

ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築

清水勝義¹・永井紀彦²・里見 茂³・李 在炯⁴
久高将信⁵・藤田 孝⁶

沿岸波浪観測網を津波監視にも機能拡張させるため、海底設置式波浪計より沖合での観測が可能な GPS ブイの活用が検討されているが、ブイ自体の周波数応答特性のため、ブイの動揺特性を考慮した波浪観測データの処理・解析システムの構築が必要である。本研究は、室戸岬沖南 13 km の水深 100 m 地点に設置された GPS ブイと、近傍の室津港沖水深 27 m 地点の海底設置式波浪計との観測結果の比較検討を通じて、ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築をめざしたものであり、GPS ブイによるデータ解析フローを提案したものである。

1. はじめに

沿岸波浪観測網を津波監視にも機能拡張させるため、設置水深が 50 m 以下の浅海域に限定される海底設置式波浪計に替わって、より沖合での観測が可能な GPS ブイの全国沿岸への展開が計画されている。GPS ブイは、ブイ頂部に位置する GPS 受信機の下および水平 2 成分位置座標を、RTK-GPS 法によって cm 精度で毎秒計測することが可能であり、比較的周期の短い風浪から、周期の長い津波・大潮・潮汐まで、きわめて広範囲な周期帯の海面変動計測が可能である特徴を有している（春日井ら, 2005; 永井ら, 2005a）。しかし、波浪計としては、ブイ自体の周波数応答特性のため、ブイの動揺特性を考慮した波浪観測データの処理・解析システムの構築が必要である（永井ら, 2003; Nagai ら, 2004）。本研究は、大水深 GPS ブイと、近傍の浅海域に設置された海底設置式波浪計との観測結果の比較検討を通じて、ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築をめざしたものである。

2. 室戸沖における波浪・津波観測

GPS ブイの試験機は、2004 年 4 月に、図-1 に示す室戸岬沖 13 km、水深 100 m 地点に設置された（Kato ら, 2005）。同海域近傍では、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の一環として、室津港沖 2 km、水深 27 m 地点において、海底設置式超音波式波高計（USW）および流速計型波向計（CWD）による定常波浪観測が 2004 年 10 月まで行われていた。これらの波浪・津波観測システムは、2004 年 9 月 5 日から 6 日にかけての東

海道沖地震津波（永井ら, 2005b）や 10 月 20 日の台風 0423 号近接時の高波（永井ら, 2005c）の観測に成功しており、GPS ブイによる観測システムの有効性を証明すると共に、大水深沖合から浅海域を経て港内に至る津波の伝播特性の解明や、高波浪時での沖波のスペクトル特性の解明にあたって、貴重な観測情報を提供している。

3. GPS ブイの波浪応答特性

図-2 は、室戸沖 GPS ブイの周波数応答特性を示したものである。実測されたブイ上の GPS アンテナの鉛直・水平座標値より 6 成分のブイ運動を分離推定することは困難であったため、上下揺（Heaving）および横揺（Rolling）については、さまざまな周波数の入力波浪に関する応答を数値シミュレーション（丸山ら, 1997）で求めた結果を示した。縦軸の応答値は入射波の振幅で正規化した結果を紹介したため、図中の表示に示される単位量となる。ただし、船首揺（Yawing）は、周期の短い波浪を外力条件とした数値シミュレーションでの再現が困難な長周期の振れ回り運動であるため、ここでは、

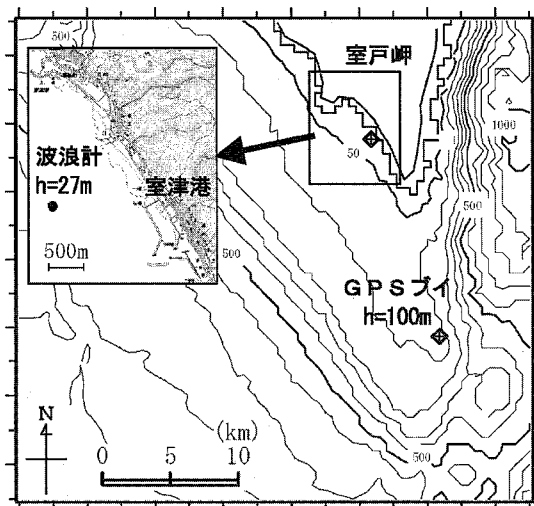


図-1 観測位置図

- | | |
|------------|-------------------------------|
| 1 正 会 員 | (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長 |
| 2 フェロー 工博 | (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部長 |
| 3 | 東北地方整備局 釜石港湾事務所 |
| 4 正 会 員 工博 | (財)沿岸技術研究センター 波浪情報部 主任研究員 |
| 5 正 会 員 | ㈱エコー 海象解析部長 |
| 6 正 会 員 工修 | 日立造船技術研究所主任研究員 |

