

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
海洋技術環境学専攻

平成29年度

修士論文

北極海の海氷厚中期予測  
に関する研究  
(Research on the mid-term prediction of  
the Arctic sea ice thickness)

平成30年1月26日提出

指導教員  
山口 一 教授

47-156790 繆 森

# 目次

第1章	序論.....	5
1.1.	研究背景.....	5
1.1.1.	北極海の海氷.....	5
1.1.2.	北極航路.....	7
1.2.	既存研究.....	10
1.3.	研究目的.....	10
第2章	使用データ.....	11
2.1.	衛星リモートセンシング.....	11
2.2.	マイクロ波放射計 AMSR-E, AMSR2.....	12
2.3.	海氷密接度.....	14
2.4.	海氷厚.....	15
2.4.1.	海氷厚推定アルゴリズム.....	15
2.4.2.	検証用の海氷厚観測データ.....	21
2.5.	気象データ.....	22
第3章	海氷厚中期予測の準備.....	23
3.1.	IJIS アルゴリズムによる海氷厚データの検証.....	23
3.1.1.	CryoSat-2/SMOS Data Fusion との比較.....	23
3.2.	予測に用いる月の選定.....	37
第4章	海氷厚分布の予測.....	38
4.1.	海氷との関係.....	38
4.1.1.	計算範囲.....	38
4.1.2.	無相関検定 - t 検定.....	38
4.1.3.	5月の海氷厚との関係.....	40
4.1.4.	海氷密接度との関係.....	43
4.2.	気象との関係.....	44
4.2.1.	気温との関係.....	44
4.2.2.	風速との関係.....	51
4.3.	重相関分析.....	60
4.3.1.	5月の海氷厚・気温と10月の海氷厚との関係.....	61
4.3.2.	5月の海氷厚・風速と10月の海氷厚との関係.....	66

4.3.3. 5月の海氷厚・海氷密接度と10月の海氷厚との関係.....	68
4.4. 海氷厚分布予測.....	69
第5章 結論.....	73
5.1. まとめと考察.....	73
5.2. 今後の課題.....	74

# 図表目次

Fig. 1-1 北極海地形図[1] .....	5
Fig. 1-2 最小海氷域面積の変動[3] .....	6
Fig. 1-3 9月10日の海氷密接度分布[4] .....	7
Fig. 1-4 北東航路[5] .....	7
Fig. 1-5 北西航路[5] .....	8
Fig. 1-6 北極海航路と南回り航路の比較[6] .....	8
Fig. 1-7 2035年9月1日出発の最適航路[6] (色は海氷厚[m]) .....	10
Fig. 2-1 マイクロ波放射計 AMSR-E [12] (左) とその後継機 AMSR2[13] (右) .....	13
Fig. 2-2 2014年10月1日の海氷密接度[%] .....	15
Fig. 2-3 三種類の表面に対する周波数・偏波方向の放射依存性[16] .....	16
Fig. 2-4 ULS で計測された海氷厚の AMSR-E による PR/GR ごとの分布[15] .....	17
Fig. 2-5 ULS の構造 (左) と設置地点 (右) [15] .....	17
Fig. 2-6 IJIS アルゴリズムによる 2013年各月の1日の海氷厚分布[m] (その1) .....	18
Fig. 2-7 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と ULS で計測した海氷厚との誤差[m] .....	21
Fig. 2-8 CryoSat-2/SMOS Data Fusion による 2014年10月20日からの一週間の平均海氷厚 [m] .....	22
Fig. 2-9 ERA-Interim による 2004年5月1日の2m高度の気温[K] .....	22
Fig. 3-1 IJIS アルゴリズムによる海氷厚[m] (左) .....	23
Fig. 3-2 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の差[m] .....	26
Fig. 3-3 IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の RMSE[m] (その1) .....	30
Fig. 3-4 季節補正によって 2013年11月1日の海氷厚分布[m] .....	31
Fig. 3-5 IJIS アルゴリズムの季節補正值[m][15] .....	32
Fig. 3-6 提案補正手法によって IJIS アルゴリズムの海氷厚[m] .....	33
Fig. 3-7 2012年から2016年まで各年の10月と11月の IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の差[m] .....	33
Fig. 3-8 各月の ULS による厚さの相関行列[11] .....	37
Fig. 4-1 12年間における10月1日の海氷厚データの数 n .....	38
Fig. 4-2 5月1日 (左) と10月1日 (右) の海氷厚の12年間の平均値[m] .....	40
Fig. 4-3 12年間における10月1日の海氷厚の偏差[m] (その1) .....	41
Fig. 4-4 12年間における5月1日と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) .....	43
Fig. 4-5 12年間における5月1日の海氷密接度と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq$ 3) .....	44
Fig. 4-6 12年間における5月から9月まで各月の平均気温[K] .....	45
Fig. 4-7 12年間における7月の気温の偏差[K] (その1) .....	46
Fig. 4-8 融解期における各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) .....	48

Fig. 4-9 12 年間における 5 月から 9 月まで各月の平均風速(m/s) (左) .....	51
Fig. 4-10 12 年間における 7 月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その 1) .....	53
Fig. 4-11 融解期における各月の平均風速と 10 月 1 日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) .....	58
Fig. 4-12 5 月 1 日の海氷厚・融解期における各月の平均気温と 10 月 1 日の海氷厚 .....	62
Fig. 4-13 5 月 1 日の海氷厚と 10 月 1 日の海氷厚の相関係数 (左) .....	64
Fig. 4-14 5 月 1 日の海氷厚・各月の平均風速と 10 月 1 日の海氷厚の重相関係数 (左) ( $m \geq 4$ )と有意なグリッド (右) (その 1) .....	66
Fig. 4-15 5 月 1 日の海氷厚・密接度と 10 月の海氷厚の重相関係数 ( $n \geq 4$ ) .....	69
Fig. 4-16 5 月 1 日と 10 月 1 日の海氷厚の有意な相関係数 (左) と .....	69
Fig. 4-17 5 月 1 日と 10 月 1 日の海氷厚の有意な相関係数 (左) と .....	70
Fig. 4-18 手法一で予測した 2017 年 10 月 1 日の海氷厚の分布[m] (左) .....	70
Fig. 4-19 手法一による予測した 2017 年 10 月 1 日の海氷厚と観測値の誤差[m] .....	71
Fig. 4-20 手法二による予測した 2017 年 10 月 1 日の海氷厚の分布[m] (左) .....	71
Fig. 4-21 手法二による予測した 2017 年 10 月 1 日の海氷厚と観測値の誤差[m] .....	72
Table 1-1 北東航路通航貨物量[7].....	9
Table 1-2 航路沿い氷況予測とその効果[8].....	9
Table 2-1 AMSR-E センサーの詳細[12].....	13
Table 2-2 AMSR2 センサーの詳細[13].....	14
Table 3-1 極地氷海船の階級と対応の氷の状況・季節[6].....	29
Table 4-1 $t$ の境界値 .....	39
Table 4-2 有意水準 5%時の相関係数検定表 .....	39
Table 4-3 気温の場合の有意なグリッドの数とその割合 .....	50
Table 4-4 風速の場合の有意なグリッドの数とその割合 .....	59
Table 4-5 有意水準が 5%時の $F$ の境界値 .....	61
Table 4-6 異なる状況の有意なグリッドの割合 .....	63
Table 4-7 異なる状況の有意なグリッドの割合 .....	68
Table 4-8 手法によって RMSE の比較 .....	72

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景

### 1.1.1. 北極海の海水

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 1400 万 km<sup>2</sup>の海である。Fig. 1-1[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。

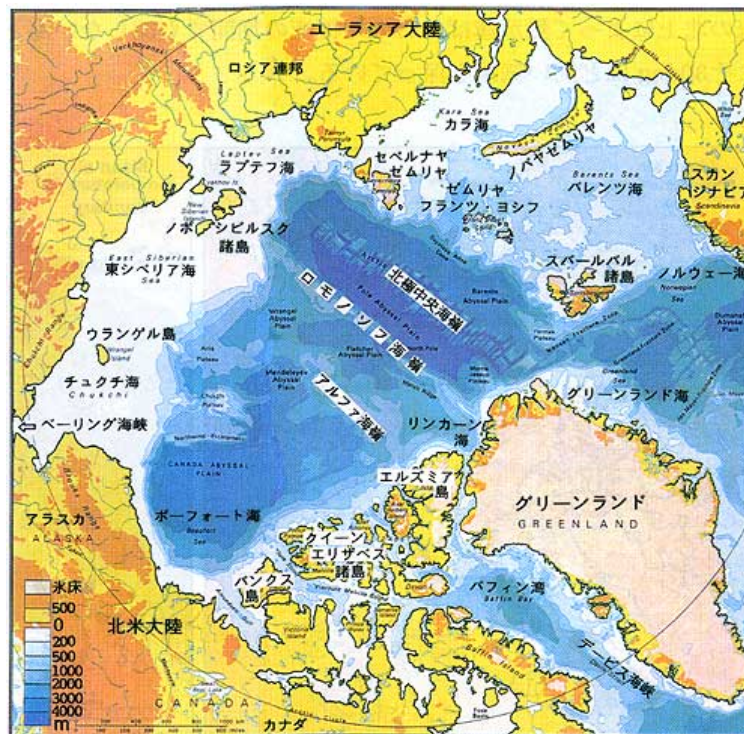


Fig. 1-1 北極海地形図[1]

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。Fig. 1-2[3]は北極海の最大と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 km<sup>2</sup>、2007年）を大きく下回る349万 km<sup>2</sup>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 km<sup>2</sup>であった。

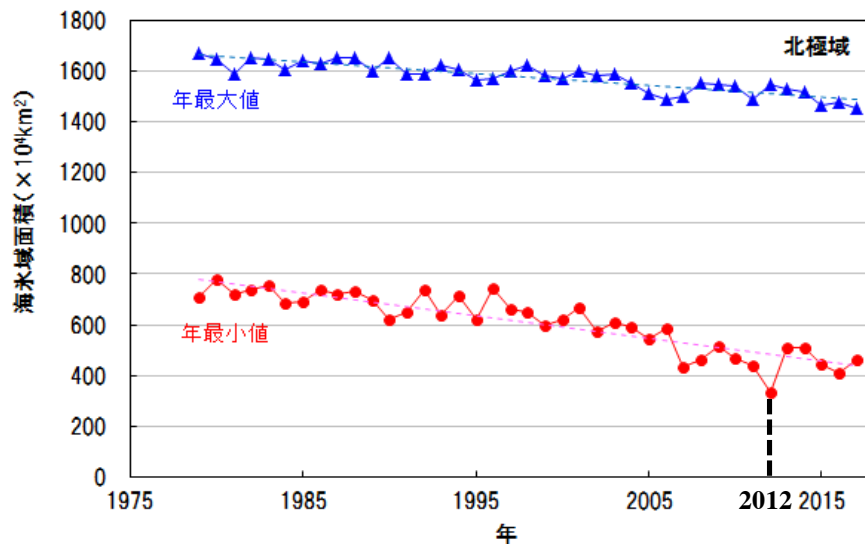


Fig. 1-2 最小海氷域面積の変動[3]

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。Fig. 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った。航路として利用する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どの情報が重要になる。

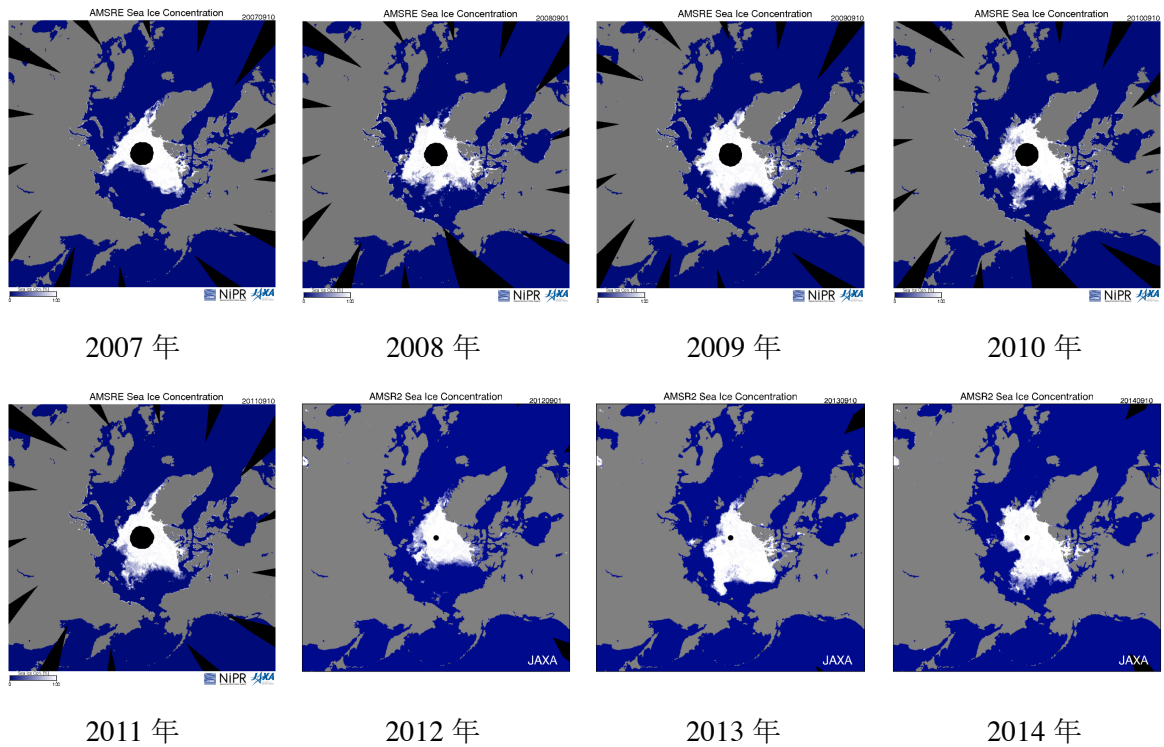


Fig. 1-3 9月10日の海氷密接度分布[4]

### 1.1.2. 北極航路

北極海を通る航路を北極航路 (ASR, Arctic Sea Route) と呼ぶ。北極航路には主に二つある。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東航路 (Fig. 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 (Fig. 1-5[5]) である。航路から全く海水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。

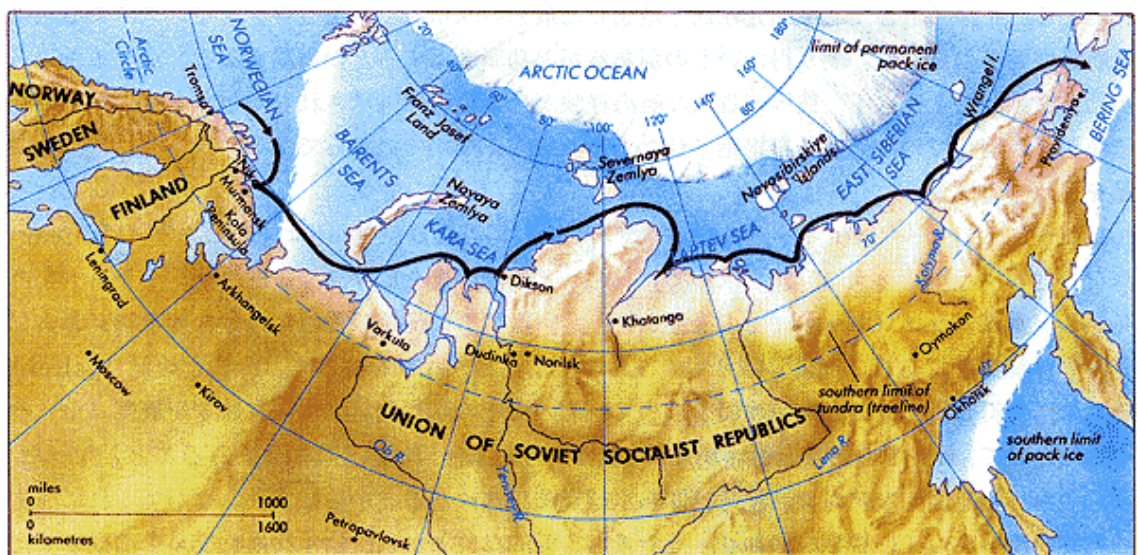


Fig. 1-4 北東航路[5]



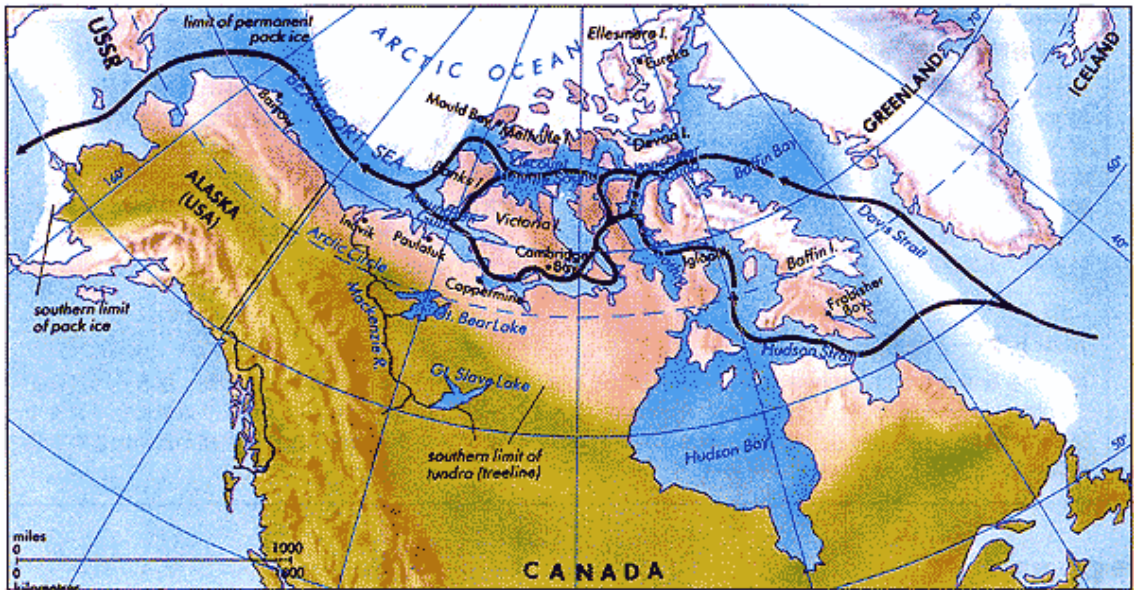


Fig. 1-5 北西航路[5]

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、北東航路の商業的航路としての価値が高まってきた。北東航路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38%ほど短縮することができる (Fig. 1-6[6])。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。

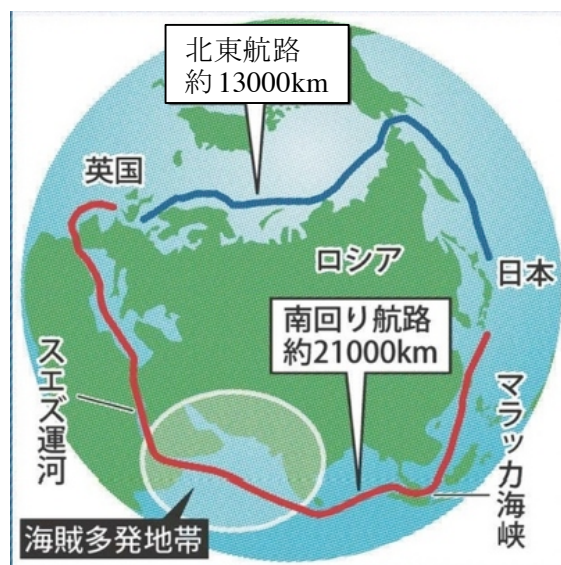


Fig. 1-6 北東航路と南回り航路の比較[6]

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。Table 1-1[7]は2010年から2013年までに北東航路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。

**Table 1-1 北東航路通航貨物量[7]**

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

現在、北極海の航路利用の課題はその採算性と安全性の向上にある。何よりも先にまず安全な氷海航行ができるためには、救難設備や航行性能の優れた船舶の建造が必要である。そして、このようなハード面でのインフラに加えて、航路沿いの気象・氷況データの整備と、それをもとに航海の適性を判断できる情報技術などのソフト面での航行支援も航路実現に欠かすことはできない。この両者が揃うことによって安全性が確立されれば、船舶の故障や、それに伴う輸送保証のための費用が削減できる。そうなれば、北極航路の定期的な利用に大きく近づくことになるだろう。

ここでは航行支援に必要な不可欠な氷況予測についてまとめる。Table 1-2[8]は、予測期間と必要な決定事項の関係をまとめたものである。このうち、②については海氷運動の数値予報モデルの改良によって高い精度で解決できる。また、③については現在行っている100年レンジの海氷面積予測の期間を短くすることで精度が上がるであろう。今回の研究の目的となるのが中期予測である。航路を利用するかどうか、またどんな航路を取るかを決定するためには、夏季の氷況を数ヶ月前に予測することが必要である。中野(2015)[6]は北極海航路における最適航路探査手法を開発した、そして海氷の短期と長期予測データを用いて航路を探査した。Fig. 1-7はその例を示している。もし中期予測ができれば、中期間の最適航路探索もできるだろう。

**Table 1-2 航路沿い氷況予測とその効果[8]**

	予測期間	決定事項
①	1ヶ月から半年程度（中期）	北東航路・北西航路の決定
②	1週間程度の予測（短期）	氷海突入後の航路決定
③	10年レンジの予測（長期）	経済効果など長期効果を図る、造船計画の決定

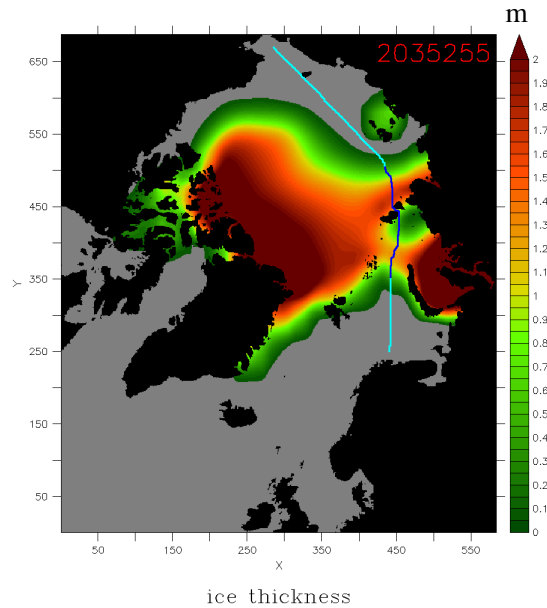


Fig. 1-7 2035年9月1日出発の最適航路[6] (色は海水厚[m])

## 1.2. 既存研究

Kimura et al. (2013)[9]は、マイクロ波放射計による観測データをもとに毎日の海水漂流速度を計算し、12月から4月までの海水の動きから夏季の海水の密接度分布を予測していた。この手法では、予測に用いたデータとして5月や6月の分も随時取り込むことによって、より正確な予測状況に更新することが出来、より高い精度で予測することが出来る。しかし、海水の厚さの状況に関しては予測することができていない。

森(2015)[10]は人工衛星データによる海水厚を推定するアルゴリズムに基づき、5月と10月の海水厚データで回帰方程式を算出して予測に用いた。しかし、この手法では10月の海水厚を決定する要素は5月の海水厚しか考慮できていないために、5月と10月の間に海水が激しく動く場合は、予測の結果と観測の結果が大きく異なることが考えられた。

## 1.3. 研究目的

現在北極航路を航行しているほとんどの船は耐氷能力があり、海水域では砕氷船に先導されている。つまり、砕氷船の砕氷能力以上に厚い海水でない限り、海水が存在するかどうかだけではその領域が航行可能か判断することは出来ない。更に、安全性と経済性を評価するためには、どの程度の厚さの海水がどの程度の広さにおいて分布しているかという情報に関する予測が必要になる。

本研究の目的は、森[10]の手法を元に、春季までの厚さデータから夏季もしくは秋季の海水厚を予測する手法を提案することである。

## 第2章 使用データ

### 2.1. 衛星リモートセンシング

本研究では、地球観測衛星によるリモートセンシングデータを用いて解析を行う。

リモートセンシングとは、航空機や人工衛星に搭載したセンサーから音波や電磁波を手がかりに地上の物体の種類やその状態を特定する技術である[11]。

センサーは、その特徴から 2 つの観点で分類することが出来る。それは、使用する電磁波の周波数による分類（可視光、赤外線、マイクロ波）と、衛星自らが電磁波を発するかどうかによる分類（能動型、受動型）である。

使用される電磁波ごとの特徴は以下の通りである[11]。

#### 可視光

太陽光のエネルギーの直接的な反射現象を利用して観測される。つまり、地上の物質の反射特性の違いから物体の判別を行うものである。大気によるノイズを受けやすい。

#### 赤外線

地表面の物体の放射温度を観測することができる。海洋における温度分布、温排水などの観測、火山、温泉地帯の噴気といった対象物の熱的情報を知るのに役立つ。可視光と違って夜間の観測が可能である。ただし、可視光、赤外線の 2 種類は雲がある時は地表面の観測が出来ない。

#### マイクロ波

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。ただしマイクロ波は波長が長いので、可視光・赤外線に比べて高い解像度を得ることが難しい。

熱を持つ物体は全て電磁波を放射しており、その放射の特性は物体の種類や状態によって異なる。また、入射する電磁波をよく吸収する物体ほど電磁波をよく放射するという特性もある。したがって、完全吸収体の場合は温度のみで放射量が決定される。このようにあらゆる波長の電磁波を吸収・輻射する理想物体を黒体(black body)と呼び、黒体の輻射エネルギーは次のプランク(Planck)の法則によって示される[11]。

$$B_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1)$$

$B_{\nu}$  : 黒体の分光放射輝度、 $\nu$  : 周波数、 $T$  : 絶対温度

$h$  : プランク定数、 $k$  : ボルツマン定数

つまり、波長と絶対温度によって放射エネルギーを導くことができる。温度が高くなるにつれ最大放射量を与える波長は短くなる。

理想輻射物体としての黒体の特性は、太陽・地球を物理的にマクロに捉えるのに役立つ。

しかし、現実にはこのような理想物体はないので、以下のキルヒホッフの式で与えられるエミッシビティ(emissivity)  $\varepsilon$ によって現実物体と結び付けることになる。一般の物体は $\varepsilon$ が 0 から 1 の間にある灰色体である。

$$\varepsilon = B/B_b \quad (2)$$

$B$  : 現実物体の単位面積あたり輻射エネルギー、 $B_b$  : 黒体の単位面積輻射エネルギー

また、人工衛星によるリモートセンシングにおいては、各物質の周波数ごとの、輝度温度(brightness temperature)の値を観測するが、輝度温度についても同様に以下の式で表される。

$$T_b = \varepsilon T \quad (3)$$

$T_b$  : 物質の輝度温度、 $T$  : 物質絶対温度

以上のように、物体の輝度温度の値の違いによって物体を識別することができる。海氷は厚さ、冠雪、表面状態が輝度温度の値に影響するため、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[11]。

## 2.2. マイクロ波放射計 AMSR-E, AMSR2

本研究で海氷厚の計算に用いた輝度温度のデータのうち、2003年から2010年までのものはNASAの地球観測衛星Aquaに搭載されている改良型高性能マイクロ波放射計AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System)(Fig. 2-1 左)によるものである。

AMSR-Eは地表面から放出されるマイクロ波放射を観測する受動型のセンサーであり、6.9 GHzから89 GHzまでの6周波数帯で、水平偏波・垂直偏波で観測を行っている。そのうち、89 GHzにはAとBの2つの受信機があり、総チャンネル数は14である。マイクロ波放射計としては最大級の1.6 m口径のアンテナを搭載し、高い空間分解能をもつ。Table 2-1はAMSR-Eセンサーの詳細である。

AMSR-Eは2011年に観測を終了しており、2012年から2017年の氷厚の計算に関しては、AMSR-Eの後継として、JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)が打ち上げた第一期水循環変動観測衛星「しずく」GCOM-W1(Global Change Observation Mission 1st-Water)に搭載されたマイクロ波放射計AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)(Fig. 2-1 右)による観測データを用いた。

AMSR2はAMSR-Eと同様のマイクロ波放射計であり、AMSR-Eと同じ6.9 GHzから89 GHzまでの6周波数帯のチャンネルセットに、電波干渉軽減のための7.3GHzが追加されている。マイクロ波放射計としては世界最大の約2m口径のアンテナを搭載している。Table 2-2はAMSR2センサーの詳細である。

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。

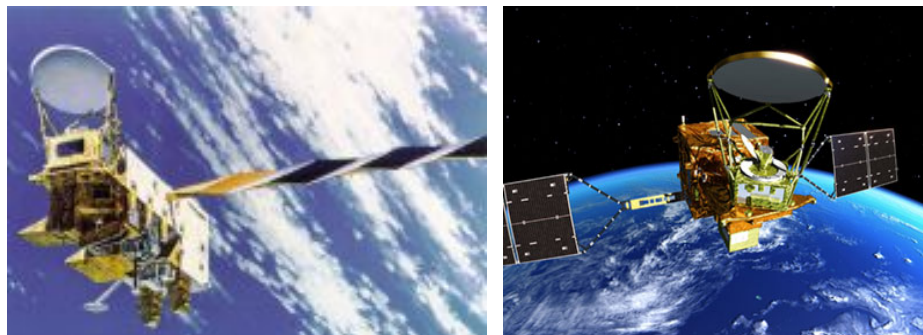


Fig. 2-1 マイクロ波放射計 AMSR-E [12] (左)  
とその後継機 AMSR2[13] (右)

Table 2-1 AMSR-E センサーの詳細[12]

中心周波数 (GHz)	偏波	空間分解能 (km)
6.925	V	43×75
6.925	H	43×75
10.65	V	29×51
10.65	H	29×51
18.7	V	16×27
18.7	H	16×27
23.8	V	18×32
23.8	H	18×32
36.5	V	8.2×14.4
36.5	H	8.2×14.4
89.0	V (受信機 A)	3.7×6.5
89.0	H (受信機 A)	3.7×6.5
89.0	V (受信機 B)	3.5×5.9
89.0	H (受信機 B)	3.5×5.9

**Table 2-2 AMSR2 センサーの詳細[13]**

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

本研究で使用した輝度温度は、国立極地研究所が JAXA との協定のもとで Arctic Data archive System(ADS) [14]下で配布している AMSR-E と AMSR2 による輝度温度データで、解像度 10 km、グリッド数 900×900 の毎日データである。

### 2.3. 海氷密接度

本研究では、海氷の面積的な分布を示す指標として、ある範囲内の海面で海氷が占める割合を示す海氷密接度データを使用した。海氷密接度は ADS[14]による水平方向の解像度 10 km、グリッド数 900×900 の毎日データである。Fig. 2-2 に 2014 年 10 月 1 日の海氷密接度分布を示す。黒い部分は衛星軌道による極点周辺の欠測である。

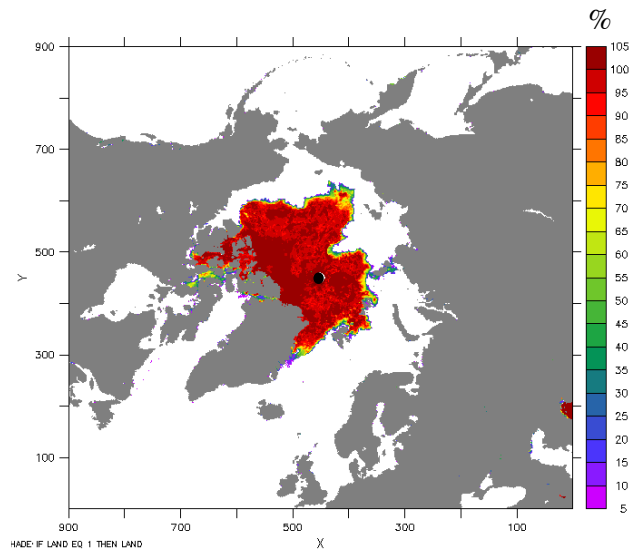


Fig. 2-2 2014 年 10 月 1 日の海氷密接度[%]

## 2.4. 海氷厚

### 2.4.1. 海氷厚推定アルゴリズム

本研究では、Krishfield et al. (2014)[15]によって開発された、マイクロ波放射計 AMSR-E と AMSR2 による輝度温度データを元に海氷厚を推定するアルゴリズム (IJIS アルゴリズム) を用いた。

このアルゴリズムの特徴は、3 種類の異なる海表面 (開水面・一年氷・多年氷) からの電磁波が各周波数帯での輝度温度を構成していると仮定したことである。一年氷 (FY, First Year ice) は板状軟氷から発達し、一冬より長くは経過しない海氷で、厚さ 30 cm~2 m。これに対し、多年氷 (MY, Multi-year ice) は少なくとも一夏は融けずに残っている氷。厚さは 3 m 以上以上のものが多い。

ここで各輝度温度において 3 種類の表面を区別するのに用いられるのが Fig. 2-3 である。



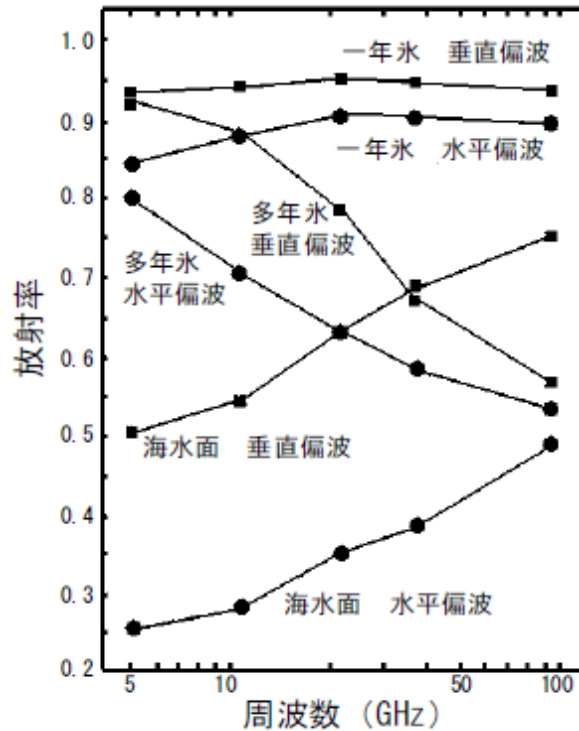


Fig. 2-3 三種類の表面に対する周波数・偏波方向の放射依存性[16]

Fig. 2-3 を見ると、多年氷は周波数が上がるほど放射率が低くなる、つまり輝度温度が低い値を示すことが分かります。これに対して、一年氷では周波数依存性が少ない。また開水面は周波数が高いほど輝度温度が上がり、垂直偏波と水平偏波の差も大きい。この特性を用いて、 $PR$  (polarization ratio) と  $GR$  (spectral gradient ratio) という2つの変数を定義する。

$$PR_{36} = \frac{T_b(36V) - T_b(36H)}{T_b(36V) + T_b(36H)} \quad (4)$$

$$GR_{06-36} = \frac{T_b(36V) - T_b(06V)}{T_b(36V) + T_b(06V)} \quad (5)$$

ここで、 $T_b(36H)$ ,  $T_b(36V)$ ,  $T_b(06V)$ は輝度温度であり、6、36は周波数を、 $V$ ,  $H$ は垂直偏波、水平偏波をそれぞれ表す。 $PR$  と  $GR$  は使った輝度温度の周波数によって、違い値が得られる。

$PR$  は開水面と海氷域を識別するために用いられ、 $GR$  は一年氷と多年氷を識別するために用いられる。IJIS アルゴリズムでは  $GR_{06-36}$  を元に一年氷と多年氷を区別した上で、それぞれに対する経験式を用いて厚さを推定する。Fig. 2-4 に示されているとおり、IJIS アルゴリズムは  $GR_{06-36}$  の値と ULS (Upward-Looking Sonar) による計測データの間には一定の関係性が見られた。ULS とはカナダ側の北極海域の海底に係留した、海中から上向きに音波を発射し、反射波の到達時間を解析することで海氷厚を計測する装置である。構造と設置場所は Fig. 2-5 に示している。

そして、IJS アルゴリズムでは、

$$GR_{06-36} \geq -0.035 \quad (6)$$

の時は一年氷、

$$GR_{06-36} < -0.035 \quad (7)$$

の時は多年氷という経験的な線引きによる判定をしていた。

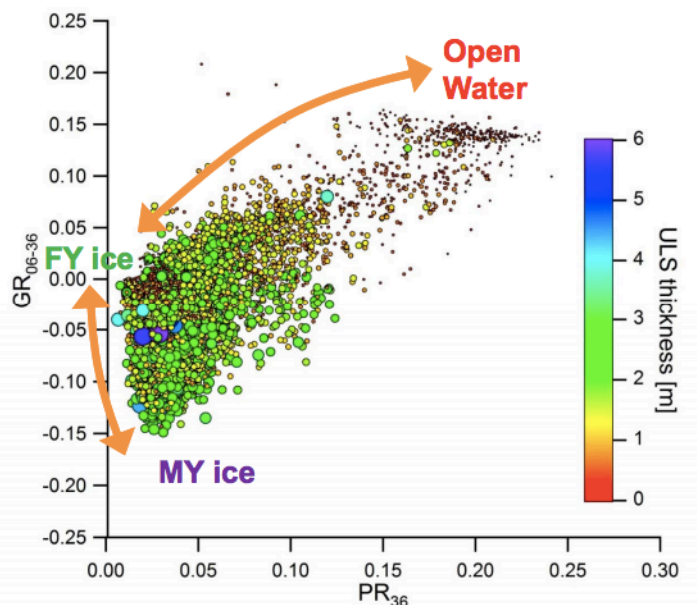


Fig. 2-4 ULS で計測された海水厚の AMSR-E による PR/GR ごとの分布[15]

