

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420822

研究課題名(和文) 省エネルギー型船舶運航支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of an energy-saving support system for ship operation

研究代表者

井関 俊夫 (Iseki, Toshio)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：70212959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、省エネルギー型船舶運航支援システムの開発を目的として、離散ウェーブレット変換を用いた主機関出力推定法と小型模型船を用いた燃料消費量データベース構築法を提案した。本システムでは、船体動揺から推定した波浪状況とデータベースから燃料消費量を推定するので、主機関に特別なハードウェアを装備する必要が無い点が特徴である。離散ウェーブレット変換を用いた解析法では、船体動揺から燃料消費量を直接推定できることを示した。また、開発したトルク計測システムを用いれば、精度向上の課題が残ってはいないものの、燃料消費量データベースが構築可能であることを示したので、本研究の目的は達成できたものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is development of an energy-saving support system for ship operation. This study consists of two kinds of research work. One is the main engine power estimation based on discrete wavelet transform. The other is development of a model experiment procedure to construct the fuel-consumption data base. The system doesn't require any additional hardware to the main engine, but can estimate the fuel-consumption based on the wave spectra estimated from ship motions and the data base constructed by the model experiment. It has been shown that the main engine power can be estimated by the multi-resolution analysis of the discrete wavelet transform. Moreover, it has also been clarified that the fuel-consumption database can be constructed using torque measurement system developed in this study. Overall, it can be recognized that the objectives of this study have been achieved, although accuracy improvement remained as a future task.

研究分野：誘導制御

キーワード：省エネルギー 燃料消費量 地球温暖化ガス排出削減 ベイズ波浪推定 離散ウェーブレット変換 多重解像度解析 トルク計測システム

1. 研究開始当初の背景

我が国の最終エネルギー消費の約2割を運輸部門が占め、国内物流の約4割、産業基礎物質の約6～8割を海上輸送が担っていることを考えれば、海上輸送における省エネルギー化が運輸部門におけるエネルギー・コスト低減の有効な手段の一つと考えられる。一方、温室効果ガスの排出量を削減するために、国際海事機関(IMO)では、2011年7月の海洋環境保護委員会において、エネルギー効率設計指標(EEDI)および船舶エネルギー効率管理計画書(SEEMP)の導入を強制化した。しかしながら、船舶の推進効率、燃料消費量と海象条件の関係についての理論的研究は行われてはいるものの、十分な推定精度に達しているとは言えない。また、一般商船の運航に導入されているウェザルーティング(気象予報に基づいた最適航路選定サービス)における船速および主機関出力は、理論計算および統計解析を用いて算出されたパフォーマンス・カーブにより推定されており、個別の船の性能を十分に表現しているとは言えない。

ここで、東京海洋大学附属練習船汐路丸を用いて計測された平均船速と主機関出力の関係を図1に示す。図は一定の海象条件下で、6種類の針路においてそれぞれ10分間直進した場合の船速と主機関出力を計測したものである。一般的な船舶では、正面向かい波状態において最も船速が低下し、主機関の負荷が最大となる。商船で多く搭載されているディーゼルエンジンでは、負荷が高くなると回転数を一定に保つために出力が最大となり、燃料消費量が増大する。改めて図1を見ると、本実験条件において最大の主機関出力と船速低下がみられる230度が正面向かい波状態であることが容易に理解できる。仮に、図1の主機関出力の振幅(以下、振幅データベースと呼ぶ)が既知であり、現在の波向きが何らかの方法で分かっていたら、任意の針路の燃料消費量の推定が可能となり、省エネルギーを念頭においた操船判断を下すことが可能となる。

一方、研究代表者はこれまで船舶安全運航支援システム開発の一環として、船体動揺から波浪海面の方向波スペクトルを推定する研究を行ってきた。この研究では、航行中の船舶を波浪計とみなして海面の方向波スペクトルを推定し、波浪荷重や船体動揺が最も少ない針路と船速を船舶運航者へ提示するシステムの開発を行った。船体動揺から方向波スペクトルを推定する方法はベイズ型モデルを用いた確率統計理論に基づいており、波浪観測用ブイデータの方向波スペクトル解析法を、前進速度を有する船体動揺データに拡張応用したものである(以下、ベイズ波浪推定と呼ぶ)。図2は船体動揺データを用いて方向波スペクトルを推定した結果である。画面左側が方向波スペクトルの等高線図であり、70度方向から周波数0.12Hzの波が

