ウェザールーティングシステムの構築に関する研究-I. -アブログによる推進性能の推定-

庄司 るり*・足達 宏之**・大津 皓平*

A Study on Development of Weather Routing System-I. -Estimation Method for Ship Performance at Seas using Abstract Logbook-

Ruri SHOJI, Hiroyuki Adachi and Kohei OHTSU

Abstract

A ship's abstract logbook contains a lot of useful information on the outline of navigation. Previous studies on the abstract logbook have focused on the long term performances of the objective ship.

In this paper, simple methods for estimating and evaluating ship's propulsive performance at seas are proposed by analyzing the abstract logbook data for comparatively short term. The target ship is a container ship of 6,200TEU with the abstract logbook records for 6 voyages in winter 2007. The engine power at calm sea is estimated from the logbook data analyzing the ship resistance, the resistance increase and the sea margin.

It is also demonstrated that the proposed method is useful to evaluate the actual ship performance. And, this method is capable of providing a way to determine an operation guideline; by connecting the change of engine power and propeller revolution with ship's speed and sea margin as well as introducing the effective engine performance chart.

Keywords : *Weather routing, Propulsive performance, Wind/Wave information, Abstract logbook Sea margin,*

キーワード: 最適航路選定, 推進性能, 気象・海象情報, アブストラクト・ログブック, シーマージン

1. はじめに

ウェザールーティング（最適航路選定）が、船舶の安全かつ効率的な運航の実現に効果的であることはこれまでの研究により示されている^{(1),(2)}が、近年の深刻なエネルギー問題および環境負荷低減等への対応策としても、効率的な運航への応用においてさらに期待が大きくなっている。

ウェザールーティングには、気象・海象の正確な予測、船舶の航海性能の把握およびある評価基準に基づく最適化の3つの技術要素が必要となる。ここで、「航海性能」とは、ウェザールーティングを行うために必要な船舶の「実海域」での推進性能および耐航性能とする。

このような航海性能は、船体線図、設計時の試験結果、海上公試結果、入渠状況等の船舶の詳細な情報が入手できれば、線型推定法や非線形推定法等により精度の高い推定が可能となってきた⁽³⁾。また、これらの情報を利用して航海中のログブックのデータを解析し、航海性能を推定する方法⁽⁴⁾も行われている。しかし、ウェザールーティングを実施する現場においては、上に述べたような情報を入手することは困難であり、過去にウェザールーティングを行った際の実績を元に推定しているのが現状である。

主に運航管理会社に報告するために使用され、航海の実態を大まかに把握できるアブストラクト・ログブック（撮要航海日誌、Abstract Logbook、以下、

* 正会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) rshoji@kaiyodai.ac.jp

** 非会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

アブログと記す)は、短期間のデータであれば、ウェザールーティングを行う現場でも比較的入手しやすい情報である。そこで、このアブログのデータを使用し、対象船舶の推進性能を推定することを試みた。これまでのアブログを用いた研究では、長期間にわたる膨大な量のデータを統計的に利用することが多かった^{(5),(6),(7)}。本論文では、入手しやすい短期間のアブログデータの限られた情報により、ウェザールーティングを行うために必要な航海ごとの推進性能を比較的簡単に推定する方法を開発した。

2. アブログデータについて

2.1 アブログデータの解析手順

解析手順は、まず平水中出力を推定し、主機出力とプロペラ回転数および船速とシーマージンの関係を求め、さらに主機出力とプロペラ回転数の状態および船速とシーマージンの状態の2つの状態空間を相互に対応させて、航海中の推進性能を推定することとした。

また、気象・海象情報から波浪中抵抗増加を推定し、提案する解析法により船速の推定を行った。

2.2 アブログデータについて

対象としたアブログデータは、6,200TEU型コンテナ船(全長283.8m)の2007年12月~2008年3月、東アジア-北米間3往復、6航海のデータである。アブログには6航海で64日分のデータが記載されているが、時間調整のためなど通常の航海と異なる航海

