
4 章

もっと知りたい同位体

「同位体環境学共同研究」（2012 年度～）は、
総合地球環境学研究所で行っている共同研究事業です。
日本の大学・研究機関だけではなく、世界の大学・研究機関とも一緒に研究しています。
一緒に研究を行っている研究者の方々から、研究内容を紹介させていただきます。

酸素と水素同位体比による水田が主体な扇状地の 地下水涵養源評価の可能性

吉岡有美
(島根大学学術研究院)

1. 地下水とは？ 地下水は何の水か？

利用可能な淡水資源として、イメージされるものは、湖やダム、河川の水ではないでしょうか。しかし、淡水資源の98%を占めるのは、地面の下にある地下水なのです。地下水は、砂漠などの乾燥した地域では唯一の水資源であることも珍しくありません。将来的に、気候変動により洪水や渇水といった雨や河川の状況が不安定になれば、豊富な水量があり、安定的に利用できる地下水への需要が高まる可能性もあります。地下水は、管理や保全するのが困難なときもあります。3つの理由によるものです。1つ目はその流れや貯留されている様子が目に見えないこと、2つ目はときには数百や数千 km² のように広域に存在することです。3つ目は地下水の上、つまり地面にある雨や河川、田んぼの中に溜まった水などのいろいろな水が地面に浸透して、地下水となっていること（これを地下水涵養と呼びます）です。

扇状地は河川により運ばれた土砂が扇状に堆積した地形で、日本の低地の約半分がこの地形となっています。扇状地内を流れる河川の水を利用した水田農業が行われています。ある扇状地内の地下水を対象に、河川の水か、水田の水のどちらの水によってできているかを、酸素と水素の同位体によって調べることができるのではないかと考え、研究に取り組んでいます。

2. 重さの違いで水を見分ける？

水分子を形成している酸素と水素の同位体には、蒸発すると同位体の値（同位体比）が高くなる特徴があります。同位体比が高いとは、質量数

の大きい同位元素が多いことを意味しており、「重い水」という表現を使って表現されることもあります。同位体比を体重に置き換えて、「軽い水」が水面から蒸発しやすいため、残った水は「重い水」になると考えると捉えやすいかもしれません。稲の栽培のため水を溜める水田では、日中盛んに蒸発が生じています。したがって、地下水が水田の水でできている場合は、地下水は「重い水」になります。一方で、山から海へと短ければ数日で流れる河川の水は蒸発の影響が小さいため「軽い水」です。したがって、地下水が河川からの水でできている場合は、地下水は「軽い水」になります。地下水が水田と河川の水の半量ずつでできている場合は、「軽くも、重くもない水」となると考えることができるでしょう。

3. 調査の目的と概要

2015年5月に河川上流の山地で大きな斜面崩壊が発生して、土砂が河川内に大量に堆積しました。その結果、河川の水に土砂が混ざり長期間、茶色く濁る問題が発生しました。河川からの浸透や、水田からの浸透、つまり地下水涵養の減少が懸念される事態となりました。そこで、同位体比を使った地下水涵養源の調査は、1回や数回のみ行われるのが一般的ですが、濁水が地下水涵養に影響しているのか、影響するならどのように、いつまで影響するのかなどを調べるために、同位体比の定期モニタリングを2016年4月より開始しました。

調査は、図2に示す石川県のほぼ中央に位置する手取川扇状地全域（約190 km²）の約35箇所

の井戸から地下水、そして地下水になる前の水、つまり涵養水源となりうる、3つの河川の水や水田の水（以下、田面水と呼びます）、雨などを定期的に採取しました。同じ地点の水について時期を変えて20回以上測定し、酸素・水素同位体比の変化を調べました。

この研究は、石川県立大学生物資源科学部瀧本裕士先生、京都大学農学研究科中村公人先生、大阪府立大学生命環境科学研究科中桐貴生先生および櫻井伸治先生と共同で行っています。

4. モニタリング結果

同位体比は海水の中に含まれる同位元素の数を基準としていますので、海水の同位体比は0となります。また、%（百分率）と似た‰（千分率）という単位を使用します。日本のように中緯度の地域では、蒸発が進んだ水以外はマイナスの値となります。-5‰と-10‰の同位体比を比較するとき、-5‰の水を重いといいます。

図1は5月から8月までの河川水、田面水、地下水の酸素の同位体比の変化を示しています。石川県では4月下旬から5月中旬ごろが田植えの季節です。モニタリングをはじめた5月から6月にかけては緑線の田面水の同位体比は、青線の河川の水より4%以上高い（重い）日が多くなっています。田植えから約1カ月後の6月5日に2‰ともっとも重くなり、河川水との差は12.5‰にもなります。河川水を水田に入れる（灌漑する）と、

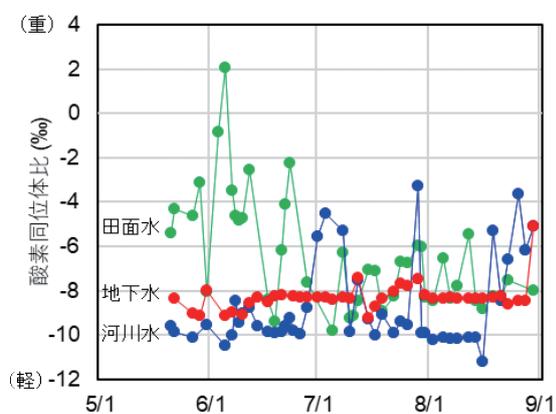


図1. 河川水（用水路で採取）、田面水、地下水の酸素同位体比の変化（2019年）

河川水と田面水に大きな違いが生まれることがわかります。6月以降は成長した稲に日射が一部遮断されて、蒸発が弱くなるため、徐々に田面水の同位体比は低下していきます。それでもほとんどの期間で河川水よりも2‰は重くなっています。つぎに、赤線の地下水は-8‰より少し小さい値となっており、重い田面水と軽い河川水の間にあります。井戸は河川より5kmほど離れていますが（図2の●地点）、上に述べたように田面水の値が重くなる時期においても、地下水の値は河川水より2‰ほどしか重くならないことから、河川水の影響も及んでいることがわかります。

