

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01538

研究課題名（和文）波および船体運動・構造応答の非線形性が生涯最大荷重期待値に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Influence of the nonlinearities in waves, ship-motions, and ship-structure-responses on the expected maximum load on the ship's life

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）・講師

研究者番号：30636808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形発達する波浪場における時間領域船体応答計算コード NMR1W-II-HOSMを開発した。本コードを用いた一方向不規則波中のコンテナ船応答シミュレーションを実施し、船体形状に起因する非線形性だけでなく波の非線形性も縦曲げ荷重応答の極値分布に影響を及ぼすことを明らかにした。さらに、非線形波中のそのような船体応答極値を確率的に推定する手法HOSM+FORMを開発した。船体の非線形応答のsurrogate modelを導入することで、波だけでなく船体応答の非線形性も考慮した極値の確率的推定が可能となった。本手法の妥当性は、アクリル弾性模型船を用いた水槽実験により検証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波の非線形発達が船体応答に及ぼす影響はまだまだ明らかでない中で、非線形発達する波の中での船体応答を計算することが可能な数値計算コードを国内で初めて開発した（国外でもわずかしが存在しない）。さらに、このような非線形波浪中の船体応答極値を確率的に推定する手法も初めて開発し、船舶・海洋構造物の設計への活用等、海上安全の実現に向けて意義のある成果と考える。

研究成果の概要（英文）：A time-domain nonlinear strip method for simulating ship response to nonlinearly evolving waves, called "NMR1W-II-HOSM", has been developed. The numerical simulation of the response of a container ship to long-crested irregular waves showed that not only the body nonlinearity but also the wave nonlinearity can affect the extreme value distributions of the sagging moment. Furthermore, a method called HOSM+FORM was developed to estimate such extreme values of the ship response together with their probability of occurrence. The introduction of a surrogate model of the nonlinear ship response enables the extreme value estimation of the ship response to take into account the nonlinearities in both the wave and the ship response. This extreme value estimation method was verified by a tank experiment using a flexible acrylic ship model.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：HOSM FORM 非線形波 極値推定 弾性模型船

## 1. 研究開始当初の背景

船舶は、航行中に水から様々な外力を受ける。船舶がその生涯の中で様々な外力にさらされる中で折損することが無いよう、国際船級協会連合 (IACS) や世界の各船級協会は、縦曲げ最終強度、すなわち船体が耐えうる最大の縦曲げモーメント (以下 VBM) に関する要件を定めている。その中で波から受ける最大の VBM は、通常、船が生涯 (約 25 年) に出会う波の数  $10^8$  の中で最大の応答、すなわち超過確率が  $10^{-8}$  に相当する期待値として考えられる。その推定には、船が一生のうちに遭遇する  $10^5$  程度の短期海象の中で最大の波浪中 VBM が発生する「最悪短期海象」を考え、その中で  $1/1000$  最大値を考えるいわゆる福田法 (福田, 1969) が広く用いられている。このような最大荷重推定において、最悪短期海象の設定には、北大西洋における有義波高と平均波周期の結合頻度分布 (短期海象発現頻度分布) を用いることが、国際海事機関 (IMO) の目標志向型構造基準 (GBS) にて推奨されている。また、海象は、数式で表現される標準スペクトルにより表現することが推奨されている。しかし、短期海象を有義波高と平均波周期のみで定義して標準スペクトルで表現することは、最大荷重推定において妥当であろうか？

また、スペクトル形状によっては、波の弱い非線形相互作用 (変調不安定) により波高の統計が変わり得る。近年の研究で、波スペクトルの周波数幅、方向幅がともに狭くなるほど、変調不安定により高波高の波の発生確率が上昇することが明らかにされている (e.g., Janssen, 2003)。線形な波浪場に対する、非線形な船体運動・構造応答を考慮した最大荷重推定などは行われているものの、このような波の変調不安定を考慮した場合の最大荷重推定はこれまでにほとんど検討されていない。また、変調不安定がフリーク波 (巨大波) の形状に影響を及ぼすこと (Fujimoto et al., 2019) や、フリーク波中の船体 VBM が波形状に強く影響を受けること (Houtani et al., 2019) も明らかにされており、このような観点からも、波の変調不安定が最大荷重期待値に影響を及ぼすことが予想される。

