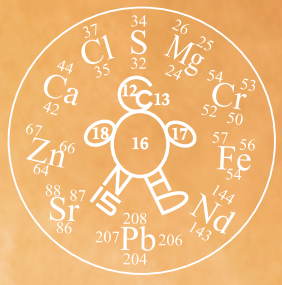


同位体環境学がえがく世界





2023年版

陀安 一郎
申　 基澈
鷹野 真也　編

目　次

はじめに ―― 陀安一郎、申　基澈、鷹野真也　5

1章　何がわかるの同位体？ ―― 7

はちみつの測定から、研究へ ―― 中原聖乃　9

物質に含まれる時間軸 ― 生まれ年のワイン ― ―― 石川尚人　11

髪の毛の安定同位体比からわかる食生活 ―― 陀安一郎　13

2章　私たちのくらしと同位体 ―― 17

「環境トレーサビリティー」コアプロジェクト ―― 陀安一郎　19

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　22

山梨県忍野村の取り組み ―― 大森昇　27

この水、どこから来たの？ ― 山梨県忍野村の調査事例 ― ―― 藪崎志穂　30

福井県大野市の取り組み ―― 帰山寿章　34

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　37

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　40

フィリピン、シラン・サンタローサ流域の人の生活と地下水 ―― 上原佳敏　42

広域の地下水流動を把握する ― 自治体と地球研の連携研究による地域貢献 ―
―― 安部豊、内山佳美　45

3章　ところで、同位体って何？ ―― 51

元素の同位体比 ―― 陀安一郎　53

軽元素同位体 ―― 陀安一郎　55

重元素同位体 ―― 申基澈　59

元素濃度 ―― 申基澈　62

重元素同位体の前処理から測定まで ―― 申基澈　65

地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法 ―― 藪崎志穂　69

同位体地図（Isoscape） ―― 陀安一郎　77

トレーサビリティ ―― 陀安一郎　79

4章　もっと知りたい同位体 ―― 81

水循環過程 ―― 83

水の安定同位体を用いた地下水や湧水の涵養域の推定 ― 福島県沿岸域の研究例 ―
―― 藪崎志穂　85

地下の水は何歳？ ― 福島県沿岸域の調査からわかったこと ― ―― 藪崎志穂 90
地下水の安定同位体比から日本の気候変動を考えてみよう ―― 勝山正則 94
弘前の降雪の同位体比変動 ―― 谷田貝亜紀代 100
同位体の導く流域における降雪の影響度 ―― 川越清樹 105
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 111
地域の水循環に田んぼが果たす役割の評価 ―― 中桐貴生 114
大阪平野の降水起源の地下水の分布と残存する有機物汚濁
―― 益田晴恵、根本達也、新谷毅 118
シベリアの河川と水循環 ― レナ川とインディギルカ川の不思議な流れ ― ―― 鷹野真也 123
アフリカ熱帯高山の消えゆく氷河 ― 氷河と山麓水資源の関係性の解明 ― ―― 大谷侑也 131

大気からの物質負荷 ―― 137
豊かな恵みと大気汚染物質を運ぶ北西季節風 ―― 佐瀬裕之 139
越境大気汚染や黄砂の影響をコケの安定同位体比で評価する ―― 大石善隆 143
森林のカルシウム不足を火山灰が救う ―― 越川昌美 147

水質と物質循環、集水域特性 ―― 151
沿岸域の地下水の水質と安定同位体比から見えてくる水質形成の仕組み
― 仙台市宮城野区の調査事例の紹介 ― ―― 藪崎志穂 153
直下型地震に伴う地下水の流れの変化を同位体で追う ―― 谷水雅治、細野高啓 158
塩類の起源に迫る ― 農地が汗をかくと塩を吹く ― ―― 久米崇 163
混合比から読み解く富士川濁水の起源と行方 ―― 鷹野真也 168
トンレサップ湖水系の地表水循環 ― 多元素分析による解析で見えてきたこと ―
―― 吉川尚 172
安定同位体比から明らかになる底質有機物の起源 ―― 小川裕也 176
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 180

生物多様性と生態系機能 ―― 183
高山の霧を吸収するハイマツ ― 雨と霧を同位体比で区別する ― ―― 久米篤 185
雨から来た窒素を同位体比で追跡する ―― 木庭啓介 189
メタボ化した森林から流出した過剰な窒素成分は、下流域でどう変化するの？
―― 篠塚賢一 193
食料生産の向上と地球温暖化の抑制に関わる水田土壌の有機物蓄積プロセスを解き明かす
―― 矢内純太 197
街路樹の炭素安定同位体比から COVID19 による産業活動停滞の影響検出を試みる
―― 半場祐子 200

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 205
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 210
アミノ酸の窒素同位体比が開く世界 ——— 大河内直彦 215
サケは海でどこを泳いで帰ってくるの？
— 同位体地図（アイソスケープ）を用いた回遊経路の復元 — ——— 松林順 220
魚の骨の鉛同位体から魚の生息海域を特定できるか？ ——— 西村日向子 225
長距離を移動する昆虫の同位体を調べて分かること ——— 大塚彰 229

産地判別、文明環境史 ——— 233
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 235
縄文時代の狩猟域を解き明かす
— イノシシ・ニホンジカはどこで捕獲されたのか？ — ——— 石丸恵利子 240
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 245
古代犬はどんな餌を食べていたか？ ——— 覚張隆史 249
古代アンデスの人々はリャマやアルパカを飼育していたのか？
— ストロンチウム同位体比分析で動物の出身地を探る — ——— 瀧上舞 254
古代アンデスの人々は何を食べていたのか？
— 炭素・窒素同位体比分析でトウモロコシ利用を探る — ——— 瀧上舞 257
法医学で同位体学を利用できるかな？ ——— 小山哲秀 261
氷河の氷の安定同位体比から復元する昔の気温 — シルクロードの気候変動を探る —
——— 竹内望 264
ネオジム同位体比から明らかになった日本海の形成史 ——— 堀川恵司 268

手法開発 ——— 273
微少な試料の同位体比を測定する ——— 小川奈々子 275
海水中粒子に含まれる重金属の起源を調べる ——— 高野祥太朗 279

5章　実験施設と同位体環境学共同研究 ——— 283
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・分析室 285
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・分析室 286

はじめに

陀安一郎、申　基澈、鷹野真也
（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。

続いて、2020年度から2022年度まで、特定推進研究「環境トレーサビリティに基づく研究基盤の応用」を行いました。本書は2020年3月末に最初に取りまとめたものをベースとし、2021年3月末、2022年3月末および2023年3月末に新たに執筆していただいた原稿を合わせて作成したものです。今後も、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、ホームページ版「同位体環境学がえがく世界」（https://www.environmentalisotope.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：2020〜2023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・分析室
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

総合地球環境学研究所特定推進研究「環境トレーサビリティに基づく研究基盤の応用」（2020 〜 2022年度）
陀安一郎、藤吉麗、鷹野真也

表紙、4章各節の扉イラスト制作　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

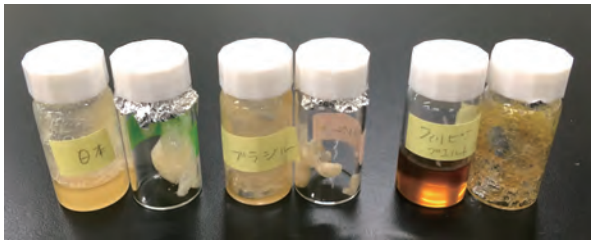


図 3. 左から、今回測定した日本産はちみつ（A）乾燥前・乾燥後、ブラジル産はちみつ（B）乾燥前・乾燥後、フィリピン産はちみつ（C）乾燥前・乾燥後

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

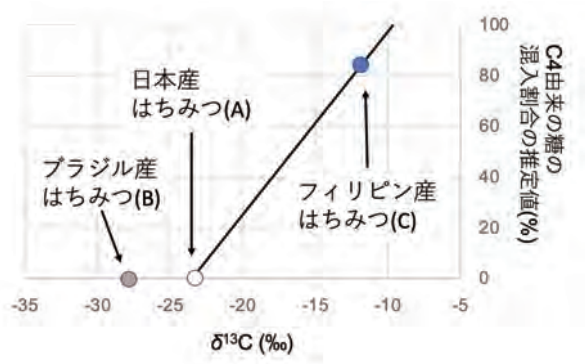


図 4. はちみつを生産する植物は「C3 植物」と呼ばれ、炭素同位体比（δ^{13}C 値）が低い（図の左の方）のに比べ、混ぜ物に使われるトウモロコシやサトウキビは「C4 植物」と呼ばれ、それら由来の糖の炭素同位体比（δ^{13}C 値）は高い（図の右の方）という特徴があります。今回の分析結果では、80％以上が「混ぜ物」だと考えられました（正式には AOAC 国際規格 Method Number, 998.12 に基づく測定法が必要です。今回は簡易的な分析によりました）。

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）

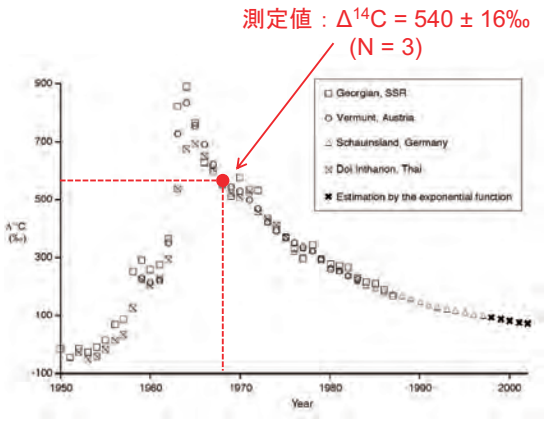
「古いものには価値がある」というのは本当でしょうか？　「もの」によって、あるいは価値を見出す「ひと」によって、答え方は様々かもしれません。ワインはその代表例と言えるでしょう。いわゆる「ヴィンテージワイン」のラベルには、原材料となるブドウの収穫年が書かれています。良質なブドウが収穫された年のワインほど、あるいはじっくり時間をかけて熟成されたワインほど、高い価値がつくことが多いようです。そして、それを逆手に取った様々な偽造ワインが、残念ながら市場に多く流通しているようです。

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。私たちの食べ物は、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

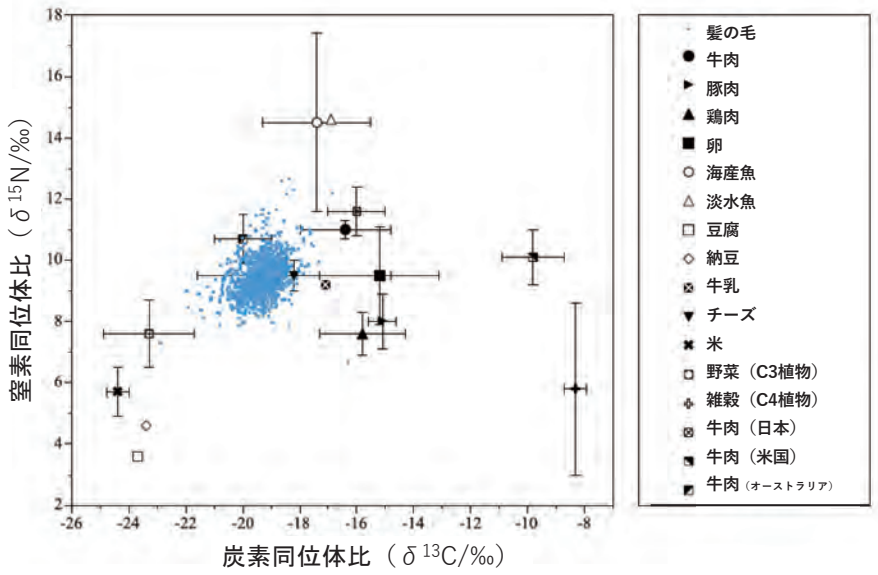


図 1. 1,305 名の日本人の髪の毛および食べ物の同位体比。食べ物の同位体比には髪の毛に対する栄養濃縮係数（「軽元素同位体」の項目参照：髪の毛の場合は、δ^{13}C については 2.5‰、δ^{15}N については 4.1‰）を加えてあるため、単純に比較することができます（Kusaka et al. 2016 を改変）。

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

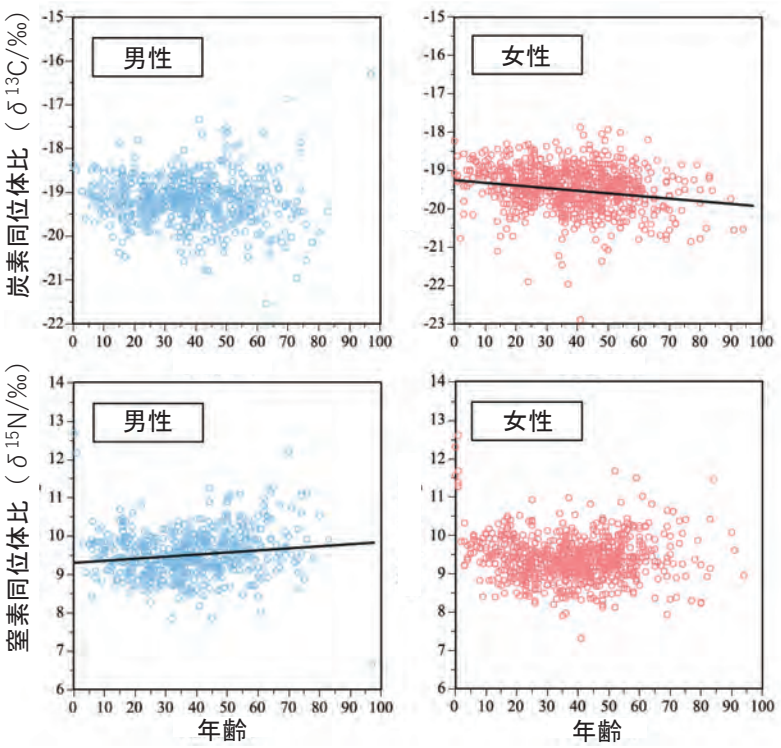


図 2. 1,305 名の日本人の髪の毛の年齢・性別の炭素・窒素同位体比（Kusaka et al. 2016 を改変）。年齢に沿って有意な関係があるもののみ線が引いてあります。

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

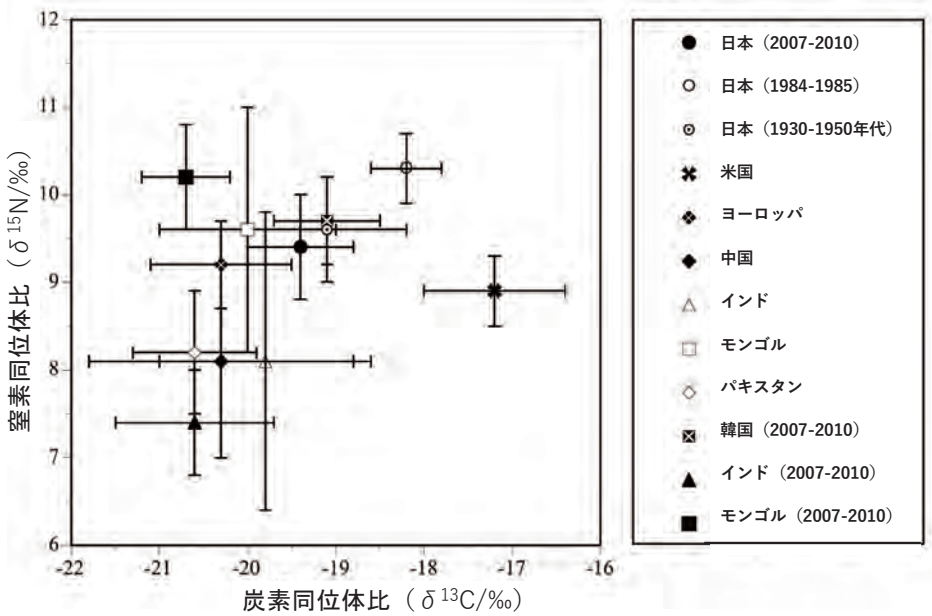


図 3. 日本・韓国・インド・モンゴルの 2007–2010 年に採取された髪の毛のデータ（平均値と標準偏差）と、その他の文献値の比較（Kusaka et al. 2016 を改変）。

「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々が協力して研究してきました。
いろいろな方々の声から、どのような研究が行われたか見てみましょう。
また、地域連携研究を行った例も紹介します。

「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。

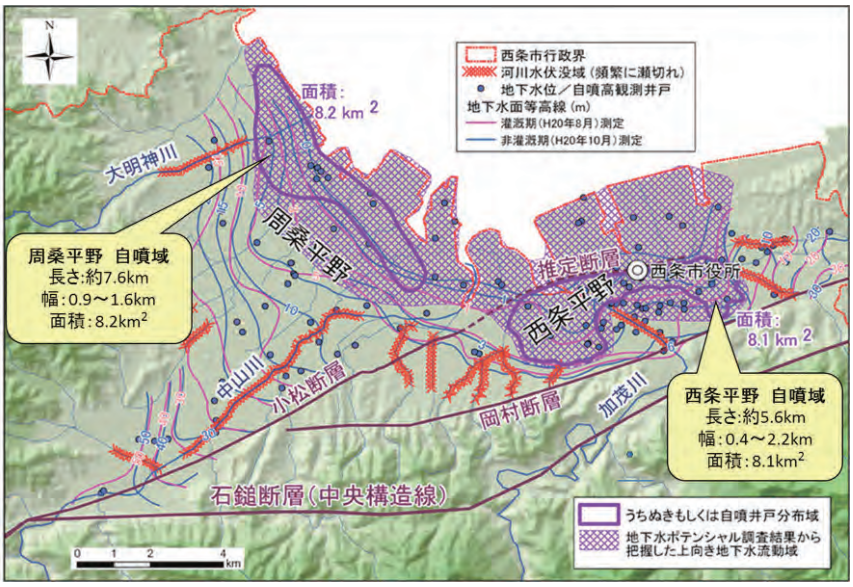


図 1. 道前平野の自噴帯の分布　（出典　西条市（2017））

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

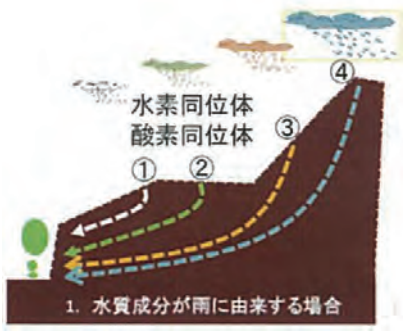


図 2. 水素・酸素同位体の地下でのフロー（出典　中野ら（2015））

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

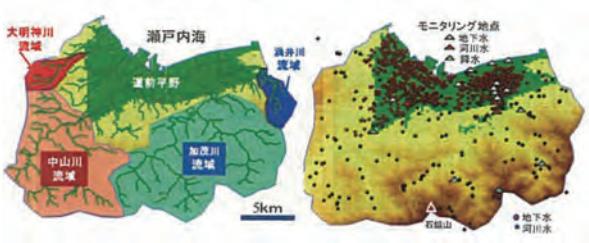


図 3.　西条市の河川流域（左）、地下水と河川水、降水の採水地点およびモニタリング地点（右）（出典　中野ら（2015））

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

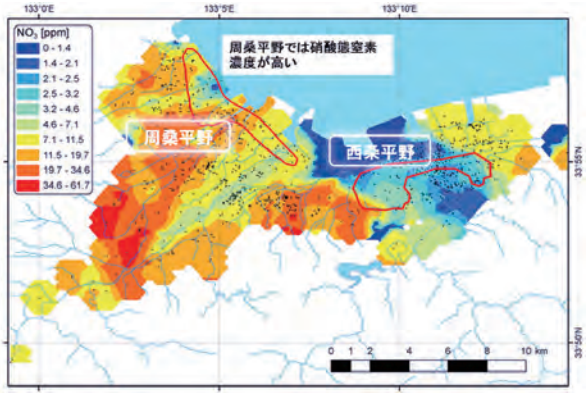


図 4.　地下水の硝酸態窒素濃度の分布（出典　西条市（2017））

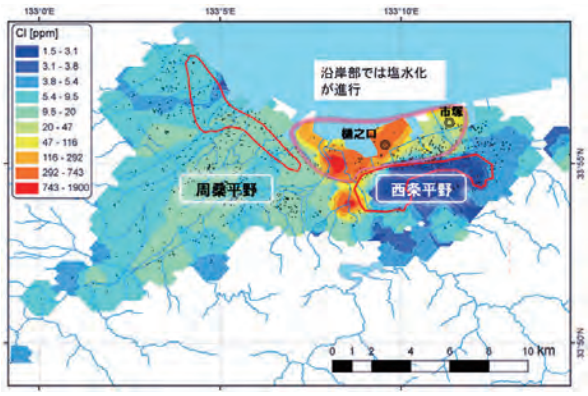


図 5.　地下水の塩化物イオン濃度の分布（出典　西条市（2017））

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）

この水、どこから来たの？
― 山梨県忍野村の調査事例 ―

藪 崎 志 穂
（総合地球環境学研究所）

1. 忍野村の湧水と地下水

皆さんは“忍野八海”という名称を耳にしたことがあるでしょうか。これは山梨県南都留郡忍野村で湧き出している湧水のことで、日本で最も標高の高い富士山の一帯で涵養された水として知られています。忍野八海はその名のとおり八つの湧水池（出口池、お釜池、底抜池、銚子池、湧池、濁池、鏡池、菖蒲池）から成り、2013 年 6 月 26 日に世界文化遺産富士山の構成資産として認定されました。富士山の雄大な山容を背景に湧き出す清冽な湧水群を見るため、国内のみならず海外からも多くの観光客が忍野村を訪れ、賑わいを見せています。特に、冬の晴れた無風の早朝に冠雪の富士山を湧水池の水面に映す、いわゆる逆さ富士を眺めると、その美しさに暫く見惚れてしまいます（図 1）。

忍野村には忍野八海以外にも複数の湧水があり、また地下には豊富な水が蓄えられています。村の民家の多くは敷地内に井戸を持ち、水道設備が整った現在でもこの井戸水（地下水）を生活用水などに利用されている方々も多くいます。また、地下水は農業用水や食品加工などにも利用され、住民にとっては欠くことのできない大切な資源です。こうした豊富な地下水は、周囲を高い山に囲まれた地形的な条件と水を貯留しやすい地下の構造によりもたらされており、まさに自然の恩恵を受けているといえます。忍野村の南西部には富士山の裾野が広がり、北部から東部の周縁部は道志山塊と接しており、これらの山地で涵養された水が地下水となって忍野村の地下を流動していると考えられます。また上述したように異なる山塊に接していることから、忍野村の地下水の水質や流動は場所により異なる特徴を有することが予想されます。言い換えれば、村内の地下水は場所によって水の起源が異なるということになります。

地下の水がどこから来たのかを知ることは、持続的な水利用や地下水保全、災害の対策などを考える際に重要な情報となります。本研究では、忍野村広域を対象として、地下水や湧水などの水質の特性や地下水流動について把握することを目的として地下水調査を実施しました。本稿では Yabusaki et al.（2023）の結果を元に、調査の概要について以下に説明します。

2. 忍野村の自然環境

忍野村は山梨県の南東部に位置し、周縁は標高 950～1,600 m ほどの山で囲まれ、中央部が低地となる盆地状の地形となっています。低地部の標高は約 930 m、村内の面積は 25.05 km^2 です。村の南西方向には標高 3,776 m の富士山が聳え、村の北部から東部は道志山塊の山と接しています。村内には、桂川が南から北に流れ、新名庄川が東から西に流れています。両河川は村の西部で合流して、桂川として富士吉田市方面に流下しています。また、忍野八海のうち七つの湧水は桂川と新名庄川の合流地点の近くに分布しており、残る一つの湧水（出口池）は南に約 900 m ほど離れた位置にあります。

地質の特徴として、村の中央付近の低地部には新生代第四紀完新世の非海成の堆積岩、北・東・南東の山地部には第四紀更新世～完新世の堆積岩（火山灰）、村の南西部には富士山から噴出した完新世の火成岩（玄武岩）がそれぞれ分布しています。



図 1. 冬の鏡池（2017 年 3 月撮影）

地質断面図によると、場所によりやや特徴が異なりますが、富士山に近い村の西部では地下 100 m 以上にわたり富士山起源の玄武岩質の溶岩や火山灰、スコリア（玄武岩質の黒っぽい色をした軽石。岩滓ともいいます）などが堆積しています。

忍野村の平均気温は 10.6℃、年降水量は 1,568 mm です（いずれも気象庁のアメダス観測地点「河口湖」の 1981～2010 年の平年値）。

土地利用では、村の周辺の山地部には森林が広がり、村の中央部の平地には住宅地や水田、畑が分布しています。また、忍野村ではトウモロコシが特産品となっており、春から夏にかけて栽培が盛んに行われています。

3. 調査方法

忍野村の広域調査は、2017 年 1 月 18～19 日、および 2017 年 8 月 8～10 日に実施しました。本研究では、地質の特徴により、井戸深度が 30 m 以下のものを浅層地下水（不圧地下水）、井戸深度が 30 m よりも深いものを深層地下水（被圧地下水）としました。1 月の調査では、浅層地下水は 49 地点、深層地下水は 11 地点、自噴井は 1 地点、湧水は 11 地点、8 月の調査では、浅層地下水は 53 地点、深層地下水は 28 地点、自噴井は 1 地点、湧水は 11 地点、河川水 2 地点、温泉水 1 地点で、それぞれ調査・採水を実施しました。浅層地下水は村内の住民のお宅の井戸が主体で、深層地下水は自治体の観測井や水源井、工場の井戸などが対象となっています。湧水は忍野八海とその他の湧水を調査しました。なお、自噴井とは地下水が自然に地表に湧き出す井戸のことを指し、湧水とは地下の水が自然に地表に湧き出していることを意味しています。

現地では EC（電気伝導率）、pH、水温、ORP（酸化還元電位）を測定、可能な地点では地下水位を計測し、加えて水質分析用の採水をおこないました。水質分析に関しては、陰イオン（F^-, Cl^-, NO_2^-, Br^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}）および陽イオン（Li^+, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}）はイオンクロマトグラフ（ICS-3000, Thermo Fisher Scientific）、HCO_3^- は pH4.2 アルカリ度滴定法、酸素と水素の安定同位体比（$\delta^{18}O$, δ^2H）は CRDS 法（L2130-i, Picarro）、微量成分（51 元素）は ICP-MS（7500cx, Agilent）で測定しました。

4. 忍野村の水質の特徴

忍野村の水質の特徴の概要を図 2 にまとめました。浅層地下水の水質（Ca-HCO_3 型で、Mg^{2+} と SO_4^{2-} の割合も高い）と深層地下水の水質（Ca-HCO_3、(Ca+Na)-HCO_3、(Ca+Mg)-HCO_3、Na-HCO_3 型を示す）は異なっており、それぞれ異なる帯水層の水であることは明らかです。また、忍野八海などの湧水の水質（Ca-HCO_3 型で、Mg^{2+} と SO_4^{2-} の割合も高い）は湧水の近くに位置する浅層地下水の水質組成と近似しており、地下水が湧水に流入など相互関係があると思われます。また、浅層地下水では 1 月と 8 月に溶存成分濃度に差異が生じる地点がありましたが（夏季に NO_3^- が高い値を示す地点があり、農業活動の影響と予想）、深井戸や湧水では季節変化は殆ど認められませんでした。また、浅層地下水や深層地下水の水質は、村の東部と西部では特徴に差異が生じる傾向があり、地下水流動と関係していると考えられます。特に、P（リン）や V（バナジウム）は富士山を涵養域とする水に多く含まれていますので、これらの元素濃度は富士山起源の水とその他



図 2.　忍野村の水質の特徴

の起源の水を区分する際に活用することができます。本調査地点においてもＰやＶの濃度に差異が認められ、特に村の西部の深層地下水でこれらの濃度が高くなる傾向が認められました。

深層地下水の安定同位体比（δ^{18}O や δ^{2}H）は、浅層地下水や湧水の同位体比と比べて相対的に低い値を示しており、同位体が有する高度効果[1)] の特徴により、深層地下水は浅層地下水や湧水よりも標高の高い場所で涵養された水であると考えられます。

また、村の北部に位置する自噴井のみ Ca-SO_4 型の水質組成を示し、δ^{18}O と δ^{2}H が調査地点内で最も低く、明らかに忍野村の他の調査地点（浅層地下水や深層地下水、湧水）の特徴とは異っており、不思議な水です。δ-ダイアグラムの結果から、この自噴井の水は天水（降水）起源であることは示せましたが、仔細はまだ明確にはなっていません。自噴井の水の起源がどこにあるのか、可能性の一つとして温泉水の混入が考えられ、微量成分や Sr（ストロンチウム）安定同位体比の結果を用いて現在検討を進めているところです。

5.　忍野村の地下水流動

水質の特徴から、忍野村の浅層地下水や深層地下水には異なる地下水流動系があることが予想されました。地下水流動を明らかにするために、2017 年 1 月と 8 月の調査時に測定した地下水位を元に地下水流線を作成して、地下水流動をそれぞれ求めました。その結果の概要を、浅層地下水は図 3 に、深層地下水は図 4 にそれぞれ示しました。

深層地下水と浅層地下水にはやや違いがありますが、全体的にみると概ね同じ特徴を有しています。忍野村の西部では、南から北に向かう地下水流動が認められ、これは富士山で涵養された地下水が忍野八海方面に向かう流れに相当します。この地域には村の水源井も含まれており、村内の水道は富士山起源の水を利用していることが調査の結果でも明らかになりました。一方、村の中央から東部では、東から西に向かう地下水流動が認められ、これは道志山塊で涵養された地下水が村の西側に流動する流れに相当しています。また、浅層地下水については、東から流れてきた地下水が村の中央付近で北側の新名庄川に向けて流動する地下水の流れがあります。2019 年 8 月および 2020 年 1 月、3 月、10 月に実施した河川流量調査（未公表データ）の結果において、上記の地下水流動が河川と交わる付近で河川流量が増加する傾向が認められ、従って地下水が河川に流入し河川流量が増加している可能性が示唆されました。これは本調査の結果と矛盾がありません。

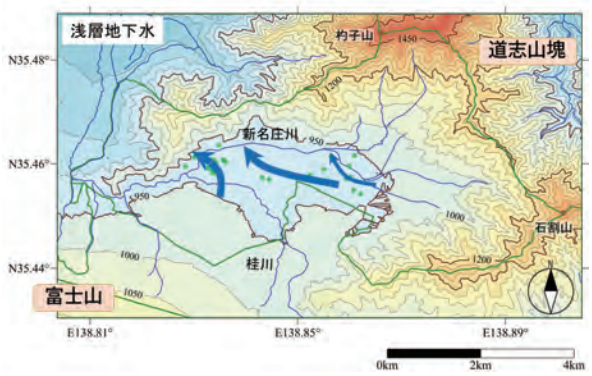


図 3.　忍野村の地下水流動（浅層地下水）

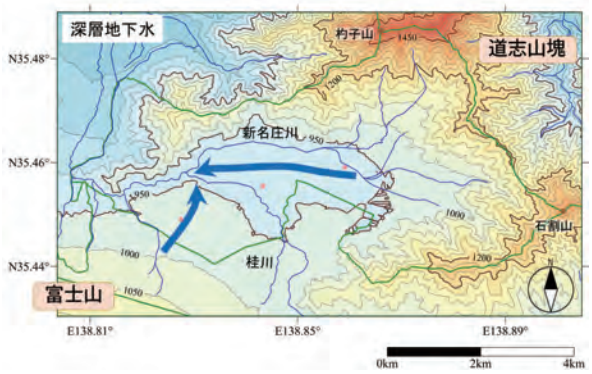


図 4.　忍野村の地下水流動（深層地下水）

6.　まとめ

忍野村広域を対象とした調査の結果、浅層地下水や深層地下水、湧水などの水質の特徴を把握し、さらに地下水位観測から地下水流動を推定することができました。その結果、忍野村では村の西部と東部で地下水流動が異なり、特に村の西側の地下水（井戸水）は富士山の影響を強く受けた水（富士山で涵養された水）であることを把握しました。また村の中央から東部では、東側に連なる道志山塊で涵養された地下水が流れていると考えられます。涵養域の山体の規模や地質の特徴を考えると、忍野村ではおそらく富士山起源の地下水のほうが涵養量は多く、比較的多くの水を利用することができるのではないかと考えられます。しかしながら、涵養量以上の水を使ってしまうと、地下水位の低下や湧水の枯渇および湧出量の減少を招くことに繋がりますので、地下水の利用には注意が必要です。本調査で明らかとなった地下水流動に加え水収支の情報などを複合的に用いることで、今後の持続可能な水利用に役立てることができると期待されます。

謝辞

本調査を行うにあたり、忍野村役場　企画課の皆さま、忍野村の天野多喜雄村長、および職員の皆さまに大変お世話になりました。また、井戸の調査や情報提供にご協力いただきました住民のみなさまにも深く御礼申し上げます。

注釈

1）　降水の酸素および水素の安定同位体比は標高と負の相関を持ち、標高の高い地点で降る降水ほど同位体比が低くなります。この特徴を同位体の高度効果と呼んでおり、地下水や湧水の涵養域（涵養標高）を推定する際に活用されています。

文献

Yabusaki S, Taniguchi M, Tayasu I, Akimichi T, Ohmori N, Gotou K, Watanabe H, Watanabe S, Furuya S (2023) Water quality characteristics and dynamics of groundwater and spring water revealed by multi-tracers in Oshino, Yamanashi, Japan. Geochemical Journal, 57 (1), 28–41. https://doi.org/10.2343/geochemj.GJ23003

著者情報



藪崎志穂　筑波大学大学院 博士課程 生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学、地下水学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

（2023 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、

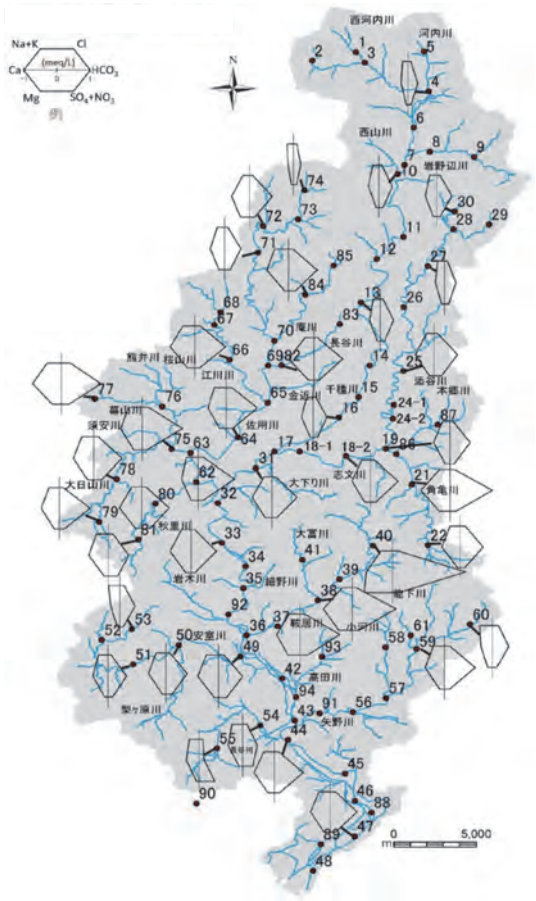


図 1. 千種川流域の水質（ミネラル成分）の分布と特徴（山本 2016）

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

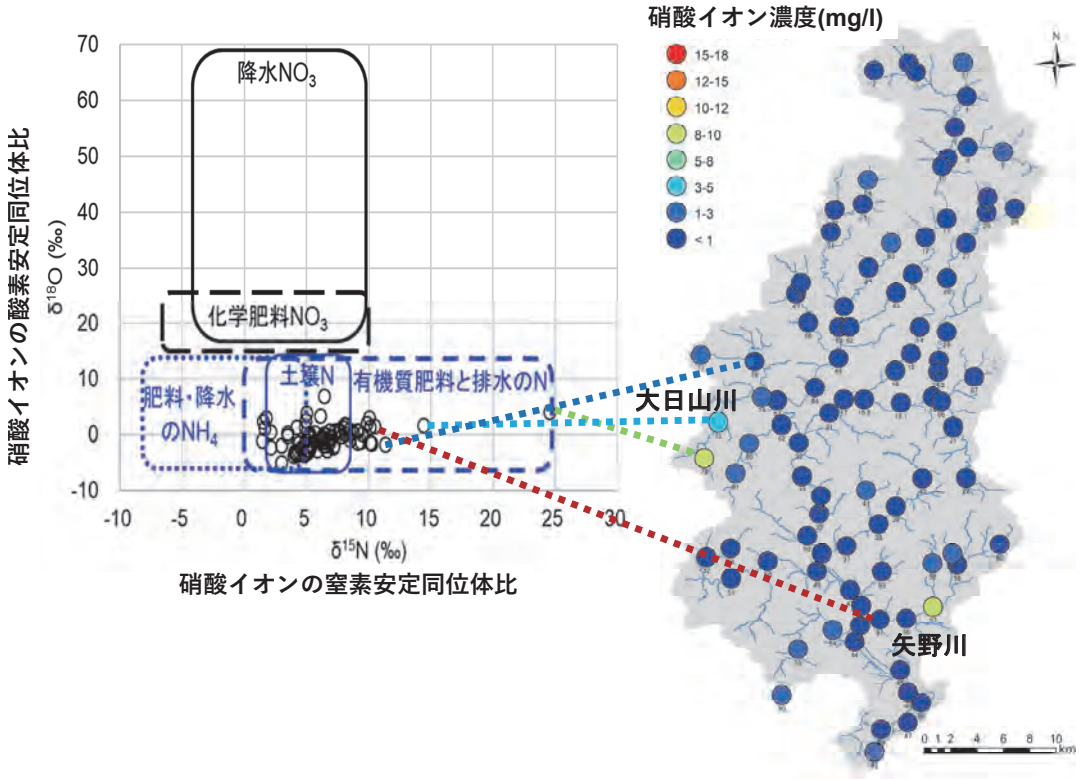


図 2. 安定同位体分析を用いた、千種川流域の硝酸イオンの起源推定（右の図は、2018 年 8 月の千種川流域の硝酸イオン濃度の空間分布。左の図は、安定同位体分析 1）を通した硝酸イオンの起源推定に用いる図）

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

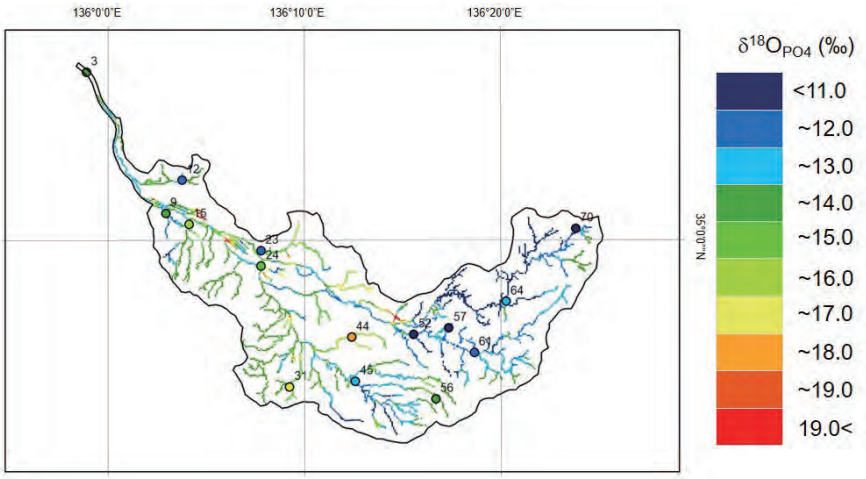


図 1. 野洲川のリン酸酸素安定同位体比の同位体地図。色の違いはリン酸酸素安定同位体比の違いを示している。〇で示しているのが実際の調査地点で、ラインになっているものが予測した河川のリン酸酸素安定同位体比を示している。

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）

フィリピン、シラン・サンタローサ流域の人の生活と地下水

上　原　佳　敏
（総合地球環境学研究所；現所属 WorldLink & Company Co. Ltd.）

1. 安定同位体比情報を社会や人々の暮らしの中でどのように活用できるのか？

環境中の水や土などの物質や生物に含まれている元素の安定同位体比は、生態系や環境中の物質の起源の推定や、物質の化学反応過程中の進行の程度を評価する事が出来ます。そのため、単に科学者や専門家だけが安定同位体情報を扱うのではなく、様々な分野の研究者が集まり協力して研究を行うような（学際的な）地球環境学の枠組みの中での利用方法や、さらには環境問題を解決するため、専門家や政治家、地域に住んでいる住民など、社会と連携して行う超学際的なアプローチにおいて、安定同位体情報をどのように活用するのかを検討する必要があります。

私たちはフィリピンの一つの流域を対象として、地域住民や行政と協働で河川や地下水の調査を行いました。得られた安定同位体比などの科学的な知見を現地の人たちと共有しながら、環境問題の解決に向けて取り組んできた事例を紹介します。

2. シラン･サンタローサ流域で生活している人々の意識

シラン・サンタローサ流域は、フィリピンのラグナ湖西部に位置しています（図 1）。

首都マニラの発展に伴い、人口増加や経済成長が急激に進んでいます。そのため、下水処理場などのインフラ整備が不十分な状態で、急激な開発が進んでいます。

この流域の上流域には農地が広がっており、中流域には自動車や飲料水製造などの工業地域があり、下流域には住宅地が広がっています（図 2）。

総合地球環境学研究所の栄養循環プロジェクトで行ったシラン・サンタローサ川の調査では、中流から下流にかけて河川の窒素やリンなどの栄養塩濃度が高く、生物多様性が非常に低いことがわかってきました（Peralta et al., 2019）。ちなみにこの川は、上流部でさえゴミが大量に捨てられており、下流域ではひどい悪臭を放っています。そのため、調査の時はいつも胴長を着て、両手にビニール手袋の上からゴム手袋を着用し、厳重な体制で調査に臨んでいました。その一方で、上流域から中流域の一部では、自然環境が残っている場

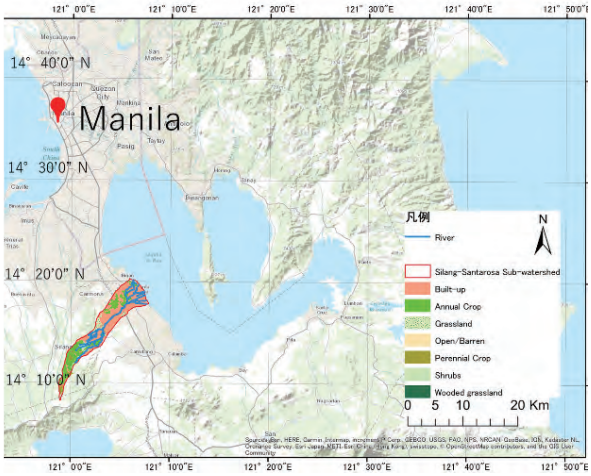


図 1. シラン・サンタローサ流域の位置



図 2. 中流域の様子

所があり、川が遊びの場であり、生活の場として利用している集落もあります。

この流域では、河川の多面的な基礎調査研究と並行して、地元の行政職員と共に地域住民に対して聞き取り調査を行い、地域の課題や地域の人たちが持っている環境に対しての経験知識を抽出しました。その結果、中流域から下流域にかけての地域住民らは、河川や身近な自然への関心が低いが、健康や生活に関わっている地下水については関心が高いことがわかってきました。さらにこの流域では、農業や企業活動、生活用水における地下水依存度がとても大きいため、地下水の汚染や枯渇が懸念されています。

そこで私たちは、普段地域住民が生活に使用している井戸水や、水道会社が使用している地下水ついて、汚染の状況や水や汚染源を明らかにするために、地下水中の重金属の濃度や、水の酸素・水素安定同位体比、窒素安定同位体比を測定しました。

3. 地下水の起源と地下水汚染

井戸の所有者からの聞き取りから、井戸の深さを聞き取りプロットしたものと、水の酸素水素安定同位体比の情報から、上流部から中流部にかけて、人々の生活で使用されている井戸水（地下水）は、ほぼ同じ $\delta^{18}O$ の値を示していることから、同じ帯水層であり、地下でつながっている事が示されました。また、下流部の一部の井戸の $\delta^{18}O$ は河川水の値に近い事から、河川水が井戸水に混入している事が示唆されました（図 3）。

また地下水には、有害な重金属元素の汚染は無いことがわかりましたが、上・中流部の地下水は硝酸態窒素の濃度が高く、一部の井戸からは WHO の飲用水の基準値を超える濃度の硝酸態窒素が検出されました。さらに、地下水中の窒素の起源については、安定同位体の情報から流域の上流から中流では農業の肥料由来の窒素であることがわかりました（図 4）。また、中流から下流の地下水の硝酸態窒素は、有機質肥料と排水に由来

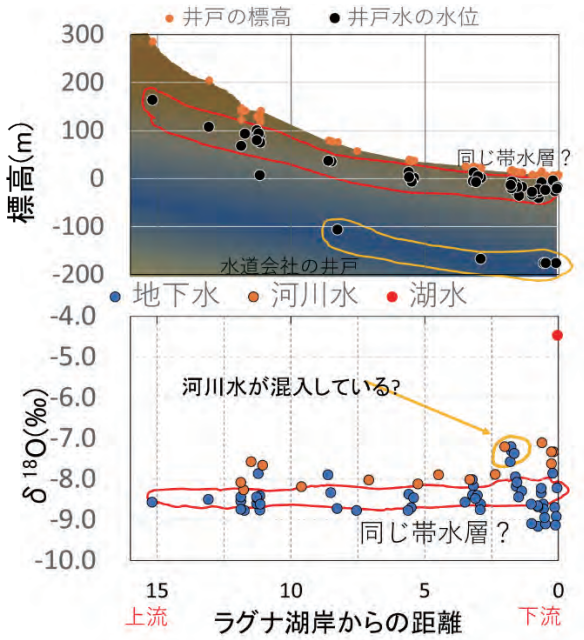


図 3. 聞き取り調査から得られた井戸の深さ（上図）と水の酸素安定同位体比（下）

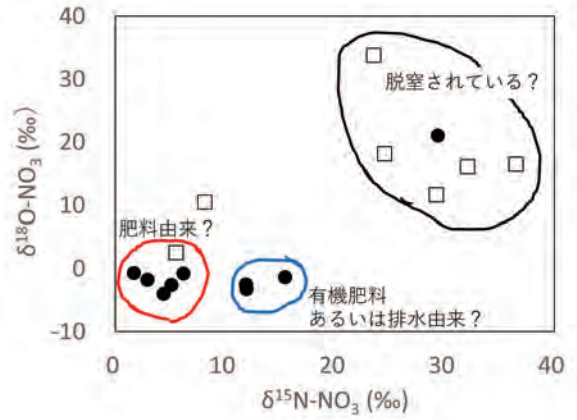


図 4. 硝酸態窒素の窒素と酸素の安定同位体比

している事がわかりました（図 4）。

4. 結果（科学的知見）の共有と、地域の経験値との融合

流域全体の地下水や河川水の状態を、安定同位体情報を基に地理情報システムやグラフで可視化する事で、地下水や河川水は上流と下流は繋がっている事がわかりました。フィリピンの行政機関や地域住民と結果の共有などのワークショップを重ねた結果、流域全体で“水”について考える必要性が確認されました。そこで、この流域内にある 3 市の市長や地域行政職員、町長や住民、企業

などの利害関係者が集まるフォーラムが開催されました。このフォーラムでは、参加者どうしで、水や身近な自然についての議論や科学的知見の共有が行われました。また、上流から下流までの水や人の繋がりを表現した「A water journey」の映像鑑賞を通じて、人と自然、上流と下流、人と人の繋がりを実感しました。このフォーラムをきっかけに、国の機関・行政に向けて「水管理の仕組み、制度」の要求がなされました。

5. まとめ

このように、安定同位体情報を基にした研究結果をコミュニケーションツールとして活用し、専門家だけでなく、行政や地域住民らが協働で環境問題について考えるのを促すという事に活用できたと感じました。

文献

脇田健一・谷内茂雄・奥田昇編（2020）「流域ガバナンス」京都大学学術出版社

Peralta, E M, L S Batucan Jr, I B B De Jesus, E M C Triño, Uehara Y, Ishida T, Kobayashi Y, C-Y Ko, Iwata T, A S Borja, J C A Briones, R D S Papa, F S Magbanua, Okuda N (2020) Nutrient loadings and deforestation decrease benthic macroinvertebrate diversity in an urbanised tropical stream system. Limnologica 80: 125744

著者情報



上原佳敏（総合地球環境学研究所；現 WorldLink & Company Co. Ltd.）2015 年九州大学大学院生物資源環境学府修了、博士（農学）。2015 年総合地球環境学研究所研究員を経て、2019 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

広域の地下水流動を把握する
― 自治体と地球研の連携研究による地域貢献 ―

安部　豊、内山佳美
（神奈川県自然環境保全センター）

1. はじめに：背景

1-1. 神奈川県の水源環境保全・再生の取り組み

森林の手入れ遅れなどにより林床の下層植生が衰退した荒廃人工林においては、水源かん養機能の低下による豪雨に伴う洪水の増加、土壌侵食・流出、土砂崩れなどの災害リスクが高くなることが指摘され、社会問題となっています。神奈川県は全国の自治体に先駆けて、平成 19（2007）年から、将来にわたる良質な水の安定的な確保を目的として、神奈川県内の丹沢山地を中心とした水源林地域（図 1）において、森林の水源環境を保全・再生するための取り組みを始めました。この取り組みは水源環境保全税を財源として森林管理を行い、その森林環境への効果の調査・研究結果をもとに、行政と県民とが一緒になって将来の水源林づくりを話し合いながら事業を進めることになっています。また、不確実性の高い自然環境を対象とすることから、5 年ごとに実行計画を見直しながら取り組みを進めることとなっています（内山・山根，2008；神奈川県環境農政部緑政課，2010）。



図 1. 神奈川県の水源エリアと試験流域

1-2. 水文モニタリング調査・研究

上記の取り組みでは、手入れ遅れの森林の間伐や植生保護柵の設置、シカの生息密度管理などの森林管理事業を実施し、加えて、これらの事業が水循環や生態系などの自然環境にどのように影響を与えるかを評価する調査･研究を行っています。神奈川県自然環境保全センターの研究部門では、森林管理が渓流水の流出や土砂流出にどの程度効果があるのかを観測・検証することを担当しており、県内の水源林エリアの 4 か所に精緻な調査・研究エリアとして試験流域を設定しました（図 1）。図 2a に示すような数 ha 程度の集水地形を呈した試験流域において、渓流水の流出量を 10 分間隔で連続観測する流量堰（図 2a 写真）や、地下水観測井（50 m 深）、気象観測システムなどを設置し、渓流水流出量、土砂流出量や降水量、地下水位を長期的かつ精密に観測する水文モニタリング調査[1)] を行っています。間伐や植生保護柵設置などの森林管理事業を実験的に行い、前後の渓流水の流出量の変化を定量的に観測することで、森林管理が及ぼす水循環への効果を把握しています（内山・山根，2013）。水文モニタリング調査のもう一つの重要な役割は、観測開始の 2012 年からの長期間のデータを蓄積することで、現在の環境を知るだけでなく、将来の気候変動などによる変化を知るための基準もしくは基盤情報になることです。

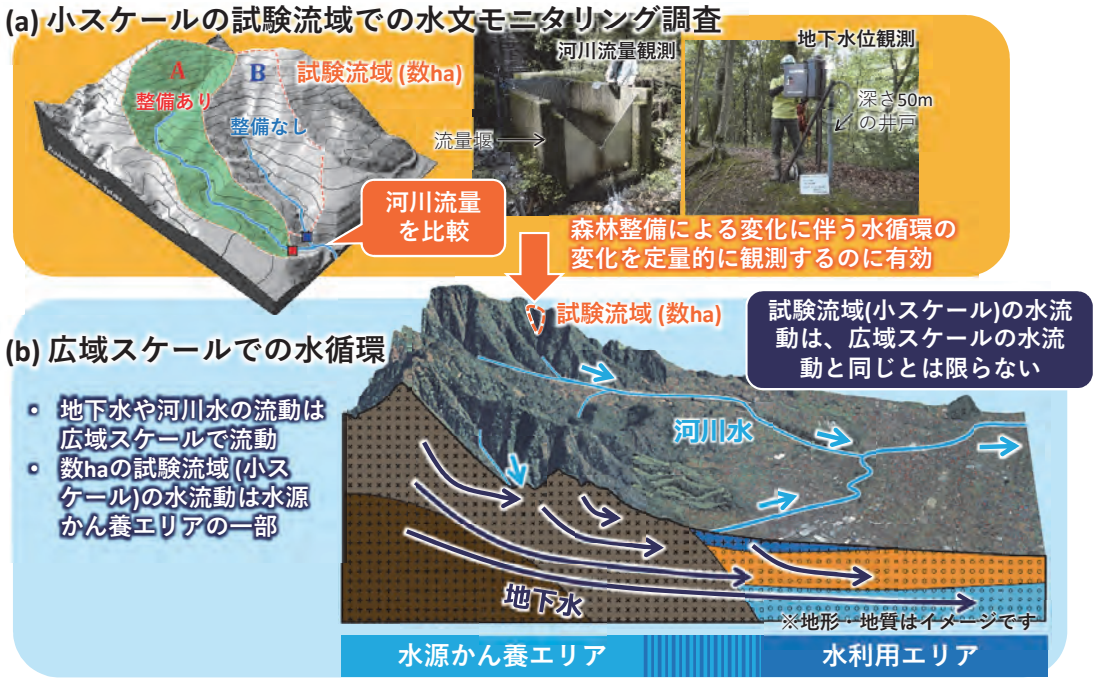


図 2. 小スケール試験流域と広域スケールの水循環の概念図

1-3. なぜ広域スケールが必要なのか

水文モニタリング調査から、試験流域において森林に降った雨が林内や地中でどのように移動し、下流の河川に流出しているかなどの水循環の特性がわかってきました（Oda et al., 2013；横山ほか, 2013；Abe et al., 2020 など）。ただし、水源環境を保全・再生する取り組みのミッションは水源林エリア全体を対象としています。そのため、各試験流域で得られた水循環の特性や森林管理の効果を、わかりやすく県民の皆様に説明したり、行政にフィードバック[2)] したりする際には、水源林地域の全体像として示す必要があります。しかし、数 ha の試験流域のような小規模スケールでの現象を単純に広げても、必ずしも広域スケールの現象と同じとは限りません（図 2b）。一つとして同じ形の木がないように、水循環特性を決める重要な環境条件（地形や土壌、地質、植生など）は小スケールの流域ごとに異なります。そのため、広域スケールの水循環の特性を把握し、試験流域（小スケール）の現象が広域スケール特性の中でどういう特徴があるのかを把握することが重要です。

1-4. トレーサー手法の利点

トレーサー手法は、広域スケールの水循環を把握する研究に有効です。水試料に含まれる溶存イオン成分（Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-} など）や各種同位体は、雨が降った年代や標高、雨との土や岩石と接触、地中の移動などの水流動の歴史を記録しています。情報を持つ水質や同位体をトレーサー（追跡子）と呼び、トレーサーの性質から記録された情報を読み解きます。例えば、山地で降った雨水の酸素安定同位体比は、標高が高いほど低い性質があるので、ある地点の河川水の酸素安定同位体比を分析することで、河川水がどの標高で降った雨で構成されているのかが推定できます。また、1 地点での採水で上流域の代表の値として広域の情報を読み取ることができます。河川水を例にすると、ある 1 地点で採取した河川水は、その上流域から集まってきた水が混合しているので、広域の水質・同位体の代表値として扱うことができます。局所的な不均質が目立たない、より空間的に広域で平均的な情報が手に入る点も広域スケールを把握するのに利点といえます。

そのため、本研究は水源地域全体の地下水流動

を含む水循環の特性の一端を明らかにすることを目的として、試験流域を中心とした周辺地域における雨水・河川水・湧水・地下水に含まれる特定の成分を水質・同位体トレーサーとして用いた調査・研究を行いました。本稿では、試験流域 4 か所のうち、相模湖に面する「貝沢」と丹沢山地西部の「ヌタノ沢」試験流域における、観測井の地下水と湧水に焦点を当てて紹介します。観測井の深さは 50 m と深く、深層の地下水であるといえ、湧水は地下水が地表面から流出した水であり、地表面近く（表層）の地下水を表します。表層近くと深層の地下水がどのように流動しているか、2 つの地域に絞って考察します。

2. 県と地球研をつなぐ

地方自治体がトレーサーを用いた水循環を把握する高度な研究を行うには、「分析」と「解釈」が大きな壁となります。それを解決してくれたのが、総合地球環境学研究所（以下、地球研）との連携でした。

水循環を対象にしたトレーサー手法の手順は、①現地調査での採水、②室内分析、③考察･解釈、のおおむね 3 つの行程があります。行程①に関して、県で既に水源地域の各試験流域で様々な環境調査が行われており､調査地点の選定や許可申請、採水調査はスムーズに行うことができました。ここは自治体が得意とするところです。しかし、行程②の溶存イオン成分や同位体などの室内分析に関しては必要な分析機器は高価なことなどから、自治体の研究機関ではほとんど所有していません。分析専門の民間会社に依頼することもできますが、分析料は高価で、多くの地点を測定することが難しくなります。地球研の実験施設は多くの分析機器を所有しているだけでなく、外部者でも分析機器を利用できる共同利用事業を行っています。もちろん、使用者は分析技術と知識を持ち、学術研究目的である必要がありますので、それらの条件をクリアした上で分析機器を利用することができました。また、行程③に関して、分析した水質や同位体の値がどのような水の流動現象を表すかを考察し解釈するには、高度な専門知識と解析経験が必要です。本研究の場合は、著者が水同位体を用いた地下水流動研究の経験があったため、水流動に関する同位体トレーサーを解釈することはできますが、地質構造が多様である丹沢山地や小仏山地においては、地質の情報も地下水流動にとって重要でした。そのため、地球研の申基澈（Shin, Kicheol）准教授の協力を仰ぎ、水と岩石の相互作用も含めた広域水循環の把握を目指す体制ができました。

この研究連携のキッカケになったのは、地球研に所属していた経歴を持つポスドク[3)] であった著者を当センターで雇用していたことでした。当センターではこの大規模な研究プロジェクトのために数名のポスドクを特別研究員として雇用しているため、県職員だけでなくいろいろな背景や経験を持った人が一緒に研究しており、様々な情報が集まり、人とのつながりが広がります。これらの人のつながりが本研究での自治体と研究機関の連携に役に立ったといえます。

3. 研究でわかったこと

3-1. 研究対象地域と研究方法

貝沢とヌタノ沢の試験流域において、表層の地下水としての湧水、地表面から 50 m の深さで掘削した地下水観測井から深層の地下水を採取しました。貝沢は、約 5200 ～ 3200 万年前と約 1 億年前～ 6500 万年前に海溝で複雑に変形した地層（付加体）の境界に位置し、ヌタノ沢は、約 1500 万年前～ 700 万年前の花崗岩質の深成岩を基岩としています。17 地点で 20 試料の地下水および湧水を採取する調査を行いました。調査時期は降水が少なく、地下水への影響が少ない冬季（2018 年 11 月～ 2019 年 3 月）に行いました（図 3）。採水した水試料の溶存イオン成分、酸素・水素安定同位体比（$\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$）、ストロンチウム同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）の分析には、地球研の分析機器を使用しました。



図 3. 調査状況写真

3-2. 水質・同位体トレーサーから読み取る

図 4a は、溶存イオン成分の特徴を比較するための散布図で、図中のⅠ～Ⅳは地下水の大まかな水質タイプを表します。貝沢では地下水はタイプⅢで、湧水はタイプⅠであり、異なる水質タイプを示した一方で、ヌタノ沢では、地下水も湧水もタイプⅠで同じでした。また、図 4b の酸素・水素安定同位体比の散布図では、貝沢では地下水が湧水に比べて離れて低い値であり、ヌタノ沢では地下水と湧水のばらつきは大きくありませんでした。一般に高い標高での降雨は低い同位体比になることから、貝沢では地下水は湧水よりも高い標高（遠い場所？）で地下水になった雨を起源としている可能性が考えられました。図 4c はストロンチウム同位体比を水の種類を分けてプロットしたものです。貝沢は 0.707 ～ 0.709 の範囲に分布し、ヌタノ沢の 0.704 付近にまとまっていました。

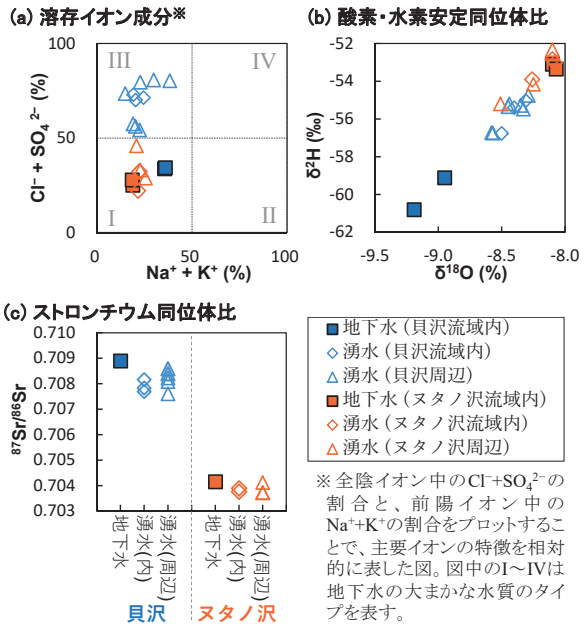


図 4. 貝沢、ヌタノ沢における水質、酸素・水素安定同位体比、ストロンチウム同位体比の特徴

これらの水質・同位体トレーサーの特徴から考えると、どうやら貝沢の深層の地下水は、湧水とは異なる場所で形成された地下水のようで、試験流域やその周辺の表層の地下水とは分断され混ざり合うことなく流動してきたと推察できます。一方、ヌタノ沢では、深層の地下水と表層の地下水を表す湧水は、水質組成も同位体の特徴も似ており、同じような流動の歴史を持っているか、混ざり合っていることが考えられました。

3-3. トレーサーと既存研究からわかる地下水流動のまとめ

水質・同位体トレーサーから読み取った地下水流動の特徴と、既存の調査･研究結果を合わせて、貝沢とヌタノ沢の深層地下水と表層地下水（湧水）の流動の特徴をまとめてみましょう。

貝沢については、砂岩や頁岩、砂岩泥岩互層などの堆積岩で構成され、層状の地質であることから、地表面付近の地下水と深層の地下水が難透水

層（泥岩など地下水を浸透させにくい地層）で分かれていてもおかしくはない地質です。貝沢の観測井では地下水が自噴[4]していますが、これは井戸の取水口（深さ 50 m）と地表面の間に難透水層がある可能性が高いことを示す現象です。そのため、貝沢では、図 5（上）に示すように難透水層によって、深層と表層の地下水は異なる帯水層を流動しており、深層地下水のかん養源は離れた場所にあることが考えられました。

ヌタノ沢における観測井掘削の際に採取した地質コアサンプルでは、地表面から 50 m の深さで風化した花崗閃緑岩であり、多くの亀裂が確認されました。風化された花崗閃緑岩はマサと呼ばれる砂礫になり、地下水が早く浸透できる帯水層となります。また、降水の際の地下水位の変化や数値モデルによる水収支の計算から、流域内に降った雨が、地下深くの基盤岩にすばやく浸透することが確認されています（Abe et al., 2020）。これらのことから、ヌタノ沢では、図 5（下）のように風化した岩盤や亀裂を地下水が流動しやすい地質になっており、50 m 深の深層地下水と表層地下水が同一の帯水層を流動していることが考えられました。

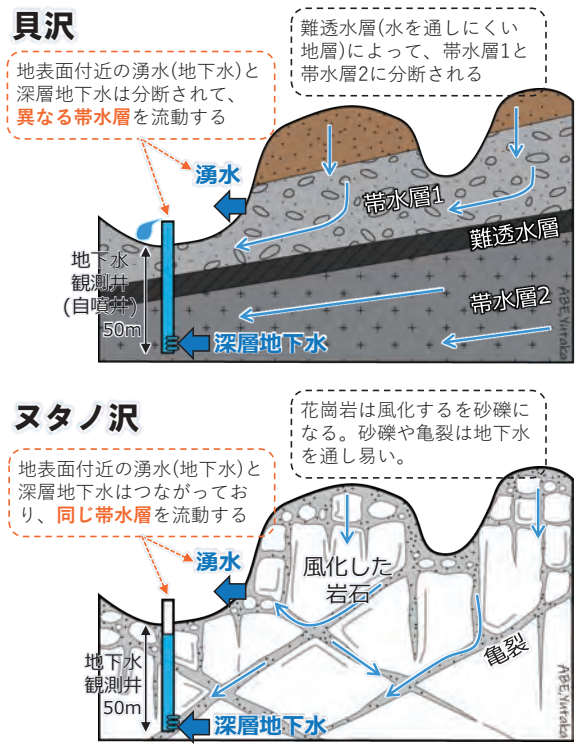


図 5.　貝沢、ヌタノ沢の地下水流動の違いの概念図

ストロンチウム同位体比は、ヌタノ沢の地質（約 1500 万年前～ 700 万年前の深成岩）と、貝沢の地質（約 5200 ～ 3200 万年前と約 1 億年前～ 6500 万年前の境界線に位置する付加体）の岩石の年代をよく表しました。貝沢では、ストロンチウム同位体比に幅があり、何かが読み取れそうな雰囲気を醸し出しています。今後、更なる考察から、深層地下水のかん養源が把握できる可能性を示しているように思います。

以上のように、水質・同位体トレーサーから水循環の情報を読み取ることは、非常に地道な作業と考察を要しますが、水循環の全体像を把握するのに大変に有効な方法です。今後は、流域の地形・地質特性や金属元素を加えて解析を進め、県民の皆様への説明や行政へのフィードバックなど、将来の水源林における再生・保全の取り組みに貢献できるような水循環の情報を提供していきたいと考えています。

注釈

1）水文学（すいもんがく）は、雨や河川水、地下水などの陸域の水の動きや質を対象とした学問で、モニタリングは自然環境の状況について、〇〇時間ごとなど決められた間隔で「連続的」に観測を実施することです。本稿では 2012 年から継続している試験流域における河川水流量を中心とした連続観測を「水文モニタリング調査」と呼ぶこととします。

2）フィードバックとは、取り組みの計画の見直しのための情報提供のことです。神奈川県の取り組みは 5 年ごとの計画の見直しを設定しているので、非常に重要です。

3）ポスドクとは、Post-doctor の略語で、博士号を取った後に任期付きの研究職に就いて研究の修行している人たちです。任期付きなので、色々な職場を経験しています。

4）自噴とは、地下水面が井戸の上端よりも高く、

井戸から自然に地下水が溢れ出る現象です。一般に、井戸の取水口と地表面の間に難透水層があり、深層地下水の圧力が高い条件でおきる現象です。

文献

Abe Y, Uchiyama Y, Saito M, Ohira M, Yokoyama T (2020) Effects of bedrock groundwater dynamics on runoff generation: a case study on granodiorite headwater catchments, western Tanzawa Mountains, Japan. Hydrological Research Letters. 14: 62–67. https://doi.org/10.3178/hrl.14.62

神奈川県環境農政部緑政課（2010）神奈川県の水源環境保全・再生施策について．地下水学会誌．52：65–73. https://doi.org/10.5917/jagh.52.65

Oda T, Suzuki M, Egusa T, Uchiyama Y (2013) Effect of bedrock flow on catchment rainfall-runoff characteristics and the water balance in forested catchments in Tanzawa Mountains, Japan. Hydrological Processes. 27: 3864-3872.https://doi.org/10.1002/hyp.9497

内山佳美・山根正伸（2008）：森林における水環境モニタリングの調査設計．神奈川県自然環境保全センター報告．5：15–24.

内山佳美・山根正伸（2013）：対照流域法によるモニタリング調査のための観測システムの整備．神奈川県自然環境保全センター報告．10：13–21

内山佳美・横山尚秀・三橋正敏（2015）：西丹沢ヌタノ沢の流出特性．神奈川県自然環境保全センター報告．13：39–47

横山尚秀・内山佳美・山根正伸（2013）：西丹沢ヌタノ沢の水文地質と流出状況．神奈川県自然環境保全センター報告．10：101–113.

著者情報



安部　豊（神奈川県自然環境保全センター研究企画部 研究連携課特別研究員）2012 年に筑波大学大学院生命環境科学研究科修了、博士（環境学）取得。総合地球環境学研究所計測分析部門技術補佐員、サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社水科学研究所研究員を経て、2018 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改版）

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。

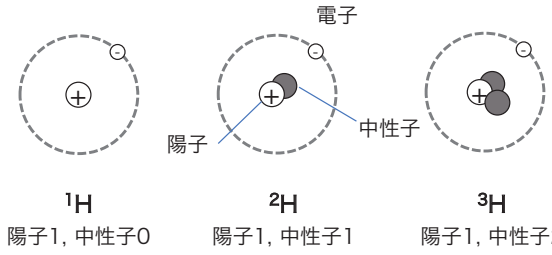


図 2. 水素の同位体の例　原子番号１の水素には陽子１個と中性子０個を持つ安定同位体 ^{1}H、陽子１個と中性子１個を持つ安定同位体 ^{2}H（重水素、デューテリウム、D とも書く）、陽子１個と中性子２個を持つ放射性同位体 ^{3}H（三重水素、トリチウム、T とも書く）があります。

周期＼族	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）
（2022 年 3 月 31 日改版）
（2023 年 3 月 31 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。

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

酸素の同位体比も同様に表します。

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

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。

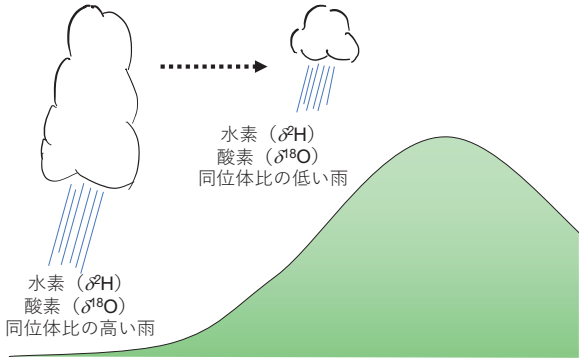


図 1. 水素同位体比（δ^2H）、酸素同位体比（δ^{18}O）の「高度効果」の概念図。

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 3 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（0.028％）から上昇して 400 ppm（0.040％）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。

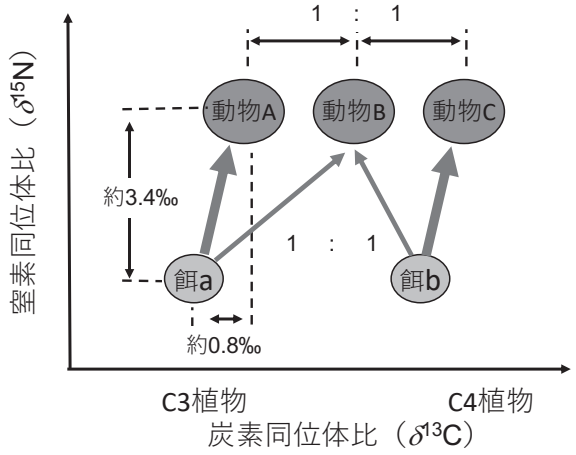


図 2. 炭素・窒素同位体比を用いた「食物網」の概念図。餌 a だけを食べる動物 A と、餌 b だけを食べる動物 C はそれぞれの餌の「右上」に位置します。餌 a と餌 b を食べる動物 B は、ちょうどその真ん中に位置します。

炭素・窒素同位体比を測定するためによく用いられているのは、動物の筋肉部分です。図 2 のように、植物などの「餌の候補」も一緒に測って図示すると、動物がどの植物を主に食べているかがわかります。また、これらの動物を食べる捕食者はさらに窒素同位体比が高くなるので、動物を食べる動物（高次捕食者）の「栄養段階」も推定することができます。人間の髪の毛の同位体比を測定することで、私たちの体が主に何からできているのかに関しては、「髪の毛の安定同位体比からわかる食生活」で説明していますので、興味ある方はご覧ください。

このように、一般に使われている「バルク（組織全体）」分析での同位体分析に対し、近年は「成分別」安定同位体分析も用いられています。特に、「個別のアミノ酸」の窒素同位体比を用いることによって、図 2 のように餌の元となる植物の窒素同位体比を測定することなく、動物の窒素同位体比を測定するのみで「栄養段階」を推定することもできるようになりました。興味のある方は、「アミノ酸の窒素同位体比が開く世界」をご覧ください。

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、

$$\delta^{34}S = \frac{\left[{}^{34}S/{}^{32}S\right]_{試料}}{\left[{}^{34}S/{}^{32}S\right]_{VCDT}} - 1 \qquad （式 7）$$

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）
（2022 年 3 月 31 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）。

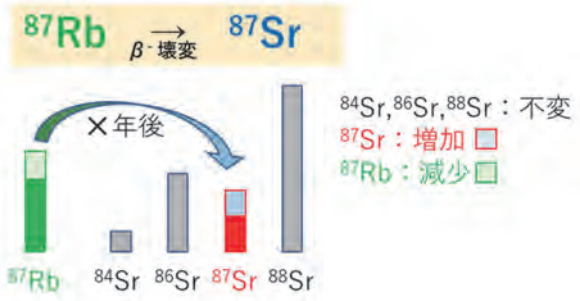


図 1.　Rb の放射壊変と Sr 安定同位体の変化

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

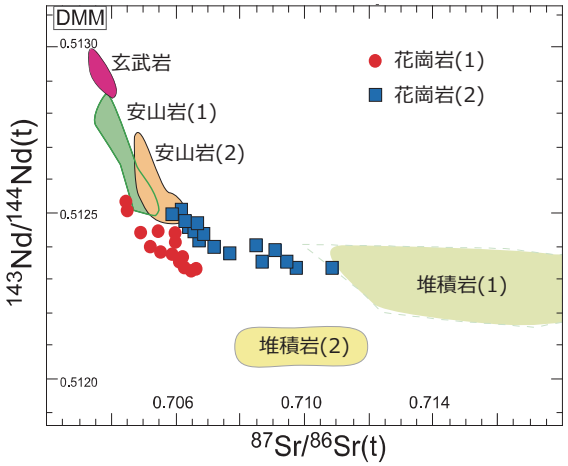


図 2.　岩石研究で用いられる Sr-Nd 放射起源同位体図の例　花崗岩（1）は安山岩（1）と、花崗岩（2）は安山岩（2）及び堆積岩（1）と密接な関係を持っていることが分かります。

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。

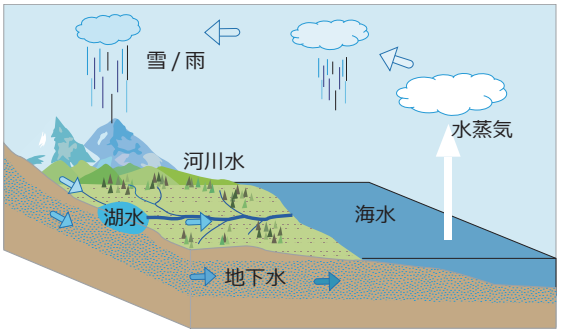


図 1. 地表環境での水循環

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）

重元素同位体の前処理から測定まで

申　　基　澈
（総合地球環境学研究所）

金属元素はほとんどの物質に様々な割合で含まれています。その含有量の多少で主成分元素や微量成分元素に分類します。岩石の場合はその構成元素の中で1%以上の割合を占める元素を主成分元素（major element）といいます。学校の地学で学ぶシリカ（Si）、アルミニウム（Al）、鉄（Fe）、カルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）、ナトリウム（Na）、カリウム（K）などがここに該当します。一方で非常に少ない割合で含まれている元素を微量元素（trace element、ppm 濃度以下の含有量）といいます。重元素同位体比測定によく用いられるストロンチウム（Sr）、鉛（Pb）、ネオジミウム（Nd）などがここに含まれていますが、他の元素も多く存在しており、我々の日常生活に幅広く使われています。

ある物質に含まれている金属元素に対して同位体比測定を行うためには、測定する元素を他の元素から分離・精製する必要があります。軽元素の場合は試料を装置に導入して燃やすなどの方法で気化させ、そこから測定元素のみを選択することができますが、金属元素の場合はそれが出来ません。目的元素のみを試料から取り出して分析装置に導入する必要があります。

すべての物質は元素の集合体でもありますので何らかの方法を使って試料を元素やイオン単位に分解して分離・精製します。特に違う元素なのに同じ質量数を持つ同重体（isobar）の除去は細心の注意を払わなくてはいけません。重元素同位体を測定するための試料前処理から測定までの流れを図1で表しました。試料の種類と測定元素によって前処理期間は異なりますが、多くは1週間程度でできますが、長くかかる試料は1カ月以上を必要とする場合もあります。

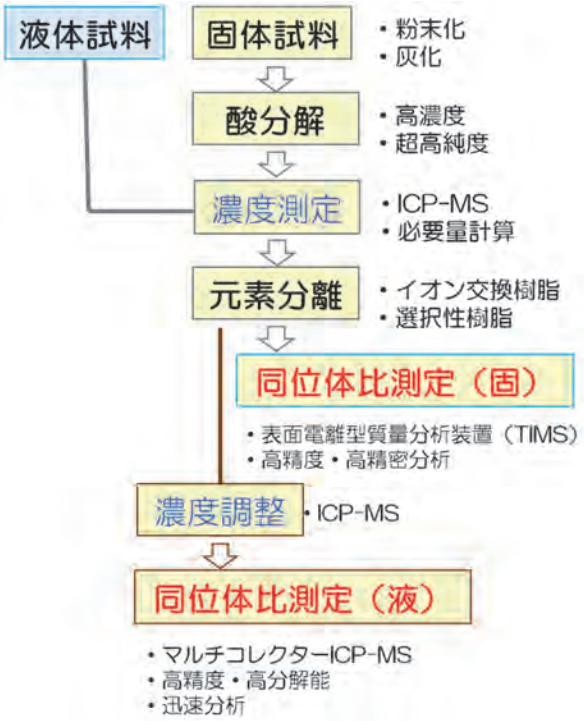


図 1.　重元素同位体比測定の流れ

1.　試料の分解（溶液化）

河川水などの溶液試料は試料自体が溶液状態なので前処理としては、まずフィルターを用いて不純物や粒子などを取り除きます。試料に有機物成分が多く含まれている場合には硝酸などを用いて酸処理を行い次の濃度測定に進みます。

固体試料を効率的に溶液化にするためにはまず粉末化する必要があります。岩石や堆積物及び土壌のような無機試料なら切断機や粉砕装置を使って大きさ数 μm 以下になるように完全につぶします。生物（動・植物）試料は乾燥又は凍結してから粉砕装置で粉末にします。完全に粉にしてから試料を十分な量を用いて溶液化に進みます。生物試料は有機物で構成されているため溶液化の段階で大量のガス（主に二酸化炭素や水蒸気）が発生し、完全な分解を妨害することがあります。その

ため、生物試料を酸で分解する前に燃やして灰化することで有機物を効率よく取り除くことができます。この灰化で金属の測定元素が失われることを防ぐためにも 500℃くらいの高温で灰化するマッフル炉（又は電気炉）を使うより 100～130℃前後のより低い温度で灰化できる低温灰化装置を用いるのをお勧めします。

粉末になった試料は高純度かつ高濃度の酸を用いて溶液化します。試料を溶液化するということは、強く結合している元素同士を切り離してイオンの状態にすることを意味します。多様な元素同士が様々な形態で結合して一つの物質を構成しているため、それらの結合を切り離すためにはその結合に合わせた酸を使う必要があります。ケイ酸塩が中心になっている岩石や土壌はシリカ結合を切り離せるフッ化水素酸（HF）が必要ですし、有機物は炭素結合を中心に形成されているため強い酸化力を持っている硝酸（HNO_3）を使用します。

一般的に岩石・鉱物のような無機試料はフッ化水素酸（HF）－過塩素酸（$HClO_4$）－硝酸（HNO_3）－塩酸（HCl）などを組み合わせて 180℃以上の高温・高圧状態で分解します。試料に対して使用する酸の種類と量は実験環境によって様々な方法がありますので自分の研究目的と試料に合った方法を選択します。一方、有機物試料は硝酸（HNO_3）と過酸化水素水（H_2O_2）を用いることで簡単に分解することができます。最近は危険なフッ化水素酸の代わりにテトラフルオロホウ酸（HBF_4）を用いることもあります。

高濃度酸は非常に反応性が高いためわずかなミスでもすぐ周囲の物質を溶し込んで汚染されてしまいます。高濃度酸を使用する際には細心の注意を払いながら安全かつきれいな環境が整った実験室が必要ですので、空気中の微粒子の量が制限されているクリーンルームで実験を行います。また使う実験道具は酸と反応しないテフロン製の器具を使います。酸の純度も不純物が非常に少ない超高純度酸を使うことになります。超高純度酸は高価なため、安価な酸を購入し実験室で非沸騰蒸留を行うことで不純物を取り除き、超高純度酸を精製して使うこともあります。この際には、2 回蒸留することが多いです。

試料は通常はホットプレートで加熱しますが、一連の分解過程を終えるには 1 週間程度かかります。そのため、短時間で効率よく加熱・分解するためマイクロ波分解装置（家庭用電子レンジと同じ仕組みですが実験用に開発されたもの）を用いることが多くなっています。

このように高濃度酸を用いて溶液化された試料は一旦酸溶液中の要らない成分を取り除くため蒸発・乾固を行った後に ICP-MS を用いて元素濃度を測定するために再び硝酸で溶解します。

