

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04513

研究課題名（和文）北極海航路向け最適航路探索システムの研究

研究課題名（英文）A study of optimum route search system for the Arctic sea routes

研究代表者

山口 一（Yamaguchi, Hajime）

国立極地研究所・国際極域・地球環境研究推進センター・特任教授

研究者番号：20166622

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：北極海航路における船舶航行データを用いて、船舶のIce Classと船速の関係を見出すことで、実際の船舶に近い船速アルゴリズムへの高度化を行った。また、現在用いている航路探索アルゴリズム（A*法）の検討を行い、新たなアルゴリズム（*法）を採用した結果、探索結果が、航路距離、航行時間、燃料消費量において改善され、より現実に近い結果が得られるようになった。さらにGPUを用いた並列計算の導入により、従来の方法と比較して最大で7倍程度の高速化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで導入されていた、理想的な環境における北極海航路探索システムは、2000年代に実施されたデータベースを用いた船速アルゴリズムを使用していた。より現実の結果に近いものにするためには、近年のデータベースを用いた新たな船速アルゴリズムへの置き換えが必要であった。またアルゴリズムおよびWebアプリケーション改良は、船上での利用を進めるうえで非常に有効であり、予測計算により得られた海水データを用いることで、実際の船上でのナビゲーションへの利用が可能となるものである。

研究成果の概要（英文）：The ship speed algorithm was upgraded to be closer to actual ship speeds by using ship navigation data in the Arctic Ocean routes to find a relationship between ship Ice Class and ship speed. The currently used navigation algorithm (A* algorithm) was examined and a new algorithm (* algorithm) was used to improve the search results in terms of passage distance, navigation time and fuel consumption to obtain more realistic results. Furthermore, the implementation of parallel computation using GPUs has achieved a speed-up of to seven times faster than the previous method.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：北極海航路 AIS

1. 研究開始当初の背景

北極海は近年の温暖化による海水の減少に伴い、以前よりも長期間航路としての利用が可能になっている。しかしながら、海水の融解期や結氷期には、比較的多くの海水が漂っているため、船は厚い海水を回避したり、氷盤を割ったりしながら進む必要がある。このため、海水の少ない開放水面に比べて格段に危険度が増すとともに、到着遅れや燃料消費量の増大につながる。近年は北極圏の天然資源に関心が寄せられ、商業用船舶の航行が増えており、燃料コストの削減や運航の安全性の担保は最重要課題である。また、船舶からの排出ガスを抑制することも大きな関心事であり、年々規制が強化されてきている。しかしながら、実際の運航では、航路選択は運航者の経験に基づいて決定しているため、必ずしも効率的な航路を選択できていないといえ、排出ガスを抑制した航行を行うことも難しい。また到着時間に関しても、資源を届けられる日時を正確に指定できれば商業船舶にとって大きなメリットとなる。そのため、安全で時間コストと燃料コストを抑えた航路の実用的な提案は、北極海航路を行う船舶にとって需要が高い。これらの問題に対応するためにも実用的な最適航路を提案できるシステムは意義のあることである。

一般的に、航路探索システムを構築するために必要となる要素は、1) 環境に適合した最大船速の推定、2) 航路を評価するための基準の決定、3) 最適な航路を計算する探索手法、の3つである。それぞれの要素を高度化することにより、実用的な結果を得られる航路システムに改良できると考えている。「1) 最大船速推定方法」では、海水データに加えて、風や波浪、海流などのデータを推定式に組み込むことで、計算結果が現実的な航路に近づくことが予想できる。これは低緯度帯におけるウェザールーティングで長年研究されている。また、船舶固有の性能データを用いることでも、船速推定計算が高精度となることも知られている。「2) 評価基準」は、今までのような単純な条件での最適化ではなく、より複雑で現実を模倣した条件に変えることで、実用的な最適化が行えると考えられる。「3) 最適航路探索手法」では、今までは、探索アルゴリズムの特性上、常に最大船速で航路を進むという条件で計算されていた。このため、例えば燃料節減のための低速航行という選択肢を取ることが出来ず、非現実的な選択を行う場合があったと考えられる。このため、船速を最大船速以下に抑えられる探索アルゴリズムを開発すれば、実用的な航路を計算できると考える。また、この方法に加えて、計算機資源に頼った総当り的な計算方法ではなく、評価関数の数学的な解を基にした計算方法の開発も行う。

