到着遅延リスクを考慮した内航船の 省エネルギー運航について

高嶋 恭子*・加納 敏幸**・小林 充***

Energy Saving Operation for Coastal Ships with Consideration of Arrival Delay Risk

Kyoko TAKASHIMA, Toshiyuki KANO and Mitsuru KOBAYASHI

Abstract

Following predetermined voyage plans is of the utmost importance for coastal shipping. Generally, coastal ships are operated slightly ahead of schedule to keep sufficient room for avoiding any risk of arrival delay. If the standard deviation of arrival time error on the recommended route can be estimated, it is possible to follow the ship operation schedule and save a large amount of fuel. From the above point of view, the authors propose a new weather routing algorithm that takes the “risk of delay” concept into account. In the proposed algorithm, the standard deviation of the error of arrival time is estimated using information on the accuracy of wind/wave forecast. Our simulation results confirmed that the standard deviation of the arrival time error on the minimum fuel route can be accurately estimated, reducing the risk of delay of arrival time.

Keywords : *weather routing, minimum fuel route, environmental forecast*

キーワード : ウェザー・ルーティング, 最小燃料消費航路, 気象・海象予測

1. はじめに

これまで、内航船に対しては指定された到着時刻までに遅れることなく目的地に到着することが最優先に考えられてきた。そのため、内航船は遅延リスクを回避するために、できるだけ早く、余裕を持って目的地に到着し、沖待ちにより時間調整を行なうような運航を行なってきた。しかし、近年の原油価格高騰や、環境問題への配慮を受け、内航船に対しても燃料の節約が急務となっており、定時性を保った省エネルギー運航が必要となってきた。これに関連して、萩原ら⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾は外航商船を対象とした研究を行い、いくつかのウェザールーティングの手法を提案している。

著者らは、高精度気象・海象予測データに基づいた内航船の省エネルギー運航について研究を始め、指定された航海時間以内で目的地に到着できる最小燃料消費航路（以下 MFR (Minimum Fuel Route)）を計算する

アルゴリズムを開発⁽⁴⁾した。

本論文では、まず、上記アルゴリズムを用いて決定された MFR を航行した場合の到着時刻の誤差の標準偏差を推定する方法を述べる。次にその推定に使用する気象・海象予測データについて予測精度を調査し、その結果を示す。そして、実際に日本沿岸海域を就航中の内航船舶の実海域データを用いてシミュレーションを行ない、その効果を確認する。

2. 到着遅延リスクを考慮した MFR

ここでは、気象・海象予測データおよび気象・海象が船速やエンジン出力に及ぼす影響を表現するモデルに基づき、ある一定の確率で指定された到着時刻より早く目的地に到着でき、かつ航海中の燃料消費を最小とする航路を求めるアルゴリズムについて述べる。以下、この航路のことを「到着遅延リスクを考慮した MFR」と呼ぶことにする。

* 学生会員 東京海洋大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) d062024@kaiyodai.ac.jp

** 非会員 独立行政法人 海上技術安全研究所

*** 正会員 独立行政法人 海上技術安全研究所

2.1 計算手法

到着遅延リスクを考慮した MFR は、以下の手順により求められる。

- (1) まず、指定到着時刻 T に目的地に着くような MFR_0 を求める。
- (2) その MFR_0 の到着時刻の予測誤差の標準偏差 σ_T を推定する。(実際の到着時刻が T より $\sigma_T, 2\sigma_T, 3\sigma_T$ 以上遅れる確率は、それぞれ 0.1587, 0.0228, 0.0013 である。)
- (3) 気象・海象予測が不確実なことから到着時刻が遅れることのリスクを考慮し、 T より $k\sigma_T$ だけ早く目的地に到着する MFR'_0 を再度求める。ここで k は、到着遅延リスクの大きさを表現する係数であり、 $k\sigma_T$ のことを余裕時間と呼ぶことにする。
- (4) その MFR'_0 上を航走し、気象・海象予測が更新されたら、その時の船位から目的地に T に到着する MFR_1 を計算し、(2), (3), (4) を繰り返す。

