

グラフ理論とコンパクト海洋モデルを用いた 最適航路選定法の開発

内山 雄介¹・黒澤 賢太²・小碓 大地³・多田 拓晃²

¹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 (国研) 港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究グループ (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

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、船速に影響を与える海流の効果と大圏距離を考慮したウェザールーティング (WR) 計算モデルを開発した。WRモデルにより最短距離航路、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WRに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易に計算できるように軽量化したWR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。

Key Words : *optimal ship navigation, weather routing, A-star algorithm, compact ocean model*

1. はじめに

地球温暖化の抑制に向けて、運輸部門における温室効果ガスの削減が求められている。このうち、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の一つに、海流や波浪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) がある。WRとは「航海中の気象・海象状況が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¹⁾、評価基準としては燃費に加えて移動時間や安全性など様々な目的関数が想定される。最近の気象・海象の予報技術や通信技術の発達、船舶耐航性能の評価技術の向上により船舶用WR技術は急速に進歩しつつあり、船舶の安全で効率的な運航への応用に対しても大きな期待が寄せられている。

一方で、有限のノード・リンクから最適経路を検索するカーナビゲーションとは異なり、船舶は海洋上であらゆる方向に進行し得るため、原理的に膨大な量の経路探索が必要となることから、計算効率の大幅な向上が課題となる。また、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、公表データでは時空間的解像度が不十分な場合がある。出航・帰港時

間や航路選択に対する制約の少ない漁船やプレジャーボートへのWR応用においても、より詳細な海況予報結果を船上で得ることによるメリットは極めて大きい。

そこで本研究では、WRのための効率的な航路選定アルゴリズムを新たに開発し、いくつかの事例に適用することで、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する。また、航海中に再帰的に航路探索を行うリルーティング機能を実装し、移動する台風や、時間とともに拡散する海洋中の汚染物質を避けた航路を求める技術をあわせて開発し、その評価を行う。

2. 最適航路評価法

WRの中核を構成する最適経路問題は、グラフ理論を用いて解かれるのが一般的である。その解法としては、Jamesが提案した等時間曲線法²⁾や、Dijkstraが提案したDijkstra法³⁾が広く利用されている。また、Drigoが提案したAnt Colony Optimization⁴⁾も最適経路問題の解法の一つとしてよく知られ、Tsou and Cheng⁵⁾はこれを船舶の最適航路選定に応用した。例えば、カーナビにも用いられるDijkstra法は出発地から目的地までの最短経路を求める手法であるが、離散的な一次元のノードとリンクから構成される道路とは異なり、船舶はあらゆる方向に進行し

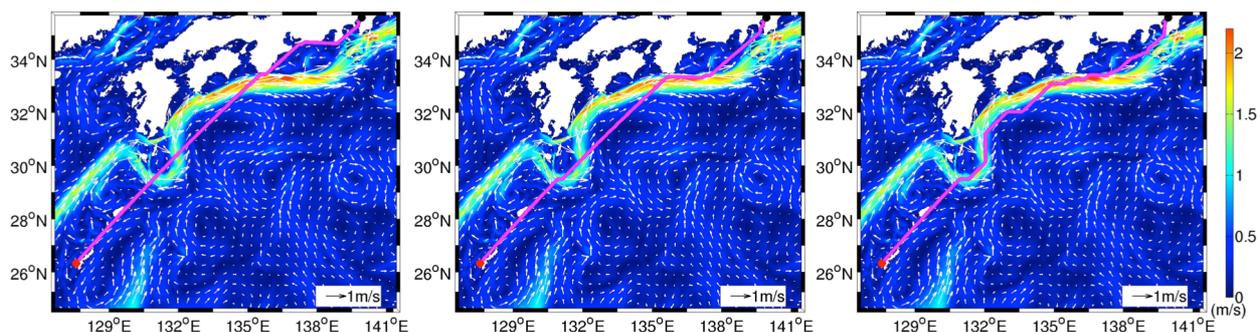


図-1 沖縄（那覇）から東京へ向かう外航船舶航路へのWRモデルの適用例。左から、最短距離法、最短時間法、最小燃費法による経路（各マゼンタ線）。表層流速ベクトルおよびその絶対値（カラー）を同時に示している。

