

G P S 波浪計が捉えた大水深海域の波浪特性

OFFSHORE WAVE CHARACTERISTICS OBSERVED BY GPS BUOYS

永井紀彦¹・清水勝義²・佐々木誠³・村上明宏⁴

Toshihiko NAGAI¹, Katsuyoshi SHIMIZU², Makoto SASAKI³, Akihiro MURAKAMI⁴

¹フェロー 工博 (独)港空研 統括研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 (独)港空研 海洋・水工部上席研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³前(独)港空研 海洋・水工部海象情報研究室研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴ 国土交通省東北地方整備局港湾空港部港湾空港防災危機管理課長
(〒950-0013 宮城県仙台市青葉区花京院1-1-20)

This paper introduces characteristics of observed offshore waves by two sets of GPS buoy system at the Northern Pacific Coast of Japan from April to September in 2007. Very few lack of data appeared during the term, including in the very rough sea conditions caused by typhoon attacks. Offshore GPS buoys observed much bigger significant wave heights in both normal and abnormal sea states than the shallower seabed wave gauges, due to the topographical sheltering effects by peninsulas, meaning that deep-sea wave observation is necessary in order to obtain offshore wave conditions.

Key Words : GPS buoy, NOWPHAS, Wave Observation, Deep Sea, Offshore Waves

1. はじめに

近年, 台風等によって非常に大きな発達を遂げた, 有義波周期が16sを超える周期の長い波が, 我が国沿岸で数多く観測されるようになってきている¹⁾. こうした事象が地球温暖化による台風の強大化と直接つながるかどうかは今後の重要な課題となっており, 長期的継続的な波浪モニタリングの重要性が強く認識されている. しかし, 現在の我が国沿岸の波浪観測網で中心的な役割を果たしている海象計^{2), 3)}に代表される海底設置式波浪計は, 海底のセンサーを定期的に清掃するなどのメンテナンスが必要となるため, 水深50mを超える大水深域での波浪観測は困難であった. 周期16sの波浪を沖波条件で観測するためには, 水深200m程度での観測が必要となるため, 設置水深の制約がない大水深波浪観測法の開発が, 長年望まれていた. こうした背景で誕生したのが, RTK-GPS技術を応用したGPS波浪計である^{4), 5)}.

本研究は, 国土交通省港湾局関係機関によるGPS波浪計観測網構築⁶⁾のさきがけとして, 東北地方太平洋沿岸に新たに設置された, 2基のGPS波浪計によって観測された大水深沖合における波浪特性を, 浅海域における既存の全国港湾海洋波浪観測網 (ナウファス)⁷⁾ 海底設置式波浪計による観測記録と, 比較・検討したものである.

2. GPS波浪計の設置と観測データの概要

図-1 は, GPS 波浪計のシステムを示したものである. 洋上ブイの鉛直および水平 2 成分の瞬時の位置を cm オーダの精度で正確に把握するため, 近傍の陸上固定点で同時並行観測を行い, 鉛直座標 GPS 計測の誤差の最小化をはかっている. 観測データは陸上基地局を経て, 港湾空港技術研究所にリアルタイムで伝送され, 処理解析が行われている.

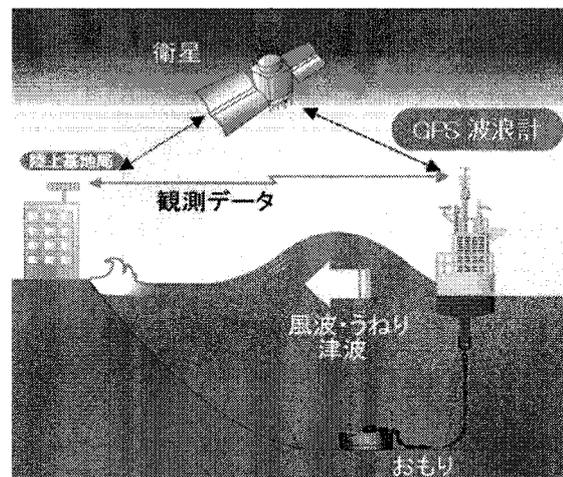


図-1 GPS 波浪計のシステム

検討対象期間は、台風 0709 号に伴う高波が観測された 9 月 7 日を含む 2007 年 4 月から 9 月までの半年間とした。浅海域に設置されている既設のナウファス海底設置式波浪計（釜石・石巻）との比較を、波候統計および異常時波浪の両面から行った。比較検討にあたっては、ゼロアップクロス法に基づいて算出された有義波高や有義波周期の比較に加えて、スペクトル解析に基づく周期帯波高や波向についても考慮した。

