

GPS ブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測

永井紀彦* ・小川英明**・寺田幸博***・
加藤照之****・久高将信*****

海底部の維持補修作業が不要な新たな沖合海象観測システムとして、小型ブイ上の GPS 受信部の 3 次元的な変位情報を得る GPS 津波計を開発した。本研究は、GPS 津波計による大船渡港沖における通年観測データのとりまとめを行い、観測データから解析して得られた波浪・津波・高潮（潮位）情報を、港湾局の久慈・釜石・仙台南港沖合の各沿岸波浪観測情報や、気象庁の大船渡港内の潮汐観測推算情報と比較し、その信頼性と適用性の検証評価を行ったものである。GPS 津波計は、津波ばかりでなく、波浪や潮位・高潮をも、概ね適切に観測していることが判明し、今後のさらなる大水深域への展望が開けた。

1. はじめに

津波・潮位などの海象情報をいち早く観測探知することは、沿岸域の防災上きわめて重要である。かつては、こうした長周期の海面変動は、港内に設置された井戸内の水位変動を計測するフロート式検潮器（合田，2002）が、唯一の測定手段であり、沿岸に到達した後でなければ高潮や津波の把握は困難であるとされていた。しかし、1993 年北海道南西沖地震津波を契機として、沿岸波浪観測のための海底設置式波浪計が、沖合における津波の波形を正確に探知できることが、実測データをもとに明らかにされ、その後の数例の津波に関して、沖合における周波数スペクトルなどの基本的な特性が、明らかにされつつある（合田，2001；永井ら，1993，1995，2001；小舟ら，1996）。

しかし、長周期海面変動を定常的に観測することのできる海底設置式沿岸波浪計の設置は、維持補修の必要上、一般的に水深 50 m 以下の浅海域に限定されているため、津波波形を観測探知してから実際の沿岸への津波の来襲までの時間差は数分間程度しかなく、十分な防災対策をとることは極めて困難であった。他方、海底部の維持補修作業が不要で大水深海域への設置が可能なブイの運動加速度計測を行うブイ式波浪計は、津波や潮位などの加速度の小さい長周期変動成分を捉えることは、事実上不可能である。このため、海底部の維持補修作業が不要な、新たな沖合海象観測システムの開発が望まれている。

著者らは、小型ブイ上の GPS 受信部の 3 次元的な変位情報を得て沖合の津波を観測する GPS 津波計を開発し、長期間にわたる現地実証実験を大船渡港沖合海域で実施

している（Kato ら，2001）。本研究は、GPS 津波計による通年観測データのとりまとめを行い、観測データから解析して得られた波浪・津波・高潮（潮位）情報を、周辺沿岸域の波浪・潮位観測結果と比較し、その信頼性と適用性の検証評価を行ったものである。

観測結果の検証にあたっては、国土交通省港湾局および港湾空港技術研究所を含むその関係機関によって構築・運営されている全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）の久慈・釜石・仙台南港沖合の各沿岸波浪観測情報（永井，1998）や、気象庁の大船渡港内の潮位観測情報を用いた。

2. 大船渡における GPS 津波計の現地実験

大船渡港沖合の水深 53 m 地点に 2001 年 1 月末にブイを設置し、現地実証観測を継続実施中であるが、本稿では、2001 年の通年観測データをもとに検討を行った。陸上基地局を用いる GPS 測位法の RTK（Real Time Kinematic）法によって、小型ブイ上に設置した GPS アンテナ位置を WGS 84 測地系で 1 s 毎に測位し、XYZ 座標を cm 精度で計測した。検討対象期間中には、低気圧や台風による高波浪期間や、ペルー地震津波の来襲が含まれている。

図－1 は、観測位置を示したものである。GPS ブイには、ENE から SW にかけての外洋波浪が入射する地形条件となっている。陸上基地局は、気象庁によって観測が実施されている港内検潮所の近くで、ブイを見渡すことのできる位置に設けられた。

