

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360355

研究課題名(和文)新国際基準で求められる操船影響を考慮した波浪中船舶復原性評価法の構築

研究課題名(英文)Development of ship stability assessment procedures in waves by taking operational aspects into account

研究代表者

梅田 直哉 (Umeda, Naoya)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20314370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：IMOで審議中の第2世代非損傷時復原性基準のうち、操船基準に利用できるような船舶復原性評価法を検討した。パラメトリック横揺れ、追波中復原力喪失、ブローチングについて、不規則波中の自由航走模型実験を種々の船速や進路について実施した。そして、その結果を定量的に説明できる数値シミュレーション・モデルを構築した。さらに、簡易な推定法についても、メルニコフ解析や平均化法を用いて提案し、その検証も行った。これにより、IMOに操船基準を我が国から提案していくための、対象船が遭遇した海象下でどのような船速や進路を選べば危険が回避できるかを推定する方法が確立されたといえる。

研究成果の概要(英文)：Towards the operational criteria of the second generation intact stability criteria, which are now under development at the IMO, stability assessment procedures for parametric roll, pure loss of stability in astern waves and broaching were investigated. First, free-running model experiments in irregular waves were conducted for various ship speeds and courses. Second, numerical simulation models were developed for quantitatively explaining the experimental results. Third, simplified prediction methods were also proposed in the light of Melnikov Analysis, averaging method and so on, and then were validated. As a result, the stability assessment methodologies to be proposed for the IMO from Japan were almost established for avoiding danger by selecting appropriate ship speed and course for a given ship under the encountered sea state.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：パラメトリック横揺れ 追波中復原力喪失 ブローチング IMO 第2世代非損傷時復原性基準 メルニコフ解析 危険確率

1. 研究開始当初の背景

船舶の復原性は、国連機関である国際海事機関(IMO)の基準によって判定されている。現在の国際船舶復原性基準は、設計基準として、事故の統計解析による経験則と日本が提案し1985年に採択されたウェザークライテリオンから構成されている。後者は、横波横風中の同調横揺れを考慮したエネルギーバランスの考え方と事故データとのチューニングにもとづいており半経験則といえる。これらは経験的な要素を含むため、制定当時の船には有効であったが、それから数十年が経過した現在、新しいタイプの船舶、たとえば海上都市のようなメガクルーズ客船や10000個のコンテナを同時に運ぶポストパナマックスコンテナ船、の出現により、従来の経験則の限界が顕著になっている。具体的な事例としては、ポストパナマックスコンテナ船で今までとまったく異なる激しい横揺れが生じてコンテナの大量損傷が起こったり、国内でも大型カーフェリーが追波を受けて大傾斜し最終的に横転する事故が2009年に発生した。設計基準を補完する操船基準としては、やはり日本の提案により、1996年に追波操船ガイダンスが作られた。これはその制定当時に簡単のため、対象となる船舶の特性を反映せず、どのような船についても同じ操船上の注意を与えることとなった。このためやはり、新しい船舶への適用性は限界がある。このようなことから、2002年よりIMOでは、物理則を導入して非損傷時復原性基準の全面見直しを行う作業を開始した。IMOではまず、対応すべき転覆モードとして、パラメトリック横揺れ、追波中復原力喪失現象、ブローチング、デッドシップ状態の同調横揺れを選んだ。そして、最も実際の状況に忠実な不規則波中数値シミュレーション(直接評価法)の使用が容易でないことから、まず(2階層よりなる)簡易な基準で危険があるかどうかを安全側に判定し、危険の可能性があるとされたときのみ直接評価法を利用する枠組みとなった。我が国は、4つのモードすべてについて2階層の簡易基準と直接評価法をIMOに対して、提案した。このうち、直接評価法案は研究代表者らの受けた科学研究費補助金(2006-2008年度)簡易基準案は研究代表者らの受けた科学研究費補助金(2009-2011年度)による研究成果がベースとなっていた。そして各国の基準提案のなかで、デッドシップ状態の同調横揺れの第1階層簡易基準は日本案で決定し、パラメトリック横揺れの第1、第2階層簡易基準、追波中復原力喪失現象の第1、第2階層簡易基準、ブローチングの第1、第2階層簡易基準が日本案をベースとして最終化されようとしていた。これらの設計基準が最終化された後の課題は、それを補完する操船ガイダンスの策定となる。すなわち、現時点実際の船舶の転覆事故は設計のみならず適切な操船によっても確保されていることから、操船を無視し

