

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249135

研究課題名(和文) 風浪中を航行する船の針路安定性とそれに及ぼす主機出力の影響に関する研究

研究課題名(英文) Course stability of ships in adverse weather conditions and the effect of main engine output

研究代表者

安川 宏紀 (Yasukawa, Hironori)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：40363022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：風浪中における船の操縦運動の時刻歴非線形シミュレーション計算法を開発し、水槽試験結果との比較により検証した。風浪下を航行する船の釣り合い状態を求め、その状態において運動方程式を線形化して、針路安定性を判別する新しい理論計算法を開発した。開発された2つの計算ツール、風浪中における船の操縦運動計算法と風浪中における船の針路安定性の理論計算法を用いて、種々の船種を対象に、外乱条件や主機出力を種々変化させたときの操縦運動や波浪動揺を計算し、その計算結果を基に、安全な航行が可能となる外乱条件や主機出力の影響を具体的に提示した。

研究成果の概要(英文)：A non-linear time-domain simulation method was developed for predicting maneuvering motions of ships in adverse weather conditions, and validated through the comparison with tank model test results. Obtaining an equilibrium of the ship in adverse weather conditions and linearizing the motion equations of the ship at the equilibrium, a new theoretical method was developed for judgement of course-keeping ability of ships. By means of the developed two calculation tools, the time-domain maneuvering simulation method and the theoretical method for course-keeping ability, the maneuvering motions and oscillations in waves were predicted for various kinds of ships with changing the external disturbance condition and the engine output. Based on the prediction results, the external disturbance conditions where the safe navigation is possible, and the effect of the engine output were presented in detail.

研究分野：工学

キーワード：針路安定性 操縦性能 主機出力 水槽試験 波漂流力 波浪中操縦運動

### 1. 研究開始当初の背景

国際海事機関(International Maritime Organization; IMO)における EEDI プロジェクトに関する重要な論点の一つに、風浪中を航行する船の操縦性が確保できる最低主機出力をどのように設定すべきかという問題がある。EEDI プロジェクトでは、船の省エネを進め、船から排出される CO<sub>2</sub> を大きく削減することを目指している。もしも期待の通りに船の省エネ化が進み、それに伴って、主機出力が小さくて済むようになると、その分、風波等による外乱影響が相対的に大きくなり、特に低速航行時にその影響が顕著となる。主機出力が小さく、低速航行ということになると、舵の効きそのものが悪くなることも懸念される。最悪の場合には、必然的に低速で航行しなくてはならない湾内操船において、安全な航行が確保できなくなる恐れがある。それを防ぐには、ある程度余裕を持って、大きめの主機を載せれば良いが、それでは船の省エネを進めることはできない。従って、設定された風浪中において船の操縦性が確保でき、安全航行が可能となるような最低の主機出力を合理的に決める必要が生じることとなる。

この問題を、整理すると、次のようになる。

(1) 低主機出力、低速時において、舵効きならびに船の操縦運動はどのように変化するか

(2) 風波中ではどのように変化するか

(3) 操縦性の重要な指標である、風波中における船の針路安定性をどのように定義し、議論すれば良いのか

(4) 船の安全性を確保できる最低の主機出力はどのように決めれば良いのか

従来、船の操縦性研究は、ある程度の船速を有することを前提に、平水中での検討が主流であった。そのため、これらについて、十分な知見がないのが実状である。(1)は、低速時における操縦運動の把握を必要とする。従来は、プロペラ逆転停止性能や港湾内操船について、水槽試験、シミュレーション計算による検討が行われてきた。しかし、基礎となる低速時の舵力特性や低速時における通常の旋回運動や zig-zag 運動の特性については、必ずしもきちんと把握されていない。ましてや、(2)のような風波中における低速時の操縦運動の検討はほとんど行われていない。コンテナ船を対象とした安川(本研究の研究代表者)による検討が行われたただけである。(3)を考えると、風波中における針路安定性の理論を構築する必要があるが、今のところ、そのような理論はない。また、(2)と(3)については、波によって船に作用する流体力(波漂流力)が重要な鍵となる。一方、波浪中における波漂流力(抵抗増加、漂流横力、漂流回頭モーメント)の特性、特に船速影響については、あまり調べられておらず、その第一歩としては、水槽試験による計測が必要である。(4)では、(1)から(3)の検討を踏まえ、安全に関するある