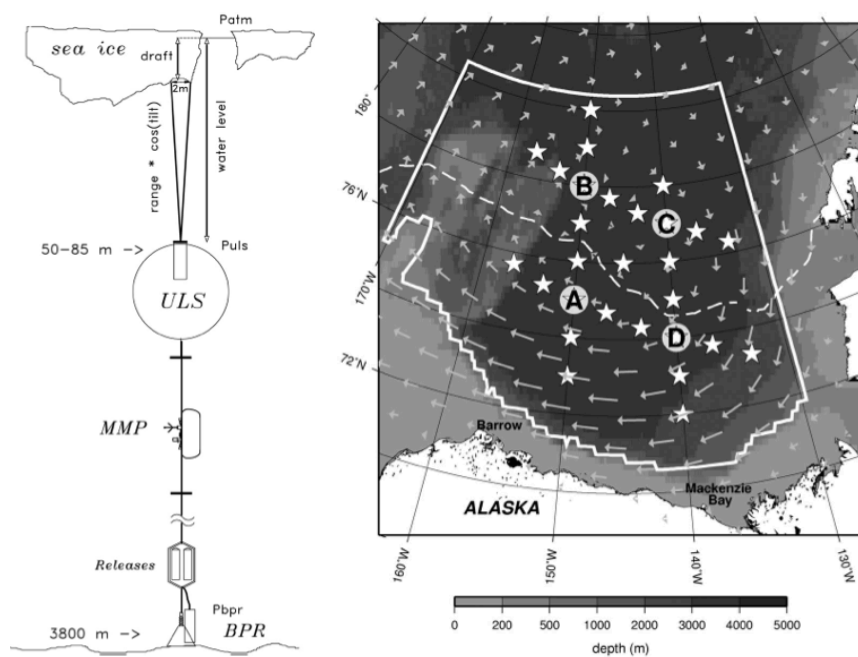


Fig. 2-5 ULS の構造 (左) と設置地点 (右) [15]

その上で、一年氷に関しては、以下の経験式、

$$IJIS\ draft[m] = 2.34 \cdot \exp\left(\frac{(PR_{36} - 0.0019)}{-0.0283} + 0.085\right) \quad (8)$$

多年氷に関しては、以下の経験式、

$$IJIS\ draft[m] = 0.162 + 0.244 \cdot \exp(-20.785 \cdot GR_{06-36}) \quad (9)$$

を用いて、それぞれの海氷厚を推定する。

また、海氷の表面が溶けて水たまり状のメルトポンドと呼ばれる状態になると、海氷厚の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を以下の計算により算出し、メルトポンドの密接度が 20%以上になるグリッドは、エラーとして海氷厚の計算の対象から除外する。

$$melt = (06H - 89V)/36H \quad (10)$$

$$melt\ conc = (melt - 0.1028)/(-0.0147) \quad (11)$$

また、海氷密接度が 30%以下の地点も計算の対象から除外する。

Fig. 2-6 は 2013 年 1 月から 12 月まで各月の 1 日の IJIS アルゴリズムにより海氷厚の分布を示している。白い部分はメルトポンドによるエラー、黒い部分は衛星軌道による極点周辺の欠測である。

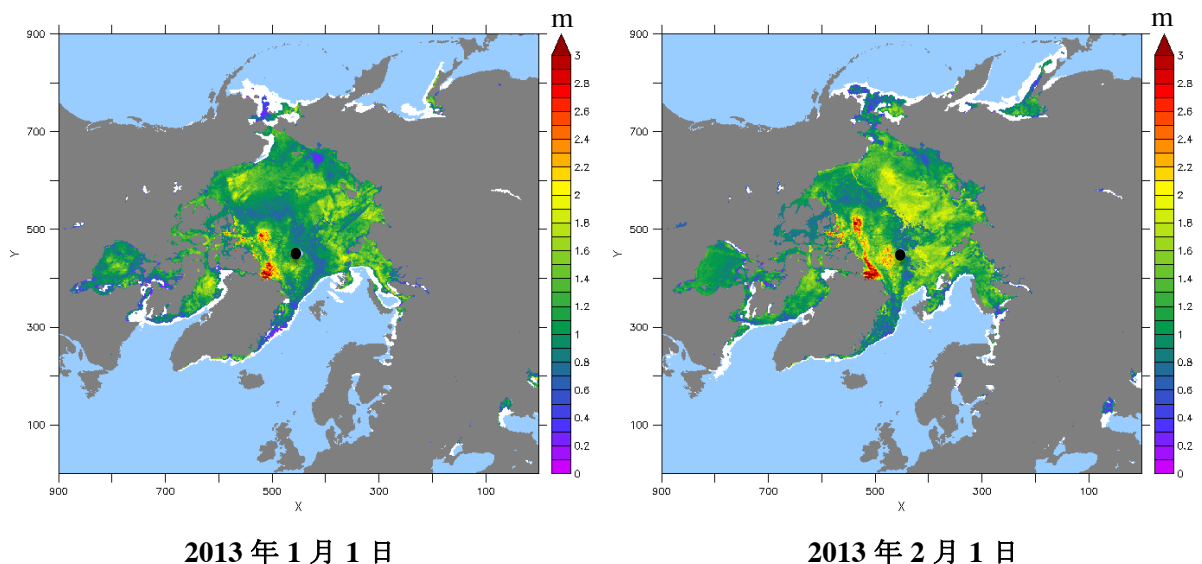
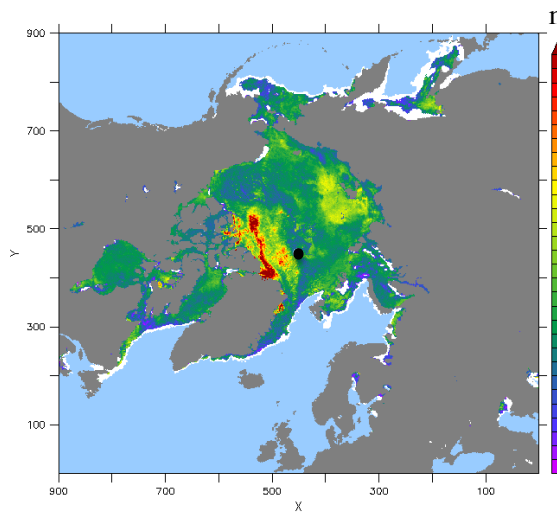
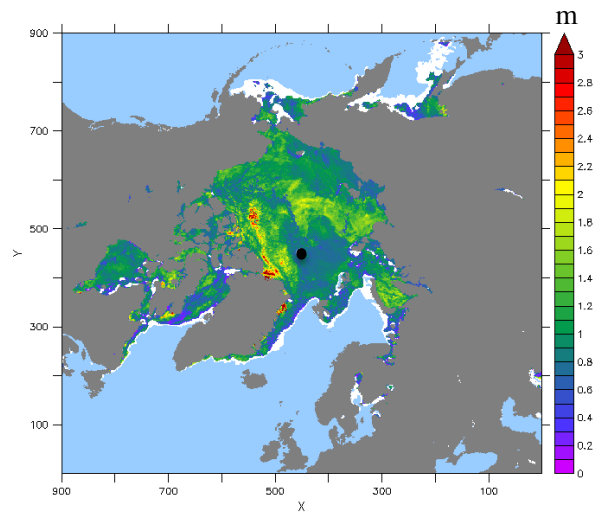


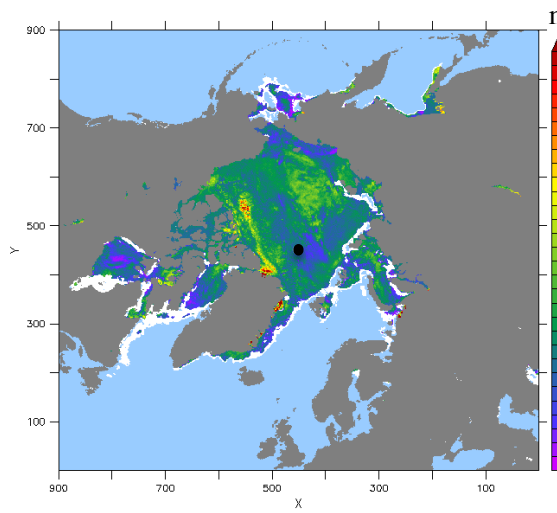
Fig. 2-6 IJIS アルゴリズムによる 2013 年各月の 1 日の海氷厚分布[m] (その 1)



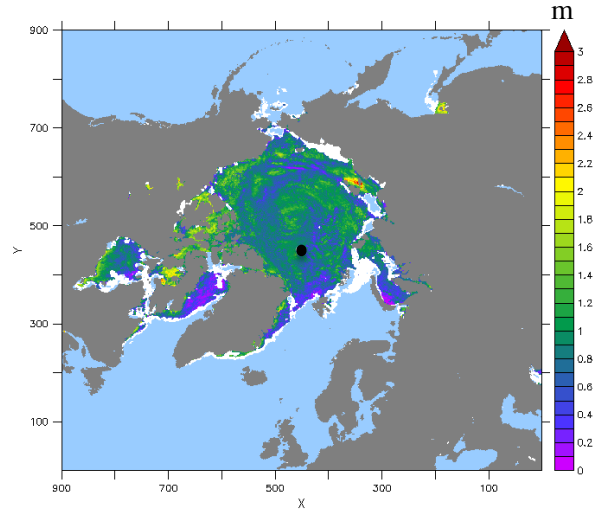
2013年3月1日



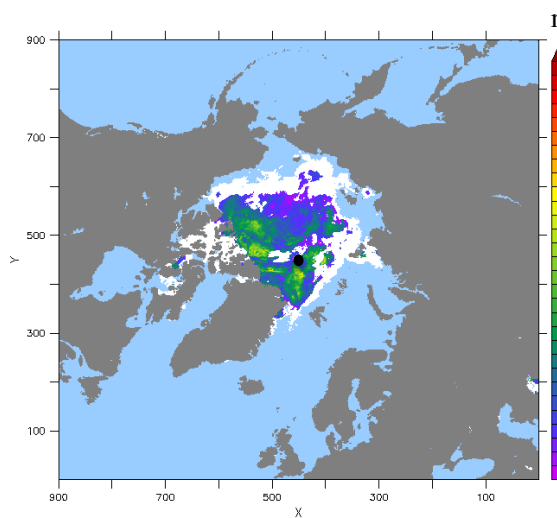
2013年4月1日



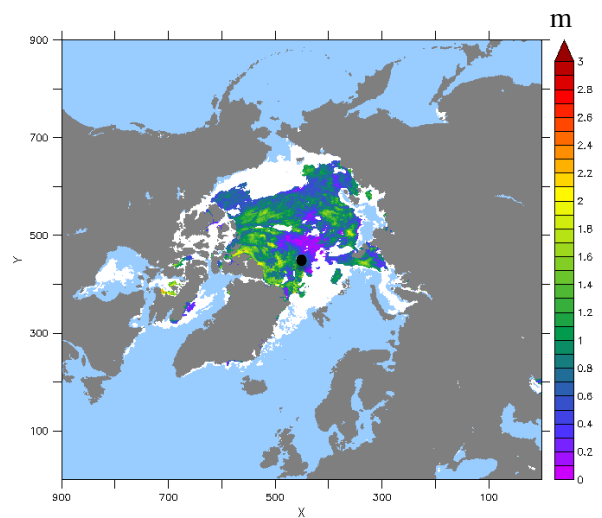
2013年5月1日



2013年6月1日

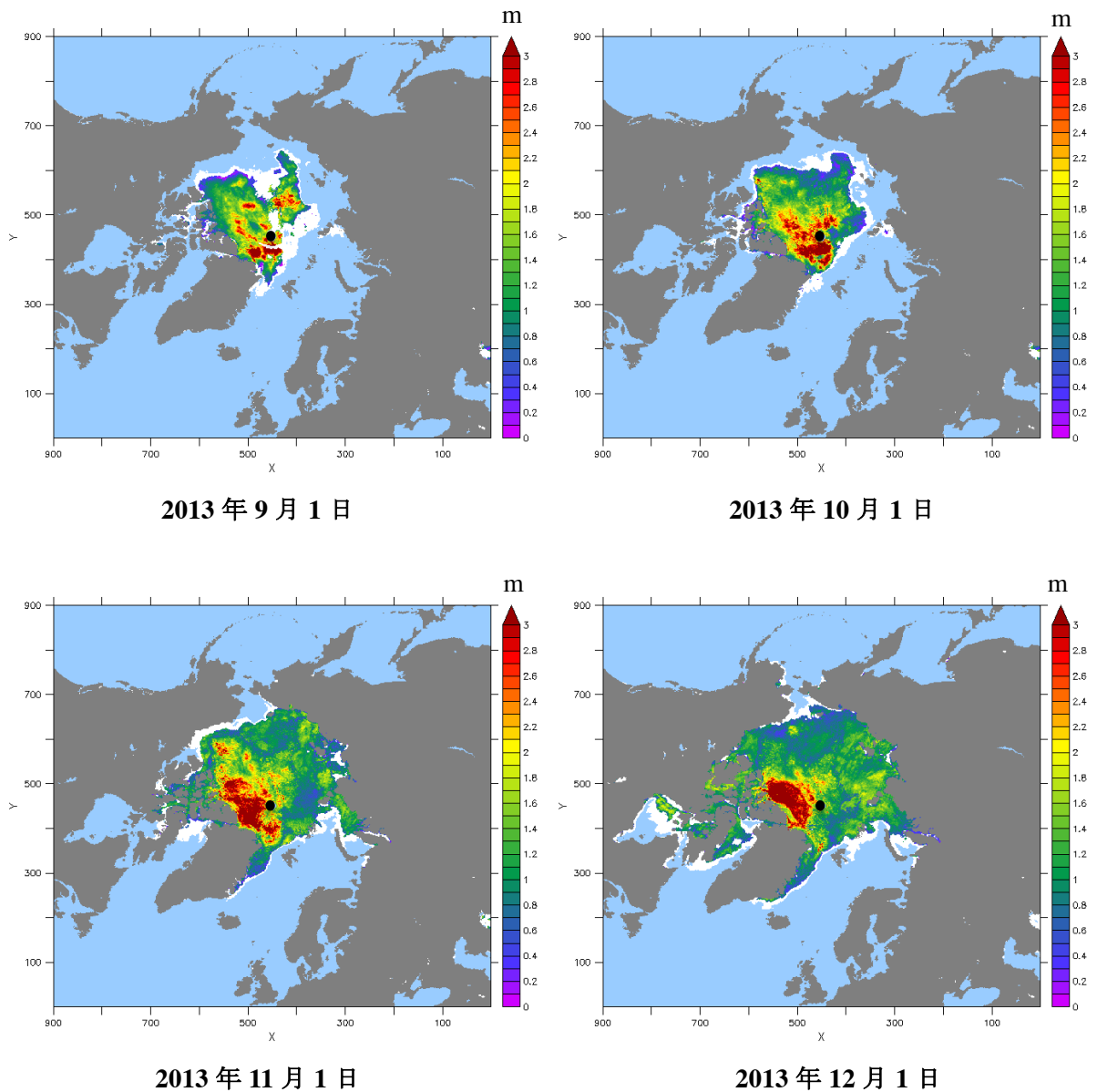


2013年7月1日



2013年8月1日

Fig. 2-6 IJIS アルゴリズムによる 2013 年各月の 1 日の海氷厚分布[m] (その 2)



**Fig. 2-6 IJIS アルゴリズムによる 2013 年各月の 1 日の海氷厚分布[m] (その 3, 終)**

この図から、海氷の融解期となる 7 月から 9 月までの海氷厚にメルトポンドによるエラーが多く存在していたことがわかった。その不自然な部分により、データの信頼性が低いと考えた。よって、本研究では海氷厚データを使用した際に、7 月から 9 月までのデータを除外した。

### 季節補正について

Fig. 2-7 は、前述の IJIS アルゴリズムによって海氷厚と ULS による計測値の差を表示している。その結果、IJIS アルゴリズムは 8 月から翌年 2 月までの間に、海氷厚が過大評価、3 月から 7 月が過小評価になっていることがわかった。この季節によって変化する誤差に対応するため、下記の式を用いて季節補正を行い、季節補正值 (season error) と modified IJIS draft を定義していた[15]。

$$\begin{aligned}
 \text{Modified IJIS draft} &= \text{IJIS draft} - \text{season error} \\
 &= \text{IJIS draft} - (a \cdot JD^4 + b \cdot JD^3 + c \cdot JD^2 + d \cdot JD + e)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

where JD is Julian Day, and for AMSR - E:

$$a = -2.07 \times 10^{-9}, b = 1.40 \times 10^{-6}, c = -2.57 \times 10^{-4}, d = 8.33 \times 10^{-3}, \text{ and } e = -0.18$$

for AMSR2:

$$a = -1.02 \times 10^{-9}, b = 5.32 \times 10^{-7}, c = -3.53 \times 10^{-5}, d = -9.04 \times 10^{-3}, \text{ and } e = 0.60$$

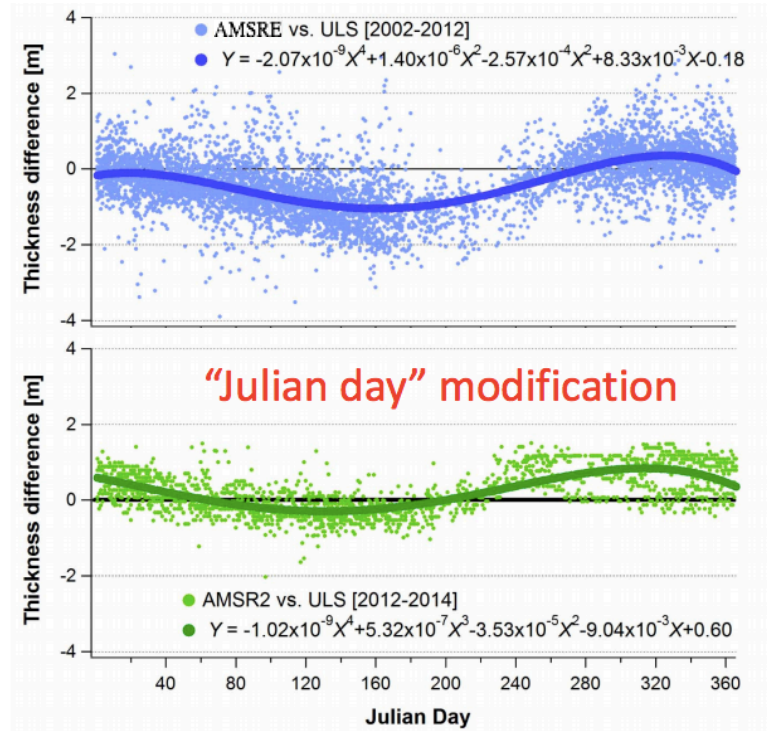


Fig. 2-7 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と ULS で計測した海氷厚との誤差[m]とその補正関数[15]

#### 2.4.2. 検証用の海氷厚観測データ

前述の IJIS アルゴリズムの季節補正は、Fig. 2-5 (右) に示された ULS が存在しているカナダ北側の北極海の非常に限定された範囲のみ検証した上で提案された。ほかの地点への応用の可否が不明である。

本研究では、広範囲で IJIS アルゴリズムによる海氷厚の精度、または季節補正の必要性を検討するため、CryoSat-2/SMOS Data Fusion[17]を使用した。これは 2010 年に欧州宇宙機関 (ESA, European Space Agency) が打ち上げた地球観測衛星 CryoSat-2 に搭載されたレーダー高度計による観測データと L-band マイクロ波センサー SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) による観測データから計算した海氷厚データ。解像度 25 km、グリッド数 720×720 の週間平均データである。また、5 月から 9 月までの間に、データが存在していない。Fig. 2-8 は CryoSat-2/SMOS Data Fusion による 2014 年 10 月 20 日から 26 日までの一週間、海氷厚の平均値の分布を示している。

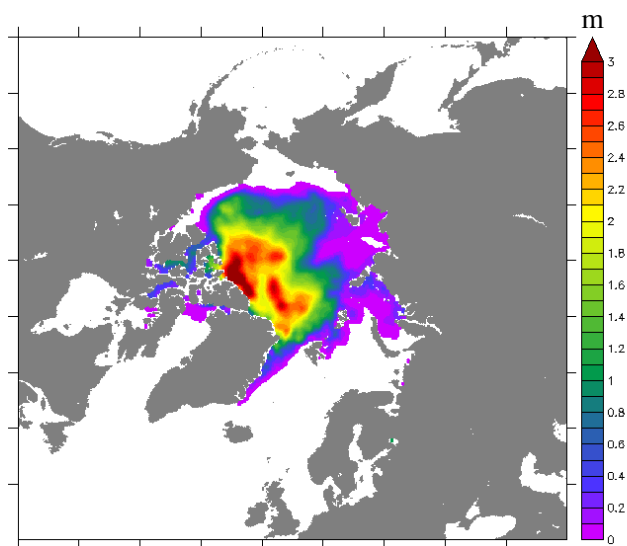


Fig. 2-8 CryoSat-2/SMOS Data Fusion による 2014 年 10 月 20 日からの一週間の平均海氷厚[m]

## 2.5. 気象データ

海氷厚を決定する要因のひとつに気象条件があると考えられる。本研究では、気象要素が海氷厚に対してどれだけ影響しているか検討するため、気象データとして ECMWF(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)[18]が提供している再解析データ ERA-Interim から気温、風速データを入手し解析に用いた。データは解像度  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (最大約 28 km)の毎日データであり、その例を Fig. 2-9 に示されている。

ECMWF とはヨーロッパ 18 ヶ国を中心として、6 ヶ国の協力国と共に世界中の気象データおよび大気環境データを扱っている機関である。ECMWF では日々、地球上の各地に配置されている約 1300 の気象観測用の気球や海上の気象ブイ、観測を委託している船舶、航空機、あるいは気象衛星から得られる膨大な気象データを処理し続けている[1]。

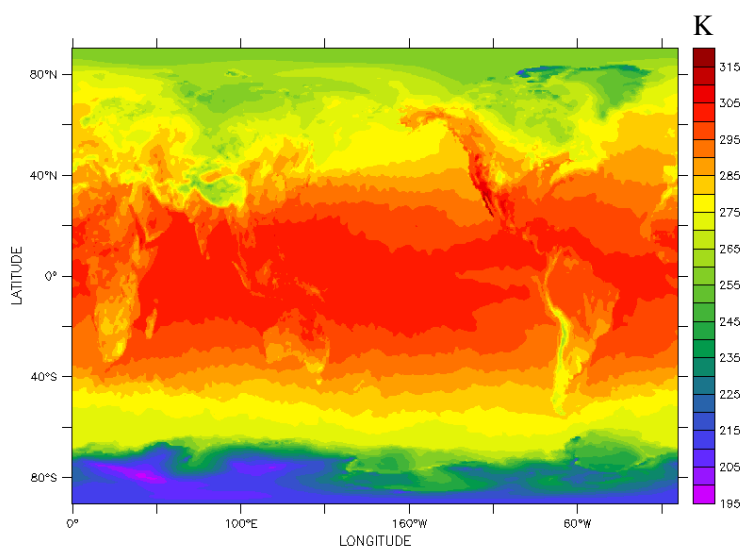


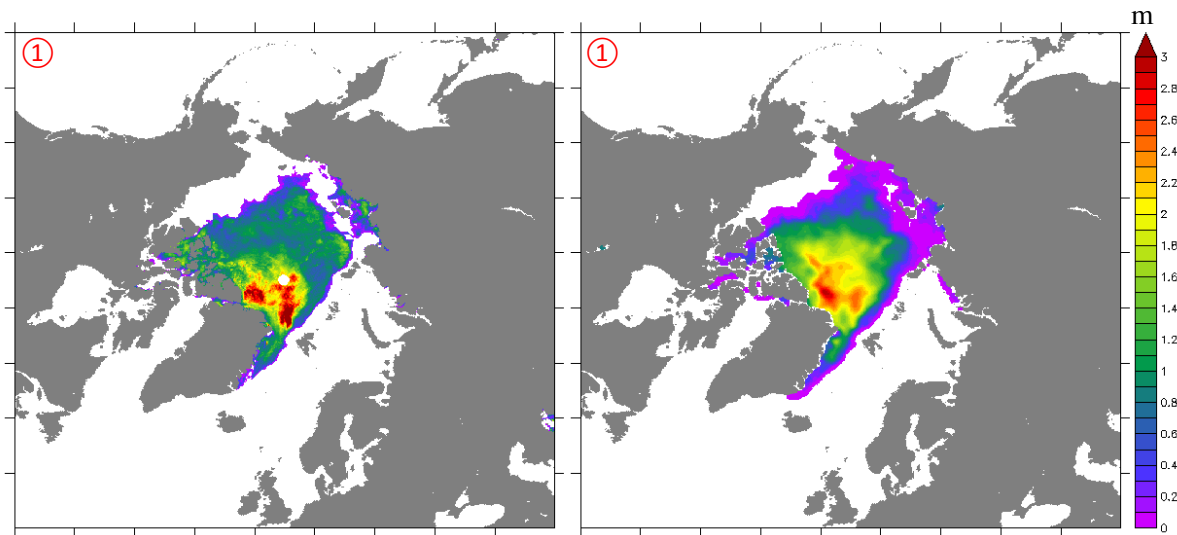
Fig. 2-9 ERA-Interim による 2004 年 5 月 1 日の 2 m 高度の気温[K]

# 第3章 海氷厚中期予測の準備

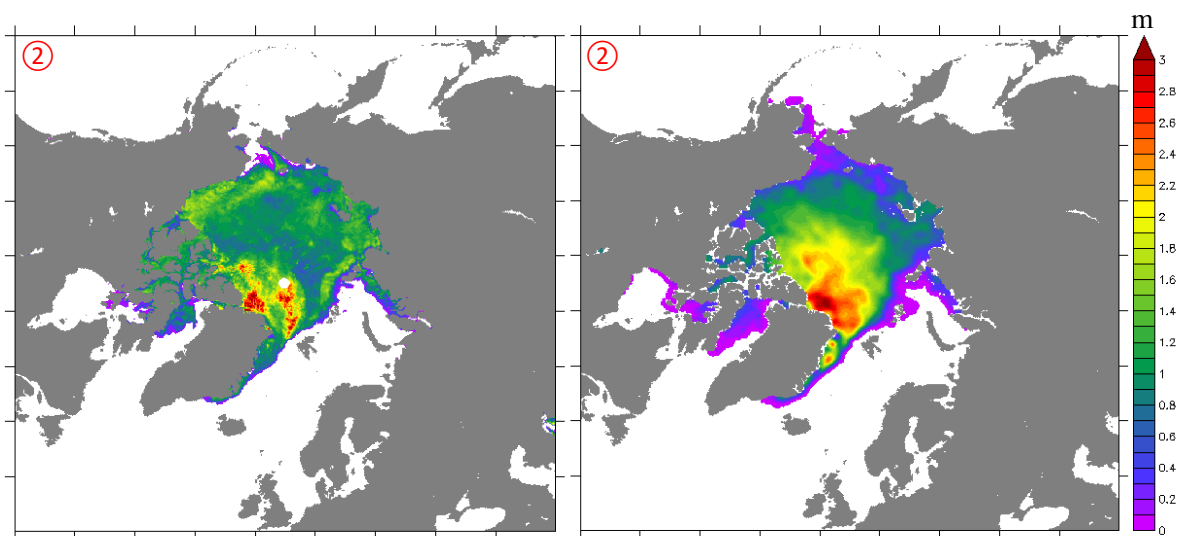
## 3.1. IJIS アルゴリズムによる海氷厚データの検証

### 3.1.1. CryoSat-2/SMOS Data Fusion との比較

IJIS アルゴリズム海氷厚データと CryoSat-2/SMOS Data Fusion 各自の特徴によって、検証期間は 2012 年から 2016 年までの特定な期間になる。IJIS アルゴリズム海氷厚データは週間平均値をとり、座標系と解像度は CryoSat-2/SMOS Data Fusion の座標系と解像度に変更した。Fig 3-1 は 2012 年 10 月から 2013 年 10 月までの一年間、両者の海氷厚分布の例を示している。また、Fig 3-2 (左) は IJIS アルゴリズムの海氷厚ひく CryoSat-2/SMOS Data Fusion の差を示している。



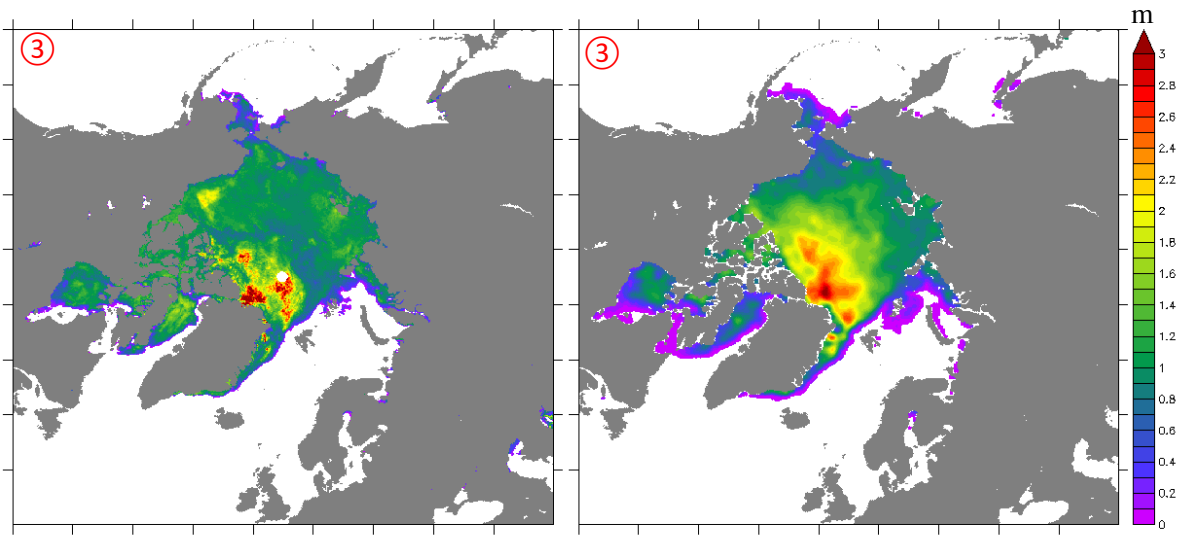
2012 年 10 月 22 日から 28 日までの一週間



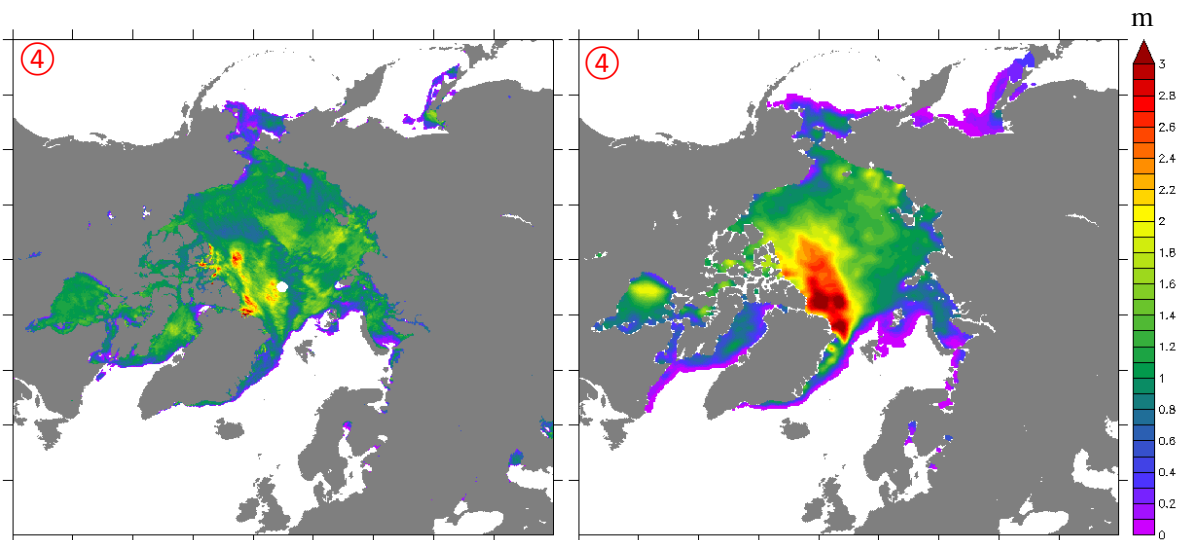
2012 年 11 月 19 日から 25 日までの一週間

Fig. 3-1 IJIS アルゴリズムによる海氷厚[m] (左)  
と CryoSat-2/SMOS による海氷厚[m] (右) (その 1)

