

# GPS 津波計測ブイシステム

## GPS を搭載した海洋ブイによる津波早期検出システム

神崎 政之・松下 泰弘

東日本大震災は、東北地方の太平洋沿岸部に未曾有の災害、特に大津波により甚大な被害をもたらした。この大震災を踏まえ、国土交通省では国民の暮らしや産業・経済活動の被害をできるだけ軽減する事を目指し、新規施策と政策の見直しを行うことを発表した。大規模災害の予防対策として、総合的な津波対策を推進する目的から、沖合津波観測体制の強化等による津波警報の精度向上・発表内容の改善を図ることが挙げられている。

本稿では、海洋ブイを利用した GPS 津波計による津波観測の現状と高度化に向けた開発内容について述べる。

キーワード：地震, 津波, 防災, 減災, 警報, GPS, RTK, ブイ

### 1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、日本の観測史上最大のマグニチュード 9.0 を記録した東北地方太平洋沖地震と、海洋プレートの大きな変動に伴って発生した 10 m を超える巨大津波によって東北地方の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。津波警報等には緊急地震速報システムが活用されているが、地上に設置された地震計（加速度計）が想定を超える大きな地震によって振切れたため正確な測定ができない状態となり、その結果として地震規模が過小評価され、岩手県・福島県両沿岸に到達する津波の高さをそれぞれ 6 m と 3 m と実際と比較して大きく下回る予測をした。地震の発生から 24 分後に岩手県釜石市沖 20 km に設置された GPS 波浪計が 3 m を超える波

高を観測したことから、気象庁では沿岸部に到達する津波の高さをそれぞれ 10 m と 6 m に切替えて発表した。この津波警報の精度向上に大きく貢献した GPS 波浪計とは、東京大学地震研究所他との共同研究「GPS 津波計」の成果を発展させて、津波波高だけでなく港湾整備に必要な沖合の波浪情報（波浪や潮位）を海洋ブイに搭載した GPS 受信機を用いて計測するものであり、国土交通省港湾局により整備が進められている。

### 2. GPS 津波計測ブイシステムの基本機能

GPS 津波計測ブイシステムのコンセプトは、津波を沿岸への到達より先に検知し住民に知らせることに伴って、津波被害の軽減に役立てることである。システムの概念図を図 1 に示す。沖合に係留した海洋

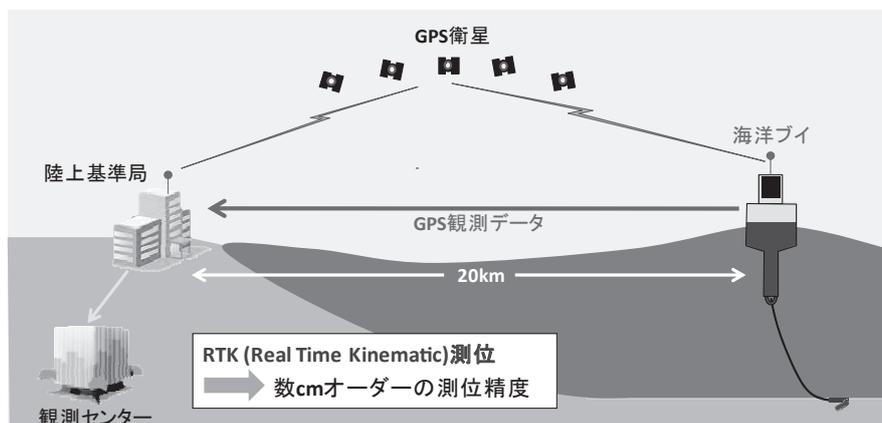


図1 システム概念図

ブイに GPS 受信機と通信機器を搭載して、陸上基準局との間を RTK (リアルタイムキネマティック) 測位方式により海面の変動を cm レベルの精度でリアルタイム計測する。計測結果は観測センターに常時転送され、通常の風波と津波を弁別するために、フィルター処理を施した結果と共にホームページ上に判り易くグラフ化して一般公開する。