得るため、船舶のWRに应用する際には平面2次元的な海洋空間（海洋表層）を細かなグリッドに分割して多数のノードとリンクを定義する必要がある。したがって膨大な量の経路探索が必要となり、計算効率の向上が重要な課題となる。そこで本研究では、Dijkstra法から発展したHartらによるA*法⁹をベースに、ルーティング計算モデルを開発することとした。

A*法では、Dijkstra法のように経路を闇雲に探索するのではなく、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可能となる。標準的なA*法では、 h およびノード間移動コスト χ として単にユークリッド距離を用い、 χ を最小化することで最適経路を求める。したがって、求まる最適経路は最短距離経路となるが、本研究ではさらに、外航船舶航路問題にも対応するように地球の球面効果（大圏距離）を h と χ に、また、船舶の速度に影響を与える海流の効果を χ に組み込んだ。すなわち、外的な要因によって船舶の相対速度が変化すると次のノードまでの移動距離が見かけ上変化すると考え、 χ の評価に反映させることとした。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。以下に本研究で構築したノード間移動コスト χ の与え方を示す。

(1) 最短距離経路

出発地から目的地までの最短距離経路を求めるため、標準的なA*法における χ の与え方と同様になる。つまり、ノード n と次のノード $n+1$ 間の球面効果を考慮した最短距離（大圏距離）を L としたとき、 n から $n+1$ への移動コストは単純に次式のように表される。

$$\chi(n, n+1) = L \quad (1)$$

(2) エンジン開度を一定とした最短時間経路

船舶の速度に影響を与える因子として海流を考慮し、さらに船のエンジン開度を一定に保ちながら移動するときの出発地から目的地までの最短時間経路を求める方法を考える。エンジン開度を一定に保つため、海流に対する相対船速は一定であるが、海流によって絶対船速は時空間的に変化し、それが移動コストに反映されると考える。したがって、流れの向きが船の進行方向と同じ（順方向流と呼称）ならば絶対船速は増加し、その逆（逆方向流）ならば低下する。海流の影響を受けていない船速（すなわち相対船速）を v_s 、海流の速度を v_o 、海流の影響を受けた後の船速（絶対船速）を v'_s とするとき、ノード移動間コスト χ は次式で表現される。

$$\chi(n, n+1) = L \cdot \frac{v_s}{v'_s} = L \cdot \frac{v_s}{v_s + v_o} \quad (2)$$

つまり、順方向流では $v'_s > v_s$ なのでコスト χ は低下し、逆方向流であれば反対に χ は増加する。したがって χ を最小化することにより、2点間を最小時間で結ぶ経路を求めることができる。

(3) 絶対船速を一定とした最小燃料消費経路

絶対船速を一定に保持し、海流の状況に応じてアクセル操作を行って相対船速を変化させることを考える。すなわち、順方向流に対してはエンジン開度を減少させて燃料を節約し、逆方向流であればエンジン開度を増加させることを想定する。海流を効率的に利用できれば、出発地から目的地までの最小燃料消費経路を求めることが可能となる。燃料消費量は船速の自乗に比例することが知られているが、この関係を用いると、ノード間移動コスト χ は次式のように表される。

$$\chi(n, n+1) = L \cdot \left(\frac{v'_s}{v_s} \right)^2 = L \cdot \left(\frac{v_s - v_o}{v_s} \right)^2 \quad (3)$$