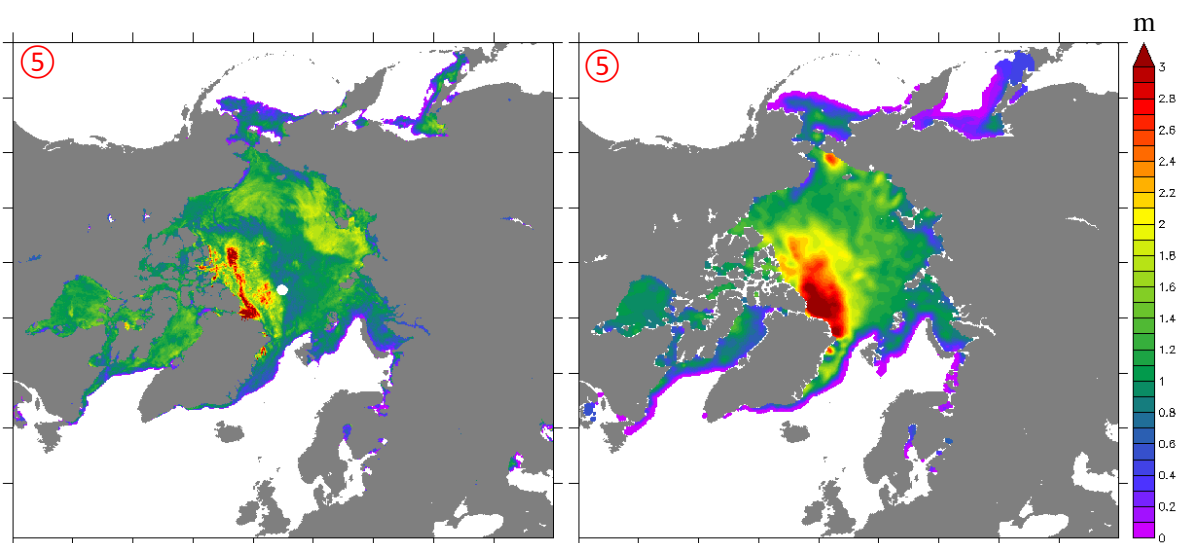




2012年12月17日から23日までの一週間

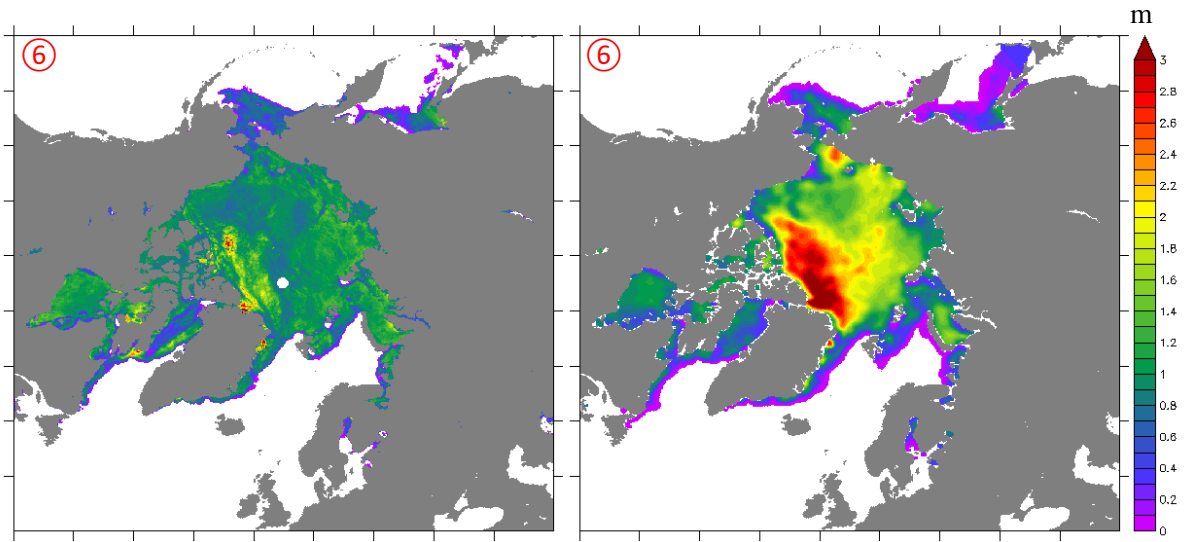


2013年1月14日から20日までの一週間

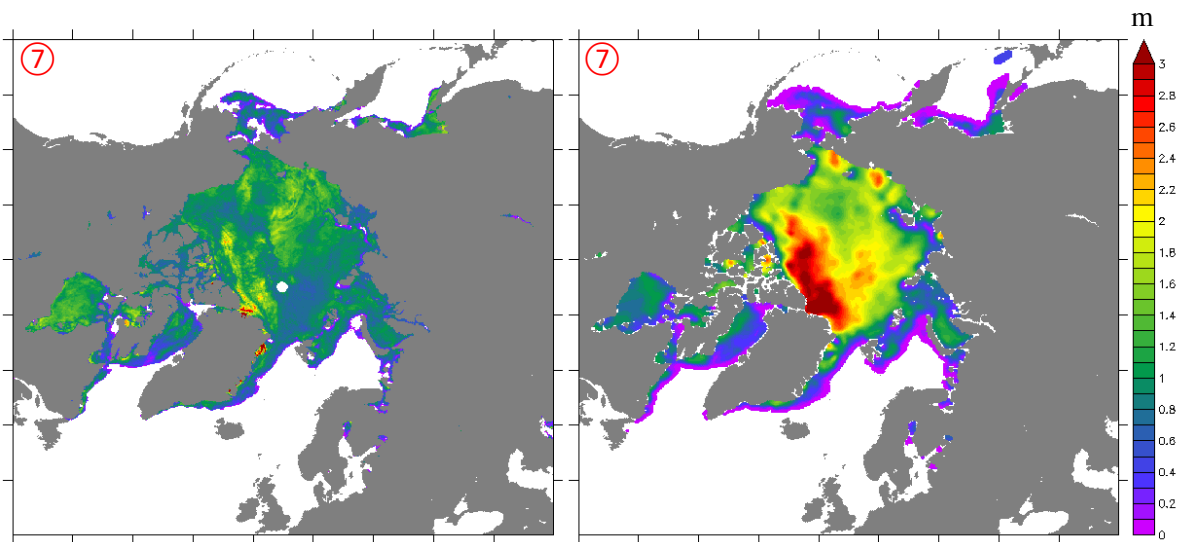


2013年2月18日から24日までの一週間

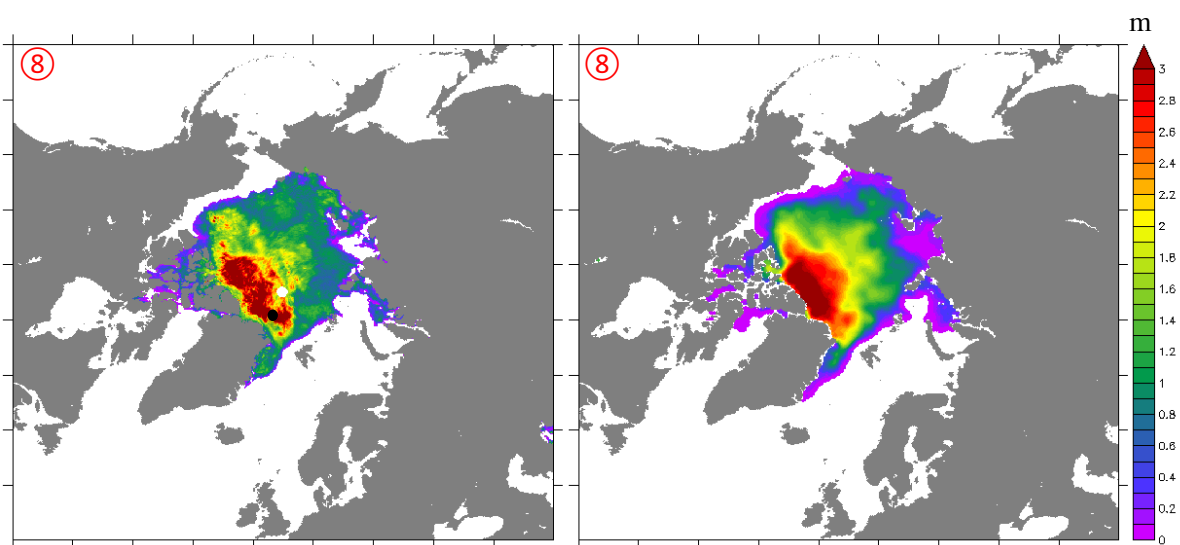
Fig. 3-1 IJIS アルゴリズムによる海氷厚[m] (左)  
と CryoSat-2/SMOS による海氷厚[m] (右) (その2)



2013年3月18日から24日までの一週間

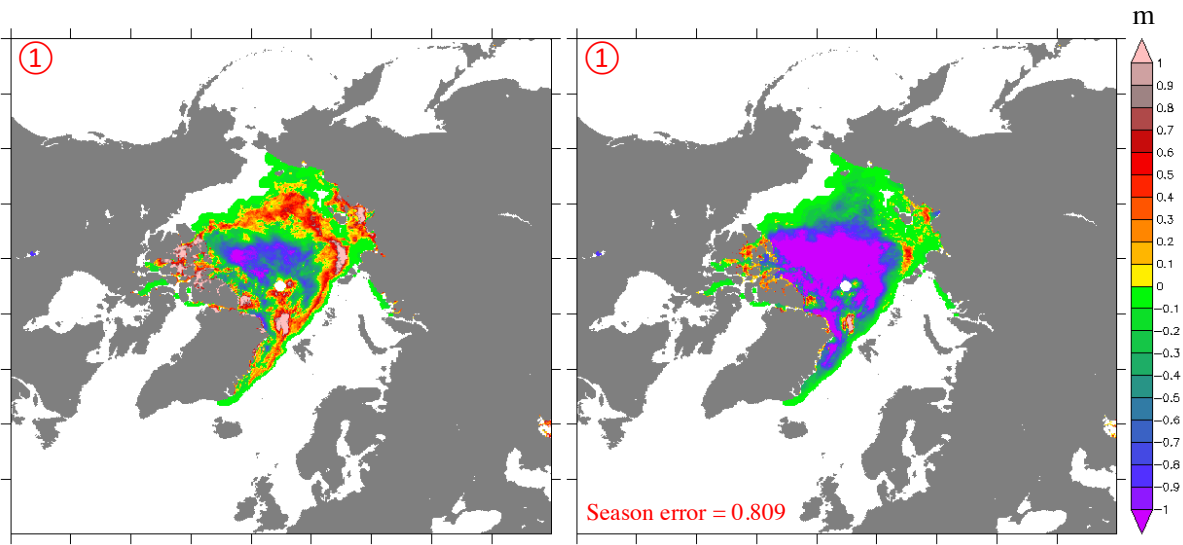


2013年4月8日から14日までの一週間

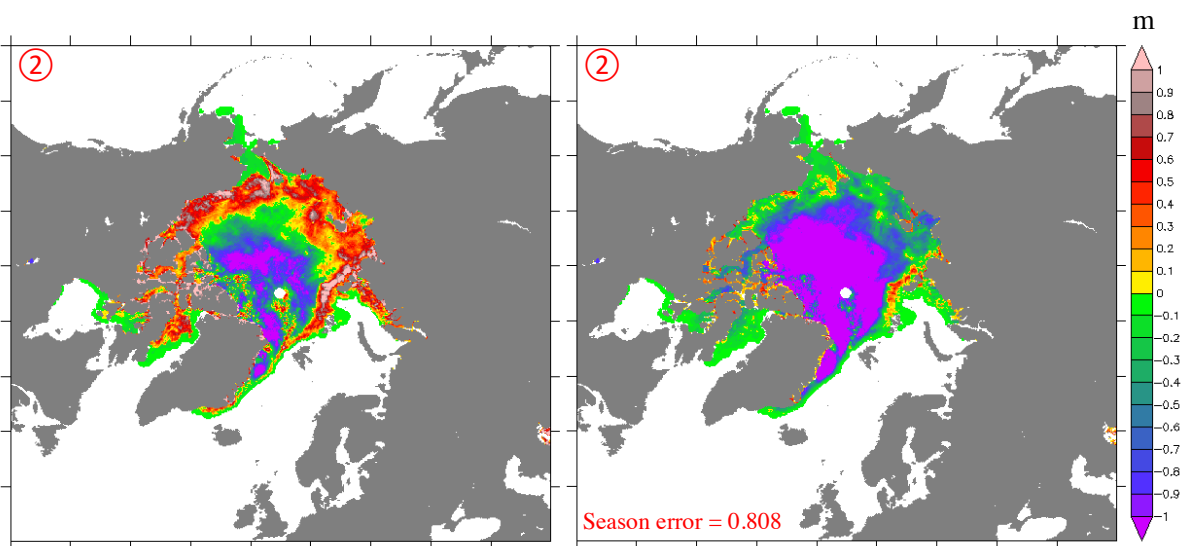


2013年10月21日から27日までの一週間

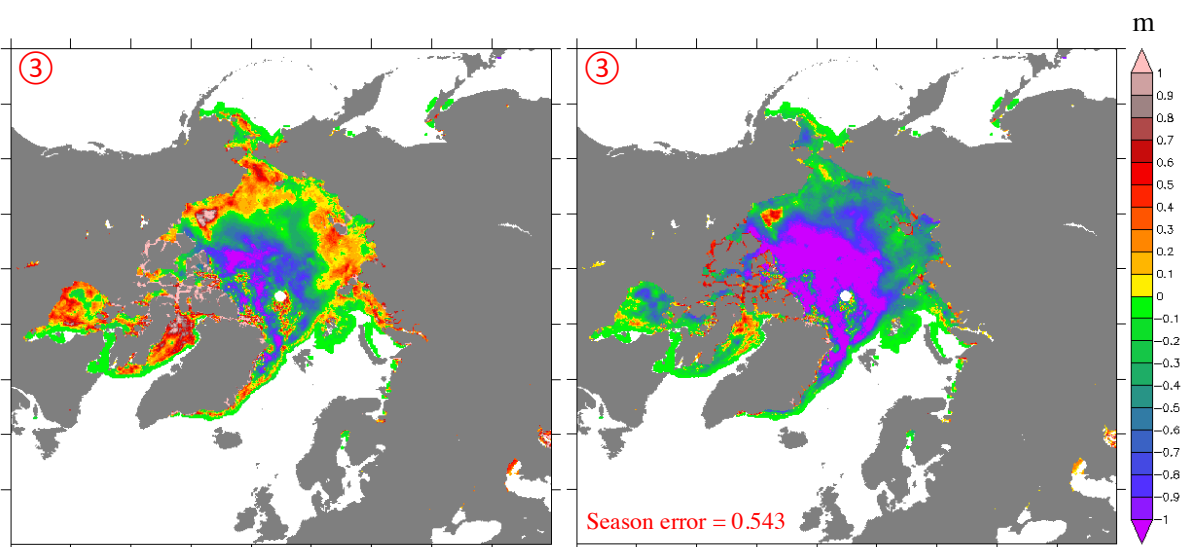
Fig. 3-1 IJIS アルゴリズムによる海氷厚[m] (左)  
と CryoSat-2/SMOS による海氷厚[m] (右) (その3, 終)



2012年10月22日から28日までの一週間

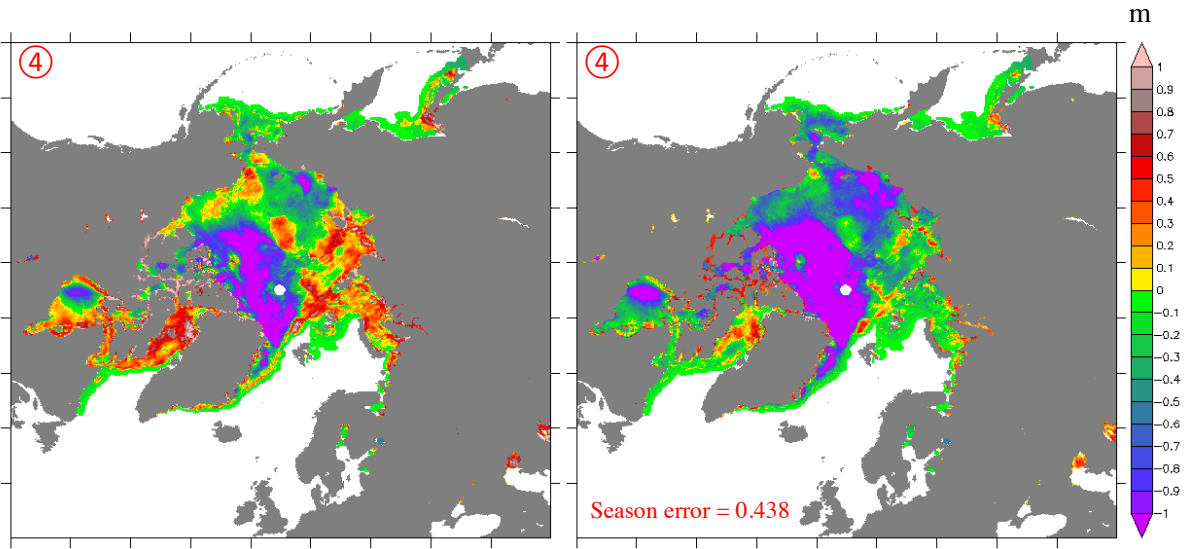


2012年11月19日から25日までの一週間

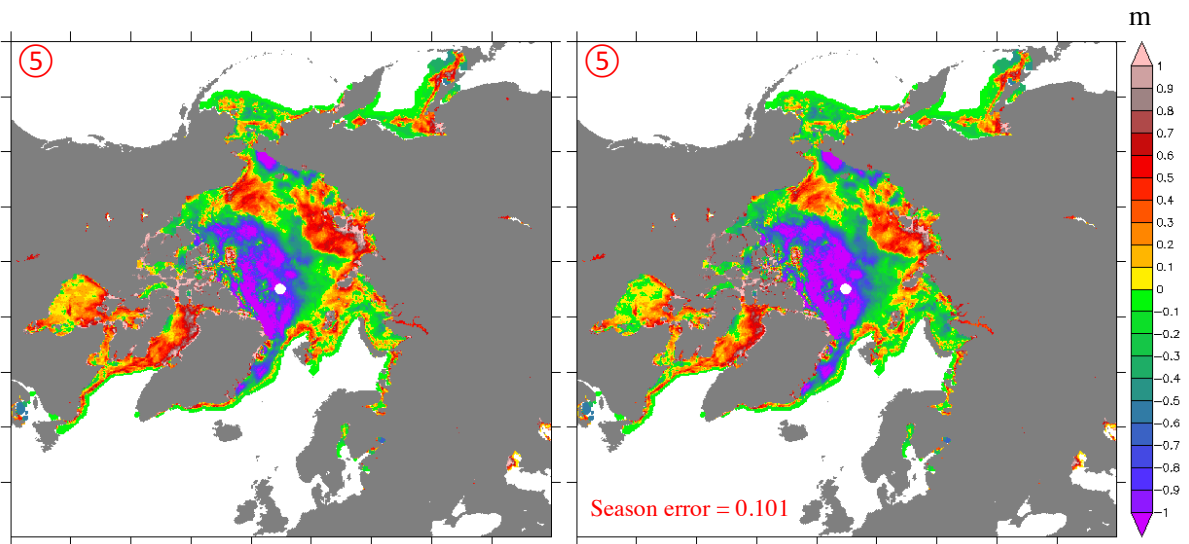


2012年12月17日から23日までの一週間

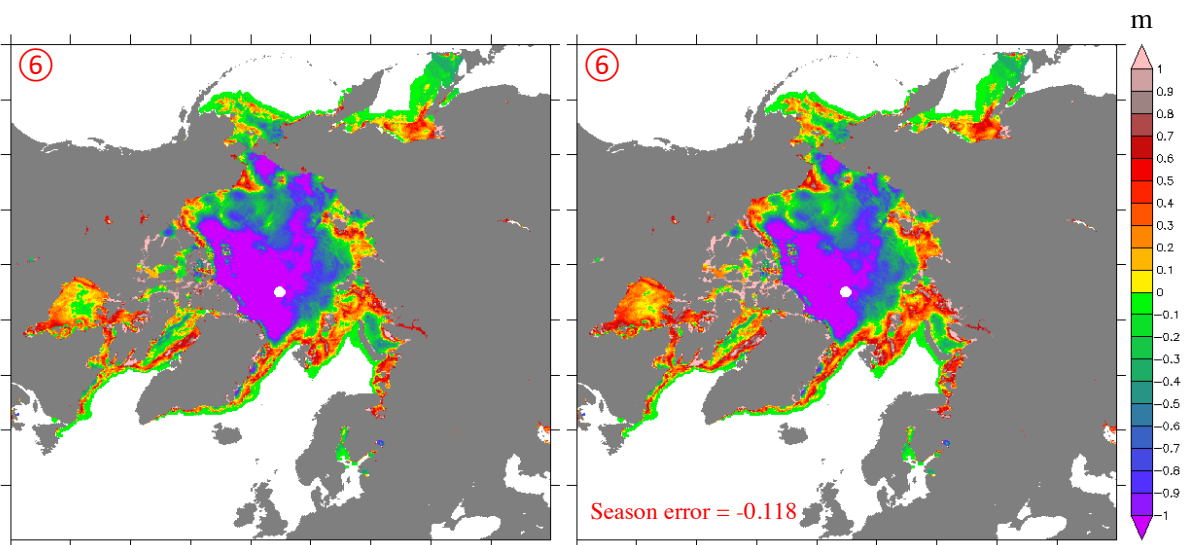
Fig. 3-2 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の差[m]  
 (季節補正なし (左)、季節補正あり (右) ) (その1)



2013年1月14日から20日までの一週間

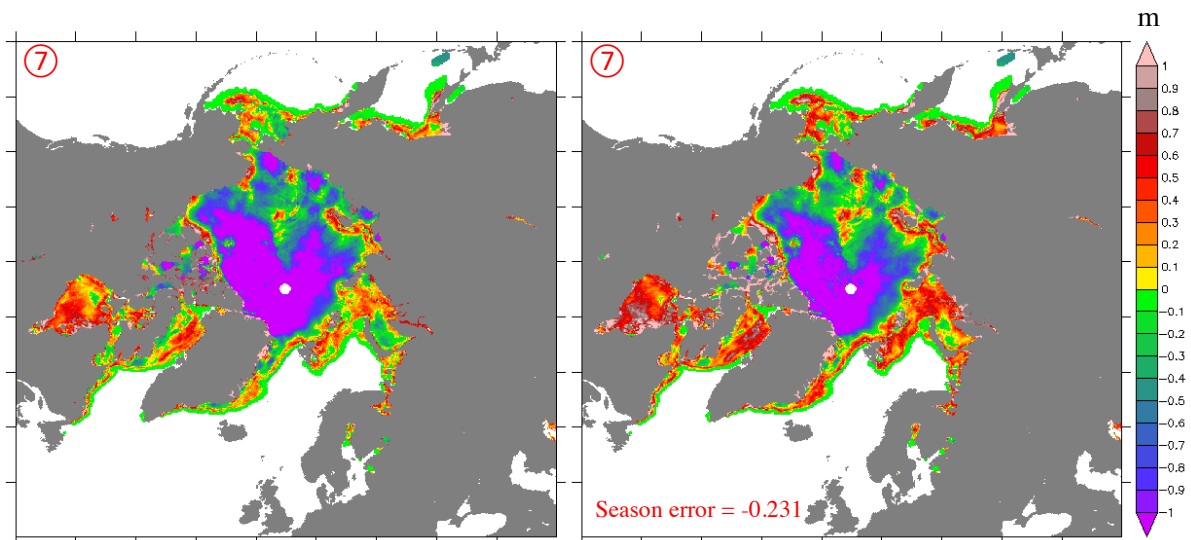


2013年2月18日から24日までの一週間

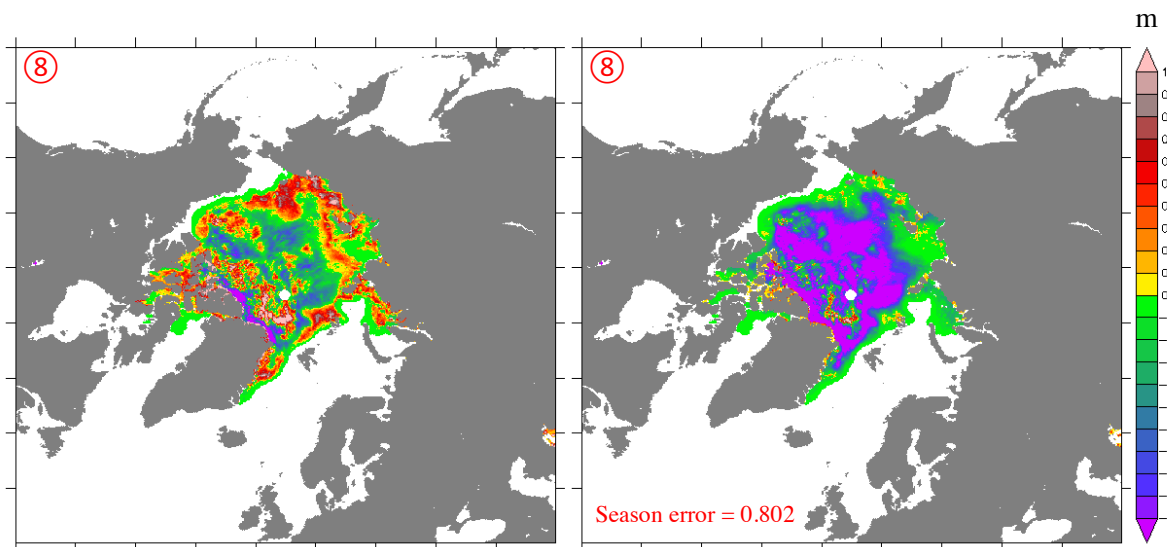


2013年3月18日から24日までの一週間

Fig. 3-2 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の差[m]  
 (季節補正なし (左)、季節補正あり (右) ) (その2)



2013年4月8日から14日までの一週間



2013年10月21日から27日までの一週間

Fig. 3-2 IJIS アルゴリズムによる海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の差[m]  
(季節補正なし (左)、季節補正あり (右)) (その3, 終)

比較の結果、海氷域の範囲については両者がほぼ同じだが、CryoSat-2/SMOS data fusion は IJIS アルゴリズム海氷厚に比べて、厚さ 0.2 m ほどの海氷が多く見られた。その原因は海氷厚を計算した際に、CryoSat-2/SMOS data fusion は海氷密接度が 20%以上の地点のみ用いた[17]が、IJIS アルゴリズムの場合は 30%以上の地点のみ使用した[15]。また、CryoSat-2/SMOS data fusion は IJIS アルゴリズムのメルドポンドによるエラーの一部分 (P20, Fig. 2-6) を厚さ 0.2 m の海氷と見なした[17]。

実際に、現在北極航路を航行している船には、ほとんど耐氷能力を持っている。Table 3-1 は国際船級協会連合(IACS, International Association of Classification Societies)が定義した極地氷海船の階級(Polar Class)を示している。航行可能な氷況及び時期により PC1 から PC7 の 7 段階に分類し、PC1 が最も厳しい。この表から、階級が PC7 の船は多年氷が一部混在する薄い一年氷 (0.3 m – 0.6 m) がある海域に航行できることがわかった。従って、厚さ 0.2 m ほどの海

氷の有無の誤差は考えない。また、氷厚の参考値から見ると、海氷厚の推定誤差は 20 cm 以下の方がいいと考えました。

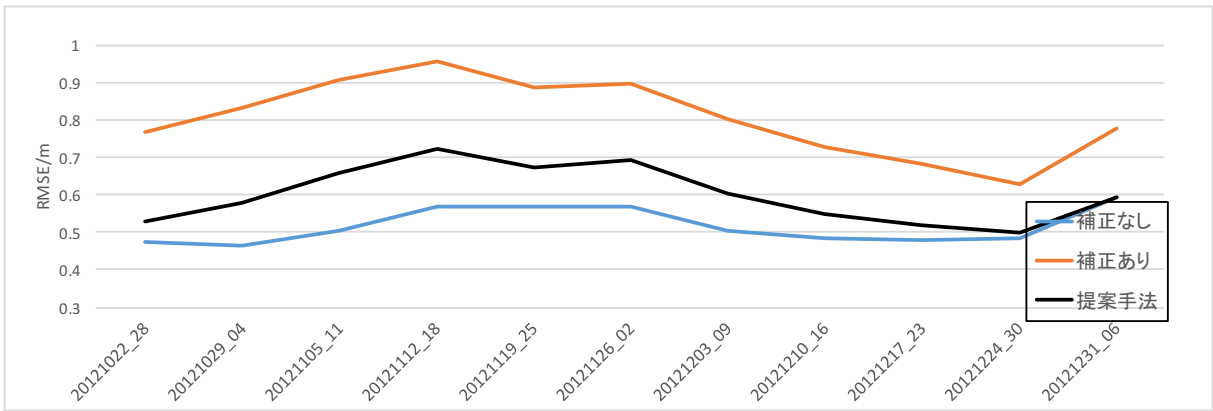
**Table 3-1 極地氷海船の階級と対応の氷の状況・季節[6]**

Polar 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	中程度の厳しさの多年氷が存在する氷の水域を通年航行する船	300-350
PC3	多年氷が一部混在する二年氷の中を通年航行する船	200-300
PC4	多年氷が一部混在する厚い一年氷の中を通年航行する船	120-200
PC5	多年氷が一部混在する中程度の厚さの一年氷の中を通年航行する船	70-120
PC6	多年氷が一部混在する中程度の厚さの一年氷の中を夏季又は秋季に航行する船	50-90
PC7	多年氷が一部混在する薄い一年氷の中を夏季又は秋季に航行する船	30-60

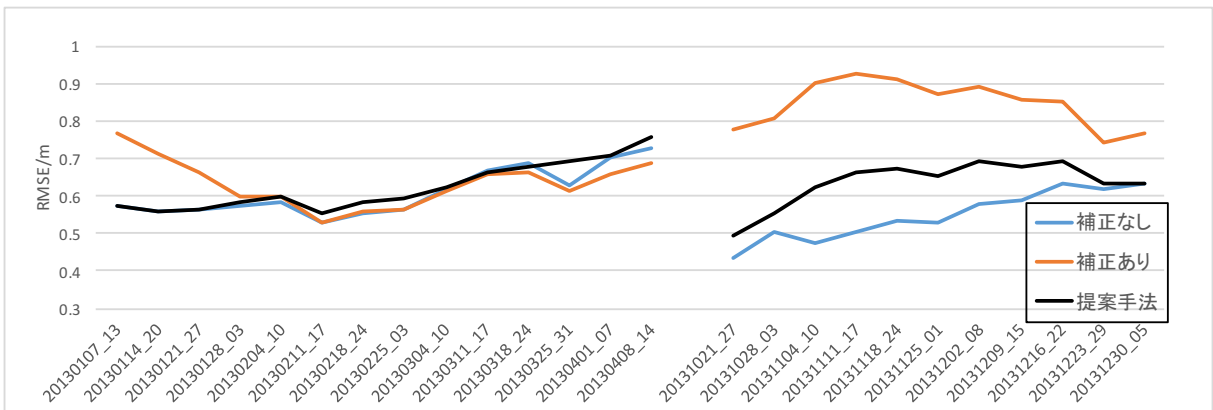
そして厚さの分布については、両者の厚さ 3 m ほどの多年氷の分布は類似していたが、IJIS アルゴリズム海氷厚は CryoSat-2/SMOS data fusion より薄い。そして誤差は 10 月から翌年の 4 月までの間に (Fig 3-2①~⑦) だんだん増えていた。氷縁部分の一年氷については、10 月から 12 月までの間に (Fig 3-2①~③)、IJIS アルゴリズム海氷厚は CryoSat-2/SMOS data fusion より厚い、過大評価になっていることがわかった。また、1 月から 4 月までの間に (Fig 3-2④~⑦)、チュクチ海、東シベリヤ海、ボーフォート海の海氷厚は、IJIS アルゴリズムが CryoSat-2/SMOS data fusion より薄くなった。過小評価になっていることがわかった。そして、ほかの年も同じ傾向がみられた。よって、IJIS アルゴリズムによる海氷厚は季節によって誤差が変化していることが確かに存在していることがわかった。

次に、本研究は季節補正によって誤差は減少できるか検証した。Fig. 3-2 (P26, 右) は季節補正を行った IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS data fusion の差を示している。図の左下はその時期の季節補正值 (season error) を表示している。補正なしの場合 (Fig. 3-2 (左)) と比べると、3 月と 4 月を除き、誤差はかえって増えたことがわかった。

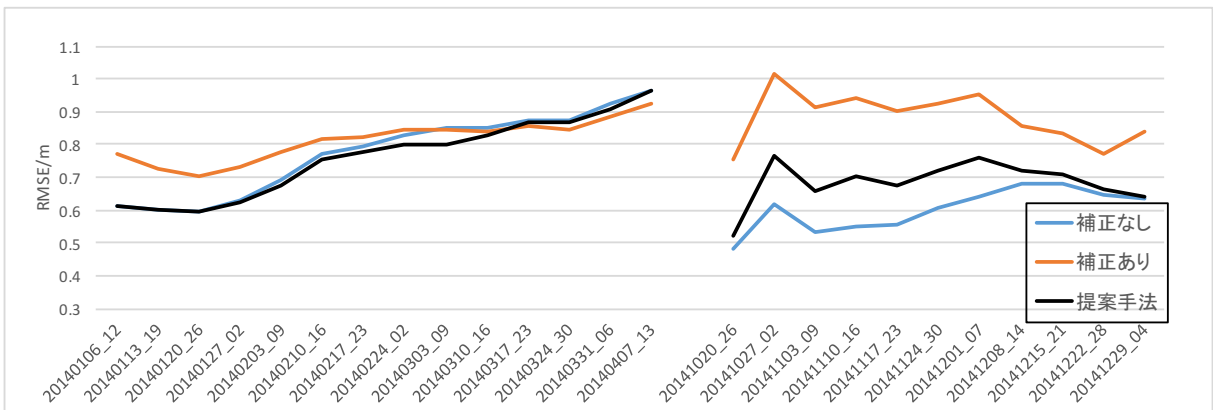
Fig. 3-3 は IJIS アルゴリズムによる海氷厚と CryoSat-2/SMOS data fusion の海氷厚の全域の Root Mean Square Error(RMSE)を示している。この図から、季節補正を行った場合、3 月と 4 月の RMSE は補正なしの場合より少し減っていたが、残りの季節は増えたことがわかった。特に 10 月から 12 月、補正によって RMSE は元の値のほぼ 1.5 倍になった。



2012 年

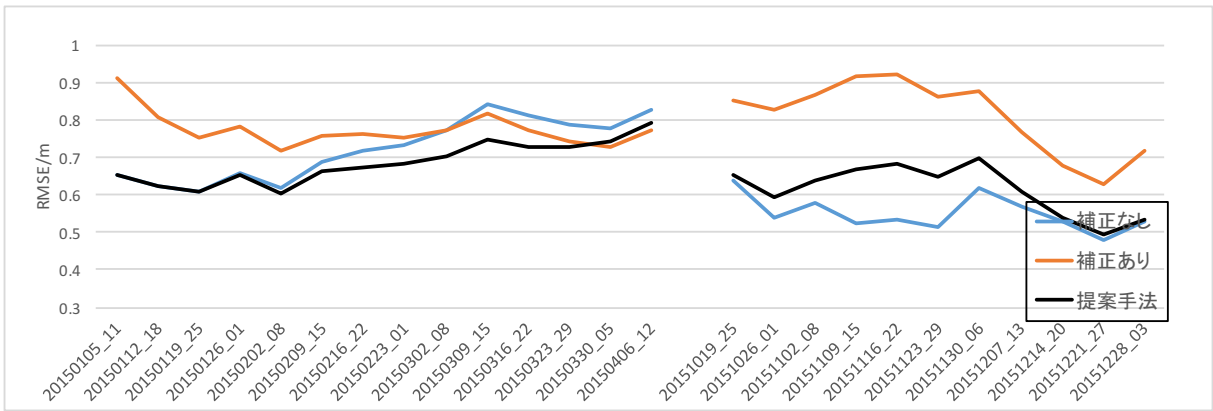


2013 年

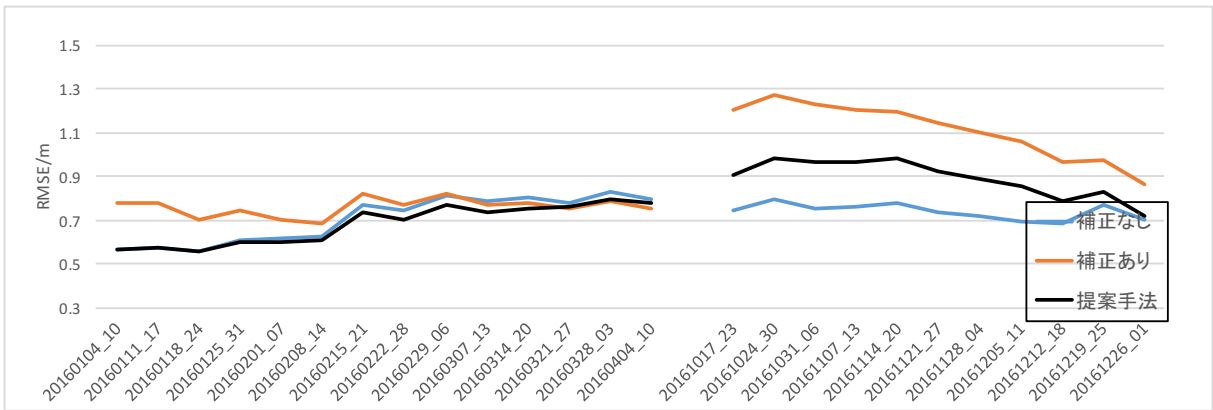


2014 年

Fig. 3-3 IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の RMSE[m] (その 1)



2015 年



2016 年

Fig. 3-3 IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS による海氷厚の RMSE[m](その 2, 終)

その原因は 10 月から 12 月の季節補正值は大きすぎると考えた。Fig. 3-4 は季節補正を行った 2013 年 11 月 1 日の海氷厚の分布を示している。その時期の補正值は 0.827 m であり、季節補正によって、不自然な部分はたくさん存在していたことがわかった。

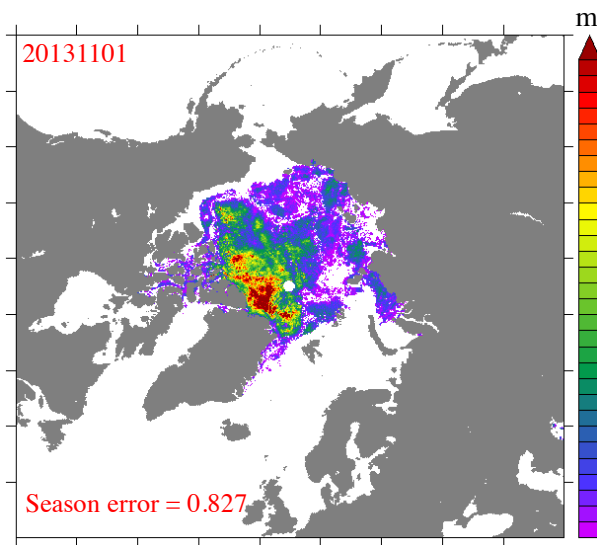


Fig. 3-4 季節補正によって 2013 年 11 月 1 日の海氷厚分布[m]



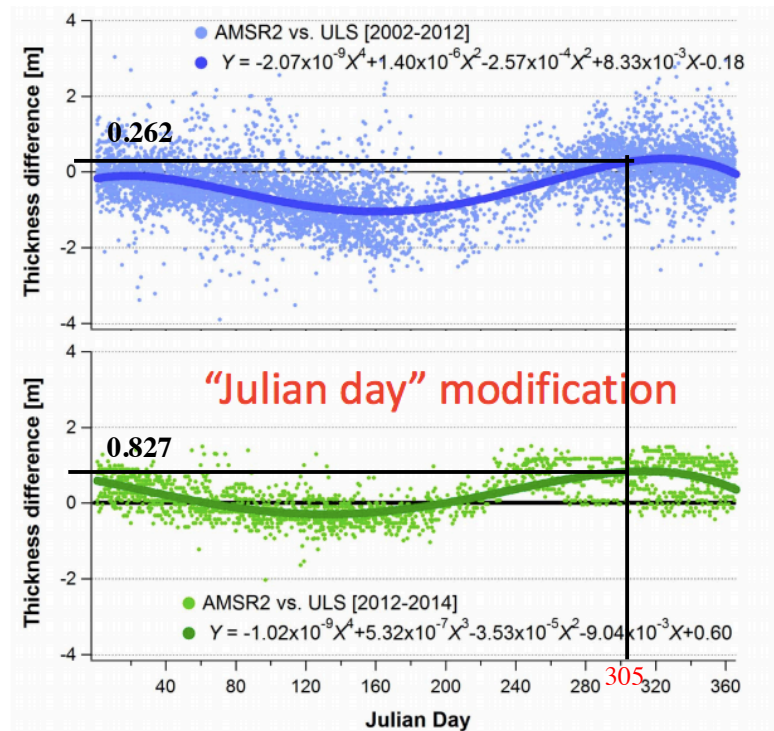


Fig. 3-5 IJIS アルゴリズムの季節補正值[m][15]

