

# 観測データに基づく気象・海象条件とFreak wave出現特性の解析

## Weather and Sea Conditions of Freak Wave Occurrence

森 信人<sup>1</sup>・吉木昌弘<sup>2</sup>・島田広昭<sup>3</sup>・安田誠宏<sup>4</sup>・間瀬 肇<sup>5</sup>・河合弘泰<sup>6</sup>・加島寛章<sup>6</sup>

Nobuhito MORI, Masahiro YOSHIGI, Hiroaki SHIMADA, Tomohiro YASUDA  
Hajime MASE, Hiroyasu KAWAI and Hiroaki KASHIMA

A series of data set of ocean wave records from the Pacific Ocean and the Sea of Japan is analyzed for understanding freak wave characteristics in lights of wave height statistics, frequency and directional spectrum parameters, and nonlinear statistical parameters. In addition, measured maximum wave heights are compared with predicted ones by a nonlinear wave theory, and the relation of freak wave occurrence with weather condition is made. It was found that observed data shows a weak correlation between maximum wave heights and kurtosis of free surface elevation and that freak waves at peak of storm are observed under migratory low atmospheric pressures.

### 1. 序論

海岸・海洋構造物の設計条件や沿岸部における波浪災害は有義波高をもとに議論されるが、実際には、最大波を含む数波の大きな波によってもたらされることが多い。このため、沿岸部および海洋における波浪災害を考える上で、最大波を予測することは重要である。

ここ数年で急速に進展しているFreak waveに関する研究は、この最大波を予測するものであり (Dystheら, 2008), 非線形相互作用による線形理論からの偏差を考慮するものである。基本的な考え方は、スペクトル形状から水位変位のkurtosisを求め、これと波列の長さから最大波を推定するというものである。一方向波については、水槽実験・数値計算による詳細な検証が行われており (Mori, 2009), その後、多方向性の影響が指摘され (Onorato, 2009), 現在、予測理論の拡張が行われている (森ら, 2008)。しかし、これまでに展開されているFreak wave予測理論や水槽実験・数値計算結果の検証は、定常状態における最大波高分布やFreak wave出現頻度を対象にしたものであり (例えばPetrovaら, 2008), 実際の碎波や気圧・風速など気象条件が非正常に変化する海域における出現条件・特性については検討されていない。これは、上記のFreak waveに関する理論的枠組みの検証には、 $H_{max}$ や $H_{1/3}$ 等の基本的な波浪統計量に加えて、水面変位の高次モーメント、周波数スペクトルおよび方向分布関数の情報が必要であるためである。

そこで本研究では、詳細な波浪情報と十分なサンプル

数を持つ観測波浪データを解析し、非線形指標や方向スペクトルを含む波浪統計量をもとにしたFreak waveの出現特性について解析する。さらに、波浪統計量の時間変化と気圧配置をもとにFreak waveの出現と気象条件について考察を行う。

### 2. 波浪観測データの概要

用いた観測データは、全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の観測時間波形である。方向スペクトルを計測可能な海象計を候補とし、解析対象として日本海および太平洋沿岸合計6観測点 (設置水深50m) を選定した (図-1を参照)。表-1に、今回解析の対象とした各観測点の観測期間、有効観測回数および平均観測波数を示す。今回対象とした観測期間は2001~2007年であり、観測時間間隔は2001~2005年で2時間毎、2006~2007年では24時間連続的に行われている。解析では、1回の観測で得られる2400点 (2Hz) の水位データと方向スペクトルの両者を用いた。研究ではこれらの観測データを観測点毎にまとめ、各地点約1万~4万サンプルに対し

