

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246152

研究課題名(和文) 強非線形現象を誘起する多方向不規則海象と船体運動に関する研究

研究課題名(英文) Study on multi-directional irregular wave field inducing strong nonlinear phenomena and ship motion

研究代表者

上野 道雄 (UENO, Michio)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60358405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,400,000円

研究成果の概要(和文)：全周造波機を備えた試験水槽で実際の海難事故時の多方向不規則波浪場を再現して波浪場の方向スペクトル解析手法によって検証しました。水面上の風と波浪場を併存させることで実海域の気海象を再現するとともに波風併存時の実験・計測・解析を実施してその有効性を確認しました。実際の海難事故として多方向不規則波中の高速船の大振幅横揺れや双峰性の波方向スペクトル中の漁船の追い波中ブローチング現象の再現に成功しました。補助推力装置を用いた自由航走模型船によって荒天で実船相似の船体運動を実現する手法を開発しました。不規則波中で過渡運動を再現する計算手法を開発し傾斜船体の運動計算でその有効性を確認しました。

研究成果の概要(英文)：Our directional wave analysis verified the method realizing short-crested irregular wave field in our model ship basin. Tank test using model ships in both waves and wind successfully realized a ship running in actual sea condition and our measurement and analysis confirmed the validity of the experimental technique. Free-running model tests successfully reproduced in model scale actual accidents such as large roll motion of a fast ferry and broaching-to of a fishing vessel in the similar wave fields estimated and reproduced for the accidents. We developed an auxiliary thruster for free-running model test and a method realizing full-scale equivalent ship motion in wind and waves using scale models. Our numerical method confirmed its validity to calculate transient motion of an initially inclined ship in irregular waves.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海難事故再現 多方向不規則波 波風併存時気海象 荒天下操船限界 補助推力装置 自由航走模型実験 メモリー影響関数 傾斜時船体運動

1. 研究開始当初の背景

不規則で複雑な実際の海の波は、理論的には無数の周波数(周期)と進行方向、振幅を持つ規則波成分の重ね合わせとして理解され、多方向不規則波浪場と呼ばれます。この実海域波浪場は進行方向毎、周波数成分毎の波のエネルギーを表した方向スペクトルという形で表現されます。方向スペクトルは船用のレーダーなどで計測された例があるほか、気象観測値を用いた波浪推算でも推定できます。

波浪中の船の性能を評価するため、試験水槽では波浪中で性能試験がおこなわれてきました。しかし、これまでは一方向に進む規則波または不規則波が中心でした。壁面反射などを利用した多方向不規則波浪場の発生法も研究されてきましたが、任意の多方向不規則波浪場を安定して起こせる試験水槽はありませんでした。近年、全周造波機を持つ小型の円形水槽では様々な波浪場を発生させることが実証され、海上技術安全研究所では全周造波機を備えた本格的な船用試験水槽が完成しました。80m×40mの大きさで全周に382台の分割型造波機を備えた水槽で、実海域の方向スペクトルデータを用いて多方向不規則波浪場を安定して発生させることができると考えられます。

さて、後を絶たない海難事故は船が遭遇した気象が深く関係しています。特に近年の海難事故では生存者の証言などから「三角波」や「一発大波」が原因とされることもしばしば見受けられます。しかし、本当に「三角波」が発生したのか、その波の中で船は事故当時の挙動を本当に示すのか、といったことを実際の波浪場の推定に基づいて模型実験あるいは理論計算で裏付けた例はありません。これは海難事故が発生した波浪場を忠実に再現できる水槽がなかったためと考えられます。

上記の新しい船用試験水槽では多方向不規則波浪場を自由に「設計」できますから、裏付けとなる事故時の方向スペクトルデータを元にして実験的に海難事故を再現できると考えられます。また、実海域における船の強非線形の挙動の理論計算手法や波浪場を計測・解析する技術が格段に進歩すると考えられます。なぜなら、これまではわからなかった実海域の方向スペクトルの「正解」が試験水槽では波浪場再現の入力データとして既知となるからです。このような再現技術の進歩はさらなる模型実験手法の高度化にもつながり、ひいては海難事故の原因究明にもつながると期待されます。

2. 研究の目的

全周造波機を備えた試験水槽において多方向不規則波浪場を再現し、造波特性における周波数分解能および方向分解能ならびに時間的・空間的な安定性などの造波特性を把握します。水槽に再現された波浪場を計測し、

入力としての方向スペクトルデータとの比較によって方向スペクトル解析手法の定量的検証と高度化をおこないます。水面上の風の影響を明らかにしたうえで信頼性の高い波浪場の計測・解析手法を目指します。

