

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

修士論文

北極海航路における
最適航路探索に関する研究

平成 27 年 8 月

指導教員
山口 一 教授

47-136652 中野 佑哉

目次

第 1 章 序論.....	5
1.1. 研究背景	5
1.2. 既存研究	10
1.3. 研究目的	11
第 2 章 使用データ	12
2.1. 海氷数値モデル Ice-POM	12
2.2. 人工衛星データ（マイクロ波放射計 AMSR2）	16
2.3. NSR 実航行データ（AIS データ）	18
2.4. 全球気候モデル MIROC5	20
第 3 章 最適航路探索の準備.....	23
3.1. 経路探索アルゴリズム	23
3.2. Ice Index 法	27
3.3. Ice Index と船速の関係	32
第 4 章 結果と考察.....	37
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	37
4.2. 実航行データとの比較	62
4.3. 長期予測データを用いた航路の将来性検討	88
第 5 章 結論.....	101
5.1. まとめと考察	101
5.2. 今後の課題	102
参考文献.....	103
謝辞	106

図表目次

図 1-1 北極海地形図（田中(2009)[1]）	5
図 1-2 最小海氷域面積の変動（出典：気象庁 HP[3]）	6
図 1-3 9月10日の海氷密接度分布（出典：極地研究所 ADS[4]）	7
図 1-4 北極海航路[5]	7
図 1-5 北西航路[5]	8
図 1-6 氷海航行のための支援システム（Yamaguchi (1995)[7]）	9
図 1-7 バルト海における最適航路探索例（Kotovirta et al. (2009)[10]）	10
図 1-8 経済性を考慮した最適航路探索例（Nam et al. (2013)[11]）	11
図 2-1 Ice-POM による 2011 年 10 月 16 日の海氷密接度の平均値（左）、標準偏差（右）	12
図 2-2 Ice-POM による 2011 年 10 月 16 日の海氷厚[m]の平均値（左）、標準偏差（右）	13
図 2-3 切断正規分布に対する 2011 年 10 月 31 日の検定統計量 D	14
図 2-4 対数正規分布に対する 2011 年 10 月 31 日の検定統計量 D	15
図 2-5 マイクロ波放射計 AMSR2（出典：JAXA HP[16]）	17
図 2-6 2014 年 9 月 10 日の海氷密接度[%]（左）、海氷厚[cm]（右）	17
図 2-7 船 A～船 C の航跡例（色は水深[m]を表す）	19
図 2-8 RCP4.5 による 2055 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）	20
図 2-9 RCP8.5 による 2055 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）	21
図 2-10 RCP4.5 による 2095 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）	21
図 2-11 RCP8.5 による 2095 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）	22
図 3-1 ネットワークにおける探索の模式図（Fu et al. (2006)[24]）	23
図 3-2 航路探索の模式図	25
図 3-3 実船航海による Ice Numeral と船速の関係[5]	27
図 3-4 リッジの形状	29
図 3-5 一年氷密接度[10 分率]（INSROP 環境データ[5]）	30
図 3-6 多年氷密接度[10 分率]（INSROP 環境データ[5]）	30
図 3-7 積算寒度[degree-days]（INSROP 環境データ[5]）	31
図 3-8 海域分け	31
図 3-9 Ice Index と船速の関係[5]	32
図 3-10 船 A の船速減少率と Ice Index の関係	33
図 3-11 船 B の船速減少率と Ice Index の関係	33
図 3-12 船 C の船速減少率と Ice Index の関係	34
図 3-13 船 A、B、C の船速減少率と Ice Index の関係	35
図 3-14 Ice Index < 15 のデータに対する船 A、B、C の船速減少率と Ice Index の関係 ..	36
図 4-1 距離のみを考慮した最適航路	38
図 4-2 距離のみを考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化	45

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路	46
図 4-4 距離・時間を考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化	52
図 4-5 失敗率	53
図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路	54
図 4-7 失敗率の考慮による航路の変化	60
図 4-8 距離・時間・失敗率を考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化	61
図 4-9 船 A の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）	62
図 4-10 船 A の実航行航路上の氷況および船速	67
図 4-11 船 A に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速	68
図 4-12 船 B の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）	68
図 4-13 船 B の実航行航路上の氷況および船速	72
図 4-14 船 B に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速	73
図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）	74
図 4-16 2014 年 11 月 10 日の海氷厚分布（単位：m）	79
図 4-17 船 C の実航行航路上の氷況および船速	80
図 4-18 船 C に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速	81
図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）	82
図 4-20 船 C に対するビルキツキー海峡を通る最適航路上の氷況および Ice Index、船速	87
図 4-21 北極海の最小海氷域面積（Allison et al. (2009)[26]）	88
図 4-22 9 月 10 日の海氷域面積	89
図 4-23 MIROC5 (RCP4.5)による 2014 年 9 月 10 日の海氷厚分布（単位：m）	89
図 4-24 氷厚補正の対象海域	90
図 4-25 2014 年 9 月の AMSR2 に対する最適航路	91
図 4-26 2014 年 9 月の MIROC5 に対する最適航路（左：RCP4.5、右：RCP8.5）	91
図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路（左：RCP4.5、右：RCP8.5、色は海氷厚[m]）	92
図 4-28 RCP4.5 に対する航行距離の変化（2015 年～2045 年）	97
図 4-29 RCP4.5 に対する航行距離の変化（2055 年～2095 年）	97
図 4-30 RCP4.5 に対する航行時間の変化（2015 年～2095 年）	98
図 4-31 RCP8.5 に対する航行距離の変化（2015 年～2045 年）	98
図 4-32 RCP8.5 に対する航行距離の変化（2055 年～2095 年）	99
図 4-33 RCP8.5 に対する航行時間の変化（2015 年～2095 年）	99

表 1-1 NSR 通航貨物量 (Otsuka et al. (2014)[6])	8
表 2-1 AMSR2 センサーの詳細[16]	16
表 2-2 各アイスクラスの対応および階級別の氷の状況・季節	18
表 2-3 船 A～船 C の諸元	19
表 3-1 I_A の係数 C_1, C_2 の値	28
表 3-2 I_C の係数 M_{CS} の値	29
表 3-3 AIS データ（開水面除く）のデータ数、相関係数、決定係数	34
表 4-1 船 A の実航行航路と最適航路の距離・時間	67
表 4-2 船 B の実航行航路と最適航路の距離・時間	72
表 4-3 船 C の実航行航路と最適航路の距離・時間	79
表 4-4 船 C の実航行航路と条件付き最適航路の距離・時間	87
表 4-5 AMSR2、MIROC5 に対する最適航路探索結果	91

第1章 序論

1.1. 研究背景

北極海は、ユーラシア大陸、北米大陸、グリーンランドに囲まれた、約 1,400 万 km² の海である。図 1-1（田中(2009)[1]）に北極海の地図を示す。スカンジナビア半島とグリーンランドの間には深海平原が広がり、その東部はノルウェー海、西部はグリーンランド海と呼ばれて北大西洋に隣接する。ユーラシア大陸と北米大陸の間はベーリング海峡であり、ベーリング海を経て北太平洋につながる。カナダ北部には多島海域が広がっており、バフィン島、エルズミア島などが存在する。アラスカ沖にはボーフォート海が広がっている。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、それらによって区切られる海域は東からチュクチ海、東シベリア海、ラプテフ海、カラ海、バレンツ海と呼ばれる。また、ウランゲル島の南はロング海峡、セベルナヤゼムリヤの南はビルキツキー海峡、ノバヤゼムリヤの南はカラゲイト海峡と呼ばれる。北極海は大陸棚が沖合まで広がり、中央部を除くとその水深は比較的浅い。

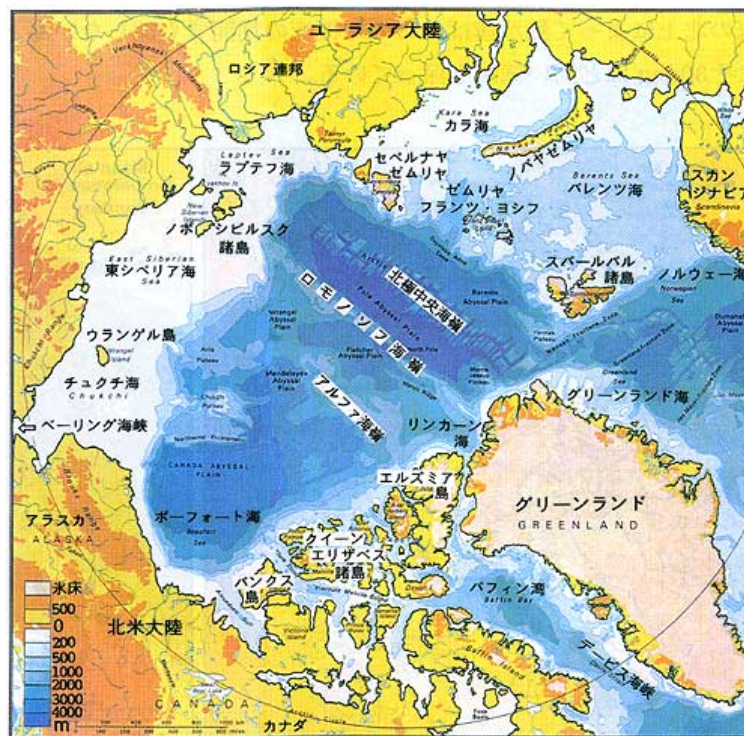


図 1-1 北極海地形図（田中(2009)[1]）

北極海は海水に覆われる海である。中央部には年間を通して融けることのない多年氷が存在する。秋季以降この周辺から南に向かって海水域が拡大する。さらに、北極海は河川流入量が多いため、冬に海岸から海に向かって成長した定着氷が発達する。これらが一緒になって海水が北極海の全体を覆う。

また、北極域には資源が豊富に存在する。広大なタイガやツンドラと現在は海底となった大陸棚に多くの鉱物資源、エネルギー資源が埋蔵されている。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）[2]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。今後ガス田や油田などの開発が進むことで、タンカーや作業船等の航行が増えていくことが予想される。

近年、地球温暖化の影響で北極海の海氷は減少傾向にある。図 1-2[3]は北極海の最小海氷域面積の年変化を示している。海氷域面積は、2012 年にそれまでの最小記録（425 万 km²、2007 年）を大きく下回る 349 万 km²まで減少した。2013 年以降、海氷域面積は大きく回復し、2014 年には 2007 年以降では最大となる 519 万 km²であった。

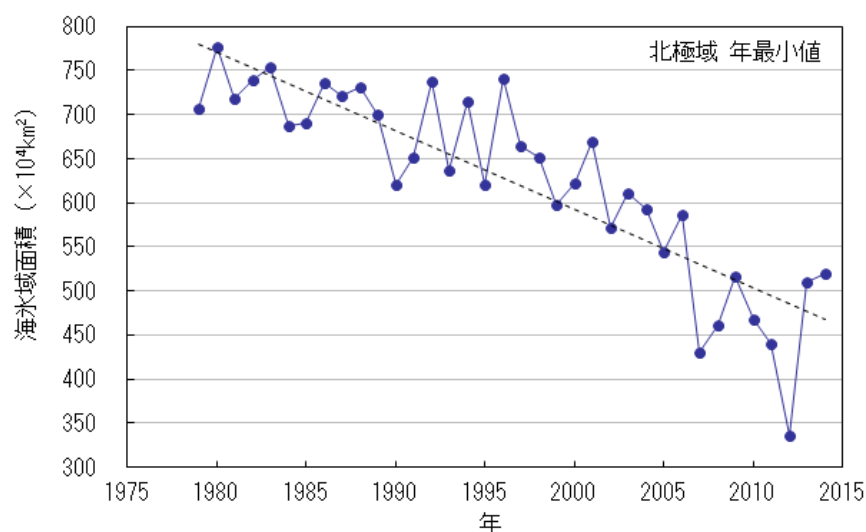


図 1-2 最小海氷域面積の変動（出典：気象庁 HP[3]）

海氷域面積は長期的な減少傾向があるが、海氷の分布は年によって大きく違う。図 1-3[4]は衛星観測による 2007 年から 2014 年の 9 月 10 日（海氷域最小期）の海氷密接度を示している。総面積の変化だけでなく、海氷域の分布形状が年によって異なることが分かる。航路として利用する際にはその年の分布がどのような形になり、どこで氷が融け残りやすく、どこで海氷域の縮小が早いかな等の情報が重要になる。

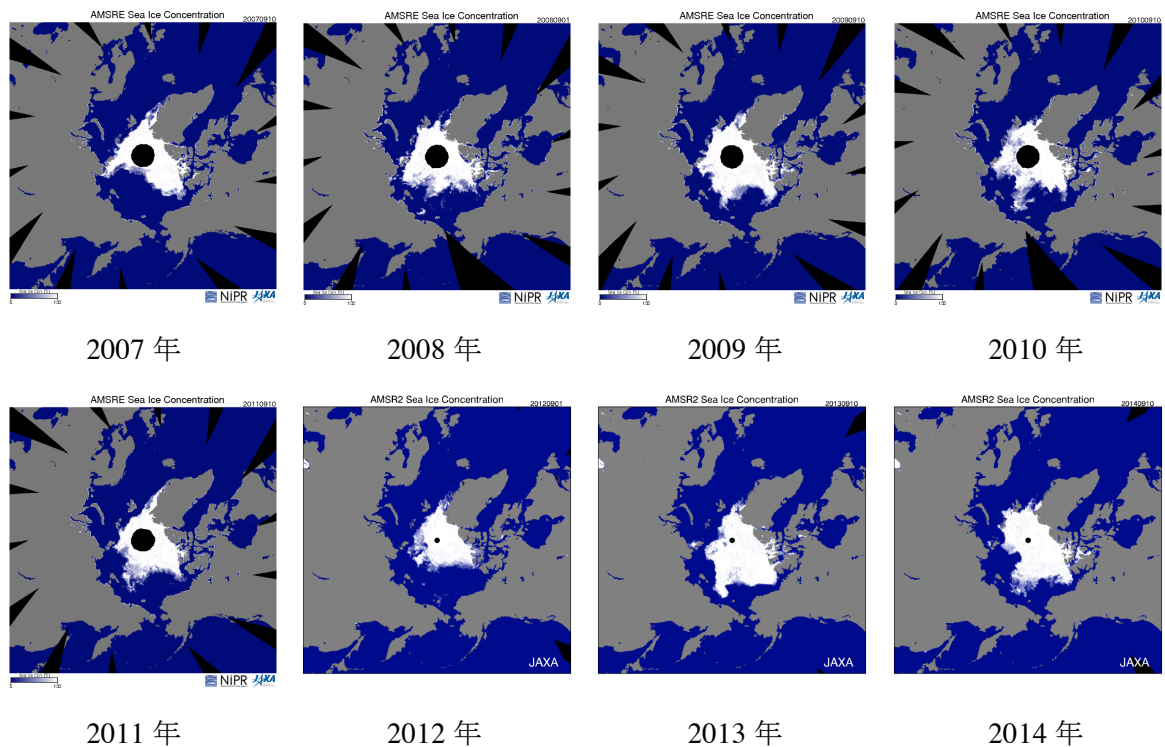


図 1-3 9 月 10 日の海氷密度分布（出典：極地研究所 ADS[4]）

北極海を通る航路を北極航路と呼ぶ。北極航路には 2 種類ある。ヨーロッパからロシア沿岸を通過して北太平洋に抜ける北極海航路（NSR, Northern Sea Route）（図 1-4[5]）と、カナダ多島海を通航してヨーロッパからアメリカ西海岸、東アジアに向かう北西航路（図 1-5[5]）である。航路から全く海氷がなくなるのはごく短期間に限られ、その前後の期間は氷海を航行することになる。



図 1-4 北極海航路[5]



図 1-5 北西航路[5]

オホーツク海を含めロシア領北極海はロシア旧体制下、閉ざされた海であり、科学的な関心は高かったが海運業界の関心を惹く要素はほぼ皆無だった。1987年にゴルバチョフ書記長（当時）は、NSRを国際商業航路として開放することを宣言した。しかし北極海の商業航路としての利用は困難であり、その港湾に航路利用を見越した大きな投資はなかった。

この航路の最大の特徴は海氷の存在である。氷は船速の低下を引き起こす大きな障害であり、時には船体・推進器に損傷を与えることもある。前述の通り、北極海の高緯度域には多年氷が存在し、冬の沿岸域には定着氷が発達する。航行には砕氷あるいは耐氷能力を持つ氷海船舶が必要となる。

近年、長期的な海氷の減少に伴って、NSRの商業的航路としての価値が高まってきた。NSRの利用は従来の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、コストの削減になるとともに温室効果ガスの排出抑制にもなる。また、ソマリア沖等で問題となっている海賊による被害も回避することが出来る。こうしたことから、航路利用の拡大は今後も続くと考えられる。表1-1（Otsuka et al. (2014)[6]）は2010年から2013年までにNSRを航行した貨物をまとめたものである。航行数、貨物量ともに年々増加していることが分かる。

表 1-1 NSR 通航貨物量（Otsuka et al. (2014)[6]）

Year	2010	2011	2012	2013
Number of Voyage	4	34	46	71
Liquid Bulk (ton)	70,000	604,652	894,079	978,735
Bulk (ton)	41,000	110,339	359,20	276,939
General cargo (ton)		24,673	8,265	100,223
Total (ton)	111,000	820,789	1,261,545	1,355,897

ヨーロッパから NSR を航行した場合、日本は最初に到達するアジアの国になる。NSR の利用がさらに拡大すると、北海道等にハブ港を作ることで、日本がアジア物流の上流に立てる可能性もあり、日本にとって大きなチャンスでもある。

現在、北極航路の課題はその採算性と安全性の向上にある。船舶における海上輸送は大量輸送が本義であるため貨物需要に上限がなく、航海安全上の制約がなければその採算性は向上する。氷海中の船舶が安全に航行できるためには、救難設備や航行性能の優れた船舶の建造が必要である。だがこういったハード面でのインフラだけでなく、個々の航海において航路沿いの気象・氷況データを得て航海の適性を判断するためのソフト面での航行支援も欠かすことはできない。想定される氷海航行支援システムを模式的に図 1-6 (Yamaguchi (1995)[7]) に示す。

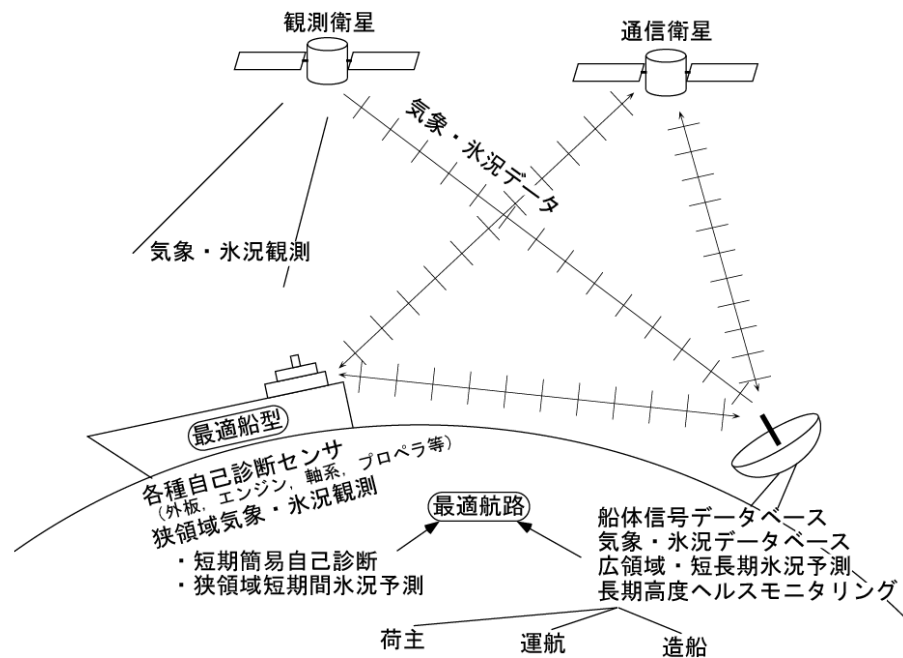


図 1-6 氷海航行のための支援システム (Yamaguchi (1995)[7])

こうした航行支援システム構築のためには、衛星による海水モニタリング、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。現在、世界最大の民間気象予報会社ウェザーニューズ社では NSR も含めて航行支援サービスを行っているが、航路の選定については過去の実績をもとに人間が考えている状態である。最適航路を計算によって求め、実際のサービスに供することが出来るようになれば、システムとしてのコスト削減につながるほか、客観性のあるデータを示すことが出来るというメリットがある。

1.2. 既存研究

通常海域においては主に風、波浪、海流を考慮して航路を選定することになる。「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」[8]をウェザールーティングと呼び、これまでに多くの研究が行われている。ここで最適な航路とは、所要時間を最短にする航路、燃料消費量を最小にする航路、船体の動揺を最小におさえる航路等をさす。内野 (2013)[9]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。

それに対して、氷海域における航路探索についての研究はあまり多くない。氷海域においては、海氷が航路選定の大きな要因となる。航路上から氷が完全になくなるのはごく短い期間に限られており、それ以外の期間は氷海域を航行する必要がある。船の能力を超える海氷との遭遇はスタック（氷海中への閉じ込め）の危険性があるほか、氷との衝突によって重大事故を引き起こす可能性もある。

Kotovirta et al. (2009)[10] はバルト海における航路選択について、海氷の密接度（ある範囲に占める海氷の面積の割合）、厚さ、リッジ（海氷が乗り重なって厚くなった状態）を考慮して検討した（図 1-7）。また実船によるテスト航海を行い、航路探索結果との比較を行った。Nam et al. (2013)[11] は、燃料費、操船費などの費用関数を設定し、航行コストに着目して北極海における最適航路探索を行った（図 1-8）。

Choi et al. (2015)[12] は、海氷数値モデルによるアンサンブル予報を行い、最適航路探索を行った。アンサンブル予報は、数値予報において生じる誤差を評価するため、バラつきをもたせた初期値を用いて複数回計算を行い、平均値を取って予報とするものである。これによって、予報の高付加価値化が期待できる。[12]では海氷データの初期値を±10%の範囲で変化させ、計算を行った。しかしながら、氷況に対する船速の計算は、密接度と氷厚に比例する単純な低減式を用いていた。本研究では[12]をベースに、密接度や氷厚以外に船のアイスクラスやリッジの影響、氷の強度影響等を評価して氷況を表す指標である Ice Index 法を取り入れて、より複雑な氷況に対応した船速低減式の導出を試みる。

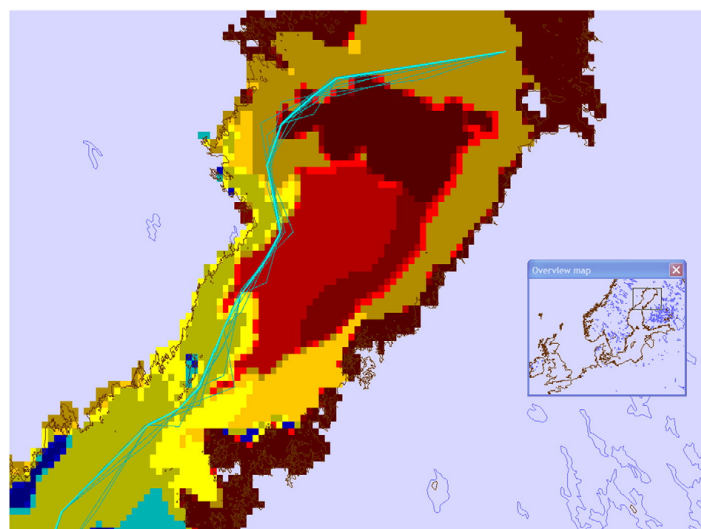


図 1-7 バルト海における最適航路探索例（Kotovirta et al. (2009)[10]）

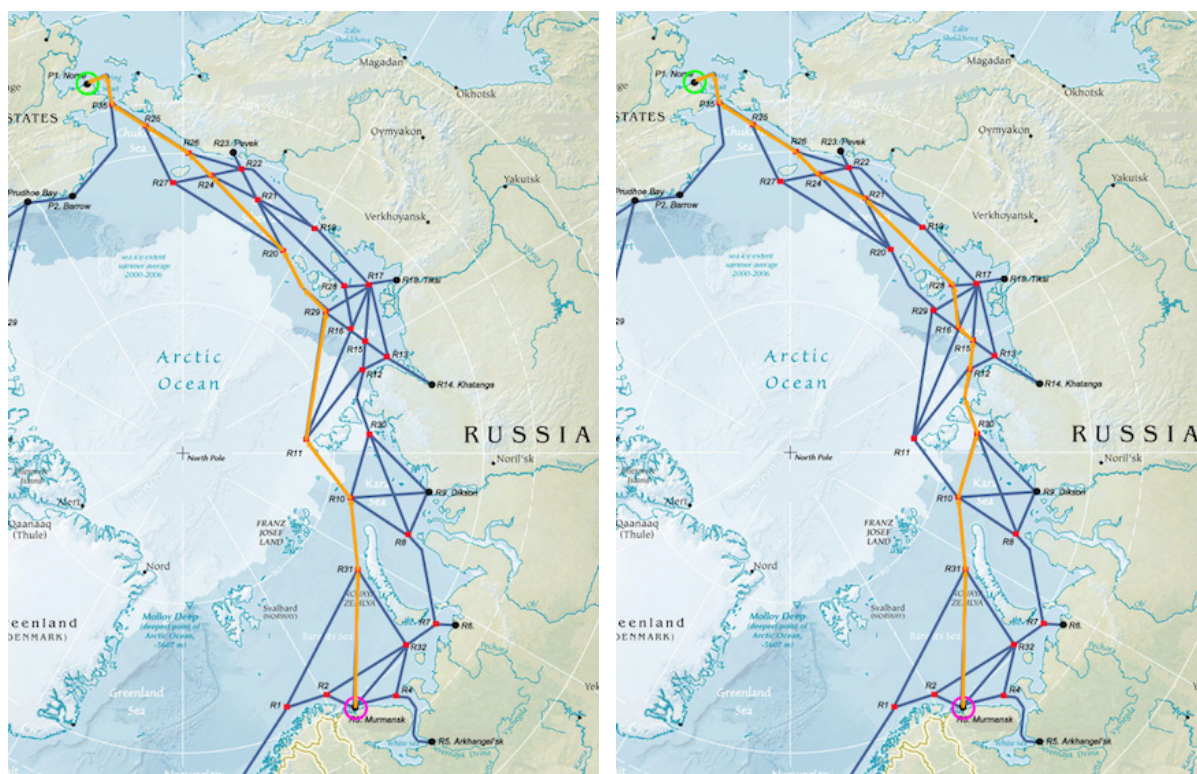


図 1-8 経済性を考慮した最適航路探索例 (Nam et al. (2013)[11])

1.3. 研究目的

本研究では、Ice Index 法を用いて氷況と船速を関連づけ、夏季の北極海航路における最適航路探索手法の開発を行う。また、実航行データとの比較を行い、その性質について検討するほか、海氷の長期予測データを用いて将来的な航路利用拡大の可能性について考察する。

数値モデルによる短期予報、衛星データ解析による中期予報等と組み合わせることで、安全な北極海航行実現のための航行支援システムに資する航路探索の手法を確立する。

第2章 使用データ

2.1. 海氷数値モデル Ice-POM

実際に航行船舶が航路探索を行う際には、数日先から 10 日先ほど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は、数値モデルを活用する必要がある。本研究では、De Silva et al. (accepted) [13]による海洋-海氷連結モデルを用いた。

このモデルの海洋部分はプリンストン大学の海洋数値モデル POM (Princeton Ocean Model) を用いている。静水圧近似の Primitive 方程式と連続の式からなり、水平方向の解像度は 25km、鉛直方向に 33 層の σ -H 座標である。

海氷部分は佐川 (2007)[14]、Fujisaki et al. (2010)[15]をベースにした。海氷の力学、熱力学を表現するモデルからなる。円盤氷盤の集合体について計算を行い、氷縁近くで弾粘塑性レオロジーを取り入れている。航路探索に際して必要となる水深データは、etopo1 をモデルのグリッドに合わせて変換したものを用いた。

本研究では、このモデル Ice-POM によるアンサンブル予測計算を行い、予測された海氷場に対して最適航路の探索を行った。計算期間は 2011 年 9 月から 10 月の 2 ヶ月間で、北極海の海氷面積が大きく変化した時期である。海氷密接度の初期値を $\pm 10\%$ の範囲でランダムに変化させて 31 回の計算を行い、グリッドごとの毎日の海氷密接度および海氷厚の平均値と標準偏差を計算した。図 2-1、図 2-2 に 2011 年 10 月 16 日の海氷密接度および海氷厚の平均値、標準偏差を示す。

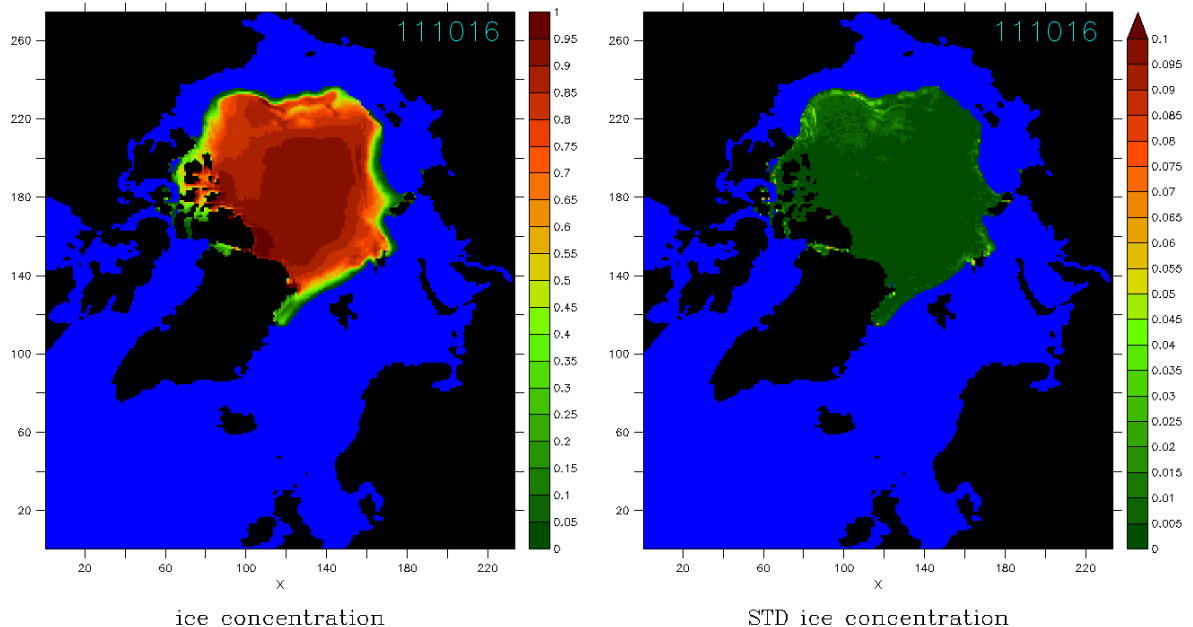


図 2-1 Ice-POM による 2011 年 10 月 16 日の海氷密接度の平均値 (左)、標準偏差 (右)

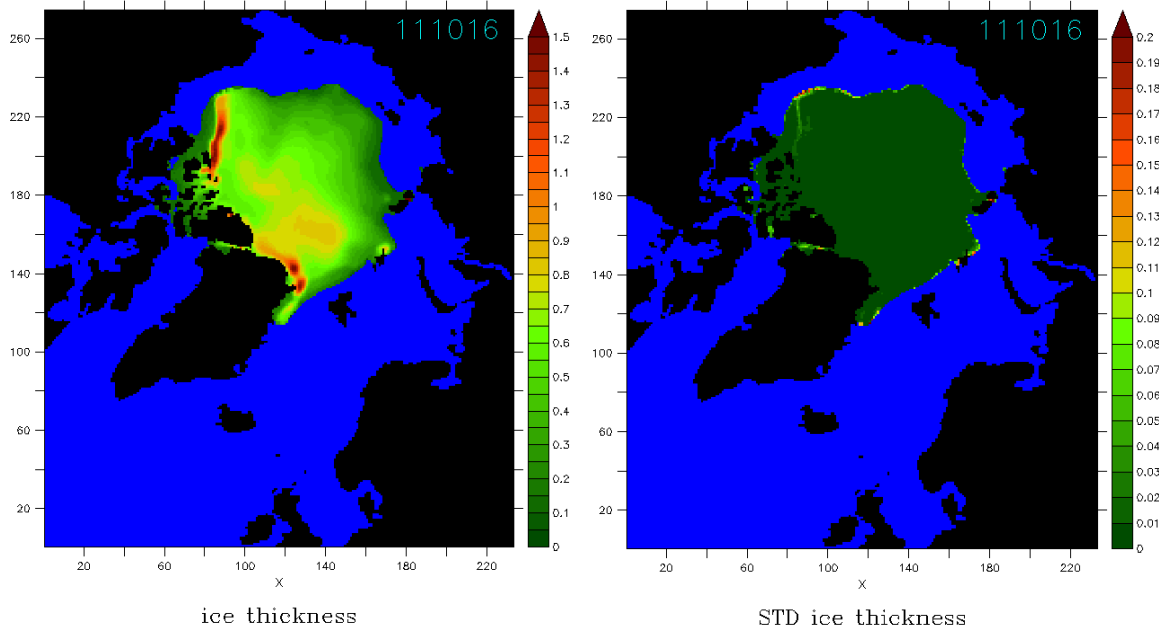


図 2-2 Ice-POM による 2011 年 10 月 16 日の海氷厚[m]の平均値（左）、標準偏差（右）

海氷データの分布関数は切断正規分布を仮定した。切断正規分布は定義域が有限 ($a \leq x \leq b$) の正規分布で、上下ともに有界のものを二重に切断された正規分布、一方のみのものを単一切断正規分布とよぶ。データの平均を μ 、分散を σ^2 とすると、切断正規分布の確率密度関数（pdf, probability density function） $f(x)$ 、累積分布関数（cdf, cumulative distribution function） $F(x)$ および平均、分散は以下になる。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma Z} \phi(\xi) \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{\Phi(\xi) - \Phi(\alpha)}{Z} \quad (2)$$

$$\text{mean: } \mu + \frac{\phi(\alpha) - \phi(\beta)}{Z} \quad (3)$$

$$\text{variance: } \sigma^2 \left[1 + \frac{\alpha\phi(\alpha) - \beta\phi(\beta)}{Z} - \left\{ \frac{\phi(\alpha) - \phi(\beta)}{Z} \right\}^2 \right] \quad (4)$$

ここで、

$$\xi = \frac{x - \mu}{\sigma}, \alpha = \frac{a - \mu}{\sigma}, \beta = \frac{b - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right): \text{ pdf of } N(0,1) \quad (6)$$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \phi(x) dx: \text{ cdf of } N(0,1) \quad (7)$$

$$Z = \Phi(\beta) - \Phi(\alpha) \quad (8)$$

である。

[12]では分布に関する検証は行われなかったが、本研究では確率分布関数の検討を行った。海氷データの切断正規分布への適合度を検証するため、一標本コルモゴロフ-スミルノフ検定を行った。この検定では、 $x = x_1, x_2, \dots, x_{31}$ を昇順に並べ替えた 31 通りのアンサンブル予測計算結果（密接度、氷厚）として、経験累積分布関数 $F_n(x)$ と理論累積分布関数 $F(x)$ を比較する。

$$F_n(x) = \frac{1}{31}, \frac{2}{31}, \dots, \frac{31}{31} \quad (9)$$

$$F(x) = \frac{\Phi(\xi) - \Phi(\alpha)}{Z} \quad (10)$$

ここで、 $F_n(x)$ は実際のデータの累積相対度数、 $F(x)$ は切断正規分布による x までの累積相対度数である。これらの差の絶対値の最大を検定統計量 D とする。

$$D = \max(|F_n(x) - F(x)|) \quad (11)$$

D を有意水準 5%の棄却限界値 $\alpha = 0.23788$ と比較し、 $D < \alpha$ であれば切断正規分布に従っていると考えられる。

図 2-3 は 10 月 31 日の密接度および氷厚に対する検定統計量 D である。 $D < \alpha$ の部分を灰色で塗りつぶし、 $D \geq \alpha$ の部分を色で表示した。氷縁を中心に一部で $D \geq \alpha$ の箇所が見られるが、全体としてはほぼ全てのグリッドで切断正規分布に従っていると考えられる。

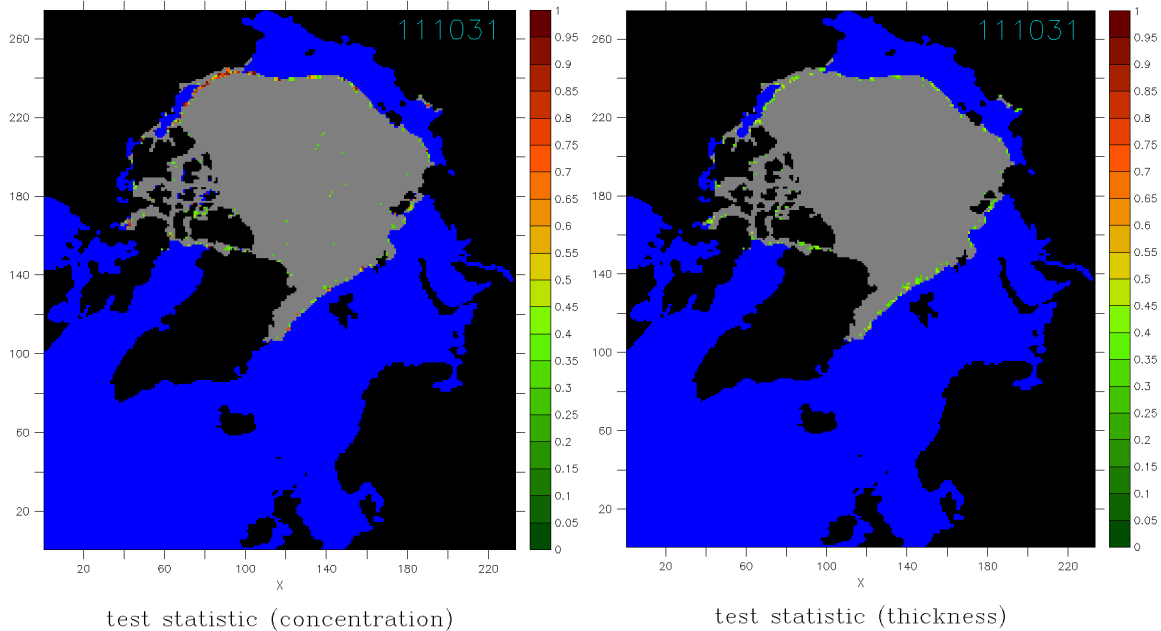


図 2-3 切断正規分布に対する 2011 年 10 月 31 日の検定統計量 D
(左：密接度、右：氷厚)

また、他の分布関数として、対数正規分布についても検討を行った。対数正規分布は、対数が正規分布となるような確率変数であり、定義域は $0 \leq x \leq \infty$ である。この分布の確率密度関数 $f(x)$ 、累積分布関数 $F(x)$ は次のように表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right) \quad (13)$$

対数正規分布への適合度検証として前述の一標本コルモゴロフ-スミルノフ検定を行った。10月31日の密接度および氷厚に対する検定統計量 D を図2-4に示す。 $D < \alpha$ の部分（対数正規分布に従っていると考えられる箇所）を灰色で塗りつぶし、 $D \geq \alpha$ の部分の色を表示した。全体としてはほぼ全てのグリッドでよく適合していると考えられる。

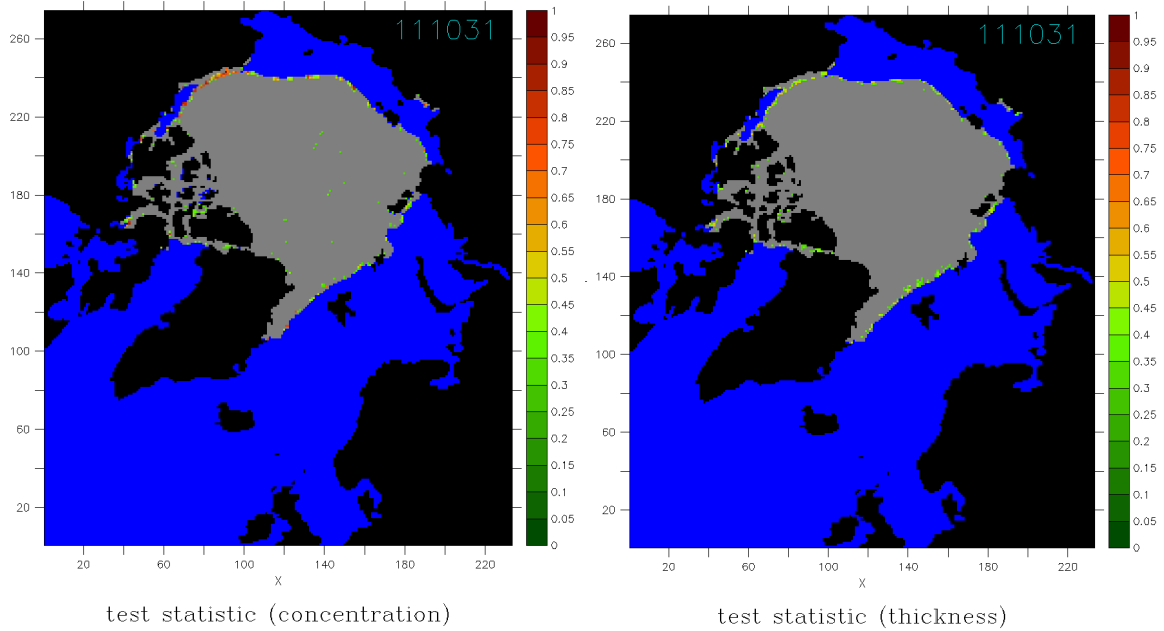


図 2-4 対数正規分布に対する 2011 年 10 月 31 日の検定統計量 D
(左：密接度、右：氷厚)

結果として、切断正規分布と対数正規分布では適合度に大きな差はないといえる。そこで本研究では単純な正規分布に近い分布である切断正規分布を用いることとした。海水密接度はある範囲内における海水の占める面積の割合であり、0 と 1 の間の値をとるので、 $0 \leq x \leq 1$ の二重に切断された正規分布を仮定し、海水厚は負にはならないため $0 \leq x$ の単一切断正規分布を仮定して計算を行った。

2.2. 人工衛星データ（マイクロ波放射計 AMSR2）

時空間的に広く連続的な観測を行える人工衛星データは海氷研究において重要である。本研究では、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に、人工衛星観測による海氷データを用いた。

人工衛星のデータはマイクロ波放射計 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, 図 2-5[16])によるものを用いた。AMSR2 は、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)の第一期水循環変動観測衛星「しずく」GCOM-W1 (Global Change Observation Mission 1st-Water)に搭載されて打ち上げられ、2012 年 7 月より観測を開始した。

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。6.925 GHz から 89.0 GHz までの 6 周波数帯(および電波干渉軽減のための 7.3GHz)で、水平偏波、垂直偏波で観測を行っている。表 2-1 は AMSR2 センサーの詳細である[16]。

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る。マイクロ波は微小な水滴には散乱されにくいので、上空の気象条件の影響を受けずに、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[17]。

表 2-1 AMSR2 センサーの詳細[16]

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	



図 2-5 マイクロ波放射計 AMSR2 （出典：JAXA HP[16]）

本研究で用いた衛星データは海氷密接度および海氷厚である。

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)[18])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IJS アルゴリズム (Krishfield et al. (2014)[19])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。本研究ではこのエラー値のグリッドは一様に氷厚 20cm として扱った。

密接度、厚さともに国立極地研究所が JAXA との協定のもとで Arctic Data archive System (ADS)[4]を通じて配布している、水平方向の解像度 10km、グリッド数 900×900 の毎日のデータである。図 2-6 に 2014 年 9 月 10 日の海氷密接度分布および海氷厚分布を示す。また、衛星軌道により極点周辺に欠測があるが、本研究では一様に密接度 100%、氷厚 2m とした。