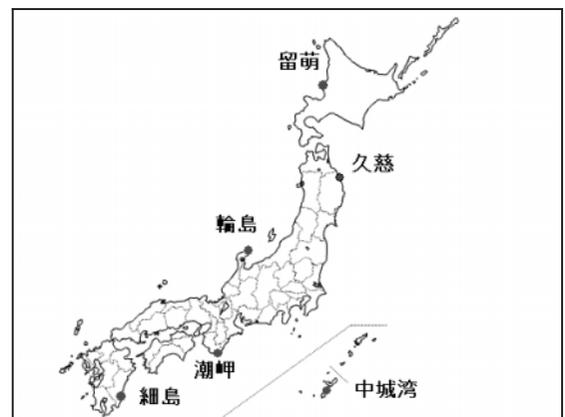


図-1 解析対象とした観測点

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所  
2 学生会員 博(工) 関西大学大学院 理工学研究科  
3 正会員 博(工) 関西大学准教授 環境都市工学部  
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所  
5 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
6 正会員 修(工) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部

表-1 観測点, 観測期間, 有効観測回数および平均観測波数

観測点	観測期間	有効観測回数	平均観測波数
留萌	2001-2005	11680	269
	2006-2007	39098	276
久慈	2001-2005	17331	221
	2006-2007	38428	211
輪島	2001-2005	14079	261
	2006-2007	37313	286
潮岬	2001-2005	15598	230
	2006-2007	42972	215
細島	2002-2005	10276	227
	2006-2007	35087	231
中城湾	2003-2005	9652	221
	2006-2007	37778	225

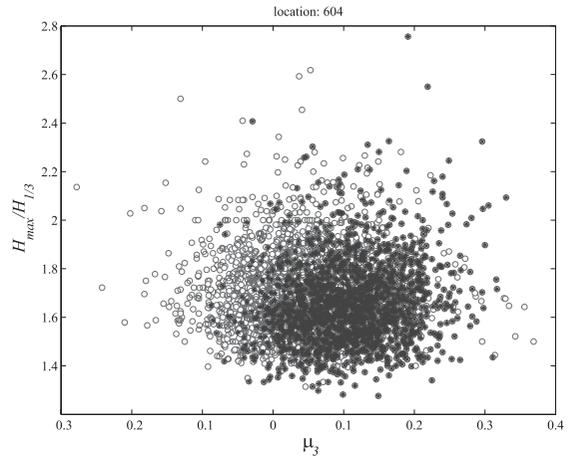


図-2  $H_{max}/H_{1/3}$  と skewness の関係 (留萌)  
(○: 全観測データ, \*:  $H_{1/3} > 2m$ )

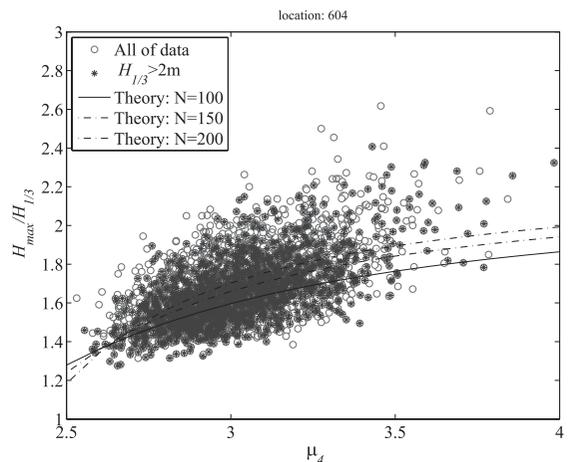


図-3  $H_{max}/H_{1/3}$  と kurtosis の関係: 留萌  
(○: 全観測データ, \*:  $H_{1/3} > 2m$ , 線: 理論値)

