



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北部北太平洋地域における山岳アイスコア研究
Author(s)	的場, 澄人; Matoba, Sumito
Citation	低温科学, 82, 161-170
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.161
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91751
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p161-170_LT82.pdf



北部北太平洋地域における山岳アイスコア研究

的場 澄人¹⁾

2023 年 11 月 27 日受付, 2023 年 12 月 7 日受理

山岳氷河は南極やグリーンランドの氷床と比べて年間の涵養量が著しく高いため、山岳アイスコアで掘削されたアイスコアは高い時間分解能で環境を復元することができる。低温科学研究所では、北部北太平洋地域の環境復元を目的にカムチャツカ半島で2ヶ所、アラスカで2ヶ所の山岳氷河から計5本のアイスコアを採取した。これらのアイスコアから、カムチャツカとアラスカにおける数百年間の年間涵養量が復元され、北部北太平洋域への大気由来鉄の沈着量が復元されるなどの成果が得られた。この一連の研究から、精密な年代決定がなされたアイスコアを用いれば、気象再解析データ、気候モデルと比較できる降水量やエアロゾル沈着量のデータを復元できることが示された。

Alpine ice core research in the northern North Pacific

Sumito Matoba¹

Alpine glaciers have significantly higher annual accumulation rates than the Antarctic and Greenland Ice Sheets, allowing for environmental reconstruction with high temporal resolution. The Institute of Low Temperature Science has collected a total of five alpine glacier ice cores from two mountain glaciers in the Kamchatka Peninsula and two in Alaska to reconstruct the environmental changes in the northern North Pacific region. As a result of these researches, hundreds of years of annual accumulation rates in Kamchatka and Alaska have been reconstructed, as well as the deposition of air-borne iron to the northern North Pacific region. This series of researches showed that precisely dated ice cores can recover precipitation and aerosol deposition data that can be compared to meteorological reanalysis data and climate models.

キーワード：山岳氷河、古環境復元、北部北太平洋、アイスコア掘削

Ice core, Alpine glacier, Reconstruction of paleo-environment, northern North Pacific, Ice-core drilling

1. はじめに

氷床や氷河を掘削して採取されるアイスコアは、過去から現在までの地球の環境変化を復元できるアーカイブの一つとして知られている。アイスコアの掘削は1950年代にグリーンランドで開始された。当初、アイスコアを

用いた古環境研究の目的は、氷期・間氷期スケールの気候変動を復元することであり、年間の降水量が少なく氷が厚い場所で長いアイスコアを採取することが求められた。グリーンランドでは、1966年には北西部のCamp Century基地にて岩盤まで到達する1367 mのアイスコアが掘削された (Hansen and Langway, 1966)。さらに1992年

連絡先

的場 澄人

北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-5485

Email: matoba@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature
Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

にはデンマーク、フランス、スイスなどの西ヨーロッパ諸国がグリーンランド氷床の頂上部のSummit / GRIP基地で、1993年にはアメリカがGISP2基地において岩盤まで到達するアイスコアの採取に成功した (Dansgaard et al., 1993; Mayewski et al., 1994)。これらのアイスコアは、現代から一つ前の氷期の氷を完全に含み、氷期には寒冷化と温暖化が何度も繰り返されること (Dansgaard-Oeschger サイクル) や (Johnsen, et al., 1992)、気温の変化と二酸化炭素濃度の関連性などが明らかにされた (Ankin et al., 1997)。南極では1968年にByrd基地にて岩盤まで到達する2191mのアイスコアが掘削され (Gow et al., 1967)、その後Vostok基地 (Lipenkov et al., 1989)、Dome Concordia基地 (Augustin et al., 2007)、Dome Fuji基地 (Motoyama et al., 2021) において岩盤まで到達するアイスコアが採取された。これらの南極氷床のアイスコアは50～80万年間の環境変動情報を含み、氷期―間氷期サイクルの繰り返しが復元された。

山岳氷河や極域の比較的小さな氷河、氷帽でのアイスコア掘削は1970年代から本格的に実施された。代表的な研究は、1983年にペルーのQuelccaya氷帽にて行われた164 mのアイスコア掘削で、このアイスコアから約1800年間の環境変化が復元された (Thompson et al., 2013)。日本の研究機関が中心となった山岳アイスコア掘削は、本稿で取り上げる北部北太平洋地域以外に、ネパールヒマラヤ (Tsushima et al., 2021; 對馬, 2024)、中央アジア (Takeuchi et al., 2019)、チリ・アンデス山脈 (Shiraiwa et al., 2002)、スバルバル諸島 (Matoba et al., 2002)、北極カナダ (Okuyama et al., 2003) などで行われてきた。

山岳アイスコアの特徴は、掘削地点が山岳地域の高所であり、そのような場所は年間の降水量が大きい、氷河の氷厚が100-200 m程度、最も多くて1000 m程度と極域氷床に比べて薄いことである。そのような場所で採取されたアイスコアから復元される過去の環境情報は、遡ることができる時間スケールが短い、時間分解能が高くなる。山岳氷河には氷期まで遡ることができるようなアイスコアもあるが、殆どのアイスコアが対象とするのは100年から1000年程度の環境変動である。そのほかの特徴は、掘削地点が人間の活動域に近く、人間の活動に関連する環境変動が復元できることである。産業革命以降、人間の産業活動や農業活動によって放出された汚染物質の変遷や、人間の生活史に影響を与える降水量の変化などの水循環環境の変化が復元できる。また、様々な地上観測、人口衛星を使った観測などによって詳細な環境モニタリングがされている最近50年程度の環境復元におい

ては、山岳アイスコアからは、地上観測データが少ない高所の気象情報や降水量、観測ステーションが少ないエアロゾルの化学組成など、近年の温暖化による環境変化を解明するために必要な情報が得られる。

本稿では、北海道大学低温科学研究所が中心となり北部北太平洋地域において行われたアイスコア研究をレビューし、現在、低温科学研究所が進めているグリーンランド南東ドームアイスコアプロジェクトと、南極ドームふじ深層掘削機の開発について紹介したい。