### 3. 基礎機能実験

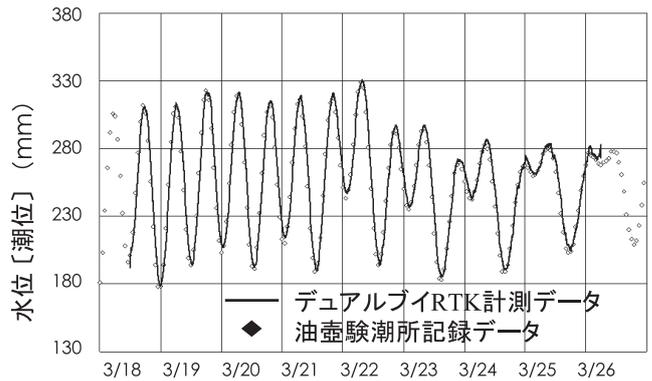
平成 8 年に東京大学地震研究所と共に GPS 津波計の開発を開始し、翌年 1 月に小網代湾にてプロトタイプブイ (写真—1) による実験を実施した。平成 10 年には相模湾沖約 900 m の位置にデュアルブイ (写真—2) を設置して 10 日間連続した計測を行った。この実験では、アンテナ位置を 1 秒のサンプリングで RTK 測位を行い、鉛直方向成分の変位を海洋ブイの上下動としてその時系列変化をリアルタイムに表示した。得られた結果を実験海域近くにある油壺験潮所の潮汐データと比較したグラフを図—2 に示す。験潮所の計測データは毎正時、海洋ブイの上下動データは



写真—1 小網代湾実験プロトタイプブイ



写真—2 デュアルブイ



図—2 デュアルブイで計測した潮汐データと験潮所記録との比較

毎秒のデータであることから、風波成分を除去して潮汐データを得るためにローパスフィルターとして鉛直方向成分に 9 秒の移動平均をかけた値をプロットしている。実験期間中の毎正時 169 回の潮汐値を比較した結果、両計測値の最大差が 5.2 mm、標準偏差は 2.0 mm であった。この結果から、本システムは秒単位の周期を持つ風波から日単位の周期の潮汐までの広い周波数領域に対応できる海面変位計として機能することを確認した<sup>1)</sup>。

### 4. 実海域における実用化実験

相模湾での基礎機能実験において本システムが海面変動の検出に有効であることを確認したことから、沖合展開可能な GPS 津波計測ブイシステムとして必要不可欠な海面変位への追随性の良い海洋ブイと係留設備を設計施工し、風波と津波の弁別アルゴリズム、システムに負荷の少ない測位システムの検証及び市民へのデータ公開を行う防災システム等を開発課題として、平成 11 年より大船渡市にて実用化に向けた応用実験を行った。大船渡沖約 2 km の位置に実用型ブイ (写真—3) を設置して 3 年間連続した計測を行った。海洋ブイ本体の径は 2.8 m、高さは 10 m である。海



写真—3 実用型ブイ

洋ブイで受信した GPS データ（疑似距離・搬送波位相 等全ての情報）は、429 MHz 帯の特定小電力無線を用いて陸上基準局に伝送し、同じく陸上基準局で受信した GPS データと併せて RTK 測位を行ない、毎秒得られる測位結果（時刻・緯度・経度・波高）は 3.4 KHz のアナログ専用電話回線 2 系統で大船渡市役所総務課防災部門と大船渡市消防署指令室に送信し、各関係機関でリアルタイムに監視できるようにした。また、ISDN 回線を使用してインターネットサーバに転送しホームページで一般公開した。図-3 に表示例を示す。図中の上部に海洋ブイで計測された波高を

1 秒ごとに 1 時間分表示し、短周期の波浪成分と長周期の津波成分に分離して表示している。下部左側には、海洋ブイの水平の動きを示し、毎秒の位置をドットで表示している。最下部には 2 日分の波高を表示して、潮汐の動向を確認できるようにしている。実験期間中の平成 11 年 6 月 25 日にペルー沖地震による津波を、平成 13 年 9 月 26 日に十勝沖地震に伴って発生した津波をそれぞれ観測した。図-4 に十勝沖地震により発生した津波の波形を捉えたグラフを験潮所データと共に示す。