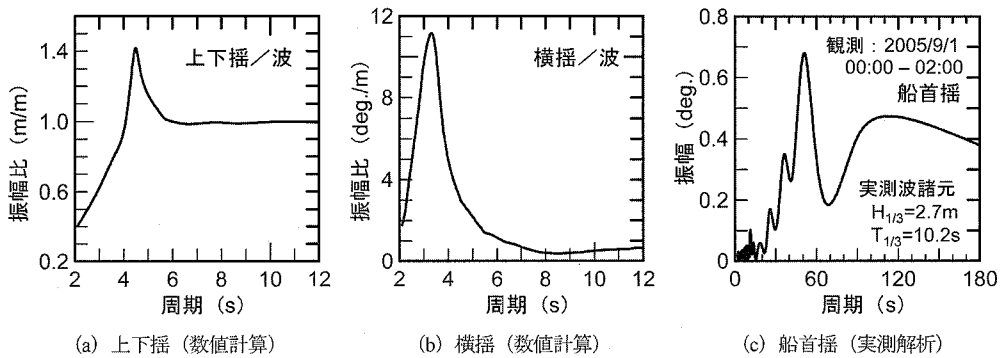


図-2 ブイの周波数応答特性

ブイ上に設置されたコンパスによって実測された、ブイの水平回転運動のスペクトルの一例を紹介した。

周期 6 s 以上の波浪に対しては、上下揺は海面変動にほぼ完全に応答し、横揺は小さいことがわかる。反面、周期 30 s 以上の長周期帯で、ブイの振れ回り運動に対応すると考えられる船首揺が見られる。すなわち、GPS ブイを波浪観測機器として考えると、周期 6 s から 30 s の間の周期帯では、ブイの運動と波浪による水粒子運動とは良好に対応すると考えられるので、ブイの上下変動を波浪による海面上下変動と考え波高や周期を算定し、ブイの水平 2 成分運動から波向を推定することは、実用上大きな問題はないと考えられる。しかし、周期 6 s 以下の短周期波に対してはブイの上下揺の周波数応答を考慮した波高算定が必要であり、周期 30 s 以上の長周期波に対してはブイは水平方向に振れ回るため、水平 2 成分運動から波向を算定することは困難であることも、同時にわかる。

4. スペクトル解析に基づく周期帯波浪表示

こうしたブイの動揺特性を配慮した上で、表-1 に示すように周期帯を区分し、全国港湾海洋波浪情報網で用いられているスペクトル解析に基づく周期帯波浪情報表記 (永井ら, 2000; 合田, 2001; Nagai ら, 2002) を検討した。すなわち、周波数スペクトル算定結果をもとに、各周期帯についてスペクトルの部分積分を行い、積分値の平方根の 4 倍の値を、周期帯波高として定義する。スペクトルの全周波数領域積分値の平方根の 4 倍が、有義波高にほぼ一致することから類推された算定法である。

周期 30 s 以上の f1 周期帯では、ブイの水平変位はブイ自体の振れ回りにより波浪とはよく対応しないので、周期帯成分波高の算出は可能であるが、波向算出は困難である。周期 6 s 以下の f6 周期帯では、横揺の影響が大きく GPS 水平変位データからの波向算定は困難であるが、上下揺れに対しては、海底水圧変動から表面波を