て設計のみで復原性を担保しようとする、現在の船舶よりも不経済なものを建造、運航することになり、海運そして世界経済に負の影響を与えることになる。これについては、現在の対象船の特性を反映しない操船ガイダンスから、対象船を特定して設計基準との整合性を考慮したものとすることはIMOで合意されている。ただし、それ以上のことはこれからの各国提案次第となっていた。設計基準案の骨格は日本であることを考えあわせると、操船基準についても我が国、そして研究代表者からの学術研究にもとづく具体的な提案が期待されていた。

2. 研究の目的

このような状況を受けて、本研究では、船舶の主要転覆シナリオ(パラメトリック横揺れ、追波中復原力喪失現象、ブローチング)について、IMOの設計基準案に用いられる物理則、すなわち不規則外乱下の非線形振動の力学的手法を発展させ、船舶の操船要素である、船速や進路の選択を助ける復原性評価法を新たに構築することを目標とする。そして最終的には、我が国から国際操船基準としてIMOに提案し、その実現を図ることにつながる。

3. 研究の方法

これまでの設計基準案のベースとなった船舶復原性評価法では、船速や波との進路について、評価で安全側となるよう最も危険な船速や進路を仮定して解析を行っていた。このため、船速や進路の影響の評価が不十分であった。このため、本研究では、パラメトリック横揺れ、追波中復原力喪失現象、ブローチングの3つの危険モードについて、船速や進路も系統的に変化させた波浪中模型実験を実施した。そして、その実験を説明できるよう直接数値シミュレーション・モデル構築する。さらに、船上でも容易に利用できるよう、迅速に計算できる簡易計算法についても検討する。

4. 研究成果

(1) パラメトリック横揺れ

まず、従来の縦波中心の自由航走模型実験ではなく、斜め波中の自由航走模型実験を実施し、パラメトリック横揺れ振幅と波との出会い角の関係を明らかにした。すなわち、縦波から外れるほど横揺れ振幅は小さくなった。次に、縦波中でパラメトリック横揺れの定量的推定を可能とした直接推定法を斜波中に拡張した。縦波用の推定法は上下揺れ・横揺れ・縦揺れの3自由度モデルによるもので、フルードクリロフ力の係数のみならずラディエーション力やディフラクション力の係数も横揺れ角の関数としたところに特徴がある。今回は、斜め波で保針運動の効果も取り入れるため、左右揺れ、船首揺れ、自動操舵との連成、特に大斜航角で船体に働く流体

抗力成分も考慮した5自由度モデルを構築した。そのモデルによる時間領域シミュレーションの結果、斜め波中の横揺れ振幅の実験値を概略説明することができた。さらに、斜め波では横復原力係数の変動のみならず強制力も生じることに着目して平均化法による簡易推定法を新たに導いた。その簡易推定法の結果も、自由航走実験やシミュレーションと概略一致した。これらの成果は、操船の2大要素のひとつである進路の決定を船上で容易かつ正確に決定することができることを意味しよう。また、船速については、危険な船速を迅速に特定することが必要となる。このために、平均化法と陰関数定理を組み合わせて、パラメトリック横揺れの発生する船速範囲やパラメトリック横揺れが最大となる船速を直接求める理論手法を導き、数値シミュレーションとの比較でそれを検証した。

(追波中復原力喪失)

追波中復原力喪失については、これまで実験における大きな横揺れ角の発生を4自由度数値シミュレーション・モデル(前後、左右、旋回、横傾斜)で定性的に予測できることを確認できていた。操船基準の作成のためには、船速や進路の影響を定量的に推定できることが求められる。そこで不規則波中自由航走模型実験を種々の船速、進路に対して実施し、大角度横傾斜を含む船体運動軌跡を計測した。そして、4自由度数値シミュレーション・モデルに計測された入射波時系列のフーリエ・スペクトルを入力することで、数値シミュレーションが不規則波中の運動時系列レベルでも実験をよく推定できることを確認した。さらに、その横揺れ角の標準偏差が4自由度数値シミュレーションで信頼区間内に推定できることを確認した。これにより、操船基準に利用できるだけのシミュレーション・モデルの定量的推定精度を確認したことになる。

(ブローチング)

ブローチングについては、これまで規則波中での4自由度数値シミュレーション・モデル(前後、左右、旋回、横傾斜)の検証にとどまり、しかも大角度横傾斜により片舷の舵が露出する状況については十分な推定ができなかった。そこで、不規則波中自由航走模型実験を同一の入射波スペクトルのもとで50試行反復して実施し、大角度横傾斜を含む船体運動軌跡を計測した。そして、4自由度数値シミュレーション・モデルを不規則波中かつ舵空中露出状態に拡張した。そして、自由航走模型実験結果より、ブローチングの発生確率とその信頼区間を定量化した。また、決定論的数値シミュレーションモデルと統計的波浪理論を組み合わせた理論でもこの確率を概略推定できることを示した。また、

