

タジキスタン・パミール・Kon Chukurbashi 氷帽アイスコアを 用いた気候復元

Climate Reconstruction Using Ice Core Data from the Kon-Chukurbashi Ice Cap in the Pamir, Tajikistan

近藤ひかる^{1,2}, 的場澄人², 黒崎豊², 松本真依^{1,2}, 柳沼蒼良^{1,2}, 松崎倭太郎^{1,2}, 北爪正希^{1,2},
平野瑞幸^{1,2}, 飯塚芳徳², Evan S Miles^{3,4,5,6}, Stanislav Kutuzov⁷, Tomas Saks³, Enrico Mattea³,
近藤研⁸, Ivan Lavrentiev⁹, Dilorom Kayumova¹⁰, Abdullo Jahongir¹⁰, Davlatov Jovidon¹⁰,
Andreas Henz⁴, Khushnazarova Zebokhonim¹¹, Nazrialo Sherali Sheralizoda¹⁰,
Francesca Pellicciotti¹², Martin Hoelzle³, 藤田耕史⁸
Hikaru Kondo^{1,2}, Sumito Matoba², Yutaka Kurosaki², Mai Matsumoto^{1,2}, Sora Yagimuma^{1,2},
Kotaro Matsuzaki^{1,2}, Masaki Kitazume^{1,2}, Mizuki Hirano^{1,2}, Yoshinori Iizuka², Evan S Miles^{3,4,5,6},
Stanislav Kutuzov⁷, Tomas Saks³, Enrico Mattea³, Ken Kondo⁸, Ivan Lavrentiev⁹,
Dilorom Kayumova¹⁰, Abdullo Jahongir¹⁰, Davlatov Jovidon¹⁰, Andreas Henz⁴,
Khushnazarova Zebokhonim¹¹, Nazrialo Sherali Sheralizoda¹⁰, Francesca Pellicciotti¹²,
Martin Hoelzle³, Koji Fujita⁸

Corresponding author: kondo.hikaru.v5@elms.hokudai.ac.jp (H. Kondo)

¹北海道大学大学院環境科学院, ²北海道大学低温科学研究所, ³Cryosphere Research Group, University of Fribourg,

⁴Glaciology and Geomorphodynamics Group, University of Zurich, ⁵Swiss Federal Research Institute WSL,

⁶VAW, ETH Zurich, ⁷School of Earth Sciences, The Ohio State University, ⁸名古屋大学大学院環境学研究科,

⁹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,

¹⁰Center for research of Glaciers of the National Academy of sciences of the Tajikistan,

¹¹Agency for Hydrometeorology of the Republic of Tajikistan, ¹²Institute for Science and Technology of Austria

¹ Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,

² Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Cryosphere Research Group, University of Fribourg,

⁴Glaciology and Geomorphodynamics Group, University of Zurich, ⁵Swiss Federal Research Institute WSL,

⁶VAW, ETH Zurich, ⁷School of Earth Sciences, The Ohio State University,

⁸Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,

¹⁰Center for research of Glaciers of the National Academy of sciences of the Tajikistan,

¹¹Agency for Hydrometeorology of the Republic of Tajikistan, ¹²Institute for Science and Technology of Austria

We analyzed water stable isotope ratios and major ions from an ice core drilled at Kon Chukurbashi Ice Cap to reveal long-term water cycle variations in the Eastern Pamirs and to examine the environmental factors driving these variations. D-excess and NH_4^+ concentrations increased simultaneously above 8 m w.e., suggesting that they may be influenced by a common environmental change. However, the seasonal $\delta^{18}\text{O}$ signal was partially smoothed, and independent dating markers together with further analyses are required for a more robust interpretation of the ice-core record.

1. はじめに

地球温暖化の進行に伴い、世界の多くの氷河・氷床では質量損失が進行している。しかし、カラコルム山脈やクンルン山脈の多くの氷河では、1990年代以降、質量収支が安定あるいは増加傾向を示すことが報告されており、この特異な現象は「カラコルムアノマリー」と呼ばれている^{1,2)}。

その要因として、冬季降雪量の増加³⁾、夏季の気

温上昇の抑制⁴⁾、灌漑拡大に伴う大気中の水蒸気量の増加⁵⁾、氷河の気温感度の低さ⁶⁾などが提案されてきたが、未だに統一的な見解は得られていない。

一方で、近年の衛星観測からは、カラコルム地域においても氷河質量が再び減少傾向へ移行しつつあることが報告されている⁷⁾。中央アジアの山岳氷河は、干ばつ時に河川流量を維持する重要

な水資源であり⁸⁾, 気候変動に伴う氷河変動の実態把握と将来予測が求められている. そのためには, カラコルムアノマリーをもたらした要因や氷河変動の長期的な特徴を理解し, 近年の質量損失の傾向がどのような気候・環境変化のもとで生じているのかを明らかにする必要がある. しかし, 本地域では長期気象観測データや現地観測データが極めて限られており, 氷河変動の背景にある水循環・気候変動の実態解明が課題となっている.