が人為的に行われていることが明らかな場合を除き、58日分を解析の対象データとする。

アブログのデータ項目を、以下に示す。

(1) 出発時および到着時

出発地および到着地、時刻、喫水(船首、中央、船尾)、排水量、燃料搭載量

(2) 航海中

日付、航海時間、正午位置、航行距離、平均速力、プロペラ回転数、見かけのスリップ、風向、ビューフォート階級、うねり高さ、主機関・補助機関・ボイラー等燃料消費量(正午位置間)、24時間当たりの燃料消費量、主機出力、残航程、到着予定時刻、シーマージン

6 航海の航海中のデータについて、上記の項目の時系列の一部を Fig.1 に示す。Fig.1 は、いずれも横軸に航海日(6航海分で58日)を表している。縦軸は、左列上からビューフォート階級、風向(縦軸の数字は、正面から右回りに8方向を表しており、グラフ左下に数字の方向を示す)、うねり高さ(m)、中列上から船速(knots)、シーマージン(%), スリップ(%), 右列上からプロペラ回転数(rpm)、エンジン出力(kW)、燃料消費量(mt)である。

アブログデータのうち、航海時間、緯度、経度、航行距離、船速、燃料消費量は計測されたデータおよび計測データからの計算値である。それ以外は、計測されたデータの平均値あるいは代表的な値が記載されている。船速は、対地船速(Speed over the ground)と対水船速(Speed through the water)が記

Fig.1 Abstract logbook data

載されているが、本論文では対水船速を使用する。

3. 平水中出力の推定

3.1 シーマージンの定義

本論文では、シーマージンを「ある船速で実海域を航行するときの航海出力と同一船速での平水中出力の割合」として、

$$Sm(\%) = \frac{P(V) - P_0(V)}{P_0(V)} \times 100 \quad (1)$$

で定義する。

Sm : 実海域を航海中の場合のシーマージン(%)

V : 船速(knots)

$P_0(V)$: 船速 V の場合の平水中出力(kW)

$P(V)$: 船速 V の場合の航海出力(kW)

3.2 平水中出力の推定

平水中出力は、(1)式により、アブログの主機出力とシーマージンから推定できる。しかし各航海で喫水が異なっているため、6 航海のデータを統一的に扱うために各航海の喫水の違いを考慮した。各航海の浸水面積を求め⁽⁸⁾、最初の航海を基準とした浸水面積差の相対比率により、喫水の違いによる主機出力の修正（以後、喫水修正と記す）を行った。

Fig. 2 に、横軸を船速とし、アブログ記載の主機出力に対し喫水修正を行った主機出力 P_D を+で示す。また、 P_D を使用して(1)式に従い求めた平水中出力 P_{D0} を○で示す。平水中の出力は、図中の実線のように、ほぼ船速の 3 乗に比例する P_{D0} の平均線で示されるが、アブログデータではこの平均線から離れているデータが散見される。

Fig.2 Engine power P_D , engine power at calm sea P_{D0} and the fitted curve of P_{D0}

3.3 低速域における平水中出力の推定

船速が比較的高速域(22knts 以上)の場合は、Fig.2

に示した P_{D0} の平均線を平水中の主機出力として用いることとした。しかし、22~16knts においてはデータ数が少ないこともあり、この平均線の延長をそのまま使用することは出来ないと考えられる。

そこで低速域では、船体抵抗の主要部分は粘性抵抗であることから、主機出力は船体の粘性抵抗によるものとしてよいと考え、低速域での船体抵抗曲線は摩擦抵抗曲線に平行になることを利用して、平水中出力を推定することとした。

「標準喫水」における船体の浸水面積に対応する相当平板の摩擦抵抗 R_f (N) は、摩擦抵抗係数を C_f とすると

$$R_f = C_f \frac{1}{2} \rho v^2 S_{wet} \quad (2)$$

により計算できる。 C_f は、1957 年 ITTC の式を採用した。ここで、 v は船速(m/s)、 ρ は海水密度($kg \cdot s^2/m^4$)、 S_{wet} は船体の浸水面積(m^2)である。

