

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18295

研究課題名(和文)波の非線形性に着目したフリーク波中の船体横揺れに関する研究

研究課題名(英文)A study on roll motion of a ship in a freak wave focusing on the nonlinearity of waves

研究代表者

宝谷 英貴(Houtani, Hidetaka)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30636808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：変調不安定メカニズムにより形成されるフリーク波中の船体横揺れ応答を明らかにするため、変調不安定波中の2次元模型の横揺れ応答計測実験を行った。変調不安定波のローカルな形状(波長、波形勾配等)が船体横揺れに大きな影響を及ぼすことを明らかにした。さらに波形状について詳しく考察するため、ステレオカメラによる波形状の計測手法を開発した。変調不安定波の形状について詳しく調べた結果、空間周期的な変調不安定波と時間周期的な変調不安定波の波形はクレスト高さが最大となる付近で一致するという知見を得た。

研究成果の概要(英文)：To clarify the roll response of a ship in a freak wave generated due to modulational instability, we carried out a tank experiment with a two-dimensional floating body model in modulated wave trains. We hence revealed that the local geometry of modulated wave trains, such as wavelength and wave steepness, much influence the roll motion of a ship. To further investigate the wave profile experimentally, we have developed a method to measure a spatial wave profiles by stereo imaging. Through the investigation of the wave profiles of modulated wave trains, we revealed that the wave profiles of the temporally-periodic and spatially-periodic modulated wave trains coincide in the vicinity of the maximum crest height.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：フリーク波 変調不安定波 船体運動 波形状 ステレオカメラ 高次スペクトル法

1. 研究開始当初の背景

フリーク波が引き起こしうる船舶事故の一つに、横からフリーク波を受けての転覆が考えられる。これまでの実験研究により、船体の大傾斜や転覆という現象に対し、波の観点からは、波形状や粒子速度というような巨大波のローカルな特徴が重要であることが示唆されている (e. g., 平山、山下(1985)、石田他(1990, 1993))。これら実験では、線形波理論に基づく一発大波(集中性過渡水波等)が水槽に造波されている。しかし、集中性過渡水波のような波が実海域で発生し得るかは明らかでない。

その後、フリーク波に関する研究が進み、フリーク波の形成には線形集中メカニズムではなく、波の弱い非線形相互作用(変調不安定、準共鳴相互作用)が重要であることがわかってきた (e. g., Janssen (2003), Waseda et al. (2009))。このような波の準共鳴相互作用は、波のローカルな粒子速度に大きな影響を及ぼすことが明らかにされており (Waseda et al. 2014)、またフリーク波は波前面の勾配が大きいというような観測結果も報告されている (Myrhaug and Kjeldsen (1986))。このように、非線形性によるフリーク波のローカルな特徴は、横揺れの観点から船舶に重大な危険を及ぼす可能性を有すると考えられるが、明らかでない。

<引用文献>

- ・平山次晴、山下禎文：砕波による漁船の転覆過程について、関西造船協会誌、第 196 号 (1985)
- ・石田茂資、安野三樹雄、高石敬史：小型船の横波中転覆機構に関する模型実験(その 1、その 2)、日本造船学会論文集、第 167 号(1990)、第 174 号(1993)
- ・Janssen, P. A. M. E. : Nonlinear Four-Wave Interactions and Freak Waves, J. Phys. Oceanogr., Vol. 33, 2003
- ・Waseda, T., Kinoshita, T. and Tamura, H. : Evolution of a random directional wave and freak wave occurrence, J. Phys. Oceanogr., Vol. 39, 2009
- ・Waseda, T. et al. : Deep water observation of extreme waves with moored and free GPS buoys, Ocean Dynamics, Vol. 64, 2014
- ・Myrhaug, D. and Kjeldsen, S. P. : Steepness and asymmetry of extreme waves and the highest waves in deep water, Ocean Engineering, Vol. 13, 1986

2. 研究の目的

本研究では、準共鳴相互作用を考慮したフリーク波のローカルな特徴(形状等)に着目し、船体横揺れの観点から危険な波の特徴を明らかにすることを目的とし、以下の課題に取り組む。

- (1) ステレオカメラによる波形状および波粒子速度計測手法の開発：ステレオカメラ

による波計測手法を開発し、水槽実験において、フリーク波のローカルな特徴(波形状等)を明らかにする。

- (2) フリーク波中の 2 次元模型の横揺れ応答：フリーク波のローカルな形状が船体運動に及ぼす影響を明らかにするため、2 次元模型船を用いた水槽実験を行う。ここでは、波の準共鳴相互作用を考慮したフリーク波のモデルとして、一方向変調不安定波を水槽に造波する。

- (3) 時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の関係：水槽実験においては、これまで時間周期的な変調不安定波が造波されてきた一方で、数値計算では時間周期的な変調不安定波が扱われることも多い。これらの違いが船体横揺れに影響を及ぼしうるかという観点から、両者の波形の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) ステレオカメラによる波形状および波粒子速度計測手法の開発：