また、航路探索に際して必要となる水深データは、etopo1 を AMSR2 のグリッドに合わせて変換したものを用了。

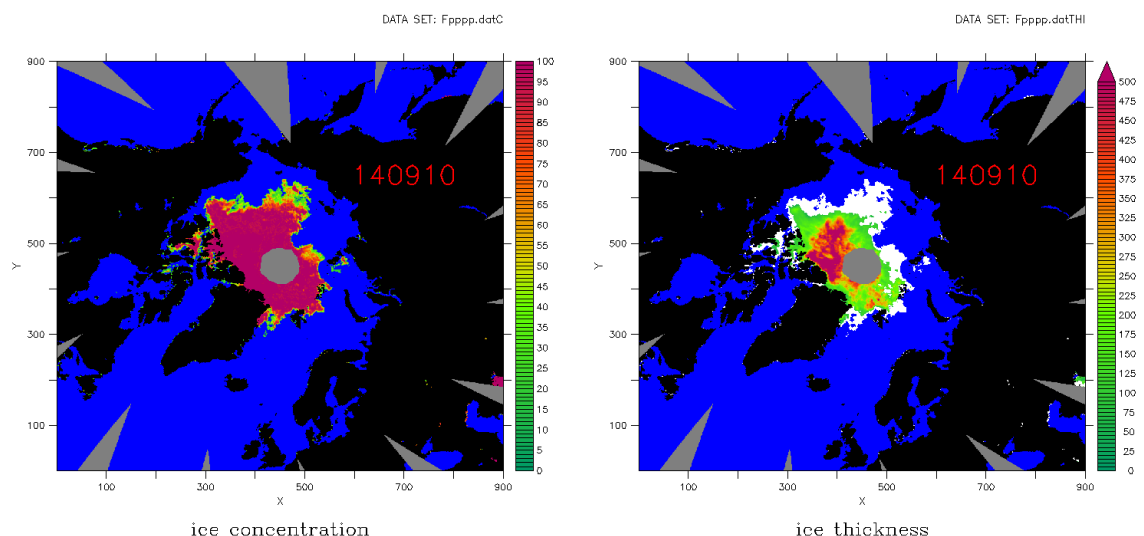


図 2-6 2014 年 9 月 10 日の海氷密接度[%]（左）、海氷厚[cm]（右）
海氷厚分布の白い部分はメルトポンドによるエラー値を示す。

2.3. NSR 実航行データ (AIS データ)

本研究では、船速と氷況の関係について解析し、計算による最適航路との比較のために実航海の航行データを用いた。

データは、衛星を通じて取得された自動船舶識別装置 AIS (Automatic Identification System) の情報である。国際海事機関(IMO, International Maritime Organization)による SOLAS 条約(The International Convention for the Safety of Life at Sea) に基づいて、300GT 以上の国際航海する船舶、500GT 以上の非国際航海の船舶、国際航海の全旅客船は AIS の搭載が義務づけられており、船種、船位、針路、船速などの情報を国際 VHF で送信している。本研究では、北日本港湾コンサルタント株式会社[20]の大塚氏より提供を受けた、2014 年の NSR 航行データを用いた。データには日時、船位 (緯度・経度)、針路、船速が含まれ、その中で、特に NSR を東西に幅広く航行している耐氷商船 3 隻について取り上げた。これを船 A～船 C とする。

耐氷船および砕氷船にはアイスクラスと呼ばれる等級がある。アイスクラスとは、船体補強、設備・装備等が一定基準に達している船に対し、その砕氷性能又は耐氷性能を証明する公的な等級のことである[21]。IMO が定める極地氷海船階級 (Polar Class)、ロシア船級協会 (RS, Russian Maritime Register of Shipping) の定める階級、フィンランド・スウェーデン両国が定めた規則に基づく FSICR (Finnish-Swedish Ice Class Rule)のアイスクラス等がある。FSICR のアイスクラスは、もとはバルト海を航行する船の耐氷性能を証明する等級だが、耐氷船のアイスクラスとして世界で最もポピュラーなものである。表 2-2 に各アイスクラスの対応および氷厚の参考値をまとめた。

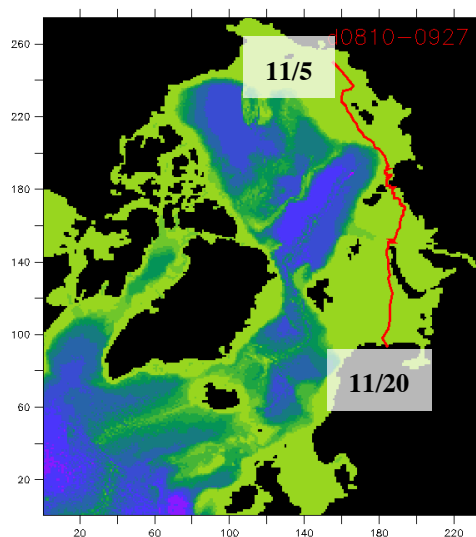
表 2-2 各アイスクラスの対応および階級別の氷の状況・季節
(「北極海航路ハンドブック」[21]を参考に作成)

Polar Class	RS Ice Class	FSICR Ice Class	氷の状況及び季節 (船の構造要件等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	Arc9		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	Arc8		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	Arc7		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	Arc6		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	Arc5	IA Super	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	Arc4	IA	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

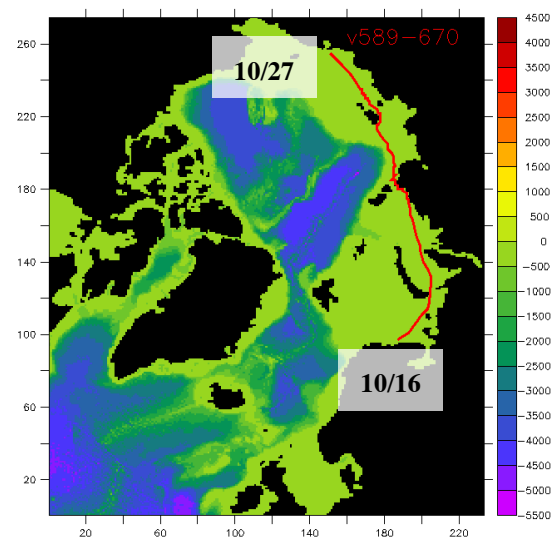
船 A～船 C のアイスクラス、船種、大きさ、総トン数 (GT, Gross Tonnage)、載貨重量トン (DWT, Dead Weight Tonnage)、航行期間を表 2-3 に示す。また、3 船の航行航跡例を図 2-7 に示す。

表 2-3 船 A～船 C の諸元

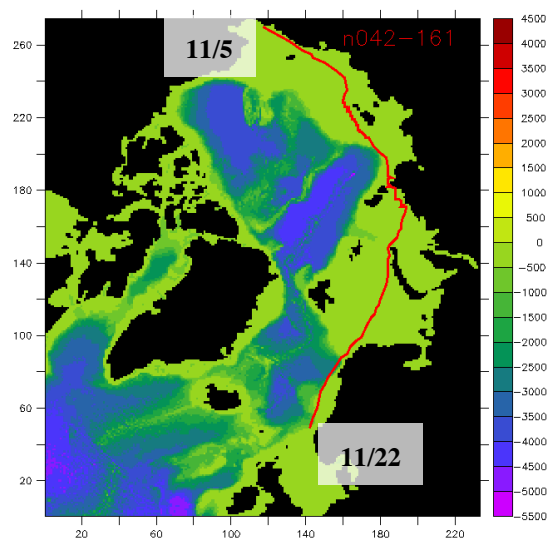
	ship A	ship B	ship C
Ice class	Arc5 (IA Super)	UL (IA)	Arc4 (IA)
Ship type	Crude Oil Tanker	Crude Oil Tanker	Bulks Carrier
Size	164×22×9.5 m	164×22×9.5 m	225×32×14 m
GT	11,290 t	11,290 t	41,500 t
DWT	16,168 t	16,038 t	77,000 t
Sailing term	Jun. 2014 – Feb. 2015	Jul. 2014 – Dec. 2014	Sep. 2014 – Jan. 2015



船 A



船 B



船 C

図 2-7 船 A～船 C の航跡例 (色は水深[m]を表す)

2.4. 全球気候モデル MIROC5

将来的な航路活用の可能性を検討するため、数十年先に渡る長期的な海氷予測データとして、MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate) (Watanabe et al. (2010)[22]) による計算結果を用いた。MIROC5 は全球気候モデル (GCM, Global Climate Model) のひとつで、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構で共同開発されている大気海洋結合モデルのバージョン 5 である。

使用したデータは、RCP4.5 (Representative Concentration Pathway, $+4.5\text{W/m}^2$) および RCP8.5 (Representative Concentration Pathway, $+8.5\text{W/m}^2$) シナリオに基づく将来予測実験の結果である。RCP4.5 および 8.5 は、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) によって取りまとめられた温室効果ガス濃度に基づいた将来予測シナリオで、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較してそれぞれ $+4.5\text{W/m}^2$ および $+8.5\text{W/m}^2$ 上昇するものである。

MIROC5 は、モデルの中に現実的な大気場および海洋循環を形成するため、大気について 10 年、海洋について 530 年のスピニングアップを行い、大気と海洋を結合した後にさらにパラメーターをチューニングしながら 1000 年の積分計算を行った。これらをもとに 20 世紀気候再現実験を実施し、その結果を初期値として計算されたのが今回使用した将来予測実験結果である。

計算期間は 2006 年から 2099 年で、グリッドは 1 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。図 2-8、図 2-9 に 2055 年 9 月 10 日の海氷密接度、氷厚を、図 2-10、図 2-11 に 2095 年 9 月 10 日の海氷密接度、氷厚を示す。

なお、航路探索に際して必要となる水深データは、etopo1 を補間したモデルグリッドに合わせて変換したものをを用いた。

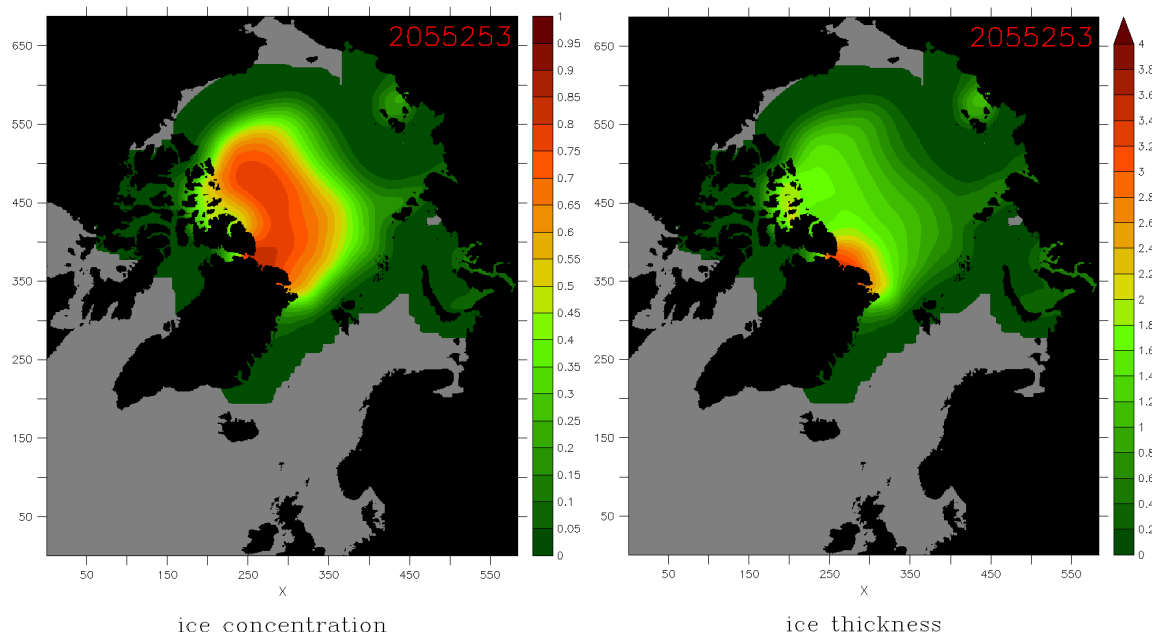


図 2-8 RCP4.5 による 2055 年 9 月 10 日の海氷密接度 (左)、海氷厚[m] (右)

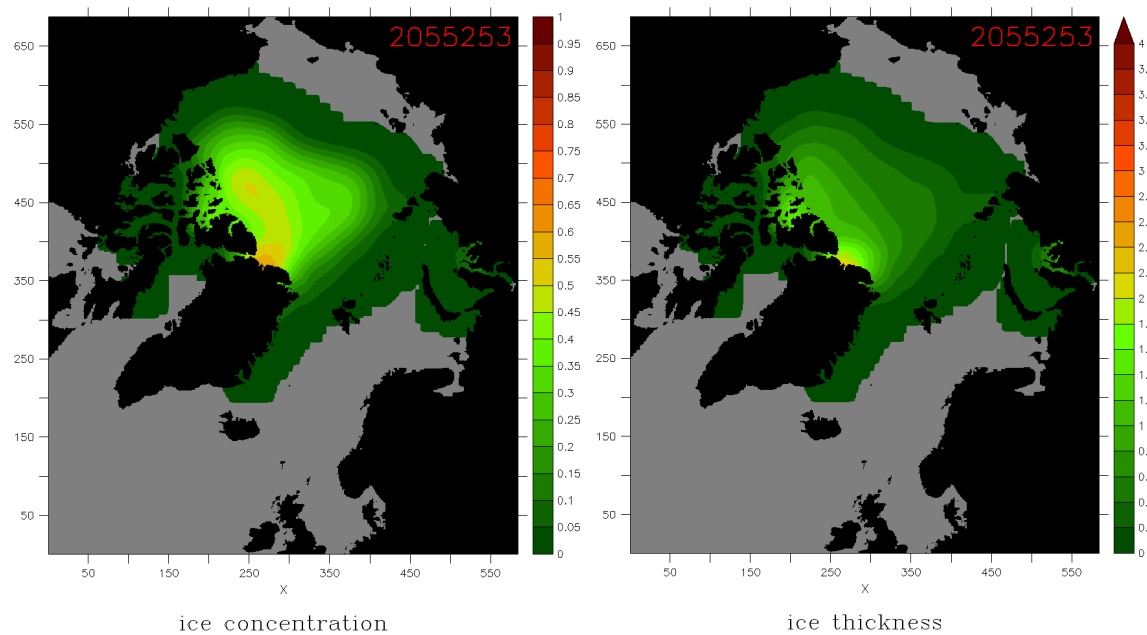


図 2-9 RCP8.5 による 2055 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）

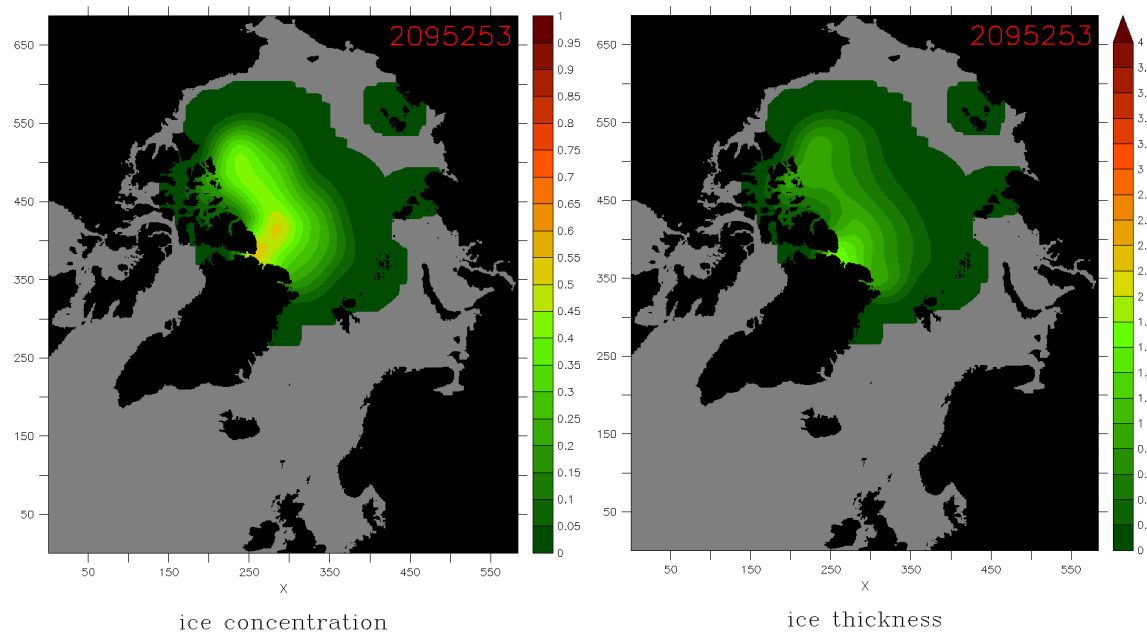


図 2-10 RCP4.5 による 2095 年 9 月 10 日の海氷密接度（左）、海氷厚[m]（右）

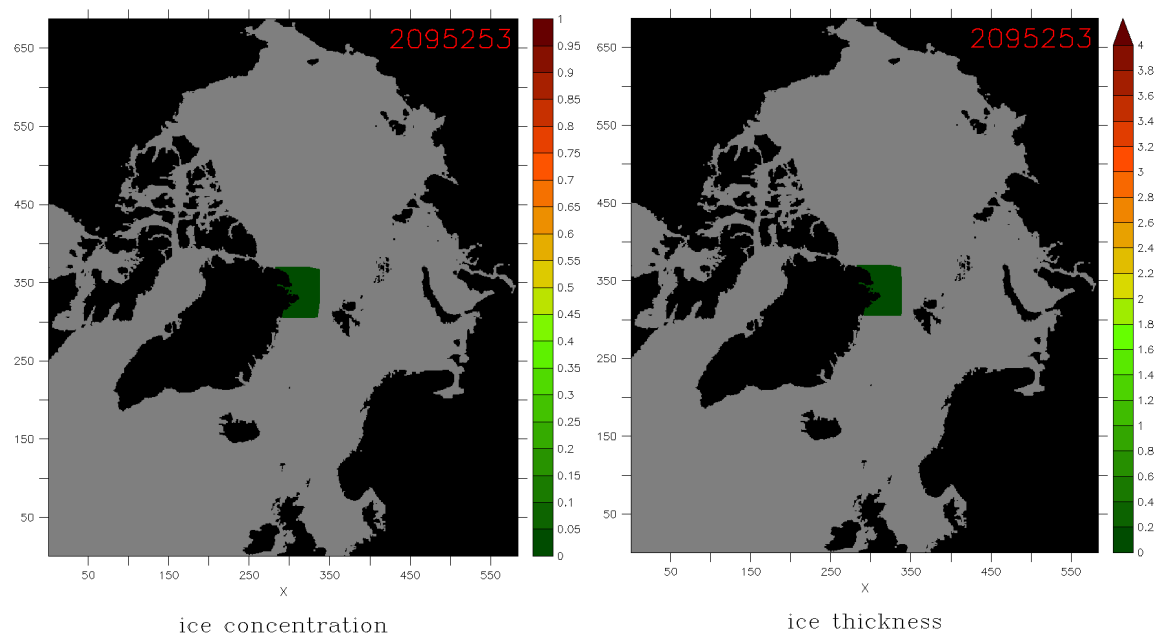


図 2-11 RCP8.5 による 2095 年 9 月 10 日の海氷密接度 (左)、海氷厚[m] (右)

第3章 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)[23]) を用いた。A* アルゴリズムは経路探索に用いられる最良優先探索のひとつで、ダイクストラ法を推定値付きの場合に一般化したものである。図 3-1 (Fu et al. (2006)[24]) に示すようなノードとリンクで構成されたネットワークにおいて、スタートノードから順次ノードを展開していき、ゴールノードが展開されると探索終了となる。ここで展開とは、そのノードからリンクをたどった先のノードを調べることである。

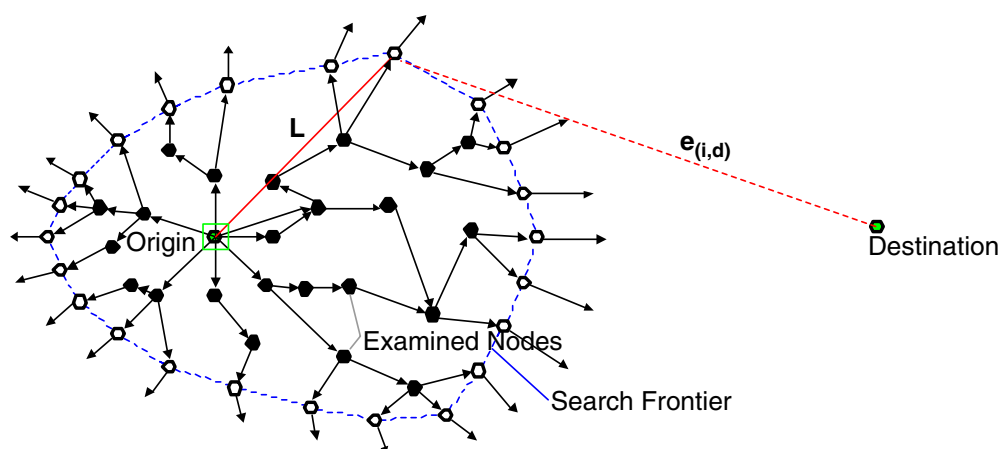


図 3-1 ネットワークにおける探索の模式図 (Fu et al. (2006)[24])

あるノード 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）の経路コストを $f(n)$ とすると、以下のように表すことができる。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (14)$$

ここで、 $g(n)$ 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である。探索過程において、 $g(n)$ はスタートノードからのコストを積算し、探索に伴って更新することで求められるが、 $h(n)$ は探索終了まで知ることができない。そこで、 $h(n)$ の推定値 $h^*(n)$ を使って、(14) 式を次のように書き換える。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \quad (15)$$

ここで、 $f^*(n)$ は $f(n)$ の推定値であり、これを評価値としてこの値が小さいノードから順に展開を行うのが A* アルゴリズムの特徴である。ゴールノードが最小評価値を持って展開のために選ばれた時点で探索終了となる。また、 $h(n)$ の推定値 $h^*(n)$ をヒューリスティック関数と呼ぶ。

A*アルゴリズムの具体的な手順を以下に示す。

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。

$$0 \leq h^*(n) \leq h(n) \quad (16)$$

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。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \leq g(n) + h(n) = C \quad (17)$$

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、

$$C < f^*(G) \quad (18)$$

である。以上より、

$$f^*(n) < f^*(G) \quad (19)$$

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、ノードにあたる各グリッドに緯度、経度の他に海水密接度および氷厚の情報があり、それを参照して船速を決定し、所要時間を計算した。海水データは日ごとに存在するため、あるグリッドに到達した時間に応じてその日の海水データを参照することとした。模式的に表すと図 3-2 のようになる。本研究では、あるグリッドからの移動先として、 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航路探索を行った。

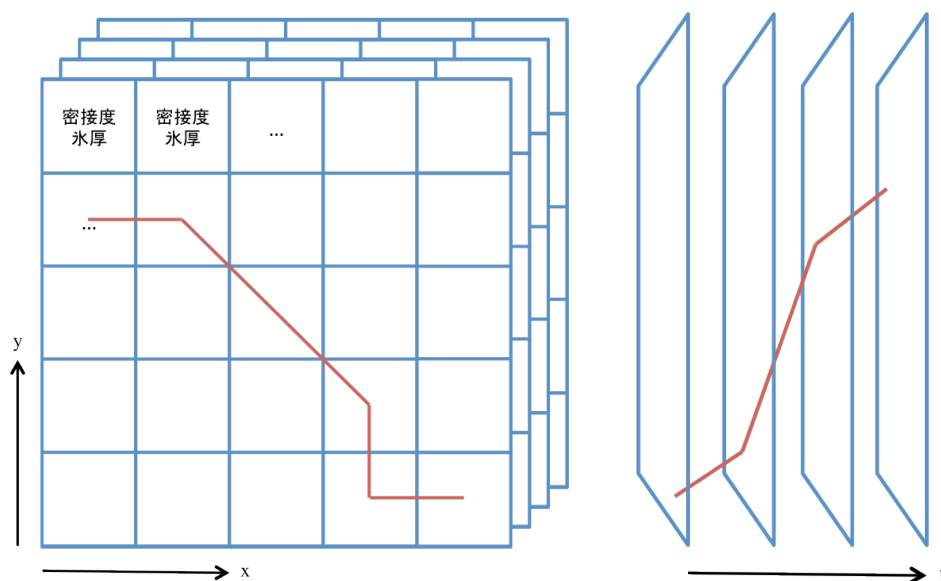


図 3-2 航路探索の模式図

本研究では、コストとして航行距離、航行時間、失敗率（4.1.にて述べる）を考慮した。航行距離のヒューリスティック関数は最短距離（ノード n とゴールノードの間の大圏距離）とし、航行時間のヒューリスティック関数は最短時間（最短距離を計算上の最大船速で除したもの）として、失敗率のヒューリスティック関数は0で一定とした。これらは全て明らかに(16)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を備えている。

3.2. Ice Index 法

航路探索を行う上で重要なのが氷況に対する船速の計算である。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る。INSROP は、14 ヶ国、390 名の研究者の参加によって行われた国際的・学際的研究事業であり、下記 4 つのサブプログラム[5]に基づいて研究プロジェクトを実行し、166 本のプロジェクトレポート、3 冊の書籍、3 回の国際会議等の成果を残した。

1. 北極海の自然環境と氷海航行技術
2. 北極海航路啓開が自然、生態系及び社会環境に及ぼす影響評価
3. 北極海航路の経済性評価
4. 北極海航路啓開に関する政治的・法制的背景

このプロジェクトで行われた NSR 運航シミュレーションの中で開発されたのが Ice Index である。これは CASPPR (Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations) のひとつである Arctic Ice Regime Shipping System Standards のなかで使われている Ice Numeral という考え方を基にしている。すなわち、氷の種類と密接度を勘案して、航海の難易度から見た氷の状態を数値指標として表し、その指標と航海速度との間にある関係があれば、氷の状態を表す数値指標から航海速度を推定することが可能になるというものである。図 3-3[5]は INSROP で行われた実船航海試験で得られた Ice Numeral と船速の関係である。両者の間には相関関係が見られる。

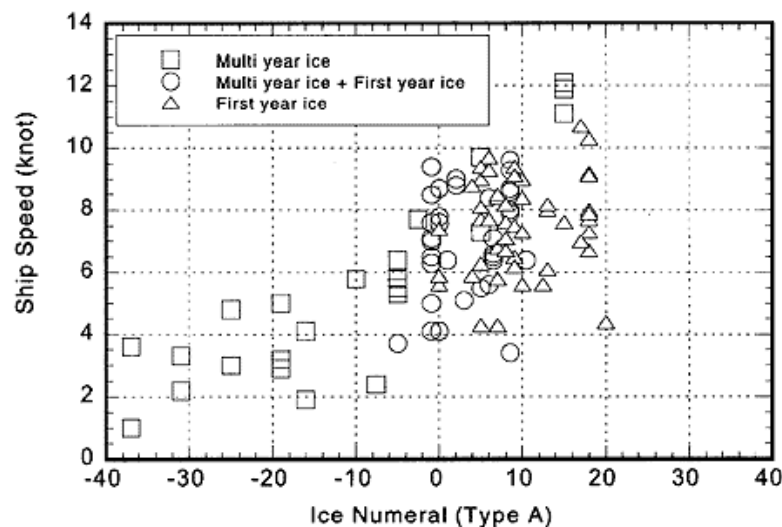


図 3-3 実船航海による Ice Numeral と船速の関係[5]

Ice Index は、Ice Numeral にリッジの密度、氷の強度影響を加えて改良したもので、次のように 3 つの要素からなる。

$$I = I_A + I_B + I_C \quad (20)$$

ここで、 I は Ice Index、 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、海水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。

$$I_A = C_1 \times C_m + C_2 \times C_f + 2 \times (10 - C_f - C_m) \quad (21)$$

C_m : concentration of multi year ice [10 分率]
 C_f : concentration of first year ice [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。INSROP では、一部の係数に修正を加えたこと以外、 I_A は Ice Numeral と同じである。本研究においては CASPPR の値と INSROP の値を基に係数を決定し、それぞれ氷厚および連続砕氷能力によって決まるものとした。表 3-1 にその値を示す。

表 3-1 I_A の係数 C_1, C_2 の値

	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

I_B と I_C は Ice Numeral には存在せず、Ice Index に導入された項である。まず、 I_B は次のように表される[5]。

$$I_B = -2 \times \frac{C_r}{10} \times (C_f + C_m) \quad (22)$$

ここで、 C_r はリッジの密接度を表す10階級の指数である。リッジを図3-4のような形状で近似すると、リッジ密度 D_r [km^{-1}]とリッジ幅 W_k [m]を用いて、 C_r は次のように定義される。

$$C_r = W_k \times \frac{D_r}{1000} \times 10 \quad (23)$$

リッジ幅 W_k を $W_k = 20H_s$ と近似すれば、

$$C_r = \frac{H_s D_r}{5} \quad (24)$$

となり、(22)式に代入することで I_B は次のように表せる。

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

H_s : ridge sail height [m]

D_r : ridge concentration [km^{-1}]

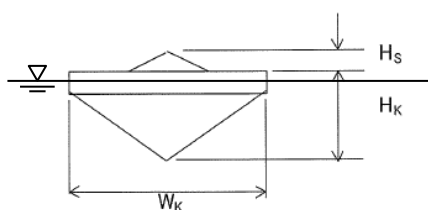


図 3-4 リッジの形状

I_C は次式で表される[5]。

$$I_C = M_{CS(FY)} \times C_f + M_{CS(MY)} \times C_m \quad (26)$$

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

	Fist-year ice			Multi-year ice		
Average monthly temperature T [$^{\circ}\text{C}$]	$T \leq -10$	$-10 < T \leq -2$	$-2 < T$	$T \leq -10$	$-10 < T \leq -2$	$-2 < T$
M_{CS}	-0.12	0	0.12	-0.44	0	0.44

本研究で使用した、数値モデルおよび衛星から得られる海氷データは海氷密接度および氷厚なので、一年氷・多年氷密接度 $C_f \cdot C_m$ 、リッジ密度 D_r 、リッジ高さ H_s 、月平均気温 T については推定を行った。推定には 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[5]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 3-5[5]、図 3-6[5]、図 3-7[5]に示す。

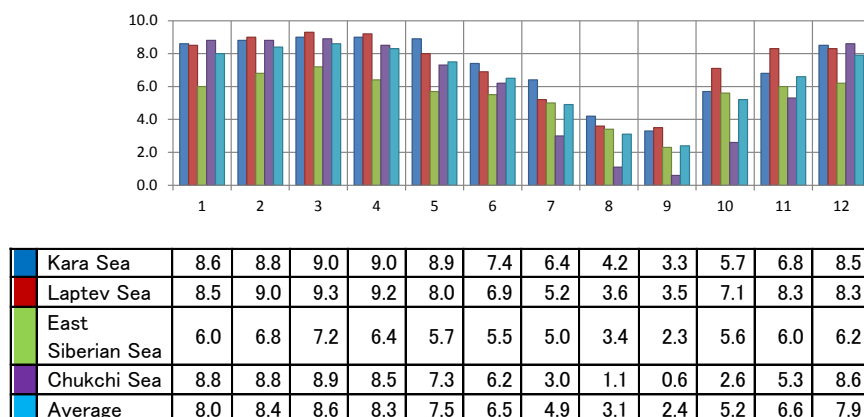


図 3-5 一年氷密接度[10 分率] (INSROP 環境データ[5])

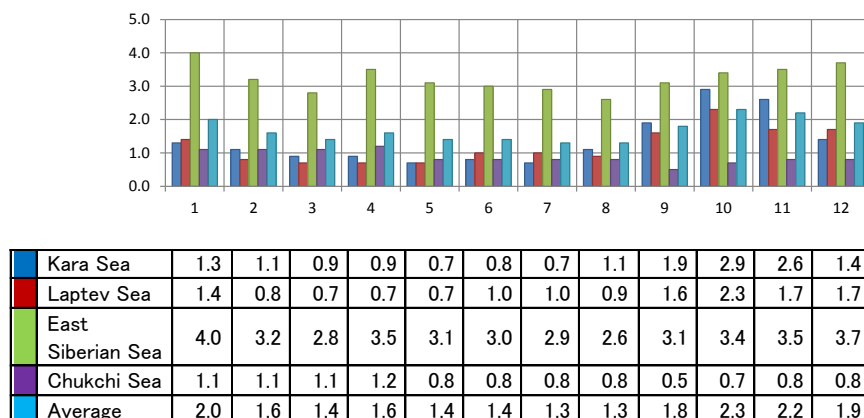
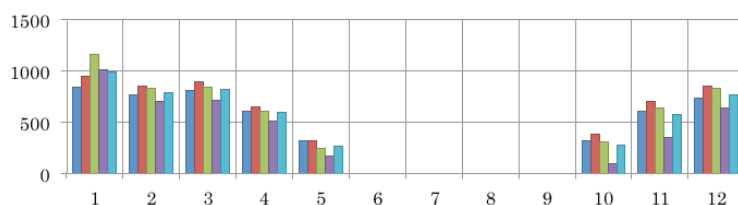


図 3-6 多年氷密接度[10 分率] (INSROP 環境データ[5])



Kara Sea	842	767	811	608	326	0	0	0	0	324	608	737
Laptev Sea	950	858	895	649	326	0	0	0	0	384	710	852
East Siberian Sea	1169	837	849	608	243	0	0	0	0	314	642	833
Chukchi Sea	1016	701	721	515	174	0	0	0	0	95	358	639
Average	994	791	819	595	268	0	0	0	0	279	579	765

図 3-7 積算寒度[degree-days] (INSROP 環境データ [5])

一年氷と多年氷の割合は INSROP 環境データと変わらないと仮定し、一年氷密接度および多年氷密接度の比を用いて使用データの密接度を配分して、一年氷・多年氷密接度 $C_f \cdot C_m$ とした。また、気温にあたるデータがないため、積算寒度をその月の日数で割ることで月平均気温 T とした。リッジについては、海氷が乗り重なって厚くなった状態を指すため、リッジの起きている海氷ほど厚くなると考えられる。本研究ではリッジに関するパラメーターは氷厚に比例するものと仮定した。リッジ密度 D_r は、平均氷厚 (0.97m) に対する平均リッジ密度 13.9 km^{-1} [5] を、使用データの氷厚に応じて比例配分し、同様にリッジ高さ H_s は、平均氷厚 (0.97m) に対するリッジ高さ 0.94m [5] を、使用データの氷厚に応じて比例配分した。

データは海域ごとに与えられており、本研究では北極海ロシア沿岸域を図 3-8 のように経度に応じて海域分けしてデータを対応させた。

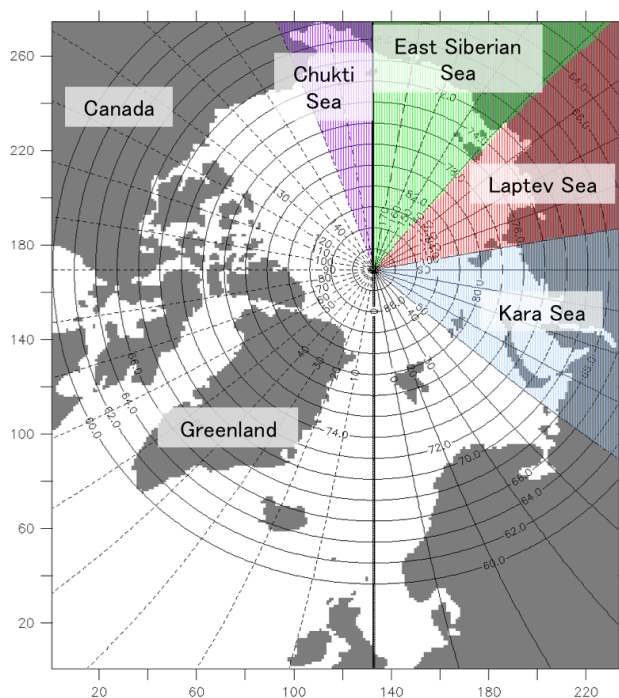


図 3-8 海域分け

3.3. Ice Index と船速の関係

Ice Index と船速の関係については INSROP でも研究が行われた。同プロジェクトで開発された NEWSIM2 (Patey and Riska (1999)[25])という計算コードを用いて、抵抗式から種々の氷況下における船速を計算したもので、結果を図 3-9[5]に示す。特に Ice Index が 20 から 10 に減少するにつれて船速が低減する様子が分かる。

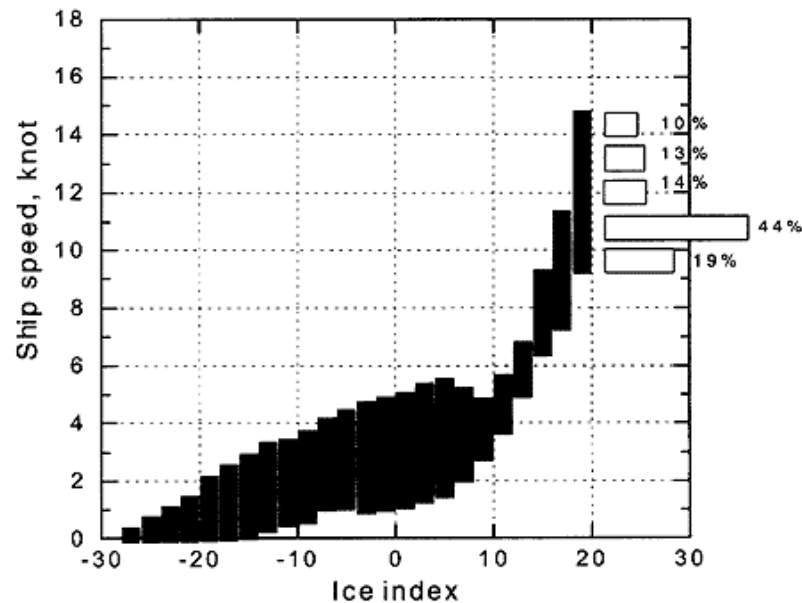


図 3-9 Ice Index と船速の関係[5]

本研究では、AIS による実航行船速データと衛星観測（AMSR2）による氷況データ（海氷密接度、海氷厚）を用いて Ice Index と船速の関係を検証した。Ice Index は衛星データに対して 3.2.で述べた手法を用いて計算した。NSR を航行する船舶は原則として海氷域中では砕氷船のエスコートを受けることになっている。よって、AIS データも開水面以外でのデータについては砕氷船の先導に従って航行したものである。Ice Index を計算する際の砕氷能力は 1.5m とした。なお、開水面においては船種・砕氷能力によらず Ice Index は 20 で一定である。

Ice Index は氷況をひとつの指標に表し、そこから船速を推定するものだが、船型や設計速度によっても船速は違ってくるため、船速そのものを推定するには個船ごとにデータ解析を行うことが必要になってしまう。そこで本研究では、船型によらない船速推定を行うため、開水面船速に対する船速減少率を用いて解析を行った。

船速を v 、開水面での船速を v_{ow} とすると、船速減少率は次式で計算される。

$$\text{speed reduction rate} = 1 - \frac{v}{v_{ow}} \quad (27)$$

AIS の船速データには様々な要因の減速が表れる。中にはエスコートの砕氷船待ち、港への入港待ち、オペレーションの都合等により、氷況によらずに減速することもある。たとえば氷況の比較的緩い海域で極端に遅い船速を示している場合は、こうした氷況以外の要因で

減速した可能性が高い。この影響を排除するため、解析にあたって、明らかに氷況によるもの（その時の氷況が厳しいもの）以外の船速 2knots 以下のデータは除外した。

その上で、船ごとに開水面を航行した船速の平均値を取り、 v_{ow} とした。図 3-10、図 3-11、図 3-12 に船 A から船 C について、Ice Index と船速減少率の関係を示した。Ice Index の値 10 ごとに階級を取り、平均値と標準偏差で示した。色は季節（AMJ: 4-6 月、JAS: 7-9 月、OND: 10-12 月、JFM: 1-3 月）を表す。全て 2014 年のデータ（ただし JFM は 2015 年）である。

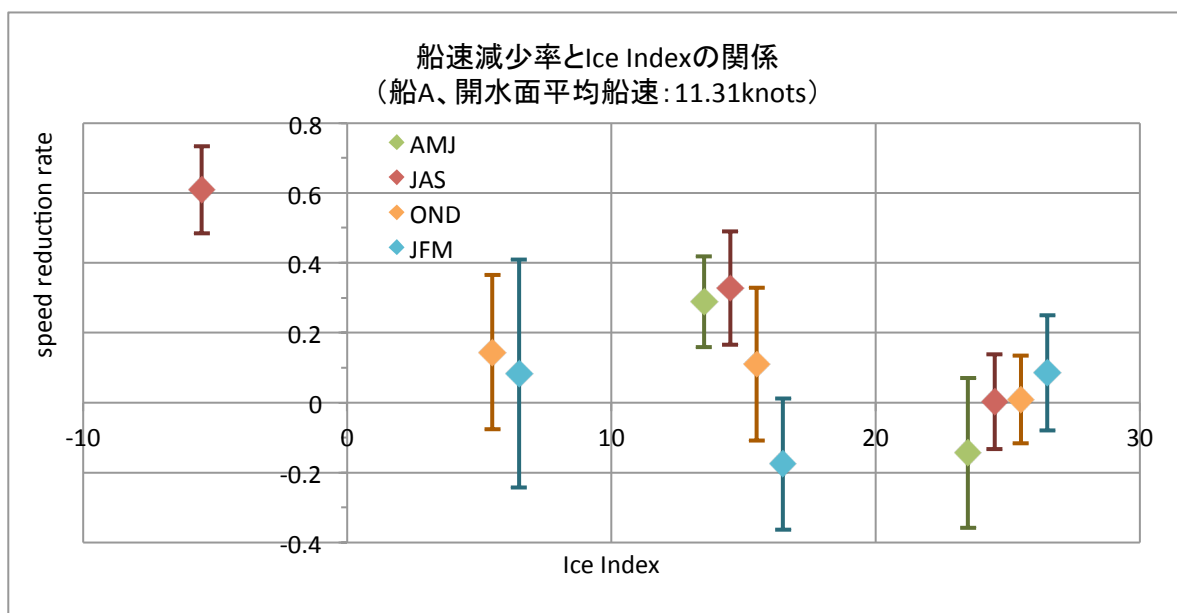


図 3-10 船 A の船速減少率と Ice Index の関係

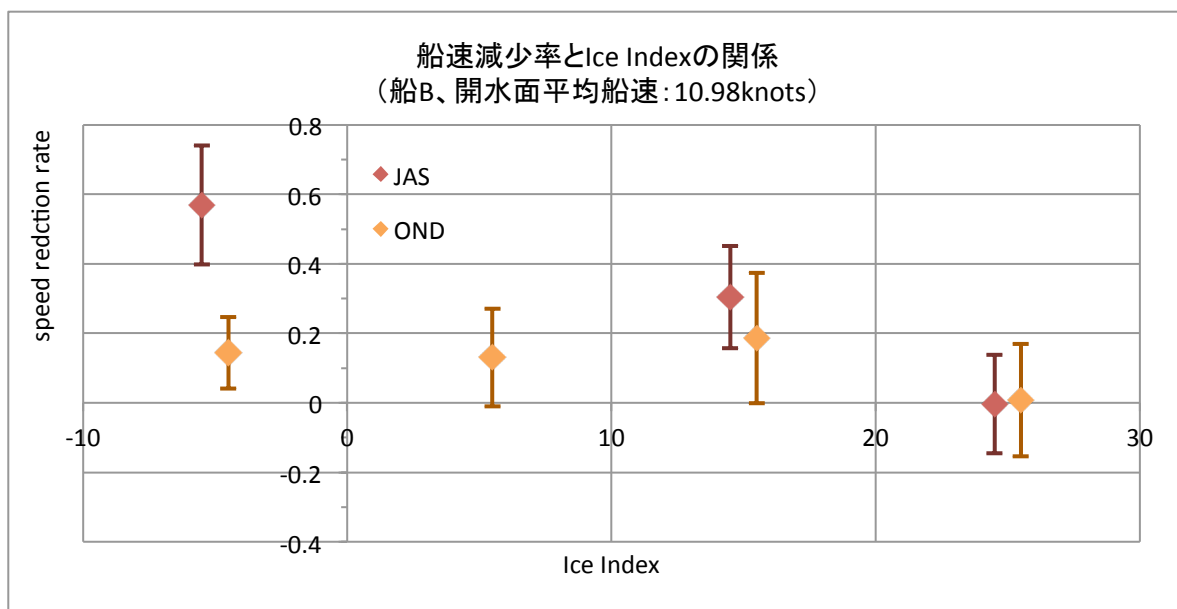


図 3-11 船 B の船速減少率と Ice Index の関係

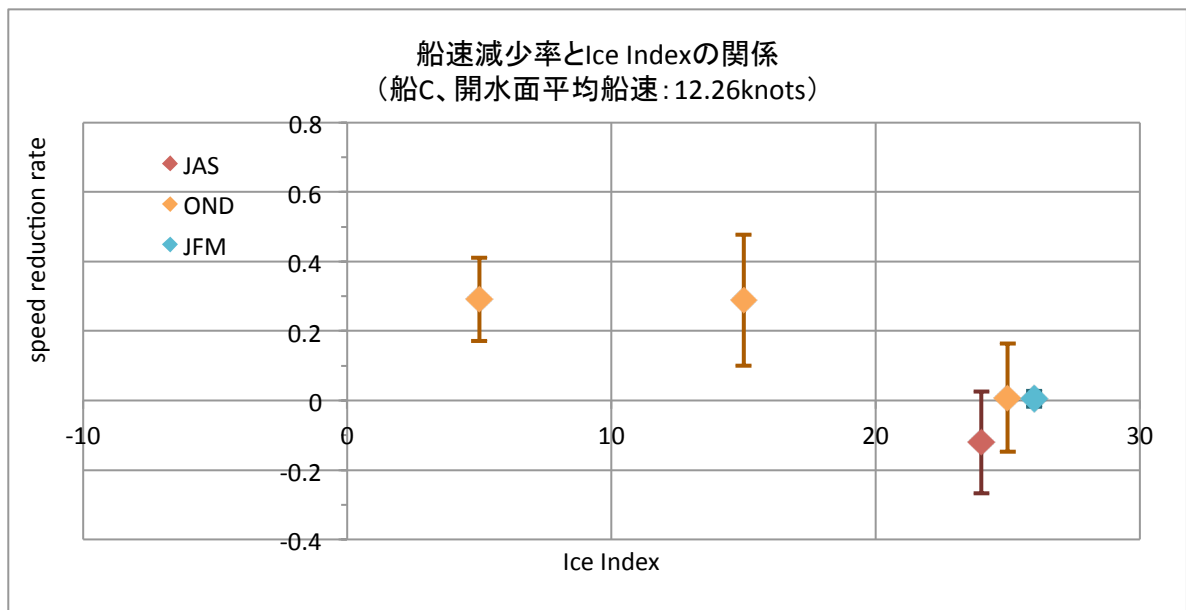


図 3-12 船 C の船速減少率と Ice Index の関係

全体としては Ice Index が小さくなるほど船速減少率が高くなる傾向が見える。また、7-9 月（赤色）よりも 10-12 月（橙色）の船速減少率がわずかに小さく（船速が大きく）なっていることが分かる。これは、7 月や 8 月の氷は冬季に出来て在齢が長くなっているのに対して、10 月や 12 月の氷は結氷期になって出来たばかりであり、相対的に強度が弱いことを Ice Index で捉えきれていないためと考えられるが、全体的な傾向は捉えられているといえる。

