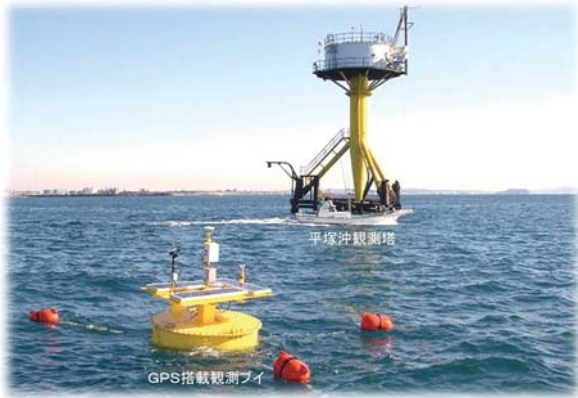


PVD 式波浪観測ユニット および沿岸浅海域観測システムの開発

Development of a PVD Wave Monitoring Unit and Small GPS Buoy for Coastal Areas



三宅 寿英 Toshihide Miyake ①
奥村 知樹 Tomoki Okumura ②
松下 泰弘 Yasuhiro Matsushita ②

あ ら ま し

海洋観測技術の1つとして、GPS 波浪計が実用化されている。これは高精度な衛星測位技術とブイを組み合わせて波浪や潮位などの海面変動を計測するシステムである。国土交通省港湾局は、2006年からGPS 波浪計の全国配備を進めており、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震にともなって発生した津波の計測にも成功した。当社では、より経済的で多様なニーズにも応えるため、沿岸浅海域の複数地点にブイを設置するネットワーク型津波防災システムを前提とし、安価で維持管理がしやすい小型GPSブイを開発した。また、既存の浮魚礁や灯浮標などへの装着も可能な波浪観測ユニットを開発した。この波浪観測ユニットには、周期が短い風波の観測に特化した独自のGPS測位技術であるPVD法が実装されている。

Abstract

GPS wave gauges are used as a part of modern ocean monitoring technology. They utilize a floating buoy with a GPS antenna attached on top of the buoy body as an observation instrument. They can measure waves and tide-level variations. GPS wave gauges have been installed offshore around the Japanese coast by The Ministry of Land, Infrastructure and Transport since 2006 and they succeeded in measuring the tsunami caused by the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake on March 11, 2011. In order to respond to various scientific needs and customer's requests for economical instruments, we developed a small GPS buoy. It is economical and easy to maintain and it will be used in a networked tsunami prevention system along coastal areas. We have also developed a PVD wave monitoring unit which can be easily installed on thousands of existing offshore facilities such as floating fish-breeding reefs or floating beacons. The PVD method is our proprietary GPS positioning method and it is used in this wave monitoring unit.

1. 緒 言

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震によって発生した津波は、東日本沿岸の広範囲に甚大な被害を及ぼした。高さ10mを超える防潮堤を安々と津波が乗り越えた地区もあり、人工構造物で被害を食い止める方策にも限界があることが、改めて浮き彫りとなった。また、地震や津波の発生予知に関して様々な研究開発がなされているが、これらの正確な予知は極めて困難であり、今回も事前に予知出来なかったばかりか、被害規模は三陸沖地震の想定を遥かに超えるものとなった。さらに、従来の気象庁の津波高さの予報値は、地

震の震源位置と規模からデータベース検索によって求めるものであり、3月11日の地震発生直後には実際の津波高さよりも小さめに予想されてしまった。

これらの教訓を踏まえると、津波の到来を沖合で一刻も早く検知し、実際の津波高さを正確に計測した上で、沿岸域の住民に「高さ何mの津波が何時何分に到達する」という的確な情報を知らせる事が出来れば、各自の避難意識を喚起することにも繋がり、人的被害を最小限に食い止められると考えられる。

当社では、GPSを用いた高精度な衛星測位技術と海洋ブイを組み合わせたGPS津波・波浪観測システムを実用化している。このシステムは、国土交通省港湾局が2006年から全国配備を進めているGPS波浪計にも活用されている。GPS波浪計は、2011年8月現在までに

① Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所 精密技術グループ

② Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 鉄鋼ビジネスユニット 海洋プロジェクト部

合計15基が設置されている。東北地方太平洋側の約20km沖合にも7基設置されており、今回の東北地方太平洋沖地震に伴う海面変動も、沿岸域に到達する9分以上前に観測に成功していた。GPS波浪計の観測データは、気象庁の津波警報にも活用されており、気象庁は3月11日14時49分に大津波警報を発表した後、同日15時14分にGPS波浪計による沖合での津波観測結果を受け、宮城県での津波予想高さを6mから10mに引き上げた。この津波高さの予想修正によって、GPS波浪計が人的被害の低減に少なからず貢献出来たと考えている。

当社では、国内外で高まっている津波防災へのニーズに応える為、従来のGPS津波・波浪観測システムの更なる沖合展開に向けた取り組みを行っている。一方で、GPS津波・波浪観測システムで培った技術を応用し、より経済的で多様なニーズに応えることを目指した海洋観測システムの開発も行なっている。

本稿では、GPS波浪計の実用化実績と、新たな海洋観測手法として開発した沿岸観測ブイおよび波浪観測ユニットについて報告する。沿岸観測ブイは、浅海域への設置を前提とした、より安価で維持管理がしやすい小型のブイである。波浪観測ユニットは、既存の灯浮標や浮魚礁に搭載することで波浪観測を可能とするもので、既に高知県浮魚礁（土佐黒潮牧場）2基に搭載されている。

2. GPS 波浪計の概要と実績

GPS津波・波浪計測システムは、海上に浮かべたブイの頂部にGPSアンテナを搭載し、RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) と呼ばれる測位法を用いて、海面変動によるブイの上下変位を数cmの精度で計測することにより、波浪や潮位を計測するシステムである¹⁾²⁾。風波など短周期成分の除去には適切な数値フィルタを利用し、潮汐などの長周期成分の除去には、海洋観測で用いられる調和解析技術を応用することにより、雑多混在した波形から潮位や津波をリアルタイムで抽出できる³⁾。GPS津波・波浪観測システムの概要を図1に示す。

現在も、高知県室戸岬から13km、水深132mの海域に実験用ブイが設置され、実証実験が行われている。室戸沖のブイで観測された波浪や潮位のリアルタイム波形は、インターネットのホームページで一般公開されている (<http://www.tsunamigps.com/>)。図2に室戸沖ブイの構造概要を示す。浮体部直径は4.5m、全高は17.2m、重量は38.2トンである。チェーンによる一点緩係留方式で設置されており、係留索全長は348m、アンカーにはダンフォース型アンカー 27トンが使用されている。室戸沖ブイでは、RTK-GPS測位による波浪・潮位観測だけでなく、気圧・気温、水温、風向・風速、流向・流速の観測も行っている。

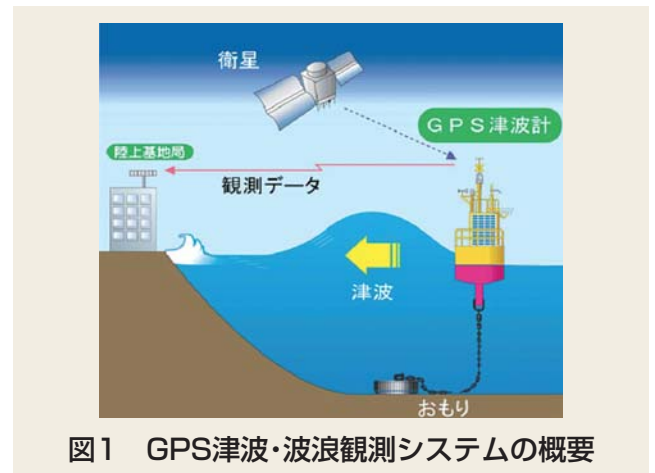


図1 GPS津波・波浪観測システムの概要

室戸沖ブイでの研究成果を活用し、国土交通省港湾局は、2006年度からGPS波浪計の全国配備を進めている。現在までに三陸沖および東海道沖を中心に、合計15基が設置されている。設置場所は沖合約20km、水深100～400mの海域となっており、RTK-GPS測位値などの観測データは無線通信により陸上まで送信されている。GPS波浪計での観測データは、国土交通省港湾局のホームページ「リアルタイムナウファス」で一般公開されている (<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)。また、12基のGPS波浪計が気象庁の津波観測地点として利用されている。