図-2 および図-3 に、2 基の GPS 波浪計の設置位置を示す。本稿では、近傍のナウファス海底設置式波浪計（石巻港沖海象計および釜石港沖超音波式波高計）の観測記録との比較を通じて、大水深海域の海象出現特性を考察した。2 基の GPS 波浪計の設置位置は、設置水深が深いばかりでなく、地形による遮蔽をほとんど受けていない。他方、石巻港沖および釜石港沖の海底設置式波浪計は、それぞれ半島などによって遮蔽されているので、波浪の入射方向が限定されている。

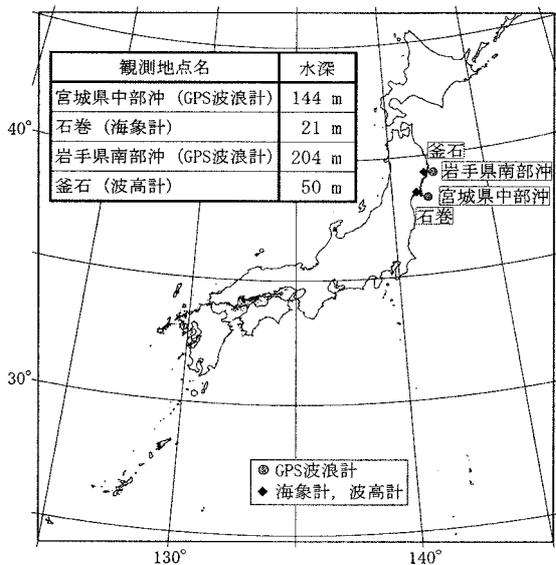
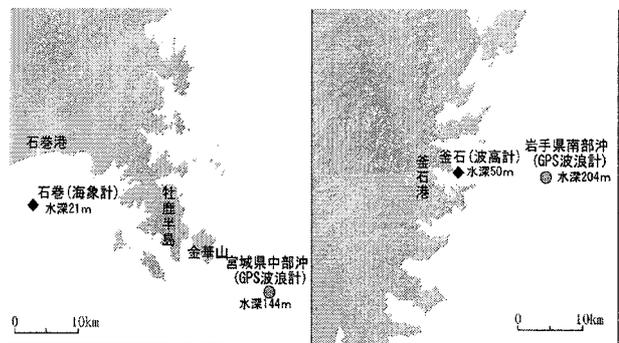


図-2 2 基の GPS 波浪計と海底設置式波浪計の設置位置

これまでの、設置水深の制約を受け、かつ海底ケーブルの延長が長いほど敷設費を多く要する海底設置式波浪計では、GPS 波浪計設置位置のような地形による遮蔽条件の少ない観測点を設定することはきわめてむづかしく、海域を代表する沖波観測が困難であったことが、設置位置図からよく理解できる。

図-4 は、宮城県中部沖 GPS 波浪計（水深 144m）、石巻港沖海象計（水深 20m）、岩手県南部沖 GPS 波浪計（水深 204m）および釜石港沖超音波式波高計（水深 50m）の各観測点で得られた半年間の有義波高 ($H_{1/3}$) と有義波周期 ($T_{1/3}$) の経時変化を示したものである。GPS 波浪計では 1.0s 間隔で、海底設置式波浪計では 0.5s 間隔で、それぞれ観測された海面上下変動記録を 20 分間毎に区切って、ゼロアップクロス解析を行い、20 分毎の有義波の算定を行った。図からわかるように、各観測点では欠測がほとんど見られず、台風 0704 号や 0709 号通過に伴う高波浪時を含めてデータの測得状況は、これまでの波浪観測年報⁷⁾でとりまとめられている他の波浪観測点と比較すれば、きわめて高い良好な測得率であると評価できる。



