

論 文

摩周湖の全面結氷条件の解明およびそれに基づく 2021 年 2 月の全面結氷日の予測

亀田 貴雄^{1*}, 蜂谷 衛², 仁平 慎吾^{1,3}, 細川 音治⁴

要 旨

摩周湖の結氷状況を近くの展望台で 1974 年から 2021 年まで毎年観測した。その結果、摩周湖は 48 年間で 27 回全面結氷をしており、全面結氷率は 56.3% であった。摩周湖に近い川湯と弟子屈のアメダスデータを用いて、摩周湖が全面結氷する条件を調べた結果、川湯アメダスの 2 月の月平均気温が -8.9°C 以下になると、95.5% の確率で全面結氷年を推定できることがわかった。弟子屈アメダスの日平均気温の 61 日間の移動平均での年最低値が -7.8°C 以下になった時にも 95.5% の確率で全面結氷年を推定できることがわかった。摩周湖は一定の日積算寒度に到達すると全面結氷するのではなく、前年の夏の気温の影響を受けて、全面結氷に必要な日積算寒度に変化することもわかった。この関係を用いて 2021 年の摩周湖の全面結氷日を 2020 年 9 月 1 日、2021 年 1 月 1 日、1 月 16 日時点で予測した。その結果、全面結氷日はそれぞれ 2 月 22 日、2 月 10 日、2 月 8 日と予測できた。2021 年は 2 月 14 日に全面結氷したため、予測誤差はそれぞれ +8 日、-4 日、-6 日であり、前後 1 週間程度の予測誤差となった。現在、摩周湖周辺では 2 月の月平均気温が上昇しているため、摩周湖が全面結氷する確率は、今後減少すると考えられる。

キーワード：摩周湖、結氷湖沼、結氷、全面結氷日、全面結氷日と気象データとの関係、全面結氷日の予測、寒冷圏季節学

Key words: Lake Mashu, freezing lakes, ice cover, freeze-up date, relation between freeze-up date and meteorological data, a prediction of freeze-up date, cryophenology

1. はじめに

地球温暖化の進行とともに中高緯度域での湖と河川などの淡水域の結氷が注目を集めている（例えば、新井, 2000 ; 2009 ; Magnuson *et al.*, 2000 ; George, 2010 ; Benson *et al.*, 2012 ; Kirillin *et al.*, 2012 ; 永田ら, 2012 ; Leppäranta, 2015 など）。Magnuson *et al.* (2000) は結氷日 (freeze date, 観測する水面が全て氷に覆われる最初の日と定義¹)

または解氷日 (breakup date, 夏の開水面前の最後に氷が割れた日と定義²) が長期間記録されている北半球の 26 の湖と河川のデータを用いて、1846 年から 1995 年では平均すると結氷日は 100 年間で 5.8 日遅くなり、解氷日は 100 年間で 6.5 日早くなっていることを明らかにした。また、

1 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

2 〒088-3211 北海道川上郡弟子屈町中央 1 丁目 5-18

3 大子町役場

〒319-3526 茨城県久慈郡大子町大字大子 866

4 061-3213 石狩市花川北三条 3 丁目 4-13-403

* 問合せ先: kameda@mail.kitami-it.ac.jp

¹ Leppäranta (2015) などでは freeze date は観測する水面に初めて結氷した部分が現れた日と定義する (結氷初日)。観測エリアの全てが結氷した最初の日 (全面結氷日) は, IAHR (1980), Leppäranta (2015) などでは freeze-up date と定義する。久保 (1980) には IAHR (1980) の和訳が掲載されている。

² Leppäranta (2015) では ice break-up date (全面解氷日) は冬季に観測する水面から氷が全てなくなった最初の日と定義する。IAHR (1980) ではこの日は breakup date と定義する。

Woolway *et al.* (2020) は, Magnuson *et al.* (2000) で報告された 20 の湖の中で, 19 の湖のデータで 2019 年まで伸ばし, 1855 年から 2019 年では結氷日が 100 年間で 11.6 日遅くなり, 解氷日は 100 年間で 8.1 日早くなっていること示し, 1995 年以降, 北半球の湖の結氷期間は加速度的に短くなっていることを示した.

これらの研究では日本での観測結果として諏訪湖のデータ (原典は藤原・荒川, 1954) が含まれている. 諏訪湖では結氷した水面の亀裂とその後の隆起が「御神渡り」と考えられていたため, 諏訪地方の八剣神社が 1397 年から結氷日, 御神渡日を記録していた. この記録を用いた過去 500 年以上の気候復元に関する研究が従来から行われている (Fujiwhara, 1921; 藤原・関口, 1936; Arakawa, 1954; 藤原・荒川, 1954; 荒川, 1954; Gray, 1974; Tanaka and Yoshino, 1982; 三上・石黒, 1998; 三上, 2006; Mikami, 2008 など). なお, 荒川 (1963), 石黒 (2001) および Ishiguro *et al.* (2002) は諏訪湖の結氷データから古気候を推定する際の注意点を報告している.

一方, 北海道内の淡水湖の多くは冬季に全面結氷もしくはそれに近い状態になるが, 観測データが少ないため, 研究例も少ない. その中で, 北海道東部の網走湖では人工衛星データとモデル計算を用いて 1961 年から 2016 年までの全面結氷日, 全面解氷日の変動が調べられている (Ohata *et al.*, 2017). それによると, 全面結氷日は 10 年間で 0.74 日遅くなり, 全面解氷日は 10 年間で 1.71 日早くなっていた. ただし, 全面結氷日の変動は有意水準が 15% 以下のため, 統計学的には有意ではなかった.

北海道西部の倶多楽湖では石川ら (1980) が 1977 年から 1979 年の 3 冬季の結氷前後の気象観測を実施し, 湖の小気候的特徴を明らかにした. 知北ら (2017), Chikita *et al.* (2018) および知北ら (2020) は近年の暖冬化に伴い 2013 年から 2016 年の 4 冬季では平均氷厚が薄くなり, 調査が実施された 2013~2016 年の平均では 4 年に 1 回の全面結氷しない状態が 20 年後 (西暦 2033~2036 年) には 2 年に 1 回になる可能性を報告している. 北海道内の淡水湖では支笏湖, 洞爺湖が結氷しない不凍湖として知られている (田中, 1992; 2004 お

よび国立天文台編, 2020). これらの湖は水深が深く, 湖の熱容量が大きいためであるが, 支笏湖は全面結氷する年があったことも知られている (例えば, 今田ら, 2002).

淡水と海水が混じった汽水湖ではあるが, サロマ湖では多くの研究が実施されている (例えば, 高橋・白澤, 2002). サロマ湖の結氷日や結氷期間に関する研究としては Shirasawa *et al.* (2005) と 館山 (2011) がある. Shirasawa *et al.* (2005) は, 1964 年から 2003 年までの結氷状況を報告した. それによると, サロマ湖の全面結氷日は 1960 年代の 12 月中旬から 90 年代以降の 1 月下旬から 2 月上旬に遅くなっていた. 全面結氷期間も 1979 年以降減少していた. ただし, この減少にはサロマ湖で 1978 年 12 月 5 日にオホーツク海とサロマ湖の間の砂州が開削され, 第二湖口が造成されたことの影響が指摘されている (Shirasawa and Leppäranta, 2003). 館山 (2011) は NOAA 衛星に搭載された AVHRR センサーによる画像を用いて, 1997 年から 2007 年までのサロマ湖の結氷パターンの変動を報告している.

一方, 本論文で扱う摩周湖は面積の割に水深が深いため, 近くにある屈斜路湖, 阿寒湖, パンケトー, ペンケトーと比べると結氷時期が遅いことが知られている (図 1). また, 摩周湖は年により全面結氷する年と部分結氷する年があることも知られている (細川・蜂谷, 2004; 蜂谷, 1998, 2006, 2021). 摩周湖の結氷に関連しては結氷から解氷までを多くの写真で示した報告 (東海林・蜂谷, 2017), 透明度の変化と結氷状況 (東海林, 1984), 水温変化と結氷との関係 (濱田, 2004; 濱田ら, 2005; 濱田, 2007; 濱田ら, 2011) などがあるが, これまでに摩周湖で観測された結氷に関する全ての観測データ (全面結氷と部分結氷の分類および全面結氷の場合は全面結氷日) を用いた包括的な雪氷・気象学的研究は行われていない.

本研究の目的は, 1) 摩周湖の結氷に関して記録に残されている 1974 年から 2021 年のデータを用いて, 摩周湖が全面結氷する条件を明らかにすること, 2) 近年の地球温暖化などの影響が摩周湖の結氷にどのように影響を与えてきているのかを明らかにすること, 3) 2021 年の摩周湖の全面結氷日の予測方法とその結果を述べることである.

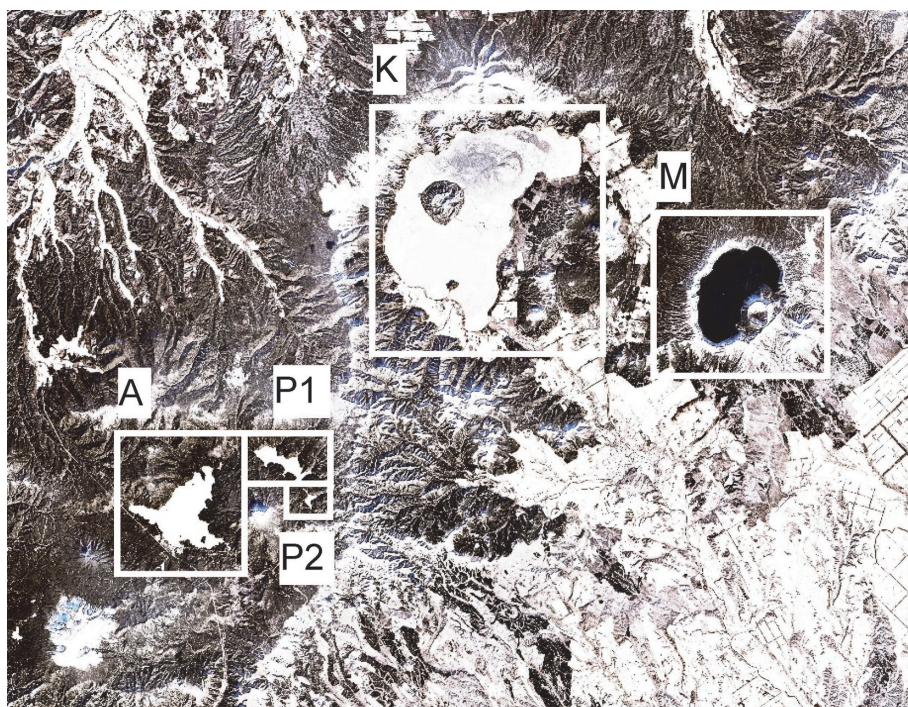


図 1 摩周湖 (M), 屈斜路湖 (K), 阿寒湖 (A), ペンクトー (P1) とペンクトー (P2) の結氷状況。摩周湖のみ結氷していないことがわかる (データ提供: European Space Agency, 人工衛星: Sentinel-2 L2 A, 撮影日時: 2019 年 2 月 9 日, 16:25:01 JST)。

摩周湖の全面結氷日が予測できると、それに基づく観光ツアーの計画などが事前に検討できるようになるため、観光業にとっても有益な情報になると考えられる。

本論文では湖全体が結氷することを全面結氷、湖に結氷部と未結氷部 (開水面) が共存することを部分結氷、冬季の最初に全面結氷になった日を全面結氷日と記述する。また、本論文での湖の結氷に関する年は寒候年で示した。つまり、単に 2021 年と記載したときには 2020 年 8 月 1 日から 2021 年 7 月 31 日の期間を意味する。

2. 摩周湖および使用データ

北海道東部に位置する摩周湖は面積 19.2km², 水面標高 351m, 平均水深 137.5m, 最大水深 211.4m の淡水のカルデラ湖で、ほぼ中央にカムイシュ島 (カムイシュとはアイヌ語で「神様のような老婆」を意味する) がある (図 2)。摩周湖は全域が阿寒摩周国立公園内に位置し、湖への流入河川および湖からの流出河川がなく集水域がカル

