

# 内航商船に対するウェザー・ルーティングについて

高 嶋 恭 子  
(東海大学海洋学部講師)

## 目 次

1. はじめに
2. 内航商船に対する最適航路について
  - 2.1. 最適航路の計算手法
  - 2.2. シミュレーションによる効果の検証
3. 内航商船の運航特性を考慮したウェザー・ルーティング
  - 3.1. リルーティングによる気象予測の誤差への対策
  - 3.2. 到着遅延リスクを考慮した運航計画の立案
  - 3.3. 航行海域の制限がある場合の燃料節約効果の検証
4. まとめ

## 1. はじめに

最近の原油価格高騰による運航コストに占める燃料費の割合は増加しており、船舶運航の分野においても燃料の節約を目的とした様々な対策が実施されている。また、地球環境保護の国際的な認知といった点からも、燃料節約が急務となっている。航海中の燃料消費量を削減するため、船体形状やプロペラ形状および機関性能等についての改良がなされているが、これらはハード面の改良であり、既存の船舶に対して応用する場合、相当長期にわたる改良期間とかなりのコストがかかると考えられる。一方、ソフト面から航海中の省エネルギー問題を解決しようとする試みとして、ウェザー・ルーティング (WR: Weather Routing) がある<sup>1</sup>。WRとは、“航海中の気象・海象状態をできる限り正確に予測し、対象船舶の耐航性能を考慮して、ある評価基準に基づいて最適な航路を選定すること”と定義される<sup>2</sup>。WRにより運航計画の改善を行い、省エネルギーを図ることは、既存船に対して即時に適応でき、適応範囲も広いと考える。

WRの研究は数多くなされ、技術の実用化が図られてきた。WRの研究には燃料の節約を目的としたものも多く、その効果についても実船実験等による評価が行われている。しかし、これらの研究のほとんどは外航商船を対象としたものであり、内航商船を対象としたものは少ない。内航商船は定時運航が最重要課題であり、航海時間が短く航路もほぼ固定されている。船陸間の情報伝達も十分とはいえず、これらの背景から内航商船に対するWRはあまり進められてこなかった。しかし、前述のような環境保護と原油価格の高騰に

対応するため、内航商船においても燃料の節約が強く求められるようになった。さらに、最近の気象・海象の予報技術の発達、通信技術の発達により内航商船に対するWRの実用化の可能性が増している状況にある。

本研究では内航商船に対するWRの実用化を目的とし、まず日本沿岸に就航中の内航商船を供試船とし、内航商船に対する最小燃料消費航路（MFR：Minimum Fuel Route）の計算法を検討し、その省エネルギー効果について、シミュレーションによる評価を行った。次に、内航商船に対して強く要求される定時運航を考慮した省エネルギー運航を実現するために、気象・海象の予報誤差に起因する到着時刻の誤差を少なくする手法としてルーティングの適用について考慮し、さらに到着遅延リスクを考慮した最小燃料消費航路の計算法のアルゴリズムについて提案し、シミュレーションにより評価を行った。さらに、実際の運航特性を考慮し、航行区域の制限がある場合のMFRについて述べ、燃料節約効果の検討を行う。

## 2. 内航商船に対する最適航路について

ウェザー・ルーティングとは「最適航路の選定」であるが、「最適」とは対象となる船舶の船種、船型、運航スケジュールや燃料油価格などにより大体以下の4つに分けられる<sup>2</sup>。

- ① 最安全航路
- ② 最短時間航路
- ③ 最小燃料消費航路
- ④ 最大経済性航路

現在の内航商船の背景を考慮すれば、求めるべき最適航路は最小燃料消費航路（MFR）であると考えられる。一般に、WRによるMFRの計算法として等時間曲線法、ダイナミック・プログラミング（DP：Dynamic Programming）、Dijkstra法がよく利用されている。

内航商船の運航特性として、航海時間が短い、航路が比較的短距離である等が挙げられ、内航商船を対象としたMFRを求める場合、内航商船の運航実態を考慮して、適切な計算法を選択する必要がある。