海難事故として典型的な追波・横波・波風中の海難事故を調査・抽出し、事故時の波浪場の方向スペクトルを推定した上で試験水槽内に当該波浪場を再現し、模型船を用いて海難事故を再現します。波浪場の一部に三角波等の集中波・過渡水波を再現するなどして、海難事故につながる波の発生という視点から波浪場を分析します。模型船プロペラ荷重を実船相似にする試験法を考案し、上記波浪場の再現および風環境の再現と合わせ海難事故の忠実な再現を試みます。

過去の研究成果を活かした計算手法に連続する大波を受ける浮体の運動推定手法を加えて発展させ、多方向不規則波中で過渡の大振幅運動を再現する計算手法を開発し、上記の多様な海難事故再現実験結果を用いた有効性の検証と改良をおこないます。重大な海難事故はしばしば大振幅の強非線形の現象となり、さらに「三角波」や「一発大波」中の船体運動は様々な周期成分を含んだか過渡現象と考えられます。計算手法の開発ではこれら強非線形の過渡現象に対応して海難事故の本質に迫るとともに、海難事故の発生機構解明と原因究明に資することを目指します。

3. 研究の方法

(1) 実海域環境の再現手法の研究

追波中の海難事故対応の実海域波浪場を再現します。追波中の事故は波周期が単一周期(平均波周期)に近く、波の進む方向も一つの主方向のまわりに分布した波浪場であると考えられます。しかし、その中でも海難事故を引き起こすきっかけとなる波は平均波周期や波の主方向から少しずれた波である可能性が考えられます。このような点に注意しながら実際の波浪場を推定した方向スペクトルデータに基づきどのような波が海難事故を誘起したかの観点から波浪場を再現します。

まず、多方向不規則波浪場の計測・解析システムを設計・製作し、入力としての方向スペクトルとの比較検討によりその妥当性を定量的に検証します。同時に、再現された多方向不規則波浪場の特性および再現性・安定性について検証し、全周造波機を備えた試験水槽の有効性を明らかにします。次に追い波中で転覆現象などにつながる実海域波浪場を再現します。連続する複数の大波の発生が船の運動に大きく影響することに特に注意を払います。波浪場計測・解析手法の改良をおこないます。さらに、多方向不規則波浪場に送風装置を使って風環境を与えて波風併存時の実海域環境を再現します。送風環境の波浪場計測への影響も明らかにして手法の

改良をおこないます。

(2) 海難事故の実験的再現手法の研究

追波中の大傾斜事故またはブローチング現象を取り上げて海難事故を実験的に再現します。模型船は自走させる方法を取り、試験水槽の曳引車に設置されたカメラ画像を元に曳引車が模型船を自動追尾する方法で模型船の挙動を計測します。模型船は転覆しても支障ない水密構造模型とします。必要に応じて荷崩れ等の現象を再現してその影響について明らかにします。

外乱下でもプロペラ荷重度を実船相似にした模型実験を可能にする荷重度変更自走試験システムの設計をおこない妥当性を検討します。荷重度変更自走試験システムを設計・製作し基本特性の調整をおこないます。

波風併存時の操船限界近くの現象を再現します。荷重度変更自走試験システムにより外乱下大斜航時等でも適用可能な新しい模型試験手法の有効性を検証します。

(3) 海難事故の理論的再現手法の研究

傾斜船体の波浪中過渡現象を再現する理論計算手法を定式化し推定計算でその妥当性を検証します。理論的推定については高次の細長体理論を用います。特に過渡応答の再現計算が妥当かどうかを検証します。

4. 研究成果

実際に起こった高速フェリーの大傾斜事故の再現を試みました。再現したのは垂線間長さ 150m の高速フェリーが熊野灘を針路 235 度、船速約 20kt で航行中に突然大傾斜を起こしたという事故です。急激な減速と急旋回がこれに続き、船は大傾斜したままとなりました。当時この海域の気海象は東北東の風 15.4m/s、有義波高 4.59m、平均波周期 10.0s の東からの波という状況でした。乗員の証言によれば、突然 20～30 度の右傾斜を生じ、続いて 40 度を超える傾斜になったとのこと。この間、荷崩れによると思われる音がしていたことが乗員によって確認されています。