2. 低温科学研究所が中心となって行われた北部北太平洋地域のアイスコア研究

北部北太平洋地域には、西部にはカムチャツカ半島、東部にはアメリカのアラスカ州、ワシントン州、カナダのユーコン準州、ブリティッシュコロンビア州の山岳地域に氷河がある。この地域のアイスコア研究は1980年代にアラスカ州のランゲル山山頂での掘削に始まる (Benson, 1982)。2000年代以降、東部ではアラスカ州のボナ・チャチル山 (Sierra-Hernández et al., 2002)、エクリプス氷原 (Yalcin and Wake, 2001)、ユーコン準州のローガン山 (Goto-Azuma et al., 2023) などにおいてアメリカやカナダの研究機関が中心になってアイスコア観測が実施された。

北海道大学低温科学研究所では、白岩孝行を中心に1998年にロシア、カムチャツカ半島東山脈のウシュコフスキー山山頂氷河において212 mのアイスコアを掘削したのを始めに (白岩ら, 1999)、2003、2004、2005年にアラスカ州ランゲル山 (e.g. Yasunari et al., 2007)、2006年にカムチャツカ中央山脈のイチンスキー山 (Matoba et al., 2007)、2008年にアラスカ州オーロラピーク近傍氷原にてアイスコア掘削が実施された (Tsushima et al., 2015) (図1)。これらのアイスコアによる研究によって得られた代表的な成果を以下に紹介する。

2.1 カムチャツカ・ウシュコフスキーアイスコア研究による、200年間にわたる降水量の復元と北太平洋10年規模気候変動との関連

ウシュコフスキー山はカムチャツカ半島の東山脈にあり、カムチャツカ中央部のクリチェフスカヤ火山群の第三の高峰である。山頂部は直径4 kmの氷河に覆われたカルデラである。このカルデラの外輪の一角には直径800 mゴルシュコフ・クレーターがあり、氷河で埋積されている。1998年7月に、この氷河上において深度212 mに到達するアイスコアが掘削された (白岩 ほか, 1999)。アイスコア掘

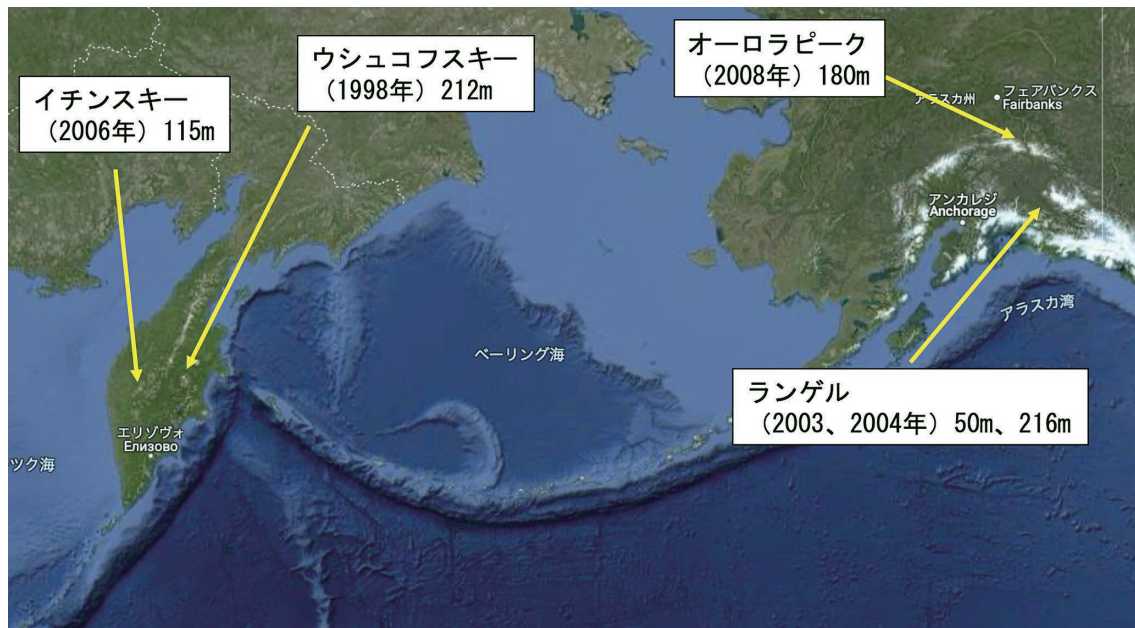


図1：低温科学研究所が中心となって行われた北部北太平洋地域のアイスコア掘削サイト。図はGoogle Earthより作製したものに加筆（Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus, IBCAO, U.S. Geological Survey, INEGIに帰属するデータを使用）

Figure 1: Ice core drilling sites in the northern North Pacific region conducted by ILTS. The map was produced by Google Earth with some additions. (using data belonging to Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus, IBCAO, U.S. Geological Survey, INEGI)

削の前後には、自動気象観測装置による通年の気象観測や積雪断面観測などが実施され、積雪中の水同位体比と硝酸イオン濃度が季節変動をすることなどが見出された (Shiraiwa et al., 2001a)。また、氷河の表面形状、表面質量収支、岩盤地形探査、掘削温度測定が実施され (Shiraiwa et al., 1997; 松岡ほか, 1997; Shiraiwa et al., 2001b)、2次元の氷河の動力学―熱力学結合モデルが考案され、氷河流動が復元された (Salamatin et al., 2000)。一般的に、極域氷床に比べて山岳氷河は流動場が複雑であり、鉛直方向のひずみ量を考慮して求められる年間涵養量の復元には誤差が少なくないことが指摘されている。しかし、ウシュコフスキーアイスコアの研究においては、様々な観測の成果を基に構築された流動モデルにより、流動が複雑な深部においても涵養量が精度よく復元された。

ウシュコフスキーアイスコアから復元された1900年から現在にかけての年間の涵養量は、北太平洋十年規模振動 (PDO) 指数の時間変化に対応し、PDO指数が高いときにカムチャツカの降水量が低くなる傾向が見てとれる。白岩と山口 (2002) では、この変動傾向は、PDO指数が高い時期に、東側の北米沿岸で海面水温が高く西側のカムチャツカ側で低く、北太平洋からカムチャツカに進入する低気圧が少なくなり降水量が減少したと推定した。ま