等時間曲線法は、計算時間が短く、広い範囲についての最適航路の選定に適した手法であり、航路選定の幅が広い大洋航路を航行する外航商船に対する最適航路の計算に広く用いられている。しかし、外航商船とは異なり、ほぼ決められた航路に沿って航行し、航路選定の幅が狭い内航商船に、この方法を適用することは困難である。一方、DPやDijkstra法は通常航行している航路を最適航路の選択肢の一つとして設定する事ができ、また、計算範囲（航路選定が可能な海域の範囲）に合わせた計算精度の重み付けの設定が容易である。

ここでは、MFRの算出にDijkstra法を用いた。Dijkstra法とは、最短時間経路問題を効率的に解くアルゴリズムのことで、1959年にオランダの情報工学者、E.W.Dijkstraにより考案された手法である。したがって、Dijkstra法では最適条件は航海時間となり、最短時間航路を求めることとなり、厳密な意味でのMFRではないが、航海中のプロペラ回転数を一定に保って航行する場合、最短時間航路をMFRとみなすことができる<sup>3</sup>。一般的に、

内航商船の運航においては、出航後まず予定航路の航程や外力を考慮し、指定された到着時刻までに目的地に到着できるようなプロペラ回転数を決定し、そのプロペラ回転数を保って目的地付近まで航行し、ある程度目的地に接近した時点でプロペラ回転数を制御することで定時運航を図っている。したがって、航海中のプロペラ回転数を一定とし、針路制御のみでMFRを求めるDijkstra法は実際の運航に見合っているものと考えられる。

### 2.1. 最適航路の計算手法

Dijkstra法によるMFR計算では、まず出発地 $P_0$ と目的地 $P_S$ の間に、任意に変針点 $P_l$  ( $l=1, 2, \dots, L$ , ただし $P_{L+1}=P_S$ ) を設定し、 $P_0$ を出発し、変針点を通して $P_S$ へ航行する基準となる航路を設定する。以下、この航路のことをSR (Standard Route) と記す。次に、任意の距離 $D$ を設定し、 $P_l$ から $P_{l+1}$ 間を $D$ に近い値で等分に分け、その等分点を通りSRと垂直に交わる線を描き、その線上に等間隔でグリッドを設定する。この同一線上のグリッドをグリッド列と記す。変針点 $P_l$ 上のグリッド列の設定は、 $P_{l-1} \sim P_l$ のグリッド列の向きと、 $P_l \sim P_{l+1}$ のグリッド列の向きの中間の向きに線を描き、その線上に同様にグリッドを設定する。船舶は、 $P_0$ を出航し、各グリッド列のグリッドを1つずつ経由して $P_S$ へ航行する (Fig. 1)。

このグリッド間の最適計算についてFig. 2により説明する。Dijkstra法によりMFRを求めるには、始めに航海時間を指定し、適当なプロペラ回転数を設定する。次に、このプロペラ回転数を航海中一定に保ち $P_0$ から $P_S$ までの最短時間航路を求める。

出発地 $P_0$ からグリッド $G(k+1, j)$ まで航海する最短時間 $T_{min}(G(k+1, j))$ は

$$T_{min}(G(k+1, j)) = \text{MIN}_i \{ T(G(k, i), G(k+1, j)) + T_{min}(G(k, i)) \} \quad (k=0, 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

により求められる。ここで、 $T(G(k, i), G(k+1, j))$  は直前のグリッド $G(k, i)$ から現在のグリッド $G(k+1, j)$ までの航海時間を示す。MINは右辺の $\{ \}$ 内を $i$ について最小化する事

