

令和 5 年 10 月 25 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20442

研究課題名（和文）花粉化石の安定同位体比に基づく過去15万年間の古気候復元

研究課題名（英文）Palaeoclimatic reconstructions for the last 150,000 years based on stable isotope ratios of fossil pollen grains

研究代表者

山田 圭太郎（Yamada, Keitaro）

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・助教

研究者番号：30815494

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、新手法による過去の気候変動の復元を目指して、福井県水月湖の過去15万年間の堆積物からセルソーターを用いて化石花粉を高純度抽出するとともに、抽出した化石花粉及び現生花粉の酸素・水素安定同位体比測定を行った。その結果、花粉の酸素安定同位体比は石筍の酸素同位体比などと同期的な変動を示すなど、モンスーンの影響を強く受けていることが示唆された。安定同位体比を用いた高精度古気候復元は、これまで氷床や海洋コア、鍾乳石などに限られていた。本研究は、安定同位体比を用いた古気候復元を陸上堆積物でも実現するもので、今後、様々な陸上堆積物への応用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化石花粉の安定同位体比は古気候指標として有力視されてきたものの、化石花粉の高純度抽出の難しさから長らく実現していなかった。本研究は、セルソーターによる化石花粉の高純度抽出技術を用いることで、その安定同位体比による古気候復元を初めて実現した。この成果は、水月湖の新たな古気候情報を提供するだけでなく、安定同位体比を用いた古気候復元を多くの陸上堆積物でも可能とするもので、陸域の古気候変動の理解を前進させる大きなきっかけとなる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we extracted fossil pollen grains from the sediments of Lake Suigetsu, Fukui Prefecture, Japan, over the last 150,000 years, and measured oxygen and hydrogen stable isotope ratios of the extracted fossil pollen and collected modern pollen. The oxygen stable isotope ratios of fossil pollen grains fluctuate synchronously with those of Hulu stalagmite, suggesting a strong influence of the monsoon. High-precision palaeoclimatic reconstructions using stable isotope ratios have been limited in terrestrial regions due to insufficient available materials. This study will facilitate terrestrial palaeoclimatic reconstructions using stable isotope ratios and is expected to have future applications in a wide range of terrestrial sediments.

研究分野：古気候学

キーワード：安定同位体 古気候 花粉 年縞

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動とそれに伴う諸問題は、世界的に広く認識された課題の一つであり (IPCC, 2013) 私たちの衣・食・住を破壊する直接的な脅威といえる。気候変動は数十年～数万年周期といった比較的長い時間スケールも含む現象であり、そのメカニズムを理解するためには、気象観測記録だけではなく、“天然の長期記録”である堆積物や氷床などの地質学的試料を読み解く必要がある。そのため、氷床 (e.g. Steffensen et al., 2008) 海洋堆積物中の底生有孔虫 (e.g. Lisiecki and Raymo, 2005) サンゴ、鍾乳石 (e.g. Wang et al., 2008) などを用いて古気候の復元が行われてきた。特に安定同位体比の測定は、客観的なデータを効率よく読み取ることができることから、古気候研究の主流の一つを形成している。

気候システムを理解し、正確な将来予測につなげるためには、過去の気候変動における氷床、海洋、陸上の相互作用を総合的に解明していく必要がある (Lowe et al., 2001; 2008)。しかし、陸上の堆積物中には同位体比の測定に適した物質が乏しく、氷床や海洋と比較したときに、陸上の古気候記録データが効率的に蓄積されているとはいいがたい。これまで、陸域における安定同位体比を用いた高精度古気候復元は鍾乳石が大きな役割を果たしてきた。しかし、鍾乳石は分布に地理的な制約が強く、特に世界の人口が集中する低～中緯度地域において、陸上の任意の地点で安定同位体比分析によって長期的な古気候記録を得ることは困難であった。

より普遍的な陸域の地質学的試料として湖沼堆積物が挙げられる。堆積物は地理的制約が少ないことに加え、宇宙生成核種や火山灰を利用することで、氷床や海洋の古気候記録と厳密な対比が可能である (e.g. Bronk Ramsey et al., 2012; Adolphi & Muscheler, 2016; McLean et al., 2016)。湖沼堆積物から古気候の情報を得る手法としては、微化石分析が長い研究の歴史を持ち、得られる情報も極めて具体的である。しかし、環境変動に対する生物の応答には非線形性が認められることから、微化石分析データを氷床や海洋コアの同位体データと直接比較するには注意を要する。この問題は、気候システム全体を古気候学的なアプローチで解明しようとするとき、大きな妨げとなっていた。