航海が進むにつれて、気象・海象の予測時間が短くなるので、 σ_T は小さくなる。したがって、遅延リスク時間 $k\sigma_T$ を次第に小さくすることができ、最終的に 指定到着時刻 T に目的地に到着することができる。

2.2 標準偏差の推定法

ここでは計算された MFR の到着時刻の予測誤差の標準偏差 σ_T を推定する方法を述べる。なお、 σ_T の推定において、海流・潮流の数値予報精度を調査するのは現段階では困難であるため、風と波の予測誤差のみを考慮するものとする。

時刻 T_0 に出発地 P_0 を出発し、目的地 P_f まで航海する船を考える。この船は時間間隔 Δt の間、針路・プロペラ回転数を一定に保って航行することとする。船が P_0 を出発した後、 $i+1$ 番目の waypoint P_{i+1} に到達する時刻 T_i は、

$$T_{i+1} = T_i + \frac{D_i}{V_{gi}} \quad (1)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots)$$

という差分方程式で表される。ここで、 V_{gi} は waypoint P_i における対地速度、 D_i は P_i と P_{i+1} の間の距離である。船の対地速力は、対水速力、海流によるドリフト角と海流ベクトルの状態関数であるので、 P_i と P_{i+1} の間の対水速力を V_i 、海流によるドリフト角を α_i 、海流ベクトルを W_i で表せば、対地速力を V_{gi} は次のように書ける。

$$V_{gi} = V_{gi}(V_i, \alpha_i, W_i) \quad (2)$$

対水速度 V_i は、風と波、及び針路 θ_i とプロペラ回転数 n_i の関数であるので、 V_i は次式で表現する。

$$V_i = V_i(\theta_i, n_i, S_i) \quad (3)$$

ここで、 S_i は風と波の状態ベクトルであり、次のよ

うなパラメータから成る。

$$S_i = [w_i \ \gamma_i \ h_i \ \varphi_i \ F_i]^T \quad (4)$$

$w_i, \gamma_i, h_i, \varphi_i, F_i$ は、それぞれ P_i における風速、風向、有義波高、卓越波向、有義波周期である。

T_{i+1} の予測誤差 ΔT_{i+1} は、

$$\Delta T_{i+1} = \Delta T_i + \frac{-D_i}{V_{gi}^2} \Delta V_{gi} \quad (5)$$

と書ける。対地速度 V_{gi} の予測誤差 ΔV_{gi} は近似的に、

$$\Delta V_{gi} = \frac{\partial V_{gi}}{\partial V_i} \Delta V_i = \cos \alpha_i \Delta V_i \quad (6)$$

と書ける。ここで、 W_i は予測誤差を含まないとし、対水速度の予測誤差 ΔV_i によるドリフト角の予測誤差 $\Delta \alpha_i$ は小さく無視できるとする。(6) 式を (5) 式に代入すると

$$\Delta T_{i+1} = \Delta T_i + \frac{-D_i}{V_{gi}^2} \cos \alpha_i \Delta V_i \quad (7)$$

(3) 式より ΔV_i は、

$$\Delta V_i = \frac{\partial V_i}{\partial S_i} \Delta S_i = \left[\frac{\partial V_i}{\partial w_i} \quad \frac{\partial V_i}{\partial \gamma_i} \quad \frac{\partial V_i}{\partial h_i} \quad \frac{\partial V_i}{\partial \varphi_i} \quad \frac{\partial V_i}{\partial F_i} \right] \begin{bmatrix} \Delta w_i \\ \Delta \gamma_i \\ \Delta h_i \\ \Delta \varphi_i \\ \Delta F_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表せる。(8) 式を (7) 式に代入すると、

$$\Delta T_{i+1} = \Delta T_i + \frac{-D_i}{V_{gi}^2} \cos \alpha_i \frac{\partial V_i}{\partial S_i} \Delta S_i \quad (9)$$