アイスコアは降水や大気環境の変化を連続的に保存する自然アーカイブであり, 過去の環境変動を高時間分解能で復元できる. 本研究では, アイスコアの水安定同位体比および化学成分を用いて東パミール地域の長期的な水循環変動の特徴を明らかにし, その環境要因について考察する.

2. 方法

2.1 掘削

アイスコアの掘削は, タジキスタン・東パミール・Kon Chukurbashi 氷帽 (39.250 °N, 73.558 °E, 5814 m a.s.l.) で, 直径 3 インチのエレクトロメカニカル式軽量アイスコアリングシステム (icedrill.ch, FELICS 社製) を用いて行った. 掘削期間は, 2025 年 9 月 23 日 – 30 日で, 105 m, 104.76 m, 20 m のアイスコアを掘削し, そのうち 104.76 m のアイスコアを北海道大学低温科学研究所に輸送し, 分析を行った.

2.2 分析・解析

分析は, 水安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD), 主要イオン種 (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+), 密度の測定および層位観察を行った. 水安定同位体比は, コアの両側面 7 mm を鉛直方向に切り出し, 3–7 cm 間隔で切断し, ガラス瓶内で融解後, WS-CRDS 水安定同位体分析装置 (L2120-i, Picarro 社製) で測定した. イオン分析用のサンプルは, 水安定同位体比用サンプルの 1 つの切り出し面から 8–10 mm を鉛直方向に切り出し, 4–10 cm 間隔で切断した. その後, クリーンルーム内で試料表面をセラミックナイフで削り, 表面の汚染を除去し, ポリエチレン袋で融解後, イオンクロマトグラフィー (Dionex Integrion HPIC, Thermo Fisher Scientific 社製) で測定した. 密度は, X 線透過法により 1 mm 間隔で計測した. 層位は, 主に氷, フィルン, ダスト, 気泡に着目し, 目視で観察し記録した.

3. 結果・考察

$\delta^{18}\text{O}$ の結果を図 1 に示す. パミール・カラコルム地域の氷河から採取されたアイスコアの $\delta^{18}\text{O}$ は季節変動を保存しており^{9,10)}, 本コアの $\delta^{18}\text{O}$ も季節変動を反映している可能性のある短周期変動を示した. しかし, 氷層が卓越していた 5–15 m w.e. では, 振幅の減衰が認められ, これは氷河表面での融解と浸透した融解水の再凍結過程による同位体シグナルの平滑化を反映している可

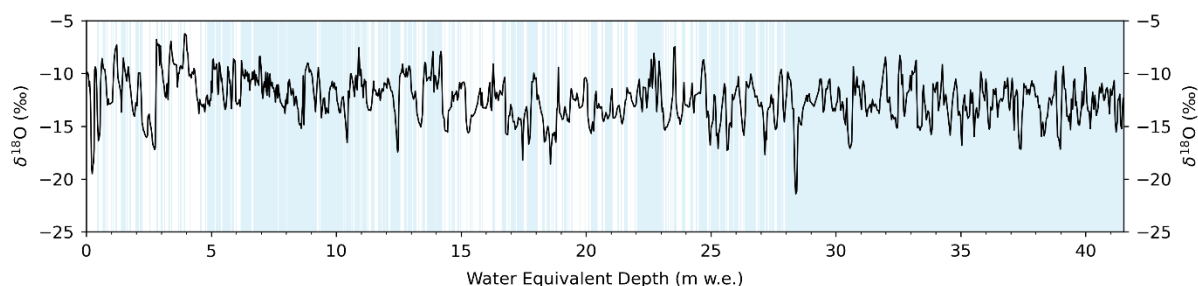


図 1 アイスコアにおける $\delta^{18}\text{O}$ の水当量深度プロファイル. 背景の色は氷層を示す.

