

東京大学大学院  
新領域創成科学研究科  
海洋技術環境学専攻

平成 30 年度

修士論文

# 最適航路探索を用いた 北極海航路の航行容易性評価

平成 31 年 1 月 23 日

指導教員  
山口 一 教授

47-176630 岡田 健吾



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	既存研究	6
1.3.	研究目的	7
第 2 章	海氷中期予測を用いた最適航路探索	8
2.1.	中期予測データ	8
2.2.	高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR 2)	9
2.3.	経路探索アルゴリズム	11
2.4.	AMSR2 のデータを用いた船速推定	14
2.5.	結果	19
2.6.	結果の検証	35
第 3 章	海氷長期予測を用いた最適航路探索	38
3.1.	長期予測データ	38
3.2.	Ice Index 法	39
3.3.	結果	44
3.4.	燃料最適化計算との比較	47
第 4 章	結論	49
4.1.	まとめ	49
4.2.	今後の課題	50
	参考文献	51
	謝辞	53

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景

北極海はユーラシア大陸、グリーンランド、北米大陸に囲まれた、海氷に覆われている海域である。図 1.1 に北極海の地図を示す。海域はユーラシア大陸東部から順にチュクチ海、東シベリア海、ラプテフ海、カラ海、バレンツ海と海域があり、ロシア沿岸にはウランゲル島、ノボシビルスク諸島、セベルナヤゼムリヤ、ノバヤゼムリヤ等の島が存在し、海域の境界となっている。また地形的な特徴として、ユーラシア大陸から広大な大陸棚が存在していることがあげられる。北極海における主な海流は図 1.2 に示す通りボーフォート循環流とトランスポーラードリフトの2つで、外海への流出入は主に北大西洋に向かうトランスポーラードリフトが担っている。太平洋と北極海を結ぶベーリング海峡は幅 90km に満たない狭い海峡であり、流出入は少ない。このような環境の中で、北極海を覆う海氷は絶えず拡大、縮小をしながら動いている。

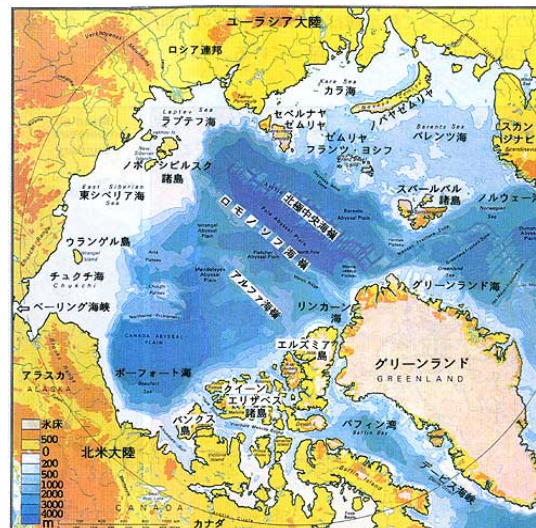


図 1.1 北極海地形図（田中(2009)[1]）

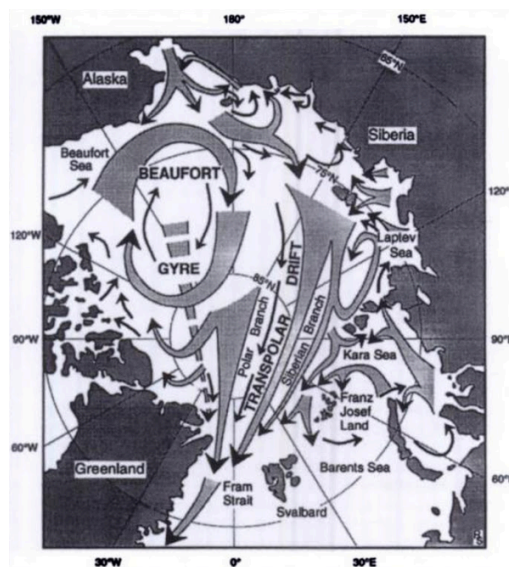


図 1.2 北極海における海流の概略図[2]



北極海では3月頃に海氷が最も発達し、5月頃から溶け始め、9月に最も海氷が少なくなる。そして秋から冬にかけて再び海氷が発達するというサイクルになっている。冬に新しくできた海氷は一年氷と呼ばれ、その後夏の融解期間を超えて残った海氷を二年氷、さらに三年目、四年目と溶けず残ったものは多年氷と呼ばれる（二年氷も多年氷に含まれる）。北極海の大部分を占める一年氷は30cmから2m程で、比較的薄く広大に広がっていることが多く、北極海を航行する商船が遭遇する氷のほとんどは一年氷である。一方多年氷は年々厚さを増すだけでなく、海氷内の塩分含有率が下がることで強度を増すことが知られており、北極海を航行する船舶にとっては大きな障害となる。また陸の河川から海水よりも凝固点が高い淡水が流入することで、冬には沿岸域に定着氷が発達しやすいことも北極海の特徴である。

また米国地質調査所が2008年7月に公表した環北極圏資源評価（CARA, Circum-Arctic Resource Appraisal）[3]によると、北極圏（北緯66.56°以北、陸地も含む）の未発見資源量は、世界の未発見石油の13%、未発見天然ガスの30%を占めるとされており、今後資源開発が進み、タンカーなどの商船の航行が増えることが予想される。実際に、ロシアのヤマル半島で多くの日系企業が参画するガス田開発が2018年12月に全面稼働し、資源開発だけでなくそれを運搬するための商船の航行が活発になっている。

北極海の家氷の家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。図1.3に示す通り、北極域の家氷域面積（家氷密接度が15%以上の面積）は減少傾向が確認されており、この家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家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。

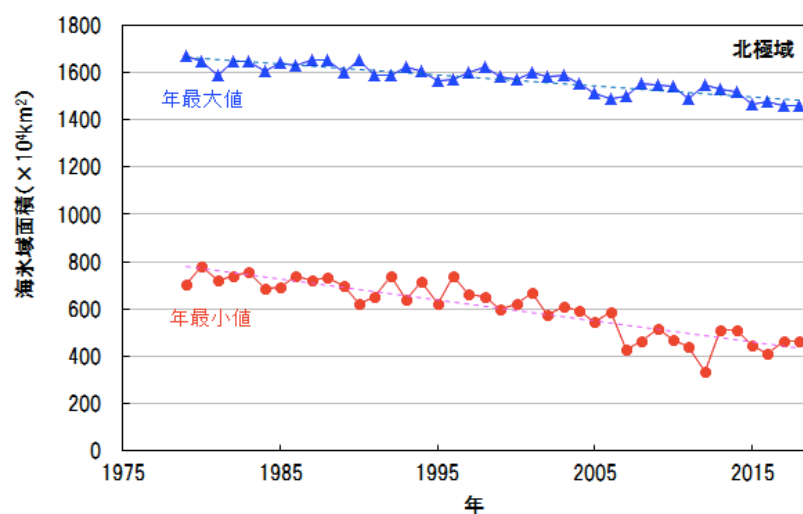


図 1.3 北極海の家氷域面積の各年最大・最小値（気象庁 HP[4]）

この大きな地球環境の変化に対して、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。図 1.4 に NSR の航路の例を示した。また図 1.5 に 2018 年 9 月の家氷密接度分布の衛星データを示す。夏に大陸沿岸の家氷が減り始めたことで、従来アジア・ヨーロッパを結ぶ航路であったスエズ運河経由の航路の代わりに、北極海を航行できるようになりつつある。NSR を使うことで、アジア・ヨーロッパ間の航行距離をスエズ運河経由に比べて 30~40%短縮できる。航行距離と日数の短縮に伴い、CO2 の排出も抑制できるので、アジア・ヨーロッパ間の貿易や資源輸送

の航路として社会的に需要が高まっている。



図 1.4 北極海航路（北極海航路ハンドブック[5]）



図 1.5 2018 年 9 月 21 日の海氷 (灰：陸域、青：海域、白：海氷、ADS[6])

しかし **NSR** の利用にはいくつかのリスクが伴う。船体が海氷の中で動けなくなり閉じ込められることや、氷況によって定時制が保てないこと、さらに海難救助の問題や海上事故による油流出への対応など、新たに生じる課題は多い。これらの課題は、海氷の存在や気温の低さが主な原因であり、海氷の動きをより正確に把握することが何より重要である。

そこで安全な航行システムに必要なのが毎日の衛星観測データと、それを用いて作られた予測データである。北極海の観測データとしては、第 2 章で述べる AMSR2 のデータから、海氷密接度(グリッド内の海氷が占める面積の割合)と海氷厚を毎日得ることができる。そして観測データと物理モデル、統計的解析などを用いることで海氷分布の予測がされるのだが、海氷予測はその期間によって短期・中期・長期の 3 種類に大別される。それらの特徴や用途

などを表 1.1 海氷予測の種類にまとめた。

表 1.1 海氷予測の種類

	短期予測	中期予測	長期予測
期間	1 週間程度	数ヶ月先まで	数十年先まで
用途	個々の船舶の 航路選択	海運会社の 配船計画	造船発注、港湾整備、 大規模投資の意思決 定
予測手法の 例	数値モデル (Ice-POM)	衛星データ解析 (統計的手法など)	数値モデル (COCO)
提供変数	海氷密接度、海氷厚	一年氷・多年氷の 海氷密接度 海氷厚：なし	海氷密接度、海氷厚
特徴	実用レベルの高精度	高精度で海氷域面積 を予測可能	実測値に最も近い モデルを使用

氷海航行するための船舶は、その性能によって耐氷船、あるいは砕氷船と呼ばれる。厚い海氷の中を航行できる船舶はそれだけ船体補強・設備・装備などにかかる費用が大きい。ある一定の耐氷性能・砕氷性能がある船舶に対しては、アイスクラス（公的に証明される等級）が与えられており、IMO(国際海事機関) が付与するアイスクラス、極地氷海船階級(Polar Class)PC1～7 の各階級別の性能を表 1.2 極地氷海船階級に示す。また代表的な砕氷船・耐氷船の性能を表 1.3 代表的な船舶の砕氷性能に示す。

表 1.2 極地氷海船階級

極地氷海船階級 (Polar Class)	氷の状況及び季節（船の構造要件などを決める上での目安）	氷厚の参考値（cm）
PC1	すべての極地の氷の水域を通年航行する船。	350 以上
PC2	中程度の厳しさの多年氷が存在する氷の水域を通年航行する船。	300 ～ 350
PC3	多年氷が一部混在する二年氷の中を通年航行する船。	200 ～ 300
PC4	多年氷が一部混在する厚い一年氷の中を通年航行する船。	120 ～ 200
PC5	多年氷が一部混在する中程度の厚さの一年氷の中を通年航行する船。	70 ～ 120
PC6	多年氷が一部混在する中程度の厚さの一年氷の中を夏季又は秋季に航行する船。	50 ～ 90
PC7	多年氷が一部混在する薄い一年氷の中を夏季又は秋季に航行する船。	30 ～ 60

表 1.3 代表的な船舶の砕氷性能

船 名 (国/用途)	要 目	砕氷能力	相当する 極地氷海船階級
戦勝 50 周年号 (ロシア/ 原子力砕氷船)	完工:2007 年、排水量:25,840 トン、全長:160 メートル、 幅:30 メートル、喫水:11.1 メートル、 出力:49,000 キロワット、平均速力:21.45 ノット	連続/ 2.3 m 最大/ 5 m	PC1
2 代目・しらせ (日本/砕氷自衛艦 ,南極観測船)	完工:2009 年、排水量:12,500 トン、全長:138 メートル、 幅:28 メートル、喫水:9.2 メートル、 出力:22,070 キロワット、平均速力:15.0 ノット	連続/1.5 m 最大/ 5 m	PC2
みらい (日本/ 海洋地球研究船)	完工:1997 年、排水量:10,627 トン、全長:128.58 メートル、 幅:19 メートル、喫水:6.9 メートル、 出力:7,352 キロワット、平均速力:16 ノット	最大/約 0.5 ~ 0.9 m	PC6 (IA Super)
ガリンコ II (日本/ 観光砕氷船)	完工:1997 年、排水量:250 トン、全長:35 メートル、 幅:7 メートル、喫水:1.9 メートル、 出力:400 ~ 740 キロワット、平均速力:10.4 ノット	連続/0.4 m 最大/0.8 m	PC6

本研究で耐氷船と記述する際、PC 6 から PC7 程度の船舶を想定する。

NSR の実用化には安全性と採算性が保証できなければならない。採算性を考える上ではどの期間、安全に航行できるかが重要であり、海氷のデータに対して安全で理想的な航行条件を導くことができれば採算性の計算にも貢献できる。

## 1.2. 既存研究

船舶の航行ルートにおける時間、距離、安全性などの最適化という課題は古くから存在し、大航海時代にコロンブスが貿易風や偏西風を利用し始めた時にまで遡ることができる。海洋観測が活発になった現代では、風、潮流、波浪などの環境条件を用いて航路を決定する手法としてウェザー・ルーティングが研究されている。ウェザー・ルーティングとは「航海中の気象・海象状態を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」[7]と定義されており、航行時間、船体動揺、燃料消費量等を最適化する手法として使われている。内野 (2013)[8]はダイクストラ法、等時間曲線法を用いて、太平洋における大型帆船の最適航路選定手法について研究を行った。

しかし本研究で対象とする北極海では、海氷という大きな障壁があるため、これらの手法だけでは不十分である。現時点で完全に海氷に全く遭遇せずに NSR を利用できる期間は限られた期間のため、耐氷船または砕氷船で海氷のなかを通過することが必要である。

海氷のデータを用いた航路探索の研究として、中野 (2015) [9]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) [10]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。

本研究では中野、今井の手法をベースとして、これまであまりされていなかった海氷の将来予測データを用いた航路探索を行った。

### 1.3. 研究目的

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、**NSR** 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 **NSR** の実用化に貢献することを目的とする。

## 第2章 海氷中期予測を用いた最適航路探索

### 2.1. 中期予測データ

Kimura et al.[11]はマイクロ放射計による観測データから、12月から4月にかけて面相關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。図 2.1 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。

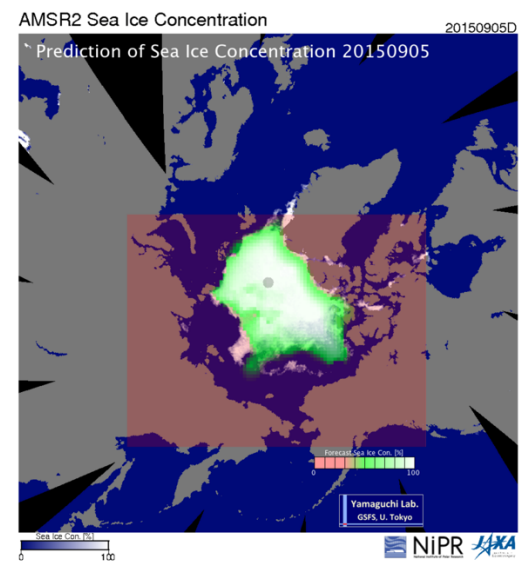


図 2.1 Kimura et al.の手法による予測結果(2015/09/05)[11]  
(白領域:観測値, 緑領域:5月下旬に発表した予測値)

また Kimura et al.は、夏に溶けずに翌年まで残った海氷の動きを追跡することで、4月までの海氷分布から夏の多年氷の分布を予測している。図 2.2 の赤い海域が多年氷の分布である。

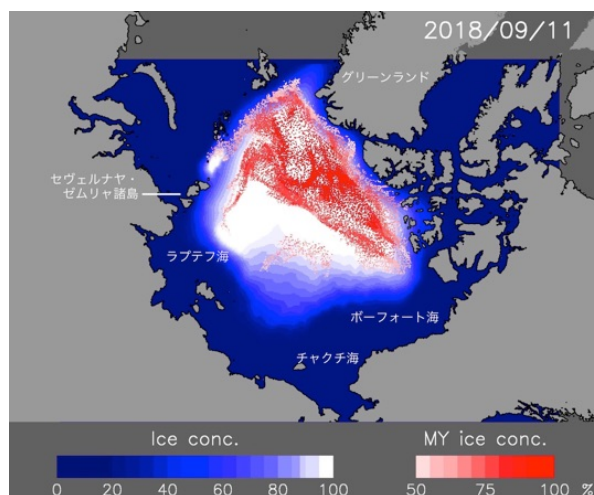


図 2.2 多年氷の分布予測

この手法で夏の終わりまでの全体の海氷密接度および多年氷の密接度が計算されているが、本研究で航路探索を行う上で重要な海氷厚の計算はされていない。海氷厚は航路探索手法で述べたとおり、船体の侵入可否や船速を決定する上で重要なデータである。そこで本研究では、AMSR2 の衛星データを解析して海氷密接度と海氷厚の推定式を導き、航路探索を行った。

## 2.2. 高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR 2)

2012 年に JAXA が打ち上げた気象衛星「しずく」に搭載された高性能マイクロ波放射計 2(AMSR 2)は、地表や海面、大気などから自然に放射されるマイクロ波とよばれる電磁波を、7GHz から 89GHz までの 6 つの周波数帯で観測するセンサである。地上 700km で観測を行い、1 回の走査で約 1,450km の幅を観測する。アンテナの直径は衛星搭載用の観測センサーとしては世界最大の約 2m、回転部分は高さが約 2.7m で、重さは約 250kg ある[12]。表 2.1 に AMSR2 センサーの詳細を示す。

