

AMSR2 データを用いた北極海一年氷の海氷厚推定アルゴリズムの改良

Improving the algorithm to estimate sea ice thickness in Arctic by AMSR2

渡辺 由梨加¹, 舘山 一孝², 泉山 耕³, 佐藤 和敏²
Yurika Watanabe¹, Kazutaka Tateyama², Koh Izumiyama³, Kazutoshi Sato²
Corresponding author: m2052200226@std.kitami-it.ac.jp (Y.Watanabe)

Satellite data shows a decrease trend in sea ice extent and the increase in fraction of first-year ice in the Arctic Ocean. Therefore, sea ice observation by satellite remote sensing is becoming more important for monitoring the global climate change and using the Arctic Ocean routes. This study focuses on thickness of the first-year ice, and improve the accuracy of the algorithm to estimate sea ice thickness in Arctic by AMSR2.

1. はじめに

北極海の海氷は、地球の平均気温が上昇していることに對し減少傾向にあり、特に海氷が融解する夏季の減少傾向は著しい。気象庁¹⁾によると海氷域面積の年最小値は、1979年から2019年の間に1年当たり8.9万km²の速度で減少しており、これは北海道の面積(8.3万km²)に匹敵する。

このような北極海の変化により、北極海には以下に記述する2つのことが期待されるようになった。第一に北極海航路の実利用である。海氷の少なくなる夏季には、北極海の海氷が融解した海域を船が航行できる。北川ら²⁾によると、南周り航路に對し北極海航路は60%程度の航程であるため、経済効果が大きいとされている。

第二に北極海で石油事業の発達が見込まれることである。アメリカ地質調査所(USGS: United States Geological Survey)³⁾によると、北極には約900億バレルの石油、約50兆m³の天然ガス、また約440億バレルの液体天然ガスが未発掘の状態が存在すると推定されている。

北極海航行にせよ石油採掘にせよ、これらの事業を安全に執り行うには海氷を避けることが必須である。そのためには海氷の場所、種類、形状を常に観測する必要がある。また、海氷は気候の影響に敏感に受けるため、それらの海氷に関する情報は、気候を評価する際のパラメータとして使用することができる。北極海は極めて広大であり、環境も過酷であるため、常に現場で観測を行うことは困難である。そのため、人工衛星に搭載したマイクロ波リモートセンシングによる観測が最適であると考えられる。

Krishfieldら⁴⁾は宇宙航空研究開発機構(JAXA:

Japan Aerospace Exploration Agency)の水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1: Global Change Observation Mission 1st-Water "Shizuku")搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)で観測された6GHzから89GHzまでの7つの周波数の輝度温度データを使用して海氷厚推定式を作成した。以下のような2つの輝度温度比(PR: Polarization Ratio)(GR: Gradient Ratio)を用いて海氷厚を算出する。1つ目は36GHzの垂直偏波 TB_{36V} 、36GHz水平偏波 TB_{36H} による比 PR_{36} である。

$$PR_{36} = (TB_{36V} - TB_{36H}) / (TB_{36V} + TB_{36H}) \quad (1)$$

2つ目は36GHzの垂直偏波 TB_{36V} と18GHzの垂直偏波 TB_{18V} による比 GR_{18-36} である。

$$GR_{18-36} = (TB_{18V} - TB_{36V}) / (TB_{18V} + TB_{36V}) \quad (2)$$

これらの比を用いて、 $GR_{18-36} = -0.025$ を閾値とし、それぞれ以下の式で推定海氷ドラフト D_{AMSR2} を算出する。一年氷($GR_{18-36} \geq -0.025$)のとき

$$D_{AMSR2} [m] = 2.34 \cdot \exp\left(\frac{PR_{36} - 0.0019}{-0.083}\right) + 0.085 \quad (3)$$

多年氷($GR_{18-36} < -0.025$)のとき

$$D_{AMSR2} [m] = 0.162 + 0.244 \cdot \exp(-20.79 \cdot GR_{18-36}) \quad (4)$$

舘山ら⁵⁾はこれらのアルゴリズムの精度を高めるため、AMSR-Eの後継機であるAMSR-2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)を使用し、 D_{AMSR2}

¹ 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻

² 北見工業大学 地球環境工学科

³ 北海道大学 北極域研究センター

Graduate School of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Arctic Research Center, Hokkaido University