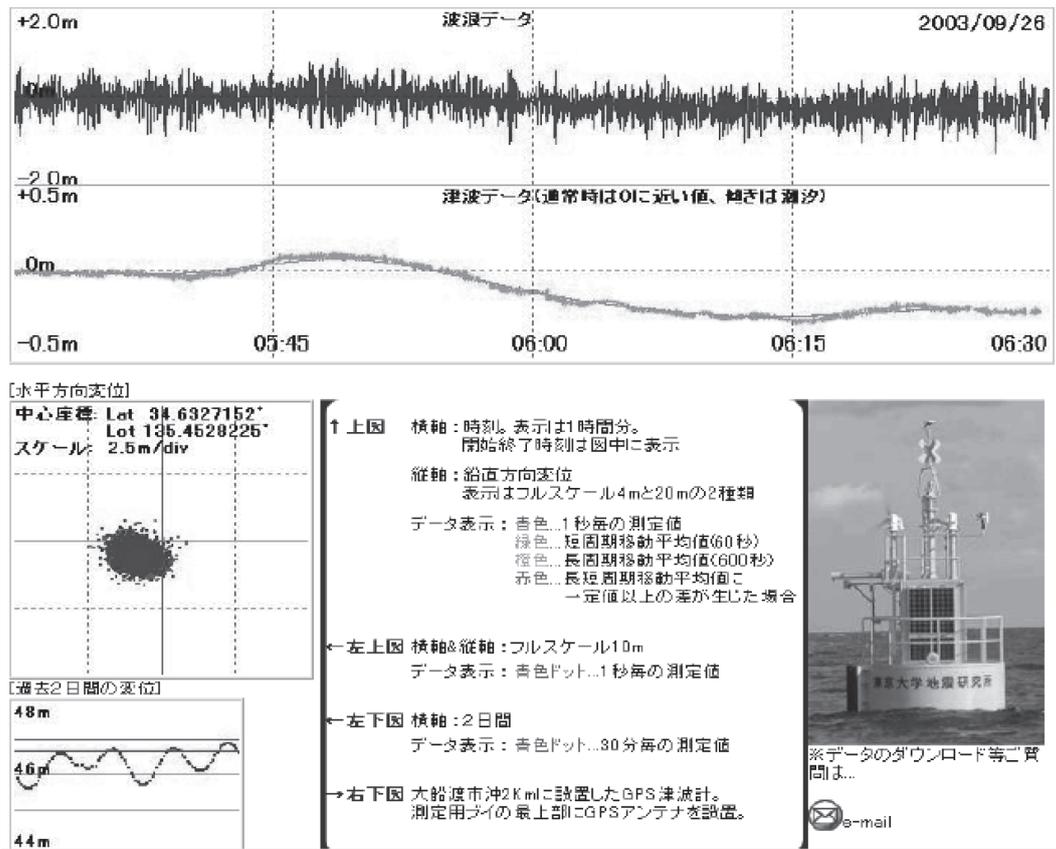


図-3 一般公開用ホームページ表示例

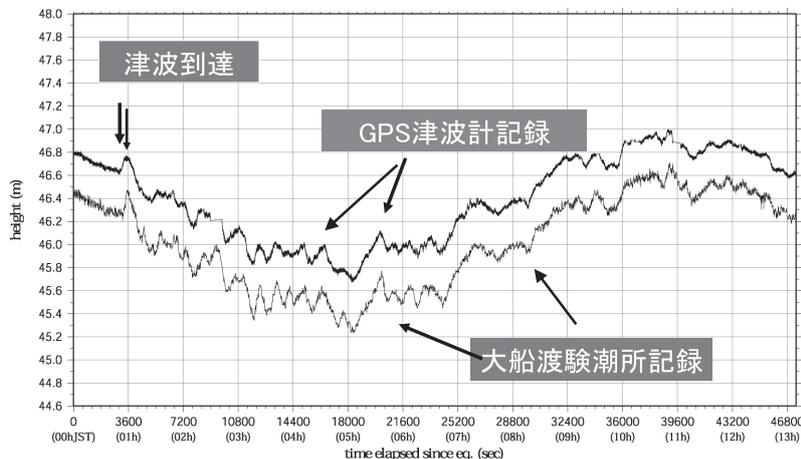


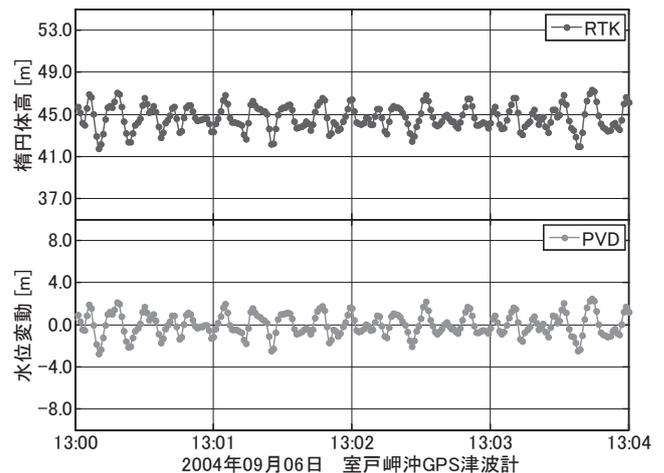
図-4 十勝沖地震津波観測データ

## 5. 大深水沖海域における実証実験

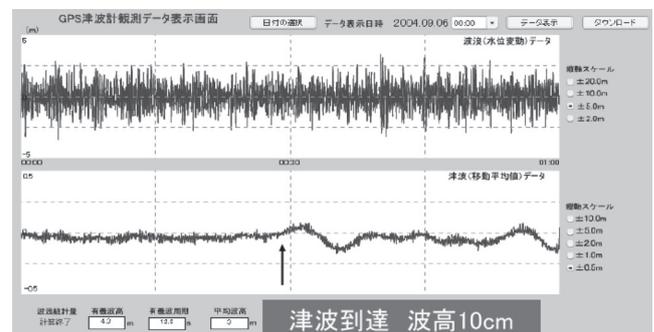
大船渡沖の実海域における実用化実験により、GPS津波計測システムは実際の津波を検知し、準リアルタイムに防災関係機関及び住民へ津波波形情報を伝達できることを実証した。この成果を受けて、平成14年から文部科学省産官学連携プロジェクトとして東京大学地震研究所・港湾空港技術研究所・人と防災未来センターと共に、新方式GPS計測法、海上・陸上のデータ伝送法、津波検出法、波浪データ解析法、津波伝播シミュレーション法を確立するとともに、リアルタイム常時データ公開方法及び自治体防災への活用方法を明らかにするべく開発を開始した。平成17年度より科学研究費補助金基礎研究事業として再編、研究者の組織変更等の理由により、高知工業高等専門学校及び東北大学大学院が本開発に参加している。

