

グリーンランド・シオラパルク周辺における海水厚変動の推定

Estimation of sea ice thickness fluctuation around Siorapaluk, Greenland

原田 睦史¹, 舘山 一孝², 山崎 哲秀³

Yoshifumi Harada¹, Kazutaka Tateyama², Tetsuhide Yamasaki³

Corresponding author: m3245200202@std.kitami-it.ac.jp (Y. Harada)

To determine the total amount of sea ice, it is necessary to measure sea ice extent and thickness, but sea ice thickness observations have not been sufficiently conducted. In this study, we estimated the sea ice thickness variation around Siorapaluk, located in northwestern Greenland, over a total of 10 seasons from September to May 2013-2023. Sea ice thickness were estimated from freezing degree days by applying Stefan's equation and the estimation accuracy was verified by comparing with in-situ sea ice thickness.

1. はじめに

近年、地球規模の温暖化傾向が顕著であり、温暖化が進むことによって雪氷圏では大きな影響を受けることが予測されている¹⁾。特に北極域では年平均気温の上昇傾向と海水面積の急激な減少傾向が報告されており²⁾、海水の減少や薄氷化が北極域の温暖化をさらに加速させることが懸念されている。

北極域での温暖化の指標として海水の総量の変動を把握するために面積だけでなく海水厚の測定の把握が必要であるが、観測は十分に行われていない³⁾ため、観測データが不足している地点・期間の海水厚を推定する必要がある。

他方で、グリーンランド北西部に位置するカナックやシオラパルクでは、過去に強風の影響によりフィヨルドの定着氷が大規模に流出し、定着氷上に設置していたカラスガレイ漁のための小屋や漁具が流されるなどの被害が生じた⁴⁾。このように定着氷の流出は現地の住民の生活基盤である漁業や冬期の氷上交通に大きな影響をもたらしており、定着氷の流出条件および流出後の海水厚の成長を明らかにすることは重要である。

本研究は現地の気象データからフィヨルドの定着氷の海水厚の推定精度を検証し、定着氷流出イベント時の気象条件を調査することを目的とした。

2. 使用データ

本研究で使用した観測データの詳細を表1に示す。海水厚データは、アバンナット北極プ

ロジェクトの山崎哲秀氏により現地で取得されたものであり、2013年から2023年にかけて図1に示す1-1～3-1のシオラパルク沖のロバートソン・フィヨルド内の定着氷上で測定された。

表1 使用データおよび各観測期間

使用データ	現場観測		再解析
分類	海水厚	気象	ERA5
手法	ドリル掘削	自動気象計	モデル
頻度	数日	5分	1時間
年	2013～2023	2019～2023	2013～2019
期間	11月～5月	9月～5月	9月～5月

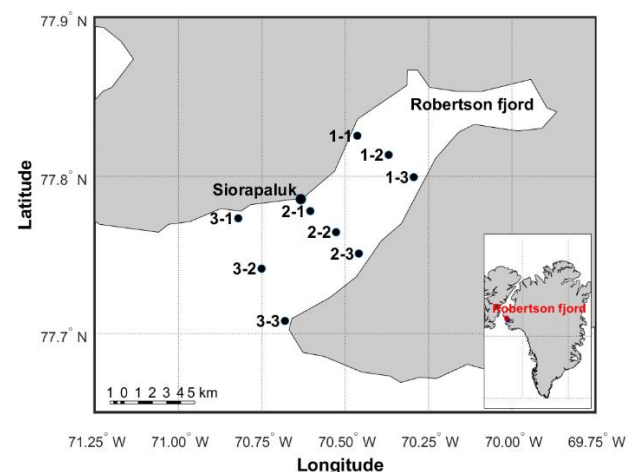


図1 シオラパルクとロバートソン・フィヨルド内の海水厚測定地点(1-1～3-1)の位置。

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 アバンナット北極プロジェクト

Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Avangnaq Arctic Project

気象データは、山崎哲秀氏によって 2019 年からシオラパルクの北緯 77°46'58.1", 西経 70°40'52.8" の地点に設置された自動気象計 (HOBO U30-NRC Weather Station) により、5 分ごとに記録された気温や風速、風向データを使用した。2019 年以前の気象データは、再解析データである ERA5 を用いた。

3. 解析手法と結果

3.1 シオラパルク周辺における海水厚の特徴

シオラパルクにおいて過去 10 シーズンでロバートソン・フィヨルド上の定着氷で実測された積雪深と海水厚の時系列を図 2 に示す。前提として、これらの定着氷上のデータは人が安全に定着氷上を補講可能な時期に観測されたものであるため、概ね海水が十分に成長する 11 月前後から、融解し始める 5 月頃にかけて測定が行われている。図 2 に示すように、海水厚は例年 100~120cm 程度まで成長する。最大海水厚が 100cm に満たなかった 2020~2021 年は、強風により大規模な定着氷の流出イベントが発生した年であり、2 月に定着氷が流出したことによって開放水面が再び成長したことに起因すると考えられる。

