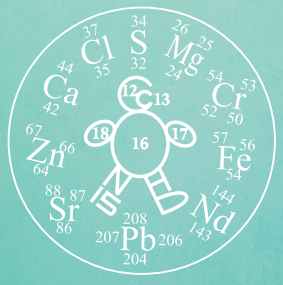
同位体環境学がえがく世界



2020年版

陀安 一郎
申　基澈
藤吉　麗　編

目　次

はじめに ―― 陀安一郎、申　基澈、藤吉　麗　3

1章　何がわかるの同位体？ ―― 5

はちみつの測定から、研究へ ―― 中原聖乃　7

物質に含まれる時間軸 ― 生まれ年のワイン ― ―― 石川尚人　9

髪の毛の安定同位体比からわかる食生活 ―― 陀安一郎　11

2章　私たちのくらしと同位体 ―― 15

「環境トレーサビリティー」コアプロジェクト ―― 陀安一郎　17

愛媛県西条市「千の水を採って〜千点の地下水調査からわかったこと〜」 ―― 徳増　実　20

山梨県忍野村の取り組み ―― 大森　昇　25

福井県大野市の取り組み ―― 帰山寿章　28

兵庫県千種川流域 ― 地元住民の調査が原動力となった環境問題解決への取り組み ―
―― 藤吉　麗　31

リン酸酸素安定同位体比を使ってリンはどこからやってくるのかを調べる ―― 石田卓也　34

3章　ところで、同位体って何？ ―― 37

元素の同位体比 ―― 陀安一郎　39

軽元素同位体 ―― 陀安一郎　41

重元素同位体 ―― 申　基澈　45

元素濃度 ―― 申　基澈　48

同位体地図（Isoscape） ―― 陀安一郎　51

トレーサビリティ ―― 陀安一郎　53

4章　もっと知りたい同位体 ―― 55

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　57

豊かな恵みと大気汚染物質を運ぶ北西季節風 ―― 佐瀬裕之　60

コケ、環境を語る ― 人里離れた高山でさえ、汚染が進行している？ ― ―― 大石善隆　64

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　67

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　72

法医学で同位体学を利用できるかな？ ―― 小山哲秀　77

古代人の暮らしを解き明かす同位体分析 ― 海産魚はどこの海から運ばれたのか？ ―
―― 石丸恵利子　80

縄文人の集団間の移動をストロンチウム同位体比から調べる ―― 日下宗一郎　85

リャマとアルパカ ― アンデス文明動物飼育物語 ― ―― 瀧　上　　舞　89
資源開発における環境負荷低減のための同位体研究 ―― 大　竹　　翼　93

5 章　実験施設と同位体環境学共同研究 ―― 97
実験施設と分析装置 ―― 99
同位体環境学共同研究へのお誘い ―― 100

はじめに

陀 安 一 郎、 申　　基 澈、 藤 吉　　麗
（総合地球環境学研究所）

「同位体」とは、元素の性質を示す「陽子」の数は同じですが、「中性子」の数が異なるため、全体の重さが異なる原子のことを指します。それぞれの同位体は重さが異なるので、物理的な変化や、化学的な反応速度にわずかな違いがあります。これらの性質を利用することで、どの標高に降った雨が地下水になるかであったり、汚染物質がどこから飛んできたかであったり、動物がどのような餌を利用してきたかであったり、いろいろなことがわかります。また、現代人だけでなく、昔の人類や家畜がどのように移動していたかなどもわかります。このような手法を利用することで、私たちのまわりの環境について、いろいろなことを調べることができます。私たちは、これを同位体環境学と呼び、いろいろな方々と共同研究しています。

本書では、まず 1 章でちょっと面白い同位体の使い方を紹介します。続いて 2 章で、自治体や住民の方と一緒に研究した結果を、それぞれの立場の方々から紹介してもらいます。1 章、2 章は、同位体の基礎知識がなくても気軽に読んでいただけるように作成しましたが、言葉や原理の説明が必要な場合は 3 章をご覧ください。

3 章では、「同位体」というキーワードを用いて研究するにあたって必要な基礎知識について解説しています。使い方の例が知りたい方は、飛ばしていただいても構いません。4 章では、地球研で行っている「同位体環境学共同研究事業」で一緒に共同研究している方たちの研究紹介を行っています。どの研究もエッセンスを簡単に紹介していただいているので、わかりやすいと思います。

京都市にある総合地球環境学研究所（地球研／Research Institute for Humanity and Nature）は、地球環境学の総合的研究をおこなう大学共同利用機関のひとつとして 2001 年 4 月に創設され、2004 年からは大学共同利用機関法人人間文化研究機構に属しています。地球研で 2017 年度から 2019 年度に「環境研究における同位体を用いた環境トレーサビリティー手法の提案と有効性の検証」というプロジェクトを行いました。このプロジェクトでは、環境のつながりを理解する「環境トレーサビリティ」という考え方を「同位体」というツールを用いて環境問題の研究に適用しました。2 章で地域の紹介をしていただいている自治体の方々とも一緒に研究しました。

本書は 2020 年 3 月末時点で一旦取りまとめたものですが、著者と読者（興味のある方）との相互作用によって改訂していきたいと考えています。ここの説明がよく分からない、この話題が面白かった、この項目をもっと詳しく知りたい、同位体でこういうことは出来るのか？など、ホームページ（https://www.chikyu.ac.jp）にご意見・ご質問をいただければありがたく存じます。

「同位体環境学がえがく世界：2020 年版」制作協力

総合地球環境学研究所研究基盤国際センター
計測・分析部門
陀安一郎、申基澈、藪崎志穂、由水千景、倉田純子、淵上由里子、上田佐知子、友膳菜津子、保田昭子

総合地球環境学研究所コアプロジェクト「環境研究における同位体を用いた環境トレーサビリティー手法の提案と有効性の検証」（2017～2019 年度）
陀安一郎、藤吉麗、あるがゆう、中原聖乃

表紙制作　寺本瞬

1章

何がわかるの同位体？

同位体を使って何がわかるでしょうか？
同位体が教えてくれる○○のひみつを紹介します。

はちみつの測定から、研究へ

中　原　聖　乃
（総合地球環境学研究所）

私は同位体を専門とする研究者ではなく、文化人類学を専門とする研究者です。同位体研究についての体験や測定については書けませんが、私の趣味にも同位体測定を役立てることができることをお伝えしようと思います。

いまははちみつブームだそうです。私もブームに乗って、旅行や出張の折には、当地のはちみつを探し回ります。お土産専用のお店よりも、スーパーマーケットや市場で求めます。そこには、現地の人が日常的に使うものがあり、生活の息遣いが感じられるからです。ブラジルでは、ドイツ系移民でブラジルの文化人類学の父と言われる研究者を輩出した家系の農家を訪れ、はちみつを購入しました。どこの場所のはちみつも、花の種類が違うからでしょうか、独特な香り立つはちみつを楽しんでいます。

フィリピン出張でもいつものようにはちみつを求めました。しかし、これが偽物だったのです。

学会も終わり、トライシクルの中で運転手にはちみつを探していると告げると、ちょうど通りかかった市場に、はちみつを売っている店がある、というのです。寄り道してもらうことにしました（図 1）。その市場には、新鮮な野菜や雑貨があり、フィリピンの人の台所、という感じを受けました。探し始めてほどなくすると、あるお店の奥の棚にはちみつがありましたので、購入することにしました。多少、茶色っぽい気がしたが、ペットボトルに売られているのがまたなんとも庶民らしく、つい買ってしまったのです（図 2）。

ところが今回は、リュック一つで出張に来ていました。はちみつは液体物なので、手荷物ではなく、預け入れ荷物として預けなくてはいけませんが、はちみつを入れるバッグがありません。そこで、もうひとつリュックサックを購入し、はちみつを日本に持ち帰りました。

これほど素朴なボトルに入ったはちみつは初めてだったので、フィリピンの人たちの暮らしを思い描きながら、眺めていたのですが、帰国後一か月たっても一向に固まる気配がないのです。ふつうはちみつと言ったら、寒い冬には結晶化が進み、スプーンでガリガリ削って食べなければいけないのですが…。もしや「混ざりもの入りのはちみつ」

図 1. 所狭しと雑多なものが並べられた市場の様子

図 2. 棚の奥にひっそりと売られたはちみつ

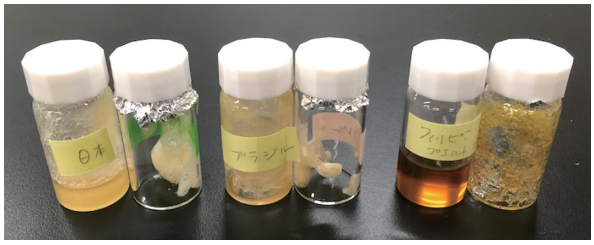


図 3. 左から、今回測定した日本産はちみつ（A）乾燥前・乾燥後、ブラジル産はちみつ（B）乾燥前・乾燥後、フィリピン産はちみつ（C）乾燥前・乾燥後

か？　と思い、手元にあった日本産とブラジル産のはちみつとともに、地球研の安定同位体分析機器で同位体分析をしてもらいました（図 3）。

数日後結果が出ました。結果は「混ざりもの入り」どころか、ほとんど「混ざりもの」のはちみつでした（図 4）。

思い返すと、棚への陳列の仕方がかなり不自然でした。おかしいと思っても本当のところはわかりません。同位体測定ならば､明確に数値化され、真偽が出ます。それが同位体測定なのです。

先ほど、私は文化人類学を専門とする研究者だと書きました。いま私は、マーシャル諸島における米国による核実験の被害にあったコミュニティの生活再建について研究しています。核実験で

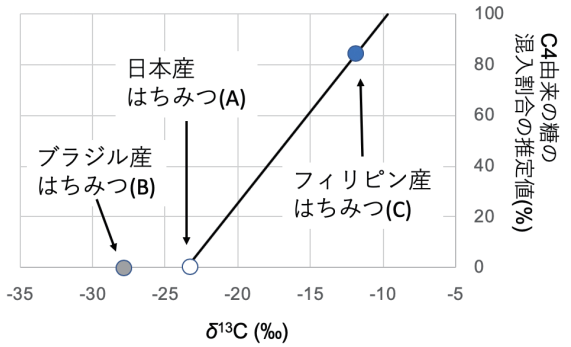


図 4. はちみつを生産する植物は「C3 植物」と呼ばれ、炭素同位体比（δ^{13}C 値）が低い（図の左の方）のに比べ、混ぜ物に使われるトウモロコシやサトウキビは「C4 植物」と呼ばれ、それら由来の糖の炭素同位体比（δ^{13}C 値）は高い（図の右の方）という特徴があります。今回の分析結果では、80％以上が「混ぜ物」だと考えられました（正式には AOAC 国際規格 Method Number, 998.12 に基づく測定法が必要です。今回は簡易的な分析によりました）。

人々が被ばくしただけではなく、放射能に汚染された故郷に戻れない人もいます。現在は被害に対して補償金が支払われているものの、補償金への過度の依存や、生活習慣病の蔓延、アルコールやドラッグ問題など、核実験の間接的影響が続いています。私はこのような影響を、主に現地の人びとへインタビューを行って得られた「語り」によって明らかにしようとしています。ただ、この語りは、単なる思い違いや、あるいはそうであったならよかったのに、という気持ちから、結果的に間違った情報も含まれてしまいます。私は間違った情報は情報としての価値がないとは思っておらず、むしろ間違って記憶しているその理由も含めての「人びとの記憶」だと捉えています。しかしながら、科学的に認められた方法論に裏付けされたデータによって、そうした「語り」とは違う種類の情報が得られれば、それは人々の現状をより多方面から説明することにつながるのではないか、とも考えます。補償金の額によって、あるいは、核実験の影響を受けた人とそうでない人との違いによって、食生活や体に取り込まれた化学物質は違うのかもしれません。人びとの体にはその痕跡が残ってはいないのでしょうか。

「昔は､捕っても捕っても魚がいなくならなかった」このような語りを単なるノスタルジーと片付けず、科学的なデータで裏付けることはできないのでしょうか。

趣味から始まった同位体測定への興味｡いまは、自身の研究に生かす方法を模索しています。

著者情報

中原聖乃　総合地球環境学研究所オープンチームサイエンスプロジェクト研究員。専門は文化人類学。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

物質に含まれる時間軸
― 生まれ年のワイン ―

石　川　尚　人
（海洋研究開発機構）

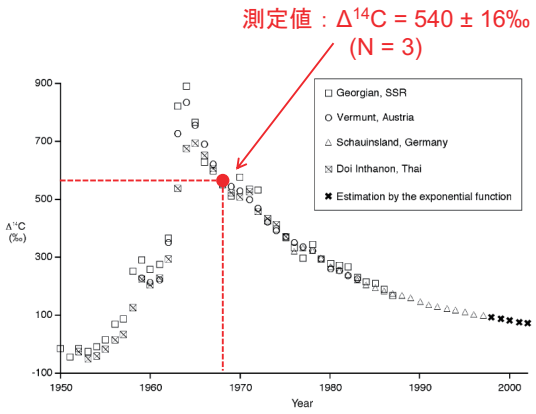
「古いものには価値がある」というのは本当でしょうか？　「もの」によって、あるいは価値を見出す「ひと」によって、答え方は様々かもしれません。ワインはその代表例と言えるでしょう。いわゆる「ヴィンテージワイン」のラベルには、原材料となるブドウの収穫年が書かれています。良質なブドウが収穫された年のワインほど、あるいはじっくり時間をかけて熟成されたワインほど、高い価値がつくことが多いようです。そして、それを逆手に取った様々な偽造ワインが、残念ながら市場に多く流通しているようです。

それでは、ワインの作られた年を科学的に推定し、ヴィンテージワインが本物かどうかを鑑定する方法はあるのでしょうか？　答えは「イエス」です。ワインの成分に含まれる放射性炭素（^{14}C）濃度を測定する、というものです。^{14}C は、米ソ冷戦時代の 1950~60 年代に、大気核実験を通じて大気中へ大量に放出されました。1963 年にようやく大気核実験が禁止される頃には、大気中の二酸化炭素（CO_2）に含まれる ^{14}C 濃度は、自然状態のおよそ 2 倍まで増えていました。その後、植物や海による吸収などを通じて、大気 CO_2 の ^{14}C 濃度は減り続けています。

ブドウは、光合成を行って大気 CO_2 を吸収しています。そして、大気 CO_2 の ^{14}C 濃度は、そのままブドウ（ワイン）の ^{14}C 濃度に反映されます。先に述べたように、大気 CO_2 の ^{14}C 濃度は年ごとに決まっているので、ワインの ^{14}C 濃度が分かれば、そのワインがいつ収穫されたブドウからできているかが分かるはずです。

著者は「1969 年フランス・ボルドー産」というラベルのついたワインの ^{14}C 濃度を測定しました。このワインは、著者の恩師である陀安一郎先生が地球研の教授に就任した際に「生まれ年ワイン」として、弟子を含む関係者一同から贈られたものです。お祝い会で参加者がテイスティングを楽しんだのち、空になったボトルの底に沈んでいた残渣をかき集め、乾燥させ、加速器質量分析計という機械で試料の ^{14}C 濃度を測定しました。

その結果を図 1 に示します。横軸に西暦年、縦軸に ^{14}C 濃度（$\Delta^{14}C$）をとっています。白と黒のプロットで示したのは、1950 年から現在まで、世界中のいろいろな場所で測定された、大気 CO_2 の $\Delta^{14}C$ 値です（Hyodo *et al.* 2006）。1950 年代から 60 年代半ばにかけて急激に上昇し、その後ゆ



Hyodo *et al.* (2006) *Functional Ecology*

図 1.　西暦年と大気 CO_2 の ^{14}C 濃度（$\Delta^{14}C$）との関係（白と黒のプロット）。Hyodo *et al.* (2006) *Functional Ecology* より。赤い丸プロットが「生まれ年ワイン」の測定結果。

るやかに減少する傾向が見てとれます。そして、気になる試料の $\Delta^{14}C$ 値は 540±16‰（N＝3）と測定されました。これは、図 1 では赤い丸のプロットの場所に位置しています。この値を、年代測定のモデルにあてはめてみると「1968 年 9 月から 1970 年 9 月である確率が 97％以上」という結果が弾き出されました。すなわち、贈られたワインの生産年は 1969±1 年と推定され、ワインのラベルに書かれた年の信憑性はかなり高い、と結論づけられました。大気 ^{14}C 濃度の年ごとの変化率が大きい 1960 年代のワインだったからこそ、ここまで正確に推定できたと考えられます。

さて、冒頭の問い「古いものには価値があるか？」について、ワインが本当に古いかどうかは、^{14}C で分かると言えそうです。しかし、古いワインには本当に価値があるのでしょうか？　その答えは、残念ながら ^{14}C では分かりません。自分でワインを飲んで、自分で確かめるしかないのでしょう。はたして、陀安教授にとって「生まれ年ワイン」はおいしかったのでしょうか？　答えが気になる方は、地球研に行ってぜひ聞いてみてください。

文献

Hyodo F, Tayasu I, Wada E (2006) Estimation of the longevity of C in terrestrial detrital food webs using radiocarbon (^{14}C): how old are diets in termites?. Functional Ecology 20:385-393. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01081.x

著者情報

石川尚人（海洋研究開発機構生物地球化学プログラム研究員）2011 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。2011 年京都大学生態学研究センター博士研究員、2013 年日本学術振興会特別研究員（海洋研究開発機構）、2016 年日本学術振興会海外特別研究員（スイス連邦工科大学チューリッヒ校）などを経て 2017 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

髪の毛の安定同位体比からわかる食生活

陀　安　一　郎
（総合地球環境学研究所）

1. はじめに

私たち人間が生きていくためには、食べ物を食べなければいけません。言うまでもないことですが､私たちの体は食べ物によって作られています。私たちが食べ物は、野菜や果実などの植物、キノコなどの菌類、肉や魚などの動物といったようにいろいろあります。しかし、これらはすべて植物が太陽エネルギーを用いて光合成した産物を出発点としています。つまり、私たちの体はもとをただせば、

二酸化炭素→植物→（動物）→人間

という経路をたどっています。生物の体を構成する元素は、バクテリアからカビ・キノコ、植物、動物、もちろん私たち人間も含めてほぼ共通であり、水素（H）、炭素（C）、窒素（N）、酸素（O）、リン（P）、イオウ（S）といった元素に加え、カルシウムやマグネシウムといったミネラル類です。私たちは、食事からこれらの元素を取り入れているので、私たちも生態系の「食物網」のつながりのなかに位置づけられます。特に、「軽元素同位体」の項で述べる、炭素・窒素同位体比の図を使いますと、食べ物の傾向がわかります。

2. 日本人の髪の毛の同位体比

私たちの体の同位体比を測定するにあたって、よく使われるのが、髪の毛や爪です。これらは、ケラチンというタンパク質を主成分とし、刻々と成長することからサンプリングもしやすい組織です。少し前のことになりますが、2007 年から 2010 年に地球研のプロジェクト「日本列島における人間 ― 自然相互関係の歴史的・文化的検討（プロジェクトリーダー湯本貴和教授）」の一環で日本の 47 都道府県から 1305 名の方の髪の毛をいただいて分析しました。その髪の毛の炭素・窒素

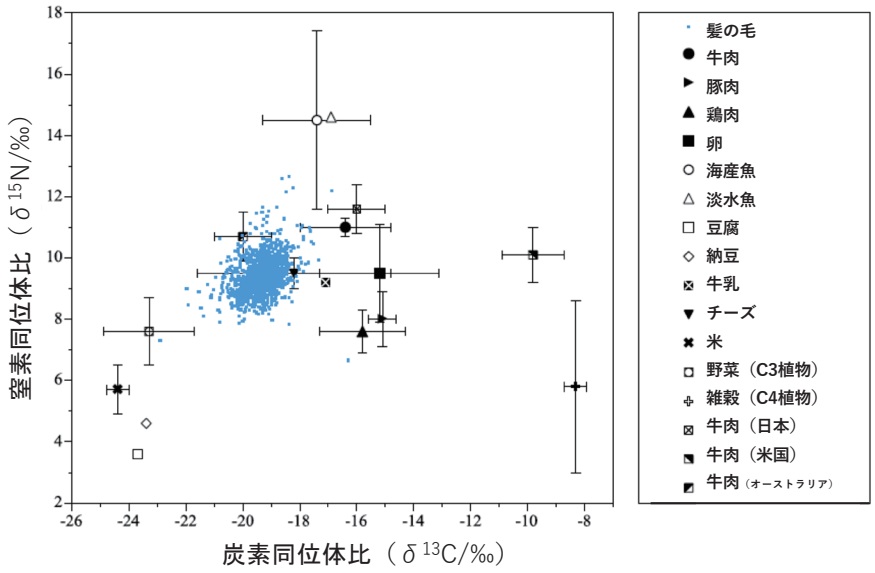


図 1. 1,305 名の日本人の髪の毛および食べ物の同位体比。食べ物の同位体比には髪の毛に対する栄養濃縮係数（「軽元素同位体」の項目参照：髪の毛の場合は、$\delta^{13}C$ については 2.5‰、$\delta^{15}N$ については 4.1‰）を加えてあるため、単純に比較することができます（Kusaka et al. 2016 を改変）。

同位体比を測定したところ、全体としては

炭素同位体比（$\delta^{13}C$）＝－19.4 ± 0.6‰

窒素同位体比（$\delta^{15}N$）＝－9.4 ± 0.6‰

となりました。

次に、いくつかの食べ物の同位体比と比較しましょう。実際にどのような同位体比を示すかは、同じ食材でも採集された産地、植物では肥料の与え方、動物では餌や飼育方法によっても異なりますので、必ずしもこれが一般的とは言えません。ここでは、滋賀県在住の私（陀安）の食卓にのぼる食材、および近辺で購入出来る食材に加え、文献値も併せて記載しました。図１では、各自の髪の毛の同位体比（青い点）に対して、それぞれの「食べ物候補」のうち、より近い方に位置するものの影響を、より強く受けていると言えます。

この図１では限られた食べ物のデータしかありませんが、一般的に「左下」（窒素同位体比と炭素同位体比が低い）の方向にいくほど「植物性タンパク（C3 植物）」の影響を受けており、「上」（窒素同位体比が高い）の方向に行くほど「海産魚」の影響を受けており、「右」（炭素同位体比が高い）の方向に行くほど「トウモロコシなどの C4 植物飼料を餌に育てられた肉類」の影響を受けているといえます。日本人全体としては流通が発達した社会で暮らしているので、非常に均一な分布をしていると見ることができますが、個人としてはどちらよりの傾向があることがわかります。この調査に参加していただいた方には、それぞれ「ご自身の髪の毛の炭素・窒素同位体比」の値をお伝えしましたので、ご自身の傾向がわかったと思います。

次に、年齢・性別を見てみましょう（図 2）。女性においては年齢が高くなるほど炭素同位体比（$\delta^{13}C$）が低くなる傾向がありました。炭素同位体比が低い食べ物は植物性タンパク（C3 植物）ですので（図 1）、女性は年齢が高い方ほど植物性タンパクの影響をより受けているといえます。一方、男性については、年齢の高い方で窒素同位体比（$\delta^{15}N$）に幾分高い方が多くなっていました。窒素同位体比が高い食べ物は海産魚ですので（図 1）、男性については年齢の高い方が、よりたくさんの魚を食べておられるのでしょうか。また、男

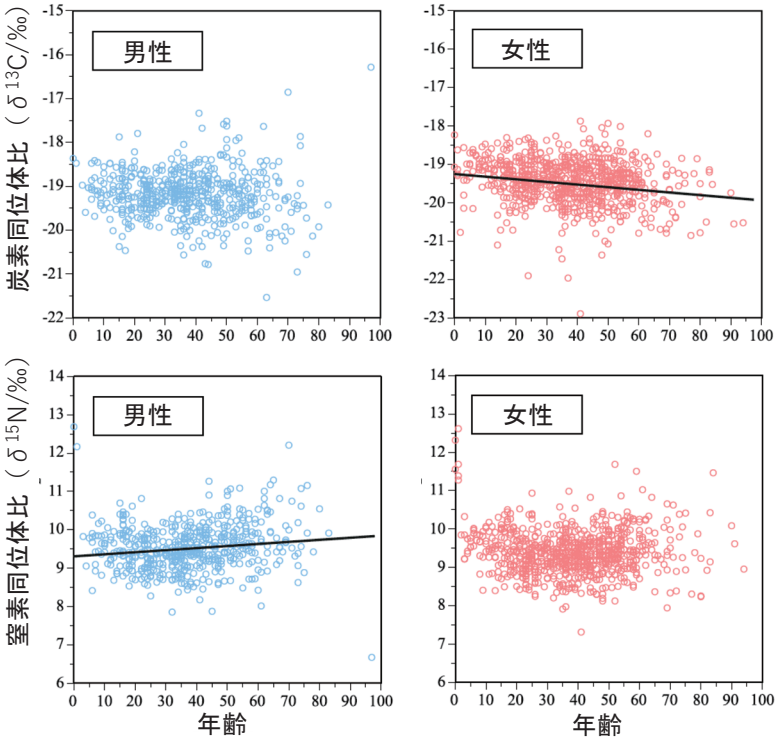


図 2. 1,305 名の日本人の髪の毛の年齢・性別の炭素・窒素同位体比（Kusaka et al. 2016 を改変）。年齢に沿って有意な関係があるもののみ線が引いてあります。

性・女性に関わらず、乳児の方（年齢 =0 の線上の点）は、それより年齢の高い子どもさんに比べて高い値を示していました。これは「母乳」の影響だと考えられます。つまり、お母さんの体の窒素同位体比を反映している「母乳」を消化して体を作ると、栄養濃縮係数のために、乳児の髪の毛はお母さんの窒素同位体比よりも高い窒素同位体比になります。「軽元素同位体」の項目の図 2 を参考にすれば、「お母さんの体を食べている」のと同じ意味になり、窒素同位体比は仮想的な栄養段階につれて高くなっているといえます。

この研究では、髪の毛の同位体分析と同時に、「牛肉、豚肉、鳥肉、卵、海産魚、淡水魚、豆腐、納豆、牛乳、チーズ」の 10 種類の食事を 1 週間に何度食べるか？　というアンケート調査を行いました。アンケート結果と、髪の毛の窒素・炭素の安定同位体比の関係を調べたところ、「統計的に有意（$p<0.05$）」であるものは以下のようになりました。

炭素同位体比（$\delta^{13}C$）を高くする方向の食べ物が牛肉、卵、海産魚で、低くする方向の食べ物が豆腐、納豆でした。また、窒素同位体比（$\delta^{15}N$）を高くする方向の食べ物が牛肉、海産魚で、低くする方向の食べ物が豆腐、納豆でした（Kusaka et al. 2016）。この中でも海産魚の食事の頻度が窒素同位体比（$\delta^{15}N$）を高くする効果が一番高いという結果が出ました。