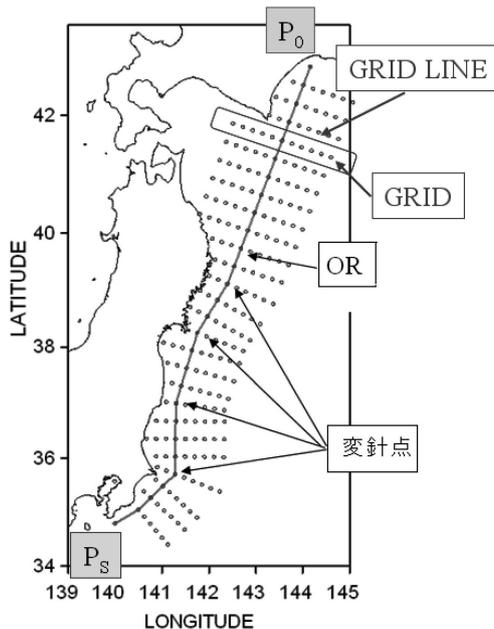


Fig. 1 Dijkstra法のグリッド設定例

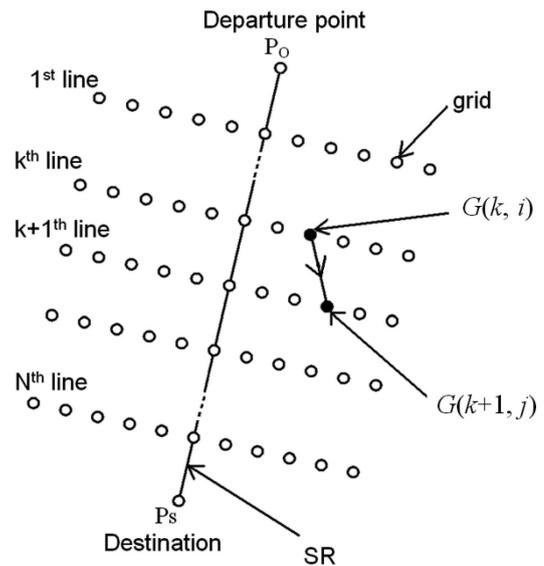


Fig. 2 グリッド間の計算方法

を意味する ( $k = 0$ のとき $G(0, i) = P_0$ とし、 $k = N$ のとき $G(N+1, j) = P_S$ とする)。

$P_0$ から $P_S$ までの最短時間航路と最短航海時間は、Dijkstra法の関数再帰方程式 (1) を用いて求めることができる。

次に、求めた最短航海時間が指定した航海時間に近づくようにプロペラ回転数を修正し、最短時間航路を求める計算を繰り返し、最短航海時間が指定した航海時間に十分に近づいたら、そのときの最短時間航路をMFRとする。

## 2.2. シミュレーションによる効果の検証

シミュレーションには、東日本および西日本の太平洋沿岸に就航中の内航商船2隻を供試船とした。船社への聞き取り調査により、供試船が通常変針点として設定している地点を調査し、その変針点を結び、その航路を常用航路とした。

まず、東日本太平洋側沿岸を航行海域とする供試船 (以下、A丸) について、2008年11月20日に釧路を出航し、東京へ向かう航海のシミュレーション結果をこのときの海流図と共にFig. 3に示す。この図より、MFRは釧路を出航後、南に流れる海流を利用してまっすぐに南下し、福島県沖の北向きの流れを避け、その後鹿島灘沖の強い順流を利用した航路となっていることがわかる。一方、常用航路は福島県沖の強い逆向きの流れを受けて航行する航路となっている。この他、MFRは航海に有利な海上風および波浪を利用した航路となっていることがわかった。この航海では、指定航海時間に到着するために必要なプロペラ回転数は、常用航路航行では134.6rpmであったのに対し、MFRでは131.3rpmに抑えることができ、常用航路を航行した場合の燃料消費量は54.55トン、MFRを航行した場合の燃料消費量は50.69トンで、MFRは常用航路に比べ7.1%の燃料節約が期待できるという結果であった。

次に、西日本太平洋側沿岸を航行海域にする供試船 (以下、B丸) について、2008年10月5日に足摺岬沖を出航し、東京へ向かう航海のシミュレーション結果をこのときの海流図と共にFig. 4に示す。この図より、MFRは強い黒潮を利用するためかなり沖まで出ていることが分かる。この航海では、指定航海時間に到着するために必要

