HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ネパールヒマラヤ，トランバウ氷河でのアイスコア掘削
Author(s)	對馬，あかね
Citation	低温科学，82，171-181
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.171
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91748
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p171-181_LT82.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 82 （2024） 171–181
doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 171

ネパールヒマラヤ，トランバウ氷河でのアイスコア掘削

對馬　あかね [1)]

2023 年 12 月 5 日受付，2024 年 1 月 3 日受理

2019年の10月から11月にかけて，ネパールヒマラヤ，ロールワリン地域に位置する，トランバウ氷河の涵養域にて全長81.2mのアイスコアを掘削した．掘削地点は海抜5860 mの高地であり，かつ，ネパール政府が定める飛行制限区域のため，通常ではヘリコプターの使用が困難な地域であるが，政府からの許可を得てヘリコプターにてアイスコアと掘削機器の輸送を行うことができた．またインドからドライアイスを輸入して同梱し，掘削されたアイスコアは融解することなく，北海道大学低温科学研究所まで輸送することに成功した．現場での初期解析の結果，アイスコアの88%が密度830 kg m^{-3}以上の再凍結氷であることがわかった．

The Ice core drilling at Trambau Glacier, Nepal Himalaya

Akane Tsushima[1]

An 80.12-m-long ice core was retrieved from the accumulation area (5862 m above sea level (a.s.l.)) of Trambau Glacier in the Rolwalig region during October–November 2019. The drilling site is located at a high elevation area and is in a restricted flying area, normally making it difficult to operate a helicopter. However, we could transport the ice core and drilling equipment by helicopters with permission from the government of Nepal. Dry ice imported from India was included in the insulation boxes with ice cores, and the ice cores were successfully transported to a cold laboratory in ILTS without melting. The primary analysis showed that 88% of the ice core was refrozen with a density of > 830 kg m^{-3}.

キーワード：アイスコア，ネパールヒマラヤ，古環境変動，アジア高山域
Ice core, Nepal Himalaya, Paleoenvironmental change, High Mountain Asia

1．はじめに

将来の気候変動予測のためには，樹木年輪，アイスコア，海底堆積物などの様々な古気候プロキシ（代替指標；過去の気候や環境変動の記録媒体）から復元される古気候情報が必要不可欠であり（Alexander et al., 2013），気候変動の将来予測の信頼性を高めるためには古気候プロキシデータの空間的な拡充と得られる古気候情報の高精度化は重要な課題である．気候変動はごく狭い地域でも空間的に一様ではなく，特に，数年から数十年程度で生じる比較的短期間の気候変動は，地域によってその変動期間や変動規模が大きく異なる（PAGES 2K Consortium, 2013; Tsushima et al., 2015）．近年の急激な温暖化の実態把握に必要な古気候プロキシデータは，全球の広い範囲で

連絡先
對馬　あかね
千葉大学 大学院理学研究院
〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33
Tel: 043-290-2844
Email: atsushima@chiba-u.jp
1）千葉大学 大学院理学研究院
Graduate School of Science, Chiba University, Chiba, Japan

面的に拡充されてきた（PAGES 2K Consortium，2013）．一方で，高標高域は低標高域に比べて温暖化が顕著であることが報告されているものの（Wang et al.，2016），気候変動の標高依存性が議論できるような古気候プロキシデータはほとんどない．

ネパールヒマラヤのような夏季モンスーン期に一年間の大半の降水が集中する夏季涵養型氷河は，気温が上昇した場合，降水型が雪から水に変わるために，降水が夏期の氷河の質量増加に寄与しなくなる，氷河表面が新雪で覆われなくなることで表面アルベドの低下が引き起こされる，などの作用の効果が強まり，温暖化に対して敏感に応答する（Fujita 2008a, b）．温暖化など気候変動に伴う山岳氷河の縮小は一時的な河川流量の増加をもたらす一方で，長期的には氷河の消滅による河川水の枯渇などを引き起こし，人間社会に直接的に甚大な影響を与える可能性がある（Immerzeel et al.，2010）．さらに，アジア地域は近年の急激な人口増加や経済発展のために，人為起源大気汚染物質の主要な発生源の一つとなっている（Ohara et al.，2007; Alexander et al.，2013）．したがって，この地域で，過去数百年程度の環境変動や人為起源大気汚染物質の変遷が復元可能な，長いアイスコアを掘削し，社会や経済の発展と気候・環境変動の関係性を理解することは重要である．

ヒマラヤ山脈でのアイスコア掘削は，地理的なアクセスの困難さなどから，歴史的にもそれほど多くはないが，これまでに中央ヒマラヤのDasuopu氷河（Thompson et al.，2000）とチベットヒマラヤのEast Rongbuk（ER）氷河（Qin et al.，2002）から，いくつかのアイスコアが掘削され，アジアモンスーンや偏西風などの大規模な大気循環の変動とアイスコアに含まれる不溶性ダストや地殻成分との関係性などが報告されている（e.g. Thompson et al.，2000; Kang et al.，2002; Qin et al.，2002）．また，Qin et al.（2002）は，ERアイスコアの硫酸イオン濃度がDasuopuアイスコアの硫酸イオン濃度に比べて２倍程度高く，これがエベレストの登山客らによるローカルな影響を反映した結果であると述べるとともに，北半球の人為起源大気汚染物質の影響についても議論している．一方，Kaspari et al.（2008）は，125km離れたこれらの2つのアイスコアの涵養量変動の違いを明らかにした．ERアイスコアの涵養量は1800年代に最も低い値を示すが，同時期のDasuopuアイスコアの涵養量は最も高い値を示している．この比較的近い場所で掘削されたアイスコアの涵養量の非同期性については，ヒマラヤの複雑な地形によるものか，モンスーン循環などによる局所的な違いによるものか，はたまた，アイスコアの年代推定に伴う誤差による可能性も考えられるが，その原因は定かではない．この地域で掘削されたアイスコアや気象データが少ないために検証が不十分だからである．特に，ヒマラヤ山脈の南側はアクセスが困難なために掘削されたアイスコアはほとんどない（Fujita et al.，2002）．したがって，この地域で新たなアイスコアを掘削する必要がある．

本掘削は2017年4月に早稲田大学と名古屋大学を中心に始動した，科研費プロジェクト「樹木年輪とアイスコアの統合解析によるアジア山岳域の標高別古気候復元（代表・佐野雅規）」の一環として実施した．降水量の指標として用いられている樹木年輪酸素同位体比（Sano et al.，2013，2019）とアイスコアの2つの古気候プロキシを用いて，森林限界以下の標高では樹木年輪による降水量復元を行い，森林限界以上の標高ではアイスコアによる降水量復元を行うことで，ヒマラヤ地域の過去数百年間の気候変動の高度依存性を評価することを目的としたプロジェクトである．山岳氷河は近年の急激な温暖化に伴い消滅の危機にさらされており，世界的にも，一刻も早く貴重な情報を取り出す必要があるとの認識が共有されている（Ice Memory project; https://en.unesco.org/events/international-launch-ice-memory-project）．

