, Morio Toyoshima⁵, Shin-ichi Yamamoto⁵, Mamoru Ishii⁵, Takuya Tsugawa⁵, Michi Nishioka⁵, Kenichi Takizawa⁵, Yoshinori Shoji⁶, Tadahiro Iwasaki⁷, Naoyuki Koshikawa⁷**

1. ERI, Univ. Tokyo, 2. Nat. Inst. Tech., Kochi Col., 3. Nagoya Univ., 4. Nat. Inst. Tech., Yuge Col., 5. NICT, 6. MRI, JMA, 7. JAXA

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed in Japan and has been implemented as the national wave monitoring system since around 2008. Its record was used to update the tsunami warning at the 11 March 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, Japan. Yet, the buoys are placed only less than 20km from the coast and are not far enough for effective evacuation of people. We are thus trying to improve the system for putting the buoys much farther from the coast. For this purpose, we employ a new PPP-AR analysis algorithm, instead of conventional RTK-GPS, for positioning. In addition, we use a two-way satellite data transmission in contrast with current surface radio system. We have conducted a series of experiments using this new system in 2013 and 2014, using a buoy used for a fish bed located about 40km south of Cape Muroto, Shikoku, southwest Japan. GEONET data were used to obtain precise orbits and clocks of satellites. Then, the information was transferred to the GNSS buoy using a satellite communication system of the Japanese positioning satellite called Michibiki. The received information on the buoy were used for real-time PPP-AR analysis for every second. The obtained buoy position was then transmitted back to the ground base through a geostationary satellite called ETS-VIII. The received data was then disseminated to public through the internet. The success of these experiments indicate that the GNSS buoy can be placed at nearly anywhere in the ocean. Given this success, we made up a new research plan in which we test a commercially available satellite communication system and try to develop a new GPS-acoustic system for monitoring ocean bottom crustal movements nearly continuously. Moreover, we seek for further application of GNSS data for ionospheric and atmospheric researches. Deployment of such GNSS buoy system as an array in a wide ocean will be a powerful tool for monitoring geohazards in the region as well as for other basic research on earth sciences. The new project started in June 2016 and we are now designing a regional GNSS buoy array in the western Pacific. The first newly designed GNSS system is established at another buoy for fish bed, located about 40km south of Cape Ashizuri, southwest Japan. The system is now under testing. We are planning to implement a GNSS-acoustic system for monitoring crustal movements of the sea floor in early 2017 fiscal year at the same buoy.

Keywords: GNSS buoy, geohazard monitoring, tsunami, ocean bottom crustal movement, GNSS meteorology, ionosphere

[発表2017-2p]

IAG Symposium / IAG05. IAG Joint / G07. Global Geodetic Observing System (GOS) and Earth monitoring services

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

* Prof. Teruyuki Kato ¹⁾, Prof. Yukihiro Terada ²⁾, Prof. Keiichi Tadokoro ³⁾, Prof. Akira Futamura ⁴⁾, Dr. Morio Toyoshima ⁵⁾, Mr. Shin-ichi Yamamoto ⁵⁾, Dr. Mamoru Ishii ⁶⁾, Dr. Takuya Tsugawa ⁶⁾, Dr. Michi Nishioka ⁶⁾, Dr. Kenichi Takizawa ⁷⁾, Dr. Yoshinori Shoji ⁸⁾, Dr. Tadahiro Iwasaki ⁹⁾, Dr. Naoyuki Koshikawa ⁹⁾

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan ¹⁾, National Institute of Technology, Kochi College, Kochi, Japan ²⁾, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan ³⁾, National Institute of Technology, Yuge College, Ehime, Japan ⁴⁾, Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan ⁵⁾, Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan ⁶⁾, Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan ⁷⁾, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency ⁸⁾, Satellite Applications and Operation Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Ibaraki, Japan ⁹⁾

The GNSS buoy system for tsunami early warning has been developed and is now operational as a national wave monitoring system since 2008 in Japan. It was used to update the tsunami warning at the 2011 Tohoku-oki tsunami, Japan. Yet, the buoys are placed less than 20km from the coast and are not far enough for effective evacuation. We are thus trying to improve the system for putting the buoys much farther from the coast. For this purpose, we employ a new PPP-AR analysis algorithm, instead of conventional RTK-GPS, for positioning. In addition, a two-way satellite data transmission in contrast with current surface radio system is introduced. We have conducted a series of experiments using the upgraded system in 2013 and 2014, using a buoy located about 40km south of Cape Muroto, southwest Japan. GEONET data were used to obtain precise orbits and clocks of satellites, and the information was sent to the buoy using a satellite. The information was used for real-time PPP-AR analysis for every second. The estimated buoy position was then sent back to the ground base through another satellite. The received data was disseminated to public through internet. These experiments indicate that the GNSS buoy can be placed at nearly anywhere in the ocean. Given this success, we made up a new research plan in which we test a commercially available satellite communication system and try to develop a new GNSS-acoustic system for continuous monitoring of ocean bottom crustal movements. Moreover, we are trying further applications of GNSS data for ionospheric and atmospheric researches. A new project started in June 2016 which tries to establish a GNSS buoy array in the western Pacific, which will be a powerful tool for monitoring geohazards in the region. The newly designed GNSS system is deployed at another buoy located about 40km south of Cape Ashizuri, southwest Japan. The system is now under testing. We are adding a GNSS-acoustic system in 2017 to the same buoy.

[発表2017-3p]

34

新たな海洋総合防災 GNSS ブイアレイの開発

Development of a new ocean GNSS buoy array for a synthetic disaster mitigation

#加藤照之¹, 寺田幸博², 田所敬一³, 衣笠菜月³, 二村彰⁴, 多田光男⁴,
小司禎教⁵, 瀬古弘⁵, 石井守⁶, 津川卓也⁶, 西岡未知⁶,
豊嶋守生⁶, 山本伸一⁶, 滝沢賢一⁶, 越川尚清⁷

1: 東大地震研; 2: 高知工業高専; 3: 名大環境; 4: 弓削商船高専; 5: 気象研; 6: NICT; 7: JAXA

#T. Kato¹, Y. Terada², K. Tadokoro³, N. Kinugasa³, A. Futamura⁴, M. Tada⁴,
Y. Shoji⁵, H. Seko⁵, M. Ishii⁶, T. Tsugawa⁶, M. Nishioka⁶,
M. Toyoshima⁶, S. Yamamoto⁶, M. Ishii⁶, K. Takizawa⁶, N. Koshikawa⁷

1: Earthquake Research Institute, the University of Tokyo;

2: National Institute of Technology, Kochi College;

3: Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University;

4: National Institute of Technology, Yuge College;

5: Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency;

6: National Institute of Information and Communications Technology;

7: Japan Aerospace Exploration Agency

はじめに

津波の早期検知をめざしたGNSSブイの研究は1997年頃より行ってきた。当初はRTK-GPSと呼ばれる、陸に基地局を置いて基線による相対測位の方式をとってきた。このため、沿岸からの距離は20km以内に制限されていた。この方式は全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASに取り入れられ、現在までに20基程度のブイが設置・稼働している。2011年東北地方太平洋沖地震に際しては三陸沖に設置されたブイが津波を捉えたことから、津波警報の更新に用いられたが、有効性は十分でなく多くの人命が失われた。この教訓から、より沖合へのブイの展開が重要と考えられ、より効果的な津波早期警戒のためのブイの開発を行ってきた。

新しいブイシステムの開発

新たなブイは、より沖合への展開が必要であることから、精密単独測位方式と衛星通信を用いたデータ伝送を取り入れることとした。我々のシステムでは、精密単独測位には日立造船がGPS Solutionsと共同開発したPPP-AR方式を採用し、それを組み込んだRTNetソフトウェアを使用することとした。また、データ伝送には、本プロジェクト開始当初は準天頂衛星初号機(みちびき)と技術試験衛星VIII号(きく8号)を用いたが、きく8号が2016年に運用を停止したことから、商用衛星に切り替えている。

また、もう一つの大きな挑戦として、GNSS-音響方式による海底地殻変動の連続的な観測に挑戦することとした。このためにブイと海底に音響の送受波装置を設置することとした。現状ではまだ全体の装置の設置が完了していないが、完成した際のデータの流れを略述すると下記のようなになる。

- ① 地上局においてMADCOA等の暦・時刻補正パラメータとGEONETデータを取得し、PPP-AR用の補正情報を作成する。
- ② 補正情報を他の制御用データとともに衛星を経由してブイに伝送する。
- ③ ブイではGNSS観測のほか、音響による海底局との測距を行う。また、温度・気圧等のデータ取得も行う。これらの観測データをブイ上に置かれた小型計算機を用いて測位およびその他の処理を実施する。
- ④ ブイから衛星経由で地上局に測位データと海底地殻変動観測等の処理済みデータを伝送する。
- ⑤ 地上局において最終処理とチェックを行い、インターネット等を介して測位解等を公開する。音響測距データについては別途解析を行い、海底位置を算出して公開する。

以上のデータフローを下に示す。本プロジェクトは科研費基盤研究Sによって平成28年度から5年計画で実施している。平成28年度は、きく8号の運用中にブイと衛星の間の衛星通信に関する将来の衛星通信の仕様策定のために必要なデータを取得した。また、本年2月には海底地殻変動の予備調査としてブイ周辺でCTD観測を実施し、6月に海底局の設置と船舶を用いた音響測距観測を実施した。これらの船上観測や機器設置には練習船弓削丸を用いた。精密単独測位においては同時に天頂遅延量と電離層TECを同時に推定しており、これらをそれぞれの分野で活用することも検討している。これらが実現すれば、海洋にGNSSブイをアレイ展開することで総合的な防災への応用が可能となり、また新たな地球科学の発展が期待できる。現在、ブイでのGNSS観測が事情により停止しており、本年11月ころには復帰させたいと考えている。

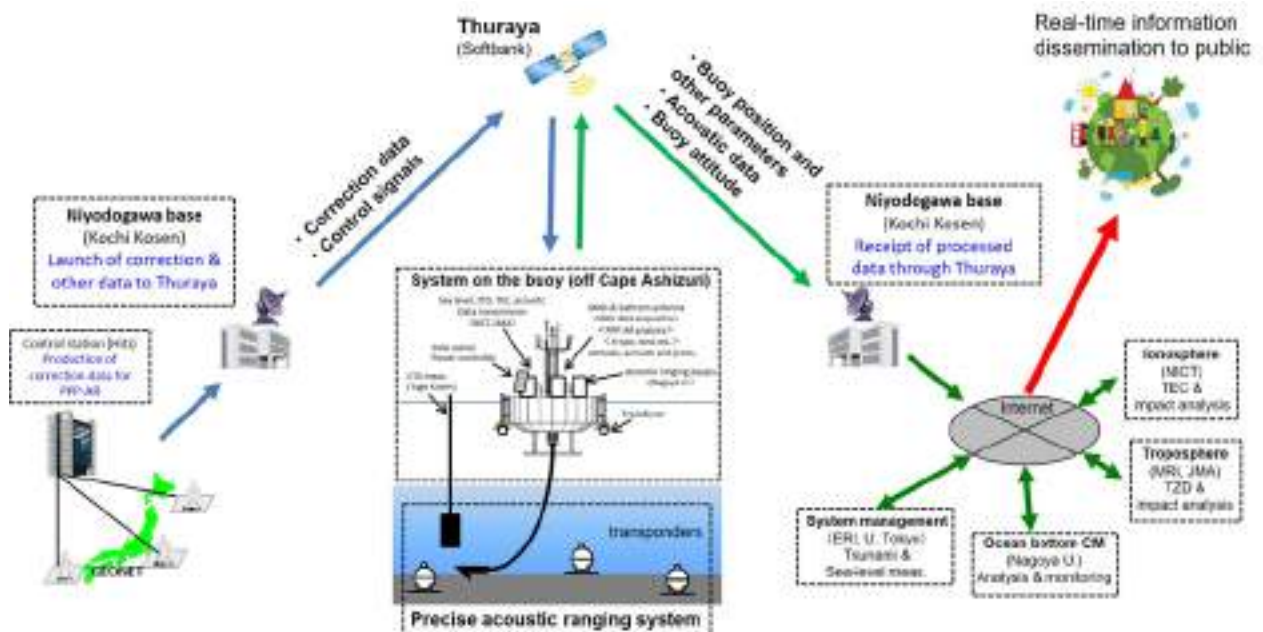


図 1: 新しい GNSS ブイシステムのデータフロー図

[発表2017-4p]



UNITED NATIONS
Office for Outer Space Affairs







[About Us](#) -
[Our Work](#) -
[Space4SGs](#) -
[Information for...](#) -
[Events](#) -
[Space Object Register](#) -
[Documents](#) -
[COPUOS 2022](#) -

[Our Work](#) - [International Committee on GNSS](#) - [ICG Annual Meetings](#)

Twelfth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), Kyoto, Japan, 3 - 7 December 2017

AVAILABLE ONLINE RESOURCES:

- Meeting Agenda
- ICG Meetings web-page
- Nineteenth Meeting of the Providers' Forum, 2 and 6 December 2017, Kyoto, Japan
- Working Groups web-page

ONLINE PRESENTATIONS

Note: The views expressed in the presentations and papers below are those of the authors and do not reflect the policies or views of the United Nations Office for Outer Space Affairs. The presentations and papers are provided solely for informational purposes.

Providers Systems and Service Updates

Status Update on the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) - Go TAKIZUKA, QZSS Strategy Office, national Space Policy Secretariat, Japan

Global Positioning System (GPS) Programme and Advisory Board Update - Harold MARTIN, National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing, and John BETZ, United States Positioning, Navigation and Timing Advisory Board Representative, United States of America

Global Navigation Satellite System (GLONASS) Status Update - Aron REZNIKOV, Roscosmos Space Corporation, Russian Federation

Status Update on the European Satellite Navigation System (GALILEO) - Christoph KAUTZ, European Commission

Update on the BeiDou Satellite Navigation System - Jie Qing MA, China Satellite Navigation Office, China

Presentations by Members, Associate Members, Observers and Invited Observers on Matters of Interest to the ICG

GNSS contribution to the new ITSP - Chris RIDGIE, International Association of Geodesy (IAG)

United Nations Global Geospatial Information Management (UN-GGIM) Subcommittee on Geospatial - Mikael LILJE, International Federation of Surveyors (FIG)

Civil GPS Service Interface Committee - Russell HOLMES, Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC)

The Cyber threat impact on aviation - Bernard SMITH, Federation Aeronautique Internationale

Perspectives of GNSS applications Italy: RailRoad synergy as selected example - Alberto TUZZI and Alessandro NERI, Italian Space Agency

Enabling GNSS Science Galileo satellite metadata - Javier VENTURA-TRAVES and Daniel BLOMGA, European Space Agency (ESA)

Update on ICG-IVG-B achievements on interoperable GNSS Space Service Volume (SSV) - Werner ENDEPLER, Stefan WALLNER, European Space Agency

EUROPE Activities - Markku POLTANEN, IAG Reference Frame Sub-committee for Europe (EUREF)

GNSS activities by the Joint Research Centre of the European Commission - Matteo RAONNI, Joint Research Centre, European Commission

GNSS: The systems providers versus the non-providers - Refaat RASHAD, Arab Institute of Navigation (AIN)

Our Work

[Secretariat of COPUOS](#)
[Programme on Space Applications](#)
[UN SPIDER](#)
[International Committee on GNSS](#)
[Overview](#)
[Members](#)
[ICG Terms of Reference](#)
[Workplan Future](#)
[Working Groups](#)
[ICG Annual Meetings](#)
[Current Meeting](#)
[Past Meetings](#)
[ICG Programme on GNSS Applications](#)
[Relevant UN Documents](#)
[Other Events](#)
[ICG Transfer](#)
[UN Space](#)
[UNSPACE+10](#)
[Space Law](#)
[Benefits of Space](#)
[Space4Health](#)
[Access to Space for All](#)
[Space for Persons with Disabilities](#)
[Space4Youth](#)
[Space4Water](#)
[Space4Women](#)
[World Space Forum](#)
[Worldwide Space Agencies](#)
[Capacity Building Activities](#)

Australia's Programme on GNSS – John DAWSON, Australia

Applications and Experts Seminar

Water vapor analysis over the ocean using shipborne GNSS measurements for the mitigation of weather disaster - Yoshinori SHOJI, Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency, Japan

Variations of water vapor observed with a Japan-borne GNSS network - Toshiaki TSUDA, Research Organization of Information and Systems (ROIS), Japan

Radar Remote Sensing using surface-reflected GNSS signals - Steve LOMÉ, JPL/Caltech, United States

Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazards monitoring system - Tetsuyuki KATO, earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

How the real-time GNSS can contribute to near field tsunami early warning? - Kazuki OHTA, Research Centre for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan

Real-time GNSS earthquake and tsunami early warning - Gerald BAWDEN, National Aeronautics and Space Administration, United States

Comprehensive application of RTSS + RDS - Gang HU, BDSat Navigation, China

Early Warning Services via GNSS signals - Frederic DOMPS, European Commission and Yoshihiro KAWAZU, Cabinet Office, Japan

Latest

2023/04/25

REPORT AAC 181/2021 - Summary of discussions on dark and quiet skies for science and society

2023/04/24

IMPLEMENTATION STRATEGIES/Plan I - The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Mitigation Second Edition

2023/03/29

REPORT AAC 181/2021 - Summary of discussions on dark and quiet skies for science and society

Links

UIC Online

GNSS Vienna

UN-SPIDER

United Nations

Contact us

United Nations Office for Outer Space Affairs

United Nations Office at Vienna
Vienna International Centre,
Vienna International S.
A-1120 Vienna
AUSTRIA

Telephone: +43-1-260 60-466
Fax: +43-1-260 60-5830

[Send us a message!](#)

ICG12 in Kyoto (3 Dec., 2021)

Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazards Monitoring System

Tetsuyuki Kato, Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Japan
Yukihiro Terada, Nat. Inst. Tech., Kochi Col., Japan
Keiichi Tadokoro, Natsuko Kimigasa, Grad. Sch. Env. St., Nagoya Univ., Japan
Akira Tadamura, Mitsuo Tada, Nat. Inst. Tech., Yamanashi Col., Japan
Mori Teiyoshima, Shin-ichi Yamamoto, Mamoru Ishii,
Takuya Tsugawa, Michi Nishikawa, Kenichi Takigawa, NICT, Japan
Yoshinori Shoji, Hirofumi Sato, MRI, JMA, Japan
Tadahiro Iwasaki, Naokiyo Koshikawa, JAXA, Japan



GNSSブイを用いた総合防災ブイアレイ構想の現状と将来への展望 Present status and future scope of the GNSS buoy array project for synthetic disaster mitigation

*加藤 照之¹

*Teruyuki Kato¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

我々は20年以上、GNSSブイを開発してきた。本講演では最近のGNSSブイ開発の現状と将来の可能性、また見えてきた課題などについて報告する。当初はRTK-GPSを用いたいわゆるGPS津波計として開発してきた。このシステムで数cm程度の波高の津波を観測することに成功して実績をあげ、波浪観測のための観測網であるNOWPHASに組み込まれる形で実用化することができた。また、気象庁の津波観測の一部としても採用された。2011年東北地方太平洋沖地震による津波も沿岸到達前に捉えられ、津波警報の更新に生かされたが、リードタイムが短かったため効果は十分ではなく、結果として多くの人命が津波によって失われた。このことから、津波をより早く検知するために、いくつかの改善を行っている。当初のシステムでは基線を用いた相対測位を実施するため、沿岸からの距離が約20km未満と短かった。そこで、相対測位によらない精密単独測位方式を導入することとした。また、データの送信を、従来の地上波を用いた無線から、衛星通信に切り替えることとした。現在このシステムでの稼働実験を行っている。このシステムが順調に稼働することになれば、GNSSブイの応用範囲は格段に広がる。まずは、現在船舶を用いて実施しているGNSS-音響方式による海底測位を、ブイによって置き換えることにより、より高頻度の観測が可能となる。これによって海底地殻変動をこれまでになく詳細にとらえられることとなり、例えば海溝付近で短期的スローイベントが発生するようなことがあれば、そのような現象も捉えられると期待される。GNSS観測を陸から遠い海洋で実施することにより、気象や電離層の研究に新たなデータが提供されると共に各種防災のための応用が可能となる。このようなGNSSブイを例えば日本の排他的経済水域のような領域にアレイとして実装することにより、総合的な防災ブイアレイとして機能することになる。また、その他の各種センサーを搭載することで海洋学等にも寄与することができると思われる。なお、まだこの計画は構想段階であり、さまざまな技術的課題や運用上の問題を解決する必要があることも付け加えておく必要がある。技術的課題としては、まずは安定したリアルタイム高速多チャンネルの衛星通信が必要であり、できれば専用の通信衛星が必要である。また、「みちびき」を利用した衛星の精密暦配信を利用した精密単独測位の精度評価、深海に設置するブイ本体の耐久性、電源確保の問題など、多くの課題がある。また、このような大規模な海洋アレイをどの機関がどのような体制で運用し、また必要な資金を確保していくかなどについても多面的に検討していかなくてはならない。こうした問題を少しずつクリアしていくことにより、いつの日か日本周辺海域にGNSSブイアレイが構築される日が来ることを期待したい。

キーワード：GNSS ブイ、ブイアレイ、海底地殻変動観測

Keywords: GNSS buoy, buoy array, ocean bottom crustal movement observation

海洋GNSSブイを活用した海底地殻変動観測システムの開発 Development of observation system for ocean bottom crustal deformation measurement utilizing marine GNSS buoy

*田所 敬一¹、衣笠 菜月¹、稲垣 駿¹、二村 彰²、加藤 照之³、寺田 幸博⁴、松廣 健二郎¹

*Keiichi Tadokoro¹, Natsuki Kinugasa¹, Shun Inagaki¹, Akira Futamura², Teruyuki Kato³, Yukihiro Terada⁴, Kenjiro Matsuhira¹

1. 名古屋大学、2. 弓削商船高等専門学校、3. 東京大学地震研究所、4. 高知工業高等専門学校

1. Nagoya University, 2. National Institute of Technology, Yuge College, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Kochi National College of Technology

GNSS/音響方式による海底地殻変動観測の課題のひとつは、時間分解能の向上である。これは、海上局として船舶を用いているためであり、時間分解能の向上のためには船舶に替わる海上プラットフォームが必要である。そこで、平成28年度から科学研究費補助金の基盤研究（S）の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」（研究代表者：加藤照之）において、海洋GNSSブイの機能拡張の一環として係留ブイを用いた海底地殻変動観測システムの開発を行っている。

ブイにはGNSS測位アンテナと受信機のほかに、音響測距海上装置と送受波センサ、ジャイロセンサを搭載する。これらの機器による測定データは、アラブ首長国連邦のThuraya Telecommunications Companyが提供している衛星電話サービスを利用して高知県仁淀川町の地上局に送信され、サーバに蓄積される。衛星経由の通信容量の削減のため、送信する音響測距データは、1測距あたり64キロバイトの信号波形そのものではなく、同60バイトの信号到達時刻に関する数値のみとした。このために、音響信号到達時刻は、基本的には受信波形と基準波形との相互相関係数が最大値をとる時刻として認識される。ところが、海面反射波の到達時刻での相互相関係数が最大となる場合が少なくないため、複数の相互相関係数のピークを抽出し、S/N比も併用して正しい直達波の到達時刻を自動的に判定するプログラムを作成した。観測船から行った音響測距波形にこの方法を適用して試験を行ったところ、正しい直達波到達時刻が99%以上の割合で判定できた。

本研究プロジェクトでは、海上プラットフォームとして足摺岬の南東約40kmに係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイを借用することとしており、このブイの設置地点に3台の海底局（トランスポンダ）からなる一辺約1400mの正三角形の海底局アレイを設置した。ブイからの連続的音響測距の準備として、2017年6月6日と9日に弓削商船高専の「弓削丸」で、9月20日に海洋エンジニアリング（株）の「第三開洋丸」で現行の観測・解析方法によって海底局アレイ形状（各海底局位置）の決定を行った。各観測日の音響測距データ数は、それぞれ2000個程度であった。本海域は黒潮強流域に近く、海中音速の水平勾配が大きい。現行の解析方法でもこの水平勾配は良く推定されており、3回の位置決定で三角形の海底局アレイの各頂点の座標が水平各成分とも2～3cmの誤差で決定できた。

平成30年度以降に黒潮牧場18号ブイからの連続的音響測距を行うとともに、観測船からも並行して音響測距を行い、ブイ方式の観測精度の評価を行う予定である。

海洋GNSSブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響信号処理装置の開発

Development of acoustic signal processing unit for continuous observation of ocean bottom crustal deformation using marine GNSS buoy

*衣笠 菜月¹、田所 敬一¹、稲垣 駿¹、寺田 幸博³、二村 彰⁴、加藤 照之²

*Natsuki Kinugasa¹, Keiichi Tadokoro¹, Shun Inagaki¹, Yukihiro Terada³, Akira Futamura⁴, Teruyuki Kato²

1. 名古屋大学環境学研究科、2. 東京大学地震研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 弓削商船高等専門学校

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. National Institute of Technology, Kochi College, 4. National Institute of Technology, Yuge College

GNSS/音響方式 (global navigation satellite system) による海底地殻変動観測とは、海底に固定された海底局座標の長期的な変化を観察することである。海底局座標は海上局と海底局間を伝播する音響信号の往復走時から推定される。船による観測は年間数回が限度で時間分解能が低いことが、沈み込むプレート境界の固着強度の時間変化をモニタリングする上での課題となっている。連続観測ができるようになれば、プレート境界のスロースリップイベントの機構解明につながると期待されている。そこで、我々は海洋ブイを活用することで海底地殻変動連続観測の実現を目指している。

平成28年度に始動した科学研究費補助金の基盤研究 (S) の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」(研究代表者：加藤照之) では、高知県足摺沖に係留されているブイを利用し開発に取り組んでいる。ブイにGNSSアンテナと受信機、音響測距装置、衛星通信装置を搭載し、音響測距結果と精密単独測位によって得られるブイの座標を、衛星電話サービスを利用して地上局に伝送する計画である。音響測距システムは音響測距装置と信号処理装置から構成される。信号処理装置に音響信号が入力されると相関処理を行い、信号送信時刻や往復走時などを含むメッセージを衛星通信装置に出力する仕様となっている。

往復走時を正確に得るには、受信信号とレプリカ信号との相関処理を行う必要がある。音響信号が海面で反射した場合、相関ピークが複数個出現する。これまでの船による観測でも直接波よりも海面反射波の方が、相関係数が大きくなる場合が見られている。直接波が先に到達し、後から反射波が到達するため、この場合、最大相関ピークより前に出現するピークの中に直接波によるものが紛れていることになる。また、直接波が到来したタイミングで受信信号の振幅が急激に大きくなると考えられる。以上のことから、相関係数の値と受信信号の振幅の2つの指標から直接波到来を判定することを提案する。評価指標に閾値を設けることで、直接波による相関ピークを自動的に認識し、正確な往復走時が得られると考えた。提案するアルゴリズムでは、相関の高い3つのピークを到達時刻が最も早いものから順番に、それが直接波によるものなのかを条件をもとに判定していくことにした。2017年6月と9月に実施した高知県足摺沖の船による観測データを用いて、目視で直接波のピークを判定し、閾値の検討を行った。当該海域での直接波の判定条件を、相関係数の値が0.25以上でかつ信号対雑音比が5.0以上とすることにした。直接波判定の精度は99%以上が見込まれる。

ブイは太陽光発電を採用しているため、電力供給が不安定であることが予想される。そこで、電源復旧後に信号処理装置から音響測距装置に計測開始コマンドを送り、自動で再起動する機能を持たせて停電時の対策を行った。開発した音響測距システムをブイに設置する前に、2017年10月にプールにて一連の動作確認を行った。相関結果の衛星通信ユニットへの伝送も問題なくなされ、1週間途切れることなく連続的に運用できることを確認した。平成30年度中に足摺岬沖のブイに機材を設置し、連続観測の安定的運用を目指す。

キーワード：海底地殻変動、GPS/音響方式、海洋GNSSブイ

Keywords: Ocean bottom crustal deformation, GPS/Acoustic method, Marine GNSS buoy

044**係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測のための音響測距試験**
Acoustic ranging test for continuous measurement of seafloor crustal
deformation using mooring buoy#田所敬一¹, 衣笠菜月¹, 加藤照之², 寺田幸博³, 松廣健二郎⁴

1: 名古屋大学環境学研究科; 2: 神奈川県温泉地学研究所; 3: 高知工業高等専門学校;

4: 名古屋大学全学技術センター

1: Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University;

2: Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government;

3: National Institute of Technology, Kochi College;

4: Technical Center of Nagoya University

はじめに

GNSS/音響方式の海底地殻変動観測結果は、地震時の地殻変動の検出やプレート間の固着状態の推定など、地震サイクルにおける様々な研究に対して大きな成果を挙げ続けている。この方式の当面の技術的な課題は、連続的観測の実施による時間分解能の向上であり、そのためには、船舶の代替となる無人海上プラットフォームが必要である。そこで、平成28年度から科学研究費補助金の基盤研究(S)の研究プロジェクト「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」(研究代表者:加藤照之)において、海洋GNSSブイの機能拡張の一環として係留ブイを用いた海底地殻変動連続観測システムの開発を行っている。本講演では、ブイ上から実施した音響測距試験の結果について報告する。

ブイを用いた海底地殻変動連続観測システム

本研究プロジェクトでは、足摺岬の南東32kmに係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイを海上プラットフォームとして借用し、システムの構築と試験を実施している。GNSSアンテナはブイの頭頂部に、トランスデューサはブイの外板に固定した長さ約3.6mのポールの先端(海面下約3m)にそれぞれ取り付けられた。GNSS受信機、音響測距装置、ジャイロセンサは、ブイの甲板上に固定された防水箱に格納した。これらの機器への給電は、135Wの太陽電池パネル4台に接続された2V-300Ahの蓄電池12個から行う。ブイの座標は、GNSS受信機内で1秒ごとにPPP-AR測位法によって決定する。

音響測距海底局は、ブイの予想漂流範囲を囲むように3台を2017年6月5日に弓削商船高等専門学校の「弓削丸」で設置した。音響測距は、内部波による海中音速構造の時間変化の周期よりも充分短い3分間隔で順次3つの海底局に対して実施することとした。

ブイ上に設置した機器による測定データは、アラブ首長国連邦のThuraya Telecommunications Companyが提供している衛星通信サービスを利用して送信し、高知県仁淀川町の地上局サーバに収録する。測距信号の生波形は、後処理も可能なようにブイ上の音響測距装置内に保存することとした。

連続的音響測距試験

連続的音響測距試験は、2018年3月28日から3月31日までと6月2日から7月12日までの計45日間にわたって実施した。この期間中、音響測距は継続して実施することができた。音響測距の回数は、3月が1485回、6月が19158回の計20643回であった。これらのうち海底局からの返信がなかった測距を除くと、ブイで収録された波形は3月が1295個、6月が15111個の計16406個であった。

前述の通り、音響測距データを含むブイでの測定データは衛星通信によって陸へ送信しているが、予期せぬ通信ポートの切断が度々発生したため、地上局サーバへ送信されたデータ数はブイで収録された波形のわずか17% (2841個) に留まった。

音響測距信号の自動検取

測距波形の生データの容量は64 KB（ヘッダ含む）であり、これをそのまま衛星経由で送信すると莫大な通信コストがかかる。そこで、測距信号の到達時刻に関する情報のみを衛星経由で送信することとし、通信容量を60バイト（約1,000分の1）に圧縮した。

音響測距海底局は、ブイから送信された測距信号を収録し、そのまま返信する。そのため、測距信号のブイへの到着時刻は、音響装置内で生成した信号波形である基準波形との相互相関係数が最大になる時刻として認識することができる。音響測距に必要となるのは海底局からの直達波の走時であるが、測距信号が14.322 msの信号長を有するM系列信号であるため、これまでの船からの音響測距の経験上、この時間内に反射波等の後続波が直達波に重なった場合に、後続波の到着時刻で相互相関係数が最大になる場合がある。そのため、海面やブイ本体からの反射波を防ぐ目的で、吸音材を内面に貼り付けた反射防止カバーをトランスデューサの上方と側面を覆うように取り付けたところ、海面やブイ本体からの反射波の混入は防ぐことができた。しかし、測距波形には直達波と0.3 ms（往復経路差45cm相当）前後の走時差をもつ後続波が散見され、この後続波の到着時刻で相互相関係数が最大になるケースが見られた。往復経路差をもとにすると、この後続波は反射防止カバーからの反射波であると推察される。このことから、カバーに取り付けた吸音材がその効果を十分に発揮しなかったと考えられる。

そこで、反射波の到着時刻で相互相関係数が最大になっても極力正しい直達波の到着時刻を自動で認識できるアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムは、相互相関係数のピークを3つ抽出し、各ピーク時刻において直達波が到着しているかを相互相関係数のピーク値と信号のエネルギー比（当該時刻の前後0.39ms間の二乗平均振幅の比）に閾値を設けて判定するものである。これらの閾値は、ブイ上の音響測距装置内に保存した測距信号の生波形を用いて設定した。設定した閾値をもとに自動で認識した直達波の到着時刻と目視で認識した直達波の到着時刻を比較したところ、直達波の到着時刻の認識間違いは全体の0.8%（130個）であった。これを1日あたりに換算すると4個程度である。このアルゴリズムは相互相関係数のピークを基にしているため、特に直達波と反射波の往復経路差が極めて小さいために反射波の相互相関係数のサイドローブが直達波の相互相関係数の最大値に被っている場合には、原理的に直達波の到着時刻が認識できないという問題点がある。したがって、今後、アルゴリズムの高度化が不可欠である。

045

ブイによる海底地殻変動連続観測のための解析手法の開発

Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by
continuous observation using marine GNSS buoy#衣笠菜月¹, 田所敬一¹, 二村 彰², 寺田幸博³, 加藤照之⁴

1: 名古屋大学大学院環境学研究科; 2: 弓削商船高等専門学校; 3: 高知工業高等専門学校;

4: 神奈川県温泉地学研究所

#Natsuki Kin ugasa¹, Keiichi Tadokoro¹, Akira Futamura², Yukihiro Terada³, Teruyuki Kato⁴

1: Graduate School of Environments, Nagoya University;

2: National Institute of Technology, Yuge College;

3: National Institute of Technology, Kochi College;

4: Hot Springs Research Institute of Kanagawa

研究背景と研究目的

GNSS (global navigation satellite system)/音響方式による海底地殻変動観測では、海底に固定された海底局の位置の長期的な変化を観察する。海底局位置は海上局と海底局間を伝播する音響信号の伝播時間から推定できる。船舶による観測は年間数回程度しか行えないため、プレート境界の固着強度の時間変化をモニタリングするには時間分解能が低い。そこで我々は海洋ブイを用いて海底地殻変動連続観測の実現を目指し、科学研究費補助金の基盤研究 (S) の研究プロジェクト「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」を始動させた。

高知県足摺沖に係留されている高知県の黒潮牧場18号ブイに GNSS アンテナと受信機、ジャイロ計、音響測距装置を搭載し、衛星電話サービスを利用して音響測距結果とブイの座標と姿勢データを地上局に伝送している。ブイの座標は日立造船が開発した PPP-AR 方式により測位される。船による観測と比べて音響測距の間隔を長くしていることや、リアルタイム測位のためブイの位置の測位精度が低いことから、海底局位置の推定がより難しくなると予想される。また音響測距と並行して UCTD (underway conductivity-temperature-depth) 観測が行えないため、古い海中音速プロファイルを使用しなければならない。本研究は船観測と同等の精度で海底地殻変動解析を実現することを目標に、解析手法の開発に取り組んでいる。

海底地殻変動解析

海中音速の水平構造に一定の勾配があると仮定し、また音響信号は直線的に伝播すると仮定すると、海上局と海底局間の片道走時 T は次式で表現される。

$$T = |P|C(t)\bar{S}_0 + \frac{1}{2}|P|\{(r_x + u_x)S_x + (r_y + u_y)S_y\}$$

$\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$: ブイの位置 (m), $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$: 海底局の位置 (m), $\bar{S}_0$: アレイ重心におけるスローネスの平均値 (s/m), $C(t)$: スローネスの時間変化係数, S_x, S_y : スローネスの水平勾配 (s/m/m), $P =$

$r-u$. このときブイと海底局の位置は海底局アレイの重心を基準とした ENU (east-north-up) 座標系で表現する.