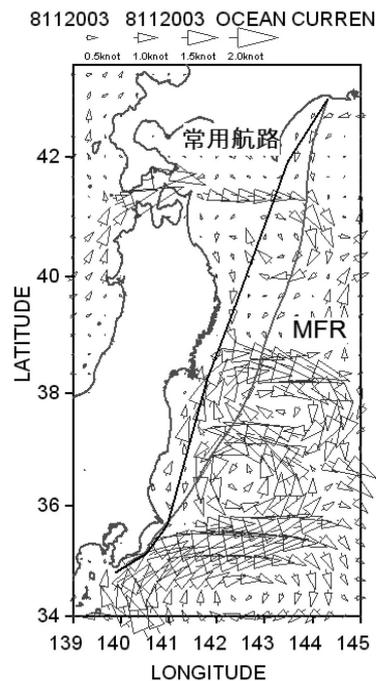


Fig. 3 釧路→東京航路のシミュレーション結果

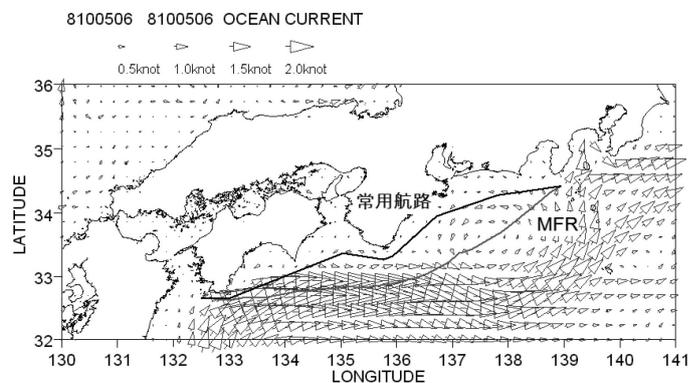


Fig. 4 足摺岬沖→東京航路のシミュレーション結果

なプロペラ回転数は、常用航路航行では152.8rpmであったのに対し、MFRでは143.7rpmに抑えることができ、常用航路を航行した場合の燃料消費量は14.63トン、MFRを航行した場合の燃料消費量は10.15トンで、MFRは常用航路に比べ30.6%の燃料節約が期待できるという結果であった。

2隻の供試船について、それぞれ出港日時を変更して同じ航路で数多くシミュレーションを行った。その結果、すべてのシミュレーションでMFRは常用航路と比べて燃料の節約が期待でき、MFRの形状は一定のものではなく、気象・海象に応じて航路の形状は異なることがわかった。

### 3. 内航商船の運航特性を考慮したウェザー・ルーティング

実際の運航時にMFR計算を行う場合には、予報気象・海象データを用いて行うこととなる。予報気象・海象データには予報誤差が含まれるため、求められるMFRは真のMFRとは言えず、また到着時刻にも誤差が生じる。本章では、予報気象・海象データを使用して求めたMFRを航行する場合、気象・海象の予報誤差による到着時刻の誤差がどの程度生じるかをシミュレーションにより算出し、その誤差の対応策としてリルーティング手法の利用について取り上げる。また、実船の運航方法を考慮し、予報気象・海象データの予報誤差について調査を行い、予報誤差に起因する遅延リスクを考慮してあらかじめ余裕を持って航行し、航海が進むにつれ徐々に遅延リスクの重みを減じ、指定到着時刻に遅れることなく到着できる運航計画のアルゴリズムについて説明し、その効果についてシミュレーションにより考察を行う。

さらに、内航商船には航海海域の制限がある。B丸については、実は沿海海域航行船であった。したがって、沿海海域を越えて航行することができず、黒潮を有効に利用することができない。そこで、航行海域に制限を持たせた場合どの程度の燃料節約効果が期待できるのかをシミュレーションにより検証する。

#### 3.1. リルーティングによる気象予測の誤差への対策

一般的に、気象・海象の予報精度は、予報期間の増加とともに劣化する。また、気象・海象の予報計算が実施されてから、WRに使用できるまである程度の時間を要するため、最新の予報データを用いたとしても、必ず予報誤差が含まれる。

予報期間が長くなることによる予報精度の劣化に対応するために、出航後も気象・海象の予報データが更新されるたびに、最新の予報気象・海象データを用いて、その時の地点から目的地までのMFRを再計算する必要がある。このような方法で、MFRを再計算することをリルーティングという。

