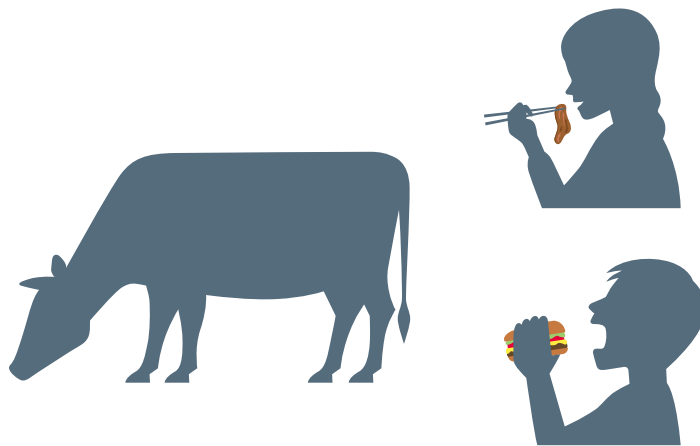




シロアリ塚(高さ約3m)。熱帯の大型土壌動物の総重量では1/3を超えることもあるシロアリは、細菌やきのこの力を助けに、堅い木材や落葉、枯れ草、土壌までを餌にする。その糞とアリ塚の土は、微生物や植物に使いやすい資源となる。

【Perspectiveより】

撮影：兵藤不二夫(岡山大学) 撮影地：コートジボワール

今号テーマ

地球というわたしたち

生命の性質は、地球という惑星の性質と深く関わっています。地球と生きものの関係を見れば、火山活動などの激しい動きが絶滅を招くこともある一方、生物は地球というシステムを上手に利用して続いてきたことがわかります。パースペクティブでは総合地球環境学研究所の陀安一郎先生が、元素の同位体から生命と地球の物質循環を語ります。紙工作「絶やすのはたやすい絶滅動物」はフクロオオカミ。肉食の有袋類という独特の見た目から、家畜に害をなすと恐れられ絶滅に追い込まれました。一方、催しの報告は、ペンギンのヒナの誕生を手助けするアドベンチャーワールドの人々の物語です。生きものは地球の一部でありながら、地球を大きく作り替えてきました。今のところ地球にしか存在しない生命としてどう生きるか、考え続けたいと思います。

もくじ

PERSPECTIVE

地球と生きものをめぐる元素

陀安一郎 総合地球環境学研究所

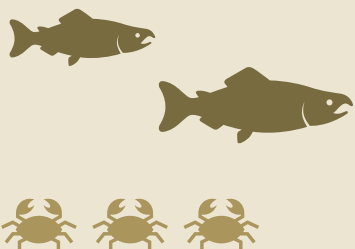
PAPER CRAFT

絶やすのはたやすい消えた動物 フクロオオカミ

JT生命誌研究館

REPORT

ペンギン誕生! その現場で起こっていること —スタッフ後記



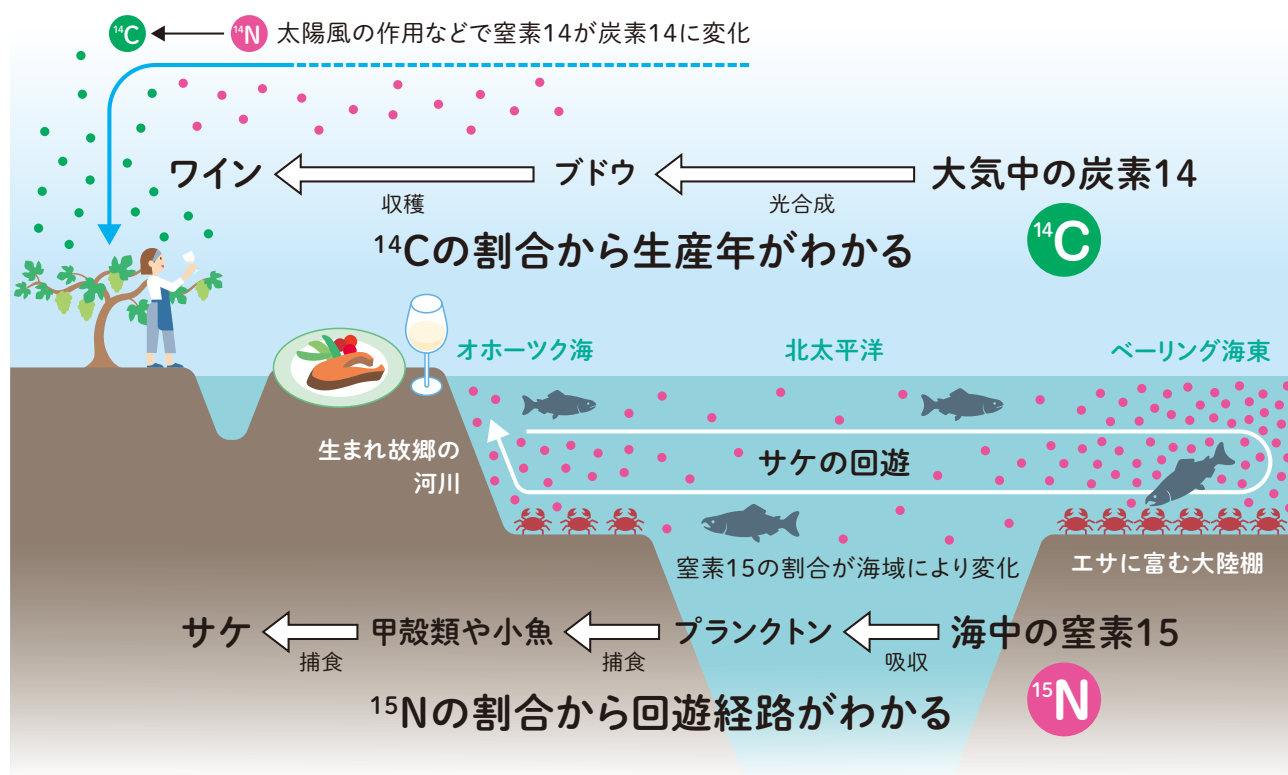
地球というわたしたち

〈物質の循環と生きもの〉

地球上の生きものは、一つの大気や海の中で続いてきました。火山活動が作りだす鉱物や大気の成分は、生物に取り込まれ食物連鎖を通してヒトの体になります。地域から地域へ、無生物から生物へ、常に物質が循環しているのが地球であり、生きものは代謝することでその循環に参加しています。わたしたちは海や砂漠や火山とどのようにつながっているのでしょうか。

原子の重さから生きものの履歴を探る

地球の物質を構成する原子の中には、同じ元素でも原子一個あたりの重さが少しだけ異なる「同位体」という原子が存在します。物質に含まれる同位体の量には、その物質が成立した時代や場所の痕跡が残っていることがわかりました。痕跡をもつのは私たち生きものも同じです。同位体比から地球と生命の物質循環を探る研究を見てみましょう。



地球と生きものをめぐる元素

陀安一郎

総合地球環境学研究所



CHAPTER

- | | |
|------------------|----------------|
| 1. 安定な原子と壊れる原子 | 2. 地球で一つの海と大気 |
| 3. 食べ物から見える生態系 | 4. 生物の代謝も物質循環 |
| 5. 水はどこから来るのか | 6. 元素は時間と場所を映す |
| 7. 同位体研究への尽きない興味 | |
-

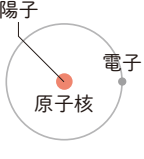
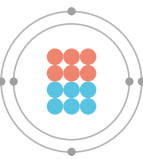
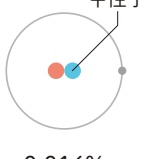
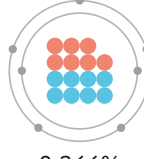
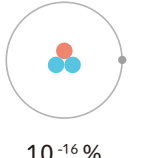
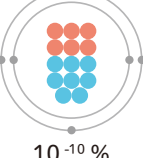
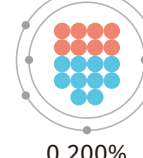
1. 安定な原子と壊れる原子

地球で見つかっている元素は100種類を超えます。物質を構成する原子の中には、元素としては同じ性質をもっている、原子一個あたりの重さが他と異なるものが混じっていることがあるのです。同じ元素でも重さが異なる原子どうしを「同位体」と呼びます。