程度の余裕を持って、最低の主機出力の線引きを行う基準を策定する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、風浪中を航行する船の操縦性が確保できる最低主機出力を合理的に決定する方法を開発することである。それを達成するために、低主機出力ならびに低速時において、平水中ならびに風浪中を航行する船の操縦運動が予測可能な時刻歴非線形シミュレーション計算法を開発するとともに、風波中を航行する船の針路安定性をマクロに把握するための理論を開発する。それらの検証のために、また計算法や理論のもととなる基礎的なデータを取得するために、船の運動や流体力に関する水槽試験を実施する。本研究は、現在、国際海事機関(IMO)で議論されている、EEDI に関する重要な論点に対して、一つの解答を示すものであり、我が国造船業や海運業に大きく貢献するものである。

### 3. 研究の方法

風浪中における船の操縦運動の時刻歴非線形シミュレーション計算法、風浪中における船の針路安定性の理論の開発、それに対する実験による検証という形で研究を遂行する。開発された計算法を用いて、船の航行安全性と最低主機出力に関する検討を行う。研究の流れと詳細を次に示す。

(1) 主機出力の変化を考慮した風浪中における船の操縦運動の実用計算法の開発

操縦運動は低周波数での運動であり、波浪揺は比較的高周波数での運動である。この性質を利用して、低周波数での運動方程式と、高周波数での船の運動方程式を導き、両者を連成させながら問題を取り扱う。波のない平水中においては既存の MMG 型操縦運動モデルに、直進航行時の波浪中においては広く用いられるストリップ法(New Strip Method)に一致するような計算モデルを構築する。風については従来使用されている方法を適用する。波漂流力については、3D パネル法、抵抗増加の実用的計算法をベースに、規則波中における漂流力を求め、それに短期予測の手法を用いて平均値を算出し、それを外力項として取り扱う。さらには、外乱下におけるプロペラトルクと主機のモデルを導入して、操縦運動時のトルクリッチを考慮する。

(2) 計算プログラムの開発と水槽試験の実施、計算法の検証と改良

上記総合計算モデルを数値的に解き、実際に運動を求めることができるシミュレーション計算法を開発する。低周波数域における運動方程式(4元)、高周波数域における運動方程式(6元)ならびに実際に運動を求めるための微分方程式(6元)の計16元連立の運動方程式を解く必要があり、具体的に解く方法として Newmark の法を用いる。波浪に関する流体力は、時々変化する船の操縦運動に対応した形で、波浪流体力を求める。

さらには、プロペラ推力や舵力の数学モデルにおいても、波浪影響を考慮し、それらを統合して、操縦運動シミュレーションが可能となる計算プログラムを開発する。

水槽試験に用いる模型船の計画、製作を行い、実施すべき水槽試験の計画を行う。この計画された模型船を用いて、広島大学船型試験水槽にて、平水中ならびに低速時における操縦流体力特性(舵力特性、船体減衰力特性)といった基礎となるデータを計測する。次に、水産工学研究所の角水槽において、船速を変えながら、短波長不規則波における旋回運動や zig-zag 運動といった操縦運動ならびに波浪動揺の計測を行う。得られた実験データを使用して、計算法の検証を行う。

#### (3) 風浪中における船の針路安定性の理論の開発

開発した計算法の低周波数における運動方程式をベースに、一定風速ならびに不規則波中を航行する船の針路安定性の理論を開発する。一定風速下を航行する船の針路安定性の理論は、安川(本研究の代表者)等によって、既に提示している。今回、この方法を波の影響を含むものへと拡張する。まず、風浪下を航行する船の釣り合い状態を求め、その状態において、運動方程式を線形化し、針路安定性に関する基礎式を誘導する。具体的な計算においては、運動パラメータ(船速、方位、斜航角等)に対する波漂流力の偏微分値が必要であるが、それについては、既存の理論計算法を用いて推定する。

#### (4) 基礎となる波漂流力の計測、計算法の検証と改良

上で述べた針路安定性の理論計算法ならびに開発された風浪下での操縦運動の時刻歴非線形シミュレーション計算法において、波漂流力は重要な役割を演ずることが予想される。そこで、既存の方法による波漂流力の推定精度を確認すべく、検証データを取得するため、波方向を種々変化した規則波中での水槽試験を実施する。水槽試験は、三菱重工業長崎研究所の耐航性能水槽を借用して実施する。計測にあたり、低速から船速を変化させ、その影響を把握する。