順方向流では海流流速 v_o の分だけ船速（相対速度） v_s を

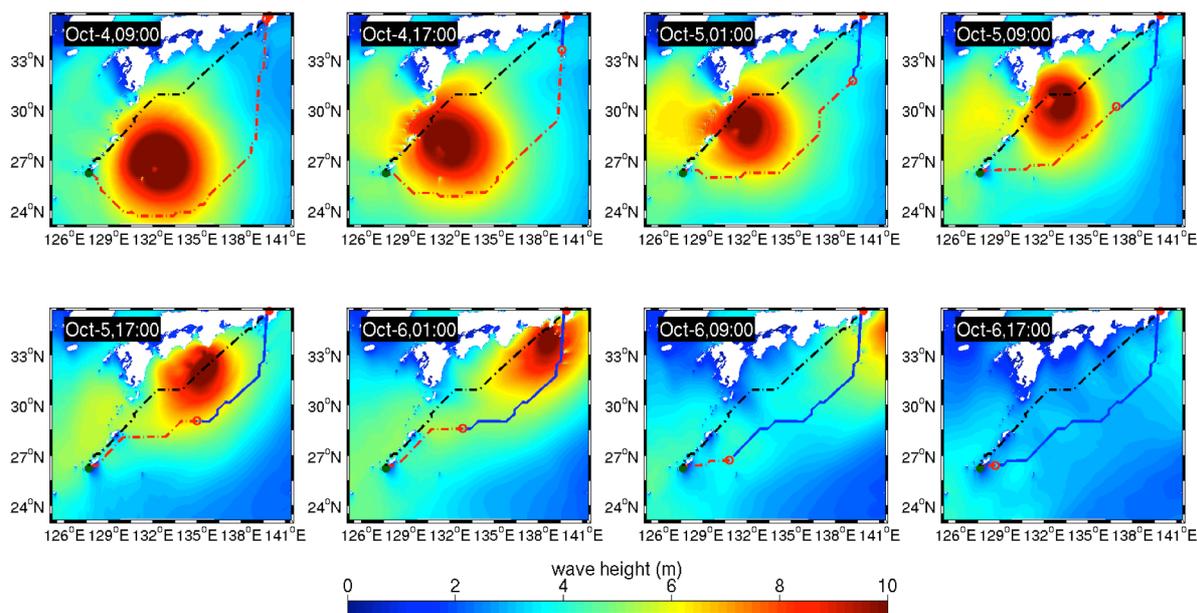


図-2 移動する台風を回避しながら東京から沖縄（那覇）に向かう外航船航路への適用例。黒線は最短時間航路、青線は台風を回避して実際に進んだ最短時間航路、赤線は各図の時刻においてこれから進む予定の最短時間航路。カラーは気象庁GPV-CWMによる有義波高分布であり、赤から暖色系の海域は台風18号のおおよその影響範囲に対応している。

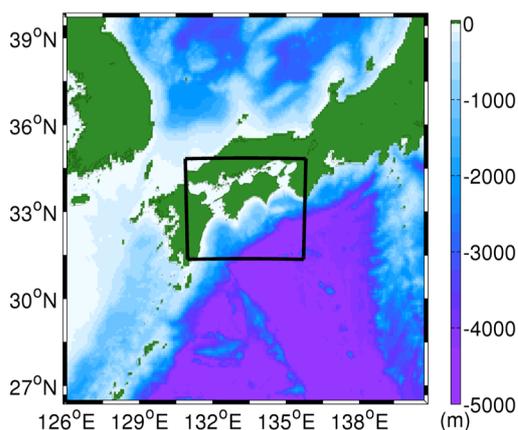


図-3 船舶への搭載を志向したWR用コンパクト海洋モデルによる瀬戸内海モデル計算領域（黒枠）。カラー：水深（m）。

v_s まで低下させられるので、 $v'_s < v_s$ となってコスト χ は低下し、逆方向流であれば反対に χ は増加する。そのため、 χ を最小化することによって2点間を航行する際に最も低燃費となる経路を求めることができる。