本研究では2段階の解析プロセスを経て海底地殻変動を推定する. (1) 船舶による観測データを使用した海底局アレイ形状推定; (2) ブイによる観測データを使用した地殻変動量推定. 海底局はアレイ形状を保ったまま地殻変動すると仮定し, 最小二乗推定を再帰的に行うことで未知パラメータの推定を行う.

結果と考察

2017年6月に足摺沖約 40 kmの係留ブイを取り囲むようにして3個の海底局の設置を行った. 2017年の6月及び9月と2018年の6月に弓削商船高専の弓削丸と海洋エンジニアリングの第三開洋丸を使用して音響測距観測を実施した. ブイでの本格的な音響測距観測は2018年6月から開始し, 同6月3日には船舶とブイによる並行観測を実施した.

船舶による観測データを使用し推定した海底局アレイ形状を図1に示す. 海底局座標の推定標準誤差約 1 cm 程度で決定された. ブイによる地殻変動解析を船と同等の精度で実現するには, より正確にアレイ形状を決定することが必要不可欠である. 今後はブイによる観測データを長期間蓄積し, 解析手法の評価を行う.

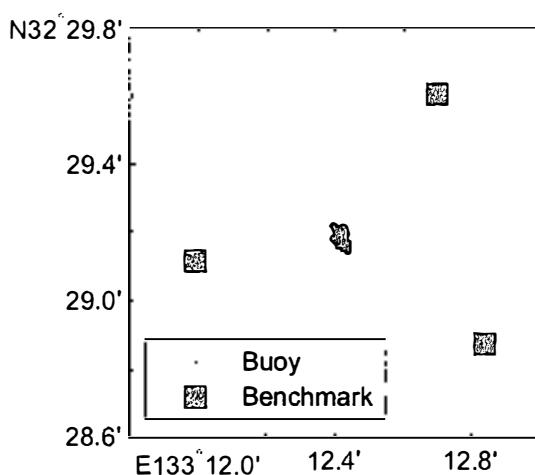


図1: 係留ブイと海底局の座標.
ブイの位置は2018年6月2日から10日の期間を示す.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H06310 の助成を受けたものです.

T41F-0361: Experiment of acoustic ranging from GNSS buoy for continuous seafloor crustal deformation measurement

Thursday, 13 December 2018

08:00 - 12:20

📍 Walter E Washington Convention Center - Hall A-C (Poster Hall)



•  [AGU B0.pdf](#)
[ePoster](#)

The next challenge of the measurement system of the seafloor crustal deformation through the GNSS/acoustic method is the continuous measurement of seafloor crustal deformation using this method. Then we started to develop a measurement system on a buoy moored 32 km off Cape Ashizuri, Japan, named as Kuroshio-Bokujyo buoy No. 18, operated by Kochi prefecture. An acoustic transducer was fixed at about 3 m under the sea surface with a pole mounted on the buoy. Three ocean bottom acoustic transponders had been installed around the moored point of the buoy. The acoustic signals are sequentially transmitted to these three transponders every three minutes. The recorded data on the buoy are transmitted to a ground base station through a commercial communication satellite operated by Thuraya Telecommunications Company.

We performed a test for the continuous acoustic ranging between the buoy and the ocean bottom transponders from March 28 to 31 and June 2 to July 12, 2018. We succeeded to perform the acoustic ranging throughout the above periods. The acoustic signals were transmitted 20643 times in total, and the buoy-mounted acoustic ranging unit received 16406 signals from the ocean bottom transponders. However, the acoustic data sent to the ground base station was only 17 % because of unexpected trouble of the communication port of the satellite modem.

The arrival time of the acoustic signal is usually recognized by the cross-correlation computation with the transmitted waveform. When the acoustic signal is contaminated by high amplitude reflected waves from the sea-surface and/or the buoy's body, the cross-correlation coefficient attains maximum at the timing of the reflected wave arrival; then we set an antireflection cover to the transducer. Nevertheless, subsequent waves with the maximum cross-correlation coefficient are found after about 0.3 ms from the direct wave. These subsequent waves are arisen from the reflection at the antireflection cover. We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio (the ratio of the squared amplitudes preceding and following a test point). The program successfully picked the correct direct wave onset for 99 % of the recorded waveforms.

First Author

Keiichi Tadokoro

Nagoya University

Authors

Natsuki Kinugasa

Nagoya University

Teruyuki Kato

*Hot Springs Research
Institute of Kanagawa
Prefectural Government*

Yukihiro Terada

*National Institute of
Technology, Kochi College*

Day: Thursday, 13 December 2018

T41F-0362: Development of analysis method for ocean bottom crustal deformation by continuous observation using marine GNSS buoy

Thursday, 13 December 2018

08:00 - 12:20

📍 *Walter E Washington Convention Center - Hall A-C (Poster Hall)*

Observation for ocean bottom crustal deformation by global navigation satellite system (GNSS)/acoustic method is monitoring long-term movements of transponders fixed on seafloor, which can be estimated from the travel time of acoustic signal between onboard transducer and transponder. Observation method using vessel and its analysis method have been established. However, it is incapable of monitoring the temporal variation of fixing strength of plate boundary because observation can be performed only several times a year.

We aim to realize continuous observation by using marine buoy, which helps to clarify the mechanisms of slow slip events in more detailed. The Grant-in-Aid for Scientific Research (S) project "A challenge to develop GNSS buoy system for high-functional tsunami monitoring and continuous observation of ocean-bottom crustal movements" which has been started from 2016 utilizes the mooring buoy off the coast of Ashizuri, Japan. Observation data are transferred from buoy to ground station using mobile satellite service. In comparison with observation using vessel, it has difficulties in analysis caused by: low frequency of acoustic ranging; lower GNSS positioning precision; and use of old sound speed profile. Our purpose of this work is to develop analysis method which reduces their influences to the estimation of crustal movements and achieves precision equivalent to that of observation using vessel.

Our strategies to estimate ocean bottom crustal deformation precisely includes following steps: 1) estimating shape of array of transponders using data observed by vessel; and 2) estimating displacement vector using data observed by buoy assuming that the array moves while keeping its shape determined in step 1. In both steps, we propose estimating both temporal variation and horizontal gradient of sound speed in ocean for highly precise estimation.

We used data obtained by six times observations during the period from 2017 to estimate array shape. The estimated standard errors of coordinates of transponders were about 1 cm. We discovered that it is essential to have correct array shape and position of buoy for highly precise estimation of displacement. We just started observing by buoy since June in 2018 and then will evaluate our proposed analysis method by using long-term accumulated data.

First Author

Natsuki Kinugasa

Nagoya University

Authors

Keiichi Tadokoro

Nagoya Univ.

Yukihiro Terada

*National Institute of
Technology, Kochi College*

Teruyuki Kato

The University of Tokyo

Akira Futamura

*National Institute of
Technology, Yuge College*

Day: Thursday, 13 December 2018

[発表2019-1p]

Maritime Water Vapor Estimation using Ocean Platform GNSS Measurement

Yoshinori Shoji

(Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency, yshoji@mri-jma.go.jp)

Teruyuki Kato

(Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government,

teru@onken.odawara.kanagawa.jp)

Yukihiro Terada

(National Institute of Technology, Kochi College, terada@ce.kochi-ct.ac.jp)

Toshitaka Tsuda

(Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto University, tsuda@rish.kyoto-u.ac.jp)

Masanori Yabuki

(Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto University, yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp)

Japan is an island country located in the easternmost of East Asia and influenced by the East Asian monsoon. Moist air inflow coming from ocean often causes heavy rainfall (Kato 2006, Tsuguchi and Kato 2014). In early July 2018, extreme rainfall events occurred in western

Japan to the Tokai region. During the event (28 June – 8 July), more than 1,000 mm precipitation was recorded in several regions with at the maximum of 1,852.5 mm. A press release of Japan Meteorological Agency (JMA) (JMA, 2018) attributes the event to concentration of two massively moist air streams over western Japan and persistent upward flow. With the increase of extreme precipitation events, water vapor monitoring over the ocean is one of the important issues in Japan. Shoji et al. 2009 showed improvement of a heavy rainfall prediction by assimilating precipitable water vapor (PWV) estimated at Global Positioning System (GPS) observation network in East Asia as well as Japan's nationwide dense GPS network. The result insists the importance of water vapor monitoring in upstream.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, -0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate).

Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring.

The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the “BAIU” seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that, compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA’s objective analysis is larger over the ocean.

Taking these results, in the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA’s research vessel).

Reference

Japan Meteorological Agency, 2018: Primary Factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the Subsequent Heatwave in Japan from Mid-July Onward, press release, available at http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/press_20180822.pdf (accessed on 2 December, 2018).

Kato, T., 2006: Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over northern Kyushu, Japan on 29 June 1999, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 129-153.

Kato T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018: Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, *Journal of Disaster Research* Vol.13 No.3, 460-471.

Shoji, Y., Kunii, M., Saito, K. (2009) Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data for a Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan, *SOLA 5*: 045–048.

Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. *Earth Planets Space*. 69, 153.

Tsuguti, H. and T. Kato, 2014: Contributing Factors of the Heavy Rainfall Event at Amami-Oshima Island, Japan, on 20 October 2010, *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 163-183.

Acknowledgements

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

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310. A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

European Space Agency (ESA), 2019 Living Planet Symposium, 13-17 May 2019,
MiCo - Milano Congressi, Milan, Italy

Ocean Platform GNSS Meteorology for Heavy Rainfall Prediction

Shoji Y.¹, **Tsuda T.**², **Kato T.**³, **Terada Y.**⁴, **Yabuki M.**²

¹ Meteorological Research Institute, Tsukuba Ibaraki, Japan

² Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto University, Uji Kyoto, Japan

³ Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government, Odawara
Kanagawa, Japan

⁴ National Institute of Technology, Kochi College, Kochi Kochi, Japan

Water vapor plays a crucial role for the development of hazardous cumulus convection. Via the condensation process, moisture releases latent heat which becomes an energy source for the rapid development of cumulus convection. Because most of atmospheric water vapor concentrates in lower troposphere, monitoring of water vapor in low-level has received a lot of attention. For the island country like Japan, low-level moisture often come from ocean. Several studies of hazardous weather events have revealed that low-level moisture from the ocean plays an essential role in such weather cases (Kato and Aranami 2005, Shoji et al. 2009). However, currently, there is no continuous water vapor sensor which can observe water vapor amount over the ocean.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOFU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, -0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate). Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring. The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the “BAIU” seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that,

compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA's objective analysis is larger over the ocean.

Taking these results, in the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA's research vessel).

Reference

- Kato, T., Aranami, K. (2005) Formation Factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving Model, SOLA 1: 1–4. doi:10.2151/sola.2005-001
- Kato T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018: Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, Journal of Disaster Research Vol.13 No.3, 460-471.
- Shoji, Y., Kunii, M., Saito, K. (2009) Assimilation of Nationwide and Global GPS PWV Data for a Heavy Rain Event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan, SOLA 5: 045–048.
- Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. Earth Planets Space. 69, 153.

Acknowledgements

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

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310. A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

船舶やブイで観測した GNSS データを用いた同化実験(その1)

*瀬古 弘(気象研究所・海洋研究開発機構)、小泉 耕・小司 禎教(気象研究所)
加藤 照之(神奈川県温泉地学研究所)

1. はじめに 近年、毎年のように豪雨が発生し、豪雨の予測精度向上は喫緊の課題である。たとえば、平成 29 年九州北部豪雨では東シナ海の下層の水蒸気量のわずかな差が予測降水量に大きく影響を及ぼしていたことが示唆されている。海上の水蒸気量は降水量に大きく影響を及ぼすがデータ数は少ないため、船舶等を用いた海洋上の観測が必要である。ここでは、船舶やブイで観測した GNSS で観測した可降水量をデータ同化した結果について報告する。

2. 船舶 GNSS の同化実験の結果 2017 年 6 月 5 日から 9 日に低気圧が西日本を通過した。この期間に GNSS を設置した凌風丸が九州の西から奄美大島へ、さらに四国沖に移動した。その期間の船舶 GNSS データ(Shoji et al 2016, 2017)を、気象研に移植したメソ NAPEX を用いて同化すると、凌風丸が東シナ海を南下しているときの 850hPa の T-Td 解析値の差(船舶 GNSS 同化ありー同化なし)は、凌風丸の通過位置で水蒸気量が大きく変化し、その領域が時間とともに九州に接近していた(図 1)。この事例では降水域に大きな差は無いが、水蒸気量のインクリメントは期待通りの様相を示した。

化すると、インクリメントは小さくなるものの、同様な傾向がみられた(図 2 右)。これらから、ブイ GNSS は 1 地点のみでも降水域の位置や強度に影響を与えることがわかった。今後は、船舶とブイの両方について、事例数を増やし、インパクトを与える条件等を調べる予定である。

謝辞:本研究の一部は、科研費「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」より支援を受けました。

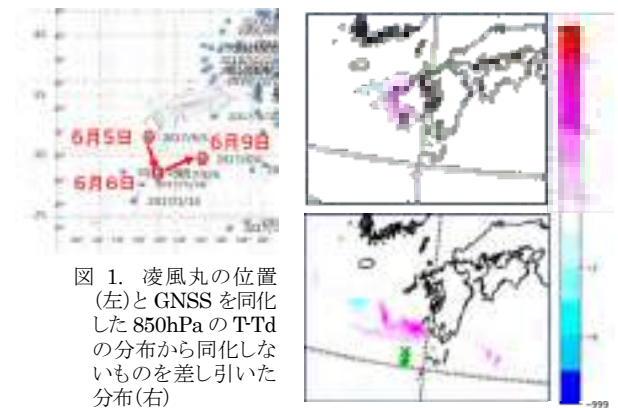


図 1. 凌風丸の位置(左)と GNSS を同化した 850hPa の T-Td の分布から同化しないものを差し引いた分布(右)

3. ブイ GNSS の同化実験の結果

ブイは足摺岬先端から約 30km 南東にあり、南から四国に供給される水蒸気量の監視に適した位置にある。解析した GNSS 可降水量(Shoji et al 2019, 投稿中)とメソ解析を比較すると、メソ解析の方が大きいバイアスがあるものの、対応が良いことがわかっている。

この可降水量も気象研に移植したメソ NAPEX を用いて同化した。同化すると、四国の東部分で下層の水蒸気量が減少、四国の西部分から九州で増加していて、降水域もより南北に伸びる形状になった(図 2 左)。観測値にバイアスを補正して同

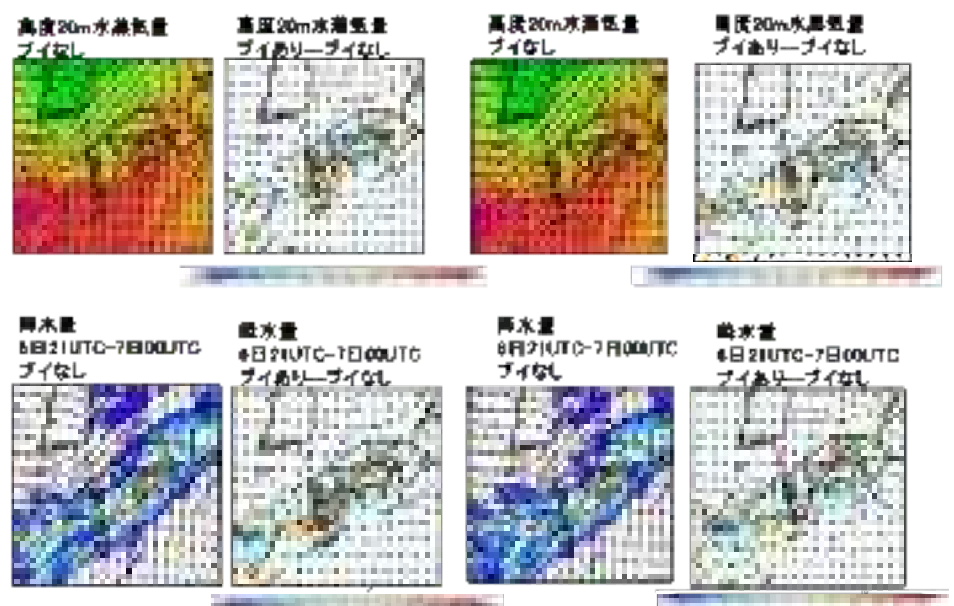


図 2. 足摺岬先端から約 30km 南東にあるブイを入れたデータ同化実験と入れない同化実験の水蒸気量と降水量分布。左はバイアス補正あり、右はバイアス補正なし。

海中音速構造の不均質性を考慮したGNSS/音響方式による海底地殻変動解析

Analysis for GNSS/acoustic ocean bottom crustal deformation considering the heterogeneity of sound speed structure in ocean

*衣笠 真月¹、田所 敏一¹、寺田 幸博²、加藤 照之³

*Natsuki Kinugasa¹, Keiichi Tadokoro¹, Yukihiro Terada², Teruyuki Kato³

1. 名古屋大学大学院環境学研究科, 2. 高知工業高等専門学校, 3. 神奈川県泉地学研究所

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

GNSS (global navigation satellite system) 音響方式による海底地殻変動観測では、船舶やブイから海底に設置された海底局までの距離を音響信号で測距し、解析から得られる海底局位置の長期的な変化を観察する。1つの観測点に複数の海底局を設置してあるため、船舶による観測の場合海底局アレイの周りと各局の真上から測距している。解析では海底局間の相対位置、つまりアレイ形状は、時間的に変化しないものと仮定し、船舶による観測ごとに海底局アレイ位置を推定する手法をとっている。したがって、地殻変動を精度よく推定するには、まず正しいアレイ形状を推定することが必要となる。

海底局位置の推定誤差の主要な原因は、海中での音波の伝播速度が時間的にまた空間的に変化することにある。音速は、潮汐により半日から1日周期で変化し、また内部重力波により10分から1時間程度の周期で時間変化すると考えられている。1回の観測の間は海底局位置が変化しないと仮定して解析することで、長周期の時間変化は容易に推定できる。また短周期の変化は観測周りに含まれる雑音と見なせば、海底局位置のバイアス誤差の原因とはならないと考えられる。一方、空間勾配は音速が海水の温度と圧力、塩分によって変化することによって生じる。垂直方向の速度勾配は、音響測距と並行して行うCTD (conductivity, temperature, depth profiler) 測定でプロファイルが得られる。水平方向の空間勾配は主に温度勾配によって生じる。特に黒潮流域に設置された観測点では顕著な速度勾配が観測されている。我々は音速の水平勾配が海底局位置のバイアス誤差の最大の原因となると考えた。そこで本研究は海底局アレイ形状を高精度に推定することを目的として、海中音速の時空間変化を考慮した解析手法の開発を行った。

黒潮流域に設置された足摺沖と熊野灘沖の名古屋大学の観測点について、水平方向に一定の勾配を仮定した音速構造を推定する解析手法を開発し、適用した。その結果から水平勾配を考慮しない場合、音速の速い場所に位置する海底局は浅く、音速の遅い場所に位置する海底局は深く推定されることが分かった。音速の速い場所に位置する海底局の理論走時を小さくするには、定数上伝播距離を短くしなければならない。海底局アレイを囲むように円周航路で測距しているため、海底局の水平位置をずらしても観測中の走時残差の平均値を小さくする効果は小さい。以上から、海底局が深く推定された理由が説明できる。以上の結果から、黒潮流域に設置された海底局位置を高精度に推定するには、音速構造の水平方向の不均質性を考慮することが不可欠であるといえる。また測距する際の船舶の航路も解析精度に影響することが分かった。

キーワード：海底地殻変動、GNSS/音響、時空間変化、黒潮

Keywords: Ocean bottom crustal deformation, GNSS/acoustic, Temporal and spatial variation, the Kuroshio current

Study of Water Vapor Monitoring in the Open Ocean using Kinematic Precise Point Positioning

*小司 禎教¹、加藤 照之²、寺田 幸博³、津田 敏隆⁴、矢吹 正教⁴

*Yoshinori Shoji¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³, Toshitaka Tsuda⁴, Masanori Yabuki⁴

1. 気象研究所気象衛星・観測システム研究部第2研究室、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 京都大学生存圏研究所

1. The Second Laboratory of Meteorological Satellite and Observation System Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Hot Springs Research Institute/Kanagawa Prefectural Government, 3. National Institute of Technology, Kochi College, 4. Research Institute for Sustainable Humanosphere/Kyoto University

Japan is an archipelago located easternmost of East Asia and influenced by the East Asian monsoon, which is characterized by moist air inflow coming from the ocean that often causes heavy rainfall (Kato 2006, Tsuguti and Kato 2014, Kato 2018). From June 28 to July 8, 2018, extreme rainfall frequented western Japan to the Tokai region, wherein more than 1,000 mm, at the maximum of 1,852.5 mm, precipitation was recorded in several regions (Tsuguti et al. 2018). A press release of Japan Meteorological Agency (JMA) (JMA, 2018) attributed the event to the concentration of two massively moist air streams over western Japan and persistent upward flow. With the frequency of extreme precipitation events, water vapor monitoring over the ocean becomes one of the important issues in Japan. Shoji et al. 2009 exhibited the improvement of a heavy rainfall prediction method by assimilating precipitable water vapor (PWV) estimated via the Global Positioning System (GPS) observation network in East Asia, as well as Japan's nationwide dense GPS network. The result insisted the importance of water vapor monitoring upstream.

Unlike ground-based fixed GNSS stations, ocean-platform (ship and buoy) GNSS measurements face difficulties in analyzing the variable antenna position simultaneously with the atmospheric delay. However, recent advancement of kinematic precise point positioning technology is beginning to overcome these difficulties. Shoji et al. (2017) installed two GNSS antennas on a research vessel, the RYOBU MARU of the Japan Meteorological Agency (JMA), and conducted experimental observations to assess the GNSS derived precipitable water vapor (PWV) from October 19, 2016, to August 6, 2017. The GNSS derived PWVs showed good agreement with the radiosonde observations on the vessel (1.7 mm root mean square difference, -0.7 mm bias, and 3.6% rejection rate).

Kato et al. (2018) introduced a GNSS buoy system for a synthetic geohazard monitoring. The buoy is located about 40 km south of Cape Ashizuri, west of Shikoku, Japan. We succeeded continuous PWV retrieval from June to September 2018. Retrieved PWVs vividly captured water vapor variations associated with north-south shifting of the "BAJU" seasonal rain front and passages of heavy rainfalls and typhoons. The GNSS buoy PWVs also suggest that, compared to over land, uncertainty of water vapor field in JMA's objective analysis is larger over the ocean (Shoji et al. 2019).

In the year of 2018, we started a new research project to monitor PWV over the ocean west of Kyushu, Japan, getting supports from eight vessels (six regular line cargo vessels, one fisheries research vessel, and one JMA's research vessel). The purpose of this study is to assess the impact of water vapor monitoring in upward of west Japan on heavy rainfall prediction. Preliminary PWV analyses show about 3 mm rms with about -1 mm bias against JMA's operational regional objective analysis.

Acknowledgements

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

GNSS observation on top of a floating buoy is funded by JSPS KAKENHI Grants 16H06310. A part of this study is supported by JSPS KAKENHI Grants 17H00852.

キーワード：水蒸気、豪雨、GNSS

Keywords: Water Vapor, Heavy rainfall, GNSS

新たな海底地殻変動観測手法のためのGNSSブイからの連続音響測距

Continuous acoustic ranging from a GNSS buoy for the new method of seafloor crustal deformation measurements

*田所 敬一¹、衣笠 菜月¹、加藤 照之²、寺田 幸博³、二村 彰⁴、松廣 健二郎¹

*Keiichi Tadokoro¹, Natsuki Kinugasa¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³, Akira Futamura⁴, Kenjiro Matsuhira¹

1. 名古屋大学地震火山研究センター、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 弓削商船高等専門学校
1. Research Center for Seismology, Volcanology and Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3. Kochi National College of Technology, 4. National Institute of Technology, Yuge College

Our research group has been testing a measurement system for the continuous seafloor crustal deformation at a moored buoysite operated by Kochi prefecture, located 32 km off Cape Ashizuri, Japan. An acoustic transducer was fixed at about 1.7 m beneath the sea surface with a pole mounted on the buoy body. Three ocean bottom acoustic transponders had been installed around the moored point of the buoy. The acoustic signals are sequentially transmitted to these three transponders every three minutes. The recorded data on the buoy are planned to be transmitted to a ground base station through a commercial communication satellite operated by Thuraya Telecommunications Company.

We performed a test for the continuous acoustic ranging between the buoy and the ocean bottom transponders from March 28 to 31 and from June 2 to July 12 (1st period), and from November 16 to December 17 (2nd period) in 2018. The acoustic ranging was continuously possible throughout the above periods when power was supplied whereas it was unexpectedly terminated because of power failure during the winter season. The acoustic signals were transmitted 27,856 times in total, and the buoy-mounted acoustic ranging unit received 23,342 signals from the ocean bottom transponders. However, the acoustic data sent to the ground base station was only 12 % because of some trouble of the satellite communication modem.

The reflected signals from the buoy body and/or the seafloor sometimes contaminated the received acoustic signals; also multiple reflections inside of an anti-reflection cover attached to the buoy-mounted transducer, whose purpose is to cut off the reflection from the sea surface, were remarkable during the 1st period. The multiple reflections caused the misidentification of the direct wave from the sea-bottom units. We, therefore, removed the anti-reflection cover during the 2nd period, which remarkably reduced the confused reflections.

We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio (the ratio of the squared amplitudes preceding and following a test point) to reduce the capacity of data transferred via satellite communication using the acoustic waveform recorded during the 1st period. The program successfully picked the correct direct wave onset for more than 99 % of the waveforms recorded during the 2nd period.

リアルタイム観測・大深度掘削・高圧実験の統合による沈み込み帯4D描像

Innovative 4D imaging of subduction-zones through real-time observatories, ultra-deep drilling and high-pressure experiments

*木下 正高¹、平田 直¹、篠原 雅尚¹、入船 徹男²、鍵 裕之⁷、加藤 照之³、小野 重明⁴、道林 克禎⁶、阿部 なつ江⁴、稲垣 史生⁴、小村 健太郎⁵、小原 一成¹

*Masataka Kinoshita¹, Naoshi Hirata¹, Masanao Shinohara¹, Tetsuo Irifune², Hiroyuki Kagi⁷, Teruyuki Kato³, Shigeaki Ono⁴, Katsuyoshi Michibayashi⁶, Natsue Abe⁴, Fumio Inagaki⁴, Kentaro Omura⁵, Kazushige Obara¹

1. 東京大学地震研究所、2. 愛媛大学、3. 温泉地学研究所、4. 海洋研究開発機構、5. 防災科学技術研究所、6. 名古屋大学、7. 東京大学地殻化学実験施設

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Ehime University, 3. Hot Springs Research Institute, 4. JAMSTEC, 5. NIED, 6. Nagoya Univ., 7. Geochemical Research Center, Univ. Tokyo

我々は、2014年に「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」として提出した「海底・陸域での地震・地殻変動観測網整備」と「超深度掘削による地下圏孔内観測」を、2017年の小改訂により統合し、「海陸・掘削統合観測による革新的地震・噴火予測科学ー沈み込み帯の時空間情報科学の挑戦ー」として提出した。2020年の改訂にあたっては、2017年の改訂提案に、新たに海洋ブイ測地観測研究、およびマントルまでの超高圧再現実験研究を加えて、沈み込み帯周辺の諸現象を時空間解読し、地震・噴火からマントル構造、そして地球の遠未来を予測する革新的情報科学を創立する。このため、日本列島～西太平洋の海域をカバーするケーブル・ブイ統合リアルタイム地震・地殻変動観測網（大気・電離層・海洋観測含む）を整備し、超深度掘削による試料採取と超高圧実験による地球内部の再現を行う。地球科学者の叡智を結集し、30年以内の発生確率が70-80%に及ぶ南海トラフ地震発生帯等の深部構造を含めた4D描像を行うとともに、その原動力である沈み込みの力学を理解する鍵となるマントル粘性率を、温度構造や揮発性成分からこれまでにない精度で評価する。さらにマントルへの水・エネルギー移動を捉え、地球・海洋の数億年後の将来までを予測することに挑戦する。

キーワード：Seafloor cable network、Ultra-deep drilling、High pressure experiments、GNSS buoy、Subduction zone、Mantle rheology

Keywords: Seafloor cable network, Ultra-deep drilling, High pressure experiments, GNSS buoy, Subduction zone, Mantle rheology

[発表2019-8p]

" Recent Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Disaster Mitigation System in the ocean "

Teruyuki Kato*, Yukihiro Terada**, Keiichi Tadokoro***, and Akira Futamura****

*Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Japan,
teru@onken.odawara.kanagawa.jp

**National Institute of Technology, Kochi College, Japan

***Graduate School of Environmental Science, Nagoya University, Japan

****National Institute of Technology, Yuge College, Japan

Abstract:

This presentation introduces the recent development and discusses future scope and problems to be solved for a GNSS buoy system as a synthetic disaster mitigation system in the ocean. The buoy was developed originally aiming at the tsunami early warning apparatus. The system was able to detect the high tsunami of the 2011 Tohoku-oki tsunami before its arrival to the coast and was used for updating the tsunami alert. Yet, because the system used RTK baseline measurements, distances of buoys from the base station are limited only less than twenty kilometers. Consequently, the lead time of tsunami alert to the tsunami arrival was only a few minutes and consequently lots of people's lives were lost.

This motivated us to upgrade the system, introducing a precise point positioning system so that we do not require any onshore base station and the buoy can be put much farther away from the coast. We also introduced a satellite communication for data acquisition. Currently, we are conducting the experiments borrowing a fishery buoy of Kochi Prefecture off the Cape Ashizuri, southwest Japan. Given that the system is evaluated as feasible, the area of application fields will get much wider.

One of the most challenging application is to use the buoy for the GNSS-Acoustic system for continuous ocean bottom crustal movement measurements. Continuous measurements of ocean bottom crustal movements observations might discover new phenomena such as slow slip events nearby oceanic subduction zones. Buoys can be used for other applications such as atmospheric and ionospheric researches including their applications to the geohazards monitoring. Moreover, ancillary sensors on, above and below the buoys can be used for ocean researches. If such buoys are established many places in the ocean, say, northwestern Pacific, such system will be a powerful infrastructure for synthetic geohazards monitoring.

