

電磁誘導式氷厚計を用いた 2013 年サロマ湖の湖氷観測

Observation of lake ice thickness in the Saroma-ko lagoon using the Electro-Magnetic induction device

館山一孝（北見工業大学），星野聖太（北見工業大学大学院），中村和樹（日本大学），
山川紘一，戸村嘉実，森祐太（日本大学大学院）

Kazutaka Tateyama, Seita Hoshino, Kazuki Nakamura, Koichi Yamakawa, Yoshimi Tomura, Yuta Mori

1. はじめに

サロマ湖は面積 150.35km^2 、周囲長 90.24km と我が国で最大の汽水湖で、オホーツク海と 2 つの湖口で通水している海跡湖である。湖水の塩分は、流入する河川の河口周辺を除いて外洋とほぼ同じ値 ($31\sim33\text{psu}$) を示し、湖氷は外洋の海氷とほぼ同じ物理特性を有している¹⁾。そのため、雪氷、海洋生物等の様々な分野の研究機関によって外洋に比べて安全な海氷観測フィールドとして利用されている。

筆者らは衛星リモートセンシングを利用した氷厚推定技術の開発を目的として、サロマ湖氷上において衛星観測と同期した現場データの取得を行ってきた。サロマ湖の広範囲な氷厚分布を効率的に取得するために、2005 年より電磁誘導式氷厚計 (Electro-Magnetic induction device, 以下 EM) を橇に搭載し、氷厚を連続測定する手法の開発に取り組んできた²⁾。本研究は、初めて EM を用いたサロマ湖の広域観測に成功した 2013 年の観測結果と測定精度について報告する。

2. 観測エリアと観測方法

2013 年のサロマ湖は例年よりも早く 1 月初旬に全面結氷し、2 月にはほぼ全域にわたってスノーモービルでの走行が可能な厚さを示した。

本研究は 1km 間隔で格子状の観測地点を設定し、2013 年 2 月 15 日から 20 日にかけて図 1 に丸印で示すように 117 点の観測地点を得た。湖口付近の空白地域は、氷厚が 10cm 以下の薄氷域で、スノーモービルでのアクセスが不可能であった。

各観測地点において、最初に積雪深を観測し、ドリル（アイスオーガ）を用いて湖氷表層の塩分サンプルを採取した後、湖氷を貫通する孔を開け、氷厚と水位を測定した。EM を用いた氷厚測定は、図 2 に示すように EM との干渉を避けるために金属部品を一切使用しない FRP 製の橇に EM を搭載し、長さ 10m のナイロンロープを用いスノーモービルによって時速 20km で

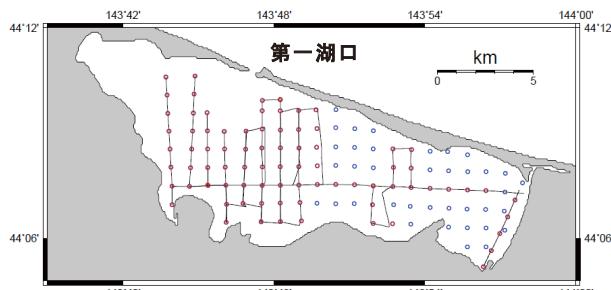


図 1 サロマ湖氷上の観測地点。丸印で示した地点はドリルを用いた実測地点。赤丸と実線はドリルと EM の両方で観測した地点。青丸はドリルのみのデータがある地点。

牽引した。測定間隔は 1 秒とした。前述の掘削地点毎に 30 秒間静止し、EM 観測と実測氷厚データを比較して EM 観測の精度を検証した。

3. 観測結果

1) 2013 年のサロマ湖の結氷状況

2013 年は 1 月 8 日に全面結氷し、4 月 13 日まで 96 日間の結氷期間であった³⁾。図 3 は過去 48 年間のサロマ湖の全面結氷期間と時期の経年変動を示している。この図が示すように 1980 年以前は全面結氷期間が 100 から 130 日間に達し、全面結氷時期も 12 月中であった。1980 年以降、全面結氷時期が遅くなり、期間も減少した。1988 年以降は大幅な減少が起り、全面結氷しない年が現れ始め、これまで外洋の流氷が湖内に流入するのを妨げていた湖氷の不足により、湖内の養殖施設が流入した流氷によって破壊され、数千万円から数億円の被害が生じた。2001 年より湖口に流氷をせき止めるアイスブームが導入され、流氷害は解消された。

このような全面結氷期間が減少している背景であったにもかかわらず、2013 年の全面結氷期間は過去 25 年間で最長となった。また、これまで薄氷や未結氷であった地域においてもスノーモービルでの走行が可能な厚さに達し、サロマ湖のほぼ全面を観測することができた。