来ていることを示している。ベイズ波浪推定で得た波浪情報と図1の結果によって燃料消費量を推定したものを図3に示す。図1の主機関出力(赤い線)と良く一致していることが分かる。このように、波高と船速をパラメータとして振幅データベースを構築することができれば、ベイズ波浪推定によって船舶の省エネルギー運航を実現できる可能性があるといえる。このシステムの最大の利点は、主機関に特殊なハードウェアを装備する必要がないため、一般船舶においても省エネルギー運航を容易に導入することができる点にある。しかしながら、個別の船について振幅データベースを実船実験で構築することは時間とコストの問題から不可能であり、何らかの方法を考える必要がある。

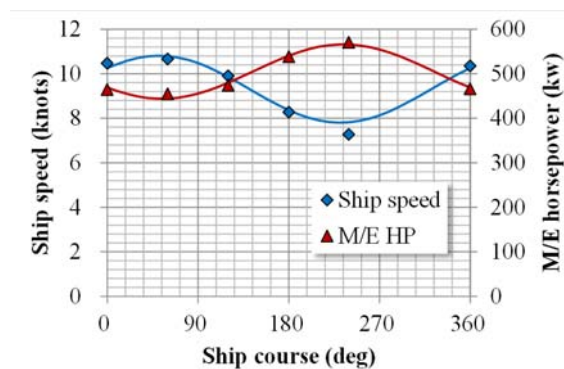


図1 船速と主機関出力の針路に対する変化の計測結果

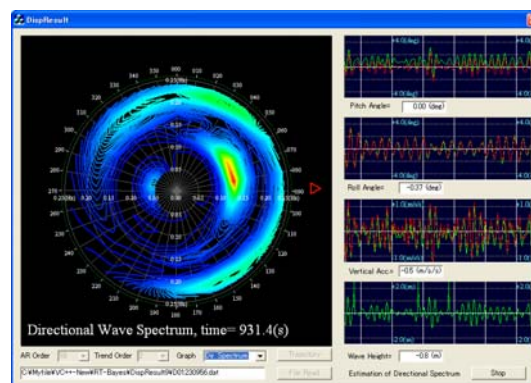


図2 ベイズ法による方向波スペクトルの推定結果

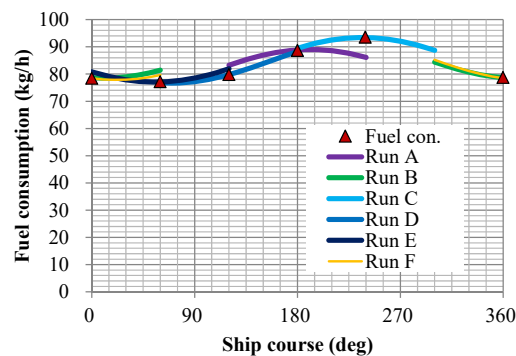


図3 燃料消費量の推定結果

## 2. 研究の目的

本研究課題では、省エネルギー型船舶運航支援システムの実現を目的として、その開発に必要なと思われる基礎的研究を行った。本システムが操船者に提供する情報は、変針・増減速の操船判断を行う際に、燃料消費量がどのように変化するかを予測するものであり、船体動揺から推定された波浪状況と振幅データベースに基づいて推定された主機関出力変化とする。このシステムを実現するに当たり、本研究課題では(1)船体動揺から波浪状況を推定する効率的な計算法の確立、(2)振幅データベース構築のための模型実験法開発、(3)実船実験データによる燃料消費量推定の有効性の検証、を具体的な目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

前節で述べた3つの具体的目的に対応して、研究も3つに分けて行うこととした。(1)船体動揺から波浪状況を推定する効率的な計算法の確立に対しては、通常のフーリエ変換と比較して、コンピュータでの計算に向いていると考えられる離散型ウェーブレット変換の導入について研究を行うこととした。また、ベイズ波浪推定については、研究協力者のUlrik Dam Nielsen 准教授(デンマーク工科大学)とも情報交換・共同研究を行うとともに、その結果を共著論文として発表することとした。(2)振幅データベース構築のための模型実験法開発では、水槽実験において種々の波浪との出会い角を再現しやすい小型模型船を対象として、垂直循環型回流水槽における拘束模型試験法とフラップ式造波装置を備えた角水槽における自由航走試験用の計測システムの開発を行った。(3)実船実験データによる燃料消費量推定の有効性の検証については、東京海洋大学附属練習船汐路丸の実験データを用いるとともに、デンマーク工科大学のニールセン准教授が計測している、9,400TEU型コンテナ船による実船実験結果を用いることとした。

