

平成 22 年 6 月 21 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360225

研究課題名 (和文) Freak Wave の出現予測法の構築とその出現特性の解明

研究課題名 (英文) Development of freak wave prediction method

研究代表者

永井 紀彦 (NAGAI TOSHIHIKO)

独立行政法人 港湾空港技術研究所 理事

研究者番号：00359233

研究成果の概要 (和文)：

本研究は、Freak wave (一発大波と呼ばれる異常波) の発生頻度を予測する手法の開発をめざしたものである。Freak wave を有義波高の 2 倍以上の波として定義し、最大波高とスペクトルの関係に関する理論的な定式化を行い、その妥当性を現地波浪観測結果と平面水槽実験により検証した。その結果、海面の水位変動の 4 次モーメントと最大波高の相関を見出し、波浪スペクトルから最大波高の推定が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Freak wave is abnormal big wave, which causes various sea disasters. This study developed reliable prediction of freak wave. The definition of freak wave is the wave height larger than twice of significant wave in the train and the statistical distribution of maximum wave height as functions of wave spectrum parameters. The fourth-order moment of surface elevation is correlated with the maximum wave height and the freak wave is possible to prediction based on the wave spectrum information. The validity of the theory was verified by field data and experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：

キーワード：Freak wave, Rogue wave, 異常波浪, 最大波高, 方向スペクトル, 非線形干渉, 海洋工学

## 1. 研究開始当初の背景

Freak wave とは一発大波とも呼ばれる巨大波浪を意味し、これまで海事関係者に恐れられてきた。日本沿岸ではここ 3 年間に 100 トン以上の大型漁船の沈没が 3 回起こり、合計

39 名の死者・行方不明者がでており、海難審判庁によるとこのような海難事故は高波を原因とする場合が多いことが指摘されている。このような洋上で発生する海難事故は、年間約 4000 件、死者・行方不明者は年間約

200 名にも上るものである。漁船の事故はこの内の 5 割を占め、海難審判庁で裁決された漁船の死亡海難のうち、転覆は 2 割強、と数多くの方が死亡・行方不明と報告されている。転覆の原因の多くは、「気象・海象状況への不十分な対応」もしくは「漁ろう等作業の不適切」に大別されている。

さらに、日本の輸出貿易の生命線でもある北太平洋大圏航路の海域は、アリューシャン列島に沿うストームトラックに位置するため、有義波高（平均エネルギー換算波高）が 15m を越えることもある。さらに、近年、サハリン沖油田の開発や海底メタンハイドレートの回収などの大規模な海洋開発も進みつつある。

こうした海域における海難事故や波浪災害を防ぐためには、Freak Wave、すなわち一発高波と呼ばれこれまで海事関係者に恐れられてきた異状高波を、よりの確に予測することが重要である。しかし、これまでの波浪予測実務では、有義波高などの平均エネルギーの推定だけが行われており、Freak Wave などの現実に現れる波高の最大値、つまり最大波高の推定とその出現頻度の評価は、体系的に行われていないのが現状である。

Freak wave については、80 年代後半からその存在が指摘され、90 年代前半から 10 年ほどかけてその発生原因について海洋物理学、海岸工学、造船工学の研究者により研究が進められてきた。その結果、屈折・回折や海流の影響がない一般的条件下における Freak wave の発生原因は波浪成分間の高次の共鳴相互作用によるものと結論づけられている。

このような Freak wave の予測に必要なのは、最大波高分布の予測あり、平均エネルギーに相当する有義波高ではなく、最大値として実際に出現する最大波高を予測することが重要である。

## 2. 研究の目的

有義波高の 2 倍を超える高波を Freak wave と定義し、その発生頻度を予測する手法を開発する。第 1 の目的は波浪のスペクトルと最大波高の関係を理論的に定式化することである。ついで、得られた理論を波浪観測データ、平面水槽実験および数値実験結果と比較し、その妥当性について検討し、Freak wave の発生条件を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

Zakharov 方程式において、連続スペクトルを持つ波列で生じる準共鳴 4 波相互作用の条件を考慮し、スペクトル周波数幅  $Q_p$  と波形勾配  $ak$  から水面変位の 4 次モーメント kurtosis:  $\mu_4$  を求める推定式を導く。さらに、kurtosis を考慮した弱非線形波高分布および

