

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560980

研究課題名(和文) 最適運航計画支援のための船舶運航性能推定手法の検討と評価

研究課題名(英文) Method and Evaluation of a Simplified Propulsion Performance Estimation for Eco-Friendly Navigation Planning Support System

研究代表者

小林 充 (Kobayashi, Mitsuru)

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：10373416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：ウェザールーティングの一つである最適運航計画支援による推奨航路の作成と船速計画の策定のため、現状の推定手法で必要とする船体形状データが欠けた船舶の実海域運航性能推定手法を提案した。波による抵抗増加量の推定、風による風圧抵抗の推定式を、容易に得ることのできる船体要目より推定できるよう計算式を作成し、一般船舶に適用できるように推定プログラムを作成した。船体要目を入力することで容易に風抵抗係数、波抵抗増加係数が算出される。この推定手法を実運航船に適用し検証したところ、推奨航路の燃費削減効果および船速推定精度に従来手法とほとんど差がなく、簡易推定手法は詳細推定の代替になり得ることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed a simplified propulsion performance estimation method for Eco-Friendly Navigation Planning Support System, a type of weather routing systems. The existing method needs hull shape documents, but the documents is generally considered as trade secrets. The proposed method is applicable for ships whose general characteristics (at least Length, Breadth, depth) are known. We proposed the method and a program which contains calculating formulas to estimate wind, wave resistance coefficients easily with several values of ship's general characteristics. We evaluate the method by using a merchant ship. We found quite little difference of fuel consumption reduction effects and vessel speed estimation accuracy between the proposed and the existing method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：航海支援システム ウェザールーティング 実海域運航性能推定

1. 研究開始当初の背景

筆者らはこれまで、NEDO 省エネルギー研究開発「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」(平成 18~20 年度、21 年度~22 年度)において内航船のウェザールーティングといえる最適運航計画支援システムの研究開発を行ってきており、実証システムを作り上げた。これは、風・波・海流の予測情報を利用して個船の運航性能データをもとに最も省エネになる推奨航路と到着時刻を守る機関出力を求めて船舶に送信し、操船を行う一連のシステムである。平成 22 年度において本システムの実証試験を行っている。

個船の運航性能データの作成については、現状の手法として次のように分析し求めている。

波に対する抵抗については船舶の水面下部の形状(ラインズ)から流体力学的手法によって波スペクトルに対する動揺応答係数、波浪中抵抗増加係数を求めている。

風に対する抵抗については船舶の一般配置図から船体の水面上部の投影面積を求め、回帰分析的な手法により船体風圧前後力および船体風圧回転モーメントを求めている。

理論値と実際との誤差を調整するために、軸馬力計を船舶に設置し、その他航行計器類の出力信号をモニタリング装置で記録し、風速や対水船速等と主機出力との関係を回帰分析的な手法でフィッティングすることで、風波、船速と主機出力との関係を総合的に求めている。

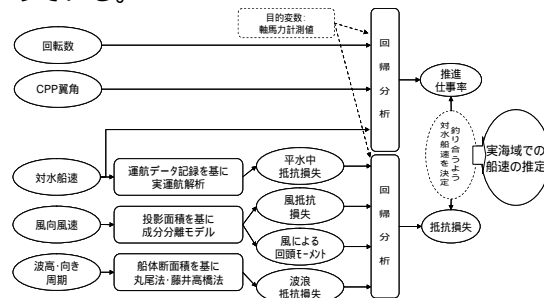


図 1 現状の船舶運航性能推定手順

ところが、船舶の水面下部の形状(ラインズ)は造船所の秘密情報に属するものであり、その取得は一般的に難しく、また守秘義務を課されるなど慎重な取り扱いを要するものである。一方で、一般貨物船は船種と船型(大きさ)が決まると形状に大きな相違はないといわれ、影響の定量的な分析は必要ではあるが、比較的取り扱いが容易な船体設計図である一般配置図をもとに通常の船体形状を再検討することで適用できる可能性がある。

また船舶による運航上の事情からも、貨物船のように到着時刻の正確性よりも燃料消費量の低減に主眼を置いているもの、逆にフ

ェリー・RORO のように到着時刻の正確性を重視するものなどそれぞれ異なっている。

このような観点から、必ずしも現状の手法をすべての船舶に適用することは不適切かつ不可能であり、船舶の事情に応じた運航性能推定手法を開発し、それらの燃料消費削減効果、到着時刻の正確性に対する効果を推奨航路策定アルゴリズムを応用したシミュレータで測定し、それぞれの手法の得失を定量化して提案することが必要である。

2. 研究の目的

船舶の運航性能推定を行うために必要な情報の欠落した船舶を想定し、このような船舶でも高品質なウェザールーティングを適用できるようにするため、必要とする情報を簡略化した代替手法を提案する。