3. 外航船航路への適用

本研究で開発したWRシステムを沖縄那覇-東京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通りの最適航路選択法について解析を行った（図-1）。ここでは、表層海流にJCOPE2-ROMSダウンスケーリングシステムによる北西太平洋海域海象再解析結果を用いた。基準となる

表-1 東京から沖縄への航路で遭遇した風速と有義波高

| | 最大風速 (m/s) | 最大波高 (m) |
|-----------|------------|----------|
| 黒線の最短時間航路 | 193 | 9.7 |
| 青線の最短時間航路 | 138 | 7.3 |

表-2 WR用コンパクト海洋モデルの諸条件

| | |
|----------|----------------------|
| 計算期間 | 2013年2月1日～3月1日 |
| 格子数 | 224×192×鉛直20層 |
| 水平空間解像度 | 2km |
| 初期・開境界条件 | JCOPE2再解析値（日平均値） |
| 外力（海上風） | JMA GPV-MSM（1時間平均値） |
| 海面フラックス | NOAA-COADS（月平均気候値） |
| 潮汐 | TPX07.0 全球調和定数（10分潮） |

船速は10ノットとし、さらに簡単のためにリルーティングは行わず、出発時点における海象条件が時間的に維持された状態を仮定し、目的地まで移動するとした。

最短距離経路は、航路上にある島や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あとはしばらく黒潮を利用しながら航行している様子が見て取れる。この結果、移動時間は最短距離経路と比べて約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、最短距離経路の場合よりも燃費が17.6%向上するという結果になった。以上の結果から、本WRモデルはそれぞれの目的関数に応じた3種類の航路を適切か

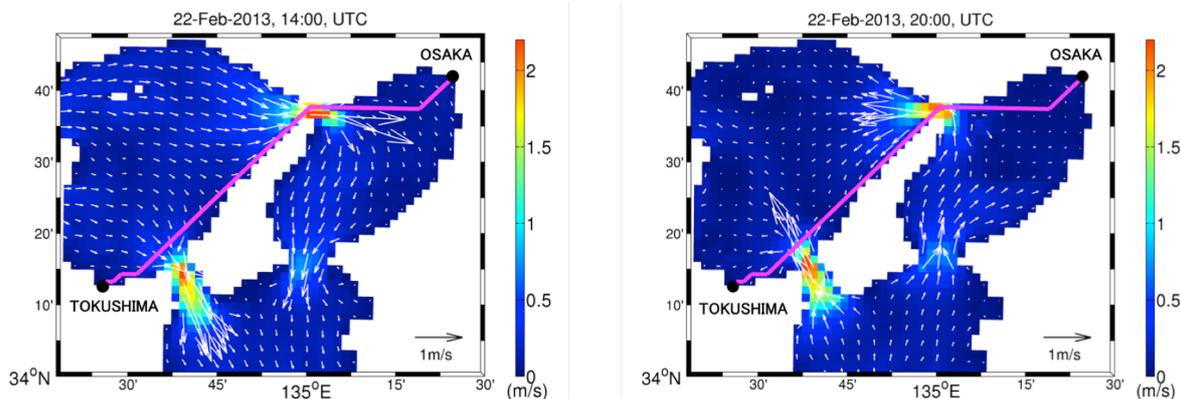


図-4 大阪から徳島へ向かう内航船航路への適用例. 左：12時出航・14時における表層流速分布. 右：18時出航・20時の状況. マゼンタ線は最短時間経路, 矢印は1時間平均表層流ベクトル, カラーは流速絶対値.

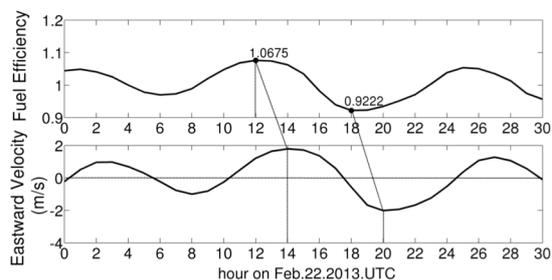


図-5 出航時刻毎の燃料消費効率変化(上), 明石海峡における東向き流速の時間変化(下). 上図の2点と数値は12時および18時に出航した場合の燃料効率を示している.