### (1) 室戸岬南方沖 GPS 津波計による実証実験

平成16年には大船渡沖にて連続観測を行ってきた海洋ブイを撤収し、新たに高知県室戸岬南方沖約13 kmの位置にGPS津波計を設置して3年間の実証実験を行った。海洋ブイ本体の径は3.4 m、高さは16 mと大船渡沖の海洋ブイからさらに大型化した。10 kmを超える距離におけるRTK測位の安定性を確認するとともに、さらに外洋へ設置することを考えて、設置位置（陸上からの距離）に依存しない新しいGPS測位法としてPVD法の開発と実証を行った。PVD法とは、陸上基準点のGPSデータを必要とせず、海洋ブイに搭載したGPS受信機単独で変動のみを検出する方式である。この方式では、大容量データ伝送のための無線装置や、高価な二周波受信機も必要としないため、沖合での波浪計測には最適な手法である。ただし、搬送波位相の短周期変動成分のみを計測することから、周期が30秒以下の波浪の観測に適用できるが、周期が数十分を超える津波の観測には適用できない。図一5に室戸岬沖GPS津波計にて計測されたRTKとPVDの波高データの比較結果を示す。実験期間中の平成16年9月5日に発生した紀伊半島沖地震による津波をリアルタイムに観測した。この津波は海洋ブイに到達した時点で10 cmという非常に微小な津波ではあったが、潮汐・波浪と弁別するためのフィルターを施すことにより、図一6の通り津波と認識できる結果を得た。併せて、GPS津波計の波高と験潮儀、シミュレーションとを比較を行ったところ、津波波高シミュレーション結果とGPS津波計の計測結