デラ内に限られるため、汚染源が極めて少ないことで知られている。摩周湖は透明度が高いことでも知られ、1931 年 8 月 31 日には 41.6m の透明度を記録した (高安・近藤, 1934; 田中, 1992)。これは当時確認された世界一の記録であった。1980 年からは環境庁 (現在の環境省)、北見工業大学、北海道環境科学センターにより湖水環境が継続的に調査されており、水質、底質土壌、大気成分、水生動物・植物などの状況が報告されている (地球環境研究センター, 2004)。これによると、近年の摩周湖の透明度は 18~28m 程度となっている。

表 1 に本研究で使用した摩周湖の結氷に関するデータを示す。ここでは各年の結氷状況を全面結氷と部分結氷に分類し、全面結氷した時には全面結氷日を記載した。これらの記録の確認者および確認方法も記載した。ここで、「展望台での確認 (2 地点)」とは、冬季でも通行可能な摩周第一展望台に加えて、冬季間は除雪されていない摩周第三展望台からも摩周湖の結氷状況を確認したことを意味する。「展望台での確認 (1 地点)」とは、第

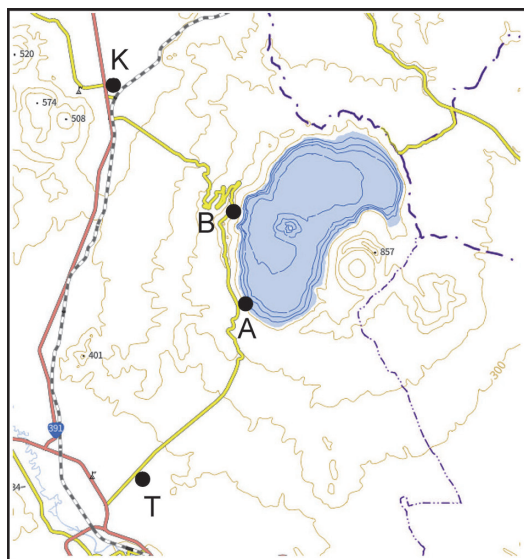


図 2 摩周湖および展望台 (A: 第一展望台, B: 第三展望台) と気象庁アメダスの (K: 川湯アメダス, T: 弟子屈アメダス) の位置. ベースマップは国土地理院がインターネットで公開している地理院地図 (電子国土 web) を使用.

一展望台でのみ結氷状況を確認したことを意味する. 「展望台での確認」とは, 第一展望台での結氷の確認に加えて, 第三展望台でも結氷を確認した可能性があるが, 第三展望台での確認の記録が残されていない場合を意味する. これらの展望台での結氷状況の確認は 1988 年を除いて双眼鏡を用いて実施した³. 図 2 に展望台の位置を記載した.

2021 年の摩周湖の結氷状況では摩周第一展望台での現地確認に加えて, 第一展望台に設置され, 1 分ごとの画像がインターネットサイトの「弟子屈ナビ」で公開されている摩周湖のライブカメラ画像 (<https://www.masyuko.or.jp/pc/live1.html>) も使用した.

気象データは摩周湖の湖岸から直線距離で 5.4 km と 6.1 km にそれぞれ位置する気象庁の川湯アメダスと弟子屈アメダスの日平均気温データを用いた. これらのデータは気象庁 HP (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index>.

³ 1988 年の観測で双眼鏡を使用したかどうかは不明である.

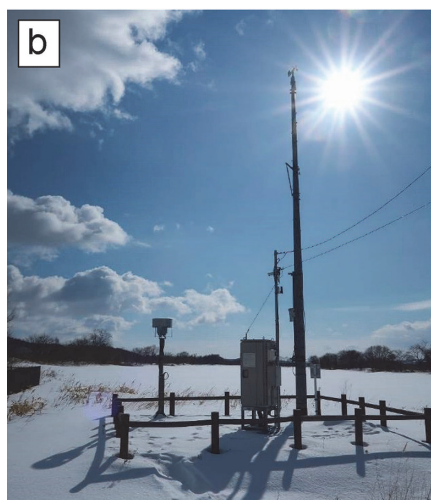
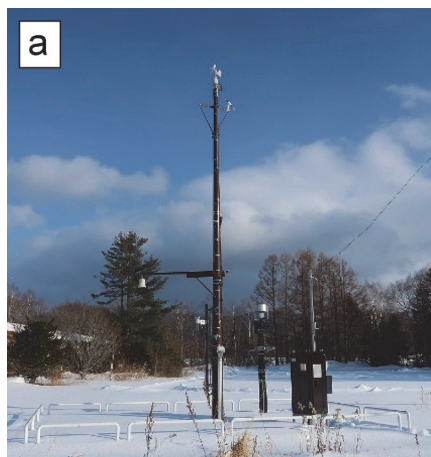


図 3 (a) 川湯アメダス, (b) 弟子屈アメダス (撮影日: 2021 年 2 月 11 日).

php) からダウンロードした. 図 3a に川湯アメダス, 図 3b に弟子屈アメダスを示す.

3. 結果

3.1 1974 年から 2021 年の摩周湖の結氷状況

図 4 に 1974 年から 2021 年までの摩周湖の結氷状況を示す. 過去 48 年間で 27 回, 全面結氷したことがわかった. 従って, 56.3% の全面結氷率である. ここで, 1977 年から 1988 年まで 12 年連続で全面結氷したことが大きな特徴である. また, 1989 年から 1993 年までの 5 年間および 2014 年から 2017 年までの 4 年間, 部分結氷が続いたことも目立つ. 図 5 には 10 年ごとの全面結氷年の

表 1 摩周湖の結氷状況. 全面結氷日, 記録確認者, 確認方法 (1974 年～2021 年).

年	結氷状態		全面結氷日	記録確認者	確認方法
	全面結氷	部分結氷			
1974		○		細川	展望台での確認
1975		○		細川	展望台での確認
1976		○		細川	展望台での確認
1977	○		1977/2/20	東海林	展望台での確認(1地点)
1978	○		1978/2/15	東海林	展望台での確認(1地点)
1979	○		不明	細川	展望台での確認
1980	○		不明	細川	展望台での確認
1981	○		1981/2/14	細川	展望台での確認
1982	○		1982/2/7	細川・小野寺	展望台での確認
1983	○		1983/2/9	細川・NHK釧路	展望台での確認
1984	○		1984/2/12	細川	展望台での確認
1985	○		1985/2/2	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1986	○		1986/2/3	細川・蜂谷	展望台での確認(2地点)
1987	○		不明	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1988	○		1988/2/3	美化財団(現自然公園財団)	展望台での確認(1地点)
1989		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1990		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1991		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1992		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1993		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1994	○		1994/1/31	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1995		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1996	○		1996/2/5	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
1997		○		細川・蜂谷	展望台での確認(2地点)
1998		○		細川・蜂谷	展望台での確認(2地点)
1999	○		1999/2/27	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2000	○		2000/2/22	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2001	○		2001/2/5	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2002		○		細川	展望台での確認(1地点)
2003	○		2003/2/26	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2004		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2005	○		2005/3/2	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2006	○		2006/2/10	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2007		○		細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2008	○		2008/2/7	細川・蜂谷	展望台での確認(1地点)
2009		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2010		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2011		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2012	○		2012/2/12	蜂谷	展望台での確認(1地点)
2013	○		2013/2/16	蜂谷	展望台での確認(1地点)
2014		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2015		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2016		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2017		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2018	○		2018/2/22	蜂谷	展望台での確認(1地点)
2019	○		2019/2/20	蜂谷	展望台での確認(1地点)
2020		○		蜂谷	展望台での確認(1地点)
2021	○		2021/2/14	蜂谷	展望台での確認(1地点)

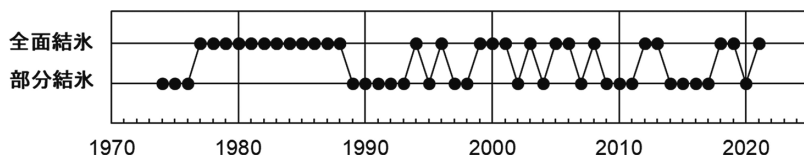


図 4 1974 年から 2021 年まで摩周湖の結氷状況。

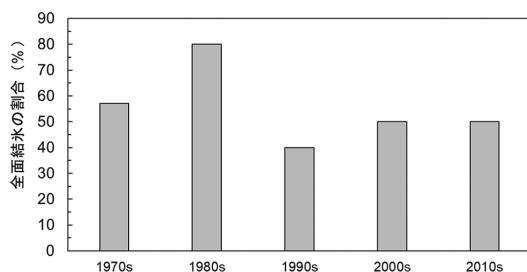


図 5 10 年ごとの全面結氷した年の割合。ただし、1974 年からは 1980 年までは 6 年間、2011 年から 2021 年までは 11 年間にに対する割合を示す。

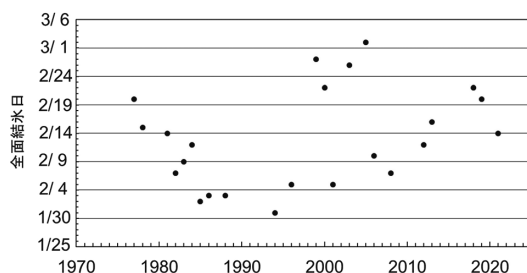


図 6 摩周湖が全面結氷した年の全面結氷日。1 月 31 日 (1994 年) から 3 月 2 日 (2005 年) に分布している。なお、2 月 28 日以降に全面結氷した年は 2005 年のみであり、2005 年はうるう年でないため、縦軸は毎年の全面結氷日のままで示した。

割合を示す。ただし、1970 年代は 1974 年から 1980 年までの 6 年分、2010 年代は 2011 年から 2021 年までの 11 年分に対する割合を示した。全面結氷する割合は、1980 年代が大きく、それ以外は 40 % から 60 % 程度であることがわかった。

図 6 に摩周湖が全面結氷した年の全面結氷日を示す。全面結氷日は 1 月 31 日 (1994 年) から 3 月 2 日 (2005 年) に分布しており、平均では 2 月 13 日 ± 8.6 日 (2 月 4 日 ~ 2 月 22 日) であった。ここで、± は式 (1) で示す標本標準偏差 (不偏標

準偏差ともいう) s を示す。本論文で ± で示した値は式 (1) による標本標準偏差の結果を示す。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

ただし、以降の記述では s は単に標準偏差と記す。

3.2 2021 年の結氷・解氷過程と気象データとの関係

2021 年 2 月 1 日から 3 月 15 日まで、第一展望台のライブカメラ画像および第一展望台にて湖面の結氷状況を確認した。結果を図 7a に示す。図 7b には摩周湖に最も近い川湯アメダスの気温 (日平均気温およびエラーバーで日最高気温と日最低気温)、図 7c には川湯アメダスの風速 (日平均風速、日最大瞬間風速) を示す。

2 月 1 日から 2 月 4 日までは湖面は結氷していなかったが、図 7a に示すように 2 月 5 日には 70 % まで結氷が急激に進んだ。その後、2 月 13 日まではカムイシユ島の南側および南東側に開水面が存在したが、2 月 14 日および 15 日に全面結氷した。図 8 に全面結氷時の摩周湖の状況を示す。薄氷部の結氷状況の確認はライブカメラ画像では難しいため、2 月 8 日は第一展望台からの目視観察、12 日以降は第一展望台から双眼鏡で薄氷部を観察した。その結果、2 月 13 日まではカムイシユ島の南側と南東側の黒く見える湖面では風による小さなさざ波が確認できたが、2 月 14 日には湖面の全域でさざ波が観察できなかった。このため、14 日に摩周湖は全面結氷したと判断した。その後、16 日には結氷率は 40 %、17 日には 25 % と急激に減少した。28 日には再び 75 %、3 月 4 日には 60 % となったが、徐々に減少した。結氷開始 (2 月 5 日) から全面結氷 (2 月 14 日) までは 9 日間であった。

図 7b の気温データによると 2 月 3 日から 5 日

にかけて、気温が急激に低下し、日平均気温は -14.8°C から -16.1°C 、日最低気温は -20.3°C から -24.0°C となった。この時の日平均風速は0.6