船体運動計測等、船舶海洋分野でも使用されているモーションキャプチャシステム (Qualisys 社) を活用した波面計測手法を構築する。水槽の水面に多数のマーカーを浮かべ、それらの 3 次元運動から波形状および粒子運動を推定する手法を開発する。

- (2) フリーク波中の 2 次元模型の横揺れ応答：

2 次元模型(浮体)を用い、フリーク波(変調不安定波)中の浮体動揺計測実験を行う。波の準共鳴相互作用を考慮した造波を行うため、宝谷らが開発した高次スペクトル法(HOSM; West et al. 1987)に基づく造波法である HOSM 造波法(Houtani et al. 2015)を活用する(科研基盤 A、2013-15、代表：早稲田卓爾(東京大学))。また、様々なパラメータ(波長、波高、摂動波数(波群の長さ))を有する変調不安定波を造波することで、波のローカルな形状が船体運動に及ぼす影響を調べる。水槽実験は、海上技術安全研究所の動揺水槽(長さ 50m、幅 8m、水深 4.5m)で実施する。

また、フリーク波中の浮体の運動応答の物理を明らかにするため、波の準共鳴相互作用を考慮した波浪中の 2 次元浮体の船体運動時系列計算手法の開発を試みる。

- (3) 時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の関係：

時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の波形の関係を明らかにするため、①水槽実験、②数値シミュレーション、③解析解による検討、を実施する。水槽実験では、両変調不安定波を造波し、波形状を計測する。ただし、計測領域が限られ、空間解像度

の問題もあることから、境界要素法に基づく fully nonlinear な数値造波水槽 (NWT2D、谷澤(1997)) を用いた数値造波実験を実施してより詳細な調査を行う。さらに、非線形シュレディンガー方程式の解析解である Akhmediev breather を用い、解析的に波形の比較を行う。

<引用文献>

- ・West, B. J., et al. A new numerical method for surface hydrodynamics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 92(C11), 11803-11824, 1987
- ・Houtani, H., et al. Freak wave generation in a wave basin with HOSM-WG method. In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, V007T06A085, 2015
- ・谷澤 克治：加速度ポテンシャルによる波浪中浮体運動の非線形理論と数値解法の研究、博士論文、(1997)

4. 研究成果

(1) ステレオカメラによる実験水槽内の波面計測手法の開発 (宝谷他 2017[雑誌論文①])

実験水槽内の水面に 100 個以上のマーカー (直径 10~20mm 程度) を浮かべ、波浪中のそれぞれのマーカーの 3 次元運動をステレオカメラにより追跡することで、波形状および自由表面流体粒子速度を計測する手法を開発した。マーカーの影の影響を除去するため、赤外線カメラおよび赤外線反射マーカーを使用した。また、これまでに提案されてきた実験水槽内の波面計測技術の多くは、水面を散乱体とするためにアルミ粉を撒く等の必要があったが、本提案手法では、マーカーの大きさが 10~20mm 程度であるため容易に回収することができ、水面を汚すことは無い。

本提案手法により計測した規則波の波形状の例を図 1 に示す。また、本手法を用いた変調不安定波の空間波形の計測を実施し、(3) における変調不安定波の波形に関する考察に活用した。

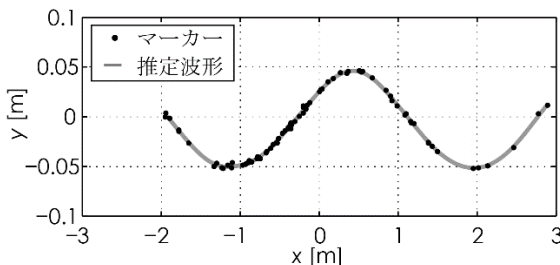


図1 ステレオカメラ計測で得られた規則波の空間波形

(2) フリーク波中 2 次元模型の横揺れ応答 (宝谷他 2017[学会発表④])

海上技術安全研究所の動揺水槽にて、変調不安定波中の 2 次元浮体の運動計測実験を実施

した (図 2)。本研究では、HOSM 造波法を利用した実験方法を提案した。HOSM 造波法は、狙った波を水槽内の狙った位置、場所に再現することができるため、波長、波高、波群長等の変調不安定波のパラメータを様々に変えながら、非線形な波浪中の運動応答を系統的に計測できることを示した。変調不安定波中の浮体運動計測例を図 3 に示す。本実験研究により、浮体の上下揺れや横揺れは、変調不安定波の波長や最大波高 (波形勾配) に大きく影響を受けることを明らかにした。また、これらの運動応答は波高に対して大きく非線形な応答を示すことを明らかにした。