風浪中における船の操縦運動の時刻歴非線形シミュレーション計算法の計算プログラムを用いて、種々の条件における操縦運動や波浪動揺の計算を行う。得られた計算結果は、水槽試験結果と比較を行い、理論計算法の検証を行う。

#### (5) 船の航行安全性と最低主機出力に関する検討

開発された2つのツール、風浪中における船の操縦運動計算法と風浪中における船の針路安定性の理論、を用いて、種々の外乱条件や主機出力を変化させ、そのときの操縦運動や波浪動揺を計算する。外乱下での当て舵や船体斜航角、さらには安定した航行が可能となるオートパイロットのゲインなどを指

標として、安全な航行が可能となる外乱条件と主機出力の関係を具体的に提示する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主機出力の変化を考慮した風浪中における船の操縦運動の実用計算法の開発と検証

風浪中における船の操縦運動の時刻歴非線形シミュレーション計算プログラムを開発した。計算法の検証データを得るため、水産工学研究所の角水槽において、船速を変えながら短波長不規則波における旋回運動や zig-zag 運動といった操縦運動ならびに波浪動揺の計測を行った。図1に、不規則波中におけるコンテナ模型船の舵角  $35^\circ$  の旋回航跡の比較を示す。図中、cal は理論計算結果、exp は水産工学研究所で実施した水槽試験結果を意味する。船速5kn相当での結果である。理論計算結果は、水槽試験結果とおおよそ一致しており、開発された計算法が妥当であることが検証された。

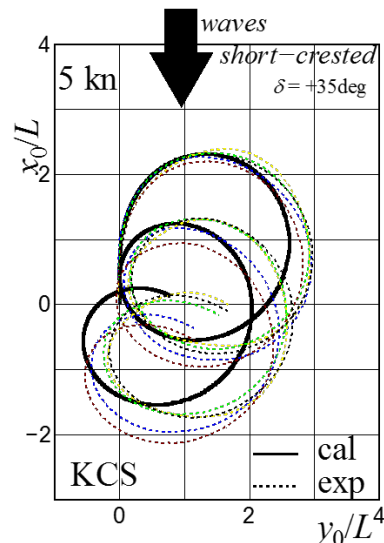


図1：不規則波中におけるコンテナ模型船の旋回航跡の比較

##### (2) 風浪中における船の針路安定性の理論の開発

一定風速ならびに不規則波中を航行する船の針路安定性の理論を開発した。まず、風浪下を航行する船の釣り合い状態を求め、その状態において、運動方程式を線形化し、針路安定性に関する基礎式を誘導した。この理論式を元に、具体的に釣り合い状態を求め、針路安定性を検討する計算プログラムを開発した。図2に、この度開発した計算法を用いて予測した浅水域( $h/d=1.2$ ;  $h$  は水深、 $d$  は吃水)における風圧下自動車運搬船の釣り合い状態(あて舵 と船体斜航角)の計算結果を示す。図中、BF は風圧レベルを表し、この数値が大きいほど風速が大きくなる。また、グラフ横軸の  $\theta$  は風向を意味し、 $0\text{deg}$  が正面向風、 $90\text{deg}$  が横風、 $180\text{deg}$  が追風を意味する。