3. 国別・時代別比較

最後になりましたが、これら 2007–2010 年の日本人の髪の毛の炭素・窒素同位体比の値は世界的に見てどのあたりに位置するでしょうか？

2007–2010 年の調査では、数は少ないですが、韓国・モンゴル・インドの方々についても分析しましたので、図 3 に加筆しました。図 1 のままで重ねると見にくいので、平均値と標準偏差で簡略化して示しています。

インドは「左下」（窒素同位体比と炭素同位体比が低い）に位置します。これは、先ほど図 1 でも説明しましたように、「植物性タンパク（C3 植物）」の影響が多い傾向を示します。一方、モンゴルは「左上」（窒素同位体比は高く、炭素同位体比は低い）という、先ほどは説明しなかった位置にあります。これはおそらく、内陸に位置して海産物も C4 植物の影響も受けず、ほぼ C3 植物由来の家畜の影響を受けているからだと考えられます。韓国は、ほぼ日本と同じ位置にあります。

文献データを見ると、米国が先ほど説明した

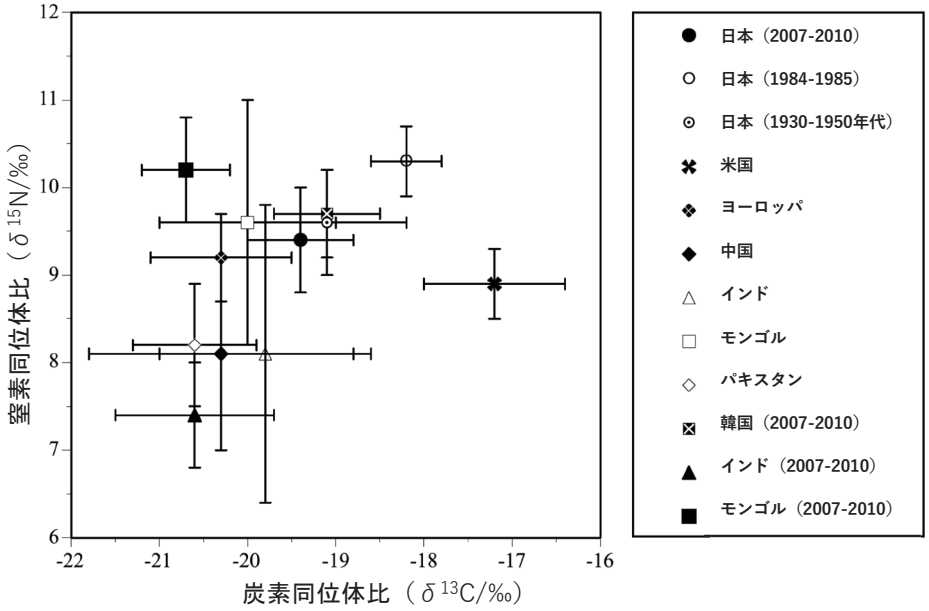


図 3. 日本・韓国・インド・モンゴルの 2007–2010 年に採取された髪の毛のデータ（平均値と標準偏差）と、その他の文献値の比較（Kusaka et al. 2016 を改変）。

「右」（炭素同位体比が高い）の位置にあり、「トウモロコシなどの C4 植物飼料を餌に育てられた肉類」の影響が強いことがわかります。また、歴史的なデータと比較すると、1984–1985 年当時の日本人のデータ（Minagawa 1992）は、より「上」（窒素同位体比が高い）の方にあり、「海産魚」の影響をより強く受けていたことがわかります。ほんの数十年でも人の食べ物の傾向は変わるもので、これは政府の統計にも出ています。

「人の髪の毛」の炭素・窒素同位体比は、健康診断のように健康状態を表すものではありませんが、個人がどのような食生活を送っているのかを大まかに判断する材料になります。それは、地球の物質循環の中で、個人として「どの位置」を占めているかを表すもので、地球の中の「私」を考える材料になるのではないでしょうか。

文献

Kusaka, S., Ishimaru, E., Hyodo, F., Gakuhari, T., Yoneda, M., Yumoto, T. and Tayasu, I. (2016) Homogeneous diet of contemporary Japanese inferred from stable isotope ratios of hair. Scientific Reports 6:33122. https://doi.org/ 10.1038/srep33122

Minagawa, M. (1992) Reconstruction of human diet from $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in contemporary Japanese hair: a stochastic method for estimating multi-contribution by double isotopic tracers. Applied Geochemistry 7: 145–158. https://doi.org/10.1016/0883-2927(92)90033-Y

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

2章
私たちのくらしと同位体

「環境トレーサビリティー」コアプロジェクト（2017～2019年度）では、
環境のつながりを調べる科学的な方法を用いて、
研究者と研究者以外の方たちが協力して研究してきました。
いろいろな方たちの声から、どのような研究が行われたか見てみましょう。

「環境トレーサビリティー」コアプロジェクト

陀 安 一 郎
（総合地球環境学研究所）

1. はじめに

総合地球環境学研究所（地球研）では、2016年度から「コアプログラム」という仕組みをはじめました。コアプログラムとは、個別の課題や分野に限定されず、さまざまな地球環境問題に適用が可能であり、総合地球環境学としての基礎と汎用性を持った研究を進めようとするものです。その「コアプログラム」の中に「コアプロジェクト」が複数存在します。本項で紹介するコアプロジェクトは、2016年度に行った予備研究を経て、2017年度から2019年度の3年間において行った「環境研究における同位体を用いた環境トレーサビリティー手法の提案と有効性の検証（略称：環境トレーサビリティー）」です。ここでは、簡単にプロジェクトの経緯と成果についてお話しします。

2. プロジェクトが目指したもの

地球研のプロジェクトでは、同位体を用いた研究が多くおこなわれてきました。物質を構成する元素レベルで見てみますと、同じ元素でも異なる「同位体比」を持つ物質は見分けることが可能であるという特徴を生かしたものです。物質レベルで見分けることが可能になりますと、環境中に存在する物質のつながりを示すことができます。これを「トレーサブル（追跡可能）」な指標として考えることができます。しかし、物質や生物に含まれる元素の同位体比は、環境基準[1)]のような「これ以下にするのが望ましい基準値」のようなものはありません。つまり、トレーサブル（追跡可能）な情報である同位体比は、単独で解釈することが難しいばかりか、それ自体に有害性がないため環境モニタリング項目に採用されていませんし、社会的認知度もありません。

一方、さまざまな元素濃度や同位体比を用いることで、ある物質の産地や発生源、それが生まれるプロセスが明らかになると期待され、環境診断の精度向上や学際的研究（Interdisciplinary research）のツールとして高い可能性を有しています。元素の同位体を用いた研究は、いろいろな分野の統合としての学際的研究に用いられるようになってきましたが、社会と連携した研究を目指した超学際的研究（Transdisciplinary research）[2)]において、トレーサブルな情報のもつ利点や価値、そしてそれらの情報をどのように使うことが可能か関しては、今まで考えられていませんでした。

そこで「環境トレーサビリティー」コアプロジェクトでは、多元素安定同位体比を用いた同位体地図（Multi-Isoscapes）作成などをとおして、地域における環境問題を解決するうえで、この手法をどのように使うと研究者・住民・行政の間をつなぐことができるかついて検証しました。特に、環境の繋がりに関する情報を指す「環境トレーサビリティ概念」が、地域における環境問題の解決に至るステークホルダー（stakeholder）[3)]間の共通理解に果たす役割の有効性について検証しました。その手段として、地域の方々や、実践プロジェクトとの共同研究をおこないました。一つひとつの自然科学的測定値は、個別のステークホルダーにとって、それぞれ利用価値が異なると考えられます。そこで、本プロジェクトでは、利用価値を行政側からの視点、住民側の視点、研究者側の視点の相互作用としてとらえ、それぞれの視点を類型化し、環境トレーサビリティ手法の有効性を検

証しました。また､環境トレーサビリティ概念は、ステークホルダーをつなぐ信頼性の構築という意味で、食のトレーサビリティと関係する概念だと考えられます。これについても実践プロジェクトと協働で検討しました。

3. わかったこと

研究は、福井県大野市、愛媛県西条市、岩手県上閉伊郡大槌町、山梨県南都留郡忍野村、兵庫県千種川流域、滋賀県野洲川流域、フィリピン国シラン・サンタローザ川流域でおこないました。

各調査地において、環境トレーサビリティ手法を用いた研究の成果を紹介するシンポジウムを開催しました。そして、シンポジウムに来場された地域住民の方々に対して、環境トレーサビリティ手法の有効性を問うアンケート調査を行いました。

その結果、環境トレーサビリティ手法を、調査地における環境問題の解決のために有効と判断したステークホルダーのタイプについて、複数の調査地間に共通して次の３つの特徴がみられました。それは､「調査地における環境保全の対象（地下水や川）と、普段から関わりがある人」､「環境トレーサビリティー手法で得られる情報に対して、普段から関心が高い人」､「シンポジウムで研究者によって説明される環境トレーサビリティ手法についての理解度が高い人」でした。

これらのアンケート調査の結果を受けて、プロジェクトでは、環境トレーサビリティ手法に関心のある人を集め、興味が持てるようなウェブサイト作りに取り組んでいます。なお、各地域でいろいろな方とどのような研究を行ったかは、それぞれの項目をご覧ください。

注釈

1）環境基本法第十六条によれば、「政府は、大気の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染及び騒音に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を定めるものとする」と書かれています。このように、定められた基準より数値を下げることを目標とするというような具体的な指針を得ることができます。

2）環境研究においては、学際的研究は複数の学問分野が共同で環境問題に対する研究を行うことを指すのに対し、超学際的研究は学術界のみならずステークホルダーも含んだ研究を指します。前者に比べ、後者は「学問」の体系自体が変革する必要があると考えられています。

3）近年の地球環境問題に関しては、科学者が事実を解明するだけでは解決に至らないため、地球環境問題を引き起こす原因を作っている人々、及びその影響を受ける人々と共に考えなければいけないとされています。「公害問題」と異なる点は、加害者と被害者が明確に分かれていず、地球温暖化の問題のように、温暖化を引き起こす要因となっている温室効果ガスの発生に関わる一方、影響を受ける立場でもあるということがあります。

文献

Mauser M, Klepper G, Rice M, Schmalzbauer BS, Hackmann H, Leemans R, Moore H (2013) Transdisciplinary global change research: the co-creation of knowledge for sustainability. Current Opinion in Environmental Sustainability 5: 420–431. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.001

藤吉麗､西村武司､加藤尊秋､陀安一郎（2019）「同位体を用いた地下水調査に対する住民意識 ― 山梨県忍野村のシンポジウム参加者を対象に」環境情報科学学術研究論文集 33: 133–138 doi:10.11492/ceispapers.ceis33.0_133

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

愛媛県西条市
「千の水を採って～千点の地下水調査からわかったこと～」

徳　増　　実
（愛媛県西条市経営戦略部政策企画課地域創生室）

1. はじめに

本市は、縦横に複数の断層が複雑に走った独特の地下構造を有し、東の西条平野と西の周桑平野（合わせて道前平野といいます）に、それぞれ地下水を貯める帯水層[1)]が存在し、全国でもめずらしい広大な自噴域が、西条平野には 8.1 km^2、周桑平野には 8.2 km^2 広がっています（図 1）。鋼管を 20 m～30 m ほど地下に打ち込むだけで湧き上がる地下水（自噴水）は「うちぬき」と呼ばれ、その数は 3,000 本を数えます。昭和 60 年に環境省（当時環境庁）から「名水百選」に選定され、さらに岐阜県揖斐川で開かれた、“いびがわ”ミズみずフェスタ「全国利き水大会」で 2 年連続全国 1 位に選ばれた“おいしい水”です。また 11 万人の市民のうち半数は自家水[2)]を利用しており、水道普及率は 50％ほどしかありません。つまり、多くの市民が日本一おいしいミネラルウォーターに直接アクセスして暮らしていると言っても過言ではありません。また、まちのいたるところに湧水（泉）が存在し、中小河川の源になり、清く透きとおった水が市内の水路を縦横無尽に流れています。このようなことから、本市は「水の都」と呼ばれています。

山間部と平野の割合は日本の平均と同じ 7：3 で、集水域[3)]には、石鎚山系や高縄山系の山々が分布しています。この集水域もほぼ本市域内にあるため、一体的な水管理が可能となっています。平野部の年間降水量は 1,400 mm 程度ですが、山間部には 2 倍以上の降水量があり、瀬戸内海地域でありながら水資源の豊富な地域になっています。

しかし、昭和の後半から平成にかけて、沿岸部では地下水の塩水化[4)]が進行し、その原因と対策を研究する必要が生じてきました。

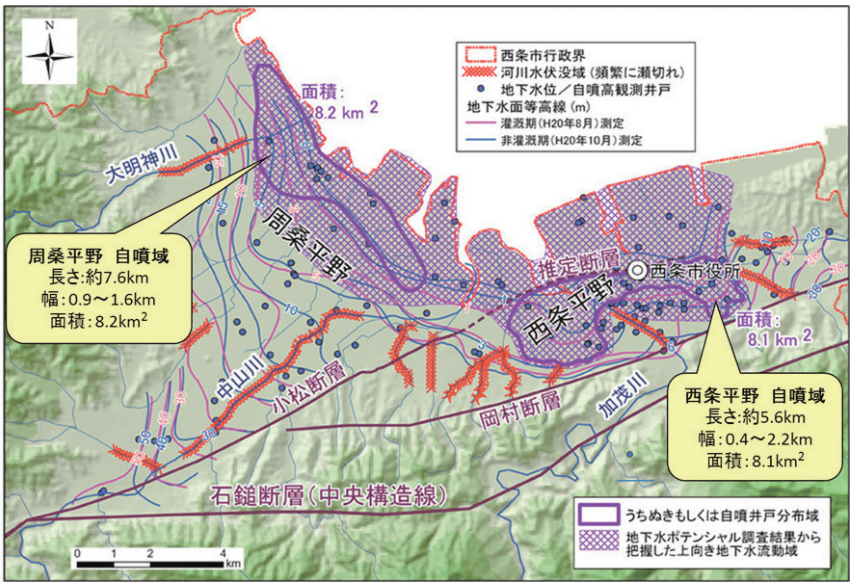


図 1. 道前平野の自噴帯の分布　（出典　西条市（2017））

2. 道前平野地下水資源調査研究委員会

このように地下水に恵まれているが故に、地下水に強く依存している本市では、地下水を将来にわたって保全しなければなりません。前述の塩水化や主要河川の加茂川の流況が悪くなるなど、地下水資源への不安が強まったことから、本市では市全域で地下水資源の調査をすることになりました。通常、行政の調査はコンサルタント会社に丸投げして、調査結果を受け取って完了、というパターンが多いのですが、この地下水調査では、平成 19 年 4 月に道前平野地下水資源調査研究委員会を立ち上げて、この委員会の中で、調査内容や手法を委託したコンサルタント会社と協議しながら調査を進めました。その委員には水文学、地質、水質、流動解析など各分野から地下水の有識者の方々に集まっていただきました。地球研からは谷口真人副所長と中野孝教名誉教授に委員になっていただきました。この委員会発足が地球研と本市の関わりの起点となりました。

3-1. 水循環研究と水質調査

平成 19 年にこの委員会がたちあがると、各委員から実際に調査に加わりたいとの要望があり、中野孝教名誉教授を中心に谷口真人副所長ほか 4 年間に 22 のテーマで、地球研ほか 7 大学 8 名の先生方に調査に加わっていただきました。ここでは、中野孝教名誉教授とのコラボレーションを中心に紹介させていただきます。

地下水を持続的に利用するには、水循環の考えに立ち、地下水の涵養域[5] と地下での流動を明らかにした上で、流速や流量、人為影響を評価し、将来の量と質を予測する科学情報が必要です。

量を予測する情報は実際の流速や流量の観測値です。河川の管理者が測定したり、管理者の許可を取って、研究者が測ったりします。今回、中野孝教名誉教授とコラボレーションしたのは水質の分野です。

分析の主な項目は安定同位体[6] と微量金属です。水を構成する水素と酸素の安定同位体比は水

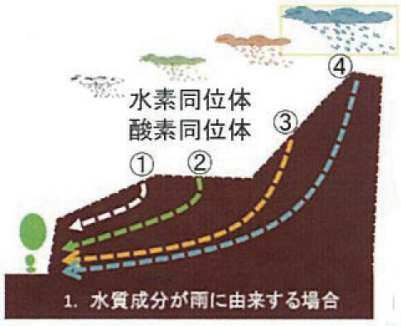


図 2. 水素・酸素同位体の地下でのフロー（出典　中野ら（2015））

の指紋と言われ、水に含まれる成分と共に、水のつながりを明示する履歴を表す指標として利用されてきました。例えば、降水の水素・酸素同位体比は標高と共に変化しますが、地下の岩石は水を含まないので、その値が保存され湧水や地下水の両安定同位体比は涵養域の推定や特定に有効です。例えば、4 つの涵養域（①、②、③、④）の降水の平均的な水素・酸素の安定同位体比が異なれば、その雨に由来する地下水や湧水も降水に類似した値となります（図 2）。一方ストロンチウムや硫黄の安定同位体比は地質や化学肥料によって特徴的な値を示すので、地下の堆積物や人為影響に関する情報が得られます。

水循環は、地下水と交流する地表水やその起源である降水など、存在形態が異なる水を互いに比較することによって明らかになります。現在では上記元素の安定同位体や 50 種程度の元素の濃度も比較的簡便かつ高精度で分析できるようになっています。したがって多数の水質項目を測定できれば、水循環の保全や管理に必要な水の履歴に関する情報を一挙に獲得できることになります。そのためには、安定同位体も含め多くの水質項目をまとめて分析できる共用施設と共に、得られる水質情報を共有し、水資源管理に活かす仕組みも併せて重要となります。地球研は大学共同利用機関として、こうした研究に応えうる実験施設が整備されており、地球研との協働研究はとりわけ重要でありがたいものでした。このようなことが契機となり、平成 21 年 8 月に地球研と本市は交流協

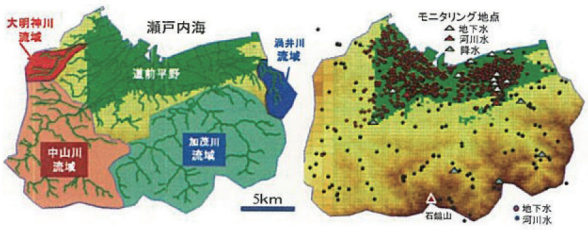


図 3.　西条市の河川流域（左）、地下水と河川水、降水の採水地点およびモニタリング地点（右）（出典　中野ら（2015））

定を締結し、水質履歴法の開発とその社会実装がより活発に進められました。

3-2.　地表水の多項目水質マップ

河川水は地下水と交流しているので、地下水と地表水を高密度に採水し、多項目にわたって水質を比較することで、地下水の涵養域や流動に関する基盤情報が得られるはずです。このため、まず地表水の特徴を明らかにすることを目指し、山地域を中心に河川の約 150 地点において、渇水期（梅雨入り前）と豊水期（秋）の地表水を採水しました（図 3）。試料は全て地球研にて 53 成分の水質組成と 4 種類の安定同位体比が分析され、結果、多くの水質項目について、1. 季節変化より地理的変化がはるかに大きいこと、2. 山地の河川水は流域の地質や降水量の違いを強く反映すること、が明らかとなりました。市が採水している 91 カ所の地下水についても同様な分析が実施され、相互に比較した結果、より多くの地点で地下水の水質項目を地図化し、河川水の結果と重ね合わせて比較することで、地下水の涵養域や流動を解明できることが強く支持されました。

3-3.　千の地下水の多項目水質マップ

市民に水への理解を深めてもらうことを意図して、平成 20 年 9 月に市民シンポジウムを開催しました。研究成果の紹介は一部に留め本市の水の豊さを伝えることを主眼とし、地球研スタッフと本市職員が自然科学および歴史文化の両面から講演し議論しました。台風が接近し雨中であるにもかかわらず 300 名弱の市民が参加し本市が水に恵まれた市であることを再認識する良い機会となりました。このシンポジウム後、市民が中心になり多くの地点で井戸水の採水と水温を測定し、水質分析結果を市民と市に還元していただくプロジェクトが中野名誉教授から提案され、ありがたく受諾実施することになりました。「千の風になって」の歌手、秋川雅史氏が本市出身であることから、「千の水を採って」というプロジェクトの名称で市の広報に掲載し採水と水温測定を募りました。採水した地下水は 1,032 地点に及び地表水と同じ多項目水質分析が行われました（図 3）。

結果を水質マップとして表現することにより、地下水水質の全容が解明されました。

河川の流域規模や平均標高の違いにより、水素・酸素の安定同位体比は異なりました。例えば、加茂川や中山川など平均標高が高い河川は、平野域でも特徴的な同位体比を示しました。この特徴は予想通り地下水に現れており、河川水が川のよう

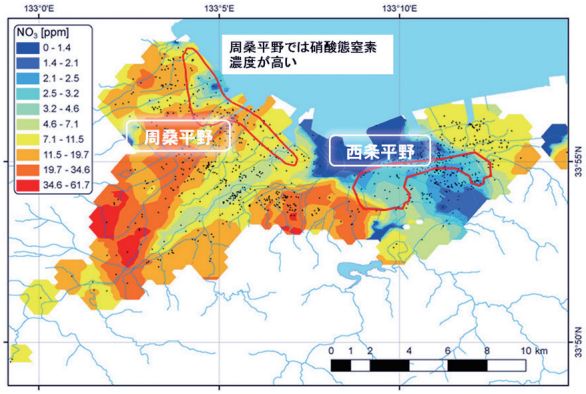


図 4.　地下水の硝酸態窒素濃度の分布（出典　西条市（2017））

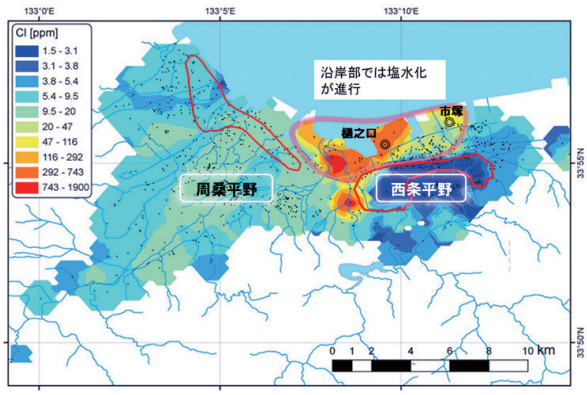


図 5.　地下水の塩化物イオン濃度の分布（出典　西条市（2017））

に地下を流れる姿を可視化できました。地下水と涵養する河川の関係が明確となり、河川水が流れている範囲など、水資源利用に重要な情報が得られました。

他の水質成分からは、さらに異なる情報が得られました。窒素汚染の実態は硝酸イオンの分布に現れており（図 4）、土地利用や窒素同位体情報から、その要因が施肥に起因すると示唆されました。塩化物イオンやマンガンなどの分布からは、塩水化は還元的環境下で進んでいることが示されました（図 5）。また輝安鉱の廃鉱山によるアンチモンが浅層地下水にのみ現れており、「うちぬき」の保全にとって貴重な情報も得られました。

ストロンチウムと硫黄の安定同位体比は流域地質と良い一致を示し、それらと相関の高いミネラル成分も含めて、岩石の化学風化と水質の関係も明らかになりました。これらの同位体情報は、水から養分を吸収する植物や農水産物に反映されます。本市は水を生かした農業を目指しており、地質に由来する同位体情報は、農水産物や食の地域認証指標として利用できます。また「うちぬき」の地下水を涵養する加茂川は、平野域に入る前から伏流[7] しており、断層によって陥没した砂礫層が地下水プールを形成し、断層や上位の地層を構成する細砂や粘土が不透水層となっている可能性など、自噴水形成に関与する地下環境についても新たな知見が得られました。

水質分析の結果は、採水に参加した市民一人一人に簡単な説明文を加えて報告されました。それと共に、第一回市民シンポジウムの成果を本としてまとめ、熊本などの地下水研究の先進事例の紹介も併せて、第二回目の市民シンポジウムを開催し、地下水分析全体の結果が中野名誉教授により報告されました。参加した市民は 600 人におよびました。同様な湧水・地下水問題を抱える自治体は多く、岩手県大槌町や山形県遊佐町、福井県大野市などからも首長や職員が参加し、後述のように新たな展開につながりました。

3-4. 水質の経時的モニタリング

地表水と地下水の水質マップの作成と合成により、両水の因果関係が明確になり、水に及ぼす降水や地質などの自然環境、流域の人間活動の影響とその原因も明らかになってきました。しかし地下水資源の将来予測には、地下水流速などの情報も必要です。水質マップから鍵となる地点を選定できた（図 3）ので、水循環を構成する地下水や河川水、降水を毎月回収し、水温と共に水質についても同様なモニタリングが実施されました。

同じ加茂川に由来する地下水であっても、浅層の地下水は水温変化が大きいのに対して、自噴水の水温変化はほぼありません。前者は水質マップから、加茂川が平野に入った後の伏流水であると考えられます。伏流する涵養地点と地下水地点（例えば大町小学校）における水温および水質の時間的な違いから、1 日 10 m ほどの流速がある非常に速い地下水であると考えられます。いっぽう自噴水の涵養域は、水質マップから浅層地下水よりさらに山地側にあることが判明しています。モニタリング結果も、水温や水質の季節変化が小さく、浅層地下水より涵養域が離れ、深部をゆっくり流動しているという考えを支持しています。水質情報をさらに解析され、流速も含めその流動が明確になることが期待されています。

降水の水素・酸素同位体からは、本市に降った雨の再蒸発による寄与が指摘されています。一方重金属元素濃度は地表水や地下水に比べて 2 桁程度高く、中には水道水の水質基準をこえる鉛濃度を示す降水も見られました。このことは、降水由来の重金属元素は土壌に吸着されていること、すなわち地下水涵養域である山地の森林土壌が優れた浄化機能を果たしていることを示しています。重金属元素濃度が高い降水は冬季に多く、ストロンチウム同位体比を用いた解析からは、アジア大陸からの越境汚染の可能性が指摘されています。しかし鉛同位体比は 10 年前の中国鉛と異なる値を示しており、中国の急激な経済成長に伴う発生源の変化が示唆されています。このことは、同位

体も含めたモニタリングの実施と継続の重要性を示しています。

4. 今後の展望について

平成 19 年から実施されてきた道前平野地下水資源調査の結果は、平成 29 年 8 月に西条市地下水保全管理計画としてまとめられました。現在は、この計画を基にした、地下水の保全に関する条例の見直しを目指しています。

水質マップやモニタリングにより、本市一流域においても、広域的な大気環境変化の影響を受けていることが明らかになってきました。

本市では、同じような地下水・湧水問題を抱える地域との連携が重要と考え、情報交換や交流を行ってきました。岩手県大槌町でも沿岸域の湧水利用に向けて、本市と同様な水質マップを作成し、湧水保全域の基礎情報になっています。その成果報告も兼ねて大槌町で開催された復興シンポジウムでは、私が参加しネットワークの強化を図りました。秋田県遊佐町では、鳥海山山塊の岩石採取に伴う出水により、山麓部の湧水枯れの可能性が大きな問題になっています。同町においても、同様な水質マップを作成して検討した結果、採石場上流部の湿地帯の保全の重要性が指摘されました。いっぽう大野市では湧水再生室を設け、湧水保全に向けた様々な取り組みを実施されていますが、将来の環境教育の一環として、水質マップ作りを学校教育の中で開始しています。こうした研究により、各地域の水循環の特徴が明確になってきました。各地で得られるデータを利活用できるようになれば、地域性の強い水循環の特徴を理解する上でも有益であると考えています。