Keywords (3-5 words):

GNSS buoy, tsunami early warning, synthetic disaster mitigation

[発表2019-10p]

6.3 GNSS ブイを用いた総合防災システムについて～現状と課題～

加藤照之（温泉地学研究所）・寺田幸博（高知工業高等専門学校）

teru@onken.odawara.kanagawa.jp

terada@ce.kochi-ct.ac.jp

6.3.1 はじめに

我々は GNSS 受信システムをブイに取り付けて津波を計測する GNSS 津波計（開発当初の呼称は GPS 津波計）を 1990 年代の終わりころから約 20 年にわたって開発してきた。最近の技術の進展に伴い、GNSS ブイは多様な応用に役立てられることがわかり、現在では GNSS ブイを海洋にアレイ展開して総合的な防災ブイとして活用できるようなシステムを開発中である。本稿では、我々の GNSS ブイの開発の歴史を振り返り、現状と今後の課題や見通しについて触れてみたい。

6.3.2 GNSS 津波計の概念

津波を、その襲来前に正確に計測し、その観測値に基づく沿岸への正確な到達時刻と津波高の予測、及び情報の適切な伝達によって沿岸住民の避難・誘導に活用できれば、津波による被害は大幅に軽減できるだろう。

このような考えに基づき、従来の津波計測手法とは全く異なる GNSS を用いた海面変動計測装置の開発を行い、波浪から潮汐に至る広い周波数範囲の海面変位を数 cm の精度で計測でき、設置や維持管理が容易に実施できる津波観測システムの実現を目指している。システム構成の基本的概念を図 1 に示す。海上に浮かべたブイの最上部に GNSS アンテナを取り付け、ブイの動揺と共に変化するアンテナ位置の精密測位結果の鉛直方向時系列データから、海面高の変位を計測することができる。波浪、津波及び潮汐の計測には、数 cm の精度とリアルタイム性が必要であることから、当初は、RTK(Real Time Kinematic)法を基本的な測位方式として採用した。この方法では、陸上に基地局を設けて GNSS 観測をブイと同時に、ブイで取得された 1 秒ごとの位相データ

は無線によって基地局に伝送され、基地局に置かれた計算機により即時に基線解析が行われ、ブイの位置を陸上基地局に対する相対位置として推定する。この手法では電波の伝搬媒質の影響が観測点間距離とともに急速に大きくなることから、精度保持のためブイの基地局からの距離を 20 km 以内程度としなくてはならないという制限がある。後節で述べるように、最近の技術の進展により、現在では、基準点を設ける必要が無い精密単独測位法によっているため、沖合展開における限界の問題が払拭され、大洋上のどの位置にでも設置できるようになっている。

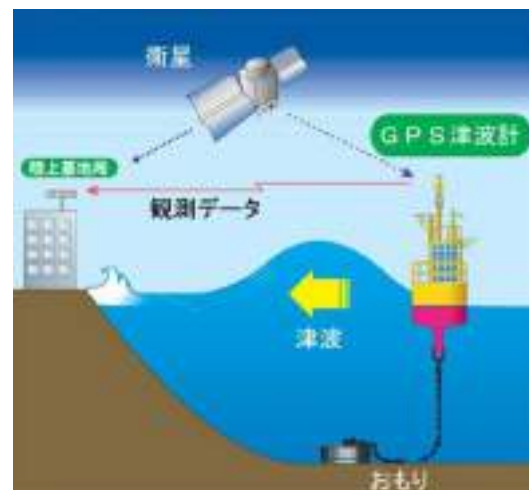


図1 GNSS津波計の概念。

6.3.3 開発の経緯とその意義

1997年に神奈川県相模湾にて実施した基礎実験においてGNSS津波計が誕生した（加藤他、1998）。この時のGNSS受信器や記録装置を積み込んだブイを図2の左側に示す。続いて、1998年に同地で基本機能実験を行い、波浪と潮汐を同時にcmオーダーで観測できることを示した。次に、実用化実験として2001年から岩手県大船渡

市沖に GNSS 津波計を設置して 3 年間の連続計測を実施した。ここまでの成果は、寺田・加藤 (2003) に詳しく記している。



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

続いて、この技術の外洋対応の技術開発を進め、高知県室戸岬沖で実証実験を行ったときの海洋ブイを図 2 の右側に示す。計算結果はインターネットの VPN 接続でサーバー (室戸岬では高知高専) に送り、ホームページで図 3 に示す画像を表示してリアルタイムに市民へのデータ公開を行った。通常の波浪は数秒から数十秒程度の周期であるのに対し、津波は数分以上の長い周期を持っているので、フィルタリング操作によって容易に識別が可能である。図において、上段は周期の短い波浪を示しており、中段に示す津波データは、数分から数時間の周期で変化する成分を示すようにしている。

室戸岬沖の実証実験では、図 4 に示すように波浪データの有義波高 $H_{1/3}$ (波高の高い方から $1/3$ の平均値) と周期 $T_{1/3}$ (有義波高の計算対象とした波の周期の平均値) が、近隣の海底超音波

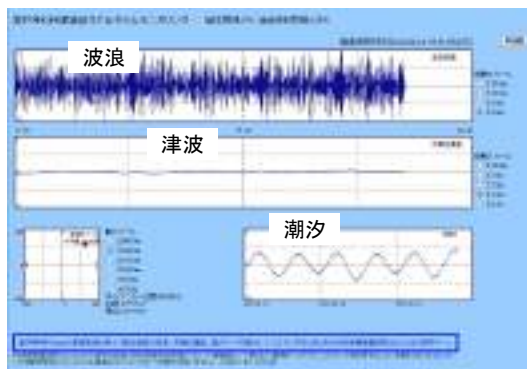


図3 リアルタイム公開したデータ (室戸岬沖)。波浪、津波データの横軸はフルスケール 1 時間であり、潮汐の場合は 3 日である。縦軸は、いずれも海面高であり、それぞれのフルスケールは $\pm 2\text{m}$, $\pm 1\text{m}$, $\pm 2\text{m}$ である。

式波浪計で得られるものと同様の傾向を示すことが確認できた。さらに、潮汐、高潮などの情報も測位データから得られるほか、多種のセンサーを搭載することにより水温、洋上風などの情報を発信でき、漁業活動や海運などの海に係わる地域の経済活動の支えとなる海洋観測ステーションとしての機能も備え得ることを示してきた。

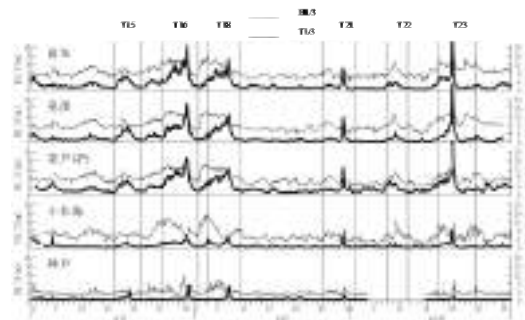


図4 2004 年 6 月～10 月に観測された有義波高。太線が有義波高を示し、細線が有義波周期を示している。横軸のフルスケールは 3 カ月であり、縦軸は、何れもフルスケール 10m である。

ここまでの実績によって、国土交通省港湾局が GNSS 波浪計 (正式名称は GPS 波浪計) として全国展開することになり、防波堤や港湾施設の設計施工のために不可欠な波浪データの常時観測を行い、津波発生の際には気象庁によって津波予報に利用されている。

6.3.5 章に述べるように、このシステムは 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を観測し、気象庁の津波警報の更新に役立てられたものの、GNSS 波浪計の設置場所が十分に沿岸から十分遠くに設置されていなかったことと、情報の伝達が十分でなかったことなどから、結果として大きな犠牲者を生むこととなった。こうした反省を踏まえ、システムを刷新してより効果的な津波・波浪計測システムを導入することとした。これについては 6.3.6 章に詳しく述べる。

6.3.4 沖合における津波観測

大船渡市沖に設置した GNSS 津波計は、2001 年 6 月 25 日に初めて津波を捉えた。その前日に南米のペルー沖で発生した $M_w 7.9$ の地震による津波が約 23 時間後に大船渡市沖に到達した (寺田・加藤, 2003)。続いて、2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震津波を捉えた。これらは何れも波高 10cm 程度の津波であり、目標とした検出精度の確認が出来た。

2004年9月6日の紀伊半島沖地震津波では、室戸岬沖で図5に示す津波が観測できた。図中に青線で示すGNSS津波計の観測値は、波高・周期共に赤線で示すシミュレーション結果と良い一致を示している。このことは、沖合で津波を計測することによって、震源域直上での波源を推測できる可能性を示唆している。実際、津波観測直後に波源を逆計算し津波伝播シミュレーションの再計算を行うことによって、正確な津波高さや到達時間が得られるリアルタイム津波予測への道を切り開くことができた（Tatsumi and Tomita, 2010）。

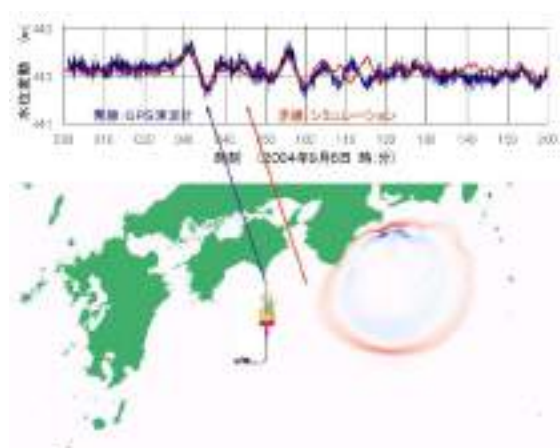


図5 2004年9月6日紀伊半島沖地震津波。(青線) GPS津波計による記録。(赤線) 数値シミュレーションによる計算値。

沖合で津波を正確に計測できるようになれば、当然のことながら、津波をいち早く捉えて避難・誘導に活かすことができる。13km沖合に設置した室戸岬沖GNSS津波計で得られた図5の観測結果では、約8分のリードタイムが得られた。これらのことから、GNSS津波計の沖合展開への期待はさらに大きくなっていった。ただし、津波の伝播速度は、水深に重力加速度を乗じた値の平方根で与えられ、沖合への展開で水深が大きくなることによる伝播速度の増大で、リードタイムは単純な期待どおりに伸びないことに注意する必要がある。

6.3.5 東北地方太平洋沖地震津波

2011年3月11日の東日本大震災発生時には、国土交通省港湾局によってGNSS波浪計として図6に示すように全国に15基が配備され、リアルタイムにデータが公開されていた。釜石沖に設

置されていたGNSS波浪計のリアルタイム観測値を図7に示す。図中下部に平均水面高変位として表示されている津波高さは6.7mを示し、気象庁はこのデータを含む複数のデータを根拠に大津波警報を最大級に引き上げた（Ozaki, 2011）。

第1波の観測データを発信した後、被災地域の停電によって通信網は寸断され、それ以降のリアルタイムデータが発信されなくなったが、観測データは高台に設置された基地局のバックアップ電源の下、図8に示す完全な津波波形が保存出来ていた（河合他, 2011）。



図6 GPS波浪計設置状況（2011年3月11日）
(<http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf> より)



図7 ナウファスで捉えた2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波。(横軸) フルスケール24時間。(縦軸) 上図はフルスケール6.5m, 下図の縦軸は、±5.5mである。上図から潮汐成分をフィルタリングしたものが下図である。

2013年3月に、気象庁は津波警報の発表方法を大幅に変更し、今後の津波予測に沖合の圧力式海底津波計とGNSS波浪計のデータを活用としている。これらのことから、震源域を含む海

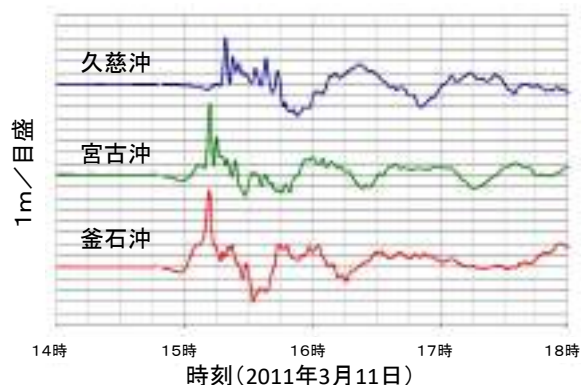


図8 東北地方太平洋沖地震津波全波形（国土交通省港湾局提供）

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

6.3.6 さらなる沖合展開に向けての開発

第一の課題である被災地域の通信網の寸断への対策の基本は，観測された津波データを，被災の無い遠方の地域に送ることである．これには，通信衛星の利用が最も有望である．しかし，揺れ動き回転するGNSS海洋ブイでは，太陽電池だけの自立的電力供給事情による省電力にも配慮する必要があり，無指向性のアンテナの使用を余儀なくされる．我々はまず2013年時点で利用可能であった通信衛星の技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」を使い，室戸岬沖に設置したGNSS津波計実験機を用いて，衛星通信実験を行った．ブイ上で精密単独測位計算を行うために必要なGNSS精密暦を準天頂衛星「みちびき」から送信し，測位計算結果を「きく8号」の通信システムを用いて地上に送り返す方式とした．波浪，津波，潮汐の変化をブイ上で計算し，得られた観測値を衛星通信で伝送して良好な結果が得られた．その後2016年に「きく8号」は運用を停止することになったため，現在は商用衛星のスラヤを用いたソフトバンクの衛星携帯用通信装置を用いた実験に切り替えている．図9に現在使用しているシステムの全体図を示す．

第二の技術課題であるより沖合でのGNSS測位法については，RTK法の改良に取り組んだ．

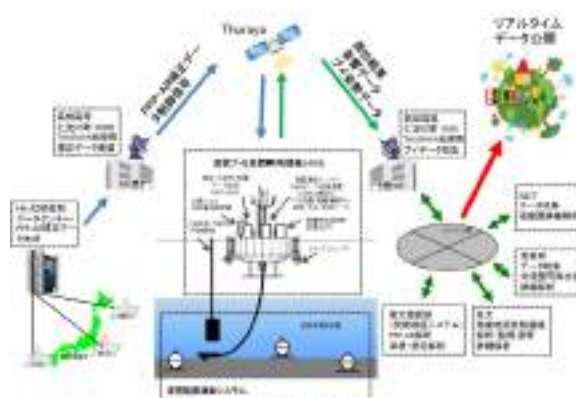


図9 現在の全体システム図

図10(a)は，改良前の RTK 測位結果の一例である．波浪による海面変位を示しているが，安定した測位ができていない．これに対して，搬送波位相計測値に対する対流圏遅延の補正を適切に行うことによって，図10(b)に示すように基線長80kmでも安定的な測位が可能になった．また，洋上のブイのGNSS観測データだけで測位する単独測位法の検討を進め，周期が秒単位の波浪については精密単独変位計測(PVD)法(Isshiki et al., 2000)，周期の長い津波・潮汐の観測には精密単独測位(PPP-AR)法(Mervert et al., 2008)が有効であった．図10(c)は，PPP-ARを適用した結果である．これらの新しい測位法は，室戸岬沖GNSS津波計実験において，先に示したホームページでデータ公開を行った．このとき，図3に例示したような良好な結果がリアルタイムで継続的に得られた．

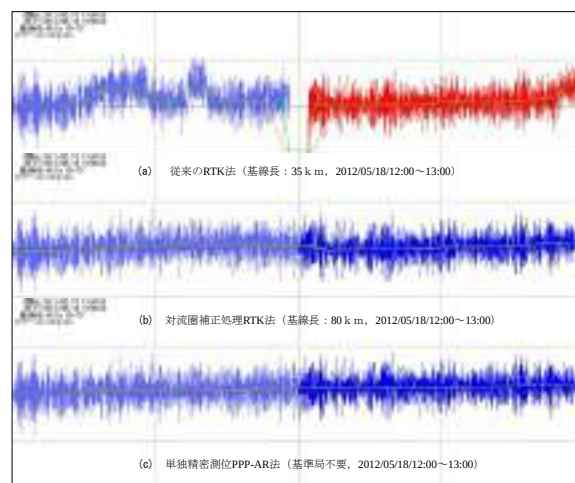


図10 GPS 測位法の改良．横軸は，何れもフルスケール1時間を示している．縦軸は，1m/目盛である．

以上のように技術的課題が克服できるとの見通しが得られたため、2016 年度からは新たな実験を開始した。この実験では高知県の海洋牧場ブイ No.18 を借用させてもらい、ここに GNSS 受信システム、衛星通信装置などを搭載している。これらに加え、GNSS-音響システムによる連続的な海底地殻変動計測を実現するために、ブイ直下に一辺が 1.7km の正三角形を構成するように音響トランスポンダーを投入した。なお、このブイ位置の水深はおよそ 800m 程度である。このトランスポンダーに対して音響を射出して反射波を受信するためのトランスデューサをブイの舷側に設置している。

GNSS 測位はブイ上に設置された計算機によって PVD 及び PPP-AR の出力を得るとともに、大気の大気遅延量や電離層の総電子数なども算出され、これらのデータはソフトバンク社製の衛星携帯テレメータ装置を介して地上局に送られる(図 9)。地上局は高知県仁淀川町に設置されており、ここで受信データを点検・格納するとともに、Web サーバを介して測位データをリアルタイムで公開するほか、海底地殻変動、気象や電離層の研究のために提供される。

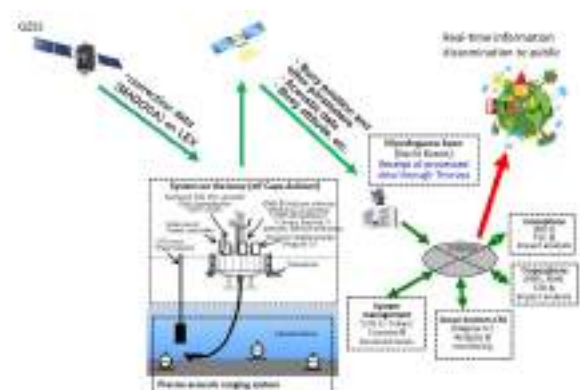


図 11 将来の全体システム図

しかしながら、このような商用の衛星通信は一般的に極めて高額になり、多数のブイを運用するとなると経費が大きな問題になる。これを回避する方法として、陸上からブイに送る精密暦を準天頂衛星経由で送信する方法が考えられる。準天頂衛星からは L6 信号の 2 チャンネルがこのようなメッセージ送信に使われており、1 チャンネルは国内向けであるが、もう一つのチャンネルからは MADOCA と呼ばれるシステムによる精密暦が放送されている。これをブイ上で受信することにより、片側の衛星通信は不要になる。図 11 は

これを考慮に入れたシステムであり、我々も今後この方式を取り入れて行きたいとかがえている。

6.3.7 今後の展開

本稿では、GNSS ブイによって津波や波浪などの海面高変化を計測する手法の開発について述べてきたが、この計測方式が海洋のどこでも可能となるとその応用分野は多岐にわたる。例えば、最近急速に注目が集められている分野に GNSS と音響を組み合わせた海底地殻変動の観測がある。その詳細は他書に譲るが(例えば、Spiess, 1985; Fujita et al., 2006)、現在は海上保安庁や大学グループが実施して重要な成果が得られている(例えば Yokota et al., 2016)。この計測には船舶が用いられているため常時行えるわけではなく、せいぜい年数回程度である。船舶をブイに置き換えることで計測はほぼ常時に行えることになり、海底地殻変動を連続的に監視することが可能となる。日本列島を襲う巨大地震の多くが海底下で発生し、それが津波を発生させることを考えるとこの応用分野は日本の地震・津波防災には極めて重要と考えられる。また、GNSS を用いた精密測位では大気(水蒸気)や電離層の影響が誤差因となるが、一方ではこれらを補正するパラメータは気象学や電離層研究にとっては大変重要な物理量を提供することになる。例えば日本の西方海域に GNSS ブイを投入して、得られる水蒸気量を気象の数値予測解析に取り込んでいくことによって最近多くみられる集中豪雨の予測などに役立てることができると期待される。また、電離層の擾乱はいわゆる宇宙天気予報にとって重要な情報と考えられる。GNSS ブイは海底下の地殻変動から津波・波浪、海洋気象、電離層など地球の表層部で発生する多様な現象に関するデータを提供してくれる(図 12)。



図 12 GNSS ブイを用いた総合防災システムの概念図

6.3.8 取り組むべき課題

今後このような総合防災ブイが実利用化されるためには、まだ様々な課題を克服する必要がある。

6.3.8.1 ブイ上の電力の確保

現在使用されているブイは直径が数m程度である。ここに 50W 程度の太陽光パネルと蓄電池を数枚置いているが、GNSS、衛星通信および海底地殻変動計測機器を設置すると電力が極めてひっ迫した状況になる。今後、さらにさまざまな機器を搭載する要求が出てくると考えられるので、十分な電力確保は喫緊の課題と言える。ただ、太陽光パネルにしても蓄電池にしても昨今は技術革新が目覚ましく、それほど心配することはないかもしれない。

6.3.8.2 自律的に運用できるブイの構築

ブイを陸から離れた海洋上で安定的に作動させるためには自律的なシステムを構築する必要がある。計測器が故障等で作動しなくなった場合の自動リセットが必要だろう。衛星等を用いた陸側からのリモート操作ができればよいが、必ずしもそれが可能とは限らない。陸との通信が途切れた時にも最低限データがブイ上で収集できるようになっている必要もある。また、そのような場合にどのように陸—ブイ間の通信を再開できるようにするのか、技術的な開発が必要であろう。

6.3.8.3 盗難・流出・衝突などへの対応

少なくとも既に実用化しているナウファスシステムでは 20 機近いブイが 10 年以上運用されていて大きな支障は出ていないと聞いている。盗難や流出の場合は GNSS を搭載しているわけなのでその位置をトラッキングすれば対策はとれるであろう。衝突を防ぐためには現在でも海上保安庁に灯浮標の申請を行っており、船舶にはその存在を知られるようになっているので、基本的な問題はないと考えられる。ただ、広大な海上に浮遊しているブイであるので、想定外のことはありうるだろう。

6.3.8.4 高速かつ安価な衛星通信システム

以前使われていた技術試験衛星が運用停止となり、現在は商用衛星が使われているためデータ通信が極めて高額になっている。是非とも専用の防災衛星とでもよばれる衛星が欲しいところである。我々のチームにも衛星関係の研究者が協力してくれており、将来の衛星打ち上げに向けて必要な仕様を研究中である。是非とも実現したいと

考えている。

6.3.8.5 システム全体を運用する運用体制の構築

もしこのようなブイを多数並べてデータを収集する場合には、ブイの運用だけでなく、データ収集・配布、防災への貢献を考慮したデータの作成と関係機関・住民との共有などを運用する組織が必要になる。このような運用体制を作り上げるためには、その必要性を政府等に働きかけて国の組織として位置付けることが必要であろう。こうした努力が必要であろう。

6.3.9 おわりに

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

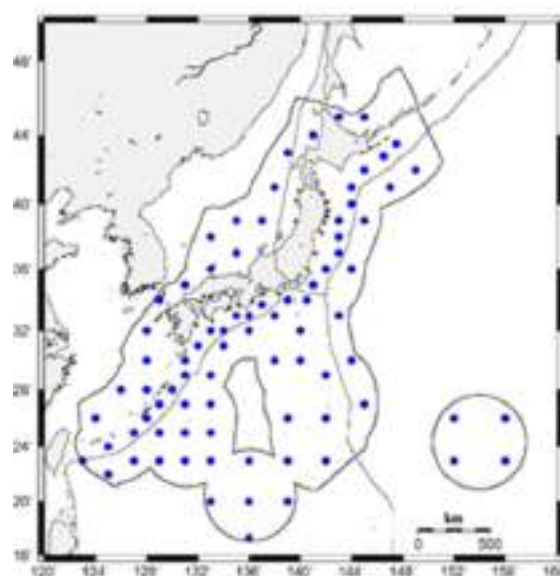


図13 西太平洋ブイアレイの構想。

謝辞

本研究開発に参画した港湾空港技術研究所、宇宙航空研究開発機構、情報通信研究機構、気象研究所及び日立造船に所属する研究者の方々に感

謝します。また、実験サイトを提供された国、自治体、ご協力いただいた多くの市民の皆様に謝意を表します。

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

本原稿は土質工学（2018）への寄稿に加筆しました。

参考文献

- /1/ 朝日新聞, 2011年8月17日朝刊.
- /2/ Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo, GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-276, 2006.
- /3/ Isshiki, H., A. Tsuchiya, T. Kato, Y. Terada, H. Kakimoto, M. Kinoshita, M. Kanzaki and T. Tanno, Precise Variance Detection by a Single GPS Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method ---, *J. Geod. Soc. Jap.*, **46** (4), 253-267, 2000.
- /4/ 加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩, GPS津波計の開発, *月刊海洋*, 号外 **15**, 38-42, 1998.
- /5/ 加藤照之・寺田幸博, GNSSを用いた総合防災ブイの開発, *地質工学*, **15**, 33-38, 2018.
- /6/ 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性, *港湾空港技術研究所報告*, **50** (4), 3-63, 2011.
- /7/ Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi, Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, September, 397-405, 2008.
- /8/ Ozaki, T., Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) - Tsunami warnings/advisories and observations -, *Earth Planets Space*, **63**, 827-830, 2011.
- /9/ Tatsumi, D., T. Tomita, Real-time Tsunami Inundation Prediction Using Offshore Tsunami Observation, *Proc. of 32nd International Conference on Coastal Engineering, currents. 3*, 1-10, 2010.
- /10/ Spiess, F. N., Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-23**, 502-510, 1985.
- /11/ 寺田幸博・加藤照之, GPS津波計, *非破壊検査*, **52** (7), 338-343, 2003.
- /12/ Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, Seafloor geodetic constraints on interpolate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632, 2016.

[発表2019-11p]

G34A-08 - Observation for Seafloor Crustal Deformation Using Moored Buoy by GNSS-A Technique Considering the Heterogeneity of Sound Speed in Ocean

Thursday, 12 December 2019
10:45 - 11:00
Moscone South - I60, Upper Mezz.

Abstract

We started using the moored buoy off the coast of Ashizuri, Japan to observe seafloor crustal deformation continuously by GNSS-acoustic technique. The position of transponders set on the seafloor can be estimated by the acoustic ranging measurements. The main factor of positioning error is temporal and spatial variation of sound speed in ocean. Temporal variation is caused by the tide with a cycle of 12-24 hours and by the inertial gravity wave with a cycle of several 10 minutes. The spatial variation caused by the temperature, pressure, and salinity has large effect on the positioning in the area near the Kuroshio current because the temperature gradient is generated. Then, we introduced the sound speed structure model considering its temporal and spatial variation into the analysis. Proposed analytical method firstly determines the relative position of transponders using measurements of vessel and secondly estimates the displacement of transponders from initial position by using data observed by buoy with assumption that every single transponder moves in the same vector due to the crustal deformation. We applied this method to data observed by buoy for two weeks in April 2019 and discovered that the positioning accuracy has been greatly improved. The dispersion in the estimated position was within 2 cm, while it was 30 cm in the case of using sound speed model not considering its horizontal gradient. Thus, the proposed method is efficient in removing the effect of heterogeneity of sound speed in the analysis using short term observation data. We will evaluate it after accumulating long-term observation data.

Authors



K

Natsuki Kinugasa
Nagoya University



T

Keiichi Tadokoro
Nagoya Univ.



T

Yukihiko Terada
National Institute of Technology, Kochi College



K

Teruyuki Kato
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

係留ブイを用いたGNSS-Aによる海底地殻変動観測のための解析手法の開発

Development of analytical method for detecting seafloor crustal deformation from GNSS-A data acquired by moored buoy

*衣笠 菜月¹、田所 敬一¹、加藤 照之²、寺田 幸博³

*Natsuki Kinugasa¹, Keiichi Tadokoro¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³

1. 名古屋大学 地震火山研究センター、2. 神奈川県立地学研究所、3. 高知工科大学専門学校

1. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government, 3. National Institute of Technology, Kochi College

We have been developing observation system on moored buoy off the coast of Ashizuri for monitoring seafloor crustal deformation by global navigation satellite system-acoustic (GNSS-A) technique. The purpose of this work is to develop analytical method for detecting seafloor displacement from the GNSS-A data acquired by moored buoy.

Main cause of an error for seafloor positioning is the misinterpretation of sound speed variation. Sound speed structure in the near from the Kuroshio current has heterogeneity because the temperature gradient is generated by a warm current. Some previous works proposed sound speed model assuming a sloping structure. We also applied this model to analysis using data for two weeks in April 2019 acquired by buoy and obtained position of the seafloor units. The dispersion in the estimated position was within 2 cm, while it was within 30 cm in the case of ignoring horizontal gradient of sound speed.

The buoy we use for this research barely moves around, but stays near from the centroid of units.

Generally, it is difficult to estimate seafloor displacement separately from horizontal gradient due to the insufficiency of information for sound speed structure. The theoretical travel time indicates that the displacement can be detected if the direction of displacement is different from azimuth of horizontal gradient. We also obtained the same result by performing simulation using synthetic data. However, the misinterpretation of displacement possibly occurs caused by the positioning error of onboard acoustic transducer and the modeling error for sound speed structure. Then, we will summarize practical issues for analysis using longer term observation data acquired by buoy.

キーワード：GNSS-A、音速構造、海底地殻変動、水平勾配、ブイ

Keywords: GNSS-A, sound speed structure, seafloor crustal deformation, horizontal gradient, buoy

Buoy-mounted system for continuous and real-time seafloor crustal deformation measurements

*田所 敬一¹、衣笠 菜月¹、加藤 照之²、寺田 幸博³、松廣 健二郎⁴

*Keiichi Tadokoro¹, Natsuki Kinugasa¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³, Kenjiro Matsuhiro⁴

1. 名古屋大学地震火山研究センター、2. 神奈川県温泉地学研究所、3. 高知工業高等専門学校、4. 名古屋大学全学技術センター

1. Research Center for Seismology, Volcanology and Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government, 3. National Institute of Technology, Kochi College, 4. Technical Center, Nagoya University

Our research group has been testing a measurement system for the continuous seafloor crustal deformation at a moored buoy site operated by Kochi prefecture from March 2018. We performed continuous acoustic ranging tests for a total of 106 days during the following four periods: March 28–31, June 2–July 12, and November 16–December 17 in 2018; and March 24–April 25, 2019. The tests revealed that the developed system can continuously transmit the acoustic ranging signals and send the acquired data to the on-land station via the satellite link, if sufficient electrical power is supplied. The system on the buoy was able to acquire high-quality acoustic waveforms with extremely high maximum cross-correlation coefficients. We coded a program for detecting the arrival time of direct acoustic wave automatically on the basis of thresholds of cross-correlation coefficient and energy ratio to reduce the capacity of data transferred via satellite communication. More than 99 % of the direct acoustic wave onsets at the buoy were correctly distinguished using our program code even if those waveforms had been corrupted with reflected waves. The above experimental studies show that our software system is capable of continuous real-time measurement of seafloor crustal deformation. However, the acoustic ranging controller and the satellite communication modem frequently experienced power failures during the test phase, and we re-designed the power supply part. We found that some of the solar panels were under the shadow of the mast, constructed on the center of the buoy, due to the stable yaw angle of the buoy. The original system was equipped with five 135-Watt solar panels connected in a series and 24 V valve-regulated stationary lead-acid batteries with a capacity of 300 Ah (10-hour rate). In the newly designed system is equipped with additional three (eight in total) solar panels which are separated to two parallel circuits. The power storage is also reinforced with additional two batteries. The re-installation of the new system was started in December 2019; the establishment is planned to be finished by the end of March, 2020. We report the present status of the continuous measurement using the newly designed system.

049 係留ブイによる GNSS-A 海底地殻変動観測のための解析手法の研究

Study on analytical method for GNSS-A seafloor crustal deformation observation using moored buoy

#衣笠菜月¹, 田所敬一¹, 加藤照之², 寺田幸博³

1: 名古屋大学地震火山研究センター; 2: 神奈川県温泉地学研究所; 3: 高知工業高等専門学校

Natsuki Kinugasa¹, Keiichi Tadokoro¹, Teruyuki Kato², Yukihiro Terada³

1: Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University;

2: Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

3: National Institute of Technology, Kochi College

はじめに

GNSS-A (Global Navigation Satellite System-Acoustic) 方式による海底地殻変動観測とは、船やブイなどに搭載された音響トランスデューサと海底に設置された海底局間を伝播する音響信号の走時と、信号送信時の座標などから海底局位置を推定し、その長期的な位置の変化をモニタリングする観測手法である。1年に5~6回程度の船舶による観測を実施することで、スロースリップの検出に成功した先行研究があることから、私たちの研究グループでは長期連続観測の実現を目指し、2016年から高知県足摺岬沖の漁業用ブイを利用した観測システムの開発を行った。ブイには太陽光発電システムを備えて、音響測距装置やGNSS受信機、ジャイロ計などの観測機器や地上へデータ転送するための衛星通信機器に給電する仕組みとなっている。またブイの周辺に3個の海底局を設置した。

解析手法の開発

GNSS-Aデータによる海底局位置解析では、海中音速をいかに正しく推定できるかが解析精度を決定する。観測点の近くを黒潮が流れているため、海水温度に勾配が作られ、付近の音速構造が不均質となる。先行研究で水平に一定の勾配を仮定する音速モデルが提案され、海底局位置の推定誤差の低減効果が示されたことから、本研究でもこのモデルを導入して解析することとした。また、海底局位置を高精度に推定するために、船舶による観測を実施し、予め海底局のアレイ形状を決定しておき、係留ブイで取得した観測データから海底局アレイの変位を推定することにした。

船舶による観測を2017年から2019年に計4回実施し、解析した結果、海底局アレイの形状を約1.5 cm の推定精度で決定した。また推定された音速構造と、GNSS-A観測と並行して実施した音速測定から得られた構造とを比較したところ、整合的であることが分かった。したがって、音速モデルおよび解析手法が適切であると示された。

係留ブイを用いた観測と船舶による観測の大きな違いは、ブイの位置を制御できない点である。そのため、観測データに含まれる音速構造を決定するための情報量が不足することが懸念さ

れる．そこで、ブイの実環境を想定した数値実験を行ったところ、本研究の観測方式と解析手法で海底地殻変動を理論的には検出可能であることが確認された．

係留ブイによる観測

ブイから地上サーバに転送している観測データは、観測走時、ブイの加速度と方位角、ブイの座標である．ブイ上サーバには各観測データの生データが保存されている．これまで係留ブイで取得した観測データを分析したところ、次のようなことが分かった．ブイ上トランスデューサが受信した音響波形の内、96%が正常な波形であり、高品質のデータが取得できていることが分かった．ブイ上GNSS受信機は、衛星通信経由で届いた補正情報を使用してリアルタイムに瀬光単独測位解を算出している．しかしながら、度々通信が途切れることがあるため、安定的に精密な測位解が得られていないことが分かった．よって、アレイ変位解析には、ブイ上サーバに保存された搬送波位相測定値を回収し、後処理でブイの座標を計算して使用することにした．したがって、海底局アレイ変位のリアルタイム解析には課題があるといえる．

これまで発電不足などが原因で、長期の連続観測が実現していなかったため、2020年3月にソーラーパネルやバッテリーの増設工事を行い、安定的に運用できるようになった．発表では、これまで取得したデータから分かった、解析手法の課題と解決方法について議論する．

謝辞

本研究はJSPS科研費16H06310の助成を受けたものです．また、観測システムの開発には高知県所有の黒潮牧場18号ブイを利用しています．船舶による観測は弓削商船高等専門学校にご協力いただきました．

海洋GNSSブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦～レビューと今後の課題～

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

*加藤 照之¹、寺田 幸博²、田所 敬一³、二村 彰⁴

*Teruyuki Kato¹, Yukihiko Terada², Keiichi Tadokoro³, Akira Futamura⁴

1. 大正大学地域情報研究所, 2. 高知工業高等専門学校, 3. 名古屋大学環境科学研究科, 4. 弓削商船高等専門学校

1. Institute of Regional Development, Taisho University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. National Institute of Technology, Yuga College

我々は2016～2020年の5年間に亘り、科研費基盤研究(S)によって課題を課題名とする新たなGNSSブイシステムの開発を行った。本発表ではこの研究開発の経緯と成果、及び残された課題や今後の可能性について述べる。2011年東北沖地震における教訓をもとに、海岸からより遠く離れた遠洋での運用を可能とするための改良を行い、同時に、GNSS一音響システムを用いた海底地殻変動の連続観測に挑戦しようとするものであった。また、GNSSブイを遠洋に設置できればGNSSデータから得られる可降水量(PWV)や電離層の総電子数(TEC)を用いることで気象学や電離層研究など応用できる領域が格段に広く及ぶ。これらの目的を実現するため、精密単独測位方式PPP-ARを導入し、測位解析がブイ上で可能な受信機を用い、解析に必要な精密暦と得られた測位結果を双方向とも衛星通信で送信することとした。衛星通信には商用衛星であるThurayaを用いた。また、海底地殻変動連続観測のため、海底位置と水中音速構造を同時に推定する新たな解析アルゴリズムを開発して適用した。ブイは高知県が運用する海洋牧場ブイのうち足摺岬沖約40kmにあるブイを借用することとした。実験は足掛け4年以上に及び、一定の成果を挙げることができた。測位手法として導入したPPP-ARは信号がFlxされている限りはブイの位置を数cm程度の精度で推定でき、短周期の変動に用いられるPoint-Variance-Detection (PVD)法とあわせて長周期と短周期の海面変動を分離してリアルタイムに監視できることを明らかにした。また、GNSSデータから得られた大気可降水量や電離層の総電子数がそれぞれの分野で有効に活用できることも示唆された。また、ブイの振動による衛星通信のデータ欠測率の増加についてそれを克服するための基礎的な資料を取得することができ、将来期待される多数のブイからの衛星通信に関する新たな効率的な伝送方式が提示された。一方で多くの課題も見出された。ブイ上の電源不足等による機器の停止やデータ断などがたびたび発生した。海底地殻変動連続観測についてははじめての連続的な海底測位の成果を得ることができた。一方、ブイが大きく振れ回らないと海底アレイの位置推定と水中の音速構造パラメータの分離が難しいなどの課題が残った。これらの課題について検討し、改良を重ねて問題を克服し、遠洋においてGNSSブイが長期に安定的に運用できれば、海洋のブイアレイを構築することにより単に津波早期検知だけでなく様々な防災応用や新たな地球科学の展開ができると期待される。

