

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
Citation	低温科学, 82, 161-170
Issue Date	2024-03-29
DOI	10.14943/lowtemsci.82.161
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/91751
Туре	bulletin (article)
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<sup>1)</sup>

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 Matoba<sup>1</sup>

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

#### 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 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

 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)、スパールバル諸島(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が、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が、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うる降水量の変化な 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・チャー 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 ツク海の海氷変動復元

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,3m×5m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Bezymianny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 て海氷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氷面積の指標に 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氷面積が小さ 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氷面積変動の情報 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 フィン湾の海氷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~ 27.0 mg m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>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く 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近傍の氷原の標高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℃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、降水中の水同位体比と沈 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の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ブースターの開発 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ーの製作など(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握 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. Gudestrup, C. U. Hammer, P. Iversen, J. Jouzel, B. Stauffer and J. P. Steffensen (1992) Irregular glacial interstadials 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. Esasshi, 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. Geophy. 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 BaffinBay 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, Russa. In: Shiraiwa (ed) *Report on Amur-Okhotsk Project*, 4, Amur-Okhotsk Project, 191-200.
- Matoba, S., S. V. Ushakov, K. Shimobri, H. Sasaki, T. Yamasaki,
  A. A. Ovshannikov, A. G. Manevich, T. M. Zhideleeva,
  S. Kutuzov, Y. D. Muravyev and T. Shiraiwa (2007) The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka,
  Russia. *Bullet. Glaciol. Res.*, 24, 79-85.
- 的場澄人,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
- 的場澄人,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, north-
- western Greenland Ice Sheet, 2017. *Bull. Glaciol. Res.* **36**, 15–22. https://doi.org/10.5331/bgr.18r01
- 的場澄人,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/10.1029/94E000814
- 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. Gephys. 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.
- 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ーの製作〜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. Salamatin 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 themometry. 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 deHielo Patagónico Sur, South America, revealed by analysis of a 45.97m long ice core. *Ann. Glaiol.*, **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 Nabraska 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/10.1080/15230430.2 019.1638202
- Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, V. S. Zagorodnov, I. M. Howat, V. N. Mikhalenko 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.
- Tshusima, 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 accumulatio 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