また、地球研と本市との交流協定に基づき、平成 29 年度から政策情報交換会を開催し、お互いのニーズやシーズを出し合い、さらに win-win の関係を築いて行こうとしています。

注釈

1）地下水で満たされた砂層等の透水性が比較的良い地層であり、一般には地下水取水の対象となり得る地層のこと

2）各家が自らの土地にパイプを帯水層まで打ち込みポンプ等でくみ上げた水

3）降った雨や溶けた雪は地表を流れて川に流れこみますが、雨や雪が流れ込む範囲

4）地下水帯水層に海水が混入し、地下水の塩素イオン濃度（塩分濃度）が高くなること

5）地表の水（降水を主としてほかにも、湖沼水・河川水、貯水池・雨水浸透ますなどの水、その他）が地下浸透して帯水層に水が供給されるエリア

6）放射性同位体のように放射性崩壊をせず、一定の比率で自然界に安定に存在する同位体

7）河川水が河川敷や旧河道の下層にある砂礫層に流れ込むことを意味します。加茂川の場合、岡村断層の山側から裂罅（れっか）水として、帯水層に流れ込んでいると考えられています。

文献

中野孝教、斎藤 有、申 基澈、佐々木和乙、徳増 実（2015）「RIVER FRONT」Vol. 81、公益財団法人リバーフロント研究所、pp. 26–29

徳増 実、山田佳裕、高瀬恵次、中野孝教（2019）「長期観測結果からみた愛媛県西条平野の断層が地下水位に及ぼす影響について」、地下水学会誌、第 61 巻第 3 号、pp. 183–196

西条市（2017）、西条市地下水保全管理計画

著者情報

徳増　実（西条市経営戦略部政策企画課地域創生室）1982 年愛媛大学大学院農学研究科修士課程修了、1982 年道前福祉衛生事務組合（構成団体：西條市ほか 1 市 2 町）化学分析センター、2004 年西条市市民環境部環境課、2016 年愛媛大学大学院連合農学研究科博士課程社会人コース入学、2017 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

山梨県忍野村の取り組み

大　森　　昇
（山梨県忍野村　企画課）

1. はじめに

本村は明治 8 年（1875 年）に旧内野村と忍草村が合併し、現在忍野村役場は村のほぼ中心部にあり、役場より東側を内野地区、西側を忍草地区と称し、大きく二つに分かれています。

このような村ですが、忍草地区から縄文時代早期の土器が見つかったことや小臼・大臼をはじめ多くの遺跡があることから、村はすでに縄文時代ころから人が住んでいたと考えられています。特に「笹見原遺跡」からは平安時代の遺物として「水神・可」の墨書土器が見つかっていることから、忍野村は古くより水と深くかかわる文化を重んじ、生活用水や農業用水として利用されてきました。

しかし、昭和 50 年代後半になり地下水を生活用水等として利用してきた井戸の水位が低下し始め、生活用水を確保するためのボーリング工事が行われるようになり、それを契機に村は住民の生活用水等を確保するための上水道事業を計画し、村全体に上水道を整備することに決め、昭和 58 年度より事業着手し、昭和 62 年 8 月 20 日一部地域で共用が開始されましたが、約 20 年が経過したころで水源の水質悪化が確認されたため、新しい水源を確保し、安全で安定した給水が出来るよう施設も移転し住民の生活用水の確保に努めてきました。それと並行して地下水の保全にも力を注ぐべく、地下水の村外持ち出し等を規制する地下水資源保全条例を平成 23 年 9 月に制定し、村から地下水が持ち出されないように資源の保全に努めているところです。

2. 忍野村の異なる地盤

忍野村は山梨県の東南部、富士北麓に位置し、村内には富士山世界文化遺産の構成資産であり、国の天然記念物にも指定されている八つの湧水池「忍野八海」が点在している、風光明媚で水と自然に恵まれている面積 25.05 ㎢、人口約 9,600 人の高原の村です。地形は平坦で、周囲を山々に囲まれ、居住地区は役場を中心とした東西の平坦な集落に集中しています。また、村の二地区は地盤（地質）も大きく異なり西側の忍草地区は地下水位が高く軟弱地盤の上に住宅が建てられ、一方東側の内野地区では富士山の溶岩流とみられる堅固な地盤の上に住宅が建てられているといった両極端な地盤となっている特徴があります。

3. 地下水流動の把握

このような地形から近年多発しているゲリラ豪雨等の急激な降雨により居住地域内の排水路などから水が溢れ、住宅地への浸水や交通障害など日常生活に支障をきたす状況が生じたため、村として村民の安全・安心な暮らしを確保するべくゲリラ豪雨等による水害対策を検討することとなりました。検討の過程で調整池や既存河川の改修、河川隋道等が有力な候補案として出されました。

そこで問題となってきたのが地下水脈の把握でした。特に国の天然記念物や富士山世界文化遺産に登録された構成資産にもなっている「忍野八海」の存在でありました。調整池や河川改修、河川隋道を建設する場合には雨水を取り入れるための工事として、地中に溝を掘る導水路工事を行う必要があり、その工事を行うことで忍野八海の水脈に何かしらの影響があっては大変なことになると考

え、それならば事前に「忍野八海」を含む村内の地下水の流動方向を確認するべきではないかとの結論に至り調査を行うこととなりました。

4. 地球研とのかかわり

しかし、いざ調査を行う段階になり本調査業務を行えるところとはどの様な会社なのか、委託業務先の見当すら全くつかない状況で困っていたところ、山梨県世界遺産センターのプレオープン時に秋道所長と出会い、今の忍野村の課題を提示したところ所長より「私が所属している『総合地球環境学研究所（以後「地球研」という。)』では、その様な調査・研究を専門として行っている研究チーム（後の「コアプロジェクト」）がある」との情報をいただいたため、秋道所長を介して「地球研」の研究チームをご紹介いただき、本村の調査目的や依頼内容を説明したところ、調査を引き受けていただけることの了解を得たため、調査に着手出来ることとなりました。また、同時に「コアプロジェクト」のメンバー（自治体）としてプロジェクトへ参加させていただき、「地球研」と協働で調査を行うこととなりました。

調査の事前準備として「地球研」のコアプログラムディレクターである谷口副所長やコアプロジェクトリーダーである同研究所の陀安教授とともに平成 28 年 8 月 15 日、9 月 7 日及び 11 月 11 日と 3 回の打ち合わせを経て、同年 11 月 11 日に平成 28 年度の委託業務契約を締結し、平成 29 年 1 月 17 日～ 19 日までの 3 日間の日程で 1 回目の現地調査に臨みました。調査にあたっては「地球研」の谷口副所長や陀安教授、地球研職員のほか村役場企画課職員とで 3 班に別れて村内の湧水地並びに個人宅の井戸等の地下水を採取し、現地では水温、PH 値、電導度等を測定、また同位体比を測定するため採取したサンプル水を「地球研」へと送り、計測分析等を行っていただきました。

併せて毎月、富士山や杓子山など「忍野八海」周辺地域の降雨を採取し、雨水と湧水の関係性についても調査を実施しているところです。

さらには平成 29 年 8 月 7 日～ 9 日までの 3 日間の日程で 2 回目の現地調査に臨み、調査にあたっては前回と同様に 3 班に別れて村内の湧水地並びに個人宅の井戸等の地下水を採取し、前回と同様の作業を実施しました。

2 回目の調査では前回とどのような変化が見られるのか解析なども併せて実施いたしました。

5. これまでの取り組みで解明されたこと

2 回の村内現地調査及び定期的な雨水採取などから忍野村の地下水について 2 つのことが判ってきました。

(1) 地下水の流動は南側から北側に向かう流れと東側から西側に向かう流れの大きく 2 つの流れがある。

(2) 湧水の年代も遊水池で異なり、5 ～ 8 年の比較的短い期間と 20 ～ 30 年の長い年月とがある。

6. 中間報告と意見・質問

調査の結果を受けて忍野村では「地球研」と協議を行い、調査の中間報告として多くの人たちに知っていただきたいとの思いから『富士山の湧水と文化：忍野八海 ― 忍野の水はどこから来たの？―』と題して、平成 30 年 1 月 20 日に「地球研」との共催で忍野村公開シンポジウムを開催し、調査結果を踏まえた中間報告を「地球研」の薮崎研究員が行い、基調講演として山梨県立富士山世界センターの秋道所長はじめ元山梨県埋蔵文化センターの新津所長、産業技術総合研究所地質調査総合センターの戸崎研究員がそれぞれの分野での講演を行っていただきました。また、シンポジウムには約 300 名余りの方々にご参加いただき、参加者からは地下水の年代や地下貯水量など様々な視点でのご意見・ご質問をいただき、少なからずシンポジウムに参加された方々については忍野村の地下水流動についてご理解いただけたのではないかと思っています。

7. 今後の展開

現在も継続して流動調査を行っていますが、平成 31 年度（令和元年度）からは流動調査に加えて新たに地下貯水量の調査も始めたところなので、今後は両調査を継続して実施し、各種データを蓄積することで、詳細な分析･解析につながり、新たな事象が判明するのではないかと期待しているところです。

今後は調査において得た貴重なデータや資料などを多くの人に知っていただけるような周知の場や展示施設などを整備し、富士山と湧水の関係についても掘り下げていければと考えているところです。

また、富士山周辺の自治体との協力体制が整うならば、富士山に降った雨や雪などが地下水となり、富士山周辺地域にどの様な影響をもたらすのかなど解明できれば、富士山周辺に湧き出る地下水としての貴重な資料となるのではないかと期待を膨らましているところです。

著者情報

大森昇（忍野村　企画課　課長）
昭和 60 年 4 月忍野村役場入庁、建設課、教育委員会、水道課、観光産業課等を経て、平成 28 年 4 月より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

福井県大野市の取り組み

帰　山　寿　章
（福井県大野市　民生環境部上下水道課）

大野盆地は古くから地下水が豊富で、飲料水などの生活用水をはじめ、農業や工業など様々な用途に利用されています。また、名水百選に選ばれた「御清水（おしょうず）」などの湧水地が点在するだけでなく市民と水の関わりには特に深いものがあり水と共生する生活様式や水に関わる伝承など特有の文化を育んできました。

しかし、高度経済成長期に地下水位が低下し、湧水の減少・枯渇が進んだため本市特有の湧水文化を後世に引き継ぐことが困難な状況になりつつあったため、地下水を保全するための様々な施策を行っています。

1. はじめに

本市は、福井県の東部に位置し、北は石川県、東は岐阜県に接し、大野盆地を中心に山々に囲まれた地形であり、総面積 872.43 km^2 の内約 87％を森林が占める自然豊かな地方都市です。

また、白山を源とした九頭竜川とその支流である真名川、清滝川、赤根川の 4 つの一級河川がそれぞれ、北に向かって流れています。

大野盆地は古くから湧水が豊富で、人々はこの湧水を「清水（しょうず）」と呼び親しんできました。

古くは約 440 年前に織田信長の家臣であった金森長近が湧水を利用した城下町を整備しましたが、その城下町は当時では珍しい上下水道を完備したものでありました。

現在でも中心市街地では各家庭に自家用ポンプが設置され、飲用や炊事用、あるいは風呂やトイレ、洗濯、洗車にも地下水を使用していることをはじめ、農業や工業など様々な用途に利用されています。

また､昭和 60 年に名水百選に選ばれた｢御清水」や平成 20 年に平成の名水百選に選ばれた「本願清水（ほんがんしょうず）」などの湧水地が点在するだけでなく、平成 8 年には本市が「水の郷百選」に選ばれたように、市民と水の関わりは特に深いものがあり、水と共生する生活様式や水に関わる伝承など、特有の湧水文化を育んできました。

2. 地下水低下と湧水の枯渇

湧水と共に生きてきた本市ですが、昭和 40 年代後半から 50 年代にかけて地下水位が低下しました。これにより、多い時で約 1,000 軒の家庭で井戸が枯れたり、名水百選の「御清水」や平成の名水百選の「本願清水」が枯渇したりしました。

その原因としては、①九頭竜川や真名川の上流にダムができた、②市街地の上流域で土地改良事業が進み原野が無くなり保水力が落ち、かん養量が減った、③繊維産業が盛んで、市街地に約 200 社あった繊維工場が大量に地下水を使用した、など諸説あります。

3. 地下水の保全施策

本市では、地下水を保全するために地下水審議会を昭和 48 年に設置し、昭和 52 年に地下水保全条例を制定しました。また、市民全体で地下水を守るために、新たに地下水を採取する者は届け出ることや、冬期間の融雪のために地下水を使用しないことなどを定めました。

また、地下水が低下する冬期間には、水田に水をため充て、かん養する「冬期水田湛水事業」を昭和 53 年から開始し、更に平成 8 年には、水環境のシンボルにするために水源地域にあるブナの天然林を約 200 ha を購入しました。

平成 12 年には地下水保全基金をつくり、地下

水保全のための基金を市民から募集しました。そして平成 13 年・14 年には本市の地下水の現状を総合的に把握するため「大野市地下水総合調査」を行いました。そしてこの調査に基づき地下水の健全な管理を行うことを目的に「大野市地下水保全管理計画」を策定しました。

その後、湧水をただ守るだけでなく、湧水に関わる文化も後世に残していく必要があると考え「越前おおの湧水文化再生計画」を平成 23 年に策定しています。

この「越前おおの湧水文化再生計画」では地下水位の最終目標値が設定されており、基本観測井の「御清水観測井」で 1.2 m、「春日公園観測井」で 5.5 m、「菖蒲池観測井」で 7.0 m としていますが、これは先に記述した「大野市地下水総合調査」において、「御清水」が湧水で満たされるための水位が 1.2 m とされており、「御清水観測井」の水位が 1.2 m の時、「春日公園観測井」では 5.5 m、「菖蒲池観測井」で 7.0 m となるとされたためであります。

水位の観測を始めた昭和 50 年代にはこの目標水位より下回った日数は年間 30 日程度でありましが、過去 10 年平均をみると年間 100 日を超えており、平成 21 年には 200 日を超える状態でした。

しかし、平成 23 年に「越前おおの湧水文化再生計画」が策定され、国・県・市をはじめとする関係機関や団体などと連携し地下水保全の取組みを強化した結果、目標水位の超過日数は徐々に減り平成 25 年には 0 日となりました。

関係機関の取り組みの主なものとして、国土交通省　近畿地方整備局　九頭竜川ダム統合管理事務所による真名川ダム弾力的管理や福井県の真名川水際掘削及び河岸攪乱があります。これらにより地下水に大きく関与している真名川の澪筋の固定化や樹林化を解消され、真名川からの地下水浸透が進み、水位の改善が図られたものと考えています。

また、山林が外国資本に買収されるという事例を受け、平成 24 年には「大野市森・水保全条例」を制定しました。この条例では、売買の事前の届出のほか、山林の中で工作物を作る場合も届出をし、事前協議を行うこととしています。

市民の取り組みとして、国の天然記念物である「イトヨの生息地　本願清水」における清掃活動があります。本願清水では、過去には子どもたちがイトヨと一緒に泳いで遊んでいましたが、昭和 53 年には水枯れが起き枯渇状態になってしまったことを契機に、市民総出による湧水再生に向けた活動などが昭和 60 年代の初めから始まり、小学校の子どもたちと大人が一緒に清掃活動を行うなどの様々な努力の甲斐があり、現在は湧水地が復活したところもあります。

4. 地球研とのかかわり

そんな中、平成 24 年に愛媛県西条市で開催された「名水サミット」において、大野市の「本願清水イトヨの里」の館長をお願いしている森教授の紹介で、総合地球環境学研究所の中野教授の「千の水をとって～千点の水の調査からわかったこと」の講演を聞き大野市でも調査をお願いしました。

総合地球環境学研究所、香川大学、同志社大学と、本市の小学校が連携し、本市の市街地にある約 8,000 本の井戸などから採取したデータを使って水温調査を行いました。これは、近年の地球温暖化により気温が上昇しているのに伴い、本市の地下水の温度も変化しているのかを調査するために行ったもので、市内の小学 4 年生～ 6 年生に、各家庭で使っている地下水の温度を、調査日を定めて一斉に測定してもらうことで、本市の水温の変化を監視ししながら学童期からの啓発効果を狙っています。

地球研以外の研究機関・大学と連携した取り組みも行っています。筑波大学とは、平成 25 年度から大野盆地で安定同位体による水循環解析の調査を進めています。

また、国土交通省の国土技術政策総合研究所には、平成 25 年と 26 年の 2 か年で「水循環解析モ

デルによる大野盆地の地下水の流れ」を解析していただきました。

このように当市は水循環を考えていくうえでの研究フィールドとして近年注目されています。

5.「水への恩返し」Carrying Water Project

これまでの取り組みにより大野市の地下水は回復の兆しを見せていますが、市民には地下水は「有って当たり前」の意識が根強く残っています。

そこで、市民が水への感謝と誇りを再認識し、その思いや行動を世界に向けて発信することで当市のブランド力を高め、交流人口の増加と人口減少対策の一つとして「水への恩返し」を基本理念に「Carrying Water Project（以下 CWP という。）」を実施しました。

CWP 活動は市民・企業から寄付を募り、水環境に恵まれない地域への支援とともに、大野の恵まれた「水」を核とした地方創生に向けたブランディング活動を展開するものです。

大野の豊かな水について国内だけでなく世界に発信することで、大野の人々が水に恵まれていることを再認識するきっかけとするもので、これにより、産業や人材を育て特産品などの競争力を高め、地域経済が活性化し、中長期的には人口減少対策とする狙いです。

水環境に恵まれない地域への支援として、公益財団法人日本ユニセフ協会とパートナーシップを締結し、安全な水の確保に苦しむ東ティモール民主共和国への 2017 年から 3 年間､現地の子供たちが清潔で安全な水を使えるように支援しました。

なお CWP に必要な資金は、市民、企業からの寄付の他、ふるさと納税や「越前大野名水マラソン」などの各種イベントの参加者からの寄付を募るなど、全国に支援の輪を広げていきました。

CWP を通じ、水に関して困難を抱える地域と絆を結び、支援や交流を図ることによって、大野市民が自らのアイデンティティをより深く理解するきっかけとすると同時に、CWP は国際的な貢献活動で「水で未来を拓くまち＝大野市」を世界へ発信し、ブランドを確立するための主要なプロジェクトと考えています。

6. 今後の展開

本市では地球研と合同で古民家をリノベーションした「水のがっこう」の整備を進めています。

これは､「水」や「湧水文化」の保全・継承・活用に総合的に取り組むための施設を整備し、水に関する学習や情報発信の拠点とするものです。

施設の 1 階は学習スペースとし、各大学の研究成果や地下水に関するパネルの展示、研究の発表会、情報交換会等を開催するほか、観光客や遠足で本市に訪れた方が自由に水について学習する場に利用します。

2 階は研究室になります。水に関する研究者（大学、研究機関）がフィールドワークを行う時の活動拠点とし、簡単な検査や資材の保管場所として活用します。

多くの研究者にこの施設を利用していただくことで「水」という貴重な地域資源を生かし、大学等研究機関による研究の場、展示や情報発信等の場として活用し、地域の活性化を図りたいと考えています。

この施設は令和 2 年 3 月 22 日（世界水の日）にオープンしたばかりです。多くの皆様のお越しをお待ちしています。

著者情報

帰山寿章（大野市民生環境部　上下水道課　課長）1983 年大野市役所入庁、2012 年大野市産経建設部　建設整備課　湧水対策室に配属、2019 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

兵庫県千種川流域
― 地元住民の調査が原動力となった環境問題解決への取り組み ―

藤　吉　　麗
（総合地球環境学研究所）

兵庫県西部に位置する千種川流域では、地元住民の手による「千種川一斉水温調査」が 2002 年から毎年続けられています。総合地球環境学研究所は 2015 年より神戸大学とともにこの調査に参画し、水の詳細な化学分析を通して千種川の水環境の解明を目指しています。地元住民による調査が原動力となり、千種川の水環境についてさまざまなことが明らかになってきました。

1. 住民主体の「千種川一斉水温調査」

千種川では、毎年 8 月の第一日曜日に、川の源流から河口までの全 94 地点において、川の水温と電気伝導率を調べる「千種川一斉水温調査」が行われます。この調査は、「千種川の環境の現状を知りたい」という流域の住民の強い気持ちに応じて、兵庫県立人と自然の博物館の提案によって 2002 年に始まりました。調査のリーダーを務める横山正さんは、「元々は千種川を大事に思う住民が、川の上流や下流でホタルの観察やチチコ釣りなどの活動を個別に行っていた。千種川全体を視野に入れて、みんなで共通の活動をしたいと考えたときに、この形ができた」と調査のはじまった背景を説明しています。

水温は、水に溶ける酸素の量と関係し、水温が上がると水に溶ける酸素の量が減少し、アユに代表されるような生物の生息にとって悪影響を与えるため、水生生物の生息環境の指標となります。また、電気伝導率は、数値が高いほど水に溶け込む物質が多いことを示し、河川水の汚染の指標の一つとなります。これらの指標を使うことで、だれもが簡単に環境の良しあしを大まかにとらえることができます。さらに、膝まで川に浸かった時に肌で感じる水温の冷たさやぬるさによって、川の状態を実感することができます。

2. 千種川の現状と課題

兵庫県西部に位置する千種川は、流域面積 754 km^2、本川流路延長 72 km の二級河川で、流域内には県内の 2 市 4 町（赤穂市、相生市、たつの市、宍粟市、上郡町、佐用町）が含まれています。昭和の名水百選に選定された清流を有し、アユやオオサンショウウオなどの生物が生息しています。一方、2009 年の兵庫県西・北部豪雨の洪水被害を受けて、兵庫県は 2015 年にかけて大規模な災害復旧工事を実施しました。その結果、川幅拡張工事が行われた中流域を中心に水深が浅くなり、水温上昇が確認されています。2019 年の調査では、全地点のほぼ半数の 45 地点で水温が 30 度を超えました。横山さんは、「災害復旧工事は必要だったが、川に棲む生き物にとっては、夏の暑さをしのぐために淵などが必要。今後、人工的に瀬と淵を作るなど、生き物の生息環境への配慮が必要。行政には、水温調査の結果を参考として活かしていただきたい」と話しています。

3. 毎年の水温調査からわかってきたこと

調査をはじめるまでは、住民の方々がなんとなく感覚的に思い込んでいたことが、水温調査を継続していくことで様々な発見が蓄積されていきました。調査開始時には、「川は上流の千種が冷たく、下流の上郡や赤穂に行くほど高くなる」と思い込んでいたものが、実際は支流ごとに温度分布があ

ることに気がつきました。次の発見は、中流部でも最高水温を示す地点があったことです。農業用の風船ダムが 100 m の区間に 2 つ、3 つもあり、川が流れておらず、農業に起因する環境であることがわかりました。さらに、水温の低い小さな支流が合流する地点では、スポット的に温度低下効果があることもわかり、細流の重要さを再発見しました。その後も、冷たい水塊が存在できる深い淵、たっぷり酸素や餌の虫を供給する瀬の重要さなど、当たり前の事実を再認識でき、アユやうなぎが減少する原因を実感しました。その一方で、2009 年の水害後の災害復旧工事による短期間の環境変化、瀬や淵の消失、細流の水路化などの高水温エリアの拡大をも実感することとなりました。

4. 総合地球環境学研究所と神戸大学の参画による調査からわかってきたこと

総合地球環境学研究所は 2015 年より神戸大学とともにこの調査に参画しています。水温と電気伝導率の測定に加えて、参加者の方々に採水をお願いし、水の詳細な化学分析を行っています。

これまでに、カルシウムイオン、塩化物イオンなどの主要イオンの濃度を調べ、水質としての千種川の特徴を明らかにすることができました（図 1）。

また、様々な人間活動（生活排水、農業の施肥など）から川に排出される硝酸イオンについて、川の中の硝酸イオンがどこからきたか？　を、安定同位体分析[1)] とよばれる手法を用いて調査しています（図 2）。この調査から、流域内の 2 つの支川（大日山川、矢野川）では硝酸イオンの起源が有機質肥料と排水に由来する可能性が高いことが明らかになりました。

5. 研究成果を住民と共有し、視点を重ね合わせることの重要さ

総合地球環境学研究所と神戸大学の参画から得られた研究成果の一部は、2018 年 6 月に開かれた、

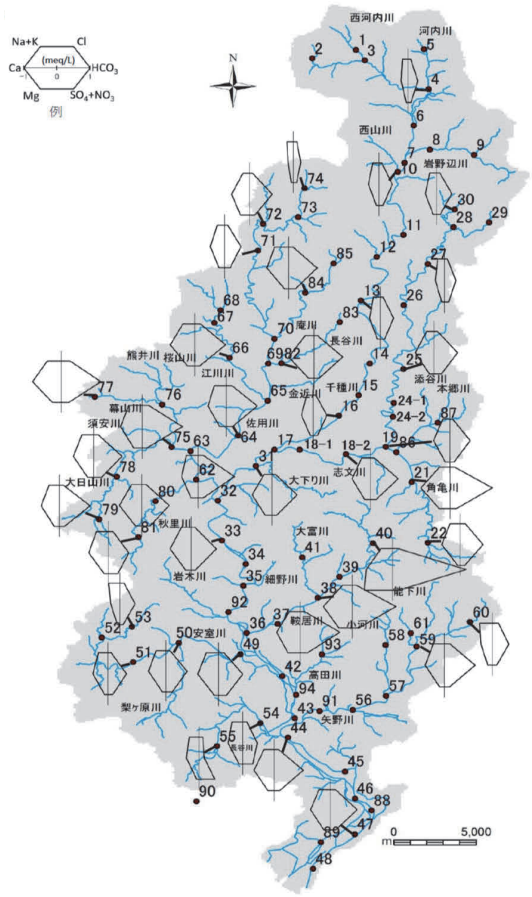


図 1. 千種川流域の水質（ミネラル成分）の分布と特徴（山本 2016）

流域の 5 つのライオンズクラブ合同主催による「千種川フォーラム」で紹介しました。また兵庫県立人と自然の博物館が開催する「共生のひろば」にて、2018 年と 2019 年にポスター発表を行い、住民の方々から様々な意見をいただくことができました。

住民の方々からいただく意見は、「そこに住んでいるからこそ知っていること」であり、それが研究を進める上での大きな進捗のきっかけになることがあります。例えば、川の中の塩化物イオンの濃度について、地点ごとの濃度が高い低いなどの傾向がわかったが、その原因が見えなかったときに、「この辺りは冬に道路が凍結するから融雪剤をまく。その影響ではないか？」と鋭い指摘をいただきました。実際に起きている問題の解決の点でみると、住民の方々だからこそ気づく「生活者としての視点」と、研究者が提供できる「客観

