

平成 30 年 1 月修士論文要旨

(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)
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

学籍番号 47-156790 繆 森

指導教員 山口 一 教授

(平成 30 年 2 月 2 日発表予定)

キーワード：北極航路、海氷厚、中期予測、回帰分析

Keywords: Arctic Sea Route, sea ice thickness, mid-term prediction, regression analysis

1. 序論と先行研究

北極海は冬季に海氷でほぼ全域を覆われるが、地球温暖化に伴い、夏季は沿岸部を船舶が航行できるほど海氷域が減退する。それに伴い、北極航路(ASR, Arctic Sea Route)の利用が進んでいる。北極航路にはヨーロッパからロシア沿岸を通って北太平洋に抜ける北東航路と、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の二つがある。Fig. 1[1]に示すように北東航路(別名: 北極海航路)は既存航路と比べて欧州、東アジア間の距離を 38% 短縮することができる。これによって、燃料消費が抑えられ、コストの削減とともに温室効果ガスの排出抑制にもなる。既存航路と大きく異なる点は海氷の存在である。安全で効率的な北極航路の利用のために、また最適航路の探索にも、海氷厚に関する予測が重要である。

Kimura et al.[2]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氷漂流速度を計算し、12 月から 4 月までの海氷の動きから夏季の海氷の密接度分布を予測していた。しかし、海氷の厚さの状況に関しては予測することができない。森[3]は人工衛星データによる海氷厚を推定するアルゴリズムに基づき、5 月と 10 月の海氷厚データで回帰分析を行い、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 月の海氷厚を決定する要素は 5 月の海氷厚しか考慮できていないために、5 月と 10 月の間に海氷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る。

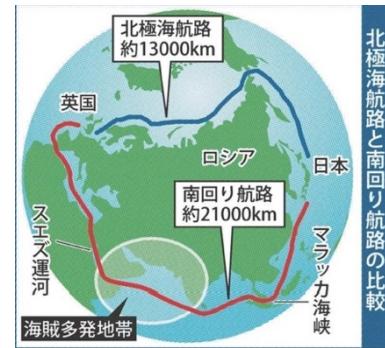


Fig. 1 The comparison between
Northern Sea Route and
Southern Sea Route.[1]

2. 研究目的

北極海における最適航路の探査、またその安全性と経済性を評価するためには、海氷厚の予測が必要である。本研究の目的は、森[3]の手法に基づき、春季までの厚さデータから夏季の海氷厚を予測する手法を提案することである。

3. 使用データ

3.1 人工衛星データ

海氷厚データの計算には、Krishfield et al.[4]によって開発された、マイクロ波放射計のデータをもとに海氷厚を推定する IJIS アルゴリズムを用いた。使用したのは人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System(AMSR-E) と Advanced Microwave Scanning Radiometer 2(AMSR2)による輝度温度と海氷密接度データである。いずれも解像度 10 km、グリッド数 900×900 の毎日のデータである。国立極地研究所の Arctic Data archive System(ADS)[5]を通じて取得した。海氷厚データは、厚さ 20 m ほどの不自然な点が多少見られないので、解像度は 50 km に変換した。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。

また、広範囲で海氷厚データを検証するため、CryoSat-2/SMOS Data Fusion[6]を使用した。これは 2010 年に欧州宇宙機関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 Soil Moisture and Ocean Salinity(SMOS)による観測データから計算した海氷厚データである。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 月までの間のデータは存在していない。

3.2 気象データ

気象データは European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)が公開している ERA-interim[7]再解析データの 10 m 高度風と Skin Temperature を用いた。解像度は 0.25°(最大約 28 km)の毎日のデータである。また、座標系と解像度は海氷厚データと同様に変換する。

4. 予測の準備

4.1 海氷厚データの検証

Krishfield et al.[4]は IJIS アルゴリズム海氷厚データとカナダ側の北極海海域に設置された Upward-Looking Sonar(ULS)による計測値を比較した。結果は IJIS アルゴリズムは秋季かつ冬季に海氷厚が過大評価、夏季が過小評価になっている。この季節によって変化する誤差に対応するため、季節補正を行った。

本研究における海氷厚データと検証データ比較の結果、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。そして、アルゴリズムが提供した季節補正を検証した。結果は全般の誤差が増えたので、不適切と判断した。そこで、北極航路探索に重要な航路上の海氷厚の精度を保証するために、もとの補正手法に基づき、新たな補正手法を提案した。Fig. 2 はそれぞれ補正なしの場合と提案補正手法を用いた場合の 10 月の海氷厚データと検証データとの差を示している。提案手法は氷縁部分の海氷厚の誤差を減少することが出来る。