また、海水厚の変動傾向としては海水厚の最大値に注目すると 2014~2015 年に観測された値を上回ることがなく、緩やかに減少していることがわかった。図 2 の黒棒で示される積雪深は、2016~2017 年以前と以降を見比べると、2016 年~2017 年以降の方が増加していることがわかった。

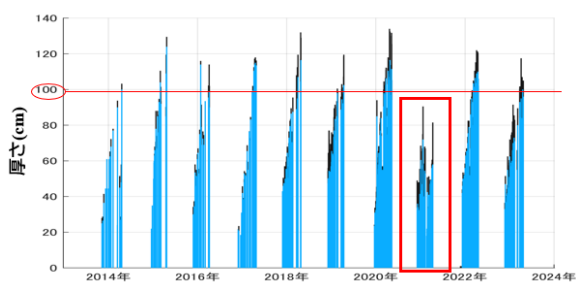


図 2 全氷厚変動 (2013~2023 年)

青線：海水厚 黒線：積雪深 赤棒：最大海水厚が 100cm に満たなかった 2021~2022 年を表す

3.2 Stefan の式による海水厚の推定

実測されていなかった日の海水厚を推定するために、純氷の成長を熱伝導理論から説明する Stefan の理論^{5,6)}を用い、日平均気温 T_a [°C]から

海水厚 h [m]を推定した。氷表面の気温 T_a と底面の水温 (-1.8°C) との温度差を θ [°C]とすると、氷内部の温度勾配 θ/h 面のために氷の下では熱伝導によって上方に奪われる融解潜熱 L [J kg⁻¹]に応じて氷の厚さが dh [m]だけ成長する。

海水の熱伝導度を K [W m⁻¹ °C⁻¹], 海水の密度を ρ [kg m⁻³]とすると、次の式(1)が導かれる。

$$h^2 = \frac{2K}{L\rho} \int_0^t \theta dt \quad (1)$$

$\int_0^t \theta dt$ は積算寒度 (°C・day) と呼ばれる。 $\frac{2K}{L\rho}$ を μ^2 とすると、 μ は氷厚係数と呼ばれ、海水の成長のしやすさを表している。

以上から、海水厚を推定するためには氷厚係数と積算寒度が必要であることがわかる。現地の観測から海水の熱伝導度や融解潜熱、密度を実測することは困難であるため、本研究は実測された海水厚を気象計から得られた積算寒度で除すことによって経験的に氷厚係数を算出し、観測期間で平均することで平均氷厚係数 $\bar{\mu}$ を求めた。

積算寒度を計算する際には積算開始日を設定する必要がある。本研究では Stefan の式(1)を用いた推定海水厚と実測海水厚の相対誤差の平均が各年で最も小さくなるよう積算開始日を調整し、結氷開始日として扱った。その結果を図 3 (a) ~ (j) に示す。(d) 2016 年~2017 年と(h) 2020 年~2021 年は定着氷がそれぞれ 12 月と 2 月に流出したことが山崎氏により記録されている。これらの年では流出した日を結氷開始日とし、積算寒度を再計算している。

図 3 (a) ~ (j) のグラフの赤線は気温、緑線は Stefan の式による推定海水厚、青点は実測海水厚を意味している。図 2 の各年における結氷開始日、氷厚係数の平均値 $\bar{\mu}$ 、相対誤差を表 2 にまとめた。 $\bar{\mu}$ は 1.59 から 2.35 の値を示し、定着氷の流出が起きた 2016~2017 年と 2020~2021 年の $\bar{\mu}$ は小さい値を示し、他の年と比較して相対誤差が大きくなった。これは定着氷の流出イベントの前後で同一の $\bar{\mu}$ を用いて海水厚を推定していることが原因と考えられる。最大海水厚が 100cm を超える 2014~2015 年と 2019~2020 年、2021~2022 年は 2 を超える $\bar{\mu}$ の値を示し、比較的小さい相対誤差を示した。

