

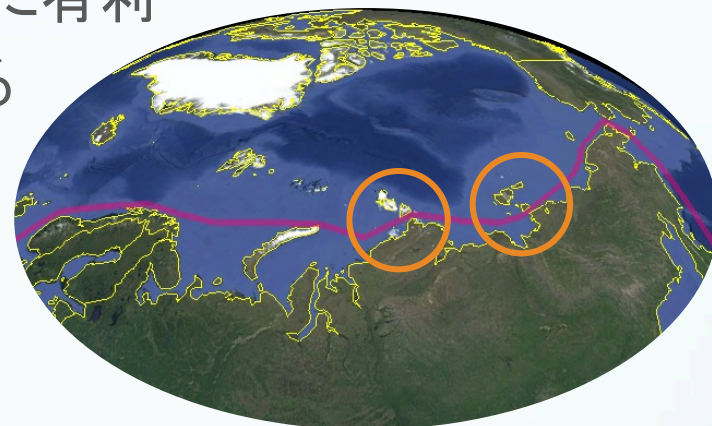
最適ルートと 運行支援モデル化に向けて

東京大学大学院新領域創成科学研究科
山口一、中野佑哉

氷海における航路決定

- 氷海航行の特徴

- 海氷との衝突やスタック(閉じ込め)の危険性
- 距離・所要時間を短くすることが経済的に有利
- 航路幅の狭いところや島の間などを通る必要がある
- 海氷の変化をある程度予測して航路を決定する必要がある



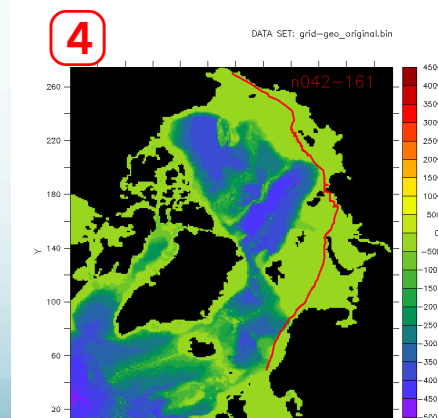
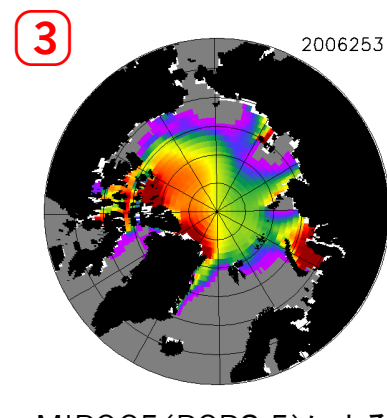
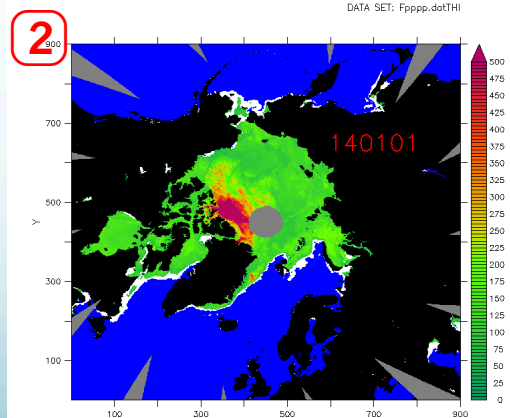
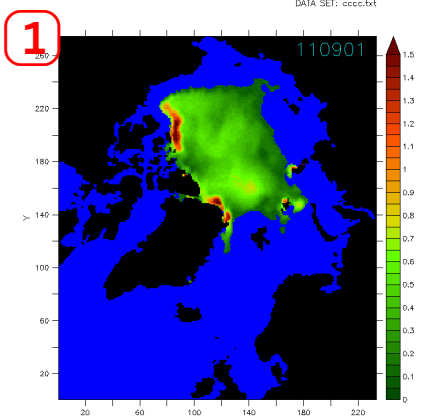
- 先行研究

- バルト海における航路選択 (Kotovirta et al., 2009)
- 経済性(航行コスト)に着目した航路選択 (Nam et al., 2013)
- 氷況予報の不確かさに着目 (Choi et al., 2015)
 - 密接度と氷厚に比例する単純な船速低減式

Ice Indexを用いた、複雑な氷況に対応する船速推定式の導出
北極海航路の夏季氷海航行における最適航路探索法の確立

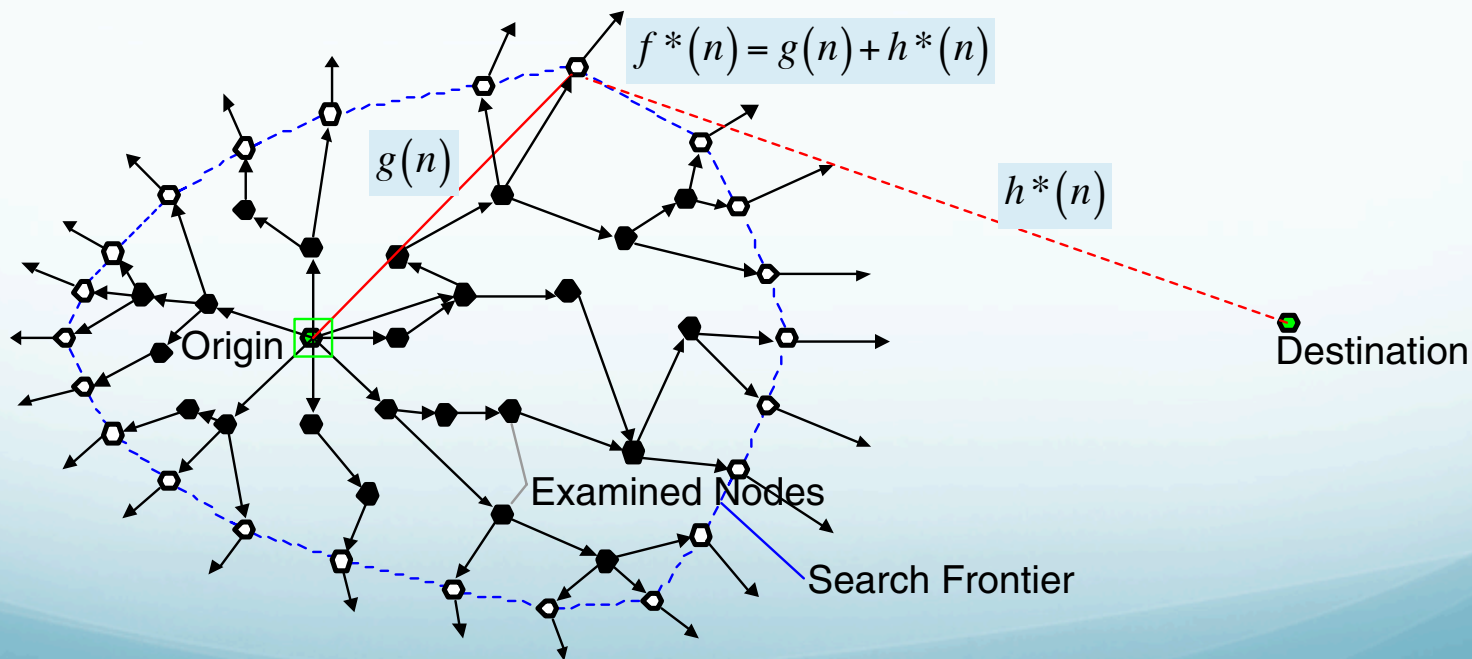
使用データ

種類	内容	解像度 グリッド数	期間	備考
① 短期予報データ 数値モデルIce-POM	海水密接度 海水厚	25km 233×274	2011年 9月-10月	初期値を変えて31回計算 確率分布として 切断正規分布を仮定
② 衛星観測データ マイクロ波放射計AMSR2	海水密接度 海水厚	10km 900×900	2014年 -2015年	氷厚のエラー(メルトポイントに よる)は20cmとして扱った
③ 長期予測データ 気候モデルMIROC5	海水密接度 海水厚	10km補間 584×687	2006年 -2009年	RCP4.5、RCP8.5による 将来予測実験結果
④ NSR実航行データ 自動船舶識別装置AIS	緯度・経度 船速	—	2014年6月 -2015年2 月	耐氷船最強クラス貨物船 (アイスクラスIA、IA Super) 船速2ノット以下は原則除外

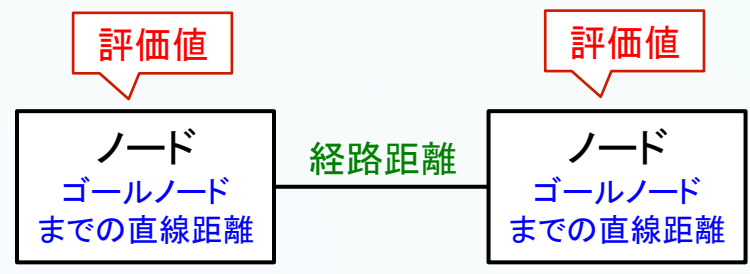
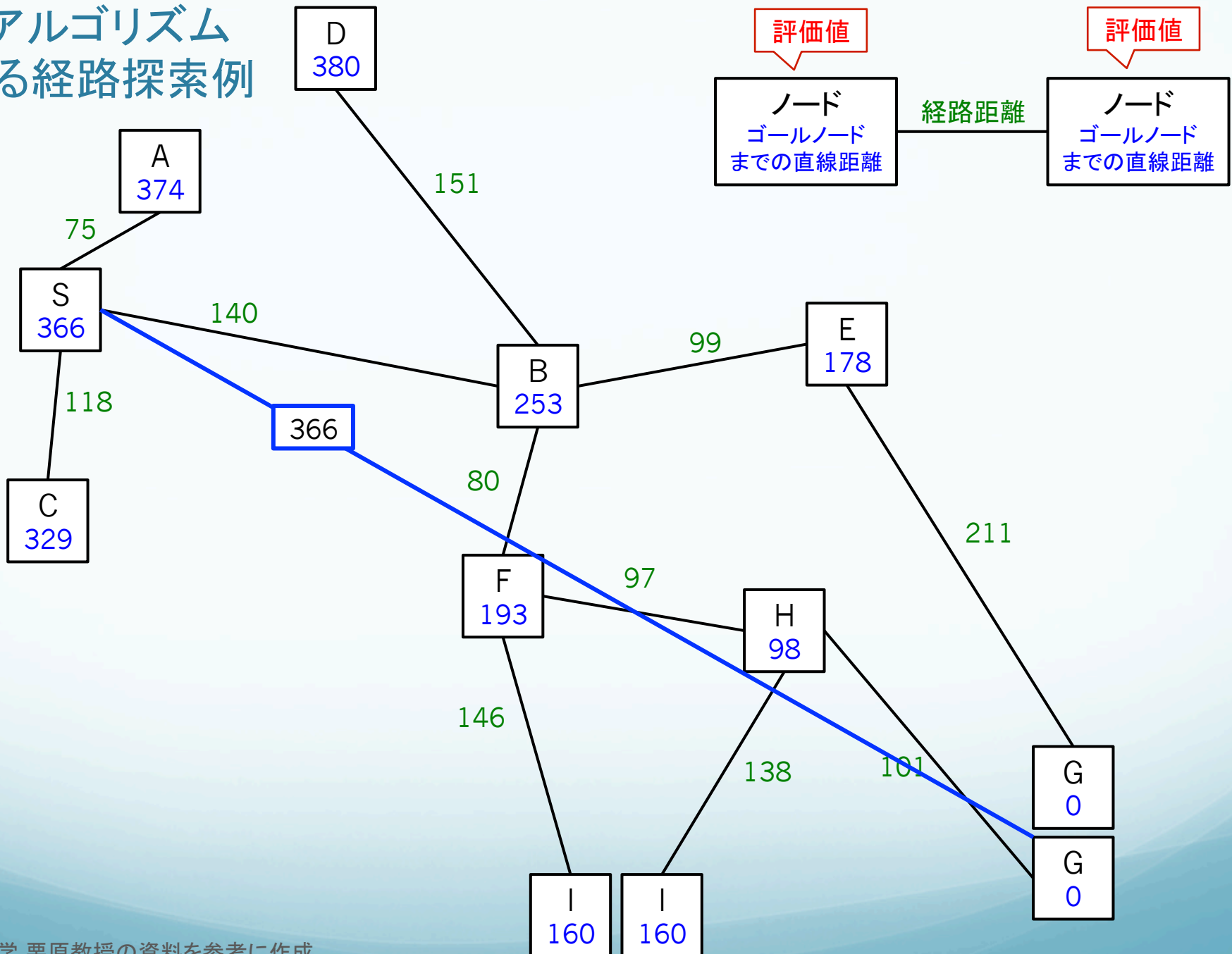


経路探索アルゴリズム

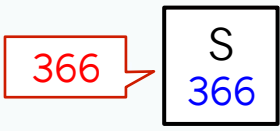
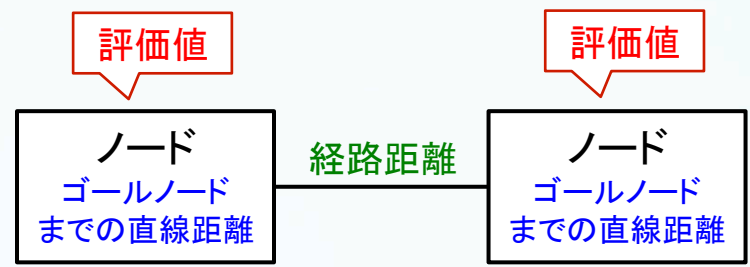
- A* algorithm (Hart et al., 1968)
 - 一定の条件のもと、完全性と最適性がある
 - 解が存在すれば必ず見つけ、最小コスト解を最初に見つける
 - 各探査対象ノードについて評価値を計算し、値の小さいノードから展開していく
 - ゴールノードが展開されたら探索終了



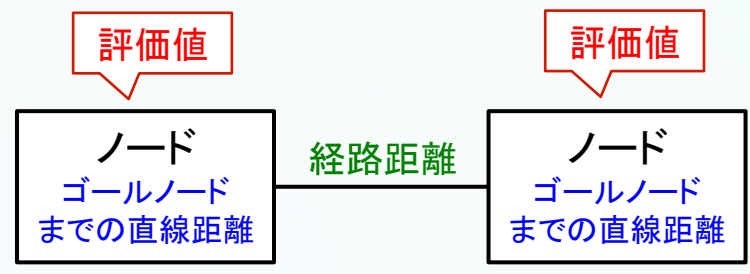
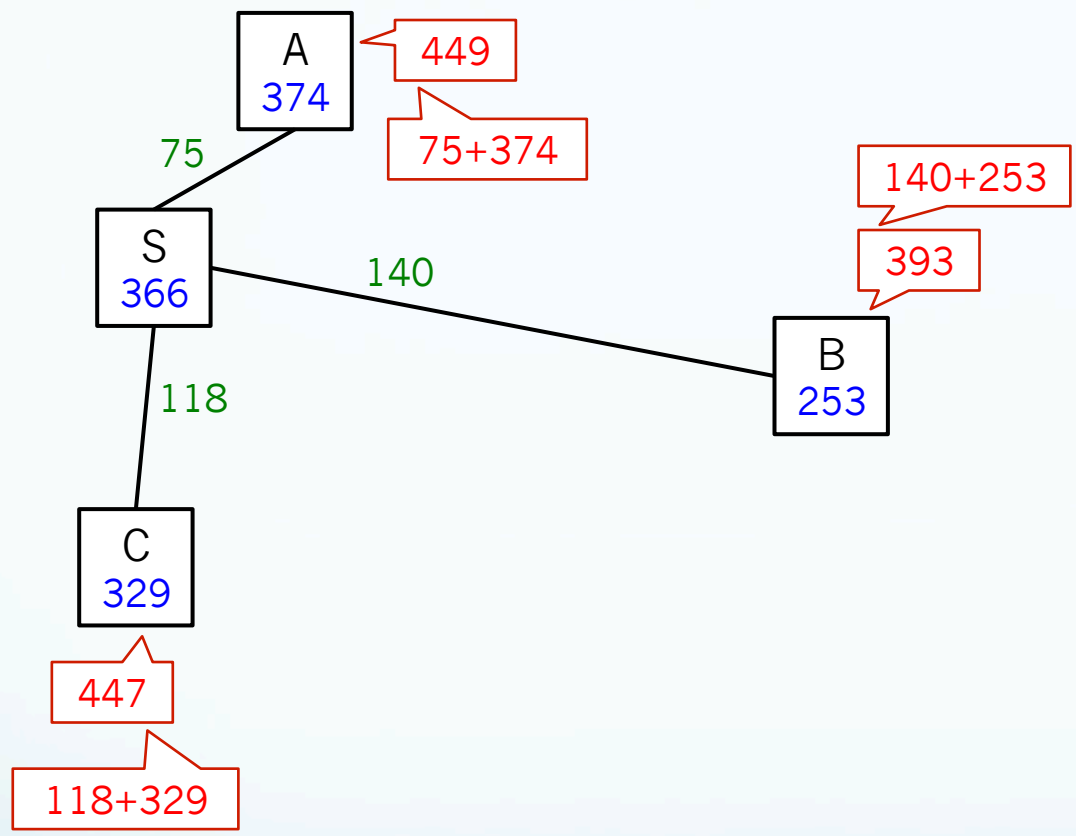
A*アルゴリズムによる経路探索例