キーワード：GNSSブイ、防災、津波、海底地殻変動

Keywords: GNSS buoy, disaster mitigation, tsunami, ocean bottom crustal movements

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

*Teruyuki Kato¹, Yukihiro Terada², Keiichi Tadokoro³, Akira Futamura⁴

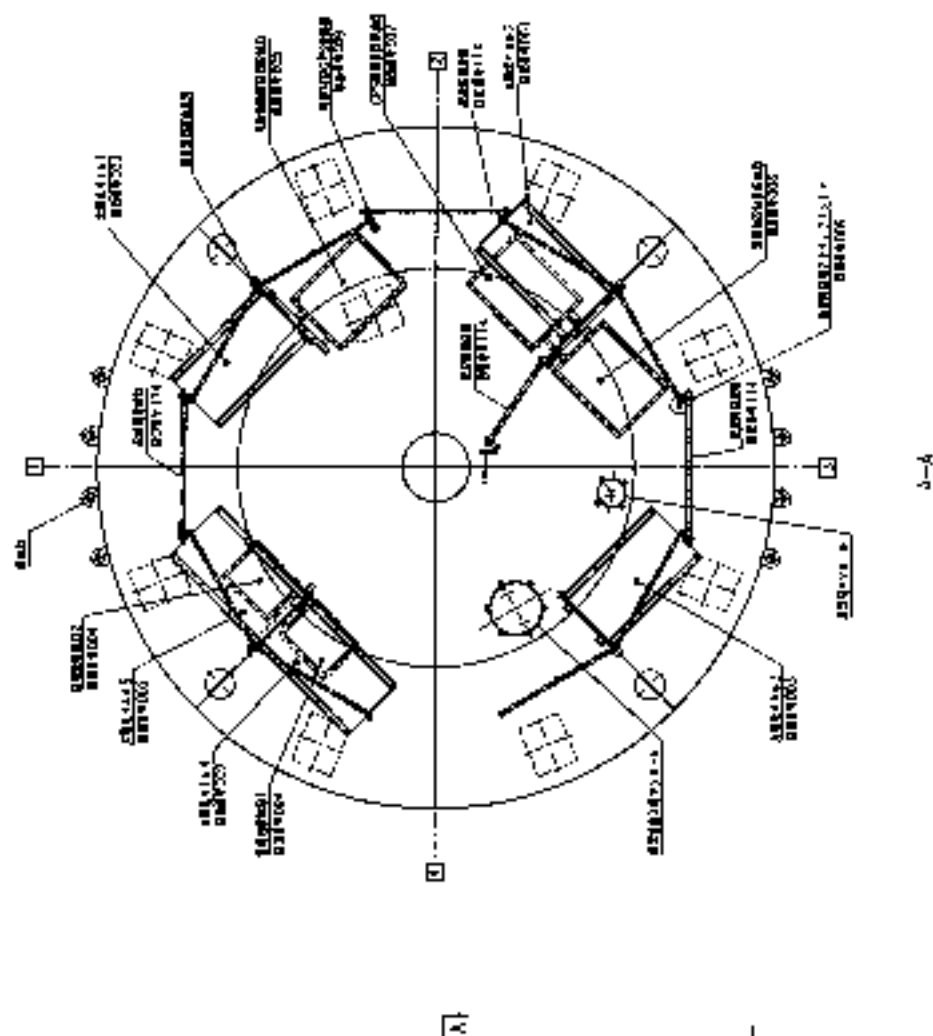
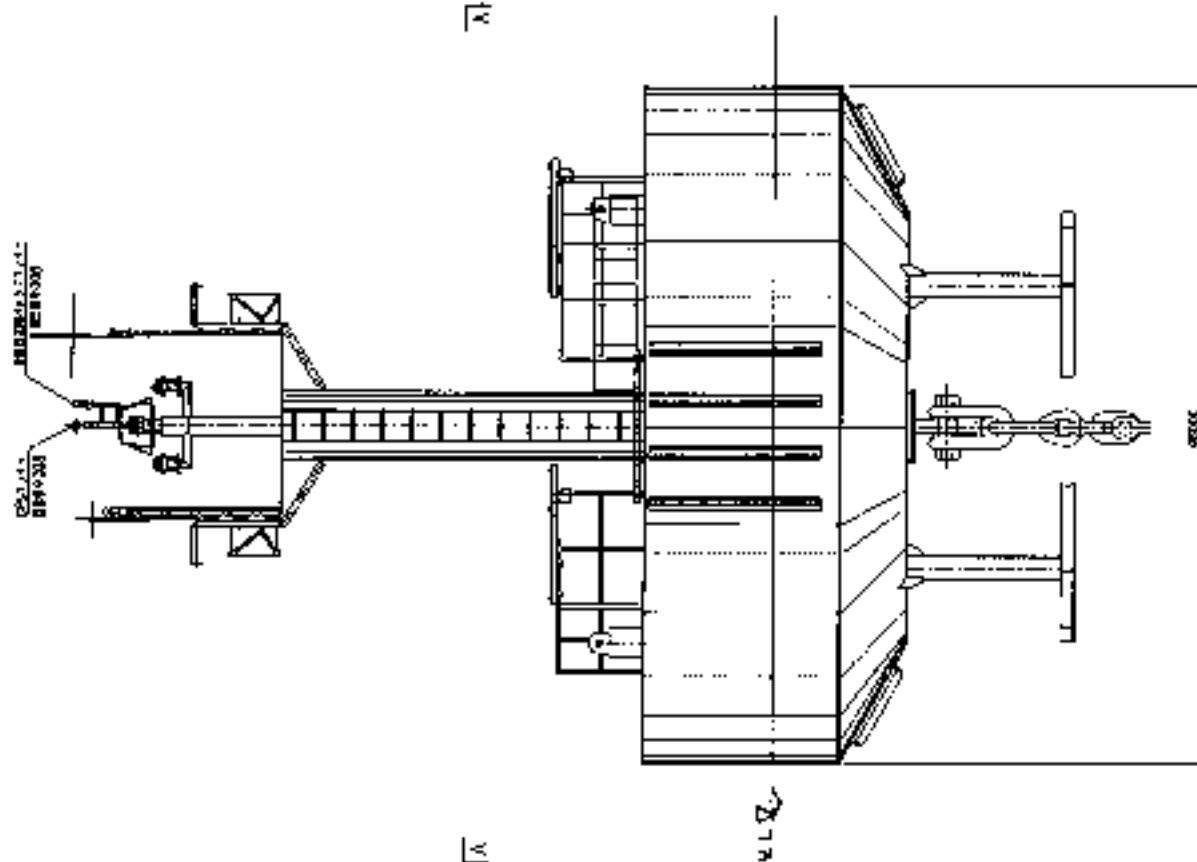
1. Institute of Regional Development, Taisho University, 2. National Institute of Technology, Kochi College, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. National Institute of Technology, Yuge College

We have developed a new GNSS buoy system for tsunami early detection and continuous monitoring of sea bottom crustal movements. The presentation reviews this five-year project conducted by a JSPS Kakenhi grant. Based on the lessons learnt from the case of the 2011 Tohoku-Oki tsunami, we decided to put the buoy much farther from the coast. For this purpose, we employed two new technologies. First, we introduced Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR) algorithm for the estimation of the buoy coordinates without using baseline mode analysis. Second, we used a satellite data transmission for sending precise orbits and clocks for PPP-AR analysis on the buoy and also sending back the obtained precise position of the buoy to land, together with other ancillary data taken on the buoy. We used the commercially available Thuraya satellite for data transmission. In order to estimate the position of the transponder array at the sea bottom, we used the GNSS-acoustic system and developed a new algorithm for the simultaneous estimation of the coordinates of the transponder array at the sea bottom and the velocity structure of the sea water. We borrowed a buoy that is used for fishery by Kochi Prefecture. The buoy is placed about 40km south of Cape Ashizuri, Japan. The experiment continued for more than four years and obtained significant results for the future applications. PPP-AR enabled the positioning of the buoy with a few centimeters' accuracy as far as the signal is fixed. Together with Point Variance Detection (PVD) analysis for a shorter period of wind waves, we were able to monitor long and short periods of waves separately in real time mode. The precipitable water vapor (PWV) and total electron content (TEC) data obtained from GNSS data were evaluated for their accuracy if they can be used for their own research field. TEC data showed that they were accurate enough for monitoring ionospheric disturbances. PWV data seems also valuable for monitoring water vapor variations over the ocean and they could be used in the objective analysis for weather prediction. Moreover, an experiment was conducted to get the data for improving the satellite data transmission rate due to tilting of buoy. Based on the data, a new algorithm using IoT was proposed for improving the efficiency of data transmission from many buoys to the dedicated satellite for a buoy array. On the other hand, a number of problems occurred during the experiment; for example, frequent power failures occurred mainly due to power shortages due to insufficient solar panels or unknown reasons, though some of them were suspicious of problems in satellite transmission system. For the GNSS-acoustic system, separation of parameters between array coordinates and acoustic velocity structures were found difficult unless buoy swings widely enough around the transponder array area. Examinations and overcoming of these problems will make it possible for a long-term GNSS buoy operation at far offshore and it will bring us a new powerful tool not only for disaster mitigation but also for applications in the various fields of earth science.

Keywords: GNSS buoy, disaster mitigation, tsunami, ocean bottom crustal movements

資料 3－3 ブイ上機器資料

1. 当初（2016/10）の配置図
2. 設置当初（2016/10）の浮体安全性・安定性計算書
3. 浮体動揺特性（周波数応答）計算書
4. ブイ上計測システムの改良フロー
5. 電源改良（2019/9）後の安定計算・係留計算に基づく配置
6. 電源改良（2019/9）後の機器材
7. 電源改良後（2019/9）の配置図
8. 電源改良後（2019/9）の浮体安全性・安定性計算書



1. 当初 (2016/10)の配置図

年 数	平成25年度	図面番号	(A)
工 号	海洋アイへの機器取付		
図面名称	全体配置図		
縮 尺	1/60	単位	mm
2016/10	H25.10.25	図 数	-
日立造船株式会社			

観測装置設置後の浮体安全性・安定性に関する検討

1. 概要

本書は、東京大学地震研究所が行う「海洋GNSSブイを用いた津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究(研究代表者 加藤照之)において必要である「黒牧ブイ用観測装置」の設置に関わる検討である。装置の搭載による影響を考慮し、浮体の安定性等に関する検討を行う。

なお、観測装置は浮魚礁「土佐黒潮牧場18号ブイ」への搭載を前提とし、GPSによる津波観測、音響による地殻変動観測を連続的に行うことを目的としている。

2. 検討項目

土佐黒潮牧場18号の設計条件に基づき、装置搭載によって設計計算結果に影響が生じる下記の設計項目について再検討を行う。

- 1) 係留環
- 2) 係留索
- 3) 浮体の安定性

3. 観測装置諸元

・重量

1,174.8kg

※観測装置および取付金具の全重量

・重心高さ

デッキ上0m(喫水面から約1.5m)地点 ※水平面位置の偏心は0とする。

4. 検討結果

観測装置の設置による重量増加と重心位置の変化を考慮し、設計計算を行った。2に示した検討項目について、装置の設置前と設置後の計算値比較表を以下に示す。

1) 係留環

照 査 対 象	計 算 値		許 容 値
	装置設置前	装置設置後	
支圧応力度の照査	1309kN	1322kN	3474kN
はし抜け強度の照査	74.0N/mm ²	74.7N/mm ²	150N/mm ²
応力集中部の照査	90.3N/mm ²	91.2N/mm ²	263N/mm ²

2) 係留索

照 査 対 象	計 算 値				許容値 (安全率)
	装置設置前		装置設置後		
	設計外力	安全率	設計外力	安全率	
係留環接続部アンカーシャックル	1309kN	3.23	1322kN	3.20	3.0以上
上部チェーン	1309kN	3.05	1322kN	3.02	
ケーブル	1290kN	3.42	1303kN	3.38	
下部補強チェーン(上部)	1187kN	3.04	1200kN	3.01	
下部補強チェーン(中部)	1162kN	3.24	1176kN	3.21	
下部補強チェーン(下部)	1032kN	3.50	1046kN	3.45	
下部一般鎖	1013kN	3.12	1027kN	3.08	
アンカー	593kN	1.218	596kN	1.210	1.2以上

3) 浮体の安定性

照 査 対 象	計 算 値		許容値
	装置設置前	装置設置後	
最大引込力時乾舷 (最大波高時)	0.431m	0.404m	0以上
最大引込力時 メタセンター高さ	2.42m	2.38m	0以上
最大傾斜角	41.0deg	43.0deg	50.0deg

以上の検討結果より、全項目において許容値を満たしており、観測装置の設置後も浮体安定性、強度等に問題はない。(詳細計算については添付資料3参照)

以上

[添付資料]

1. 設計総括表(装置設置前)
2. 設計総括表(装置設置後)
3. 設計計算書(装置設置後) ※検討項目該当箇所のみ

添付資料 1

<設計総括表(装置設置前)>

設計条件					
設置位置	北緯: 32° 29' 08" 東経: 133° 12' 09" (世界測地系)		設計耐用年数		10年
水深	795m	流速 U_{10}	61.0m/s	有義波高 $H_{1/3}$	12.5m
底質	粘土	海水流速	2.00m/s	最大波高 H_{max}	25.0m
付着生物	40N/m ²		波浪		有義波周期 $T_{1/3}$
					16.0s
適用基準	・漁港・漁場の施設の設計の手引 2003年版 (社)全国漁港漁場協会 ・洋上観測設計・施工技術基準 平成4年3月 M621				

設計強度の許容値					
許容応力度(N/mm ²)	材質	SS400	SS400	SS400	SS400
耐重状態	常時	1.0	1.5	1.0	1.5
耐増係数	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5
耐風圧力 (引張り、曲げ)	$t \leq 40$	140	210	185	278
	$t > 40$	125	188	175	263
せん断応力度	$t \leq 40$	90	120	105	158
	$t > 40$	75	113	100	150
二軸応力度の許容値	1.2				
係留部の安全率	3.0				
アンカーの安全率	1.2				

設 計 結 果					
浮 体 係	8.0m	浮体水体高	3.10m		
全 高	11.0m	全 浮 力	1450kN		
調査対象	断面／材質	調査項目		調査結果	
1. 甲板部(デッキ部)	PL-9 (SS400)	四辺固定板としての調査	202.8N/mm ²	<	210N/mm ²
2. 側板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	121.7N/mm ²	<	210N/mm ²
3. 斜板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	114.0N/mm ²	<	210N/mm ²
4. 底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	80.2N/mm ²	<	210N/mm ²
5. 係留部(電線部)	PL-150 (SM450)	支柱応力度の調査	1305kN	<	347kN
		はし掛け強度の調査	74.0N/mm ²	<	150N/mm ²
		応力集中部の調査	90.3N/mm ²	<	263N/mm ²
調査対象			設計外力	安全率	
係留部	係留部(デッキ部)	φ97mm	1305kN	3.23 > 3.0	
	上唇チェーン	φ81mm x 25m	1306kN	3.05 > 3.0	
	ケーブル	鋼線φ7mm x 73本(ケーブル径 62mm) x 710m	1290kN	3.42 > 3.0	
	下部斜張チェーン(上部)	φ81mm x 25m	1187kN	3.04 > 3.0	
	下部斜張チェーン(中部)	φ111mm x 80m	1142kN	3.24 > 3.0	
	下部斜張チェーン(下部)	φ81mm x 25m	1032kN	3.50 > 3.0	
	下部一部鋼	φ70mm x 410m	1012kN	3.12 > 3.0	
	アンカー	ダンフォース型 17t	583kN	1.218 > 1.2	
浮体の安定性		最大引込力時沈没 (最大波高時)	0.431m > 0	係留・機器が水没しない 安定 41.0dag 係留・機器が水没しない	
		最大引込力時 メタセンタースタビリティ	2.42m > 0		
		安定	安定		
		最大傾斜角	41.0deg		

<設計総括表(装置設置後)>

設計条件					
設置位置	北緯 32° 29' 06" 東経 133° 12' 09" (世界測地系)		設計耐用年数	10年	
水深	795m	風速 U_{10}	61.0m/s	有義波高 $H_{1/10}$	12.5m
		粘土	潮流速	2.06m/s	最大波高 H_{max}
付着生物	80N/m ²			有義波周期 $T_{1/10}$	18.0s
適用基準	・港湾・臨海の施設の設計の手引き 2003年版 (社)全国港湾開発協会 ・浮き屋設計・施工技術基準 平成4年3月 MF21				

設計強度の許容値					
許容応力度[N/mm ²]	材質	SS400		SM400	
	荷重状態	常時	一時許容荷重	常時	一時許容荷重
		1.0	1.5	1.0	1.5
	引張強度				
	垂直応力 σ _{垂直} (引張力、圧力、 圧縮、曲げ)	1 ≤ 40	140	210	120
	1 > 40	125	188	175	263
せん断 応力度	1 ≤ 40	80	120	100	150
	1 > 40	75	113	100	150
二軸応力の許容値	1.2				
鋼管部の安全率	3.0				
アンカーの安全率	1.2				

設 計 結 果					
浮 体	浮 体 径	8.0m	浮 体 本 体 高	3.10m	
	全 高	11.0m	全 浮 力	1450kN	
	調査対象	断面/材質	調査項目	調査結果	
	1. 甲板部(デッキ部)	PL-9 (SS400)	四辺固定板としての調査	202.8N/mm ²	< 210N/mm ²
	2. 側板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	121.7N/mm ²	< 210N/mm ²
構 造 部	3. 斜度板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	114.0N/mm ²	< 210N/mm ²
	4. 吊環部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての調査	102.2N/mm ²	< 210N/mm ²
	5. 吊環部(足輪部)	PL-150 (SM490)	支柱応力の調査	1322kN	< 347kN
			はし掛け強度の調査	74.7N/mm ²	< 150N/mm ²
			応力集中部の調査	91.2N/mm ²	< 263N/mm ²
係 数 部 材	調査対象				
	係数部補強部(アンカー部)	φ 97mm		設計外力	安全率
	上層チェーン	φ 81mm x 25m		1322kN	3.29 > 3.0
	ケーブル	素鋼 φ 7mm x 73本(ケーブル径 92mm) x 710m		1322kN	3.07 > 3.0
	下部補強チェーン(上部)	φ 81mm x 25m		1303kN	3.38 > 3.0
	下部補強チェーン(中部)	φ 117mm x 80m		1200kN	3.01 > 3.0
	下部補強チェーン(下部)	φ 81mm x 25m		1176kN	3.21 > 3.0
	下部一輪部	φ 70mm x 410m		1040kN	3.45 > 3.0
	アンカー	ガンフォース型 17t		1027kN	3.08 > 3.0
				596kN	1.210 > 1.2
浮 体 の 安 定 性	最大引込力時(最大波高時)	0.404m > 0	水没しない	※既存の設計計算書と値が異なる箇所を赤字で示す。	
	最大引込力時(最大波高時)	2.38m > 0	安定		
	最大引込力時(最大波高時)	2.38m > 0	安定		
	最大引込力時(最大波高時)	2.38m > 0	安定		
装置・機器が水没しない					

添付資料 3

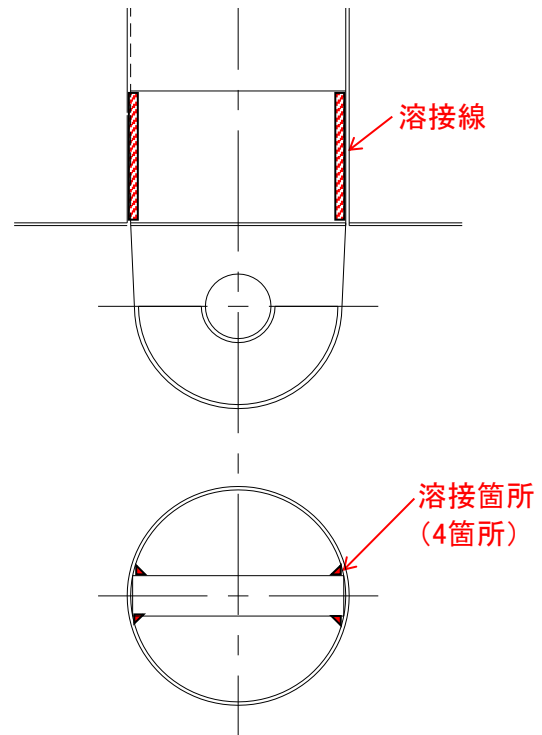
(7)係留環

1)設計条件

係留索最大張力: $T = 1322.0 \text{ kN}$

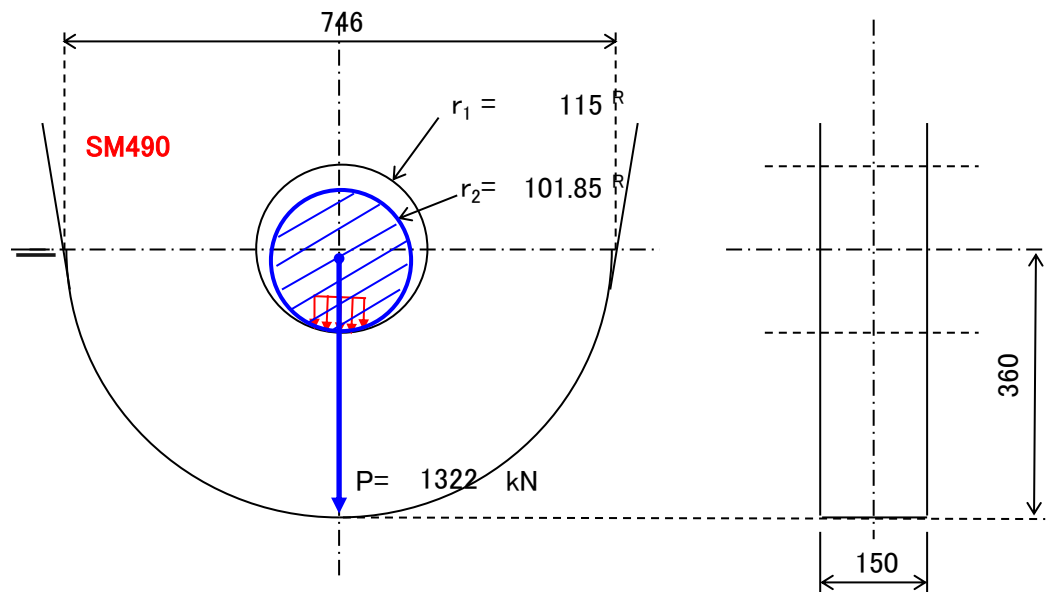
係留環腐食・磨耗代: 186 mm

係留環材質: **SM490**



2)ピン周りの照査

① 支圧



$$P_a = K_2 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 - r_2} \cdot t \quad \text{許容荷重} \text{[*-11]}$$

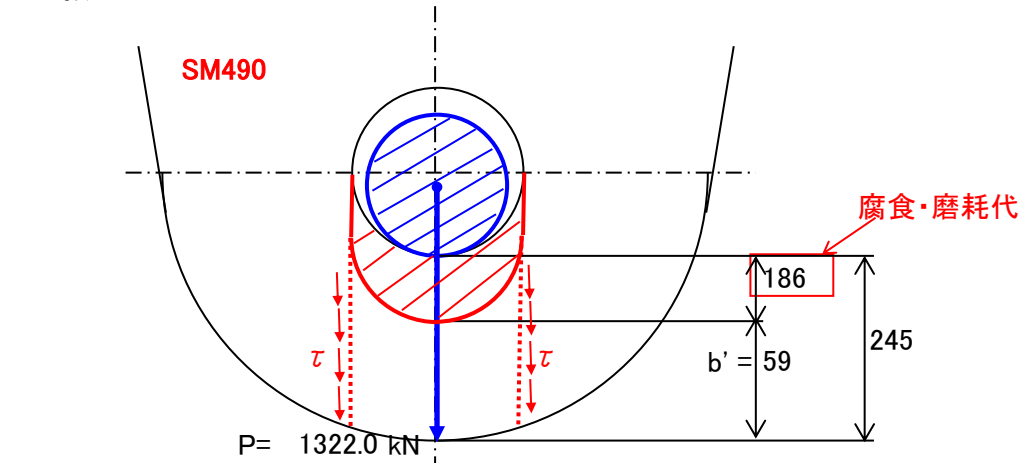
$$= 3474 \text{ kN} > P = 1322 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$r_1/r_2 = 1.13 \geq 1.02$$

$K_2 = 26 \text{ N/mm}^2$: 許容荷重係数 (SM490)

※ヘルツの許容荷重係数の2倍とする [*-12]。

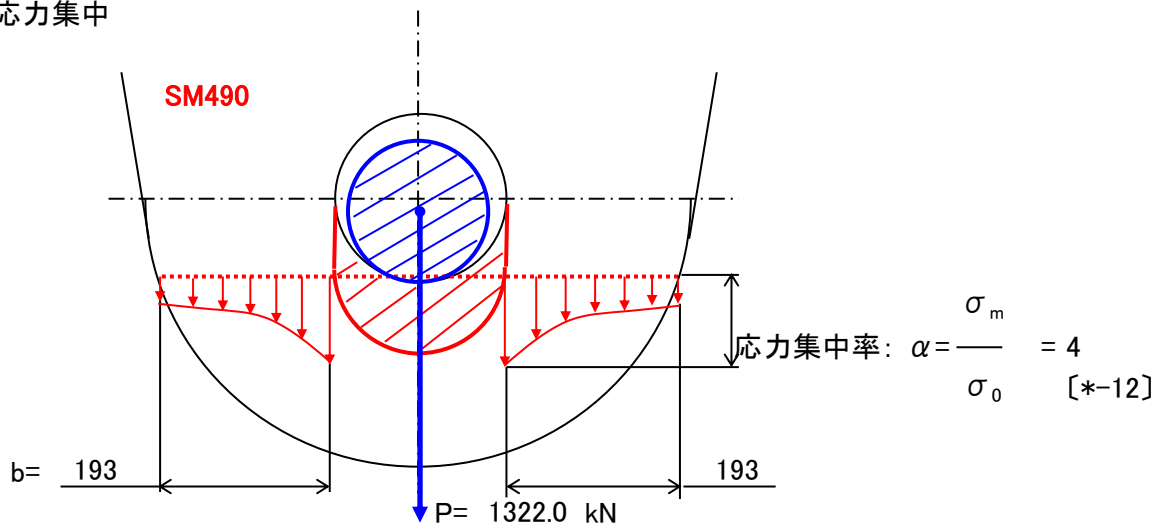
② はし抜け



$$\tau = \frac{P}{2 \cdot b' \cdot t}$$

$$= 74.7 \text{ N/mm}^2 < \tau_a = 150 \text{ N/mm}^2 \text{ (SM490-t>40)}$$

③ 応力集中



$$\sigma = \alpha \times \frac{P}{2 \cdot b \cdot t}$$

$$= 91.2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a = 263 \text{ N/mm}^2 \text{ (SM490-t>40)}$$

3) 溶接部の照査

すみ肉サイズ 12 mm → 有効のど厚 $a_e = 8.5 \text{ mm}$

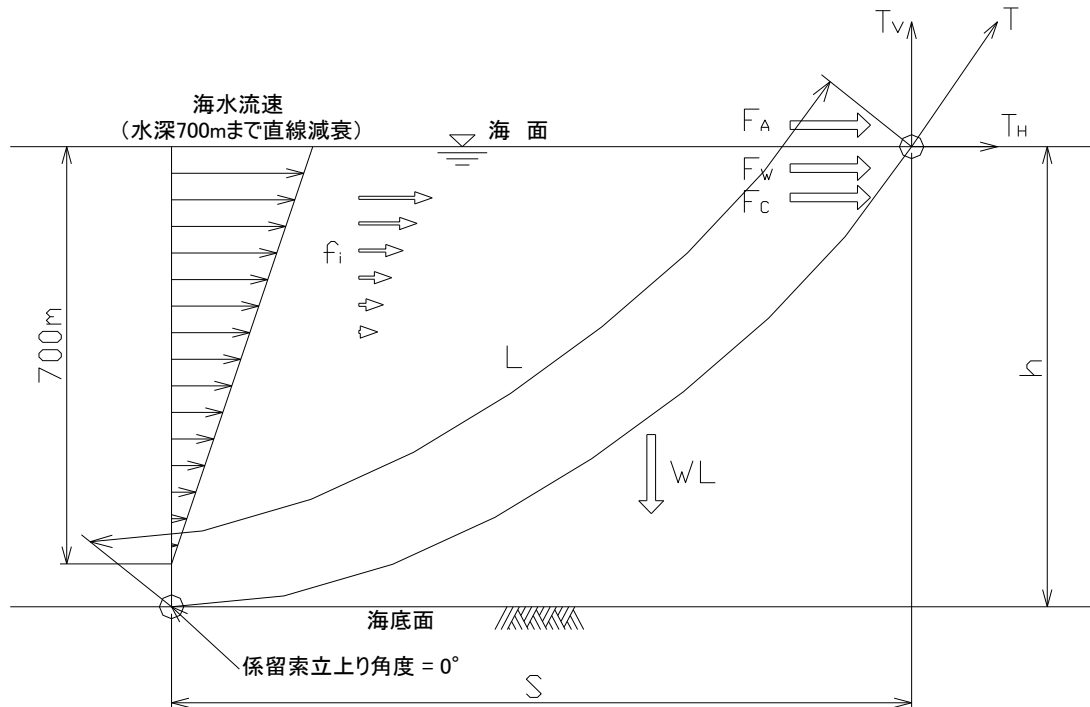
作用応力度 $\tau = P / (n \cdot a_e \cdot L) = 1322.0 \times 10^3 / (4 \cdot 8.5 \cdot 500)$

$$= 77.9 \text{ N/mm}^2 < \tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$$

ここで、n:4箇所(溶接箇所数)、L:500mm(溶接線長)

4. 係留索の設計

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして、作用外力を算出する。



- h : 水深
- T : 係留索張力
- T_H : 係留索上端に作用する水平力
- T_V : 係留索引揚力(=引込力)
- L : 係留索上端～着底点間の係留索長
- S : 同上部分の水平長
- W : 係留索の単位長さ当たりの水中重量
- F_A : 浮体本体に作用する風荷重
- F_C : 浮体本体に作用する海水流速圧力
- F_W : 浮体本体に作用する波力
- f_i : 係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力

各種荷重が作用した場合の係留索に対して、カテナリー計算を実施する。 W が不均一で、係留索に海水流速圧力が作用するため、簡単な関数で表現することはできない。よって、数値解析を用いてカテナリー計算を実施するものとする。

(1)係留索の構成

係留索の構成と実際の長さ[接続用シャックル類を含んだ長さ]は以下のとおりとする。

[浮体本体]～上側鎖(25m)～ケーブル(710m)～下側鎖(540m)～[アンカー]

1)係留索全長:L

$$L = 25 + 710 + (25 + 80 + 25 + 410) = 1275 \text{ m}$$

2)係留索各部諸元

名 称	種 類	仕 様
上側鎖	電気溶接アンカーチェーン	JIS フラッシュハット溶接アンカーチェーン第3種 呼び径 $\phi 81\text{mm}$
ケーブル	高耐食型 被覆平行線ケーブル	素線 $\phi 7\text{mm} \times 73\text{本}$ (ケーブル径 92mm)
下側鎖	電気溶接アンカーチェーン	JIS フラッシュハット溶接アンカーチェーン第3種 補強部:呼び径 $\phi 81\text{mm}/111\text{mm}/81\text{mm}$ 一般部:呼び径 $\phi 70\text{mm}$

3)係留索各部重量

名 称	呼び径 (mm)	気中重量 (kN/m)	水中重量 (kN/m)
上部チェーン	$\phi 81$	1.504	1.307
ケーブル	$\phi 7\text{mm} \times 73\text{本}$	0.300	0.230
下部補強チェーン(上部)	$\phi 81$	1.504	1.307
下部補強チェーン(中部)	$\phi 111$	2.824	2.454
下部補強チェーン(下部)	$\phi 81$	1.504	1.307
下側チェーン 一般部	$\phi 70$	1.123	0.976

※1. 表中の重量はJIS F 3303 p.7の1mあたりの質量算定式に、シャックル等の取り付けによる割増を考慮して求めたものである。

※2. 上表より、計算で想定した係留索重量(気中)は1012.2kN = 103.3ton、数量計算による重量は102.4tonで、誤差は1%未満である。

(2)作用外力

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして検討を行う。その時の乾舷は、 0.404 m であると仮定する。

1)風荷重 F_A

浮体本体が受ける風荷重 F_{a1}

$$F_{a1} = (\rho / 2g) \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d = 9.1 \text{ kN}$$

ρ : 空気密度 (= 12.3 N/m³)

g : 重力加速度 (= 9.8 m/s²)

V : 風 速 (= 61.0 m/s)

A : 受風面積 (= 8 × 0.404 = 3.2 m²; 本体)

C_d : 抗力係数 (= 1.2) [適用基準① P83 表2-6-2]

マストが受ける風荷重 F_{a2}

$$F_{a2} = (\rho / 2g) \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d = 17.3 \text{ kN}$$

各部の受圧面積および抗力係数

	受圧面積 A (m ²)	抗力係数 C_d	$A \cdot C_d$	F_{a2}
(a)標識	0.47	1.8	0.85	2.0
(b)踊り場(レーダーレフ)	1.32	1.8	2.38	5.5
(c)マスト	3.50	1.2	4.19	9.8
合 計			7.42	17.3