最大波高の分布を導出し、Freak wave の出現頻度の予測式を得た。

上記の予測式について、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。

## 4. 研究成果

準共鳴 4 波相互作用により不規則波の統計量は正規分布からずれる場合があり、その大きさはスペクトル形状に依存することになる。このスペクトルと kurtosis の関係について、Zakharov 方程式をもとに定式化を行った。得られた推定式によると、kurtosis の値は、波浪の非線形性が強くなると増加し、スペクトル幅が広がると減少する。さらに、kurtosis が増加すると最大波高の分布も大きな波高を持つ波が増加する方向にシフトし、Freak wave の出現頻度が増加する。これら波浪条件と kurtosis・最大波高の関係の妥当性について、水槽実験および現地データを元に確認を行った。

図 1 に示すのは、断面 2 次元水路を用いた実験結果であり、全測点の波列中の波の数  $N$  を 11,900 波と固定し、各測点における  $\mu_4$  の値と Freak wave の出現頻度を示したものである。図中の実線と破線は、提案式による  $\mu_4$  の変化を考慮した頻度（以下、非線形理論と略記）と Rayleigh 分布に基づく最大波高理論（以下、線形理論と略記）より得られる頻度である。Freak wave の出現頻度は  $\mu_4$  の値が大きくなると線形に増加する。実験結果と比較すると、 $\mu_4$  の値が大きくなると Freak wave の出現頻度が増加するという傾向が非線形理論で良く説明できる。

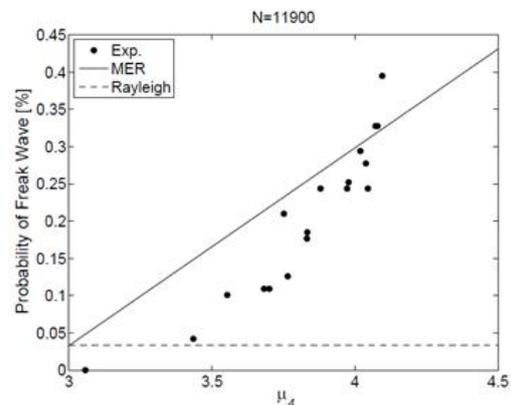


図 1 : Freak wave の出現確率と kurtosis:  $\mu_4$  の関係: 波の数  $N=11900$  (●: 実験結果, 実線: 提案式, 点線: Rayleigh 分布)

ついで、全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) を用いて理論の検証を行った。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時間連続的に観測が行われている。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。

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に示すのは、留萌における  $H_{max}/H_{1/3}$  と kurtosis の関係である。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2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3に、 $H_{max}/H_{1/3}$  の確率密度分布を示す。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、本研究で得られた予測式と比較した。一般的に、 $H_{max}/H_{1/3}$  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ている。本研究で得られた非線形理論はこの傾向を良く示しており、その妥当性が確認された。

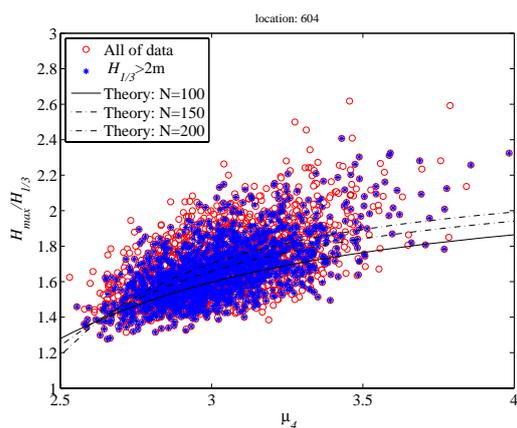


図2:  $H_{max}/H_{1/3}$  と kurtosis の関係: 留萌

(○: 全観測データ, \*:  $H_{1/3}>2m$ , 線: 理論値)