2. 濃度測定と必要な量

まず、ICP-MS などを用いて試料に含まれている金属元素の濃度を測定することにより（詳細は「元素濃度」を参照）、同位体分析に必要な元素の量に合わせて、溶液化された試料から分析に必要な量を計算します。一つの例として河川水試料を考えてみます。Sr 同位体比測定に必要な Sr 元素の量は 100 ng 程度です。河川水に含まれている Sr 濃度が 100 ppb（ng/mL）なら 1 mL あれば Sr 同位体比の測定ができます。しかし含有量が少ない Pb が 2 ppb（ng/mL）くらいの濃度だとするとその必要な試料量は 50 mL になります。そのため ICP-MS や ICP 発光装置などで同位体比の測定に必要な試料量を取り分けて元素分離工程に進みます。この際に硝酸溶液にした試料をもう一度蒸発乾固して再調整することもあります。

3. 元素分離

試料の溶液化を通してイオン化された元素は、イオン交換樹脂を用いたクロマトグラフィー法で分離・精製します。イオン交換樹脂は樹脂の表面にあらかじめイオンを吸着させているもので、溶液中に存在するイオンを吸着する代わりに樹脂が持っていたイオンを離すことでイオン交換反応が起きます。樹脂に吸着されるイオンの種類は溶液

の種類と酸濃度によって変化するので目的元素（イオン）のみが吸着される条件を作り出して元素分離を行います。元素によっては 1 回の分離過程で終わるものもありますが、似たような工程を 2〜3 回繰り返さなければきれいに分離・精製できないものもあります。樹脂表面に陰イオンが吸着されるのが陰イオン交換樹脂であり、陽イオンが吸着されるのが陽イオン交換樹脂です。このイオン交換樹脂は比較的に安価で、1 回の工程で複数の元素分離ができますし、綺麗に洗浄すれば繰り返して使うことができるメリットがありますが、必要な樹脂量と溶液量が多くて時間がかかるデメリットもあります。また使用状況によって分離状況が悪くなることがあるので気を付けて使う必要があります。

目的の元素のみを分離する選択性樹脂も広く使われています。Sr 樹脂や Pb 樹脂、REE（Rare-earth elements：希土類元素）樹脂のような選択性樹脂は決まった条件で決まった元素のみを吸着して、他の元素はそのまま流します。このような選択性樹脂は必要な樹脂の量も少なく、必要な溶液も少量でできるので、作業時間が短く分離状況も良いというメリットがありますが、高価で、かつ 1 回しか使えないので、費用が掛かるというデメリットがあります。最近は費用が掛かっても作業効率が良い選択性樹脂を使うことが多いです。地球研で行われている元素分離の工程を図 2 にまとめました。

ここで注意が必要なのが、同位体比を標準物質に対する偏差（δ 値）で表す元素（例えば Mg や Fe などの金属元素）を分離する場合です。元素分離過程で、樹脂に投入した元素の“一部だけ”が回収されると、同位体分別によって試料が持つ本来の同位体比から大きくずれてしまいます。それを防ぐために、樹脂に投入した量と回収された量を確認して、回収率が 95％以上になっていることを確かめなければなりません。

分離・精製された同位体比測定用試料は、塩酸溶液又は硝酸溶液状態で回収されます。分析装置

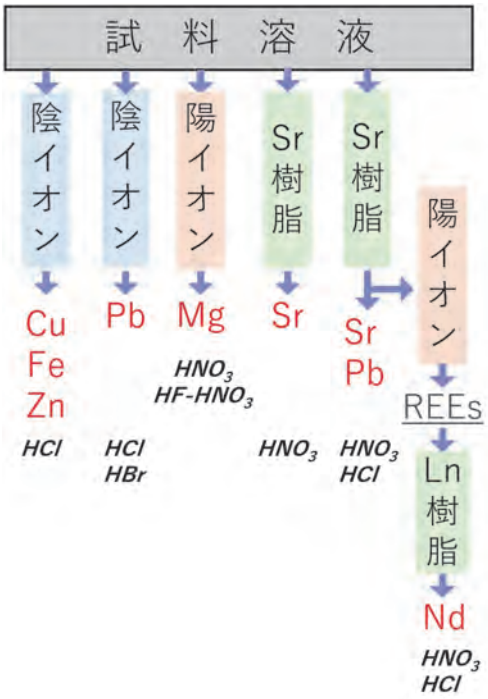


図 2. 元素分離で使用される樹脂と溶液の種類。複数の溶液種類を使ったり、同じ溶液を濃度を変えて使ったり、一つの工程を繰り返して行ったりして目的元素のみを綺麗に分離・精製します。（REES：希土類元素）

の種類に合わせて濃度調整もしくは蒸発乾固を行い、同位体比測定に移ります。

4. 同位体比測定

図 1 で示したように同位体比の測定は表面電離型質量分析装置（TIMS; Thermal Ionization Mass Spectrometry）又はマルチコレクター ICP-MS（MC-ICP-MS）を用いて行います。TIMS はイオン化エネルギーが高い金属のフィラメントの上に測定試料を載せて蒸着させて測定します。フィラメントとして使われるものは超高純度（99.999％以上）のレアメタルであり、レニウム（Re）とタンタル（Ta）とタングステン（W）が広く使われます。測定用試料が載っているフィラメントに電流を流すと高温の熱が発生するのでその熱で元素をイオン化させます。電流の強さで測定する元素の信号強度を調整できるので非常に安定した信号強度を得ることができますが、測定が進行すると僅かではありますがイオン化される同位体

の割合が軽い同位体と重い同位体で差が生じます。つまり、軽い同位体が重い同位体よりイオン化されやすいので時間が経過するとその差は大きくなっていきます。このように、装置内部で起きる同位体分別によって、測定された同位体比は試料自体が持っている同位体比を示さないことになります。そのため同位体分別によるずれを直す内部補正ができる元素については非常に安定した高精度測定ができます。

一方、時間経過による同位体分別が起きないのが溶液試料で測定する MC-ICP-MS です。MC-ICP-MS は高温のアルゴンプラズマ（約 6,000～7,000℃）で元素をイオン化させ同位体比を測定します。測定用試料は均質な溶液であるため測定の最初と最後で差が生じません。また内部補正ができない元素に対しては内部補正を可能にする別の元素を添加することができるので、そのような元素は安定した測定ができます。例えば Pb の測定にタリウム（Tl）を添加すると同位体分別の補正ができます。しかし、アルゴンプラズマが持っている振動のため、イオン化された元素の信号強度は常に変化します。そのため TIMS のような高い安定性が確保できません。また測定元素の信号強度は試料の濃度によって決定されるため測定試料の濃度調整が必要になります。元素分離で回収された試料から ICP-MS を用いて元素濃度を測定し、標準物質の濃度に合わせます。同じ試料を両装置で測定したときに測定値の精度は TIMS の方が MC-ICP-MS より 3～4 倍くらい良い結果を出します。

TIMS での測定は高真空条件で行うため試料を装置に導入してから 6 時間以上の真空引きが必要ですし、一度に装置にセットできる試料数（21 個）に制限があるため迅速分析はできません。しかし MC-ICP-MS は大気圧下で溶液試料を流すだけなので真空引きが要らず、迅速分析が可能です。

以上のように金属元素の同位体比を測定には TIMS と MC-ICP-MS の 2 種類の装置が使われていますが、装置それぞれの特徴を理解した上で自分の研究目的に合った装置を選択する必要があります。

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。

（2023 年 3 月 31 日掲載）

地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法

藪 崎 志 穂
（総合地球環境学研究所）

1. 水循環と地下水流動

地球上に存在する水には、もっとも量の多い海水のほかに、地下水、湧水、河川水、湖沼水などがあります。大気中にも水蒸気が存在し、降水（降雨や降雪など）の源となっています。これらの水はエネルギー（主に太陽エネルギー）を得ることにより循環しており、こうした現象は「水循環」と呼ばれています。持続可能な水利用を行うためには水循環を把握することが不可欠です。また、水害などの自然災害や水質汚染の対策・予防を検討するためにも、水循環は非常に重要な概念となっています。

水循環に関する研究は多岐に渡りますが、その一つに地下水の流動に関する研究も含まれています。実は地下水は人間活動とも大きく関わっており、たとえば、農業や工業用として地下水は多く利用されていますし、降雪の多い地域では融雪用として地下水が用いられている場所もあります。お酒や豆腐、ミネラルウォーターなどの食品用としても利用されており、また身近な例としては、私たちが飲む水道水の水源に地下水が利用されている地域もあります。このように人間生活と密接に関わっている地下水ですが、間違った使い方をすると枯渇したり、涵養域や流域の無闇な開発により水質汚染が生じたりすることもあります。こうした問題を考える際に、地下水流動研究は重要な役割を担っています。地下水の流動を明らかにするために、多く活用されているのが、水の性質（＝水質）です。ひとことで水質といっても、種類は沢山ありますが、本稿では一般的によく使われている項目について紹介したいと思います。

2. 現地で測定する項目

地下水調査では現場で測定する項目があり、水温、pH、EC、ORP、DO などが相当します（表 1）。特に水温は時間が経過すると値が変わるため、その場で測定しなければなりません。他の項目は実験室に持ち帰ってから測定する場合もありますが、時間の経過と共に変化することもあるので、通常は現地で測定しています。いずれも持ち運びが可能なポータブルの測定機器がありますが（図 1）、メーカーや価格によって測定範囲や機能が異なりますので、研究目的に適した測定機器を用いる必要があります。以下では、各項目の特徴について簡単に説明します。

水温は水の温度で、河川水や湖沼水など大気に接している水では気温の影響を受けて、測定する時期や時間によって大きく変化しますが、地下水は地中にある水のため大気とは接しておらず、年間を通じてほぼ一定した値を示します。ただし、浅い地下水の水温は降水の浸透の影響などを受けて変化する場合もあります。深い地下水では地温の影響を受けるため、表層から深層にむけて水温が変化することもあります。また、涵養された標高によって水温は変化するため、同じ地域の地下水の水温の差により、大まかですが、涵養標高の違いを把握することができる場合もあります。

pH（potential of hydrogen）は水の酸性やアルカリ性の程度を示す値で、水素イオンの濃度を反映しています。なお、以前は“ペーハー”と呼ばれることもありましたが、現在は日本の工業規格に従い“ピーエッチ”または“ピーエイチ”と読むことが推奨されています。pH は酸性（pH ＜ 7）、中性（pH=7）、アルカリ性（塩基性）（pH ＞ 7）

表 1. 水温、EC、pH、ORP、DO の特徴

項目		単位		特徴
水温	water temperature		℃	・河川水や湖水など大気に接している水では時期や時間によって大きく変化する ・地下水は地中にある水のため大気とは接しておらず、年間を通じてほぼ一定した値を示す ・深度が深い地下水では地温の影響を受けるため、表層から深層にむけて水温が変化することもある ・同じ地域の地下水の水温の差により、涵養標高の大まかな違いを把握することも可能
pH	potential of hydrogen			・pH7 以下→酸性、pH ＝ 7 →中性、pH7 以上→アルカリ性（塩基性） ・日本の地下水では、一般的に 6 ～ 7 前後の値を示す ・深い地下水では相対的に高い値（アルカリ性）の値を示すことが多い ・火山地域の地下水では火山ガスの影響を受けて酸性を示すことが多い
EC	electrical conductivity	電気伝導率	mS/m, S/m	・水に溶存している物質量の総量を示す ・EC の値が高いほど水に溶けている成分量は多くなるが、何が溶けているのかは把握できない ・降水の EC は通常 3 mS/m 以下の低い値を示す ・地下水では、一般的に EC は 10 ～ 30 mS/m を示す地点が多いが、火山地域の地下水や沿岸付近で海水が混入している地下水、深度の深い地下水などでは沢山の成分が溶けているため EC は高くなる ・海水の EC は 4,000 ～ 4,500 mS/m と非常に高いため、海水の混入の把握が可能
ORP	oxidation-reduction potential	酸化還元電位	mV	・水が好気的条件下にあるか、嫌気的条件下にあるかの判断に用いられる ・常時大気に降れているような河川や湖沼水では好気的条件にあるため、相対的に高い値を示す ・深い地下水など嫌気的な条件下にある場合には ORP は低い値を示す
DO	dissolved oxygen	溶存酸素量	mg/L, ppm	・水にどれくらいの酸素が溶けているかを示す ・DO が高いと酸素が多く溶けており，DO が低いと溶存酸素量は少ない ・DO は植物や生物活動と深く関連しているため、湖沼環境を把握する際に良く利用されている



図 1. （右）EC・pH メーター（D-54，HORIBA）、（左）ORP メーター（PH72，YOKOGAWA）

に区分できます。pH は地質の影響を受けやすく、日本の地下水では、一般的に 6 ～ 7 前後の値を示すことが多いですが、深い地下水では相対的に高い値（アルカリ性）を示すことが多く、また火山地域の地下水では火山ガスの影響などを受けて酸性を示す場合が多いです。

EC（electrical conductivity）は電気伝導率とも呼ばれており、水に溶存している物質量の総量を把握できます。EC の値が高いほど水に溶けている成分量は多くなります。しかし、EC の値からは何が溶けているのかはわかりません。降水は成分が殆ど溶けていないため、EC は通常 3 mS/m（ミリジーメンス／メートル）以下の低い値を示しています。一般的な河川の EC は上流で低く、下流に向かうにつれて高くなる傾向があります。日本の場合、平均的には 5 ～ 20 mS/m 程度の値を示しています。地下水では、一般的に EC は 10 ～ 30 mS/m を示す地点が多いですが、火山地域の地下水や沿岸付近で海水が混入している地下水、深度の深い地下水（滞留時間が長い地下水、化石海水が混入している地下水）などでは沢山の成分が溶けている場合が多く、EC も高い値を示すことになります。たとえば、海水の EC は 4,000 ～ 4,500 mS/m と非常に高いため、地下水における海水混入の有無を EC からある程度判断することができます。

ORP（oxidation-reduction potential）は酸化還元電位とも呼ばれており、水が好気的条件下にあるか、嫌気的条件下にあるかの判断に用いられています。常時大気に降れているような河川や湖沼

水では好気的条件にあるため、ORP は 200 ～ 300 mV の相対的に高い値を示しますが、深い地下水など嫌気的な条件下にある場合には ORP は低い値を示します（-200 mV 以下になる場合もあります）。

DO（dissolved oxygen）は溶存酸素量とも呼ばれ、水にどれくらいの酸素が溶けているかを示す値です。mg/L または ppm で表示され、値が高いほど多くの酸素が溶存していることになります。DO は植物や生物活動と深く関連しているため、湖沼環境を把握する際に良く利用されています。たとえば、有機物や微生物が多い湖沼（一般的に水質汚濁が生じている湖沼）では消費される酸素が多くなるため DO が低くなり、貧酸素状態となって生物が生息できない環境であることがわかります。

これらの項目を測定し、データを地図にプロットして平面分布図を作成することで、地下水の帯水層の違いや、地下水流動の把握などに活用することができます。

3. 無機溶存イオンと水質組成図

水には物質を溶かす性質があり、沢山の種類の物質が溶存しています。しかしながら、何が溶けているのかは地下水の場所や深度、地質の条件などによって異なるため、分析装置で測定することにより初めて知ることができます。なお、現場で大よその特徴を把握するための試薬（パックテストなど）もありますが、これは色で判断するため主観的な要素が強く、参考値として利用するのが望ましく、正確な値を知るためには、やはり機器分析で実施する必要があります。

地下水に溶存している成分で一般的に多く含まれているものとして、無機溶存イオンが挙げられます。これには、ナトリウムイオン（Na^+）、カリウムイオン（K^+）、アンモニウムイオン（NH_4^+）、カルシウムイオン（Ca^{2+}）、マグネシウムイオン（Mg^{2+}）などの陽イオンと、塩化物イオン（Cl^-）、硝酸イオン（NO_3^-）、硫酸イオン（SO_4^{2-}）、リン酸イオン（PO_4^{3-}）、炭酸水素イオン（HCO_3^-）などの陰イオンがあります。昔は滴定など手分析で項目ごとに分析しており、手間と時間がとてもかかっていたようですが、現在は分析装置（主にイオンクロマトグラフ（IC））を利用することで、陽イオンと陰イオンを比較的短時間かつ高精度で測定することができます。地球研では ICS-3000 や ICS-6000（いずれも Thermo Fisher Scientific 社製）を用いて分析しています。こうしたイオンの濃度はペットボトルのラベルに表示されている場合がありますので、みなさんもご覧になったことがあるかもしれません。イオン濃度は、通常“mg/L”（1L 中に何 mg のイオンが含まれているか）として表示されます。mol 表示などで示される場合もありますが、いずれも変換は可能です。

イオン濃度は数値として表示されますが、沢山の地点を比較する場合には、数値では把握しにくい場合があります。そこで、溶けている成分の値を図示して、水質の特徴を把握する方法がよく用いられています。この図を水質組成図と呼んでいます。水質組成図には表現方法の違いにより複数の種類がありますが、ここではよく使われているシュティフダイアグラムとトリリニアダイアグラムについて説明します。

シュティフダイアグラム（stiff diagram）は、陰イオンと陽イオンの濃度を六角形の図で表したもので、形や大きさから水質の特徴をひとめで把握することができます（図 2）。ヘキサダイアグラムと呼ばれることもあります。なお、濃度の単位は meq/L（水 1L に含まれるミリ当量値）を用いています。凡例で示しているように、真ん中を 0 とし、左側に陽イオン（上から $Na^+ + K^+$、Ca^{2+}、Mg^{2+}）、右側に陰イオン（上から Cl^-、HCO_3^-、$SO_4^{2-} + NO_3^-$）をプロットし、それぞれの点を線で結ぶと作成できます。真ん中の直線から距離が離れているほど、すなわち図の形が大きいと濃度が高いことになり、より多くの物質が溶存していることになります。

シュティフダイアグラムでは図の形から水質の

特徴を知ることができます。特徴的な水質組成 4 つを例として図 2 に示しました。1 は海水で、Na^+ と Cl^- を多く含んでおり、このような水質組成を Na-Cl 型と示します。また、横方向に 1/200 で表示されているため、濃度が非常に高いことがわかります。2 は石灰岩地域の湧水で、Ca^{2+} と HCO_3^- 以外は殆ど含まれておらず、Ca-HCO_3 型となっています。石灰岩は炭酸カルシウム（$CaCO_3$）を主成分とする堆積岩で、水に溶解すると、“$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$”の化学反応が生じ、水中の Ca^{2+} と HCO_3^- 濃度が高くなります。鍾乳洞の地下水も同様の水質組成を示しますが、濃度は場所によってやや異なります。3 は比較的深い地下水（深井戸の水）で、Na-HCO_3 型を示しています。日本では浅い地下水や湧水、河川水などでは Ca-HCO_3 型が卓越していますが、深い地下水は地下に滞留している時間が長くなるため、地層中の鉱物との化学反応等が生じて水質も変化し（たとえば、粘土鉱物と水との反応では、Ca^{2+} や Mg^{2+} が粘土鉱物に吸着され、Na^+ や K^+、HCO_3^- が放出されるため、水中の Na^+ や K^+、HCO_3^- 濃度が高くなります）、Na-HCO_3 型の水質組成を示すことが多くなります。更に年代を経た水では

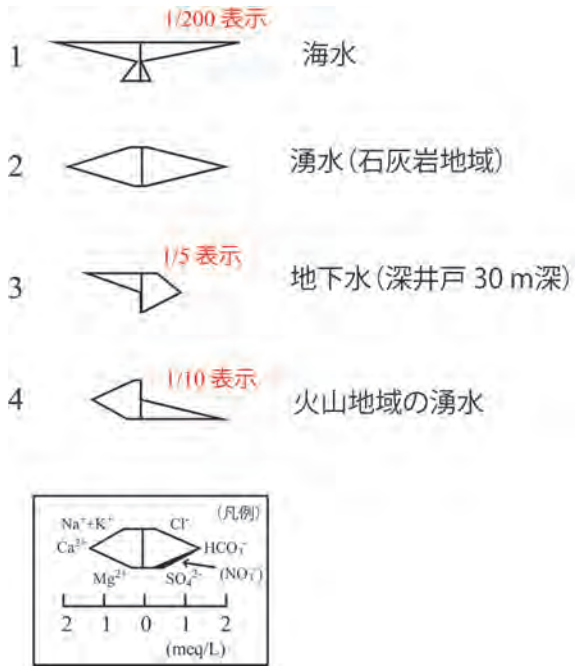


図 2. 水質組成図（シュティフダイアグラム）

Na-（Cl＋HCO_3）型や Na-Cl 型のように異なった水質組成に変化することもあります。深度が 1,000 m を超えるような非常に深い地下水でこうした水質の特徴が散見されており（茶屋ほか, 1977；丸井，2014 など）、地質の影響に加え、化石海水の影響などを受けていると考えられます。また、大抵の場合、深い地下水のほうが溶存成分量は多くなっています。そのため、水質組成をみることで、浅い地下水か、深い地下水かの大まかな情報を得ることができます（この例に当てはまらない場合もあります）。4 は Ca-SO_4 型で、少し珍しい水質組成です。火山起源地域の地下水・湧水や温泉水、黄鉄鉱を含む地質が分布する地域の地下水などで見られる水質組成です。Ca-SO_4 型の水では Fe（鉄）や Mn（マンガン）などの金属元素濃度も高いことが多く、地質と強い関係を持つ水質であると言えます。これら 4 つの水質組成のほかにも Ca-Cl 型（塩水化した地下水や融雪剤の影響を受けた地下水などで見られる）や複合型など多くの種類があります。いずれにしても、形と大きさを比べることで、同じ地域の地下水であれば地下水流動や帯水層の把握に役立てることができますし、沿岸域であれば海水の混入の有無のほか、帯水層の深度や地質の推定などにも活用することができ、地下水流動研究では非常に重要な手法になります。

もう一つ、よく利用される水質の表示法があります。トリリニアダイアグラム（trilinear diagram）と呼ばれるもので、中央の菱形座標図（キーダイアグラム）と、左右 2 つの三角座標図からなります（図 3）。パイパーダイアグラム（piper diagram）とも呼ばれています。シュティフダイアグラムと同様に、陰イオン 4 成分、陽イオン 4 成分を対象としています。この図ではそれぞれのイオン濃度の当量値の割合（当量％）を表示しているため、溶存成分量は反映されませんが、化学成分濃度の相対的な割合を瞬時に把握することができます。通常、トリリニアダイアグラムの菱形座標図の部分を 4 つに区分し、Ⅰ「アルカリ土類炭酸塩型」、

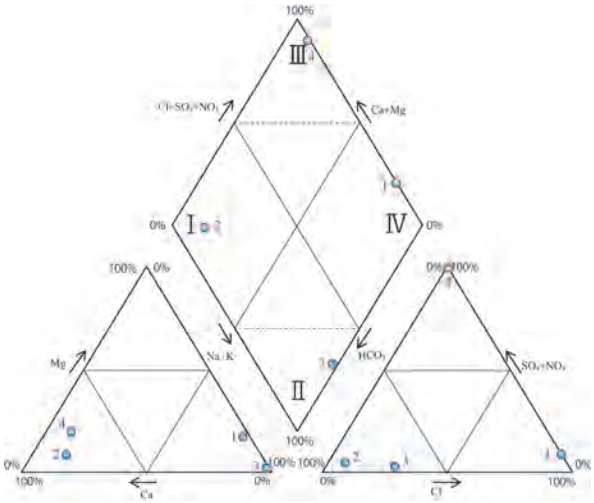


図 3. 水質組成図（トリリニアダイアグラム）

Ⅱ「アルカリ炭酸塩型」、Ⅲ「アルカリ土類非炭酸塩型」、Ⅳ「アルカリ非炭酸塩型」と呼んでいます。ⅡおよびⅢの部分を更に上下に二等分し、内側の部分を「中間型」として表示する場合もあります。

それぞれの大まかな特徴として、Ⅰには浅層地下水や湧水、河川水などがプロットされ、日本の表流水や地下水では最も多くの地点がこの部分に含まれます。Ⅱには深層地下水など滞留時間が比較的長い水がプロットされます。Ⅲには温泉水（熱水）や化石海水、火山地域の地下水・湧水など、Ⅳには海水などがプロットされます（藪崎, 2011）。ただし、すべての水が上記の分類に適合する訳ではないので（たとえば、温泉水でもⅡにプロットされる場合があります）、この点に注意して水質の評価を行う必要があります。図 2 のシュティフダイアグラムで示した 4 地点について、1（海水）はⅣに、2（湧水）はⅠに、3（深層地下水）はⅡに、4（火山地域の湧水）はⅢにプロットされており、ほぼ上述した分類に適していることがわかります。今回は 4 地点のみの表示ですが、百～数百を超えるような多くの地点でも同一の図にプロットすることができるため、溶存成分の場所による違いや、同じ地点での水質の時間変化を把握する際に特に効力を発揮します。

このようにシュティフダイアグラムおよびトリリニアダイアグラムでは同じ水質データから異なる情報を得ることができるため、用途に応じて多くの地下水流動研究で利用されています。

4. 微量成分

水中にごく僅か含まれている成分を微量成分と言います。たとえば、Fe（鉄）や Mn（マンガン）、Al（アルミニウム）、Cu（銅）、Zn（亜鉛）、Sr（ストロンチウム）、Hg（水銀）、As（ヒ素）などがあります。これらは原子吸光光度計や ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析計）などで測定することができます。特に ICP-MS では複数の元素を同時に分析することができ、検出感度は元素によって異なりますが、ppb ～ ppt のオーダーで測定することができます。地球研では、Agilent 7500cx や Agilent 8900 ICP-QQQ で分析しています。

地下水の微量成分の濃度は場所によって異なりますが、火山地域の地下水では Al や Fe、Mn、B（ホウ素）などを多く含んでいることが多いです。また、微量成分の多くは地質由来となっているため、岩石や土壌と長期間接触している滞留時間の長い地下水では濃度が高くなる傾向があります。また人体に有害な As や Hg、Cd（カドミウム）、Pb（鉛）などを多く含んでいる場合もあり、地下水汚染の把握では重要な項目となります。これらの元素は人為的な汚染により負荷された場合が多いですが、地質等の自然起源のものもあります。また、V（バナジウム）のように富士山など一部の限られた地域の地下水や湧水で濃度が高い元素もあり、こうした物質は地下水流動や帯水層の違いを調べる際に利用できます。また、地質（岩石）により含まれる元素は異なっているため、地下水中の微量成分濃度を測定することで、地下水流動や涵養域を推定できる場合があります。このように、地下水流動研究では微量成分もトレーサーとして有効活用することができます。

5. 水の安定同位体

安定同位体には様々な種類があります。水（H_2O）を構成する元素の H（水素）と O（酸素）

にも安定同位体があり、水素安定同位体（以下、δ^2H）および酸素安定同位体（以下、δ^{18}O）と呼ばれています。これらの同位体は水そのものとなりますので、水の挙動を把握するための非常に優れたトレーサー（追跡子）となります。なお、同位体の詳細については、本冊子の「3 章　軽元素同位体」をご参照ください。

H と O の同位体比分析では、かつては前処理を行ったのち質量分析装置で測定するのが一般的でしたが、近年は波長スキャン・キャビティリングダウン分光方式（WS-CRDS）の機器を利用することにより、従来の質量分析計で測定する場合と比べてより簡便かつ短時間で分析することが可能となりました。地球研では、通常は、WS-CRDS の L2130-i および L2140-i（いずれも Picarro 社製）を利用しています。

δ^{18}O および δ^2H には複数の特徴があり、これらの特徴を活かして、多くの地下水流動研究で利用されています。利用法の一例を、以下に紹介します。

- 流域の地下水等の同位体比の空間分布を示すことで、帯水層の違いや地下水流動、他の水塊との混入の有無などを把握することができます。なお、海水の δ^{18}O と δ^2H は約 0‰で、通常の地下水や湧水、河川水等と比べると相対的に高い値を示すため、沿岸域では海水混入の把握にも活用することができます。
- δ–ダイアグラム[1] に地下水や湧水、海水など異なる水塊の δ^{18}O と δ^2H をプロットして計算することにより、ある水試料に混入していると予想される水塊のそれぞれの混合割合を推定することが可能となることもあります。この場合、異なる水塊の同位体比には明瞭な差があることが条件となります。
- 蒸発の発生に伴い水の同位体比が高くなる性質を利用して、地下水や湧水の蒸発の有無や、土壌中（土壌水）で蒸発の影響がおよぶ深度を把握することができます。
- 標高と同位体比に負の相関が存在するため（高度効果）、この特徴を利用して地下水や湧水などの涵養域を推定することができます。
- 地下水の同位体比は時間変化が少なく比較的一定した値を示しますが、降水（降雨や降雪）はイベント毎に同位体比が大きく変動するため、降水と河川水の連続観測を行い両者の同位体比を比較することで、降雨 – 流出過程の解明につなげることもできます。

このように、工夫次第で多くの情報を得ることができるため、δ^{18}O や δ^2H は地下水流動研究では欠くことのできない重要な項目となっています。

6. 滞留時間の推定

持続的な地下水利用を行う際には、地下水の滞留時間[2] を把握することが重要となります。水の滞留時間を把握するためには幾つかの方法がありますが、その中でも ^{3}H や CFCs、SF_6 を用いた推定方法がよく利用されています。

^{3}H は水素の放射性同位体で、トリチウムとよばれています。陽子 1 つと中性子 2 つから構成される核種で、β 線を放出して ^{3}He（ヘリウム）に壊変します。12.32 年経過すると濃度が半減し、これを半減期といいます。時間が経過すると濃度が減少する性質を利用して、水の滞留時間を推定することができます。濃度は Bq/L または TU（トリチウムユニット；1 TU=0.118 Bq/L）で示されます。たとえば、ある地下水試料について涵養された当初の ^{3}H 濃度が 10 Bq/L で、現在の ^{3}H 濃度が 2.5 Bq/L の場合、1/4 の濃度に減少しているため、滞留時間はおよそ 25 年（半減期 × 2）であると推定されます。^{3}H の半減期は比較的短いため、数年～ 100 年ほどの滞留時間の推定に利用できます。そのほかに、地下水の年代測定では ^{14}C（半減期 5730 年）や ^{36}Cl（半減期 301000 年）などの放射性同位体が利用されていますが、これらは半減期が長いため、滞留時間が数千年～ 100 万年のようにとても長いものに対して有効となります。日本の地下水では（非常に深い地下水を除き）数年～ 100 年程度の滞留時間が多いため、利

用できる地点は限られてきます。

CFCs はクロロフルオロカーボン類（Chlorofluorocarbons）といい、CFC-11、CFC-12、CFC-113 などがあります。冷却剤や洗浄剤などの工業用として 1930 年代に人工的に生成された有機化合物で、化学的に極めて安定な性質を持つため、放出された CFCs は大気中に蓄積されました。年代によって大気中の CFCs 濃度が異なるため、水中の CFCs 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。

SF_6 は六フッ化硫黄（sulfur hexafluoride）のことで、電気や電子機器などの縁ガスとして 1960 年代から利用されている気体です。化学的に非常に安定な性質を持っており、大気中の濃度は現在も増加しています。CFCs と同様に、水中の SF_6 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。CFCs と比較して、より新しい水（滞留時間が 10 年よりも短い水）の年代推定が可能です。

降水の ^3H 濃度、大気中の CFCs（CFC-11，12，113）および SF_6 濃度の経年変化を図 4 に示しました。これらの濃度と試料水の濃度を比較することにより涵養された時期が判明しますので、結果として滞留時間を求めることができます。ただし、単純に濃度を比較するだけで結果が得られる訳ではなく、涵養プロセスにおいて地下水流動を考慮しなければならないので（通常はモデルを用いて検討します）、多少手間はかかりますが、重要な情報を得ることができます。

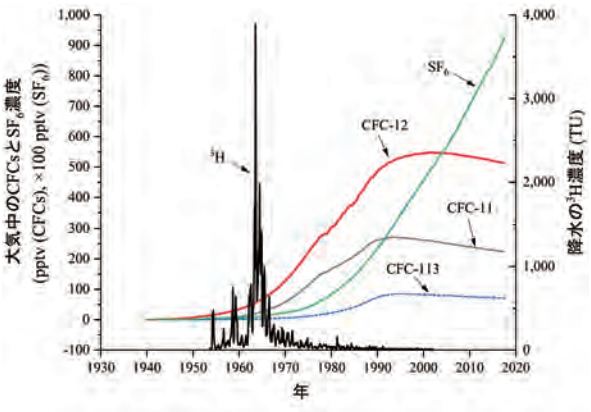


図 4. 降水の ^3H 濃度、大気中の CFCs および SF_6 濃度の経年変化（藪崎, 2021 の図を一部加筆・修正）

7. おわりに―マルチトレーサーとしての有効性―

以上で紹介したように、地下水流動研究では溶存成分や同位体など、多くの項目をトレーサーとして活用することができます。これらのトレーサーは単体で利用することもできますが、複数のトレーサーを併せて利用することで得られる情報は格段に増え、また信頼性も増すため、できるだけ多くのデータを得ることが望ましいと言えます。こうした複数のトレーサーを用いてある事象を解明する方法をマルチトレーサー法と言います。マルチトレーサー法は、広域を対象とした地下水流動研究などで特に効果的であると考えられます。

複数のトレーサーを用いた研究例として、忍野村の河川調査で実施した結果を図 5 に示しました。この図は、村内を流れる新名庄川（しんなしょうがわ）と桂川の pH とシュティフダイアグラムの平面分布を示しています。両河川ともに、pH は上流（東側）で高く、下流（西側）に向かうにつれて低下しており、特にある地点を境に値が大きく変化していることがわかります。この結果より、値が急変している辺りで pH が 7 前後の浅層の地下水や湧水が河川に流入していることが予想されます。また、pH が変化している地点でシュティフダイアグラムの形や大きさもやや変化しており、下流の河川水の水質組成は浅層の地下水や湧水の水質組成に近付いています。このように pH や水質組成図などの複数のトレーサー（マルチトレーサー法）を利用することにより、河川水と地下水の相互関係について明瞭に把握することができました。この研究例では 2 つのトレーサーを用いた単純なものですが、更に複数のトレーサーを併せることで、より複雑な地下水流動の解明にもつなげることができると考えられます。

今回紹介したトレーサーのほかに、地下水流動

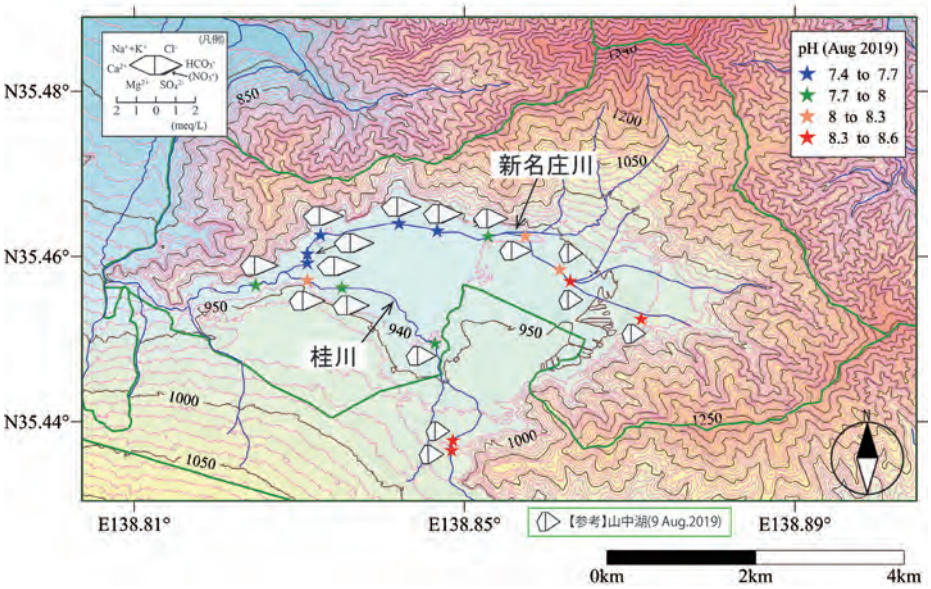


図 5. 河川水の pH と水質変化（山梨県忍野村の調査例）（藪崎，2020）

研究では比較的新しい項目である Sr 同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）や Pb 同位体比（$^{208}Pb/^{206}Pb$，$^{207}Pb/^{206}Pb$）などを利用した研究も増えてきており、今後、マルチトレーサー法を利用したさらなる研究の発展が期待されます。

注釈

1）δ-ダイアグラムとは、横軸（x 軸）に $\delta^{18}O$、縦軸（y 軸）に $\delta^{2}H$ をとり、水試料の同位体比をプロットした図のことを意味します。

2）滞留時間とは降水や河川水等が地下に浸透して帯水層（地下水）に達したときを 0（ゼロ）とし、地下水が地中を流動して、ある場所に到達するまでにかかった時間のことを意味しています。簡単に言えば水の年齢に相当します。

文献

茶谷邦男・加賀美忠明・富田伴一・大沼章子・荘加泰司・浜村憲克（1977）：濃尾平野の超深層地下水の水質とラドン濃度の時期的変動．日本地下水学会誌，19，87–103.

丸井敦尚（2014）：首都圏の深層地下水．地学雑誌，123，172–181.

藪崎志穂（2011）：地下水の水質と安定同位体の特徴およびその活用法．高村弘毅編「地下水と水循環の科学」．古今書院，41–68.

藪崎志穂（2020）：忍野八海と忍野村の地下水．BIOCITY，84，36–43.

藪崎志穂（2021）：「見えない」地下水の流れを「見える」ようにするには？－安定同位体や CFCs，SF_6 を用いた地下水の涵養域および滞留時間の推定法－．地球科学，75，91–96.

著者情報



藪崎志穂　筑波大学大学院 博士課程 生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

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。

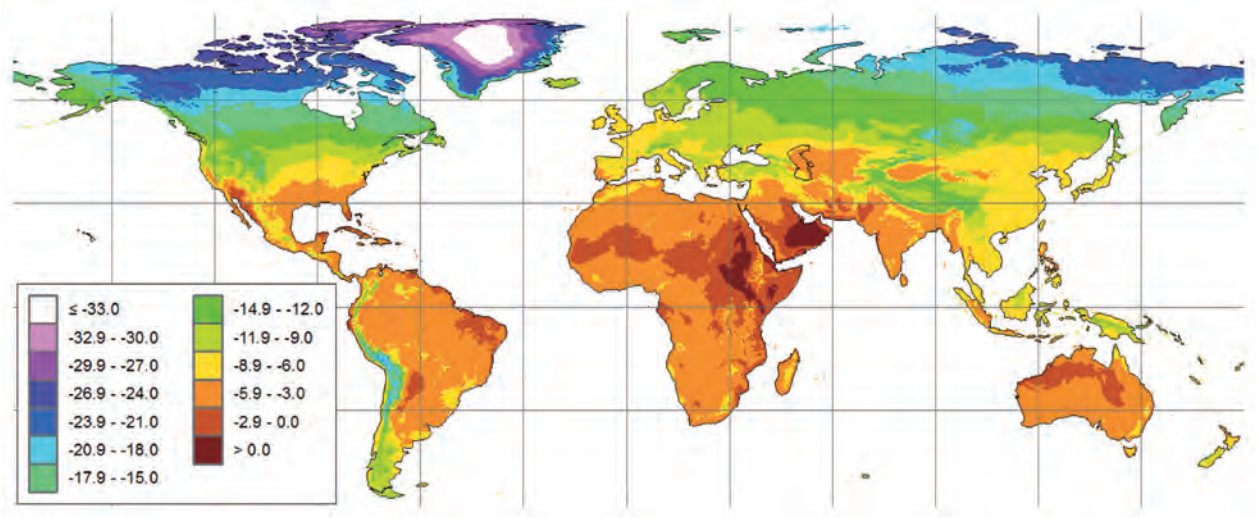


図 1. モデルにより推定された降水量で重み付けされた年間平均降水の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）の例（Terzer et al. 2013）。

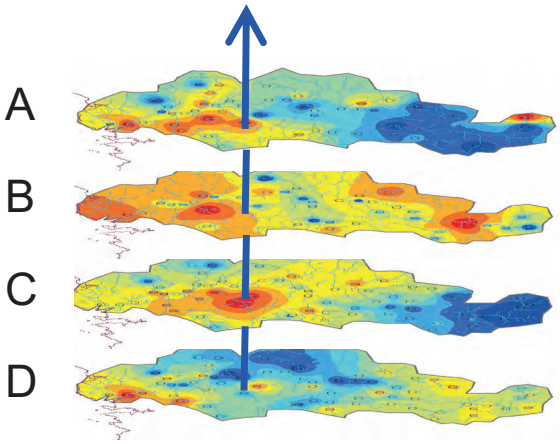


図 2. 多元素同位体地図（Multi-Isoscapes）の概念図 1 つの元素の同位体地図を 1 枚とした場合、この例では A ～ D の 4 枚の図を重ね合わせて矢印の地点の特徴が表現されます。

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。



水循環過程

水は地球上をぐるぐると循環しています。蒸発した水蒸気は雲となり、雨や雪を降らせます。雨は、川となって流れるとともに、地表面から染み込んで地下水としてもゆっくり流れます。蒸発や凝結によって、水がその状態を液体から気体へ、気体から液体へと変化させるときには、水の水素・酸素安定同位体比が変化します。一方、地下水のように、状態変化をせずに流れる場合は、同位体比は変化せず、元の値を保ちます。このような原理をもとに、水の循環についてどのようなことがわかるのか、具体的な研究を見てみましょう。

水の安定同位体を用いた地下水や湧水の涵養域の推定
― 福島県沿岸域の研究例 ―

藪 崎 志 穂
（総合地球環境学研究所）

1. 水循環とは？

地球はよく“水の惑星”と呼ばれていますが、水は人間も含め、動物や植物が生きてゆくには必要不可欠なもので、皆さんもその大切さは重々承知されていることと思います。近年、気候変化に伴う降水量の変化や人口増加に起因する水利用の増加によって水資源が不足している地域があり、また人間活動によって引き起こされた地下水汚染などの問題も生じています。地球上には海や氷河、河川、湖沼、地下水など様々な形態で水が存在しており、これらはそれぞれが独立しているのではなく、相互的に関係を持っています。例えば、太陽エネルギーなどによって海から蒸発した水蒸気は雲となり、雨を降らせます。雨は地表面に到達し、一部は地表を流れて河川や湖沼に流入し、一部は地下に浸透して地中水（土壌水や地下水）となります。河川や地下水は流動して、滞留する時間こそ異なりますが、最終的には海に流出します。こうした一連のサイクルは“水循環”と呼ばれています。水の循環を把握することにより、地下水の汚染や水の枯渇など、様々な環境問題を解決する糸口を見いだせるため、水の研究ではとても重要な概念となっています。

この水循環研究の一つとして、地下水の流動を把握することが挙げられます。地下水流動とは、水がどこで涵養され、どこを流動しているのかを明らかにすることです。ちなみに、涵養とは、降水や河川水、灌漑水などの地表水が地表面から浸透して、地下水面に達することを意味しています。地下水流動を明らかにすることができれば、地下水の汚染対策や水の持続可能な利用についてなどを把握する際の重要な情報となります。

地下水ということばを聞くとあまり身近なものに思えないかもしれませんが、水道水源として利用されていたり、工業や農業用水、雪国では融雪のために利用されていたりと、実は私たちの生活にも密接に関わっています。最近では、ペットボトルの水として、日本の地下水だけでなく、世界の地下水も流通していますので、お店などで目にしたこともあるのではないでしょうか。このような地下水を活用するためにも、水の動きを知ることが重要となっています。

2. とっても役に立つ水の安定同位体比

それでは、目で見ることのできない地下水の流れを把握するにはどうしたら良いでしょうか？河川水や湖沼など、地表面にある水の動きは直接目視できるため、比較的理解しやすく、また調査もしやすいのですが、地下にある地下水は通常は目で追うことができないため、状況を把握するのは非常に困難です。その水の流れを把握するためには幾つかの手法があるのですが、その中でも多く利用されているものとして同位体があります。同位体には時間の経過により放射性壊変して値が変化する放射性同位体と、時間に対して不変な安定同位体があります。ここでは後者の安定同位体について説明します。

安定同位体を持つ元素には、H、C、N、O、S、P など多くの種類がありますが、水は H_2O で構成されていますので、H（水素）と O（酸素）の安定同位体が対象となります。水素の安定同位体は ^{1}H（天然存在比は 99.984％）と ^{2}H（同 0.016％）

があり、酸素の安定同位体は ^{16}O（同 99.762%）、^{17}O（同 0.038%）、^{18}O（同 0.200%）があります（Meija et al., 2016）。このうち、存在比が一番大きいものと 2 番目に大きいものの比を取り、$^{2}H/^{1}H$、および $^{18}O/^{16}O$ として示しますが、これらの比は非常に小さいため、標準平均海水（v-SMOW）からの千分率偏差である δ 値として表示されます。

H と O の安定同位体は一般的な条件下では岩石などと反応せず、他の水塊の混入や蒸発などの影響を受けない限りはほぼ不変であるため、水の流れを追跡するのに適しています。このように水の安定同位体は便利なトレーサー（追跡子）ですが、20 ～ 30 年位前までは分析手法が難しく、分析機器（質量分析計）も限られていたため、同位体の分析値を出すのがなかなか困難でしたが、近年では新たな分析機器の開発なども進み、短時間でかつ簡便に多くの試料を測定できるようになり、様々な研究で活用されるようになりました。水の安定同位体は、水循環研究には欠かせないものになってきています。

3. 水の安定同位体比と標高の関係は？

水の安定同位体を用いて水の流れを把握するためには、水の安定同位体の特徴を理解することが必要です。たとえば、降水の安定同位体比を例に挙げると、以下のような特徴が存在します。

1）標高が高くなると、同位体比は低くなる（高度効果）
2）温度が高くなると、同位体比は高くなる（温度効果）
3）内陸部ほど、同位体比は低くなる（内陸効果）
4）高緯度ほど、同位体比は低くなる（緯度効果）

これらの効果は水蒸気から降水が形成される際の過程（レイリー蒸溜）によってもたらされます。上記の特徴のうち、高度効果と内陸効果の概念図を図 1 に示しました。日本のような地形条件では、沿岸域では標高が低く、内陸部では標高が高くなる場合が多く、また標高の高い地点や高緯度地域の気温は低いため、高度効果と内陸効果、温度効果、緯度効果は関連していると言えます。このような水の安定同位体比の特徴を活用することで、水がどこから来たのかを把握することが可能となります。

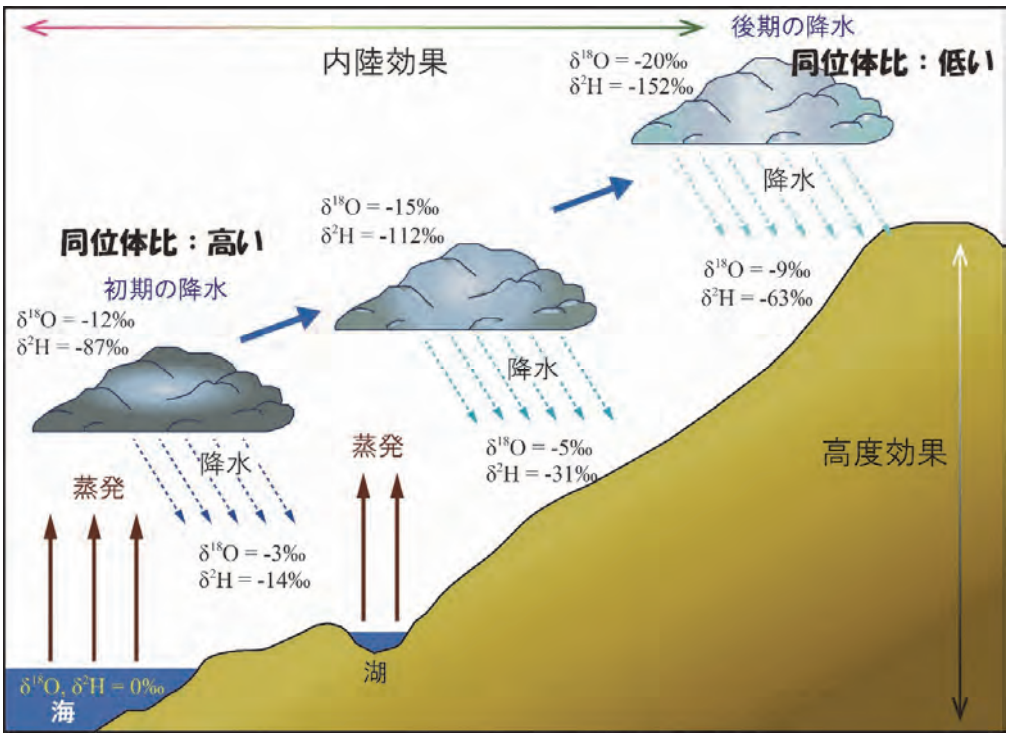


図 1. 内陸効果、高度効果の概念図（藪崎，2021）の図を元に加筆

4. 地下水の涵養域の推定法 ― 福島県南相馬市の研究例 ―

次に、水の安定同位体を用いた研究例について紹介します。この研究では福島県南相馬市の沿岸域を調査対象地域とし、同地域の地下水や湧水等の水質特性や地下水流動、滞留時間を把握することを目的として実施しています（藪崎，2020）。

流域の地下水や湧水の涵養域を把握するためのデータとして、2014 年 4 月から 2015 年 3 月までの 1 年間、南相馬市の沿岸域から内陸部の飯舘村までの間に降水採取地点を 4 個所設置し、2 か月に一度、降水試料を回収しました。降水地点の標高は 10 m、50 m、220 m、515 m で、各地点には蒸発が生じないような仕組みを備えた自製の降水採取装置を設置しました。降水試料回収時には採取量を計測して降水量に換算し、pH と EC（電気伝導率）を測定し、ろ過を行った後に酸素と水素の安定同位体測定を実施しました。同位体分析は、かつては亜鉛還元法や自動平衡装置による前処理を行った後、質量分析計という比較的大がかりな機器で分析していましたが、近年は分析や機器の管理が比較的簡便で、かつ短時間で多くの分析が可能である WS-CRDS（Wavelength scanned-cavity ring down spectroscopy）法が開発され、本研究でもこの CRDS 法の機器（L2130-i, Picarro 社製；図 2）を用いて分析しました。

降水試料の酸素安定同位体比（$\delta^{18}O$）と水素安定同位体比（$\delta^{2}H$）の各地点の 1 年間の平均値を求めるため、それぞれの期間内の降水量を用いて加重平均し、得られた同位体比と各地点の標高の関係を図 3 に示しました。この図では 4 地点の降水データはほぼ直線上に沿うようにプロットされていますので、標高と同位体には相関があることがわかります。また、標高が高い地点ほど同位体比は低い値を示していますので、明瞭な負の相関をもつことになり、この地域には 3 節で説明した高度効果が存在することが明らかとなりました。標高と同位体比の関係は、$\delta^{18}O$ では −0.24‰ /100 m（標高が 100 m 上昇すると $\delta^{18}O$ は 0.24‰低くなることを意味しています）、$\delta^{2}H$ で −2.0‰ /100 m となりました。この結果を用いると、例えば、地下水の $\delta^{18}O$ 値が −8.0‰、$\delta^{2}H$ が −52‰であれば（図 3 の★）、地下水の平均的な涵養標高は 150 m と推定できます（藪崎，2020）。



図 2. Picarro L2130-i（地球研設置）

このように、降水の同位体比から涵養標高を把握することができるのですが、降水量が少ない場合や、気温や湿度などの条件、降水が地表面から地下に浸透する過程で蒸発の影響を大きく受けるような場合には、降水の同位体比が変化する可能性があることが指摘されています。そのため、福島県沿岸域の調査では、集水域を把握できる湧水を数地点選び、それらの酸素・水素安定同位体比と標高のデータを用いて涵養直線を求めました（図 4）。この結果より、標高に伴う湧水の同位体比の減衰率は、$\delta^{18}O$ は −0.26 ‰ /100 m、$\delta^{2}H$ は −1.6 ‰ /100 m となり、仮に地下水の $\delta^{18}O$ が −8.0‰、$\delta^{2}H$ が −52‰であれば（図 4 の★）、涵養標高は 200 m ほどと推定できます（藪崎，2020）。降水のデータを用いた涵養域とは若干差はありますが、オーダーとしては概ね一致していることがわかります。福島県沿岸域の研究では、こうした涵養直線をもとに地下水や湧水の涵養標高を推定し、それぞれの水質や滞留時間に関する検討を進めています。

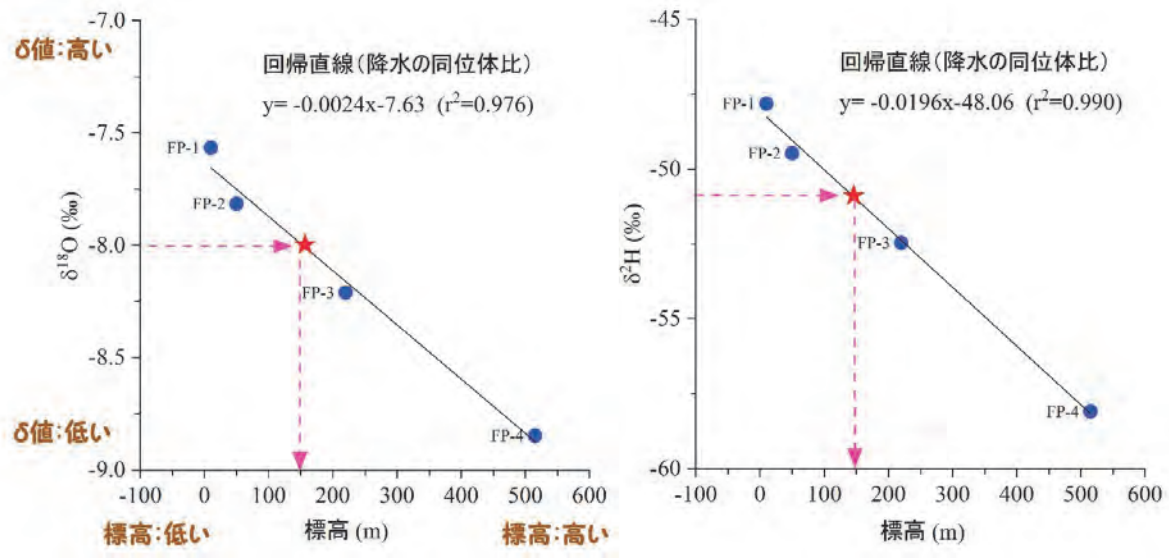


図 3. 降水の同位体比と涵養直線

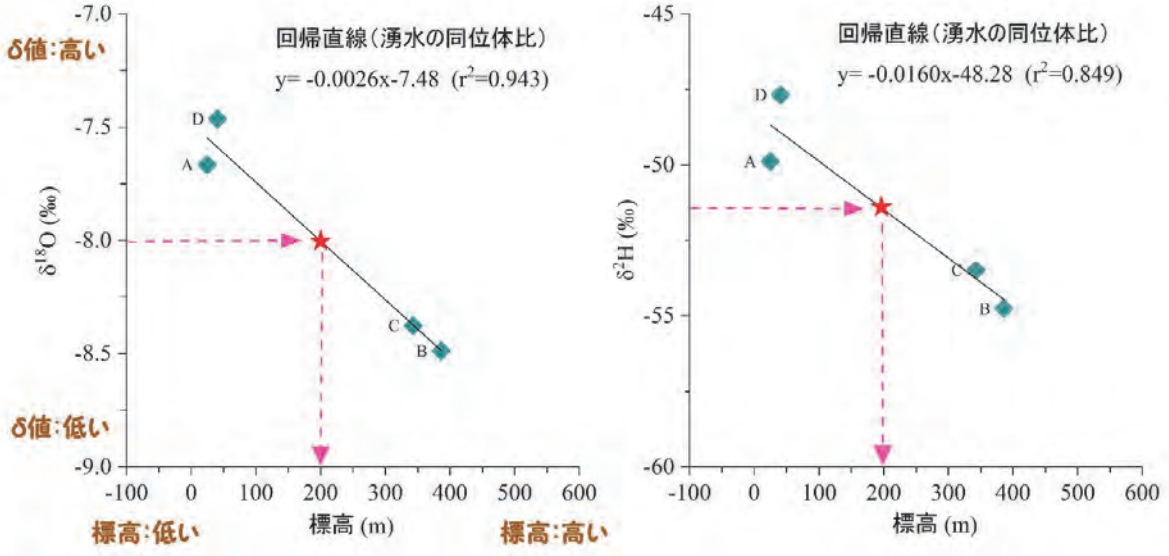


図 4. 湧水の同位体比と涵養直線

5. おわりに

以上で示したように、降水や湧水の安定同位体比と標高との関係を用いることで、地下水や湧水の起源（涵養域）を知ることが可能となります。さらに、水の同位体比のほかに、溶存成分量や水温、pH、他の同位体など、複数の項目を併せて検討することで、涵養標高や水の流れについてより詳細に示すことができるようになるため、水循環研究においても複数のトレーサーを用いる方法（multiple tracer methods）が今後益々重要になってくると言えます。

文献

藪崎志穂（2020）：福島県北部沿岸域の地下水，湧水等の水質特性の把握と安定同位体を用いた涵養域の推定．地下水学会誌，62（3），449–471.

藪崎志穂（2021）：「見えない」地下水の流れを「見える」ようにするには？— 安定同位体や CFCs，SF_6 を用いた地下水の涵養域および滞留時間の推定法 —．地球科学，75，91–96.

Meija J, Coplen TB, Berglund M, Brand WA, Bièvre PD, Gröning M, Holden NE, Irrgeher J, Loss RD, Walczyk T and Prohaska T

(2016): Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 88, 293-306.

著者情報



藪崎志穂　筑波大学大学院博士課程生命環境科学研究科を修了。博士（理学）。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県沿岸域や忍野村の地下水調査などを行なっています。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

地下の水は何歳？
― 福島県沿岸域の調査からわかったこと ―

藪 崎 志 穂
（総合地球環境学研究所）

1. 地下水の滞留時間とは

皆さんが立っている地面の下には沢山の水（地中水）が貯留されています。地中水はその物理的な性質により土壌水と地下水に区分され、簡単に言えば地下水面より下にある水が地下水と呼ばれています。この地下水の源に関して、扇状地のように地表面から水が浸透しやすい地形が広がる地域では河川水が地下に浸透して地下水を涵養[1)]している場合もありますが、多くは空から降ってくる降水が源となり地下水をつくりあげています。地下水が涵養される地域（場所）のことを涵養域といい、日本のような山地が多い地形条件下では、地下水の涵養域の多くは山間部となります。よって、涵養域の近くの比較的浅い地下水は涵養されてからあまり時間が経過していないことが多いですが、涵養域から遠く離れかつ深い地下水ではかなり長い時間をかけて流れてきていることは想像に難くありません。この水の流れてきた時間は人間に例えれば年齢に相当しており、学術的には「滞留時間」と呼ばれています。滞留時間の定義は、降水や地表水が地下に浸透して帯水層（地下水面）に達したときを 0（ゼロ）とし、地下水が地中を流動して、ある場所に到達するまでにかかった時間のこと、とされています。ただし、地表面から地下水面までの不飽和帯の厚さが特に厚い場合には、この分を考慮する必要があります。日本のような島弧では地下水の滞留時間は比較的短い場合が多く、民家の井戸などで利用されている浅井戸（浅層地下水）では数年～数十年オーダーの滞留時間を示す地下水が多いですが、一方で工場用水や水道水源などで利用されている 100 m を超えるような深井戸（深層地下水）では数十年～数百年、場合によっては千年以上の滞留時間を示す場合があります。更に 1,000 m を超える非常に深い井戸では、数万年～数十万年の値を示すこともあります。

2. 滞留時間の推定方法

このように滞留時間はバリエーションに富んでいますが、それではこうした滞留時間はどのようにして求められているのでしょうか？

水の滞留時間の推定には複数の方法がありますが、比較的古くから利用されている手段として放射性同位体を用いる方法が挙げられます。放射性同位体の原子核は一定の時間の経過に伴い放射壊変をして他の元素に変化しますが、この原子数が半分に減るのに要する時間を半減期といいます。例えば ^{3}H（トリチウム）では 12.32 年、^{14}C では 5,730 年、^{36}Cl では 301,000 年となっています。この性質を利用して、試料水の放射性同位体の濃度を測定し、過去の時系列データと比較することにより滞留時間を推定することができます。一般的に半減期の 10 倍程度の時間まで推定することができるとされていますので、^{3}H では数年～100 年程度、^{14}C では数千年～数万年程度、^{36}Cl では数十万年～百万年のオーダーの滞留時間の推定に利用されています。調べたい水を採取してそれぞれの放射性同位体の濃度を把握することにより滞留時間を推定することができるので便利な手法ですが、対象とする放射性同位体が人工的に環境中に排出された場合にはこの方法の適用が困難になることもあります。

その他に、1990 年代頃から CFCs や SF_6 を用いた滞留時間の推定が行われています。CFCs はクロロフルオロカーボン類（chlorofluorocarbons）といい、CFC-11、CFC-12、CFC-113 などがあり、冷却剤や洗浄剤などの工業用として 1930 年代に人工的に生成された有機化合物で、化学的に極めて安定な性質を持っています。SF_6 は六フッ化硫黄（sulfur hexafluoride）のことで、電気や電子機器などの絶縁ガスとして 1960 年代から利用されている気体です。CFCs や SF_6 を用いる方法では現在～100 年ほどの滞留時間を推定することができるため、日本で一般的に利用されている浅井戸や一部の深井戸の滞留時間を推定するのに適した方法といえます（詳細は「同位体環境学がえがく世界、第 3 章　地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法」をご覧ください）。

3. 調査地域の概要

滞留時間は持続可能な地下水利用の検討や地下水流動を把握する際に重要な情報となります。ご存知のように、福島県沿岸域は 2011 年 3 月 11 日に発生した地震の影響により津波が発生し、広域で甚大な被害が生じました。また、地震に伴い福島第一原子力発電所（FDNPP）の事故が生じ、環境中に多量の放射性物質が放出されたため、長期間にわたり立ち入りや居住、農業活動などが制限されました。2023 年 1 月時点において、大部分では規制が解除されましたが、未だ立ち入りが制限されている地域もあります。その一方で、沿岸域では道路の修繕、盛土や堤防の造成、海岸防災林や緑地公園などが整備され、住民が戻り生活を再開する地域も増えてきました。また、稲作などの農業活動も徐々に再開されており、地下水の利用も今後増えてくることが予想されます。こうしたことから、沿岸域の現在の地下水の水質の特徴や、津波被害の影響の有無、地下水流動の把握などが重要であると考えられます。また、内陸部に飛散した放射性物質が浸透水と共に地中を移動して地下水に取り込まれた場合、それらの影響が沿岸域の地下水に現れる可能性があるのか、もしあればいつ頃なのか、などの判断や対策を行う場合にも滞留時間の情報は不可欠です。本研究では地下水流動把握の一環として、地下水や湧水の滞留時間の推定に取り組みました（Yabusaki and Asai, 2023）。

研究対象地域は福島県沿岸域の新地町、相馬市、南相馬市、浪江町、大熊町で、湧水 31 地点、地下水 13 地点、自噴井 13 地点の計 57 地点で調査を行いました。なお、自噴井とは地下水が自然に地表に湧き出す井戸のことで、扇状地の扇端部や火山山麓、盆地などに設置された比較的深い井戸で多くみられます。本研究地の自噴井の深度は 30～100 m です。また、これらの地点において、^3H 測定用（湧水 38 サンプル、地下水 14 サンプル、自噴井 19 サンプル）と、CFCs、SF_6 測定用（湧水 9 サンプル、地下水 1 サンプル、自噴井 11 サンプル）の試料採取を実施しました。なお、調査地点数よりも ^3H 測定用の採取サンプル数が多くなっていますが、これは時期に伴う濃度変化の確認のため、数地点において複数回の試料採取を行ったためです。また、^3H のサンプル数に対して CFCs と SF_6 のサンプル数は少なくなっていますが、CFCs と SF_6 は大気に触れないように試料水を専用の採水容器に採取する必要があるため、一部の調査地点では分析用の試料水を採取することができなかったことに因ります。

4. 滞留時間の分布

採取した水試料について、前処理を行った後、^3H は液体シンチレーションカウンターで、CFCs と SF_6 はガスクロマトグラフで濃度を測定し、それぞれ必要な補正を行い、大気中の濃度曲線と比較検討して滞留時間を推定しました。

^3H 濃度は、湧水や浅層地下水では相対的に高く、特に FDNPP に近い浪江町や大熊町では高い値を示し、原発事故による放射性物質の混入の影響が及んでいることがわかりました（図 1）。一方、自噴井では位置に関わらず ^3H は自然のレベルの

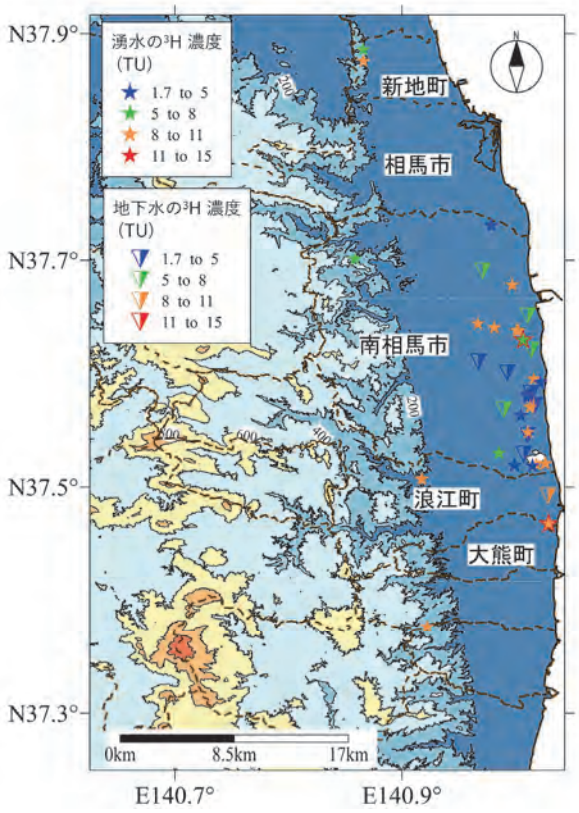


図 1. 湧水、地下水の ^{3}H 濃度分布図

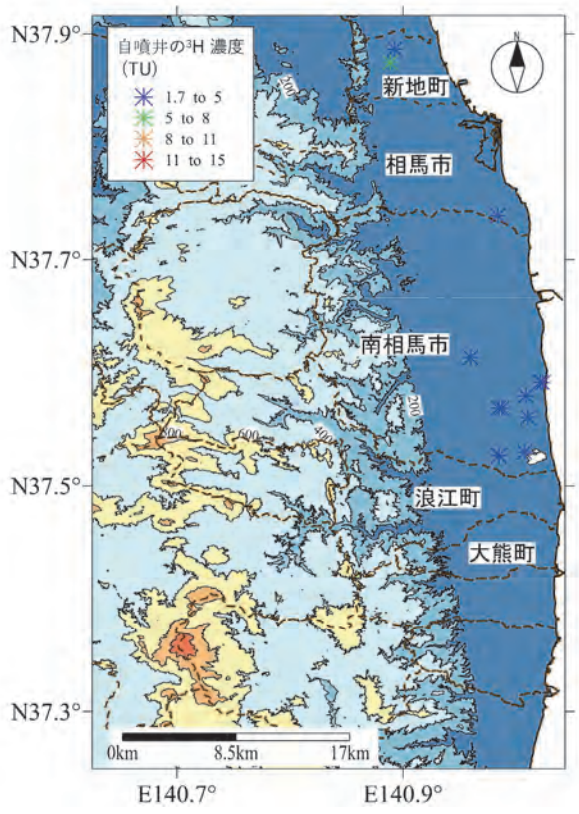


図 2. 自噴井の ^{3}H 濃度分布図

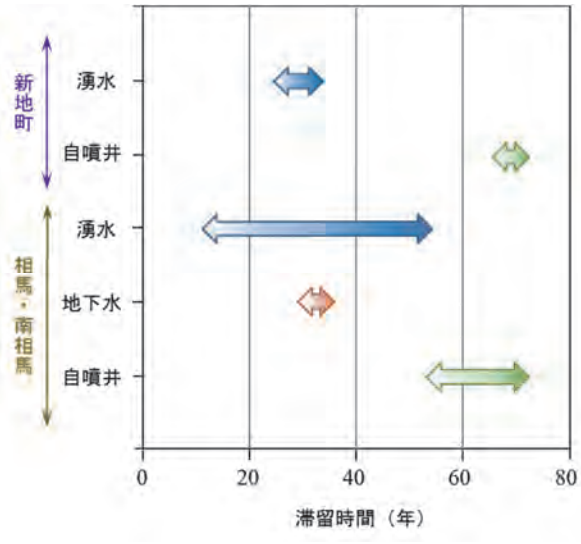


図 3. 滞留時間の推定値
（CFCs、SF_6 を用いた解析結果）

範囲内（概ね 5 TU[2] 以下）を示しており、FDNPP の影響は認められませんでした（図 2）。このことから、湧水や地下水では滞留時間を求めるために ^{3}H を利用することはできませんが、自噴井は ^{3}H の利用が可能であることがわかりました。

CFCs と SF_6 を用いた滞留時間の推定結果から、湧水と地下水の滞留時間は約 15 年～45 年、自噴井の滞留時間は約 50 年～70 年で、相対的に自噴井の滞留時間が長いことが示されました（図 3）。水質調査の結果をみると、自噴井の多くは Na-HCO_3 型の水質組成を示し、また SiO_2 濃度が高いことから相対的に長い滞留時間の水質の特徴を有しており（藪崎, 2020）、本研究で求めた CFCs や SF_6 による滞留時間の推定結果と矛盾がありません。

5. 今後の課題

本調査の結果から、福島県沿岸域の地下水の滞留時間の推定値は、湧水と地下水、および自噴井では明瞭な差があり、地下水流動の違いを反映していることを把握できました。こうした滞留時間の結果を地下水流動の推定に活用して、沿岸域の適正な地下水利用につなげてゆきたいと考えています。また、阿武隈山地や宮城県沿岸域など他の

地域にも同様の手法を用いて、滞留時間の推定や地下水流動把握に努めてゆく予定です。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤（C），課題番号：16K01212，および 20K01150，研究代表者：藪崎 志穂）の助成を受けて実施しています。

注釈

1） 降水や河川・湖沼などの地表水が地表面から浸透して地下水に吸収・付加されることを意味します。また、地下水の涵養が行われる地域（場所）を涵養域といいます。

2） TU とはトリチウムユニット（Tritium Unit）の略で、1 TU とは水素原子（H）10^{18} 個中に ^{3}H が 1 個含まれていることを意味しています。従って、TU が大きければより多くの ^{3}H が含まれている（^{3}H 濃度が高い）ことになります。なお、1 TU は 0.118 Bq/L です。

文献

Yabusaki, S. and Asai, K. (2023): Estimation of groundwater and spring water residence times near the coast of Fukushima, Japan. Groundwater, (in press, Accepted on December 31st, 2022). https://doi.org/10.1111/gwat.13288

藪崎志穂（2020）：福島県北部沿岸域の地下水，湧水等の水質特性の把握と安定同位体を用いた涵養域の推定．地下水学会誌，62（3），449–471. https://doi.org/10.5917/jagh.62.449

著者情報



藪崎志穂　筑波大学大学院 博士課程 生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学、地下水学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

（2023 年 3 月 31 日掲載）

地下水の安定同位体比から日本の気候変動を考えてみよう

勝　山　正　則
（京都府立大学大学院生命環境科学研究科）

1. 水の循環と安定同位体比

地球上に存在している水は水（液体）、水蒸気（気体）、氷（固体）と形を変えながら、回り続けています。この動きを水循環と言います。循環なのでどこからスタートしてもいいのですが、例えば海をスタートとすると、海水が蒸発して雲になり、雲は降水（雨や雪）をもたらします。極地域や高山では雪は氷として貯留されることになります。雨は地表面に到達すると、一部はそこから蒸発します。森林など植生がある場所では葉にトラップされ、そこから直接蒸発する遮断蒸発や、根から吸収され葉の気孔から放出される蒸散などに配分されます。これらを総称して蒸発散と言い、水蒸気が大気中に戻る現象で再び雲の材料となります。一方で、蒸発散の影響を受けずに深部に浸透した水は地下水となり、湧き出して川となって、池や湖に注ぎ込み、やがては海に戻ります。

水循環には固体・液体・気体間の変化、つまり相変化を伴います。では、氷を水に、水を水蒸気に変えるにはどうすれば良いでしょうか。温めれば良いですね。温めると言うことは別の言い方をすると熱エネルギーを与えることです。水蒸気を水に、水を氷に替えるときはその逆で、熱エネルギーを奪います。つまり、地球上の水循環は熱エネルギーの輸送を伴い、これによって地球上の気候が作られていると言えます。

ところで、水が相変化するときには、水分子の酸素・水素安定同位体比の値が変化します。従って、水循環を研究するときには水の安定同位体比が有効なツールとして利用できます。現在、地球では気候変動による気温の上昇が確認されていますが、これは水循環にどのように影響するでしょうか？　ここでは、特に日本の地下水に着目した研究例を紹介します。

2. 使用するデータと研究のきっかけ

ここでは、日本各地の地下水を収集し、その安定同位体比を測定して、空間分布や時間変動を見ます。日本全国の地下水を収集する必要がありますが、実際に全国を巡って採水するのは容易ではありません。そこで、ここでは一つのアイデアとして、比較的入手が容易な市販のミネラルウォーターをサンプルとして用いることとします。

水の安定同位体比の測定原理や表現方法などについては本書の他のページをご参照いただくとして、ここでは、ミネラルウォーターに着目したきっかけ、つまり研究のタネについて話をします。

水の安定同位体比に限らず、化学分析をする場合は値（同位体比、濃度など）が既知のスタンダード（標準物質）が必要です。このスタンダードに対して自分のサンプルがどれだけ離れているかで値を決めます。このスタンダードには市販のものを使うことも多いですが、水の安定同位体比の場合は非常に高額で、日常的には使えません。そのため、自分で同位体比が既知の水を大量に用意しておき、普段はこれを使います。これをワーキングスタンダードと呼びます。ワーキングスタンダードは広い値の範囲をカバーしていることが望ましいです。この研究を始めた当時、分析は京都大学生態学研究センターで行っていたのですが、ある時ここで準備されている同位体比の小さいワーキングスタンダードの残量がなくなってきました。もともとはロシアのヤクーツクに調査に行かれた先生が持ち帰られた水で、高緯度地域のため、緯度効果（後述）で同位体比が小さいと考えられます。代わりとなる水をそう簡単に現地に調達に行

けるわけもなく、さて、新しいのをどうやって調達しようということになりました。そこで思いついたのがペットボトルのミネラルウォーターです。ヤクーツクの水は市販品を見たことがありませんが、同じく高緯度地域のカナダの水は使えるのでは、高度効果（後述）を狙って富士山の水ならどうだろう、そもそも世界各地の水の同位体比に分布はあるのだろうか、など、興味が広がっていきました。そこからは、なるべく多くのサンプルを収集する作業です。近所のスーパー等で購入、出張先・旅行先で購入、インターネットで購入したものに加え、友人・知人・研究者仲間が買ってきてくれるものもありました。海外の製品も数多く、特に海外出張や旅行に出かける際には、現地のスーパーを巡って調達します。ラベルに書かれた言語が読めなくても、今はオンライン辞書で簡単に翻訳できます。ここでご紹介するデータは、このようにして収集した、日本国内の地下水の同位体比の空間・時間分布です。ほとんどの製品で、ラベルには採水された市町村が書かれています。また、ウェブサイトを調べれば情報が得られることもあります。別製品でも採水地が同じものについては除外します。これをもとに採水地の緯度、経度、標高を判別し、さらにその地点の気象データを収集しました。これにより、現時点で 47 都道府県から 460 のデータを収集しています。そんなに種類があるの？と思われるかもしれませんが、意外とあるものです。

さらに、研究の広がりとして、日本コカ・コーラ社の協力を得て、同社が各地で販売している水源地の異なる製品「いろはす」を毎月提供していただきました。近所のスーパーやコンビニで簡単に購入可能な製品ですが、実は水源地は日本に 6 箇所（2023 年 1 月現在）あり、地域によって販売されている製品が異なります。例えば京都市内では 500 ml サイズの製品は鳥取県の水、350 ml サイズの製品は山梨県の水が販売されています。各製品には賞味期限がありますから、逆算すればいつ頃採取された水かが判断可能です（実は、いろはすは刻印を読み解くと採水日までわかります）。これにより、時系列変化も把握できました。このように、1 つのきっかけ、アイデアから次々と展開できるのは研究の醍醐味です。

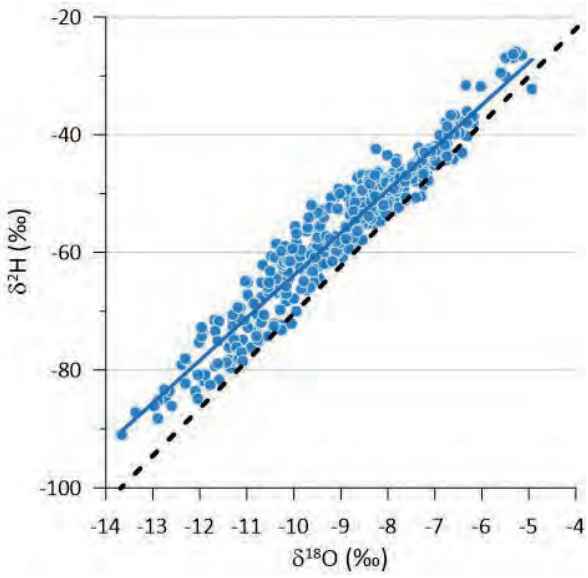


図 1. 地下水の酸素と水素の安定同位体比の関係性
図中の青い実線は近似直線を、黒い破線は天水線を示す

3. 地下水の酸素と水素の安定同位体比の関係

図 1 に酸素と水素の安定同位体比の関係を示しました。酸素と水素には明確な関係性が見られ、近似直線は

$$\delta^2\mathrm{H} = 7.23\delta^{18}\mathrm{O} + 8.42 \quad (r^2 = 0.93)$$

となりました。このように明確な直線関係があるということは、どちらか一方の値が決まれば他方も決まることを意味しています。よって、これ以降の議論では主に酸素安定同位体比を使って進めますが、水素でも同様と考えて構いません。

4. 地下水の酸素安定同位体比の空間分布

図 2 に（a）緯度、（b）標高、（c）平均気温のそれぞれと δ^{18}O との関係を示しました。緯度との関係を見ると、高緯度、つまり北の方のサンプルほど δ^{18}O が小さい傾向が見られます。緯度が 1° 大きくなると δ^{18}O は 0.365‰小さくなる関係です。この関係性は緯度効果[1)] と呼ばれます。ただし、北緯 36 度付近には特に同位体比が小さいデー

タが見られます。標高との関係を見ると、標高が高いほど同位体比が小さい傾向（高度効果[2]）があります。標高が 100 m 上昇すると 0.29‰小さくなる関係でした。ただし、標高が低い地点ではばらつきが大きいために、関係は明瞭ではありません。北緯 36 度付近で同位体比が小さいデータは、この付近に存在する日本アルプス一帯で採取されたサンプルです。つまり、緯度効果の図には、高度効果が重なっていることになります。平均気温との関係では、気温が高いほど同位体比が大きい関係が明瞭に現れます。気温が 1℃ 上昇すると $\delta^{18}O$ は 0.4‰大きくなる関係でした。この関係は温度効果[3] と呼ばれます。ただし、データ数が多い 10℃ から 17℃ 程度の範囲では、ばらつきも大きくなっています。つまり同じ平均気温でも同位体比が異なる地点があります。これは、日本列島スケールで考えるときには気温が重要な要素であるが、より小さなスケールで考える場合は別の要素も考える必要があることを意味しています。

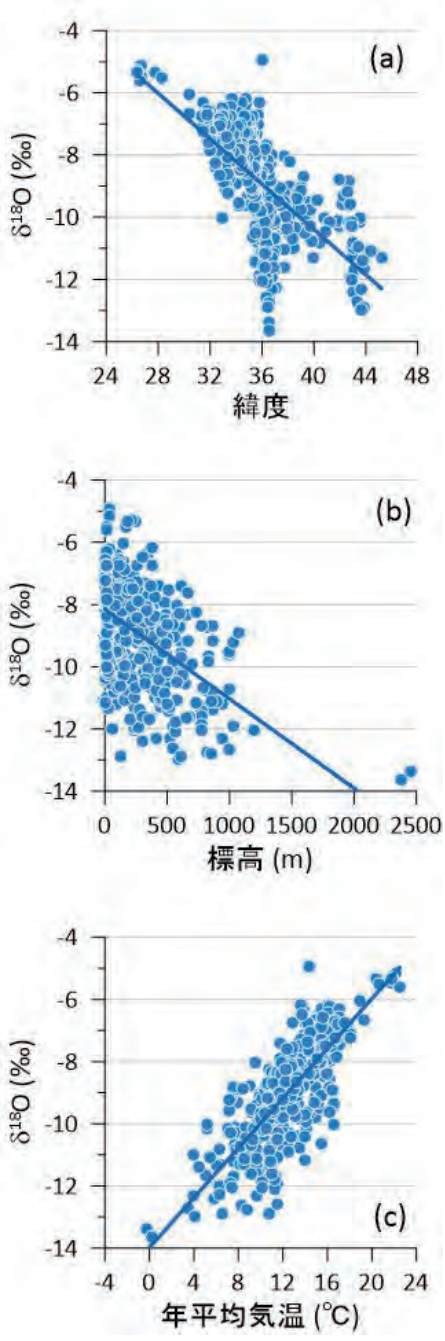


図 2. (a) 緯度、(b) 標高、(c) 平均気温と地下水 $\delta^{18}O$ との関係

これら 3 つの「〇〇効果」は、実際にはそう簡単に切り分けることができません。高緯度地域では気温も低くなりますし、標高の高い地域でも同様です。言い換えると、水の同位体比には水循環が発生する場所の温度条件を強く反映しているということができます。

5. 地下水と降水の関係性

3. で酸素と水素の同位体比の関係を式で示しました。この式では傾きが 7.23、切片が 8.42 となっています。世界中の降水を測定し、同じようにグラフに載せると、傾き 8、切片 10 の直線付近にプロットされることが知られており、この直線は天水線と呼ばれます。この天水線と、ここで示した地下水の近似線とは傾きと切片が比較的よく似ています。また、地下水の酸素安定同位体比の空間分布として「緯度効果」「高度効果」「温度効果」という用語を使いましたが、これらはもともと降水の安定同位体比分布に使用される用語です。ここで示した図はすべて地下水の結果です。つまり降水で見られた情報が、地中に浸透して地下水となっても保存されていることを意味しています。また、これまでの研究により、渓流水・河川水でも同様の関係が見られることが示されています（Katsuyama et al., 2015）。

降水と地下水、渓流水とに明確な繋がりがあることがわかりました。水の安定同位体比は、サンプルさえあれば比較的容易に分析ができます。で

は、水の入手しやすさを考えるとどうでしょうか？降水は漏斗をつけたボトルで集めます。ここでは詳細を示しませんが、毎回の降水ごとに同位体比の変動が大きく、平均的な値を知るには年間を通じて観測する必要があります。これは、特に雪の多い地域では容易ではありません。一方で、地下水や渓流水は過去の様々な時点の降水が混合したものであることから、多少の季節変動はあるものの、その地域の平均的な値になっていると考えられます。したがって、年間を通じた観測は必要ありません。また、降水にしても地下水・渓流水にしても、その場所に行って採取するのは難しい場合もありますが、ここで示したように市販のペットボトルのミネラルウォーターが使えるのであれば、サンプル採取は容易になります。これは、データを広く集める上で大きな利点となります。

6. 気候変動と地下水

図 2（c）で示した平均気温と酸素安定同位体比の関係をもう一度見てみましょう。日本の地下水の同位体比には、その地点の平均気温と明確な関係があることがわかります。ご承知のとおり、現在、地球上では気候変動が進行中です。気候変動は地球温暖化とも言われますが、地球上の平均気温が将来にわたって上昇することが指摘されています。仮にある地点で平均気温が上昇した場合、その地点の地下水同位体比は図 2（c）上で右上の方向に移動するのではないか、と想像されます。これは、気温が上昇すると、海からの蒸発を促すエネルギーが増え、質量の大きい ^{18}O がそれまでより容易に蒸発できるようになり、水蒸気中の ^{16}O を持つ水分子の数に対する ^{18}O を持つ水分子の数の割合、すなわち同位体比が大きくなるためです。同位体比の大きい降水が増えて、その水が地下水になるなら、地下水の同位体比も大きくなっていくのではないかと思われます。

果たして、そんなに単純でしょうか。長期間の観測結果から検証してみましょう。図 3 には北海道札幌市、山梨県北杜市、鳥取県西伯郡で採取された地下水の同位体比の約 10 年間の時系列変化を示しました。この 3 地点では、前述のストーリーのとおりに同位体比が上昇しているのは山梨だけ（1 年あたり 0.05‰の上昇傾向）で、札幌はほぼ変化がありません（1 年あたり 0.006‰の上昇傾向）。さらに、鳥取では同位体比が低下傾向です（1 年あたり 0.02‰の低下傾向）。これは何を意味しているのでしょうか？

それぞれの地点の気温の変動を調べるとたしかに上昇傾向にありました。したがって、降水の同位体比も上昇していると考えられます。では、なぜそれが地下水に反映されないのか。ここには、最初に述べた水循環の仕組みが関係していると考えています。気温の上昇は降水の同位体比だけでなく、降水量や、短時間に強い雨が降る回数の変化など雨の降り方のパターンにも影響します。これはその後の循環にも影響を与えます。蒸発散によって大気に水蒸気として戻る水と、浸透して地下水になる水の量の比率も変わるかもしれません。結果として、循環の速度も変わるでしょう。さらに、これらの変化の現れ方は、地域によって異なります。現在までの解析で、同位体比に変化がほとんど見られない札幌では、降水量が増加した分が浸透して地下水になる水に多く配分されていることが影響しているのではないかと考えています。また、山梨と鳥取の違いは、太平洋側と日本海側の気候・気象の違いが影響していると思われます。日本では豪雪地域を除くと夏季に降水量が多いので、地下水も夏季の影響をより大きく受けます。日本列島では夏季は太平洋高気圧を中心とした南東方向からの大気・水蒸気の流れに強く影響されますが、太平洋側でその影響を直接受けやすい山梨と、四国山地や中国山地を越えて乾燥した大気の影響を受けやすい鳥取とでは条件が異なります。この違いが同位体比の変動パターンに現れているのではないかと考えているところです。このパターンの違いは、気候変動に対して、その地域ごとの影響の受けやすさの違いを反映しているとも考えられるでしょう。

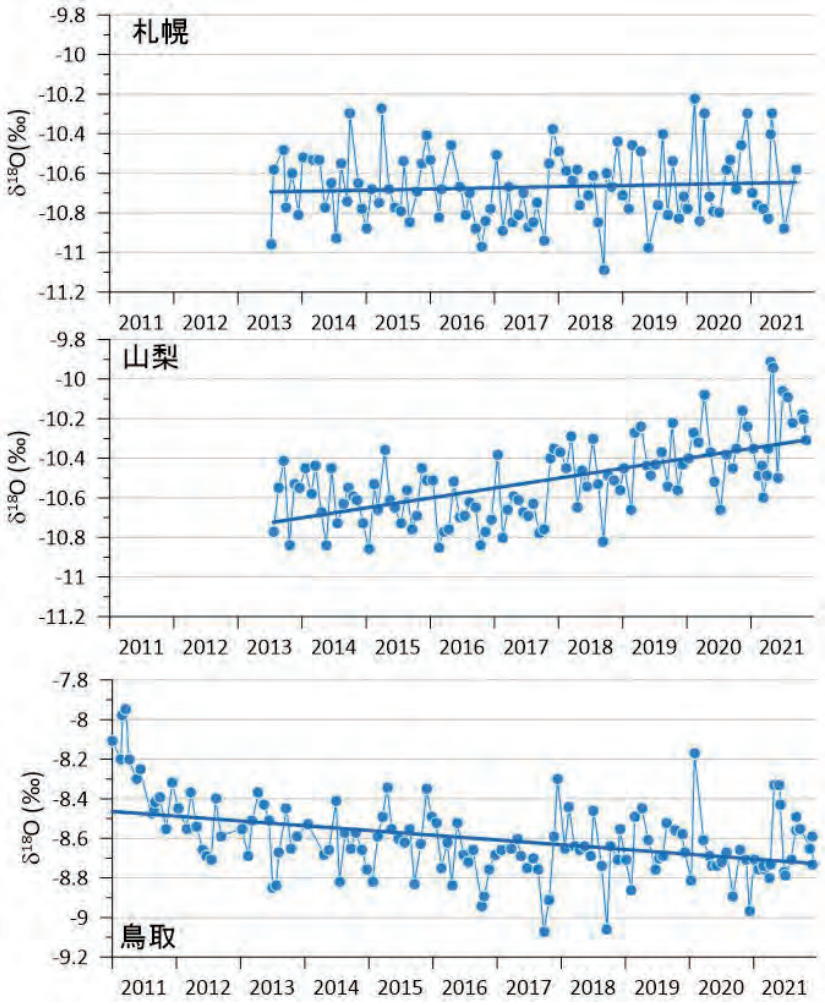


図 3. 札幌、山梨、鳥取の地下水の地下水 $\delta^{18}O$ の時系列変化

ただし、ここまで書いてきたことには想像も多く含まれます。例えば、本当に降水の同位体比は気温の上昇に伴って上昇傾向なのか。これは実際に降水を定期的に採取して調べないと証明できません。一方で、地下水は我々人類にとっても重要な水資源です。将来、この水資源はどうなるのでしょうか。同位体比に見られる変動は、この水資源の危機を反映しているのでしょうか？これを考えるためにも、データを今のうちからしっかりとっておくこと、それを継続していくことは大変重要なのです。今回用いた、ペットボトルのミネラルウォーターをサンプルとする方法は、誰にでも真似のできる方法です。科学の世界の用語でいうと、これは再現性の検証できる可能性が高いということになります。

もともとはなくなりそうなワーキングスタンダードの代わりを探すことから始まった研究ですが、色々集めて色々調べると、面白さが増すと同時にわからないことも増えていきます。ここではお示ししませんでしたが、世界の地下水を見ても、面白そうなことが見えてきています。小さな研究のタネが、どんな芽を出し、どんなふうに育つか、それを追いかけることこそが科学の醍醐味です。

注釈

1） 高緯度ほど、同位体比が小さくなる現象
2） 標高が高くなると、同位体比が小さくなる現象
3） 温度が高くなると、同位体比が大きくなる現象

文献

Katsuyama, M., Yoshioka, T., Konohira, E. (2015) Spatial distribution of oxygen-18 and

deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, Hydrology and Earth System Sciences, 19, 1577–1588. DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.

