

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。



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。

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。

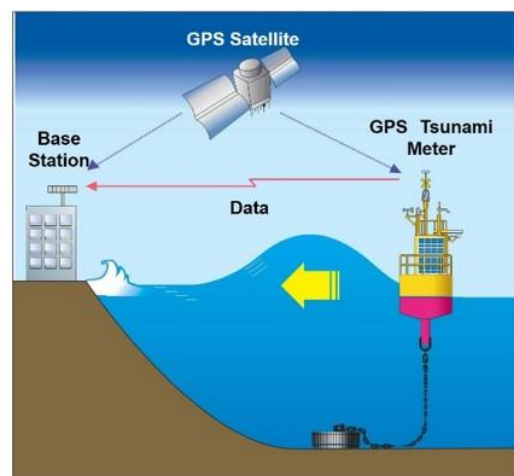


図-2 : GPS 津波計の概念図。

4機以上の衛星からの距離がわかるとアンテナの中心位置の緯度、経度、高さと時刻が算出される。地上セグメント（アンテナと受信機）は、測量機器として基本的な位置情報を算出するものから、地図データと組み合わせて自動車に搭載するカーナビやスマホに搭載している地図アプリや位置を使うゲームソフトなど、広い分野で用いられている。

GPS の受信システムを海岸から離れた沖合の海洋に浮かべたブイに搭載してその位置を精密に計測することにより海面高の変化を監視することができる。もし津波が発生してブイを通過すれば、津波が海岸に到達する前に検知することができるだろう（図-2）。このようなアイデアを実現しようと1996年頃から“GPS 津波計”の開発をはじめた。私個人ではアイデアはあっても実際に実験を行うのは大変である。幸い日立造船株式会社という大手企業が協力を申し出てくださいだったので、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



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ピラーの上に水平に GPS アンテナが装着されている。斜めに取り付けられているのは無線通信用のアンテナ。

込み、観測所に置かれた同じ GPS 受信装置を基準としたブイの相対位置をモニターすることに成功した。このように、地上に置かれた観測点を基準として動く物体の動きを測定する方法を即時キネマティック方式（Real-time kinematic）と呼ぶ。この方式で海面高の変化が数 cm 程度の精度で測定することが可能であるが、これは陸の基地局との間の相対的な位置を計測することで測位の誤差原因となる GPS 衛星からの電磁波が通ってくる電離層や大気の影響を差し引くことで誤差を低減できるからである。一方、そのため、基地局とブイが遠く離れてしまうと電磁波の伝搬経路が離れてしまって差し引く効果が薄れてしまい精度よく測位をすることができなくなる。そのため、この方式では数 cm という高精度で測位するためにはブイと基地局の距離は 20 km 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。

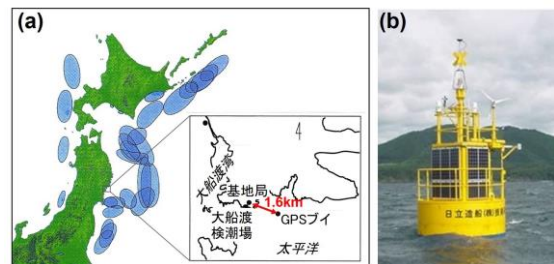


図-4：大船渡に設置された GPS 津波計。(a) 設置場所を示す。青い楕円は東北日本周辺の大地震の震源域を示す²⁾。(b) ブイの写真。ブイで取得されたデータは無線により遠方に見える陸上に設置された基地局で受信される。

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1.6km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津波計を設置しここでは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。

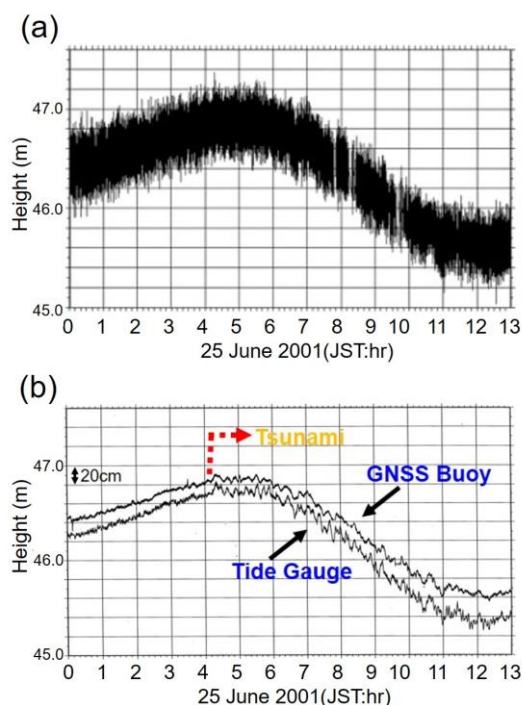


図-5：2000年6月24日に取得されたペルー地震による津波。(a)原データ。風波が卓越して津波は判別できない。(b)上側の波形は(a)の波形にローパスフィルターを作用させたもの。下側の波形は大船渡検潮場の記録。いずれも10cm程度の小さい振幅の津波波形が見て取れる。

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6 m、岩手3 m”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6 m 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10 m 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10 m 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

