



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY



広島大学



配布先:文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会、広島大学関係報道機関

2025 年 11 月 26 日

報道機関 各位

御神木が語る大気汚染の移り変わり ～年輪のイオウが示す 500 年の環境変化の記憶～

【本研究のポイント】

- ・イオウ酸化物の排出量は近年減少しているが、開国による日本の工業化(1850 年)以前と比べて現代の大気がどの程度清浄化しているかは、未解明のまま残されていた。
- ・本研究では、御神木の年輪に含まれるイオウ安定同位体比($\delta^{34}\text{S}$)^{注 1)}を分析し、1500 年代から現在にかけて 500 年にわたる大気中のイオウの起源の変化を探った。
- ・年輪から計測されたイオウ同位体比は、工業化を境に大きく変化し、御神木は倒れる直前まで汚染された大気の色を記録していた。この結果は、現代の大気が工業化以前の清浄な水準にまだ戻っていないこと、あるいは土壌に蓄えられた過去の汚染イオウがいまも環境中に放出されていることを示している。

【研究概要】

名古屋大学大学院生命農学研究科の塩出 晏弓 博士後期課程学生、谷川 東子 准教授は、同大学院環境学研究科の中塚 武 教授、加藤 義和 研究員、平野 恭弘 教授、アジア大気汚染研究センターの佐瀬 裕之 部長、諸橋 将雪 主任研究員、広島大学の石田 卓也 准教授との共同研究により、中部日本の 2 本の御神木から 500 年分の年輪を読み解き、「産業革命前から開国を経て現代に至るまで」の大気汚染の移り変わりをたどりました。

化石燃料の消費に伴うイオウ酸化物の排出量は、2000 年代以降、世界的に減少しています。しかし、現代の大気は、化石燃料の大量消費が始まる以前、すなわち産業革命前と比べ、どの程度まで清浄化しているのかは、これまで明らかにされていませんでした。本研究では、自然災害で倒木した中部日本の 2 本の御神木を対象に、年輪に含まれるイオウ安定同位体比を分析し、各年代のイオウの起源(化石燃料か自然由来か)を推定しました。イギリスの産業革命後であっても、日本の本格的な工業化以前までは、同位体比は高い値で安定していました。ところが、工業化の進行に伴って値はイオウ同位体比が低い石炭や石油の影響を受けて急激に低下し、その低い値は木が倒れる直前まで維持されていました。御神木は、「イオウ排出量が減少した今もなお清浄な大気には戻っていない」、あるいは「かつて放出された化石燃料由来のイオウが土壌に蓄えられ、いまでも環境中をめぐっている」ことを伝えています。この成果は、今後の気候変動対策や大気保全の指標づくりに役立ちます。本研究成果は、2025 年 11 月 13 日に Springer Nature 雑誌『Biogeochemistry』に掲載されました。

【研究背景と内容】

(1)研究の背景

化石燃料の消費などにより排出されるイオウ酸化物は、酸性雨の原因物質の一つとして知られ、生態系にさまざまな影響を及ぼしてきました。近年、その排出量は世界的に減少傾向にありますが、一方で気候変動対策として、成層圏に硫酸エアロゾルを注入して地球を冷却させる「気候工学(ソーラー・ジオエンジニアリング)」の研究も進展しています。こうした状況の中で、私たちがどのような大気の時代に生きているのかを知る手がかりとして、イオウ循環の長期的な歴史をさかのぼり、「産業革命以前の清浄な大気」と「今の大気」を比較することが重要だと考えました。

これまで南極やグリーンランドの氷床コアを用いた研究は、地球規模でのイオウ循環の長期変動を明らかにしてきました。氷床コアが遠い極地でしか得られないのに対し、樹木は私たちの身近に存在します。年輪は一年に一つずつ正確に刻まれるため、樹木の中にはその土地の空気や土の変化が細かく記録されています。つまり樹木は、その生育地域におけるイオウ循環の移り変わりを細かく教えてくれる「自然の記録帳」ということができます。

今回、ペンやインクに相当するのは、イオウの安定同位体比($\delta^{34}\text{S}$)です。イオウはその発生源によって、 $\delta^{34}\text{S}$ 値が異なります。たとえば、自然起源の海塩エアロゾルはおよそ +20.3‰、火山ガスは +5‰ と比較的高い値を示します。一方、日本で多く利用されてきた中東産の石油は -8～0‰ と非常に低い値を持っています。このため、木の年輪に含まれる $\delta^{34}\text{S}$ 値を調べることで、その時代の大気中イオウの主な発生源を推定することができます。