これらの手法開発を通して、「現実的な最適航路を数学的に得ることは可能なのか」という学術的な問いの答えを見つけることを目標とした。

2. 研究の目的

本研究は、航路探索システムの要素技術を高度化することにより、現実的な最適航路を提案できるシステムを開発することを目的としている。また、航路探索アルゴリズムの開発を通して、計算機の能力に頼るのではなく、数学的に最適な航路を計算する方法を探る。

次に最適航路を決定するための評価基準を決める。航路を評価する基準は人によって異なるため、絶対的な値として一意に決定することはできない。このため、到着時間や安全性、燃料コストなどのいくつかの基準を設け、これらを組み合わせることで評価関数を構築する。その際、霧や風速データなどから安全性が、船体形状や燃料消費量データから燃料コストなどが計算されて、評価関数に反映される。これらのデータの高度化を行うことにより評価関数を現実的な値に近づける。

最後に、探索手法の開発を行う。本研究では「最大船速以下の速度で隣接する格子点へ移動する」という移動条件に変えた探索手法を提案する。数値計算では、このような不等号で表される条件を組み込むことは難しく、厳密に行くとアルゴリズムの大幅な変更を伴うことになってしまう。このため、取り得る船速を離散化することにより、近似的に解を得ることを考える。すなわち、船速を N 等分し、それぞれの速度で移動した場合の評価関数を計算して比較を行う。このように速度の制限を加えることで、近似的に不等号の条件を組み込むことにする。当然、このような速度の離散化により、考えうる選択肢が N 倍に増えることになるため、計算量も増えてしまう。しかしながら、最終的な航路で通過する格子点自体の数が増えるわけではないため、分割数を極端に多くしなければ現実的な計算時間で航路探索が行えると考えられる。

3. 研究の方法

これまで、現実の航路と乖離しがちであった航路計算手法を、船速を制御することにより、より現実的な航路を求められるようにする。また、数学的なアプローチにより、様々な拘束条件を付与できる計算手法を開発する。

これらの計算手法の改良だけでなく、環境データと船舶性能データの収集、およびそこから求められる最大船速と船舶性能データの推定法も高度化することにより、現実的な航路を提案する。

計算によって求めた航路の妥当性を検証するために、既存の航海の AIS データとの比較を行

う。検証を十分行えた場合、海氷や大気、海洋の予測シミュレーションの計算結果データを収集して、1～2週間先までの最適航路の予測計算を行う。

4．研究成果

(1)船舶航行データ解析

2018年から2020年にかけての船舶自動識別装置(AIS)の千を超える船舶航行データを、ロシア北極海航路管理局(NSR)発表の実績データや公表されている船舶データなどと照らし合わせ、船舶やIce Classの特定と、船速アルゴリズム改良に使用可能なデータの抽出を実施し、北極海航路航行実績データベースの作成を開始した。

北極域の氷海域航行において航行者が安全で効率的な航路を選定できるようにするために、環境データ整備、船舶性能推定と併せて、最適な船速を選択できる航路探索手法を考案するなどして、より現実的な航路を提案する総合的な航路予測システムの実用化を目指す。さらに、高効率な航路探索アルゴリズムの新規開発にも着手する。また、オフラインでもWEBブラウザから利用可能な可視化アプリケーションを開発することで、ネットワーク環境の整わない船上においても航行者が環境データや航路を表示しながら比較・検討できる環境を整えた。

このデータベースを基にして、北極の氷海域を航行する船舶のうち、停泊している船舶や信頼性の低いデータを排除することで、船速アルゴリズムの改良に適したデータのみを抽出した。しかし近年のロシアのウクライナ侵攻により北極海を航行する船舶のデータの件数が増加しなかったこともあり、基礎データ数を増やせなかった。

(2)船速推定アルゴリズムの高度化

カナダの航行規則で用いられているIce Numeralを基に、船舶のIce Classと氷況の両方を含んだパラメータとしてIce Indexを導入した経験式にて船速推定した。一方、個々の船舶の燃料消費量まで推定できる様に、氷中抵抗理論式に基づく船速アルゴリズムも作成した。これらのアルゴリズムを上記データベースなどと照らし合わせて、船速アルゴリズムの高度化に着手した。

