

最適航路探索を用いた北極海航路の航行容易性評価

Evaluation of Northern Sea Route Feasibility by Optimum Route Search

学籍番号 47-176630 岡田 健吾

指導教員 山口 一 教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)

Keywords: 北極海航路, 最適航路探索, 海氷密接度, 海氷分布予測

Keywords: Northern Sea Route, navigability, ice concentration, sea ice forecast

1. 序論

北極海の海氷の海氷は近年の地球温暖化に敏感に反応していることが知られている。Fig.1.1 に示す通り、北極域の海氷は近年の夏にはかなり小さく縮小する傾向が見られる。この海氷減退が太陽光の吸収・海水温の上昇を引き起こし、将来的には北極海の海氷が消滅することもシミュレーションで予測されている。もちろん地球温暖化を緩和する対策は重要であるが、温暖化への適合策として考えられているのが北極海航路(以下 NSR)の利用である。

北極海の海氷の分布予測精度は日に日に向上しているが、実際にそれを用いて最適な航路を調べた例は少ない。本研究では、海氷分布の中期・長期予測のデータを用いて航路探索を実施し、北極海航路の利用可能な時期や条件、具体的な航路を明らかにすることを目的としている。さらに予測データの種類に対応した航路探索手法を考案し、予測データの活用と北極海航路の実用化に貢献することを目的とする。

先行研究として中野 (2015) [2]は A*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立した。海氷密接度と海氷厚からアイスインデックス法を用いて船速推定を行い、航路探索結果と実際の航行データを比較から実際の航行よりも航行距離・航行時間を短縮できることを示した。

また今井 (2017) [3]は中野の手法をベースにして、氷海航行における抵抗式である KPR の式を用いて到達速力計算を行い、航路探索に燃料消費量の計算を導入した。さらに航行時間の最適化と燃料消費量の最適化で同様の航路選択がされることを示した。本研究ではこれらの研究をベースにして、探索手法を予測データに合わせて改良し、より詳細な航路探索結果を求めた。

2. 使用データ

2.1 海氷海洋結合モデル COCO4.9

本研究では海氷の長期予測データとして COCO と呼ばれるモデルの計算結果を JAMSTEC の小野氏から提供していただいた。COCO では大気データを用いながらも、海氷、海洋の干渉が詳細に再現される。地球環境の変化に関して、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) が示す RPC8.5 (高位参照シナリオ: CO₂ の排出量、気温上昇が最も大きいシナリオ) を元に計算されており、実際 Fig. 2.1 の様に海氷域面積の減少は予測よりも早く進んでいることがわかる。今回は最も実測値に近いモデルとして COCO のデータを使用した。このデータは緯度・経度 0.25 度間隔 (解像度は約 27.8km) で 2099 年までの海氷密接度と海氷厚が予測されたものである。



Fig 1.1 Decreasing of sea ice in the Arctic Ocean[1]

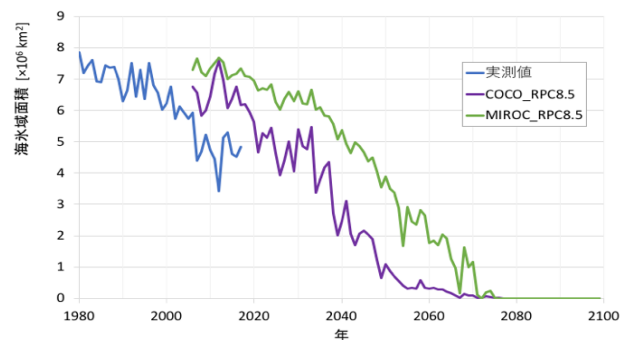


Fig 2.1 Change of sea ice extent in each model and observation

2.2 中期予測データ

中期予測データとして、木村ら[4]が統計的手法を用いて予測した海氷密接度の分布を用いた。木村らはマイクロ放射計による観測データから、12月から4月にかけて面相関法により計算された海氷移流速度をもとに、冬季の海氷移流と夏季海氷分布との間の関係を明らかにし、夏季海氷分布の高精度な予測を行った。Fig 2.2に Kimura et al.の手法による予測結果と観測値との比較を示す。また全体の海氷密接度だけでなく多年氷の密接度も計算されており、航路探索に侵入禁止条件として使用した。