船速減少率は開水面（Ice Index=20）において 0 となるべきものなので、開水面のデータを除外してそれぞれのデータ数および Ice Index との相関係数、決定係数を計算したものが表 3-3 である。季節によっては高い相関を示しており、船全体で見ても特に船 A と船 B ではある程度の相関があるといえる。船 C の相関係数は低いが、データ数が少ないことと、いくつかの減速率が特に高い点に引っ張られたためと考えられる。

表 3-3 AIS データ（開水面除く）のデータ数、相関係数、決定係数

船	季節	データ数	相関係数	決定係数
船 A	AMJ	21	-0.644	0.415
	JAS	141	-0.825	0.680
	OND	194	-0.185	0.034
	JFM	12	-0.313	0.098
	total	368	-0.486	0.236
船 B	JAS	119	-0.846	0.717
	OND	124	0.064	0.004
	total	243	-0.612	0.375
船 C	JAS	0	-	-
	OND	61	-0.066	0.004
	JFM	0	-	-
	total	61	-0.066	0.004

Ice Index と船速減少率の関係について、船 A、船 B、船 C を全てまとめてプロットしたのが図 3-13 である。横軸は Ice Index から 20 を減じたものである。また、Ice Index と船速の対応関係として、最も単純な直線による近似を行った。データ数は 672、相関係数は-0.526、決定係数は 0.277 であり、ある程度の相関関係はあると考えられるが、特に Ice Index が 20 に近い範囲（図 3-13 の横軸 0 から-5 にかけての範囲）では点が縦軸方向に広く分布しており、関係性が見えにくい。これは、氷況が緩いことから中には単独航行しているデータも含まれる可能性があることや、砕氷船待ちに向けて減速している場合等、氷況以外による減速のデータが多く含まれるためと考えられる。

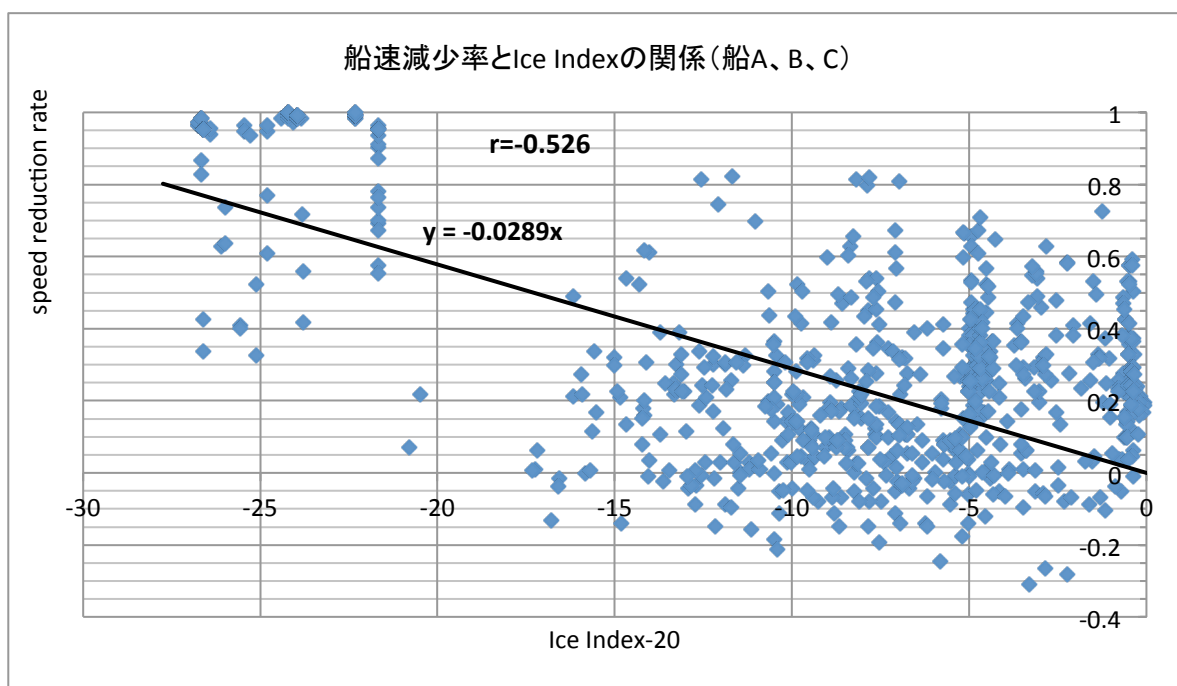


図 3-13 船 A、B、C の船速減少率と Ice Index の関係

そこで、Ice Index ≥ 15 の範囲については図 3-9 に示した INSROP の研究結果を用いた。図 3-9 では、Ice Index が 20 の時に船速 12knots であるのに対して、Ice Index が 15 の時に 8knots となっており、船速減少率は $1 - \frac{8}{12} = \frac{1}{3} \approx 0.3333$ である。その間を比例関係とすると、次のような式に表せる。

$$1 - \frac{v}{v_{ow}} = -0.06667(I - 20) \quad (28)$$

これを変形すると、次のようになる。

$$v = 0.06667v_{ow}I - 0.3333v_{ow} \quad (I \geq 15) \quad (29)$$

Ice Index < 15 の場合は、AIS データを用いた。図 3-13 から Ice Index ≥ 15 のデータを除き、横軸を Ice Index から 15 を減じたものに変えたのが図 3-14 である。データ数は 415、相関係数は -0.718、決定係数は 0.515 であり、比較的高い相関関係を示しているといえる。

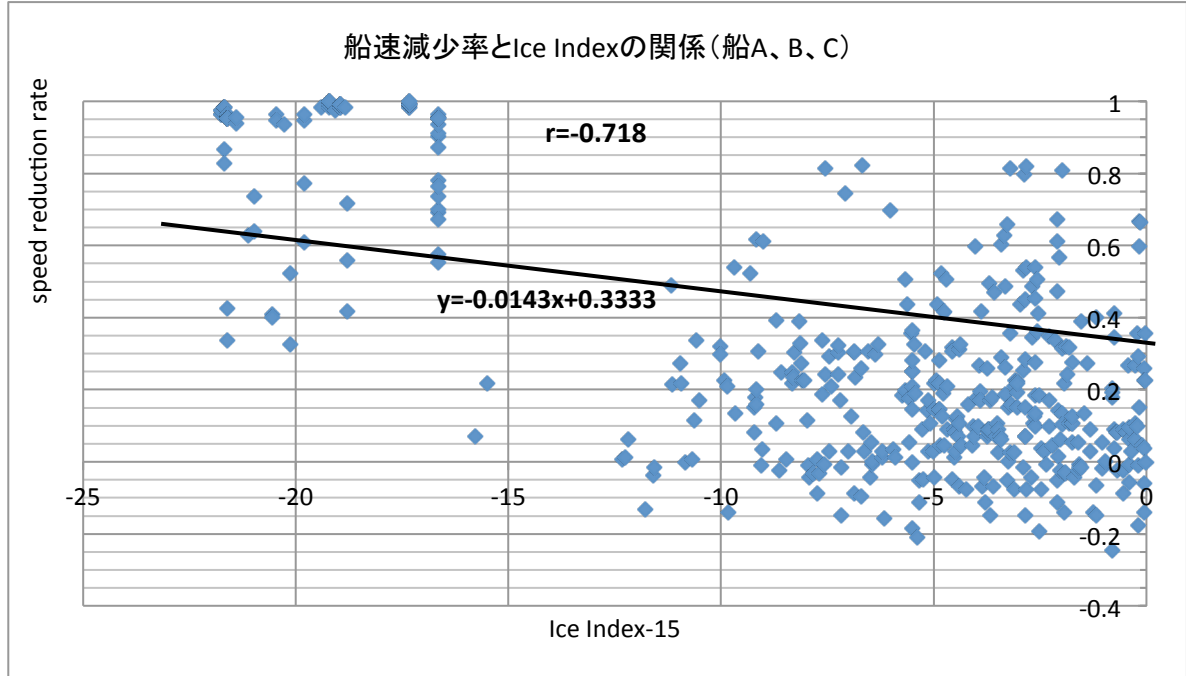


図 3-14 Ice Index < 15 のデータに対する船 A、B、C の船速減少率と Ice Index の関係

このデータに対して、Ice Index が 15 の時に船速減少率 0.3333 となるような近似直線を最小二乗法で計算すると、次式のようなになる。

$$v = 0.0143v_{ow}I - 0.4517v_{ow} \quad (I < 15) \quad (30)$$

本研究では、開水面船速 v_{ow} は 3 船の開水面平均船速の平均値 11.52knots を用いた。(29)式および(30)式の v_{ow} に代入することで、Ice Index に対する船速推定式は次のようになる。

$$v \text{ [knots]} = \begin{cases} 0.768I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647I - 5.209 & (I < 15) \end{cases} \quad (31)$$

第4章 結果と考察

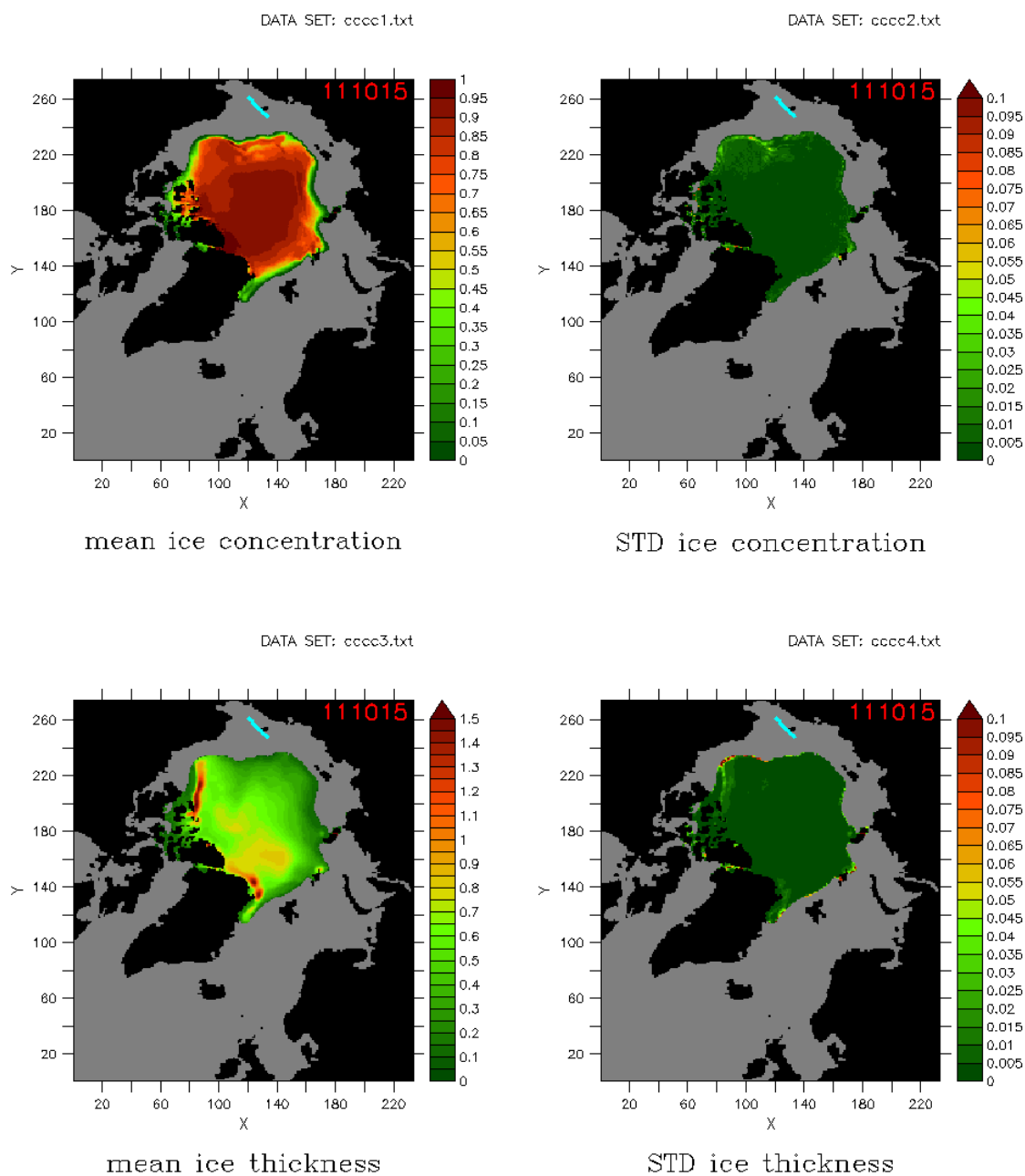
4.1. アンサンブル予測計算結果のバラつきを考慮した航路探索

実際に海氷予測を用いて航路探索することを想定して、海氷数値モデル Ice-POM による結果を用いて最適航路探索を行った。航行船舶の砕氷能力はアイスクラス IA、氷厚 0.6m まで砕氷可能とした。ただし、Ice Index ≤ 18 の時は砕氷船によるエスコートを受けるものとし、その際は氷厚 1.5m まで砕氷可能とした。また、喫水制限として水深 10m より浅い海域には入らないこととした。2011 年 10 月 15 日にチュクチ海を出発し、スカンジナビア半島の北を目指す航路を探索した。

航路探索の際の評価関数は次式のようにした。

$$\text{cost function} = w_1 \times (\text{distance [nm]}) + w_2 \times (\text{time [hours]}) \quad (32)$$

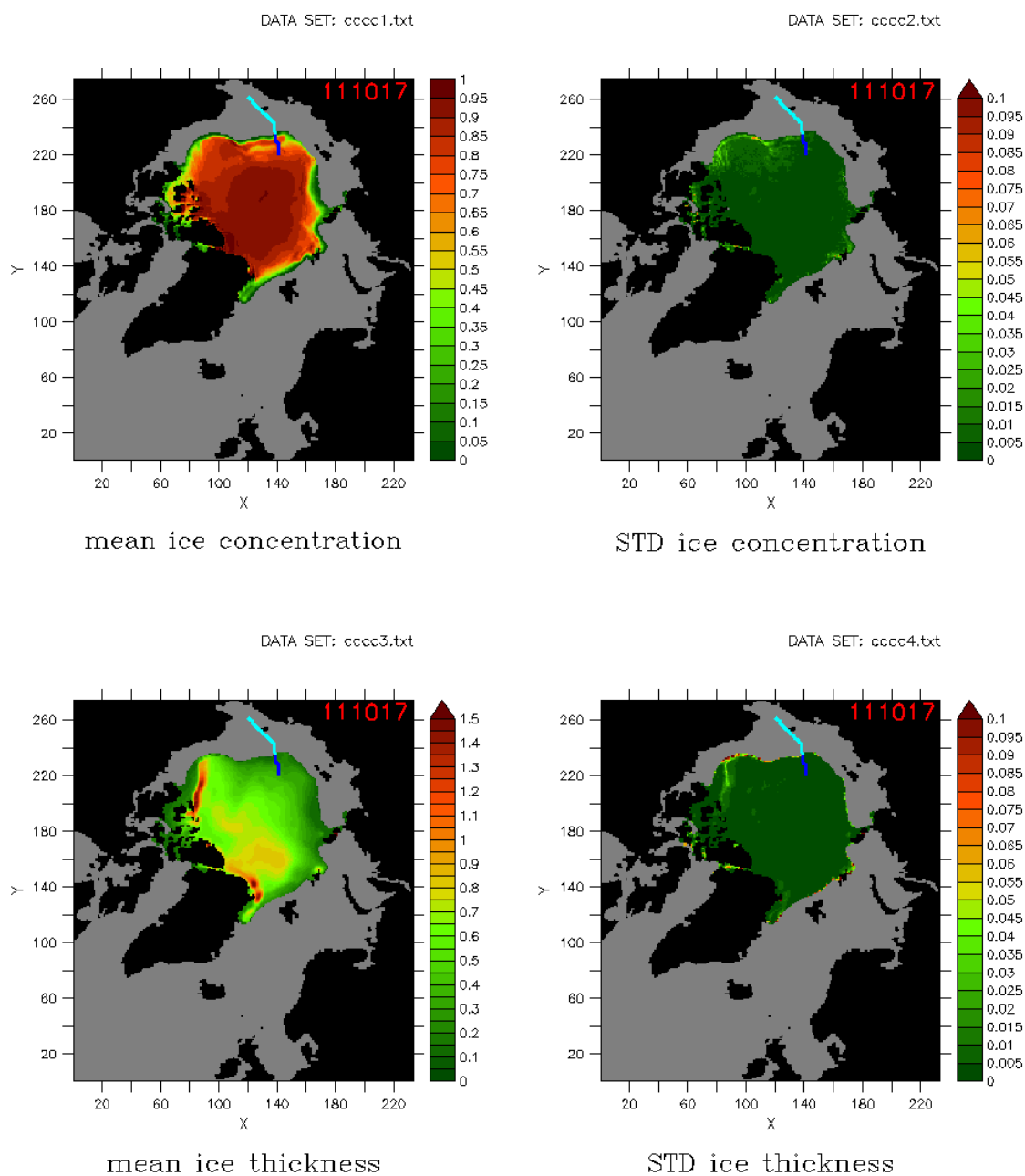
まず、 $w_1 = 1, w_2 = 0$ として、距離のみを最小化する航路を求めた。結果を一日おきに密接度および氷厚の平均・標準偏差と共に描いたものを図 4-1 に示す。航跡は水色の線で示し、青色の部分は砕氷船エスコート区間を示す。



2011 年 10 月 15 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路

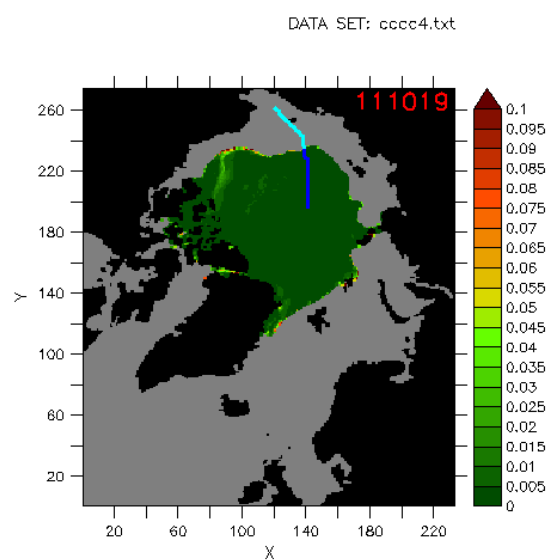
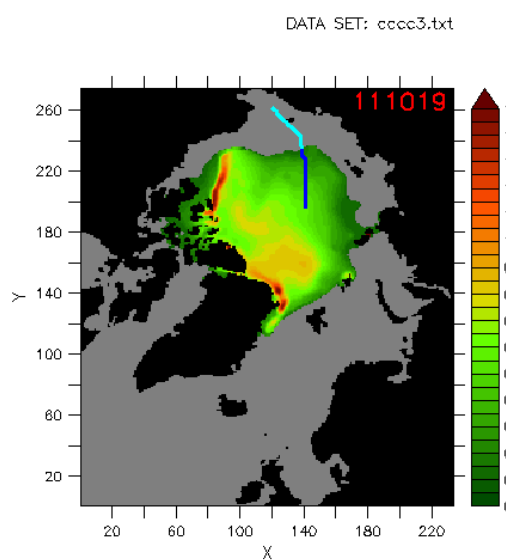
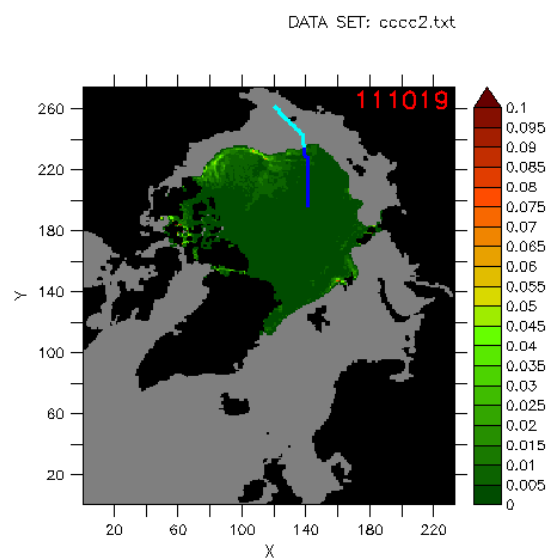
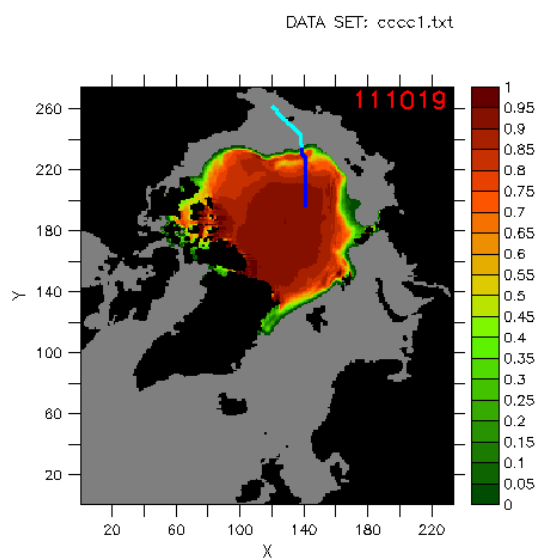
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 17 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路（続き）

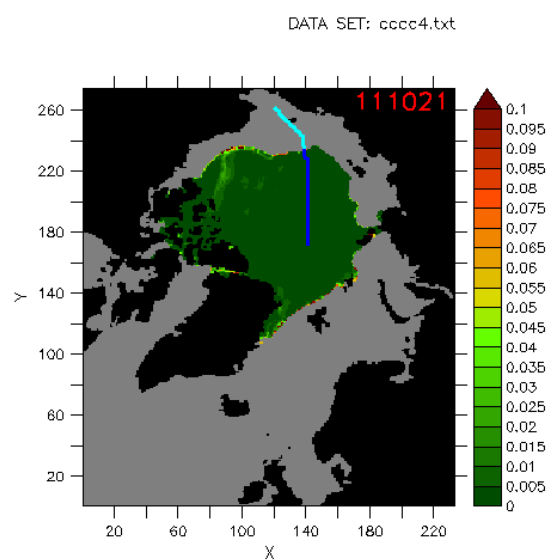
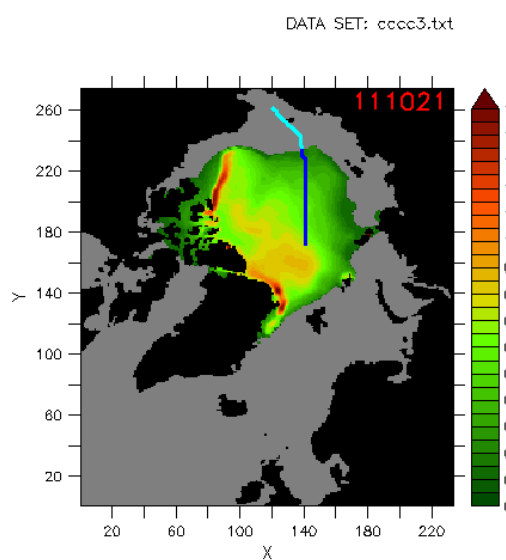
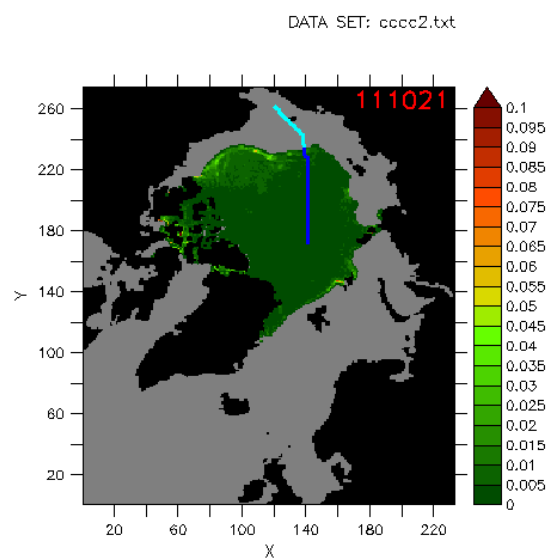
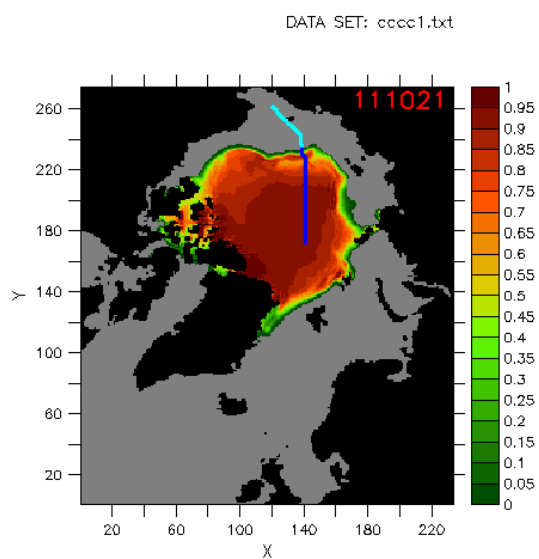
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 19 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路 (続き)

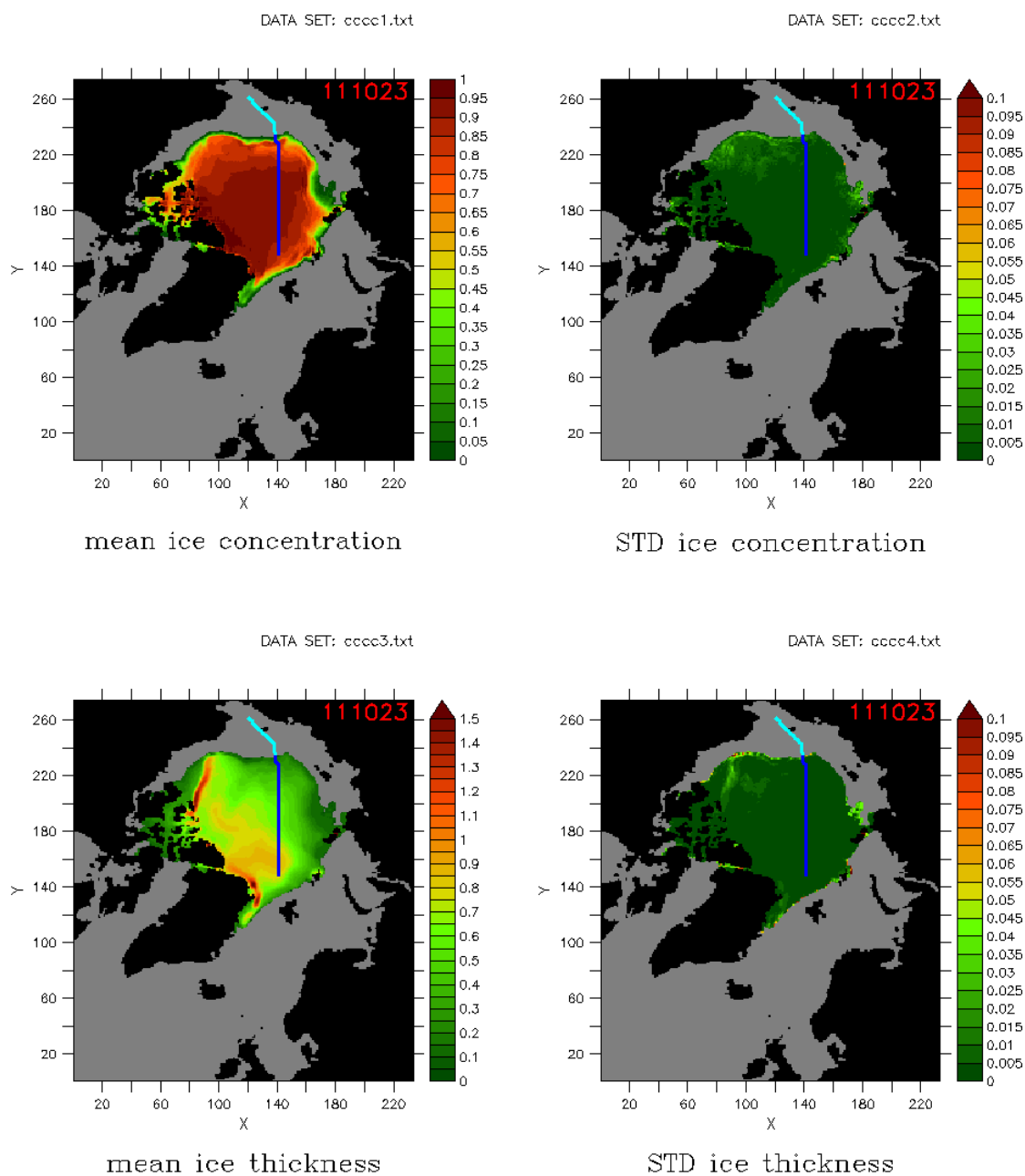
上 : 密接度 (左 : 平均値、右 : 標準偏差)、下 : 氷厚 [m] (左 : 平均値、右 : 標準偏差)



2011 年 10 月 21 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路（続き）

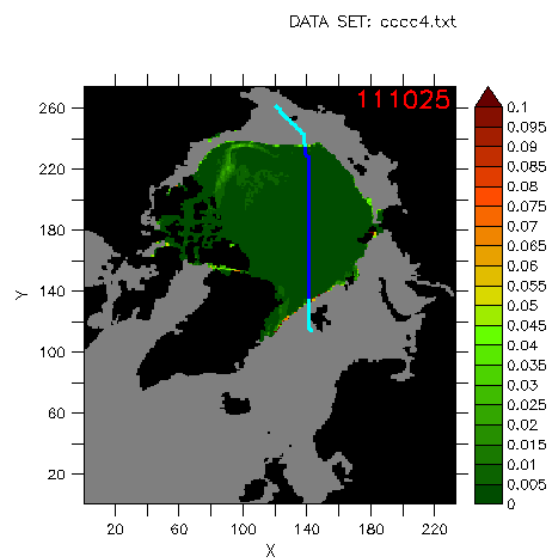
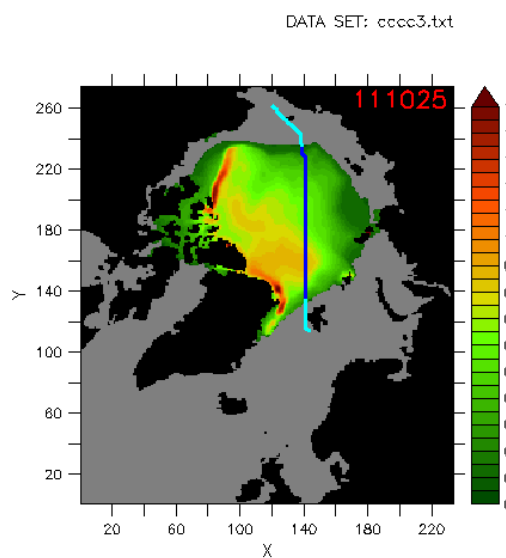
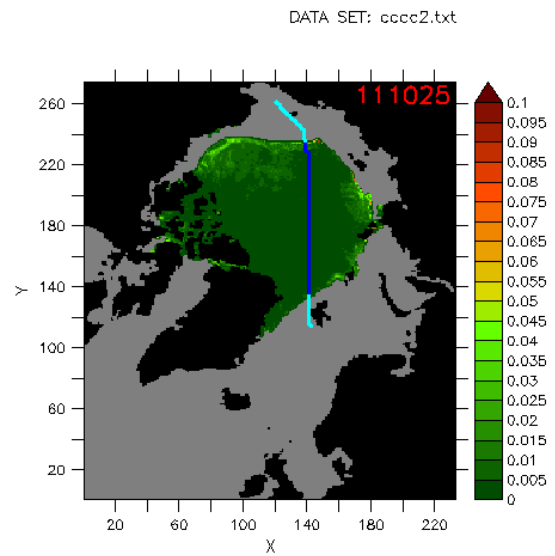
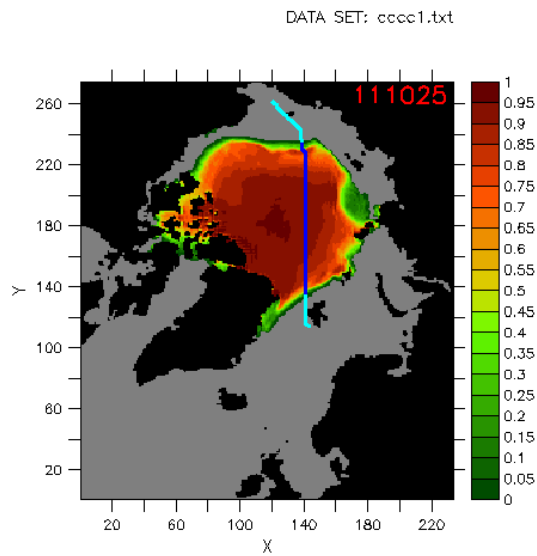
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 23 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路（続き）

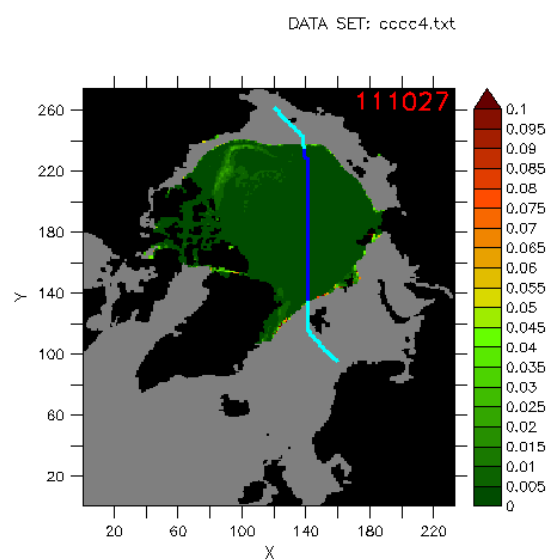
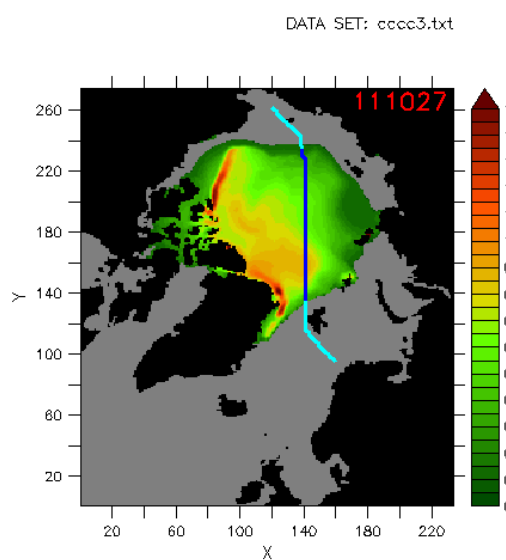
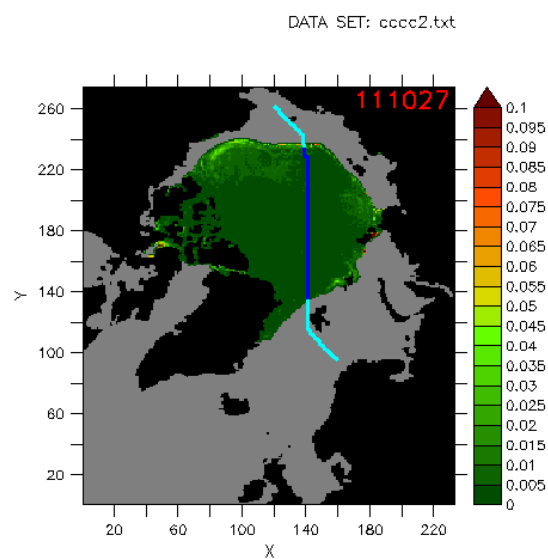
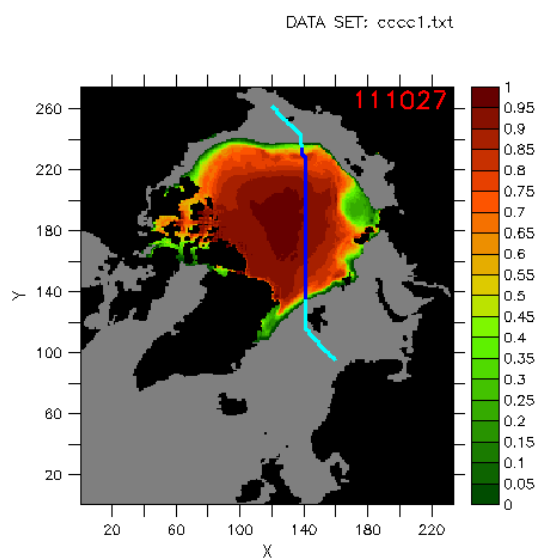
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 25 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 27 日

図 4-1 距離のみを考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）

距離のみを考慮したため、氷の厚さに関わらず大圏航路に近い航路を通っており、航路探索が正しく行われていることが分かる。航行距離は2,482nm、航行時間は291.5時間であった。

また、航路上の海氷密接度、海氷厚、Ice Index、船速の変化を図 4-2 に示す。高密度度かつ1m 近い厚さの海氷中を航行していることもあり、Ice Index、船速ともに低い値になっていることが分かる。

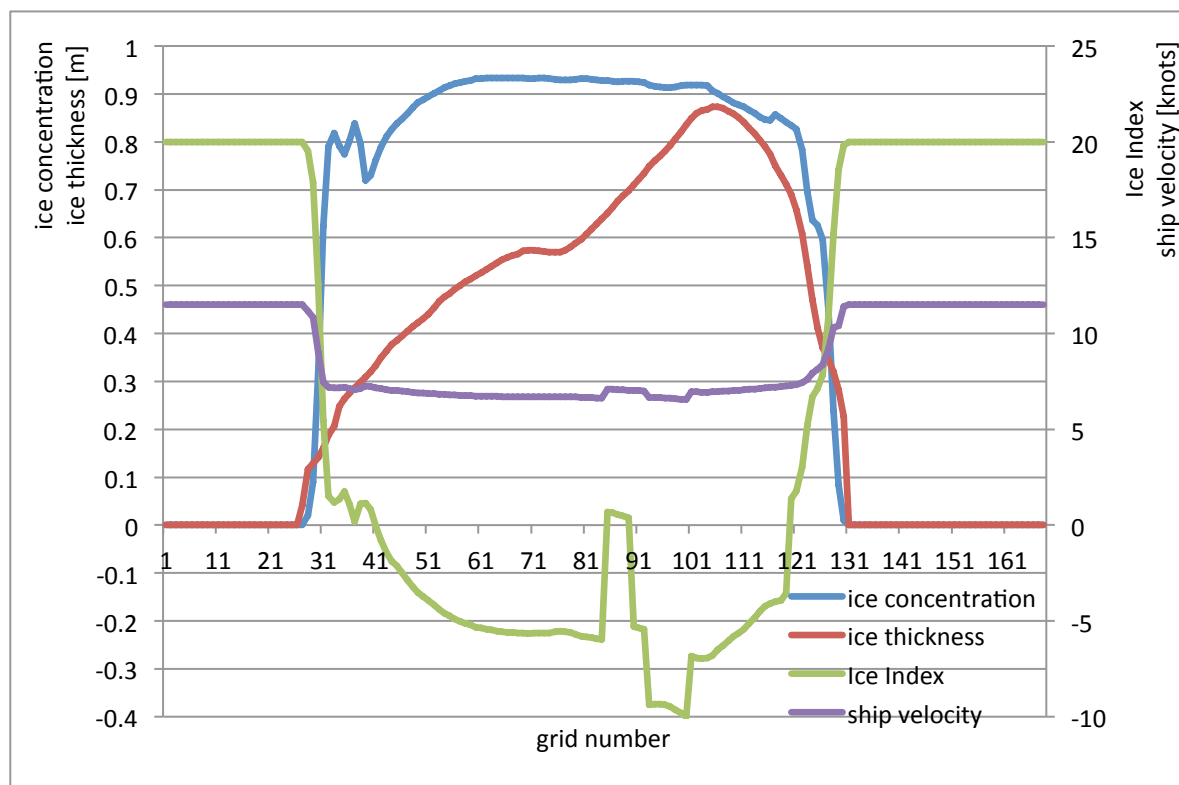
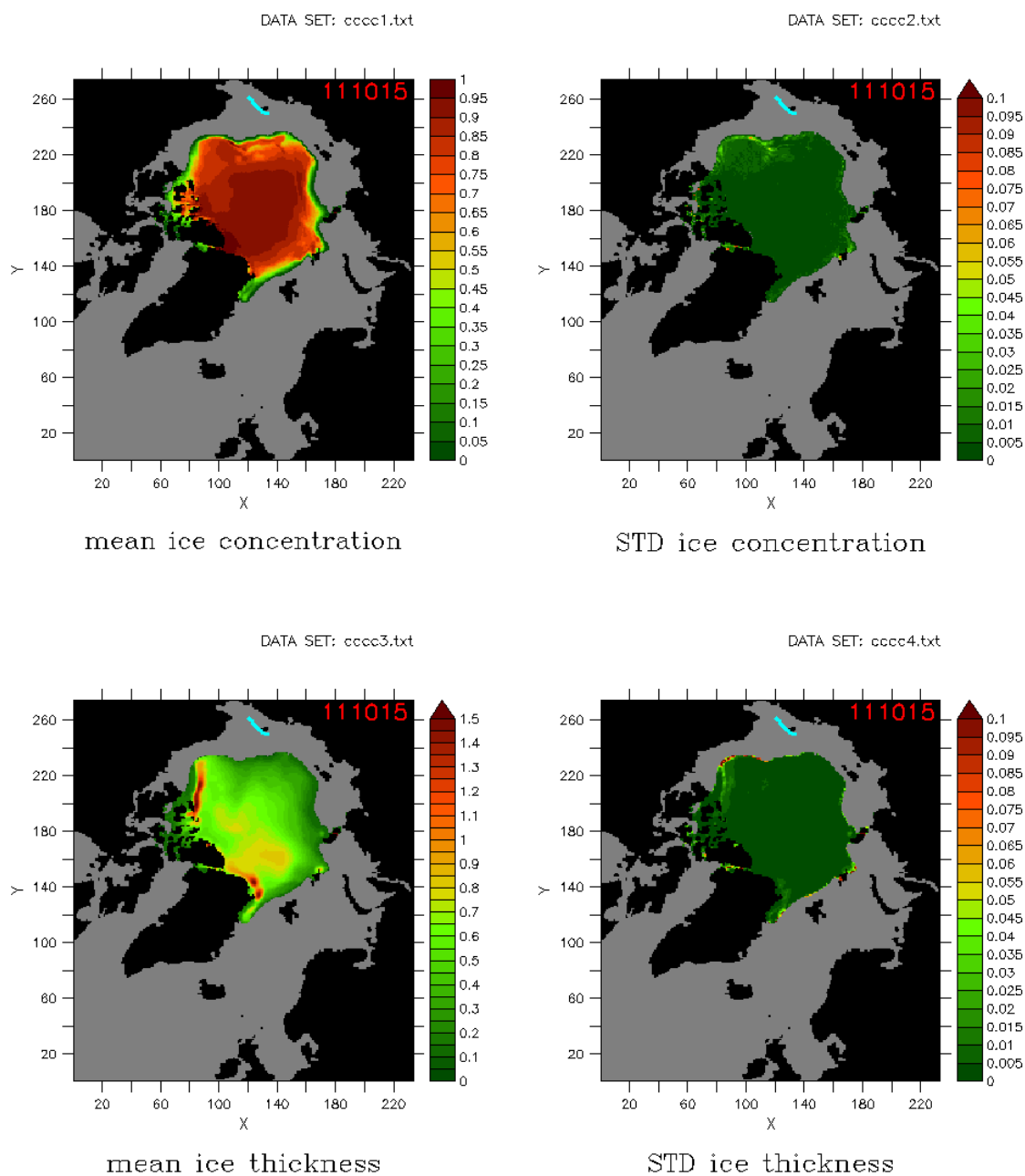