Fig. 3-5 は 11 月 1 日 (JD = 305) の季節補正值を示している。AMSR-E の場合は 0.262 m が、AMSR2 は 0.827 m である。同じ日の季節補正值はセンサーにより大きく異なっていることがわかった。しかし、AMSR-E の補正関数は 2002 年から 2012 年まで（実際は 2010 年まで）の 8 年間のデータから、AMSR2 は 2012 年から 2014 年までの 2 年間のデータから得られた経験式である。AMSR2 は AMSR-E と同様のマイクロ波放射計である[10]ことを前提として、本研究では、二つの補正関数が異なった原因は使用したデータ総数の違いと考えた。よって、今回は以下の季節補正手法を提案する

$$\text{Modified IJIS draft} = \text{IJIS draft} - (0.8 \times Y_1 + 0.2 \times Y_2) \quad (13)$$

$Y_1$ : AMSR-E の季節補正值、 $Y_2$ : AMSR2 の季節補正值

Fig 3-6 は提案手法によって 2013 年 11 月 1 日の海水厚の分布を示している。結果から、不自然な部分は減少したことがわかった。

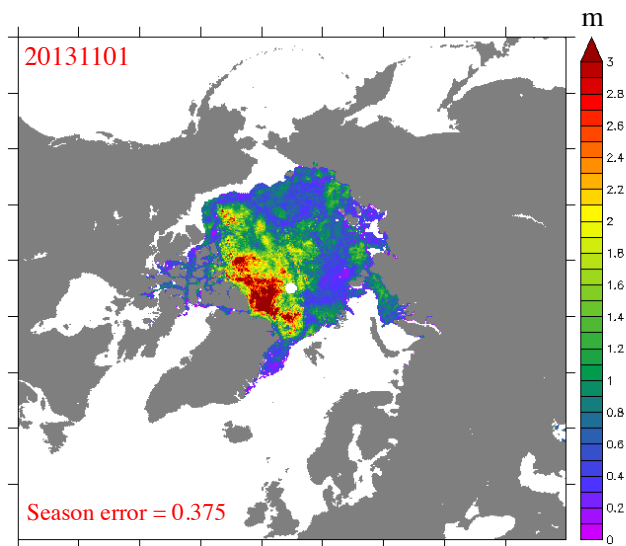


Fig. 3-6 提案補正手法によって IJIS アルゴリズムの海氷厚[m]

そして Fig. 3-7 は 2012 年から 2016 年まで、各年の 10 月と 11 月の季節補正なし（左）、補正あり（中）と今回提案した手法（右）それぞれによって IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の誤差を示している。Fig. 3-3 (P30) はそれぞれの RMSE を示している。結果から、提案の補正手法によって、10 月と 11 月の北東航路上の海氷厚の誤差を減少したことがわかった。また、全域の RMSE も IJIS アルゴリズムの季節補正手法より小さい。

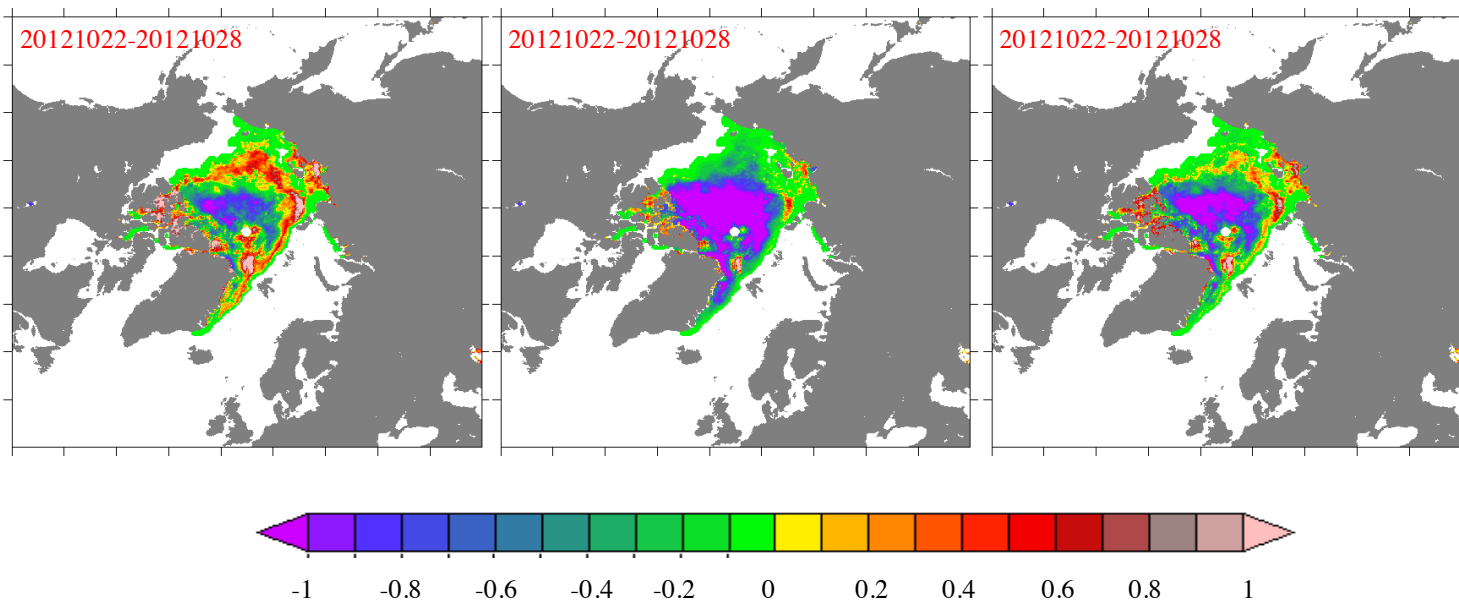


Fig. 3-7 2012 年から 2016 年まで各年の 10 月と 11 月の IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の差[m]  
(季節補正なし (左)、季節補正あり (中) と提案手法 (右) ) (その 1)

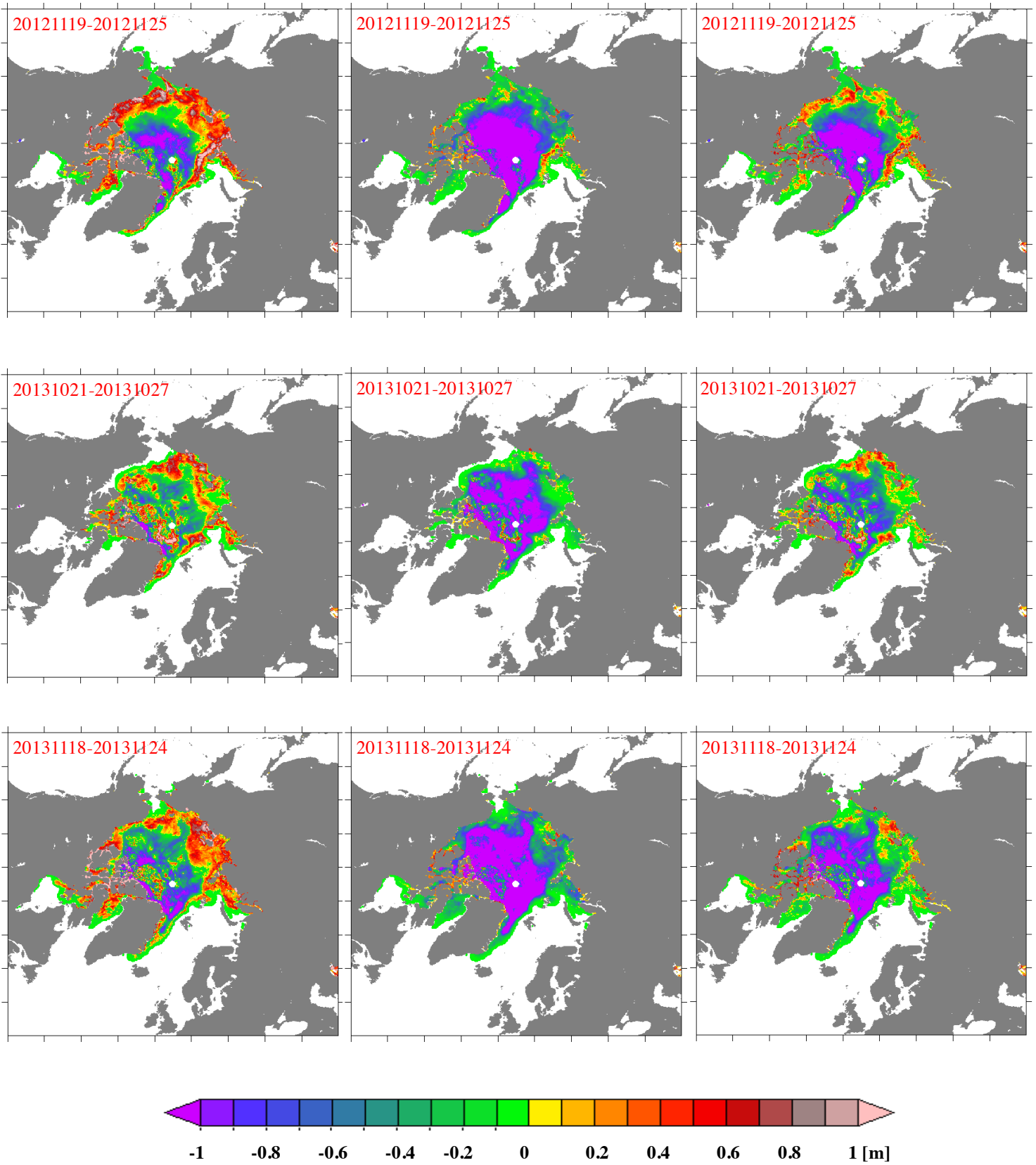


Fig. 3-7 2012 年から 2016 年まで各年の 10 月と 11 月の IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の差[m]  
 (季節補正なし (左)、季節補正あり (中) と提案手法 (右) ) (その 2)

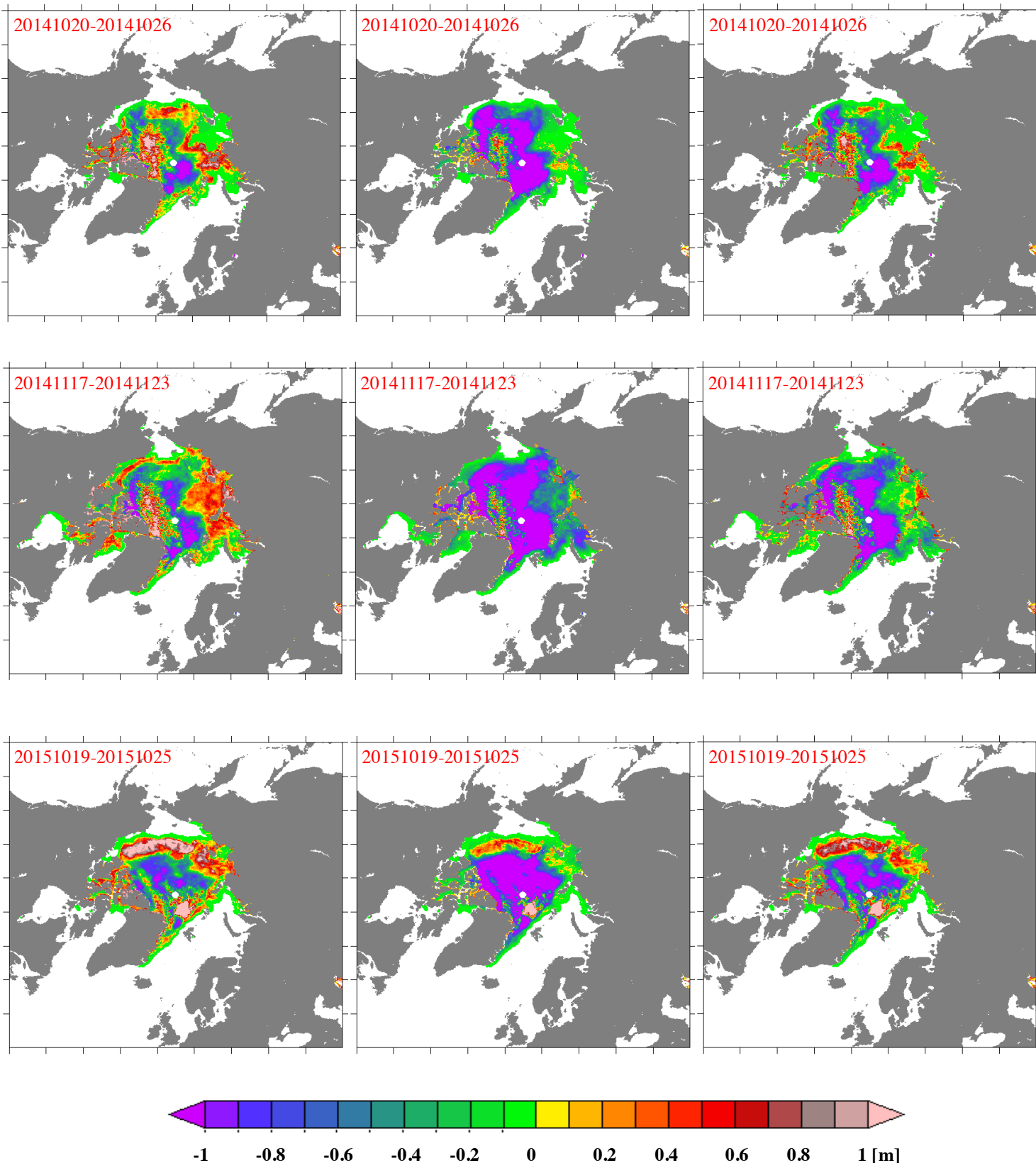


Fig. 3-7 2012 年から 2016 年まで各年の 10 月と 11 月の IJIS アルゴリズム海氷厚と  
 CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の差[m]  
 (季節補正なし (左)、季節補正あり (中) と提案手法 (右) ) (その 3)

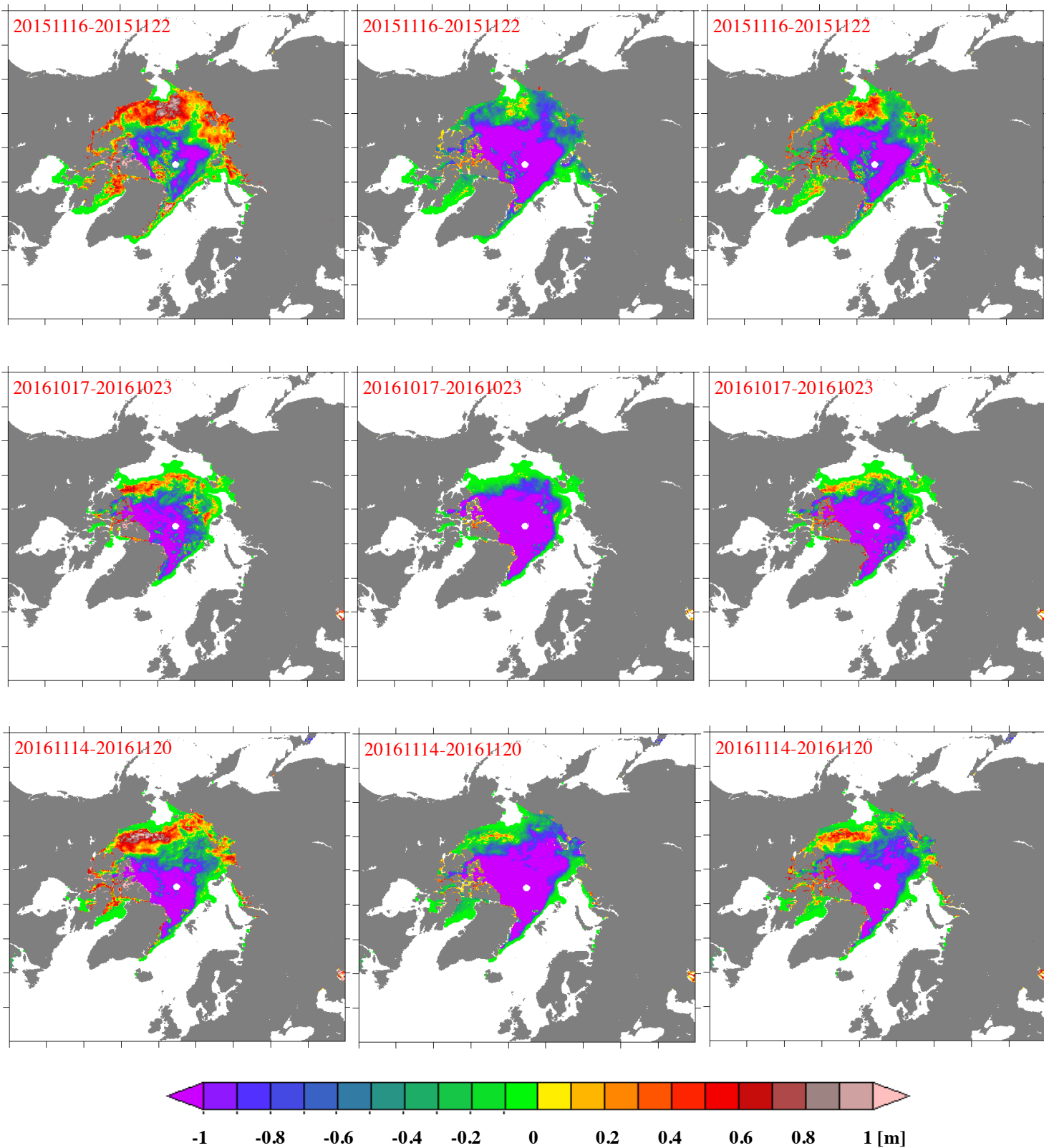


Fig. 3-7 2012 年から 2016 年まで各年の 10 月と 11 月の IJIS アルゴリズム海氷厚と CryoSat-2/SMOS Data Fusion 海氷厚の差[m]  
 (季節補正なし (左)、季節補正あり (中) と提案手法 (右)) (その 4, 終)

### 3.2. 予測に用いる月の選定

2.4 節で述べたとおり、IJS アルゴリズムの海氷厚データは7月から9月までの間にメルトポンドによるエラーがたくさん存在しているので、この期間の海氷厚データは使用しない。また、森(2015)[11]は ULS によって計測された各月の海氷厚の相関性を検証した。Fig. 3-8 はその検証結果を示している。その中で、4月と9月、5月と10月の決定係数（相関係数の二乗）が高いことがわかった。なお、前述の季節補正によって、10月と11月の海氷厚の誤差は他の季節より小さい。

以上の理由で、本研究では5月の海氷厚データを用い、10月の海氷厚の分布を予測することである。

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
4月	1.00							
5月	0.83	1.00						
6月	0.72	0.77	1.00					
7月	0.55	0.62	0.49	1.00				
8月	0.61	0.63	0.46	0.88	1.00			
9月	0.71	0.63	0.56	0.78	0.95	1.00		
10月	0.63	<b>0.65</b>	0.62	0.51	0.86	0.96	1.00	
11月	0.33	0.35	0.57	0.36	0.70	0.90	0.87	1.00

Fig. 3-8 各月の ULS による厚さの相関行列[11]

## 第4章 海氷厚分布の予測

### 4.1. 海氷との関係

#### 4.1.1. 計算範囲

海氷厚データは、IJS アルゴリズムによって算出した値を用いた。そして今回提案した季節補正手法によって補正した。データの解像度は 10 km だが、多年氷帯には厚さ 20 m ほどのグリッドがいくつか見られていた。よって、本研究では細かい空間スケールの変化には注目せず、北極海全体での海氷厚分布を予測対象とする。海氷厚データの解像度は 50 km に変換して用いた。

計算期間は 2003 年から 2016 年であり、人工衛星の稼働時期の関係でデータが欠損している 2011 年と 2012 年を除き、12 年間の 5 月 1 日と 10 月 1 日のデータを使用した。検証には 2017 年のデータを使用した。

#### 4.1.2. 無相関検定 - t 検定

森[10]は相関分析を行った際に、無相関検定を使用しなかった。一般に、2 つの変数間の相関係数の絶対値が 0.2 以下であればほとんど相関がないといい、0.7 以上あれば高い相関があるという。しかしながら、サンプル数が少なければ偶然によって相関係数が高い値を示すこともある。このため、サンプル数を考慮したうえで母集団の相関の有意性を判定する必要がある[19]。Fig 4.1 は計算期間の 12 年間における 10 月 1 日の海氷厚データの数  $n$  を示している。本研究で用いたデータの数は最大 12 個しかないので、無相関検定の実行が必要と考えられる。よって、本研究では無相関検定の t 検定を行った。

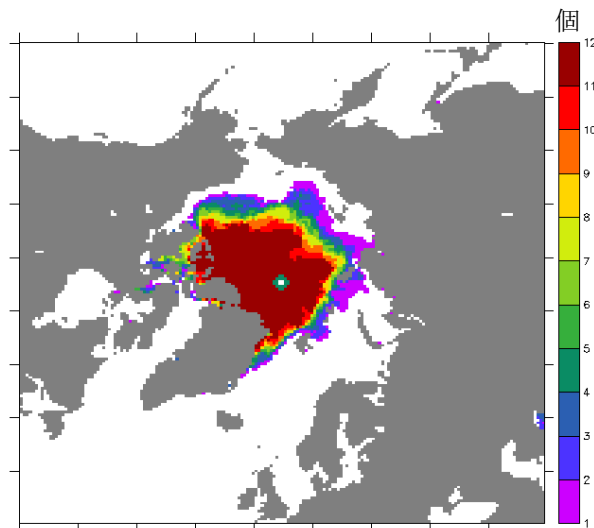


Fig. 4-1 12 年間における 10 月 1 日の海氷厚データの数  $n$

t 検定ではまず以下の式から t を算出する。

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (14)$$

ここで r は相関係数、n はデータ数（サンプル数）を表示する。また、n-2 は自由度と呼ばれる。

Table 4-1 は異なる有意水準の t の境界値を示している。本研究は有意水準 5% の無相関検定を行った。また、今回は t の境界値表を使いやすいために、式 (14) を用いて有意水準 5% 時の相関係数検定表 (Table 4-2) をまとめた。二つの変数間の相関係数の絶対値 |r| が表中の数値以上であれば、その相関関係が有意と考えられる。

**Table 4-1 t の境界値**

自由度 (df)	有意水準		
	0.10	0.05	0.01
n-2			
1	6.314	12.706	63.657
2	2.920	4.303	9.925
3	2.353	3.182	5.841
4	2.132	2.776	4.604
5	2.015	2.571	4.032
6	1.943	2.447	3.707
7	1.895	2.365	3.499
8	1.860	2.306	3.355
9	1.833	2.262	3.250
10	1.812	2.228	3.169

**Table 4-2 有意水準 5% 時の相関係数検定表**

データ数 n	r の境界値
3	0.9969
4	0.9500
5	0.8783
6	0.8114
7	0.7545
8	0.7067
9	0.6664
10	0.6319
11	0.6020
12	0.5760



### 4.1.3. 5月の海氷厚との関係

はじめに、5月と10月の海氷厚分布の特徴を調べた。Fig. 4-2は計算期間の12年間における5月1日（左）、と10月1日（右）の海氷厚の平均値の分布を示している。

図から、5月1日の厚さ3m程度の海氷がカナダ多島海の北側の海域に多く存在していた。緯度が高ければ高いほど、海氷がより厚くなることがわかった。また、北東航路と北西航路上の海氷の厚さは1.6mほどである。

10月1日の平均厚さ分布から、厚さ3m以上の厚い海氷がグリーンランドの北側の海域に存在して、数は5月より少ないことがわかった。また、北東航路上の海氷の厚さは0.2mほど、欧州沿いの北西航路上の海氷厚では0.6m以下ので、この時期に北極航路を利用することができると考えた。

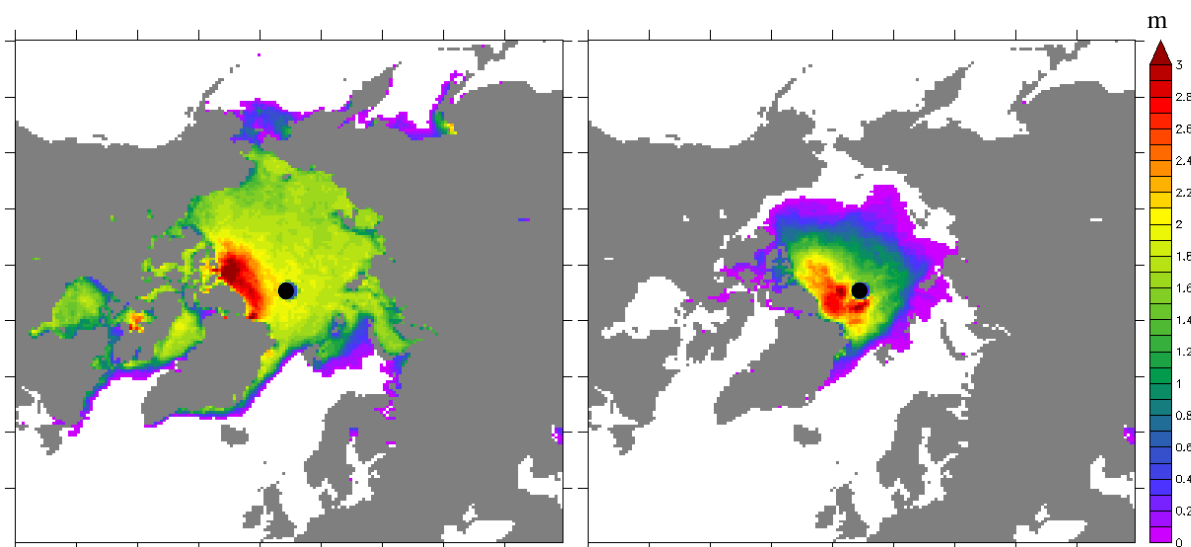


Fig. 4-2 5月1日（左）と10月1日（右）の海氷厚の12年間の平均値[m]

そして Fig. 4-3 は12年間における各年の10月1日の海氷厚の偏差をしめしている。結果から、10月1日の海氷厚分布は年によって大きく変動していることが分かった。例えば2004年はほぼ全域の海氷が平年より厚いが、2015年の場合は薄いことであった。

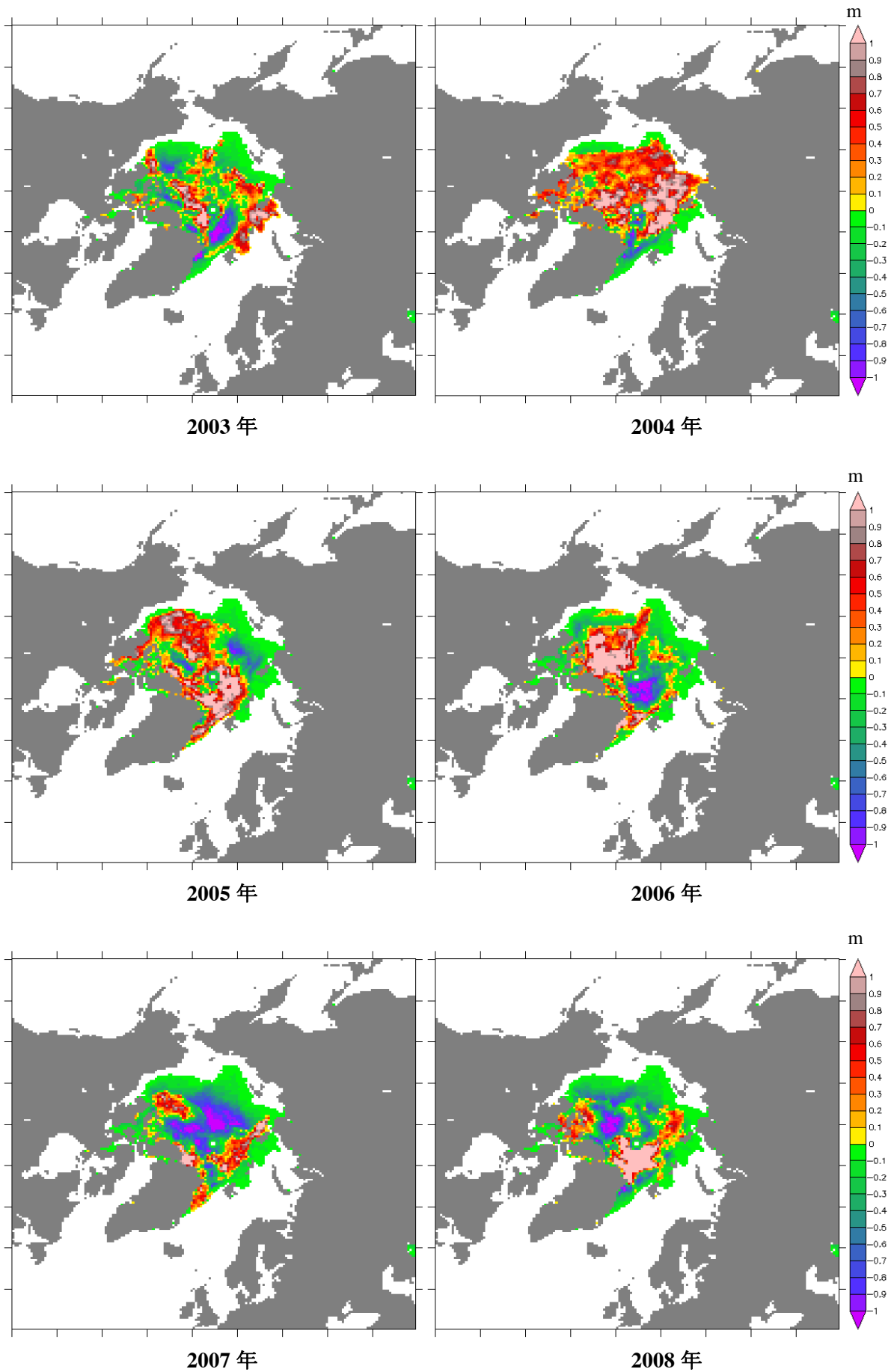


Fig. 4-3 12年間に於ける10月1日の海氷厚の偏差[m] (その1)

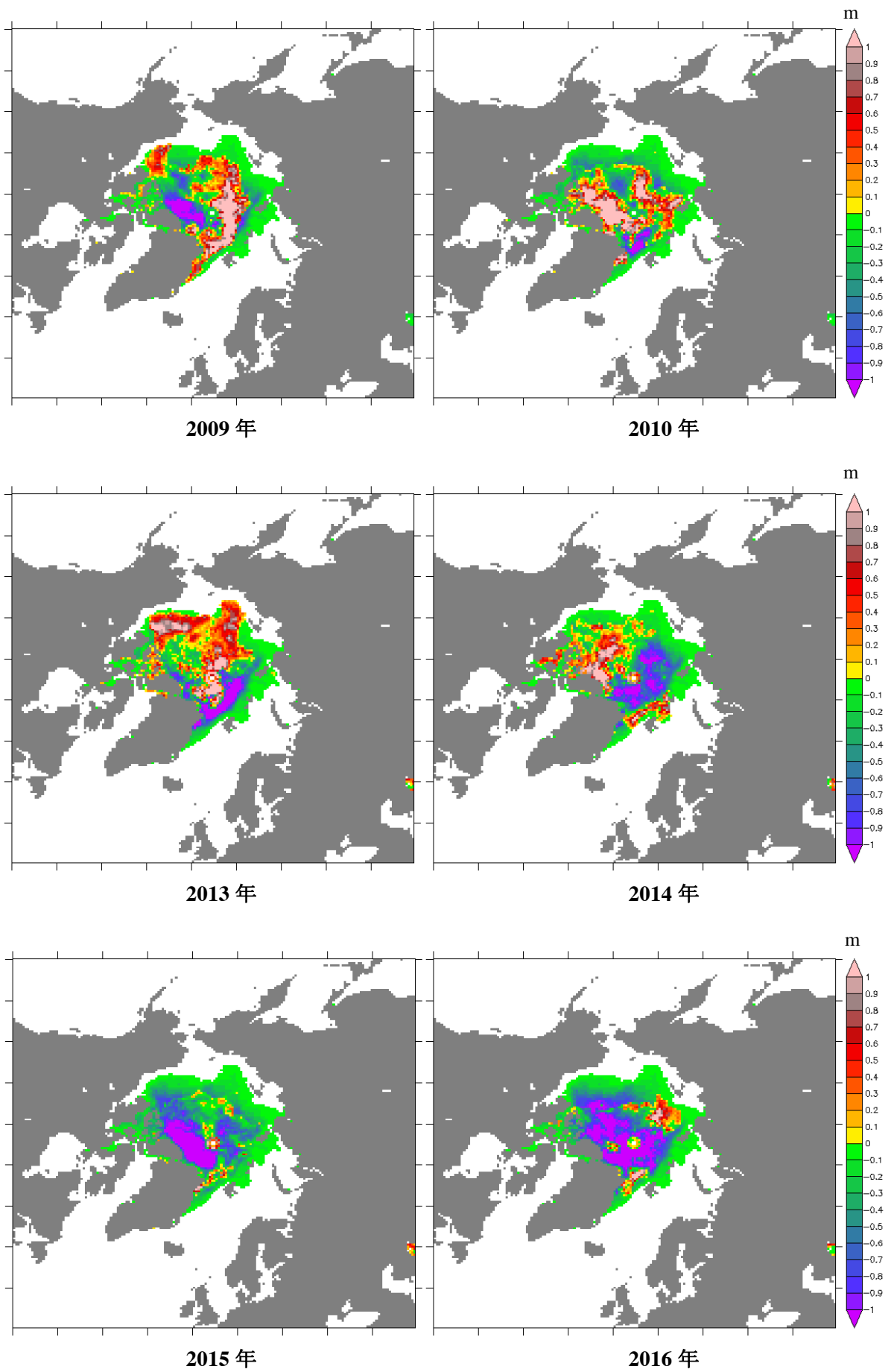


Fig. 4-3 12 間における 10 月 1 日の海氷厚の偏差[m] (その 2, 終)

次に、回帰分析を行い、5月1日と10月1日の海氷厚の相関関係を考察した。Fig. 4-4 (左) は計算期間の12年間に両者の相関係数を示している。黒い丸で囲まれた、ボーフォート海、東シベリヤ海とカラ海の北側に、相関係数0.5ほどのプラス相関が多く見られた。しかし、無相関検定を用いて有意なグリッドのみ抽出すると (Fig. 4-4 右)、グリッドの数はかなり減少したことが見られた。有意なグリッドはグリッド総数に対する割合は7%ほど、有意な相関関係はあまり見られなかった。すなわち、5月の海氷厚は10月の海氷厚にあまり影響を与えないといえる。その原因は使用したデータの数が少ないことと5月から9月までの海氷は他の季節よりも大きく運動しているためと考えた。

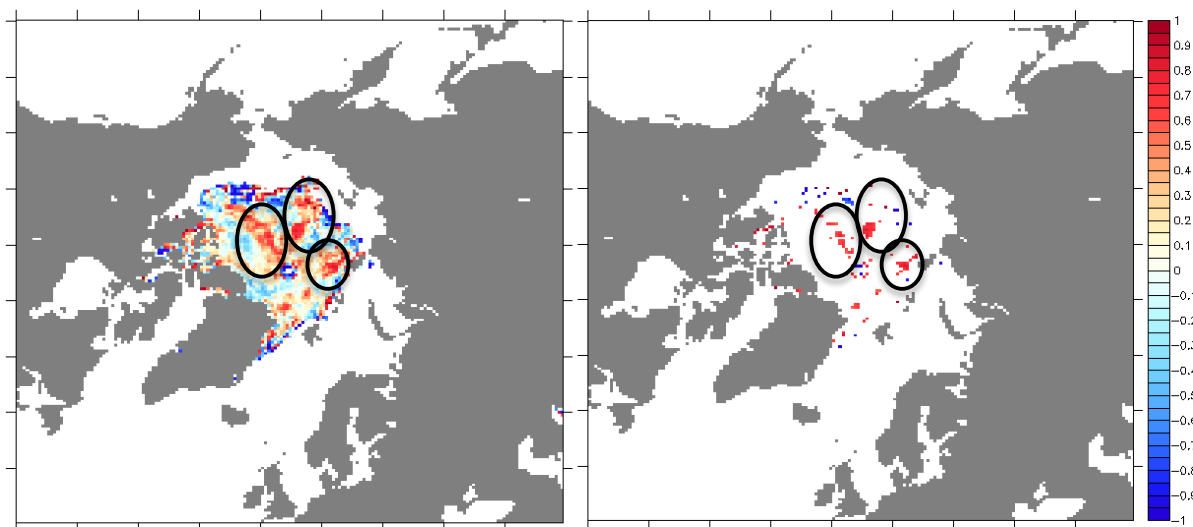


Fig. 4-4 12年間ににおける5月1日と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) と有意なグリッドのみ (右)

