

鍾乳石中の雨水が明らかにした火山噴火と数十年規模の寒冷化～同位体測定だけで導いた過去の気候記録～

植村 立
Uemura Ryu

1. 火山と気候－数十年スケール変動

気候は、数日先を予測する「気象」とは異なり、より長い期間にわたる平均的な変動を指します。筆者らが注目したのは、そのなかでも数十年というスケールでの変動です。例えば、二酸化炭素が単調に増加しているにもかかわらず、地球温暖化の速度が一時的に遅くなることがあります。このような気候システムに潜む「数十年スケールの変動」は、地球温暖化の理解や予測を難しくする要因の1つとなっています。

なかでも、大西洋では海面水温が約50～80年程度のスケールで変化する現象が知られており、AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation)¹と呼ばれています。この変動が、内部要因（例えば海洋循環）によるものか、それとも外部要因（例えば火山噴火）の影響によるものか、については長らく議論が続いています。近年では、火山噴火や人間活動によるエアロゾル排出が寒冷化をもたらし、それが数十年ス

ケールの変動に重要な役割を果たしているとする研究が増えてきています¹⁾。火山噴火は明確な周期性を持たないと一般的には考えられるので、この説が正しければAMOは特徴的な周期性のある「振動 (Oscillation)」というよりは、「変動 (Variability)」と表現した方が良いという主張もあります（注釈参照）。

一般的には、火山噴火が太陽光を遮り、寒冷化を引き起こす時間スケールは、約1～3年程度であると考えられます。これは、噴火によって放出された大気中の火山灰や硫酸エアロゾルの大半は速やかに大気中から除去されるためです。一方で、前述の「数十年スケールの変動」については、複数の大規模噴火が連続することで、海洋と大気の循環パターンを変化させ、数十年間にわたる寒冷化を持続させる効果がある²⁾、と予想されています。

このような数十年スケールの変動を研究する大きな制約は、現代の高精度な気象データは長くても過去100年間分程度しかない点です。つまり、数十年スケールの変動を本当に理解するには、より長い時間軸にわたる高精度の記録が必要なのです。

本研究では、この制約を乗り越えるために、約7000年前の1000年間にわたる鍾乳石の高分解能データを用いて研究を行いました。近年大きく進展した同位体分析技術によって、年代の決定精度が飛躍的に高まり、また「温暖」「寒冷」といった相対評価にとどまらず、摂氏何度の変化かを定量的に復元できるようになりました。この技術的な強みを背景に、筆者らは鍾乳石を天然の気候アーカイブとして用い、従来の研究では不可能だった時間スケール

1 大西洋の表面海水温が数十年単位で変動する現象。近年の研究では、AMOは単なる海洋内部の自然変動ではなく、火山噴火や人為起源で発生したエアロゾル等の外部強制力によって強く影響を受ける可能性が指摘されている。一般的には火山噴火は明確な周期性を持たないと考えられる。そのため、AMOを周期的な振動とみなすのではなく、変動として捉えるべきだという視点から、AMV (Atlantic Multidecadal Variability) という用語が提案されている。ここでいう「変動」は、特定の卓越周期ではなく複数の不明瞭な周期性（例えば50～80年の周期で複数の卓越周期）を持つという意味。AMOと同期する数十年スケール変動は、大西洋だけではなく、本研究の対象地域の亜熱帯北西太平洋を含めて多くに地域で観測されている。

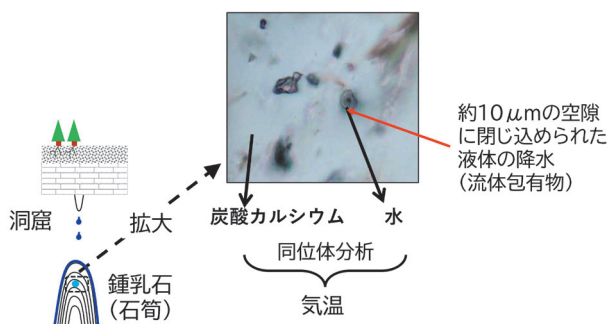


図1 鍾乳石と流体包有物

と精度で、火山噴火と数十年スケールの気候変動の関係を明らかにすることに挑みました³⁾。

2. 鍾乳石に保存される気候の記録

鍾乳石は、洞窟の天井から落ちる水滴から二酸化炭素が脱ガスすることで炭酸カルシウムが析出し、少しずつ成長していきます。その成長速度は環境によって大きく異なります。日本の場合は10年間で0.1～3 mm 程度の場合が多いです。連続的に堆積するため、時間の経過に伴って当時の環境情報を記録していきます。たとえるなら、洞窟内部というのは、地球が「過飽和水溶液からの結晶析出」という無機化学実験を数千から数万年にわたってコツコツと地道に続けている、極めてユニークな環境であるともいえます。炭酸カルシウム中の酸素同位体比は、降水の変動や気温の変化を敏感に反映するため、古気候研究の有力な手段として広く用いられてきました。