となる。

風と波の誤差ベクトル ΔS_i は Gaussian purely random sequence (Gaussian white sequence) ではなく、 ΔS_{i+1} と ΔS_i の間には相関がある。そこで、 ΔS_i を次の shaping filter により生成される Gauss-Markov random sequence とみなす。

$$\Delta S_{i+1} = \Phi_i \Delta S_i + \Delta S_{i+1}^* \quad (10)$$

ここで、 ΔS_{i+1}^* は平均値が 0 の Gaussian white sequence、 Φ_i は ΔS_i と ΔS_{i+1} の相関の程度を表す正規化された相関行列である (Φ_i は対角行列とする)。

(9) 式と (10) 式をまとめてベクトル形式で書けば、

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{i+1} \\ \Delta S_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{D_i}{V_{gi}^2} \cos \alpha_i \frac{\partial V_i}{\partial S_i} \\ 0 & \Phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_i \\ \Delta S_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0^T \\ I \end{bmatrix} \Delta S_{i+1}^* \quad (11)$$

となり、(11) 式を簡単に、

$$\Delta Z_{i+1} = A_i \Delta Z_i + B \Delta S_{i+1}^* \quad (12)$$

と書けば、誤差ベクトル ΔZ_{i+1} の共分散行列 M_{i+1} は、

$$M_{i+1} = A_i M_i A_i^T + B Q_{i+1} B^T \quad (13)$$

ただし、 Q_{i+1} は ΔS_{i+1} の共分散行列で、(10) 式の両辺に両辺の転置ベクトルを右から乗じて期待値をとれば、

$$P_{S_{i+1}} = \Phi_i P_{S_i} \Phi_i^T + Q_{i+1} \quad (14)$$

となるので ($P_{S_{i+1}}$ は ΔS_{i+1} の共分散行列、 P_{S_i} は ΔS_i の

共分散行列、 Φ_i は相関行列、 Q_{i+1} は ΔS_{i+1} の共分散行列)、

$$Q_{i+1} = P_{S_{i+1}} - \Phi_i P_{S_i} \Phi_i^T \quad (15)$$

より求めることができる。したがって、誤差ベクトル ΔZ_{i+1} の共分散行列 M_{i+1} は、

$$M_{i+1} = A_i M_i A_i^T + B (P_{S_{i+1}} - \Phi_i P_{S_i} \Phi_i^T) B^T \quad (16)$$

により計算できる。共分散行列 M_{i+1} の左上隅の値が waypoint P_{i+1} への到着時刻の予測誤差の分散 $\sigma_{T,i+1}^2$ である。

(16) 式 ($i = 0, 1, 2, \dots$) により、各 waypoint への到着時刻の予測誤差の分散が順次計算でき、最終的な waypoint となる目的地における到着時刻の予測誤差の分散を決定できる。

以上の方法により、MFR の到着時刻の予測誤差の標準偏差 σ_T を推定することができる。

3. 航行海域の気象・海象予測データの解析

遅延リスクを考慮した MFR を求めるには、前進型ダイナミック・プログラミングを用いて MFR を求め、リルーティングを行なうたびに上記方法を用いて到着時刻の予測誤差の標準偏差の計算を行なう。この標準偏差を求めるには、海上風と波の予測精度情報が必要である。船舶にとって、燃料消費量を左右する主要因である速力とエンジン出力の変化は、風と波による影響が大きいので、それらに関する予測精度情報は非常に重要となる。

本研究では、3 時間おきの予測基準時 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21GMT) において、72 時間先まで 1 時間間隔で予測値が計算される気象・海象データについて、1 ヶ月分の海上風と波の予測精度を調査した。緯度・経度による予測グリッドは $2' \times 2'$ であり、各グリッドにおいて海上風と波の各パラメータ (風速, 風向, 有義波高, 卓越波向, 有義波周期) の 1 時間間隔の予測値の予測誤差の平均値と共分散行列を計算した。また、それらのパラメータの予測誤差間の相関係数についても計算を行った。