表-1 周期帯の区分

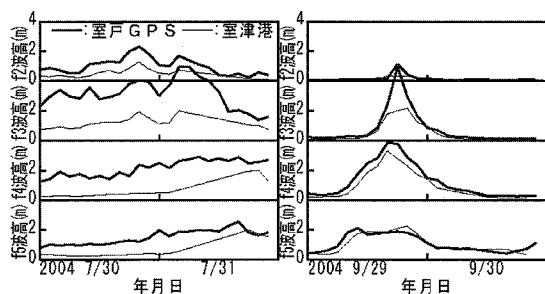
表 記	周期 帯	周波数帯
f1	30 s 以上	0.031 Hz 以下
f2	15~30 s	0.039~0.063 Hz
f3	10~15 s	0.070~0.094 Hz
f4	8~10 s	0.102~0.125 Hz
f5	6~8 s	0.133~0.164 Hz
f6	6 s 以下	0.172 Hz 以上

推定する手法 (橋本ら, 1993) に倣った周波数応答関数を考慮して成分波高補正することによって、成分波高の算出が可能であると判断された。f2, f3, f4, f5 の周期帯波向は、スペクトル解析によりブイの水平 2 成分運動を周期帯分離し、各周期帯毎の運動軌跡図をもとに、 180° の定義範囲 (室戸沖では E-S-W 方向) で算定することとした。

5. 周期帯波高の比較・検討

図-3 は、台風近接時の各周期帯波高の時系列を両観測点で比較した結果である。E 系の波浪が発達した台風 0410 号では、海底設置式波浪計は地形による遮蔽の影響を受けるので GPS ブイに比べていずれの周期帯でも換算波高が小さかった (図-3(a))。これに対して、台風 0421 号では、室戸に最接近した 9 月 29 日 16 時頃までは SW からの波浪が発達を続けたため、両観測点の全周期帯における周期帯波高はよく一致した。しかし、その後は SE からのうねりが発達したため、GPS ブイで見られたさらなるうねりの発達は、E からの波浪が遮蔽されている海底設置式波浪計では見られなかった (図-3(b))。

図-4 は、2004 年 7 月から 11 月にかけての、両観測点における各周期帯波高の相関を比較したものである。各周期帯毎に、横軸に海底設置式波浪計で求めた周期帯波高を、縦軸に GPS ブイで求めた周期帯波高をそれぞれ示すとともに、最小自乗法で求めた回帰直線 ($y=ax$)



(a) 台風 0410 号通過時 (b) 台風 0421 号通過時

図-3 台風通過時の周期帯波高の経時変化

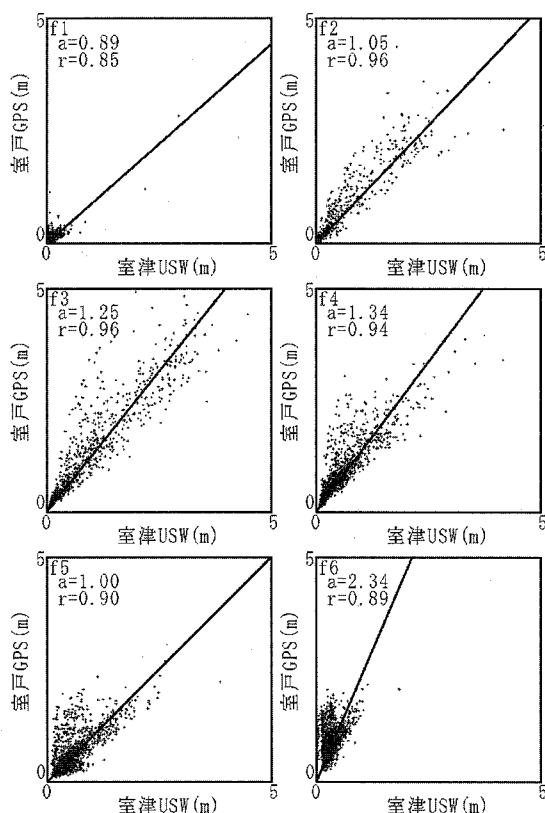


図-4 周期帯波高の相関

の勾配を a として、相関係数を r として、それぞれ図中に表示している。 a の値に注目すると、 $f1$ から $f4$ までは、周期が短くなるほど a の値は大きくなる傾向が読み取られる。

これは、長周期波ほど E 系の波浪が地形の遮蔽を回り込み込んで海底設置式波浪計まで伝わり易いこと、浅水変形の影響を受けやすいこと、などが原因であろう。周期の比較的短い波浪成分である $f5$ および $f6$ の両観測点の相関は複雑であり、プロットが V 字型に 2 系列に