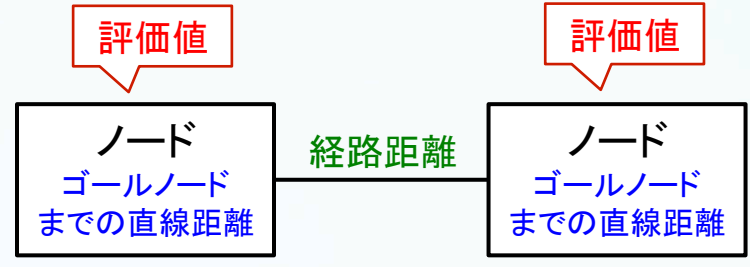
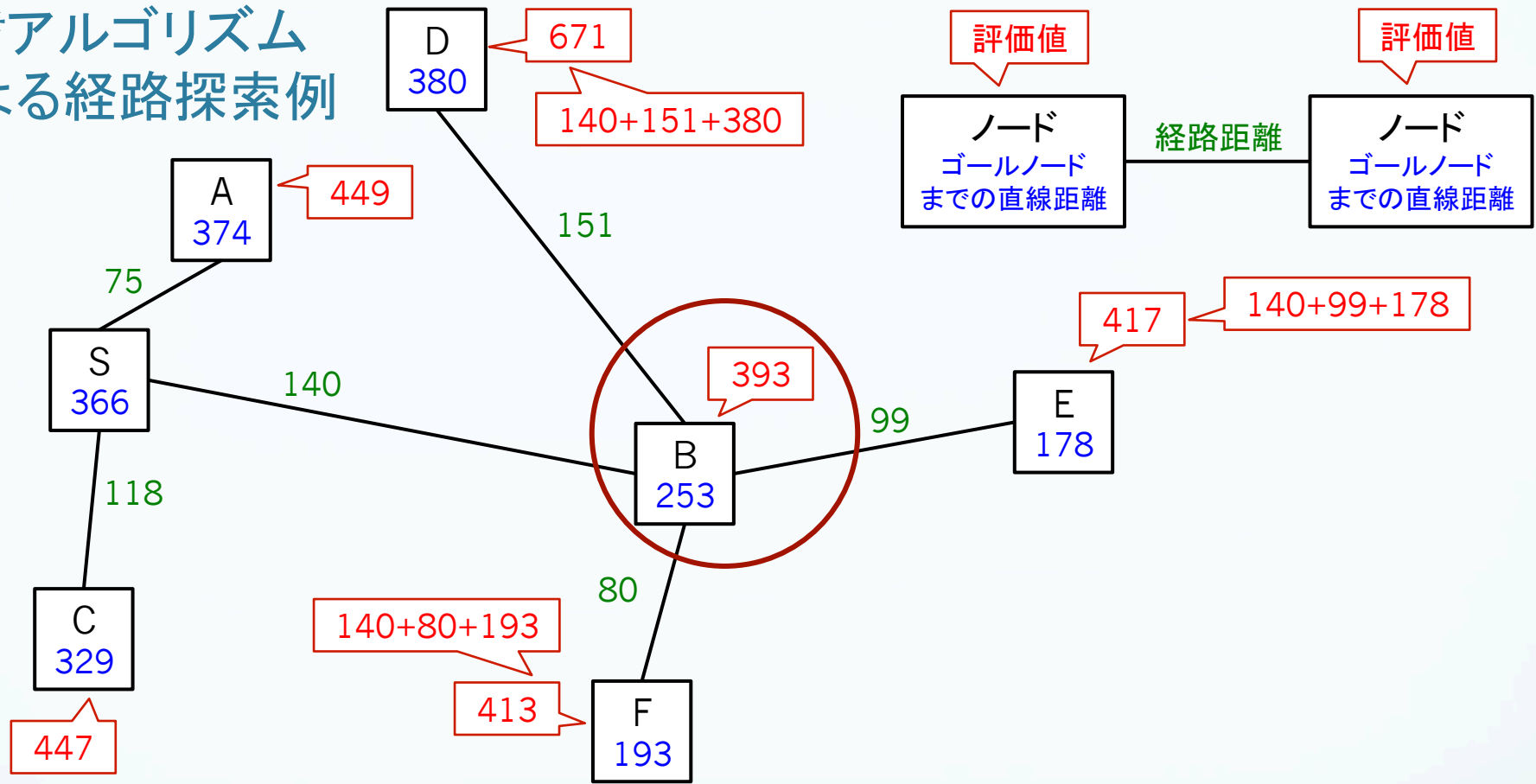
A*アルゴリズム による経路探索例



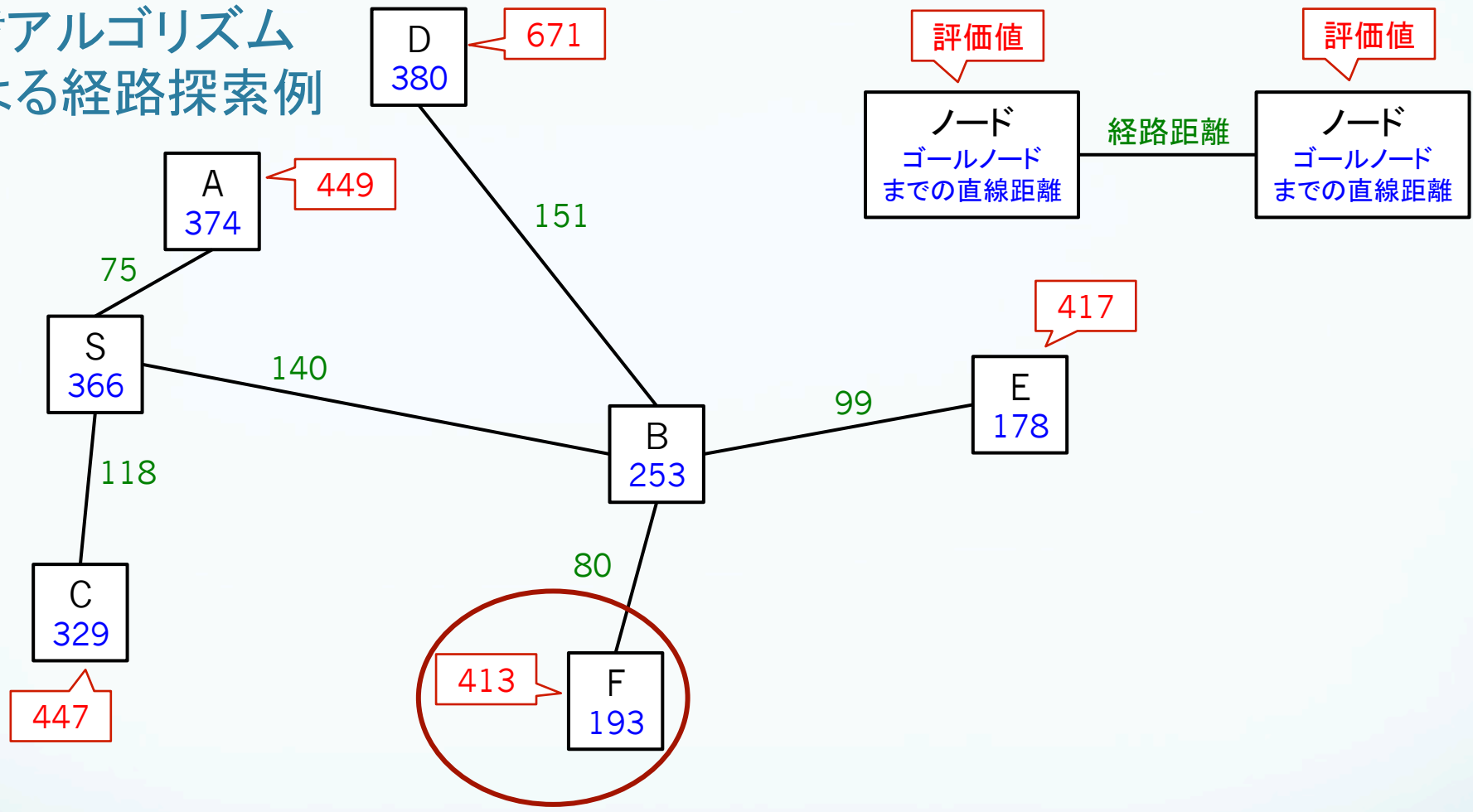
A*アルゴリズム による経路探索例



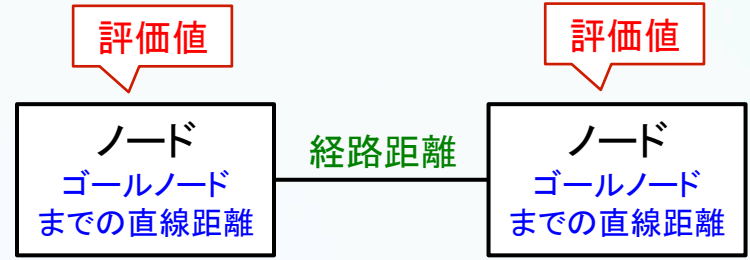
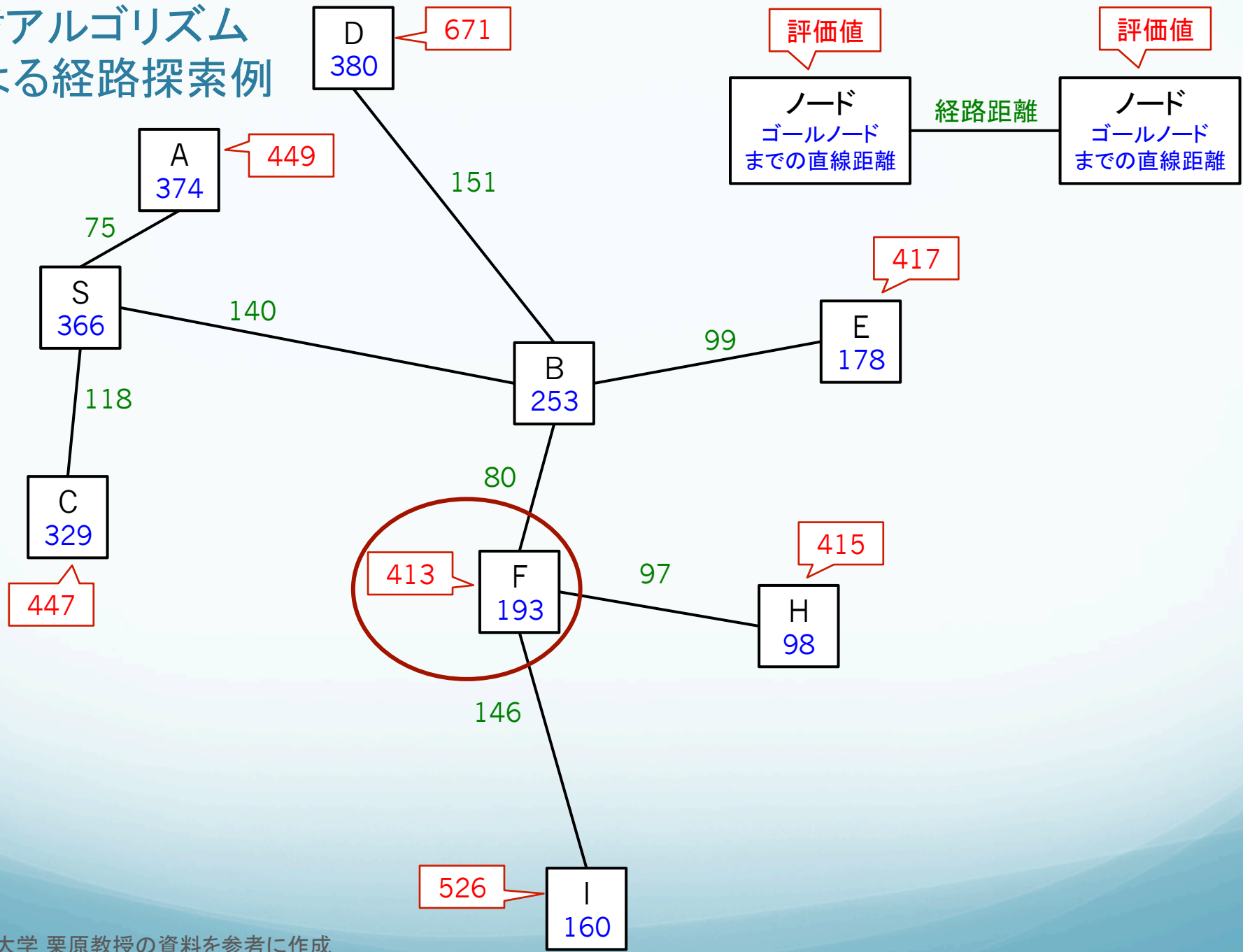
A*アルゴリズムによる経路探索例