なお、予測基準時における各パラメータの実況値を真値と見なすが、予測値計算は 3 時間毎にしか行なわれないため、予測基準時から 3 時間先までの予測値を真値と見なして計算を行なった。

3.1 海上風と波の予測誤差の平均値と標準偏差

各予測グリッドにおいて、72 時間先までの 1 時間間隔の予測値の誤差の平均値 (予測バイアス) $E[\Delta \hat{C}(m, n, t)]$ を次式により求めた。

$$E[\Delta \hat{C}(m, n, t)] = E[C(m, n) - \hat{C}(m, n, t)] \quad (17)$$

ここで、 m, n は予測海域における各予測グリッドのナンバー、 t は予測期間 ($t = 3, \dots, 72$)、 $C(m, n)$ は予測グリッド (m, n) における風と波の実況値、 $\hat{C}(m, n, t)$ は予測グリッド (m, n) における t 時間予測の風と波の予測値、 E は期待値演算子 (1 ヶ月の調査期間における集合平均をとることを表す) とする。

ベクトル $C(m, n)$ と $\hat{C}(m, n, t)$ は

$$C(m, n) = [w_{wi} \gamma_{wi} h_{wv} \varphi_{wv} F_{wv}]^T \quad (18)$$

$$\hat{C}(m, n, t) = [\hat{w}_{wi} \hat{\gamma}_{wi} \hat{h}_{wv} \hat{\varphi}_{wv} \hat{F}_{wv}]^T \quad (19)$$

である。ここで w_{wi} , γ_{wi} , h_{wv} , φ_{wv} , F_{wv} はそれぞれ風速、風向、有義波高、卓越波向、有義波周期の実況値であり、 $\hat{w}_{wi}$, $\hat{\gamma}_{wi}$, $\hat{h}_{wv}$, $\hat{\varphi}_{wv}$, $\hat{F}_{wv}$ は t 時間予測の風速、風向、有義波高、卓越波向、有義波周期の予測値である。

予測値のバイアスを除去するために、予測誤差の平均値 $E[\Delta \hat{C}(m, n, t)]$ を予測値に加えたものを、新たにバイアスのない予測値 $\bar{C}(m, n, t)$ とする。

$$\bar{C}(m, n, t) = \hat{C}(m, n, t) + E[\Delta \hat{C}(m, n, t)] \quad (20)$$

バイアスを除去した風と波の予測値の誤差は、次式により与えられる。

$$\Delta C(m, n, t) = C(m, n) - \bar{C}(m, n, t) \quad (21)$$

さらに、風と波の予測誤差の共分散行列 $P_C(m, n, t)$ を次式により求めた。

$$P_C(m, n, t) = E[\Delta C(m, n, t) \Delta C(m, n, t)^T] \quad (23)$$

共分散行列の対角項が風速、風向、有義波高、卓越波向、有義波周期の予測誤差の分散となる。

シミュレーションを行なう船舶の航行海域における海上風と波の予測精度の違いを調べるために、その海域を Fig.1 に示すような $30' \times 30'$ のサブエリアに分割した。サブエリア内には、陸地が無ければ 225 個の予測グリッドが含まれる。各サブエリアにおいて、予

Fig.1 Sub-area of wind/wave forecasts

Fig.2 Mean error and standard deviation of forecasted wave height averaged over each sub-area versus the time of forecast

測誤差の平均値と標準偏差の平均値を計算した。

シミュレーションで船舶が航行する海域について Fig.1 の 5 つのサブエリアを選択し、そのエリアについて有義波高の予測誤差の平均値と標準偏差を Fig.2 に示した。図中、実線で示したものが予測誤差の平均値、点線で示したものが標準偏差を表す。予測誤差の平均値は $\pm 0.2\text{m}$ の範囲内で変動しており、選択したすべての範囲で予測期間が 45~55 時間以前では負の値となっており、予測期間が長くなると正の値となっている。したがって、有義波高は予測期間が 2 日程度であれば実際より大きく予測され、それ以上になると実際より小さく予測されていることがわかる。予測誤差の標準偏差は、予測期間が長くなるほど大きくなっている。

