

# A\*アルゴリズムをベースとした最適航路評価法 および船舶搭載用コンパクト海洋モデルの開発

学生会員○黒澤 賢太（神戸大学） 非会員 内山 雄介（神戸大学）  
非会員 小碓 大地（港湾空港技研） 非会員 多田 拓晃（神戸大学）

## 要旨

本研究では、グラフ探索アルゴリズムの一つであるA\*法をベースに、地球の球面効果と船舶の船速に影響を与える海流の効果を考慮したルーティング計算モデルを開発し、最短距離航路、最短時間航路、最小燃料消費航路を求め、いくつかの事例に適用することでその有用性についての評価を行った。また、内航船航路では瀬戸内海のような狭い海域を通過し、既存の海況予報データでは時空間解像度が低く、必ずしも適さないという問題があるため、航行中の船舶上のパソコン等で簡単に計算できるように軽量化したウェザールーティング用のコンパクト海洋モデルを構築し、その妥当性についても検討した。

キーワード： 航路・航海援助施設、航路選定、ウェザールーティング、海洋モデル、A\*アルゴリズム

## 1. 研究背景

近年、地球温暖化が問題視されるようになり、温室効果ガスの削減が強く求められている。船舶から排出される温室効果ガスの削減に向けた燃料消費効率の向上のための技術として、海流などの海象気象情報を有効利用するウェザールーティング（以下、WR と呼称）に大きな期待が寄せられている。しかしWRで航路選定をする際、船舶は海洋上であらゆる方向に進行し得るため膨大な数の経路探索が必要となり、計算効率の面で重大な問題がある。さらにWRでは専門機関が公表する海象気象予報データを利用することを前提としているが、例えば瀬戸内海などに見られる狭い海域や水路を通過する内航船航路では、微細な地形の影響を受けて時々刻々と変化する潮流が流れに対して支配的になるため、上記の公表データでは時空間的解像度が不十分な場合がある。そこで本研究では、WRのための新しい航路選定アルゴリズムを開発し、いくつかの事例に適用して、経路変更に起因する燃料消費量などへの影響を定量的に評価し、その有用性を検証する。さらに航行中の船舶上で海況予報を行うための軽量のWR用海洋モデルを構築し、その妥当性について検討した。

## 2. 最適航路評価法

本研究では、グラフ探索アルゴリズムの一つであるDijkstra法を一般化したA\*法をベースにルーティング計算モデルを開発した。A\*法では、目的地までの期待値であるヒューリスティック関数 $h$ を導入することで大規模なノード・リンク構造を持つ海洋で

の経路探索を実用的な計算時間で行うことができる。通常のA\*法では $h$ およびノード間移動コスト $\chi$ として単にユークリッド距離を用いて最短経路を探索するが、本研究ではさらに地球の球面効果を $h$ と $\chi$ に、船舶の速度に影響を与える海流の効果を $\chi$ に組み入れた。その結果、本WRシステムでは、出発地と目的地の2点間の最短距離経路、エンジン開度を一定として求める最短時間経路、海流に対する相対船速を一定として求める最小燃費経路の3通りの経路を探索することが可能となった。

## 3. 外航船航路への適用

まず、開発したWRシステムを、北西太平洋海域モデル(1)を用いて東京・沖縄間の外航船航路に適用し、日本列島の太平洋沿岸を北上する黒潮による経路選択への効果を考慮した3通りの最適航路選定法について解析を行った(図-1)。今回の検証では船舶は船速10ノットで進むものと仮定し、さらに簡単のためにルーティングは行わず、出発時の海象条件のまま目的地まで移動すると仮定した。

最短距離経路は、陸地を避けながら出発地と目的地を結ぶ単純な最短距離経路となるため、ほぼ直線的になっている。最短時間経路は、最短距離経路に比べると順方向の黒潮を多く利用しており、四国沖では余分な迂回をせずに、紀伊半島沖で黒潮に合流した後しばらく黒潮に沿って進行している様子が見取れ、その結果、移動時間は約4時間短縮された。最小燃費経路は、九州南岸沖から遠州灘に至るまでの長距離にわたって黒潮を利用した航路となり、燃