著者情報



勝山正則　京都府立大学大学院生命環境科学研究科 教授。海外出張は現地のスーパーめぐりとセットで、水採取用のボトルを持っていく。専門は森林水文学。

（2023 年 3 月 31 日掲載）

弘前の降雪の同位体比変動

谷田貝亜紀代
（弘前大学大学院理工学研究科）

1. 弘前

青森県弘前市は、日本海側の豪雪地帯に位置する、落ち着いた城下町です。アメダス最大積雪深記録のある酸ヶ湯は、八甲田山系に位置し、弘前の東北東 30 km ほどの距離のところにあります（図 1）。日本海側の豪雪は、西高東低の冬型の気圧配置のときに冬季の季節風（シベリアからの冷たく乾いた風）が日本海からの蒸発した水を含み、それが脊梁山脈により強制上昇してもたらされると誰もが聞いています。しかし、実際の気圧配置は日々かわります。たとえば新潟では、北西季節風が強い時の山雪と、日本海上空に寒気があるときに平地で雪の多くなる里雪があることは知られています（図 2）。弘前は、3 方を山に囲まれていますので、酸ヶ湯ほどの豪雪にはならないのですが、どういう気象条件の時にどこから来た水蒸気で降雪がもたらされるかを調べておくと、これから温暖化時の降水がどのように変化するのかを予測したり、古文書や古気候の復元に用いる環境資料を解釈したりに役立つと思います。もちろん、土や水の溶存物質や年輪などの分析結果を解釈するときにも、降雪の同位体比の結果は、参考になると思います。

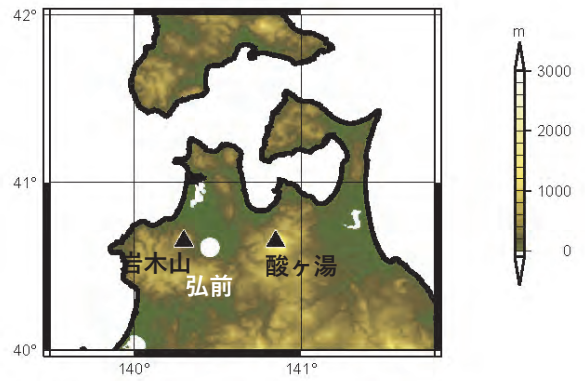


図 1. 青森県周辺の地形。カラーは標高（スケール参照）。○：弘前、▲：岩木山（西側）と、八甲田山系の酸ヶ湯（東側）

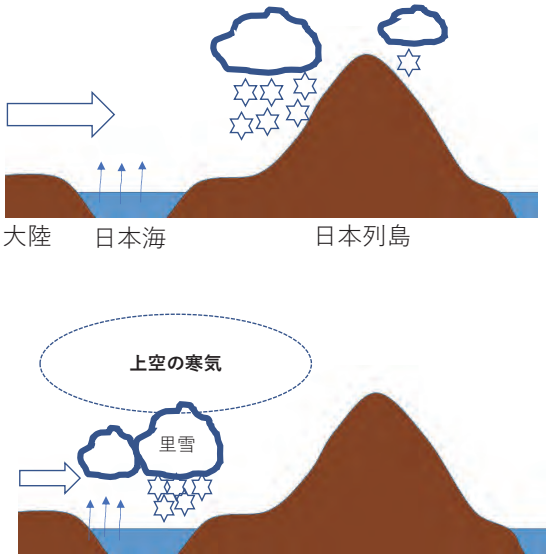


図 2. 山雪と里雪の模式図。（上）強い北西季節風により山地で降雪が多くみられる。（下）日本海上空の寒気により、平地で降雪が多くみられる。

2. 降水の同位体比

水や酸素の安定同位体比は古環境の復元に古くから用いられてきました。南極やグリーンランドの氷河や、海洋底に沈む生物化石に含まれる酸素の同位体比は気候復元の重要な指標になっています。これらは地球全体の気候が温暖であったか寒冷であったかという指標となっています。

一方で、1960 年代から地球上の様々な場所で降水の同位体比が観測され、地理的な分布も国際的なネットワーク等で明らかになりデータの共有もすすんでいます。これら水（酸素・水素）の同位体比と平均的な気象要素や空間的特徴との相関が発見・整理されて、それらは、温度効果、緯度効果、高度効果、内陸効果、降水量効果と呼ばれ

てきました。これらは、重い水、すなわち高い同位体比の水（^{18}O の ^{16}O に対する比が大きい、^{2}H の ^{1}H に対する比が大きい）ほど先に凝結して降り、一方水面から蒸発するときには軽い水分子から蒸発するという原理から説明されています。例えば青森県の複数個所で2週間ごとの降水の同位体比変動を計測した研究（Hasegawa et al.(2014)）では、八平地と八甲田山の同位体比は、高度効果で説明できる（平地が重く、山地である八甲田は軽い）としています。

このような分別には、温度の関数である平衡の同位体分別のほかに、動的同位体分別があります。この動的同位体分別は例えば激しい蒸発時に水面からの分子拡散速度の差により生じるもので、$\delta^{18}O$ と $\delta^{2}H$ の相対的な変動の差となって現れます。この指標として、天水線（$\delta^{2}H = 8 \times \delta^{18}O+10$）からのずれを表す d-excess（$\delta^{2}H-8 \times \delta^{18}O$）という値が用いられます。気象分野でも水安定同位体比が用いられるようになり、解説もされているので（芳村ほか 2009）、詳しく知りたい場合は読まれると良いと思います。

興味深いのは、冬季日本海の激しい蒸発をうけた水、すなわち日本海側の降雪は、d-excess が高いことが知られており（例えば芳村・一柳、2009）、弘前の降雪には、非常に特徴的な d-excess を持つものと、気流系によってはそうでないものが混ざっていると考えられることです。そこで水蒸気輸送経路の違い、つまり水分子の通った履歴や混合過程の結果である日々の降雪水の同位体比変動や、年々の違いをみることは面白いし、前述のように、他の資料と比較することや、過去や将来を知るにも役立つと思って、この研究を行いました。

3. 大気循環と水循環の結果としての弘前の降水 ～2冬季の結果から～

弘前での降雪のサンプリングは、大学の屋上にポリバケツを設置して、日本時間の12時にバケツを交換することで行いました。週末は計測せず金曜日から月曜日の降水をまとめて計測した時もありますが、3年間の冬季に計測をしています。

・第1冬季　2019年12月～2020年3月初め
・第2冬季　2020年12月～2021年2月終わり
・第3冬季　2021年12月～（現在）

第2冬季の途中からは、水蒸気の同位体比の計測も行ったのですが、ここでは説明を省略します。

第1冬季は、暖冬小雪でした。これに対し、第2冬季は、弘前の降水量は平年並みでしたが、日本各地で豪雪被害がありました。第3冬季の現在と第2冬季は、ラニーニャの状態にあります。また、上記の観測期間には、雨として降った日もあります。溶ける時には同位体比は変わらないので、ここでは同様に降水として扱って示します。

図3は、第1冬季の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）、水素同位体比（$\delta^{2}H$）、d-excess を、図4は、第2冬季の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess を表しています。

まず、全体的な特徴として、$\delta^{18}O$ と $\delta^{2}H$ は似たような変動傾向をしていると言えます。また、それぞれの値の中でも同位体比が高い（水が重い）時と低い（水が軽い）時があり、1週間から10日の間に次第に重くなるように見える時期があることです。

この両者の関係（動的同位体分別の指標）である d-excess は、従来から言われているように、日本海からの激しい蒸発を受けたと考えられる高い値を示しています。また、芳村･一柳（2009）は、中部地方・東北地方における降水・地表水の同位体比季節変化の報告（早稲田・中井、1983）を再考察し、北西季節風時に d-excess ＞ 20、南岸低気圧通過時は d-excess = 20 との概念モデルを表していますが、ここでの d-excess の幅は 5 ～ 40 と大変大きく、北西風の強い時の多かった第2冬季では、d-excess が 40 を超えるときもありました。

それぞれの日の大気循環や水蒸気輸送過程との関係をすべて示すことは紙面の都合上難しいので、第2冬季の豪雪災害のあった日との対応と、第1冬季のだんだん重くなる時の例と、第2冬季の極端に軽い降水の日について簡単に紹介します。

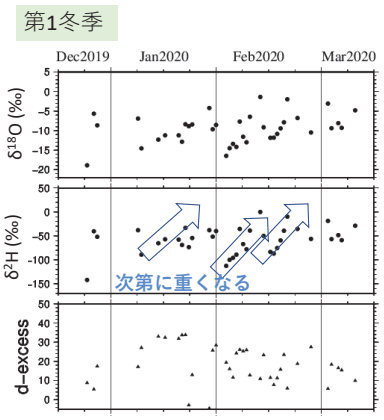


図 3. 弘前における第 1 冬季（2019 年 12 月～ 2020 年 3 月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess。

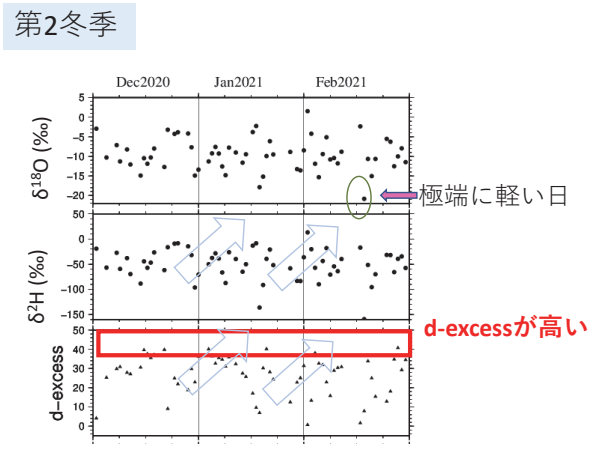


図 4. 弘前における第 2 冬季（2020 年 12 月～ 2021 年 2 月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess

4. 豪雪災害のあった日

第 2 冬季に日本で豪雪災害が発生した主な期間と弘前の降雪同位体比の特徴を記します。

・2020/12/14–12/21

日本海側断続的豪雪。d-excess は高く、同位体比も高い。

・2021/1/7–1/11

秋田で強風、広範囲で大荒れ。d-excess 高く、同位体比も高い

・2021/2/17

上越市高田で豪雪。d-excess 高い。

2/15–16 は同位体比が低かったが 2/17 は高くなった。

・2021/2/23–25

北海道岩見沢で豪雪。d-excess、同位体比とも次第に高くなる。

以上から、いずれも d-excess が高く、強い北西季節風で日本海から激しい蒸発による降雪が弘前でももたらされたことが推察されます。同位体比が高い原因、高くなる原因については今後の詳細な解析が期待されます。

5. 重い日とだんだん重くなる時

第 1 冬季には、3 回、だんだん同位体比が高くなる現象がありました。このうち 2020 年 2/9 から 2/13 への循環場の変化を図 5 に示します。

2/9 は大陸から低温・乾燥した空気が弘前に流入していました。これは西高東低の冬型の時です。

一方、2/13 には、南西からの湿った空気が弘前上空に来ています。この変化があった時、水が重くなっていく（$\delta^{18}O$ 上昇）と共に、d-excess は減少しました。これは、冬型（同位体比低く、

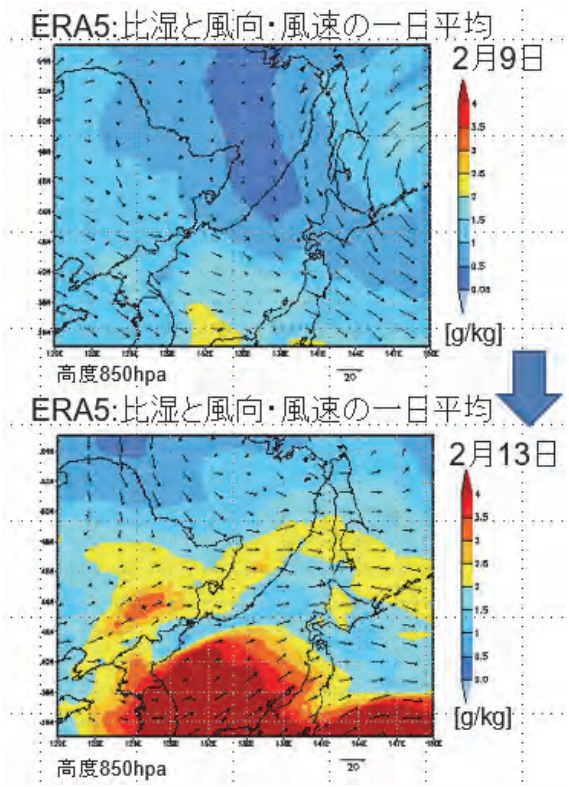


図 5. ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）作成の大気再解析データによる 850hPa 高度面の比湿、風向・風速

d-excess 高い）がゆるみ移動性の低気圧による降水（同位体比高く、d-excess 低い）に変わっていく際の、南西からの水蒸気の混合の結果と推察されます。このときの模式図を図 6 に示します。

1/10–1/14 の変化でも、次第に西から湿った空気が流入したのですが、この事例では、同位体比は高くなっていくものの、d-excess の変動は小さいものでした。

第 2 冬季の同位体比の変化（図 4）では、重くなっていく時に d-excess が高くなっていくようにも見えます。この解釈は別の機会に報告をしたいと考えています。

6. 特に軽い日

第 2 冬季の 2/16、すなわち 2/15 の日本時間正午から 2/16 の日本時間正午に降った雪は、最も低い同位体比（軽い水）でした。この事例で 2/16 正午に弘前上空 850hPa にあった空気塊は、一日前（降雪サンプリング開始時刻）2/15 12JST には朝鮮半島の付け根付近～中国東北にあり、非常に乾燥し、同位体比の低いものでした（詳しくは上野ほか（2021））。この空気塊は、2/15–16 に急発達した爆弾低気圧の西側で、圏界面が折れ曲がったもの（tropopause folding）でした。成層圏由来の乾燥した空気が 700hPa 付近まで下りてきており、これが弘前上空に移動したのです。

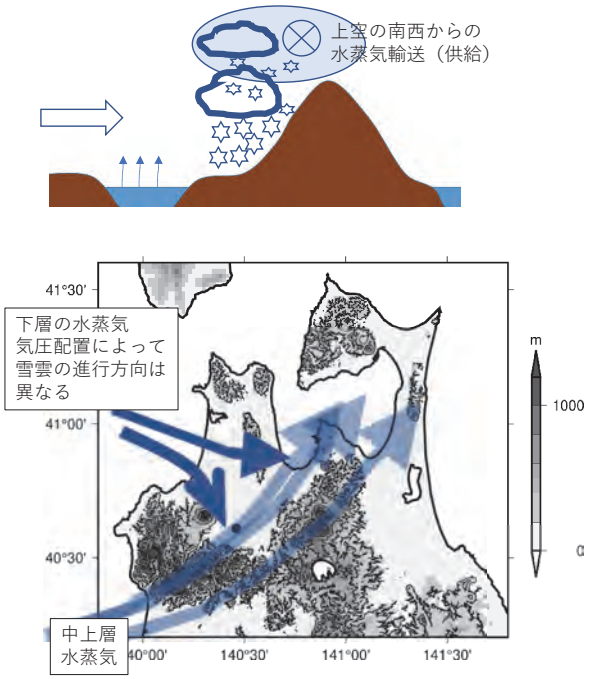


図 6. 北西季節風に南西からの水蒸気輸送が混合する模式図

ただし成層圏の空気は乾燥していますので、それが豪雨豪雪の源とは考えにくいです。図 4 をよく見るとこの降水事例（2/16）の前日と翌日の d-excess は高いのですが、このイベント（2/16 正午に回収した雪）の d-excess は前後に比べて少し低くなっていて、日本海の激しい蒸発による水蒸気とは異なる起源でありそうです。低気圧が進行するときに日本の東側の太平洋からの蒸発とその凝結熱により、低気圧が急発達することがあります。その水蒸気による降水が軽い水の起源ではないかと考えています。

7. 今後の展開

降雪をもたらす水蒸気輸送源について示唆を与える水の同位体分析が出来ましたが、降雪はあくまで蒸発や混合、そして凝結過程を経た履歴が重なっています。そのため、水蒸気の同位体比の計測も行うことにし、水蒸気同位体比の連続観測も第 3 冬季に行っているところです。また今回書いていませんが、水同位体過程を組み込んだ数値モデルもあわせて実行して、比較検討を行っています。モデルは同位体比の相対的変動をよく表現できていますが、d-excess の絶対値はまだ表現が難しいようです（非常に高い d-excess を表現していません）。弘前での降雪・水蒸気の同位体比の計測値は、モデルの開発にも役立つと考えています。

文献

Hasegawa H, Akata N, Kawabata H. Sato T, Chikuchi Y, Hisamatsu S (2014) Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotope ratios in precipitation collected in a snowfall region, Aomori Prefecture, Japan, Geochemical Journal 48: 9–18. https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0279

上野優，谷田貝亜紀代，芳村圭（2021）2020/2021 年の弘前市における降水の安定同位体比の特徴について，令和 3 年度日本気象学会東北支部気象研究会予稿集 P27-28 https://www.metsoc.jp/tohoku/workshop/abstract_2021.pdf

芳村圭，一柳錦平（2009）東アジアにおける降水 d-excess 季節変動に関する再考察，水文・水資源学会誌，22，pp262-276.

芳村圭，一柳錦平，杉本敦子（編）（2009）「気象学における水安定同位体比の利用」気象研究ノート 第 220 号，日本気象学会，128pp.

早稲田周，中井信之（1983）「中部日本・東北日本における天然水の同位体組成」地球化学，17，83-91.

著者情報



谷田貝亜紀代（弘前大学大学院理工学研究科教授）1996 年筑波大学大学院地球科学研究科修了、博士（理学）。専門は気候・気象学。2002.3～2011.2 総合地球環境学研究所助教。中国、インド、トルコなどの学際調査に携わる傍ら、2016 年からアジアの日降水量グリッドデータ（APHRODITE）を作成公開し、データは世界的に用いられる。
2016 年に弘前大学に着任（准教授）、2018 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

同位体の導く流域における降雪の影響度

川 越 清 樹
（福島大学共生システム理工学類）

1. はじめに

日本は、北半球の中緯度付近に位置するものの世界有数の積雪量の認められる稀有な国です。多積雪になることで産業発展の停滞や冬季の生活へ支障を受けることが認識されており、法律上でも豪雪地帯対策特別措置法が制定され、交通通信、農林業、義務教育、医療等の機能維持の対策を講じる取り組みが進められています。一方で、積雪による地上の水循環の一時的な貯留効果は、安定的な水供給への効用を持ち、灌漑、電力、上水道、鉱工業の多岐にわたる水資源の役割を担っています。これらはあくまで代表的な事例として説明したものですが、積雪は社会活動を行う上で多岐にわたる「正」と「負」の側面をもっているといえます。安全かつ安定的な社会活動を行うためには、今後の「正」に対しての持続的な運用、「負」に対しての対応、対策を検討しなければなりません。この検討を進めるために、①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するのか？　②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するのか？　③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？　を明らかにすることが必要とされます。

「どのような量になるか？」は、スーパーコンピューターの普及により GCM（Global Climate Model、General Circulation Model）と呼ばれる数値気候モデルから水と大気の循環を解析することで将来像を予測できるようになりました。最新の結果を参考にすれば、北海道の一部地域を除いて将来は温暖化の影響によって降雪・積雪は減少すると予測されています。一方で、10 年に 1 度の大雪が現状以上に増加する地域も存在することが指摘されています。

「どのような質になるか？」は、雪に関すれば、例えば河川水ほど多地域、多地点で性質を同定するための取り組みが実施されていません。そのため、予測するためのベースとなる過去から現在までのデータが不足しています。データが不足していることから、大まかな範囲での積雪、および降雪の特徴を導くプロセスは解明されている一方で、地域の特徴を誘導するための積雪、および降雪の状態は未だ不明瞭な状態です。こうした地域特徴、特徴を導くプロセスに対して、安定同位体のデータを利用しています。安定同位体以外にイオン組成の化学的な性質も分析して雪の「質」のデータを整備しています。現在、取得されているデータの整備と検討により、地域の特徴を示す雪の質、および質に関連付けられる起源、プロセスの将来像を誘導することを目標にしています。

なお、「どのような量になるか？」、「どのような質になるか？」の結果が得られれば、いずれ、将来の「どのような地域の特徴を示すのか？」は明らかにされると考えられます。

2. 対象地域と降雪と積雪の関係

この研究の取り組みが、日本の積雪、降雪の地域の特徴を求めるための模式事例になることを目標に、代表的な豪雪地域である阿賀野川流域を対象地域に設定しています（図 1 参照）。阿賀野川は、栃木県、福島県、山形県、新潟県の標高 2,000 m 級の急峻な山岳地を水源とした 243 の中小河川、猪苗代湖などの水域により構成されています。河川全長 210 km、流域面積 7,710 km^2 の日本上位の大規模流域として位置づけられています（全長

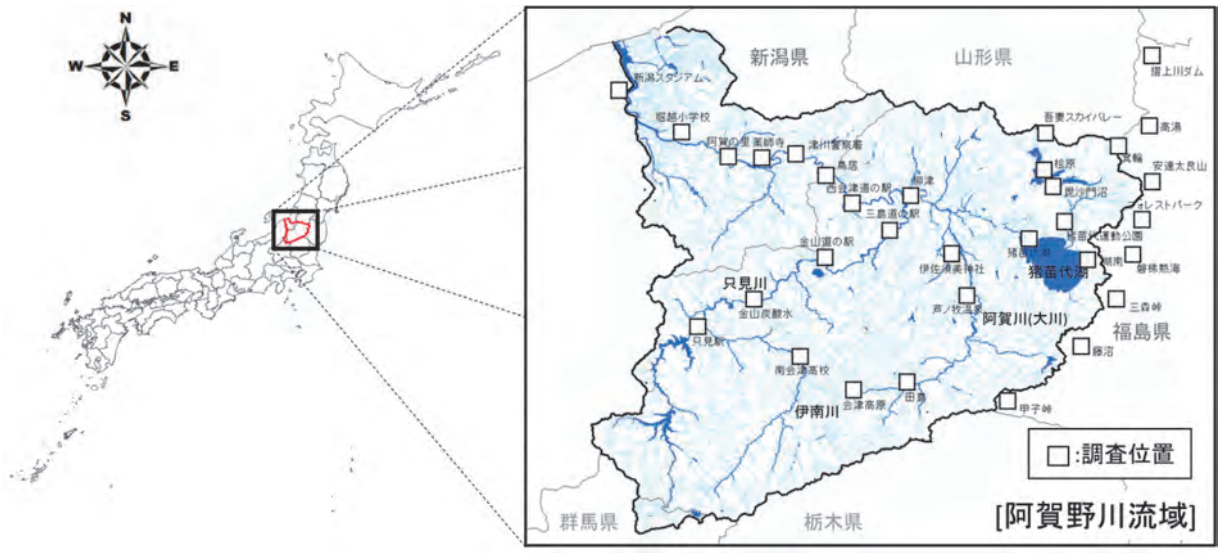


図 1.　研究対象位置図

10 位、流域面積 8 位）。なお、阿武隈川の流量は日本最大級（流量 4 位）であり、年間の流量の約半分が融雪時期の出水に関わることが知られています。この豊富な流量を利用して、流域内では日本最大級の稲作の生産、水力発電がなされています。また、流域の上流域には、磐梯朝日や尾瀬、日光など複数の国立公園が分布しています。いずれの国立公園とも積雪に関与する水の涵養より自然環境が形成されています。また、この自然環境に付随してエコツーリズムも確立されています。これらの状況より阿賀野川では、早急に積雪、降雪の地域特徴と将来に向けた環境遷移を把握しなければならない状況です。同時に積雪、降雪に関わるデータも特に整備していく必要のある地域といえます。なお､特徴や遷移を求める上では「量」だけでなく「質」も把握しなければなりません。「質」を得ることで、自然環境への負荷、もしくは養分の供給も捉えることができます。例えば、世界各地では、酸性雪による河川や湖沼の生物に与える悪影響の問題なども認められています。同様の環境問題が生じないようにするためにデータを蓄積して、①過去から現状を把握する、②将来を予測する、③地域の特徴を知り異常現象を察知する､ことに示される管理を行うことも必要です。

3.　日本列島が多積雪になるプロセスと考察

日本列島では、冬季に西側でシベリア高気圧と東側でアリューシャン低気圧がともに強まります。列島の周辺は西高東低の気圧配置となり、これらに挟まれる等圧線が南北方向へ縦縞模様に発達します。この気圧配置によりシベリアから乾燥した寒気が吹送されることになります。寒気は温暖な日本海上を通過し、海から大量の水蒸気を補給します。補給された水蒸気はその近傍で降水として失われることなく、海上 2 ～ 3 km 以下の季節風の気層に蓄積されます。季節風は日本列島の脊梁山脈に当たり、地形性に応じた上昇気流が生じて雲を形成します。この雲の形成と寒冷化した日本列島陸域の状態に応じて降雪が生じます。この一連のプロセスにより日本列島、特に日本海側は世界有数の多積雪地帯になります（以上　図 2 参照）。ただし、稀に太平洋側を中心に多積雪になる事例も認められます。気温の低い冬季に日本の太平洋側北緯 30° 付近に発達した低気圧が東進する場合、関東、東海地方に北側から冷たい湿った空気が流入しやすくなり、大雪になる可能性が高くなります。この日本の南海上を主として東から北東方向に進む低気圧は、南岸低気圧と呼ばれます。以上に示す通り、日本列島は冬季に多積雪になる気象条件を含んでいますが、大気や海域の

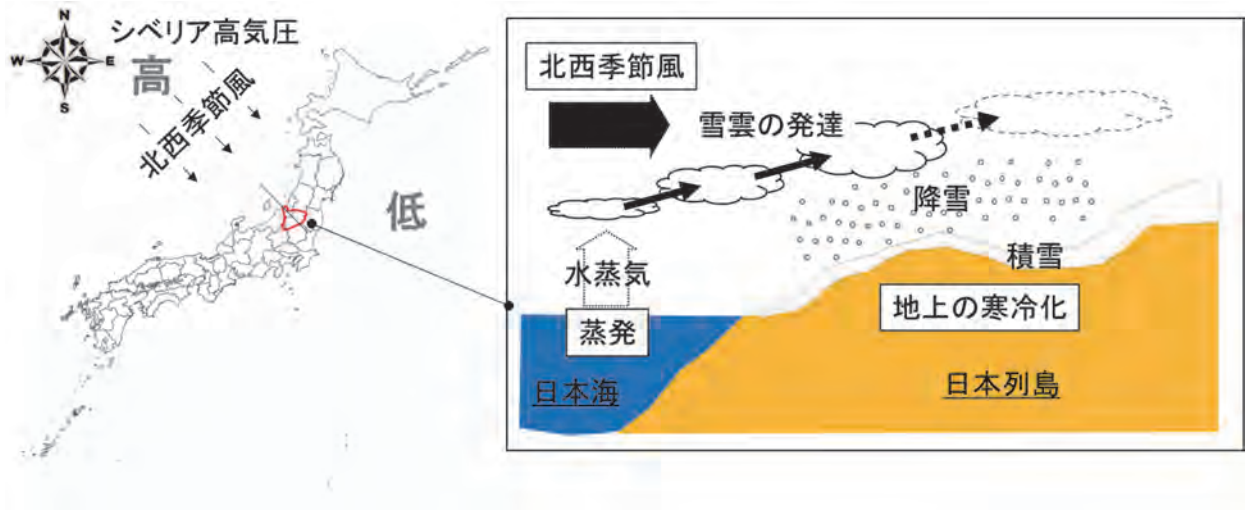


図 2.　日本海起源の降雪プロセス

状況の変化により、積雪、降雪の状況は変動することも推測されます。なお、地上、および地上付近の大気の条件も積雪、降雪の条件に影響を与えます。現在までの経験上、地上の気温が 2℃ 以下、上空約 1,500 m が −4℃ 以下だと雪、それ以上の高い気温が認められた場合は雨になる可能性が高いことも知られています。これらの条件も気候システムの温暖化により大きく変化しうるものです。数値気候モデルより将来の積雪、降雪の予測もなされていますが、微妙な変化が生ずれば予測結果も変化する可能性をもちます。

4.　阿賀野川流域の積雪量の経験値

図 3 は、阿賀野川流域内の気象観測機器が流域全域で運用された 1990 年からの流域平均積雪深を示したグラフです。おおよそ 1990 ～ 2020 年までの流域平均積雪深の最大値は約 164 cm（2015 年）、最小値は約 28 cm（2020 年）、平均値は約 115 cm で示されます。全期間を通じた変動傾向を捉えることは難しいですが、最近は、少雪年の出現が多くなっていると同時に、多雪の出現するケースも認められています。極端な積雪深の変化が生じやすくなっているものと解釈でき、積雪、降雪の大小の変化に及ぼす気象要素が敏感に反応しているものと推測します。

過去の研究成果を参考にすれば、北日本の日本海側の流域の中で阿賀野川流域は、日本海の蒸発に関与する日本海表面海水温度と最も関係性が小さく、安定的に積雪の見込まれることが知られていました。このような特徴の示される流域で極端な積雪深の変化が認められている最近の状況は、経験則だけでは解釈しきれない影響要素が波及していること、なおかつ敏感に積雪、降雪に反応しやすくなっている可能性を示しています。

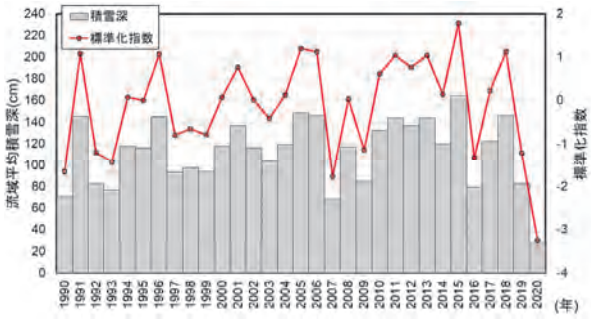


図 3.　阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化

5.　阿賀野川流域の安定同位体による降雪の影響

図 4 は、2014 年から 2020 年まで継続して観測した積雪の安定同位体比のデータを用いて流域内の各地域に「どこを起源にした降雪が到達しているのか？」を求めた結果です。水素同位体比 δ^{2}H と酸素同位体比 δ^{18}O の関係（天水の式）より求めることのできる d-excess 値［‰］より降雪の到達を推測しています。既に今までの研究成果か

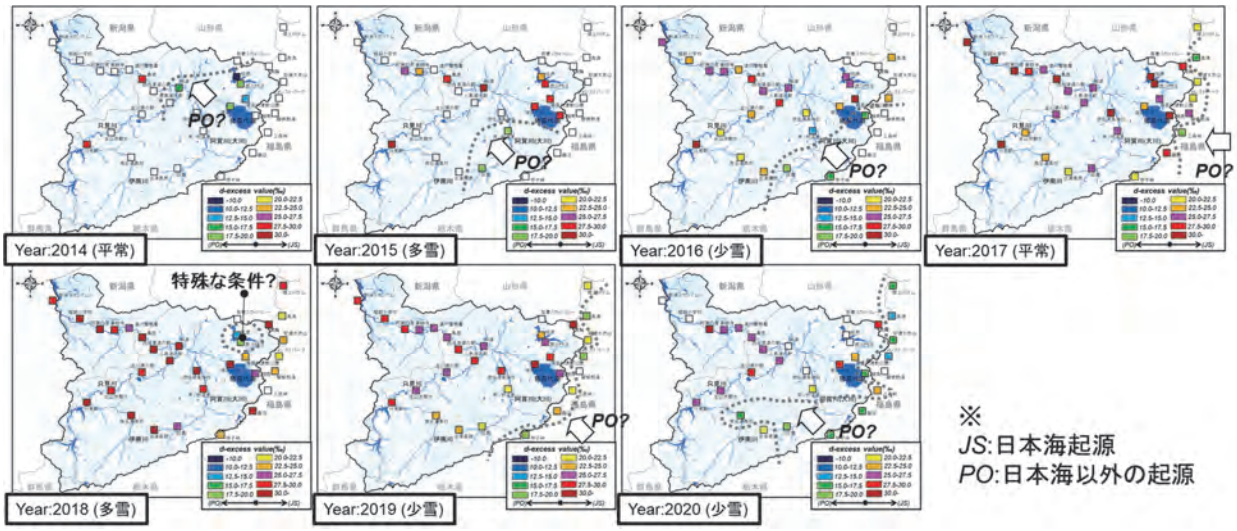


図 4.　阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化



図 5.　阿賀野川流域の積雪分析の統合結果図

ら得られている日本海起源は 20‰より大きな値、太平洋起源は 10‰より小さい値になる d-excess 値の基準より判別を行いました。結果として積雪の多い状態、少ない状態に関わらず日本海起源の影響が影響を及ぶ範囲は年々変化していることが明らかにされました。また、今までの日本海起源以外の影響を受けやすい地域が存在することも明らかにされました。具体的には、流域の南東部に位置する南会津地域と北東部に位置する猪苗代湖周辺の地域（図 5 参照）は日本海以外の影響も受ける結果を得ました。日本海から距離のある流域の奥部では、日本海以外の降雪を起源とする降雪が寄与している結果を明らかにしました。南会津地域に関しては、比較的に太平洋側と距離が近いため、南岸低気圧に伴う降雪の影響を受けやすい地域であることが推測されます。一方で、太平洋側から距離の離れた猪苗代湖周辺の地域に関しては、解釈の整理が難しい状況でした。

6.　裏磐梯地域の安定同位体による降雪の影響

日本海起源以外の降雪の影響の生じる裏磐梯地域の降雪を調べるために裏磐梯地域内の桧原、およびその近傍に位置する米沢（日本海側）、福島（太平洋側）の降雪日の降雪試料を 2016 年から 2018 年にかけてサンプリングし、それらの d-excess 値の推移を分析しました。その結果を図 6 に示しま

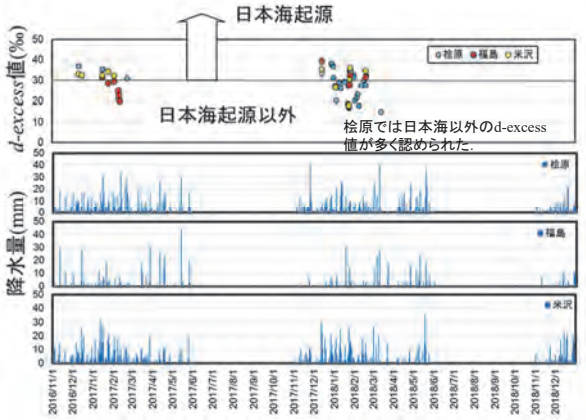


図 6.　桧原・米沢・福島の降雪日の d-excess 値の推移図

す。結果として、桧原は日本海起源以外の d-excess 値を示す降水が特に多く認められている結果を得ました。また、米沢、福島との比較より、桧原の地域のみに日本海起源以外の降雪が出現していることを把握しました。この結果は日本海起源、太平洋起源の影響を受けない地域固有の降雪の出現を示唆しています。桧原を含む裏磐梯地域は、急峻な山岳地に囲まれた高い標高の平地であり、特に日本海側から季節風の吹送される北西側には、飯豊山などの標高 2,000 m 級の山地が連なっています（図 5 参照）。こうした遮閉されやすい地形の高度条件が日本海外側からの影響を弱めると推測します。また、遮閉された地形の中で比較的に解放された南側には日本最大規模水域面積（面積 103.24 km^2）の猪苗代湖が分布しています。日本海と同様に猪苗代湖の湖水温度による水蒸発気が降雪に変化している可能性も示されます。こうした大規模な水域面積の湖沼の水蒸気が降雪をもたらす現象は世界各地でも認められており、北米の五大湖付近の湖の熱変化の影響が降雪現象にまで及ぶことは有名です。なお、世界山岳気象観測史上 1 位の積雪深は琵琶湖北側に位置する滋賀県の伊吹山で記録されており、1927 年 2 月 14 日に 1,182 cm の積雪深となりました。湖沼の水蒸気の発生が降雪、積雪に影響することは有力です。地域としての降雪、積雪の特徴は、概ねの要素から説明できますが、そのプロセスは明確にされたわけではありません。そのため、このプロセスを明瞭にするための調査、分析を継続して実施しています。

7. おわりに

本文では「同位体の導く流域における降雪の影響度」として、研究対象地域にしている阿賀野川流域の研究事例を報告しました。①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するのか？　②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するのか？　③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？　の内の「質」に対しての調査と分析を進めて、流域内の地域特徴を把握することができました。また、この研究から地形条件と大規模湖沼による降雪、積雪の影響を示す結果が明らかにされました。同位体がトレーサーとなり影響を誘導する結果が得られたものとなります。地上では水循環システムが形成されていますが、地球全体の規模で動く大規模循環の他に、ある程度の領域で動く中小規模のスケールの循環も存在しています。先に示した「量」の予測研究では数値気候モデルを解析することで将来を予測することを説明しました。しかしながら、このモデルは何百年にもわたる予測計算を行わなければならないため、スーパーコンピューターを用いても計算できる単位当たりの面積や、単位時間には限りがあります。現段階の数値気候モデルの結果は地球全体の規模で動く大規模循環に特化する傾向に則した予測がなされているものと解釈できます。今後のスーパーコンピューターの進化にもよりますが、ある程度の領域を緻密に予測するためには、まだ、時間がかかるものと思います。この研究で示されるデータが予測を補完するものになります。また、将来的には予測された結果への検証の材料になることと思います。このような関係は、「質」の研究が「量」の研究を補完して、更に精度をたかめているような状況になると思います。結果的に「①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するのか？」と「②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するのか？」の個別の研究が相互作用し、「③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？」の精度を上げているものと捉えることができるかもしれません。また、この精度の向上が、地域の特徴を知ることに反映されて、異常現象を察知できるような知見に繋がっているものと考えます。まだまだ、現在までの結果も途上段階です。引き続き研究を進めて、進化を図りたいと思います。

引用文献

文部科学省・気象庁（2020）「日本の気候変動」

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_honpen.pdf, Site Viewed: 2020/12/24.

Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu (2016) Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. Climatic Change 139: pp. 265–278. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1781-3

川越清樹，鈴木絢美，井上浩太，神内亨太，佐藤佑哉，中村光宏（2016）「阿賀野川流域の積雪特性と水循環の関係性」In：裏磐梯・猪苗代地域の環境学、福島民報社、pp. 79–94

井上浩太，鈴木絢美，川越清樹（2015）東北地方日本海沿岸の積雪比較分析と考察．土木学会論文集 G（環境）71（5）：I_295-I_304. https://doi.org/10.2208/jscejer.71.I_295

早稲田周，中井信之（1983）中部日本・東北日本における天然水の同位体組成．地球化学 17：pp. 83–91.

Dewey,K.F (1975) The prediction of lake Huron lake-effect snowfall system, Journal of applied meteorology and Climatology14: pp. 3–7.

鈴木絢美，川越清樹，藪崎志穂（2018）化学分析による地域スケールに対する降雪イベントの特徴の同定．土木学会論文集 G（環境）74（5）：I_1–I_9. https://doi.org/10.2208/jscejer.74.I_1

著者情報



川越清樹（福島大学共生システム理工学類教授）、博士（環境科学）、2007 年東北大学大学院環境科学研究科博士課程後期修了、2005 年東北大学大学院環境科学研究科産学官連携研究員、2008 年カーティン工科大学客員研究員、2009 年福島大学共生システム理工学類准教授、2018 年国立環境研究所客員研究員、2019 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

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。

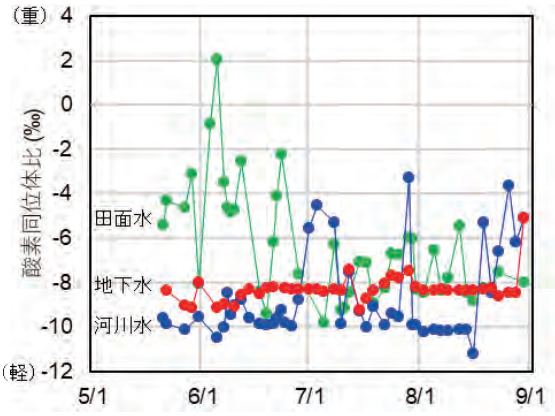


図 1. 河川水（用水路で採取）、田面水、地下水の酸素同位体比の変化（2019 年）

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

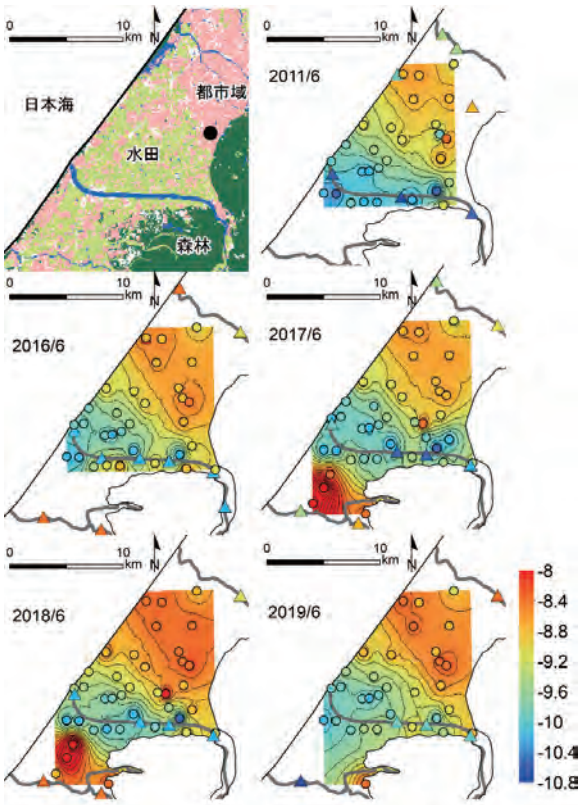


図 2. 扇状地の土地利用と地下水の酸素同位体比
〇地下水、△河川水
（赤：重い水、青：軽い水）

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）

地域の水循環に田んぼが果たす役割の評価

中　桐　貴　生
（大阪府立大学大学院生命環境科学研究科）

1. 水田における水利用

もし「日本の原風景とは？」と聞かれたら、皆さんはどういう光景をイメージされるでしょうか？　日本で長く生活している人であれば、里山に水田が広がる光景、いわゆる田園風景を思い浮かべる人も少なくないと思います。日本では、古来より、各地で水田農業が広く営まれてきました。

ご存じの方も多いと思いますが、水田で稲を育てるためにはたくさんの水が必要となります。日本でのお米の収穫は基本的に年１回で、地域によって多少のずれがあるものの、３月下旬頃から田植えの準備が始められ、４月～５月に田植えを行い、９月下旬頃に稲刈りを行うというのが標準的で、このおよそ半年の間に必要とされる水の量は、降雨量と同じように水深で表すと、およそ 2,000 mm に相当します。

日本で１年間に降る雨の量は、地域によってかなり大きなばらつきがありますが、全国で平均するとおよそ 1,700 ～ 1,800 mm とされ、これは世界全体での平均年降雨量の約２倍にも相当します。水田の稲作には、半年でそれをも上回る量の水が必要とされるわけですから、その量がいかに多いかということがおわかり頂けると思います。そして、当然のことながら、これだけの量の水を天水、すなわち空から田面に降り注ぐ雨だけでまかなうことは困難です。このような場合、天水以外の水を水田に供給すること、すなわち“かんがい”が必要となり、日本のほとんどの水田にはそのための施設として用水路や排水路などが設けられています。かんがいの用水源には、河川の水が利用されるケースがほとんどであり、河川から取水した水を、取水地点から分岐を繰り返しながら各水田圃場まで繋がっている用水路に流すことによって各圃場へと水が供給される仕組みとなっています。水田が面積的に大きく広がった地域では、時には、河川の水がなくなりそうなほど取水されてしまうこともあります。

2. 水田に取り入れられた水のゆくえ

さて、それでは、水田に取り入れられたたくさんの水は、その後どうなるのか、皆さんご存じでしょうか？　稲からの蒸散や、光合成による植物体内への吸収、あるいは田面に溜まっている間に生じる蒸発によってなくなってしまうと思われる人も少なくないかもしれませんが、実はそれらの量は割合的にはそれほど多くはなく、水田に入れられた水のほとんどは、排水路へと流れ出るか、底の土の中へ浸透していくかによって水田から出て行き、その後、下流にある河川へと流入したり、地下水の一構成成分となったりしています。

そして、水田から河川や地下水へと流出した水が、それより下流にある水田で再びかんがい用水として利用される例も少なくありません。これを専門用語で「反復利用」と言います。これは、少し極端な言い方をすれば、上流の水田が下流の水田の水源としての役割も果たしているとも言えます。

3. 水田農業と地域における水循環の関係

水田にはたくさんの水が取り入れられる一方で、それとあまり変わらない量の水がそこから出ていくのであれば、地域内に水田があろうがなかろうが、その地域における水の循環過程、すなわち降雨として地表に到達した水が、河川や地下水へと流入し、最終的には海洋へと流出していく過

程において、さほど影響が無いように思えるかもしれません。しかし、トータルの量でみると水田への流入量と水田からの流出量に大きな差が無いにしても、水田に水が取り入れられるタイミングと、それが出て行くタイミングに差があるため、地域の水循環過程には少なからず影響を及ぼしている可能性があると考えられています。

わかりやすい例をあげると、たとえば大雨が降った時、水田は水が貯まりやすい構造になっているため、水田があれば、降った雨の一部がそこに貯まってしばらくの間留まり、直接流れ去るよりは長い時間をかけて水田の外へと流出していくことになります。しかし、もしそこが水田でなければ、そのような一時的な水の貯留や流出の時間遅れは生じないため、河川に到達するまでの時間がより短くなり、水田がある場合に比べ、河川への流入が集中的となり河川流量が増大しやすくなります。近年、水田によるこうした機能が注目され、水田におけるこの特性を積極的に利用することで、大雨時の洪水を抑制しようとする取り組みが各地で実際に行われています。

また、水田に入れられた水には、砂時計から落ちる砂のように、時間をかけて少しずつ水田からしみ出ていくものがあり、しばらく降雨が無い時には、こうした水が河川の流量維持の役割を果たすことになるとも考えられます。

つまり、地域内に水田があるかないかによって、河川における流量の変化の仕方が異なってくると考えられます。

4. 水田農業による地域水循環への定量評価

水田が地域における水の循環過程に何かしらの影響を及ぼしうることは、ある程度認知されてきましたが、実際にそれがどの程度であるかについては、実はまだ明らかにはなっていません。このことを明らかにするためには、河川を流れる水や地下水の中に、水田から出てきた水がどれだけ含まれているかを知る必要がありますが、それはとても困難だからです。複数の色の絵の具をそれぞれ別に溶かした水をある割合で混ぜ合わせ、その混ざった状態の水だけから、ある色の水がどういう割合で混ぜられたかを特定するのは難しいというのと似ています。

ところで、ご存じの方も多いかもしれませんが、近年、日本ではとくに都市圏を中心に農地の宅地化が進み、また、山間部においても農業従事者の高齢化や担い手不足などによって耕作放棄が進んでおり、農地面積が年々減少の一途をたどっています。農地の減少によって、地域の水循環過程にも変化が生じる可能性がありますが、どういった変化がどの程度生じうるかはまだ不明のままです。しかし、農地の減少に伴って、たとえば河川流量が洪水時には増大しやすくなり、逆に渇水時には低下しやすくなるといった、水循環過程への悪影響が及ぶ可能性もあり、農地がなくなってしまってからでは対策が困難となるということもあり得ますので、今のうちに、こうした評価ができるようになることはとても重要な課題といえます。そして、河川水や地下水の中に含まれる水田から出てきた水の割合を定量評価できるようになることは、その課題解決に向けての大きな第一歩となります。

5. 水の酸素・水素安定同位体比を用いた定量評価

こうした中、地表水における酸素・水素安定同位体比の特性の違いを利用することによって、今まで困難とされてきたその定量評価の可能性が見出され、現在、検討を行っています。図 1 は、兵庫県西部にある千種川上流域において、2019 年 4 月～ 11 月にかけて、本流および支流の源流部および各地点の河川水と、流域内にある水田の田面水を採取し、酸素および水素の安定同位体比（$\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$）を分析した結果を $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ 座標上にプロットしたものです。プロットは、おおよそ直線状に散らばっており、田面水、源流水、河川水にグループ分けすると、分布の左端の両 δ 値とも小さい側（水の軽い側）に源流水のみが分布する比較的小さな領域があり、一方、右端の両 δ 値

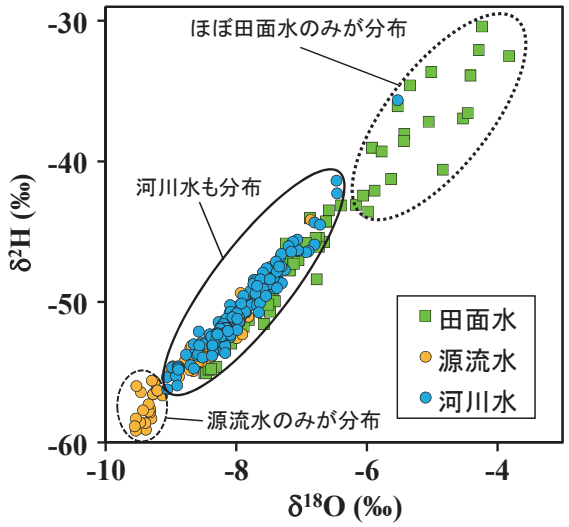


図 1. 源流水、河川水、田面水の同位体比

とも大きい側（水の重い側）にほぼ田面水のみが分布する領域があり、河川水は、それら 2 つの領域にちょうど挟まれる領域に分布するという興味深い結果が得られました。

水における $\delta^{18}O$ および $\delta^{2}H$ の値は、地表において蒸発作用（動的分別作用）を受けなければ、ほぼ変化することはなく、一方、蒸発作用を受けると、酸素、水素それぞれ、質量数が相対的に小さく軽い ^{16}O および H が水中から優先的に蒸発し、その結果、地表に留まった水の中の ^{18}O および ^{2}H の割合が増えて、$\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$ ともに値が大きくなり、わずかながら水が重くなる側に変化することが知られています。つまり、この流域の水田では、かんがい用水として基本的には河川の水が利用されていますが、水田に入れられた水が田面に貯留されている間に蒸発作用を受けることによって、田面水の $\delta^{18}O$ および $\delta^{2}H$ が $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ 座標上で源流水や河川水とは明確に区別できる程度まで値の大きな重い水へと変化することが図 1 からうかがわれます。ただし、田面水については、河川から取り入れたばかりの水の割合が多い時もあれば、数日間蒸発作用を受けた水の割合が多い時もあるため、プロットのちらばりが大きく、河川水の分布領域と重複しているものも見受けられます。

水は河川を流れている間にも蒸発作用を受けるため、δ 値はある程度変化しますが、日本の河川は基本的に短く、最上流部から河口まで流達するのにせいぜい 1 ～ 2 日程度であり、その間における δ 値の変化量は、夏季に水田内で変化する大きさに比べると小さいといえます。また、今回調査を行った千種川上流域では、河川水は図 1 で示された源流水の δ 特性をもつ支流からの流入と、水田から還元してきた水によって主に構成されることが現地調査を通じて確認されています。そこで、河川水における δ 値は、もともと源流水の δ 特性を有していた水が、河川への流入後、流下中の蒸発によってわずかながら変化するとともに、田面でより多くの蒸発作用を受けて重くなった水が河川へと還元し混合されることによって形成されたと考え、流域内で大きな支流にある調査地点を対象に、いくつかの前提条件の下で、調査を行った日における河川水に占める水田から還元してきた水の割合を試算したところ、図 2 に示すような結果が得られました。この河川地点における流域面積に対する水田面積の割合はたった 0.7％に過ぎないにもかかわらず、かんがい期においては、河川水中に占める水田還元水の割合がその 20 倍以上となる 16％にもなることがあり、非かんがい期になるとその割合はやはり小さくなるという傾向がみられました。まだデータ数が少なく、示された数値がどの程度の代表性をもっているかについては検討の余地がありますが、他の河川地点で試算を行ってもやはり同様の結果が得られてお

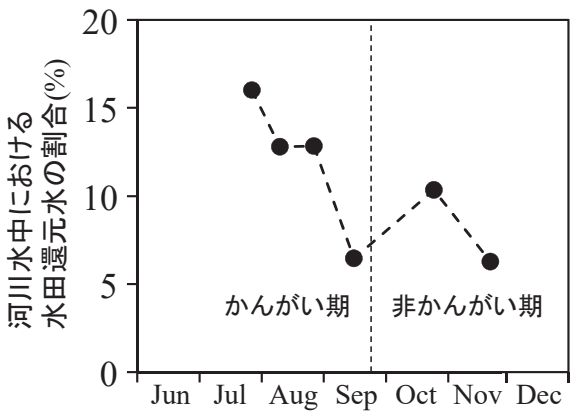


図 2. 河川水における水田還元水の混合割合の試算結果

り、とくにかんがい期においては水田が河川流量に対して少なからぬ影響を及ぼしていることはやはり間違いなさそうです。今後、同様の調査を継続し、試算方法や推定結果の妥当性について引き続き検討を行いながら、水田が地域の水循環にどの程度寄与しているのかについて定量的に評価できるようになるところまで究めていきたいと考えています。

文献

中桐貴生、松本武志、大串健一、吉岡有美、堀野治彦、藪崎志穂、陀安一郎、櫻井伸治（2020）「水の安定同位体比を用いた水田農業による河川流況への影響評価」2020 年度（第 69 回）農業農村工学会大会講演会要旨集、農業農村工学会、pp. 469–470

著者情報



中桐貴生（大阪府立大学大学院生命環境科学研究科准教授）1995 年京都大学大学院農学研究科修了、博士（農学）。1997 年大阪府立大学農学部助手、2008 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

大阪平野の降水起源の地下水の分布と残存する有機物汚濁

益 田 晴 恵[1]、 根 本 達 也[1]、 新 谷 毅[2]
（[1]大阪市立大学大学院理学研究科、[2]北海道立総合研究機構）

はじめに

厚い堆積物からなる大阪平野は、我が国有数の地下水賦存地域です。地下水は優れた水資源ですが、地盤沈下や水質汚濁を避けて適正に利用するためには、水循環過程を正確に理解することが必須です。この報告では、大阪平野の地下水を可視化するために行った一連の研究の中で、地下水の起源を整理した研究の一部を紹介します。再生可能な現在の降水を起源とする地下水の地理的分布をお見せします。また、そのような地下水に見られる過去の汚染の残存状況も示します。これらの結果から、地下の水循環について考察しましょう。

降水を起源とする地下水

図 1 に大阪平野の表層地形と新生代の堆積物の分布を示しました。大阪平野は、大阪湾とともに周辺を低山地と淡路島に囲まれた大阪盆地を形成しており、その東半部を占めています。この盆地は 3.3 百万年～ 3.5 百万年前に沈降を開始したとされており、堆積物の最大層厚は、平野部で約 1,500 m に及びます。平野と周辺山地の境界は活断層です。また、平野中央部にも上町断層があり、この断層の活動によって形成された上町台地が大阪平野を東の河内平野と西の西大阪平野に分けています。表層堆積物の年代は中央の低地から外側

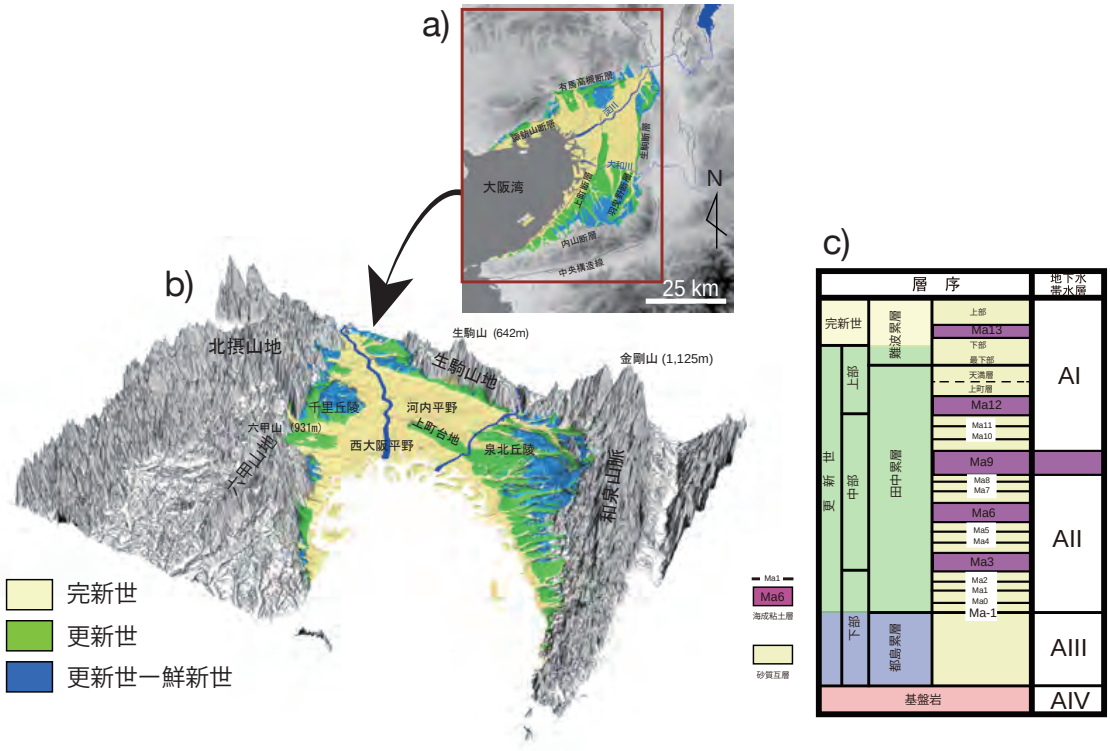


図 1. 大阪平野の地質
a）インデックス図と活断層、赤四角で囲った部分（90 km × 60 km）が b）で示す三次元地形図の範囲；b）3 次元表層地質図、俯瞰図の原点は 34° 39′ 22.959″ N、135° 21′ 6.675″ E、北から時計回りに 52°、俯角は 23°。；c）平野中央部の地層区分と本報告の帯水層区分（説明は本文を参照のこと）。

に向かって古くなります。図では表層地質を 3 つに分類しました。中央部は、縄文海進（最終氷期後の海進、約 7000 年前）以降の堆積物（クリーム色）が分布しています。その周辺には、およそ 10 万年周期で海進と海退を繰り返していた時代の堆積物（緑色）が、さらに外側には大阪盆地の水域が淡水の湖沼であった時代の堆積物（青色）が分布しています。また、平野の地下では、これらの堆積物が深度の増加とともに出現します。平野地下の地層と表層地質図を対比させたものが図 1c です（表層地質図と同じ色を地層の年代と累層名に塗ってある部分が対応しています）。図 1a）と b）の表層の緑色の地層は、c）の平野地下の層序の更新統上部・中部と下部の最下位の海成粘土層（海底に溜まった粘土の地層、Ma-1（エムエーマイナスワンと読む））より上位の地層に対応します。図 1a）と b）の表層の青色の地層は、c）の Ma-1 より下位の地層に対応します。

ここでは、便宜的に地下水帯水層[1)] を AI ～ AIV の 4 つに分けました（図 1c）。AI は Ma9（43 万年前の海成粘土層）より上位の帯水層です。この帯水層は海岸や河床底と直接接触している場所があり、地表水や海水が直接帯水層を涵養[2)] しています。その下位にある AII は、最下位の海成粘土層である Ma-1（124 万年前）より上の淡水成の砂礫層が海成粘土層と繰り返して堆積している部分です。AIII は Ma-1 より下の内陸の湖や河川に沿って堆積した淡水成の地層です。AII と AIII を構成する堆積物層は丘陵部に露出しているので、丘陵での降水が地下に浸透した地下水が見られます。AIV は基盤岩に滞水する地下水です。平野の堆積物の下にある基盤岩は花崗岩が最も多いのですが、南部では、火山岩や堆積岩なども見られます。また、中生代～古生代の堆積岩が多く分布する北摂山地や白亜紀の堆積岩が広く分布する和泉山脈などでは、山地の降水が岩石の割れ目を流れる地下水も見られます。

500 点近い地下水の分析結果をもとに、地表から涵養されている地下水（317 点）だけを抽出して、酸素と水素の安定同位体比の関係を図 2 に示しました。酸素・水素の安定同位体比は、地下水の起源を推定するのに有効です。（実際には、安定同位体比とともに他の溶存化学成分も用いて統計学的処理を行っていますが、ここでは説明しません。）ここでは、地表から涵養されている水とは、大阪平野や周辺山地の降水や河川水・淀川や大和川などの大阪盆地外から流入する河川水と海水です。淡水の多くは、大阪府域の河川水の酸素・水素安定同位体比の範囲とほぼ一致しており、同じ起源を持つ水であることがわかります。また、4 つの帯水層で、同位体比の分布にはほとんど違いが見られません。また、海水が混入している地下水では、酸素・水素安定同位体比が、海水混合線に沿って大きくなる傾向が見られます。

図 3 には海水を含む地下水と降水起源の淡水の地下水の地理的分布を 3 次元で示しました。この図には、表層（平野部は薄い色で表現してある）と堆積物を剥いだ平野地下の基盤岩の分布を示してあります。縦方向の縮尺が横方向の 13 倍あることに注意してください。

この図が示す重要なことは、現在の降水を起源とする地下水の多くが浅い深度に分布しているこ

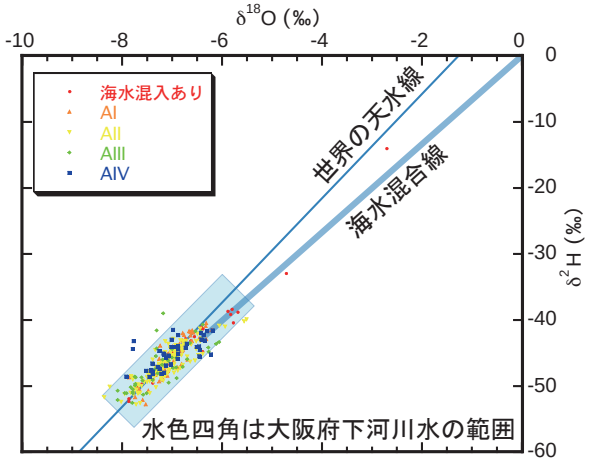


図 2. 現在の降水と海水を起源とする地下水の $d^{18}O$ と $d^{2}H$ の関係
海水が混入した地下水と、帯水層区分ごとの淡水（Cl- ＜ 100mg/L）の地下水に分けて表示。

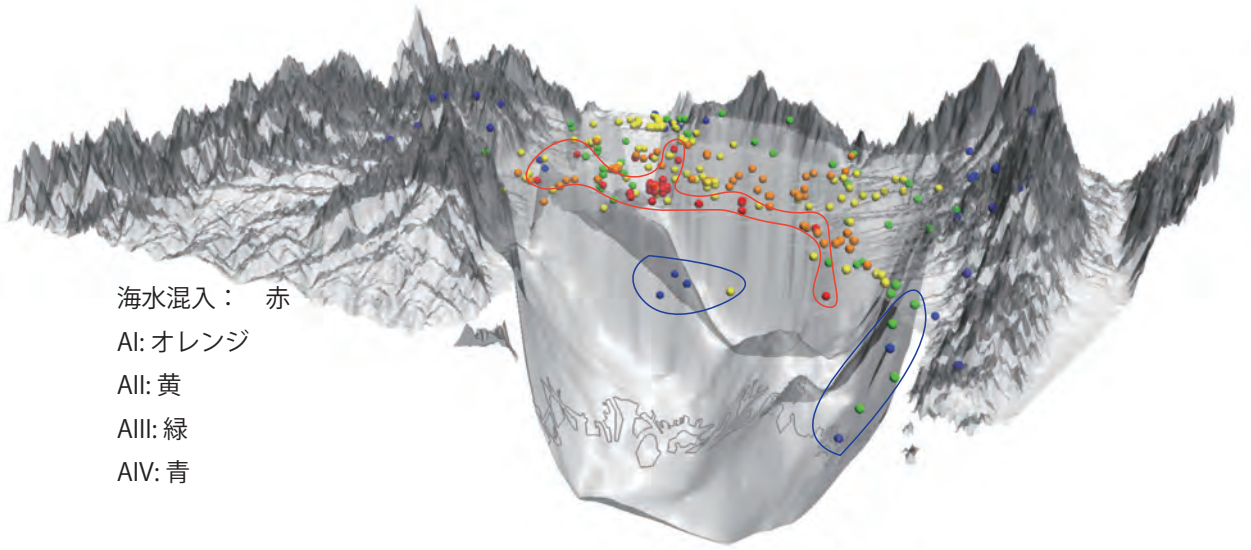


図 3. 現在の降水と海水を起源とする地下水の 3 次元分布図
俯瞰図の原点は 34° 39′ 22.959″ N、135° 21′ 6.675″ E、北から時計回りに 53°、俯角は 8°。標高の縮尺は水平方向の 13 倍。赤線と青線で囲ってある試料についての説明は本文を参照のこと。

とです。海水を含む地下水は、大阪湾の沿岸部の海抜 0 m 地帯に多く見られます（図 3 の赤で囲んだ地域）。また、淀川に沿った内陸部にも海水を含む地下水が見られます。淀川河口に近い大堰ができる以前は、京都府と大阪府の境に近い枚方大橋付近まで海水が遡上していたことが知られています。現在では、大堰に堰き止められて、淀川を海水が遡上することはありません。しかし、河床底地下の伏流水の水路を通じて、海水が遡上していることはあり得る話です。また、降水起源の AI ～ AIV の淡水地下水は、大雑把には平野の中央部から外側に向かって分布する傾向があります。AI（オレンジ色）の帯水層には平野での降水や平野を流れる河川水などが直接涵養しています。AII（黄色）は低地部との境界近い場所に分布する丘陵部や上町台地が涵養減です。AIII は山麓に広がる丘陵地に分布し、AIV は山地に分布しています。つまり、これらの地下水は、井戸のある地点から比較的近い場所で涵養されていると言えます。

降水を起源として流動する地下水は、平野の比較的浅い帯水層（最大でおよそ 100 m 以浅）にしか存在しません。AIII や AIV の地層は平野の低地部の地下にも分布しているのですが、丘陵部や山地で涵養された地下水は、連続しているはずの平野深部にまでは流動していかないと言えます。例外的に、上町断層と内畑断層に沿って AIII と AIV の地下水が高深度で見られます（青で囲った部分）。これらは、わずかですが、断層を通じて降水が、ほぼ鉛直方向に地下の深部にまで浸透していることを示すものです。ここに示した地下水は再生可能な地下水資源ですが、そのような地下水が分布する深度は限定的です。

本報告の話題ではないので取り上げませんでしたが、AIII や AIV には、縄文海進以前に涵養された淡水、化石塩水や有馬温泉の塩水と似た性質の塩水が多く見られます。そのような古い時代の水は、使えば無くなってしまいます。温泉水として使われていることが多くありますが、大切に利用して欲しいものです。

地下水に残存する汚染物質

日本は環境政策における先進国です。大気汚染対策が功を奏して遠方の風景が美しく見えるようになりました。河川水も目に見えてきれいになっています。しかし、循環速度の遅い地下環境では、高度成長期から 1980 年代にかけて自然界に放出した汚染物質が残存していることが観察されま

す。その例を示しましょう。

揮発性有機炭素（Volatile Organic Compounds: VOC）は大気中で気体となる有機化合物の総称です。VOC の多くは、発がん性などの健康影響があり、光化学スモッグやオゾン層破壊の原因物質でもあります。これらは、1988 年のモントリオール議定書により、自然界への放出が禁止され、日本でも翌年から排出規制が開始されました。ここでは、四塩化炭素（テトラクロロエチレン、PCE）とトリクロロエチレン（TCE）に注目してみましょう。これらの物質は、洗浄剤として工場やドライクリーニングなどで便利に用いられていました。また、これらの物質の地下での分解は、主として微生物によるものです。PCE は TCE に、TCE はジクロロエチレン（DCE）を経由して塩化ビニールモノマー（VC）へと変化します。地下水環境によりますが、PCE・TCE が DCE に変化するまで 20 ～ 30 年、VC に変化するまでは 30 ～ 40 年かかります。これらの物質の中で最も毒性の高い VC は無害なエタンと二酸化炭素に変化しますが、さらに 30 年以上が必要だと言われています。これらの物質は容易に光分解するため、揚水して日光に晒すことができれば、簡単に分解します。それなので、地表に取り出して処理すればいいのですが、地下に残存した状態で処理するのは簡単ではありません。

図 4 に、大阪府下の地下水中に VOC が検出される地点と、VOC の成分として VC も含む地点を示しました（2017 年）。これらの汚染が見られる地下水は、前述した降水を起源とする地下水です。地表から涵養されるということは、汚染物質も共に流入することがあるということなのです。検出地点は泉南の海岸部を除いては、内陸に多く分布していることがわかります。DCE から VC へ変化している地点は、大阪平野東側の河内平野と丘陵の谷部が多く、丘陵の開けた場所で採取された地下水では DCE で止まっていることがわかりました。DCE は、少し還元的な環境での微生物活動でより活発に分解が進んで VC になること

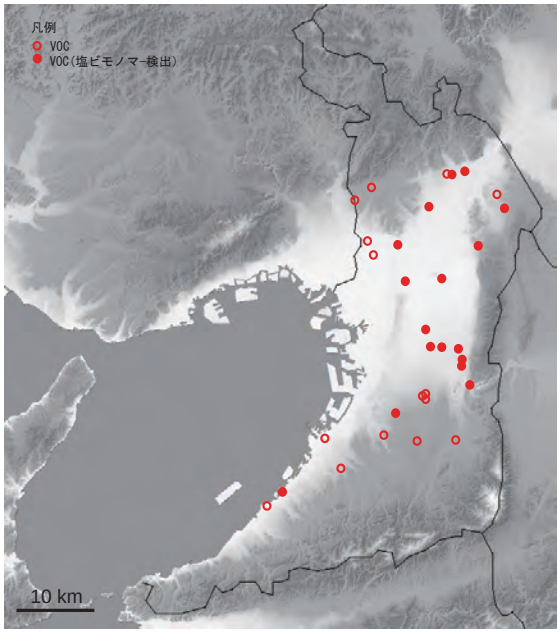


図 4. 大阪府下で地下水中に揮発性有機炭素が検出された地点

が知られています。上町台地より西側の大阪市内で VOC 汚染が見られないのは、海水を含む塩水が出入りすることで汚染された地下水が流出したのだろうと考えています。それなので、DCE が保存されている地下水の方が、VC にまで分解が進んでいる停滞的環境下にある地下水よりも短時間で汚染浄化される可能性があります。

VOC 汚染された地下水は再生可能な地下水です。汚染物質ごと揚水して処理できれば、地下環境を早く回復できます。

まとめ

地下水は、適切な管理のもとに利用すれば、良質の水資源です。日本全体が汚染の少ない自然環境になっている今日では、醸造や瓶詰めの水の製造など、良質の水を大量に利用する地方で、良好な水循環を保全する活動を官民協同で行っている自治体が多くあります。過去の汚染が残っている大都市圏では、きれいな地表水を地下に流して、残存している汚染物質を流失させることも可能でしょう。そのためには、降水起源の地下水をうまく利用したほうがいいと、私たちは考えています。

目に見えることの少ない地下水ですが、水質を

可視化し、マッピングすることで、地下水の置かれている状況を知ることができます。これを読んでいる皆さんには、地表だけでなく、地下の水循環にも興味を持っていただけると嬉しいです。

注釈

1）帯水層：取水できる地下水を含む地層のことで、砂や礫などの粗粒の堆積物や、割れ目の多い岩石などからなっています。

2）涵養：地表の水が地下浸透して帯水層に供給されること。

文献

井川怜欧・益田晴恵・新谷毅・三田村宗樹（2019）水文環境図 No. 11「大阪平野」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/contents/osaka/osaka.htm

益田晴恵（2018）第 7 章　大都市の水環境 ― 健全な利用を進める ―. 公益財団法人日本生命財団編、「人と自然の環境学」、129–145. 東京大学出版会：ISBN 978-4-13-063371-0.

