

積雪の影響を考慮した海氷厚推定アルゴリズムの改良

Improvement of sea ice thickness estimation algorithm considering the effect of snow cover

渡辺 由梨加¹, 舘山 一孝², 東海林 尚登³

Yurika Watanabe¹, Kazutaka Tateyama², Naoto Shoji³

Corresponding author: m2052200226@std.kitami-it.ac.jp (Y. Watanabe)

本研究では、海氷と海氷上の積雪のマイクロ波放射特性を明らかにするために、積雪の種類や含水率などの状態による影響を調査した。結氷期のサロマ湖上で湖水及び湖水上の積雪について、小型マイクロ波放射計を用いて輝度温度の測定を行った。その結果を応用し、先行研究で開発された海氷厚推定手法に積雪深を用いて補正を施す手法を作成した。衛星搭載レーダー高度計から得られた全氷厚を正解値として使用した場合、本研究によって補正した衛星搭載マイクロ波放射から推定氷厚の平均二乗誤差は0.09mであった。

1. はじめに

1. 1 研究背景

北極海における海氷の厚さの情報は、気候変動調査の指標としてだけでなく、北極海航路や北極海に存在する海底資源開発時の安全確保等に不可欠である。北極海は広大であり海氷上常時観測網を展開・維持することは困難であるため、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。

Krishfiledら¹⁾はAqua衛星搭載マイクロ波放射計(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開発した。このアルゴリズムを用いた場合、一年氷の氷厚推定は過大評価される傾向にあることが分かっており、推定精度のばらつきの原因の1つとして、海氷上の積雪深の多寡や融解による積雪の含水率の変化が影響していると考えられる。

1. 2 マイクロ波と海氷上の積雪

マイクロ波とは周波数が300MHzから300GHzの範囲の電磁波のことを指しており、電場の振動が地面に対して垂直であるものを垂直偏波、水平であるものを水平偏波という。また、マイクロ波放射計によって測定される輝度温度とは、ある波長の輝度と等しい輝度の黒体の温度のことを指す。

これまでマイクロ波と海氷上の融解・積雪の関係と比較した研究が行われており、直木ら²⁾は南

極昭和基地沖において、融解期の多年氷の輝度温度を三菱電機特機システム社製の可搬型マイクロ波放射計(Microwave Millimeter-wave Radiometer/MMRS2)を用いて測定結果、海氷上の積雪が湿雪である場合、雪面の輝度温度は積雪条件にのみ依存することを示した。中川ら³⁾は直木らと同様のMMRS2を用いて結氷期のサロマ湖湖水と湖水上の積雪の輝度温度を測定した結果、湖水の浸み上がりが発生している地点では、積雪深の増加に伴って輝度温度が急激に上昇する傾向を示した。

1. 3 研究目的

本研究の目的は以下の2つである。

- 1) サロマ湖上で湖水のマイクロ波放射を測定し、積雪の性質や含水率による影響を調査する。特に、積雪含水率を定量的に測定してマイクロ波放射率と比較することが、本研究の新規性である。
- 2) AMSR2によって測定された輝度温度と、Cryosat2搭載のレーダー高度計(SIRAL: SAR Interferometer Radar Altimeter)によって推定された海氷厚を比較し、上記の目的による結果を、薄氷域におけるGCOM-W衛星搭載マイクロ波放射計AMSR2の海氷厚推定精度向上に利用できるかどうか検討する。

2. 研究方法

2. 1 MMRS2 サロマ湖実験

本研究は結氷期のサロマ湖においてMMRS2を用いた実験を行った。サロマ湖は面積150.4km²

¹北見工業大学大学院 工学研究科

²北見工業大学 地球環境工学科

³北見工業大学 機械工学科

Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology

の日本で最も大きな汽水湖である。2つの湖口によってオホーツク海につながっており、湖水の塩濃度は31~33psuと、同時期の外海沿岸水とほぼ同程度であると言われている⁴⁾。観測期間は2021年2月22日から26日までである。図1のようにSt.1からSt.5の5地点で実験を行った。

