

実海域におけるGPS波浪計・津波計の 性能確認実験

EXPERIMENTAL MONITORING OF TSUNAMI, WAVES AND TIDE
OBSERVATION SYSTEM USING RTK-GPS

加藤照之¹・寺田幸博²・松岡幸文³・高田美津雄⁴

Teruyuki KATO, Yukihiko TERADA, Yukifumi MATSUOKA and Mitsuo TAKADA

¹理博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

²工博 日立造船株式会社 技術研究所首席研究員 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

³工修 正会員 同上 鉄構・建機事業本部係長 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀2-6-33)

⁴関西設計株式会社 海洋プロジェクト室部長 (〒550-0001 大阪市西区土佐堀1-4-8)

A new sea level observation system has been developed using GPS (Global Positioning System) technique to detect the ocean waves, tide and tsunami before it reaches the coast. The system consists of a buoy on the sea, which has the GPS antenna in the top part, and a GPS antenna on land. We employed real-time kinematic (RTK)-GPS technology to monitor a moving buoy in real-time with an accuracy of a few centimeters by relative positioning. After the basic experiment was carried out in Sagami Bay in 1998, the practical application experiment has been executed at the position about 2km away from the coast of Ofunato city since 23rd January 2001. This paper reports the summary of the new measurement system to observe the sea level, and the findings of an efficiency experiment in the ocean.

Key Words : GPS, RTK, Tsunami, Waves, Tide

1. はじめに

地震多発国である我が国は、これまでに地震の揺れによる被害とともに、津波による多大な被害を受けてきた。津波の発生を止めることは出来ないが、事前の襲来予測によって津波被害を軽減させることは可能である。気象庁は1999年春から津波予報システムを大幅に改善し、全国を66ブロックに区分して高精度な量的津波予報システムの運用を開始した。これらは、地震の規模や震源地の情報をもとに、海底地形を考慮した津波の伝搬シミュレーションを行い、沿岸域における津波の到達時間と高さを予測するものである¹⁾。

この津波予報システムは、地震の検出を前提としているが、ゆっくりとした長周期地震では地震計の周波数特性によって本来の振幅値を観測出来ない場合がある。その場合、津波予報システムが機能せず、住民は地震の揺れを感じることなく突然津波に襲われることになる。津波を起こす地震の10%程度はこの津波地震であるとの報告もある²⁾。したがって、津波の発生をより早く確実に把握する最良の方法として、海面変動を直接的に検出する方法が必要とされている。

津波や波浪による海面変動の計測は、港湾内の検潮所や沖合の海底に設置された超音波式や圧力式のセンサーで実施されている。しかし、検潮所の観測データでは津波の来襲を予測することが困難であり、沖合に計測機器を設置する場合には、計測器の精度・分解能、設置水深の限界やメンテナンスを含めたコストなどの問題を抱えている。

東京大学地震研究所と日立造船(株)技術研究所が共同で、沖合での海面変動を高精度で監視するシステムとして「GPS波浪計・津波計」の研究開発を進めている。本システムは、海面変動への追従性に優れたブイの最上部にGPS (Global Positioning System) アンテナを搭載し、ブイの位置をRTK (Real Time Kinematic)方式により測位させて広い周波数域の海面変動に対して数cmの計測精度とリアルタイムな表示を可能とするものである。1998年3月、神奈川県相模湾において、プロトタイプのブイを用いた基本機能実験を実施し、測位データの連続伝送による海面監視の有用性とGPS測位の精度を確認した^{3), 4)}。現在、実用化に向けて、岩手県大船渡市沖合で性能確認実験を実施している⁵⁾。本稿では、GPS波浪計・津波計の基本機能と実海域での性能確認実験について報告する。

2. GPS波浪計・津波計の基本機能

GPS波浪計・津波計の概念図を図-1に示す。本システムは、沖合に投入するGPSブイと陸上基地局で構成している。陸上基地局とブイのGPSデータを無線でリンクさせ、ブイ上部のGPSアンテナの動揺を精密に計測して海面変動を検出する。測位の時系列データを海面変動としてリアルタイムに表示できるとともに、波浪解析処理によって波浪情報の出力が可能である。