を全氷厚に換算する式及び海氷厚を表面温度によって補正する式を開発した。

泉山⁹⁾は以上のアルゴリズムの精度を検証するため、Beaufort Gyre Exploration Project (BGEP) による、ボーフォート海の4地点において Upward Looking Sonar (ULS) により計測された海氷ドラフトの日平均データと、先行研究で完成したアルゴリズムのドラフトデータにおけるデータ数のヒストグラムを作成した(図1)。横軸が海氷のドラフトの大きさ、縦軸がそのドラフトに対応するデータの数である。ヒストグラムでは、約60cm付近の推定ドラフトのデータ数がULSによる計測ドラフトに対して大幅に欠けており、反対に約70~90cmの部分にデータが集中している。このことから約1m以下の海氷、すなわち1年氷の推定精度にばらつきがあると言える。

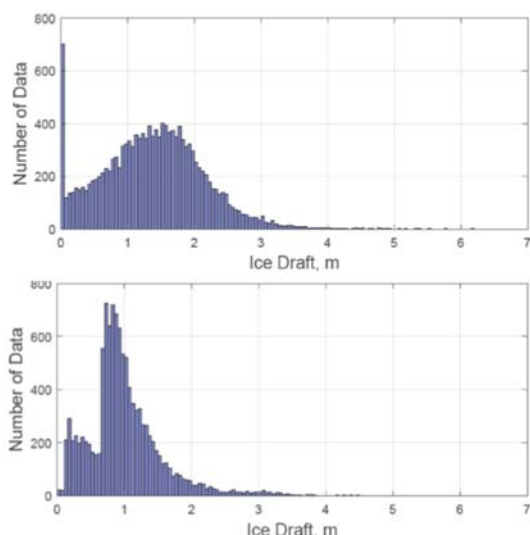


図1 BGEP 日平均ドラフト(上)と先行研究による推定ドラフト(下)の分布. 泉山⁹⁾により作成された。

本研究の目的は、推定精度が低く、気候変動の影響により割合が増加し重要性の増した一年氷に着目し、推定精度を向上させるための新たな推定式を提案することにある。

2. 一年氷の海氷厚推定アルゴリズムの改良

2. 1 使用したデータ

輝度温度のデータはJAXAのAMSR2により計測されたものを使用した。

AMSR2の輝度温度データと比較し推定式を作成するため、定着氷上でドリル掘削により測定された氷厚データ(以下、「実測氷厚」という)を使用した。

これらの測定データには、山崎哲秀氏が2012年から2019年までの期間にグリーンランドで測定したデータと、カナダのIce Thickness Programにより2012年から2016年の期間に測定されたデータを使用した。8地域、10地点での測定データが含まれている。

2. 2 海氷厚推定式の導出方法

AMSE2には、フットプリントという周波数毎のビーム幅に応じた観測エリアがある。このフットプリントの中に陸地が入ると海氷厚の推定に影響するため、AMSR2の輝度温度データ取得場所を、少なくとも陸地から30kmは離して設定する必要がある。山崎氏のデータやカナダのIce Thickness Programの実測氷厚データは、いずれも陸地付近で海氷厚を計測している。そのため、可能な限り現地観測地点から離れないよう衛星データ取得箇所を陸地から30km離れた。このとき、陸地付近の氷厚と衛星データ取得地点の氷厚は同じであると仮定している。また陸地に囲まれており30km離すことのできない地点のデータは、本研究では除外した(図2)。



図2 AMSR2データ(緑)と実測氷厚データ(赤)を取得した地点。数字は各地点間の距離。数字の記載がないものは除外した地点。

はじめに、海氷厚推定アルゴリズムが海氷の密接度や融解度、種類による影響を受けないよう、データの選別を行う。海氷密接度はAMSR2が提供している海氷密接度を使用し、100%未満のデータを排除した。融解度は田中ら⁷⁾によるメルトポンド割合推定式を使用し、30%以上は融解とみなして排除した。また、海氷の種類は式(2)を使用し、一年氷と多年氷に区別した後、多年氷のデータを排除した。

上記の手法によって選別された各周波数の輝度温度データを実測氷厚と比較し、各周波数の輝度温

度データを図 3 に示した。横軸が実測氷厚であり、縦軸が各周波数の輝度温度である。輝度温度は、赤色が水平偏波によるもの、青色が垂直偏波によるものである。10GHz 水平偏波の輝度温度が実測氷厚に対して最も相関が高く、ヒストグラムのばらつきも比較的少ないため、一年氷の海氷厚の変動に敏感であると言える。