(1) 宮城県中部沖 (2) 岩手県南部沖

図-3 宮城県中部沖および岩手県南部沖におけるブイ設置位置

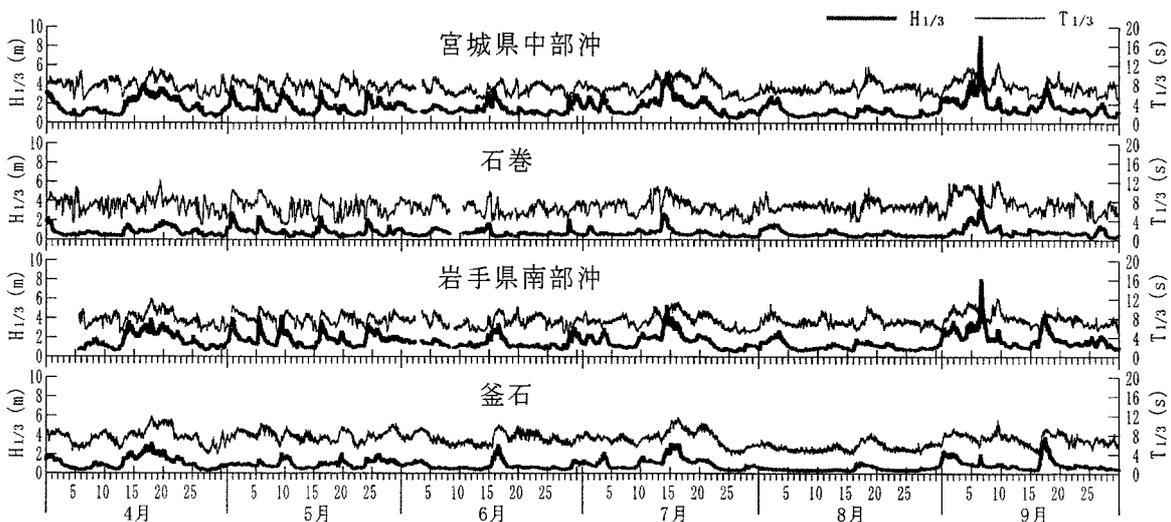


図-4 有義波の経時変化

3. 波候統計の比較

図-5は、4観測点の月平均有義波高と有義波周期を示したものである。2観測点の大水深GPS波浪計の月平均有義波はきわめてよく一致している。有義波高についてみると、GPS波浪計は、もっとも平均有義波が小さい8月においても1.0m程度であり他の月は1.5-2.0m程度の値を示している。この値は、浅海の2観測点の1.5-2.0倍であり、大水深海域の波高は、統計的に見

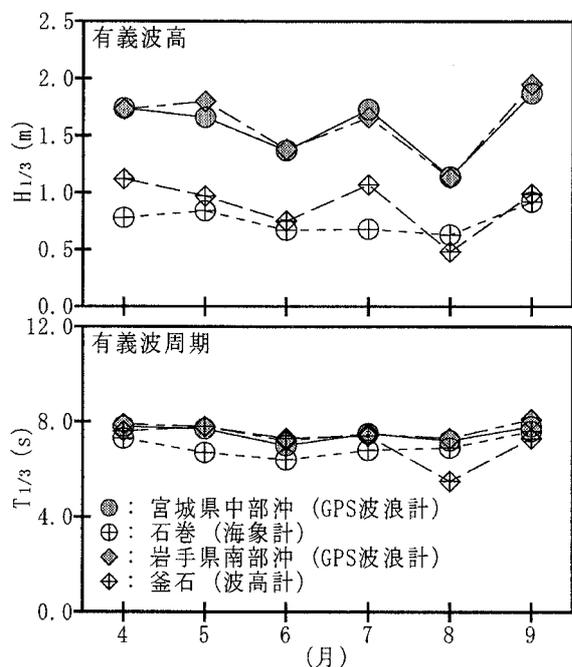


図-5 月平均有義波高と周期の比較

て、浅海域よりもはるかに高いことがわかる。これに対して、有義波周期は、各観測点で波高ほど顕著な相違は見られず、いずれの月でもいずれの観測点でも6.0-8.0sの範囲に収まっている。すなわち、大水深域の波浪は、統計的に浅海域の波浪と比較して、波高は高いものの周期は比較的近い値となっていることが示された。ここで見られたGPS波浪計と海底設置式波浪計との顕著な有義波高の相違は、岬や半島等による平面的な地形による遮蔽効果の相違による影響が大きいと考えられる。こうした地形条件に伴う遮蔽効果の定量的評価は、今後の波浪推算や波浪変形計算などの数値シミュレーションを用いたさらなる検討が望まれる課題である。