## 4. 研究成果

以下に、本研究課題において行った研究内容を、3つの研究目的ごとに、年度別に記述する。

(1)船体動揺から波浪状況を推定する簡易計算法の確立：

平成26年度では、船体応答統計値のAleatory uncertainty (偶然的な不確実性)に基づくShort-term variability (短期変動)に関する研究を行い、船体動揺クロススペクトルの位相成分に不規則な短期変動が存在することを明らかにし、これがベイズ波浪推定に影響している可能性があることを示した。この結果を日本航海学会で発表し、論文として投稿した。さらに、非定常の船体動揺時系列データを解析するために、船体動揺デ

ータの解析に離散型ウェーブレット変換を導入し、通常のフーリエ変換とは異なった知見が得られることを示した。図4には、定常時系列をスライドさせて連続解析する本報告の方法によるクロススペクトル解析結果を示している。本研究では、クロススペクトルの相対位相角(複素スペクトルの偏角)が激しく変化することを発見し、ベイズ波浪推定においてAleatory uncertaintyに基づくShort-term variabilityであると指摘した。この研究成果は日本航海学会論文集第132巻に掲載された。

平成27年度では、非定常時系列データ解析のために、離散型ウェーブレット変換を導入し、通常のフーリエ変換とは異なった知見が得られることをSTAB2015で発表した。さらに、離散型ウェーブレット変換に基づく多重解像度解析を船舶主機関の非定常な応答に適用し、燃料消費量削減のための操船支援情報として利用できることをANC2015で発表した。

平成28年度では、離散ウェーブレット変換の多重解像度解析法を非定常に変動する船舶主機関出力時系列に適用し、その原因となる船体動揺を推定することを試みた。図5の青い破線は、主機関出力時系列データの多重解像度解析結果を示しており、多重解像度解析法による縦揺れ(赤線)と船体動揺の長周期成分の組み合わせ(緑線)によって、主機関負荷変動を近似することが可能であることが分かる。また、主要な高周波成分に対して、多次元自己回帰モデルのパワー寄与率解析手法を適用した結果、波との出会い角変化によって主機関出力変化に影響を及ぼす船体動揺が変化することが明らかとなった。これらの結果を論文にまとめ、国際会議PRADS2016において発表した。

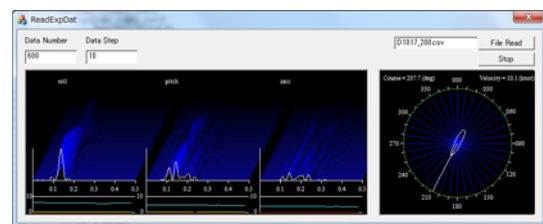


図4 定常時系列をスライドさせた場合の連続クロススペクトル解析結果

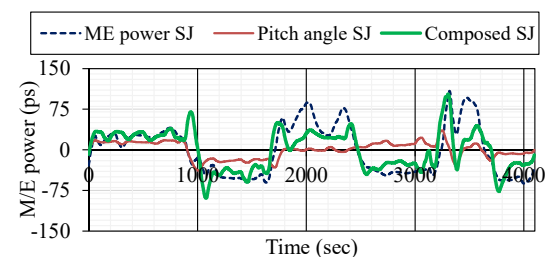


図5 多重解像度解析法に基づく主機関出力の推定結果



(2)燃料消費量データベース構築のための模型実験法の開発：

平成 26 年度では、小型模型船に搭載したモータの消費エネルギーから、実船の燃料消費量を推定する実験方法の開発を行った。モータ出力の計測精度を向上させるために、模型船搭載用抵抗動力計とトルク・メータを購入し、回流水槽における拘束模型試験を実施した。これによって、推力減少率や有効伴流率を高精度で計測できた。図 6 は、波浪中の速力変化をプロペラ負荷変動で模擬できると仮定し、モータの電力消費量変化から実船の出力変化を推定することを試みた結果を示しており、図 1 の実船実験結果に対応するものである。この実験では、プロペラ回転数一定の条件下、平均流速 0.756m/s、消費電力の平均値は 3.02W、変動の片振幅は 0.35W（平均消費電力の 13%）であり、実船実験結果（平均出力の 12%）と良い一致を示していることが分かり、本実験の有効性を確認することができた。問題点としては、スクリュー・プロペラが船体を貫通する部分の水密とその回転抵抗を挙げられる。

平成 27 年度では、小型模型船に搭載するためのトルク計測システムを開発した（図 7）。この方式は従来のシャフトの振れ量からトルクを計算するものとは異なり、シャフトの「すべり量」からトルクを推定する全く新しい原理に基づいている。本研究では、ディファレンシャル・ギアと発電ブレーキの組合せによって、十分な精度でトルクを計測できる事を確認した。本発明については、大学知財本部と協議した結果、事業性の見通しがないので発明申請は行わず、その内容を学会で発表することとした。