本稿では，2019年にネパール東部のロールワリン地域で実施した81.2mの浅層アイスコア掘削と，掘削現場で行われたアイスコアの初期解析の結果について，既に国際雪氷学会（International Glaciological Society）の学術誌 Annals of Glaciology に掲載されている論文（Tsushima et al., 2021）の内容をもとに，一部加筆し，詳しく報告する．

2. 掘削地点と観測日程

2.1 掘削地点の概要

トラカルディン－トランバウ氷河はネパール東部のロールワリン地域に位置する（図1a）．氷河は標高 4600 ー 6850 m a.s.l.，面積76.5km^{2}で，末端には1960年代から拡大し続けるネパール最大の氷河湖ツォ・ロルパが形成されている（Sakai et al.，2000）．トラカルディン－トランバウ氷河は標高5000 m a.s.l. 地点を境に岩壁で分断され，デブリ（岩屑）被覆域である下流のトラカルディン氷河と，裸氷が露出する上流のトランバウ氷河に分けられる（図1a）．2019年11月に，トランバウ氷河上流, 標高 5862 m a.s.l. 地点（27, 919° N，86，545° E）の傾斜のなだらかな雪原にて（図1b），アイスコアの掘削が実施された．2016年から2018年までに行われた氷河全域に張り巡らされたステーク（氷河の表面質量収支を測定するために氷河上に設置す

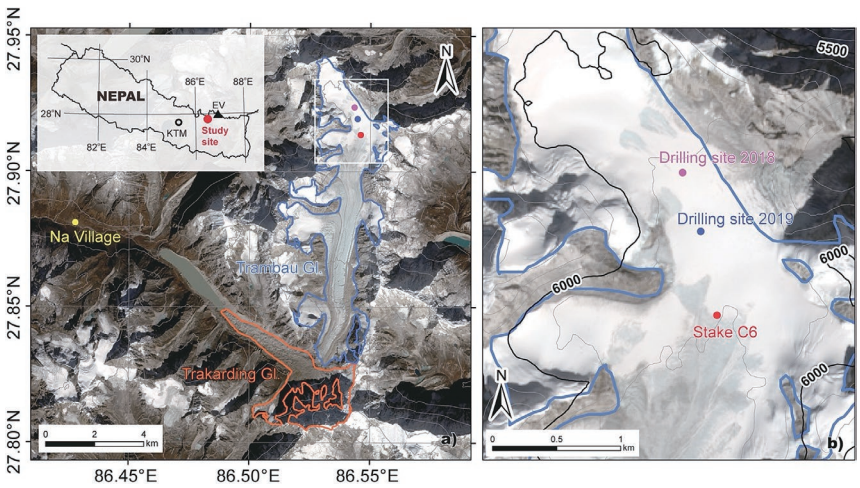

図1：(a) ネパール・ヒマラヤ，ロールワリン地域にあるトラカルディン－トランバウ氷河の概要．左上にはロールワリン地域（赤丸），カトマンズ（KTM），およびエベレスト（EV）の位置関係を示した．黄色の丸で示したNa村 は，標高 4,100 m に位置し，氷河にアクセスする前に通る最後の村である．(b) 掘削地点の拡大図を示した．氷河の境界は，GAMDAM 氷河インベントリ（Nuimura et al., 2015; Sakai, 2019）で補正した．背景の氷河の画像は，2017 年 11 月 24 日に撮影されたセンチネル 2 の衛星画像である．Tsushima et al.（2021）より引用．

Figure 1: (a) Overview of the Trakarding–Trambau glaciers in the Rolwaling region, Nepalese Himalaya, and (b) a close-up view of the drill site. The inset in (a) shows the Rolwaling region (red circle), Kathmandu (KTM), and Mount Everest (EV). Na Village (yellow circle in (a)) is the highest (4100 m a.s.l.) and final village before the field site. Open white box in (a) denotes the area of (b). Glacier boundaries were modified from the GAMDAM Glacier Inventory (Nuimura et al., 2015; Sakai, 2019). The background image is a Sentinel-2 image taken on 24 November 2017. Cited from Tsushima et al. (2021).

る棒。雪尺とも呼ばれる。）網で年間の質量収支が測量され，掘削地点は平衡線高度（氷河の年間の正味質量収支がゼロになる高度）に位置することがわかっている（Sunako et al., 2019）．また，GPR（Ground Penetrating Radar）測量により，掘削地点の氷厚は300m程度であると推定されている（personal communication from Sunako et al.）．

2.2 観測メンバー

観測隊は，観測メンバー 8人，シェルパ 7 人およびポーター 38人の計53人で構成された．そして，アイスコア掘削はシェルパ 3 人，メンバー 4人の計 7 人で遂行された．厳密に言えば，職業としての「シェルパ」のカテゴライズには諸説あるが，本稿では，「シェルパ」は主にトレッキングガイドや生活・観測のサポート，「ポーター」は荷物の運搬のみを行う方々の総称として記載している．

2.3 観測スケジュール

今回の調査では，氷河上流の雪原でのアイスコア掘削の他に，氷河下流から氷河上流の広い範囲で，ドローンによる氷河の空撮（図2a），氷河表面を覆うデブリの温度の測定（図2b），GPSによる氷河の表面形状の測量，自動気象測器のデータ回収およびメンテナンス，自動気象測器の新設置（図2c），ステークによる表面質量収支測量とステークの再設置（図2d），気温計のデータ回収と再設置，

図2：氷河観測の様子
(a) Na村でのドローン調査（撮影者：著者）．(b) キャンプ 1 付近，デブリ温度測定（撮影者：佐藤洋太氏）．(c) キャンプ 3 付近，自動気象測器の新設作業（撮影者：佐藤洋太氏）．(d) キャンプ 4 付近，裸氷域でのステークの設置作業（撮影者：藤田耕史氏）．(e) 掘削現場にて，鉛直方向に切断されたアイスコア（撮影者：著者）．(f) 悪天候の中のキャンプ4の設営作業（撮影者：藤田耕史氏）．

Figure 2: Glacier observation
(a) An unmanned aerial vehicle operation at Na village (Photo by Akane Tsushima). (b) Temperature measurements of debris layers at near the Camp 1 (Photo by Yota Sato). (c) Installation of new AWSs at near the Camp 3 (Photo by Yota Sato). (d) Measurement and re-installation of mass-balance stakes near the Camp 4 (Photo by Koji Fujita). (e) An ice core cut vertically at the drilling site(Photo by Akane Tsushima). (f) Setting up the Camp 4 under the strong wind (Photo by Koji Fujita).