係数 k を導入して、平水中の抵抗 R_v を

$$R_v = R_f + kR_f \quad (3)$$

を使って計算することにする。

また軸出力 P (kW) と船体抵抗 R (kN) の関係は、船速 v (m/s) および推進係数 η を使い、

$$R = \frac{P}{v} \eta \quad (4)$$

として計算されるが、このとき推進係数 η は船速によらず一定と仮定した。

低速域において(3)式で求めた抵抗 R_v から推定される主機出力の曲線が、Fig.2 の 22knts 以上の曲線に滑らかにつながるようにしたものを「標準喫水」における平水中出力 P_0 と仮定することにした。(3)式=(4)式として得られる $P=(1+k)R_v/\eta$ が 22knts 付近で成り立つように、係数 $(1+k)/\eta$ を決定した。

3.4 平水中出力の近似式

前述の解析から、平水中出力を P_0 とし、A、B、C、D を係数とした船速 V の 3 次の多項式として、

$$P_0(V) = AV^3 + BV^2 + CV + D \quad (5)$$

のように近似する。(5)式において、 $V=16knts$ 程度の速度域での平水中出力と Fig.2 で求めた P_{D0} の点を(5)式で近似するために係数 D を使用した。従って、(5)式は 16knts 程度から 25knts 程度までに適用される近似式とする。

Fig.3 に 3.2 で求めた平水中出力 P_{D0} (Fig.2) を○

で、(5)式の近似曲線と共に示す。Fig.3 から、近似曲線は P_{D0} の平均線となっていることがわかる。今後、(5)式を平水中の主機出力 P_0 の近似式として使用することとする。

Fig.3 Engine power at calm sea P_{D0} and the fitted curve by (5)

3.5 シーマージンの再計算

アブログ記載の主機出力 P_D と(5)式で計算される平水中出力 P_0 を使用して(1)式からシーマージンの再計算を行った。Fig.4 に、再計算したシーマージンを○で、アブログ記載のシーマージンの値+で示す。

この図によると、再計算したシーマージンは、アブログのシーマージンを再現できていると見ることができる。約 23knots 以上では船速が増加するとシーマージンは低下し、約 23knots 以下では船速の狭い範囲 (22.3 knots~23knots) で、シーマージンのばらつきが大きくなるという傾向が見られる。

Fig.4 のシーマージンの比較により、(5)式による P_0 は本船の平水中出力の近似としては十分な精度であるといえる。以後の解析では、(5)式の平水中出力 P_0 から再計算したシーマージン S_m を使用することにする。

Fig.4 Sea margin

4. プロペラ特性と推進特性の推定

次に、プロペラの特性を利用して、航海中の推進

特性（主機出力と回転数）の推定を行う⁽⁹⁾。

4.1 プロペラ特性と回転数

本船のプロペラについては、直径およびピッチ（アブログ記載のスリップからの推定値⁽¹⁰⁾）をもとに、MAU 5-80 のプロペラを利用して、プロペラ特性曲線とした⁽¹⁰⁾。

さらに自航要素を仮定して、プロペラ特性曲線および主機出力から後述する(6)、(7)、(8)式を使用して、プロペラ回転数を定める。

自航要素（伴流係数(1-w)および推力減少係数(1-t)、推進係数 η については、コンテナ船のデータ⁽¹¹⁾を参考にして設定し、後述する(6)から(8)式を使用して繰り返し計算によって、アブログのデータと適合するように修正した。

4.2 平水中プロペラ回転数の推定

4.1 で述べた推定法により、平水中出力 P_0 および 4.1 の方法で既出した自航要素を用いて、平水中を航行する場合のプロペラ回転数 N を求めた。この解析に必要な船体抵抗は、 P_0 から(4)式を利用して求めている。

その結果を Fig.5 に曲線で示す。プロペラ回転数 $N=91.5 \text{ rpm}$ で平水中を航行した場合の船速は 25.2knots となった。

また、参考として、図中に+で航海中のプロペラ回転数を示している。図によると、航海中は船速が 23knots 以上ではプロペラ回転数 $N=91.5 \text{ rpm}$ を中心に比較的一定であるのに対して、23knots 未満では 88rpm 付近を中心に 83rpm から 91rpm の間で、ばらつきが大きくなっているようにみえる。このばらつきは、Fig.2 の約 23.3knots 以下の主機出力 P_D (+マーク) のばらつきにほぼ対応している。