つ効率的に評価できることが確認された.

4. 外航船航路における台風の回避

第3章で用いた海洋モデルの結果⁷⁾を使用して, 2014年台風18号が本州付近を通過するタイミングでの東京から沖縄那覇へ向かう外航船航路に対する最短時間経路探索を行い, 台風発生・通過時の最適航路問題について検討する. ここでは, ビューフォート風力階級表を参考に, 波高が7.5 m, 風速が17.2 m/s以上となる海域をルート探索ノードから除外することにより, 台風を回避する経路を探索する. なお, 除外ルールは任意に設定できるように設計しており, 例えば風向や波の周期などを考慮することも可能である. 本解析では, 海表面流速にはJCOPE2-ROMS北西太平洋モデル計算結果⁷⁾, 海上風には気象庁GPV-MSM再解析, 有義波高には気象庁GPV-CWM再解析値をそれぞれ与える. また, 海象・気象情報は1時間ごとに更新されるものと仮定し, 航行途中であってもデータが更新されるたびに最適航路を選定し直すルーティング機能を追加し, 最適経路の逐次探索を行う.

図-2は探索結果を8時間ごとに示したものである. 黒点線は台風を考慮せずに求めた最小時間経路であり, 航

路に対して平均的に逆方向流となる黒潮を避けて沖縄に向かう様子が示されている. 台風を考慮し, さらに1時間ごとにルーティングを行った予測結果が赤い点線であり, 各パネルの時刻までに実際に通過した航路を青実線で示している. 図から, 台風に遭遇するタイミングを予測しながら最適航路を逐次選定し直し, 台風を回避している様子が確認できる. 一般に風速や波が強くなる台風経路右側を通過する経路を選択している点が興味深い. また, 航行済み経路と, その時点での台風位置および自船位置から最適な回避ルートをルーティングによって逐次計算することで, 迂回距離を最小化していることが分かる. このとき, 台風を回避して航行した経路上では, 航海中に遭遇する有義波高や風速の影響は十分に低減できており, 安全かつ経済的な経路が選択されていることが分かる(表-1). 強風や高波を回避する経路選択は船舶の航行安全性に対して重要であることは当然であるが, 同時に, 波や風による船体抵抗の抑制にも効果が見込めることから, 燃費抑制にも役立つことが期待される.

5. 潮流を考慮した内航船航路探索

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JCOPE2⁹⁾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となる. 一方, 外航船においても, WRに必要な大量の気象・海象データを航海中の外洋公海上で逐次収集することは, 外洋における通信環境の脆弱性を考慮すると必ずしも現実的ではない. そこで本研究では, 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逐次行ってWRに反映させることを最終目標として, 予報精度を著しく損なうことな