#### 4.1.4. 海氷密接度との関係

海氷の密接度は大きければ大きいほど、その地域の海氷が多く存在するため、海氷が融解しにくいので厚さも大きいと考えた。

Fig. 4-5 は計算期間の12年間ににおける5月1日の海氷密接度と10月1日海氷厚の相関係数の分布を示している。結果から、多数のグリッドにマイナス相関が見られたことがわかった。特にカナダ多島海北側の海域に有意なマイナス相関を持つグリッドがたくさん存在していた。有意なグリッドの割合は5.53%、つまり5月の海氷密接度は10月の海氷厚に与えた影響は5月の海氷厚より弱いことがわかった。その原因も使用したデータの数が少ないことと5月から9月までの海氷は他の季節よりも大きく運動しているためと考えた。

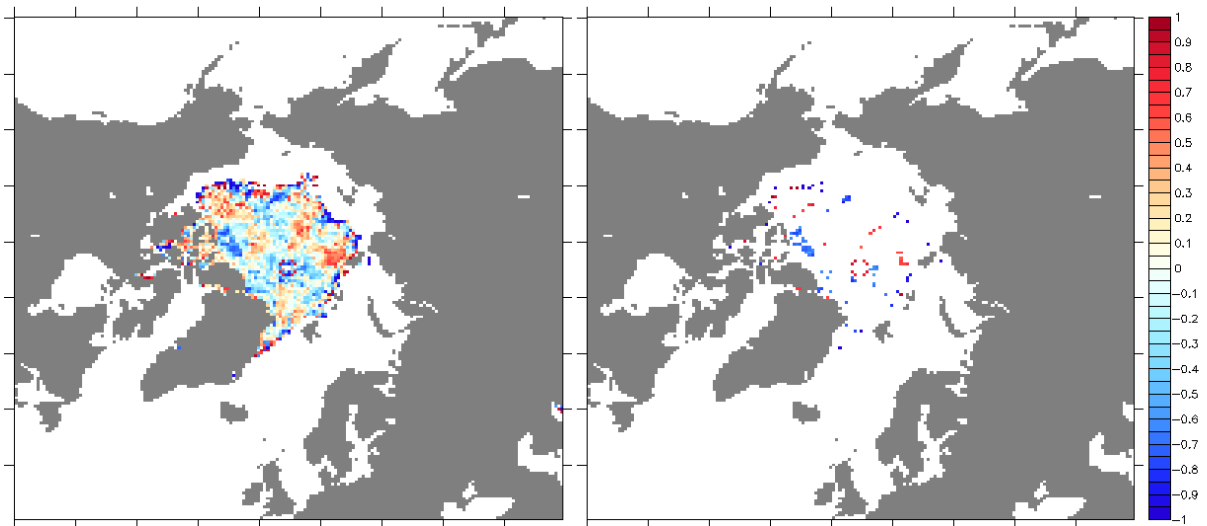


Fig. 4-5 12 年間に於ける 5 月 1 日の海氷密接度と 10 月 1 日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) と有意なグリッド (右)

## 4.2. 気象要素との関係

### 4.2.1. 気温との関係

この 100 年間で、北極の気温は、世界全体の平均気温の約 2 倍の速さで上昇している[20]。それに伴い、北極海の海氷域面積に長期的な減少傾向がある。一般的には気温が高いと海氷が融解しやすいと考えられる。

本節では、10 月の海氷厚と海氷融解期 (5 月から 9 月まで) の気温との関係を考察するために、ECWMF の ERA-interim により Skin temperature データを使用した。また、気温データの座標系と解像度は AMSR データの座標系と解像度に変更した。

まずは気温の分布の特徴を把握した。Fig. 4-6 は計算期間の 12 年間に於ける 5 月から 9 月まで各月の平均気温を表示している。図から、5 月の海氷域に於ける平均気温は 266~274 K 程度である。また、6 月から 8 月までの気温は 278 K ほど、5 月に比べて暑くなった。そして 9 月の気温の分布は 5 月に類似し、8 月に比べて寒くなった。

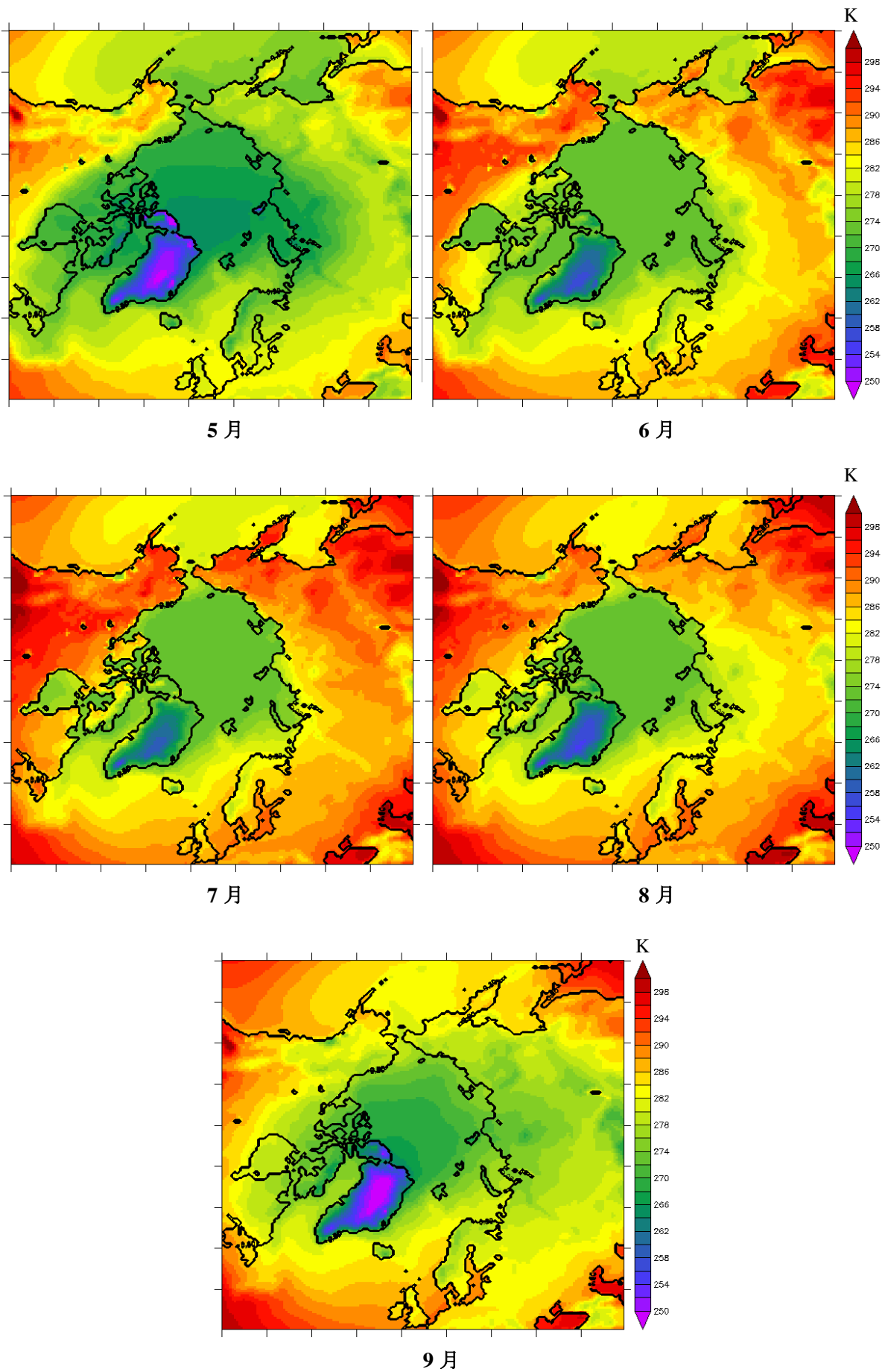


Fig. 4-6 12年間における5月から9月まで各月の平均気温[K]

Fig. 4-7 は計算期間の 12 年間に於ける各年の 7 月の平均気温の偏差を示す。図から、年によって気温の偏差は -0.5K から 0.5 K、ほぼ 0 になったことが分かった。

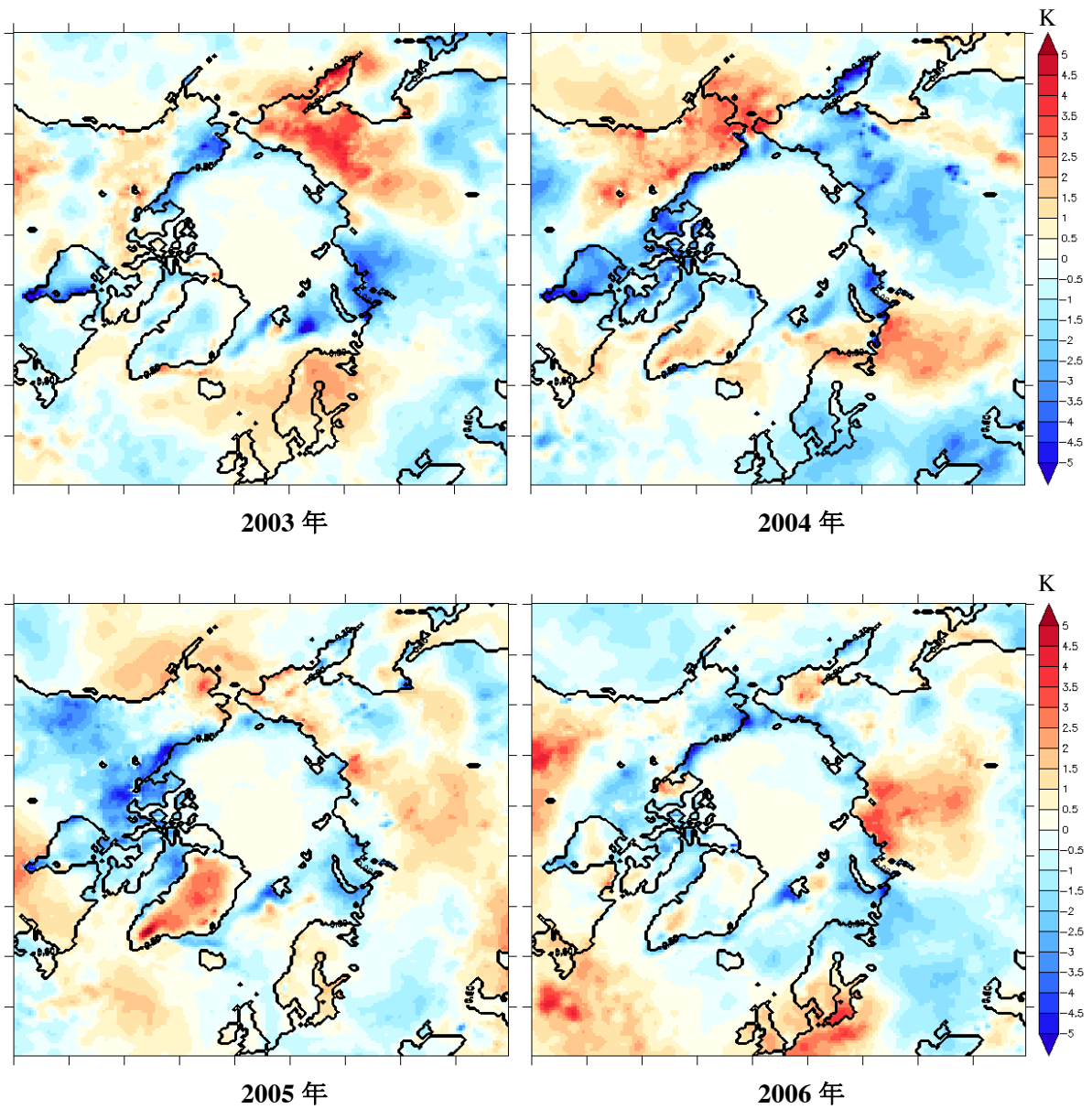


Fig. 4-7 12 年間に於ける 7 月の気温の偏差[K] (その 1)

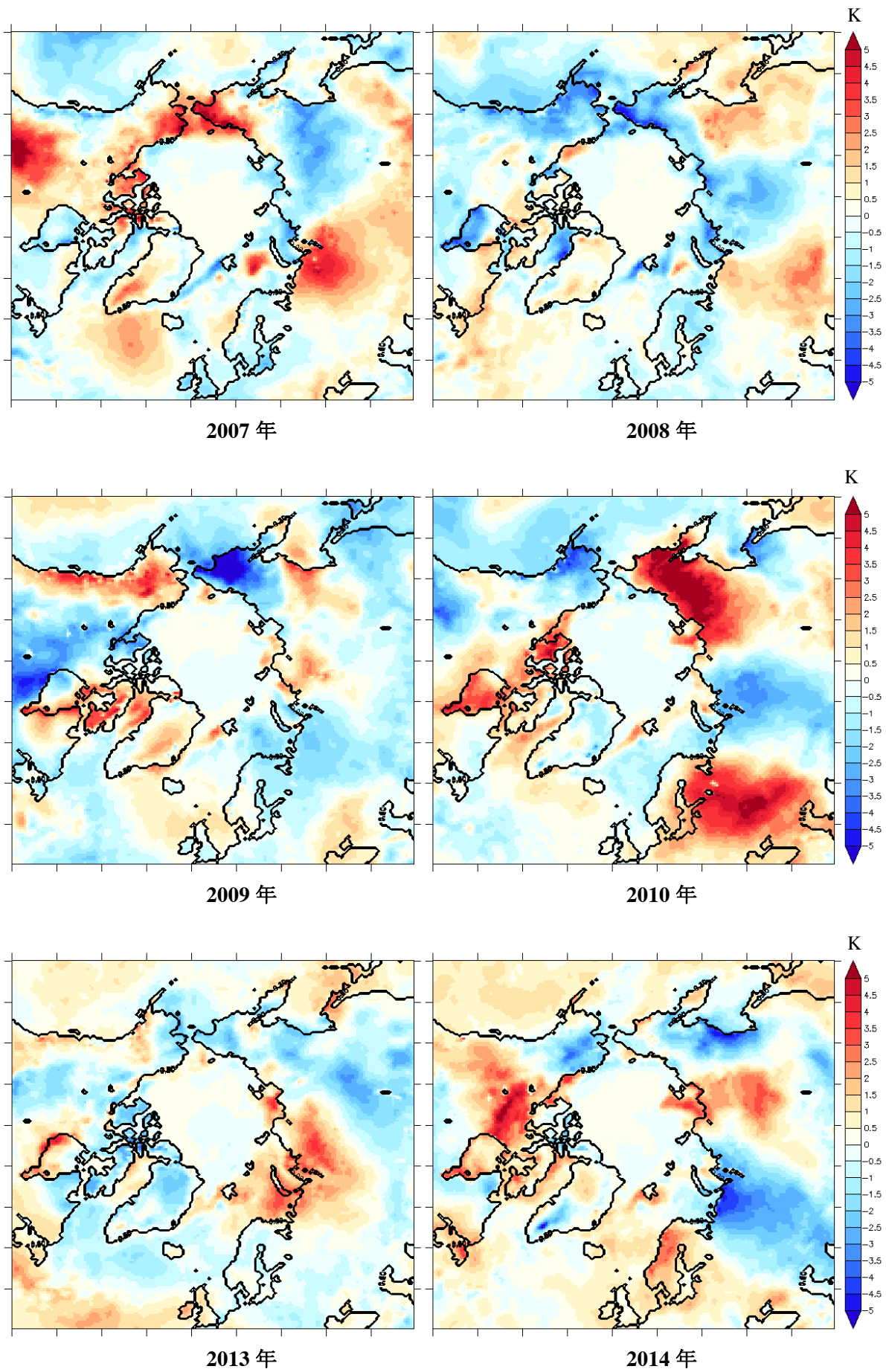
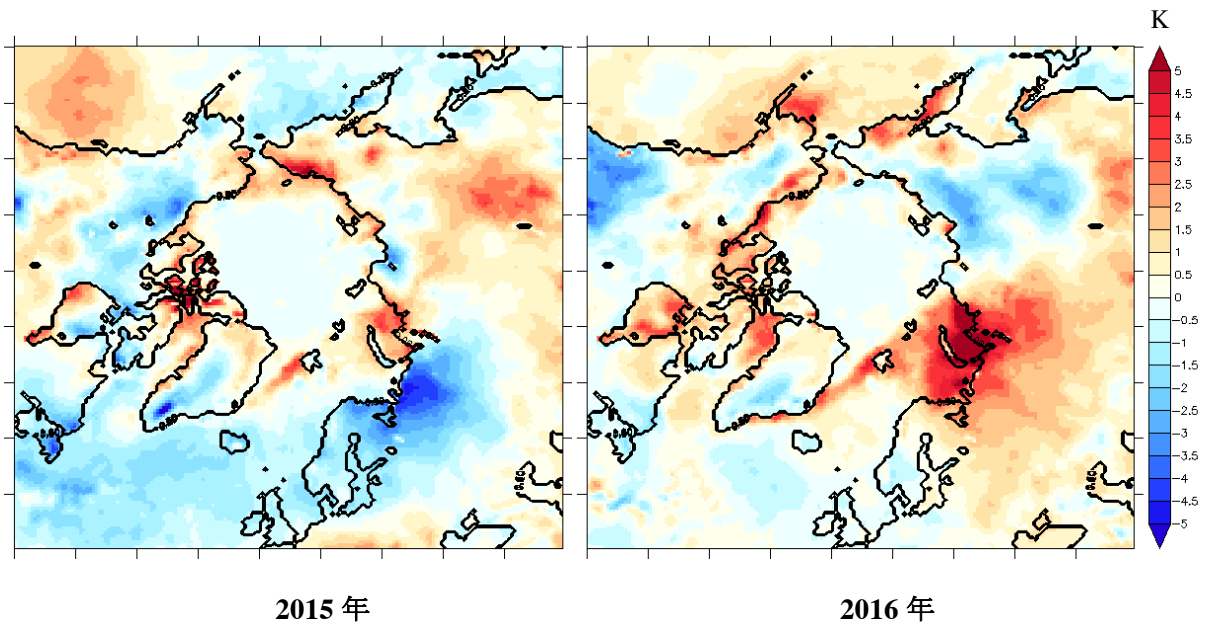


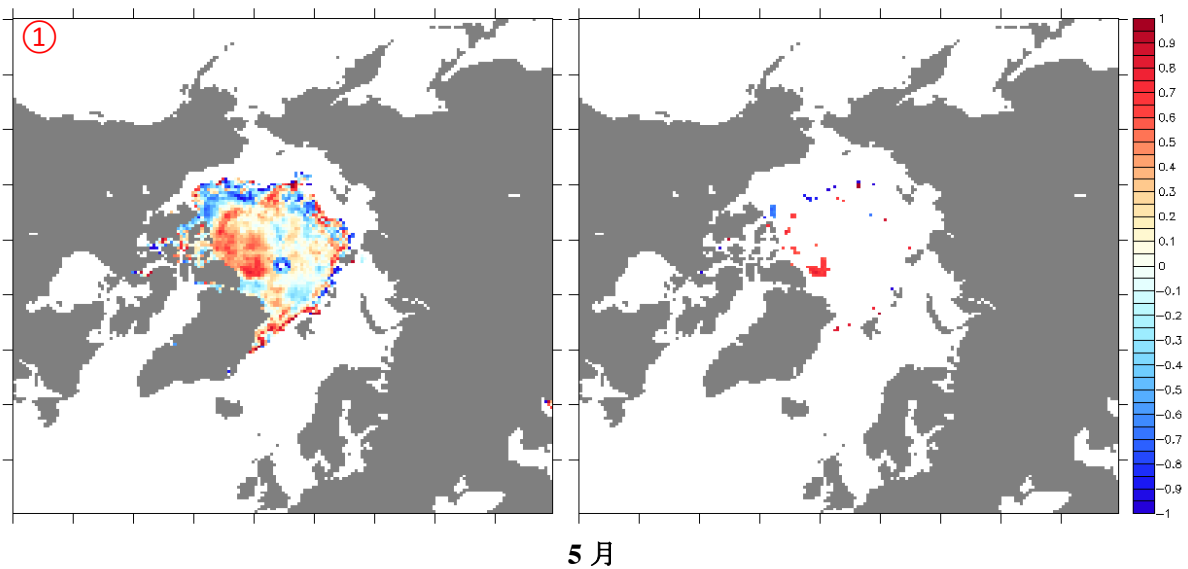
Fig. 4-7 12年間に於ける7月の気温の偏差[K] (その2)





2015年 2016年  
**Fig. 4-7 12年間に於ける7月の気温の偏差[K] (その3、終)**

次に、融解期（5月から9月まで）の気温と10月の海氷厚の相関関係について考察した。Fig. 4-8 は計算期間の12年間に於ける5月から9月まで、それぞれの月平均気温と10月1日の海氷厚との相関係数（左）と有意なグリッドのみを抽出した結果（右）を示している。Table 4-3 はそれぞれの有意なグリッドの数とそれをグリッド総数に対する割合を表示している。



5月  
**Fig. 4-8 融解期に於ける各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数（左）(n >= 3) と有意なグリッド（右）(その1)**

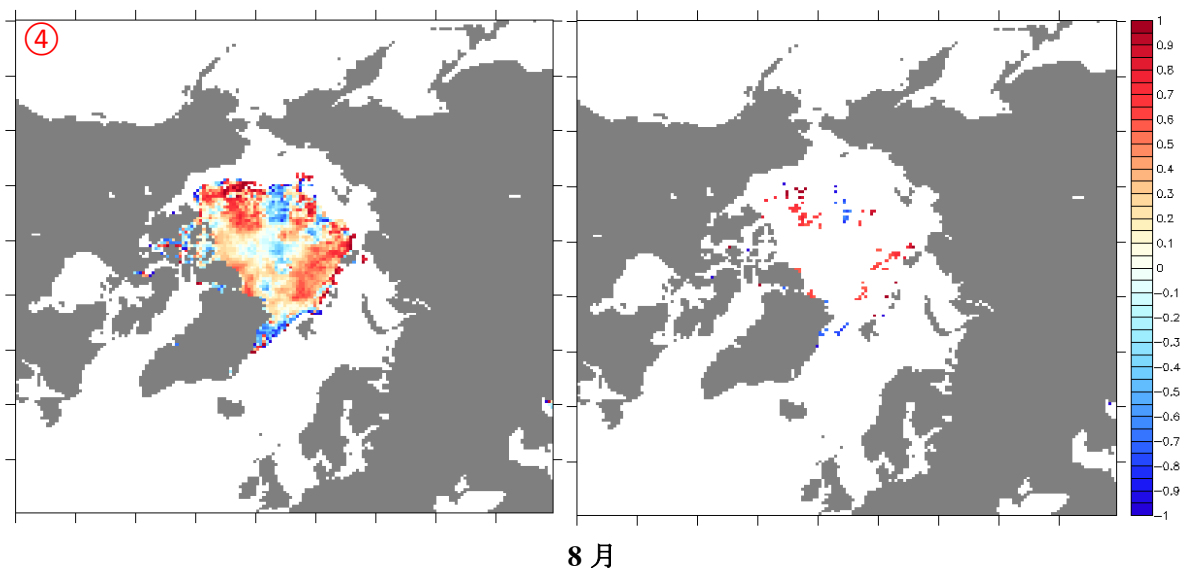
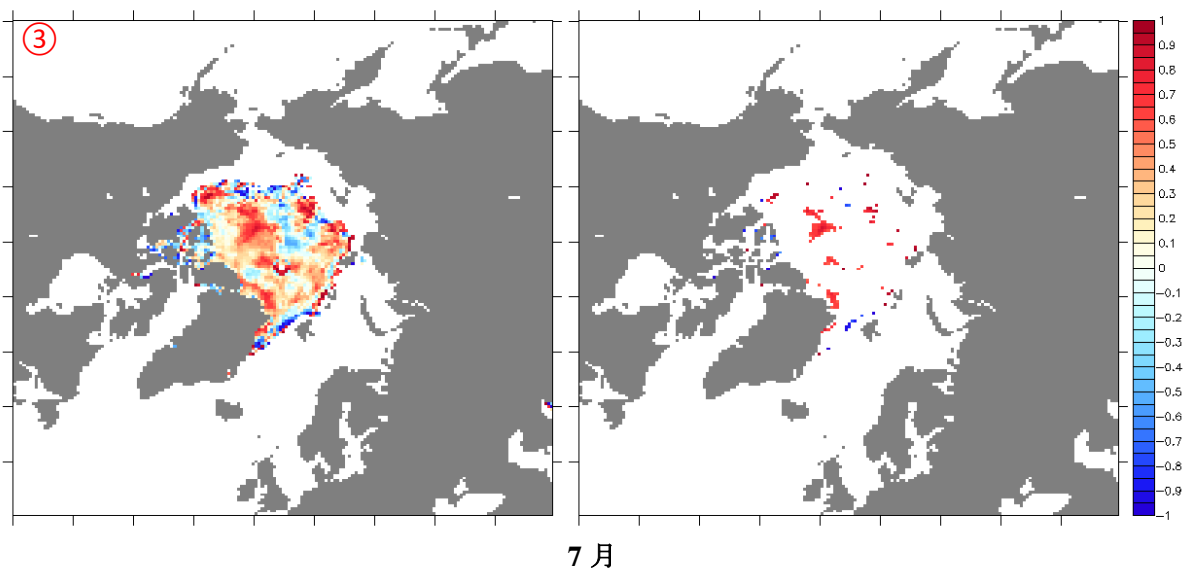
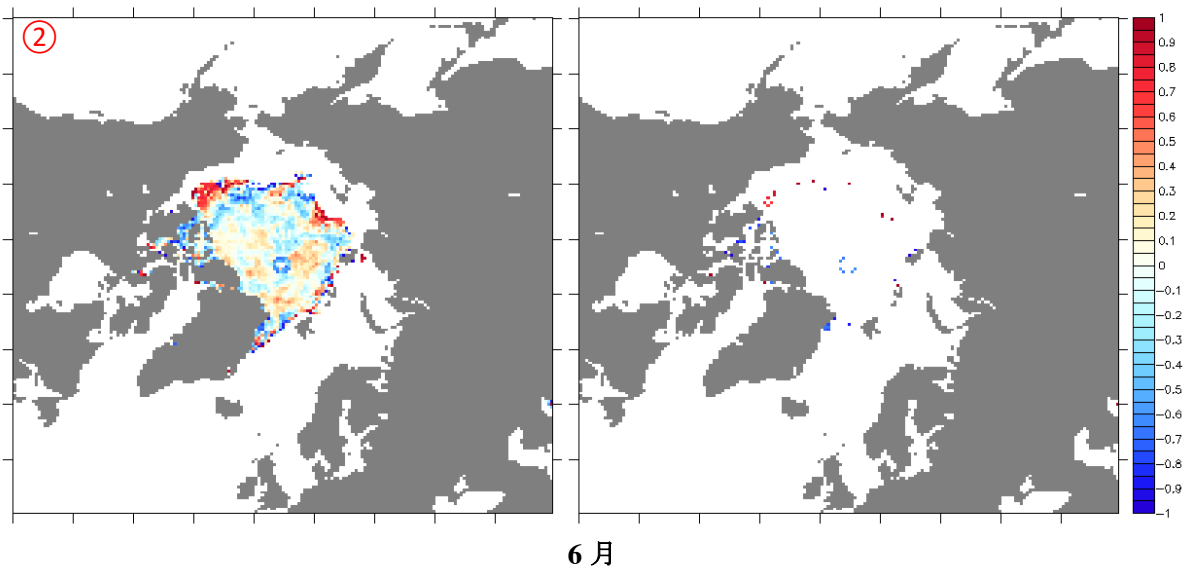
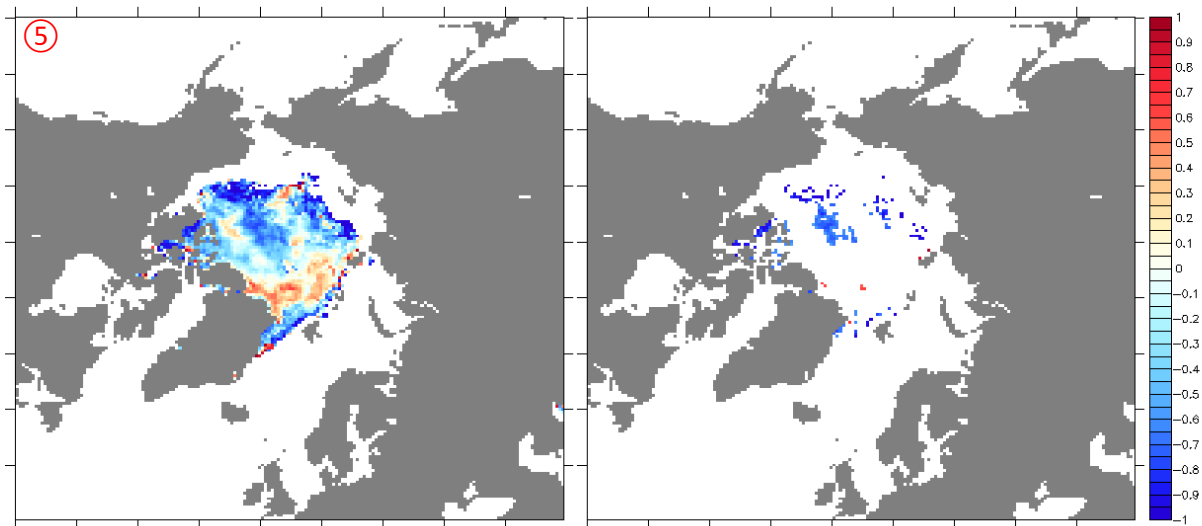


Fig. 4-8 融解期における各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数(左) ( $n \geq 3$ ) と有意なグリッド(右) (その2)



9月

Fig. 4-8 融解期における各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数（左）(n >= 3) と有意なグリッド（右）（その3，終）

Table 4-3 気温の場合の有意なグリッドの数とその割合

月	データがある グリッド総数/個	有意なグリッドの数/個	割合
5月	2313	91	3.93%
6月	2313	77	3.33%
7月	2313	161	6.96%
8月	2313	142	6.14%
9月	2313	244	10.55%

結果から、

5月（Fig 4-8の①）は、カナダ多島海の北側の海域にプラス相関が広く見られ、5月の気温が高ければ高いほど、10月の海氷厚が厚くなることがわかった。また、強いマイナス相関はほぼボーフォート海にのみ見られ、他の海域もほぼ無相関だった。そして有意なグリッドを抽出すると、割合は3.93%、有意な相関関係はほとんど見られなかった。つまり、5月の平均気温は10月の海氷厚にほとんど影響を与えないことがわかった。

6月（Fig 4-8の②）は、カナダ多島海にいくつかの有意なグリッドが見られ、ほかの海域の相関係数はほぼ有意ではなかった。よって、6月の気温と10月の海氷厚とは相関関係がないことがわかった。

7月（Fig 4-8の③）は、広い範囲にプラス相関が見られた。特にボーフォート海北側のアルファ海嶺とグリーンランド北側の海域には、有意なグリッドがたくさん分布していた。そのプラス相関になる原因は見いだせなかった。また、有意なグリッドの数は5月と6月に比べて、ほぼ2倍になった。

8月 (Fig 4-8 の④) は、7月に似ていた。全域はほぼプラス相関が見られた。また、有意なグリッドの数は多くではないため、7月の気温は10月の海氷厚にあまり影響しないことがわかった。

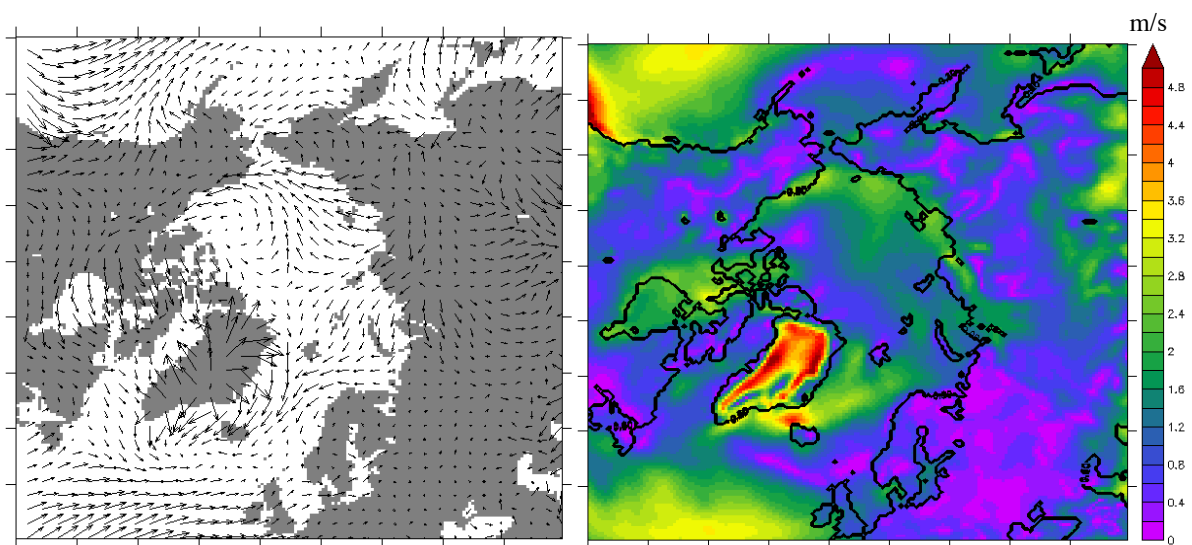
9月 (Fig 4-8 の⑤) は、グリーンランド北側の海域を除き、ほぼ全域にマイナス相関が見られた。とくにアルファ海嶺に有意なマイナス相関を持つグリッドは多数見られた。また、氷縁部分の東シベリヤ海にも有意なグリッドを分布していた。よって、9月の平均気温は10月の海氷厚に影響を与えたことがわかった。

#### 4.2.2. 風速との関係

風と海氷の動きについての関係はよく指摘されている。風は海氷を動かす主な駆動力といわれており、沿岸域や海氷密集域を除いた地域では海氷は地衡風の約0.8%、約8°時計回り向き移動する[21]。地衡風とは、気圧傾斜とコリオリ力が釣り合、かつ摩擦力が働かない上空において等圧線に沿って平行に吹く理想的な風のことを指す。つまり、風は海氷を発散および収束されることにより、海氷の厚さを影響していると考えた。また、低緯度からの風は一般的に暖かいので融解にも寄与すると考えられる。

本節では、10月の海氷厚と融解期(5月から9月まで)の風速との関係を考察するために、ECWMFのERA-interimにより10m高度風データを使用した。また、風速データの座標系と解像度はAMSRデータの座標系と解像度に変更する。

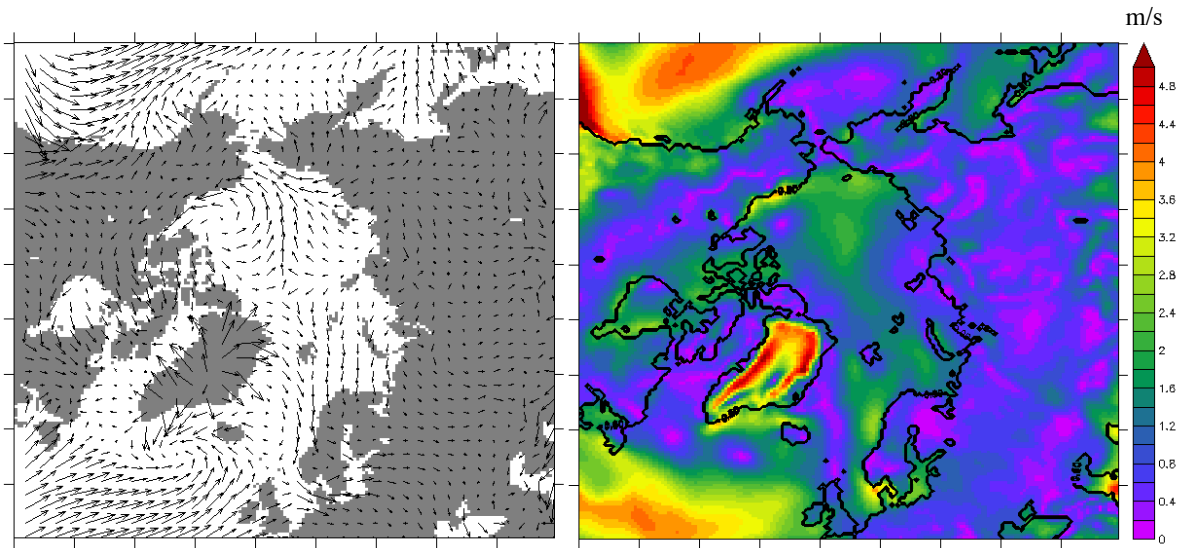
まずは風速分布の特徴を考察した。Fig. 4-9(左)は2003年から2016年まで(2011年と2012年を除き)の12年間における5月から9月まで各月の平均風速を表示している。Fig. 4-9(右)はその値の分布を示す。図から、海氷域における風速の大きさは7月を除き、ほぼ1~2 m/s程度であることがわかった。7月の場合は0.6 m/sほど、ほかの季節より小さい。また、平均風向は主にカナダ多島海とグリーンランドの多年氷帯から一年氷帯に吹いていたことがわかった。