Shintani T, Masuda H, Okazaki K, Even E, Ono M, Marui A (2019) Characterization of groundwater based on $\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$ and Cl^{-} concentration beneath the Osaka Plain, Southwest Japan. Geochemical Journal, 53: 235–247. https://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/2019e/53040235.pdf

著者情報



益田晴恵　大阪市立大学大学院理学研究科・教授。専門は環境地球化学、水圏地球化学。水循環に伴う水質汚濁、海洋地殻内の続成作用に伴う水―岩石反応などに関する研究を行ってきた。



根本達也　大阪市立大学大学院理学研究科・准教授。専門は情報地質学。地理情報、地質情報などのデータベースを用いた 3 次元可視化の手法開発などを研究してきた。



新谷　毅　北海道立総合研究機構･研究員。専門は環境地球化学、地下水学。環境同位体と水質を用いた地下水流動系の評価を研究対象としてきた。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

シベリアの河川と水循環
― レナ川とインディギルカ川の不思議な流れ ―

鷹　野　真　也
（総合地球環境学研究所）

1. 地球は水循環＝水の呼吸の使い手？

“水循環”とは何か､皆さんご存知ですか？「水が循環すること…？」と考えたそこのあなた。…正解です。完璧です。もう少し詳しく言うと、雨（水）が降って、溜まって、流れて、蒸発して、また降って…と文字通り“水”が地球上をぐるぐると“循環”すること､それが“水循環”です。我々はその水循環を研究しています。

では何故その水循環を研究する必要があるのでしょう？　それは水が色々なものを運ぶからです。水の流れに乗って運ばれるものもあれば、水の中に溶けて運ばれたりもします。もちろん目に見えるものもあれば、見えないものもあります。例えば、炭素や熱（エネルギー）がそれらに当たります。炭素や熱が水によって動かされるというのは実はとても大変なことで、もしバランスを保っていたものが崩れると様々な弊害が起こります。炭素は有機態として植物や土壌中に多く存在しますが、その陸域にストックされていた有機炭素が水と共に川や海へ流れ出てしまうことがあります。この流れ出た炭素によって、陸からだけでなく川や海からも二酸化炭素（CO_2）やメタン（CH_4）といった温室効果ガスが大気中に放散される恐れがあり、地球温暖化や海洋酸性化[1)]への寄与が危惧されています。また海の水の流れ、つまり海流は、海水の密度の違いによって生まれ、地球全体をぐるぐる回り熱などを輸送します。これを熱塩循環と呼ぶのですが、この熱輸送は気候に影響を与えてしまうほど大きなものです。何かの拍子に水循環が変化してしまうと（具体的には海への淡水の供給量が変化すると）、海流とそれに伴う熱の輸送システムも変化してしまい、ひいては気候変動まで引き起こされてしまいます。このように水の流れは連鎖的に他の物質の流れも生み出すことが多く、一例として昨今の温暖化・気候変動を考える上でも、水循環研究は非常に重要な役割を担っているわけです。

水は自然の中で廻り続けています。まるで地球が呼吸をするように。まさに水の呼吸ですね。〇〇ノ型！　なんてものは出てきませんが、水の循環にもパターン（型）はあります。その型がどう変わったのか（これからどう変わるのか）、云わば地球の“水の呼吸”の真髄と変化を調べるのが水循環研究です。同じ水循環研究でも、水質や水環境の汚染など水資源利用の観点からの研究も沢山ありますし、先述した温暖化・気候変動に関連する研究もあります。ここでは後者について紹介したいと思います。

2. なぜシベリアの水循環？

私が今からするのは、シベリアでの水循環研究のお話です。皆さんは“シベリア”と聞いて何を思い浮かべるでしょうか？　多くの方は、漠然と極寒の地とかシベリア鉄道などのイメージを持っているのではと推測しますが、そもそもシベリアってどこ？　という方も少なくないと思います。定義が色々あるようですが、一般的にはユーラシア大陸の北東部、ロシア連邦の中央部から東側のとても広い地域を“シベリア”と呼びます。実際に行ったことがある方はあまりいないかもしれませんが、社会科の教科書で、タイガやツンドラといった植生（図 1）と永久凍土が広がってい

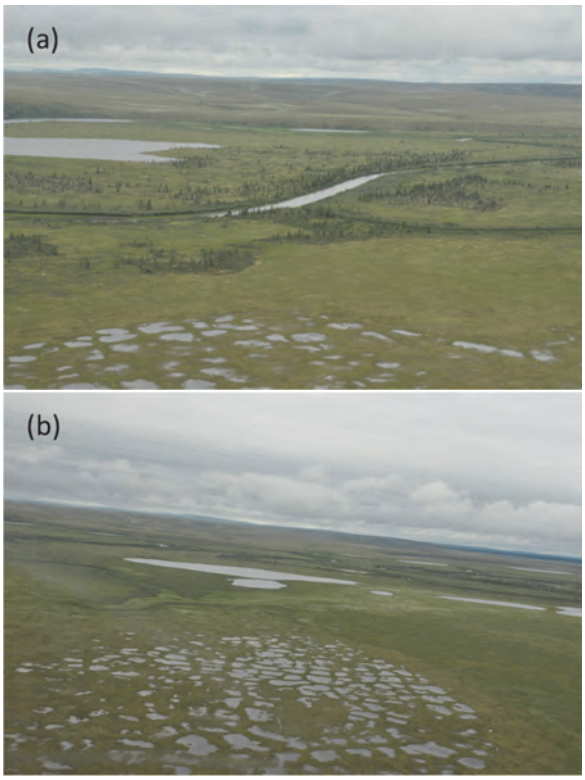


図 1. 北東シベリア・チョクルダ周辺域におけるタイガーツンドラ境界（a）とツンドラ湿地（b）。タイガを構成する針葉樹（カラマツなど）とツンドラの背の低い草本類が交じり合って分布しています。ツンドラにはポリゴンという網目模様の微地形（地表面の凹凸）が見られ、凹みに水が溜まってツンドラ湿地を形成します。

る、という記述を一度は目にしたことがあるかもしれません。いずれにしても日本に住んでいる人々にはあまり馴染みのない土地であり、実はロシアの人々にとってもまだまだ未知の世界と言われている、そんなシベリアでの水循環とは一体何なのでしょうか。

まず何故そんな日本から遠いところの研究をしているのかというと、理由は地球温暖化にあります。日本でも近年暑いなと感じている方もいるかもしれませんが、シベリアを含む北極域では世界（地球全体）平均の約 2 倍の温暖化が起きている（これから起こる）とされています。その温暖化によって様々な問題が生じるのですが、大きな問題の 1 つとして永久凍土の融解が懸念されています。

シベリアには広く永久凍土が分布しており、中でも東シベリアは世界最大・最深の永久凍土帯といわれています（ちなみに永久凍土とは“2 年”以上 0℃を上回らない土壌のことで、永久に凍った土壌ではありません。夏に融解・冬に凍結というサイクルを繰り返す土壌は季節凍土（活動層）と呼ばれます）。凍土には土壌中の水分を氷として一時貯留させておくリザーバーのような性質があり、加えて凍土中の氷が物理的なバリアになって水の浸潤を妨げ地下水・土壌水の動きを制限するなど、凍土はシベリアの水循環システムにおいて重要な役割を担っています。先述のようにシベリアにはタイガ林やツンドラ湿地といった植生が広がっていますが、これらは気温や土壌中の水分量に非常に敏感で、ちょっとした変化によって植生の枯死や種類の変化が引き起こされてしまいます。また、その植生の下には泥炭という有機物（炭素）を沢山含んだ土壌が堆積・凍結しています。つまり永久凍土が融解すると、これまでの水循環のバランスが崩れ植生に影響を与えるのと同時に、地中に冷凍保存されていた有機物（炭素）も解放され、水と共に河川や海へ流出してしまう恐れがあるのです。

これは温暖化、及び永久凍土の融解によって起こり得る問題のほんの一例に過ぎませんが、シベリアの“水の呼吸”の乱れは地球規模で影響を及ぼしかねない可能性を秘めています。その影響の範囲や大きさを予測しないと、地球の未来のために対策さえできません。そのためには生態系のベースとなる水循環とは何かを知ることが第一歩となります。現在の水循環システムを理解し、温暖化により今起きていること・これから起こり得ることを調査し、気候や生態系へどのように影響するのか予測する、それがシベリアの水循環研究の目的です。

3. 水循環研究の秘密兵器“水同位体比”

水循環研究を行う上で、便利且つ有効なツールが水の安定同位体比です。ここでは水同位体比について、またその使い方を簡単に説明します。

水（H_2O）は水素（H）と酸素（O）からなる分子で、水素の安定同位体には ^{1}H と ^{2}H（D）、

酸素の安定同位体には^{16}Oと^{17}Oと^{18}Oが存在します。自然界の水分子は$^{1}H_2{}^{16}O$がほとんどですが、それに次いで、比率としてはわずかではあるものの$^{1}H^{2}H^{16}O$と$^{1}H_2{}^{18}O$が存在します（$^{2}H_2{}^{16}O$や$^{1}H^{2}H^{18}O$、及び^{17}Oを含む水分子は更に存在量が小さいためここでは無視します）。本来、同位体とは原子について用いる言葉ですが、水分子の、さらにその内の$^{1}H^{2}H^{16}O$と$^{1}H_2{}^{18}O$を“水（の安定）同位体”と便宜的に呼んでいます。

そして、水分子中の^{1}Hに対する^{2}Hの存在比を“（水の）水素同位体比”、^{16}Oに対する^{18}Oの存在比を“（水の）酸素同位体比”と呼び、それらを総称して“水（の安定）同位体比”といいます（少しややこしいのですが、$^{1}H_2{}^{16}O$に対する水同位体（$^{1}H^{2}H^{16}O$と$^{1}H_2{}^{18}O$）の存在比ではないことに注意してください）。しかし水分子中の^{1}Hや^{16}Oに対する^{2}Hと^{18}Oの存在比（水同位体比）は値がとても小さく比較しづらいため、δ（デルタ）値を用いてもう少しわかりやすくします。このδ値とは、簡単に言うと、「調べようとしている水試料」と「基準とする特別な海水」の水同位体比はどれだけ違うか（偏差）、を表しています（詳しくは第3章「元素の同位体比」と「軽元素同位体」をご覧ください）。そのδ値のうち、^{2}Hに関するものをδ^{2}H、^{18}Oに関するものをδ^{18}Oと表記します。

この水同位体比が水循環研究に有効なツールである理由は、水同位体の性質にあります。水同位体比が変化するのは、主に①水が相変化した時、②分子拡散時、③異なる同位体比を持つ水同士が混合した時です。つまり水同位体比を観測することで、その水が経てきた相変化や循環過程を推定することが可能になるのです。また、試料採取や分析が比較的容易であることも理由の1つとして挙げられます。

一概に水同位体比を用いた水循環研究といっても、その使い方は研究対象や目的によって様々です（本当に色々あるので、本章の他の研究例とも見比べてみてください）。今回私が紹介するシベリアの研究例は“河川水”に主に焦点を当てたものです。河川水とは一般的に、水循環の中の「雨（雪）が降って、土壌を経由し、河川へ流れる」という過程を経て集まった水です。同じように流れているように見えても、その過程のちょっとした変化によって河川水の水同位体比も変化します。この水同位体比の変動から、どの水がどのように河川に流れているかを推定します。先述したように水同位体比は「③異なる同位体比を持つ水同士が混合した時」に変化するので、上記の過程に含まれ得る色々な種類の水の同位体比がわかると推定の精度が上がります。特にそれらの水の大元ともいえる降水（雨や雪）の同位体比は非常に重要な情報となります。

図2は北東シベリア・チョクルダ（北緯70度、東経148度）における降水や河川水等の水同位体比をまとめたものです。この図から、夏の降水が最も高く、冬の積雪（降雪ではなく“積雪”であることに注意してください）が最も低い水同位体比を示すことが認められます。これは“温度効果”と呼ばれる降水同位体比の特徴の1つで、気温との相関により夏に最高値・冬に最低値となる周期性を持つことがわかっています（その他の効果については第3章「軽元素同位体」と「同位体地図（Isoscape）」を参照してください）。この結果を踏まえて、シベリアの河川水同位体比変動と水循環過程を考えていきます。

4. 東シベリア・サハ共和国の首都ヤクーツクでの水循環過程 ― レナ川と井戸水

ここからはより具体的で、少し専門的なお話になります。シベリアの水循環過程の研究例として、まず東シベリアを流れるレナ川の水同位体比季節変動を紹介します。（※以降の研究例紹介では、水同位体比の議論に酸素同位体比（δ^{18}O）のみを用います。水素同位体比（δ^{2}H）を用いても議論の結果・本質は変わらないのでご了承ください。）

レナ川はバイカル湖西側のバイカル山脈に源を発し、東シベリア・サハ共和国最大の都市であるヤクーツクを通って北極海へ注ぐ（図3）、流域

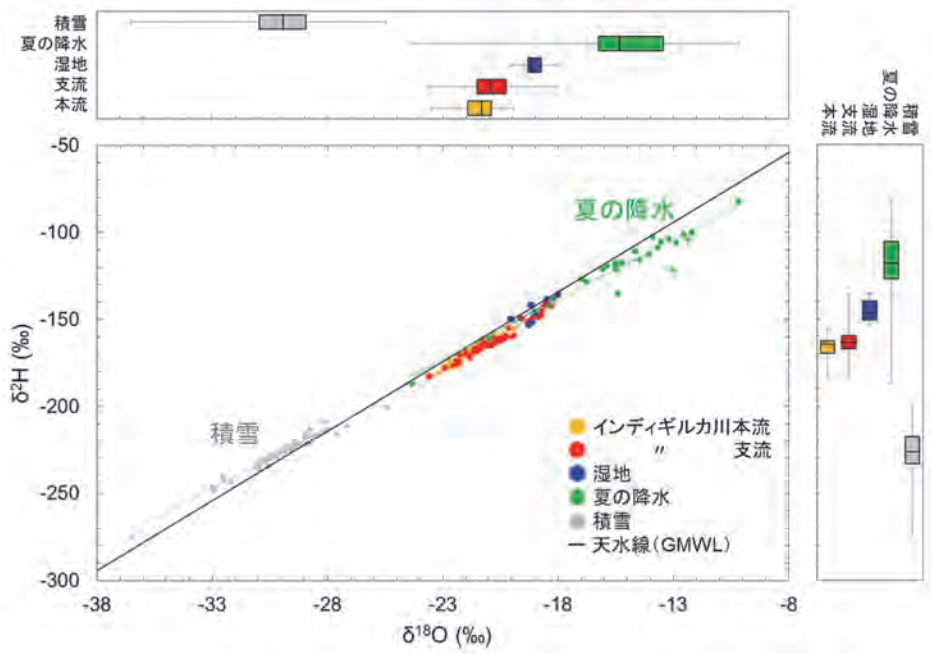


図 2. チョクルダ周辺域で採取した様々な水同位体比（$\delta^2H - \delta^{18}O$ 座標）。インディギルカ川本流が黄、支流が赤、湿地が青、夏の降水を緑、積雪を灰で色分けしました。

面積世界第 8 位のとても大きな河川です。永久凍土帯を流域に広く含む大河川として、また北極海への淡水の大きな供給源として世界的に注目されており、多くの研究が行われています。冬には車が走れるほど川面が凍結し（分厚い氷の下では水が流れています）、春（融雪期）になると流域の融雪水が一気に流入してちょっとした洪水・氾濫を引き起こし、夏から秋にかけて段々流量が減っていきます。

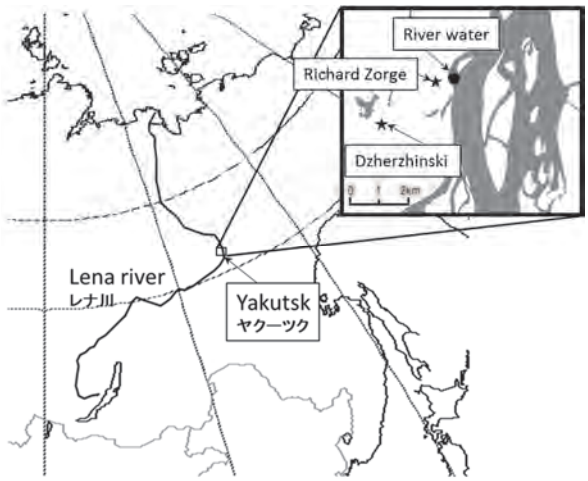


図 3. 東シベリア・ヤクーツクとレナ川。右上のパネルはヤクーツク市内でのレナ川河川水と井戸水（Richard Zorge と Dzherzhinski）の採取地点を示しています。

このように 1 年のうちに凍結・融解し、流量も大きく変動するレナ川ですが、その河川水の水同位体比も大きな季節変動を示します。図 4 はヤクーツクで採取したレナ川河川水の $\delta^{18}O$ の時間変化を示しています。図中の青プロットがレナ川の $\delta^{18}O$ で、1 年周期で規則的に値が上がったり

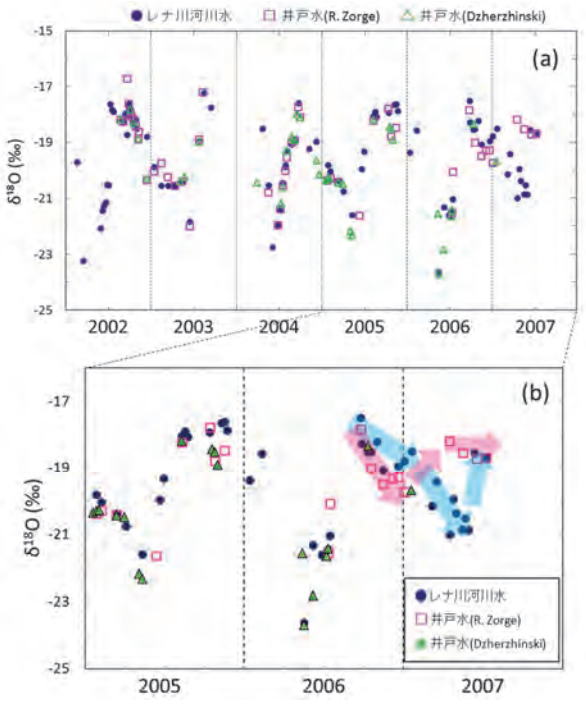


図 4. レナ川と井戸水の $\delta^{18}O$ の時間変化 （鷹野卒論より一部改変）

下がったりを繰り返していることが見て取れると思います。もう少し詳しく見ると、春に急低下し、夏に上昇、秋から冬にかけて徐々に低下していることがわかります。この変動は、レナ川に流入する流域の降水の δ 値が季節によって異なる値（夏に最高値、冬に最低値）を持つことに主に起因し、その周期性を反映していると考えられます。つまりレナ川 δ 値の春の急低下は融雪水（低 δ 値）の流入を示唆し、夏の上昇は融雪水流入の減退とそれに代わる流域の夏の降水（高 δ 値）の流入によって引き起こされたと推定されます。

一方、ヤクーツク市内のレナ川氾濫原に位置する井戸水（Richard Zorge、Dzherzhinski; 図 3）の $\delta^{18}O$ は、レナ川河川水の $\delta^{18}O$ とほとんど同じ時間変化を示しました（図 4）。これはレナ川河川水と井戸水が同じ起源であることを示唆しています。ヤクーツクは年降水量が 300 mm 程度の非常に乾燥した気候のため、通常はレナ川から氾濫原の地下へ水が浸み出して井戸水となっていることが考えられます。しかし、2006 年の秋から 2007 年の春にかけて、井戸水の δ 値変動がレナ川河川水の規則的な変動からズレる結果が得られました。具体的には、2006 年 10 月から 2007 年 1 月にレナ川よりも井戸水の δ 値が低下し、逆にレナ川の δ 値が急低下した 2007 年春（融雪期）には井戸水の δ 値はやや上昇し比較的高い値を保ち続けました（図 4b）。この変動のズレは、ヤクーツクにおける 2006 年夏期の記録的な大雨が関係している可能性が考えられます。元々レナ川から氾濫原の地下へ水が浸潤していたものが、2006 年夏期の過剰な降水があったことで水のポテンシャルが逆転し、氾濫原の井戸水側からレナ川の方へ水が流れた（井戸水が流域の土壌水の δ 値を反映した）のだと推測されます（図 5）。このような大雨に伴う水文過程の変化は、降水量増加が予測されている近い将来に、物質循環や生態系へ大きな影響を与える可能性が懸念されます。

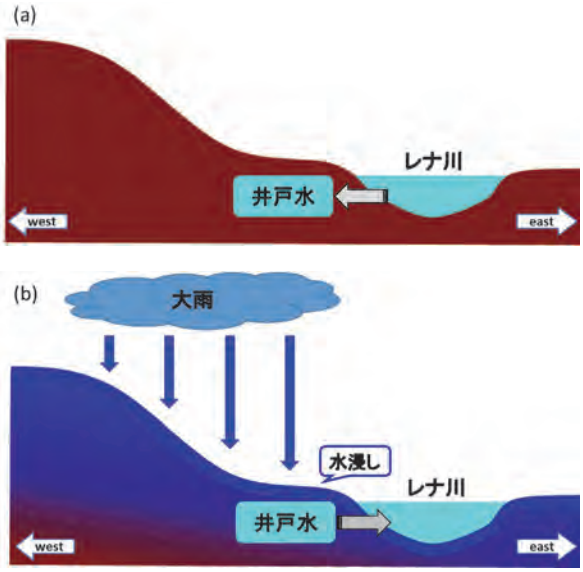


図 5. レナ川流域の断面図、通常の水の移動（a）と 2006 年の大雨後の水の移動（b）（鷹野卒論より一部改変）

5. 極北の地チョクルダ、インディギルカ川への DOC 流出

もう 1 つの研究例として、北東シベリアのインディギルカ川[2] における水循環過程研究を紹介します。インディギルカ川はレナ川と比べると小さいですが、流域の大部分が北極域に位置し、温暖化の影響や有機物（炭素）の流出を評価するために非常に重要な河川の 1 つです。このインディギルカ川の下流域にはチョクルダという村があり（図 6）、この周辺はタイガ林とツンドラ湿地の境界域となっていて（図 1）、学術的にとても貴重且つ価値のある研究対象地域です。このチョクルダ以北に広がるツンドラ湿地には多くの泥炭（炭素）が堆積しており、湿地の水は DOC（Dissolved Organic Carbon; 溶存有機炭素）という水の中に溶けた状態の有機態炭素を沢山含んでいます（図 7）。つまりツンドラ湿地からの排水は北極域河川や北極海にとって有機態炭素の重大なソース（起源）になり得ます。これまで述べてきたように北極域永久凍土帯の水循環過程は少し複雑になっているので、どんな状況・タイミングでこの湿地の水が流出するのかを水同位体比を用いて考えます。

まずインディギルカ川本流の水同位体比時間変

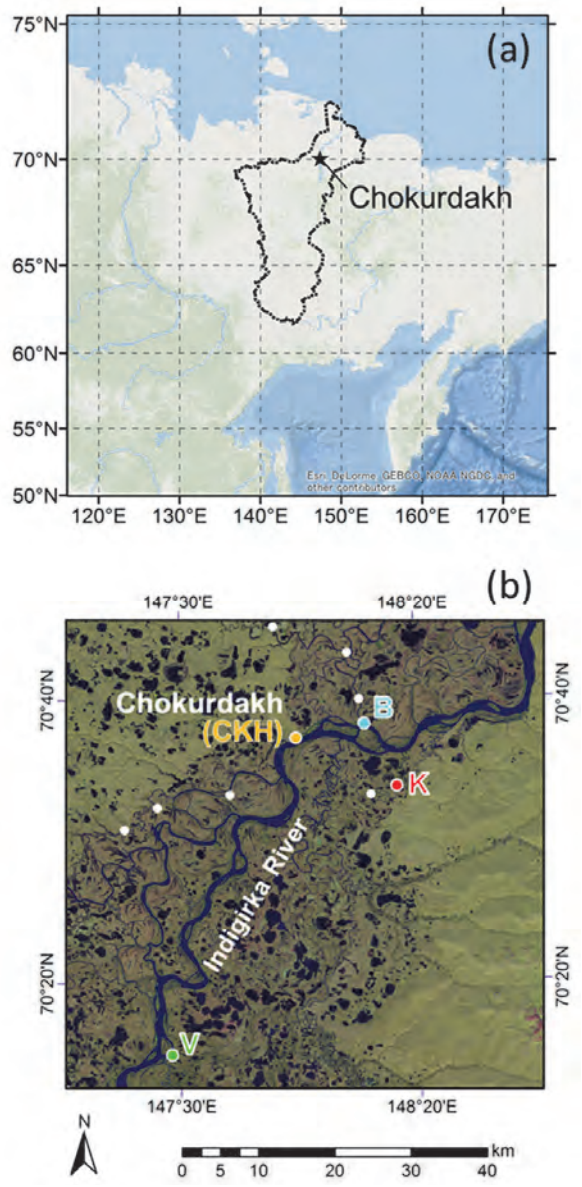


図 6. 北東シベリア・チョクルダとインディギルカ川。(a) 内の実線はインディギルカ川の分水嶺を示しています。

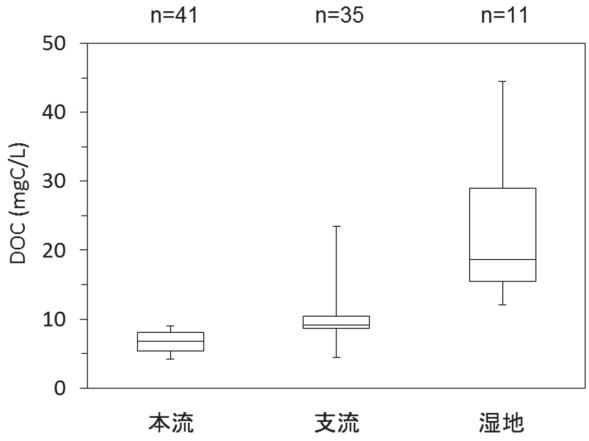


図 7. インディギルカ川本流と支流、湿地の DOC 濃度

化を見ると、レナ川と同様の規則的な季節変動が認められました（図 8）。この変動はレナ川の水同位体比変動でも説明したように、図 2 で示した降水同位体比の季節変動と流入のタイミングを反映していると考えられます。また、夏期（7 月前後）に採取したインディギルカ川本流とチョクルダ周辺の支流、ツンドラ湿地の水同位体比を図 2 にプロットしました。この 3 種類の水の δ 値を比べると、インディギルカ川本流が最も低く、支流の値が本流と同じかやや高く、湿地の水が最も高いことがわかります。これは湿地の水が支流に排水され、その支流の水が本流へ流入し、本流の夏期の δ 値上昇傾向に寄与していることを示唆しています。

以上のように「湿地→支流→本流」というごく一般的な水の流れが δ 値の座標で示唆されましたが、本流と支流の夏期 δ 値時間変化からはまた違った側面が見えてきます。図 9 はインディギルカ川本流と支流の $\delta^{18}O$ の夏期時間変化（2011 ～ 2013 年）で、2012 年は支流の δ 値が本流よりも常に高く、共に δ 値が徐々に上昇していることから、先述の水の流れを裏付ける結果となりました。しかし 2011 年と 2013 年の変動を見ると、本流と支流が途中まで（2011 年は day-of-year（DOY）[3] 203（7 月 22 日）まで、2013 年は DOY 183（7 月 2 日）まで）同等の値を示し、その後支流の値が本流よりも上昇しました。2013 年に限っては、その後 DOY 202（7 月 21 日）以降に再び両者が同等の値を示すようなりました。この支流の δ 値変動のタイミングはインディギルカ川本流の水位変動と完全に一致しており、本流の水位が高いと

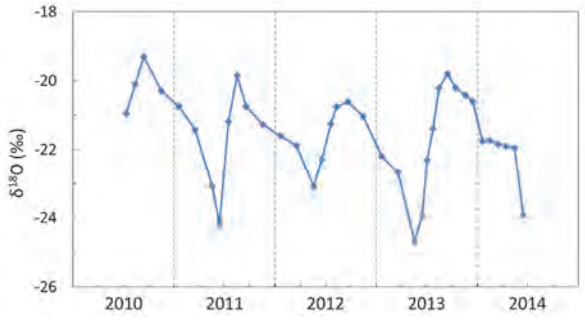


図 8. インディギルカ川本流の $\delta^{18}O$ の時間変化

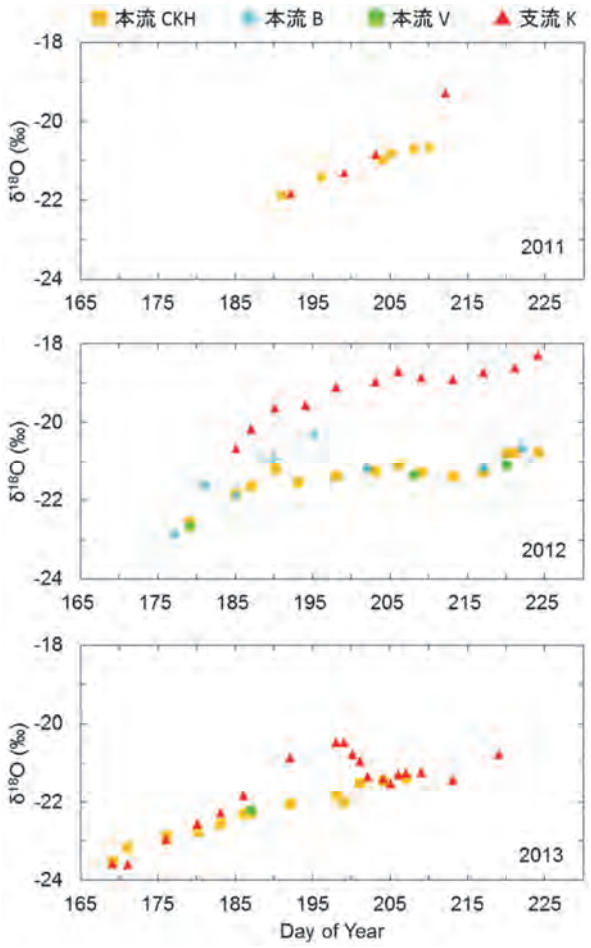


図 9. インディギルカ川本流と支流の $\delta^{18}O$ の夏期時間変化

き支流の δ 値は本流と同等の値を示し、水位が低くなると支流の δ 値が高い値を示しました（図 10）。

この δ 値時間変化と河川水位変動の関係は、本流の水位が高いときには「本流→支流」の方向に水が逆流し、支流内には本流由来の水が優位になり、下流域の湿地由来の排水を妨げていることを示唆しています。対して、本流の水位が低くなったときに湿地水が支流へ排水されるようになり、その水が支流から本流へ流入すると考えられます。すなわち下流域の湿地水は、融雪期及び夏期高水位時の後、河川水位が下がったとき（つまり晩夏から秋にかけて；図 10）流出が最大となり、北極域河川 DOC の主要なソースの 1 つになり得ることを暗示しています。

6. おわりに

本研究では、水同位体比の情報からシベリアの

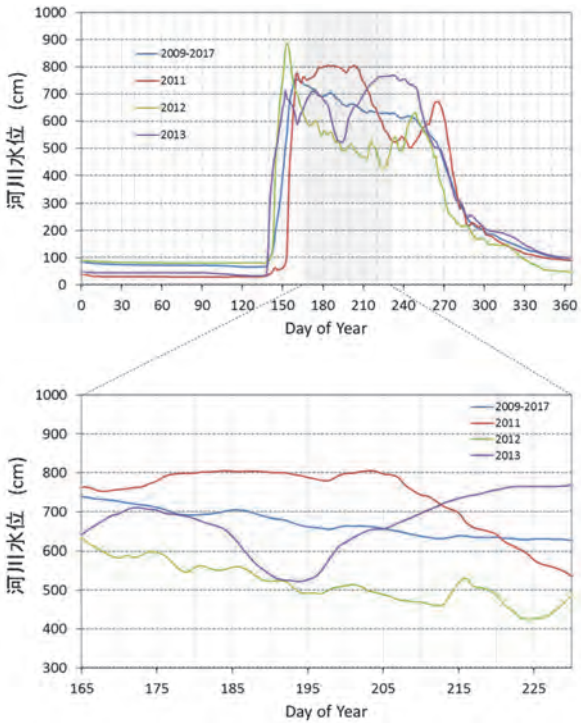


図 10. インディギルカ川本流の水位変動

水循環過程を推測しました。このように遠く離れた地域の、目に見えない“水の呼吸”がデータを通して見えるようなること、それがツールとしての水同位体比の利便性・強みです。しかし私の師匠はこうも言いました、「己の足で赴き、目で見て、肌で感じるフィールドワークは、自然科学分野の研究にとって必要不可欠である」と。目に見えるものが全てではないが、それは逆もまた然りであり、1 つの視点にとらわれず広い視野を持って取り組むことの重要性を説いた有り難いお言葉です。我々総合地球環境学研究所が提案する“環境トレーサビリティ研究”は、研究者と行政や民間・地域の方を含むステークホルダーの方々を繋ぐ超学際的研究を目指しています。師の教えを胸に、地球研が提供する同位体研究を基盤とし、ステークホルダーの方々に寄り添った多角的な視点を持つ共同研究を推し進めていければと、常々心掛け取り組んでいます。このシベリア水循環過程の研究例が、そんな環境トレーサビリティ研究を世間の方々に知って頂くきっかけ・一助となれば幸いです。

注釈

1）海洋が大気から二酸化炭素を吸収し、海水中の二酸化炭素濃度が高まり、海水の pH が低くなることをいいます。これにより炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の殻・骨格を持つプランクトンやサンゴ等がダメージを受け、海洋生態系に深刻な影響を及ぼすことが懸念されています。

2）インディギルカ川とは現地の言葉で「魚が湧き出てくる川」というような意味合いを持っているそうで、実際に漁業が盛んで現地民の主食になっています。そのため河川水中に有機物が多く、茶色いのが特徴です。現地調査時はこの川の水を飲むのですが、紅茶を入れて、これは紅茶の茶色だと自分に思い込ませて飲みます。「紅茶を飲めば浮かぶ、インディギルカ川の情景」シベリアの切ない思ひ出が今でも蘇ってきます。

3）day-of-year（DOY）とは年間通算日のこと。日付がその年の 1 月 1 日から数えて何日目かを表しています。1 月 1 日が DOY 1、12 月 31 日は DOY 365（閏年は 366）となります。

文献

Takano S, Yamashita Y, Tei S, Liang M, Shingubara R, Morozumi T, Maximov T C, Sugimoto A (2021) Stable Water Isotope Assessment of Tundra Wetland Hydrology as a Potential Source of Arctic Riverine Dissolved Organic Carbon in the Indigirka River Lowland, Northeastern Siberia, Frontiers in Earth Science. https://doi.org/10.3389/feart.2021.699365

鷹野真也（2011）東シベリア永久凍土帯から流出する水の同位体比，卒業論文.

著者情報



鷹野真也（総合地球環境学研究所ポスト・コアプロジェクト「環境トレーサビリティに基づく研究基盤の応用」研究員）2019 年北海道大学大学院環境科学院博士後期課程単位取得退学。2020 年学位取得（環境科学）。北海道大学学術研究員を経て、2021 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

アフリカ熱帯高山の消えゆく氷河
― 氷河と山麓水資源の関係性の解明 ―

大　谷　侑　也
（サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社 水科学研究所）

1. 消えゆく熱帯の氷河

気候変動は近年の人類が直面している喫緊の問題です。その中でも特に影響が大きいと考えられているのが氷河です。世界各地の山岳氷河は1900 年代から急速に縮小していますが、最も顕著なのは熱帯アフリカの高山が有する氷河です。アフリカにはキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の 3 つの高山があり（図 1）、それらの頂上付近には氷河が存在します。しかし、いずれも気候変動の影響により 10 ～ 20 年後には消失するとの予測がなされています。中でも、世界遺産に指定されているケニア山の氷河は年約 7 ～ 10 m の非常に速いスピードで縮小しています（図 2）。今すぐ現地に行ってモニタリングを開始しなければ氷河の縮小と周辺の水環境の関係性を記録することができなくなると考えました。

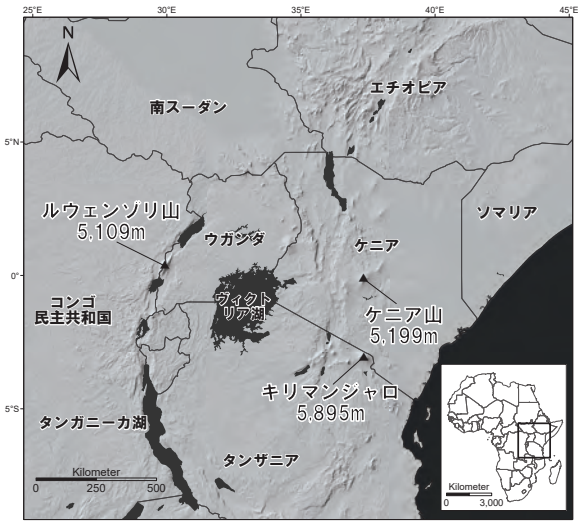


図 1. 東アフリカのキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の位置図

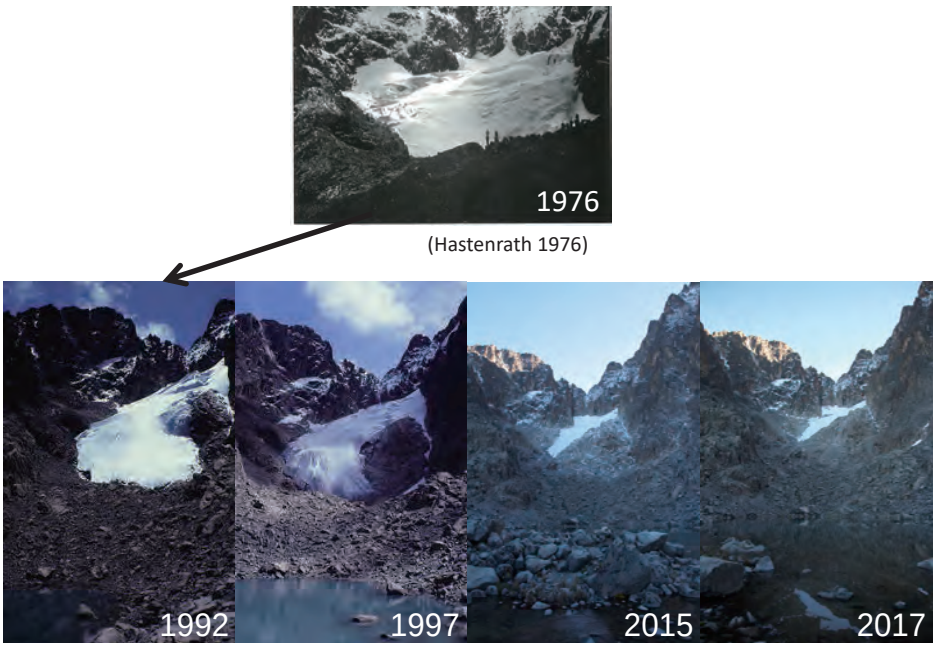


図 2. ケニア山のティンダル氷河の縮小（左から 1992、1997 年は水野一晴撮影、2015 年、2017 年は著者撮影）

そこで、アフリカのケニア共和国（以下、ケニア）へ調査に行くことになりました。私の想像のなかでアフリカは灼熱の大地というイメージがあったのですが、ケニアの首都ナイロビに初めて降り立ったとき感じたのは「涼しい！」でした。これはケニアが「アフリカ大地溝帯」に位置し標高が高いからです。アフリカ大地溝帯は地球の表面を覆うプレート（岩盤）とプレートの境界であり、アフリカ大陸を南北に貫く幅 35 ～ 100 km、総延長が 7,000 km にもおよぶ世界でも有数の地溝帯です。プレートの境界はマグマができやすく、地下深くで、ある一定以上の量が溜まると地上に噴出（噴火）します。そのためアフリカ大地溝帯には多くの火山が形成されています。

今回、調査対象としたケニア山（5,199 m）をはじめ、アフリカ大地溝帯が擁する高山は上昇気流を発生させ、多くの雨をもたらします。そのためこれらの山は概して降水量が少ないサバンナにとって貴重な存在であり、地元の人達は山を「Water Tower（給水塔）」と呼んだりします。一方、この給水塔の役割を果たすケニア山は、乾季には雨が少なくなり、山麓地域の水資源は雨季に比べて減少するのですが、現地で観察をすると川の水や湧き水はある一定の量を保ち続けていました。そこで私はこれら 2 つの山が持つ氷河の融け水（氷河融解水）に注目しました。氷河は「天然のダム」とも言われます。これは雨の少ない乾季において氷河の融けた水が、一定量、氷河の下流域に供給され続けるからです。このような氷河と山麓の水資源の研究は、とても大きな氷河が残るヒマラヤやヨーロッパアルプス等では展開されてきましたが、それら地域と比べ雨が少なく、また赤道直下の熱帯高山の氷河に焦点を当てた研究はほとんど見当たりませんでした。

これまでの研究から、マグマが冷えて固まった玄武岩質の火山の上部で取り込まれた水は地下深くまで浸透しやすく、浸透した水は地下水となって山麓で湧き出すことがわかっています。一方、山体の中腹以下の降水は溶岩流のち密な部分に阻まれて山体の内部に浸透することができず、表流水や浅い地下水となって山麓に流下することも明らかになってきています。このことから、玄武岩でできたケニア山の山麓の湧水は、山体中腹の降水よりむしろ、山体上部の氷河融解水が起源になっている可能性が高いと考えました。

2. 水の「重さ」の違いから麓の水の起源を調べる

氷河と山麓の河川・地下水の水の酸素同位体を分析して、河川水や湧水がどの標高から流れてきているのか（涵養標高）を調べることで、氷河と山麓の水資源の関係性の解明を試みました。ここで少し安定同位体の説明をしておきます。元素には陽子は同じですが中性子の数が異なるため質量数（重さ）の異なる原子が存在し、これを同位体といいます。そのうちの多くは時間の経過とともに崩壊し他の核種に変化する放射性同位体ですが、安定同位体は時間が経過しても不変です。また、安定同位体は自然界の様々な物質の循環過程のなかでその同位体比が変化します。そして質量数の大きい同位元素が多ければ同位体比が高い≒重いと表現され、それと比較して同位体比が低ければ「軽い」と表現されます。これらの同位体比の「重さ」を詳しく分析・比較することにより、自然界の物質の循環内での位置付けや、生成経路を明らかにする研究が多くなされてきました。

降水中の酸素同位体比は、同位体高度効果（標高が高くなるにつれ同位体比が低くなる効果）を示します。これは、水蒸気が雨滴として凝結する際に重い同位体が濃縮するため、残された水蒸気の同位体が軽くなるというメカニズムに基づきます。これを図で示しますと、雲が山麓に流れ込んでくると、標高の低い地域では同位体比の高い（重い）水を含んだ雨が選択的に先に降ります（図 3 の①）。

重い同位体を含む雨が先に降り、水蒸気の同位体比が軽くなることで、高い標高帯で降る降雪や山体上部の氷河ほど水の同位体比は低く（軽く）なっていきます（図 3 の②）。

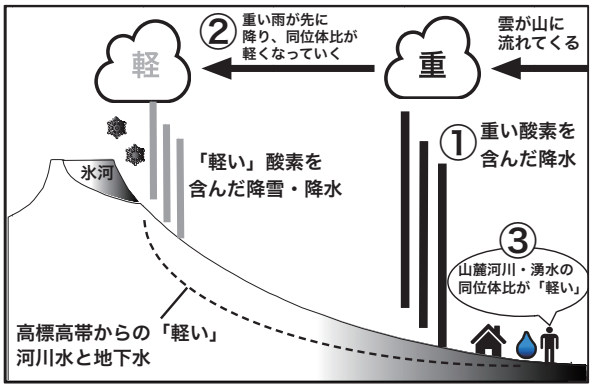


図 3. 同位体高度効果と水の起源把握のメカニズム

本研究では、この高度効果による氷河･積雪と、山麓の降水の同位体比の違いを利用して、山麓湧水・河川水の涵養標高の推定を実施しました。もし、ケニア山の山麓の河川水と地下水の同位体比が、山麓の降水と比較して低く（図 3 の③）、高標高帯の氷河や積雪の値に近ければ、山麓湧水・河川水は氷河地帯から流れてきていることがわかります。

以上のメカニズムを利用し、山麓の湧水・河川水がどの標高帯から流れてきているかを推定し、麓の水資源の起源を明らかにしようと考えました。

3. 山麓の河川水・湧水の涵養標高の推定

実際にケニア山に登り、フィールドワークを行いました。まず驚いたのは標高によって自然環境が目まぐるしく変わることでした。4,000 m 以上の高山帯では岩盤から開放されたばかりの大きな岩や氷河･積雪があり（図 4：a）、4,000 ～ 3,200 m ではジャイアント・セネシオといった半木本植物が多く見られました（図 4：b）。3,200 ～ 2,300 m ではジメジメとした湿気の多い森林帯（雲霧帯ともいう）があり（図 4：c）、そこを抜けると山麓帯があり、乾いた大地が広がります（図 4：d）。

ケニア山の標高ごとに採水した降水サンプルの酸素同位体比（$\delta^{18}O$）は、標高が高くなるにつれ低くなる高度効果を示しました。そこから高度効果直線を算出しました（図 5）。この直線により山麓の水の涵養標高を推定することができました。山麓の湧水の $\delta^{18}O$ の平均値（−3.73‰）を高度効果直線に代入すると（図 5 の①）、涵養標高は 4,916 m となり、また山麓の河川水（−3.03‰）の涵養標高は 4,650 m と推定されました（図 5 の②）。

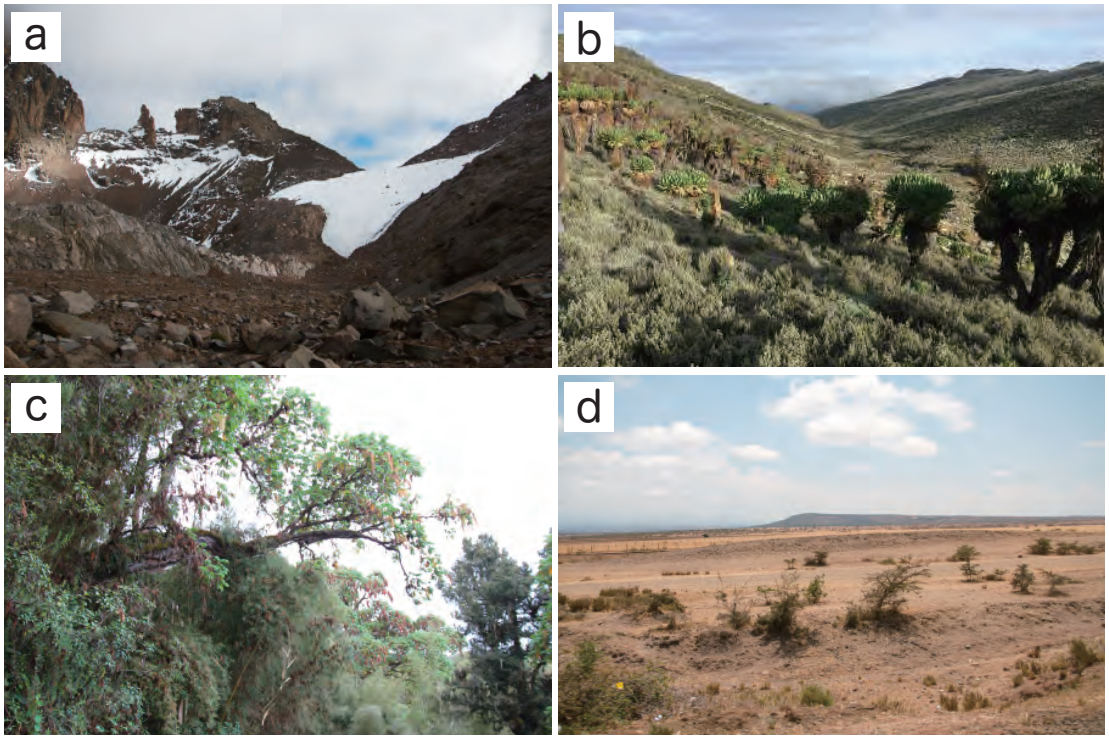


図 4. ケニア山の標高ごとの風景。a）高山帯（>4,000 m）、b）ヒース・湿地帯（3,200–4,000 m）、c）森林帯（2,300–3,200 m）、d）山麓帯（<2,300 m）

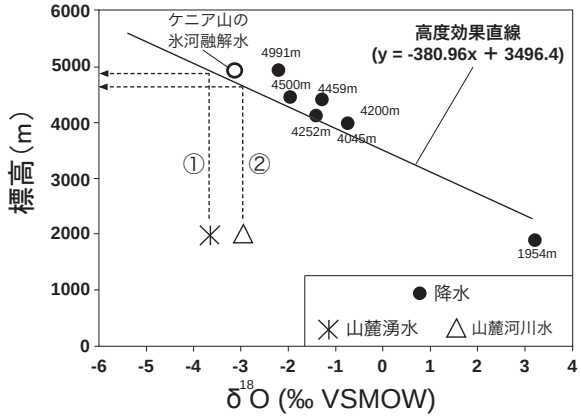


図 5. ケニア山の高度効果と山麓の湧水と河川水の涵養標高の推定

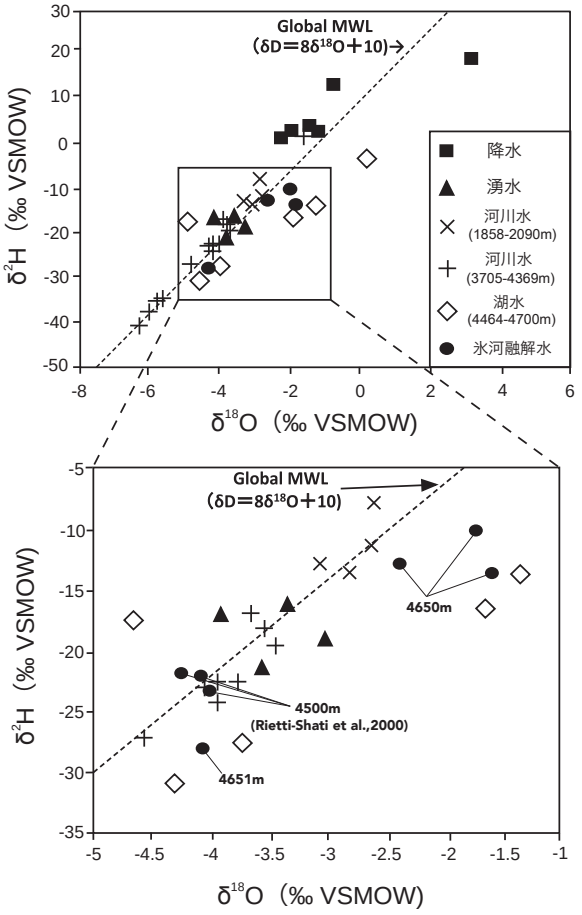


図 6. ケニア山で採水された各種水サンプルの水素（δ^2H）・酸素同位体比（δ^{18}O）

また、降水、湧水、山麓の河川水（1,858 m–2,090 m）、高標高の河川水（3,705 m–4,369 m）、湖水（4,464 m–4,700 m）の δ^{18}O と水素同位体比（δ^2H）をプロットしたものが図 6 です。各サンプルのデータはおおよそ Global MWL（天水線）に沿うことが分かりました。天水線とは世界各地で採水された降水や河川水、湖水といった循環する水の δ^{18}O と δ^2H の間の一定の関係を示す直線のことです。プロットされたデータを見てみると、山麓の湧水や山麓の河川水、高標高の河川水は降水よりもむしろ氷河融解水の値に近いことがわかりました。山麓を流れる水が完全に氷河由来である、ということまでは言い切れませんが、これらの結果から、乾季の山麓湧水と山麓河川水は、中腹の降水よりも、氷河地帯の水が涵養源となっている可能性があることがわかりました（大谷，2018）。

4. 山麓湧水の年代測定

4,900 m 以上の高山帯が涵養源とわかった乾季の山麓湧水に対して、トリチウムという放射性同位体とフロン類を用いた年代測定を行いました。その結果、湧水は山体（約 4,900 m 以上）で取り込まれてから山麓で湧き出すまでに約 40 ～ 50 年かかることがわかりました。図 2 からもわかるように 40 ～ 50 年前のケニア山の 4,900 m 付近にはまだ広大な氷河が存在していました。したがって現在の山麓湧水には過去のケニア山の氷河融解水が寄与している可能性があります。氷河は 10 年以内に消滅する可能性が高いので、それは山麓湧水の涵養源が大きく失われることを意味します。つまり 50～60 年後、地域住民にとって重要な山麓湧水に大きな影響が出てくることが予想されます。

今後は同位体を使った調査のみならず、氷河が失われることで山麓の水資源が量的にどの程度減るのかを水循環モデルを用いて解明しようと考えています。

尚、本研究は筆者の大学院在籍時の研究業績であり、現所属先とは一切関係がありません。

文献

大谷侑也（2018）：ケニア山における氷河縮小と水環境の変化が地域住民に与える影響 . 地理学評論，91（3），211–228.

Hastenrath S (1976): Weitere beobachtungen zu bodenfrosterscheinungen am Mount Kenya.

Zeitschrift für Geomorphologie, 20: 235–239.

Rietti-Shati M, Yam R, Karlen W, Shemesh A (2000) Stable isotope composition of tropical high-altitude fresh-waters on Mt. Kenya, Equatorial East Africa. Chemical Geology 166 (3–4): 341–350. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00233-8

著者情報



大谷侑也（サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社）2020 年京都大学大学院文学研究科地理学専修修了、博士（文学）。2020 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）



大気からの物質負荷

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

豊かな恵みと大気汚染物質を運ぶ北西季節風

佐　瀬　裕　之
（アジア大気汚染研究センター）

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

1. 米どころ新潟

私が働くアジア大気汚染研究センター（ACAP）は、新潟県新潟市に所在しています。新潟県は、豪雪と美味しいお米で有名ですが、それらは密接に関係しています。肥沃な大地や気候条件はもちろんですが、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

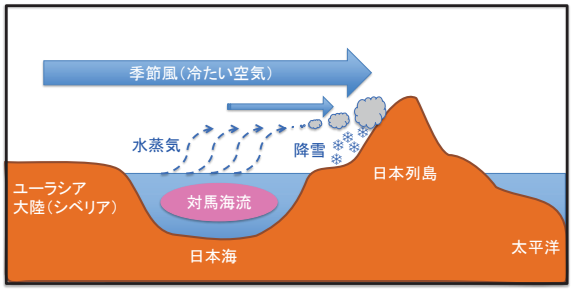


図 1. 日本海側に雪が降る仕組み（十日町市のホームページを参考に筆者が作図）

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。

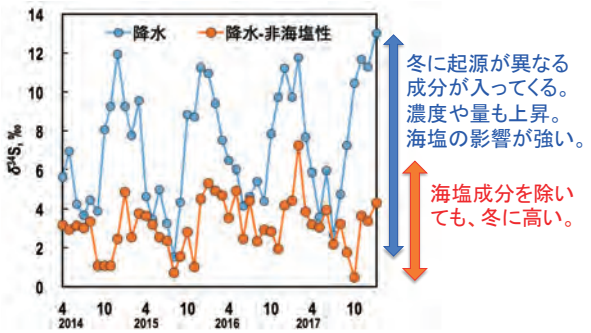


図 2. 加治川試験地（新発田市）での硫黄同位体比の季節変化

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）

越境大気汚染や黄砂の影響をコケの安定同位体比で評価する

大 石 善 隆
（福井県立大学）

1. コケにできないコケ

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

コケが大気環境の指標となる理由については、その水・栄養分の吸収方法が大きく関係しています。実はコケには根が発達せず、体の表面から直接、大気中や雨に含まれる物質を吸収しています。そのため、コケは大気中に浮遊していたり、雨に溶けたりしている汚染物質を容易に吸収してしまうのです。ちなみに、コケを引っ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、他にもさまざまな事情があります。例えば、観測機器を設置・維持するには手間もコストもかかります。そのため、多くの地域で継続的に環境を評価するのは容易ではありません。その一方、野外に生えているコケを利用すれば、効率的に環境を評価することができるのです。

2. コケと大気汚染

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

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

窒素（N）

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

コケに含まれる窒素の起源を探るうえで、窒素同位体比は有用な指標になります。化石燃料（石油や石炭など）の燃焼で発生した窒素や、大気を浮遊する微小な粒子（PM）に含まれている窒素では、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域では、コケの窒素同位体比も高くなりそうです。

鉛（Pb）

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

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

ストロンチウム（Sr）

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

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

3. コケの同位体比と越境大気汚染・黄砂

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

【仮説】西風の影響を受けやすい西斜面では、東斜面と比べて同位体比が高くなる

4. 八ヶ岳におけるコケの同位体比

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

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

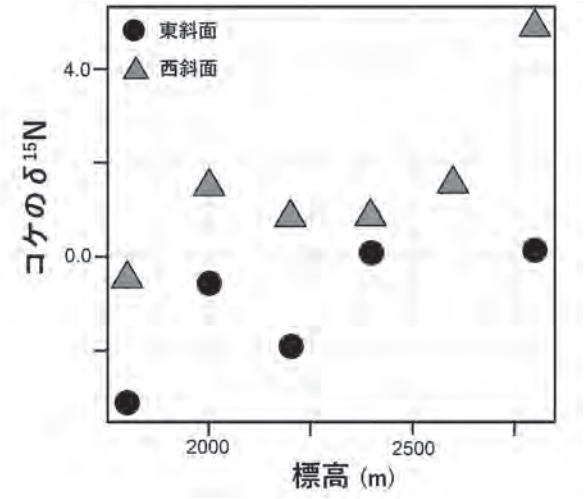


図 1. コケの窒素同位体比（δ^{15}N）と標高・斜面方位との関係
Oishi（2019）の結果の一部（W2、E2 プロット）を利用して作図。

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

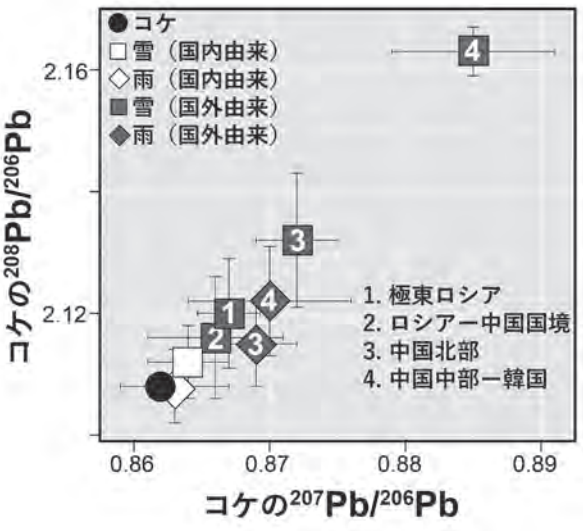


図 2. コケと雪・雨（国内・国外）に含まれる鉛同位体比の比較
Oishi et al.（2021）の Fig. 5 を改変。雪・雨の同位体比については Mizoguchi et al.（2012）、Mukai et al.（1999）を参照。1–4 の番号は、国外の起源となった地域を示す。2020 年度版の【同位体環境学がえがく世界】の図を改変。

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

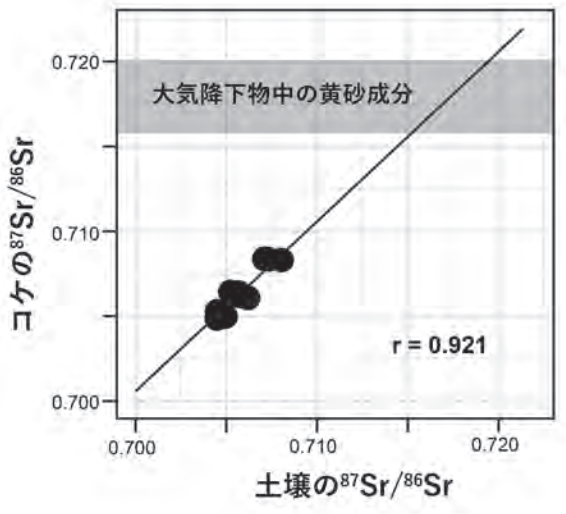


図 3. コケと土壌のストロンチウム同位体比
コケのストロンチウム同位体比は各調査プロットの平均値を用いた。大気降下物中の黄砂成分の値は Nakano et al.（2001）による。Oishi（2021）の結果をもとに作図。

5. コケの同位体比の指標性

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

その一方、ストロンチウム同位体比の値から、コケは主に生育場所の土壌からストロンチウムを吸収しており、その同位体比には大気由来の成分の影響はほとんど反映されていないと結論されました。この理由としては、ストロンチウムは調査地の土壌に高い濃度で含まれており、コケに多く吸収されていたことなどが挙げられます。

6. まとめ

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

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

文献

Mizoguchi T, Jing Z, Satake H, Mukai H, Urano K, Kawasaki K (2012) Lead and sulfur isotopic ratios in precipitation and their relations to trans-boundary atmospheric pollution. Atmospheric Research 104–105: 237–244. https://doi.org/ 10.1016/j.atmosres.2011.10.015

Mukai H, Tanaka A, Fujii T, Zeng Y, Hong Y, Tang J, … Zhai P (2001) Regional characteristics of sulfur and lead isotope ratios in the atmosphere at several Chinese urban sites. Environmental Science & Technology 35: 1064–1071. https://doi.org/10.1021/es001399u

Nakano T, Yokoo Y, Yamanaka M (2001) Strontium isotope constraint on the provenance of basic cations in soil water

and stream water in the Kawakami volcanic watershed, central Japan. Hydrological Processes 15: 1859–1875. https://doi.org/10.1002/hyp.244.

Oishi Y (2019) Moss as an indicator of transboundary atmospheric nitrogen pollution in an alpine ecosystem. Atmospheric environment 208: 158–166. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.005

Oishi Y (2021) Potential use of Sr isotope ratio to evaluate trace metal uptake in moss. Ecological Indicators 121: 107063. https://doi.org/10.1007/s11355-021-00476-5

Oishi Y, Shin K C, Tayasu I (2021) Lead isotope ratios in moss for the assessment of transboundary pollutants in the Yatsugatake Mountains, central Japan. Ecological Research 36: 401–408. https://doi.org/10.1111/1440-1703.12205

著者情報



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

（2020 年 3 月 31 日、2021 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改題、改版、加筆）

森林のカルシウム不足を火山灰が救う

越 川 昌 美
（国立環境研究所）

1. カルシウム不足と森林環境

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

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

本研究は、森林のカルシウム循環への火山灰の寄与評価を目的として行いました。森林のカルシウム供給源を、大気降下物と土壌鉱物に分けたとき、土壌鉱物由来のカルシウムが酸の中和で消費されて不足してくると、大気降下物由来の寄与が相対的に高くなると予想されます。そこで、カルシウムの起源を解析して、森林生態系のカルシウムが十分足りているかを調べることにしました。起源解析には、カルシウムとよく似た性質をもつストロンチウム（Sr）の同位体を使いました。また、より基礎的な研究課題として、大気降下物と基盤岩の 2 成分系の起源解析は行われていますが、そこに火山灰を加えた 3 成分系で起源解析を試みたことが、本研究の特徴です。

2. Sr 同位体比でカルシウムの供給源を調べる

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



図 1. 試料採取地点

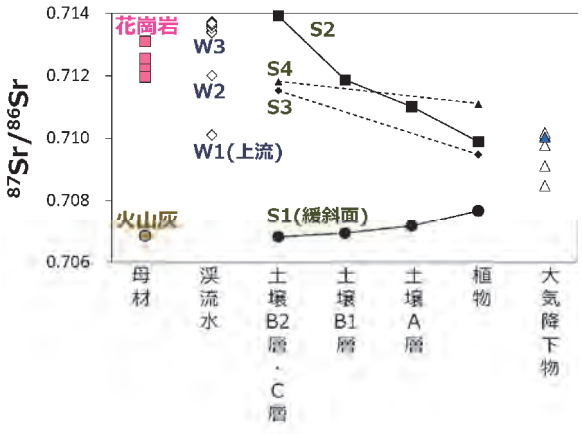


図 2. 森林の各種試料の Sr 同位体比。土壌は層位別[3]に分析した。

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

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

3. 土壌中の火山灰

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

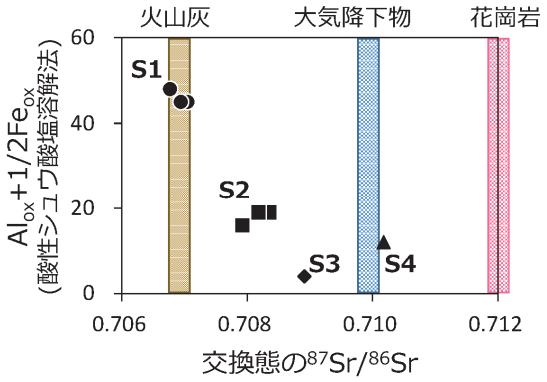


図 3. 土壌の交換態 Sr 同位体比と火山灰の指標（Andic properties）となる値（Al_{ox} ＋ ½Fe_{ox}）の関係

4. 渓流水中の火山灰由来 Sr

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

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

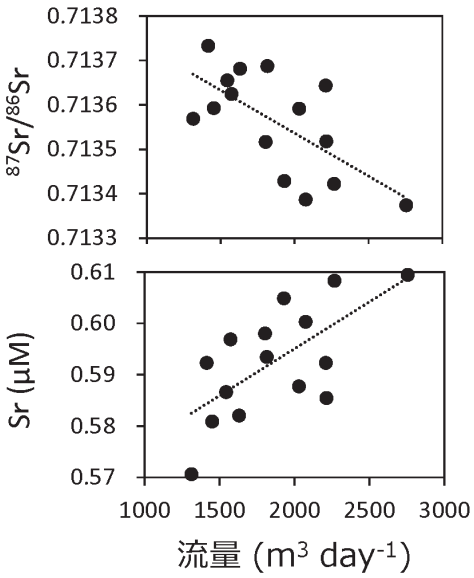


図 4. 渓流水の流量と Sr 同位体比や Sr 濃度の関係

$$(^{87}Sr/^{86}Sr)_{streamwater} = f_{atmospheric}(^{87}Sr/^{86}Sr)_{atmospheric} + f_{granite}(^{87}Sr/^{86}Sr)_{granite} + f_{volcanic\ ash}(^{87}Sr/^{86}Sr)_{volcanic\ ash} \quad \text{Eq. 1}$$

$$f_{atmospheric} + f_{granite} + f_{volcanic\ ash} = 1 \quad \text{Eq. 2}$$

$$f_{atmospheric} = (Sr/Cl)_{atmospheric}/(Sr/Cl)_{streamwater} \quad \text{Eq. 3}$$

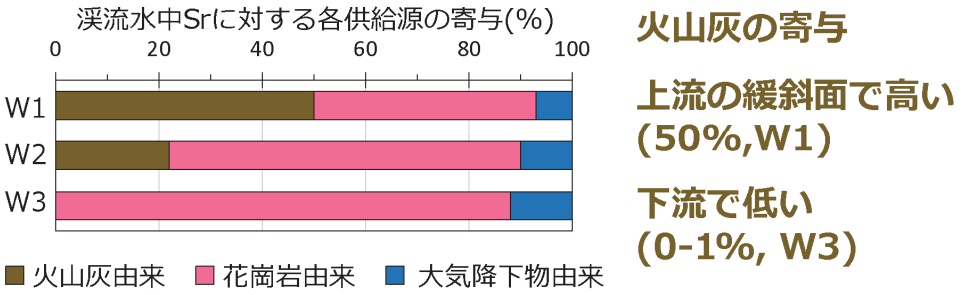


図 5. 渓流水中 Sr に対する火山灰、基盤岩（この場合は花崗岩）、大気降下物の寄与率計算の式と結果

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

5. 植物中の火山灰由来 Sr

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

6. おわりに

以上をまとめますと、まず、山地斜面における火山灰の分布の特徴として、上流の緩斜面の渓流水や植物で火山灰由来の Sr の寄与が高いことがわかりました。Sr 同位体比を用いて、火山灰による Sr 供給の寄与を評価できることがわかりました。次に、大気降下物由来 Sr の寄与が、渓流水で 10–20％、植物で 50％以下であったことから、文献値と比較しても大気降下物由来の寄与はそれほど高くなく、今回の試験地では火山灰や花崗岩による Sr の供給が十分であると考えられました。そして、以上の結果は、カルシウムについても同様と考えられました。

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

注釈

1）土壌に含まれる陽イオン（カチオン）のうち、カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウムを塩基カチオンと呼び、いずれもイオン交換により酸を中和する働きがある。

2）土壌中の陽イオンは、土壌粒子の表面に弱く吸着して水に溶けやすく植物に吸収されやすい形態と、土壌粒子に強く結合して容易に水に溶けない形態で存在し、前者を交換態と呼ぶ。交換態の陽イオンは、土壌を 1 mol/L 酢酸アンモニウムで抽出して分析する。

3）土壌学では土壌は水平に積み重なった層から成り立つとみなす。森林土壌は、堆積有機物層と鉱質土層に分かれ、鉱質土層は上から順に A 層（腐植に富む）、B 層（腐植が乏しい）、C 層（基盤岩の礫に富む）に分かれる。

文献

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

著者情報



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

（2021 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改版）



水質と物質循環、集水域特性

河川や湖沼の水は、周りからいろいろな元素が流れ込んで来たり、生息する生物が元素を取り込んだりするため、絶えず変化していきます。水の中に溶け込んでいる、たくさんの元素の量を測ったり、同位体比を測定したりすることで、物質の起源や現場で起きているプロセスを推測することができます。これらについて、具体的な研究を見てみましょう。

沿岸域の地下水の水質と安定同位体比から見えてくる水質形成の仕組み

― 仙台市宮城野区の調査事例の紹介 ―

藪 崎 志 穂
（総合地球環境学研究所）

1. はじめに

“海の水は塩辛い”。海で泳いだことのある人はもちろん、海にほとんど行ったことが無い人にとっても、これは公然の事実でしょう。波打ち際に広がる砂浜の砂を掘ってしみ出てくる水も、もちろん塩辛い海の水です（ただし、ある特定の場所では、海岸の砂浜から真水が湧くこともあります）。それでは、海岸近くの土地に井戸を掘った場合、その水はどんな味がするのでしょうか。砂浜と同じく、塩辛いのでしょうか。それとも、普段私たちが飲んでいる水道水のように、無味なのでしょうか。

私たちは宮城県仙台市宮城野区の海岸近くに位置する新浜（しんはま）地区という場所にある複数の井戸を調査し、水質の特徴について調べました。この一帯は、今から約 11 年前の 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の津波による浸水被害を受けた場所です。七北田川（ななきたがわ）と名取川（なとりがわ）に囲まれた新浜地区の近くの海岸には約 10 km におよび砂浜が広がり、夏には海水浴場として利用され沢山の人々で賑わっていました。海岸の近くには多くの住宅が建てられており、また、江戸時代はじめごろから建設された運河（貞山堀）に沿うように松林が広がっていました（図 1）。しかし、大地震の後に発生した津波によって、住宅や電柱、海岸沿いにあった砂防林などが流され、道路が損壊し、畑や水田にも海水がかぶり、住民の方々は長い間よその場所で避難生活を送っていました。その後、長い時間をかけて、損壊した建物や道路、



図 1. 貞山堀と松林（仙台市若林区荒浜海岸付近、2011 年 1 月 4 日撮影）

堤防などの修復が行われ、現在は元の場所に戻り生活をしている住民が多くいます。

新浜地区では、震災前から自家用の井戸を持っている家が多く、生活用水や家庭菜園、洗車などに利用されていました。津波によって破損してしまった井戸もありましたが、その後、新しく作り直すなどして、震災後も井戸水を利用されている方が多くいます。これらの井戸の水質を測定することで、2011 年の津波による塩水化の有無や、この周辺地域の本来の地下水の水質について知ることができます。更に水の安定同位体比や CFCs[1)]、SF_6[2)] などの分析を行うことで、水の涵養域や滞留時間について把握することができると考えられます。なお、涵養とは降水が地表面から地下に浸透し帯水層（地下水）に水が供給されることを意味しており、涵養域とは涵養が生じる場所のことを指しています。また、滞留時間とは降

水が地下に浸透して帯水層（地下水）に達したときを 0（ゼロ）とし、地下水が地中を流動して、ある場所に到達するまでにかかった時間のことです。簡単に言えば水の年齢に相当します。これらの情報は、今後の持続的な地下水利用を行うためにも重要な情報です。なお、水質組成図や滞留時間推定法に関しては 3 章の「地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法」でも紹介していますので、ご参考にしてください。

本研究では仙台市宮城野区の沿岸に近い集落の井戸（浅井戸 1 か所、深井戸 5 か所）と水路を対象として調査を行い、それぞれの水質の特徴や季節変化、水質形成について明らかにすることを目的として調査や採水を行いました。調査地点の位置図を図 2 に、調査地点の概要を表 1 に示しました。なお、地下水等の現地調査は 2018 年 12 月から毎月実施しており、現地では EC（電気伝導率）、pH、水温を測定しています。無機溶存成分や微量元素、安定同位体の分析用として、250 mL 容器に水試料を採取しました。また、滞留時間推定のための CFCs や SF_6 分析用の採水も 2019 年 1 月に実施しました。本稿では特に 2018 年 12 月～2019 年 12 月に実施した調査結果について紹介します。

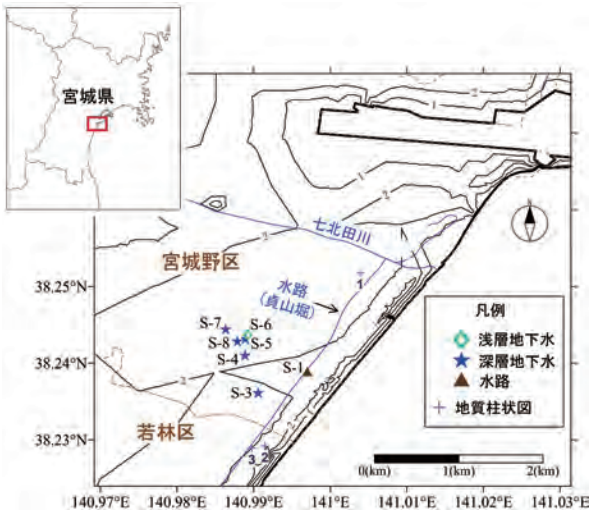


図 2. 調査地点の位置図

表 1. 調査地点の概要

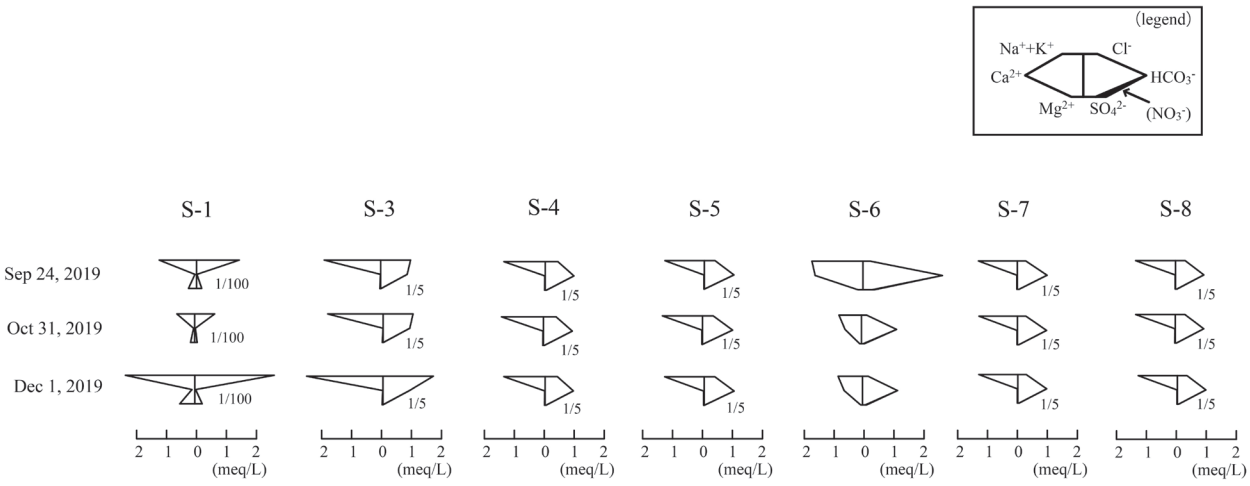
地点 No	緯度 °N	経度 °E	標高 m (a.s.l.)	種別	井戸深度 m
S-1	38.236	140.995	2.3	運河	–
S-3	38.236	140.991	0.9	深井戸	30.0
S-4	38.241	140.989	0.9	深井戸	28.0
S-5	38.243	140.989	1.0	深井戸	30.0
S-6	38.244	140.989	1.1	浅井戸	3.1
S-7	38.244	140.986	1.0	深井戸	30.0
S-8	38.243	140.988	1.3	深井戸	34.0

2. 無機溶存成分の特徴

採水した地下水および水路の水試料について、陰イオン（F^-, Cl^-, NO_2^-, Br^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}）と陽イオン（Li^+, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}）はイオンクロマトグラフ（ICS-3000 または ICS-6000）、HCO_3^- は pH4.8 アルカリ度滴定法を用いて分析しました。これらの分析結果を利用して、2019 年 9 月～ 12 月に採水した試料の水質組成図（シュティフダイアグラム）を作成しました（図 3）。シュティフダイアグラムは水質組成の特徴や溶存成分量を一目で把握することができ、複数地点の比較もしやすいという利点があります。

水路（S-1）の水質組成は Na-Cl 型で溶存成分量は多く、海水の水質に近い特徴を有しています。しかしながら、水路の溶存成分量は海水よりも少なく（海水の 1/10 ～ 1/2 ほど）、時期によって濃度が変化するため、河川水や降水（場合によっては浅層の地下水も含む）と混合していることが伺えます。

浅層地下水（S-6）は（Na+Ca）-HCO_3 型を示し、溶存成分量は水路や深層地下水と比較して相対的に少ないです。この結果から、少なくとも調査時においては、2011 年の津波による塩水化の影響は生じていないことが明らかです。また、時期によって水質組成（特に溶存成分量）が変化しており、例えば図 3 では 2019 年 9 月と 10 月の間で変化しています。2019 年 10 月には非常に多くの降水があり、気象庁の AMeDAS データ（https://www.jma.go.jp/jma/index.html）によると、仙台の観測地点で 644.5 mm（観測史上 1 位）、名取の観測地点で 555.0 mm（同 1 位）を記録しています。S-6 の井戸深度は 3.1 m と浅いため、多量に降っ



* S-1は1/100表示, S-3, 4, 5, 7, 8は1/5表示

図 3.　水質組成図

た雨水の浸透の影響を受けて地下水の水質が変化したと考えられます。10 月のシュティフダイアグラムの成分量は 9 月と比べて減少している点においても、降水の混合による希釈の結果として矛盾がありません。

深層地下水では 2 種類の水質組成が認められます。S-4、5、7、8 の 4 地点では Na-HCO_3 型であるのに対し、S-3 では Na-（Cl+HCO_3）型となっており、他の深層地下水よりも Cl^-（塩化物イオン）濃度が高くなっています。S-3 は他の井戸よりも沿岸近くに位置する井戸のため、海水、あるいは海塩の影響が水質に影響を与えていることが予想されます。また、深層地下水の水質はいずれの地点もほぼ一定しており、Na^+ と HCO_3^- 濃度が相対的に高い水質組成を示すことから、降水の影響は受けず、比較的長い滞留時間を有していることがわかりました。

3.　酸素と水素の安定同位体比の特徴

各地点の酸素安定同位体比（$\delta^{18}O$）と水素安定同位体比（δ^2H）を CRDS 法（Picarro L2130-i）により測定し、結果を用いて δ-diagram を作成しました（図 4）。この図には、S-1 ～ S-8 のデータのほかに、参考として調査対象地域の近傍で採取した海水の同位体比もプロットしています。

水路（S-1）や浅層地下水（S-6）の同位体比は溶存成分量と同様に変動が大きく、降水の影響を受けていると考えられます。S-1 の回帰線は $\delta^2H = 6.41\delta^{18}O-0.155$（$r^2$=0.995）となっており、この回帰線の延長線上に海水がプロットされています。従って、δ-diagram の結果においても S-1 は海水との混合があることを示唆しています。また、S-1 の同位体比の変動が大きいのは、降水の影響に加え、時期により水路の水に混入する海水の量（割合）が大きく変化していることに起因していると考えられます。海水の同位体比は相対的に高いため（$\delta^{18}O$、δ^2H ともに約 0‰）、即ち、海水の量が多くなると、水路の同位体比は相対的に

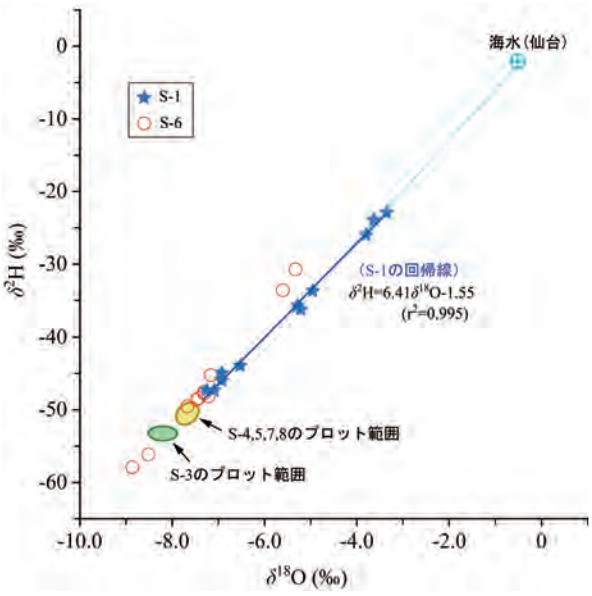


図 4.　δ-diagram

高い値を示すことになります。一方、降水の同位体比は降水イベントによって異なるため、その時々の降水同位体比の影響を受けて浅層地下水の同位体比は上昇または低下することになります。

深層地下水（S-4、5、7、8）の同位体比はほぼ同じ値となっていますが、S-3 は他の地点よりも若干低くなっています。酸素と水素の安定同位体比が異なる要因として、他の水塊との混入や蒸発の影響などがありますが、涵養域の標高の違いもその一つです。一般的に、涵養域の標高が高いと地下水の同位体比は低くなりますので（同位体の高度効果）、S-3 は他の地点よりも涵養域の標高が高いことが予想されます。