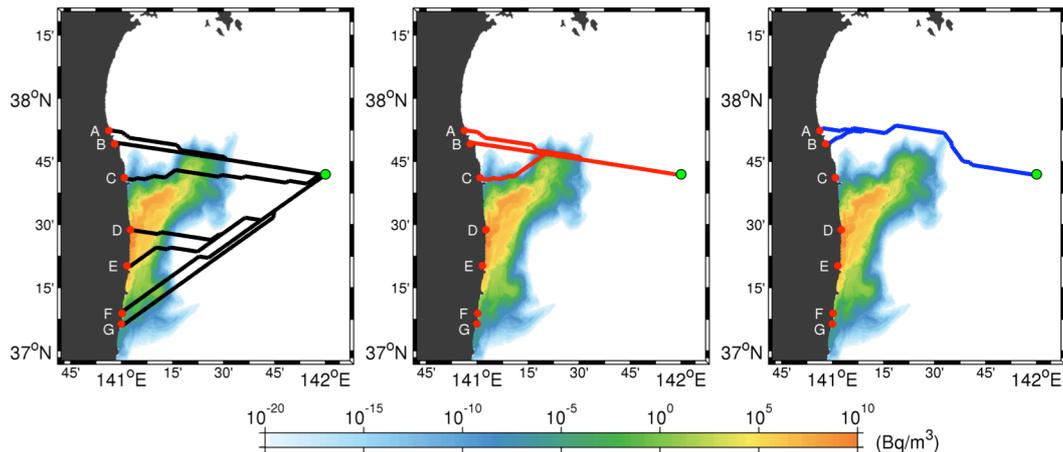


図-6 海面付近の放射能を回避しながら漁港 A~G (赤丸印) に避航する漁船の最適経路問題への適用例. 左: 被曝を一切回避しない最短時間航路, 中: ^{137}Cs 濃度が $1.0 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ 以上の海域を回避する最短時間航路, 右: 被曝量がゼロになるように回避する最短時間航路. カラーは 2011 年 3 月 31 日午前 4 時における海洋表層溶存態 ^{137}Cs 濃度分布の再解析結果¹⁰⁾. 沖合の薄緑丸印は漁船の初期位置.

く可能な限り軽量化したWR用のコンパクト海洋モデルを構築し、試験的に瀬戸内海航路に適用した(図-3, 表-2). 本モデルのベースとなるのは領域海洋循環モデルROMS⁹⁾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には標準的なデータセットを用いた(表-2). 具体的には、JCOPE2(水平解像度約10 km)にROMSを直接ネスティングさせ、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、熱フラックスのオンライン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日分の海流予測が標準的な市販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. ここでは経路探索には最短時間経路法を用い、コンパクト海洋モデルによる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、航路、移動距離、移動時間はほぼ変わらないが、18時出航の場合には12時出航時よりも燃料消費効率が15.4%も向上するという結果を得た. 出発時刻がわずかに数時間変わることにより燃料消費量に大きな差が出る原因としては、瀬戸内海で卓越する半日周潮汐に伴う潮流の影響が考えられる. そこで、12時、18時に出航した船舶がそれぞれ明石海峡を通過するタイミングとなる14時、20時における表層流速の1時間平均値の分布を求めた(図-4). 12時出航の船が明石海峡付近を通過する時には、同海峡において船舶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明石海峡通過時に進行方向と同方向の潮流が発達し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-5)、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、18時出航のケースでは明石海峡通過時の順方向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、時空間的に詳細な潮流予報を簡易的に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と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.

6. 災害避難への応用：福島原発事故を例に

本研究で開発した航路選定法の災害避難問題への応用例として、2011年東北地方太平洋沖地震津波による福島第一原子力発電所事故を取り上げる. ここでは、開発済みの福島沿岸域モデル¹⁰⁾の結果(1時間毎の出力)を用い、2011年3月25日午前1時から放射性核種の海洋への直接漏洩が始まり、沖合へと拡散した6日後の3月31日午前1時に福島沖に接近した漁船が、海上の放射能による被曝を回避しながら福島県内の漁港へ避難する、というシナリオを設定した. 海洋表層の溶存態 ^{137}Cs (セシウム137)濃度が設定濃度以上となる海域をルート探索ノードから除外することで回避を考慮し、最短時間経路法を用いた航路選定シミュレーションを行った.