リルーティング・シミュレーションの計算方法は、まず出発日時に使用することのできる最新の予報気象・海象データを用いて、出発地から目的地までのMFRを計算する。次に、求めたMFR上を解析気象・海象データ（実際の気象・海象データとみなす）を用いてシミュレーションにより供試船を航行させる。予報気象・海象データが更新されたら、これを用いてその時の船の位置から目的地までのMFRを再計算し、求めたMFR上を解析気象・海象データを用いてシミュレーションにより供試船を航行させる。この手順を供試

船が目的地に到着するまで繰り返し、最終的に目的地に到着する時刻を算出する。なお、予報気象・海象データは3時間毎に更新されるものとする。リルーティングを行った場合の到着時刻と指定到着時刻の差、およびリルーティングを行わなかった場合の到着時刻と指定到着時刻の差を求め、この2つの到着時刻の差を比較することによりリルーティングの効果について検討した。

一例として、A丸が2008年10月24日00時に釧路を出航し、東京へ向かう航海のリルーティング・シミュレーションの結果を示す。出航24時間後、供試船は房総半島沖を航行するがその時の海上風の予報データと解析データをFig. 5に示す。Fig. 5(1)は、出航時に得られる10月25日00時の予報データ、Fig. 5(2)は出航12時間後に得られる10月25日00時の予報データであり、Fig. 5(3)は10月25日00時の解析データである。

出航時に算出されたMFR上を指定航海時刻に到着できる必要プロペラ回転数で航行した場合、目的地への到着時刻は、指定到着時刻より43分早く到着するという結果であった。これは、予報気象・海象データが実際のものより厳しいものであったためである。気象・海象データが更新されるたびにリルーティングを行い、MFRとプロペラ回転数を適宜更新した結果、最終的な到着時刻の誤差は2分の遅延となった。リルーティングを行うたびに求めた到着時刻の誤差と更新されたプロペラ回転数をFig. 6に示す。図中の横軸は、出航後何回目のリルーティングであるか（以下、リルーティング番号と記す）を示し、棒グラフは到着時刻の誤差を示す。この値が正の場合は指定到着時刻より遅延することを意味し、負の場合は早着を意味する。また、折れ線グラフはリルーティングを行う毎に更新される必要プロペラ回転数を示す。リルーティングを行わない場合は、出航時に求めたプロペラ回転数134.8rpmを一定に保って目的地まで航行するが、リルーティングを行うこと

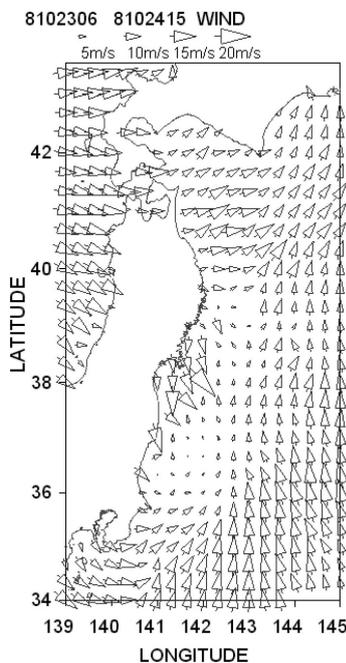


Fig. 5(1) 10月25日の海上風予報データ(出航時)

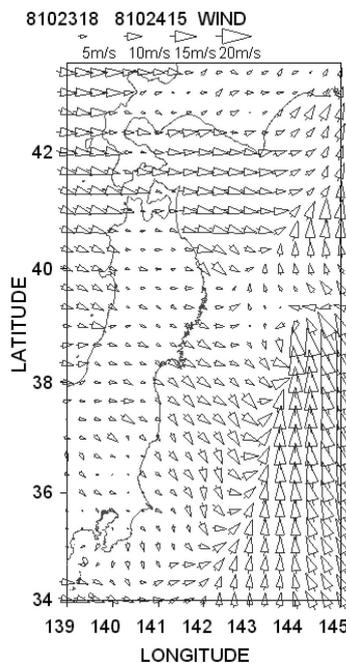


Fig. 5(2) 10月25日の海上風予報データ(出航12時間後)

