



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

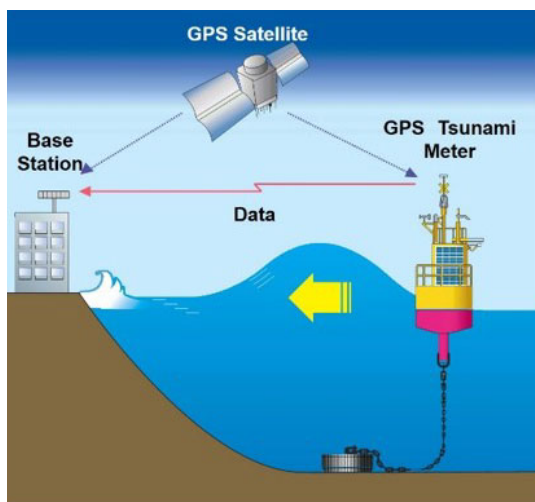


図1 GNSSブイの概念図. GPS衛星からのデータをブイと地上局で受信し、ブイの地上局に対する相対位置を推定する。

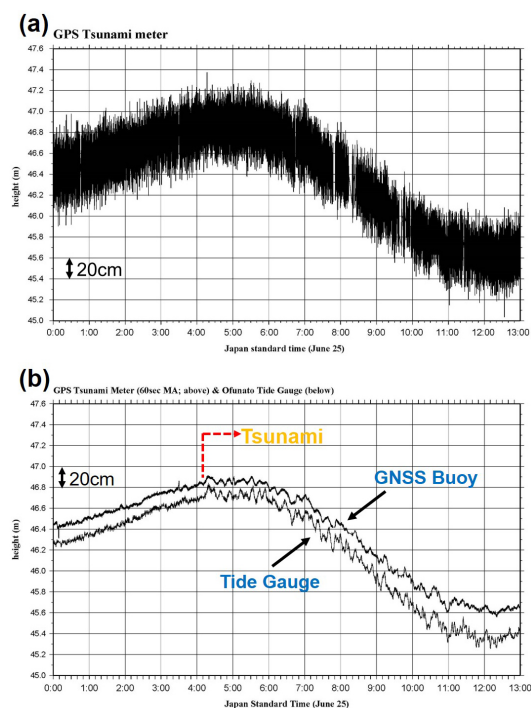


図2 大船渡沖実験で得られたはじめての津波記録. (a) 一秒サンプリングによる原記録, (b) 原記録に60秒の移動平均を操作したグラフ (上) と近傍の大船渡検潮所で得られた記録。

湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の次世代機として2008年頃より三陸沿岸を手始めとして全国に展開された。この観測網は波浪の監視を目的としていることからGPS波浪計と命名されたが、津波も監視の対象に入れられている。また、気象庁でも津波監視の対象として同年より用いられている。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、気象庁から地震直後に宮城沖6m、岩手沖3mの津波警報が出されたものの、NOWPHASの岩手沖観測点等から3mを超える津波が観測されたことから、警報が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