ただし、土壌がイオウを捉える力が強い場合には、大気の状態と年輪に記録される値との間に時間的な「ずれ」が生じます。「ずれ」の存在は、過去にもたらされた汚染由来のイオウを、樹木が土壌から吸収しているということ、すなわち、過去に人間活動により大量放出されたイオウが今なお環境を循環していることを意味します。

(2)調査方法

本研究では大雨や台風によって倒木した 2 本の御神木—大湫神明神社(岐阜県瑞浪市)の樹齢約 670 年の大杉と伊勢神宮(三重県伊勢市)の樹齢 500 年の神宮杉を試料として用いました(図 1)。どちらも数百年にわたって地域の方々に大切に守り育てられてきた樹木です。これらの樹木の幹試料を 5 年ごとに分割し、イオウ同位体比を分析することで、樹木が長期的にどのように変動したかを明らかにしました。

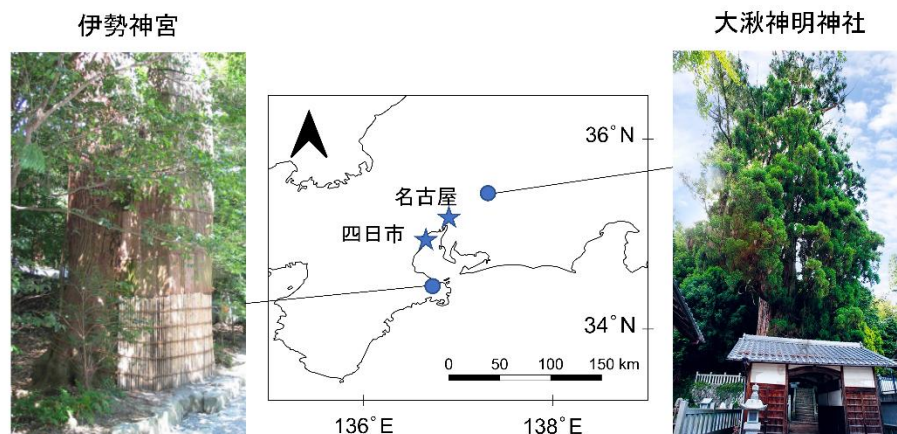


図 1. 2本の御神木の生育地

(3)研究成果

イオウ同位体比($\delta^{34}\text{S}$)の長期的な変動は、図 2 の矢印で示した年に統計的に有意な転換点が認められました。本研究から見てきたこと、そしてこれから明らかにしていくべき点を以下に整理しました。