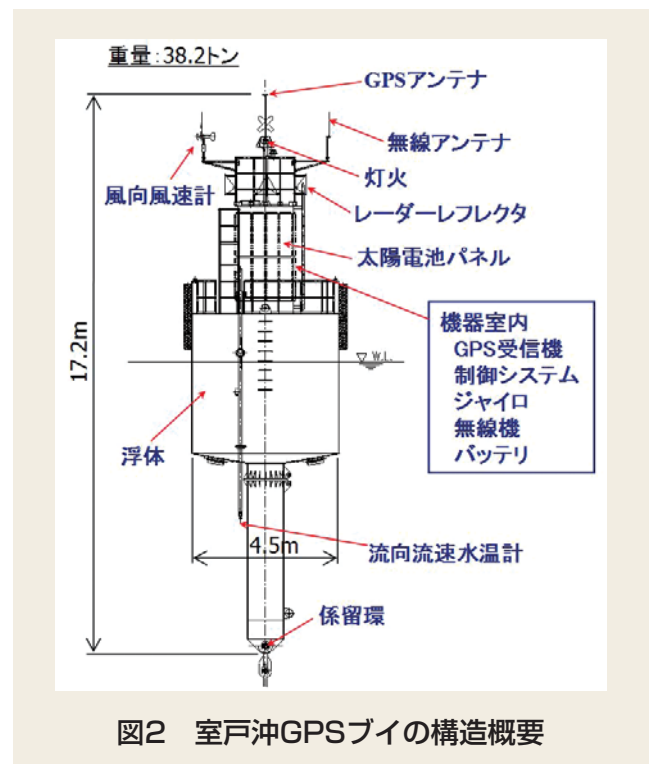


図2 室戸沖GPSブイの構造概要

東北地方太平洋沖地震によって発生した津波はGPS波浪計でも観測されており、これらの観測データは独立行政法人港湾空港技術研究所のホームページに公開されている (<http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/>)。特に、岩手県南部沖（釜石沖）のGPS波浪計は、沖合約20km、水深204m地点に設置されているが、15時12

分頃に最大高さ約6.7mの津波が観測されており、これは釜石港の潮位計で最大波が記録された時刻より9分早かったことが示されている。

3. 沿岸観測ブイ

3.1 多目的観測ブイによる海洋観測システム

東京大学生産技術研究所（以下、東大生産研）の目黒教授らにより、インド洋沿岸諸国を対象とした多目的観測ブイによる津波警報システムが提案されている⁷⁾。提案されている多目的観測ブイは、運用が簡単で安価、かつ日常の海洋情報ニーズを満足するシステムとすることで、資金・人材・技術が不足する地域でも持続的に維持管理されるというものである。

提案された多目的観測ブイの概念図を図3、ネットワーク化された津波警報システムを図4に示す。沿岸漁業や観光業の日常的な海洋情報収集ニーズを満たすブイに、津波監視機能を持たせることで、沿岸部の産業振興と同時に、継続的な津波監視が可能となる。津波発生時には、ネットワーク上の観測ブイが計測した津波情報を、他の観測ブイと共有することで広範囲の津波警報システムとして機能する。インド洋において多目的ブイによるネットワークを構築した場合の人的被害削減効果に関する研究も報告され、その有効性が示されている⁸⁾。