た、Solomina et al. (2007) では、地上観測によって記録された気象データ、カムチャツカで採取された樹木の年輪幅の変化、このアイスコア中の融解層分布、氷河の質量収支変動を用いてカムチャツカにおける400年間の気候変化を復元した。高精度に年代が推定された山岳アイスコアを用いれば、アイスコアはマルチプロキシによる環境変動復元研究に十分対応が出来ることが示され、その後の山岳アイスコアや高涵養域のアイスコア研究に重要な筋道を示した先駆的な観測と研究として位置づけられる。

2.2 カムチャツカ半島イチンスキーアイスコアによるオホーツク海の水氷変動復元

1998年にアイスコアを採取したウシュコフスキー山は活火山であり、アイスコアに含まれる化学成分は火山噴出物の影響を大きく受けていた。そのため、長距離輸送される大気中のエアロゾル組成の変化は、火山噴出物の影響に隠れてしまい、抽出することができなかった。このウシュコフスキーアイスコアの欠点をふまえ、カムチャツカ地域の化学成分が示す長期的な環境変動を復元するため、火山の影響が少ないオホーツク海側のカムチャツカ・スレドニー山脈の最高峰であるイチンスキー山の山頂の氷河で掘削を行った。イチンスキー山の標高は3,607

mで、3 m×5 mの山頂カルデラに覆われ、頂上部全体が氷冠に覆われている。アイスコアの掘削は2006年8月に行われた(Matoba, 2007)。1回の掘削ランで採取されるアイスコアが50 cmと短い小型の浅層メカニカルドリルで掘削を行い、6日間、総掘削時間42.5時間、236ランで岩盤まで到達し、全長114.99 mのアイスコアが採取された(Matoba et al., 2007)。観測地点の平均気温の目安となる10 mの掘削孔温度は-13℃、掘削孔の最深部(114.99 m)での温度は-3.4℃であり、掘削地点の氷体は十分に寒冷であったが、融解の度合いを示すアイスコア1 mあたりの融解再凍結層の厚さ(MFP: Melt Feature Percentage)は0から100%まで大きく変動していた。観測期間中、掘削地点は8月11～13日、18～19日に激しい暴風雨に見舞われた(的場ほか, 2007)。このような夏期の降雨が生じたことも考慮するとアイスコア中の化学成分は、表面融解や降雨による流出や再配分の影響を受けていることが考えられた。

アイスコア中の水同位体比と主要イオン種の濃度の分析の結果、水同位体比や化学成分プロファイルからは年層を判別できるような季節変動は確認できず、融解水や降水によってプロファイルが乱されている可能性がみられた。MFPが高い層と低い層に含まれる化学成分の濃度を比較した結果、融解水によって流出しやすい硫酸イオンや硝酸イオンの濃度の平均値と変動の標準偏差に違いが見られなかったことから、季節変動レベルのプロファイルは融解層によって乱されているが、流出による化学成分の損失は確認されず、長期間にわたる環境変化の情報は保存されている可能性が高いと判断された(Matoba et al., 2011)。アイスコアの年代は、硫酸イオンピークを火山噴火のシグナルとし、1956年のBezmyanny火山の噴火などカムチャツカで観測された5つの火山噴火を同定して推定した。この年代推定の精度と融解水による再配分を考慮すると、イチンスキーアイスコアから復元できる環境変化は、10年規模程度の長期間にわたる変化といえる。

Matoba et al. (2011)は、水蒸気輸送のプロセスにおいて海水に覆われたオホーツク海が大陸として振る舞い、降水や水蒸気の同位体分別に影響を与え、水素同位体比の急激な負のピークはオホーツク海の海水面積の指標になるという仮説をたて、水素同位体比とMFPの時間変化からカムチャツカには1950-60年代と1990-2000年代に温暖期があり1990-2000年代はオホーツク海の海水面積が小さくなっていること、それらの変動は太平洋十年規模振動と北極振動が影響している可能性があることを示した。

アイスコア掘削地点は当初の想像以上に融解水と降雨の影響を受けていたため、当初期待されていた黄砂の沈

着量など大気エアロゾルに関する環境情報をアイスコアから得られることが出来なかった。しかし、アイスコアから復元されることが殆どなかった海水面積変動の情報を水同位体比から推定した成果はユニークであり、北西グリーンランドのアイスコアの水同位体比の変化からバフィン湾の海水面積を定量的に推定する研究へと発展する切っ掛けになった(Kurosaki et al., 2020)。

2.3 アラスカ・ランゲル山アイスコアから推定した北部北大西洋域に沈着する大気由来鉄と海洋環境への影響

アラスカ州の南部、Wrangell-St. Elias山脈のランゲル山、標高4000 m地点において、2003年～2006年にアイスコア掘削を含む雪氷観測が行われた。2003年に50.29 m、2004年に215.88 m長のアイスコアが採取された(Shiraiwa et al., 2004)。2005年には積雪観測のためのタワーを建て、2005～6年の積雪深の時間変化が観測され、降雪の季節配分と周辺の都市の降雪量との関係から降雪が生じるときの気象メカニズムが明らかになった(Kanamori et al., 2008)。

アラスカや北アメリカ大陸西海岸は、北部北太平洋を横断する偏西風の下流域にあたり、それらの地域で採取されるアイスコアに含まれる化学成分プロファイルは、北部北太平洋海域に沈着する大気由来物質の変化を反映していることが期待される。北部北太平洋海域は表層に主要な栄養塩が高濃度で存在するにもかかわらず植物プランクトンの生産量が低い状態で維持されるHNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 海域であり、表層海水に溶存する鉄が不足した状態であることが知られている。北部北太平洋海域への鉄の供給源の一つがアジア大陸乾燥域から大気へ放出され輸送される鉱物粒子である。Sasaki et al. (2016)は、2003年と2004年にランゲル山で掘削されたアイスコア中に含まれる鉄濃度を分析し、1981～2003年の大気由来鉄の沈着フラックスを求め、北部北太平洋海域に与える影響を推定した。図2はアイスコアから復元された鉄の年間堆積フラックス、中国内陸部で観測されたダストストームの頻度、日本で観測された黄砂日の累積日数、アラスカ南部のCordovaで観測された年間降水量の経年変化を示す。鉄の堆積フラックスは、中国内陸部において鉱物粒子エアロゾルの発生量に指標となるダストストームの頻度、鉱物粒子の輸送経路にあたる日本での黄砂の累積観測日と高い相関を示したが、沈着プロセスと関連するCordovaの降水量とは相関を示さなかった。アイスコアから推定された鉄の年間沈着フラックスは $3.2 \sim 27.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。この沈着量を東部北太平洋海域の冬季の最大混合層深度80mに(Nishioka et al., 2001)、

