

令和元年6月15日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02429

研究課題名(和文) 海洋波における波群形成過程と船体応答の解明

研究課題名(英文) Investigation on the formation of ocean wave groups and the ship response

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：外洋で突発的に発生するフリーク波を伴う波群の幾何学的な特徴を現場観測と数値シミュレーションにより明らかにし、制御された水槽実験により船体応答の詳細を検討した。そして、新たにステレオカメラによる計測とデータ同化による広域波面計測手法、縦曲げ及びねじり振動の計測を可能とする模型船製作手法を開発した。実海域における波群の形成過程に資するデータベースを構築するとともに、変調波列における波形及び波群の時空間発達に関する新たな知見を得、さらに、波群中の代表的な波の相対的な形状の関係により船体の弾性応答が大きく異なることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実海域におけるフリーク波発生要因は、まだ結論が出ていない。本研究により開発された波浪解析システムにより、今後は観測された波浪・波群の非線形性を考慮した発達過程の解明が可能となる。そして、船殻そのもので強度を保つ模型船の開発により、より実船に近い縦曲げとねじりが同時に起こる船体応答に資する実験が今後可能となる。このような新たな技術開発は学術的に意義が高い。そして、本研究は最先端の流体力学的な知見と最先端の構造力学的な知見が融合されている点に意義がある。波形が時空間的に変化し、同じ波形でも船体が受ける荷重が大きく異なるという知見は、今後、船舶の設計基準策定にあたり非常に重要である。

研究成果の概要(英文)：Geometrical features of the wave groups including freak waves that suddenly appear in the ocean were studied based on ocean observation and numerical study. The ship response to freak wave groups was studied at a controlled towing tank. Moreover, a new data assimilation scheme merging the stereo reconstructed wave field and nonlinear numerical wave model was developed. A new ship model capable of measuring bending moment and the torsional moment was developed as well. Making use of these new tools, a database of a wave field was constructed to study the mechanism of the wave group formation, a new knowledge on the spatiotemporal evolution of wave group was gained, and the elastic response of the ship to the freak wave was revealed that depends on the encounter timing of the ship to the waves.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海難事故 非線形波動・フリーク波 ステレオカメラ波高計測 船体強度 弾性模型船 データ同化 アンサンブルシミュレーション 高次スペクトル法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

① 研究の学術的背景

海洋波の発達に関する基礎理論の根幹をなすのは、波浪成分間の共鳴相互作用、風からのエネルギー入力、そして、砕波による散逸である。その結果、水位の変動がガウス過程で記述され、周波数スペクトルが自己相似形を保ち、方向分布がある程度広いという考察は頑強であると思われていたが、外洋に突発的に現れるフリーク波の研究から、海洋のスペクトルは、気象擾乱や海流の影響で時々刻々変化し、波浪成分の位相が重要となる100周期程度のオーダーの非線形効果により、有義波高の2倍を超える波浪の発生確率が高くなることが判ってきた。

そのメカニズムとして、変調不安定による波群の形成が考えられる。スペクトルが狭い場合水位の変動は、非線形シュレーディンガー方程式で表すことができるが、その解析解の一つであるブリーザー解は、空間的または時間的に局所的に振幅が増大し減少する様々な振幅の変調を包括する。周囲の波に比べ、突出して波高が高い様子が、外洋で観測されるフリーク波に類似していることから、ブリーザー解はフリーク波発生要因の有力な候補と考えられている。

しかしながら、実際の海洋波の確率密度関数は、弱い非線形発達は重要でないという研究結果もある。即ち、確率論だけでは、フリーク波の生成要因を判別することはできないのである。そこで、近年着目されているのが、フリーク波の幾何学的、動学的な特徴である。波群中最大波の粒子速度が弱非線形理論の推定を超えて大きくなること、波形は前後非対称となり、三日月上に変形することが判ってきた。このような幾何学的・動学的特徴に着目すれば、海洋波における波群そしてフリーク波の形成メカニズムの解明が可能となるであろう。