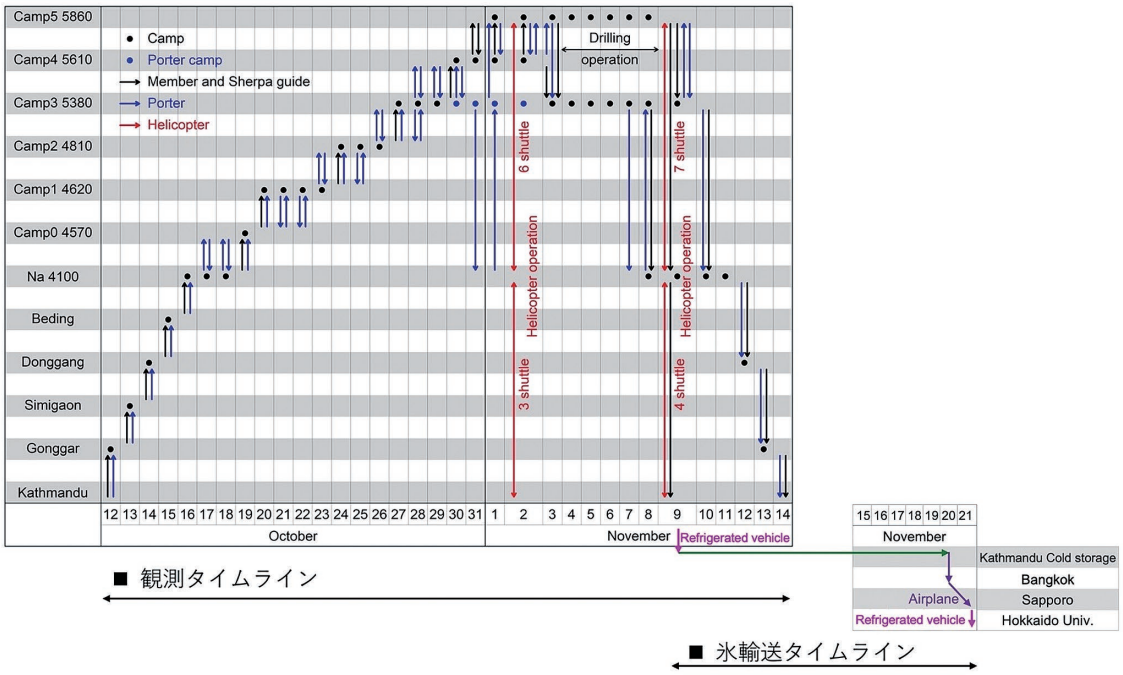

図3：アイスコア掘削を含むヒマラヤ氷河観測のタイムラインと氷輸送のタイムラインを示した．キャンプの標高（海抜表記）を併せて示した．Tsushima et al.（2021）に加筆.
Figure 3: Timeline of the 2019 ice core drilling expedition and ice core transport. Elevations (m a.s.l.) of the camps are also listed. Modified from Tsushima et al. (2021).

などの氷河観測を実施した．図2に観測中の作業の様子を写真で示した．今回の観測中の人の動き，ポーターやヘリコプターによる荷物の動きおよび掘削されたアイスコアの動きを図3に示した．アイスコア掘削を含む氷河観測は，10月12日にカトマンズを出発してから，11月14日にカトマンズに戻るまでの計34日間で実施された.

3. ヘリコプターオペレーション

ヘリコプターのオペレーションには大きく2つの問題点があった．飛行自体の不確実性と，荷物の重量制限である．掘削関係の主要な荷物の一覧を図4aに示した．一般的に数千メートルを超える高高度へのヘリコプターの飛行・物資の輸送は困難である．今回の掘削地点は5860 m a.s.l.地点に位置し，かつ，ロールワリン地域が飛行制限区域であるため，ヘリコプターによる掘削機材とアイスコアの輸送の可否が当日まで不確実であった．ヘリコプターが使用できた場合でも，6000m a.s.l.への飛行と荷上げは厳しく，ヘリコプターが掘削地点より低い標高に着陸した場合には，そこから掘削地点へは人力での荷上げを想定していた．この場合，復路ではアイスコアも掘削地点から低い標高まで人力で下ろすことになり，運搬には数日を要することが予想され，アイスコアが融解する恐れがあった．アイスコアが融解した場合には，アイスコアの掘削時に付着した表面の汚れが融解水とともにアイスコア内部に侵入し，化学分析の結果に支障をきたす．それを防ぐために掘削地点にてアイスコア表面の汚染除去作業を行う必要があり，当初の掘削スケジュールには2日の猶予を持たせた．また，人力での荷物輸送を想定するため，１個の荷物の重量はポーターが担ぐ最大重量の40kg未満になるように梱包する必要があった．例えば，通常はドリルウインチに巻いてある180mのウインチケーブルを外し，それぞれを40kg以下にし，ケーブルとウインチを別々に運搬した．その他の機材もできる限り解体し40kg以下になるように再梱包した（図４a）．また，運搬中のポーターの安全のために，運搬しやすく，バランスの取れた形状・サイズに梱包することも重要であった（図４b, c）.

もう一つの問題は，使用するヘリコプターの機体サイズである．1998年にネパール西部のヒドゥン・バレーで行われた過去の観測では，荷物の輸送に，5000 m a.s.l.で2トンを超える荷物が積載可能なロシア製の大型ヘリコプター（Mi-8）をチャーターしている（Fujita et al., 2002）．しかしながら，近年このようなヘリコプターはネパール軍に徴用され，民間用途に利用できなくなっている．本

a)

掘削関係荷物	梱包方法	重量(kg)	輸送方法
ドリル操作盤	青ダン	10	ヘリコプター
ウインチドラム	毛布	34	ヘリコプター
ウインチケーブル	毛布	17	ヘリコプター
ウインチベース，モーター	毛布	17	ヘリコプター
ドリルヘッド	毛布	8	ヘリコプター
ドリルマスト	2つのパーツに分解，毛布	2×2	ヘリコプター
ドリルバレル，ジャケット	毛布	16	ヘリコプター
掘削ドリル用工具	青ダン，計2個	35, 30	ヘリコプター
発電機	木箱	38	ヘリコプター
発電機	段ボール箱	32	ヘリコプター
ガソリン	ガソリンタンク	20×4	ポーター
発電機用オイル，不凍液	-	1, 1	ポーター
シャベル	気泡緩衝材	9	ヘリコプター
アイスコア切断用電気のこ/バッテリー，セラミックナイフ，夜間掘削用電気/バッテリー　など	青ダン，計4個	20×4	ヘリコプター

図4：(a) 掘削関係の主要な荷物の一覧を示した．全ての荷物はポーターによる輸送を想定し，1個が40kg未満になるように準備した．発電機用のガソリンはヘリコプターへの搭載が不可のためポーターによる輸送をおこなった．(b) 重量・容量制限のために，ケースから取り出され，現地で調達した毛布などで再梱包された掘削機材（撮影者：江刺和音氏）．(c) ポーターによる物資運搬（撮影者：藤田耕史氏）．(d) ヘリコプターに積まれた掘削機材（撮影者：佐藤洋太氏）．Tsushima et al. (2021) に加筆．

Figure 4: (a) List of equipment. One box was prepared to be <40 kg for each porter load. Gasoline used for a generator could not be loaded onto a helicopter, and therefore it was transported by porters. (b) Drilling equipment repackaged due to weight and capacity limits (Photo by Nao Esashi). (c) Transport of supplies by porters (Photo by Koji Fujita). (d) Drilling equipment loaded onto a helicopter (Photo by Yota Sato). Modified from Tsushima et al. (2021).