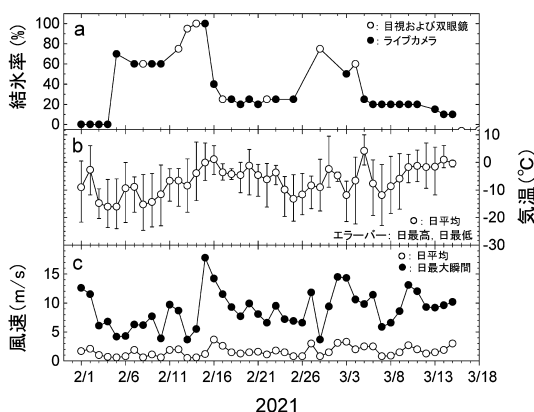


図 7 (a) 2021 年 2 月 1 日から 3 月 15 日までの結氷割合 (%)。2 月 14 日と 15 日は完全結氷になった。白丸は第一展望台からの観測での判定、黒丸はライブカメラ画像による判定。(b) 川湯アメダスの日平均気温 (○)、エラーバーは日最高気温および日最低気温。(c) 川湯アメダスでの日平均風速 (○)、日最大瞬間風速 (●)。

m/s から 1.0 m/s であり、風速が弱い状況であった。このように風が弱く低温の気象条件のため、2 月 5 日に結氷が急激に進んだと考えられる。また、15 日から 16 日には気温が上昇し、日平均気温は $+1.1^{\circ}\text{C}$ から -3.9°C 、日最高気温は $+7.4^{\circ}\text{C}$ から $+6.0^{\circ}\text{C}$ となった。図 6c の風速データによると、2 月 15 日から風速が高くなっており、15 日 22 時 31 分には最大瞬間風速 17.8 m/s を記録した。日中の高い気温とともに夜の強い風のため、結氷率 100% の氷は 15 日夕方から 16 日未明にかけて吹き寄せられ、融解したと考えられる。

2 月 24 日から 27 日および 3 月 3 日から 4 日は気温が低下したために、2 月 28 日の結氷率は 75%、3 月 4 日の結氷率は 60% になったと考えられる。ただし、3 月 5 日には日平均気温が 4.2°C 、日最高気温が 10.0°C となったため、湖面の氷のかんりの部分が再び融解した。

第一展望台およびライブカメラ映像によると、2 月 7 日から 15 日では氷上に雪がうっすらと積もっていたことが「白い湖面」からわかった。ただし、2 月 6 日は濃霧、2 月 11 日は我々の記録が欠測のため、氷上の積雪状況は不明である。3 月



図 8 全面結氷した摩周湖。(a) 2021 年 2 月 14 日 (撮影: 蜂谷 衛), (b) 2021 年 2 月 15 日 (ライブカメラの画像)。

3日から5日にも氷上の積雪が観察された。

このように摩周湖の結氷には低温とともに、湖面での波浪が大きく影響していることがわかった。氷上の積雪については氷の厚さ増加の妨げになっていると考えられる。

2019 年の場合、2 月 9 日には湖岸から結氷が始まっており（およそ 5% 程度の結氷率）、全面結氷日は 2 月 20 日であった。このため、結氷開始から全面結氷までは 11 日程度であり、2021 年とはほぼ同じ期間で全面結氷に至った。

東海林・蜂谷（2017）によると、「（摩周湖は）最寒季に全面結氷すると、途中での解氷は無く、春季 4 月下旬から 5 月の上旬まで、全面が結氷している」と記載されているため、2021 年冬季の結氷過程は平均的な年の結氷過程とは異なると考えられる。

4. 解析

4.1 月平均気温を用いた摩周湖が全面結氷する条件

摩周湖近くの気象庁の川湯アメダスと弟子屈アメダスの月平均気温を使って、摩周湖の全面結氷、部分結氷との関係を調べた。図 9a は川湯アメダスの 12 月から 2 月の平均気温、12 月、1 月、2 月のそれぞれの月平均気温と摩周湖の全面結氷と部分結氷との関係を示す。ここで、全面結氷年は白丸、部分結氷年は黒丸で示した。図 9b は弟子屈アメダスに対する図 9a と同様の図である。

図 9a、9b とともに、全面結氷と部分結氷を分類するのに最も適切と考えられる基準温度を点線でそれぞれ示した。ここで、基準温度とはそれ以下の温度でなるべく多くの全面結氷年が入り、かつそれを越えた温度でなるべく多くの部分結氷年が入るように設定した温度である。具体的には二値分類での混同行列（confusion matrix）での正解率（accuracy、基準温度以下で全面結氷となり、基準温度を超えた温度で部分結氷となった割合）が最大になる温度を基準温度とした（混同行列については例えば平井、2012 の p. 31 参照）。ただし、最大の正解率で偽陽性率（false positive rate、部分結氷となったときに基準温度以下となった割合）が高い値のときには 2 番目に高い正解率で偽陽性率が低いものを基準温度とした。さらに、正解率

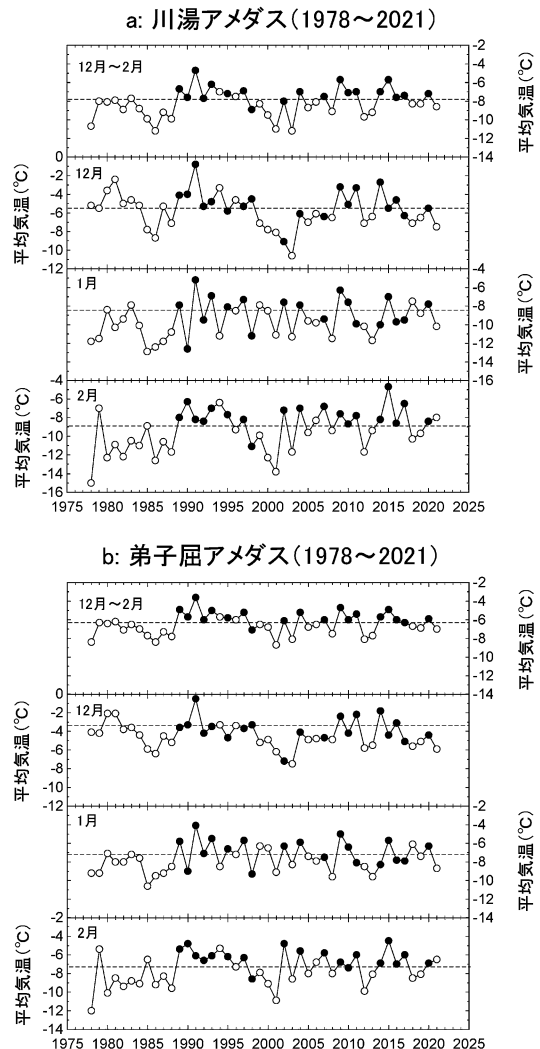


図 9 (a) 1978 年から 2021 年までの川湯アメダスの冬季気温（12 月から 2 月の冬季平均気温、12 月、1 月、2 月の月平均気温）と全面結氷年との関係。(b) 1978 年から 2021 年までの弟子屈アメダスの冬季気温（12 月から 2 月の冬季平均気温、12 月、1 月、2 月の月平均気温）と全面結氷年との関係。両図ともに白丸は全面結氷年、黒丸は部分結氷年を示す。点線はそれぞれの気象要素での基準温度で、(a) では 12 月から 2 月は -7°C 、12 月は -4°C 、1 月と 2 月は -8°C であり、(b) では 12 月から 2 月は -5.5°C 、12 月は -3°C 、1 月と 2 月は -6°C である。年は寒候年のため、12 月から 2 月のデータおよび 12 月のデータは 1 月以降の年で示した。

表 2 それぞれの月での全面結氷年と部分結氷年を分類する基準温度.

地点名	12月～2月 (°C)	12月 (°C)	1月 (°C)	2月 (°C)
川湯アメダス	-7.8	-6.5	-8.4	-8.9
弟子屈アメダス	-6.2	-3.4	-7.2	-7.3

表 3 表 2 に示した各基準温度での正解率, 偽陽性率, 適合率の割合 (%).

地点名	12月～2月 (%)	12月 (%)	1月 (%)	2月 (%)
川湯アメダス	88.6, 10.5, 91.7	70.5, 5.3, 92.9	75.0, 42.1, 73.3	88.6, 5.3, 95.5
弟子屈アメダス	90.9, 10.5, 92.0	65.9, 63.2, 64.7	75.0, 36.8, 75.0	84.1, 10.5, 90.9

表 4 それぞれの移動平均期間の年最低気温での全面結氷年と部分結氷年を分類する基準温度.

地点名	11日間	21日間	31日間	41日間	51日間	61日間
川湯アメダス	-12.1	-10.9	-10.1	-10.5	-9.9	-9.6
弟子屈アメダス	-9.9	-8.7	-8.4	-8.4	-7.7	-7.8

と偽陽性率が同じ値の場合には, 2022 年以降の全面結氷予測で今回の基準温度を用いることを想定して, 最も低い平均気温を基準温度とした.

また, 基準温度以下で全面結氷となる割合は適合率 (precision, 全面結氷と予測したときに基準温度以下になったときの割合) で評価した. 表 2 にはそれぞれの基準温度, 表 3 にはこれらの基準温度での正解率, 偽陽性率, 適合率を示す. 付録 1 には正解率, 偽陽性率, 適合率の定義および意味, 混同行列, 基準温度の算出過程の詳細をまとめた. 表 A2 には各期間で最も正解率が高くなったときの混同行列での各指標の年数をまとめた.

表 3 より, 正解率が最も高いのは弟子屈での 12～2 月の平均気温であることがわかる (正解率 90.9%). ただし, この時には偽陽性率が 10.5% であった. 一方, 川湯での 2 月の平均気温の正解率は 88.6% であったが, 偽陽性率が 5.3% と低い値となった. このため, 摩周湖での全面結氷と部分結氷とを平均気温で分類するためには, 川湯アメダスの 2 月の月平均気温を用いることが妥当であると判断した.

また, 川湯の 2 月の月平均気温が -8.9°C の時の適合率は 95.5% であった. このため, 川湯アメダスの 2 月の月平均が -8.9°C 以下になった場合には 95.5% の確率で, 全面結氷を推定できること

がわかった. なお, 1978 年から 2021 年では川湯アメダスの 2 月の月平均気温は $0.63^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ で上昇している. このため, この気温上昇が続く場合には, 摩周湖が全面結氷する割合は今後, 減少すると考えられる.

4.2 日平均気温の移動平均を用いた摩周湖が全面結氷する条件

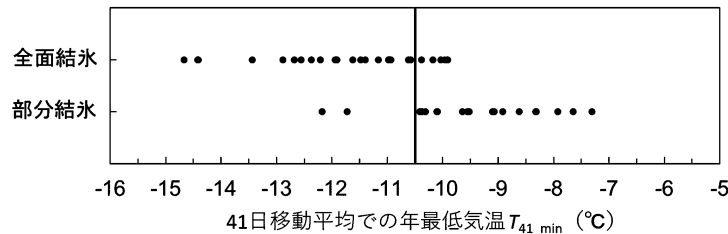
湖の結氷には継続的な低温が重要なため, 川湯アメダスと弟子屈アメダスの日平均気温の 11 日間, 21 日間, 31 日間, 41 日間, 51 日間, 61 日間の日平均気温の移動平均を使って, 摩周湖の結氷との関係を調べた. 61 日間の移動平均であれば中央日の前後 30 日間の平均を移動させて計算した. 日平均気温は 3 月 1 日から翌年 4 月 30 日までのデータを用いた. ただし, 川湯アメダスと弟子屈アメダスは 1977 年 10 月 6 日から観測を開始しているため, この年は 10 月 6 日からのデータを用いた.

その結果, それぞれの移動平均での年最低気温を用いると摩周湖の全面結氷と部分結氷を分類できることがわかった. 表 4 にそれぞれの移動平均期間で全面結氷と部分結氷に関する正解率が最も高くなった基準温度を示す. 表 5 にはそれぞれの基準温度での正解率, 偽陽性率, 適合率を示した. 表 A3 には各移動平均で最も正解率が高くなった

表 5 表 4 に示した各基準温度での正解率, 偽陽性率, 適合率の割合 (%).