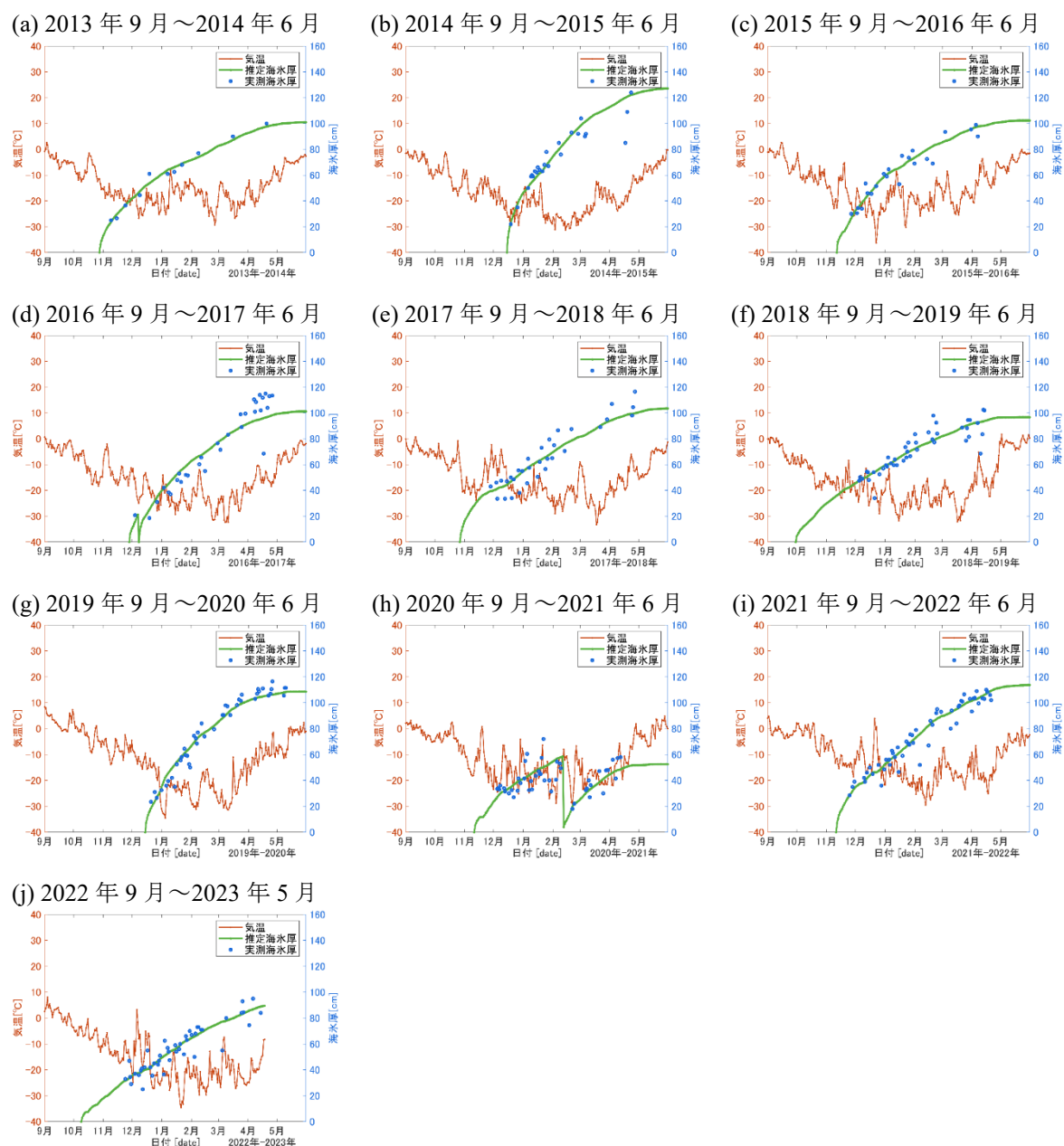


図3 2013 年から 2023 年のシオラパークにおける気温とフィヨルド定着氷の海水厚の変動
赤線：AWS 気温，青点：実測海水厚，緑線：Stefan の式を用いた推定海水厚

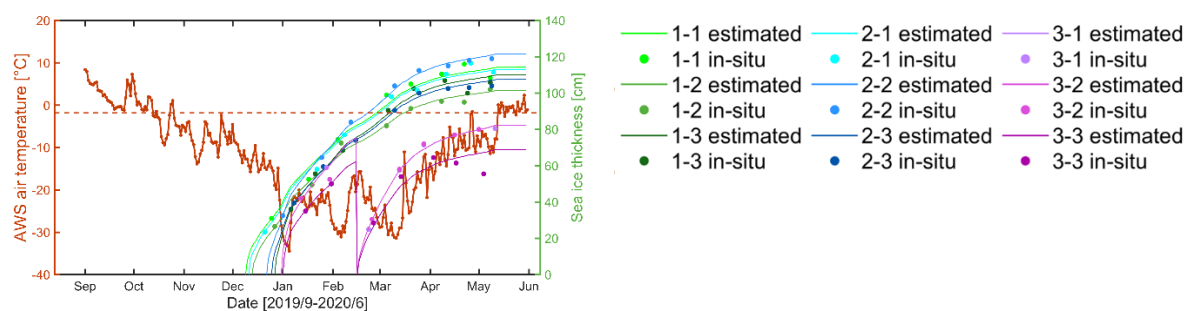


図4 3-1 と 3-2 の 2 地点で定着氷の流出イベントが発生した 2019 年 9 月から 2020 年 5 月のシオラパークにおける気温と地点別のフィヨルド定着氷の海水厚の変動