観測にて我々がチャーターしたヘリコプターはエアバスAS350-B3e で，最大積載容量は0.68m^{3}程度である．ヘリコプターはカトマンズのトリブバン国際空港からトランバウ氷河へ往復するが，標高が高く，風の影響が強くなる氷河上を飛行する際には積載重量を大幅に減らす必要がある．そのため，カトマンズから来たヘリコプターは一度，氷河最近傍のNa村（図1a）に着陸し，荷物を積み直して積載重量を大幅に減らしてから氷河上を往復した．カトマンズとNa村間の最大積載重量は240kgで，Na村から氷河上掘削地点（6000 m a.s.l.）間の最大積載重量は50-100kg程度とされた．氷河上での最大積載重量に幅があるのは，風の強さなど天気に左右されるためである．つまり，荷物の輸送にヘリコプターを利用する場合にも，全ての荷物のサイズ・重量を厳密に調整する必要があった（図４a, b, d）．

2019年11月2日に往路のヘリコプターオペレーションを実施した．3機のヘリコプターで，約330kgの掘削機材をトリブバン国際空港からNa村まで輸送した．Na村と掘削地点間の輸送には3機で計6往復を要した．復路は，11月9日に掘削機材とアイスコアで合計約550kgと2人の観測メンバーを輸送した．計2機のヘリコプターで掘削地点とNa村間を計7往復し，トリブバン国際空港とNa村を計4往復した．

4. 氷輸送オペレーション

アイスコアは，トリブバン国際空港から冷凍車（-18℃）でカトマンズの冷凍倉庫（-13℃）に運ばれ，日本に輸送されるまで保管された（図3）．アイスコア保管中と輸送中の温度管理のためアイスコアボックスからランダムに二つ選び，小型防水温度データロガー（TR-52i; T&D Co.）を同梱した．図5には，アイスコアボックス内の温度変化に加えて，アイスコアボックスの保管の様子を示した．アイスコアボックス内の温度は，2019年11月9日にNa村からカトマンズへのヘリコプターでの輸送中にプラスの値を示した．これは，氷河からNa村に輸送されたアイスコアが，ヘリコプターの故障により，2-3時間Na村に放置されたためである（図5b）．2019年11月9日以降は，アイスコアボックス内の温度はマイナスの値を示した．北海道大学低温科学研究所に到着後にアイスコアの状態を確認したが，アイスコアボックス内の温度が一時プラスの値を示したものの，アイスコアが融解した痕跡は見当たらなかった．

ネパールから日本までの氷の輸送も困難を極めた．まず，ネパールと日本の間では冷凍コンテナを備えた航空便がなかった．そのため，ドライアイスをアイスコアと同梱して輸送することとした．ところが，ネパール国内ではドライアイスが購入できないことが分かったため，日本へ輸送する前々日の2019年11月19日にインドからネパールに200kgのドライアイスを輸入した．そのドライアイスを，１箱15kg程度のアイスコアに対して，約10kg程度になるように同梱した．翌日の2019年11月20日にアイスコアは通常定期便の普通貨物にてトリブバン国際空港からバンコク経由で北海道新千歳空港に空輸された．2019

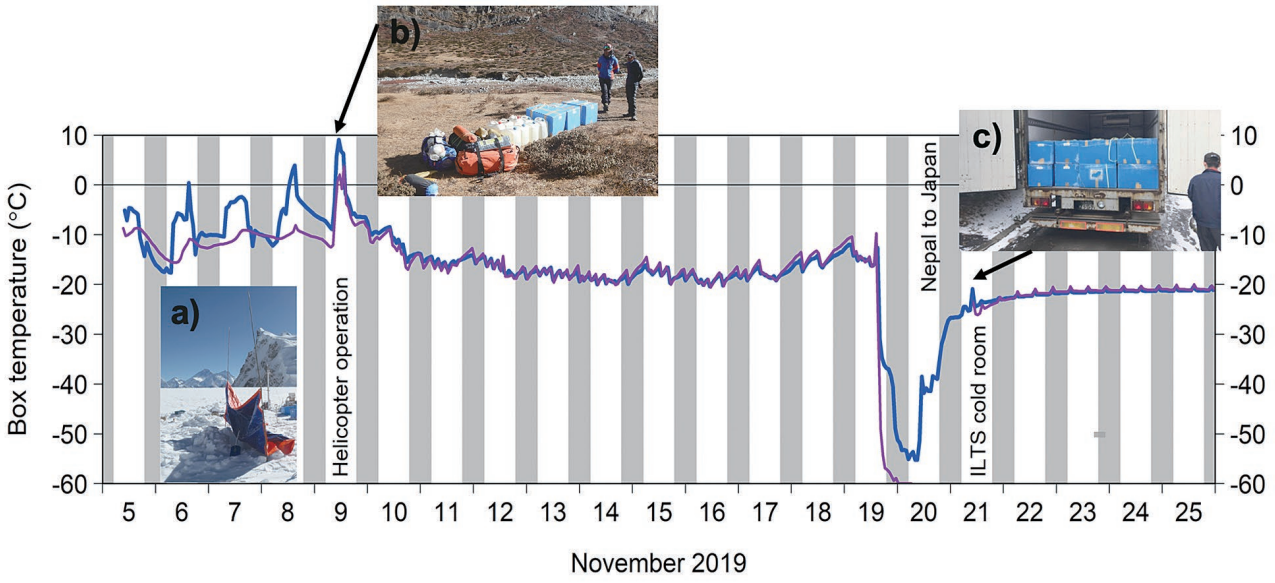

図5：アイスコアボックスの中に入れた小型防水温度データロガー（TR-52i; T&D Co.）の時間変化を示した．データロガーはランダムに選んだ二つのアイスコアボックスに1台づつ入れた．灰色は夜間帯を示す．11月19日の夜間から21日までの期間は，データロガー1台（紫色）が作動していない．これはドライアイスによる過剰な冷却が原因であると考えられた．(a) 氷河上でのアイスコアボックスの保管の様子．強い日射を避けるため，雪の中に埋めて，その上に日除けを立てた（撮影者：著者）．(b) 2019年11月9日，ヘリコプタートラブルでNa村足止めされたアイスコアボックスの様子．ヘリコプターの故障により2-3時間この状態で留まることになった（撮影者：佐藤洋太氏）．(c) 冷凍輸送車にて北海道大学低温科学研究所に到着したアイスコアの様子（撮影者：的場澄人氏）．Tsushima et al.（2021）に加筆．