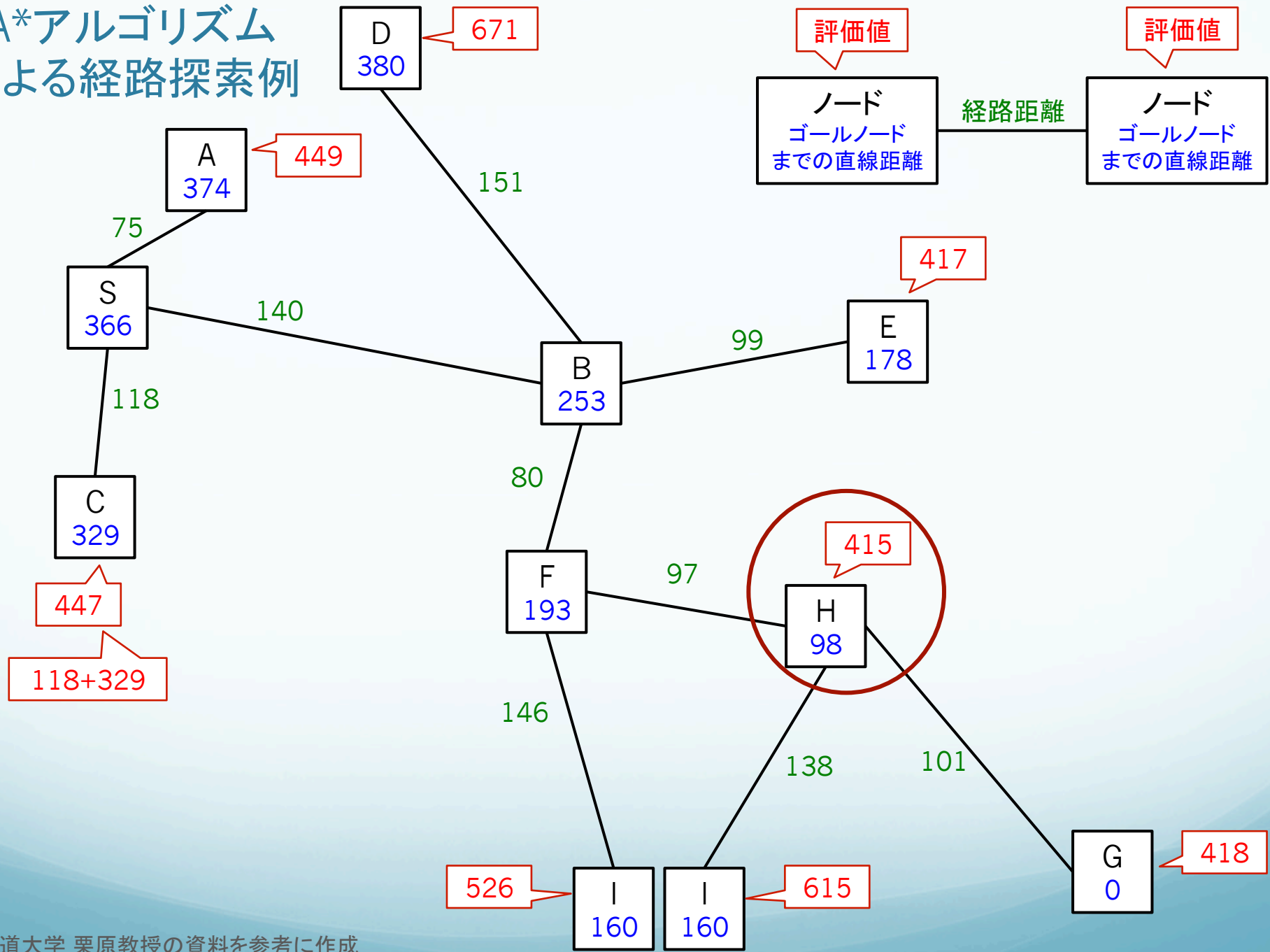
A*アルゴリズムによる経路探索例



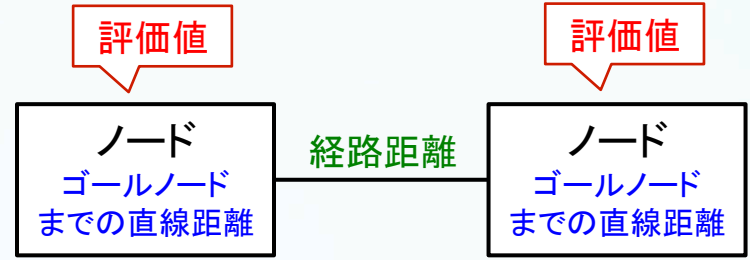
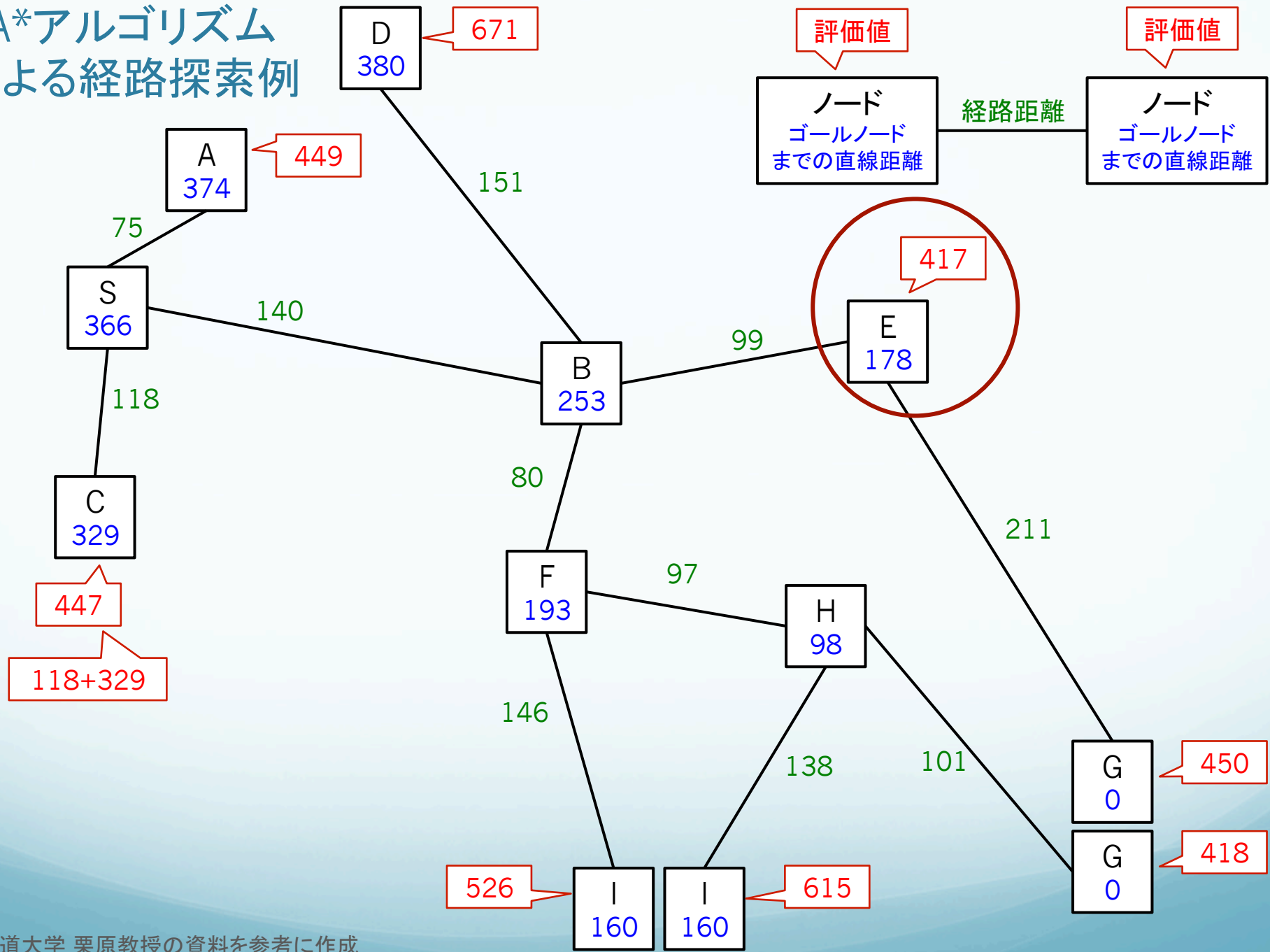
A*アルゴリズムによる経路探索例



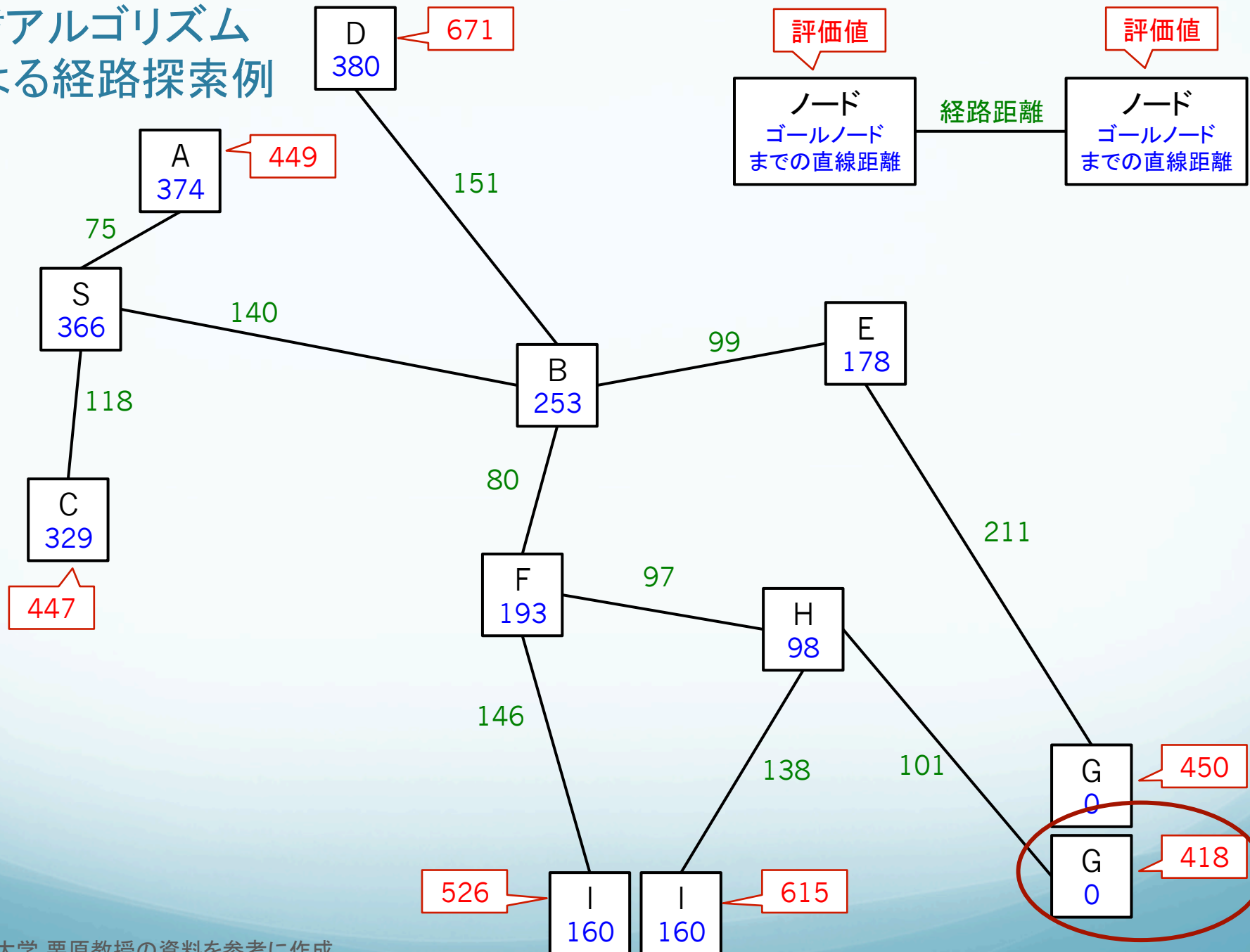
A*アルゴリズムによる経路探索例



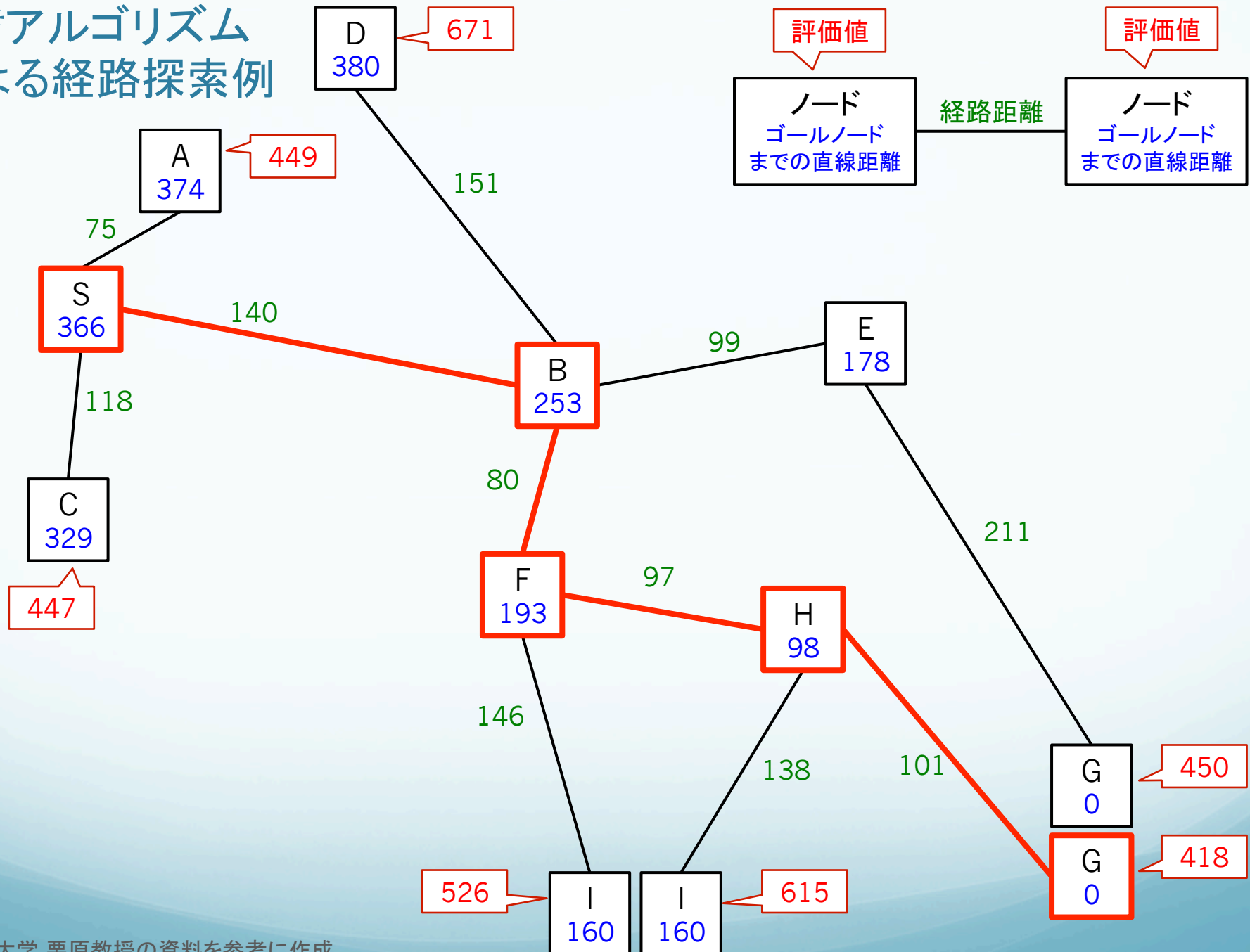
A*アルゴリズムによる経路探索例



A*アルゴリズムによる経路探索例



A*アルゴリズムによる経路探索例



氷況に対する船速の推定

航路探索のため、氷況に対して船速を決定する



砕氷抵抗式を用いるためには船型パラメーターが必要

$$R_{SF} = R_{SF1} + R_{SF2} + R_{SF3} + R_W$$

$$R_{SF1} = \bar{k}_3 \rho_i g r h_i L F_L^2 \tan^2 \alpha_o$$

$$R_{SF2} = \bar{k}_2 \rho_i g r h_i B F_L (\mu + C_{WE} \tan \alpha_o)$$

$$R_{SF3} = \bar{k}_1 \rho_i g \sqrt{r h_i} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left(1 + 4\mu C_{WE} \frac{L_H}{B}\right)$$

Matsuzawa et al. (2015)より

だが、海運会社等の持つ船型パラメーターは公開されておらず、
一般のユーザーには利用できない



船型によらずに、氷況と過去の航行実績から船速を推定する

船速推定のための指標

- Ice Index
 - INSROP (1993-1999) で提唱された、航行の難易度を表す指標
 - 開水面で最大値20を取り、小さいほど厳しい氷況を表す

$$I = I_A + I_B + I_C$$

I : Ice Index

I_A : 密接度、氷厚、対象船舶のアイスクラスの影響を表す指標

I_B : リッジ(海氷が乗り重なって厚くなった状態)の影響を表す指標

I_C : 気温によって決まる氷の強度影響を表す指標

I_A が最も影響大 / I_B 、 I_C はINSROPでロシアから提供された環境データを用いて推定

衛星観測の氷況データを用いてIce Indexを計算



船型によらない解析のため、開水面船速に対する船速減少率を用いてAISデータを整理し、Ice Indexと船速の関係を解析した

船速推定のための指標

- Ice Index

- INSROP (1993-1999) で提

- 開水面で最大値20を

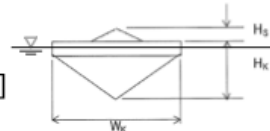
$$I_A = C_1 \times C_m + C_2 \times C_f + 2 \times (10 - C_f - C_m)$$

C_f : 一年氷密接度 [10分率]
 C_m : 多年氷密接度 [10分率]
 C_1, C_2 : 氷厚、船のアイスクラスによって決まる係数

表す指標

$$I_B = \left(-H_s \cdot D_r / 25 \right) \times (C_f + C_m)$$

H_s : リッジ高さ [m]
 D_r : リッジ密接度 [km^{-1}]



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

M_{CS} : 気温によって決まる係数

$$I = I_A + I_B + I_C$$

I : Ice Index

I_A : 密接度、氷厚、対象船舶のアイスクラスの影響を表す指標

I_B : リッジ(海氷が乗り重なって厚くなった状態)の影響を表す指標

I_C : 気温によって決まる氷の強度影響を表す指標

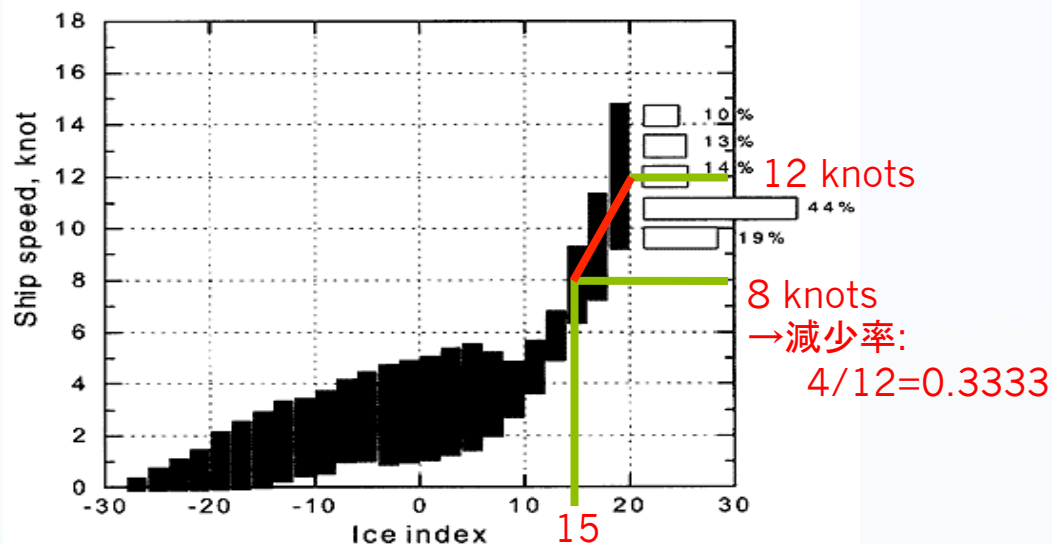
I_A が最も影響大 / I_B, I_C はINSROPでロシアから提供された環境データを用いて推定

衛星観測の氷況データを用いてIce Indexを計算



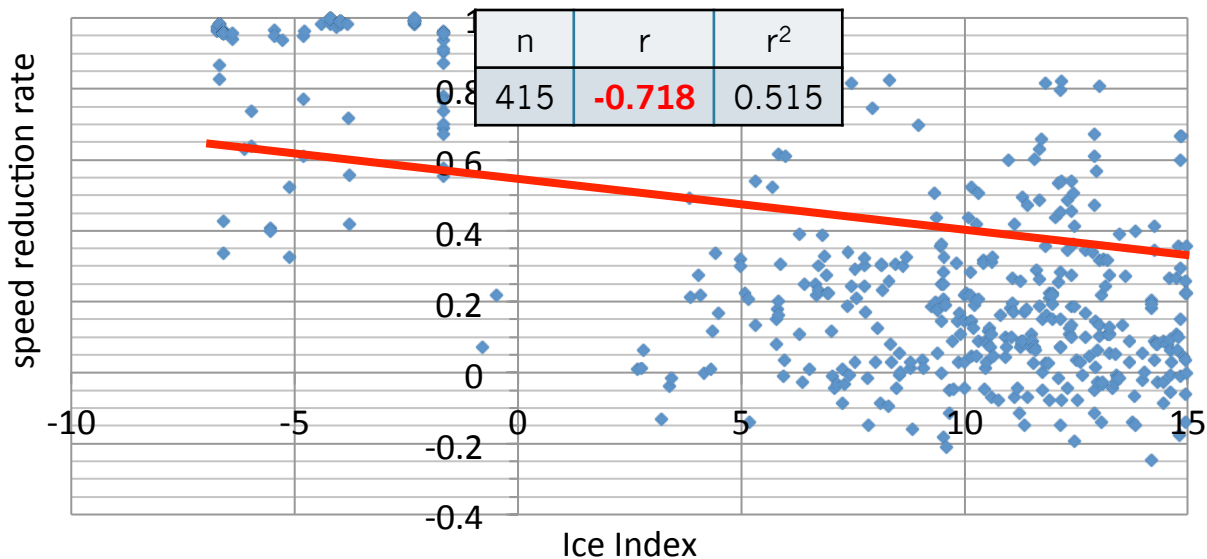
船型によらない解析のため、開水面船速に対する船速減少率を用いてAISデータを整理し、Ice Indexと船速の関係を解析した

Ice Indexと船速減少率の関係



- 15 ≤ Ice Index ≤ 20 のとき
 - AISデータはバラつき大
 - 氷況以外の要因か
 - INSROPで抵抗計算から得られた結果を使用
 - Ice Index = 15 で船速減少率 0.3333

シップ・アンド・オーシャン財団
「北極海航路—東アジアとヨーロッパを結ぶ最短の海の道—」



- Ice Index < 15 のとき
 - AISデータを使用
 - 比較的高い相関
 - Ice Index = 15 で船速減少率 0.3333 とする近似直線