4.2 予測に用いる月の選定

まず海氷厚データの特徴を調べた。海氷が融解する 7 月から 9 月までの間にメルトボンドによるエラー値が多く見られ、不自然な部分が存在している。よって、この期間の海氷厚データは使用しない。また、Mori (2015)[3]は ULS によって計測された各月の海氷厚の関係性を検証した。結果から、4 月と 9 月、5 月と 10 月の相関係数はほかより高いことがわかった。よって、本研究では 5 月の海氷厚から 10 月の海氷厚を予測する。

5. 海氷・気象要素との関係

5.1 5 月の海氷との関係

5 月に海氷が厚い所は 10 月にも厚いと考え、まずは 5 月の海氷厚と 10 月の海氷厚の相関分析を行った。カナダ多島海、西シベリア海とカラ海の北側に広く正の相関が見られた。しかし有意水準 5% で無相関検定を行った結果、有意な相関関係を持つグリッドの数は多くではなかった。

次に 5 月の海氷密接度と 10 月の海氷厚の相関を考察した。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し、海氷が融解しにくいので厚さも大きいと考えた。その結果、ほぼ氷縁の部分のみに有意な負の相関が見られた。従って、5 月の海氷密接度は 10 月の海氷厚にあまり影響しないことがわかった。

5.2 融解期における気温との相関

一般的には気温が高いと海氷は融解しやすいと考えられる。本研究ではその相関性を考察するために、まずは 2003 年から 2016 年の 5 月から 9 月における気温の月平均値の分布と偏差を把握した。海氷域における月平均気温の偏差は小さいことがわかった。そして 10 月の海氷厚との相関を計算した。その結果、5 月と 6 月の平均気温は 10 月の海氷厚にあまり影響しないことがわかった。7 月と 8 月の場合には広範囲で正の相関が見ら、一般的の認識と異なるが、その原因は見出せなかった。Fig. 3 は 9 月の平均気温と 10 月の海氷厚の相関係数の分布を示している。広範囲で負の相関が見られ、とくにボーフォート海とカナダ多島海、有意な相関関係がたくさん存在している。その辺は北西航路の途中なので、厚さの情報はとても重要である。

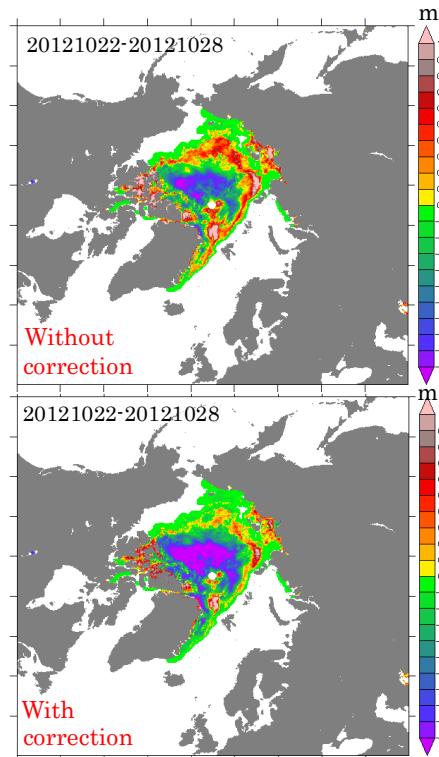


Fig. 2 The differences between
IJIS sea ice thickness and
Cryosat-2/SMOS data fusion

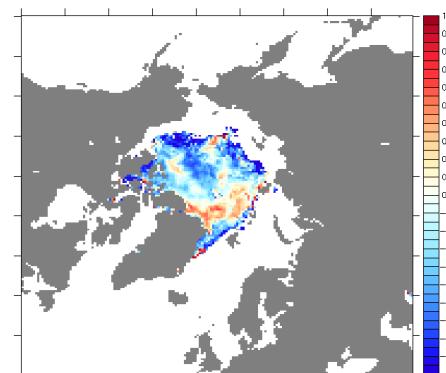


Fig. 3 correlation between average temperature
of Sep. and sea ice thickness

5.3 融解期における風速との相関

風は海氷を動かす主な駆動力といわれており、海水を発散および収束させることにより、海水の厚さに影響すると考えた。本研究ではまず、2003年から2016年の5月から9月における風速の月平均値の分布と偏差を把握した。気温と違い、風の方向、風速の偏差は年によって大きく変動している。そして10月の海水厚との相関を計算した結果、6月、7月と9月の有意な相関関係はあまり見られなかった。5月の有意な相関関係を持つグリッドの数も多くではないが、北東航路上のカラ海にたくさん集まっていた(Fig. 4に示す)。8月には広範囲で負の相関が見られ、とくにグリーンランド北側の海域に有意なグリッドが多く分布していた。