Figure 5: Temporal changes in temperatures inside two ice core storage boxes. One temperature logger (purple) did not work during the transportation between Nepal and Japan, due probably to overcooling by dry ice. Shading indicates night periods.
(a) Storage of ice core boxes on the glacier. To avoid strong sunlight, we buried them under the snow with sunshade (Photo by Akane Tsushima). (b) Ice core boxes left behind in Na Village for 2-3 hours due to a trouble of helicopter (November 9, 2019) (Photo by Yota Sato). (c) Ice core boxes delivered to the ILTS by a refrigerated vehicle (Photo by Sumito Matoba). Modified from Tsushima et al. (2021).

年11月20日に新千歳空港に着いたアイスコアはすぐさま冷凍車に積み替えられ，北海道大学低温化学研究所の低温室（−20℃）に到着・保管された（図3, 5c）．輸送中の約20時間程度は室温下に置かれたアイスコアボックスであったが，融解することなく氷を輸送することができた．

5. アイスコア掘削

5.1 掘削ドリル

本プロジェクトでは，2017年と2018年の試掘削を経て，2019年に本掘削を行った．試掘削には，九州オリンピア工業（株）が製造したコア直径73mmの軽量化されたハンドオーガを用いた．2019年の本掘削は輸送時のコスト削減と，高山域での取り扱いやすさを考慮して，小型で軽量化された（株）地球工学研究所が製造した浅層用掘削装置を用いた（高橋，1996，2005）．このドリルは2004年以降，主に高山域での掘削に使用されている（e.g. Takeuchi et al., 2004, 2014; Matoba et al., 2007; Tsushima et al., 2015）．

浅層用掘削装置では1回の掘削動作でコア径95mm，長さ0.50mのアイスコアが掘削できる．ウインチモーターは最大 750 W，ドリルモーターは DC100V で 350 Wをそれぞれ要する．詳細な仕様はTakeuchi et al.（2004）に記述されている．図6に，掘削現場で実際にセットアップされた掘削システム全体を示した．ドリルはアーマドケーブルで吊り下げられ，ケーブルはマストの頂上に取り付けられた滑車を通してウインチに導かれる．ウインチの巻き上げ巻き下ろし操作によってドリルが上下方向に動く仕組みになっており，操作板で，ウインチモーターやドリルモーターの操作を行った（高橋，1996，2005）．高標高域で電動掘削装置を使用するにあたり，発電機が規定の出力で電力を供給できるかが，大きな不安材料であった．本掘削で使用した発電機は，寒冷地での使用に適したガソリンエンジン発電機（EF2500i，ヤマハ発動機（株））で，総重量は29kg，規定出力は海抜 0mで2.5 kVAである．高標高では気圧が低く酸素濃度が低くなるので不完全燃焼を防ぐため，キャブレター内のジェットノズルの径を小さくし（部品番号：1HX-1423E-31，ヤマハ発動機（株）），

図6：2019 年の観測にて実際に設営された掘削システムの様子．撮影されたのはドリルがスタックした11月5日で，氷から引き出したドリルのジャケットを木槌で叩き，チップを取り出す様子．著者による撮影．
Figure 6: Drilling system set up during observation in 2019. The photograph was taken after drill stack (November 5th), showing that we hit the drill jacket with a wooden hammer for removing ice chips immediately after pulling out the drill from the ice (Photo by Akane Tsushima).

燃料の噴射量が少なくなるように調整した．さらに，酸素不足による不完全燃焼でかぶりやすくなるプラグ（NGK, BPR4ES），黒く汚れやすくなるオイルの交換を頻繁に行なった．発電機自体は常時野外に設置したが，交換するオイルは，低温環境下に放置しないように注意した．以上の対策により，発電機は標高 6000 m a.s.l.での掘削時に十分な電力を供給することができた．

5.2 アイスコア掘削

掘削は全6日間で行い，掘削時間は合計約41時間，計177ランで，ケーブル長での換算で78.4mのアイスコアが掘削された．掘削中はマスト上部に小型防水温度データロガーを日除け無しで取り付け，気温の測定を行った．掘削期間中の気温は常に0℃度を下回ったが（図7a），日中の強い日射によりドリルが温められた．氷体温度が0度付近の温暖氷河や山岳氷河のアイスコア掘削においては，気温が高く日射が強いため，掘削には様々な問題が発生しやすい（Kamiyama et al., 2001; Fujii et al., 2002; Kohshima et al., 2002; Takeuchi et al., 2004; 高橋, 2005）．先行研究によると，ジャケット下部の入口付近でチップの詰まりが発生することによるドリルの空回りや，カッターマウントの裏側，カッターとヒールの間の凹凸や，ヒールを固定するボルトの穴などに圧密されたチップが付着し，カッターの刃先が浮き上がることでドリルが空回りする，などの問題が挙げられる（Takeuchi et al., 2004; 高橋, 2005）．トランバウ氷河にて2017年，2018年に実施したハンドオーガ掘削，2019年に実施した本掘削においても大きな問題となったのは，ドリルのスタックである．トランバウ氷河は，気温は低いものの，日中の数時間は日射が強く，強い日射によりドリルが暖まってしまう．そのため，ドリルが暖まったまま掘削した場合に，融解再凍結氷から作られたチップが湿り気をおびてスパイラルを上がってくる過程でコアバレルとの間で詰まって圧密されることがスタックの主な原因と考えられた．2018年の掘削時にスタックしたドリルを後に取り出して確認したところ，チップはジャケットの上方へ輸送されず，下端からスパイラルに沿ってびっしりと詰まって固まっていた．

2019年に実施したアイスコア掘削期間中の気温と掘削速度を図7に示した．掘削初日（実際にはドリルを設置した前日に，確認のために数コア掘り下げている．2019年11月4日）は気温が低かったため，日中も含めて1日中掘削を続けることができた．しかし，2日目（2019年11月5日）の日中は気温が高く（図7a），日射が強かったため，日中の掘削時にドリルがスタックした．氷から引き抜いたドリルのジャケット表面には水滴がついており，コアバレルはジャケットから引き出せなかった．数分間，ジャケットを木槌で叩き続けてバレルとジャケットの間に圧縮されたチップを落としてコアバレルを引き出すと（図6）バレル上のスパイラルの間には圧密されたチップがびっしりと詰まっていた．このトラブルのために，深度20mあたりでは掘削速度が一時的に減速した（図7b）．そこで，ドリルのスタックを避けるため，3日目，4日目（2019年11月6日，7日）は正午前から日射が弱まる午後2時過ぎまでは掘削を中断することにした．最終日（2019年11月8日）は曇りで比較的日射が弱かったため，午前 6 時から12時頃まで掘削を続けることができた．