図 4-2 距離のみを考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化

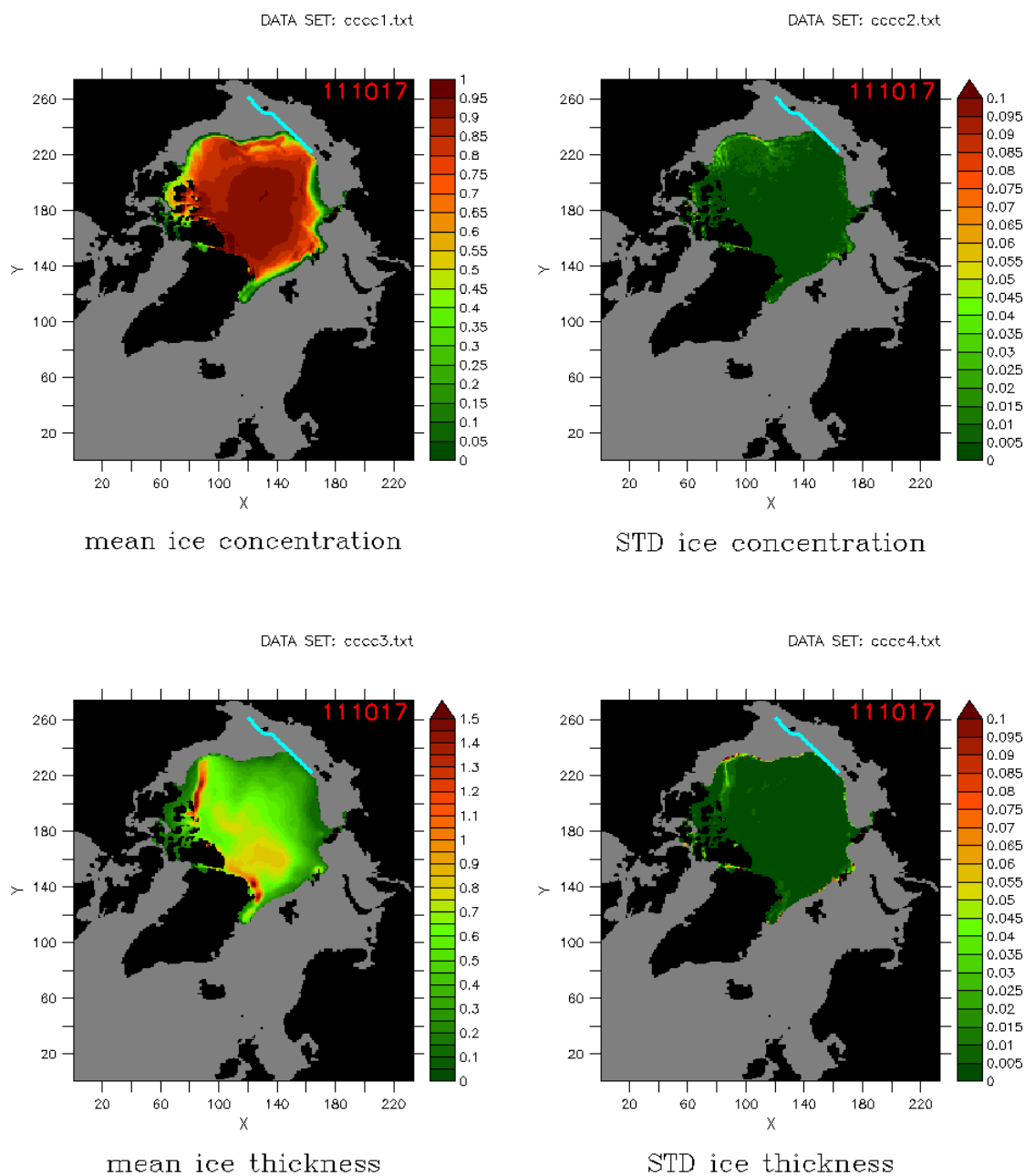
次に、 $w_1 = 1, w_2 = 100$ として、距離に加えて時間を考慮して最適航路を求めた。航行距離は 10^3 [nm]のオーダー、航行時間は 10^2 [hours]のオーダーなので、航行時間に対する重み付けを距離に対するその 100 倍にすることによって、航行時間をより重視する探索を行うことが出来る。航路探索結果を一日おきに密接度および氷厚の平均・標準偏差と共に描いたものを図 4-3 に示す。航跡は水色の線で示し、青色の部分は砕氷船エスコート区間 ($\text{Ice Index} \leq 18$) を示す。



2011 年 10 月 15 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路

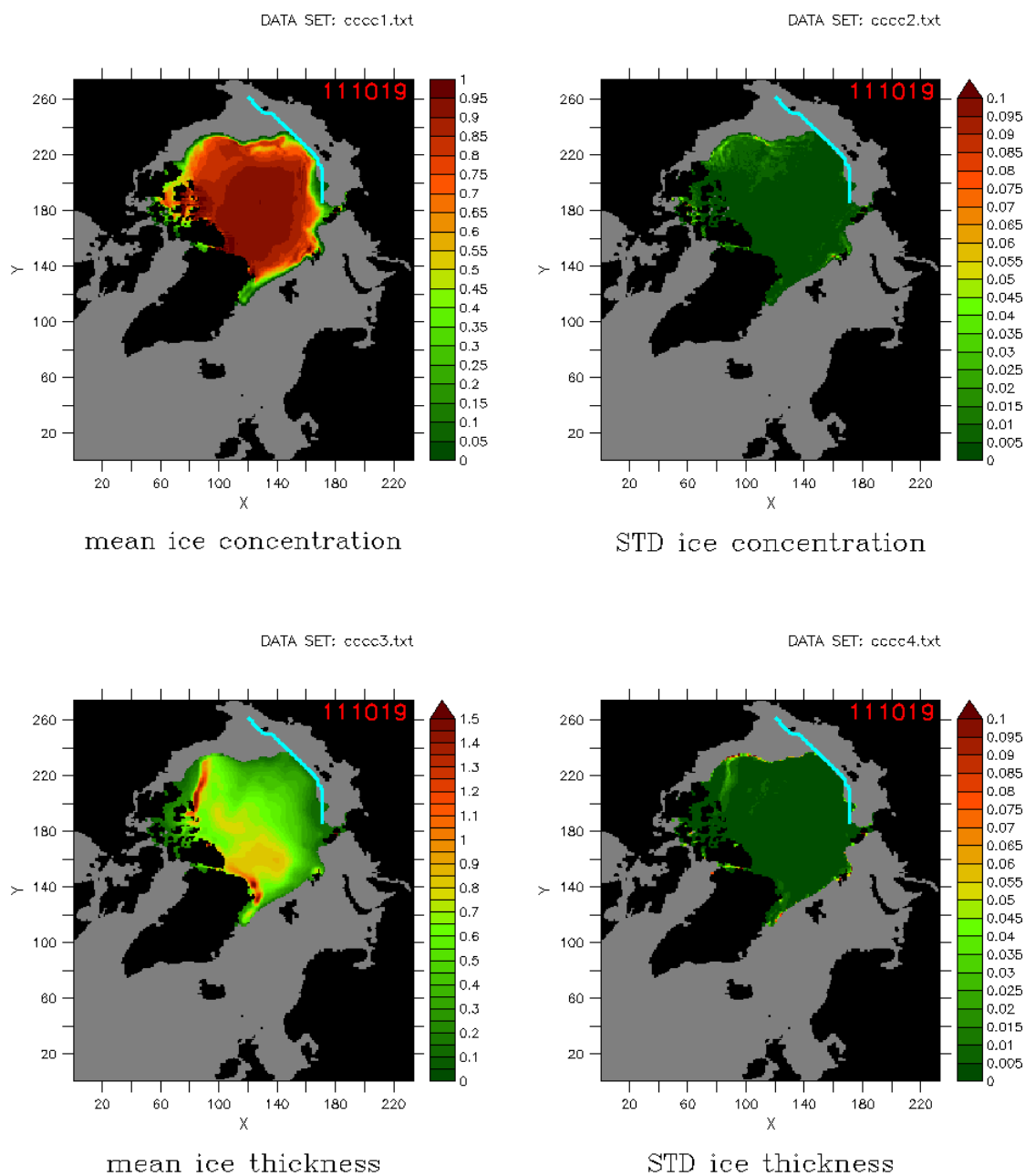
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 17 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路（続き）

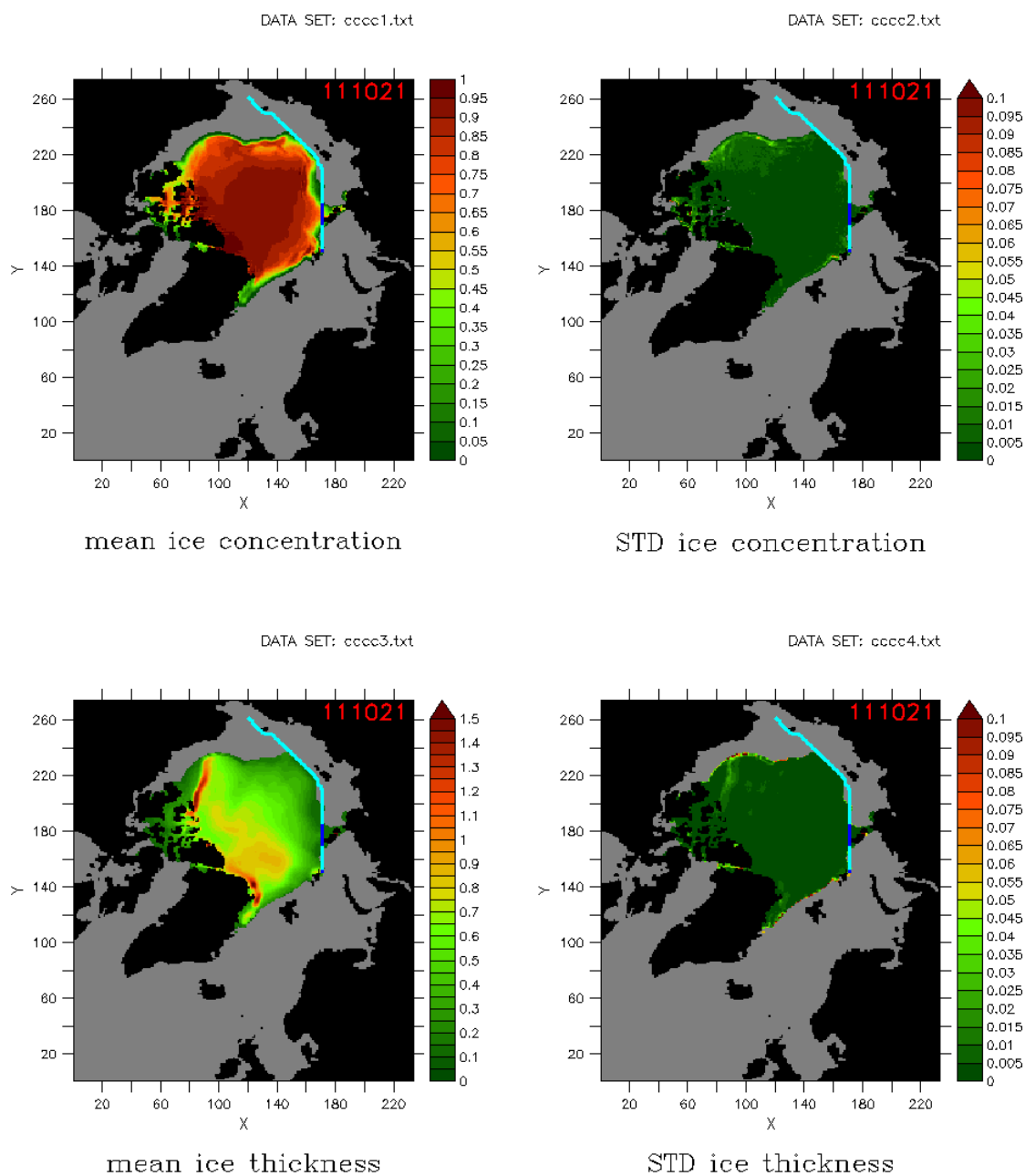
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 19 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路（続き）

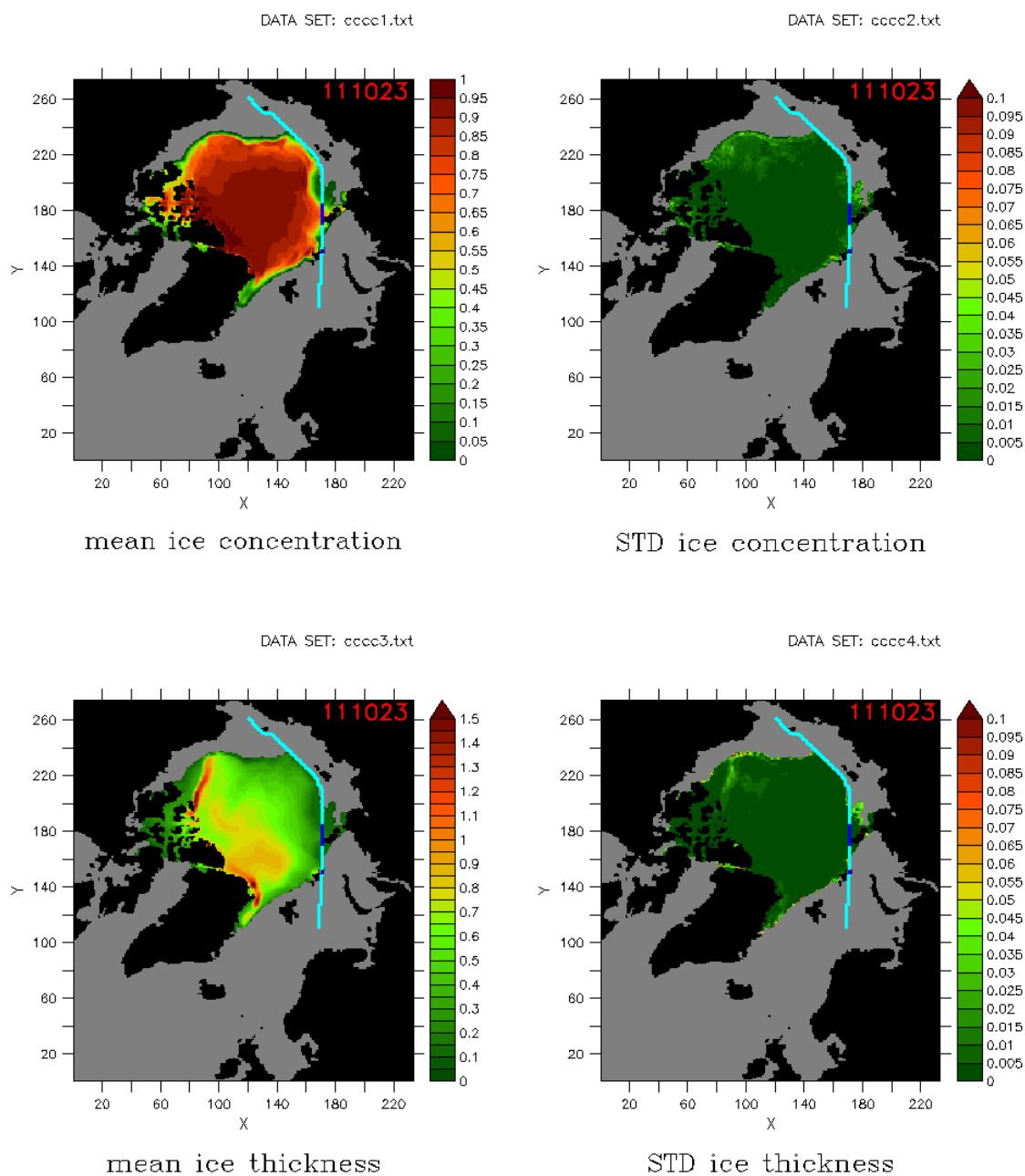
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 21 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路（続き）

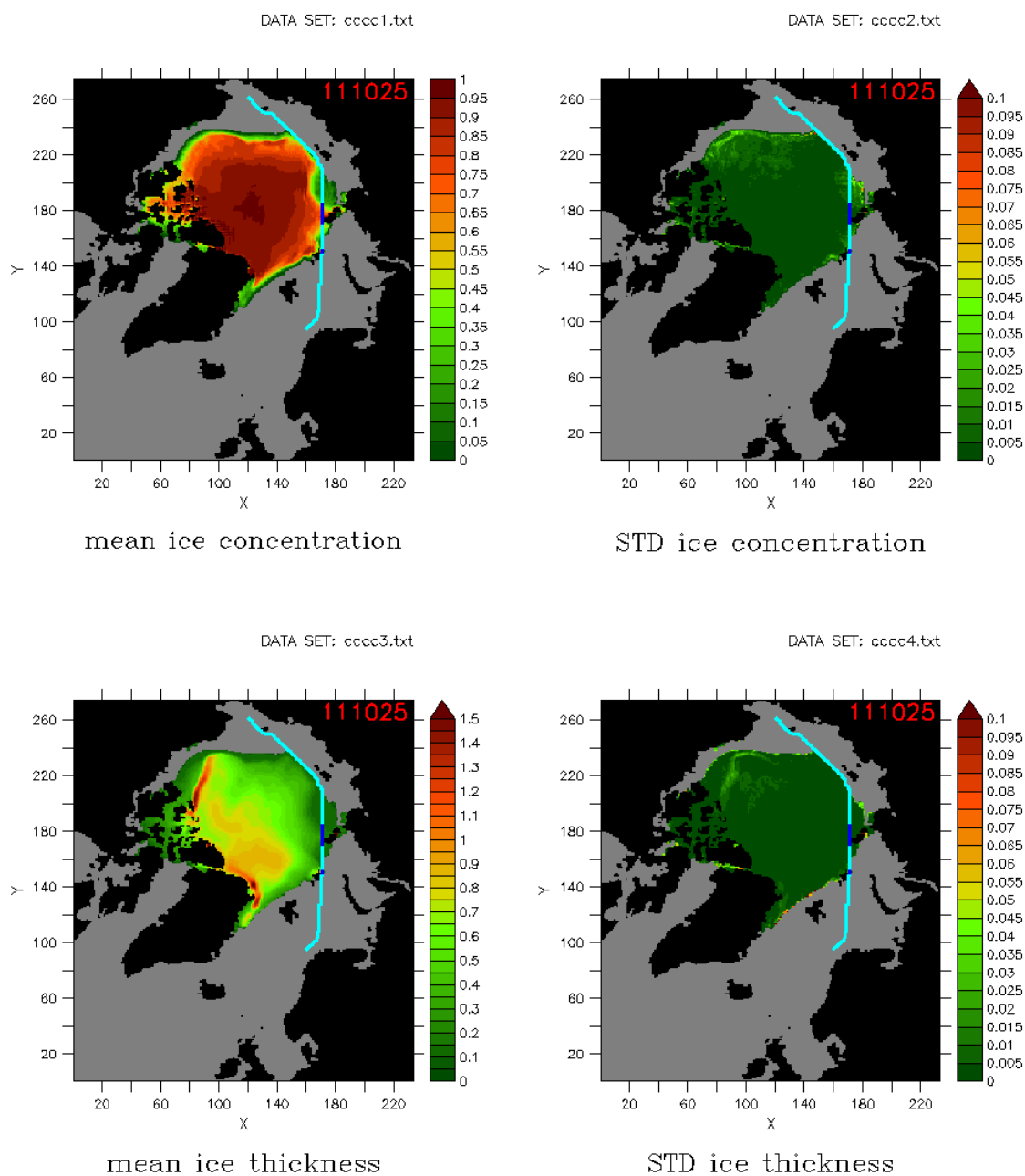
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 23 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 25 日

図 4-3 距離・時間を考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）

距離に加えて時間を考慮したことで、海氷域を避けるような航路になった。現実的に妥当といえる航路をとっており、航行距離は 2,641nm、航行時間は 237.4 時間であった。距離のみを考慮した場合に比べ、航行距離は長くなっているが、航行時間は大きく短縮された。

また、航路上の海氷密接度、海氷厚、Ice Index、船速の変化を図 4-4 に示す。航行時間の短い航路を探索した結果、海氷域を通らざるを得ない場合も、Ice Index が負になるような厳しい氷況は避けており、密接度・氷厚ともにある程度の範囲におさえることで、船速の低下を最小限に抑えたことが分かる。

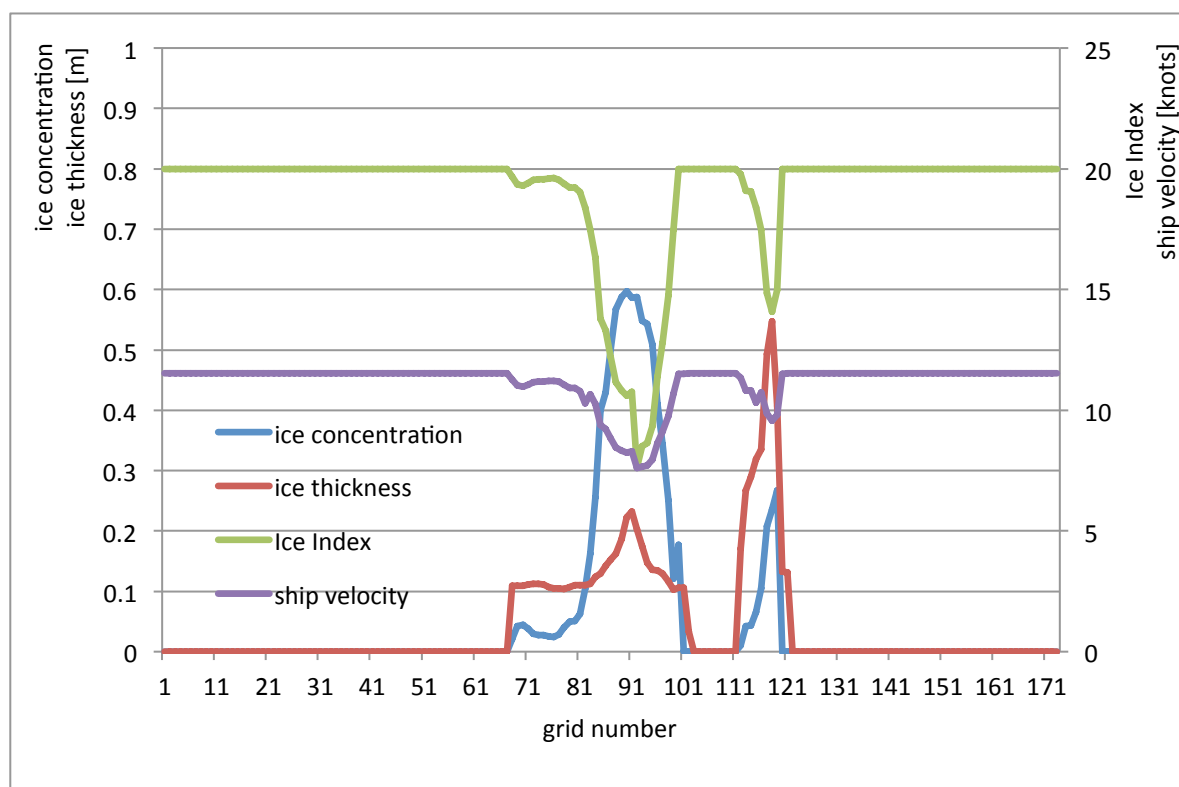


図 4-4 距離・時間を考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化

実際に船が航行する際、航路を決めるための氷況データは数日から 10 日ほど先の短期予報（すなわち数値モデルによる計算結果）によってもたらされる。しかしながら、モデルのアンサンブル平均を決定論的に捉えるのは適切ではなく、計算結果の持つバラつきを考慮して検討する必要がある。本研究では、いくつかのアンサンブル予測計算結果がある時、そのバラつきを考慮して航路探索を行うことを試みた。

2.1.で述べたように、本研究では海氷数値モデル Ice-POM によるアンサンブル予測計算結果に切断正規分布を仮定している。このとき、海氷厚もある広がりを持った分布となっているので、平均的には砕氷能力を超えない厚さの海氷が予想されていても、実際にはそれより厚い可能性がある。その場合、船はスタックしてしまうことになり、これは避けるべき事態である。そこで、この「氷厚が砕氷能力を超えて厚い確率」を失敗率（failure rate）と呼び、航路探索の際に考慮した。模式的に表すと図 4-5 のようになる。

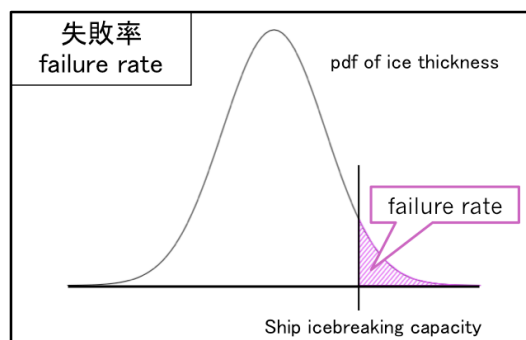
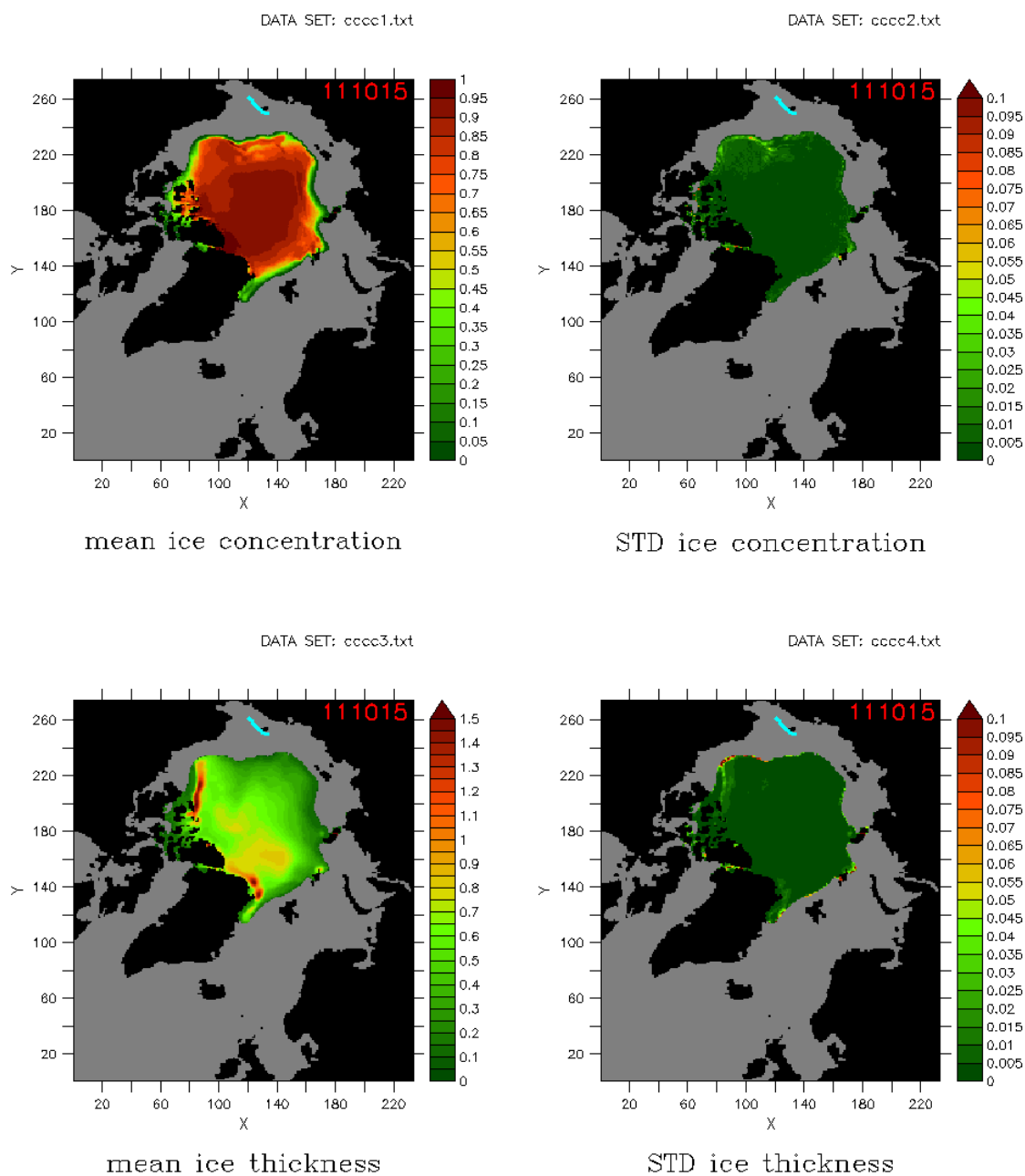


図 4-5 失敗率

正規分布を仮定した氷厚の pdf が図のようになっているとき、船が砕氷可能な厚さを超えて厚い海氷である確率は図の紫色の部分の面積にあたる。これを失敗率とし、航路探索の際に考慮した。すなわち、航路探索の際の評価関数を以下のようにした。

$$\text{cost function} = w_1 \times (\text{distance [nm]}) + w_2 \times (\text{time [hours]}) + w_3 \times (\text{failure rate}) \quad (33)$$

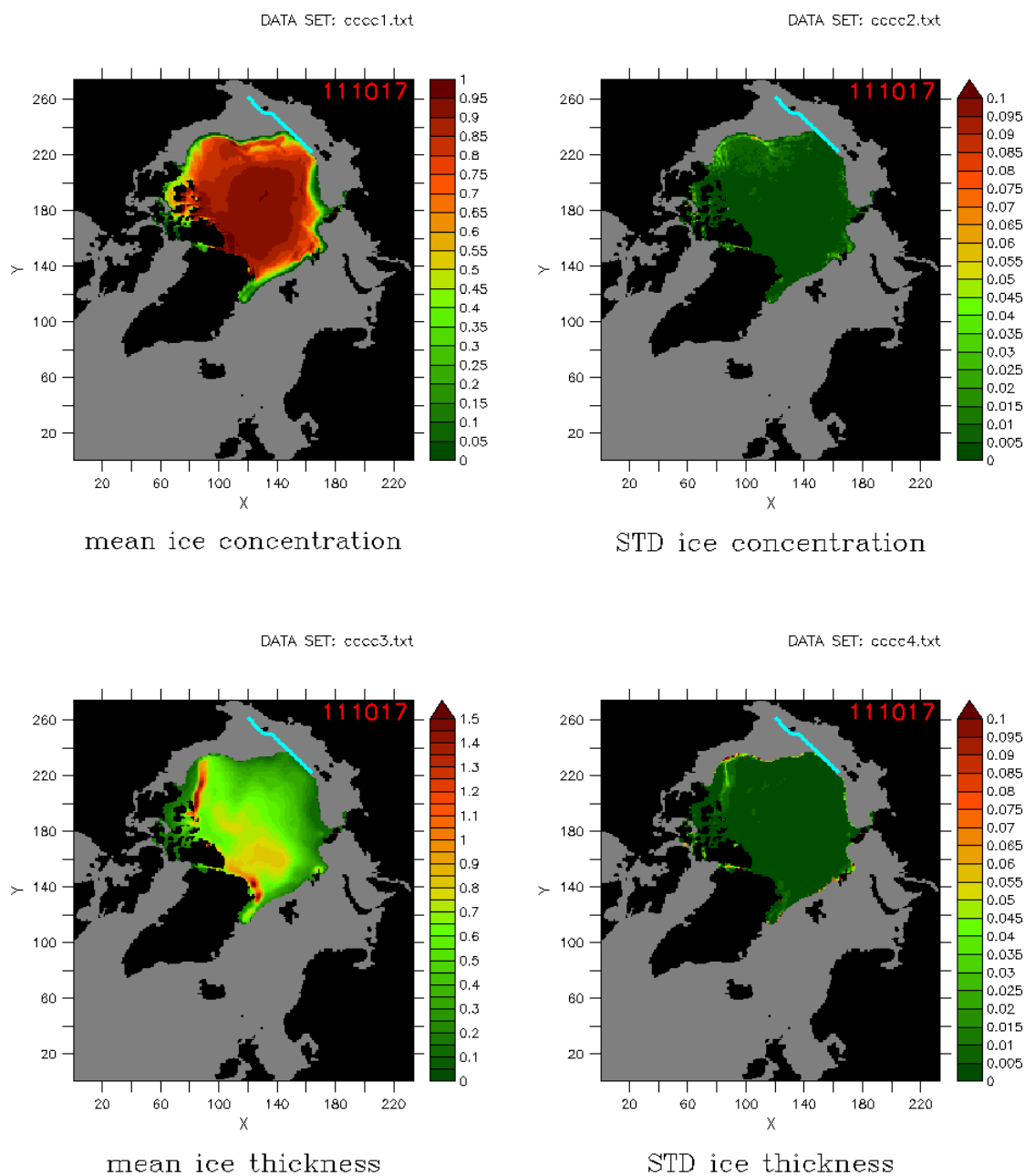
距離のみを考慮した場合および距離・時間を考慮した場合と同じ設定で、 $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$ として、失敗率を重視する航路を求めた。航路探索結果を一日おきに密接度および氷厚の平均・標準偏差と共に描いたものを図 4-6 に示す。航跡は水色の線で示し、青色の部分は砕氷船エスコート区間（Ice Index ≤ 18 ）を示す。



2011 年 10 月 15 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路

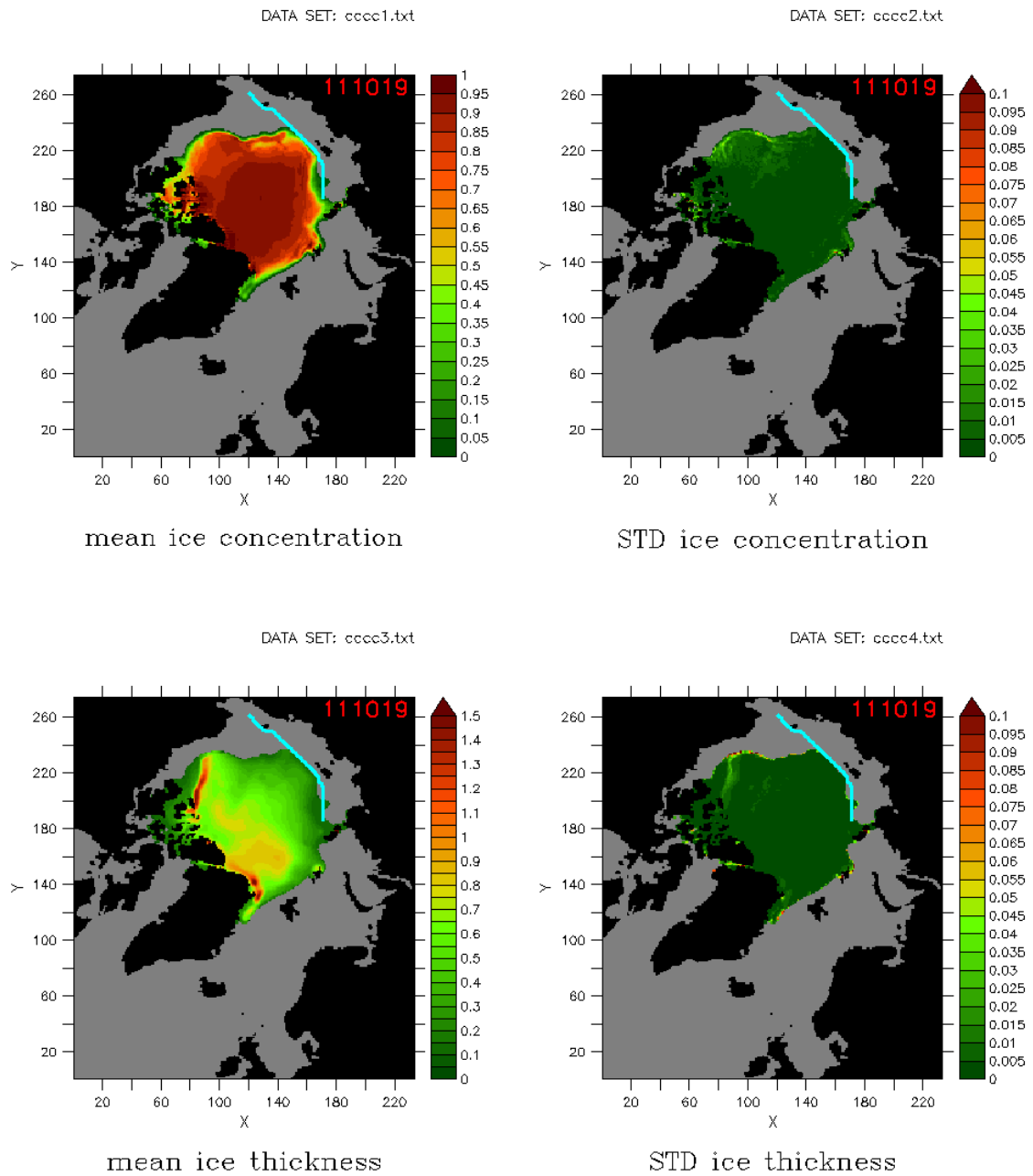
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 17 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路（続き）

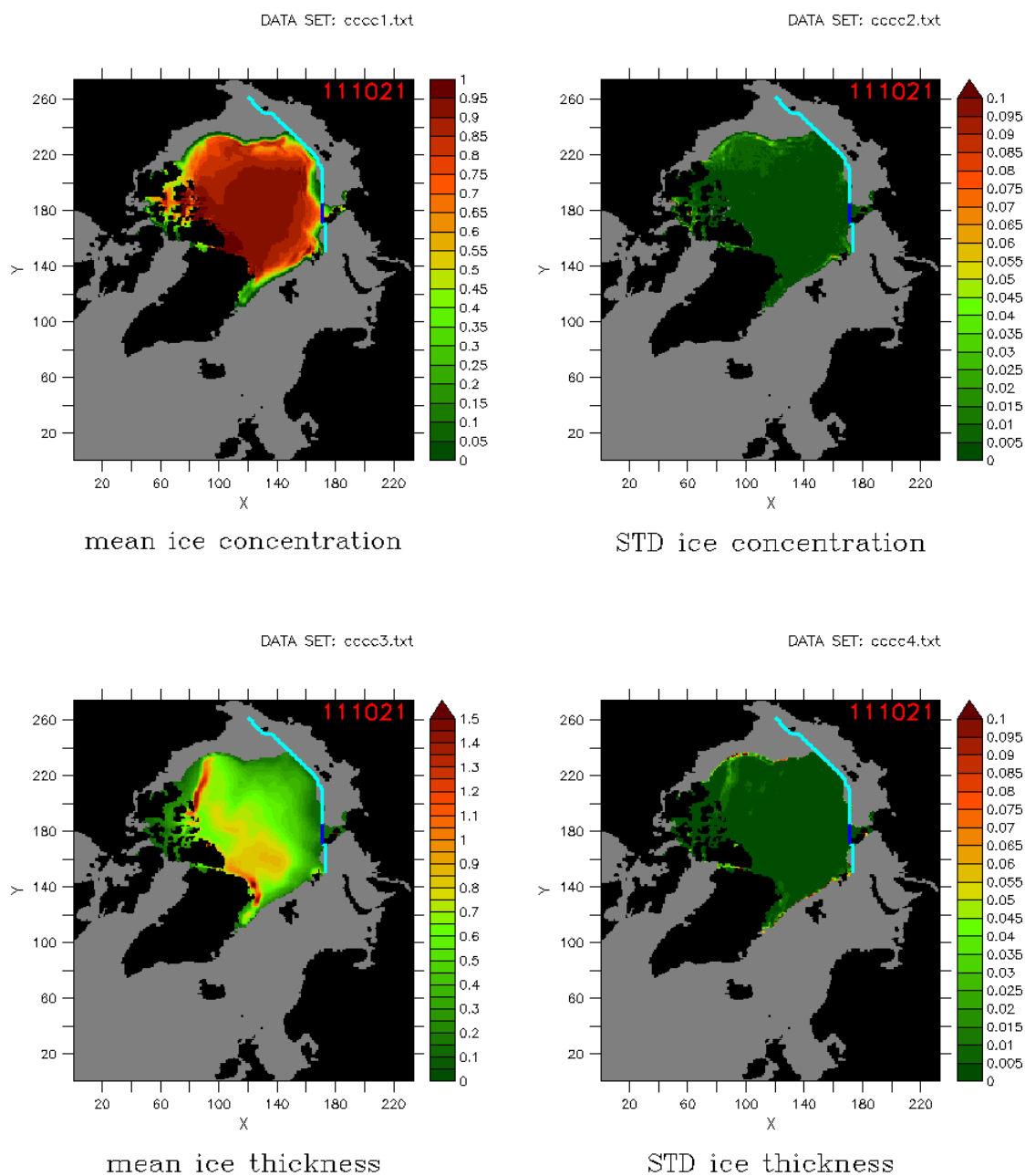
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 19 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路（続き）

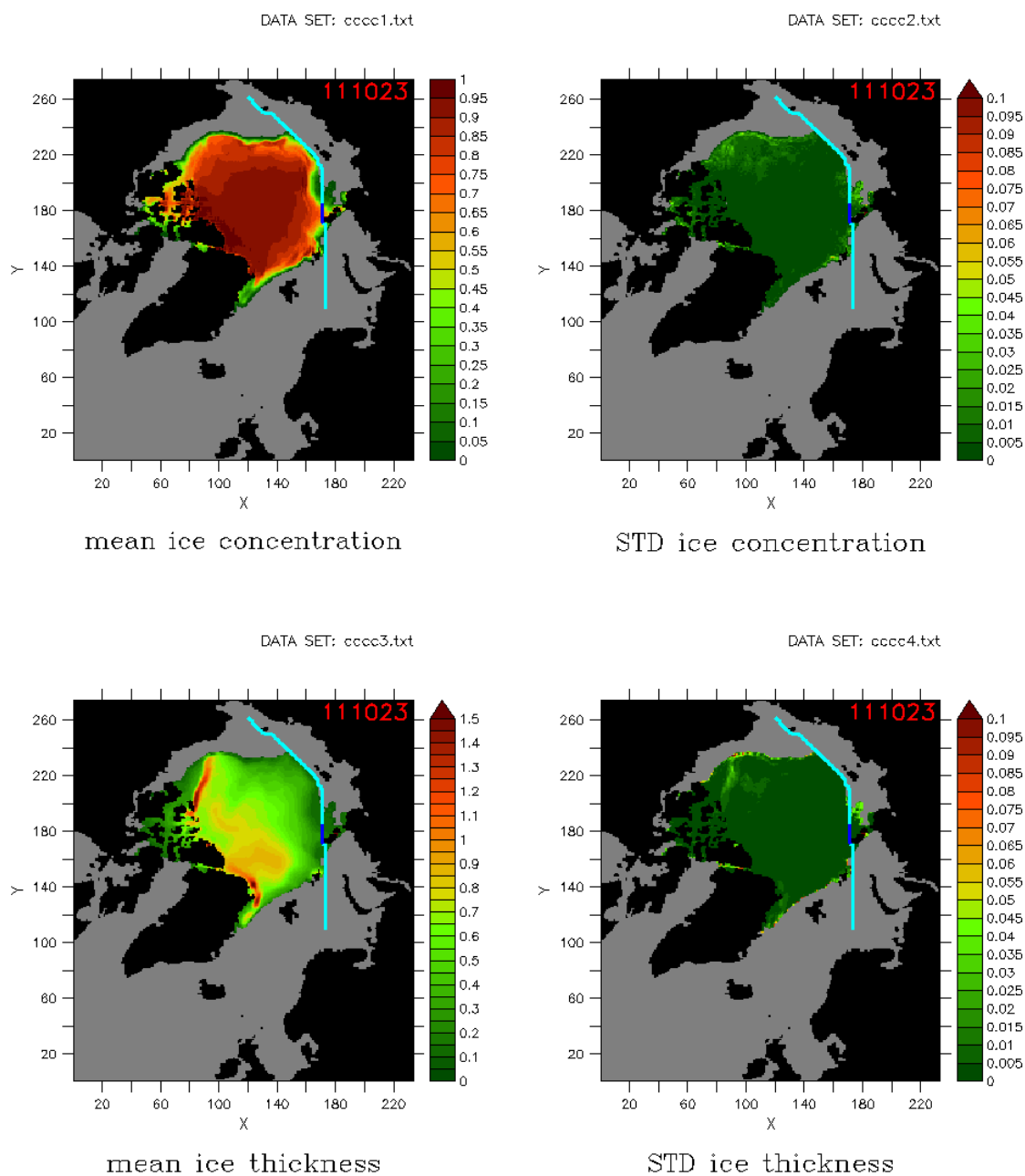
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 21 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路（続き）