### <参考文献>

- 福田淳一：船体応答の統計的予測、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、99-119 (1969)。
- Janssen, P. A. (2003). Nonlinear four-wave interactions and freak waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(4), 863-884.
- Fujimoto, W., Waseda, T., & Webb, A. (2019). Impact of the four-wave quasi-resonance on freak wave shapes in the ocean. *Ocean Dynamics*, 69, 101-121.
- 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.

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、水槽実験・数値計算・実船計測を通じ、波および船体運動・構造応答の非線形性やスペクトル形状が最大 VBM 期待値に及ぼす影響を明らかにし、またそのような影響を考慮した最大 VBM 推定手法を構築することである。

## 3. 研究の方法

以下、(1)-(3)の方法で研究を行う。

- (1) 非線形波浪中船体応答計算手法の開発：  
非線形発達する波浪場における時間領域船体応答計算手法を開発する。
- (2) 合理的な最大荷重推定法の開発：  
構造信頼性理論の考え方を利用し、非線形波浪中の船体応答極値の確率的推定手法を開発する。
- (3) 非線形波浪中船体応答に関する水槽実験：  
弾性模型船を用いた非線形発達する波浪中の船体運動・荷重応答計測実験を行い、(1)、(2)の検証に必要なデータを得る。

## 4. 研究成果

### (1) 非線形波浪中船体応答計算手法の開発

非線形発達する波浪中の船体応答計算コード“NMRIW-II-HOSM”の開発

時間領域非線形ストリップ法による波浪中船体荷重解析コード“NMRIW-II”に、高次スペクトル法 (HOSM) により計算した非線形時間発達する波浪場を入力できるよう拡張した“NMRIW-II-HOSM”を開発した (Houtani et al., 2023 OMAE)。線形な波に対する非線形な船体応答 (例えば船体形状に起因する非線形性) を計算することが可能なコードは国内外で多数開発されているが、非線形発達する波に対する線形 / 非線形な船体応答を実施しているのは国外でも数例のみである。

開発した **NMRIW-II-HOSM** を用い、一方向不規則中の正面向波条件でのコンテナ船（形状非線形）/ 垂直舷側船（形状線形）の船体応答に関する数値計算を線形 / 非線形な波浪条件、低波高 / 大波高条件で実施した。一般の形状非線形な船に対し、波の非線形性が船体縦曲げ荷重の極値分布に影響を及ぼすことは示唆されていたが（**Guo et al., 2019**）、形状線形な船型であっても、波の非線形発達が顕著になると船体縦曲げ荷重の極値分布が **fat** になる（大きい極値が発生する確率が上昇）することを明らかにした（**Houtani et al., 2023 OMAE**）。