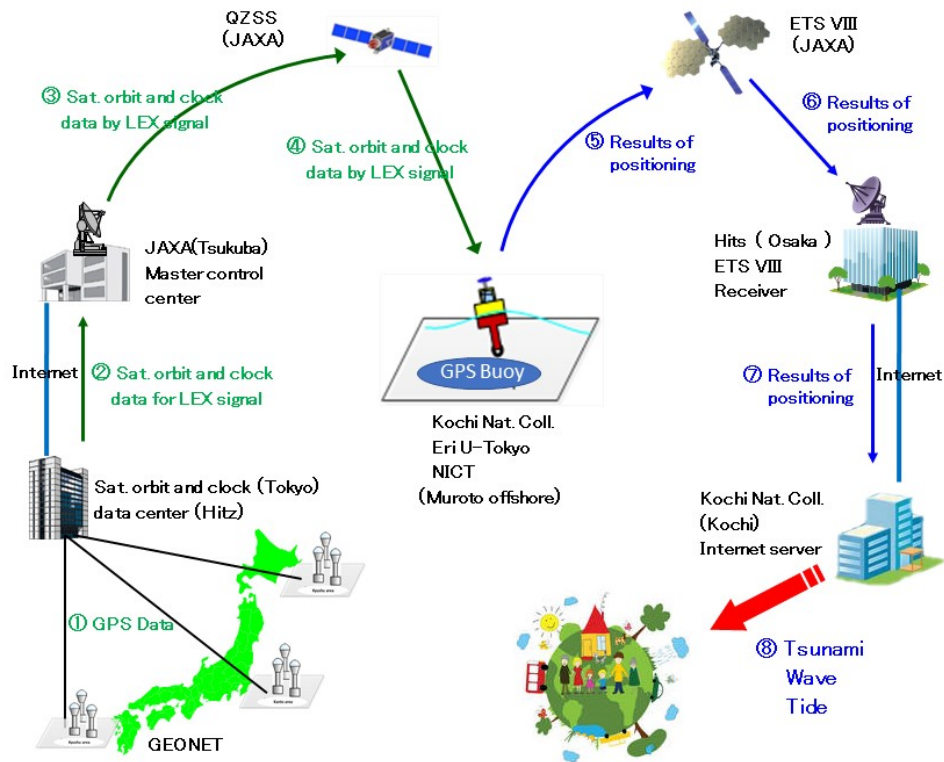


図3 QZSSとETS-VIIIの2つの衛星を用いた実験のデータの流れ。

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ことが必要になってくる。幸い、開発を始めた時点では JAXA が打ち上げた ETS-VIII という試験衛星が使えることが判明したため、JAXA の協力も得ることとした。ブイという揺れが大きくなることが想定されるような場合の衛星通信がどこまで可能かを検証する必要があるが、これも考慮に入れた計画を作ることとなった。

3. 新たな手法を取り入れた実験（2013～2015年）

これらの方式を取り入れた計測実験を 2013～

2014 年に実施した。ここでは、ブイは自前のものではなく、高知県が土佐湾で行っている多数のブイを漁礁に見立てて漁を行う、黒潮牧場と呼ばれるプロジェクトのブイを借用することとした。いくつかあるブイのうち、室戸沖約 35 km のところにある黒潮牧場 16 号ブイを借用することとした。このブイ上に GNSS のアンテナ / 受信機セット及び PPP-AR の解析を行う計算機、及び衛星通信用の送受信装置などを設置した。また、継続的観測を行うため、太陽光発電用のパネル及び蓄電池も設置した。

全体システムを図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

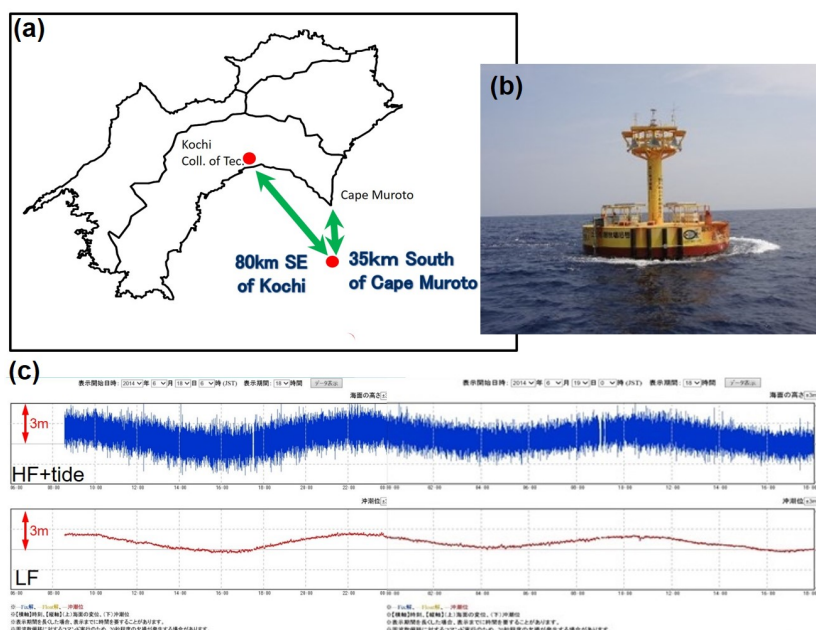


図4 (a) 室戸沖実験のブイ及び地上局 (高知高専) の位置, (b) 黒潮牧場 16 号ブイ, (c) 実験で得られた記録: (上) 短周期データ, (下) 長周期データ.