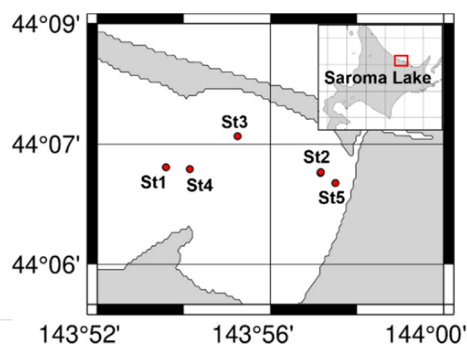


図1 サロマ湖上の各観測地点

実験で使用したMMRS2の観測周波数は6GHz, 18GHz, 36GHzの3周波であり、それぞれの垂直偏波(H)と水平偏波(V)を測定した。また同時に、MMRS2によって赤外温度も測定を行っている。周波数が18GHzの水平偏波(各周波数・偏波に対してここでは18Hというように呼ぶ)のみ、測定装置の不具合のため測定を行っていない。

観測項目は、輝度温度および赤外温度(この2つを観測項目1とする)に加えて、雪温、積雪深、積雪層分布、各積雪層の粒径および含水率(この5つを観測項目2とする)、氷厚、フリーボード、海水の塩濃度および温度(この4つを観測項目3とする)である。積雪含水率の測定には、秋田谷⁵⁾が開発した秋田谷式含水率計を使用した。

観測手順は以下の通りである。ここでは、積雪で覆われており、観測等で変化を加えていない自然状態の湖水観測面を「積雪表面」、積雪層の一部を除去した状態の観測面を「積雪内部層」、すべての積雪を取り除いた後の裸氷状態の観測面を「湖水表面」と呼ぶことにする。初めに、積雪表面において観測項目1を測定する。その測定と同時に進行で積雪断面観測も行う。積雪断面観測では、観測項目2を測定する。その後、測定結果に基づいて最上部の積雪層を2m×2mの領域だけ取り除き、積雪内部層の観測項目1を測定する。同じようにこの作業を湖水表面が露出するまで繰り返す。湖水表面において観測項目1を測定し終えた後、湖水にアイスドリルで穴を開け、観測項目3を測定した。

また、St.3では湖水に1m×2mの穴を開け、解放水面から徐々に成長する海水を数日間かけて観測した。St.2にはいずれの観測日も積雪が見られなかったため、観測項目1および氷厚のみの測定となる。同様にSt.1も積雪が存在しないため、項目1および氷厚のみの測定となる。また、St.3はデータが欠損したため、観測項目1および氷厚のデータのみ解析で使用した。図2に観測風景を示す。



図2 サロマ湖実験の様子

2.2 衛星搭載マイクロ放射計 AMSR2 への応用

本研究ではAMSR2から推定した海水厚(以下、AMSR2海水厚)の比較対象として、SIRALの推定氷厚(以下、SIRAL海水厚)を使用した。SIRAL推定氷厚には、星野ら⁶⁾が作成した海水厚プロダクトESA Level2の推定手法を用いた。

解析の対象とする期間は2021年1月20日から同年3月21日までとした。また、対象範囲はカラ海ヤマル半島沖の緯度72°-74°、経度60°-65°とした。図3にヤマル半島沖のSIRAL海水厚の月平均海水厚分布図を示す。

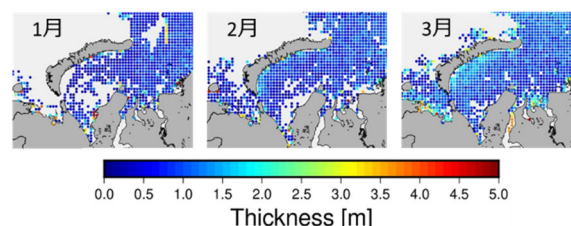


図3 ヤマル半島沖月平均海水厚分布図

3. 研究結果

3.1 MMRS2 用いたサロマ湖実験

表1に各観測地点の観測日および観測場所、氷厚、積雪深の結果を示した⁷⁾。また、図4に湖水の積雪表面を測定した際の放射率と、その時の海水厚(積雪は含めない)を比較したグラフを示す⁷⁾。

温度による輝度温度への影響を無視するため、輝度温度から赤外温度を除いて求められる放射率を用いて比較を行った。

表1 各観測地点の観測日および観測場所、氷厚、積雪深の結果

	St1	St3	St4	St5
日付	2月22日	2月25日	2月26日	2月26日
緯度	44° 07' 27"	44° 07' 55"	44° 07' 25"	44° 07' 13"
経度	143° 54' 14"	143° 55' 43"	143° 54' 43"	143° 57' 45"
積雪深	0.0cm	4.5cm	6.0cm	16.0cm
氷厚	41.5cm	18.0cm	40.3cm	51.0cm