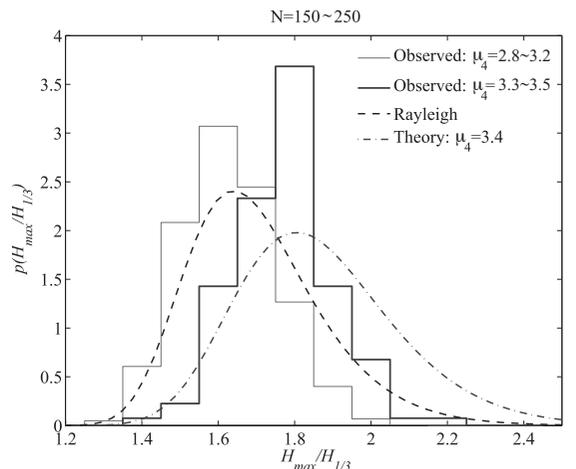


図-4  $H_{max}/H_{1/3}$  の確率密度分布 (実線: 観測データ, 破線: Rayleigh分布, 一点鎖線: 非線形理論 ( $\mu_4=3.4$ ))

て波浪データ解析を行った。

データ解析は、観測された水位データに対して3次元位相空間法 (Moriら, 2007) により1次処理を行った後、代表的な波浪統計量を計算し、統計的検定を行い、有効データセットを作成した。最大波にはスパイクノイズが大きな影響を与えるため、1次処理では特にノイズに留意して処理を行った。ついで、skewness, kurtosis, BFI等の非線形指標、周波数スペクトル幅パラメータ等の各種波浪統計量26項目、これに海象計データからEMLM (橋本ら, 1995) により推定される方向分布スペクトルを加えたものをデータ解析の対象とした。

作成したデータベースをもとに、Freak waveに関連する統計量の相互関係を調べた。さらに、特に大きな波高を持つFreak wave出現時に着目し、幾つかの事例をピックアップし、時間波形、波浪統計量の1週間および1日間の変化、および気象庁日本域地上天気図 (12時間毎) をもとにFreak wave出現における海象の非正常性と気象擾乱の関係について分析を行った。

### 3. 結果と考察

#### (a) 波浪統計量から見たFreak waveの特性

まず始めに、Freak waveが属する統計的母集団について波浪統計量をもとに検討を行った。図-2および3に示すのは、留萌における  $H_{max}/H_{1/3}$  と skewness  $\mu_3$  および kurtosis  $\mu_4$  との関係である。まず、図-2より  $H_{max}/H_{1/3}$  は skewness に依存しないことがわかる。これは最低次の非線形補正では、skewness は  $H_{max}$  に直接的な影響を与えないためである。一方、kurtosis は、非線形補正として波高分布に直接影響を与える。それゆえ図-3のように、 $H_{max}$  と kurtosis には弱相関が見られる。図中に示す非線形理論にもとづく kurtosis と  $H_{max}/H_{1/3}$  の期待値の関係 (Mori・Janssen, 2006) は、kurtosis が3.5を超えると過小評価であるが、定性的には観測データが示す  $H_{max}/H_{1/3}$  の kurtosis 依

