

橈型電磁誘導式氷厚計を用いた

サロマ湖氷厚の測定精度と全氷厚の経年変動

Accuracy assessment of a sled-borne electromagnetic induction device and long-term variations of total ice thickness in Saroma-ko Lagoon

松本 大輝¹, 館山 一孝²

Daiki Matsumoto¹ and Kazutaka Tateyama²

Corresponding author: m3265400185@std.kitami-it.ac.jp (D. Matsumoto)

¹北見工業大学大学院 工学専攻, ²北見工業大学 先進工学科

¹ Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology, ² Department of Integrated Engineering, Kitami Institute of Technology

Global warming has caused a decline in sea ice worldwide. In Saroma-ko Lagoon, the duration of complete ice cover has decreased, and ice-free winters have become more frequent. Accurate measurements of total ice thickness are important for estimating total ice volume and monitoring long-term changes in ice conditions. This study evaluated the accuracy of a sled-borne electromagnetic (EM) induction device by comparing its measurements with drill-hole observations. The device achieved a mean error of 8 cm and an RMSE of 18 cm, although larger errors were observed in shallow-water areas. Long-term observations from 2013 to 2026 revealed an overall thinning trend in the total ice thickness of Saroma-ko Lagoon.

1. はじめに

サロマ湖は北海道東部に位置し、北半球における海水の南限であるオホーツク海と 2 つの湖口でつながる日本最大の汽水湖である (図 1). 冬季には氷厚 1m 以下の薄い湖水が結氷する. 広大な湖面の氷厚を効率的に観測するため, 橈型電磁誘導式氷厚計 (橈 EM) を用いた観測が 2000 年以降継続して実施されており, 観測精度の向上を目的とした精度検証が行われてきた. 先行研究では, 水深が 6m 以浅では湖底の影響を受けて大きな測定誤差が生じること¹⁾, 湖水の浸み上りが観測精度に影響を及ぼすこと²⁾が報告されている. しかし, これらの結果を複数年にわたって統合解析し, 橈 EM の観測精度を総合的に評価した研究は行われていない.

一方, 地球温暖化の影響により, サロマ湖では全面結氷期間の短縮や全面結氷しない年の増加が報告されている³⁾. 図 2 に全面結氷期間およ

図 1 サロマ湖の位置

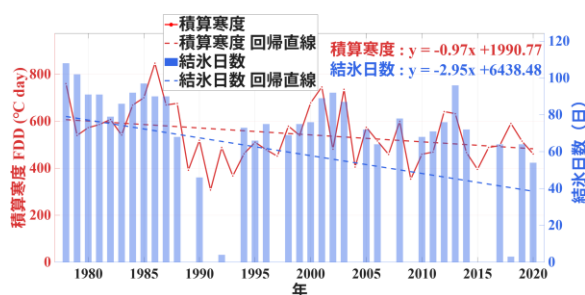
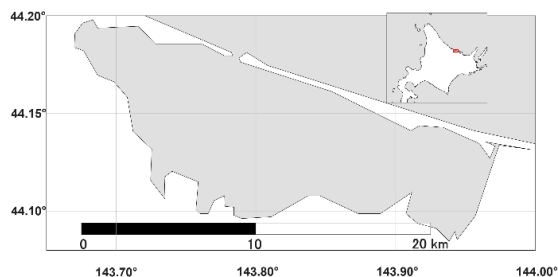


図 2 サロマ湖の全面結氷日と積算寒度経年変化. サロマ湖養殖漁業協同組合(2025)と気象庁の AMeDAS データを使用した.

び積算寒度の経年変化を示す. 両者はいずれも減少傾向を示しているものの, 湖氷厚の長期的な変動特性については十分に明らかになっていない.

そこで本研究では, 複数年にわたる橈 EM の校正データを用いて観測精度を検証するとともに, 2013~2026 年に取得した湖氷厚データと積算寒度との関係および湖氷厚の長期変動特性を明らかにすることを目的とした.