※抗力係数は適用図書① P83 表2-6-2より決定

風荷重の合計

$$F_A = F_{a1} + F_{a2} = 26.4 \text{ kN}$$

2) 海水流速圧力 F_C

$$\text{海水流速 } V_c = v + v_b = 3.80 \text{ m/s}$$

$$v: \text{潮流速} (= 2.06 \text{ m/s})$$

$$v_b: \text{吹送流速} (= 0.03 \times U_{60} = 1.74 \text{ m/s})$$

受圧面積 A と抗力係数 C_d

部 位	受圧面積		抗力係数 C_d
	算出式	$A(\text{m}^2)$	
ブイ本体※	$8.0 \times (3.1 - 0.404) - 0.8 \times 1.45 + 0.07 \times 10.03$	21.1	1.0
支柱※	$(0.2674 + 0.07 \times 2) \times (2.0 - 0.175) \times 4$	3.0	1.0
ダンパー	0.175×4.70	0.8	2.0
合 計		24.9	

※付着生物厚さを考慮

浮体に作用する海水流速圧力

$$F_C = (\gamma / 2g) \cdot V_c^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d) = 191.3 \text{ kN}$$

$$\gamma: \text{海水の単位体積重量} (= 10.1 \text{ kN/m}^3)$$

$$g: \text{重力加速度} (= 9.8 \text{ m/s}^2)$$

3) 波力 F_W

$$F_W = (\gamma / 2g) \cdot u_m^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d) = 319.5 \text{ kN}$$

$$u_m: \text{最大波による水粒子の水平流速} (= \pi H_m / T = 4.91 \text{ m/s})$$

$$H_m: \text{最大波高} (= 25 \text{ m})$$

$$T: \text{波周期} (= 16.0 \text{ s})$$

4) 浮体本体に作用する外力の合計 F

$$F = F_A + F_C + F_W = 537.1 \text{ kN}$$

5)係留索の単位長さあたりに作用する海水流速圧力 f_i

$$f_i = (\gamma / 2g) \cdot V_z^2 \cdot A \cdot C_d$$

C_d : 抗力係数 (= 1.0) [適用基準② P36 3.2.5]

V_z : 海底面から高さ z における潮流の流速 ($=v \cdot (1-(z-h))/700$) (m/s)

z : 海底面からの高さ

A : 係留索の単位長さ当たりの受圧面積

係留索各部に作用する海水流速圧力は、数値解析にて求める。

(3)係留索の張力

1)各部での最大張力〔解析結果〕

・浮体から着底点までの係留索長	$L =$	1275 m
・浮体から着底点までの係留索水平長	$S =$	935 m
・係留環接続部に発生する係留索張力	$T_1 =$	1014 kN
・ワイヤーケーブル上端に発生する係留索張力	$T_2 =$	996 kN
・下部補強チェーン(上部)上端に発生する係留索張力	$T_3 =$	892 kN
・下部補強チェーン(中部)上端に発生する係留索張力	$T_4 =$	868 kN
・下部補強チェーン(下部)上端に発生する係留索張力	$T_5 =$	738 kN
・下部チェーン 一般部上端に発生する係留索張力	$T_6 =$	719 kN
・係留索着底部において係留索に発生する水平張力	$T_H =$	596 kN
・ブイに作用する係留索の引き込み力	$T_V =$	861 kN
・係留索に作用する海水流速圧力	$F_K =$	59 kN

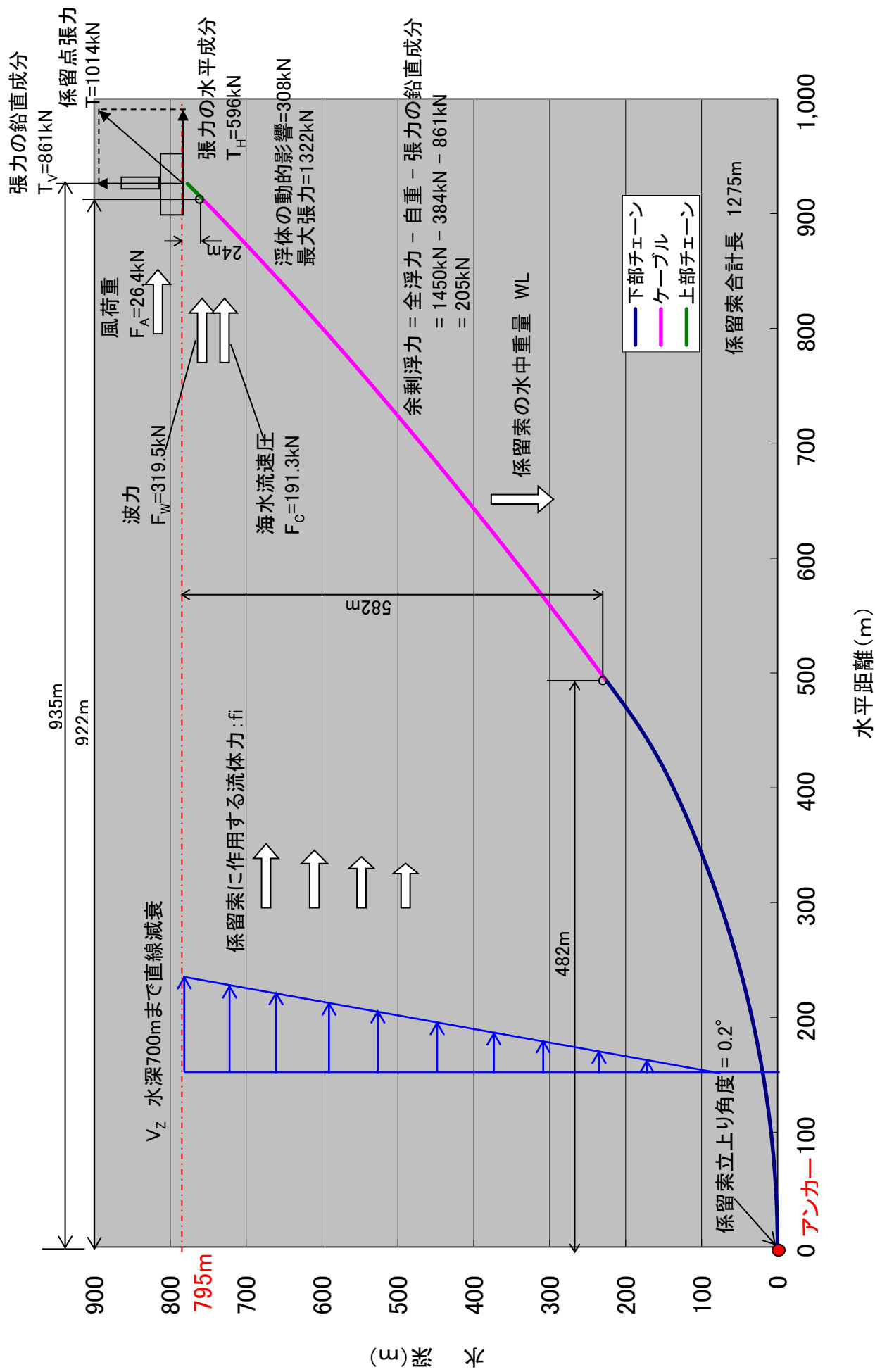
2)余剰浮力

$$\cdot \text{余剰浮力} = \text{浮体全浮力} - \text{浮体自重} - T_V = 1450 - 384 - 861 = 205 \text{ kN}$$

3)乾舷

$$\cdot \text{乾 舷} = \text{余剰浮力} / (\text{浮体断面} \times \text{海水の単位体積重量}) = 0.404 \text{ m (仮定した値と等しい)}$$

$$\text{浮体断面} = 8.0^2 \times \pi / 4 = 50.3 \text{ m}^2$$



最大張力時のカタナリー形状

(4)係留索の強度検討

1)係留索各部での所要安全率

係留索の強度検討に用いる最大張力は、(3)の静的解析で求めた値に、浮体の動的な影響による変動外力を加えた値とする。変動外力は、浮体が 0.8 G[*10]の加速度で上下動した場合の慣性力に等しいとみなす。

$$\Delta T = 0.8 \times 384 \text{ (浮体自重)} = 308 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{最大張力} \quad T_{\max 1} &= T_1 + \Delta T = 1322 \text{ kN} \\ T_{\max 2} &= T_2 + \Delta T = 1303 \text{ kN} \\ T_{\max 3} &= T_3 + \Delta T = 1200 \text{ kN} \\ T_{\max 4} &= T_4 + \Delta T = 1176 \text{ kN} \\ T_{\max 5} &= T_5 + \Delta T = 1046 \text{ kN} \\ T_{\max 6} &= T_6 + \Delta T = 1027 \text{ kN} \end{aligned}$$

		呼び径 (mm)	最大張力 (kN)	破断強度 (kN)	安全率
係留環接続アンカーシャックルピン		φ 97	1322	4227	3.20 > 3.0
係留環接続アンカーシャックルホディ		φ 97	1322	4050	3.06 > 3.0
上部チェーン	エントリンク(上部)	φ 102	1322	4051	3.06 > 3.0
	スィベル	φ 102	1322	6465	4.89 > 3.0
	エントリンク(下部)	φ 102	1322	4115	3.11 > 3.0
	アンカーシャックルホディ	φ 97	1322	4066	3.08 > 3.0
	一般部エントリンク(上部)	φ 81	1322	3986	3.02 > 3.0
	一般部	φ 81	1322	4246	3.21 > 3.0
	一般部エントリンク(下部)	φ 81	1322	4347	3.29 > 3.0
ワイヤーケーブル		φ 7mm x 73本	1303	4410	3.38 > 3.0
接続部チェーン(スィベル)		φ 87	1303	4958	3.80 > 3.0
下部補強チェーン(上部)		φ 81	1200	3610	3.01 > 3.0
下部補強チェーン(中部)		φ 111	1176	3769	3.21 > 3.0
下部補強チェーン(下部)		φ 81	1046	3610	3.45 > 3.0
下部チェーン 一般部		φ 70	1027	3165	3.08 > 3.0

2) アンカーの照査

アンカー仕様	17 ton ダンフォースアンカー		
アンカー重量	167 kN (気中)		145 kN (水中)
アンカー点張力	596 kN		
海底傾斜	無し	+ 1 / 80	－ 1 / 80
アンカー傾斜荷重	0.0 kN	－1.8 kN	1.8 kN
アンカー点荷重	596.3 kN	594.5 kN	598.2 kN
アンカー把駐力係数K	5.0		
アンカーの把駐力	724 kN		
安全率(>1.2)	1.21	1.22	1.21

※把駐力係数は、係留システム設計指針((財)日本海事協会)[*-13]よりK=5.0とする。

3) 腐食/磨耗後の呼び径D' 及び破断強度の算出

チェーンは、想定した腐食・磨耗量だけ減耗した楕円形になると仮定し、その断面積と等価な円断面として評価し、破断強度を推定する。

		使用前		腐食・ 磨耗量 F(mm)	10年後 呼び径 D'(mm)	破断強度 T(kN)
		呼び径	実径			
		D(mm)	d(mm)			
係留環接続アンカーシャックルピン		97	203.7	100	75.4	4227
係留環接続アンカーシャックルボディ		97	158	80	73.6	4050
上部チェーン	エンドリンク(上部)	102	178	119	73.6	4051
	スィベル	102	114.8	14	95.2	6465
	エンドリンク(下部)	102	122	51	74.3	4115
	アンカーシャックルボディ	97	136	51	73.8	4066
	一般部エンドリンク(上部)	81	97.2	17	73.0	3986
	一般部	81	81	10	75.5	4246
	一般部エンドリンク(下部)	81	97.2	10	76.5	4347
接続部チェーン(スィベル)		87	97.9	10	82.2	4958
下部補強チェーン(上部)		81	81	20	69.2	3610
下部補強チェーン(中部)		111	111	58	70.8	3769
下部補強チェーン(下部)		81	81	20	69.2	3610
下部チェーン 一般部		70	70	10	64.5	3165

(5) ケーブルソケットの強度検討

ケーブル間の接続は、ソケットおよびチェーンを介して行うものとし、ケーブルと同等の強度を有するものとして設計する。(最大引張力：1303 kN)

ソケット(ピン含む)の材質および強度は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.2、3.2.3[*-14、15]に従い下表のとおりとする。

				ソケット部 (ピン部含む)	備 考
材 質				S45CN	
許 容 応 力 度	ソ ケ ッ ト	引張・圧縮	σ_a	210	道示Ⅱ3.2.2
		せん断	τ_a	120	道示Ⅱ3.2.2
		支 圧	τ_p	310	道示Ⅱ3.2.2
	ピ ン	せん断	σ_s	150	道示Ⅱ3.2.3
		曲 げ	σ_{bp}	290	道示Ⅱ3.2.3
		支 圧	σ_{ps}	155	道示Ⅱ3.2.3

耐用期間中の腐食・磨耗代は、他の部材と接触が無い一般部と、常に他の部材と接触している部分に分けて設定する。

一般部 : 0.15 mm/年 …… 適用基準①p166の表3-2-8を参考に0.15mm/年と設定

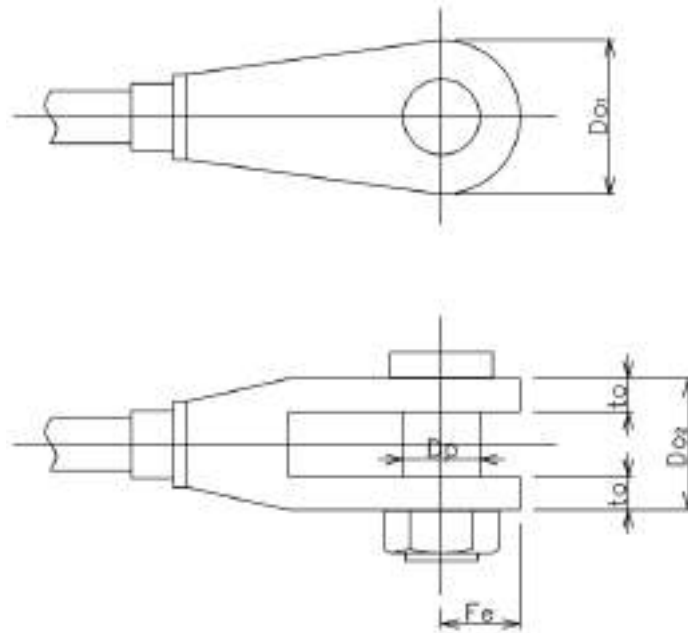
接触部(ピンとピン穴、ピン端部のフランジおよびナットとソケットフランジ部)

 : 1.5 mm/年 …… 適用基準①p689ではチェーンの磨耗速度は1mm/年であるが、ソケットの材料(S45C)と比べ、チェーンの材料(SBC690)の方が硬いため、硬度差分より、磨耗量の割増(1.5倍)を設定した。

(a) ケーブルソケット形状

(単位:mm)

			使用前	10年後	備 考
ソ ケ ッ ト フ ラ ン ジ 部	横 幅	Do ₁	370	367	
	縦 幅	Do ₂	315	312	
	厚 さ	to	80	77	
	縁 開 き	Fe	185	183.5	
	ピン孔半径	Rh	91.5	93	
		rh ₁			一般部
		rh ₂			接触部
ピ ン	直 径	Dp	180	163.5	
	半 径	Rp	90	88.5	
		rp ₁			一般部
		rp ₂			接触部



(b) ケーブルソケットの強度検討

① ピン孔近傍の引張応力度 σ_1

ピン孔を通る横断面の応力照査は、応力集中係数 $\alpha = 4$ を考慮する。

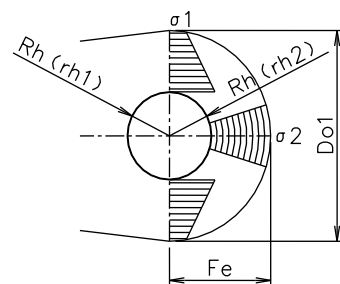
使用開始から10年後に腐食代が完全に消失した場合のピンとピン穴の関係を右下図に示す。

【当初】 $\sigma_1 = 4P_{\max} / \{(Do_1 - 2Rh) \times to \times 2\}$

$= 174.3 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

【10年後】 $\sigma_1' = 4P_{\max} / \{(Do_1' - 2rh_1) \times to' \times 2\}$

$= 187.0 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$



② ピン孔近傍の引張応力度 σ_2

【当初】 $\sigma_2 = P_{\max} / \{(Fe - Rh) \times to \times 2\}$

$= 87.1 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

【10年後】 $\sigma_2' = P_{\max} / \{(Fe' - rh_2) \times to' \times 2\}$

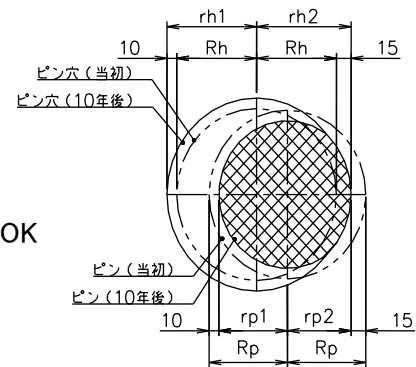
$109.9 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

(c) ピンの強度検討

① ピンの支圧応力度 σ_3

$$\begin{aligned} \text{【当初】 } \sigma_3 &= P_{\max} / (2R_p \times t_o \times 2) \\ &= 45.3 \text{ N/mm}^2 < 155 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

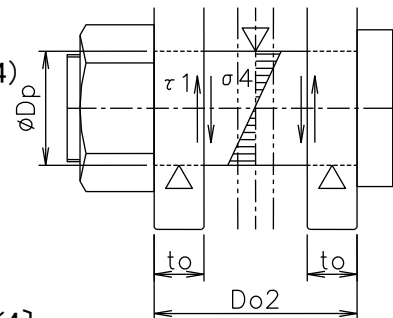
$$\begin{aligned} \text{【10年後】 } \sigma_3' &= P_{\max} / (2r_{p2} \times t_o' \times 2) \\ &= 56.4 \text{ N/mm}^2 < 155 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$



② ピンの曲げ応力度 σ_4

$$\begin{aligned} \text{【当初】 } \sigma_4 &= M_p / Z = \{P_{\max} \times (D_{o2} - t_o) / 4\} / (\pi \cdot R_p^3 / 4) \\ &= 76574481 / 572555 \\ &= 133.7 \text{ N/mm}^2 < 290 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【10年後】 } \sigma_4' &= M_p / Z = \{P_{\max} \times (D_{o2}' - t_o') / 4\} / [\pi \cdot r_{p2}^3 / 4] \\ &= 76574481 / 331340 \\ &= 231.1 \text{ N/mm}^2 < 290 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$



③ ピンのせん断応力度 τ_1

$$\begin{aligned} \text{【当初】 } \tau_1 &= P_{\max} / (R_p^2 \times \pi \times 2) \\ &= 25.6 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【10年後】 } \tau_1' &= P_{\max} / (r_{p2}^2 \times \pi \times 2) \\ &= 36.9 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

5. 浮体の安定性検討

(1) 浮体の浮力と乾舷(喫水)

1) 全浮力 1450kN

円柱部 1167kN $= 4.0^2 \times \pi \times 2.3 \times 1.03 \times 9.8$

円錐部 277kN $= \pi \times 1/3 \times (4.0^2 + 4.0 \times 2.550 + 2.550^2) \times 1.03 \times 9.8$

係留環部 1kN $= 0.15 \times 0.66 \times 0.88 \times 1 \times 1.03 \times 9.8$

ダンパーステー 5kN $= 0.1337^2 \times \pi \times 2.0 \times 4 \times 1.03 \times 9.8$

ダンパー 1kN $= 1.051 / 7.85 \times 1.03 \times 9.8$

2) 乾舷(係留索なし) 2.10m $= (1450 - 384) / (4.0^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 $[(\text{全浮力}-\text{自重}) / (\text{ブイ半径}^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8]$

3) 乾舷 1.49m $= (1450 - (384 + 310.2)) / (4.0^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 (係留索あり; 静水時) $(\text{全浮力}-(\text{自重}+\text{係留索})) / (\text{ブイ半径}^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 ※海底までのチェーンおよびケーブル重量を考慮

海底までのチェーンおよびケーブル重量

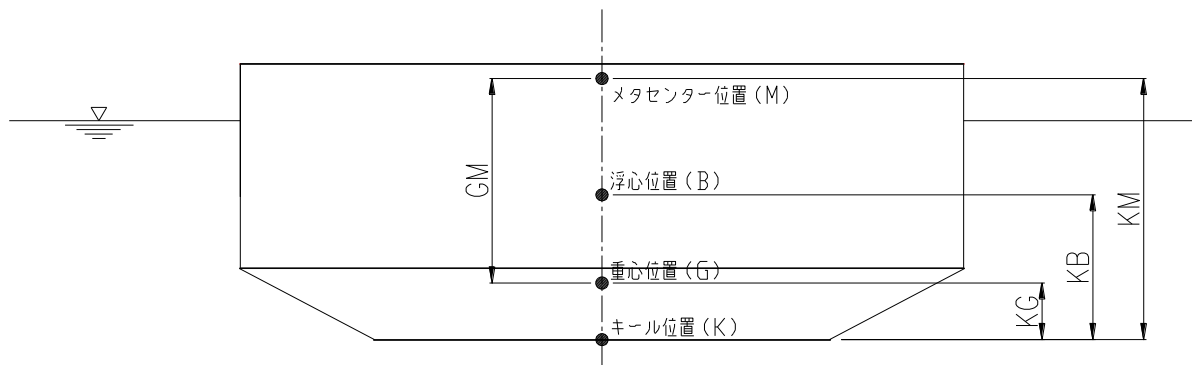
名称	水中重量 (kN/m)	長さ (m)	重量(kN)	
			本体	付着物
上部チェーン	1.307	25	32.7	0.7
ワイヤーケーブル	0.230	710	163.4	---
下部補強チェーン(上部)	1.307	25	32.7	---
下部補強チェーン(中部)	2.454	32.89	80.7	---
合計			309.4	0.7

(2) 浮体の安定性

1) 静的安定性

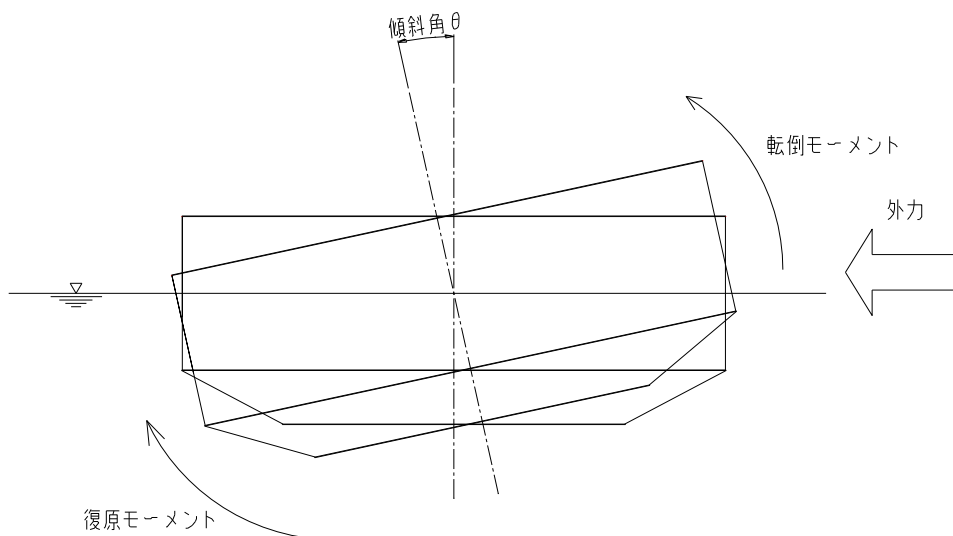
適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従いメタセンター高さ(GM)が正であることを確認する。

浮体状態	GMが最も小さくなる状態
喫水	2.70m
喫水面の断面二次モーメント(I)	201m
排水量	1245 kN
排水容積(V)	123m ³
重心高さ(KG)	0.70m
浮心高さ(KB)	1.45m
$GM = I/V - BG = I/V - (KG - KB)$	
$= 201 / 123 - (0.70 - 1.45)$	
$= 2.38 > 0m$	



2) 動的安定性

適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い動的安定性について検討を行う。



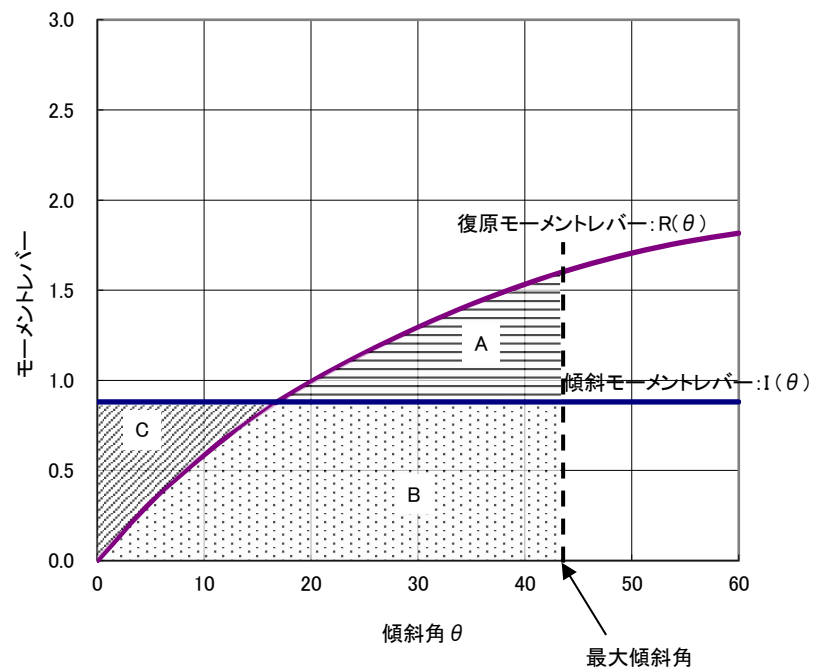
傾斜モーメント

項目	荷重(kN)	浮体係留点から の高さ(m)	傾斜モーメント (kN*m)
浮体本体が受ける風荷重	9.1	3.40	30.8
マストが受ける風荷重	17.3	7.02	121.5
波・海水流速による流体力	510.8	1.85	943.9
合計	537.1	2.04	1096.2

傾斜モーメントレバー $l(\theta) = 0.88\text{m}$ (傾斜モーメント/排水量)

復原モーメントレバー

deg	$R(\theta)(\text{m})$
0	0.00
5	0.32
10	0.59
15	0.81
20	0.99
25	1.15
30	1.29
35	1.42
40	1.53
45	1.63
50	1.71
55	1.77
60	1.82



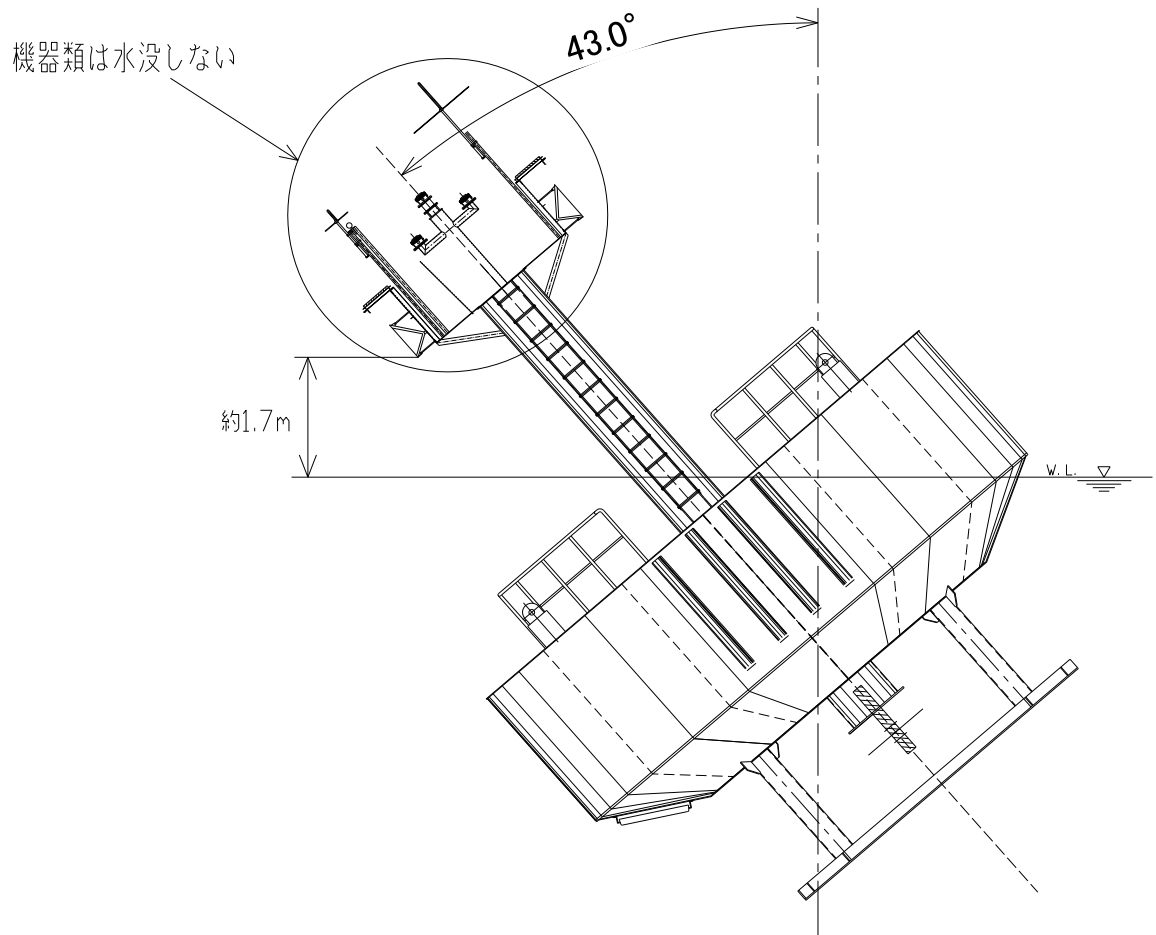
$R(\theta)$: 復原モーメントレバー(m) (復原モーメント/排水量)

動的安定性能の判定は適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い、下式により行なう。

$$\int_0^{\theta_1} R(\theta) d\theta = \text{面積}(A+B) > 1.1 \int_0^{\theta_1} I(\theta) d\theta = 1.1 \times \text{面積}(B+C)$$

上式の右辺と左辺が一致する θ_1 (最大傾斜角)は、 $\theta_1 = 43.0 \text{ deg}$ である。

下図より、 43.0° 傾斜しても装置、機器類は水没しない。



観測装置設置後の浮体動揺特性(周波数応答)に関する検討

1. 概要

本書は、東京大学地震研究所が行う「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究（研究代表者 加藤照之）において必要である「黒牧ブイ用観測装置」の設置に関わる検討である。「土佐黒潮牧場 18 号ブイ」への観測装置の搭載による影響を考慮し、上下揺の動揺特性（周波数応答）を求め、観測精度の向上を図るものとする。

GPS 波浪計などの小型ブイの鉛直方向動揺（上下揺）では、4～5 秒程度に固有周期を有する場合が多く、周期 8 秒以上の波浪に対しては良く追従し、観測には問題ないが、周期 6 秒以下の波浪に対しては上下揺の動揺特性が影響し、観測値に誤差を生じることが知られている。このため、従来の浮体動揺解析を用いて、上下揺の動揺特性（周波数応答）を求めておき、GPS 測位で得られたブイの鉛直運動にこの周波数特性を考慮することによって、周期 6 秒以下の波浪観測精度を向上させる方法が考案されている。

2. 動揺解析手順

係留動揺シミュレーションに、単一周期・単一波高（規則波）を外力として入力し、ブイの鉛直運動の波に対する応答を求める。外力としては、規則波のみとし、風や潮流、波漂流力は考慮しない。鉛直運動の応答値を必要な周波数間隔で順次求めれば、周波数応答関数と固有周期を算出することができる。これらの計算手順を図 1 に示す。

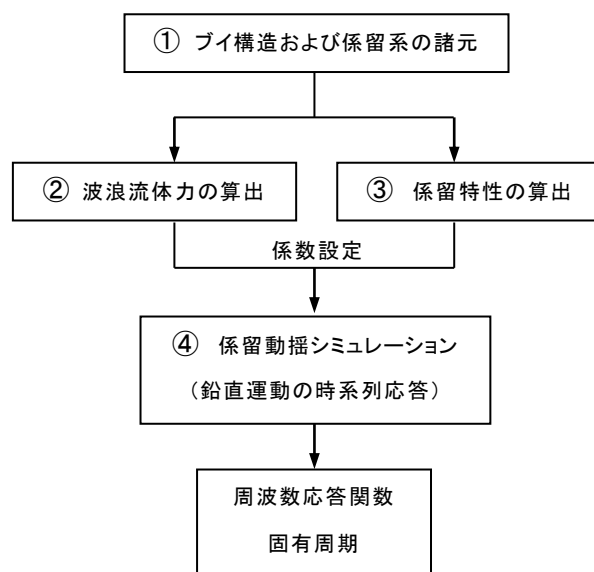


図 1 ブイ上下揺に関する周波数応答関数算定手順

①ブイ構造および係留系の諸元

黒牧 18 号の浮体，係留索の諸元を下表および図 2 に示す．これらの諸元を④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いる．

表 1 浮体諸元

	黒牧18号
ブイ径(m)	8.00
浮体高さ(m)	3.10
喫水(m)	1.61
乾舷(m)	1.49
斜面高さ(m)	0.80
底板径(m)	5.10

表 2 係留索諸元

	黒牧18号	
	呼び径(mm)	長さ(m)
上部鎖	81	25
ケーブル	92	710
下部補強鎖／上	81	25
下部補強鎖／中	111	80
下部補強鎖／下	81	25
下部一般鎖	70	410

