

サロマ湖における結氷面積と湖水厚の変動

Fluctuations in ice cover and thickness in Saroma-ko lagoon

野原 大我¹, 舘山 一孝²

Taiga Nohara¹, Kazutaka Tateyama²

Corresponding author: m3255200222@std.kitami-it.ac.jp (T. Nohara)

¹北見工業大学大学院 工学専攻, ²北見工業大学大学院 地球環境工学科

¹ Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology,

² School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

In Saroma-ko lagoon, both the number of fully ice-covered days and the ice-covered period are decreasing. This study aims to clarify changes in ice area and lake ice thickness using observational data and assess potential impacts on local fisheries under future climate change. Using the Landsat satellite imagery from 1973 to 2025, we investigated long-term changes in ice coverage, spatial distribution of ice thickness, and their relationship with accumulated freezing degree-days. Our results indicate that full ice cover typically occurs after mid-February, with the eastern part of the lagoon, which freezes earlier, tended to have thicker ice than the western part. Since 2006, the frequency of ice-free years has increased, accompanied by a continued decline in both the number of freezing days and average ice thickness.

1. はじめに

近年, 地球温暖化による地球の環境の変化が深刻な問題として取り上げられている. 地球温暖化の進行に伴い高緯度地域での海水や湖沼の融解が進行しており, 結氷期間の短縮や氷厚の低下が顕著に観測されている¹⁾. サロマ湖は北海道東部に位置する汽水湖であり(図1), 2つの湖口を通じてオホーツク海と接続しているため, 湖水は外洋と類似した塩分を呈している. サロマ湖は日本有数のホタテガイの養殖地であり, 水産業は地域経済を支える重要な基幹産業である. 近年, サロマ湖においても全面結氷開始日が遅くなり, 全面結氷期間が減少していることが報告されている²⁾. しかしながら, サロマ湖の結氷特性に関する実測データに基づく詳細な分析は依然として不足しており, 今後の気候変動の進行に伴う水産業への影響についても明らかになっていない. そのため, 衛星観測による定量的な結氷面積の長期モニタリング³⁾と実測氷厚データを用いた解析が重要となる. 本研究の目的は, サロマ湖の結氷面積や湖水厚の変動を実測データのない過去に遡って調べるために, 衛星データや気象データを用いることでサロマ湖の結氷面積や湖水厚の経年変化を明らかにすることである.

2. 使用データ

本研究ではサロマ湖の結氷状況および気象に

関する複数の観測データを用いた. 結氷面積に関しては, アメリカ地質調査所が提供する1973年から2025年までのLandsat衛星画像を用いて解析を行った. 全面結氷日および解氷日は, 1960年から2020年の期間において, サロマ湖漁業協同組合による目視観測データを用いた. 湖水厚については, 2013年から2025年の期間に北見工業大学によって観測された実測値を使用した. 日平均気温に関しては, 1978年から2025年の気象庁アメダスデータを用いた. 観測月は, Landsatによる結氷面積は1月から3月, 全面結氷・解氷日は12月から4月, 湖水厚は2月から3月, 気温は9月から3月までである. サロマ湖での湖水厚の観測は1km間隔で行われた. 日平均気温についてはサロマ湖付近にある3地



図1 サロマ湖の位置

点のアメダスを使用した。

3. 解析手法と結果

3. 1 結氷面積の算出

サロマ湖における 1973～2025 年までの結氷面積の変動は、Landsat を用いて算出された。Landsat のバンド 4 (B4:0.76～0.90 μm) とバンド 5 (B5:1.55～1.75 μm) から NDWI (Normalized Difference Water Index) を計算することで、結氷部分と未結氷部分を区別した。NDWI 画像とは水体の検出に特化したリモートセンシングの指標の一つであり、主に衛星画像や航空写真を使って湖・川・湿地などの水域を明瞭に抽出するために用いるものであり⁴⁾、次式から求められる。

$$NDWI = \frac{B4 - B5}{B4 + B5} \quad (1)$$

NDWI の画像例を図 2 に示す。サロマ湖内の色の明るい部分が未結氷部分であり、図中の赤い枠で囲っている部分が結氷部分である。作成した NDWI 画像に Otsu 法を適用することで湖内の結氷面積を求めた⁵⁾。Otsu 法とはヒストグラムのクラス間分離度が最大になるときの閾値を求めることにより自動で閾値を設定する手法である。閾値が妥当か確認を行うにあたってサロマ湖が全面結氷した年を Otsu 法で解析し、サロマ湖の面積と一致するかを見ることで妥当性を検証し、その後すべての年に適用して結氷面積を算出した。結氷面積の変動を表したものを図 3 に示す。図の赤い点が 1 月中旬の結氷面積であり、青い点が 2 月中旬の結氷面積である。図の破線を上回った場合に全面結氷とした。また、点のない年は晴れた日の衛星画像を入手できなかったため結氷面積を算出できなかった年である。図 3 からサロマ湖は 2 月中旬以降に全面結氷をすることが多いことがわかる。また、2006 年ごろからは全面結氷しない年が増加していることが分かった。