表-1は、有義波高と周期の結合出現頻度表を示したものである。図-5で示された大水深域と浅海域との統計的な波浪の相違が、より顕著に示されている。すなわち、有義波周期の出現分布は4観測点でそれほど顕著な相違は見られないのに対して、有義波高の出現状況は、大水深域と浅海域とできわめて異なった分布となっている。すなわち、有義波高1.0m以下となる低波浪状態の出現率は、宮城県中部沖および岩手県南部沖のGPS波浪計でそれぞれ24.1%と21.7%であるのに対して、石巻港沖および釜石港沖の海底設置式波浪計ではそれぞれ82.5%と69.7%となっており、有義波高が3.0m以上となる高波浪状態について見ても、宮城県中部沖および岩手県南部沖のGPS波浪計でそれぞれ5.6%と6.0%であるのに対して、石巻港沖および釜石港沖の海底設置式波浪計ではそれぞれ0.2%と0.4%となっている。このように、大水深域と浅海域との間には、きわめて顕著な波高の出現状況の相違が確認された。

表-1 有義波高と周期の結合出現頻度表

地点：宮城県中部沖						地点：岩手県南部沖							
単位：%						単位：%							
$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	合計	未超過	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	合計	未超過
5m ~			0.0	0.3	0.3	100.0	5m ~			0.0	0.3	0.3	100.0
4m ~ 5m		0.0	0.6	0.2	0.9	99.7	4m ~ 5m	0.1	0.3	0.3	0.6	99.7	
3m ~ 4m		1.1	2.2	1.2	4.4	98.8	3m ~ 4m	0.4	2.6	2.1	5.0	99.1	
2m ~ 3m		7.5	8.5	2.1	18.0	94.4	2m ~ 3m	6.4	9.5	1.8	17.8	94.0	
1m ~ 2m		39.0	12.5	0.7	52.2	76.4	1m ~ 2m	38.8	15.3	0.5	54.6	76.3	
~ 1m		18.3	5.7	0.1	24.1	24.1	~ 1m	17.8	3.9		21.7	21.7	
合計		65.9	29.5	4.6	100.0		合計	63.4	31.6	5.0	100.0		
未超過		65.9	95.4	100.0			未超過	63.4	95.0	100.0			

地点：石巻						地点：釜石							
単位：%						単位：%							
$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	合計	未超過	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	合計	未超過
5m ~			0.0	0.0	0.0	100.0	5m ~						100.0
4m ~ 5m			0.1	0.0	0.1	100.0	4m ~ 5m						100.0
3m ~ 4m			0.1		0.1	99.9	3m ~ 4m		0.3	0.1	0.4	100.0	
2m ~ 3m		0.2	0.9	0.9	2.1	99.8	2m ~ 3m	0.5	2.5	1.9	4.9	99.6	
1m ~ 2m		7.1	6.3	1.8	15.2	97.7	1m ~ 2m	10.0	13.6	1.3	24.9	94.7	
~ 1m		68.9	12.3	1.4	82.5	82.5	~ 1m	59.9	9.8	0.1	69.7	69.7	
合計		76.2	19.7	4.1	100.0		合計	70.3	26.2	3.5	100.0		
未超過		76.2	95.9	100.0			未超過	70.3	96.5	100.0			