そこで注目されたのが、多くの堆積物に含まれている化石花粉である。化石花粉は化学的に堅牢な物質から構成されているため (Li et al., 2019)、その安定同位体比を測定することができれば、過去の気候を記録した“情報のタイムカプセル”として利用できる可能性が高い。Loader & Hemming (2004)は、予察的な研究として、現生花粉の安定同位体比は降水中のそれとの相関が認められることから、化石花粉の炭素、酸素、水素の安定同位体比は非常に有力な古気候指標になると結論した。しかし、堆積物中の花粉化石を高純度かつ大量に集めることが困難であるため、花粉化石の安定同位体比変動を用いた古気候の復元は、有力視されつつも実現していなかった。

## 2. 研究の目的

私たちが住む陸上では、どのような気候変化が起きてきたのか。また、陸上・氷床・海洋がどのように相互作用して気候が変化していったのか。気候モデルの確立やその検証、そして将来予測のためには、これらの事実を詳らかにしていく必要があるが、氷床・海洋・陸上で起きてきた気候変動を共通の“言語”で復元し、直接比較することは困難であった。本研究では、化石花粉の安定同位体比分析により、この問題を本質的に解明することを目指した。

本研究では、氷床や海洋などの地質学的記録との精密な年代対比が可能な福井県水月湖の年縞堆積物に対し、研究代表者が主体となって開発した花粉化石の高純度濃縮技術を用いることで、堆積物中の花粉化石の水素・酸素安定同位体比を測定し、過去 15 万年間の古気候変動の復元を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料

本研究では、福井県水月湖の年縞堆積物を対象に、そこに含まれる化石花粉を抽出するとともに、その安定同位体比を測定した。水月湖は、人口の密集する中緯度地域に位置する湖で、その湖底では、一年に一枚の縞を形成する年縞堆積物が堆積している。これまで、水月湖の年縞堆積物は顕微鏡や $\mu$ XRFを用いた精密な縞数え (Marshall et al., 2012; Schlolaut et al., 2012; 2018)と、800 点を超える放射性炭素年代測定によって、精緻な年代モデルが構築されている (Bronk Ramsey et al., 2012; 2020; Staff et al., 2011)。さらに近年では、火山灰を利用することでグリーンランド氷床コアと厳密な対比がなされるなど (McLean et al., 2017)、氷床や鍾乳石など代表的な古気候アーカイブと厳密な対比がなされている (Nakagawa et al., 2021)。本研究では、年縞堆積物を 25 cm 区間から抽出した低解像度試料を用いて、走査的に分析を行うとともに、一部層準では 2 cm 区間から抽出した高解像度試料を用いて化石花粉の抽出とその分析を行った。

## (2) 手法

セルソーターを用いた堆積物からの化石花粉の抽出は、いくつかのコンセプトが提案されてきたが(e.g. Tennant et al., 2013; Zimmerman et al., 2019)、ルーチンでの抽出は実現していなかった。その後、研究代表者らは、前処理技術、光学フィルタ等の改良を重ね、花粉化石の高速濃縮技術の実用化に成功した。本研究では、堆積物から化石花粉を効率的かつ高純度に抽出するために、これまで開発を行ってきたセルソーターを用いた高純度化石花粉抽出技術をさらに発展させるとともに、その技術を用いて化石花粉の抽出を行った。抽出したサンプルは、シース液(生理食塩水)を除去後、銀箔に包み、熱分解型元素分析計及び同位体比質量分析計を用いて酸素・水素安定同位体比を分析した。同位体比分析には、Thermo Fisher 社製同位体比質量分析計を使用した。また、2022年10月以降は、新たに導入した Elementar 社製同位体比質量分析計を使用した。

