

内航船の最小燃料消費航路計算 アルゴリズムについて

高嶋 恭子（東京海洋大学大学院）、田丸 人意（東京海洋大学）

Algorithm of Calculating Minimum Fuel Route for Coastal Ships

by

Kyoko TAKASHIMA and Hitoi TAMARU

1. はじめに

船舶の運航コストにおいて燃料費の占める割合は非常に大きく、近年の原油価格高騰に伴い航海中の燃料をいかに節約するかはきわめて重要な問題となっている。また、温室効果ガスの排出量制限が数値目標として提示されたため、内航船も排ガス規制が要求されている。その点でも燃料の節約はきわめて重要な課題である。

これまで、内航船は燃料の節約よりも定時運航に重点が置かれてきた。実際の運航では遅延リスクを回避するため、航海中の不確実な気象・海象状況を考慮して、かなりの余裕をもって目的地へ到着できるような運航を行なっている。もし、高精度な気象・海象予測データを利用でき、この余裕時間を航海時間に還元し適切な減速運航を行なって、定時運航を達成することができれば、サービスの質を低下させることなく燃料消費量・環境負荷低減を図ることができる。

本研究では、高精度な気象・海象データを利用し、内航船に対する最小燃料消費航路計算のアルゴリズムを開発した。これにより、船体等ハード面での改造をすることなく、既存の船で省エネルギー運航を行なうことが可能となる。開発したアルゴリズムの有効性を確認するために、東京～苫小牧／釧路航路に就航中の船舶をモデルとし、シ

ミュレーションを行なうこととした。

2. 最小燃料消費航路の 計算アルゴリズム開発

最小燃料消費航路（以下 MFR（Minimum Fuel Route））の計算には、ダイナミック・プログラミング（以下 DP（Dynamic Programming））を使用した。DP は多段決定問題を解くための強力な最適化手法である。燃料を節約するのに航海中のプロペラ回転数の制御がどのくらい効果があるのかを確認するために、航海中、針路制御に加えてプロペラ回転数もダイナミックに制御して MFR を求める方法と、航海中、針路制御のみで MFR を求める方法の2つを開発した。なお、MFR を求める問題において、航海時間（出発時刻および到着時刻）は指定されているものとする。

2.1 後進型 DP による方法

航海中、針路制御に加えてプロペラ回転数もダイナミックに制御して求める MFR の計算には、後進型 DP を用いた。出発地点 P_0 と目的地 P_s の間に任意に変針点を設定し、 P_0 から P_s へ航行する基準となるルート（以下 SR（Standard Route））を設定する。各変針点間をそれぞれ等分し、等分点を