平成 28 年度においては、開発したトルク計測システムを用いて、模型船内で完結したエネルギー消費量計測システムと自航システムを完成させることができた。図 9 は計測された船速とプロペラトルクを示している。この図から、模型船速が上がるとトルクが減少していくことが分かる。これは船速が上がるにつれてプロペラ流入速度が増大し、プロペラ負荷が低下するためである。また、回頭運動によって船速が低下するとともにプロペラ負荷が増大し、その結果としてプロペラトルクが上昇していく様子が良く分かり、本研究で開発したトルク計測装置は有効であると言える。この結果を論文にまとめ、日本航海学会第 134 回講演会で発表した。

(3) 実船実験データによる燃料消費量推定の有効性の検証

平成 26~27 年度は、汐路丸共同利用プロジェクトと連携し、汐路丸の計測制御 LAN の構成機器の改修を行った。平成 27 年度においても汐路丸計測制御 LAN システムが調整中であったため、デンマーク工科大学のニールセン准教授との共同研究で行っている 9,400TEU 型コンテナ船による実船実験結果

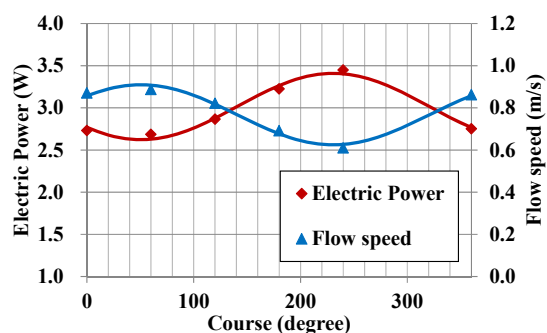


図 6 多重解像度解析法に基づく主機関出力の推定結果

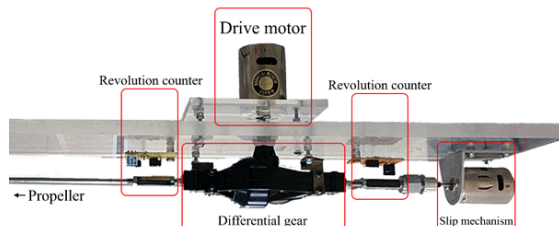


図 7 「すべり量」計測方式による小型模型船搭載用トルク計測システム

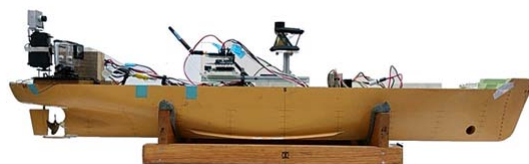


図 8 小型模型船による自由航走試験用エネルギー消費量計測システム

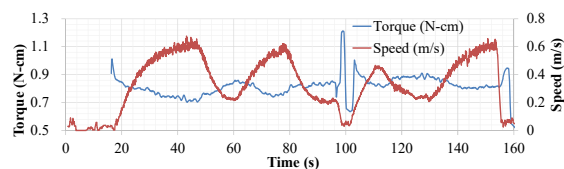


図 9 船速とプロペラトルクの計測結果

を論文にまとめ、第 5 回世界海事技術会議 (WMTC2015)において発表した。

平成 28 年度においては、波浪中船体運動応答関数の不確定モデルについての研究を行った。通常は、理論的に船体応答関数を正確に求めることができるが、船速、吃水、相対波向き等の実運航データの不確定性のために、船体動揺の推定精度は劣化される傾向がある。そこで、不確定モデリングを導入して、大量の実船計測データを用いて、不確定モデリングの有効性を示すことができた。この結果を論文にまとめ、日本航海学会第 134 回講演会で発表した。

以上、本研究課題では、省エネルギー型船舶運航支援システムの実現を目的として、その開発に必要と思われる基礎的研究を行っ

た結果、計測精度のさらなる向上が必要であるものの、当初の目的をほぼ達成することができた。

#### 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 1 1 件)

①Peng Xu and Toshio Iseki, Estimation of main engine power fluctuation based on discrete wavelet transform, Proceedings of PRADS2016, p.1 - 8, 2016 年 9 月 7 日 (査読有)

②濱田 聡、井関 俊夫、波浪中の燃料消費量変化に関する実験的研究-II. - 小型模型船におけるトルク計測について -、第 134 回講演会 日本航海学会講演予稿集、4 巻 1 号, p.150 - 151, 2016 年 5 月 19 日 (査読有)