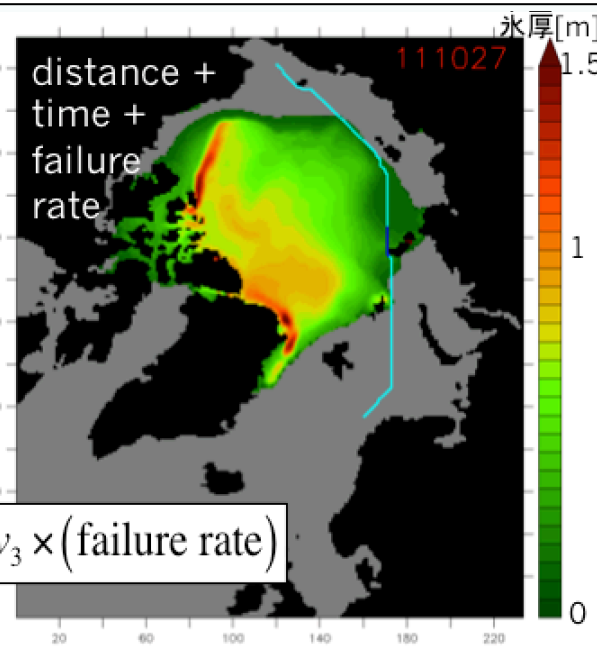
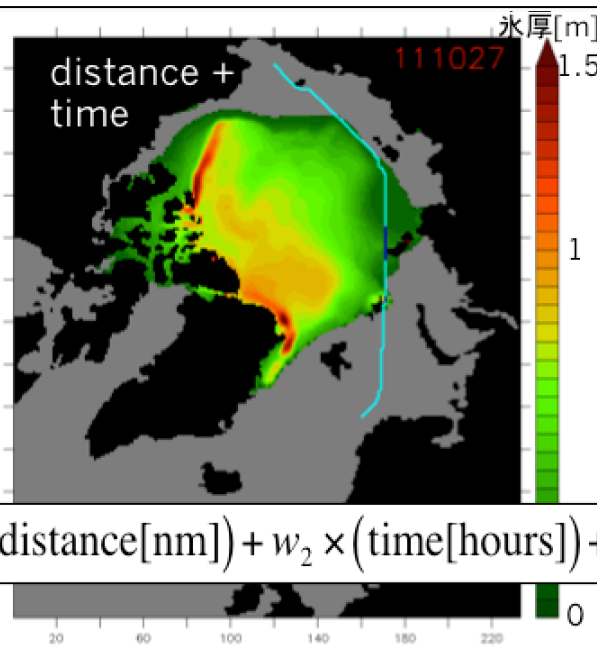
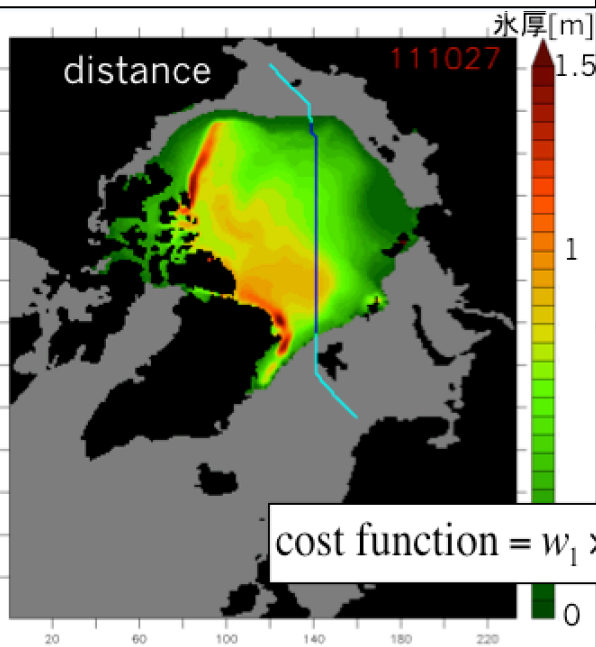
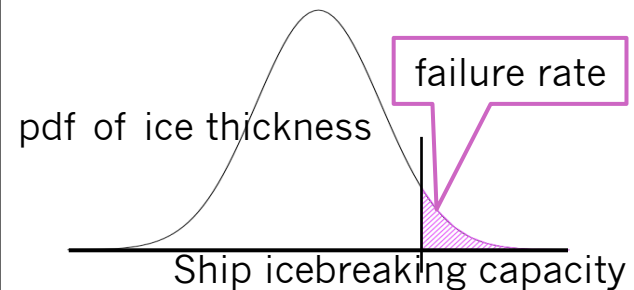
アンサンブル予報によるバラつきを考慮した最適航路探索

- 砕氷能力 : 0.6 m
砕氷船エスコート下
(Ice Index < 18) : 1.5 m
- 喫水制限 : 10 m

- 2011/10/15出発

$$v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$$

$$v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$$



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

$$w_1 = 1, w_2 = 0, w_3 = 0$$

$$w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 0$$

$$w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$$

2482 nm

distance

2641 nm

distance

2663 nm

291.5 hours

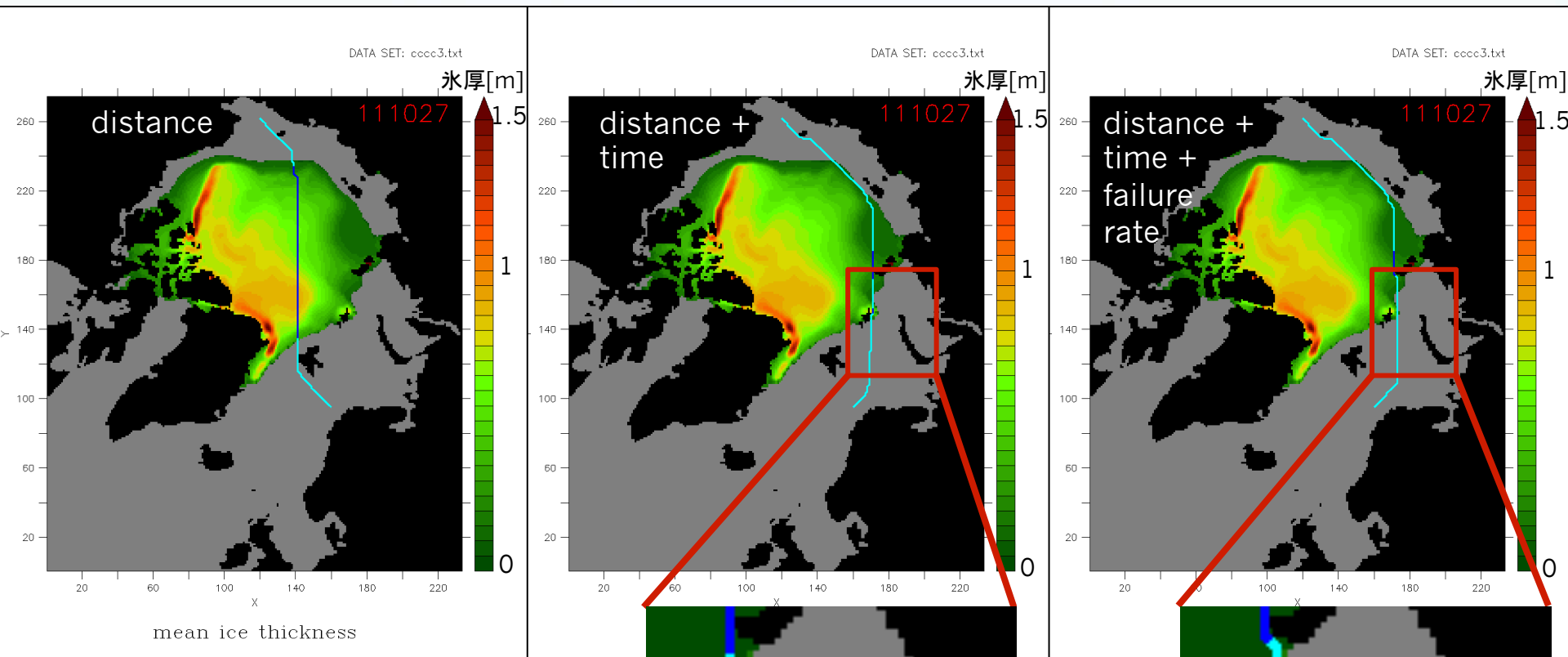
travel time

237.4 hours

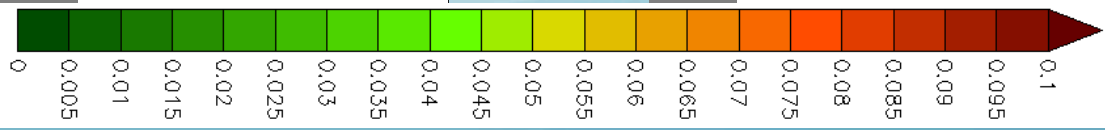
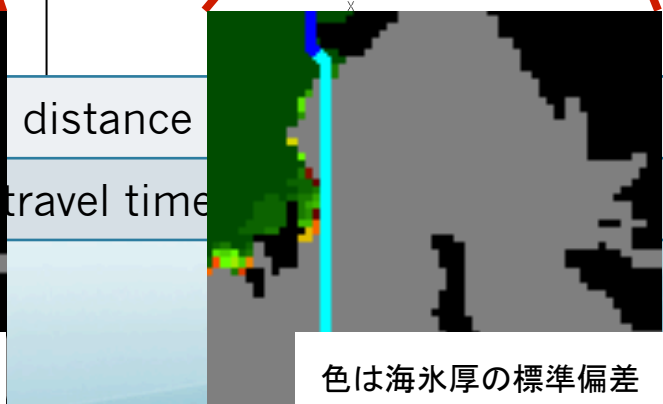
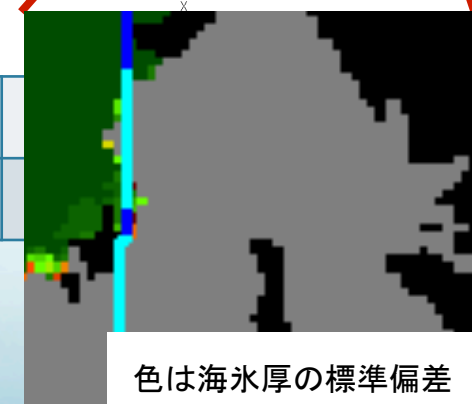
travel time

238.0 hours

アンサンブル予報によるバラつきを考慮した最適航路探索



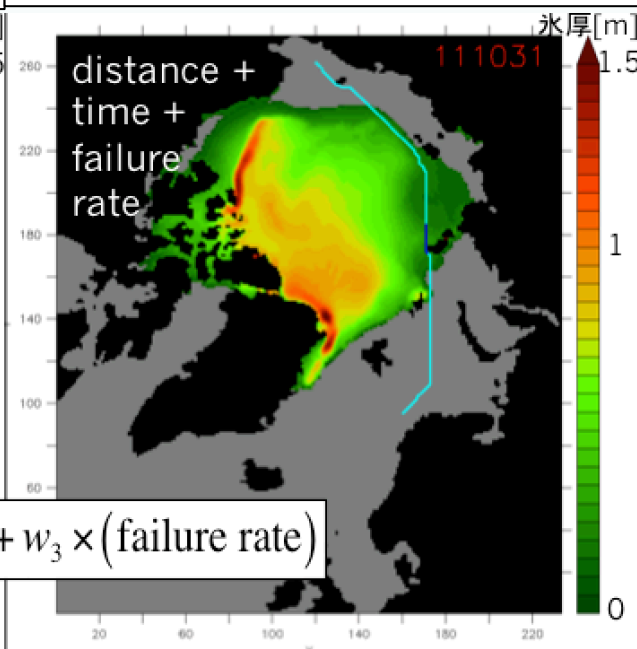
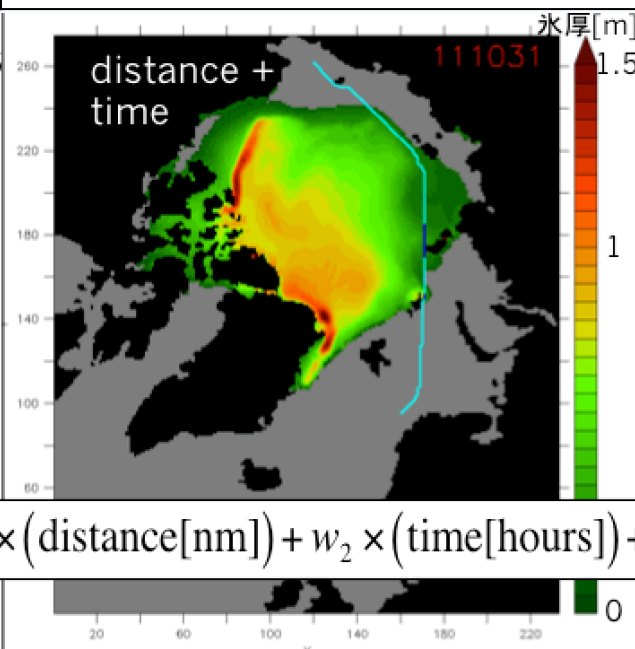
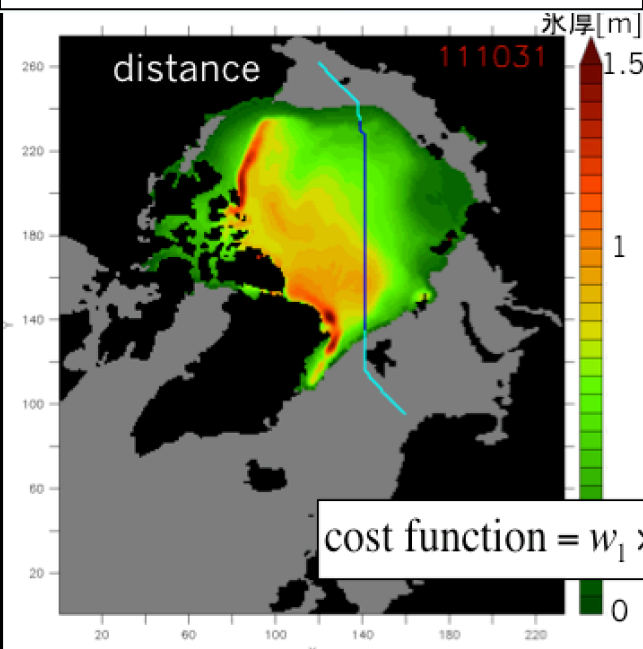
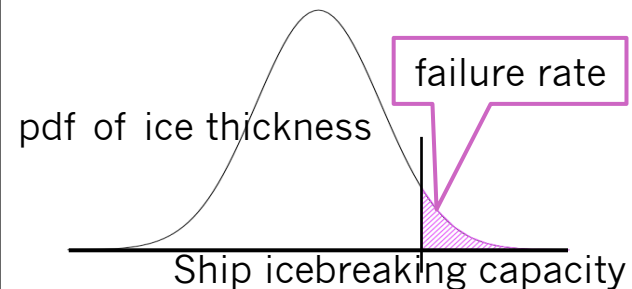
2482 nm	distance
291.5 hours	travel time



アンサンブル予報によるバラつきを考慮した最適航路探索

- 砕氷能力 : 0.6 m
砕氷船エスコート下
(Ice Index < 18) : 1.5 m
- 喫水制限 : 10 m

- 2011/10/15出発
- $$v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$$
- $$v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$$