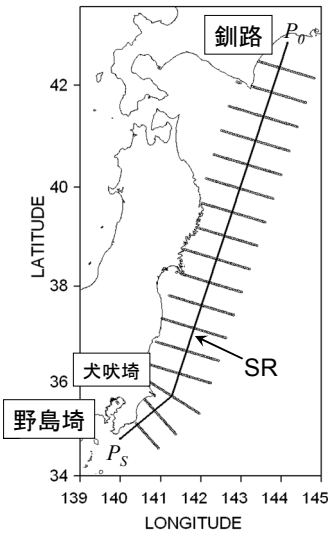


Fig.1 Grid points for DP and SR between Kushiro and Nojima Saki

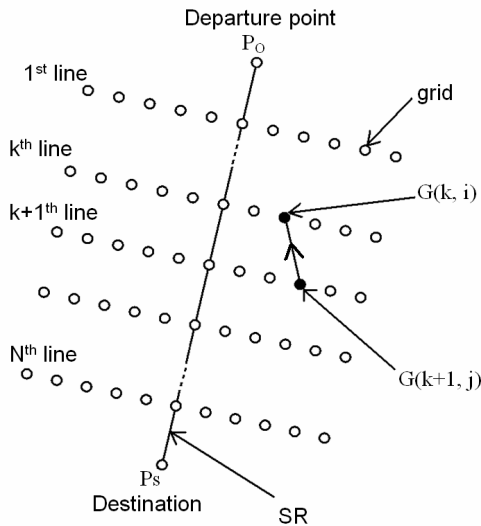


Fig.2 Grid points of DP for calculation of minimum fuel route

通り SR に直交するラインを設定し、そのライン上に等間隔に多数のグリッドを設置する。以下、この同一ライン上のグリッドをグリッド列と呼ぶ。

それぞれの変針点間のグリッド列の間隔はなるべく近い値とし、変針点上のグリッド列の方向は、その直前と直後のグリッド列の方向の中間値を取ることとした。このような手順で設定された釧路沖から野島埼沖までのグリッドを SR とともに Fig.1 に示す。船舶は、 P_0 を出航し各グリッド列のグリッドを順に 1 つずつ経由して P_s へ航行する。

P_0 から k 本目のグリッド列上の i 番目のグリッドを $G(k, i)$ と書くことにする。船は $G(k, i)$ を時刻 t_k に出発し、 $k+1$ 本目のグリッド列上の j 番目のグリッド $G(k+1, j)$ に時刻 t_{k+1} に到達するものとする (Fig.2 参照)。このとき、 $G(k, i)$ から $G(k+1, j)$ までの燃料消費量は $F(G(k, i), G(k+1, j), t_k, n_k)$

と表すことができる。ここで n_k は、 $G(k, i)$ から $G(k+1, j)$ まで航海する間のプロペラ回転数である。

また、 $G(k+1, j)$ への到達時刻 t_{k+1} は

$$t_{k+1} = t_k + T(G(k, i), G(k+1, j), t_k, n_k) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $T(G(k, i), G(k+1, j), t_k, n_k)$ は、 $G(k, i)$ から $G(k+1, j)$ までの航海時間である。

時刻 t_k に $G(k, i)$ から P_s を目指して出発した場合の P_s までの最小燃料消費量 $F_{\min}(G(k, i), t_k)$ は、 $G(k, i)$ から $G(k+1, j)$ までの燃料消費量と、時刻 t_{k+1} に $G(k+1, j)$ から P_s を目指して出発した場合の P_s までの最小燃料消費量との和を、 j と n_k により最小化することで求められる (ただし、 P_s に指定した到着時刻より早く到着できることを条件とする)。 $F_{\min}(G(k, i), t_k)$ は、式 (2) により求められる。

$$F_{\min}(G(k, i), t_k) = \min_{j, n_k} \{ F(G(k, i), G(k+1, j), t_k, n_k) + F_{\min}(G(k+1, j), t_k + T(G(k, i), G(k+1, j), t_k, n_k)) \} \quad (2)$$

$$(k = N-1, \dots, 1, 0)$$

ここで $\min_{j, n_k}$ は、右辺の $\{ \}$ 内を j と n_k について最小化することを意味する ($k=0$ のとき $G(0, i) = P_0$ とする)。

また、 P_s の直前のグリッド列が P_0 から N 本目とすると、グリッド $G(N, i)$ から P_s まで航海する間の最小燃料消費量 $F_{\min}(G(N, i), t_N)$ は式 (3) より求められる。

$$F_{\min}(G(N, i), t_N) = \min_{n_N} \{ F(G(N, i), P_s, t_N, n_N) \} \quad (3)$$

このように、 N 本目のグリッド列から P_0 へグリッド列を 1 本ずつ後退しながら、各グリッドから P_s までの最小燃料消費量を算出し、最終的に P_0 から P_s までの最小燃料消費量を求める。式 (2)、式 (3) が後進型 DP の関数再帰方程式である。

なお、以上の計算において、各グリッドを出発する時刻も状態変数である。すなわち、式 (2) において出発時刻 t_k は、グリッド $G(k, i)$ を出発する可能性のある時間帯に、等しい間隔で多数設定される。

この方法で計算された MFR のことを以下 MFR-B (Minimum Fuel Route by Backward DP) と呼ぶ。この MFR-B は厳密な意味で真の最小燃料消費航路である。