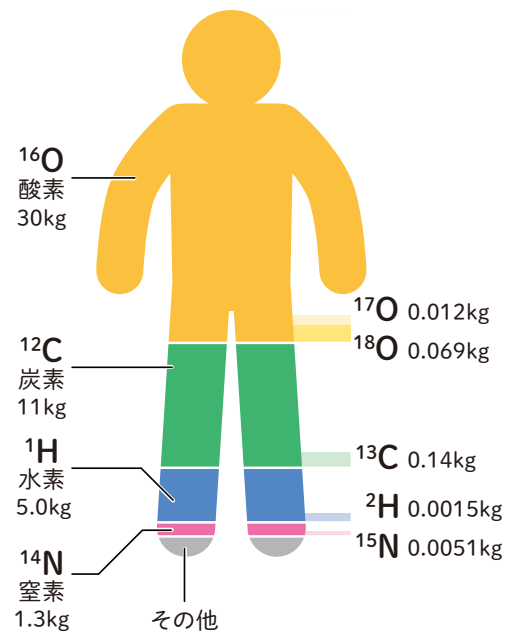
原子核は、陽子と中性子で構成されています（図1）。この2つの総和が原子の重さを表す「質量数」で、元素記号の左上に表記されます。原子の元素としての性質は陽子数によって決まりますが、重さが異なる原子は、その性質に影響を与えない中性子の数が違います。例えば ^2H は、 ^1H よりも「重い」水素なのです。

私たちの体にもさまざまな原子の同位体が含まれています（図1）。生物の主成分である水と有機物は、炭素C、水素H、窒素N、酸素O、リンP、イオウSからなりますが、リンを除いて複数の同位体が存在するのです。他にも、生物に微量に含まれるカルシウムや鉄、その他の鉱物やガス状の元素にも同位体が存在します。

同位体の構成と存在比

水素	炭素	窒素	酸素
^1H  99.984% 安定	^{12}C  98.894% 安定	^{14}N  99.634% 安定	^{16}O  99.762% 安定
^2H  0.016% 安定	^{13}C  1.106% 安定	^{15}N  0.366% 安定	^{17}O  0.038% 安定
^3H  $10^{-16}\%$ 不安定	^{14}C  $10^{-10}\%$ 不安定		^{18}O  0.200% 安定

ヒトの中の同位体



(図1) 同位体の種類とヒトの中の同位体

同じ元素でも中性子の数が異なる原子を同位体と呼ぶ。安定なものを「安定同位体」、不安定で弱い放射能を出しながら崩壊する原子を「放射性同位体」と呼ぶ。自然界には同位体が一定の比率で存在し、ヒトの体にも含まれている。

安定同位体の存在比データ: Meija et al. 2016 *Pure and Applied Chemistry* 88(3) 265-291.

放射性同位体の存在比データ: 化学便覧 基礎編(丸善出版)

ヒトの同位体のデータ: 和田英太郎「Isotope person」(季刊「生命誌」60号より)



原子の中で安定して存在している同位体を「安定同位体」と呼びます。その種類は元素によりさまざま、酸素のように3つの安定同位体がある元素もあれば、リンのように1つしかない元素もあります。なぜこのような違いがあるのかは深遠な問いであり、宇宙科学の範疇かもしれません。現代の技術を使えば、原子の中性子の数を大幅に増やしたり減らしたりできますが、操作された原子の多くはすぐに崩壊してしまいます。つまり中性子は何個でもよいわけではなく、原子が形成されたビッグバン直後から今に至るまでに、ある程度安定な組み合わせが残ってきたのだと考えられます。

同位体の中には、すぐ壊れはしないものの不安定さをもち、長い時間を経て崩壊するものも存在します。これを「放射性同位体」と呼びます。原子が崩壊する際に放射線を出すことからこの名前があります。488億年という半減期(注)をもつルビジウムが、長い時間をかけて壊れる同位体の例です。また ^{14}C や ^3H のように、天然の核反応によって安定同位体が放射性同位体になる場合もあります。これらは今も新しく生まれ続けており、 ^{14}C は5730年、 ^3H は12.3年の半減期をもちます。

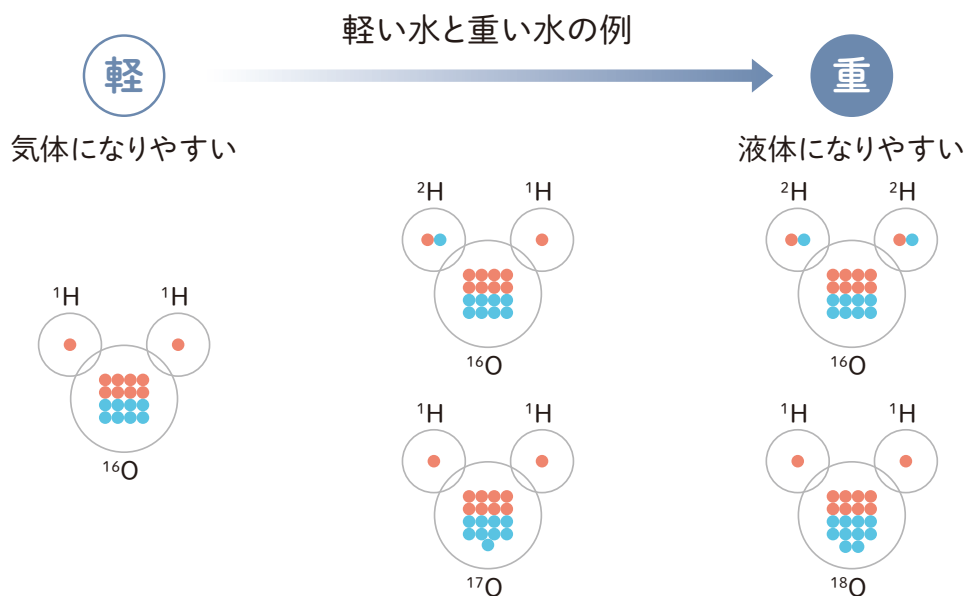
粒子が合体を繰り返して地球という惑星ができた際、この星の同位体の存在比（同位体比）は概ね固定したと考えられます。一方、隕石に含まれる有機物は地球の有機物には見られない高い ^{13}C の含有率を示すことなどから、宇宙の違う場所では地球と異なる原子の集まり方があることが伺えます。同位体から見れば、地球もある特徴をもった、宇宙の中の一地域ととらえることができるのです。

（注）半減期 放射性同位体の数が、原子の崩壊によって半分になるのに必要な時間。

2. 地球で一つの海と大気

地球全体での元素の同位体比は固定していても、地域や時代、物質ごとに細かく分けていくと、同位体比は少しずつ異なってきます。地球上で循環する限り原子としての総量は同じなので、どこかで分子の「軽い」同位体が増えれば、別のどこかで分子の「重い」同位体が増えます。私たち同位体研究者は、そのわずかな重さの変動を精密に測ることから、同位体比の変化をとらえます。ここから物質の動きを伴うさまざまな現象を追っているのです。