また、このような準共鳴相互作用を考慮した波浪中の 2 次元浮体運動の時系列計算手法の開発を試みた。本研究では、境界要素法に基づく fully nonlinear な数値造波水槽 (NWT2D、谷澤(1997)) と、準共鳴相互作用を考慮した造波法である HOSM 造波法を組み合わせることで、水槽での物理実験に相当する数値実験の実施を検討した。しかし、大波高時の浮体と水面の境界部分で計算が発散する問題が生じており、適切なスムージングを適用する等計算方法の改良が今後の課題である。



図2 2次元浮体を用いた水槽実験の様子。浮体の両端部のアクリル板は、波浪場の 2 次元性を確保するための整流板。

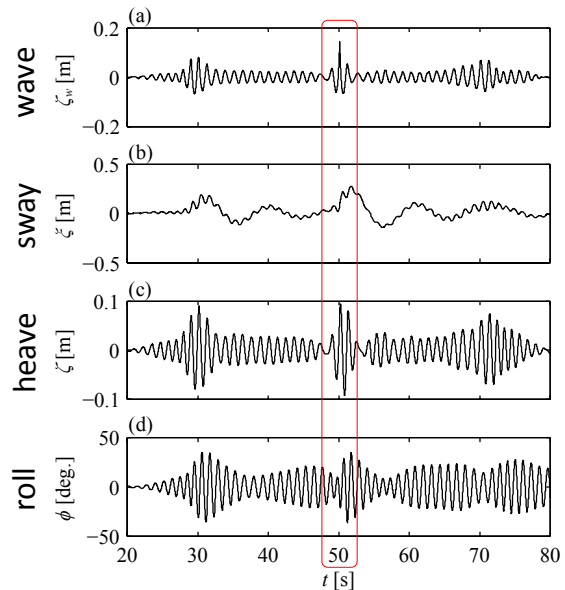


図3 変調不安定波中の水位および浮体運動計

測例。t=50(s)で変調不安定波の最大クレストが浮体位置に現れるように造波。

(3) 時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の関係 (Houtani et al. 2018 [雑誌論文②]ほか)

水槽実験、数値シミュレーション、解析的検討を通じ、時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の波形の違いについて調べた。その結果、クレスト高さが最大となる付近で両者の波形が一致すること、またその波形が一致する領域が波群の長さ程度であることを明らかにした。また、これまでに、波のスペクトルの幅が狭くなると、準共鳴相互作用により周波数と波数の関係が線形分散関係からずれることが報告されていたが、時間周期的な変調不安定波と空間周期的な変調不安定波の波形の一致は、この分散関係のずれに起因することを明らかにした。

つまり、本研究(2)のように空間周期的な変調不安定波を造波する場合も、従来実施されてきたように時間周期的な変調不安定波を造波する場合も、浮体の横揺れ運動という観点からは、どちらも同じ結果が得られるだろうという重要な知見を得た。

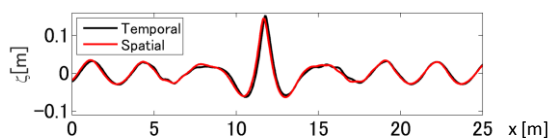


図 4 NWT2D の数値シミュレーションで得られた時間周期的変調不安定波 (黒線) および空間周期的変調不安定波 (赤線) の波形の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① 宝谷英貴、早稲田卓爾、谷澤克治、ステレオカメラによる実験水槽内の波形状および自由表面流体粒子速度の計測法—方向規則波による検証、日本船舶海洋工学会論文集、査読有、25、2017、93-102

DOI: 10.2534/jjasnaoe.25.93

② Houtani, H., Waseda, T., Tanizawa, K., Experimental and numerical investigations of temporally and spatially periodic modulated wave trains, Physics of Fluids, 査読有, 30(3), 2018, 034101
DOI: 10.1063/1.5010431

[学会発表] (計 4 件)

① Houtani, H., Waseda, T., Tanizawa, K., On the wave geometry of unstable Stokes' waves in deep water. Waseda Workshop on Theoretical and Computational Methods of Nonlinear Water Waves, An Introduction to the Mathematical Theory of Nonlinear Water Waves, 2016. 5. 16 -

2016. 5. 17 (東京)

② Waseda, T., Houtani, H., Fujimoto, W., Kinematics of freak waves in the ocean and ship response. 5th DNVA-RSE Norway-Scotland Waves Symposium, 2017. 1. 9 - 2017. 1. 10 (Oslo, Norway)

③ 宝谷英貴、早稲田卓爾、谷澤克治、変調不安定波の波形について、日本船舶海洋工学会平成 29 年度春季講演会、2017. 5. 23 - 2017. 5. 24 (東京)

④ 宝谷英貴、谷澤克治、非線形波中の 2 次元浮体の同様に關する実験研究、日本船舶海洋工学会平成 29 年度秋季講演会、2017. 11. 27 - 2017. 11. 28 (広島)

[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 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宝谷 英貴 (HOUTANI, Hidetaka)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30636808

(4) 研究協力者

沢田 博史 (SAWADA, Hiroshi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80470053