2.2 前進型 DP による方法

後進型 DP の計算は計算量が多く、MFR を求め

るのにかなりの時間を要する。また、将来の気象・海象予測データの不確実性を考慮すれば、航海中にプロペラ回転数を大幅に制御するのは実用的ではない。そこで、前進型 DP を用いてプロペラ回転数を航海中一定とし、針路制御のみで MFR を求める方法を開発した。

前進型 DP は最短時間航路を求める手法であるが、これを利用して MFR を求めるにはまず、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、そ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 $G(k, i)$ まで航海する最短時間 $T_{\min}(G(k, i))$ は

$$T_{\min}(G(k, i)) = \min_j \{ T(G(k-1, j), G(k, i)) + T_{\min}(G(k-1, j)) \} \quad (4)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N+1)$$

により求められる。ここで、 $T(G(k-1, j), G(k, i))$ は直前のグリッド $G(k-1, j)$ から現在のグリッド $G(k, i)$ までの航海時間を示す。 $\min_j$ は右辺の $\{ \}$

内を j について最小化する事を意味する ($k = N+1$ のとき $G(N+1, i) = P_s$ とする)。前進型 DP の関数再帰方程式 (4) を用いて、 P_0 から P_s までの最短時間航路と最短航海時間を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。この方法で求められた MFR のことを以下 MFR-F (Minimum Fuel Route by Forward DP) と呼ぶ。

MFR-F は厳密な意味での MFR とは言いえないが、航海中、プロペラ回転数を一定に保って航海する場合の MFR と見なすことができる。MFR-F を求めるには針路のみについて最適化を行えばよく、MFR-B に比べ計算量が少ないので、計算時間の短縮が可能である。

3. 最小燃料消費航路計算アルゴリズムを使用したシミュレーション結果

2 章で述べたアルゴリズムを用いてシミュレーションを行ない、効果を確認した結果について以下に説明する。シミュレーションには、実際に日本沿岸を定期運航している RO-RO コンテナ船をモデルとし、この船舶の速力推定式、エンジン出力推定式を用いた。モデルとした船舶の実航海データ入手し、

出発時刻・位置、到着時刻・位置情報に基づいてシミュレーションを行ない、実航路を航行した場合と、シミュレーションにより求めた最小燃料消費航路とを比較した。

実航路を航行した場合の燃料消費量を求めるには、出発位置から到着位置まで航行するのに実際にかかった時間を指定航海時間とし、指定航海時間と誤差 0.02 時間以内で実航路上を航行できるプロペラ回転数をシミュレーションにより求めて、そのときの燃料消費量を求めた。なお、航海中のプロペラ回転数は一定とした。

シミュレーションには、風向・風速、波高・波向・波周期に加え、海流・潮流データも使用して計算を行なった。

3. 1 最小燃料消費航路と実航路との比較

以下の条件で、釧路～野島埼沖まで航行する南航航路についてシミュレーションを行ない、実航路（以下 ACTUAL）、MFR-B、MFR-F について比較した。得られた MFR-B、MFR-F、ACTUAL を、出航から約 10.5 時間後の海流図と共に Fig.3 に示す。MFR-B を緑色、MFR-F を青色、ACTUAL を赤色で示す。

- 出発日時 : 2007 年 1 月 31 日 07:34 (JST)
- 出発地 : $42^{\circ} 48.60' N, 144^{\circ} 09.17' E$
- 到着日時 : 2007 年 2 月 1 日 06:13 (JST)
- 目的地 : $34^{\circ} 53.78' N, 140^{\circ} 00.13' E$
- 指定航海時間 : 22.65 時間

