

単独測位方式による GPS波浪観測システムの実証実験

OCEAN EXPERIMENT ON A LOW-COST GPS-BASED
WAVE HEIGHT AND DIRECTION SENSOR

村山貴彦¹・中西寛登²・宇都宮好博³・松田正俊⁴・山口功⁵
Takahiko MURAYAMA, Hiroto NAKANISHI, Yoshihiro UTSUNOMIYA,
Masatoshi MATSUDA, and Isao YAMAGUCHI

¹ (財) 日本気象協会 首都圏支社調査部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

² (財) 日本気象協会 首都圏支社調査部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

³ 正会員 博 (工) (財) 日本気象協会 首都圏支社調査部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

⁴ 海上保安庁 総務部 海上保安試験研究センター (〒190-0015 東京都立川市泉町1156)

⁵ 工博 (独) 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢6-13-1)

Ocean wave information is indispensable for a coastal activity and service of ship to be carried out safely and economically. A low-cost wave height and direction sensor was developed by Japan Aerospace Exploration Agency and Japan Weather Association. The purpose of this study is to examine observation accuracy of wave height, period, and direction on the light buoy of Japan Coast Guard. Then, we installed a low-cost wave height and direction sensor on the light buoy and observed ocean wave in the sea. And, we compared data observed by light buoy with data observed by NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Port and HarbourS). Our results show that observation accuracy on the light buoy is high.

Key Words : wave height, wave direction, GPS, buoy, wave observation,

1. はじめに

港湾および沿岸の開発・維持管理や船舶の運航および海洋レジャーにとって、海洋観測情報は不可欠なものとなっている。しかし、現在主流の海底設置型の波浪計は設置や維持管理にかかるコストが膨大で手軽に設置することは難しい。また、設置できる水深に制限があるため、外洋での観測が困難である。

そこで、低コスト（設置・維持管理面）で、外洋でも利用できるようにGPS単独測位方式の波浪観測システム（以下、GPS単測式波浪計）の開発を目指し、これまで陸上および海上の実験・検証を行い、一定の成果を得てきている^{1), 2)}。

一方、港湾施設や船舶の航行する付近でよくみられる航路標識（灯浮標、灯標等）は、灯火および塗装等により岩礁、浅瀬等の危険箇所や航路等を標示しており、航行する船舶にとって非常に重要な情報を提供している。

これらの航路標識で気象海象が観測できれば、船舶の安全運行に有益な情報が得られるものと考えられる。

本研究では、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）と財団法人日本気象協会（JWA）が開発したGPS単測式波浪計を海上保安庁所管の灯浮標に取り付け、一般的な航路標識におけるGPS単測式波浪計の観測精度を検証した。なお、精度検証には運輸省港湾局所管の全国港湾波浪観測網（NOWPHAS）の実測値を使用した。本論はその内容を報告するものである。

2. 観測システムの概要

(1) GPS観測量の特性

GPSの測位精度は、その処理アルゴリズムによって異なり、単独測位は数十m、ディファレンシャルGPSは数m、キネマティックGPSは数cmとなっている。キネマティックGPSはその精度の高さから長周期の低加速度運動にも

追従して正確な測位が可能であるため、津波計測などに適している。しかし、キネマティックGPSは陸側に固定された基準局を必要とし、基準局までの距離が15～20km以内という制限があるため外洋で使用できないという欠点がある。単独測位アルゴリズムは、1台のGPS受信機で位置を計測するため、GPS信号が伝播中に受ける大気遅延などGPSシステムに起因する誤差が除去できず、測位精度は他のアルゴリズムに比べて低い。しかし、誤差の変化はゆっくりしており100秒から数十分程度の時定数を持っている。これは、測位誤差に影響を与えるGPSシステムに起因する誤差（受信機誤差を除く）が100秒以上の時定数を持っているためである。このことから測位誤差のほとんどすべての電力は0.01Hz以下の周波数帯に存在している。一方、海洋波浪により動揺するブイの運動は0.1秒から20秒（0.05Hz～10Hz）の周期を持つことから、両者を適当なフィルタで弁別し、GPSシステム誤差の影響を最小限に抑えてブイの運動だけを抽出できることがわかる²⁾。

