

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249126

研究課題名(和文)海難事故原因究明にむけた危険波の再現

研究課題名(英文)Reproducing dangerous waves to understand the causes of marine accidents

研究代表者

早稲田 卓爾 (Waseda, Takuji)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30376488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,000,000円

研究成果の概要(和文)：外洋に突発的に発生するフリーク波が原因と考えられる、漁船等の海難事故が日本近海だけでなく、世界中で起こっている。しかしながら、事故時の波浪場についての情報は限られ、原因究明には至っていない。本研究では、海難事故時の波浪場の解析を行い、起こりうる危険な波を数値計算で推定し、実験水槽で再現するシステムを開発した。過去にフリーク波が観測されたときの海象条件とフリーク波の再現を行い、波の形状特性とその時間変化、船体応答と外力について新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Ship accidents in seas near Japan and throughout the world are considered to be caused by encounters with freak waves whose height outstand the surrounding waves. However, wave measurement at the time of the accident is rather limited, and the actual causes of the ship accidents are seldom discovered. In this research, we have developed a system to numerically hindcast the sea state during the ship accident and analyze the dangerous wave, and generate the wave in an experimental model basin. Sea states when freak waves were observed in an open ocean were analyzed and freak waves were generated in the tank. Through this study, we have gained new knowledge about the geometry of the freak waves, its temporal evolution, and the associated ship motion and load.

研究分野：工学

キーワード：海難事故 船舶工学 海洋科学 巨大波 ステレオ計測 造波法 船体応答

1. 研究開始当初の背景

フリーク波発生機構についての研究が進み、弱い非線形相互作用により波浪の変調が増大することで、フリーク波の発生頻度が高くなることが分かった (e.g. Waseda et al. 2009)。Waseda et al. (2012) は、日本近海における漁船等の海難事故時の波浪場の解析を行い、特異な気象条件下で波浪が狭帯化し、フリーク波の発生頻度が高い時に海難事故が起こる傾向を複数の事例で確認した。

しかし、単に発生頻度が稀な高波が船舶にとって危険であるかはわからない。そもそも、船舶にとって危険な波とは何であろうか。海難審判では、熟練した船長でも操船による回避が不可能であり、船体の応答が予期できない特殊な波浪との遭遇という意味で、三角波という用語が使われる。そのような Monster Wave (危険波) は存在するのか。

本研究では波浪そのものを特徴づける波形勾配、波形の非対称性、波頂の長さ、軌道速度など幾何学的・動学的特性が統計的に稀であり危険である波を Monster Wave (危険波) と定義する。非線形性が卓越する特異な波浪場における、これら幾何学的・動学的特性の統計分布は分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では、波形勾配、波形の非対称性、波頂の長さ、軌道速度など幾何学的・動学的特性の統計分布を把握し、船舶にとっての危険波の特徴を、水槽実験により明らかにする。新しい造波法、新しい計測法、そして、海洋波の新しい記述を行うことがゴールである。

以下の課題に取り組む

- (1) HOSM 造波法の確立: 高次スペクトル法 (以降 HOSM) により、任意の方向スペクトルについて、非線形性を考慮した造波信号を作成する。モンテカルロシミュレーションにより、ターゲットとなる波を特定し、水槽内で再現する。
- (2) 実海域で観測されたフリーク波・巨大波の再現: 2009 年に早稲田 (科研若手 S、2008-2013) が行った外洋での波浪観測 (水深 5400m) では、波高 13m のフリーク波が観測された。波浪モデルと HOSM 造波法により、海技研・実海域再現水槽で再現を試みる。
- (3) ステレオカメラによる 3 次元水位計測法の確立: 水槽内にて、ステレオカメラにより 3 次元波面計測を行う。それにより、危険波の幾何学的な特性を明らかにする。
- (4) 危険波の統計的特性: HOSM シミュレーション (弱非線形)、水槽実験 (強非線形) により、船舶にとって危険な波の特徴を把握する。

- (5) フリーク波に対する船体応答と波浪荷重: 実海域再現水槽内に発生させた危険波中を航走する模型船の動揺ならびに波浪荷重を計測し、応答や荷重と波浪との関係を明らかにする。

- (6) フリーク波発生メカニズム: 非線形波と乱れた海流との相互作用により、フリーク波の発生頻度が高くなる可能性が有る。非線形相互作用と流れの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) HOSM 造波法の確立