本研究では長期予測・中期予測ともに解像度を約25km、北極点を中心とした584×687の正射図法の地図に補間を行なった。ただし航路探索の時は緯度・経度を使ってコストを導出している。

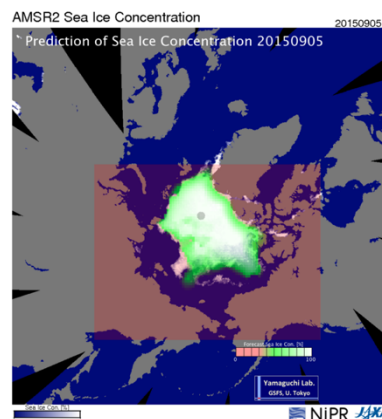


Fig 2.2 Mid-term forecast[5]

3. 航路探索手法

3.1 A*アルゴリズム

A*アルゴリズムは最良優先探索法の一つであり、スタートノードからあるノードまでのコストと、そこからゴールまでの推定値(ヒューリスティック関数)の和が小さいノードを展開していく手法である。またA*アルゴリズムは完全性(解が存在すれば必ず発見すること)と最適性(最初に見つける解が最小コスト解であるということ)を備えている。各グリッドに緯度、経度、海の深さなどの基本的な情報に加え、海氷密接度と海氷厚(中期予測では海氷密接度のみの)の情報があり、グリッド間の移動についてはあるグリッドから0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°の角度にあたる周囲8グリッドを参照している。

3.2 長期予測データを用いた航路探索手法

長期予測データに対して、中野(2015)と同じIce Index法による船速推定をして航路探索を行った。Ice Indexとは海氷密接度や海氷厚に応じて航行の難易度を定める数値指標であり、20の時は無氷海面、負の方向に変化すると氷況が厳しく、船速が落ちていく。Ice Indexを*I*として、船速*v*を式(1)で示す。

$$v \text{ [knots]} = \begin{cases} 0.768I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647I + 5.209 & (I < 15) \end{cases} \quad (1)$$

また評価関数は次の式で表した。

$$\text{cost function} = w1 \times (\text{Distance [nm]}) + w2 \times (\text{Time [hours]}) \quad (2)$$

この時中野(2015)の先行研究より、 $w1=1, w2=100$ とした。

3.3 中期予測データを用いた航路探索手法

今井(2017)は海氷密接度*C*を用いて、船速を次式で表した。

$$v = -0.05358C^3 + 0.6997C^2 + (-3.982)C + 14.01 \quad (3)$$

ただしこれは海氷厚が1mという仮定で計算されており、本研究では厚さについて一般化するために有効海氷密接度*Ce*を以下の式で与えた。ここで*hi*は1m、*hr*は海氷厚、*C*は海氷密接度を示す。

$$Ce = \frac{hr}{hi} C \quad (4)$$

ここで*hr*として、衛星データを解析することで各海氷密接度における海氷厚の中央値を用いた。*hr*は次のように表される。

$$hr \text{ [cm]} = \begin{cases} 24.92 & (0 < C < 60) \\ 0.1185C^3 - 0.2574C^2 + 18.72C - 428.7 & (60 \leq C \leq 90) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入して有効海氷密接度*Ce*を海氷密接度*C*の関数として求め、有効海氷密接度を式(3)の*C*の部分に代入することで船速を導いた。また今井(2017)の先行研究では燃料消費量についても船速と同様に海氷密接度の関数で表されており、式(4)~(5)を用いて関係式を導いた。

また海氷密接度に対して海氷厚が耐氷船の砕氷性能である0.6mを下回る確率を成功率として、衛星データの解析から以下の式を導いた。

$$(\text{成功率}) = \begin{cases} 1 & (C \leq 50.8) \\ -0.0037C + 1.1892 & (C > 50.8) \end{cases} \quad (6)$$

最後に評価関数を次の式で定義した。

$$\begin{aligned} \text{cost function} = & w1 \times (\text{Distance [nm]}) + w2 \times (\text{Time [hours]}) \\ & + w3 \times (\text{Fuel Oil Consumption [t]}) + w4 \times (\text{Failure Rate [%]}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで $w1=0, w2=0, w3=1, w4=100$ とした。燃料消費量を最適化し、失敗率を重視した航路探索を行なった。失敗率は式(9)の成功率を 1 から減じたものである。