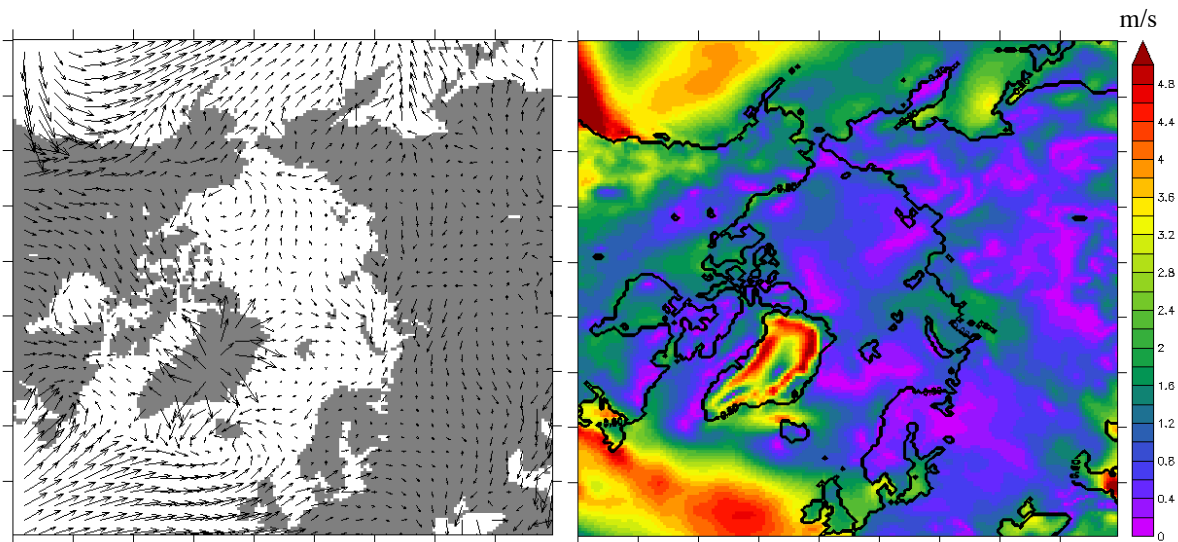
5月(→ 5 m/s)

Fig. 4-9 12 年間における5月から9月まで各月の平均風速(m/s) (左)

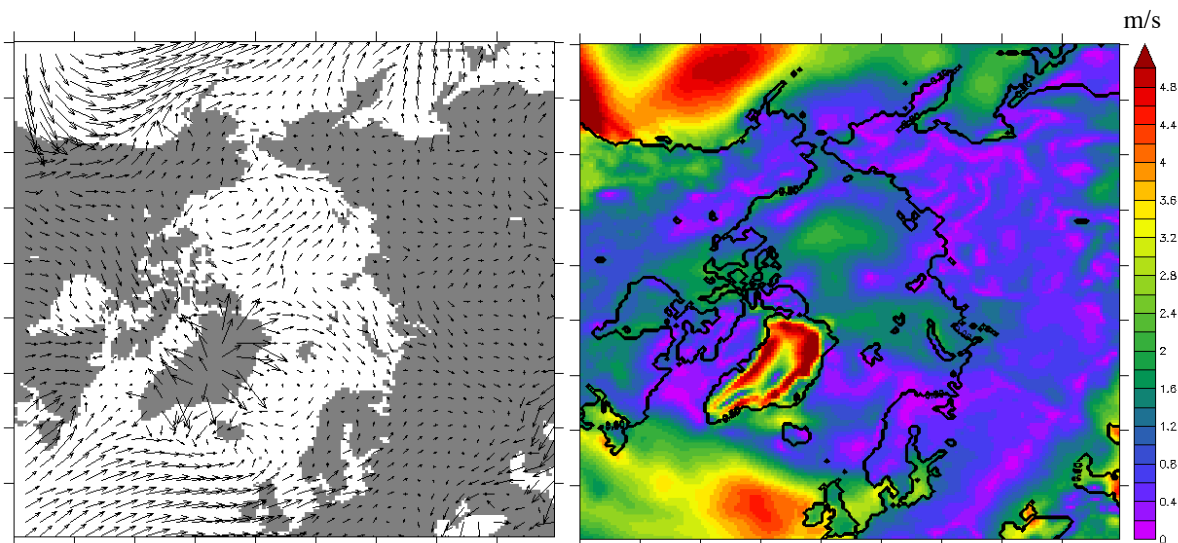
とその値 (右) (その 1)



6月(→ 5 m/s)



7月(→ 5 m/s)



8月

Fig. 4-9 12 年間における 5 月から 9 月まで各月の平均風速(m/s) (左)  
とその値 (右) (その 2)

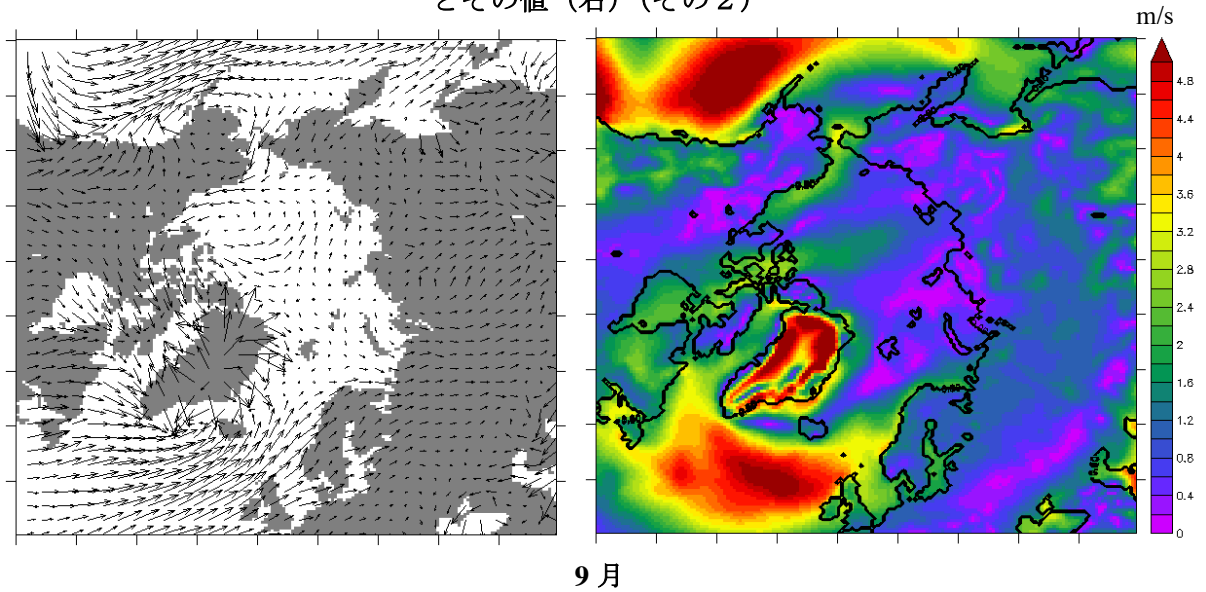


Fig. 4-9 12 年間における 5 月から 9 月まで各月の平均風速(m/s) (左)  
とその値 (右) (その 3, 終)

そして各月の偏差を把握した。Fig. 4-10 は各年 7 月の平均風速の偏差とその値を示めている。図から、7 月の海氷域における平均風速がかなり小さいだが、年によって偏差は大きく変動していたことがわかった。とくに 2003 年の偏差はかなり大きい。2003 年 7 月の平均風速は、ボーフォート海に時計回りの渦みtainな風が存在していた。これによって、2003 年 10 月でボーフォート海に平年より多い海氷が存在した推測したが、実際にはそういう明確な関係が見られなかった。

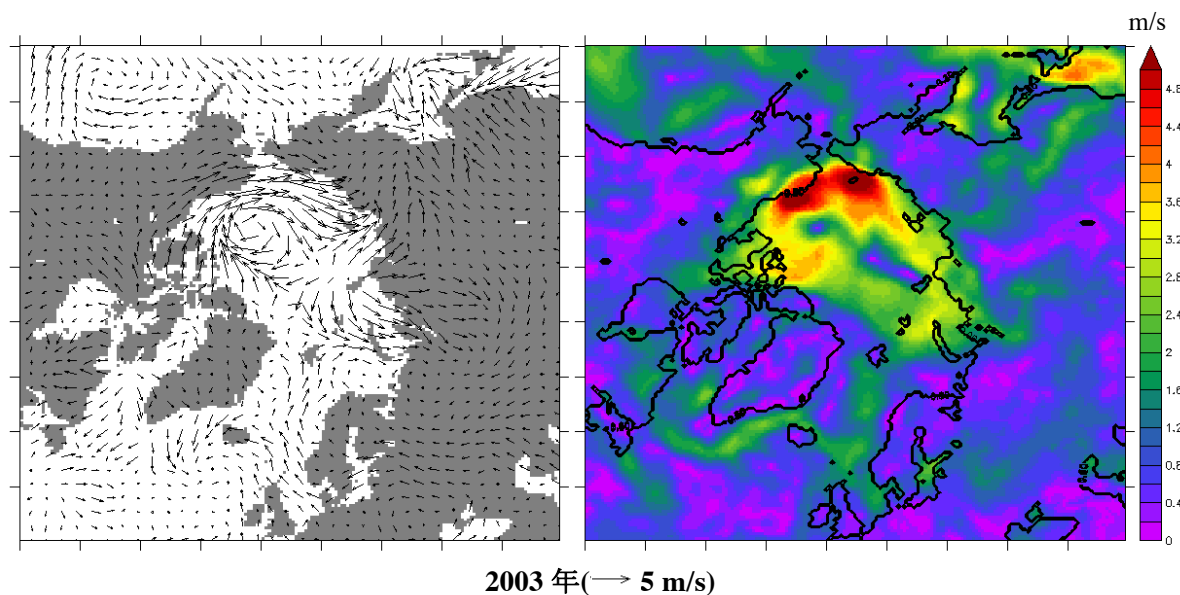


Fig. 4-10 12 年間における 7 月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その 1)

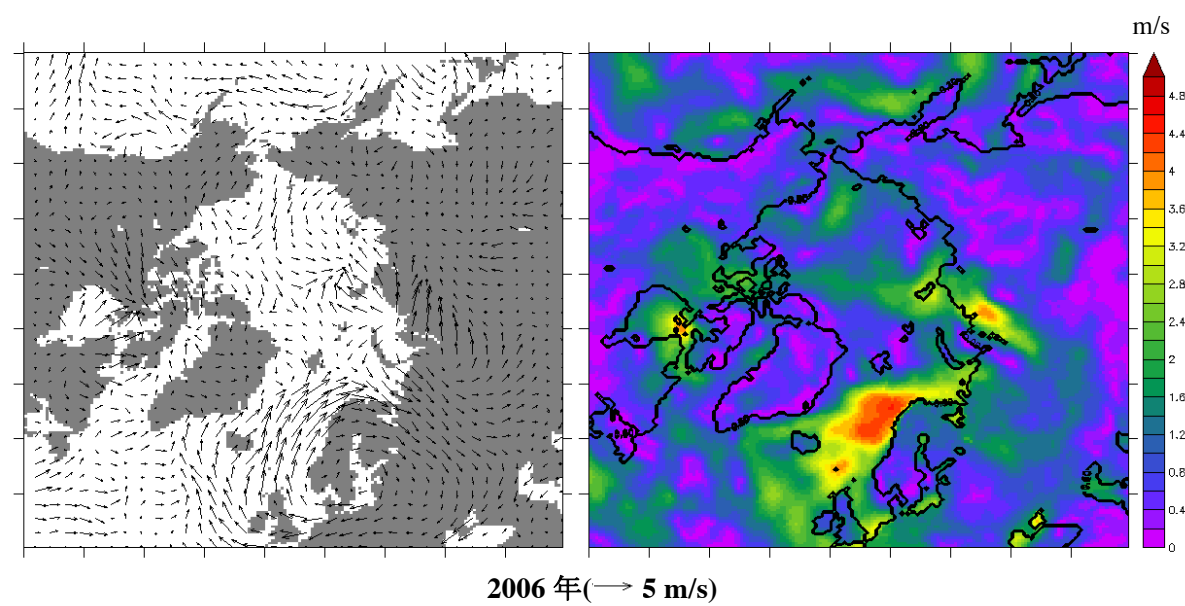
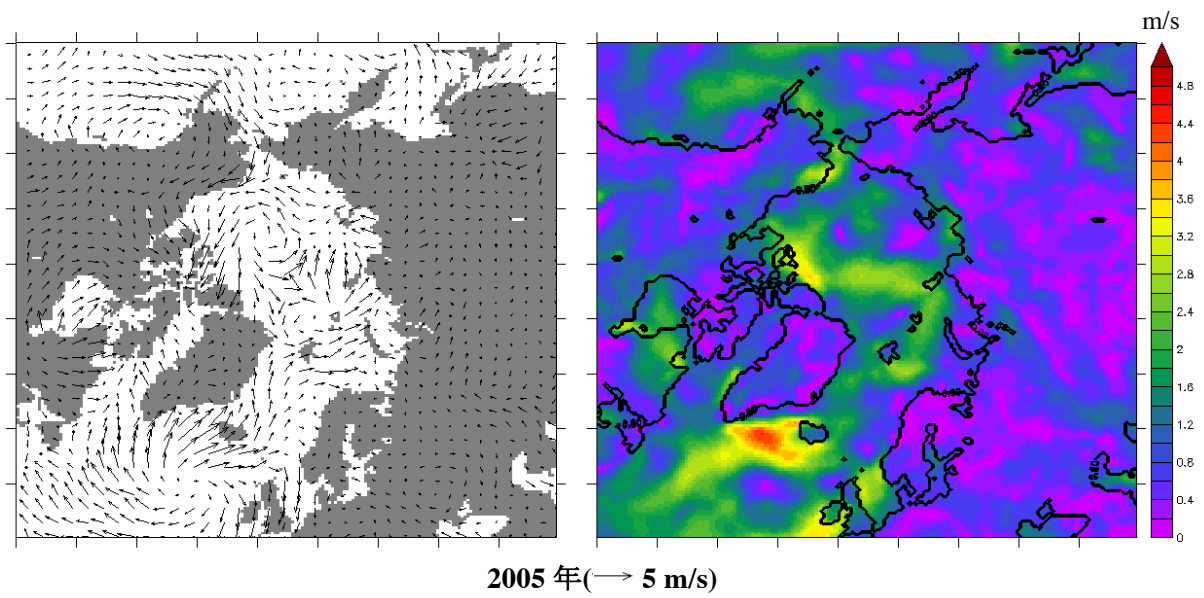
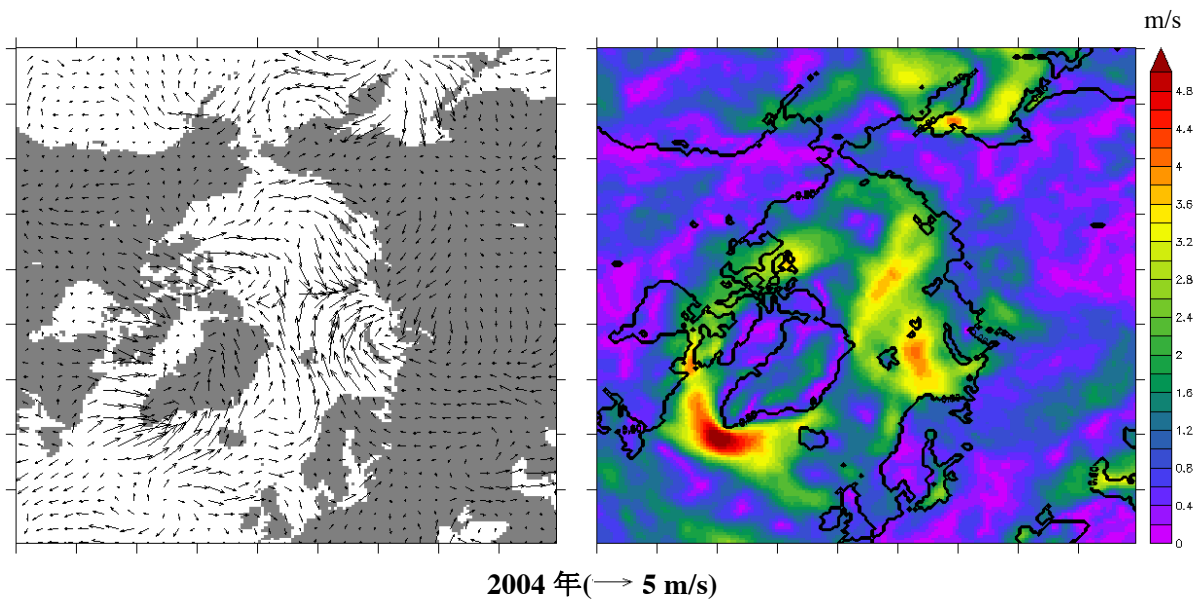


Fig. 4-10 12年間に於ける7月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その2)

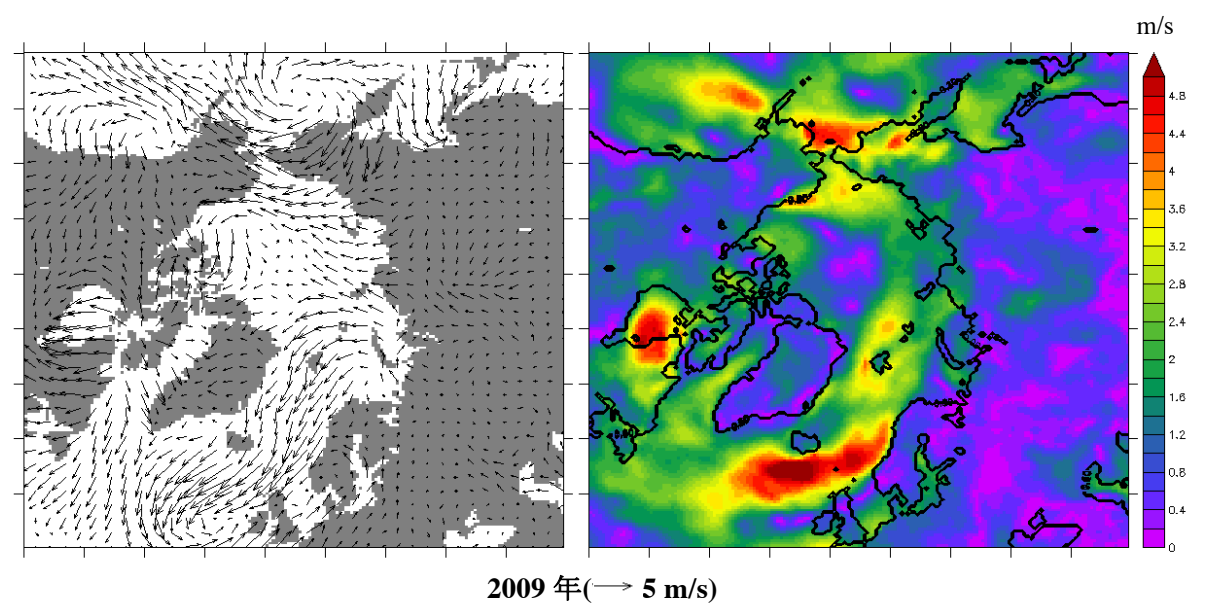
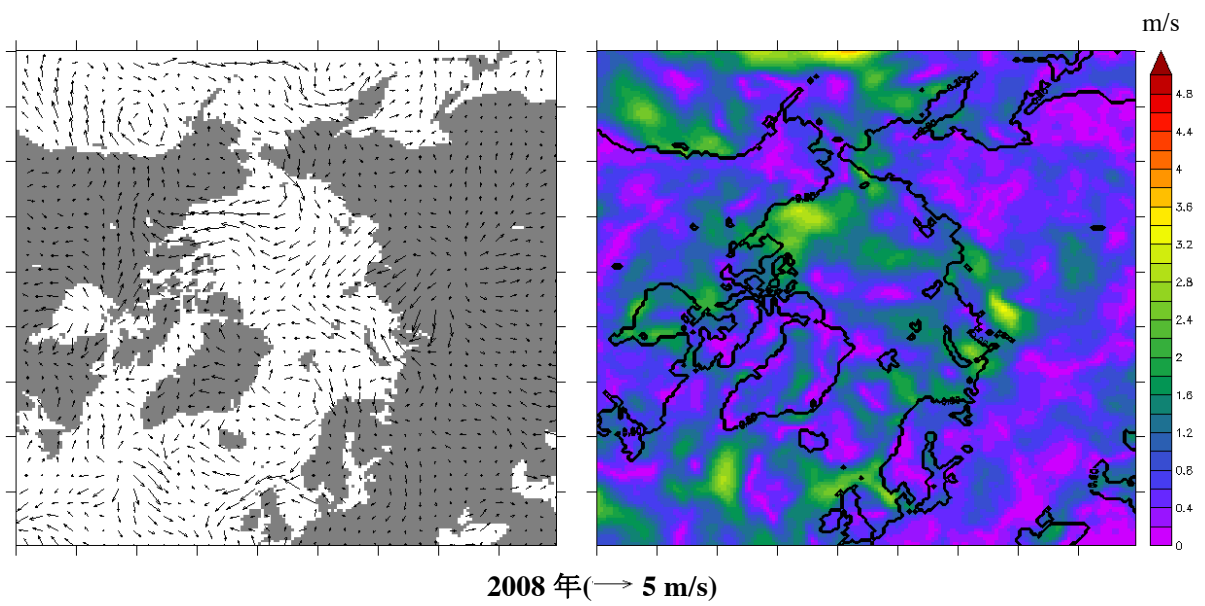
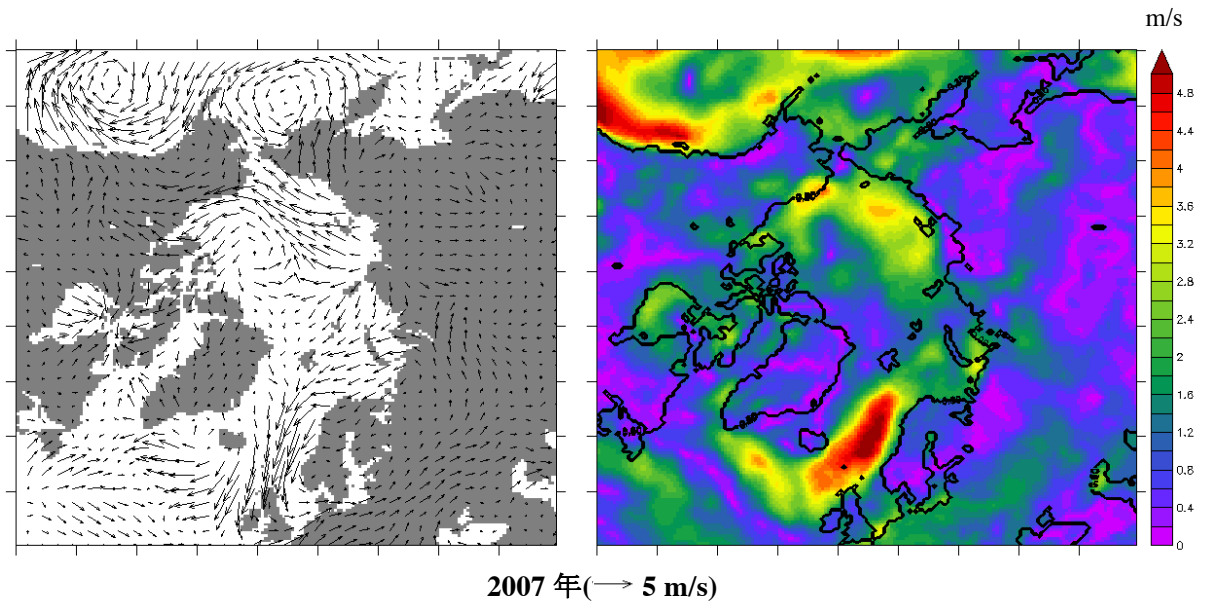


Fig. 4-10 12年間に於ける7月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その3)



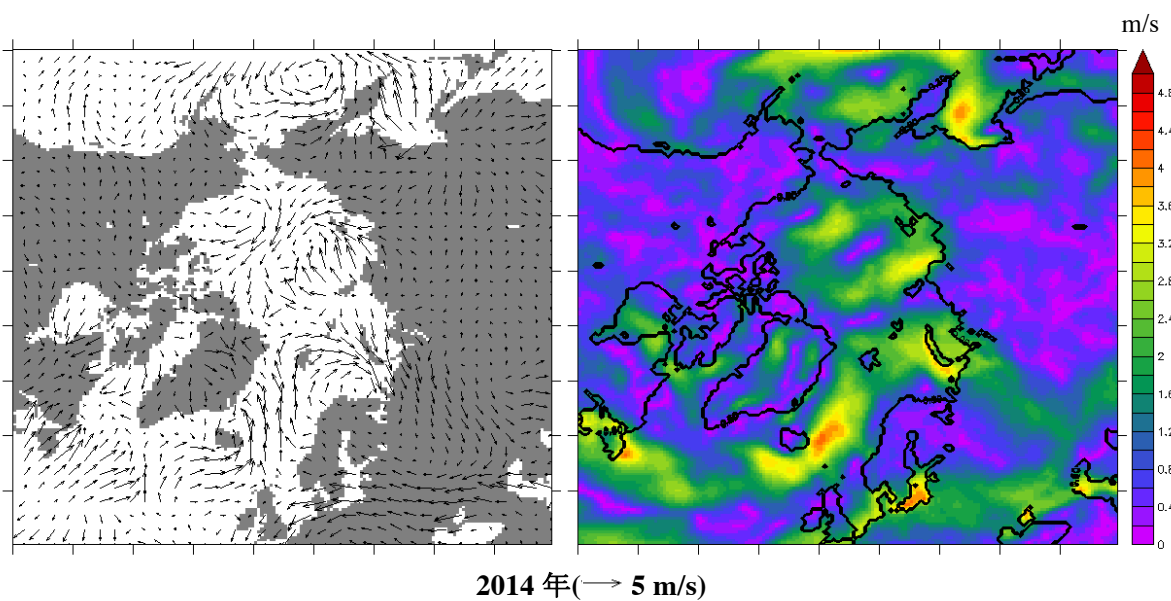
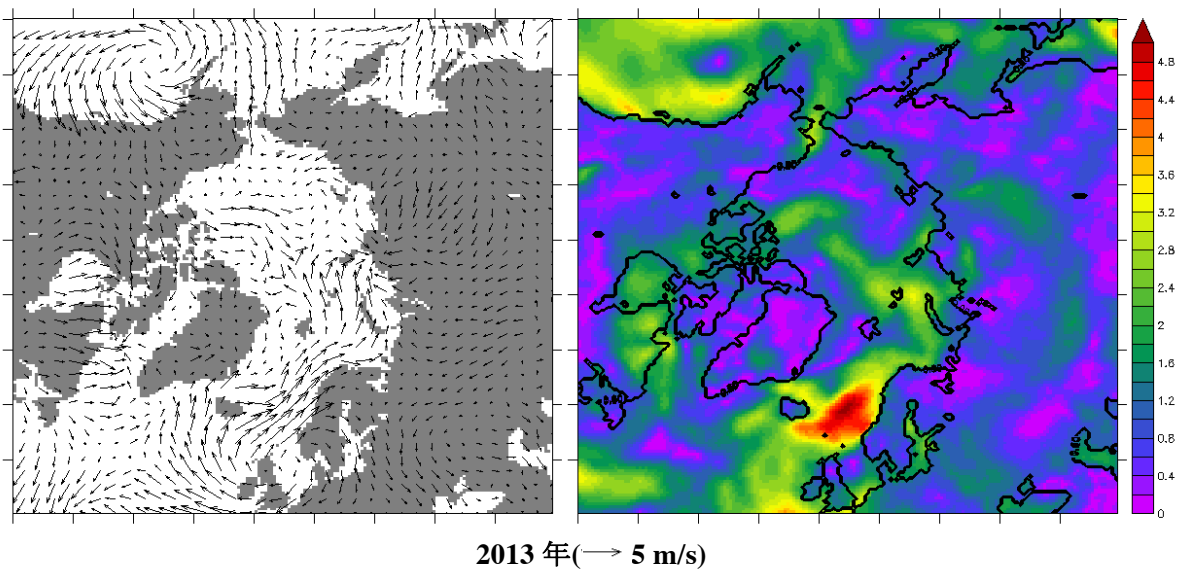
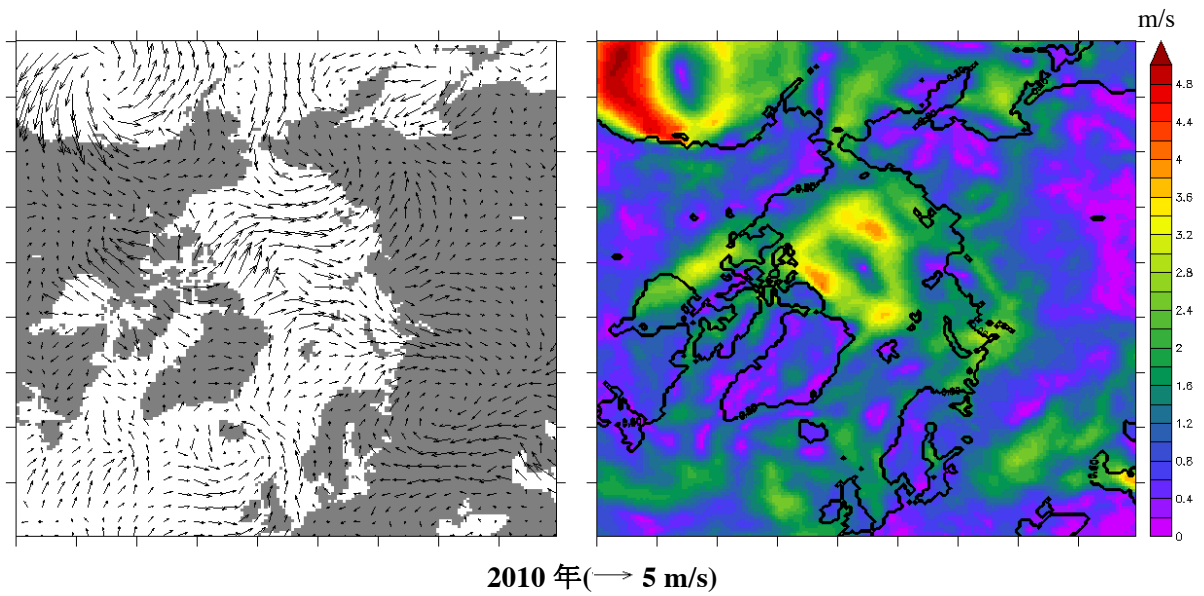
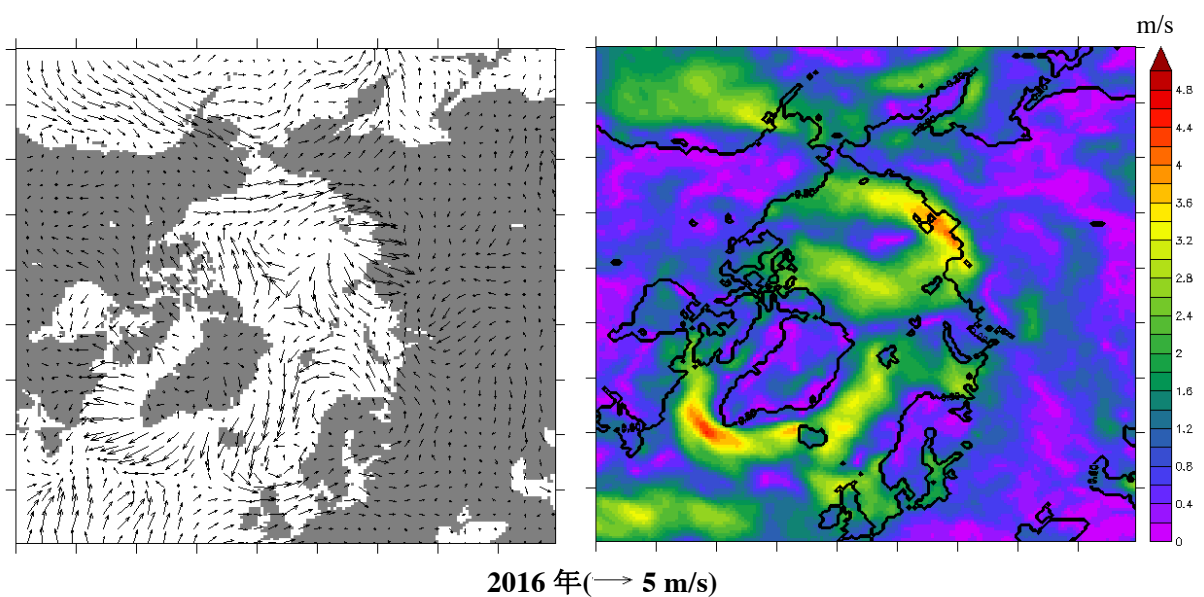
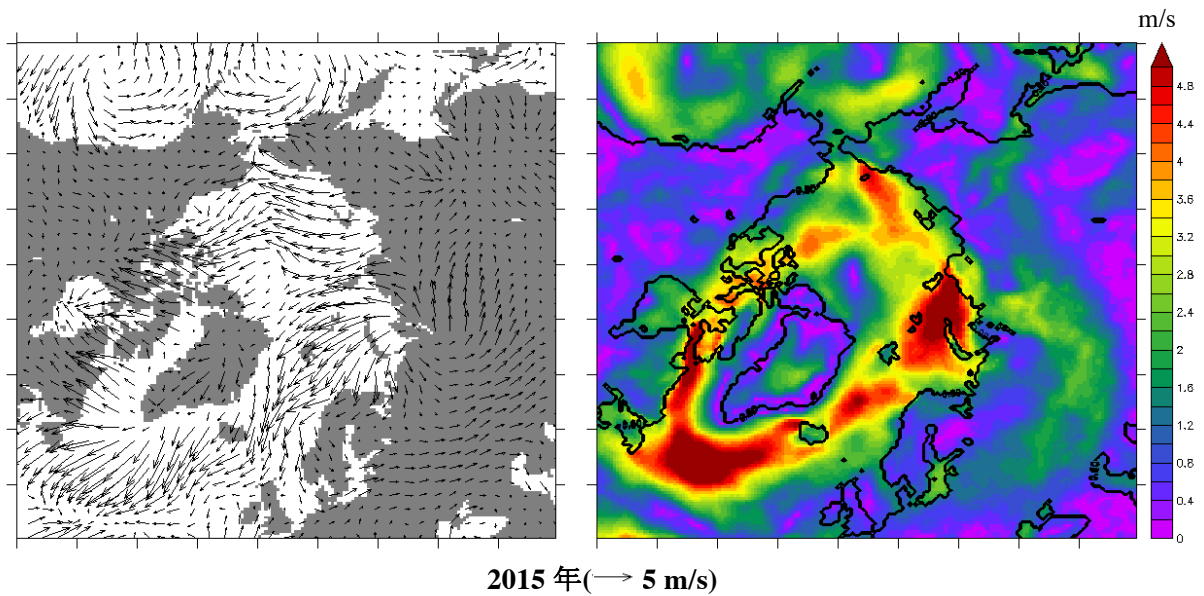


Fig. 4-10 12年間に於ける7月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その4)



**Fig. 4-10** 12年間における7月の風速の偏差(m/s) (左) とその値 (右) (その5, 終)

次に、融解期 (5月から9月まで) の風速と10月の海氷厚の相関関係について検討した。Fig. 4-11 は計算期間の12年間における5月から9月まで、それぞれの平均風速と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) と有意なグリッドのみを抽出した結果 (右) を示している。Table 4-4 は各月の有意なグリッドの数とその割合をまとめた。