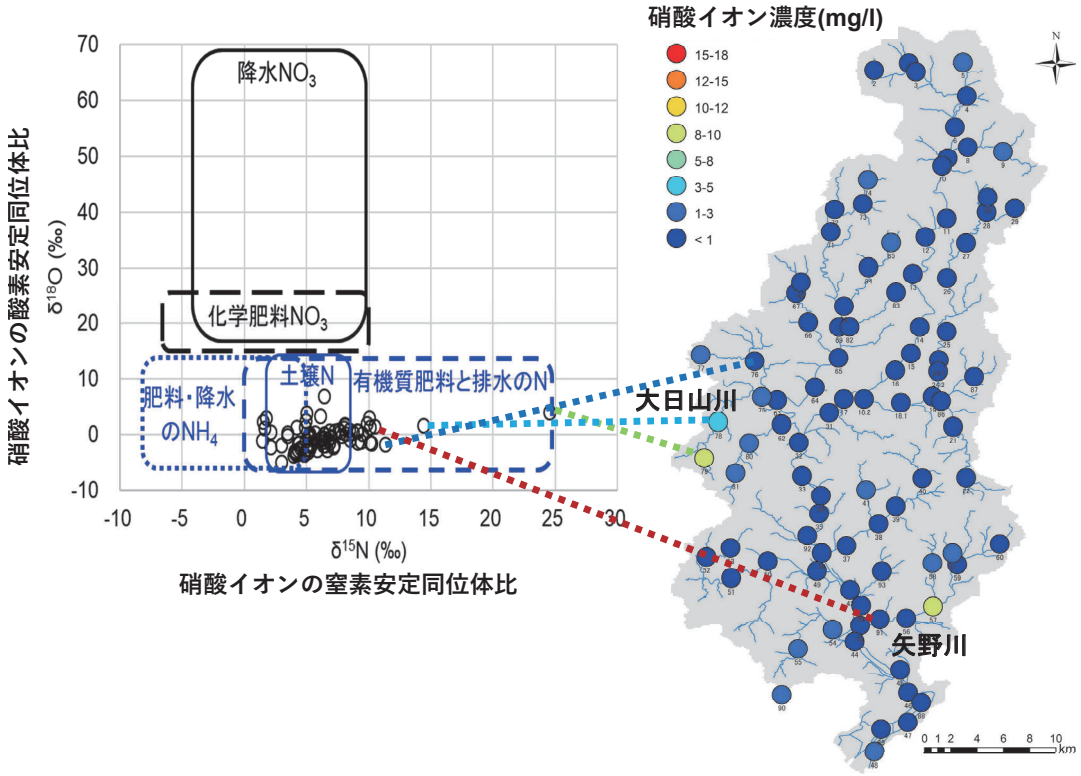


図 2. 安定同位体分析を用いた、千種川流域の硝酸イオンの起源推定（右の図は、2018 年 8 月の千種川流域の硝酸イオン濃度の空間分布。左の図は、安定同位体分析 1）を通した硝酸イオンの起源推定に用いる図）

的な視点」を合わせることで、地域の問題解決に向かいやすいのではないかと感じています。

「千種川一斉水温調査」は、年々参加者の高齢化が進み、参加者人数も減少してきていることから、調査自体の継続が懸念されています。総合地球環境学研究所と神戸大学は、調査を主導するメンバーの方々にこれまでの研究成果を全て還元し、今後の調査の方向性を決めるためのサポートを全力で行う所存です。

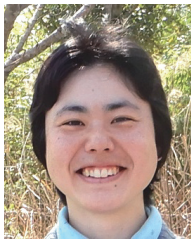
注釈

1）硝酸イオン（NO_3^-）は窒素原子 1 つと酸素原子 3 つからできています。窒素原子には、質量数 14 と 15 の二種類の、安定に存在する窒素原子があり、これらを互いに同位体といいます。同様に、酸素原子には、質量数 16 と 18 の二種類の、安定に存在する酸素原子があります。窒素および酸素に含まれるこれら同位体の比率を安定同位体比といい、窒素および酸素の安定同位体比を調べることにより、硝酸イオンの起源や動態に関する情報を得ることができます。

文献

山本雄大（2016）卒業論文「兵庫県千種川の水質に関する地球化学的研究」、神戸大学

著者情報



藤吉麗　総合地球環境学研究所「環境研究における同位体を用いた環境トレーサビリティー手法の提案と有効性の検証」研究員。博士（環境科学）。2016 年に北海道大学大学院環境科学院で学位取得後、山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター附属演習林に技術補佐員として勤務。2017 年 6 月より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

リン酸酸素安定同位体比を使って リンはどこからやってくるのかを調べる

石 田 卓 也
（総合地球環境学研究所）

1. リンが引き起こす環境問題

河川や湖沼に関わる環境問題として、富栄養化や赤潮といったことばを聞いたことがあるでしょうか。富栄養化は、水に溶けている栄養素が異常に増える現象で、家庭、工場、農業排水が未処理のまま河川などに流れることで発生します。富栄養化した状態の河川や湖沼では、増殖の速いプランクトンが異常繁茂します。プランクトンの色素によって水が赤く染まって見えることから赤潮と呼ばれます。プランクトンが異常繁茂すると、ほかの生物が生きられなくなります。

リンは生物にとって必須栄養元素でエネルギー代謝や遺伝など多くの生命活動に関わっています。同時に、河川を含む多くの生態系において生物に利用可能な量が少ないため、生物の成長や増殖を制限する要因になっています。そのため、リンは最も富栄養化や赤潮の原因になりやすい栄養素の一つといえます。リンがどこから河川や湖沼にやってくるのか、リンの供給源を特定することが富栄養化を改善するために非常に重要になります。

2. リン酸酸素安定同位体比でリンの供給源を調べる

リンは、岩石や土壌などの自然物から、そして工場、家庭の排水や農業などの人間活動によって河川へ流入します。これらのリンの供給源のうち、どれが最も重要なのかを特定することは、その河川流域の土地利用や地質、排水の処理状況など様々な要因が関わってくるので、そう単純ではありません。そこで、私たちの研究グループでは、河川へのリンの供給源を特定するために、リン酸酸素安定同位体比（$\delta^{18}O_{PO4}$）を用いました。$\delta^{18}O_{PO4}$ とは、リン酸（PO_4）の酸素（O）の安定同位体比（^{16}O と ^{18}O の比）のことで、リンの供給源や生態系内の循環プロセスを評価できることから、世界中の研究者が注目しています。リンの供給源毎にある $\delta^{18}O_{PO4}$ 値を持つので、供給源と河川の $\delta^{18}O_{PO4}$ 値をそれぞれ調べ、河川の値がどの供給源の値に近いのか、土地利用との関係はどうなのかなどを調べることで、どの供給源からの負荷が大きいのかを評価することができる可能性があります。しかし、分析方法が非常に難しいので、世界的に見ても、$\delta^{18}O_{PO4}$ を分析している研究室は多くありません。そのため、この分析によって実際に何がどこまでわかるのかは、あまりわかっていませんでした。

私たちの研究グループでは、この分析技術を習得するため、多くの試行錯誤をくり返してきました。そして 5 年以上の歳月をかけ、ようやく分析できる目途がたち、$\delta^{18}O_{PO4}$ を適用した河川調査を行いました。調査は滋賀県の琵琶湖へ流れこむ河川の中で最大の野洲川で行いました。$\delta^{18}O_{PO4}$ を分析するためには、まず試料となる河川水を 20 ～ 40 L 採取し、それを濾過・濃縮する必要があります。これを野洲川の上流から下流まで 30 地点で、くり返さなければならず、合計で 800 L の河川水を集めました。一つ 20 kg のタンクを何回も持ち運ぶ作業は身体的にとても大変で、その後の試料処理は深夜にまで及び、精神的にもとてもつらいものがありました。その後、リン供給源の候補となる試料（下水処理水、水田土壌、森林

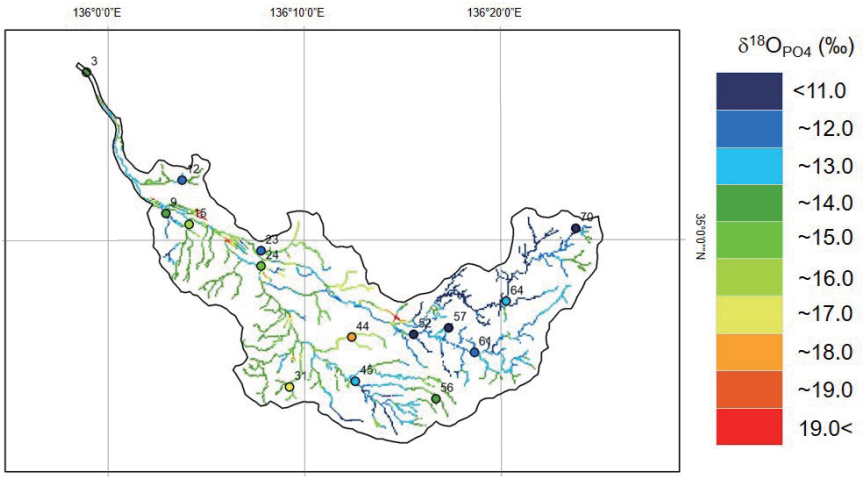


図 1. 野洲川のリン酸酸素安定同位体比の同位体地図。色の違いはリン酸酸素安定同位体比の違いを示している。〇で示しているのが実際の調査地点で、ラインになっているものが予測した河川のリン酸酸素安定同位体比を示している。

土壌、岩石、肥料）も採取しました。そのすべての試料の実験処理にさらに 1 年以上が必要でした。実験処理には、高度な専門知識と経験を必要とする操作がいくつもあります。分析技術を習得したとはいえ、私たちは多くの失敗をくり返してしまいました。それでも地道に作業をつづけ、ようやくリン供給源と 15 地点分の河川水のデータを得ることができました。残念ながら採取したうちの半分、15 地点分の河川試料の実験はうまくいかず、データを失うことになりました。しかし、残りのデータから野洲川の $\delta^{18}O_{PO4}$ がどのような空間分布をしているのかを示すことができました。

河川と供給源の $\delta^{18}O_{PO4}$ と流域内の土地利用や地質などのデータを合わせて解析することで、野洲川流域では、岩石と水田が重要なリン起源であることが明らかになりました。さらに、土地利用や地質の情報を統合することで野洲川の安定同位体比地図を作成し、$\delta^{18}O_{PO4}$ を「見える化」することができました（図 1）。将来、流域内で新たなデータを手に入れたとき、この同位体地図と比較することで、今回の調査では見つけられなかったリン起源の有無を評価できると期待しています。

多くの時間がかかりましたが、この研究で、私たちは世界で初めて、流域スケールで $\delta^{18}O_{PO4}$ を適用し、リンの供給源評価に成功した先駆者となりました。この評価方法を活用することで、河川や湖沼での効果的な水質改善策を考えるうえで重要な情報を提供できると期待できます。現在、フィリピンの人為かく乱の影響が強い河川でも同様の調査をしており、フィリピンの水質保全対策へ活かそうと考えています。

文献

Ishida T, Uehara Y, Iwata T, Cid-Andres AP, Asano S, Ikeya T, Osaka K, Ide J, Privaldos OLA, Jesus IBBD, Peralta EM, Triño EMC, Ko CY, Paytan A, Tayasu I, Okuda N. (2019) Identification of Phosphorus Sources in a Watershed Using a Phosphate Oxygen Isoscape Approach. Environmental Science & Technology 53: 4707–4716. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05837

著者情報

石田卓也（総合地球環境学研究所 栄養循環プロジェクト研究員）
2015 年名古屋大学大学院生命農学研究科博士課程後期（農学）修了。2016 年から現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

3章
ところで、同位体って何？

1章、2章で使ってきた「同位体」について、知っていると便利な基礎を解説します。
原理や仕組みを知りたい方はお読みください。
使い方の例が知りたい方は、この章を飛ばしていただいても結構です。

元素の同位体比

陀　安　一　郎
（総合地球環境学研究所）

1. 元素の安定同位体と放射性同位体

元素は、すべての物質や生物を構成する要素です。図１に現在確認されている元素のリスト（周期表）を示しますが、一つ一つの元素は「原子番号」で特定されます。「原子番号」は元素に含まれる「陽子」の数のことを意味します。一方、同じ元素（同じ陽子数）であっても、「中性子」の数は原子によって異なることがあり、これを「同位体」と呼びます。「同位体」の中には、時間が経つと放射線を出して原子核（陽子と中性子が結合した複合粒子）が崩壊する「放射性同位体」と、時間が経っても原子核が崩壊しない「安定同位体」が存在します。

図２に水素の例を示しますが、この３つはいずれも陽子が１個なので、原子番号１の水素です。このうち、左の２つは中性子の数が０個と１個ですが、いずれも時間が経っても崩壊しないので、安定同位体といいます。一方、右の中性子が２個のもの（^{3}H）は時間が経つと崩壊するので、放射性同位体といいます。

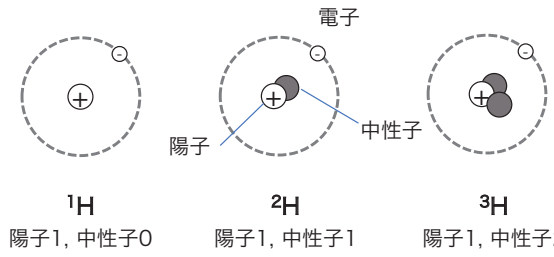


図 2. 水素の同位体の例　原子番号１の水素には陽子１個と中性子０個を持つ安定同位体 ^{1}H、陽子１個と中性子１個を持つ安定同位体 ^{2}H（重水素、デューテリウム、D とも書く）、陽子１個と中性子２個を持つ放射性同位体 ^{3}H（三重水素、トリチウム、T とも書く）があります。

族 / 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテニウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	ランタノイド系	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	アクチノイド系	104 Rf ラザホージウム	105 Db ドブニウム	106 Sg シーボーギウム	107 Bh ボーリウム	108 Hs ハッシウム	109 Mt マイトネリウム	110 Ds ダームスタチウム	111 Rg レントゲニウム	112 Cn コペルニシウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フレロビウム	115 Mc モスコビウム	116 Lv リバモリウム	117 Ts テネシン	118 Og オガネソン

凡例
原子番号
元素記号
元素名

ランタノイド系	57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリニウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イッテルビウム	71 Lu ルテチウム
アクチノイド系	89 Ac アクチニウム	90 Th トリウム	91 Pa プロトアクチニウム	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm キュリウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリホルニウム	99 Es アインスタイニウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデレビウム	102 No ノーベリウム	103 Lr ローレンシウム

図 1. 元素の周期表（日本化学会原子量専門委員会 2019）。本書に登場する「軽元素」はオレンジ、「重元素」は緑で表示します。

2. 元素の同位体比

「同位体比」とは、同位体の数の比のことを指します。どの比を「同位体比」として使うかは、それぞれの元素によって異なっています。詳しくは、「軽元素同位体」および「重元素同位体」の章で説明しますが、ここでは図 2 の水素について見てみましょう。

地球上の水のほとんどは海水に存在しますが、海水（H_2O）は水素（H）と酸素（O）で成り立っています。海水の水素の安定同位体は ^{1}H が 99.984％、^{2}H が 0.016％存在します（Meija et al. 2016）。これを国際機関である IAEA が「標準海水（VSMOW）」と呼んでいます。この標準海水について、2 つの同位体の存在比（[^{2}H の量]／[^{1}H の量]）を計算することができます。一方、皆さんの家の水道の蛇口から出てくる水の中の水素にも ^{1}H と ^{2}H が存在しますが、これらから同様に 2 つの同位体の存在比（[^{2}H の量]／[^{1}H の量]）を計算することができます。

しかし、この同位体の存在比（同位体比）の値は非常に小さく（例えば VSMOW の水素の場合は 0.00015576）、また自然界での様々な物質の同位体比の変化も小さいため、これらの値の差がわかりにくいことから、同位体比を「標準物質に対する偏差（δ 値）」で表すことがあります。試料の水素同位体比（$\delta^{2}H$）は、試料と標準物質（水素については VSMOW）の同位体比のさらに比をとった「偏差」を計算し、

$$\delta^{2}\mathrm{H} = \frac{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H}\right]_{\text{試料}}}{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H}\right]_{\mathrm{VSMOW}}} - 1 \quad \text{（式 1）}$$

と表します。同位体の割合に関して地球上での変動はほんのわずかなので、式 1 の値は 0 に近い数字になります。そのため、同位体比（δ 値）は一般的にこの数字を千分率（‰）で表現します。例えば、この値が 0.006 の場合は 6‰となりますし、−0.010 の場合は −10‰となります。これは「標準物質（「軽元素同位体」の項目を参照）」に比べて、試料中の「重い同位体」が多いとプラスの値、少なければマイナスの値になります。

文献

Coplen TB (2011) Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. Rapid Communications in Mass Spectrometry 25: 2538–2560. https://doi.org/10.1002/rcm.5129

Meija et al. (2016) Isotopic compositions of the elements 2013. Pure and Applied Chemistry 88:293–306. https://doi.org/10.1515/pac-2015-0503

日本化学会原子量専門委員会（2019） http://www.chemistry.or.jp/activity/atomictable2019.pdf

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所 研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

軽元素同位体

陀 安 一 郎
（総合地球環境学研究所）

地球上には 100 を越える元素が存在しますが、どこまでを「軽元素」、「重元素」と呼ぶかという定義はありません。ここでは、気体試料で同位体比を分析する、水素（H）、炭素（C）、窒素（N）、酸素（O）、イオウ（S）といった有機物を構成する主要元素の同位体を便宜上「軽元素同位体」と表記します。ここでは、これらの元素に関して簡単な特徴を示します。

1. 軽元素同位体比の表記

軽元素の安定同位体に関して、表 1 にそれぞれの存在割合の例を示しました。自然界では、それぞれの同位体の存在割合は変動しますので、代表的な値として国際機関である IAEA が「標準物質」としている物質の存在割合を記載しています。

試料における軽元素の同位体比は、「元素の同位体比」の項目で示したように、表 1 に示したそれぞれの標準物質に比べて「重い同位体」がどれだけ多いかという「標準物質に対する偏差（δ 値）」で表します。水素の場合は、試料中の重い同位体 ^{2}H と軽い同位体 ^{1}H の比が、標準物質の標準海水（VSMOW）に比べて多ければプラスの値、少なければマイナスの値になります。

$$\delta^{2}\mathrm{H} = \frac{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H}\right]_{\text{試料}}}{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H}\right]_{\mathrm{VSMOW}}} - 1 \quad \text{（式 1）}$$

酸素の同位体比も同様に表します。

$$\delta^{18}\mathrm{O} = \frac{\left[{}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O}\right]_{\text{試料}}}{\left[{}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O}\right]_{\mathrm{VSMOW}}} - 1 \quad \text{（式 2）}$$

表 1. 軽元素の安定同位体の種類、標準物質として定められている物質、およびその同位体存在割合（Meija et al. 2016）。

元素名	標準物質及びその同位体存在量	
水素（H）	標準海水（VSMOW）	
	^{1}H	99.984%
	^{2}H	0.016%
炭素（C）	矢石（VPDB）	
	^{12}C	98.894%
	^{13}C	1.106%
窒素（N）	空中窒素（Air）	
	^{14}N	99.634%
	^{15}N	0.366%
酸素（O）	標準海水（VSMOW）	
	^{16}O	99.762%
	^{17}O	0.038%
	^{18}O	0.200%
イオウ（S）	トロイライト（VCDT）	
	^{32}S	95.040%
	^{33}S	0.749%
	^{34}S	4.197%
	^{36}S	0.015%

2. 水素・酸素同位体比

まず、水のことを考えてみましょう。地表のほとんどの水は海に存在しています。海や陸から蒸発した水蒸気は雲を作り、雨として降ってきます。地表から浸透した水は地下水になり、地表面を流れる水は河川となり、ともに海へと注ぎます。これら一連の水の動きを水循環といいます。

水素（H）と酸素（O）は水（H_2O）を構成する元素のため、水循環の研究に用いることができます。水の蒸発や凝結には、同位体分別（Isotopic fractionation）[1)] が起き、同位体比が変化します。

図 1 に示しますように、標高の低い場所では水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）ともに高い同位体比を持つ雨が降り、標高が高くなるほど低い同位体比を持つ雨が降ります。これを「高度効果」といいます。そのほか、一般に緯度が高いほど（緯度効果）、内陸になるほど（内陸効果）、気温が低いほど（温度効果）、雨量が多いほど（雨量効果）、同位体比は低くなり、「水」に特徴が生まれることになります。

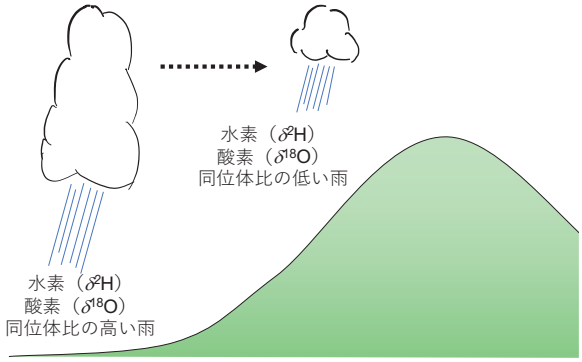


図 1. 水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）の「高度効果」の概念図。

また、水（H_2O）には水素と酸素の両方の同位体比が存在しますが、世界全体の雨の水素と酸素の同位体比の関係を見ると、

$$\delta^2H = 8 \times \delta^{18}O + 10‰ \qquad (式\ 3)$$

の関係があります。これを天水線（Meteoric water line）の式といいます（Craig 1961）。実際の降雨や湖沼の水は、蒸発などの影響を受けて必ずしも式 2 のような関係を持っていない場合もあります。そこで、d-excess 値（d 値とも略す：deuterium excess）という値を計算して水の特徴を表します。

$$d = \delta^2H - 8 \times \delta^{18}O \qquad (式\ 4)$$

水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）、d-excess 値の 3 つの値は水の特徴を示すため、降水がどのような経路で河川水や地下水を形成するかといった水の流動や、地下水の起源となる降水がどの標高に降ったのかなどの研究に用いることができます。

また、水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）は、水以外の物質でも用いることができます。例えば、植物を構成する有機物の水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）は、植物が吸収した水の水素・酸素同位体比の値と、蒸散の影響を受けます。これらの関係をうまく使うと、水循環と生態系の関わりについての研究を行うことができます。

3. 炭素・窒素同位体比

炭素（C）と窒素（N）は生物の体などの有機物を構成する主要な元素であるために、生態系の研究によく用いられます。植物は、大気中の二酸化炭素（CO_2）と水（H_2O）から光のエネルギーを用いて糖（デンプン）を作ります。植物体の窒素は、土壌中で分解された無機態の窒素を取り込んで作られます。

炭素・窒素の同位体比の定義は、それぞれ化石の矢石（VPDB）と空中窒素（Air）とを標準物質として、

$$\delta^{13}C = \frac{\left[{}^{13}C/{}^{12}C\right]_{試料}}{\left[{}^{13}C/{}^{12}C\right]_{VPDB}} - 1 \qquad (式\ 5)$$

$$\delta^{15}N = \frac{\left[{}^{15}N/{}^{14}N\right]_{試料}}{\left[{}^{15}N/{}^{14}N\right]_{Air}} - 1 \qquad (式\ 6)$$

と表します。大気中の二酸化炭素（CO_2）の炭素同位体比 δ^{13}C は、光合成と呼吸という生物圏とのやり取りによって影響されていますが、産業革命以降は人間の影響も強く現れています。今の大気中の二酸化炭素濃度は産業革命前の 280 ppm（0.28％）から上昇して 400 ppm（0.4％）を超えつつあります。この原因は、化石燃料（石炭および石油）ですが、大気中の二酸化炭素の炭素同位体比の変化からも証明できます。化石燃料は昔の生物が光合成によって大気中から固定した炭素が地中深く埋められたものです。生物の光合成には、C3 植物（木本（いわゆる「木」）、米や麦などの多くの草本：δ^{13}C ＝－27‰前後）、C4 植物（とうもろこしやサトウキビ、乾燥熱帯に生息するイネ科の草本：δ^{13}C=－12‰前後）、CAM 植物（サボ

テンなどの多肉植物：$\delta^{13}C$=－12 ～－30‰と広い範囲）といったタイプがありますが、多くを占める C3 植物では同位体分別により $\delta^{13}C$ が低い有機物を生成します。化石燃料は､昔の生物の「化石」ですので、これを燃焼することで $\delta^{13}C$ が低い CO_2 を大気中に放出することになります。大気中の二酸化炭素の炭素同位体比（$\delta^{13}C$）は、産業革命前には－6.5‰でしたが、現在は－8‰～－9‰へと下がっています。この事実は、現在の大気中の二酸化炭素上昇が、人類が化石燃料の燃焼によって起きていることの証拠にほかなりません。

では、動物はどうでしょうか？草食動物は、植物の炭素・窒素を利用しますし、肉食動物は餌となる動物の炭素・窒素を利用します。動物が餌を食べる時、一般的に餌の炭素・窒素同位体比よりも炭素同位体比は 0.8‰程度、窒素同位体比は 3.4‰程度高い値を示します（栄養濃縮係数）[2)]。この経験則を用いますと炭素・窒素同位体比を用いて「食物網」（食う―食われる関係）を描くことができます。

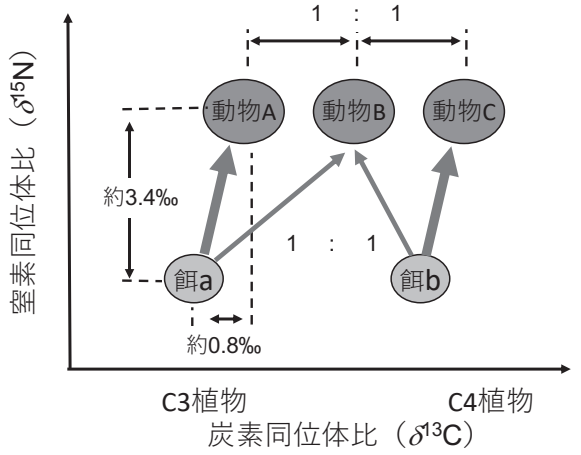


図 2. 炭素･窒素同位体比を用いた「食物網」の概念図。餌 a だけを食べる動物 A と、餌 b だけを食べる動物 C はそれぞれの餌の「右上」に位置します。餌 a と餌 b を食べる動物 B は、ちょうどその真ん中に位置します。

また、食物網以外にも窒素同位体比はいろいろな使い方ができます。例えば、植物の栄養源になる硝酸イオン（NO_3^-）は、微生物が有機物を分解しアンモニウムイオン（NH_4^+）になったものが酸化（硝化）されたものですが、過剰な硝酸イオンは富栄養化の原因になったり健康被害をもたらしたりします。水環境の評価・管理を行う上では、その起源に関する情報が重要になります。硝酸イオンの起源、すなわちどのような経緯でこの硝酸イオンができたかを調べるために、硝酸イオン（NO_3^-）の窒素同位体比（$\delta^{15}N$）、酸素同位体比（$\delta^{18}O$）を用いることができます（「兵庫県千種川流域」の項目を参照）。