地点名	11日間	21日間	31日間	41日間	51日間	61日間
川湯アメダス	88.6, 26.3, 83.3	88.6, 21.1, 85.7	81.8, 42.1, 75.8	84.1, 10.5, 90.9	84.1, 10.5, 90.9	84.1, 10.5, 90.9
弟子屈アメダス	86.4, 26.3, 82.8	88.6, 26.3, 83.3	84.1, 36.8, 78.1	86.4, 21.1, 85.2	88.6, 21.1, 85.7	88.6, 5.3, 95.5

a: 川湯



b: 弟子屈

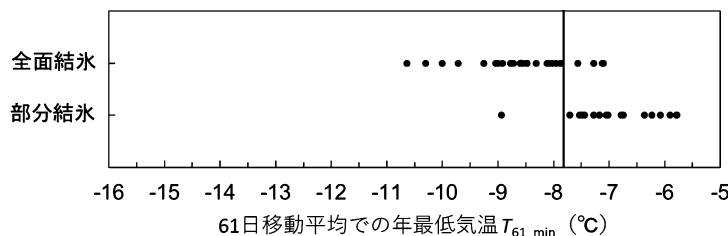


図 10 (a) 川湯アメダスの 21 日間の年最低気温 (\bar{T}_{21_min}) と摩周湖の全面結氷年と部分結氷年との関係,
 (b) 弟子屈アメダスの 61 日間の年最低気温 (\bar{T}_{61_min}) と摩周湖の全面結氷年と部分結氷年との関係.

ときの混同行列での各指標の年数をまとめた.

表 5 に示したように, 川湯アメダスでの移動平均を使って全面結氷と部分結氷の正解率が最も高かったのは 11 日間と 21 日間の移動平均の場合で 88.6% であったが, 偽陽性率がそれぞれ 26.3% と 21.1% と高い値であった. 一方, 移動平均の期間が 41 日間, 51 日間, 61 日間では正解率は 84.1% であったが, 偽陽性率が 10.5% であった. このため, 41 日間, 51 日間, 61 日間の移動平均を用いることが全面結氷と部分結氷の分類で適切と考えた. ただし, 移動平均の期間が短いほうが今後の移動平均を用いた全面結氷予測を実施する上で利便性が高い. このため, 川湯アメダスの日平均気温の移動平均では, 41 日間の移動平均を用いることが妥当と判断した. 図 10a に 41 日間の移動平均を用いた結果を示す. 縦線は基準温度であるが, 基準温度を挟んで全面結氷年と部分結氷年が分類できていることがわかる. ただし, 基準温度以下で部分結氷となった年が 2 年間 (1990, 1998)

あった. 部分結氷年に対するこの 2 年間の割合が偽陽性率 (10.5%) である.

一方, 弟子屈アメダスの日平均気温を用いた場合では 21 日間, 51 日間, 61 日間の移動平均を用いると, 正解率が 88.6% となった. 偽陽性率が最も低かったのは 61 日間のときであり, 5.3% であった. このため, 図 10b に 61 日間の移動平均を用いた結果を示す. 縦線は基準温度であるが, 基準温度を挟んで全面結氷年と部分結氷年が分類できていることがわかる. この時, 基準温度以下で部分結氷となったのは 1 年間のみ (1998) であった (偽陽性率で 5.3%).

従って, 移動平均を用いて全面結氷と部分結氷を分類する場合には, 弟子屈アメダスの 61 日間の移動平均を用いることが適切であることがわかった. また, この時の適合率は 95.5% であったため, 弟子屈の日平均気温を使った 61 日間の移動平均での年最低気温が -7.8°C 以下になった時には, 95.5% の確率で全面結氷年を推定できるこ

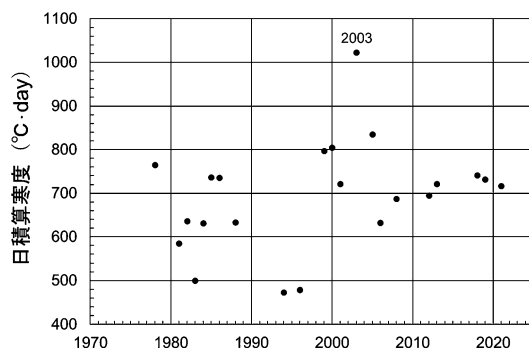


図 11 摩周湖の全面結氷日までの川湯アメダスの日積算寒度の経年変化。(1980 年-2020 年). 2003 年のデータのみ日積算寒度が大きい.

とがわかった.

4.3 日積算寒度を用いた摩周湖が全面結氷する条件および夏季の気温との関係

図 11 に川湯アメダスの日平均気温を用いて摩周湖が全面結氷した日までの日積算寒度 (T) を調べた結果を示す. ここで日積算寒度は前年の 11 月 1 日から日平均気温 (\bar{T}) がマイナスになった日のみを積算し, 式 (2) に示す絶対値で示した.

$$T = |\sum (\bar{T} < 0^\circ\text{C})| \quad (2)$$

式 (2) で日平均気温の積算を 11 月 1 日以降としたのは, 付録の図 A2 に示すように 1978 年から 2020 年までの川湯アメダスの日平均気温では 11 月 1 日頃より日平均気温がマイナスの日が現れ始めるからである (年は寒候年のため, 1978 年とは 1977 年 11 月 1 日からの日積算寒度を示す).

図 11 より, 摩周湖の全面結氷日に至るまでの日積算寒度には系統的な変化がないことがわかった. また, 図 11 より 2003 年は他の日積算寒度と比べ大きな値を示すことがわかった ($1023.2^\circ\text{C} \cdot \text{day}$). 2003 年 2 月 12 日から 14 日にかけて摩周カルデラ付近を震源とする地震が増加したとの報告があり (最大規模の地震は 13 日 4 時 17 分の M3.6. 弟子屈町での震度 2; 気象庁, 2003), 摩周湖の結氷に影響を与えた可能性が考えられる. このため, 本研究では 2003 年の日積算寒度のデータは使用しないことにした.

図 12 に 2003 年のデータを除いた全面結氷日とそれまでの日積算寒度の関係を示す. 全面結氷日

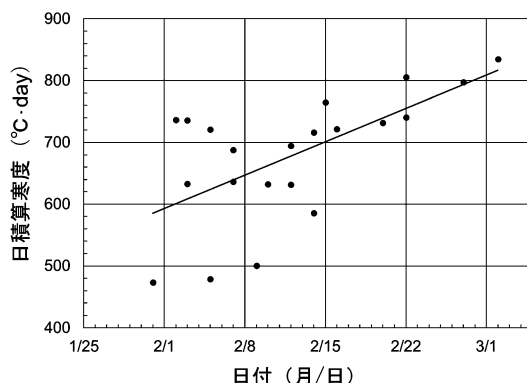


図 12 摩周湖の全面結氷日と全面結氷日までの川湯アメダスの日積算寒度の関係. 川湯アメダスで気象データが存在する 1977 年 11 月 1 日以降で, 全面結氷した 25 年間で全面結氷日が不明な 3 年間 (1979, 1980, 1987) および 2003 年を除いた 21 年間で比較.

が遅くなると, 日積算寒度が大きくなる傾向があった. 両者の関係は式 (3) で示すことができ, 相関係数は 0.63, t 分布を用いた検定では 1% で有意であった.

$$T = 7.73x + 353.6 \quad (3)$$

ここで, T は日積算寒度, x は全面結氷日で図 12 とは異なり, 1 月 1 日からの日数 (DOY, Day of year) とした.

式 (3) より, 摩周湖はある一定の日積算寒度に到達すると全面結氷に至るのではなく, 全面結氷するのに必要な日積算寒度が年により変化することがわかった. このときの値 ($470 \sim 820^\circ\text{C} \cdot \text{day}$) が摩周湖が全面結氷するために必要な日積算寒度の値である.

従って, 摩周湖は日平均気温がマイナスになった 11 月上旬から 3 ヶ月から 4 ヶ月後に全面結氷に至ることがわかった. これを摩周湖の近くの屈斜路湖 (蜂谷, 2021) と比べると, 1984 年から 2021 年では平均すると摩周湖の全面結氷日は屈斜路湖の全面結氷日より 17.4 ± 10.7 日遅いことがわかった (2 つの湖が全面結氷した 1984 年以降の 18 年間で比較). これは摩周湖が面積の割に平均水深が深いため (摩周湖は面積 19.2 km^2 , 平均水深 137.5 m に対して, 屈斜路湖は面積 79.6 km^2 , 平均水深 28.4 m), 春から夏に蓄えられる湖水の

熱容量が表面積に比べると相対的に大きく、摩周湖は結氷しづらいことを反映していると考えられる (図 1 参照)。

一方、温帯と寒帯にある湖沼の水温分布は、表面から表面混合層、水温躍層、深水層の 3 層に分かれることが知られている (新井, 2004 など)。ここで、表面混合層と水温躍層に貯熱された熱量は春から夏の温暖な時期の気温と太陽からの短波放射量に依存するため、摩周湖の全面結氷に必要な積算寒度は春から夏の気温によって変化する可能性が考えられる。このため摩周湖近くの川湯アメダスと弟子屈アメダスの前年夏季の月平均気温を用いて、様々なパターンでの夏季の気温と摩周湖の全面結氷日までの日積算寒度との関係を調べてみた。

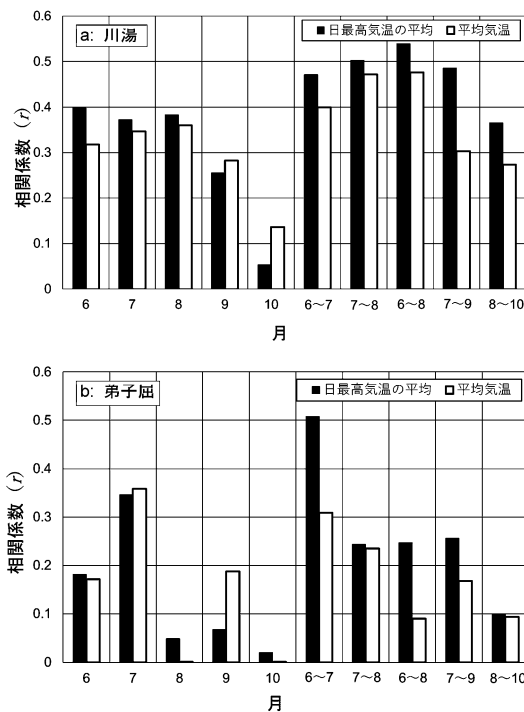


図 13 (a) 川湯アメダスの夏季気温と摩周湖の全面結氷日までの日積算寒度との相関係数および (b) 弟子屈アメダスの夏季気温と摩周湖の全面結氷日までの日積算寒度との相関係数。川湯アメダスで夏の気象データが存在する 1978 年 6 月 1 日以降、全面結氷した 24 年間で全面結氷日が不明な 3 年間 (1979, 1980, 1987), 2003 年および 2021 年を除いた 19 年間で比較。

図 13a に川湯アメダスでの様々な夏の気温データと全面結氷日に至るまでの日積算寒度との相関係数、図 13b に弟子屈アメダスとの相関係数を示す。ここで、 x 軸の 6 とは 6 月 1 日から 30 日を意味し、6~7 とは 6 月 1 日から 7 月 31 日を意味する。図 13a, b より、全面結氷日に至るまでの日積算寒度と最も相関が高かったのは図 13a に示す川湯アメダスの 6 月 1 日から 8 月 31 日までの日最高気温の平均であることがわかった。図 14 に 6 月から 8 月の日最高気温の平均 (\bar{T}_{\max_JJA}) と全面結氷日までの日積算寒度 (T) との関係を示す。両者の関係は式 (4) で表すことができた。相関係数は 0.54 で、 t 分布を用いた検定では 5% で有意であった。

$$T = 38.3 \bar{T}_{\max_JJA} - 132.8 \quad (4)$$

図 14 より 6 月から 8 月までの日最高気温の平均が高いと摩周湖の全面結氷日までの日積算寒度が大きな値が必要になることがわかった。これは摩周湖には継続的な流入河川とともに流出河川もないため、湖水中の温度分布に対して夏の気温の影響が大きく現れていることに加えて、摩周湖の透明度が高いために湖内深くまで日射が進入していることも影響している可能性が考えられる。ただし、実際の全面結氷過程には図 7 に示したように、マイナスの気温だけでなく、日中のプラスの気温、強風、降雨、降雪、氷上の積雪などの影響も受けていることを本来は考慮する必要がある点に注意が必要である。

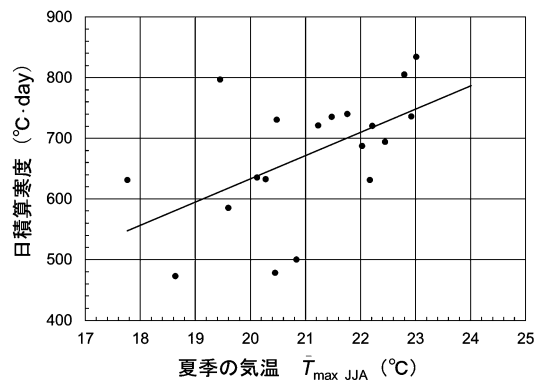


図 14 全面結氷日までの日積算寒度と 6~8 月の最高気温の平均 (川湯アメダス) の関係。

なお、11月1日以降の日積算寒度のみを用いて完全結氷年と部分結氷年が分類できるかを検討した。その結果、両者に間には有意な関係は存在しなかった。これはこの節で議論したように摩周湖の結氷過程には前年夏の気温の影響とともに、冬季におけるプラス気温なども影響しているためである。