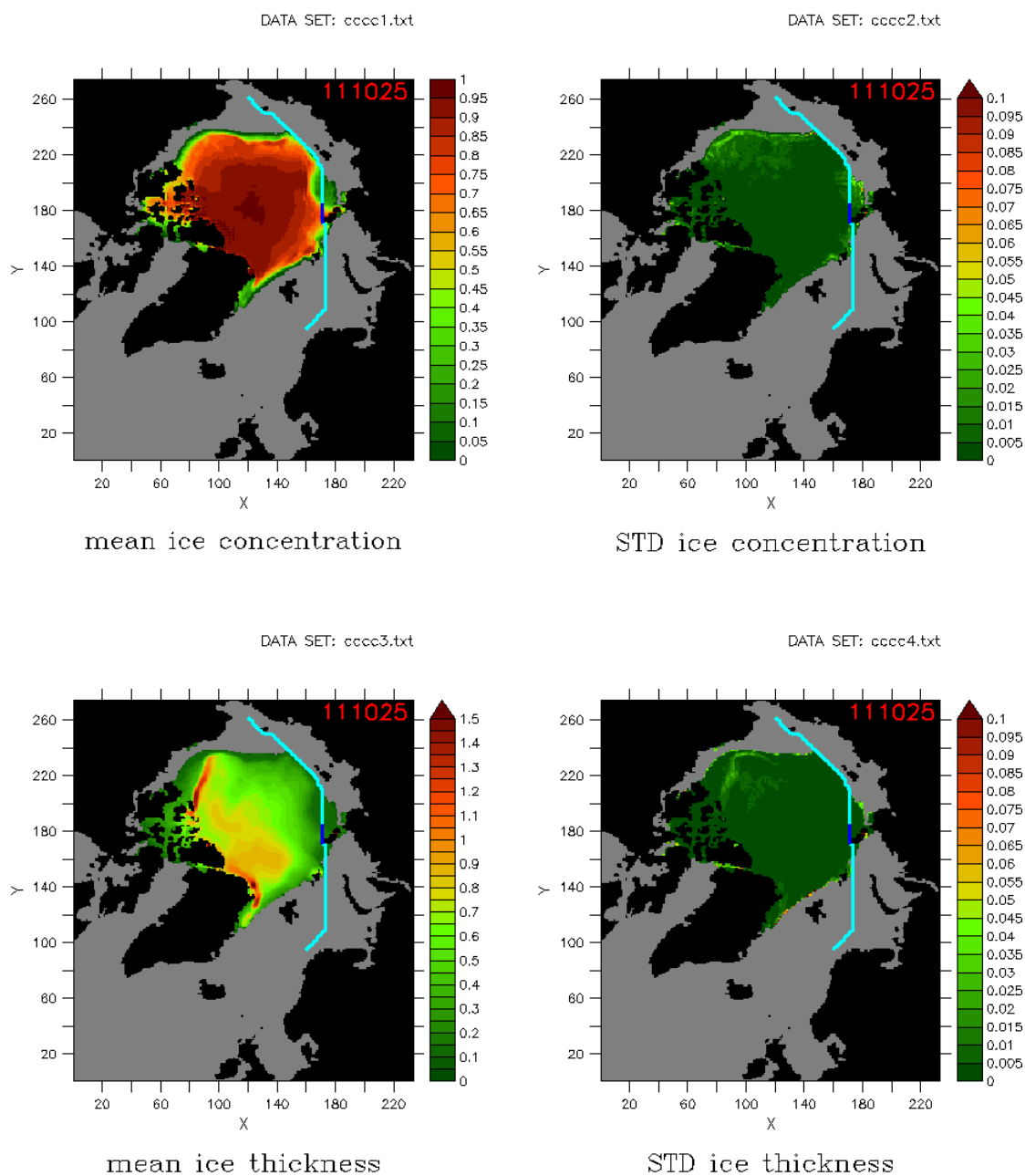
上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 23 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）



2011 年 10 月 25 日

図 4-6 距離・時間・失敗率を考慮した最適航路（続き）

上：密接度（左：平均値、右：標準偏差）、下：氷厚 [m]（左：平均値、右：標準偏差）

失敗率を考慮したことで、海氷データの不確かさが大きい海域を避けるようになったと考えられる。航行距離は 2,663nm、航行時間は 238.0 時間と、失敗率を考慮しない場合に比べて距離・時間ともに増加したものの、安全性という観点からはより良い航路になったと考えられる。失敗率を考慮したことによる航路の変化を拡大して図 4-7 に示す。失敗率を考慮することで、海氷データの不確かさの大きい島の近くを避け、安全性を優先した航路となっている。

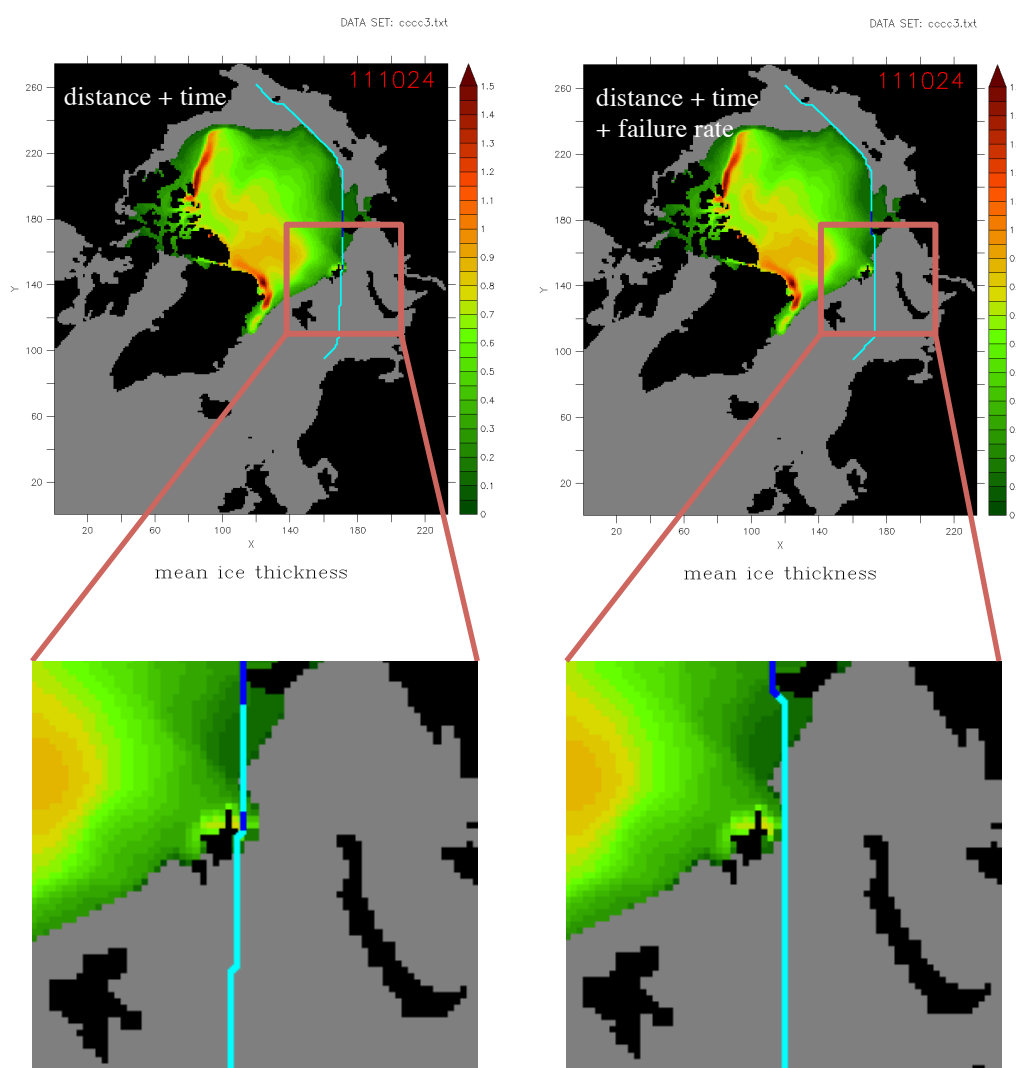


図 4-7 失敗率の考慮による航路の変化
(左：距離・時間、右：距離・時間・失敗率を考慮。色は平均氷厚[m])

また、航路上の海氷密接度、海氷厚、Ice Index、船速の変化を図 4-8 に示す。不確かさの大きな島の近くを避けたことで、結果として失敗率を考慮しない時に通っていた 0.6m 近い海氷を避け、全体として減速の少ない航路になっていることが分かる。最短時間航路ではないものの、安全性を考慮した最適航路と呼べるのは失敗率を考慮した際の探索結果であると考えられる。

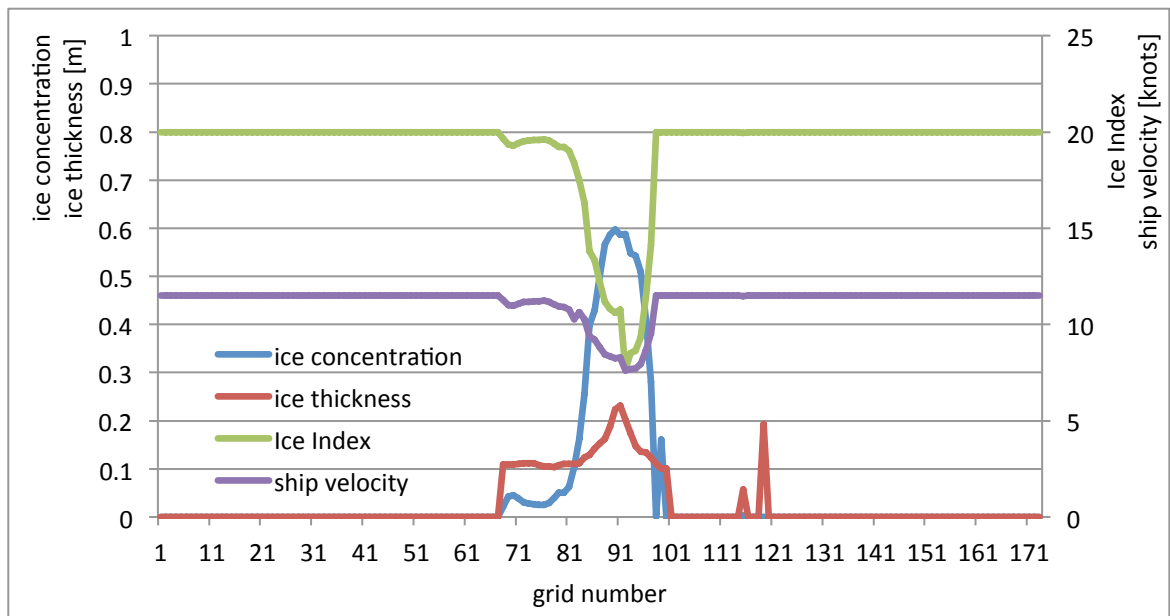


図 4-8 距離・時間・失敗率を考慮した際の航路上の氷況、Ice Index、船速の変化

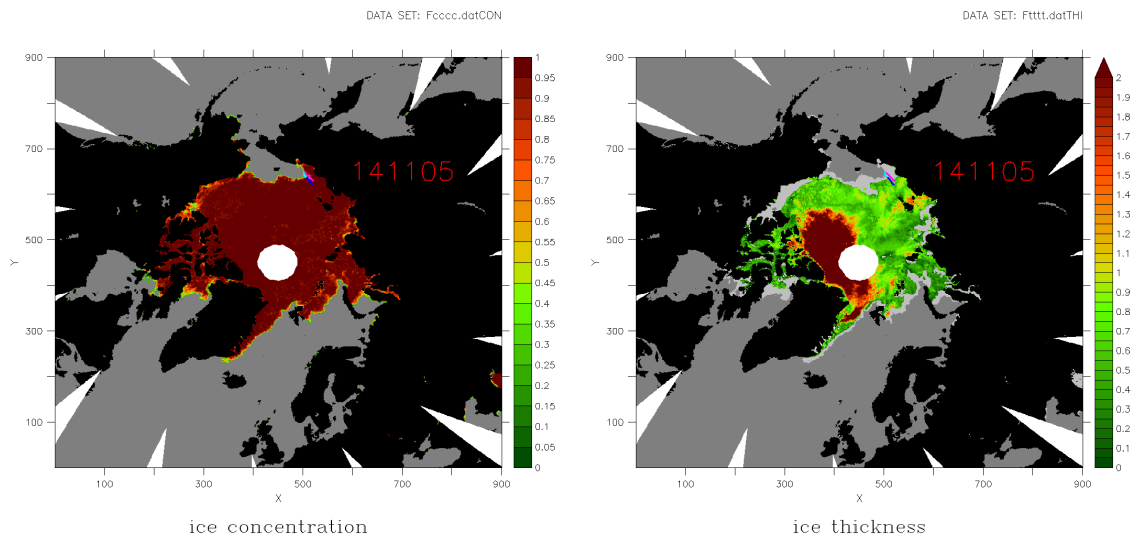
4.2. 実航行データとの比較

最適航路探索手法の性質を検討するため、AIS による実航行データの航路と、最適航路探索による航路の比較検討を行った。最適航路探索は AMSR2 のデータを用いて行い、距離・時間を最小化する航路を探索した。船 A から船 C について、それぞれ 1 つ、ある程度の距離を航行していて、なおかつ AMSR2 氷厚のエラーが比較的少ない秋季から冬季の航海を選び、出発点と到着点を合わせて最適航路探索を行った。以下、砕氷能力は 0.6m (ただし、Ice Index ≤ 18 の時は砕氷船エスコートを受けるものとし砕氷能力 1.5m)、評価関数は(32)式に対して $w_1 = 1, w_2 = 100$ とした。

$$\text{cost function} = w_1 \times (\text{distance [nm]}) + w_2 \times (\text{time [hours]}) \quad (32)$$

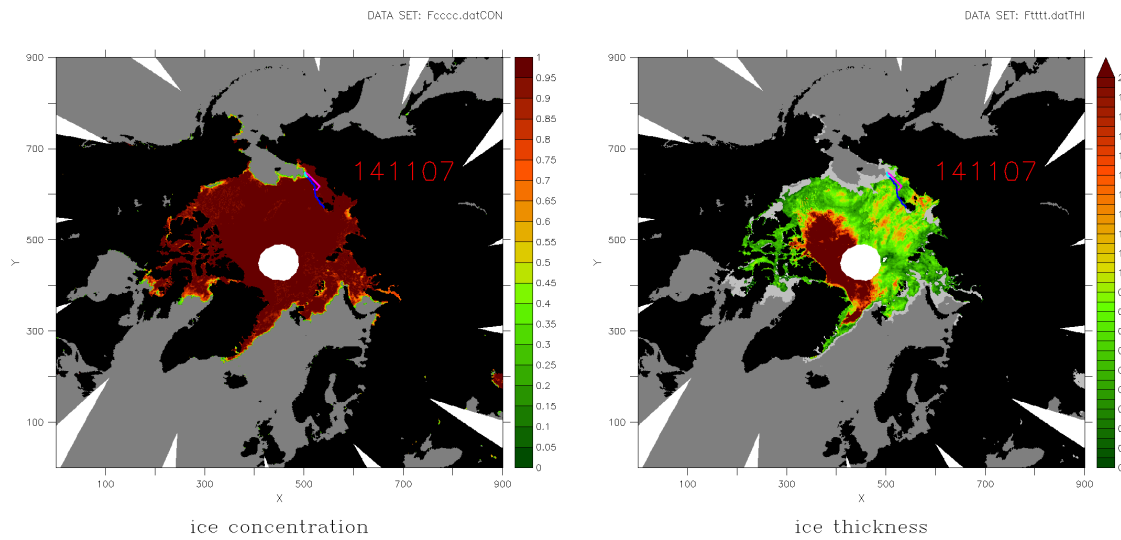
船 A の場合

2014 年 11 月 5 日に東シベリア海 Pevek 周辺を出発し、11 月 20 日にバレンツ海の西、Murmansk まで航行した航跡を取り上げた。喫水制限は船 A の喫水 9.5m に 1m の余裕をとって水深 10.5m とした。探索した最適航路および実航行データの航路を一日おきに図 4-9 に示す。紫色が実船の航路、水色が最適航路、青色はそのうち砕氷船エスコート区間 (Ice Index ≤ 18) を示す。

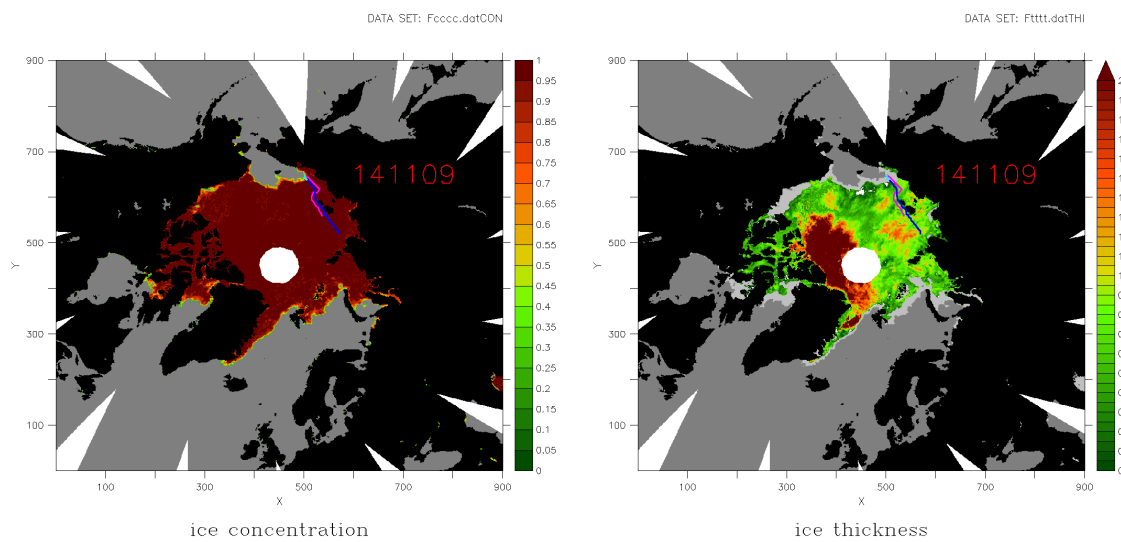


2014 年 11 月 5 日

図 4-9 船 A の実航行データと最適航路 (左 : 密接度、右 : 氷厚[m])

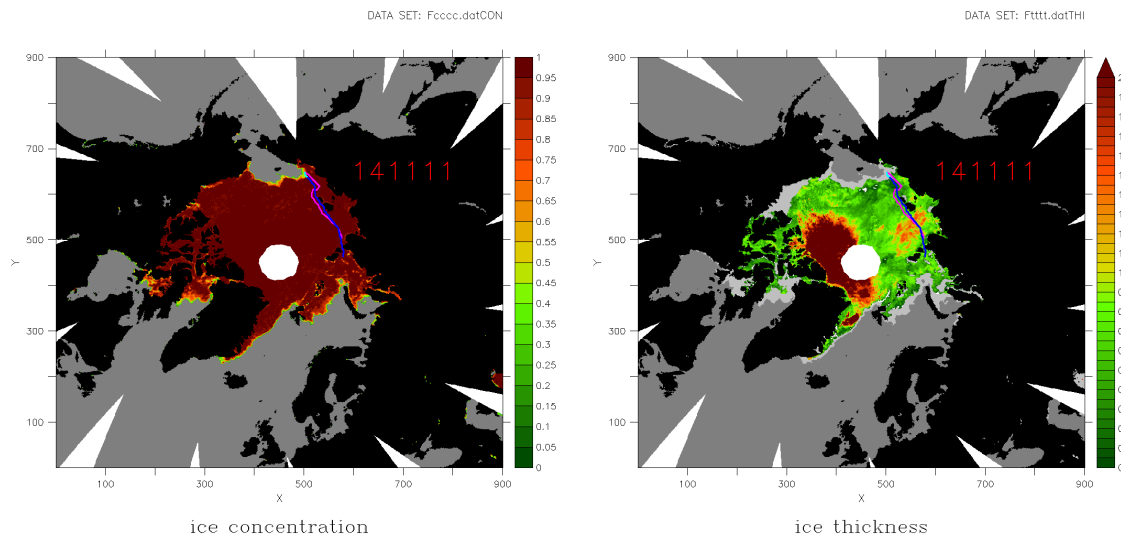


2014 年 11 月 7 日

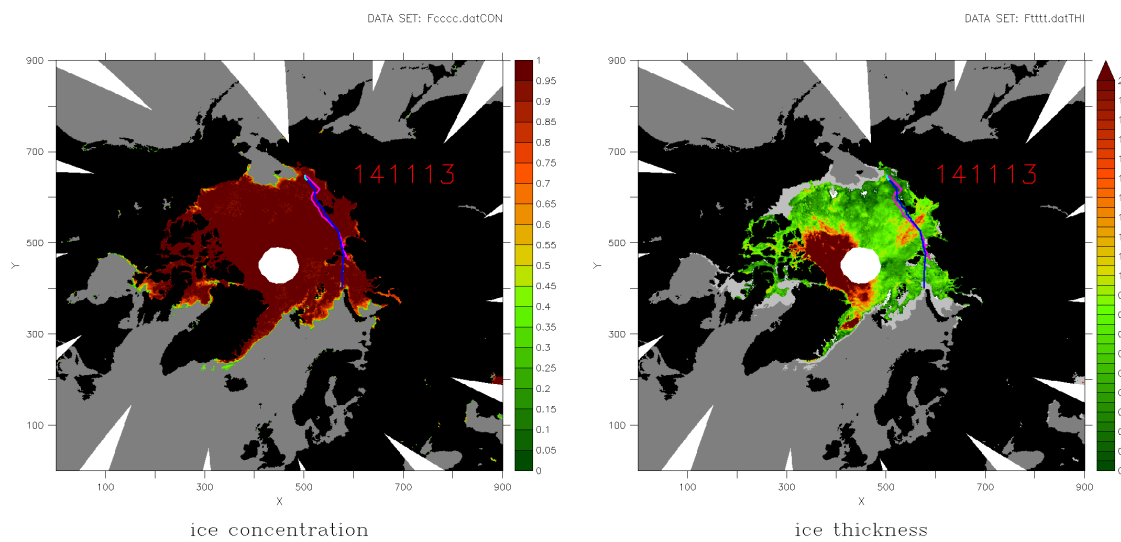


2014 年 11 月 9 日

図 4-9 船 A の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

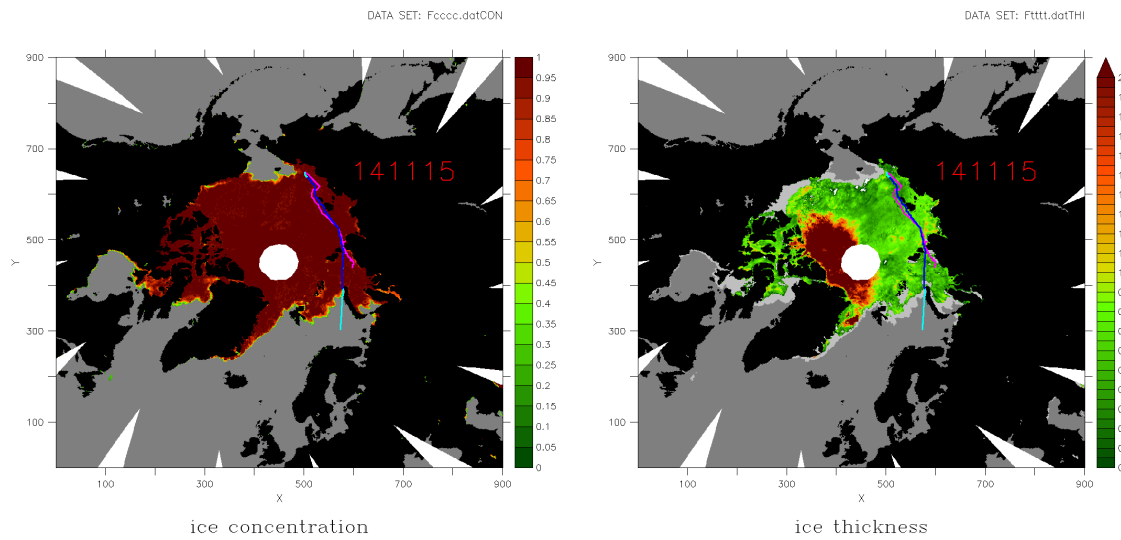


2014 年 11 月 11 日

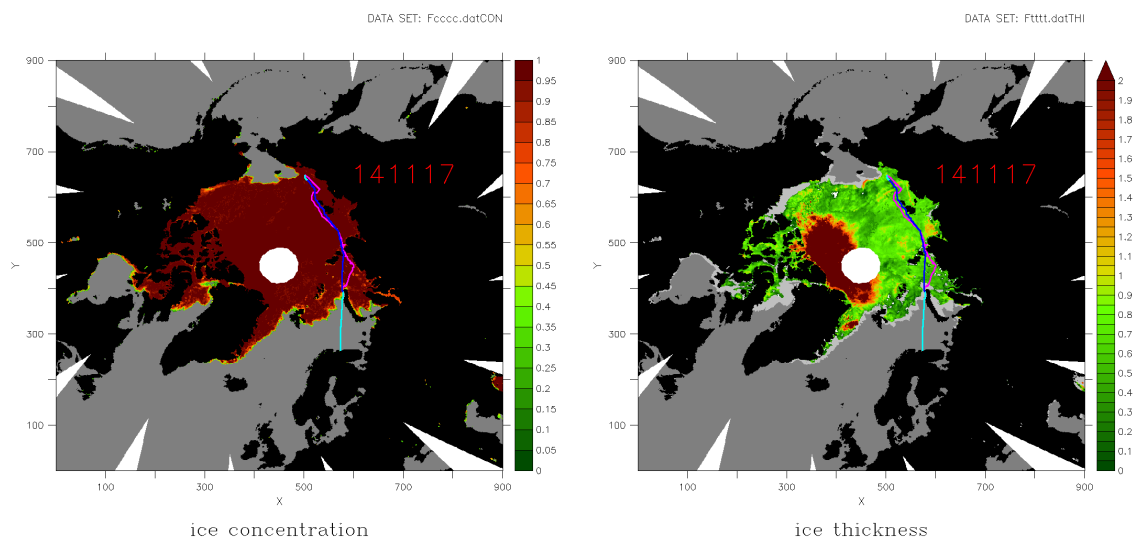


2014 年 11 月 13 日

図 4-9 船 A の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

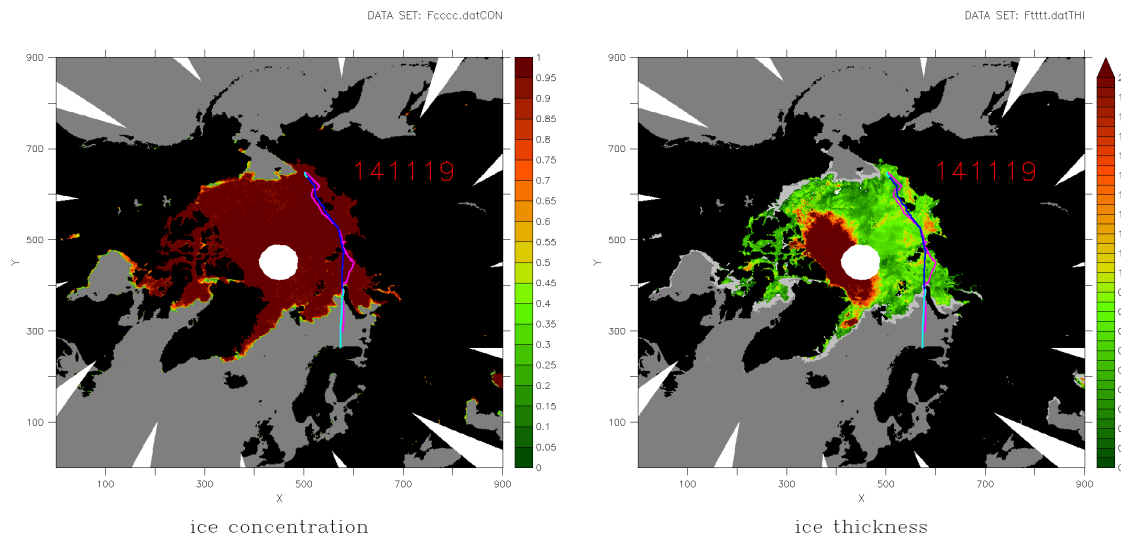


2014 年 11 月 15 日

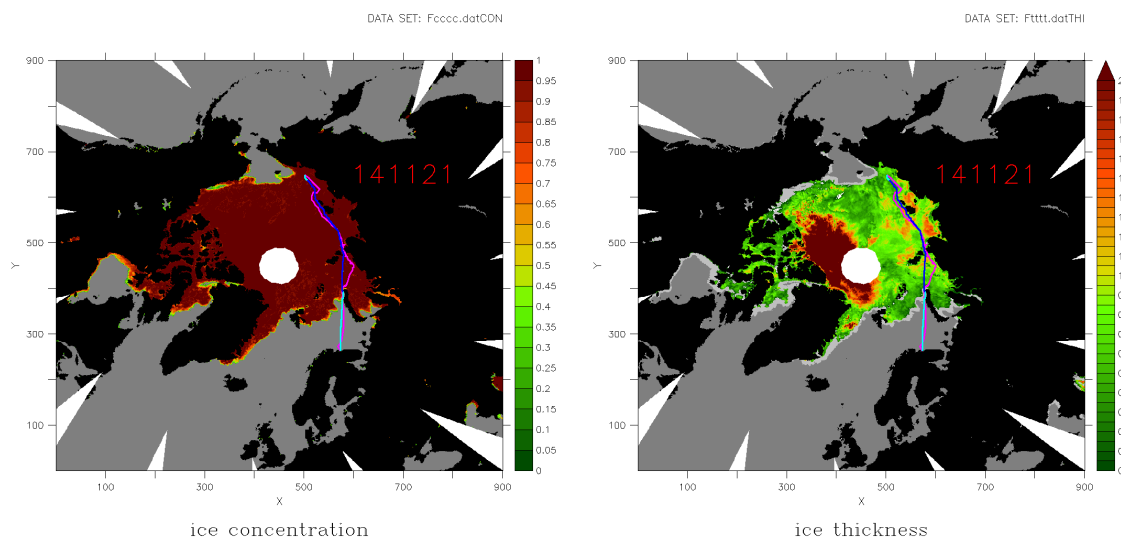


2014 年 11 月 17 日

図 4-9 船 A の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）



2014 年 11 月 19 日



2014 年 11 月 21 日

図 4-9 船 A の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

最適航路はおおむね実航行データと似た航路をとっており、最適航路探索手法が妥当な航路を探索できていることが分かる。それぞれの航行距離、航行時間を表 4-1 に示す。実航行データと比べると、最適航路は距離、時間ともに短縮していることが分かる。

表 4-1 船 A の実航行航路と最適航路の距離・時間

	Actual route	Optimized route (compared to actual one)
Distance	2,564 nm	2,299 nm (-10.3%)
Time	383.0 hours	282.1 hours (-26.3%)

また、図 4-10 に実航行の航路上の海水氷密接度、氷厚、船速を、図 4-11 に計算した最適航路の航路上の海水氷密接度、氷厚、Ice Index、船速を示す。実航行データには途中砕氷船待ち等の理由で停船していた期間があり、およそ 43 時間から 69 時間ほどは氷況以外の要因で止まっていたと考えられる。

実航行データに関しては、参照している海水データは解像度 10km の AMSR2 データなので、必ずしもその時の氷況を正しく再現しているわけではないが、全体として実航行の方が厚い海水中を航行している。船速については、実航行データで上下動が激しいものの、平均的にはおよそ 6~7 ノットと、近い船速を再現できていると考えられる。

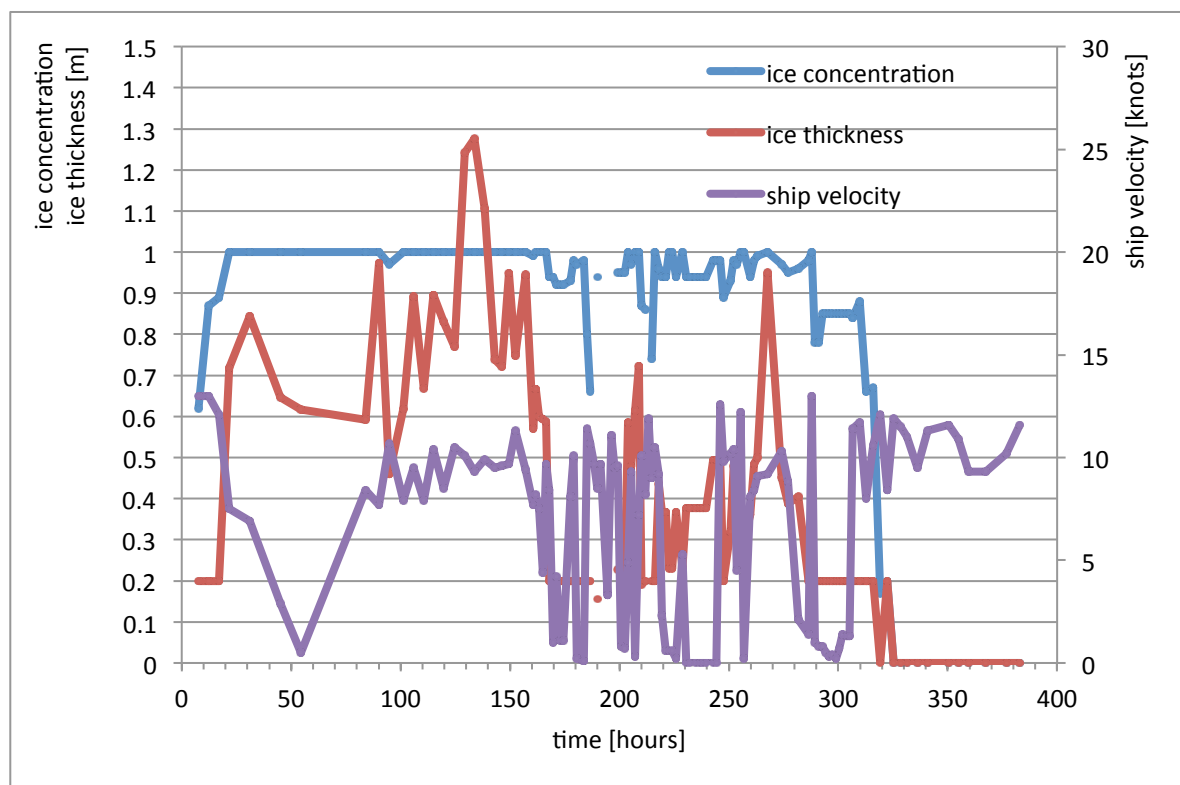


図 4-10 船 A の実航行航路上の氷況および船速

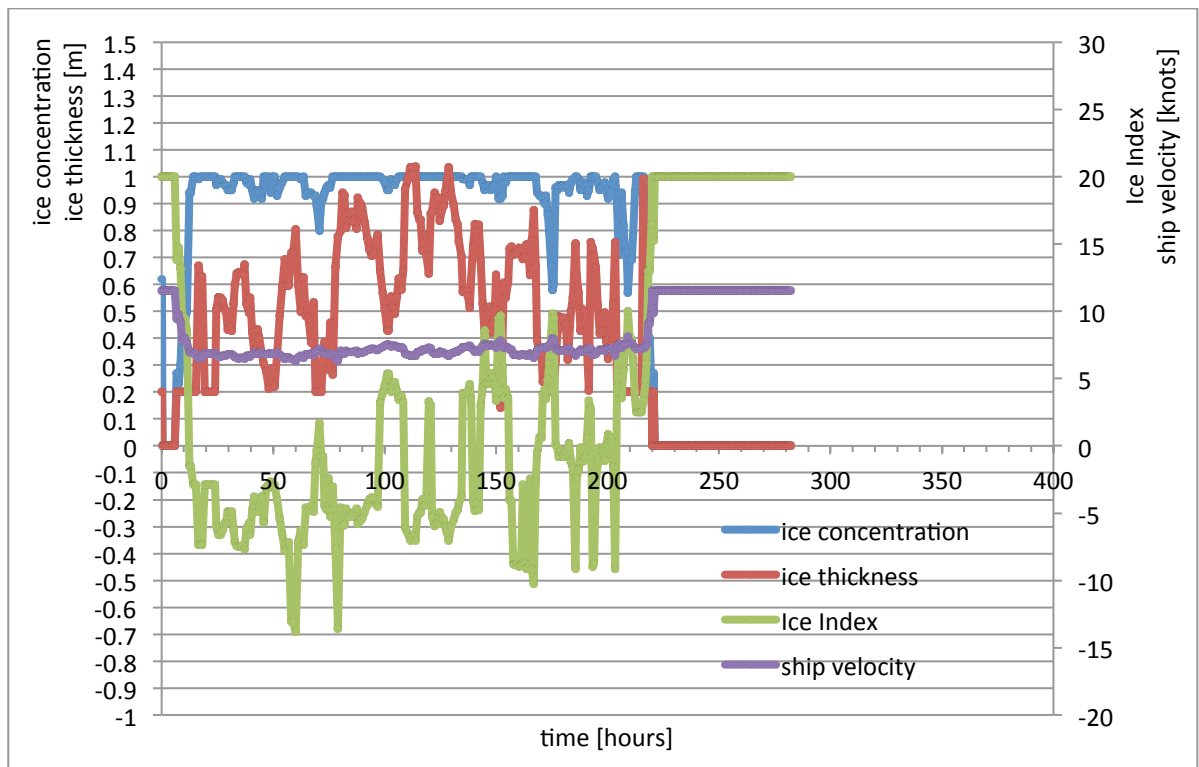
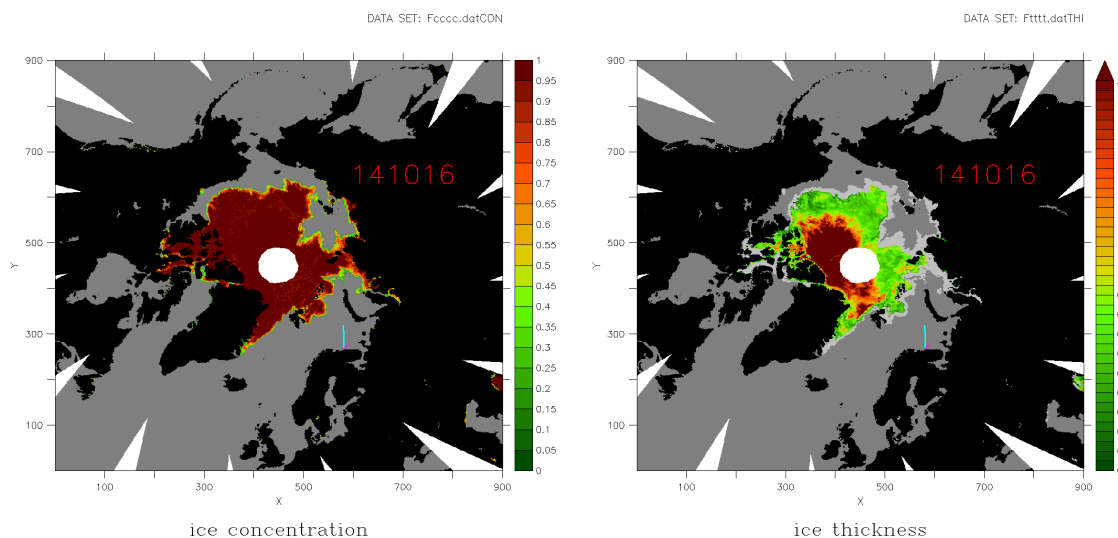


図 4-11 船 A に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速

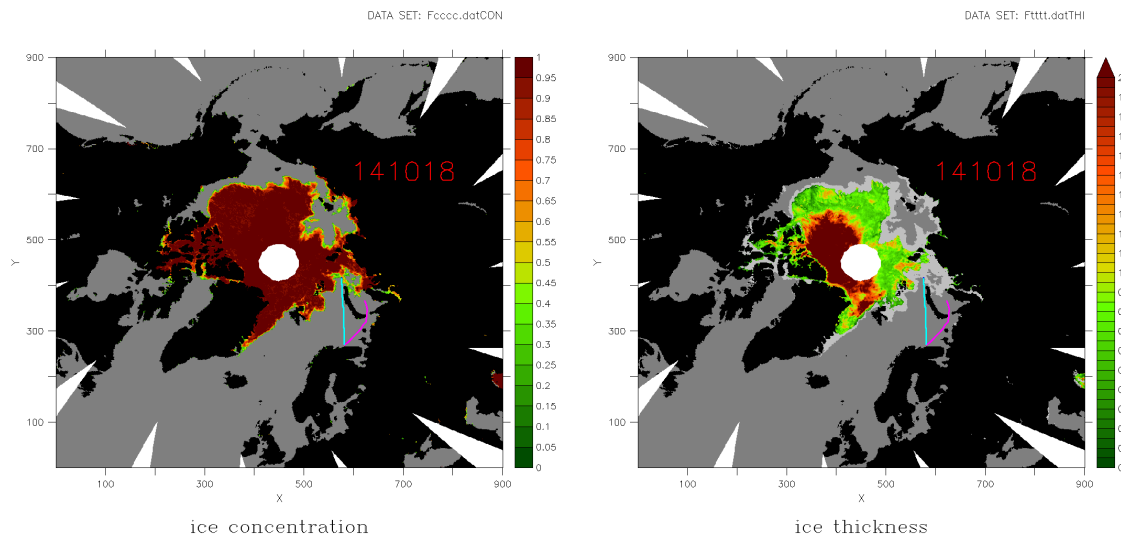
船 B の場合

2014 年 10 月 16 日に Murmansk を出発し、10 月 27 日に Pevek 周辺まで航行した航跡を取り上げた。船 A とは期間が異なるが逆方向の航路となる。喫水制限は船 B の喫水 9.5m に 1m の余裕をとって水深 10.5m とした。探索した最適航路および実航行データの航路を一日おきに図 4-12 に示す。紫色が実船の航路、水色が最適航路、青色はそのうち砕氷船エスコート区間（Ice Index ≤ 18 ）を示す。