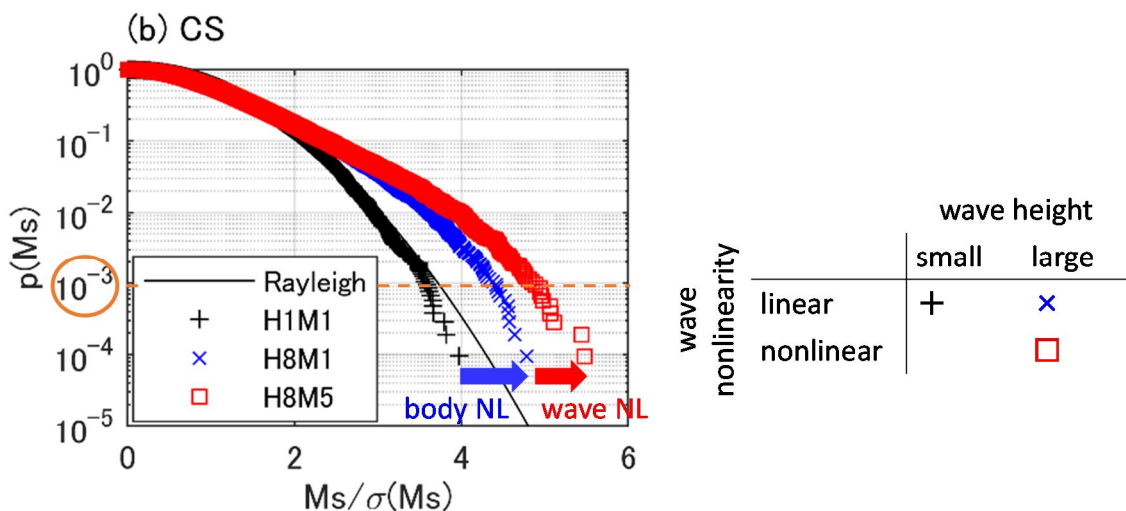


図 1：一方向不規則波中のコンテナ船サギングモーメントの極値分布例（線形 / 非線形な波条件、低波高 / 大波高条件）

#### HOSM により計算された非線形波浪の内部流場推定

**HOSM** は自由表面変位  $\zeta$  と自由表面における速度ポテンシャル  $\phi^s$  の時間発達を解く手法である。**HOSM** で計算された波浪場を船体応答計算に入力する場合、船体表面位置、すなわち波浪内部の流場データが必要となるため、自由表面のデータ ( $\zeta, \phi^s$ ) から内部流場を計算するコードを開発した。開発当初、計算された波浪内部の圧力場に高周波振動が現れるという問題が見られた。その原因が内部圧力場計算過程で適切な **anti-aliasing** フィルタが適用されていなかった点にあることを突き止め、その点を改良した（宝谷他、2022 日本船舶海洋工学会 秋季講演会）。**HOSM** 計算結果から内部流場を推定すること自体はこれまでも行われてきていたが、論文等でなかなか公表されることがないこのような計算上の **tips** を明らかにした。

また、このような改良をもってしても、巨大波のクレスト付近における圧力場に一部不整合が見られていた。その原因が、内部流場計算法の非線形オーダーの取り扱いにあることを突き止め、**HOSM** モデルの非線形オーダーと整合性のとれた形で内部流場を計算する手法を導出した。

#### (2) 合理的な最大荷重推定法の開発

**FORM (First order reliability method)** を活用し、**HOSM** で計算された非線形波浪場と、周波数領域の船体応答から、非線形波浪中の船体縦曲げ荷重を含む任意の船体応答極値を確率的に推定する手法 (**HOSM+FORM**) を開発した（**Takami et al., 2023**）。これまで、線形波中の船体応答極値を **FORM** による確率的推定は行われてきていたが、**HOSM+FORM** により、非線形波浪中の船体応答極値の確率的推定が可能となった。また、船体応答の非線形性を考慮するための **surrogate model** を導入することで、波だけでなく、船体応答の非線形性も考慮した応答極値の確率的推定も可能となった（**Komoriyama et al., 2024 OMAE (in press)**）。

本手法では、その応答極値を引き起こす尤もらしい波形 (**MPWE; most probable wave episode**) も同時に推定され、設計不規則波としても利用が可能である。設計不規則波は、もともと、非線形性を示す波浪中船体応答の極値の確率的推定（例えば **1/3000** 最大値）において、線形波と線形船体応答を仮定した上である確率レベルでの応答極値を引き起こす尤もらしい波形状として推定されてきた。このように推定された設計不規則波が同じ確率レベルで非線形応答の極値も引き起こすという仮定の下、その波に対する非線形な船体応答を数値計算や水槽模型実験で推定することで、非線形な応答極値を求めるものであった。本研究で開発した **HOSM+FORM** により、波および船体応答の非線形性をはじめから考慮して応答極値を推定することで、“このように推定された設計不規則波が同じ確率レベルで非線形応答の極値も引き起こすという仮定”という部分の不確かさを抑えることが可能となった。