図一5 RTK法とPVD法による波高データの比較



図一6 紀伊半島沖地震津波観測データ

果が良く一致していることを確認した。これは、験潮儀では浅海域での複雑な海底地形の変化や、験潮儀近辺での反射波などの影響により、シミュレーションでは考慮しきれない波の変化が発生したものと考えられる。一方、GPS津波計は外洋上での計測であるため、これら複雑な変化の影響を受けないことから、津波シミュレーションの検証や改訂に役立つことを確認した。

### (2) 室戸岬西方沖 GPS 津波計による実証実験

平成18年3月に室戸岬南方沖に設置したGPS津波計に大型フェリー船が衝突したため、実証実験は一時中断をせざるを得なくなった。平成20年4月に室戸岬西方沖に再設置して実証実験を再開した。再設置した海洋ブイの外観と諸元を図一7に示す。設置位置を室戸岬西方沖に変更したのは、南方沖は船舶の往来が頻繁な航路であることから、衝突を回避するためである。離岸距離は前と同じく約13 kmとして、室戸岬に設置した陸上基準局の他、南国市にある高知工業高等専門学校にも長距離試験用の陸上基準点を新設した。新しい長距離対応のRTK測位法や、準天頂衛星に対応したマルチGNSS対応受信機の試験等、沖合展開に向けての事前試験を実施した。また、GPS津

