

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23246153

研究課題名(和文)船舶の実海域性能評価のための新しい自航試験法の研究

研究課題名(英文) Study on the development of the new experimental methodology for the self-propulsion model test to evaluate ship performance at the actual seas

研究代表者

谷澤 克治 (Tanizawa, Katsuji)

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：70373420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではターボチャージャーを含む2ストローク低速ディーゼル主機の数学モデルを組み込んだ主機特性模擬自航装置を開発し、これを用いた自由航走試験により、実海域波浪場での船体運動、船速低下量、プロペラ推力・トルクと回転数変動等を計測することで、これまでの抵抗の積上計算に基づく間接的な推定法に代わって、実海域性能を直接的に計測・評価する水槽試験技術を開発した。また実海域再現水槽にて本試験技術の有効性を検証した。本試験法を用いることで、これまで水槽試験で評価することが困難であった波浪中でのプロペラ負荷変動に対する主機応答が評価可能となり、ガバナーの最適化等、機関制御への応用も可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a marine diesel engine simulator: MDS was developed for the self-propulsion test of model ships in waves. MDS is a real-time control system of propeller rotating speed, which reflects the characteristics of a marine diesel engine. MDS is composed of servomotor, dynamometer and controller in which mathematical model of 2 stroke low speed diesel engine with turbo charger is installed. Using MDS, we can measure ship speed, propeller thrust, torque and rotating speed coupled with the engine by model experiment in waves. Using MDS and auxiliary thruster also developed in this study, the authors conducted a self-propulsion test of a model ship in waves and measured not only ship motion responses but also the realistic dynamic responses of a ship propulsion system in waves such as propeller load and rotating speed fluctuation, fuel supply rate, etc. By this feature, the applicability of MDS for the design of engine control system was also confirmed.

研究分野：船舶工学

キーワード：船舶工学 実海域性能 波浪中自航試験 主機数学モデル 摩擦修正

1 . 研究開始当初の背景

国際海事機関 IMO の EEDI 導入に伴って船舶の実海域推進性能向上に関する研究開発はこれまで以上に重要視されており、海上技術安全研究所においても省エネ船型の開発や船尾ダクト型省エネデバイス WAD などの開発を実施してきた。

一方、それらの省エネ性能を評価するための技術についても高精度化する必要がある。波浪中推進性能を正しく評価するためには波浪中抵抗増加量を精度良く推定する事が重要であるが、その精度良い推定技術は永年における船舶耐航性能研究の課題であり、海上技術安全研究所に於いても実運航性能シミュレータ VESTA を開発し評価技術向上に貢献している。ただし、VESTA も含め線形理論に基づく推定技術は微小振幅波理論を前提とした手法であり、高波高条件を想定する場合は非線形影響を考慮しないと十分な推定精度が担保出来ないとされている。

その点、水槽試験は理論とは異なり、波の非線形性を完全に考慮でき、かつ波浪中抵抗増加は粘性影響を殆ど受けないため、模型船と実船で基本的に相似と見なすことが可能であり、模型船に作用する波浪外力や抵抗増加は実船相当値として高波高条件下においても陽に計測できる。

しかし、模型船で波浪中での船速低下を正確に計測するには、(1) レイノルズ数の違いによる実船と模型船での摩擦抵抗の違いと、船尾伴流分布の違い、(2) 波浪中でのプロペラ負荷変動に伴う実船主機と模型船用電動モータの応答の違いが大きな壁となっており、このブレイクスルーが必要であった。

2 . 研究の目的

本研究の目的は、上記(1),(2)の壁を克服し、模型試験で実船の船速を直接計測できる水槽試験法を開発することである。

ここで、「船速を直接計測する」とは「模型船のフルード数が同じ外乱中を航走する実船と同値になる」ことであり、相似とは基本的にフルード相似則に則った相似である。この状態を実現するためには、実船と模型とのレイノルズ数の差に起因する流体力学的な尺度影響を考慮して、船体への作用外力の総和を相似にする必要があると同時に、船速低下に伴う馬力増加による実船主機の回転数変動などの主機応答特性を考慮して、模型試験のプロペラ推力変動に反映させる必要がある。

