

化石花粉を用いた放射性炭素年代測定とその可能性



山田 圭太郎
Yamada Keitaro

1 はじめに

私たちの社会は、気候変動や、地震、洪水、噴火といった様々な自然現象にさらされ続けています。これらの自然現象は様々な被害をもたらすと同時に、それ以上の教訓をもたらしてきました。近年では、2011年の東北地方太平洋沖地震等を契機に、低頻度ながらも大規模な自然現象に注目が集まっています。しかし、その数十年～数千年といった発生間隔は私たちにとってあまりに長く、我々の社会にはこのような低頻度な自然現象に対して十分な“教訓”の蓄積があるとは言い難いのが現状です。

そのような不足する“教訓”を補う重要な情報源として、泥等の堆積物が活用されています。堆積物は、気候変動、地震、洪水、噴火等を含む様々な自然現象によって運搬・形成されるため、様々な自然現象の情報を記録しています。その中でも年代は重要な情報の1つで、放射性核種はそれを読み出すためのツールとして活用されています。特に、放射性炭素 (^{14}C) を用いた ^{14}C 年代測定は、過去 5.5 万年間¹⁾ の年代を決定する定番手法として幅広く利用されています。

2 地球科学と ^{14}C 年代測定

宇宙線によって大気中で作られた ^{14}C は生物の体内に取り込まれ、その死後、5,730 年ごとに半減し

てゆきます。そのため残っている ^{14}C の割合を調べることで、その生物の死からの時間を求めることができます。実際は、宇宙線の強度変化等によって大気中の ^{14}C 濃度は絶えず変化しているため、その生物が死んだ瞬間に保持していた ^{14}C 濃度は時代によって異なります。そのため ^{14}C 年代測定では、大気 ^{14}C 濃度変動曲線 (IntCal¹⁾) を用いて較正を行うことで、暦年代を得ています。

私たちは、堆積物に含まれる有機物の ^{14}C 年代測定を行うことで、地層とそれを形成した様々な自然現象の年代を決定することができます。しかし、すべての有機物が年代測定に適しているわけではありません。例えば、貝等の海洋生物の遺骸は海水中の古い炭素の影響を受けるため、補正を行う必要があります。また陸源の有機物であっても植物の根っこや植物が分解してできるフミン酸等は、その地層の年代とは異なる年代を示すことがあります。そのため、地層の正確な年代を求めるためには、測定試料を厳選する必要があります。

理想的な放射性炭素年代測定試料の1つは、大気 ^{14}C 濃度を直接反映する木本植物の葉っぱです。しかし、堆積物中に葉化石は豊富に含まれるものではなく、多くの場合、年代を知りたい地層には含まれていません。そこで着目されたのが同じ木本植物から大量に生産される花粉です。特にスギ等の風媒花が生産する花粉の数は凄まじく、陸域やその沿岸に位置するほとんどの堆積物には化石花粉が含まれて

います。したがって、化石花粉は大気 ^{14}C 濃度を直接的に反映するだけでなく、任意の地層の年代を決定することが可能で、理想的な放射性炭素年代試料と言えます。

3 化石花粉とセルソーター

化石花粉を用いて ^{14}C 年代測定を行う試みは1990年代前半から行われてきました。しかし、堆積物中の含有率の少ない化石花粉を高純度に抽出することは容易ではなく、長らく実用化することができませんでした。“セルソーター”の登場は、閉塞感のあった化石花粉を用いた ^{14}C 年代測定技術の開発に新たな風穴を開けるに至りました。

セルソーターは、放射線研究に端を発する装置で、主に生命科学分野で使用されています(図1)。セルソーターは、対象となる細胞に付着させたマーカーが発する蛍光を観察することで粒子を識別し、静電気等を利用することで細胞を生きたまま選別することができます(図2)。

セルソーターを化石花粉抽出に応用する試みは、2010年代前半ごろからイギリス²⁾やアメリカ等の世界各地で行われてきました。これらの研究は化石花粉を用いた ^{14}C 年代測定の可能性を感じさせる一方で、いずれも抽出方法をルーチン化するには至りませんでした。

近年、筆者らのグループでは前処理方法の改良や、セルソーターが化石花粉を識別するための蛍光波長の組み合わせを新設計することで、化石花粉の高純度な抽出を実現すると共に、処理のルーチン化にも