Fig.5 Propeller revolution for ship speed

4.3 主機出力、プロペラ回転数および船速、シーマージンの関係

航海中の推進性能の推定には、平水中の航走状態を基準として、気象・海象が変化した場合の主機出力 P 、船速 V およびプロペラ回転数 N 、シーマージン S_m の関係を求める必要がある。これらの間には、以下述べる関係式が成立する。(以後、船速 V は *knots* と v は *m/s*、プロペラ回転数 N は *rpm* と n は *rps* として使用する。)

(1) シーマージンの関係式

(1)式のシーマージンの定義は、同一船速における航海時の出力と平水中出力の相対変化量である。ここでは、航海中のある出力において、プロペラ回転数 n と船速 V が変化した場合にシーマージン S_m も変化すると、シーマージン S_m を変数として扱うこととする。

基準とする出力を $P_0(n_0, V_0) = 2\pi n_0 Q_0(n_0, V_0)$ 、航海時のシーマージン S_m に対応する出力を $P(n, V) = 2\pi n Q(n, V)$ とすると、

$$h(S_m, n, V) = Q(n, V)n - (1 + 0.01S_m)Q_0(n_0, V_0)n_0 = 0 \quad (6)$$

の関係式が得られる。ここで、 Q_0 、 n_0 は基準とする船速 V_0 におけるトルクおよび回転数である。

(2) 機関トルクとプロペラトルクの関係式

機関で発生するトルク Q はそのままプロペラに伝達されるとすると、プロペラトルクは主機出力のトルクと等しくなる。プロペラ直径を D 、トルク係数を K_Q 、海水密度を ρ とすると、

$$f(n, V) = Q(n, V) - \rho n^2 D^5 K_Q(n, v_a) = 0 \quad (7)$$

を満たさなければならない。

ここで、 $v_a(m/s) = 0.5144(1-w)V(knots)$ で、船尾に設置されたプロペラに流入する平均速度を表す。伴流係数 $(1-w)$ は、粘性および船体形状により、船尾流速が船速から変化する割合を示すもので、4.1 で推定したものを使用する。

(3) 船体抵抗とプロペラ推力の関係式

ある海象の下で船舶が船速 V で進む場合に、プロペラの出す推力を T とすると、定常的には船体抵抗 $R(V)$ と $(1-t)T$ が等しくならなければならない。スラスト係数を K_T とすると、プロペラの推力が $T(n, V) = \rho n^2 D^4 K_T(n, v_a)$ であることから、

$$g(n, V) = R(V) - (1-t)\rho n^2 D^4 K_T(n, v_a) = 0 \quad (8)$$

が成り立たねばならない。推力減少係数 $(1-t)$ は、プ

ロペラ無しの状態と比べてプロペラが作動することで増加する船体抵抗の影響を示すもので、4.1 で推定した値を使用する。

以上の解析では、プロペラ特性曲線におけるトルク係数 K_Q およびスラスト係数 K_T を、プロペラ前進係数 $J = v_a/nD$ の2次式近似とした。

4.4 自航要素の修正手順

自航要素は初期値を仮定し、(6)、(7)、(8)式を利用して計算を行い、計算されたプロペラ回転数 N' または船速 V' とアブログデータの差の2乗誤差が最小となるよう、自航要素を漸近的に変化させて決定した。Fig.6 に、自航要素の計算手順を示す。

Fig.7 は、このようにして決定した自航要素から再計算した船速とアブログの値の差で、差の平均は $0.02knots$ 、標準偏差は $0.76knots$ であった。

Fig.6 Calculation flow for the self-propulsion factors

Fig.7 Error between calculated ship speed and actual ship speed

5. 推進特性の表現

(6)、(7)および(8)式により、主機出力 P 、プロペラ回転数 N の状態空間と船速 V 、シーマージン Sm の状態空間を相互に対応できるので、機関特性（主機出力、プロペラ回転数）と運航特性（船速、抵抗増加）の関係を表わす表現方法が得られる。