図2は、扇状地全体の地下水の酸素同位体比のマップです。点在している井戸で採取した地下水の同位体比の値から、平面上のデータを持たない点の値を補間して作成しました。すべての図で共通している特徴は、扇状地の北、中央、南に3つの河川が流れていますが、このうち中央の河川（手取川）に沿ったエリアの地下水の同位体比がとく

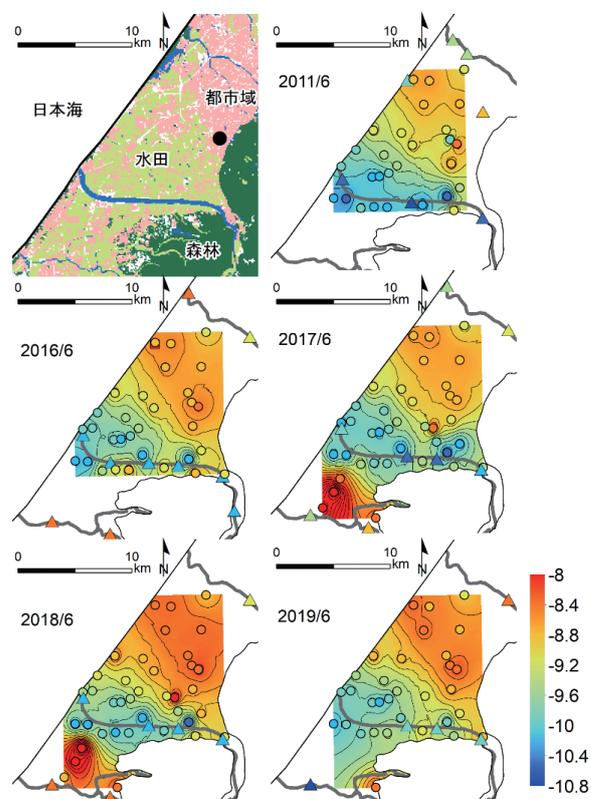


図2. 扇状地の土地利用と地下水の酸素同位体比
○地下水、△河川水
(赤：重い水、青：軽い水)

に低くなっています。中央の河川から南部へ、あるいは北部へと距離が離れるにしたがって、軽い同位体比を示す青色から重い同位体比を示す赤色へと変化するグラデーションがみてとれます。このような特徴は、4年間のモニタリング期間から6～10月の地下水でみられることがわかっています。図1に示したように同位体比の値は、河川水と田面水が区分できる程度に異なっていることから、河川に近い地下水の同位体比が小さくなるのは、この地点の地下水が同じ扇状地内の他の地下水と比較して、起源の多くが河川水であることを示しています。

斜面崩壊前の2011年6月のマップと比較すると、扇状地全体においては地下水の同位体比には顕著な変化はみられません。しかし、より小さいエリアの同位体比の変化について注目すると、2016年6月は河川の左岸域のごく河川に近い数地点の地下水の同位体比が上昇していることがわかりました。濁水の影響によって、河川水の影響が小さくなったために、水田水の影響が大きくなったことを示していると考えられます。さらに、モニタリングを継続すると、2017年以降は2011年と同じような値に戻っており、

長期的な濁水の影響はなかったこともわかってきました。

現在は、水田内や地面に浸透した後に地下水に到達するまでに同位体比がどのように変化するのかを、追加で検討しています。検討結果も踏まえて、図2に示した地下水の同位体比から地下水涵養源をより、正確に診断できるようなツールの開発に取り組む予定です。

文献

吉岡有美、伊藤真帆、中村公人、瀧本裕士、土原健雄 (2018) 酸素・水素安定同位体比からみた手取川扇状地の河川水-地下水の交流現象と地下水涵養源、地下水学会誌、60 (2) : 205-221

著者情報



吉岡有美 (島根大学学術研究院環境システム科学系助教) 2014年京都大学大学院農学研究科修了、博士 (農学)。鳥取大学農学部助教などを経て2019年より現職。

(2020年3月31日掲載)

花咲かクマさんといじわるクマさん？

— クマたちの種まきがサクラやサルナシの運命を左右する —

直江将司
(森林総合研究所)

1. 温暖化からの樹木の避難

今日では地球温暖化が急速に進んでおり、動植物への影響が懸念されています。特に、多くの生物の生息地であり、木材生産や炭素蓄積、防災などの点でも重要である森林において、森林を構成する樹木が温暖化にどのように応答するかが注目されています。樹木の種の分布範囲内でも温暖な場所では死亡率の上昇、成長量の減少、繁殖の失敗などが報告されており、かつての生息適地が温暖化によって適地でなくなっていることが分かっています。生物が温暖化から逃れる最も簡単で有力な手段は気温の低い高緯度、あるいは高標高の場所へ移動することです。野生植物の場合、移動は動物や風などを利用した種子の散布によって行われます。そのため、樹木が温暖化から逃れて移動できるかを判断する上では、種子が高緯度・高標高の場所にどれだけ散布されているかを評価する必要があります。

温暖化から逃れるために必要な移動距離は、緯度方向よりも標高方向のほうがはるかに短くなっています。例えば、100 m 標高の高い場所に移動すれば気温は約 0.65℃ 低くなるのに対し、北に向かって 100 km 移動しても約 1℃ しか低くなりません。そのため、標高方向の種子散布は樹木にとって、温暖化の影響から逃れるための最も効率的な移動手段といえます。

しかし、標高方向の種子散布を評価することは容易ではありません。既存の手法で評価しようとすると、1 個 1 個の散布種子について、山の中に無数に生えている木のなかから親木を見つけないといけないなど、非現実的な労力が必要でした。

そのため、これまで標高方向の種子散布は評価されてきませんでした。

2. 酸素安定同位体を用いることで、樹木の標高方向の移動が検出可能に

私はこの問題に対して、酸素安定同位体を用いることで解決できないかと考えました。これまで酸素安定同位体は生物の移動に関して、主に鳥類の渡りを調べる目的で使われていました。緯度によって降水の酸素安定同位体比は異なり、降水を利用する鳥類の羽根の酸素安定同位体比も変化します。この緯度による羽根の酸素安定同位体比の変化を利用することで、越冬地に渡ってきた鳥がどの緯度からやって来たのかを評価する研究が行われていました。そこで私は緯度によって酸素安定同位体比が変化するのであれば標高によっても変化するのではないか、また樹木の種子に適用できれば、種子がどの標高からやってきたのかわかるため、標高方向の種子散布が評価できるのではないかと考えました。この方法では散布種子の親木自体を特定する必要がないため、既存の方法と比べて非常に簡単に標高方向の種子散布を評価できます。