2) 氷厚、積雪深、水位の空間分布

図 4 から図 6 に全 117 地点の実測結果を示す。氷厚の平均値は $32.7 \pm 8.9\text{cm}$ 、積雪の平均値は $10.0 \pm 4.9\text{cm}$ であった。

図 4 は実測氷厚の空間分布を示している。氷厚分布は南東部で最も厚く、第一湖口付近が最も薄い特徴を示した。これは結氷期に北西風が卓越し、氷晶が風下側の南東部に堆積するため、最も早く結氷が起きるためである。南東部でも特に北側と南側に 60cm を越える厚い氷が見られるが、これは流入河川の影響で塩分が低いことが原因である。第一湖口付近は外洋と接しているため水温が高く、結氷時期が最も遅い。そのため最も薄い分布を示している。

図 5 は実測積雪深の空間分布を示している。氷厚分布と異なり、南西側や南側に積雪深が多い傾向を示している。これは遮蔽物のない湖氷上では風が強く、積雪分布は



図 2 EM を搭載した FRP 製の橇

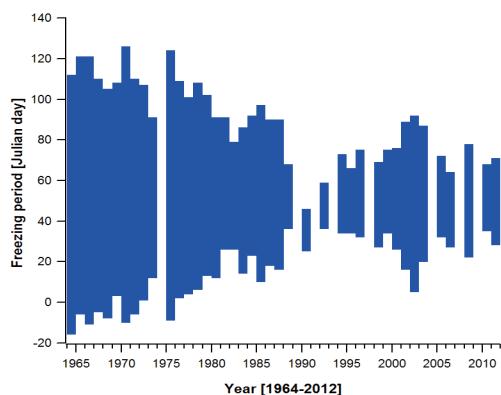


図 3 1964 年から 2012 年のサロマ湖の全面結氷時期と期間。縦軸は 1 月 1 日を 0 とした Julian day で表している。負の値は前年の 12 月を意味する。サロマ湖養殖漁業協同組合 (2013) のデータ³⁾を使用。

風による再配分の影響を大きく受けていることが考えられる。そのため陸上から風によって輸送される雪の量が多い風上(南西部)や陸地付近(南部)で積雪が多い分布を示している。

図6はドリルで湖氷に開けた穴の水面の高さを示している。北部を除いてほとんどの地点で負の値を示している。これは水面の高さが湖氷の表面よりも高いことを意味しており、実際これらの地点で孔を開けると湖水が溢れ出す。サロマ湖の湖氷は周囲の陸地と接しているため、外洋の海氷のようにアイソスタシーが成り立っておらず、積雪の重みで下向きに撓んでいるような状態になっているためである。このような負の水位を示す地点では、湖氷と積雪の境界に湖水を多く含んだ濡れ雪層(スラッシュ)が存在する。この高塩分の濡れ雪はEM観測において氷厚を過小評価してしまう誤差原因になることが知られている⁴⁾。

3) EM 観測結果

図7に実測全氷厚(積雪深+氷厚)とEM観測から得られたみかけ電気伝導度を比較した結果を示す。全氷厚とEMのみかけ電気伝導度の間には負の指數関数の関係が見られる⁴⁾。

本研究ではサロマ湖の全氷厚の変化幅が50cm程度と狭いものの、みかけ電気伝導度は600から1000mS/mの比較的大きなダイナミックレンジを示し、良好な測定対象であることがわかった。両者の関係にばらつきが見られるが、測定日が異なる場合があったことや、地吹雪のため掘削孔の跡が消えてしまい比較する場所に若干のずれが生じていることが原因であると考えられる。この結果から得られたEMのみかけ電気伝導度と実測全氷厚の関係式を用いて、EMから全氷厚を推定した。