また、「2. 無機溶存成分の特徴」で説明した S-3 の水質形成要因では、海水や海塩の影響がおよんでいるのではないかと推察しましたが、仮に地下水に海水が混入した場合には、海水の同位体比は地下水よりも相対的に高い値であるため、地下水の同位体比も高い値を示すことになります。ところが、上述したように、S-3 の同位体比は他の深層地下水の地点よりもやや低い値を示しており、この結果から S-3 の地下水に海水自体が混入している可能性は低くなります。そのため、海水の混入ではなく、海塩が混入して Cl^- 濃度が高くなっている可能性が高いと考えられます。では、この海塩の起源は何であるのか、という疑問が残ります。先行研究によると、この地域には地下に化石海水があることが報告されており（内田ほか、2005）、こうした化石海水が地層中の鉱物等に吸着し、その成分（海塩）が地下水に溶出することで、地下水の Cl^- 濃度が高くなる説明がつきます。しかしながら、この要因についてはまだ不明瞭であるため、他の分析データを用いるなどして、今後も検討を進めてゆきます。

4. 地下水の滞留時間

持続可能な地下水利用をおこなうためには、地下水の滞留時間（涵養されてから流出するまでの時間の長さ）を把握することが重要となってきます。滞留時間を推定するためには幾つかの方法がありますが、本研究では地下水の CFCs と SF_6 の濃度を測定して、過去の大気中の CFCs と SF_6 濃度と比較することで地下水の滞留時間を推定する方法を利用しました。2019 年 1 月に深井戸 4 地点で採取した水試料について CFCs と SF_6 の分析を実施し、モデルを用いて検討した結果、これらの深井戸の滞留時間の推定値は 70 年前後であることがわかりました。この結果は、深層地下水の水質組成の特徴とも矛盾がありません。

5. 今後の研究の展開について

溶存成分と酸素・水素の安定同位体比の測定結果から、仙台市宮城野区の沿岸付近の浅層地下水と深層地下水の水質の特徴や、地下水と海水および降水との関係を明らかにし、水質形成について把握することができました。沿岸に近い深層地下水の水質には海塩の影響がおよんでいる可能性が認められましたが、浅層地下水および深層地下水ともに 2011 年の津波による塩水化は生じていないことも把握できました。

本稿では仙台市宮城野区の海岸近くに位置する民家井戸の調査結果を中心に紹介しましたが、本調査地点の近く（沿岸域）に新たに設置した深度の異なる 3 か所の観測井の調査も 2020 年 2 月から開始しており、海水と地下水の相互作用について考察を進めています。また、溶存成分や水同位体比に加え、ストロンチウムの同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）等の測定も行い、複数のトレーサーを利用して、仙台市沿岸域の水質形成や地下水の涵養域、地下水流動について更に検討する予定です。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤（A）、課題番号：18H04146、研究代表者：黒沢高秀 福島大学教授）の助成を受けて実施しています。調査では福島大学 柴崎研究室の学生さんに調査・採水を行っていただきました。また、井戸の調査については、新浜地区の住民の皆さまに快くご協力

いただきました。沿岸近くのビオトープ井戸の調査では、東北学院大学 教養学部の平吹喜彦教授に大変お世話になりました。ここに記して、深く御礼申し上げます。

注釈

1）クロロフルオロカーボン類（Chlorofluorocarbons）といい、CFC-11、CFC-12、CFC-113 などがあります。冷却剤や洗浄剤などの工業用として 1930 年代に人工的に生成された有機化合物で、化学的に極めて安定な性質を持つため、放出された CFCs は大気中に蓄積されました。年代によって大気中の CFCs 濃度が異なるため、水中の CFCs 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。

2）六フッ化硫黄（Sulfur hexafluoride）のことで、電気や電子機器などの縁ガスとして 1960 年代から利用されている気体です。化学的に非常に安定な性質を持っており、大気中の濃度は現在も増加しています。CFCs と同様に、水中の SF_6 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。CFCs と比較して、より新しい水（滞留時間が 10 年よりも短い水）の年代推定が可能です。

文献

Yabusaki S, Yamamoto R, Shibasaki N（2022）Seasonal variation in groundwater quality revealed by the multi-tracer near the coastal area of Sendai, Japan. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources., 35 (3), 192–201. https://doi.org/10.3178/jjshwr.35.192

内田洋平・安川香澄・天満則夫・大谷具幸・森康二（2005）仙台平野における地下温度構造に関する研究　その 1．3 次元地下水流動・熱輸送広域モデルの構築．日本地熱学会誌，27（2），115–130. https://doi.org/10.11367/grsj1979.27.115

著者情報



藪崎志穂　筑波大学大学院博士課程生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学、地下水学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

（2022 年 3 月 31 日掲載）
（2023 年 3 月 31 日改版）

直下型地震に伴う地下水の流れの変化を同位体で追う

谷 水 雅 治[1]、細 野 高 啓[2]
（[1]関西学院大学生命環境学部、[2]熊本大学理学部）

地下水は、飲料水、農業用水、工業用水など幅広い用途に利用される重要な水資源です。地下水の水質低下を防ぐためには、様々な化学成分の変化を監視し、人為的および自然由来の化学汚染物質の流入を検出することが重要となります。自然由来の化学物質の混入には、沿岸帯水層における海水の浸入による塩水化や、火山活動が盛んな地域での熱水成分の混入によるヒ素やフッ素濃度の上昇などの例があります。また、地震も地下水の水質変化の引き金となることがあります。地下水に溶存する主要イオン濃度、微量元素濃度、安定同位体比を分析することで、地震活動に伴う地下水の化学組成変化を説明した研究がいくつかありますが、溶存微量元素の安定同位体比を用いた研究はこれまでほとんど行われていません。

2016 年 4 月に発生したマグニチュード（Mw）7.0 の熊本地震に伴う地下水の変化を観測井戸で調査した結果、震源地周辺の地下水面の低下は地下の開口亀裂の生成に伴うことが示唆されました。また、地下水涵養域の水位上昇は周辺の山岳帯水層からの水の放出によって説明されることが、H_2O 分子の $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ 安定同位体分析に基づき、明らかとなりました。一方で、局所的には震源地付近のいくつかの井戸で塩化物イオン（Cl^-）、硫酸イオン（SO_4^{2-}）、ホウ素（B）濃度などの上昇が観測されましたが、これらの成分の起源は特定されていません。

本研究では、地下水中に微量に溶存するリチウム（Li）とホウ素（B）をトレーサーとして利用し、$^{7}Li/^{6}Li$ と $^{11}B/^{10}B$ の同位体比を用いて、熊本地震に伴う地下水の変化を評価しました。海水、停滞地下水（化石地下水）、熱水には、浅層地下水と比較してリチウム（Li）とホウ素（B）が高濃度に含まれています。また、$^{7}Li/^{6}Li$ と $^{11}B/^{10}B$ の安定同位体比は、同位体間の相対的な質量差が大きいため、δ スケールで大きな変動を示します。例えば、$\delta^{7}Li$ は −15‰ から +50‰、$\delta^{11}B$ は −30‰ から +60‰の範囲を示し、海水中で最も高く、火山岩や大陸地殻の岩石では低い値をとることが知られています。

熊本市周辺の地下水は、日本最大の資源保有地域であり、飲料、農業、産業活動などの目的に使用され約 100 万人の生活の基盤を支えています。この地域の地下水は、阿蘇カルデラ西麓と周辺の高地での雨水の浸透によって供給されており、地下水は地形に沿って南西へ流動し、そのほとんどが熊本市内の江津湖周辺において湧出しています。また、平野部や沿岸部には、地下水流動が停滞している地域も見られます。

採水地点は図 1 の熊本地域の地図上に記したように、東から西への主要な地下水の流れの方向に沿った、4 つの井戸（T11、T12、T34、T40）と江津湖の湧水地です。そのうち T11 は主要な流れの末端である平野部に位置し、布田川断層と Mw7.0 本震の震源の近くに位置しています。さらに沿岸域の 2 地点（T21 と T45）、北側の涵養域の 1 地点（T41）で採水を行いました。第 1 回目の調査は、2015 年 9 月 7–9 日にかけて、2 回目は本震から 4.5ヶ月後の 2016 年 8 月 28–29 日に実施しました。

東側と北側の主要な流れに沿った合計 6 つの地下水試料は、Ca-HCO_3 型の地下水であり、活発に流動していることが示唆されました。一方、沿岸部の 2 試料は停滞した地下水の特徴を持つ Na-HCO_3 型でした。地下水の主要元素組成には、地震の前後で明らかな変化は見られませんでした。

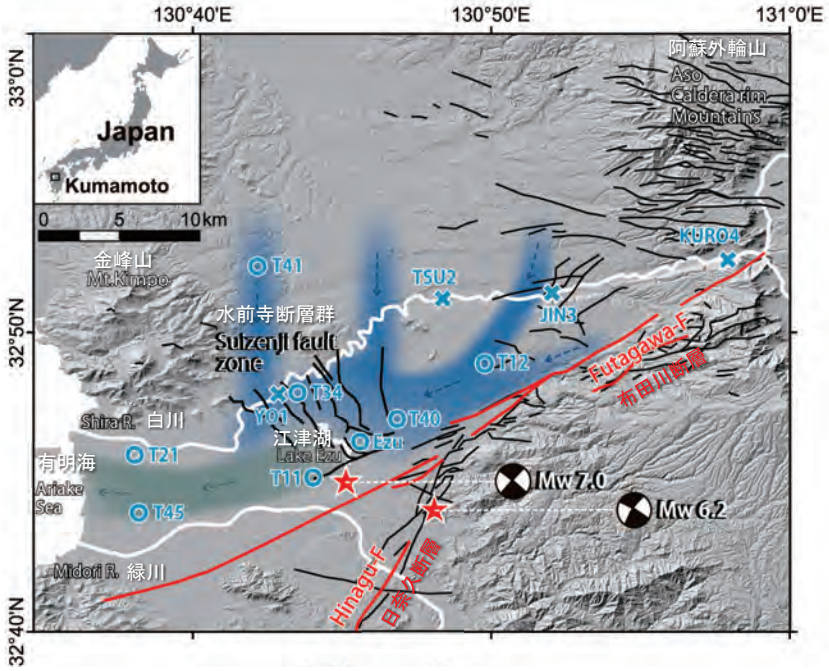


図 1. 熊本地域の主要地下水流動方向と採水井戸の地点

水試料の分析データ（表 1）を Cl-B-Li の相対濃度図（図 2）によりさらに化学的分類を行うと、沿岸部（T21、T45）とそれ以外の地下水試料では、組成に明らかな違いがあることが確認されました（図 2 の白丸）。つまり、沿岸部の試料はほとんど B コーナーにプロットされましたが、その他の地下水試料は図の中央部にプロットされたことから、岩石学的な違いや地下水の滞留時間の違いを反映していると考えられます。

現代海水、停滞地下水、熱水はいずれも塩化ナトリウムに富むため、これら三者を主溶存成分から区別することは容易ではありません。しかし、ホウ素とリチウムといった微量元素と塩化物イオンの相対存在量を表す Cl-B-Li 組成図では、それぞれのコーナー近くに塩水性、停滞性、熱水性という 3 タイプの地下水が特徴的にプロットされるため、地下水に混入した他起源の地下水の同定に有効です。沿岸域の地下水（T21 と T45）においてB が増加する傾向は、海水組成とは別に、地下に存在する海洋堆積物中の水を含む粘土鉱物に由来する層間水の寄与があると解釈しました。

地震後の主要地下水流動域では、Cl-B-Li 図において、Cl/(B+Li) 比が相対的に増加し、Cl のコーナーへわずかにシフトしたことによる（図 2 の黒丸）、明らかな化学変化が見られました。一方、沿岸域では逆方向へのシフトが起こっており、異なったプロセスが働いていることが示唆されました。ただし、Cl-B-Li 図では、本研究対象地域地下水の Li と B の濃度が低いため、地震に伴う水質変化はおおまかな傾向であり、主流動域と沿岸域で異なる 2 つの水質変化のメカニズムが存在することを示したに過ぎません。

このメカニズムを明らかにするために、δ^{7}Li と δ^{11}B の変化を見ていきます。地震前、B コーナー（図 2）の周辺にプロットされた 2 つの沿岸地下水試料（T21 と T45）は、高い δ^{7}Li（+42.7‰ と +29.1‰）と δ^{11}B（+27.7‰ と +23.2‰）の値を示し（表 1）、海水由来の成分の値を反映していることが分りました。しかし、このことは、Cl-B-Li 図の現代海水（図 2 の四角）に示されるように、海水（δ^{7}Li で +31‰、δ^{11}B で +40‰）そのものが沿岸地下水へ直接混入しているとは言い難く、その代わりに、両 δ 値が高い、過去の海成堆積物から絞り出された海水由来成分の寄与によって引き起こされたものと考えられました。これに対して、主要流動域の地下水では、δ^{7}Li が約 +10‰、δ^{11}B

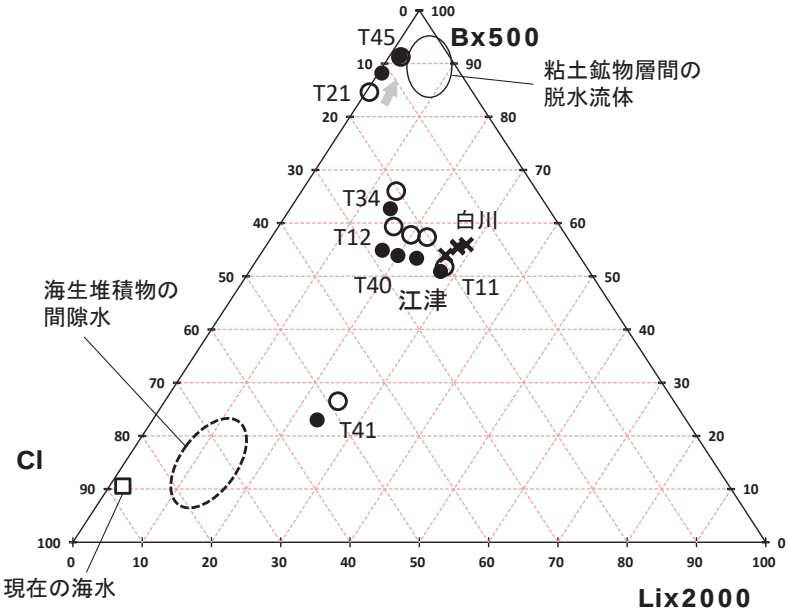


図 2. 地下水の Cl-B-Li 図

表 1. 化学分析データ

試料名	深度（m）	採水年	pH	EC（mS/m）	Eh（mV）	DO（mg/L）	Cl（mg/L）	B（mg/L）	Li（mg/L）	δ^{11}B（‰）	δ^{7}Li（‰）
第二帯水層											
T11	110	2015	8.12	19	−90	0.06	8.1	0.041	0.0055	4.0	20.0
		2016	8.34	21	309	1.37	9.5	0.045	0.0061	2.7	16.0
		2017						*0.040*	*0.0055*	*5.0*	*18.4*
T12	90	2015	7.47	24	432	7.86	8.1	0.040	0.0028	3.7	7.2
		2016	7.12	24	440	8.37	9.4	0.037	0.0029	3.1	7.5
T34	65.4	2015	8.51	39	−5	0.08	13.4	0.087	0.0045	5.1	15.7
		2016	7.57	38	131	0.60	14.2	0.078	0.0045	6.9	13.9
T40	70.8	2015	6.93	23	410	7.62	8.3	0.043	0.0037	3.3	7.3
		2016	7.31	27	394	6.12	9.7	0.040	0.0037	3.1	7.9
Ezu	—	2015	8.38	22	429	7.56	8.1	0.046	0.0045	3.1	8.6
		2016	7.04	23	437	8.25	9.1	0.041	0.0044	3.0	8.5
		2017						*0.047*	*0.0056*	*2.8*	*7.5*
第一帯水層											
T21	15	2015	8.47	161	190	1.67	159.4	1.81	0.0026	27.7	42.7
		2016	8.68	139	379	1.52	113.4	1.77	0.0024	24.9	40.5
T45	10	2015	9.57	137	112	0.08	45.2	1.17	0.0055	23.2	29.1
		2016	9.44	156	83	0.67	52.6	1.35	0.0057	22.6	29.6
T41	60	2015	6.52	24	68	0.03	12.8	0.014	0.0033	22.0	−2.6
		2016	7.20	24	274	1.08	13.9	0.012	0.0031	22.7	−1.5
白川											
YO1	—	2018	7.71	30	449	8.99	13.2	0.074	0.009	0.7	11.2
TSU2	—	2018	8.20	34	378	8.86	14.1	0.093	0.012	0.5	10.9
JIN3	—	2018	8.00	35	382	8.58	15.3	0.102	0.013	0.6	9.9
KURO4	—	2018	7.80	35	405	8.85	14.3	0.105	0.013	1.1	9.4

が約 +4‰と比較的均一な値を示し、これは、この地域の火山性堆積物からなる帯水層、もしくはこの地域を流れる主要河川である白川（図 1 の X 印）の δ 値（δ^{7}Li が約 +10‰、δ^{11}B が約 +0‰；表 1）のいずれかを反映していると思われます。

地震後に発生した沿岸部の地下水試料（T21）の化学的変化（図 2）は、δ^{7}Li および δ^{11}B データからも確認されました（表 1）。これは柔らかい堆積物の液状化現象に起因する可能性があります。T21 周辺の浅い帯水層（深さ 10 m 程度）は、沿岸の帯水層／堆積物の化学組成のなかで、T45 に似た化学組成および同位体組成の間隙水の混合の影響を受けており、Cl 濃度の低い地下水が地震による液状化でできた新しい経路を通って垂直あるいは水平方向に運ばれて混合した結果であると結論付けました。

これに対して、主要流動地域地下水の Li-B 同位体比は地震発生後、ほとんど変化しませんでしたが（表 1）、震源地周辺、すなわち T11 井戸では、わずかな同位体比変化が検出されました。この井戸水の両同位体が本震後 4.5ヶ月で低い δ 値側に動いたことは、Li と B の濃度の上昇に関連しています。この変化をさらに確認するために、2017 年 3 月に T11 井戸の追加採水を行った結果、地震後 11ヶ月後には濃度、同位体比ともに元の値に近づいていることが確認されました（表 1）。

このような高 Li・B 濃度の地下水には、塩分を含む停滞水と、深部からの熱水という 2 つの候補があります。沿岸の地下水のような前者の流体が混入した場合、δ^{7}Li 値と δ^{11}B 値は増加するはずですが、逆の結果が観測されました。従って、停滞水の混合は考えにくく、両 δ 値が低い値を持つ熱水が妥当であると示唆されました。2016 年の熊本地震後、布田川断層の東側延長線上の阿蘇カルデラ内で、新たな熱水性深部流体が地表に流出したことが報告されており、布田川断層の南西端に近い位置にある T11 観測井へ、同じ起源をもつ熱水の寄与が考えられます。

T11 観測井周辺では、地下約 1,000 m から温泉が汲み上げられているため、地震に伴って、帯水層（厚さ 250 m 程度）に比べてより深い場所から流体が浅層地下水と混合したと考えられました。これにより、最初に述べた震源地周辺で地震後に認められた Cl^{-}、SO_4^{2-}、B 濃度の上昇が生じたと解釈できます。

T11 地下水と阿蘇カルデラで湧出した熱水の間で、Li と B の濃度およびその同位体比が異なることから、震源地周辺の浅い地下水帯水層への熱水由来の深部流体の寄与が小さいながら存在することを明らかにすることができました。また、地震後の熱水の浅層地下水への混合割合は、数％と計算されました。たとえ寄与が小さくても、Li と B の同位体比を指標として用いると、その同位体比は海水、停滞地下水、熱水で明瞭に異なることから、浅層帯水層へのこれらの他起源地下水の混合を高感度に同定することができました。

地震発生に伴い池や井戸の水が枯れる、または水位が上昇するなどの変化は、これまで多くの地域で記述されてきました。これらの原因を特定するためには、観測地点の存在が重要となります。ところが、特に内陸直下型地震の場合、地震が起こった地域でたまたまこれら観測点が時空間的に整っていることは一般的に希だといえます。また、災害発生前と発生後のデータを比較するために必要な各種データが揃っているケースはますます少なくなります。このような背景から、地震によってどのような地下水環境の変化が生じるのかという問いに対し、私たちはこれまであまり明瞭なイメージを持てていませんでした。熊本地域では多くの観測井戸が存在し、水位や水質など様々なデータが継続的に観測されています。今回、こうした地域の直下で巨大内陸地震が発生したため、結果的に地震発生前後の各データを比較できる十分な情報を入手でき、地震による地下水環境の変化をこれまでになく詳細に捉えることに繋がりました。

文献

M. Tanimizu, N. Sugimoto, T. Hosono, C. Kuribayashi, T. Morimoto, A. Ito, R. Umam, Y. Nishio, K. Nagaishi, and T. Ishikawa (2021) Application of B and Li isotope systematics for detecting chemical disturbance in groundwater associated with large shallow inland earthquakes in Kumamoto, Japan. Geochem. J., 55, 241–250. DOI: 10.2343/geochemj.2.0633

T. Hosono, C. Yamada, M. Manga, C.-Y. Wang, and M. Tanimizu (2020) Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. Nature Comm., 11, #2776. DOI: 10.1038/s41467-020-16604-y

著者情報



谷水雅治　関西学院大学生命環境学部・教授。専門は同位体地球化学。無機質量分析法を駆使して、地球表層でのさまざまな元素の物質循環を把握する研究を行ってきた。



細野高啓　熊本大学大学院理学研究科･教授。専門は同位体環境学。各種同位体などを用い、流域における環境問題の実態把握や原因究明に関する研究を行ってきた。

（2023 年 3 月 31 日掲載）

塩類の起源に迫る
― 農地が汗をかくと塩を吹く ―

久　米　　崇
（愛媛大学大学院農学研究科）

1. はじめに

乾燥地域の農地では、土の表面に真っ白な塩が吹くことがあります。これを塩類集積といいます。

土には様々な要因により多量に塩類を含んでいるものがあります。例えば、そもそもの地質に多量の塩類を含むことがあげられます。また、昔海底であった場所が土砂堆積などで陸地になった場合、土の中に多量の海水が閉じ込められ塩類が残存していることがあります。このように、土の中には歴史的な経緯によってさまざまな理由で塩類が存在しています。

塩類、特に塩化ナトリウムなどは、作物の大敵です。作物によって程度の差はありますが、塩化ナトリウムが土の中に多量に存在すると、多くの作物は枯れてしまいます。したがって、適切に農地の塩類を管理する必要があります。

その際に重要なのは、塩類の起源を明確にすることです。土の中の塩類がどこから来たのかがわかれば、どのような対策・管理をすればよいのかを考えやすくなります。そこで本稿では、安定同位体を用いて塩類の起源を推定する方法を紹介します。

2. 農地の塩類集積

農地の塩類集積はどのようにしておきるのでしょうか。私たちが真夏にスポーツをして大量に汗をかくと、黒いＴシャツの背中に白く塩を吹くことがあります。農地でも同じことがおきます。

作物を育てるために人為的に農地に水を供給することを「かんがい」といいます。また、その水をかんがい水といいます。土の中に多量の塩類が存在している農地にかんがいを行うと、かんがい水の中に塩類が溶けます。乾燥地のように激しく水が蒸発する農地では、塩類を溶解したかんがい水は、毛管現象により土の表面へ移動し蒸発していきます。その際、水は蒸発して大気中に霧散しますが、塩類は再結晶して土の表面に集積します。

このようにして、スポーツ後のＴシャツのように、農地が汗をかく（水が蒸発する）と塩を吹く（塩類集積する）ことになるのです。

3. ストロンチウム安定同位体による塩類起源の推定

ここでは、ストロンチウム（以下、Sr）という重金属元素の安定同位体を用いて、海水起源の塩類がどの程度農地土壌に含まれているのかを推定することにします。

Sr には、複数の安定同位体があります。ここでは、質量数 87 と 86 の安定同位体の比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）（以下、Sr 同位体比）を用いることとします。その理由は、海水の Sr 同位体比は世界中どこの海から採取したものでも 0.70918 であることが分かっているからです。

大雑把ではありますが、ある水サンプル中における Sr のうち、海水起源の Sr が大半を占めていれば、その水サンプル中の塩類の主な起源は海水である（海水の影響を大きく受けている）と考えることができます。本稿では、このような考え方のもとで Sr 同位体比による塩類起源の解析を進めます。

4. 研究対象地域の概要

ここで紹介する研究成果（Kume et al., 2010）は、総合地球環境学研究所プロジェクト「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」において筆者が実施したものです。

このプロジェクトは、トルコ共和国のセイハン川流域（図 1）を対象として実施されました。流域の下流に位置するアダナ市周辺は大規模かんがい農地の開発が行われています（図 2）。筆者は、このかんがい農地の上流から下流の水の流れと塩類の移動の観測・解析を担当しました。

対象とするかんがい地域は上流にダムを有し、セイハン川とかんがい水路を通じて農地へかんがいを行っています。ここでは、不要なかんがい水を排除するための排水路が至るところに張り巡らされています。図 2 に示すように 3 つの灌漑ブロックがあり、それぞれに幹線排水路が設置され、排水は地中海に排出されます。下流域の土は塩類化の傾向を示しており塩類集積が認められていました。



図 1. トルコ共和国とセイハン川流域

5. 排水中の塩類の起源をみる

農地には人間活動によって水だけでなく様々な物質が供給されます。図 3 に示すように、排水路には、降水、肥料、農薬、かんがい水、地下水、そして場合によっては海水が浸入します。つまり排水は様々な起源から供給された塩類が混合した水ということになります。

対象地域には、先に述べたように幹線排水路が 3 つ設置されています。これらの排水路の末端における排水には、それぞれの排水ブロックからの排水が混合し、その特徴が色濃く反映されているはずです。そこで、混合理論を使って、それぞれの起源から供給された塩類の混合比を求めることで、塩類の起源を明らかにすることにします。

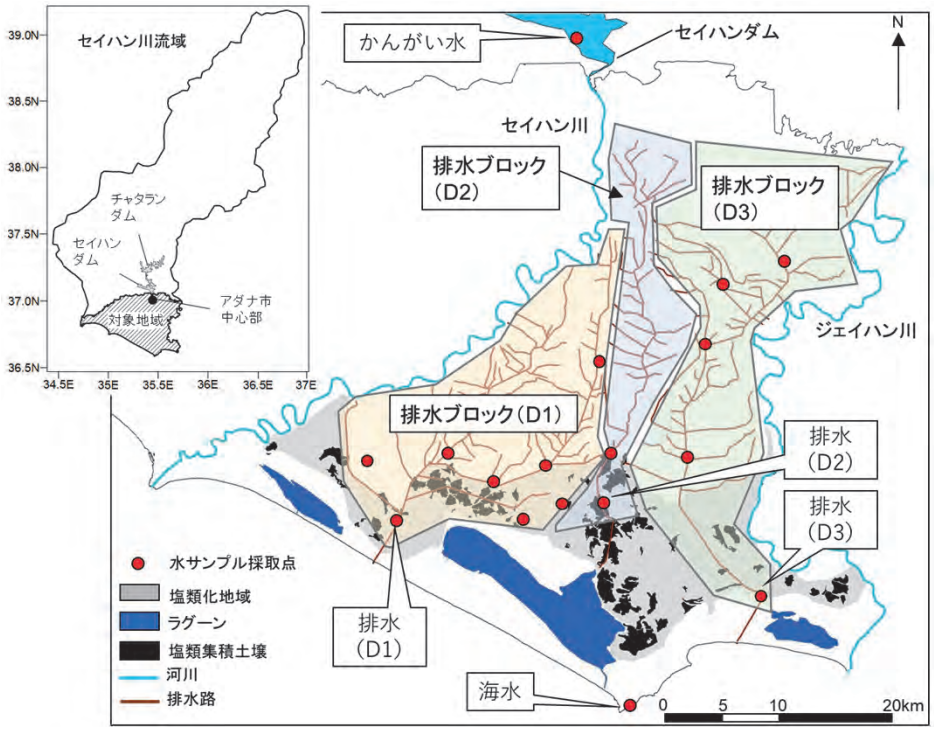


図 2. 研究対象地域と各種サンプリング地点

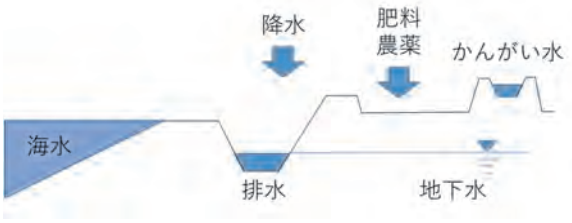


図 3. 農地におけるさまざまな水・物質起源

6. 主要な起源は何か

排水中にはさまざまな起源からもたらされた塩類が混合しています。そのすべてを対象とすることは難しく現実的ではありません。そこで、次の理由から 3 つの起源に注目をします。

まず一つ目は海水です。対象地域は、昔海面下にあり海水塩の影響を大きく受けているはずです。また、地中海沿岸部は、海水浸入を受けていることからも海水塩は対象とするかんがい農地における主要な起源の一つと考えられます。

二つ目はかんがい水です。対象地域の農地には、春から夏にかけて大量のかんがい水が供給されます。かんがい水中の塩分濃度は低くても、それが大量になれば相当量の塩類が農地に供給されることになります。

そして三つめは肥料です。農地には大量の肥料が毎年投入されます。ここに含まれる塩類は相当な量であると推測されます。

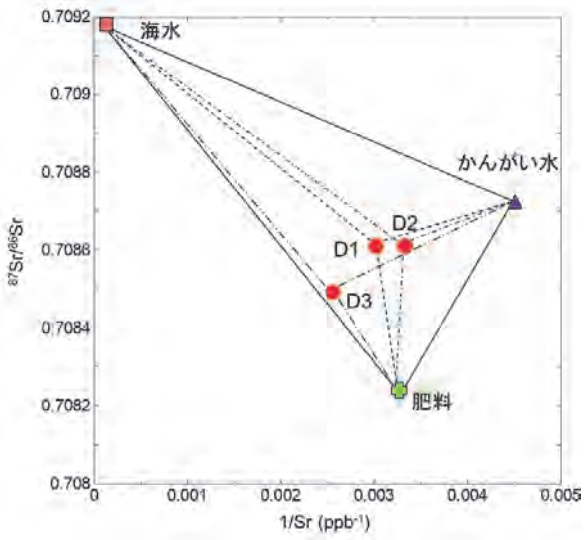


図 4. 各サンプルの Sr 同位体比と Sr 濃度（夏季）

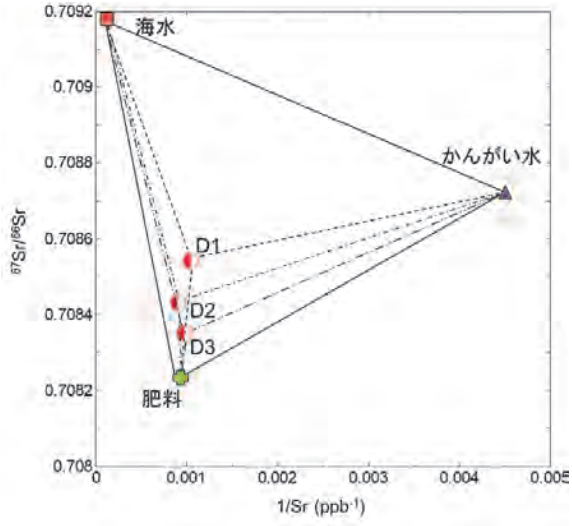


図 5. 各サンプルの Sr 同位体比と Sr 濃度（冬季）

7. 解析の方法

対象地域では春から夏にかけて大量のかんがい水が農地に供給されます。一方、秋から冬には供給されません。したがって、夏季と冬季では、排水に含まれる塩類の混合比が異なる可能性があります。そこで、ここでは夏季と冬季それぞれの混合比をみていきます。

まず、各種サンプルを室内に持ち帰り、Sr 濃度と Sr 同位体比の測定を行います。そして図 4、5 に示すように海水、かんがい水、肥料そして 3 つの排水路（D1、D2、D3）から採取した排水の Sr 濃度の逆数と Sr 同位体比をプロットします。

図 4、5 に示すように夏季、冬季のいずれにおいても、排水のプロットがすべて海水、かんがい水、肥料を結んだ三角形の中に入っています。このような場合、混合理論（Faure and Mensing, 2005）にもとづいた次の連立方程式を解くことで、海水、かんがい水、肥料それぞれから各排水に供給された Sr の混合比（割合）を計算することができます。

$$1 = f_{海} + f_{か} + f_{肥} \quad (1)$$

$$1/Sr_{排} = 1/Sr_{海} f_{海} + 1/Sr_{か} f_{か} + 1/Sr_{肥} f_{肥} \quad (2)$$

$$Sr比_{排} = Sr比_{海} f_{海} + Sr比_{か} f_{か} + Sr比_{肥} f_{肥} \quad (3)$$

ただし、$f_{海}$, $f_{か}$, $f_{肥} < 1$

ここで、Sr 同位体比（Sr 比と表記）と 1/Sr（ppb^{-1}）はそれぞれ図 4、5 の縦軸と横軸に示した既知の測定値です。そして、添字の「*海*」、「*か*」、「*肥*」、「*排*」はそれぞれ、海水、かんがい水、肥料、排水を示します。*f* は未知数であり、求めるそれぞれの混合比（割合）です。この連立方程式に夏季、冬季におけるサンプルの実測値を代入して計算を行いました。

8. 塩類の起源（＝混合比）の解析結果

図 6 は D1、D2、D3 それぞれの夏季における海水、かんがい水、肥料の混合比を示しています。D1 の排水中には、海水起源の Sr が 6%、肥料起源の Sr が 28%、そしてかんがい水起源の Sr が 66% 含まれていました。D2 と D3 の排水路には海水起源の Sr がそれぞれ 3%、2% 含まれていたことがわかります。

夏季は、上流のダムから供給されるかんがい水が多量なため、その中に含まれている Sr が農地から排水路に排水されていきます。その影響がとても大きいということになります。また、肥料も大量に農地に投入されます。肥料は、かんがい水によって溶解され不要な肥料分はやはり排水路に排水されます。このような理由から、夏季における混合比は、どの排水路でもかんがい水と肥料が大きな値を示したと考えられます。

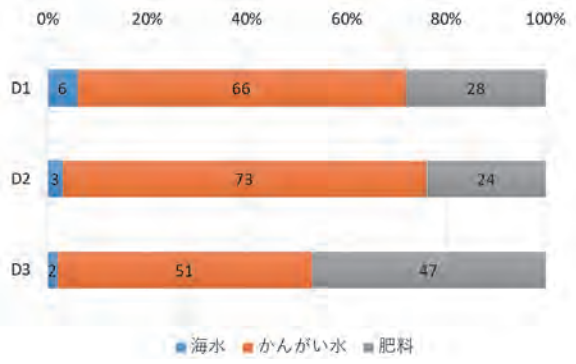


図 6. 各排水における塩類の混合比（夏季）

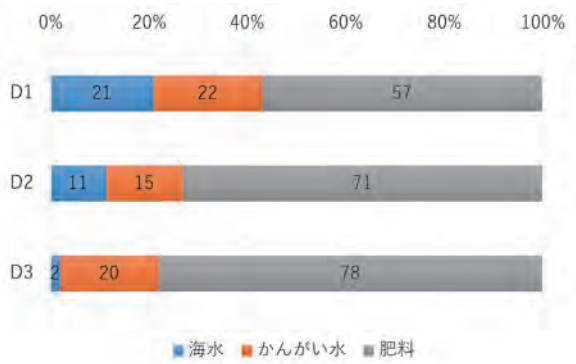


図 7. 各排水における塩類の混合比（冬季）

次に、図 7 を見てみましょう。これは冬季における混合比です。夏季とは違って、それぞれの排水中に含まれる海水起源の Sr に明確な違いがみられました。D1 では排水中に含まれる海水起源の Sr は 21% でした。夏季は 6% でしたから 3 倍以上も増加したことになります。D2 も海水起源の Sr が 3% から 11% に増加していました。D3 は夏季と同じ 2% でした。

冬季における Sr の混合比の違いの原因は何でしょうか。それは、土の塩分濃度にあると考えられます。D1、D2 の排水路には、図 2 に示すように排水ブロック中に多くの塩類集積農地の存在（図中の黒く塗られている箇所）が認められます。一方、D3 の排水ブロックにはほとんど塩類集積農地が認められません。

夏季には、これら塩類集積農地から排出された塩類は大量のかんがい水によって希釈されるため海水の混合比は小さくなります。しかし、冬季はかんがい水による希釈がなくなるので、排出された塩分濃度が混合比にそのまま表れてくるのです。つまり、土は海水の影響を受けており、海水起源の塩類が排水路に排出されてくるのです。肥料の混合比が夏季に比べて冬季に大きくなるのも同様の理由です。

9. おわりに

本研究で示したように、塩類集積が発生している農地における海水塩の影響を Sr 同位体比と Sr 濃度を用いて解析することで定量的に明らかにすることができました。海水、かんがい水、肥料、そして排水にはそれぞれ固有の Sr 同位体比があ

り、それを質量分析器で測定することができます。

農地における複数の排水路から排水サンプルを採取し、その Sr 同位体比を測定するだけでも明確に異なる値が得られるはずです。それをもとにして、各農地の塩分起源の差異を簡便に診断することもできるでしょう。

さらに応用すれば、津波や台風などによって沿岸域農地に海水が被った際に、土中水や排水などの Sr 同位体比を測定することで、陸域における海水の影響評価を実施することができます。

この塩はどこから来たのだろうか。またどこへ行くのだろうか。そんな疑問に対して科学的に答えを示してくれる Sr 安定同位体比はとても魅力的なものだと思いませんか。

引用文献

Faure, G. and Mensing, T.M. Isotopes, Principles and applications (Third edition), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005

Takashi Kume, Erhan Akca, Takanori Nakano, Takanori Nagano, Selim Kapur and Tsugihiro Watanabe, 2010, Seasonal Changes of Fertilizer Impacts on Agricultural Drainage in a Salinized Area in Adana, Turkey, Science of the Total Environment, vol. 408, issue16, 3319–3326, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.028

著者情報



久米　崇（愛媛大学大学院農学研究科准教授）2004 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士（農学）。総合地球環境学研究所プロジェクト上級研究員、鳥取大学乾燥地研究センタープロジェクト研究員、総合地球環境学研究所プロジェクト上級研究員・特任准教授を経て、2012 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

混合比から読み解く富士川濁水の起源と行方

鷹　野　真　也
（総合地球環境学研究所）

1. はじめに

「富士川の濁りが近年強くなってきている」

そんな声が流域に住む方々から届きました。

濁りがなぜ強くなったのか？　発生源は何なのか？下流や河口、海に棲む生き物への影響は？　これからどうなってしまうの？　等々、考えてもわからないことだらけ。地域住民の不安は募るばかりです。

こんな時には、同位体を用いた環境トレーサビリティ手法が解決の糸口になるかもしれません。色々とわからないことばかりなら、まずは物事のベースとなる部分を押さえることが大切です。ここでは、濁りがどこからどれだけ来たのか（またそれはどこへ行くのか）、つまり濁りの起源を知ることがそれにあたります。本稿では富士川の濁りの起源をストロンチウム（Sr）同位体比を用いて推定した研究例を紹介します。

2. 富士川の濁り問題

富士川は主に山梨県と静岡県を南流し駿河湾へ注ぐ一級水系です（図 1）。もともと日本三大急流河川に数えられるほど流れが速い、つまり土砂運搬能力が高い河川であり、流域の崩れやすい地質も相まって比較的濁りが発生しやすいことで知られています。

その富士川で、近年濁りが少しずつ強くなっていることが観測され（たかはし河川生物調査事務所，2016）、特に富士川の主要支流の 1 つである早川（及び早川水系の雨畑川；図 1）から強い濁りが何度も見られるようになりました。時を同じくして、富士川中下流部におけるアユの目撃数の減少や、駿河湾でのサクラエビの不漁等が報告されるようになり、富士川の濁りが水圏生態系へ与える影響の懸念が強まり始めました。

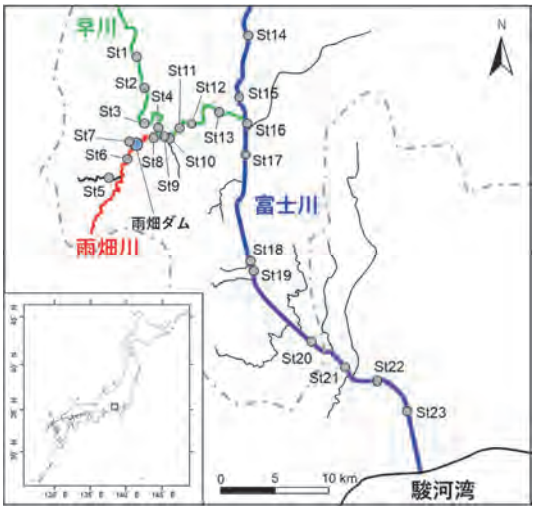


図 1. 富士川中下流域の調査地点。一点鎖線は山梨県と静岡県の県境を示しています。

ここで、特に強い濁りが見られた早川と雨畑川が富士川の濁りの発生源ではないかという疑いがかけられました。確かに早川と雨畑川からは見るからに強い濁水が流れていました（図 2a）。しかし一方で、早川と合流する前の富士川の水も充分濁っているように見えます（図 2b）。では実際のところ、早川・雨畑川由来の濁水が合流後の富士川に対してどれだけ寄与しているのでしょうか？その割合を Sr 同位体比と同位体マスバランス（混合理論）を用いて推定しました。

3. 富士川濁水の起源を解くために ― 調査と手法

調査は 2021～2022 年の期間に月 1～2 回程度、早川と雨畑川を含む富士川中下流域の最大 23 地点で実施しました（図 1）。各地点で河川水と河川水中の懸濁物質（SS: Suspended Solids）、及び河床堆積物を採取し、それらに含まれる Sr 濃度と Sr 同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）を測定しました。（$^{87}Sr/^{86}Sr$ について、詳しくは第 3 章「重元素同位体」をご覧下さい）

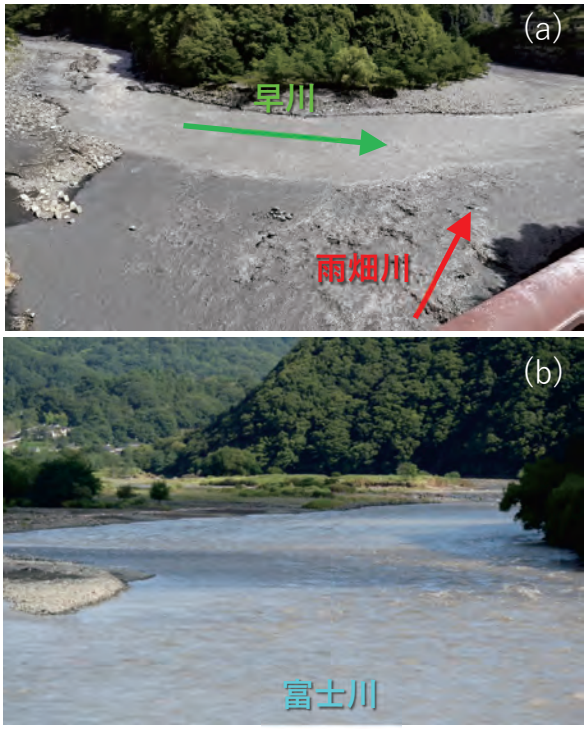


図 2. 早川・雨畑川（a）と早川合流前の富士川（b）の濁りの様子（2021 年 8 月 19 日撮影）

測定したサンプルの Sr 濃度と Sr 同位体比から、同位体マスバランスモデル（混合理論）を用いて混合比（割合）を求めます（Faure and Mensing, 2005）。この理論では、異なる Sr 濃度と Sr 同位体比をもつ 2 つの成分（A と B）の混合体 M とした時、縦軸に $^{87}Sr/^{86}Sr$、横軸に Sr 濃度の逆数（1/Sr）をとると、A と B のプロットを結んだ直線上に M のプロットが分布します（図 3）。この関係を用いて、M の中の A と B の混合比を推定します。詳しい式や計算方法は注釈として稿末に記載しましたので、興味があればぜひご覧下さい[1)]。

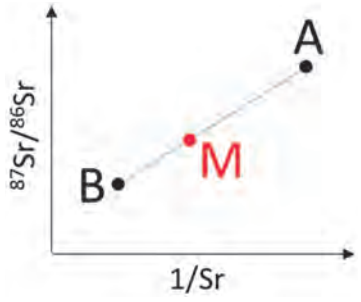


図 3. $^{87}Sr/^{86}Sr$-1/Sr 濃度ダイアグラム上での成分 A と B、その混合体 M の関係

4. 三つの産地（雨畑川と早川上流、及び富士川上流）のブレンド

河川水と河川水中の懸濁物質（以下、SS と表記）の Sr 濃度と Sr 同位体比を $^{87}Sr/^{86}Sr$-1/Sr 濃度ダイアグラムにプロットしたものを図 4 に示しました。わかりやすい例として、河川水と SS ともに 2021 年 7 月に採取したサンプルのデータを使用しました。

まず河川水と SS ともに、雨畑川と早川上流（雨畑川との合流前）のプロットを結んだ直線（緑の破線）上に早川下流（雨畑川合流後）のプロットが分布しました。そして早川下流と富士川上流（早川との合流前）のプロットを結んだ直線（青の破線）上に富士川下流（早川合流後）のプロットが分布しました。これらのことから、雨畑川、早川上流、及び富士川上流を主要な成分（端成分）とした混合体として、合流後の河川水と SS が構成されていると考えられます。つまり、先述の混合理論からそれぞれの混合比を求めることができます。

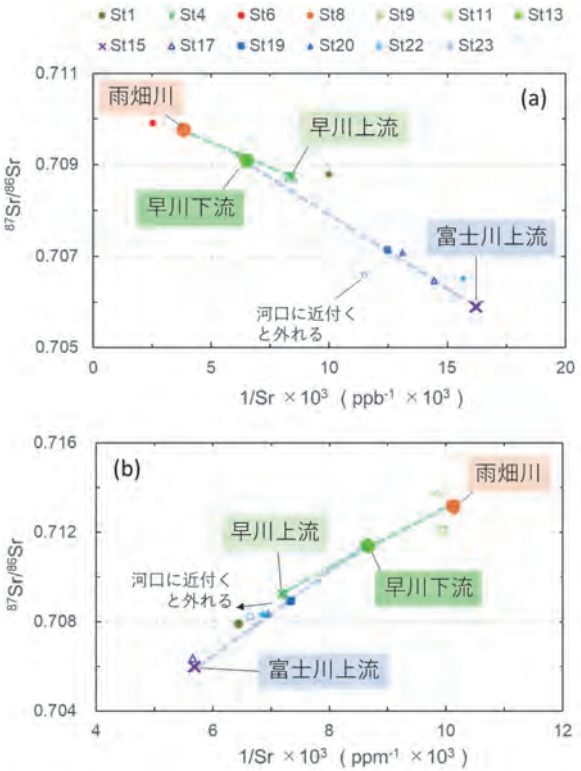


図 4. 河川水（a）と SS（b）の $^{87}Sr/^{86}Sr$-1/Sr 濃度ダイアグラム。ともに 2021 年 7 月採取サンプル。

ちなみに、河川水と SS ともに富士川河口付近のプロットが青の破線から外れました。これは河口に近付くにつれて下流域由来の他の成分が混入したことによるズレと考えられます。

5. 混合比から濁水の起源と行方を読み解く

上記実測値と混合理論から、富士川下流における雨畑川と早川（上流及び水系全体）、及び富士川上流由来の成分の混合比を計算し、調査期間全体のデータを図 5 にまとめました。同様に河床堆積物についての混合比と、流域面積比も同図に示しています。データに少し幅があるものは中央値で議論しています。

まず河川水の混合比を見てみましょう。平時（低水位）の富士川下流河川水では、早川水系全体と雨畑川由来の水の割合がそれぞれ約 13% と約 4% でした。降水後の高水位時には、それらの割合はそれぞれ約 24% と約 10% に上昇しました。これは早川水系が国内でも屈指の降水量を誇る南アルプスを源流部に持つためと考えられます。この河川水の混合比は、やや幅があるものの流域面積比と同程度の割合を示しました。

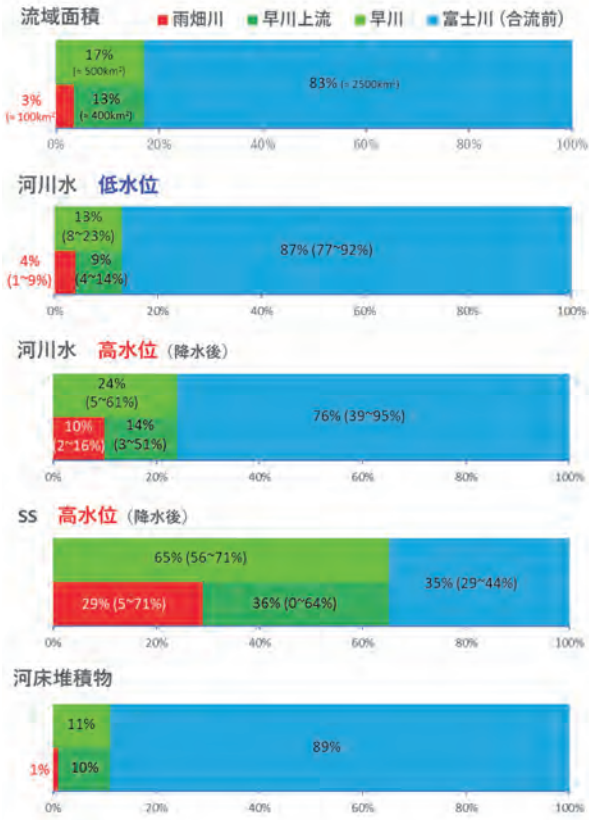


図 5. 河川水、SS、及び河床堆積物の混合比と流域面積比

一方、SS の混合比を見てみると、早川水系由来が 60% 以上、そのうち約半分を雨畑川由来が占めていることがわかりました。これらは河川水や流域面積の割合と比べてかなり高く、早川水系由来の SS が富士川濁水の主要供給源であることを示唆しています。（裏を返せば、30% 程度は富士川上流由来であるとも言えます）

また、河床堆積物における混合比も推定したところ、早川水系由来と雨畑川由来がそれぞれ 11% と 1% 程度と、他と比べて最も低い割合を示しました。河床堆積物は一般的に河川による土砂運搬の履歴を反映していると考えられていますが、この結果から早川水系由来の SS は河床にあまり堆積していない可能性が示唆されました。つまり、早川水系由来 SS は富士川濁水の主要供給源であるものの、堆積しにくく大部分が駿河湾へ流出している可能性が考えられます。

6. おわりに

本研究では、富士川の濁水がどこから来てどこへ行くのかを、Sr 濃度と Sr 同位体比を用いて定量的に明らかにしました。富士川の高濃度の濁水は、流域の水棲生物の生育環境にとって悪影響を及ぼし得るものですが、河床に泥として堆積・残留している（またそれに伴う二次的な弊害の）可能性は低いのかもしれません。一方、濁水が流入する駿河湾の海洋生物への影響も懸念されているため、富士川の濁りの状態を今後注視し対策を講じる必要があります。

今後の課題として、この富士川（早川水系）の濁りの中から人為的影響（ダムや採石場の影響、産業廃棄汚泥の不法投棄など）を検出できるかどうかを現在検討しています。この濁水は天然要因（土砂崩れ）だけでなく人的要因の影響も少なくないのではないかという懸念があり、より詳細な発生源の解明が求められています。今回の Sr 同

位体を用いた手法からそれが可能なのか、はたまた他の同位体や元素濃度を用いたアプローチなら解決できるかどうか。まだ糸口を探っている段階ですが、良い報告ができるよう研究に邁進していきたいと思います。

また、“水質と物質循環、集水域特性”の「塩類の起源に迫る ― 農地が汗をかくと塩をかく ―（久米崇さん）」にて、本研究と同様に Sr 濃度と Sr 同位体比から混合比を求めた研究例（こちらは 3 成分の混合比計算です）が紹介されています。Sr 同位体比の混合理論を用いた手法の理解が深まると思いますので、ぜひ併せてご覧下さい。

注釈

1） 混合理論では、異なる Sr 濃度・Sr 同位体比をもつ 2 つの成分（A と B）の混合体 M とした時、M の Sr 同位体比を以下の式で表すことができます。

$$R_M = R_A f_A \left(\frac{Sr_A}{Sr_M}\right) + R_B(1 - f_A)\left(\frac{Sr_B}{Sr_M}\right)$$

ここで R_M、R_A、R_B、は M、A、B の Sr 同位体比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）を、Sr_M、Sr_A、Sr_B は M、A、B の Sr 濃度をそれぞれ示しています。また、f_A は M 内の A の存在比（割合）を示しています（つまり 1–f_A は M 内の B の存在比を意味します）。この式は R_M が Sr_M の逆数（つまり $1/Sr_M$）の一次関数であることを表しています。要するに、縦軸に $^{87}Sr/^{86}Sr$、横軸に Sr 濃度の逆数（1/Sr）をとると、A と B のプロットを結んだ直線上に M のプロットが分布します（図 3）。また、上記の式を変形して以下のように f_A を求め、混合比を推定します。

$$f_A = \frac{R_M Sr_M - R_B Sr_B}{R_A Sr_A - R_B Sr_B}$$

文献

たかはし河川生物調査事務所（2016）平成 27 年度 天然アユを指標とした富士川の環境保全調査報告書.

Faure G and Mensing T M (2005) Isotopes: Principles and Applications (third ed.), John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey.

著者情報



鷹野真也（総合地球環境学研究所 環境トレーサビリティ特定推進研究 研究員）2019 年北海道大学大学院環境科学院博士後期課程単位取得退学。2020 年学位取得（環境科学）。北海道大学学術研究員を経て、2021 年より現職。

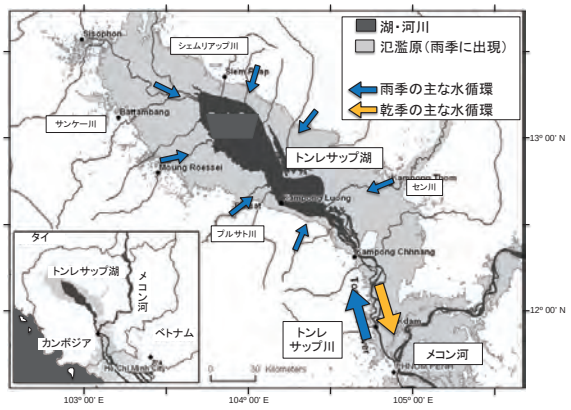
（2023 年 3 月 31 日掲載）

トンレサップ湖水系の地表水循環
― 多元素分析による解析で見えてきたこと ―

吉　川　　尚
（東海大学海洋学部）

1. トンレサップ湖の環境変化

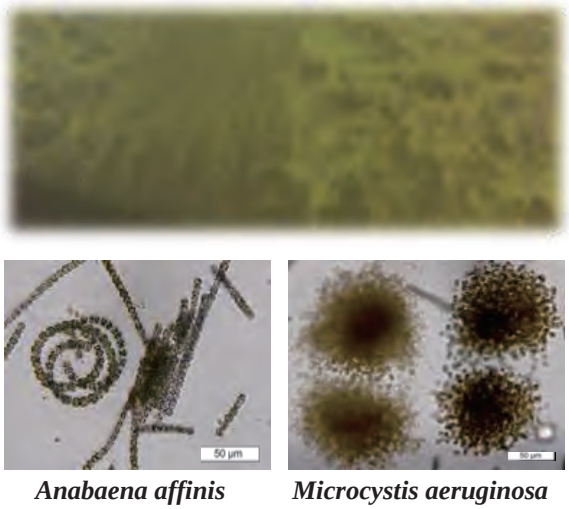
カンボジアにあるトンレサップ湖は、東南アジア最大の淡水湖で、琵琶湖の 4 倍（乾季の面積比）もある広大な湖です。雨季には、メコン河からの水がトンレサップ川を経由して湖内に大量に流入し、湖から溢れ出した水により広大な氾濫原が出現します（図 1）。地元住民にとって、トンレサップ湖とその氾濫原は、漁業や農業、水運等の産業を支えるだけでなく、古くから歴史・文化を育んできた大切な存在です。



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 1. トンレサップ湖の地表水循環の概要。雨季にはメコン河からの水が流入し、逆に乾季には湖水が流出する。また、雨季には広大な氾濫原が出現する。

しかしながら、近年、そのトンレサップ湖の環境や生態系が大きく変化しています。まずは、人口増加を背景とする水質汚濁・過剰漁獲・土地開発等といった、主に湖や氾濫原の内部に起因する変化があります（図 2）。それらのうち水質汚濁は、生活・産業排水中に含まれる様々な物質が、河川等を通じて湖に流入することで起こります。次に、トンレサップ湖の場合、国際河川であるメコン河水系の一部をなしており、より大きな空間スケールの影響もあります。例えば、メコン河上流部で中国やラオス等が大規模ダムを設置することで、メコン河や湖の水位が不安定化したり、氾濫原が縮小する等の影響が懸念されています。一方で、トンレサップ湖の水質の変化は、下流域にあるベトナムのメコンデルタの水質・生態系に影響を与えている可能性もあります。さらに、地球規模の気候変動により、湖水の集水域における降水量の変化も懸念される等、トンレサップ湖の現状と将来は楽観視できない状況にあります。



Anabaena affinis*　　*Microcystis aeruginosa

図 2. 乾季の湖北部でみられたアオコ（上）。富栄養化により藍藻（下）が異常発生し、湖面が緑色に着色していた。

2. ICP-MS による湖水や河川水の多元素分析

こうした環境変化が懸念されるトンレサップ湖で、私たちの研究チームは、水質と地表水循環について調べました（Yoshikawa et al. 2020）。具

体的には、湖水や周辺の河川水を採取してその元素組成を分析しました。生物の身体は様々な元素で構成されており、必要な元素が環境や食物中に不足していると、それ以上増えることができません。逆に、過剰な量の元素や有毒な元素の存在は、生物の生存に有害です。つまり、湖水の元素組成を調べることで、湖の生態系の健全性に関する基礎情報が得られます。さらに、湖水の元素組成を周囲の河川水と比較することで、湖水とその中に含まれる元素の由来を推定することも可能となります。湖の地表水循環については、その概要は先述した通り調べるまでもなく分かっているのですが（図 1）、メコン河とその他の河川が湖水やその含有元素の供給源としてどれだけ貢献しているのかといった、定量的な知見は得られていません。

私たちが用いた ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）では、少量の試料中に含まれる約 50 種の多元素の濃度を、一度に分析することができます。現地調査では、カンボジアの共同研究者とともに漁船や自動車を使って、湖や周辺の河川を巡って、水試料を採取しました（図 3）。暑い中、慣れない状況での調査は大変ですが、実際の現場の様子を知っておくことは、後で分析データを解釈する際に役立ちます。



図 3. 湖の水上家屋（左上）。湖内は漁船で調査した（右上）。河川は岸辺から採水した（左下）。水試料はフィルターで懸濁物をろ過除去後（右下）、元素濃度を分析した。

3. トンレサップ湖水系の地表水循環

日本に持ち帰った湖や河川の水試料を ICP-MS で分析し、得られた元素組成の特徴に基づいて統計的に解析（クラスター解析）した結果、各地点の水試料は A、B、C の 3 グループに分けられました（図 4）。グループ A は、Si（ケイ素）、Al（アルミニウム）、Fe（鉄）の割合が高いのが特徴で、岸辺が赤土だったシェムリアップ川等の水が該当していました。グループ C は、Na（ナトリウム）が多いことが特徴で、生活排水が多く流れこむシェムリアップ川河口等の水が該当しました。グループ B には、水試料の大部分が該当したので、さらに B1、B2、B3 の 3 つのサブグループに分けました。サブグループ B1 は、Ca（カルシウム）が比較的多く（図 4）、メコン河の水は雨季・乾季ともにこれに該当しました（図 5、図 6）。サブグループ B2 は、Si、Al、Fe が比較的多く、雨季・乾季のセン川、雨季のサンケー川、プルサト川等が該当しました。サブグループ B3 は、Na が比較的多く、乾季の湖、トンレサップ川、サンケー川、プルサト川等が該当しました。

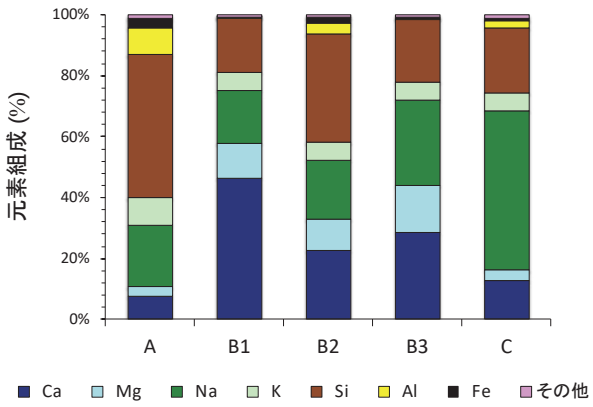
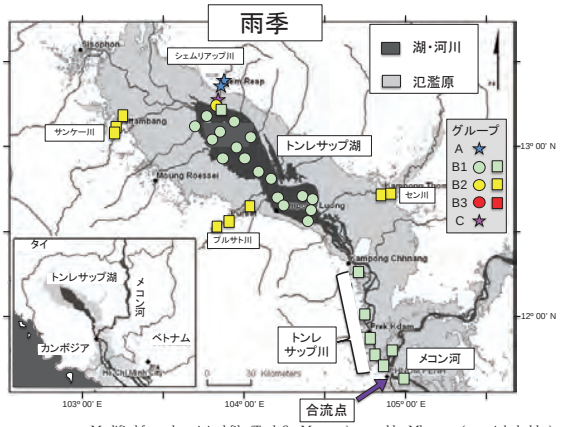


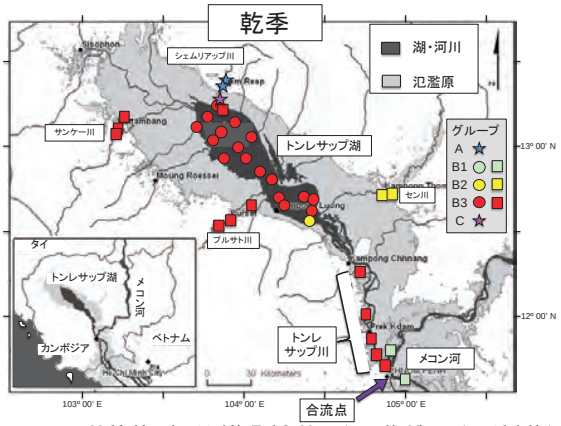
図 4. 水試料の各グループの元素組成の特徴。

雨季と乾季における水試料の各グループの水平分布（図 5 と図 6）から、トンレサップ湖水系の地表水循環について、以下のことが分かってきました。雨季には、トンレサップ湖の水と元素の大部分は、トンレサップ川を通じてメコン河から流入し、他の河川の影響は小さいことが示唆されます。一方、乾季では、湖水の元素組成には、周囲の小河川や湖底からの溶出等の影響が大きく、雨季にメコン河から供給された水や元素の影響はあ



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 5. 元素組成の特徴で分類した、水試料各グループの水平分布（雨季）。



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 6. 元素組成の特徴で分類した、水試料各グループの水平分布（乾季）。

まり残ってないことが示唆されます。また、メコン河は、トンレサップ川との合流地点の上流・下流で元素組成が変化してないことから、トンレサップ湖がメコン河に与えている影響も大きくはないようです（ただし、特定の元素や物質によっては影響している可能性はあります）。

4. 水源としての評価・潜在的なリスク

ICP-MS 分析では、試料中にわずかしか含まれない微量元素の情報も得られるため、飲料水に人体に有害な元素が含まれてないか、安全チェックにも用いられています。トンレサップ湖で水上生活を営む人々は、食事の煮炊き等に日常的に湖水を使っています。また、雨季に氾濫原に溢れ出した湖水の一部は地下水となり、乾季に飲料水となっている可能性があります。さらに、農・水産物を通して有害元素を摂取する可能性もあり、トンレサップ湖の水の安全性について、監視・モニタリングすることは重要です。

特に、As（ヒ素）については、世界各地で地下水の汚染が深刻な問題となっており、カンボジアでもメコン河やトンレサップ川流域等が高リスク地帯とされています。そこで、本研究の分析結果を、世界保健機関のガイドライン（WHO 2011）と比較しみると、乾季の湖水の As 濃度は 0.9–3.5 μg L^{-1} と多くの地点で基準値（10 μg L^{-1}）の 1/10 を超えており、今後注意が必要な状況でした。また、乾季の湖水の As 濃度は、トンレサップ川及びメコン河（1.5–2.2 μg L^{-1}）に比べて高い地点が目立ち、湖底からの溶出が影響している可能性が考えられます。雨季の湖水の As 濃度（0.8–1.4 μg L^{-1}）は、メコン河（0.7–1.5 μg L^{-1}）等と同程度で、概ね基準値の 1/10 以下でした。

他に健康被害が懸念される元素としては、マンガン（Mn）や亜鉛（Zn）等がありますが、これらの湖水中の平均濃度（Mn: 2.5 μg L^{-1}, Zn: 1.6 μg L^{-1}）は基準値（Mn: 400 μg L^{-1}, Zn: 3000 μg L^{-1}）より 2–3 桁低い値であり、トンレサップ川やメコン河の水（Mn: 63 μg L^{-1}, Zn: 21 μg L^{-1}）と比べても 1 桁低い値でした。Mn や Zn の濃度が湖で河川より低くなった理由として、湖ではこれらの金属元素の多くが鉄（Fe）等とともに水和物や酸化物のコロイド粒子を形成し、水底へ堆積することで、水中から除去されることが考えられます。

5. おわりに

私たちが行った調査により、トンレサップ湖水系の地表水循環に伴う元素の挙動が可視化され、水源としての湖水の安全性に関する基礎情報が得られました。一方で、まだ未解明な部分も色々と残されています。例えば、調査は、雨季と乾季に 1 回ずつしか行っていないため、季節変化の詳細は不明ですし、湖水の安全性についても確定的なことは言えません。また、私たちの調査では地表

水（地面の上にある湖水や河川水）を採取しましたが、地下水については調べていません。他チームによる天然ラドン（^{222}Rn）の分布調査等による研究（Burnett et al. 2017）では、トンレサップ湖におけるリン（P）の供給源として、氾濫原に溢れた湖水が地下水となって再流入する経路が重要である可能性が示唆されています。さらに、将来、湖の富栄養化が進み、底層で貧酸素水塊が発生するようになった場合は、嫌気的な環境となった湖底で As が溶出してくる潜在的なリスクがあります。

私たちの調査で用いた ICP-MS 分析では、元素の化学形態（無機態か有機態か、酸化数等）の情報は得られないため、環境中の挙動や生物に対する毒性等を評価する上で制約があります。一方、ICP-MS 分析は、少量の試料で多くの元素の情報が一度に得られる利点があります。その長所を生かしつつ、他の分析手法も適宜組み合わせることで、上述した未解明の点についても明らかにしていくことが可能と考えています。

なお、本稿でご紹介した研究成果は、以下の方々との共同研究で得られたものです（敬称略、所属は調査当時）：高木映、石川智士、申基澈、中野孝教（地球研）、堀美菜（高知大学）、Hort Sitha、Eng Chaesan、Srun Limsong（カンボジア王国水産局）。

文献

W. C. Burnett, G. Wattayakorn, R. Supcharoen, K. Sioudom, V. Kum, S. Chanyotha, R. Kritsananuwat, (2017) Groundwater discharge and phosphorus dynamics in a flood-pulse system: Tonle Sap Lake, Cambodia. Journal of Hydrology 549: 79–91.

T. Yoshikawa, A. P. Takagi, S. Ishikawa, M. Hori, T. Nakano, K.-C. Shin, H. Sitha, E. Cheasan, S. Limsong (2020) Major and trace elements in the surface water of Tonle Sap Lake, Mekong River, and other tributary rivers, Cambodia. Environmental Monitoring and Assessment 192: 467. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08292-4.

WHO (2011) Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: World Health Organisation.

著者情報



吉川　尚（東海大学海洋学部水産学科教授）。2002 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了、博士（農学）。東京大学アジア生物資源環境研究センター研究機関研究員、近畿大学水産研究所 COE 博士研究員、東京大学大学院農学生命科学研究科助教、東海大学海洋学部水産学科講師等を経て、2019 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

安定同位体比から明らかになる底質有機物の起源

小　川　裕　也
（自然環境研究センター）

1. はじめに

底質とは海や河川などの水底の構成物で、砂や泥、動植物の遺骸などが堆積したものです。生態学的には底生生物（水底を生活の場にしている生物群）にとって大切な環境ですが、普段の私たちの生活で意識することは少ないでしょう。研究においては、底質は土壌や地層のような環境指標として、過去や近年の環境やその変化を解明するために使われます。

ここで紹介するのは、底質を構成する有機物の起源を推定した研究です。一般的に河川における一次生産者（植物のような食物連鎖の基底をなすもの）は、上流から下流にかけて陸生植物から付着藻類、河口域においては植物プランクトンへと変化します。安定同位体比を用いた研究の普及により、世界中の様々なスケールで底質の有機物の起源の変化や特性が明らかにされてきました。

本研究は、マングローブ樹種が植生を構成しているフィリピンのバタン湾という沿岸域で行いました。湾口が狭くて複雑な地形をしており、内湾が広がる半閉鎖的な環境です。バタン湾はもともと存在していたマングローブ林の面積の 90％以上が養殖池へ転換された場所です。養殖池といってもコンクリートや化学肥料などは使わず、エビやミルクフィッシュを粗放的に生産しています。

炭素・窒素安定同位体比（$\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$）を用いて底質の有機物起源を推定する研究はしばしば行われていますが、このような複雑な地形の場所ではあまり研究が行われていません。このような湾でもこれまで行われてきた研究と類似した結果が出るのか？　という疑問から研究を始めました。

2. 試料採集と安定同位体比の分析結果

安定同位体比は生物にも非生物にも利用できる天然の指標（値）になります。異なる物質が異なる値を持つため、それらの混合物の値から起源となる物質の混合割合を推定することができます。これは安定同位体比を用いた手法の一つで、混合モデルと呼ばれます。混合モデルに用いる指標の数が増えるほど結果の信頼度は高まり、推定したい起源となる物質の数も増やすことができます。そのため本研究では分析しやすい炭素・窒素の安定同位体比と、炭素と窒素の比率（C/N 比）を指標として解析を行いました。

底質の有機物起源を推定するためには、混合物である底質そのものと、有機物起源になり得る一次生産者の安定同位体比分析が必要になります。バタン湾の各地で、マングローブ、陸生 C_3 植物（モモタマナ、ミミモチシダなど）、陸生 C_4 植物（イネ、カヤツリグサの仲間など）、農作物、海草、藻類、底生微細藻類、養殖池で使われている餌、そして湾内の底質（表層 5–10 cm）を採取して、炭素・窒素安定同位体比分析を行いました。

分析の結果、対象物の安定同位体比はおおむね先行研究[1)]と同じ傾向を示しました。図 1 のように底質中有機物の炭素・窒素安定同位体比および C/N 比の値が、マングローブ、底生微細藻類、植物プランクトンの値の間に位置していることから、これらがバタン湾の主な有機物起源であることが確認できました。底生微細藻類とは、干潟や浅瀬などの砂泥粒子の表層に付着して繁殖する植物プランクトンと同程度の大きさの藻類で、底生生物の餌資源としての重要性が認識されています。

また、底質の有機物起源は河川から湾口にかけて陸生 C_3 植物由来から海洋性植物プランクトン

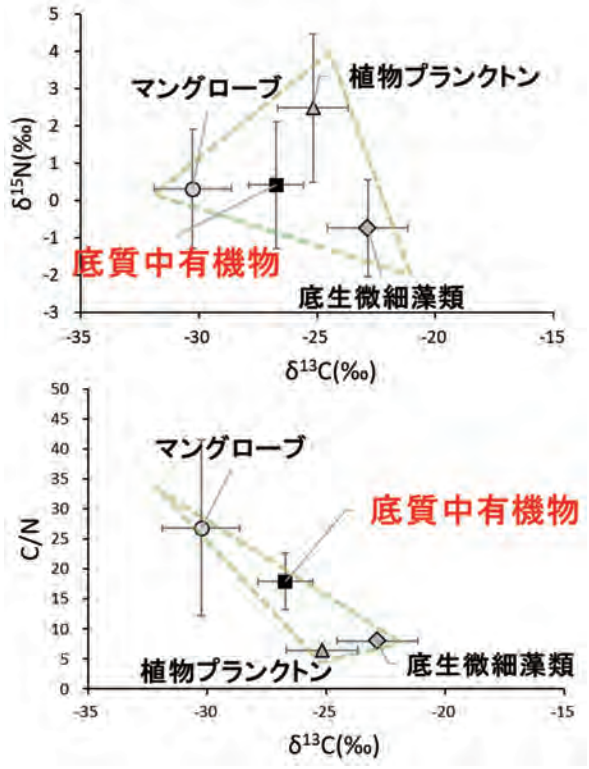


図 1. バタン湾における底質と主な有機物起源の δ^{13}C、δ^{15}N、C/N 比。底質中有機物の値は、マングローブ、底生微細藻類、植物プランクトンの間に示されることから、それらの混合物であることがわかる。

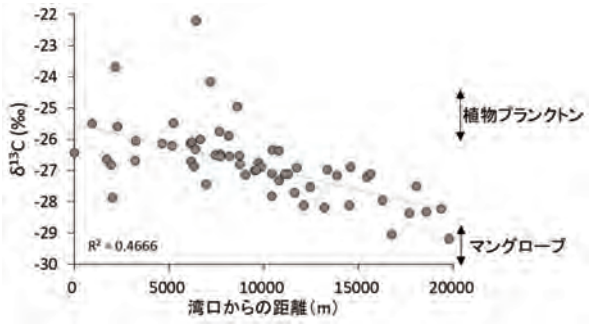


図 2. 河川から湾口にかけて、底質の有機物の δ^{13}C が高くなり、有機物起源が陸生由来から海洋性由来に変化していることがわかる。

由来へと変化していくため、底質の有機物の δ^{13}C も低い値から高い値へと変化することが多くの研究で示されています。図 2 のように、バタン湾でも底質の有機物の δ^{13}C と湾口からの距離の間に相関関係があることが確認できました。

3. 安定同位体比を用いた生態区分

環境要因などで地域を生態学的に区分すること

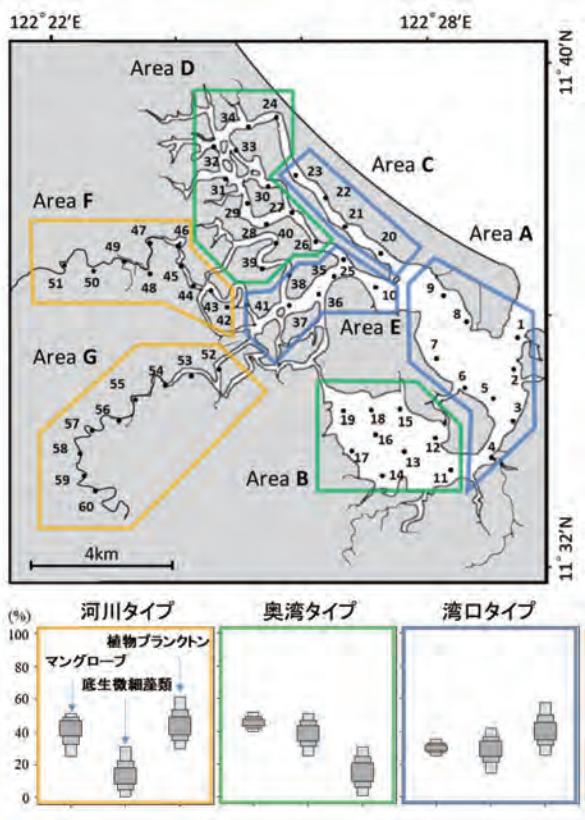


図 3 上. 60 箇所の調査地点と、底質と環境要因から区分された範囲。黄色は河川タイプ、緑色は湾奥タイプ、青色は湾口タイプを示す。

図 3 下. 3 タイプの区分におおける底質の有機物起源の混合割合。それぞれで特徴が違うことがわかる。

を生態区分と言います。バタン湾内の 60 地点で測定した環境要因（水質や水深）と、底質の安定同位体比および C/N 比の値を用いた解析で、図 3 上の地図ようにバタン湾を 3 タイプ（湾口タイプ、湾奥タイプ、河川タイプ）と、さらに細かい 7 区域（Area A から Area G）に生態区分することができました。それぞれの Area で特性がありますが、ここでは 3 タイプにおける底質の有機物起源に着目します。前述した混合モデルを用いることで、図 3 下のようにそれぞれのタイプにおいて主な有機物起源の混合割合を求めることができました。

河川タイプ（黄色）は湾内に流入する主な 2 つの河川域が当てはまり、マングローブ（ここでは値の似ている陸域 C_3 植物も当てはまる）と植物プランクトンが有機物起源として目立っています。

自然状態の河川で植物プランクトンが主な有機物起源となることは少ないですが、バタン湾のようなインフラの整っていない地域では、河川沿いの民家からの生活排水の流入が局所的な植物プランクトンの発生に影響していることが考えられます。湾奥タイプ（緑色）は主な河川流路から外れて滞留構造になりやすい場所に位置しており、水深は浅く、底質の C/N 比は高い値を示しました。このことからマングローブの葉などが溜まりやすいことと、底生微細藻類の繁殖が盛んであることが分かります。湾口タイプ（青色）は海域に近く塩分濃度が高い地点が当てはまり、さまざまな有機物が比較的均一に混合していることが分かります。河川と海という生態系の間に位置するため、常に様々なものが混合している場所だと考えられます。

また、一部の底質の有機物で $\delta^{13}C$ の値が突出して高い地点が示されましたが（図 2）、浅い場所で付近にウミショウブ藻場が確認できる場所でした。海草は高い $\delta^{13}C$ を持つため、辺りの底質の有機物の起源になっていることが考えられます。この海草が具体的にどれくらい有機物起源として貢献しているかを明らかにするには、違う方法を考えなければなりません。

4. バタン湾の特徴

本調査でバタン湾の底質の有機物の炭素・窒素安定同位体比および C/N 比が明らかになりました。他の同じような研究を参照して、バタン湾の特徴を考えることができます。バタン湾の炭素安定同位体比（−26.7 ±1.2‰）は、他の研究例と比べると全体的に値が低く、C/N 比（17.9 ±4.7）は高いことが分かりました。このことはバタン湾では陸生 C_3 植物やマングローブが底質の有機物起源に大きく貢献していることを示唆しています。本研究では全ての生態区分で、少なくとも 30% 以上がマングローブ由来だと推定されました。バタン湾のような多くのマングローブ林が養殖池へ転換された地域でも、半閉鎖的な湾の構造が陸生由来の有機物を多くトラップしていることが考えられます。

窒素安定同位体比（−0.4 ±1.7‰）は、全体的に 0.0‰に近く、他の研究例と比べると低い値を示していました。化学肥料や生活排水などの人的行為に伴う影響は窒素安定同位体比を高めることが知られているため、バタン湾は人為的な影響が少ないことが示唆されます。これはあくまでも参照にした研究例との比較であって、バタン湾における人為的な環境負荷が少ないというわけではありません。

5. おわりに

正直なところ、結果を見るまでは半信半疑な気持ちでしたが、解釈のできる値や空間分布が示されて、安定同位体比の環境指標としての効力を感じた調査でした。観察だけでは得られない自然環境の安定同位体比分析による数値化は、他にも多くの疑問を解明できる便利なツールであることは間違いありません。バタン湾での研究においても、他元素の安定同位体比や、深い場所の底質を探ることで、マングローブ伐採や養殖池管理方法の変化、台風攪乱による影響など、さらに多くのことが分かるかもしれません。

注釈

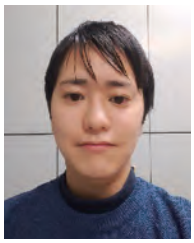
1） 炭素・窒素安定同位体比は研究によってさまざまですが、平均的な一次生産者の値は次のようになります。C_3 植物（$\delta^{13}C = -27$‰、$\delta^{15}N = 0$‰）、植物プランクトン（$\delta^{13}C = -24.3$‰、$\delta^{15}N = -2.1$‰）、底生微細藻類（$\delta^{13}C = -22.2$‰、$\delta^{15}N = -2.9$‰）（Fourqurean & Schrlau, 2003; McKee et al., 2002; Muzuka & Shunula, 2006; Kohn 2010、Doi et al. 2010）

文献

Ogawa, Y., Okamoto, Y., Sadaba, R.B., Kanzaki, M., 2020. Sediment organic matter source estimation and ecological classification in the semi-enclosed Batan Bay Estuary, Philippines.

Int. J. Sediment Res. 36 (1), 110–119. https://doi.org/ 10.1016/j.ijsrc.2020.05.007.