そこで同位体の専門家である地球研の陀安一郎先生（当時は京都大学生態学研究センター）に相談して、様々な標高で樹木の種子を採集し、種子の酸素安定同位体比を計測してみることにしました。すると多くの樹木で、標高が高くなるほどそこに生育する樹木が生産する種子の酸素安定同位体比が小さくなるという関係が見つかりました (Naoe et al. 2016a)。この関係を検量線として利

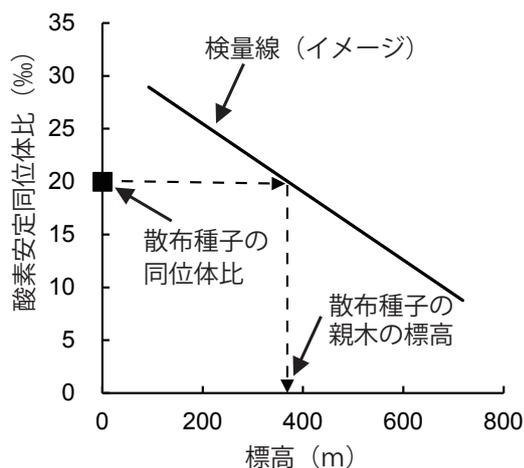


図1. 散布されていない種子の酸素安定同位体比と標高の関係

用することで、散布種子の酸素安定同位体比から、親木の生えている標高を特定することができます(図1)。そして、「種子が散布された標高(つまり、散布種子を拾った標高)」と「親木の生えている標高」の差から、種子の移動した標高差、すなわち、標高方向の種子散布距離を求めることが可能になりました。

3. クマたちはサクラのタネを高標高の場所に運ぶことで、サクラの避難を助けていた

さて、酸素安定同位体を用いることで標高方向の種子散布距離を求められるようになりましたが、どのような樹木を対象にするのが良いでしょうか？ここでは動物による種子散布、特に周食散布に注目しました¹⁾。周食散布とは、鳥類や哺乳類などの動物が種子の周りの果肉を食べる目的で種子ごと飲み込み、種子を糞として排出することで散布するというものです。動物は風などに比べて動きが複雑なため、どこに種子が散布されるか予想がつかないところがあります。ただ、せっかく標高方向の種子散布を評価できるようになっても、動物の行動圏が小さくて、種子をごく近所に散布しているようでは面白くありません。そこで行動圏が数千haと広大なツキノワグマの種子散布を評価したいと考え、ツキノワグマを中心に哺乳類を研究されている東京農工大学の小池伸介



写真1. 満開のカスミザクラ

先生に相談しました。その結果、東京農業大学の山崎晃司先生(当時は茨城県立博物館)、酪農学園大学の佐藤喜和先生(当時は日本大学)や学生さんの協力を得て、東京都の奥多摩地方でツキノワグマなど哺乳類の糞から種子を採取してもらえることになりました。糞からはさまざまな樹木の種子が採集されますが、まずは哺乳類の好物である野生の桜、カスミザクラを対象にしました(写真1)²⁾。

2010年から2013年にかけて、標高550~1,650mにおよぶ調査ルート(総延長16km)で哺乳類の糞を採取してもらいました。その結果、カスミザクラの種子を散布していた主な哺乳類は、散布数の多い順からツキノワグマ、テン(イタチの仲間)、アナグマ、ニホンザルで、それぞれ全体の80.3、19.6、0.07、0.03%を占めていました。

ツキノワグマとテンについて、糞から抽出したカスミザクラ種子の酸素安定同位体比から親木の標高を求め、糞の回収地点の標高との差から、標高方向の種子散布距離を求めました(図2)。その結果、ツキノワグマは平均で+307m、テンは平均で+193m、高標高の場所に偏って種子を散布していることが分かりました。この散布距離を気温減率(標高が100m高くなるたびに気温が0.65℃下がる)で換算すると、ツキノワグマは2℃、テンは1.3℃気温の低い場所にカスミザクラを移動させたことになります。地球温暖化が最も進ん

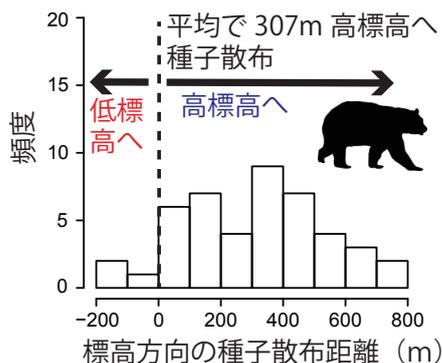


図 2. ツキノワグマによる標高方向の種子散布 (Naoe et al. 2016b)

だ場合の予想では 2100 年までの気温上昇は 4.8℃ ですから、カスミザクラは 2100 年までにツキノワグマに 3 回、もしくはテンに 4 回種子散布されれば温暖化から逃れられると考えられました。カスミザクラはサクラ亜属 *Cerasus* に分類され、同亜属で類似した生態を持つヤマザクラ、オオヤマザクラ、エドヒガンなどでも同様なパターンが期待されます。今回の研究から、ツキノワグマが野生のサクラを温暖化の危機から守る上で重要な役割を果たしていることが分かりました。

ツキノワグマ、テンによる種子散布が高標高の場所に偏っていた原因としては、エサとなる植物の開葉や結実の時期が影響していると考えられました。春から夏にかけて、植物の開葉や結実は山麓から山頂方向にかけて進みます。また春から夏にかけて、ツキノワグマやテンは植物の若葉やサクラの果実を多く利用します (図 3a)。そのため、ツキノワグマとテンはこれらのエサ植物を追いかけて山麓から山頂方向に移動し、その途中で糞をすることで高標高の場所に偏って種子を散布していたものと考えられました。