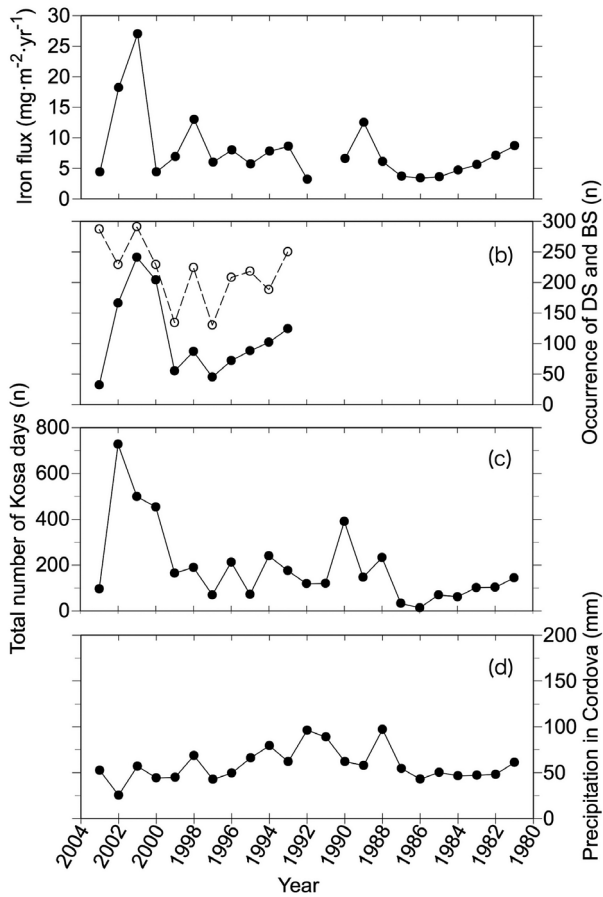


図2：(a) アラスカ・ランゲルアイスコアから復元した鉄の年間堆積フラックス、(b) アジア大陸で観測された砂嵐イベント (DS ●) と風塵イベント (BS○) の頻度、(c) 日本の気象官署で観測された黄砂日の積算値、(d) アラスカCordovaの年間降水量 (Sasaki et al., 2016)

Figure 2: Temporal variations in (a) annual flux of iron in the ice core, (b) frequency of occurrence of Dust Storm (DS; solid circle) and Blowing sand (BS; open circle), (c) total number of Kosa days, and (d) precipitation amount (Sasaki et al., 2016)

海水に対する大気由来鉄の溶解度1.1 ~ 2.2 % (Ooki et al., 2009) で溶解させた場合、大気由来鉄から溶出した溶存鉄の濃度は0.009-0.075nMであると見積もられた。この濃度は、東部北太平洋海域の冬の混合層内の溶存鉄濃度の8.2 ~ 68%に相当する。この見積もりには鉱物粒子の海水への溶解度、海水中での滞留時間などの多くの不確定な要素があり、以前、精緻な研究が必要とされている分野の一つである。

この研究は、これまでコンタミネーションの問題のために、報告例が殆どないアイスコア中の微量金属、特に鉄の濃度を測定したことに加え、推定された鉄の年間堆積フラックスとダストストームの発生頻度などの気象観測要素との相関を議論したことが成果の一つといえる。これまでアイスコアから復元されたエアロゾル濃度や組成

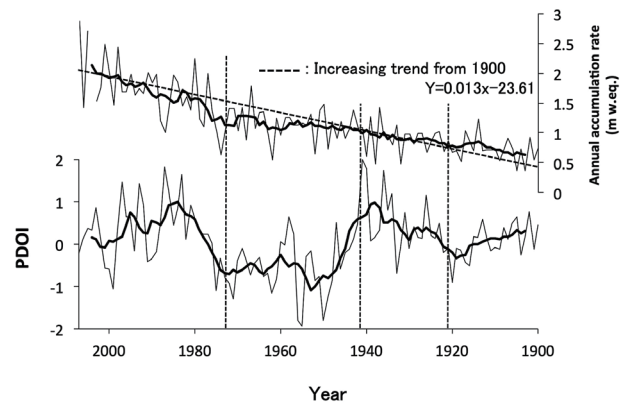


図3：(上) アラスカ・オーロラピークアイスコアから復元した1900年以降の年間涵養量の変化、(下) 北太平洋10年規模振動 (PDO) 指数の変化 (Tsushima et al., 2015)

Figure 3: Temporal variations in (top) annual accumulation rate of the Aurora Peak ice core and (bottom) the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index (Tsushima et al., 2015).

は、相対的な濃度変化を表すことに留まり、他のプロキシや気象要素と定量的な比較が不可能であった。その原因の一つは、アイスコアが一年間の環境変動をすべからず記録していない可能性があるからである。年間の降雪量が少ない場所では、降雪が生じない期間の環境情報は保存されず、また風速が大きな場所では一旦積もった雪が削剥されて消失することも生じる。しかし、ランゲルアイスコアから得られた年間の鉄の沈着フラックスは、黄砂を取り扱った大気輸送モデルで推定されたランゲル山上空の黄砂の濃度ともよい相関を示した (佐々木, 2017)。つまり、ランゲル山のように一年中積雪が生じ、かつ降水量が大きく保存性が高い場所で得られたアイスコアを用いれば、エアロゾル沈着量の経年変化を定量的に評価できることが示され、後述するグリーンランドの高涵養地域のアイスコアによるエアロゾルの経年変化の研究へと発展するきっかけの一つとなった。

2.4 アラスカ中央部、オーロラピークアイスコアからみられる降水量の急激な増加

太平洋に面し、海洋からの水蒸気供給の影響を大きく受ける Wrangell-St Elias 山脈に位置するランゲル山のアイスコアと比較し、アラスカ内陸部の気候・環境変化の変遷を明らかにすることを目的に、アラスカ中央部に位置するアラスカ山脈の最高峰 Hayes 山の南東15km地点にある Aurora Peak 近傍の水原の標高2900 m地点において、2008年に180.17 mのアイスコアを掘削した (Matoba et al., 2014)。掘削地点の年平均気温を示す10 m深の雪温