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。

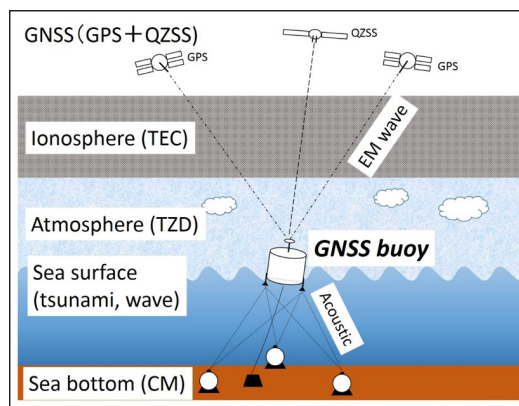


図5 GNSSブイを用いた総合防災システムの概念図。

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

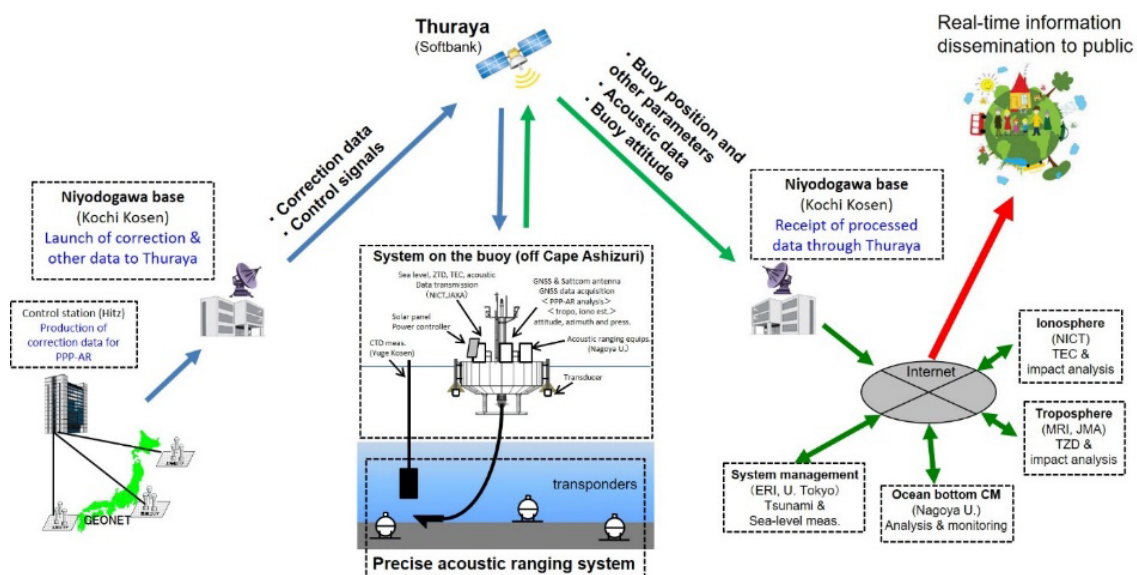


図6 2016-2020 実験で用いられたシステムとデータの流れ。衛星にはThurayaを利用。ブイにはGNSSのほか、衛星通信及び海底地殻変動観測用機材を搭載。ブイにトランスデューサ、海底にトランスポンダーを設置。ブイ周辺でCTD観測を実施する。

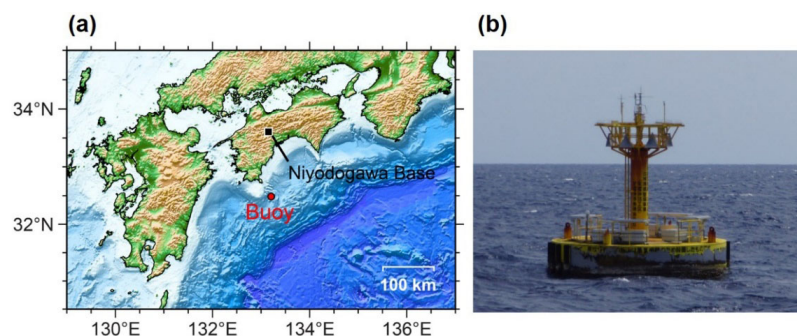


図7 (a) 2016-2020 実験におけるブイ(足摺岬沖)と地上局(仁淀川)の位置, (b) 海洋牧場18号ブイ。

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で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