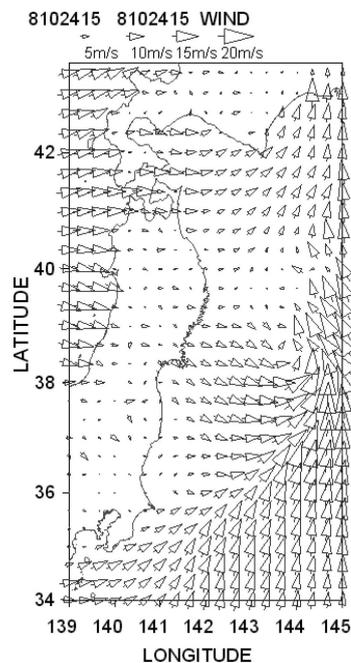


Fig. 5(3) 10月25日の海上風解析データ

でプロペラ回転数を徐々に落とすことができたため、5.5%の燃料の節約ができるという結果となった。

リルーティングを行うことにより、出航時に予測不可能な気象・海象の変化に対応することが可能となり、気象・海象の予報誤差による到着時刻の誤差を小さくすることができると考えられる。

さらに、予報値が実況値

より厳しく予報される場合には、リルーティングを行うことで適宜プロペラ回転数を落とすことができ、燃料の節約が可能と考える。

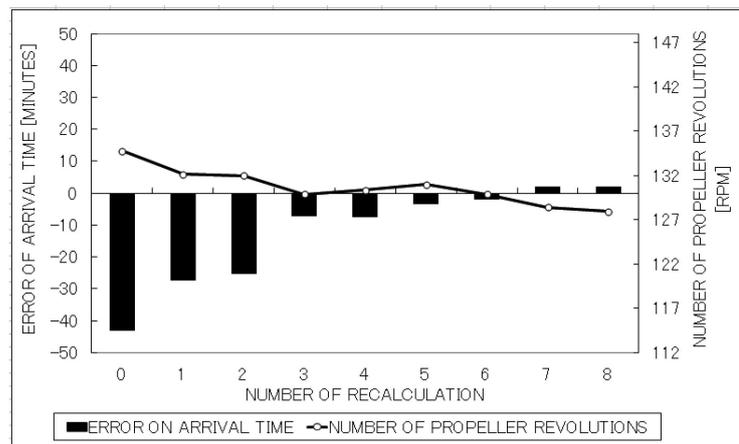


Fig. 6 リルーティングによる到着時刻の誤差量と必要プロペラ回転数

### 3. 2. 到着遅延リスクを考慮した運航計画の立案

内航商船にとって、定時運航は最重要課題であり、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とされている。前節において、リルーティングを行うことにより、気象・海象の予報誤差に起因する到着時刻の誤差を少なくすることが期待できることを述べた。しかし、実際の気象・海象が予報されたものより厳しい場合、航海始めの方ではプロペラ回転数を低く設定し、リルーティングを行う毎にプロペラ回転数を修正して指定到着時刻に間に合うような速力計画を提案するが、予報誤差が大きい場合は航海後半でプロペラ回転数を最大に設定しても遅延が発生する可能性がある。

実船の運航状況を見てみると、船舶は目的地への到着時刻の遅延を回避するために、不確実性を持った将来の気象・海象の変化に対応できるよう、航海の前半では到着時刻に余裕を持たせるよう少し早めの速力で航行し、ある程度目的地に近づいてから減速して時間調整を行っている。ここで問題となるのが、どの程度余裕を持てば遅延リスクを回避できるかということである。余裕時間を多く持てば遅延リスクは減るが必要以上に速力をあげることとなり、燃料節約効果が小さくなってしまう。逆に余裕時間を小さくすれば、遅延リスクが大きくなってしまう。

そこで、一定期間の気象・海象の予報誤差について調査し、どの程度の誤差が見込まれ、それにより船舶の速力にどれくらいの影響があるのかを考慮し、予測される到着時刻の誤差を推定することができれば、遅延を回避するために持つべき余裕時間を提示することができ、船舶にとって有用な情報となる。また、燃料の節約にもつながる。このような予報気象・海象データおよび気象・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、指定された到着時刻に目的地へ到着できる確率を一定に保ちながら、かつ航海中の燃料消費を最小とする航路のことを「到着遅延リスクを考慮した最小燃料消費航路」<sup>4</sup>と呼ぶことにする。