図 2 Landsat の NDWI 画像 (2025 年 2 月 23 日)

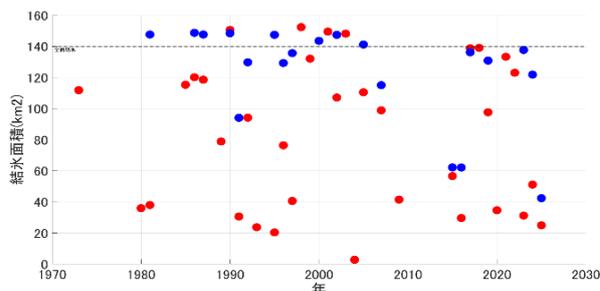


図 3 1973～2025 年の結氷面積の変動

青線：全面結氷面積

赤点：1 月中旬の結氷面積

青点：2 月中旬の結氷面積

3. 2 湖氷厚の分布

2013～2025 年のサロマ湖での実測データを用い、湖氷厚分布図を作成した。サロマ湖での湖氷厚の観測は 1km 間隔で行われており、最大で約 140 地点を観測した 2013 年の分布図を代表例として図 4 に示す。この図からサロマ湖は西部で湖氷が薄く、東部では湖氷が厚い傾向があることが分かった。湖氷厚の分布に差が出た原因として、結氷初期にフラジルアイスなどの新成氷が風の影響を受けて風下側に輸送される効果が考えられる。気象庁のアメダスから佐呂間の風向・風速を調べた結果を図 5 の風配図に示す。ここでは代表例としてサロマ湖北西部の佐呂間アメダスの結果を示している図 5 から風速 7m 以上の強い風が発生する場合は西方向からの風であることが多く、この風によって湖の東部に新成氷が輸送されることで東部が早く結氷し、湖氷が厚くなり湖内での湖氷厚に差が出ると考えられる。

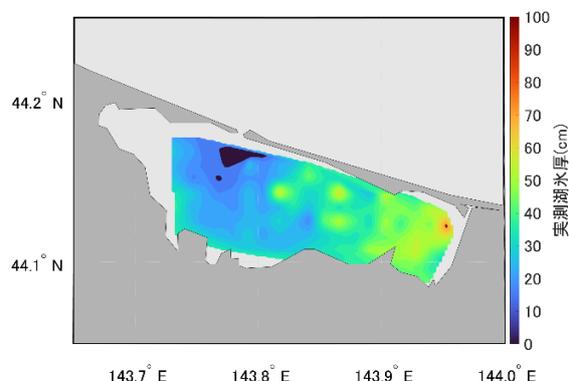


図 4 サロマ湖の湖氷厚の分布

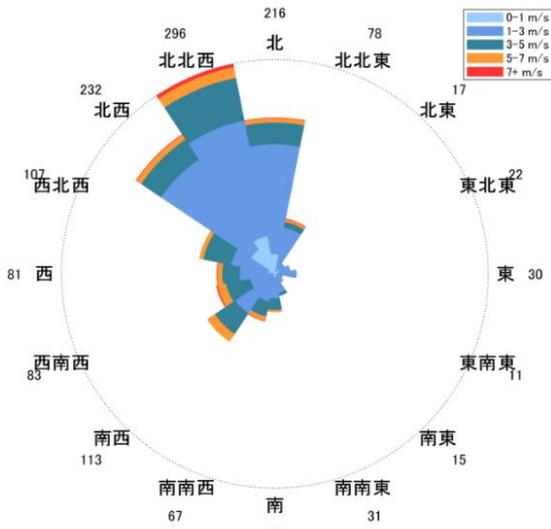


図5 佐呂間アメダスから作成した風配図

3.3 積算寒度と湖氷厚の変動

気象庁のアメダスから入手した日平均気温を用いて1978~2025年までの積算寒度を算出した。積算寒度とはある期間にわたっての気温の低さの蓄積を表す指標であり、海水の結氷温度である -1.8°C 以下の日平均気温を積算したものである。その後、サロマ湖での現地観測を行った2013~2025年のすべての年で共通していた7地点（以降、共通観測地点と称す）を用いて各地点の氷厚係数を算出し、積算寒度を用いて過去の湖氷厚の変動を推定した。

