

氷河の氷の安定同位体比から復元する昔の気温

— シルクロードの気候変動を探る —

竹 内 望
(千葉大学)

極地や高山に分布する氷河は、過去数百から数万年にわたって毎年雪が積もり重なって形成されたものです。氷河の中に保存された雪の年輪を掘削して得た円柱状の氷の試料を、アイスコアといいます。アイスコアの氷の構成する水の安定同位体比を分析すると、その雪が降った当時の気温を推定することができます。大気から地上に降る雪や雨の水の安定同位体は、気温が高い時ほど重い同位体をもつ水分子がわずかに多く含まれるためです。近年、南極や北極だけでなく、アジアの山岳地帯からもアイスコアが掘削されるようになりました。そのような低緯度山岳氷河のアイスコアは、数千年の我々人類の歴史とも密接と関わる環境変動を明らかにしてくれます。

1. 氷河とアイスコア

氷河とは、重力によってゆっくりと流れる雪と氷の塊で、地球の寒冷域に分布します（図1）。氷河は、南極やグリーンランドなどの極地のほか、ヒマラヤや天山、ロッキー、アンデス山脈などの高山域にも分布します。夏でも気温の低いこのよ

うな寒冷地では、一度降った雪が融けてなくなることがないため、積雪は毎年層となって積もり重なっていきます。数百から数千年という長い間、雪が降り積もると、深さ数百から数千 m の巨大な雪と氷の塊となり、さらにその塊は重力によってゆっくり動き出します。このように形成されたものが、氷河です。

氷河の内部には、数百から数万年にもわたって降り積もった雪や氷が、層となって年輪のように保存されています。この氷河の年輪を氷河の上から特殊なドリルを使って掘り出した円柱状の試料を、アイスコアといいます（図2）。アイスコアは、現在から過去にかけて地球上に降った雪を連続的に保存した試料ということになります。大気上空から降ってくる雪は、大気の成分や大気中に浮遊する様々な物質と一緒に巻き込んで氷河上に堆積します。このような雪に含まれる成分や物質は、その時の地球環境を示す重要な情報を持っています。アイスコアに含まれているさまざまな成分を分析することによって、過去の地球環境を連続的な時系列で復元することができるのです。アイス



図 1. 中央アジア天山山脈の山岳氷河



図 2. 氷河から掘削したアイスコア試料

コアの研究は、地球の過去にさかのぼるタイムマシンといってもいいでしょう。

過去の地球環境を復元する手段には、他にも樹木の年輪や湖底堆積物などがあります。その中でもアイスコアは、昔の降水や大気、大気に浮遊する物質をそのまま冷凍保存するという、他の方法にはない特徴をもった貴重な試料といえます。

2. 氷の安定同位体比と気温

雪や氷からなるアイスコアには、環境指標となる様々な微量物質が含まれており、それらの濃度や構成の分析から過去環境が復元されています。さらに氷を構成する水そのものにも、重要な環境情報が含まれています。その一つが、雪が降った当時の気温です。氷を構成する水に含まれる安定同位体の構成が、雪が降った時の気温と関係があるため、アイスコアの安定同位体分析から気温を復元することができます。

水分子を構成する酸素原子と水素原子には、それぞれ複数の安定同位体が存在します。酸素原子は質量数 16、17、18、水素原子は質量数 1、2 の同位体です。ただし、地球上に存在するほとんどの酸素原子は質量数 16、水素原子は質量数 1 の同位体です。質量数の重い同位体は、数千から数万个に一つと、ごくわずかに含まれるだけです。ただし、水の中に含まれるこの重い同位体の量は、水が蒸発や凝結する過程で変化します。氷河の上に降る雪に含まれる重い同位体の量は、雪になる前の水蒸気が、どこからどのように蒸発して輸送されてきたかによって変化し、さらにその過程の気温の影響も大きく受けます。その過程は実際には複雑ですが、多くの場合では、気温が高いほど降水や降雪に含まれる重い同位体の量がわずかに多くなります。つまり、気温と水の重い同位体の量（水の安定同位体比）には、正の相関関係があり、その関係式を知ることができれば、降水の安定同位体比から降った時の気温を推定することができます。このように気温を推定するために利用

