

北極海航路における最適航路探索に関する研究

Study on route optimization in the Northern Sea Route

学籍番号 47-136652 中野 佑哉

指導教員 山口 一 教授

(平成 27 年 8 月 26 日発表予定)

Keywords: 北極海航路, 海氷, 最適航路, Ice Index

Keywords: Northern Sea Route, sea ice, route optimization, Ice Index

1. 序論

北極海は冬季には全域を海氷に覆われるが、夏季に海氷域が縮小すると沿岸部を航路として通ることが出来る。北極海の家氷は長期的な減少傾向にあり、近年それに伴って航路としての利用が拡大しつつある。北極海を通る航路のうち、ロシア側を通るものを北極海航路 (NSR, Northern Sea Route) と呼ぶ。NSR の利用は、スエズ運河経由に比較してヨーロッパ・東アジア間の航行距離を 30-40%短縮する。これによって、燃料消費が抑えられ、コストの削減とともに温室効果ガスの排出抑制にもなる。

NSR 航行にあたって課題となるのは、Fig. 1[1]に示すような氷海を安全に航行するための航行支援システムの構築である。そのためには、衛星による海氷モニタリング、数値モデルによる海氷予測もさることながら、それらの情報を統合して最適航路を示すことが重要になる。

Choi et al. (2015)[2] は、海氷数値モデルによるアンサンブル予測計算結果を基に予報の不確かさを考慮した最適航路探索を行ったが、船速を密接度と氷厚に比例する単純な低減式で計算した。本研究では[2]をベースに、さまざまな氷況と船のアイスクラスをひとつの数値で表す Ice Index という指標を用いてより複雑な氷況に対応した船速低減式を導出し、夏季の NSR における最適航路探索を行う。また、実航行データとの比較を行い、海氷長期予測データを用いて航路利用の将来性について考察する。

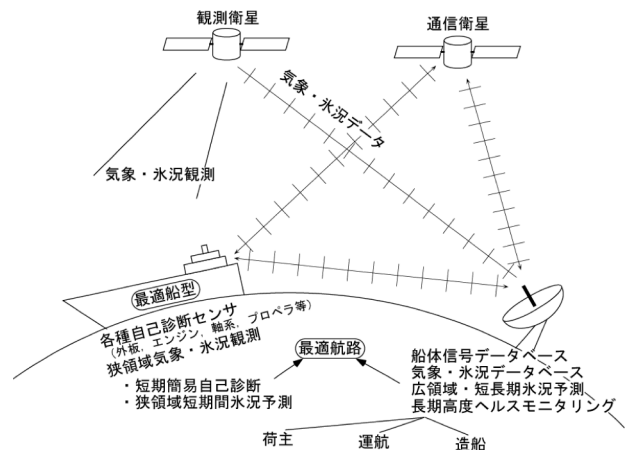


Fig. 1 Schema of navigation support system[1].

2. 使用データ

2.1. 海氷数値モデル Ice-POM (Princeton Ocean Model)

実際に航行船舶が航路探索を行う際には、数日から10日ほど先の期間の氷況の予報値が必要となる。そうした短期的な予報に必要な数値モデルとして、De Silva et al.[3]による海洋-海氷連結モデルを用いた。水平解像度は25 kmで、233×274のグリッドデータである。

2011年9月から10月の2ヶ月間について海氷密接度の初期値を±10%で変化させて31回のアンサンブル予測計算を行い、毎日の海氷密接度・海氷厚を得た。分布関数として、密接度は $0 \leq x \leq 1$ 、氷厚は $0 \leq x$ の切断正規分布を仮定した。

2.2. 人工衛星データ

実航行の船速データを整理し、実航行航路と比較する最適航路探索を行うため、マイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)による衛星観測データを用いた。使用したのは海氷密接度・海氷厚で、いずれも水平方向の解像度10 km、グリッド数900×900の毎日のデータである。国立極地研究所の Arctic Data archive System (ADS)[4]を通じて取得した。