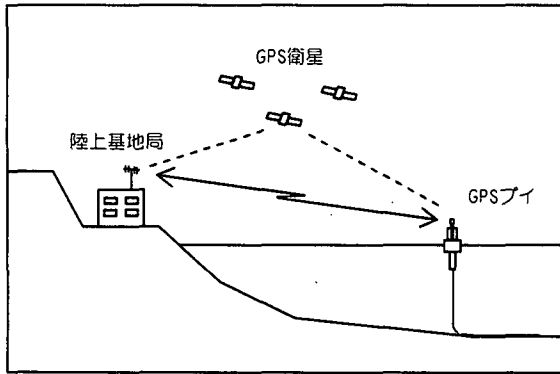


図-1 GPS波浪計・津波計システムの概念図

GPSは、米国が軍事用に運用している全地球測位システムであり、地上高約2万kmに配置した計24個の衛星を用いて地球上の緯度、経度及び標高を精密に計測できる。表-1⁶⁾に示すように、測位精度は測位アルゴリズムによって異なる。GPS測位方式の基本となる単独測位では、測位精度は数m程度である。波浪及び津波による海面変動の計測には数cmの精度とリアルタイム性が重要なことから、RTK (Real Time Kinematic)の測位方式を基本とした。搬送波位相の計測値を用いるRTK方式の場合、衛星間の時計の差、受信機間の時計の差及びGPS衛星から受信機までの伝搬路における電離層や大気中の水蒸気等に起因する誤差要因の除去が必要となる。そのため、緯度、経度及び標高が既知となる基準局の測位データを参照値として用いている。

表-1 種々のGPS測位法

測位方式	主要な計測量	精度
単独測位	C/Aコード	~30m
DGPS	C/Aコード	~3m
RTK	搬送波位相	~3cm
スタティック	搬送波位相	~1cm

3. 基本機能実験

図-1に示すシステム構成をもとに、1998年3月18日から3月26日までの8日間、相模湾における基本機能実験を実施した。東京大学地震研究所油壺観測所屋上に基地局を設置し、基地局から900m離れた海上に直径2mのブイを設置した。ブイの最上部に取り付けたアンテナ位置をサンプリング周期1秒でRTK測位し、鉛直方向成分の変位をブイの上下動としてその時系列変化をリアルタイム表示した。そ

の結果、波浪による海面変動の変化を正確に取得することが確認出来た⁴⁾。

実験海域の近くにある油壺検潮所の潮汐データと比較したものを図-2に示す。検潮所の計測データは、毎正時のデータである。GPSによる海面変位データは毎秒の計測値であることから、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として、鉛直方向成分データに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、両計測値の差の最大値は5.2mmであり、その標準偏差は2.0mmであった⁴⁾。

以上のことから、本システムは、秒単位の周期をも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が検証出来た。

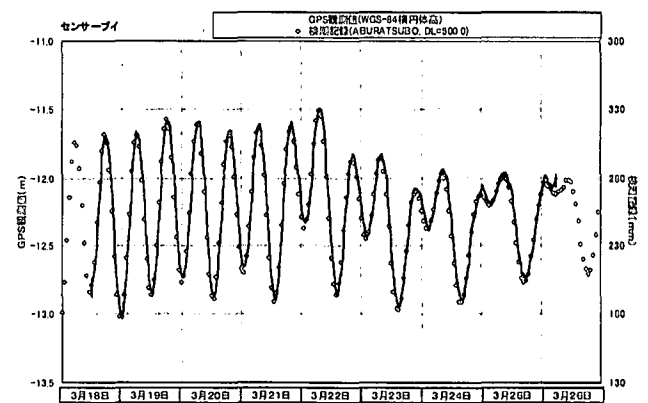


図-2 本システムで計測した潮汐データと検潮所記録との比較

4. 性能確認実験

相模湾での基本機能実験において、本システムが海面変動の検出に有用であることが確認されたことから、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方式、外洋に対応できるブイシステム及び市民へのデータ公開を行う防災システムなどを開発課題として、大船渡市沖での実用化に向けた性能確認実験を開始した。