3 . 研究の方法

そこで本研究では、主機応答特性を模擬してプロペラ回転数をリアルタイムに制御する新しい模型船自航装置（主機特性自航装置）と、自由に航走する模型船のプロペラ荷

重度を実船相当にできる補助推力装置を開発し、プロペラ回転数応答を実船相当にする方策を整備することで実船と相似な船速や主機応答を計測できる方法論を構築した。また、これらの装置と方法論を総合して、模型船の波浪中自走試験により、実船の同じ波浪中での速力を計測可能な新しい試験法“船速相似法”を開発した。

(1) 主機特性自航装置の開発

実船主機の応答特性を水槽模型試験で再現するため、Bondarenko が提案した主機応答特性数学モデルを実装した主機特性自航装置を開発した。この数学モデルは2ストローク低速ディーゼル主機の負荷変動に対する1回転間のトルク、回転数、燃料投入量等の平均値の与えるモデルで、機械式ガバナーモデル、燃焼によるトルク発生モデル、軸系の回転運動モデルの3要素で構成されている。

図1に自航装置とその制御ブロックを示す。自航装置はサーボモータと動力計から構成され、動力計で計測したプロペラ軸のトルクと回転数が制御系の入力となる。制御系には MATLAB, Simulink, Simulink Real-Time を用い、主機の数学モデルをリアルタイムにシミュレートするプログラムが搭載されており、波浪中を航走する模型船のプロペラトルク変動による回転数の応答をリアルタイムに計算し、サーボモータの回転数指令として自航装置に出力する。この演算に必要な時間は出会波周期と比較して無視できる程度であり、この装置を用いて波浪中を航走する船舶のプロペラトルク変動に応じたディーゼル主機の回転数変動を模擬することが可能となった。

また、主機の数学モデルには燃料投入量も一変数となっており、水槽試験により燃料消費量の評価も可能になっている。

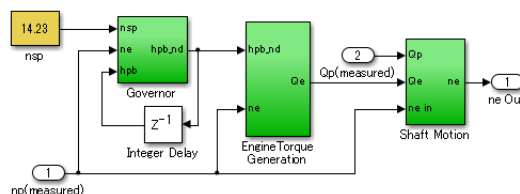


図1 主機特性自航装置とその制御ブロック

主機特性自航装置は荒天下を MCR に近い状態で航走する主機応答や、プロペラレーシングが発生した際の主機応答の計測・評価にも対応可能であり、実海域性能の安全性の観点からの評価試験にも活用することができる。

(2) 補助推力装置の開発

主機特性自航装置の開発によって実船主機の波浪中挙動を模型尺度で再現することが可能となった。しかし、実船と同じフルード数で航走する模型船のレイノルズ数は実船より低い場合、摩擦抵抗は相対的に大きくなり、必要プロペラ回転数や出力は実船相当より大きくなる。これでは主機を実船相当の回転数で回せないため、摩擦修正量(SFC, Skin Friction Correction)を模型船に付与した Ship-point 状態で模型船を自由航走させるための補助推力装置を開発した。

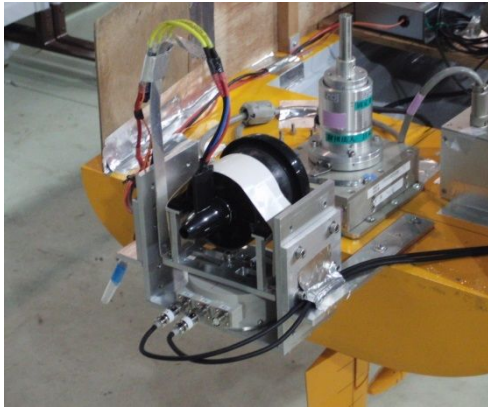


図2 ダクトファン型補助推力装置

図2に船尾に取り付けた補助推力装置を示す。これはダクトファンにより任意の補助推力を自由航走する模型船に与える装置であり、ファン下部に設置した検力計の計測値をフィードバックしてファン回転数を制御することで常に目標推力を模型船に与えることができる。補助推力装置の目標推力を自走中の速度に応じた摩擦修正量に設定することで、常に実船相当の状態を模型船を自由航走させることが可能になった。本装置は制御にたいする推力の応答が良く、動揺を伴う波浪中航走時においても精度良く目標推力を模型船に与えられることが確認されている。

摩擦修正量を付与した実船相当状態の模型船のプロペラ荷重度は同フルード数で航走する実船のプロペラ荷重度と一致するため、補助推力装置により主機特性自航装置への制御入力値を実船相当に近づけることができた。