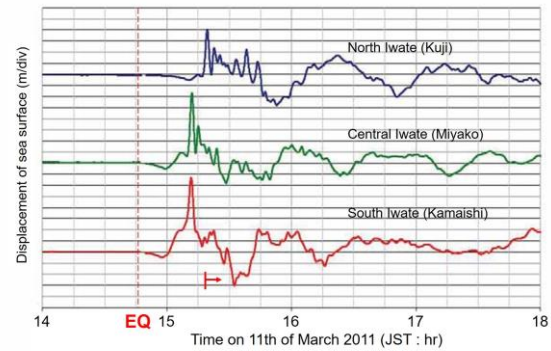


図-6 : 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に発生した津波のGPS波浪計による記録。上から岩手北部(久慈)、岩手中部(宮古)、岩手南部(釜石)。EQが地震発生時刻、15時18分頃の矢印はおよその津波の沿岸への到来時刻を示す。縦軸は一目盛りが1 m。

近すぎたことによると考えることもできるだろう。当時使われていた技術が陸上の基地局とブイの距離が20 km 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20 km 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の名称であるが、安全保障の

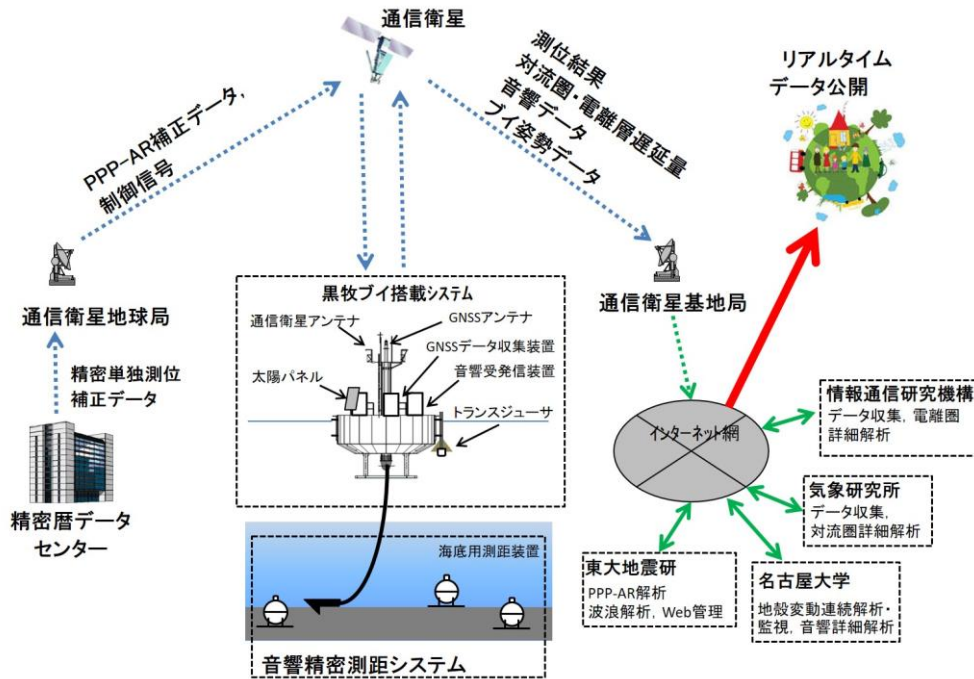


図-7：新しく開発した遠洋用GNSSブイシステム。

観点からロシアや中国、ヨーロッパ (EU) などがそれぞれで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を音響を使って測位するための装置も装着されている。GNSS では衛星から受信装置までの距離を電磁波を用いて計測するのであるが、電磁波は水中を伝わることができないため、音波を使ってブイと海底におかれた音波の送受波装置の間の距離を計測し、海底の位置を推定するのである。海底の位置計測は名古屋大学の研究者が担当している。さらには得られた GNSS のデータを用いることで大気中の水蒸気量や電離層の電子数なども推定することができるため、気象学や電離層研究な

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⁾。

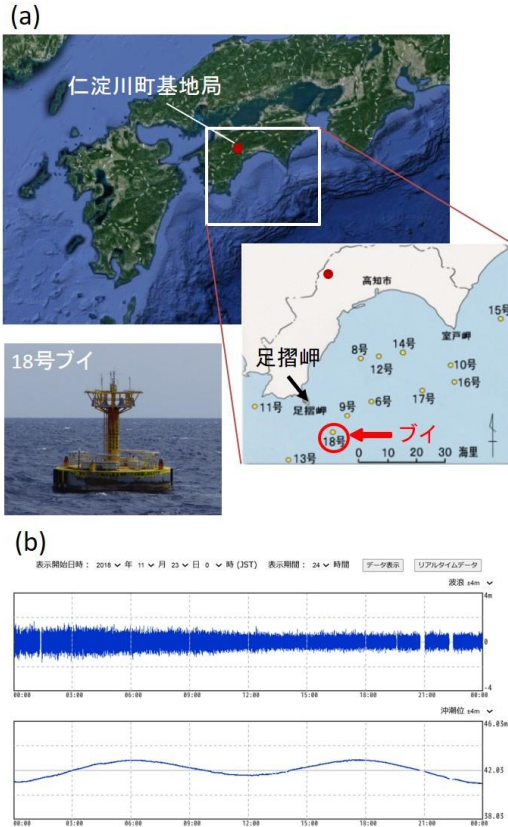


図8 : (a)GNSS ブイの位置と仁淀川町に設置された基地局の位置を示す。左下は実験に用いられた高知県海洋牧場 No. 18号ブイの写真。(b)取得されたデータの Web 上の記録。2018年11月23日24時間のブイの上下変動データを示す。(上) 波浪を示す短周期データ、(下) 短周期データを除去したデータ。

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ブイは様々な災害の軽減に寄与することが期待されることから、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。ブイは高知県の足摺岬沖約40kmのところ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。

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.