AMSR2 は、地表面から放出されるマイクロ波放射を観測する受動型のセンサーであり、マイクロ波は微小な水滴には散乱されにくいため上空の気象条件の影響を受けず、地表面を連続的にモニタリングすることが可能である。海氷の輝度温度は厚さ、冠雪、表面状態によって変化するため、輝度温度を観測することで氷の種類や密接度を知ることができる。



表 2.1 AMSR2 センサーの詳細[13]

中心周波数 (GHz)	偏波	空間分解能 (km)	観測幅 (km)
6.925	V	35×62	1450
6.925	H	35×62	
7.3	V	35×62	
7.3	H	35×62	
10.65	V	24×42	
10.65	H	24×42	
18.7	V	14×22	
18.7	H	14×22	
23.8	V	15×26	
23.8	H	15×26	
36.5	V	7×12	
36.5	H	7×12	
89.0	V	3×5	
89.0	H	3×5	

本章では AMSR2 のデータから導出された海氷密接度と海氷厚の値を用いた。海氷密接度とはある範囲内の海面で海氷が占める面積の割合であり、海氷の面積的分布を表すのに広く使われる値である。使用した密接度データは NASA Team Algorithm (Cavalieri et al. (1984)[14]) を用いて 18.7GHz と 36.5GHz のデータから計算されたものである。

海氷厚データは IJIS アルゴリズム (Krishfield et al. (2014)[15]) によって、6.925GHz と 36.5GHz のデータを用いて計算されたものである。このアルゴリズムは、マイクロ波放射計による輝度温度から氷厚を推定するが、海氷の表面が融けてメルトポンドと呼ばれる状態になると、推定精度が大幅に落ちてしまう。そこで、メルトポンドの密接度（ある範囲内に占める面積の割合）が 20%以上になるグリッドはエラーとして計算の対象から除外する。

## 2.3. 経路探索アルゴリズム

この節では本研究で用いた最適航路探索の中心部分である A\* (A-star) アルゴリズム (Hart et al. (1968)[16]) について説明する。A\*アルゴリズムは経路探索アルゴリズムの中でも最良優先探索の手法の一つであり、解があれば必ず見つける性質 (完全性) と、一定の条件下で最適解を最初に見つける性質 (最適性) の二つの性質を持っている。最適性における条件はヒューリスティック関数が許容的であることとしている (後述)。

A\*アルゴリズムでは、あるノード  $n$  を経由する最短経路の見積もりコスト  $f(n)$  を式(1)で定義し、それを評価関数とする。

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

$g(n)$  はノード  $n$  までの最小コストを表し、 $h(n)$  はノード  $n$  からゴールまで最小コストを表している。それらの和である  $f(n)$  はスタートからノード  $n$  を経由してゴールに至る最小コストを示す。ここで  $h(n)$  の推定値として  $h^*(n)$  を設定して ( $h^*(n)$  をヒューリスティック関数と呼ぶ)、 $f(n)$  の推定値を式(2)とする。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \quad (2)$$

$f^*(n)$  の値が小さいものから未展開のノードを展開することで、最短経路を見つけることができる。また  $h(n)$  の推定値である  $h^*(n)$  はヒューリスティック関数と呼ばれ、一般的な経路探索の場合ではゴールまでの直線距離を用いることが多い。

A\*アルゴリズムの具体的な手順を以下に示す (Nakano (2015)[9])。

1. スタートノード (S) とゴールノード (G) を用意する。また、未展開 (探索対象) のノードを格納する OPEN リストと展開済み (計算済み) のノードを格納する CLOSE リストを用意する。
2. S を OPEN リストに追加し、CLOSE リストを空にする。
3. OPEN リストが空なら探索失敗とする。
4. OPEN リストに格納されているノードのうち、最小の  $f^*(n)$  を持つノード  $n$  を選択する。
5.  $n = G$  なら探索を終了する。それ以外の場合は  $n$  を CLOSE リストに移す。
6.  $n$  に隣接する全てのノード ( $m$  とする) に対して以下を行う。
  - A)  $f'(m) = g(n) + h^*(m) + \text{COST}(n, m)$  を計算する。ここで  $\text{COST}(n, m)$  はノード  $n$  からノード  $m$  へ移動するためのコストである。
  - B) ノード  $m$  の状態に応じて以下を行う。
    - ①  $m$  が OPEN リストにも CLOSE リストにも含まれていない場合  
 $f^*(m)$  に  $f'(m)$  を代入し、 $m$  を OPEN リストに追加して、 $n$  を  $m$  の親として記録する。
    - ②  $m$  が OPEN リストに含まれている場合  
 $f'(m) < f^*(m)$  であれば、 $f^*(m)$  に  $f'(m)$  を代入して  $m$  の親を  $n$  に置き換える。
    - ③  $m$  が CLOSE リストに含まれている場合  
 $f'(m) < f^*(m)$  であれば、 $f^*(m)$  に  $f'(m)$  を代入して  $m$  を OPEN リストに移動し、 $m$  の親を  $n$  に置き換える。

7. 手順 3 から手順 6 を繰り返す。
8. 探索終了後、 $G$  から親を順次たどり、 $S$  から  $G$  までの最小コスト経路を得る。

以下に、 $A^*$ アルゴリズムの重要な特徴を示す。

まず、 $A^*$ アルゴリズムは完全性がある。すなわち、解が存在すれば必ず発見する。

ゴールノードへ至らない経路を限りなく進んでいくと、その経路先端のノードの評価値  $f^*(n)$  は増大し続け、いずれはゴールノードへ至る経路の先端にあるノードの評価値の方が小さくなり、それが展開のために選ばれることで解へ接近するためである。

次に、 $A^*$ アルゴリズムはヒューリスティック関数  $h^*(n)$  が許容的であるとき、最適性をもつ。すなわち、局所的最小値にはまることなく、最初に見つける解は最小コスト解である。ここで、許容的 (admissible) とは、全ての  $n$  に対して以下が成り立つことを指す。

$$0 \leq h^*(n) \leq h(n) \quad (3)$$

つまり、実際のコストよりも小さい値を推定値として用いればよい。たとえば、距離をコストとして最短距離経路を探索する際には、ノード  $n$  からゴールノードまでの直線距離を用いることで、ヒューリスティック関数を許容的とすることが出来る。

ヒューリスティック関数が許容的なとき、 $A^*$ アルゴリズムが最適性を持つことの証明

最適解（最小コスト解）の経路上のあるノード  $n$  の評価値  $f^*(n)$  は、 $h^*(n)$  が許容的であることから、最適解のコスト  $C$  以下である。すなわち、以下が成り立つ。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \leq g(n) + h(n) = C \quad (4)$$

一方で、最適解ではない経路のゴールノード  $G$  の評価値  $f^*(G)$  は、最適解でないことから  $C$  を超える。すなわち、

$$C < f^*(G) \quad (5)$$

である。以上より、

$$f^*(n) < f^*(G) \quad (6)$$

が成り立ち、必ず  $G$  より先に  $n$  が OPEN リストから選択されて展開される。このことから、非最適解のゴールノード  $G$  は決して OPEN リストから選択されない。したがって最初に見つかる解が最適解である。

(証明終)

本研究ではノードに当た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)の情報が有り、それに応じて経路が選択されるようにした。海氷のデータは日ごとに更新されるため、図 2.3 のように平面的な経路探索だけでなく時間軸を加えた 3 次元的な航路探索を行なった。グリッド間の移動についてはあるグリッドから  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $270^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$  の角度にあたる周囲 8 グリッドを参照することとした。

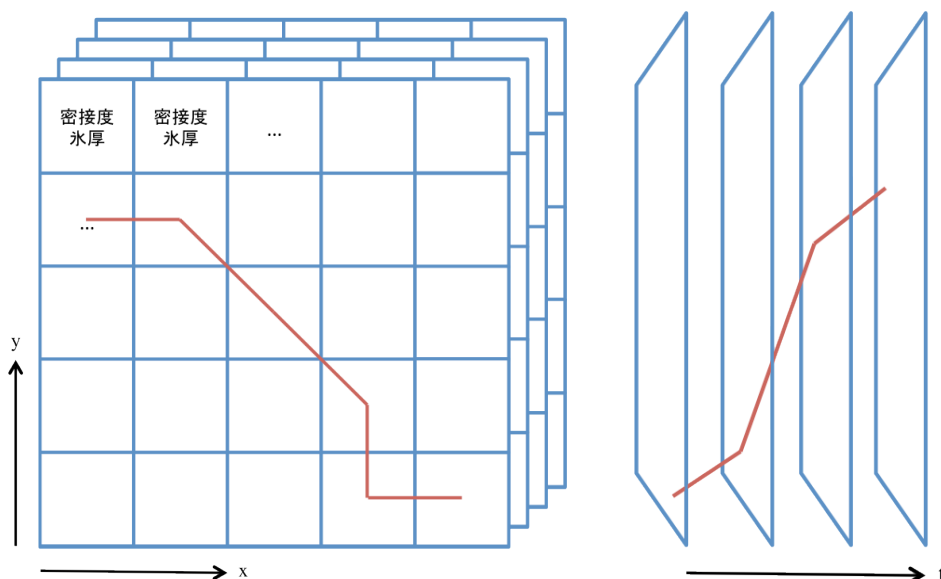


図 2.3 3 次元的な航路探索の模式図

また本研究で行なった航路探索では、コストとして航行距離、航行時間、燃料消費量、失敗率を考慮した。各コストに対するヒューリスティック関数は表 2.2 のように設定した。

表 2.2 ヒューリスティック関数

コスト	ヒューリスティック関数
航行距離	ノード n とゴールノード間の最短距離(=大圏距離)
航行時間	上記航行距離を最大船速で除した値
燃料消費量	上記航行時間において無氷海域として計算した値
失敗率	0 (4.1 節にて説明)

これらの条件は全て(3)式を満たしており、本研究で行う最適航路探索は完全性と最適性が保証されている。

## 2.4. AMSR2 のデータを用いた船速推定

海氷厚がわからない中期予測のデータを用いる上で、Ice Index 法では海氷厚の差で大きく係数が変化するという欠点がある。そこで今井(2017)[10]は氷況に応じた船速・燃料消費量の推定式として、船体の性能を考慮し到達速力計算により導出した式を用いた。これは海氷厚が 1m と仮定した時、船速と燃料消費量を海氷密接度の関数で表したものである。本研究では、さらに AMSR 2 のデータから海氷密接度に対する海氷厚の推定を行うことで、海氷厚が 1m という条件を一般化した。

まず、海氷密接度に対して耐氷船の砕氷限界として仮定した 0.6m を超える確率を求める。AMSR 2 の対象期間の各グリッドのデータからランダムに 100 万点を抽出し、海氷密接度と海氷厚を図 2.4 にプロットした。ここで海氷厚が急激に大きくなる海氷密接度 90%以上の時は航行不可とし、計算対象外としている。

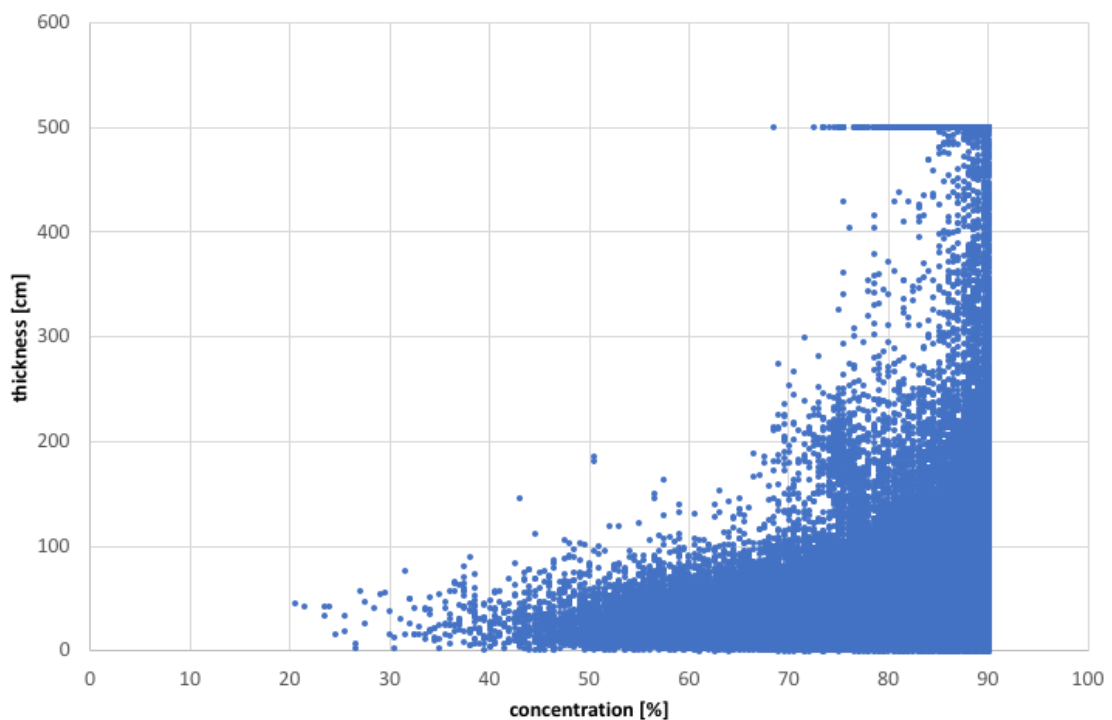


図 2.4 海氷密接度と海氷厚

また使用したデータの海氷密接度は 0.5% 間隔であり、各海氷密接度におけるデータ数を片対数グラフで図 2.5 に示した。

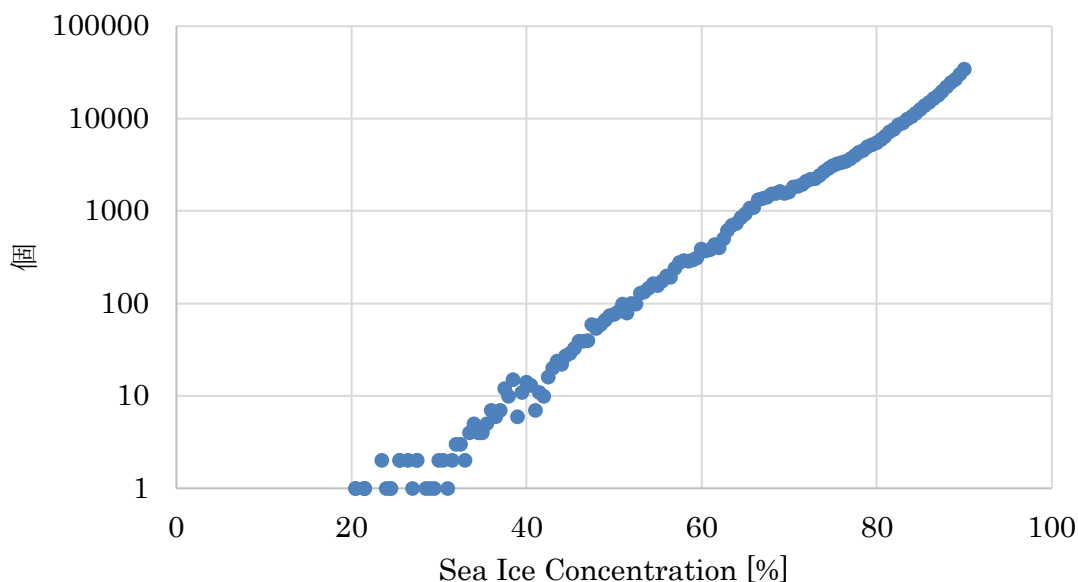


図 2.5 データ数

データ数から海氷密接度 50%以下の時に約 100 個以下となり、海氷密接度が小さいほどデータが不足する傾向が見られた。次に海氷厚が 60cm 以下になる割合を図 2.6 に示す。