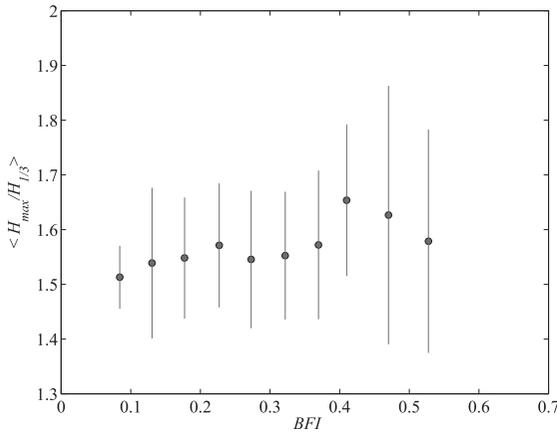


図-5  $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ とBFIの関係

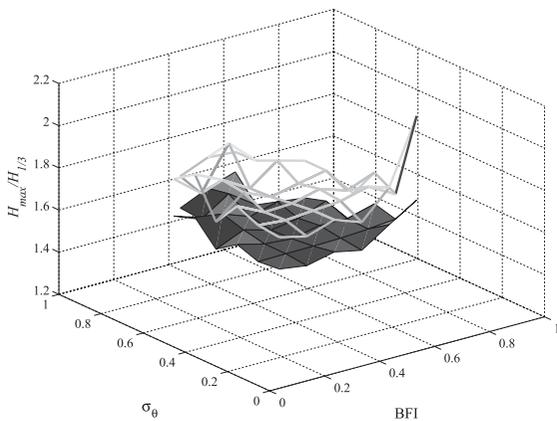
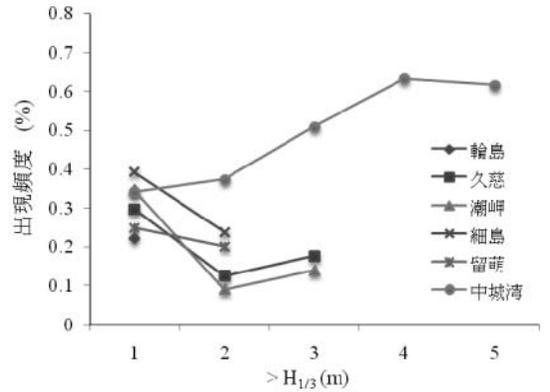


図-6  $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ , BFIおよび $\sigma_\theta$ の関係  
(面：平均，線：平均+標準偏差)

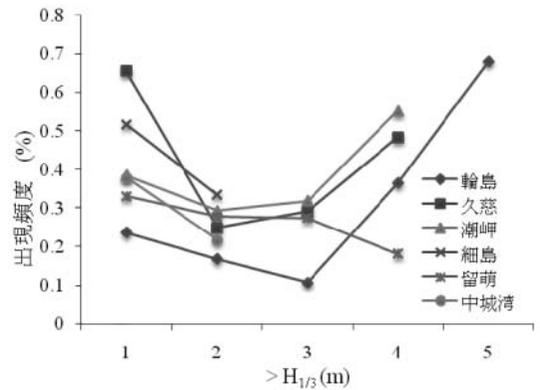
存性を良く表している。Rayleigh分布は理論値の $\mu_4=3$ の値に相当し、波列中の波の数 $N$ が100~200ではほぼ $H_{max}/H_{1/3}=1.6$ を示している。

この $H_{max}/H_{1/3}$ におよぼす非線形性の影響をより明確に確認するため、図-4に示すのは、 $H_{max}/H_{1/3}$ の確率密度分布である。図中の実線は観測結果を表し、波の数 $N$ が150~250かつkurtosisが2.8~3.2と3.3~3.5を満たすデータのみを抽出し、Mori・Janssen (2006) の式と比較した。図からわかるように、 $H_{max}/H_{1/3}$ の分布はkurtosisが2.8~3.2の範囲ではほぼRayleigh分布に従っている。しかし、図-4に示すようにkurtosisが大きくなるとRayleigh分布から外れて危険側にシフトし、非線形理論はこの傾向を良く示している。

上記のように観測データにおいて明確な $H_{max}/H_{1/3}$ のkurtosis依存性が確認されたため、ついでBFIによるkurtosisの推定精度について検討を行った。図-5は $H_{max}/H_{1/3}$ の期待値 $\langle \rangle$ とBFIの関係であり、分散が大きいのものBFIが大きくなると $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ が増加する傾向が見られる。BFIは周波数スペクトルから定義される値であり、



(a) 夏季



(b) 冬季

図-7 設定した $H_{1/3}$ を超えるFreak waveの出現頻度

定常場ではkurtosisと一義的な関係を持つ。この結果は $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ の予測が可能であることを示唆しているが、分散も大きい。kurtosis推定のためにBFIに加えて方向分散の影響を考慮し、推定精度を向上させる考え方がある(森ら, 2008)。そこで、図-6に示すように $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ をBFIと方向分散から推定した。しかし、現地データからは、数値計算で予測される $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ の方向分散依存性(森ら, 2008)が見られなかった。このkurtosisおよびBFIにおける $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ の振る舞いの差異については今後検討の余地が残る。