(2) 波浪データの抽出方法

本研究に使用しているGPS単測式波浪計では、GPS単独測データから以下の3段階の処理を経て波浪データを抽出している。第1段階では、GPS測位データを東、北、上の局所座標系に座標変換する。座標原点は測位データの初期値を原点としている。第2段階では、受信しているGPS衛星の変更や信号追尾におけるサイクル・スリップなどで発生する測位の不連続点の除去である。不連続点でみられる高調波は、次の段階のハイパスフィルタ処理で誤差となって影響を及ぼすので、ここでは衛星の切替や、急激な位置の変化がないかを統計処理で検知して、不連続点がある場合は前後のデータのオフセットを0にして連続的に波形が繋がるような処理をしている。第3段階はハイパスフィルタによるGPSシステム誤差の除去である。ここでは、30秒周期の波まで観測できるようにカットオフ周波数を0.02Hzとし、誤差を数cmに抑えることができるような特性を有する6次のハイパスフィルタを組み込んでいる。

この手法を用いた陸上実験では、誤差が波高で2.5cm、周期で0.17秒、方位で1.7°で計測できることが確認されている²⁾。

(3) 波浪諸元の算定方法

波高、周期の定義に関しては、ゼロ・アップ・クロス法が広く使われている。ゼロ・アップ・クロス法では、波が平均海面を下から上へ横切り、再び下から上へ横切るまでの間を一波と定め、その一波の間にある頂点と最下点の距離がその波の高さ（波高）で、その一波の間の時間が周期である。一定期間の個々波を波高が大きい順に1/3抽出して平均したものを有義波、同じく1/10までを対象としたものを1/10最大波、一定期間内で最も大きい波を最大波として算出している。

波向に関しては様々な定義がある。最もよく使われる手法は、スペクトル解析に基づくもので、海洋波浪のエネルギー（方向スペクトル）は周波数スペクトルと方向分布関数の積で表すことができる。Longuet-Higgins, Cartwright and Smith³⁾によれば、方向分布関数はフーリエ展開でき、クロススペクトルを求めることで方向関数を近似的に計算することができる。ここでは、方向スペクトルの第1ピークから第3ピークにおける周波数で、波向を求めている。

(4) 観測システムの構成

観測システムの構成を図-1に示す。観測システムは、GPS式波浪計、GPSアンテナ、携帯用アンテナ（航路標識一陸間通信用）、風向・風速計、蓄電池および太陽電池パネルで構成されている。GPS式波浪計の筐体内には、GPSの位置と時刻情報および風向・風速計の信号を演算処理する装置と、演算後の観測データを陸上に伝送するためのNTT-DoCoMoパケット通信システムが格納されている。

現在観測可能な波浪諸元（波高、周期、波向）は、毎正時10分前から正時10分後の20分間の位置情報を演算処理することにより算出している。算出された波浪諸元は、風向・風速および電源電圧情報と共に、リアルタイムにデータを陸上側にメール送信できる。

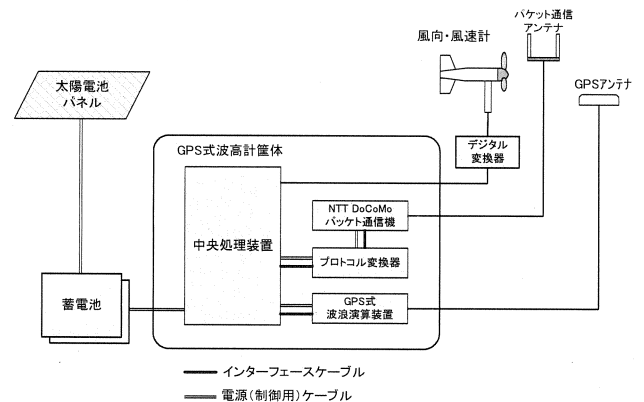


図-1 観測システムの構成

3. 実証試験

(1) 試験場所

灯浮標に取り付けたGPS単測式波浪計の精度検証は、灯浮標付近に設置されている海底設置型超音波式波高計の実測値と比較することとした。このため、運輸省港湾局所管の全国港湾波浪観測網（NOWPHAS）の地点であるアシカ島付近にある、海上保安庁の灯浮標（かさじま）を実証試験場所とした（図-2参照）。