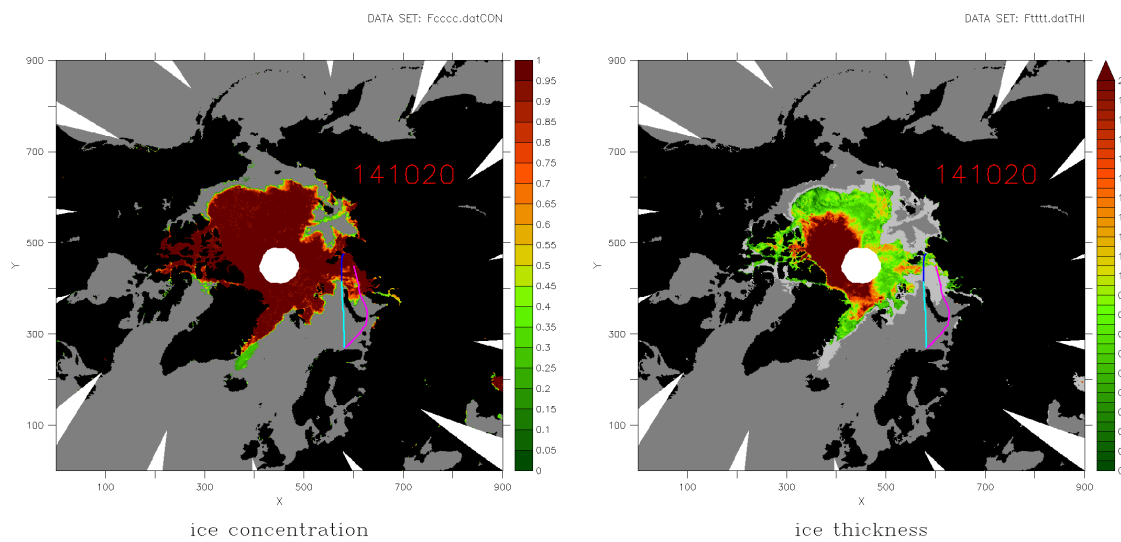


2014 年 10 月 16 日

図 4-12 船 B の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）

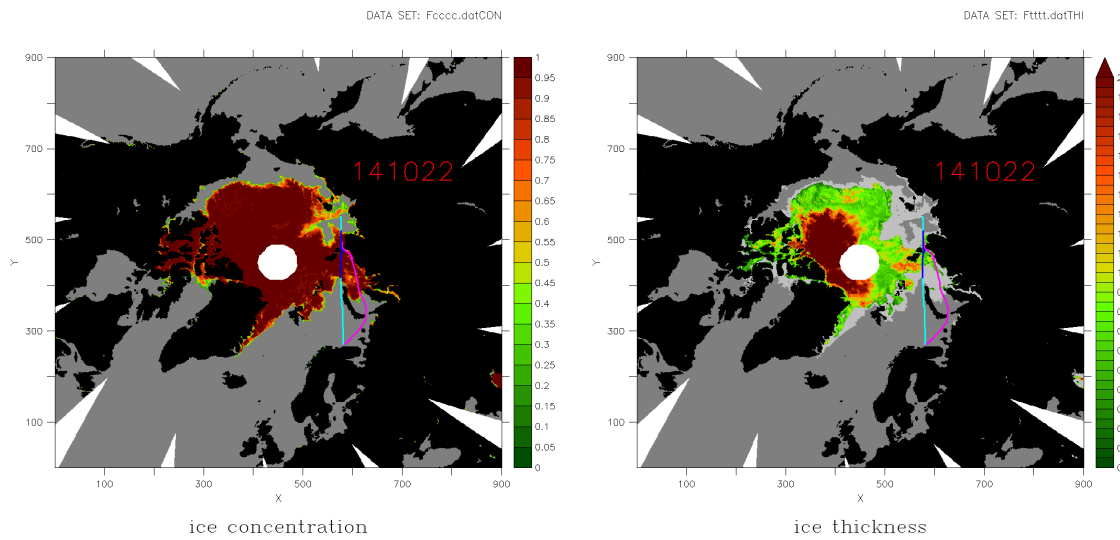


2014 年 10 月 18 日

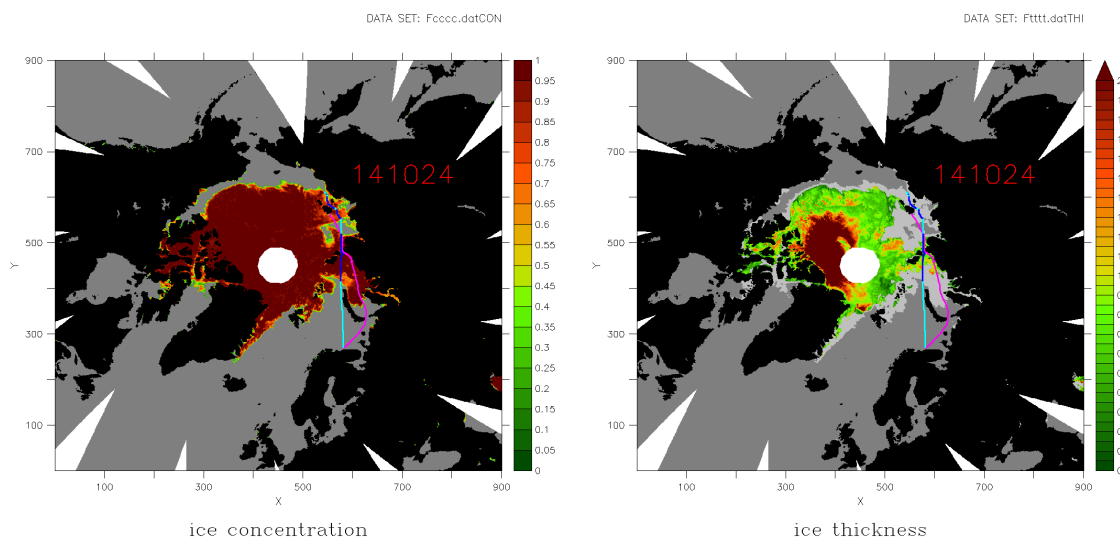


2014 年 10 月 20 日

図 4-12 船 B の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

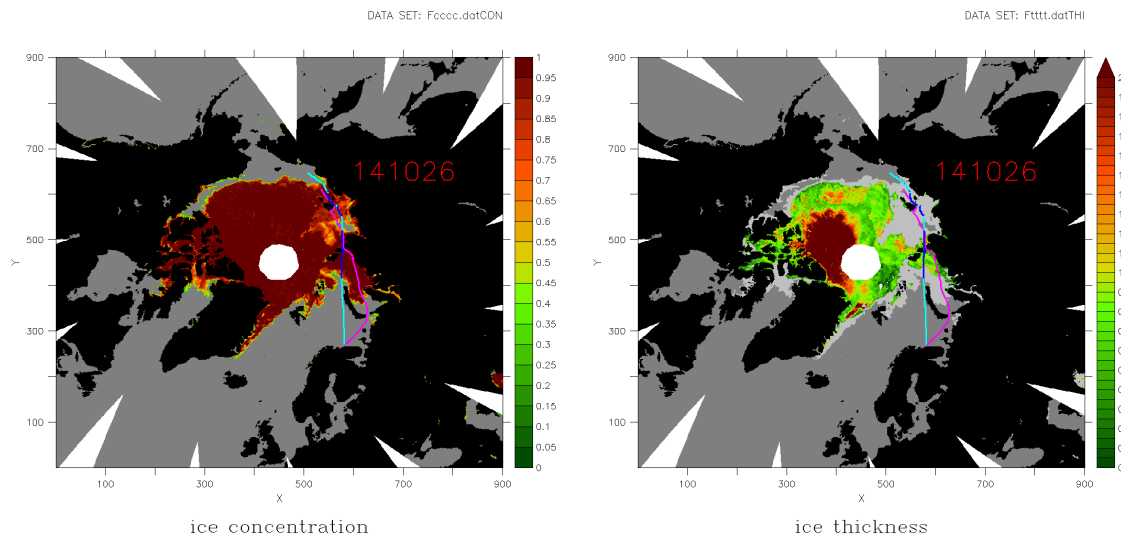


2014 年 10 月 22 日

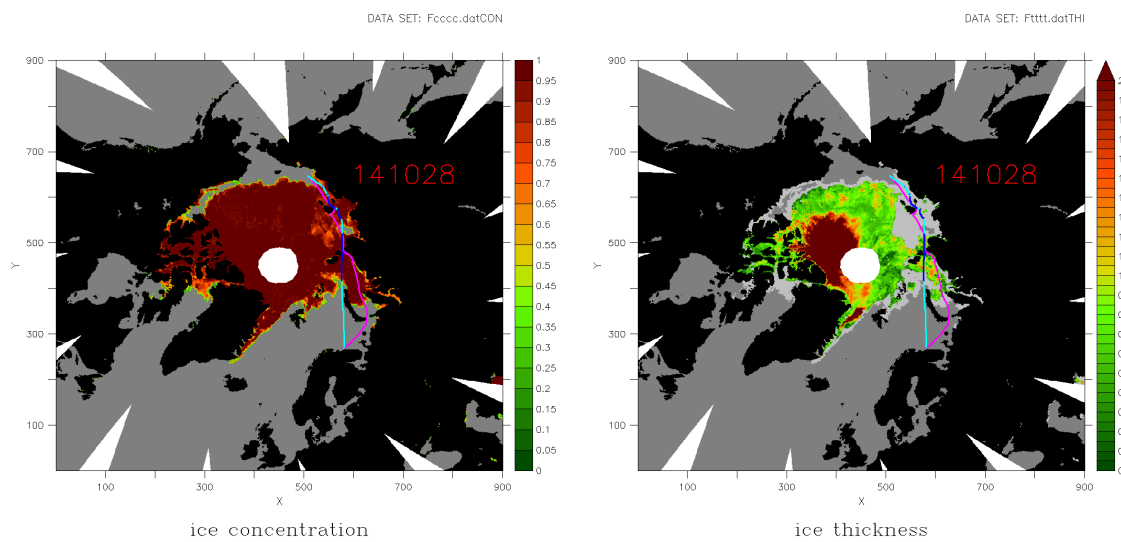


2014 年 10 月 24 日

図 4-12 船 B の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）



2014 年 10 月 26 日



2014 年 10 月 28 日

図 4-12 船 B の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

最適航路と実航行データは、ノバヤゼムリヤの北を通るか南のカラゲイト海峡を通るかという点で大きく異なっており、それ以外の箇所は似た航路をとっている。それぞれの航行距離、航行時間を表 4-2 に示す。船 A と比べると短縮幅は少ないものの、距離、時間ともに短縮している。

表 4-2 船 B の実航行航路と最適航路の距離・時間

	Actual route	Optimized route (compared to actual one)
Distance	2,422 nm	2,275 nm (-6.1%)
Time	285.1 hours	241.5 hours (-15.3%)

また、図 4-13 に実航行の航路上の海水密接度、氷厚、船速を、図 4-14 に計算した最適航路の航路上の海水密接度、氷厚、Ice Index、船速を示す。実航行、最適航路ともに、セベルナヤゼムリヤの南、ビルキツキー海峡において最も厳しい氷況と遭遇している。

船 A と同様に、実航行データには途中およそ 16 時間から 38 時間ほど、止まっていた期間を含んでいるが、それを考慮しても最適航路は航行時間を短縮する航路となっている。その主たる要因はノバヤゼムリヤの北を通った選択である。しかしながら、ノバヤゼムリヤの北の海域は場合によって風や波が激しいことがあり、そういった理由で船 B がノバヤゼムリヤの南を通った可能性もある。

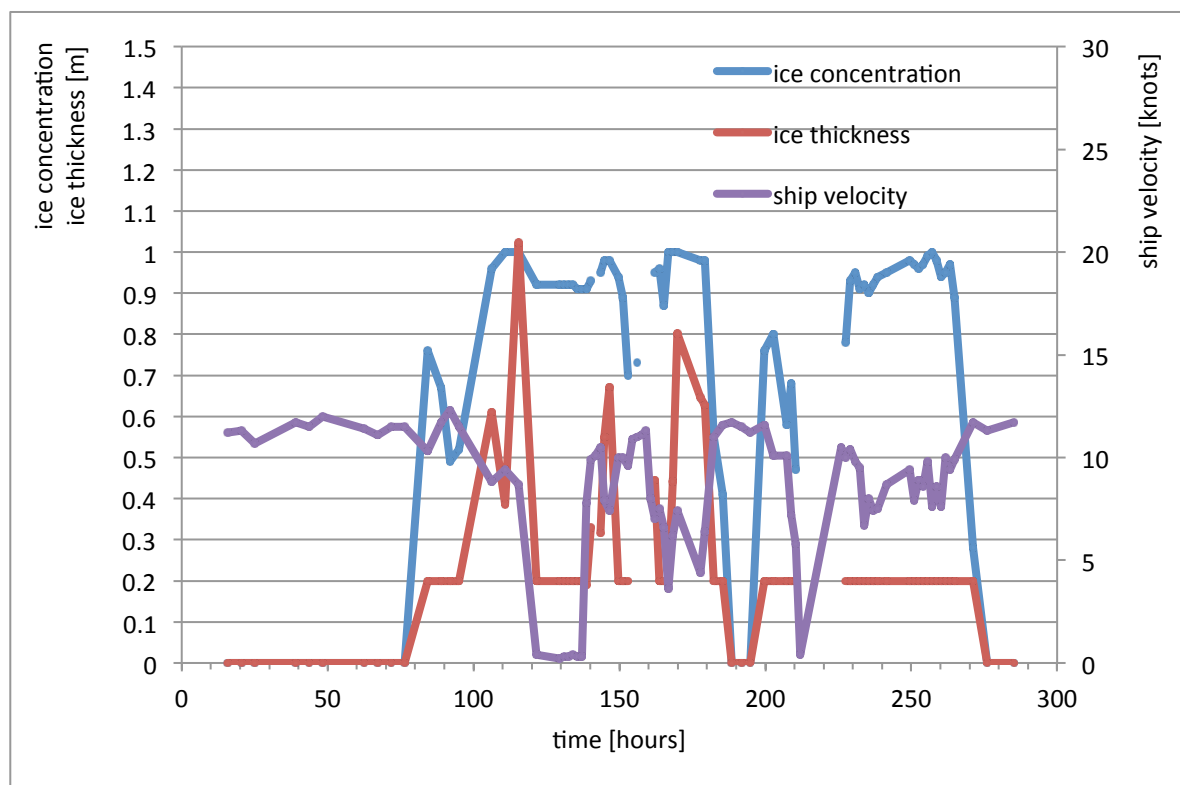


図 4-13 船 B の実航行航路上の氷況および船速

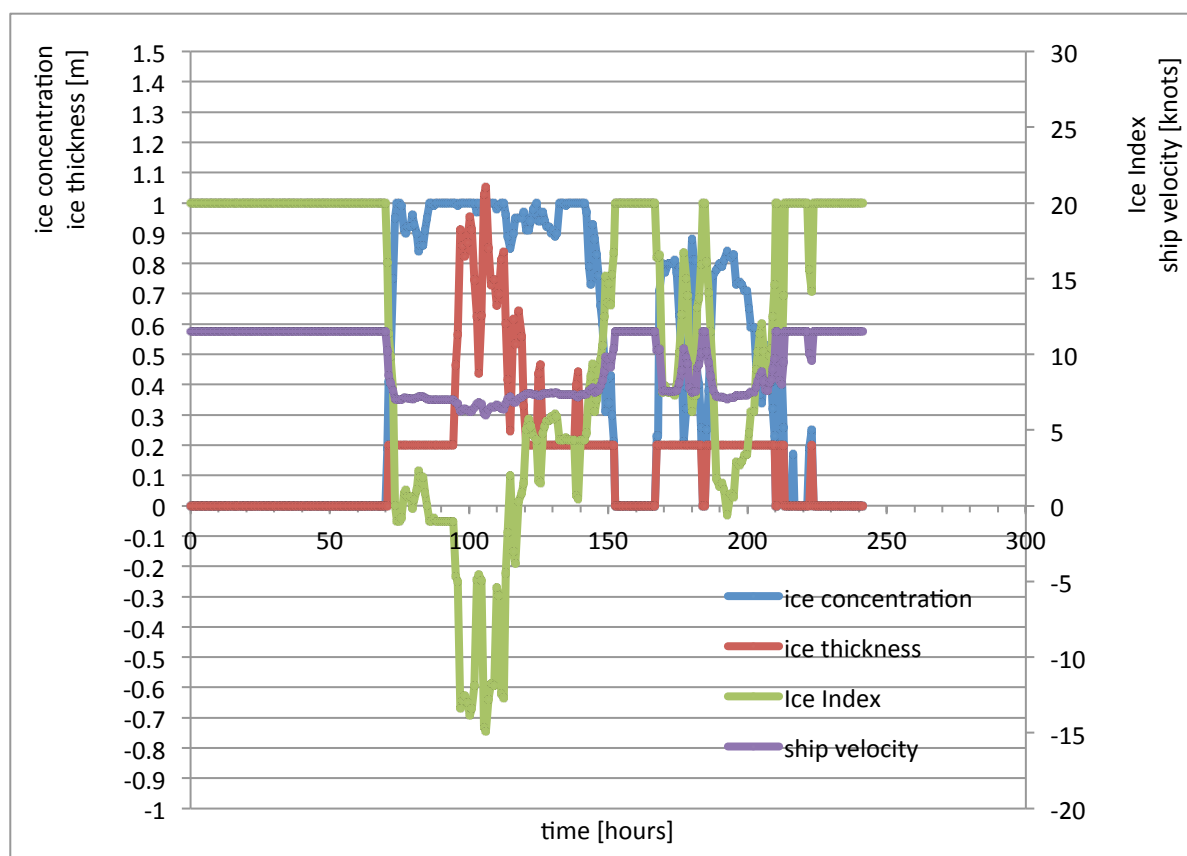
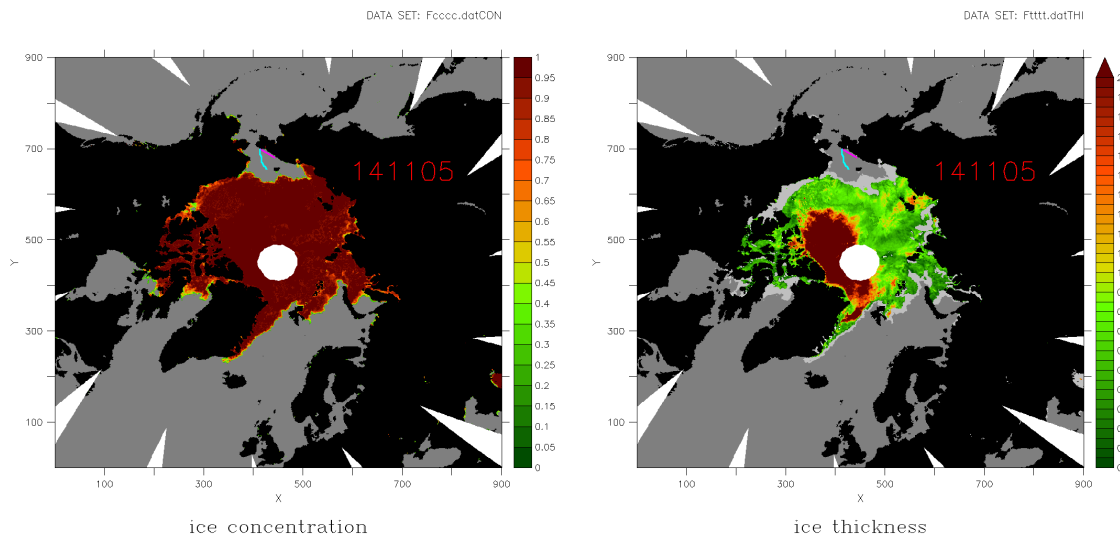


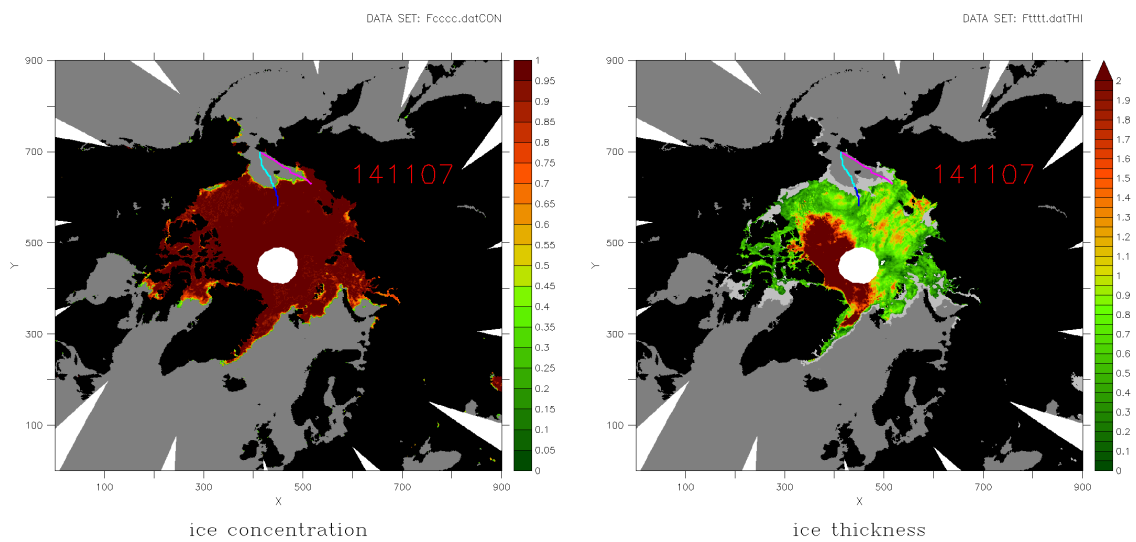
図 4-14 船 B に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速

船 C の場合

2014 年 11 月 5 日にベーリング海峡を抜けて、11 月 22 日にノルウェー南部に到達した航跡を取り上げた。NSR を含む北極海ロシア側の東端から西端まで通して航行した航路である。喫水制限は船 C の喫水 14m に 1m の余裕をとって水深 15m とした。探索した最適航路および実航行データの航路を一日おきに図 4-15 に示す。紫色が実船の航路、水色が最適航路、青色はそのうち砕氷船エスコート区間（Ice Index ≤ 18）を示す。

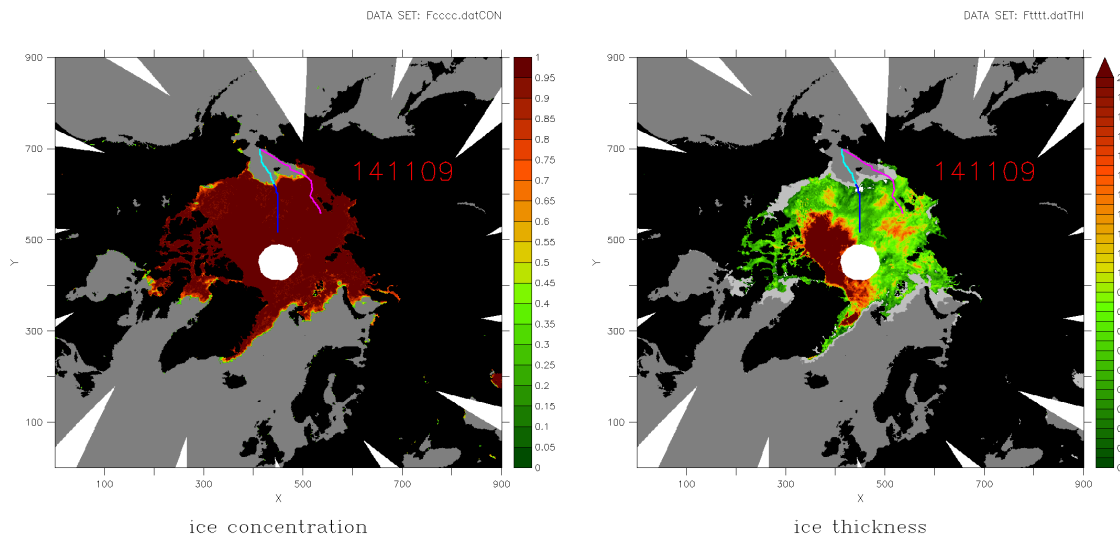


2014 年 11 月 5 日

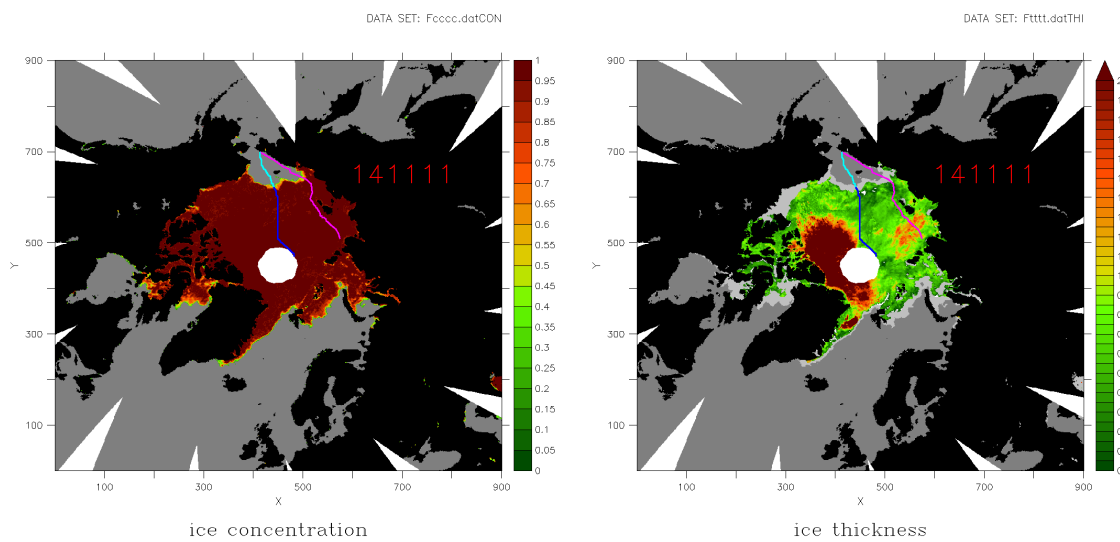


2014 年 11 月 7 日

図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）

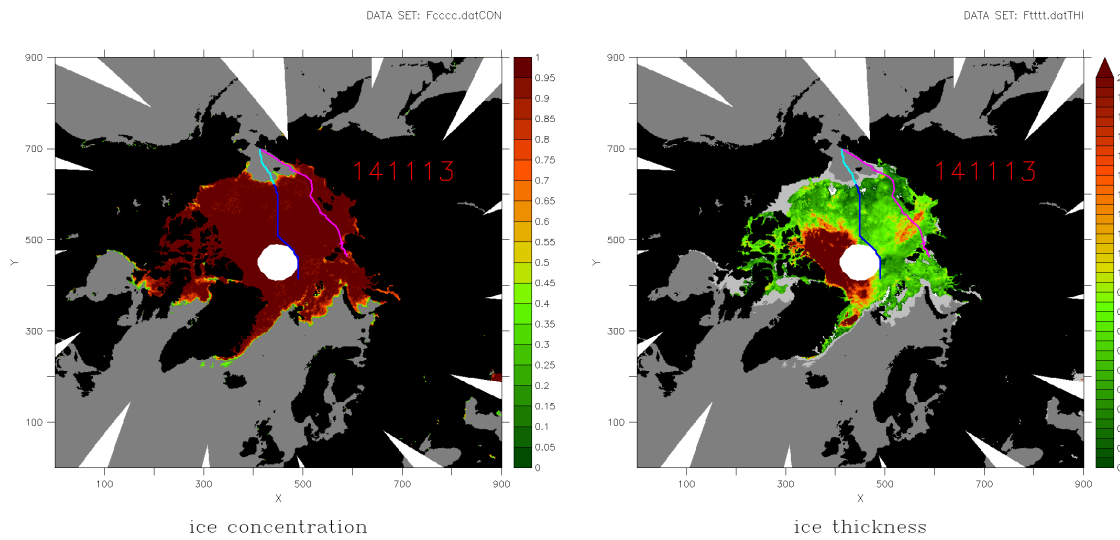


2014 年 11 月 9 日

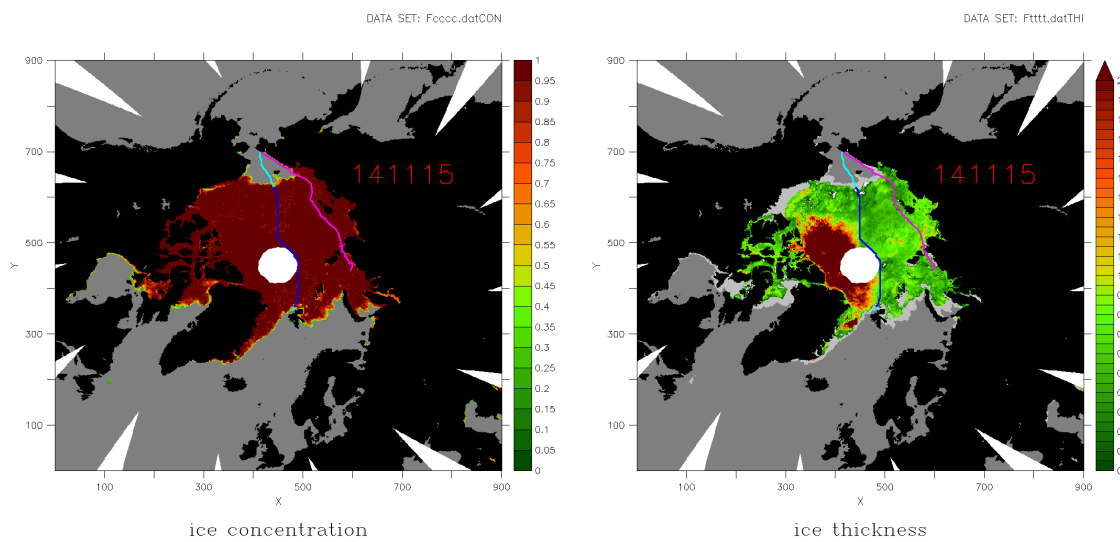


2014 年 11 月 11 日

図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

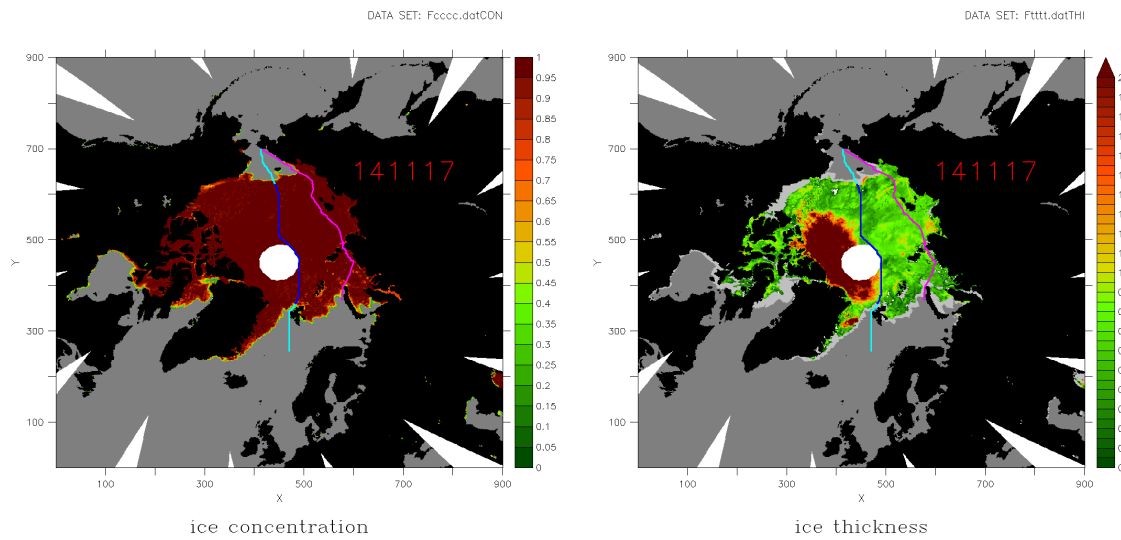


2014 年 11 月 13 日

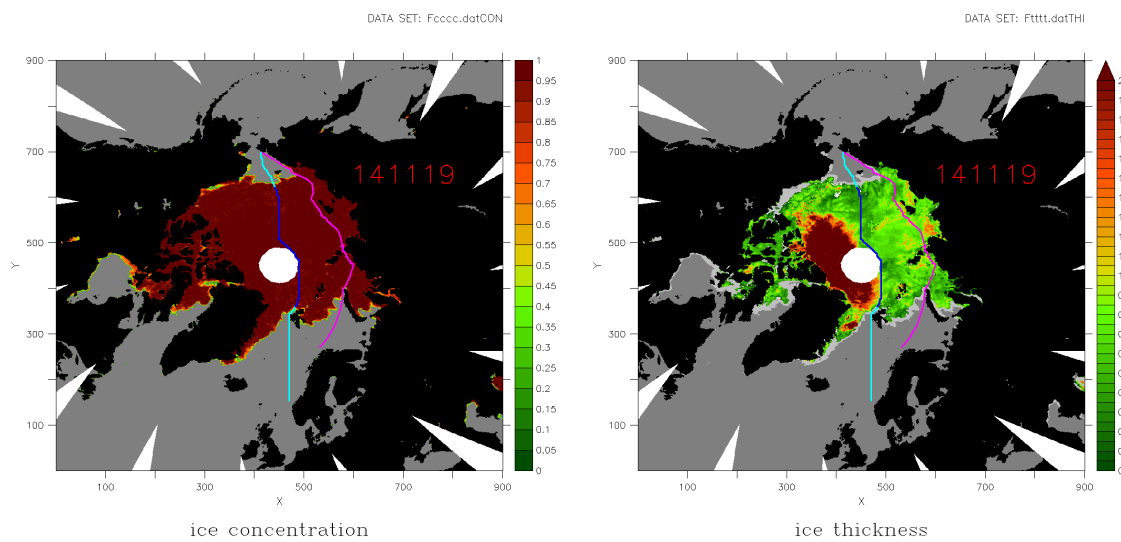


2014 年 11 月 15 日

図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

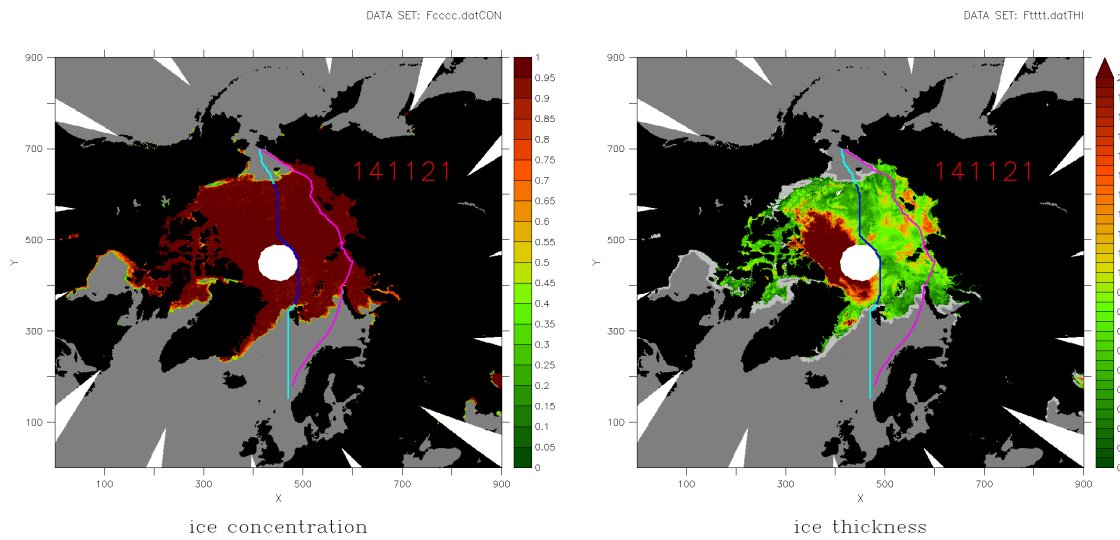


2014 年 11 月 17 日

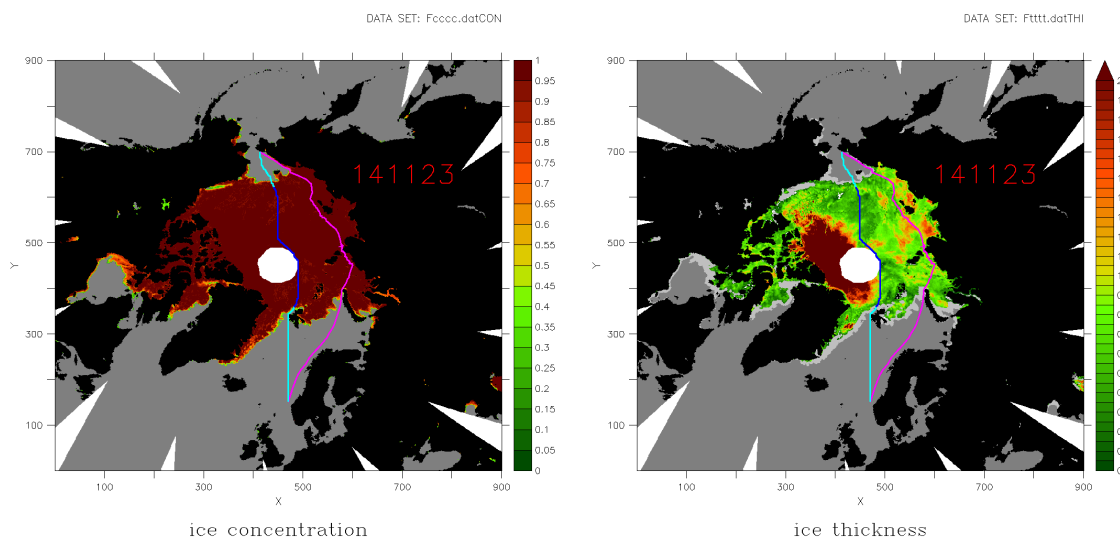


2014 年 11 月 19 日

図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）



2014 年 11 月 21 日



2014 年 11 月 23 日

図 4-15 船 C の実航行データと最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

計算した最適航路は、実航行の航跡を大きく離れ、極点近くを通る航路となっている。これは、2014 年 11 月の海氷厚分布の特徴によるものである。図 4-16 に 11 月 10 日の海氷厚分布（および実航行（紫色）、最適航路（水色・青色）それぞれの航路）を示す。図中、赤丸で囲った沿岸部に氷厚 1m を超える厚い氷が分布しており、青丸で囲った沖合にはさほど分厚い氷は分布していないことが分かる。衛星観測による氷厚値には誤差も含まれるが、沿岸に厚い氷が多く沖合に少ないという定性的な傾向は実際に衛星から捉えられる通りと考えられる。よって、氷況だけを考えるなら沖合を通る方が所要時間が少なくなり、より効率的な航路であったといえる。しかし、大陸を離れて沖合を航行する際には、スタックしたり事故が発生したりした際に救援が向かうのが遅くなるリスクがあり、所要時間が短いから良いとは一概に言えない。また、高緯度海域では海氷がぎっしりと詰まって広がっており、沿岸に比べて強度が高いという特徴を Ice Index で捉えきれていない可能性もある。こうした点を考慮すると、実際にこの航路をとるべきかには議論の余地があるが、一考すべき航路選択の提案である。

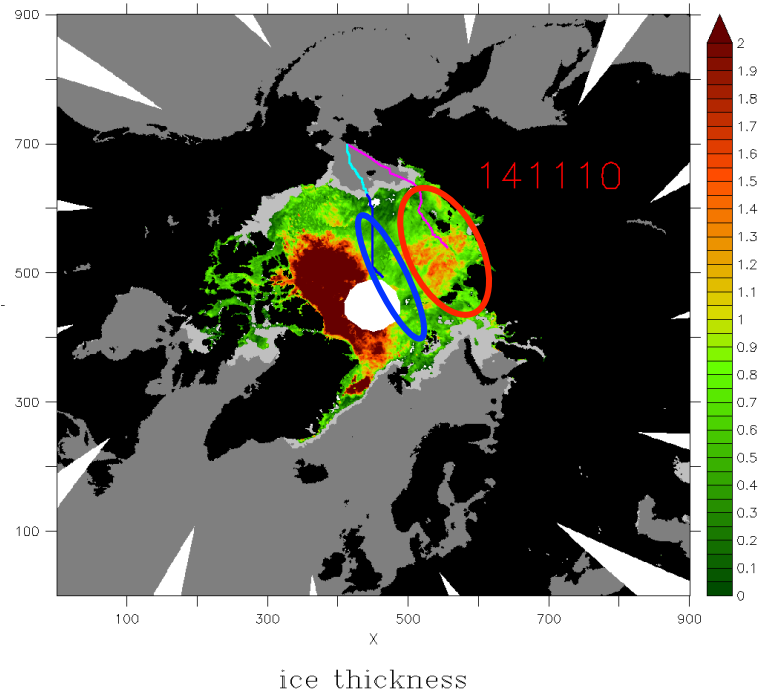


図 4-16 2014 年 11 月 10 日の海氷厚分布（単位：m）

実航行、最適航路それぞれの航行距離、航行時間を表 4-3 に示す。高緯度海域を通過することで距離、時間ともに十数%の短縮になる結果を示している。

表 4-3 船 C の実航行航路と最適航路の距離・時間

	Actual route	Optimized route (compared to actual one)
Distance	3,767 nm	3,213 nm (-14.7%)
Time	415.6 hours	360.0 hours (-13.4%)

また、図 4-17 に実航行の航路上の海氷密接度、氷厚、船速を、図 4-18 に計算した最適航路の航路上の海氷密接度、氷厚、Ice Index、船速を示す。実航行データには途中およそ 22 時間から 36 時間ほど止まっていた期間を含んでいるが、それを考慮しても沖合を通る航路は実航行と同じか少し短い程度の航行時間ですんでいる。これは、実航行は 1m を超える氷厚の海域を通過しているのに対して、沖合を通る最適航路はそこまで分厚い氷には遭遇せずに航行しているためである。

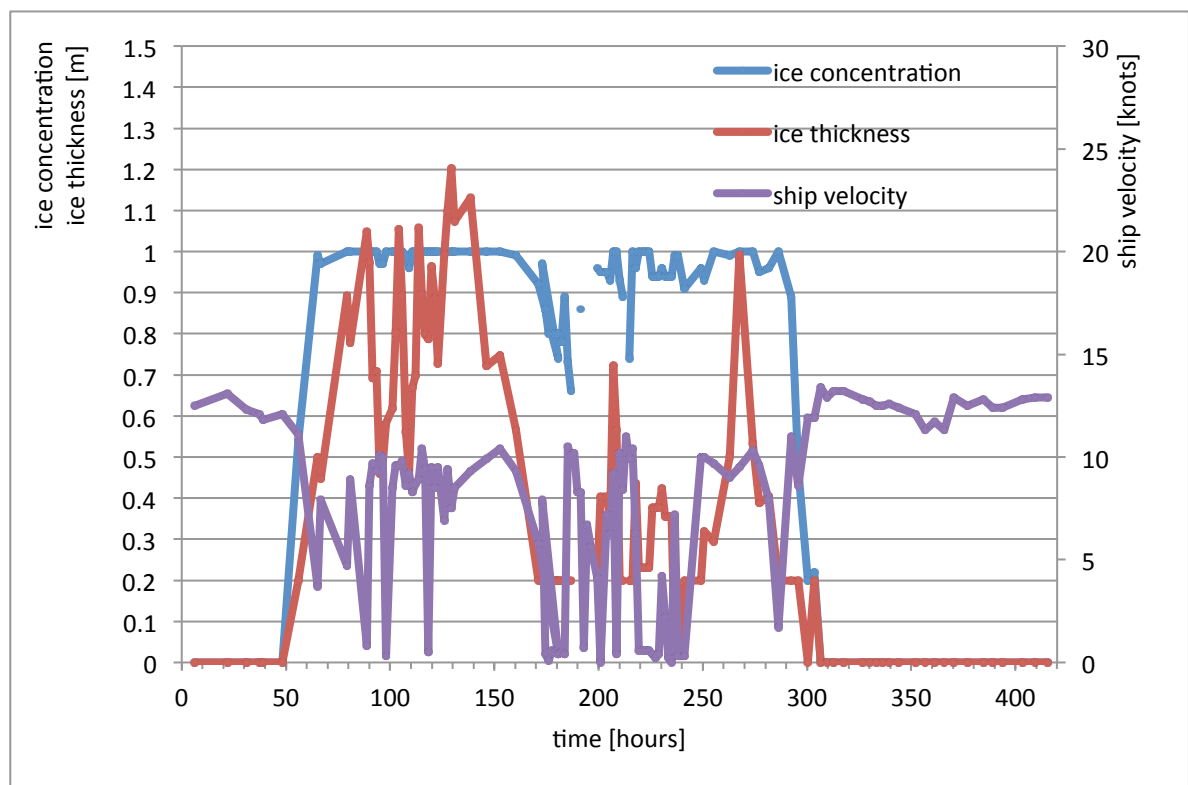


図 4-17 船 C の実航行航路上の氷況および船速

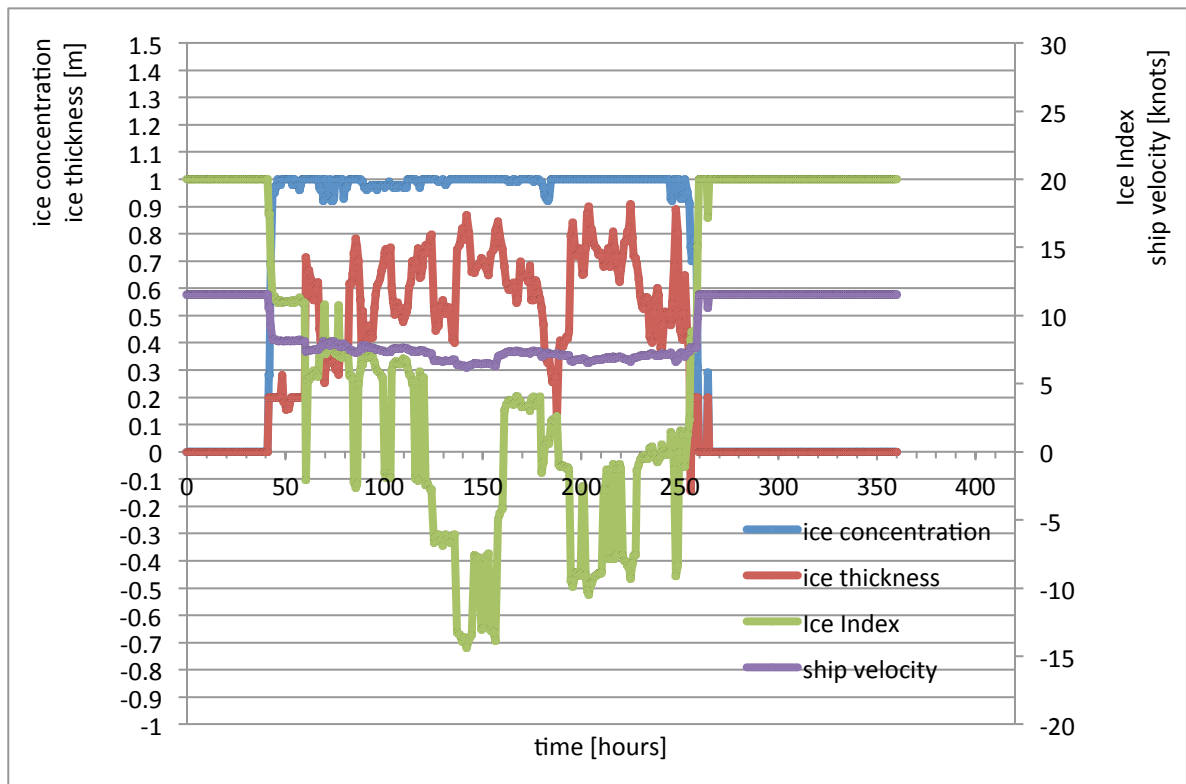
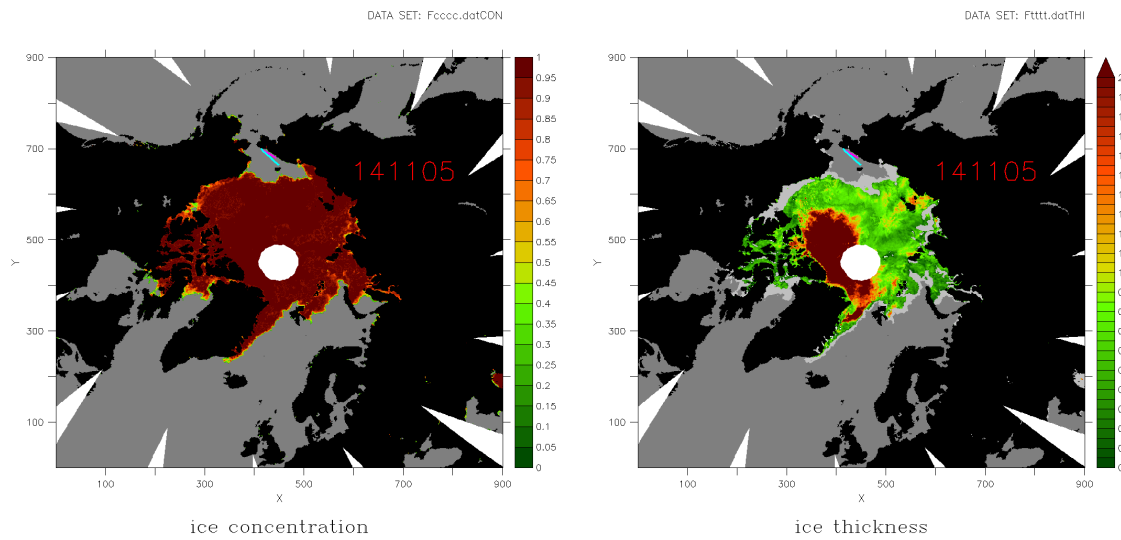