2.3. NSR 実航行データ

船速と氷況について解析するため、実航行データとして、北日本港湾コンサルタント株式会社[5]の大塚氏より提供を受けた、自動船舶識別装置 Automatic Identification System (AIS)のデータを用いた。2014年にNSRを東西に幅広く航行した耐氷商船3隻(船A~Cとする)について、日時、船位(緯度・経度)、針路、船速のデータを使用した。

2.4. 長期予測データ

将来的な航路活用の可能性を検討するため、長期的な海氷予測データとして、全球気候モデルのひとつである MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate, ver. 5) (Watanabe et al. (2010)[6]) による計算結果を用いた。使用したのは RCP4.5 (Representative Concentration Pathway, +4.5 W/m²) および RCP8.5 の実験結果で、2100 年の温室効果ガスによる放射強制力が産業革命前と比べて +4.5 W/m² および +8.5 W/m² 上昇する予測シナリオによるものである。2006 年から 2099 年までについて、1 度間隔の毎日の海氷密接度および海氷厚データを、北極域のみ取り出して水平解像度 10 km、グリッド数 584×687 の格子データに補間して使用した。

3. 最適航路探索の準備

3.1. 経路探索アルゴリズム

本研究では航路探索に A* (A-star) アルゴリズム (Hart et al. (1968)[7]) を用いた。このアルゴリズムは、スタートノードから順次ノードを展開し、ゴールノードが展開されると探索終了となる。展開の際に式(1)で表される評価値を各ノードに対して計算し、小さいものから展開する。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \quad (1)$$

ここで、 $f^*(n)$ はノード n を通ってスタートノードからゴールノードまでたどり着く最適経路（最小コスト経路）の経路コストの推定値であり、 $g(n)$ はスタートノードからノード n までの最小コスト、 $h^*(n)$ はノード n からゴールノードまでの最小コストの推定値である。

A* アルゴリズムは一定の条件を満たすことで完全性と最適性を持つ。すなわち、解が存在すれば必ず見つけ、最初に見つける解が最適解（最小コスト解）である。

3.2. Ice Index 法

氷況から船速を決定するため、本研究では Ice Index 法を用いた。Ice Index は、1993 年から 1999 年にかけて行われた国際北極海航路計画 (INSROP, International Northern Sea Route Programme) で提唱された、氷況をひとつの数字として表す指標であり、次のように計算される。

$$I = I_A + I_B + I_C \quad (2)$$

$$I_A = C_1 \times C_m + C_2 \times C_f + 2 \times (10 - C_f - C_m) \quad (3)$$

$$I_B = -\frac{H_s D_r}{25} \times (C_f + C_m) \quad (4)$$

$$I_C = M_{CS(FY)} \times C_f + M_{CS(MY)} \times C_m \quad (5)$$

ここで、 I は Ice Index、 C_f と C_m は一年氷・多年氷の密接度 [10 分率]、 C_1 と C_2 は氷の種類および船のアイスクラスに応じて決まる係数、 H_s はリッジの高さ [m]、 D_r はリッジの密接度 [km⁻¹]、 M_{CS} は気温に応じて決まる係数である。本研究では、モデル結果および衛星から得られないパラメータについては INSROP で得られた環境データ [8] を参考にして推定した。

3.3. Ice Index と船速の関係

Ice Index から船速を推定するため、AIS による実航行の船速データを AMSR2 データから計算した Ice Index に基づいて整理した。船型によらない解析を行うため、船ごとの開水面平均船速に対する船速減少率を用いた。AIS データによる船速減少率と Ice Index の相関が低い Ice Index ≥ 15 の範囲については INSROP で得られた結果 (Fig. 2[8]) を用いて、Ice Index < 15 については比較的高い相関を示した AIS データから得られた結果 (Fig. 3) を用いることで、以下の船速推定式 (単位: knots) を得た。

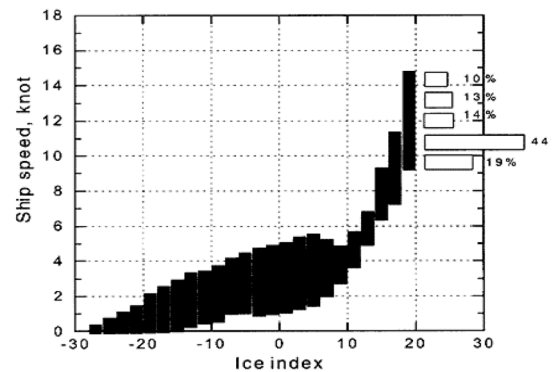


Fig. 2 Relationship between ship speed and Ice Index (INSROP[8]).