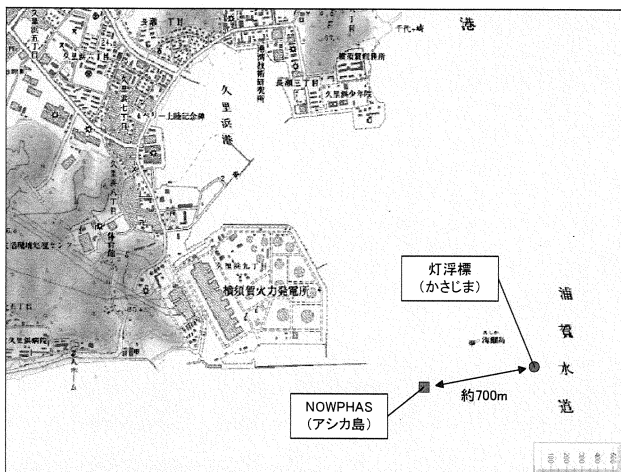


図-2 実証試験海域（久里浜港沖）

(2) 試験期間

実証試験は、平成17年12月8日から翌年1月27日までの約1ヶ月半実施した。

(3) 試験方法

GPS単測式波浪計および風向・風速計を灯浮標（かさじま）に取り付け、気象海象を観測した。灯浮標に観測装置を艀装した状況を写真-1に示す。

実測値はNTT DoCoMoのポケット通信システムを用いてリアルタイムで陸上にメール送信し、インターネットを介してJWAが受信した。JWAでは毎時受信するメール（実測値）を、波浪観測データ伝送・監視システムによって、監視・データ処理した（図-3参照）。

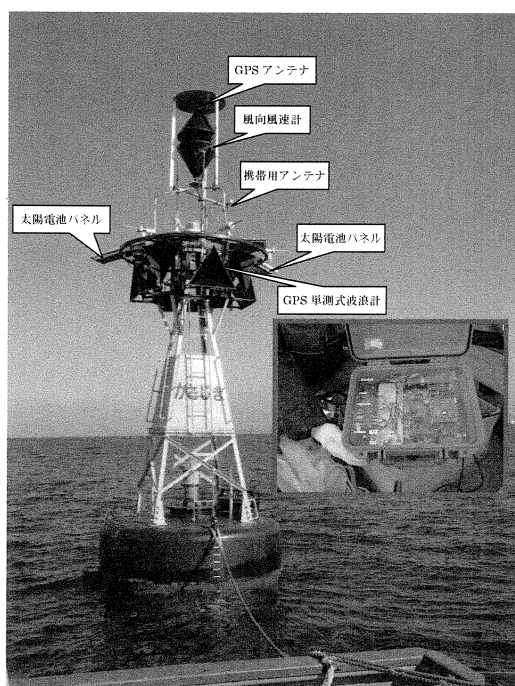


写真-1 灯浮標（かさじま）に艀装された観測システム

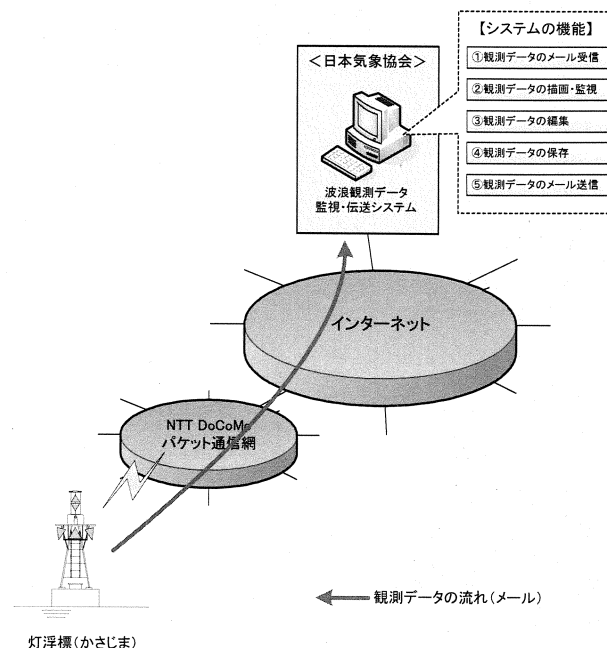


図-3 実測値の流れ

4. 実証試験結果と検証

(1) 測得状況

実測値の欠測状況および測得率を表-1に示す。欠測数は全期間中10回で、測得率は99%と高い測得率であった。同期間のNOWPHASアシカ島の欠測数は10回であることから、NOWPHASと同程度の測得状況といえる。