著者情報



小川裕也（自然環境研究センター・研究員）2022 年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻京都大学大学院農学研究科修了。博士（農学）。

（2023 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。

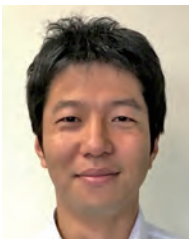
ニッケルラテライト鉱床は、気温が高く降水量の多い熱帯～亜熱帯地域に発達するため、東南アジアではインドネシアやフィリピンなどで開発が進んでいます。風化で脆くなった岩石のため容易に採掘できますが、地下 30 m 程度までの表層付近にニッケルが濃集しているため、表土を広く剥ぎ取る必要があります。また、この鉱石はニッケルだけでなくクロムも多く含んでいるため、雨水などと反応することでクロムが溶け出し、周辺の河川を汚染することも懸念されており、フィリピンなどでは近年のニッケルラテライト鉱床開発が抑制される傾向にあります。しかしながら、周辺の岩石もニッケルやクロムに富んでいることが多く河川には自然由来の重金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



生物多様性と生態系機能

生物は、周りの環境からいろいろな元素を取り込みます。植物は、水と二酸化炭素を吸って、有機物と酸素を作り出す光合成を行います。また、環境から窒素などの多岐にわたる栄養塩を吸収します。これらの元素の安定同位体比を測定することで、植物が吸収した元素の由来や、植物がどのような状態で光合成したかを推測することができます。

一方、動物は生きていくために必要な物質を、他の生き物（餌）から得ているため、その体には餌の情報が刻まれています。この動物の持つ安定同位体比を測定することで、動物が何を食べているのかを推測することができます。また、生物に含まれる同位体比の履歴情報を、同位体比の分布情報である「同位体地図」に重ね合わせることで、植物種子や動物の移動履歴についても、近年いろいろなことがわかってきました。

生物が関わるいろいろな現象について、具体的な研究を見てみましょう。

高山の霧を吸収するハイマツ
― 雨と霧を同位体比で区別する ―

久　米　　篤
（九州大学大学院農学研究院）

1. 日本の高山植生を特徴付けるハイマツ

ハイマツ（*Pinus pumila*）は日本の中部山岳を分布の南限とし、高山の森林限界上部に優占することの多い、マツ科・マツ属の矮生低木です（図 1）。ほとんどのマツ属の樹種では幹が単幹・直立に伸張するのに対して、ハイマツは矮性低木としての性質が固定され、常に多幹・匍匐の生育型を示し、面的に広がります。濃緑色の密度の高い樹冠を持ち、高さ数メートルの斜面全体に広がる大きな群落を形成することがあり、その一方で山頂や尾根付近では高さ十数センチの矮性・匍匐型の生育形で頑張っていることもあります。

ハイマツ群落の林冠は、高さ 1 m 範囲内に全ての葉が集中しているため、大量の針葉が地上部数 m に圧縮された、例外的に高い葉密度を持ちます。針葉の投影面積を葉面積として計算すると、地表面あたりの針葉面積（葉面積指数：LAI）は 5 $m^2 m^{-2}$ 以上の値となり、林冠の厚さあたりの針葉面積（葉面積密度）も 4 ～ 6 $m^2 m^{-3}$ となります。これは通常のマツ林というよりかは、亜高山帯域に見られるオオシラビソやトドマツの優占する森林の値に近く、かなり大きな値です。そのため、成育期間が無雪期に限られて短いにもかかわらず年間の光合成物質生産量は低地の常緑針葉樹林に匹敵するほど大きくなると推定されています。光合成には大量の水が必要となります。しかし、ハイマツが生育している高山環境では水分を保持する土壌はほとんど発達しておらず、根系の発達も抑制される上、ハイマツの生育している環境では土壌は冬季に凍結しています。雪が解けても土壌が解けなければ水を吸収することができません。一方、日本の山岳では霧がよく発生し、地表面への霧水沈着量は降水を上回る事もあります。ハイマツ樹冠の表面積はとても大きいため、植生表面に付着した霧水が水分供給源となっている可能性があります。

そこで、このような環境下で、光合成に伴う大量の蒸散に必要な水をハイマツがどうやって得ているのかを、降水や霧水（H_2O）の水素（H）と酸素（O）の安定同位体比を利用して確かめることにしました。

2. 立山浄土平の気象環境

立山は富山県最高峰の標高 3000 m を超える山岳地域で、上部にはハイマツ群落がよく発達しています（図 1）。山頂付近の浄土平（2839 m）には富山大学立山施設があり、気象観測が行われています（図 2）。

図 3 に、立山周辺で観測された 2005 年と 2006 年の月別降水量を示します。麓の富山市と比較して、立山山頂部の降水量は年ごとの変化幅が大き



図 1. 立山室堂の斜面に広がるハイマツ群落（濃い緑色）

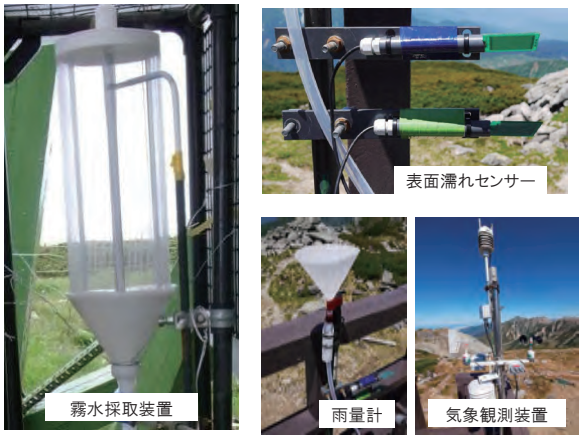


図 2. 富山大学立山施設における気象観測

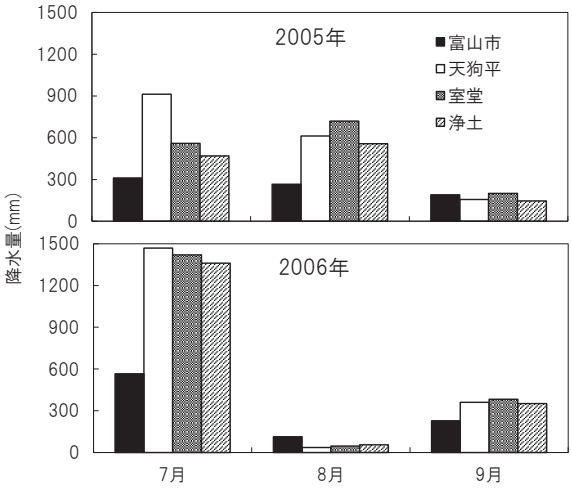


図 3. 2005 年と 2006 年の月別降水量
富山市（標高 9 m）、天狗平（標高 2290 m）、室堂（標高 2450 m）、浄土（標高 2840 m）

く、2005 年の 8 月の降水量が 600 mm 程度あったのに対して、2006 年にはほとんど雨が降りませんでした。

山頂付近の植物群落の土壌水分量を測定しても、2006 年 8 月の土壌水分量は 2005 年よりも少なくなっていました(図 4)。このような状況では、2005 年と比較して 2006 年にはハイマツの光合成速度は低下していると予想しました。ところが、実際に現地でハイマツの光合成・蒸散速度を測定したところ、2006 年 8 月でも、ハイマツは活発に光合成・蒸散を行っていまいた。ハイマツは、雨が降らなくてもどこからか水を吸収しているようです。

山頂付近に濡れセンサーを設置して、葉面が濡

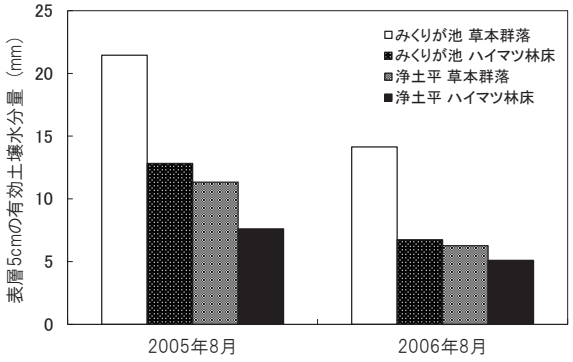


図 4. 立山高山帯の 2005 年と 2006 年の表層土壌の水分量。ADR 土壌水分センサーで測定（Delta-T 社、ML2x）

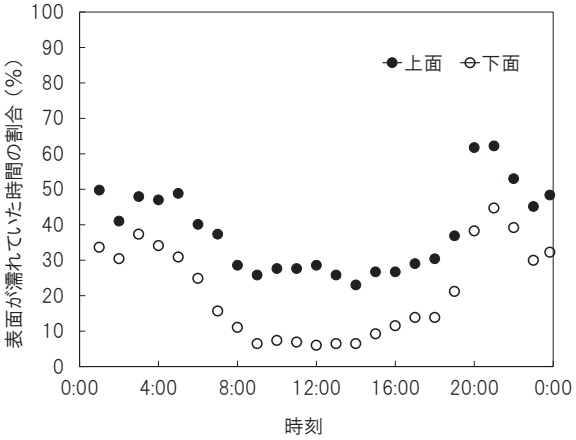


図 5. 浄土平で 8 月に表裏 45 度傾けて設置した濡れセンサーの測定結果

れている時間を推定してみました（図 5）。その結果、雨が降らなくても毎日夕方になると濃い霧が発生し、19：00 頃には樹冠がびしょびしょに濡れていることが多いことがわかりました。実際、現地では葉の先から水がポタポタ落ちていることも観察できました。このような霧水を、ハイマツはどれくらい利用できるのでしょうか？

3. 雨と霧の同位体比

重い水分子（$^{1}H^{2}H^{16}O$ あるいは $^{1}H_{2}^{18}O$）と軽い水分子（$^{1}H_{2}^{16}O$）を比較すると、重い水分子は軽い水分子よりも飽和水蒸気圧が低いという性質があります。霧水は雨粒よりも小さく、地表近くの大気中を長時間漂っているため、軽い水分子が選択的に蒸発し、重い水分子が濃縮される傾向があります。そのため、雨粒と比較すると霧水の $\delta^{2}H$

や $\delta^{18}O$ はより多く（重く）なります。そこで、雨水と霧水、ハイマツ林の林床に供給される水（樹冠通過雨）の同位体比を調べることで、ハイマツ林床に供給される水の起源の推定を行いました。

高山環境では、通常の方法では樹冠通過雨を採取することは出来ません。いろいろ試してハイマツ林の林床のあちこちに、雨樋を加工した常時開放型雨量計を設置することにしました（図 6）。この装置で採取された水が、ハイマツ樹冠を通過して、地表に供給された水ということになります。

次に、ハイマツ樹冠上に供給される雨水と霧水の量を測定し採取するために、山頂付近の富山大学立山施設に、霧水や雨水の採取装置を設置しました（図 2）。霧水採取器には雨除けの屋根がついており、その下にテフロン細糸が上下に多数張られており、霧粒が糸にぶつかると、そこで水滴になって下に流れ落ちます。

採取された水の同位体を分析すると図 7 のようになりました。立山の高山帯では、平野部で重い水から雨になるため、軽い水の割合の高い雨が降ります。一方、霧水は空中を漂っている間に蒸発して、重い水の割合が増えます。バラツキはありますが、雨水は軽く霧水は重いというはっきりとした傾向がありました。そして樹冠通過雨は降水と霧水のちょうど真ん中付近に分布していました。単純混合モデルのエンドメンバーの両端を霧水と降水として、樹冠通過雨への霧水の寄与を計

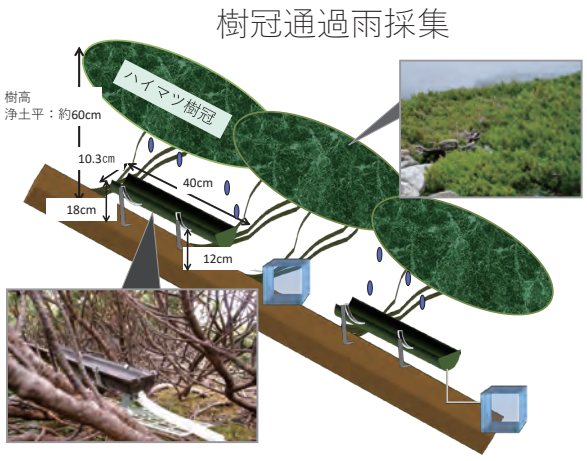


図 6. ハイマツ林の樹冠通過雨（林内雨）の採取方法

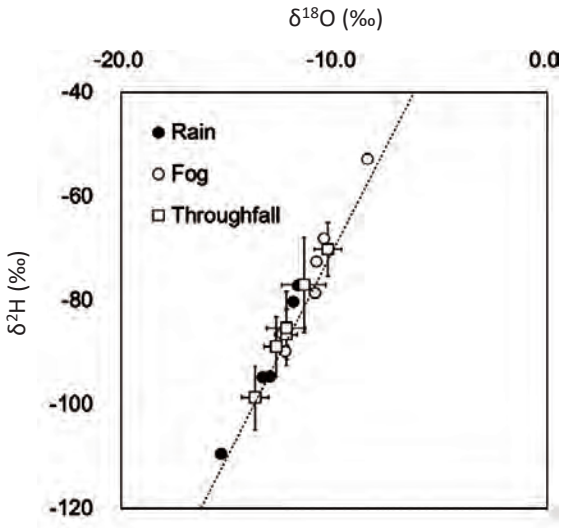


図 7. 降雨（Rain）、霧（Fog）、樹冠通過雨（Throughfall）の水素と酸素の同位体比（Uehara et al. 2012）。

算して加重平均すると、霧水は約 50％程度寄与しているという結果が出ました。さらに、実際に採取した水の量から得られた計算結果からも、同様の結論が得られました。これは、降雨の有無にかかわらず、ハイマツ樹冠が霧水を効率的に取り込むことで、林床に水を供給していることを示しています。

ハイマツ群落に霧水が供給される量は、霧粒の密度と風速に伴って増加しますが、細い針葉が密集するハイマツ樹冠の形態は霧水採取器とよく似ており、群落表面の風速を弱めず、霧水を効率的に採取できる形態と考えられます。風が強く霧の多い日本の高山では、ハイマツの樹冠形状は霧水の吸収に適しているようです。

日本の山岳地域では霧の発生頻度が高い場所が多く、酸性霧の被害などが問題になることもあります。水素と酸素の同位体を測定することで、他の化学物質とは独立に、森林への水の供給源を推測することができます。

謝辞

本研究は上原佳敏博士が中心となり、富山大学理学部関係者のサポートによって実施されました。特に同位体分析については佐竹洋教授の指導の下で行われました。記して感謝いたします。

文献

Uehara Y, Kume A (2012) Canopy rainfall interception and fog capture by *Pinus pumila* Regal at Mt. Tateyama in the Northern Japan Alps, Japan. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 44: 143–150. https://doi.org/10.1657/1938-4246-44.1.143

久米篤（2009）「ハイマツ群落」In：高山植物学 ― 高山環境と植物の総合科学 ―（増沢武弘編著）、共立出版版、pp. 348–358

著者情報



久米　篤（九州大学大学院農学研究院教授）1996 年早稲田大学大学院理工学研究科修了、博士（理学）。1996 年 JST-CREST 研究員（広島大学森林衰退研究センター）、2004 年富山大学理学部、2008 年九州大学農学部附属北海道演習林などを経て 2015 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

雨から来た窒素を同位体比で追跡する

木　庭　啓　介
（京都大学生態学研究センター）

様々な生態系では、生元素の一つである窒素が図１にあるような様々な過程を受けながら循環しています。たとえば森林を見てみると、森林の大部分の窒素は有機態窒素の形で土壌に存在し、植物体には土壌と比較してずっと少ない量が存在しているだけです。そしてさらに、土壌中の植物や土壌微生物が利用できる窒素（図１のアンモニウムイオン、硝酸イオン、そして一部の有機態窒素；これらをまとめて可給態窒素と呼びます）はごく限られた量しか存在しないことが知られています。これは図１にあるように可給態窒素は土壌微生物による無機化（有機態窒素を無機態窒素であるアンモニウムイオンに変換する微生物過程）そして硝化（硝化菌と呼ばれる特殊な微生物がアンモニウムイオンを酸化して亜硝酸イオンや硝酸イオンに変換する微生物過程）を経て生成されないといけない、そして可給態窒素を生成する微生物も可給態を吸収同化する、ということに主な原因をもちます。可給態窒素のこの小さな存在量などから考えて、森林にいる植物はその成長において窒素が足りない状態、言い換えると窒素制限下にあると一般的に考えられています。

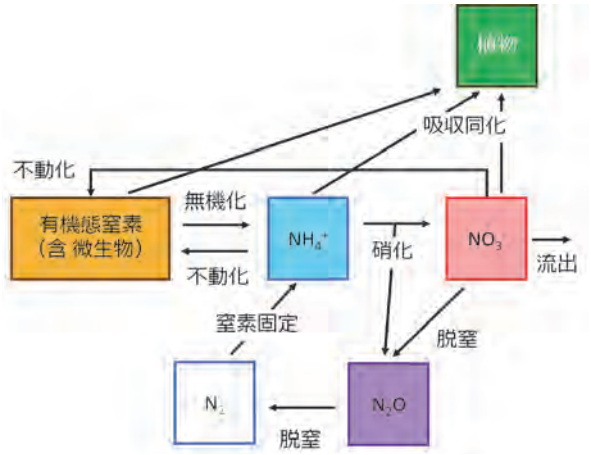


図 1. 窒素循環の概略図。環境中で有機物に含まれる窒素（有機態窒素）は分解（無機化）されアンモニウムイオン（NH_4^+）に、さらに硝化菌という特殊な微生物により硝酸イオン（NO_3^-）に変換される。アンモニウムイオン、硝酸イオン、そして一部の有機態窒素は植物や微生物に取り込まれる（吸収同化、特に土壌微生物による吸収同化を不動化と呼ぶことがある）。酸素の少ない環境では酸素ガスの代わりに硝酸イオンを用いた呼吸を微生物が行い、一酸化二窒素（N_2O）や窒素ガス（N_2）を放出する脱窒という作用がある。また大気中の窒素は窒素固定を行う微生物によってこの循環系に取り込まれる

このような重要性を持つため、可給態窒素については、古くよりその特徴について多くの研究がなされています。その中でも特に硝酸イオンについては、土壌中で動きやすい性質を持つことから、陸上生態系から流出する時の主な窒素化合物であることが知られています。そのため、どれだけの硝酸イオンが生成されるのか、そしてそれがどれだけ渓流水に溶け込み流出してゆくかを理解することが、森林で循環できる窒素量、そして窒素循環全体を考えるときに大変重要になります。また一方で、降水により供給される可給態窒素は、森林の中で植物と土壌中の微生物に速やかに利用されてしまい、森林から出てくる窒素は多くはない、と考えられてきました。平たく言えば雨由来の可給態窒素は森林で「きれい」にされる、ということになります。

では、本当に「きれい」になっている、つまり雨の窒素は十分に使い切られているのでしょうか？　ここでは森林から失われる、つまり森林渓流水に含まれる窒素のうち大半を占める硝酸イオンに着目します。渓流水中の硝酸イオンの濃度を計測すると、確かに低い森林もあり、そこでは雨

で入ってきた窒素が使われて、図１の窒素循環過程の硝化によって生成された硝酸イオンが植物と微生物により利用されることを免れて、ほんの少しだけ流れ出ているのだと思われます。しかし、測定してみると硝酸イオン濃度が高い森林も実際にはあります。渓流水中の硝酸イオン濃度の高低については長年研究がなされてきていますが、実際のところ、その濃度だけをつぶさに測定していっても、どれだけ降水由来の硝酸イオンが渓流水中の硝酸イオンに含まれているかを知ることはなかなかできません。

そこで、安定同位体比の出番です。古くから硝酸イオンについてはその窒素安定同位体比が測定されていました。古くは肥料由来の硝酸イオン（肥料は大気窒素から生成されるために、大気の窒素と近い値を取ります）と、土壌中の硝化由来硝酸イオンを区別することを目的として窒素安定同位体比の測定が行われたりしています。しかし､これまで得られているデータを集めてみると、降水由来の硝酸イオンの取る窒素安定同位体比と、土壌中の硝化由来硝酸イオンの取る窒素安定同位体比の範囲は重なってしまっていて（図 2)、渓流水中の硝酸イオンの窒素安定同位体比を測定しても、降水由来なのか、それとも土壌由来なのかを判定することができませんでした。

2000 年代になって、硝酸イオンの窒素安定同位体比だけでなく酸素安定同位体比も測定する手法が開発され、また、その必要な試料量も劇的に減少したため、現在世界の多くの研究室でその測定が行われるようになってきました（永田・宮島 2008)。この新しい測定によりこれまででわかってきたことの１つは、窒素安定同位体比では区別が難しかった硝化由来の硝酸イオンと降水由来の硝酸イオンでは、その酸素安定同位体比が大きく異なることです（図 2)。この理由は硝酸イオンにふくまれる酸素原子の由来が異なることにあります。硝化作用（図 1）によって硝酸イオンが生成されるとき、その酸素原子は水そして酸素ガスからくると考えられています（図 2)。これら水そして酸素ガスが持つ酸素安定同位体比は比較的低いことが知られているので、それを原料として作られる硝酸イオンの酸素安定同位体比も比較的低い値を取ります（図 2 の下側、緑四角部分)。一方で、降水由来の硝酸イオンについては、その酸素原子の一部が上空大気中のオゾン由来だと考えられています（図 2)。このオゾンですが、実は大変高い酸素安定同位体比を持つことが知られています（その理由については難しいので今回は割愛します)。そのため、降水由来の硝酸イオンは極めて高い酸素安定同位体比を取ることがわかってきました（図 2 の上側、赤四角部分)。この特徴を利用することで、渓流水中の硝酸イオンが高い酸素安定同位体比を取るのであれば、降水由来の硝酸イオンの割合が高い、というように考えることができると言うことになります。

実際に様々な森林の渓流水を対象として、そこに含まれる硝酸イオンの濃度、そして窒素安定同位体比、酸素安定同位体比を測定してみました（図 3)。濃度が低いものから高いものまで様々なサンプルがありますが、そのほとんどについて、図３下側の緑四角部分よりデータが上方にありました。つまり、渓流水硝酸イオンの酸素安定同位体比は、硝化由来の硝酸イオンが取ると思われる酸素安定同位体比よりは高いことがわかります。このことは、雨由来の窒素をきれいにしていると

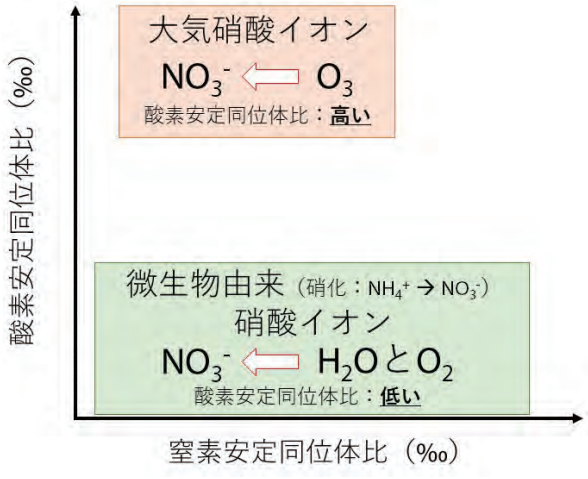


図 2. 硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比マップ（Kendall et al. 2007 より一部改訂)。

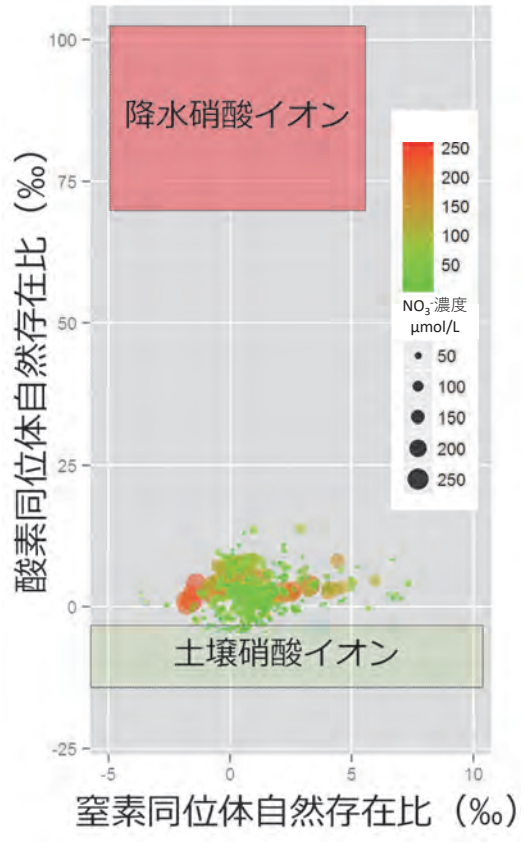


図 3. 様々な森林の渓流水中に含まれる硝酸イオンの濃度とその窒素・酸素安定同位体比（木庭ら、未発表データ）
○の大きさと色で渓流水硝酸イオン濃度（単位はμmol/L）が表されている。土壌硝酸イオンと降水硝酸イオンの範囲はこれまで報告されている文献値などから類推されたものである。

思われる硝酸イオン濃度が低い森林でも、あまりきれいにしていないと思われる、濃度が高い森林でも、雨由来の硝酸イオンが漏れ出てしまっている、つまり使い切れていないということを表していると考えられます。ざっと降水硝酸イオンと土壌硝酸イオンの代表的な値をつかって計算してみると、おおよそ 10％程度の降水硝酸イオンがそのまま渓流水へと流れ出ているという試算になります。

冒頭で述べたように、森林の植物は窒素が足りない状況にあると思われるのに、せっかく降ってきた、足りない窒素を使い切れずに流してしまうと言うのは不思議な感じがします。この矛盾については様々な理由が考えられています。たとえば雨自体の流出とともに植物や微生物が使えないまま流れ出してしまう、ということが傾斜の急な森林では起こりやすいと言うことがあるでしょう。また、雨で入ってくる窒素のタイミングと植物や微生物の活性のタイミングが合わないということもあるかもしれません。傾斜が急な地域と緩い地域、雨が夏に多い地域と冬に多い地域などを比較することで、この矛盾について議論できると思われますが、今のところまだ明確な答えは得られていません。

人間活動の増大に伴い、降水によって森林にもたらされる窒素の量が増大しており、これまで足りなかった窒素が余っている森林（窒素飽和林）というものが報告されるようになっています（徳地ら 2011）。窒素飽和林では植物や微生物が窒素を使い切れないので、渓流水中に多くの窒素が含まれると考えられますが、では、その中には降水由来の窒素は多く含まれるのでしょうか？　ここでも硝酸イオンについて考えて見ます。素直に考えると、大量の降水由来の硝酸イオンがもたらされ、植物にとっては窒素が余っている状態なのであれば、降水由来の硝酸イオンは使われずにそのまま流れるために、渓流水中の硝酸イオンには高い割合で降水由来の硝酸イオンが含まれると考えられます。しかし、図 3 を見てみると、硝酸イオン濃度が高い場合でもその酸素安定同位体比が高い、という傾向は見えてきません。つまり、雨由来の硝酸イオンの割合はたとえ渓流水硝酸イオン濃度が高いところでも上昇しているようには認められません。これは、大量にもたらされた降水由来の窒素に影響を受け、土壌中の硝化活性（図 1）も上昇しており、結果として降水由来の硝酸イオンが、土壌由来の硝酸イオンによって希釈され、割合としてはあまり上昇しない、ということが生じているのではないかと考えられています。大量の降水由来の硝酸イオンと、大量の土壌硝化由来の硝酸イオンが混ざって渓流水に流出してゆく、ということです。しかし、この部分についても、その重要性にもかかわらずまだわかっていない部分がたくさんあります。なお、降水由来の硝酸イ

オンの割合をより正確に算出するためには、酸素安定同位体比の異常、という特別なパラメーターを特別な測定により計算することが必要ですが、この新しいパラメーターを用いた研究も現在進んできています（角皆ら 2010）。

硝酸イオンの酸素安定同位体比測定は、今回紹介した森林の硝酸イオン除去状態の判定だけでなく、様々なところで利用されるようになっています。たとえば先に述べたように降水中の硝酸イオンの酸素安定同位体比が、その起源物質の酸素安定同位体比の影響を受けることを逆に利用して、どのような大気化学プロセスで降水硝酸イオンが形成されるかを解析したり、その延長として、どこで硝酸イオンが生成したかという生成場所を推定したりという研究がなされています。また、硝酸イオンが吸収同化や脱窒によって利用される（図 1）と、軽い ^{14}N や ^{16}O が選択的に利用されるので（これを同位体分別と呼びます）、これを利用して、環境中で硝酸イオンの消費が起きているかどうかを判定したりすることも可能です。さらには作物中の硝酸イオンの酸素安定同位体比から、その作物の栽培が無機栽培か有機栽培かを判定できるかもしれません（木庭 2017）。このように、1 つの物質について複数の安定同位体比を測定することで、より細かくその物質の生成・消費・移動過程などを見ることが可能となります。今後もますますこのような研究が発展してゆくと考えられます。

文献

C. Kendall, E. M. Elliott, S. D. Wankel, Tracing anthropotenic inputs of nitrogen to ecosystems, In: Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, Second Edition (eds. R. Michener, K. Lajtha), 2007, Blackwell Publishing Ltd.

角皆潤、小松大祐、代田里子、中川書子、野口泉、張勁（2010）三酸素同位体組成を指標に用いた大気沈着窒素 ― 森林生態系間相互作用の定量的評価法．低温科学 68 107–109. http://hdl.handle.net/2115/45170

永田俊、宮島利宏（2008）「流域環境評価と安定同位体 ― 水循環から生態系まで」京都大学学術出版会

徳地直子、大手信人、臼井伸章、福島慶太郎（2011）窒素負荷に伴う森林生態系の窒素循環過程の検討．日本生態学会誌 61（3）275–290. https://doi.org/10.18960/seitai.61.3_275

木庭啓介（2017）有機野菜は判定できるか ― 硝酸イオン同位体比の利用可能性について ― 現代化学 2017 年 3 月 38–40.

著者情報



木庭啓介（京都大学生態学研究センター教授）1998 年京都大学大学院農学研究科博士課程中退、博士（農学）。京都大学大学院情報学研究科助手、東京工業大学大学院総合理工学研究科講師、東京農工大学共生科学技術研究院特任准教授、農学研究院准教授をへて 2016 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

メタボ化した森林から流出した過剰な窒素成分は、下流域でどう変化するの？

篠 塚 賢 一
（福岡工業大学）

1. 福岡市近郊森林域のメタボ化

明治時代の外国人技術者が日本の川の流れの激しさに驚き「これは川ではない。滝だ！」と発した逸話があります。日本は細長い島国で、中央に屋台骨の様に高くそびえる山々があります。一方、下流域では平野が広がり、水田の広がる「瑞穂の国」とも呼ばれています。そのため、日本の川は急傾斜な山の中を流れる川、なだらかな扇状地や平野を流れる川と緩急様々な勾配を流れています。急勾配な地形を流れる川では、水の動きも速く、ザーザーと流れ出すため、あまりその場所に留まりません。そのため、水は河川周囲の環境の影響をあまり受けず、水源の水質を反映します。一方で緩い勾配の地形を流れる川では、水の動きは遅く、ゆったりと流れるため、周囲の環境から受ける影響も大きくなります。一般的な川の山間部は急な勾配を流れ、田園地や都市域になると緩い勾配を流れます。

福岡市は、北は博多湾に面し、その周囲を三郡山地や脊振山地に囲まれています。三郡山地の河川からは、標高 430 m の山間では 7.6° の急勾配で流れ出ていますが、下流に広がる都市域に近づくと河川周囲の勾配は 0.1° と緩くなります。山間部の斜面にはスギやヒノキが植林されていますが、中流域の河川沿いには水田が広がり、下流域では商業地や住宅地が広がるようになります。

一般的に、上流にある森林では人為的な影響は少なく、河川水に含まれる硝酸イオン（NO_3^-）濃度は低くなりますが、中・下流域の河川水では農地や畜産、ゴルフ場など人為的な影響が大きくなり、NO_3^- 濃度が高くなると考えられています。しかしながら、関東近郊の森林や北陸地方の森林を流れる河川からは、NO_3^- が高濃度で流出していることが報告されています。この様な森林は、窒素飽和した森林、メタボ化した森林と呼ばれており、下流への窒素汚染源となっています。窒素は生物を構成する主要な元素であり、生物の体を構成するアミノ酸やタンパク質の元になっているため、生物にとって大切な栄養元素になっています。大気中には多くの窒素ガス（N_2）が含まれていますが、反応性が低く、そのままでは多くの生物が利用することが出来ません。しかし、肥料から供給されるアンモニア態窒素（NH_4^+）や硝酸態窒素（NO_3^-）、そして排気ガスに含まれる窒素酸化物（NOx）から生成される NO_3^- は、反応性が高く流域に生息する生物へ様々な影響を与えます。日本には、大陸から長距離輸送されてきた大気汚染物質が到達し、年々増加する傾向がありました。広域の大気の流れを介して運搬されるため、都市から離れた森林にも NO_3^- をはじめとした生物が利用しやすい窒素の沢山溶けた雨が降り注ぎます。これらの窒素は樹木をはじめとした森林の生物に利用され、特に生長速度の速い若い樹木では、活発に窒素を取り込みます。しかし、福岡近郊の植林地では伐採期を迎えた十分に成長した樹木の割合が高くなっており、生長に必要な栄養をあまり必要としていません（Chiwa et al., 2012）。そのため、大気からの窒素がたくさん降ってくる場所の森林の河川からは、高濃度の NO_3^- が年間を通して流出しています。この様な流域で、森林から高濃度で流出した NO_3^- は、下流域に流れていくとどうなるのでしょうか？　実際に、福

岡市を流れる複数の河川で、地形の違いが河川水質へ与える影響を、窒素や酸素の安定同位体比を測定することによって探ることにしました。

2. 福岡市近郊の流域特徴

福岡市を流れる多々良川流域は、猪野川、須恵川、宇美川の 3 つの支流を持っています。森林から流れ出た河川は、農地や都市域を通過して博多湾に流れ出ます（図 1）。上流から下流に下るにつれ様々な土地利用を持つ流域を流れていきます。同時に流域地形も大きく変化します。急勾配地形を持つ山間部から比較的緩い勾配を持つ農地、都市域へと変化していきます。この様な、流域の土地利用、地形の違いは、森林から高濃度の NO_3^- 濃度を持つ河川水質へ様々な影響を与えていました。

この 3 つの河川で測定された NO_3^- 濃度を図 2 に示します。森林面積が大半を占めている場所では、3 つの河川とも上流には窒素飽和の森林があるため NO_3^- 濃度は高くなります（41 ～ 65μmol/L, 2.5 ～ 4.0 NO_3^- mg/L）。しかし、猪野川都市域の割合が増加すると、NO_3^- 濃度が大きく低下する傾向が見られました。須恵川、宇美川では都市域の濃度は夏には低下、冬には横這いかやや上昇する傾向が見られます。都市域からの人為的な窒素流出は、有機態窒素の形で流出して来ることが一般的に知られています。須恵川、宇美川のみならず猪野川でも都市域の面積が増加すると有機態窒素が流出してくる傾向がみられ、都市域からの窒素負荷が生じていることが分かります。次に、同位体比の変化と地形の関係をより詳しくみてみましょう。

3. 下流で NO_3^- 濃度が減少する河川の特徴

硝酸中に含まれる安定同位体比の変化を見ていきます。脱窒素細菌が硝酸を窒素ガスに変える脱窒が起きる場合、軽い ^{14}N から先に利用されやすいため、河川水中には重い ^{15}N が残留します。図 3 を見ると、猪野川では脱窒の影響を受けていることが示唆されます。同様に、酸素においても、^{16}O が優先的に利用され、河川水中の NO_3^- に含まれる ^{18}O の割合は高くなります。脱窒による反応では、この関係が 2：1 で起きることが知られています（Kendall et al., 2008）。猪野川では、傾きの比が -5.8：-2.2 となり、およそ 2：1 の関係を示しています。このことから猪野川では、脱窒による影響により NO_3^- 濃度が低下していると考えられます。猪野川の下流では須恵川や宇美川と異なり、都市域の面積割合が低いことが要因の一つとして考えられます。加えて、都市部が広がっている地形がこの 3 つの河川でどのように違っているのかを詳しく見ていく必要があります。

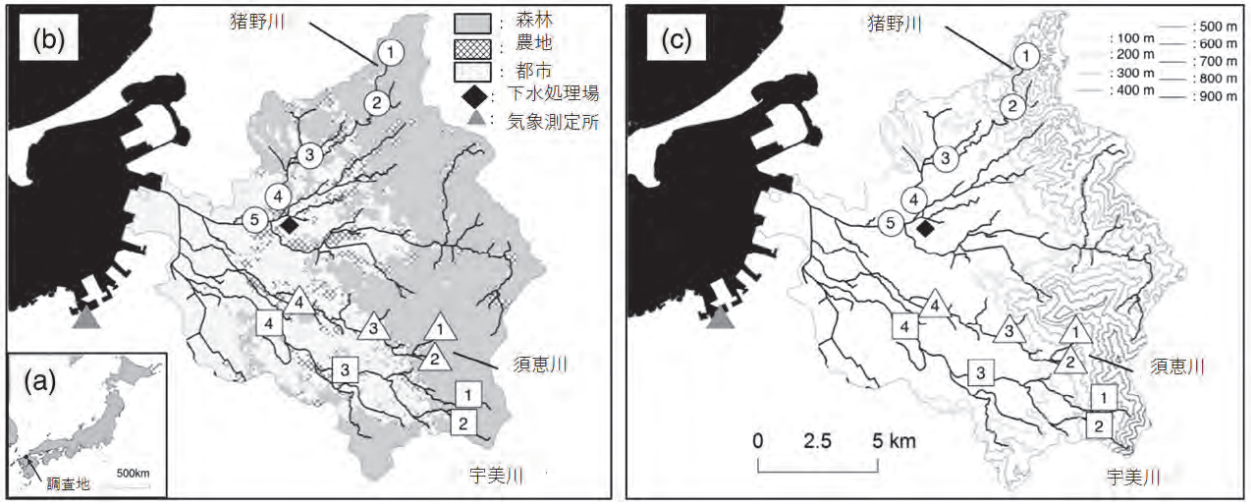


図 1. 猪野川、須恵川、宇美川の流域における土地利用と地形の地図

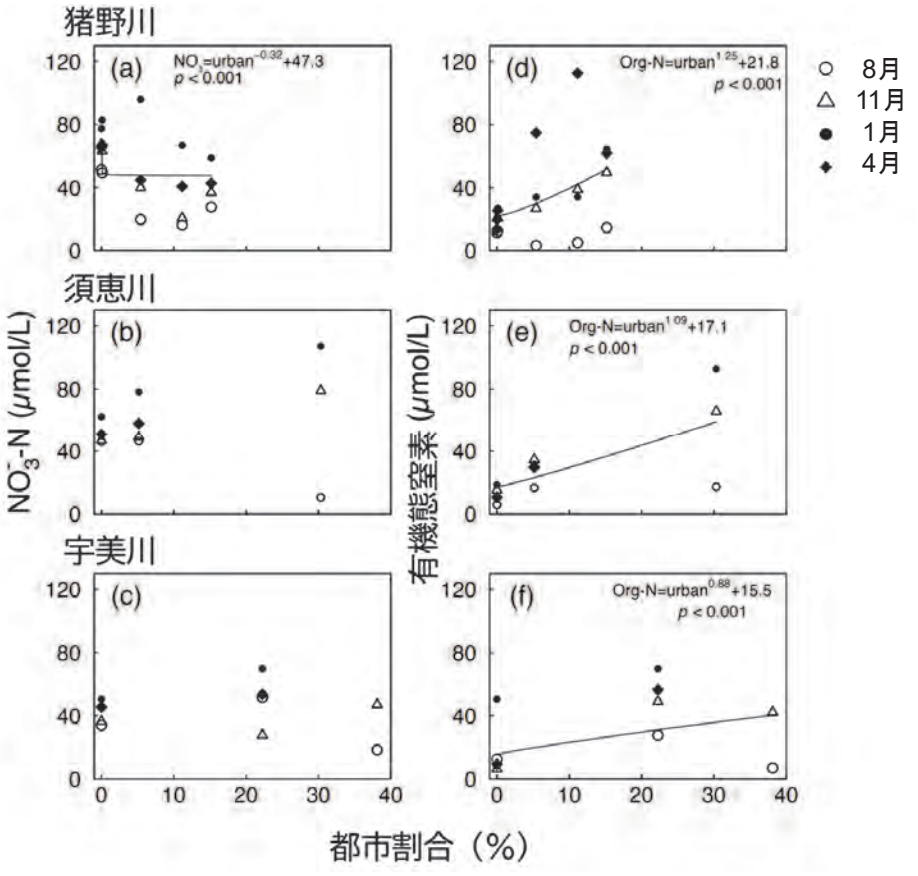


図 2. 猪野川、須恵川、宇美川の市街地の割合と硝酸イオン、有機態窒素濃度の関係

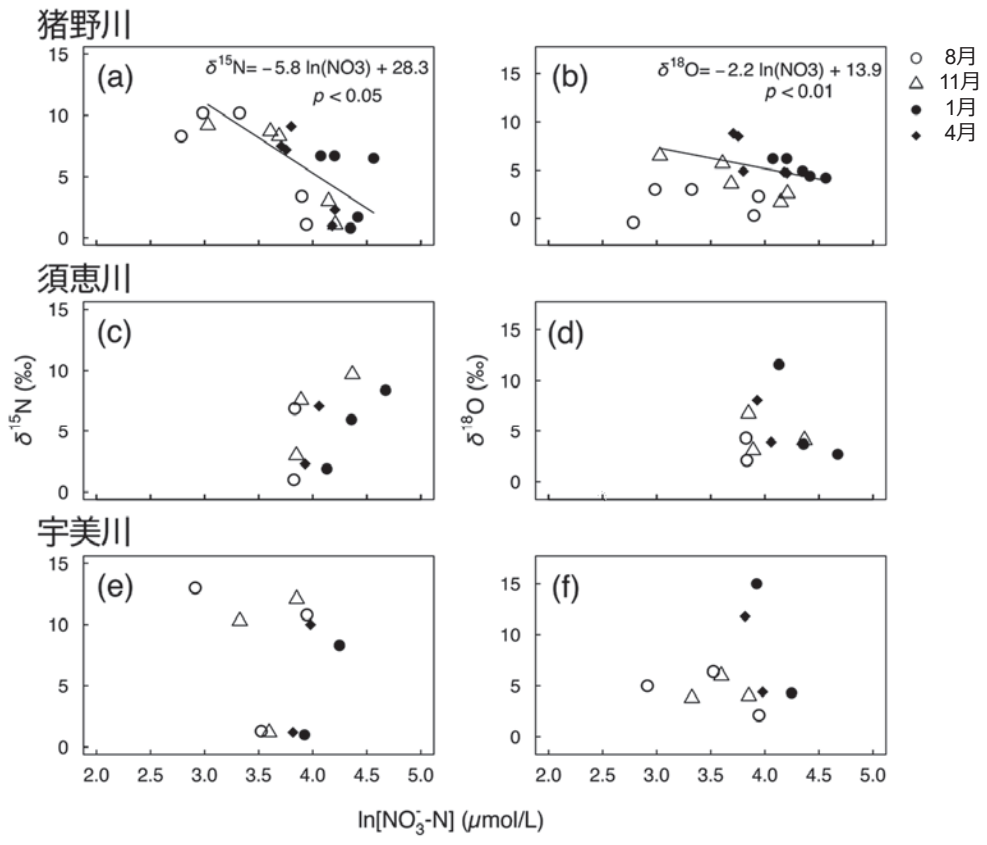


図 3. 猪野川、須恵川、宇美川の硝酸イオン濃度と窒素安定同位体比、酸素安定同位体比の関係

猪野川の流域で脱窒や同化が行われやすい環境を探すために、それぞれの河川が流れる地形の特徴を解析しました。NO_3^- を減少させる脱窒や同化といった現象は、生物によって引き起こされます。そのため、河川周囲の地形が緩やかな水が溜まりやすい場所では、水の流れが緩やかになるため、これらの生物の活動が盛んになります。一方の急な勾配の場所では、水が流れやすくなりこれらの影響は受けにくくなります。そこで、水文流出モデルを利用し、水の集まりやすい指標を比較しました。その結果、須恵川や宇美川と比べて猪野川では、都市域が増える下流域で水が集まりやすい傾向を示しました。都市域の割合が増える下流域や勾配の緩い流域を流れる場所では、上流の森林から供給された NO_3^- が脱窒や同化されていることがわかりました。

今回の研究では、下流の都市域であっても、水が停滞しやすい地形指標の河川下流部では、上流の森林から供給された NO_3^- が脱窒等の影響を受けて河川水中で存在形態を変化させていることが分かりました。河川水中の NO_3^- の上昇は、止水域の富栄養化などの問題の引き金となります。日本は 4 方を海に囲まれていますので、沿岸域で生じる赤潮の影響がよく知られています。森林域から高濃度の NO_3^- 流出がみられる河川では、流域規模での窒素循環（「雨からきた窒素を同位体比で追跡する」を参考）を考えていく必要があります。そのため、森林域からの高濃度の NO_3^- 流出がみられても、上流から下流までのモニタリングと、集水域の地形を詳細に見て流域管理を行って行くことが重要であることが分かりました。

文献

Chiwa M, Onikura N, Ide J, Kume A. (2012) Impact of N-saturated upland forests on downstream N pollution in the Tatara River Basin, Japan. Ecosystems 15: 230–241 https://doi.org/10.1007/s10021-011-9505-z

Shinozuka K, Chiwa M, Tayasu I, Yoshimizu C, Otsuki K, Kume A. (2017) Difference in Stream Water Nitrate Concentrations between a Nitrogen-Saturated Upland Forest and a Downstream Mixed Land Use River Basin 4: 43 https:// doi:10.3390/hydrology4030043

Kendall, C.; Elliott, E. M.; Wankel, S.D. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. In Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science; Michener, R. H., Lajtha, K., Eds.; Blackwell Publishing Ltd.: Oxford, UK, 2008; pp. 375–449.

謝辞

本研究は九州大学農学部の関係者のサポートによって実施されました。同位体比分析については地球環境科学研究所の陀安教授の指導の下で行われました。記して感謝いたします。

著者情報



篠塚賢一（福岡工業大学情報システム工学部研究員）2017 年九州大学大学院農学物環境農学専攻修了、博士（農学）。2017 年から九州大学学術研究員、福岡工業大学研究員（永淵研）、2019 年より福岡工業大学（徳安研）にて医療 AI の研究開発研究員。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

食料生産の向上と地球温暖化の抑制に関わる水田土壌の有機物蓄積プロセスを解き明かす

矢 内 純 太
（京都府立大学）

1. 水田土壌の有機物の重要性

土壌は陸域生態系の基盤であり、食料生産や陸域環境の保全に大きな役割を担っています。土壌の固相成分は、岩石由来の一次鉱物、土壌中で生成される二次鉱物、そして土壌に付加された動植物遺体が土壌中で様々に化学的変化を受けて生成する土壌有機物から構成されています。そのうち土壌有機物は、土壌粒子の集合体である土壌団粒の発達や保水性向上などの物理的機能から、養分保持能や緩衝能の向上および植物への各種養分の供給などの化学的機能、さらには土壌微生物の活性化などの生物的機能にいたるまで、土壌に様々な機能を付与しています（Brady and Weil, 2007）。

水田は、「瑞穂の国」と呼ばれる日本の稲作文化を支えるとともに、モンスーンアジアを中心にコメを主食とする国々の食料生産基盤として機能して世界人口の約 2/3 を支えるなど、日本においても世界においても非常に重要な役割を果たしています。そのため、水田土壌は、かけがえのない土壌資源であると言えるでしょう。さて、そのような水田の土壌有機物は、分解に伴って各種養分をイネに供給することによりイネの生育を促進し収量を向上させるとともに、大気中の炭素を土壌中に隔離しているという点で地球温暖化の抑制にも貢献していると考えられています（Lal, 2004）。たとえば、世界の農耕地土壌に毎年 0.4％ずつ炭素を蓄積することで、大気中の二酸化炭素の濃度上昇はゼロにできると試算されています（Minasny et al., 2017）。また、水田土壌は、一定期間湛水条件におかれることから、微生物による有機物分解が抑制され、森林・草地・畑地などの土壌と比べ土壌有機物が蓄積されやすいことも知られています。これらのことを総合的に捉えると、水田において土壌有機物を適切に蓄積させることは、食料生産の面でも環境保全の面でも望ましいことと考えられます。

2. 土壌有機物の理化学性に基づく分画

さて、本来であれば微生物に分解されてしまう有機物が土壌中で分解されないのは、土壌団粒中に閉じ込められたり土壌鉱物に吸着されたりして、「保護」されているためであると考えられています（Six et al., 2004; Zimmermann et al., 2007）。そのため、土壌有機物を保護の仕組みによって分画し、それぞれの特徴を評価すれば、土壌有機物全体を総体として評価するよりも土壌有機物の実態がより詳細に検討できることが期待されます。そこで本研究では、土壌有機物を「①保護なし（Light Fraction: LF）」「②団粒内に保持（Heavy Fraction: HF）」「③土壌鉱物に吸着（Oxidizable Fraction: OxF）」「④特に化学的に難分解構造で土壌鉱物に吸着（Non-Oxidizable Fraction: NOxF）」の 4 種類に分画しました（図 1）。ここで、水田土壌試料としては、東北農業研究センター（秋田県）、愛知県農業総合試験場、滋賀県農業技術振興センターにおける、化学肥料と有機質肥料の管理を組合わせた長期連用水田圃場の、表層土（0–15 cm）を用いました。

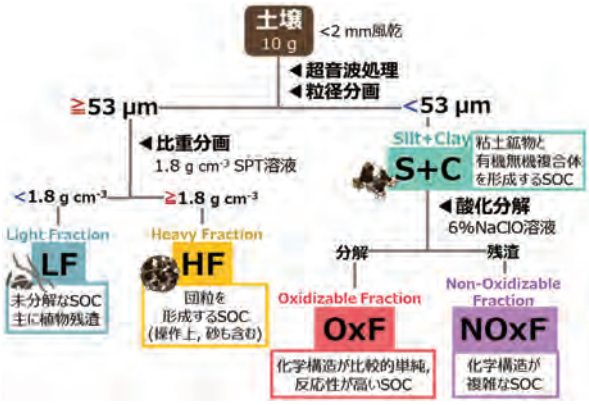


図 1. 保護機構に対応した、理化学性に基づく土壌有機物の分画

3. 水田土壌の有機物の画分別存在量

さて、土壌有機物量は、一般に土壌有機炭素量の約 1.7 倍として求めることができます。そこで、画分ごとの重量と炭素濃度をそれぞれ測定し、それらの積として画分ごとの炭素蓄積量を算出しました。その結果、全炭素蓄積量は、秋田、愛知、滋賀の平均値でそれぞれ 22.4、13.0、8.8 gC/kg でした。すなわち、土壌重量の約 1 ～ 2%が土壌炭素であり、土壌重量の約 2 ～ 4%が土壌有機物であることが確認されました。また、秋田、愛知、滋賀の画分ごとの存在割合は、全般的には、「③土壌鉱物に吸着（OxF）」が 45%、「④特に難分解構造で土壌鉱物に吸着（NOxF）」が 35%、「①保護なし（LF）」「②団粒内に保持（HF）」が 10%ずつでした（表 1）。このことは、水田中の土壌有機物は保護機構に対応しておよそ固有の存在割合をもち、物理的あるいは化学的に保護されているものの方がより多く存在することを示しています。それでは、これら画分ごとの有機物はどれほどの期間土壌中に存在するのでしょうか？

表 1. 愛知・滋賀・秋田の水田土壌の画分別炭素蓄積割合（平均値）

蓄積C (%)	愛知	滋賀	秋田
LF	7.9	13	9.4
HF	5.5	6.6	8.6
OxF	46	52	43
NOxF	41	29	39

4. 水田土壌の有機物の画分別平均滞留時間

そこで、有機物が平均でどの程度の期間土壌中に留まるかを表す「平均滞留時間」を、画分ごとに評価しました。すなわち、ある程度の平均滞留時間が見込まれる、「②団粒内に保持（HF）」「③土壌鉱物に吸着（OxF）」「④特に難分解構造で土壌鉱物に吸着（NOxF）」に対し、炭素の同位体分析に基づいた ^{14}C 年代測定により平均滞留時間を調べたところ、以下のような結果が得られました。

まず、画分別に比較すると、いずれも圃場や管理によって異なるものの、「④特に難分解構造で土壌鉱物に吸着（NOxF）」では約 1 ～ 3 千年を示したのに対し、「③土壌鉱物に吸着（OxF）」では非常に若いものから約 2 千年を、「②団粒内に保持（HF）」は非常に若いものから約千年を示し、より強い保護機構により守られている画分ほど長い平均滞留時間を取ることがはっきりと示されました。従って、保護機構は、画分別有機物の存在量のみならず平均滞留時間にも大きな影響を与えていました。

続いて肥培管理の影響を比較すると、画分によらず、無施肥区の平均滞留時間が最も長いのに対し、化学肥料の施用により幾分短くなり、有機肥料の施用によりさらに短くなることが示されました。有機物の動態において、比較的新鮮な有機肥料を施用することで平均滞留時間が短くなることは想定されていましたが、炭素を含まない、窒素・リン・カリウムの化学肥料を施用することでも土壌有機物の平均滞留時間が短くなることは、管理の上でも非常に興味深いものでした。これは、化学肥料の施用によりイネの生育が向上し、結果として土壌に還元されるイネの根などの有機物量が増加したためと考えることができます。

さらに、圃場間で比較すると、全般的に、愛知＞滋賀＞秋田の順番になりました。これは、愛知と秋田が細粒質土壌であるのに対し滋賀が団粒を作りにくく鉱物への吸着もしにくい砂質土壌であること、秋田の土壌が火山灰の影響を受けていて

有機物との反応性の高い非晶質鉱物を多く含むこと、秋田の年平均気温が愛知と滋賀より低いこと（低温ほど有機物分解は進みにくい）、などを反映し、土壌有機物の比較的分解を受けやすい画分が、秋田でもっとも多く分解されずに土壌に留まっていたためと考えられました。

5. まとめ

以上みてきたように、水田の土壌有機物は、保護機構に基づいて様々な画分から構成されていて、それぞれ存在量も平均滞留時間も異なることが明らかとなりました。強調しておきたいのは、このような保護機構は、土壌の鉱物や微生物と有機物との相互作用の下で、土壌そのものがシステムとして自然に発現させているということです。従って、土壌が持つこのような保護機能をうまく活用すれば、我々は水田により多くの土壌有機物をより持続的に蓄積することができ、食料生産の向上と地球温暖化の抑制という我々の生存に関わる 21 世紀の重大な課題にも貢献することができると考えられます。

謝辞

貴重な長期連用圃場の土壌試料をご提供くださった、東北農業研究センター、愛知県農業総合試験場、滋賀県農業技術振興センターの皆様と、ともに研究を進めてくれた研究室のメンバーに、心より感謝申し上げます。

文献

Brady NC, Weil RR (2007) The Nature and Properties of Soils (14th ed.), Pearson.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food sequrity. Science 304: 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Minasny B et al. (2017) Soil carbon 4 per mille. Geoderma 292: 59–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002

Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research 79: 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008

Zimmermann M, Leifeld J, Schmidt MWI, Smith P, Fuhrer J (2007) Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. European Journal of Soil Science 58: 658–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x

著者情報



矢内純太（京都府立大学大学院生命環境科学研究科教授）京都大学大学院農学研究科博士課程修了、博士（農学）。京都大学農学部助手、大学院地球環境学堂助手、京都府立大学大学院農学研究科助教授を経て、2011 年より現職。専門分野は土壌学。土壌肥沃度の評価と管理、陸域生態系の持続的管理などに取り組んでいる。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

街路樹の炭素安定同位体比から COVID19 による産業活動停滞の影響検出を試みる

半　場　祐　子
（京都工芸繊維大学　応用生物学系）

1. 日本の大気汚染の現状

日本の都市部で、大気汚染物質である窒素酸化物の問題が最も顕著だったのは 1985 年前後でした。1990 年代なかば以降は、日本の大気中の窒素酸化物の量は着実に減少しています。2019 年には京都市において、二酸化窒素の大気中の濃度は、ピーク時の 1/3 近くまで減少している地点もあります。一方、2000 年代以降は、アジア地域で中国やインドなどの著しい経済成長に伴って大気汚染が劇的に悪化し、越境汚染として周辺の国々にも大きな影響を及ぼすようになりました。大気汚染の問題は、アジア地域における最も重要な環境問題の一つとなっています。

都市における窒素酸化物の主な排出源は、自動車です。年間の窒素酸化物の排出量は、乗用車などと比べると、大型車（いわゆるトラック）が圧倒的に大きくなっています。日本の都市部で大気中の二酸化窒素量が着実に減少してきた背景には、排気ガス浄化装置の搭載など、トラックの環境性能が大幅に向上したことがあります。

しかし、交通量が非常に多い幹線道路沿いなどでは、依然として二酸化窒素のレベルは高く、交通量が少ない郊外との間には大きな差があります。京都市の二酸化窒素のレベルが高い地点では、2019 年時点でも 1 年の半分以上の日数で環境基準の濃度（0.02 ppm とした場合）を超えています。大気汚染は、日本においても過去の問題とはいえないのです。

2. 炭素安定同位体比から街路樹の大気汚染ストレスを診断する

都市に植栽されている街路樹は、樹冠で大気汚染物質を吸収・捕捉したり、木陰をつくって高温化を抑えたり、光合成で二酸化炭素を吸収するなどの多くの効用を持っています。光合成は街路樹の生長や生存を支える生理的な働きであるため、光合成活性を維持することは、都市部で樹木が生存していくためには必須です。しかし、光合成に必要な二酸化炭素を取り込む「気孔」は、大気汚染ストレスを感じるといち早く閉じてしまい、その結果、光合成が低下してしまいます。

植物の葉に含まれる光合成産物の炭素安定同位体比（$\delta^{13}C_{plant}$）は、植物の光合成活動による同位体比の変化（$\Delta^{13}C$）と、大気の同位体比（$\delta^{13}C_{air}$）によって決まります。$\Delta^{13}C$ は、平均的な気孔の開度を反映します（図 1）。気孔があまり開いていないと、軽い方の同位体（^{12}C）が植物に取り込まれにくくなるためです。ストレスを感じると、多くの場合、気孔は閉じていきます。このような

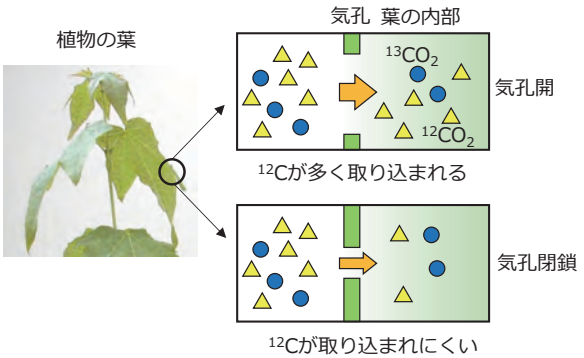


図 1. 葉の内部への炭素安定同位体 ^{12}C の取り込まれ方は、気孔が開いているときと閉じているときで異なる。木本植物の生理生態（2020）を改変。

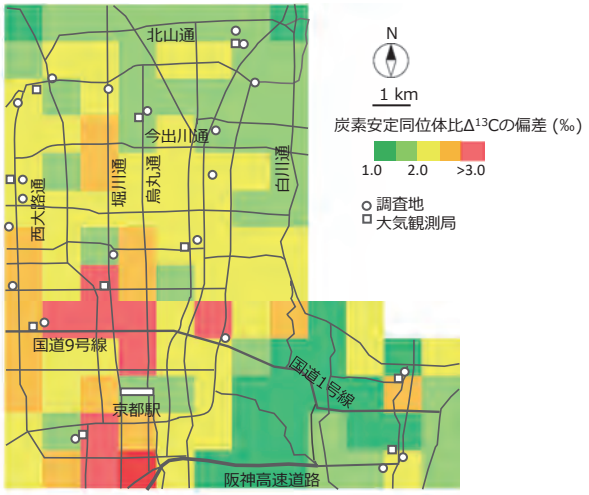


図 2. 常緑低木であるヒラドツツジの葉の $\Delta^{13}C$ の偏差を京都市内でマッピング。$\Delta^{13}C$ の偏差が大きいほど強いストレスがかかっている。

ことから、$\Delta^{13}C$ の値から、植物が受けている大気汚染ストレスを診断できます。

3. 京都市内における交通量の違いと街路樹の大気汚染ストレス：$\Delta^{13}C$ の空間的変化

わたしたちは $\Delta^{13}C$ を使って、京都市内の場所による交通量の違いが、街路樹の大気汚染ストレスとどのように関係しているのかを調査しました。その結果、街路樹であるヒラドツツジは、交通量が多い、つまり二酸化窒素量が多い場所にあるほど、気孔が閉じていました。このことから、大気中の二酸化窒素が、ヒラドツツジの光合成機能に悪影響を及ぼしていることが分かりました（図 2）。なお、ヒラドツツジは常緑の低木で、京都府だけで約 90 万本が植栽されており、街路樹の低木の中では 40％以上を占め、日本国内でも最も多く利用されている樹木種です。

4. 街路樹の炭素安定同位体比から COVID19 による産業活動停滞の影響を検出する：$\Delta^{13}C$ の時間的変化

大気汚染の大きな要因になっているのは、トラックから排出される窒素酸化物です。そして、トラックの通行台数は、経済産業活動を強く反映しており、好景気のときには増加し、不景気のときには減少します。首都高速道路では、トラックの通行台数の変化が、景気の変化に 3ヶ月先行して生じる、という研究結果も出されています。

2020 年から始まった新型コロナウイルス感染症（COVID19）の流行は、世界的な経済産業活動の低下を引き起こし、日本も例外ではありませんでした。この経済産業活動の低下により、トラックなどの車両の通行台数が減り、大気中の二酸化窒素量も減ったと考えられます。その結果として、大気汚染物質の影響を受けやすいヒラドツツジなどの街路樹では、光合成機能低下が緩和された可能性があります。

わたしたちは 2005 年から 2021 年にかけて断続的に、京都市を中心とした都市域で街路樹の葉を採取して $\Delta^{13}C$ 解析を行っています。葉の $\Delta^{13}C$ の経年変化を追跡することで、街路樹の光合成機能に、COVID19 による経済産業活動の低下がどのように影響したのかを検出できる可能性があります。

次のようにして調査を行いました。

1）交通量が異なり、大気中の窒素酸化物の濃度が異なると予想される調査地を 2005 年～2020 年に京都市内を中心として選定しました。

2）街路樹であるヒラドツツジとイチョウの葉を採取して $\Delta^{13}C$ を測定し、調査地点の二酸化窒素濃度との関係を調べました。$\Delta^{13}C$ を計算するために、実測した大気中の二酸化炭素の炭素安定同位体比をもちいて補正をしました。窒素酸化物の濃度は、国立環境研究所から提供されているデータベースの値を引用しました。

5. ヒラドツツジは 2020 年・2021 年に大気汚染ストレスが緩和されている可能性がある

まず京都市の 2005 年～2021 年の二酸化窒素濃度を解析したところ、特に交通量が多い大気汚染物質観測局で、リーマンショックが起こった 2009 年に大幅な落ち込みが見られ、さらに 2020 年と 2021 年にも落ち込みがみられました（図 3）。さらに、緊急事態宣言や蔓延防止などの措置がとられている期間に、特に二酸化窒素濃度の落ち込

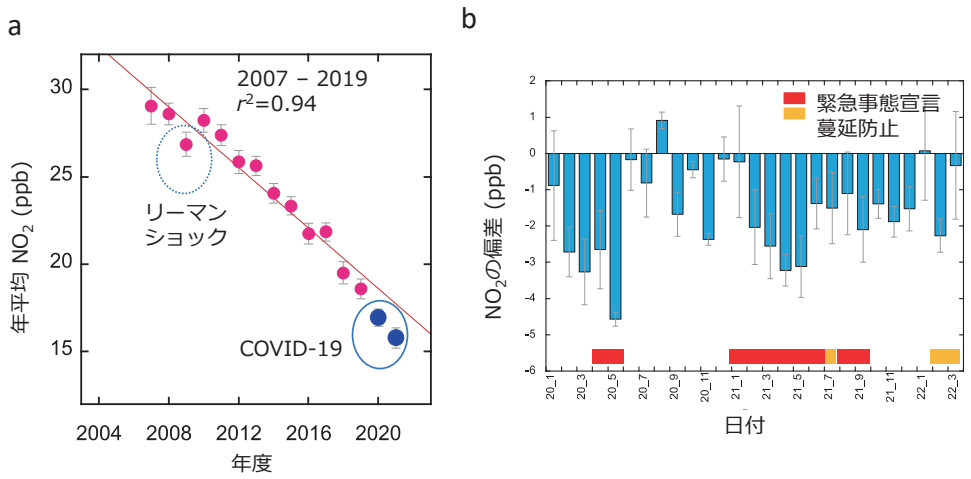


図 3. （a）京都市内で最も二酸化窒素濃度が高い 3 つの観測局における、2007 年から 2021 年までの二酸化窒素濃度平均値の年変化。2007–2019 年のデータの回帰直線を図中に示す。（b）2007–2019 年のデータを直線回帰したときに予測される 2020 年、2021 年の値と、実際の観測地との偏差。NO_2 データ：http://www.nies.go.jp/igreen/td_down.html

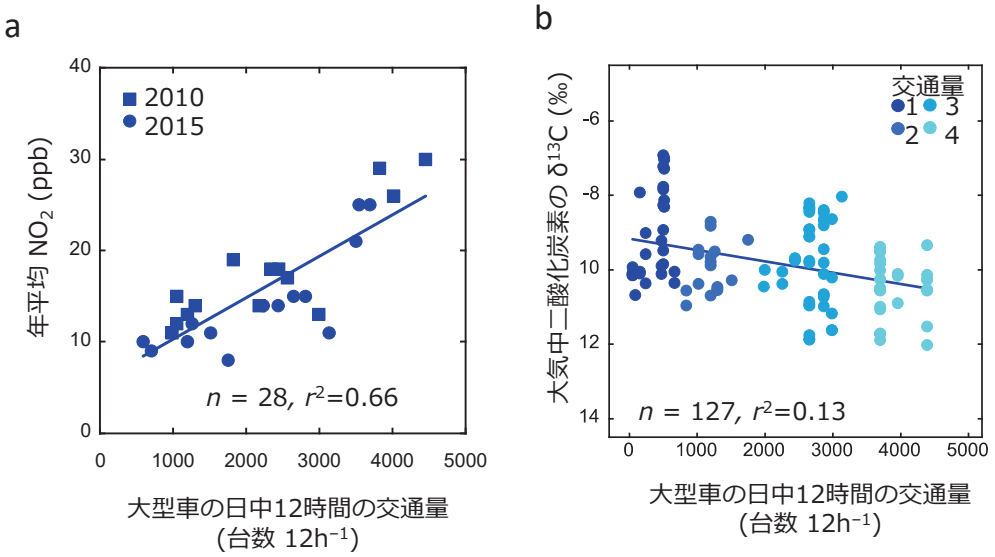


図 4. （a）京都市内の 14 の観測局における二酸化窒素濃度の平均値と、その観測局付近の大型車の日中 12 時間交通量との関係。2010 年と 2015 年のデータを示す。（b）大気中の二酸化炭素の炭素安定同位体比（$\delta^{13}C$）と大型車の日中 12 時間交通量との関係。2010 年・2015 年の日中大型車交通量のクラスター分析により調査地を 4 分類：1（4,900 台 /12h）、2（14,100 台 /12h）、3（23,700 台 /12h）、4（38,600 台 /12h）。
NO_2 データ：http://www.nies.go.jp/igreen/td_down.html
交通量データ：平成 22 年度・平成 27 年度交通センサス

みが大きいことも示唆されました。2020 年と 2021 年に、COVID19 による影響が二酸化窒素濃度の減少となって現れている可能性があります。ただし、2020 年と 2021 年の二酸化窒素濃度の減少幅は、2009 年のときよりは緩やかでした。

トラックの交通量と二酸化窒素濃度との関係を分析したところ、トラック交通量が多いほど二酸化窒素濃度が高くなりました（図 4）。葉の $\Delta^{13}C$ と二酸化窒素濃度との関係を見てみると（図 5）、イチョウでは二酸化窒素濃度に対して $\Delta^{13}C$ がほとんど変化していませんが、ヒラドツツジでは二酸化窒素濃度が高いほど $\Delta^{13}C$ は高くなりました。ヒラドツツジでは、二酸化窒素濃度が高いほど強いストレスがかかっていることを示しています。

2005 年～2019 年の $\Delta^{13}C$ データを、COVID19 の影響があった 2020 年または 2021 年のデータと

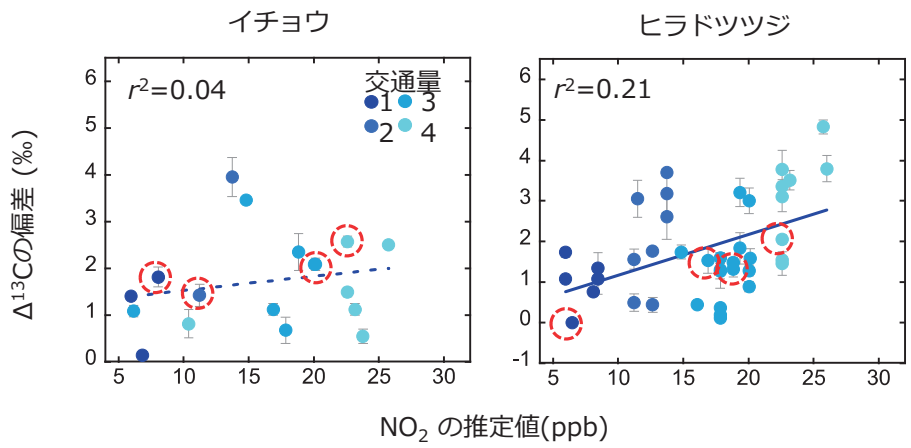


図 5. 京都市内における街路樹 2 種、イチョウとヒラドツツジの葉における炭素安定同位体比 Δ^{13}C の偏差と、交通量から推定された NO_2 濃度との関係。赤い囲みは 2020 年と 2021 年のデータ。2010 年・2015 年の日中大型車交通量のクラスター分析により調査地を 4 分類：1（4,900 台 /12h）、2（14,100 台 /12h）、3（23,700 台 /12h）、4（38,600 台 /12h）。
NO_2 データ：http://www.nies.go.jp/igreen/td_down.html
交通量データ：平成 22 年度・平成 27 年度交通センサス

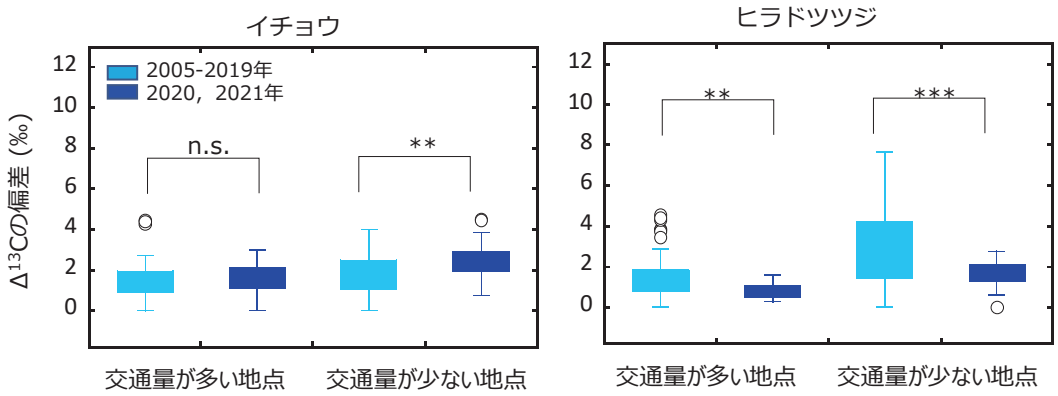


図 6. 京都市内における街路樹 2 種、イチョウとヒラドツツジの葉における炭素安定同位体比 Δ^{13}C の偏差について、2005–2019 年までのデータを 2020 年または 2021 年のデータと比較。

比較してみました（図 6）。イチョウでは 2020 年に Δ^{13}C は増加しましたが[1)]、ヒラドツツジでは逆に、2021 年に Δ^{13}C は減少しました。このことから、ヒラドツツジでは、COVID19 の影響があった年に、大気汚染によるストレスが緩和されている可能性が示唆されます。

6. まとめ ― 街路樹ストレス診断ツールとしての炭素安定同位体 ―

大気中の二酸化窒素濃度が、リーマンショックが起こった 2009 年と、COVID19 の影響下にあった 2020 年・2021 年に減少していることは、この時期の産業経済活動の停滞を反映している可能性があります。さらに 2021 年に、ヒラドツツジで Δ^{13}C が減少したことは、二酸化窒素濃度が低くなったことにより、ストレスの影響が緩和したとも考えられます。

ただし、今回の研究では、二酸化窒素濃度について、年度とともに単調減少すると仮定して 2020 年・2021 年の二酸化窒素濃度を予測し、その予測値と実測値のずれを検出する、という簡単なモデルを用いています。COVID19 の影響を確実に検出するためには、より精密なモデルが必要である点に注意が必要です。

注釈

1） イチョウで 2020 年に $\Delta^{13}C$ が増加した理由は不明ですが、二酸化窒素濃度以外の要因によるものと考えられます。

文献

ニッセイアセスメント株式会社　コラム　吉野貴晶の「景気や株価の意外な法則」
https://www.nam.co.jp/market/column/hosoku/2017/170824.html

国立環境研究所データベース・大気環境月間値・年間値データ
http://www.nies.go.jp/igreen/td_down.html

飯塚 康雄, 舟久保 敏（2018）わが国の街路樹 VIII　国土技術政策総合研究所資料　国土交通省国土技術政策総合研究所
http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1050pdf/ks105002.pdf

Mayu Matsumoto, Takashi Kiyomizu, Saya Yamagishi, Tomomitsu Kinoshita, Luisa Kumpitsch, Atsushi Kume, Yuko T. Hanba (2022) Responses of photosynthesis and long-term water use efficiency to ambient air pollution in urban roadside trees. Urban Ecosystems 25, 1029–1042. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-713702/v1

半場祐子（2020）「安定同位体から見た森林樹木」In: 木本植物の生理生態（小池孝良・北尾光俊・市栄智明・渡辺 誠　編）、共立出版、pp.123–138

著者情報



半場祐子　京都工芸繊維大学　応用生物学系　植物分子工学研究室教授。博士（理学）。専門は植物生理生態学。1996 年に京都大学理学研究科で学位取得後、岡山大学資源植物科学研究所を経て、2004 年より京都工芸繊維大学フィールド科学教育研究センターに勤務。2012 年 4 月より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）
（2023 年 3 月 31 日改題・改版）

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

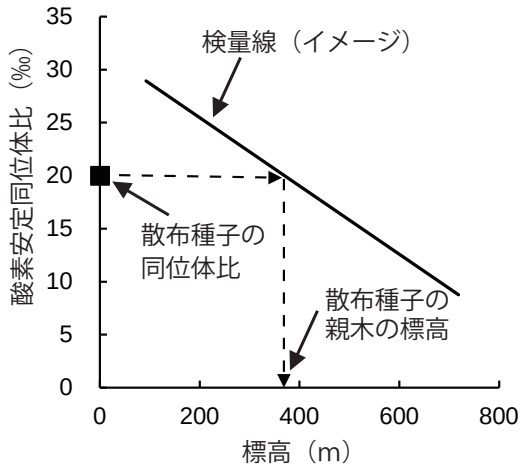


図 1. 散布されていない種子の酸素安定同位体比と標高の関係

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

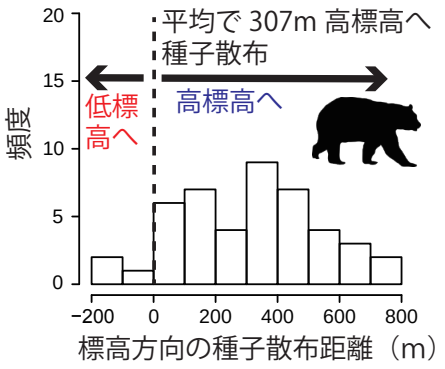


図 3. ツキノワグマによる標高方向の種子散布
(Naoe et al. 2016b)

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

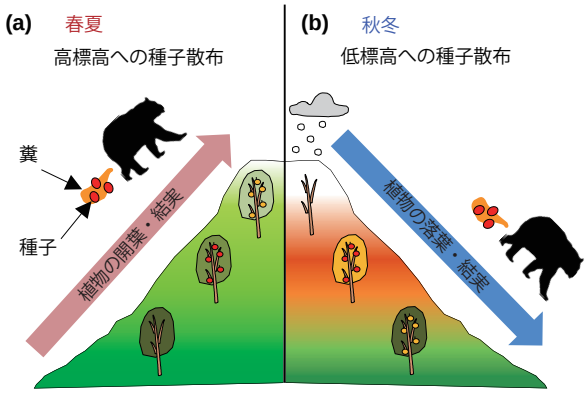


図 4. 哺乳類による種子散布（a）春夏では山麓から山頂にかけて植物の開葉や結実が進み、それを哺乳類が追いかけた結果、種子が高標高に散布されます。（b）秋冬では山頂から山麓にかけて植物の落葉や結実が進み、種子が低標高に散布されることが予想されます。
(Naoe et al. 2019)

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）。

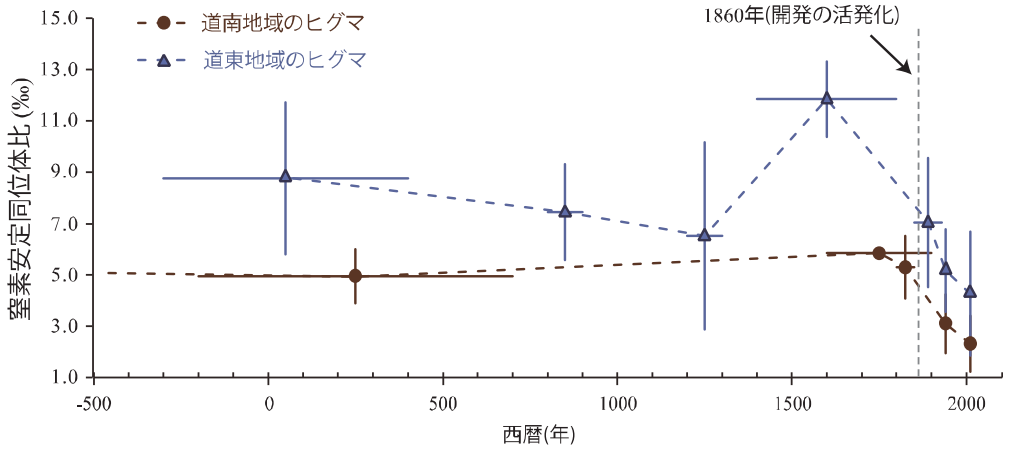


図 2. 動物質食物利用の指標となる、窒素同位体比の時間変化。1860 年前後を境に窒素同位体比が減少し始めたことが分かる。

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。

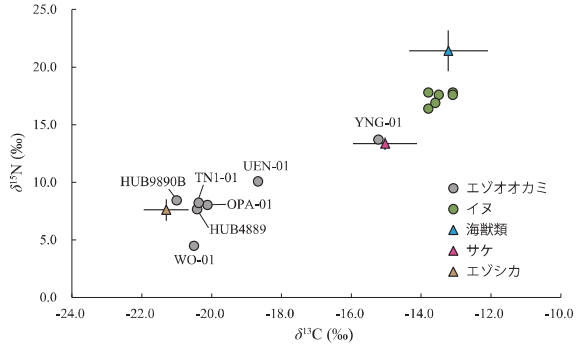


図 4. エゾオオカミ（及び飼いイヌ）とその餌資源の炭素・窒素安定同位体比。

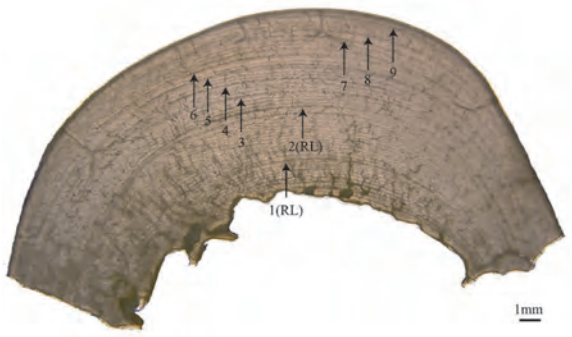


図 5. ヒグマの大腿骨の横断切片の写真。複数の成長停止線（図中の矢印）が確認できる。

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

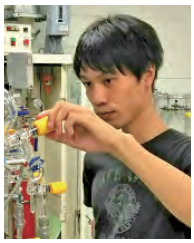
Matsubayashi J, Morimoto J, Tayasu I, Mano T, Nakajima M, Takahashi O, Kobayashi K, Nakamura F (2015) Major decline in marine and terrestrial animal consumption by

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）

アミノ酸の窒素同位体比が開く世界

大河内　直彦
（海洋研究開発機構）

窒素同位体比は、多様な生き物が織りなす食物網の解析に広く用いられてきました。これは、「食う－食われる」の関係によって、窒素同位体比が3～4‰上昇するというよく知られた知見が基礎となっています。生き物の窒素の多くは20種類のアミノ酸の窒素ですから、個々のアミノ酸の窒素同位体比を測れば、さらに詳細な知見を得ることができます。ここではそんな研究を紹介したいと思います。

20種類のアミノ酸の中でも、生き物の食物網を知るためには特にグルタミン酸とフェニルアラニンが役に立つことがわかっています。動物にとってグルタミン酸は非必須アミノ酸（体内で合成できるアミノ酸）ですが、多くの場合自ら合成することはなく、食物に含まれるグルタミン酸をそのまま利用しています。グルタミン酸は、動物の体内でアミノ基（$-NH_2$）が脱離してケト酸（α-ケトグルタル酸）に代謝され、その時に窒素同位体が分別します。これによって、捕食者のグルタミン酸の窒素同位体比は、被食者のそれに比べて平均8.0‰規則的に高くなります。