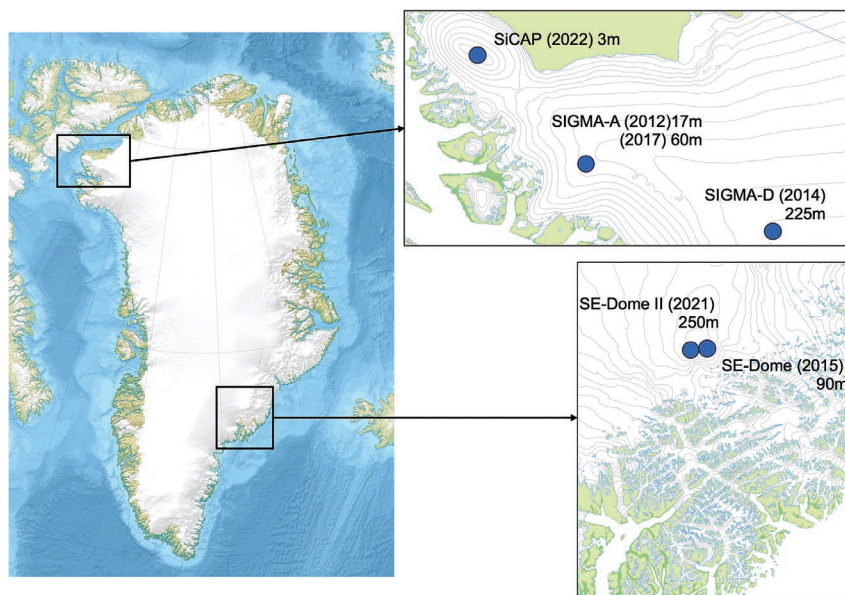


図4：グリーンランド氷床にて低温科学研究所が中心となって行ったアイスコア掘削地点地図はNuna-GISにより作製。

Figure 4: Ice core drilling site on the Greenland Ice Sheet led by ILTS. The map was produced by Nuna-GIS.

は -2.2°C と高かったが、これは融解水の再凍結時に放出される潜熱によって積雪が加熱されたことが原因と考えられた。アイスコア中の水素同位体比、ナトリウムイオン濃度、MFPは明瞭な季節変動を示し、アイスコアに含まれる化学シグナルが融解水によって乱されていないことが示された。上記3要素の季節変動を用いて復元された年間降水量は、1900年以降、年間 8 mm yr^{-1} の増加量で増加し、1970年代以降は、さらに著しく増加していることが示された (Tsushima et al., 2015) (図3)。この著しい降水量の増加は、地上の気象観測、人工衛星観測、気象再解析データには検出されていない現象であり、熱帯域の海面水温上昇との同期やアリューシャン低気圧の強化などの要因が推測された (對馬, 2015; Winski et al., 2017)。この研究成果からは、様々な観測データセットが揃っている近過去の環境復元においても、再解析データの精度が不十分な降水量や高標高地域の気象要素など、アイスコアから復元される環境情報の有用性が再認識された。

3. 低温科学研究所における現在のアイスコア研究、掘削機の開発と今後の展望

低温科学研究所におけるアイスコア研究は、2011年からグリーンランド氷床涵養域を中心に行われている。科研費による研究プロジェクトであるSIGMAプロジェクトI & II (代表：青木輝夫・国立極地研／気象研)、SE-

Dome プロジェクトI & II (代表：飯塚芳徳・北大低温研)と文部科学省補助事業である北極域研究加速プロジェクトArCSII (サブ課題代表：的場澄人・北大低温研)のもとに実施されたグリーンランド氷床涵養域における雪氷研究において、4地点から6本のアイスコアを掘削した (図4) (Aoki et al., 2014; Iizuka et al., 2016, 2021; 的場, 2017; Matoba et al., 2015, 2018; Nagatsuka et al., 2021)。2015年と2021年にグリーンランド氷床で最も年間降水量が大きい南東部 (SE-Dome) において採取されたアイスコアは、掘削地点の高い降水量を反映し、降水中的水同位体比と沈着したエアロゾルの保存性が極めて高かった。Furukawa et al. (2017) は2015年に掘削された90 mのアイスコア中の酸素同位体比の変化が、水同位体分別を加味した領域気候モデルで推定される降水中的酸素同位体比の変化とほぼ同期していることを示し、1ヶ月の精度でアイスコアの深さに対応する日付を割り振ることを可能とした。この精度の高い年代決定により、アイスコアから復元される降水量やエアロゾルの組成、沈着量の変化は、地上気象データ、気象領域モデルを用いた大気輸送モデル、人口衛星データとの比較が可能になった (e.g. Iizuka et al., 2018)。Kurosaki et al. (2022) は、このアイスコア中の硫黄化合物の沈着量を月単位で復元し、2002年以降、グリーンランド東岸において夏期に植物プラントンの増殖が増加していることを示した。2021年に掘削された250 mのアイスコアは、1799年以降の年代を半年の精度で決定し、産業革

命から現在にかけての大気エアロゾル組成やグリーンランド氷床の融解の変遷が明らかにした (Kawakami et al., 2023). 次期は、中世温暖期化から小氷期への移行期に重点をおき、SE-Dome地点で1000 mの掘削をすることを計画している。SE-Domeは、年間の積雪深が3–5 mあり、掘削のための施設は1シーズンしか維持することができない。また、1000 mの掘削を行うためには、掘削孔が氷床の圧力で収縮することを防ぐために掘削孔に液をいれた状態で掘削する液封掘削が必要とされる。つまり、SE-Domeで1000 mのアイスコアを掘削するためには、1シーズンで1000 m掘れる超高速液封掘削機が必要であり、その開発も併せて計画している。