表-1 GPS単独測位方式によるデータの取得率

測得率: 99.16%

	計測数	欠測数	欠測率
2005年12月	572	7	1.22%
2006年01月	624	3	0.48%
全期間	1196	10	0.84%

(2) NOWPHAS実測値との比較

GPS単測式波浪計の観測精度を検証するために、灯浮標（かさじま）の近傍に位置するNOWPHASアシカ島地点（図-2参照）の実測値（以下、NOWPHAS実測値）とGPS単測式波浪計の実測値（GPS波浪計実測値）とを比較した。

かさじまとアシカ島とは約700m離れ、水深がそれぞれ35mと22mで異なっていることから、両地点の波浪は実際に異なっていると推測される。このため、GPS単測式波浪計の精度を厳密に検証する上ではこの違いを考慮する必要がある。

そこで、両地点の海底地形の違いによる波浪特性の違いを把握するために、沖波が各地点に伝播する際に波が

変形する様子を再現した（浅海変形計算）。この浅海変形計算はエネルギー平衡方程式を基本として、沖波が浅海域に伝播する際の方向および周波数のスペクトルを計算する手法である。浅海変形計算結果から、かさじまとアシカ島の波高階級別周期階級別の波高比、周期比、および波向の偏角を算定した（浅海変形パラメータの作成）。この浅海変形パラメータを用いてNOWPHAS実測値を補正し、GPS波浪計実測値と比較した。以下にその内容を観測要素別に示す。

a) 有義波高

GPS波浪計の実測波高と浅海変形補正したNOWPHASの実測波高との相関図を図-4に示す。この図から、両者の相関係数は $R^2=0.87$ で、GPS波浪計の実測波高はNOWPHASの実測波高より全般的に26%程度高めであることが明らかとなった。

さらに、両地点の浅海変形の効果を明確にするために、NOWPHASの実測値とそれを浅海変形補正した値とを比較した。その比較図を図-5に示す。この図から、波高の浅海変形の効果は2%程度であることがわかった。

b) 有義波周期

GPS波浪計の実測周期と浅海変形補正したNOWPHASの実測周期との相関図を図-6に示す。この図から、両者の相関係数は $R^2=0.67$ で、GPS波浪計の実測周期はNOWPHASの

実測周期より全般的に6%程度高めであることが明らかとなった。

さらに、波高同様にNOWPHASの実測値とそれを浅海変形補正した値とを比較した。その比較図を図-7に示す。この図から、周期の浅海変形の効果は1%程度であることがわかった。

c) 卓越波向

NOWPHASアシカ島では波向を観測していないことから、波向の精度検証はJWAが作成した「日本沿岸局地波浪データベース（以下、局地波浪DB）」の卓越波向を用いた。この局地波浪DBは、気象庁から1日2回配信される日本沿岸波浪GPV（格子間隔：6分（約10km）、時間間隔：6時間）を、地形による遮蔽効果と局所的な風波を考慮に入れて2分格子間隔（約3.7km）の値に内挿・再計算を行った結果であり、初期値（実測値を基に作成された格子点値）と6時間先予測値から構成されている。このDBには予測値も含まれているが、実況を精度よく解析・予測していることから、設計波算定などの際の沖波として多方面で利用されている。

そこで、GPS波浪計の実測波向と浅海変形補正した局地波浪DBとの差を求め検証した。両者の波向の偏差（GPS波浪計－局地波浪DB）の出現頻度を図-8に示す。この図の横軸は、波向偏差を16方位に分割したものを示し、波向偏差=0のときはGPS波浪計の実測波向は局地波