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

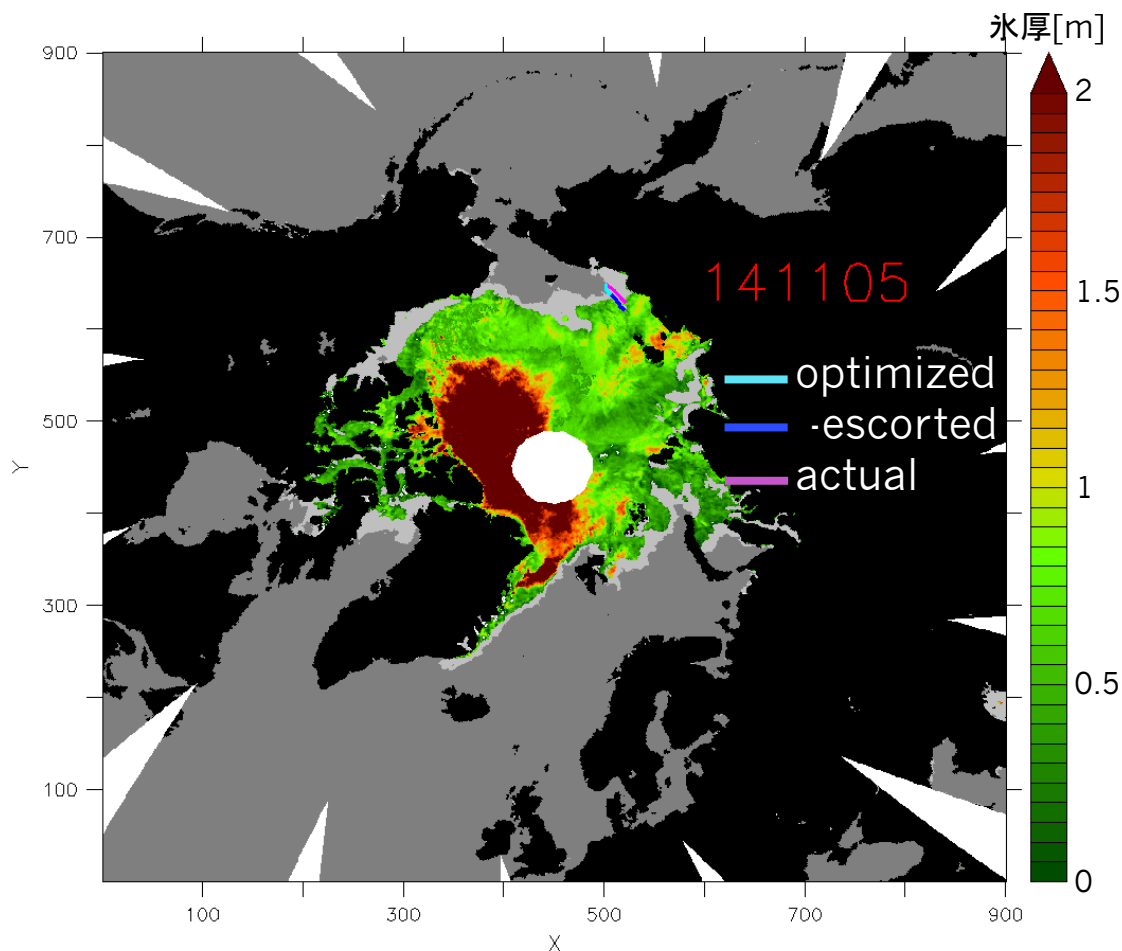
$w_1 = 1, w_2 = 0, w_3 = 0$

$w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 0$

$w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$

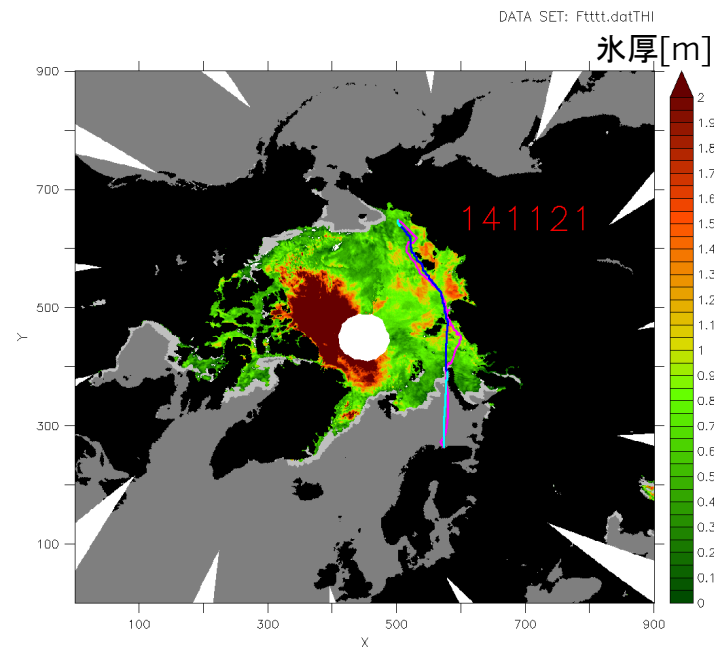
2482 nm	distance	2641 nm	distance	2663 nm
291.5 hours	travel time	237.4 hours	travel time	238.0 hours

実航行データとの比較1



- 2014年11月5日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
- 喫水制限 : 10.5 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$

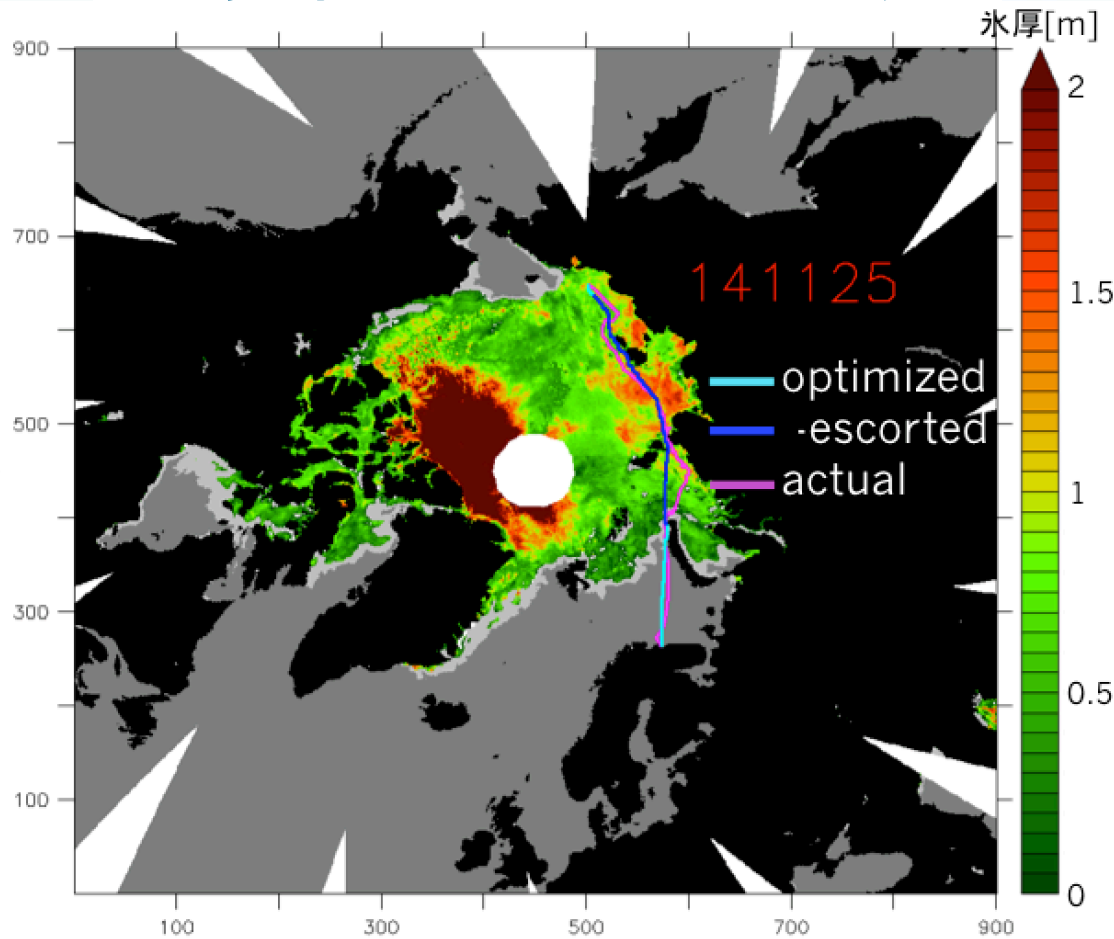
実航行とほぼ同じ航路を再現
距離・時間を短縮



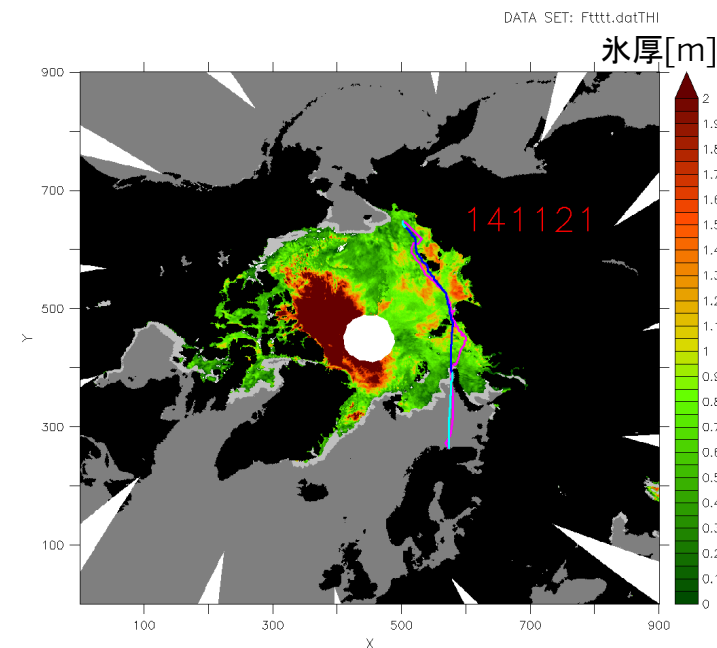
cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	2564 nm	2299 nm (-10.3%)
time	383.0 hours	282.1 hours (-26.3%)

実航行データとの比較1



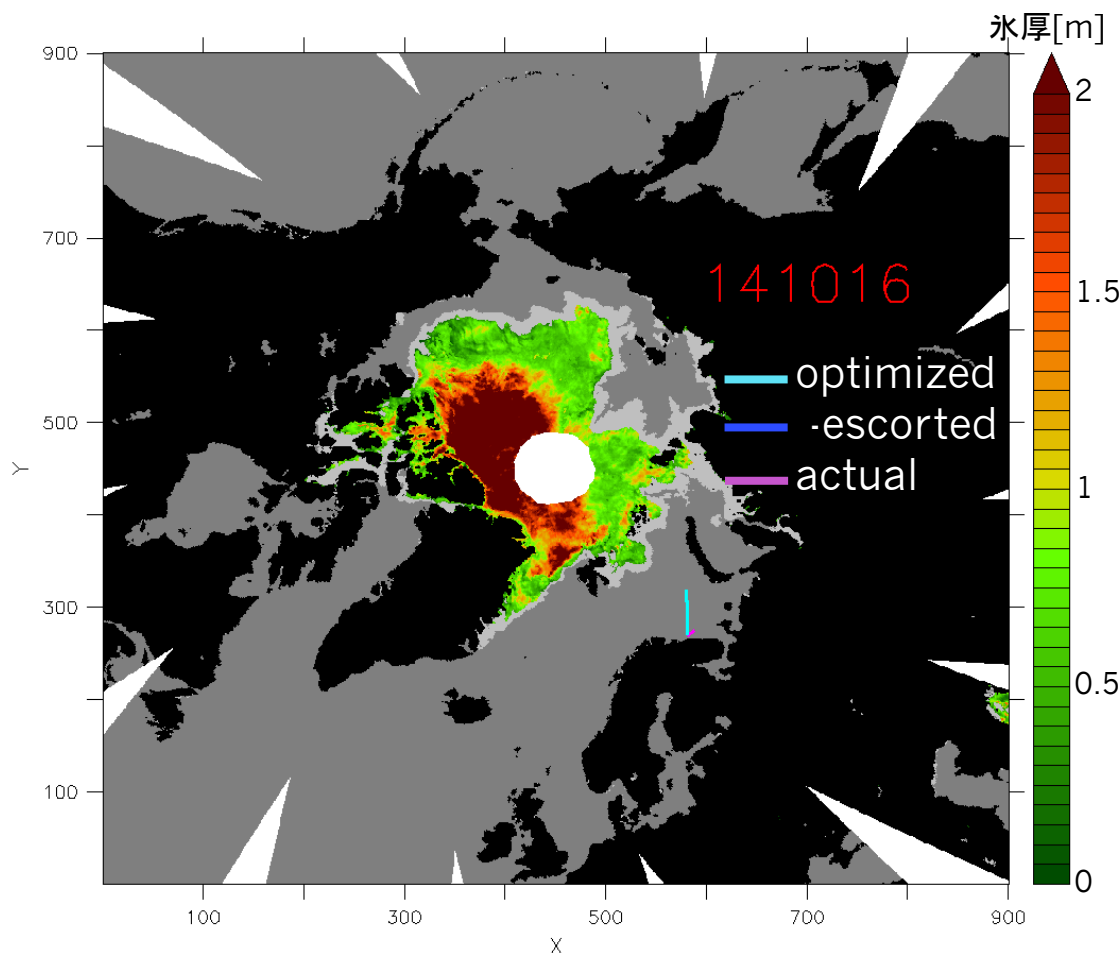
- 2014年11月5日出発
 - 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
 - 喫水制限 : 10.5 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$
- 実航行とほぼ同じ航路を再現
距離・時間を短縮



cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	2564 nm	2299 nm (-10.3%)
time	383.0 hours	282.1 hours (-26.3%)

実航行データとの比較2



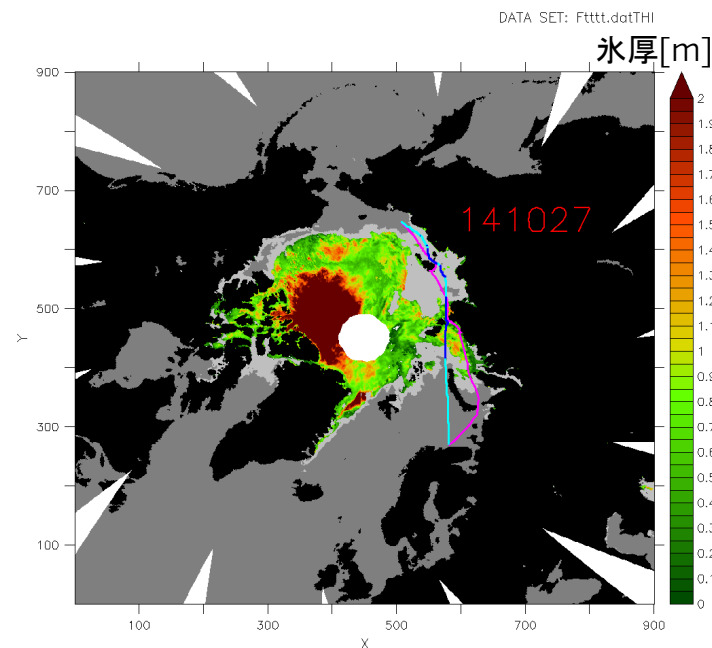
- 2014年10月16日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m

- 喫水制限 : 10.5 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$

ノバヤゼムリヤの北を通る航路
よりよい航路である可能性あり

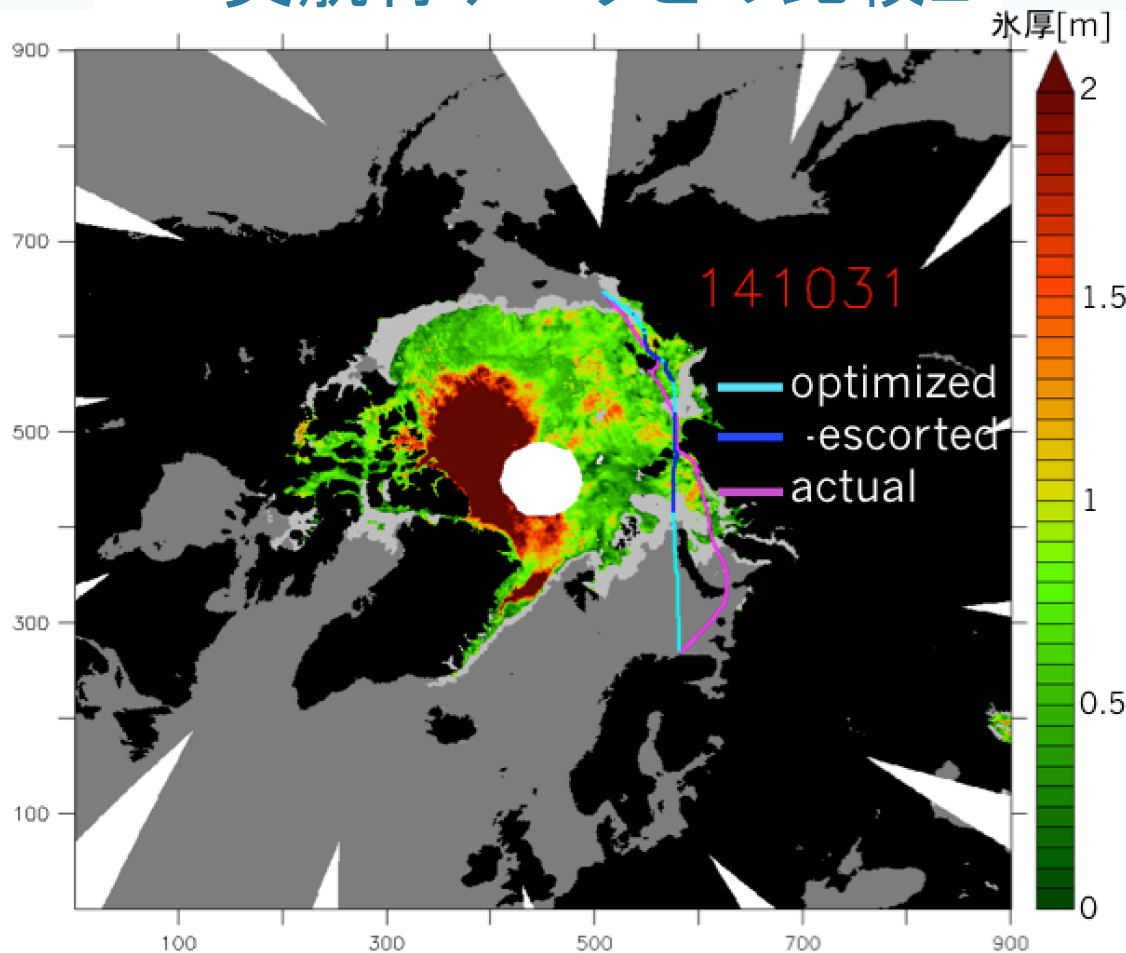
cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	2422 nm	2275 nm (-6.1%)
time	285.1 hours	241.5 hours (-15.3%)