(3) 船速相似法

前節の最後に実船相当に近づけることができると書いたが、これは補助推力装置を用いてプロペラの推力は実船相当に一致させることが出来たが、実船と模型船との伴流分

布の違いやプロペラレイノルズ数の違いにより、まだトルクは実船相当になっていないためである。これには補助トルク発生装置が必要となるが、本研究では動力計で計測したトルクを制御系に入力する前段に、補正演算段を追加し、制御系から出た回転数指令をサーボモータに入力する前段に、逆補正演算段を追加することで、実船相当の実験を模型船で実施することを可能にした。図3にこの補正のフローを示す。詳細については5節の論文を参照願いたい。

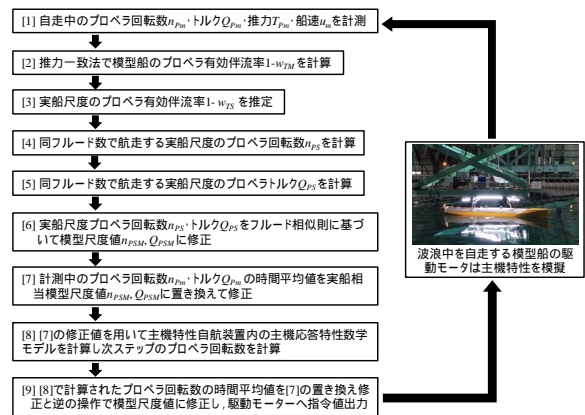


図3 回転数・トルクの補正フロー

(4) 水槽試験による検証

船速相似法を適用して規則波中および多方向不規則波中の自由航走速力試験を実施した。試験目的は主機特性自航装置による波浪中の主機応答を計測すること、および船速相似法を用いて実船の波浪中性能と合理的に見なせる計測データを実際に取得することにある。試験は海上技術安全研究所の実海域再現水槽で実施した。供試船は垂線間長300mのコンテナ船で、1/75スケールの4m模型を用いた。試験では曳引台車が自走する模型船に追従する自動追尾システムを使用し、模型船内試験装置への電源供給や信号送受信は有線で行った。航走時には直進航走を保持するためPID制御で自動操舵を施している。図4に模型船の外観と航走時の様子を示す。



図4 コンテナ船模型を用いた波浪中速力試験

計測データの時間平均値解析結果を図5に示す、規則波向波状態で波高8cmの結果である。横軸は波長船長比で、縦軸は上から平

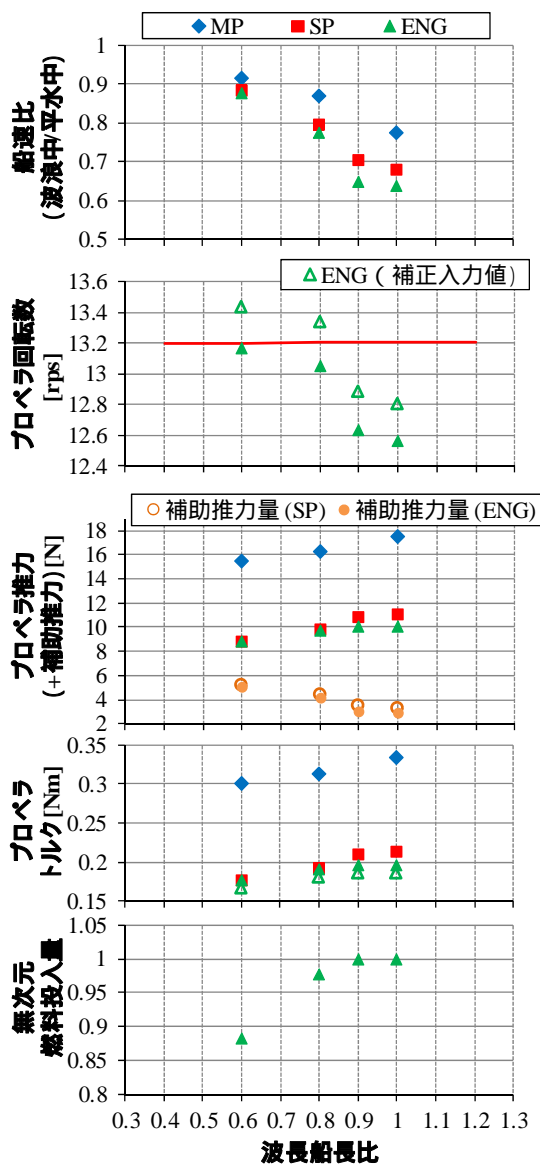


図5 規則波向波中速力試験の計測データの時間平均値 (波高 8.0cm)