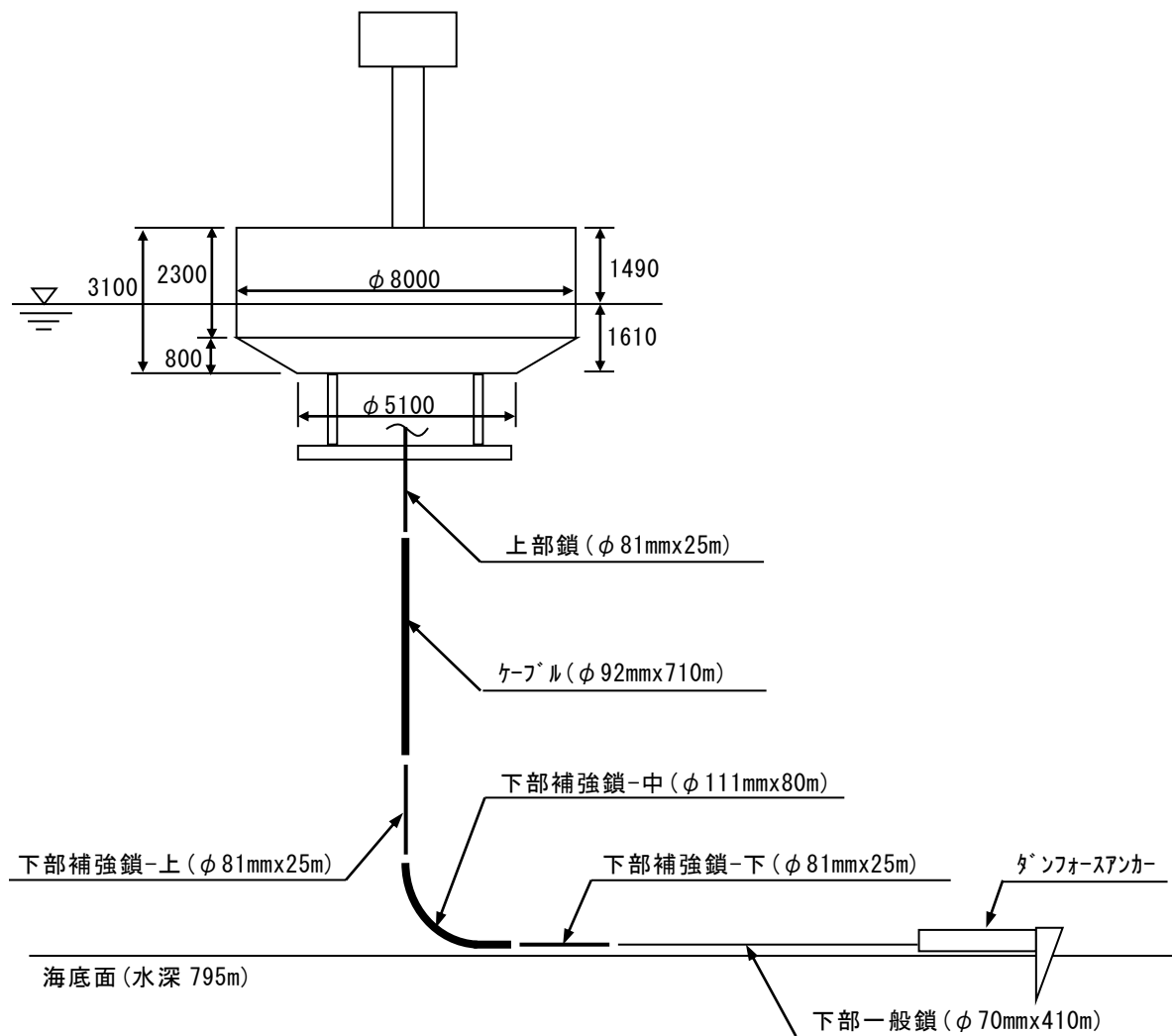


図2 黒牧 18 号浮体形状及び係留索構成図

②波浪流体力の算出

三次元の特異点分布法により，付加質量などの波浪流体力を算出する．三次元特異点分布法に用いる計算メッシュの分割例を図3に示す．この計算結果は④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いられる．

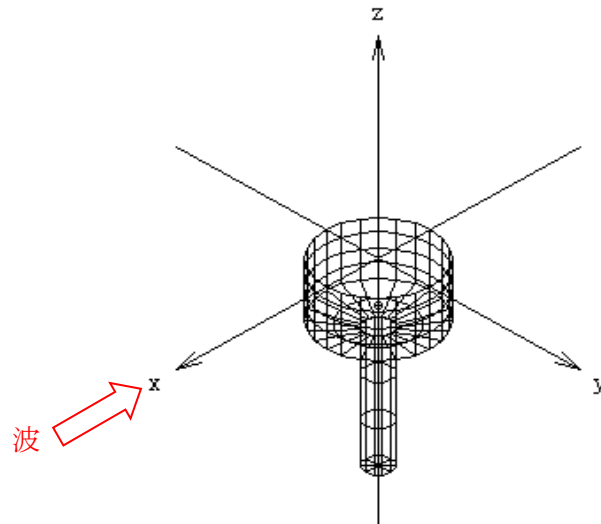


図3 数値計算メッシュの一例

③係留特性の算出

ブイの移動に伴う係留反力を算出する．図4に示すカテナリーモデルより，ブイの変位と係留張力の関係を求める．この計算結果は④係留動揺シミュレーションの入力条件に用いられる．

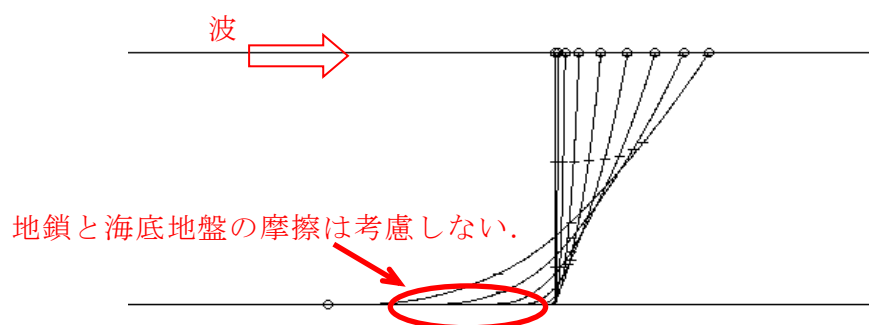


図4 係留索カテナリーモデル

④係留動揺シミュレーション

算出された波浪流体力および外力データを用いて、係留ブイの動揺シミュレーションを実施する。基本的には、次式に示す運動方程式を解き、ブイ動揺変位について時刻歴応答を出力する。

$$\sum_{j=1}^6 \left[(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{X}_i(t) + B_{ij} \dot{X}_i(t) + N_{ij} |\dot{X}_i(t)| \dot{X}_i(t) + C_{ij} X_i(t) \right] = F_i(t) \\ (i = 1, 2, \dots, 6)$$

ここで、

X_i : ブイの変位

M_{ij} : ブイの質量もしくは慣性モーメント

A_{ij} : 付加質量もしくは付加慣性モーメント

B_{ij} : 造波減衰係数

N_{ij} : 粘性減衰係数

C_{ij} : 静的復原力

$F_i(t)$: 外力（波強制力，係留力）

3. 動揺解析結果

黒牧 18 号の上下揺周波数応答を算出した．その結果を図 5 及び表 3 に示す．図の縦軸は，ブイの上下揺の応答値を入射波振幅で除したものの，横軸は，周期を示す．

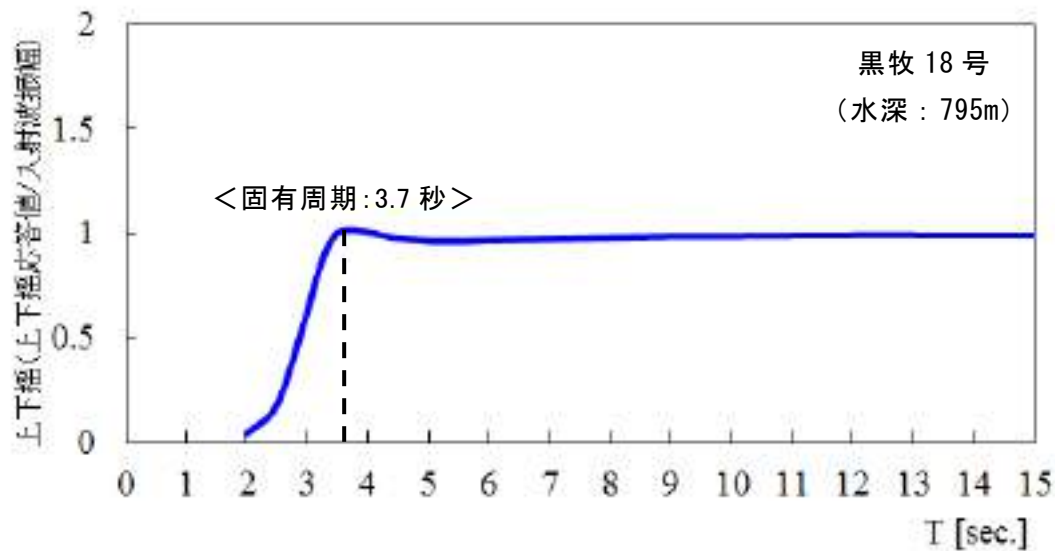


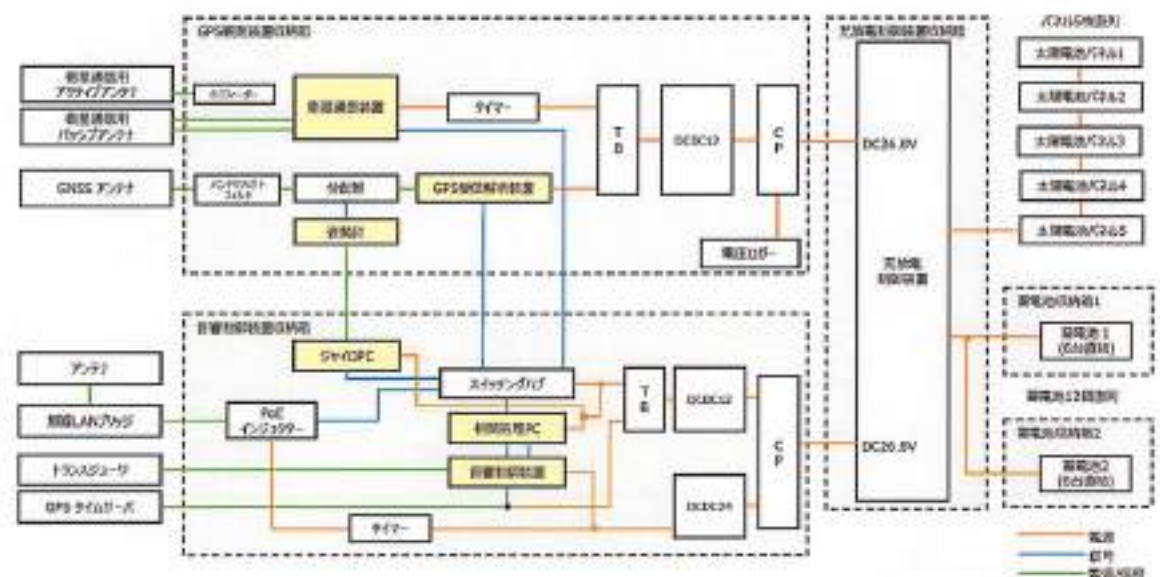
図5 黒牧 18 号の上下揺周波数応答

表3 上下揺周波数応答の数値データ

波周期T [sec.]	上下揺 [m/m]	波周期T [sec.]	上下揺 [m/m]
2.0	0.04	5.0	0.96
2.5	0.18	5.5	0.96
3.0	0.62	6.0	0.97
3.1	0.73	7.0	0.97
3.2	0.83	8.0	0.98
3.3	0.91	9.0	0.99
3.4	0.97	10.0	0.99
3.5	1.00	12.0	0.99
3.6	1.02	15.0	0.99
3.7	1.02	20.0	0.99
3.8	1.02	25.0	0.99
3.9	1.01		
4.0	1.01		
4.1	1.00		
4.2	0.99		
4.3	0.99		
4.4	0.98		
4.5	0.98		

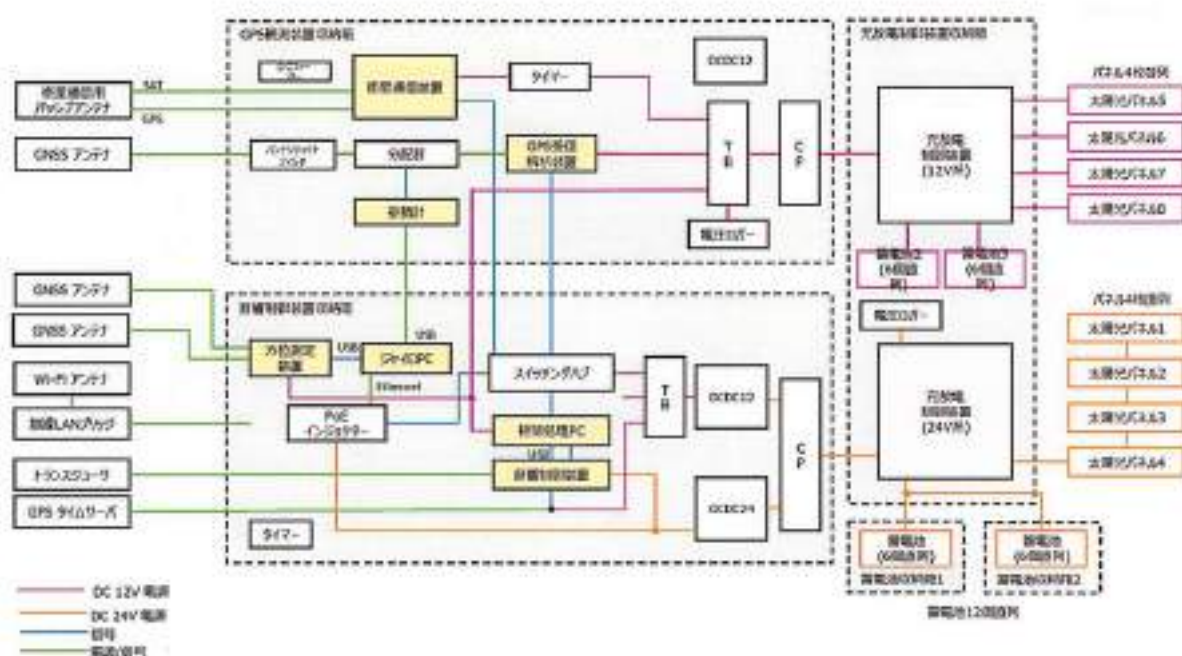
2. ブイ上システムの改良フロー

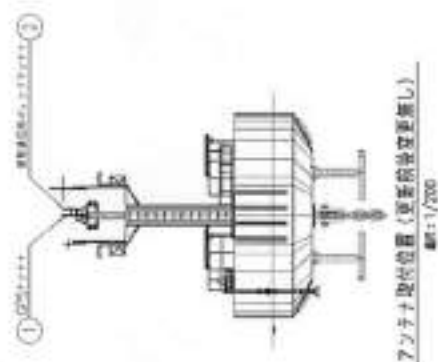
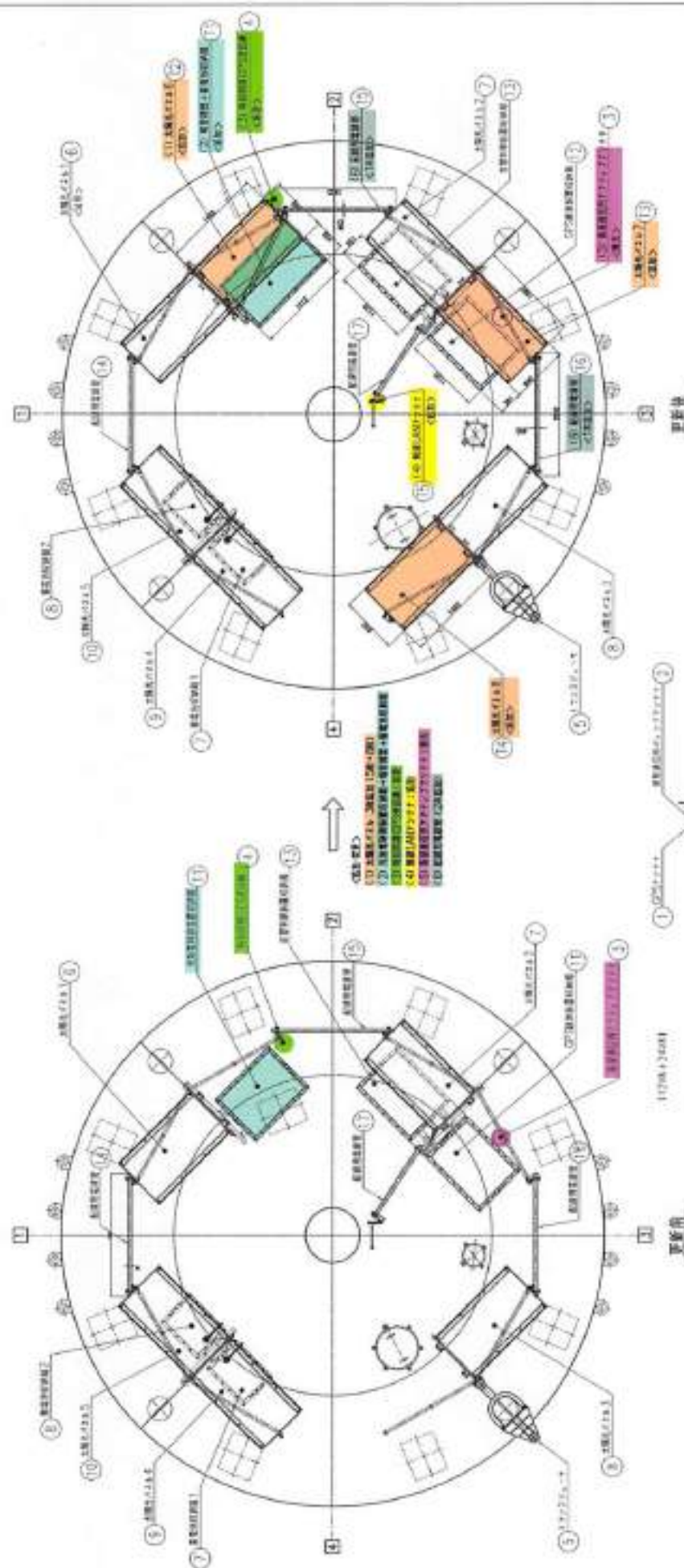
当初のブイ上計測システム



ブイ上計測システムの改良

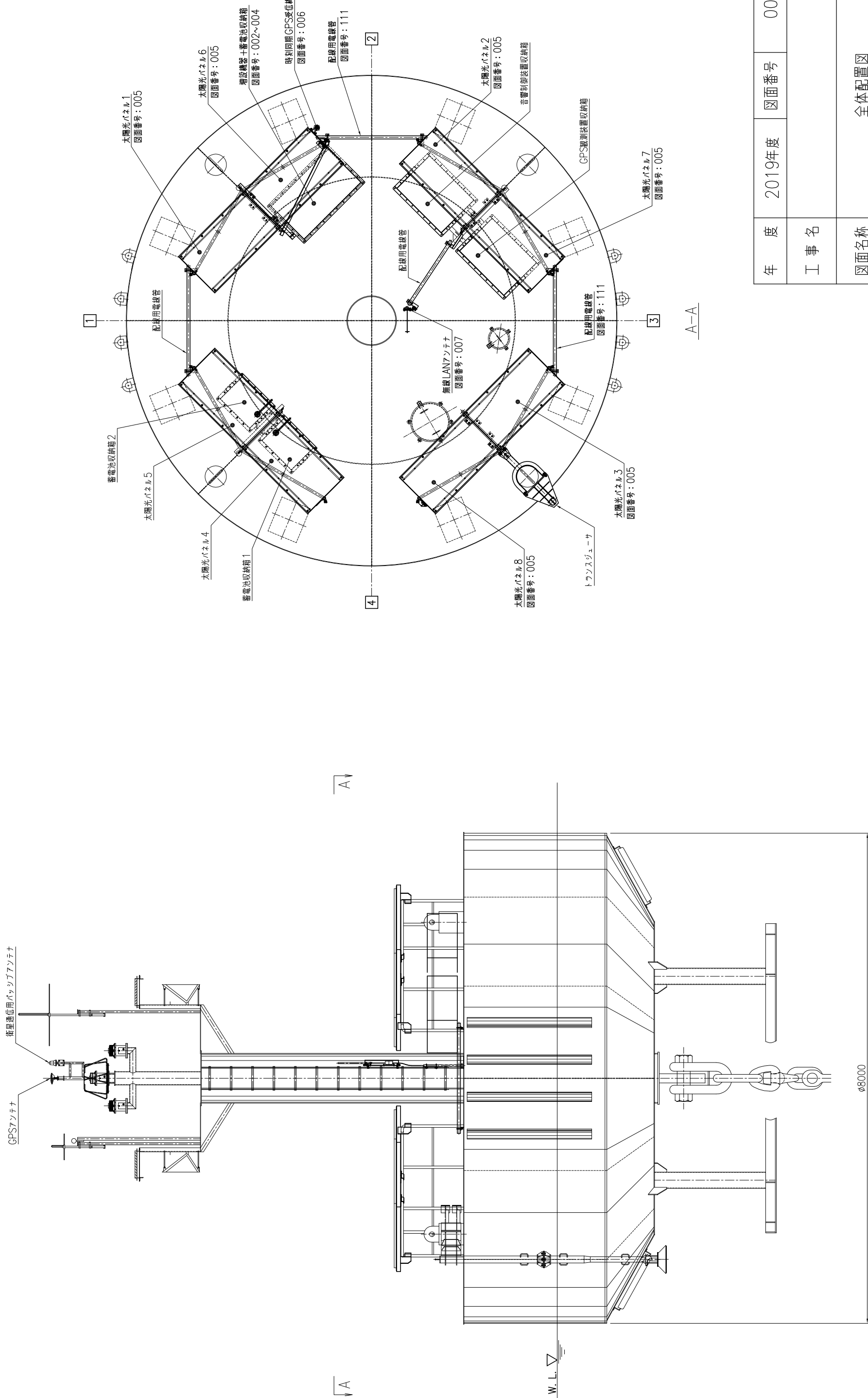
電源改良後のブイ上計測システム





3. 電源改良 (2019/9)後の安定計算・係留計算に基づく配置

年 数	2019年度	図面番号	K001
工 事 名	足摺戸GNSSアンの設置増設		
図面名称	機密配置図 (1/2)		
縮 尺	1/60	単 位	mm
図面年月日	2019.09.17	組 数	-
関西設計株式会社			



5. 電源改良後 (2019/9) の配置図

観測措置設置後の浮体の安全性・安定性に関する検討

1. はじめに

2011年11月において、高知県土佐清水市足摺岬沖に設置された表層型浮漁礁「土佐黒潮牧場18号」(以下、黒牧18号)は、2016年より「津波観測の高性能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」の基盤研究で活用されている。今年度に、本研究に資する観測装置の追加が実施される予定であるため、黒牧18号の浮体の全重量が変更となる。

このため本報では、それに伴う「1)浮体の安定性」と「2)係留設備の安全性」に関する検討結果を報告する。

なお、追加される観測装置は2021年2月末に撤去予定である。そのため、本検討は耐用年数9.25年(9年3ヶ月)にて実施する。撤去後(9.25年～10年)における浮体の安全性・安定性は装置追加前と同等となる。

黒牧18号設置	: 2011年11月25日
追加装置撤去	: 2021年 2月25日 (予定)
期間	: 9年3ヶ月(9.25年)

2. 検討項目

観測装置の追加に伴い表層型浮漁礁の設計計算に変更が生じる箇所は、以下の通りである。

- 1) 係留環
- 2) 係留索
- 3) 浮体の安定性

3. 観測装置諸元

Table-1に観測装置の据付位置と重量を示す。表中の座標は、甲板上面の中心を原点としたときのものである。観測装置の追加により、重量は現状から532kg増加していることが分かる。

Table-1 観測装置の据付位置と重量

No.	名称	座標 ※			重量 (kg)	備考
		X	Y	Z		
1	太陽光パネル1	1276	2331	1021	39	2枚タイプ
2	太陽光パネル2	2331	-1276	1021	39	2枚タイプ
3	太陽光パネル3	-1276	-2331	1021	39	2枚タイプ
4	太陽光パネル4	-2331	1276	1021	39	2枚タイプ
5	太陽光パネル5	-1276	2331	1021	39	2枚タイプ
6	太陽光パネル6	2331	1276	1021	39	2枚タイプ(追加)
7	太陽光パネル7	1276	-2331	1021	39	2枚タイプ(追加)
8	太陽光パネル8	-2321	-1276	1021	39	2枚タイプ(追加)
9	蓄電池収納箱1	-2020	1374	346	200	既設
10	蓄電池収納箱2	-1340	2054	346	200	既設
11	増設機器 + 蓄電池収納箱	2063	907	415	467	追加
12	音響制御装置収納箱	2064	-1040	346	111	既設
13	GPS観測装置収納箱	1041	-2063	346	108	既設
14	GPSアンテナ	0	0	6744	14	既設
15	衛星通信用アクティブアンテナ	-	-	-	0	撤去
16	衛星通信用パッシブアンテナ	250	0	6759	3	既設
17	時刻同期用GPS受信機	3148	897	1021	2	既設
18	トランスジューサ	-2957	-2957	203	214	既設
19	無線LANアンテナ	249	-581	1335	8	既設+追加
20	配線用電線管・固定金具等	0	0	500	68	既設+追加
合計					1707	

前回 1175 kg

※ 座標について 今回増加分 532 kg

X, Y : プイ中心を原点とする

Z : デッキ上0m(喫水面から約1.5m)地点

4. 検討結果

2章で述べた各検討項目に対し、観測装置の追加前後における設計計算値の比較をTable-2～Table-4に示す。

1) 係留環

Table-2 係留環に関わる照査

照査対象	計算値		許容値
	装置追加前	装置追加後	
支圧応力度の照査	1322 kN	1327 kN	3474 kN
はし抜け強度の照査	74.7 N/mm ²	75.0 N/mm ²	150 N/mm ²
応力集中部の照査	91.2 N/mm ²	91.6 N/mm ²	263 N/mm ²

2) 係留索

Table-3 係留索に係る照査

照査対象		計算値				許容値 (安全率)
		装置追加前		装置設置後 [※]		
		設計外力	安全率	設計外力	安全率	
係留環接続部アンカーシャックル		1322 kN	3.198	1327 kN	3.185	3.0 以上
上部チェーン		1322 kN	3.016	1327 kN	3.004	
ケーブル		1303 kN	3.383	1308 kN	3.372	
下部補強 チェーン	(上部)	1200 kN	3.008	1205 kN	3.077	
	(中部)	1176 kN	3.205	1181 kN	3.517	
	(下部)	1046 kN	3.452	1051 kN	3.528	
下部一般鎖		1027 kN	3.082	1032 kN	3.107	1.2 以上
アンカー		596 kN	1.210	598 kN	1.207	

※装置設置後のチェーンに関しては耐用年数9.25年にて検討

3) 浮体の安定性

Table-4 浮体の安定性に係る照査

照査対象	計算値		許容値
	装置追加前	装置設置後	
最大引込力時乾舷 (最大波高時)	0.404 m	0.394 m	0 以上
最大引込力時 (最大波高時)	2.380 m	2.340 m	0 以上
最大傾斜角	43.0 deg.	44.2 deg.	50.0 deg.

5. おわりに（留意事項）

以上の検討結果より、観測装置の追加後において浮体の安全性・安定性に問題はないことが確認された。

添付資料

- (1) 設計総括表(装置追加前)
- (2) 設計総括表(装置追加後)
- (3) 設計計算書(装置設置後) ※ 検討項目該当箇所のみ

・設計総括表

<装置追加前>

設 計 条 件								
設置位置	北緯：32° 29' 06"			東経：133° 12' 09"		(世界測地系)	設計耐用年数	10年
水 深	795 m	風速 U_{10}	61.0 m/s	波 浪		有義波高 $H_{1/3}$	12.5 m	
底 質	粘土	海水流速	2.06 m/s			最大波高 H_{max}	25.0 m	
付着生物	80 N/m ²			有義波周期 $T_{1/3}$		16.0 s		
適用基準	・ 漁港・漁場の施工の設計の手引き 2003年版 (社)全国漁港漁協協会							
	・ 浮漁礁設計・施工技術基準 平成4年3月 MF21							

設計強度の許容値						
許容応力度 [N/mm ²]	材質		SS400		SM490	
	荷重状態		常時	一般的な荷重	常時	一般的な荷重
	割増係数		1.0	1.5	1.0	1.5
	鉛直応力度	t ≦ 40	140	210	185	278
	(引張、圧縮、曲げ)	t > 40	125	188	175	263
	せん断応力度	t ≦ 40	80	120	105	158
		t > 40	75	113	100	150
二軸応力度の許容値						
1.2						
係留部の安全率						
3.0						
アンカーの安全率						
1.2						

設 計 結 果						
浮 体 諸 元	浮 体 径	8.0 m	浮 体 本 体 高	3.1 m		
	全 高	11.0 m	全 浮 力	1450 kN		
	照 査 対 象	断 面 / 材 質	照 査 項 目	照 査 結 果		
	1. 甲板部 [デッキ部]	PL-9 (SS400)	四辺固定板としての照査	202.6 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	2. 側板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	121.7 N/mm ² < 210 N/mm ²		
係 留 部 諸 元	3. 斜度板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	114.0 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	4. 底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	80.2 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	5. 係留環 (尾筒部)	PL-150 (SMA490)	支圧応力度の照査	1322 kN < 3474 kN		
			はし抜け強度の照査	74.7 N/mm ² < 150 N/mm ²		
			応力集中部の照査	91.2 N/mm ² < 263 N/mm ²		
係 留 部 諸 元	照 査 対 象			設 計 外 力	安 全 率	
	係留環接続部7カーヤングル	φ97mm		1322 kN	3.198 > 3.0	
	上部チェーン	φ81mm × 25m		1322 kN	3.016 > 3.0	
	ケーブル	素線φ7mm × 73本 (ケーブル径 92mm) × 710m		1303 kN	3.383 > 3.0	
	下部補強チェーン	(上部) φ81mm × 25m (中部) φ111mm × 80m (下部) φ81mm × 25m		1200 kN	3.008 > 3.0	
浮 体 の 安 定 性	下部一般鎖	φ70mm × 410m		1176 kN	3.205 > 3.0	
	アンカー	ダンフォース型 17t		1046 kN	3.452 > 3.0	
	最大引込力時乾舷 (最大波高時)	0.404 m > 0		1027 kN	3.082 > 3.0	
	最大引込力時メタセンター高さ	2.380 m > 0		596 kN	1.210 > 1.2	
	最大傾斜角	43.0 deg.				
			装置・機器が水没しない			

・設計総括表

<装置追加後>

設計条件						
設置位置	北緯：32° 29' 06" 東経：133° 12' 09"		(世界測地系)		設計耐用年数	10年
水深	795 m	風速 U ₁₀	61.0 m/s	有義波高	H _{1/3}	12.5 m
底質	粘土	海水流速	2.06 m/s	最大波高	H _{max}	25.0 m
付着生物	80 N/m ²			波 浪		
適用基準	・ 漁港・漁場の施工の設計の手引き 2003年版 (財)全国漁港漁協協会 ・ 浮漁礁設計・施工技術基準 平成4年3月 MF21					

設計強度の許容値						
許容応力度 [N/mm ²]	材質		SS400		SMA490	
	荷重状態		常時	一般的な荷重	常時	一般的な荷重
			1.0	1.5	1.0	1.5
	鉛直応力度 (引張、圧縮、曲げ)	t ≤ 40	140	210	185	278
		t > 40	125	188	175	263
せん断応力度	t ≤ 40	80	120	105	158	
	t > 40	75	113	100	150	
二軸応力度の許容値	1.2					
係留部の安全率	3.0					
アンカーの安全率	1.2					

設計結果						
浮体諸元	浮体径	8.0 m	浮体本体高	3.1 m		
	全高	11.0 m	全浮力	1450 kN		
	照査対象	断面/材質	照査項目	照査結果		
	1. 甲板部 [デッキ部]	PL-9 (SS400)	四辺固定板としての照査	202.6 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	2. 側板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	121.7 N/mm ² < 210 N/mm ²		
係留部諸元	3. 斜底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	114.0 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	4. 底板部	PL-12 (SS400)	四辺固定板としての照査	80.2 N/mm ² < 210 N/mm ²		
	5. 係留環 (尾筒部)	PL-150 (SMA490)	支圧応力度の照査	1374 kN < 3474 kN		
			はし抜け強度の照査	75.0 N/mm ² < 150 N/mm ²		
			応力集中部の照査	91.6 N/mm ² < 263 N/mm ²		
浮体の安定性	照査対象			設計外力	安全率	
	係留環接続部アンカーヤケル	φ97mm		1327 kN	3.185 > 3.0	
	上部チェーン	φ81mm × 25m		1327 kN	3.004 > 3.0	
	ケーブル	素線φ7mm × 73本 (ケーブル径 92mm) × 710m		1308 kN	3.372 > 3.0	
	下部補強チェーン	(上部) φ81mm × 25m (中部) φ111mm × 80m (下部) φ81mm × 25m		1205 kN 1181 kN 1051 kN	3.077 > 3.0 3.517 > 3.0 3.528 > 3.0	
浮体の安定性	下部一般鎖	φ70mm × 410m		1032 kN	3.107 > 3.0	
	アンカー	ダンフォース型 17t		598 kN	1.207 > 1.2	
	最大引込力時乾舷 (最大波高時)	0.394 m > 0				
	最大引込力時メタセンター高さ	2.340 m > 0				
	最大傾斜角	安定 44.2 deg.				
			装置・機器が水没しない			