4. クマたちはサルナシのタネを標高の低い場所に運ぶことで、サルナシの避難を妨げていた

さて、夏に結実するカスミザクラでは、哺乳類がエサ植物を追いかけて山を登った結果、種子を高標高の場所に偏って散布していることがみえてきました。一方で、秋から冬には植物の紅葉・落

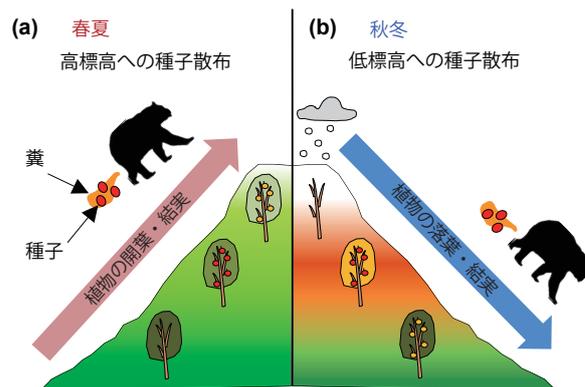


図 3. 哺乳類による種子散布 (a) 春夏では山麓から山頂にかけて植物の開葉や結実が進み、それを哺乳類が追いかけた結果、種子が高標高に散布されます。(b) 秋冬では山頂から山麓にかけて植物の落葉や結実が進み、種子が低標高に散布されることが予想されます。(Naoe et al. 2019)

葉や結実は、春夏とは逆に山頂から山麓方向に進みます。もし哺乳類がこれらのエサ植物の季節変化を追いかけて低標高へ移動するのであれば、秋から冬に結実する樹木の種子は低標高の場所に散布されることが予想されます (図 3b)。

この仮説を検証するため、秋に結実するキウイフルーツの仲間、サルナシを対象に、哺乳類による標高方向の種子散布を調べることにしました (写真 2)³⁾。

カスミザクラの時と同様に奥多摩で採取された哺乳類の糞を利用し、糞中のサルナシ種子を取り出しました。種子を散布していた主な哺乳類は、散布数の多い順からタヌキ、ツキノワグマ、ニホンザル、テンの 4 種で、それぞれ全体の 36.0、29.9、20.8、13.3% を占めていました (図 3a)。標



写真 2. サルナシの果実

高方向の種子散布の結果は、カスミザクラとは対照的なものでした。タヌキを除く哺乳類は全てサルナシを低標高の場所に偏って種子散布しており、その平均散布距離はツキノワグマでは平均で-393.1 m、ニホンザルでは-98.5 m、テンでは-245.3 mでした。タヌキでは、平均で+4.5 m、高標高の場所に散布していました。

研究結果は、秋冬結実の樹木では動物によって種子が低標高の場所に散布されるという仮説を支持するものでした。温暖化が進んでいるにも関わらず、より気温の高い低標高の場所に散布された種子は更新に失敗してしまうでしょう。サルナシの種子の一部は高標高の場所にも散布されていましたが、サクラなど春夏結実の樹木ではよりたくさんの種子が高標高に散布されてサルナシとの競合が発生することを考えると、サルナシの高標高の場所への種子散布は生息地の移動にはあまり有効ではないと考えられました。

面白いことに、タヌキはわずかですが高標高の場所に偏って種子散布していました。タヌキはコミュニケーションの手段として複数個体で糞をする場所を共有することが知られています（ため糞といいます）。そのため、コミュニケーションを維持するためにエサが少なくなっても高標高の場所を訪れているのかもしれません。

5. まとめ：温暖化が進むなかで、動物たちの種まきが果たす役割

今回、哺乳類によってカスミザクラでは高標高の場所に、サルナシでは低標高の場所に種子散布されていることが分かってきました。カスミザクラにとって哺乳類はありがたい存在、サルナシにとっては迷惑な存在ということになるのでしょうか？実はそんなに単純でもありません。標高方向の種子散布は諸刃の剣で、その果たす役割は気候変動の状況によって異なります。温暖化が進むなかでは高標高の場所への種子散布は樹木にとって有利、低標高の場所への散布は不利に働きます。一方で、寒冷化が進むと高標高への散布はより寒

いところに運ばれるので不利となり、低標高への散布は逆に有利に働くでしょう。地球では、これまで温暖化と寒冷化を繰り返してきたことを考えると、行動の異なる多様な動物に種子散布してもらうことが樹木種の長期的な存続に重要と言えます。

さて、日本を含む東アジアや欧米のような温帯地域では、森林を構成する樹木の多くは動物によって種子散布されます。このなかにはブナやナラなど、ドングリをつける樹木も含まれます。これらの樹木のほとんどは秋から冬に結実するため、サルナシのように動物によって低標高の場所に偏って種子散布されている可能性があります。温暖化が進むなか、森林の種構成や多様性、またその生態系機能がどう変化するか予測するためにも、標高方向の種子散布をさまざまな樹木を対象に調べていく必要があります。

用語の説明

- 1) 動物による種子散布：植物にとって、種子散布は唯一の移動手段です。植物は種子の散布に、風や水流、動物などを利用することが知られています。樹木でよくみられる動物散布には、1) 周食散布、2) 動物が種子（ドングリ）を貯えた後に食べそびれる貯食散布があります。いずれも、鳥類と哺乳類が重要な種子散布動物と考えられています。キウイフルーツやブドウ、リンゴなど果物とされるものは全て周食散布植物です。周食散布は温帯林では35～71%の樹木で見られ、種数において最もよく見られる散布タイプです。ブナやナラ類、カシ類は貯食散布植物です。貯食散布は種数は少ないですが、森林で優占する樹木に多くみられます。
- 2) カスミザクラ（霞桜、*Prunus verecunda*)：北海道から九州にかけて、また朝鮮半島や中国東部の山地に自生する野生のサクラです。
- 3) サルナシ（猿梨、*Actinidia arguta*)：国内では北海道から九州、国外では朝鮮半島や中国

北部の山地に自生するマタタビ属の1種で、コクワとも呼ばれます。果実は同じ仲間のキウイフルーツを小さくしたようなもので、人が食べても大変美味しく、哺乳類によく食べられます。

K, Nakajima A, Sato Y, Yamazaki K, Kiyokawa H, Koike S (2019) Downhill seed dispersal by temperate mammals: a potential threat to plant escape from global warming. *Scientific Reports* 9: 14932.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-51376-6>