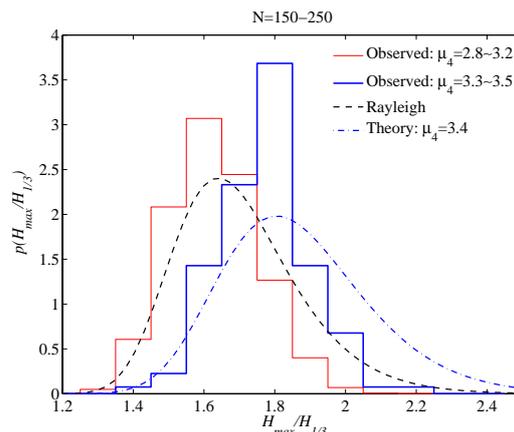


図3:  $H_{max}/H_{1/3}$  の確率密度分布 (実線: 観測データ, 破線: Rayleigh 分布, 一点鎖線: 非線形理論 ( $\mu_4=3.4$ ))

以上の結果、Freak wave やこれを含む最大波高分布は波列中の波の数  $N$  だけでなく、非線形指標 kurtosis/BFI の値に応じて変化し、例えば線形不規則波の  $\mu_4=3.0$  と比べて、1/8 だけ大きな  $\mu_4=3.125$  の場合、非線形効果は線形理論と同じオーダーとなる。つまり、kurtosis の値がこれより大きな場合、非線形の影響は顕著に表れ、このような海象条件では Freak wave の出現が高まるということが分かった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

(2009 報告; 3 件)

- ① 森 信人・吉木 昌弘・島田 広昭・安田 誠弘・間瀬 肇・河合 弘泰・加島 寛章, 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, 海岸工学論文集, 査読有, 第 56 巻, 2009, pp.141-145.
- ② T. Nagai, T. Hiraishi, H. Kawai, K. Kawaguchi 他 2 名, Characteristics of Yorimawari-Nami, Peculiar Japan-Sea Low Frequency Swell, Observed by NOWPHAS Seabed Wave Gauge Network, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 19 巻, pp.940-945.
- ③ N. Mori, M. Onorato and P. A. E. M. Janssen, Directional Effects on Freak Wave Prediction, Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering, 査読有, No.676 Vol.1, pp.392-403.

(2008 報告; 4 件)

- ④ 森 信人・Peter A. E. M. Janssen・川口 浩二：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，査読有，第 55 巻，2008，pp.111-116.
- ⑤ 永井 紀彦・平石 哲也・河合 弘泰・川口 浩二ら他 2 名：波浪観測網が捉えた 2008 年 2 月 24 日の日本海沿岸高波の特性，海岸工学論文集，査読有，第 55 巻，2008，pp.146-150.
- ⑥ M. Onorato, T. Waseda, A. Toffoli, L. Cavaleri, O. Gramstad, P. A. E. M. Janssen, T. Kinoshita, J. Monbaliu, N. Mori ら他 5 名：Statistical Properties of Directional Ocean Waves: The Role of the Modulational Instability in the Formation of Extreme Events, Physical Review Letters, 査読有，102 巻，2009，114502-1-114502-4.

(2007 報告 ; 4 件)

- ⑦ 森 信人・Peter A. E. M. Janssen・Miguel Onorato：異常波浪予測における多方向性の影響，海岸工学論文集，査読有，第 54 巻，2007，pp.96-100.
- ⑧ 清水 勝義・永井 紀彦ら他 4 名：日本沿岸で観測された 2006 年の台風等による高波特性，海岸工学論文集，査読有，第 54 巻，2007，pp.326-330.
- ⑨ Nobuhito MORI, Miguel Onorato, Peter A. E. M. Janssen ら他 2 名：On the extreme statistics of long crested deep water waves: Theory and experiments, Journal of Geophysical Research, 査読有，Vol.112, doi:10.1029/2006JC004024.

[学会発表] (計 16 件)

(2009 報告 ; 3 件)

- ① 加島 寛章，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，第 56 回海岸工学講演会，2009. 11. 19, 水戸 (茨城県立県民文化センター).
- ② Toshihiko NAGAI，Characteristics of Yorimawari-Nami, Peculiar Japan-Sea Low Frequency Swell, Observed by NOWPHAS Seabed Wave Gauge Network , The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2009), 2009. 6. 22, 大阪 (リーガロイヤルホテル大阪).
- ③ Hiroaki KASHIMA，EFFECTS OF BOTTOM TOPOGRAPHY CHARACTERISTICS ON TRANSFORMATIONS OF LONG PERIOD SWELL, 4<sup>th</sup> SCACR International Short Conference on APPLIED COASTAL RESEARCH, 2009. 6. 16, スペイン・バルセロナ (カタルーニャ工科大学).