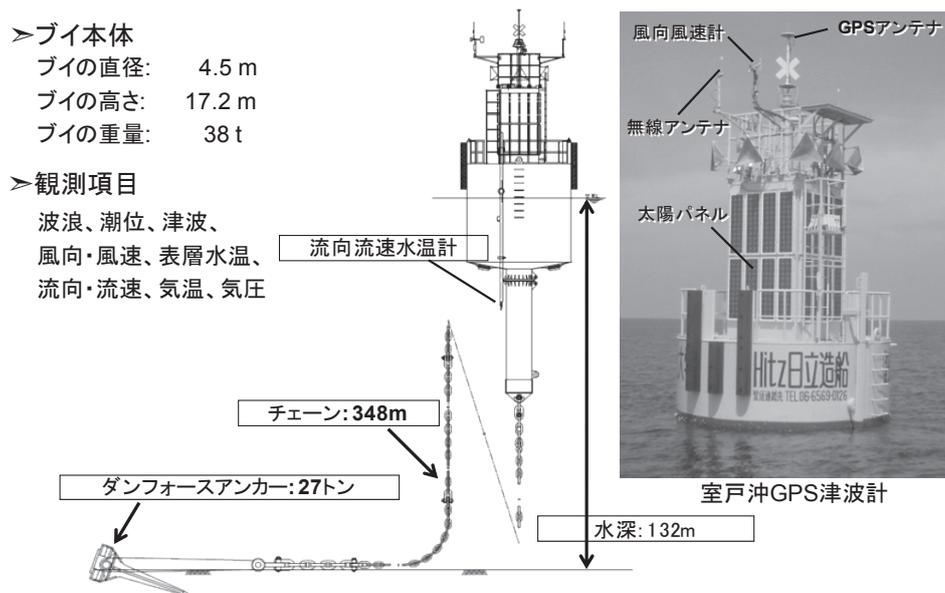


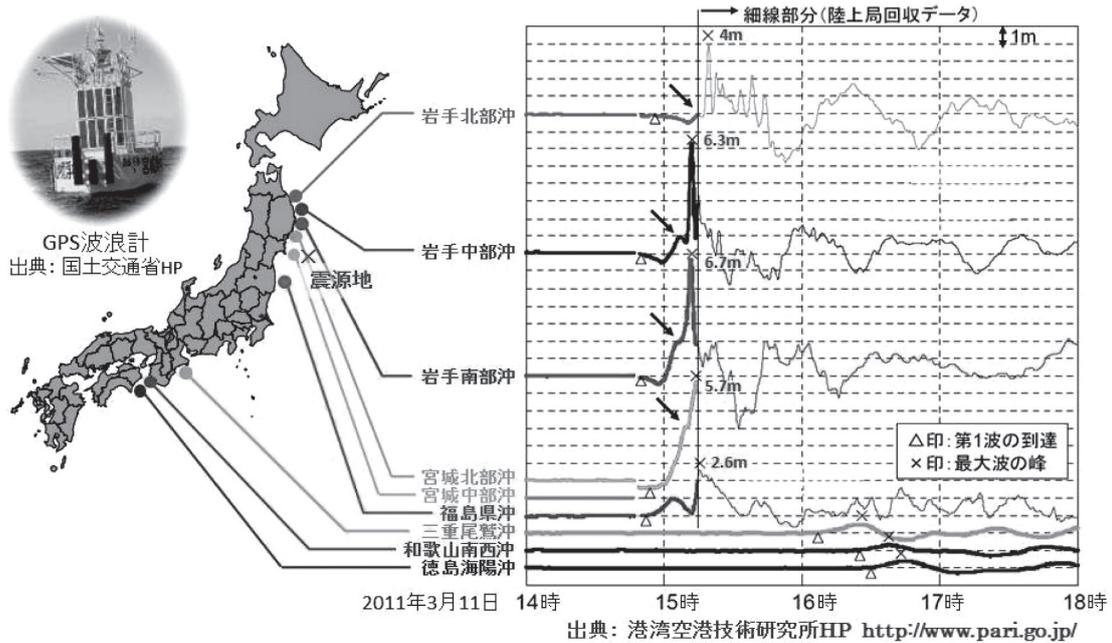
図-7 室戸岬沖 GPS 津波計概要

波計は海洋上で観測した GPS データを陸上まで伝送していることから、このデータを大気監視に利用する試みも行われた。GPS 衛星と海洋ブイの間に存在する大気（電離層・対流圏）の状態に関しては GPS 観測の誤差として扱ってきたが、海洋ブイの三次元位置が正確に判明する事から、これらの誤差から海洋上での大気の状態が正確に計測できると考えられた。気象研究所と情報通信研究機構により海洋ブイで観測された GPS データを地上基準点と統合して解析を行ったところ、気象予測の改善や電離層擾乱状態の広範囲な観測に利用可能であることを確認した。本開発は平成 25 年度まで継続するが、設置した海洋ブイが設計耐用年数を越えたため平成 23 年 11 月に撤収した。現在は、更なる沖合展開に向けて高知県が所有する大型の海洋ブイ「土佐黒潮牧場 16 号浮魚礁」をプラットフォームとして新たな実証実験を進めている。この海洋ブイは室戸岬東方沖約 41km に設置されており、現有の陸上基準局の設定等を変更するのみで継続利用が可能である。

## 6. 東日本大震災における巨大津波の観測結果

平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、その地震による巨大津波は各研究機関により沖合に展開されている各種の津波計により観測された。最初に釜石市沖の 2 箇所に設置された海底ケーブル式圧力計（東京大学・東北大学）で波形が観測され、釧路沖の 2 箇所に設置された海底ケーブル式圧力計（海洋研究開発機構）でも津波波形が観測された。そして岩

手県・宮城県・福島県から沿岸に約 20 km 離れた 4 箇所に設置された GPS 波浪計でも津波波形が観測された。いくつかの津波計で観測された津波波形には、長周期の津波に短周期の津波が乗った特徴的な波形を捉えていた<sup>2)</sup>。先に述べたように GPS 波浪計とは、国土交通省港湾局が港湾設備管理に必要な波浪観測を目的として整備している沖合波浪観測ブイであり、その観測データは全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)を通じて広く公開している。GPS 波浪計の詳細については、本誌 2009 年 9 月号に国土交通省港湾局により寄稿された「GPS 波浪計による沖合波浪の観測」に記載されているので参考にされたい<sup>3)</sup>。港湾空港技術研究所がまとめられた、太平洋沿岸に設置した GPS 波浪計で観測された津波波形を図-8 に示す。図中で太い線で示す波形はリアルタイムで計測され、陸上基準局から地上回線で観測センター等へ配信された情報である。細い線で示す波形は、地震によって地上回線が壊滅的な被害を受けたため、陸上基準局から外部へ配信する事ができなかった情報であり、震災後に陸上基準局の装置から取得したものである。津波警報の予測到達波高を変更するきっかけとなったのは岩手県南部沖 GPS 波浪計で計測された情報であるが、地上通信回線が不通となってからは、有意な波高情報を配信する事ができず、最終的に第 7 波まで観測された津波波高情報を津波警報の継続的な発表や津波警報の解除に活かすことができなかった。GPS 波浪計で計測された津波による波高の計測は、世界で初めてリアルタイムに直接波形を記録したものであり、発災時における津波警報の訂正だけでなく、今後の減災研究