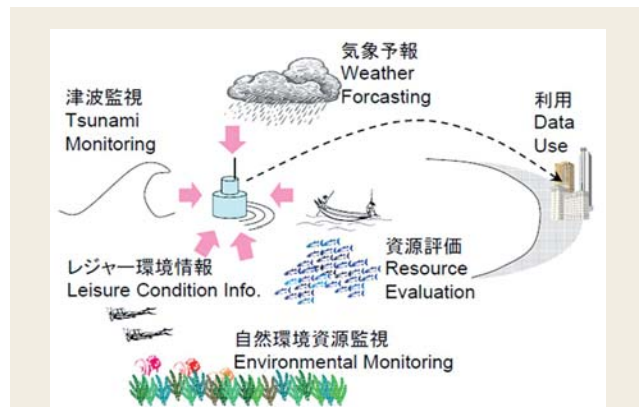


図3 多目的観測ブイの概念図

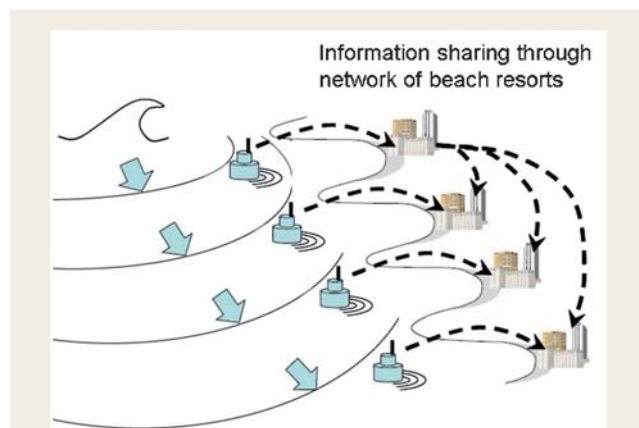


図4 観測ブイシステムのネットワーク化

3.2 沿岸観測ブイの実証実験

当社では、東大生産研の目黒教授らにより提案された多目的観測ブイを想定し、沿岸浅海域用の小型観測ブイを開発した。沖合に設置する場合、海象条件が厳しく水深も深いため大きなブイになってしまう。しかし、湾内などの沿岸域での設置を想定すれば、安価な係留設備で構成でき、ブイを小型化できる。波浪、潮位、津波の計測にはRTK-GPSを利用しているが、補正情報には電子基準点のデータを使用しているため、ユーザが専用の基準局を設置する必要が無い。ここで、電子基準点とは、国土地理院がGPS衛星からの電波を連続観測している新しい測量基準点であり、全国に約20km間隔で約1,200点設置されている。また、ブイの設置場所は沿岸から数kmを想定しており、ブイから陸上へのデータ通信には携帯電話会社の通信サービスを利用している。

2010年1月より、東大生産研に当社が協力する形で、沿岸観測ブイの実海域での実証実験を行った。図5に示すように、ブイは神奈川県平塚沖1km、水深20mの地点に設置されていた。小型沿岸観測ブイの構造概要を図6に示す。このブイには、GPS受信機以外にも風向風速計、流向流速計、水温計、気圧計が搭載されている。ブイの振れ回りを抑えるため、3点係留方式により係留されており、係留索には合成繊維ロープが使用されている。

図5のように、実験用ブイの設置点のすぐ側には、東京大学海洋アライアンスが管理運営する平塚沖総合実験タワーがある。平塚沖総合実験タワーの超音波式波高計での観測結果と沿岸観測ブイでのGPSによる観測結果を比較して、計測精度を評価した。図7と図8に、1/10最大波高と1/10最大波周期の比較を、図9に潮位の比較を示す。ここで、20分間の波群中で波高の大きいものから数えて1/10に相当する波を抽出し、それらの波高および周期の平均値を1/10最大波高および1/10最大波周期と呼んでいる。両観測点での観測結果はよく一致しており、開発した沿岸観測ブイが波浪や潮位の計測に十分な精度を有していることが示されている。