(1) 観測システム⁵⁾

大船渡市沖に設置した本実験システムの概念図を図-3に示す。海上で計測したL1及びL2搬送波位相等の全ての受信機出力は、キャリア周波数429MHz帯の特定小電力無線を用いて、伝送速度4800bpsで陸上基準局に伝送し、別途陸上基準局で計測した搬送波位相データを用いてRTK計算を実施する。

測位結果の緯度、経度及び標高データは、帯域3.4kHz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消防署司令室に送信し、各関係機関でリアルタイムにモニタしている。また、リアルタイムモニタの状況は、30分毎にISDN回線でインターネットサーバーに送り、

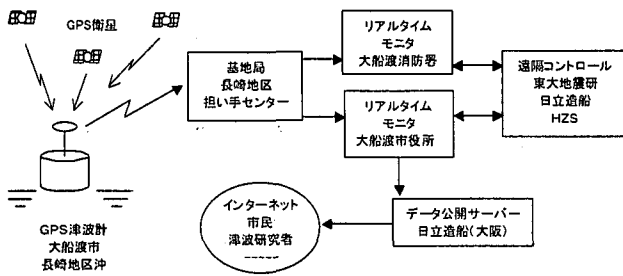


図-3 GPS津波計大船渡市沖実験システム

<http://tsunami.ekankyo21.com/>で市民に公開している。その表示例を図-4に示す。図中の上部に示すデータは、GPSアンテナの標高測位値の時刻系列データであり、サンプリングピッチを1秒として1時間分のデータを表示している。このデータは、短周期の波浪成分（上側）と長周期の津波成分（下側）に分離して表示している。その下の左側には、アンテナの水平位置の動きを示し、毎秒の計測位置をドットで表示している。また、図中の左最下部には、2日分のデータを表示して潮汐の動向を確認できるようにしている。

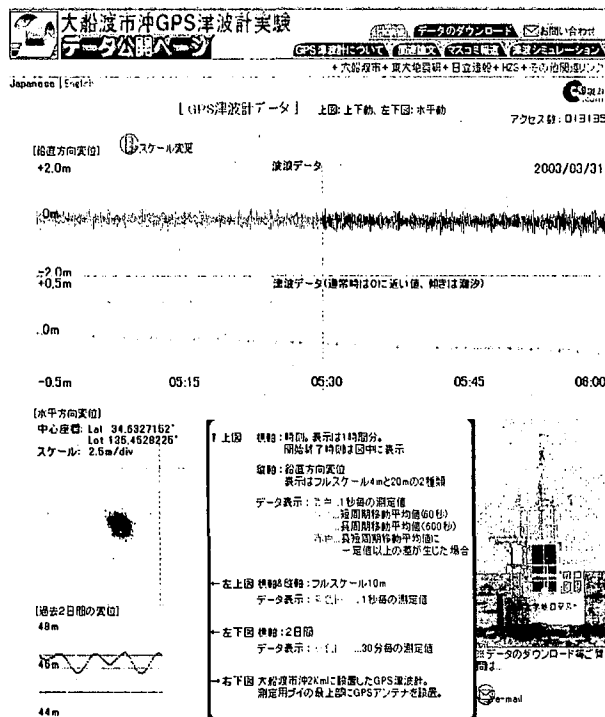


図-4 GPS津波計データ公開ページ
(<http://tsunami.ekanyo21.com/>)

(2) ブイシステム⁵⁾

大船渡市沖でのGPSブイの投入位置を図-5に示す。コオリ埼灯台から東南東へ2.1km、水深53mの地点に位置し、陸上基準局を設置した担い手センターからは2.1kmの距離である。この地点における50年再現確率による荒天時の気象・海象条件として、風速40.0m/s、潮流2.0kt、有義波高9.0m及び平均波周期13.1秒を考慮し、ブイ本体及び係