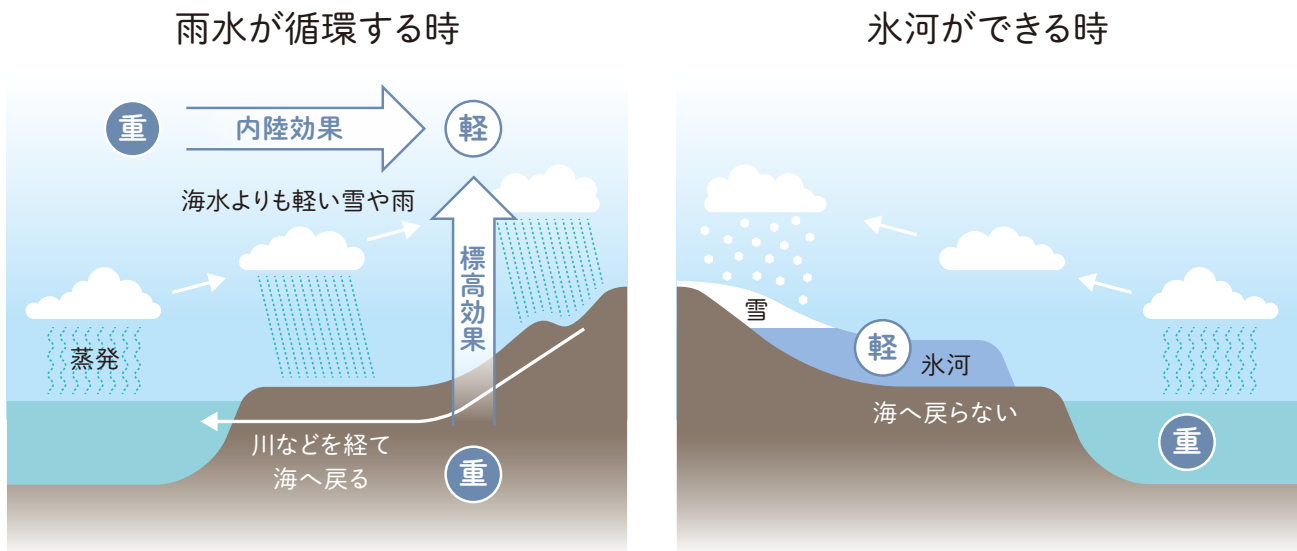
同位体は元素としての性質は同じなので、重い同位体が含まれていても物体や生物の機能に影響を与えることはありません。しかし原子や分子の単位で見ると、同位体によって少しだけ物理・化学的な反応のしやすさが異なります。例えば同じ H_2O で表記される水分子であっても、液体の水が水蒸気になる際は、軽い水分子のほうが水蒸気になりやすく、逆に水蒸気が液体の水になる際は、重い水分子のほうが液体になりやすいのです。つまり液体を構成する水よりも、水蒸気として大気や雲をつくる水の方が、軽い水素原子や酸素原子の構成割合が大きくなり、全体に軽くなります（図2）。このように、相の変化（液相・気相・固相）や化学反応を通して同位体比が変化することを「同位体分別」と呼びます。



（図2）軽い水分子と重い水分子の例

さまざまな同位体で構成された水分子の例。中性子（水色）の多い原子が含まれる水分子は重いため、気体になりにくく液体になりやすい。

海で生じた雲は、海水より軽い水でできています。それが雨や雪になる際は、重い水分子から先に雨になりますから、雨の水は海から離れて内陸に向かうほど、また標高が高い場所に向かうほど、海水よりさらに軽くなります（図3）。通常、陸で降った雨や雪は海に戻りますが、高山や極地に降った雪が解けずに氷河となった場合、その水は海に戻りませんから、海水には氷河が抜けた分、重い水分子が濃縮されます。つまり地球上に氷河が多く存在した寒い時代は、温暖な時代より海水が重くなるのです。



（図3）循環を通した水の重さの変化

（左）海の水が蒸発してできた雲の水蒸気の分子は、海の水より軽いものが多くなる。さらに雨や雪の分子は内陸へ向かうほど、また標高が高くなるほど軽くなる（内陸効果・標高効果）。

（右）海水よりも軽い分子でできた雪や雨が氷河となった場合、海へ戻らないため、氷河として蓄積した分、海水の分子は重いものが残る。そのため大量の氷河が存在した氷河期は、現在より海水が重かった。

南極の氷床の地下深くには、数十万年前から降り積もってきた氷河の層があります。ここに含まれる水分子の重さから、過去の地球上の氷河と海水の量のバランスを推測することができます。この調査から、地球が氷期と間氷期という気候変動を十万年周期で繰り返してきたことが明らかになりました。

大気同位体も常に動いています。CO₂を構成する炭素の中で、放射性同位体である¹⁴Cは、基本的には高層大気に影響を与える太陽活動によって、¹⁴Nが変性することで生まれ続けています。半減期が5730年ある¹⁴Cは、考古学の分野で数百年～6万年前くらいまでの、生物由来の遺物の年代測定に使われます。

実は人類が引き起こした核反応からも¹⁴Cが生成するのです。特に大気核実験が盛んに行われた米ソ冷戦時代は大量の¹⁴Cがばら撒かれ、ピーク時は自然状態の約2倍にまで達しました。1950年代以降に生きている生物はこれを取り込んでいるため、それ以前の¹⁴C年代測定の基準が使える

せん。核実験でできた大量の ^{14}C は、常に供給される太陽活動由来の ^{14}C とは違い一度きりしか発生しませんので、海に溶け込んだり植物が吸収したりすることで大気から減っていきます。1950年代以降はその変化速度が年代測定のものさしになるのです。例えばワインのように、製造後に密閉された状態で保管された食品は、その成分に含まれる ^{14}C 濃度を測定することで製造年代を推定することができます。

大気 CO_2 の炭素の安定同位体比も、同じ人類の影響で変化しています。 CO_2 の炭素の安定同位体比は産業革命前と現在を比較すると、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の δ 値（注）で2%ほど軽くなっているのです。これは化石燃料の使用によるものです。化石燃料は軽い炭素 ^{12}C を多く含んでいるため、それを燃やして出た CO_2 も軽いわけです。同位体を通して、大気への人為的な影響が明らかになっています。

同位体研究者は試料を分析する際、そこにどんな時代背景や相互作用があるかを加味し、さまざまな補正を加える必要があります。しかしそれらを一つひとつクリアしていけば、一握りの試料からその時代の地球全体の情報が得られるのです。見方を変えれば、大気や海の中を回っていく元素は、常に地球で一つであるということです。

（注） δ 値

同位体比を示す表記方法。標準となる物質の同位体存在比からみた、対象の同位体存在比の偏差を示す。

δ 値＝対象となる物質の同位体存在比 / 標準となる物質の同位体存在比 - 1

炭素の場合は ^{13}C の同位体比を使用するため $\delta^{13}\text{C}$ となる。この場合の同位体存在比は、 ^{13}C と ^{12}C の存在比（ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）を示す。

また、この値は小さい値になるので、通常は‰（‰の10分の1）で示す。

3. 食べ物から見える生態系

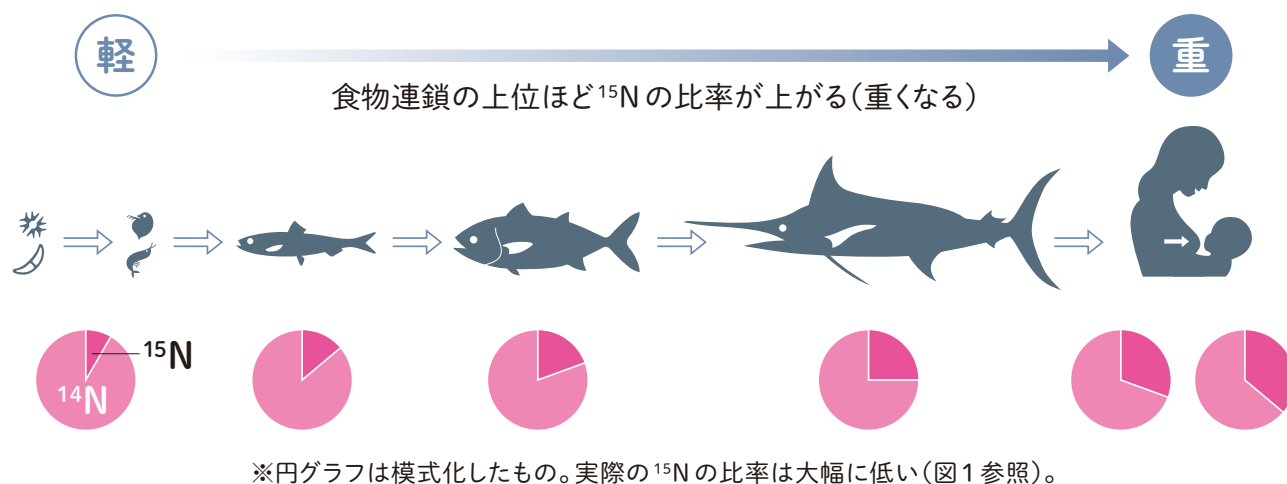
動物は食べ物を分解・吸収して自分の体にします。この化学反応の過程でも、同位体分別が起こります。例えば私たちが卵を食べた場合、そのタンパク質や炭水化物などの成分は一度ばらばらにされて体に取り込まれますが、このとき重い窒素の同位体（ ^{15}N ）が優先されます。同じ生物だけを食べ続けた場合、その動物の体は、食べられた生物に比べて窒素の同位体比（ $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ）の δ 値が約3.4%上がることがわかっています。これは動物が窒素をアンモニアとして排出する際に軽い窒素（ ^{14}N ）から排出され、重い窒素（ ^{15}N ）が体に残ることから起こります。

