

## 大気からの物質負荷

---

春になると、大陸からやってくる黄砂やPM2.5の話題が世間を賑わします。しかし、これらは本当にすべて大陸からやってくるのでしょうか？国内にも起源があるかもしれませんし、長期的に見れば国内にたくさんある火山の影響も受けているかもしれません。大気から降り注いでいる物質の生態系への影響について、具体的な研究を見てみましょう。



# 豊かな恵みと大気汚染物質を運ぶ北西季節風

佐瀬 裕之

（アジア大気汚染研究センター）

日本では、冬になると北風が吹いてきます。日本の北西方向、ユーラシア大陸のシベリアから吹き付ける冬季の季節風は、私たちに豊かな恵みをもたらす一方で、大陸で発生した大気汚染物質を運んできます。その様子が、複数の元素の同位体を測定することで、より詳しく分かってきましたので、ここでご紹介します。

## 1. 米どころ新潟

私が働くアジア大気汚染研究センター（ACAP）は、新潟県新潟市に所在しています。新潟県は、豪雪と美味しいお米で有名ですが、それらは密接に関係しています。肥沃な大地や気候条件はもちろんです。豊富な雪解け水が美味しいお米に大きく貢献していると言われています。では、その雪はどこから来るのでしょうか？

雪は、冬の北風によってもたらされます（図1）。シベリアから吹き付ける冬季の季節風は、最初は寒冷で乾いています。ところが日本と大陸の間には暖流の対馬海流が流れる日本海があるため、冷たく乾いた風が吹くと暖かい日本海から水蒸気が空に昇っていきます。このように日本海から供給された水蒸気を蓄えた季節風が雲となり、日本列島の山脈に向かって吹き付けることによって、山

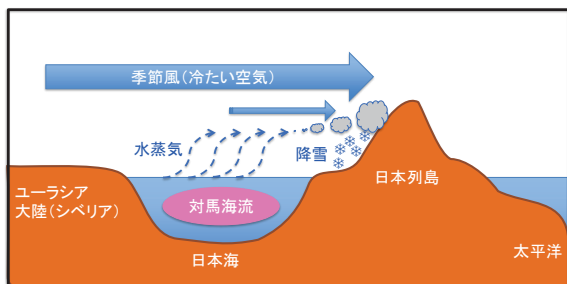


図1. 日本海側に雪が降る仕組み（十日町市のホームページを参考に筆者が作図）

脈の日本海側に大雪をもたらします。豪雪で有名な十日町市のホームページに分かりやすく解説されていますので、こちらもご参照ください。

<http://www.city.tokamachi.lg.jp/yukiguni/Y004/index.html>

このように、冬季に北西季節風が吹くことが、日本海側での豪雪やその豊富な雪解け水による美味しいお米を生み出すのです。ここで覚えておいていただきたい点が2つあります。

- ・冬の季節風はユーラシア大陸からやってくる。
- ・雪となる水蒸気は日本海から供給される。

## 2. 日本海を越えて運ばれてくる大気汚染

越境大気汚染という言葉聞いたことがあるでしょうか？周辺諸国から国境を越えて運ばれてくる大気汚染のことです。一時期、中国のPM2.5<sup>1)</sup>の濃度が著しく高くなり、日本にも影響しているとの報道があったことを覚えている方もいると思います。日本では、中緯度地域で年間を通して西側から偏西風が吹いています。その上、冬季には上述した北西季節風も吹くため、大陸から物質が運ばれてくることは容易に想像が付きまします。そのため、日本では、色々なアプローチで調査・研究が行われ、越境大気汚染を示す結果が得られてきました。例えば、環境省では全国20地点以上で降水の化学特性を測定していますが、そこに含まれる非海塩性の硫酸イオン<sup>2)</sup>は、山陰や本州中北部の日本海側で、冬季にその濃度や量が多くなることが報告されています（環境省2019）。また、コンピュータを用いたシミュレーション・モデルでは、大陸で発生した大気汚染が日本列島に輸送

される現象が再現されています。

このように、大陸からの越境大気汚染は確かにあるようなのですが、今、ここに降る雨に越境してきた大気汚染物質がどのくらい含まれているかを知ることはなかなか難しいものです。例えば冬季に高濃度の硫酸イオンが検出されても、どこ産であるという「しるし」がついている訳ではないので、物証という意味では弱いのです。じゃあ、その「しるし」を見つけられないかということで、同位体測定を活用するというアイデアが出てきました。

### 3. 越境大気汚染のしるし

環境省のモニタリングや私たちの研究サイト等で得られた試料を使って、その「しるし」を見つけることにしました。すでにイオン濃度など基本的なデータが得られているため、同位体測定を取り入れることによって、新しい視点が得られやすいという利点もありました。