## 4. 研究成果

### (1) 化石花粉の抽出技術の改良

堆積物に含まれる化石花粉の量は、気候変動に伴って大きく増減する。本研究で使用するセルソーターを使って抽出可能な50 $\mu$ m以下の化石花粉は、温暖期の堆積物には多く含まれる一方、寒冷期の堆積物には少ない。本研究が対象とする最終間氷期以降の幅広い環境下で堆積した堆積物から、化石花粉の抽出と安定同位体比測定を安定的に実現するために、一連の抽出手法のさらなる検証・改良を行った。その結果、主として前処理過程において化石花粉の損失(図1a)が発生していることが分かり、改良を行った結果、ほぼすべての化石花粉の回収に成功し、最大で50%程度収率を上げることに成功した(図1b)。この成果は Yamada et al. (2021)として公表された。当初、体積当たりの抽出可能な花粉化石含有率が低い氷期の堆積物については高解像度分析が難しいと考えていたが、本技術を使用することで、これらの堆積物についても、当初の想定を上回る解像度での分析が実現した。

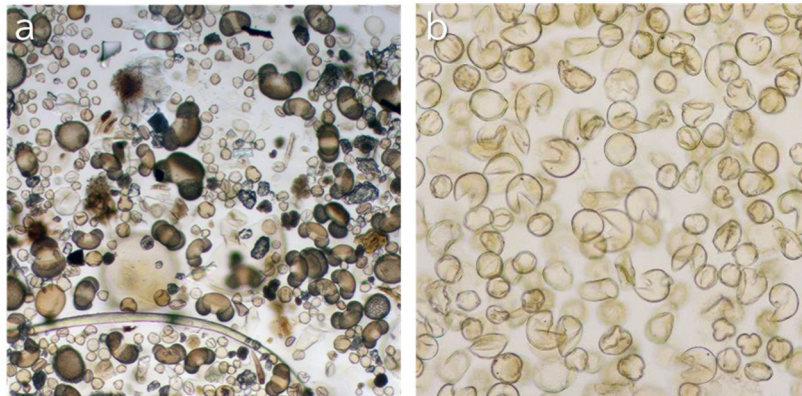


図1 (a) 前処理で流出した全サイズの化石花粉。(b) 水月湖の年縞堆積物から抽出した化石花粉の例。

### (2) 現生花粉の安定同位体比分析

化石花粉を用いた安定同位体比分析は、古気候指標として有力視されてきたが、高純度抽出が難しいことから長らく実現していなかった。そのため、化石花粉の安定同位体比が気候に対してどのように応答しているのかについても、いまだ不明な点が多い。そこで本研究では、化石花粉の安定同位体比を解釈するために、日本各地の現生花粉を収集した。本研究期間中、新型コロナウイルスによる感染症拡大に伴い、協力研究機関も含めて研究活動が大幅に制限された。しかしながら、研究室周辺地域での採取のほか、各地の研究者や機関などの協力によって、最終的には屋久島から北海道までの幅広い環境下で生産された現生花粉を収集することに成功した。

また、収集した現生花粉から花粉壁を抽出(化石化処理)し、約600点の酸素・水素安定同位体比の測定を行った。その結果、現生花粉の水素同位体比はセルロースのそれと同様にバラつきが大きいことがわかってきた。いっぽう、現生花粉の酸素同位体比は、比較的バラつきが少ないことが分かった。現生花粉のうち、多くの地点から収集することができたスギ花粉に着目すると、その酸素安定同位体比は気温と相関が認められることに加え、太平洋側と日本海側では異なる傾向が観察された。また、開花時期の異なるマツ花粉に着目すると、その酸素安定同位体比は気温と相関が認められるいっぽうで、スギ花粉とは異なる傾向を示した。これらの結果から、さらなる検証は必要であるものの、アジアモンスーンが花粉の酸素安定同位体比に一定の影響を与えていることが示唆された。

### (3) 化石花粉の安定同位体比分析

水月湖の年縞堆積物から化石花粉をそれぞれ1~200万粒を抽出した。抽出された化石花粉試料のうち20万粒以上の化石花粉が含まれる約300点について、その酸素・水素安定同位体比を測定した。また、50 μmを超える大型の化石花粉についても物理化学処理によって高純度抽出し、その酸素・水素安定同位体比を測定した。大型の化石花粉の安定同位体比は、小型の化石花粉の安定同位体比と比べ変動幅が小さく、また変動を示した。化石花粉の大きさは種の違いを反映しており、現生花粉と同様に、種の違いによる開花時期の違いが影響していると考えられる。