高次スペクトル法 (HOSM) は、West et al. (1987)、Dommermuth and Yue (1987) により考案された、ポテンシャル理論に基づく波浪場の解析手法である。自由表面の速度ポテンシャルを摂動展開し、再帰的に高次の解を求める。鉛直勾配は波数空間での演算子におきかえ、一定水深、周期境界条件という制約を課すことで、2D-FFT (Fast Fourier Transformation) による高速数値計算を行う。HOSM 造波法は、あらかじめ HOSM により計算を行い、造波信号を作成する。予備実験では、直進変調不安定波列の造波信号を作成した (Waseda et al. 2013)。空間的な周期性が保持され、波列の変調が時間的に発達することを確認し、これにより、HOSM 造波法の妥当性が示された。この手法を、本研究では不規則方向波に拡張する。

(2) ステレオカメラによる 3 次元水位計測法の確立

水槽実験における自由表面水位の計測は、容量式波高計等を用いて行うが、測定点は限定される。海面をステレオカメラで撮影し、3 次元水位を直接測定する技術が近年開発されているが (例 Gallego et al. 2011) 水槽でのステレオカメラによる計測方法は必ずしも確立されていない。そこで、物理的なマーカー、光学的なマーカーなどを用いて数百点における水位の計測手法を開発する。

(3) 観測データの分析とスペクトルと波形の再現

2009 年 9 月から 12 月の間に、有義波高 6m 超の時に、最大波高 13m のフリーク波を二度計測した。前者はフリーク波が起こりやすい条件下であったが、後者は必ずしもフリーク波が起こりやすい条件下では無かった。このようなフリーク波の違いが明らかにするために、HOSM を用いた分析を行う。

- (4) 危険波への船体応答と波浪荷重の計測
実海域再現水槽で発生させた危険波中における模型実験を実施し、船舶の動揺ならびに波浪荷重の計測実験を実施する。船舶の応答や縦曲げ荷重などを指標に危険波の性質を明らかにする。そのために、弾性模型船を新たに設計・製造し、実験を実施する。

実験設備

- ・海上技術安全研究所・実海域再現水槽: 76m × 36m、水深 4.5m、4 面造波機 (382 機)
- ・海上技術安全研究所・動揺水槽: 50m × 8m、水深 4.5m、直進波造波
- ・東京大学生産技術研究所・海洋工学水槽: 50m × 10m、水深 5m、1 面に 32 機の造波機

4. 研究成果

海難事故解析システム (University of Tokyo Marine Accident Analysis System)

第三代波浪モデル、HOSM モンテカルロシミュレーション、そして HOSM 造波を一連の流れで行う、海難事故解析システムの基盤を構築した (図 1)。このシステムを活用し、本研究では、2009 年 10 月 26 日と 27 日に JAMSTEC の JKEO サイトで K-Triton ブイにより計測されたフリーク波 2 例について、数値計算と造波実験を行った

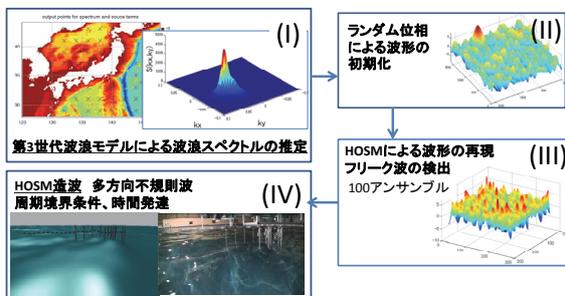


図 1 海難事故解析システム概要

以下、課題別に成果をまとめる。

(1) HOSM 造波法 (Hotani et al. 2015 他)

通常の造波では、非線形性の影響で、波浪スペクトルや波浪統計が空間的に発達する。本造波法では、時間的に造波信号を変化させることで、空間的に周期的で時間発展する波浪場を再現する。事前に計算した波浪場から、造波機位置における水位と速度ポテンシャルを切り出し、造波機の信号 (粒子速度) を作成する。以下の点に工夫を施した。

- 自由波と束縛波の分離: 造波信号は時系列で制御するため、束縛波成分が自由波として造波される。そのため、あらかじめ束縛波成分を線形分散関係に基づき除去する
- 波数空間での Biesel 伝達関数の適用: 空間的に周期性を持ち、時間的には発展するため、造波伝達関数を波数成分に適用する。
- Schaffer の 2 次造波理論の適用: 造波板の形状に依存して高調波成分に誤って生成される自由波を Schaffer の理論に従って打ち消す。