まずは、硫黄 (S) の同位体を測定することにしました。原子番号 16 番の元素である硫黄の原子量は 32.065 です。主成分 (95.02%) である質量数が 32 のものに加え、質量数が異なる 34 (4.21%)、33 (0.75%)、36 (0.02%) などの安定同位体があります (これらはそれぞれ、 $^{32}\text{S}$ 、 $^{34}\text{S}$ 、 $^{33}\text{S}$ 、 $^{36}\text{S}$  と表記されます)。そのうち、存在比率が多い、 $^{32}\text{S}$  と  $^{34}\text{S}$  の割合が指標として用いられています。硫黄の場合は、 $^{32}\text{S}$  に対する  $^{34}\text{S}$  の割合を、標準物質であるキャニオン・ディアブロ隕石に含まれる鉄の硫化鉱物 (Canyon Diablo Troilite, CDT: FeS) 中の存在割合と比較して、 $\delta^{34}\text{S}$  として千分率 (%、パーミル) で表しています<sup>3)</sup>。 $\delta^{34}\text{S}$  値は、燃料となる石炭や石油の産地によって異なるため、降水中に含まれる硫酸イオンの起源 (発生源) を推定するために有効であると考えられています。また、降水と河川・湖沼水の  $\delta^{34}\text{S}$  値を比較することにより、生態系内での循環・蓄積、大気以外の地質などからの影響などについて、情報を得ることも可能となります。

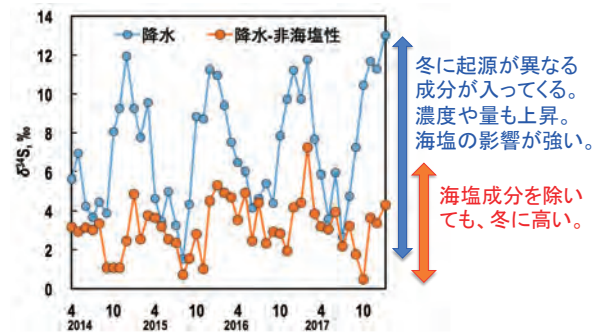


図 2. 加治川試験地 (新発田市) での硫黄同位体比の季節変化

新潟県の森林地域の降水に含まれる硫酸イオンの  $\delta^{34}\text{S}$  値は、大きな季節変動を示し、冬季に北西季節風が吹く時期には、濃度や量とともに上昇しました (図 2)。北西季節風によって、夏季とは起源が異なる硫酸イオンが入ってきていると考えられます。季節風によって日本海を越えてもたらされる雨や雪には、海塩成分が多く含まれ、その硫酸イオンの  $\delta^{34}\text{S}$  値は、+20.3‰ という非常に高い値を持っています。これが冬季に  $\delta^{34}\text{S}$  値が上昇する原因の一つですが、その影響を除いた非海塩性の成分の  $\delta^{34}\text{S}$  値を算出しても、やはり夏季よりも高い値が見られます。海塩由来だけでなく、化石燃料等の燃焼に由来する硫酸イオンが、季節風によって日本海の向こうから運ばれてくることが分かりました。中国で燃料として利用されている石炭は、日本で主に使われている中東地域の石油よりも  $\delta^{34}\text{S}$  値が高いことから、その起源として有力であると考えられました。それらに由来する  $\delta^{34}\text{S}$  値は、平均的には、それぞれ +6.6% と -2.7% 程度と考えられています。これらの同位体比と硫酸イオンの量を考慮したバランス計算によると、新潟のこの森林地域では、海塩由来、越境大気汚染由来、国内発生源由来の寄与は、それぞれ 22%、48%、30% 程度であると推計されています (Inomata et al. 2019)。この地域の降水に含まれる硫酸イオンの約半分が越境大気汚染由来でした。

#### 4. 北西季節風の二面性

最初に述べたように、豊富な雪解け水が米どころ新潟を支えています。そして、その雪は、冬季の北西季節風によって、日本海から蒸発した水蒸気に由来するものです。これも同位体測定で「しるし」を見つけることができます。ここでは詳しく述べませんが、降水 ( $H_2O$ ) の水素 (H) と酸素 (O) の安定同位体比を測ると、冬季に得られる降水 (雪) の同位体比は、確かに夏季の降水とは大きく異なっていて、違う起源の水蒸気による雨であることが分かります。そして、河川水にも、その冬季の降水の影響が大きく残っているようです。

このように、冬季の北西季節風は、厳しい冬ではありますが、日本海側に雪解け水とそれを用いた美味しいお米という豊かな恵みをもたらしています。一方で、その季節風によって、越境大気汚染という、招かれざる客も運ばれてきます。このような、冬季の北西季節風の二面性が、硫黄と水の酸素・水素の同位体を測定することによって、より詳しく分かりました。