また、50 μm以下の化石花粉の過去12万年間の酸素安定同位体比に着目すると、中国のSanbao洞やHulu洞の石筍の酸素同位体比変動と同期的に変動することが分かった(図2)。このことに加え、現生花粉の酸素安定同位体比は日本海側と太平洋側で異なることを考慮すると、少なくとも軌道スケールの時間スケールでは、アジアモンスーンが花粉の酸素安定同位体比変動に大きな役割を果たしている可能性がある。

本研究は、陸域の古気候復元に新たな指標をもたらすと同時に、その成果は陸上・氷床・海洋がどのように相互作用して気候が変化していったのか、気候モデルの確立やその検証、そして将来予測に大きく貢献すると考えられる。

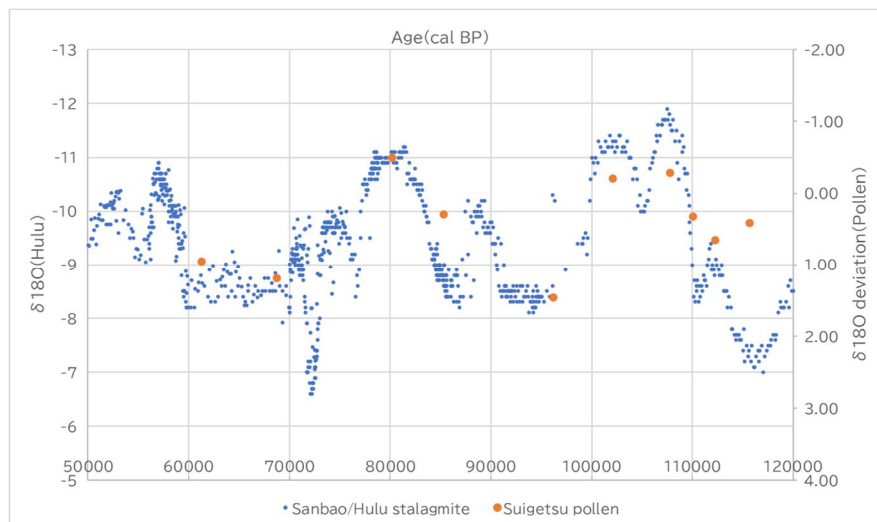


図2 水月湖の堆積物から抽出した化石花粉の酸素安定同位体比偏差と中国 Sanbao/Hulu 洞の酸素同位体比の抜粋。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamada Keitaro, Omori Takayuki, Kitaba Ikuko, Hori Tatsuo, Nakagawa Takeshi	4. 巻 272
2. 論文標題 Extraction method for fossil pollen grains using a cell sorter suitable for routine 14C dating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 107236 ~ 107236
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quascirev.2021.107236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Omori Takayuki, Yamada Keitaro, Kitaba Ikuko, Hori Tatsuo, Nakagawa Takeshi	4. 巻 77
2. 論文標題 Reliable radiocarbon dating of fossil pollen grains: It is truly possible	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Quaternary Geochronology	6. 最初と最後の頁 101456 ~ 101456
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quageo.2023.101456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山田 圭太郎, 大森 貴之, 北場 育子, 中川 毅
2. 発表標題 花粉化石を用いた放射性炭素年代測定と第四紀研究への応用の可能性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 圭太郎, 大森 貴之, 北場 育子, 山崎 彬輝, 中川 毅
2. 発表標題 Pollen isotope records from Lake Suigetsu, Japan
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 圭太郎, 大森 貴之, 北場 育子, 中川 毅
2. 発表標題 水月湖に保存された花粉化石の酸素安定同位体比変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Yamada, Takayuki Omori, Takeshi Nakagawa, Ikuko Kitaba
2. 発表標題 Stable isotope records of pollen fossils in Lake Suigetsu, Japan, during the Last Glacial-Interglacial Transition
3. 学会等名 INQUA (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中川 毅  (Nakagawa Takeshi)  (20332190)	立命館大学・総合科学技術研究機構・教授   (34315)	
研究協力者	大森 貴之  (Omori Takayuki)  (30748900)	東京大学・総合研究博物館・特任研究員   (12601)	
研究協力者	北場 育子  (Kitaba Ikuko)  (60631710)	立命館大学・総合科学技術研究機構・准教授   (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------