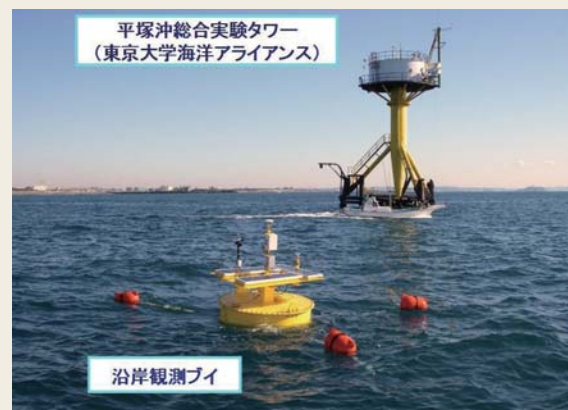


図5 沿岸観測ブイ平塚沖総合実験タワー

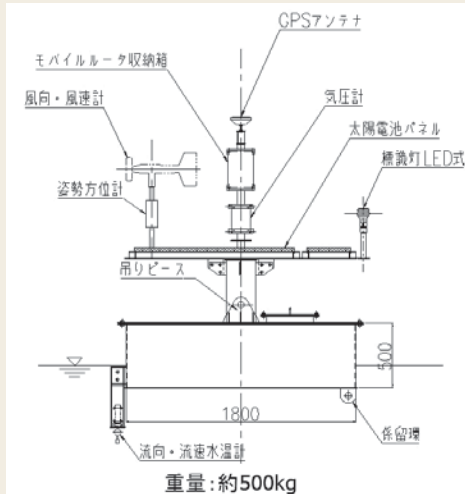


図6 沿岸観測ブイ(実験機)の構造概要

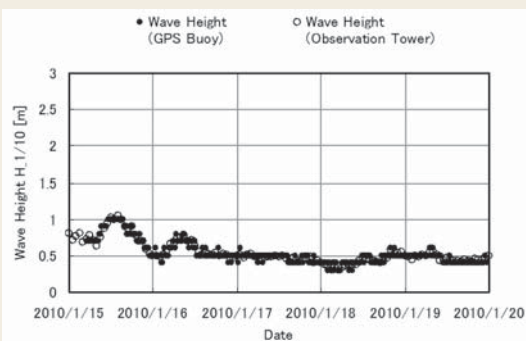


図7 波高の比較

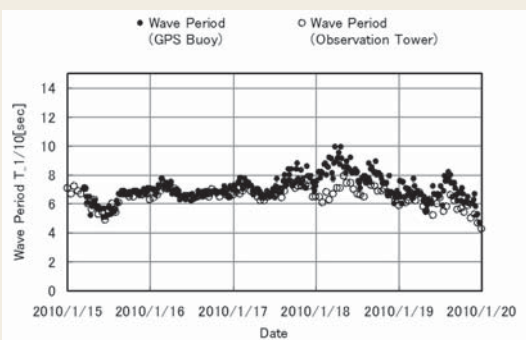


図8 波周期の比較

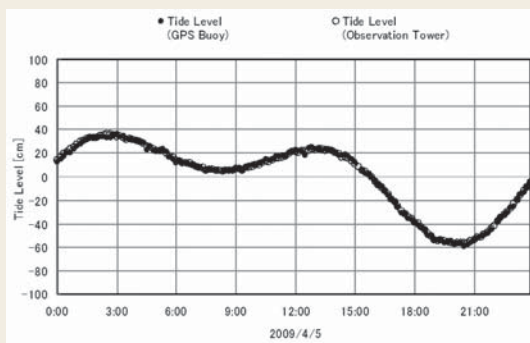


図9 潮位の比較

4. PVD 式波浪観測ユニット

GPS波浪計や沿岸観測ブイでは、海面変動の計測にRTK-GPSと呼ばれる測位法が使用されている。しかし、RTK-GPSの場合、基準点と観測点の距離すなわち基線長が20km程度以内でなければ数cmの計測精度が確保できないという課題がある。これは、GPS観測データに含まれる誤差が、座標が既知の基準点と観測点で同量であるとみなし、これらを相殺するという考えにRTK-GPSが基づいている為である。そこで当社では、観測点単独でRTK-GPSと同程度の精度で波浪計測ができるPVD (Point precise Variance Detection) 法を開発し、これを実装した小型の波浪観測ユニットを開発した。PVD法では周期30秒以下の風波のみを計測対象とし、GPS観測データから周期30秒を超える成分を全てハイパスフィルタで消去している。電離層や対流圏などGPSの精度に影響を与える誤差の変動周期は30秒よりも長く、これらは前述のハイパスフィルタで消去できる。従って津波のような長周期波は計測できないが、周期30秒以下の風波に限っては、RTK-GPSと同等の計測精度が達成される。

