

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04865

研究課題名(和文) KL展開に基づく波浪表現と低次元モデルを用いた船体複合荷重応答の極値予測法

研究課題名(英文) Extreme Value Prediction Method of Combined Load Response in a Ship Using KL Expansion Based Wave Representation and Reduced Order Model

研究代表者

高見 朋希 (Takami, Tomoki)

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：50586683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究期間全体において、大別して、1. KL展開を用いた波浪表現と信頼性理論FORMを用い、さらに船体の縦曲げモーメントの低次元モデルを活用した極値評価法の確立と実証
2. KL展開を用いた波浪表現と信頼性理論FORMによる極値予測法の、船体の非線形横揺れ角の極値推定への応用
3. スプリングとホイッピングの双方を考慮した船体縦曲げモーメントの低次元モデル化と極値評価の検証を実施した。
これらにより、ホイッピングとスプリングの両方の流力弾性影響の低次元モデル化の提案、波のKL展開による流力弾性応答の効率的な極値評価、ならびに波のKL展開を用いた極値予測法のさらなる展開を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの諸研究により船舶の波浪中応答を計算する手法はCFDやFEMを活用することにより研究、提案されてきたが、これらの手法は膨大な計算時間を要するため船舶の設計段階における使用が困難であることが問題視されてきた。本研究による成果は船の設計段階において想定される極大応答を高速かつロバストに予測する新しい手法を提供しており、より安全性の確保された設計が可能となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：During the entire research period, 1. The establishment and demonstration of an extreme value prediction method using wave representation with KL expansion and FORM, while utilising a reduced-order model of the vertical bending moment of a ship. 2. Application of the extreme value prediction method using KL wave representation FORM to the estimation of extreme values of the non-linear rolling of a ship. 3. Reduced-order modelling of the vertical bending moment considering both springing and whipping, together with validation of the extreme value prediction. are conducted.
Above-mentioned achievements allowed the proposal of reliable reduced-order modelling of the hydroelastic effects from both whipping and springing, efficient extreme value evaluation of the hydrodynamic elastic responses by means of KL expansion. Versatility of the present method was further demonstrated.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：極値予測 KL展開 一次信頼性理論 低次元モデル 流力弾性応答

1. 研究開始当初の背景

船体構造の安全性を確保するためには、極限海象中における船体構造応答の定量的な評価が重要となる。さらに、与えられた極限海象中において、設計時に想定された船体構造の極限状態に達する確率を評価することも必要と言える。この手法として、1次近似信頼性手法 (FORM) を用いて目的の構造応答に対して最も起こり得る波列 (Design Irregular Wave, DIW) を同定する手法が知られている。船舶に作用する荷重の3次元的な分布をロバストに求めるためには、数値流体力学 (CFD) や有限要素法 (FEA) を用いた高次の計算手法を用いることが理想的であると言える。しかし、昨今の計算機技術の進歩をもって未だ計算時間は膨大であると言え、また FORM の実行プロセスでは不規則波列を構成する確率変数を変えたシリーズ計算が必要となるため、さらに工数が増大し、FORM の直接的な適用は非現実的となる。さらには船体の縦曲げモーメントには流力弾性応答が含まれ、極値分布への考慮も必須である。以上の事から、流力弾性応答を精度よく再現可能な CFD-FEA 計算を元にして、いかに極値分布をロバストに予測するか、が課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、流力弾性効率的な不規則波中を向波で航行する船体応答をターゲットとして、CFD-FEA 計算を簡易的な物理モデルに置き換える低次元法 (Reduced Order Method, ROM) を構築する。次に、従来不規則波の表現に用いられている正弦波の線形重ね合わせ方式に代わる表現法として Karhunen-Loeve (KL) 展開に基づく不規則波表現法[4]を採用する。KL 展開に基づく不規則波表現法と1次信頼性理論 FORM を用い、さらに ROM を組み合わせることによって高速かつロバストな極値評価法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、まずは CFD ソフトウェア STARCCM+ と FE 解析ソフトウェア LSDYNA を組み合わせ、ホイッピング及びスプリングを含む縦曲げモーメントの ROM を構築する。また、Prolate Spheroidal Wave Function (PSWF) を活用し、確率的海洋波の KL 展開を行う。これにより、FORM において極値予測に必要な確率変数の数を大幅に削減することが可能となる。ROM と海洋波の KL 展開、さらに FORM を用いて高速な極値予測を実現し、モンテカルロシミュレーションや水槽実験と比較検証を行う。