2. 使用データ

本研究では、複数年にわたり取得したドリル掘削による実測氷厚と橈 EM による観測氷厚を用いた。また、観測当時の結氷状況を把握するために、Landsat8 衛星画像を使用した。サロマ湖における観測期間および使用した衛星画像の撮影日を表 1 に示す。

橈 EM 観測には、Geonics 社製 EM-31 SH を使用した。積算寒度は、気象庁 AMeDAS 常呂観測所の日平均気温を用い、12 月から翌 2 月までの期間について算出した。

表 1 観測期間と衛星画像の撮影日

観測期間	衛星画像撮影日
2013 年 2 月 16 日-23 日	3 月 23 日
2014 年 2 月 21 日-25 日	3 月 5 日
2015 年 2 月 25 日-3 月 6 日	3 月 8 日
2016 年 2 月 26 日-3 月 3 日	3 月 10 日
2018 年 2 月 22 日-28 日	2 月 28 日
2021 年 2 月 21 日-28 日	2 月 4 日
2022 年 2 月 21 日-27 日	2 月 28 日
2024 年 2 月 25 日-3 月 5 日	3 月 8 日
2025 年 2 月 23 日-27 日	2 月 28 日
2026 年 2 月 20 日-27 日	2 月 18 日

3. 観測原理と観測方法

3. 1 観測原理

EM は、海水と海水の大きな電気伝導度の違いを利用し、受信コイルから海氷底面の海水までの距離 Z_E を測定する。送信コイルから発生した一次磁場は海氷と海水の境界で誘導電流を生じ、この電流によって形成される二次磁場を受信コイルで検知する。測定された二次磁場の強さは見かけの電気伝導度 σ_a として記録され、 σ_a が大きいほど氷厚は薄く、小さいほど厚くなる関係にある。

3. 2 EM の較正方法

EM 較正は、EM センサ高 Z_L を段階的に変化させ、 Z_E に対する σ_a を測定する作業である。この関係から較正曲線式を作成し、観測された σ_a から Z_E を算出し、 Z_E から Z_L を引くことで全氷厚 Z_{SI} に換算する。サロマ湖では、湖水の塩分が年や時期により変化するため、観測期間ごとに較正を実施した。

3. 3 橈 EM の観測方法

橈 EM をスノーモービルで牽引し、牽引速度 20 km/h、測定間隔 1 秒で連続的に全氷厚を観測し

た。実測点では橈 EM を停止させ、その直近で積雪深の測定とドリル掘削による氷厚測定を行い、これを全氷厚の実測値として橈 EM による観測値との比較に用いた。

4. 解析結果

4. 1 キャリブレーション結果

EM 較正データが取得できた各年の較正曲線を図 3 に示す。また、較正曲線式から全氷厚推定式を導出した。その一般式を式(1)に、各年の較正係数を表 2 に示す。

$$Z_E = a - \ln(\sigma_a - b)/c \quad (1)$$

図 3 は較正によって得られた Z_E と σ_a の対応関係を表している。2013 年の較正曲線は、他年度と比べ異なる形状を示した。2013 年は観測を開始した年にあたり、較正における Z_E の変化幅が十分ではなかったことが原因と考えられる。

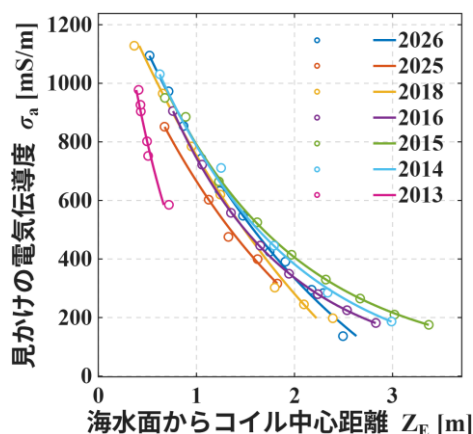


図 3 EM 較正結果

表 2 各年の較正係数

年	a	b	c
2013	4.850	-127.000	1.570
2014	10.307	3.871	0.717
2015	10.263	36.518	-0.715
2016	8.774	28.385	-0.846
2018	19.646	707.981	0.391
2025	13.959	318.642	0.532
2026	16.666	456.544	0.455

4. 2 橈 EM の測定精度

測定精度の評価結果を図 4 に示す。横軸はドリル掘削による全氷厚の実測値、縦軸は較正によって導出した氷厚推定式から算出した EM による

全氷厚の観測値である。図4の回帰直線は解析を行った年度全体の結果を示しており、相関係数は $R=0.845$ と強い相関がみられ、RMSE は 0.082m と高い測定精度が得られた。