図一八 太平洋沿岸に設置された GPS 波浪計で観測された津波波形

や地球物理学，津波研究に大いに役立つものと期待されている。

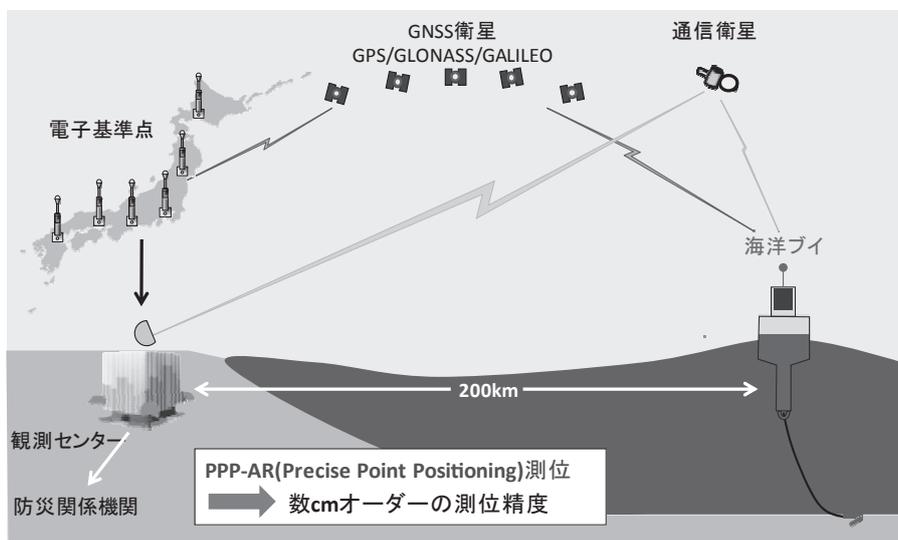
### 7. GPS 津波計測システムの高高度化に向けた開発

東日本大震災では，GPS 波浪計によってリアルタイムに沖合 20 km における津波の波高観測ができたこと，そしてその情報を気象庁へ配信されたことによって，津波が沿岸に到達する約 10 分前に津波警報を改訂することができた。このことから，GPS 津波計測システムの初期の目的を達成できたと言える。しかしながら，巨大津波の被害から逃れるために

は 10 分という時間の猶予は短すぎることから，更なる沖合への展開に向けた研究開発が求められる。安全に避難が可能な時期に津波早期警報が発表できることを目標として，200 km 程度の沖合に海洋ブイを設置するために必要となる開発課題と現在の状況について述べる。高度化された GPS 津波計測システムの概念図を図一 9 に示す。

#### (1) 沿岸からの距離に制限のない安定した測位

津波検知が可能な測位法として RTK 方式を採用しているが，陸上基準局と海洋ブイとの距離が 20 km を超えると安定した測位が不可能である。予測のつかない津波災害に対応するためには，99%以上の可用率



図一 九 高度化された GPS 津波計測システム

を求められるため、陸上基準局からの距離制限のない安定した測位方式を開発する必要がある。また、東日本大震災では、陸上基準局の位置も広範囲・大規模な地殻変動により変化したため、正確な海洋ブイの位置計測に支障をきたした。これらのことから、現在 RTK に代わる新しい測位法である PPP-AR（精密単独測位方式）の採用を目指して技術開発と検証を行っている。この方式では、陸上基準局での GPS データ観測は不要となる代わりに、国土院が運用している全国 GNSS 連続観測システムのデータを利用して、GPS 衛星の軌道と時計、そして搬送波測位に必要な補正情報を生成して伝送する必要がある。現在 1,000 km 程度の距離における測位試験では、RTK と同等な測位精度を確認しているが、気象・海象の環境に依らずに安定した測位ができること、そして GPS だけでなく GNSS（GPS・GLONASS・GALILEO 等の衛星測位システム）に対応して信頼性を確保できるように、更なる開発と検証を実施する。