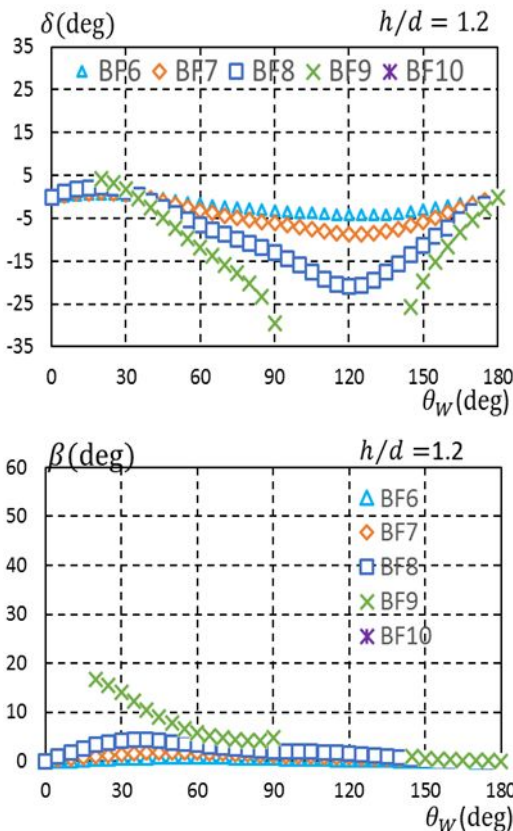


図2：風圧下における自動車運搬船の釣り合い状態(あて舵と船体斜航角)の計算結果

(3) 基礎となる波漂流力の計測，既存の計算法の検証

既存の方法による波漂流力の推定精度を確認すべく，検証データを取得するため，波方向を種々変化させた規則波中での水槽試験を実施し，波漂流力の計算プログラムを用いて，種々の条件における波浪動揺や波漂流力の計算を行い，水槽試験結果と比較を行った。図3にコンテナ船の正面向波中での規則波中波浪中抵抗増加係数の比較を示す。ストリップ法をベースとした計算結果は，水槽試験結果と概ね一致している。

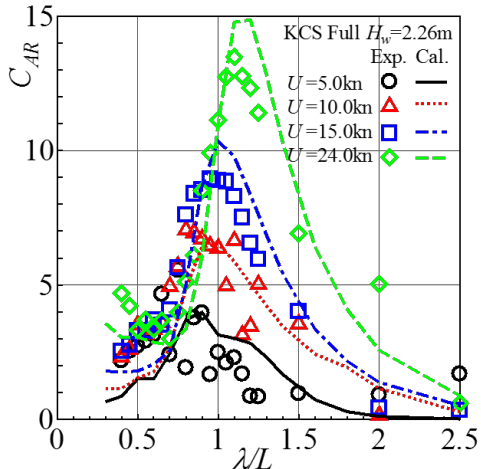


図3：波浪中抵抗増加係数の比較(KCS)

(4) 船の航行安全性と最低主機出力に関する検討

開発された2つのツール，風浪中における船の操縦運動計算と風浪中における船の針路安定性の理論計算を用いて，種々の外乱条件や主機出力を変化させ，そのときの操縦運動や波浪動揺を計算した。また，外乱下での当て舵や船体斜航角等を指標として，安全な航行が可能となる外乱条件を具体的に提示した。

図4に，荒天下を変針するコンテナ船のプロペラ位置の相対水位の計算結果を示す。時間  $t=300s$  で船の方位を  $0deg$  から  $30deg$  に変針したときの時刻歴結果である。時間  $300s$  までは横風波を受けて航行している。変針後は，波や風が正面から来るようになったため，運動の周期が小さくなり，その上船の縦運動が大きくなり，負の水位が発生している。これは，プロペラレーシングの発生を意味する。このように，操縦と耐航を同時に取り扱えるような理論計算が可能となった。

図5に自動車運搬船の荒天下操船限界を示す。図の半径方向波BFスケールを表し，回転方向は風波の方向を意味する。BF9の風波方向  $0deg$  ならびにBF10の風波方向  $0-70deg$  において，操船限界(赤の×印)に達することが示されている。これは船の正面からの外乱のため，主機がトルクリッチの制限にかかったためである。なお，操船限界に及ぼす主機出力の影響は大きなものではないことが別途示されている。

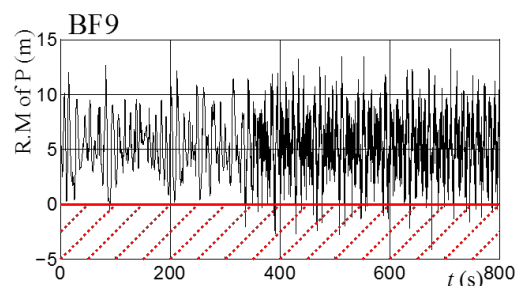


図4：荒天下(BF9)を変針するコンテナ船(KCS)のプロペラ位置の相対水位の時刻歴計算結果。時刻  $300s$  のところで方位を  $0deg$  から  $30deg$  に変針。水位が負のところプロペラレーシングが発生しているのが分かる。