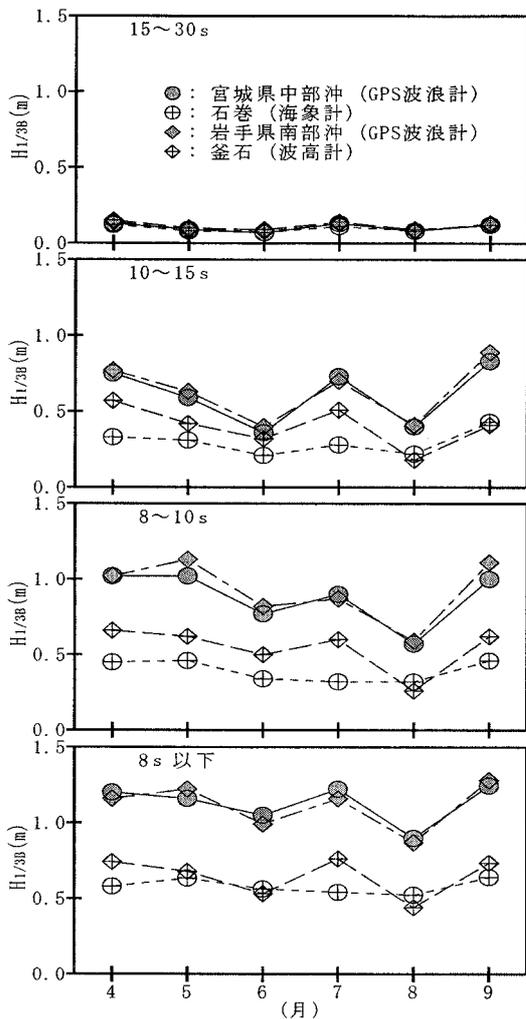


図-6 周期帯別の月平均有義波高の比較

GPS波浪計では、波向は周期帯毎に示される⁹⁾。

図-6は、4観測点のスペクトル解析に基づく周期帯別の月平均有義波高を示したものである。ここに、周期帯の区分は、ナウファスによるデータ処理に倣って、①15s以上（ナウファスのf1およびf2の合成値）、②10-15s（ナウファスのf3）、③8-10s（ナウファスのf4）、④8s以下（ナウファスのf5およびf6の合成値）とした（清水ら、2006b）。

各周期帯に共通して、2観測点の大水深GPS波浪計の月平均周期帯波高はきわめてよく一致している。浅海域観測点と比較すると、すべての周期帯で大水深域の方が浅海域より換算波高が大きいものの、この相違は短周期の周期帯で顕著であるように見える。ただし、周期15sから30sの間の比較的周期の長いうねりに対応する周期帯では、常時のエネルギーレベルは低いため、月平均値での比較は困難であった。

図-7は、波向観測が行われていない釜石港沖超音波式波高計を除く3観測点の周期帯別の波向出現分布を示したものであり、各観測点について、10-15s（ナウファスのf3）および8-10s（ナウファスのf4）の2周期帯について表示を行ったものである。

ここで、GPS波浪計では波向の範囲を片側±90度からの来襲を仮定したデータ処理システムが構築されていることには注意を要する。これは、GPS波浪計によって求められる周期帯毎の波向は、周期帯毎に整理されたブイの水平運動軌跡から算出されるためである。このため、ここでは、反対方向からの波の来襲の可能性のある方向からの波浪成分は図から除外することとし、来襲波向きが、NEからSEにかけての波浪についてだけ図示した。全方位からの波浪の来襲に対応する周期帯波向解析方式への改良が、今後のGPS波浪計データ処理解析システムの課題となっている⁹⁾。