ついで、Freak wave出現頻度におよぼす波高の大きさや季節の影響について解析した。Yasuda・Mori (1997)は、 $H_{1/3}$ が4~5mを越えるとFreak waveの出現頻度が増加する傾向を示している。そこで、 $H_{1/3}$ と $H_{max}$ を1m毎に区分し、区分毎のデータを対象に、Freak waveの出現頻度を求めた。図-7に示すのはその結果であり、 $H_{1/3}$ 毎にFreak waveの出現頻度を求めると、 $H_{1/3}$ が3m未満では全ての観測点において出現頻度は $H_{1/3}$ に対して単調減少となる。これは、 $H_{1/3}$ が大きくなると周期が長くなり、観

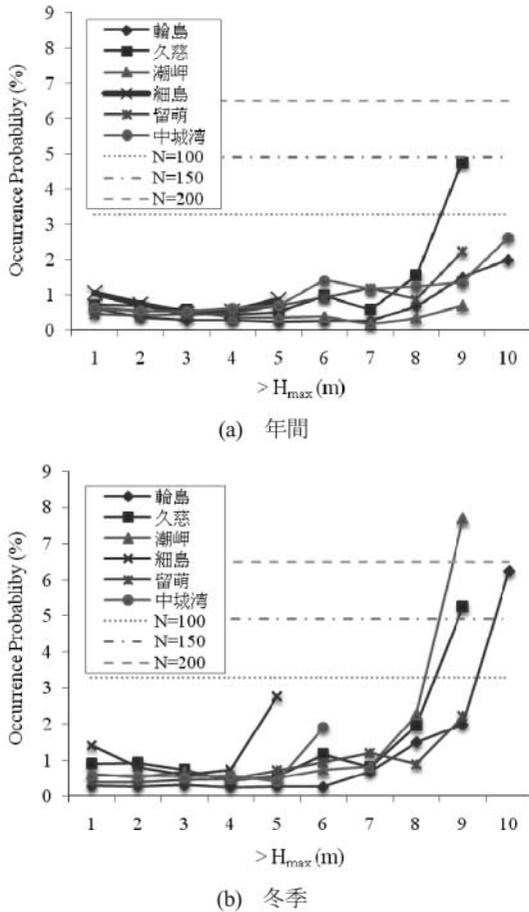


図-8 設定した $H_{max}$ を超えるFreak waveの出現頻度 (点線: Rayleigh分布 $N=100\sim 200$ )

測される波の数が減少することによる見かけ上の減少傾向である。一方、対象とする $H_{1/3}$ を3m以上とすると、輪島、久慈、中城湾の3地点で増加傾向が見られる。ついで、季節による影響について4~9月を夏季、10~3月を冬季と分類して解析を行った。夏季については、中城湾以外では $H_{1/3}$ が3m以上のFreak waveは見られなかった。夏季と冬季で比較したところ、夏季に比べて冬季の方がFreak waveの発生頻度が高く、特に3m以上における出現頻度の増加傾向が見られた。

図-8は、 $H_{max}$ について図-7同様に整理したものであり、図中に示す点線は波の数 $N$ を100~200とした場合のRayleigh分布に基づく期待値である。Rayleigh分布に基づく $N=100, 150, 200$ についての期待値は3.3, 4.9, 6.5%である。 $H_{max}$ で整理した場合、 $H_{1/3}$ で分類した場合よりもFreak wave出現頻度の顕著な波高依存性が見られ、 $H_{max}$ が4~5m以上に大きくなると頻度の増加傾向が見られた。Rayleigh分布と比較して、 $H_{max}$ が5m未満のFreak waveの出現頻度はかなり低く、6mを越えると逆に増加