まず、MFR-B と MFR-F を比較すると、両航路

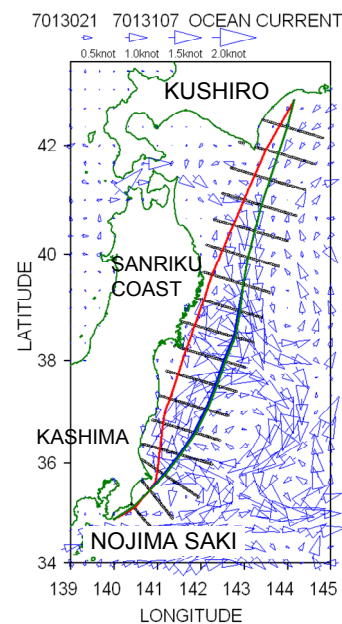


Fig.3 MFR-B, MFR-F and actual route

とも陸岸から離れた航路を採用しており、ほぼ同じ形状であった。また、燃料消費量は MFR-B は 61.27 トン、MFR-F は 61.17 トンで、ほとんど差がなかった。したがって、航海中のプロペラ回転数をダイナミックに制御しなくても、針路選定のみで十分に燃料の節約が可能であったことがわかる。以下、MFR-F と ACTUAL について結果を比較する。

MFR-F は陸岸から離れた航路となっているのに比べ、実航路は釧路沖を出航後、三陸海岸のトドガ埼へ向けて航行し、その後陸岸に沿って航行する航路となっている。燃料消費量を見てみると、MFR-F は 61.17 トンであったのに対し、実航路は 64.72 トンであり、MFR-F では実航路に比べ 5.5% の節約が可能であるという結果となった。Fig.3 を見てみると、実航路は三陸沖と鹿島沖において強い逆向きの海流を受けて航行しており、一方 MFR-F は、三陸沖の南方へ流れる海流を利用し、鹿島沖の強い北向きの海流を避ける航路となっている。したがって、この海域では燃料の節約に海流の影響が大きかったことがわかる。

得られた実航海データのうち、釧路沖～野島埼沖の実航データが 8 航海分得られたので、そのすべてについて MFR-F と実航路のシミュレーションを行なった。その結果得られた燃料消費量を出発日時ごとに Fig.4 に示す。すべてのシミュレーションで MFR-F は実航路より燃料を節約しており、平均 4.8% の節約が可能であるという結果となった。

以上より、開発したアルゴリズムはあらゆる出発日時についても最小燃料消費航路が得られ、省エネルギー運航に有効であるということが確認できた。

3. 2 リルーティング

3.1 で述べたシミュレーションでは、出航時に予測された気象・海象データを利用して MFR の計算を行なった。使用した気象・海象データは 3 時間毎に更新されている。出航時に予測不可能であった気象・海象の変化に対応するために、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・海象データを用いて最小燃料消費航路を再計算する必要がある。このように最適航路を再計算することをリルーティング (rerouting) という。リルーティングの効果を確かめるために、モデルシップのリルーティング・シミュレーションを 3.1 と同じ出発・到着条件で行なった。