Ice Indexを指標とした経験式と氷中抵抗理論に基づいた推定式を上記データベースと照合することにより、推定式と実際の状況が乖離してしまう状況の調査を行った。

(3)探索アルゴリズムの高度化

航路探索アルゴリズムとして、それまでのA*アルゴリズムを*アルゴリズムに置き換えた。これにより、探索された航路の不自然な寄り道経路が解消され、解の格子依存性が改善された。また、*アルゴリズムの採用により、探索結果が、航行距離、航行時間、燃料消費量すべてにおいてA*アルゴリズムより2-8%改善され、より真の最適航路に近い結果が得られるようになった。計算時間が当初10倍以上増加してしまっていたが、コードの改良により数倍まで改善され、実用性も高まった。最終的にはアルゴリズムを改良し、GPUを用いた並列計算を行うことにより、計算に要する時間を大幅に短くすることができた。改良した計算アルゴリズムの計算速度は、従来の方法と比較しても平均で4倍、最大で7倍ほどの高速化を実現できた。

(4)アプリケーションの開発

新たに開発したアルゴリズムをWEBアプリケーションに実装して動作検証を行った。本システムは、操作性を改良し、WEB上で一般公開を行うことができた。

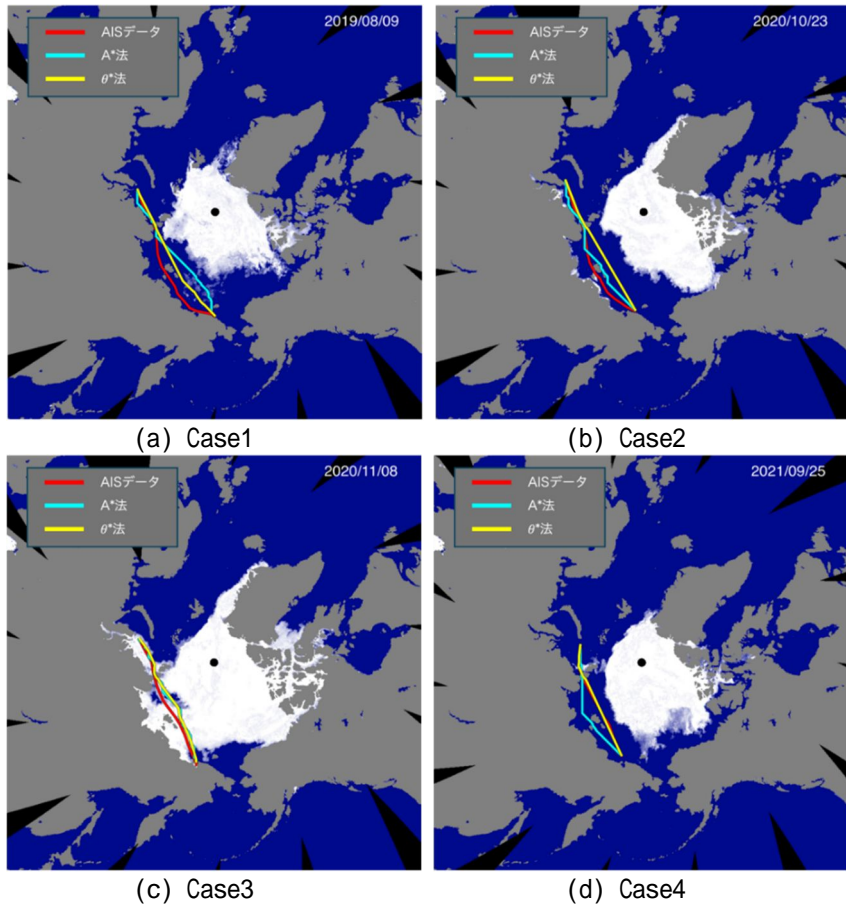


図1 . 計算結果と AIS データの比較結果。4 通りの条件に対して、A*法、 θ 法、AIS データの比較解析を実施。

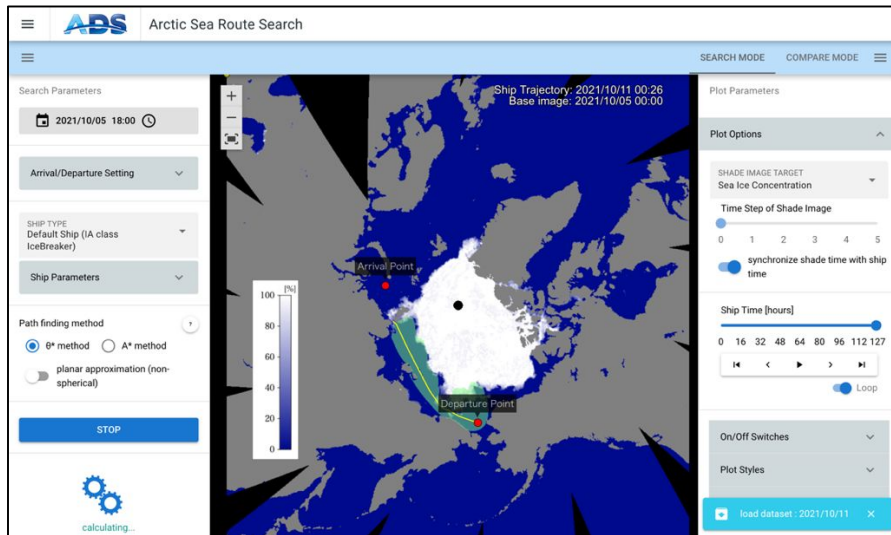


図2 . WEB アプリケーションのスナップショット。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takeshi Sugimura; Takeshi Terui; Hironori Yabuki; Hajime Yamaguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development and Verification of an Arctic Sea Route Search System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of 26th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 杉村 剛, 矢吹 裕伯, 山口 一	4. 巻 -
2. 論文標題 北極海最適航路探索Webアプリケーションの開発とWebGLを用いた計算の高速化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第50回 可視化情報シンポジウム 講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takeshi Sugimura, Hajime Yamaguchi and Hironori Yabuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Development and Implementation of an Arctic Sea Route Search System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ASME 2021 40th Intern. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng. (OMAE2021)	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2021-62238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Sugimura, T, Yamaguchi, H, Yabuki, H
2. 発表標題 Development and Implementation of an Arctic Sea Route Search System