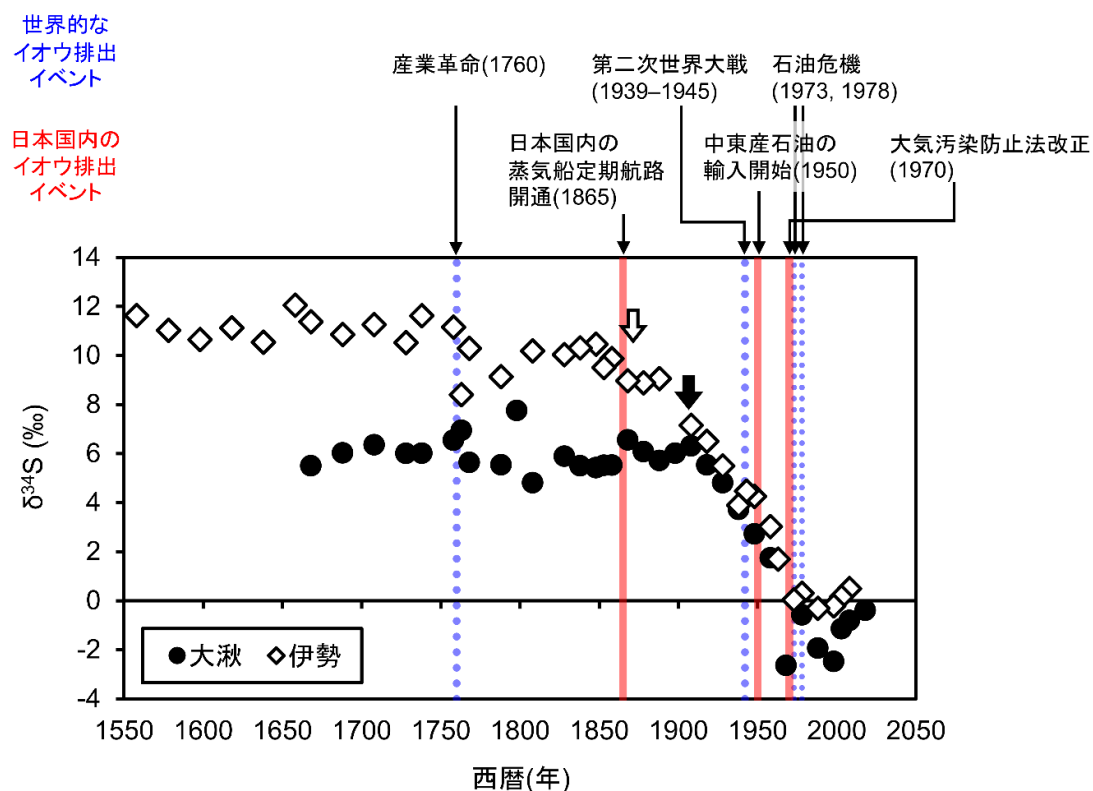


図 2. 樹木年輪のイオウ同位体比($\delta^{34}\text{S}$)の経時変化

- ① 日本の工業化前の樹木に含まれるイオウ同位体比は高い値で安定していた。化石燃料の大量消費が始まる前は、数百年にわたって $\delta^{34}\text{S}$ 値が安定していました(図 2)。1760 年のイギリス産業革命直後は、日本で大規模な火山噴火があったため値が動いていますが、その後再び 1760 年以前の値に戻り安定しました。

このため、日本においてはイギリスの産業革命による大気汚染の影響は限定的であったと考えられます。大湫は伊勢よりも内陸に位置しており、高い $\delta^{34}\text{S}$ 値を持つ海塩の影響を受けにくいと、2 地点の間には一貫して 4.5%程度の差異が見られました。これまで樹木の年輪を用いたイオウ同位体比の研究では 1830 年が最も古い年代であり、大規模なイオウの排出が始まった 1760 年の産業革命前も含む年輪のイオウ同位体比を明らかにした初めての研究となりました。

② 樹木年輪のイオウ同位体比が大きく変化するの、日本国内で化石燃料が消費されるようになってから。

やがて日本でも工業化が進み、化石燃料の大量消費が始まると、年輪の $\delta^{34}\text{S}$ 値は急激に低下しました。特に、蒸気船や鉄道のような近代的な運輸手段の整備が大きな影響を与えていると考えられます。

③ 人為起源イオウの影響は、排出量減少後も年輪中に検出される。

1970 年に大気汚染防止法が改正されると、脱硫装置の普及などによりイオウ排出量が減少し、人為起源イオウの寄与割合が低下しました。その結果、年輪の $\delta^{34}\text{S}$ 値は上昇傾向を示しました。しかし、 $\delta^{34}\text{S}$ 値は工業化前と比較するとはるかに低く、降水や工業化前の年輪から推定した人為起源のイオウの寄与率については 1970 年以降も高い水準にとどまっていることが示されました(図 3)。

④ 土壌がイオウを捉えることによる時間の「ずれ」はあったのか？

大気から降ってきたイオウや、植物が落葉などを通じて地表に戻したイオウは、いったん土の中に蓄えられます。大湫と伊勢の土壌は、イオウを強くつかまえるタイプではないと考えられますが、土壌が「時間のずれ」を生じさせて、昔の大気の情報をおとから木に伝えていたのかどうかは、まだはっきりしていません。工業化前の年輪の $\delta^{34}\text{S}$ 値と現代の年輪のそれとの大きなギャップは、現代の大気は綺麗になってきたとはいえ、その清浄さは工業化以前の大気の状態にははるかに及ばないこと、あるいは、過去の大気汚染によって土壌に蓄えられたイオウが、時間をかけて再び樹木に取り込まれている可能性を示しています。もし後者であれば、かつて降り注いだイオウは、今もなお森の中で静かに循環を続けているということになります。