そして、波浪の空間波形を時系列で実測することが可能となってきた。ステレオカメラを用いて再現された波面の時空間データから、新しい波浪統計が構築されつつあり、本研究で着目している、コヒーレントな波群の形成メカニズムの解明に有望な観測手段と考えられる。

そして、このようなフリーク波もしくは波群との遭遇が、船舶の海難事故の原因である可能性が指摘される。日本近海で起こった海難事故の多くが、フリーク波が起きやすい海象条件下で起こっていることが判っているが、追い波やパラメトリックロールという、特殊な条件下で起こる船体応答が原因となっていると思われる事例が複数あった。これらの事故は、海上物流量の増大に伴い、様々な海象条件下での航行が行われるようになったこと、船型が変わってきて、波浪と船体の応答における非線形性が、より重要となってきたことが遠因であると考えられる。これまでの研究で、波形の非対称性が時間変化すること、船舶がどのタイミングでフリーク波に遭遇するかで、縦曲げモーメントが大きく変わることが示された。インド洋で起きた大型コンテナ船折損事故が起きたのは、決して厳しい波浪条件下ではなかったが、波形の違いについての検討はなされていない。

2. 研究の目的

外洋に突発的に現れるフリーク波の研究を通して、海洋波のスペクトルが時々刻々変化し、波高の統計分布が線形理論からずれることが判ってきた。そのメカニズムとして、準共鳴非線形相互作用によるコヒーレントな波群の形成が重要と考えられるが、外洋における波群の存在とその特徴は、必ずしもわかっていない。本研究では、外洋における波面のステレオカメラ計測により、波浪の時空間データベースを構築し、波群の形成過程の解明と、その特徴を定量化することを第一目的とする。次に、その幾何学的な特性、動学的な特性をとらえるために、波群を水槽実験により再現する。そして、そのような波群に遭遇した船舶が、どのような挙動を示すかを、船体の縦強度に着目し、実験的に検証する。

3. 研究の方法

外洋における波面のステレオカメラ計測により、波浪の時空間データベースを構築し、波群の形成過程とその特徴を明らかにする。そして波群を水槽実験により再現し、遭遇した船舶がどのような挙動を示すかを、船体の縦強度に着目し、実験的に検証する。以下の3点を実施した。

【ステレオカメラによる波面解析】二台のカメラを東京大学平塚総合実験塔に設置し、波面の計測を行う。ステレオ解析により再構成した波浪情報は、観測塔での計測波高、そして、現地集中観測計測による現場観測波高との比較により誤差推定と検証を行う。

【数値計算とデータ同化】ステレオ解析範囲（奥行き50m、幅40m-70mの台形領域）では、典型的な波長（50m）の波群の特性をとらえることが難しいので、より広範囲の波浪情報を構築するためにアンサンブル計算による4次元変分法(a4DVAR)によるデータ同化手法を導入する。モデルはポテンシャル理論に基づく高次スペクトル法を用いる。再解析により構築された波面は、集中観測計測結果との比較により、手法の妥当性を確認する。

【船体運動と船体強度】変調不安定波列含む直進波・多方向波と船体の応答を明らかにするために、海上技術安全研究所の実海域再現水槽（80m×40m×4.5m）にて波浪中曳航実験を実施する。船体縦曲げ、ねじりに関する知見を得るために、弾性模型船は縦曲げおよびねじり振動のモード形状を実船相似とするウレタン製一体型コンテナ船弾性模型とする。その際、PE樹脂のような柔らかい素材に対し、FBG(Fiber Bragg Grating)ひずみゲージによるひずみの計測を実施し、船に作用する最大サギングモーメントやねじりモーメントに資する計測を行う。