する水の安定同位体比を、安定同位体温度計とも言います。

厚さ 3,000 m を超える巨大な氷河である南極氷床には、過去数十万年というとても長い期間の降雪が保存されています。南極氷床から掘削されたアイスコアからは、水の安定同位体比を利用して過去数十万年間の気温変動が復元され、地球が氷期と間氷期という気候変動を十万年周期で繰り返してきたことが明らかとなりました。

3. シルクロードの気候変動

近年では南極やグリーンランドなどの極域の氷河だけではなく、ヒマラヤや天山山脈など、山岳地の氷河からもアイスコアが掘削されるようになりました。このような低緯度帯の山岳氷河のアイスコアは、極域ほど長期間の記録を持っているわけではありませんが、地理的に我々人類の生活圏と近く、過去数千年の人類の文明や移動とも関わる気候変動を明らかにしてくれます。

天山山脈は、ユーラシア大陸中央部に広がる砂漠地帯を東西 3,000 km に横切る巨大な山脈です。山脈の標高は 4,000 から 7,000 m に達し、4,000 m を超える山肌には、山岳氷河が発達しています。天山山脈の南北の山麓には、古くから西洋と東洋を結んだ交易路として知られるシルクロードが通っています。天山山脈の氷河の融解水が、山麓の砂漠地帯にオアシスを形成し、人々の往来を可能にしたためです。数千年に渡って様々な民族や文化が往来したシルクロードは、過去どのような気候変動があったのでしょうか。またその気候変動は、地域の文化や人々の往来に影響はしなかったのでしょうか。

2007 年に中央アジア、キルギス共和国の天山山脈の氷河（グリゴレア氷帽、図 3、図 4）でアイスコアの掘削が行われました。標高 4,700 m の氷河の頂上から氷河底の岩盤まで、深さ 87 m の連続的な氷が採取されました。氷河の底から得られた有機物の放射性炭素年代測定から、最底部の氷は、約 13000 年前のものであることがわかりま