留系の検討を行った。GPSブイの形状を図-6に、その係留状態を図-7に示す。

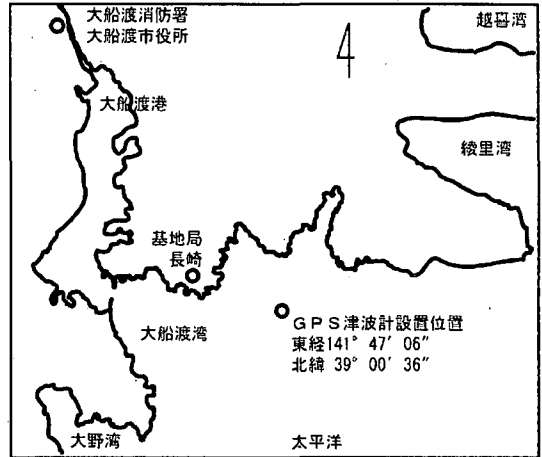


図-5 大船渡市沖GPSブイ投入位置

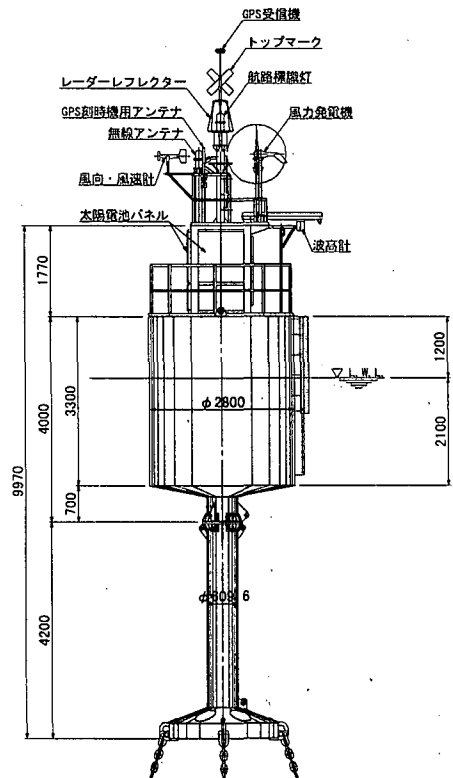


図-6 GPSブイの形状

ブイの構造諸元は、浮体部直径2.8m、海面から最上部まで6.4m、海面から尾筒最下端部まで7.0mであり、重量は約10tである。係留設備は、ブイの方位維持と振れ回り範囲の制限から3点係留方式を採用した。係留索は呼び径34mm、長さ180mのチェーンとし、アンカーには57tコンクリートブロックを用いた。各係留索のほぼ中央に中間シンカーを設置して荒天時におけるブイの振れ回り範囲を半径20m程度に抑えた。

海面変動に対するGPSブイの追従性を確認するため、係留力を考慮したブイの上下揺シミュ

レーションを実施した。波浪条件として、プレットシュナイダー・光易型の波スペクトル⁷⁾による不規則波(有義波高9.0m, 平均波周期13.1秒)を想定し, 加えて同方向からの潮流(2.0kt)及び変動風(平均風速40.0m/s)の影響を考慮した。

図-8に示す波浪を含めた外力が図-7のD方向から作用した場合のブイの上下方向の応答値を図-9に示す。ブイの上下揺と波高は良い対応を示しており, 1/3期待値の波高9.07mに対するブイの追従性は95.6%である。外力の作用方向がブイの上下揺応答に与える影響を検討するため, A~E方位を対象に, 同条件下でのブイの上下揺シミュレーションを実施した。結果を表-2に示す。ただし, E方位は陸側であるため, B方位から波浪が作用するものとした。作用方向を問わず, 良好な追従性を有していることが確認された。

波浪の平均波周期に着目して, ブイの波高追従性指標及び波周期追従性指標を評価したものを図-10及び図-11に示す。平均波周期が2.25秒から5.0秒の範囲において, ブイの計測値が波高に対して大きくなる傾向にある。これは, ブイの動揺固有周期(上下揺約5.0秒, 縦・横揺約5.2秒)の影響によるものと考えられる。