また、波の非線形発達を考慮して設計不規則波を推定することは、それを水槽実験に用いる際にも大きな長所となる。というのは、従来のように線形波理論の範疇において推定された設計不規則波を水槽内に造波すると、その伝播の仮定で波が非線形に発達し、狙った設計不規則波が水

槽に必ずしも精度よく再現されないためである。そのために造波信号の修正を行うという手法も提案されているが、その操作は確率レベルの修正につながってしまう。その点、**HOSM+FORM**で推定された設計不規則波 (**MPWE**) は、波の非線形発達を考慮した造波法 (**HOSM** 造波法 (**Houtani et al., 2018**))を用いることで、精度よく水槽内に再現できることも確かめられた(宝谷他、**2024** 日本船舶海洋工学会 春季講演会(in press))。

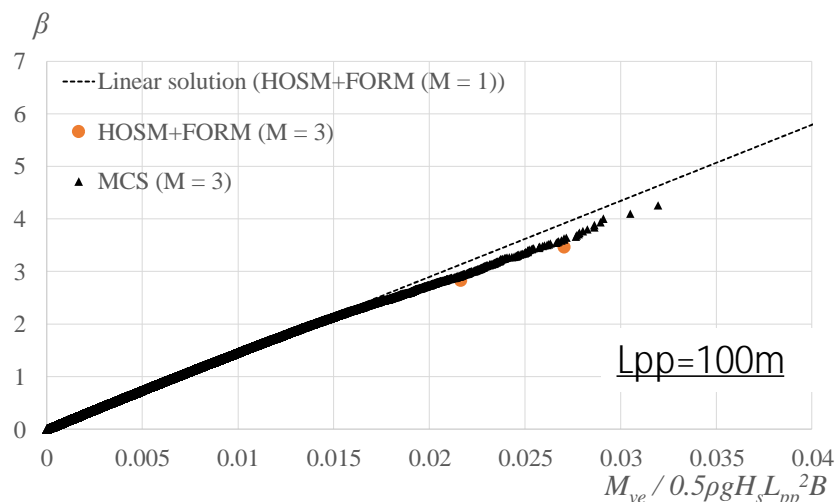


図 2 : **HOSM+FORM** によるコンテナ船ホギングモーメントの極値推定

### (3) 非線形波浪中船体応答に関する水槽実験

長さ **2m** のコンテナ船一体型弾性模型を製作し、東京大学工学部船型試験水槽 (**85m × 3.5m × 2.4m**) において、波浪中曳航試験を実施した。波として、規則波、変調不安定波 (波群中のフリーク波を模擬) および **HOSM+FORM** により推定された **MPWE** を用いた。弾性模型船を用いたため、変調不安定波および **MPWE** 中の実験では、縦曲げに関する船体弾性振動も計測された。今後、**NMRIW-II-HOSM** においては、船体弾性振動を含めた計算も実施できるよう拡張し、これら水槽模型実験結果との比較検証を行っていく予定である。