再現実験では全周造波機を備えた実海域再現水槽の造波装置に事故当時の海象を表す方向スペクトルを入力する方法によって当時の海象を再現しました。図 1 に目標とした方向スペクトルと水槽内に再現した波浪場の方向スペクトルの比較を示しました。そして、実船相似の模型船を製作して当時の状況の通りに模型船を航走させました。この時、その海象と同じスペクトルを持ったごく小さな集中波を重ねることによって横揺れを発生させ荷崩れを模擬する装置を作動させることで当時の現象に近いと思われる現象を再現することに成功しました。模型船が大傾斜して急旋回を始める様子を図 2 の連続写真に示しました。

もう一つの例は漁船の斜め追い波中のブローチング現象です。長崎県平戸島西方沖で 80GT 型巻き網漁船(全長 37.8m、平水中

船速 15.9kt)が左舷後方 49 度からの波を受ける状況でブローチング現象によって転覆しました。当時の有義波高は 1.71m、平均波周期は 4.8 秒でした。この海象を先のフェリーの場合と同じように試験水槽内に再現しました。方向スペクトルの目標値と計測値の比較を図 3 に示します。図 1 とは異なり、スペクトルのピークが 2 つある双峰性波浪場であることがわかります。この多方向不規則波浪場中で漁船模型を用いて当時の状況を再現したところ、図 4 に写真を示すようにブローチング現象を再現することができました。模型船を使った規則波中のブローチング現象の報告例はありますが、多方向不規則波中でしかも事故当時の実海象を模擬した波浪場での再現の成功がこれが初めてと考えられます。

図 5 は本研究で開発した補助推力装置とこれを装備した自由航走模型船です。この補助推力装置を使うことによって従来は曳航模型船でしかできなかった摩擦修正を自由航走模型船でできるようになりました。さらに、この補助推力装置を使って波や風などの外乱下でも実船相似の船体運動を模型船で実現できる舵効き船速修正の手法を開発しました。図 6 に舵効き船速修正を適用した模型船(RSC)と摩擦修正を適用した模型船(SP)、補助推力を使わない模型船(MP)を実船と比較した風圧下のジグザグ操船のシミュレーション計算結果を比較して示します。図 7 はビューフォート風力階級 11 の荒天下を航行するタンカーの定常航行状態をシミュレーション計算で推定した結果です。これらの結果は舵効き船速修正で外乱下でも実船相似の現象を模型船で実現できることを示しています。

図 8 に示すように、波と風が併存する実海域を模型尺度で試験水槽に再現し、荒天下中の操船限界を実験的に調べました。また、過渡水波中の船体運動を推定する計算法を開発して傾斜した船体の横揺れ運動に関するシミュレーション計算をおこない、図 9 の例に示すように、過渡応答に対する横傾斜角の影響を明らかにしました。

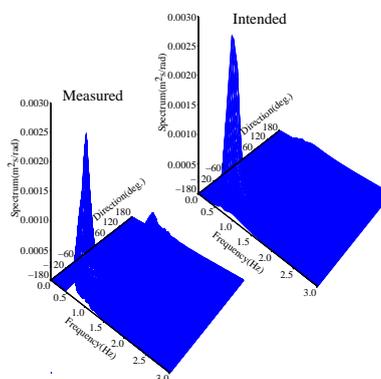


図 1 フェリー大傾斜事故当時の海象を表す方向スペクトル(右)と試験水槽に再現した波浪場の方向スペクトル(左)

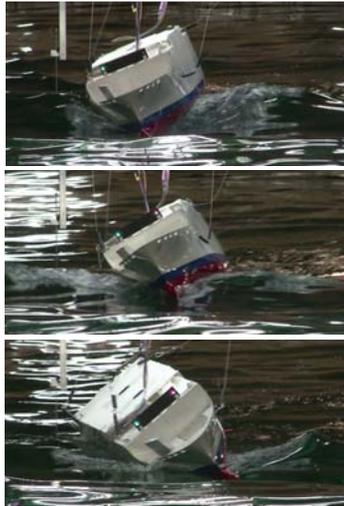


図2 斜め追い波中航走時に荷崩れを起こして大傾斜して急旋回する高速フェリーの事故再現実験

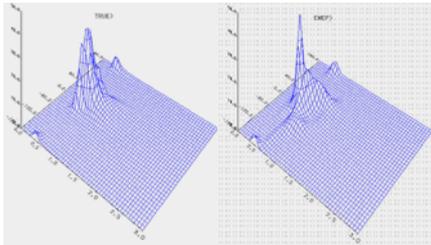


図3 双峰性スペクトルの推算値(左)と再現値(右)