同様に、風速、風向、波向、波周期についても調査を行なった結果、すべてのパラメータについて予測期間が長くなるほど予測誤差の標準偏差が大きくなることがわかった。また、海域による予測精度の違いは見られなかった。

3.2 海上風と波の予測誤差間の相関

航海中の船舶において、ある地点で観測される海上風・波の予測誤差と、その地点から Δt 時間航行した地点で観測される予測誤差の間には相関がある。そこで、各予測グリッドにおける t 時間予測値の誤差と、その周囲の予測グリッドにおける $(t + \Delta t)$ 時間予測値の誤差の相関を求めた。Fig.3 にその概略を示す。ある予測グリッド P において、 t 時間予測値の誤差と、予測グリッド A における $(t + \Delta t)$ 時間予測値の誤差との相関

を求める。同様に、P と周囲の各グリッド B~H との予測値の誤差の相関を求める。後に述べるシミュレーションでは 15 分間隔で船位の計算を行なっているため、 Δt は 15 分とし、周囲のグリッドとの距離は、 Δt の間にシミュレーションで使った船舶が航走する最大距離をカバーできる範囲のものとした。

Fig.1 で示した AREA3 における各予測グリッドにおける予測誤差と、そこから 000° 、 090° 、 180° 、 270° 方向にある予測グリッドにおける予測誤差との間の風速の相関係数をサブエリア内で平均したものを Fig.4 に示す。予測グリッド間隔が非常に狭いため、相関係数は 0.8 以上となっている。また、南北方向の相関係数を実線で、東西方向の相関係数を点線で示したが、東西方向の相関のほうが南北方向の相関より強いことがわかる。これは、Fig.1 で示した AREA 1~5 についても同様の傾向がみられた。

4. 遅延リスクを考慮した MFR のシミュレーション

これまで述べてきた気象・海象予測データの解析結果と到着時刻の予測誤差の標準偏差を求める手法を用いて、到着遅延リスクを考慮した MFR シミュレーションを行なった。シミュレーションでは、出発時直前の予測基準時に予測された気象・海象予測データを用いて MFR を求め、その MFR 上を航行した場合の到着時刻の標準偏差 σ_T を計算した。そして遅延リスクを考慮し、指定された到着時刻より $2\sigma_T$ 時間早く目的地に到着するような MFR を再計算した。以後、この $2\sigma_T$ を余裕時間と呼ぶ。予測情報が更新されるたびに MFR、余裕時間の計算を繰り返した。なお上記計算時、船位と相次ぐ通過地点までの到着時刻の標準偏差は 15 分の間隔で計算した。

4.1 シミュレーションに使用した船舶

シミュレーションには、宇部~名古屋/東京航路に就航中のセメント船を使用した。以下、シミュレーションで使った船舶をモデルシップと呼ぶ。モデルシップの主要目は Table 1 に、プロペラ回転数を 157rpm とした時の速力性能曲線を、船首と波向がなす角 15° おきに Fig.5 に示す。この速力曲線は、モデルシップより航行中に得られた実データ、水槽実験より求めたものである⁽⁵⁾。海上風と波の予測誤差がモデルシップの対水速力にどのような誤差を与えるかは、(8) 式の偏微分係数により決定される。また、1 時間あたりの燃料消費量は、以下の式で求められる。

$$F = KP \quad (24)$$

ただし、 K は燃料消費率であり、このモデルシップでは $K = 0.182\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{hour})$ とした。また、 P はエンジン

