

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13941

研究課題名(和文) フリーク波形成メカニズムが船体縦曲げ応答に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Investigation of the influence of the mechanism of freak wave generation on the vertical bending response of a ship

研究代表者

宝谷 英貴 (Houtani, Hidetaka)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：30636808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：フリーク波中のコンテナ船弾性模型曳航実験の解析を通じ、コンテナ船に作用する最大サギングモーメントは、船長と波長が同程度の場合に、フリーク波前後の谷深さに大きく影響されることを明らかにした。これは、縦曲げモーメントの出会い波成分が、船体運動(特にpitch)の履歴に影響を受けるためである。また、弾性振動応答についても、フリーク波を含む波群全体の形状・ダイナミクスが影響を及ぼすことがわかった。その他、関連する実験技術として、全周造波機を備えた水槽におけるopposing seaの再現やステレオカメラおよび分布型光ファイバセンサによる船体たわみ分布計測技術の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、船体最終強度に強く関連するテーマであった。本研究により、フリーク波に対する、もしくは短期海象中の最大縦曲げモーメントを推定する上で、波高のみを考えるのでは不十分であり、波形状を考慮する必要があることが明らかになった。このような波形状の船体構造応答への影響に関する知見は、例えば船体に作用する最大縦曲げモーメントを精度よく推定するための設計波(設計不規則波)の設定に有用であり、船体構造設計に活用され得ると考えられる。また、フリーク波形成メカニズムという科学的な議論と、船体構造応答への影響という工学的な議論を結び付けたことで、両方面からの研究の活発化が期待される。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the vertical bending responses of a hydro-structural container ship model in a freak wave in detail. We revealed that the maximum sagging moments acting on the ship varied depending on the relative depth of the troughs in front and behind the freak wave when the ship's length is approximately the same as the wavelength. This wave-geometry influence is because the wave-frequency components of the vertical bending moments are affected by the ship motion (notably, the pitch motion) history. We also revealed that the whipping responses are influenced by both the geometry and dynamics of a wave group that includes the freak wave. Besides, as the related experimental techniques, we reproduced an opposing sea in a wave basin in a fully directional wave basin and developed an experimental method to measure the deflection distribution of a ship model using stereo cameras and distributed fiber-optic sensors.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：フリーク波 弾性模型 縦曲げモーメント 全周造波機 ステレオカメラ 分布型光ファイバセンサ

1. 研究開始当初の背景

近年の研究により、フリーク波の形成には波の変調不安定(準共鳴相互作用、弱い非線形相互作用)が重要な役割を果たしていることが明らかになってきている(例えば[1])。一方で、実海域で観測されたいくつかのフリーク波については、変調不安定波重要でなく、線形集中のメカニズムで説明がつくことも指摘されている(例えば[2])。フリーク波は、変調不安定もしくは線形集中のいずれかのメカニズムのみより形成されるということではなく、海象条件(スペクトル形状)等に依存し、どちらのメカニズムでも形成し得るものと考えられる[3]。さらに、これら形成メカニズムの違いにより、フリーク波の形状に違いが見られることが指摘されている[3]。

フリーク波は、船舶にとっては、例えば縦強度の観点から危険な波と考えられている。フリーク波との遭遇により、スラミングが発生し、船体に弾性振動が誘起されることで、大きな縦曲げモーメントが発生するためである。しかし、フリーク波の形状が船舶の縦曲げ応答及ぼす影響は明らかではない。また、もしそのような影響がある場合には、線形集中と変調不安定というフリーク波形成メカニズムの違いにより、船体縦曲げ応答が変わる可能性がある。これまで、多くのフリーク波中の船体構造応答に関する多くの数値研究、実験研究においては線形集中波が用いられてきたが、海象によっては変調不安定を考慮すべきかもしれない。このような、フリーク波形成過程の船体構造応答への影響はこれまでに検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では、線形集中/変調不安定というフリーク波形成メカニズムが船体縦曲げモーメント応答に及ぼす影響を、水槽実験により明らかにすることを旨とする。その上で鍵となるのが、フリーク波形状が船体縦曲げ応答に及ぼす影響である。そのような影響を、船体運動や波のダイナミクスにも着目しながら明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) フリーク波中コンテナ船縦曲げ応答