さらに、長さ **3m** のアクリル製一体型弾性模型船を製作し、海上技術安全研究所の実海域再現水槽 (**80m × 40m × 4.5m**) で波浪中試験を実施した。これまでに、より単純な形状のアクリル製弾性模型船を製作した経験はあったが (小森山、**2022**)、本研究ではより実船に近い形状のものを製作した。本模型により、実船と同様に、波浪に対する船殻の変形応答の計測が可能となる。また、アクリルで弾性模型船を製作した例は、先に挙げたより単純な形状の模型と本件の **2** 例のみである。本アクリル模型を用いた。規則波中試験では、模型船の基礎的な波浪中応答 (運動、縦曲げモーメント) 特性を検証した。また、**HOSM+FORM** により推定した **MPWE** (設計不規則波) 中での試験を実施し、**surrogate model** による船体応答の非線形性が妥当に考慮できていることを確認した。また、**HOSM+FORM** の船体応答極値の確率的推定において、**MPWE** の推定に必要な船体応答の周波数応答関数を事前に精度よく推定しておくことの重要性も明らかにした (**Komoriyama et al., 2024 OMAE (in press)**)。

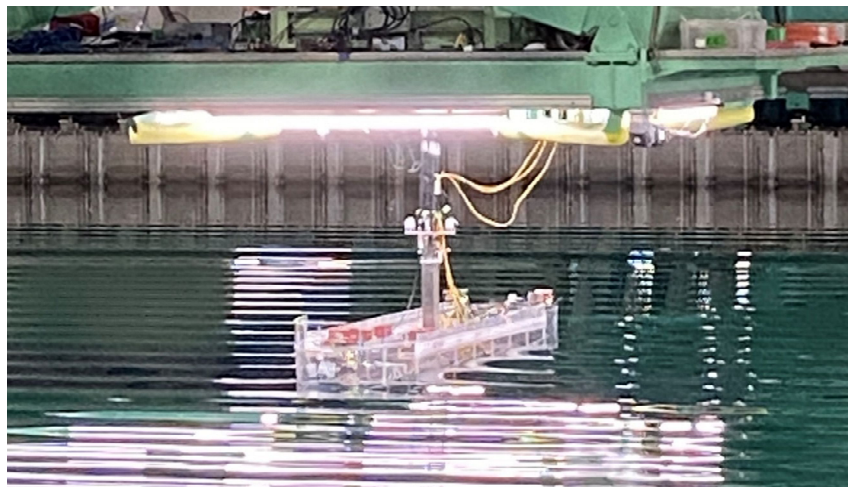


図 3 : アクリル弾性模型船による波浪中実験の様子

<参考文献>

(「5. 主な発表論文等」に記載されているもの以外；研究期間終了後発表のものも含む)

- **Guo, B., Gramstad, O., Vanem, E., & Bitner-Gregersen, E. (2019). Study on the effect of climate change on ship responses based on nonlinear simulations. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 141(4), 041605.**
- **Komoriyama, Y., Houtani, H., Takami, T., Matsui, S. & Fujimoto, W., “Tank Test of Flexible Acrylic Ship Model in Waves for Extreme Response Prediction”, In ASME 2024 43th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, accepted**
- **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.**
- 宝谷英貴，高見朋希，藤本航，小森山祐輔，松井貞興，“水槽への設計不規則波再現における波の非線形発達の影響”，日本船舶海洋工学会講演会論文集, **38, in press**
- 小森山祐輔. (2022). 水圧計測による波浪中船体構造応答の推定手法 第 1 報 縦曲げモーメントの推定 . 日本船舶海洋工学会論文集, **35, 77-85.**

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takami Tomoki, Fujimoto Wataru, Houtani Hidetaka, Matsui Sadaoki	4. 巻 286
2. 論文標題 Combination of HOSM and FORM for extreme wave-induced response prediction of a ship in nonlinear waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 115643 ~ 115643
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.oceaneng.2023.115643	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 -