日本のアイスコア掘削機は、1970年代に低温科学研究所の鈴木義男と新堀邦夫によって開発と製作がなされ、南極氷床における日本のアイスコア掘削を先導してきた (Suzuki, 1976; Suzuki and Shimbori, 1984). 鈴木 (1978) で考案された、サイドカッター式アンチトルクシステムは、掘削孔に細い溝を掘り、その溝にドリル上部に取り付けられた細長い金属プレートを差し入れドリルの回転を防止するという非常にユニークなシステムとして知られる。その後、民間企業である地球工学研究所 (株) の高橋昭好が後を継ぎ、南極氷床みずほ基地のアイスコア掘削で使用されたサーマルドリルや南極ドームふじ基地の深層アイスコア掘削で使用された深層液封掘削機の開発と製作を行った (Suzuki and Shimbori, 1986; Takahashi et al., 2002). 地球工学研究所がアイスコア掘削機の開発と製作の中心を担うようになった後も、低温科学研究所は、新堀を中心に、深層液封掘削機の送液プースターの開発と改良やコアキャッチャー、カッターの開発など、深層掘削機の開発に貢献した (高橋ほか, 1996). さらに、低温科学研究所が中心となって行われた氷河観測において、その掘削サイトの条件に特化した山岳用軽量型掘削機やチタン製手動フィルンコアドリルなど開発と製作が行われた (Kohshima et al., 2002; Shiraiwa et al., 2004).

現在、低温科学研究所では技術部を中心に、上述した1000 mのアイスコアが採取できる超高速液封掘削機の開発、小口径軽量ハンドオーガの製作など (的場ほか, 2022; 佐藤ほか, 2022) を行っている。また、国立極地研究所が中心となって進めている第三期ドームふじ深層掘削計画に使用する掘削機の開発においては、電送システムの重要な部分の開発を担っている。

謝辞

本稿は、日本学術振興会科研費 (18H05292) と北極域研究加速プロジェクト (JPMXD1420318865) の協力を受けた。カムチャツカにおける山岳氷河掘削はロシア科学アカデミー極東支部火山地震研究所 (代表: Yaloslav D. Muravyev博士) との共同研究で実施した。アラスカ州ランゲル山の掘削はアラスカ大学フェアバンクス校 Geophysical Institute (代表: Carl S. Benson教授), オーロラピークアイスコアの掘削は、アラスカ大学フェアバンクス校 Water and Environmental Research Center (代表: Kenji Yoshikawa教授) との共同研究で実施した。

参考文献

- Ankin, M., J. Schwander, B. Stauffer, J. Tschumi, A. Fucks, J. M. Bornola and D. Raynaud (1997) CO₂ record between 40 and 8 kyr B.P. from the Greenland Ice Core Project ice core. *J. Geophys. Res.*, **102(C12)**, 26539–26546.
- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama (2014) Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 3–20.
- Augustin, L., S. Panichi and F. Frascati (2007) EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results. *Ann. Glaciol.*, **47**, 68–72. <https://doi.org/10.3189/172756407786857767>
- Benson, C. (1984) Ice core drilling on Mt. Wrangell, Alaska, 1982. *CRREL Spec. Rep.*, **83-84**, 61–68.
- Dansgaard, W., S. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel and B. Bond (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218–220.
- Furukawa, R., R. Uemura, K. Fujita, S. Sjolte, K. Yoshimura, S. Matoba and Y. Iizuka (2017) Seasonal-scale dating of a shallow ice core from Greenland using oxygen isotope matching between data and simulation. *J. Geophys. Res.:Atmos.*, **122**, 10873–10887. <https://doi.org/10.1002/2-17JD026716>
- Goto-Azuma, K., T. Shiraiwa, S. Matoba, T. Segawa, S. Kanamori, U. Fujii and T. Yamasaki (2003) An overview of the Japanese glaciological studies on Mt. Logan, Yukon