#### 5. おわりに

現在、私たちは、有害な重金属である鉛 (Pb) や黄砂の指標となるストロンチウム (Sr) の同位体も同時に測定し、日本周辺の大気汚染の状況やその生態系内での役割について、より詳しく知ろうとしています。既存のモニタリング試料に、複数の同位体測定を取り入れていくというのは、新しい試みであり、私たちをより広い世界に案内してくれるものと思います。近年、中国における大気汚染物質の発生量は減少に転じたと言われていています。今後は、大気環境の改善や、それに伴う生態系の応答 (回復?) も見られる可能性があります。その時に、単に量的な変化でなく、確かに中身が変わりつつあるということについて、同位体測定は確かな「しるし」を示してくれると期待できます。

なお、上記の結果は、EANET ネットワークセンター研究及び環境省越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの一環として行われたものであり、以下の同僚たちの努力の賜物です：大泉毅、猪股弥生 (現：金沢大学)、齋藤辰善 (現：新潟県)、高橋雅昭、諸橋将雪、山下尚之 (現：森林総合研究所) (敬称略)。

#### 注釈

- 1) 大気中に浮遊している  $2.5 \mu m$  以下の小さな粒子：微小粒子状物質
- 2) 降水に含まれる硫酸イオン ( $SO_4^{2-}$ ) のうち、海塩に由来する成分を差し引いた、化石燃料等の燃焼により発生した  $SO_2$  に由来すると考えられる成分。いわゆる酸性雨の主成分の一つ。
- 3) 安定同位体比は、直接比率を表すのではなく、標準となる物質に存在する安定同位体の割合と試料中に存在する安定同位体の割合を比較して、標準物質からどの程度ずれているかをデルタ ( $\delta$ ) 値として、千分率 (‰, パーミル) で表されることが多い。

#### 文献

- Inomata Y, Ohizumi T, Saito T, Morohashi M, Yamashita N, Takahashi M, Sase H, Takahashi K, Kaneyasu N, Fujihara M, Iwasaki A, Nakagomi K, Shiroma T, Yamaguchi T. (2019) Estimate of transboundary transported anthropogenic sulfate deposition in Japan by using the sulfur isotopic ratio. *Science of the Total Environment*, 691: 779-788.
- 十日町市役所 (2016) 「雪がふるしくみ」, 雪国とおかまち, 十日町市ホームページ  
<http://www.city.tokamachi.lg.jp/yukiguni/Y004/index.html>
- 環境省 (2019) 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書 (平成 25 ~ 29 年度)

## 著者情報



佐瀬裕之 一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター生態影響研究部長。1965年生まれ。千葉大学大学院博士課程修了、博士（学術）。東アジア13カ国による東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）のネットワークセン

ターとして設立された酸性雨研究センター（現：アジア大気汚染研究センター）に1998年に入所、2010年より現職。

（2020年3月31日掲載）

（2020年4月7日改版）

# 越境大気汚染や黄砂の影響をコケの安定同位体比で評価する

大石善隆  
(福井県立大学)

## 1. コケにできないコケ

小さくて目立たず、不味くて食料にもならず、おまけにきれいな花も咲かせないコケ。そのため、文字通りコケにされがちなコケですが、こんなコケでも、いや、コケだからこそ、活躍する場面もあります。その一つに、コケが環境の指標となること(=コケの状態をみたり、コケに含まれる物質を分析したりすることで、環境の良し悪しを手軽に評価すること)が挙げられます。とくに、コケは大気環境の指標として広く利用されています。

コケが大気環境の指標となる理由については、その水・栄養分の吸収方法が大きく関係しています。実はコケには根が発達せず、体の表面から直接、大気中や雨に含まれる物質を吸収しています。そのため、コケは大気中に浮遊していたり、雨に溶けたりしている汚染物質を容易に吸収してしまうのです。ちなみに、コケを引っっこ抜くと根のようなものがついていますが、これは「仮根」といって、その主な役割は土や木の幹、岩にくっつくことで、木や草のように水や栄養分を土から吸収する機能はほとんどありません。

「環境を評価するなら、観測機器を設置すればいいのに。わざわざコケを使わなくても…」という意見はごもっともです。もちろん、理想をいえばそうなのですが、生物を使うからこそそのメリットや、他にもさまざまな事情があります。例えば、観測機器を設置・維持するには手間もコストもかかります。そのため、多くの地域で継続的に環境を評価するのは容易ではありません。その一方、野外に生えているコケを利用すれば、効率的に環境を評価することができるのです。