食う-食われるが繰り返された場合、食物連鎖の上位にいる動物の体ほど重い窒素が濃縮されていくことになります。よって窒素の同位体比は、その動物の生態系の中での位置づけ（栄養段階）を知る手がかりになります（図4）。例えば海の世界食物連鎖の頂点にいる大型の魚は、重い窒素の同位体比（ $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ）が他の生物より高いのです。

この傾向はヒトとも関係があります。髪の毛一本あればヒトの同位体比を知ることができますが、魚をよく食べる人は、そうでない人より重い窒素の割合が高い傾向にあります（文献1）。これはヒトが

食べる魚が、比較的高い栄養段階にいるためです。自然界の生物同士の関係性が、同位体を通してヒトの体にも反映されているのです。

窒素同位体からわかること



※円グラフは模式化したもの。実際の ^{15}N の比率は大幅に低い(図1 参照)。

(図4) 窒素同位体からわかること

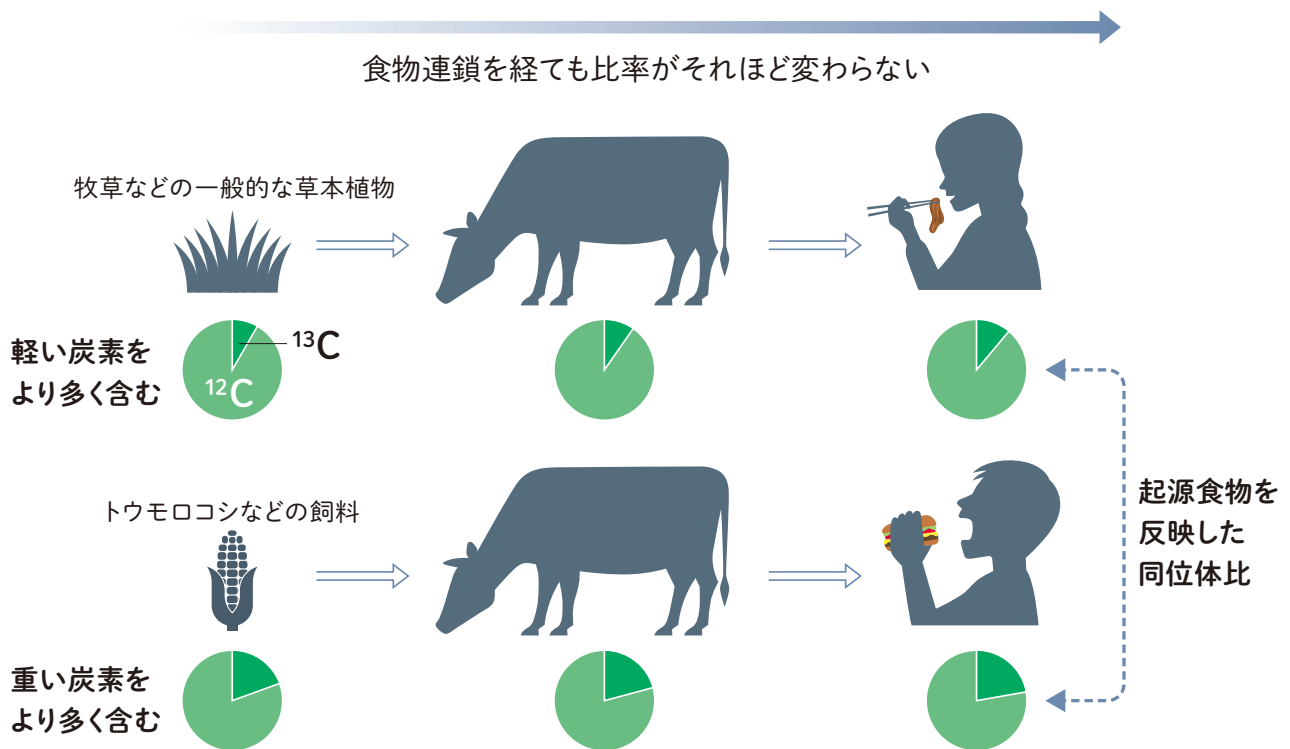
窒素の安定同位体 (^{15}N) の割合は捕食を通して大きく増加する(重くなる)ため、 ^{15}N からその生物の栄養段階を推測することができる。乳児は母乳を介してお母さんを「食べている」状態であるため、大人より重い窒素の割合が高い。

※雑食性のヒトはさまざまな食物の同位体比の影響を受けるため、体全体の窒素同位体比が魚より高くなるとは限らない。図では海の生物からヒトへの食う-食われるの関係を通して窒素同位体に変化する様子を示した。

窒素に比べ、捕食を通した炭素の同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) の δ 値の変化は0.8%とわずかです。つまり炭素の場合は食う-食われるを繰り返しても、起源食物の同位体比が比較的保たれやすくなります。例えば、トウモロコシが光合成により固定した有機物は、重い炭素を一般的な植物より大量に含んでいるため、トウモロコシ飼料で育った牛の炭素も重くなる傾向にあるのです。放牧などでさまざまな植物を食べて育った牛の炭素は、これに比べて軽くなります。私たちの研究では、この違いがさらに、牛肉を食べたヒトにも引き継がれている可能性があることがわかりました(文献1・図5)。

継続的な食生活に由来するものが、生物の体になります。同位体研究の強みは、生物の体そのものから、その生物が長期的にどのような資源に依存し、どのような生活を送っているかがわかる点です。これはヒトも同じで、直接食べている生物だけでなくそれを支えている生物をも辿ることができ、同位体の上では生態系の構成要素の一つに位置付けることができるのです。

炭素同位体からわかること



※円グラフは模式化したもの。実際の ^{13}C の比率は大幅に低い(図1参照)。

(図5) 炭素同位体からわかること

炭素の安定同位体 (^{13}C) の割合は捕食を通して大きく変化しないため、 ^{13}C から食物連鎖の起点となる生物を推測することができる。

※成人の炭素の同位体比をアメリカと日本で比較したところ、アメリカに住む人のほうが炭素同位体比が高いことがわかった。この違いは牛の育て方の違いに由来する可能性がある。

4. 生物の代謝は物質循環

さまざまな生物間の食う-食われるの関係をつなぎ合わせると、一つの生態系の食物連鎖は多くの場合、一本道ではなく網目のように絡み合っています。この関係性を「食物網」と呼び、生態系がどのような生物のバランスで成り立っているのかを知ることができます。

独立した生態系に外来生物が侵入して、それまでの生態系が壊されてしまったという話はよく耳にするでしょう。日本では、琵琶湖に強い肉食性のブラックバスが入って在来種を追いやったことが知られています。同じように外来種のコクチバスの侵入を受けたカナダの湖の調査では、それまで在来種が占めていた上位の栄養段階をバスが占めてしまったが、生き残った在来種はバスが食べない低い栄養段階のプランクトンに食性をシフトさせたことがわかりました。同位体比から、生態系に影響を及ぼすような環境変化があった場合に何が起こるかを知り、予測することができるのです。

生物がもっている元素は、持ち主が遺体となって分解され、再び他の生物が使える形になることでようやく生態系を一巡します。熱帯地域でこの分解に活躍するのが、堅い木材やリター（落葉や枯草などの植物遺体）、土壌をも餌にするシロアリです。私たちが同位体を使ってシロアリの栄養段階を調べたところ、シロアリは腸内細菌の力を使って空中の窒素を直接栄養源にしたり、巣の中できのこを育て、きのこに木材を分解させてから食べるなどのユニークな食性をもつことがわかりました（図6）。シロアリは熱帯の大型土壌動物の1/3を占める場合もあるほどたくさん生息しています。その集団から大量に出る糞やアリ塚の土は、窒素と炭素のバランスが改善された、微生物や植物に使いやすい資源になるのです。

キノコシロアリの塚



リター食のシロアリの塚



土壌食のシロアリの塚



（図6）さまざまなシロアリのアリ塚

さまざまなシロアリのアリ塚。熱帯の大型土壌動物の総重量では1/3を超えることもあるシロアリは、細菌やきのこの力を助けに、堅い木材やリター（落葉や枯草などの植物遺体）、土壌までを餌にする。その糞とアリ塚の土は、微生物や植物に使いやすい資源となる。

撮影地：（上段）コートジボワール・オーストラリア （下段）カメルーン・同・コートジボワール
 撮影者：陀安一郎（オーストラリア・カメルーンの写真）・兵藤不二夫（コートジボワールの写真）