本研究では、直進変調不安定波、一方向不規則波、不規則方向波および実海域方向スペクトルによる造波を海上技術安全研究所の実海域再現水槽と動揺水槽にて実施した。

(2) フリーク波観測時の海象の特徴 (Fujimoto et al. 2016, 2015 他)

2009 年 10 月 26 日 19:00 (UTC) と 10 月 27 日 16:00 (UTC) に計測された最大波は、前者が最大波高 13.2m、有義波高 6.6m、AI 値 (最大波高と有義波高の比) 2.0、後者が最大波高 12.3m、有義波高 5.8m、AI 値 2.13 で、ともにフリーク波となる。しかし、波浪の方向スペクトルは大きく異なり、前者は単峰、後者は双峰スペクトルを有する。この 2 ケースについて、海難事故解析システムを利用し、それぞれ 5000 周期分の波浪場の再現を行った。その結果、方向スペクトルが狭い時と広い時を比べると、波高及び波頂高さの確率密度関数のテール部に統計的に有意な差が確認され、方向スペクトルが狭い程フリーク波が発生しやすいことを確認した。また、その際の波形は、方向スペクトルが狭い時の方が前後の非対称性が強く、クレストの歪みが大きくなることが判った。この波形の歪みは 3 次の非線形が鍵となることを解明した。

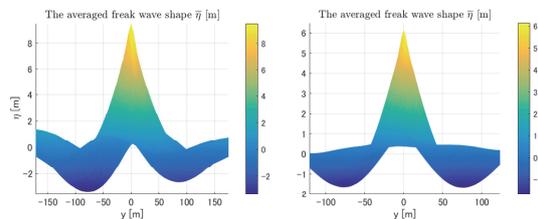


図 2 狭い方向スペクトル時の波形 (左図) と広い方向スペクトル時の波形 (右図)。進行方向 (右) に対して、狭い場合は前後の谷の深さが非対称になる。

(3) マーカーネット法の確立 (Mozumi et al. 2015 他)

水面にマーカーを格子状に並べて浮かせる 3 次元ステレオ計測手法開発した (Marker Net Method)。軽量のプラスチックネットに蛍光塗装を施した発泡体の球を合計 600 以上格子状に配置し水面に浮かべ、2 台のビデオカメラを同期して撮影、DLT (Discrete Linear Transformation) 法によりステレオ解析を行う。この手法により、3 次元波面の再構築が可能となる。その例を図 3 に示す。

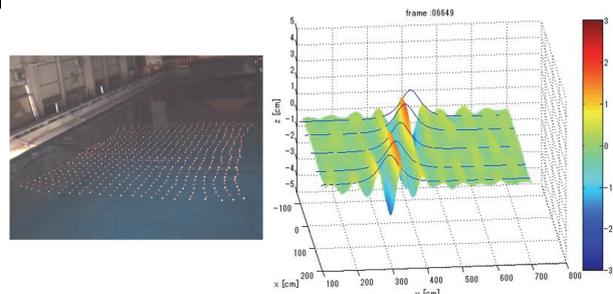


図 3 水槽に設置されたマーカーネット (左図) とステレオ再構築された 3 次元波形 (右図)

(4) 波の幾何形状と動学的特性、その時間変化 (Waseda et al. 2013, Hotani et al. 2015, Waseda et al. 2014ab)

直進不安定波、観測事例に基づく不規則方向波について波高計アレイ、ステレオカメラによる計測を行った。同時に開発した数値水槽 (NWT2D) による数値実験、そして HOSM 計算結果との比較により、ローカルな波浪の幾何形状 (波高、波長、波形勾配、クレスト高さ、谷深さ) とその時間発達に関する特性を詳細に検討した。その結果、時間的に変調する場合と、空間的に変調する場合の波形は、波群程度の範囲においては一致するということが判った (Houtani et al. 投稿予定)。また、最大波高の前後で、前傾、対称、後傾と 1 周期ほどで変化することが判り、後述する船体縦曲げモーメントに大きく影響することが判った (Houtani et al. 2015、図 4)。