4. 研究成果

【ステレオカメラによる波面解析】

東京大学平塚総合実験塔にて、2017年4月よりステレオカメラによる波面計測を行った。画素数 2048×2048 のカラーカメラ (GigE UI-5370CP-C-HQ, IDS Imaging GmbH) の設置高度は約 16m、カメラ間距離は 3.9m で 10 から 15fps で同期されている。500 程度の 20 分間の画像を取得し、ステレオ解析を行い、波面変位の推定とその誤差の定量化を行った (図 1 左、中)。また、2018 年 9 月 1 日から 10 月 2 日まで平塚総合実験塔近傍に海底設置 ADCP、係留波浪ブイ 2 基 (Spotter と Piper-A) を設置し、ステレオカメラとの比較を行った。その結果、有義波高の良い一致が確認され、ステレオカメラによる推定の妥当性を確認した (図 1 右)。誤差は塔から離れるにつれ大きくなるが、平均的な有義波高は塔の超音波波高計、ADCP、係留波浪ブイと良く一致した。

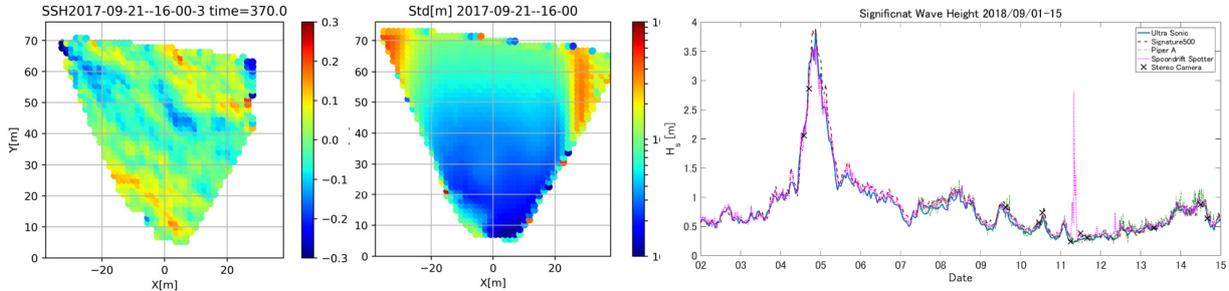


図 1: ステレオカメラにより推定した波面のスナップショット (左) と誤差 (中)。集中観測 (2018 年 9 月) における有義波高の時系列比較 (超音波波高計、海底設置 ADCP、係留波浪ブイ (Spotter と Piper-A)、ステレオカメラ) (右)。

【数値計算とデータ同化】

ステレオカメラから再構成した波面水位は代表的な波浪を一波長程度しか計測できていない。そこで、高次スペクトル法による広域 ($2.64 \text{ km} \times 2.64 \text{ km}$) の計算を行った。2009 年に 5400m 水深に設置された観測ブイにて計測されたフリーク波 2 例の解析では、高次スペクトル法による波面のモンテカルロシミュレーションを行い、フリーク波の代表的な形状に関する統計的な解析を行ったが (Fujimoto et al. 2019), 本研究ではデータ同化により初期位相を推定した (図 2 左)。データ同化は、アンサンブルシミュレーションにより評価関数の勾配と曲率を推定する手法 (a4DVAR, Yaremchuk et al. 2016) を波浪計算の特徴を生かして拡張する SWEAD (Surface Wave reconstruction by Ensemble Adjoint-free Data assimilation) を開発した (Fujimoto et al. 2019 投稿中)。SWEAD により、ステレオカメラで計測された海面 (図 2 左 赤枠) の面積にして 2500 倍の領域での波面が推定できる。図 2 右に示すように、観測とデータ同化による再解析とは良く一致し、ステレオカメラ解析による推定で見られた波浪スペクトルの空間的なばらつき (計測誤差) が均一化されている。