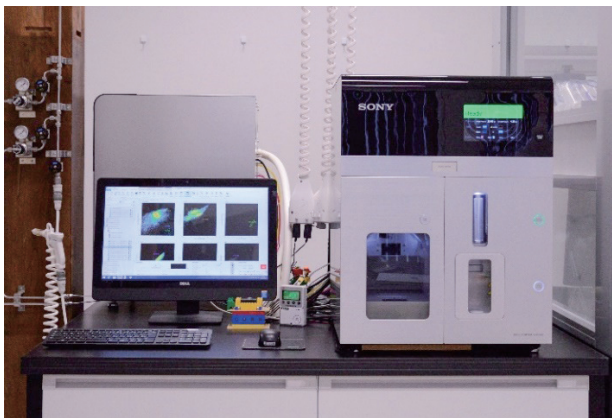


図1 本研究で使用したセルソーターの写真

セルソーターを利用することで、堆積物から化石花粉を高純度かつ高速に抽出することができます

成功しました(図3)³⁾。抽出された化石花粉は個数ベースで純度99%に達し、 ^{14}C 年代測定に十分な純度が確保されています。この抽出手法は、比較的抽出が容易な湖や海の堆積物だけでなく、有機物が多く含まれるために抽出が難しい湿地等の堆積物からも化石花粉を高純度に抽出することが可能で、過去に発生した噴火や津波の年代決定や、気候変動研究等の幅広い分野への応用が期待されます。

4 化石花粉と ^{14}C 年代

では、抽出された化石花粉は本当に年代測定試料として適しているのでしょうか？筆者は東京大学総合研究博物館と共同で、化石花粉の ^{14}C 年代測定技術の開発とその検証を行ってきました。

検証には福井県にある水月湖の年縞堆積物を使用しました(図4)。年縞堆積物は、年輪のように1年

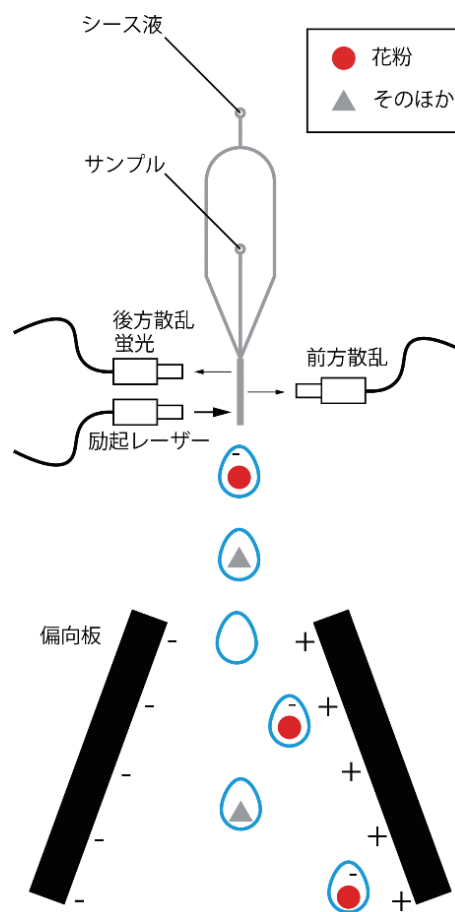


図2 セルソーターの仕組み

セルソーターは粒子をレーザーで励起し、その蛍光を観測することで、粒子を識別します。識別した粒子がターゲットだった場合、静電気等を使って偏向・分取することができます

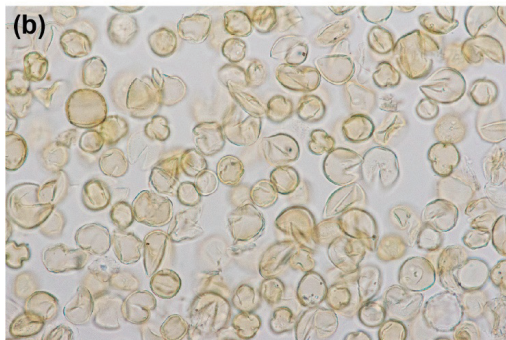
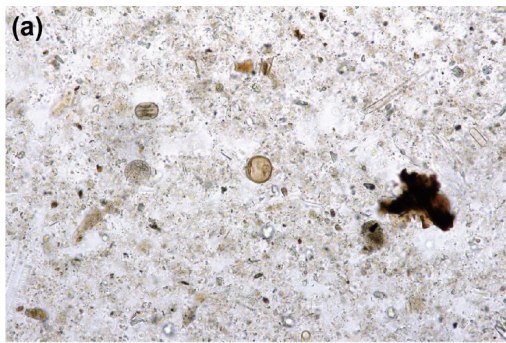