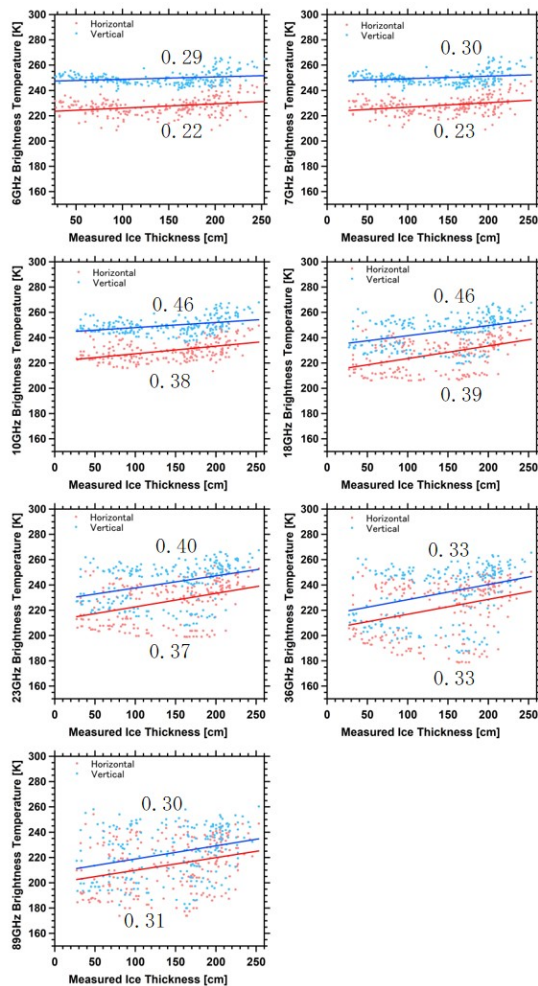


図 3 AMSR2 による各周波数の輝度温度と実測氷厚の関係。赤：水平偏波，青：垂直偏波
図中の数字は相関係数を表す。

この結果をもとに、先行研究で使用された輝度温度比を用いて海氷厚推定式を作成する。10GHz の水平偏波の輝度温度 TB_{10H} と各周波数各偏波の輝度温度を組み合わせる輝度温度比を作成し、それぞれ実測氷厚と比較して決定係数 R^2 を算出した。最も決定係数が高い輝度温度比は 6GHz 垂直偏波の輝度温度 TB_{06V} との比 XPR (Cross Polarization Ratio) であるため、この輝度温度比 XPR_{6V-10H} をもとに推定式を作成する。

$$XPR_{6V-10H} = (TB_{06V} - TB_{10H}) / (TB_{06V} + TB_{10H}) \quad (5)$$

輝度温度比 XPR_{6V-10H} と実測氷厚との関係を図 4 に示した。横軸が実測氷厚、縦軸が度温度比 XPR_{6V-10H} の値、データの色の違いは氷厚の計測地点の違いである。赤色のケンブリッジ・ベイのデータが散乱していることが分かる。ケンブリッジ・ベイの AMSR2 データ取得地点は氷厚計測地点から約 92.81km と著しく距離が離れている。そのため、ケンブリッジ・ベイのデータは両者が離れたことによる海氷厚の変化が誤差を生んだと考えられるため、次の解析では除去した。その他の地点は約 36.38～62.50km 離れているが、すべて許容範囲内であるものとした。