北日本の気象はエルニーニョ、ラニーニャおよびPDO(太平洋十年規模変動)の影響を受けていることが知られている(例えば、気象庁, 2021a, 2021b)。特に、ラニーニャでは北日本は冬から春が寒く、夏が暑いことが知られている(前田, 2013)。このため、これらの指標と摩周湖の全面結氷年との関係を調べた。その結果、特に有意な関係はなかった。また、地上での気温に関連する観測データの変動理由として太陽活動に原因があるとの報告がある(例えば、藤井・元場, 2006; Gray *et al.*, 2010 などに解説あり)。このため、太陽活動の指標として太陽黒点数(Sunspot number)、全太陽放射(TSI, Total Solar Irradiance)と摩周湖の結氷状況を比較したが、両者ともに有意な関係は存在しなかった。

4.4 2021年冬季の摩周湖の全面結氷日の予測

4.4.1 2020年9月1日時点での予測

4.3節で議論した「摩周湖の全面結氷に必要な日積算寒度と夏の気温」との関係(式(4))を用いて、2020年9月1日時点での2021年の摩周湖の全面結氷日を予測した。ここでは、摩周湖の全面結氷日ともっとも相関が高かった川湯アメダスでの観測開始の1978年から2020年までの日平均気温を用いて、日積算寒度を計算した。

2020年6月1日から8月31日までの川湯アメダスでの日最高気温の平均は22.0℃であったため、(4)式より2021年の全面結氷に必要な日積算寒度は710℃・dayであることがわかった。この結果、1978年から2020年までの日平均気温を用いた日積算寒度の平均を用いると、2021年は2月22日±13日(2月9日～3月7日)に全面結氷することが予測できた。ここで、カッコ内は1978年から2020年までの気温変化に対する標準偏差の範囲を示す。以下にこの予測方法を詳しく述べる。

図15に川湯アメダスでの1978年から2020年

までの11月1日からの日積算寒度の変化を示す(年は寒候年のため、1978年とは1977年11月1日からの日積算寒度を示す)。表6には日積算寒度が400℃・dayから900℃・dayになる平均的な日数と標準偏差を示す。ここで日数A、日数Bとはそれぞれ11月1日、1月1日から該当する日積算寒度に到達する日数を示す。標準偏差はその日数の変動範囲を示す。この表はそれぞれの年の日積算寒度の結果より、400℃・dayから10℃・dayごとの日付を内挿により求め、43年間での平均値(日数欄に記載)とその標準偏差を示した。図15に示すように43年間の中には寒い冬や暖かい冬があるため、日付と日積算寒度との関係が年により異なる。このため、平均値にばらつきが生ずるため、表6には標準偏差の欄を加えた。また、暖かい冬の場合、図15に示すように2021年の全面結氷に必要な710℃・dayにならない年もある。そのため、表6では所定の日積算寒度に到達した年のみを使って日数と標準偏差を計算した。

表6より、2021年の全面結氷に必要な710℃・dayに相当する日付は113.3±12.8日であることがわかる。この日付は11月1日からの日数のため、2月22日±13日(2月9日～3月7日)に摩周湖は全面結氷することが予想できた。

ここで、図15に示した1978年から2020年までの日積算寒度で2021年の全面結氷に必要な710℃・dayに到達しない年は43年間中に3年間あり(1989, 2008, 2014年)、全体の7%であった。このため、2021年が全面結氷に至らない確率は7%であると考えられる。

3.2節で述べたように2021年の全面結氷日は2月14日だったため、予測は8日遅い結果となった。

4.4.2 2021年1月1日時点での予測

次に、2021年1月1日時点での摩周湖の全面結氷日の予測を行なった。9月1日の予測では次の冬がどのような冬かを予測できないが、1月1日の予測では12月31日までの気象データを用いることができる利点がある。ここでは、2020年11月1日から12月31日までの日積算寒度を算出し、それを過去43年間の同じ期間の日積算寒度と比べることで2021年冬季を「寒い冬」、「普通の冬」、「暖かい冬」のどれに該当するかを判定し、

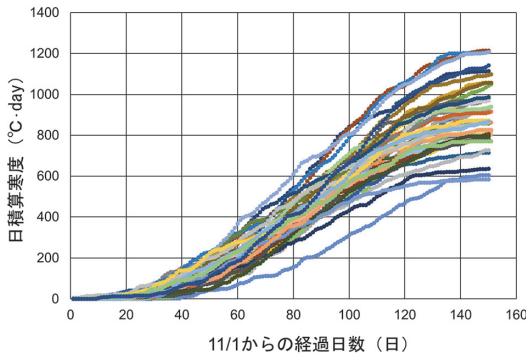


図 15 11 月 1 日から 3 月 31 日までの日積算寒度の変化 (1978-2020) (川湯アメダスのデータを使用)。

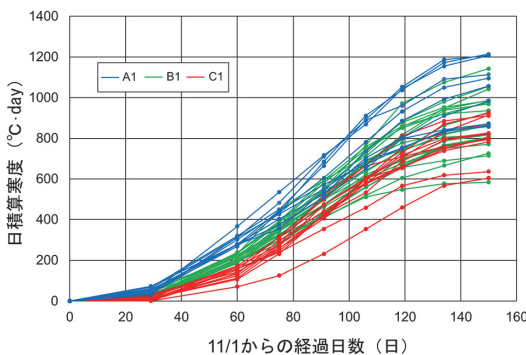


図 16 2021 年 1 月 1 日時点での冬のパターン分け (川湯アメダスのデータを使用)。A1 は 11 月 1 日から 12 月 31 日までの日積算寒度で寒い冬となった 10 年間 (1985, 1986, 1988, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2017, 2018), B1 は同じ期間で普通の冬となった 21 年間 (1978, 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1993, 1995, 1997, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020), C1 は同じ期間で暖かい冬となった 12 年間 (1980, 1981, 1983, 1990, 1991, 1994, 1996, 1998, 2009, 2011, 2014, 2016)。年は寒候年のため, 1 月以降の年で表示。

以降もそれが継続すると仮定することで予測精度の向上を試みた。以下に具体的な方法を記述する。

1978 年から 2020 年までの 11 月 1 日から 12 月 31 日までの日積算寒度を図 16 に示すように 3 つのパターンに分類した (年は寒候年のため, 1978 年とは 1977 年 11 月 1 日から 12 月 31 日を意味する)。ここでは, この期間の日積算寒度が $255^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$

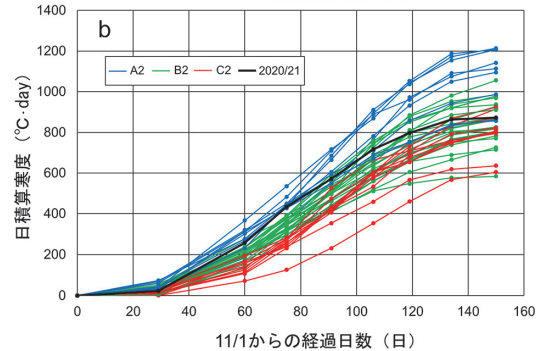
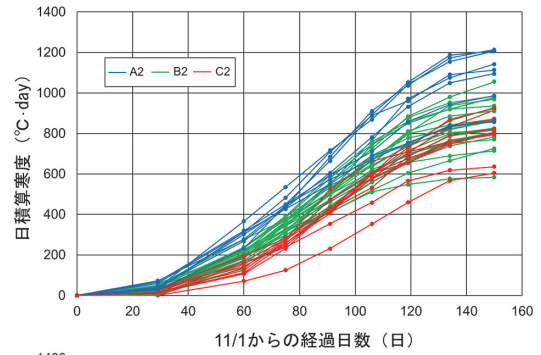


図 17 (a) 2021 年 1 月 16 日時点での冬のパターン分け (川湯アメダスのデータを使用)。 (b) (a) に 2020/21 年を黒線で追加した。A2 は 11 月 1 日から 1 月 15 日までの日積算寒度で寒い冬となった 8 年間 (1985, 1986, 1988, 2001, 2002, 2003, 2017, 2013), B2 は同じ期間で普通の冬となった 25 年間 (1978, 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012, 2015, 2016, 2018, 2019, 2020), C2 は同じ期間で暖かい冬となった 10 年間 (1980, 1981, 1983, 1990, 1991, 1994, 1996, 2009, 2010, 2014)。年は寒候年のため, 1 月以降の年で表示。

day 以上を「寒い冬」(図 16 では A1 と記載), $180^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 以上 $255^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 未満を「普通の冬」(B1 と記載), $180^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 未満を「暖かい冬」(C1 と記載)とした。それぞれの閾値は過去 42 年間での上記期間での日積算寒度の値をほぼ等しく 3 つに分類できるように設定した。次に, それぞれのパターンで日積算寒度が任意の値に至る日をそれぞれのパターンで求めた。表 7a は寒い冬 (A1) での日積算寒度とその値に至るのに必要な日数と標準偏差, 表 7b は普通の冬の場合, 表 7c は暖かい冬の時に使う計算表である。ここでも 1 月 1 日からの日数を併記した。

表 6 日積算寒度に相当する日付とその標準偏差. 到達日数 A は 11 月 1 日からの日数, 到達日数 B は 1 月 1 日からの日数. 2 月 29 日以降のうるう年は 1 日ずらして使うこと (日積算寒度とその標準偏差は川湯アメダスの 1978~2020 年の日平均気温を使用).

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	81.3	20.3	8.5	570	99.0	38.0	11.3	740	115.4	54.4	11.5
410	82.5	21.5	8.7	580	100.3	39.3	12.3	750	116.9	55.9	12.2
420	83.6	22.6	8.8	590	100.4	39.4	10.9	760	118.4	57.4	12.9
430	84.6	23.6	8.9	600	101.4	40.4	11.4	770	120.0	59.0	13.8
440	85.5	24.5	8.9	610	101.6	40.6	9.7	780	121.1	60.1	14.4
450	86.6	25.6	9.0	620	103.0	42.0	10.5	790	122.1	61.1	14.8
460	87.6	26.6	9.2	630	104.3	43.3	11.2	800	122.9	61.9	15.5
470	88.7	27.7	9.2	640	104.4	43.4	9.6	810	120.6	59.6	13.4
480	89.7	28.7	9.4	650	105.8	44.8	10.1	820	120.5	59.5	13.1
490	90.7	29.7	9.5	660	107.0	46.0	10.5	830	119.7	58.7	11.9
500	91.8	30.8	9.7	670	108.3	47.3	11.0	840	121.1	60.1	12.6
510	92.7	31.7	9.8	680	109.4	48.4	11.2	850	122.5	61.5	13.4
520	93.7	32.7	9.9	690	110.7	49.7	11.5	860	123.7	62.7	14.4
530	94.8	33.8	10.1	700	112.1	51.1	12.3	870	121.9	60.9	12.5
540	95.7	34.7	10.4	710	113.3	52.3	12.8	880	120.9	59.9	10.9
550	96.8	35.8	10.5	720	113.6	52.6	12.1	890	122.6	61.6	11.7
560	97.8	36.8	10.7	730	114.0	53.0	11.0	900	124.1	63.1	12.0

表 7a 寒い冬 (A1 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 1 日用). 到達日数 A は 11 月 1 日からの日数, 到達日数 B は 1 月 1 日からの日数. 2 月 29 日以降のうるう年は 1 日ずらして使うこと.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	72.1	11.1	5.5	570	88.4	27.4	6.3	740	104.5	43.5	9.6
410	73.1	12.1	5.4	580	89.2	28.2	6.5	750	105.5	44.5	10.1
420	74.0	13.0	5.3	590	90.1	29.1	6.7	760	106.5	45.5	10.4
430	75.2	14.2	5.5	600	90.9	29.9	6.9	770	107.5	46.5	10.9
440	76.3	15.3	5.8	610	91.8	30.8	7.2	780	108.3	47.3	11.3
450	77.4	16.4	5.8	620	92.8	31.8	7.5	790	109.3	48.3	11.6
460	78.3	17.3	5.9	630	93.7	32.7	7.6	800	110.5	49.5	12.0
470	79.5	18.5	6.0	640	94.6	33.6	7.8	810	112.1	51.1	12.5
480	80.4	19.4	6.0	650	95.4	34.4	7.9	820	113.1	52.1	12.7
490	81.4	20.4	6.0	660	96.4	35.4	8.1	830	114.1	53.1	13.2
500	82.5	21.5	6.0	670	97.4	36.4	8.2	840	115.8	54.8	14.5
510	83.3	22.3	5.9	680	98.4	37.4	8.3	850	117.5	56.5	15.8
520	84.2	23.2	5.9	690	99.3	38.3	8.4	860	117.4	56.4	17.4
530	85.1	24.1	6.0	700	100.3	39.3	8.2	870	114.5	53.5	14.0
540	85.8	24.8	6.1	710	101.3	40.3	8.5	880	111.7	50.7	9.2
550	86.9	25.9	6.2	720	102.5	41.5	8.9	890	113.0	52.0	9.2
560	87.7	26.7	6.3	730	103.6	42.6	9.3	900	—	—	—

使用データ：寒い冬となった 10 年間 (1985, 1986, 1988, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2017, 2018) の日平均気温.