水中と波浪中での船速比，プロペラ回転数，推力，トルク，無次元燃料投入量である。

最上段に示す船速比は，波長船長比が1に近づくにつれて小さくなり，波浪中船速低下が顕著になっている。これは波長船長比が1付近で波浪中船体運動が顕著になり，波浪中抵抗増加が最大になるためである。補助推力装置を使わないプロペラ回転数一定の実験(MP)では，波長船長比1付近で20%強の船速低下が見られるが，補助推力装置を使ったプロペラ回転数一定の実験(SP)では船速低下は30%に達し，さらに主機特性自航装置も使った実船相当の実験では35%の低下が計測された。この直接的な原因は主機応答再現によって回転数が大きく低下したためであるが，回転数低下の要因は燃料投入量が既に最大値に到達しているためである。つまり，水槽試験結果は「主機がMCR状態に到達したことにより発生させられるエンジントルクは既に最大限となり，プロペラ回転数は負荷トルク

(主機特性自航装置への補正入力トルク)とエンジントルクが釣り合うように減少していく」という実船主機の作動状況を再現していると言える。

一方，プロペラ推力とトルクは波長船長比が1に近づくにつれ増加する傾向にある。これは船速低下に伴ってプロペラ流入速度が減少するためである。

MCRでの値で無次元化した無次元燃料投入量では，波長船長比が0.9を超えた辺りで1.0に達しており，主機にこれ以上の燃料を供給できない状態になっていることが分かる。プロペラ回転数の劇的な低下は，燃料投入量が飽和したことによる。

以上のように複雑な主機応答が厳密に考慮された上で推進性能を評価できることは主機特性を簡便に取り扱った従来の方法より大きく進歩した点であると言える。

4. 研究成果

本研究では波浪中船速低下などの実海域推進性能を水槽模型試験で直接計測できる水槽試験法「船速相似法」を開発し，波浪中速力試験を実施して計測データからその有用性を検証した。また，本試験法の応用として水槽試験を活用した主機設計に活用した。さらに，波浪中主機負荷変動量を数値計算で推定するための理論計算法も開発した。本研究で得られた具体的な成果は以下の通りである。

(1) 実船主機の応答特性を水槽模型試験で再現するため，Bondarenkoが提案した主機応答特性数学モデルを実装した主機特性自航装置を開発し，規則波中曳航試験結果と同状態の数値予測結果より実船主機の挙動が再現されていることを確認した。

(2) 補助推力装置を開発し，摩擦修正量を与えた状態の模型船と実船の船速の関係性について主に無次元運動方程式から考察を施し，主機特性自航装置へ入力するプロペラトルクおよび回転数を実船相当に補正する方法を考案した。そして，模型船の船速を同外乱下の実船と合理的に相似にする水槽試験法「船速相似法」を開発した。

(3) 船速相似法を用いて規則波中および多方向不規則波中の自由航走速力試験を実施し，従来のプロペラ回転数を一定とする手法による計測結果との比較を行った。そして，複雑な主機応答が水槽模型試験で得られることを示し，船速相似法を用いることで実船の実海域推進性能が水槽模型試験で直接得られることを示した。

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 7 件)

Tanizawa K., Kitagawa Y., Takimoto T. and Tsukada Y.: Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test With a Marine Diesel Engine Simulator, Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.23, No.3, pp1-8, 2013.

Bondarenko O., Fukuda T. Yoo DH. and Tanizawa K. : Development of Diesel Engine Simulator for Use with the Self-Propulsion Ship Model, Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, Vol.48, No.5, pp98-105, 2013.

Ueno M., Tsukada Y. and Tanizawa K.: Estimation and Prediction of Effective Inflow Velocity to Propeller in Waves, Journal of Marine Science and Technology, Vol.18 Issue 3, pp.339-348, 2013.

Tanizawa K., Kitagawa Y., Hirata K., Fukazawa M.,: Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test With a Marine Diesel Engine Simulator and a Controllable Pitch Propeller, Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.24, No.2, pp142-148, 2014.

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, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 20 号, pp.71-79, 2014 .

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭, 上野道雄 : 実船の波浪中船速低下を直接計測する水槽試験法の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, VOL.22, pp21-34, 2015.