同様の栄養成分に関して､リン酸イオン（PO_4^{3-}）についても考えたいのですが、残念ながらリン（P）には安定同位体が 1 種類しかないため、重要な元素であるにもかかわらず、リンについて安定同位体手法は用いることが出来ません。しかしながら、近年リン酸イオン中の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）を用いる研究が行われています（「リン酸酸素安定同位体比を使ってリンはどこからやってくるのかを調べる」の項目を参照）。

4. イオウ同位体比

イオウも、炭素や窒素と同様に、有機物を構成する主要な元素の一つで、生態系の研究に用いられています。イオウ（S）同位体比は、本項の他の同位体比同様、隕石のトロイライト（VCDT）を標準物質として、

$$\delta^{34}S = \frac{\left[{}^{34}S/{}^{32}S\right]_{試料}}{\left[{}^{34}S/{}^{32}S\right]_{VCDT}} - 1 \qquad （式 6）$$

と表します。

陸上におけるイオウの起源は岩石に起因しますが、硫酸イオンの形で水に溶けて生態系を循環します。この循環を解明するために硫酸イオン（SO_4^{2-}）のイオウ同位体比（$\delta^{34}S$）、酸素同位体比（$\delta^{18}O$）を用いることができます（「兵庫県千種川流域」の項を参照）。一方、海には多量の硫酸イオンが存在し、海の硫酸イオンのイオウ同位体比（$\delta^{34}S$）は均一な値（21.0‰）をとります（Rees et al. 1987）。

イオウ同位体比について、図 2 で示した栄養濃

縮係数は 0‰に近い値を示しますので、動物の体のイオウ同位体比は餌のイオウ同位体比とほぼ同じと考えられます。これらの関係を用いて、例えばある生物が陸由来のものと海由来のものとをどのくらいの割合で利用しているのかを推定することが可能になります（「骨が記憶する過去の生態系」の項目を参照）。

注釈

1）蒸発や凝結といった物理過程や、化学反応においては、反応が起こる前の物質（基質）と反応が起こった後の物質（生成物）の同位体比が異なり、それを同位体分別といいます。一般には、「軽い」同位体の方が「重い」同位体に比べ反応速度が速いため、基質に比べ生成物の同位体比の方が低くなります。反応においてどれだけ同位体比が変わりうるかを示す係数を「同位体分別係数（Isotopic fractionation factor）」と呼びます。

2）生物の捕食により、餌に比べて体の同位体比がどれくらい変わるかを示す値を栄養濃縮係数（trophic discrimination factor）と呼びます。同位体分別係数が化学的プロセスを示すのに対し、濃縮係数は体内の複雑な代謝の結果を示しています。

文献

Coplen TB (2011) Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. Rapid Communications in Mass Spectrometry 25: 2538–2560. https://doi.org/10.1002/rcm.5129

Craig H (1961) Isotopic variations in meteoric waters. Science 133:1702–1703. https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702

Meija et al. (2016) Isotopic compositions of the elements 2013. Pure and Applied Chemistry 88:293–306. https://doi.org/10.1515/pac-2015-0503

Rees CE, Jenkins WJ, Monster J (1978) The Sulphur isotopic composition of ocean water sulphate. Geochimica et Cosmochimica Acta 42:377–381. https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90268-5

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

重元素同位体

申　　基　澈
（総合地球環境学研究所）

重元素というものが何を指すのかということには決まった定義はありません。これは便宜上使う言葉であり、分野によってはその意味も変わります。地球科学分野では主に金属元素のことを言いますが、軽元素（水素、炭素、窒素、酸素等）より重い元素という意味で使う人もいます。

まず、重元素同位体について話す前に、用語について話しておきます。同位体は、原子核が安定しているかどうかによって放射性同位体（Radioactive Isotope；RI）と安定同位体（Stable Isotope；SI）とに分けられますが、この安定同位体には、もとから安定な同位体と放射起源同位体（Radiogenic Isotope）が含まれます。ここでは重元素（金属元素）の放射起源同位体と安定同位体の両方について話します。一般的に重元素同位体というと放射起源同位体のことを指すことが多いのですが、2000 年頃から分析技術の発展に伴い、それまでは出来なかった金属元素の安定同位体の測定が可能になったため、両方を区別しておく必要があります。

1. 放射起源同位体（Radiogenic Isotope）

一般的に安定同位体というのは、太陽系が出来て以来その存在量に変化がなくて一定に安定して存在しているものですが、放射起源同位体は親元素である放射性元素の放射壊変によって生成する安定した同位体です。この放射起源同位体は、時間が経つことによってその存在量はどんどん増えていきます。その一方で親元素の放射性元素はその存在量が少なくなっていて、最終的にはなくなることになります。この関係を「親元素（放射性）— 娘元素（安定）」と表記します。このような同位体は、条件が合えばそれらを含んだものの年代測定に用いることができます。昔から地球と隕石の年代や各種岩石の形成年代測定に用いられ、U-Pb（ウラン — 鉛）年代測定法や Rb-Sr（ルビジウム — ストロンチウム）年代測定法などがこれに当たります。このような放射性同位体－放射起源同位体は他にも K-Ar、Sm-Nd、U-Pb、Th-Pb、Lu-Hf、Re-Os などがあり、アルゴン（Ar）、ネオジミウム（Nd）、鉛（Pb）、ハフニウム（Hf）は放射起源同位体となります。ここでは Sr（ストロンチウム）を中心にお話しします。

Sr は 4 つの安定同位体を持っており、^{84}Sr、^{86}Sr、^{87}Sr,^{88}Sr です。^{87}Sr が放射起源同位体ですが、厳密にいうと太陽系が形成された時にすでにあった安定同位体とその後 ^{87}Rb の放射壊変で生成された放射起源同位体の両方からなっています（図 1）。

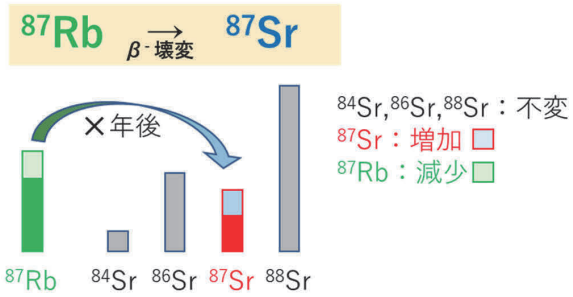


図 1.　Rb の放射壊変と Sr 安定同位体の変化

安定同位体である ^{84}Sr、^{86}Sr、^{88}Sr の比は地球上のどの物質でも一定の値を持っているため変わりません。変わるのは量が増える ^{87}Sr のみです。

同位体研究では、実際計測が難しい各同位体の絶対値を求めるより、それらの存在比の方が比較的に容易に測定できます。Sr では ^{87}Sr/^{86}Sr 比で放射起源同位体を、^{88}Sr/^{86}Sr 比で安定同位体を求めています。特に ^{87}Sr/^{86}Sr 比は時間の経過でし

か変化しないため、ある物質に含まれている Sr 放射起源同位体比は、温度や圧力変化などの環境変化によってはその値が変わりません。

$^{87}Sr/^{86}Sr$ の放射起源同位体は 1960 年代以降から岩石研究に広く利用され、様々な岩石について同位体比の測定が行われてきました。その結果、岩石の種類とそれらの形成年代によって $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比が異なることが分かってきました。富士山玄武岩なら $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比は 0.704 くらい（倉沢 1986）で、屋久島花崗岩なら 0.708-0.709（Anma et al. 1998）、海水は 0.70918（Faure and Mensing 2005）です。

つまり、ある地域の岩石は特定の $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比を持っていて、同じ岩石であっても他の地域の違う年代のものや、同じ年代であっても違う種類の岩石であれば、その同位体比が違うことになります。これを用いると、岩石の Sr 放射起源同位体から何処から出てきた岩石かを推定することが可能になります。Sr と共に Nd や Pb などの同位体

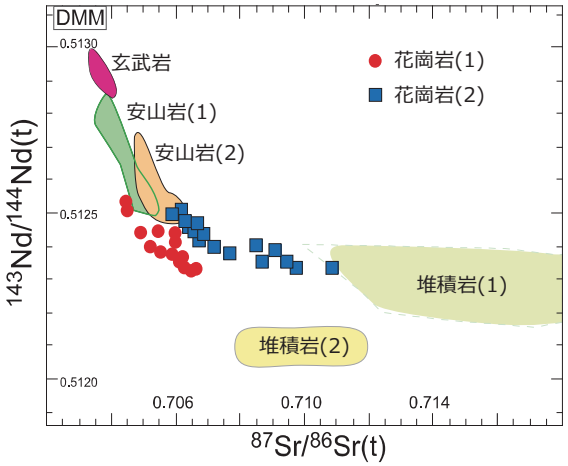


図 2.　岩石研究で用いられる Sr-Nd 放射起源同位体図の例　花崗岩（1）は安山岩（1）と、花崗岩（2）は安山岩（2）及び堆積岩（1）と密接な関係を持っていることが分かります。

を一緒に解釈することでより正確な関係が分かります（図 2）。

Sr 放射起源同位体を用いることで物質や元素の移動を追跡することができるため、Sr はトレーサービリティー研究によく用いられています。これは Sr の化学的な挙動がカルシウム（Ca）とよく似ており、Sr が Ca を置換して存在することができるからです。Ca は岩石に多く含まれている元素ですが、岩石の風化過程で水に溶けて移動します。水に溶けている Ca は動物や植物が容易に取り入れることができるので、骨格を構成するなど生物にとって主要な元素の一つとして使われています。そのため Ca と置換している Sr は微量ながらも様々な生物に広く存在していて、それらの放射起源同位体を測ることで、その生き物がずっとそこに居たものなのか、それともどこからか来たのなのか、どこからきたのかなどを明らかにすることができます。例えば、遺跡から出土した縄文時代の人骨と動物骨について Sr 同位体比を測定し、その地域で生存したものか他地域からの転入した個体かを明らかにした研究報告が報告されています（日下 2018）。

2.　重元素安定同位体（Stable Isotope）

重元素の安定同位体は 2000 年頃からの分析技術の進歩によって可能になった研究分野です。特に MC-ICP-MS（高分解能マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置）という装置の開発は高分解能測定ができるため、金属元素の安定同位体比測定に大きな進展をもたらしました。重元素は軽元素に比べると同位体間の相対的な質量差が小さく、また化学反応の際に同位体間に起きる結合力の差が小さいため同位体比の変化（同位体分別）が起きにくいという特徴があります。そのため、わずかな変化を検知するためには高分解能高精度の同位体分析装置が必要となります。

2004 年に「Geochemistry of Non-traditional Stable Isotopes」という本が出版されて以来、この分野の研究が拡大されることになり、マグネシウム（Mg）、カルシウム（Ca）、鉄（Fe）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）などの天然環境で生物活動と密接な関係を持っている元素を中心に研究が進んでいます。

これにより、金属の酸化還元反応や微生物による反応、生物間での捕食被食関係、体内組織での

生化学反応など様々な要因により、重元素でも同位体分別が起きていることが明らかになってきました。

上で話したように、放射起源同位体はその比を測定してその数値をそのまま使いますが、安定同位体は、軽元素と同様に基準となる標準物質の値に対する未知試料の値のずれとして表します。そのため安定同位体比測定では標準物質（Reference materials；RMs）の役割は非常に重要です。しかし、現実問題としてこの標準物質が十分に安定して供給されていないという問題があります。標準物質（又は認定標準物質；Certified RMs）は分析において必要不可欠なものであり、測定値の補正や、測定法及びその正確度の評価に使われます。また、他研究室との比較などでも利用されているため、測定値の信頼度を担保する重要な物質です。

このような標準物質は安定同位体比を測定するためには十分に均質であり、かつ時間の経過でその値が変化しないということが重要です。放射起源同位体で使っていた標準物質を安定同位体で用いたり、新たな標準物質を作成したりしていましたが、同位体的に不均質だったり、作成したものを使い切ってしまったりなど、残念ながらその供給は安定していません。

重元素の安定同位体比は分析装置で測定しますが、試料を調整する段階で大きな同位体分別が起きやすいので、試料の前処理では細心の注意が必要です。

MC-ICP-MS を用いた重元素の安定同位体研究は、軽元素の安定同位体研究や放射起源同位体研究に比べるとまだその歴史が浅く、直面している問題点も多いですが、その分開拓の余地も大いにある分野でもあります。

文献

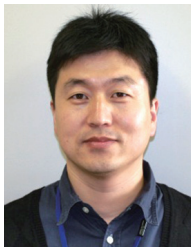
Faure G, Mensing T. (2005)「ISOTPOPES principles and applications 3rd ed.」John Wiley & Sons, INC.

倉沢一（1986）ストロンチウム同位体比からみた日本列島弧の火山岩類の成因. 地学雑誌 95-4、p. 254-276.

Anma R. et al. (1998) Compositional zoning and its implication in a toroidal circulation inside the Yakushima pluton, SW Japan. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 53, 157-176. http://id.nii.ac.jp/1291/00002343/

日下宗一郎（2018）古人骨を測る　同位体人類学序説，京都大学学術出版会

著者情報



申　基澈（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター）、2008 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士課程終了、博士（理学）、2009 筑波大学　研究基盤総合センター研究員、総合地球環境学研究所技術補佐員、2011 産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門　特別研究員を経て、2012 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

元素濃度

申　　基　澈
（総合地球環境学研究所）

元素濃度はある物質の中に含まれている元素の量を全体量中に占める割合で示したものです。例えば海水中の塩分濃度を 3.5％とします。これは海水 1Kg の中に塩分が 35 g 入っていることを意味します。塩分のうち 55％は塩化物イオン（Cl^-）で、30.6％はナトリウムイオン（Na^+）で構成されておりますので、それぞれ海水 1Kg 中に含まれる量は 19.25g と 10.71 g になります。つまり海水中のナトリウム濃度は 10.71 g/Kg、塩化イオンは 19.25 g/Kg となります。これが質量分率で表した元素濃度です。

元素濃度は体積濃度や、質量濃度や、モル濃度で表すことがありますが、一般には質量濃度をよく用います。上記の海水の Na 濃度（10.71 g/Kg）を百分率で表すと 1.071％、千分率で表すと 10.71‰となります。含有量がもっと少ない元素の場合は百万分率（ppm；parts per million）や十億分率（ppb；parts per billion）を主に使いますが、極微量の場合には一兆分率（ppt；parts per trillion）で表すこともあります。以下の表記はそれぞれ 1000 倍の比率関係です。

千分率（‰）：g/Kg（mg/g）
百万分率（ppm）：mg/Kg（ug/g）
十億分率（ppb）：ug/Kg（ng/g）
一兆分率（ppt）：ng/Kg（pg/g）

ただし、水の場合には水 1 Kg=1 L として、Kg の代わりに L をよく使います（mg/L）。

1. 元素濃度の測定

ある物質中に含まれるカルシウム（Ca）元素の濃度を調べようとすると、Ca を特定でき、かつ量を測定できる装置が必要です。元素濃度を測定する装置は、主に試料の状態によって、固体で測定する装置と溶液状態で測定する装置に分けることができます。岩石や土などに含まれている元素を測定する際には、表面をきれいにするか、細かく粉砕し粉状にしたものを用います。XRF（蛍光 X 線分析装置）や EPMA（電子線マイクロアナライザー）などがこれにあたります。一方、溶液状態で測定する装置は ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）や ICP-発光装置などがあります。特に ICP-MS は、現在元素濃度分析に一番よく用いられている装置で、元素周期表にあるほとんどの金属元素について測定することができる、非常に優れた性能を持っています。約 10 分という短時間で 50 種類くらいの多元素を同時に測定することが可能ですし、濃度が濃い元素（数十 ppm）と極微量しか含まれていない元素（数 ppt）を同時に測定することも可能です。例えば、ある地域の河川水中の Na 濃度（30 ㎎ /L、ppm）と一緒にウラン（U）濃度（0.007 μg/L、ppb）を測定することが可能です。天然水中に含まれている元素の種類とその濃度を測定する時は、ろ過をして微粒子などを取り除いた後､硝酸を少量（硝酸濃度が 1％くらいなるように）添加して装置に直接導入します。それだけで、どの元素がどのくらい入っているかを測定することができます。岩石や土の場合は、濃酸を用いて溶解してから測定します。この場合は、固体試料の溶解に時間がかかりますし、使用する酸は毒劇物なので、取り扱いには細心の注意が必要です。

2. 元素濃度の変化

地球上のすべての物質は元素の集まりです。人間を含む生物は水素、炭素、窒素、酸素が中心ですし、岩石や鉱物はケイ素、酸素を中心とした集

合体です。他にも様々な元素が含まれています。含有量が少ない元素を微量元素といいますが、地球科学分野では 100 ppm 以下の元素に対して使います。ある物質中に含まれている元素の種類と濃度は、大体は同じ元素組成を持ちながらも、地域的な特徴も表すことが多いです。例えば日本の河川水とアメリカの河川水を比較しても、そこに含まれている元素の種類と濃度はそれほど変わりません。

元素濃度を調べることで様々な情報を得ることができます。例えば、ある特定の元素が周囲よりも濃ければ、そこはその元素を多く含む何かによって汚染されている可能性があることが分かります。その場合は、各元素濃度をさらに詳しく見ることで、何が汚染物質（汚染源）であるのかを特定し、どのように対処するかを判断する手がかりが得られるかもしれません。また、直接には見えない地下であっても、周りの地下水を測定することで、その汚染物質がどこからどこへ向って流れているのか、その汚染源は何かということを判断する手がかりが得られます。もし普段の元素情報が分かっていれば、何らかの突発的な出来事（集中豪雨や汚染物質の流出など）があった場合、それらの出来事がその地域にどういう影響を及ぼすのかということを、元素の変化から判断することも可能です。このように、元素の種類と濃度及びその変化は我々に様々な情報を与えてくれます。

元素濃度の変化を水を例にみてみましょう。水分子は、正電荷（＋）と負電荷（－）が偏っている極性分子と呼ばれる分子です。そのため極性を持つ様々なもの（イオンや極性分子など）と反応しようとするため、色々な元素が溶け込みます。どこで何が水に溶け込むかは水循環で説明できます。図 1 は地表環境での水循環の様子を簡単に表したものです。地球に存在している水は殆ど海水で占められています（97％以上）。海から蒸発した水は水蒸気として大気中に移動し、雲になり、やがては雨や雪として地表に降ります。最初に蒸発した水はほぼ純粋な水であり、溶け込んでいる元素の量は少ない（十数 mg/L 以下）です。

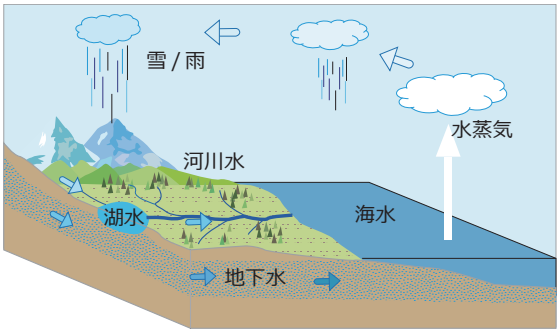
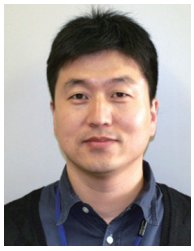


図 1. 地表環境での水循環

雨として降った水は地表を流れて川や湖を経て再び海に戻ります。一部は地下に潜って地下水として流れていきます。この際に水は様々な物質（岩石、土壌、植物や人工構造物）と反応して色々な元素が溶け込みます。海までたどり着くまでに時間がかかればかかるほど反応は進み、溶け込む元素の量は全体的に増えていきます。この際にどのような岩石や土壌を通って来たかによって、どのような元素が多く溶け込むかは変わります。例えば市販されているミネラルウォーターで最も有名なブランドの一つであるエビアンは石灰岩（$CaCO_3$）地域の水なので、その水には Ca が豊富に含まれています。また富士山地域の地下水は他の地域の水と違って特有のバナジウム（V）を含んでいることが知られています。このように、含まれている元素の種類や濃度を調べることで、その水（その物質）の由来や移動経路を追跡することが可能です。すなわち、水に含まれている元素の種類と濃度を測ってその特徴を明らかにすると、その水が雨として降った後の履歴を把握することができるわけです。このように、元素濃度を調べるだけでも、その物質の移動経路を追跡することが可能ですが、これに同位体情報などを加えると、その正確度は一層向上します。

著者情報



申　基澈（総合地球環境学研究所 研究基盤国際センター）、2008 筑波大学大学院生命環境科学研究科博士課程終了、博士（理学）、2009 筑波大学　研究基盤総合センター研究員、総合地球環境学研究所技術補佐員、2011 産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門　特別研究員を経て、2012 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

同位体地図（Isoscape）

陀 安 一 郎
（総合地球環境学研究所）

元素の安定同位体比は、元素の由来（どこからきたか）や反応過程（どのように変化してきたか）を含んだ情報です。例えば、水の水素・酸素同位体比であれば、水がどのように蒸発するか、大気をどのように移動し、どこで雲を作り、どこに雨として降るか、また降った雨が地下水や河川としてどのように流れてくるかなどによって、ある場所にある水の水素・酸素同位体比は影響を受けます。

そこで、例えば降水の水の水素・酸素同位体比をたくさんの地点で測定して、地図の上に書いてみると、ちょうど天気図のように「同位体比の分布状況の地図」を書くことができます。これを同位体（Isotope）から見た風景（landscape）という意味で、Isoscape と呼びます（West et al. 2010）。定訳はありませんが、ここでは「同位体地図」としておきましょう。同位体地図を利用すると、その場所の同位体比の状況が直感的にわかります。実際にあらゆる地点の同位体比を測定することはできないので、同位体比が変化する理論を用いたり、地点間を内挿したりして GIS（地理情報システム）上で作成します。例えば、図 1 では、モデルにより推定された降水量で重み付けされた年間平均降水の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）の例を示しますが、「軽元素同位体」の項目で説明した、「緯度が高いほど酸素同位体比が低くなる」などの水の水素・酸素同位体比の分布の特徴が直感的に理解できます。

図 1 は降水の酸素同位体比の例ですが、同じ世界地図に他の元素の同位体比を重ね合わせることもできます。図 2 に示しますように、ひとつの同位体地図では「同じ同位体比」を示す場所はたくさんありますが、複数の同位体比に関する同位体地図を重ね合わせることで、より確からしく場所の特定ができる可能性があります。例えば、汚染源の特定や食品の産地判別に関しては、出来るだけ候補となる場所が限定される方が、その特定にも役に立ちます。私たちはこのやり方を「多元素同位体地図（Multi-Isoscapes）」と呼び、この研究方法をさらに進めようとしています。

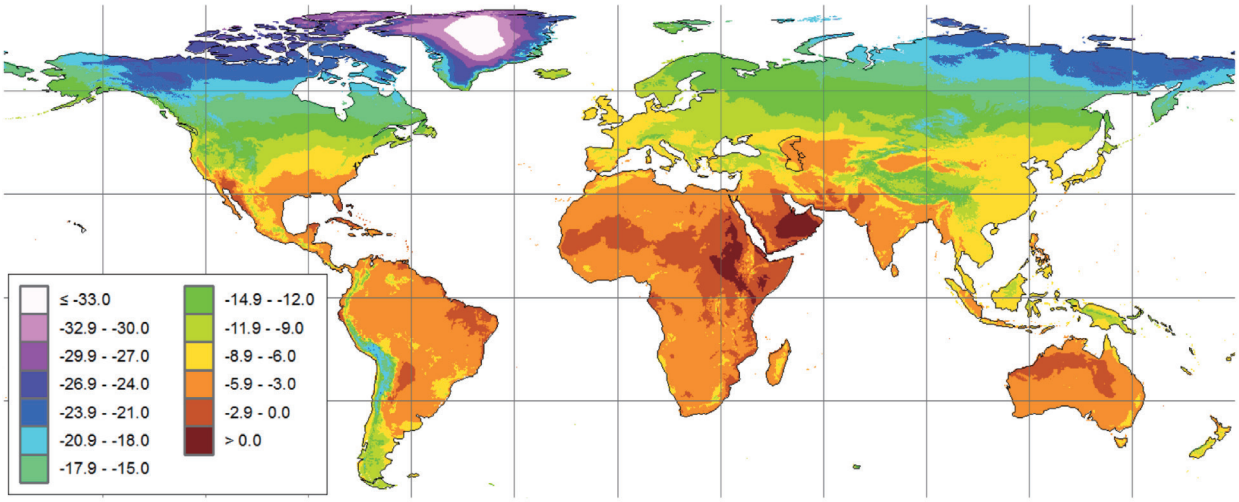


図 1. モデルにより推定された降水量で重み付けされた年間平均降水の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）の例（Terzer et al. 2013）。

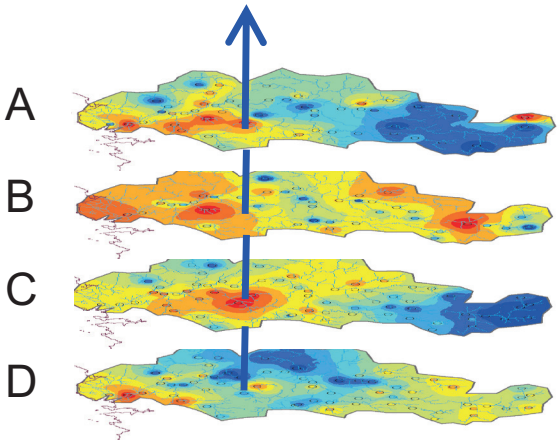


図 2. 多元素同位体地図（Multi-Isoscapes）の概念図 1 つの元素の同位体地図を 1 枚とした場合、この例では A ～ D の 4 枚の図を重ね合わせて矢印の地点の特徴が表現されます。

文献

Terzer S, Wassenaar LI, Araguás-Araguás LJ, Aggarwal PK (2013) Global isoscapes for $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. Hydrology and Earth System Sciences 17: 4713-4728. https://doi.org/doi:10.5194/hess-17-4713-2013

West JB, Bowen GJ, Dawson TE, Tu KP (2010) Isoscapes: Understanding movement, pattern, and process on Earth through isotope mapping. Springer