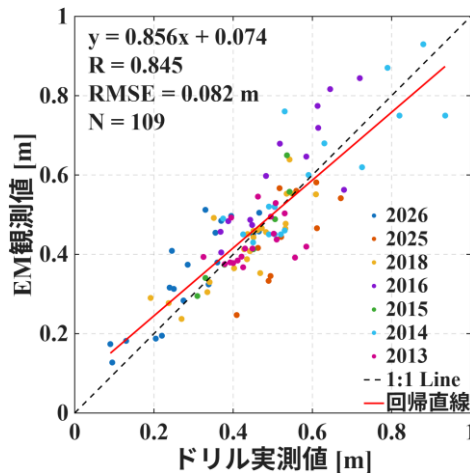


図4 測定精度結果

年度別にみると、実際に観測された全氷厚の範囲 (0.2~1.0m) を十分にカバーするように較正を実施した年では、相関係数が高く RMSE も小さい傾向がみられた。一方、較正データの取得範囲が限定された年では、観測精度が低下する傾向がみられた。

4. 3 全氷厚の分布図と経年変動

図5は、橇 EM 観測による全氷厚分布図を、その観測当時の Landsat8 の衛星画像に重ね合わせたものである。本研究では、湖口付近を除いて湖の大部分が結氷した年を全面結氷と定義した。これは、湖口部ではオホーツク海との海水交換に伴い流速の増加により結氷が抑制されることが報

告されており⁴⁾、多くの年で湖口付近が未結氷となるためである。解析期間中に全面結氷した年は 2013, 2014, 2021, 2022, 2024, 2026 であり、この 10 年間では全面結氷年数の顕著な減少は認められなかった。一方、2018 年以降は全面結氷した年であってもサロマ湖東部の氷厚が薄く、観測の継続を途中で断念した事例が多くみられた。特に 2026 年は氷厚が薄く、湖表面に多数のクラックが確認された。

全面結氷しなかった年は、2015, 2016, 2025 である。2015 年は湖の半分も結氷せず、氷厚も著しく薄かった。2016 年は全面結氷に至らなかったものの、未結氷年の中では結氷面積が広く、湖中央付近でも氷厚が 0.4m と比較的厚い状態であった。2025 年は、結氷面積、氷厚がともに解析期間中で特に小さい年であった。

図6は、2026年2月に観測した橇 EM 全氷厚と Landsat8 の衛星画像を示し、比較的多くの年度で観測を実施できた SN5 と EW4 の地点を示している。

図7は SN5 および EW4 地点の2地点の全氷厚、結氷状況、積算寒度の経年変化を表している。積算寒度が約 $400^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ を下回る年では、全面結氷に至らない場合が多くみられた。また、EW4 地点では全氷厚に減少傾向が認められ、積算寒度の減少傾向と対応していた。一方、SN5 地点では氷厚は増加傾向を示し、積算寒度との明瞭な相関は認められなかった。これは、SN5 地点が湖東岸近くの水深が浅い水域に位置し、冬季に卓越する北西風によるフラジライスの集積など、積算寒度以外の要因の影響を強く受けるためと考えられる。