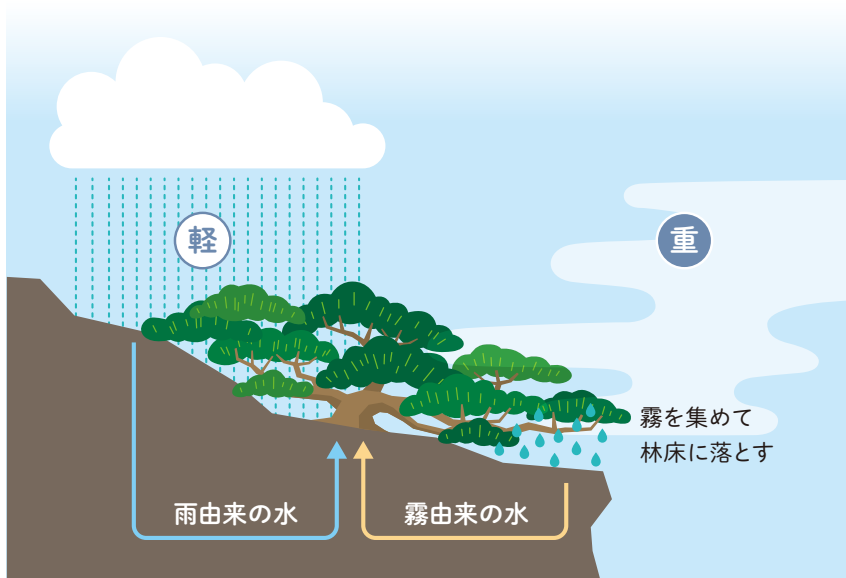
^{14}C を使って有機物の年代を測定したところ、植物のリターは光合成によって生態系に入ってから数年単位で土壌に移行していくこと、リター食や土壌食であるシロアリやミミズなどの土壌動物も、光合成から数年～10年程度経過した炭素を利用していることがわかりました。一方、木材を食べるシロアリは光合成から数十年も経った炭素を利用していました。鳥やクモなどの森林生態系の捕食者は、植食者（緑の葉を食べる生きもの）と腐食者（分解された有機物を食べる土壌動物などの生きもの）の両方を食べます。つまり森林の食物網では、分解に関わる生物も重要であり、土は数十年単位で生態系を支える有機物のプールとなっているのです。

5. 水はどこから来るのか

陸にある水の起源は降雨や降雪ですが、雨が降っていない時でも川は流れていますね。降った雨が地面に浸透して、湧水として出てくるまでに時間差があるためです。このお陰で陸には常に川や湖があり、生物が生きられるのです。水分子の同位体比から、同じ水でもどこから来た水なのかを分けることができます。

高山の雪に由来する水分子の同位体は軽いため、雪解け水で涵養^{かんよう}されている川の水は、周囲の水よりも軽くなります。ここにミネラルの特性などを加味すると水源地を特定でき、例えば私たちが富士山の湧水地「忍野八海」を有する忍野村と行った共同研究では、村の湧水が富士山だけでなく隣の道志山からも来ていることがわかりました。 ^3H などの放射性同位体を使うと、湧水の年齢を推定することもできます。京都大学の調査では、アフリカのキリマンジャロの麓の川や地下水には、50年も前にできた氷河の水が豊富に含まれていることが明らかになりました（文献2）。きれいな水が私たちの元に来るまでに必要な集水域の面積や時間が、具体的にわかってきています。

同位体から水の由来を分けていくと、生物がどのように水を得ているかもわかってきます。例えば植物が、雨水か土深くにある地下水のどちらを多く利用しているのかなどが推測できます。興味深い例として、日本の立山に生息するハイマツという高山植物が、霧を直接集めて水源としていることもわかりました（文献3・図7）。全ての生きものを養う水が、さまざまな気象や地形の条件に支えられていることが見えてくるのです。



霧のハイマツ林(立山)



ハイマツの針葉

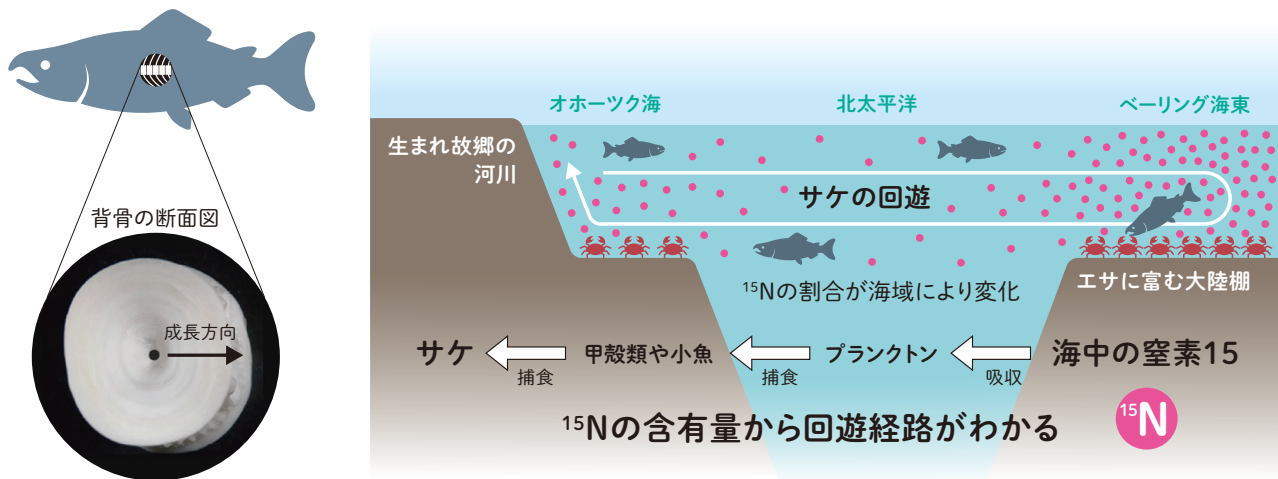
(図7) 立山(富山県)のハイマツの水利用

ハイマツが生息する高山は、水分を保持する土壌が発達していない。このような環境でハイマツはどのように水分を得ているのだろう。霧から直接とった水は、雨由来の水より重いことを利用して、林床に供給される水の由来を調査したところ、ハイマツは雨と霧の水分を両方利用しており、季節によっては林床に供給される水の半分以上が霧に由来することがわかった。(文献3)

6. 元素は時間と場所を映す

ある地域の環境に含まれる元素と、そこで暮らす生物の間には相互作用があります。野外動物はもちろん、ヒトの体をつくる炭素や窒素の分子にも、食べ物や飲み水の情報が残ります。特に、動物の骨や歯、眼の水晶体など長い時間かけて成長する器官には、食べたものの元素の情報が少しずつ蓄積していくことになります。食べ物や飲み水の同位体比に地域的な差が見られるならば、それらの器官に蓄積されている情報と比較することで、動物の移動履歴がわかるかもしれません。

これまで縄文人の骨や歯、クマの水晶体などを分析し、幼少期から成体になるまでの間に食べてきたものや、移動範囲を推測できる可能性が見えてきました(文献4、5)。サケの背骨の分析から、この魚の生涯にわたる移動履歴を推測することにも成功しています(図8)。この研究では、窒素の重さが海域によって異なることを利用して、骨に蓄積した窒素の重さの変化から、サケの回遊範囲が明らかになったのです。