5.1 機関特性

船に設置されているエンジンは、運転許容範囲内で運転されなければならない。通常運転時のプロペラの特性は、試運転時の平水中のプロペラ特性に対してサービスマージン（15～30%）を持つように設定される。エンジンは、このプロペラ出力がエンジンの連続最大出力 MCR（Maximum Continuous Rating）に一致するように最適調整される。通常は、MCR の 85% の出力である CSR（Continuous Service Rating）以下での運転を目指している。Fig.8 は、CSR を基準に機関の運転許容範囲を示す簡易的な図であり、横軸はプロペラ回転数、縦軸は主機出力で、①は船舶の設計運航条件におけるプロペラ特性、②は試運転時のプロペラ特性、③は荒天時等に短時間許容できる限界線である⁽¹²⁾。太い線と横軸で囲まれた範囲が運転許容範囲となり、この図は機関特性を表すものとなっている。

Fig.8 Engine characteristic

5.2 推進特性ダイヤグラム

機関特性曲線に運航特性（船速、抵抗増加（シーマージン））を重ね合わせることで、船の航海中の推進特性を表すことができると考えられる。

本船のプロペラ回転数 N に対する主機出力 P を Fig.9 に示す。①の太線は、 P_0 （シーマージン $Sm=0\%$ ）の出力曲線で、Fig.3 の近似曲線に対応するものである。図中の①については、Fig.3～Fig.5 に示すように、アブログデータから推定される平水中出力として実用的な精度で推定できたものとして使用した。

平水中の機関特性に対し、一定シーマージンを加

えた主機出力と回転数の関係が小さな点線で示されている。また、船速が一定とし、プロペラ回転数を変化させた場合の機関特性が大きな点線で示されている。図中の○は、アブログの主機出力とプロペラ回転数を「標準喫水」に対応するように修正した値（ P_D と P_D に対応するプロペラ回転数）である。

Fig.9 のように、機関特性と運航特性の関係を表した図を、推進特性ダイヤグラムと呼ぶこととする。

本図より、本船は、 N が 91rpm 程度、 P が約 41,000kW、 V が 24～25knots 程度で、 $Sm=40\%$ 以下で航行している場合（図中 A の部分）と、 V が 23knots 程度を目指して航行している場合（図中 B の部分）があると推測できる。気象・海象の影響等で船体抵抗増加が大きくなった場合は、 P と N を調整しながら Sm が 60% 以下（ $Sm=60\%$ のラインより右側）かつ V が 22knots 以上（ $V=22knots$ のラインの右側）で運航されているように見える。

Fig.9 Propulsion characteristic diagram

推進特性ダイヤグラムは、気象・海象の変化に対応した運航を行う際に利用可能である。今、図中の☆（ $P=30,500kW$ 、 $N=83.3rpm$ 、 $V=22knots$ 、 $Sm=40\%$ ）で航行中、気象・海象が変化して抵抗増加があったとする。もし抵抗増加率を一定としたい場合は、この図を使用して $Sm=40\%$ の線に沿って P および N を減少させる。その結果、 V も減少する。 V を保ちたい場合は、 $V=22knots$ の線に沿って、 P および N を増加させる。その結果、抵抗増加率は増加することになる。また、 P 一定あるいは N 一定の運航を行う場合に、 V または Sm がどのように変化

するかが判るようになっている。

このように運航特性と機関特性の関係を推定できる推進特性ダイヤグラムは、ウェザールーティングの重要なツールとして利用することができる。

6. 気象・海象の変化による抵抗増加

6.1 航海中の気象・海象について

ここでは、気象・海象の変化に対すると抵抗増加について検討する。

本船が遭遇した気象・海象については、アブログに記載されている船上での観測と気象庁の全球数値予報モデルおよび全球数値波浪予報モデル（Grid Point Value：以後、GPV と記す）の初期値のデータ⁽¹³⁾を用いることとした。Fig.10 に、GPV の 2007 年 12 月 20 日 00UTC の北太平洋の波の状態と、○で本船位置を示す。図中の矢印の向きで波向、矢印の大きさに波高、等高線で波周期を示す。○における本船の状態は、波向き=340deg.、波高=3.2m、波周期=11.2sec であった。

Fig.10 Wave data of GPV and ship's position at 20th Dec. 2007 00UTC

対象とした 6 航海中に、本船が遭遇した 2 時間毎の風速を*で、波高を○で、Fig.11 に示す。航海中の多くの時間で、風速 15m/s 以下、波高 4m 以下の状態であったが、波高が 7m 程度まで発達した時もあったことが分かる。