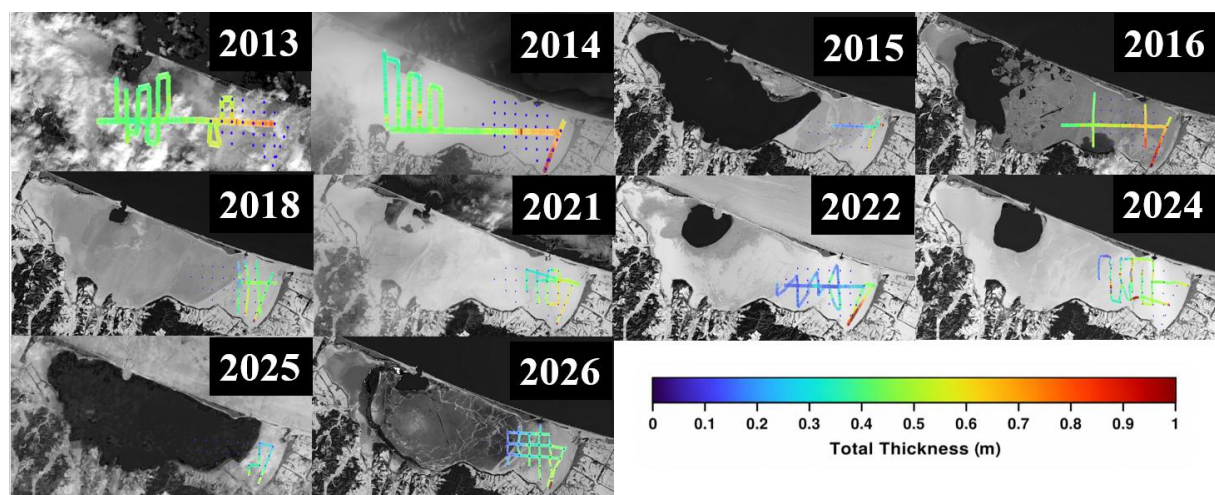


図 5 全氷厚分布図

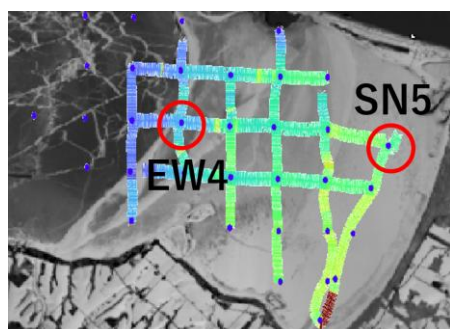


図 6 SN5 と EW4 地点の位置

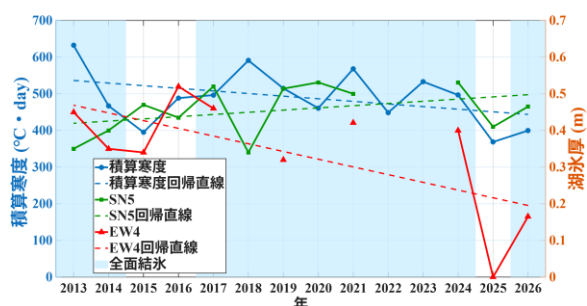


図 7 サロマ湖水厚, 積算寒度, 結氷状況経年変動

5. まとめ

本研究では, 橈 EM を用いて複数年にわたる較正データの解析および測定精度の検証を行うとともに, サロマ湖における全氷厚, 結氷状況および積算寒度の経年変動について解析した. その結果, 橈 EM は RMSE が 0.082m と高い測定精度を有することが示された. また, 較正では, 観測対象となる全氷厚の範囲を十分にカバーし, 観測頻度の高い全氷厚範囲で密に実施することで, 測定精度が向上することが示された.

長期変動解析では, 積算寒度が $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ を下回る年は, 全面結氷に至らない場合が多いことが明らかとなった. また, 湖東岸から離れた EW4 地点では, 積算寒度と全氷厚がともに減少傾向を示し, 積算寒度の低下が全氷厚の減少に影響している可能性が示唆された. 一方, 湖東岸近傍の SN5 地点では, 積算寒度と全氷厚に明瞭な関係は認められず, これは浅水域であることや風下にあたるため冬季に卓越する北西風によってフラジルアイスが集積しやすいなど, 積算寒度以外の地理的要因が氷厚形成に大きく影響しているためと考えられる.

【謝辞】

本研究は, 北極域研究強化プロジェクト「ArCSIII」北極域の保全と利用課題サブ課題 2「氷海変動の実態把握」による支援を受けて実施した. ここに記して謝意を表する.

【参考文献】

- 1) 館山一孝, 白澤邦男, 宇都正太郎, 河村俊行, 石川正雄, 高塚徹(2005): 電磁誘導式氷厚計を用いたサロマ湖広域氷厚観測. 北海道の雪氷, **24**, 57-60.
- 2) 北桃生, 館山一孝, 星野聖太, 中村和樹, 牛尾収輝(2016): 橈型電磁誘導式氷厚計を用いたサロマ湖水厚の測定に関する研究. 北海道の雪氷, **35**, 111-114.
- 3) サロマ湖養殖漁業協同組合(2025): 結氷状況. <https://saromako.org/data/index.php> (2025 年 9 月 24 日閲覧)
- 4) 河合孝治, 正木智, 原文宏, 大島香織, 古屋温美, 佐伯浩(1997): サロマ湖内結氷盤氷縁における流入流水の運動に関する研究. 海洋開発論文集, **13**, 795-800.
- 5) Tateyama, K., K. Shirasawa, S. Uto, T. Kawamura, T. Toyota, and H. Enomoto (2006): Standardization of electromagnetic-induction measurements of sea-ice thickness in polar and subpolar seas. *Annals of Glaciology*, **44**, 240–246.