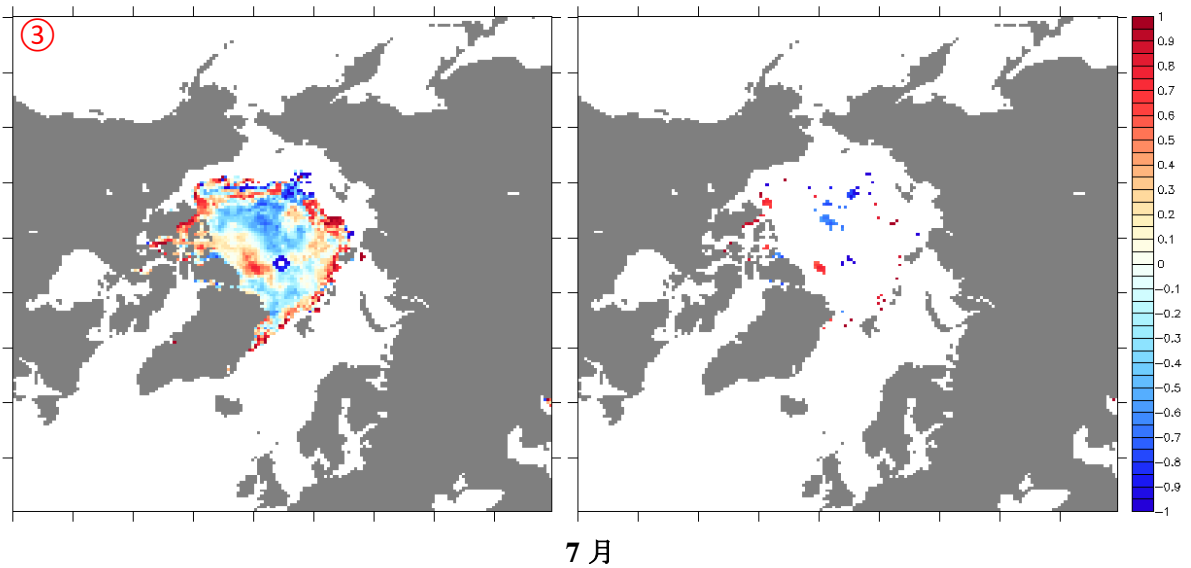
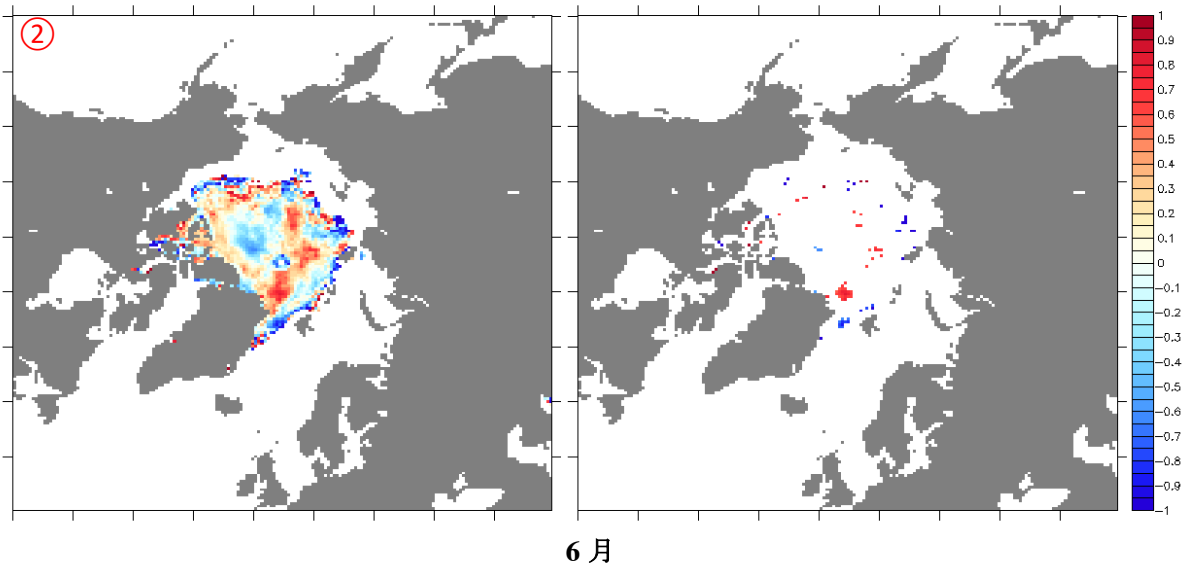
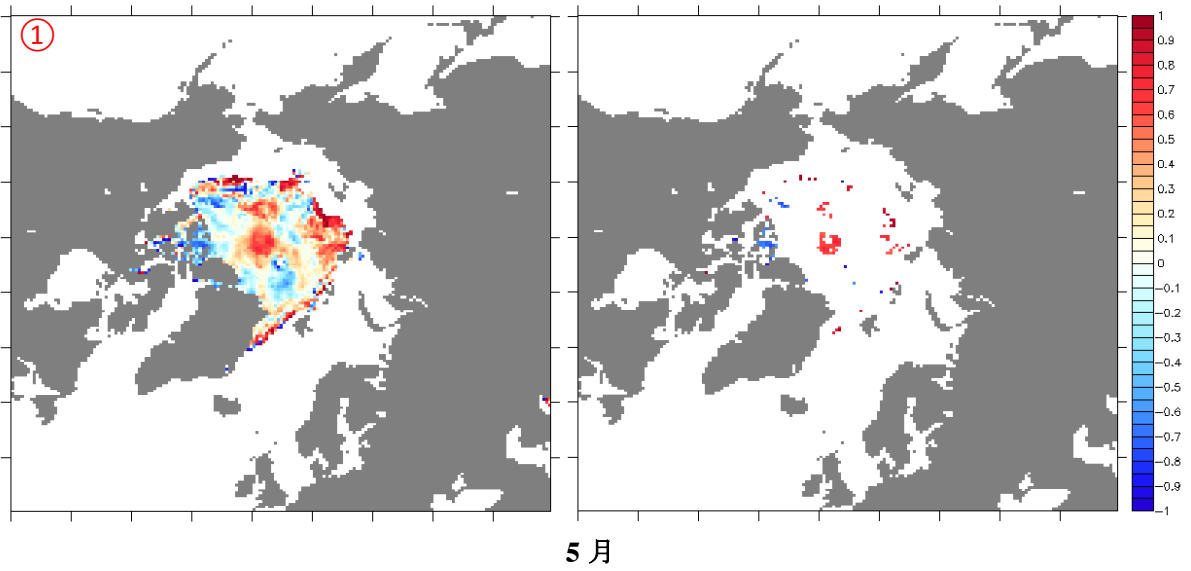
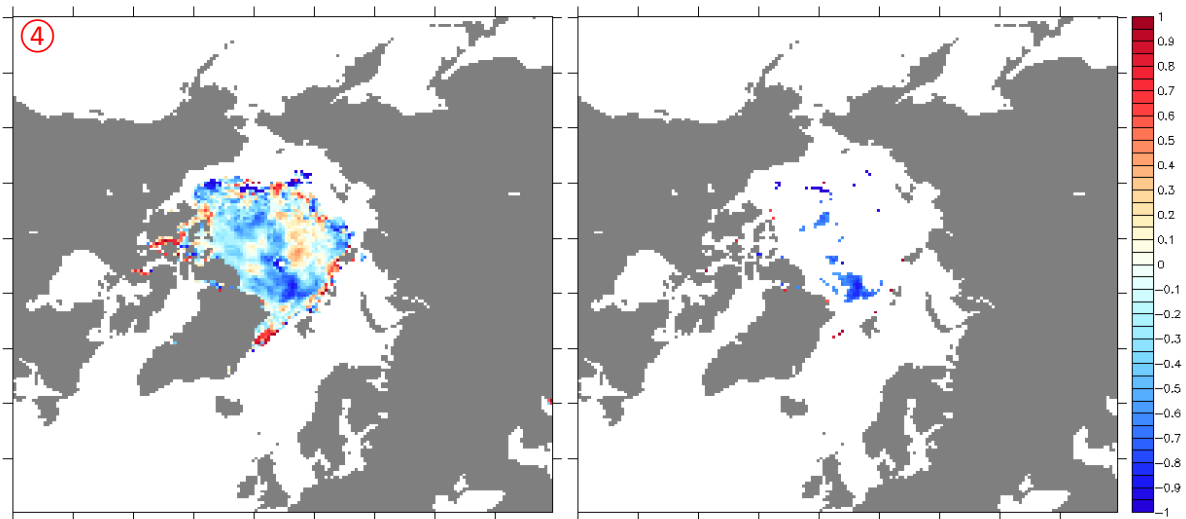
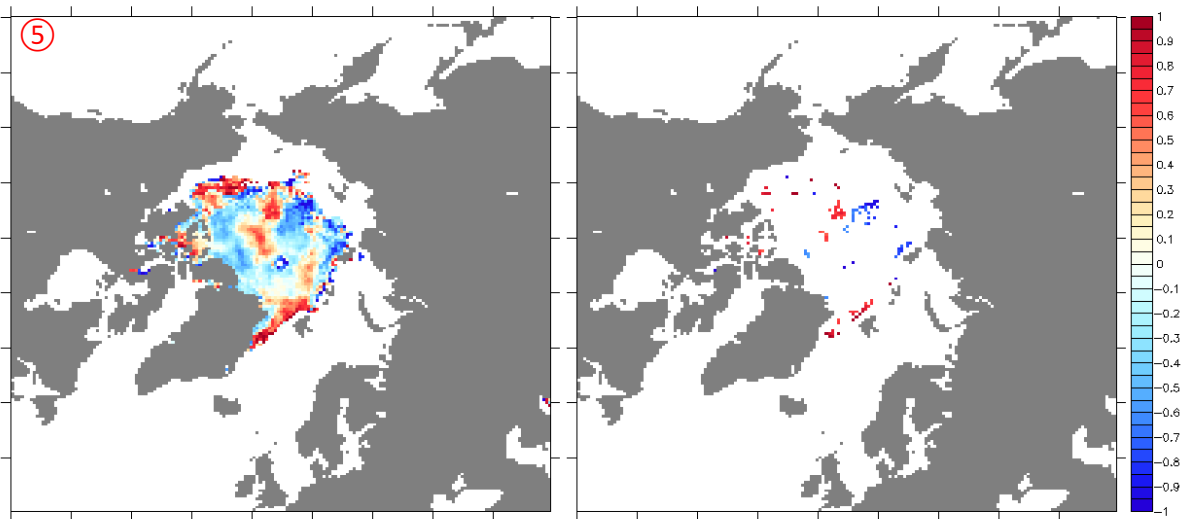


Fig. 4-11 融解期における各月の平均風速と10月1日の海氷厚の相関係数 (左) ( $n \geq 3$ ) と有意なグリッドのみ (右) (その1)



8月



9月

Fig. 4-11 融解期における各月の平均風速と10月1日の海氷厚の相関係数（左）（ $n \geq 3$ ）と有意なグリッドのみ（右）（その2，終）

Table 4-4 風速の場合の有意なグリッドの数とその割合

月	データがある グリッド総数/個	有意なグリッドの数/個	割合
5月	2313	140	6.05%
6月	2313	107	4.63%
7月	2313	125	5.40%
8月	2313	170	7.35%
9月	2313	125	5.40%

結果から、

5月 (Fig 4-11 の①) は、北極点に近い海域とラプテフ海北側の海域にはプラス相関関係が多く見られた。これらの海域には風速は大きければ大きいほど、10月の海氷厚がもっと厚くなる。5月の平均風向分布 (P51, Fig. 4-9) を参照すると、その原因はラプテフ海の風は大陸から海に強く吹いていたので、海氷が収束させ、厚くなったと考えた。また、有意なグリッドの割合は 6.05%、有意な相関関係はあまり見られなかったが、北東航路上に有意なグリッドが多く存在していたことがわかった。

6月 (Fig 4-11 の②) は、氷縁部分にマイナス相関が多くみられたことがわかった。北極点から太平洋向きの平均風速 (P52, Fig. 4-9) は一番大きいので、海氷は発散させて薄くなったと考えた。また、有意なグリッドの割合は5月より少ない、よって6月の風速は10月の海氷厚にほとんど影響を与えないと考えた。

7月 (Fig 4-11 の③) の場合は6月の逆、チュクチ海の北側を除いた氷縁部分にプラス相関が多くみられた。その原因は見出せなかった。

8月 (Fig 4-11 の④) は、ほぼ全域にマイナス相関がみられた。とくにグリーンランドの北側の海域に、有意なマイナス相関が多く分布していた。8月の平均風速 (P52, Fig. 4-9) を参照すると、その原因は8月の風は主にカナダ多島海とグリーンランド側からロシア大陸の方向に吹いていたので、海氷は発散させ、薄くなったと考えた。有意なグリッドの割合は5月から9月までの間に一番大きいことがわかった。よって、8月の風速は10月の海氷厚に一定な影響を与えたと考えた。

9月 (Fig 4-11 の⑤) の分布は6月に似ている。有意なグリッドの数は多くではないので、10月の海氷厚とはほとんど関係ないと考えた。

### 4.3. 重相関分析

以上より、単一要素は10月の海氷厚にあまり影響を与えなかったことがわかった。

そこで本節では10月の海氷厚は5月の海氷データと気象データから、複数の要素を説明することができるか考察した。考察には重相関分析を行った。相関の強さは重相関係数を用いて評価した。重相関係数というのは、複数の変数を直線の式で表して線形結合した値と他のある変数の値との相関係数のこと。0から1の間の値を取り、1に近いほど分析の精度は高いと言える[22]、以下の式より計算する。

$$R = \sqrt{1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_i (f_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

ここで、 $R$  は重相関係数、 $y$  は観測値、 $f$  は回帰方程式による推定値を表す。 $SS_{res}$  は残差平方和(residual sum of squares)と呼ばれ、データと推定モデルとの間の不一致を評価する尺度である。小さい値はデータに対してモデルがぴったりとフィットしていること示している。 $SS_{tot}$  は総平方和(total sum of squares)、観測値の分散を表す尺度である。

また、重相関係数  $R$  の平方  $R^2$  は決定係数と呼ばれ、独立変数（説明変数）が従属変数（被説明変数）のどれくらいを説明できるかを表す値である。寄与率と呼ばれることもある[23]。

重相関関係の有意性を検証するため、F 検定を行った。F 検定は無相関検定方法の一つ、t 検定に似ている。t 検定は従属変数が一つしかない時に使えるが、F 検定は複数の従属変数がある場合も対応できる。Table 4-5 は有意水準が 5% 時の F の境界値をまとめた。F は以下の式より計算する。

$$F = \frac{SS_{res}/n}{SS_{reg}/(n - m - 1)} \quad (16)$$

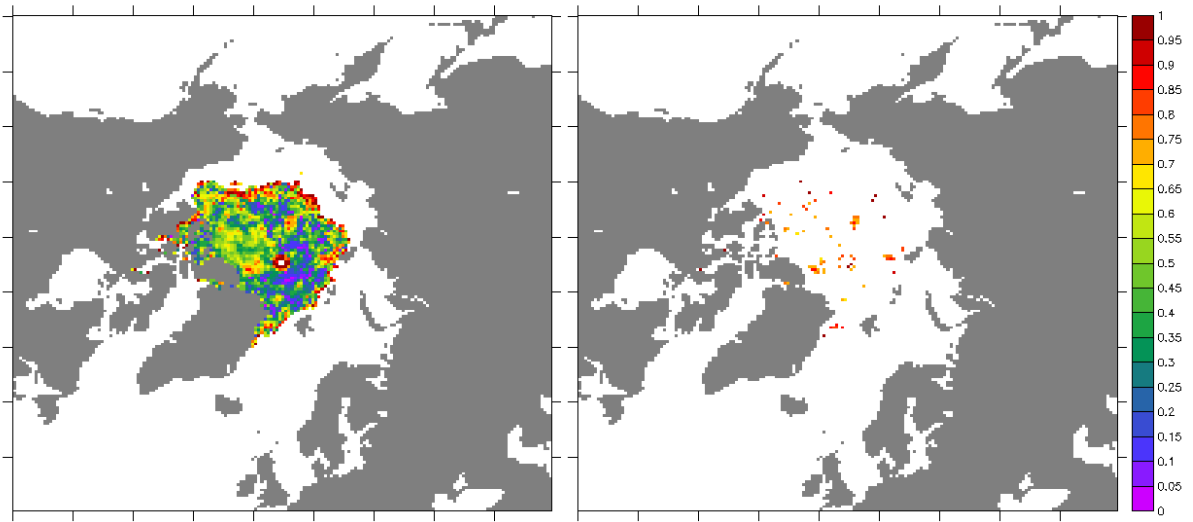
ここで、 $n$  は観測値の数、つまりデータ数。 $n-m-1$  は自由度と呼ばれ、 $m$  は従属変数の数。 $m=1$  の場合は、 $F = t^2$ 、F 検定と t 検定はほぼ同じ評価効果を持っている。F 値が表中の数値以上であれば、その相関関係が有意である。

Table 4-5 有意水準が 5% 時の F の境界値

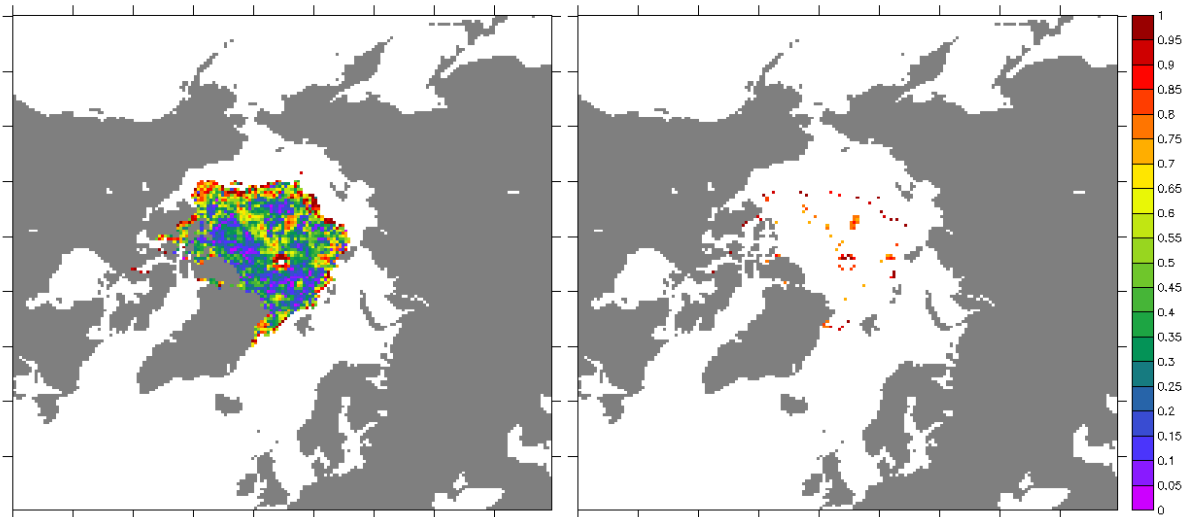
自由度 (df)	従属変数の数 m									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n-m-1$										
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978

#### 4.3.1. 5月の海氷厚・気温と10月の海氷厚との関係

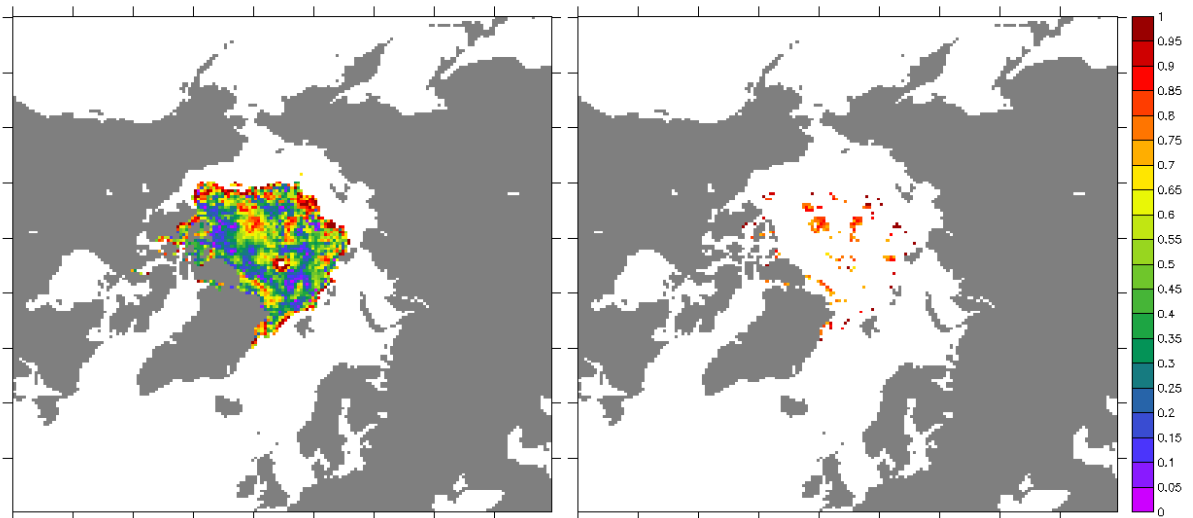
Fig. 4-12 (左) は5月1日の海氷厚と5月から9月まで各月の平均気温それぞれの従属変数として、10月の海氷厚を考えた場合の重相関係数の分布を示している。F 検証によって有意なグリッドを抽出した結果は Fig. 4-12 (右) に示している。Table 4-6 にそれぞれ有意な相関関係を持つグリッドの割合をまとめた。



5月1日の海氷厚・5月の平均気温



5月1日の海氷厚・6月の平均気温



5月1日の海氷厚・7月の平均気温

Fig. 4-12 5月1日の海氷厚・融解期における各月の平均気温と10月1日の海氷厚の重相関係数 (左) ( $n \geq 4$ )と有意なグリッド (右) (その1)

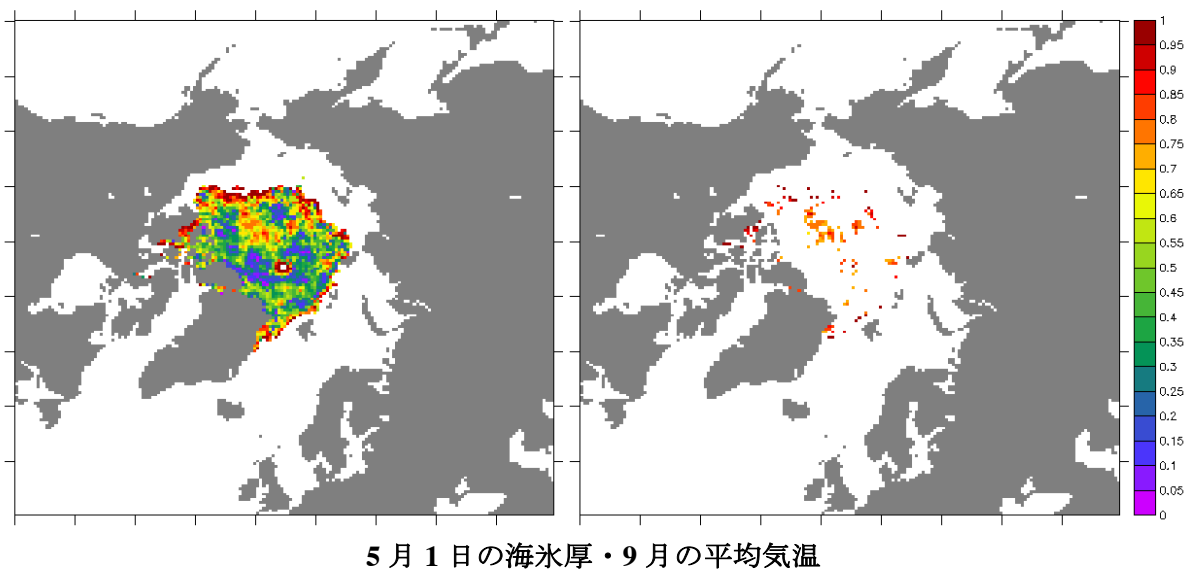
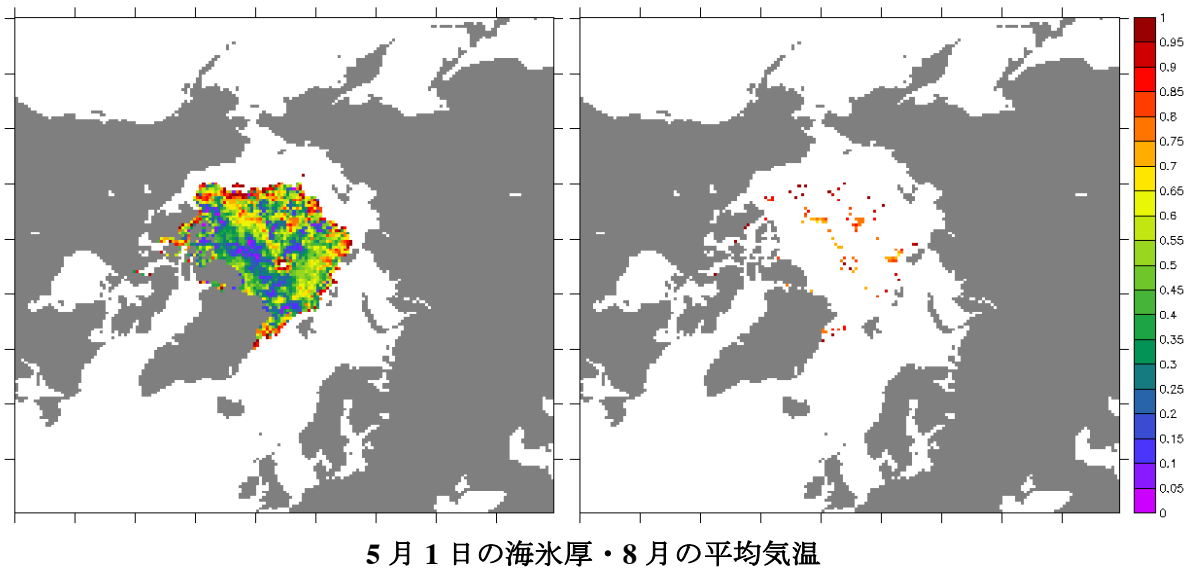


Fig. 4-12 5月1日の海氷厚・各月の平均気温と10月1日の海氷厚の重相関係数（左）(n >= 4)と有意なグリッド（右）（その2）

Table 4-6 異なる状況の有意なグリッドの割合

月	状況①の割合	状況②の割合	状況③の割合
5月	7.00%	3.93%	4.90%
6月		3.33%	5.42%
7月		6.96%	8.74%
8月		6.14%	5.47%
9月		10.55%	8.64%

状況①: 5月1日の海氷厚と10月1日の海氷厚の相関係数

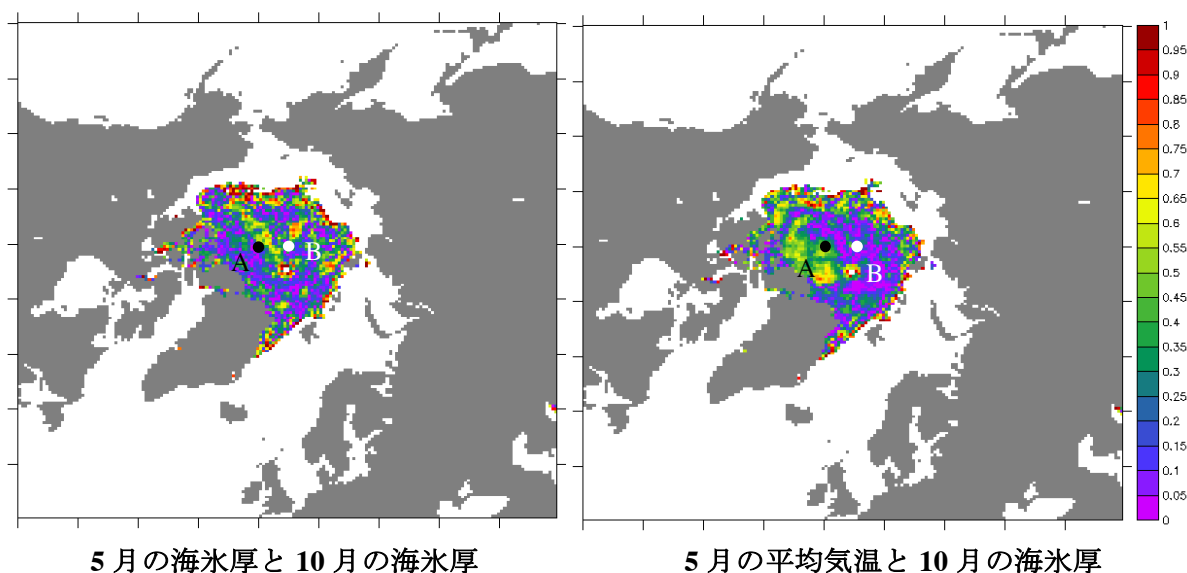
状況②: 各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数

状況③: 5月1日の海氷厚・各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数



結果から、重相関回帰によって全体の相関係数が上昇したが、7月を除き、有意なグリッドの割合は単一従属変数を考えた場合より小さくなったことがわかった。その原因について考察を行った。

Fig. 4-13 (左) は5月1日と10月1日の海氷厚の相関係数の分布を示している。そして Fig. 4-13 (右) は5月から9月まで各月の平均気温と10月1日の海氷厚の相関係数の分布を示している。ここで、比較しやすいため、相関係数の絶対値をとった。Fig. 4-12 と比べると、重相関係数は二つの相関係数の足し算みたいなものである。例えば5月にAグリッド (Fig. 4-17①黒い点、 $x=100, y=101$ ) の5月と10月の海氷厚の相関係数は0.5629、5月の平均気温と10月の海氷厚の相関係数は0.4635、そして重相関係数は0.6819。Bグリッド (Fig. 4-12②白い点、 $x=89, y=102$ ) の5月と10月の海氷厚の相関係数は0.5778、5月の平均気温と10月の海氷厚の相関係数は-0.0121、そして重相関係数は0.5865。つまり、相関係数がともに高いグリッド (Aグリッド) は重相関回帰によって、より高くなる。相関係数が低いグリッドと高いグリッドの組み合わせの場合 (Bグリッド) は、重相関係数は高い値と比べ、あまり増えない。その結果、重相関係数は前よりあまり上昇しなかった場合は (例えB地点)、F検定の基準によって無相関と判断した。



5月の海氷厚と10月の海氷厚  
5月の平均気温と10月の海氷厚  
Fig. 4-13 5月1日の海氷厚と10月1日の海氷厚の相関係数 (左)  
5月から9月まで各月と10月1日の海氷厚の相関係数 (右) ( $n \geq 3$ ) (その1)

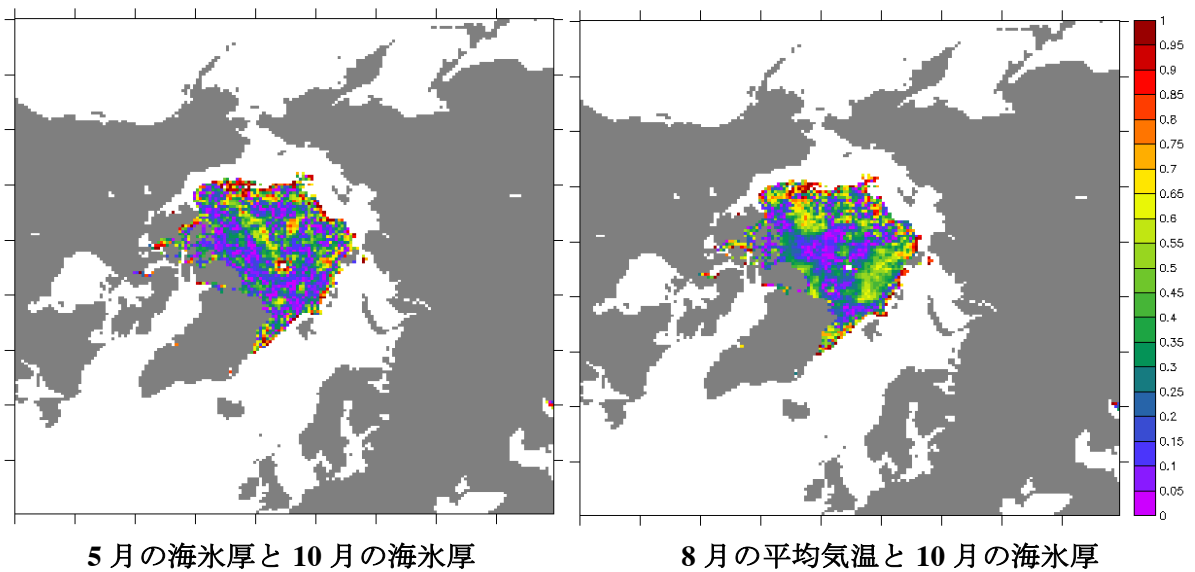
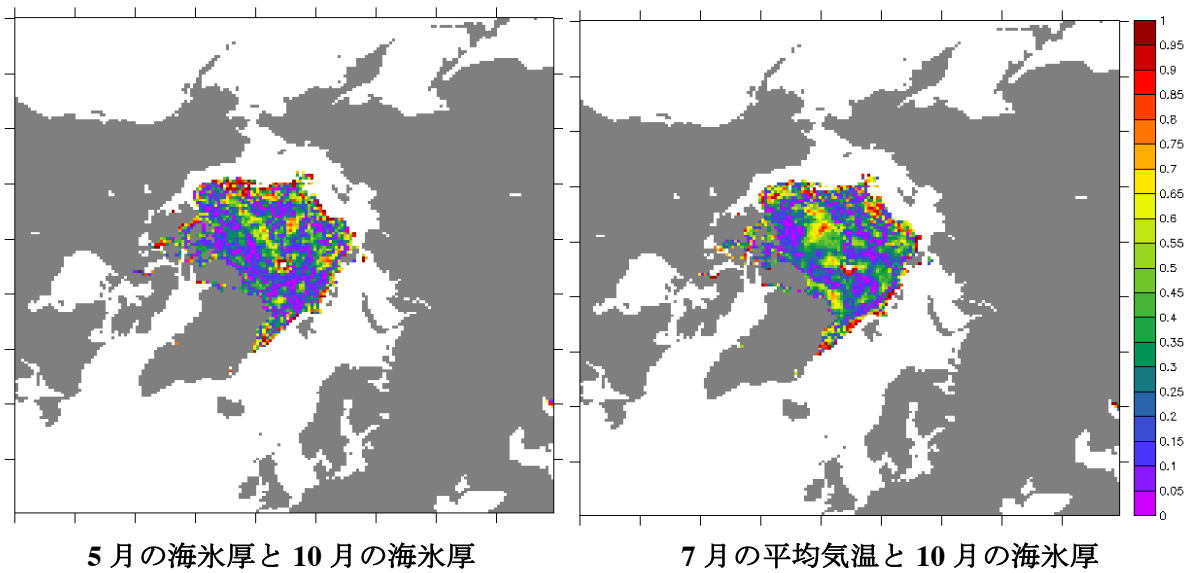
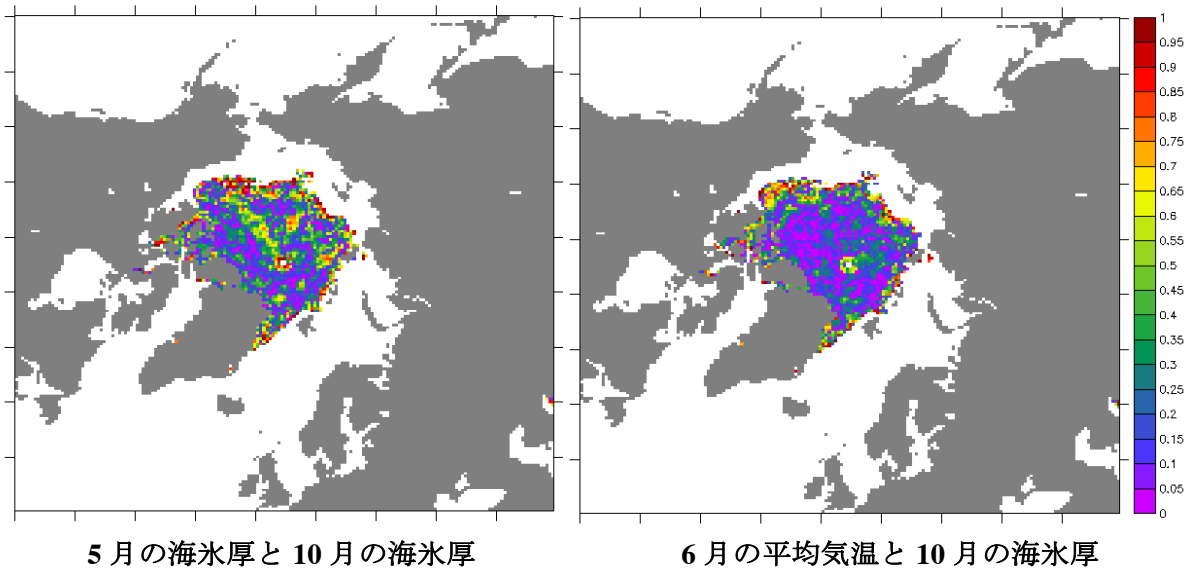
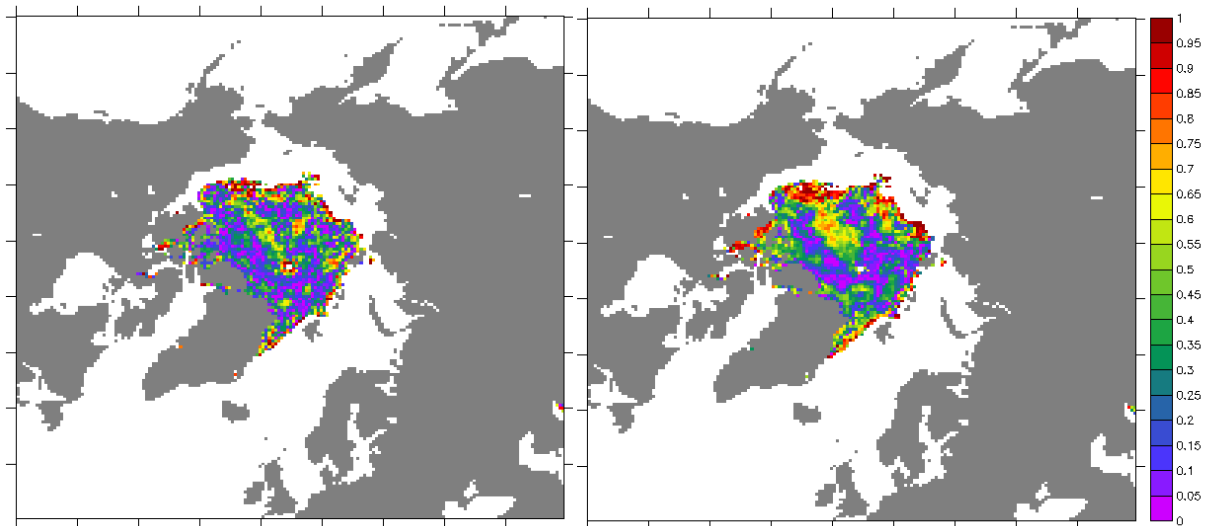