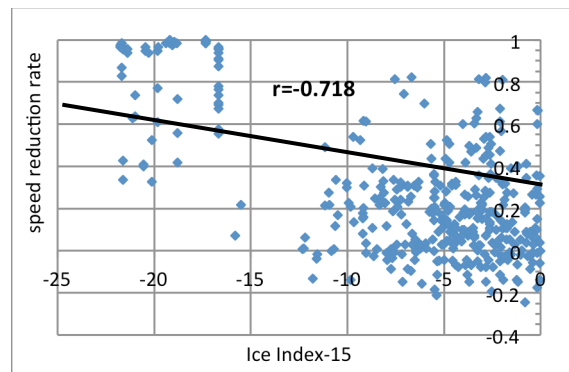


Fig. 3 Relationship between ship-speed reduction rate and Ice Index.

$$v = \begin{cases} 0.768I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647I - 5.209 & (I < 15) \end{cases} \quad (6)$$

4. 結果

4.1. アンサンブル予測計算結果のバラつきを考慮した航路探索

Ice-POM によるアンサンブル予測計算結果を用いて最適航路探索を行った。氷厚 0.6 m まで砕氷可能とし、2011 年 10 月 15 日にチュクチ海を出発してスカンジナビア半島の北を目指す航路とし、Ice Index ≤ 18 の時は砕氷船のエスコートを受けるものとした。アンブル計算結果から切断正規分布を仮定した海水厚が、砕氷能力を超えて厚くなる確率を失敗率 (failure rate) として、それを考慮して安全性の高い航路を探索した。探索の際の評価関数は式(7)のようにした。 $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$ として得られた結果を Fig. 4 に示す。

$$\begin{aligned} \text{cost function} = & w_1 \times (\text{distance [nm]}) \\ & + w_2 \times (\text{time [hours]}) \quad (7) \\ & + w_3 \times (\text{failure rate}) \end{aligned}$$

4.2. 実航行データとの比較

手法の性質を検討するため、AIS による実航行データと出発点・到着点を合わせ、AMSR2 による海水データを用いて最適航路探索を行った。氷厚 0.6 m まで砕氷可能とし、式(7)に対して $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 0$ として距離・時間を最小化する航路を探索した。船 A に対する結果を Fig. 5 に示す。

船 A について、おおむね実航行と同じ航路を再現しながら、航行距離・航行時間を短縮する航路を探索することが出来た。船 B についてはノバヤゼムリヤの南を通った実航行に対して、最適航路は北を通航する航路となった。海水以外の状況を考慮しなければ、北を通った方が短時間で航行することが出来た可能性を示した。船 C については、実航行から大きく離れた沖合を通る航路が探索された。沿岸部に 1 m を超える氷厚の氷が分布していたのに対して、沖合にはそれほど厚い氷がなかったため、氷況のみを考慮すればそうした航路を選択する方がよい場合もある。また、ビルキツキー海峡を通航することを強制する最適航路探索も行った。航行支援システムとしての将来を考えると、特定の海峡を通航する場合・しない場合の複数航路を提示することは重要である。

4.3. 長期予測データを用いた航路の将来性検討

造船計画や、長期にわたる航路の経済性検討にあたっては数十年単位の長期予測が必要となる。本研究では、航路の経済性を評価する端緒として、MIROC5 の計算結果を用いて、将来的に NSR を通航するのにかかる所要時間がどのように変化するか検討した。4.2. と同じく氷厚 0.6 m まで砕氷可能とし、式(7)に対して $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 0$ として距離・時間を最小化する航路を探索した。