	St2-1	St2-2	St2-3	St2-4
日付	2月23日	2月24日	2月25日	2月27日
緯度	44° 07' 23"	44° 07' 23"	44° 07' 23"	44° 07' 23"
経度	143° 57' 27"	143° 57' 27"	143° 57' 27"	143° 57' 27"
積雪深	解放水面	フラジルアイス	0.0cm	0.0cm
氷厚	解放水面	フラジルアイス	8.0cm	10.5cm

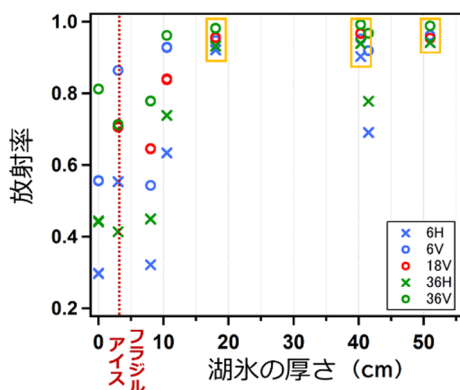


図4 湖氷の厚さと輝度温度の比較

図4のグラフのデータのうち、橙色の四角で囲んでいるデータは、積雪のある地点のデータである。このグラフから、湖氷の成長に従って放射率は増加する傾向にあることが分かる。また、積雪が存在することにより、36V以外のほぼすべての周波数・偏波において放射率が大きく上昇した。

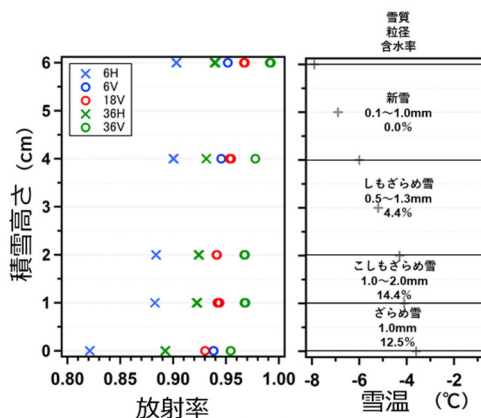


図5 積雪断面観測結果と各積雪層の輝度温度

また、図5には積雪断面観測結果と各積雪層の放射率を示した。結果はSt.4における測定結果を代表例として示している。グラフから、積雪量が多いほど放射率は増加することが分かる。この結果は中川ら³⁾による測定結果と同じ傾向を示した。図5に示した積雪断面観測結果の各項目を各積雪内部層の放射率と比較した結果を、図6に示す。この結果から、積雪深、含水率、雪温、粒径とともに弱いながらも放射率と相関があることが分かる。

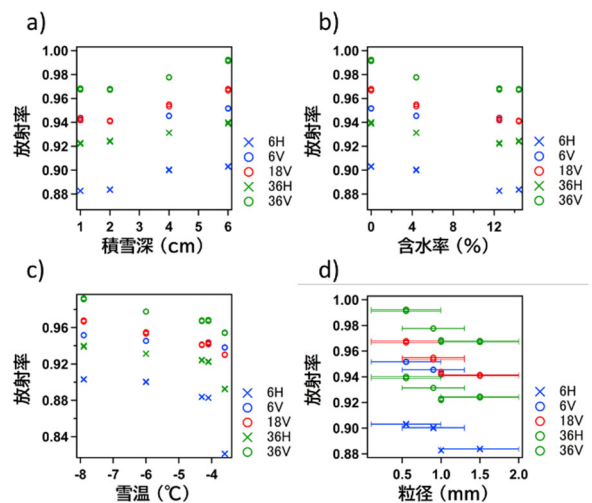


図6 積雪断面観測の各項目と放射率の比較
a) 積雪深, b) 含水率, c) 雪温, d) 放射率

以上の結果から、積雪深を用いて Krishfield¹⁾による推定海氷厚の補正式を作成する。図7に氷厚の推定誤差(推定海氷厚-測定で得た全氷厚(積雪を含める))と測定された積雪深を比較した結果を示す。

積雪深の値が大きくなるに従って、推定海氷厚は過小評価される傾向にあることが分かる。

この近似直線から以下の補正式を作成した。推定氷厚 H'_{MMRS2} (m) の補正式は次式で表される。

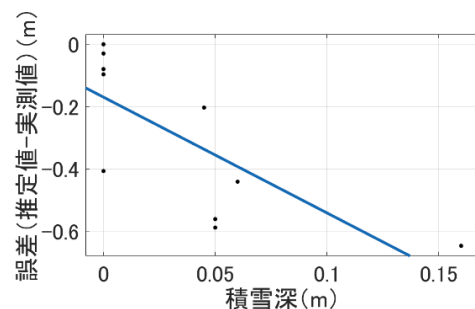


図7 推定誤差と積雪深の比較

$$H'_{\text{MMRS2}} = H_{\text{MMRS2}} + 3.723Z_{\text{snow}} + 0.169 \quad (1)$$