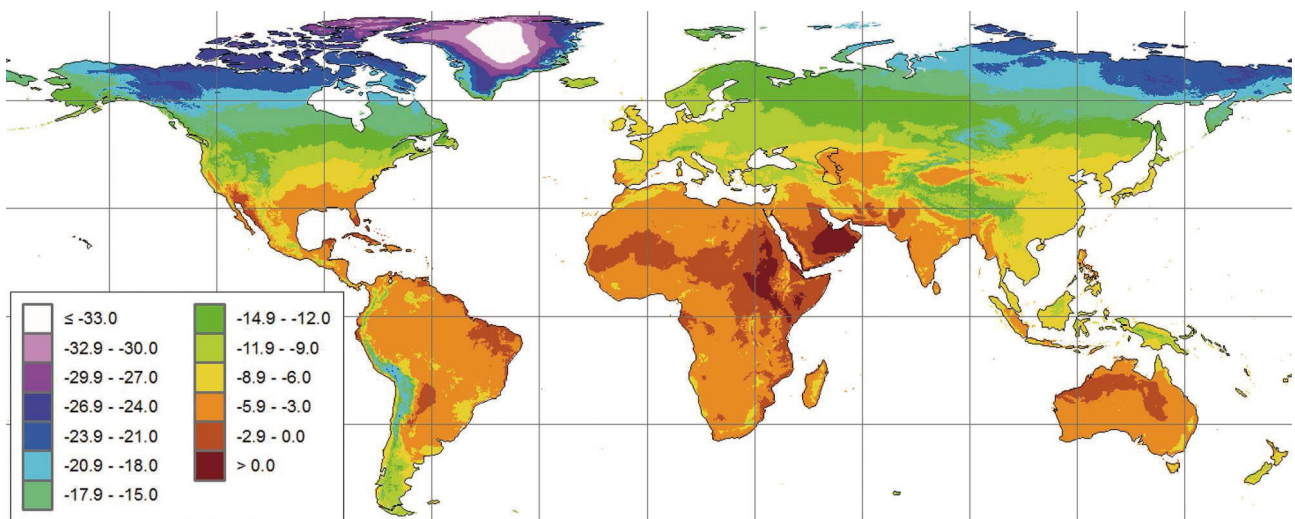


(図8) サケの回遊経路

魚類の背骨は年輪のように内から外へ骨の成分が蓄積していくことで毎年成長する。骨の同位体比 ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) を調べることで、幼魚から成魚になるまでの間の食物を知ることができる。特に ^{15}N は海域ごとに特徴があり、サケがそれを反映した餌を食べることで回遊経路も推測できる。旅の記録が骨に刻まれているのだ。

Matsubayashi et al. 2020 *Ecology Letters*. 23: 881–890.

窒素だけでなく、雨に含まれる酸素や水素の同位体比にも全球的な違いがあり、その情報を「同位体地図」として描くことができます(図9)。体をつくる酸素や水素の同位体比は地域のそれに似てくることから、同位体の地域性の情報を利用して、動物の出身地を推定する研究も行われています。有名な例では、メキシコからカナダまで数千キロを旅する蝶「オオカバマダラ」の正確な移動経路が明らかになったり、さらには水道水の同位体比の地域性が大きいアメリカでは、身元のわからなくなった人の出身地を、髪の毛の同位体比から推定する試みがなされるなど、社会での応用も始まっています。



(図9) 同位体地図

元素同位体比の地理的な分布。降水量で重み付けされた年間平均降水の酸素同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の δ 値)の例を示す。

Terzer et al. 2013 *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 4713–4728より

窒素・酸素・水素に加え、地質年代によって違いが出てくるストロンチウム同位体比などを重ね合わせると、多元素で描かれる地球の「番地」がみえてきます。ここから、さまざまな生きものの生息地や移動履歴を知ることができるのではないかと期待しています。

7. 同位体研究への尽きない興味

生物活動の大きさなど、さまざまな要因で同位体比は変化します。同位体研究を面白いなと思ったきっかけは、学生の時にたまたま本屋で見つけて読んだジェームズ・ラブロックの、地球を1つの生命体ととらえた「地球生命圏 ガイアの科学」という本。「地球は生きている」という表現をしたために、生物学の世界では批判的にもなりました。しかし地球の歴史を紐解くと、地球の環境は生物が大きく変えてきたのです。石炭紀には巨木が繁栄し、分解システムが不十分な中、固定された有機物が地中に埋没することで酸素が増えたりといったことが起こりました。もっと遡れば、無酸素の時代に酸素を作り出す生物が生まれ、溶存鉄を酸化し尽くしたことで大気が酸化的環境になりました。効率的な酸素の代謝システムができあがったことでオゾン層が生まれ、紫外線が遮られたことで陸でも生物が生きられる環境ができました。生物と地球の環境は、ずっと相互作用してきたのだという考え方に心惹かれたのです。

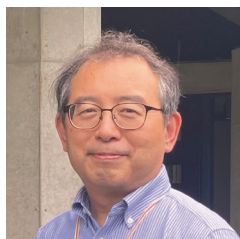
ちょうどこの頃、大学院で京都大学生態学研究センターに入り、安部琢哉先生のもとでシロアリを対象として、和田英太郎先生が持っていた同位体の分析機器を使って研究を始めました。高価な機械ですから必然的にみんなで使うことが多く、さまざまな人にアドバイスしながら一緒にやるが多かったですね。今は大学共同利用機関である総合地球学研究所で、多くの人に設備を使ってもらい、一緒に研究することが使命になっています。同位体環境学からさまざまな結果が見えてくることを楽しみにしています。

引用文献

- 1) Kusaka S, Ishimaru E, Hyodo F, Gakuhari T, Yoneda M, Yumoto T, Tayasu I (2016) Homogeneous diet of contemporary Japanese inferred from stable isotope ratios of hair. *Scientific Reports* 6:33122.
- 2) 大谷侑也 (2018)「ケニア山における氷河縮小と水環境の変化が地域住民に与える影響」地理学評論, 91(3): 211–228.
- 3) Uehara Y, Kume A (2012) Canopy rainfall interception and fog capture by *Pinus pumila* Regal at Mt. Tateyama in the Northern Japan Alps, Japan. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 44: 143–150.
- 4) Kusaka S, Ando A, Nakano T, Yumoto T, Ishimaru E, Yoneda M, Hyodo F, Katayama K (2009) A strontium isotope analysis on the relationship between ritual tooth ablation and migration among the Jomon people in Japan. *Journal of Archaeological Science* 36: 2289–2297.
- 5) Miura K, Matsubayashi J, Yoshimizu C, Takafumi H, Shirane Y, Mano T, Tsuruga H, Tayasu I (2025) A novel method for fine-scale retrospective isotope analysis in mammals using eye lenses. *Ecosphere* 16(5): e70276.

関連するその他の文献

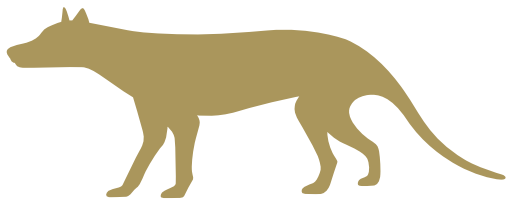
陀安一郎、申基澈、鷹野真也 編 (2023)『同位体環境学がえがく世界：2023年版』



陀安一郎 (たやす・いちろう)

1997年 京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、博士(理学)。

日本学術振興会特別研究員、同・海外特別研究員、総合地球環境学研究所助手、京都大学生態学研究センター助教授・准教授、総合地球環境学研究所研究高度化支援センター教授・研究基盤国際センター教授を経て、2024年より基盤研究教授、基盤研究部長、副所長。