## 2. コケと大気汚染

中国など東アジアの国々から日本へは西風によっていろいろな大気汚染物質(越境大気汚染)や黄砂が飛来します。とくに近年は活発な経済活動などによって汚染物質の飛来量が増加し、生態系や健康などへ与える影響が懸念されています。

これらの越境大気汚染物質には、国内のものとは値の異なる安定同位体比(以下、同位体比)をもつ元素も含まれています。ここでは、その中から3つの元素(窒素、鉛、ストロンチウム)に着目して、越境汚染に対するコケの指標性について検討してみましょう。

### 窒素(N)

数ある越境大気汚染物質のなかで、今、大きな問題になっているものの一つに窒素汚染があります。窒素は植物にとって欠かすことのできない重要な元素です。しかし、あまりに多くの窒素が供給されすぎると、生態系に深刻な影響が生じます。例えば、窒素を好む植物ばかりになってしまったり、それに伴って、生態系のバランスが崩れてしまったりします。

コケに含まれる窒素の起源を探るうえで、窒素同位体比は有用な指標になります。化石燃料(石油や石炭など)の燃焼で発生した窒素や、大気を浮遊する微小な粒子(PM)に含まれている窒素では、 $\delta^{15}\text{N}$ の値が高くなることが知られています。越境由来の窒素には化石燃料の燃焼によって発生するものが多く含まれ、おまけにPMに含まれて日本やってくるものも少なくありません。この状況を踏まえれば、越境由来の窒素汚染が深刻な地域では、コケの窒素同位体比も高くなりそうです。

### 鉛 (Pb)

鉛は生物にとって毒性の強い元素で、食物連鎖によって濃縮されることから、その動態を把握することは生物多様性や生態系の保全にとって重要です。

窒素同位体比と同じように、鉛同位体比も鉛の起源の推定に用いられます。既存の研究によると、越境由来の大気に含まれる鉛の同位体比は、国内由来のものよりも高くなる傾向があります。そこで、越境由来の大気の影響を受けやすい地域では、コケの鉛同位体比も高くなると予想されます。

### ストロンチウム (Sr)

近年は中国内陸部の森林の減少に伴って日本で観測される黄砂の頻度も高まっており、その影響評価が求められています。

一般に、黄砂に含まれるストロンチウムの同位体比は国内由来のものよりも高い値をもつことが報告されています。そのため、黄砂が多く降り注ぐ地域では、コケのストロンチウム同位体比も高くなっている可能性があります。

### 3. コケの同位体比と越境大気汚染・黄砂

以上のように、コケの窒素、鉛、ストロンチウム同位体比は越境大気汚染・黄砂の影響が強い地域で高くなると考えられます。この推察を確かめるため、八ヶ岳（長野県）でコケを採取し、その同位体比を測定しました。越境由来の大気は西風にやって飛来することを考慮すれば、次の仮説が立てられます。

【仮説】 西風の影響を受けやすい西斜面では、東斜面と比べて同位体比が高くなる

### 4. 八ヶ岳におけるコケの同位体比

八ヶ岳で採取したコケの窒素、鉛、ストロンチウム同位体比について、斜面ごとに結果をまとめると、次のようになります。

- (1) コケの窒素同位体比は西斜面で高くなった。この傾向は、越境大気汚染の影響が相対的に強くなる標高の高い地域で顕著であった (図1)。

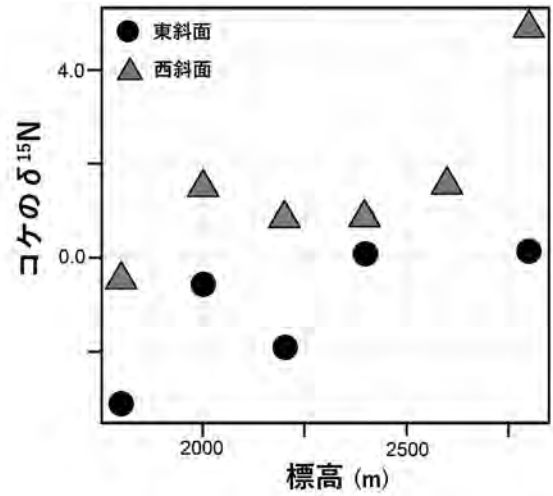


図1. コケの窒素同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) と標高・斜面方位との関係  
Oishi (2019) の結果の一部 (W2、E2 プロット) を利用して作図。

- (2) コケの鉛同位体比は西斜面で高くなった。しかし、その値は越境由来のものではなく、国内由来の大気汚染物質に含まれる鉛化合物の同位体比の範囲内にあった (図2)。