ケース2

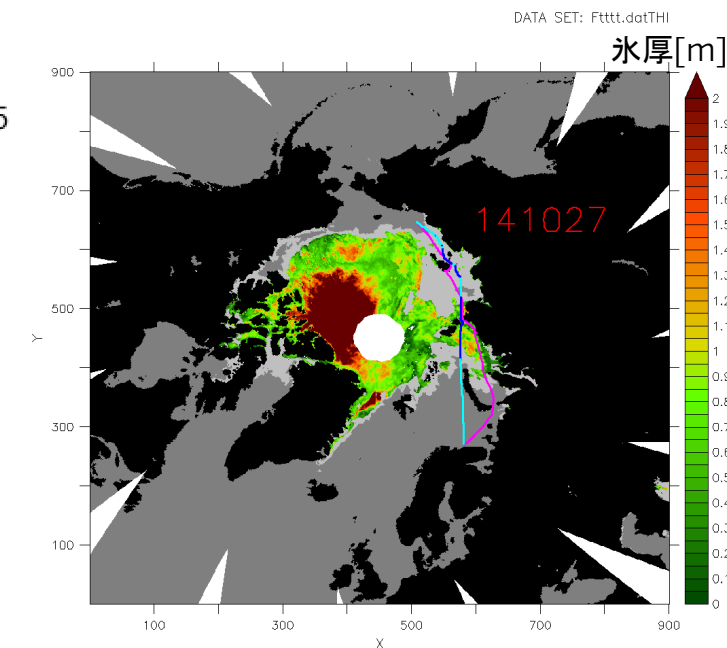
実航行データとの比較2



- 2014年10月16日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m

- 喫水制限 : 10.5 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$

ノバヤゼムリヤの北を通る航路よりよい航路である可能性あり



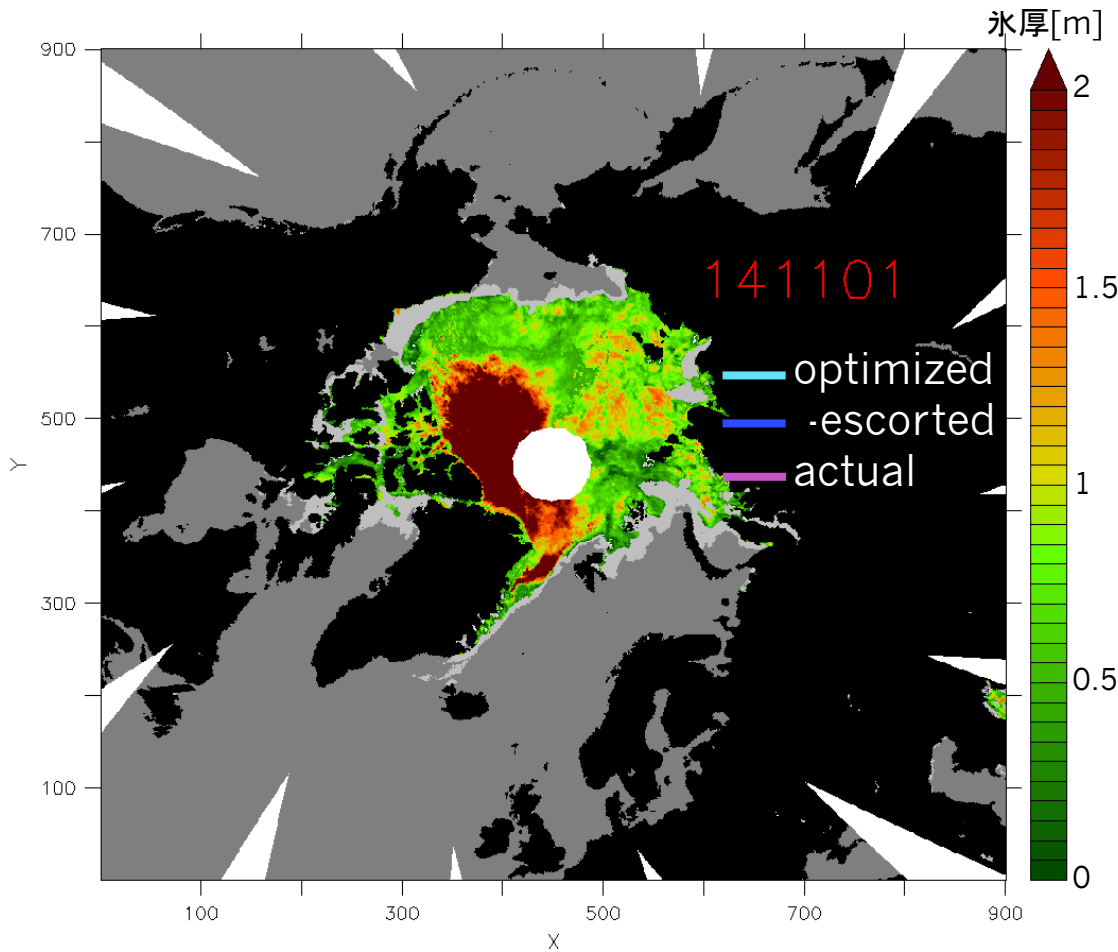
cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	2422 nm	2275 nm (-6.1%)
time	285.1 hours	241.5 hours (-15.3%)

ice thickness

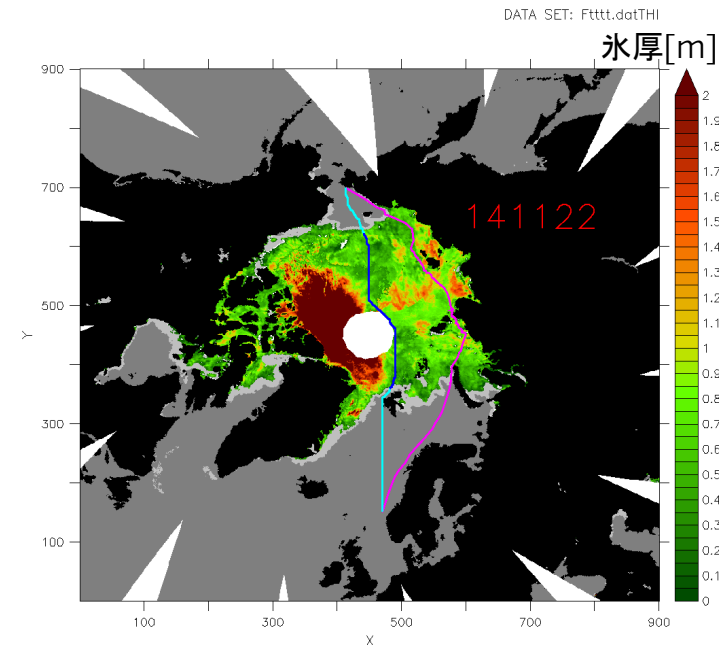
ケース2

実航行データとの比較3



- 2014年11月5日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
- 喫水制限 : 15 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$

沖合を通る航路
事故時に救援が遅くなるリスク



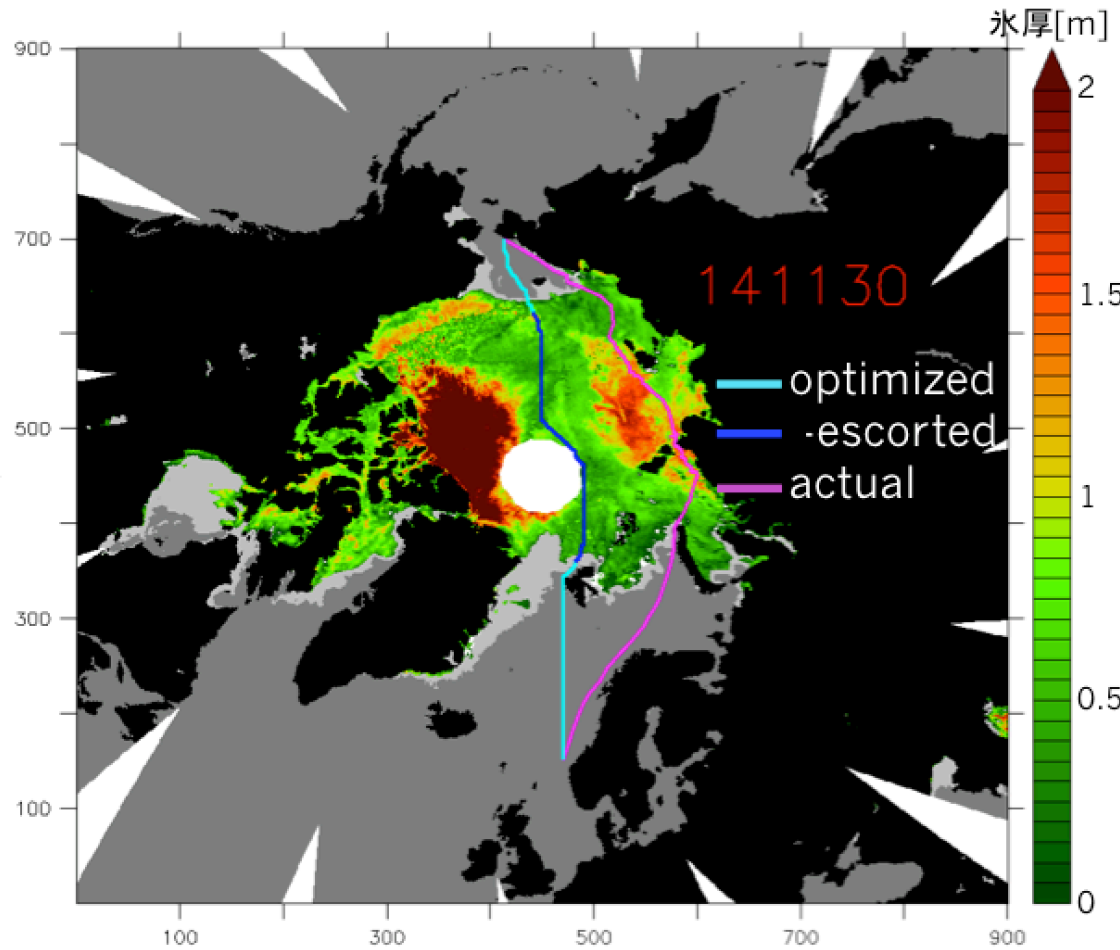
cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	3767 nm	3213 nm (-14.7%)
time	415.6 hours	360.0 hours (-13.4%)

ice thickness

ケース3

実航行データとの比較3

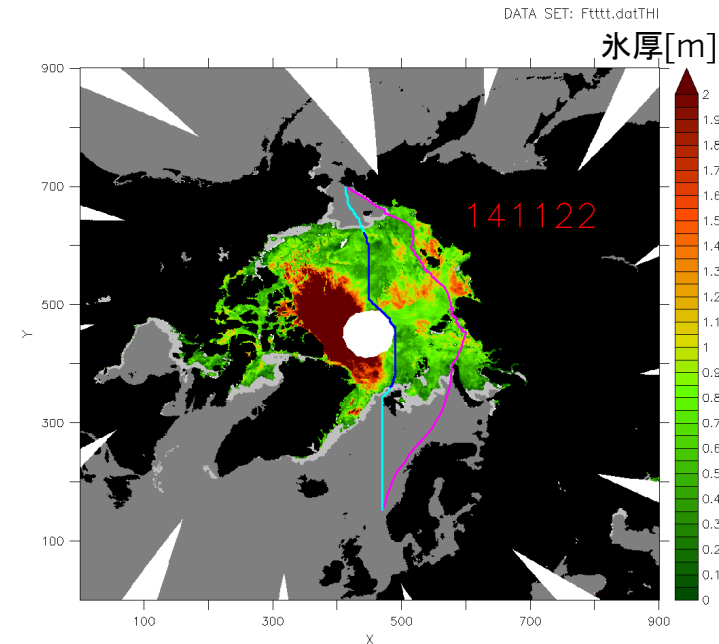


- 2014年11月5日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
- 喫水制限 : 15 m
 - $v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$
 - $v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$

沖合を通る航路
事故時に救援が遅くなるリスク

cost function = $1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$

	actual route	optimized route
distance	3767 nm	3213 nm (-14.7%)
time	415.6 hours	360.0 hours (-13.4%)

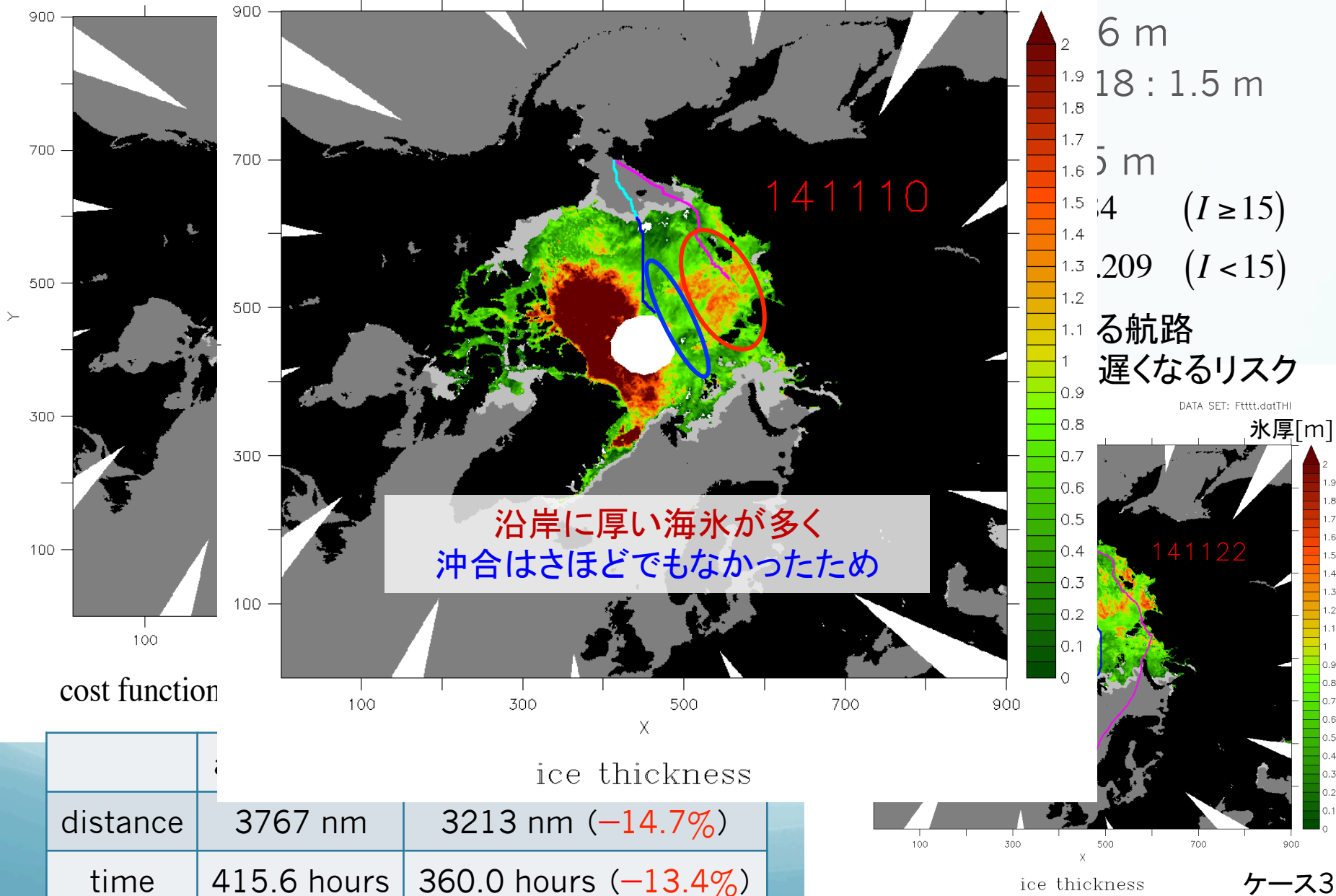


ice thickness

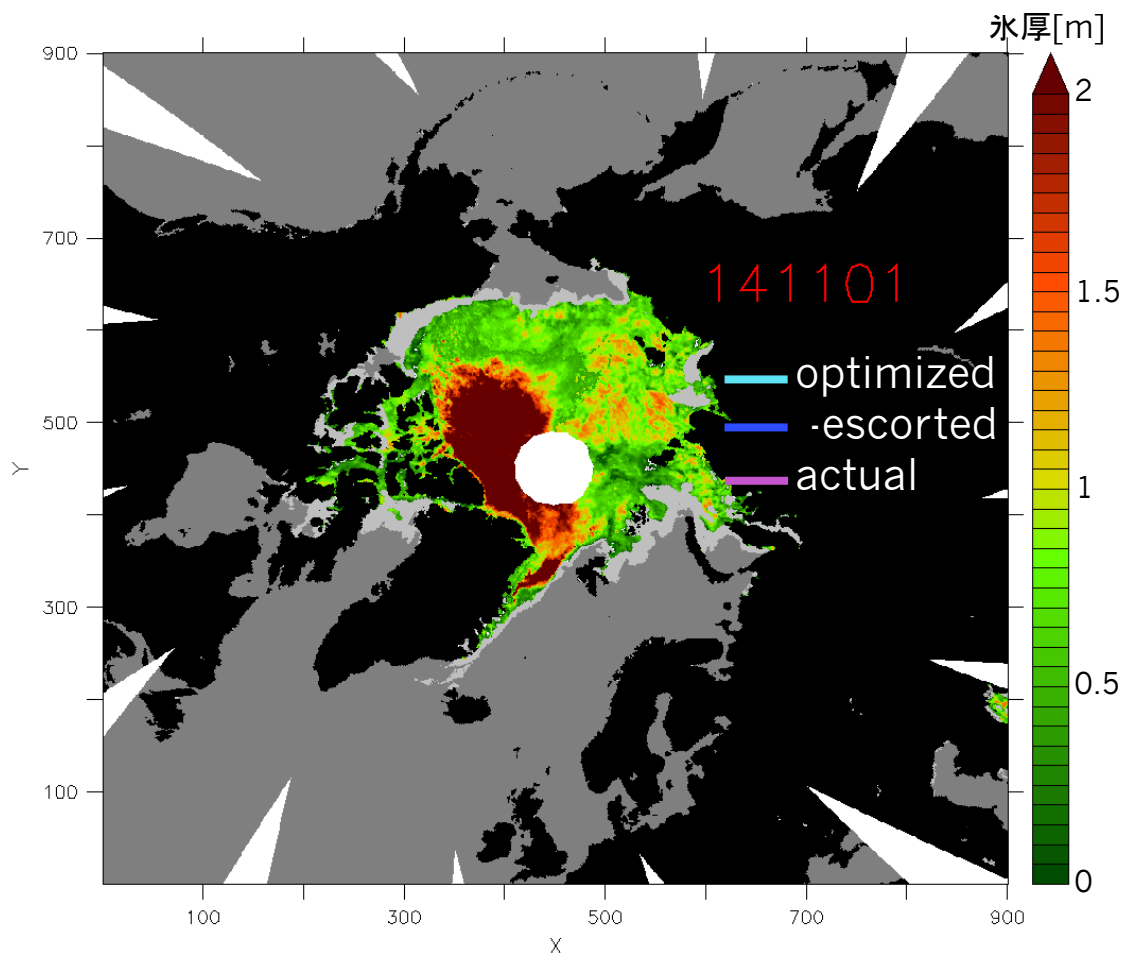
ケース3

実航行データとの比較3

● 2014年11月5日出発



実航行データとの比較3



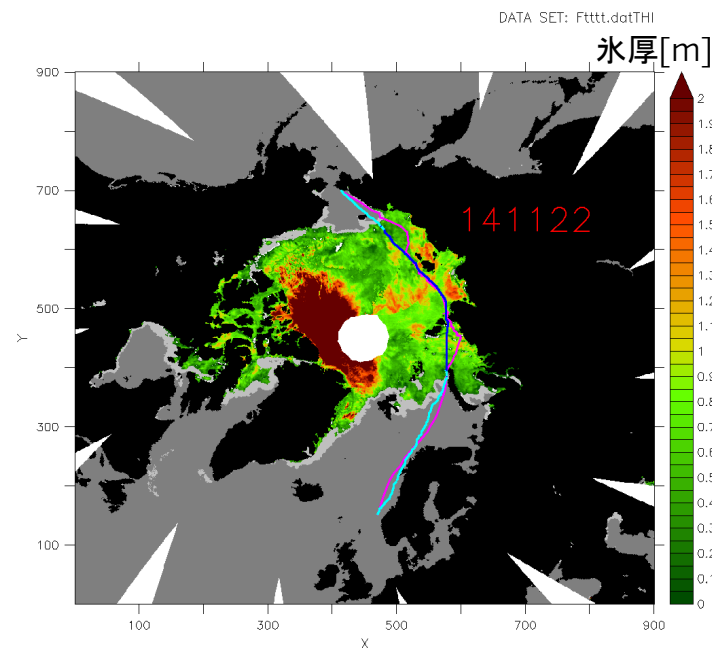
- 2014年11月5日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
- 喫水制限 : 15 m