鍾乳石の大きな強みは、その年代をウラン・トリウム年代測定によって客観的かつ高精度に決定できる点です。放射性同位体の崩壊速度を利用して絶対年代を割り出せるという点で、過去数十万年スケールの気候変動の研究では最も信頼度が高い年代と考えられています。

3. 鍾乳石に閉じ込められた雨水の同位体

更に鍾乳石の内部には、成長時に取り込まれた微小な雨水が「流体包有物」として保存されています。大きさは数十 μm 程度とごく小さく、顕微鏡で確認できるものです。肉眼では水を含む空隙の乱反射によって、乳白色の結晶として観察することができます。

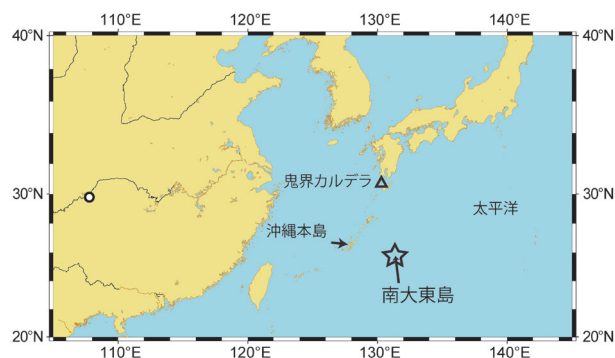


図2 南大東島の位置

本研究の鍵は、この微量の流体包有物に含まれる安定同位体比の分析です(図1)。従来の研究では、炭酸カルシウム(CaCO_3)の $\delta^{18}\text{O}$ だけを測定していました。しかし炭酸カルシウムの $\delta^{18}\text{O}$ は、生成温度(洞窟内の気温)と元の降水の $\delta^{18}\text{O}$ の2つの要因で決まるものであり、それらを分離して評価することができませんでした。本研究では、流体包有物の水を直接測定することで降水の $\delta^{18}\text{O}$ を独立に得ることができます⁴⁾。すると、炭酸カルシウムの $\delta^{18}\text{O}$ と組み合わせることで、両者($\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$)の間に働く酸素同位体分別係数の温度依存性(実験的に求められている関係式)を利用して、当時の気温を定量的に計算することが可能になります。

この方法によって、従来の「温暖」「寒冷」といった相対的な議論にとどまらず、摂氏何度の変化かを具体的に示すことに成功しました。

もちろん、鍾乳石に含まれる水の量は非常に少なく、高精度同位体測定を行うことは容易ではありません。そこで、筆者らのグループでは市販の水蒸気同位体比アナライザー(キャビティリングダウン式分光計)に自作の前処理装置を結合した高感度の分析手法を開発しました⁵⁾。概略としては、鍾乳石は50～200 mg 程度を破碎し、前処理装置内で直ちに気化した水分子(液体換算で100～300 nL)の同位体分析を行うという仕組みです。

4. 調査地点と試料

今回対象としたのは、沖縄県南大東島の洞窟で採取した石筍(床から成長する鍾乳石)です。南大東島は太平洋に浮かぶ離島です(図2)。今回解析した鍾乳石は約7300～6400年前に成長しており、当

時の気候を約 1000 年間にわたって高精度に記録していました²⁾。なお、この石筍は洞窟を観光開発する際の工事で破損した試料をいただいて分析したものです。

5. 7000 年前の火山噴火と寒冷化

沖縄県南大東島の鍾乳石に保存された水と炭酸カルシウムの同位体分析から、約 7300～6400 年前の 1000 年間にわたる気候変動が明らかになりました。この解析結果を、南極・北極の氷床コアから推定された火山噴火データ⁶⁾と照合すると、この時期は世界的に噴火活動が活発で、少なくとも巨大噴火が連続する時期（噴火クラスター）が 4 回存在していたことが分かります。

重要なのは、鍾乳石の記録が大規模噴火の後に数十年スケールの寒冷化が生じる具体的な時間発展を示した点です。噴火後、およそ 40 年かけて気温が約 2℃低下し、その後 30～40 年で元の水準へ回復します。すなわち、1 サイクルは約 70～80 年という「数十年スケール変動」の存在が確認されました（図 3）。

なお、約 7180 年前の噴火は過去 1 万年で最大級のもので、残念ながら、本研究で比較に用いた氷床コアの火山記録自体は噴火場所を特定できていません。ただし、その噴火時期と規模を総合すると、九州の鬼界カルデラ噴火に対応している可能性が高いと考えられます。このような超大規模噴火であるという認識と整合的に、鍾乳石の同位体記録においても、他の噴火クラスターと比べて相対的に最も大きな気温低下が観測されました（図 3）。しかし興味深いことに、この寒冷化は破局的に長期間続いたわけではなく、他の噴火イベントと同様に約 80 年後には気温が噴火前の水準に回復していました。

6. 複数の噴火が「寒冷化を下支え」

南大東島の鍾乳石が示す約 7000 年前の記録は、数十年スケールの気候変動が実際に存在していたことを実証しました。そしてその変動は、複数の大規模噴火が連続して発生することと密接に連動していました。