平塚総合実験塔での計測では、当初期待されたステレオカメラによる波群そのものの直接的な計測は観測範囲の制約と代表的な波長との関係からできなかったが、データ同化を新たに行うことにより、広域の波群の伝搬特性の検討が非線形を考慮した再解析により可能となった。特に着目して解析を行った観測事例 (2018 年 9 月 22 日) からは、興味深い波群の形成の可能性が示唆される。図 3 左に示すように、波の進行に対して斜めに波群が進行していることが観測され、これは、東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて再現された斜行する波群 (Chabchoub et al. 2019) を想起させる。今後構築したデータベースの解析により、さらなる実海域での波群形成メカニズムの解明が期待される。

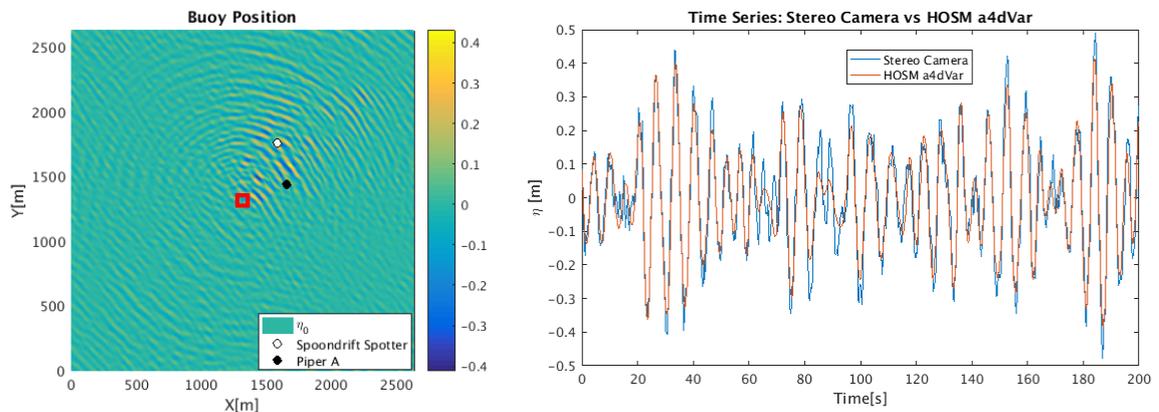


図 2: 400 メンバーのアンサンブルシミュレーション (高次スペクトル法) により推定された初期の波面形状 (左)。右図はステレオカメラ画像の中心における水位と SWEAD 再解析による水位の時系列の比較。

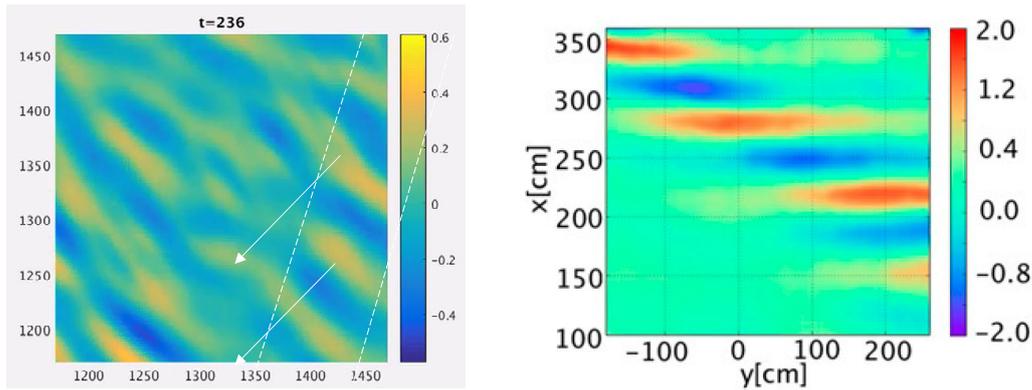


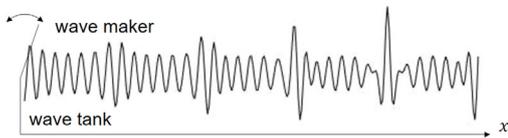
図 3 : 2019 年 9 月 22 日ステレオカメラ観測に基づく再解析波浪データ (300m 四方を拡大) にみられる波群 (左図) と東大生研海洋工学水槽にて再現された斜行する波群 (右図)