した。このアイスコアは、シルクロードの 13000 年間の歴史に対応する気候変動を保存していることになります。



図 3. 天山山脈グリゴレア氷帽頂上のアイスコア掘削キャンプ

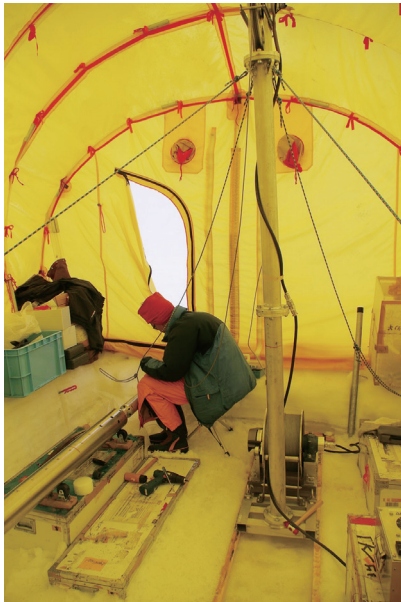


図 4. アイスコアを掘削するアイスドリル

このアイスコアの水の安定同位体比の分析の結果、13000 年間の気温変動を復元することができました（図 5）。アイスコアの浅い部分は、氷河の表面に近くなるほど、安定同位体比は高くなっていることがわかりました。これは、20 世紀以降、降雪の中の重い同位体の量が増えている、つまり気温が上昇していることを示しています。その気温上昇量は 100 年あたり、約 1.2°C と推定できました。また、この近年の気温は、過去 13000 年間で最も温暖であることがわかりました。19 世紀以前は、小さな変動があるものの比較的安定な気温が長く続いていたこともわかりました。最も大きく気温が変化したのは、今から約 8000 年前であることがわかりました。この氷の層の安定同位体比は、大きく低下しています。過去 10000 年間は完新世と呼ばれる最終氷期の後の温暖な時代ですが、このアイスコアは完新世の初期に中央アジアでは大きな寒冷化があったことを示しています。さらにアイスコアの最深部の年代が 13000 年であったことは、13000 年前にはこの氷河は存在しなかったほど、今よりも温暖であったことを示しています。最終氷期末期に、現在よりも温暖な時代があったことは、このアイスコアの大きな発見の一つです。最終氷期から完新世にかけて、人類はユーラシア大陸を移動し分布を広げたと考えられています。このような中央アジアの気候変動は、人類の移動やシルクロードの成立にも大き

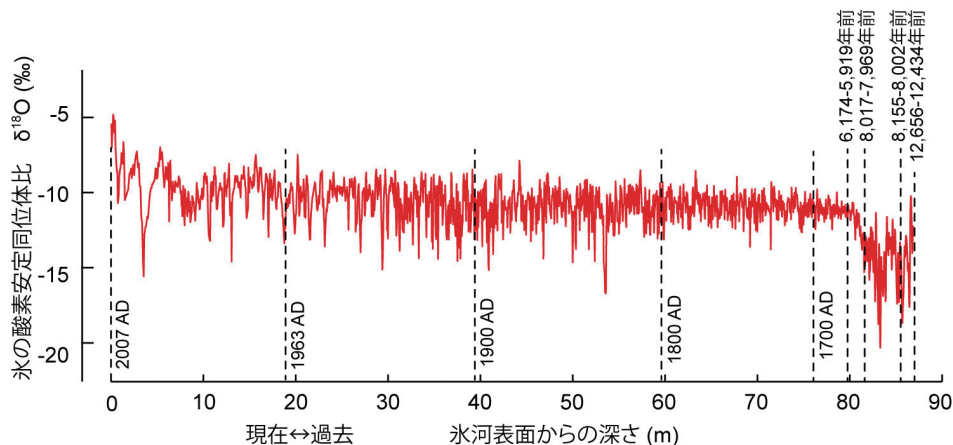


図 5. 天山山脈グリゴレア氷帽のアイスコアの酸素安定同位体比。重い同位体の量が多い ($\delta^{18}\text{O}$ が高い) ほど、気温が高いことを示しています。

く影響を与えた可能性があります。高山の氷河に保存された氷の安定同位体比を分析することで、我々は地球環境と人間文化の密接な関係を知ることが可能となり、それは将来の気候変動を予測する上でも重要な意味を持っています。

文献

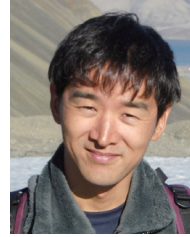
- Takeuchi N, Fujita K, Aizen V B, Narama C, Yokoyama Y, Okamoto S, Naoki K, Kubota J (2014) The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 103: 26e33.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.006>
- Takeuchi N, Sera S, Fujita K, Aizen V B, Kubota J (2019) Annual layer counting using pollen grains of the Grigoriev ice core from the Tien Shan Mountains, central Asia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51(1):

299-312.

<https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1638202>

竹内望（2012）「天山山脈アイスコアからみる中央ユーラシアの気候変動」In：中央ユーラシア環境史 1 環境変動と人間（奈良間千之編）、臨川書店、pp. 16-85

著者情報



竹内 望（千葉大学大学院理学研究院教授）1999 年東京工業大学大学院生命理工学研究科修了、博士（理学）。アラスカ大学研究員、総合地球環境学研究所助教、千葉大学大学院自然科学研究科准教授を経て、2012 年より現職。専門は雪氷学、雪氷生物学。環境変動と雪氷環境に生息する微生物の関係を明らかにするため、ヒマラヤ、天山、北極など世界各地の氷河の調査を行っている。

（2022 年 3 月 31 日掲載）