4.1 PVD法の原理 PVD法は、GPS受信機で計測された各衛星の搬送波位相距離データから、計測対象物の短周期変動成分のみをハイパスフィルタ処理によって抽出し、3個以上の衛星データから変動成分の測位演算を行う手法である。搬送波位相を用いた手法であるため、RTK-GPSと同等の精度が得られる。以下に、その原理を概説する。

観測点の座標 $(x_{rcv1}, y_{rcv1}, z_{rcv1})$ を、長周期変動成分 (^) と短周期変動成分 (~) に分け、(1) ~ (3) 式のように定義する。

$$x_{rcv1}(t) = \hat{x}_{rcv1}(t) + \tilde{x}_{rcv1}(t) \quad (1)$$

$$y_{rcv1}(t) = \hat{y}_{rcv1}(t) + \tilde{y}_{rcv1}(t) \quad (2)$$

$$z_{rcv1}(t) = \hat{z}_{rcv1}(t) + \tilde{z}_{rcv1}(t) \quad (3)$$

短周期変動成分 (~) は、通常はGPS受信機1と衛星i間の距離 ρ_i^i に比べて十分に小さいので、GPS衛星の座標を $(x_{sat}, y_{sat}, z_{sat})$ とすれば (4) 式のように記述できる。

$$\begin{aligned} \rho_i^i &= \sqrt{(\hat{x}_{rcv1} - x_{sat}^i + \tilde{x}_{rcv1})^2 + (\hat{y}_{rcv1} - y_{sat}^i + \tilde{y}_{rcv1})^2 + (\hat{z}_{rcv1} - z_{sat}^i + \tilde{z}_{rcv1})^2} \\ &\approx \hat{\rho}_i^i(t) + \frac{(\hat{x}_{rcv1} - x_{sat}^i) \tilde{x}_{rcv1}}{\hat{\rho}_i^i} + \frac{(\hat{y}_{rcv1} - y_{sat}^i) \tilde{y}_{rcv1}}{\hat{\rho}_i^i} + \frac{(\hat{z}_{rcv1} - z_{sat}^i) \tilde{z}_{rcv1}}{\hat{\rho}_i^i} \\ &= \hat{\rho}_i^i(t) - e_{1,x}^i \tilde{x}_{rcv1}(t) - e_{1,y}^i \tilde{y}_{rcv1}(t) - e_{1,z}^i \tilde{z}_{rcv1}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、(4) 式の e は、観測点から衛星iを結ぶ方向の単位ベクトルであり、仰角 $\theta_{1,elv}^i$ および方位角 $\theta_{1,azm}^i$ を用いれば (5) 式のように表せる。

$$(e_{1,x}^i, e_{1,y}^i, e_{1,z}^i) = (\cos \theta_{1,elv}^i \sin \theta_{1,azm}^i, \cos \theta_{1,elv}^i \cos \theta_{1,azm}^i, \sin \theta_{1,elv}^i) \quad (5)$$

つまり、変動成分は(6)式のように表せるので、3個以上の衛星について(6)式が求まれば、(1)～(3)式の短周期変動成分(-)を得ることができる。

$$\tilde{\rho}_1^i(t) = -e_{1,x}^i \tilde{x}_{rev1}(t) - e_{1,y}^i \tilde{y}_{rev1}(t) - e_{1,z}^i \tilde{z}_{rev1}(t) \quad (6)$$

(6)式の左辺を求めるためには、GPS受信機で計測される生の搬送波位相距離データにハイパスフィルタを適用する必要がある。この時、計測対象物の変動周期に応じてカットオフ周波数を決定するよう注意しなければならない。