分離されているようにも見られる。すなわち、 a が極めて大きい縦軸に近い直線上のプロット群と a が 1~2 程度の直線上に近いプロット群との並存が見られる。前者は E 系の洋上風が吹いた場合、後者は W 系の洋上風が吹いた場合であると想像される。周期の短い E 系の風浪は、地形による遮蔽を強く受けるので、海底設置式波浪観測点には伝わりにくいためであろう。

r の値を見ると、 $f2, f3, f4$ の周期帯すなわち周期 8s から 30s の周期帯で両者の相関はきわめて高く、これより周期の長い $f1$ や周期の短い $f5, f6$ では、相関が相対的に低くなっているが、このことも、周期の長い波ほど屈折の影響を強く受け、E 系の波浪も海底設置式波浪計設置点まで回り込みやすくなっているためであろう。ただし、長周期波領域の $f1$ では、常時においてはエネルギーそのものの絶対値が低いため、両観測点の相関は現れにくくなっているものと思われる。

6. 周期帯表示による波向解析法

図-5 は、GPS プイの水平 2 成分位置データをプロットした例である。台風 0418 号の影響で高波浪状態の時の事例であるにもかかわらず、プイの水平運動は複雑であり、明確に水平 2 成分 GPS 位置データから波向を算定するのは困難に見える。これは、主として、 $f1$ 周期帯で発生するプイの長周期振れ回り運動のためである。すなわち、プイの水平運動から波向を算定するにあたっては、観測された水平位置座標を単純にプロットするだけの手法ではプイの船首揺れの影響が強く現れすぎるため、周期帯毎に分離して整理する必要がある。

図-6 は、図-5 と同時刻のプイの水平 2 成分運動をそれぞれスペクトル解析し、定義される周期帯成分をフーリエ逆変換して求めた、周期帯毎のプイの運動軌跡図を示したものである。振れ回り運動の影響を受ける $f1$ および横揺の影響を受ける $f6$ を除けば、それぞれの周期帯の波向は、図-5 に比べて明確であることがわかる。このため、GPS プイによる波向観測結果は、周期帯毎に表示を行うこととした。

図-7 は、2004 年 7 月から 11 月にかけての、両観測点における周期帯 $f2$ (周期 15~30s) から周期帯 $f5$ (周期 6~8s) までの各周期帯毎の波向出現特性を成分波高階級とともに示したものである。GPS プイには、各周期帯で E-S-W の幅広い方向から波浪が来襲するが、 $f2$ では $f4$ や $f5$ に比べて E および ESE からの波の頻度が少ない。これは紀伊半島による遮蔽によってうねりの発達に制約されるためと考えられる。海底設置式波浪計によって観測される波向は、屈折の影響を強く受け、GPS プイより狭い範囲に集中している。 $f4, f5$ の最多波向が S であるのに対して $f2, f3$ の最多波向が SSW となって

いるのは、長周期波浪ほど屈折の影響を強く受けるためであろう。

7. GPS 波浪計によるデータ処理フローの提案

図-8は、上記の検討を経てとりまとめた、GPS ブイによるデータ解析フローを示したものである。大水深沖合に設置される GPS ブイは、①津波監視（概ね周期 300 s 以上の長周期成分波形監視）、②常時の長周期波浪

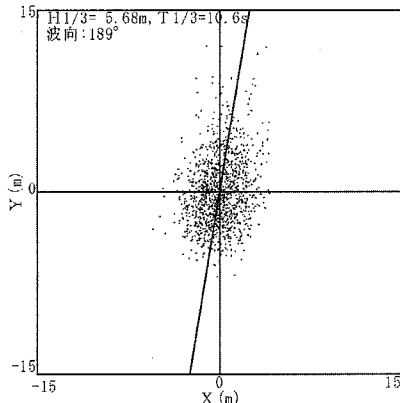


図-5 ブイの水平運動 (2004. 9. 7. 11:50~12:10)