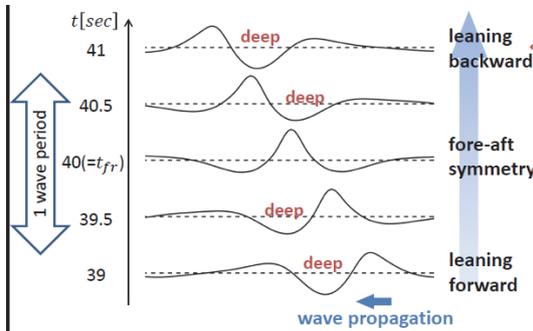


図 4 波形の時間変化、前傾⇒対称⇒後傾と 1 周期程度で大きく変化することが判る

また、波群中の粒子速度について観測データに基づき傾向を解析したその結果、多くの波浪について、うねりの状態 (即ち風による発達が無い) にて、波群を形成し、弱非線形過程によって線形的な推定から大きく外れることが判った (Waseda et al. 2014b)。

(5) 船体縦曲げ強度とフリーク波位相の関係 (Hotani et al. 2016、宝谷博士論文 2015)

弾性模型 (全長 4m) を開発し、フリーク波に対する船体縦強度に関する実験を、海上技術安全研究所の実海域再現水槽で行った。その結果、船体縦曲げモーメントの大きさは、フリーク波との遭遇のタイミングで、大きく変わることが判った。それは、フリーク波の形状が時間と共に変化するためである。前傾から、前後対称、後傾へと変化すること、フリーク波前後の谷が深い (浅い) 状態から、浅い (深い) 状態へと変化することから、どのタイミングで波浪と遭遇するかにより、船体の運動は大きく変わることが判った (図 4)。縦曲げモーメントの計測結果を図 5 に纏める。波頂とそのあとの谷の深さで定まる波高と高い相関があることがわかる。

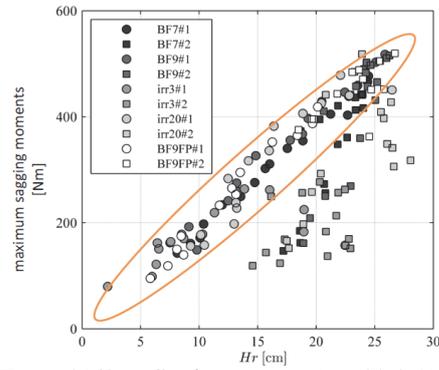


図 5 船体縦曲げモーメントの最大値と遭遇した波浪の波高との関係

(6) 非線形相互作用と不規則流れの影響 (Waseda et al. 2015, Toffoli et al. 2015)

海洋波の非線形相互作用は、現状では保存系で成立する場合のみの考えており、海流などにより分散関係そのものが変化する場合における相互作用は考えていない。本研究では 2 点について検討した。まず、はじめに、変調不安定波列における海流の影響を検討した。流速の収束により、Action Balance から波高が高くなり、非線形性が增大することで変調不安定が増強されることが判った (Toffoli et al. 2015)。次に 4 波共鳴が海流の乱れ成分の影響を考慮することで、抑制されることが判った。これは、新しい発見であり (Waseda et al. 2015)、今後様々な視点から検証されるべきである。

<引用文献>

Dommermuth, D. G., & Yue, D. K. (1987). A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 184, 267-288.

Gallego, G., Yezzi, A., Fedele, F., & Benetazzo, A. (2011). A variational stereo method for the three-dimensional reconstruction of ocean waves. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(11), 4445-4457.

宝谷英貴 (2015) 実験水槽におけるフリーク波再現に関する研究、2015 年 6 月東京大学博士論文

Waseda, T., Kinoshita, T., & Tamura, H. (2009). Interplay of resonant and quasi-resonant interaction of the directional ocean waves. *Journal of Physical Oceanography*, 39(9), 2351-2362.

Waseda, T., Tamura, H., & Kinoshita, T. (2012). Freakish sea index and sea states during ship accidents. *Journal of Marine Science and Technology*, 17(3), 305-314.