文献

Naoe S, Tayasu I, Masaki T, Koike S (2016a) Negative correlation between altitudes and oxygen isotope ratios of seeds: exploring its applicability to assess vertical seed dispersal. *Ecology and Evolution* 6: 6,817–6,823.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2380>

Naoe S, Tayasu I, Sakai Y, Masaki T, Kobayashi K, Nakajima A, Sato Y, Yamazaki K, Kiyokawa H, Koike S (2016b) Mountain-climbing bears protect cherry species from global warming through vertical seed dispersal. *Current Biology* 26: R315-R316.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.03.002>

Naoe S, Tayasu I, Sakai Y, Masaki T, Kobayashi

著者情報



直江将司（森林総合研究所東北支所森林生態研究グループ主任研究員）2012年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。2012年東京大学農学生命科学研究科研究員、特任助教、2013年森林総合研究所非常勤特別研究員などを経て2017年より現職。

（2020年3月31日掲載）

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

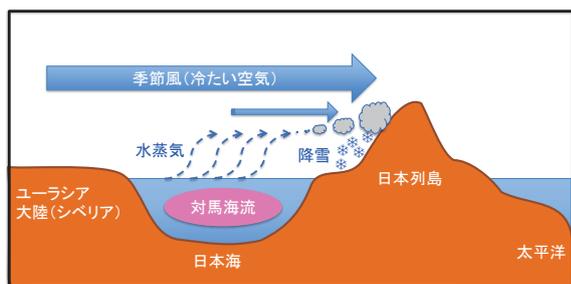


図1. 日本海側に雪が降る仕組み（十日町市のホームページを参考に筆者が作図）

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、こちらをご参照ください。

<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PM2.5¹⁾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²⁾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}S 、 ^{34}S 、 ^{33}S 、 ^{36}S と表記されます）。そのうち、存在比率が多い、 ^{32}S と ^{34}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}S に対する ^{34}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³⁾。 $\delta^{34}\text{S}$ 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。

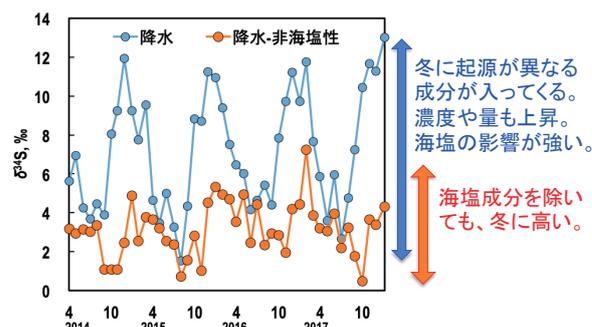


図2. 加治川試験地（新発田市）での硫黄同位体比の季節変化

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

- 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 (δ) 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）

コケ、環境を語る

— 一人里離れた高山でさえ、汚染が進行している？ —

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—すなわち、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、世のなかには大人の事情もあります。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. コケの同位体で何がわかる？

コケが大気汚染の指標となるとして…では、コケに含まれる同位体を分析して、いったいどんなことがわかるのでしょうか？ここでは、海外からやってくる大気汚染、いわゆる「越境大気汚染」に注目してみましよう。海外からやってくる大気汚染物質の同位体比は日本のものと少し値が異なっている場合があります。越境大気汚染の影響が大きい地域に生えているコケではこれらの汚染物質を高い割合で吸収します。そのため、その同位体比も海外の値に近づくようになります。つまり、コケの同位体比を分析することで、その地域における越境大気汚染の影響を評価できるのです。

3. 山の窒素汚染

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が、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、重要な元素ゆえに、その影響力は計り知れません。

越境由来の大気汚染にはNO_xやアンモニア類などの窒素を含む化合物が多く含まれています。そこで、窒素汚染が進行しつつある現在、その実態を明らかにすることが強く求められています。とりわけ、懸念されるのが山岳地域への影響です。

人里離れた高山などの山岳では窒素の供給が少ない状態で維持されているため、窒素を含む越境大気汚染の影響を受けやすいのです。

幸いなことに、山にはコケが豊富にあり、環境を評価するためのコケサンプルに事欠きません。そこで、私はコケに含まれる窒素の安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) に着目して、山岳地域の窒素汚染の評価を試みました。なお、 $\delta^{15}\text{N}$ は、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点では、コケの窒素安定同位体比も高くなりそうです。

4. コケが教えてくれたこと

本州中部の「八ヶ岳」の東西南北の斜面（合計9本のルート）で山麓から山頂にかけてコケ（イワダレゴケ）を採取し、このコケに含まれる $\delta^{15}\text{N}$ を分析したところ、興味深いことがわかりました（図1）。

- (1) 標高が高くなればなるほど、コケの $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる
- (2) 高山のコケの $\delta^{15}\text{N}$ の値は、越境由来の $\delta^{15}\text{N}$ の値に近くなる
- (3) この傾向は山の西斜面で顕著になる