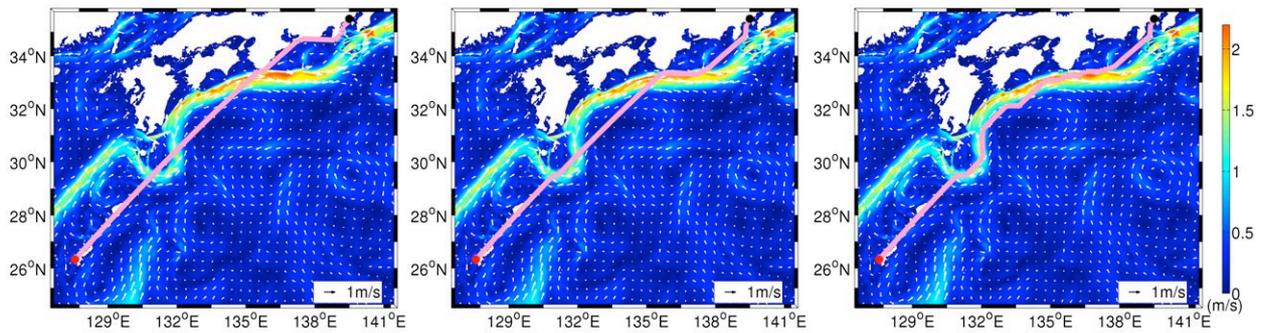


図 1 沖縄から東京へ向かう外航船航路への適用例. 左から, 最短距離法, 最短時間法, 最小燃費法による経路 (マゼンタ線). 表層流速ベクトルおよびその絶対値 (カラー) も同時に示している.

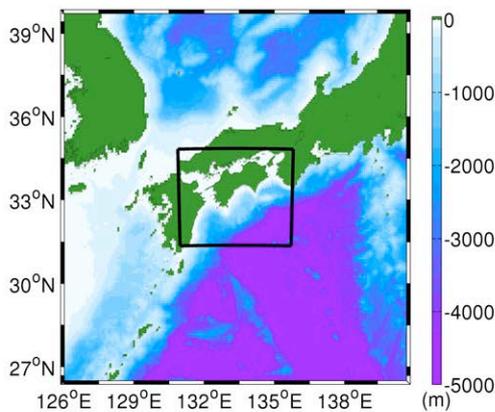


図 2 船舶搭載を志向した WR 用コンパクト海洋モデルによる瀬戸内海全域に対する計算領域 (黒枠). カラー: 水深 (m).

費は 17.6% 向上するという結果になった. 以上の結果から, 本 WR モデルは目的にあった 3 種類の航路を適切かつ効率的に評価できることが確認された.

#### 4. 潮流を考慮した内航線航路経路探索

例えば, WR 用の海象情報として JAMSTEC による海洋再解析・予報データセット JCOPE2<sup>2)</sup>を使用する場合, その水平空間解像度は 10 km, 時間分解能は 24 時間が標準である. これに対して瀬戸内海のような内航船航路では主に M2, S2 による半日周期潮流が卓越し, しかも海峡部などの地形によって水平流速分布は複雑なものになる. 外航船においても WR に必要となる大量の気象・海象データを航海中に逐次収集することは必ずしも現実的ではない. そこで, 出航前に収集した情報に依拠しながら, 航海中の船舶上のパソコンやタブレットなどを用いて海況予報を行う WR システムの開発を最終目標として, 予報精度を著しく損なうことなく可能な限り軽量化した

表-1 WR 用コンパクト海洋モデルの計算条件

計算期間	2013 年 2 月の 1 ヶ月
格子数	224 × 192 × 鉛直 20 層
水平空間解像度	2.0 km
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM (1 時間平均値)
海面フラックス	COADS (月平均気候値)
潮汐	TPX07.2

WR 用のコンパクト海洋モデルを構築し, 瀬戸内海航路に適用した (図-2, 表-1). 本モデルのベースとなるのは領域海洋循環モデル ROMS<sup>3)</sup>であり, 広域海流情報, 成層構造, 潮汐および潮流, 海上風, 海面熱・放射フラックスなどは標準的なデータセットを用いた. 具体的には, JCOPE2 (水平解像度約 10 km) にネスティングさせ, 瀬戸内海全域を含む海域 (図-2) を水平解像度 2 km, 鉛直 20 層の比較的粗い格子で表現し, 熱フラックスの逐次計算を省略するなど計算条件を一部簡素化することにより, 1 日分の海流予測が市販のノートパソコンを使って約 4 分で完了するように設計した.

コンパクト海洋モデルと WR を統合した経路評価の一例として, 大阪から徳島に向かう瀬戸内海における内航船航路を取り上げる. ここでは最短時間経路法を用い, 海況予報計算結果に基づき 1 時間毎のリルーティングを用いて逐次探索を行った. 2013 年 2 月 22 日 12 時 (UTC) および同日 18 時に大阪を出航した場合の経路を見ると (図-3), 航路, 移動距離, 移動時間はほぼ変わらないが, 18 時出航の場合に燃料消費効率が 15.4% も向上するという結果を得た. 出航する日にちは同じであっても, 出発する時刻が変わってくるにより燃料消費量に差が出てくる要因としては, 瀬戸内海で卓越する半日周期潮流に伴う潮流が原因であると考えられる. そこで,