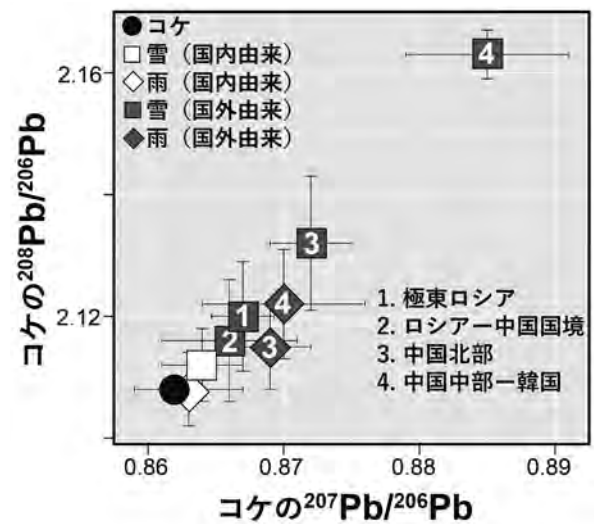


図2. コケと雪・雨 (国内・国外) に含まれる鉛同位体比の比較  
Oishi et al. (2021) の Fig. 5 を改変。雪・雨の同位体比については Mizoguchi et al. (2012)、Mukai et al. (1999) を参照。1-4 の番号は、国外の起源となった地域を示す。2020 年度版の【同位体環境学がえがく世界】の図を改変。



(3) 窒素や鉛とは異なり、コケのストロンチウム同位体比は西斜面と東斜面との間で有意な差はみられず、その値は黄砂由来のものとは大きく異なっていた。その一方、コケのストロンチウム同位体比と生育場所の土壌のストロンチウム同位体比との間には極めて高い相関 ( $r=0.921$ ,  $t=1.175$ ,  $df=22$ ,  $p < 0.01$ ) がみられた (図3)。

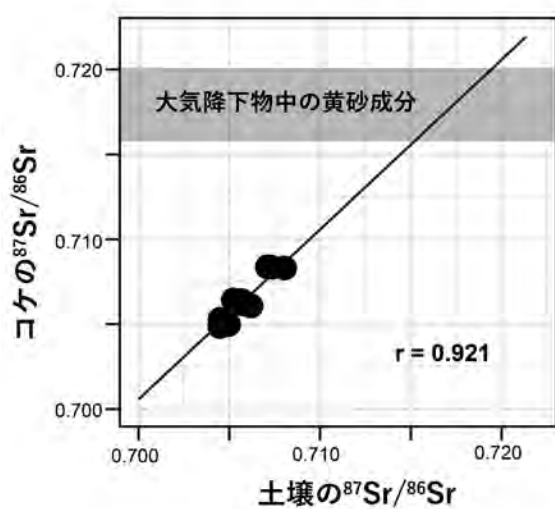


図3. コケと土壌のストロンチウム同位体比  
コケのストロンチウム同位体比は各調査プロットの平均値を用いた。大気降下物中の黄砂成分の値は Nakano et al. (2001) による。Oishi (2021) の結果をもとに作図。

### 5. コケの同位体比の指標性

以上の研究成果より、調査地のコケの窒素同位体比には越境由来の窒素汚染物質の影響が、鉛同位体比には国内の大気汚染物質の影響が反映されていると考えられました。なお、鉛同位体比に越境大気汚染の影響が現れなかった理由の一つとして、越境由来の窒素汚染物質と比べて、鉛化合物はコケ植物に吸収されにくい可能性が挙げられます。

その一方、ストロンチウム同位体比の値から、コケは主に生育場所の土壌からストロンチウムを吸収しており、その同位体比には大気由来の成分の影響はほとんど反映されていないと結論されました。この理由としては、ストロンチウムは調査

地の土壌に高い濃度で含まれており、コケに多く吸収されていたことなどが挙げられます。

### 6. まとめ

今回の研究から、コケに含まれる窒素、鉛、ストロンチウムはそれぞれ越境由来の大気汚染物質などへの応答が異なることがわかりました。コケの窒素・金属元素吸収プロセスにはさまざまな要因が関連しています。今回のストロンチウムのよう、大気以外に由来する金属がコケに吸収されていることもあれば、コケに吸収される際に金属イオンの間で競合が起こることも報告されています。今後、これらの要因を一つずつ紐解いていくことで、コケの指標性について考察を深めることができるでしょう。

本報告は2019年度、2020年度版の【同位体環境学がえがく世界】の内容を一部加筆・修正するとともに、新たにSr同位体に関する話題も加えて再執筆したものです。なお、Sr同位体の結果は Oishi (2021) をもとに執筆しました。

### 文献

- Mizoguchi T, Jing Z, Satake H, Mukai H, Urano K, Kawasaki K (2012) Lead and sulfur isotopic ratios in precipitation and their relations to trans-boundary atmospheric pollution. *Atmospheric Research* 104-105: 237-244.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.015>
- Mukai H, Tanaka A, Fujii T, Zeng Y, Hong Y, Tang J, ... Zhai P (2001) Regional characteristics of sulfur and lead isotope ratios in the atmosphere at several Chinese urban sites. *Environmental Science & Technology* 35: 1064-1071.  
<https://doi.org/10.1021/es001399u>
- Nakano T, Yokoo Y, Yamanaka M (2001) Strontium isotope constraint on the provenance of basic cations in soil water

and stream water in the Kawakami volcanic watershed, central Japan. Hydrological Processes 15: 1859-1875.