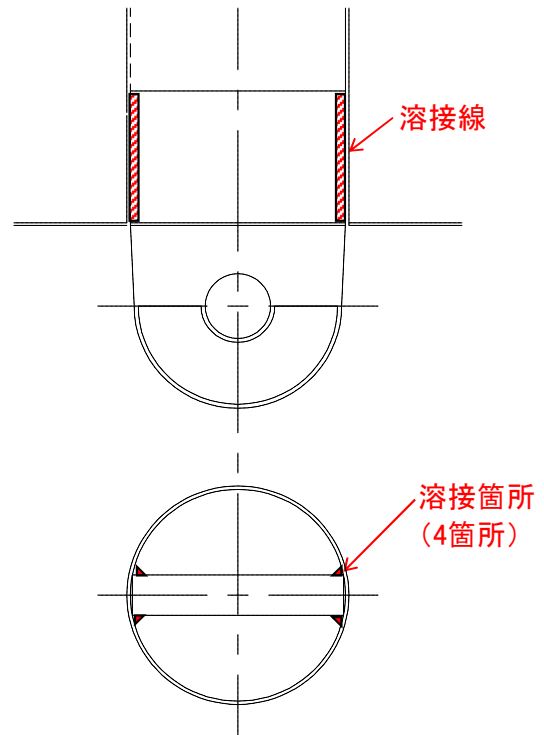
(7)係留環

1)設計条件

係留索最大張力: $T = 1326.9 \text{ kN}$

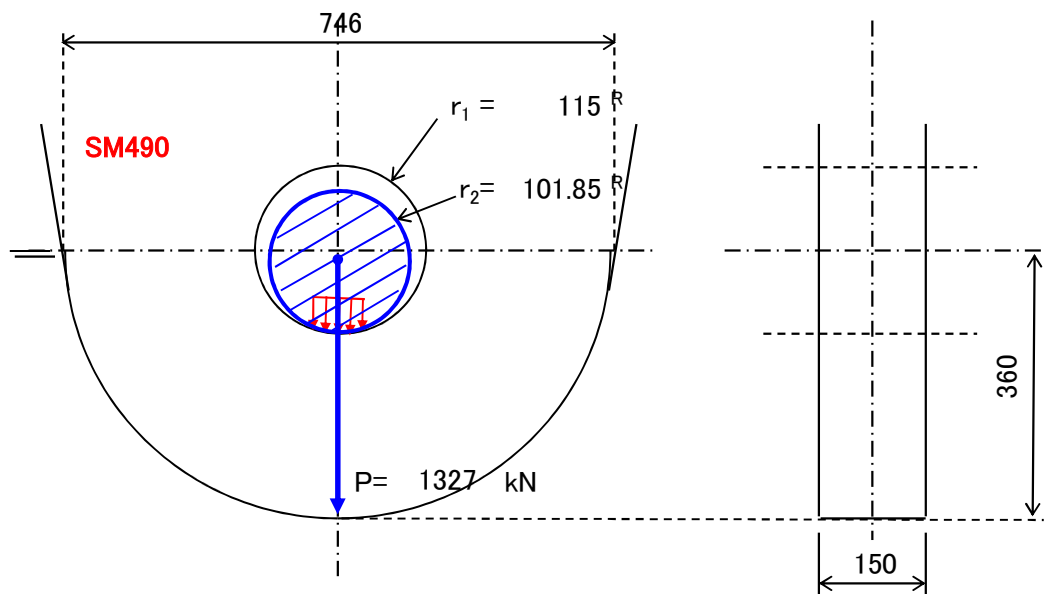
係留環腐食・磨耗代: 186 mm

係留環材質: **SM490**



2)ピン周りの照査

① 支圧



$$P_a = K_2 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 - r_2} \cdot t \quad \text{: 許容荷重 [*-11]}$$

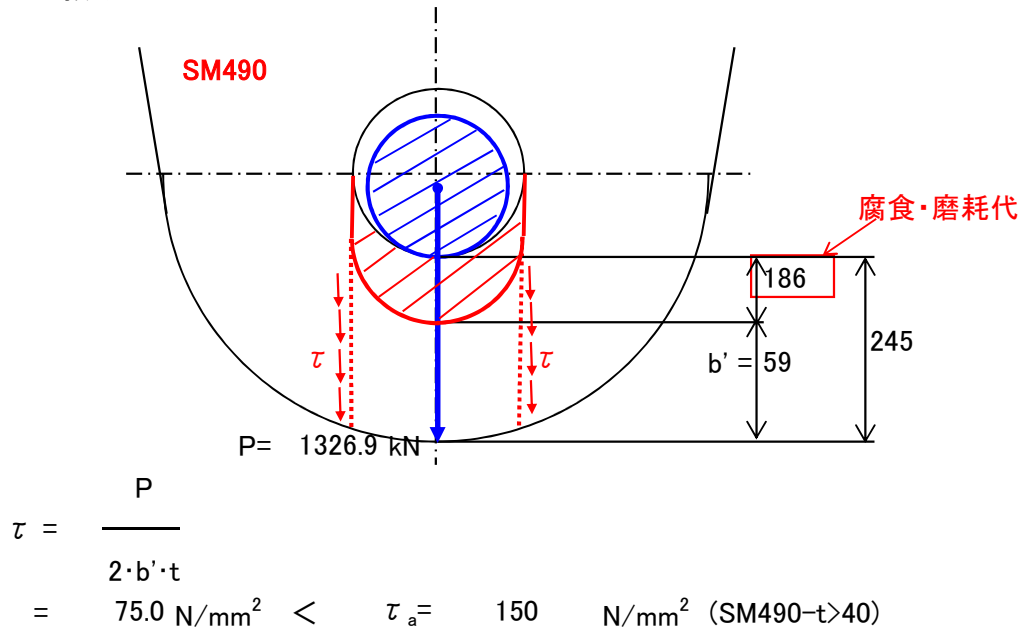
$$= 3474 \text{ kN} > P = 1327 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$r_1/r_2 = 1.13 \geq 1.02$$

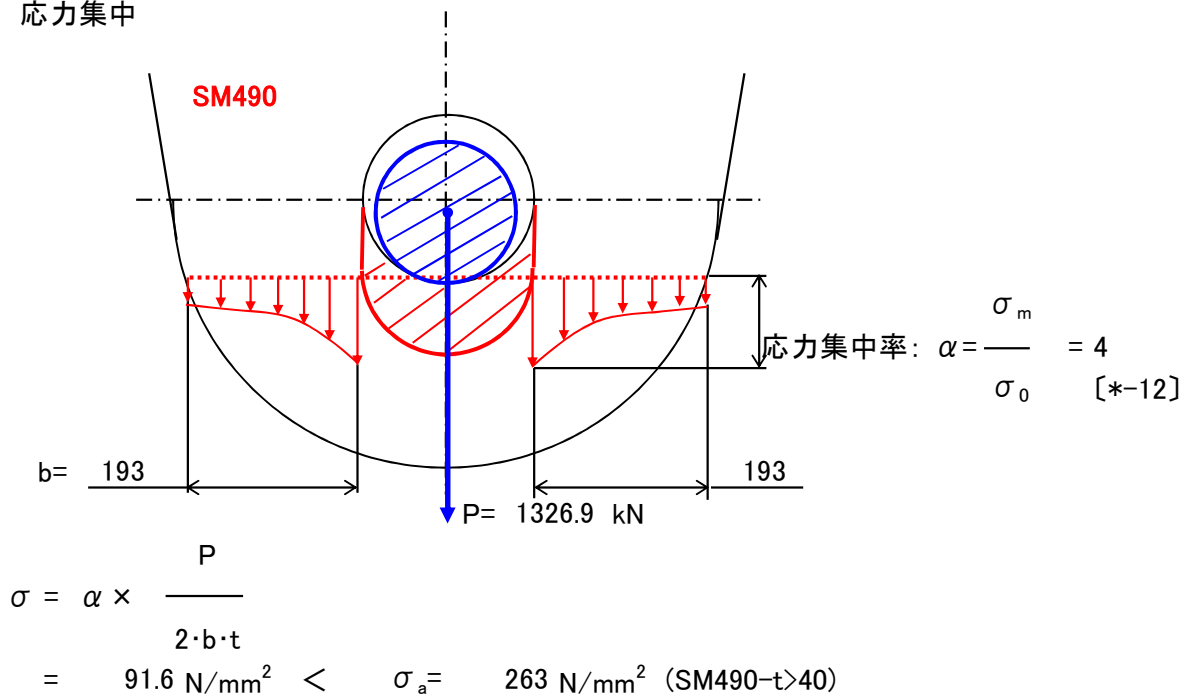
$$K_2 = 26 \text{ N/mm}^2 \quad \text{: 許容荷重係数 (SM490)}$$

※ヘルツの許容荷重係数の2倍とする [*-12]。

② はし抜け



③ 応力集中



3) 溶接部の照査

すみ肉サイズ 12 mm → 有効のど厚 $a_e = 8.5 \text{ mm}$

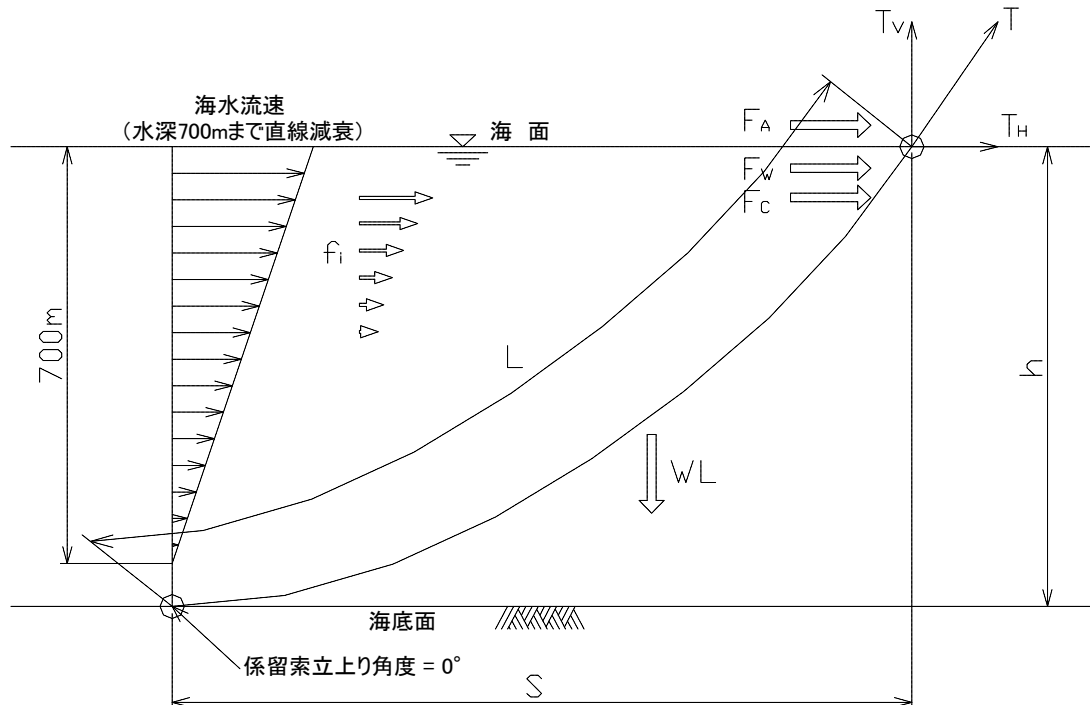
作用応力度 $\tau = P / (n \cdot a_e \cdot L) = 1326.9 \times 10^3 / (4 \cdot 8.5 \cdot 500)$

$= 78.2 \text{ N/mm}^2 < \tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$

ここで、n:4箇所(溶接箇所数)、L:500mm(溶接線長)

4. 係留索の設計

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして、作用外力を算出する。



h : 水深

T : 係留索張力

T_H : 係留索上端に作用する水平力

T_V : 係留索引揚力(=引込力)

L : 係留索上端～着底点間の係留索長

S : 同上部分の水平長

W : 係留索の単位長さ当たりの水中重量

F_A : 浮体本体に作用する風荷重

F_C : 浮体本体に作用する海水流速圧力

F_W : 浮体本体に作用する波力

f_i : 係留索の単位長さ当たりに作用する海水流速圧力

各種荷重が作用した場合の係留索に対して、カテナリー計算を実施する。 W が不均一で、係留索に海水流速圧力が作用するため、簡単な関数で表現することはできない。よって、数値解析を用いてカテナリー計算を実施するものとする。

(1)係留索の構成

係留索の構成と実際の長さ[接続用シャックル類を含んだ長さ]は以下のとおりとする。

[浮体本体]～上側鎖(25m)～ケーブル(710m)～下側鎖(540m)～[アンカー]

1)係留索全長:L

$$L = 25 + 710 + (25 + 80 + 25 + 410) = 1275 \text{ m}$$

2)係留索各部諸元

名 称	種 類	仕 様
上側鎖	電気溶接アンカーチェーン	JIS フラッシュバット溶接アンカーチェーン第3種 呼び径 $\phi 81\text{mm}$
ケーブル	高耐食型 被覆平行線ケーブル	素線 $\phi 7\text{mm} \times 73\text{本}$ (ケーブル径 92mm)
下側鎖	電気溶接アンカーチェーン	JIS フラッシュバット溶接アンカーチェーン第3種 補強部:呼び径 $\phi 81\text{mm}/111\text{mm}/81\text{mm}$ 一般部:呼び径 $\phi 70\text{mm}$

3)係留索各部重量

名 称	呼び径 (mm)	気中重量 (kN/m)	水中重量 (kN/m)
上部チェーン	$\phi 81$	1.504	1.307
ケーブル	$\phi 7\text{mm} \times 73\text{本}$	0.300	0.230
下部補強チェーン(上部)	$\phi 81$	1.504	1.307
下部補強チェーン(中部)	$\phi 111$	2.824	2.454
下部補強チェーン(下部)	$\phi 81$	1.504	1.307
下側チェーン 一般部	$\phi 70$	1.123	0.976

※1. 表中の重量はJIS F 3303 p.7の1mあたりの質量算定式に、シャックル等の取り付けによる割増を考慮して求めたものである。

※2. 上表より、計算で想定した係留索重量(気中)は $1012.2\text{kN} = 103.3\text{ton}$ 、数量計算による重量は 102.4ton で、誤差は1%未満である。

(2)作用外力

浮体本体に風荷重、海水流速圧力、波力が作用し、同時に係留索にも海水流速圧力が作用するものとして検討を行う。その時の乾舷は、 0.394 m であると仮定する。

1)風荷重 F_A

浮体本体が受ける風荷重 F_{a1}

$$F_{a1} = (\rho / 2g) \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d = 8.8 \text{ kN}$$

ρ : 空気密度 (= 12.3 N/m³)

g : 重力加速度 (= 9.8 m/s²)

V : 風 速 (= 61.0 m/s)

A : 受風面積 (= 8 × 0.394 = 3.2 m²; 本体)

C_d : 抗力係数 (= 1.2) [適用基準① P83 表2-6-2]

マストが受ける風荷重 F_{a2}

$$F_{a2} = (\rho / 2g) \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d = 17.3 \text{ kN}$$

各部の受圧面積および抗力係数

	受圧面積 $A(\text{m}^2)$	抗力係数 C_d	$A \cdot C_d$	F_{a2}
(a)標識	0.47	1.8	0.85	2.0
(b)踊り場(レーダーレフ)	1.32	1.8	2.38	5.5
(c)マスト	3.50	1.2	4.19	9.8
合 計			7.42	17.3

※抗力係数は適用図書① P83 表2-6-2より決定

風荷重の合計

$$F_A = F_{a1} + F_{a2} = 26.1 \text{ kN}$$

2) 海水流速圧力 F_C

$$\text{海水流速 } V_c = v + v_b = 3.80 \text{ m/s}$$

$$v: \text{潮流速} (= 2.06 \text{ m/s})$$

$$v_b: \text{吹送流速} (= 0.03 \times U_{60} = 1.74 \text{ m/s})$$

受圧面積 A と抗力係数 C_d

部 位	受圧面積		抗力係数 C_d
	算出式	$A(\text{m}^2)$	
ブイ本体※	$8.0 \times (3.1 - 0.394) - 0.8 \times 1.45 + 0.07 \times 10.05$	21.2	1.0
支柱※	$(0.2674 + 0.07 \times 2) \times (2.0 - 0.175) \times 4$	3.0	1.0
ダンパー	0.175×4.70	0.8	2.0
合 計		25.0	

※付着生物厚さを考慮

浮体に作用する海水流速圧力

$$F_C = (\gamma / 2g) \cdot V_c^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d) = 191.9 \text{ kN}$$

$$\gamma: \text{海水の単位体積重量} (= 10.1 \text{ kN/m}^3)$$

$$g: \text{重力加速度} (= 9.8 \text{ m/s}^2)$$

3) 波力 F_W

$$F_W = (\gamma / 2g) \cdot u_m^2 \cdot \Sigma (A \cdot C_d) = 320.5 \text{ kN}$$

$$u_m: \text{最大波による水粒子の水平流速} (= \pi H_m / T = 4.91 \text{ m/s})$$

$$H_m: \text{最大波高} (= 25 \text{ m})$$

$$T: \text{波周期} (= 16.0 \text{ s})$$

4) 浮体本体に作用する外力の合計 F

$$F = F_A + F_C + F_W = 538.5 \text{ kN}$$

5)係留索の単位長さあたりに作用する海水流速圧力 f_i

$$f_i = (\gamma / 2g) \cdot V_z^2 \cdot A \cdot C_d$$

C_d : 抗力係数 (= 1.0) [適用基準② P36 3.2.5]

V_z : 海底面から高さ z における潮流の流速 ($=v \cdot (1-(z-h))/700$) (m/s)

z : 海底面からの高さ

A : 係留索の単位長さ当たりの受圧面積

係留索各部に作用する海水流速圧力は、数値解析にて求める。

(3)係留索の張力

1)各部での最大張力〔解析結果〕

・浮体から着底点までの係留索長	$L =$	1275	m
・浮体から着底点までの係留索水平長	$S =$	936	m
・係留環接続部に発生する係留索張力	$T_1 =$	1015	kN
・ワイヤーケーブル上端に発生する係留索張力	$T_2 =$	997	kN
・下部補強チェーン(上部)上端に発生する係留索張力	$T_3 =$	893	kN
・下部補強チェーン(中部)上端に発生する係留索張力	$T_4 =$	869	kN
・下部補強チェーン(下部)上端に発生する係留索張力	$T_5 =$	739	kN
・下部チェーン 一般部上端に発生する係留索張力	$T_6 =$	720	kN
・係留索着底部において係留索に発生する水平張力	$T_H =$	598	kN
・ブイに作用する係留索の引き込み力	$T_V =$	861	kN
・係留索に作用する海水流速圧力	$F_K =$	59	kN

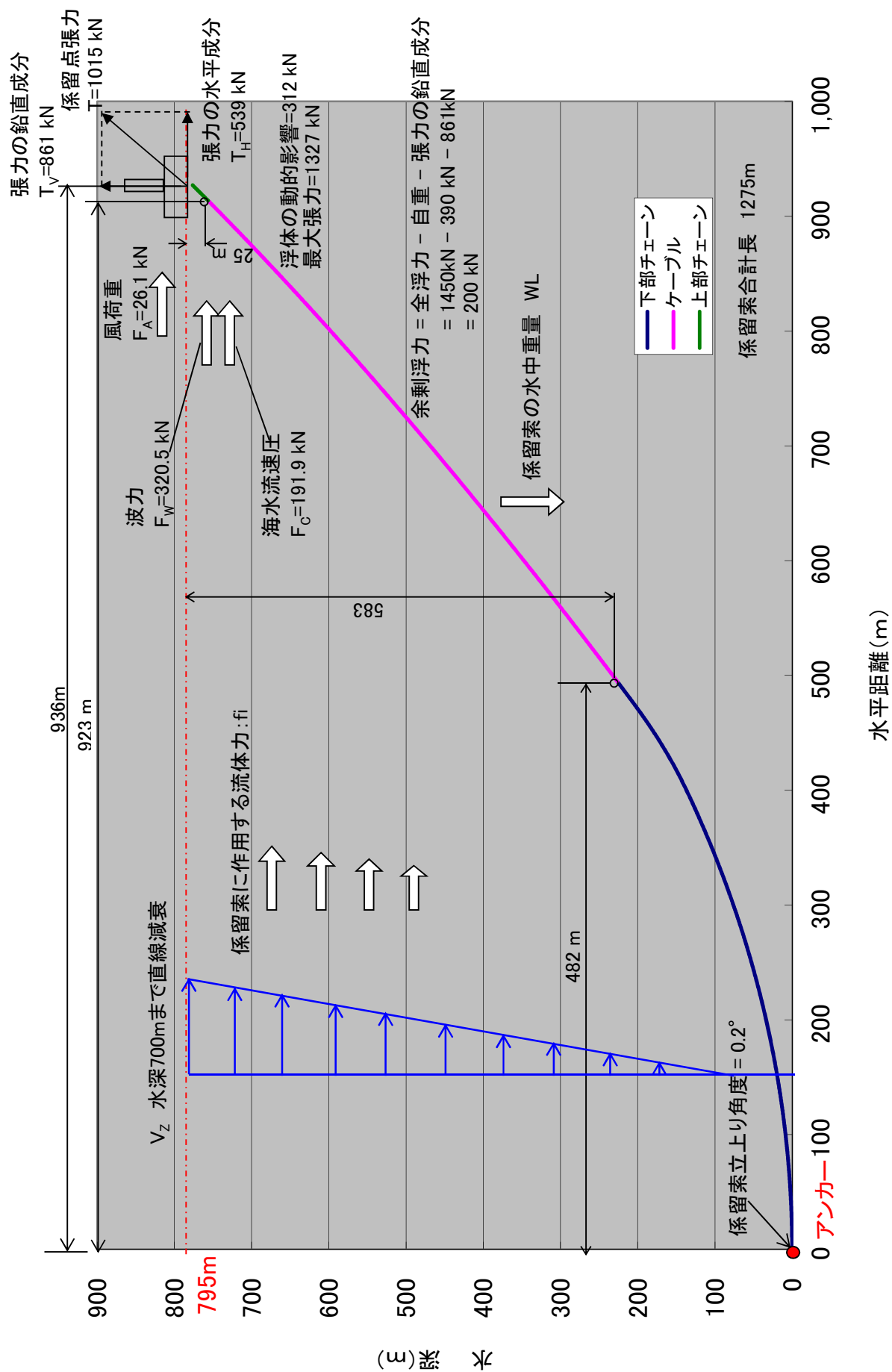
2)余剰浮力

$$\text{・余剰浮力} = \text{浮体全浮力} - \text{浮体自重} - T_V = 1450 - 390 - 861 = 200 \text{ kN}$$

3)乾舷

$$\text{・乾 舷} = \text{余剰浮力} / (\text{浮体断面} \times \text{海水の単位体積重量}) = 0.394 \text{ m (仮定した値と等しい)}$$

$$\text{浮体断面} = 8.0^2 \times \pi / 4 = 50.3 \text{ m}^2$$



最大張力時のカテナリー形状

(4) 係留索の強度検討

1) 係留索各部での所要安全率

係留索の強度検討に用いる最大張力は、静的解析で求めた値に浮体の動的な影響による変動外力を加えた値とする。変動外力は、浮体が0.8G[*-10]の加速度で上下動した場合の慣性力に等しいとみなす。

$$\Delta T = 0.8 \times 390 \text{ (浮体自重)} = 312 \text{ kN}$$

最大張力

$$\begin{aligned} T_{\max 1} &= T_1 + \Delta T = 1327 \text{ kN} \\ T_{\max 2} &= T_2 + \Delta T = 1308 \text{ kN} \\ T_{\max 3} &= T_3 + \Delta T = 1205 \text{ kN} \\ T_{\max 4} &= T_4 + \Delta T = 1181 \text{ kN} \\ T_{\max 5} &= T_5 + \Delta T = 1051 \text{ kN} \\ T_{\max 6} &= T_6 + \Delta T = 1032 \text{ kN} \end{aligned}$$

		呼び径 (mm)	最大張力 (kN)	破断強度 (kN)	安全率
係留環接続アンカーシャックルピン		φ 97	1327	4227	3.185 > 3.0
係留環接続アンカーシャックルボデー		φ 97	1327	4050	3.052 > 3.0
上部チェーン	エンドリンク(上部)	φ 102	1327	4051	3.053 > 3.0
	スィベル	φ 102	1327	6465	4.872 > 3.0
	エンドリンク(下部)	φ 102	1327	4115	3.101 > 3.0
	アンカーシャックルボデー	φ 97	1327	4066	3.064 > 3.0
	一般部エンドリンク(上部)	φ 81	1327	3986	3.004 > 3.0
	一般部	φ 81	1327	4291	3.234 > 3.0
	一般部エンドリンク(下部)	φ 81	1327	4347	3.276 > 3.0
ワイヤーケーブル		φ 7×73本	1308	4410	3.372 > 3.0
接続部チェーン(スィベル)		φ 87	1308	4958	3.791 > 3.0
下部補強 チェーン	(上部)	φ 81	1205	3708	3.077 > 3.0
	(中部)	φ 111	1181	4154	3.517 > 3.0
	(下部)	φ 81	1051	3708	3.528 > 3.0
下部チェーン 一般部		φ 70	1032	3206	3.107 > 3.0

2) アンカーの照査

アンカー仕様	17tonダンフォースアンカー		
アンカー重量	167 kN(気中) 145kN(水中)		
アンカー点張力	598 kN		
海底傾斜	無し	+1/80	-1/80
アンカー傾斜荷重	0.0 kN	-1.8 kN	1.8 kN
アンカー点荷重	597.7 kN	595.9 kN	599.5 kN
アンカー把駐力係数 K	5.0		
アンカー把駐力	724 kN		
安全率 (> 1.2)	1.21	1.21	1.21

※ アンカー把駐力係数は、係留システム設計指針(財日本海事協会)[*-13]よりK=5.0とする。

3) 腐食/磨耗後の呼び径D' 及び破断強度算出

チェーンは想定した腐食・磨耗量だけ減耗した楕円形になると仮定し、その断面積と等価な円断面として評価し、破断強度を推定する。

		使用前		腐食 磨耗量 F※ (mm)	10年後 呼び径 D' ※ (mm)	破断強度 T (kN)
		呼び径 D (mm)	実径 d (mm)			
係留環接続アンカーシャックルピン		97	203.7	100.00	75.4	4227
係留環接続アンカーシャックルボデー		97	158.0	80.00	73.6	4050
上部チェーン	エンドリンク(上部)	102	178.0	119.00	73.6	4051
	スィベル	102	114.8	14.00	95.2	6465
	エンドリンク(下部)	102	122.0	51.00	74.3	4115
	アンカーシャックルボデー	97	136.0	51.00	73.8	4066
	一般部エンドリンク(上部)	81	97.2	17.00	73.0	3986
	一般部	81	81.0	9.25	76.0	4291
	一般部エンドリンク(下部)	81	97.2	10.00	76.5	4347
接続部チェーン(スィベル)		87	97.9	10.00	82.2	4958
下部補強 チェーン	(上部)	81	81.0	18.50	70.2	3708
	(中部)	111	111.0	53.65	74.7	4154
	(下部)	81	81.0	18.50	70.2	3708
下部チェーン 一般部		70	70.0	9.25	64.9	3206

※チェーンに関しては腐食・磨耗後における破断強度の算出法が示されているため、設置期間を考慮した、9.25年後の強度を算出する。その他は保守側に10年後の強度とする。

(5) ケーブルソケットの強度検討

ケーブル間の接続は、ソケットおよびチェーンを介して行うものとし、ケーブルと同等の強度を有するものとして設計する。(最大引張力; 1308 kN)

ソケット(ピン含む)の材質および強度は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.2、3.2.3[*-14、15]に従い下表のとおりとする。

				ソケット部 (ピン部含む)	備 考
材 質				S45CN	
許 容 応 力 度	ソ ケ ッ ト	引張・圧縮	σ_a	210	道示Ⅱ3.2.2
		せん断	τ_a	120	道示Ⅱ3.2.2
		支 圧	τ_p	310	道示Ⅱ3.2.2
	ピ ン	せん断	σ_s	150	道示Ⅱ3.2.3
		曲 げ	σ_{bp}	290	道示Ⅱ3.2.3
		支 圧	σ_{ps}	155	道示Ⅱ3.2.3

耐用期間中の腐食・磨耗代は、他の部材と接触が無い一般部と、常に他の部材と接触している部分に分けて設定する。

一般部 : 0.15 mm/年 … 適用基準①p166の表3-2-8を参考に0.15mm/年と設定

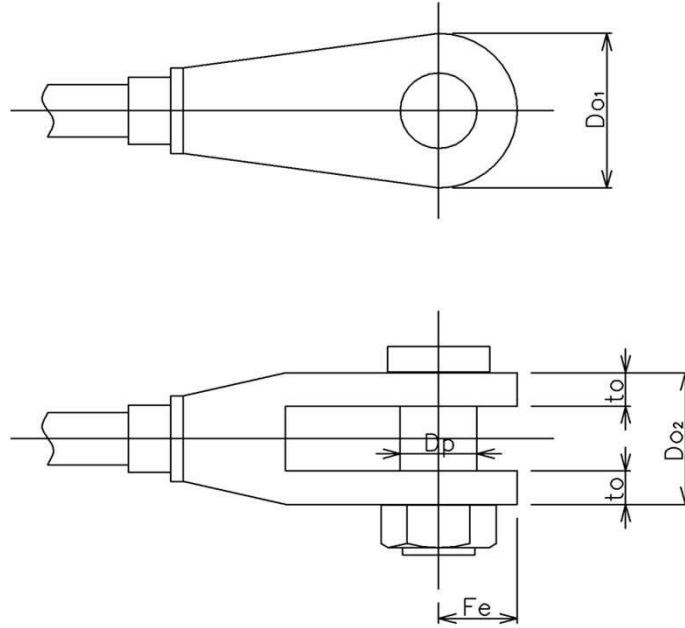
接触部(ピンとピン穴、ピン端部のフランジおよびナットとソケットフランジ部)

: 1.5 mm/年 … 適用基準①p689ではチェーンの磨耗速度は1mm/年であるが、ソケットの材料(S45C)と比べ、チェーンの材料(SBC690)の方が硬いため、硬度差分より、磨耗量の割増(1.5倍)を設定した。

(a) ケーブルソケット形状

(単位:mm)

			使用前	10年後	備 考
ソ ケ ッ ト フ ラ ン ジ 部	横 幅	Do ₁	370	367	
	縦 幅	Do ₂	315	312	
	厚 さ	to	80	77	
	縁 開 き	Fe	185	183.5	
	ピン孔半径	Rh	91.5		
		rh ₁			一般部
		rh ₂			接触部
ピ ン	直 径	Dp	180	163.5	
	半 径	Rp	90		
		rp ₁			一般部
		rp ₂			接触部



(b) ケーブルソケットの強度検討

① ピン孔近傍の引張応力度 σ_1

ピン孔を通る横断面の応力照査は、応力集中係数 $\alpha = 4$ を考慮する。

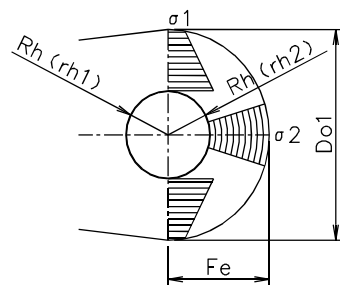
使用開始から10年後に腐食代が完全に消失した場合のピンとピン穴の関係を右下図に示す。

$$\text{【当初】 } \sigma_1 = 4P_{\max} / \{(Do_1 - 2Rh) \times to \times 2\}$$

$$= 174.9 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{【10年後】 } \sigma_1' = 4P_{\max} / \{(Do_1' - 2rh_1) \times to' \times 2\}$$

$$= 187.8 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$



② ピン孔近傍の引張応力度 σ_2

$$\text{【当初】 } \sigma_2 = P_{\max} / \{(Fe - Rh) \times to \times 2\}$$

$$= 87.5 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{【10年後】 } \sigma_2' = P_{\max} / \{(Fe' - rh_2) \times to' \times 2\}$$

$$110.3 \text{ N/mm}^2 < 210 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$

(c) ピンの強度検討

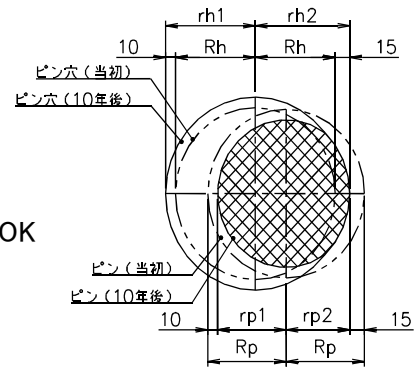
① ピンの支圧応力度 σ_3

【当初】 $\sigma_3 = P_{\max} / (2R_p \times t_o \times 2)$

$= 45.4 \text{ N/mm}^2 < 155 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

【10年後】 $\sigma_3' = P_{\max} / (2r_{p2} \times t_o' \times 2)$

$= 56.6 \text{ N/mm}^2 < 155 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$



② ピンの曲げ応力度 σ_4

【当初】 $\sigma_4 = M_p / Z = \{P_{\max} \times (D_{o2} - t_o) / 4\} / (\pi \cdot R_p^3 / 4)$

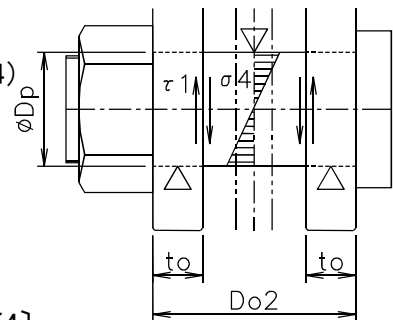
$= 76866349 / 572555$

$= 134.3 \text{ N/mm}^2 < 290 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

【10年後】 $\sigma_4' = M_p / Z = \{P_{\max} \times (D_{o2}' - t_o') / 4\} / [\pi \cdot r_{p2}^3 / 4]$

$= 76866349 / 331340$

$= 232 \text{ N/mm}^2 < 290 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$



③ ピンのせん断応力度 τ_1

【当初】 $\tau_1 = P_{\max} / (R_p^2 \times \pi \times 2)$

$= 25.7 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

【10年後】 $\tau_1' = P_{\max} / (r_{p2}^2 \times \pi \times 2)$

$= 37 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK}$

5. 浮体の安定性検討

(1) 浮体の浮力と乾舷(喫水)

1) 全浮力 1450kN

円柱部 1167kN $= 4.0^2 \times \pi \times 2.3 \times 1.03 \times 9.8$

円錐部 277kN $= \pi \times 1 / 3 \times (4.0^2 + 4.0 \times 2.550 + 2.550^2) \times 1.03 \times 9.8$

係留環部 1kN $= 0.15 \times 0.66 \times 0.88 \times 1 \times 1.03 \times 9.8$

ダンパーステー 5kN $= 0.1337^2 \times \pi \times 2.0 \times 4 \times 1.03 \times 9.8$

ダンパー 1kN $= 1.051 / 7.85 \times 1.03 \times 9.8$

2) 乾舷(係留索なし) 2.09m $= (1450 - 390) / (4.0^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 $[(\text{全浮力}-\text{自重}) / (\text{ブイ半径}^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8]$

3) 乾舷 1.48m $= (1450 - (390 + 310.1)) / (4.0^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 (係留索あり; 静水時) $(\text{全浮力}-(\text{自重}+\text{係留索})) / (\text{ブイ半径}^2 \times \pi) / 1.03 / 9.8$
 ※海底までのチェーンおよびケーブル重量を考慮