PAPER CRAFT

絶やすのはたやすい 消えた動物



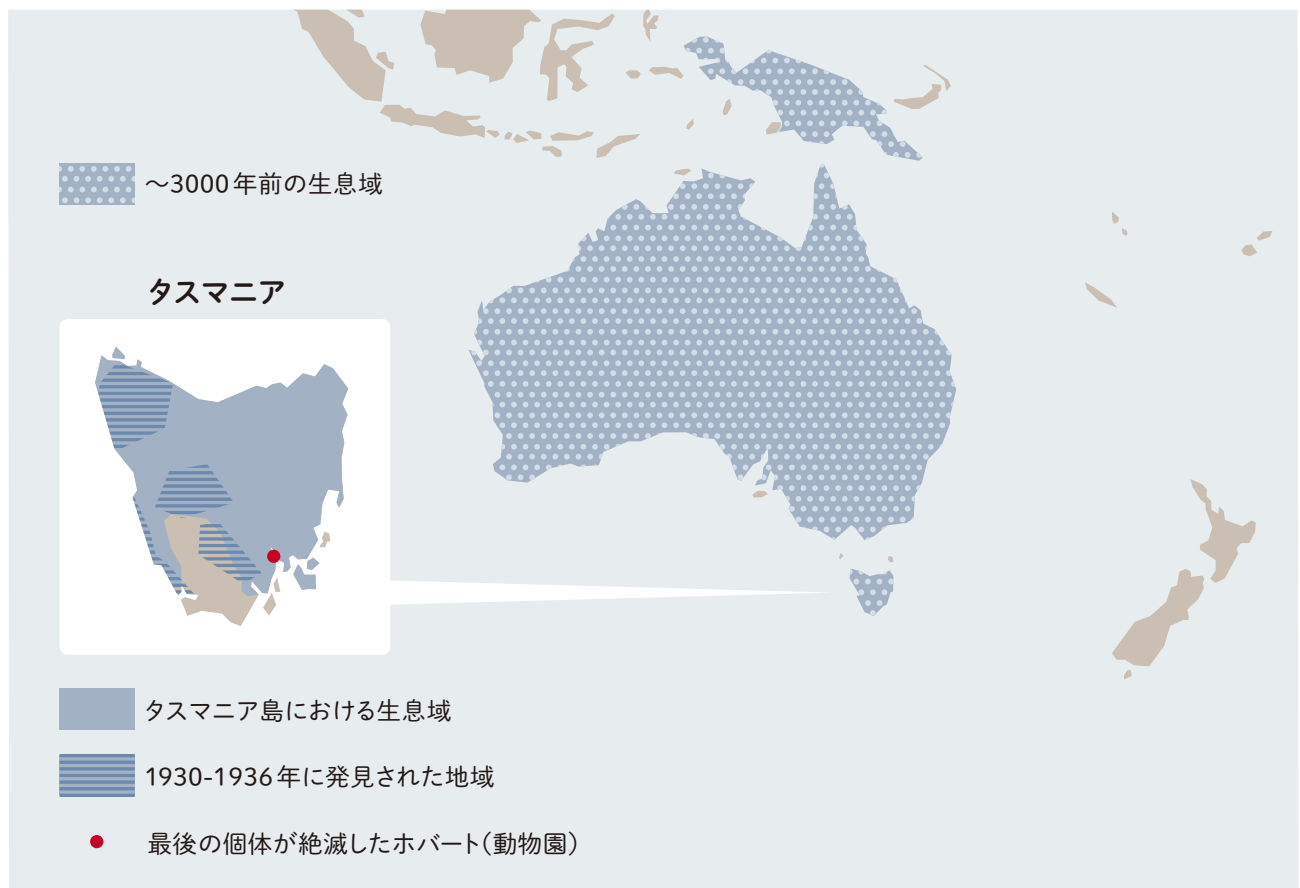
生命誕生からおおよそ40億年、この地球にいるすべての生きものは共通祖先から同じだけの時間を経てここにいます。人間もまたその生きものの一つです。ところが人間の活動は、多くの生きものの暮らしに影響を与え、中には種を絶やすほどの行いもありました。絶滅というと「恐竜の絶滅」のようにはるか過去の事件のように聞こえますが、実は今まさに絶滅しつつある生きものがいます。私たちが気づかない間に消えてしまった生きものも数多くいるはずです。紙工作「絶やすのはたやすい消えた動物」では、人間の些細な都合で絶滅してしまった生きものをつくります。いなくなってしまう生きものは取りもどせません。今、私たち人間も生きものとして自然のなかに生きるとはどういうことか、改めて考える時です。

1. フクロオオカミ

フクロオオカミは、オーストラリア大陸の南東に浮かぶタスマニア島に生きた大型の肉食動物です。背中に縞模様をもつことからタスマニアタイガーとも呼ばれます。「オオカミ」や「タイガー」など、哺乳類の食肉目の猛獣に例えられますが、「フクロ」とつくようにお腹の袋で子育てをする有袋類で、カンガルーやコアラの仲間です。雌のお腹の下の方には4つの乳首があり、4匹まで子を育てることができ、尾の方から袋に出入りしました。雄にも陰嚢を保護する袋があり、雌雄ともに袋をもつのは有袋類でも珍しい特徴です。



およそ4000年前のニューギニア島やオーストラリア本土の先住民の洞窟にフクロオオカミの姿が刻まれており、広い範囲で見られた動物であったことが伺えます。しかし、その後まもなく、フクロオオカミは本土から姿を消しました。文明の進歩による人の活動の変化、エルニーニョによる気候変動のため獲物が減ったことが原因とされます。人類が持ち込んだイヌのディンゴとの競合により駆逐されたという説は有力ですが、南アメリカ大陸の肉食の有袋類が真獣類の捕食者の侵入によって絶滅に追い込まれたことのアナロジーとも解釈されています。結果としてフクロオオカミは、現存するタスマニアデビルと共にタスマニア島の集団だけが生き延びました。タスマニア島のフクロオオカミは、氷河期の終わり、タスマニア島がオーストラリア大陸から孤立した1万4千年前から、そこに暮らす先住民と共に暮らしていたはずですが、野生の行動の記録はほとんど残っていません。1803年には本土からヨーロッパ人の入植が始まりました。文字をもたないタスマニアの先住民は、入植者により排除され、その記憶はフクロオオカミが絶えるのを待たずして失われていたのです。



(図1) フクロオオカミが生息した地域

1808年オーストラリア人博物学者のジョージ・ハリスが、罠で捕らえた雄のフクロオオカミを *Didelphis cynocephala* (犬の頭をもつオポッサム) と記載しました。「鼻先から尾の先端までの長さは5フィート10インチ(約178cm)で、うち尾は約2フィート(約61cm)を占める。... 頭は非常に大きく、オオカミまたはハイエナに似ている。目は大きく丸く黒色で、これが動物に獰猛で悪質な

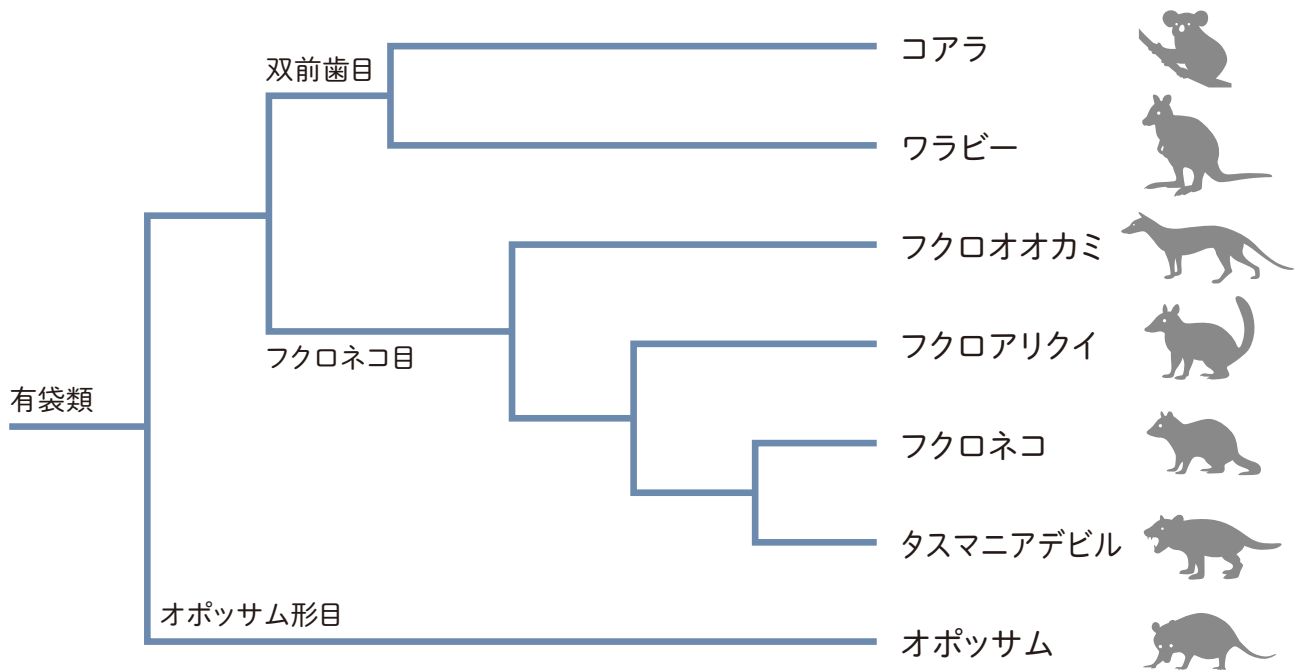
印象を与える....」と説明しています。学名は、その後現在の *Thylacinus cynocephalus* (袋を持つ犬で狼のような頭を持つ) になりました。