<https://doi.org/10.1002/hyp.244>.

Oishi Y (2019) Moss as an indicator of transboundary atmospheric nitrogen pollution in an alpine ecosystem. Atmospheric environment 208: 158-166.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.005>

Oishi Y (2021) Potential use of Sr isotope ratio to evaluate trace metal uptake in moss. Ecological Indicators 121: 107063.

<https://doi.org/10.1007/s11355-021-00476-5>

Oishi Y, Shin K C, Tayasu I (2021) Lead isotope ratios in moss for the assessment of

transboundary pollutants in the Yatsugatake Mountains, central Japan. Ecological Research 36: 401-408.

<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12205>

#### 著者情報



大石善隆 福井県立大学学術教養センター准教授。京都大学農学研究科博士課程修了。博士（農学）。専門はコケの生物学。著書に『コケはなぜに美しい（NHK 出版）』など。

(2020年3月31日、2021年3月31日掲載)

(2022年3月31日改題、改版、加筆)

# 森林のカルシウム不足を火山灰が救う

越川昌美  
(国立環境研究所)

## 1. カルシウム不足と森林環境

酸性雨の生態系影響は、主に 1970 年代から 1990 年代に欧米で報告され、湖沼から魚がいなくなり森林が枯損するといった被害が大きな問題となりました。日本でも欧米と同程度の酸性雨が降っていますが、魚への被害や森林の成長抑制は認められていません。それはなぜでしょうか。この疑問に答えるために、本研究では土壌のカルシウムに注目しています。

土壌中のカルシウムは、イオン交換反応によって酸を中和できます。また、カルシウムは樹木など生物に欠かせない栄養であるため、土壌中カルシウムは養分供給の観点からも重要です。イオン交換にかかわるカルシウムを供給する鉱物は、基盤岩由来の鉱物だけでなく、黄砂や火山灰のようにあとから付加した鉱物もあります。日本各地に、数千年前から数万年前の大規模な火山活動で降下した火山灰は、風化が速く、カルシウムなどの塩基カチオン<sup>1)</sup>の供給能力が高いため、火山灰を多く含む土壌は、酸中和能が高いと期待できます。しかし、山地斜面では火山灰の分布を把握するのが難しいため、山地斜面における火山灰のカルシウム供給能の評価は困難で、国内外を問わず報告されていません。

本研究は、森林のカルシウム循環への火山灰の寄与評価を目的として行いました。森林のカルシウム供給源を、大気降下物と土壌鉱物に分けたとき、土壌鉱物由来のカルシウムが酸の中和で消費されて不足してくると、大気降下物由来の寄与が相対的に高くなると予想されます。そこで、カルシウムの起源を解析して、森林生態系のカルシウムが十分足りているかを調べることにしました。

起源解析には、カルシウムとよく似た性質をもつストロンチウム (Sr) の同位体を使いました。また、より基礎的な研究課題として、大気降下物と基盤岩の 2 成分系の起源解析は行われていますが、そこに火山灰を加えた 3 成分系で起源解析を試みたことが、本研究の特徴です。

## 2. Sr 同位体比でカルシウムの供給源を調べる

観測は、茨城県筑波山の南側に位置する試験地で行いました。この地域の基盤岩は、花崗岩という、カルシウム供給能が低いといわれている岩です。そしてこの地域には、約 3 万年前に群馬県赤城山の噴火によって火山灰が降下したことがわかっています。試料採取地点 (図 1) は、地形による火山灰の蓄積しやすさを考慮して選び、緩斜面、急斜面、谷部で土壌と植物を、溪流の上流・中流・下流で渓流水を採取しました。また、下流の近傍で降水と花崗岩を採取しました。