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。

- (a) 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。
- (b) その  $MFR_0$  の到着時刻の予測誤差の標準偏差  $\sigma_T$  を推定する。
- (c) 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。
- (d) 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、(b), (c), (d) 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、 $\sigma_T$  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。 $\sigma_T$  は予報気象・海象データの予測誤差の平均値と標準偏差、さらに海上風と波浪の予報誤差間の相関を調査することにより求められる<sup>5</sup>。

一例として、A丸が2008年12月11日に釧路沖を出航し、東京へ向かう到着遅延リスクを考慮したMFRのシミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは、リルーティングのみを行った場合、到着時刻に2分の遅延が発生するが、到着遅延リスクを考慮したMFR上を求められた航海計画に従って航行することで、指定された到着時刻に目的地へ到着できるという結果であった。Fig. 7にリルーティングを行う毎に計算した余裕時間とプロペラ回転数を示す。棒グラフが余裕時間、折れ線グラフはプロペラ回転数を示しており、リルーティングのみ行った場合を×印、遅延リスクを考慮した場合を○印で示す。横軸はリルーティング番号である。出航時に求めた余裕時間は20分であり、この余裕時間だけ早く目的地に到着するように航海計画を立てるため、プロペラ回転数は130.0rpmを必要とし、余裕時間を設定せずリルーティングのみの場合は128.4rpmであった。しかし、航海が進むにつれて余裕時間は徐々に小さくなるため、リルーティングのみを行う場合に比べプロペラ回転数の制御の幅を小さくすることができ、6回目の再計算ではリルーティングのみの場合より必要プロペラ回転数が小さい値となった。

燃料消費量を比較してみると、到着遅延リスクを考慮した場合は51.05トン、リルーティングのみを行った場合は

50.79トンであり、到着遅延リスクを考慮すると0.5%燃料消費量が多くなる結果であったが、その差はほとんど無視できる程度であった。したがって、考案した到着遅延リスクを考慮し余裕時間を持たせた速力計画を立てても、同程度の燃料節約効果が期待できるといえる。

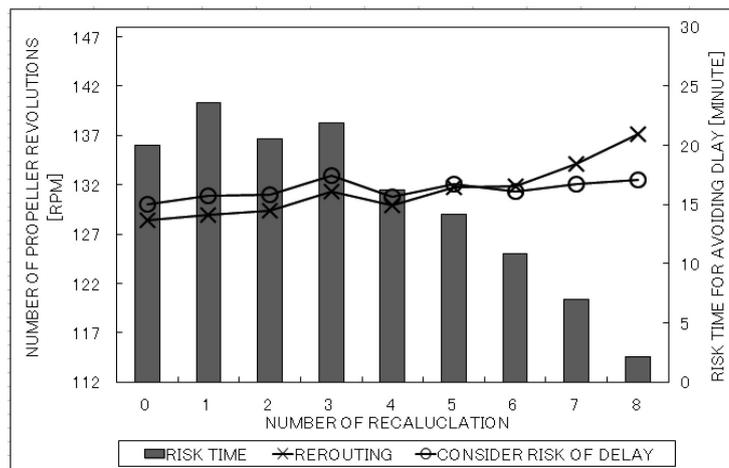


Fig. 7 余裕時間とプロペラ回転数の変化

### 3.3. 航行海域の制限がある場合の燃料節約効果の検証

B丸は沿海区域航行船のため可航海域に制限がある。基本的には海岸から20マイル以内の水域を航行することが船舶安全施行規則で定められている。足摺岬沖から東京に向かう東向き航路について、ある一定期間出発日時を変更してMFR計算を行い、求めたすべてのMFRについて、航行海域に制限を設けない場合をFig. 8に、沿海区域の制限を設けた場合をFig. 9に常用航路を太い線で、MFR群を細い線で共に示す。Fig. 8では、東に流れる黒潮を効率よく利用するためかなり沖まで航路選定の海域となっており、航路の形状も気象・海象に合わせて様々に変化している。一方、Fig. 9では、航路選定のための海域が狭くMFRは常用航路に近い航路となっているが、一様に最短距離航路を選んでいるわけではなく、可航海域範囲内で航海に有利な海上風、波浪及び海流の海域を選んだ航路となっている。