3. 学会等名 40th Intern. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng. (OMAE2021), online（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉村剛, 矢吹裕伯, 山口一
2. 発表標題 北極海最適航路探索システムの開発と実装
3. 学会等名 雪氷研究大会2021・千葉-オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sugimura, H. Yabuki, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Improvement of an Arctic Sea Route Search System to increase calculation speed
3. 学会等名 7th Intern. Symp. Arctic Research (ISAR-7), NIPR, Tachikawa, Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sugimura, H. Yabuki, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Fast computation of Arctic Sea Route Search Systems using GPUs
3. 学会等名 13th Symp. Polar Science, NIPR, Tachikawa, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugimura, T. Terui, H. Yabuki, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Development and Verification of an Arctic Sea Route Search System
3. 学会等名 26th IAHR Intern. Symp. Ice, Montreal, Canada (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉村 剛, 矢吹 裕伯, 山口 一
2. 発表標題 北極海最適航路探索Webアプリケーションの開発とWebGLを用いた計算の高速化
3. 学会等名 第50回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口一
2. 発表標題 北極海の高氷減少と将来の航行可能性
3. 学会等名 北極海沿岸地域と関連する非北極圏の将来シナリオ分析 第2回ワークショップ, J-Arcnet (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Arctic Sea Route Search System https://ads.nipr.ac.jp/routeSearch/#/top

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	矢吹 裕伯 (Yabuki Hironori) (00392936)	国立極地研究所・国際極域・地球環境研究推進センター・特任教授 (62611)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	照井 健志 (Terui Takeshi) (70640762)	国立極地研究所・国際北極環境研究センター・研究員 (62611)	削除：2023年2月27日
研究分担者	杉村 剛 (Sugimura Takeshi) (80455493)	国立極地研究所・国際極域・地球環境研究推進センター・特任研究員 (62611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関