また Fig.1 に示したように、アブログには風向、ビューフォート階級およびうねり高さが記載されている。Fig.12 に、アブログのうねり高さと GPV の波高との差を示す。（GPV にはうねりの項目はないため、GPV の波高の値を使用した。）この期間では、アブログのうねり高さの方が、GPV の波高より平均で 0.55m 高く、両者の差の標準偏差は 0.97m であった。これは、数値データは実際より低いのではないかという運航者の感覚と一致している。図中の点線は、波高 0.55m を示している。

Fig.12 Difference of wave height

6.2 気象・海象による抵抗増加

次に、気象・海象が変化した場合の船舶の抵抗増加について検討する。

実海域を航行中の船舶の全抵抗は、

$$R = R_0 + R_{AA} + R_{AW} + R_{AE} \quad (11)$$

と表現することができる。ここで、

Fig.11 Wind speed and wave height every 2 hours on 6 voyages

- R : 全抵抗
 R_0 : 平水中抵抗
 R_{AA} : 風による空気抵抗
 R_{AW} : 波による抵抗増加
 R_{AE} : 操舵による抵抗増加

である。

今回は、風による空気抵抗と波による抵抗増加について考えることとし、これら 2 つの抵抗を加えたものを気象・海象による抵抗増加 R_{WX} とする。操舵による抵抗増加は無視することとする。

6.2.1 風による空気抵抗

風による抵抗増加は、

$$R_{AA} = C_A(\mu) \frac{1}{2} \rho_A A v_A^2 \quad (12)$$

により求めることとする⁽¹⁴⁾。ここで、

$C_A(\mu) = k(\mu) C_{A0}$: 空気抵抗係数

R_{AA} : 風による空気抵抗 (kN)

μ : 風向 (deg.)

$k(\mu)$: 風向影響係数

C_{A0} : 正面空気抵抗係数

ρ_A : 空気の密度 ($kg \cdot s^2/m^4$)

A : 水面上の船体正面投影面積 (m^2)

v_A : 船に対する相対風速 (m/s)

である。

Fig.13 にコンテナ船の風洞実験解析から求めた空気抵抗係数 C_A を、Fig.14 にこの C_A を使って(12)式より求めた風による空気抵抗 R_{AA} を示す。このとき風速については、アプログ記載のビューフォート階級に平均的な風速の値を対応させて使用した。

Fig.13 Air resistance coefficient

Fig.14 より、風による空気抵抗の 76%が $\pm 100kN$ 以内であったことがわかる。Fig.14 は SR108 コンテナ船の風による抵抗増加の値（造船設計便覧⁽¹⁰⁾ P429 図 115）と近いものとなっていることから、風による空気抵抗 R_{AA} が推定できると考え、今後、ここで求めた値を使用することとする。

Fig.14 Air resistance due to wind

6.2.2 波による抵抗増加

波による抵抗増加は、

$$R_{AW} = R_{AW(0)} + R_{AW(1)} \quad (13)$$

で表すことができる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。ここで、

R_{AW} : 波による抵抗増加

$R_{AW(0)}$: 船体運動に基づく抵抗増加

$R_{AW(1)}$: 船首部からの反射に基づく抵抗増加

である。

$R_{AW(0)}$ については、ストリップ法等の計算⁽¹⁶⁾により求めることができる。また $R_{AW(1)}$ については、船側及び船底からの反射の効果を考慮する必要がある⁽¹⁷⁾。Fig.15 に、波長船長比 (λ/L) に対する R_{AW} 、 $R_{AW(0)}$ 、 $R_{AW(1)}$ の関係を示す。

本船の遭遇海象は、その船長から Fig.15 の楕円で囲んだ付近の短波長域であることが多く、また図からわかるように、この領域では主として $R_{AW(1)}$ の影響が大きく、ほぼ一定の値となると考え、抵抗増加係数 C_{AW} を一定値と仮定することとした。 C_{AW} は、コンテナ船の実験計算例⁽¹⁸⁾を参考に求めた値 ($C_{AW}=0.8$) を使用した。