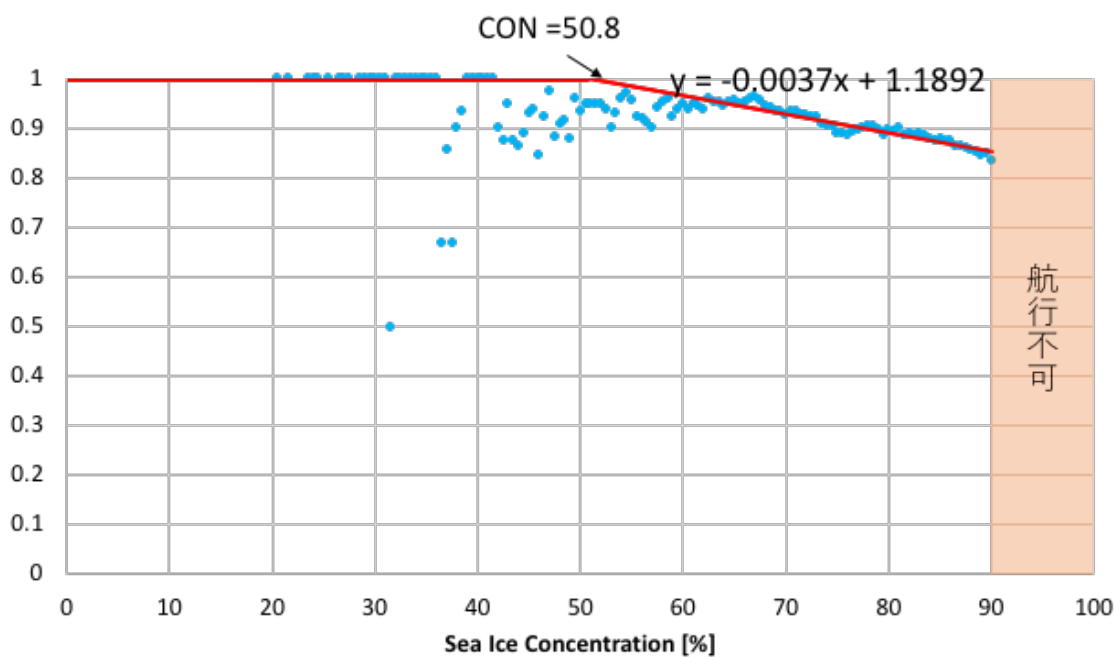


図 2.6 海氷厚 60cm 以下の確率

青いプロットで示された、海氷厚 60cm 以下となる割合の値に対して、減少傾向が見られる海氷密接度 60～90%で近似直線を引いた。また近似直線で海氷厚 60cm 以下の確率が 1 になる点が海氷密接度 50.8%であり、海氷密接度が 50.8%以下の時は全て海氷厚は 60cm 以下になると仮定した。この近似値を、1 グリッドあたりの成功率とし、成功率を 1 から引いた値を失敗率とした。以上から成功率を式(15)で表す。

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

C: 海氷密接度 [%]

次に船速推定式を求めるために、海氷密接度に対する海氷厚の代表値を求める。AMSR 2 のデータから 0.5% 間隔の海氷密接度に対して海氷厚の平均値(mean)、中央値(median)、最頻値(mode)を計算したものを図 2.7 に示す。

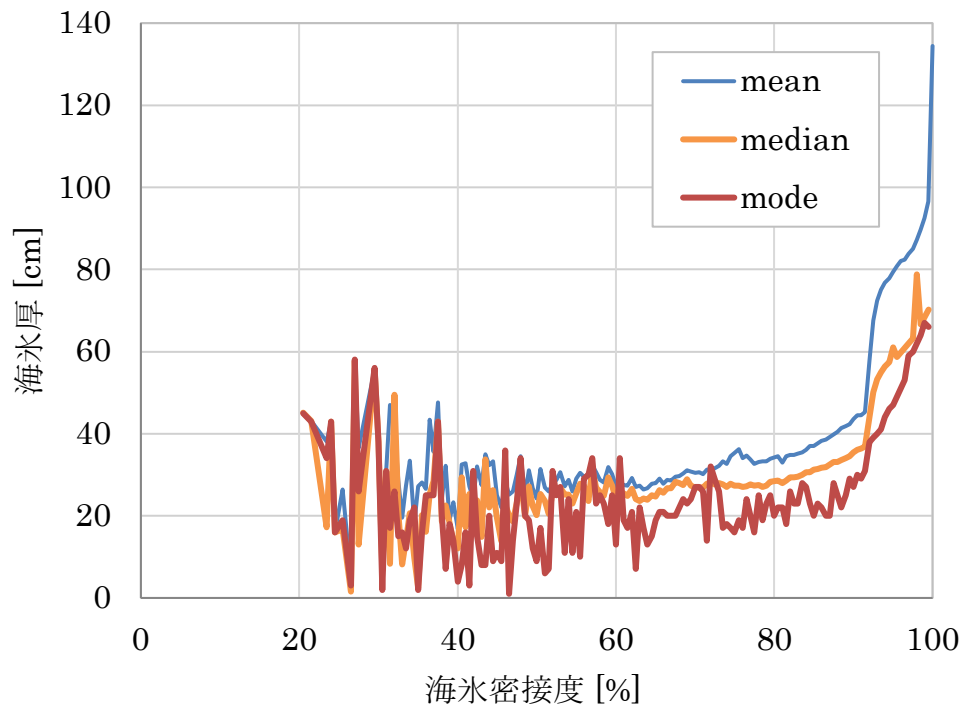


図 2.7 海氷密接度に対する海氷厚の代表値

3 種類の代表値に共通する点として、サンプル数の少ない海氷密接度 60% 以下の時には安定した値が求められていないこと、そして海氷密接度 90% 付近で急激に上昇していることが見られる。海氷密接度 60~90% の範囲でそれぞれの代表値を比較すると、平均値が最も大きく、最頻値が最も小さい傾向が見られる。代表値を計算する目的は耐氷船で航行可能な時に船速や燃料消費量を求めるためなので、1~数m の厚い海氷の影響で大きな値を取る平均値は対象から除外する。さらに値が安定していない最頻値を対象から除外し、中央値を代表値として用いることとした。

次に図 2.7 の中央値から、海氷密接度 60~90% の範囲で Excel で図 2.9 の近似曲線を描いた。

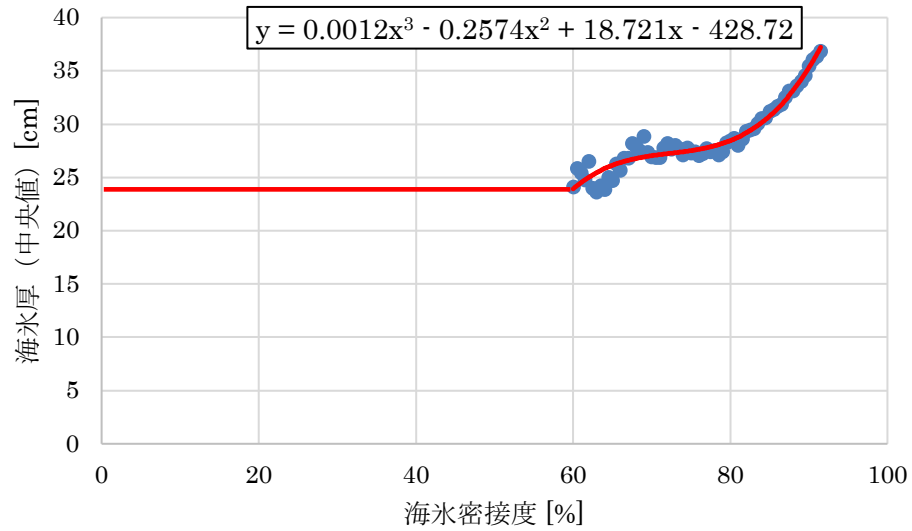


図 2.8 海氷密接度と海氷厚の関係における近似曲線

船速が飛躍する点がある航路探索として現実的ではないので、海氷密接度 60%未満の時、近似曲線で海氷密接度 60%の時の値である海氷厚 24cm で一定とした。ここで海氷厚 $hr$ は、海氷密接度  $C$ [%]に対して以下の近似式で表される。

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

今井(2017)[10]の手法では、海氷厚が 1m として船速及び燃料消費量を以下の海氷密接度の関数で表した。また関係式を導出する上で用いられた耐氷船（バルカー）の規格を表 2.3 に示す。

$$v = -0.053578887C^3 + 0.699690272C^2 + (-3.981528773)C + 14.00677837 \quad (3)$$

$$BHP = -4.506610295C^3 + 51.00814207C^2 + (-520.0441699)C + 6582.638008 \quad (4)$$

$$SFC = (4.18928/10^{13})BHP^3 + (2.86056/10^7)BHP^2 + (-0.003947462)BHP + 179.0820029 \quad (5)$$



表 2.3 対象耐氷船の規格 (Matsuzawa et al. [17])

Lengthbetween perpendiculars <sub>p</sub>	217.34 [m]
Breadth molded	32.26 [m]
Draft	14.0 [m]
Dead weight	73,000 [MT]
Engine output	(MCR) 9,070 [kW]
Service speed	14 [knot]

本研究ではこれらの関係式を一般化するために有効密接度  $C_e$  を用いた。すなわち、

$$C_e = \frac{hr}{hi} C \quad (6)$$

$hi$  : 1 [m]

$hr$  : 海氷厚の中央値 [cm]

$C$  : 海氷密接度

とした。1m の海氷厚に対して、実際はそれよりも薄い海氷でのみ航行するので、海氷厚の比率だけ海氷密接度を変化させたものが有効海氷密接度である。これを図 2.9 に示す。

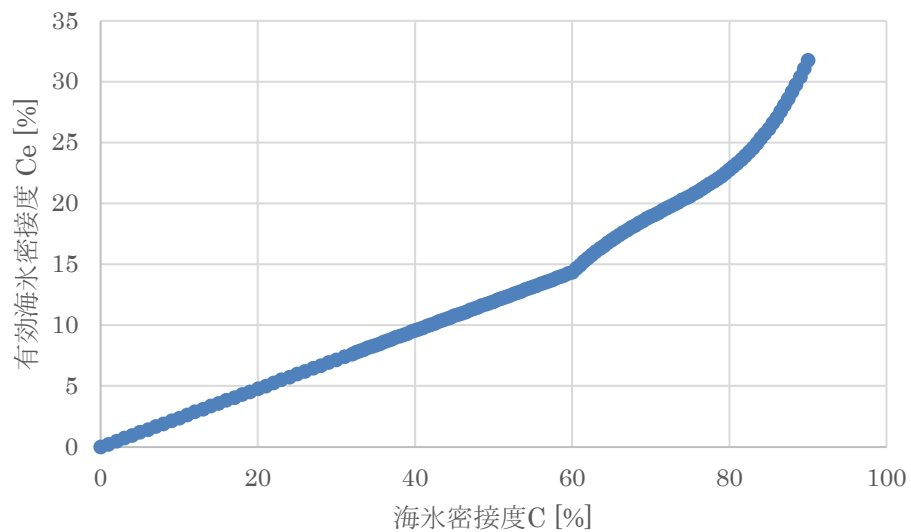


図 2.9 海氷密接度と海氷有効密接度

有効密接度  $C_e$  の式(20)と海氷厚の式(16)を海氷厚 1m の時の船速推定式(17)に代入して船速を求め、図 2.10 に示した。

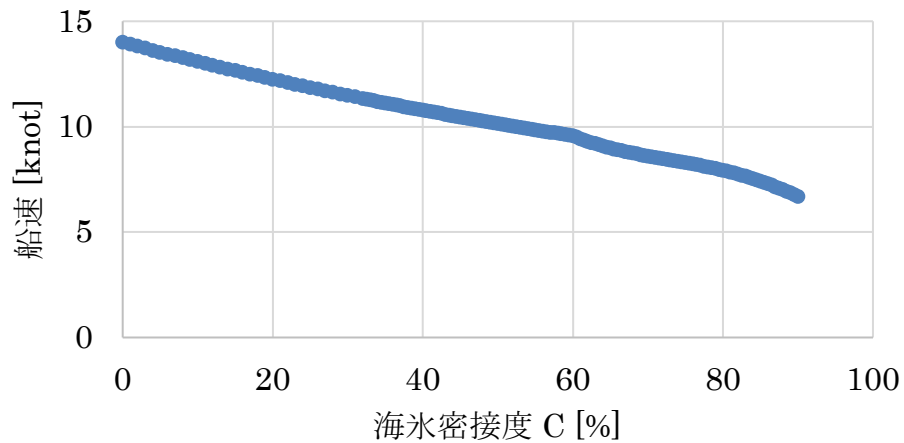


図 2.10 海氷密接度と船速

## 2.5. 結果

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 11 日までの各日を出発日として、2.4 節で説明した手法を用いた。また評価関数は式(22)である。

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

ここで成功率が最重要という前提のもとで、燃料優先、時間優先、距離優先の 3 つの条件を比較した。すなわち、燃料優先では  $w1=0, w2=0, w3=10, w4=1000$ 、時間優先では  $w1=0, w2=10, w3=0, w4=1000$ 、距離優先では  $w1=1, w2=0, w3=0, w4=1000$  とした。優先する要素の重み付け係数は、一般的な航行コストにおける桁数を考慮している。失敗率 (Failure Rate) は式(9)の成功率を 1 から減じたものである。

航路探索の結果の一例を図 2.11 から図 2.22 に示す。全体の海氷密接度と、多年氷の海氷密接度を重ねて表示し、青色で燃料優先、赤色で時間優先、緑色で距離優先の航路を示している。

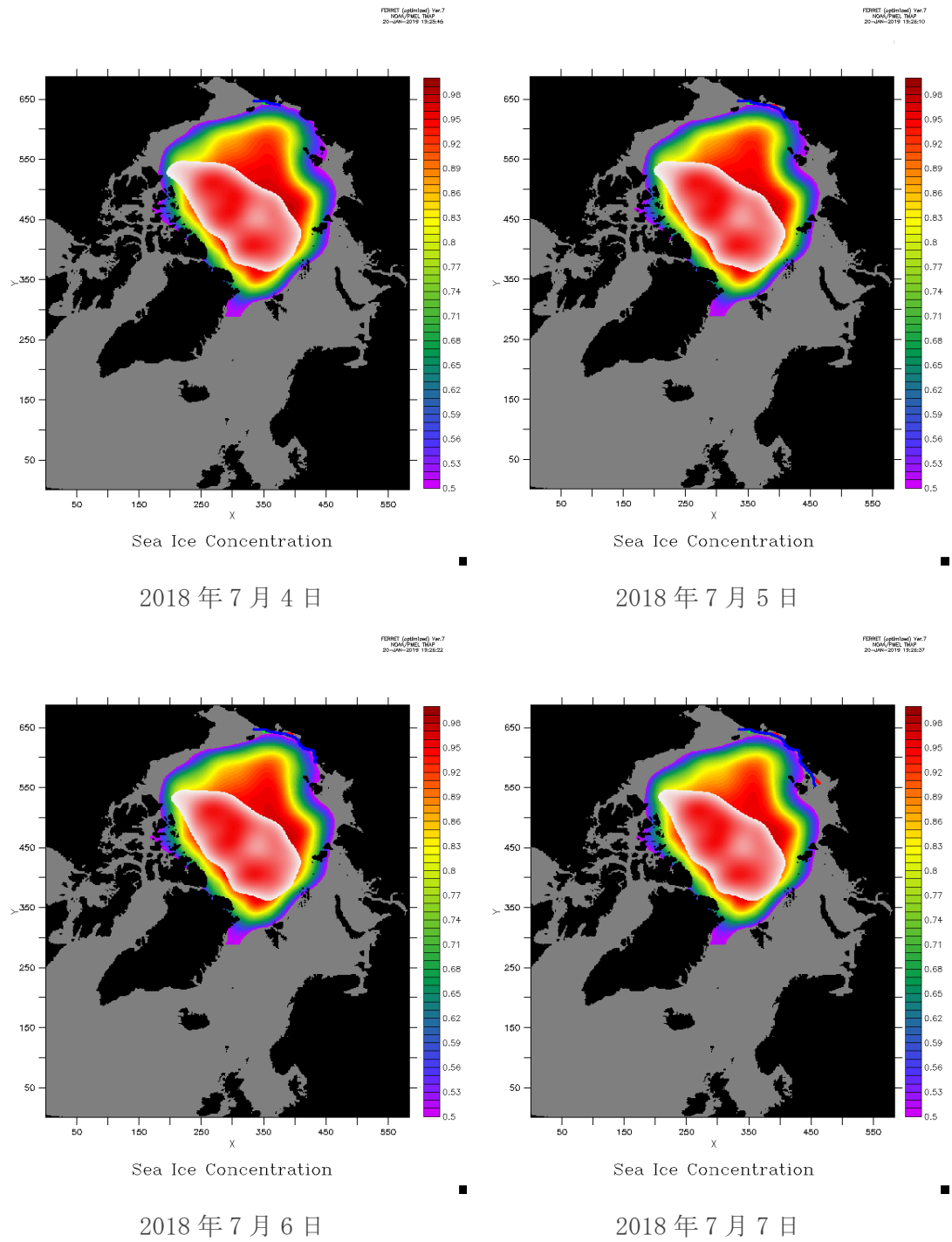


図 2.11 2018年7月4日に出発した場合の航路(7月4日から7日)