4. 結果

4.1 長期予測データを用いた航路探索

まずシナリオとして、「0.6m までの海水厚に耐えられる耐氷船での航行」、「耐氷・砕氷性能がない通常船での航行」の 2 通りと、「スタート地点からゴール地点までの最短経路上で海水に遭遇しない航行」のシナリオを加えた 3 通りを考える。2018 年から 2099 年の各年について、1 日目、5 日目、…、365 日目というように、4 日おきの計 92 日を出発日として指定した。ただし 2099 年の 12 月は対象外とする。

その結果として、各条件で航路探索が成功し、北極海航路が可能となる期間を Fig 4.1 に示した。(ただし最短経路で航行可能な期間は最短経路、最短経路で航行できないが通常船で航行可能な期間は通常船の色としている)。また Fig 4.2 から Fig 4.4 に 3 つのシナリオの航路の例を示した。

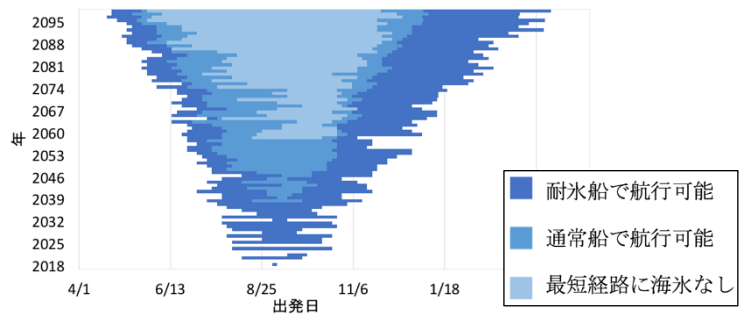


Fig 4.1 Available duration of shipping

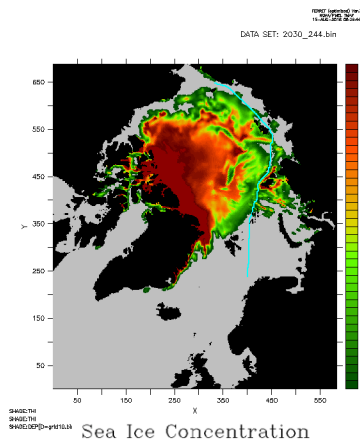


Fig 4.2 Ice class ship's route

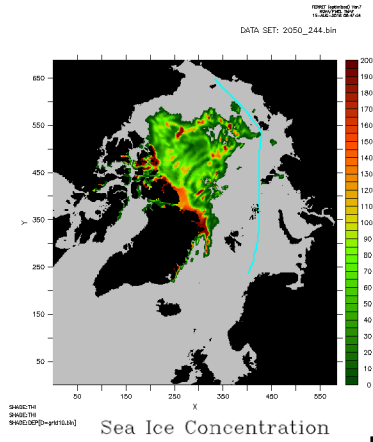


Fig 4.3 Normal ship's route

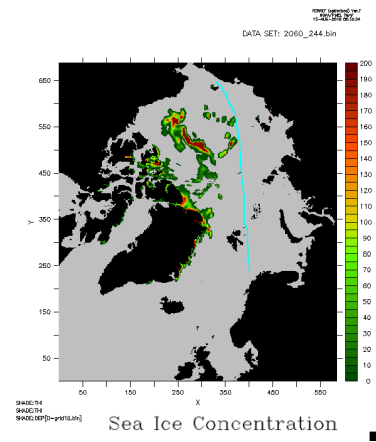


Fig 4.4 Shortest route

Fig 4.1 から各シナリオにおける航行可能な期間は次第に増えていく傾向が見られた。現在は耐氷船で北極海航路を利用ができるようになりつつあり、2050 年頃には通常船で 2~3 ヶ月の航行がなることが予想される。さらに 2060 年頃にはアジアヨーロッパ間を最短経路で海水に遭遇せずに航行できるという結果が得られた。