(2008 報告 ; 9 件)

- ④ 森 信人，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，第 55 回海岸工学講演会，2008 年 11 月 13 日，富山 (富山国際会議場).
- ⑤ 永井 紀彦，波浪観測網が捉えた 2008 年 2 月 24 日の日本海沿岸高波の特性，第 55 回海岸工学講演会，2008 年 11 月 13 日，富山 (富山国際会議場).
- ⑥ Nobuhito MORI，Directional dispersion effects on kurtosis for freak wave prediction, Rogue Waves 2008, 2008. 10. 14, フランス (プレスト).
- ⑦ Katsuya HIRAYAMA，Examples of unexpected high waves in shallow water in Japan, Rogue Waves 2008, 2008. 10. 13, フランス (プレスト).
- ⑧ 森 信人，Freak wave 出現におよぼす方向分散の影響，日本海洋学会秋季大会，2008 年 9 月 26 日，広島 (広島国際大学).
- ⑨ Nobuhito MORI，DIRECTIONAL EFFECTS ON FREAK WAVE PREDICTION, International Conference on Coastal Engineering 2008 (ICCE2008), 2008. 9. 3, ドイツ (ハンブルグ).
- ⑩ Tetsuya Hiraishi，Damage of Harbor Structure due to Recent Storm Waves, Seminar on Abnormal Extreme Waves, 2009. 6. 13, 韓国 (韓国海洋研究院).
- ⑪ Katsuya HIRAYAMA，Reproduction of High Waves by Using a Boussinesq-type Wave Transformation Model for Wave Breaking and Runup in Coastal Zone, Seminar on Abnormal Extreme Waves, 2009. 6. 13, 韓国 (韓国海洋研究院).

(2007 報告 ; 4 件)

- ⑫ Nobuhito MORI，Freak wave prediction from spectra , 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, 2007. 11. 10, アメリカ.
- ⑬ 清水 勝義，日本沿岸で観測された 2006 年の台風等による高波特性，第 54 回海岸工学講演会，2007 年 11 月 9 日，宮崎 (宮崎観光ホテル).
- ⑭ 森 信人，異常波浪予測における多方向性の影響，第 54 回海岸工学講演会，2007 年 11 月 7 日，宮崎 (宮崎観光ホテル).
- ⑮ 森 信人，巨大波浪 Freak Wave の予測に向けて，日本流体力学学会 2007，2007 年 8 月 10 日，東京 (東京大学).

[図書] (計 1 件)

- ① Nobuhito MORI，World Scientific Pub. Co., in Handbook of Coastal and Ocean

Engineering, 2009, 1192p (pp.131-149).

[その他]

ホームページ等

・「巨大波浪に関する講演会」の開催（平成21年10月20日、港湾空港技術研究所にて）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永井 紀彦 (NAGAI TOSHIHIKO)

独立行政法人・港湾空港技術研究所・理事  
研究者番号：00359233

### (2) 研究分担者

森 信人 (MORI NOBIHITO)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：90371476

平山 克也 (HIRAYAMA KATSUYA)

独立行政法人・港湾空港技術研究所

海洋・水工部 研究チームリーダー

研究者番号：60371754

(H20, 21)

川口 浩二 (KAWAGUCHI KOJI)

独立行政法人・港湾空港技術研究所

海洋・水工部 主任研究官

研究者番号：50371753

平石 哲也 (HIRAISHI TETSUYA)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋・水工部 部長

研究者番号：20371750

(H19→H20, H21：連携研究者)

河合 弘泰 (KAWAI HIROYASU)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋・水工部 研究チームリーダー

研究者番号：40371752

(H19→H20, H21：連携研究者)

加島 寛章 (KASHIMA HIROAKI)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋・水工部 研究官

研究者番号：60463098

(H19→H20, H21：連携研究者)

清水 勝義 (SHIMIZU KATSUYOSHI)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋・水工部 上席研究官

研究者番号：80392984

(H19)

中川 康之 (NAKAGAWA YASUYUKI)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋・水工部 主任研究官

研究者番号：30360762

(H19)

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

Peter A. M. E. Janssen

ヨーロッパ中期気象予報センター

(ECMWF ; European Centre for Medium-Range  
Weather Forecasts)