重要なのは、現在と同じように 7000 年前にも火

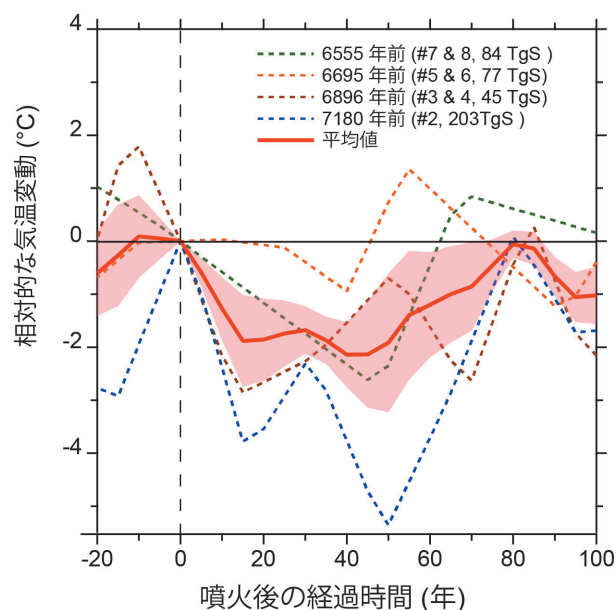


図 3 噴火と気温変動の関係（4 回の噴火クラスターそれぞれについて、噴火の開始時点 zeroes としてプロットした）

山噴火と数十年スケール変動が連動していたという点です。すなわち、AMO と呼ばれる数十年スケール変動は、現在だけの現象ではなく、過去の地球においても繰り返し起きていた可能性を示すものです。

7. 現代への示唆

本研究は、火山活動と数十年スケールの気候変動が結び付いていたことを、約 7000 年前の高分解能データで示しました。よく考えると、冒頭で述べた「振動ではなく変動」という議論と併せると違和感を覚えられるかもしれません。なぜなら、噴火クラスターそのものが少なくとも現在と約 7000 年前の双方で、約 70～80 年のサイクルを持っていたことを意味するからです。

これは個々の火山に固有の周期があると言っているものではありません。地球規模で噴火が“まとまって起こる”時期が数十年スケールで繰り返されていたということです。

また、今回対象とした時代は噴火活動が異常に活発だった時代です。したがって今後は、噴火が不活発な時期にも同様の数十年スケール変動が見られるのかを検証する必要があります。

8. “同位体だけで読む” 鍾乳石の気候記録

地球科学分野外の方々から見ると、本研究の結果の特殊性が分かりにくいかもしれません。本研究の方法論的意義は、鍾乳石の同位体分析だけから年代と気温を同時に導いた点にあります。年代はウラン-トリウム系列による絶対年代測定で高精度に決定され、気温は流体包有物中の酸素安定同位体を直接測定し、炭酸カルシウムとの分別係数の温度依存性を用いて算出しました。その結果、従来の「温暖期・寒冷期」といった定性的な記述ではなく、「70～80年周期で約2℃の変動」という定量的データを導くことに成功しました。

通常、このような変換には年代校正曲線や気候モデルによる推定式、あるいは母液同位体比の仮定が伴います。また、多くの気候復元に用いられる指標（化石、樹木年輪、サンゴ骨格等）は生物が関与しており定量的な気温換算には経験的な回帰式が必要になります。しかし、本研究では、洞窟という特殊環境で無機的に生成された結晶と母液（流体包有物）を分析しています。その点で、得られた年代と気温が純粋に同位体の実測値と確立された化学定数の計算だけに基づいている点に革新性があります。

このように、鍾乳石から客観的かつ定量的な気候

データを同位体科学の手法だけで入手できるようになったことは、今後の同位体研究の可能性を広げるユニークな成果の1つであると考えています。実際に、筆者らの分析装置を用いた共同研究では、日本の沈み込み帯の変成岩中の石英に閉じ込められた流体包有物の分析により生成温度と起源推定を行いました⁷⁾。このような高温で生成された試料も含めて様々な研究に応用されることが期待されます。

参考文献

- 1) Mann, M. E., *et al.*, *Science.*, **371**, 1014-1019 (2021)
- 2) Birkel, S. D., *et al.*, *NPJ Clim. Atmos. Sci.*, **1**, 1-24 (2018)
- 3) Azharuddin, S., *et al.*, *Communications Earth & Environment.*, <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02047-0> (2025)
- 4) Uemura, R., *et al.*, *Climate of the Past.*, **16**, 17-27 (2020)
- 5) Uemura, R., *et al.*, *Geochim Cosmochim Acta.*, **172**, 159-176 (2016)
- 6) Sigl, M., *et al.*, *Earth Syst Sci Data.*, **14**, 3167-3196 (2022)
- 7) Yoshida, K.K., *et al.*, *Geosci. Lett.*, **12**, **19**, <https://doi.org/10.1186/s40562-025-00396-4> (2025)

(名古屋大学 環境学研究科 地球環境科学専攻 大気水圏科学系)