Fig. 6 は RCP8.5 による 10 年ごとの 7 月から 11 月、各月 1 日に出発する氷況に対して、NSR 通航に

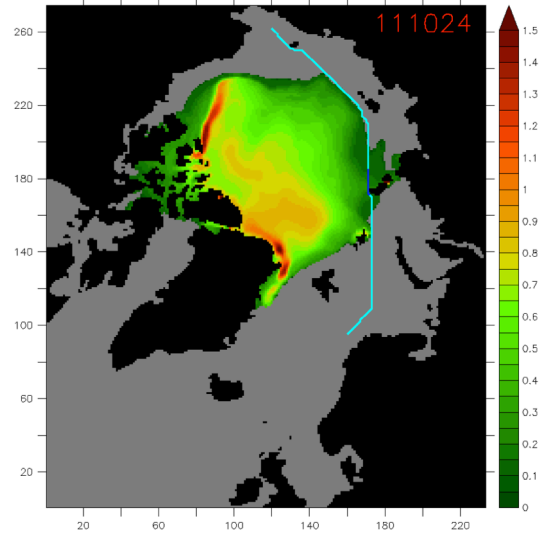


Fig. 4 Optimized route (light blue: independent, blue: escorted by icebreaker) considering failure rate. Color indicates mean ice thickness [m] on Oct. 24, 2011.

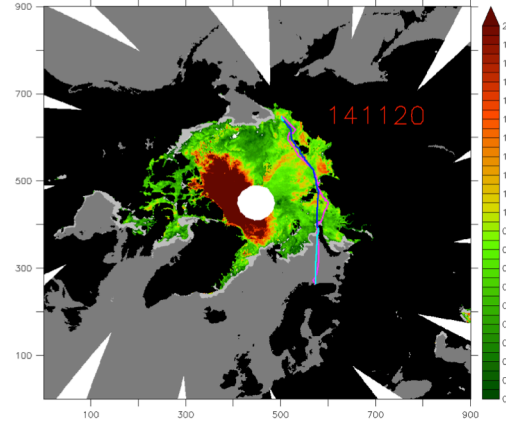


Fig. 5 Optimized route (light blue: independent, blue: escorted by icebreaker) and actual route (purple) of ship A. Color indicates ice thickness [m] on Nov. 20, 2014.

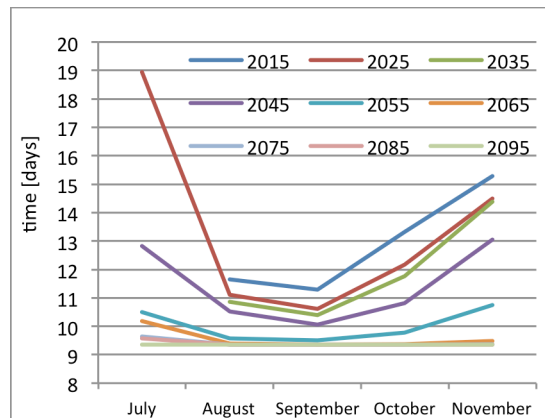


Fig. 6 Time spent to use NSR for the results of RCP8.5.

かかる時間を示す。海氷最小期の 9 月を極小として、年を経るにつれて所要時間が短くなることが分かる。全体として氷況が緩く（海氷域が小さく、氷厚が薄く）なっていくのに伴い、2015 年と比べると 2045 年で十数%、2055 年では 20%ほど航行時間が短くなっている。今後数十年経てば夏季は海氷に気にすることなく航行することが出来る可能性もある。減速要因がなくなることでより船速が上がり、航路としての優位性は今後増していくものと考えられる。

5. 結論

5.1. まとめと考察

本研究では、船速データと海氷状況を関連づけ、それを基に夏季の北極海航路航行における最適航路探索手法を開発した。また、実航行データとの比較および長期予測データによる将来性の検討を行った。以下に結果をまとめる。