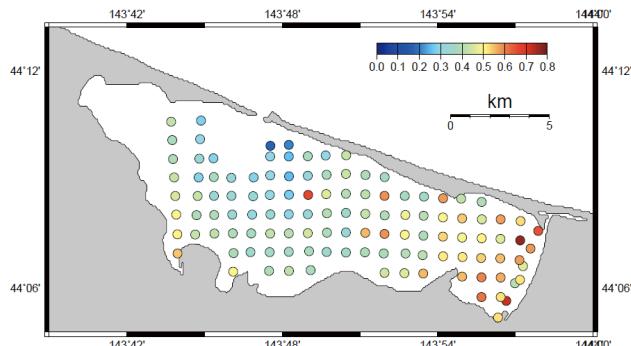


図4 掘削による実測氷厚分布

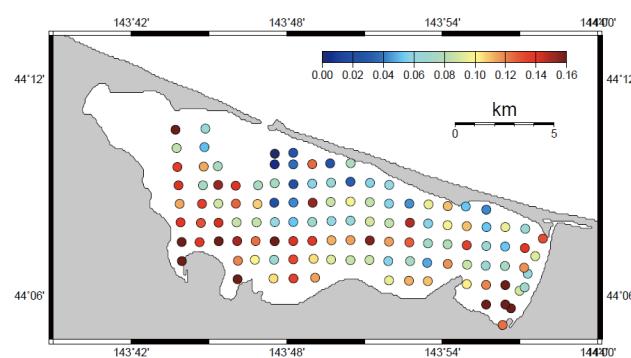


図5 実測積雪深分布

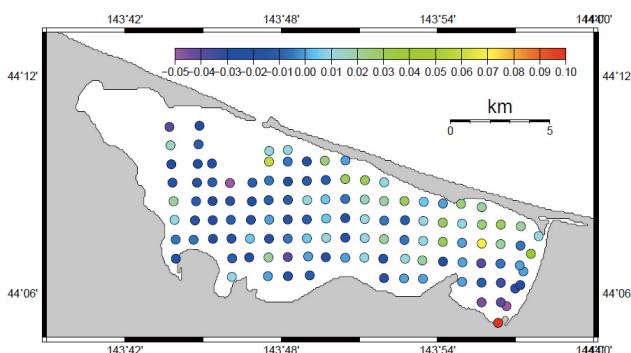


図6 掘削による実測水位分布

図 8 に EM 全氷厚と実測全氷厚の分布比較の例として、東西ライン（約 20km）の結果を示す。EM 全氷厚は厚い氷に対して過大評価している傾向が見られたものの、概ね良い一致を示しており、最小自乗誤差は 9cm であった。過大評価の原因として、塩分を含み EM 観測の過小評価の原因となるスラッシュが多く存在するデータをもとに EM の氷厚換算式を定めたために、スラッシュのない厚い氷で過大評価が生じたことが考えられる。

4. まとめ

今回の結果から、EM を橇に乗せて連続的に氷厚を測定する手法は効率的に詳細な氷厚分布を得られるもの、異なる湖氷状態、特に塩分を多く含む濡れ雪層の有無によって測定精度が左右されることがわかった。今後は 2 次元の多層モデルを EM の氷厚推定式に導入するなど、誤差を小さくする工夫が必要である。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 24510005 の助成を受けたものです。

【参考・引用文献】

- 1) 白澤邦男, 藤芳義裕, 前川公彦, 2002 : サロマ湖の水理および海氷環境, 月刊海洋号外 海氷生態系, 号外 30, 50-61.
- 2) 館山一孝, 自澤邦男, 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, 7-10.
- 3) サロマ湖養殖漁業協同組合ホームページ, 2013 : サロマ湖の過去の結氷記録
<http://saromako.sakura.ne.jp/kepyou.pdf>
- 4) Haas, C., Gerland, S., Eicken, H. Miller, H. 1997: Comparison of sea-ice thickness measurements under summer and winter conditions in the Arctic using a small electromagnetic induction device, *Geophysics*, 62, 749-757.

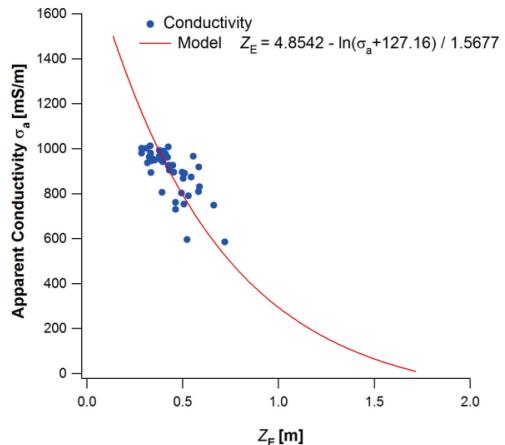


図 7 実測全氷厚（積雪深+氷厚）と EM 観測から得られたみかけ電気伝導度の比較。赤線は近似曲線。

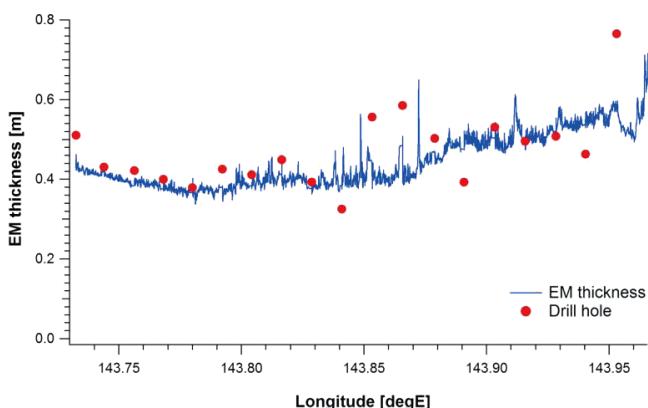


図 8 東西ラインにおける EM 全氷厚（青実線）と実測全氷厚（赤点）の分布比較の例。