図－2 は、GPS ブイの諸元を示したものである。直径 2.8 m のブイは、チェーンによって多点係留した。ブイの上端（海面上 6.4 m）には GPS 受信アンテナを設置している。GPS 受信アンテナは水没すると必要な位置検出が困難になるため、水面上のある程度の高さが必要である。しかしながら、図からわかるように受信アンテナの位置とブイの重心が一致していないため、GPS で検出されるブイ変位には、ブイの重心位置の変位とブイの回転によ

* 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室長
** (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室
*** 工博 日立造船(株)技術研究所基礎技術研究室主席研究員
**** 理博 東京大学地震研究所教授
***** 正会員 (株)エコー 海象解析部長

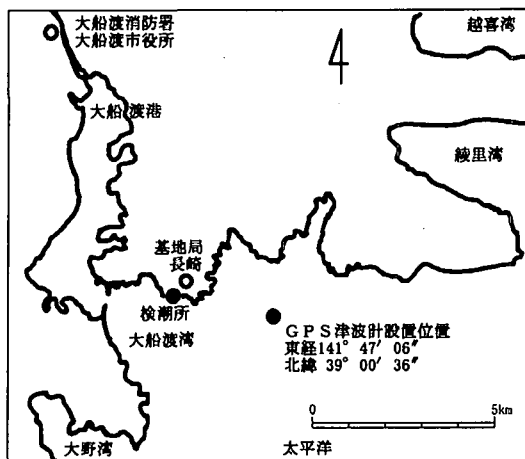


図-1 大船渡港沖合における観測位置

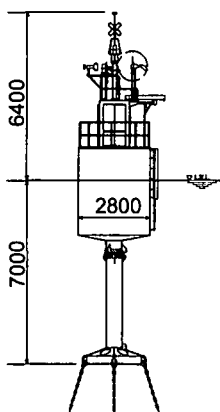


図-2 GPS ブイの概要 (mm 単位)

るアンテナ位置の変位とが、合成されたものとなっていることには、注意が必要である。

3. 波浪の観測

1s 間隔で測得される GPS アンテナの変位情報は、通信障害等によって一部に異常値が含まれるものであった。異常データのパターンとしては、データの欠落やとびはねなどが多かった。しかしながら、たとえ一部の観測情報に異常値が含まれていたとしても、異常部分のデータを採用しないことによって、ブイの鉛直変位から求めた海面変動記録をもととしたゼロアップクロス法による有義波諸元の算出は可能である(合田, 2001)。ここでは、ナウファスによる波浪データ処理の基準に倣って、毎偶数正時前後 10 分ずつの、すなわち、2 時間毎に 20 分間の、観測データをもとに有義波諸元の算定を試みた。

図-3 は、検討対象期間中のデータの測得状況を示したものである。横軸は、2001 年の 1 月 1 日から 12 月 31

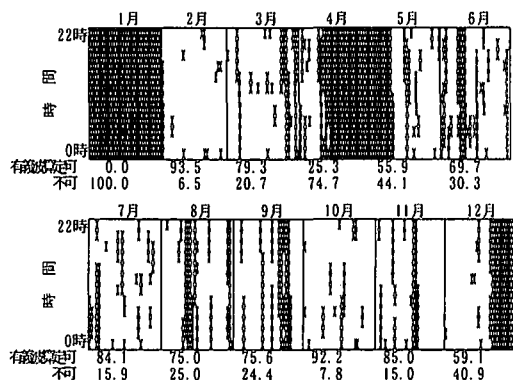


図-3 有義波観測データの取得状況 (2001 年)