表 7b 普通の冬 (B1 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 1 日用).
他は表 7a と同様.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	81.1	20.1	5.4	570	100.5	39.5	10.6	740	115.6	54.6	9.1
410	82.5	21.5	5.8	580	102.1	41.1	12.4	750	117.2	56.2	10.0
420	83.8	22.8	6.0	590	101.2	40.2	8.5	760	118.7	57.7	10.6
430	84.8	23.8	6.3	600	102.2	41.2	8.7	770	120.4	59.4	11.7
440	85.8	24.8	6.5	610	103.6	42.6	9.6	780	120.5	59.5	11.2
450	86.9	25.9	6.8	620	105.2	44.2	11.0	790	122.7	61.7	12.5
460	88.1	27.1	7.1	630	106.6	45.6	12.1	800	125.1	64.1	14.5
470	89.3	28.3	7.4	640	105.9	44.9	8.7	810	121.7	60.7	11.5
480	90.3	29.3	7.6	650	107.3	46.3	9.2	820	119.6	58.6	8.7
490	91.4	30.4	7.7	660	108.7	47.7	10.0	830	121.2	60.2	10.2
500	92.5	31.5	7.8	670	110.0	49.0	10.7	840	122.3	61.3	10.7
510	93.5	32.5	8.0	680	111.0	50.0	10.9	850	123.5	62.5	11.4
520	94.6	33.6	8.3	690	112.2	51.2	11.3	860	125.0	64.0	11.8
530	95.6	34.6	8.4	700	113.9	52.9	12.7	870	121.9	60.9	6.2
540	96.6	35.6	8.8	710	115.1	54.1	13.3	880	123.2	62.2	6.5
550	97.8	36.8	9.2	720	114.6	53.6	11.7	890	124.6	63.6	7.1
560	98.9	37.9	9.6	730	114.1	53.1	8.8	900	126.3	65.3	7.3

使用データ：普通の冬となった 21 年間 (1978, 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1993, 1995, 1997, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020) の日平均気温.

表 7c 暖かい冬 (C1 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 1 日用).
他は表 7a と同様.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	89.9	28.9	7.6	570	106.5	45.5	10.8	740	124.5	63.5	7.3
410	91.0	30.0	7.8	580	107.6	46.6	11.0	750	126.0	65.0	7.8
420	91.9	30.9	8.0	590	108.9	47.9	11.8	760	127.9	66.9	9.0
430	92.8	31.8	8.2	600	110.4	49.4	12.9	770	129.6	68.6	9.5
440	93.5	32.5	8.2	610	108.9	47.9	8.1	780	132.3	71.3	10.5
450	94.5	33.5	8.5	620	110.9	49.9	10.0	790	132.4	71.4	10.4
460	95.5	34.5	8.9	630	112.8	51.8	11.4	800	131.9	70.9	10.7
470	96.4	35.4	9.1	640	111.1	50.1	4.8	810	132.2	71.2	9.4
480	97.4	36.4	9.2	650	112.7	51.7	5.0	820	134.4	73.4	10.1
490	98.5	37.5	9.4	660	113.9	52.9	5.4	830	129.8	68.8	5.2
500	99.6	38.6	9.9	670	115.0	54.0	5.5	840	130.9	69.9	5.1
510	100.5	39.5	10.0	680	116.3	55.3	5.7	850	132.4	71.4	5.1
520	101.4	40.4	10.2	690	117.9	56.9	5.4	860	134.6	73.6	6.7
530	102.6	41.6	10.4	700	119.3	58.3	5.8	870	136.4	75.4	7.3
540	103.6	42.6	10.5	710	120.5	59.5	6.3	880	135.4	74.4	4.7
550	104.6	43.6	10.7	720	121.6	60.6	6.6	890	139.2	78.2	3.9
560	105.5	44.5	10.8	730	122.7	61.7	6.7	900	141.2	80.2	3.2

使用データ：暖かい冬となった 12 年間 (1980, 1981, 1983, 1990, 1991, 1994, 1996, 1998, 2009, 2011, 2014, 2016) の日平均気温.

表 8a 寒い冬 (A2 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 16 日用).
到達日数 A は 11 月 1 日からの日数, 到達日数 B は 1 月 1 日からの日数. 2 月 29 日以降のうるう年は 1 日ずらして使うこと.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	69.7	8.7	3.5	570	85.8	24.8	4.9	740	102.9	41.9	10.1
410	70.6	9.6	3.1	580	86.6	25.6	5.0	750	103.9	42.9	10.6
420	71.5	10.5	3.0	590	87.5	26.5	5.2	760	104.9	43.9	11.1
430	72.5	11.5	3.2	600	88.3	27.3	5.4	770	105.9	44.9	11.7
440	73.4	12.4	3.4	610	89.2	28.2	5.8	780	106.8	45.8	12.1
450	74.4	13.4	3.4	620	90.3	29.3	6.4	790	107.6	46.6	12.5
460	75.3	14.3	3.4	630	91.4	30.4	6.7	800	108.5	47.5	12.7
470	76.3	15.3	3.3	640	92.3	31.3	6.9	810	109.7	48.7	12.9
480	77.1	16.1	3.3	650	93.2	32.2	7.2	820	110.6	49.6	13.1
490	78.3	17.3	3.9	660	94.2	33.2	7.5	830	111.6	50.6	13.6
500	79.4	18.4	4.3	670	95.4	34.4	7.8	840	113.1	52.1	15.0
510	80.3	19.3	4.3	680	96.5	35.5	8.1	850	114.8	53.8	16.5
520	81.5	20.5	4.4	690	97.5	36.5	8.3	860	113.5	52.5	17.2
530	82.3	21.3	4.6	700	98.6	37.6	8.2	870	108.5	47.5	7.3
540	83.1	22.1	4.6	710	99.7	38.7	8.6	880	109.6	48.6	7.3
550	84.1	23.1	4.8	720	100.9	39.9	9.1	890	110.9	49.9	7.4
560	85.0	24.0	4.8	730	102.1	41.1	9.8	900	112.3	51.3	8.1

使用データ：8 年間 (1985, 1986, 1988, 2001, 2002, 2003, 2017, 2013) の日平均気温.

表 8b 普通の冬 (B2 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 16 日用).
他は表 8a と同様.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	81.1	20.1	4.0	570	99.7	38.7	8.8	740	116.1	55.1	9.3
410	82.5	21.5	4.4	580	101.2	40.2	10.6	750	117.7	56.7	10.0
420	83.6	22.6	4.5	590	100.5	39.5	6.5	760	119.1	58.1	10.7
430	84.7	23.7	4.6	600	101.6	40.6	6.7	770	120.7	59.7	11.7
440	85.7	24.7	4.8	610	102.6	41.6	7.0	780	121.4	60.4	11.7
450	86.7	25.7	4.9	620	103.8	42.8	7.3	790	122.1	61.1	11.6
460	87.8	26.8	5.0	630	105.1	44.1	7.9	800	124.4	63.4	13.4
470	89.0	28.0	5.2	640	106.3	45.3	8.2	810	122.7	61.7	11.2
480	90.0	29.0	5.4	650	107.6	46.6	8.7	820	121.8	60.8	9.9
490	91.0	30.0	5.5	660	108.9	47.9	9.3	830	121.7	60.7	9.1
500	92.1	31.1	5.7	670	110.1	49.1	9.9	840	123.0	62.0	9.7
510	93.0	32.0	5.9	680	111.1	50.1	10.2	850	124.4	63.4	10.4
520	94.1	33.1	6.3	690	112.3	51.3	10.5	860	126.0	65.0	11.1
530	95.0	34.0	6.4	700	113.8	52.8	11.8	870	124.3	63.3	8.2
540	96.0	35.0	6.9	710	114.9	53.9	12.4	880	124.0	63.0	6.6
550	97.1	36.1	7.2	720	114.8	53.8	11.1	890	125.6	64.6	7.5
560	98.2	37.2	7.6	730	114.6	53.6	8.8	900	127.1	66.1	7.8

使用データ：25 年間 (1978, 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012, 2015, 2016, 2018, 2019, 2020) の日平均気温.

表 8c 暖かい冬 (C2 パターン) での日積算寒度に相当する日付とその標準偏差 (1 月 16 日用).
他は表 8a と同様.

日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差	日積算寒度	日数A	日数B	標準偏差
400	91.8	30.8	7.9	570	109.5	48.5	11.6	740	125.3	64.3	5.7
410	92.9	31.9	8.1	580	110.6	49.6	11.9	750	126.9	65.9	6.2
420	94.0	33.0	8.3	590	111.9	50.9	12.7	760	128.8	67.8	7.2
430	94.9	33.9	8.5	600	113.4	52.4	13.9	770	130.6	69.6	7.6
440	95.8	34.8	8.6	610	112.3	51.3	10.4	780	133.1	72.1	8.8
450	96.9	35.9	8.9	620	115.3	54.3	13.5	790	135.0	74.0	9.4
460	98.3	37.3	9.5	630	117.5	56.5	15.7	800	134.5	73.5	10.0
470	99.3	38.3	9.7	640	111.2	50.2	4.0	810	133.3	72.3	7.1
480	100.3	39.3	9.7	650	113.0	52.0	4.7	820	135.1	74.1	8.5
490	101.4	40.4	9.8	660	114.2	53.2	5.2	830	132.1	71.1	3.0
500	102.4	41.4	10.4	670	115.4	54.4	5.1	840	133.0	72.0	3.3
510	103.4	42.4	10.6	680	116.7	55.7	5.2	850	134.4	73.4	4.0
520	104.3	43.3	10.8	690	118.7	57.7	4.3	860	136.9	75.9	6.0
530	105.6	44.6	10.9	700	120.1	59.1	4.6	870	138.9	77.9	6.4
540	106.5	45.5	11.1	710	121.3	60.3	5.1	880	137.8	76.8	3.3
550	107.6	46.6	11.4	720	122.5	61.5	5.4	890	141.5	80.5	0.2
560	108.5	47.5	11.6	730	123.6	62.6	5.7	900	143.0	82.0	0.2

使用データ：10 年間 (1980, 1981, 1983, 1990, 1991, 1994, 1996, 2009, 2010, 2014) の日平均気温.

2020 年 11 月 1 日から 12 月 31 日まで川湯アメダスの日積算寒度は $256.9^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ となったため, 2021 年は寒い冬 (A1) に入ることがわかった. このため, 寒い冬の表 (表 5a) を用いて日積算寒度が $710^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ の時の日数を求めると 101.3 ± 8.5 日後だとわかる. この日付は 11 月 1 日以降の日数のため, この方法では 2 月 10 日 ± 8.5 日 (2 月 1 日 ~ 2 月 19 日) に全面結氷することが予測できた. A1 パターンで日積算寒度が $710^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ に至らなかった年はないため, 基本的には 100% の確率で 2021 年は全面結氷になることが予測できた.

3.2 節で述べたように 2021 年の全面結氷日は 2 月 14 日だったため, 予測は 4 日早い結果となった.