4.2 波浪観測ユニットとシステム構成

PVD法を実装した波浪観測ユニットは、既存の浮魚礁や灯浮標への設置を目的としている。浮魚礁とは、魚を集め効率的に漁業を行うための施設である。一部の浮魚礁には、漁業者への情報提供のため、風向風速計、水温計、流向流速計などの観測センサーが搭載されている。これまで漁業者は、沿岸の波浪情報や浮魚礁に搭載された風向風速計のデータを参考にして操業の可否を判断していたが、浮魚礁で波浪観測ができれば、出港の可否に関して、より適切な判断が可能となる。通常、浮魚礁は沖合40km程度の海域に設置されている。このためRTK-GPSでは計測誤差が大きくなってしまいが、PVD式波浪観測ユニットを用いれば波浪の観測が可能となる。PVDによる波浪演算は浮魚礁に設置したユニットで行い、演算結果のみを20分毎に衛星通信で陸上に送信するため、RTK-GPSと比較して通信コストが大幅に低減できる。また、GPS受信機、演算装置、衛星通信装置を一体化することにより、波浪観測ユニットの小型化及び省電力化を図っている。浮魚礁に搭載されるPVD式波浪観測ユニットのシステム構成を図10に示す。

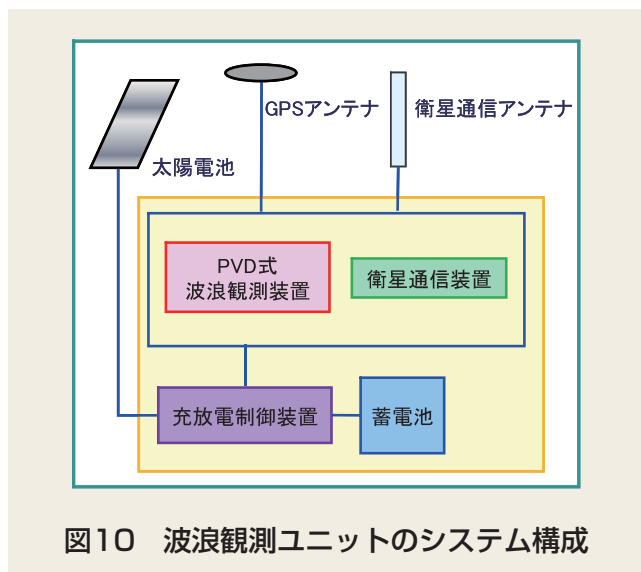


図10 波浪観測ユニットのシステム構成

PVD波浪観測ユニットは、2010年3月に高知県が保有する既設の浮魚礁2基（土佐黒潮牧場10号および13号）に搭載された。波浪観測ユニットの設置状況を図11に示す。