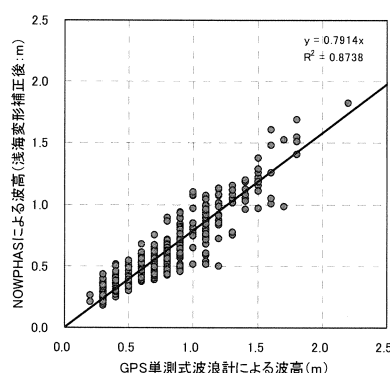


図-4 波高の相関図

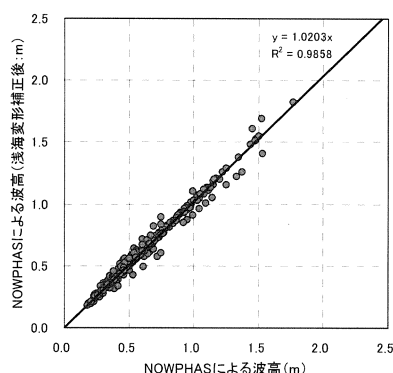


図-5 浅海変形計算の効果（波高）

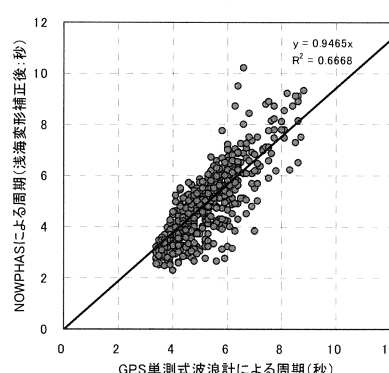


図-6 周期の相関図

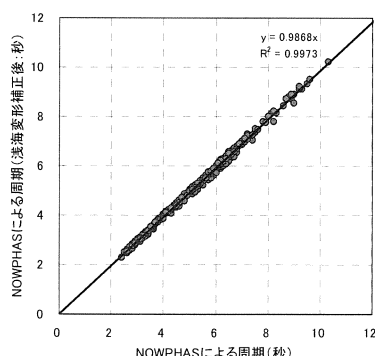


図-7 浅海変形計算の効果（周期）

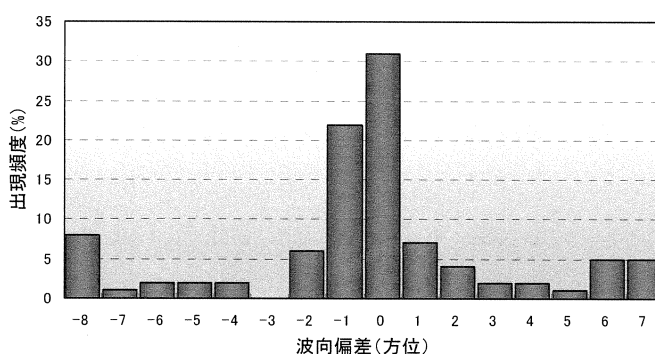


図-8 GPS波浪計の実測波向と浅海変形補正した局地波浪DBとの偏差

浪DBの波向と一致していることを表している。また、波向偏差=-8のときはGPS波浪計の実測波向は局地波浪DBの波向と正反対であることを表している。

この図から、GPS波浪計の波向は±1方位の偏差以内に60%の割合(±2方位の場合70%の割合)で出現していることがわかった。また、波向偏差が+6から-8の出現頻度が若干高めていることから、GPS波浪計の実測波向が正反対の方位に観測される場合もあることがわかった。

(3) 有義波高の補正

灯浮標は波浪により上下左右方向に動揺するが、浮体の種類や形状によって固有動揺特性が異なる。このため、波浪を精度よく観測するにはこの固有動揺特性を考慮した補正をする必要がある。

そこで、今回の試験で用いた灯浮標(L-2型ブイ)の固有動揺特性を類似の円筒型ブイ水槽実験に基づく流体係数にて計算した。

固有動揺特性の補正式は、係留された浮体の上下運動を2次遅れ系として線形近似したものをを用いている。その伝達関数 $G(s)$ は固有角周波数を ω_0 、減衰比を ζ として