し、10m以上ではRayleigh分布の期待値に近い値まで上昇している。夏季には、中城湾のみにおいて類似した傾向が見られた。中城湾は、台風の影響のみを受ける地点であるため、他の観測点とは異なる傾向を示していた。一方、冬季では日本海側において出現頻度の増加傾向が最も強く見られた。夏季に比べて、中城湾を除く全ての観測点においてFreak waveの出現頻度が高い。一般に、Rayleigh分布による高波高の出現頻度は観測よりやや大きくなるのが知られているが、潮岬、輪島及び久慈では $H_{max}$ が9~10m以上で、Rayleigh分布の期待値を上回った。このように波高が大きい場合にFreak waveの出現頻度が増加する原因は不明であり、今後詳細に調べる必要がある。また、 $H_{1/3}$ および $H_{max}$ ともに、夏季と冬季ではFreak waveの出現頻度に違いがあり、Freak waveの発生に季節、すなわち、気象擾乱による影響があると推察される。

(b) 気象擾乱との関係

上記の結果を踏まえ、Freak wave出現に及ぼす気象要因の影響を調べた。夏季と冬季でのFreak waveの発生頻度に違いが見られること、 $H_{max}$ が4~5m以上に大きくなるときに出現頻度の増加傾向が見られたことから、 $H_{max}$ が5mを超えるFreak waveに的を絞り、該当する55ケースについて、図-9に示すような形式でFreak Wave出現前後24時間の気圧配置、波浪統計量の1週間の変化、非線形指標の短時間変化および観測波形の関係についてとりまとめ、分析を行った。

Freak wave出現時の波形を見る限り、波群を持つもの、1波突出したもの、両者の中間に位置するものなど様々であった。ついで、表-2に示すように気象擾乱をもとに、i) 台風, ii) 冬型気圧配置で発達した移動性低気圧, iii) 南岸低気圧の通過による高波の3点に分類した。対象となった $H_{max} > 5m$ の観測例は10505回であり、平均的にはFreak waveの出現頻度は0.5%前後である。この中で上記の3つの分類に該当するFreak waveは全体の67%を占めた。台風が通過、接近した時に発生したFreak waveが全体の22%であり、冬型気圧配置で発達した移動性低気圧により発生したFreak waveが34% (シベリア寒気団により発生したFreak waveはこのうち18%, その他は16%), そして南岸低気圧の通過による高波により発生したFreak waveは11%であった。この3種類以外の気象擾乱により発生したFreak waveは33%であった。それぞれの擾乱の頻度についてはカウントしてないために量的な評価は出来ないが、台風および移動性低気圧におけるFreak waveの発生割合が多く、また波高のピーク出現前後3時間のFreak wave割合は46%と、気象変化の激しい場合に出現するFreak waveが多く見られた。