日に至る 365 日間を 2 段 (6 か月ずつ) に分けて表示し、縦軸は、毎日の 0 時から 22 時までの 12 観測を表示したものである。空白部分は有義波諸元の算定が可能であった観測を、×印は異常データが多く有義波諸元の算定が不可能であった観測をそれぞれ意味している。検討対象期間中、観測開始前の 1 月の 1 か月間と、システム障害による 4 月から 5 月にかけての約 1 か月間および 12 月下旬の約半月間の、合計 3 回の長期欠測があった。しかしながら、こうした長期欠測を含めても年間のデータ測得率は 66% であり、長期欠測期間を除外すれば 82% であった。高波浪時に特に欠測が多くなることもなかったため、最初の実用化試験としては比較的良好な測得率が得られたものと考えられる。

表-1 は、年間を通じた観測の結果抽出された上位 3 ケースの高波について、その起時と気象要因を示すとともに、算定された有義波高と周期を、近傍のナウファス沿岸波浪観測記録 (永井ら, 2003) と比較したものである。3 月 4 日 22 時および 10 月 11 日 18 時のそれぞれの二つ玉低気圧による高波発生時、および 8 月 23 日 6 時の台風 0111 号来襲による高波発生時には、久慈港、釜石港、および仙台南港沖合の海底設置式沿岸波浪計も同様な高波を観測しており、観測された有義波高や周期は、同じ程度の値となっていることがわかる。

図-4 は、有義波高と有義波周期の月平均値を、各観測

表-1 観測された高波記録

最大有義波の起時	2001年 3月4日22時	2001年 10月11日18時	2001年 8月23日6時
気象要因	二つ玉低気圧	二つ玉低気圧	台風0111号
大船渡 ブイ	H1/3(m) 4.06	3.66	3.30
	T1/3(s) 12.0	11.0	10.4
久慈	H1/3(m) 3.95	3.42	2.98
	T1/3(s) 11.5	10.5	9.8
釜石	H1/3(m) 2.26	3.45	1.71
	T1/3(s) 9.3	10.1	8.6
仙台南港	H1/3(m) 3.59	3.95	3.18
	T1/3(s) 10.2	10.4	9.9

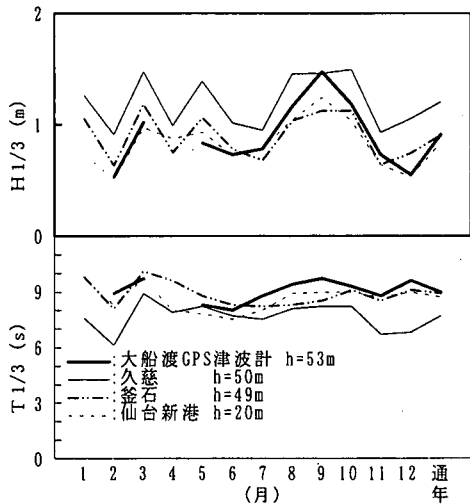


図-4 月平均有義波の比較 (2001年)

点で比較したものである。月平均有義波高・周期とも、大船渡港沖のGPSブイで観測された値は、近傍のナウファス沿岸波浪観測点に近い値となっている。また、月平均有義波高が3月と10月頃に極大値を示し、7月頃と12月頃に極小値を示す変化傾向も、各観測点に共通している。GPSブイによって観測された情報は、波候統計を概ね正確に示しているようである。

図-5は、年間を通じて最も高い有義波高を記録した3月4日から5日にかけての有義波高と有義波周期を、経時変化として比較したものである。二点鎖線で示される釜石港沖合の波浪観測点は、地形の影響によって東方向以外からの来襲波は遮蔽されるため、若干、波高が低くなっているようであるが、大船渡港沖のGPSブイを含む他の観測点における経時変化は、概ね一致している。このことも、また、GPSブイの高波浪時における有義波観測値の妥当性を示すものである。