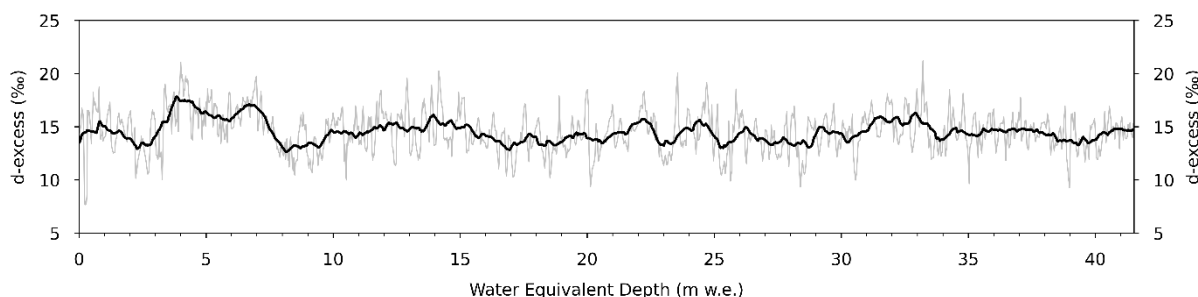


図 2 d-excess の水当量深度プロファイル. 黒線は 0.5 m w.e.移動平均を示す.

能性がある。そのため、本コアでは水安定同位体比のみを用いた年代決定は不確実性が大きく、同位体記録に加えて、年層指標あるいは示準層となる独立した年代指標の導入が必要である。

水安定同位体比から算出される $d\text{-excess}$ ($= \delta D - 8 \times \delta^{18}O$) は、短周期変動を示した (図 2)。 $d\text{-excess}$ の 1 m w.e. 移動平均は、浅層部の 8 m w.e. 付近から 4 m w.e. 付近まで比較的高い値であった。 $d\text{-excess}$ は、水蒸気供給源における蒸発時の相対湿度、風速および海面水温を反映する指標であり¹²⁾、大陸内部で再蒸発した水蒸気は高い $d\text{-excess}$ を示す¹³⁾。したがって、8–4 m w.e. の区間では、大陸内部で再蒸発した水蒸気の寄与が増加した可能性が示唆される。

主要イオン濃度の 0.5 m w.e. 移動平均の結果を図 3 に示す。全てのイオンで、8.3 m w.e. および 4.7 m w.e. 付近に濃度の低下が認められた。 NH_4^+ 以外のイオンは、全層を通じて類似した変動パターンを示したが、5.3 m w.e. 付近の濃度上昇は SO_4^{2-} では不明瞭であった。 Ca^{2+} および SO_4^{2-} は、全層を通じて他のイオン種と比較して高濃度であった。このことは、鉱物ダストに加えて石膏などの蒸発岩鉱物が飛来している可能性を示している。

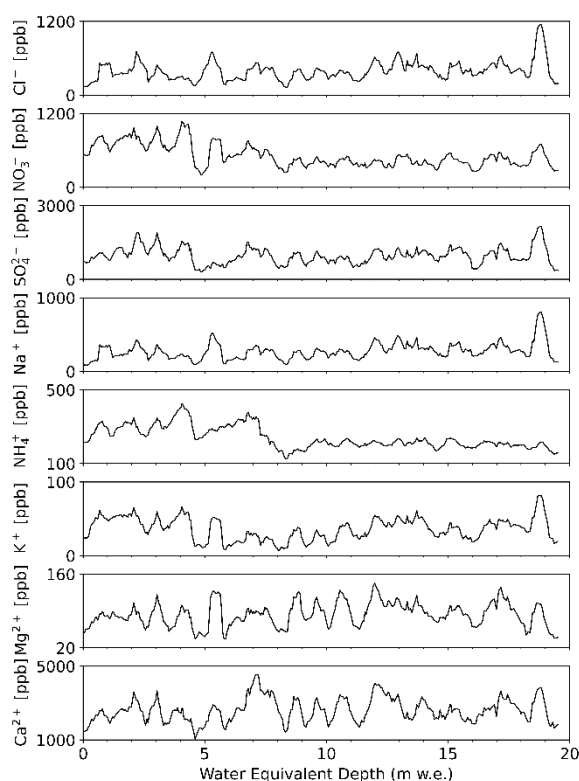


図 3 主要イオン種 (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+) の水当量深度プロファイル (0.5 m w.e. 移動平均)

他のイオンと異なる変動を示す NH_4^+ は、8 m w.e. 以浅で顕著な濃度上昇が認められ、これは他の主要イオン種では認められなかった。

$d\text{-excess}$ と NH_4^+ の増加時期が概ね一致することから、両者の変動には共通する環境要因が関与している可能性がある。その一因として、 NH_3 が放出される地域を起源または経路とする大陸内部起源水蒸気の寄与の増加が考えられるが、その検証には独立した年代指標の導入とさらなる解析が必要である。