一方、フェニルアラニンの代謝ではアミノ基の脱離はほとんど起きず、水酸基（−OH）が付加されてチロシンになります。アミノ基が関わらないこの代謝では、窒素同位体の分別は原理的に起こりません。したがって、フェニルアラニンの窒素同位体比は、食物連鎖を通してほぼ一定に保たれることになります。実際、さまざまな生物について詳しく調べた結果、被食者から捕食者への同位体比の上昇は、平均するとわずか0.4‰にすぎないことがわかっています。さらにほとんどの動物にとってフェニルアラニンは必須アミノ酸（体内で合成できないアミノ酸）ですから、それはすべて食物に由来しています。つまり高次の捕食者といえども、それがもつフェニルアラニンの窒素同位体比は、生態系の基盤をなす樹木や藻類などの植物（独立栄養生物）の同位体比に近い値をもちます。

さらに興味深いことに、そういった植物についてグルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体比を比べると、非常に安定した関係性がみられます。つまり、前者が後者より、水域の植物では平均3.4‰高く、陸域の植物では平均8.4‰低いという生物種に依存しない関係です。上に述べたことを示したのが図1で、栄養段階とそれぞれのアミノ酸の窒素同位体比とを関連づける数式は以下のようになります（Chikaraishi et al., 2009, 2014）。

（水域生物）

$$栄養段階 = (\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4) / 7.6 + 1$$

（陸域生物）

$$栄養段階 = (\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} + 8.4) / 7.6 + 1$$

ちなみに栄養段階とは、植物プランクトンなどの独立栄養生物が1、それを食べる植食者が2、植食者だけを食べる動物が3という数値です。多様な生き物を捕食することによって小数点以下の数値もありえます。重要なことは、生き物の栄養段階がグルタミン酸とフェニルアラニンの「窒素同位体比の差」の単純な一次関数として表せることです。目的生物の試料さえ手にすればその栄養段階を知ることができることが、従来法と比べた長所の一つです。栄養段階の推定誤差は、理論上0.1程度であることがわかっています。

これまでの研究は、この手法がほとんどの生態系について成り立つことを示唆してきました

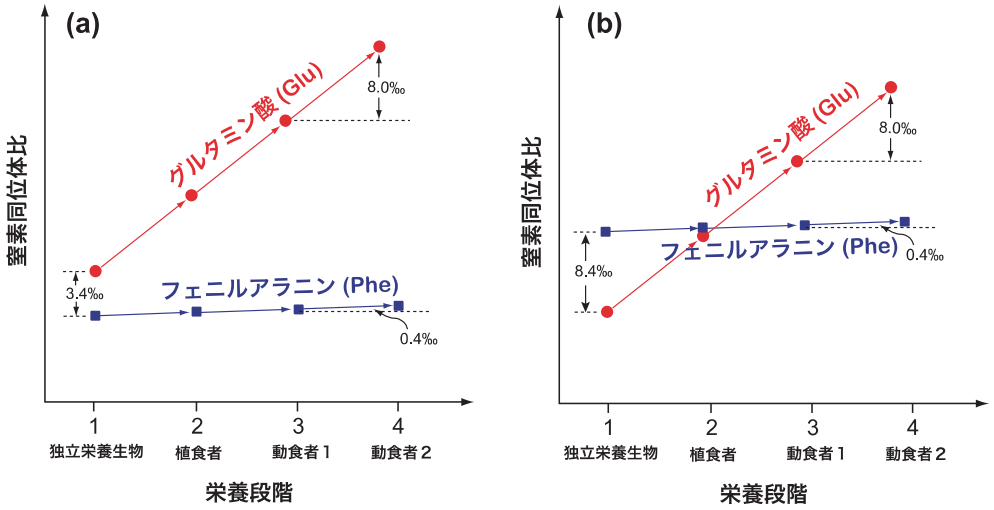


図 1. グルタミン酸 (Glu) とフェニルアラニン (Phe) の窒素同位体比を用いて、(a) 水域に暮らす生き物と (b) 陸域に暮らす生き物の栄養段階を推定する方法の原理（Chikaraishi et al., 2009, 2014 を改変）。

(Ohkouchi et al., 2017)。この新しい方法の応用例について以下に紹介します。

東北沖の底魚の例

世界有数の漁場の一つとして知られる東北沖で採取された底魚類、つまり海底および海底付近を主な生活場にする多様な生き物の栄養段階を推定した結果を図 2 に示します (Ohkouchi et al., 2016)。ここで示した 25 種の生物の栄養段階は 2.6 から 4.5 まで分布することがわかります。同じカレイ目でもミギガレイは平均 3.2 であるのに対し、アカガレイは 4.1 程度でかなり異なるようです。また蒲鉾の材料になるスケソウダラの栄養段階は平均 3.9、蒲焼きにして食されるイラコアナゴの栄養段階は最も高い 4.5 であることがわかります。

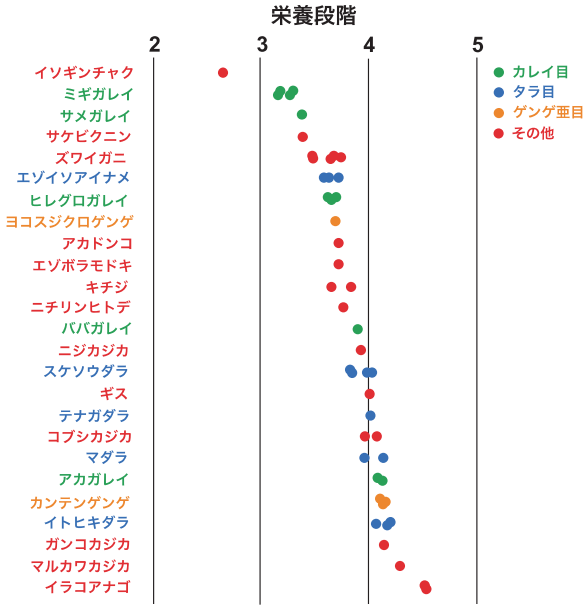


図 2. 東北沖で採取された生き物の栄養段階（Ohkouchi et al., 2016 を改変）。

環境変化が生き物の食性に及ぼす影響：琵琶湖のイサザの例

よく知られているように、琵琶湖では高度成長期に富栄養化が進行しました。琵琶湖の北湖では、1950 年代から深層水中に硝酸が蓄積し始めています。60 年代から 70 年代にかけて、夏になると各地でアオコが発生し水質の悪化は顕著になりました。こういった水質汚染と、それにブルーギルやブラックバスなど移入種の増加によって、プランクトン種や魚種が大きく入れ替わりました。そんな環境変化が生態系や生き物の食性にどのような影響を及ぼしてきたのでしょうか？　そんな問いに答えるべく、ハゼ科魚類のイサザを用いた研

究を紹介します。

イサザは研究用試料として 20 世紀初頭から琵琶湖の北湖で採取され、ホルマリン固定されて保存されてきました。このホルマリン固定ではアミノ酸の窒素同位体比は変質しないので、こういった試料を用いることにより過去の生態系情報を保持しているはずです。

京都大学がもつ膨大なアーカイブ試料の中から選び出されたほぼ同じ体長をもつ 1 歳魚のイサザのアミノ酸窒素同位体比を図 3 に示しました（Ogawa et al., 2013）。それによると、20 世紀を通してイサザの栄養段階は 3.2 ～ 3.3 の横ばいでほとんど変化していません。つまり富栄養化は進んだものの、イサザの食糧の平均的な栄養段階は 2.2 ～ 2.3 で変わらず、主に動物プランクトンやヨコエビなどを食し続けてきたと推定されます。環境と生態系が大きく変化したのですが、それに応じて代替種を食べることで適応してきたのでしょう。食物連鎖の中における機能という意味ではあまり変わらなかったと言うこともできそうです。

わが国の湖沼において環境汚染が顕著に進行したのは、高度成長期のことが多いですから、環境変化が生態系に及ぼす影響を知るには、過去の記録を読むことが重要になります。その一方で全国各地の博物館や大学などには、琵琶湖のイサザのようにホルマリン固定試料として膨大な数の試料が保存されています。そういった保存試料の解析が進めば、環境変化が生態系に及ぼしてきた影響が、これまで以上に明らかになってくるでしょう。

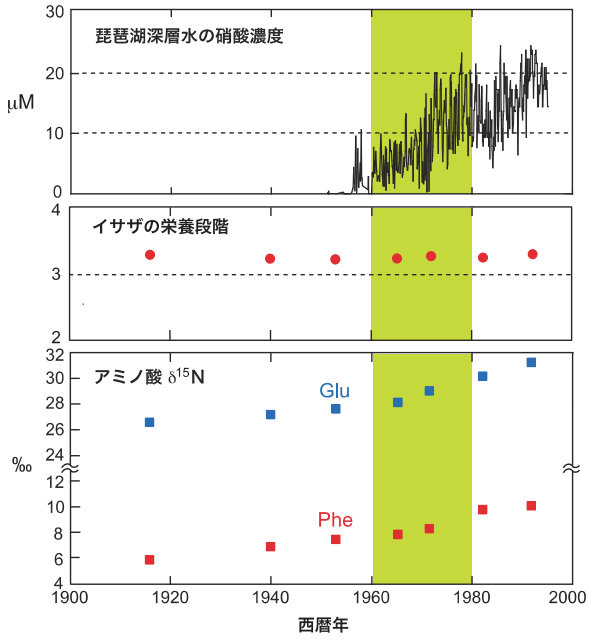


図 3. 20 世紀における琵琶湖（北湖）の深層における（上）硝酸濃度の変化、（中）イサザの栄養段階の変化、（下）グルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体比の変化（Ogawa et al., 2013 を改変）。

縄文人の食性解析

有機物の塊である生き物の軟体部は多くの場合、死後すぐに分解されてしまいます。しかし、生物が作り出す硬組織中には、長期にわたって有機物が保存されます。実際、骨（リン酸カルシウム）、歯（リン酸カルシウム）、卵の殻（炭酸カルシウム）、貝殻（炭酸カルシウム）といった硬組織中に含まれるアミノ酸を抽出して窒素同位体比を測定すると、その生物の食性を復元することができることが知られています。ここでは、私たちが東京大学と共同で行った、骨化石の中に含まれるコラーゲンのアミノ酸を用いて、縄文人の人骨化石に応用した例について紹介しましょう。

図 4 は、内陸である長野県の栃原岩陰遺跡、北村遺跡（それぞれ縄文時代早期、後期）で見出された縄文人骨と、北海道の沿岸域の北黄金貝塚（縄文時代前期～中期）で見出された縄文人骨から抽出したコラーゲン中のアミノ酸の窒素同位体比を示したものです（Naito et al., 2010, 2013）。内陸部の縄文人は、同所で発見される動物と同一の生態系に属し、その栄養段階が平均すると 2.7 程度であることがわかります。つまり彼らのタンパク源の少なくとも 7 割程度が、化石として残されているシカなどの草食動物から来ていたことを示唆しています。それに対し、沿岸域に住む当時の縄文人のタンパク源は、海洋生態系に大きく偏っていたことがわかります（タンパク源の 8 割程度）。海陸両方のタンパク源に依存するこのようなケースでは、その栄養段階を一義的に決めることは理論上できませんが、図 4 からは海からくるタンパ

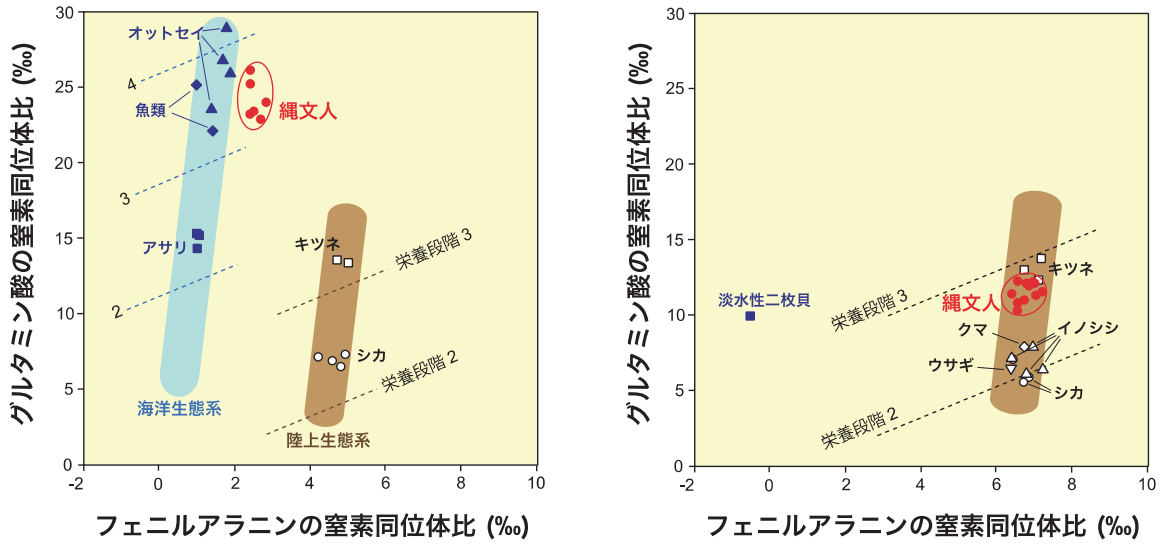


図 4. 縄文人の食性解析へ応用した例。(左)北海道沿岸域にある北黄金貝塚から得られた骨や貝試料の分析結果(Naito et al., 2010 を改変)。(右) 内陸の栃原岩陰遺跡と北村遺跡から得られた骨や貝試料の分析結果 (Naito et al., 2013 を改変)

ク源がホタテの栄養段階（～ 2.4）よりもいくらか高かったことが予想され、高次捕食者である魚類やオットセイなどをかなり口にしていたであろうことも窺えます。

おわりに

このようにアミノ酸の窒素同位体比は、生き物の食性に関する多様な研究のツールになり、さまざまな分野で少しずつ応用され始めています。ここでは述べませんでしたが、フェニルアラニンの窒素同位体比が植物、ひいてはその栄養源となる硝酸やアンモニアなどの窒素同位体比に大きく左右されることを用いて、生物が生息していた環境場の復元や移動経路の追跡にも応用できます。たとえば、サケの骨に記録された同位体記録を用いて回遊ルートの推定などが行われています (Matsubayashi et al., 2020)。

さらにここで紹介した方法論は、微生物が関わる系でも基本的に成り立つことがわかっています。つまり、生食連鎖の裏側ともいうべき腐食連鎖でも、アミノ酸の窒素同位体比を用いた栄養段階推定法は原理的に威力を発揮します (Yamaguchi et al., 2017)。このようにアミノ酸の窒素同位体比は、自然界における生き物の暮らしを知る貴重なツールになるのです。

文献

Chikaraishi Y, Ogawa NO, Kashiyama Y, Takano Y, Suga H, Tomitani A, Miyashita H, Kitazato H, Ohkouchi N (2009) Elucidation of aquatic food-web structure based on compound-specific nitrogen isotopic composition of amino acids. Limnology and Oceanography, Method 7: 740–750. https://doi.org/10.4319/lom.2009.7.740

Chikaraishi Y, Steffan SA, Ogawa NO, Ishikawa NF, Sasaki Y, Tsuchiya M, Ohkouchi N (2014) High-resolution food webs based on nitrogen isotopic composition of amino acids. Ecology and Evolution 4: 2423-2449. https://doi.org/10.1002/ece3.1103

Matsubayashi J, Osada Y, Tadokoro K, Abe Y, Yamaguchi A, Shirai K, Honda K, Yoshikawa C, Ogawa NO, Ohkouchi N, Nagata T, Naito YI, Miyamoto H, Nishio S, Tayasu I (2020) Tracking long-distance ocean migration of marine fishes using compound-specific stable isotope analysis of

amino acids. Ecology Letters 23: 881–890. https://doi.org/10.1111/ele.13496

Naito Y, Honch N, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Yoneda M (2010) Quantitative evaluation of marine protein contribution in ancient diets based on nitrogen isotope ratios of individual amino acids in bone collagen: An investigation at the Kitakogane Jomon site. American Journal of Physical Archaeology 143: 31–40. https://doi.org/10.1002/ajpa.21287

Naito Y, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Yoneda M (2013) Evaluation of carnivory in inland Jomon hunter-gatherers based on nitrogen isotope ratios of individual amino acids in bone collagen. Journal of Archaeological Science 40: 2913–2923. https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.03.012

Ohkouchi N, Shibata H, Nomaki H, Ogawa NO, Chikaraishi Y, Goto T, Fujikura K, Kitazato H (2016) A monitoring result of polychlorinated biphenyls (PCBs) in deep-sea organisms and sediments off Tohoku during 2012-2014: temporal variation and the relationship with the trophic position. Journal of Oceanography 72: 629–639. https://doi.org/10.1007/s10872-016-0359-z

Ohkouchi N, Chikaraishi Y, Close HG, Fry B, Larsen T, Madigan DJ, McCarthy MD, McMahon KW, Nagata T, Naito YI, Ogawa NO, Popp BN, Steffan S, Takano Y, Tayasu I, Wyatt ASJ, Yamaguchi YT, Yokoyama Y (2017) Progresses and challenges with the use of amino acid nitrogen isotopic compositions in ecological and biogeochemical studies. Organic Geochemistry 113: 150–174. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2017.07.009

Ogawa NO, Chikaraishi Y, Ohkouchi N (2013) Trophic position estimates of formalin-fixed samples with nitrogen isotopic compositions of amino acids: an application to gobiid fish (Isaza) in Lake Biwa, Japan. Ecological Research 28: 697–702. https://doi.org/10.1007/s11284-012-0967-z

Yamaguchi Y, Chikaraishi Y, Takano Y, Ogawa NO, Imachi H, Yokoyama Y, Ohkouchi N (2017) Fractionation of nitrogen isotopes during amino acid metabolism in heterotrophic and chemolithoautotrophic microbes across Eukarya, Bacteria and Archaea: Effects of nitrogen sources and metabolic pathways. Organic Geochemistry 111: 101–112. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2017.04.004

著者情報



大河内直彦（海洋研究開発機構海洋機能利用部門部門長）1995 年東京大学大学院理学系研究科修了、博士（理学）。京都大学生態学研究センター研修員、北海道大学助教、ウッズホール海洋研究所ポストドクトラルフェロー、固体地球統合フロンティア研究システム研究員などを経て、2019 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

サケは海でどこを泳いで帰ってくるの？
― 同位体地図（アイソスケープ）を用いた回遊経路の復元 ―

松　林　　順
（中央大学）

1. 魚類同位体比の“履歴”復元

私は 2015 年に学位を取得後、総合地球環境学研究所の陀安一郎教授が代表を務める CREST プロジェクト「沿岸生態系の多様性機能評価のための多元素同位体トレーサー技術の開発」に従事するポスドクとして雇ってもらいました。当時、このプロジェクトで取り組んでいた課題の一つが、魚類の軽元素同位体比の履歴を復元する手法の開発でした。

生物の体組織に含まれる炭素や窒素などの軽元素同位体比は、生物の栄養源や生息地などの指標として生態学的な研究で頻繁に用いられています。これらの同位体比が個体の生まれた直後から死ぬ前までの一生の間でどのように変化したかを明らかにすることができれば、同位体比から得られる生態学的な情報を最大化することができます（このような同位体比の時系列変化を本稿では“履歴”と呼びます）。このため、魚類の軽元素同位体比の履歴を復元することができれば、生活史全体での生息地や餌環境の変化を推定することができ、生態学的な研究が大きく進展すると考えられます。

同位体比の履歴を復元する手法は、継続的に成長する組織を持つ哺乳類（体毛）、鳥類（羽根）、鯨類（ヒゲクジラのヒゲ）、硬骨魚類（耳石）などで応用されてきました。中でも、魚類の耳石は一定期間ごとに輪紋が形成されるため、個体の年齢と同位体比を対応させやすいという利点があり、多くの研究で用いられてきました。しかし、耳石はほぼ純粋な炭酸カルシウム（$CaCO_3$）でできているため、窒素やイオウのように生態学的に重要な軽元素の同位体比の履歴を高い時間解像度で復元することはできませんでした。

そこで、私は耳石の代わりに魚類の骨を使って同位体比の履歴を復元する手法を模索しました。骨にはコラーゲンというタンパク質が含まれているため、軽元素の分析が可能です。さらに、魚類の脊椎骨では耳石と同様に年輪が形成されることから、過去の同位体比の情報が残されているかもしれないと考えました（図 1）。

脊椎骨に過去の同位体情報が残されているかどうかを検証するために、北海道の河川に遡上したサクラマスを使用しました。サクラマスは、他の遡河性のサケの仲間と比べて河川に長期間（1 年半程度）滞在してから海に降りるという特徴があるため、河川のシグナルが検出しやすいと考えました。実際に海から産卵のために河川へと遡上したサクラマスの脊椎骨を複数の切片に区切り、河川と海で大きく値が変動するイオウ安定同位体比を測定したところ、脊椎骨の中心部から河川のシグナルを検出することに成功しました（図 2）。以上より、脊椎骨には魚が過去に経験した同位体比の履歴が復元されていることを証明することに成功しました。

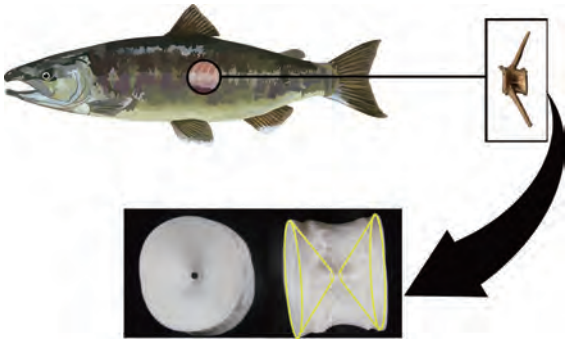


図 1. サケの脊椎骨および脊椎骨錐体

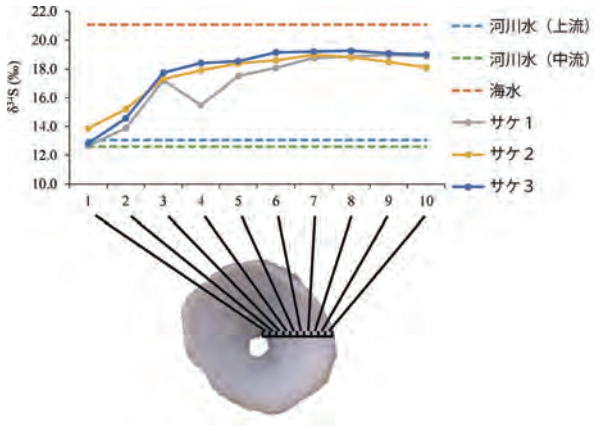


図 2. サクラマスの脊椎骨から復元したイオウ安定同位体比の履歴

2. サケの脊椎骨に残された同位体比の履歴

さて、いよいよ本稿の本題に入ります。著者は学生時代、ヒグマとその食物であるサケのつながりについて研究していたこともあり、魚類ではサケに強く興味を抱いています。そこで、同位体比の履歴を復元する手法を産卵のために河川に遡上したサケに適用してみました。すると、サケの同位体比の時系列変化は、非常に興味深い傾向を示しました。脊椎骨を成長方向に 10 等分して窒素安定同位体比を測定したところ、骨の部位によって 7.0‰を超える同位体比の変動が見られたのです。しかも、同位体比の増減の傾向は、どの個体でも概ね一致していました。

窒素安定同位体比の変動の要因として、二つの可能性が考えられました。一つはサケの食性の変化です。窒素安定同位体比は、捕食者の食物連鎖上の位置（栄養段階）が上昇するごとに約 3‰増加するとされています。したがって、サケの栄養段階が成長に伴って 2 段階以上変動していれば、観測された同位体比の変化を説明することができます。もう一つの要因は、海域ごとの一次生産者の同位体比（ベースライン）の違いです。海洋表層における一次生産者である植物プランクトンの同位体比は、その海域における硝酸の窒素安定同位体比によって決まります。窒素安定同位体比のベースラインが大きく異なる海域をサケが回遊していれば、脊椎骨の同位体比の変動を説明できるかもしれません。

サケの脊椎骨の窒素安定同位体比を変動させる要因を特定するために、アミノ酸の窒素安定同位体比分析を実施しました。通常、タンパク質全体に含まれている窒素安定同位体比は、生物の栄養段階が上昇するにつれて濃縮します。一方で、タンパク質を構成するアミノ酸ごとに同位体比を測定すると、フェニルアラニンなどの特定のアミノ酸では、栄養段階ごとの窒素安定同位体比の変化が極めて小さいことが知られています。さらに、この分析ではフェニルアラニンとグルタミン酸の窒素安定同位体比を比較することで、対象生物の栄養段階を推定することが可能です（図 3）。したがって、サケの脊椎骨の部位ごとにフェニルアラニンの窒素安定同位体比と栄養段階の変動を調べれば、サケの同位体比の変化が食性によるものなのか、回遊によるものなのかを識別できると考えました。

アミノ酸の窒素安定同位体比を測定したところ、サケの栄養段階は脊椎骨のどの部位においてもほぼ一定でしたが、ベースラインの窒素安定同位体比は大きく変動していました（図 4）。このため、観測された脊椎骨の同位体比の変動は、海洋におけるサケの回遊の履歴を反映していることが分かりました。

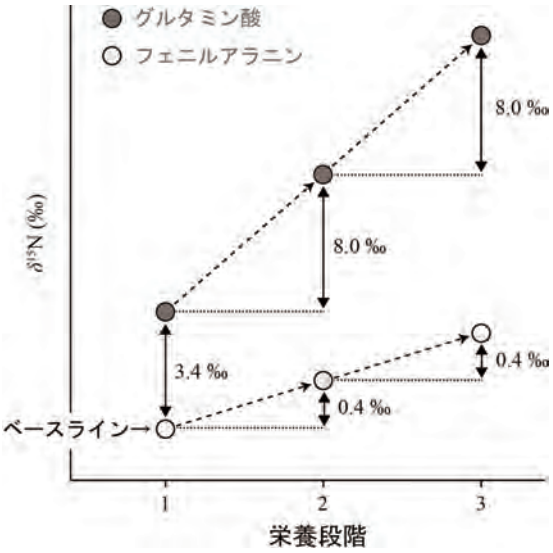


図 3. 生物の栄養段階とフェニルアラニン、グルタミン酸の窒素安定同位体比の関係

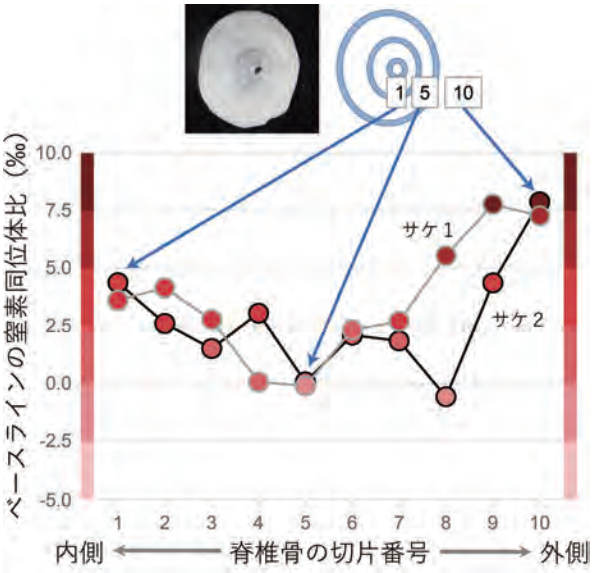


図 4.　サケの脊椎骨から復元した窒素安定同位体比の履歴

3.　海洋における窒素安定同位体比の分布地図

サケの窒素安定同位体比の履歴が回遊を反映していたということは、サケの回遊範囲における窒素安定同位体比の分布地図を作成することができれば、同位体比からその回遊経路を予測できる可能性があります。このような同位体比の分布地図はアイソスケープと呼ばれています。そこで、サケの回遊範囲である北太平洋を対象として、アイソスケープの作成を試みました。北太平洋の広範囲で採取された動物プランクトン試料から、比較的長寿で遊泳能力の低いカイアシ類 6 種を抽出しました。続いて、これらの試料のタンパク質全体およびアミノ酸ごとの窒素安定同位体比を測定し、北太平洋における窒素安定同位体比のベースラインのアイソスケープを作成しました（図 5）。

北太平洋では、ベーリング海東部の大陸棚において最も高い窒素安定同位体比が検出されました。海底の堆積物中では、微生物による脱窒という作用により、間隙水中の硝酸塩に含まれる窒素安定同位体比が上昇します。一般的な海域であれば、堆積物は有光層よりも深部に存在するため、脱窒の影響を受けた間隙水が植物プランクトンに影響することはほとんどありません。しかし、広くて浅いベーリング海東部の大陸棚では、脱窒により窒素安定同位体比が上昇した間隙水が植物プランクトンに取り込まれ、食物網全体が高い窒素安定同位体比を持つようになったと考えられます。

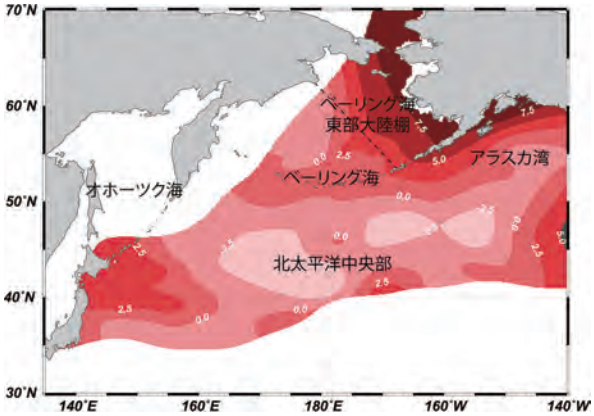


図 5.　北太平洋における窒素安定同位体比の分布地図

その他の海域における窒素安定同位体比の変動は、窒素利用効率によって説明できます。窒素利用効率とは、深層から表層に供給される硝酸塩に対する、植物プランクトンに利用された硝酸塩の割合です。海水の鉛直混合により深層から豊富な栄養塩が供給される北太平洋中央部では、植物プランクトンの生産量は硝酸以外の微量栄養素（鉄など）によって制限されているため、窒素利用効率が低くなります。このような海域では、軽い窒素安定同位体を多く含む硝酸塩が優先的に植物プランクトンに取り込まれます。一方で、硝酸塩の供給が少ない海域では窒素利用効率が高く、軽い窒素安定同位体が枯渇した硝酸が植物プランクトンに取り込まれます。つまり、硝酸の窒素安定同位体比は窒素利用効率と負の相関を持っています。

4.　アイソスケープによるサケの回遊経路復元

サケの窒素同位体比の履歴とアイソスケープを組み合わせて、回遊経路を個体ごとに推定する統計モデルを構築しました。このモデルでは、サケが遡上した場所と同一の河川で産まれたこと、サケの体サイズが増加するにつれて移動距離が増加することの二つの仮定を置いています。そして、モデル中においてサケは一つ前の切片（最初の切片の場合は、遡上した河川）からスタートして、

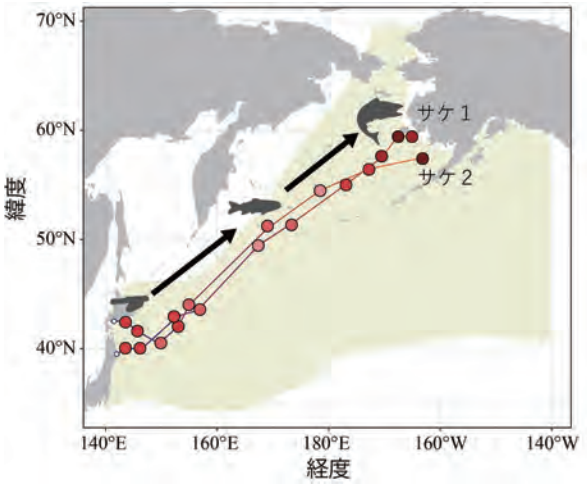


図 6. 同位体比から推定したサケ 2 個体の回遊経路。脊椎骨の部位ごとにサケの存在確率が最も高い地点を赤い○で示しており、色の濃さはその場所のアイソスケープ（図 5）を示している

次の脊椎骨切片の同位体比に近い場所により高い確率で移動していきます。こうしてすべての切片について、形成時における潜在的な分布域を確率分布で表現し、その中で最も確率の高かった点をつないで移動経路を推定しました（図 6）。モデルの結果によると、どちらの個体も北海道近海から成長に伴ってベーリング海へと北上し、最終的にベーリング海東部の大陸棚へと到達する回遊ルートが示されました。

日本近海から成長に伴ってベーリング海に移動する回遊経路は、過去の漁獲調査による研究で示された日本系サケの回遊経路と概ね一致しています。一方で、本研究で予想された回遊経路では、日本系サケが成長の最後の時期にベーリング海東部の大陸棚に至るという新たな経路の存在が示唆されました。サケの骨格が最後に成長するのは、性成熟の時だと考えられます。このため、日本系サケは栄養塩に富み生物生産が非常に盛んなベーリング海大陸棚で甲殻類などの餌を食べて性成熟することで海での回遊を終える、つまりこの海域が海での回遊のゴールとなっていることが考えられました。

5. 今後の展望

海洋の広範囲を回遊する生物がどのようなルートを辿ってきたかを明らかにすることは、海洋生態学において最も難しい課題の一つでした。本研究では、この謎に包まれた海洋生物の回遊行動を解き明かす新しい方法として、同位体比が利用できることを示しました。普段私たちの食卓にならぶ海産物の多くは、乱獲を防止するために厳密な資源管理に基づいて漁獲数などが規制されています。このとき、どのような魚がどのような回遊経路を持っていて、それが個体ごとにどの程度ばらついているのかという情報が得られれば、資源管理の方法や資源量の推定がより高精度になります。このように、海洋生物の回遊経路を推定することは、私たちの生活にも密接に結びついた重要なテーマだと言えますので、今後は本研究で開発した手法をより多くの生物に応用して、その履歴を明らかにしていきたいと思います。

文献

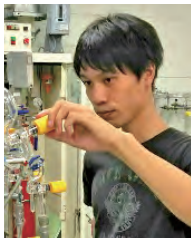
Matsubayashi, J., Y. Osada, K. Tadokoro, Y. Abe, A. Yamaguchi, K. Shirai, K. Honda, C. Yoshikawa, N. O. Ogawa, N. Ohkouchi, N. F. Ishikawa, T. Nagata, H. Miyamoto, S. Nishino and I. Tayasu (2020) Tracking long-distance migration of marine fishes using compound-specific stable isotope analysis of amino acids. Ecology Letters 23: 881–890. https://doi.org/10.1111/ele.13496

Matsubayashi, J., Y. Saitoh, Y. Osada, Y. Uehara, J. Habu, T. Sasaki and I. Tayasu (2017) Incremental analysis of vertebral centra can reconstruct the stable isotope chronology of teleost fishes. Methods in Ecology and Evolution, 8: 1755–1763. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12834

Matsubayashi, J., Y. Umezawa, M. Matsuyama, R. Kawabe, W. Mei, X. Wan, A. Shimomae and I. Tayasu (2019) Using segmental isotope analysis of teleost fish vertebrae to estimate trophic discrimination factors of bone

collagen. Limnology and Oceanograpy: Methods, 17: 87–96.
https://doi.org/10.1002/lom3.10298

著者情報



松林　順（中央大学理工学部人間総合理工学科助教）。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、2017 年国立研究開発法人海洋研究開発機構 JSPS 外来研究員を経て 2020 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

魚の骨の鉛同位体から魚の生息海域を特定できるか？

西 村　日向子
（富山大学）

1, 気候変動と魚の分布域の変動

豊かな海に囲まれている日本は昔から四季を通して様々な水産物が採れます。例えば、鰆（サワラ）は瀬戸内海に春に産卵のために来遊することから「春告げ魚」といわれ親しまれてきました。カツオは江戸時代の俳人山口素堂が「目には青葉　山ほととぎす　初鰹」とも詠ったように、初夏の訪れを告げるものとして、江戸から重宝されていました。秋の味覚の代表格秋刀魚（サンマ）は「秋に採れる刀の様な魚」として、鰤（ブリ）は冬に脂のりがよく美味しいことから「師走の魚」として私達日本人に非常に馴染み深い魚です。紹介したこれらの四季の旬の魚は、分布適水温に従い季節的に回遊する「回遊性魚類」であり、日本の沖合域における主要な水産資源となっています。

しかし近年の海水温の上昇などによる海洋環境の変動で、分布域の移動などが起こり、魚が採れる場所が変化し､水産業へ影響を及ぼしています。例えば、ブリは北海道での来遊量が増え、既存の産地では漁獲量が減ってきています。また、サワラについても、東シナ海に主に分布していましたが 1999 年以降の海水温の上昇傾向に伴って日本海に北上し、日本海での漁獲量が増えました。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書では、このまま海水温の上昇が続いていけば何十年か先には世界中の漁場で水産物の漁獲量が減っていくと警鐘をならしています。

こうした海洋環境変動に対して、持続的に水産資源を利用していくためには、水産物の資源量や生育場・回遊場などの把握が重要になっており、これらの研究が様々な研究機関で精力的に行われています。

2, 生育場や回遊場所を把握する方法

魚の生育場所や回遊場所の解析手法の始まりは標識放流だとされています。これは個体に標識票を取り付けるなどして魚に目印を付け、再び捕獲した際に放流地点の情報と紐づけをし、回遊経路を推定する方法です。科学技術の発達に伴い、データロガーなどの魚の移動経路や経験水温・水深などの情報を時系列に得られる計測機器を魚に取り付けるバイオロギング手法が行われるようになってきました。ただ、これらの計測機器は価格が高く、またロガーの回収率が低いなどの難点があり、ある程度回収率の見込める場合にしか適応できないなどの問題があります。一方で、ロガーの回収を必要としない方法としては、魚の耳石を用いた解析方法が知られています。耳石は魚の内耳部分にある硬組織で、一定間隔で輪紋状に形成される組織です。耳石は､筋肉組織などと違って、代謝回転速度が極めて遅く、取り込んだ元素が一生にわたって保存されるため、その個体が被った環境履歴を時系列的に解析するのに有用です。例えば、耳石の Sr/Ca 比（カルシウムに対するストロンチウムの濃度比）や酸素同位体比を用いることで、稚魚期から捕獲時に至るまでの移動履歴の復元が行えます。また近年では、海洋の水塊トレーサーとして知られるネオジムの同位体を用いた回遊履歴の推定なども行われています。

本研究では、代謝速度が遅く、2 価の重金属元素（鉛や亜鉛など）が比較的高濃度に含まれている脊椎骨部位に着目し、今まであまり分析に用いてこられなかった鉛同位体比の分析を行いました。鉛同位体比が生育場推定の指標になるかを検討するために、まずは様々な産地で水揚げされた

魚を集め、魚の脊椎骨を分析し、全生育期間（稚魚期から捕獲時まで）にあたる同位体比情報を明らかにしました。次に、産地ごとに魚の鉛同位体比を比較し、生育場の推定に利用できる化学指標であるかを検討しました。

3, 三大洋の海水中の鉛はそれぞれ異なる値を持つ

環境試料に含まれる鉛（Pb）には質量数の異なる 4 つの安定同位体（^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb）があります。^{204}Pb は、安定同位体で、時間の経過とともに濃度が変化しませんが、それ以外の同位体（^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb）は ^{238}U（ウラン）、^{235}U、^{232}Th（トリウム）が放射壊変を経て生成する同位体です。

石油・石炭、Pb 鉱石中のウランやトリウムの含有量は産地ごとに異なるため、それらの鉛同位体比も産地ごとに固有の値を取ります。現在、各国で使用している化石燃料や鉱石は、その使用の過程で Pb を大気に放出します。放出された Pb は近傍の海洋に供給され、海水の鉛同位体比を変化させます。インド洋・太平洋・大西洋の三大洋の海洋表層水の鉛同位体比を見ると、それぞれ異なる同位体比を持つことがわかっています（図 1）。

太平洋と大西洋で見られるような海水の鉛同位体比の違いが、魚類の骨格部にも反映される場合、鉛同位体比を魚の生育場の推定に利用できるのではないかと考えました。

4, 魚の骨の鉛同位体比からわかったこと

日本海（富山）・東シナ海（長崎）・太平洋（宮城、静岡）・大西洋（フランス、ノルウェー）で水揚げされたサバ・アジから脊椎骨部位を取り出し、鉛同位体比の分析を行いました。すると、日本の近海に分布するサバ・アジ（太平洋系群、対馬暖流系群）と大西洋に分布するサバ・アジとでは、鉛同位体比が異なることがわかりました（図 2）。

また、それぞれの海域で生育していたアジ・サバは、生育した海域の海水の鉛同位体比と類似した同位体比を持つことも分かりました。

また、北海道厚田川に遡上したシロサケの脊椎骨の鉛同位体比分析を行い、先行研究（Li et al., 2020）で報告されているカナダのブリティッシュコロンビアに遡上したサケの個体（筋肉組織）の鉛同位体比と比較したところ、両者は異なる値を持つことが分かりました（図 3）。

シロサケは、系群ごとで回遊生態が異なっており、日本系のサケ（北海道遡上個体）はオホーツク海やベーリング海やアラスカ湾などの北太平洋沿岸全域を広く回遊するのに対し、北米系（カナダブリティッシュコロンビア州遡上個体）はアラスカ湾を中心に回遊します。

アラスカ湾の海水は、北米で工業的に用いられているオーストラリア型の鉱床の鉛同位体比（^{207}Pb/^{206}Pb, ^{208}Pb/^{206}Pb）と同じく、高い値を持つ傾向にあると報告されています。そのため、日

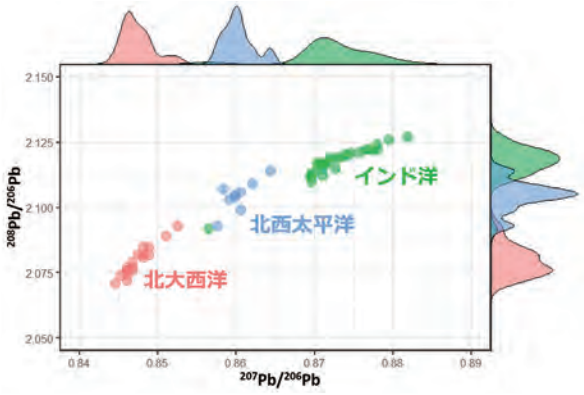


図 1. インド洋・北西太平洋・北大西洋における海洋表層の鉛同位体比（P. Pinedo-González et al., 2018; Zurbrick et al., 2017）

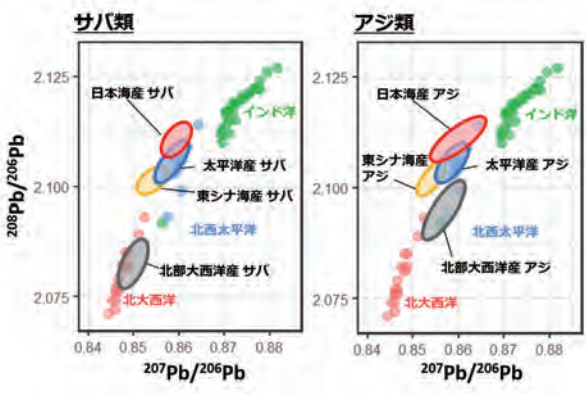


図 2. 日本の近海（太平洋系群、東シナ系群・対馬暖流系群）と大西洋に分布するサバ・アジの鉛同位体比

本系と北米系を比較すると、日本系よりも長期間アラスカ湾を回遊する北米系のシロサケはより図の右上に位置するような同位体比をとったのだと考えられます。

続いて、本研究の日本産のサバと、先行研究で報告されているニシンの鉛同位体比の値を比較し、太平洋の西側、東側とでどう異なるかを調べました（図 4）。カナダ沿岸域で採取されたニシンに比べ、日本近海のサバは $^{208}Pb/^{206}Pb$ 比がより高い値を示しており、中国の石炭・鉱床起源の鉛の回帰直線に近づく傾向がありました。

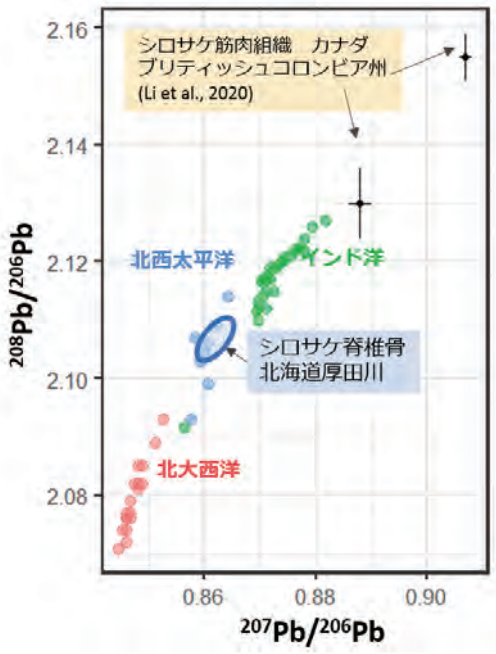


図 3. 北海道に遡上したシロサケと、カナダブリティッシュコロンビア州に遡上したシロサケ（Li et al., 2020）の鉛同位体比

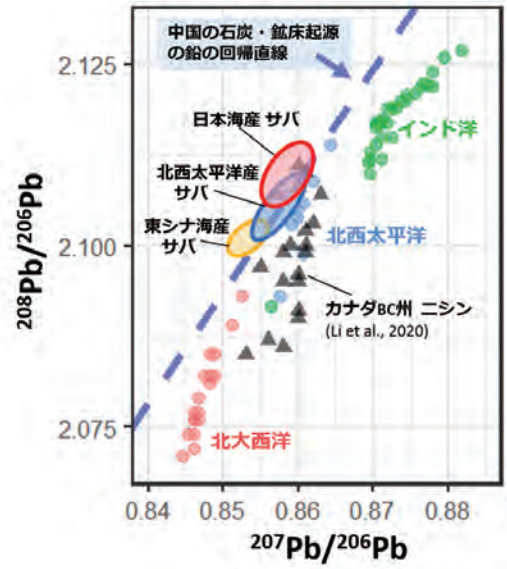


図 4. 日本近海に生息するサバ（本研究）と、カナダブリティッシュコロンビア州沿岸域に生息するニシン（Li et al., 2020）の鉛同位体比

$^{208}Pb/^{206}Pb$ が高くなる傾向にあります。北太平洋の表層海水は、アジアからの大気の飛来による Pb 汚染の影響が全域的にありますが、距離的に近い太平洋西側（日本近海）と、遠い太平洋東側（カナダ沿岸域）とでは、アジア大陸由来のダストの沈積量が違うために、太平洋西側に生息する魚種の方がより高い $^{208}Pb/^{206}Pb$ を持つような値を持ったと考えられます。

5, 今後どんなことに応用できそうか？

これまで行ってきた研究から、①太平洋と大西洋に生息する魚、②太平洋の西側と東側に生息する魚とで脊椎骨の鉛同位体比が有意に異なることが分かり、両者の間で生育場の推定や産地判別ができる可能性があることが分かりました。

産地判別の用途で鉛同位体を用いるにはコストがかかり実用化は難しいため、今後の展開としては市場価値が高く、国際的に資源管理の求められている魚種（特にマグロなど）の生育場推定や回遊履歴の復元等に応用したいと考えています。具体的には、成魚の大型のマグロの椎体を成長縞毎にサンプリングし、Pb 同位体比の変化を分析することで、回遊・移動履歴の成長段階に応じた解析ができると考えています。また成魚だけでなく、データロガー（記録型標識）の取り付けが難しい 0 歳魚（尾差長 20 cm 程度のマグロ）を対象とすることで、従来得ることが難しいとされている幼魚期の回遊生態情報の収集が可能になると考えています。

文献

Li M., Weis D., Smith E. K., Shiel E. A., Smith D. W., Hunt P.V. B., Torchinsky A., Pakhomov A. E. (2020) Assessing lead sources in fishes

of the northeast Pacific Ocean, Anthropocene, 29: https://doi.org/10.1016/j.ancene.2019.100234

Pinedo-González P., West J. A., Tovar-Sanchez A., Duarte M. C., Sañudo-Wilhelmy A. S. (2018) Concentration and isotopic composition of dissolved Pb in surface waters of the modern global ocean, Geochimica et Cosmochimica Acta, 235: 41–54

Zurbrick M. C., Gallon, C. and Flegal R. A. (2017) Historic and Industrial Lead within the Northwest Pacific Ocean Evidenced by Lead Isotopes in Seawater, Environmental Science & Technology, 51: 1203–1212

著者情報



西村日向子（富山大学理工学教育部生物圏環境科学専攻修士 2 年）環境化学計測第Ⅱ講座 堀川研究室所属。

（2021 年 3 月 31 日掲載）

長距離を移動する昆虫の同位体を調べて分かること

大　塚　　彰
（農研機構）

昆虫には季節の変化に合わせて長い距離を移動するものがいます。ここで言う長距離とはどのくらいの距離を言っているのでしょうか。数 km ？数十 km ？　いやいや、もっと長い距離です。西日本を例にして長距離移動性の昆虫を見てみましょう。

春の桜が散り青葉の季節になる 5 月頃から梅雨時期まで、日本の南の温かい湿った大気が徐々に勢いを増して来ると、中緯度帯で低気圧が発生し、東シナ海を西から東に移動するようになります。そういった低気圧はその南側に南西からの強い風を伴っています。この暖かい南西風は熱エネルギを北へと運ぶのですが、中国南部など南方でこの時期に発生する移動性の昆虫もこの気流を利用し東シナ海を越えて九州など西日本に飛来するようになります。その距離は数百 km から 1,000 km を越えることがあります。ここで対象とする移動距離はこのようなスケールです。具体的な昆虫種としてはハスモンヨトウ、アワヨトウ、ツマジロクサヨトウなどのヤガ類や、トビイロウンカ、セジロウンカなどのイネウンカ類がその代表です。こうした長距離移動性昆虫の同位体を調べるとどんなことが分かるでしょうか。

1. 水素の安定同位体比

それを知るために北米大陸での移動性昆虫の代表であるオオカバマダラ（monarch butterfly, *Danaus plexippus*）の研究を見てみましょう。このチョウは冬季にメキシコなど北米大陸の熱帯地域で越冬し、春以降世代を繰り返しながら北上し、夏季にカナダ南部以南、ロッキー山脈より東部の北米大陸で生育し、秋になるとまた熱帯地域の越冬地まで戻ります。Hobson ら（1999）は大勢のボランティアの協力を得て、夏季に北米大陸の 33 地点でこの虫の卵を自然に生えている寄主植物トウワタ（*Asclepias curassavica*）に付けその上で幼虫を育てて羽化させました。その翅の水素の安定同位体比 δ^2H_m を調べました。自生するトウワタは天水のみで育ちます。これはとても大がかりな研究ですね。測定の結果、メキシコ湾岸からカナダ南部にかけて、緯度が増えるにしたがって δ^2H_m の値が徐々に小さくなりました。北米大陸の降水中の重水素の安定同位体比は緯度が増えるにしたがって小さくなることが知られていますから（緯度効果）、両者の関係は直線回帰式で表現できて

$$\delta^2H_m = 0.62 \times \delta^2H_p - 79 \text{（‰）}$$

ここで δ^2H_p は降水中の重水素の安定同位体比です（添え字 p は precipitation の意味）。

降水⇒餌であるトウワタ⇒オオカバマダラの翅の順に重水素が移っていってこのような関係が生まれていることが分かります。

この研究ではさらに 99.9％の重水を使って異なる重水濃度の水を用意してトウワタとそれに寄生したオオカバマダラを育て、トウワタの δ^2H_a と翅の δ^2H_m との関係を調べ、直線回帰式

$$\delta^2H_m = 0.99 \times \delta^2H_a + 1.4 \text{（‰）}$$

を得ています。傾きがほぼ 1 で切片が小さな値ですから、オオカバマダラの翅の安定同位体比はトウワタの安定同位体比にほぼ等しく、重水素は餌

から翅へ割合をあまり変えず移行していることが分かります。最初の式と合わせて考えると降水の重水素がトウワタに同化される時にその割合が減っていることが示唆されます。

このような大陸における降水と翅の水素の安定同位体比の関係は他の種でも報告されています。Holder ら（2018）の重水と寄主植物の大麦を使った室内飼育実験によるとヤガ類のアメリカキヨトウ（*Mythimna unipuncta*）の翅の同位体比と降水との関係式は

$$\delta^2H_{moth} = 0.40 \times \delta^2H_p - 84.4\ (‰)$$

切片の値は上のチョウと近いですが、傾きはさらに小さくなっています。一方北米大陸のトンボ類 3 種（*Aeshna interrupta*, *Aeshna umbrosa*, *Pachydiplex longipennis*）について、それらの翅の同位体比と降水の関係式は

$$\delta^2H_{dragonfly} = 0.91 \times \delta^2H_p - 42.5\ (‰)$$

のように得られています。トンボの幼虫ヤゴは水中で過ごし、微小な甲殻類や水生昆虫をエサとするため、幼虫が草食のチョウ目とは異なり、切片、傾きともにより大きな値となっていることが興味深いです。

こうした関係式と降水の δ^2H_p 地図を使えば捕獲した昆虫がどの緯度帯から移動して来たのかを推定することができます。それを見るために今度は場所をユーラシア大陸に移してさらに 3 種の同位体研究について見てみましょう。

最初の例は中国の渤海にある島で光トラップを用いて捕獲されたチョウ目のタマナヤガ（*Agrotis ipsilon*）です。小さな島でのモニタリングですので海の上空を移動していた個体が捕獲されていると考えられ、5，6 月の早いシーズンでは δ^2H_{moth} が −41 から −32‰と高い値を示す個体が 20 パーセントと多く、これは南からの飛来を示唆していますが、秋の 9–10 月になると −62 から −51‰と低い値を示す個体が 80 パーセント弱のように主体となり、北部地域からの戻りの移動を示唆しました。

同様に、タジキスタンなど中央アジアで捕獲されたウスバキトンボ（*Pantala flavescens*）の例では 5 月に捕獲された成虫の翅の $\delta^2H_{dragonfly}$ は −78.7 から −49.6‰となり、その後 6 月から 10 月にかけては中央アジアの個体群が主体となり、その同位体比は −170.9 から −91.7‰とより低い値となりました。この研究では本種が冬季にエチオピアで発生していることや、エチオピアで捕獲した別種のトンボの翅の $\delta^2H_{dragonfly}$ が −61 から −35‰の値となり、シーズン初期のウスバキトンボの値に近いことなどから、東アフリカが 5 月の飛来虫の飛来源ではないかと推定されています。

さらに、中国大陸では主に熱帯、亜熱帯地域分布するミカンコミバエ（*Bactrocera dorsalis*）と言う熱帯果実などに卵を産む重要害虫が発生しています。気候変動によってこれらの分布域が大陸のより北部へと拡大しないかと懸念されています。そこで北京市の市場、その郊外の有機ブドウ園と中国各地（南から海南省海口市（20.0°N）、広東省広州市（23.1°N）、福建省福州市（26.1°N）、湖北省武漢市（30.6°N）、江蘇省宜興市（31.3°N））に設置したトラップで誘殺されたミカンコミバエの体全体を乾燥後粉砕し、同位体を計測しました。その結果、中国各地のミカンコミバエの δ^2H は平均で南から −80.3 から −93.5‰で、緯度が上がるにしたがって小さな値となりました。一方北京市で捕獲されたミカンコミバエの δ^2H の平均値は −88.1‰と −87.1‰であり、福州市の値に近いものでした。そのため、北京市のミカンコミバエはそこで羽化したものではなく、中国南部から飛来したものと示唆されました。

以上のように、大陸での春の北向きの長距離移動や秋の南への戻り移動について虫の水素安定同位体比を調べることで個体ごとに出生地のおおよその緯度帯を推定できることが分かってきました。

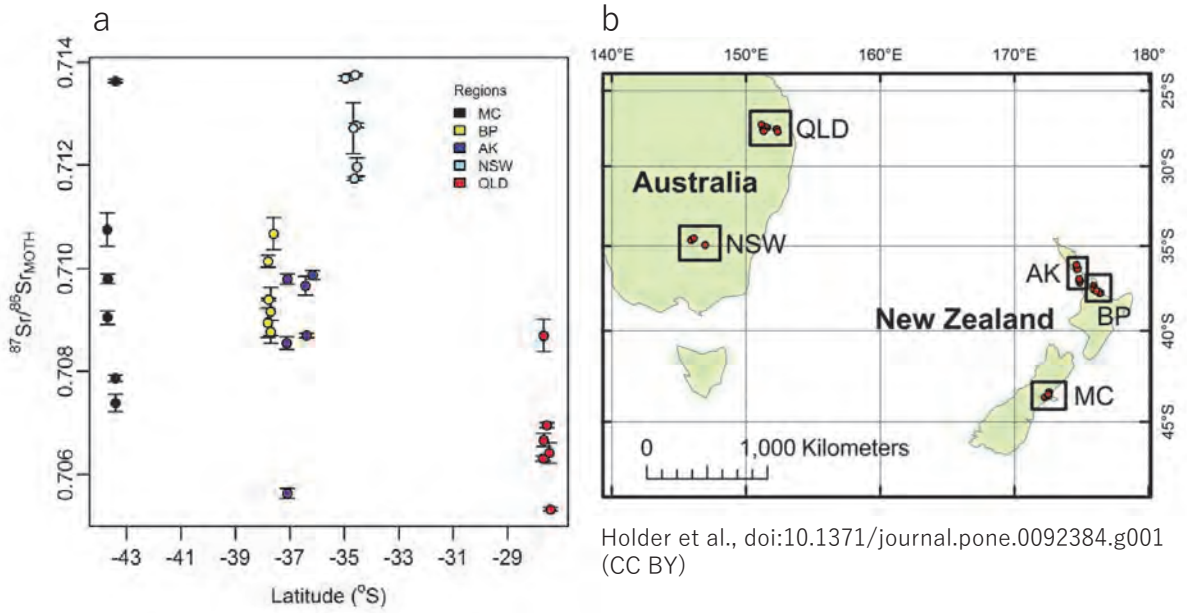
2. ストロンチウムの安定同位体比

次に昆虫とストロンチウムの安定同位体比 $^{87}Sr/^{86}Sr$ について見てみましょう。ストロンチウムの場合は $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値は岩石の種類とそれらの形成年代によって異なってきますから（第 3 章重元素同位体を参照）、これらが異なる地域で育った昆虫はその $^{87}Sr/^{86}Sr$ 値がどのような値になるのか興味あるところです。

Holder ら（2014）はニュージーランドとオーストラリアの異なる地質地域のトウモロコシを食べて育ったオオタバコガ（*Helicoverpa armigera*）の翅を除いた体の同位体比を調べました。その結果図 1 のように $^{87}Sr/^{86}Sr$ 値は地域によって異なる値となりました。地質図を参照すると、一番値が高かったオーストラリアの NSW 付近はオルドビス紀の地質で年代が古く、値が低かった QLD は若い火成岩の値を反映しているのではないかと考察されています。またニュージーランドの MC 付近は背景の山から流れ出る河川による扇状地となっているため地質的に非一様なものが混ざり、虫の採集地点ごとに値がばらついているのだろうと考察されています。さらにストロンチウムに加えて、水素、鉛の同位体解析を合わせて判別モデルを作れば 75％の精度で出生地を判別できることを示しました。

3. 我々の取り組み

冒頭に紹介しましたように日本には色々な種類の農業害虫が飛来してきます。また国内で発生した個体群が盛んに分散しています。これら移動・分散の実態をより正確に把握し、発生予察に役立てることで、害虫の適切な管理による農作物の保護を実践することが重要です。これまで長距離移動性害虫の研究では、様々なモニタリング手法を用いて発生調査を行い飛来のタイミングなどを明らかにし、飛来があった地点から気流を解析したり、虫の遺伝子を分析したり、殺虫剤に対する感受性の検定を行ったり、中国での発生情報を収集したりして移動・分散実態に迫ってきました。上の 2 つの節で見たように同位体解析は長距離移動性害虫の研究に新しい解析軸を提供します。中国大陸は日本に飛来する多くの昆虫の飛来源であり、地質学的に日本列島より古いので、ストロンチウムの解析が利用できるかもしれません。さらに複数の元素の安定同位体比を適切に組み合わせ、既存の解析法と合わせて総合的に考察すれば、



Holder et al., doi:10.1371/journal.pone.0092384.g001 (CC BY)

Holder et al., doi:10.1371/journal.pone.0092384.g003 (CC BY)

図 1　a. オオタバコガのストロンチウム安定同位体比　b. オオタバコガのサンプリング場所

トラップで捕獲した虫を個体ごとに飛来個体なのか国内で発生した個体なのかを区別できるかもしれません。例えばシーズンの初期に捕獲した虫は越冬したものなのか、飛来したものなのかを区別できればその後の防除対策に役立ちます。同位体解析を使って飛来源をより絞り込めるようになれば、飛来予測手法の改良が可能となるでしょう。こうした観点から、我々のグループは長距離移動性のヤガ類であるアワヨトウとツマジロクサヨトウの同位体解析に取り組んでいます。国内では地球研と、海外では飛来源である中国の研究機関と共同研究を進めており、同位体解析によって長距離移動性昆虫の移動・分散実態の新しいイメージが得られるようになることを期待しています。

文献

Hobson K, Wassenaar L & Taylor O (1999) Stable isotopes (δD and δ^{13}C) are geographic indicators of natal origins of monarch butterflies in eastern North America. Oecologia 120: 397–404. https://doi.org/10.1007/s004420050872

Hobson (2018) Inferring origins of migrating insects using isoscapes: a case study using the true armyworm, *Mythimna unipuncta*, in North America. Ecological Entomology 43: 332–341. https://doi.org/10.1111/een.12505

Holder P, Armstrong K, Hale R, Millet M-A, Frew R, Clough T, Baker J (2014) Isotopes and trace elements as natal origin markers of *Helicoverpa armigera* – an experimental model for Biosecurity Pests. PLoS ONE 9 (3): e92384. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092384

著者情報



大塚　彰（農業・食品産業技術総合研究機構）長距離移動性害虫のモニタリングや飛来実態解明、飛来予測技術の開発をテーマとし、中国、韓国、ベトナムとの共同研究を推進している。

（2021 年 3 月 31 日掲載）



産地判別、文明環境史

生物の体に含まれる元素の安定同位体比は、生物が取り込んだ時点の環境の同位体比を反映しますので、「同位体地図」が作成されていれば「産地判別」に使うことができます。また、その値は保存されますので、現在の人間や生物だけではなく、遺跡に埋まっている昔の人間や生物の体でも測定可能です。発掘された人間や生物に含まれる元素の同位体比は、昔の人間や生物の食べものや移動、さらには昔の人間の暮らし方についても有益な情報を与えてくれます。さらに、同位体比は地球の歴史に関する情報も与えてくれます。これらについて、具体的な研究を見てみましょう。

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

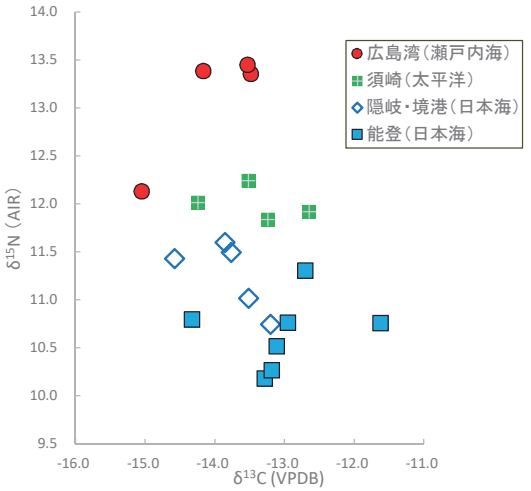


図 2.　現生マダイの炭素・窒素同位体比
＊石丸ほか（2008）を改変

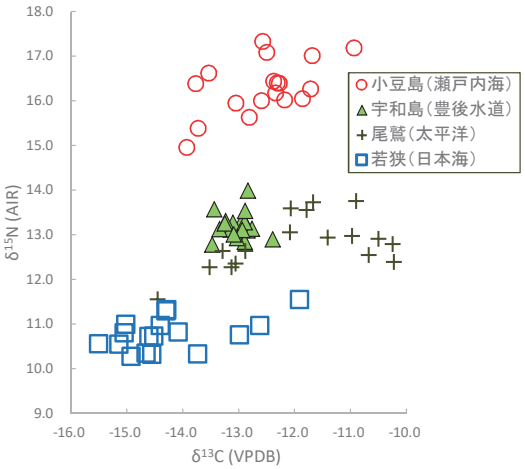


図 3.　現生メジナの炭素・窒素同位体比
＊石丸ほか（2008）を改変



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

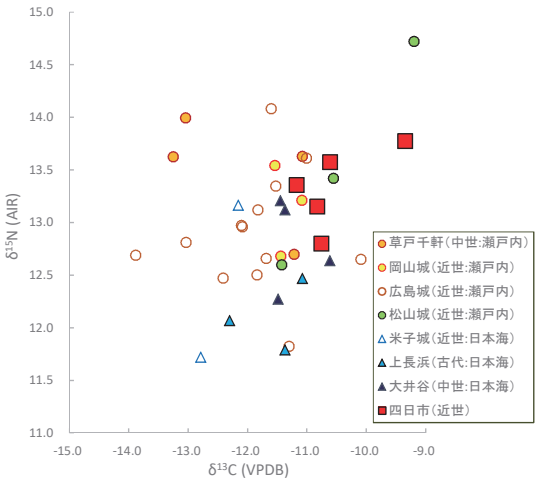


図 5. 四日市遺跡出土マダイの炭素・窒素同位体比
＊石丸ほか（2008）を改変

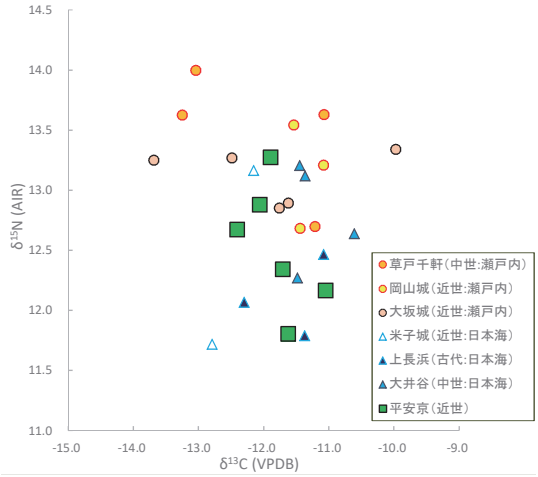


図 6. 平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの炭素・窒素同位体比
＊ Ishimaru et al. 2010 を改変

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

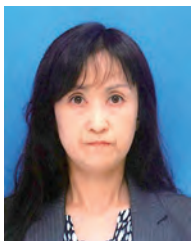
富岡直人（2004）動物遺存体の分析「平安京左京北辺四坊跡」本文編、財団法人京都市埋蔵文化財研究所、pp. 342–356

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）

縄文時代の狩猟域を解き明かす
― イノシシ・ニホンジカはどこで捕獲されたのか？ ―

石丸 恵利子
（広島大学総合博物館）

1. 縄文人の生業活動

狩猟採集を主な生業とした縄文時代、私たち人類はドングリやクリなどの堅果類やマメ類、球根類などを植物質食料として摂取し、編物や建築材としても植物を利用していました。また、貝類や魚類、イノシシやニホンジカなどの哺乳動物などを重要な動物質食料資源のひとつとして、またそれらの貝殻や骨・角を道具の素材として利用していました。洞窟や岩陰、あるいは平地や丘陵上などに竪穴住居を建てて生活の拠点とし、そこからさまざまな資源の獲得活動に出向き、また土器や道具などのものづくりをしながら生活していました。これらのさまざまな活動を通して集落間で交流し、文化や技術が伝播していったと考えられます。

同じ文様をもつ縄文土器や黒曜石やサヌカイトなどの原産地が明らかな石材の出土によって、ヒトが移動し、遠隔地と関わりがあったこと、またモノの運搬があったことを知ることができます。では、狩猟や植物採取などの食料資源の獲得における活動域、すなわち縄文人の日常的な生活圏はどのような範囲だったのでしょうか。

縄文人の生業圏は、民族学的な調査からアフリカのブッシュマンなどの狩猟採集社会での日常的領域の10 km圏内、あるいは伝統的農耕民の領域と同様な範囲5 km圏内でも生活が可能だと予想されるなどから、おおむね徒歩2時間程度の10 km圏内に収まるであろうと考えられています。獲得した各資源の産地を明らかにすることができれば、ヒトの移動の実態をより具体的に議論できることが可能となります。

ここでは生業活動のうち狩猟活動に注目し、縄文人の狩猟域について、イノシシやニホンジカなどの陸生哺乳類をどこで獲得したのかをストロンチウム（以下Sr）同位体分析によって明らかにする試みについて紹介します。

2. イノシシ・ニホンジカのSr同位体比

イノシシやニホンジカなどの脊椎動物は、骨の形態で種や部位を同定し、個体の大きさなどは計測値によって知ることができます。しかし、資料そのものの観察から生息域（産地）を知ることはできません。これは魚類や貝類も同様です。

ヒトや動物の体組織は、食物を摂取することによってその食物に含まれるたんぱく質を体内で再合成して形成されるため、骨コラーゲンの炭素と窒素の同位体比を測定することで、当時の食環境を考察することができます。Srも、食べものや飲み水から体内に取り込まれます。Sr同位体比は、生態系内では地質の値を反映するため、同一地質内に生息する動物や植物はほぼ同一の同位体比を示すことが知られています。また、Srには質量数84、86、87、88の4つの安定同位体が天然に存在しています。87Srは87Rbの放射壊変によって生成されるため時間と共に量が増えますが、87Rbの半減期が約488億年と非常に長いため、本稿で対象とする数千年オーダーの研究ではほとんど影響せず、87Srは一定と考えて議論することができます。Sr同位体比は87と86の比（$^{87}Sr/^{86}Sr$）で表されます。このような特徴から、Sr同位体比は先史時代のヒトの移動や家畜動物の飼育研究に用いられています。これらの成果に

ついては本書内に複数紹介されています。

イノシシやニホンジカの骨の Sr は、死後土壌に埋設されることによって、環境中の Sr と置換して同位体比が変わってしまいますが、歯のエナメル質は高度に石灰化した結晶からなる硬組織であるため、数千年間土壌中に埋まっていても歯エナメル質の Sr は置換しないことが知られています。この原理を利用して、遺跡から出土するイノシシとニホンジカの歯エナメル質の Sr 同位体比と周辺地域の同位体比を比較することで、当時の狩猟域を推測できる可能性があります。

3. 帝釈峡遺跡群

ここで紹介するのは、広島県北東部の庄原市や神石郡に広がる帝釈石灰岩地帯に位置する帝釈峡遺跡群での分析事例です。約 20 km 四方の範囲に 50 カ所あまりの洞窟・岩陰遺跡が確認されている遺跡で、縄文時代を中心として旧石器時代から古代以降にまでおよぶ各時代の遺物包含層が堆積していることから、当地域の歴史や文化の変遷を復元する際の基準となっています（図 1）。石灰岩地帯にあることから、山間部にあっても貝塚遺跡のように動物骨や人骨、貝類が良好な状態で残存し、当地域での動物資源利用の実態を知るうえで有益な資料であるとともに、考古学だけでなく人類学や地質学などからも注目を集め、これまで多くの学際的研究が進められてきました。

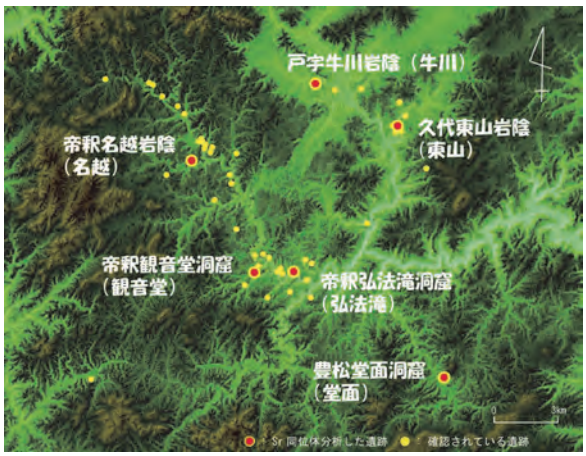


図 1. 帝釈峡遺跡群の遺跡分布図（遺跡名はいずれも「遺跡」を除いて記した）

遺跡群の中でも、出土遺物の様相から縄文時代の各時期に連続して利用されている帝釈寄倉岩陰遺跡（以下、寄倉）や帝釈観音堂洞窟遺跡（以下、観音堂）、豊松堂面洞窟遺跡（以下、堂面）などは、各小地域の拠点的な遺跡と考えられています。これらの遺跡から出土する動物遺存体は、イノシシやニホンジカを主体とするイヌやタヌキ、ノウサギなどの多様な哺乳類に加え、貝類や鳥類、両生類なども認められ、出土量が多いのが特徴です（石丸 2007）。帝釈峡遺跡群の各遺跡では、山間部の森林地帯や河川域に生息する多様な動物資源を利用していたことを示しています。

20 km 圏内に複数の拠点となる遺跡が存在する帝釈峡遺跡群では、各遺跡の住人はどのような場所で狩猟を行い、また遺跡間の交流の有無やその実態はどのようなものだったのでしょうか。

4. 歯エナメルの Sr 同位体比を測る

ここでは帝釈峡遺跡群のなかでも拠点となった遺跡を中心に、観音堂、堂面、帝釈名越岩陰遺跡（以下、名越）、久代東山岩陰遺跡（以下、東山）戸宇牛川岩陰遺跡（以下、牛川）の 6 遺跡から出土した縄文時代のイノシシとニホンジカ、および植物の葉からの考察結果について紹介します（図 1）。歯資料は、上顎もしくは下顎の臼歯や切歯を選択しました（図 2）。超純水内で超音波洗浄して乾燥させた後に、デンタルドリルで表面の汚れを除去し、ダイヤモンドポイントで削ったエナメル質を陽イオン交換樹脂カラムなどで処理することによって Sr を抽出しました。前処理によって分離した Sr の同位体比を、表面電離型質量分析計（TIMS）によって測定しました（石丸ほか 2009）。

また、遺跡周辺地域の同位体比を知るために、地質図を元に観音堂遺跡を中心とする半径約 30 km 圏内の範囲において約 5 km 間隔で採取した植物の葉の Sr 同位体比を用いました（図 3）。表面の汚れを超純水で除去して乾燥させ、灰化処理の後に歯エナメル同様に処理して Sr を抽出し、同位体比を測定しました。



図 2. 帝釈観音堂洞窟遺跡出土の動物歯（左：イノシシ下顎第 3 後臼歯、右：ニホンジカ下顎第 3 後臼歯）



図 3. 遺跡周辺採取の植物の葉（左：サカキ、右：ツバキ）

5. 分析結果と狩猟域の考察

分析の結果、イノシシの Sr 同位体比は 0.7068 から 0.7081、ニホンジカは 0.7067 から 0.7078 の値を示しました。また、植物の値は、0.7059 から 0.7093 の値が確認され、イノシシとニホンジカの値は、植物の値の範囲内に収まる結果が得られました（図 4）。また、調査範囲内での Sr 同位体比は、北部や東部で低く、寄倉遺跡周辺や南部で高い傾向が認められました（図 5）。

イノシシとニホンジカの Sr 同位体比に種間での有意な差は認められませんでした。また、分析資料には縄文時代の中で時期幅がありましたが、時期別にも Sr 同位体比に有意な差は認められませんでした。縄文時代早期でやや同位体比にバリエーションが認められましたが、これは遺跡近くに同位体比の高い場所と低い場所の両者があることによるものと考えられます。

次に、遺跡ごとにイノシシとニホンジカの値と遺跡周辺の値とを比較してみると、堂面のイノシシとニホンジカは、遺跡の半径 10 km 圏内の値に収まり、より同位体比が低い遺跡地の東方やより値が高い南方の値は認められませんでした。このことは、10 km 圏内で狩猟が行われた可能性を示していると考えられます。また、約 1 km の距離にある帝釈弘法滝洞窟遺跡（以下、弘法滝）と観音堂でも遺跡の場所を含む、遺跡から 10 km 以内の値が認められ、さらに 15 km 以上離れた同位体比が低い北方や同位体比が高い南方の値は認められませんでした。一部、遺跡の北東や西方の値も含まれていたため、これらの方角にはさらに遠方まで狩猟域が及んでいた可能性もあります。

東山や牛川、名越では、他の遺跡より Sr 同位体比が低い傾向があり、東山の資料は遺跡地の値よりも低い値を示し、これらのイノシシとニホンジカはより同位体比が低い北方あるいは北東、西方地域の値を示すものでした。牛川と名越では遺跡地の値を含み、10 km の距離にある値も含まれていました。

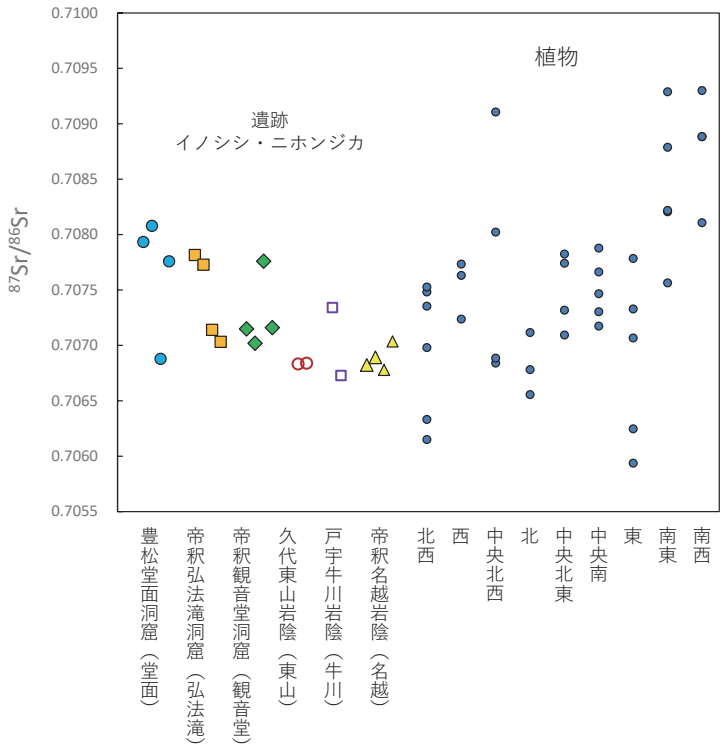


図 4. 遺跡出土イノシシ・ニホンジカ・現生植物の Sr 同位体比（植物の地域区分はサンプリング範囲の中央から見た場所を指す）

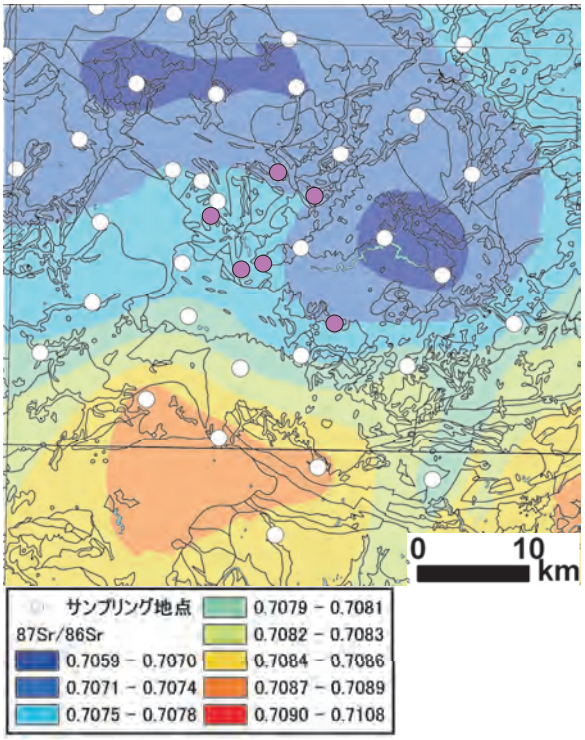


図 5. 帝釈峡遺跡群周辺の Sr 同位体比マップ（青色が同位体比が低く、オレンジ色が同位体比が高い地域　桃色丸は遺跡地点）

以上のように、帝釈峡遺跡群出土のイノシシとニホンジカの歯エナメルと周辺の植物の Sr 同位体比を比較することによって、各遺跡から直線距離にして 5 km から 10 km までの範囲に生息するイノシシとニホンジカを捕獲し、15 km を超えるような場所での狩猟活動は行っていなかったと推測することができました。また、名越と牛川と比較して、堂面や弘法滝、観音堂は同位体比が高い傾向がありました。これは、前者と後者の遺跡では狩猟域を異にしていたことを示しているのかもしれません。遺跡は近い場所で 1 km、遠くても 10 km 圏内に複数の遺跡が存在し、行き来は可能な範囲であったと考えられます。互いが動物資源を有効に利用するために、集落ごとに別の場所で狩猟活動を行っていた可能性が見えてきました。

6. おわりに

イノシシとニホンジカの歯エナメルの Sr 同位体比から狩猟域を推測する場合、イノシシとニホンジカが生まれた場所で一生暮らすのかという点

に注意する必要があります。イノシシは、オスは生後 1 年を超えると親元を離れて単独生活あるいは同じオス同士でグループ行動をし、メスはそのまま親の元で育ち、親子とその家族のメスを何頭か含む母系的なグループで生活することが多いとされます。縄張りを持たず、いくつもの群れが同じ場所を利用することも知られています。また、行動範囲は里山付近では主に半径数百メートル内で、3〜5 km 程度に及ぶ場合もあるとの報告があります。

ニホンジカは、標高 800 m 未満に生息し、移動パターンは積雪に強く影響を受け、15 km の範囲でも地形や食糧条件によって標高の上下移動が顕著な個体とあまり動かない個体などがあるとされます。また、宮城県金華山島での調査によると、オスは 2、3 歳までは同じところにいるがその後ほかの場所に移り、メスは生まれた土地で一生を過ごすと考えられています。

以上のことから、イノシシとニホンジカともに数十キロの大移動をする個体は稀で、いたとしてもわずかであると考えられます。オスはイノシシもニホンジカも一定の地域内を動き回ることから、もし遺跡周辺の Sr 同位体比の値と異なった場合、その 3 km から 5 km 圏内にその値を持つ場所があるとすると、そこで生まれた個体がヒトの狩猟域内で捕獲されたと理解することもできます。ただしメス個体においては、捕獲された場所がほぼ生まれた場所と理解してもよいのではないかと考えられます。

ここでは Sr 同位体分析による縄文時代の狩猟域を推定する研究について紹介しました。今後、出土資料の雌雄や遺跡の立地などについても考慮しながら、他の地域や各時代の遺跡でも研究を進めていきたいと考えています。

文献

石丸恵利子（2007）「山間地域における縄文時代の狩猟と遺跡の利用形態 ― 帝釈峡遺跡群の洞窟・岩陰遺跡の検討 ―」動物考古学 24：1–23.