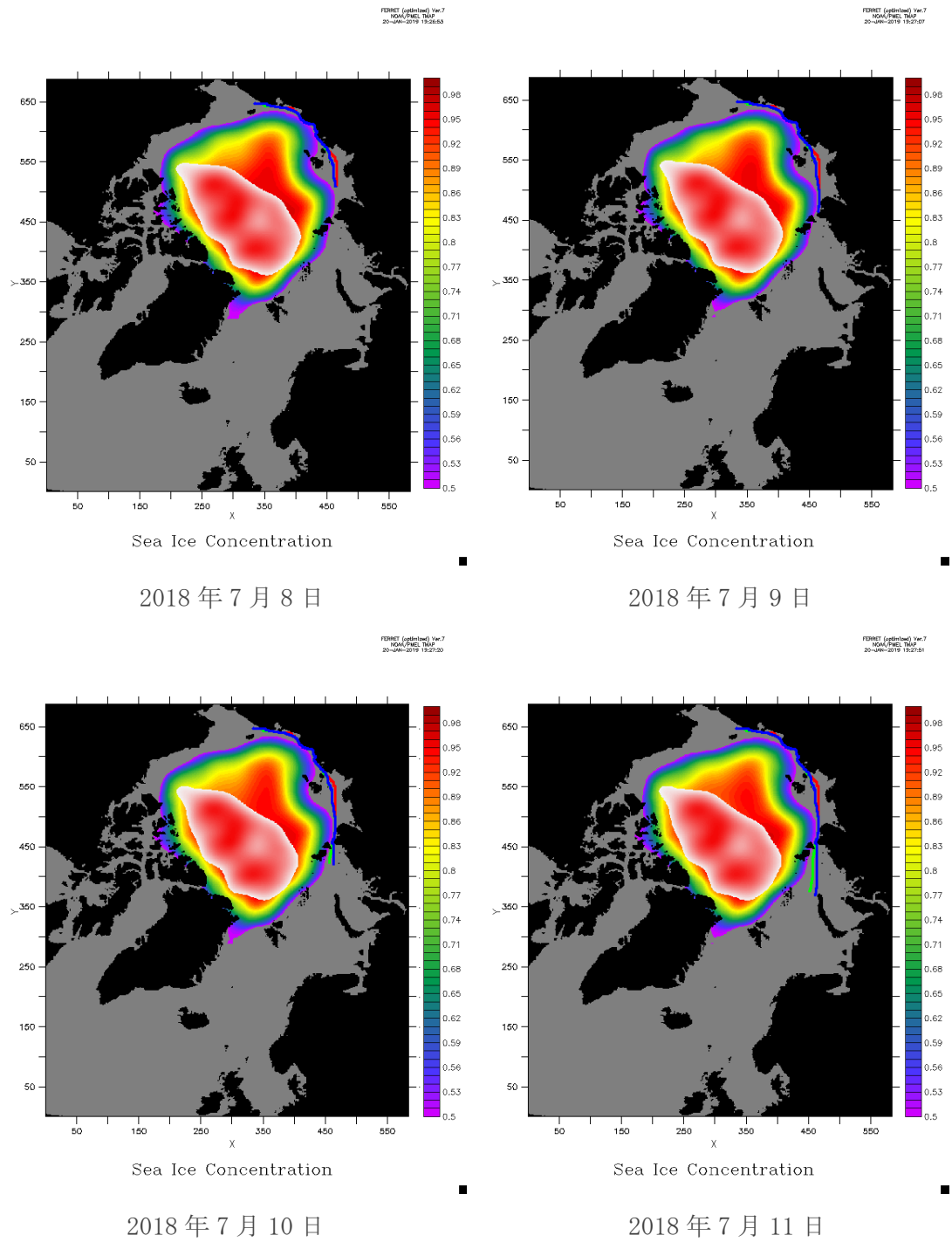


図 2.12 2018 年 7 月 4 日に出発した場合の航路(7 月 8 日から 11 日)

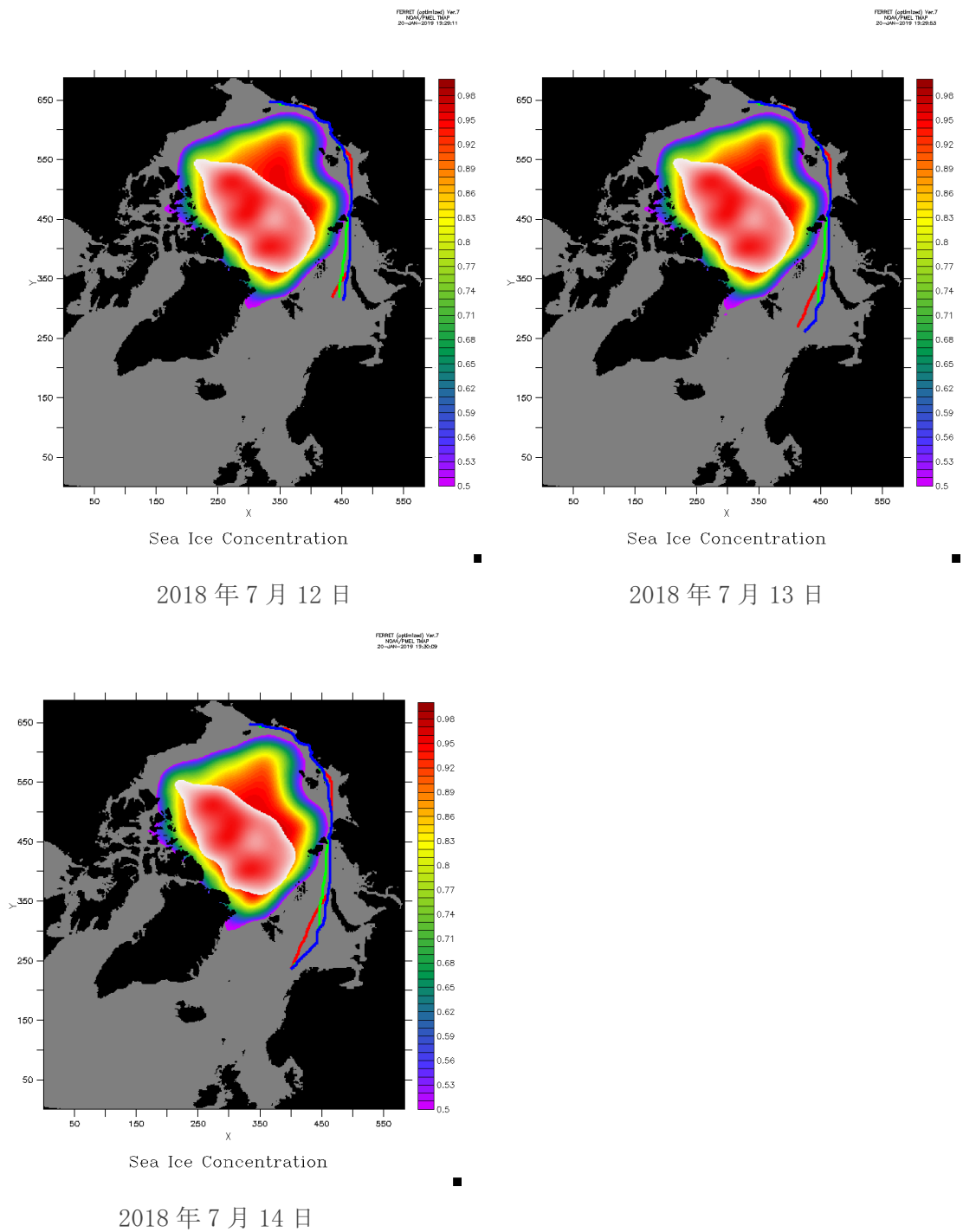


図 2.13 2018 年 7 月 4 日に出発した場合の航路(7 月 12 日から 14 日)

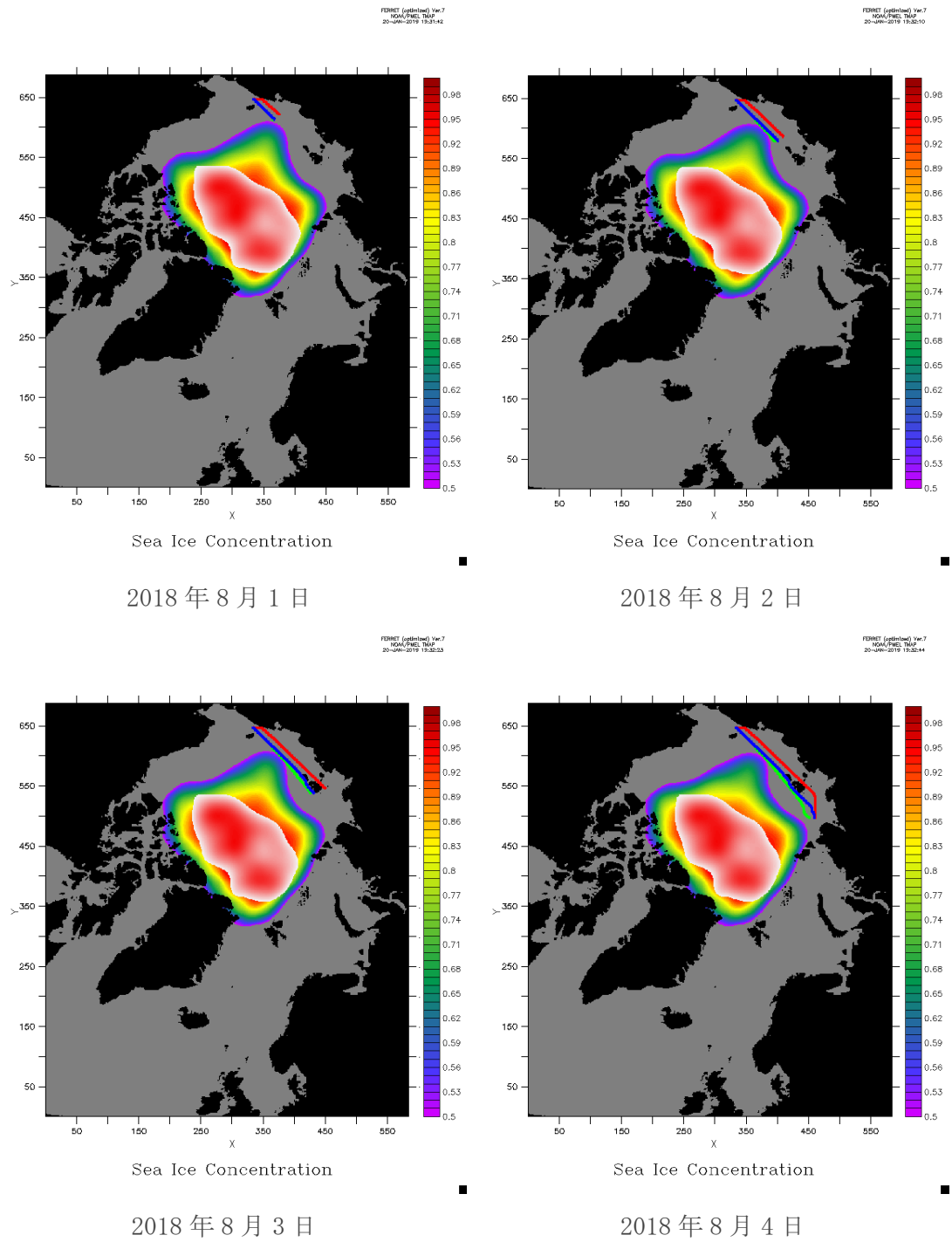


図 2.14 2018年8月1日に出発した場合の航路(8月1日から4日)

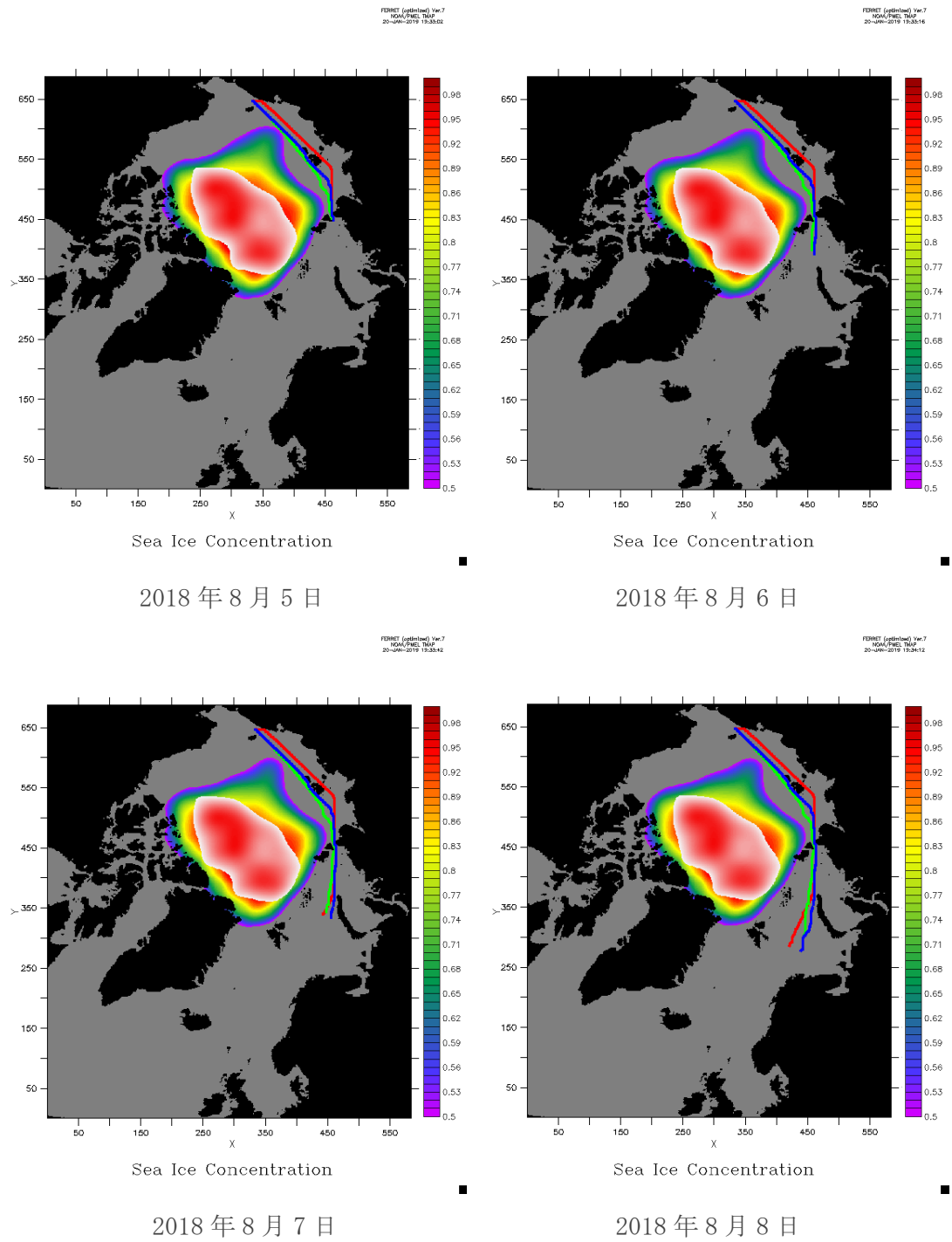
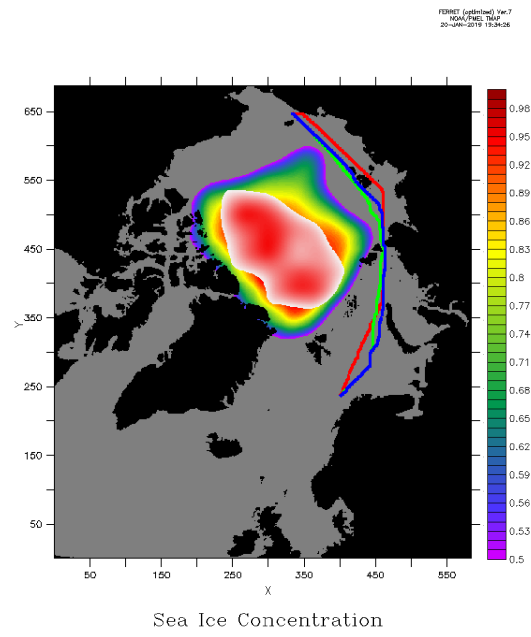


図 2.15 2018年8月1日に出発した場合の航路(8月5日から8日)



2018 年 8 月 9 日

図 2.16 2018 年 8 月 1 日に出発した場合の航路(8 月 9 日)