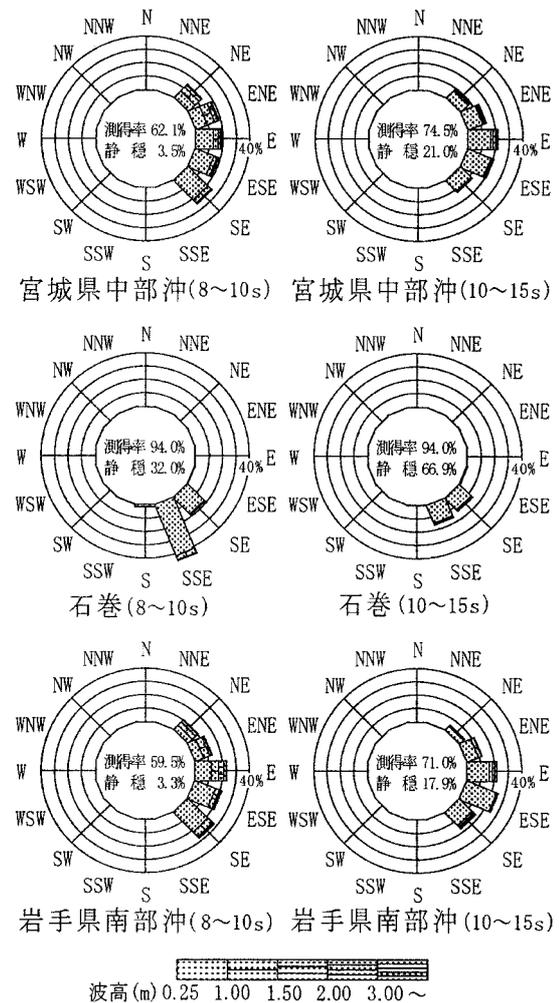


図-7 周期帯別の波向出現分布

両周期帯に共通して、2観測点の大水深GPS波浪計の波向出現特性はきわめてよく一致しており、ともに、NEからSEにかけて、まんべんなく波浪のエネルギーが来襲していることがわかる。これに対して、浅海域観測点である石巻港沖では、地形による遮蔽条件によって、SEからSの範囲に限定されている。浅海域波浪観測点では、地形による遮蔽や波浪の屈折の影響を強く受けた局所的な波浪の波向が観測されていることが、大水深波浪観測との比較から、改めて確認された。

4. 台風による高波の観測結果

図-8は、2007年9月7日に東北太平洋沿岸を通過した台風0709号による高波期間中の、4観測点における有義波高と有義波周期の経時変化を示したものである。極大有義波を見ると、宮城県中部沖GPS波浪計では9月7日11:20の観測で有義波高9.15m、有義波周期11.5s、石巻港沖海象計では9月7日12:00の観測で有義波高5.77m、有義波周期8.9s、岩手県南部沖GPS波浪計では9月7日14:20の観測で有義波高8.11m有義波周期11.6s、釜石港沖超音波式波高計では9月7日13:20の観測で有義波高2.11m、有義波周期6.7sであった。このような高波浪条件において、2基のGPS波浪計が、2基の海底設置式波浪計とともに欠測なく高波の観測に成功したことは、観測システムの信頼性の高さを示している。石巻港沖で観測した有義波高5.77mは、1995年以降の石巻港沖の観測記録の中で2002年10月2日2:00の5.66m(台風0221号)を凌ぐ既往最大観測波であったため、台風0709号による東北地方沿岸の波浪は、検討対象海域近傍では、非常にきびしいものであった。

釜石港沖の観測波が他の観測点に比較して極端に低いのは、周辺地形による遮蔽の影響が強く、E方向から来襲する波浪エネルギーだけを捉えているためである。これに対して、石巻港沖海象計では、有義波の時間変動傾向と極大時刻は、沖合の宮城県中部沖GPS波浪計とほぼ一致している。これは、台風0709号の経路から考えて、極大波を発生させた時点の波向がSEあるいはSSE方向であり、石巻港の外洋への開口方向と来襲波の波向が、ほぼ一致していたためであろう。

図-8から、異常波浪時においても、大水深GPS波浪計が観測する波浪は、浅海域波浪計による観測結果よりも大きく、外洋における波浪は、地形による遮蔽の影響を受ける浅海観測点とは大きく異なっていることが、改めて示された。こうした結果は、過去に実施された台風通過時におけるいわき沖大水深観測情報の解析結果¹⁰⁾とも一致し、台風通過時における外洋波の方向分散性は大きく、台風通過前後における風況変動が大きい際には、外洋ではさまざまな方向から波浪エネルギーの来襲があることを意味している。

波候統計上は、直線距離で100km強の間隔を持つ2基の大水深GPS波浪計の観測結果には顕著な相違は見られなかったが、図-8で示されるように個別の気象擾乱中の観測波浪は、その時系列変化においても最大波に関しても、2基のGPS波浪計は、異なる観測結果を示していることには注意を要する。これは台風経路や進行速度によるものであるが、図-8は、今後の大水深波浪観測網の構築にあたって、観測点の合理的配置を検討するための一つのめやすになるものである。