【船体運動と船体強度】

フリーク波との遭遇により船体は大きくピッチ方向に運動し、スラミングに伴う衝撃荷重により船体全体が弾性振動 (Whipping) する。それに伴う縦曲げモーメントを定量的に評価するため、海上技術安全研究所の実海域再現水槽 (80m×40m×4.5m) にて非線形波列との遭遇実験を行った。あらかじめ高次スペクトル法で計算した時間発達する波浪場を基に造波する HOSM 造波法 (Houtani et al. 2018 OE) を用いて波群の発達を伴う複数の進行波を造波した。はじめに、変調不安定波列の幾何学的特性について検討するため、空間的に周期的な波列と時間的に周期的で空間的に発達する波列におけるフリーク波形状について比較を行った (図 4 左)。その結果、フリーク波を含む波群において非線形性に伴う各波成分の変化に伴い、波形が良く一致することが分かった (図 4 右、Houtani et al. 2018 POF)。従って、造波機からの距離が限られる水槽でも模型船によるフリーク波遭遇実験が可能となる。

TPSE (temporally periodic and spatially evolving) waves

- ▶ Conventional wave generation exp. e.g.) Benjamin & Feir (1967)



SPTE (spatially periodic and temporally evolving) waves

- ▶ Zakharov equation e.g.) HOSM

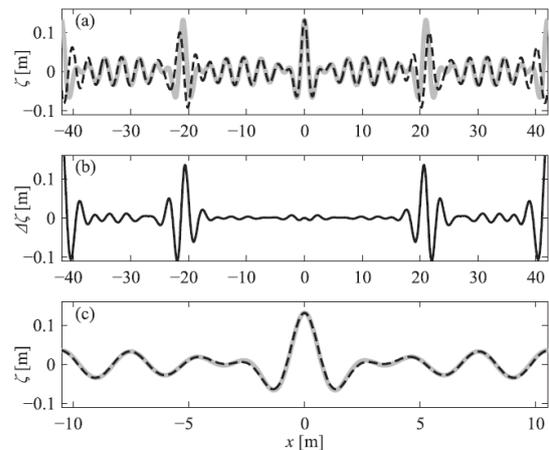
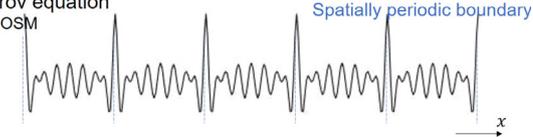


図 4 : (左上) 時間的に周期的で空間発達する波列 (TPSE) と (左下) 空間的に周期的で時間的に発達する波列 (SPTE) の波形の比較。 (右) (a) 波形の比較、(b) 波形の差分、(c) フリーク波を含む波群の波形比較拡大図

次に、実船の縦曲げ剛性の分布を考慮したバックボーンを有するウレタン船殻模型船を製作し、変調不安定波との遭遇実験を行った。波形は時間とともに変形するため、最大波高と模型船との遭遇タイミングを 0.2 秒ごとにずらし、遭遇する波高と最大縦曲げモーメントの関係を計測した (図 5 左)。その結果、同じ波高でも、大きく縦曲げモーメントが異なることが有り、二つのグループに分類できることが明らかになった。それは、最大波の波頂前後の波の谷の深さの関係に起因し、後方の谷が深いほど前方の谷が深い場合に比べ (図 5 右)、衝撃荷重が大きくなるからである (Houtani et al. 2019 AOR)。そして縦曲げおよびねじりの弾性振動の計測を目的に新たにウレタンのみ、もしくはウレタンと PE 樹脂の複合材で船殻を形成する弾性模型製作方法を開発した (宝谷他 2018, Houtani et al. 2018)。新たに開発した模型船により、変調不安定波に対する斜波中曳航実験を行った。この場合も縦曲げモーメントが二つのグループに分かれることがわかり、縦曲げ弾性振動応答はロバストな結果であることが分かった。一方ねじり応答との連成の可能性も示唆されたが、これは外力の非対称性にも関係する。2009 年に計測された多方向波中のフリーク波 (Fujimoto et al. 2019) を再現した模型船実験結果の解析により、ねじりを伴う船体応答は明らかになるであろう。