湖氷の表面温度を T ($^{\circ}\text{C}$)と定義する。 T はサロマ湖湖水の結氷点を -1.8°C と仮定し、結氷点を基準して負の方向に測った氷温を意味する。積算寒度は ΣT ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)で表される。氷の表面温度の代わりに日平均気温 T' ($^{\circ}\text{C}$)を用いた $\Sigma T'$ を計算することで、湖氷厚 I (cm)の近似解が得られる⁶⁾。

氷厚係数 μ ($\text{cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{day})^{1/2}$)とは氷の成長のしやすさを表しており、氷の熱伝導率を k 、氷の融解潜熱を l 、密度を ρ_i とすると(2)式で定義される⁶⁾。

$$\mu^2 = \frac{2k}{l\rho_i} \quad (2)$$

μ と $\Sigma T'$ から I は、(3)式で求めることができる⁶⁾。

$$I^2 = \mu^2 \int_0^t T' dt \quad (3)$$

現地で k や ρ_i を実測して μ を観測することは困難であるため、本研究では(3)式を用いて実測氷厚 I_i (cm)とアメダスの日平均気温データから計算した $\Sigma T'$ を用い、各共通観測地点における推定氷厚係数 μ' を求めた。

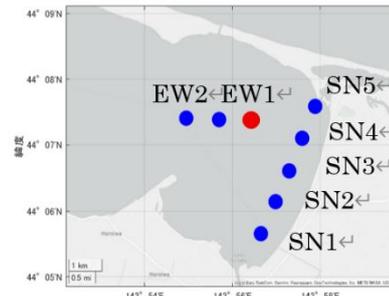


図6 2013年から2025年の共通観測地点

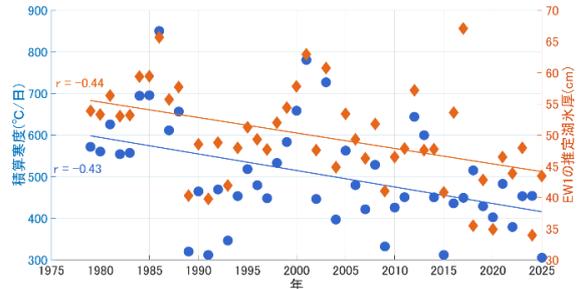


図7 積算寒度 $\Sigma T'$ (青点)と推定湖氷厚 I_e (赤点)の変動

(3)式で求めた地点ごとの μ' と過去のアメダス気温データから $\Sigma T'$ を用いることで、実測データのない1978~2012年までの推定湖氷厚 I_e (cm)を推定した。共通観測地点のうちEWにおける $\Sigma T'$ と I_e の経年変化を図7に示す。 $\Sigma T'$ は約14年周期で増減を繰り返す、期間全体を通じて減少傾向を示していた。 $\Sigma T'$ の変化に伴い、 I_e も周期性と減少傾向を示した。

4. まとめと今後の課題

本研究ではLandsat衛星画像から結氷面積の算出し長期間の結氷面積の変動を調査した。現地観測データを基に得られた氷厚係数と、日平均気温から計算した積算寒度を用いて、過去の湖氷厚の変動を推定した。その結果、全面結氷年の減少と積算寒度の減少に伴う推定湖氷厚の薄氷化が確認された。

今後の課題として、より正確にサロマ湖の結氷面積と湖氷厚の変動を調べるために、過去に取得されたサロマ湖湖水の塩分や積雪分布データを活用する。また、日平均気温を用いた積算寒度からだけでは湖氷厚推定に正確性に欠けるため、熱収支など他の要素を加えた解析を行うことでより信頼性の高い解析を行うことを目指したい。

【参考文献】

- 1) Field, C.B., Barros, V.R., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D. (2014) : Technical Summary. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 46.
- 2) サロマ湖養殖漁業協同組合 (2025) : 結氷状況.
<https://saromako.org/data/index.php> (2024 年 8 月 10 日閲覧)
- 3) 舘山一孝, 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), I_727-I_731.
- 4) Gao, B. C. (1996) : NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, **58** (3), pp. 257–266
- 5) マクセルフロンティア株式会社 (2021) : 2 値化(大津の 2 値化).
<https://www.frontier.maxell.co.jp/blog/posts/4.html> (2025 年 5 月 3 日閲覧)
- 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.