5.3 現場観測

気温は，ステークC6 サイト（1時間間隔，図1b）と掘削地点（10 分間隔，図1b）にて小型防水温度データロガーで計測された．温度センサーはステークC6サイトでは PVC パイプで日射を遮って設置されたが，掘削サイトではドリルマストの上部に日射を遮らずに設置した．2019年11月8日の掘削終了後，14時から16時にかけて掘削孔を使った氷体温度の測定を行った．パンタグラフ型のアンチトルクにデータロガーを取り付けて，掘削孔に降ろし，氷壁にサーミスターセンサーを接触させながら降下させて氷温の測定を行なった．データロガー取り付けの際には

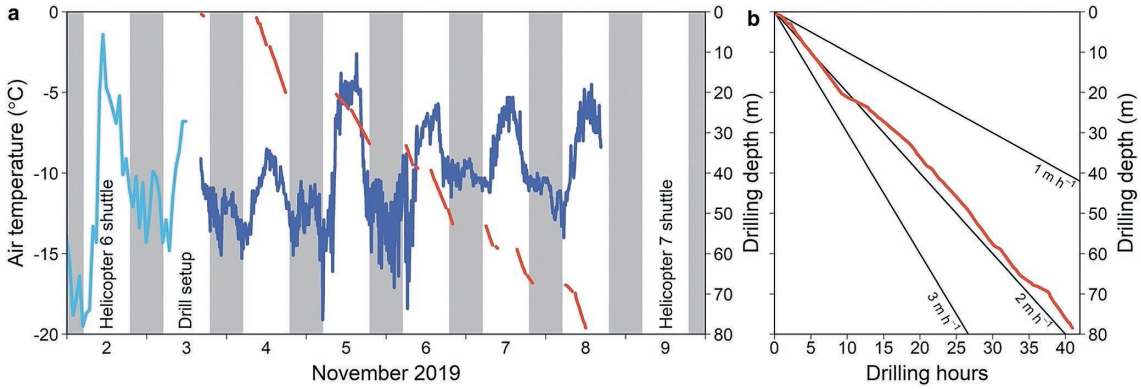

図7：(a) トランバウ氷河の観測期間中の気温（左軸）と掘削深度（右軸）を示した．水色の線はステーク網の C6サイト（1 時間間隔），青色の線は掘削地点（10 分間隔）にて，それぞれ測定された気温変化（左軸）を示す．(b) 掘削時間と掘削深度の関係を示した．a, bの両グラフの赤線は実測値の掘削深度を示す（どちらも右軸）．Tsushima et al. (2021) より引用．

Figure 7: (a) Air temperature (left axis) and drilling progress (right axis) on the Trambau Glacier in the Rolwaling region, Nepalese Himalaya, and (b) drilling progress vs time. Light blue and blue lines denote air temperatures (left axis) at Stake C6 (1 h intervals) and at the drill site (10 min intervals), respectively. The red lines in both panels denote the drilling depth (right axes). Cited from Tsushima et al. (2021).

アンチトルクが温度測定に干渉しないように，センサーの取り付け位置に注意した．温度は10秒間隔で記録され，深さ 5，10，20，30，40，60，70，77.55 m 地点で各 10 分間停止させて測定した．各深度における後半の 5 分間の平均を掘削孔温度として採用した（図8f）．

掘削されたアイスコアについては掘削現場にて，アイスコア密度の算出のために長さと重量を測定し，目視にて層位（フィルン層，氷板層，気泡層および不溶性不純物を含む層（以下ダスト層）の区別）とコア情報（掘削時やアイスコア切断時のひび割れなど）を観察・記録した（図8）．輸送費を削減するため，アイスコアは体積を6割程度に減らす必要があったため，長さと重量の測定および目視観察を行った後に，鉛直方向に切断した．アイスコアの切断は手引きノコギリと電動ノコギリ（JR101DW;（株）マキタ）を併用して，手作業で行なった．はじめにアイスコア表面を鉛直方向に手引きノコギリで数回引いて溝をつけ，次にその溝に沿って電動ノコギリを使用することで，アイスコアは比較的簡単に切断することができた（図2e）．アイスコアの 4 割は捨てて，残りの 6 割はビニール袋に入れて，シーラーで密封した後，緩衝材と共に，厚さ3cmの断熱材を入れたプラスチック製の段ボール箱（通称青ダン．0.39 m × 0.65 m × 0.45 m）に詰めて，ヘリコプターでカトマンズに輸送するまで雪の下に埋めて保管した．日中は強い日射による融解を避けるため，アイスコアが保管されている場所に，竹に結んだビニールシートを日除けとして設置した（図5a）．

6. 掘削孔温度および気温の測定結果

掘削孔温度は，深さ5m地点で-0.21℃，深さ77.55m地点で-1.33℃と，深さとともに徐々に低下した（図8f）．掘削孔温度を測定中の外気温は-6.7℃であった．一般的に，年間平均気温に相当すると考えられている深さ 10 m の温度（Loewe，1970）は，-0.82℃であった．ステークC6サイトで測定された年平均気温（2018年10月31日から 1 年間の平均値として算出）は-8.7℃で，掘削地点で測定された深さ 10 m の氷体温度は，年間平均気温よりも著しく高い値を示した．先行研究では，ER 氷河（6450 m a.s.l.）の10m深の温度は-9.6℃（Kang et al.，2003），Dasuopu 氷河（7200 m a.s.l.）の10m深の温度は-16.0℃（Thompson et al.，2000）と報告されており，それらと比較してもトランバウ氷河の10m深の氷体温度は著しく高い値を示した．図8cに示したように，掘削地点は融解再凍結が生じている．先行研究では，融解水の再凍結による潜熱放出が氷体温度を上昇させる可能性を示している（Bingham et al.，2008）．以上から，トランバウ氷河では融解水の再凍結が氷体温度を上昇させたことが示唆される．これが，氷体温度の変化だけでなく，アイスコアに保存された古気候情報にも影響を与えた可能性がある．したがって，アイスコアについては，古環境記録の復元を行う前に，融解，浸透，再凍結による化学成分への影響を詳細に検証する必要がある．