リルーティング・シミュレーションの計算方法は、まず最新の気象・海象予測データを用いて現

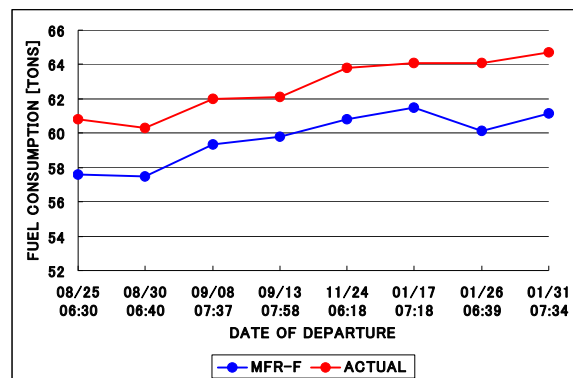


Fig.4 Fuel consumption on MFR-F and actual route for various departure time

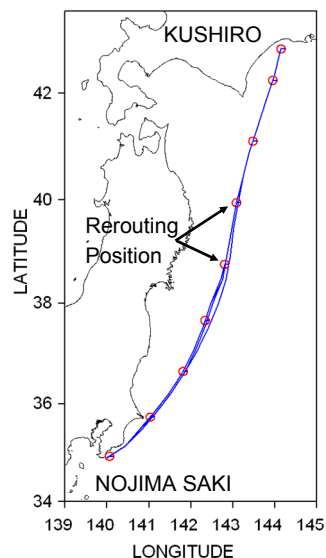


Fig.5 Recalculated MFR-Fs during the voyage

在地点から目的地までの MFR-F を計算し、その MFR-F 上を航行する。次に、気象・海象予測データが更新されたら、その時点で更新された予測データを用いて目的地までの MFR-F を再計算し、その MFR-F 上を航行する。この手順をモデルシップが目的地 (野島埼沖) に到着するまで繰り返す。最終的に出発地から目的地まで得られた MFR を以下 MFR-RE と呼ぶ。

リルーティング・シミュレーションの結果を Fig.5 に示す。この図には出発地から目的地まで予測データが更新される度に計算した 9 本の MFR-F が示されている。図中の○印はリルーティングを行なった地点を示す。各地点で再計算した MFR-F はほぼ一致しており、このシミュレーションでの MFR-RE の燃料消費量は MFR-F より 0.10 トン多い 61.27 トンであった。気象変化と MFR-RE のプロペラ回転数を比較してみたところ、MFR-RE では出航後 16.5 時間あたりでプロペラ回転数が MFR-F より大きくなり、航海終了前の約 3

時間は MFR-F より約 1.3RPM 大きくなっていた。これは航海後半について、航海前半とは逆に、出航時に予測できなかった航行に不利な気象・海象状況に遭遇したためである。以上のことより、リルーティングは運航スケジュールを保ちつつ、燃料を節約するのに必要不可欠なものであると言える。

4. まとめ

本研究では、内航船に対する最小燃料消費航路を求めるアルゴリズム開発し、シミュレーションによりその効果を確認した。まず、指定された航海時間以内で目的地に到着できる MFR を計算するアルゴリズムを 2 通り開発した。1 つは後進型 DP を用いて、航海中、針路制御に加えプロペラ回転数もダイナミックに制御して MFR-B を計算する方法、もう 1 つは前進型 DP を用いて、航海中、針路制御のみで MFR-F を計算する方法である。

次に、開発した MFR を求めるアルゴリズムの有効性を確認するために釧路沖～野島埼沖の航海を対象としてシミュレーションを行ない、MFR の燃料消費量を求めた。そして、モデルシップの実航路上をシミュレーションで航走させた時の燃料消費量と比較した。シミュレーションの結果を以下に示す。

- (1) MFR-B と MFR-F の形状はほとんど同じで、燃料消費量にも差がなかった。したがって、燃料の節約には、プロペラ回転数をダイナミックに制御するより、有利な気象・海象が利用できる航路を選定するほうが重要である。
- (2) 今回のシミュレーションでは、燃料の節約に海流が大きく影響した。開発したアルゴリズムは海流の影響を正確に考慮することができた。

- (3) すべてのシミュレーションで MFR-F は、モデルシップの実航路上をシミュレーションで航走させた場合と比べ燃料を節約することができ、8 航海の平均で 4.8% の節約が可能であるという結果となった。

- (4) リルーティングを行なうことにより、出航時に予測できない気象・海象の変化に対応した航海が可能となる。

今後、「到着時刻の遅延リスクをある一定確率以下に抑える MFR」を求める研究を行なう予定である。そのために、気象・海象予測データの予測精度（予測誤差の共分散行列、相関係数）を解析し、その予測精度情報を用いて、到着時刻の予測誤差の標準偏差を推定するアルゴリズムを開発する。また、リルーティング・シミュレーションを数多く実施し、遅延リスクを考慮した省エネルギー運航法の有効性を検証する。

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。本研究で使用した気象・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（独）海上技術安全研究所、（財）日本気象協会の皆様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 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, No.111, pp.259-266, 2004.9
- 2) 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, No.64, pp.80-81, 1980.1