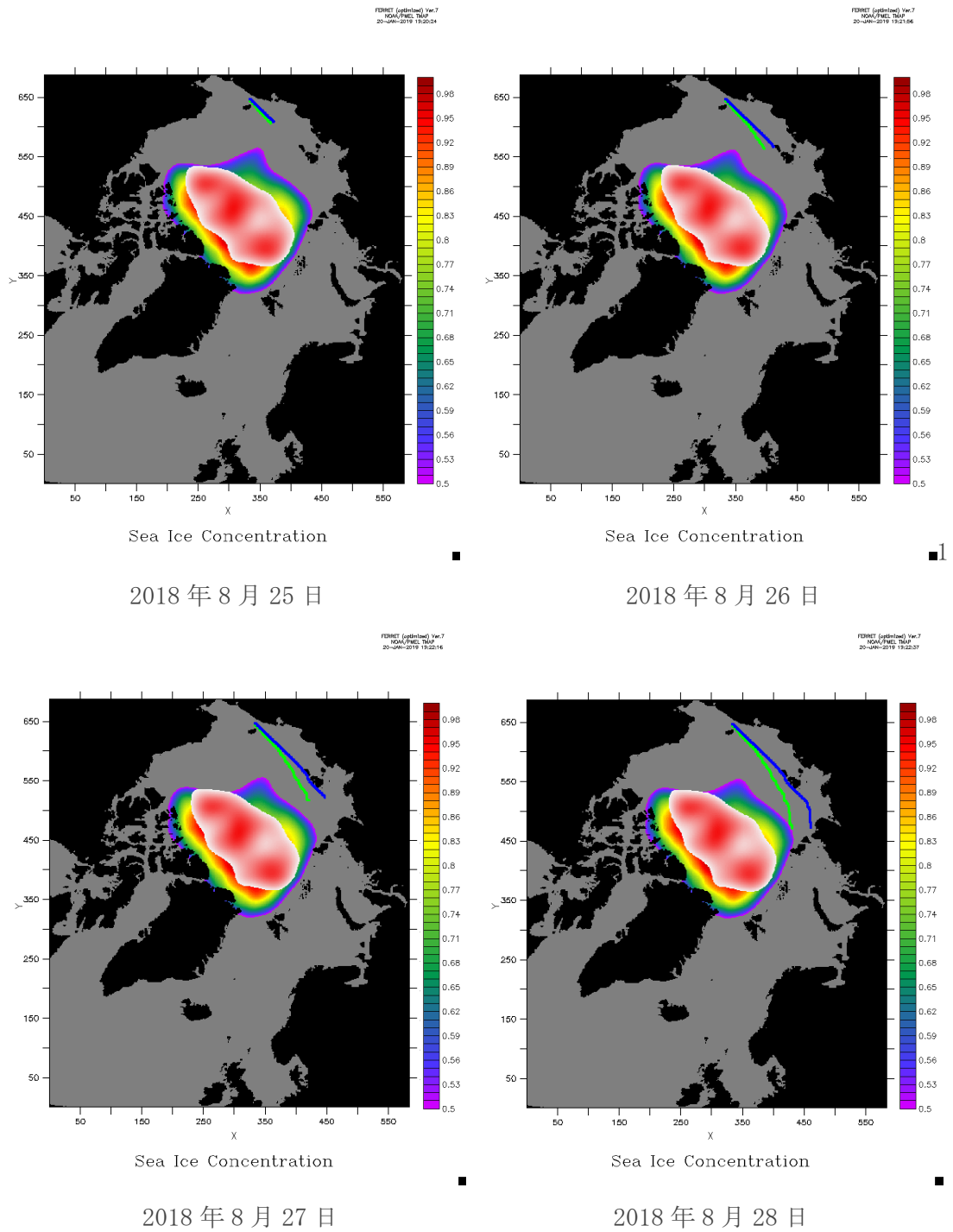


図 2.17 2018 年 8 月 25 日に出発した場合の航路(8 月 25 日から 28 日)

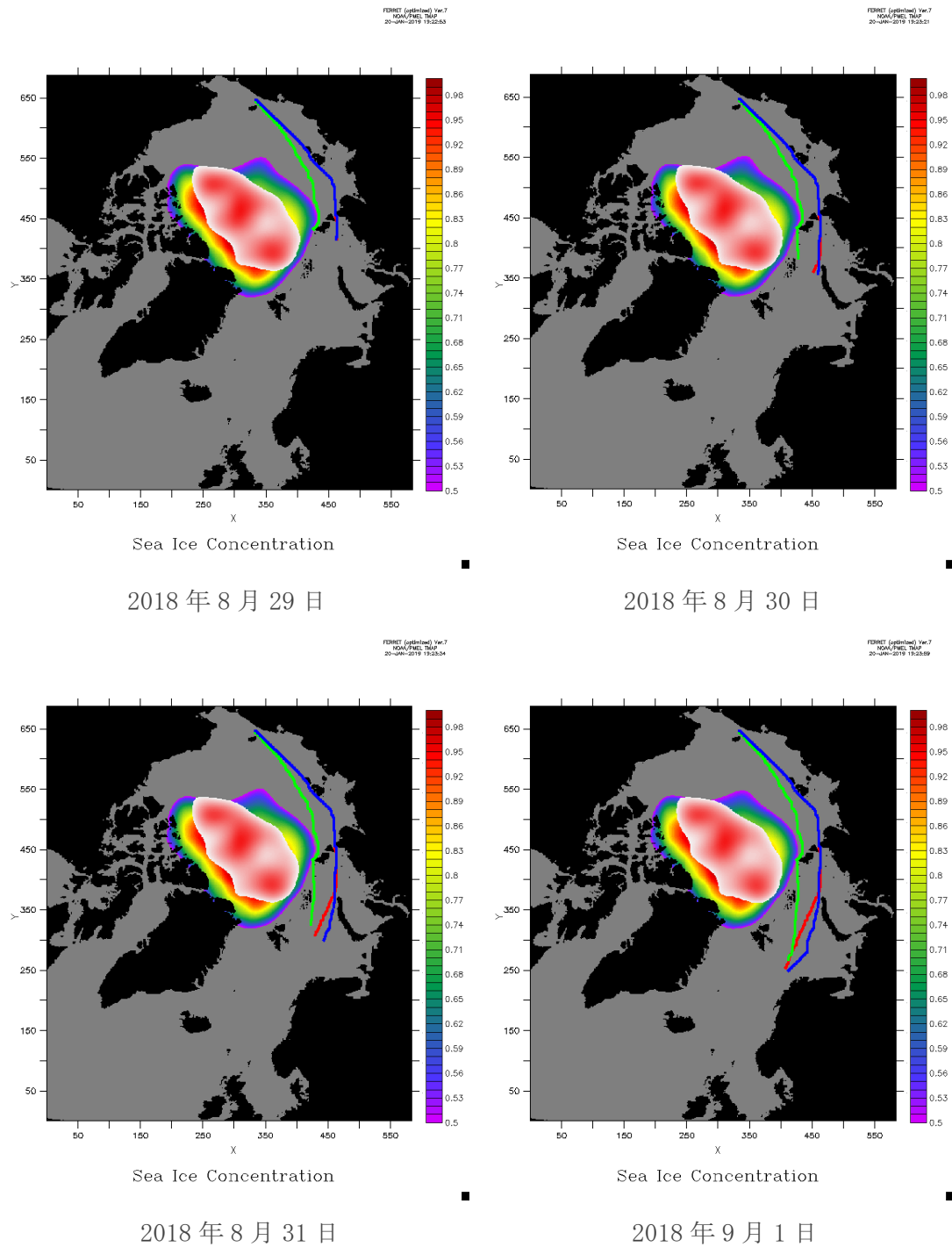
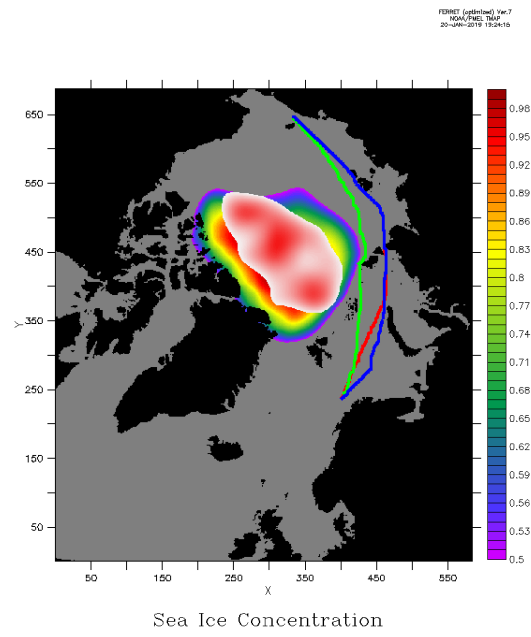


図 2.18 2018 年 8 月 25 日に出発した場合の航路(8 月 29 日から 9 月 1 日)



2018 年 9 月 2 日

図 2.19 2018 年 8 月 25 日に出発した場合の航路(9 月 2 日)

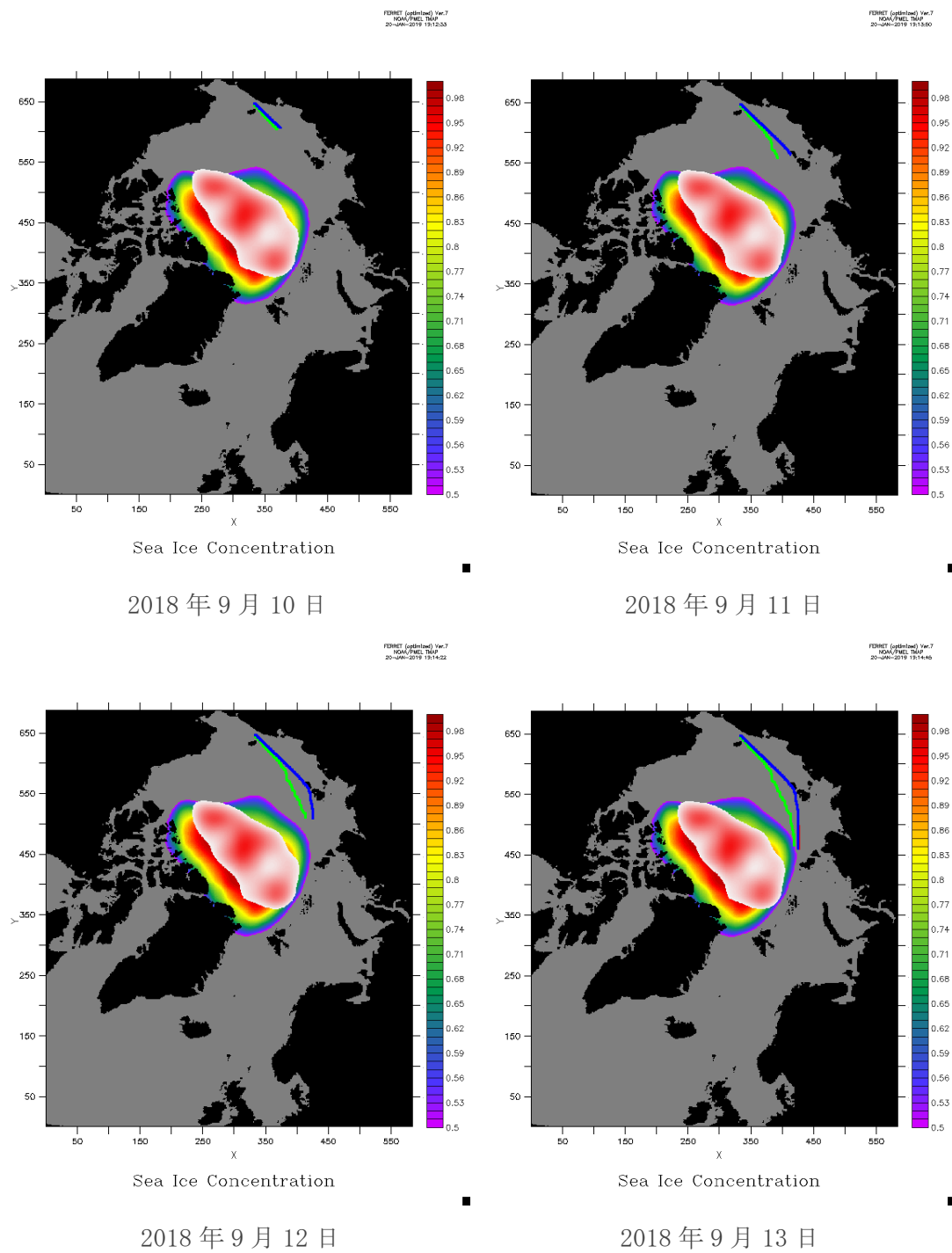


図 2.20 2018 年 9 月 10 日に出発した場合の航路(9 月 10 日から 13 日)

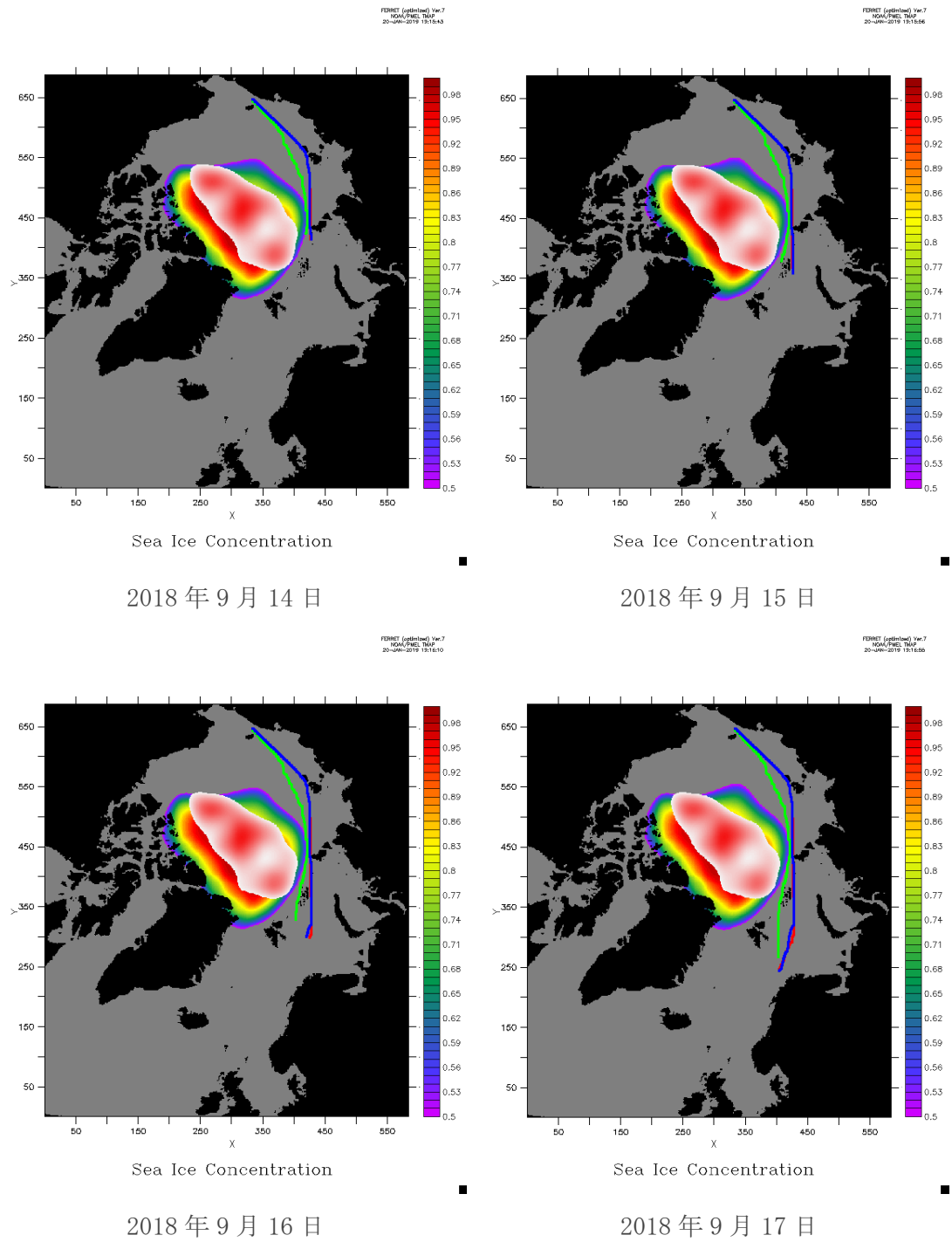
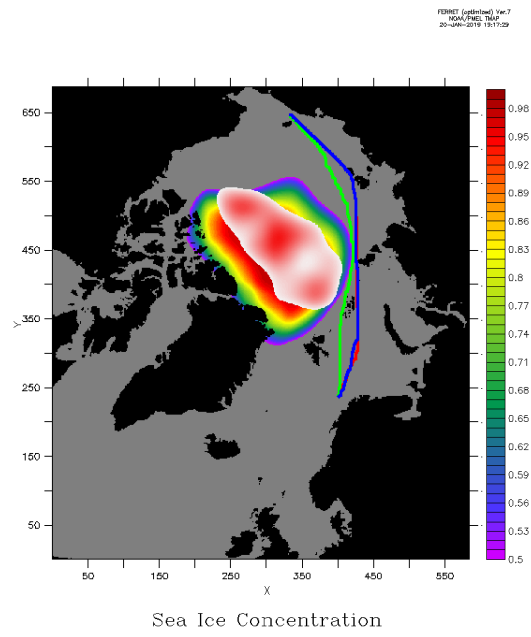


図 2.21 2018 年 9 月 10 日に出発した場合の航路(9 月 14 日から 17 日)



2018 年 9 月 18 日

図 2.22 2018 年 9 月 10 日に出発した場合の航路(9 月 18 日)