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

となる。波高の補正はこの伝達関数のゲインの逆数を求めればよいので、 $s = j\omega$ を代入して

$$\begin{aligned} 1/|G| &= 1/|G(j\omega)| \\ &= \frac{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_0\omega)^2}}{\omega_0^2} \\ &= \frac{\sqrt{\omega^4 + (4\zeta^2 - 2)\omega_0^2\omega^2 + \omega_0^4}}{\omega_0^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_0^4}\right)\omega^4 + \frac{2(2\zeta^2 - 1)}{\omega_0^2}\omega^2 + 1} \\ &= \sqrt{P_1\omega^4 + P_2\omega^2 + 1} \quad (2) \end{aligned}$$

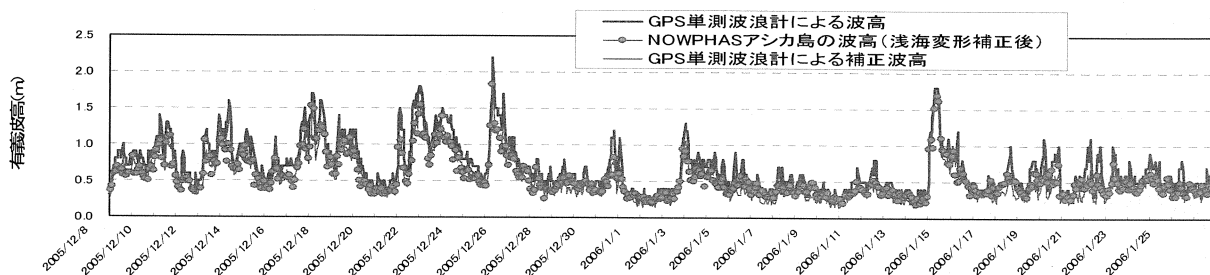


図-10 固有動揺特性による補正前、補正後のGPS波浪計の実測波高、および浅海変形補正後のNOWPHASの実測波高の経時変化図

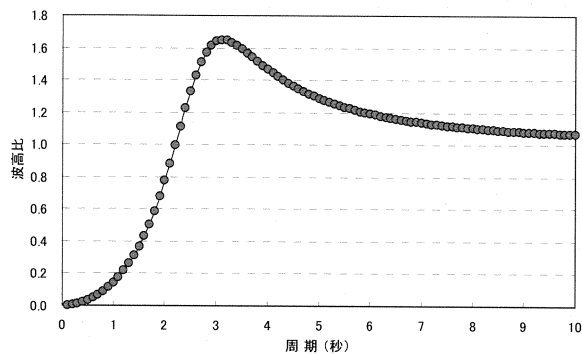


図-9 灯浮標(L-2型ブイ)のゲイン特性

となる。この式が上下運動の補正式となる。よって、係数 P_1P_2 の符号は海洋波浪の場合では、共振点でピークが多少認められるため、減衰比が臨界減衰以下($2\zeta^2 - 1 < 0$)であると推定され、一般には $P_1 > 0$ 、 $P_2 < 0$ となる。かさじまの灯浮標(L-2ブイ)の補正係数のゲインを図-9に示す。

以上のように求めた補正係数を用いてGPS波浪計の実測波高を補正した。補正前、補正後のGPS波浪計の実測波高、および浅海変形補正後のNOWPHASの実測波高の比較図を図-10と図-11に示す。なお、図-11は図-10の一部拡大図である。さらに、ここで補正されたGPS波浪計の実測波高と浅海変形後のNOWPHASの実測波高との相関図を図-12に示す。これらの図から、①GPS波浪計の実測波高の変化傾向は、補正前より補正後の方がNOWPHASの波高とよく一致している、②波高の相関係数は $R^2 = 0.86$ で、GPS波浪計の波高はNOWPHASの波高より全般的に2%高めであることが明らかとなった。

以上のことから、GPS波浪計の実測波高に灯浮標の固有動揺特性を考慮した補正を加えることで、補正前の波高の偏りが26%であったのに対し補正後のそれは2%と、ほとんど波高の偏りがなくなることがわかった。この結果から、今回のGPS単測式波浪計の波高の観測誤差は2%程度と考えられる。