フリーク波中のコンテナ船弾性模型の曳航実験の結果を解析する。フリーク波のモデルとして、変調不安定波を用いる。フリーク波の形状(波前面・後面の波高、波長)やダイナミクス(波面速度)が船体縦曲げ応答に及ぼす影響を調べる。また、縦曲げモーメントは、時間スケールの異なる“出会い波成分”と“ホイッピング(弾性振動)成分”から構成され、それぞれが生じる要因が異なる。そのため、実験で計測された縦曲げモーメントをこれら2成分に分離して解析を行う。また、両者とも、波形状だけでなく船体運動にも強く関連する現象であることから、船体運動にも着目した解析を実施する。

(2) 実験水槽における opposing sea の再現

線形集中、変調不安定という物理過程の違いがフリーク波の形状に影響を及ぼすが、うねりと風波がある程度異なる方向から来る crossing sea と呼ばれるような海象では、線形集中のメカニズムでフリーク波が発生しやすいことが示唆されている[3]。このような海象中の船体構造応答を実験的に調べる上で、このような crossing sea を水槽に再現する必要がある。しかし、特に、うねりと風波が 180°異なる方向から来る opposing sea は、1面もしくは2面に造波機が配置された従来の角水槽では再現が困難であり、全周を造波機で囲まれた水槽でなければ再現できないはずである。本研究では、海上技術安全研究所にある全周造波機を備えた実海域再現水槽において、第3世代波浪モデルにより推算された実海域の opposing sea の波スペクトルを元に、線形造波理論に基づきこの opposing sea を水槽内に再現することを試みる。計測された波浪場から方向スペクトルを推定することで、全周造波機を備えた水槽において opposing sea の再現が可能であることを示す。

(3) 模型船のたわみ分布の計測

従来水槽試験においては、静水中停船時の縦曲げモーメントを基準(ゼロ)に、波浪による縦曲げモーメントの変動値(相対値)を計測していた。しかし、静水中停船時にも、浮力と重量の船長方向分布の差により、縦曲げモーメントが生じている。船の最終強度評価という観点からは、波浪に対する応答だけでなく、このような静水応答の定量評価も重要となる。そこで、このような静水中の縦曲げ応答や、それを含んだ絶対的な応答を計測するため、ステレオカメラによるたわみ分布計測、分布型光ファイバセンサによるひずみ分布からたわみ分布を推定、という2つの手法を開発する。これらの手法を検証するため、アルミ梁の曲げ試験、および、バックボーン式のコンテナ船弾性模型の曲げ試験を行った。これら2手法により計測されたたわみ分布を、レーザー変位計によって計測された数点におけるたわみ値と比較することで、これら2手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) フリーク波中コンテナ船弾性模型曳航実験結果の解析

実験結果を元に、フリーク波形状とコンテナ船に作用する最大サギングモーメントの関係を調べたところ、船長が波長と同程度の場合には、最大サギングモーメントが、波の後方波高(波頂とその後方の谷で定義)と後方波高と前方波高(波頂とその後方の谷で定義)の比の関数で表

されることがわかった。この主たる原因は、縦曲げモーメントの出会い波成分が船体運動（特に pitch）の波に対する相対位相に影響を受けるためである（図 1）。後方波高に対して前方波高が大きいほど pitch 運動が波に対して遅れ、最大サギングモーメントの出会い波成分が小さくなる。一方、ホイッピング成分については、過去の研究でも指摘されている通り、船首の波面に対する鉛直方向の相対速度が重要なパラメータであることがわかった。もちろん、船首位置の波のダイナミクスが重要であるが、船首の鉛直速度は船体運動に支配されるため、より後方の波の情報も無視できず、波群全体の特徴がホイッピング応答に影響することが明らかになった。さらに、前後波高と最大サギングモーメントの関係は、フリーク波の波長によっても変化することも確かめられた。