図-6に3月31日午前4時の表層 ^{137}Cs 濃度分布と、各漁港へのルーティング結果を示す. 被曝を一切回避しない最短時間経路(黒線)を見ると、全ての漁港へ向かう途中で高濃度 ^{137}Cs を含む海域を通過するため、被曝の可能性があることが分かる. ごく軽度の被曝を許容しつつ避難した場合(赤線)であっても漁港D, E, F, Gにはたど

りつけないこと、一切の被爆を回避した条件（青線）では¹³⁷Cs濃度が見られる海域を迂回しながらも北側の漁港A, Bにしか辿り着けないことが示されている。線量の上限值を考慮した2ケースでは、いずれも設定した条件に適合するように被爆を回避する経路を探索することに成功しており、本システムの災害避難問題への応用可能性が示された。

7. おわりに

本研究では、グラフ理論の一つであるA*法をベースに、大圏距離と、船速に影響を与える海流の効果を考慮した新たな航路選定アルゴリズムを開発し、最短距離航路、最短時間航路、最小燃料消費航路を求めるモデルを構築した。また、海象気象情報等の更新に応じて逐次経路探索を行うルーティング機能と、海象気象条件や海洋表層の物質濃度などに対して任意に閾値を設けることで特定の海域の航行を回避するアルゴリズムを実装した。さらに、内航船航路選択問題のように、公表されている気象海象データでは時空間分解能が十分でない場合などに、船舶上で逐次海流予報を行ってWRに反映させるためのコンパクト海洋モデルを併せて構築した。

開発したシステムを外航船航路に適用して、3通りの経路探索が正確に行われていることを確認したのち、台風を回避する外航船航路、海峡部で強化される潮流が卓越する内航船航路、福島第一原発事故に伴うセシウムの海洋漏洩を対象にした災害避難問題に適用し、いずれも妥当な結果が得られることを確認した。特に船舶登載を志向したコンパクト海洋モデルとの統合により、提供されるデータの頻度や精度が不十分な状況にも臨機応変に対応できるWRシステムが構築された。

謝辞：本研究は科研費補助金（15H04049, 15H00977）、港湾空港総合技術センター研究開発助成（第18-5号）の援助を受けた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 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, pp.1-281, 1992.
- 2) James, R. W. : Application of Wave Forecasts to Marine Navigation, *US Naval Oceanographic Office*, 92 p., 1957.
- 3) Dijkstra, E. W. : A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp.269-271, 1959.
- 4) Dorigo, M., Manizizzo, V. and Colomi, A.: Ant system optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics*, Vol. 26:1, pp. 29-41, 1991.
- 5) Tsou, M.-C. and Cheng H.-C. An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing, *Polish Maritime Res*, Vol.20, No. 3, pp.28-38, 2013.
- 6) Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 100-107, 1968.
- 7) 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.1_211-1_216, 2015.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 内山雄介, 山西琢文, 津旨大輔, 宮澤泰正：福島沿岸域における放射性核種の海域移行定量化を目的とした領域土砂輸送モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1_571-1_575, 2014.

(2016.3.16 受付)

DEVELOPMENT OF A WEATHER ROUTING SYSTEM BASED ON GRAPH THEORY COUPLED WITH A COMPACT OCEAN MODEL FOR OPTIMAL VESSEL NAVIGATION

Yusuke UCHIYAMA, Kenta KUROSAWA, Taichi KOSAKO and Hiroaki TADA

We develop a weather routing (WR) system for vessel navigation based on the A-star algorithm, a descendant of the commonly used Dijkstra algorithm in graph theory. A cost function is optimally modified to account for oceanic conditions (*viz.*, surface current velocity) around the vessel of interest. Three options are thus considered to search for the optimal paths with the shortest travel time, the minimal fuel consumption, and the shortest travel distance. An avoidance algorithm from unsafe conditions is further introduced to exempt any arbitrary area from the navigation. Furthermore, a compact ocean circulation model based on ROMS executable on typical laptop PCs is configured for a vessel-borne weather routing system and is successfully applied to evaluate the optimal vessel paths in the Seto Inland Sea where high-frequency tidal currents modified by complex topography are essential to alter the vessel's speed. The WR system with the avoidance algorithm is then exploited to two evacuation problems from a migrating typhoon around the vessel paths and radionuclides at ocean surface after the Fukushima nuclear accident.