塚田吉昭, 上野道雄, 谷澤克治, 北川泰士, 宮崎英樹, 鈴木良介: 補助推力装置を用いた新しい自由航走模型試験, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻 第 3 号, pp.1-25, 2015 .

〔学会発表〕(計 16 件)

谷澤克治, 北川泰士: 機関特性を備えた自航装置を用いた水槽実験の可能性について, 日本船舶海洋工学会・運動性能研究会, 2011.

Tanizawa K., Kitagawa Y., Hirata K., Fukazawa M.,: Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test with a Marine Diesel Engine Simulator, 2nd Report Propeller Pitch Control, Proc. ISOPE 2013.

Tsukada Y.: AN AUXILIARY THRUSTER FOR FREE-RUNNING MODEL SHIP TEST, Proc. 32nd OMAE Conf.2013

北川泰士, 谷澤克治, : 主機特性自航装置を用いた波浪中自走試験 第1報 向波, 追波中, 日本船舶海洋工学会 H24 秋季講演会, 2012.

北川泰士, 谷澤克治, : 主機特性自航装置を用いた波浪中自走試験 第2報 斜波, 横波中, 日本船舶海洋工学会 H24 秋季講演会, 2012.

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭, 上野道雄 : 補助推力装置を用いた Ship-Point における波浪中自由航走試験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2013

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭, 上野道雄 : 主機特性模擬自航装置と補助推力装置を用いた波浪中船速低下計測試験法の開発, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2013

Tanizawa K., Kitagawa Y., Tsukada Y.: Coupling Self-Propulsion Tests with a Marine Diesel Engine Simulator and Auxiliary Thruster System, Proc. COMPIT ' 14, 2014, pp150-157

Kitagawa Y., Tanizawa K. Tsukada Y. : Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test With a Marine Diesel Engine Simulator, the 3rd report - Auxiliary Thruster System, Proc. 24th ISOPE Conf., 2014, Vol.1, pp691-696

Bondarenko O., Fukuda T. : Consideration of Propulsion Engine Operation in Combination with Ship Hull air Lubrication, Far East Federal University: School of Engineering Bulletin, 2015, pp22-31

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭 : 主機特性模擬自航装置と補助推力装置を用いた波浪中船速低下計測試験法の開発 第2報 - 規則波中船速低下の計測, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2014

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭: 主機特性模擬自航装置と補助推力装置を用いた波浪中船速低下計測試験法の開発 第3報 - 多方向不規則波中船速低下の計測, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2014

北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭, 上野道雄 : 主機特性模擬自航装置と補助推力装置を用いた波浪中船速低下計測試験法の開発, 日本船舶海洋工学会推進・運動合同研究会, 2014.

Kitagawa Y., Tanizawa K. Tsukada Y. : Development of an Experimental

Methodology for Self-Propulsion Test With a Marine Diesel Engine Simulator, the 4th report - Direct Measurement of Actual Ship Speed in Waves by Model Test, Proc. 25th ISOPE Conf., 2014. Vol.3, pp38-45

北川泰士：波浪中船速低下およびプロペラ力の数値予測に関する基礎的検討，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第21号，pp.337-342，2015．

北川泰士，原口富博，塚田吉昭，谷澤克治：波浪中プロペラトルクおよび回転数変動の計算方法に関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第22号，2016．

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：模型試験用自航装置および模型試験用自航システム

発明者：谷澤克治，上野道雄，平田宏一，福田哲吾，春海一佳

権利者：海上技術安全研究所

種類：特許

番号：特願 2011-124552

出願年月日：2011/6/2

国内外の別： 国内

取得状況(計 1 件)

名称：模型試験用自航装置および模型試験用自航システム

発明者：谷澤克治，上野道雄，平田宏一，福田哲吾，春海一佳

権利者：海上技術安全研究所

種類：特許

番号：特許第 5688740

取得年月日：2015/2/6

国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等 特になし．

6．研究組織

(1)研究代表者

谷澤 克治 (TANIZAWA Katsuji) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：70373420

(2)研究分担者

北川 泰士 (KITAGAWA Yasushi) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：50579852

上野 道雄 (UENO Michio) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：60358405

塚田 吉昭 (TSUKADA Yoshiaki) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：90425752

ボンダレンコ オレクシー (BONDARENKO Olexsiy) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：10647043

福田 哲吾 (FUKUDA Tetsugo) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：40505111

平田 宏一 (HIRATA Koichi) 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局・研究員

研究者番号：90425752