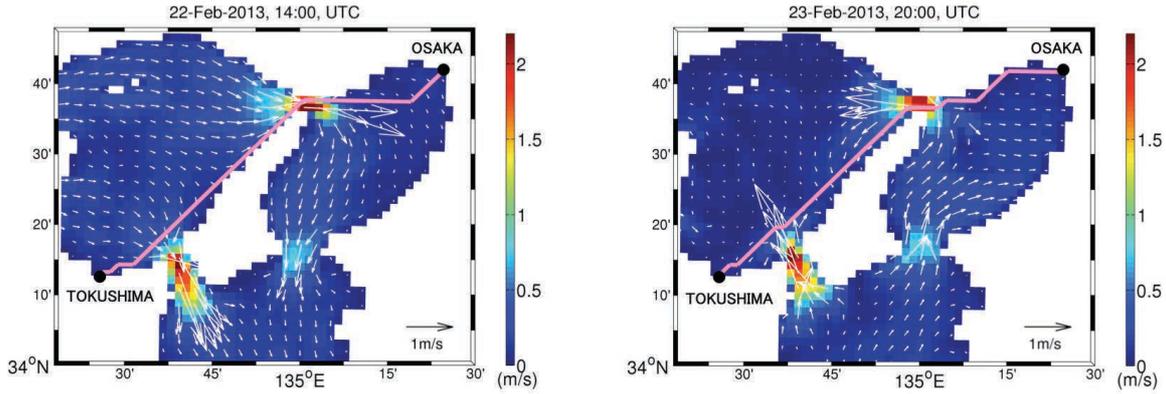


図 3 大阪から徳島へ向かう内航船航路への適用例. 左：12 時出航・14 時における表層流速分布，右：18 時出航・20 時の状況. マゼンタ線は最短時間経路，矢印は 1 時間平均表層流ベクトル，カラーは流速絶対値.

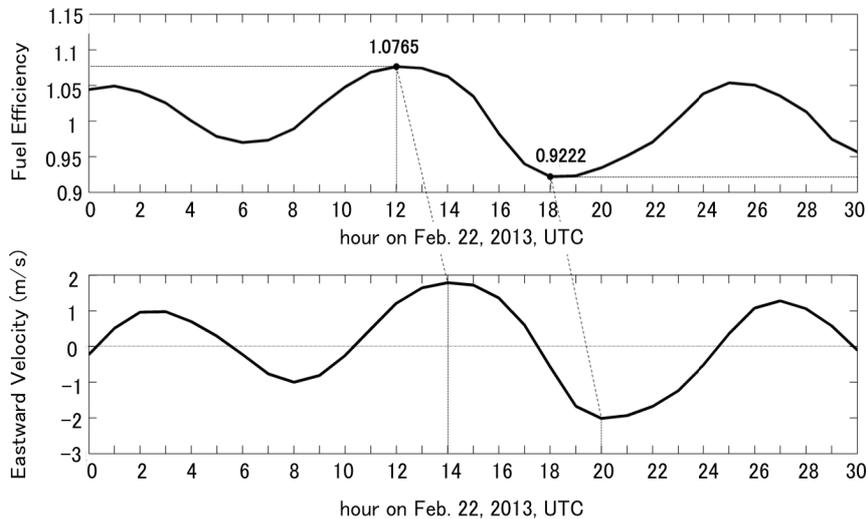


図 4 出航時刻毎の燃料消費効率変化（上），明石海峡における東向き流速の時間変化（下）. 上図の 2 点と数値は 12 時および 18 時に出航した場合の燃料効率を示している.

12 時，18 時に出航した船がそれぞれ明石海峡を通過する 14 時，20 時における表層流速の一時間平均値の分布を求めた（図-3）. 12 時出航の船が明石海峡付近を通過する時には進行方向に対して逆向きの潮流が，また，燃料消費効率が向上した 18 時出航のケースでは海峡通過時に進行方向と同方向の潮流が形成されていることが分かる. さらに，出航時刻毎の燃料消費効率変化と，明石海峡における東向き流速の時間変化を見ると（図-4），両者は 2 時間程度の位相差を保持しながらほぼ同様に変動している. つまり，明石海峡通過時の潮流を効率的に利用することで燃料消費効率が向上したことが分かる.

以上の結果から，詳細な潮流予報を行うことによって航路選択結果に大きな差が出るため，コンパクト海洋モデルの WR との統合は船舶の最適航路探索

に対する一つの方向性を示していると言える.

## 5. 参考文献

- (1) 内山雄介・多田拓晃：台風通過に伴う瀬戸内海及び太平洋北西海域における海洋構造変化，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71，No. 2，pp. I\_211-I\_216，2015.11.
- (2) Miyazawa, Y. and coauthors: Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in 15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737 -756, 2009.
- (3) Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. : The Regional Oceanic Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography-following- coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, Vol.9, pp. 347-404, 2005.