2. 最後のオオカミ

入植者の手によりタスマニア島の利用可能な土地はほぼ全て羊の放牧地となり、生態系が崩壊し、狩猟民であった先住民の生活が奪われました。当然のように、肉食動物であるフクロオオカミの獲物も減りました。わずかな記録には、「フクロオオカミは、家族集団で岩場や洞穴に暮らし、人間には近づかず危害を与えられない限り攻撃することはなかった」とあります。入植者の家禽や羊を食べたという報告はありますが、彼らが置かれた状況を考えれば仕方のないことです。ヨーロッパのオオカミのように、大集団で大型の獲物を襲った証拠はありません。羊への被害は、むしろ初期の入植者が持ち込み野生化した野犬の仕業でしたが、矛先は在来種のフクロオオカミに向けられました。大きな口、黒い瞳、不気味な縞模様の動物は、凶悪な害獣と決めつけられたのです。オーストラリア政府は駆除を推進するため、1888年から1908年まで1頭につき1ポンドの報奨金を支払い、2000頭を超えるフクロオオカミが殺されました。そのほかにも多数の懸賞金制度が設けられ、1900年代初めにはすでに希少となっていました。そのため動物園、サーカス、博物館などへ高値で取引されることになり、捕獲が加速しました。さらに伝染病の流行が追い打ちをかけたといいます。最後のフクロオオカミは、1936年9月7日タスマニア州の州都ホバートの動物園で息絶えました。オーストラリアではこの日を「絶滅危惧種の日」と定めています。

3. 有袋類としての位置づけ

世界に残るフクロオオカミの標本は、データベースに集約され、絶滅危惧種の理解や保護のための研究資源として利用できます。生存時の記録が乏しいので、生物学的な理解により実像に迫る試みが行われているのです。袋の中から得た幼体のアルコール標本から採取したDNAのゲノム配列が調べられ、現生の有袋類との系統関係が明らかになりました。現存する有袋類の中では、タスマニアデビルやフクロネコを含む「フクロネコ科」、およびフクロアリクイ(ナンバット)のみを含む「フクロアリクイ科」に近縁であることがわかりました。さらに詳しい解析では、フクロオオカミはフクロネコ科が多様化する前に、フクロアリクイ科との共通祖先から分岐していることもわかっています。また、タスマニアの集団が本土から孤立していた時期、数が減少して近親交配が進み、遺伝的な多様性が低下していたこともわかりました。多様性が減ると、感染症が流行れば皆が罹りやすくなります。人間の介入以前から絶滅の危機が忍び寄っていた可能性があったのです。



(図2) 有袋類の系統樹(Feign CY 2018より)

4. 収斂進化のしくみ

フクロオオカミは約1万2000年から現在に至る完新世における最大の肉食有袋類で、見た目は真獣類のオオカミととても似ていますが、有袋類と真獣類は、およそ1億6000万年前、恐竜が闊歩するジュラ紀には分かれていました。恐竜時代が終わりを迎えると、新大陸では有袋類が、旧大陸では真獣類がそれぞれに進化する並行進化がおきました。フクロオオカミと真獣類のオオカミが似ているのは、系統的な類縁関係ではなく、環境や生活が似ていると形態が似る収斂進化の結果です。近年の画像解析の技術の進歩に伴い、骨の形から類似性の分析が行われています。オオカミとの比較では、肉食に特化した頭骨の構造が、系統的に近い有袋類よりも明らかに似ていました。では、いつどのように似てくるのか。有袋類は、未熟な状態で生まれ、育児嚢である「袋」で離乳まで育つことが特徴なので、その後の成長に伴う肉食の行動で似てくると予想されました。しかし、実際にそれぞれの年齢ごとの頭骨を比較したところ、発生過程から鼻先の尖った成体の容貌まで並行して成長しており、行動に関わらず生まれつき肉食動物の共通性を表すことがわかりました。一方で、オオカミだけではなく食肉性の哺乳類と比較した研究からは、フクロオオカミは、オオカミやイヌよりも、ジャッカルやキツネなどの中型のイヌ科のグループに近いという結果がでました。四肢や体からは、走るのには得意でなく、獲物を追跡するよりは待ち伏せ型であり、自分の半分くらいの、ネズミやウサギ程度の大きさの獲物を狙う仲間に入りました。縞模様はカモフラージュに役立ったのかもしれませんが、オオカミのように大型の獲物を狙うには顎が弱く、待ち伏せ型で獲物を切り裂くネコの顎にも似ていませんでした。頭骨の遺伝子、脳の構造など収斂のしくみの解明が試みられていますが、有袋類の系統としての特徴が際立ちます。一方で、頭骨や脳の発生に関わる遺伝子の調節に関わる箇所が、オオカミと共通しているという発見もあります。有袋類として誕生し、小型の獲

物を待ち伏せして狩る暮らしから肉食動物として独自の進化を遂げたフクロオオカミの姿が見えてきました。

5. 生きているフクロオオカミ

最後のフクロオオカミが動物園で死を迎えた50年後の1986年、国際自然保護連合によって正式に絶滅種に指定されました。その一方で、野生にはまだ生き残っているのではないかという目撃情報が絶えません。しかし、今の時代でも明確な証拠画像などは得られておらず、1936年以降も生存した可能性はあるものの、すでに絶滅したと考えられます。また、詳細なゲノム情報が得られたことで、近縁の有袋類への遺伝子操作によって再生するという計画も挙げられています。しかし、過去を振り返れば、フクロオオカミの住む土地に羊を放ち、その被害の目の敵にして、たやすく絶やしたのが人間です。今更惜しむだけでは解決になりません。今まさに、人間の活動により自然が変えられ、気候変動が現実のものとなっています。これまで、共に暮らしてきた野生動物の行動にも変化が現れています。動物たちは環境に敏感であり生き延びることに必死なのです。人間は彼らとどう向き合えばよいのでしょうか。生きものと私たちがどう共に生きるのかが、問われているのです。

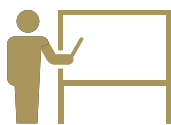
参考文献

- The Thylacine Museum TM <http://www.naturalworlds.org/thylacine/index.htm>
- Feigin CY, Newton AH, et al. Genome of the Tasmanian tiger provides insights into the evolution and demography of an extinct marsupial carnivore. *Nat Ecol Evol.* 2018 2(1):182
- Newton AH., Weisbecker V. et al. Ontogenetic origins of cranial convergence between the extinct marsupial thylacine and placental gray wolf. *Commun Biol* 2021 4(1):51.
- Rovinsky DS., Evans AR & Adams JW Functional ecological convergence between the thylacine and small prey-focused canids. *BMC Ecol Evo* 2021 21(1):58
- Brook BW, Sleightholme SR, et al. Resolving when (and where) the Thylacine went extinct, *Sci Total Environ* 2023 877:162878
- Feigin CY, Newton AH, Pask AJ. Widespread cis-regulatory convergence between the extinct Tasmanian tiger and gray wolf. *Genome Res.* 2019 29(10):1648.



フクロオオカミ
ダウンロードはこちら
PAPER CRAFT DOWNLOAD





REPORT

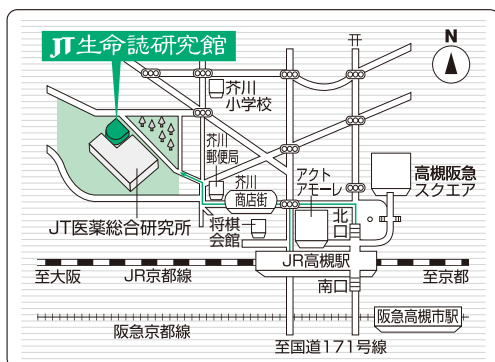
アドベンチャーワールドでは聞けないアドベンチャーワールドの話 ペンギン誕生！その現場で起こっていること —スタッフ後記—



2025年6月に、アドベンチャーワールドと共同で行った催しのご報告です。今回のテーマはペンギンの誕生。アドベンチャーワールドで私たちが見られるのは、無事に"生まれた後"の元気なヒナの姿。産声をあげるまでは舞台裏で過ごしますが、そこには飼育員のどんな仕事や努力があるのでしょうか？今回は、卵からヒナが"生まれるまで"のお話です。

講演に先立ち、研究館内スタッフにペンギンの飼育や繁殖についての質問を募集すると、30問以上が寄せられました。いくつかを紹介しながら、講演を振り返ってみましょう。

全文と全質問へのご回答は
こちらから



JT生命誌研究館

〒569-1125 大阪府高槻市紫町1-1

Tel:072-681-9750(代表) Fax:072-681-9743

開館時間 10:00-16:30 入館無料

休館日 毎週月曜日／年末年始(12月29日-翌年の1月4日)

最新の開館情報はサイト(www.brh.co.jp)でご確認ください。

交通 JR京都線高槻駅より徒歩10分

阪急京都線高槻市駅より徒歩18分

JRのご利用が便利です。