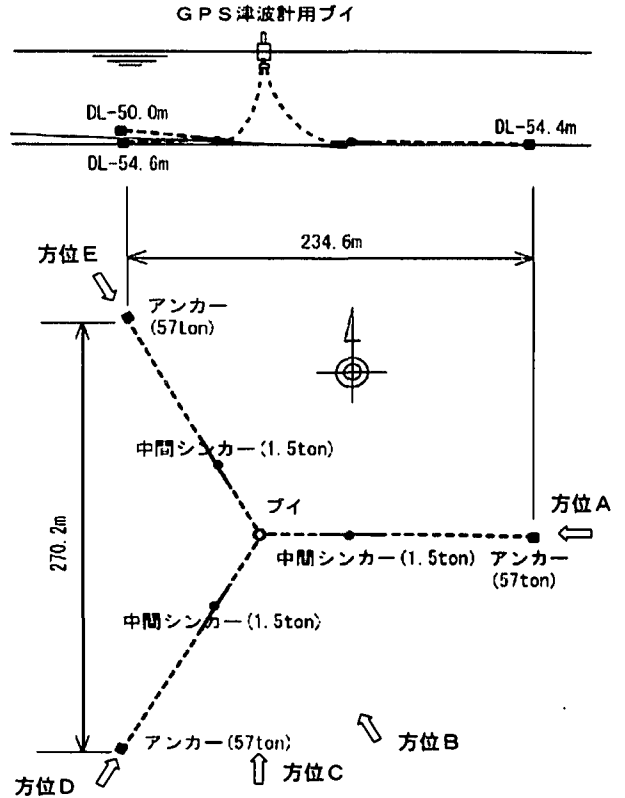


図-7 GPSブイ係留図

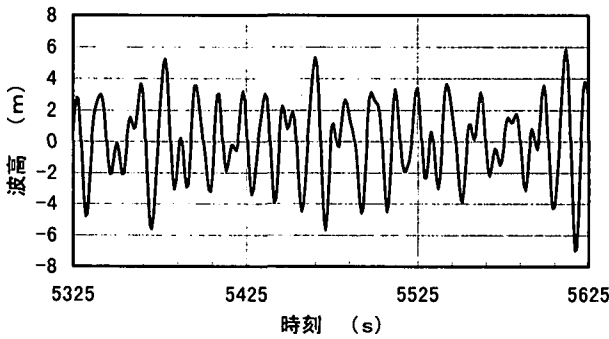


図-8 不規則波の例(有義波高9.0m, 平均波周期13.1s)

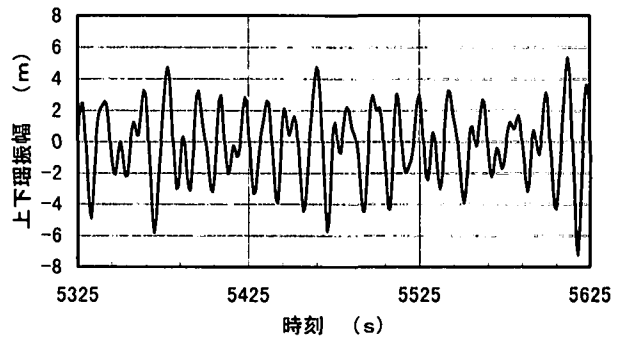


図-9 ブイの上下揺振幅予測値

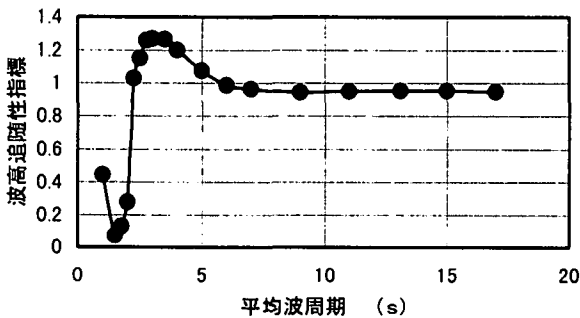


図-10 波高追従性 (波向: 南南西)

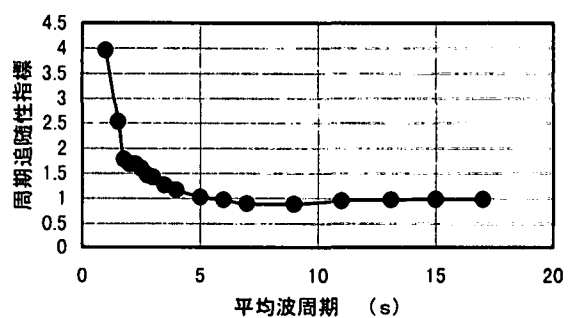


図-11 周期追従性 (波向: 南南西)