山岳の自然環境やアジア大陸からの越境大気汚染の移動経路を踏まえれば、(1) ~ (3) の結果は、次のように解釈できます。

- ・都市から離れ、国内の汚染物質の影響が小さい標高が高い地域では、越境由来の窒素化合物の影響が大きい。
- ・とくに高山では樹木が発達しないために越境

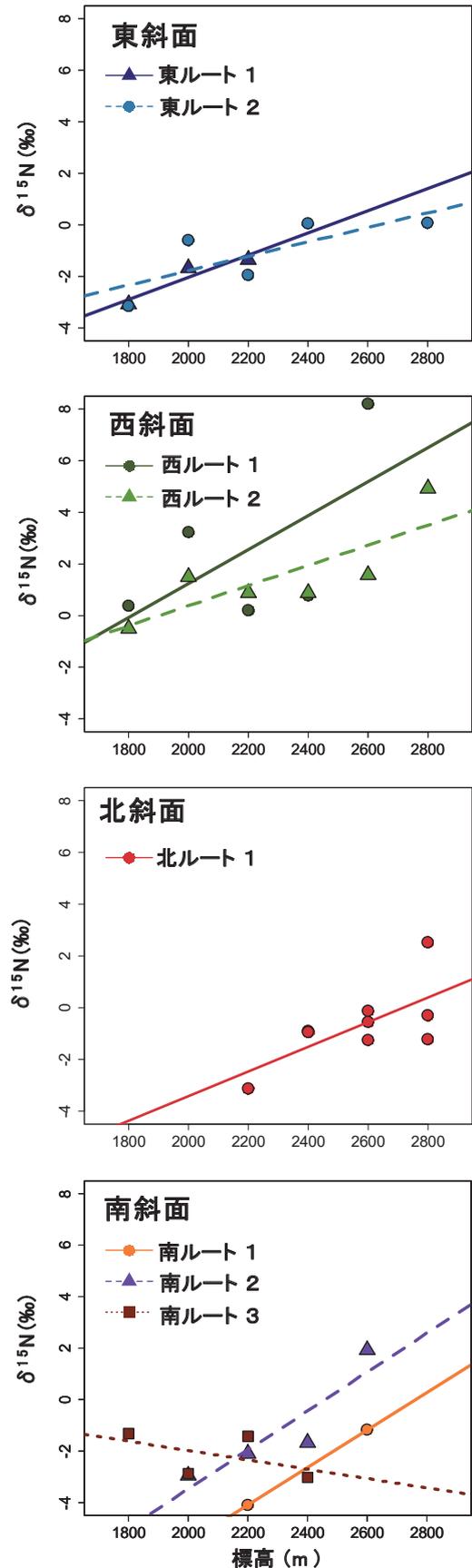


図1. 標高に沿ったコケの $\delta^{15}\text{N}$ の変化
標高に沿って $\delta^{15}\text{N}$ が上昇する。Oishi (2019) の Fig. 4 を改変。



図 2. 越境大気汚染を教えてくれるコケ
コケに含まれる窒素安定同位体比を分析することで、越境大気汚染が高山生態系に与える影響を評価することができる

由来の大気汚染物質がコケに直に降り注ぎ、コケの $\delta^{15}\text{N}$ も値もこれらの物質に近くなる。

- 大陸由来の越境大気汚染は西風によって日本にやってくるため、山の西斜面でその影響が顕著に表れる。

以上の結果より、コケの窒素安定同位体比を分析することで、人里をはるか離れた高山においてさえ、窒素汚染が進行しつつあることが明らかに

なつたのです(図2)。今後もこの傾向が続くのか、その結果、高山の生態系に何か変化が現れるのか…定期的にコケを使った環境評価をすることで、新しい知見が得られると期待されます。

文献

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>

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『苔三昧 もこもこウルウル寺めぐり』『苔登山 もののけの森でコケ探し (いずれも岩波書店)』『コケはなぜに美しい (NHK 出版)』『じっくり観察 よくわかるコケ図鑑 (ナツメ社)』など。

(2020 年 3 月 31 日掲載)

骨が記憶する過去の生態系

— 同位体分析による動物の食性復元研究 —

松 林 順

（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

1. 過去の遺物と同位体

普段私たちが生活しているこの場所では、遠い昔にはどのような生き物がどのような生活を送っていたのでしょうか。過去を生態系の姿を知るといことは、研究者にとって最も挑戦的な研究テーマの一つです。本稿で紹介する同位体食性分析は、そんな過去の生物の暮らしを紐解くうえで重要な役割を果たします。

同じ原子番号の原子のうち、中性子の数が異なるために重さの異なる原子を同位体と呼びます。同位体は化学的な性質は同じですが、化学反応の速度にわずかな違いがあります。このため、生物の光合成型の違いや食物連鎖の段階など、生物の生理機構や生態によって同位体比が変動します。したがって、対象動物の体の同位体比とその餌となる生物の同位体比を比較することで、その動物が何を食べていたかを予測することができます。このように同位体比を用いて動物の食べ物（食性）を調べる手法を同位体食性分析といいます。

同位体として保存されている食べ物の記録は、過去の生物の情報を得たいときに役立ちます。現代の動物では、胃の内容物や糞中の不消化物からその食性を調べることができます。しかし、過去の動物ではこうした調査ができません。一方で、同位体分析は過去の遺跡から出土した動物の骨でも適用できるというメリットがあります。骨の主要な構成成分は、リン酸カルシウム的一种であるハイドロキシアパタイトですが、タンパク質であるコラーゲンも20%ほど含まれています。コラーゲンには炭素や窒素といった食性の指標となる同位体元素が多く含まれているので、遺跡から出土

した骨であっても、このコラーゲンが十分量残っていれば同位体を使った食性分析が可能です。

以下では、私がこれまでに実施した動物遺骨の同位体食性分析の結果と、そこから明らかになった過去の日本の生態系について解説します。

2. ヒグマの食性の歴史的变化

ヒグマは北半球の広範囲に分布する大型の雑食動物です。雑食動物の中でも、ヒグマの食性は「日和見的な雑食性」と呼ばれており、食物環境の変化に応じて食性を大きく変化させるという特徴があります。例えば、大型のシカなどの仲間やサケが多く分布している北アメリカでは、ヒグマは動物性の食物を多く利用しています。

一方、日本の北海道にもヒグマが生活しています。しかし、日本のヒグマは動物質の餌はあまり食べておらず、草や木の実といった植物質中心の食生活であることが知られています。北海道でもエゾシカやサケといったヒグマの餌となりそうな動物が多く分布しているのに、なぜ北海道のヒグマは植物中心の食生活を送っているのでしょうか？昔から植物質中心だったのか、何らかの理由で食性が変化したのか、いくつかの可能性が考えられます。

そこで、この研究では過去の遺跡から出土したヒグマの骨を北海道中から集めて、縄文時代から現代まで約2000年間のヒグマの食性の変化を炭素・窒素およびイオウの安定同位体分析によって調べました。