## N-Full Ts=6.0

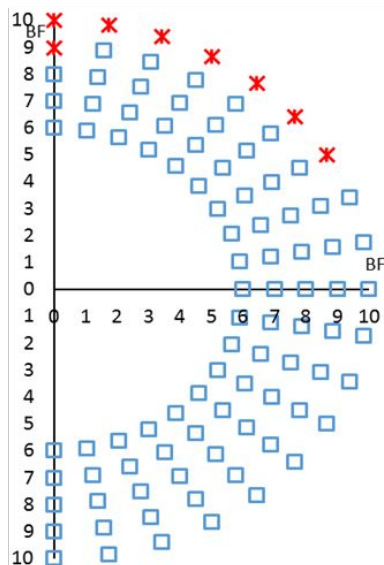


図5：自動車運搬船の荒天下操船限界の計算結果。は安全航行が可能を意味し、赤い×は安全航行が困難な状況を意味する。

### 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4件)

1. Yasukawa, H., Zaky, M., Yonemasu, I., Miyake, R., Effect of Engine Output on Maneuverability of a VLCC in Still Water and Adverse Weather Conditions, J. Marine Science and Technology, 査読有 (2017), DOI 10.1007/s00773-017-0435-0.
2. 安川宏紀, 松本晃範, 池添修自, 肥型船の波浪中抵抗増加に及ぼす波高影響日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第23号, 2016年6月, 45-54.
3. 安川宏紀, 佐野将昭, 平田法隆, 米舩 勲, 加山靖高, 橋詰泰久, 方形係数シリーズ肥型船の操縦性能(第一報:水槽試験), 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第21号, 2015年6月, 11-22.
4. Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, J. Marine Science and Technology, 査読有, Volume 20, Issue 1 (2015), 37-52.

[学会発表](計8件)

1. Sakuno, R., Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., Turning Simulation of a Pure Car Carrier Taking the Roll-Coupling Effect into Account, 3rd International Conference on Ocean, Mechanical & Aerospace --Scientists & Engineers-- (OMase 2016), OMase-711001, Terengganu, Malaysia, November 7<sup>th</sup>, 2016, USB-memory.
2. Shirai, M. and Yasukawa, H., Maneuvering Motion of a Full Hull Ship in

Irregular Waves, 3rd International Conference on Ocean, Mechanical & Aerospace --Scientists & Engineers-- (OMase 2016), OMase-711032, Terengganu, Malaysia, November 7<sup>th</sup>, 2016, USB-memory.

3. Ito, A. and Yasukawa, H., Experimental Study on Rudder Forces of a Full Hull Ship in Shallow Water, 3rd International Conference on Ocean, Mechanical & Aerospace --Scientists & Engineers-- (OMase 2016), OMase-711035, Terengganu, Malaysia, November 7<sup>th</sup>, 2016, USB-memory.
4. Yasukawa, H., Japanese R & D Project on Maneuvering in Adverse Condition and Minimum Power Requirement of Ships - continued -- Invited lecture, Joint ITTC-SHOPERA Public Workshop, Atene, Greece, September 28<sup>th</sup>, 2016.

5. Yasukawa, H., Japanese R & D Project on Maneuvering in Adverse Condition and Minimum Power Requirement of Ships Invited lecture, Joint ITTC-SHOPERA Public Workshop, London, UK, April 14<sup>th</sup>, 2016.
6. 安川宏紀, 藤本弘司, 西村 健, 荒天中のシミュレータ実験モデルの検討, 船舶の最低主機出力に関するシンポジウム, 日本航海学会, 日本船舶海洋工学会, 東京商船大学講堂, 東京都, 2016年3月18日, 57-65.

7. Yasukawa, H., Hirata, N., Yonemasu, I., Terada, D. and Matsuda, A., Maneuvering Simulation of a KVLCC2 Tanker in Irregular Waves, International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM'15), Newcastle, UK, September 9<sup>th</sup>, 2015, USB-memory.
8. Yasukawa, H., A Research Project on Maneuvering Motion in Waves and Minimum Power Requirement of Ships, Invited lecture, International Workshop on Environmentally Friendly Ships, Yokohama, Japan, March 4<sup>th</sup>, 2015.

### 6. 研究組織

#### (1)研究代表者

安川 宏紀 (YASUKAWA HIRONORI)  
 広島大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号：40363022

#### (2)研究分担者

田中 進 (TANAKA SUSUMU)  
 広島大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号：10207102

佐野 将昭 (SANO MASA AKI)  
 広島大学・大学院工学研究院・助教  
 研究者番号：40582763  
 (平成26年度, 27年度のみ研究分担者)

平田 法隆 (HIRATA NORITAKA)

広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号： 80181163