図-6は、GPSブイアンテナの3成分の位置変動をもとに算定した方向スペクトルを、同時刻の久慈港沖合の海象計で得られた方向スペクトル (永井ら, 2003) と比較したものである。北から東を経て南に至るまで、ほぼ180度の外洋波浪の来襲を受ける地形条件の久慈港沖では、ESEを主方向とするピークが見られる。これに対して、大船渡港沖のGPSブイでは、N方向とS方向との二つの周波数のほぼ等しいピークが見られる。すなわち、久慈港沖と大船渡港沖では、ピーク周波数はほぼ等しいスペクトルになっているものの、波浪エネルギーの方向分布特性がまったく異なっている。図-1に示される周辺地形から考えて、大船渡港沖ブイに北からの波浪エネルギーが来襲することは、極めて考えにくく、GPSブイによる波向 (方向スペクトル) の算定結果が、必ずしも

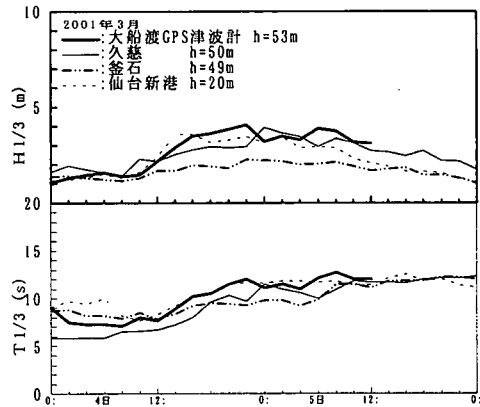


図-5 高波浪時の有義波高と周期

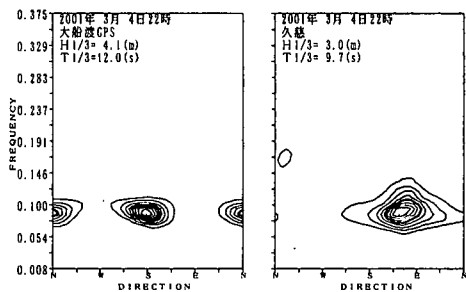


図-6 方向スペクトルの比較 (3月4日22時)

適切でないと判断される事例である。

こうした観測例は、他にも多く見られた。これは、ブイ重心と計測点の位置のずれによるものと推定される。すなわち、ブイの回転運動によって、アンテナ上部の変位は、ブイ重心位置付近の波による水粒子運動変位とは大きく異なったものとなっているものと思われる。ブイの動揺を考慮した解析ソフトの開発が今後の課題である。

4. 津波の観測

GPS津波計は、本来、沖合における津波波形の検出を開発目的としたものである。しかし、津波は極めて希に来襲する事象であるため、実際の津波波形を実証実験中に観測することは困難であると考えられていた。しかし、たまたま、日本時間2001年6月24日にペルーでM7.9の巨大地震が発生し、翌25日未明に我が国の太平洋沿岸に津波が来襲する事象が、検討対象期間中に生じた。

図-7は、この津波来襲前後の、長周期成分の波浪観測結果を、ナウファスで採用されている手法に倣って、2時間毎にスペクトル解析し周期帯換算波高で表示したものである (永井, 2000)。図の下段には、ナウファス久慈港沖合の観測結果を併せて表示した (永井ら, 2001)。周

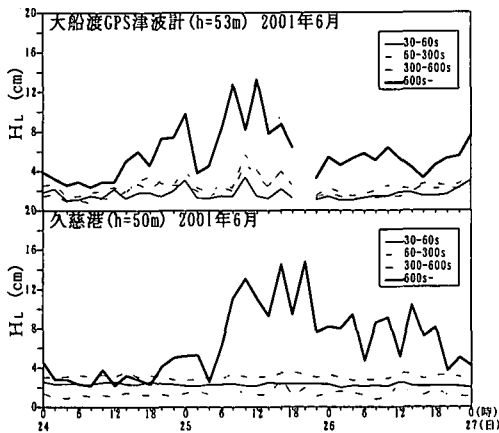


図-7 ペルー地震津波の検出

期 600 s 未満の比較的周期の短い周期帯では、6 月 24 から 26 日にかけての 3 日間にわたって、換算成分波高は数 cm 以下の低い値を保ったままであったが、周期 600 s 以上の長い周期帯に限って、25 日未明から半日間程度にわたり換算波高 10 cm 強の長周期エネルギーが明確に現れている。久慈港沖の海底設置式波浪計でも、同様の事象が観測されているため、これは津波の来襲に伴うものであると考えられる。