Fig. 4-13 5月1日の海氷厚と10月1日の海氷厚の相関係数 (左)

5月から9月まで各月と10月1日の海氷厚の相関係数 (右) ( $n \geq 3$ ) (その2)



5月の海氷厚と10月の海氷厚

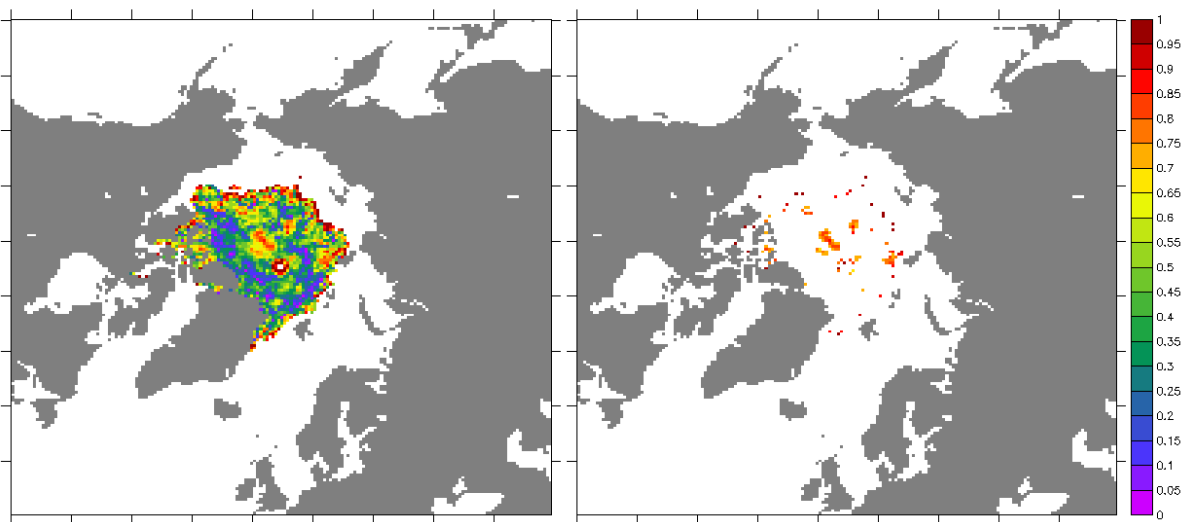
9月の平均気温と10月の海氷厚

Fig. 4-13 5月1日の海氷厚と10月1日の海氷厚の相関係数 (左)

5月から9月まで各月と10月1日の海氷厚の相関係数 (右) ( $n \geq 3$ ) (その3, 終)

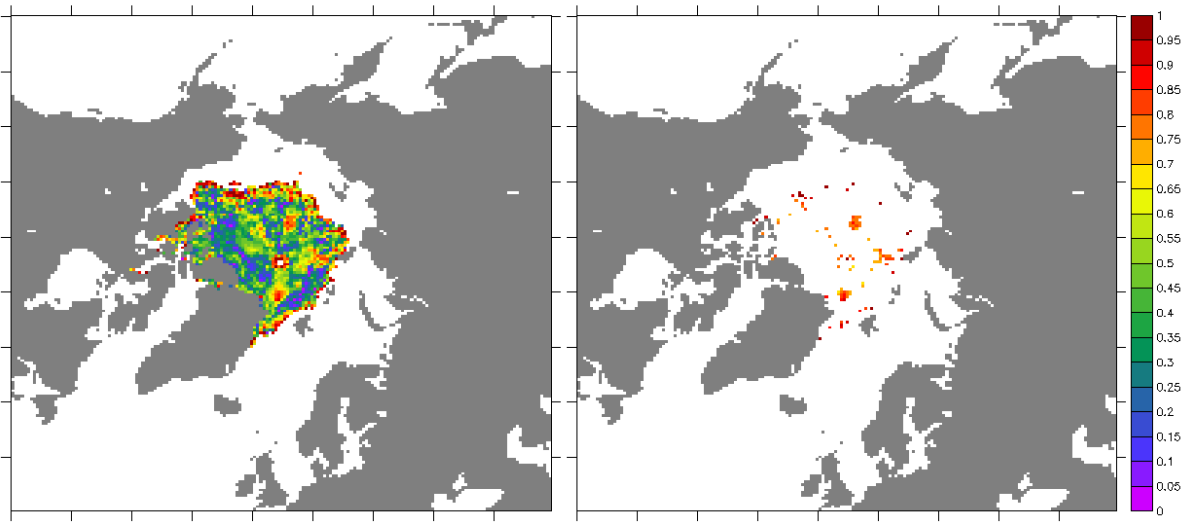
#### 4.3.2. 5月の海氷厚・風速と10月の海氷厚との関係

Fig. 4-14 (左) は5月1日の海氷厚と5月から9月まで各月の平均風速の従属変数として、10月の海氷厚を考えた場合の重相関係数の分布を示している。Table 4-7 はそれぞれ有意な相関関係を持つグリッドの割合をまとめた。

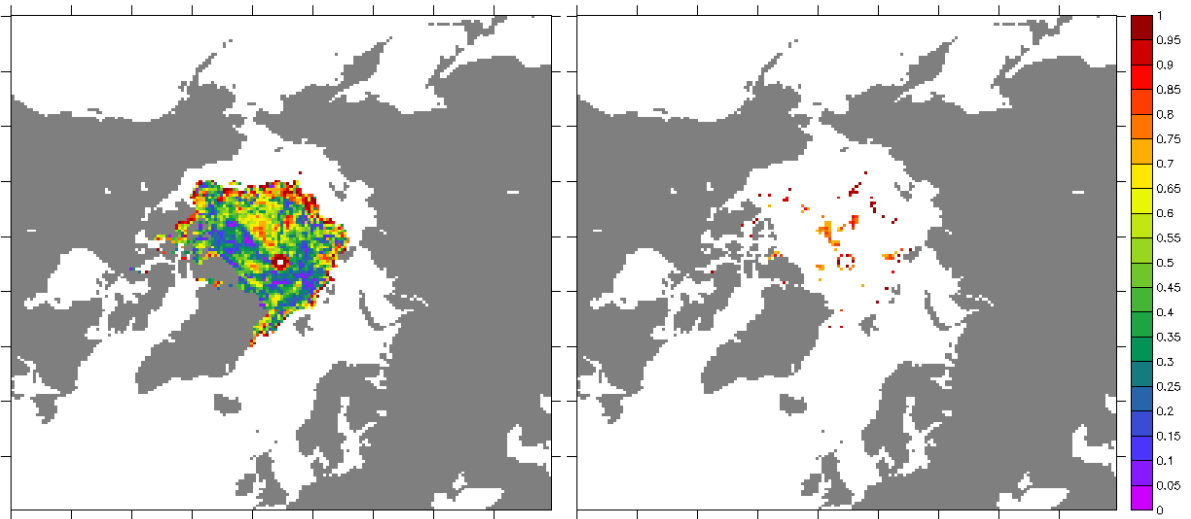


5月1日の海氷厚・5月の平均風速

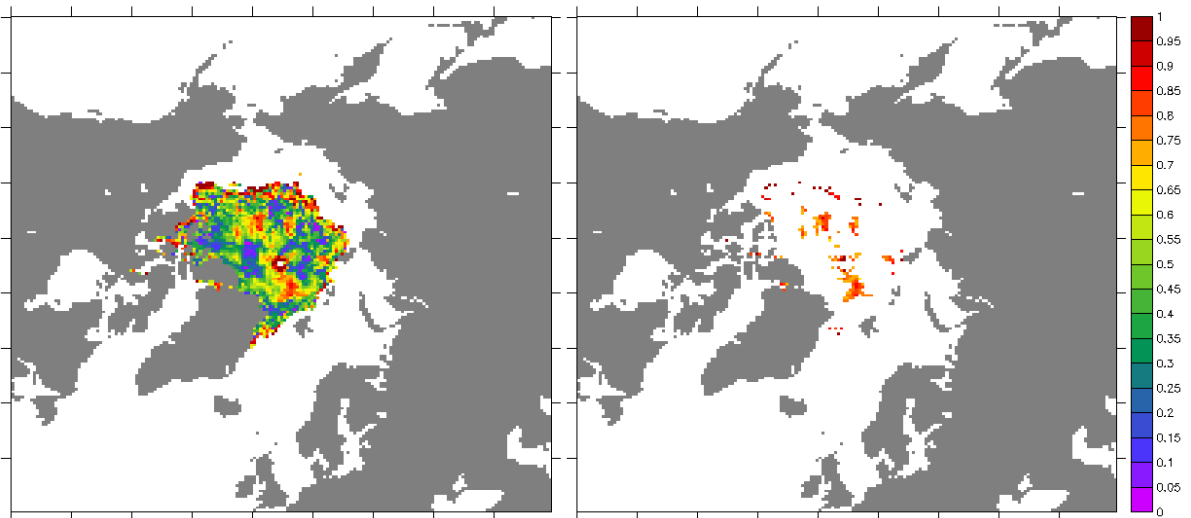
Fig. 4-14 5月1日の海氷厚・各月の平均風速と10月1日の海氷厚の重相関係数 (左) ( $m \geq 4$ ) と有意なグリッド (右) (その1)



5月1日の海氷厚・6月の平均風速

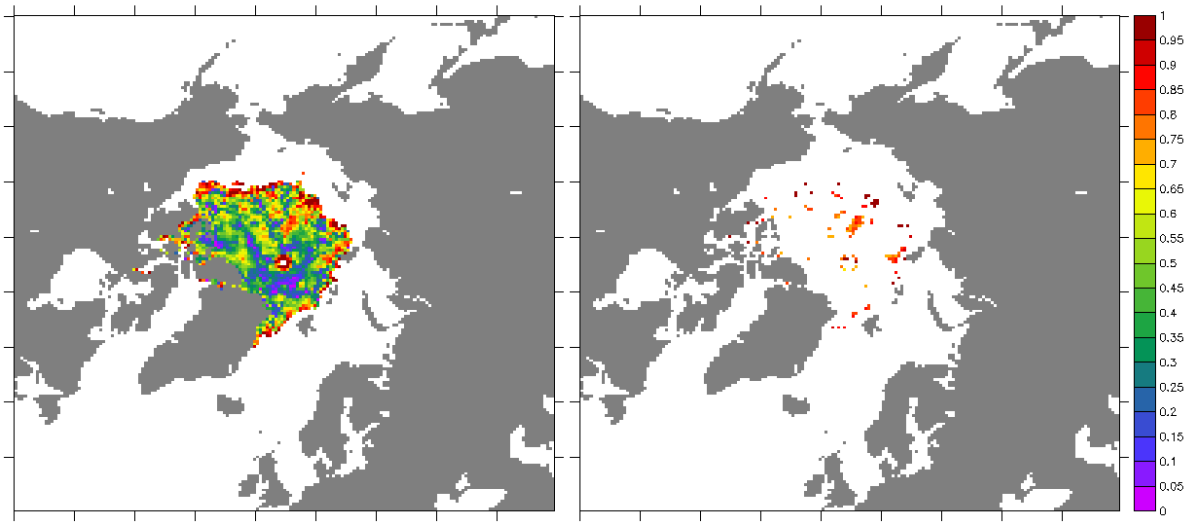


5月1日の海氷厚・7月の平均風速



5月1日の海氷厚・8月の平均風速

Fig. 4-14 5月1日の海氷厚・各月の平均風速と10月1日の海氷厚の重相関係数 (左) ( $m \geq 4$ ) と有意なグリッド (右) (その2)



5月1日の海氷厚・9月の平均風速

Fig. 4-14 5月1日の海氷厚・各月の平均風速と10月1日の海氷厚の重相関係数(左) ( $m \geq 4$ ) と有意なグリッド(右)(その3, 終)

Table 4-7 異なる状況の有意なグリッドの割合

月	状況①の割合	状況②の割合	状況③の割合
5月	7.00%	6.05%	7.15%
6月		4.63%	6.10%
7月		5.40%	6.96%
8月		7.35%	9.41%
9月		5.40%	6.39%

状況①: 5月1日の海氷厚と10月1日の海氷厚の相関係数

状況②: 各月の平均風速と10月1日の海氷厚の相関係数

状況③: 5月1日の海氷厚・各月の平均風速と10月1日の海氷厚の相関係数

結果から、8月を除き、有意な相関関係を持つグリッドの割合はあまり増えなかったことがわかった。

#### 4.3.3. 5月の海氷厚・海氷密接度と10月の海氷厚との関係

Fig. 4-15は5月1日の海氷厚・密接度と10月の海氷厚の重相関係数の分布を示している。有意なグリッドは全域にバラバラ分布していたが、その割合は6.11%、あまり大きくではなかった。

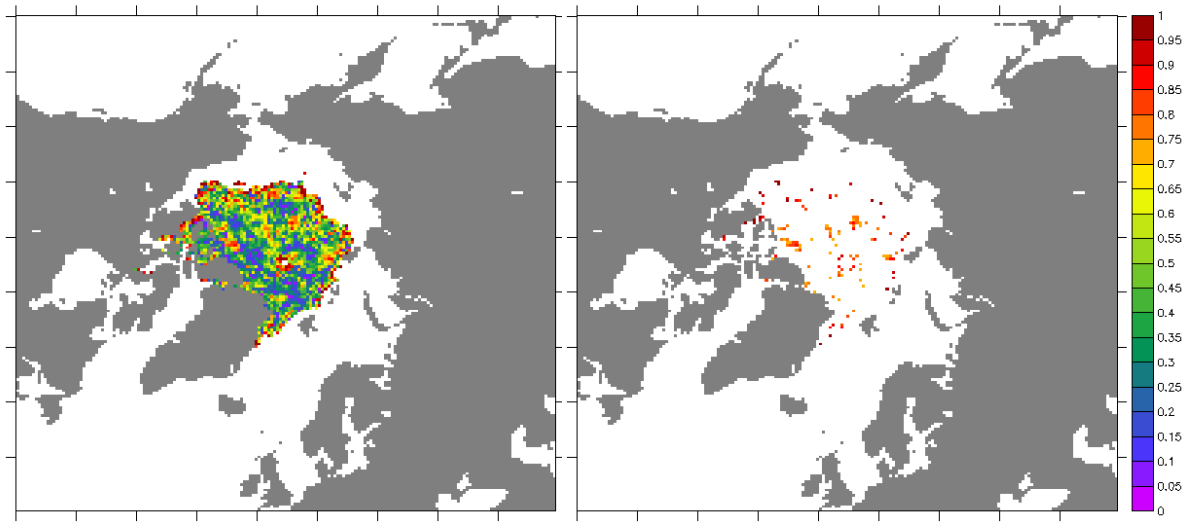


Fig. 4-15 5月1日の海氷厚・密接度と10月の海氷厚の重相関係数 (n >= 4)

#### 4.4. 海氷厚分布予測

以上より、複数の要素を用いて重相関回帰を行った結果、有意なグリッドの割合は必ずしも増えないことがわかった。しかし、北極航路上の有意なグリッドの数と相関係数を増えることができる。

Fig. 4-16 (左) は5月1日と10月1日の海氷厚の有意なグリッドの分布を示している。Fig. 4-16 (右) は5月1日海氷厚と9月の平均気温の従属変数として、10月1日の海氷厚考えた場合の有意な相関係数の分布を示している。重相関回帰によって、黒い丸で囲まれた部分、北西航路上のボーフォート海とカナダ多島海における有意なグリッドの数は少し増える同時に、相関係数も増えた。

Fig. 4-17 (右) は5月1日海氷厚と5月の平均風速の組み合わせの場合の有意な相関係数の分布を示している。重相関回帰によって、黒い丸で囲まれた部分、北東航路上のラプテフ海における有意なグリッドの数は増加したことがわかった。

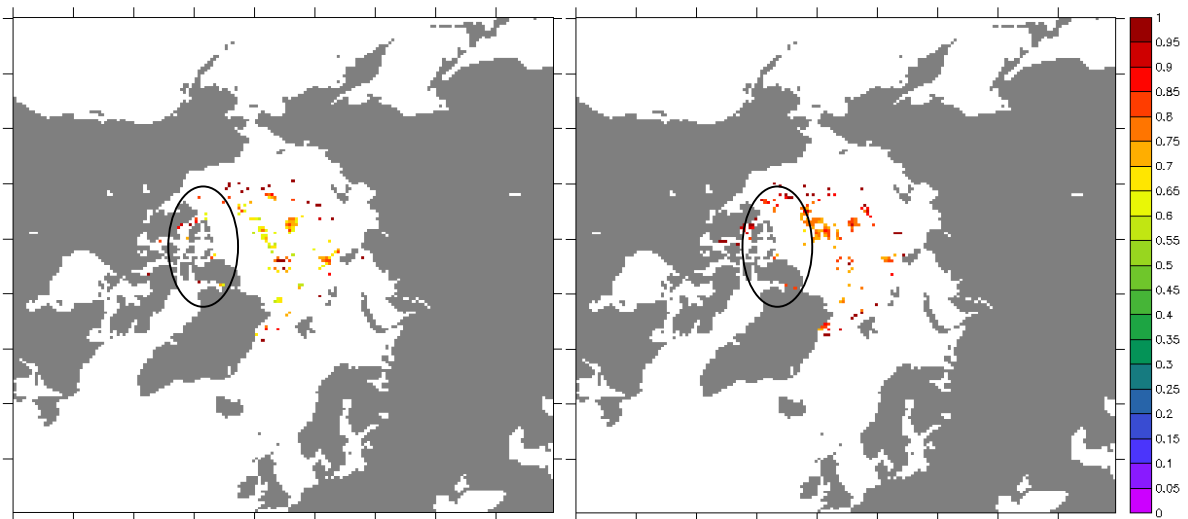


Fig. 4-16 5月1日と10月1日の海氷厚の有意な相関係数 (左) と  
5月1日の海氷厚・9月の平均気温と10月1日の海氷厚の有意な相関係数 (右)

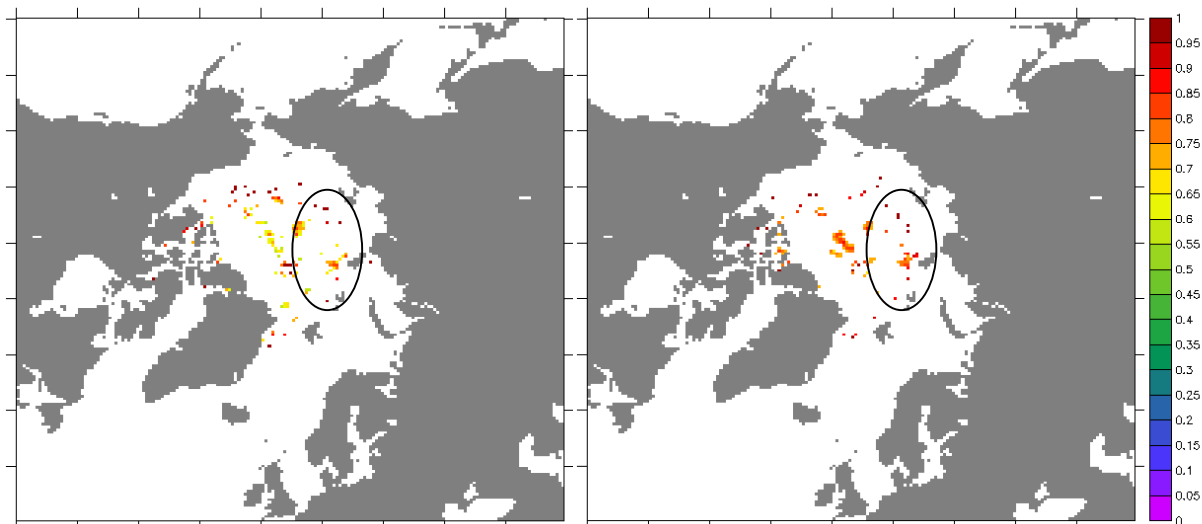


Fig. 4-17 5月1日と10月1日の海氷厚の有意な相関係数（左）と  
5月1日の海氷厚・5月の風速と10月1日の海氷厚の有意な相関係数（右）

ここで、この二つの結果を用いて予測を行った。5月1日海氷厚と9月の平均気温を用いた手法は手法一、5月1日海氷厚と5月の平均風速を用いた手法は手法二と呼ぶ。

手法一は2017年9月の平均気温データが必要である。5月時点で9月の気象要素を予測することは非常に困難である。しかし、前述の海氷域における気温の年によって偏差は小さいため、平均値を用いれば、ある程度予測することができると考えた。海氷域の範囲は、Kimuraの手法[9]から予測した2017年10月1日の海氷域として、その内側の値のみを使用した。そして予測の結果はFig. 4-18に示している。Fig. 4-19は予測値と観測値の誤差を示す。

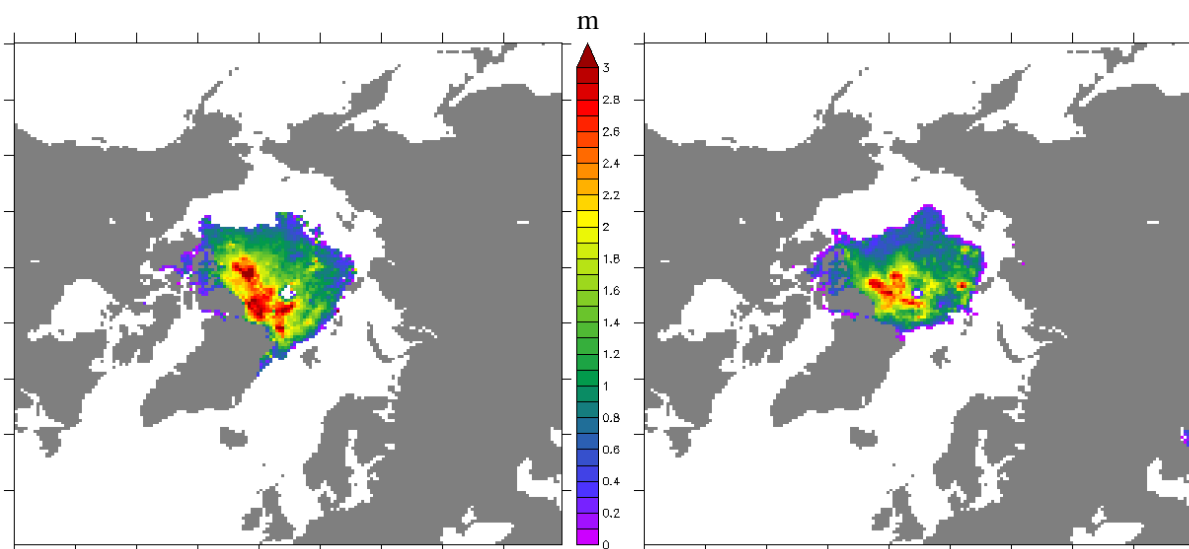


Fig. 4-18 手法一で予測した2017年10月1日の海氷厚の分布[m]（左）  
と2017年10月1日の海氷厚の観測値[m]（右）

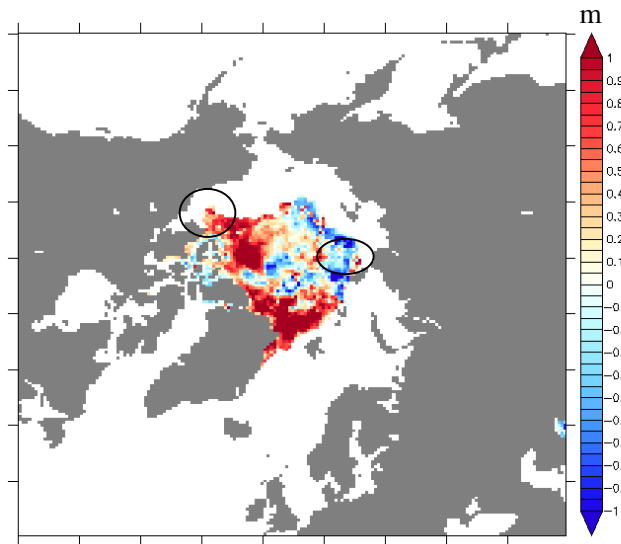


Fig. 4-19 手法一による予測した 2017 年 10 月 1 日の海水厚と観測値の誤差[m]

結果から、厚さ 3 m 以上の海氷については、予測結果は観測より多いことがわかった。黒い丸で囲まれた北西航路上のボーフォート海の海水厚誤差は 0.3 m ほど、北東航路上のラプテフ海の誤差は-0.6 m ほどである。また、全域の RMSE(Root Mean Square Error)は 0.7149 m である。

手法二の結果は Fig. 4-20 に示している。Fig. 4-21 はそれと観測値との誤差を示す。

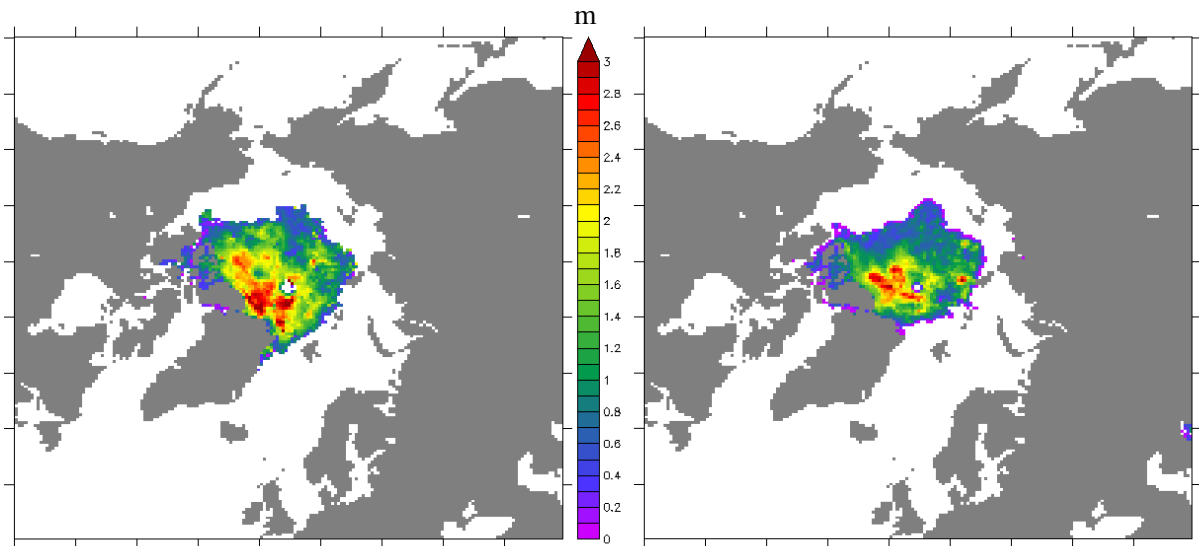
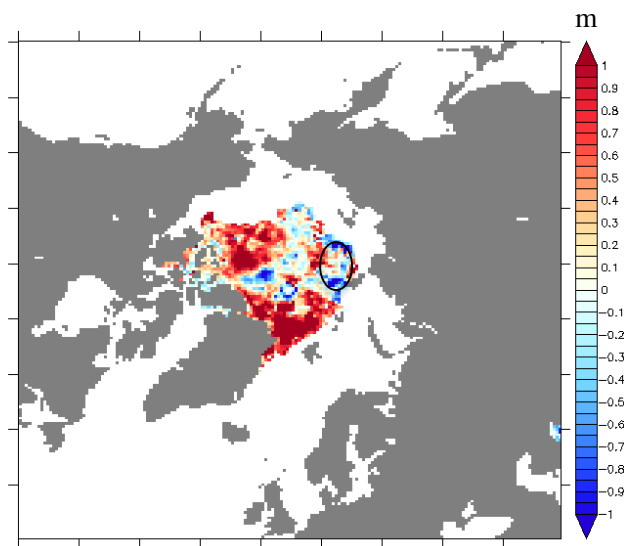


Fig. 4-20 手法二による予測した 2017 年 10 月 1 日の海水厚の分布[m] (左)  
と 2017 年 10 月 1 日の海水厚の観測値[m] (右)





**Fig. 4-21** 手法二による予測した 2017 年 10 月 1 日の海氷厚と観測値の誤差[m]

結果から、厚さ 3 m 以上の海氷は手法一より少ない、観測にもっと一致していることがわかった。北西航路上のボーフォート海とカナダ多島海における誤差は 0.6 m ほど、手法一より高いが、北東航路については黒い丸で囲まれた部分の誤差は-0.3 m から 0.4 m 程度である。また、RMSE は 0.6755 m である。

Table 4-8 は二つの手法と先行研究の森の手法[10]それぞれの RMSE をまとめた。この表から、提案手法の誤差は先行研究より減少したことがわかった。特に手法 2、RMSE は一番小さいであり、北東航路上の誤差も低いである。

**Table 4-8** 手法によって RMSE の比較

予測手法	RMSE(Root Mean Square Error)/m
森手法	0.7976
手法 1	0.7149
手法 2	0.6755

## 第5章 結論

### 5.1. まとめと考察

本研究では、人口衛星搭載のマイクロ波放射計 AMSR-E と AMSR2 の輝度温度データを用いた海氷厚推定アルゴリズム (IJIS アルゴリズム) の検証を行った。そして、夏季の北極海の海氷厚の分布と春季と海氷厚、または融解期における気象要素等との関係について解析した。最後は解析の結果によって、夏季の北極海における海氷厚の分布の予測を試みた。以下、成果をまとめる。

#### IJIS アルゴリズムによる海氷厚の精度の検証

CryoSat-2/SMOS data fusion による海氷厚データを用い、広範囲で IJIS アルゴリズム海氷厚データとの比較の結果、氷縁部分の海氷厚の誤差は季節によって変化することがわかった。そしてアルゴリズムが提供した季節補正の適切性を検討した上で、北極航路上の海氷厚の誤差を減少できる補正手法を提案した。

#### 相関分析

5月の海氷データと5月から9月までの気温、風速データを用い、それぞれと10月の海氷厚との相関関係を考察した。無相関検定を行うと、全般に有意なグリッドの数はあまり多くではなかった。その原因は使用したデータの数が少ないことと5月から9月までの海氷は他の季節よりも大きく運動しているためと考えた。しかし、その中で9月の気温と10月の海氷厚は広範囲に負の相関が見られる。すなわち、9月の気温が高いと、10月の海氷厚が薄い傾向がある。

#### 重相関分析

10月の海氷厚は単一要素からうまく説明できないため、本研究では10月の海氷厚は5月の海氷データと5月から9月までの気象データの複数の要素から説明することができるか考察した。その結果、重相関回帰によって、有意な相関係数を持つグリッドの数は総数としては必ずしも増えないが、北極航路上の有意なグリッドの数は増えた。5月1日の海氷厚と9月の気温の従属変数として10月の海氷厚を考えた場合、北西航路上の有意なグリッドの数が増えた。また、5月1日海氷厚と5月の風速の場合は、北東航路上の有意なグリッドの数が増えた。

#### 海氷厚予測

重相関分析の結果を用いて、2017年の5月1日の海氷厚データと2017年5月の風速データを用いて10月1日の海氷厚分布を予測した。その結果、予測した海氷厚分布は観測値と比べて概ね一致している。特に北東航路上の海氷厚の誤差が小さい。全域のRMSEは先行研究の森の手法[10]より小さいことがわかった。

## 5.2. 今後の課題

本研究では IJIS アルゴリズムによる海氷厚データを使用した。このアルゴリズムにはまだ改善の余地があると考えられる。特に季節によって変化する誤差の補正は全海域に同じ値を用いて補正するのは不適切と考えられる。本研究で提案した補正手法は北極航路上の海氷厚の誤差減少を目的としたが、ほかの海域の海氷厚の精度を保証できない。今後、海域別もしくは気温などの気象要素を元にする補正が期待される。

今回は 2002~2016 年、欠測年を除き 12 年間におけるデータを用いて解析を行ったが、解析対象期間が短いという問題点がある。今後も衛星観測が必要である。

気象要素の予測は難しいため、海氷厚の予測には 5 月のデータと気象要素の平均値を使用した。今後、気象要素が予測できるなら、海氷厚の予測精度も高めるだろう。

また、解析には海氷の漂流速度データを使用しなかった。その原因は現時点の海氷融解期の海氷漂流速度データの精度はよくないため、かつ海氷の動きを予測することは非常に困難であることと考えた。

## 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>(2015.1.20)
- [3] 気象庁 海洋の健康診断表  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index.html>(2018.1.25)
- [4] 国立極地研究所 ADS (Arctic Data archive System)  
<https://ads.nipr.ac.jp/ja/>(2018.1.25)
- [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] 中野祐哉, 北極海航路における最適航路探索に関する研究, 東京大学新領域創成科学研究科, 修士論文, 2015
- [7] 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
- [8] 高石脩平, 北極海における冬季海氷データを用いた夏季氷況の予測, 東京大学工学部, 卒業論文, 2010
- [9] Kimura N., A. Nishimura, Y. Tanaka and H. Yamaguchi, Influence of winter sea-ice motion on summer ice cover in the Arctic, Polar Research 32 20193, 2013
- [10] 森俊彦, 北極航路航行支援に向けた 海氷厚の中期予測手法の開発, 東京大学工学部, 卒業論文, 2015
- [11] 石井吉徳『リモートセンシング読本』, オーム社, 1981
- [12] AMSR-E ウェブページ  
[http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index\\_j.html](http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index_j.html)(2018.1.25)

- [13] JAXA 第一期水循環変動観測衛星「しずく」GCOM-W1 ウェブページ  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/index_j.html)(2018.1.25)
- [14] 国立極地研究所 北極域データアーカイブ ウェブページ  
<https://ads.nipr.ac.jp/ja/>(2018.1.25)
- [15] Krishfield, R. A., Proshutinsky, A., Tateyama, K., Williams, W. J., Carmack, E. C., McLaughlin, F. A., and Timmermans, M. L., Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle, *J. Geophys. Res.*, 119, 1271-1305, doi:10.1002/2013JC008999, 2014.
- [16] Svendsen E., K. Kloster, B. Farrelly, et al., Norwegian Remote Sensing Experiment' Evaluation of the Nimbus 7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer for Sea Ice Research, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 88, NO. C5, PAGES 2781-2791, MARCH 30, 1983
- [17] Robert Ricker, Stefan Hendricks, Lars Kaleschke, et al., A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 11, 1607–1623, 2017
- [18] ERA interim, ECMWF webpage  
[http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/?date\\_year\\_month=2013;8&time=00:00:00&step=0,3,6,9,12&param=235.128](http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/?date_year_month=2013;8&time=00:00:00&step=0,3,6,9,12&param=235.128)
- [19] 岸根卓郎: 理論応用統計学, 養賢堂, pp. 391-394.,1966
- [20] IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT  
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>(2009.1.1)
- [21] Thorndike, A. S., and R. Colony, Sea ice motion in response to geostrophic winds, *Journal of Geophysical Research*,(1982)pp.5845-5852
- [22] 重相関係数 | 統計用語集 | 統計 WEB  
<https://bellcurve.jp/statistics/glossary/1950.html>(2018.1.25)
- [23] 決定係数, Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B1%BA%E5%AE%9A%E4%BF%82%E6%95%B0>  
(2018.1.25)

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、本当にたくさんの方々のご指導、ご支援のおかげで、修士論文を完成される事ができました。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には研究生期間を含めて三年半の間に本当にお世話になりました。三年前に日本に到着した時、空港まで迎えに来てくださって、いろいろなことお教えられ、本当に感動しました。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。

また、副指導教員の林先生には3回に渡る面談のたびに、長く時間をとっていただきました。普段のゼミとは異なる視点からのご指摘をいただき、研究を客観的に見直す良い機会となりました。

特任研究員の木村さんには、衛星データの取得や取り扱い方法を助けていただきました。また、研究中で使用した海氷密接度の予測手法も教えられました。

特任研究員の Waruna さんには、描画ソフト ferret のインストールや使い方について教えられました。また、計算サーバー dale の使い方を教えていただき、研究にも助言をいただくことも多々ありました。

卒業された研究室の先輩である Yasara さんから、データの解析度や座標系を変換する方法または Fortran プログラムミングについて教えられました。卒業後もメールを通じて、助けていただき、本当に感謝します。

修士二年生の後輩の高橋くん、矢口くんとは、雑談会を行いました。日本語を練習した同時に、日本の文化もたくさん知りました。感謝します

修士課程の後輩の伏見くん、岡田くん、吉野くん、また中国人同士の初くんと研究生の洪くん、一緒に楽しい日常を過ごしました。本当に面白かった。

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。