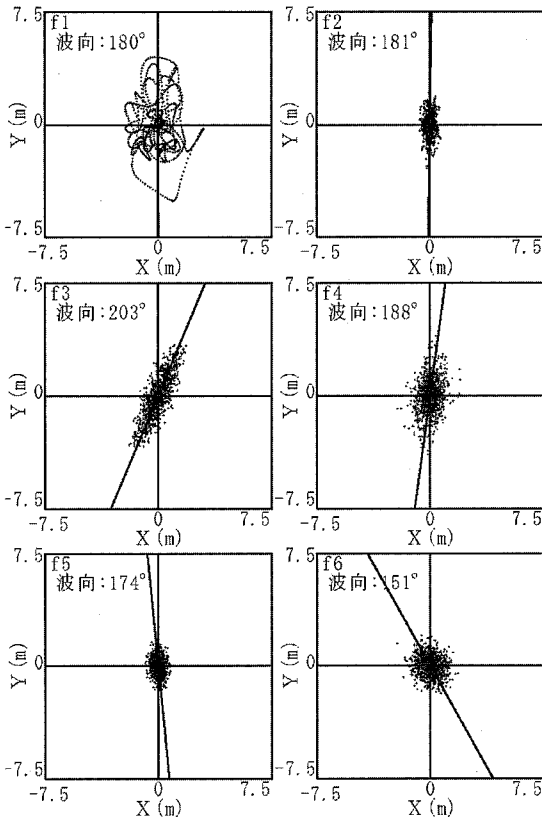


図-6 各周期帯のブイの水平運動

監視（概ね周期 30~300 s の周期帯成分波形）および、③周期 30 s 以下の風浪の監視を、それぞれ並行して同時に行うこととした。風浪の解析としては、ゼロアップクロス法による波別解析と、スペクトル解析による周期帯解析を、並行して実施することを提案した。波向は、周期帯解析の中で周期 6~30 s の範囲である、f2, f3, f4, f5 の波向を、それぞれの周期帯毎に、整理しとりまとめることとした。