表-2 海面高の変化に対するブイの追従性 (高潮位時, 平均波周期13.1秒)

波向き	方位A	方位B	方位C	方位D	方位E
波のゼロアップクロス周期の平均値 A (s)	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04
ブイの上下揺周期の平均値 B (s)	11.67	11.65	11.72	11.67	11.95
波周期追従性指標 B/A (%)	96.9	96.8	97.3	96.9	99.3
波高の1/3期待値 C (m)	9.07	9.07	9.07	9.07	9.07
ブイの上下揺振幅の1/3期待値 D (m)	8.67	8.41	8.55	8.67	9.18
波高追従性指標 D/C (%)	95.6	92.7	94.3	95.6	101.2

平均波周期が2.25以下では、海面変動に対してブイの追従が困難となる。5秒以上の平均波周期に対しては、波高・波周期とも良好な追従性を示しており、精度の高い計測データを得ることが可能である。

(3) 波浪観測

波浪観測の一例として、荒天時及び平静時における計測値の時系列データを図-12及び図-13に示す。図-12は2001年3月4日22～23時、図-13は5月13日4～5時の時系列データの一部である。この計測データと加速度計による計測値を2回積分して求めた変位データに対して統計処理したものを表-3に示す。変位に対して両者はほぼ一致しているが、周期には若干の差が見られる。

2001年1月25日から12月19日までの約11ヶ月間に収集したブイの上下移動量から波周期(平均周期)、有義波高及び最大波高の関係をまとめたものを図-14に示す。また、有義波高および有義波周期の出現率について釜石港沖での海象データと比較したものを図-15及び図-16に示す。計測データは8mを超える最大波高から0.3m程度の有義波高までを幅広く網羅し、有義波高及び有義波周期の出現率も釜石港沖とほぼ一致している。以上のことから、本システムの計測データが波浪データとして有用であると考えられる。

(4) 津波観測

2001年6月25日早朝、その前日に南米のペルー沖で発生したマグニチュード7.9の地震による津波が約23時間をかけて大船渡市沖に到達した。観測結果を図-17に示す。図中の上側に示す線が、1秒毎の鉛直方向測位データに対して60秒の移動平均値を求め、波浪成分の大半を除去した結果を示している。また、図中の下側に示す線は近くに設置されている大船渡検潮所の15秒毎の潮位記録である。半日単位で大きく変動する潮汐のデータの中に、午前4時過ぎから周期10分～30分程度で、波高10～20cmの津波波形が観測されている。それ以降、半日以上にわたって継続的に津波が観測されている。