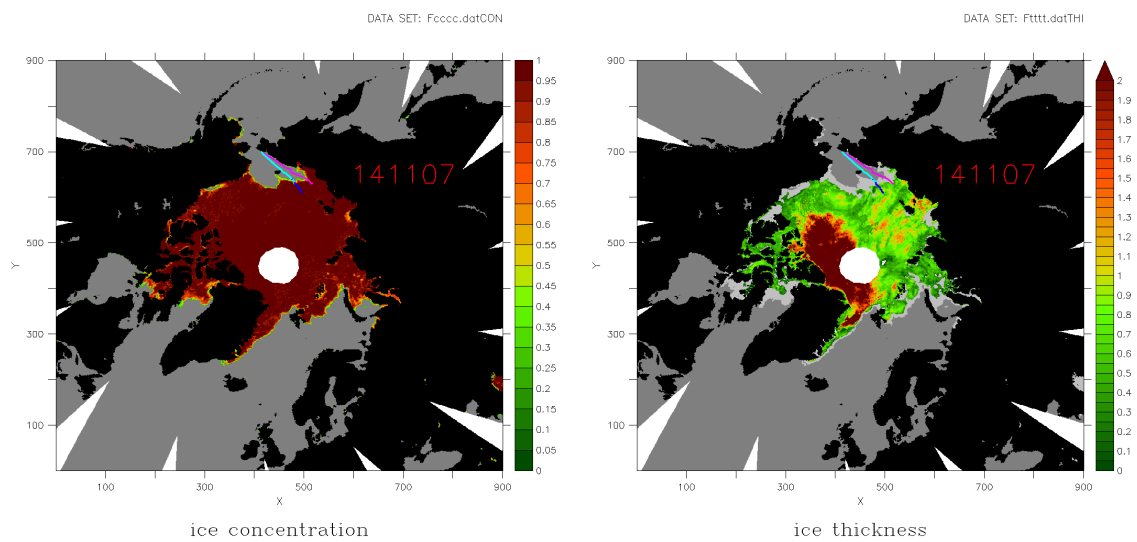
図 4-18 船 C に対する最適航路上の氷況および Ice Index、船速

船 C に対して、ビルキツキー海峡を通る条件をかけた場合

船 C に対する最適航路は上述の通りかなり高緯度海域を通るものとなった。これに対して比較として、セベルナヤゼムリヤの南、ビルキツキー海峡を通る条件下での最適航路探索を行った。条件付けは、セベルナヤゼムリヤ以北のグリッドに仮想的に陸地の壁を作り、通航不可能にすることで行った。探索した最適航路および実航行データの航路を一日おきに図 4-19 に示す。紫色が実船の航路、水色が最適航路、青色はそのうち砕氷船エスコート区間 (Ice Index ≤ 18) を示す。

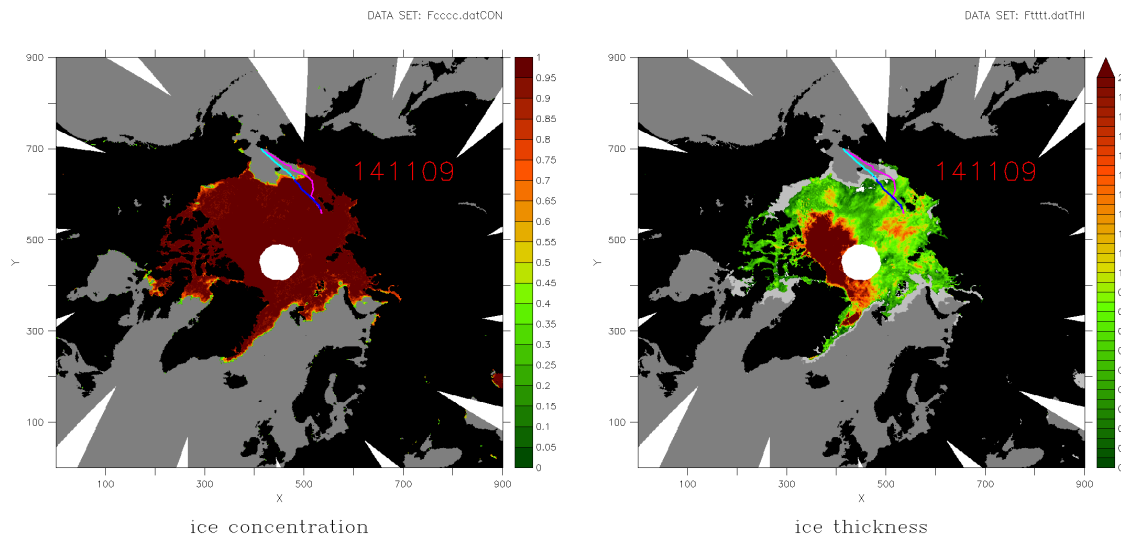


2014 年 11 月 5 日

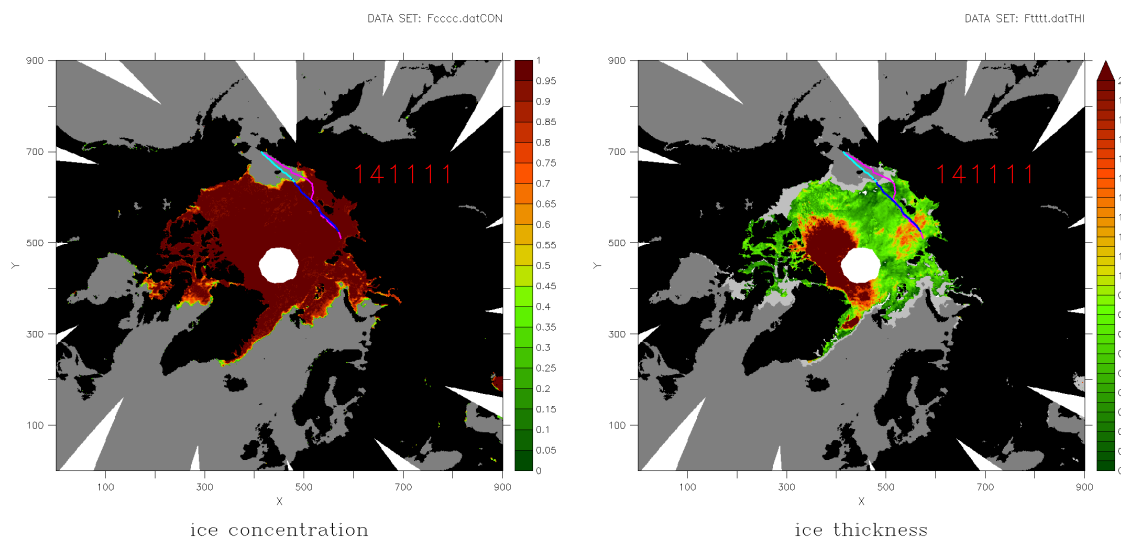


2014 年 11 月 7 日

図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）

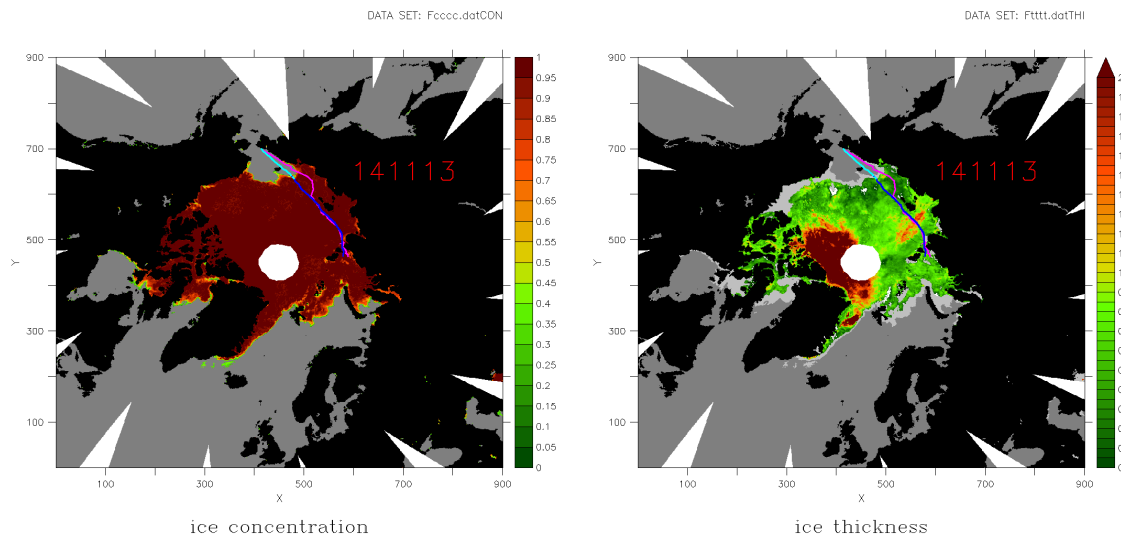


2014 年 11 月 9 日

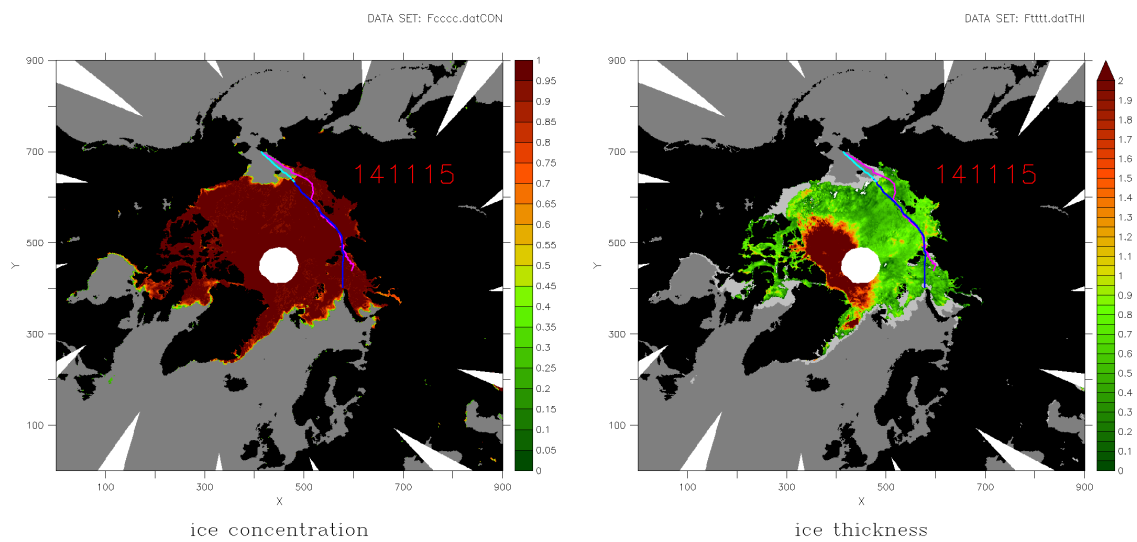


2014 年 11 月 11 日

図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

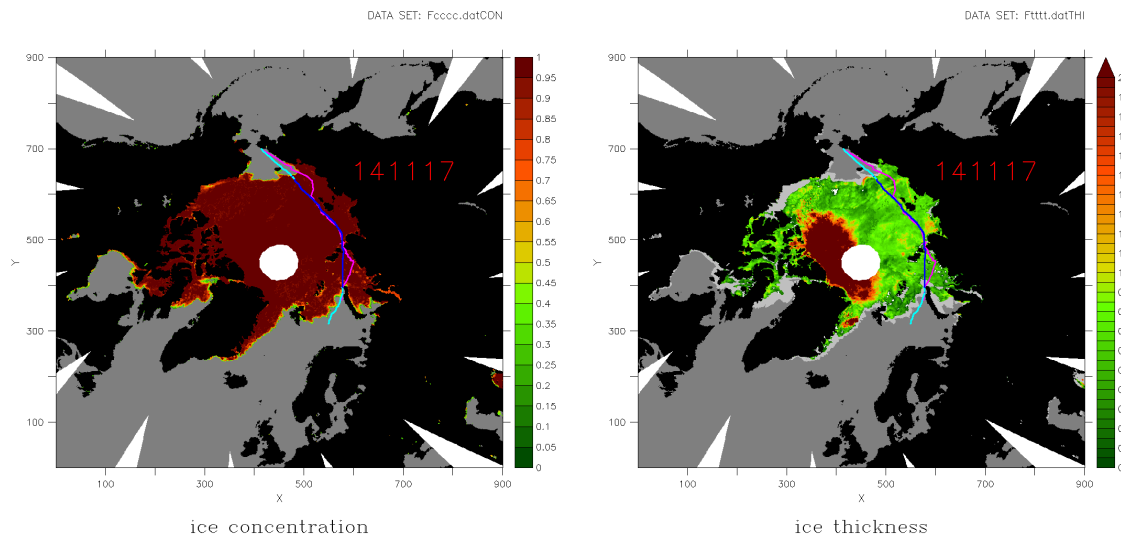


2014 年 11 月 13 日

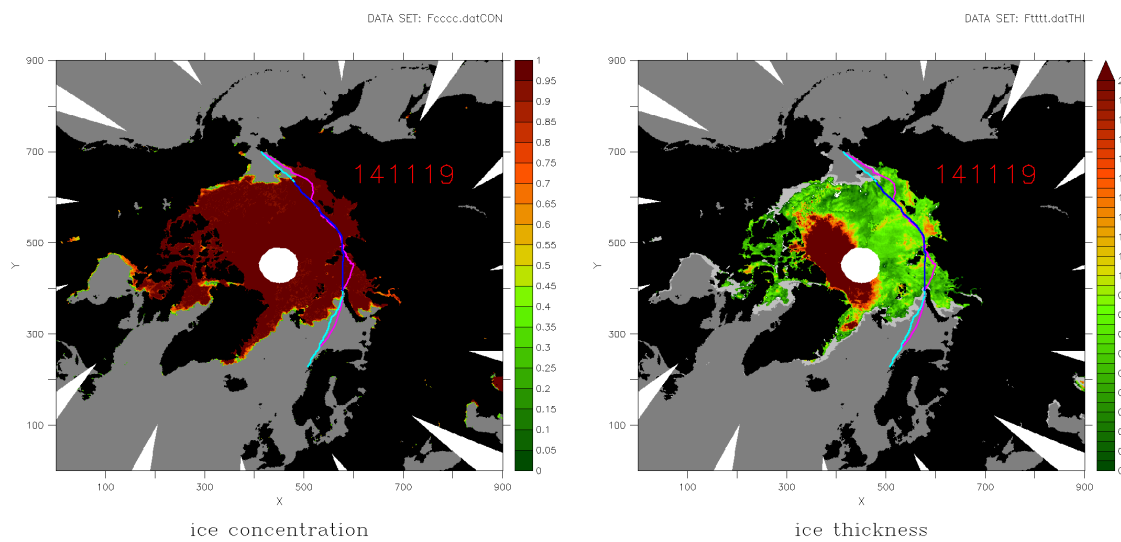


2014 年 11 月 15 日

図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

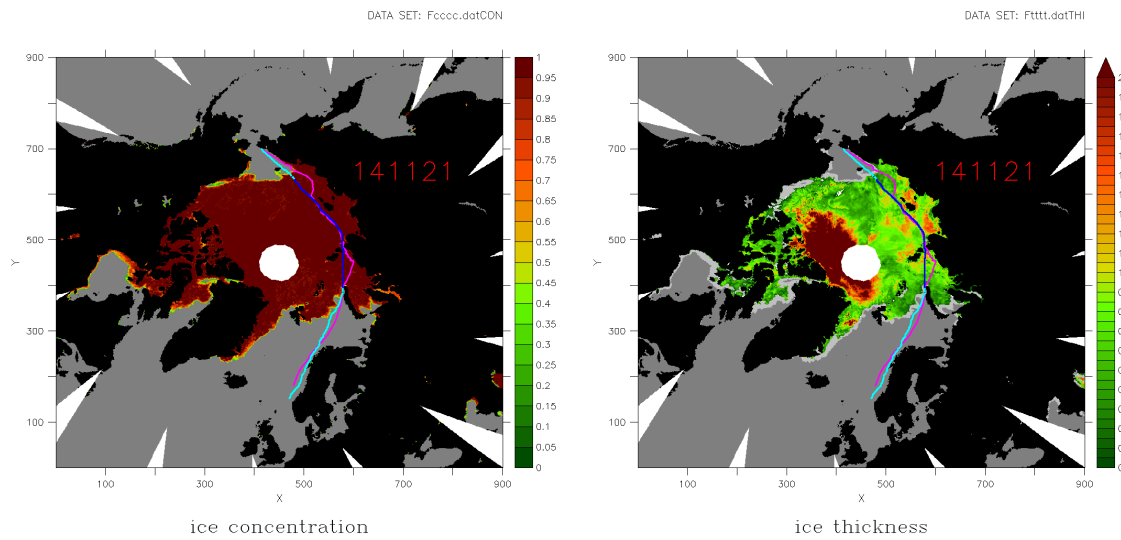


2014 年 11 月 17 日

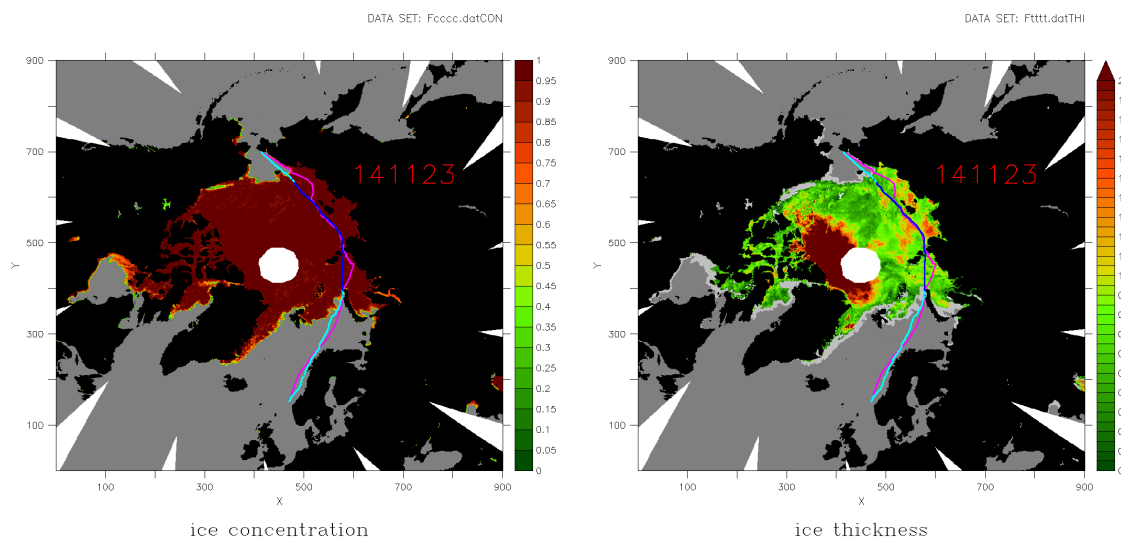


2014 年 11 月 19 日

図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）



2014 年 11 月 21 日



2014 年 11 月 23 日

図 4-19 船 C の実航行とビルキツキー海峡を通る最適航路（左：密接度、右：氷厚[m]）（続き）

ビルキツキー海峡を通ることを強制することで、実航行と似た航路が探索された。ビルキツキー海峡を通る最適航路を含めた航行距離、航行時間を表 4-4 に示す。また、航路上の氷況および Ice Index、船速を図 4-20 に示す。条件無しの場合と比べて、氷が厚く、氷況の厳しい海域を通るようになった分、所要時間はのびたが、実航行に比べると無駄のない航路を選び、距離・時間ともに短縮されている。

表 4-4 船 C の実航行航路と条件付き最適航路の距離・時間

	Actual route	Optimized route (compared to actual one)	
		No restriction	Via Vilkitskiy Strait
Distance	3,767 nm	3,213 nm (-14.7%)	3,598 nm (-12.0%)
Time	415.6 hours	360.0 hours (-13.4%)	401.9 hours (-3.3%)

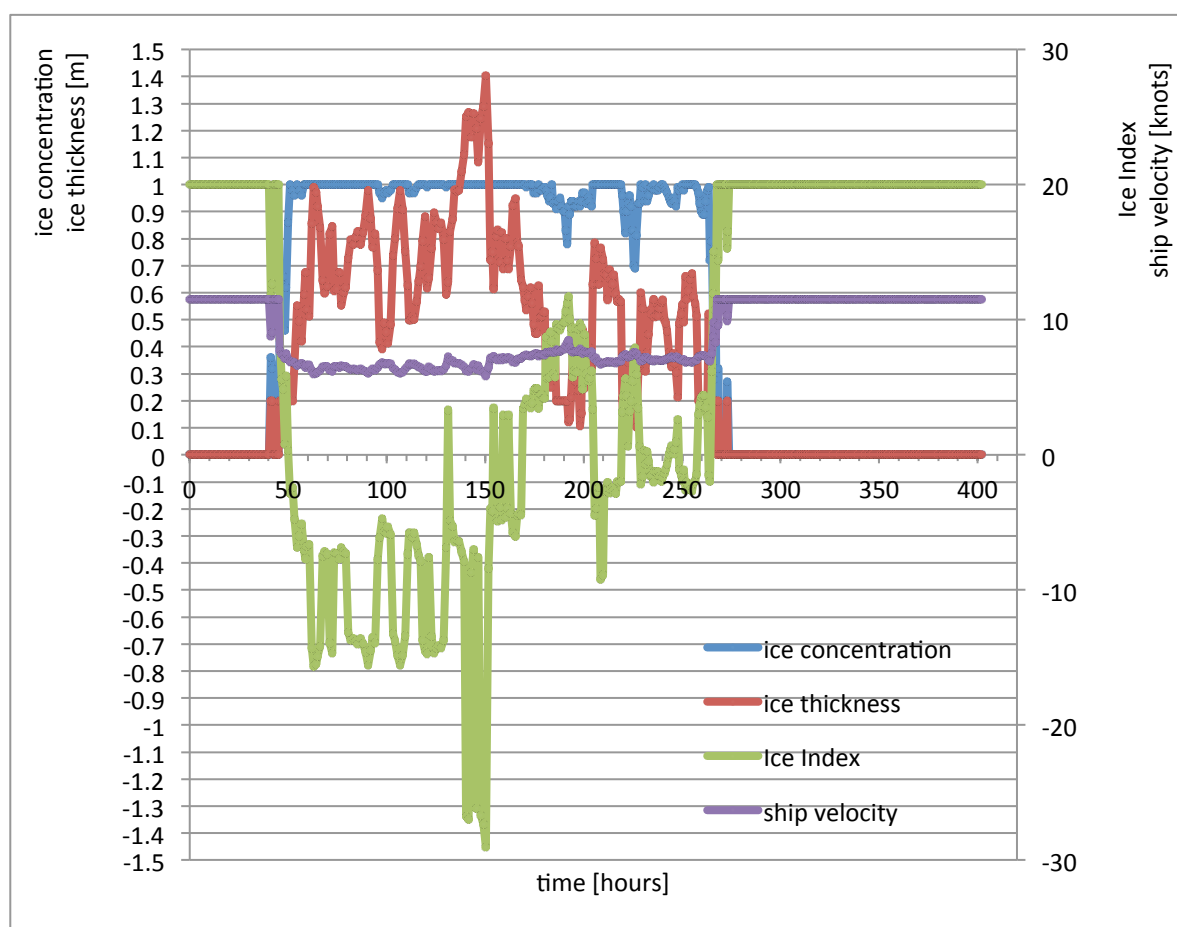


図 4-20 船 C に対するビルキツキー海峡を通る最適航路上の氷況および Ice Index、船速

航行支援システムとしての最適航路探索を考えると、航路として一本のみを提示するのは良案とはいえ、複数の航路案を提示した上で所要時間やエスコート区間の長さ等の条件を比較検討できるようにするのが好ましい。NSR 上に点在する島々の北側を通るか南の海峡を通るかをユーザー側が決めるためには、両方の場合について最適航路探索を行い、提示する必要がある、そうした面から、海峡通航を条件づけた航路探索は重要である。

4.3. 長期予測データを用いた航路の将来性検討

実際の航行に当たって、航行支援として必要になる海氷情報は数日から 10 日ほど先の短期予報であるが、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、数値モデルによる長期予測データを用いて、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。

現在、数値モデルを用いた気候変動予測は世界中でなされているが、北極海の夏季海氷面積については現実で起きている急速な海氷減少を捉えきれていない。図 4-21 (Allison et al. (2009)[26]) は北極海の最小海氷域面積について、IPCC で示された気候モデルによる変化と、観測値の変化を示している。モデルと観測は乖離を続け、観測値の急速な減少を再現しきれていないことが分かる。これは、メルトポンドの扱いを含めたアイスアルベド・フィードバックや、海洋の水平および鉛直混合等の表現が不完全なことによるものと考えられる[26]。

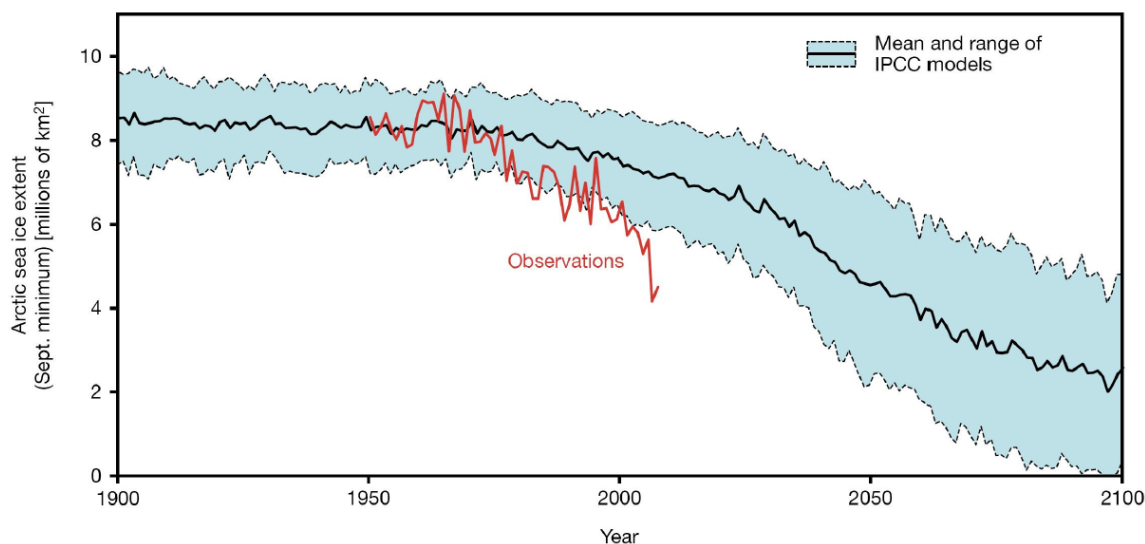


図 4-21 北極海の最小海氷域面積 (Allison et al. (2009)[26])

本研究では MIROC5 による長期予測結果を用いた。図 4-22 に衛星観測および MIROC5 による計算結果 (RCP4.5、RCP8.5) の、9 月 10 日の海氷域面積 (密接度 15%以上の領域の面積) の経年変化を示す (観測値は気象庁 HP[3]より取得)。MIROC5 による計算結果も、観測値に比べると遥かに大きい値を示していることが分かる。観測値の 2010 年代の値 (約 $4.5 \times 10^6 \text{ km}^2$) に MIROC5 の結果が到達するのは RCP4.5 の場合で 2050 年代、RCP8.5 の場合は 2040 年代である。観測値は今後 40-50 年で、MIROC5 の計算結果が 2080-2090 年代に示すような値に達する可能性がある。

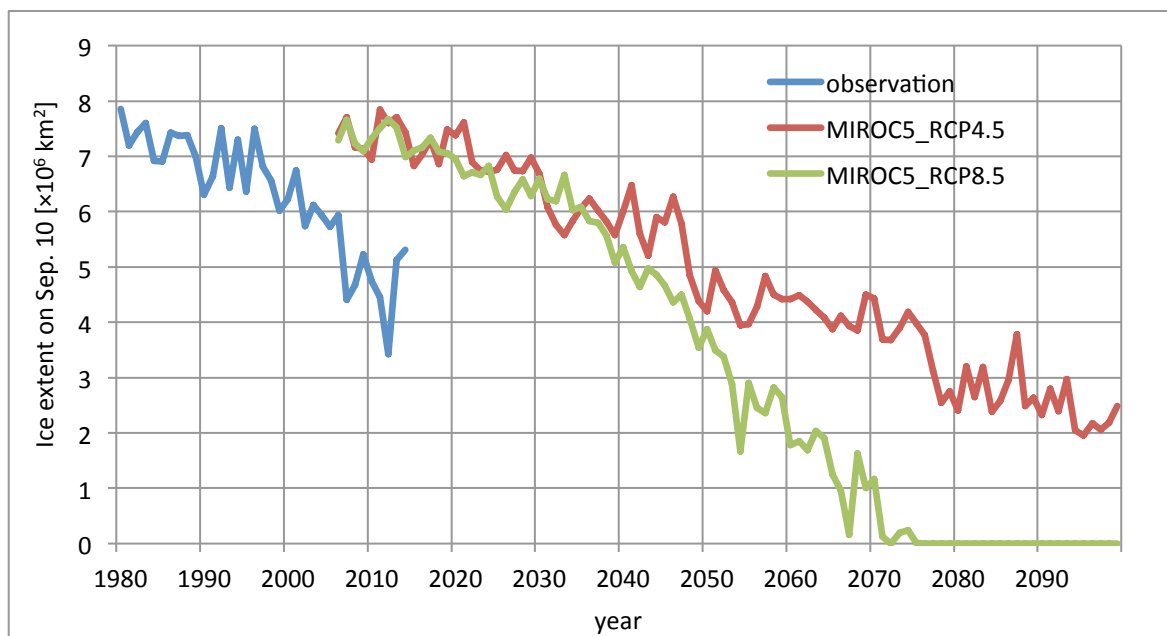


図 4-22 9 月 10 日の海氷域面積

図 4-23 に RCP4.5 の計算結果である 2014 年 9 月 10 日の海氷厚分布を示した。現実と比べて、海氷域面積が大きいのみならず、白丸で示したような、島の近傍に 2m から 3m、場所によっては 4m を超えるような非常に厚い海氷の分布を示している。これは、空間解像度が粗いために島の南の海峡が開いておらず海氷の吹きだまりになってしまい、氷厚が薄くならないことによると考えられるが、このままでは通常の船舶では通航が出来ず、航路探索自体が不可能となってしまう。

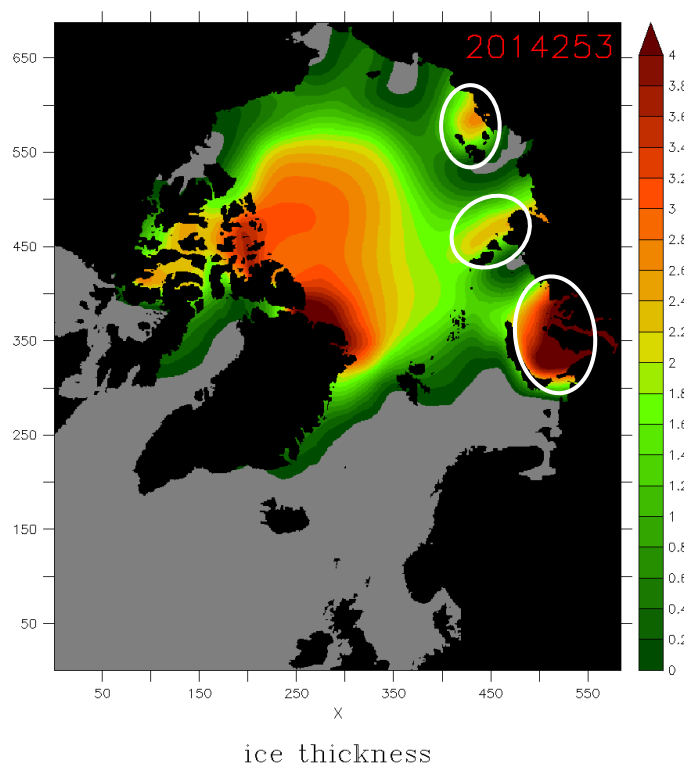


図 4-23 MIROC5 (RCP4.5)による 2014 年 9 月 10 日の海氷厚分布（単位：m）

そこで、本研究では、沿岸部に分布する非現実的な厚さの氷を、砕氷可能なものとして扱った。具体的には、図 4-24 に赤色で示した海域において、想定している砕氷船の砕氷能力（氷厚 1.5m）を超える厚さの海氷は、厚さ 1.5m として扱った。これにより、現実的には通航可能であろう海域を通れるようになり、航路探索を行うことが出来る。

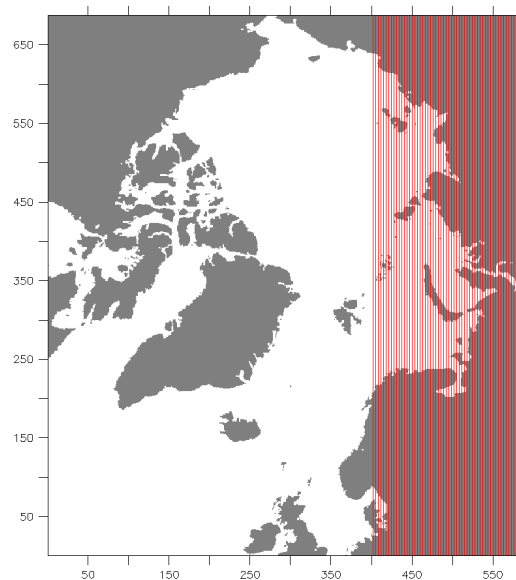


図 4-24 氷厚補正の対象海域

まず、2014 年を例に取り、衛星による観測値を用いて航路探索を行った場合と、MIROC5 の計算結果を用いて航路探索を行った場合の比較を行った。

最適航路探索は AMSR2 によるデータおよび MIROC5 による RCP4.5、RCP8.5 の結果に対して行い、失敗率は考慮せずに距離・時間を最小化する航路を探索した。2014 年 9 月 1 日にチュクチ海を出発し、スカンジナビア半島の北を目的地とした。砕氷能力は 0.6m（ただし、 $\text{Ice Index} \leq 18$ の時は砕氷船エスコートを受けるものとし砕氷能力 1.5m）、評価関数は(32)式に対して $w_1 = 1, w_2 = 100$ とした。また、喫水制限として水深 10m より浅い海域には入らないこととした。それぞれの探索結果を図 4-25、図 4-26 および表 4-5 に示す。水色の線が航跡、青色部分は砕氷船エスコート区間である。

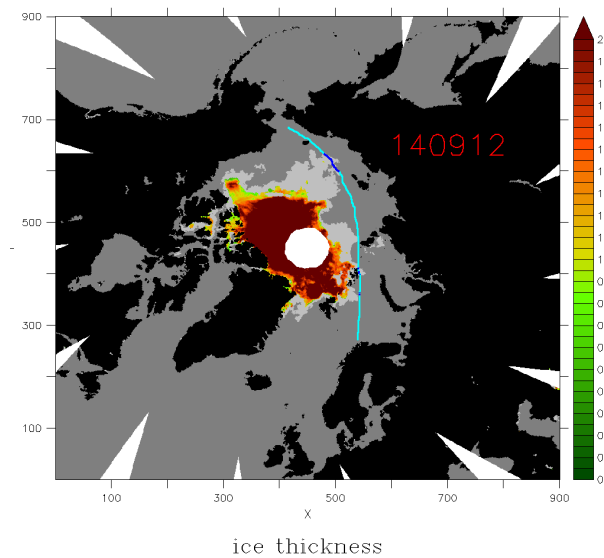


図 4-25 2014 年 9 月の AMSR2 に対する最適航路
(色は 2014 年 9 月 12 日の海氷厚[m])

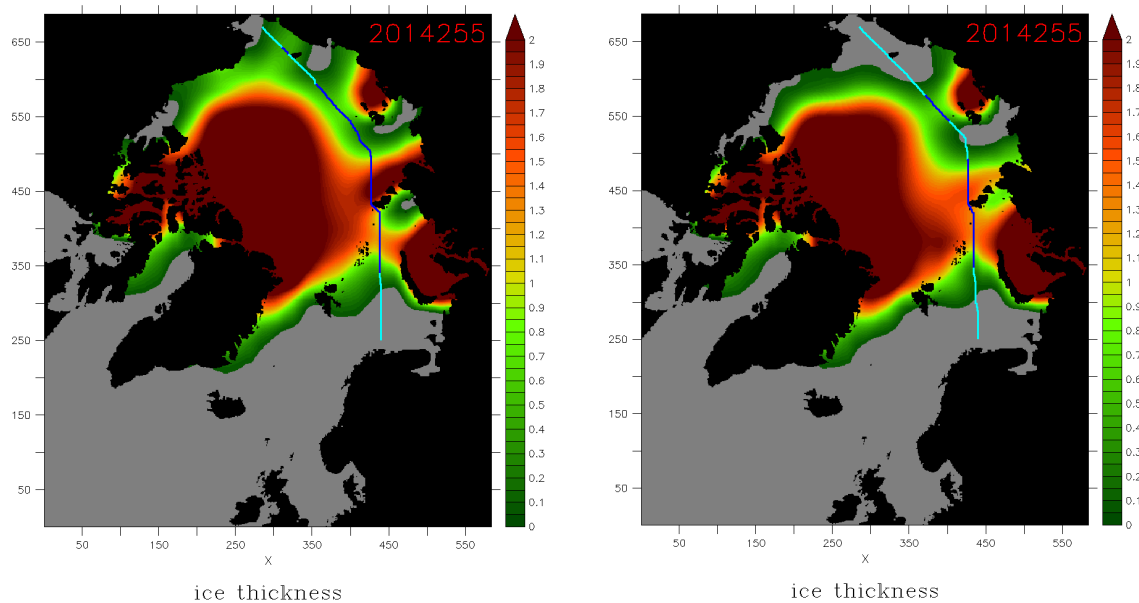


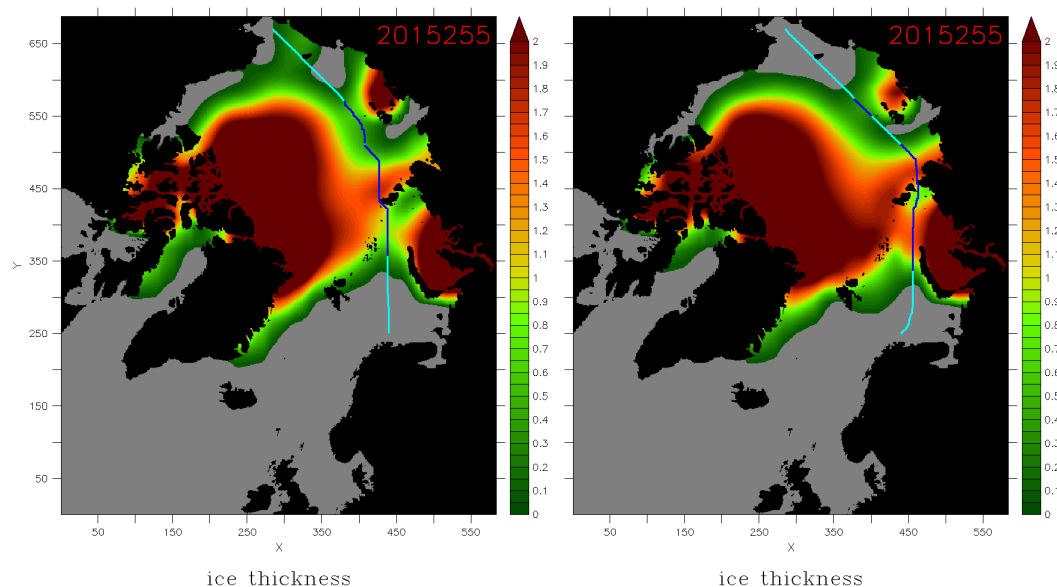
図 4-26 2014 年 9 月の MIROC5 に対する最適航路 (左 : RCP4.5、右 : RCP8.5)
(色は 2014 年 9 月 12 日の海氷厚[m])

表 4-5 AMSR2、MIROC5 に対する最適航路探索結果

	AMSR2	MIROC5	
		RCP4.5	RCP8.5
Distance	2,605 nm	2,602 nm	2,599 nm
Time	234.5 hours	271.5 hours	261.4 hours

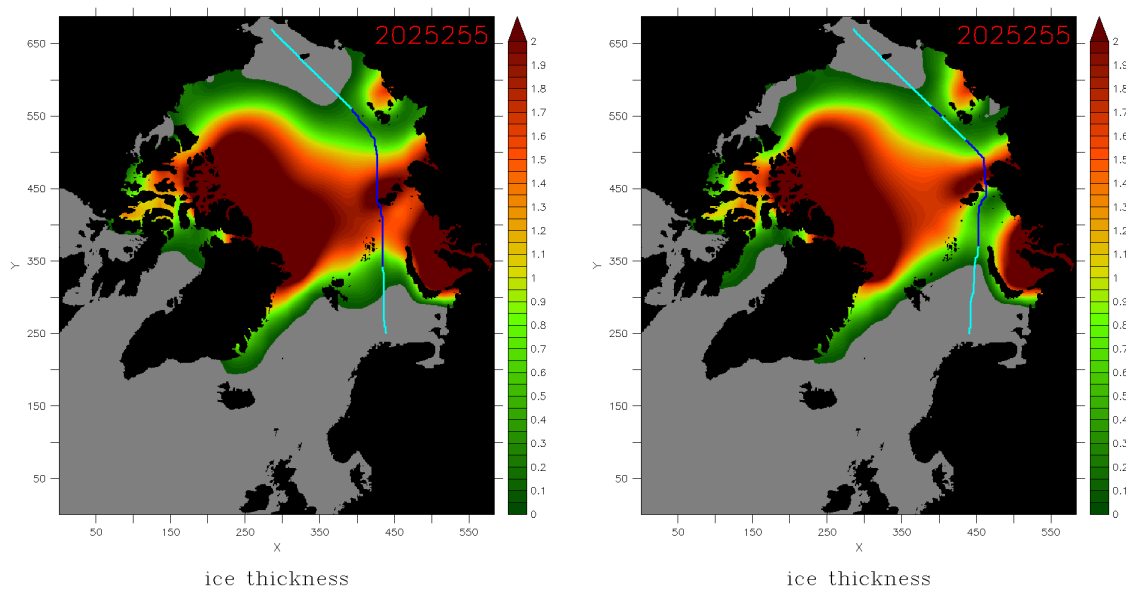
比較すると、航行距離はどれもほぼ変わらないが、航行時間は MIROC5 の方が 10-15%ほど長い。これは、MIROC5 の海氷データが全体に衛星観測値に比べて厳しい氷況を示している（海氷域が広く、氷厚も厚い）ためである。