本研究により、フリーク波の形状と船体縦曲げ応答の関係の詳細を明らかにすることができた。線形集中と変調不安定というフリーク波形成メカニズムが船体縦曲げ応答に影響を及ぼし得ることを示唆する結果である。しかし、その影響（差異）を定量評価するまでには至らなかった。今後の課題である。

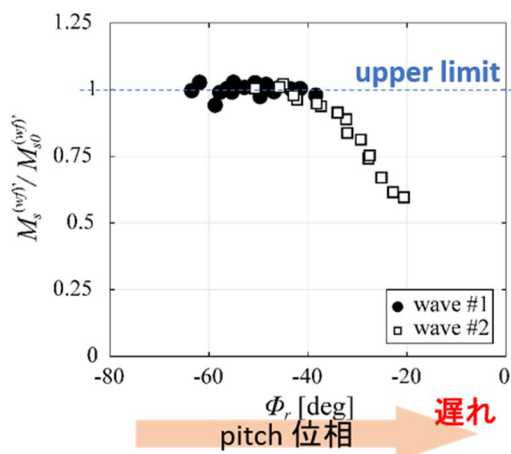


図 1 フリーク波との遭遇で生じる最大サギングモーメント（出会い波成分）と pitch 運動の波に対する相対位相の関係

(2) 実験水槽における opposing sea の再現

実海域再現水槽で実施した opposing sea の再現実験において、6 点で計測された水位時系列から、最尤法（Maximum likelihood method）を用いて方向スペクトル解析を行った（図 2）。ほぼ 180° 異なる 2 成分のエネルギーピークが現れており、全周造波機を備えた水槽において、opposing sea が再現できることを確かめた。ただし、この推定された方向スペクトルはターゲットのスペクトルに完全に一致しているわけではない。その差の原因として、最尤法による推定精度や造波・計測時間の有限性による統計的なばらつきが考えられる。また、全周造波機による消波性能に起因し、反射波が影響している可能性も示唆される[4]。現在、本研究成果は雑誌論文に投稿中である。

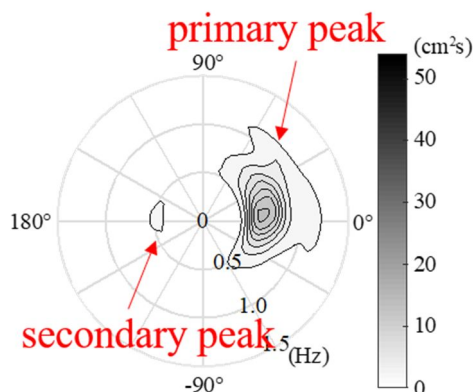


図 2 実海域再現水槽（海上技術安全研究所）に再現した opposing sea の方向スペクトル

(3) 模型船のたわみ分布の計測手法の開発

アルミ角パイプにステレオカメラ用のターゲットマーカおよび分布型光ファイバセンサを取り付け、3 点曲げ試験を実施した。両手法により計測・推定されたたわみ量を、レーザー変位計によるたわみ量と比較した結果、最大 8mm 程度のたわみ量に対し、ステレオカメラ計測は最大 3.1%、光ファイバセンサは最大 2.5% の誤差でたわみを評価できることがわかった。また、こ

のアルミ角パイプの自由振動試験を行い、両手法により約 10Hz でたわみ 1mm 程度の高周波振動が計測できることも確認された。さらに、長さ 2m の弾性模型船の 3 点曲げ試験を実施し、両手法によるたわみ分布計測を行った。本模型は、先に述べたアルミ角パイプをバックボーンとして使用している。その結果、両手法とも、0.5mm 程度以下という小さなたわみ分布を評価できることが確認された（図 3）。