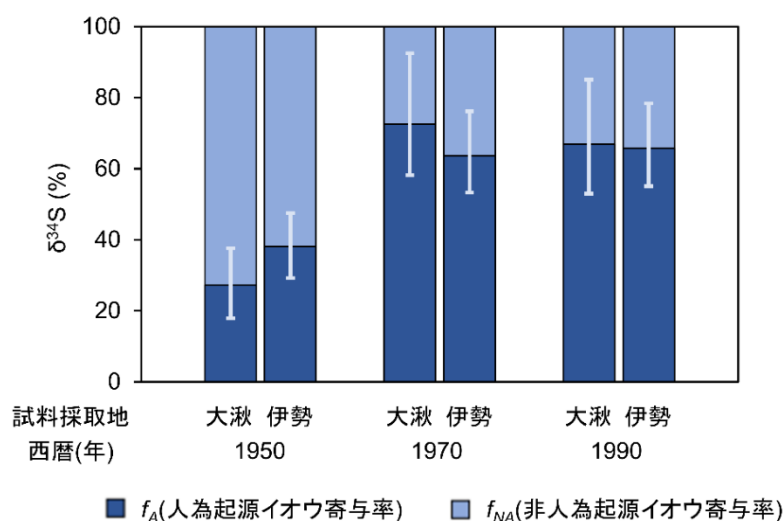


図 3. 混合モデル^{注2)}によって推定した年輪中のイオウの寄与率

【成果の意義】

本研究は、産業革命以前から現代にかけての、大気中イオウの歴史的な変化の軌跡を、2本の御神木の年輪に刻まれたイオウ安定同位体比($\delta^{34}\text{S}$ 値)から読み解きました。

その結果、化石燃料の使用が本格化する以前の年輪には、清浄な大気を反映した高い $\delta^{34}\text{S}$ 値が記録されており、現在の年輪が示す非常に低い値は、今の大気はそのレベルまで回復していない、あるいは過去のイオウ大量放出の影響が環境には色濃く残っている状況が映し出されました。

これらの成果は、イオウ排出量が減少した現代においても、過去に排出されたイオウが大気や土壌に残り、その影響を正しく理解することの重要性を示しています。そして樹木は、大気汚染のような環境の変化を、500年もの歳月にわたって記録し続けてきた、長いページをもつ「自然の記録帳」であることが明らかになりました。

【謝辞】

御神木の学術利用を許可してくださいました大湫神明神社および伊勢神宮の関係者のみなさまに深く御礼申し上げます。本研究は、科学研究費補助金研究・基盤研究(B)『森林生態系内に蓄積した大気汚染レガシーの極端気象による可動化(22H02401)』、日本技術振興機構『次世代研究者挑戦的研究プログラム(JPMJSP2125)』、文部科学省『女性研究者研究活動支援プログラム』の助成を受けて実施しました。

【用語説明】

注 1)イオウ安定同位体比($\delta^{34}\text{S}$):

イオウ(S)には、質量の異なるいくつかの種類(同位体)があり、主に軽い ^{32}S と重い ^{34}S が存在する。イオウ安定同位体比($\delta^{34}\text{S}$)は、標準物質と比較して ^{34}S と ^{32}S の比がどの程度異なるかを示す指標で、イオウの起源や循環の違いを読み解く手がかりとなる。

注 2)混合モデル:

同じイオウでも、火山から放出されたもの、海から飛んできたもの、化石燃料の燃焼で発生したものでは、 $\delta^{34}\text{S}$ 値が異なる。それぞれの発生源がもつこの特徴的な値は、まるで“イオウの指紋”のようなものである。「混合モデル」とは、この同位体の“指紋”を手がかりに、複数の発生源がどの程度の割合で混ざっているかを推定する手法。たとえば、年輪や土壌、水などの環境試料に含まれるイオウの $\delta^{34}\text{S}$ 値を測定し、海塩・火山・化石燃料などの典型的な値と比較することで、その試料中のイオウがどの発生源にどの程度の割合で由来するかを数値的に推定することができる。

【論文情報】

雑誌名:Biogeochemistry

論文タイトル:Air pollution recovery still falls short of pre-industrial conditions – Sulfur stable isotope analysis of tree rings from two giant trees

著者: Ayumi Shiode¹, Takeshi Nakatsuka², Yoshikazu Kato², Hiroyuki

Sase³, Masayuki Morohashi³, Takuya Ishida⁴, Yasuhiro Hirano², Toko Tanikawa¹ (塩出晏弓¹, 中塚武², 加藤義和², 佐瀬裕之³, 諸橋将雪³, 石田卓也⁴, 平野恭弘², 谷川東子¹)

1, 名古屋大学大学院生命農学研究科; 2, 名古屋大学大学院環境学研究科; 3, アジア大気汚染研究センター; 4, 広島大学大学院先進理工系科学研究科

DOI: 10.1007/S10533-025-01277-W

URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-025-01277-w>