各出発日の航行における航行時間、航行距離、燃料消費量、成功率を図 2.23 に示す。

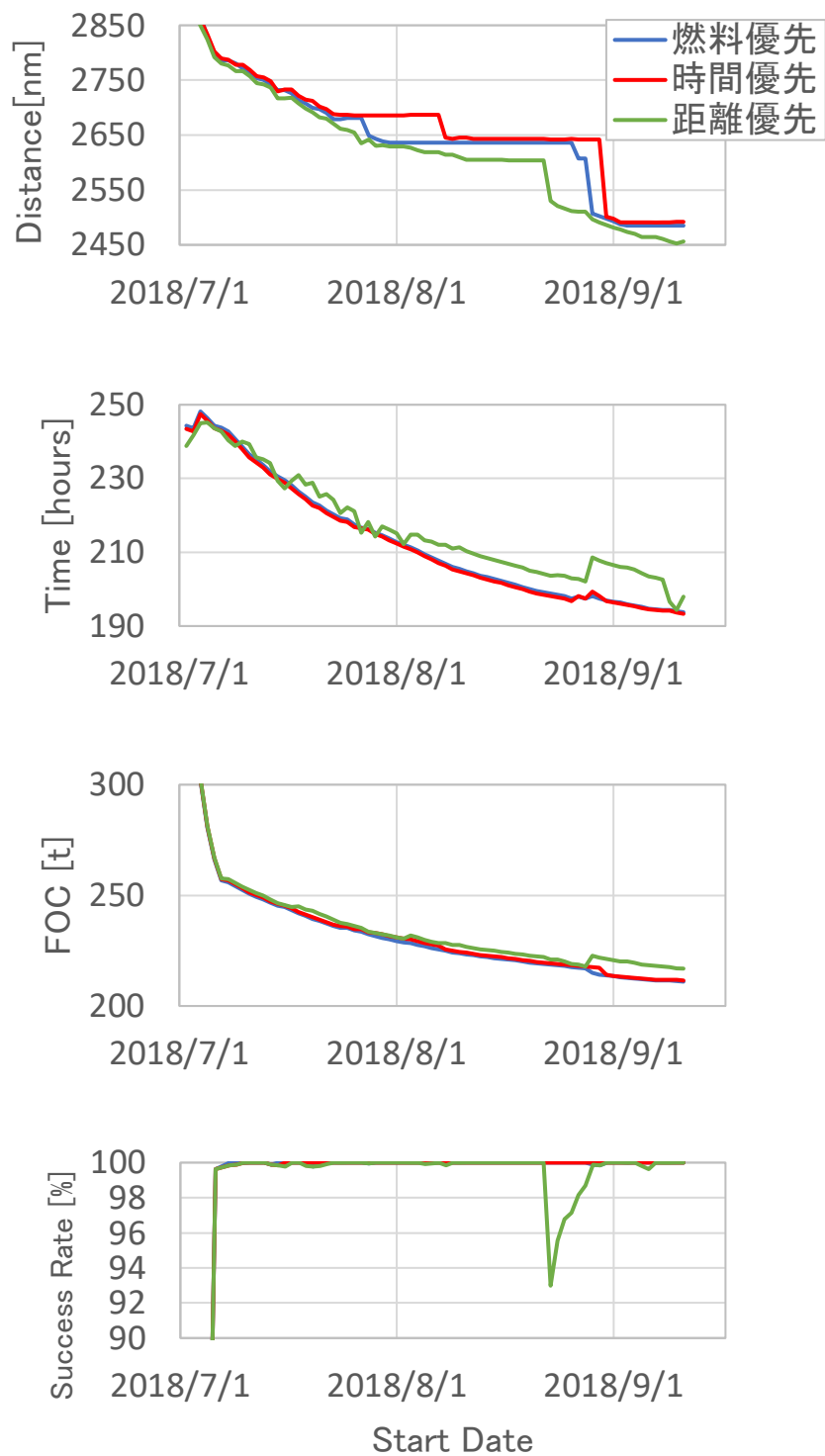


図 2.23 各出発日の航行におけるコスト

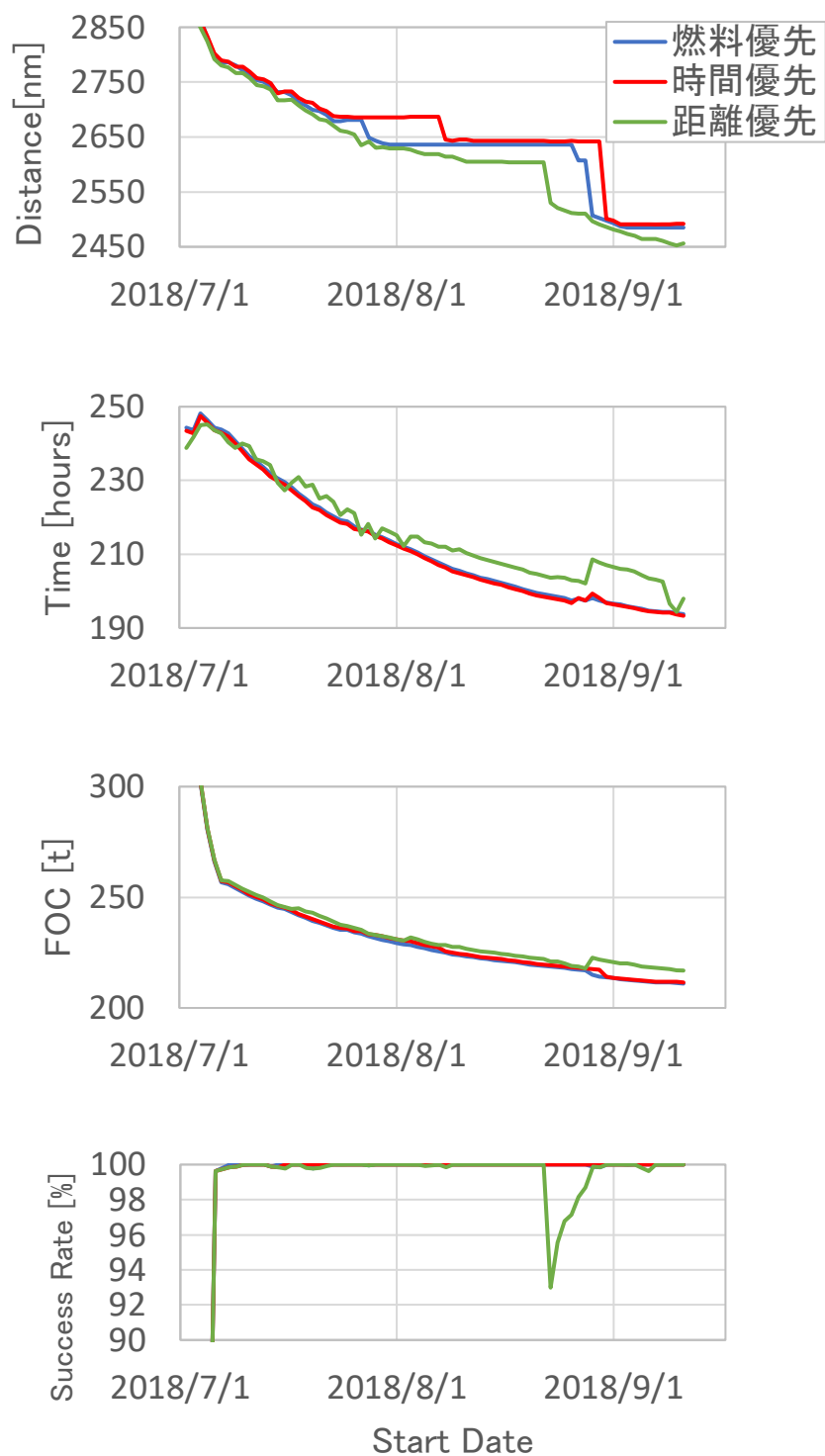


図 2.23 各出発日の航行におけるコスト図 2.23 の成功率の図で、7 月の最初の数日間は共通して成功率が低い結果となった。このことから最初の数日間は海水密接度が高い海域での氷海航行が多く、安全面から単独航行は難しいと考えられる。

燃料優先と時間優先の航路探索について、7 月 7 日以降成功率がほぼ 100% で一定となった。またこれらの条件では 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。航行距離は 7 月下旬までは徐々に減少し、7 月下旬から 8 月下旬の間に 2 度急落する点が特徴的である。8 月 1 日の航路図をみると、燃料優先の航路はノボシビルスク諸



島の北部を航行するのに対し、時間優先の航路はノボシビルスク諸島の南部を航行しており、これが1度目の距離の短縮の要因と考えられる。また8月25日出発の航路と9月10日出発の燃料優先・時間優先の航路を比較すると、セベルナヤゼムリヤの南部を航行北部を航行するかで2度目の距離の短縮が生じていることが考えられる。これら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の係数を重くしているためだと考えられる。燃料消費量や航行時間が小さくなるような航路を優先的に選択しているため、たとえ航行距離が大きく下がっても燃料消費量が上がるような航路は選択されていない。燃料消費量と航行時間は共に海氷密接度から計算されているので、それぞれを優先した航路探索結果は概ね一致する傾向があった。

また距離優先の航路探索では、8月下旬に大きく成功率が下がった。8月25日出発の航路から見られる通り、他の条件に比べて早い時点でセベルナヤゼムリヤの北部を航路として選択するため、海氷密接度の高い領域に入り成功率が下がったと考えられる。

これらの結果から、時間優先と燃料優先の航路では航路に差が生じたものの、航行時間や燃料消費量は概ね一致し、成功率もほぼ100%になることがわかった。

## 2.6. 結果の検証

2.5 節で導出した航行コストの妥当性を評価するため、既存研究との比較を行った。  
Matsuzawa et al.[17]は本研究と同じ船型を使用して、あらかじめ決定した航路（図 2.24）における航行コストを計算した。赤い航路（航路 1）は海水氷接度 60%未満、青い航路（航路 2）は海水氷接度 30%未満の条件を満たす航路であり、緑の航路（航路 3）はこれまで最も実際に使われてきた沿岸沿いの航路である。

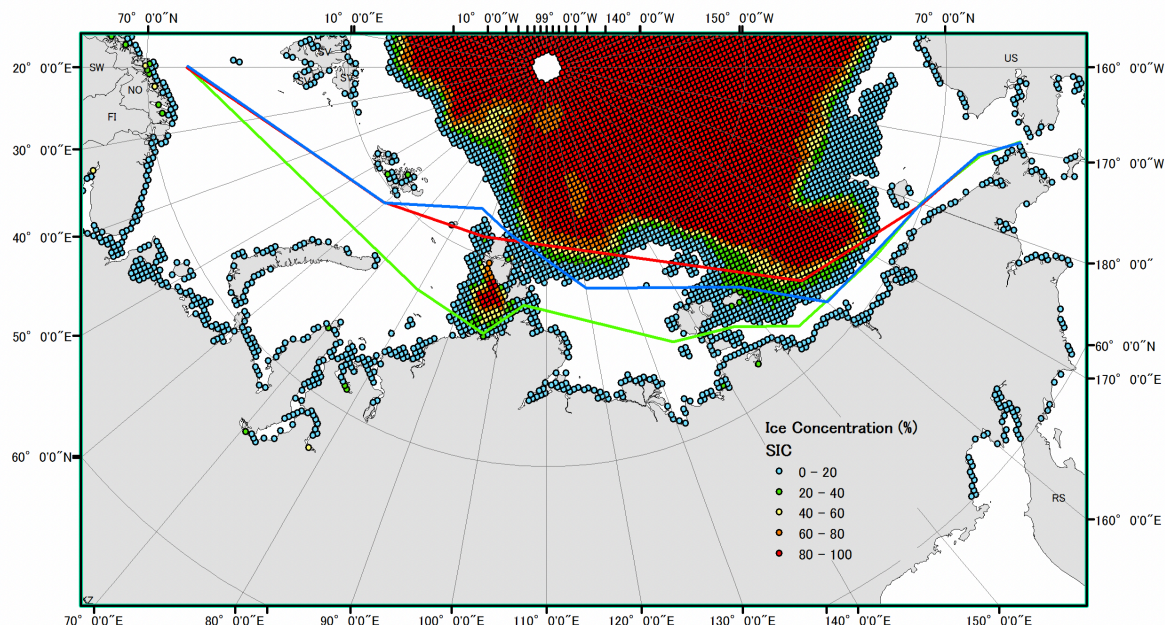


図 2.24 Matsuzawa et al. [17]で設定された航路

Matsuzawa et al. による航行コストの結果を表 2.4 に示す。ここでは本研究で設定したスタート地点、ゴール地点と同地点（西経 180 度から西経 20 度）の間で要したコストを示している。

表 2.4 Matsuzawa et al. の航行コスト計算結果

	航路 1	航路 2	航路 3
航行距離 [nm]	2500	2610	2810
航行時間 [hours]	285.3	207.9	207.9
燃料消費量 [t]	263.1	222.4	226.3

これらの結果を本研究の結果である図 2.23 の航行距離・航行時間・燃料消費量の図に重ねて図 2.25 に示す。

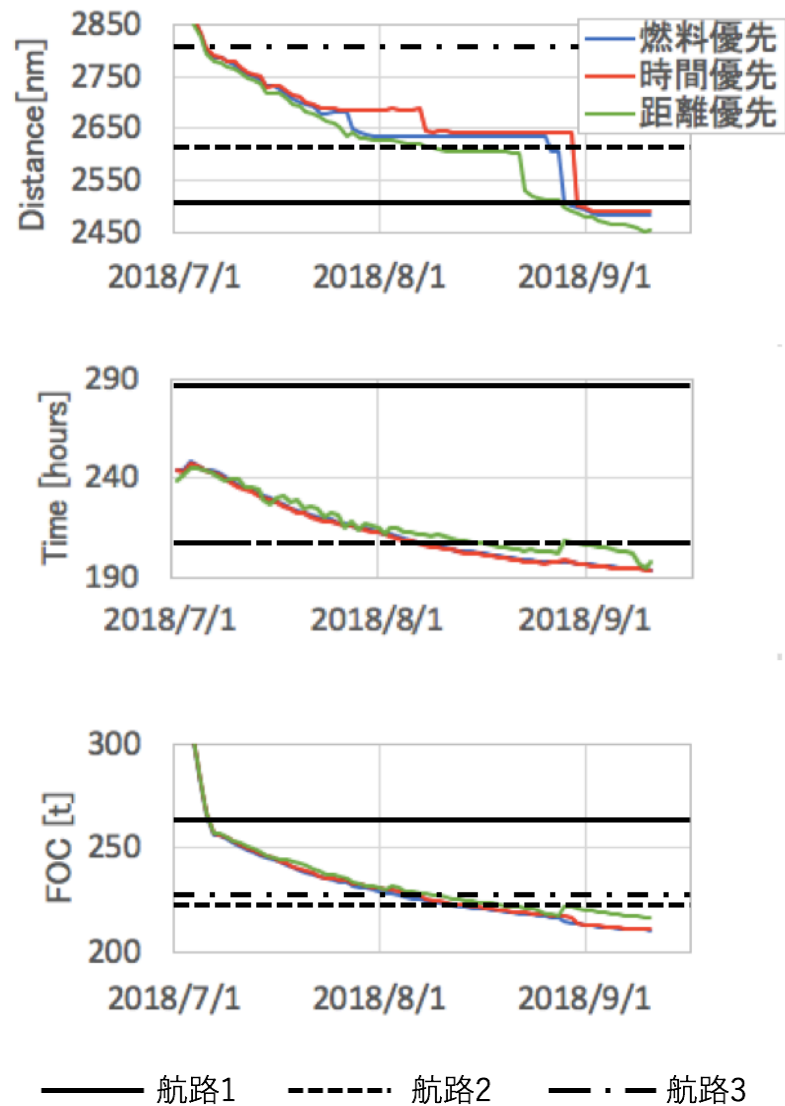


図 2.25 航行コストの比較

ここで本研究の結果と比較する上で考慮すべき点を以下にまとめる。

- ・対象期間が異なるため、海氷の分布は同じでない。また海氷の分布は年によって拡大・縮小の程度に大きな差があるため、時期による単純な比較はできない。
- ・Matsuzawa et al. による計算では海氷厚を 1m と仮定しているが、本研究では海氷厚 0.6m 以下の航行を想定している。そのため、海氷密接度の分布が同じならば航行時間と燃料消費量は本研究の方が小さくなると考えられる。

これらを踏まえた上で、まず航行距離を比較する。航路 1 と同じ、ノボビルスク諸島とセヴェルナヤゼムリヤの北部を航行したのは、本研究では 9 月の燃料優先・時間優先の航路 (図 2.26) に当たり、図 2.25 においてそれらの航行距離はほとんど一致した。

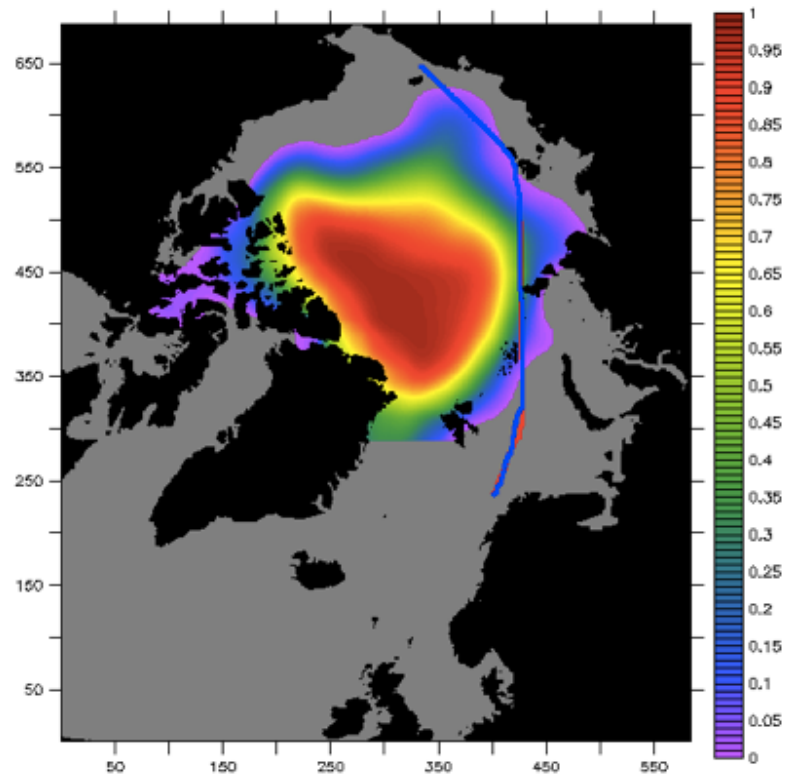


図 2.26 9 月 10 日に出発した場合の航路(青：燃料優先、赤：時間優先)と海氷密接度

次に航行時間について、航路 1 の航行時間のみ本研究の結果の範囲外であったが、これは前提となる海氷厚の差により、海氷による船速の減少が異なるためと考えられる。また図 2.24 と図 2.26 の 9 月航路の図を比較すると本研究の方が氷海航行の割合が高いが、9 月の航行時間は本研究の方が比較的小さくなることがわかった。