海底までのチェーンおよびケーブル重量

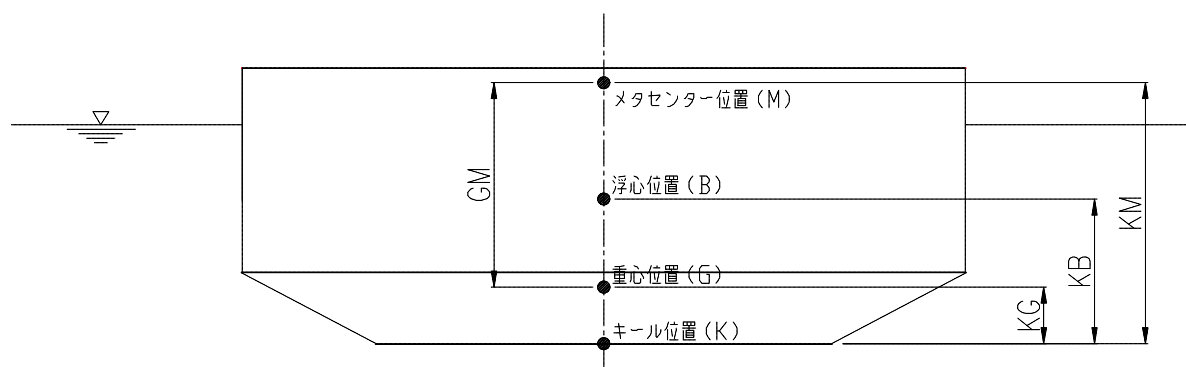
名称	水中重量 (kN/m)	長さ (m)	重量(kN)	
			本体	付着物
上部チェーン	1.307	25	32.7	0.7
ワイヤーケーブル	0.230	710	163.4	---
下部補強チェーン(上部)	1.307	25	32.7	---
下部補強チェーン(中部)	2.454	32.88	80.7	---
合 計			309.4	0.7

(2) 浮体の安定性

1) 静的安定性

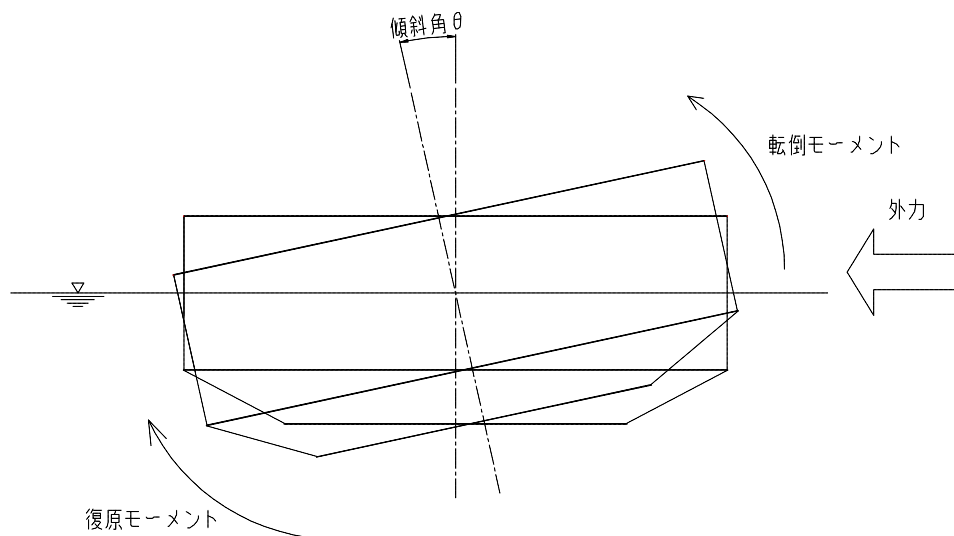
適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従いメタセンター高さ(GM)が正であることを確認する。

浮体状態	GMが最も小さくなる状態
喫水	2.71m
喫水面の断面二次モーメント(I)	201m
排水量	1250 kN
排水容積(V)	124m ³
重心高さ(KG)	0.73m
浮心高さ(KB)	1.45m
$GM = I/V - BG = I/V - (KG - KB)$	
$= 201 / 124 - (0.73 - 1.45)$	
$= 2.34 > 0m$	



2) 動的安定性

適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い動的安定性について検討を行う。



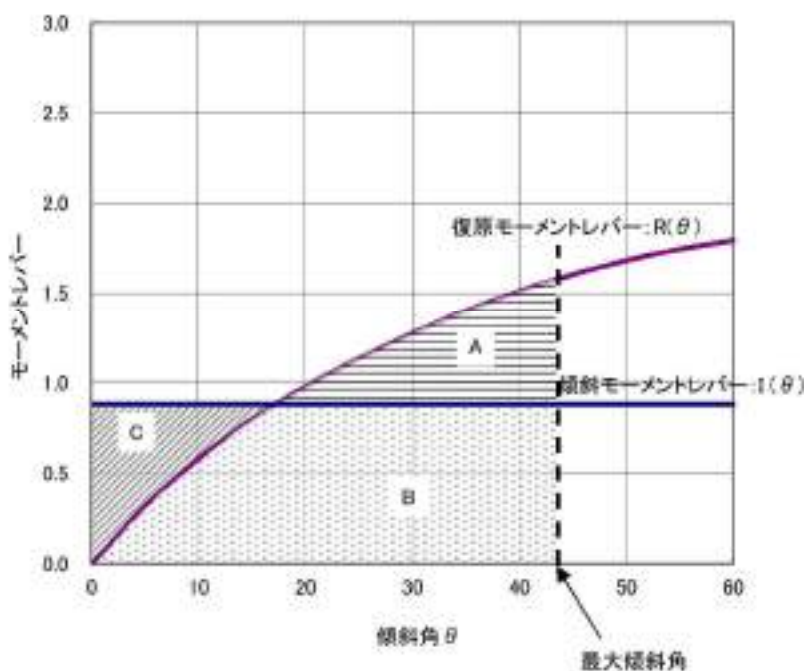
傾斜モーメント

項目	荷重(kN)	浮体係留点からの高さ(m)	傾斜モーメント(kN*m)
浮体本体が受ける風荷重	8.8	3.40	30.1
マストが受ける風荷重	17.3	7.02	121.5
波・海水流速による流体力	512.4	1.85	949.5
合計	538.5	2.04	1101.0

傾斜モーメントレバー $l(\theta) = 0.88\text{m}$ (傾斜モーメント/排水量)

復原モーメントレバー

deg	$R(\theta)(\text{m})$
0	0.00
5	0.32
10	0.58
15	0.80
20	0.98
25	1.13
30	1.27
35	1.40
40	1.51
45	1.60
50	1.68
55	1.74
60	1.79



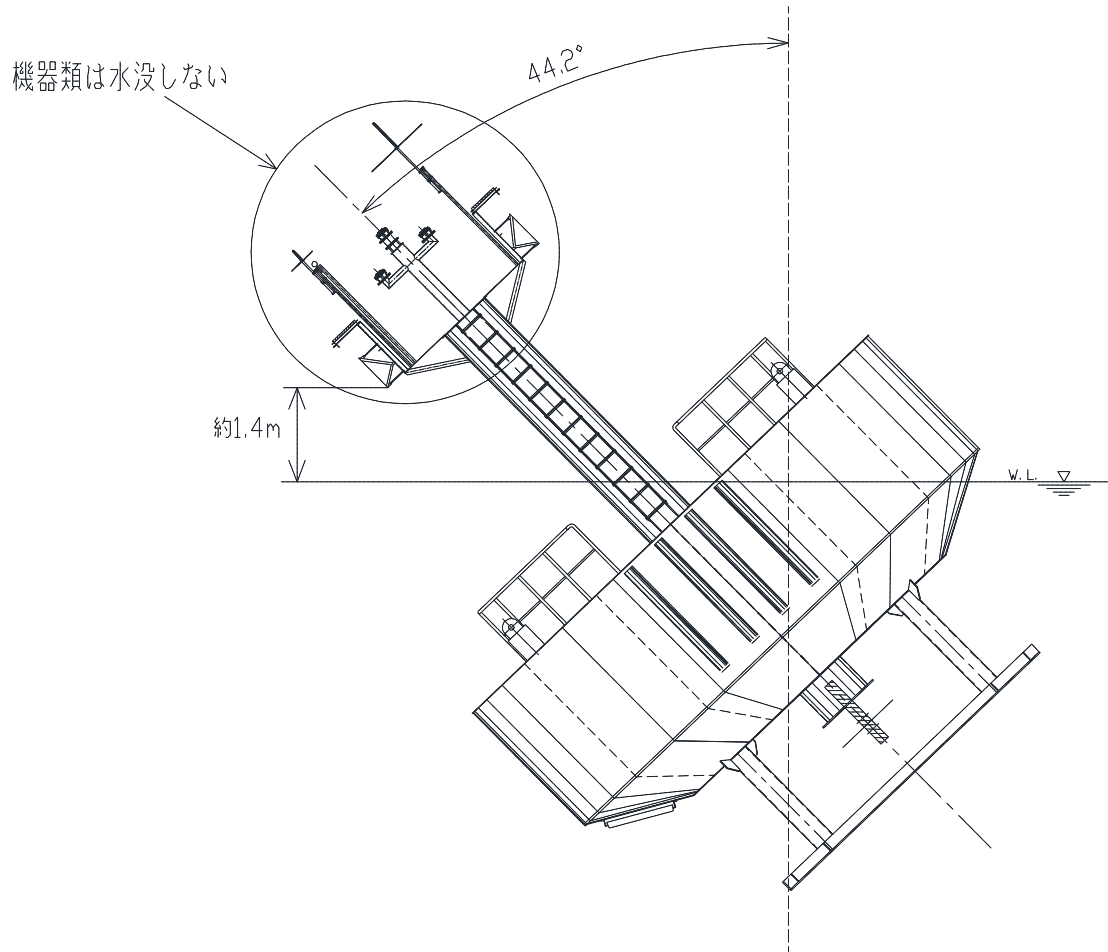
$R(\theta)$: 復原モーメントレバー(m) (復原モーメント/排水量)

動的安定性能の判定は適用基準①(P685 第11編3.3.2)に従い、下式により行なう。

$$\int_0^{\theta 1} R(\theta) d\theta = \text{面積}(A+B) > 1.1 \int_0^{\theta 1} I(\theta) d\theta = 1.1 \times \text{面積}(B+C)$$

上式の右辺と左辺が一致する $\theta 1$ (最大傾斜角)は、 $\theta 1 = 44.2 \text{ deg}$ である。

下図より、 44.2° 傾斜しても装置、機器類は水没しない。



資料 3－4 弓削丸資料

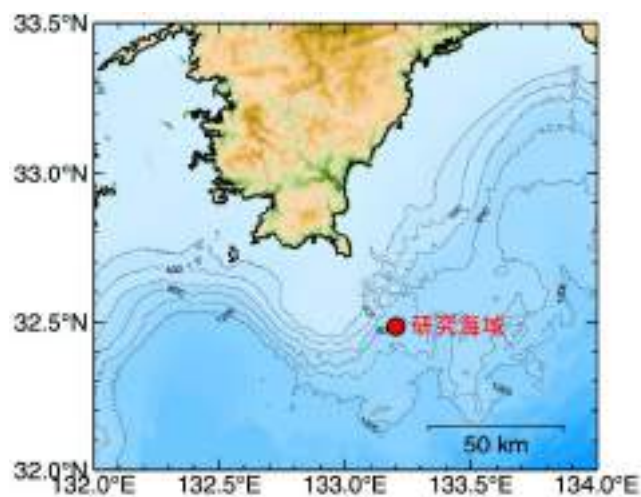


資格	近海区域（非国際航海）
長さ（全長）	40.00 m
長さ（垂線間）	35.00 m
幅（型）	8.00 m
深さ（型）	3.30 m
満載吃水（型）	2.80 m
総トン数	240 t
主機関	1,300 psx750 rpmx1 台
試運転最大速力	13.75 ノット
航続距離	約 2,300 マイル
定員	乗組員 9 名，教官 3 名，学生 44 名，計 56 名
竣工	1994 年 3 月 30 日

（弓削商船高専 Web より）

研究航海記録

日程	研究海域	目的	内容
2017 年 2 月 8 日～ 10 日	高知県足摺岬から 沖合約 20 km の黒 潮牧場 18 号ブイ設 置地点付近（図 1、 32° 29.1' N、 133° 12.1' E）。水 深約 800m。	海底地殻変動観測	・水温、塩分濃度の 調査。
2017 年 6 月 5 日～ 9 日	同上。	海底地殻変動観測	・海底局測定器設 置の実施。 ・船上局測定器に よる音響調査。 ・水温、塩分濃度の 調査。
2018 年 5 月 30 日 ～6 月 3 日	同上。	海底地殻変動観測	・船上局測定器に よる音響調査。 ・水温、塩分濃度の 調査。
2019 年 6 月 3 日～ 6 日	同上。	海底地殻変動観測	・船上局測定器に よる音響調査。 ・水温、塩分濃度の 調査。



（等深線：1200mまで200m間隔）

図 1 高知県足摺岬沖の研究海域



写真1 海底局測定器



写真2 船上局測定器による音響調査



写真3 船上からの水温、塩分調査



写真4 高知県あしずり港へ寄港

資料3-5 メディアへの掲載（新聞・番組名、掲載年月日、タイトル）

	メディア名	日付	タイトル
1	日本経済新聞	2016年8月22日	海底地殻変動 常に監視
2	NHK 高知ローカルニュース	2016年8月24日	海底の地殻変動 常時監視へ
3	愛媛新聞	2016年8月25日	G P Sで海底地殻調査
4	朝日新聞	2016年8月26日	地殻 連続観測挑む
5	準天頂衛星 WebNews	2016年8月26日	東大地震研らの研究グループ、「海のGEONET」をめざす研究開発を開始
6	高知新聞	2016年11月22日	「仁淀川町に津波観測拠点
7	高知新聞	2016年11月30日	地震の正確な知識を
8	日本経済新聞	2016年12月25日	海底にも監視網
9	NHK ニュース	2017年8月19日	（ビデオのみのため添付資料なし）
10	高知新聞	2017年12月16日	移住研究者が津波授業
11	日本経済新聞	2018年3月5日	地震 海底の動きで解明
12	日刊工業新聞	2021年3月9日	津波の早期検出目指す

海底地殻変動常監視

東大など、海上のブイ活用

東京大学の加藤隆之教授は、海底の地殻変動の常時監視。海溝型地震の対策に役立つ。現在は2017年度から、現在始める。プレート（ひた）で、精密な観測網が整う。海上のブイを使って、板（が）が沈み込んで起きる。大陸（と）海溝（なり）、海底の

地殻変動を常時監視するのは難しかった。南海トラフ巨大地震などの発生が懸念されており、観測技術の確立を急ぐ。

研究チームには名古屋大学、情報通信研究機構、気象庁気象研究所、高知

工業高等専門学校、岡山商船高等専門学校（愛媛県）なども加わる。

高知県足摺岬沖に設置されたブイを使う。海底の観測機器との間で音波をやりとりして地殻変動をつかむ。集めたデータは衛星通信を介して取得する。ブイには津波の監視や暴風の発生にかかわる海上の水蒸気量などを測る機能も付加される。

まず今年11月に津波などの観測実験を始め、17年度から地殻変動を常時監視する。日本周辺では海のプレートがゆっくり動き、陸のプレートの下に沈み込んでいる。発生したひずみが限界に達すると地震が起きる。

地殻変動の常時監視からプレートの動きが把握できれば、プレート同士が固着したりゆっくり滑ったりする様など、巨大地震の詳しい仕組みの解明に役立つ可能性がある。従来は研究者が乗船して地殻変動を観測しており、年間数回にとどまっていた。

2. NHK高知ローカルニュース 2016年8月24日



[四国 NEWS WEB TOP へ戻る](#)

MENU

▼

各地のニュース

▼

[←松山放送局](#)

ニュース詳細

海底の地殻変動 常時観測へ

08 月 24 日 19 時 24 分

8004999841_20160824192906.mp4

東京大学地震研究所などで作る研究グループは、高知県沖で、これまで行われていなかった海底の地殻変動の状況を常時観測する研究を始めることになり、海溝型の巨大地震が発生するメカニズムの解明につながることが期待されます。

これは、24日、東京大学地震研究所や愛媛県上島町にある弓削商船高等専門学校など、6つの機関で作る研究グループが上島町で記者会見して発表しました。

研究では、高知県の足摺岬沖およそ35キロにあるブイに、超音波で海底に取り付けた機器との距離などを測る装置を搭載して、海底の地殻変動の状況を常時、観測し、得られたデータを衛星通信で送る実験を行うということです。

海底の地殻変動の観測は、これまでは海上保安庁などが船で年に数回、行うのに限られていて、常時観測は行われておらず、今回の実験が成功すれば、最新の観測データを常に得られることになり、海溝型の巨大地震が発生するメカニズムの解明につながることが期待されるということです。

また、ブイには、GPSなどで津波の発生状況などを観測する装置も搭載されますが、これまで波によってブイが揺れることで衛星との通信が一時的に途切れ、データが欠けることがあったのを、新たな装置を搭載することで改善を目指すことにしています。

研究は、平成32年度までの5年間で行われ、得られたデータは、今後、インターネットで公開することになっています。

研究グループのリーダーで、東京大学地震研究所の加藤照之教授は、「このような装置を日本列島の周辺に展開できれば地震の前兆が捉えられる可能性につながるなど、総合的な防災に役立つと思う」と話していました。

愛 媛 新 聞

(3) 総 合

2016年(平成28年)8月25日 木曜日

愛

GPSで海底地殻調査

弓削商船高専など 高知沖 ブイ搭載

津波検知や地震メカニズム解明

地震などによる海底の地殻変動の継続的な観測と津波の迅速な検知を目的に、東京大地震研究所や弓削商船高専専門学校(上島町)など国内6研究機関は24日、高知県足摺岬沖で衛星利用測位システム(GPS)などを搭載したブイによる研究を始めた。発表された。

海底地殻変動は、海底に複数の装置を置き、ブイまでの音の速さとGPSを組み合わせて計測する。これまで行っていた船舶での調査は年に数回が限度だった



研究の概要を説明する東京大地震研究所の加藤照之教授
＝24日午前、上島町弓削下弓削

が、ブイの利用で連続観測が可能となる。南海トラフなどから沈み込む海洋プレートの研究など地震の発生メカニズムの解明につながる可能性もあるという。

津波観測では、東京大などがブイを利用したGPS津波計で海面の高さを計測する研究を継続している。2013、14年の衛星通信などを利用した実験では、沖合200程度に張られていた設置範囲が遠洋に広がった。今回の研究では、さらなる高精度化を目的に、ブイ

の揺れなどによる欠測を抑えるためのデータを収集。将来的に西太平洋全域に多数のブイを置くケースを想定し、衛星の仕様も研究する。

海底地殻変動、津波計のデータは、衛星経由で高知県に淀川町の基地局に送られ、インターネットでリアルタイムで公開する予定。弓削商船高専は、練習船弓削丸を活用し、ブイの揺れに関する船上実験や海底地殻変動観測に必要な海水の温度や塩分濃度などのデータを収集する。研究は20年度まで5年間実施。ブイは高知県が設置しているものを借り受ける。

弓削商船高専で会見した東京大地震研究所の加藤照之教授は「研究が成功すれば、総合的な防災システムの構築が期待できる」としている。

(月岡岳)

地殻 連続観測挑む

弓削商船高専や東大

国立弓削商船高専(上島町)や東大地震研究所、国立高知工業高専(高知県南国市)などの研究グループが、全球観測システム(GPS)技術を用いて海底の地殻の動きを連続して観測するシステムの開発を進めている。今年度から5年間、高知県沖の太平洋に浮かぶブイに観測機器を設置し、実証実験する。既に実績がある津波計測も、より精度を高める。南海トラフ地震などの巨大地震のメカニズム解明や防災に寄与したいという。

地震解明・防災貢献 狙う

GPSを用いた津波の計測は高知高専の寺田幸博客員教授、東大地震研究所の加藤照之教授らが約20年前から研究している。海上のブイに観測機器を設置。東日本大震災では、岩手県釜石市沖で約6mの津波を観測し、気象庁が観測結果を受け、津波警報のレベルを引き上げた実績がある。

従来のシステムでは沖合20mが設置の限界だったが、測定方法や観測結果を

人工衛星経由で陸上に送るなどの改良を重ね、より遠方に設置できるようになってきた。今回は高知県の足間沖約60mにある同県の海洋牧場のブイに設置する。また、波でブイが揺れる影響で衛星への送信が途切れることがあり、途切れなくデータを送れる研究にも取り組む。

海底の地殻変動は、海底に音波を送受信する機器を設置し、船から位置を測る方

法で観測している。船を用いるため、年に数回の観測に限界があったという。ブイに機器を設置して観測することで、連続したの観測が可能になり、地震直前直後などの地殻の動きを詳しく把握することにつながるという。

観測結果は11月以降、インターネットで公開する予定だ。GPSは大气中の水蒸気量を測るのにも使え、加藤教授は「気象予報の精度向上にも応用できる。将来は西太平洋に広がる総合防災システム構築を目指したい」と話す。

弓削商船高専は高知高専とのつながりで研究に参加。海水温や塩分濃度などの基礎データ収集のために練習船・弓削丸を出す同高専の木村隆二校長は「クシ」など様々な設備を備えた船を持ち、船舶技術もある商船高専の特色を生かし、南海トラフ地震などの防災に貢献したい」と述べた。(前田晋)



●実証実験で航海する練習船「弓削丸」＝弓削商船高専提供
●研究内容を発表する、東大地震研究所の加藤照之教授＝上島町の弓削商船高専

【佐川】衛星利用測位システム（GPS）を使った津波計で観測を行っている高知県立高知大学の寺田幸博さん（66）が東大地震研究所などと共同で、土佐清水市沖に観測システムを組み合わせた機器を設置し、新たな研究に取り組んでいる。寺田さんは観測データの集積や情報発信を行う基地局をこのほど、移住先の高知県土佐川町に開設。津波防災に備える態勢を「固めていきたい」と意気込んでいる。（寺田博之）

仁淀川町仁津波観測拠点

以上の建設は、いまだ
 未だ日本は、¹⁸⁸⁷其の
 國を、¹⁸⁸⁷其の
 時には、¹⁸⁸⁷其の
 の建設は、¹⁸⁸⁷其の
 則ち、¹⁸⁸⁷其の
 則ち、¹⁸⁸⁷其の

今回のトロムヘイムでは、従来の規制に加えて、環境にやさしいもの、健康にやさしいもの、巨大建設の禁止、メガシティを築く意図とする。高知高野、北大建設、宇布都市、研究機構（JAXA）など機関が参加して8月、匡福沖沖にある高知県の黒潮牧場などに新たな拠点を設置した。

「大、原に帰国した
つに顧問トーマスを訪ね
た。その時、彼は「い
つ、参田れど、参田口本
大、原に参り、参田口本」

高知高専客員教授が基地局
足摺沖GPSデータ受信

電でデータが十分に利
用できなかった経験を
踏まえ、津波が来ない
場所に開設を検討。昨
年の定年退官以来、仁



山間部から後方支援

同社は光ケーブル網が未整備だったため、町営で専用回線を竹ノ谷地区まで敷設。工事は今年初めに着手し、近日中のデータ送受信開始を予定している。

市田さんは建設区は防災情報の発信を主に行う「安全安心学習センター」も設立してその「3層型ならだ」の津波災害時の後方支援機能があると思う。津波への対応は国レベル、それらの方策を踏んだ」と語っている。

あす関係者講演

[illegible]

「三國志の戦国史を
6つのパートに分けて
解説した」といふ
田中先生（上野三
軒）

高 知 新 聞

2016年(平成28年)11月30日(水曜日)

地震の正確な知識を

仁淀川町 東大研教授らが講演

【佐川】吉川郡仁淀川町竹ノ谷の移住交流施設「山茶小屋」に今秋、衛星利用測位システム(GPS)を使った津波観測プロジェクトの基地局を開設した研究者がこのほど、施設内で「地震と津波を考える夕べ」と題した講演会を行った。正確な地震の知識を持った上で、素早い避難を呼び掛ける話を住民ら約60人が熱心に聞いた。

プロジェクトには高知高専や東大地震研究所など7機関が参加。GPSや音響観測システムなどを備えた土佐清水市の足摺岬沖の観



の最前線
東大研教授
加藤之

町にデータを送受信する基地局を開設した。講演は、元日本地震学会会長で東大地震研の加藤照之教授や寺田客員教授が、地震研究の現状やGPSによる津波観測などをテーマに行った。

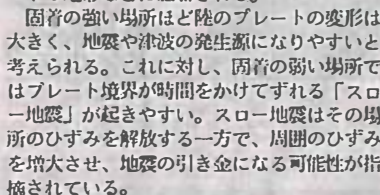
地震や津波について、専門家が
行った講演会(仁淀川町竹ノ谷)

地震予知について加藤教授は、詳しい地震活動の観測に基づいた明確な前兆現象の把握が必要とし、「現状では正確な科学的予知は難しい」と説明した。

また南海トラフ地震について「30年以内の発生確率が60〜70%で、発生パターンも多い。地震が起きた時にどう行動するか、今から対策を」と訴えた。

寺田客員教授はGPS観測の経緯を説明。仁淀川町への基地局開設について「津波被害を受けない」山間部の通信インフラなら多数の接続ルートを使える可能性がある。新たな防災拠点にしたい」と話した。

(吉川博之)



聞

県

知

高

2017年(平成29年)12月16日(土曜日)

移住研究者が津波授業 高知高专 寺田客員教授 仁淀川町の中学生に



【佐川】高知高专 寺田客員教授が、仁淀川町に移住した高知高专客員教授の寺田幸博さん(68)「写真左端」がこのほど、同町竹ノ谷の移住交流施設「山井小屋」で、市川、仁淀川中学校の生徒ら約50人を前に地震や津波について講義し、自然地震の発生メカニズムや、同町で行っている津波観測システムなどについて説明した。

高知高专創立システム(GPS)を使った津波観測に携わってきた寺田さんは、定年退職後に移住。新たに高知高专も組み合わせた津波観測のデータ集積拠点を移住施設に設け、研究を続けている。

講演会は、地域貢献を考えた寺田さんが町教委に持ち寄り、2白に開かれた。寺田さんは、海底変動で水が動く津波は、スピードが速く、エネルギーも大きく、なかなか収まらないことなどを紹介。「地震や津波に対する正しい知識を身に着けることの備えを」と訴えた。

市川中2年の竹崎海星さん(17)は「南海トラフ地震のことがよく分かった。しっかりと対策をして、生き延びたい」と話した。

(市田博之)

2018年(平成30年)3月5日(月曜日)

日経 18.3.5



観測には通信装置や太陽光パネルなどを取り付けたブイを使う(東京大学の加藤照之教授提供)

地震 海底の動きで解明

海洋機構や東大



音波を使いプレート(プレート)の動きを常時観測する

人工衛星

GPS衛星

①GPSでブイの位置を特定

ブイ

②音波で観測装置の位置を測定

観測装置

③データを地上へ

プレートの動き

海底への地震計や津波計などの設置は進んだが、地震変動を測る観測網の整備は予算不足を背景に遅れている。ブイは1カ所1億〜2億円かかるが、データを常時入手できる。

海底への地震計や津波計などの設置は進んだが、地震変動を測る観測網の整備は予算不足を背景に遅れている。ブイは1カ所1億〜2億円かかるが、データを常時入手できる。

7年前に起きた東日本大震災などの巨大地震は、海のプレートが陸のプレートの下に潜り込む境界で起こる。例えば南海トラフでは海のプレートが1年に約6センチずつ陸のプレートの下に沈み込んでいる。

境界にはプレート同士がくっつく「固着部」や、ゆっくりと滑って動く場所がある。滑るとひずみが解消されるが、周囲の固着部にはひずみがたまると地震が起きる。

地震変動の常時監視からプレートの動きが詳細に把握できれば、固着部やゆっくり滑る場所が分り、海溝型地震の詳しい仕組みの解明につながる。

ブイで常時観測

海洋機構の常時観測では、全地球測位システム(GPS)で位置を特定できるブイを海上に浮かべる。海底に音波を出す装置を複数点設置し、ブイと音波をやりとりして測量し、海底の動いた距離を測る。データは人工衛星を介して集める。

海洋機構はこれまでは、和歌山沖で約1年間の実証試験を3回行い、データの連続取得に成功している。実用化に向けて、ブイの固定方法や衝突物への対策などに課題があることも分かった。今後運用しやすいように改良する方針だ。

東京大学や名古屋大学、高知工業高等専門学校なども同様の手法の実証試験を高知県足摺岬沖で今春にも始める。ブイは津波の監視にも利用でき。まずは津波観測から始めて、その後プレートの動きの常時監視に使う。

東北大学などは日本海沿岸に20点設置した観測装置でプレートの動きを観測した。2012年から約4年間のデータをみると、陸のプレートが福島沖では東、宮城沖から岩手沖では西に動いていた。福島沖ではゆっくりとプレートが動いて、震災でたまっていたひずみを解消していた。宮城沖ではプレートの下にあるマントルが動く現象が起きていた。

青森沖ではほとんど動いていなかったが、その理由は分かっている。解明にはプレートの固着部などを詳細に調べる海底観測が必要だという。防災科学技術研究所の浦田優美特別研究員らは、海上保安庁が南海トラフ沖に置いた観測装置の動きから、プレートの固着の強さを計算した。把握した状況をもとに地震を再現する数値実験ができるようになった。震源の場所や動く範囲などを変えて約1000通りも再現できる。同研究所の香藤達彦主任研究員は「津波による浸水域域のシミュレーションなど、防災対策につながる」と強調する。

現状の海底観測は、東北大や名古屋大、海上保安庁などが日本海沿岸などに観測装置を設けた約60地点で実施している。だが、ブイの代わりには船が現地まで行かなくては測定できない。コストや手間がかかり、年1〜2回しか行けないため取得するデータは限られており、海溝型地震の研究には少ない。

ひずみ蓄積 詳細に分析

TYPE OF
INSTRUMENT[illegible]

NICT
先端研究

2013-13-34

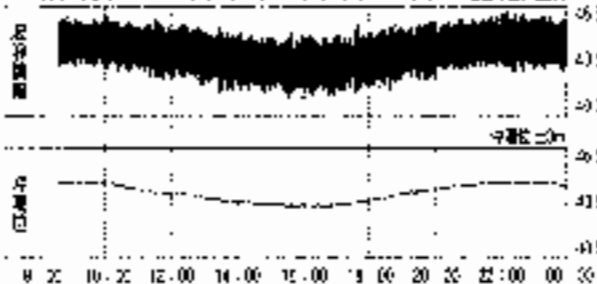
つはGPS使用できないため、津波の正犯者、高知工業高等専門学校より日立製のNICET距離計市販品を用いて、地況や地形通信網が破壊されていることである。船中とともにブイから振センタートに伝送したとき、消費電力の制限や、波の影響もあったが、一つの課題である津波の予測に関するGPS使用法のS-VWを用いた衛星実験を行った。

山本伸一

1977年4月、郵政省電報研究所(現NICT)入所。以降、郵政省V型、M型、型および型ETS衛星を用いた移動体衛星通信、衛星センサネットワークの研究に従事。



科学技術，大学

[illegible]

「一つ目の課題には新機軸で、出航直前にX国号を用いてアイの位置を特定した。GPS衛星の基（み）こみびき（こ）のLEDを、GPS衛星に送り、グーグルマップでその位置を特定した。」

「GPS衛星の基（み）こみびき（こ）のLEDを、GPS衛星に送り、グーグルマップでその位置を特定した。」

現在、ノビーで海底地殻変動と海一気象などの観測を行い、データを衛星通信によって収集し、地震や津波、豪雨などの災害の早期検出につながる研究を続けている。

ルオ・タリーの精密な理論位置を可能とした。これによって、この一書によるデータ検証と合致すること、図のA、Bをリアルタイムで収録でき、連続の早振検出に人まき前進する成果を得た。

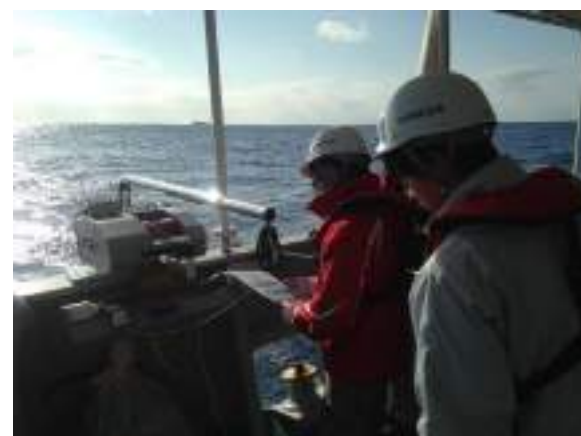
資料 3－6 写真

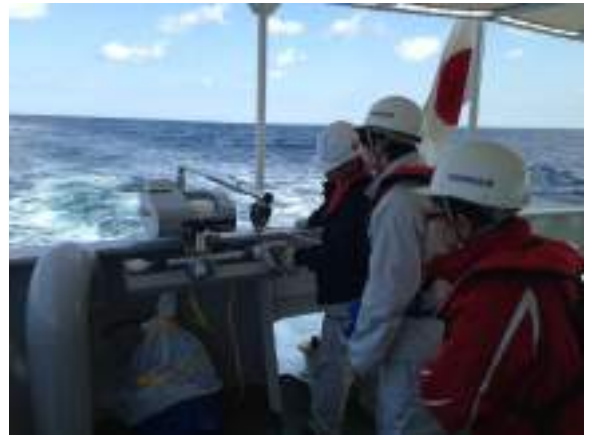
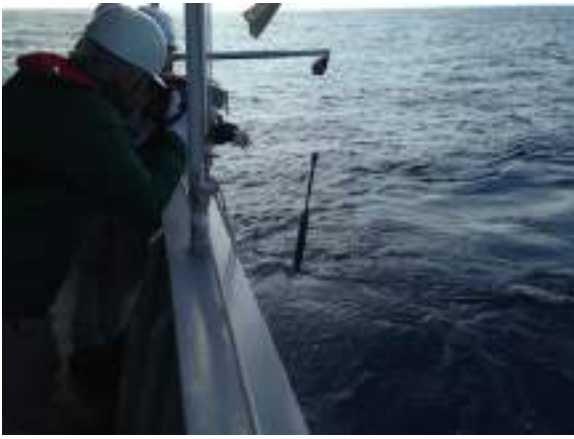
2016年8月23-24日 衛星通信実験



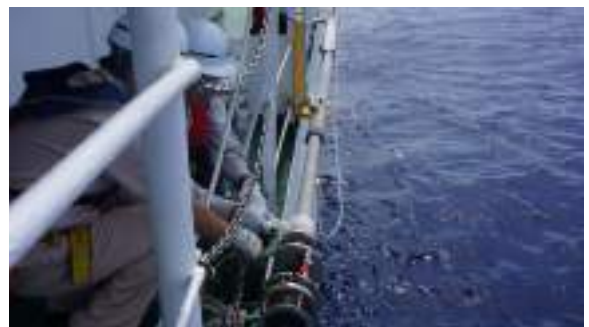


2017年2月7日 CTD観測





2017年6月5日 海底局設置





2019年10月4日 MADOCA受信実験