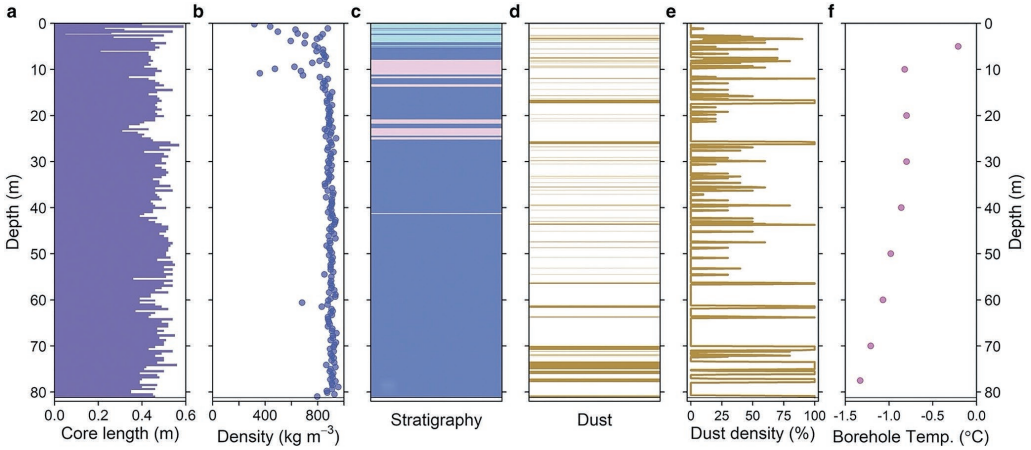

図8：2019年にネパール・ヒマラヤ，トランバウ氷河で掘削された81.2mアイスコアの，(a) コアの長さ，(b) コアの密度，(c) 層位，(d) ダスト層，(e) ダスト密度，(f) 掘削孔温度のプロファイルを示した．(c) の水色，ピンク色，青色で示した領域は，それぞれ，フィルン，気泡を多く含んだ氷，再凍結氷を示す．(e) のダスト密度は，アイスコア 0.1 m毎に 0.01 m 精度で計測されたダスト層の割合として定義した．Tsushima et al.（2021）より引用．
Figure 8: Profiles of (a) core length, (b) density, (c) stratigraphy, (d) dust layers, (e) dust density and (f) borehole temperature in the ice core from Trambau Glacier, Nepalese Himalaya, drilled in 2019. The light blue, pink, and blue shaded areas in (c) denote firn, bubble-rich ice, and refrozen ice, respectively. Dust density is defined as the percentage of dust layers counted at 0.01 m intervals in every 0.1 m of core. Cited from Tsushima et al. (2021).

7．アイスコアの初期解析結果

現場で測定されたアイスコアの長さ，長さと重量から算出されたアイスコアの密度および目視観察により判定した層位のプロファイルを図8に示した．アイスコアの全長は実測値で81.2mであった．一回の掘削で採取されたアイスコアの長さの平均値は0.46 mで，57個のアイスコアがドリルの掘削性能（0.50 m）よりも長い（図8a）．アイスコアの平均密度は 866kg m^{-3}（図8b）で，アイスコア全体の約88%が密度830 kg m^{-3}以上の再凍結氷で形成されていることから，掘削地点は浸透帯に分類されると考えられた（Cuffey and Paterson，2010）．ダスト層はアイスコア全体に分布し，アイスコア全体の約12％にダスト層が存在することが分かった（図8d）．図8eに，0.1m毎に算出したダスト密度を示した．ダスト密度は深度により大きく変化した．先行研究では，ヒマラヤの氷河へのエアロゾルの沈着量は夏季モンスーンの強弱など大気循環の変化に応答すると述べられている（e.g. Thompson et al.，2000）．トランバウアイスコアのダスト密度の変化も今後，大規模大気循環の変化との比較研究を進め，関連性を評価する必要があるだろう．

Sunako et al.（2019）は，観測データで検証された質量収支モデルを用いてトランバウ氷河の年間涵養量を算出しており，1980年から2018年の期間において，水当量（雪を水に換算した場合の量）で0.73 ± 0.11 mと推定された．したがって，長さ約80メートルのトランバウアイスコアは100 ～ 130年程度の古環境記録を保持していることが期待される．

8．おわりに

はじめてトランバウ氷河での掘削を試みたのは2010年のことである．それから10年の時を経て，ようやく長期間の古気候情報が復元可能なアイスコアの掘削に成功した．最終的には成功したものの，飛行制限区域で，かつ，6000 m a.s.l.の高標高でのヘリコプターオペレーション，ポーターによる氷河上への物資の人力輸送，悪天候（図2f）など，全てが挑戦的な観測であった．

前述したように，近年，東南アジアは急速な経済発展により人為起源の汚染物質の大気中への排出量が劇的に増加し，大規模発生源の一つとして知られる（Ohara et al，2007; Alexander et al.，2013）．現在，著者らは鉛の安定同位体比など，人間活動による大気汚染のトレーサーとなる化学種成分の分析を積極的に進めており，今後は，アイスコアから復元した環境変動情報と東南アジアを中心とした社会・経済活動の変遷を比較し，両者の関わりを明らかにしていきたい．さらに，ロールワリン地域の低標高域で採取された樹木年輪の酸素安定同位体比データの取得・解析も進めており，アイスコアから復元した涵養量と樹木年輪酸素同位体比から復元した降水量の比

較から，この地域の気候変動の高度依存性についても検証していく予定である．

謝辞

観測のメンバーと観測をサポートいただいた全ての方々に改めて深く感謝申し上げます．また，今回執筆の機会をいただいた，西岡純教授と的場澄人助教に感謝申し上げます．本研究はJSPS科研費17H01621，16K16184，18KK0098およびJSPS-SNSF国際共同プログラムJRPs 20191503の助成を受けたものです．

参考文献

Alexander, L., S. Allen, N. L. Bindoff, F-M. Breon, J. A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J. M. Gregory, D. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. K. Kanikicharla, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G. A. Meehl, I. I. Mokhov, S. Piao, G-K Plattner, D. Qin, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, T. Stocker, L. D. Talley, D. G. Vaughan and S-P. Xie (2013) Summary for policymakers, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report*, Stockholm, Sweden.

Bingham, R. G., A. L. Hubbard, P. W. Nienow and M. J. Sharp (2008) An investigation into the mechanisms controlling seasonal speedup events at a High Arctic glacier. *J. Geophys. Res.: Earth Surface* **113**(F2), F02006. doi: 10.1029/2007JF000832

Cuffey, K. M. and W. S. B. Paterson (2010) The Physics of Glaciers, *4th Edn. Oxford: Butterworth-Heinemann.*

Fujii,Y., T. Kameda, F. Nishio, K. Suzuki, M. Kohno, F. Nakazawa, J. Uetake, L. M. Savatyugin, S. M. Arkhipov, I. A. Ponomarev and N. N. Mikhailov (2002) Outline of Japan–Russia joint glaciological research on Sofiyskiy Glacier, Russian Altai Mountains in 2000 and 2001. *Bull. Glaciol. Res*., **19**, 53–58.