本件では、性能推定のために従来必要であった入手困難なデータや計測項目等を一部代替する新たな推定手法を考案することとなる。最適運航計画支援システムは内航船の燃料消費量を削減する効果がある(航路計画で 4~5%、到着時刻が正確になることにより沖待ち時間を削減できる効果を含めるとおよそ 20%)が、現行の手法ではデータや計測項目が揃っていないことを要求し、導入への大きな障壁になることが容易に予想されるため、本案件の研究成果を適用することで普及が促進され内航船全体としての環境負荷軽減が大きく進むことが期待できる。

3. 研究の方法

まず、実際の船舶について、運航計画支援システムへの適用を想定して適用環境を調査し、ニーズを把握する。またそれに応じた船舶性能推定手法を調査し考案する。次に、これを実船に適用して運航性能推定データを作成し、現状の手法による運航性能推定データと比較する。

次に、航海シミュレータを作成する。これは、既の実証試験を開始している最適運航計画支援システムに使用されている最適航路作成アルゴリズムを応用し、運航性能推定データと年間の実気象データを使用して航路を作成する機能、作成された航路に基いた航海をシミュレートして運航燃料消費量および到着時刻を算定する機能を持つものである。

航海シミュレータを用いて、従来の手法で作成された最適航路、提案手法で作成された最適航路、通常船舶が運航している固定的な常用航路のそれぞれを定時刻に到着する運航シミュレーションを行い、ウェザールーティング性能の観点から効果を比較して効果の検証を行う。

4. 研究成果

まず、運航計画支援システムへの適用を行う際に必要な前提条件、すなわち航海機器類、船体に関する図書の入手について調査したところ、造船所の所有する船体形状データの入手に支障があることが分かった。既存の手法では受風面積、没水部形状、慣動半径等の船体形状データを必要とするが、特にハル形状を示すデータについては一般的に造船所の秘密事項として認識されており、船舶を船主に引き渡してもハル形状の設計図は引き渡されることがない。これは、造船所では非常に費用の掛かる水槽試験等を通じて抵抗の少ない船型を開発しており、船主に設計図を引き渡してしまうと船主は他の造船所に設計図を持ち込み同型船を安価に建造してしまう懸念があるからだとされている。ところがハル形状データは詳細な運航性能推定を行うにあたり、波浪スペクトルに対する動揺や抵抗の応答を計算するために必要であり、船型データの入手の困難さはそのままウェザールーティングサービスの適用不能、もしくは品質の低下につながることになる。そのため、本件では船型データの欠落した船舶へのウェザールーティングの適用のための性能推定手法の開発、およびウェザールーティングを適用した際の品質の検証に焦点を当てた。

現状の波抵抗係数の推定は船体断面積をもとにした丸尾・藤井高橋法と呼ばれる手法をもとにしている。船体断面積を入手できない場合、以下のような手法で波抵抗係数を算出することを考える。

波の抵抗係数は、抵抗増加は波浪抵抗係数と波エネルギースペクトルの積を波スペクトル全体にわたって積分することで得られる。波浪抵抗係数は船体運動による抵抗増加、および波の反射による抵抗増加の係数の和としてあらわされる。

まず船体運動による抵抗増加係数について、次のように推定モデルを作成した。宮本(1972)によれば、正面規則波の無次元抵抗増加係数 K_{AWm} は船体形状影響係数 C_0 、船速影響係数 $f(F_n)$ 、 K_{AWm} の最大値を与える波周波数 ω_m を用いて

$$K_{AWm}(\omega) = C_0 f(F_n) \left\{ \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 e^{1 - (\omega_m/\omega)^4} \right\}^4$$

と表される。船体形状影響係数として

$$C_0 = \left(T_P \sqrt{g/L_{PP}} \right)^3 C_b^2 \{ \nabla / (0.1 L_W) \}^{-1/2}$$

正面規則波中の縦揺れ同期周波数として

$$\omega_{mc} \sqrt{L_{PP}/g} = \frac{1}{2F_n} \left\{ \sqrt{1 + \frac{8\pi F_n}{T_P \sqrt{g/L_{PP}}}} - 1 \right\}$$