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

トレーサビリティ

陀 安 一 郎
（総合地球環境学研究所）

1. トレーサビリティという言葉

トレーサビリティ（Traceability：トレーサビリティーとも表記される）とは、追跡（Trace）と能力（Ability）を組み合わせた造語で、日本語では「追跡可能性」と訳すことができます。食品、医薬品、工業製品、計量機器など多岐にわたって使われている概念ですが、ここでは食品のトレーサビリティを例に挙げて説明します。現代社会では、生産者と消費者が直接取引することは少なく、複雑な流通過程を経るために、どこで作られたものかが明確でないことが多いと思います。特に、ここ数十年の間に、牛肉においてBSE（牛海綿状脳症、Bovine Spongiform Encephalopathy）問題が生じたことや、遺伝子組み換え作物（genetically modified organism）に関する不安などもあって、食品のトレーサビリティが注目されています。トレーサビリティには、トレースバック（遡及）とトレースフォワード（追跡）の機能があります。前者は履歴の「上流側」にたどるものであるのに対し、後者は「下流側」にたどるものです。トレーサビリティが確立した商品では、もし何らかの問題が発見された時、トレースバック機能を用いて上流側にさかのぼり、その問題の原因を追求することに役立てることができます。また、トレースフォワード機能を用いて、それらの商品の流通経路をたどり、購入した可能性のある消費者を特定することができます（「食品トレーサビリティシステム導入の手引き」改訂委員会 2008）。現在、日本では牛肉および米についてトレーサビリティが義務化されています。これらのトレーサビリティについては、いずれも人間が問題を回避するために作り上げたシステムであり、これらが正常に機能することで社会の信頼を得ることができると考えられます。

牛肉および米についてのトレーサビリティを考える場合、「産地」は明確に特定できるため、正しくトレーサビリティが確立されれば、理論的にはすべてのトレーサビリティを人間が管理することができます。しかし、他の農産物に関してはこの様な形でのトレーサビリティは確立していないため、消費者が流通経路をたどる一般的な方法は存在しません。近年、食品の産地を知りたいという希望が消費者に生まれてきており、それに対応する様に「国産」や「○○県産」という表示を目にすることも多くなってきています。では、科学的に産地を特定する方法はあるでしょうか？ 現在、食のトレーサビリティを科学的に解明する方法は、遺伝子（DNA）情報を用いた手法や元素濃度を用いた手法（例：Leal et al. 2015）、安定同位体比の情報などがありますが、対象の産品に関してどの手法が最適かに関しては個別に検討する必要があります。

2. 環境トレーサビリティ

この「トレーサビリティ」概念を環境において考えることが「環境トレーサビリティ」です。前述しましたように、トレーサビリティの確立のためには、ある現象に関してトレースバック（遡及）とトレースフォワード（追跡）を行えることが必要です。

環境問題の歴史をひもといてみますと、日本においては高度成長期の公害問題の顕在化を受けて、環境基本法が設定され、大気の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染などに対して基準が設けられま

した。それに伴って、各工場には水質汚濁防止法が定める工場排水を規制する法律が設定されました。現在の社会においては、このような「ポイントソース（点源）」から出てくる汚染物質に関する問題については、法律的な対策が取られており、一律の基準で問題の発見と解決法が明示されています。しかし、近年顕在化してきた地球環境問題においては、「ノンポイントソース（非点源）」と呼ばれる、明確な要因のはっきりしない現象も多く、問題とされています。その対策を取るためには自然界における微妙な違いを識別する必要があります。環境基準値を満たしていれば、現在直接的に問題が生じていないと言えますが、もし何らかの物質の濃度が上昇しつつあったり、その性質が変わっていったりすれば、今後何らかの問題が起きるかもわかりません。同じ濃度であったとしても、その「性質」が変わっているかどうかに関して、いろいろな元素濃度の変化や、同位体比の変化捉えることによって、問題のトレースバック（遡及）とトレースフォワード（追跡）がいつでもできるような「予防原則」が成り立つような仕組みを「環境トレーサビリティ」という考え方でとらえていこうと考えています。

文献

「食品トレーサビリティシステム導入の手引き」改訂委員会（2008）食品トレーサビリティシステム導入の手引き
http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/trace/index.html

Leal, M.C., Pimentel, T., Ricardo, F., Rosa, R. and Calado, R. (2015) Seafood traceability: current needs, available tools, and biotechnological challenges for origin certification. Trends in Biotechnology 33: 331–336.
https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.03.003

著者情報

陀安一郎（総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授）1997 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員・日本学術振興会海外特別研究員を経て 2002 年総合地球環境学研究所助手、2003 年京都大学生態学研究センター助教授・准教授、2014 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

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、研究内容を紹介していただきます。

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 km^2 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 月に石川県手取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 km^2）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、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 5 km 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。

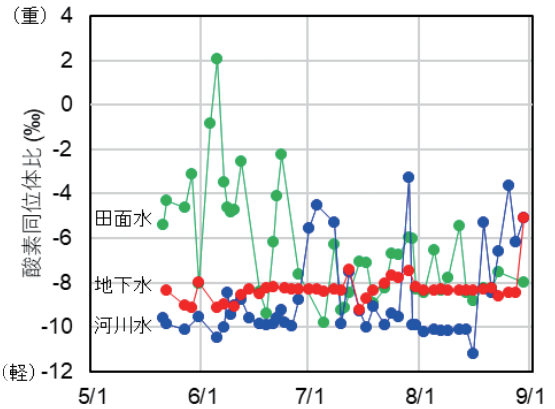


図 1. 河川水（用水路で採取）、田面水、地下水の酸素同位体比の変化（2019 年）

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

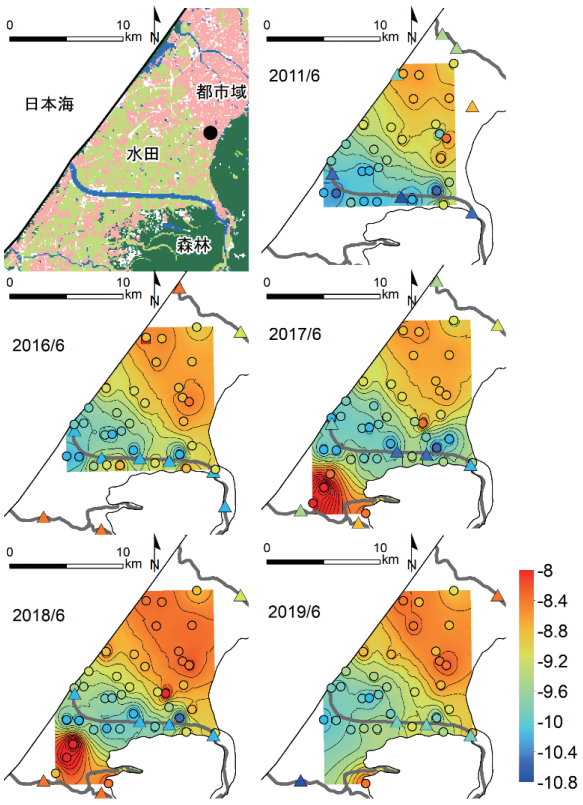


図 2. 扇状地の土地利用と地下水の酸素同位体比
〇地下水、△河川水
（赤：重い水、青：軽い水）

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ることができます。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）
（2020 年 4 月 7 日改版）

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が、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

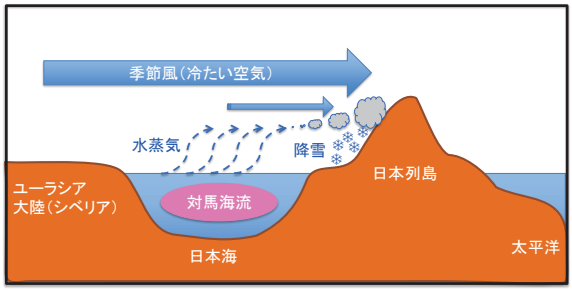


図 1. 日本海側に雪が降る仕組み（十日町市のホームページを参考に筆者が作図）

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を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 PM 2.5[1] 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つきます。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、δ^{34}S として千分率（‰、パーミル）で表しています[3)]。δ^{34}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 δ^{34}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。

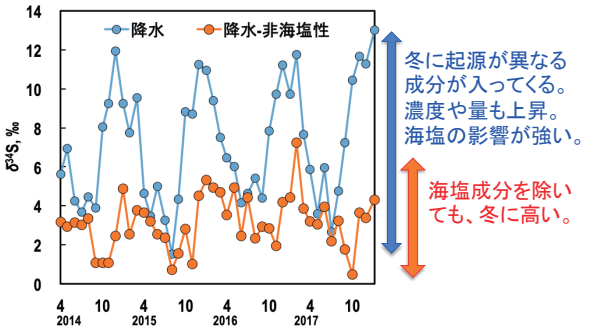


図 2. 加治川試験地（新発田市）での硫黄同位体比の季節変化

新潟県の森林地域の降水に含まれる硫酸イオンの δ^{34}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 δ^{34}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 δ^{34}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 δ^{34}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 δ^{34}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 δ^{34}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 μm 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）
（2020 年 4 月 7 日改版）

コケ、環境を語る
― 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？　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」に注目してみましょう。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 NOx 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（δ^{15}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、δ^{15}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、δ^{15}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 δ^{15}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 δ^{15}N が高くなる
(2) 高山のコケの δ^{15}N の値は、越境由来の δ^{15}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

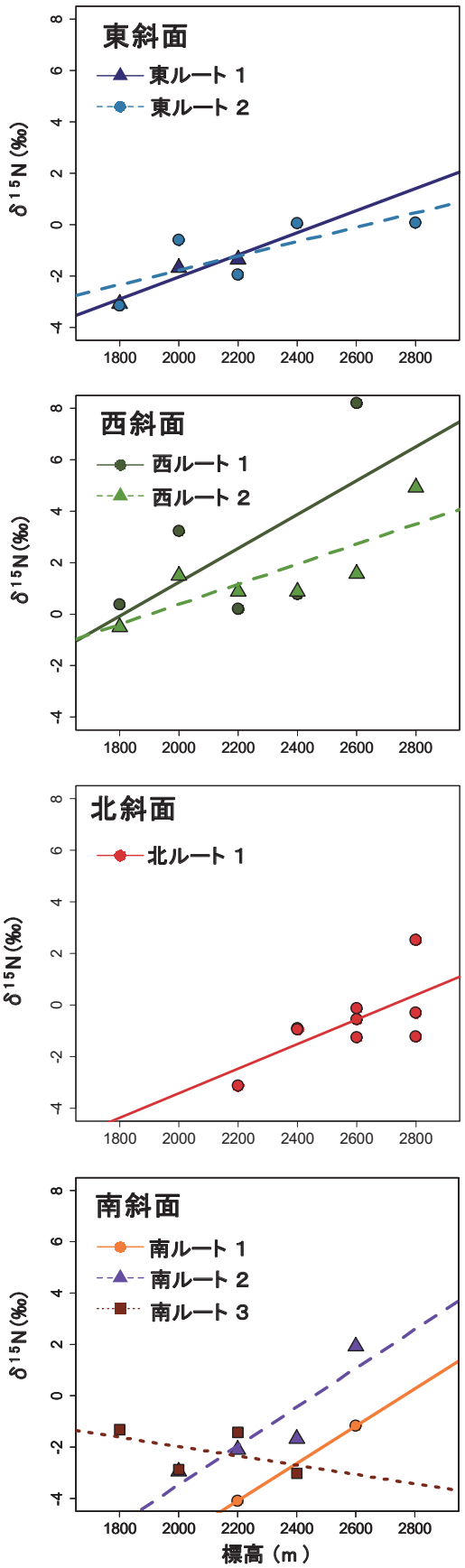


図 1. 標高に沿ったコケの δ^{15}N の変化
標高に沿って δ^{15}N が上昇する。Oishi (2019) の Fig. 4 を改変。

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 $\delta^{15}N$ 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の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ったのです（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）

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きています。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

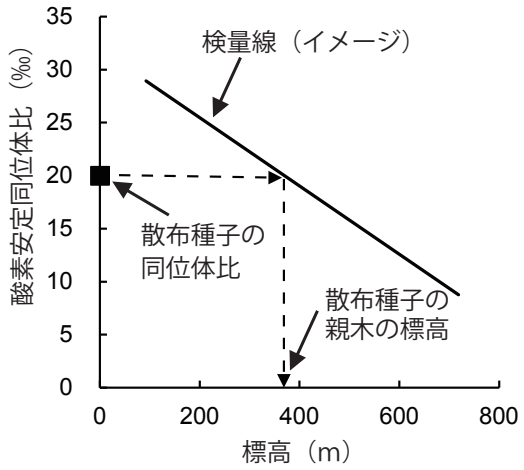


図 1. 散布されていない種子の酸素安定同位体比と標高の関係

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（図 2）[2)]。

図 2. 満開のカスミザクラ

2010 年から 2013 年にかけて、標高 550 ～ 1,650 m におよぶ調査ルート（総延長 16 km）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 3）。その結果、ツキノワグマは平均で +307 m、テンは平均で +193 m、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 100 m 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サ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

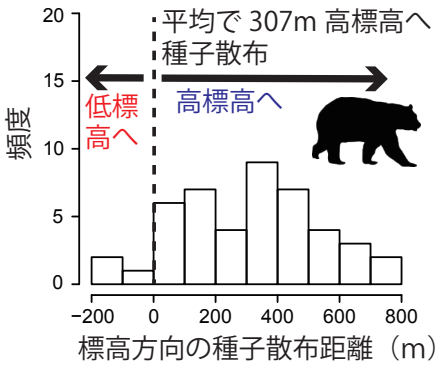


図 3. ツキノワグマによる標高方向の種子散布
(Naoe et al. 2016b)

だ場合の予想では 2100 年までの気温上昇は 4.8℃ですから、カスミサクラは 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 4a）。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

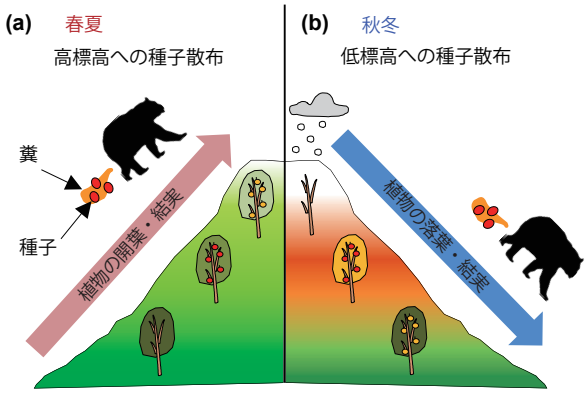


図 4. 哺乳類による種子散布（a）春夏では山麓から山頂にかけて植物の開葉や結実が進み、それを哺乳類が追いかけた結果、種子が高標高に散布されます。（b）秋冬では山頂から山麓にかけて植物の落葉や結実が進み、種子が低標高に散布されることが予想されます。
(Naoe et al. 2019)

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 4b）。

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（図 5）[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。標高方向

図 5. サルナシの果実

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そうです。

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の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。

注釈

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％の樹木でみられ、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。

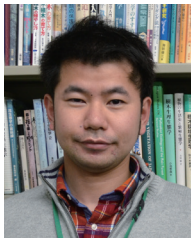
文献

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 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

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）
（2020 年 4 月 7 日改版）

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。過去の生態系の姿を知るということは、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、リン酸カルシウムの一種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変化

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。

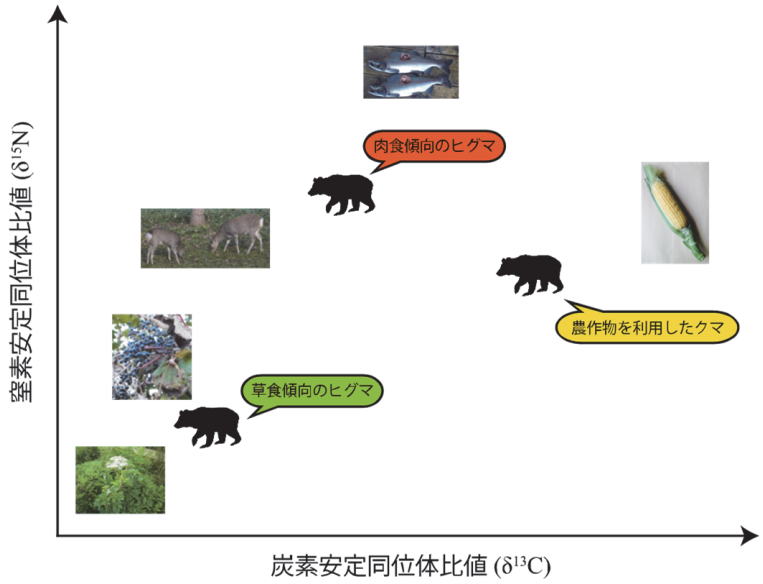


図 1. ヒグマの主要な餌資源の炭素・窒素同位体比。ヒグマの値は、多く利用した餌の値に近づく。

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 1）。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）。

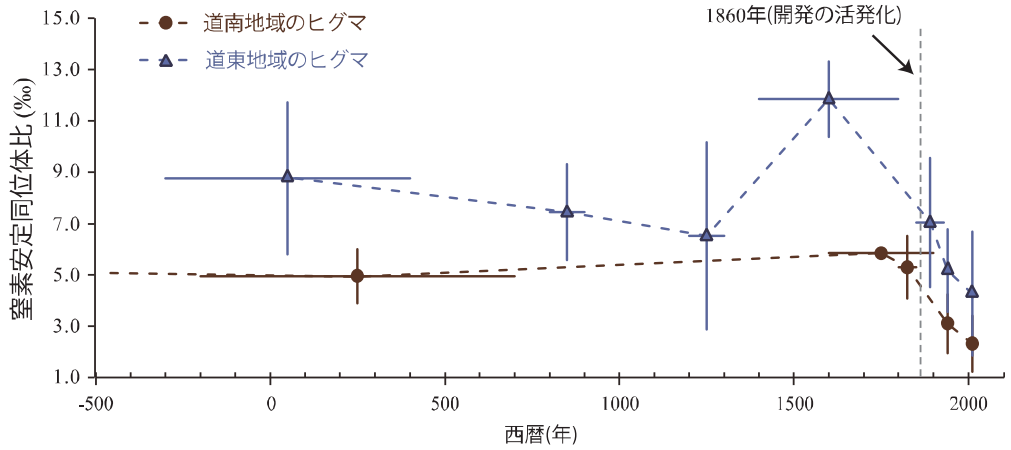


図 2. 動物質食物利用の指標となる、窒素同位体比の時間変化。1860 年前後を境に窒素同位体比が減少し始めたことが分かる。

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は沿岸部で捕獲され、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、縄文人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。

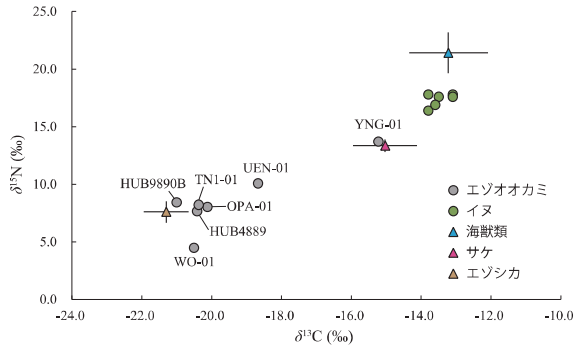


図 4. エゾオオカミ（及び飼いイヌ）とその餌資源の炭素・窒素安定同位体比。

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。

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になります。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。

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 4）。本研究で使用したエゾオオカミの同位体比値は、これらのイヌの値とは異なっているため（図 4）、これらの個体が一生を通じて飼育されていた可能性はありません。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丈夫な骨においては、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、これまでに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はなく、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

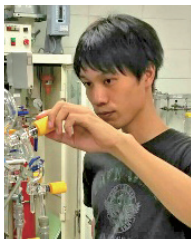
Matsubayashi J, Morimoto J, Tayasu I, Mano T, Nakajima M, Takahashi O, Kobayashi K, Nakamura F (2015) Major decline in marine and terrestrial animal consumption by

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）
（2020 年 4 月 7 日改版）

法医学で同位体学を利用できるかな？

小　山　哲　秀
（新潟大学大学院医歯学総合研究科地域疾病制御医学専攻
地域予防医学大講座法医学）

1. 同位体と法医学って？

皆さんは“法医学”と聞いて何を思い浮かべるでしょうか。最近は TV ドラマでも取り上げられることもあり、以前よりは法医学という言葉を耳にする機会が多くなったと思います。法医学とは、「医学的解明助言を必要とする法律上の案件、事項について、科学的で公正な医学的判断を下すことによって、個人の基本的人権の擁護、社会の安全、福祉の維持に寄与することを目的とする医学である。（1982 年日本法医学教育委員会報告より抜粋）」とされております。日々の業務としては、亡くなられた方の死因を究明することを主としており、数多くの知識と経験と技術を駆使して日々奮闘し、事件や事故、病気などの再発防止を含め、広く社会に還元できることを目標に活動しております。

さて、同位体を利用した研究は、法医学に関連する犯罪捜査の分野でも利用されています。例えば、炭素や窒素の同位体比の組み合わせによって、南アメリカ地方で生産されたコカインがどこで作られたか、地理的起源の追跡に利用されたりしています（Ehleringer JR et al. 2000）。また、染田らは、戦没者遺骨に対して、日本人と米国人とを判別する方法として同位体を用いた識別法を開発し、100％の正答率を得ました（Someda et al. 2016）。とりわけ、法医学で重要事項の 1 つである身元を確認する方法として同位体を利用できる可能性は、とてもエキサイティングなチャレンジだと考えています。まさに、元素の安定同位体比という「指紋」を手がかりにヒトを科学する重要なアプローチになると確信しています。

2. 行方不明者の身元を探るには？

そこで、筆者も同位体を用いた行方不明者の身元推定するツールを確立すべく注目したのが水素と酸素同位体比です。人の体の水分量は約 60％程度と言われています。その水の供給源は、多くの人の場合、食事や飲水から得られる水にあたる、水道水が占めることになります。当然ながら、水は酸素と水素により構成されておりますので、体内に存在する水素と酸素元素は概ね水道水由来であることが想定されます（図 1）。

2008 年に米国における水道水の酸素および水素同位体比には地域差があり、ヒトの毛髪中の水素と酸素同位体比と高い相関性があることが報告されました（Ehleringer JR et al. 2008）。この検討では、広い国土を持つ米国で行われており、水質や環境状況が異なるため、日本での応用が可能かどうかは不明です。そこで、日本においてもヒト由来試料と水道水安定同位体比から居住域を推定するツール作成が出来ないか検討を行っています（図 2）。

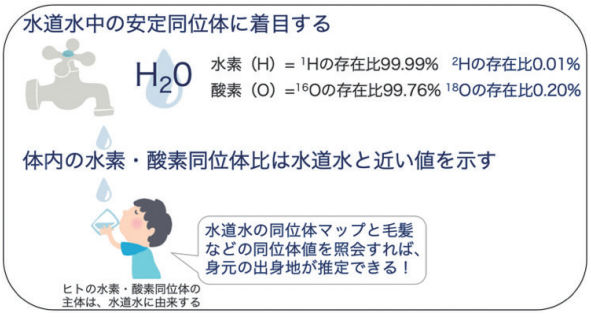


図 1.　本研究のコンセプト

図 2.　本研究の目的

3. 高い壁（＝課題）を乗り越えられるのか？

本検討を実施するにあたっては解明すべきポイントがいくつかあります。まず、環境水ではなく水道水を利用する点です。水道水に関しては、①水道水中の同位体比は地域によって差を生じうるのか？　②どの程度の地域差が生じているのか？　③環境水で認められる同位体比の季節性および経年変化による数値変動はあるのか？　こういった疑問を一つ一つ丁寧に解決し、水道水同位体マップを作成することが目標となります。

現在のところ、新潟県内数百箇所の水道水を採水し、同位体マップの作成を行っております。本稿では、具体的なデータの公表は今後の研究のために控えさせて頂きますが、地域差や数値変動においては極めて興味深いデータが得られており、鋭意発表出来るよう準備を進めております。

次に、居住域を推定するにあたっては、①既報と同様に、水道水と居住する者の毛髪中同位体に相関性が認められるのか？　②様々な背景を持つ法医サンプルにおいても、居住域の推定は可能なのか？　③毛髪以外のヒトサンプルでも、同じような検証は可能なのか？　このような視点から、解析を進めることによって、最終的に今後利用可能なツールとしての確立を目指していきます。

4. 法医学における同位体の可能性と目指すもの

筆者が経験してきた研究背景は、同位体とは全く無縁の世界です。そんな中、同位体の魅力に惹き込まれ、幸運にも研究をさせて頂くこととなりました。今回、分不相応にも本稿を書かせていただくにあたり、“法医学分野における同位体をどうやって表現すれば最も伝わりやすいのだろう？”と思案しておりましたところ、地球研のホームページの同位体環境学共同研究事業内に、「元素の安定同位体比という「指紋」が内在しています」という記述に救われた記憶があります。まさに同位体が指紋と同じような身元推定法の１つとなればこれ以上幸せなことはありません。

法医学分野で身元を推定する方法としては、歯型や指紋・掌紋に代表される身体的特徴によるものや、DNA 型による個人固有の遺伝情報によるものがあります。これらは、個人を特定する能力はありますが、対象者の情報が必要となります。一方、同位体を用いた本研究では、個人を特定することは難しいと思いますが、どの地域に居住していたかを推定することは可能であろうと考えています。将来的な展望としては、身元不明者の個人特定法として、同位体による地域推定と、歯型や DNA 型などを組み合わせた方法が確立出来れば、これまで以上に身元不明者を減らすことが出来るかもしれません。本研究を広く社会の皆様に還元出来るよう、一生懸命頑張ります。

文献

Ehleringer JR, Casale JF, Lott MJ, Ford VL. Tracing the geographical origin of cocaine. *Nature*. 408(6810):311-2 (2000) DOI: 10.1038/35042680

Someda H, Gakuhari T, Akai J, Araki Y, Kodera T, Tsumatori G, Kobayashi Y, Matsunaga S, Abe S, Hashimoto M, Saito M, Yoneda M, Ishida H. Trial application of oxygen and carbon isotope analysis in tooth enamel for identification of past-war victims for discriminating between Japanese and US soldiers. *Forensic Sci Int.* Apr; 261:166. e1-5. (2016) DOI: 10.1016/j.forsciint.2016.02.010.

Ehleringer JR, Bowen GJ, Chesson LA, West AG, Podlesak DW, Cerling TE. Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *PNAS*. Feb 26;105(8):2788-93. (2008) DOI: 10.1073/pnas.0712228105.