H_{MMRS2} (m) は MMRS2 による推定氷厚であり、 Z_{snow} (m) は実測積雪深である。補正前の H_{MMRS2} と実測全氷厚との相関係数は 0.69, 平均二乗誤差は 0.15m であったが、補正後の H'_{MMRS2} と全氷厚の相関係数は 0.76, 平均二乗誤差は 0.02m と、この補正式を適用することによって海氷厚の推定精度に改善がみられた。

3.2 衛星搭載マイクロ放射計 AMSR2 への応用

前節で得られた手法を衛星搭載センサに応用して、AMSR2 全氷厚の推定誤差と ESAL2 データセット⁹⁾から提供されている積雪深 $Z_{\text{ESAL2, snow}}$ (m) を比較した結果を図 8 に示す。

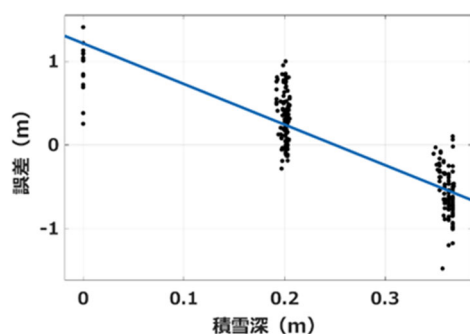


図 8 氷厚推定誤差と積雪深の比較

AMSR2 海氷厚の方が SIRAL 海氷厚よりも過大評価をする傾向にあるものの、図 7 と同様に積雪深と誤差に負の相関が見られた。この結果から、AMSR2 海氷厚 H_{AMSR2} (m) を積雪深から補正した H'_{AMSR2} (m) の推定式 (2) を作成した。

$$H'_{\text{AMSR2}} = H_{\text{AMSR2}} + 4.843Z_{\text{SIRAL, snow}} - 1.574 \quad (2)$$

(2) 式を適用することによって、 H_{AMSR2} と SIRAL 海氷厚との相関係数と平均二乗誤差はそれぞれ 0.12, 0.43m だったところ、補正された H'_{AMSR2} と SIRAL 海氷厚の場合は 0.85, 0.09m と推定精度に大幅な改善がみられた。

4. まとめ

本研究では海氷上の積雪の状態とマイクロ波の輝度温度の関係性を調査した。サロマ湖実験の結果、積雪量が多くなるほど、輝度温度は増加する傾向にあり、6GHz の水平偏波が最も顕著に積

雪の影響を受ける傾向にあることが分かった。

また、積雪深が先行研究の誤差要因のひとつであることが得られた。現段階では ESAL2 の積雪深データを利用して補正をすることができたが、ESAL2 データの観測頻度、空間分布では毎日の観測に不十分である。将来的には高分解能な客観解析データの積雪深データを使用し、AMSR2 海氷厚を補正する手法の開発を目指したい。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業、認可番号 JP20H00206, JAXA 第 2 回地球観測研究公募および Arctic Challenge for Sustainability II (ArCS II) プロジェクトの支援を受けた。また、JAXA および ESA から提供されたデータを使用した。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 直木和弘, 長幸平, 牛尾収輝, 2017: 南極昭和基地沖における融解期の多年氷のマイクロ波輝度温度特性, *雪氷*, **79** (1), 31-42.
- 3) 中川洋輔, 2019: 海氷上の積雪のマイクロ波放射特性について, 北見工業大学社会環境工学科学位論文 (未公刊), 2-14.
- 4) 館山一孝, 榎本浩之, 2011: 衛星リモートセンシングによるサロマ湖の結氷状況の推定とその経年変化, *土木学会論文集 B3* (海洋開発), **67**(2), 727.
- 5) 秋田谷英次, 1979: 熱量計による積雪含水率計の試作, *低温科学 物理篇*, **36**, 103-111.
- 6) 星野聖太, 館山一孝, 田中康弘, 2018: 北極海における衛星高度計 Cryosat-2 SIRAL を用いた海氷厚推定手法の改良と南極海への応用, *雪氷*, **80**(4), 297-309.
- 7) Y. Watanabe, K. Tateyama, N. Shoji, 2021: Microwave remote sensing of first year ice with snow cover, *The International Workshop on Modern Science and Technology*, in press.