波による抵抗増加 R_{AW} は、仮定した C_{AW} を用いて、

$$R_{AW} = C_{AW} \frac{1}{2} \rho_w h^2 (B^2 / L) \quad (14)$$

で計算できる。ここで、

R_{AW} : 波による抵抗増加 (kN)

C_{AW} : 抵抗増加係数

ρ_w : 海水の密度 ($kg \cdot s^2/m$)

h : 波高 (m)

B : 船幅 (m)

L : 船長 (m)

である。波高 h には、アプログ記載のうねり高さと、GPV の波高の 2 つを使用した。GPV の波高は、1 時間ごとに求めた 1 航海日間の平均を用いた。

Fig.16 に、*でアプログ記載のうねり高さ、◇で GPV の波高のそれぞれを使用して求めた抵抗増加

を示す。アブログ記載のうねり高さは $0.5m$ 刻みのため、計算された R_{AW} に同じ値（うねり高さ $4m$ に対応する値）が多く表れている。また、Fig.12 で示した波高の差が Fig.16 にも表れており、◇の方が低い値となっている。

Fig.15 Components of the resistance increase

Fig.16 Wave resistance

6.2.3 気象・海象中の抵抗増加

風による空気抵抗 R_{AA} と波による抵抗増加 R_{AW} を加えたものを、気象・海象の変化による抵抗増加 R_{WX} ($=R_{AA} + R_{AW}$) と考え、これと平水中と航海中の出力差から(6)式を利用して求めた抵抗増加の値と比較する。

R_{AA} については、6.1.1 で示した値を、 R_{AW} については、6.1.2 で示した2つの値を使用した。Fig.17 に、○で航海中と平水中の出力差から求めた抵抗増加、*でアブログ記載のうねり高さ、◇でGPVの波高のそれぞれを使用した R_{WX} を示す。○で示した値の変動が最も低くなっているが、3つとも同様の傾向を示していることがわかる。

この比較より、シーマージンを使用してアブログの出力から推定した抵抗増加と、気象・海象から推定した抵抗増加は、その絶対値は異なっているものの、良い相関を示しているとして、気象・海象による抵抗増加から、平水中に対する航海中の抵抗増加を推定できると判断した。

Fig.17 Resistance increase

7. 気象・海象状態から推定した推進特性の解析例

気象・海象の予測値が与えられ、その影響による抵抗増加が求められれば、これと推進特性ダイアグラムを組み合わせることで航海時の推進特性を知ることができ、ウェザールーティングにおける運航方法の選択へ応用できる。

ここでは例として、プロペラ回転数を設定した場合の解析を行った。

アブログのプロペラ回転数を使用して、気象・海象データからその状態での抵抗増加 R_{WX} を求め、4.7 で推定した自航要素と(8)、(9)、(10)式により、船速の逆推定を行った。

ここで推定した船速とアブログの船速の差を、Fig.18 に示す。*でアブログのうねり高さを使用した場合、△でGPVを使用した場合の、アブログの船速との差を示している。*の平均が $-0.20knots$ 、△の平均が $-0.84knots$ であった。

Fig.18 Difference of ship speed

8. まとめ

アブログ記載の推進性能に関する基本データである主機出力、プロペラ回転数、船速およびシーマージンを利用して、下記の通り対象船の具体的な推進性能解析を行った。

・3章において、基本となる平水中出力について、

アブログの主機出力、船速およびシーマージンのデータからの推定手法を提案した。

- ・4 章および 5 章において、船の推進特性を表す「シーマージンの関係式」、「機関トルクとプロペラトルクの関係式」、「船体抵抗とプロペラ推力の関係式」の 3 つの関係式により、主機出力、プロペラ回転数と船速、シーマージンの 2 つの状態空間がそれぞれに対応できることを示した。この対応を元に推進特性ダイヤグラムを構築した。
- ・6 章において、アブログの気象・海象データと気象庁の数値予報データ（初期値）を使用して、気象・海象が与えられた場合の抵抗増加の推定を行った。
- ・7 章において、推定された抵抗増加と上記の推進特性を表す 3 つの式から本船の航海性能解析を行い、プロペラ回転数が与えられた場合の船速の推定を行った。