著者情報

小山哲秀（新潟大学医学部法医学教室助教）2011 年 4 月から 2016 年 9 月まで新潟大学研究機構超域学術院･助教、同年 10 月から新潟大学脳研究所システム脳病態学分野･特任助教を経て、2017 年 4 月から新潟大学医学部法医学教室･助教、同年 7 月から新潟大学大学院医歯学総合研究科死因究明教育センター（兼任）。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

古代人の暮らしを解き明かす同位体分析
― 海産魚はどこの海から運ばれたのか？ ―

石　丸　恵利子
（広島大学総合博物館）

1. 遺跡の骨・貝が語るもの

私たち日本人は､古くから陸産資源だけでなく、日本列島近海で採取できる貝類や魚類などの豊富な海産資源を利用してきました。これらは当時の自然環境がどのようなものであったのかを示すものであり、かつ人々にとってそれらは重要な食資源でもありました。その証拠は多くの遺跡に残されています。日本列島は火山灰性土壌であるため酸性を帯び､また細菌やバクテリアなどによって、地中に埋没した軟体部や骨などの有機物は、その多くが分解され消失してしまいます。しかし、貝殻の集積によってややアルカリ性を帯びる貝塚や、低湿地のような嫌気的環境においては有機物が残りやすく、数千年前に利用された貝殻や骨の一部が発掘調査によって現代によみがえります。

発掘された貝殻や骨は動物遺存体と呼ばれ、過去における様々な情報を持つ貴重な資料となります。たとえば沿岸部の貝塚では、ハマグリやサザエ、アサリなどの多様な海産貝類はもちろん、マダイやクロダイ、スズキなどの海産魚類やイノシシやニホンジカなどの哺乳類が確認され、その地で暮らした人々が多様な動物資源を利用していたことを知ることができるのです。日本列島には、縄文時代から、近世・近代に至るまで、動物遺存体が出土するたくさんの遺跡が発見されています。それらの出土資料によって、各時代また各地域での豊富な資源利用の様相を知ることができます。また大きさを調べたり、表面に残る石器や金属器などによる人為的な痕跡を観察し、解体痕や調理の痕跡を調べたりすることで、当時の文化や技術を明らかにすることもできるのです。

2. 運ばれた海産資源が遠隔地とのつながりを示す

遺跡から出土する動物遺存体のなかには、当時の人たちが遠隔地へ移動したこと、あるいは物資を運搬していたことを示すものが発見されることがあります。たとえば縄文時代、中国山地に所在する帝釈狭遺跡群からは海に棲むエイ類の尾棘とハマグリやサルボウなどの海産貝類が出土しています。また奈良盆地の橿原遺跡からはマダイやスズキ、フグなどの海産魚類とクジラの骨が確認されています（丸山ほか 2011）。両遺跡は、現在の海岸線から直線距離にして前者が約 60 km、後者は約 30 km 内陸に位置しています（図 1）。また中世・近世には、平安京左京北辺四坊跡などの京都の多くの遺跡で、ハマグリやサザエ、またマダイやハモ属、ブリ属などの多様な海産物が出土しています（富岡 2004 など）。

それでは、これらの海産資源はどの海域で採れたものが運ばれてきたのでしょうか。その産地を明らかにすることができれば、縄文時代の人の移動や交流範囲、また中世・近世のものの流通圏やそのルートの解明に一石を投じることができます。

3. 炭素・窒素同位体分析から魚の産地を読み解く

魚の種や部位は、骨の形態によって同定することができますが、瀬戸内海のマダイと日本海のマダイを形態で区別することはできません。そのため、これまで海産資源の産地や流通ルートについては具体的に論じることができていませんでした。なお、イノシシやニホンジカについても、骨の形態で生息域を知ることはできないため、狩猟

図 1.　海産資源が運ばれた内陸部の遺跡と周辺の主な遺跡分布

場所が遺跡の近くであったのか、それとも遠隔地から交易品として持ち込まれたのか、これらを証明するには至っていないのが現状です[1)]。

そこで私は、炭素・窒素同位体比によって魚の産地を明らかにできないかと考えました。これまで考古学研究では、ヒトの食生態を解明するために人骨の炭素・窒素同位体分析が行われていました。また、同位体比が他と大きく異なる値を持つイノシシ属の存在から、人から餌を与えられた家畜種の可能性なども検討され始めていました。食べ物の違いで地域や時代によってヒトの同位体比が異なるならば、魚においても海域によって餌やそれらの同位体比が異なる可能性があり、炭素・窒素同位体比によって魚の生息海域を区別できるのではないかと考えたのです。

最初にこの挑戦的な研究の試みに理解を示していただいたのが地球研の陀安先生（当時、京都大学生態学研究センター）です。センターに通い、最初に日本近海で捕獲した現生のマダイ、クロダイ、スズキ、メジナを用いて、各魚の炭素・窒素同位体比を測定しました。マダイ、クロダイ、スズキは多くの遺跡から出土する代表的な種であり、現在でも多く食べられています。メジナも日本列島近海に広く分布しています。前 3 種は骨資料において同位体比を測定し、メジナについては筋肉部を用いました。

分析の結果、いずれの種においても瀬戸内海産のものの窒素同位体比が高く、日本海産では低い傾向が認められました（図 2、3）。太平洋産はほ

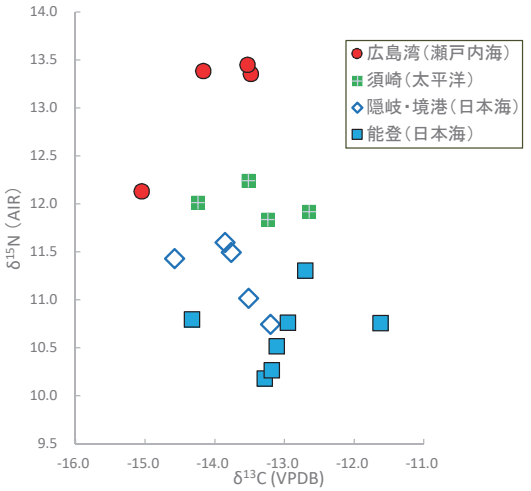


図 2.　現生マダイの炭素・窒素同位体比

＊石丸ほか（2008）を改変

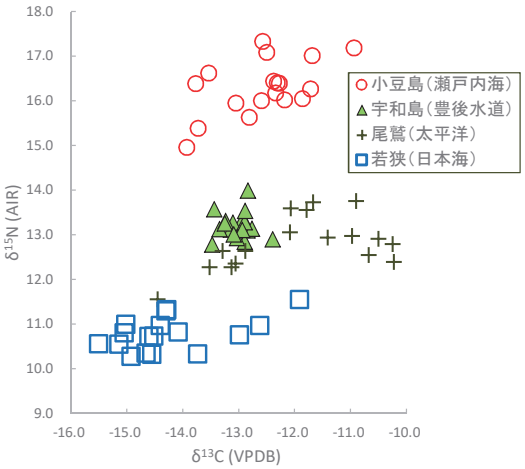


図 3.　現生メジナの炭素・窒素同位体比

＊石丸ほか（2008）を改変

図 4.　遺跡出土魚骨から抽出した骨コラーゲン

ぼその中間の値を示しました（石丸ほか 2008）。

4.　遺跡から出土する魚の産地はどこなのか

現生資料の分析によって、同一魚種においても海域で同位体比が異なることが明らかとなったため、次に遺跡資料での分析を行いました。出土資料より骨コラーゲンを抽出し、同位体比を測定しました（図 4）。ここでは幕末から近代にかけて宿駅「四日市宿」として栄えた四日市遺跡（広島県）と、中世から近世の公家屋敷地跡である平安京左京北辺四坊跡（京都府）から出土したマダイの産地について検討した結果を紹介します。

四日市遺跡は瀬戸内海から約 20 km 内陸に位置し、アカニシやアワビ、ハマグリなどの海産貝類に加え、マダイ、スズキ、ヒラメ、サメなどが出土しています（石丸 2007）。距離的にも瀬戸内海産のものである可能性が高いのですが、同位体分析の結果、窒素同位体比が高く、瀬戸内海沿岸域に位置する遺跡の同位体比と同様な値を示しました（図 5）。スズキやクロダイについても同様な特徴が認められたことから、四日市遺跡には瀬戸内海から多くの海産物が運ばれたと結論付けました（石丸ほか 2008、Ishimaru et al. 2011）。

一方、平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの同位体比は多様な値を示しました（図 6）。京都は平安京遷都以来、政治や産業、文化などが栄えた日本の中心的な都市のひとつです。各地から様々な物資が運ばれたであろうことは言うに及びません。京都の公家および武家屋敷跡や町屋跡からは、瀬戸内海では取れなかった可能性が高いカツオやマグロ属、日本海から運ばれたと考えられるマダラやサバ属なども報告されています。このような魚類の出土組成からみても平安京出土マダイの同位体比が多様であるのは、各海域で捕れたマダイが運ばれたからではないかと推測されます。窒素同位体比が低く、上長浜貝塚や米子城跡のマダイと同様な値をもつ資料は、日本海産のマダイかもしれません。

また、中世以降に貿易都市として栄えた博多遺跡群（福岡県）においても、出土するマダイの同位体比は多様な値が得られ、遺跡の前面に広がる

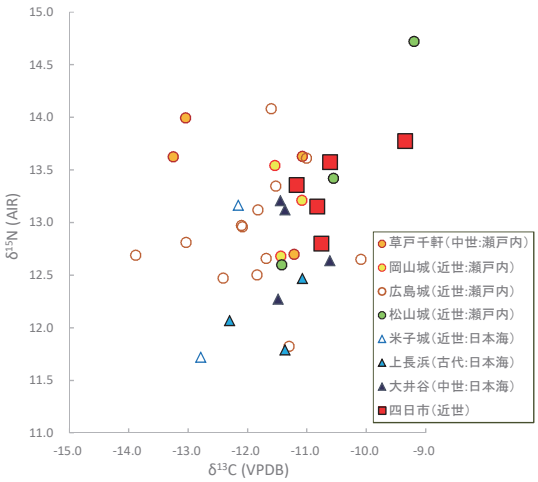


図 5.　四日市遺跡出土マダイの炭素・窒素同位体比
＊石丸ほか（2008）を改変

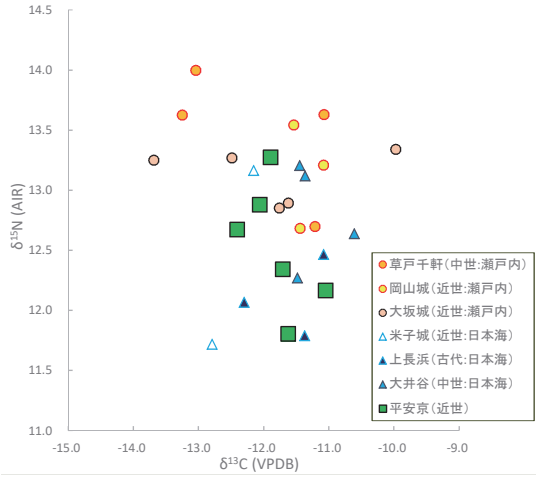


図 6.　平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの炭素・窒素同位体比
＊ Ishimaru et al. 2010 を改変

玄界灘（日本海）だけでなく瀬戸内海産のマダイも流通していた可能性が高いことがうかがえました（米田ほか 2010、石丸 2014）。

5. 古代人の暮らしを解き明かす、同位体分析の可能性

これまで記したように、炭素・窒素同位体分析は考古学研究において、ヒトの食生態の解析や魚類の産地推定など、歴史を明らかにする重要な指標となっています。ここでは、流通網が発達し、海産物が遠隔地へと運ばれるようになる中世・近世の遺跡における魚類の産地推定についての研究成果を紹介しましたが、縄文時代の遺跡でも漁撈域や過去の水域環境を推定する上で有益な結果が得られていますので、これらの成果についても少し紹介します。

例えば、青森県にある三内丸山遺跡や東道ノ上（3）遺跡から出土したマダイとスズキの炭素・窒素同位体比を比較すると、両遺跡ではやや違いが認められました（石丸 2011）。三内丸山遺跡は陸奥湾の奥部に位置し、東道ノ上（3）遺跡は太平洋側で現在は汽水湖になっている小川原湖南西の内陸部に位置しています。共に縄文時代前期を中心とした遺跡です。同位体分析の結果、マダイの炭素・窒素同位体比は、三内丸山遺跡よりも太平洋側に位置する東道ノ上(3)遺跡の方が共に高く、スズキについても同様の傾向が示されました。これは、両遺跡の漁撈域が異なっていたことを示しています。

また、房総半島周辺地域の縄文遺跡でも興味深い結果が得られました。現在の東京湾側に位置する遺跡と、現在の銚子方面から利根川低地に当時広がっていた古鬼怒湾側に位置する遺跡では、同位体比に違いが認められました[2)]。これまでの分析で、測定数が少ない魚種では比較が困難ですが、スズキについては顕著な違いが認められました。東京湾側の遺跡では炭素・窒素同位体比が共に高い一方で、古鬼怒湾側の遺跡では両値が低いという興味深い結果が得られました。これらの結果からも、両遺跡ではスズキの漁撈域が異なっていたことが示唆されます。

以上のように、海産魚類の炭素・窒素同位体分析によって、遺跡から出土する魚類の産地や漁撈域を明らかにする研究が進められ、様々な情報が得られています。これは海域によって海産魚類の同位体比が異なることを利用したものですが、出土資料の同位体比は当時の古環境や魚類の古生態を知るための有益な情報でもあります。動物資源利用の様相や当時の食文化、ヒトの移動やものの流通の歴史をより具体的に明らかにするためにも、各地域・各時代の遺跡から出土する貴重な文化財である海産魚類の炭素・窒素同位体分析を適切に進め、分析データを蓄積することが課題だと思います。

注釈

1）イノシシやニホンジカの産地（狩猟域）を明らかにするため、現在、歯エナメルのストロンチウム同位体分析を進めており、これらの研究成果については別の機会に紹介したいと思います。

2）縄文時代前期から後期頃、房総半島一体は現在の海岸線が深く入り込み（縄文海進）、東京湾側を「奥東京湾」、霞ケ浦側を「古鬼怒湾」と呼びます。

文献

石丸恵利子（2007）西条盆地の動物遺存体と骨利用「広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書」Ⅳ、広島大学埋蔵文化財調査室、pp. 539–548

石丸恵利子・海野徹也・米田穣・柴田康行・湯本貴和・陀安一郎（2008）海産魚類の産地同定からみた水産資源の流通の展開 ― 中四国地方を中心とした魚類遺存体の炭素・窒素同位体分析の視角から ―、「考古学と自然科学」57、pp. 1–20

石丸恵利子（2011）三内丸山遺跡および東道ノ上

（3）遺跡出土魚類と哺乳類の炭素・窒素同位体分析「特別史跡三内丸山遺跡年報」14、青森県教育委員会、pp. 21–26

石丸恵利子（2014）同位体分析からみた水産資源の流通、「季刊考古学」128、pp. 47–49

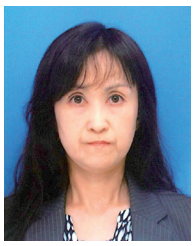
富岡直人（2004）動物遺存体の分析「平安京左京北辺四坊跡」本文編、財団法人京都市埋蔵文化財研究所、pp. 342–356

丸山真史・橋本裕子・松井章（2011）橿原遺跡出土の動物遺存体「重要文化財橿原遺跡出土品の研究」奈良県立橿原考古学研究所、pp. 281–294

米田穣・覚張隆史・石丸恵利子・富岡直人（2010）骨の同位体分析から中世博多の人々の生活に迫る「市史研究ふくおか」5、福岡市博物館市史編さん室、pp. 33–49

Ishimaru E, Tayasu I, Umino T, Yumoto T (2011) Reconstruction of Ancient Trade Routes in the Japanese Archipelago Using Carbon and Nitrogen Stable Isotope Analysis: Identification of the Stock Origins of Marine Fish Found at the Inland Yokkaichi Site, Hiroshima Prefecture, Japan. The Journal of Island & Coastal Archaeology 6–1:160–163.

著者情報



石丸恵利子（広島大学総合博物館研究員）2008 年京都大学大学院人間・環境学研究科博士後期課程研究指導認定退学。1991 年ニッカウヰスキー株式会社、2008 年総合地球環境学研究所プロジェクト研究員、2013 年徳島大学埋蔵文化財調査室特任助教などを経て 2014 年 4 月より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2020 年 4 月 7 日改版）

縄文人の集団間の移動を ストロンチウム同位体比から調べる

日　下　宗一郎
（東海大学・海洋学部・海洋文明学科）

1. 縄文時代の古人骨と抜歯風習

縄文時代人は、約 16500 年～ 2300 年前の日本列島に居住していた人々です。稲作農耕を始める前の時代で、狩猟・採集・漁労をなりわいとしていました。彼らは竪穴建物に住む定住的な暮らしをしていました。森林からはクリやドングリといった堅果類を採集して貯蔵していました。また、弓矢や槍を用いてニホンジカやイノシシなどの陸上哺乳類を狩猟していました。沿岸部では、魚や貝をとって食べていました。それらが捨てられて堆積した貝塚遺跡からは、多様な魚貝類の種類が見つかります。また、縄文時代人には貝塚に亡くなった人を埋葬する風習があり、土壌が貝殻のアルカリ性になることで、保存状態の良い古人骨が貝塚から多く見つかります。

貝塚遺跡から発掘される縄文時代の古人骨は、当時の生活を知る上で貴重な資料です。人の骨を見ると性別や死亡した年齢が分かります。歯が残っていると、虫歯や歯周病などの跡を観察することができます。また、副葬品や埋葬姿勢などを検討すると、当時の埋葬に関する風習を検討することが可能となります。

古人骨に見られる社会的な風習として、生前に人の歯をわざと抜く抜歯風習があります。抜歯風習は、縄文時代の後･晩期（約 3100 ～ 2300 年前）には多くの個体が行っていたため、成人儀礼であろうと推定されています。

抜歯風習の中でも、前歯のうち、下顎の切歯を抜く人と、下顎の犬歯を抜く人がいました。人によって歯を抜く部位が異なることは、縄文時代の社会の中における何らかの個人の役割を表していた可能性があります。考古学的には、切歯を抜く人が副葬品とともに埋葬されることが多かったため、集団の在地の人で、犬歯を抜く人が移動してきた人で、この在地者と移入者が結婚したことを抜歯が表していると考えられてきました。このような過去のことに関する仮説は、様々な観点から検証を加えることが必要です。そこで、同位体分析の手法を用いて、仮説を検証できないかと考えました。

2. 移動を調べるストロンチウム同位体分析

この問題に対して、検討を加えることができるのは、ストロンチウム同位体分析という手法です。ストロンチウム（Sr）はアルカリ土類金属で、2 価の陽イオンとなります。生物の必須元素ではないのですが、生体のうち骨や歯に多く含まれています。地球化学の分野では、環境の中で地質によってストロンチウムの同位体比に変動があることが知られていました。これは場所によって、同位体比に違いがあるということです。また、生態系の中でこの元素も循環をしています。岩石が風化して Sr が環境中に供給されます。水に溶けるので、植物や動物が吸収します。人も水や植物や動物を摂取するので、Sr を体内に取り込みます。炭素や窒素の同位体と違って、Sr の場合は食物が取り込まれる過程で同位体比の上昇が生じません。そこで、ある地域に生息する生物は、その地域の地質に由来する Sr 同位体比を示すことになります。このことを利用すると、地質が異なり、Sr 同位体比が異なる場所の間を生物が移動すると、その生物の体組織の同位体比を測定すれば、移動

図 1. 吉胡貝塚から出土した人骨（復元模型）

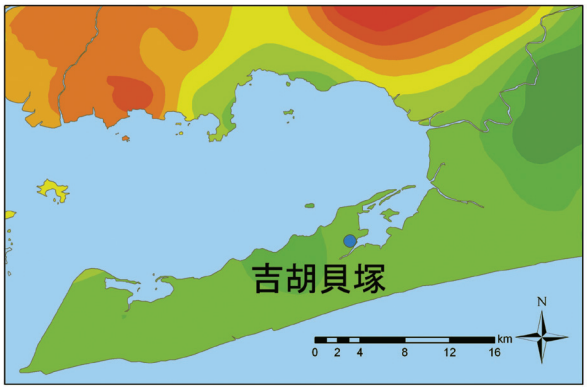


図 2. 吉胡貝塚周辺の Sr 同位体比地図（赤色が同位体比が高く、緑色が低い地域）

した個体を検出することが可能であることを示唆しています。地球研には、Sr 同位体比を測定することのできる大型の装置があり、これを利用して古人骨のストロンチウム同位体分析を行うことにしました。

研究の対象にしたのは、愛知県の南部に位置し、三河湾の沿岸にある貝塚遺跡です。縄文時代の後・晩期の吉胡貝塚からは多数の古人骨が出土しています（図 1）。この遺跡から出土した古人骨には、抜歯風習を観察することができます。そこでこれらの遺跡を研究対象としました。

人の移動を検出する前に、まず環境中の Sr 同位体比の分布を調べることにしました。これには、現代の樹木の葉を集めて、Sr 同位体比を調べました。その地域の生物が利用している Sr の値を知る必要があったので、動物と違って動くことのない植物を用いました。遺跡周辺から 5 km メッシュを基準に多くの地点から植物の葉を採取しました。分析には植物の葉を燃やして灰にして、塩酸で溶かして、いくつかの手順で分析することで Sr 元素を抽出します。そしてその同位体比を質量分析装置を用いて測定しました。すると、植物の Sr 同位体比には地域差があることが分かりました（図 2）。とくに三河湾の北の地域で値が高く、南の地域で値が低いことが分かりました。同位体比の分布の違いを示す地図のことを、同位体比地図と呼びます。この地域差の解釈のために、この地域の地質図を検討すると、北の地域が火山性の地質から成っていて、南の地域は堆積岩や石灰岩などから成っています。同位体比地図と地質図を比べてみると、地質の違いに応じて、環境中の Sr 同位体比が異なっていることが推定されます。地域によって値が異なることは、Sr 同位体分析によって、この地域で生物の移動が解析可能なことを示唆しています。

3. 移動していた縄文時代人

そして、古人骨の Sr 同位体比を測定しました。古人骨の場合は、肋骨と歯のエナメル質を分析に用いました。歯の表面に見える白い部分はエナメル質と呼ばれるとても硬い組織です。歯は子どもの頃に形成されます。歯が虫歯になって削っても再生されないように、歯のエナメル質は成人後に作られることがありません。歯のエナメル質は子どもの頃に摂取された食物から合成されていて、その Sr 同位体比は子どもの頃に住んでいた地質に由来します。いっぽうで、骨は、骨折しても治るように、破壊と再生を繰り返していますので、成人後に住んでいる場所の値を反映しています。また、歯のエナメル質は有機物が含まれずとても密な組織であるために、埋葬中に地下水の Sr が混入してしまうことがありません。しかし、骨は多孔質なため、地下水から Sr が混入してしまう特徴があります。

骨や歯の分析のためには、デンタルドリルを用いて約 3 mg の粉末試料を削ります。そして植物の場合と同じように、Sr を抽出して同位体比を

測定しました。その結果を図 3 に示しています。吉胡貝塚から出土した人骨の Sr 同位体比は、大きな変動を示しました。とくに歯のエナメル質の同位体比のばらつきが大きいことが分かります。このことは、子どもの頃に、他の場所に住んでいた移入者を含んでいる可能性を示しています。骨の値をみてみると、変動が小さいことが見てとれます。骨は遺跡の地下水の影響などで、その値が生前の値から変化している可能性もあります。

ここで、縄文時代人の食資源を考えると、大きく分けて、陸上資源（植物と陸上哺乳類）と海産資源（魚貝類）があります。陸上資源の Sr 同位体比は、現生の植物の値を参考に推定しました。吉胡貝塚の周辺の植物の値は低い値を示します。いっぽうで、海水の Sr 同位体比は 0.7092 という一定の値を示し、海水から Sr を吸収する海産資源も一定の値を示します。縄文時代人の食物の Sr 同位体比はこれらの値の範囲だと考えられるので、その範囲を在地の値の範囲と推定しました。すると、骨の値はほとんどその範囲に入り、成人の頃に住んでいた場所の値であり、また地下水の影響などもあるため、その範囲に入ると考えられます。しかし、歯のエナメル質の同位体比をみると、その範囲に入る個体と、範囲から外れる個体がいます。これは何を意味しているのでしょうか。

歯のエナメル質の値が、在地の値の範囲に入る個体は、子どもの頃も吉胡貝塚に住んでいた個体

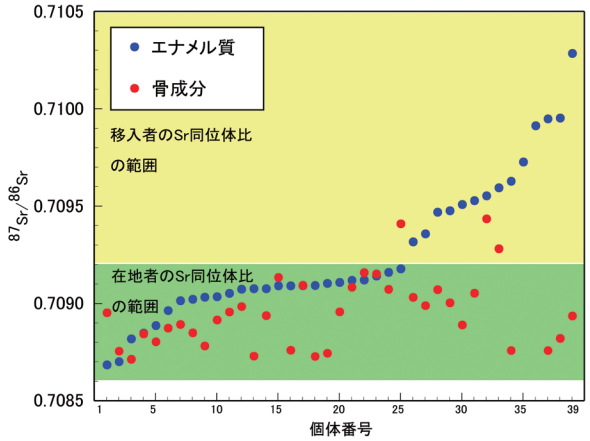


図 3. 吉胡貝塚出土人骨の骨成分と歯のエナメル質の Sr 同位体比

であることが推定されます。このような個体は集団内における在地者と呼びます。ほかに在地の値の範囲から外れる個体が見られます。このような個体は、子どもの頃に吉胡貝塚以外の場所で生活をしていた個体であり、集団内の移入者であろうと推定することができます。とくに、植物の値から作成した Sr 同位体比地図を見てみると、吉胡貝塚のある渥美半島や浜名湖周辺で同位体比が低く、北の地域で値が高いことが分かります。吉胡貝塚の移入者は、北の地域で生まれ育った可能性があることが示唆されます。

そして、性別ごとに見てみると、男性にも女性にも移入者が含まれていることが分かりました。縄文時代には男女ともに集団間を移動していたようです。また、抜歯のグループごとに見てみると、切歯を抜く個体と犬歯を抜く個体のどちらのグループにも移入者が含まれているという結果になりました。考古学的には切歯を抜く個体が在地者で、犬歯を抜く個体が移入者であろうと推定されてきましたが、Sr 同位体比からはどちらにも在地者と移入者が含まれている結果となりました。歯を抜くパターンは、人の移動とは対応をしていなかったようです。

4. おわりに

このように、古人骨の Sr 同位体比を測定することで、過去の人の移動について調べることが可能となります。亡くなった人の骨は、個人の来歴について話すことはできませんが、その同位体分析によって過去の人の移動について雄弁に語らせることができます。このほかにも、古人骨の炭素や窒素の同位体比を測定すれば、過去の食性を調べることが可能ですし、動物骨の炭素同位体比を分析すれば過去の古環境を調べることが可能となります。これからも、さまざまな元素の同位体を用いることで、過去の人の歴史について詳しく明らかにしていきたいと考えています。

文献

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. https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.06.013

日下宗一郎（2012）「縄文時代人の食性と集団間移動－安定同位体分析による試論－」考古学研究 59：92–102.