を用いた。また、船体縦揺れ運動固有周期 T_P は田才の近似式

$$T_P = 29.5 \sqrt{\frac{\{1 + 0.83(B/2d)C_p^2\}C_b d}{(5.55C_w + 1)^3}}$$

を採用した。船速影響係数としては数多くの水槽実験結果から

$$f(F_n) = 2.10 - 26.8(F_n - 0.287)^2$$

で近似しており、本件でもこれを採用することとした。なお、波向き θ に対する斜波中抵抗増加係数 $K_{AWm}(\theta)$ は正面波係数に $\cos\theta$ をかけたものとし、また波浪周波数 ω の代わりに出会い周期を考慮し

$$\omega_* = \omega \frac{(\Omega \cos \alpha + 1)}{(\Omega + 1)}$$

$$\Omega = \frac{\omega U}{g}$$

を用いて調整することとした。

波の反射による無次元抵抗増加係数 K_{AWr} は辻本ら(2008)によると、プラントネス係数、有限喫水影響項 α_1 、前進速度影響項 $(1 + \alpha_2)$ の積

$$K_{AWr} = \frac{L_{PP}}{8B} B_f(\theta) \alpha_1 (1 + \alpha_2)$$

で表される。

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 I_1^2(k_e d)}{\pi^2 I_1^2(k_e d) + K_1^2(k_e d)}$$

ただし $k_e = k(1 + \Omega \cos \theta)^2$ 、 I_1 と K_1 はそれぞれ第1種変形ベッセル関数、第2種変形ベッセル関数、 k は波数($2\pi/\lambda$)である。また、

$$(1 + \alpha_2) = 1 + C_u F_n$$

$$C_u(\alpha) = \text{Max}[F_c, 10] \quad (\text{for } B_f > 0)$$

$$F_c = -310B_f(\theta) + 68$$

として近似されており、本件でもこれを使用した。

これらの手法において必要となる船体形状に関する係数(L_W 、 C_b 、 C_p 、 C_w 、 ∇ 等)は、船舶明細書 2013年版の記載船舶から作成した。記載全船舶 7513隻から、まず一部船種(コード番号 1201以上の曳船、押船、起重機船、漁船、プレジャー船等)を除くと 4105隻になる。さらに航行区域を沿海、限定沿海、近海、限定近海に限定し、客船でも双胴船、水中翼船、航海速力のフルード数が 0.4以上のものなど通常の排水型船型と異なるものを除いた 2780隻をフェリー・コンテナ船等の高速船とタンカー・バラ積み船等の低速船(低速船は満載、空船別)に分け、回帰式を作成した。例えば船舶の肥大度を表す方形係数 C_b については、船速の速い船は流線型のように抵抗の小ささを重視し体積を犠牲にした船型となっており、遅い船はペイロードを重視した直方体に近い形状をしていることから、設計船速から算出したフルード数と図2に示す

ような一定の相関関係がある。

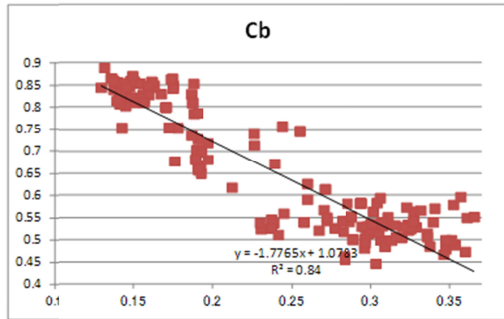


図2 方形係数（縦軸）とフルード数の相関

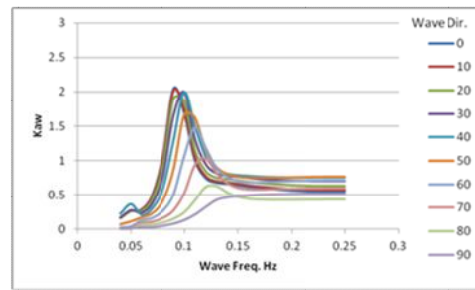
風圧力抵抗係数は既存の手法として船体受風面積から回帰により抵抗を推定する藤原(2005)による推定式を用いており、本推定でもこれを踏襲した。ただし、船体受風面積については既存船舶の一般配置図による測定結果から推定式を作成し主要目から推定できるようにした。

これらの推定式を Excel 上で動作するプログラムとして作成し、最低でも船幅 B、航海時喫水 dmid、船長 Loa または Lpp を入力することで風波抵抗係数を推定できるようにした。ただし、造船時図書によって判明している値については入力することで利用できるようにした。

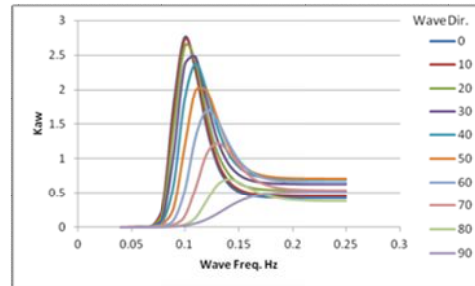
検証には、宇部興産海運のセメント運搬船「興山丸」を使用した。本船に関しては、満船状態については従来手法に基づく詳細推定と本提案に基づく簡易推定によりそれぞれ風波抵抗係数を算出し、2010 年 9 月からの 1 年間の航海モニタリングデータで実際の軸馬力に合うようフィッティングし係数を調整した。空船状態についてはそれらにあわせ、詳細推定と海上公試のパワーカーブをもとにしているが航海モニタリングによるフィッティング修正のないもの（係数調整なし）を用意した。