以上の結果から、アブログデータは航海性能解析に用いることが可能であることがわかった。また対象船について、実運航時やウェザールーティングを行う場合に、気象・海象の変化に応じた運航状態を選択する手法を提供できる可能性も確認できた。

本論文は、ウェザールーティングに必要な航海性能を推定することを目的とし、7 で示したように、推進特性の解析と気象・海象の影響を組み合わせることで、航海時の推進特性の推定が可能となることを確認できた。これを応用すれば、気象・海象の予測情報を用いたウェザールーティングにおいて、最適な運航方法の選択ロジックを組み立てることも可能となる。今後は、ウェザールーティングでの運航方法の選択のロジックとその違いについて検討をおこなう予定である。

謝辞

本論文は、東京海洋大学海洋工学部「教育研究の質の向上のための取り組み」および文部科学省・科研費・基盤研究 (C)「燃料消費低減型最適航路選定に関する陸上支援局開発研究」(21560828) の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) 萩原秀樹、桑島進、岩坂直人、石塚正則、東誠、田中充、鈴木るり：INMARSAT データ通信を用いるウェザールーティングシステムの研究－コンテナ船における実船実験－，日本航海学会論文集，第 86 号，pp.141-151，1992
- (2) 高嶋恭子、萩原秀樹、庄司るり：ウェザールーティングによる燃料節約－コンテナ船の航海データを用いたシミュレーション－，日本航海学会論文集，第 113 号，pp.259-256，2004
- (3) SR244 研究部会：実海域対応の船舶性能システムの研究，日本造船研究協会，2004
- (4) 実海域における船の推進性能，推進性能研究会第 6 回シンポジウム，日本造船学会，平成 7 年。
- (5) 石塚正則，大津皓平：シーマージンの統計的研究-I.，日本航海学会論文集第 77 号，pp.11-20，昭和 62 年 9 月。
- (6) 乾真，大津皓平，井関俊夫，石塚正則：航海撮要日誌の統計解析に関する一考察，日本航海学会論文集第 85 号，pp.41-50，平成 3 年 9 月。
- (7) 田中稔，溝口純敏：船舶の就航実績解析プログラムと解析例，石川島播磨技法 第 21 巻第 2 号，pp.99-105，昭和 56 年 3 月。
- (8) 船舶の抵抗および推進指導書 第 I 編馬力計算法，社団法人日本中小型造船工業会，昭和 44 年。
- (9) 宮本雅史，門松浩司，島田潔：第 2 章実海面での推進性能，「耐航性理論の設計への応用」，運動性能研究委員会，第 11 回シンポジウム，pp.93-146，平成 6 年。
- (10) 造船設計便覧 第 4 版，関西造船協会，海文堂出版，昭和 58 年。
- (11) SR138 研究部会：高速コンテナ船の馬力推定法の精度向上に関する研究，研究資料 No.199，日本造船研究協会，pp.27-28，pp.48-49 昭和 49 年。
- (12) 船用機関 第五十四号，郵船機関長会・郵船機関士会会誌，昭和 63 年
- (13) 京都大学生存圏研究所：トップページ
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/>
- (14) 肥大船の推進性能に関するシンポジウム，日本造船学会，1975
- (15) 藤井齊，高橋雄：肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第 137 号，pp.132-137，日本造船学会，1975
- (16) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第 1 報），日本造船学会論文集，第 101 号，pp.33-39，1957
- (17) 足達宏之：細長船の短波長域抵抗増加の計算法，第 9 回推進性能・運動性能合同研究会，2009
- (18) 山下誠也：コンテナ船の短波長域抵抗増加に関する一検討，第 8 回推進性能・運動性能合同研究会，2008

質疑応答

芳村康男（北海道大学）：

本論文で外乱を除去した船速馬力特性は、対象船舶の海上公試結果等と比較すると上手く対応しているのでしょうか。ご検討されていたらご説明をお願い致します。

庄司るり：

対象船舶の海上試結果等は入手できませんでした。本来なら、そのような比較で推定結果の精度を確認する必要があると考えています。

しかし、通常は造船会社あるいは船社等の運航管理会社以外には、ご指摘のような詳細な情報を入手することは難しいのが現状です。今回もこの理由から、入手し得る情報から航海性能に関する情報を最大限に抽出するために、研究を行いました。