4. 研究成果

まず、ホイッピング振動を含まない縦曲げモーメントの波浪成分に対する ROM を CFD-FEA 計算を元に構築して、KL 展開による極値予測の効果を調べた。図1左図には従来の三角関数による海洋波表現による縦曲げモーメントの信頼性指標 (Trig.+FORM) と KL 展開による結果 (PSWF+FORM) を示す。図中、 $2 \times M$ が Trig.+FORM に必要な確率変数の数に相当し、 N_{ξ} が PSWF+FORM に必要な確率変数の数に相当する。図より、PSWF+FORM は大幅に少ない数の確率変数で精度の良い信頼性指標を得られていることが分かり、モンテカルロシミュレーション (MCS) と同程度であることが分かる。図1右図はホイッピング振動ありの結果である。ホイッピング振動が含まれている場合でも、十分な確率変数の数を用いた Trig.+FORM とほぼ同等の信頼性指標の値を示しており、効率的な極値予測が可能であることがわかる。

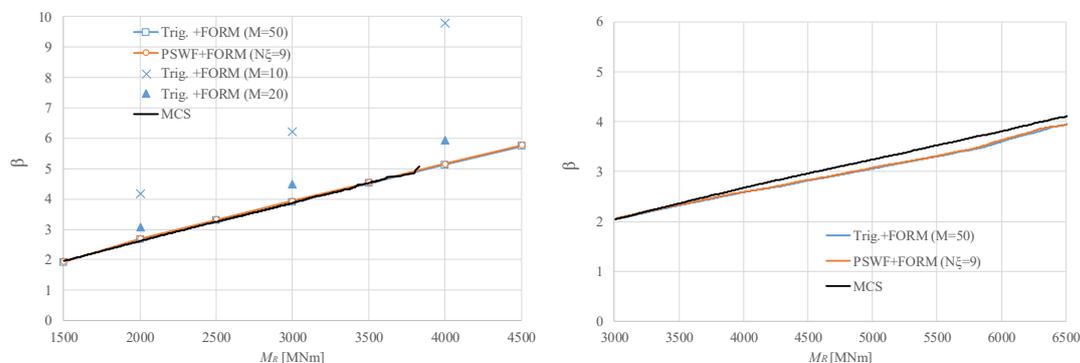


図1 縦曲げモーメントの信頼性指標の分布 (左:ホイッピング振動無し、右:ホイッピング振動あり)

次に ROM と KL 展開波+FORM のさらなる活用として、非線形横揺れ角の極値予測への適用を行った。ここでは横揺れ角を表すための1自由度モデルを ROM として扱う。ここでは KL 展

開波の時間制限が課題となった。波の表現可能な時間長さが短いと非線形横揺れ運動を精度よく表現できないため、PSWF+FORMの結果は十分な精度を有しないことが分かった(図2青線)。そこでKL展開波を外挿することを試みたが(図2赤線)、効果は限定的であった。

この問題を解決するために、非線形横揺れ角の計算を行う初期条件を予め推定する方法を構築し、PSWF+FORMを活用することを試みた(図3参照)。これにより、従来の三角関数波を長時間取った場合の結果(Long-time FORM)と比較しても、船体の転覆角付近までは精度よく信頼性指標を推定できることが明らかとなった。