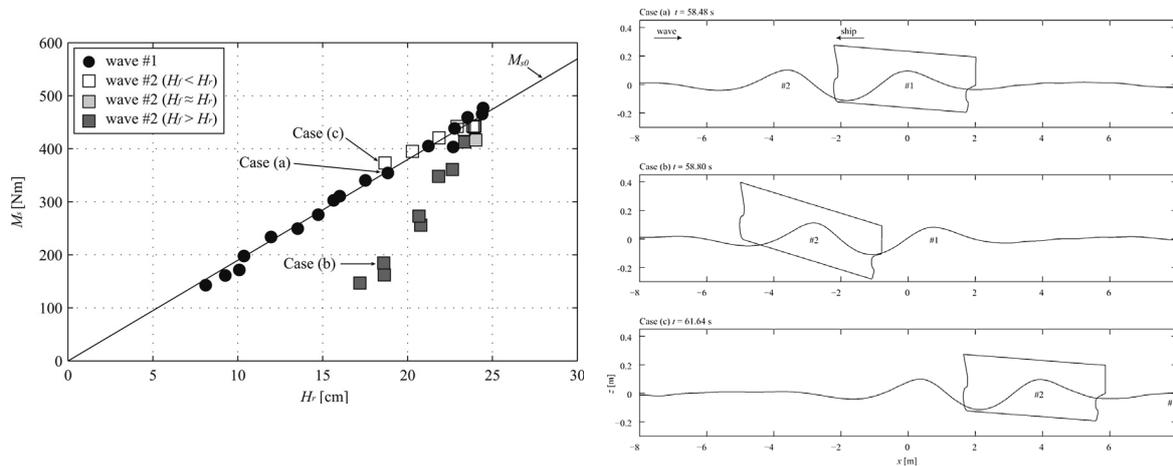


図 5：フリーク波との遭遇により生じる最大縦曲げモーメントと遭遇波高の関係（左）と船体とフリーク波との遭遇タイミングと波形の関係（右）

〈参考文献〉

1. [Chabchoub, A.](#), [K. Mozumi](#), [N. Hoffmann](#), [A. V. Babanin](#), [A. Toffoli](#), [J. N. Steer](#), [T. S. van den Bremer](#), [N. Akhmediev](#), [M. Onorato](#), [T. Waseda](#) (2019). Directional soliton and breather beams, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Apr 2019, 201821970; DOI: 10.1073/pnas.1821970116
2. [Houtani, H.](#), [Waseda, T.](#), [Tanizawa, K.](#), & [Sawada, H.](#) (2019). Temporal variation of modulated-wave-train geometries and their influence on vertical bending moments of a container ship. *Applied Ocean Research*, 86, 128-140.
3. [Yaremchuk M](#), [Martin P](#), [Koch A](#), [Beattie C](#) (2016) Comparison of the adjoint and adjoint-free 4dVar assimilation of the hydrographic and velocity observations in the Adriatic Sea. *Ocean Model* 97:129–140. doi: 10.1016/j.ocemod.2015.10.010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 8 件）