- Territory, Canada in 2002. *Bull. Glaciol. Res.*, **20**, 65-72.
- Gow, A. J., H. T. Ueda and D. E. Garfield. (1968) Antarctic ice sheet: preliminary results of first core hole to bedrock. *Science*, **161**, 1011-1013.
- Iizuka, Y., S. Matoba, T. Yamasaki, I. Oyabu, M. Kadota and T. Aoki, (2016) Glaciological and meteorological observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **34**, 1-10. <https://doi.org/10.5331/bgr.15R03>
- Iizuka, Y., R. Uemura, K. Fujita, S. Hattori, O. Seki, C. Miyamoto, T. Suzuki, N. Yoshida and H. Motoyama (2018) A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high-accumulation dome ice core, Southeast Greenland. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **123**, 2017JD026733. <https://doi.org/10.1002/2017JD026733>
- Iizuka, T., S. Matoba, M. Minowa, T. Yamasaki, K. Kawakami, A. Kakugo, M. Miyahara, A. Hashimoto, M. Niwano, T. Tanikawa, K. Fujita and T. Aoki (2021) Ice core drilling and the related observations at SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **39**, 1-12. <https://doi.org/10.5331/bgr.21R01>
- Johnsen, S. J., H. B. Clausen, W. Dansgaard, K. Fuhrer, N. Gledstrop, C. U. Hammer, P. Iversen, J. Jouzel, B. Stauffer and J. P. Steffensen (1992) Irregular glacial interstadial record in a new Greenland ice core, *Nature*, **359**, 311-313.
- Kanamori, S., C. S. Benson, M. Truffer, S. Matoba, D. J. Solie and T. Shiraiwa (2008) Seasonality of snow accumulation at Mount Wrangell, Alaska, USA. *J. Glaciol.*, **54**, 273-278.
- Kawakami, K., Y. Iizuka, M. Sasage, M. Matsumoto, T. Saito, A. Hori, S. Ishino, S. Fujita, K. Fujita, K. Takasugi, T. Hatakeyama, A. Watari, N. Esashi, M. Otsuka, R. Uemura, K. Horiuchi, M. Minowa, S. Hattori, T. Aoki, M. Hirabayashi, K. Kawamura and S. Matoba (2023) SE-Dome II ice core dating with half-year precision: increasing melting event from 1799 to 2020 in southeastern Greenland. *J. Geophys. Res.:Atmos.*, **128**, e2023JD038874. <https://doi.org/10.1029/2023JD038874>
- Kohshima S., T. Shiraiwa, M. A. Godoi, K. Kubota, N. Takeuchi and K. Shinbori (2002) Ice core drilling on Southern Patagonia Icefield – Development of a new portable drill and the field expedition in 1999 –. *Mem. Natl., Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 49-58.
- Kurosaki, Y., S. Matoba, Y. Iizuka, M. Niwano, T. Tanikawa, T. Ando, A. Hori, A. Miyamoto, S. Fujita and T. Aoki (2020) Reconstruction of sea ice concentration in northern Baffin Bay using deuterium excess in a coastal ice core from the northwestern Greenland Ice Sheet. *J. Geophys. Res.:Atmos.*, **125**, e2019JD031668. <https://doi.org/10.1029/2019JD031668>
- Kurosaki, Y., S. Matoba, Y. Iizuka, K. Fujita and R. Shimada (2022) Increased oceanic dimethyl sulfide emissions in areas of sea ice retreat inferred from a Greenland ice core. *Comm. Earth Environ.*, **3**, 327. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00661-w>
- Lipenkov, V. Ya., N. I. Barkov, P. Duval and P. Pimienta (1989) Crystalline texture of the 2083m ice core at Vostok Station, Antarctica. *J. Glaciol.*, **35**, 392-398. <https://doi.org/10.3189/S0022143000009321>
- Matoba, S., H. Narita, H. Motoyama, K. Kamiyama and O. Watanabe (2002) Ice core chemistry of Vestfonna Ice Cap in Svalbard, Norway. *J. Geophys. Res.*, **107(D23)**, ACH19-1-19-7. <https://doi.org/10.1029/2002JD002205>
- Matoba, S. (2007) Ice core drilling at Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia. In: Shiraiwa (ed) *Report on Amur-Okhotsk Project*, **4**, Amur-Okhotsk Project, 191-200.
- Matoba, S., S. V. Ushakov, K. Shimobori, H. Sasaki, T. Yamasaki, A. A. Ovshannikov, A. G. Manevich, T. M. Zhidaleeva, S. Kutuzov, Y. D. Muravyev and T. Shiraiwa (2007) The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia. *Bullet. Glaciol. Res.*, **24**, 79-85.
- の場澄人, 中村一樹, 樋口和生 (2007) 氷河観測における日本から送られる気象情報の取得方法. 北海道の雪氷, **26**, 87-90.
- Matoba, S., T. Shiraiwa, A. Tsushima, S. Sasaki and Y. D. Muravyev (2011) Records of sea-ice extent and air temperature at the Sea of Okhotsk from an ice core of Mount Ichinsky, Kamchatka. *Ann. Glaciol.*, **52**, 44-50.
- Matoba, S., K. Shimbori and T. Shiraiwa (2014) Alpine ice-core drilling in the North Pacific region. *Ann. Glaciol.*, **55**, 83-87. <http://doi.org/10.3189/2014AoG68A020>
- の場澄人, 山口悟, 對馬あかね, 青木輝夫, 杉山慎 (2017) グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動. 低温科学, **75**, 37-44.
- Matoba, S., M. Niwano, T. Tanikawa, Y. Iizuka, T. Yamasaki, Y. Kurosaki, T. Aoki, A. Hashimoto, M. Hosaka and S. Sugiyama (2018) Field activities at the SIGMA - A site, northwestern Greenland Ice Sheet, 2017. *Bull. Glaciol. Res.* **36**, 15-22. <https://doi.org/10.5331/bgr.18r01>
- の場澄人, 森章一, 佐藤陽亮, 斎藤史明, 箕輪昌紘 (2022) 小口径ハンドオーガーの製作～新しい掘削コンセプト～. 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **28**,