Fujita, K., F. Nakazawa, N. Takeuchi, M. Nakawo, B Rana, N. Azuma and Y. Fujii (2002) Ice core drilling on the southern slope of Nepal Himalayas. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 59–66.

Fujita, K. (2008a) Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance. Earth Planet. *Sci. Lett*., **276**(1–2), 14–19.

Fujita, K. (2008b) Influence of precipitation seasonality on glacier mass balance and its sensitivity to climate change. *Ann. Glaciol*., **48**, 88–92.

Immerzeel, W. W., L. P. H. Van Beek and M. F. P. Bierkens (2010) Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, **328**, 1382–1385. doi: 10.1126/ science.1183188

Kamiyama, K., H. Motoyama and O. Watanabe (2001) Field observations of the Japanese Arctic glaciological expeditions in Svalbard from 1993 to 1995. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **54**, 243–251.

Kang, S., P.A. Mayewski, D. Qin, Y. Yan, S. Hou, D. Zhang, J. Ren and K. Kruetz (2002) Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core: relationship to atmospheric circulation over Asia. *Atmos. Environ*., **36**, 3351–3361. doi: 10.1016/S1352-2310(02)00325-4

Kang, S., P. A. Mayewski, Y. Yan, D. Qin, T. Yao and J. Ren (2003) Dust records from three ice cores: relationship to spring atmospheric circulation over the northern hemisphere. *Atmos. Environ*., **37**, 4823–4835. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.08.010

Kaspari, S., R. LeB. Hooke, P. A. Mayewski, S. Kang, S. Hou and D. Qin (2008) Snow accumulation rate on Qomolangma (Mount Everest), Himalaya: synchronicity with sites across the Tibetan plateau on 50–100 year timescales. *J. Glaciol*., **54**, 343–352.doi: 10.3189/002214308784886126.

Kohshima, S., T. Shiraiwa, M. A. GodoP, K. Kubota, N. Takeuchi and K. Shinbori (2002) Ice core drilling on Southern Patagonia Icefield – development of a new portable drill and the filed expedition in 1999.*Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56**, 49–58.

Loewe, F. (1970) Screen temperatures and 10m temperatures. *J. Glaciol*., **9**, 263–268. doi: 10.3189/S0022143000023571

Matoba, S., S. V. Ushakov, K. Shimbori, 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. *Bull. Glaciol. Res*., **24**, 79-85.

Nuimura, T., A. Sakai K. Taniguchi H. Nagai, D. Lamsal, S. Tsutaki, A. Kozawa, Y. Hoshina, S. Takenaka, S. Omiya, K. Tsunematsu, P. Tshering and K. Fujita (2015) The GAMDAM glacier inventory: a quality controlled inventory of Asian glaciers. *Cryosphere*, **9**, 849–864.doi: 10.5194/tc-9-849-2015

Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan and T. Hayasaka (2007) An Asian emission inventory of

anthropogenic emission sources for the period 1980–2020. *Atmos. Chem. Phys*., **7**, 4419–4444.doi: 10.5194/acp-7-4419-2007

PAGES 2K Consortium (2013) Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nat. Geosci*., **6**, 339–346.doi: 10.1038/ ngeo1834

Qin, D., S. Hou, D. Zhang, J. Ren, S. Kang, P. A. Mayewski and C. P. Wake (2002) Preliminary results from the chemical records of an 80.4 m ice core recovered from East Rongbuk Glacier, Qomolangma (Mount Everest), Himalaya. *Ann. Glaciol*., **35**, 278–284.doi: 10.3189/172756402781816799

Sakai, A., K. Chikita and T. Yamada (2000) Expansion of a moraine-dammed glacier lake, Tsho Rolpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya. *Limnol. Oceanogr.*, **45**, 1401–1408. doi: 10.4319/lo.2000.45.6.1401

Sakai, A. (2019) Updated GAMDAM glacier inventory over the high mountain Asia. *Cryosphere*, **13**, 2043–2049.doi: 10.5194/tc-13-2043-2019

Sano, M., P. Tshering, J. Komori, K. Fujita, C. Xu and T. Nakatsuka (2013) May–September precipitation in the Bhutan Himalaya since 1743 as reconstructed from tree ring cellulose $\delta^{18}O$. *J. Geophys. Res. Atmos*., **118**, 8399–8410.doi: 10.1002/jgrd.50664

Sano, M., C. Xu, A. P. Dimri and R. Ramesh (2019) Summer monsoon variability in the Himalaya over recent centuries. In Dimri, A.P., B. Bookhagen, M. Stoffel and T. Yasunari (eds). *Himalayan Weather and Climate and Their Impact on the Environment. Cham: Springer*, pp.261–280.doi: 10.1007/978-3- 030-29684-1_14.

Sunako, S., K. Fujita, A. Sakai and R.B. Kayastha (2019) Mass balance of Trambau Glacier, Rolwaling region, Nepal Himalaya: in-situ observations, long-term reconstruction and mass-balance sensitivity. *J. Glaciol*., **65**, 605–616.doi: 10.1017/jog.2019.37

高橋昭好 (1996) 新型雪氷浅層コアドリルの開発. 雪氷, **58**, 29-37.doi: 10.5331/seppyo.58.29.

高橋昭好 (2005) 温暖氷コア掘削ドリルの開発.雪氷, **67**, 245-250.doi: 10.5331/seppyo.67.245.

Takeuchi, N., A. Takahashi, J. Uetake, T. Yamazaki, V. B. Aizen, D. Joswiak, A. Surazakov and S. Nikitin (2004) A report on ice core drilling on the warm plateau of Mt. Belukha in the Russian Altai mountains in 2003. *Polar Meteorol. Glaciol*., **18**, 121–133.

Takeuchi, N., K. Fujita, V. B. Aizen, C. Narama, Y. Yokoyama, S. Okamoto, K. Naoki and J. Kubota (2014) The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. *Quat. Sci. Rev*., **103**, 26–33. doi: 10.1016/j.quascirev.2014.09.006

Thompson, L. G., T. Yao, E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, K. A. Henderson and P.-N. Lin (2000) A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, **289**, 1916–1919.doi: 10.1126/science.289.5486.1916

Tsushima, 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.doi: 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 a high-elevation accumulation zone of Trambau Glacier in the Nepal Himalaya, *Ann. Glaciol*., **62**(85-86), 353 – 359.doi: 10.1017/aog.2021.15

Wang, Q., X. Fan and M. Wang (2016) Evidence of high-elevation amplification versus Arctic amplification. *Sci. Rep*., **6**, 19219.doi: 10.1038/ srep19219