日下宗一郎（2018）「古人骨を測る　同位体人類学序説」京都大学学術出版会

著者情報

日下宗一郎（東海大学海洋学部海洋文明学科　講師）2011 年京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）。2014 年総合地球環境学研究所プロジェクト研究員、2015 年ふじのくに地球環境史ミュージアム主任研究員・准教授などを経て、2019 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

リャマとアルパカ
― アンデス文明動物飼育物語 ―

瀧　上　　舞
（山形大学／国立歴史民俗博物館）

1. はじめに

軽くて柔らかくて暖かいアルパカセーターは、世界中で大人気の防寒具です。近年は日本でも入手しやすくなったアルパカウール製品ですが、もともとはアンデス文明で開発された資源だったということはあまり知られていません。南米アンデス山脈の周辺で発展したアンデス文明には牛や馬、羊が存在せず、その代わり大型の家畜動物としてリャマとアルパカが飼育されていました。毛は衣類に、肉は食物に、骨は道具に加工され、さらに荷物の運搬力としても利用されており、リャマ・アルパカは多用途な家畜として経済的な寄与の大きい動物でした。

リャマとアルパカは、野生のグアナコとビクーニャから家畜化されました（以下、リャマ・アルパカ・グアナコ・ビクーニャをまとめて表現する際はラクダ科動物と呼びます）。ラクダ科動物は過酷な環境への耐性が強く、特にアルパカは高地に適応しています。ラクダ科動物の家畜化は高地高原で生じ、その後、標高の低い山間部や低地にも飼育が伝播したと考えられています。家畜化が生じた時期については、単一起源説と他地域起源説の両方が存在しています。近年ではアルゼンチンやチリの高地を含む他地域起源説を支持する研究者が増えています。リャマは 4200–2000 BC の間に、アルパカは 5000–4000 BC の間に家畜化されたと推測されています。

家畜化されたラクダ科動物は各地に伝播しましたが、その時期や段階的な伝播の変遷については、未だ全容が明らかになってはいません。多用途な家畜であることから社会の発展に果たした役割は大きく、アンデス文明の研究者はラクダ科動物飼育の伝播過程や、管理の実態、利用規模などに注目してきました。

ラクダ科動物飼育の推定方法には、動物考古学的調査の長い歴史があります。ラクダ科動物骨の体サイズや歯の形態変化、出土骨中のラクダ科動物の割合やシカ骨との割合の変化、ラクダ科動物の年齢分布の変化など、飼育の開始は動物骨から得られる様々な指標で検証されてきました。近年では、これらの動物考古学的調査に加えて同位体比分析を行うことで、より確かな飼育推定を行った報告が増えてきています。私たちの研究チームもパコパンパ遺跡のラクダ科動物について調査を行いました。

2. パコパンパ遺跡

パコパンパ遺跡はペルー北部高地に位置する巨大な神殿建築です（写真 1）。標高 2,500 m のアンデス山脈東斜面上部に位置します。この遺跡はラクダ科動物飼育の伝播過程において、注目すべ

写真 1. パコパンパ遺跡遠景

き遺跡の一つです。なぜならば、パコパンパ遺跡は過去の野生ラクダ科動物の分布域外だったと考えられているからです。それにも関わらず、1200–700 BC のパコパンパⅠ期（PC–Ⅰ期）からラクダ科動物の骨が出土し始めます。続くパコパンパⅡ期（700–400 BC、PC–Ⅱ期）には、ラクダ科動物の骨の出土量が急増します。したがって、PC–Ⅰ期に極僅かなラクダ科動物がヒトの手を介して遺跡に存在し、PC–Ⅱ期にはラクダ科動物の管理・利用形態が大きく変化したという可能性が考えられます。パコパンパ遺跡に、いつ・どんな形でラクダ科動物とその飼育方法が伝わったのかを明らかにすることは、ラクダ科動物資源の利用変遷の研究に一つのマイルストーンを置くことが期待できます。私たちの調査チームはパコパンパ遺跡におけるラクダ科動物の飼育を明らかにするため、同位体比分析を行いました。

3. ストロンチウム同位体比による出身地推定

まず行ったのはストロンチウム同位体比分析です。ストロンチウム(Sr)の同位体比は地域によって異なっており、水を通してその地域に生息する植物から動物へと反映されます。特に動物の歯には、歯が形成される幼少期に過ごした地域のストロンチウム同位体比が記録されています。遺跡から出土する動物の歯のストロンチウム同位体比を分析し、遺跡周辺の同位体比や他の個体の同位体比と比較することで、「同一地域で成長したのか、それとも別の地域から来たのか」という出身地域を推定することができます（図 1）。

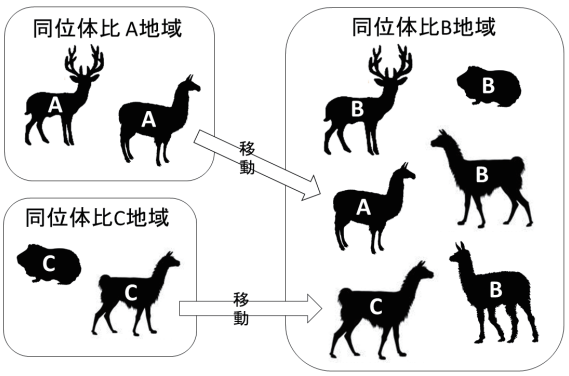


図 1. ストロンチウム同位体比分析による出身地推定の概念図

分析の結果、パコパンパ遺跡から出土した PC–Ⅱ期のラクダ科動物の歯のストロンチウム同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）は幅広い値を示しました（図 2）（Takigami et al., 2019）。このラクダ科動物の幅広い同位体比が遺跡周辺地域の値を反映しているのかどうかを確認するため、遺跡から出土したシカとクイ（テンジクネズミ）の同位体比も分析しました。アンデス文明では、シカは飼育に適さないため、その都度狩猟により入手されていましたし、クイは食用として居住地近くで飼育されていました。言い換えると、遺跡を利用していた人々の生活圏内にある同位体比がこれらの動物から推測できます。さらに遺跡が存在している地質の値

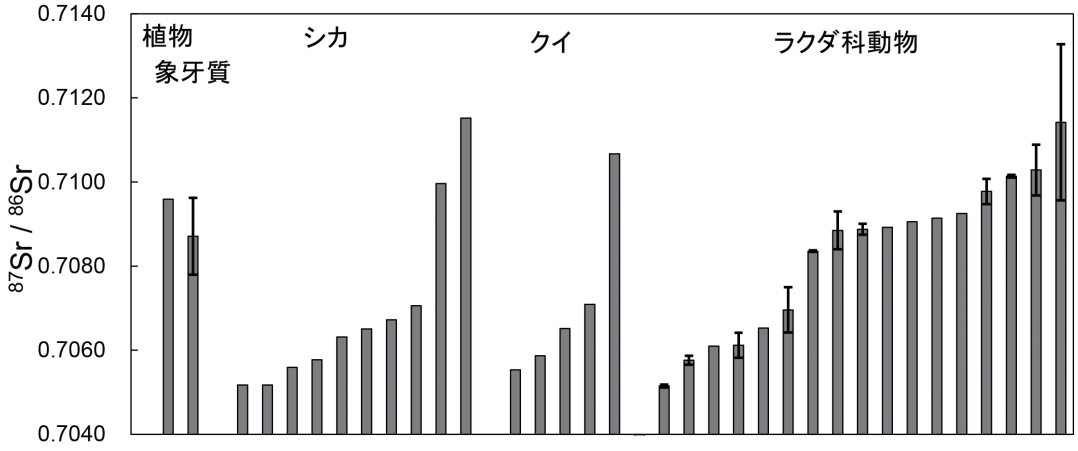


図 2. パコパンパ遺跡出土動物骨のストロンチウム同位体比（Takigami et al., 2019 の図 3改訂）

を反映した試料（歯の象牙質や植物）も含めて在地の値を調べた結果、ラクダ科動物の同位体比はほとんどが在地の値と一致しました。したがって、遺跡周辺のヒトの活動範囲内でラクダ科動物が飼育されていた可能性が示唆されます。

なお、PC-Ⅰ期のラクダ科動物のストロンチウム同位体比も比較できれば良かったのですが、PC-Ⅰ期のラクダ科動物の骨片は極少数であり、なおかつストロンチウム同位体比分析に適した歯の試料が存在していなかったため、調査が叶いませんでした。そこで、次に行ったのは、炭素・窒素同位体比分析による食性推定です。ラクダ科動物の食べた植物の種類から、飼育地域を推定しました。

4. 炭素・窒素同位体比を用いた飼育地域の推定

食性とは「何をどのくらい食べたのか」という情報のことです。食性は炭素と窒素の同位体比分析で推定できます。

食物は光合成回路の違いや食物連鎖による栄養段階の違いから、炭素・窒素同位体比の異なるいくつかのグループに分けられます。ラクダ科動物は草食動物のため、植物の同位体比に注目します。植物は光合成回路の違いから大きく 3 つに分けられます。すなわち、C_3 植物と C_4 植物、CAM 植物です。C_3 植物の炭素同位体比は低く、C_4 植物は高く、CAM 植物はその間の同位体比を有しています。CAM 植物は主にサボテン科などの多肉植物に多く、ラクダ科動物が摂取しない植物であるため、以下では考察から省きます。植物の同位体比は、その植物を摂取するラクダ科動物にも反映されます。より多く餌として食べた植物の同位体比に近い値が体組織に記録されます。そのためラクダ科動物の体組織を分析することで、「どのような植物を餌としていたのか」という食性推定ができます。なお、この分析は骨コラーゲンを用いて行えるため、僅かな骨片しか出土していない PC-Ⅰ期のラクダ科動物についても実施できました。

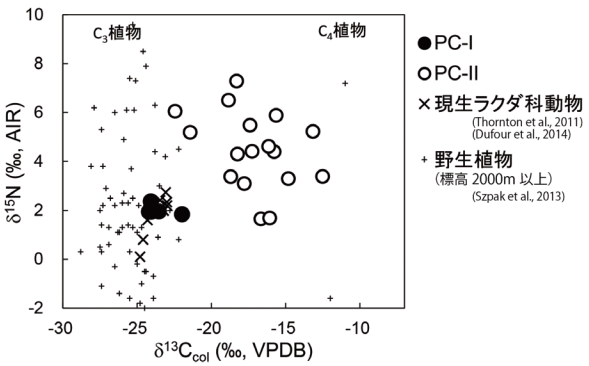


図 3. パコパンパ遺跡出土ラクダ科動物の食性推定（Takigami et al., 2019 の図 8 改訂）

パコパンパ遺跡のラクダ科動物の食性は、PC-Ⅰ期から PC-Ⅱ期の間で大きく変化していました（図 3）（Takigami et al., 2019）。PC-Ⅰ期の個体は C_3 植物を中心とした食性で、これは標高 4,000 m 以上の高地高原で飼育されている現生のラクダ科動物と良く似た食性でした。一方、PC-Ⅱ期のラクダ科動物は、C_3 植物と C_4 植物を混合した食性を示し、個体によってそれぞれの植物の寄与の割合が異なっていました。アンデスでは、標高の低い地域において野生の C_4 植物が数多く存在していますが、標高 2,000 m 以上の高地ではその種類が激減します。そのためパコパンパ遺跡のラクダ科動物のうち、特に C_4 植物の寄与が高い個体において、選択的に野生の C_4 植物だけを摂取したという状況は想像し難いです。そこで考えられるのは、ヒトが栽培していた植物です。ヒトが食べる実の部分を収穫した後に、残された葉や茎をラクダ科動物に与えた可能性が想定されます。当時のヒトの食用植物のうち、C_4 植物はトウモロコシとアマランサス（キウィチャと呼ばれる雑穀の一種）です。これらの植物をヒトがラクダ科動物に与えていた、すなわち飼育していた可能性が考えられます。やはり PC-Ⅱ期には遺跡の周辺でラクダ科動物飼育が開始されていたと言えるのではないでしょうか。

5. まとめ

私たちの研究では、動物考古学的調査を背景に、

パコパンパ遺跡のラクダ科動物の同位体比分析を実施し、PC-Ⅱ期に遺跡周辺でラクダ科動物飼育が行われていたことを明らかにしました。特に、様々な同位体比分析を組み合わせたことで、分析試料の制限という不利な条件を克服し、多角的な視点での飼育開始の確かな証拠を示すことができました。

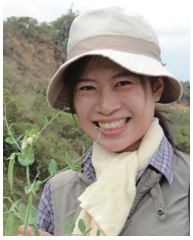
野生のラクダ科動物の分布域外と推定されているパコパンパ遺跡周辺には、おそらく元々はラクダ科動物が存在していなかったと想像されます。そのため PC-Ⅰ期にはラクダ科動物は稀少な存在でした。儀礼や祭祀の特別な生贄として稀に入手されたか、あるいは高地高原からキャラバンで荷物を載せてやってくる珍しい動物として認識されていたのでしょう。しかし、PC-Ⅱ期になると身近な動物に変貌します。自分たちで飼育・管理を行い、食料や毛織物の原料、荷駄獣として様々に活用していたと推測されます。遺跡からは PC-Ⅱ期に針や紡錘車の出土量が増加し、紡績関連活動の比重が高まったことが示唆されています。また、遺跡の神殿建築も大きく複雑になり、金銀銅製品が出土するなど､社会の発展がうかがえます。ラクダ科動物の飼育導入が影響を与えたのかもしれません。

アンデス中央高地や南部高地の高原地域で始まった飼育活動は、南北様々な地域の標高の低い山間部に伝播していきました。北部高地の他の神殿遺跡でも、パコパンパ遺跡と同時期にラクダ科動物の出土量が増加するという報告があり、ちょうど 700 BC 頃からアンデス北部の山間地域にラクダ科動物の飼育が伝播したと推測されます。このパコパンパ遺跡の同位体データはその瞬間を捉えたと言って過言ではないかもしれません｡現在、私たちのチームは他の遺跡でも同位体比分析を進めており、今後さらにこの説を補強するデータが得られると期待しています。

文献

Takigami M, Uzawa K, Seki Y, Morales Chocano, D, Yoneda M (2019) Isotopic Evidence for Camelid Husbandry During the Formative Period at the Pacopampa Site, Peru. Environmental Archaeology.
DOI: 10.1080/14614103.2019.1586091

著者情報



瀧上舞（山形大学人文社会科学部プロジェクト教員／国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員）2015 年東京大学新領域創成科学研究科先端生命科学専攻修了、博士（生命科学）。2009 年日本学術振興会特別研究員（DC1）、2012 年同（PD）、2015 年山形大学学術研究員を経て、2018 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

資源開発における環境負荷低減のための同位体研究

大　竹　　翼
（北海道大学工学研究院）

1. 資源開発と環境汚染

我々の便利な生活を維持していくために石油や石炭のエネルギー資源や鉄・銅・亜鉛などの金属資源の開発は必要不可欠です。これら地球資源の多くは、数万年～数千万年といった長い時間を経て地下深くで形成されたものであり、人間が採掘することで地表に露出し、地表の大気や水と反応します。それらが有害な金属や元素で環境中に漏出した場合には、生態系や我々の健康に重大な問題を引き起こすことがあります。例えば、銅･鉛･亜鉛といった卑金属元素は硫化物として採掘されますが、同時に産する黄鉄鉱と呼ばれる硫化鉄鉱物（FeS_2）が地表で雨水と反応し、酸化されると硫酸酸性の酸性鉱山廃水（Acid Mine Drainage: AMD）を生じます。AMD には硫化物にもともと含まれていたヒ素や鉛、カドミウムなど有害な元素も溶けていることがあるため、適切に処理しないと環境中に放出することができません。処理には中和や沈殿といった方法が用いられますが、天然に見られる化学反応や生物を利用しコストを抑えたパッシブトリートメントという方法が注目され､様々なサイトで研究が行われています｡パッシブトリートメントを効率的に行うためには、鉱山廃水中の元素の濃度や存在状態、その起源などを正確に把握することが必要になります。そのために同位体を用いた手法が活躍します。

図 1. カナダの鉱山でみられる酸性鉱山廃水。大量の鉄鉱物の沈殿によって赤褐色になっている。

2. レアアース資源開発における環境影響評価

レアアース（希土類）元素という言葉を聞いたことがあるでしょうか？　レアメタル 31 鉱種の 1 つで、スカンジウム、イットリウムの 2 元素にランタノイド族 15 元素を加えた 17 元素をまとめた元素のグループです。風力発電やハイブリッドカーに使われる高性能磁石や触媒など環境技術を含む日本の先端産業に欠かせない“産業のビタミン”です。しかしながら、レアアース元素の地球化学的挙動は、ウラン、トリウムといった放射性元素とよく似ているため、レアアース鉱石の多くに放射性元素が含まれています。したがって、その採掘・精錬は環境負荷が大きいという難点があり、採掘や精錬で発生する残渣は適切に処理されなければなりません。我々の研究グループはレアアース資源の開発に伴う環境影響評価を適切に行うためのケーススタディとして、かつてレアアースが精錬され、現在は同様の鉱石からチタンが精錬されているマレシーア・イポー市周辺地域の河川において調査を行い、精錬所や廃棄物処分場が河川の水質に与える影響また汚染物質の起源やその除去プロセスを同位体を用いて明らかにしました（Ito et al., 2017）。

調査の結果、レアアースの精錬所跡地近くには現在チタン精錬所が建設され、その残渣の堆積場

図 2. マレーシアにあるチタン精錬所の残渣堆積場からの漏洩水が混入した河川。鉄水酸化物のナノ粒子が沈殿している。

図 3. インドネシア、スラウェシ島にあるニッケルラテライト鉱山。岩石が風化により赤くなっている。高濃度のニッケルやクロムを含む。

も設置されていました。またその堆積場からは堆積物と雨水が反応した酸性水が漏洩しており、周辺河川へ流入していました。酸性水は多くのウランや鉛など金属元素を高濃度で含んでおり、河川水と混合することで pH が上昇し、濃度は低下しますが、環境基準を大きく超えるものでした（図 2）。

汚染河川において本当に金属元素が精錬所由来であるかを明らかにするには鉛の同位体比の測定が有効です。鉱石中の鉛同位体比は周辺の岩石や土壌中の鉛や排ガスなど他の人為由来の鉛が持つ同位体比とは異なるためです。分析の結果、河川中の鉛同位体比は鉱石中の鉛同位体比と類似しており、精錬所の残渣由来であることが明らかになりました。また、鉄安定同位体比の測定からは、鉄も精錬所の残渣由来であることだけでなく、pH の上昇とともに鉄水酸化物として酸化沈殿し一部はナノ粒子として河川水とともに輸送されていることも明らかになりました。汚染河川は下流に行くにしたがい鉄鉱物が沈殿するとともに、金属元素の濃度もさらに低下していき、大きな河川に流入する際には問題ないレベルまで濃度が下しており、自然浄化が達成されていました。このようなメカニズムを解明することは、今後、低コスト・低環境負荷な残渣・汚染水処理法の開発につながると期待されます。

3. ニッケルラテライト鉱床開発における環境影響評価

ニッケルは、従来のステンレスなど合金としての用途に加え、電気自動車などに必要なリチウムイオン電池の正極材として用いられるため、重要なレアメタルの 1 つであり、今後の重要増加が期待されています。ニッケルは、以前はカナダやロシアなど限られた地域に存在していた硫化物鉱床から資源を採掘していましたが、近年、新たな製錬方法の開発により、ニッケルラテライト鉱床と呼ばれる岩石の化学風化によって形成する鉱床（図 3）の開発が可能になりました。

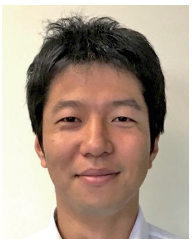
ニッケルラテライト鉱床は、気温が高く降水量の多い熱帯～亜熱帯地域に発達するため、東南アジアではインドネシアやフィリピンなどで開発が進んでいます。風化で脆くなった岩石のため容易に採掘できますが、地下 30 m 程度までの表層付近にニッケルが濃集しているため、表土を広く剥ぎ取る必要があります。また、この鉱石はニッケルだけでなくクロムも多く含んでいるため、雨水などと反応することでクロムが溶け出し、周辺の河川を汚染することも懸念されており、フィリピンなどでは近年のニッケルラテライト鉱床開発が抑制される傾向にあります。しかしながら、周辺の岩石もニッケルやクロムに富んでいることが多く河川には自然由来の重金属元素も含まれています。鉱山由来のクロムの影響を適切に評価するた

めにはクロムの安定同位体比の測定が有用だと考え、我々の研究グループは地球研と共同研究で国内ではほとんど行われていないクロム同位体比分析手法の確立を目指しています。

文献

Ito A, Otake T, Shin K, Ariffin KS, Yeah FY, Sato T (2017) Geochemical signatures and processes in a stream contaminated by heavy mineral processing near Ipoh city, Malaysia. Applied Geochemistry vol. 82, 89–101.
https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.007

著者情報



大竹　翼（北海道大学工学研究院環境循環システム部門　環境地質学研究室　准教授）2008 年ペンシルバニア州立大学大学院地球科学科修了、Ph.D. in Geosciences and Astrobiology. 2009 年東北大学理学研究科地学専攻特任助教、2011 年独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門特別研究員を経て、2012 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）

5章

実験施設と同位体環境学共同研究

総合地球環境学研究所で一緒に研究するにはどうしたら良いでしょうか？
できることも、できないこともありますが、まずはお問い合わせください。

実験施設と分析装置

総合地球環境学研究所研究基盤国際センター計測・分析部門

地球研には 18 の実験室があります。地球研においては幅広い分野のプロジェクト研究が行われていますが、実験室はプロジェクト単位で分けられてはおらず、研究目的別に分かれています。

その中に、安定同位体測定のための実験室が複数あり、下記に示す同位体分析装置があります。

水の水素・酸素同位体比分析装置：水（H_2O）に含まれる水素の安定同位体比（δ^2H）・酸素の安定同位体比（$\delta^{18}O$）を測定する装置です。地球研では、「キャビティリングダウン分光法」を用いた分析装置を採用しています。ろ過した水試料を自動的に水蒸気に気化し、レーザー光を当てて光の減衰を見ることで同位体比を測定します。

軽元素同位体比質量分析装置：有機物に含まれる水素の安定同位体比（δ^2H）・酸素の安定同位体比（$\delta^{18}O$）を測定する分析装置、試料に含まれる炭素の安定同位体比（$\delta^{13}C$）・窒素の安定同位体比（$\delta^{15}N$）を測定する分析装置、試料に含まれるイオウの安定同位体比（$\delta^{34}S$）を測定する分析装置があります。それぞれの前処理装置に固体試料をセットすることで、試料のガス化を行い（H_2、CO、CO_2、N_2、SO_2）、電場と磁場で各同位体を分離したのち、安定同位体比を測定します。また、無機物の炭素の安定同位体比（$\delta^{13}C$）・酸素の安定同位体比（$\delta^{18}O$）を測定する分析装置もあります。

表面電離型質量分析装置（TIMS）：目的の元素を分離してフィラメントに塗布し、真空中でイオン化し、電場と磁場で各同位体を分離したのち、安定同位体比を測定します。微量で高感度の測定ができるため、地球研では、Sr、Nd などの同位体比分析に用いています。

高分解能マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置（MC-ICP-MS）：試料を水溶液の状態で導入し、アルゴンプラズマでイオン化し、電場と磁場で各同位体を分離したのち、安定同位体比を測定します。多くの元素の同位体比を迅速に測定ができるため、地球研では、Sr、Pb、Zn、Fe、Ni などの同位体比分析に用いています。

誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）：水に溶けている元素の量を測定する装置です。主要元素から微量元素まで測定できるため、多元素の濃度分析を一度に行うことができます。

イオンクロマトグラフ：水に溶けている主要元素イオンの量を測定する装置です。陽イオン（Li^+、Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}）と陰イオン（F^-、Cl^-、NO_2^-、Br^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、PO_4^{3-}）を測定できます。

これらの装置は「共通機器」と呼ばれ、地球研で行われているプロジェクトのメンバーに登録されている方は、実験施設の利用申請を経て利用できます。そのほか、次節で示す「同位体環境学共同研究」に採択された方も利用が可能です。

地球研の実験施設には、これらのほか、空気中に舞っているちりやほこりのような汚染のない環境で試料を処理するクリーンルームや、顕微鏡下で試料の微小部位を削り出す微少量試料掘削回収装置もあり、共同研究に用いることができます。

同位体環境学共同研究へのお誘い

総合地球環境学研究所研究基盤国際センター計測・分析部門

地球環境に関する研究においては、対象とする地域や時間のスケールはさまざまですが、水・大気・生物・土壌など生態系を構成する種々の要素、人間の活動とその歴史など、あらゆる人間と自然の相互作用環のなかに、元素の安定同位体比という「指紋」が内在しています。地球研では、多様な環境物質と多くの元素について、この指紋情報を得ることができる実験機器を整備してきました。さまざまな元素の濃度や同位体比を用いることで、ある物質の産地や発生源、それが生まれるプロセスが明らかになると期待され、環境診断の精度向上や学際研究のツールとして高い可能性があります。これらの分析を通じて、地球環境問題の解決に資する研究をおこなうことは重要なミッションです。地球研では、これらの研究を「同位体環境学」と呼び、全国の研究者との共同研究（同位体環境学共同研究事業）を 2012 年度より進めています。

同位体環境学共同研究事業は、「地球化学」「水文学」「生態学」「地質学」「鉱物学」「人類学」「食品科学（産地判別）」「科学捜査」など、細分化された専門的学問領域で活用されている「同位体手法」を、幅広い環境学の研究に利用し、単なる「機械の共同利用」ではなく、「研究方法」や「研究成果の活用方法」も共有する共同研究をめざしています。個別学問領域で用いられてきた「同位体手法」を、学際的な地球環境学の枠組みで利用するにはどうすればよいのか、さらに社会と連携する超学際的アプローチでは安定同位体情報をどのように活用することができるかということを考えています。

同位体環境学共同研究事業は、総合地球環境学研究所研究基盤国際センター計測・分析部門の事業として行っていますが、所内外の専門家に入っていただいている「同位体環境学委員会」の助言をいただいて運用しています。同位体環境学共同研究事業では、2012 年度から 2019 年度までに、国公立大学 51 機関、私立大学 14 機関、国立・地方の研究機関 27 機関、海外の大学・研究機関 19 機関の合計 111 機関の利用がありました。

同位体環境学共同研究事業は年度ごとに公募しており、幅広い分野の申請を受け付ける「一般共同研究」と、計測・分析部門と密に連携した新しい分析手法の開発などをおこなう「部門共同研究」を募集しています。2020 年度からは人間文化研究機構に属する機関の方が代表者として応募できる「機構共同研究」も開始しています。

同位体環境学共同研究事業に採択された方には、「同位体環境学講習会」（毎年夏期に開催）によって技術を習得していただき、「同位体環境学シンポジウム」（毎年 12 月に開催）において発表することで研究結果の取りまとめに生かしていただいています。また、日本地球惑星科学連合大会（Japan Geoscience Union; JpGU）に「環境トレーサビリティー手法の開発と適用」というセッションを設け、得られた研究成果の発信に関しても活用していただいています。

2020 年度からは、研究者以外の方でもご利用可能な「同位体環境学」相談窓口を設けることにしました。この項目をもっと詳しく知りたい、同位体でこういうことは出来るのか？　など、ホームページ（https://www.chikyu.ac.jp）の連絡先にお問い合わせください。

同位体環境学がえがく世界：2020年版（第2版）

令和2年3月25日　印刷
令和2年3月31日　発行
令和2年4月 7 日　改版

発行所　総合地球環境学研究所
〒603-8047　京都市北区上賀茂本山457番地4

印　刷　株式会社　北斗プリント社

ISBN 978-4-906888-76-4

大学共同利用機関法人　人間文化研究機構
総合地球環境学研究所
Research Institute for Humanity and Nature

ISBN 978-4-906888-76-4