4.4.3 2021 年 1 月 16 日時点での予測

摩周湖の全面結氷日の予測精度をさらに向上させるため, 2020 年 11 月 1 日から 2021 年 1 月 15 日までの日平均気温を使って日積算寒度を計算し, 全面結氷日を予測してみた.

図 17a に 1 月 15 日時点で日積算寒度が $415^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 以上を寒い冬 (A2), 290 以上 $415^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$

未満を普通の冬 (B2), $290^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 未満を暖かい冬 (C2) とした結果を示す. それぞれのパターンで積算寒度が任意の値に至る日付に関して, 表 8a は寒い冬 (A2), 表 8b は普通の冬 (B2), 表 8c は暖かい冬 (C2) の計算表である. 図 17b には 2021 年冬季の日積算寒度の変化を黒線で示した.

2020 年 11 月 1 日から 2021 年 1 月 15 日までの川湯アメダスの日積算寒度は $434.1^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ であり, A2 パターンに入ることがわかった. このため, 寒い冬の表 (表 8a) を用いて日積算寒度が $710^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ の時の日数を求めた. この結果, 全面結氷日は 99.7 ± 8.6 日後だとわかった. これは 2 月 8 日 ± 8.6 日 (1 月 31 日 ~ 2 月 17 日) に全面結氷することが予測できた. なお, A2 パターンで日積算寒度が $710^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ に至らなかった年はないため, 基本的には 100% の確率で 2021 年は全面結氷になることが予測できた.

3.2 節に記載したように, 2021 年の全面結氷日は 2 月 14 日だったため, 予測は 6 日早い結果となった. 本来であれば, 1 月 1 日での予測よりも予測精度が高くなるはずであったが, 結果は異

なった。これは図 17b の黒線に示すように、2021 年は 2 月 1 日以降の積算寒度の上昇速度が「寒い冬の平均」(A2 の平均) と比べると小さかったため、予測よりも全面結氷が遅くなったためだと考えられる。実際、2020 年 11 月 1 日から摩周湖が全面結氷をした 2021 年 2 月 14 日までの川湯での日積算寒度は $716.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ であり、2020 年 6~8 月の川湯での日最高気温の平均から推定した「全面結氷に必要な日積算寒度 ($710^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)」とはほぼ等しくなっていた。

現時点では摩周湖の全面結氷に最も影響を与えている川湯の 2 月の平均気温を半年から 2 週間前に正確に予測することは難しいため、全面結氷日の予測は前後 1 週間程度の誤差が生ずることがわかった。ただし、全面結氷している摩周湖は観光資源として考えられるため、今回の方法による全面結氷日予測は観光業の方々にとっても価値が高いと考えられる。

なお、表 6、表 7a-c および表 8a-c は 2022 年以降も摩周湖の全面結氷日予測で使用することが基本的には可能である。

5. まとめ

本研究では、1974 年から 2021 年までの摩周湖の結氷データを用いて、摩周湖が全面結氷する条件を調べた。この結果、以下のことが解明できた。

- 1) 摩周湖は過去 48 年間で 27 回全面結氷した。すなわち、全面結氷した割合は 56.3% である。
- 2) 2021 年の場合、2 月 5 日から結氷が始まり、2 月 14 日と 15 日に全面結氷となった。結氷開始から全面結氷まで 9 日間であった。
- 3) 摩周湖に最も近い川湯アメダスの 2 月の月平均気温が -8.9°C 以下になると、95.5% の確率で全面結氷年を推定できることがわかった。この地域の 2 月の月平均気温は上昇しているため、今後、摩周湖が全面結氷する割合は減少することが想定できる。
- 4) 弟子屈アメダスの日平均気温の 61 日間の移動平均での年最低気温が -7.8°C 以下になると、95.5% の確率で全面結氷年を推定できることがわかった。
- 5) 摩周湖の結氷は、前年の夏の気温の影響 (特

に、6 月 1 日から 8 月 31 日での日最高気温の平均) を受けていることがわかった。この関係を用いることで、冬季の全面結氷日を予測できた。

- 6) 2020 年 9 月 1 日、2021 年 1 月 1 日および 1 月 16 日時点で 2021 年の摩周湖の全面結氷日を予測した結果、全面結氷日はそれぞれ 2 月 22 日、2 月 10 日、2 月 8 日と推定できた。実際には 2 月 14 日に全面結氷したため、予測誤差はそれぞれ +8 日、-4 日、-6 日となり、前後 1 週間程度の予測誤差が発生した。これは 1 月と 2 月の気温を半年から 1 ヶ月前に正確に予測することが難しいため生じたと考えられる。

なお、本論文に掲載している摩周湖の結氷予測に使う表 (表 6、表 7a-c および表 8a-c) は 2022 年以降も摩周湖の全面結氷日予測で使用することが基本的には可能である。

謝 辞

本研究で使用したデータの中で、1977 年と 1978 年のデータは東海林明雄博士が摩周第一展望台で確認したデータ (細川・蜂谷, 2004) を使用しました。摩周第一展望台にライブカメラを設置し、管理・運用している弟子屈町、ライブカメラ画像をインターネットで公開している一般社団法人摩周湖観光協会に感謝いたします。本研究で使用した気象データは気象庁が観測し、公開しているデータを使用した。観測装置を維持し、データを管理している気象庁に感謝いたします。摩周湖の全面結氷日と前年夏の気温との関係は大鐘卓哉氏 (小樽市総合博物館主幹学芸員、北見工業大学大学院博士後期課程在学) からのアドバイスに基づいた。片瀬亜美氏 (川湯エコミュージアムセンター自然解説員) には本研究開始時に屈斜路湖と摩周湖に関するこれまでの結氷記録を御教示していただいた。図 1 の衛星画像は、ESA (European Space Agency) が Sentinel Hub EO Browser (<https://sentinel-hub.com>) で無償公開している Sentinel-2 が撮影した衛星画像を用いた。図 2 の地図は国土地理院がインターネットで公開している「地理院地図 (電子国土 web)」を

ベースマップとして使用した。Sentinel-2 の衛星画像は館山一孝博士に御教示していただいた。IAHR (1980) と久保 (1980) 掲載の「氷術語集」は吉川泰弘博士に御教示していただいた。原稿担当委員の鈴木和良博士ならびに 2 名の査読者からのコメントは原稿改訂に大いに役立った。記して感謝いたします。

文 献

- 新井 正 (2000): 地球温暖化と陸水水温. 陸水学雑誌, **61**, 25-34.
- 新井 正 (2004): 地域分析のための熱・水収支水文学. 古今書院, 309 pp.
- 新井 正 (2009): 気候変動と陸水の温度および氷況の変化. 陸水学雑誌, **70**, 99-116.
- Arakawa, H. (1954): FUJIWHARA on five centuries of freezing dates of Lake Suwa in the central Japan. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, **B6**, 152-166.
- 荒川秀俊 (1954): 5 世紀に亘る諏訪湖御神渡の研究. 地学雑誌, **63** (4), 1-8.
- 荒川秀俊 (1963): 16 世紀の気候と“当社神幸記”に現われたる明海の記事. 天気, **10** (3), 82-83.
- Benson, B. J., Magnuson, J. J., Jensen, O. P., Card, V. M., Hodgkins, G., Korhonen, J., Livingstone, D. M., Kenton M. Stewart, K. M., Weyhenmeyer, G. A., Granin, N. G. (2012): Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855-2005). *Climatic Change*, **112**, 299-323.
- 知北和久, 大八木英夫, 山根志織, 相山忠男, 板谷利久, 岡田 操, 坂元秀行 (2017): 気候変動に対する深い温帯湖の熱的応答-北海道・倶多楽湖-. 日本水文科学会誌, **47** (2), 73-86.
- Chikita, K. A., Oyagi H., Aiyama, T., Okada, M., Sakamoto, H. and Itaya, I. (2018): Thermal regime of a deep temperate lake and its response to climate change: Lake Kuttara, Japan. *Hydrology*, **5**, 17, doi:10.3390/hydrology5010017
- 知北和久, 大八木英夫, 牧野 昌, 漢那直也, 刀根賢太, 坂元秀行, 波多俊太郎, 安藤卓人, 白井裕子 (2020): 山岳湖沼における結氷現象と気候変動との関係. 陸水物理学会誌, **2** (1), 3-13.
- 地球環境研究センター (2004): GEMS/Water 摩周湖モニタリングデータブック. 独立行政法人国立環境研究所, 北見工業大学, 北海道環境科学研究センター編, 222 pp. <https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/m016/M016.pdf> (2020. 07. 20 閲覧).
- 藤井良一, 元場哲郎 (2006): 第 2 章太陽地球系システムにおける気候変動. 環境理学 太陽から人まで, 編著: 野上道男, 古今書院, 25-64.
- Fujiwhara, H. (1921): Notes on the climatic variations concluded from the dates of the first complete freezing of Lake Suwa in Japan. *Geografiska Annaler*, **3**, 358-361.
- 藤原咲平, 関口 領 (1936): 諏訪湖結氷期日の遅速の解析. 気象集誌, **14**, 587-591.
- 藤原咲平, 荒川秀俊 (1954): 諏訪湖結氷期日並びに御神渡期日表. 研究時報, **6** (5), 127-137 (藤原咲平遺稿・荒川秀俊校訂).
- George, G. ed.(2010): *The impact of climate change on European lakes*. Springer, 507 pp.
- Gray, B. M. (1974): Early Japanese winter temperatures. *Weather*, **29**, 103-107.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G., Hood, L., Luterbacher, J., Meehl, G. A., Shindell, D., van Geel, B. and White, W. (2010): Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, **48**, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
- 蜂谷 衛 (1998): 屈斜路湖における結氷と御神渡り現象の研究. 私家版, 34 pp.
- 蜂谷 衛 (2006): 屈斜路湖における結氷と御神渡り現象の研究Ⅱ. 私家版, 29 pp.
- 蜂谷 衛 (2021): 屈斜路湖における結氷と湖水観測 2014~2021. 私家版, 19 pp.
- 濱田浩美 (2004): 摩周湖の地理学的特徴. GEMS/Water 摩周湖調査シンポジウム-摩周湖が守る地球環境-講演要旨集, 14-17. <https://www.cger.nies.go.jp/ja/news/workshop/w041105/w041105summary.pdf> (2020. 07. 20 閲覧).
- 濱田浩美 (2007): 北海道摩周湖における循環と結氷. 日本陸水学会講演要旨集, 1B11.
- 濱田浩美, 袴田 倫, 田中 敦 (2005): 北海道摩周湖における水温変化と結氷. 日本陸水学会講演要旨集, P41.
- 濱田浩美, 西川博章, 知北和久 (2011): 日本国内湖沼の結氷条件と温暖化による変化. 陸水物理学会学術大会 (2011 年度東京大会) 講演要旨集, 36-37.
- 細川音治, 蜂谷 衛 (2004): 表 5.8 摩周湖の結氷記録. GEMS/Water 摩周湖モニタリングデータブック, 96. <https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/m016/M016.pdf> (2020.07.20 閲覧).
- 平井有三 (2012): はじめてのパターン認識. 森北出版, 219 pp.
- IAHR (1980): Multilingual ice terminology. International Association for Hydraulic Research, Section on ice problems, Research Centre for Water Resources,