図 1. 試料採取地点

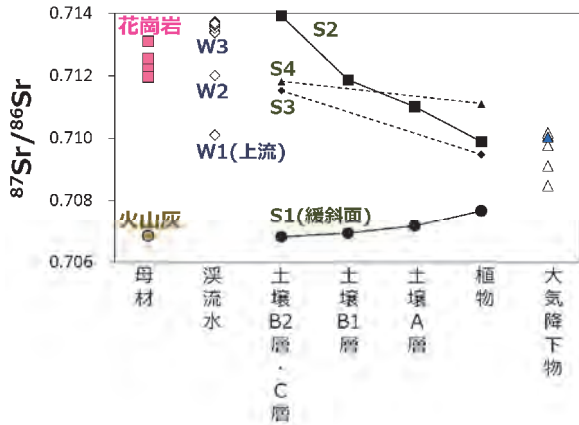


図2. 森林の各種試料の Sr 同位体比。土壌は層位別<sup>3)</sup>に分析した。

採取した水試料は濾過し、固体試料は酸分解して、元素分析および Sr 同位体分析を行いました。土壌は酢酸アンモニウムで抽出して交換態も分析しました<sup>2)</sup>。

全試料の Sr 同位体比の概要が図2です。縦軸に Sr 同位体比を示しましたが、花崗岩・大気降下物・火山灰が離れた値を示し、渓流水・土壌・植物の試料がそれらのほぼ間の値を示しました。従って、試料の値が、花崗岩・大気降下物・火山灰の混合で説明できることがわかりました。緩斜面の S1 地点の土壌と植物は、火山灰と大気降下物の間の値を示し、火山灰の寄与があると考えられました。ほかの地点の試料は、大気降下物と花崗岩の間の値を示し、火山灰の寄与があるかどうかは、同位体比だけではわかりませんでした。

### 3. 土壌中の火山灰

風化した火山灰を含む土壌の性質は Andic properties と呼ばれ、図3の縦軸の値がその指標になります。横軸は、図2で示さなかった交換態の Sr 同位体比です。緩斜面の S1 地点は、どちらの軸から判断しても、火山灰を多く含むことが確認できました。そして、S2 地点や S3 地点の土壌は、酸分解の同位体比は大気降下物より花崗岩側にありましたが、土壌抽出液の同位体比は火山灰側にあり、これらの地点でも火山灰由来 Sr の寄与があることがわかりました。

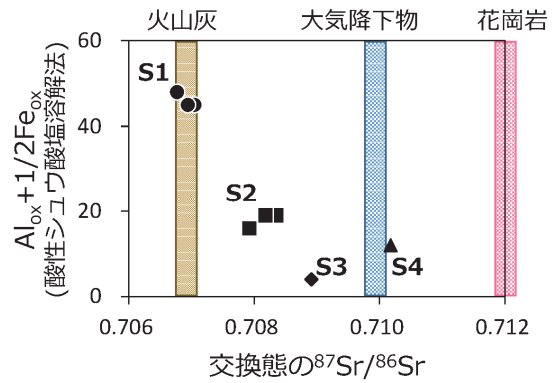


図3. 土壌の交換態 Sr 同位体比と火山灰の指標 (Andic properties) となる値 ( $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox}$ ) の関係

### 4. 渓流水中の火山灰由来 Sr

図4は下流地点の渓流水の Sr 同位体比と Sr 濃度の季節変化を、横軸を流量にして示した図です。上の図は、流量が上昇すると、同位体比が下がる傾向があります。この値は、花崗岩と大気降下物の間であり、火山灰はもっと低いので、同位体比が低下する原因が、大気降下物なのか火山灰なのか、この図だけでは判断できません。下の図は、流量が上昇すると、Sr 濃度が上昇する傾向があります。大気降下物の Sr 濃度は、渓流水の 1% 程度と低いので、この濃度変化は大気降下物ではなく火山灰の寄与によると考えられました。

以上に基づいて、渓流水中の Sr の起源を、図5の3つの式を使って計算しました。3つめの

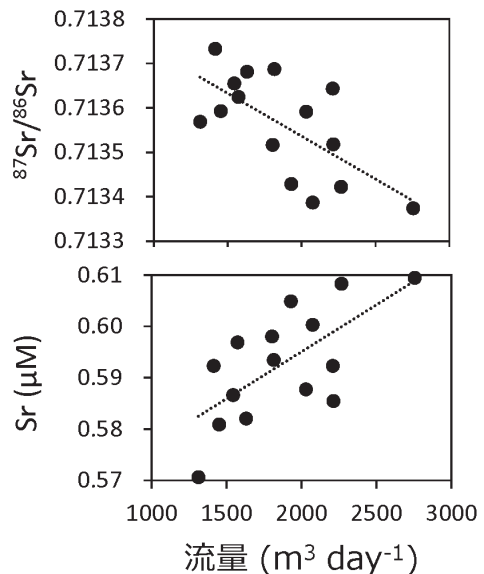
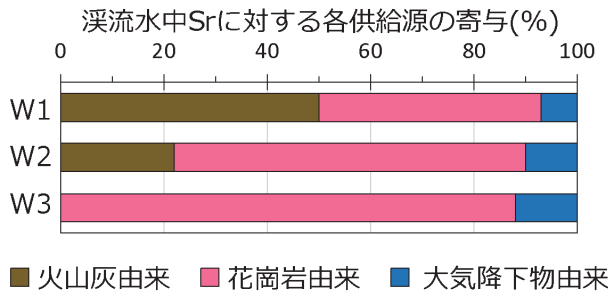