ビルキツキー海峡通航を強制

海峡通航を条件付けすることは
航行支援システムとして重要

$$\text{cost function} = 1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$$

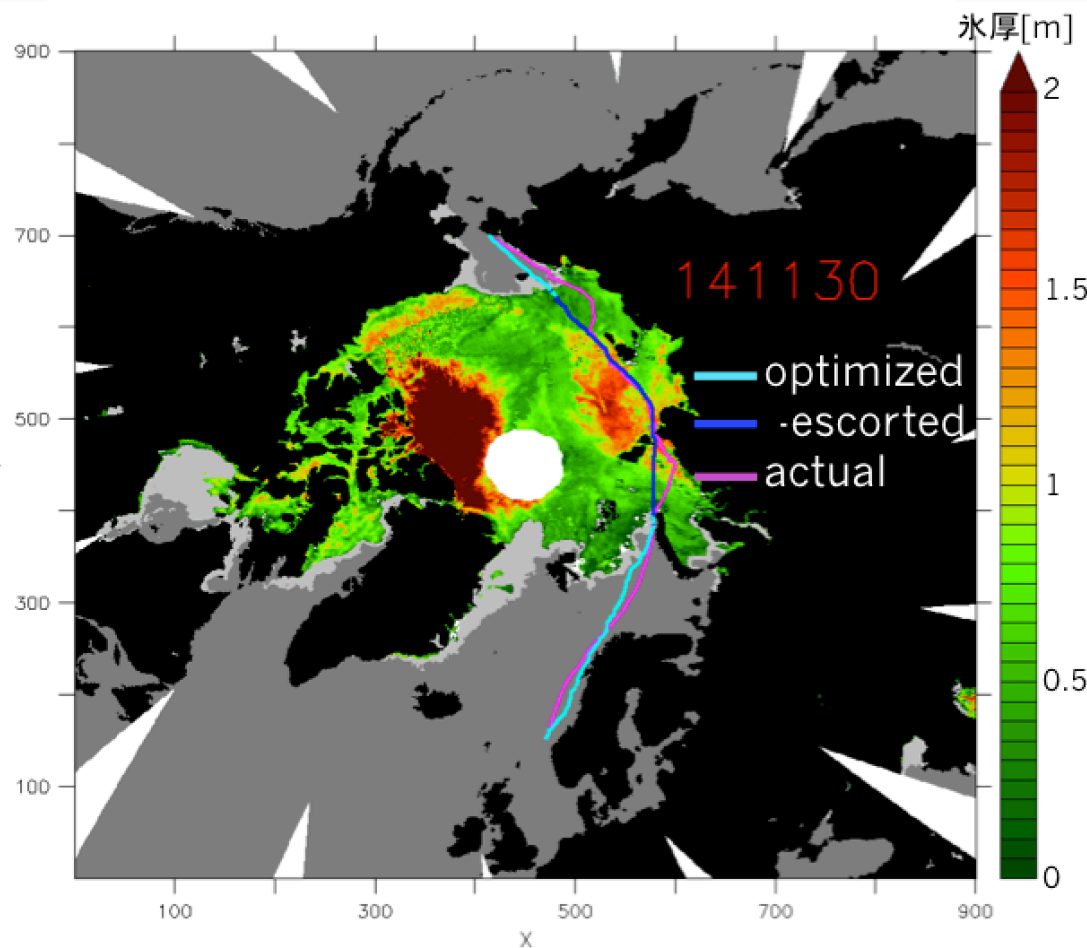
	actual route	optimized route
distance	3767 nm	3598 nm (-12.0%)
time	415.6 hours	401.9 hours (-3.3%)



ice thickness

ケース3

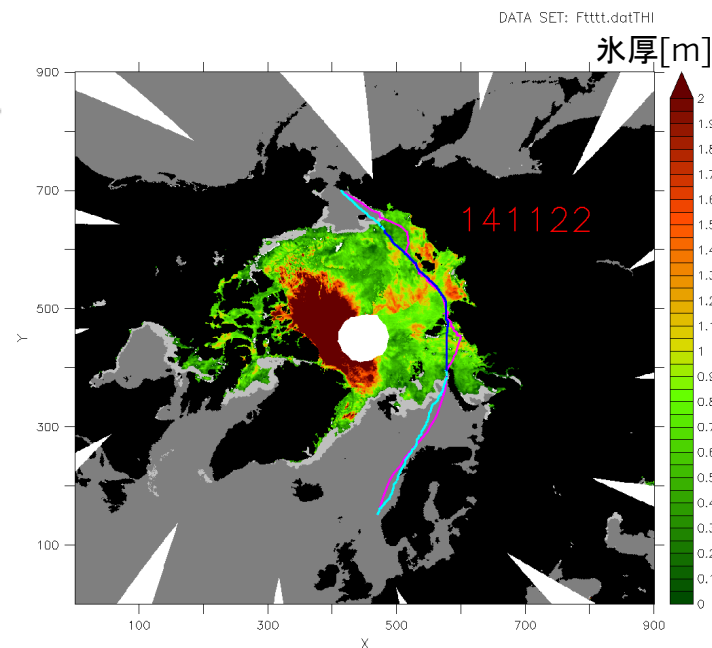
実航行データとの比較3



- 2014年11月5日出発
- 砕氷能力 : 0.6 m
 - Ice Index < 18 : 1.5 m
- 喫水制限 : 15 m

ビルキツキー海峡通航を強制

海峡通航を条件付けすることは
航行支援システムとして重要

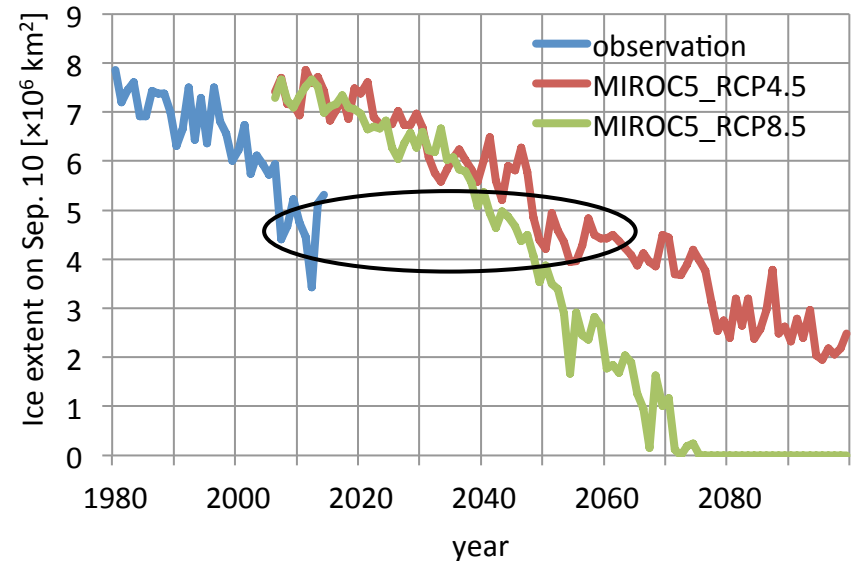
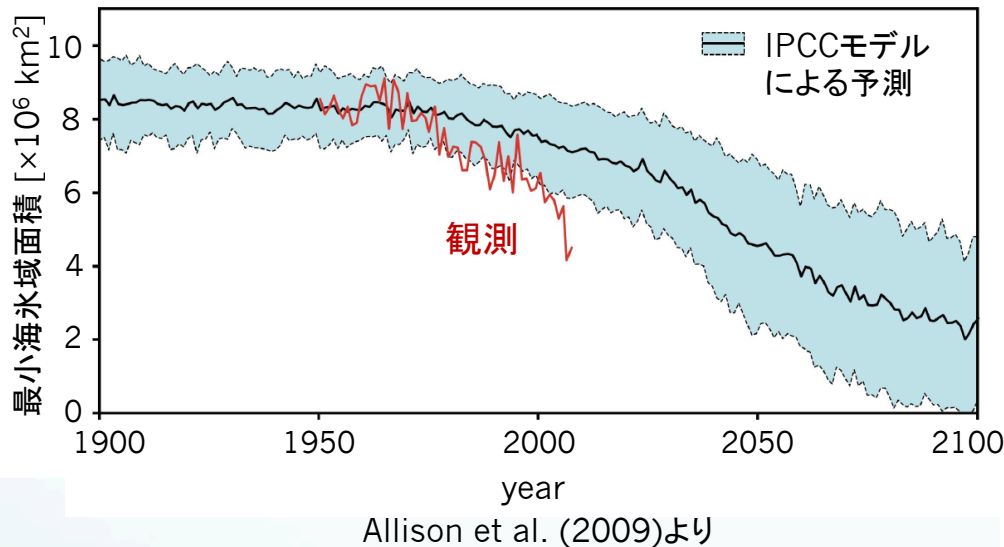


$$\text{cost function} = 1 \times (\text{travel distance}) + 100 \times (\text{travel time})$$

	actual route	optimized route
distance	3767 nm	3598 nm (-12.0%)
time	415.6 hours	401.9 hours (-3.3%)

全球気候モデルによる海氷予測

- 気候モデルによる計算は現実の急速な海氷減少を再現しきれていない
 - MIROC5による値も観測値に比べると遥かに大きい



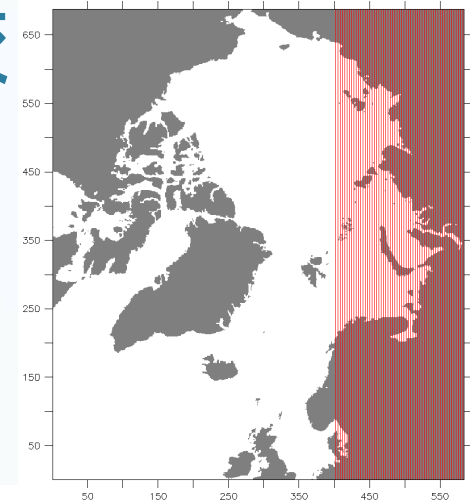
- MIROC5の値が2010年代の観測値に達するのは2040-2050年代
- 今後20-30年程度でMIRCO5が2080-2090年代に示す値になる可能性もある

衛星データと長期予測データに対する 航路探索の比較

- 2014年9月1日出発
- 砕氷能力: 0.6 m
 - 砕氷船エスコート下 (Ice Index < 18) : 1.5m
- 赤い範囲の1.5mより厚い氷は1.5mとした →→

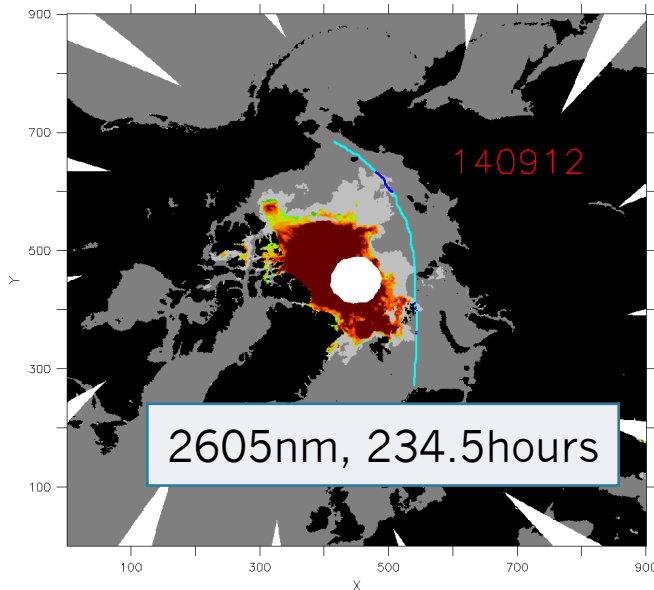
$$v = 0.768I - 3.84 \quad (I \geq 15)$$

$$v = 0.1647I - 5.209 \quad (I < 15)$$



AMSR2

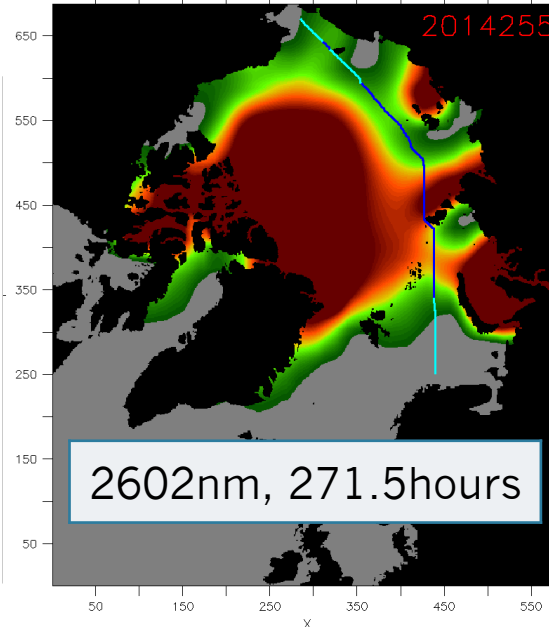
DATA SET: Ftftt.dotTHI



2605nm, 234.5hours

ice thickness

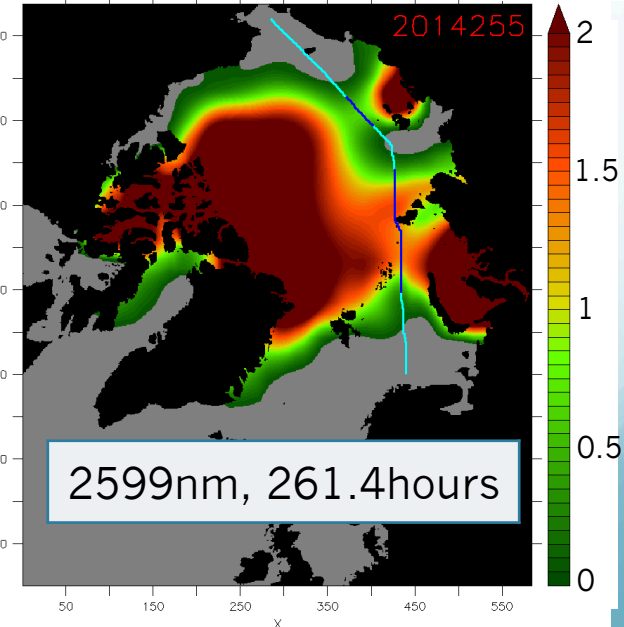
RCP4.5



2602nm, 271.5hours

ice thickness

RCP8.5



2599nm, 261.4hours

ice thickness

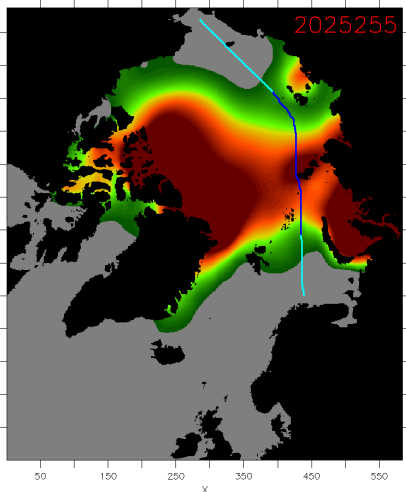
氷厚[m]



MIROC5データを使った航路探索 RCP4.5 (Sep. in 2025-2095)