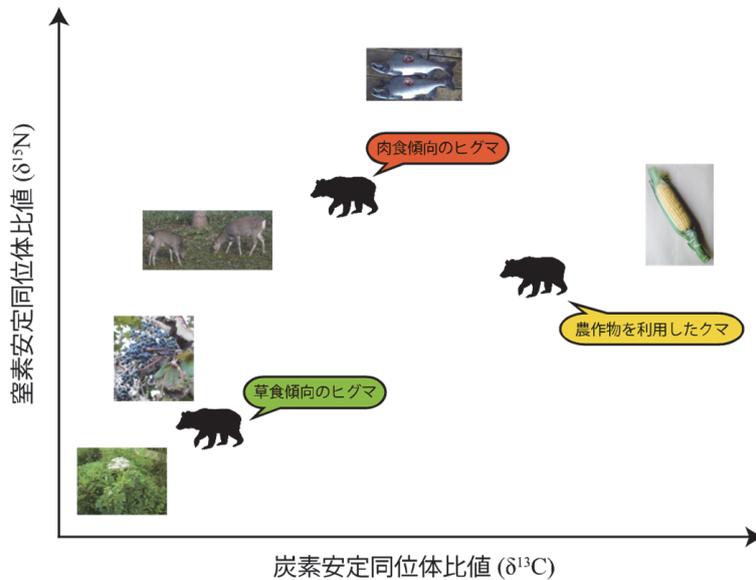


図 1. ヒグマの主要な餌資源の炭素・窒素同位体比。ヒグマの値は、多く利用した餌の値に近づく。

炭素安定同位体比は、一般的な植物（C3 植物）と C4 植物であるトウモロコシで大きく値が異なります（図 1）。一方、窒素の安定同位体比は、植物→草食動物→肉食動物の順で上昇していくという特徴があり、海由来の栄養であるサケではさらに高い値となります（図 2）。また、イオウの安定同位体比は、陸域の資源と海由来の資源で大きく値が異なります。したがって、この 3 つの同位体元素を利用することで、ヒグマの主要な餌資源である C3 植物、陸上動物類、サケ、トウモロコシをどの程度利用していたかを正確に推定することができます。この手法を使って昔から現在ま

でのヒグマの食性の変化を復元することで「なぜ北海道のヒグマは草食傾向なのか」という疑問に答えることを目標としました。

分析の結果、ヒグマの食性は時代経過に伴って肉食傾向から草食傾向に大きく変化したことが判明しました。さらに、このヒグマの大規模な食性の変化は、北海道で開発が本格化した明治以降に急速に進行したことが明らかになりました。北海道の東部地域では、サケの利用が開発開始前の 19% から、開発完了後の時代には 8% まで減少していました。また、エゾシカなどの陸上動物の利用は 64% から 8% にまで減少していました（図 2）。

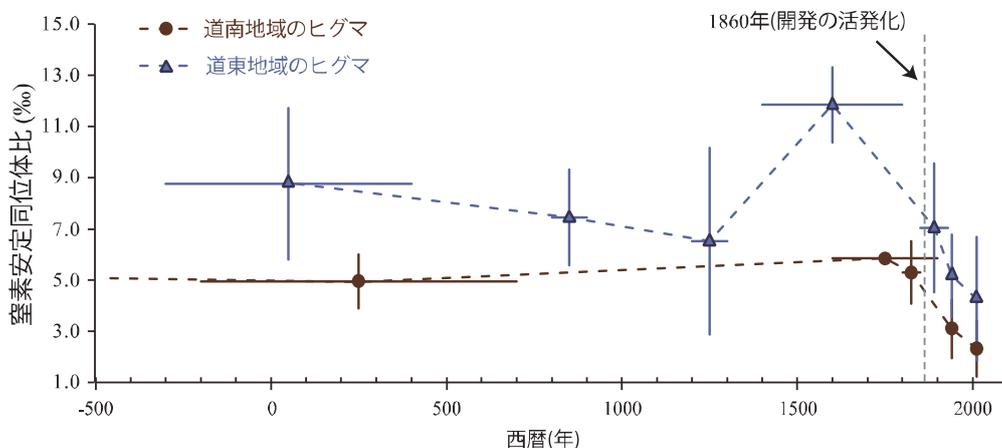


図 2. 動物質食物利用の指標となる、窒素同位体比の時間変化。1860 年前後を境に窒素同位体比が減少し始めたことが分かる。

本研究の成果から、北海道ではヒグマの食性の変化がおよそ100～200年前に始まり、それ以降急速に進行したことが分かりました。さらに、食性の変化が始まった時期は、開発が活発化した明治の始まりと一致しています。それでは、人の開発行為がどのようにヒグマの食性に影響を与えたのでしょうか。

サケの利用を減少させた人為的な要因としては、沿岸部でのサケ漁業やダムなどの工作物の設置が考えられます。近年、人工孵化事業などによってサケの資源量自体は増加しています。しかし、河川に戻ってきたサケのほとんど沿岸部で捕獲され、また河川に遡った一部のサケもダムや堰に遡上を阻まれ、下流で産卵してしまいます。このため、主に山の中で生活しているヒグマはサケを利用しにくくなったと考えられます。

陸上動物の利用の減少に影響を与えた可能性があるのが、20世紀初頭に起きたエゾオオカミの絶滅です。ヒグマが捕食する陸上動物は大半がエゾシカです。しかし、エゾシカはヒグマよりも俊敏なので、大人のエゾシカを捕まえることは簡単ではありません。また、エゾシカが自然死するのは真冬がほとんどで、この時期に冬眠中のヒグマはその死骸を利用することもできません。

一方、海外の研究では、オオカミが群れで狩りをしたシカの死骸をヒグマが横取りする事例が報告されています。同様に、北海道においてもエゾオオカミが仕留めたエゾシカを横取りすることで、ヒグマが多量のシカを利用できていた可能性が考えられます。

このように、同位体分析によって過去と現在の動物の食性を比較することで、過去の生態系の変化を明らかにできる可能性があります。人による開発や気候変動などの影響によって動物の暮らしがどのように変化したかを調べるうえで、同位体分析はとても便利なツールであるといえます。

3. 絶滅種エゾオオカミの食性復元

先ほどの研究では、かつて北海道に生息してお

り20世紀初頭に絶滅したエゾオオカミの話題がでました。このエゾオオカミは、生態学的な調査がほとんどなされないまま絶滅してしまったため、彼らが当時の北海道の生態系でどのような役割を果たしていたかは全くと言っていいほど明らかになっていません。