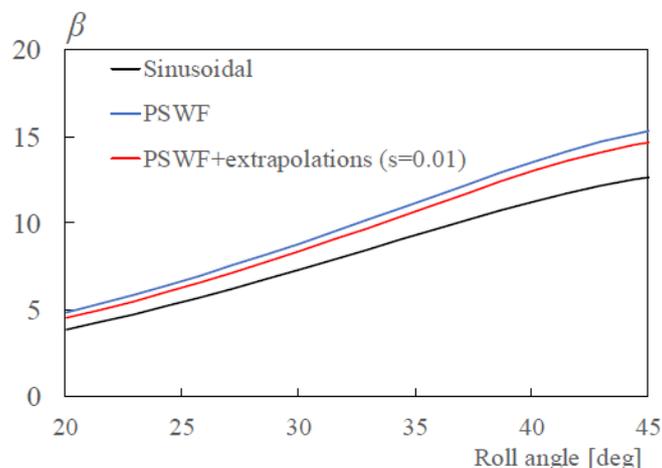


図2 非線形横揺れ角の信頼性指標の分布の比較

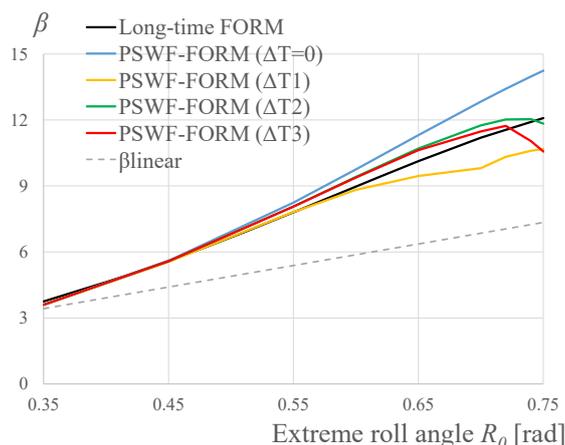


図3 初期条件の推定法を用いた非線形横揺れ角の信頼性指標の分布の比較

最終年度においては、CFD-FEA結果を参照して縦曲げモーメントのROMにホイッピングに加えてスプリングによる流力弾性振動影響の考慮を試みて、水槽試験との比較検証を行った(図4)。これにより、スプリングの考慮によって低い縦曲げモーメントの発生確率の予測精度が向上することが分かった。また一方で、使用したROMはCFD-FEA結果を必ずしも全て精度よく表現しているわけではなく、主に船尾スラミング(図5)もCFD-FEA結果では発生しており、これによる流力弾性影響を考慮する必要性も明らかとなった。

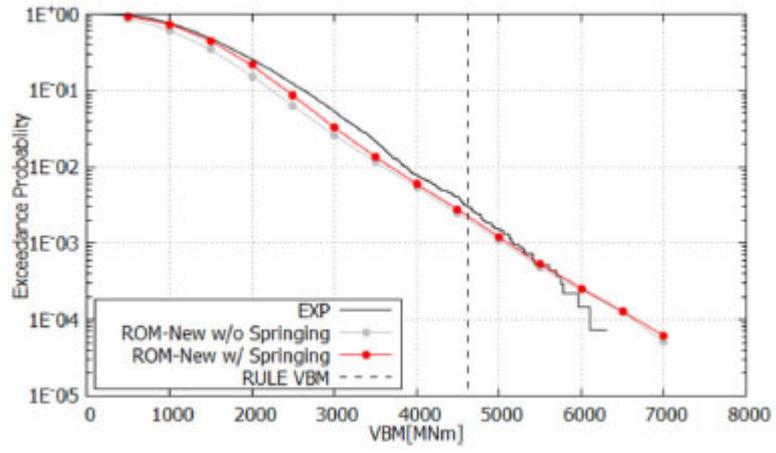


図4 縦曲げモーメントの極値超過確率の実験結果との比較

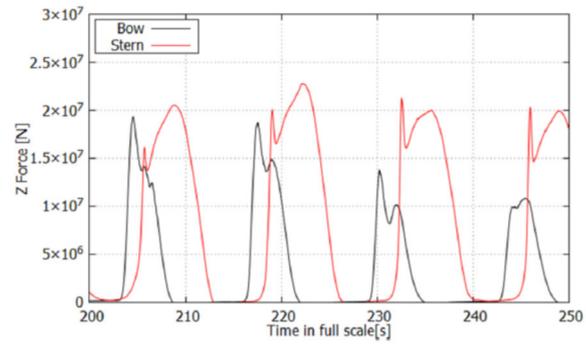


図5 船首及び船尾スラミング荷重の比較

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takami Tomoki, Jensen Jorgen Juncher, Nielsen Ulrik Dam	4. 巻 82
2. 論文標題 Short-time FORM analysis for extreme roll motion prediction in beam seas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Marine Structures	6. 最初と最後の頁 103160 ~ 103160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marstruc.2022.103160	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 該当する

1. 著者名 Takami Tomoki, Iijima Kazuhiro, Jensen Jorgen Juncher	4. 巻 72
2. 論文標題 Extreme value prediction of nonlinear ship loads by FORM using Prolate Spheroidal Wave Functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Structures	6. 最初と最後の頁 102760 ~ 102760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marstruc.2020.102760	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 該当する

1. 著者名 Pal Sumit Kumar, Ono Tomoki, Takami Tomoki, Tatsumi Akira, Iijima Kazuhiro	4. 巻 266
2. 論文標題 Effect of springing and whipping on exceedance probability of vertical bending moment of a ship	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 112600 ~ 112600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.112600	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Takami Tomoki, Jensen Jorgen Juncher, Ulrik Dam Nielsen
2. 発表標題 Response Prediction Based on FORM with Extrapolated Karhunen-Loeve Ocean Waves
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集 32号
4. 発表年 2021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
研究分担者	大橋 訓英 (Ohashi Kunihide) (10462871)	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・グループ長 (82627)	
研究分担者	安藤 孝弘 (Ando Takahiro) (30425756)	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	馬 冲 (Ma Chong) (30773197)	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	飯島 一博 (Iijima Kazuhiro) (50302758)	大阪大学・大学院工学研究科・教授 (14401)	

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0件

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			
デンマーク	デンマーク工科大学			