すなわち、GPS 津波計は、海底設置式沿岸波浪計と同様に、沖合の津波波形を捉えることができることが、実測データから検証された。

5. 潮汐と高潮の観測

GPS 津波計は、直接 GPS アンテナの変位を計測するため、より周期の長い沖合の潮位変動を測定することが理論的には可能である。ここでは、1 s 間隔の通年観測データをもとに、数値フィルターによって毎時値に変換し、調和解算計算等によって潮位変動成分の抽出を試みることとした。なお、毎時値への変換にあたっては、ナウファスデータ処理による手法に準じて (合田, 2002)、カットオフ周期 60 s と 209 分との 2 段階の数値フィルター処理を行った。

表-2 は、GPS プイによる年間観測データを毎時値に変換し調和解算計算した結果を、気象庁による港内潮位観測結果からやはり調和解算計算によって求められた調和定数と比較したものである。なお、大船渡港の港内潮位推算結果は、海上保安庁によって算定された調和定数表 (海上保安庁, 1992) を用いて計算することも可能であるし、潮位表 (気象庁, 2000) を用いて求めることも可能である。しかし、潮位変動の調和定数は、実は定数ではなく、年によって若干の変動があることが知られており (永井ら, 1996)、この変動分が天文潮位成分の評価

に当たって誤差となることが懸念されたため、ここでは、気象庁からご提供いただいた 2001 年間の 1 年間の港内潮位観測記録から直接計算して、港内の調和定数を算定した。

沖合で得られた主要 4 分潮の振幅は、いずれの分潮でも概ね港内推算値の 80-85% 程度である。これは沖合から港内への潮位変動の増幅が示されたものと考えられる。すなわち、潮位変動は、沖合から港内にかけて 20% 程度増幅されていることがわかる。遅角に注目すると、沖合の位相角は、いずれの分潮に関しても、港内の位相角よりも数度ほど大きい値を示し、位相が進んでいることがわかる。この位相角度差にそれぞれの分潮の周期を乗じたものが、各分潮の沖合と港内との時間差を意味する。毎時データをもとに解析した結果であるため、算定結果には分潮毎に異なった誤差が含まれていると考えるべきであろうが、すべての分潮で時間差は 9-18 分の間となっている。この時間差は、潮位変動のような長周期海面変動の沖合から港内への伝播時間差に対応するものであり、大船渡港港口部における高潮や津波の伝播特性として重要な値であると考えられる。

表-2 主要分潮の振幅

定数	振幅 (cm)			遅角 (°)			
	地点	沖合	港内	比	沖合	港内	角度差
M_2	24.4	30.5	0.80	104.7	97.8	6.9	14.3 分
S_2	11.9	14.0	0.85	138.3	133.7	4.6	9.2 分
K_1	19.7	23.5	0.84	164.5	160.2	4.3	17.2 分
O_1	15.7	18.5	0.85	147.4	143.7	3.7	15.9 分
Z_0	71.7	86.5	0.83	-	-	-	-

図-8 は、台風 0115 号来襲時における港内および沖合の推算潮位 (調和定数から逆算) とこの時の観測波形 (長周期成分) とを比較したものである。図は、上から順に、沖合における観測潮位と推算潮位、港内における観測潮位と推算潮位、および偏差 (観測潮位と推算潮位の差) を示している。推算潮位は天文潮位と考えることができるので、偏差は、台風による気圧低下や風による海水の吹き寄せによる海面上昇分 (いわゆる高潮) を示すと考えられる (永井ら, 2000)。