一般的に、津波の高さは深海域では低く浅海域では高くなり、GPSブイ設置位置と検潮所は約

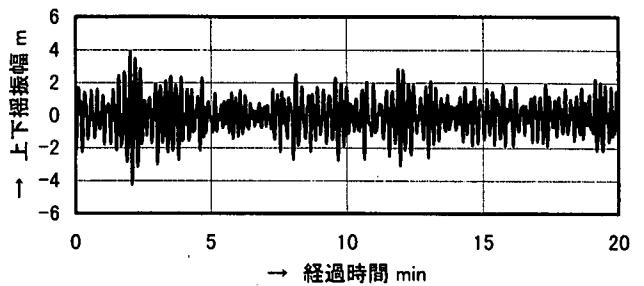


図-12 荒天時 (22:00, 4, Mar, 2001) の風波計測例

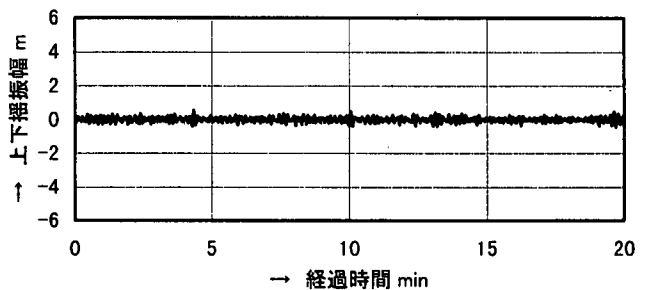


図-13 平静時 (4:00, 13, May, 2001) の風波計測例

表-3 加速度計による計測値との比較

	項目	有義値	最大値	平均周期(秒)
荒天時	GPS測位値(m)	4.14	8.14	10.39
	上下加速度(gal)	200	490	5.56
	上下変位(m)	3.96	8.99	9.34
	上下変位/GPS測位値	0.96	1.10	0.90
平静時	GPS測位値(m)	0.58	1.03	8.03
	上下加速度(gal)	40	100	5.21
	上下変位(m)	0.59	1.07	7.20
	上下変位/GPS測位値	1.02	1.04	0.90