4. 結論

本研究は 2025 年にタジキスタン・東パミール・Kon Chukurbashi 氷帽で掘削した 104.76 m のアイスコアを用いた。分析は、水安定同位体比、主要イオン種、密度の測定および層位観察を行った。

融解再凍結の影響により $\delta^{18}O$ の季節シグナルが一部平滑化されている可能性があり、年代決定には $\delta^{18}O$ 以外の独立した年代指標が必要であることが示された。また、コア浅層部では $d\text{-excess}$ および NH_4^+ 濃度が同時期に上昇しており、両者の変動には共通する環境要因が関与している可能性が示された。

以上より、本アイスコアは中央アジアにおける水循環の変動の影響を記録している可能性が示され、今後は年代軸の高精度化を進めることで、当地域の過去の環境変動の解明に貢献できると期待される。

5. 謝辞

本研究で使用したアイスコアは、スイス極地研究所 (Swiss Polar Institute) の PAMIR プロジェクトによって掘削されたものである。掘削および分析に関わった関係者の皆様に感謝申し上げます。

本研究は、北海道大学低温科学研究所附属環オホーツク観測研究センター事業費、JSPS 科研費 (25K07394)、北極域研究強化プロジェクト ArCS-3 (JPMXD1720251001)、国立極地研究所特別共同研究 (B24-02)、Project Cryospheric Observation and Modelling for Improved Adaptation in Central Asia (CROMO-ADAPT, Contract No. 81072443)、Swiss Polar Institute Flagship Initiative PAMIR Project (Grant No. SPI-FLAG-2021-001)、および GEF-UNDP-UNESCO Project Strengthening the Resilience of Central Asian Countries by Enabling Regional Cooperation to Assess High Altitude Glacio-

nival Systems to Develop Integrated Methods for Sustainable Development and Adaptation to Climate Change (GEF Project ID: 10077) の助成を受けて実施された。

【参考文献】

- 1) Hewitt, K. (2005): The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the ‘Elevation Effect,’ Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, **25**, 4, 332-340.
- 2) Farinotti, D., Immerzeel, W. W., de Kok, R. J., Quincey, D. J. and Dehecq, A. (2020): Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier Anomaly. *Nature Geoscience*, **13**, 8-16.
- 3) Cannon, F., Carvalho, L. M. V., Jones, C. and Bookhagen, B. (2014): Multi-annual variations in winter westerly disturbance activity affecting the Himalaya. *Climate Dynamics*, **44**, 441-455.
- 4) Wang, J. W., Xu, B., Li, Z., Nasir, J., Farhan, S. B., Wang, M., Xie, Y., Yang, S., Cauquoin, A. and Hussain, A. (2025): The Interpretation of Karakoram Anomaly by High Karakoram Ice Core Record. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **130**, 1.
- 5) de Kok, R. J., Tuinenburg, O. A., Bonekamp, P. N. J. and Immerzeel, W. W. (2018): Irrigation as a Potential Driver for Anomalous Glacier Behavior in High Mountain Asia. *Geophysical Research Letters*, **45**, 4, 2247-2054.
- 6) Sakai, A. and Koji, F. (2017): Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. *Scientific Reports*, **7**, 13717.
- 7) Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F. and Kääb, A. (2021): Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, **592**, 726-731.
- 8) Pritchard, H. D. (2019): Asia’s shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, **569**, 649-654.
- 9) Aizen, V. B., Mayewski, P. A., Aizen, E. M., Joswiak, D. R., Surazakov, A. B., Kaspari, S., Grigholm, B., Krachler, M., Handley, M. and Finaev, A. (2017): Stable-isotope and trace element time series from Fedchenko glacier (Pamirs) snow/firn cores. *Journal of Glaciology*, **55**, 190, 275-291.
- 10) Deji, Y., Yao, T., Yang, X., Xu, B., Zhao, H., Li, J., Li, Z., Wu, G., Yao, P., You, C., Zhu, M., Wang, M., Qu, D. and Li, Q. (2017): Warming and wetting climate during last century revealed by an ice core in northwest Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **487**, 1, 270-277.
- 11) Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 4, 436-468.
- 12) Clark, I. D. and Fritz, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, New York.
- 13) Chen S., Rugenstein, J. K. C., and Mulch, A. (2025): Stable isotope composition of surface waters across the Pamir, Central Asia: Implications of precipitation seasonality. *Journal of Hydrology*, **653**, 132815.