4.2 中期予測データを用いた航路探索

中期予測を用いた最適航路探索では、2018年の7月1日から9月1日までの各日を出発日とした。各出発日の航行におけるコストを Fig 4.5 に示す。一番下の成功率の図で、7月の最初の数日間は成功率が低く、7月7日以降ほぼ100%で一定となった。このことから最初の数日間はある程度海氷密接度が高い海域での氷海航行が多く、安全面から利用はできないと言える。7月7日から9月上旬まで、燃料消費量、航行時間ともに緩やかに減少している。一番上の航行距離は7月下旬までは徐々に減少し、7月末頃と8月末頃に急落する点が特徴的である。航路探索の結果を調べると、最初は海氷を避けるように大陸沿いに航行し、ノバヤゼムリヤの北を通りヨーロッパに達しているが、7月末から海氷が減ってきてウランゲル島の北部を航行できるようになり、さらに海氷が減った8月末からはセベルナヤゼムリヤの北部を航行できるようになる。この二つの航行距離が大きく下がる時に、航行日数と燃料消費量が大きく変化しないのは、評価関数で燃料消費量を用いているためだと考えられる。

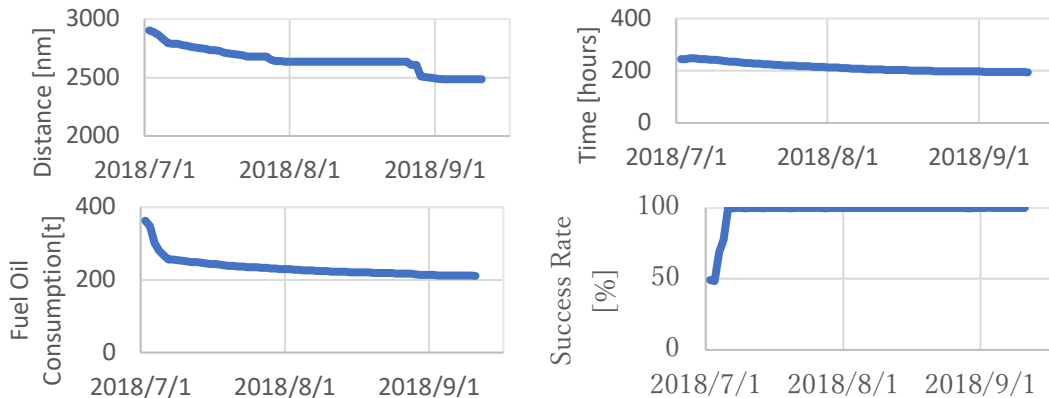


Fig 4.5 Shipping costs

5. 結論

本件研究の結論として、以下の新しい知見、結果が得られた。

NSRの将来的な利用可能期間を示した。

長期予測のデータに対して、2099年まで4日おきに最適航路探索を実施し、航行可能な期間を明らかにした。耐氷船で航行可能な期間、通常船で航行可能な期間、最短経路で航行可能な期間の3種類を調べ、それぞれ利用開始が20年ほどずれて始まることがわかった。現在のCO2排出が現在のペースで続き、本研究で用いた長期予測のシミュレーション通りに海氷が減っていけば、2050年頃には通常船では3ヶ月近く、耐氷船では5ヶ月近くNSRを利用できることになる。

AMSR2のデータを解析し、海氷厚を推定して航路探索手法を考案した。

現時点で信頼できる海氷厚の中期予測がないため、海氷厚を用いない航路探索手法を考案した。海氷密接度と海氷厚の相関関係から関係式を作り、海氷密接度から船速推定及び燃料消費量の推定をした。また海氷厚が砕氷限界値を超える確率を失敗率として導出し、航路としての成功率を計算できるようにした。成功率でNSRの利用におけるリスク低減に貢献できると考える。

中期予測に対する最適航路を求めた。

中期予測のデータを用いて最適航路探索を行った。本研究では燃料消費量を最適化したところ、航行時間と燃料消費量が日ごとになだらかに減少する傾向が見られた。航行距離は航路を大きく帰る瞬間で大きく下がるが、燃料消費量や航行時間がそれに伴い大きく変化することはなかった。また2018年の成功率は、7月7日に東シベリア海大陸付近の海氷が和らぐと同時にほぼ100%となった。成功率がある時からほぼ100%になることから、NSRの利用開始期間を明確化することができた。

5. 参考文献

- [1] 国立極地研究所 ADS (Arctic Data archive System), <https://ads.nipr.ac.jp/ja/>
- [2] 中野佑哉, 北極海航路における最適航路探索に関する研究, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 修士論文, 2015
- [3] 今井克哉, 航行シミュレーションによる北極海航路の可能性評価, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 修士論文, 2017
- [4] Kimura N., Nishimura A., Tanaka Y. and Yamaguchi H. (2013) Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic, Polar Research, 20193.