世界的にオオカミの仲間は、多くが有蹄類などの大型陸上哺乳類を捕食しています。しかし、カナダ沿岸の一部地域では、海産物に強く依存している個体群が存在します。これらの個体群は「海辺のオオカミ」と呼ばれ、泳ぎが得意であり、サケや海獣類、貝類を食べるなど、通常のオオカミとは異なる独特の生態を持っています。北海道はカナダと環境が似ており、秋になると多くのサケが河川を遡上します。従って、エゾオオカミもカナダの海辺のオオカミと同様に、サケなどの海産物を食べていた可能性が考えられます。そこで、本研究ではエゾオオカミの食性を復元することを目的として、博物館などに所蔵されているエゾオオカミの骨を使って同位体食性分析を実施しました。

エゾオオカミの骨は、絶滅直前に収集された標本が北海道大学植物園に数点所蔵されています。また、縄文やアイヌの遺跡からも僅かながらエゾオオカミの骨が出土しています。私たちは、北海道内の複数の博物館と協力して、7個体分のエゾオオカミの骨試料を収集しました（図3）。また、



図3. 苫小牧市美術博物館に展示されているエゾオオカミの骨標本。

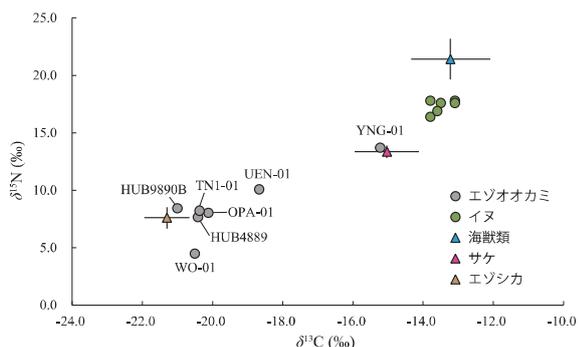


図4. エゾオオカミ（及び飼いイヌ）とその餌資源の炭素・窒素安定同位体比。

彼らの餌となる海獣類・エゾシカなどの骨も併せて収集し、炭素・窒素安定同位体比の測定を行いました（図4）。

分析の結果、7個体中5個体は栄養源のほぼ100%を陸上動物に依存していました。しかし、残りの2個体では、海産物がそれぞれ栄養源の33.1%、78.6%を占めていました。海産物の中では、サケの寄与率が特に高く、それぞれ31.1%、44.7%と推定されました。

本研究の結果から、一部のエゾオオカミ個体群では、海産物に強く依存した食性を持っていたことが明らかになりました。彼らが自然状態で海産物を多く利用していたとすれば、北海道にも「海辺のオオカミ」が存在していたこととなります。海産物を利用するオオカミは、草食動物の個体群を調整するだけでなく、海由来の栄養源を陸域へと運搬する役割を果たします。カナダの海辺のオオカミは、行動やゲノムDNAも通常のオオカミとは異なっていることが分かっていますが、エゾオオカミでも一部の個体群ではこのように特殊な生態を持っていたのかもしれませんが。

ただし、エゾオオカミが自然状態以外で海産物を利用した可能性も考えられます。それは、ヒトによる飼育です。当時、ヒトに飼育されていたイヌは、魚や海獣などの海産物をほぼ100%与えられていたことが分かっています（図1）、これらの個体が一生を通じて飼育されていた可能性は

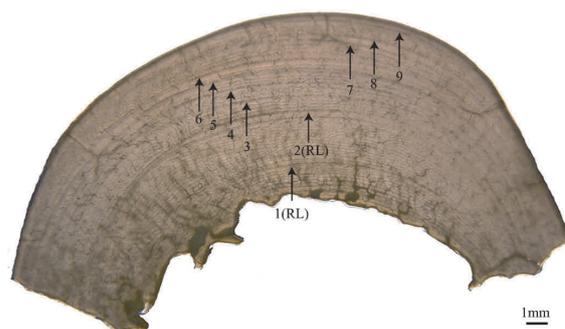


図5. ヒグマの大腿骨の横断切片の写真。複数の成長停止線（図中の矢印）が確認できる。

ありません。ただし、ある程度成長してから生け捕りにされて、数年間海産物を与えて飼育された可能性は除外できません。飼育された個体かどうかを区別するには、さらなる研究が必要です。

4. 今後の展望

過去の人や動物の骨を使った同位体分析では、10年以上の長期間における平均的な食性の情報が得られるというのが、同位体分析の分野における一般的な考えでした。しかし、最近の私たちの研究から、大腿骨のように大きな負荷がかかる上部骨においては、成長方向に分割して同位体分析を実施することで、対象動物の食性の時間的変化が復元できることが分かってきました（図5）。この方法を使えば、動物の成長に従ってその食性がどのように変化してきたかということや、対象動物の餌となる生物の資源量の年変動がその動物の食性にどのような影響を及ぼすかといった、これまではできなかった分析が可能になります。

このように、新しい動物に同位体食性分析を適用するだけでなく、同位体分析の新しい活用法を見出す研究にも力を入れて、今後この分野の研究がより進展するように尽力していきたいです。

文献

Matsubayashi J, Morimoto J, Tayasu I, Mano T, Nakajima M, Takahashi O, Kobayashi K, Nakamura F (2015) Major decline in marine and terrestrial animal consumption by

brown bears (*Ursus arctos*). Scientific Reports 5: 9203.

<https://doi.org/10.1038/srep09203>.

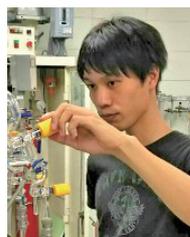
Matsubayashi J, Ohta T, Takahashi O, Tayasu I (2017) Reconstruction of the extinct Ezo wolf's diet. Journal of Zoology 302: 88–93.

<https://doi.org/10.1111/jzo.12436>.

Matsubayashi J, Tayasu I (2019) Collagen turnover and isotopic records in cortical bone. Journal of Archaeological Science 106: 37–44.

<https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.03.010>

著者情報



松林 順 (国立研究開発法人海洋研究開発機構 JSPS 外来研究員)。2015 年京都大学大学院理学研究科修了、博士 (理学)。2015 年総合地球環境学研究所研究推進支援員を経て 2017 年より現職。

(2020 年 3 月 31 日掲載)