図4. 渓流水の流量と Sr 同位体比や Sr 濃度の関係

$$\begin{aligned}
 &({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{streamwater}} \\
 &= f_{\text{atmospheric}} ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{atmospheric}} + f_{\text{granite}} ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{granite}} \\
 &+ f_{\text{volcanic ash}} ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{volcanic ash}} \quad \text{Eq. 1} \\
 &f_{\text{atmospheric}} + f_{\text{granite}} + f_{\text{volcanic ash}} = 1 \quad \text{Eq. 2} \\
 &f_{\text{atmospheric}} = (\text{Sr}/\text{Cl})_{\text{atmospheric}} / (\text{Sr}/\text{Cl})_{\text{streamwater}} \quad \text{Eq. 3}
 \end{aligned}$$



## 火山灰の寄与

上流の緩斜面で高い  
(50%, W1)

下流で低い  
(0-1%, W3)

図5. 渓流水中 Sr に対する火山灰、基盤岩（この場合は花崗岩）、大気降水物の寄与率計算の式と結果

式は、塩化物イオン (Cl) を指標として、渓流水中の大気降水物由来成分の寄与を求める式を使用しました。その結果、大気降水物の寄与は青で示したとおり 1 割から 2 割程度であること、火山灰の寄与は上流の緩斜面で 50% と高く、下流では季節変化があっても 0-1% と低いことがわかりました。

### 5. 植物中の火山灰由来 Sr

植物中の Sr の起源を計算するときは、Cl を指標とした式が使えないので、仮定のもとで計算しました。S1 地点では、花崗岩の寄与がゼロであると仮定すると、火山灰の寄与が 74% となりました。実際は花崗岩由来もある程度含まれるため、それと釣り合いをとるために火山灰の寄与はこれより高くなります。

### 6. おわりに

以上をまとめますと、まず、山地斜面における火山灰の分布の特徴として、上流の緩斜面の渓流水や植物で火山灰由来の Sr の寄与が高いことがわかりました。Sr 同位体比を用いて、火山灰による Sr 供給の寄与を評価できることがわかりました。次に、大気降水物由来 Sr の寄与が、渓流水で 10-20%、植物で 50% 以下であったことから、文献値と比較しても大気降水物由来の寄与はそれ

ほど高くなく、今回の試験地では火山灰や花崗岩による Sr の供給が十分であると考えられました。そして、以上の結果は、カルシウムについても同様と考えられました。

今後は、カルシウム供給能が花崗岩よりもさらに低いといわれている地質（チャートなど）の地域で、森林のカルシウム不足を火山灰由来カルシウムが補っている様子を調査する計画です。

### 注釈

- 1) 土壌に含まれる陽イオン（カチオン）のうち、カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウムを塩基カチオンと呼び、いずれもイオン交換により酸を中和する働きがある。
- 2) 土壌中の陽イオンは、土壌粒子の表面に弱く吸着して水に溶けやすく植物に吸収されやすい形態と、土壌粒子に強く結合して容易に水に溶けない形態で存在し、前者を交換態と呼ぶ。交換態の陽イオンは、土壌を 1 mol/L 酢酸アンモニウムで抽出して分析する。
- 3) 土壌学では土壌は水平に積み重なった層から成り立つとみなす。森林土壌は、堆積有機物層と鉱質土層に分かれ、鉱質土層は上から順に A 層（腐植に富む）、B 層（腐植が乏しい）、C 層（基盤岩の礫に富む）に分かれる。

## 文献

Koshikawa MK, Watanabe M, Shin K-C, Nishikiori T, Takamatsu T, Hayashi S, Nakano T (2016) Using isotopes to determine the contribution of volcanic ash to Sr and Ca in stream waters and plants in a granite watershed, Mt. Tsukuba, central Japan. *Environmental Earth Sciences* 75: 501.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-5097-9>

## 著者情報



越川昌美（国立環境研究所地域環境研究センター主任研究員）1996年京都大学大学院人間・環境学研究科修士課程修了。1996年国立環境研究所入所。博士（人間・環境学）。専門は水と土壌の無機分析化学。

（2021年3月31日掲載）

（2022年3月31日改版）