簡易な推定法として、ブローチングの必要条件である波乗りについて、その発生条件の上限と下限を求めようように、メルニコフ解析の拡張を行った。その結果を用いて、運航水域ごとの波乗りの発生確率を短時間に推定する手法を提案した。さらに、数値シミュレーション・モデルで前後方向波力のフルードクリロフ仮説での理論推定が不十分であることから、その実験的補正式を求めるとともに、その妥当性についてCFDにより検討を行った。

(考えられる操船基準の提言)

以上の危険モードごとの研究成果をまとめると次のような操船基準が考えられる。ある船舶が与えられると、その運航海域ごとに通常操船時の危険発生確率が推定できる。その確率が許容値以上であれば、許容値を越えないように、各モードごとに避けるべき船速や進路(波向き角)を推定することができる。これが操船基準である。この前提には、あらゆる操船努力を放棄することにつながる、デッドシップ状態、すなわち、これについても風と波を同時に発生させる模型実験で検討を行い、現行設計基準を満たせば問題のないことを確認した。よって、最悪でも適切な操船基準によりこのような状態に落ち着くよう操船することで危険を回避できることになる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計25件)

- 1) Hashimoto, H., Umeda, N.: Validation of a numerical simulation model for parametric rolling prediction using a PCTC, Proceedings of the 11th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2012, pp.141-150.
- 2) Motoki Araki, Hamid Sadat-Hosseini, Yugo Sanada, Naoya Umeda, Fredrick Stern: Study of System-based Mathematical Model using System Identification Method with Experimental, CFD, and System-Based Free-Running Trials in Waves, Proceedings of the 11th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2012, pp.171-185.
- 3) Motoki Araki, Hamid Sadat-Hosseini, Yugo Sanada, Naoya Umeda, Frederick Stern: Estimating Maneuvering

- Coefficients using System Identification Methods with Experimental, System-based, and CFD Free-running Trial Data, Ocean Engineering, refereed, vol.51, 2012, pp.63-84.
- 4) Fuka Yoshiyama, Naoya Umeda, Takumi Kubo: Examining New Generation Intact Stability Criteria on Parametric Rolling, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, non-refereed, 2012, pp.329-334.
 - 5) Hisako Kubo, Naoya Umeda, Keisuke Yamane, Akihiko Matsuda: Pure Loss of Stability in Astern Seas-Is It Really Pure?-, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, non-refereed, 2012, pp.307-312.
 - 6) Yuto Ito, Naoya Umeda, Hisako Kubo: Hydrodynamic Aspects on Vulnerability Criteria for Surf-Riding of Ships, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, non-refereed, 2012, pp.11-22.
 - 7) Takumi Kubo, Naoya Umeda, Satoru Izawa, Akihiko Matsuda: Total Stability Failure Probability of a Ship in Beam Wind and Waves: Model Experiment and Numerical Simulation, Proceedings of the 11th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2012, pp.39-46.
 - 8) Tomohiro Furukawa, Naoya Umeda, Akihiko Matsuda, Daisuke Terada, Hirofumi Hashimoto, Frederick Stern, Motoki Araki, Hamid Sadat-Hosseini: Effect of Hull Form above Calm Water Plane on Extreme Ship Motions in Stern Quartering Waves, Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, refereed, 2012, USB disk.
 - 9) Atsuo Maki, Naoya Umeda, Martin Renilson, Tetsushi Ueta: Analytical methods to predict the surf-riding threshold and the wave-blocking threshold in astern seas, Journal of Marine Science and Technology, refereed, 2014.
 - 10) Atsuo Maki, Naoya Umeda, Tetsushi Ueta: Melnikov integral formula for beam sea roll motion utilizing a non-Hamiltonian exact heteroclinic orbit: analytic extension and numerical validation, Journal of Marine Science and Technology, refereed, 2014.
 - 11) Yuto Ito, Naoya Umeda, Hisako Kubo: Hydrodynamic Aspects on Vulnerability Criteria for Surf-Riding of Ships, Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), refereed, Vol.66, No.2, 2014, pp.127-132.
 - 12) Naoya Umeda, Shoji Ikejima, Motoki Araki and Yoshiho Ikeda: Design Measures for Avoiding Parametric Rolling in Longitudinal Waves, Proceedings of the 5th International Maritime Conference on Design for Safety, refereed, Vol.1, 2013, pp.133-139
 - 13) Naoya Umeda, Akiko Sakurada, Keisuke Yamane and Hisako Kubo: A RoPax Ship Accident due to Pure Loss of Stability on a Wave Crest and intact Stability Criteria, Proceedings of the 5th International Maritime Conference on Design for Safety, refereed, Vol.1, 2013, pp.118-125.
 - 14) Jiang Lu, Min Gu, Naoya Umeda: A Study on the Effect of Parametric Rolling on Heave and Pitch Motions in Head Seas, Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, refereed, Vol.1, 2013, pp.185-191.
 - 15) Motoki Araki, Hamid Sadat-Hosseini, Yugo Sanada, Naoya Umeda, Frederick Stern: System Identification using CFD Captive and free Running Tests in Severe Stern Waves, Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, refereed, Vol.1, 2013, pp.165-177.
 - 16) Naoya Umeda: Current Status of Second Generation Intact Stability Criteria Development and Some Recent Efforts, Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, non-refereed, Vol.1, 2013, pp.138-157.
 - 17) 伊藤 祐人、梅田 直哉: カーフェリーのブローチング現象に対する危険性について、日本クルーズ&フェリー学会論文集、査読有、第4巻、2014年
 - 18) 櫻田 顕子、梅田 直哉: カーフェリーの大角度横揺れと追波中復原力喪失現象に対する IMO 新復原性基準案の関係について、日本クルーズ&フェリー学会論文集、査読有、第4巻、2014年
 - 19) Naoya Umeda, Tomohiro Furukawa, Akihiko Matsuda, Satoshi Usada: Rudder Normal Force during Broaching of a Ship in Stern Quartering Waves, Proceedings of the 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, refereed, Vol.1, 2014, USB
 - 20) Yohei Tsutsumi, Naoya Umeda, Daichi Kawaida, Akihiko Matsuda: Probability of Ship Capsizing in Beam Wind and Waves-Comparison between model