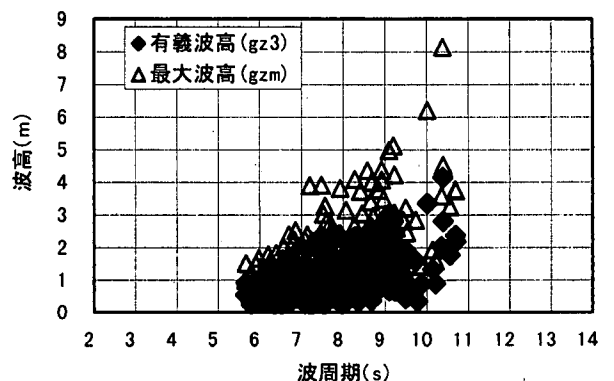


図-14 波周期と波高との関係

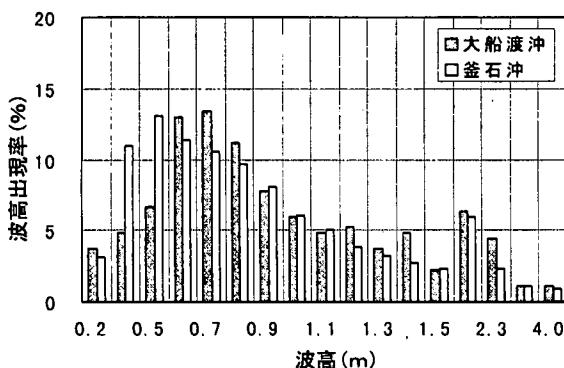


図-15 有義波高の出現率

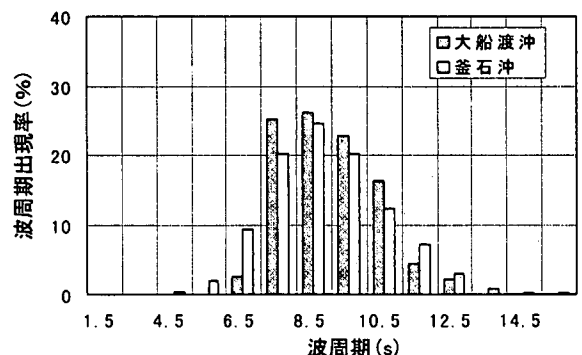


図-16 有義波周期の出現率

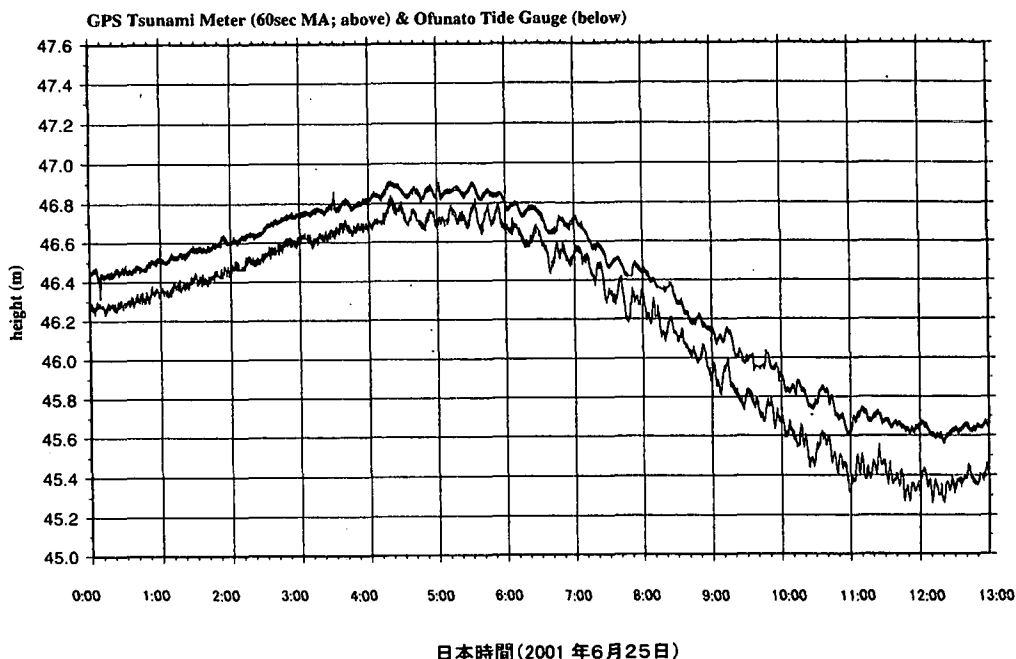


図-17 ペルー地震津波観測結果

3 kmの距離がある。これらの点を考慮すれば、両者のデータは良い対応を示しており、本システムが10cm程度の津波でも計測可能であることを実証した。

4. 結論

現在、大船渡市沖での性能確認実験を継続中である。本件における主要な結論を以下に示す。

- (1)ブイの最上部にGPSアンテナを設置し、GPSアンテナの動揺の時系列データを計測することによって、秒単位から日単位に亘る広い周波数領域の海面変位の検出が可能であり、波浪、津波及び潮汐を連続的に観測することが出来る。
- (2)本実験で用いるGPSブイ(重量約10t、全高約13.4m、浮体部直径2.8m)の動揺特性解析を実施した結果、5秒以上の平均波周期の海面変動に対して、ブイの上下揺は0.927~1.075の範囲内にあり、良好な追従性を有していることが明らかとなった。
- (3)2001年1月25日から12月19日までの約11ヶ月間に収集した計測値と釜石港沖での海象データについて有義波高および有義波周期の出現率を評価した結果、両者はほぼ一致した。
- (4)2001年6月ペルー地震による津波観測に成功した。10cm程度の津波でも本システムによる計測が可能なが実証された。
- (5)防災システムの一環として、大船渡市役所、大船渡消防署におけるリアルタイムモニタリングシステムを構築するとともに、インターネット上において準リアルタイムデータを公開している(<http://tsunami.ekankyo21.com>)。

本システムの場合、設置海域の条件(水深、海底地形および波浪条件等)によって係留系仕様が異なり、それによりコストは大きく変動する。海底ケーブルを敷設するような方式に比べて廉価なシステムではあるが、メンテナンスを含めた更なるコスト低減が今後の課題である。

謝辞：大船渡市沖実用化実験は、甘竹勝郎市長をはじめ大船渡市役所及び大船渡消防署の支援を得て遂行中である。また、GPSブイの設置において、赤碓漁業協同組合、大船渡漁業協同組合、綾里漁業協同組合及び末崎漁業協同組合の方々には、実験の意義をご理解いただき種々のご協力を得ている。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1)館畑香衛：津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋，号外15，pp.23-30，1998.
- 2)岩崎伸一：低周波まで計測できるハイドロホンによる多目的津波監視システム，月刊海洋，号外15，pp.61-65，1998.
- 3)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，pp.38-42，1998.
- 4)T.Kato, Y.Terada, M.Kinoshita, H.Kakimoto, H.Isshiki, and T.Tanno: Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Plants Space*, Vol.52, pp.841-845, 2000.
- 5)加藤照之，寺田幸博，木下正生，柿本英司，一色 浩，森口壽久，神崎政之，高田美津雄：GPS津波計の開発—大船渡市実用化実験—，電子情報通信学会論文誌B, Vol.J84-B, No.12, pp.2227-2235, 2001
- 6)土屋 淳，辻 宏道：GPS測量の基礎，p.13，(社)日本測量協会，1998.
- 7)合田良賢：港湾構造物の耐波設計，p.19，鹿島出版会，1980.