また燃料消費量についても航行時間と同様に、本研究の 9 月の値は、氷海航行の割合が高いにも関わらず Matsuzawa et al.の結果よりも小さかった。

以上から、本研究で得た航行コストは Matsuzawa et al.の計算結果と大きな差が生じることはなく、妥当性が示された。また航行時間や燃料消費量は比較的小さくなる傾向が見られた。航行時間と燃料消費量が小さくなった理由は衛星データを用いることで海氷厚を小さく推定したことと、最適航路探索によってコストの小さい航路を選択したためだと考えられる。

## 第3章 海氷長期予測を用いた最適航路探索

### 3.1. 長期予測データ

長期予測のデータとして、海氷海洋結合モデルである COCO4.9 を JAMSTEC の小野氏より提供していただいた。計算期間は 2006 年から 2099 年で、グリッドは 0.25 度間隔、毎日の海氷密接度および氷厚が含まれている。データは全球をカバーしているが、本研究では北極域のみを取り出し、水平解像度 10km、グリッド数 584×687 の格子データに補間して使用した。COCO は大気データを用いながらも、海氷、海洋の干渉がより詳細に再現される。地球環境の変化に関して、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）が示す RCP8.5（高位参照シナリオ：CO<sub>2</sub> の排出量、気温上昇がもっとも大きいシナリオ、図 3.2）を元に計算されているが、図 3.1 のように海氷域面積の実測値は予測よりも急速に減少していることがわかる。本研究で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。

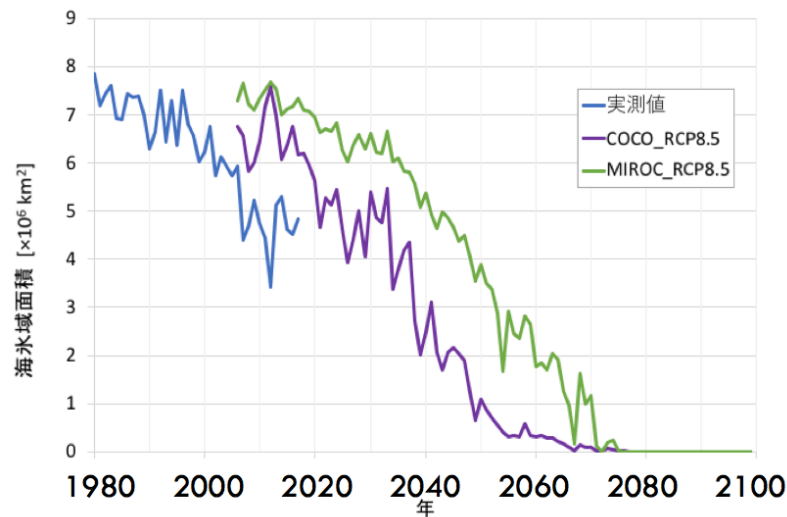


図 3.1 各モデル・観測における海氷域面積の変化

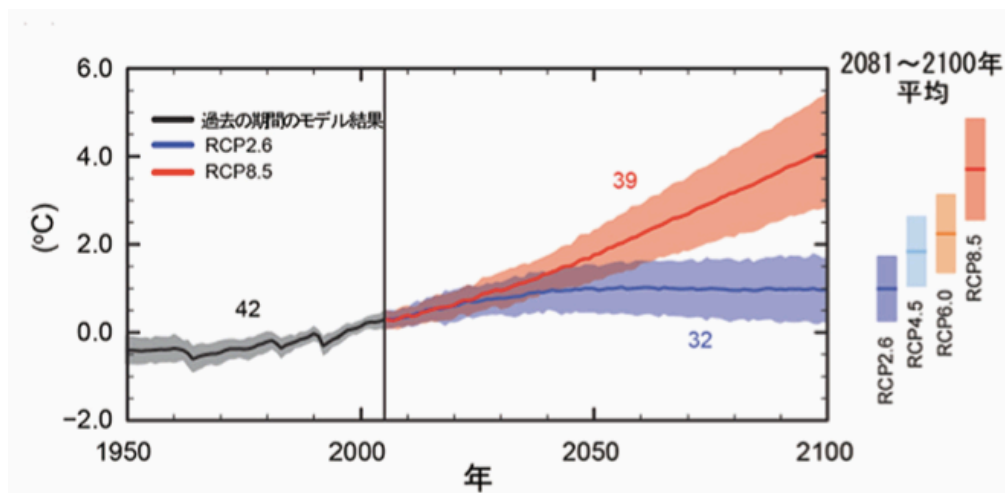


図 3.2 気温上昇のモデル予測値（赤色が RCP8.5）[18]

### 3.2. Ice Index 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 は、1993 年から 1999 年にかけて日本、ロシア、ノルウェーを中心として実施された国際北極海航路計画 (INSROP, International Northern Sea Route Programme) で提唱された、氷況と対象船のアイスクラスをひとつの数字として表す指標であり、Ice Index を用いて船速推定を行う方法を Ice Index 法と呼ぶ。Ice Index は氷の密接度や厚さ、種類だけでなく、リッジの密度、氷の強度影響まで考慮して、航行する上での難易度として作られた数値指標である。Ice Index が 20 の時は無氷海面で通常の航行が可能であり、Ice Index が負の方向へ変化するほど航行が難しく、船速が落ちるとされている。中野(2015)[9]は実際の航行データを用いて船速と Ice Index の関係式 (8) を作成しており、本研究の長期予測データにおける船速推定式として用いた。ここで  $I$  は Ice Index を示している。

$$v [\text{knots}] = \begin{cases} 0.768I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647I + 5.209 & (I < 15) \end{cases} \quad (8)$$

また Ice Index は以下の 3 つの値の和で表される。

$$I = I_A + I_B + I_C \quad (9)$$

$I_A$  は氷厚、氷の年数、密接度、アイスクラスの影響を表す指標、 $I_B$  はリッジの影響を表す指標、 $I_C$  は氷の強度影響を表す指標である。Ice Index は、海氷が全くない開水面で最大値 20 をとり、値が小さくなるほど氷況が厳しく航行が困難であることを示す。

$I_A$  は次式で計算される。[19]

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

$C_m$ : 多年氷の密接度 [10 分率]

$C_f$ : 一年氷の密接度 [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である。表 3.1 にその値を示す。

表 3.1 アイスクラスと $C_1$ ,  $C_2$ [19]

	Ice type	Ice thickness $h$ [cm]	Ice Class					
			ID	IB, IC	IA Super (PC6)	PC5	PC3, PC4	PC2, PC3
			Icebreaking capability [m]					
			~0.4	~0.5	~0.7	~1.2	~2.5	2.5~
$C_1$	Multi-year	-	-4	-4	-3.5	-2.5	0	2
$C_2$	Thick first-year	$120 \leq h$	-3	-3	-1.25	1	2	2
	Medium first-year	$70 \leq h < 120$	-2	-2	0.8	2	2	2
	Thin first-year	$50 \leq h < 70$	-1	-1	1.6	2	2	2
	Thinner first-year	$30 \leq h < 50$	-1	1	1.6	2	2	2
	Open water	$0 \leq h < 30$	2	2	2	2	2	2

次に、 $I_B$ は次のように表される。[19]

$$I_B = -2 \times \frac{C_r}{10} \times (C_f + C_m) \quad (11)$$

ここで、 $C_r$ はリッジの密接度を表す指数である。リッジとは海氷が衝突などによる圧力で割れて重なり合ったもので、かなり厚さは数 m 以上になるため航行の大きな障害となる。リッジを図 3.3 のような形状で近似した時、リッジ幅 $W_k$ [m] とリッジ密度 $D_r$ [km<sup>-1</sup>]（リッジ間距離の逆数）を用いて、 $C_r$ は次のように定義される。

$$C_r = W_k \times \frac{D_r}{1000} \times 10 \quad (12)$$

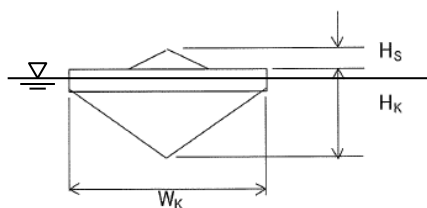


図 3.3 リッジの形状

リッジ幅 $W_k$ を $W_k = 20H_s$ と仮定し、

$$C_r = \frac{H_s D_r}{5} \quad (13)$$

となり、(11)式に代入することで $I_B$ は次のように表せる。

$$I_B = -\frac{H_s D_r}{25} \times (C_f + C_m) \quad (14)$$

$H_s$ : セール高 [m]

$D_r$ : リッジ密度 [ $\text{km}^{-1}$ ]

ここで、セール高 $H_s$ とリッジ密度 $D_r$ は、過去の調査から平均氷厚(0.97 m)に対して平均セール高 $H_s$ (0.94 m)と平均リッジ密度(13.9 /km)[19]が与えられている。これを基準にし、海域別・月別の平均氷厚に対して比例配分する。

最後に $I_C$ は次式で表される[19]。

$$I_C = M_{CS(FY)} \times C_f + M_{CS(MY)} \times C_m \quad (15)$$

ここで、 $M_{CS}$ は一年氷 (FY)、多年氷 (MY) それぞれの氷強度による係数であり、その値は気温に応じて表 3.2 のように決められる。

表 3.2  $I_C$ の係数 $M_{CS}$ の値[19]

	一年氷			多年氷		
月平均気温 $T$ [°C]	$T \leq -10$	$-10 < T \leq -2$	$-2 < T$	$T \leq -10$	$-10 < T \leq -2$	$-2 < T$
$M_{CS}$	-0.12	0	0.12	-0.44	0	0.44

月平均気温  $T$  と一年氷・多年氷の割合は、INSROP においてロシアの AARI (Arctic and Antarctic Research Institute)から提供を受けた環境データ[19]を用いた。データは月ごとおよび海域ごとに分かれており、一年氷密接度平均値、多年氷密接度平均値、積算寒度を用いた。それぞれ図 3.4[19]、図 3.5[19]、図 3.6[19]に示す。また海域の分け方は図 3.7 の通りである。

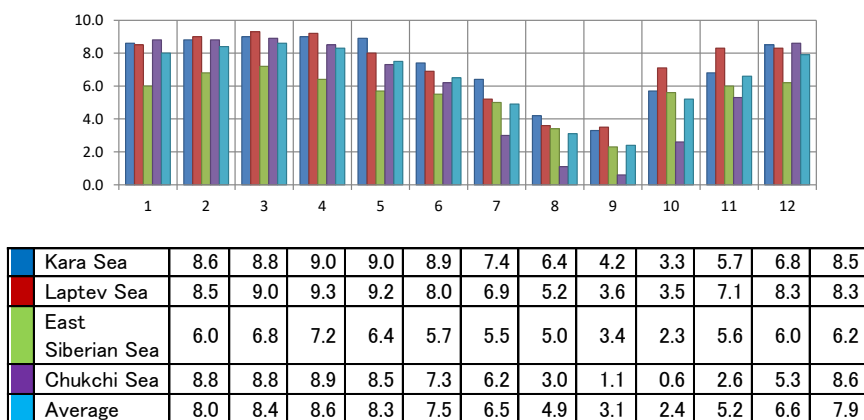


図 3.4 一年氷密接度[10 分率] (INSROP 環境データ[19])



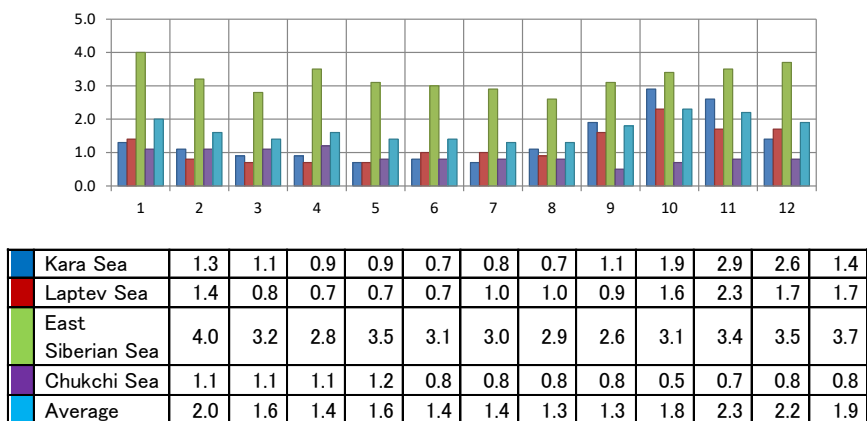


図 3.5 多年氷密接度[10 分率] (INSROP 環境データ[19])

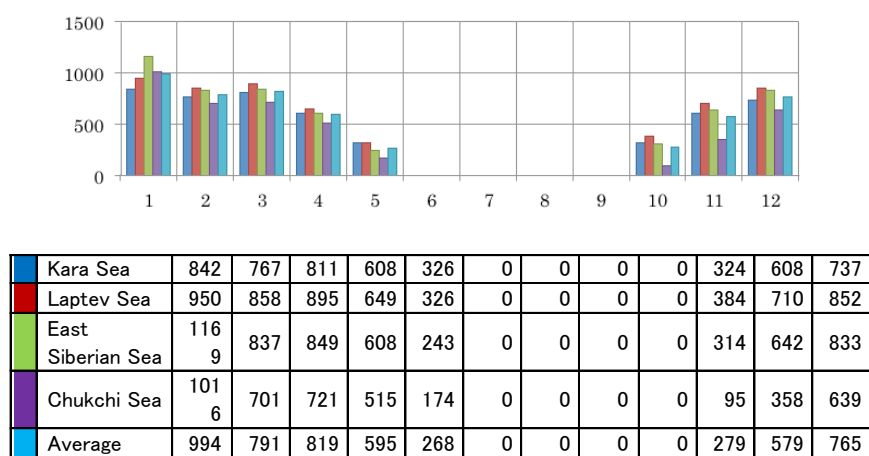


図 3.6 積算寒度[degree-days] (INSROP 環境データ[19])

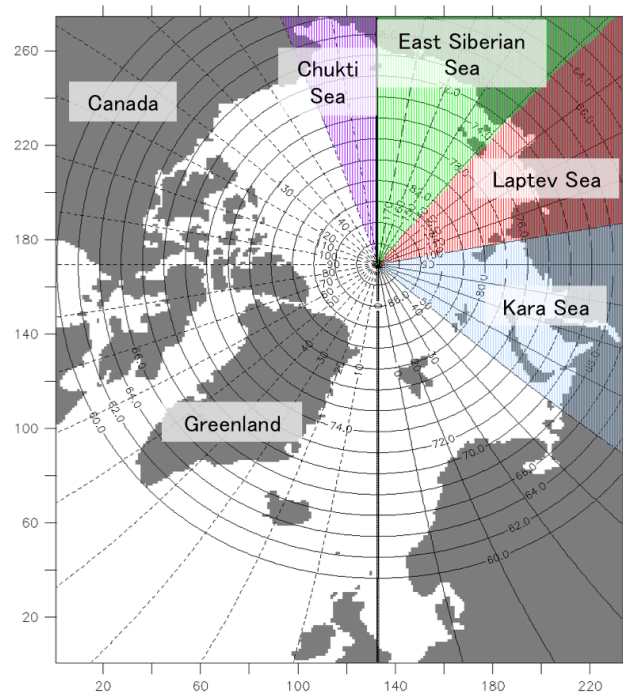


図 3.7 海域区分

以上の手法で、既存のデータと、海氷密接度・海氷厚の長期予測データを用いて Ice Index が得られ、式(8)で船速を推定した。経路探索アルゴリズムは 2.3 節と同じ A\*アルゴリズムを用いた。

### 3.3. 結果

海氷長期予測を用いて NSR の航行可能な期間を示すために、3つのシナリオを設定した。0.6m までの海氷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通りに加え、スタート地点からゴール地点までの最短経路を通常船で海氷に遭遇せずに航行するシナリオを加えた3通りを考える。評価関数は式(21)で表される。

$$\text{cost function} = w1 \times (\text{Distance [nm]}) + w2 \times (\text{Time [hours]}) \quad (16)$$