図4 多方向不規則発中を航走する漁船のブローチング現象再現実験

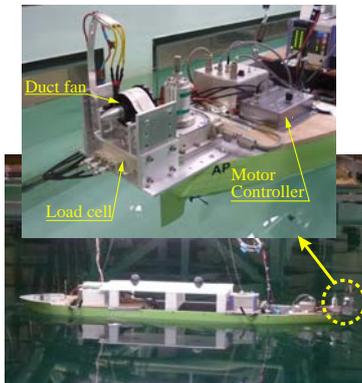


図5 補助推力装置とこれを装備したコンテナ船自由航走模型

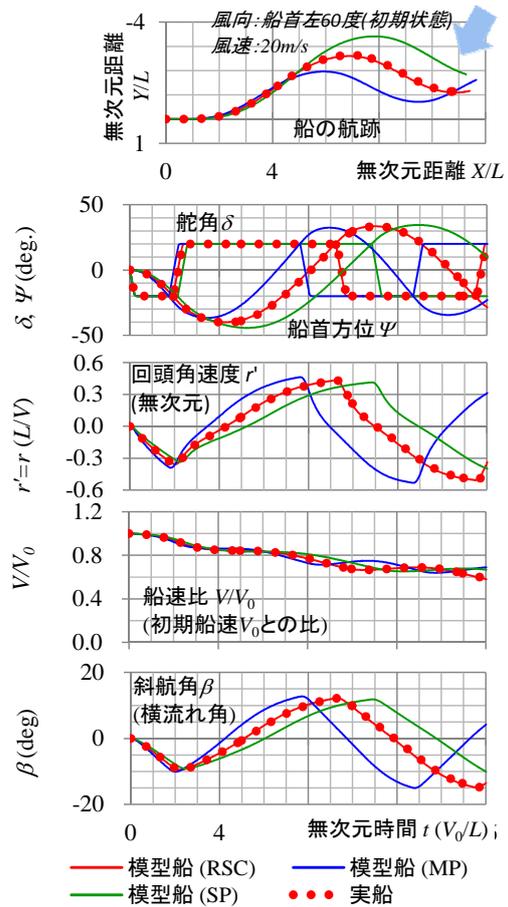


図6 強風下のジグザグ操船のシミュレーション計算(RSC 舵効き船速修正, MP 模型船自航点, SP 実船自航点(摩擦修正))

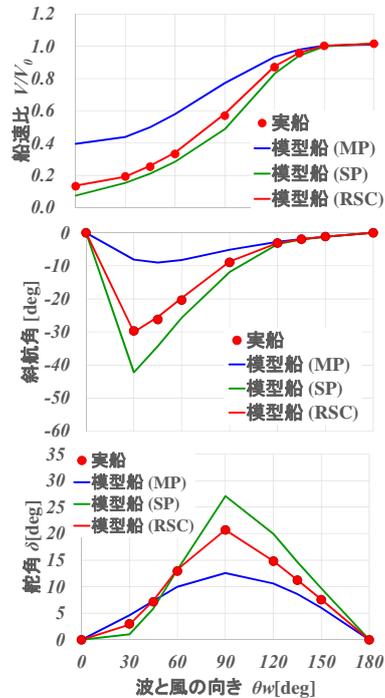


図7 ビューフォート風力階級 11 の荒天下のタンカーの定常航行に関するシミュレーション計算結果(RSC 舵効き船速修正, MP 模型船自航点, SP 実船自航点(摩擦修正))



図 8 波風併存時の操船限界に関する水槽実験

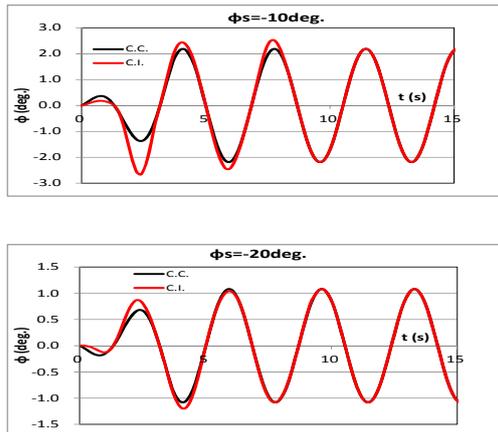


図 9 過渡水波中における定傾斜状態の横揺の時系列計算例(80GT 型まき網漁船, 正面向波, 上:定傾斜角 10 度、下:定傾斜角 20 度、CI:たたみ込み積分型、CC:定数係数型)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

塚田吉昭, 上野道雄, 谷澤克治, 北川泰士, 宮崎英樹, 鈴木良介, 自由航走模型試験のための補助推力装置の開発, 査読有り, 日本船舶海洋工学学会論文集, Vol. 20, 2014, pp. 59-67, doi.org/10.2534/jjasnaoe.20.59.

UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, KITAGAWA, Yasushi, Rudder Effectiveness Correction for Scale Model Ship Testing, 査読有り, Vol. 92, 2014, pp. 267-284, doi:10.1016/j.oceaneng.2014.10.006.

UENO, Michio, MIYAZAKI, Hideki, TAGUCHI, Harukuni, KITAGAWA, Yasushi, TSUKADA, Yoshiaki, Model Experiment Reproducing an Incident of Fast Ferry; Journal of Marine Science and Technology, 査読有り, Vol. 18-2, 2013, pp. 192-202, DOI 10.1007/s00773-012-0198-6.

[学会発表] (計 20 件)

UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, Estimation of Fluctuating Propeller Torque of Full-scale Ship Using Free-running Model in Waves, International Conference on Ocean,

Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ), 査読有り, 2015.

SUZUKI, Ryosuke, UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, A Numerical Study on Maneuverability under Steady Equilibrium Condition in Waves for Free-running Model Ship, International Ship Stability Workshop (ISSW), 査読有り, 2014, pp. 167-173.

UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, A Method to Realize Full-scale Equivalent Propeller Characteristics and Speed Using Free-running Model Ship, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (INT-NAM), 査読有り, 2014, pp. 483-494.

UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, Similarity of Rudder Effectiveness and Speed Response of a Free-running Model Ship, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ), 査読有り, 2014.

TSUKADA, Yoshiaki, UENO, Michio, MIYAZAKI, Hideki, TAKIMOTO, Tadanori, An Auxiliary Thruster for Free-running Model Ship Test, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ), 査読有り, 2013.

MIYAZAKI, Hideki, UENO, Michio, TAGUCHI, Harukuni, KITAGAWA, Yasushi, TSUKADA, Yoshiaki, Experimental study about avoiding dangerous situations of a RO/RO ferry in a quartering sea, International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS), 査読有り, 2013, pp. 444-450.

UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, Numerical Study on Rudder Effectiveness Correction of a Free-running Model Ship, International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS), 査読有り, 2013, pp. 1120-1127.

UENO, Michio, MIYAZAKI, Hideki, TAGUCHI, Harukuni, KITAGAWA, Yasushi, TSUKADA, Yoshiaki, Reproduction of an Actual Sea and Ship Motion Using the All-round Wave Generator, OCEANS, 査読有り, 2011.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

名称: 自由航走模型船の推進器関連特性を実船相似にする方法及び自由航走模型船の推進器関連特性実船相似装置

発明者：上野道雄，塚田吉昭
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2014-207707
出願年月日：2014. 10. 9.
国内外の別： 国内

名称：自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる自由航走模型船試験装置
発明者：上野道雄，塚田吉昭
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2014-207705
出願年月日：2014. 10. 9.
国内外の別： 国内

名称：自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置
発明者：上野道雄，塚田吉昭，谷澤克治，北川泰士，鈴木良介
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：PCT/JP2014/60555
出願年月日：2014. 4. 11.
国内外の別： 国際

名称：船舶の操舵方法および自動操舵装置
発明者：上野道雄，塚田吉昭
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2013-123006
出願年月日：2013. 6. 11.
国内外の別： 国内

名称：自由航走模型船試験方法及び補助推力付加手段を用いた自由航走模型船試験装置
発明者：上野道雄，塚田吉昭，谷澤克治，北川泰士
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2013-084224
出願年月日：2013. 4. 12.
国内外の別： 国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕
ホームページ等
模型船の（見掛けの）抵抗を自由に操る一補助推力装置の開発，
https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/dfat/index.html

模型船の運動を実船と相似にする一舵効き船速修正，
https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/rsc/index.html

追波中を航行する漁船の運動
https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/80Gtfishboat_Top/index.html

高速フェリーの斜め追い波中の大傾斜現象の再現
https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/ferry/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 道雄 (UENO MICHIO)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：60358405

(2) 研究分担者

塚田 吉昭 (TSUKADA YOSHIAKI)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：90425752

宮崎 英樹 (MIYAZAKI HIDEKI)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：10415797

北川 泰士 (KITAGAWA YASUSHI)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：50579852

鈴木 良介 (SUZUKI RYOSUKE)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：20711328

田口 晴邦 (TAGUCHI HARUKUNI)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：70344455

黒田 貴子 (KURODA TAKAKO)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：00415811

宝谷 英貴 (HOUTANI HIDETAKA)
(国立研究開発法人)海上技術安全研究所・その他部局等・研究員
研究者番号：30636808

(3) 連携研究者

なし