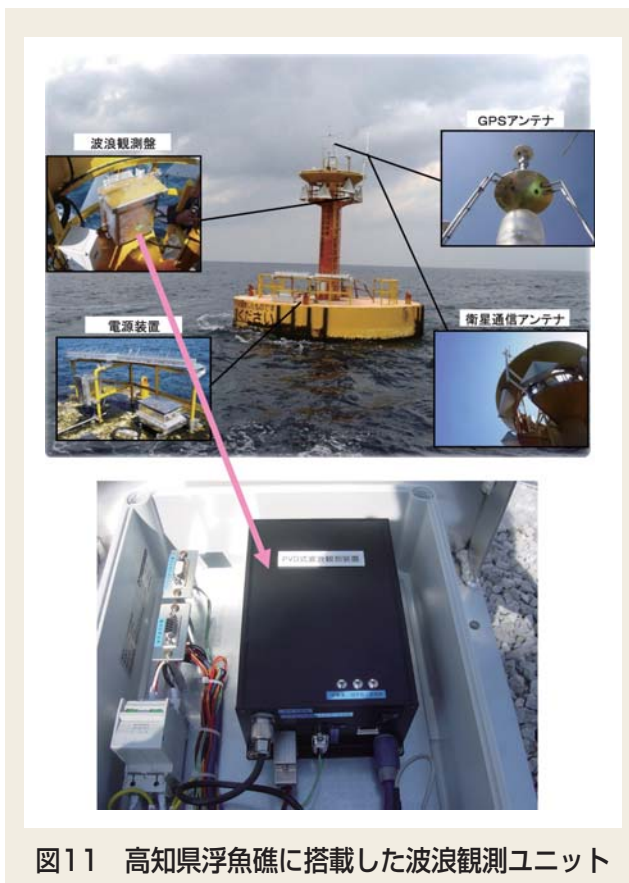


図11 高知県浮魚礁に搭載した波浪観測ユニット

5. 結 言

当社では、観測ニーズに合わせて様々なタイプの海洋観測ブイを作成している。現在も室戸沖でGPS津波・波浪観測システムの実証実験を継続しており、その研究成果は、国土交通省港湾局のGPS波浪計にも活用されている。東北地方三陸沖に設置されたGPS波浪計では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震にともなって発生した津波の観測に成功し、気象庁の津波警報引き上げにも貢献した。また当社では、安価で維持しやすい小型の沿岸観測ブイを開発し、実海域での実証試験を行った。このブイを用いた津波警報ネットワークを構築できれば、発展途上国など経済的に豊かでない国や地域においても、津波災害の低減に貢献できると考えている。更に、波浪計測に特化したPVD式波浪観測ユニットの開発に成功し、高知県の浮魚礁（土佐黒潮牧場）2基に搭載されている。

現在のところ、PVD法では短周期の風波しか計測できない。しかし近い将来、世界的な衛星測位システムの近代化と衛星数の増加によって、基線長に関係なく単独で数cm精度の測位が可能になると見込まれる。より沖合での潮位や津波の観測が可能となり、GPSブイを海底調査等の基準点として活用することも考えられる。また、海底鉱物資源の開発を目的としたプラットフォーム等の洋上設備を設置するためには、設計条件として、設置海域の波浪、風速、潮流等の海象データが必要となるが、これらの観測にも海洋観測ブイは有効

に活用できる。定点の連続観測が可能のため、海洋環境の保全や汚染の監視の手段や水産業への活用にも有効であると考えられる。

6. 謝辞

本稿で紹介したGPS津波・波浪観測システムは、東京大学地震研究所、(独) 港湾空港技術研究所、(財) 人と防災未来センター、および日立造船(株)の共同で、文部科学省の独創的革新技術開発研究及び科研費基盤研究(研究代表者: 東京大学地震研究所 加藤照之教授)の補助金を受けて開発したものである。平塚沖での観測実験は、文部科学省の科研費基盤研究(研究代表者: 東京大学生産技術研究所 目黒公郎教授)として実施されたものである。ここで、改めて関係各位に深謝の意を表す。

参考文献

- (1) 永井紀彦, 小川英明ほか: GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 土木学会, 海岸工学論文集, **2003**, 50, 1411-1415.
- (2) 寺田幸博, 加藤照之ほか: GPS津波計測システム, 日本海洋工学会, 第32回海洋工学パネル, **2005**, 56-65.
- (3) 清水勝義, 永井紀彦ほか: 沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究, 土木学会, 海洋開発論文集, **2006**, 22, 523-528.
- (4) 目黒公郎, 高島正典: 沿岸産業主導による津波災害軽減に向けて - 多目的観測ブイを用いた津波警報システムの提案 -, 土木学会誌, **2006**, 91(7), 42-43.
- (5) 竹内 雅彦, 目黒 公郎ほか: 多目的観測ブイを用いた津波警報システムの人的被害軽減効果と要求性能に関する研究, 東京大学 生産研究, **2008**, 60, 271-274.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部
技術研究所 精密技術グループ
三宅 寿英

Tel : 06-6551-9312 Fax : 06-6551-9849
e-mail : miyake_t@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Business & Product Development
Headquarters

Technical Research Institute
Precision Technology Group
Toshihide Miyake

Tel : +81-6-6551-9312 Fax : +81-6-6551-9849
e-mail : miyake_t@hitachizosen.co.jp



三宅 寿英



奥村 知樹



松下 泰弘