West, B. J., Brueckner, K. A., Janda, R. S., Milder, D. M., & Milton, R. L. (1987). A new numerical method for surface hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C11), 11803-11824.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

① Waseda, T., Kinoshita, T., Cavaleri, L., & Toffoli, A. (2015). Third-order resonant wave interactions under the influence of background current fields. *Journal of Fluid Mechanics*, 784, 51-73. doi:10.1017/jfm.2015.578 (査読あり)

② Toffoli, A., Waseda, T., Houtani, H., Cavaleri, L., Greaves, D., & Onorato, M. (2015). Rogue waves in opposing currents: an experimental study on deterministic and stochastic wave trains. *Journal of Fluid Mechanics*, 769, 277-297. doi:10.1017/jfm.2015.132. 277 (査読あり)

③ Waseda, T., In, K., Kiyomatsu, K., Tamura, H., Miyazawa, Y., & Iyama, K. (2014a). Predicting freakish sea state with an operational third-generation wave model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(4), 945-957. doi:10.5194/nhess-14-945-2014 (査読あり)

④ Waseda, T., Sinchi, M., Kiyomatsu, K., Nishida, T., Takahashi, S., Asaumi, S., ... & Miyazawa, Y. (2014b). Deep water observations of extreme waves with moored and free GPS buoys. *Ocean Dynamics*, 64(9), 1269-1280. doi:10.1007/s10236-014-0751-4 (査読あり)

[学会発表] (計 25 件) うち 11 件

(招待講演)

① Waseda, T. (2016). Resonant interaction of surface gravity waves under influence of external forcing. *Brazilian Symposium on Ocean Waves*, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.3.14-2016.3.16

② 早稲田卓爾 (2015) 海難事故と波浪スペクトル、波浪形状の関係について、船舶海洋工学会第 39 回東部構造研究会、横浜国大 (神奈川県横浜市)、2015.5.20

(査読あり)

③ Fujimoto, W., & Waseda, T. (2015). Nonlinear Effects on Local Mechanics of Freak Waves. *ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015.6.3, St. John's (Canada)

④ Houtani, H., Waseda, T., Fujimoto, W., Kiyomatsu, K., & Tanizawa, K. (2015). Freak Wave Generation in a Wave Basin with HOSM-WG Method. *ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015.6.3, St. John's (Canada)

⑤ Mozumi, K., Waseda, T., & Chabchoub, A. (2015). 3D Stereo Imaging of Abnormal Waves in a Wave Basin. *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015.6.2, St. John's (Canada)

⑥ Waseda, T., Houtani, H., & Tanizawa, K. (2013). On the Generation of Spatially Periodic Breather in a Wave Tank. *ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015.6.12, Nantes (France)

(その他)

⑦ Fujimoto, W., T. Waseda and K. Kiyomatsu (2016), Simulating observed freak waves in deep water near Japan using WAVEWATCH II and the Higher Order Spectral Method, 3rd International Conference on Violent Flows, I-site Namba, Osaka, Japan, 2016.3.10

⑧ Houtani, H., K. Tanizawa, T. Waseda, and H. Sawada (2016), An experimental investigation on the influence of the temporal variation of freak wave geometry on the elastic response of a container ship, 3rd International Conference on Violent Flows, I-site Namba, Osaka, Japan, 2016.3.9

⑨ 茂住研人、早稲田卓爾、A. Chabchoub. (2014) マーカーネット法による波面形状解析、日本船舶海洋工学会秋季講演会、長崎ブリックホール (長崎県長崎市)、2014.11.20

⑩ 宝谷英貴、早稲田卓爾、藤本航、茂住研人、谷澤克治、(2014) 任意の波浪スペクトルから発生しうるフリーク波を実験水槽に再現する方法、日本船舶海洋工学会春季講演会、仙台国際センター (宮城県仙台市)、2014.5.26

⑪ 宝谷英貴、早稲田卓爾、谷澤克治、(2013)、波の非線形な時間発達を考慮した新しい造波手法、日本船舶海洋工学会春季講演会、広島国際会議場 (広島県広島市)、2013.5.27

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕 ホームページ等 とくになし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早稲田 卓爾 (WASEDA, Takuji)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
教授
研究者番号：30376488

(2) 研究分担者

谷澤 克治 (TANIZAWA, Katsuji)
(独)海上技術安全研究所・流体性能評価
系・系長
研究者番号：70373420

宝谷 英貴 (HOUTANI, Hidetaka)
(独)海上技術安全研究所・流体性能評価
系・研究員
研究者番号：30636808

(3) 連携研究者

清松 啓司 (KIYOMATSU, Keiji)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
特任研究員
研究者番号：20647953

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)
(独)海洋研究開発機構・地球環境変動領
域・研究員
研究者番号：80419895

林 昌奎 (RHEEM, Chankyu)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：70272515