出力(kW)である。

4.2 遅延リスクを考慮した MFR の効果の検証

シミュレーションの結果を検証するために、モデルシップの実航海データを入力し、実航路を得た。この実航路上を MFR のシミュレーションで使用する気象・海象予測データ、速力性能曲線を用いてシミュレーションを行ない、燃料消費量を算出し、MFR を航行した場合と比較した。

シミュレーションは、豊後水道付近を出発地、浦賀水道航路入り口を目的地とする東航について、以下の条件で行なった。

- 出発日時 : 2006 年 11 月 21 日 18:06 (JST)
- 出発地 : 33° 01.73' N, 132° 08.50' E
- 到着日時 : 2006 年 11 月 23 日 05:21 (JST)
- 目的地 : 35° 06.52' N, 139° 44.89' E
- 指定航海時間 : 35.26 時間

出発時に計算された MFR を実航路、海流図とともに Fig.6 に示す。この図より、実航路は陸よりの航路となっているのに対し、MFR は航海に有利な海流を利用した航路となっていることがわかる。この時の実航路を航行した場合の燃料消費量は 20.14 トンであったのに対し、MFR を航行した場合の燃料消費量は 18.45 トンで実航路と比べ 8.38% の燃料の節約が出来るという結果であった。

気象・海象予測データは 3 時間毎に更新されている。航海中、気象・海象予測データが更新されるたびに、その時の地点から最新の気象・海象予測データを用いて MFR を再計算する必要がある。このように MFR を再計算することをリルーティングという。Fig.7 にリルーティングを行なって求めた、到着遅延リスクを考慮した MFR を全て示す。図中の○印はリルーティングを行なった地点である。全ての MFR の形状は、ほとんど変わらず、リルーティングを行なうことによる MFR の大きな変化は無いと言える。リルーティング毎の余裕時間とプロペラ回転数の変化を Fig.8 に示す。余裕時間は棒グラフ、プロペラ回転数は到着遅延リスクを考慮した MFR を●印、到着遅延リスクを考慮しない MFR を△印とし、折れ線グラフで示す。到着遅延リスクを考慮した場合、出発時の余裕時間は 0.7 時間で、指定された航海時間の 2.0% であった。また、プロペラ回転数は 156.16rpm を必要とし、余裕時間を持たない場合の 154.35rpm と比べると約 2rpm 高く設定して航行しなければならない。しかし、目的地に近づくにつれ、持つべき余裕時間を少なくすることができ、プロペラ回転数を徐々に下げていくことが可能となる。一方、到着遅延リスクを考慮しない MFR では、航海後半でプロペラ回転数を上げなければ、指定された到着時刻に到

Table 1 Principal particulars of the model ship

Length over all	159.7 m
Length between perpendiculars	152.5 m
Breadth	24.2 m
Full load draught	9.016 m
Gross tonnage	13,787 ton
Engine type	Diesel engine x 1
Max engine power	6,960 PS
Sea speed	13.0 knot

Fig.3 Image chart to calculate correlation

Fig.4 Correlation between errors of forecasted wind speeds versus the time of forecast(area 3)

Fig.5 Speed performance curves of the model ship

着できないことを示している。したがって、到着遅延リスクを考慮した MFR では、リルーティングする毎に余裕時間を確率的に見積もることができ、遅延リスク

Fig.6 MFR and actual route with ocean current

Fig.7 MFR considering of arrival delay risk

Fig.8 Risk time of delay and change of the number of propeller revolutions during the voyage

を軽減できるアルゴリズムとなっていることがわかる。

航海を通しての燃料消費量については、到着遅延リスクを考慮した MFR では 18.35 トンとなり、到着遅延リスクを考慮しない MFR の 18.37 トンとほぼ同じ値となった。この値は、実航路を航行した場合に比べ 8.79% 少なく、提案した到着遅延リスクを考慮した MFR によっても、到着遅延リスクを考慮しない MFR と同様の燃料の節約が可能であることが確認できた。