Ice Index 法を用いて実航行の船速データを整理し、船速の推定を行った。

船速を開水面速度に対する減少率に変換することで船型によらない解析を行った。Ice Index が 15-20 の範囲においては実航行データのバラつきが大きいこと、INSROP で行われた研究結果を参照し、Ice Index 15 以下においては比較的高い相関関係を示した AIS データを参照することで、船速推定式を得た。A*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立し、アンサンブル予報による予報計算結果のバラつきを考慮した航路探索を行った。

A*アルゴリズムを用いて完全性と最適性を持つ航路探索を行う手法を開発した。海氷厚が船の砕氷能力を超えてしまう確率である失敗率を考慮することで、島の近く等の計算結果のバラつきの大きい海域を避けた、より安全な航路を探索できた。

衛星観測データを用いて実航行と同じ期間に航路探索を行い、比較を行った。

AIS による 3 隻の船舶の実際の航行データを例に、実航行データと計算による最適航路の比較を行った。沿岸で海氷が厚く、沖合でさほどでもない場合、極点に近い航路を通ることもあったが、おおむね実航行と近い航路を探索することができ、航行距離は約 5-15%、航行時間は約 10-30%、実航行より短縮される結果を得た。また、特定の海峡を通ることを強制することも可能で、島の北を通るか南の海峡を通るか等、複数の航路を提示する形が、航行支援システムとしてはよいものと考えられる。

全球気候モデルによる長期予測データを用いて将来の航行時間の変化を検討した。

航行時間の変化を示すことで、航路としての将来の経済性評価に貢献するデータを得た。

今後海氷域が縮小を続けるのに伴って NSR 通航にかかる時間は 10%から 20%減少するとともに航行可能期間が拡大する見込みがあり、スエズ運河経由等の南回り航路に対する優位性は増していくものと考えられる。北極海の海氷は気候モデルの予測を大幅に超えて減少を続けており、今後数十年で夏季には海氷の影響を受けない航路選定が出来るようになる可能性もある。

5.2. 今後の課題

本研究では Ice Index を用いて氷況を表したが、この指標にはまだ改善の余地があると考えられる。たとえばリッジの影響や氷の強度の指標が十分に現実を反映できていない可能性がある。

また、航路探索の際に氷況のみを考慮したが、実際の航行においては波浪、風、霧等の気象・海象や、海氷の氷盤サイズ等も減速の要因となる。こうした要素を考慮に入れることが出来れば、より現実 に即した航路探索が可能となる。

船速推定において、Ice Index と船速減少率を用いて船型によらない解析を行ったが、船会社等の詳細な船型データを持っているユーザーに対しては、船型パラメーターを用いて砕氷抵抗を定式化し、抵抗から機関出力を決定する手法が有効である。想定するユーザーごとに、船型によらない Ice Index 法と船型に依存した砕氷抵抗式を両立することが理想的と考えられる。

本研究で開発した最適航路探索手法は極地研究所 ADS[4]をプラットフォームとして、数ヶ月先の氷況を予測する中期予報データ等と組み合わせて利用可能なものとする予定である。これによって、航行支援システムとして意味のあるものになることが期待されている。

参考文献

- [1] Yamaguchi, H., *Proc. of INSROP Symposium Tokyo '95*, (Ship & Ocean Foundation, Tokyo, 1995), 39-90.
- [2] Choi, M., H. Chung, H. Yamaguchi et al., *Cold Regions Science and Technology*, 109, 61-69, 2015.
- [3] De Silva, L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono, *Polar Research*, accepted.
- [4] <https://ads.nipr.ac.jp/>
- [5] <http://white-sapporo.sakura.ne.jp>
- [6] Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi et al., *Journal of Climate*, 23, 6312-6335, 2010.
- [7] Hart, P. E., N. J. Nilsson, and B. Raphael, *IEEE Transaction, System Science and Cybernetics*, SSC-4(2), 100-107, 1968.
- [8] 北川弘光, 小野延雄, 山口一 他, 「北極海航路-東アジアとヨーロッパを結ぶ最短の海の道-」, 扇興社, 2000.