図-9は、高波浪時である9月7日8:00、12:00および16:00における4観測点の波浪の周波数スペクトルを示したものである。波高の相違に伴って、大水深GPS波

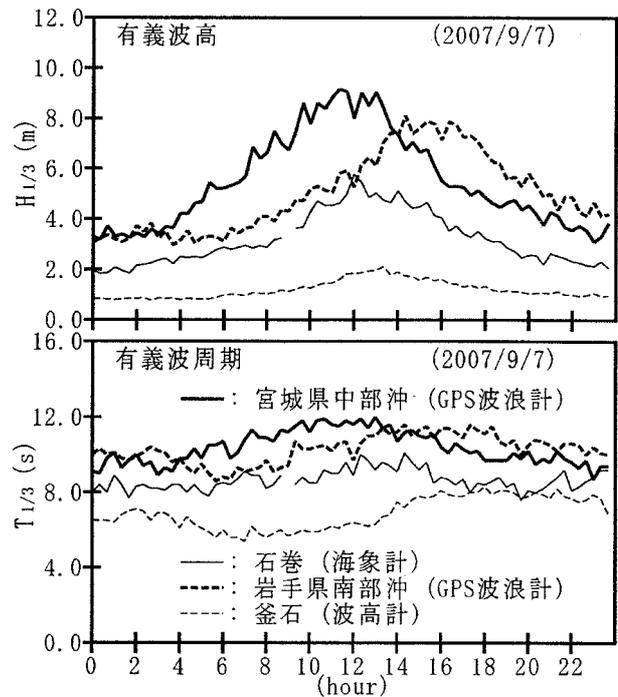


図-8 4観測点における有義波の比較
(台風0709号)

浪計と浅海の海底設置式波浪計では、波浪エネルギーの絶対値が異なる。宮城県中部沖GPS波浪計と石巻港沖海象計の周波数スペクトルを比較すると、GPS波浪計では各時刻に共通して0.08Hz(周期12.5s)付近にピークが見られるのに対して、海象計では8:00および12:00のピークは0.1Hz(周期10s)付近にピークが見られ、若干、ピーク周期が短くなっている。しかし、有義波高のピークを終えた16:00では、石巻港沖海象計の周波数スペクトルピークも0.9Hz(周期11s)と若干低周波側に変化している。これに対し、岩手県南部沖GPS波浪計と釜石港沖超音波式波高計の周波数スペクトルを比較すると、より顕著な波浪エネルギーの絶対値の相違が見られるとともに、超音波式波高計の周波数スペクトルピークは、より高周波側の1.4Hz(周期7s)付近に見られる。ただし、有義波高が極大値を過ぎた16:00以降は、0.8Hz(周期12.5s)付近にももう一つのピークが見られ、ようやくうねりの来襲が確認されている。浅海域の観測点では、地形条件により来襲波の方向が限られ、遮蔽される方向からの波浪エネルギーが届きにくいいため、こうしたスペクトル形状の違いが現れているのであろう。