こうした解析を室戸沖 GPS ブイによる実測データに適用し、同時期の近傍海底設置式波浪計による観測結果と比較し、その妥当性を確認すると共に、両観測点の波

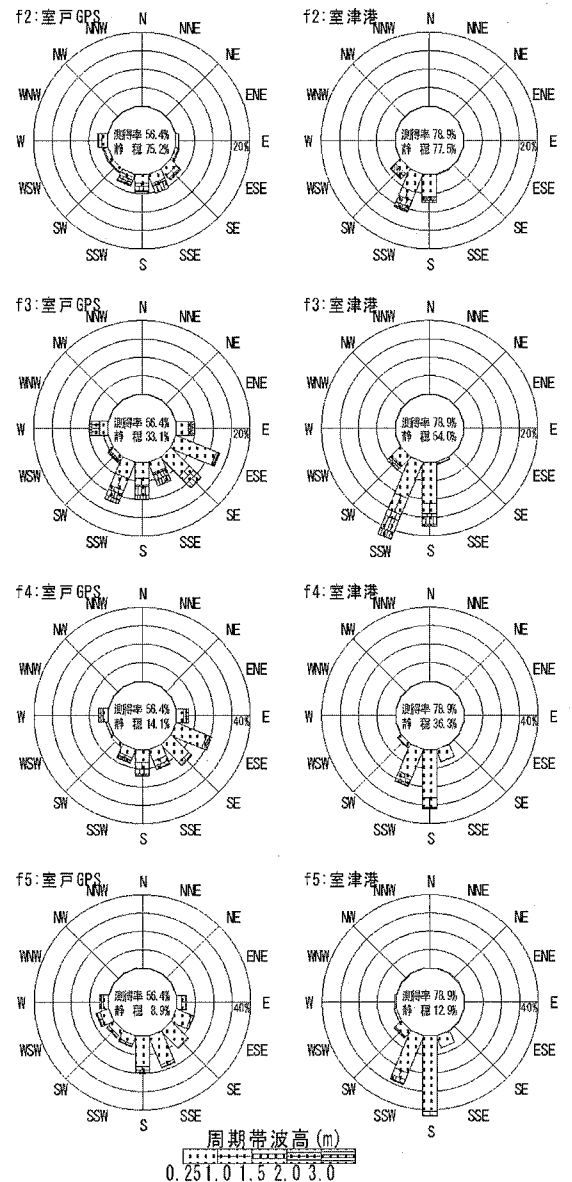


図-7 周期帯毎の波向出現状況

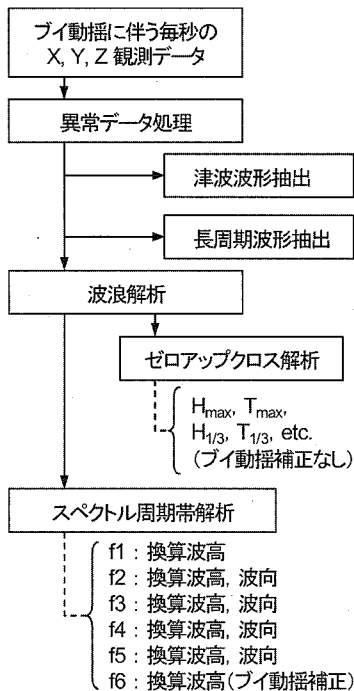


図-8 データ処理フロー

浪出現特性を比較した結果、前述したように、既存の海底設置式波浪計による観測結果は、地形による波浪の変形・遮蔽効果を強く受けており、海域を代表する汎用的な沖波を観測するためには、大水深 GPS ブイ設置点における観測の方が優れていることが示され、GPS ブイによるより大水深海域における波浪観測の必要性が示唆された。

8. ま と め

大水深 GPS ブイと、近傍の浅海域に設置された海底設置式波浪計との観測結果の比較検討を通じて、ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理フローを図-8の通り提案するとともに、その波浪演算結果を考察し、両観測点における波浪の出現特性を検討した。この結果、提案したフローにより、スペクトル解析に基づく周期帯波浪表示を行うことによって、短周期から長周期に至る広い周期幅における波浪特性の把握が可能であることを示すことができた。波向に関しても、周期帯を区切ることによって、GPS ブイによって観測できることが確認された。既存の海底設置式波浪計による観測結果は、地形による波浪の変形・遮蔽効果を強く受けてい

ることが、GPS ブイによる観測結果との比較から改めて明らかにされた。すなわち、海域を代表する汎用的な沖波を観測するための、GPS ブイによるより大水深海域における波浪観測の必要性が示唆された。

最後に、室戸岬沖への GPS ブイの設置は、文部科学省の補助金を受けたものであり、東京大学地震研究所・(財)人と防災未来センター・日立造船(株)および港湾空港技術研究所の4者共同研究の一環として実施された。また、ナウファスの一環としての室津港沖波浪観測は、国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所によって長年継続して実施されている。これら数多くの関係の方々に、深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 春日井康夫・永井紀彦(2005): 津波防災の守り神—津波観測システムの構築に向けて—, CDIT, No.17, (財)沿岸技術研究センター, 広報誌 2005 年 5 月号, pp. 10-11.
- 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)沿岸技術研究センター, 212p.
- 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・横井博志・久高将信(2000): 現地方向スペクトルに基づく波向出現特性とその表記, 海講論文集, 第 47 巻, pp. 1336-1340.
- 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信(2003): GPS ブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 海講論文集, 第 50 巻, pp. 1411-1415.
- 永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・三井正雄(2005a): 沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言, 海洋開発論文集第 21 巻, pp. 61-66.
- 永井紀彦・里見茂(2005b): 2004 年東海道沖地震津波の観測結果, 港空研資料, No1096, 22p.
- 永井紀彦・里見茂(2005c): 2004 年台風による高波の観測結果(NOWPHAS2004 特別号), 港空研資料, No1100, 65p.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一見・浅井正・朴慶寿(1993): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 港研報告第 32 巻, 第 1 号, pp. 27-51.
- 丸山忠明・川村幸男・武田純男・永田修一・三宅成司郎・藤田孝(1997): 浮体式橋梁の波浪中動揺に関する水理実験, 海講論文集, 第 44 巻, pp. 896-900.
- Kato, T., Y.Terada, K.Ito, R.Hattori, T.Abe, T.Miyake, S.Koshimura, and T. Nagai(2005), Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, Earth Planets Space, Vol.57, pp. 297-301.
- Nagai, T., N.Hashimoto, K.Kawaguchi, H.Yokoi, M.Kudaka, and M.Mitsui(2002): Frequency banded wave climate description based on the observed directional spectra, Coastal Engineering Journal, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 44, No.1, pp. 53-65.
- Nagai, T., H.Ogawa, Y.Terada, T.Kato, and M.Kudaka(2004), GPS buoy application to offshore wave, tsunami and tide observation, Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'04), vol.1, pp. 1093-1105.