一方、Freak wave出現前後において、方向分散の顕著

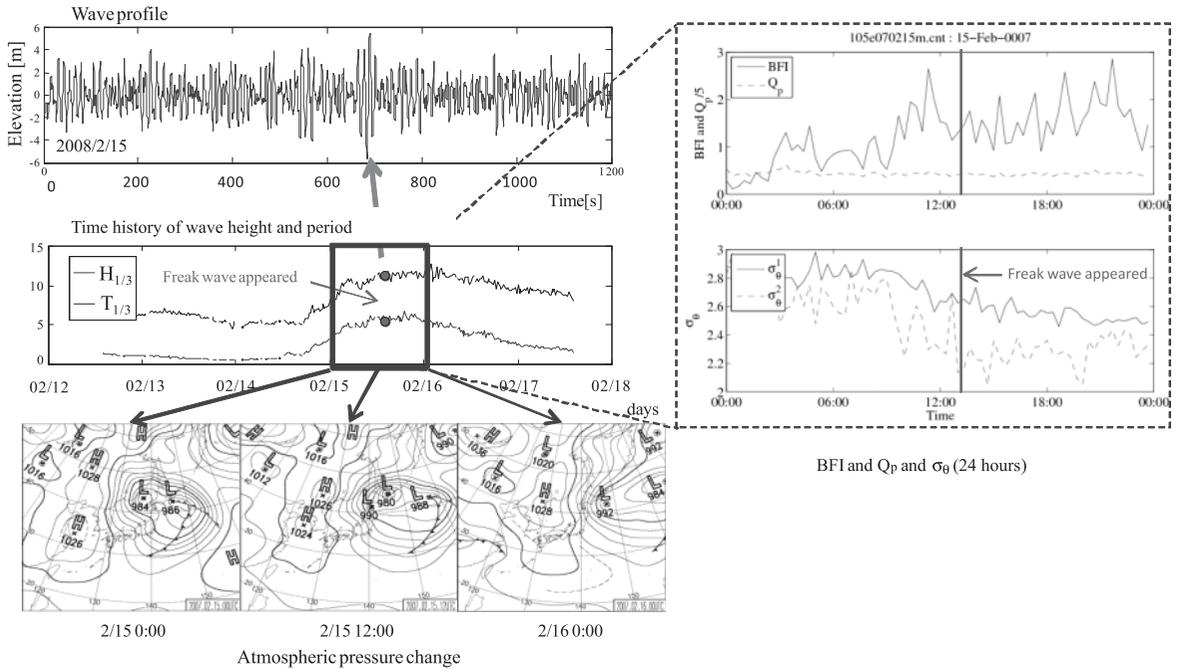


図-9 Freak wave発生時の水面波形及び波浪統計量の時間変化および気圧配置の変化の例 (輪島2007年2月15日14時に観測された波高11.50mのFreak wave)

表-2 気象擾乱毎に分類したFreak waveの発生頻度 (2001-2007年:  $H_{max} > 5m$ )

	台風	冬型移動性 低気圧	南岸 低気圧	その他
全体	0.114%	0.181%	0.057%	0.171%
Freak wave	22%	34%	11%	33%

な傾向は見られなかったが、発生時におけるBFIの増加が41%のFreak wave出現時に見られた。

#### 4. 結論

本研究は、十分なサンプル数と精度良い観測波浪データを解析し、Freak waveの出現特性について解析した。主な成果は以下の通りである。

$H_{max}/H_{1/3}$ は、kurtosisの増加と共に大きな値の出現頻度が増加し、その期待値はBFIと弱い相関が見られた。一方、理論的な裏付けはないが、大きな波高を持つ波列のFreak waveの出現頻度が高いことがわかった。さらに、波浪統計量の時間変化と気圧配置をもとにFreak waveの出現と気象条件について考察を行い、台風や移動性低気圧においてFreak waveが多く発生することを明らかにした。

気象の非定常性が波浪におよぼす影響については、今後数値シミュレーションと織り交ぜながら詳細に検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金および建設技術開発研究助成による成果である。

#### 参考文献

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 (1995) : 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1081-1085.

森 信人・川口浩二・P.A.E.M. Janssen (2008): 多方向性を考慮した異常波浪予測モデルの提案とその検証, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.111-116.

Dysthe, K., H. Krogstad, and P. Muller (2008): Oceanic rogue waves, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.40, pp.287-310.

Yasuda, T. and N. Mori (1997): Occurrence probability of giant freak waves in sea around Japan, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, pp.209-213.

Mori, N. and P.A.E.M. Janssen (2006): On kurtosis and occurrence probability of Freak waves, Journal of Physical Oceanography, Vol.36, No.7, pp.1471-1483.

Mori, N., T. Suzuki and S. Kakuno (2007): Noise of acoustic Doppler velocimeter data in bubbly flow, Journal of Engineering Mechanics, Vol.133, No.1, pp.122-125.

Mori, N. (2009) : Freak waves, Hand book of Coastal and Ocean Engineering, Ed. Y.C. Kim, World Scientific, pp.131-149.

Onorato, M. et al. (2009): Statistical properties of directional ocean waves, Physical Review Letters, Vol.102, pp.114502-1-4.

Petrova, P. G., C. Guedes Soares and Z. I. Cherneva (2008): Influence of the third order nonlinearity on the distribution of wave height maxima in an offshore basin, Proc. OMAE, OMAE2008-58049, 9p.