experiment and numerical simulation-,
Proceedings of the 7th Asia-Pacific
Workshop on Marine Hydrodynamics,
non-refereed, Vol.1, 2014,
pp.156-159.

- 21) Masahiro Sakai, Naoya Umeda, Akihiko Matsuda: Estimation of Oblique-Wave Parametric Rolling Amplitude Using an Averaging Method, Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime, refereed, Vol.1, 2014, pp.579-588.
- 22) Naoya Umeda, Daichi Kawaida, Yuto Ito, Yohei Tsutsumi, Akihiko Matsuda, Daisuke Terada: Remarks on Experimental Procedures for Numerical Intact Stability Assessment with Latest Examples, Proceedings of the 14th International Ship Stability Workshop, non-refereed, Vol.1, 2014, pp.77-84.
- 23) Hirofada Hashimoto, Shota Yoneda, Yusuke Tahara, Eiichi Kobayashi: Prediction of Wave-Induced Surge Force Using Overset Grid, Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2015,(to be published).
- 24) Naoya Umeda, Toru Ihara, Satoshi Usada: An Investigation into the Factors Affecting Probabilistic Criterion for Surf-Riding, Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2015,(to be published).
- 25) Naoya Umeda, Naoki Fujita, Ayumi Morimoto, Masahiro Sakai, Daisuke Terada, Akihiko Matsuda: Numerical Prediction of Parametric Roll Resonance in Oblique Waves, Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, 2015,(to be published).

〔学会発表〕(計0件)

〔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〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

梅田 直哉 (UMEDA NAOYA)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20314370

(2)研究分担者

松田秋彦 (MATSUDA AKIHIKO)
独立行政法人水産総合研究センター・水産
工学研究所・主幹研究員
研究者番号: 10344334

橋本博公 (HASHIMOTO HIROTADA)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号: 30397731

(3)研究協力者

寺田大介 (TERADA DAISUKE)
独立行政法人水産総合研究センター・水産
工学研究所・主任研究員

大阪大学大学院生(研究当時)
荒木元輝 (ARAKI MOTOKI)
古川智啓 (FURUKAWA TOMOHIRO)
山根 佳祐 (YAMANE KEISUKE)
伊藤 祐人 (ITO YUTO)
櫻田 顕子 (SAKURADA AKIKO)
藤田 直樹 (FUJITA NAOKI)
吉山 風花 (YOSHIYAMA FUKA)
池島 章司 (IKEJIMA SHOJI)
堤 陽平 (TSUTSUMI YOHEI)
宇貞 哲 (USADA SATOSHI)
川井田 大地 (KAWAIDA DAICHI)
酒井 政宏 (SAKAI MASAHIRO)

大阪大学学生(研究当時)
猪原 透 (IHARA TORU)
水本 健太郎 (MIZUMOTO KENTARO)
三好 誉也 (MIYOSHI TAKAYA)
山下 奈穂 (YAMASHITA NAHO)