例えば、空船時の波浪抵抗増加係数の比較を図3に示す。一部異なっている部分もあるが、おおむね類似した形状になっている。

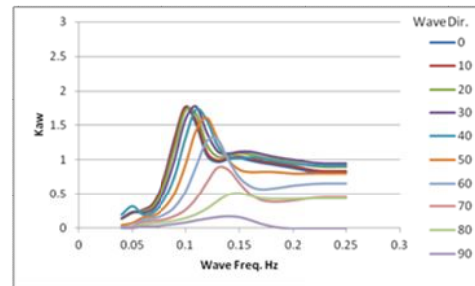
それぞれの推定結果をウェザールーティングに適用したことを想定し、2012 年 1 年間の気象推定をもとに最適航路を作成して航海シミュレーションを行い、常用航路（当該船舶が通常航行時に使用している固定的な航路）を一定航行時間で航海した場合の燃料消費量推計と比較し削減効果を算出したところ、表1の燃料消費削減効果が得られ、簡易推定も詳細推定にほぼ遜色のない効果があり、係数調整のない推定では削減効果が他の2つに対し若干劣ることが分かった。



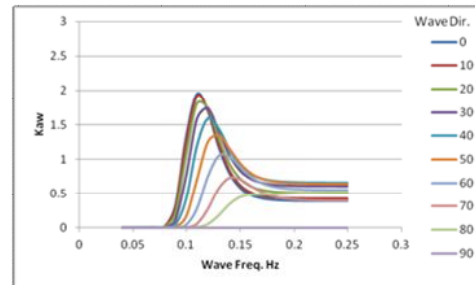
詳細推定、満船



簡易推定、満船



詳細推定、空船



簡易推定、空船

図3 波浪抵抗増加係数推定の比較

表1 燃料消費削減率の比較

| | 常用航路に対する燃料消費削減率(%) | |
|-------------|--------------------|---------|
| | Full | Ballast |
| 詳細推定 | 6.89 | 5.89 |
| 簡易推定 | 6.86 | 5.86 |
| 詳細推定、係数調整なし | - | 5.79 |

次に、2012 年 1 年間の航海モニタリングデータの推進軸馬力をもとに、各推定による船速推定を行い、実際の対水船速との誤差を求めた。結果を表2に示す。数字上、詳細推定より簡易推定がわずかに精度がよい結果となったが、誤差の範囲内と考えられる。係数調整のないものは推定精度が若干劣って

いる。簡易推定を使用しても精度に影響がないことから、最適運航計画支援システムの機能の一つである航海の定時性の確保の点においても簡易推定手法は詳細推定の代替になり得ること、またモニタリングデータによる係数調整は有効であることを示唆している。

表 2 船速推定精度の比較

| | 船速推定誤差 (%RMSE) | |
|--------------|----------------|---------|
| | Full | Ballast |
| 詳細推定 | 5.0 | 3.4 |
| 簡易推定 | 4.9 | 3.3 |
| 詳細推定, 係数調整なし | - | 3.7 |

以上、環境調和型運航計画支援システムでの利用を前提に、船型情報の入手が困難な船舶を想定し、詳細な船型情報を必要とするストリップ法に基づく詳細な推定手法の代替として、必要な情報を制限した簡易推定手法を提案した。

本システムでの利用の観点から、最適航路演算での燃料消費削減効果、ならびに船速推定精度の点から検証したところ、詳細推定のものとはほぼ等しく、簡易推定手法が詳細推定手法を代替し得るものであることを示すことができた。

本手法を幅広く船舶に適用することにより、高精度な運航性能推定と気象海象予測に基づくウェザールーティングシステムがより普及し、環境負荷の低い海上輸送を促進することを願うものである。

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)

〔学会発表〕(計 1 件)

[1] 小林充、北村文俊、運航計画支援のための簡易的運航性能推定手法の検討と評価、日本船舶海洋工学会春季講演会(論文集 p.425-428)、2014年5月

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称：海流推定方法及び海流推定システム

発明者：小林充、瀬田剛広、加納敏幸

権利者：海上技術安全研究所

種類：特許出願

番号：特願 2013-184801

出願年月日：平成 25 年 9 月 6 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 充 (KOBAYASHI MITSURU)

独立行政法人海上技術安全研究所 運

航・物流系 主任研究員

研究者番号：10373416