気象・海象予測データの解析を行った 2006 年 11 月の宇部～東京間における東航航路の 3 つの航海について同様なシミュレーションを行なった。到着遅延リスクを考慮した MFR で航行した場合、実航路を航行した場合に比べ、全てのケースについて燃料の節約が可能で、最大 18.27% であった。また、シミュレーションで求めた出発時に見積もっておくべき余裕時間の最大値は 0.87 時間で、これは指定航海時間の 2.6% であった。

そして、航海中のリレーティング計算を行うことにより、見積もるべき余裕時間を次第に少なくすることができ、最終的には指定された時刻に到着できることがわかった。

5. まとめ

本研究では、到着時刻の予測誤差の標準偏差を見積もることにより、到着遅延リスクを考慮した MFR による内航船の省エネルギー運航について検討した。まず、気象・海象予測データを解析して得られる海上風と波の予測誤差の平均、分散及び予測誤差間の相関を用いて到着時刻の誤差の標準偏差を求める方法を示した。この標準偏差を遅延リスクとして扱うことで、予定到着時間に遅れることなく、かつ燃料の節約が可能となる手法を開発し、シミュレーションによりその効果を確認した。

宇部～東京へ向かう航海について、4 航海分のシミュレーションを行なった。その結果、全てについて、出発時に見積もった余裕時間を、航海が進むにつれ徐々に減少させることができ、指定された到着時刻以前に到着でき、かつ燃料の節約が可能であることがわかった。

ウェザールーティングにおける航海中の気象・海象予測の不確実性を考慮すれば、航海の初期にあらかじめある程度の余裕時間を設定して航海し、後期で余裕時間が残っていれば、回転数を下げることにより到着時刻に合わせるような運航法が实际的であると考えられるが、到着遅延リスクを考慮した MFR のシミュレーションにより、このような運航が可能であることが確認できた。

今後、到着遅延リスクを考慮した内航船の省エネルギー運航の実用化に向けて、実船実験を行なう予定である。その準備として、様々な季節に対応できる海上風と波のデータをさらに収集して解析することにより、データを蓄積し、また、実船の航行可能海域を考慮する等、実際の利用に適するように改良を進めていく予定である。

謝辞

本研究は NEDO の受託研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」の一環として行なわれたものである。本研究で利用した気象・海象データや、モデルシップのパフォーマンスデータ等の提供・処理をしてくださった関係者の皆様に深謝いたします。

参考文献

- (1) 萩原秀樹, 庄司るり: 確率的なウェザールーティングに関する研究—航海時間と燃料消費量の標準偏差の推定精度—, 日本航海学会論文集,

No.104, pp.1-11, 2001.5

- (2) 萩原秀樹：気象・海象の予測精度情報に基づく確率的なウェザールーティング, 日本航海学会論文集, No.83, pp.155-167, 1990.9
- (3) 萩原秀樹：波浪予測精度を考慮して航海時間の誤差を見積もる一方法, 日本航海学会論文集, No.67, pp.137-147, 1982.9
- (4) 高嶋恭子, 加納敏幸, 小林充：高精度気象・海象予測データに基づく内航船の省エネルギー運航について, 日本航海学会論文集, No.118, pp.99-106, 2008.5
- (5) 加納敏幸, 小林充, 鳥海重喜：環境対応型航海支援システム, 海上技術安全研究所報告, 第7巻, 第4号, 2008.3

質疑応答

河合雅司（富山商船高等専門学校）：

波浪予測データの予測精度（予測誤差）はどのようにして計算されましたか。富山湾には冬季“寄り回り波”といううねり性波浪が北海道からやってきますが、つしま暖流を横切る時に伝搬方向が 30° 程度変化します。実際の数値計算ではうねりはまっすぐに伝搬させるためにうねり性波浪予報は困難ということになっています。

高嶋恭子：

ご質問ありがとうございます。

波浪の予測データ誤差の計算は 3.1 に示した手順で行っています。なお、今回のシミュレーションでは、御指摘のような性質を持つうねり性波浪は考慮しておりません。