

# 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)。

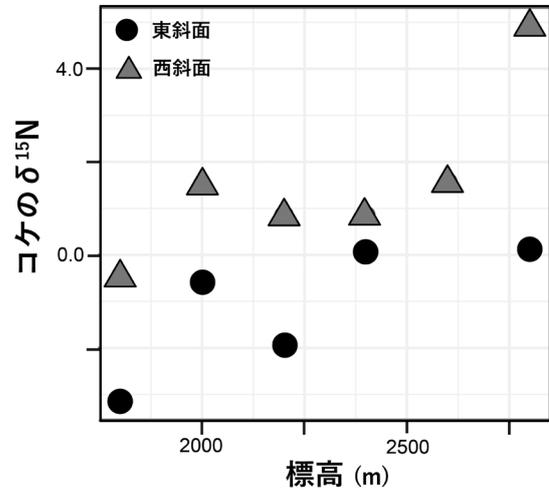


図 1. コケの窒素同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) と標高・斜面方位との関係  
Oishi (2019) の結果の一部 (W2、E2 プロット) を利用して作図。

- (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)。

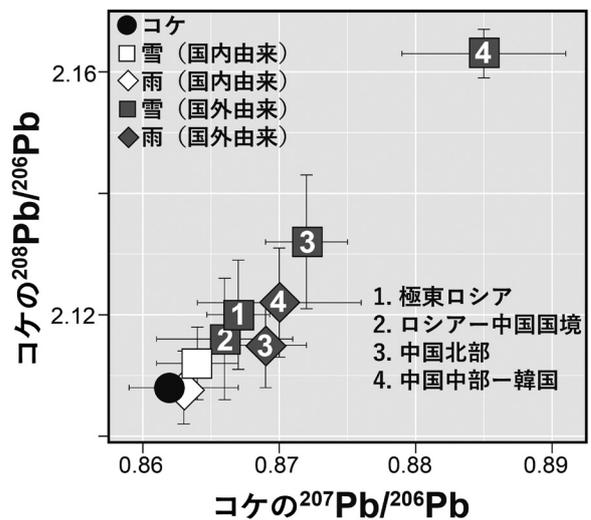


図 2. コケと雪・雨 (国内・国外) に含まれる鉛同位体比の比較  
Oishi et al. (2021) の Fig. 5 を改変。雪・雨の同位体比については Mizoguchi et al. (2012)、Mukai et al. (1999) を参照。1-4 の番号は、国外の起源となった地域を示す。2020 年度版の【同位体環境学がえがく世界】の図を改変。

(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)。

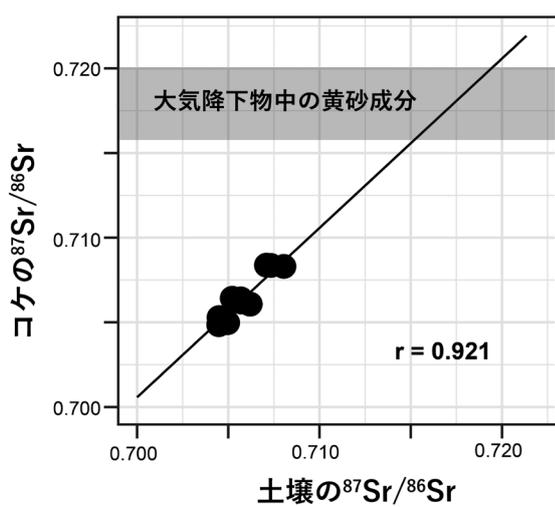


図3. コケと土壌のストロンチウム同位体比  
コケのストロンチウム同位体比は各調査プロットの平均値を用いた。大気降下物中の黄砂成分の値は Nakano et al. (2001) による。Oishi (2021) の結果をもとに作図。

### 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)