2008年11月の1カ月間、毎日00時に出発地を出航して目的地に向かうシミュレーションを行い、常用航路に対するMFRの燃料節約量の計算を行ったところ、航行海域に制限のない場合は平均18.4%、沿海区域の制限を付けた場合は3.9%の節約量であった。したがって、対象とする船舶の要求に合わせて海域の制限をしても燃料節約効果があることがわかった。

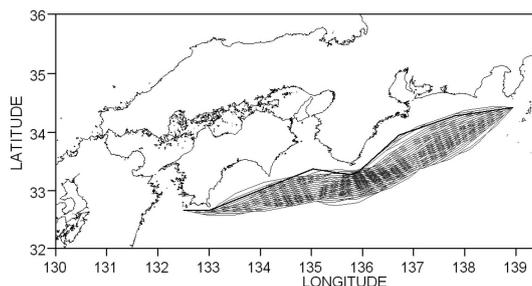


Fig. 8 航行制限のない場合のMFR

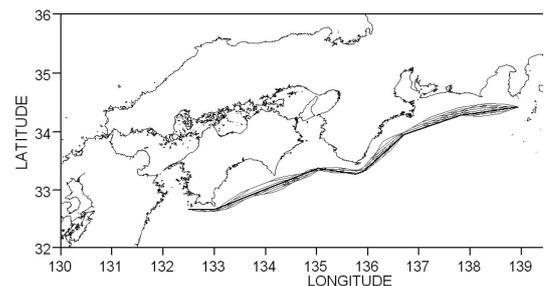


Fig. 9 沿海区域でのMFR

## 4. まとめ

本論文では、日本沿岸を航行海域とする船舶を対象として、MFRの計算手法について述べ、シミュレーションによりその効果を確認した。内航商船にとって最重要課題である定時運航を考慮し、気象・海象の予報誤差に対する方法として、リルーティングの効果について示した。また、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についての検討を行った。さらに、対象とする船舶の航行区域を考慮したMFRの燃料節約効果についての検証を行った。

その結果、提案した計算手法で求めたMFRは、船舶が通常航行している航路を航行するより燃料の節約が期待でき、航行時の気象・海象に応じたMFRを選択できることが分かった。内航商船の最重要課題である定時運航については、リルーティングを行うことにより、出航時に予測できない気象・海象の変化に対応したMFRを提供できることが確認できた。また、気象・海象データを調査し、予測誤差について解析を行い、それに基づいて航行中に持つべき目的地への余裕時間を求めることにより、リルーティングでは補いき

れない気象・海象の大きな変化にも対応でき、遅延リスクを小さくできることが確認できた。さらに、対象とする船舶の航行海域や運航形態、その他要求に合わせたMFRの算出が可能であり、設定範囲内で燃料の節約効果が期待できるMFRを提供できることが確認できた。

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」及び「内航船の環境調和型運航計画支援システムと陸上交通情報連携に関する実用化研究開発」の一環として行われたものである。関係者の皆様に深謝いたします。また、本論文は、東海大学海洋学部「海事研究プロジェクト（海事研究センター）」研究報告第2号に掲載した内容を加筆修正したものである。

- 
- <sup>1</sup> 萩原秀樹、巻島勉：最適航路に関する考察、日本航海学会論文集、pp.77-87, 1980.03
  - <sup>2</sup> ウェザー・ルーティング研究グループ：ウェザー・ルーティング－気象情報に基づく最適航法－、成山堂書店、1992
  - <sup>3</sup> Takashima, K. & et al., On the fuel saving operation for coastal merchant ships using weather routing, 8<sup>th</sup> International symposium on marine navigation and safety of sea transportation, pp.431-436, Jan. 2009.
  - <sup>4</sup> 高嶋恭子、加納敏幸、小林充：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、日本航海学会論文集、No.119, pp.145-151, 2009.03
  - <sup>5</sup> 高嶋恭子：省エネルギー運航を目的とした内航商船のウェザー・ルーティングに関する研究、学位論文、東京海洋大学、2009.09