## (2) 遠距離データ通信

沿岸からの距離に制限のない測位法が実現した場合においても、新しい測位法に必要な補正情報を海洋ブイに伝送するか、海洋ブイで観測された GPS データを陸上にある観測センターに伝送する必要がある。現在使用している無線通信システムの制限は 50 km 程度であり、求められている 100 km 以上の離岸距離では使用が困難である。そこで、通信手段として考えられるのは衛星通信であるが、現在利用可能な衛星通信ではデータ伝送量の制限、アンテナの指向性や消費電力、そして高額な通信費用という種々の問題がある。データ伝送量の削減や GPS 津波計測ブイシステムの機能の削減（波高のみの伝送など単純化）等も検討し、技術試験衛星を利用した実験などを計画中である。将来的には、無指向性と低消費電力を実現した高速かつ低価格な衛星通信が実現した時点で対応することとなるが、現実的な対応として地上型無線を拡張して利用し、伝送データの一部に低帯域の衛星通信を組合せて沖合展開を図ることが必要である。

## 8. おわりに

平成 8 年に開発を開始した GPS 津波計測ブイシステムは、従来の加速度計測ブイ方式や、海底水圧計設置方式とは異なる新しい海面変位計測システムである。その基本機能として長周期成分（津波）の検出が可能であることはもとより、直接水面変動を計測するため、

波浪から高潮、潮汐にいたる広い周期の海面変動の計測が高精度で可能なことを数々の実海域での実証実験で検証した。現在整備の進む海底設置型地震計や津波計は、海底ケーブルを敷設できる広い範囲での設置が可能であるが、その原理から海中の温度や塩分濃度の補正に付加的な計測装置または長期的な観測に基づくモデルが必要であることなど、システムの設置や維持運用を総合的に考えると高価なものである。GPS 津波計測ブイシステムはこれらの計測方法に比べて沿岸から離れた沖合に海洋ブイを設置するだけで、津波の波高を直接計測できることから、津波の到達をいち早く検出できる安価なシステムと言える。更なる高度化や長年の実績に基づくシステム改良を継続して進め、日本独自の津波早期警報システムから、全世界で活用できる総合海洋観測システムとして展開を図っていく。

## 謝 辞

本研究開発は、現在科学研究費補助金基礎研究(21221007)の助成を受けて実施しているものである。東京大学地震研究所加藤照之教授には GPS 津波計のコンセプト確立から学術的な検証を、高知工業高等専門学校寺田幸博教授には、日立造船技術研究所在職中より本研究を主導的に推進いただいている。港湾空港技術研究所永田紀彦客員研究官他、科学研究費補助金基礎研究の各研究分担者及び連携研究者の皆様には謝意を表します。

JICMA

## 【参考文献】

- 1) 加藤照之, 寺田幸博, 松岡幸文, 高田美津雄, 実海域における GPS 波浪計・津波計の性能確認実験, 海洋開発論文集, 第 19 巻, 土木学会, P839-844, 2003 年 7 月.
- 2) 谷岡勇市郎, Aditya R. Gusman, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波解析結果から再検討する巨大津波の発生様式, 地震, (第 2 輯) 第 64 巻第 4 号, 日本地震学会, P265-270, 2012 年 6 月.
- 3) 小林孝, GPS 波浪計による沖合波浪の観測, 建設の施工企画, 特集: 防災, 安全・安心な社会基盤整備, 日本建設機械施工協会, P16-19, 2009 年 9 月.

## 【筆者紹介】

神崎 政之 (かんざき まさゆき)  
日立造船(株)  
機械・インフラ本部 衛星測位事業推進室  
首席技師



松下 泰弘 (まつした やすひろ)  
日立造船(株)  
機械・インフラ本部 鉄構ビジネスユニット  
海洋プロジェクト部  
部長