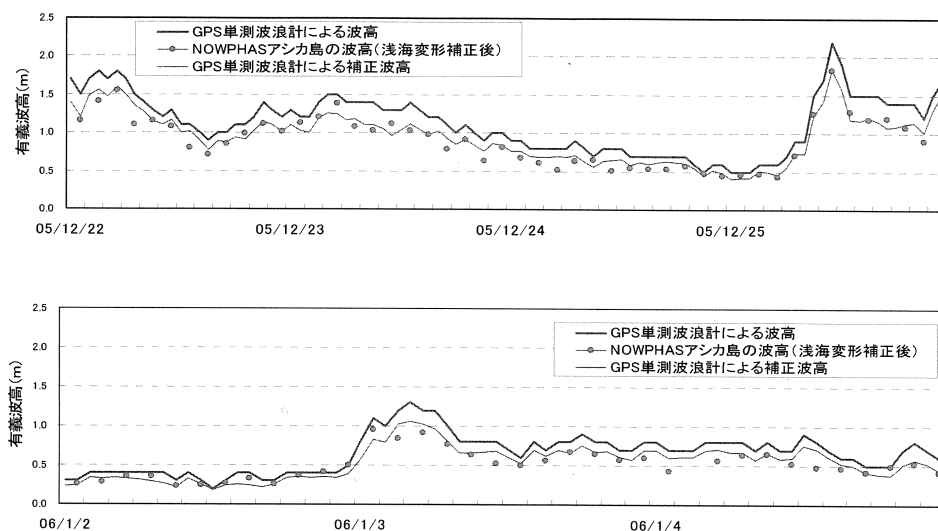


図-11 固有動揺特性による補正前、補正後のGPS波浪計の実測波高、および浅海変形補正後のNOWPHASの実測波高の拡大経時変化図

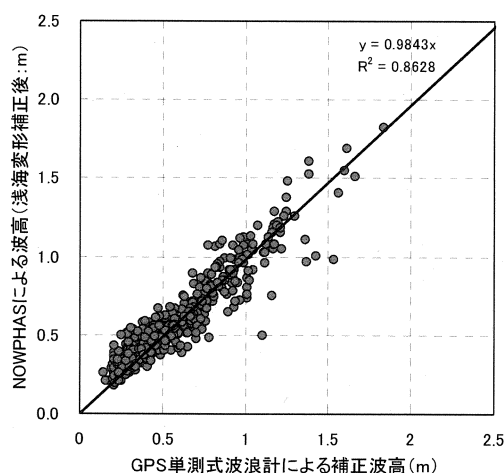


図-12 GPS波浪計の固有動揺補正波高とNOWPHASの浅海変形補正波高との相関

5. おわりに

GPS単独測位方式の波浪観測システムを海上保安庁所管の灯浮標に取り付けて、波浪観測システムの実証試験を行った。このシステムによる実測値とNOWPHASによるそれとを比較した。特に波高の比較では、GPS波浪計の実測値を灯浮標の固有動揺特性で補正することで、高い相関結果が得られている。

今後は、信頼性の高いとされる海象計（従来の海底設置型超音波式波高計と多層式ドップラー流速計の機能を一体化した観測装置）と同一地点で長期間観測し、一般的な灯浮標における観測精度を検証する必要がある。特に、波向については海象計の実測値と比較・検証すると共に、その補正方法も検討する必要がある。

謝辞：GPS単独測位方式による波浪観測システムの開発に携わり、灯浮標の固有動揺特性を計算された、株式会社ゼニライトブイには多大なご協力を得ました。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Harigae, M., Yamaguchi, I., Kasai, T., Igawa, H., Nakanichi, H., Murayama, T., Iwanaka, Y., and Suko, H.: A Low-Cost GPS-Based Wave Height and Direction Sensor for Marine Safety, ION GNSS 2004.
- 2) Harigae, M., Yamaguchi, I., Kasai, T., Igawa, H., Nakanichi, H., Murayama, T., Iwanaka, Y., and Suko, H.: Abreast of the Waves, Open-Sea Sensor to Measure Height and Direction, GPS World, May 2005, pp.16-26.
- 3) Longuet-Higgins, M., Cartwright, D. E., and Smith, N. D.: Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motions of a Floating Buoy, Ocean Wave Spectra, U. S. Naval Oceanographic Office, 1963.