ここで重み付け関数について、航路探索手法のベースとしている中野(2015) [9]の先行研究で実航行データの航路と類似した結果を得た、 $w1=1, w2=100$  の時間重視の値を用いた。航路の例を図 3.8 から図 3.10 に示す。ここでは最終日の海氷密接度の分布と、全日数分の航路を重ねて表示している。スタート地点はチュクチ海、ゴール地点はスカンジナビア半島北部とした。

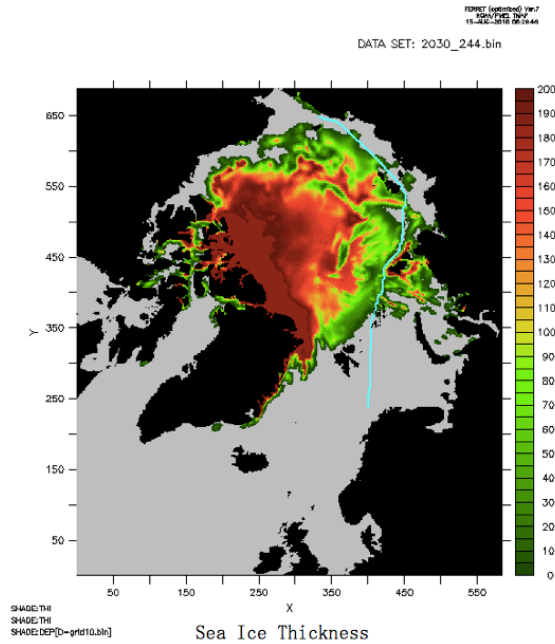


図 3.8 耐氷船で航行可能な例(2030 年 9 月 1 日)



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。その結果として、各条件で航路探索が成功し、NSR が航行可能となる期間を図 3.11 に示す。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。

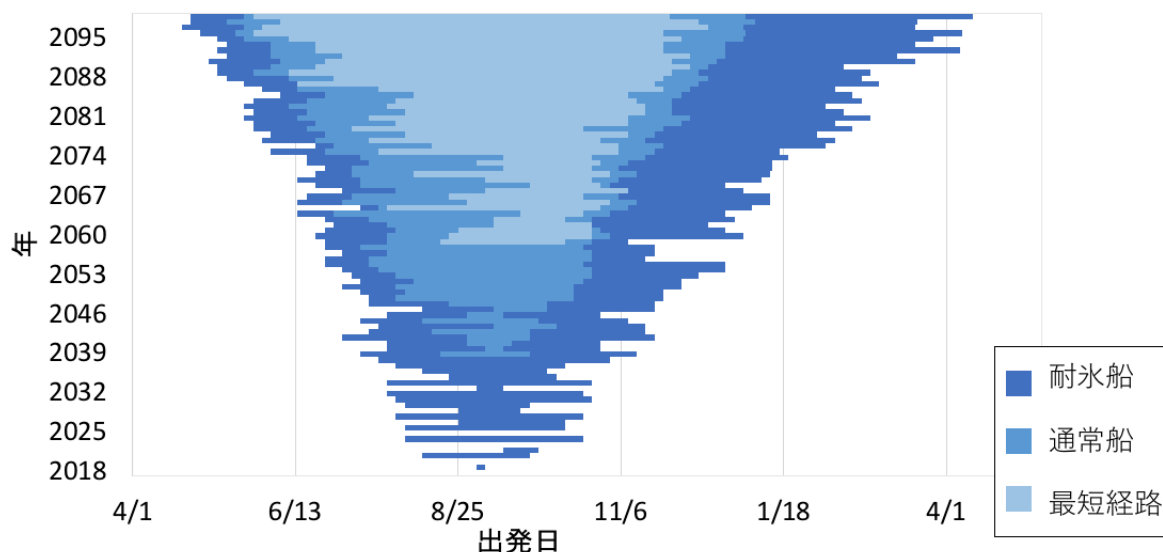


図 3.11 NSR の利用可能期間

図 3.11 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 NSR 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 ヶ月の航行ができ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氷に遭遇せずに航行できるという結果が得られた。また全体的な傾向として、NSR の利用開始時期が早まるスピードよりも利用終了時期が遅くなるスピードの方が早いことがわかる。これは気温の上昇に伴い、冬季の海氷の生成が遅くなって行くためだと考えられる。この結果から将来的に、夏季だけでなく冬季まで NSR が利用できるようになると、一日中太陽が昇らない極夜の中の航行になる場合があることも想定される。

また、耐氷船を用いた時の氷海航行の割合（航路の中で海氷があったグリッドの割合）を図 3.12 に示した。ただし航行不可の場合は 100%としている。

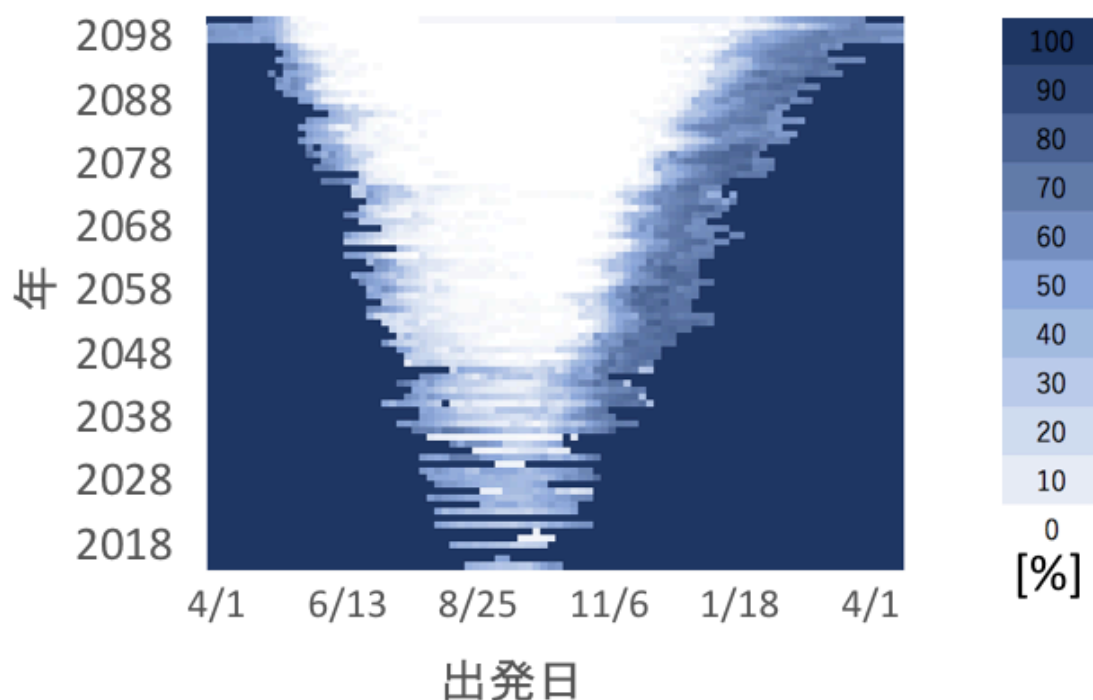


図 3.12 耐氷船航行時の氷中航行率

図 3.11 と図 3.12 を比べると、通常船では航行できず耐氷船で航行可能な期間は、航行区間中の 50~70%以上が氷海航行となることがわかる。通常船で航海できる期間は大部分が 0% となり、通常船と同様、海氷に出会わない航路が選択されている。しかし融解期間で一部 10~20%まで氷海航行をしている期間がある。これは海氷密接度と海氷厚が小さい海域であれば、航行距離を大きく短縮することで航行時間が短くなるためだと考えられる。

### 3.4. 燃料最適化計算との比較

本章では海氷長期予測を用いた最適航路探索手法として Ice Index 法による船速推定手法を用いたが、2 章で説明した燃料優先の航路探索手法を長期予測データに適応した場合と比較する。2 章では有効海氷密接度から海氷厚を推定したが、ここでは実際の海氷厚の予測値を用いた。図 3.13 の左図が Ice Index 法による船速推定で 3.3 節と同じ時間優先の航路探索を行なった結果で、右図が 2 章で用いた船速推定手法で燃料優先の航路探索を行なった結果である。長期予測データは 2030 年 9 月 1 日に出発した時のものを用いた。

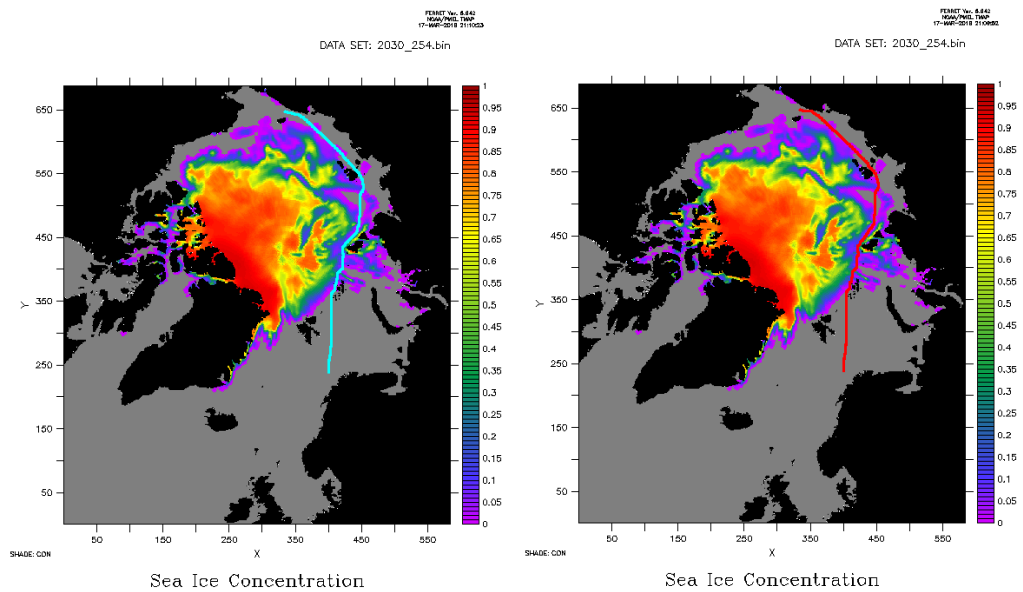


図 3.13 長期予測データを用いた航路探索(左図:Ice Index 法, 右図:燃料最適化)

図 3.13 で二つの航路はほぼ一致し、複雑な氷況においても類似した航路が選択されることがわかった。3.3 節では長期予測データに対して従来の Ice Index 法を用いた航路探索によって NSR の利用可能期間を示したが、2 章の船速推定手法を用いても同様の結果が得られると考えられる。

## 第4章 結論

### 4.1. まとめ

本研究では、これまでほとんど行われていなかった中期予測・長期予測の海氷分布を使った航路探索を行った。長期予測を用いた航路探索からは具体的な航行日数などから NSR の将来的な実用性を評価し、中期予測を用いた航路探索からは実際に利用計画を立てる上での中期予測の実用性を確かめた。以下に本研究の成果と新しく得られた知見をまとめる。

(中期予測を用いた最適航路探索)

AMSR2 のデータを解析し、海氷厚の元データを用いない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。計算された航行コストは既存研究の結果と比べても妥当な値であった。

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変更す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。

(長期予測を用いた最適航路探索)

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。



## 4.2. 今後の課題

本研究では最適経路探索手法の一つである A\* アルゴリズムを用いたが、この手法ではあるグリッドから隣接する 8 方向にしか進めないという欠点がある。隣接するノード以外を検索対象とすると計算量が膨大になってしまうが、計算量を最大限まで削減して進行方向の制約を外せばより精度の高い航路探索ができると考える。また船速推定方法もまだ完成されていない。連続的に変化する海氷密接度と海氷厚に対して船速を一意に決められることが望ましい。さらに将来的に海氷が減っていくにつれて無氷海航行が増えていくことから、

また海氷厚は衛星データから得られる情報が完全でないことがわかっている。NSR は海氷融解期間を利用するが、海氷が融解している状態ではメルトポンドができるため輝度温度を用いた推定が困難であるという問題がある。この点は実際の航行で観測して夏の密接度と海氷厚の関係を調べるか、海氷融解のメカニズムからモデルを作って推定する方法が考えられる。

## 参考文献

- [1] 田中洋平, 北極海を航行する船舶の船速推定システムに関する研究, 東京大学工学部, 卒業論文, 2009
- [2] Peter Wadhams, ICE IN THE OCEAN, Gordon and Breach Science Publishers, 2002
- [3] アメリカ地質調査所 環北極圏資源評価 (CARA, Circum-Arctic Resource Appraisal)  
<http://energy.usgs.gov/RegionalStudies/Arctic.aspx>
- [4] 気象庁, 海洋の健康診断表  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index.html>
- [5] 北極海航路ハンドブック検討委員会, 北極海航路ハンドブック, 公益社団法人 日本海難防止協会, 2015
- [6] 国立極地研究所 ADS (Arctic Data archive System), <https://ads.nipr.ac.jp/ja/>
- [7] ウェザールレーティング研究グループ, ウェザールレーティング-気象情報に基づく最適航法-, 成山堂書店, 1992
- [8] 内野岳, 大型帆走商船の最適航路選定手法の開発, 東京大学工学部, 卒業論文, 2013
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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.
- [12] JAXA 第一期水循環変動観測衛星「しずく」 GCOM-W1  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/index_j.html)
- [13] 石井吉徳, リモートセンシング読本, オーム社, 1981
- [14] Cavalieri, D. J., P. Gloersen, and W. J. Campbell, Determination of Sea Ice Parameters with the NIMBUS-7 SMMR, Journal of Geophysical Research, 89(D4), 5355-5369, 1984

- [15] Krishfield, R. A., A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, and M. L. Timmermans, Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle, *Journal of Geophysical Research*, 119, 1271-1305, 2014
  
- [16] Hart, P. E., N. J. Nilsson, and B. Raphael, A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transaction, System Science and Cybernetics*, SSC-4(2), 100-107, 1968
  
- [17] Matsuzawa, T., N. Sogihara, M. Tsujimoto, and S. Uto, NSR transit simulations by the vessel performance simulator “VESTA”: Part 1 Speed reduction and fuel oil consumption in the summer transit along NSR, *Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, 2015
  
- [18] 気象庁, IPCC 第5次報告書  
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>
  
- [19] 北川弘光, 小野延雄, 山口一, 泉山耕, 亀崎一彦, 北極海航路-東アジアとヨーロッパを結ぶ最短の海の道-, 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団, 扇興社, 2000

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の温かいご指導、ご協力を受け、修士論文を執筆することができました。この場をお借りし、厚く御礼申し上げます。

まずは指導教員である山口先生には、学業・研究面にとどまらず数々のことを学ばせて頂き、本当にお世話になりました。元々プログラミングが得意ではなく、初めは思うように研究を進めることができなかった私ですが、先生はいつも期待を捨てずに背中を押してくださりました。月に数回のゼミ発表では「何がやりたいのかわからない」「これは研究として何も面白くない」など、厳しいご指摘も多く頂きましたが、学生一人一人に教育的観点を持ってしっかり向き合ってくれていることは痛いほど感じておりました。学問に非常に真摯で妥協しない姿勢に、これから生きていく上での大切なことを学ばせて頂きました。

また副指導教員の菊地先生。極域研究の第一線でご活躍されている菊地先生にご指導を頂けたことは大変光栄に感じております。面談のたびに、これから何をやるべきか、研究の指針を考えるための的確なアドバイスを頂きました。

研究室の OB で現在海上・港湾・航空技術研究所の松沢さんには、研究で必要なデータを頂いただけでなく、研究の話を大変親身に聞いていただきました。心より感謝いたします。

本研究で重要なデータを準備してくださった JAMSTEC の小野さんにも御礼申し上げます。お忙しい中、膨大な計算時間を割いて長期予測のデータを作って頂き、本研究で使わせていただく事ができました。

特任研究員の木村さんにはいつも学生と同じ目線で優しく接していただき、感謝しております。フランクな性格とは裏腹に、学生の時の論文発表では一字一句全て暗記して間違いなく発表をしたというエピソードを聞いて、その真面目さに驚きました。見えないところで努力をする姿勢を尊敬しております。

研究室の特任研究員の Waruna さんからは、プログラミングやネットワークの使い方などを教えていただきました。文法が無茶苦茶な英語で話してもすぐに理解して気さくに話してくれるので、自分が少し英語がうまくなったような錯覚さえ抱かれます。優しく見守って研究生活を支えていただき、ありがとうございました。

大学院生や研究員しかいない東大柏キャンパスでは、多くの新しい友人ができました。専攻のメンバーは様々なバックグラウンドを持っており、話していて飽きることがありませんでした。研究のモチベーションを維持することができたのも皆様のおかげです。そしてともに研究生活を送ってきた研究室のメンバーにも本当にお世話になりました。就職活動などの苦しい時期も明るく乗り越えられたのは、同じ状況の中支えてくれた皆のおかげです。

最後に 25 年間、温かく支えてくれた家族に一番の感謝をしたいです。私を大学院まで進学させてくれたこと、そして何より深い愛情で育ててくれたことに、言葉にできないほどの感謝をしております。社会人になったら一生懸命働いて恩返しをしていきたいです。