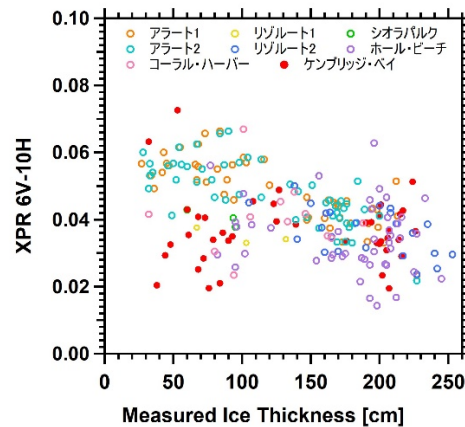


図 4 実測氷厚と輝度温度比 XPR_{6V-10H} の関係図

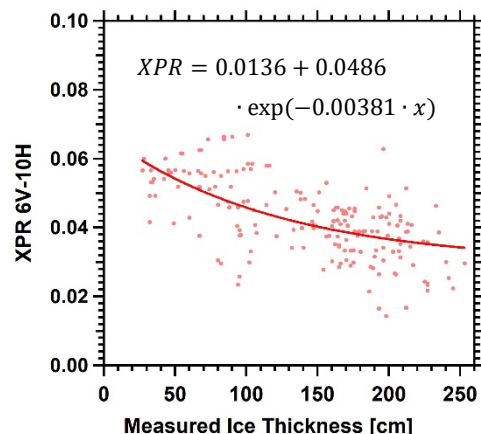


図 5 実測氷厚と輝度温度比 XPR_{6V-10H} の関係図と
回帰曲線

ケンブリッジ・ベイのデータを除去し、データに回

帰直線を描いたグラフを図5に示した。横軸が実測氷厚、縦軸が輝度温度比 XPR_{6V-10H} の値である。この回帰曲線から海氷厚推定式を算出する。

3. 海氷厚推定結果

以上の手法をもとに、実測氷厚と輝度温度比 XPR_{6V-10H} の回帰曲線を使用して作成した一年氷の海氷厚 H_{AMSR2} の推定式が以下である。

$$H_{AMSR2} [m] = -\frac{1}{0.381} \cdot \ln \left(\frac{XPR_{6V-10H} - 0.0136}{0.0486} \right) \quad (6)$$

H_{AMSR2} の推定精度を検証するため、図6を作成した。横軸が実測氷厚、縦軸が H_{AMSR2} である。データの色の違いは、計測地点の違いである。平均二乗誤差は1.77 mである。

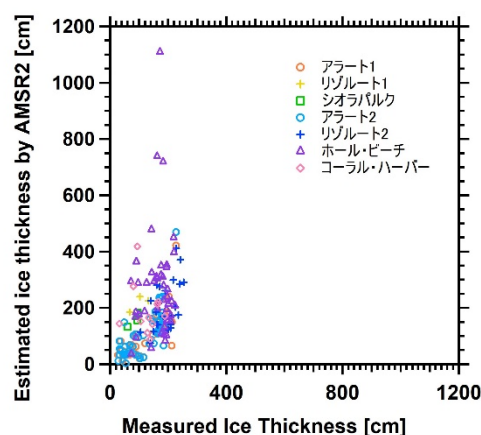


図6 実測氷厚と推定氷厚 H_{AMSR2} の関係図

4. 考察

本研究で作成した推定式は、図6によると海氷厚が1m以下である一年氷については概ね測定値と推定値が同じである。しかし、特定の地点（ホール・ビーチ）で著しく過大評価している。このような過大評価の原因として、本研究で採用した回帰曲線の線形が原因の1つと考えられる。海氷厚の値が小さい範囲の回帰曲線は傾きが大きく、回帰曲線の変化に応じて適切な推定氷厚を示すことができる。しかし、海氷厚の値が大きくなるにつれ、回帰曲線は傾きが小さくなり、わずかに輝度温度の変化で急激に推定氷厚が増加してしまう。

また、図6から地点ごとにばらつき度合いが異なっていることが示された。実測地点とAMSR2データ取得地点が比較的近いアラート1, 2ほどばらつきが少なく、両者の距離が遠いその他の地点はばら

つきが大きい。距離が離れて海氷厚が変化していることがばらつきの主な原因であると考えられる。しかし、両者の距離がさほど遠くないホール・ビーチのデータが著しくばらついていることから、距離だけでなく地点ごとの特性も影響している可能性が考えられる。

【謝辞】

本研究は山崎哲秀氏によって取得された現地観測データとJAXAから提供されたAMSR2データを使用した。

【参考文献】

- 1) 気象庁, 海氷域面積の長期変化傾向 (全球)
URL: http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shinda_n/a_1/series_global/series_global.html (2020年6月18日閲覧)
- 2) 北川弘光, 小野延雄, 山口一, 泉山耕, 亀崎一彦, 2000: 「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, 東京, 扇興社, 1-3.
- 3) United States Geological Survey, 2008: Circum-Arctic Resource Appraisal, Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle
URL: <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/> (2020年3月23日閲覧)
- 4) R. A. Krishfield, A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, M.-L. Timmermans, 2014: 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*, **101**, 1297-1303
- 5) Kazutaka TATEYAMA, Jun INOUE, Seita HOSHINO, Shota SASAKI, Yasuhiro TANAKA, 2018: Development of a new algorithm to estimate Arctic sea-ice thickness based on Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 data, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, **2**, 16-17
- 6) 泉山耕, 2019: KIT アルゴリズムによる海氷厚推定 — 現地観測結果との比較と高度化への考察 —, 私信, 46-51
- 7) Tanaka, Y., K. Tateyama, T. Kameda, and J. K. Hutchings, 2016: Estimation of melt pond fraction over high-concentration Arctic sea ice using AMSR-E passive microwave data., *Oceans*, **121** (9), 7065