- 28-30.
- Mayewski, P. A., M. Wumkes, J. Klinck, M. S. Twickler, J. S. Putscher, K. C. Taylor, A. J. Gow, E. D. Waddington, R. B. Alley, J. E. Gibb, P. M. Grootes, D. A. Meese, M. Ram, M. Whalen and A. T. Wilson (1994) Record drilling depth struck in Greenland. *Eos Trans. AGU*, **75**, 113-124. <https://doi.org/10.1029/94EO00814>
- Motoyama, H., A. Takahashi, Y. Tanaka, K. Shinbori, M. Miyahara, T. Yoshimoto, Y. Fujii, A. Furusaki, N. Azuma, Y. Ozawa, A. Kobayashi and Y. Yoshise (2021) Deep ice core drilling to a depth of 3035.22 m at Dome Fuji, Antarctica in 2001-07. *Ann. Glaciol.*, **62**, 212-222. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.84>
- Nagatsuka, N. K. Goto-Azuma, A. Tsushima, K. Fujita, S. Matoba, Y. Onuma, R. Dallmayr, M. Kadota, M. Hirabayashi, J. Ogata, Y. Ogawa-Tsukagawa, K. Kitamura, M. Minowa, Y. Komuro, H. Motoyama and T. Aoki (2021) Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years. *Clim. Past*, **17**, 1341-1362
- Nishioka, J., S. Takeda, C. S. Wong, and W. K. Johnson (2001) Size fractionated iron concentrations in the northeast Pacific Ocean: Distribution of soluble and small colloidal iron. *Mar. Chem.*, **74**, 157-179.
- Okuyama, J., H. Narita, T. Hondoh and R. M. Koerner (2003) Physical properties of the P96 ice core from Penny Ice Cap, Baffin Island, Canada and derived climatic records. *J. Geophys. Res.*, **108(B2)**, 2090, <http://doi.org/10.1029/2001JB001707>
- Ooki, A., J. Nishioka, T. Ono and S. Noriki (2009) Size dependence of iron solubility of Asian mineral dust particles. *J. Geophys. Res.*, **114**, D03292, [doi:10.1029/2008JD010804](https://doi.org/10.1029/2008JD010804).
- Sasaki, H., S. Matoba, T. Shiraiwa and C. S. Benson (2016) Temporal variations in iron flux deposition onto the northern North Pacific reconstructed from an ice core drilled at Mount Wrangell, Alaska. *SOLA*, **12**, 287-290.
- 佐々木央岳 (2017) アラスカランゲル山から復元した北部北太平洋域への陸域起源物質沈着に関する研究. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻博士論文.
- 佐藤陽亮, 森章一, 斎藤史明, 的場澄人, 箕輪昌紘 (2022) 小口径ハンドオーガの製作～加工編～. 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **28**, 31-34.
- Sierra-Hernández, M. R., E. Beaudon, S. E. Porter, E. Mosley-Thompson and L. G. Thompson (2022) Increased fire activity in Alaska since the 1980s: Evidence from an ice core-derived black carbon record. *J. Geophys. Res.*, **127**, e2021JD035668. <https://doi.org/10.1029/2021JD035668>
- 白岩孝行, 山口悟 (2002) カムチャツカ半島の近年の氷河質量収支変動と気候変動復元. 地学雑誌, **111**, 476-485.
- 白岩孝行, 西尾文彦, 亀田貴雄, 高橋昭好, 戸山陽子, Y. D. Muravyev, A. A. Ovsyannikov (1999) カムチャツカ半島ウシュコフスキー氷冠における雪氷コア掘削. 雪氷, **61**, 25-40. <https://doi.org/10.5331/seppyo.61.25>
- Shiraiwa, T., T. Fujikawa, N. Tanaka, S. Matoba, Y. Toyama, F. Nishio and Y. D. Muravyev, (2001a) A 170-years proxy climate record derived from co-isotopic and chemical analyses of ice core recovered from Ushkovsky ice cap, Kamchatka. In: Wakatsuchi, M. and Hara, T. (eds.) *Proc. The Int. Symp. Atmosphere-Ocean- Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment. Inst. Low Temp. Sci.*, 142-143. Hokkaido Univ., Sapporo,
- Shiraiwa, T., Y. D. Muravyev, T. Kameda, F. Nishio, Y. Toyama, A. Takahashi, A. A. Ovsyannikov, A. A. Salamatina and K. Yamagata (2001b) Characteristics of a crater glacier at Ushkovsky volcano, Kamchatka, Russia, as revealed by the physical properties of ice cores and borehole thermometry. *J. Glaciol.*, **47**, 423-432.
- Shiraiwa, T., S. Kohshima, R. Uemura, N. Yoshida, S. Matoba, J. Uetake and M. A. Godoi (2002) High net accumulation rate at Campo de Hielo Patagónico Sur, South America, revealed by analysis of a 45.97m long ice core. *Ann. Glaciol.*, **35**, 84-90. <https://doi.org/10.3189/172756402781816942>
- Shiraiwa, T., S. Kanamori, C. S. Benson, D. Solie and Y. D. Muravyev (2004) Shallow ice-core drilling at Mount Wrangell, Alaska. *Bull. Glaciol. Res.*, **21**, 71-78.
- Solomina, O., G. Wiles, T. Shiraiwa and R. D'Arrig (2007) Multiproxy records of climate variability for Kamchatka for the past 400 years. *Clim. Past*, **3**, 119-128.
- Suzuki Y. (1976) Deep core drilling by Japanese Antarctic Research Expedition. *Ice core drilling; proceedings of a Symposium, University of Nebraska, Lincoln, 28-30 August*, ed. By J. F. Splettstoesser. Lincoln, University of Nebraska Press, 155-166.
- 鈴木義男 (1978) エレクトロ・メカニカルドリルの新アンチ・トルク方式. 低温科学, 物理篇, **37**, 163-166.
- Suzuki, Y. and K. Shmbori (1984) Mechanical drilling systems for the 25th Japanese Antarctic Research Expedition. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **34**, 188-196.
- Suzuki, Y. and K. Shimobori (1986) Development of an ice core drill for liquid-filled holes. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec.*

- Issue*, **45**, 86-92.
- 高橋昭好, 藤井理行, 成田英器, 田中洋一, 本山秀明, 新堀邦夫, 宮原盛厚, 東信彦, 中山芳樹, 渡辺興亜 (1996) 氷床深層掘削ドリルの開発 (III). 南極資料, **40**, 25-42.
- Takahashi, A., Y. Fujii, N. Azuma, H. Motoyama, K. Shinbori, Y. Tanaka, H. Narita, Y. Nakayama, T. Kameda, S. Fujita, T. Furukawa, M. Takata, M. Miyahara and O. Watanabe (2002) Improvements to the JARE deep ice core drilling. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 117-125.
- Takeuchi, N., S. Sera, K. Fujita, V. B. Aizen and J. Kubota (2019) Annual layer counting using pollen grains of the Grigoriev ice core from Thin Shan Mountains, central Asia. *Arctic, Antarc. Alpine Res.*, **51**, 299-312. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1638202>
- Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, V. S. Zagorodnov, I. M. Howat, V. N. Mikhalev and P. -N. Lin (2013) Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~1800 years. *Science*, **340**, 945-950. <https://doi.org/10.1126/science.1234210>
- 對馬あかね (2015) 山岳アイスコアを用いた北部北太平洋の古環境復元に関する研究. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻博士論文.
- Tshushima, A., S. Matoba, T. Shiraiwa, S. Okamoto, H. Sasaki, D. J. Solie and K. Yoshikawa (2015) Reconstruction of recent climate change in Alaska from the Aurora Peak ice core, central Alaska. *Clim. Past*, **11**, 217-226. <https://doi.org/10.5194/cp-11-217-2015>.
- Tsushima, A., M. Miyahara, T. Yamasaki, N. Esashi, Y. Sato, R. B. Kayastha, A. J. B. Lama Sherpa, M. Sano and K. Fujita (2021) Ice core drilling on high-elevation accumulation zone of Trambau Glacier in the Nepal Himalaya. *Ann. Glaciol.*, **62**, 353-359. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.15>
- 對馬あかね (2024) ネパールヒマラヤ・トランバウ氷河でのアイスコア掘削, 低温科学, **82**, 167-177, <https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.167>
- Winski, D., E. Osterberg, D. Ferris, K. Kreutz, C. Wake, S. Campbell, R. Hawley, S. Roy, S. Birkel, D. Introne and M. Handley (2017) Industrial-age doubling of snow accumulation in the Alaska Range linked to tropical ocean warming. *Sci. Rep.*, **7**, 17869. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18022-5>
- Yalcin, K. and C. P. Wake (2001) Anthropogenic signals recorded in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory, Canada. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4487-4490. <https://doi.org/10.1029/2001GL013037>
- Yasunari, T. J., T. Shiraiwa, S. Kanamori, Y. Fujii, M. Igarashi, K. Yamazaki, C. S. Benson and T. Hondoh (2007) Intra-annual variations in atmospheric dust and tritium in the North Pacific region detected from an ice core from Mount Wrangell, Alaska. *J. Geophys. Res.*, **112**(D10), D10208. <https://doi.org/10.1029/2006JD008121>