③Ulrik Dam Nielsen, Kasper Fønss Bach and Toshio Iseki, Improved Wave-vessel Transfer Functions by Uncertainty Modelling, 第 134 回講演会 日本航海学会講演予稿集、4 巻 1 号, p.134 - 137, 2016 年 5 月 19 日 (査読有)

④徐鵬、井関俊夫、波浪中における主機出力変動の多重解像度解析、日本航海学会誌 NAVIGATION、第 195 号, p.101 - 102, 2016 年 1 月 (査読無)

⑤Peng Xu and Toshio Iseki, Multi-Resolution Analysis of Main Engine Power Fluctuation in Waves, Proceedings of Asia Navigation Conference 2015 (ANC2015) C4-1, p.412 - 419, 2015 年 11 月 20 日 (査読有)

⑥ Ulrik Dam Nielsen and Toshio Iseki, Prediction of First-Order Vessel Responses with Applications to Decision Support Systems, Proceedings of 5th World Maritime Technology Conference (WMTC2015), DVD p.1 - 11, 2015 年 11 月 5 日 (査読有)

⑦ Toshio Iseki, Non-stationary Ship Motion Analysis Using Discrete Wavelet Transform, Proceedings of 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB2015), Vol.2, p.673 - 680, 2015 年 6 月 18 日 (査読有)

⑧Toshio Iseki and Ulrik Dam Nielsen, Study on Short-term Variability of Ship Responses in Waves, 日本航海学会論文集、第 132 巻、(51p ~ 57p) ,2015 年 5 月, DOI(10.9749/jin.132.51) (査読有)

⑨平山圭一、馬場満徳、井関俊夫、船上における波浪計測について、日本船舶海洋工学会運動性能研究会シンポジウム 「実海域における実船性能モニタリング」, p.229 - 246,2015 年 2 月 6 日 (査読無)

⑩齋藤瑛、宮島一貴、井関俊夫、波浪中の燃料消費量変化に関する実験的研究- I. - 拘束模型実験による検討 -、日本航海学会論文集、第 131 巻, p.106 - 112, 2014 年 12 月, DOI(10.9749/jin.131.106) (査読有)

⑪Toshio Iseki and Ulrik Dam Nielsen, Study on

Short-term Variability of Ship Responses in Waves, 日本航海学会第 131 回講演会 日本航海学会講演予稿集、2 巻 2 号, p.190 - 193, 2014 年 10 月 31 日 (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

①Peng Xu, Estimation of main engine power fluctuation based on discrete wavelet transform, Proceedings of PRADS2016, p.1 - 8, 2016 年 9 月 7 日発表、コペンハーゲン、デンマーク

②濱田 聡、波浪中の燃料消費量変化に関する実験的研究-II. - 小型模型船におけるトルク計測について -、日本航海学会第 134 回講演会, 2016 年 5 月 19 日発表、神戸市勤労会館、神戸市

③Ulrik Dam Nielsen, Improved Wave-vessel Transfer Functions by Uncertainty Modelling, 日本航海学会第 134 回講演会, 2016 年 5 月 19 日発表、神戸市勤労会館、神戸市

④Peng Xu, Multi-Resolution Analysis of Main Engine Power Fluctuation in Waves, Asia Navigation Conference 2015 (ANC2015), 2015 年 11 月 20 日発表、北九州国際会議場、小倉、北九州市

⑤Ulrik Dam Nielsen, Prediction of First-Order Vessel Responses with Applications to Decision Support Systems, 5th World Maritime Technology Conference (WMTC2015), 2015 年 11 月 5 日発表、ロードアイランド、アメリカ合衆国

⑥ Toshio Iseki, Non-stationary Ship Motion Analysis Using Discrete Wavelet Transform, 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB2015), 2015 年 6 月 18 日発表、グラスゴー、連合王国

⑦平山圭一、船上における波浪計測について、日本船舶海洋工学会運動性能研究会シンポジウム 「実海域における実船性能モニタリング」, 2015 年 2 月 6 日発表、東京海洋大学、東京都

⑧Toshio Iseki, Study on Short-term Variability of Ship Responses in Waves, 日本航海学会第 131 回講演会, 2014 年 10 月 31 日発表、函館市民会館、函館市、北海道

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

井関 俊夫 (ISEKI TOSHIO)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：70212959

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し

(4) 研究協力者

ウルリク・ダム・ニールセン

(Ulrik Dam Nielsen)

デンマーク工科大学・機械工学科・准教授