1. [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. 査読有
2. [Houtani, H.](#), [Waseda, T.](#), [Fujimoto, W.](#), [Kiyomatsu, K.](#), & [Tanizawa, K.](#) (2018). Generation of a spatially periodic directional wave field in a rectangular wave basin based on higher-order spectral simulation. *Ocean Engineering*, 169, 428-441. 査読有
3. [Houtani, H.](#), [Waseda, T.](#), & [Tanizawa, K.](#) (2018). Experimental and numerical investigations of temporally and spatially periodic modulated wave trains. *Physics of Fluids*, 30(3), 034101. 査読有
4. [宝谷英貴](#), [小森山祐輔](#), [松井貞興](#), [岡正義](#), [沢田博史](#), [田中義照](#), & [谷澤克治](#). (2018). 縦曲げおよび振りのモード形状を考慮した箱型弾性模型の製作. *日本船舶海洋工学会論文集*, 28, 121-132. 査読有
5. [Houtani, H.](#), [Komoriyama, Y.](#), [Matsui, S.](#), [Oka, M.](#), [Sawada, H.](#), [Tanaka, Y.](#) & [Tanizawa, K.](#) (2018). Designing a hydro-structural ship model to experimentally measure its vertical bending and torsional vibrations, *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering* 4(4), 174-184 査読有
6. [Chabchoub, A.](#), [T. Waseda](#), [B. Kibler](#), [N. Akhmediev](#). (2017). Experiments on Higher-Order and Degenerate Akhmediev Breather-Type Rogue Water Waves, *J. of Ocean Engineering and Marine Energy*, doi.org/10.1007/s40722-017-0097-3 査読有
7. [宝谷英貴](#), [早稲田卓爾](#), [谷澤克治](#). (2017). 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*, 25 査読有
8. [Rapizo, H.](#), [Waseda, T.](#), [Babanin, A. V.](#), & [Toffoli, A.](#) (2016). Laboratory Experiments on the Effects of a Variable Current Field on the Spectral Geometry of Water Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 46(9), 2695-2717. 査読有

〔学会発表〕（計 5 件）

1. [Fujimoto, W.](#), & [Waseda, T.](#) (2018, June). Reproduction of Freak Waves Using Variational Data Assimilation and Observation. In *ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (pp.

- V003T02A004-V003T02A004). American Society of Mechanical Engineers. 査読有
2. Chabchoub, A., Hoffmann, N., Akhmediev, N., & Waseda, T. (2018, June). Drifting Rogue Packets. In ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V003T02A006-V003T02A006). American Society of Mechanical Engineers. 査読有
 3. Chabchoub, A., Genty, G., Dudley, J., Kibler, B. and Waseda, T., (2017) Experiments on Spontaneous Modulation Instability in Hydrodynamics, The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, Hyatt Regency San Francisco Airport, California, USA, June 25-30, 2017 査読有
 4. Chabchoub, A., & Waseda, T. (2016, June). Modulation Instability and Extreme Events Beyond Initial Three Wave Systems. In ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V003T02A036-V003T02A036). American Society of Mechanical Engineers. 査読有
 5. Fujimoto, W., & Waseda, T. (2016, June). The Relationship Between the Shape of Freak Waves and Nonlinear Wave Interactions. In ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V003T02A003-V003T02A003). American Society of Mechanical Engineers. 査読有

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：谷澤 克治

ローマ字氏名： KATSUJI TANIZAWA

所属研究機関名： 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

部局名： 海上技術安全研究所

職名： 研究員

研究者番号 (8桁)： 70373420

研究分担者氏名：宝谷 英貴

ローマ字氏名： HIDETAKA HOUTANI

所属研究機関名： 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

部局名： 海上技術安全研究所

職名： 研究員

研究者番号 (8桁)： 30636808

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：藤本 航

ローマ字氏名： WATARU FUJIMOTO

研究協力者氏名：AMIN CHABCHOUB

ローマ字氏名：AMIN CHABCHOUB

研究協力者氏名：小平 翼

ローマ字氏名：TSUBASA KODAIRA

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。