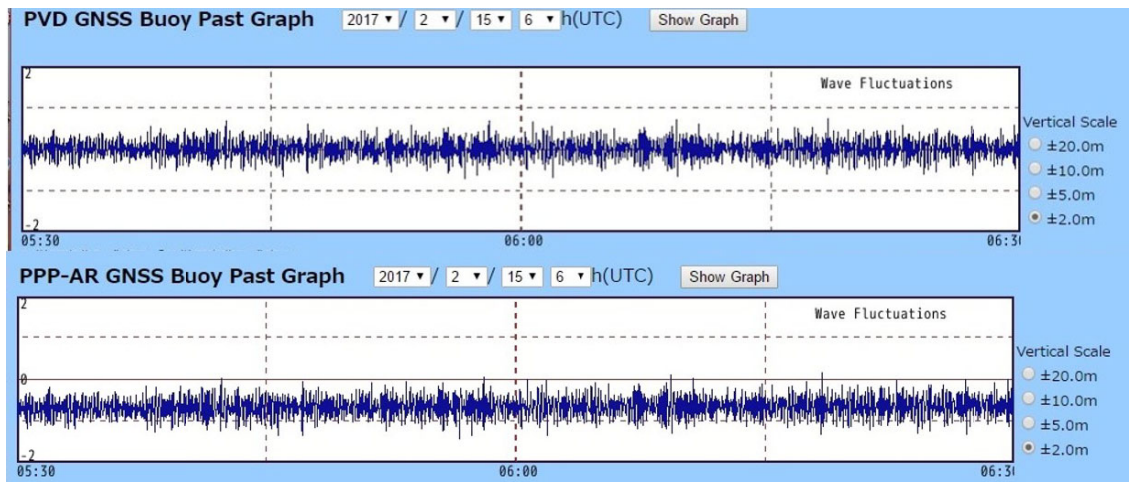


図8 2016-2020 実験で得られた記録の一例. (上) PVD, (下) PPP-ARによる解析結果.

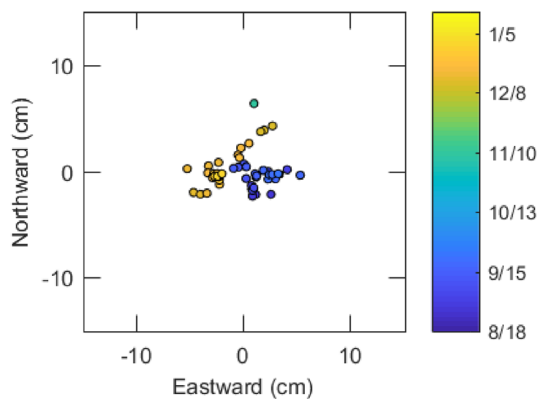


図9 2020年8月~2021年1月に得られた海底地殻変動連続観測による海底トランスポンダーアレイの重心の水平位置変化.

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

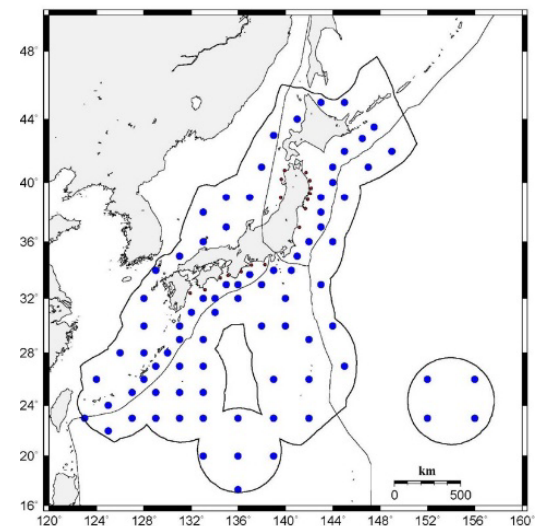


図10 西太平洋地域に展開したGNSSブイアレイの仮想図. 曲線は日本の排他的経済水域を示す. 点は任意の位置にプロット.

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.