- Budapest. https://riversgages.mvr.usace.army.mil/WaterControl/Districts/MVP/Reports/ice/iahr_ice_terminology.html (2021. 05. 14 閲覧).
- 今田和史, 安富亮平, 工藤 智 (2002): 2001, 支笏湖と洞爺湖が凍った理由. 魚と水, **38**, 59-68.
- 石黒直子 (2001): 諏訪湖の御神渡し記録の気候復元資料としての均質性. 地理学評論, **74** (7), 415-423.
- Ishiguro, N., Kajiwar, M., Fujita, T., Akiba, Y. and Touchart, L. (2002): Heterogeneity of the Omiwatari records of Lake Suwa as the database for winter temperature estimation. *SIL Proceedings (Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen)*, 1922-2010, **28** (2), 1107-1110. doi:10.1080/03680770.2001.11901889.
- 石川信敬, 小林俊一, 秋田谷英次 (1980): 倶多楽湖における小気候調査. 低温科学, 物理篇, **38**, 121-127.
- Kirillin, G., Leppäranta, M., Terzhevik, Granin, N., Bernhardt, J., Engelhardt, C., Efremova, T., Golosov, S., Palshin, N., Sherstyankin, P., Zdrovennova, G., Zdrovennov, R. (2012): Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*, **74**, 659-682.
- 気象庁 (2003): 摩周. 火山活動解説資料 (平成 15 年の活動). https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/03m12/100_03.pdf (2020. 07. 20 閲覧).
- 気象庁 (2021a): エルニーニョ/ラニーニャ現象とは. <https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/whatiselnino.html> (2021. 03. 15 閲覧).
- 気象庁 (2021b): 太平洋規模十年振動 (PDO) 指数の変動. https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/b_1/pdo/pdo.html (2021. 03. 15 閲覧).
- 久保義光 (1980): IV 氷術語集 (Multilingual ice terminology). 氷工学序説, 氷工学刊行会, 東京, 174-179.
- 国立天文台編 (2020): 日本のおもな湖沼, 理科年表, 丸善出版, 632-633.
- Leppäranta, M. (2015): *Freezing of lakes and the evolution of their ice cover*. Springer, 301 pp.
- 前田修平 (2013): 第 12 章 ENSO と日本の天候. エルニーニョ・南方振動 (ENSO) 研究の現在, 編集: 渡部雅浩, 木本昌秀, 気象研究ノート, **228**, 167-180.
- Magnuson, J.J., Robertson, D.M., Benson, B.J., Wynne, R.H., Livingstone, D.M., Arai, T., Assel, R.A., Barry, R.G., Card, V., Kuusisto, E., Granin, N.G., Prowse, T.D., Stewart, K.M., Vuglinski, V.S. (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science*, **289**, 1743-1746 (errata 2001, *Science*, **291**, 254).
- 三上岳彦, 石黒直子 (1998): 第 5 章 諏訪湖結氷記録からみた過去 550 年間の気候変動. 過去 2000 年間の気候変動とその要因, 編集: 三上岳彦, 気象研究ノート, **191**, 73-83.
- 三上岳彦 (2006): 第 5 章 文章記録と観測データから読み取る気候変動. 環境理学 太陽から人まで, 編著: 野上道男, 古今書院, 124-160.
- Mikami, T. (2008): Climatic variations in Japan reconstructed from historical documents. *Weather*, **63** (7), 190-193.
- 永田 俊, 熊谷道夫, 吉山浩平編 (2012): 温暖化の湖沼学, 京都大学学術出版会, 289 pp.
- Ohata, Y., Toyota, T. and Fraser, A.D. (2017): The role of snow in the thickening processes of lake ice at Lake Abashiri, Hokkaido, Japan. *Tellus, A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **69** (1), doi:10.1080/16000870.2017.1391655.
- Shirasawa, K. and Leppäranta, M. (2003): Hydrometeorological and sea ice conditions in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *Report Series in Geophysics*. University of Helsinki, **46**, 161-168.
- Shirasawa, K., Ishikawa, M., Takatsuka, T., Maekawa, K. (2005): Sea ice conditions, and meteorological and oceanographic observations at Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, November 2003 - September 2004. 低温科学, 物理篇, 資料集, **63**, 34-49.
- 高橋正征, 白澤邦男 (2002): 総説: 海水生態系とは. 海水生態系—サロマ湖とオホーツク海の研究から—, 月間海洋, 号外 **30**, 5-10.
- 高安三次, 近藤賢蔵 (1934): 湖沼調査. 第 1 編摩周湖調査, 水産調査報告, **35**, 1-18.
- Tanaka, K. and Yoshino, M.M. (1982): Re-examination of the climatic change in central Japan based on freezing dates of Lake Suwa. *Weather*, **37** (9), 252-259.
- 田中正明 (1992): 日本湖沼誌—プランクトンから見た富栄養化の現状—, 名古屋大学出版会, 530 pp.
- 田中正明 (2004): 日本湖沼誌 II—プランクトンから見た富栄養化の現状—, 名古屋大学出版会, 345 pp.
- 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) 特集号, **67** (2), I_72-I_731.
- 東海林明雄 (1984): 摩周湖の特性. 北海道の自然, **24**, 22-29.
- 東海林明雄, 蜂谷 衛 (2017): 摩周湖の結氷から解氷まで. 北海道の雪氷, **36**, 45-48.
- Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M. and Sharma, S. (2020): Global lake responses to climate change. *Nat.Rev.Earth.Environ.*, **1**, 388-403. <http://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

付録 1 4.1 節および 4.2 節での基準温度, 正解率, 偽陽性率, 適合率の算出方法

基準温度の算出には, 情報検索および機械学習などの分野で使われている混同行列 (confusion matrix) を用いた。以下にその詳細を説明する。表 A1 に混同行列を示す。TP は基準温度以下で全面結氷を予測し, 全面結氷となった場合であり, 真陽性 (true positive) である。FN は基準温度を超えたため部分結氷を予測したが全面結氷となった場合であり, 偽陰性 (false negative) である。FP は基準温度以下で全面結氷を予測したが部分結氷となった場合であり, 偽陽性 (false positive) である。TN は基準温度を超えたため部分結氷を予測し, 部分結氷となった場合であり, 真陰性 (true negative) である。

4.1 節および 4.2 節では全面結氷と部分結氷を分類するときの指標として正解率 (A : accuracy) と偽陽性率 (F : false positive rate) を用いた。ここで, 正解率とは基準温度以下で全面結氷となり, 基準温度を超えた時に部分結氷となった時の合計の割合であり, 式 (A1) で計算した。過去 48 年間で摩周湖が全面結氷した割合は 56.3% であり, 部分結氷年は 44.7% であったため, 全面結氷年と部分結氷年の割合は大きく異ならなかった。このため, 全面結氷と部分結氷を分類する際の基準指標として正解率を採用した。偽陽性率とは部分結氷となったときに基準温度以下となったときの割合であり, 式 (A2) で計算した。ここで, TP などのイタリック表記はそれぞれの事例数を示す。

$$A = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \times 100 \quad (A1)$$

$$F = \frac{FP}{FP + TN} \times 100 \quad (A2)$$

複数の基準温度で正解率が最大になった場合には, 偽陽性率が最も低い温度を基準温度とした。さらに, 正解率と偽陽性率が同じ値の場合には, 2022 年以降で同じ基準温度を使って摩周湖の全面結氷を予測することを考慮して, 最も低い温度を基準温度とした。

また, 基準温度以下で実際に全面結氷になるときの確率は式 (A3) に示す適合率 (P : precision) を使って評価した。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100 \quad (A3)$$

ここで, 適合率とは全面結氷と予測したときに実際に全面結氷となった割合を示す。このため, 適合率では基準温度以下になったときに実際に全面結氷となった確率を表すことができる。

付録 2 冬季気温の移動平均の計算例

4.2 節に記述した冬季の移動平均の気温の計算例を図 A1 に示す。これは正解率が最も高く, 偽陽性率が最も低くなった例であり, 弟子屈アメダスでの 2020 年 3 月 1 日から 2021 年 4 月 30 日までの日平均気温と 61 日間の移動平均の気温を示す。

付録 3 日平均気温の変化 (9/1~1/31)

図 A2 に川湯アメダスでの 1978 年から 2020 年での 9 月 1 日から 1 月 31 日までの日平均気温の変化を示す。年により, 日平均気温は大きく変化することがわかる。

表 A1 基準温度に関する摩周湖の全面結氷と部分結氷に関する混同行列。

		予測	
		基準温度以下の 気温で全面結氷	基準温度を超えた 気温で部分結氷
実際	全面結氷	TP	FN
	部分結氷	FP	TN

表 A2 表 2 で示した基準温度のときの混同行列での各指標の年数。

地点名	混同行列での要素	12月~2月	12月	1月	2月
川湯アメダス	TP	22	13	22	21
	FN	3	12	3	4
	FP	2	1	8	1
	TN	17	18	11	18
弟子屈アメダス	TP	23	22	21	20
	FN	2	3	4	5
	FP	2	12	7	2
	TN	17	7	12	17

表 A3 表 4 で示した基準温度のときの混同行列での各指標の年数.

地点名	混同行列での要素	11日間	21日間	31日間	41日間	51日間	61日間
川湯アメダス	TP	25	24	25	20	20	20
	FN	0	1	0	5	5	5
	FP	5	4	8	2	2	2
	TN	14	15	11	17	17	17
弟子屈アメダス	TP	24	25	25	23	24	21
	FN	1	0	0	2	1	4
	FP	5	5	7	4	4	1
	TN	14	14	12	15	15	18

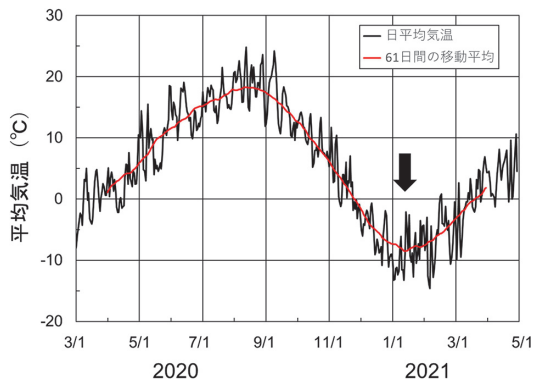


図 A1 弟子屈アメダスでの日平均気温と 61 日間の移動平均 (2020 年 3 月 1 日～2021 年 4 月 30 日). 黒矢印で移動平均での年最低気温を示す.

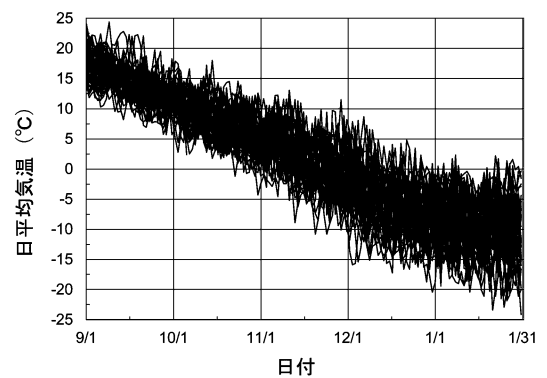


図 A2 1978 年から 2020 年までの 9 月 1 日から 1 月 31 日までの日平均気温の変化 (川湯アメダス). 年は寒候年のため, 1 月以降の年で表示.

**Meteorological conditions for complete ice cover on Lake Mashu
in Hokkaido, Japan using observational data from 1974 to 2021
and prediction of freeze-up date in February, 2021**

Takao KAMEDA^{1*}, Mamoru HACHIYA², Shingo NIDAIRA^{1,3} and Otoji HOSOKAWA⁴

¹ *Snow and Ice Research Laboratory, Kitami Institute of Technology,
165 Koencho, Kitami, Hokkaido 090-8507*

² *5-18, 1 Chome, Chuo, Teshikaga, Kawakami-gun, Hokkaido 088-3211*

³ *Daigomachi Town Hall, 866 Taishi, Daigomachi, Kuji-gun, Ibaraki 319-3526*

⁴ *4-13-403, 3 Chome, Kita 3, Hanakawa, Ishikari, Hokkaido 061-3213*

** Corresponding author: kameda@mail.kitami-it.ac.jp*

Abstract: The freezing conditions of Lake Mashu from 1974 to 2021 were investigated at the nearest observatory. We found that Lake Mashu was completely covered by ice 27 times during the period. The complete ice coverage rate was 56.3%. We also found that Lake Mashu was completely covered by ice at 95.5% when the average monthly air temperature in February at the nearest meteorological station (Kawayu AMeDAS) decreased below -8.9°C . When the yearly minimum air temperature of simple moving averages using 61 average daily temperatures at the second nearest meteorological station (Teshikaga AMeDAS) decreased below -7.8°C , we also detected the complete coverage of Lake Mashu. The accumulated negative average daily air temperature for the complete ice coverage condition is not constant and depends on the air temperature of the previous summer. Using the relationship, we can forecast the freeze-up date of Lake Mashu in 2021. The forecast date was February 24, 2021 based on the forecast on September 1, 2020. We can also forecast the dates as February 10 and February 8, 2021 based on the forecasts on January 1 and January 16, 2021, respectively. Lake Mashu was completely covered by ice on February 14 in 2021, with the forecast errors of +8, -4, and -6 days for the respective forecasts. Thus, the prediction is achieved within about ± 1 week. Because the average monthly air temperature in February increases in this region, the complete ice coverage percentage of Lake Mashu will decrease in the future.

(2021 年 5 月 30 日受付, 2021 年 9 月 30 日改稿受付, 2021 年 10 月 25 日再改稿受付,
2021 年 12 月 7 日受理, 討論期限 2022 年 6 月 15 日)