5.4 重回帰分析

以上の解析より、10月の海水厚は単一要素からうまく説明できなかった。従って、本研究では10月の海水厚は5月の海水データと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、全般の相関係数は単一要素を考えた場合より上昇したが、有意な相関係数を持つグリッドの数は必ず増えない。例えば、5月1日海水厚と5月の風速の従属変数として10月の海水厚を考えた場合、ボーフォート海における有意なグリッドの数は減少したが、ラプテフ海には増えた。また、有意なグリッドの総数は減少した。

6. 結果

重相関回帰を用いて、5月の海水厚および5月から9月までの気温・風速の組み合わせの従属変数として、10月の海水厚を考えた場合、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を増えることができる。

例えば5月1日海水厚と9月の気温の従属変数として10月の海水厚を考えた場合、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増えた。しかし、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り、実際の予測には使いにくい。だが、前の検討より、海氷域における9月の平均気温の偏差はあまり大きくないため、実測値の代わりに平均値を用いなら、ある程度予測することができる。

また、5月1日海水厚と5月の風速を考えた場合、北東航路上のラプテフ海における有意なグリッドの数が増加した。

以上より、ここで2017年の5月1日の海水厚データと2017年5月の風速データを用いて重相関回帰を行い、10月1日の海水厚分布を予測した。その際、海氷域の範囲はKimuraの手法[2]から予測した10月1日の海氷域として、その内側の値のみを使用した。Fig. 5は結果を示している。海氷厚分布は概ね一致している。厚さ3m以上の海氷は観測値より多い、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0.6mほどである。北東航路上の海氷厚については、誤差は-0.3mから0.4m程度である。全域におけるRoot Mean Square Error(RMSE)は0.6755m、森の手法[3]の0.7976mより小さくなった。

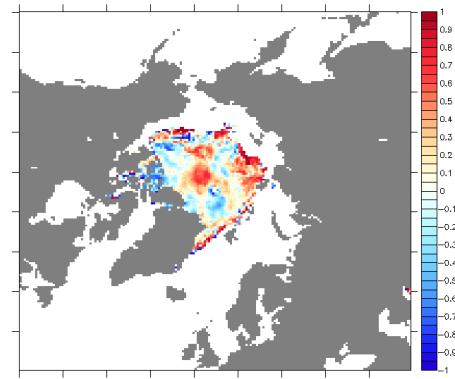


Fig. 4 correlation between average wind speed of May and sea ice thickness

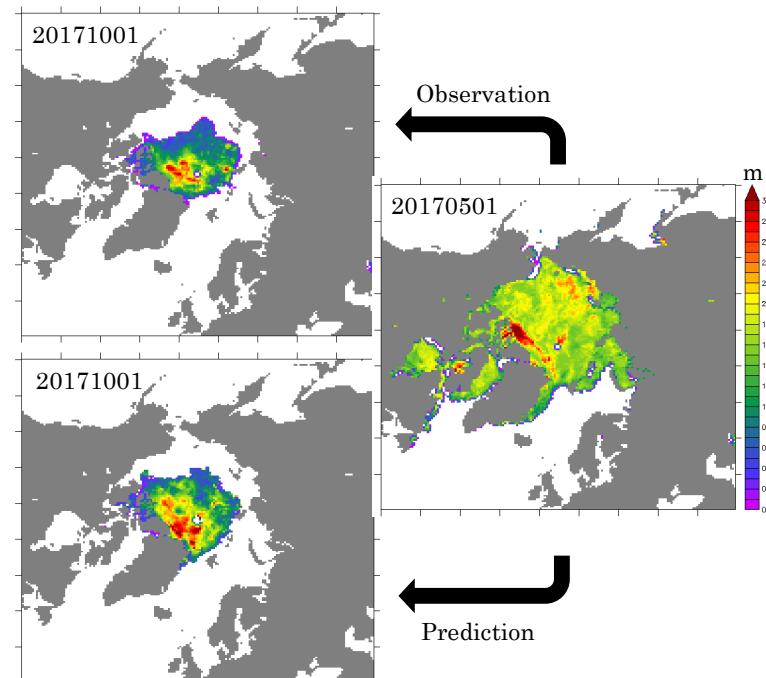


Fig. 5 Sea ice thickness distribution

7. 結論

7.1 まとめと考察

本研究では、人工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と5月から9月までの海水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[3]より小さいことがわかった。

7.2 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が、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是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。

参考文献

- [1] 中野佑哉：修士学位論文、東京大学大学院（2015年）
- [2] Kimura N., A. Nishimura, Y. Tanaka et al., Influence of winter sea-ice motion on summer ice cover in the Arctic, Polar Research 32 20193, 2013
- [3] 森俊彦：卒業論文、東京大学（2014年）
- [4] Krishfield, R. A., Proshutinsky, A., Tateyama et al., 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.
- [5] <http://www.nipr.ac.jp/>
- [6] <http://data.seaiceportal.de/>
- [7] <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>