表2 Stefan の式を用いて算出した各値

観測シーズン	結氷開始日	$\bar{\mu}$	相対誤差 (%)
2013-2014 年	10 月 28 日	1.81	5.20
2014-2015 年	12 月 15 日	2.35	7.86
2015-2016 年	11 月 12 日	1.93	8.12
2016-2017 年	11 月 28 日	1.87	13.3
2017-2018 年	10 月 27 日	1.80	11.7
2018-2019 年	9 月 30 日	1.59	7.70
2019-2020 年	12 月 15 日	2.14	7.88
2020-2021 年	11 月 11 日	1.59	17.2
2021-2022 年	11 月 11 日	2.25	7.38
2022-2023 年	10 月 9 日	1.63	10.3

3. 3 地点ごとの海氷厚の違い

図3は図1に示すフィヨルド上の地点の違いを考慮しておらず、観測場所の相違により全体的に相対誤差が大きくなってしまったと考えられる。図4は3-1と3-2地点で定着氷の流出イベントが発生した2019年9月から2020年5月の海氷の成長を地点別に示した結果である。流出イベントが発生しなかった地点の推定海氷厚は実測値と良く一致していた。流出した地点においても地点別に海氷厚を推定した方が実測値と相関が高くなった。

3. 4 定着氷流出の気象条件

図3(h)に示す2020~2021年は2月に定着氷の8地点が流出する大規模流出が発生した。図4にERA5のデータから得られた地上風の日最大風速、平均風速の中央値、日平均風速を示したものである。流出が観測された2021年2月11日において、平均風速の最大値は、シーズンの最大の23.15 m/sを記録した。また、定着氷の流出が起きた前後4日間で

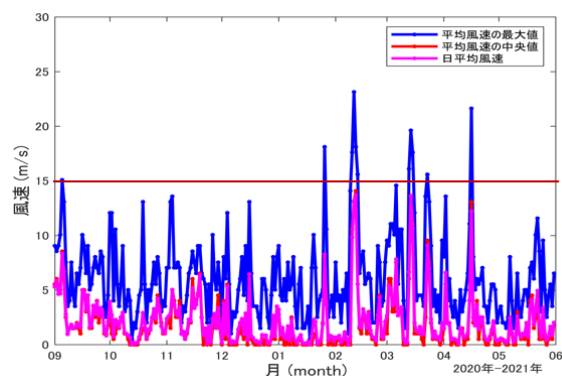


図5 風速の変動 (2020年9月~2021年6月)

平均風速の最大値は15 m/s 付近に達しており、長期間にわたるブリザードが定着氷流出につながったと推測される。

4 考察と今後の課題

氷厚係数が同じであれば、積算寒度から海氷厚を推定できる。しかし、同じ場所においても氷厚係数は年によって変動していた。その要因として、年により積雪量や風向・風速が異なること考えられる。

今後は風速だけでなく風向や降雪量などの気象要素を追加して検討し、より正確な海氷厚推定を目指したい。

【謝辞】

本研究では山崎哲秀氏から頂いた現地の海氷観測記録・気象観測のデータを使用した。

【参考文献】

- 1) 長幸平, 直木和弘, 2022: 地球温暖化の現状と衛星による海氷観測の重要性, 画像電子学会誌, **51** 巻3号, 218-225.
- 2) 気象庁, 海氷域面S系の長期変化傾向 (全球) https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/series_global/series_global.html (2024年7月5日閲覧)
- 3) 渡邊達也, 館山一孝, 2021: UAV-SfM 測量による海氷フリーボード計測の試み, 日本雪氷学会誌, **83** 巻2号 155-167.
- 4) 的場澄人, 山崎哲秀, 2018: 2016年12月にグリーンランド北西部カナック村で生じた海氷流出事故と漁業被害—グリーンランド北西部における社会・自然環境と生業の変化—, 北海道の雪氷, **37**, 51-54.
- 5) J.Stefan, 1889: Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere, Sitzungsber der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, **98**, 2a, 965-983.
- 6) 福富孝治, 楠宏, 田畑忠司, 1950: 海氷の研究 (第6報): 海氷の厚さの増加について, 低温科学, **3**, 171-186.