次に、同じ出発点・到着点で、2015 年以降 2095 年まで 10 年おきの 9 年分、各年 7 月から 11 月までの毎月 1 日を出発日として同様の最適航路探索を行った。年月日以外の設定は前述のものと同一である。各年 9 月のみ、探索された航路を図 4-27 に示す。年を経て海氷域が縮小するにつれて、より北を通る航路に移行していくことが分かる。RCP8.5 では 2075 年以降は海氷が航路に影響を与えなくなり、島を避けた最短距離を進む航路になっている。

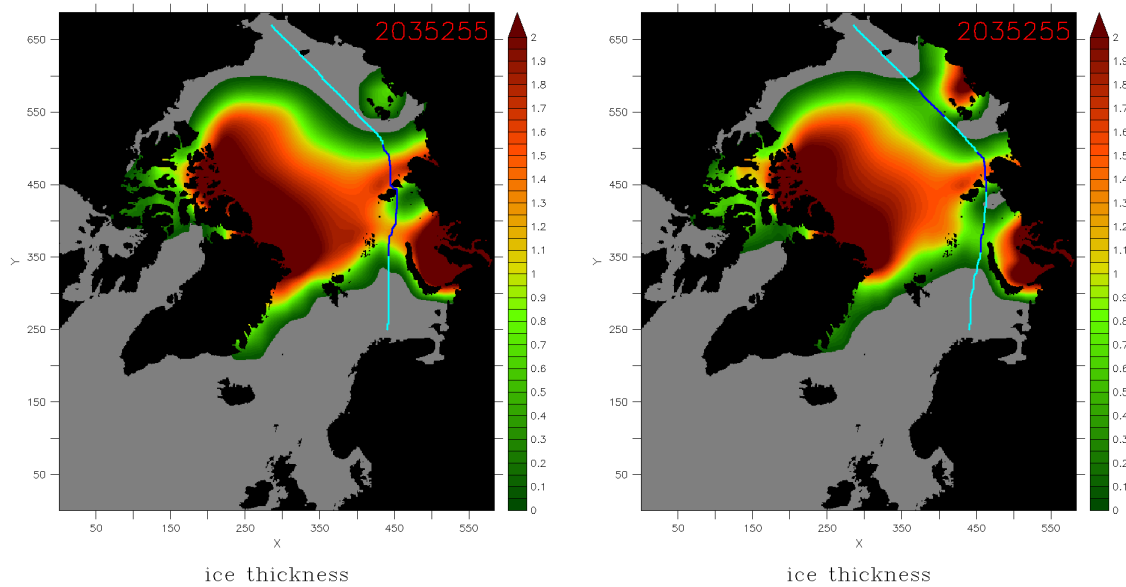


2015 年

図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路（左：RCP4.5、右：RCP8.5、色は海氷厚[m]）

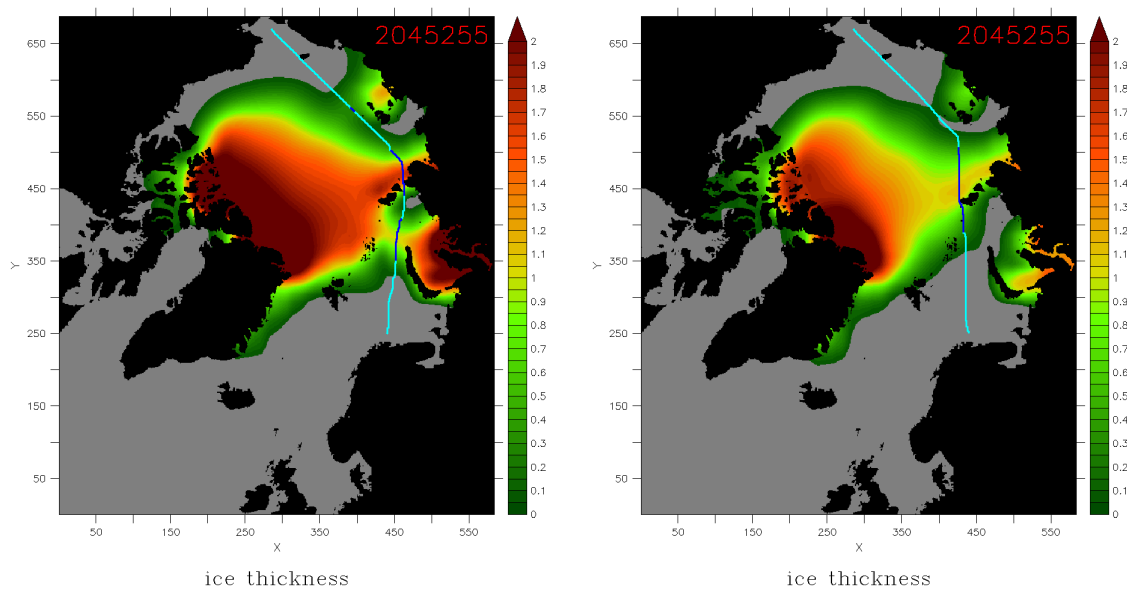


2025 年

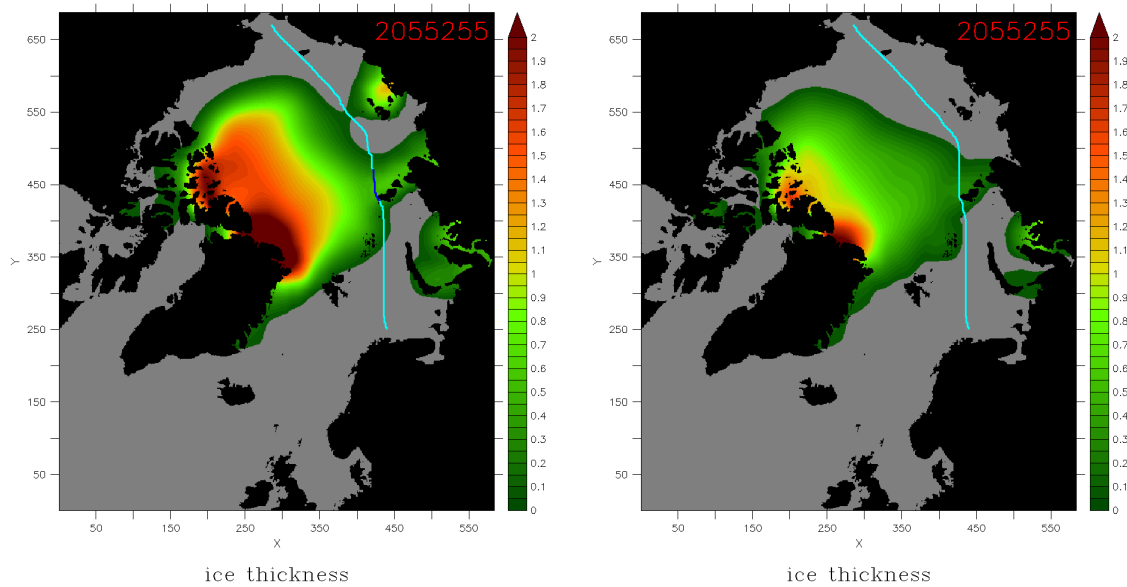


2035 年

図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路 (左 : RCP4.5、右 : RCP8.5、色は海水厚[m]) (続き)

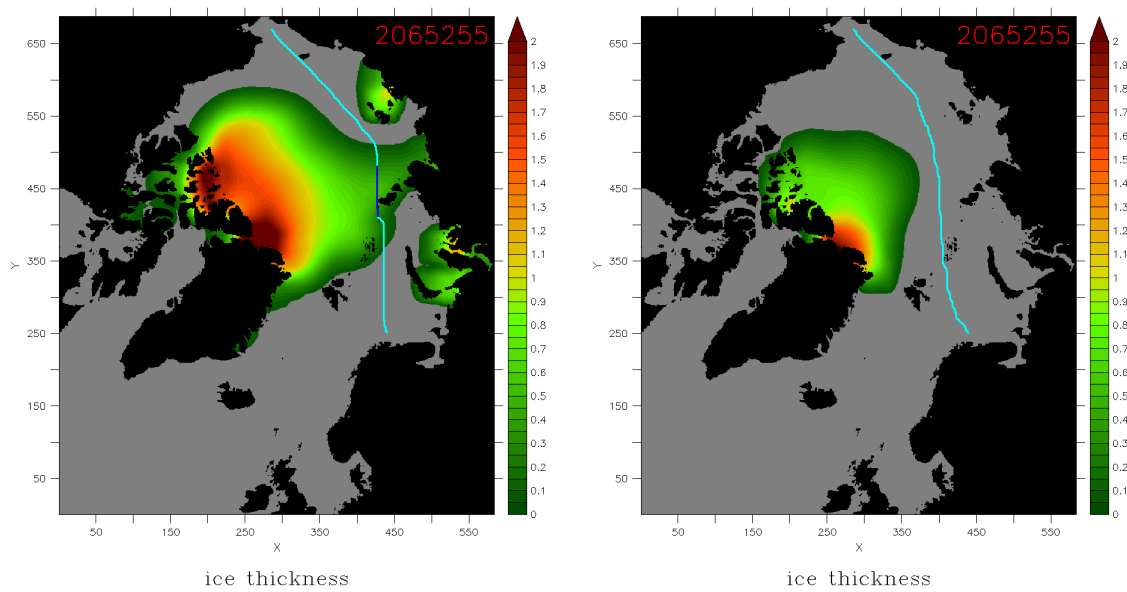


2045 年

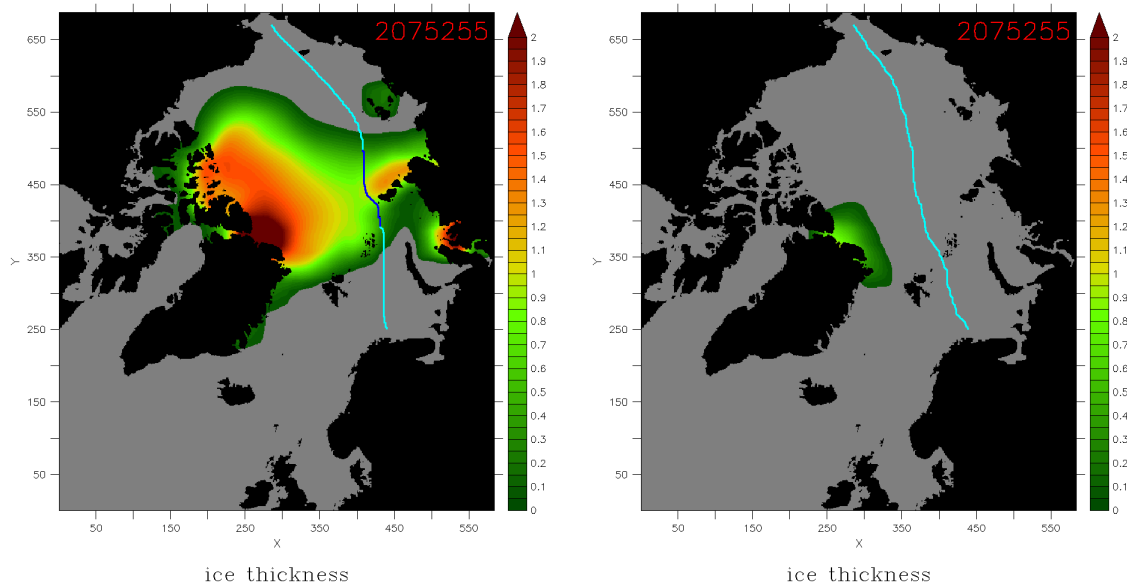


2055 年

図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路 (左 : RCP4.5、右 : RCP8.5、色は海水厚[m]) (続き)

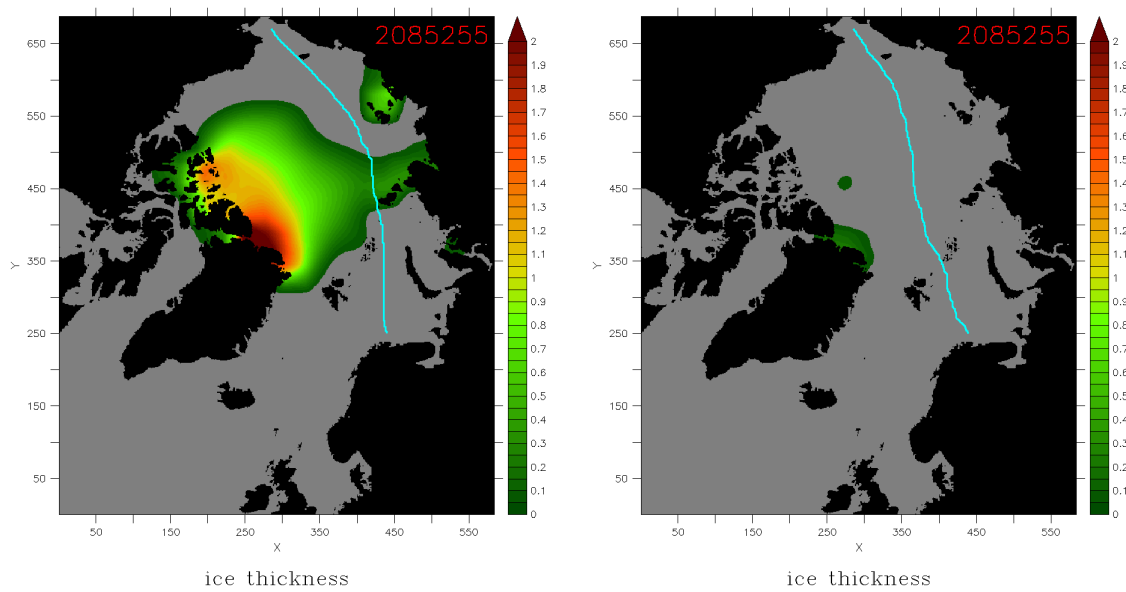


2065 年

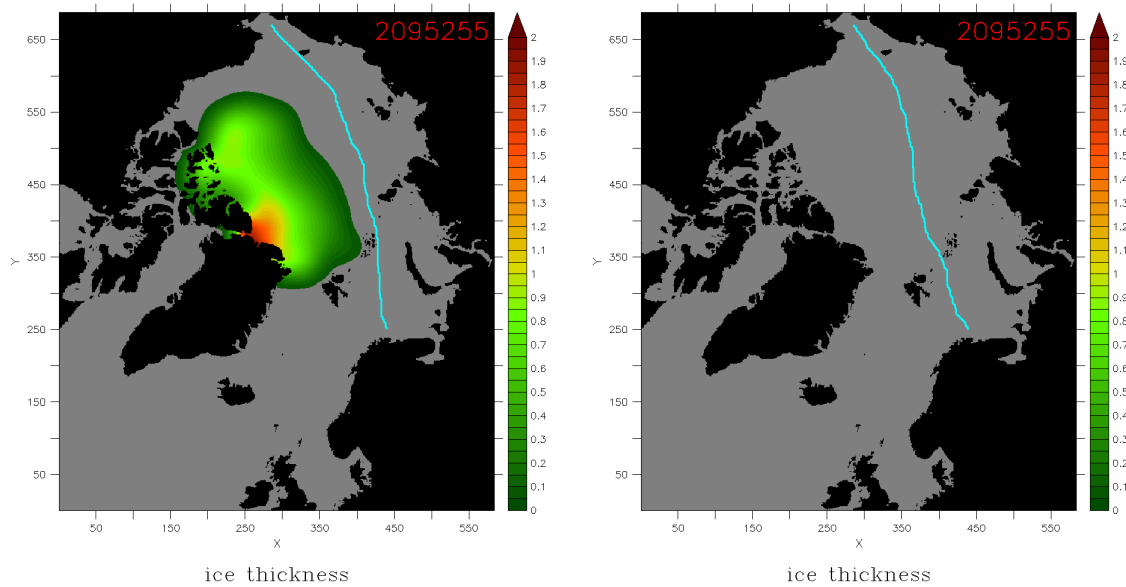


2075 年

図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路 (左 : RCP4.5、右 : RCP8.5、色は海水厚[m]) (続き)



2085 年



2095 年

図 4-27 9 月 1 日出発の最適航路 (左 : RCP4.5、右 : RCP8.5、色は海水厚[m]) (続き)

同様の探索を7月から11月について行った場合と併せて、航行距離および航行時間の変化を図4-28、図4-29、図4-30、図4-31、図4-32、図4-33に示す。データの欠けている箇所(RCP4.5の2015年7月、2055年7月、RCP8.5の2015年7月、2035年7月)は北極海全域にわたって海氷が非常に厚く、航路探索が行えなかったものである。

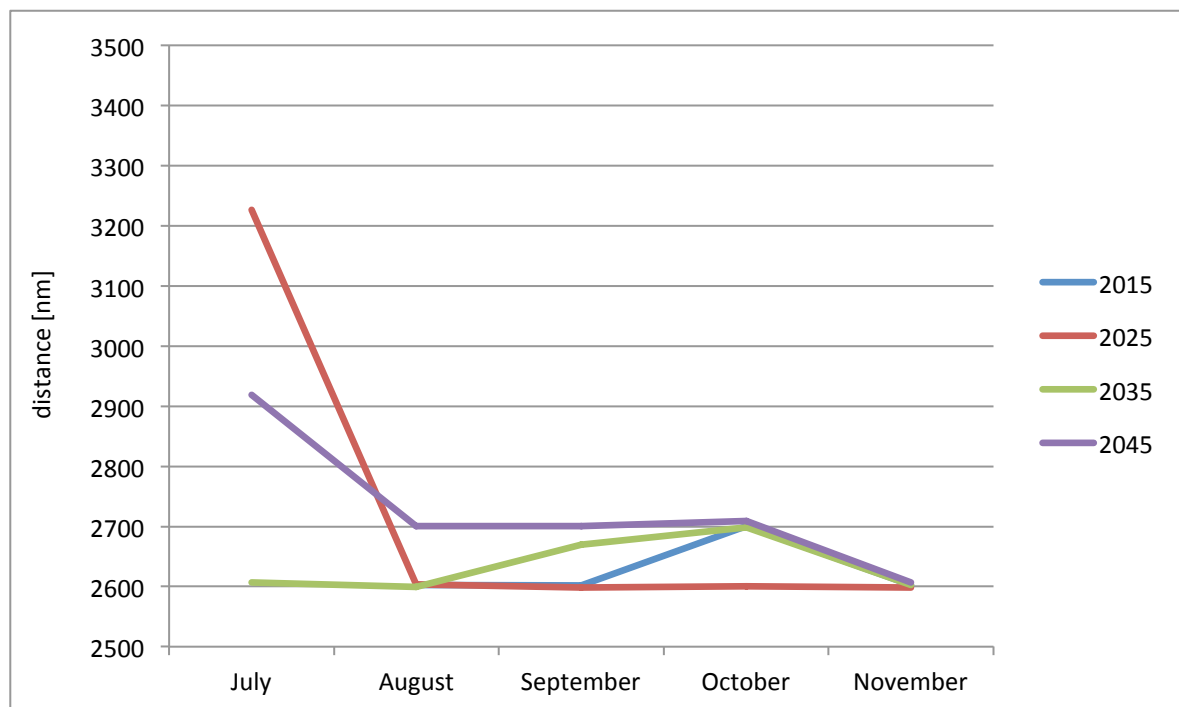


図 4-28 RCP4.5 に対する航行距離の変化（2015 年～2045 年）

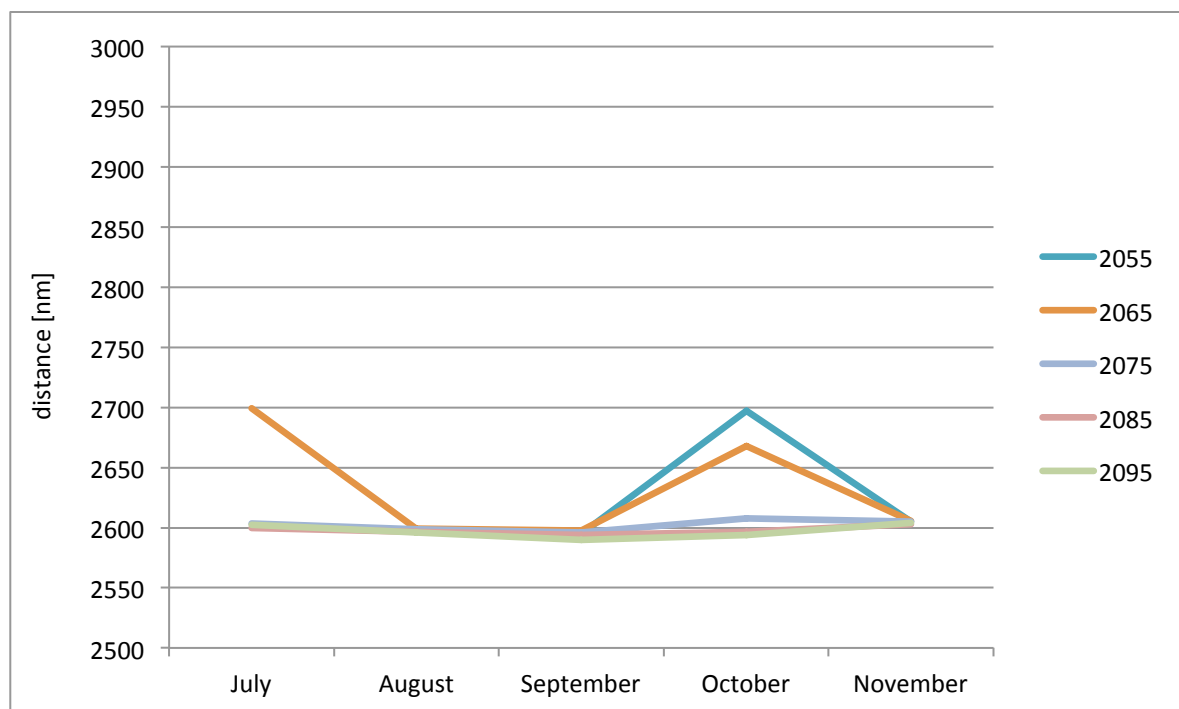


図 4-29 RCP4.5 に対する航行距離の変化（2055 年～2095 年）

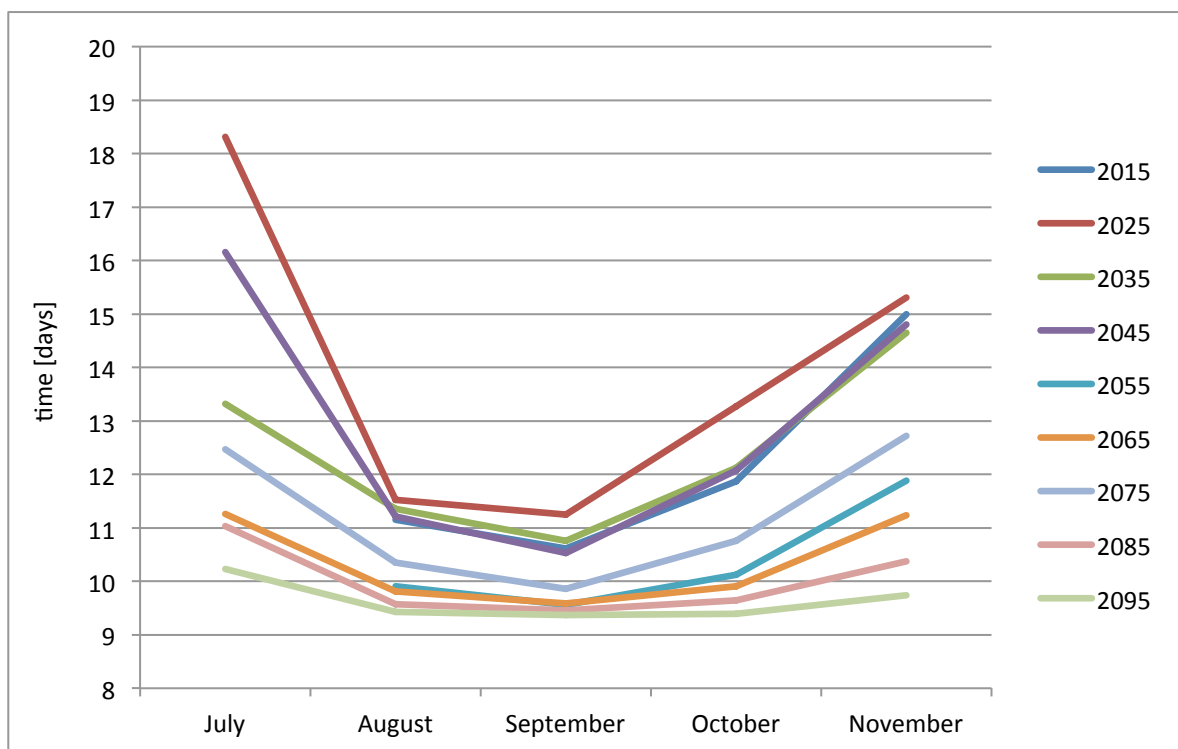


図 4-30 RCP4.5 に対する航行時間の変化（2015 年～2095 年）

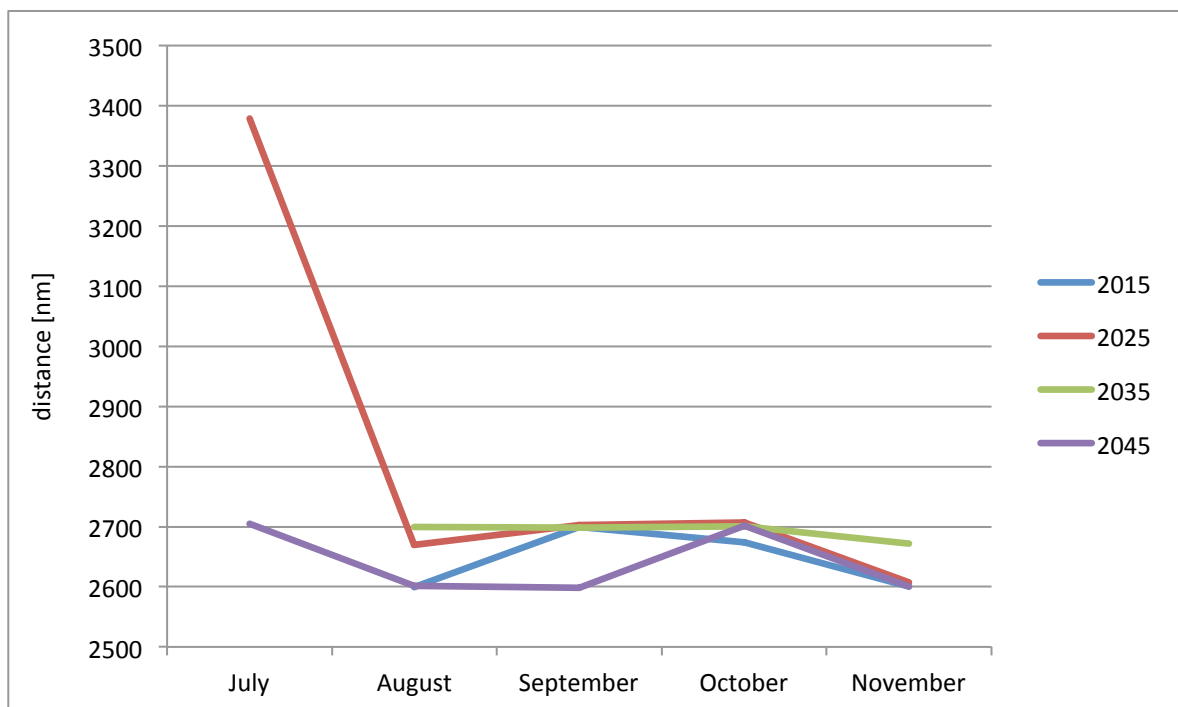


図 4-31 RCP8.5 に対する航行距離の変化（2015 年～2045 年）

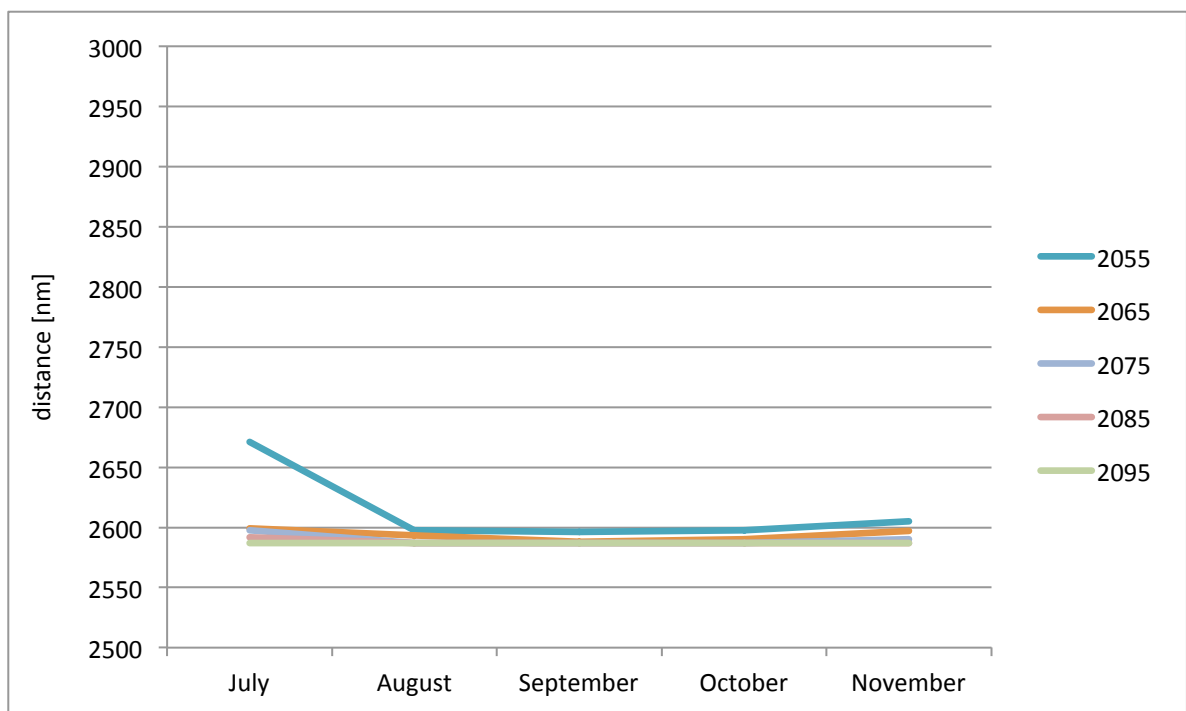


図 4-32 RCP8.5 に対する航行距離の変化（2055 年～2095 年）

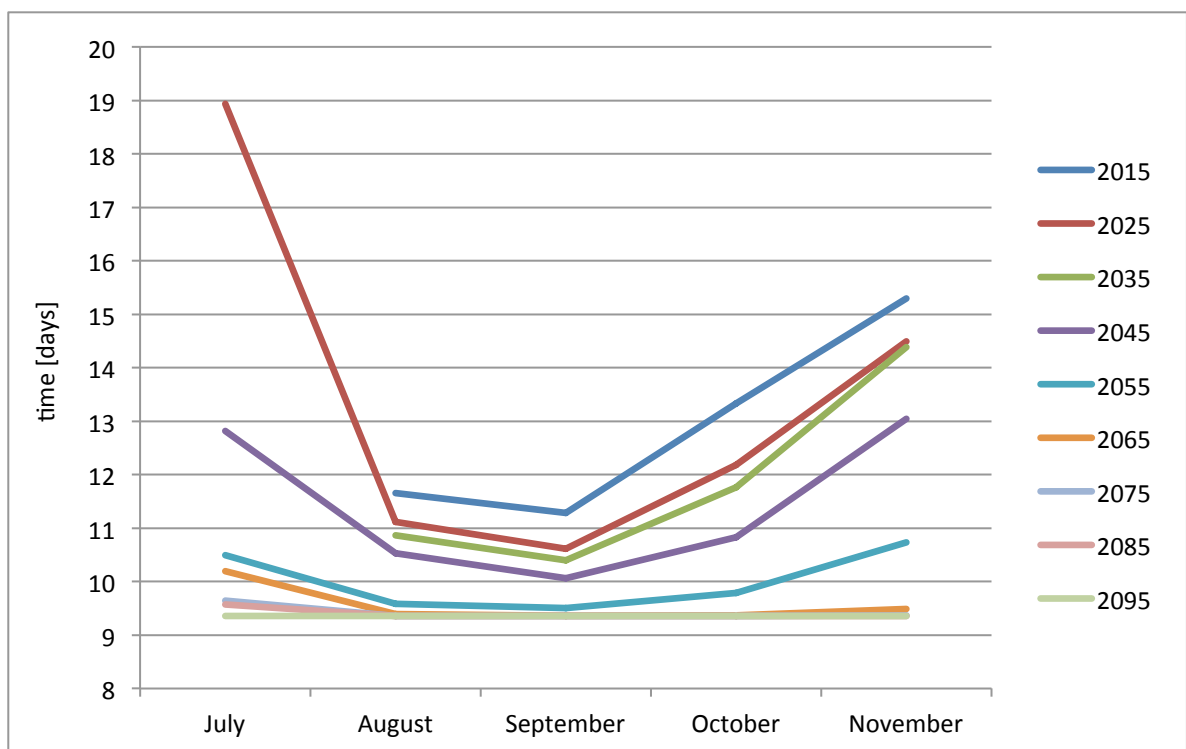


図 4-33 RCP8.5 に対する航行時間の変化（2015 年～2095 年）

航行時間はいずれのシナリオも多少のバラつきが見られるが、7月以外はおおむね2,600nmから2,700nmの間に分布しており、RCP4.5では2075年以降、RCP8.5では2065年以降、季節による変化がほとんどなくなる。7月の値が大きいのは、海氷が厚い海域が多く、かなり迂回して進むことになったためと考えられる。

航行時間にははっきりとした季節変化および年変化が見て取れる。いずれのシナリオも、海氷域が最小となる9月に極小値を取っており、また、年を経るごとに所要時間が短くなっていくことが分かる。RCP8.5では、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。距離にさほどの違いがないにも関わらず航行時間が減少することは、全体として氷況が緩く（海氷域が小さく、海氷厚が薄く）なっていくことに対応する結果が出ているものと考えられる。

図4-21、図4-22に示したように、北極海の海氷は気候モデルの予測を超えて減少しており、現に2006年から2014年については、海氷域面積、海氷厚ともに、最も温暖化の進むシナリオであるRCP8.5と比べてさえ現実の衛星観測値の方が小さい。今後数十年経てば夏季は海氷を気にすることなく航行することが出来る可能性もある。距離としては大きな短縮ではなくとも、減速要因がなくなることにより船速が上がり、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。

第5章 結論

5.1. まとめと考察

本研究では、海氷予報と組み合わせることで安全な北極海航行実現のための航行支援システムに資する航路探索の手法を確立することを目的とし、Ice Index という指標を用いて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、成果と得られた知見を述べる。

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。

衛星観測による海氷密接度および氷厚のデータと INSROP で得られた環境データを用いて Ice Index を算出し、AIS から得られた実際の航行における船速の記録を整理した。船速を開水面中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。 $15 \leq \text{Ice Index} \leq 20$ の範囲においては実航行データのバラつきが大きいため INSROP で行われた研究結果を参照し、Ice Index < 15 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、以下の船速推定式を得た。

$$v = \begin{cases} 0.768I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647I - 5.209 & (I < 15) \end{cases} \quad (34)$$

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。海氷数値モデルによるアンサンブル予測計算の結果から平均と標準偏差を用いて切断正規分布を仮定し、海氷厚が船の砕氷能力を超えてしまう確率を失敗率として、それを考慮した航路探索を行った。失敗率を考慮した結果、考慮しない場合に比べて航行距離や航行時間は増えるものの、計算結果のバラつきの大きい海域を避けることで、より安全な航路を探索できるようになったと考えられる。

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取り、実航行データと計算で求めた最適航路の比較を行った。

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。海氷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 1m 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で、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という可能性を示唆している。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。

気候モデルの氷況再現度は高いとはいえないものの、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可能性があり、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。RCP8.5によれば2075年頃には海氷の影響を受けずに航路選定できると予測されるが、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そうした状況が現実のものとなる可能性もある。

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。指標に使われるパラメーターにはINSROPの環境データを用いて推定したものもあるが、大気も含めた数値モデルから気温や風速等の短期予報データを得ることが出来ればより精度の高いものになる可能性があり、モデルの発展が期待される。

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、霧等の条件も減速の要因となる。特に氷縁付近では霧が出やすいため、NSR航行において無視できない要素である。氷況に関しては、Ice Index法で考慮できていない要素に氷盤サイズがある。小さな氷盤を押し分けながら進むのと大きな氷盤を割りながら進むのは大きく状況が異なり、同じ密接度でも氷盤サイズによって船速は変化する。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を用いた整理によって船型によらない解析が行えるのは利点でもあるが、船会社等の詳細な船型データを持っているユーザーにとっては一般性が強すぎる面もある。そうした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（Matsuzawa et al. (2015)[27]、Uto et al. (2015)[28]等）を取り入れることが有効である。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。

最適航路探索のツールとしてのプラットフォームに、極地研究所のADS[4]を検討している。最適航路探索コードを提供して移植してもらい、テストページが出来た段階である。今後、ADS上で、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ことで、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おり、これも今後進めるべき課題であるといえる。

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] 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>
- [3] 気象庁 海洋の健康診断表
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index.html>
- [4] 国立極地研究所 ADS (Arctic Data archive System)
<https://ads.nipr.ac.jp/ja/>
- [5] 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
- [6] Otsuka, N., Y. Nakano, Y. Adachi, S. Iki, Y. Kamiko, S. Kaewngern, M. Hoshi, and K. Yamashita, Cost analysis of Northern Sea Route shipping, Proceeding of 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), 218-222, 2014
- [7] Yamaguchi, H., Experimental voyage through Northern Sea Route, Northern Sea Route; Future & Perspective (Proceeding of INSROP Symposium Tokyo '95), 39-90, 1995
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Kotovirta, V., R. Jalonen, L. Axell, K. Riska, and R. Berglund, A system for route optimization in ice-covered waters, Cold Regions Science and Technology, 55, 52-62, 2009
- [11] Nam, J. H., I. Park, H. J. Lee, M. O. Kwon, K. Choi, and Y. K. Seo, Simulation of optimal arctic routes using a numerical sea ice model based on an ice-coupled ocean circulation method, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5, 210-226, 2013
- [12] Choi, M., H. Chung, H. Yamaguchi, and K. Nagakawa, Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model, Cold Regions Science and Technology, 109, 61-69, 2015

- [13] De Silva, L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono, Ice-ocean coupled computations for the sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Ocean, Polar Research, accepted
- [14] 佐川玄輝, 氷盤衝突を考慮した海氷力学モデルの開発とそれを用いたオホーツク海の海氷変動数値計算, 東京大学大学院 工学系研究科, 博士論文, 2007
- [15] Fujisaki A., H. Yamaguchi, and H. Mitsudera, Numerical experiments of air-ice drag coefficient and its impact on ice-ocean coupled system in the Sea of Okhotsk, Ocean Dynamics, 60, 377-394, 2010
- [16] 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
- [17] 石井吉徳, リモートセンシング読本, オーム社, 1981
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 北日本港湾コンサルタント株式会社
<http://white-sapporo.sakura.ne.jp>
- [21] 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
- [22] Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto, Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity, Journal of Climate, 23, 6312-6335, 2010
- [23] 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
- [24] Fu, L., D. Sun, and L. R. Rilett, Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: State of the art, Computers & Operations Research, 33(11), 3324-3343, 2006

- [25] Patey, M., and K. Riska, Simulation of ship transit through ice, INSROP Working Paper No. 155, 1999
- [26] Allison, I., N. L. Bindoff, R. A. Bindshadler, P. M. Cox, N. de Noblet, M. H. England, J. E. Francis, N. Gruber, A. M. Haywood, D. J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T. M. Lenton, M. E. Mann, B. I. McNeil, A. J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H. J. Schellnhuber, S. H. Schneider, S. C. Sherwood, R. C. J. Somerville, K. Steffen, E. J. Steig, M. Visbeck, and A. J. Weaver, The Copenhagen Diagnosis: Updating the world on the Latest Climate Science, The University of New South Wales Climate Change Research Centre, Australia, 2009
- [27] 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
- [28] Uto, S., H. Shimoda, D. Wako, and T. Matsuzawa, NSR transit simulations by the vessel performance simulator “VESTA”: Part 2 Simple resistance formulae of ships in floe ice, Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2015

謝辞

紆余曲折を経て結果として2年半かかりましたが、たくさんの方々のご指導・ご支援のおかげで、無事修士論文を完成させることができました。この場を借りて感謝の言葉を述べさせていただきます。

まずは指導教員である山口先生。研究面ではもちろん、精神面や生活面でも細かく気を遣っていただき、暖かいご指導をいただきました。ゼミでいただくご指摘の数々は的確で、行き詰まっている時には新たな方向性を見いだせるよう助言していただきました。私が修士論文を書き上げることができたのは文字通り先生のおかげであり、深く感謝しております。幅広く豊富な知識と分かりやすい説明に、学生を導く指導力。4年生の時に山口研究室を選んでよかったと今さらながらに感じます。

また、副指導教員の早稲田先生には2回に渡る面談のたびに、長く時間をとっていただき、熱心に指導していただきました。私がなんとなく通り過ぎてしまいがちな点を議論し、研究の基礎をただしていただき、大変ためになりました。

KAISTで修士をとって今はノルウェーにいるChoiさんには、研究のベース部分でお世話になりました。私が4年生のとき短期で山口研に来ていたのが最初の出会いだったと思います。が、当時M1ながらも熱心に研究して積極的にいろんなことを吸収するさまが印象的でした。

北日本港湾コンサルタント株式会社の大塚さんには、AISのデータを提供していただきました。また、日本中、世界中を飛び回ってお忙しい中、折にふれて研究についてコメントをいただき、考察を深める手助けをしていただきました。様々な航行の実情を知る立場からのご意見はとても勉強になりました。

株式会社ウェザーニューズの佐川さん、横川さんには、実際に最適航路を用いた航行支援を行っている立場から、現場で使われているツールや資料を見せていただきました。特に研究室OBでもある佐川さんには、たびたび研究について見ていただき、民間企業ならではの視点から貴重なご意見をいただきました。

極地研究所ADSチームの矢吹さん、杉村さん、照井さんには、ADSへのコード移植に関連してお世話になりました。私のつたないコードから美しいインターフェースを作り上げていただき、初めてテストページを見た時には感動を覚えました。自分の行った研究が新たに生まれ変わって社会に近づくのはとてもモチベーションを刺激されることでした。

JAMSTECの小野さんには長期予測データの準備等でサポートしていただきました。山口研にいらっしゃったところから変わらない、丁寧で迅速な仕事ぶりは、私も見習いたいと思いつつ、研究も佳境にさしかかる時期だっただけに大変ありがたいものでした。

特任研究員の木村さんには、衛星データの取り扱いや **Fortran** プログラミングなどで助けていただいたほか、日常でもお昼をご一緒したり時に雑談したりと、楽しい時間を過ごさせていただきました。昼食等に車でいろいろなところに連れて行っていただいたのも良い思い出です。また、お仕事のお忙しい中、修士論文の添削に時間を割いていただき、とても助かりました。これからも研究室ブログを一読者として楽しみにしようと思います。

特任研究員の **Waruna** さんには、短期予測モデルのデータを準備していただいた他、データの補間や、描画ソフト **ferret** の扱いについてフォローしていただきました。私のたどたどしい英語にも嫌な顔ひとつせず親身に助けていただいて、ありがたかったです。また、私が（つたないにせよ）臆せず英会話を出来るようになったのは **Waruna** さんや **Yasara** さんと雑談から研究の話までたくさん会話したおかげだと思います。良い経験を積ませて頂きました。

今は林研究室の研究員である広部さん、また、卒業された研究室の先輩である金さん、榎野さんには、山口研に來た当初からお世話になりました。根を詰めて研究に取り組む先輩方の姿に刺激されるとともに、**ferret** の扱いやデータの扱い、**UNIX** コマンドについてなど、助言をいただくことも多々ありました。

博士課程の **Yasara** さん、修士課程の後輩の永川くん、今井くん、戸田くん、研究生の **Miao** くんとは、一緒に学生生活を送る中で、刺激し合える関係性を持てたのではと思います。特に **Yasara** さんにはモデルデータのことを教わったり、永川くんには計算サーバー **dale** の使い方を教えてもらったりと、助けていただきました。それぞれ独自の視点から研究にコメントをくださったのもありがたかったです。

学部4年生の領域プロジェクトから数えると3年半、山口研究室にはお世話になりました。気付けば、院生室メンバーの中では研究員のおふたりに次ぐ3番目の古株になっていて、驚くとともに感慨深いものでした。たくさん勉強して、北極海での観測にも参加させていただいて、中身の詰まった大学院生活でした。普通言われるのとは逆ですが、短いようで長い、そんな3年半だったように思います。

最後になりましたが、大学院生活を通してあらゆる面から支えてくださった友人と家族、特に両親に心から感謝をしたいと思います。本当にありがとうございました。