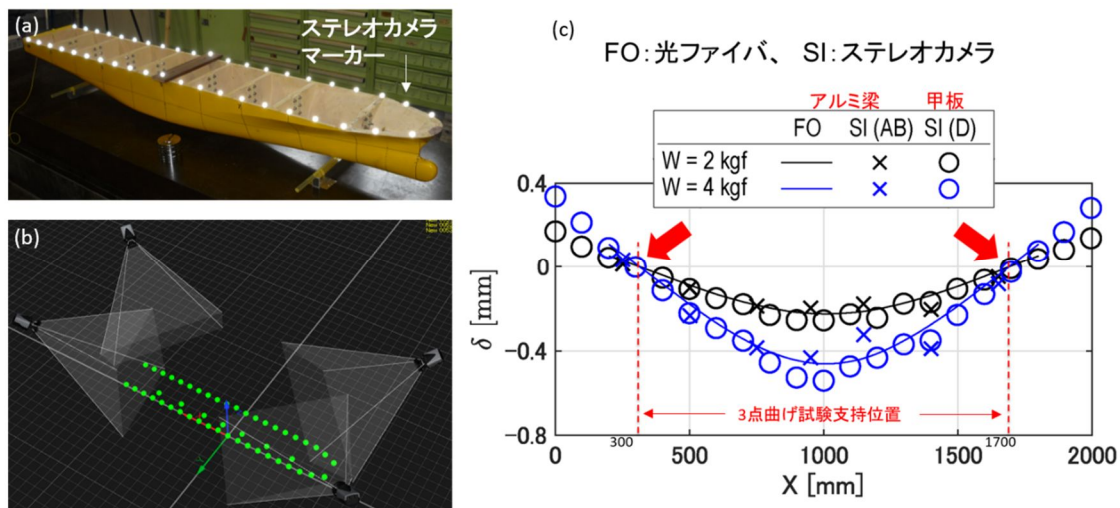


図 3 (a)たわみ分布計測に用いたコンテナ船弾性模型と配置されたステレオカメラ計測用ターゲットマーカー、(b)ステレオカメラによるターゲットマーカーの 3 次元座標推定の様子、(c)弾性模型船 3 点曲げ試験時のたわみ分布推定結果

< 引用文献 >

[1] Janssen, P. A. (2003). Nonlinear four-wave interactions and freak waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(4), 863-884.

[2] Trulsen, K., Nieto Borge, J. C., Gramstad, O., Aouf, L., & Lefèvre, J. M. (2015). Crossing sea state and rogue wave probability during the Prestige accident. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10), 7113-7136.

[3] Fujimoto, W., Waseda, T., & Webb, A. (2019). Impact of the four-wave quasi-resonance on freak wave shapes in the ocean. *Ocean Dynamics*, 69(1), 101-121.

[4] Ota, D., Kuroda, T. & Houtani, H. (2019). Quantitative evaluation of temporal variation for the short-crested irregular wave generated in experimental wave basin. In 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Hamburg, Germany.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Houtani Hidetaka, Waseda Takuji, Tanizawa Katsuji, Sawada Hiroshi	4. 巻 86
2. 論文標題 Temporal variation of modulated-wave-train geometries and their influence on vertical bending moments of a container ship	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 128 ~ 140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宝谷 英貴、三上 航平、小林 真輝人、藤 公博、村山 英晶、鈴木 英之
2. 発表標題 ステレオカメラおよび光ファイバセンサによる コンテナ船弾性模型のグローバルな静的弾性変形計測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会令和元年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidetaka Houtani, Kohei Mikami, Makito Kobayashi, Kimihiro Toh, Hideaki Murayama, Hideyuki Suzuki
2. 発表標題 Measurement of static global elastic deformation of a hydro-structural container ship model by stereo imaging and fiber optic sensing techniques
3. 学会等名 The 2nd International Symposium On Marine Structures (ISOMS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宝谷 英貴
2. 発表標題 変調不安定波の実験的・理論的・数値的研究
3. 学会等名 非線形波動現象の数理とその応用 RIMS共同研究（公開型）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宝谷 英貴
2. 発表標題 一体型コンテナ船弾性模型の製作とそれを用いた波浪中 船体弾性応答計測
3. 学会等名 2019年度R10S研究講演会 実海域船舶性能評価システムの高度化と実用化に関する産学共同研究（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考