5. おわりに

本稿で紹介したGPS波浪計による大水深海象観測結果およびその浅海域観測結果との比較は、これまではもっぱら波浪推算や波浪変形計算などの数値シミュ

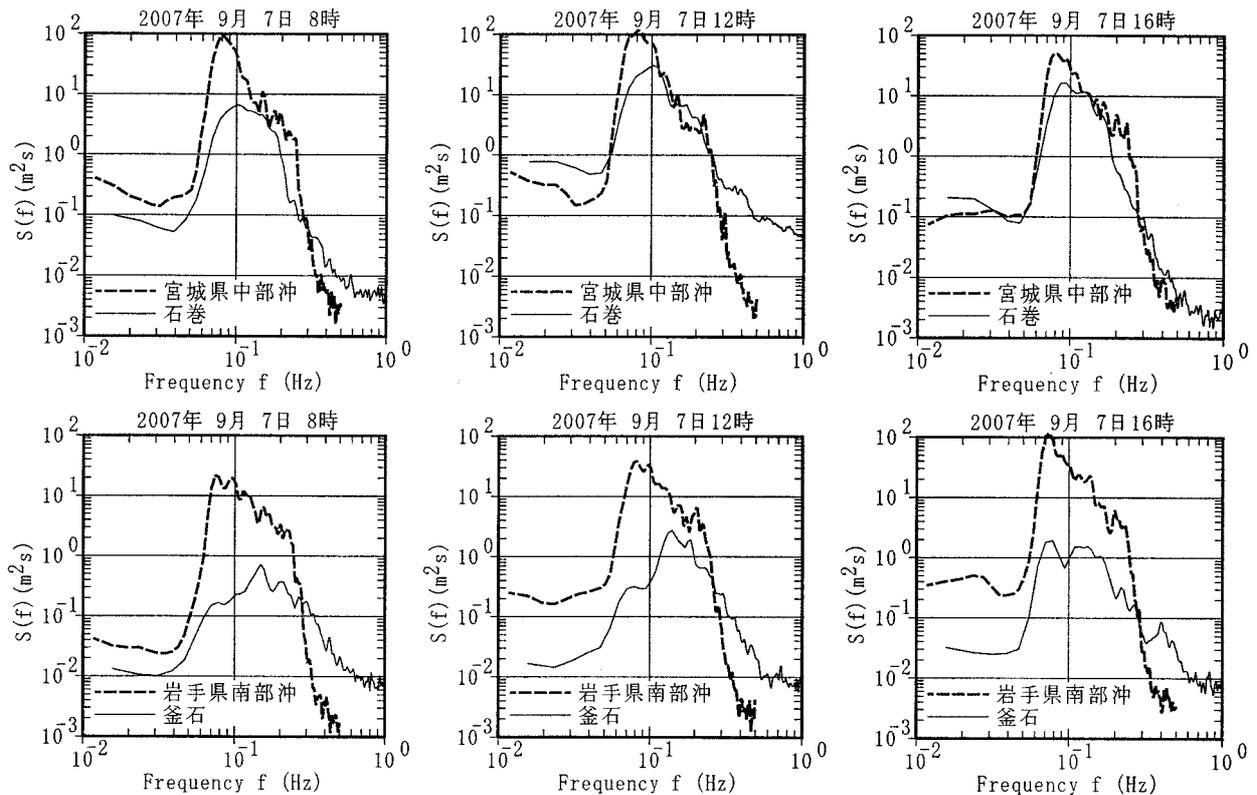


図-9 周波数スペクトルの比較 (台風0709号)

レーションによって検討されてきた、港湾・海洋構造物の計画や設計に欠かすことのできない沖波条件の設定を、実証的に検証することができるデータとなりうるものである。このため、本稿の成果をふまえ、既存のさまざまな数値シミュレーションモデルの妥当性と適用限界の検証に関する研究に取り組んでいくことが重要である。今後、関係者との連携をさらに発展させて、こうした課題に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・富田雄一郎・久高将信・額田恭史：長期波浪観測値と気象データに基づく波候の変動解析，海講論文集53巻，pp.131-135，2006。
- 2) 高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木弘：水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について，海講論文集39巻，pp.176-180，1992。
- 3) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海講論文集42巻，pp.1081-1085，1995。
- 4) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H.,

- Isshiki, H., Moriguchi, T., Takada, M., Tanno, T., Kanzaki, M. and James Johnson (2001) : A New Tsunami Monitoring System using RTK-GPS, ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-12, pp.645-651, 2001.
- 5) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，土木学会，海講論文集50巻，pp.1411-1415，2003。
- 6) 永井紀彦：波浪観測網の強化による海の安全の確保—GPS波浪計 2006年度より配備開始！—，土木学会誌91巻9号，pp.78-79，2006。
- 7) 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2005)，港空研資料No.1 161，92p，2007。(波浪観測年報は，1970年版以降毎年刊行)
- 8) 清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・久高将信・藤田孝：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，海講論文集53巻，pp.1406-1410，2006。
- 9) 清水勝義・永井紀彦・橋本典明・岩崎峯夫・足立重昭・奥勇一郎：GPSブイ式波浪計を対象とした複合的な波向計算手法の提案，海洋開発論文集23巻，pp.231-236，2007。
- 10) 清水勝義・永井紀彦・橋本典明：沖波の方向スペクトルの出現特性 (第2報) —いわき沖における7か年方向スペクトル統計—，港研報告35巻1号，pp.65-89，1996。