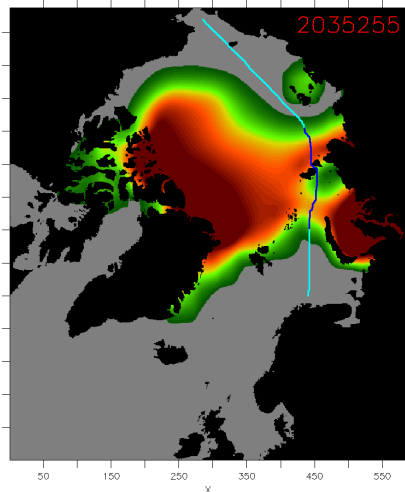
2025

氷厚[m]



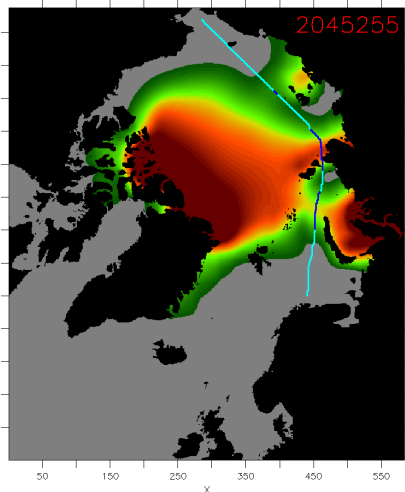
2035

氷厚[m]



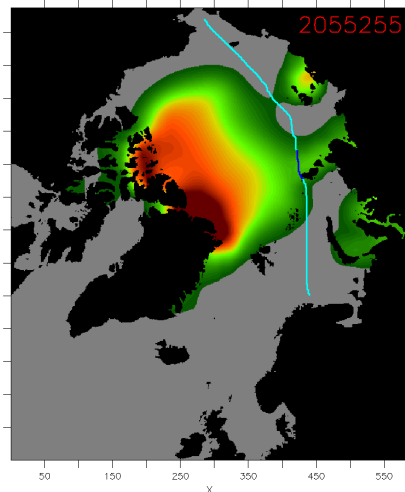
2045

氷厚[m]



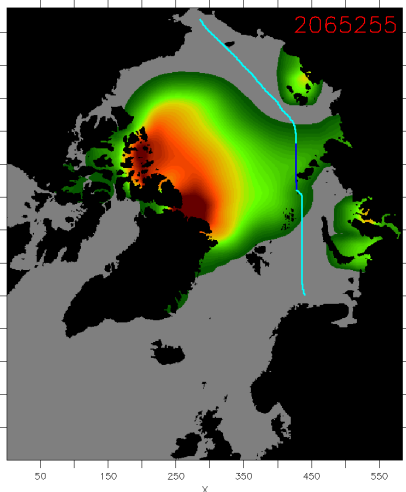
2055

氷厚[m]



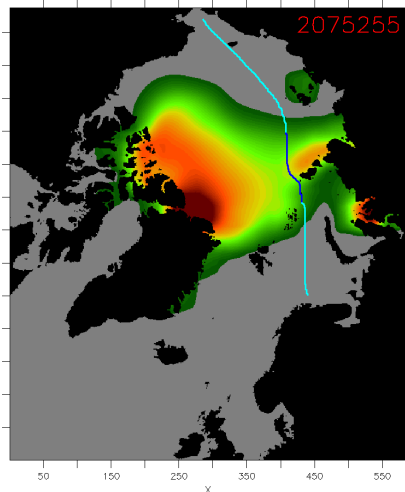
2065

氷厚[m]



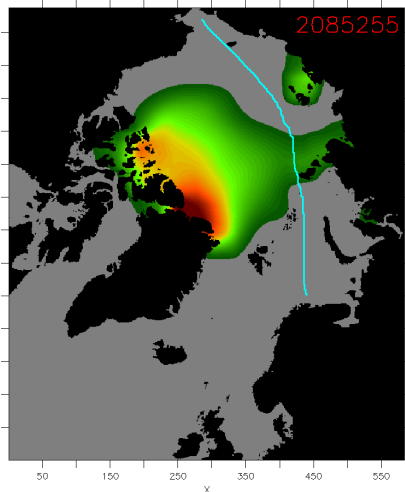
2075

氷厚[m]



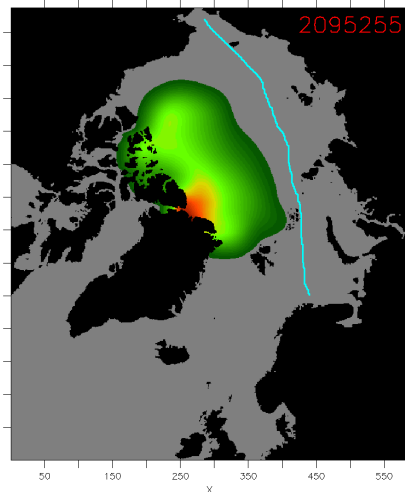
2085

氷厚[m]



2095

氷厚[m]



MIROC5データを使った航路探索 RCP8.5 (Sep. in 2025-2095)

2025

氷厚[m]

2035

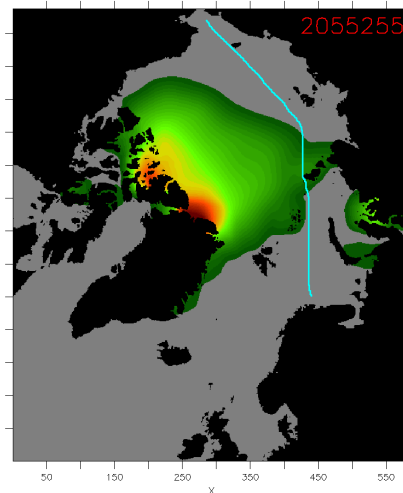
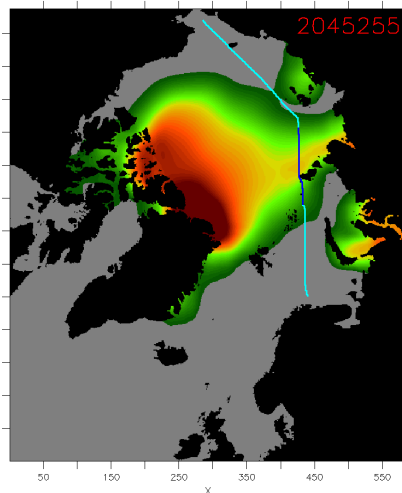
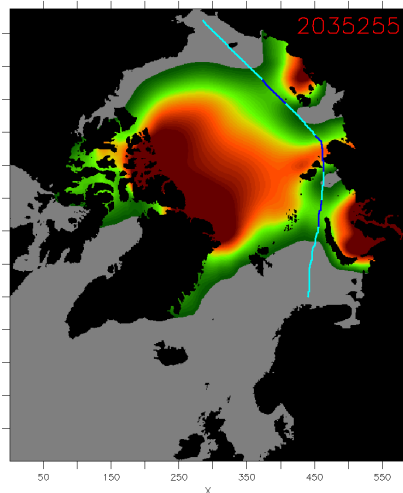
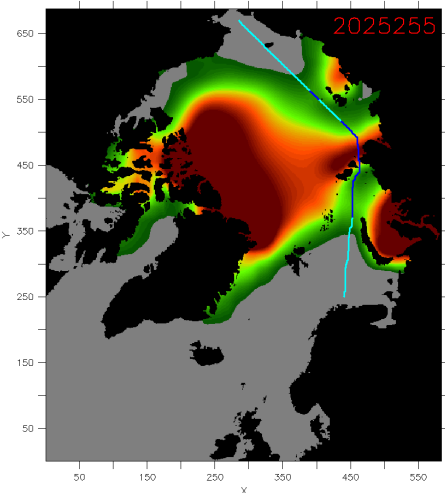
氷厚[m]

2045

氷厚[m]

2055

氷厚[m]



2065

氷厚[m]

2075

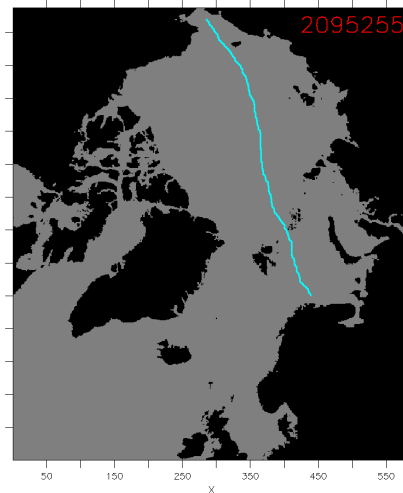
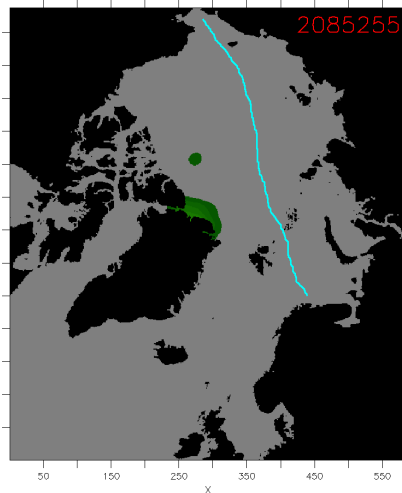
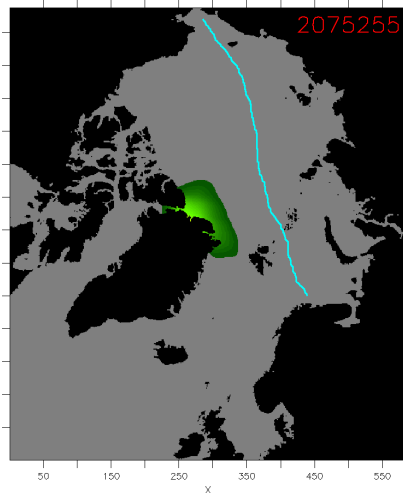
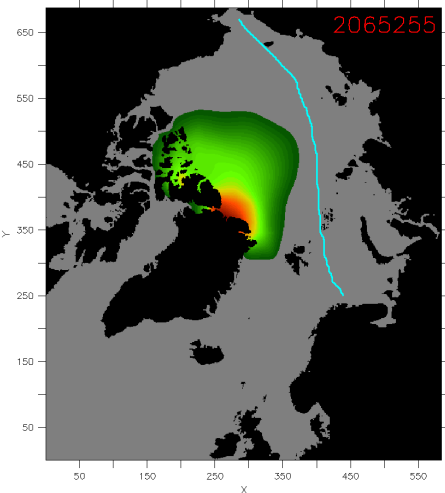
氷厚[m]

2085

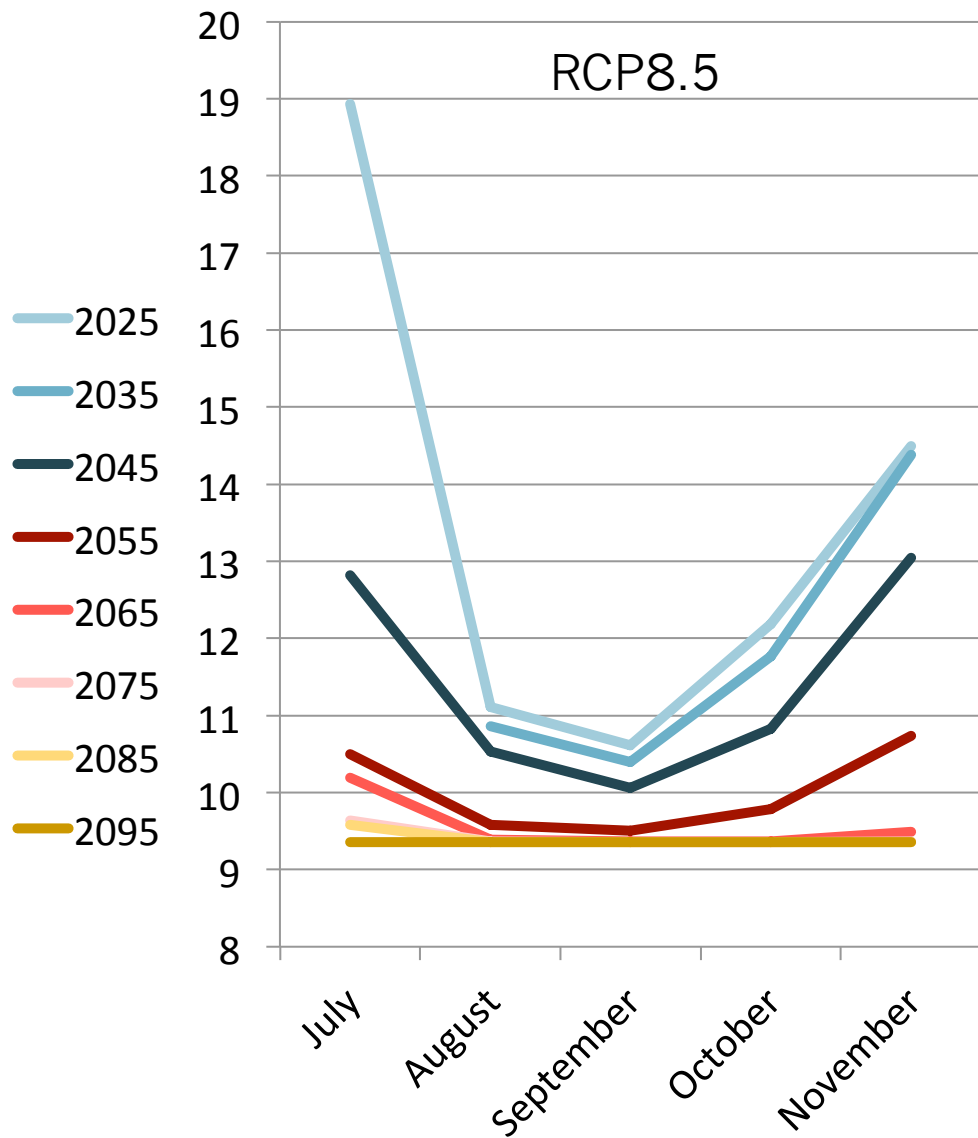
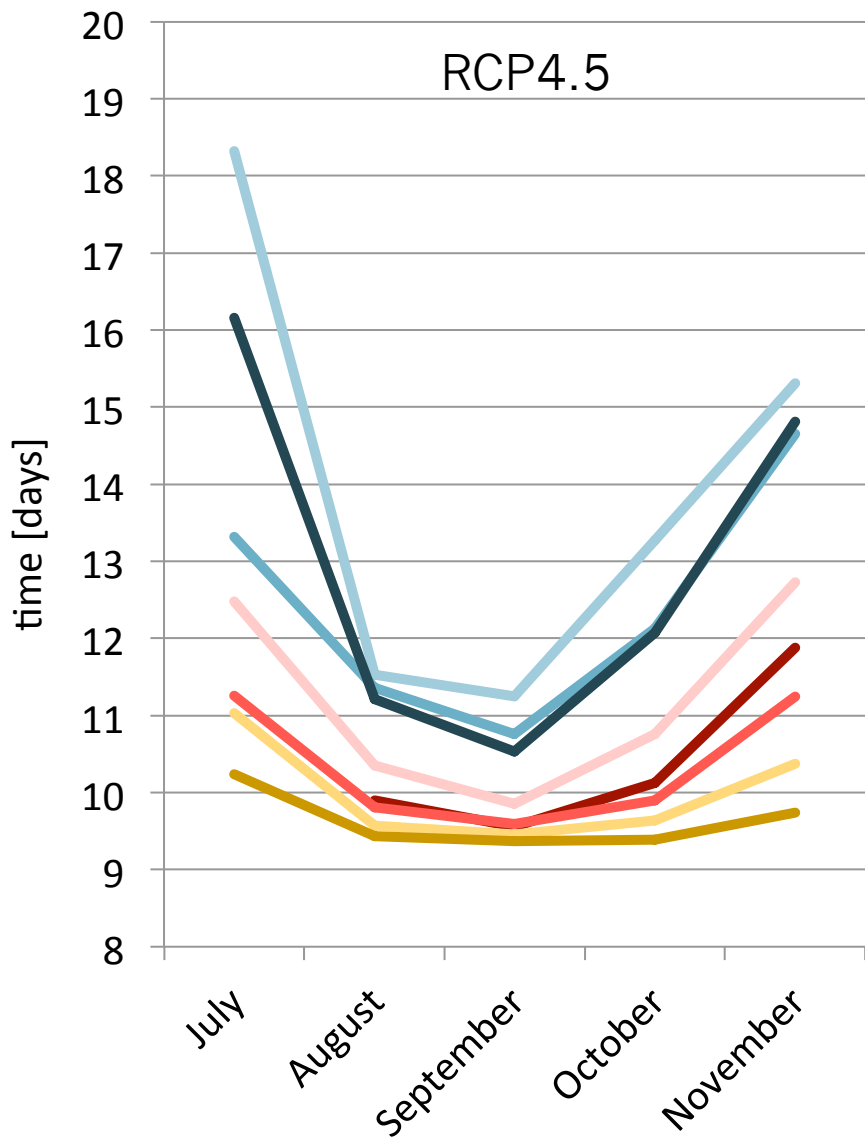
氷厚[m]

2095

氷厚[m]



航行所要時間の変化 (Jul.-Nov. in 2025-2095)



まとめと今後の課題

- Ice Indexを用いて実航行の船速データを整理し、船速を推定した
 - Ice Index<15においてはAISデータから比較的高い相関を得た
- A*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立した
 - アンサンブル予報による不確かさを考慮した航路探索を行った
 - 失敗率を考慮することでより安全な航路を探索した
 - 実航行航路との比較を行った
 - おおむね実航行と同じ航路を再現した
 - 海峡通航を強制する条件付きの航路探索を行った
 - 長期予測データを用いた将来性の検討を行った
 - NSRの優位性は今後も増していき、数十年で夏季には海氷の影響を受けなくなる可能性もある
- 今後の課題
 - 考慮するパラメーターの追加(風、波浪、霧、海氷の氷盤サイズ)
 - 砕氷抵抗式からの船速計算手法の取り入れ
 - 船型に依存しないIce Index法と、船型に依存する抵抗式の両立

ご清聴ありがとうございました