図3 セルソーターによるソート前後のサンプルの顕微鏡写真

(a) 未処理の堆積物の顕微鏡写真。(b) セルソーターによって抽出された化石花粉の顕微鏡写真。放射性炭素年代測定にはおよそ50万粒の化石花粉を使用します



図4 福井県水月湖の年縞堆積物

年輪のように1年に1枚の縞が積み重なってできた堆積物です

に1枚の縞が積み重なってできた堆積物です。水月湖では、この縞数えと葉化石の¹⁴C年代測定を組み合わせることで、世界最高精度の年代決定がなされ

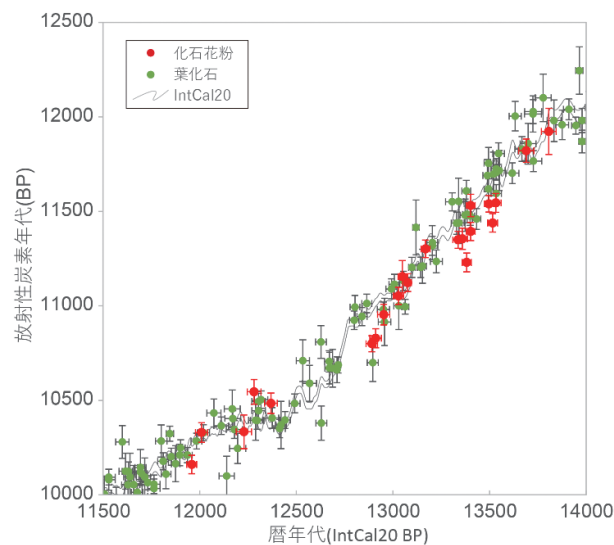


図5 福井県水月湖の年縞堆積物から抽出された葉化石と化石花粉の¹⁴C年代値の比較

化石花粉の¹⁴C年代値は、理想的な¹⁴C年代測定試料の1つである葉化石と非常に良い一致を示します

ています⁵⁾。この葉化石の年代値は、暦年較正に必要な国際較正曲線 IntCal の主要部分に利用されており、世界中で測定される¹⁴C年代値の基準となっています。

筆者らは、この水月湖の年縞堆積物から抽出された葉化石と化石花粉の¹⁴C年代値を比較・検証してきました^{3, 4)}。その結果、化石花粉から得られた¹⁴C年代値は、再現性を持って、葉化石の年代値と非常に良い一致を示しました(図5)。このことは、本稿で紹介した抽出から年代測定までの一連の手法を使用することで、化石花粉からでも信頼できる¹⁴C年代値が得られることを意味しています。

化石花粉を用いた¹⁴C年代測定の最大のメリットは、任意の地層の年代を測定できる点にあります。この利点は、近年発達の著しい年代のバイズモデリング⁶⁾と非常に相性が良く、既存の大型化石と化石花粉の¹⁴C年代測定を組み合わせることで、過去に発生した様々な自然現象の年代をより高精度に決定できる可能性があります。

筆者らはこの一連の技術を公表^{3, 4)}すると共に、化石花粉の¹⁴C年代測定サービス POLARIS (POLlen Radio Isotope; <http://14c.rits-palaeo.com/>)として広く提供しています(図6)。本技術を通して、幅広い分野の研究・発展に貢献できればと思っております。



図6 POLARIS サイト

5 化石花粉を用いた ^{14}C 年代とこれから

^{14}C 年代測定に用いる化石花粉は、数十 g の堆積物から抽出されるため、結果としてその ^{14}C は数年～数十年間の平均的な大気 ^{14}C 濃度を反映します。任意の地層の ^{14}C 年代を測定可能な化石花粉は、この平均的な大気 ^{14}C 濃度を連続的に復元可能で、暦年較正に必要な国際較正曲線 IntCal の構築の一助となるマテリアルであると考えています。

1980 年代に構築が始まった ^{14}C 年代の国際較正曲線は、現在、IntCal20¹⁾ として 5.5 万年前にまで延

長されるに至りました。今なお多くの研究者によって、より正確な IntCal の構築に向けた研究が続いています。現状、大気 ^{14}C を直接的に反映した陸源データは限定的です。過去 5 万年間をカバーする陸源データは水月湖の葉化石から得られた ^{14}C 年代のみ⁵⁾ で、更なる情報の蓄積が期待されています。現在、筆者らは水月湖の年縞堆積物から化石花粉を抽出し、その ^{14}C 年代測定を進めています。化石花粉を使うことで、より連続的な過去の大気 ^{14}C 濃度を復元すると共に、より正確な年代決定に貢献できればと考えています。

参考文献

- 1) Reimer, *et al.*, *Radiocarbon*, **62**(4), 725-757, (2020)
- 2) Tennant, *et al.*, *Journal of Quaternary Science*, **28**(3), 229-236, (2013)
- 3) Yamada, *et al.*, *Quaternary Science Reviews*, **272**(15), 107236
- 4) Omori, *et al.*, (submitted)
- 5) Bronk Ramsey, *et al.*, *Radiocarbon*, **62**(4), 989-999, (2020)
- 6) Bronk Ramsey C., *Quaternary Science Reviews*, **27**(1-2), 42-60, (2008)

(立命館大学 古気候学研究センター)