1. 著者名 Higuchi Yuya, Houtani Hidetaka, Gon?alves Rodolfo T., Yoshimura Yasuo, Hirabayashi Shinichiro, Suzuki Hideyuki, Orihara Hideo	4. 巻 11
2. 論文標題 Stereo Reconstruction Method for 3D Surface Wave Fields around a Floating Body Using a Marker Net in a Wave Tank	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1683 ~ 1683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse11091683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Houtani, H.; Sawada, H.; Waseda, T.	4. 巻 7(8)
2. 論文標題 Phase Convergence and Crest Enhancement of Modulated Wave Trains	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 275
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fluids7080275	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Hidetaka Houtani
2. 発表標題 Pressure field evaluation beneath nonlinear waves using the higher-order spectral method and its application to ship response simulations
3. 学会等名 Workshop on Nonlinear Water Waves and Related Topics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Houtani, H., Fujimoto, W. & Matsui, S.
2. 発表標題 Numerical investigation of the statistics of vertical bending moments of ships in nonlinearly evolving irregular waves
3. 学会等名 ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takami, T., Fujimoto, W., Houtani, H. & Matsui, S.
2. 発表標題 Extreme Wave and Vertical Bending Moment Predictions by Higher Order Spectrum Method and FORM
3. 学会等名 ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口湧也, 宝谷英貴, Rodolfo T Goncalves, 芳村康男, 平林紳一郎, 鈴木英之, 折原秀夫
2. 発表標題 マーカースネットを用いた浮体周辺波浪場の面的計測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和5年春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takami, T., Fujimoto, W., Houtani, H. Matsui, S.
2. 発表標題 Extreme Wave and Wave-induced Vertical Bending Moment Predictions in Higher Order Spectrum Waves using FORM
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和5年春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宝谷英貴; 松井貞興; 藤本航
2. 発表標題 非線形時間発達を考慮した波浪場における船体縦曲げ応答の数値計算
3. 学会等名 令和4年 日本船舶海洋工学会 春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Houtani, H.
2. 発表標題 On the crest height amplification of unstable Stokes wave trains in deep water
3. 学会等名 K02Wavinar #1 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宝谷英貴; 藤本航; 松井貞興
2. 発表標題 高次スペクトル法による波浪内部の圧力場の数値計算
3. 学会等名 令和4年 日本船舶海洋工学会 秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Houtani, H.
2. 発表標題 Nonlinear processes in crest enhancement of modulated wave trains
3. 学会等名 The two-day workshop on Recent Advances in Nonlinear Water Waves (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Takami, T.; Fujimoto, W.; Houtani, H.; Matsui, S.
2. 発表標題 Predictions of extreme waves and ship responses based on HOSM + FORM
3. 学会等名 Research Meeting at National Maritime Research Institute (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Houtani, H.; Matsui, S.; Fujimoto, W.
2. 発表標題 Numerical investigation of ship VBM response statistics in nonlinear waves using HOSM outputs
3. 学会等名 Research Meeting at National Maritime Research Institute (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Houtani, H.; Waseda, T.; Sawada, H
2. 発表標題 Influence of Initial Wave Steepness of Modulated Wave Trains on the Maximum Crest Height
3. 学会等名 36th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝谷英貴; 早稲田卓爾
2. 発表標題 波の変形と船体縦曲げ応答について
3. 学会等名 令和3年 日本船舶海洋工学会 春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Houtani, H
2. 発表標題 On the maximum crest height of modulated wave trains
3. 学会等名 Online Seminar on Nonlinear Water Waves and Related Topics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝谷英貴
2. 発表標題 時間周期的および空間周期的な変調不安定波の波形の一致と分散関係の偏移
3. 学会等名 海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hidetaka Houtani	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 224
3. 書名 Chapter 10 - Application 1: ship responses to freak waves	

〔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
研究 分担者	高見 朋希  (TAKAMI Tomoki)  (50586683)	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   (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	松井 貞興  (MATSUI Sadaoki)  (60734225)	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   (82627)	
研究分担者	小森山 祐輔  (KOMORIYAMA Yusuke)  (90805110)	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   (82627)	

	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
研究協力者	藤本 航  (FUJIMOTO Wataru)	日本海事協会・技術研究所	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Research Meeting at National Maritime Research Institute	開催年 2023年～2023年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関