台風近接前の 9 月 10 日にはほとんど現れなかった偏差が、11 日には顕著に現れていることが注目される。偏差の極大値は、沖合の方が港内よりも若干早く出現し、港内は沖合よりも若干増幅されているようであるが、いずれも、11 日深夜から 12 日未明にかけて 30 cm 弱の偏差が現れている。

すなわち、GPS 津波計は、沖合における潮位変動や高潮偏差を検出するためにも有効であることが示された。

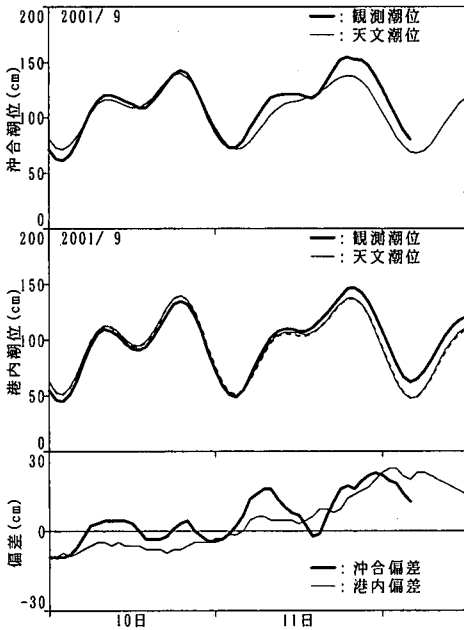


図-8 高潮の検出(台風0115号)

6. ま と め

以上の結果, GPS 津波計は, 津波ばかりでなく, 波浪や潮位・高潮をも, 概ね適切に観測していると考えられ, 今後のさらなる大水深域への展開が期待される。

最後に, 本研究は, 文部科学省による補助研究(産学官連携イノベーション創出事業費補助金: 独創的革新技術開発研究提案公募制度: 課題番号 14401: GPS 津波計の沖合展開技術に関する研究)の一環として行われたものであることを述べ, ここに謝意を表する。

参 考 文 献

海上保安庁水路部(1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第 742

号, 267 p.

気象庁(2000): 平成 13 年潮位表, 290 p.

合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集(2001): 波を測る(沿岸波浪観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 212 p.

合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集(2002): 潮位を測る(潮位観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 188 p.

小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1996): 1996 年イリアンジャヤ地震津波の特性, 港湾技研資料 No. 842, 96 p.

永井紀彦(1998): ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の現状と今後の課題, 土木学会論文集巻頭論文, 第 609 号, VI-41, pp. 1-14.

永井紀彦(2000): スペクトル解析に基づく波向と長周期波の観測情報の高度化, 平成 12 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 103-118.

永井紀彦・橋本典明・浅井正(1993): 平成 5 年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報, 港湾技術研究所報告第 32 巻, 第 4 号, pp. 51-97.

永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1995): 平成 6 年(1994 年)北海道東方沖地震津波の特性, 港湾技研資料 No. 802, 97 p.

永井紀彦・菅原一晃・渡邊弘・川口浩二(1996): 久里浜湾における長期検潮記録解析, 港湾技術研究所報告第 35 巻, 第 4 号, pp. 3-35.

永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏(2000): 台風 9918 号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性, 港湾技研資料 No. 969, 47 p.

永井紀彦・富田孝史・佐藤和敏・額田恭史(2001): 我が国沿岸の沖合波高計と港内潮位計が捉えた 2001 年ペルー地震津波, 第 13 回研究成果発表会講演要旨集, 海洋調査技術学会, pp. 16-17.

永井紀彦・小川英明(2003): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOW-PHAS 2001), 港湾空港技術研究所資料 No. 1041, 86 p. (各港湾波浪観測統計図表は CD-ROM 化)

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, T. Moriguchi, M. Takada, T. Tanno, M. Kanzaki and James Johnson(2001): A New Tsunami Monitoring System using RTK-GPS, ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12, pp. 645-651.