石丸恵利子・古角恵美・日下宗一郎・古瀬清秀・中野孝教・湯本貴和（2009）「縄文時代の狩猟採集域 ― 広島県・帝釈峡遺跡群出土動物遺存体の同位体分析から ―」『有限責任中間法人日本考古学協会第 75 回総会研究発表要旨』64–65.

著者情報



石丸恵利子（広島大学総合博物館研究員）2008 年 3 月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。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 年より現職。

（2023 年 3 月 31 日掲載）

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）

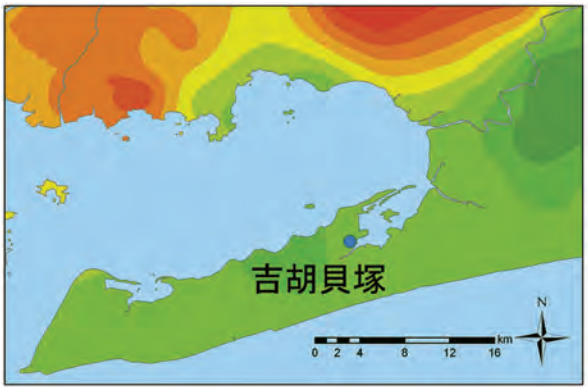


図 2. 吉胡貝塚周辺の Sr 同位体比地図（赤色が同位体比が高く、緑色が低い地域）

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。

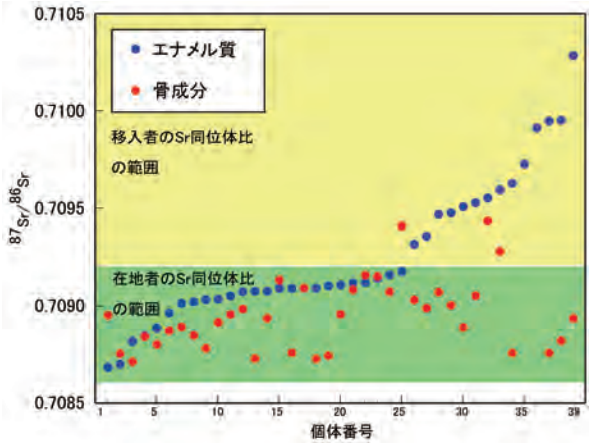


図 3. 吉胡貝塚出土人骨の骨成分と歯のエナメル質の Sr 同位体比

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）

古代犬はどんな餌を食べていたか？

覚　張　隆　史
（金沢大学）

1. 日本列島の古代犬

日本列島に犬[1)]がいた最古の証拠は、今から約7000 年前の縄文時代に遡ると言われています。日本列島には、縄文時代～近代の遺跡から多数の犬骨が見つかっており、日本全国の博物館や大学に収蔵されている犬骨は数万点にのぼります。これら膨大な犬骨コレクションは、日本列島において数千年という長い間、人[2)]と犬がともに生活してきたことを物語る貴重な資料群と言えます。

犬骨資料群の中で、特に人との関わりが強く感じられるものとして、埋葬された痕跡がある犬骨資料が挙げられます。縄文時代の遺跡からは様々な種類の動物骨が検出されますが、生きていたそのままの位置を保った状態で骨がつながって出土するのは、ほぼ人と犬に限定されます。特に、横臥状態（横向きに寝ている状態）で、小指の骨まで残るような全身骨を伴う場合もあり、この様な犬骨は縄文時代の人々が犬を葬送の対象としていた一つの証拠と言えます。

また、縄文犬骨には、他の野生動物には殆ど見られない骨折の治癒痕（骨折に伴う骨増殖）が認められており、患部が治癒する期間を通して人々の集落内・集落付近で生存していた可能性が高いといえます。いわゆる食糧資源としての「家畜」「畜産物」といった、食べられる対象物と考えるよりも、人の社会的なコミュニティ内に存在するいわば「伴侶動物」や狩猟犬などの「役畜」として存在していたと推察されてきました。

それでは、仮に縄文犬の多くが縄文人にとって「伴侶動物」や「役畜」と近しい存在であった場合、彼らはどの様に生活を共にしていたのでしょうか。現代の伴侶犬と同様に専用の均質的な「ドッグフード」を与えられていたのでしょうか。それとも、人が食べた残飯を食べていたのでしょうか。実は、その実態についてはまだほとんど研究されていないのが現状でした。

2. 北陸地方の縄文犬

日本列島の中でも特に北陸地方の縄文時代の前半期に、多数の犬骨の出土事例が報告されています。代表的な遺跡名として、鳥浜貝塚･三引遺跡･堀松貝塚・上山田貝塚・上久津呂中屋遺跡・米泉遺跡・真脇遺跡・赤浦貝塚・大境洞穴・朝日貝塚・小竹貝塚・南太閤山Ⅰ遺跡などがあり、20 個体以上の多数個体が検出されている事例は石川県七尾市にある三引遺跡（個体数；37 個体）（石川県埋蔵文化財センター 2005）と、富山県富山市にある小竹貝塚（個体数；69 個体）（富山県文化振興財団 2014）です（図 1）。

中でも小竹貝塚出土犬骨では、埋葬された可能性が高い犬 16 個体が検出されています。また、埋葬が疑われるものの、明確に埋葬と言えない事例もあり、それらを含めると 20 個以上となります。よって、日本列島の縄文時代の前半期におけ

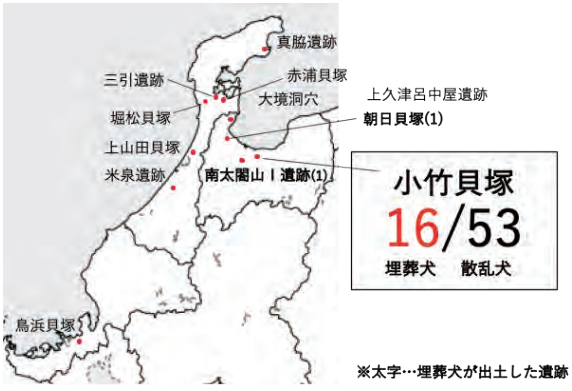


図 1. 北陸地方における縄文時代犬骨の主な出土事例



図 2. 小竹貝塚出土埋葬犬と埋葬人骨（埋葬人骨 38 号・63 号に近接した地点で出土する埋葬犬 11 号・12 号・14 号）

る埋葬犬の出土事例としては日本最大規模と言えます。小竹貝塚は埋葬犬だけでなく、同一墓域から 91 個体にのぼる多数の人骨埋葬群が検出されており、なかには埋葬犬骨と埋葬人骨が隣接して出土していることから、何らかの関連性が疑われます（図 2）。この様に、縄文時代の前半期における人と犬の関係について議論する上で、小竹貝塚出土犬骨は重要な位置を占めます。

3. 埋葬犬骨の食性解析

骨コラーゲンの炭素・窒素安定同位体比は、その個体が摂取した食物の炭素・窒素安定同位体比を反映します。このしくみを遺跡出土犬骨に応用することで、遺跡から出土する古代犬それぞれの摂取食物の特徴を復元することが可能です。小竹貝塚出土の埋葬犬 16 個体の骨から骨コラーゲンを抽出・精製し、保存状態の良いコラーゲンを得ることに成功しました。この精製コラーゲンを用いて炭素・窒素安定同位体比を測定し、摂取した可能性がある食物群の炭素・窒素安定同位体比と比較しました。その結果、海生魚類を多量に摂取した場合にとりうる炭素・窒素安定同位体比の範囲を示す古代犬が数多くいたことがわかりました（図 3）。一方で、海生魚類ばかりを食べたとはいえない様な個体も混在していたことから、個体ごとに多様な食物を摂取していたと考えられます。

次に、同じ小竹貝塚から出土した人骨の炭素・窒素安定同位体比を比較し、摂取食物の違いを見てみました。その結果、埋葬犬は人よりも炭素・窒素安定同位体比が共に高い傾向を示しており、海産物をより多く摂取していたことがわかってきました（図 4）。「お魚咥えたどら猫」ならぬ、「お魚咥えた犬」といったところでしょうか。

さらに犬と人の関わりについて検討するために、個々の埋葬犬と近い場所に埋葬されていた人骨の炭素･窒素安定同位体比を比較してみました。

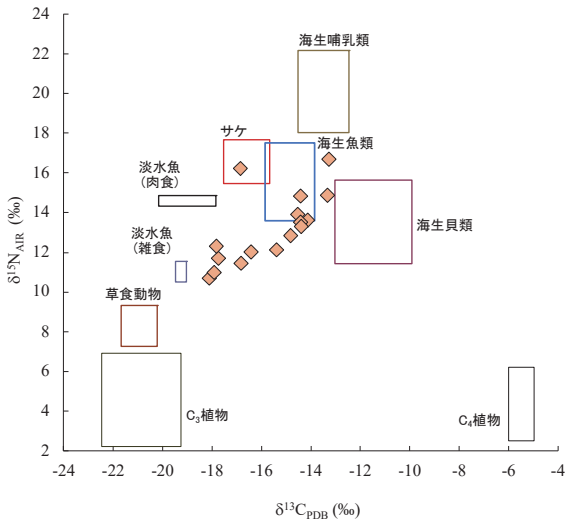


図 3. 埋葬犬骨の安定同位体比（四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。）

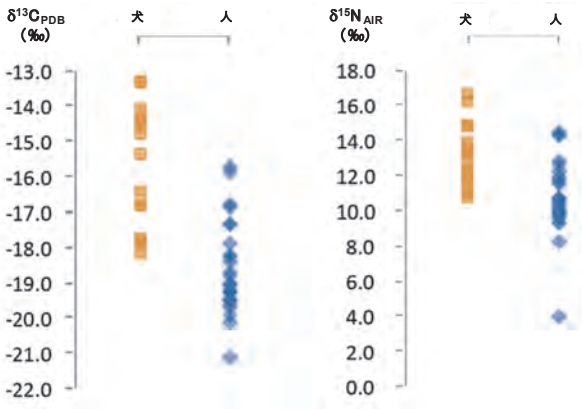


図 4. 埋葬犬骨と埋葬人骨の安定同位体比の比較

小竹貝塚 5 号犬と小竹貝塚 64 号人骨の同位体比を比較すると、両安定同位体比共に大きく異なり、埋葬犬がどちらも高い値を示していました。他の地点でも同様の傾向が見られることから、埋葬地点が近くても埋葬人骨と埋葬犬の間では摂取食物の質は類似するわけでなく、埋葬犬は人よりも海産物を摂取している傾向にありました。埋葬犬と埋葬人骨の出土地点が近い場合、必ずしも生存時における世帯の近さを意味しているわけでは無いですが、しかし、仮にもしその様な場合であっても、小竹貝塚出土埋葬犬と埋葬人骨の間には、やはり全体的に利用する食物資源の質がそもそも大きく異なることには変わりありません。よって、なぜ小竹貝塚出土犬がより多くの海産物を摂取できていたのか、その部分を中心に当時の人と犬の関係を考察していく必要がありそうです。

4. 遺跡間における出土犬の食性比較

小竹貝塚出土埋葬犬が全体的に海産物の摂取率が高い傾向にあることがわかってきましたが、では他地域ではどの様な食物資源を摂取していたでしょうか。石川県・能登半島にある七尾市の縄文早期（約 7000 年前）の遺跡である三引遺跡出土犬（散乱犬骨[3)]）の安定同位体比を比較すると、三引遺跡出土犬の方が両安定同位体比の多様性が低く、かつ小竹貝塚よりも海産物摂取の傾向が強いことがわかりました（図 5）。三引遺跡の周囲の環境は七尾湾という海に近く、遺跡からは多くの魚骨と海獣類が検出されています（石川県埋蔵文化財センター 2005）。また、小竹貝塚から出土する動物叢を見ると、三引遺跡と同様に魚骨と海獣類の検出されており、陸生動物と海生動物の比率に大きな差異は見られない。唯一異なる点として、小竹貝塚からは汽水域の魚種がより多く検出されており、三引遺跡とはやや異なる要素もありました。小竹貝塚の埋葬犬が多様な食性を示したのは、周囲の環境の違いを反映してのことかもしれません。

海岸部以外の遺跡に注目してみると、また大き

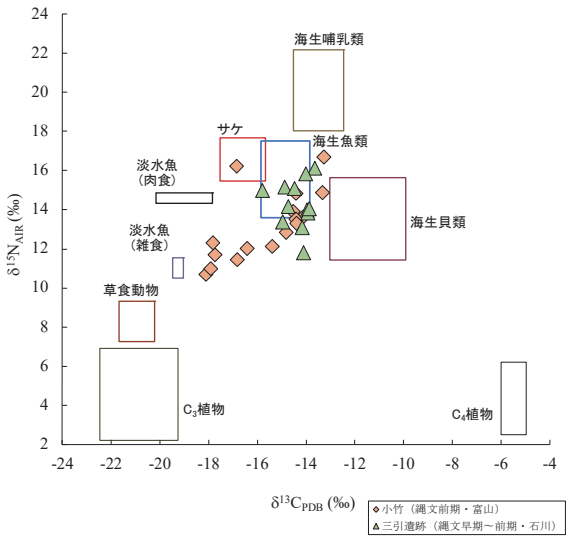


図 5. 小竹貝塚出土埋葬犬と三引遺跡出土散乱犬との比較（四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。）

く異なる様相を呈していることがわかります。愛媛県久万高原町の縄文早期の遺跡である上黒岩岩陰遺跡は、日本最古の放射性炭素年代値を示す埋葬犬骨が見つかっており、散乱犬骨も多数見つかっています。同遺跡からは人骨も検出されているため、両者の安定同位体比の比較を実施したところ、埋葬犬は人と近似した値を示すことがわかりました。一方、埋葬されていない犬は人よりも海産物をより多く摂取していました（図 6）。上黒岩岩陰遺跡がある久万高原町は名前の通り標高が高い内陸地域であり、愛媛県伊予市方面の海岸部まで約 40 km、高知県須崎市方面の海岸部へは約 60 km あります。海産物摂取率が高い個体が海岸部で成犬まで成長したと仮定した場合、数十キロの距離を単独もしくは人と共に移動してきた可能性も考えられます。この様に、縄文時代の遺跡出土犬の摂取食物の多様性は、犬の移動性においても何かしらの関連があるかもしれません。

いずれの事例においても、縄文時代の犬は人と必ずしも同じ食物資源を常に利用しておらず、日和見的な挙動を示すことだけは確かです。場合によっては、特定の餌を一時期に与えていた可能性は否定できないものの、各地域で統一的な犬の飼

育法や餌の制限はない、粗放的飼育状態であったと推察されます。

一方、縄文時代後の弥生時代以降になると、大型環壕集落跡から出土する犬骨の安定同位体比は多様性が低下する傾向にあります。稲作に生業がシフトすることで、水田に生息する淡水魚へのアクセスも容易になり、海産物摂取割合も低下していきます（図 7）。また、中近世の城下町から出土した犬骨では、海産物摂取の影響が強く見られますが、多様性が低下するという点では同様の傾向でした。これらのことから、犬の生息環境・食環境の多様化・均質化の要因は犬の食性と関連している可能性が高いといえます。縄文犬の摂取していた食物資源の高い多様性も人の社会のあり方と連動しての現象と思われます。小竹貝塚出土埋葬犬の安定同位体比の多様性もこの現象に起因するものと思われ、より粗放的な環境で自由に人の集落間を行き来していたのかもしれません。そのおこぼれの餌として人が獲った魚を食べていたり、違う集落では陸上の食物資源にありつけていと思われます。

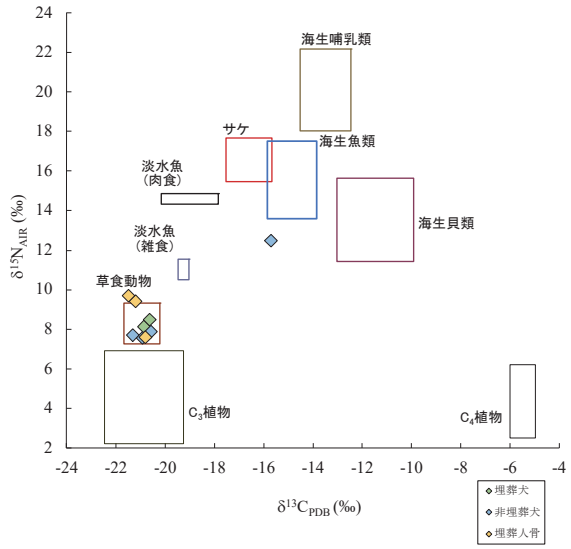


図 6. 上黒岩岩陰遺跡出土埋葬犬・散乱犬骨の炭素・窒素安定同位体比（四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。）

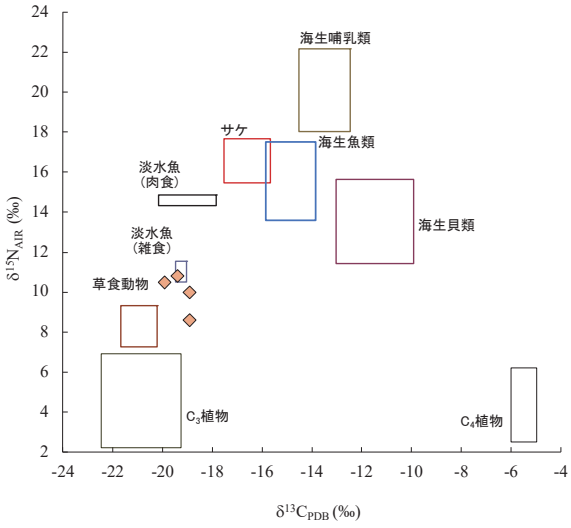


図 7. 弥生犬の安定同位体比の比較（四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。）

5. おわりに

古代犬の炭素・窒素安定同位体分析を通して、犬の摂取食物に関する情報を抽出してきましたが、ストロンチウム同位体比や酸素同位体比など他の同位体情報を応用することで犬の移動に関する情報も抽出が可能です。多元素同位体分析により、高精度な古代犬の生態復元を実施することで、過去の人と犬の関係性がより具体的に復元できます。私たち現代人は、過去の人と犬との関わりをついつい現代社会のアナロジーで捉えがちです。同位体情報という客観的な指標を用いることで先入観を打破し、私たちがこれまで予想もしなかった人と犬の関係性が見えてくると期待されます。

注釈

1)2）学術的な表現として、「犬」と「イヌ」、「人」と「ヒト」で区別して利用する場合が多いが、本原稿は学術的表記よりわかりやすさを重視するためにそれぞれ「犬」と「人」に統一した。

3）埋葬された形跡が残っていない犬骨。

文献

富山県文化振興財団（2014）「富山県小竹貝塚発掘調査報告書」富山県教育委員会埋蔵文化財

センター
石川県埋蔵文化財センター（2005）「七尾市三引遺跡 4」財団法人石川県埋蔵文化財センター

著者情報



覚張隆史（金沢大学人間社会学域助教）2011 年東京大学新領域創成科学研究科博士課程単位取得体学。2012 年日本学術振興会特別研究員（PD）（北里大学）を経て、2015 年 11 月より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改版）

古代アンデスの人々はリャマやアルパカを飼育していたのか？
― ストロンチウム同位体比分析で動物の出身地を探る ―

瀧　上　　舞
（国立科学博物館）

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。リャマは遅くても紀元前 2000 年頃に、アルパカは紀元前 4000 年頃から前 3500 年頃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。ラクダ科動物の骨の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（図 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、注目すべき



図 1.　パコパンパ遺跡遠景

遺跡の一つです。なぜならば、パコパンパ遺跡はかつて野生の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、パコパンパⅠ期（紀元前 1200 年～前 700 年，以下 PC-Ⅰ期と表記）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（紀元前 700 年～前 400 年，以下 PC-Ⅱ期と表記）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、ラクダ科動物という生態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

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 2）。

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 3）（Takigami et al., 2020）。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

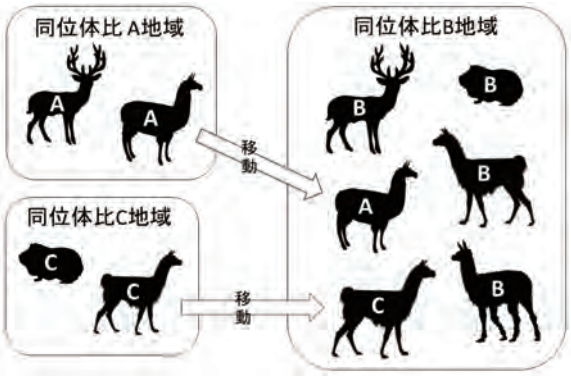


図 2. ストロンチウム同位体比分析による出身地推定の概念図

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と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、残念ながら調査は叶いませんでした。

4. 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から、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。

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。炭素・窒素同位体比分析からは、植生の異なる地域から連れて来られていた可能性が示唆されています（Takigami et al., 2021）。おそら

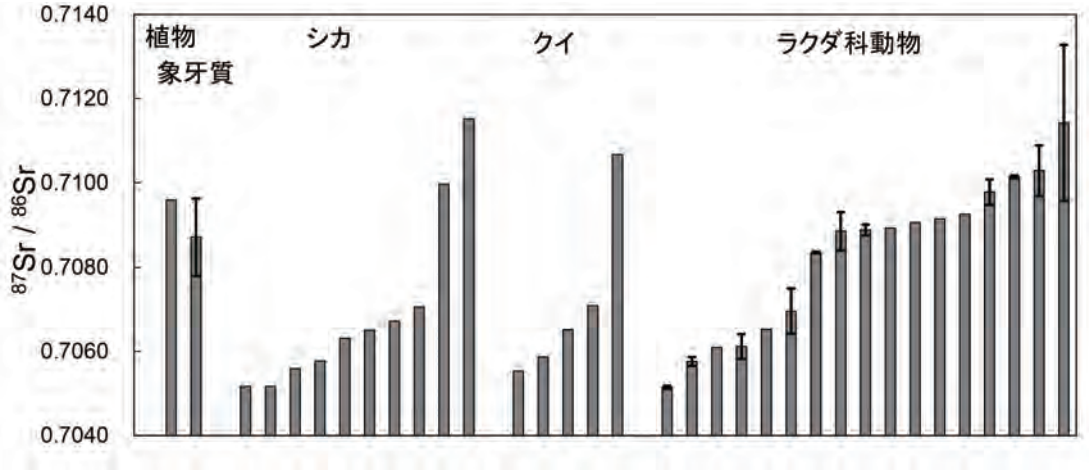


図 3. パコパンパ遺跡出土動物骨のストロンチウム同位体比（Takigami et al., 2020 の図 3 改訂）

く儀礼や祭祀の特別な生贄として稀に入手されたか、あるいは別の地域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推測されています。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社会の発展に大きな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、ちょうど紀元前 800 年～前 700 年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比データはその瞬間を捉えたと言っても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, D. Morales-Chocano, Yoneda M (2020) Isotopic evidence for camelid husbandry during the formative period at the Pacopampa site, Peru. Environmental Archaeology. 25(3): 262–278. https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1586091

Takigami M, Seki Y, Nagaoka T, Uzawa K, D Morales-Chocano, Mukai H, Yoneda M (2021) Isotopic study of maize exploitation during the formative period at Pacopampa, Peru. Anthropological Science 129(2): 121–132. https://doi.org/10.1537/ase.210531

著者情報



瀧上　舞（国立科学博物館人類研究部研究員）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、2018 年国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員を経て、2021 年より現職。

（2020 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改題・改版）

古代アンデスの人々は何を食べていたのか？
― 炭素・窒素同位体比分析でトウモロコシ利用を探る ―

瀧　上　　舞
（国立科学博物館）

1. はじめに

アンデス文明といえば、黄金色のトウモロコシがあふれる豊かな社会というイメージをもつ方も多いのではないでしょうか？　実際にアンデス文明ではいろいろな種類のトウモロコシを栽培し、たくさん食べ、お酒にして飲み、神様に捧げていました（図 1）。まるで日本における米のように、トウモロコシは大切で親しみのある食物でした。日本では弥生時代に稲作が到達し、徐々に日本各地へ広がっていきましたが、アンデス地域でも中米で栽培化されたトウモロコシが伝わった後、徐々に広がっていく歴史があります。その伝播の過程（いつ・どこで・どのくらい使われるようになったのか）は未だわからないことも多く、様々な研究者が謎の解明に取り組んでいます。私もそんな研究者の一人であり、アンデス文明初期の社会でのトウモロコシ利用の伝播を調査しています。



図 1. 屋台で売っている茹でトウモロコシ。添えてあるのは塩味のきいたチーズ。

2. アンデス文明におけるトウモロコシ

アンデス文明とは、南米のアンデス山脈周辺に栄えた文明です。一つの連続した社会ではなく、ナスカやモチェ、インカなど様々な地域で大小の社会が興亡しました。最盛期にはインカ帝国が広域を支配し、北はコロンビアから南はチリ・アルゼンチンにまたがる地域へ影響を及ぼしましたが、1532 年にスペイン人により征服されました。

そのアンデス文明で食糧として利用されていたトウモロコシは、中米地域で 9000 年前頃から利用が始まり、およそ 6500 年前までに半栽培化の状態で南米に伝わり、独自に栽培化が進んだと考えられています。遺跡や土壌堆積物から出土するトウモロコシの殻粒や穂軸、葉、花粉などから、アンデスの太平洋岸では 6500 年前、高地で遅くとも 4000 年前、アマゾン地域でも 6000 年前には栽培が始まっていたと推測されています。

では実際にヒトの食料の中で、トウモロコシはどのくらいの割合を占めていたのでしょうか？遺跡から出土する食物残渣やでんぷん粒、土壌コア中の花粉分析では、そこにその食物が存在していたことや相対的な増減は推定できますが、個人の食物中の割合までは推定できません。そこでヒトの骨の中に記録された食べ物の情報が重要になってきます。

3. 炭素・窒素同位体比分析による食性推定

ヒトが食物を摂取すると、胃や腸を通って小さく分解されます。アミノ酸まで分解された後、血液中を通って体の各組織に運ばれ、新しい組織を形成します。その時、そのアミノ酸の元となった

食物が何だったのかという情報を記録したまま、ヒトの体は形成されていきます。その情報が同位体比です。

ヒトの食物となる動植物は、光合成回路の違いや、栄養段階の違いから、異なる炭素同位体比（$\delta^{13}C$）と窒素同位体比（$\delta^{15}N$）を有しています。ヒトの体組織には摂取した食物の同位体比を混合した値が反映されており、より多く食べた食物の値に近づきます。例えば、トウモロコシを多く食べた個体は高い炭素同位体比を示し、魚を多く食べた個体は高い窒素同位体比を示します。この手法を用いて遺跡から出土する古人骨の同位体比を分析することで、昔の人がどのくらいトウモロコシを摂取していたのかという「食性」を推定することができます。

4. パコパンパ遺跡のトウモロコシ利用

分析対象としたのはペルー北部高地の標高 2,500 m の山地に位置するパコパンパ遺跡です。アンデス文明初期の社会で栄えた巨大な神殿建築の遺跡です。パコパンパⅠ期（紀元前 1200 年～前 700 年、以下 PC-Ⅰ期と表記）とパコパンパⅡ期（紀元前 700 年～前 400 年、以下 PC-Ⅱ期と表記）の 2 時期に区分され、PC-Ⅰ期の終わりから PC-Ⅱ期にかけて神殿の巨大化や複雑化、リーダーの出現、銅製品生産、遠隔地からの奢侈品輸送、地域間交流の活性化など、大きな社会的変化が生じています。私たちは同位体比分析による食性推定から、社会の変化に伴ってヒトの食性にどのような影響があったのかを調査しました（Takigami et al., 2021）。

パコパンパ遺跡のヒトの同位体比を調べると、PC-Ⅰ期は低い炭素同位体比を示しましたが、PC-Ⅱ期からは炭素同位体比が上昇していました（図 2）。これは PC-Ⅰ期の C_3 資源（キャッサバなどの C_3 植物と、野生のシカなどの C_3 植物を摂取した動物）への高い依存から、PC-Ⅱ期に C_4 資源利用の導入という食性の変化が生じたことを示しています。C_4 資源利用とは直接的／間接的

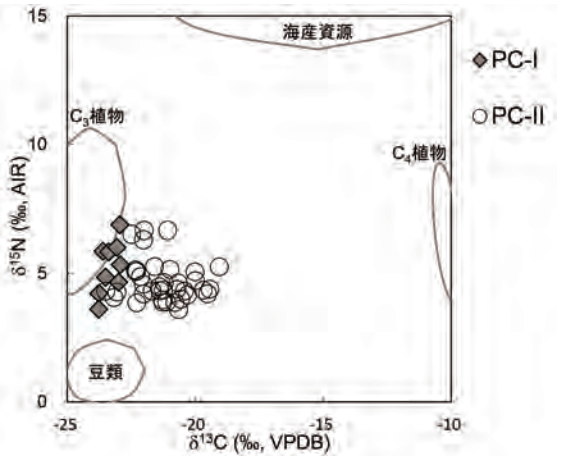


図 2. パコパンパ遺跡出土人骨の炭素・窒素同位体比（Takigami et al., 2021 を改変）

な C_4 植物の摂取を意味します。直接的な C_4 植物摂取の候補として、アンデス地域で栽培されたトウモロコシとアマランサスがあります。パコパンパ遺跡の土器や歯石中のデンプン粒分析からはトウモロコシしか検出されておらず、また現在のパコパンパ周辺の年間気温からはアマランサスの栽培には適さないことが推測されるため、パコパンパ遺跡で当時栽培されていた C_4 植物はトウモロコシだと考えられます。間接的な C_4 植物利用には、C_4 植物で飼育された動物の肉が想定されます。動物骨の同位体比分析からは、PC-Ⅰ期にテンジクネズミ（食用モルモット、クイとも呼ぶ）が、PC-Ⅱ期にテンジクネズミとリャマが C_4 植物を食べていたことが示されました（図 3）。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。パコパンパ遺跡の標高では野生の C_4 植物はほとんど存在しないため、テンジクネズミやリャマはヒトが栽培した C_4 植物、すなわちトウモロコシを摂取していたと推測されます。また、PC-Ⅰ期の時点ですでに、テンジクネズミにトウモロコシを与えていたことは注目すべき結果です。当時、テンジクネズミは台所で残飯などを餌に飼育されていました（図 4）。この小型家畜がトウモロコシを摂取していたということは、おそらく人も PC-Ⅰ期にトウモロコシを食べていたことでしょう。しかし、

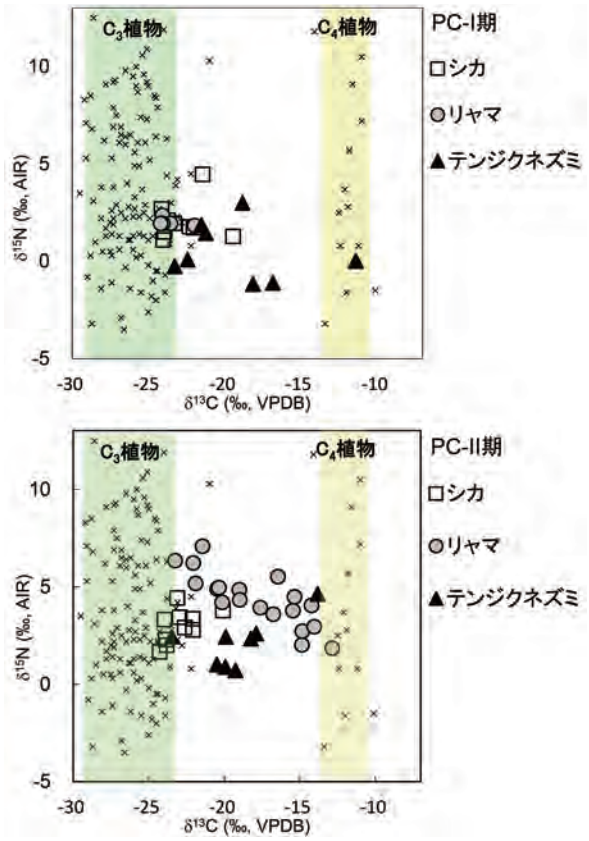


図 3. パコパンパ遺跡出土動物骨の炭素・窒素同位体比（Takigami et al., 2021 を改変）



図 4. 屋内で飼育されているテンジクネズミ

他の C_3 植物や C_3 植物を食べた動物がヒトの食料の大部分を占めていたため、PC-Ⅰ期の人骨の同位体比には表れてこなかったと考えられます。それが PC-Ⅱ期になると、トウモロコシで飼育されたリャマの肉や、増産されたトウモロコシを多く食べたことで、古人骨の同位体比にも C_4 資源利用がしっかり記録されたのだと推察されます。PC-Ⅱ期にラクダ科動物の飼育が始まった可能性は、ストロンチウムの同位体比の分析結果からも示唆されており（Takigami et al., 2020）、ラクダ科動物飼育の導入がヒトの食物資源利用に大きな影響を与えていたことが読み取れます。

なお、両時期を通じて窒素同位体比は低く、海から離れた立地のパコパンパ遺跡では海産資源の利用は極めて少なかったと考えられます。

5. アンデス形成期の食性比較

さらに、この食性変化はペルー広範囲で同時期に生じたと考えられます。パコパンパ遺跡の結果と先行研究で報告された同位体比を図にまとめてみると（図 5）、PC-Ⅰ期に相当する形成期中期（～紀元前 800 年頃）までの食性では、C_3 資源と海産資源を結ぶ長線上に各地の遺跡が分布しています。これは海産資源と C_3 資源が中心的な食物で、海産資源の割合は海岸からの距離によって異なっていたことを表していると考えられます。しかし PC-Ⅱ期に相当する形成期後期（紀元前 800 年頃～前 250 年頃）とその後の末期（紀元前 250 年頃～前 50 年頃）になると、クントゥル・ワシ遺跡や、アヤクーチョ盆地のピキマチャイ洞窟などでも、C_4 資源の利用が始まっていることが報告されており、C_4 資源利用の増加が広範囲で生じていたことが示唆されます。残念ながらこの 2 遺跡では同一遺跡内での食性の時代差が検証できていないため、形成期中期にどのような食性だったのかは分かっていません。現在のところ、同位体比分析

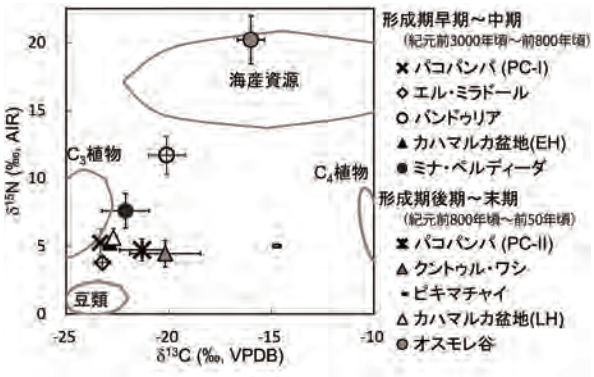


図 5. アンデス形成期の広域的な食性比較。形成期早期～中期（紀元前 3000 年頃～前 800 年頃）と形成期後期～末期（紀元前 800 年頃～ 50 年頃）で食性の傾向が異なる。（Takigami et al., 2021 を改変）

で検出された形成期の食性の時代変遷はパコパンパ遺跡が唯一の事例となっていますが、さらに検証するため、現在も調査を続けています。トウモロコシはいつ、どうしてアンデス地域の主要な食料になったのか、同位体比分析というライトで古代アンデスの人々の生活を照らしだしていきます。

文献

Takigami M, Uzawa K, Seki Y, D. Morales Chocano, Yoneda M (2020) Isotopic evidence for camelid husbandry during the formative period at the Pacopampa site, Peru. Environmental Archaeology 25(3): 262–278. https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1586091

Takigami M, Seki Y, Nagaoka T, Uzawa K, D Morales-Chocano, Mukai H, Yoneda M (2021) Isotopic study of maize exploitation during the Formative Period at Pacopampa, Peru. Anthropological Science 129(2): 121–132. https://doi.org/10.1537/ase.210531

著者情報



瀧上　舞（国立科学博物館人類研究部研究員）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、2018 年国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員を経て、2021 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

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）。

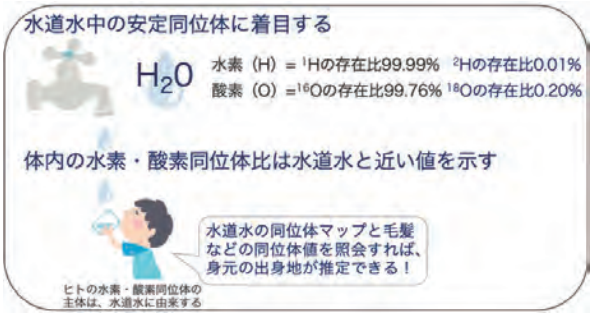


図 1. 本研究のコンセプト



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）

氷河の氷の安定同位体比から復元する昔の気温
― シルクロードの気候変動を探る ―

竹　内　　望
（千葉大学）

極地や高山に分布する氷河は、過去数百から数万年にわたって毎年雪が積もり重なって形成されたものです。氷河の中に保存された雪の年輪を掘削して得た円柱状の氷の試料を、アイスコアといいます。アイスコアの氷の構成する水の安定同位体比を分析すると、その雪が降った当時の気温を推定することができます。大気から地上に降る雪や雨の水の安定同位体は、気温が高い時ほど重い同位体をもつ水分子がわずかに多く含まれるためです。近年、南極や北極だけでなく、アジアの山岳地帯からもアイスコアが掘削されるようになりました。そのような低緯度山岳氷河のアイスコアは、数千年の我々人類の歴史とも密接と関わる環境変動を明らかにしてくれます。

1. 氷河とアイスコア

氷河とは、重力によってゆっくりと流れる雪と氷の塊で、地球の寒冷域に分布します（図 1）。氷河は､南極やグリーンランドなどの極地のほか、ヒマラヤや天山、ロッキー、アンデス山脈などの高山域にも分布します。夏でも気温の低いこのような寒冷地では、一度降った雪が融けてなくなることがないため、積雪は毎年層となって積もり重なっていきます。数百から数千年という長い間、雪が降り積もると、深さ数百から数千 m の巨大な雪と氷の塊となり、さらにその塊は重力によってゆっくり動き出します。このように形成されたものが、氷河です。

氷河の内部には、数百から数万年にもわたって降り積もった雪や氷が、層となって年輪のように保存されています。この氷河の年輪を氷河の上から特殊なドリルを使って掘り出した円柱状の試料を､アイスコアといいます（図 2）。アイスコアは、現在から過去にかけて地球上に降った雪を連続的に保存した試料ということになります。大気上空から降ってくる雪は、大気の成分や大気中に浮遊する様々な物質を一緒に巻き込んで氷河上に堆積します。このような雪に含まれる成分や物質は、その時の地球環境を示す重要な情報を持っています。アイスコアに含まれているさまざまな成分を分析することによって、過去の地球環境を連続的な時系列で復元することができるのです。アイス



図 1. 中央アジア天山山脈の山岳氷河



図 2. 氷河から掘削したアイスコア試料

コアの研究は、地球の過去にさかのぼるタイムマシンといってもいいでしょう。

過去の地球環境を復元する手段には、他にも樹木の年輪や湖底堆積物などがあります。その中でもアイスコアは、昔の降水や大気、大気に浮遊する物質をそのまま冷凍保存するという、他の方法にはない特徴をもった貴重な試料ということができます。

2. 氷の安定同位体比と気温

雪や氷からなるアイスコアには、環境指標となる様々な微量物質が含まれており、それらの濃度や構成の分析から過去環境が復元されています。さらに氷を構成する水そのものにも、重要な環境情報が含まれています。その一つが、雪が降った当時の気温です。氷を構成する水に含まれる安定同位体の構成が、雪が降った時の気温と関係があるため、アイスコアの安定同位体分析から気温を復元することができます。

水分子を構成する酸素原子と水素原子には、それぞれ複数の安定同位体が存在します。酸素原子は質量数 16、17、18、水素原子は質量数 1、2 の同位体です。ただし、地球上に存在するほとんどの酸素原子は質量数 16、水素原子は質量数 1 の同位体です。質量数の重い同位体は、数千から数万個に一つと、ごくわずかに含まれるだけです。ただし､水の中に含まれるこの重い同位体の量は、水が蒸発や凝結する過程で変化します。氷河の上に降る雪に含まれる重い同位体の量は、雪になる前の水蒸気が、どこからどのように蒸発して輸送されてきたかによって変化し、さらにその過程の気温の影響も大きく受けます。その過程は実際には複雑ですが、多くの場合では、気温が高いほど降水や降雪に含まれる重い同位体の量がわずかに多くなります。つまり、気温と水の重い同位体の量（水の安定同位体比）には、正の相関関係があり、その関係式を知ることができれば、降水の安定同位体比から降った時の気温を推定することができます。このように気温を推定するために利用する水の安定同位体比を、安定同位体温度計とも言います。

厚さ 3,000 m を超える巨大な氷河である南極氷床には、過去数十万年というとても長い期間の降雪が保存されています。南極氷床から掘削されたアイスコアからは、水の安定同位体比を利用して過去数十万年間の気温変動が復元され、地球が氷期と間氷期という気候変動を十万年周期で繰り返してきたことが明らかとなりました。

3. シルクロードの気候変動

近年では南極やグリーンランドなどの極域の氷河だけではなく、ヒマラヤや天山山脈など、山岳地の氷河からもアイスコアが掘削されるようになりました。このような低緯度帯の山岳氷河のアイスコアは、極域ほど長期間の記録を持っているわけではありませんが、地理的に我々人類の生活圏と近く、過去数千年の人類の文明や移動とも関わる気候変動を明らかにしてくれます。

天山山脈は、ユーラシア大陸中央部に広がる砂漠地帯を東西 3,000 km に横切る巨大な山脈です。山脈の標高は 4,000 から 7,000 m に達し、4,000 m を超える山肌には、山岳氷河が発達しています。天山山脈の南北の山麓には、古くから西洋と東洋を結んだ交易路として知られるシルクロードが通っています。天山山脈の氷河の融解水が、山麓の砂漠地帯にオアシスを形成し、人々の往来を可能にしたためです。数千年に渡って様々な民族や文化が往来したシルクロードは、過去どのような気候変動があったのでしょうか。またその気候変動は、地域の文化や人々の往来に影響はしなかったのでしょうか。

2007 年に中央アジア、キルギス共和国の天山山脈の氷河（グリゴレア氷帽、図 3、図 4）でアイスコアの掘削が行われました。標高 4,700 m の氷河の頂上から氷河底の岩盤まで、深さ 87 m の連続的な氷が採取されました。氷河の底から得られた有機物の放射性炭素年代測定から、最底部の氷は、約 13000 年前のものであることがわかりま

した。このアイスコアは、シルクロードの 13000 年間の歴史に対応する気候変動を保存していることになります。



図 3. 天山山脈グリゴレア氷帽頂上のアイスコア掘削キャンプ

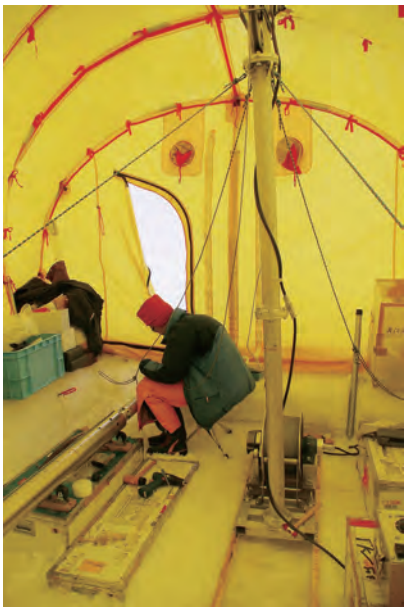


図 4. アイスコアを掘削するアイスドリル

このアイスコアの水の安定同位体比の分析の結果、13000 年間の気温変動を復元することができました（図 5）。アイスコアの浅い部分は、氷河の表面に近くなるほど、安定同位体比は高くなっていることがわかりました。これは、20 世紀以降、降雪の中の重い同位体の量が増えている、つまり気温が上昇していることを示しています。その気温上昇量は 100 年あたり、約 1.2℃と推定できました。また、この近年の気温は、過去 13000 年間の中で最も温暖であることがわかりました。19 世紀以前は、小さな変動があるものの比較的安定な気温が長く続いていたこともわかりました。最も大きく気温が変化したのは、今から約 8000 年前であることがわかりました。この氷の層の安定同位体比は、大きく低下しています。過去 10000 年間は完新世と呼ばれる最終氷期の後の温暖な時代ですが、このアイスコアは完新世の初期に中央アジアでは大きな寒冷化があったことを示しています。さらにアイスコアの最深部の年代が 13000 年であったことは、13000 年前にはこの氷河は存在しなかったほど、今よりも温暖であったことを示しています。最終氷期末期に、現在よりも温暖な時代があったことは、このアイスコアの大きな発見の一つです。最終氷期から完新世にかけて、人類はユーラシア大陸を移動し分布を広げたと考えられています。このような中央アジアの気候変動は、人類の移動やシルクロードの成立にも大き

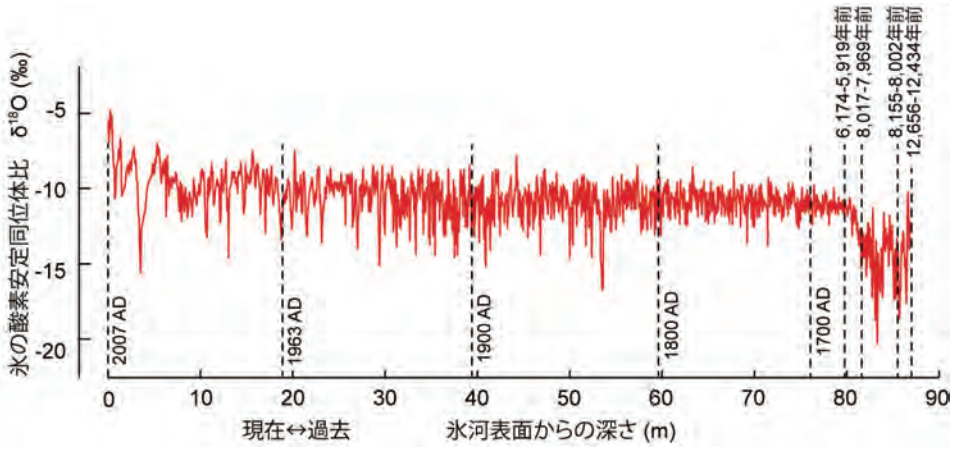


図 5. 天山山脈グリゴレア氷帽のアイスコアの酸素安定同位体比。重い同位体の量が多い（δ^{18}O が高い）ほど、気温が高いことを示しています。

く影響を与えた可能性があります。高山の氷河に保存された氷の安定同位体比を分析することで、我々は地球環境と人間文化の密接な関係を知ることが可能となり、それは将来の気候変動を予測する上でも重要な意味を持っています。

文献

Takeuchi N, Fujita K, Aizen V B, Narama C, Yokoyama Y, Okamoto S, Naoki K, Kubota J (2014) The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. Quaternary Science Reviews, 103: 26e33. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.006

Takeuchi N, Sera S, Fujita K, Aizen V B, Kubota J (2019) Annual layer counting using pollen grains of the Grigoriev ice core from the Tien Shan Mountains, central Asia. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 51(1): 299–312. https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1638202

竹内望（2012）「天山山脈アイスコアからみる中央ユーラシアの気候変動」In：中央ユーラシア環境史 1 環境変動と人間（奈良間千之編）、臨川書店、pp. 16–85

著者情報



竹内　望（千葉大学大学院理学研究院教授）1999 年東京工業大学大学院生命理工学研究科修了、博士（理学）。アラスカ大学研究員、総合地球環境学研究所助教、千葉大学大学院自然科学研究科准教授を経て、2012 年より現職。専門は雪氷学、雪氷生物学。環境変動と雪氷環境に生息する微生物の関係を明らかにするため、ヒマラヤ、天山、北極など世界各地の氷河の調査を行っている。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

ネオジム同位体比から明らかになった日本海の形成史

堀　川　恵　司
（富山大学　学術研究部理学系）

1. 日本海の形成過程

これまでに分かっている日本海の形成過程や日本列島の形成史によれば、かつて日本列島はユーラシア大陸の一部で、約 2500 ～ 2000 万年前に日本列島とユーラシア大陸の間に溝が形成され、それが徐々に拡大し、今の日本海の原型が形成されたようです。日本海の拡大が終息した 1000 万年前には、日本列島の分布は現在の弧状に近い配置になっていましたが、西日本は朝鮮半島と陸続きで、東日本の大部分は海面下にあったようです。当時の日本海は、日本列島によって閉ざされた現在のような半閉鎖的な縁海ではなく、東側に大きく開いた湾のような形状をし、日本海と太平洋との間で表層水や深層水を交換していたとされています。しかし、1000 万年前以降、東日本～北海道地域が徐々に隆起し、太平洋と日本海の間にあった海峡が徐々に縮小・浅海化して、現在のような半閉鎖的な日本海が作られました（図 1）。

日本海が太平洋と分離し、閉鎖的になっていく過程は、東北日本の隆起活動や日本列島の形成と密接に関係していますが、いつ頃、そしてどの程度の時間スケールで起こったか、については実はよく分かっていませんでした。そこで、著者らは「海水の由来」を判別できるネオジム（ネオジミウムとも表記する）同位体比に着目して、日本海の閉鎖時期を解析することにしました。これは、東北日本の隆起活動によって日本海が閉鎖的になれば､太平洋からの海水の流入が制限されるため、日本海深層水の化学組成が太平洋と異なるようになる、この変化をネオジム同位体比から明らかにできるのではないかと考えたからです。

2. 海水の由来が分かるネオジム同位体比

海水中には、大気から供給されるダスト粒子の溶脱や、岩石の風化、海底熱水からの供給など、様々な経路から様々な元素が供給され、蓄積して

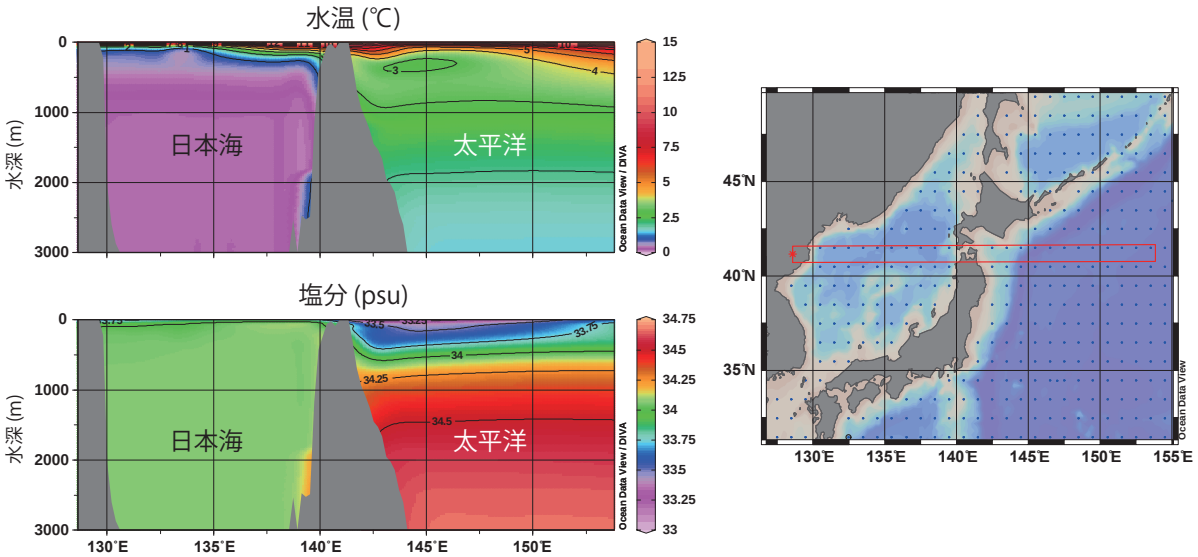


図 1. 日本海―太平洋の水温と塩分の断面図。外洋との深層水の交換がない半閉鎖的な日本海の水温・塩分は太平洋域の水温・塩分と異なった鉛直構造を示す。

います。本稿で取り上げるネオジム（Nd）も海水に溶けている元素の一つで、主に大陸の岩石が水との反応で溶け（化学風化）、河川を通じて海洋に供給されている元素になります。海水中のネオジム濃度は数十ピコモル（pmol）/kg 程度で、これは海水中の主要イオンの一つであるマグネシウム（Mg、約 50 mmol/kg）と比べると、10 億分の 1 の濃度になります。このような海水中に微量にしか存在しない元素を、微量元素あるいは極微量元素と呼んでおり、ネオジムもそのような微量元素の一つになります。

このような微量元素の同位体組成を分析するのは、非常に難しく、大量の海水試料の濃縮が必要であるにもかかわらず、1979 年には既に海水中のネオジム同位体比の分布が報告されています。この結果は、ネオジム同位体比の水塊化学トレーサーとしての有用性を明示した点で非常に重要な黎明期の研究結果の一つです。

なぜ、1970 年代から海水のネオジム同位体比が注目され、分析され始めたかというと、当時既に深海底のマンガンノジュール[1] のネオジム同位体比（海水組成を反映する）が分析されており、その結果から太平洋や大西洋で同位体比が異なること、ネオジムの海洋での滞留時間が短いことなどから、ネオジム同位体比が海水の混合や循環を解析できるトレーサーになるのではないかと、考えられ始めたためです。

ネオジムは、質量数の異なる 7 つの同位体（142, 143, 144, 145, 146, 148, 150）を持ち、多くの研究で議論に用いられるネオジム同位体比は、$^{143}Nd/^{144}Nd$ の存在比になります。$^{143}Nd/^{144}Nd$ 比の変動を議論する理由は、質量数 144 のネオジム（^{144}Nd）は安定同位体であるのに対して、質量数 143 のネオジム（^{143}Nd）は、質量数 147 のサマリウム（^{147}Sm）の放射壊変（半減期 1.06×10^{11} 年）によって、生成される核種だからです。例えば、ある岩石中にサマリウムとネオジムが含まれていた場合、時間が経過するにつれ、^{147}Sm の一部が ^{143}Nd へ放射壊変し、岩石中の ^{143}Nd 量が少し増えます。そのため、マグマが固化してできた岩石の形成年代が古いほど、あるいは、岩石中にサマリウムが多量に含まれるほど、岩石は高い $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比を持つことになります。つまり、岩石の形成年代・種類（Sm/Nd 比）に応じて、岩石のネオジム同位体比が多様に変化します。また、岩石を形成するマグマ源自体の同位体比の変化（時間と共に $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比が増加）も合わさり、一般に年代の古い大陸地殻が広く分布する北米・グリーンランド域では、低い $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比を示す岩石が見られ、より形成年代の若い火山岩が広く分布する太平洋域では、より高い $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比を持つ岩石が分布しています。

陸域に露出する岩石のネオジム同位体組成は、河川を通じて沿岸海水のネオジム同位体比にも影響を及ぼします（図 2）。このような関係は海盆スケールでも見られ、北大西洋域の海水は $-12\varepsilon_{Nd}$ 程度（エプシロンネオジム値[2]）で、北太平洋の海水は $-4\varepsilon_{Nd}$ 程度の値を示し、周辺陸域の岩石のネオジム同位体比に概ね一致し、各海域・水塊ごとにネオジム同位体比組成が大きく異なることがわかってきています。また、ネオジム同位体比は、生物活動によって同位体比が変化することがないため、半保存性成分として振る舞うことも分かってきており、このような性質から「海水の由来」を解析できる化学トレーサーとされています。

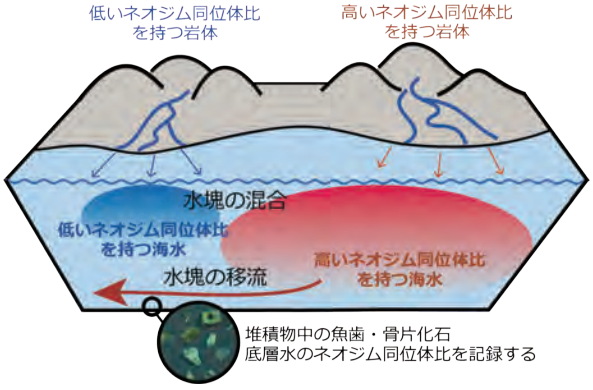


図 2. 海水のネオジム同位体比の分布を決める要因の概念図

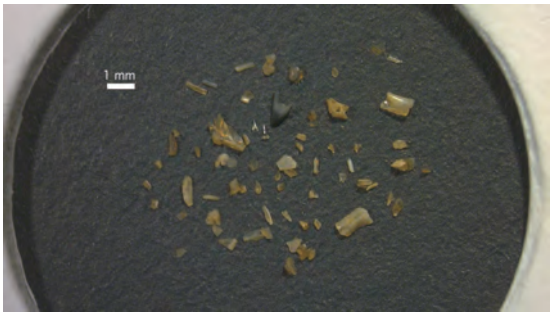


図 3. 堆積物中に含まれる魚歯･骨片化石の写真。スケールはおよそ 1 mm。

3. 魚の歯や骨の化石に記録される海水のネオジム同位体比

陸から遠く離れた海洋底では、1000 年間でおよそ 1 cm 程度の早さで堆積物が降り積もっていきます。このような堆積物について単 2 電池一個分程度の量を取って顕微鏡で覗くと、0.1 ～ 2 mm 程度の魚の歯や骨片を十数個、場合によっては百個程度見つけることができます（図 3）。0.1 ～ 2 mm の骨片数十個というのは、非常に少ない量ですが、魚の歯・骨はアパタイトで形成されており、海水中のネオジムを濃縮しています。このような濃集する性質を持つことで、微小量であっても歯や骨片化石のネオジムの同位体比の分析ができます[3)]。最も重要な点は、このように分析される魚歯骨片化石のネオジム同位体比が、当時の海底面付近の海水のネオジム同位体比を記録している点です。このような特性を持つ魚歯骨片化石を各時代の海底堆積物から拾い集め、ネオジム同位体比を分析することで、ネオジム同位体比の変化から、当時海底面を流れていた「海水の由来」を知ることができます。

4. ネオジム同位体比から明らかになった日本海の形成史

著者らは、2013 年に統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program（IODP）346 次航海）において、日本海中央部の大和堆で掘削された堆積物試料（過去 1000 万年間で堆積した全長約 400 m）を対象として、魚歯・骨片化石のネオジム同位体比を分析しました。ネオジム同位体比の分析から、試料を採取した日本海中央部の深層水が、いつ頃から北太平洋（ネオジム同位体比高い）や南太洋に由来（ネオジム同位体比やや低い）する外洋の海水の影響を受けなくなったのかを調べようとしました。

ネオジム同位体比の結果から、日本海の深層水は、1000–850 万年前の間は、北太平洋に由来する海水（ネオジム同位体比高い）の影響を受けており、850 万年–450 万年前については、南太洋に由来する海水（ネオジム同位体比やや低い）の影響を受けていたことが分かりました（図 4）。さらに興味深いことに、450 万年前、約 14 万年間の短期間に、日本海のネオジム同位体比が大きく減少していたことも分かりました。これは、高いネオジム同位体比をもつ太平洋の海水が、日本海に流入しにくくなったことを示しています。

450 万年前前後は、ちょうど太平洋プレートの運動が活発で、プレート縁辺にあたるニュージーランドやパプアニューギニアなどで造山運動が盛んだった時期に対応しており、東北日本でも造山運動が活発だった時期と重なります。そのため、今回得られたネオジム同位体比データと併せて考えると、450 万年前頃に東北日本の隆起により、太平洋と日本海を繋いでいた海峡が 14 万年程度の短期間に浅海化・縮小し、日本海と太平洋の海

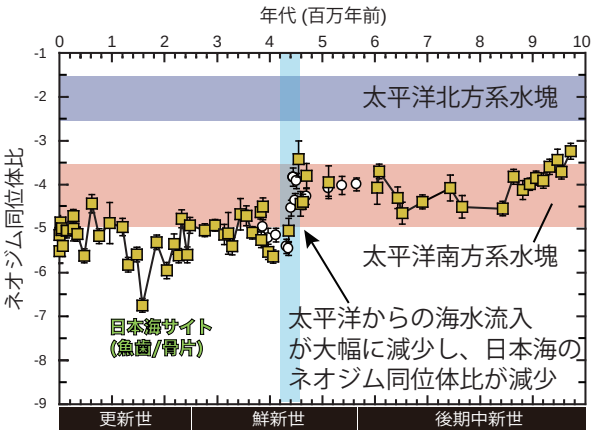


図 4. 日本海堆積物中の魚歯・骨片化石のネオジム同位体比の過去 1000 万年間の変動。同時期の太平洋北方系水塊と南方系水塊のネオジム同位体比も合わせて示した。450 万年前に日本海のネオジム同位体比の急激な減少が見られる。

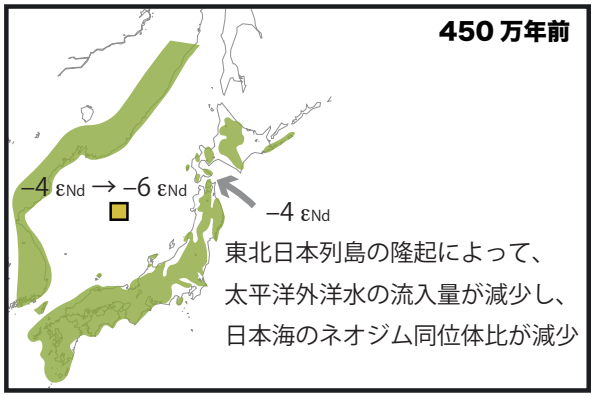


図 5. 450 万年前の日本海の推定される古地理図。東北日本の隆起に伴って、太平洋から日本海に流入する海水が大幅に減少したことが、日本海のネオジム同位体比から示唆される。

水交換が大幅に減少したことが推測されます（図 5）。つまり、東北日本の隆起が障壁になって、日本海と太平洋間での深層水交換を減少させたことから、日本海と太平洋との分離はこの時期に起こったと言うことができます。

5. おわりに

日本海の形成史や日本列島の形成史は、多くの研究者が日本海海底にある大陸地殻の厚さと形、地磁気縞、断層の走向と分布、陸上岩石の古地磁気や日本海海底堆積物に残された微化石記録を丹念に調べることで復元されてきました。本研究は、これまで日本海では適用されていなかった「海水の由来」を探れるネオジム同位体比を用いることで、日本海の閉鎖史をこれまでよりも高い時間解像度でかつ鮮明に描きました。

注釈

1）堆積物中に形成されたマンガンやコバルト、鉄、ニッケルに富んだ球形の塊。

2）エプシロンネオジム値

$\varepsilon_{Nd} = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_{sample}/0.512638-1) \times 10^4$

3）アパタイトに濃集しているネオジムは、およそ 100 μg/g 以上の濃度になる。したがって、骨片化石がおよそ 1 mg あれば、ネオジム同位体比の分析ができます。海水のネオジム同位体比の分析には、10 ～ 20 kg の海水が必要なことを考えると、アパタイト化石へのネオジムの濃集の程度がよくわかると思います。

文献

Kozaka Y, Horikawa K, Asahara Y, Amakawa H, Okazaki Y (2018) Late Miocene–mid-Pliocene tectonically induced formation of the semi-closed Japan Sea, inferred from seawater Nd isotopes, Geology, 46(10), 903–906, https://doi:10.1130/g45033.1.

著者情報



堀川恵司（富山大学学術研究部理学系准教授）2006 年、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程修了。博士（地球環境科学）。日本学術振興会特別研究員（DC1）、高知大海洋コア総合研究センター、名古屋大学・フロリダ大学（日本学術振興会特別研究員 PD）、富山大学大学院理工学研究部（理学）助教などを経て、2013 年より現職。専門は、古海洋学、地球化学。

（2021 年 3 月 31 日掲載）
（2022 年 3 月 31 日改版）



手法開発

元素の同位体比を分析するためには、自然界から試料をどのように取ってくるか、試料中から分析したい元素や化合物をどのように分離するか、同位体比をどのように測定するか、など数々の課題があります。さらに、すでに分析方法が確立している同位体比についても、さらに少ない試料で分析ができないか、より精度良く分析できないかなど、分析に関する手法開発は尽きることがありません。これらについて、具体的な研究を見てみましょう。

微少な試料の同位体比を測定する

小 川　奈々子
（海洋研究開発機構）

1. 自然の中の小さな元素

自然とは、物質科学的に見れば、微少な粒子、多様な化合物、微生物などといった目に見えない小さな物質が多数集まった複雑な混合物ということができます。個々の物質は往々にして異なる起源をもち、異なるプロセスを経てそこにあるものとも言えるでしょう。そんな自然を同位体比によって理解する方法は広く利用されていますが、研究の目的によっては、複雑な自然の物質を「そのままで」測定するのではなく、あらかじめ個々の物質に分けてからそれぞれの同位体比を求めるほうが望ましい場合もあります。しかしそういった研究を行おうとすると、物質をいかにして分けるかということと同時に、いかに微少・微量な物質の同位体比を正確に測定するかという問題にも直面します。自然の中のほんの小さな画分を測ろうとするわけですから、これは当然のことです。

炭素・窒素・硫黄といった軽元素の安定同位体比の測定は、多くの場合、同位体比質量分析計（IRMS）と呼ばれる装置で行われます。この同位体比質量分析計の基本設計は 20 世紀前半に確立されました。試料は固体でも液体でもよいのですが、炭素同位体比なら二酸化炭素（CO_2）、窒素同位体比なら窒素ガス（N_2）、硫黄同位体比なら二酸化硫黄（SO_2）の形に変えてから質量分析計のイオン源に導入します。イオン化されたそれらの気体は磁場を経由するときに同位体（質量数）に応じた軌跡を通るので、これを質量数に応じた複数の検出器で計数して測定します。これらの気体を同位体比質量分析計のイオン源へ導入する方法には、様々なものがありますが、現在、軽元素の同位体比を用いた環境学の研究で最も広く用いられている方法の一つが、元素分析計（EA）を前処理装置としてオンライン（連続フロー式）で質量分析計につなげて使用する方法です。この方法は、元素分析計／同位体比質量分析計（EA/IRMS, Elemental Analyzer/Isotope-Ratio Mass Spectrometry）と呼ばれます。この方法では、真空にしたガラスラインで試料ガスを単離精製してから、改めて拡散によってイオン源に導入するオフライン法（デュアル･インレット法）に比べ、前処理の手間や測定までの時間が大幅に短縮されます。このため 1990 年代に EA/IRMS が市販されるようになると急速に広がり、標準的な同位体比測定法として研究者の間で受け入れられました。

筆者の研究室では、この EA/IRMS システムをさらに改造して、市販のものに比べて非常に少ない試料からでも同位体比を測定できるよう工夫してきました。少ない試料に含まれる元素量（炭素や窒素の量）を知りたい、それらの同位体比を測定したい、また、測定で消費する試料はなるべく少なく済ませたいという要望はしばしば筆者の耳にも届きます。以下では、そうした「微量で同位体比を測定する方法」について紹介します。

2. 装置を微量用に改造する

図 1 に EA/IRMS の原理を示してあります。固体や液体の試料はスズなどのカプセルに包んでおき、オートサンプラーで EA の酸化炉に導入されます。そこで試料は高温で酸素と反応して燃焼酸化し、試料中に含まれている炭素は CO_2 に、窒素は窒素酸化物に、硫黄は SO_2 に変化します。還元管では燃焼で生じた窒素酸化物を N_2 に還元し、さらにその後、燃焼によって生じる水を吸湿性のある物質で除去します。その後、EA に内蔵されているガスクロマトグラフィー（GC）で

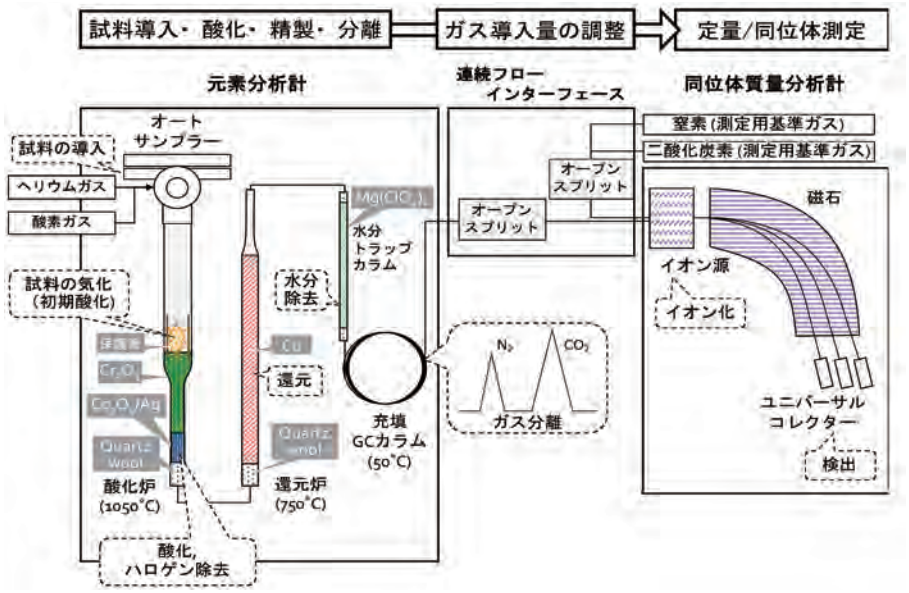


図 1. 元素分析計／同位体比質量分析計（EA/IRMS）システムの仕組み
元素分析計で試料の気化から精製と分離までを担い、インターフェースを通して検出器である同位体比質量分析計に導入するシステムです。図中の酸化炉と還元炉は微量化したあとのシステムのものを示してあります。

N_2、CO_2、SO_2 を個々のピークに分離します。分離されたガスは順次キャリアガスであるヘリウムの流れに乗って、IRMS のイオン源へと導入され、各元素の同位体比が測定されます。市販の装置はメーカーや型式によっていくらか異なるものの、普通は <0.3‰の精度をもって同位体比を測定するのに、炭素では 20 µgC（マイクログラム炭素）、窒素は 50 µgN、硫黄では 60 µgS 程度がそれぞれ必要とされます。

こうした測定の必要下限値を小さくするためには、燃焼管および還元管を図 2 に示したような異径管に変えることが有効です。具体的には、燃焼管はふつう外径 18 mm（内径 14 mm）の同径管を用いるところを、下部を外径 12 mm あるいは 10 mm（内径は 8 mm および 6 mm）に絞った異径管を用います。また還元管も外径を 12 mm または 10 mm（内径 8 mm および 6 mm）に絞ったものを用います。こうすることによって、クロマトグラム上の各ガスのピーク形状が改善され（相対的に細く高いピークになる）、測定感度が向上します。このような改良を加えるだけで、通常の 1/20 ～ 1/50 の試料量で同位体比が分析できるようになります（図 3）。これらの異径管は既に製

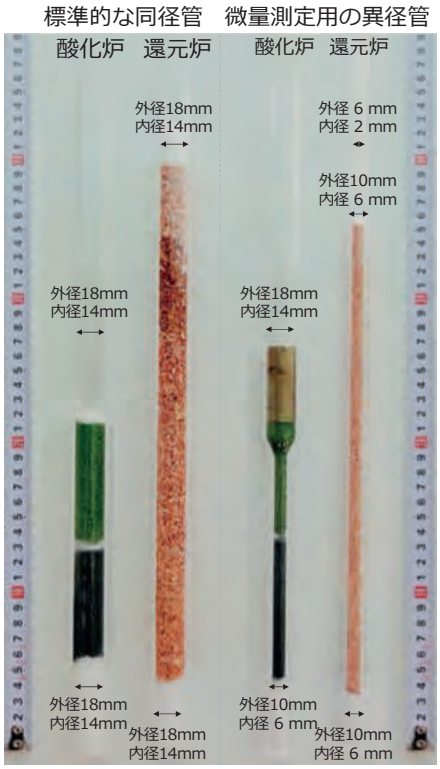


図 2. 標準的に用いられる同径の酸化管・還元管と、微量測定用に用いられる異径の管の比較
元素分析計に導入された試料は、初期酸化の反応で一気に大量の水蒸気を含むガスとなります。このため試料導入直後には反応管は太いままにして十分なスペースを確保しておきます。一度気体になった試料は、クロマトグラフィー的に最適化された細い流路を通り、より濃縮された形で同位体質量分析計まで導かれます。

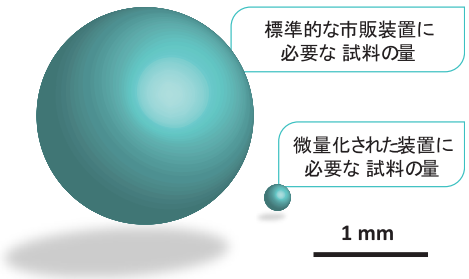


図 3. 標準的な装置と微量化された装置で必要な試料の量の比較
炭素 20％密度 1 の球状の有機物と仮定すると、それぞれ半径 0.94mm と 0.11mm のサイズになる。

品として市販されています。

窒素同位体比の場合は、大気窒素（N_2）の混入を防ぐことは非常に重要です。したがって、あらゆる継ぎ目でのリークチェックは重要な手続きになります。また筆者の研究室では、EA と IRMS のインターフェース部でオープン・スプリットからイオン源までのキャピラリー・カラムを市販のものより少し太く短くして、イオン源へのガスの導入量を意図的に増やしています。これはイオン源の真空度を下げることにもなるので、注意深く行う必要があります。

このような改良を通して、筆者の研究室では最も微量な場合では、炭素同位体比は 0.5 μgC、窒素同位体比は 0.08 μgN、硫黄同位体比は 1.5 μgS、と市販装置での場合と比べて 2–3 桁少ない量で測定出来るように装置を調整しています。

3. 微量化することの長所と短所

この微量化はさまざまな長所を持っています。その一つは当然ながら、ほんの少しの試料で測定できることです。たとえば土壌の中の特定の粒子や化合物、生き物の各器官など小さな試料、もともと目的となる生元素の含有量の少ない環境試料（たとえば、樹木のリグニン中の窒素、化石の中の有機物、隕石など）などの同位体比がうまくいけば測定できるようになります。同位体比分析のように、測定すると元の試料が無くなってしまう分析を破壊分析と呼ぶのですが、こうした破壊分析で使う試料の量が少なくてすむことは、貴重な試料の場合、その毀損を最小限に抑えることに繋がります。量が少なくて測定できることはとても重要な条件になるのです。そういったことだけではありません。元素濃度が低い試料などでは、必然的に EA に導入する試料量が多くなるため、今度は燃焼管内での燃焼効率が悪くなり、測定がうまくいかないことがあります。微量化により導入する試料量を減らすことができれば、このような燃焼効率の問題を防ぐこともできます。また酸化炉や還元炉に充填する高価な反応試薬（酸化クロム、酸化銀コバルト、酸化タングステン、還元銅など）の使用量が減ると測定のコストも下がります。IRMS にとっても、導入される試料ガスが少ないことは負担が小さくなり、メンテナンスの頻度を減らすことにつながります。

一方、長所と同時に、微量化することによる短所もあります。例えば、窒素の場合では配管のつなぎ目などからのほんの少しの漏れ、炭素の場合では測定時に試料を包むカプセルのスズに含まれる炭素というように、「これまで見えていなかった（無視できた）バックグラウンド」が顕在化して分析に干渉してきます。特にスズカプセルは精製時にスズに微量な炭素が含まれるため取り除くことが難しく、試料が微量になるほどその分の補正が必要になります。また、小さな試料を計るため今までよりも下の桁まで秤量できる天秤が必要になりますし、逆に大きな量の試料が測定しにくくなることもあります。同位体比測定では、比較のために標準物質も同時に測定しなければなりませんが、あまり小さくなると小さな粒子同士の間での同位体比の違いまで見えてくることもあります。そのような場合は、固体標品をいったん溶媒に溶かして均質化する必要があります。

このように長所と短所がありますが、うまく見極めて目的に合わせて使い分けることが出来れば、より多様な試料について、微量で正確な同位体比測定ができます。

筆者らが開発した方法は、パーツをその時々に合わせて組み替えるだけで、時に応じて簡単に微

量化できるものです。いくつかの研究室では実際に部分的な改造による微量化を汎用測定にも活用しています。皆さんも是非お試しください。

文献

Ogawa NO, Nagata T, Kitazato H, Ohkouchi N (2010) Ultra-sensitive elemental analyzer/isotope ratio mass spectrometer for stable nitrogen and carbon isotopic analyses. in *Earth, Life, and Isotopes* (Eds. Ohkouchi N, Tayasu I, Koba K), Kyoto University Press, p. 339–353.

小川奈々子、王暁水、篠原宏文、大河内直彦（2013）「安定同位体比精密測定のためのマニュアル」（財）日本分析センター

木庭啓介、木下桂、大西雄二、福島慶太郎、尾坂兼一、松尾奈緒子、舟川一穂、瀬古祐吾、目戸綾乃、平澤理世、小川奈々子、兵藤不二夫、由水千景（2021）元素分析計連結型安定同位体比質量分析計の簡易改造による微量試料炭素窒素安定同位体比測定. RADIOISOTOPES, 70：291–299.
https://doi.org/10.3769/radioisotopes.70.291

微量同位体比分析用パーツの販売情報
http://www.koshin-rs.co.jp/products/

著者情報



小川奈々子（海洋研究開発機構生物地球化学センター 生元素動態研究グループ グループリーダー）
東京農工大学農学部環境保護学科で土壌水界環境学を専攻後、京都大学生態学研究センターで博士。水と生物が好きで、有機汚染物質や有機物の安定同位体比を軸に堆積物や生物標本を使って近過去の水界環境と生態系変動の復元研究をしてきました。ウッズホール海洋研究所を経て海洋研究開発機構に着任後は「大切なものは目に見えない」をモットーに、微量同位体分析技術の改良に着手。深海から宇宙まであらゆる環境の試料を対象に研究を楽しんでいます。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

海水中粒子に含まれる重金属の起源を調べる

高 野　祥 太 朗
（京都大学化学研究所）

海洋における微量金属

海水の主要成分は、塩化ナトリウム、塩化マグネシウムなどのアルカリ金属・アルカリ土類金属塩ですが、海水には微量成分として鉄、亜鉛、銅などの遷移金属が溶けています。これらの元素は、海水 1 kg あたり数ナノグラムから数マイクログラムしか含まれていません。これは、25 m プール満杯の水にひとつまみの塩を加えた時の塩の濃度に相当します。このように微量な遷移金属ですが、そのいくつか（鉄、銅、亜鉛など）は、海洋に生息する植物プランクトンに必須もしくは毒性を示し、海洋生態系や気候変動に大きくかかわっていることが知られています。現在、海洋における微量金属を調査する国際的な研究プロジェクト（GEOTRACES 計画：https://www.geotraces.org/）が進行しており、世界の海洋における微量元素の挙動が明らかになってきました。微量金属は、岩石の風化・浸食および人間活動による放出によって大陸から海洋へ運ばれ、海水中で粒子となって、海底堆積物へと除去されます。

微量金属の同位体比

微量金属の同位体比は、起源や反応過程の違いを反映するため、海洋における微量金属の起源や循環を知る重要な手がかりとなります。海水中の微量金属の同位体比分析は、測定したい元素が微量であり、さらに海水に含まれる塩が測定を妨害するために非常に困難とされてきました。近年、分析装置や化学分離技術の発展によって、海水中のさまざまな微量金属についてその同位体比の分析法が開発されました。これらの分析法を用いて、海洋における微量金属同位体比の分布が明らかになりつつあります。しかし、これまでの研究は、そのほとんどが溶存態（海水に溶けている成分）を対象としたもので、海水中の粒子に含まれる微量金属の同位体比に関する研究は非常に少ないです。海水中の粒子は微量金属の鉛直輸送を担うため、海洋における微量金属の循環を理解するには、溶存態だけでなく粒子の分析が必須です。

日本海の沈降粒子に含まれる微量金属の同位体比

私たちの研究では、日本海の沈降粒子に含まれる微量金属（ニッケル、銅、亜鉛、鉛）の同位体比を分析し、それらの元素の起源を明らかにしました。ここではその一部を紹介します。

沈降粒子は、文字どおり海水中を沈んでいく粒子のことで、セディメントトラップという装置を海の中に設置して採取します（図 1）。日本海の沈降粒子は、大陸から運ばれてくる黄砂などの大気中粒子、海流によって輸送される陸棚堆積物、海洋表層の生物活動によって生産される有機物などで構成されることが知られています（Otosaka et al., 2004）。日本海は、西部北太平洋の縁海で、水深 3,000 m 程度の大和海盆、水深 2,500 m 程度の対馬海盆、水深 2,500 m 程度の日本海盆からなります。私たちの分析した沈降粒子は、大和海盆および日本海の水深 1,000 ～ 3,000 m で採られたものです。

沈降粒子に含まれるニッケル、銅、亜鉛の同位体比は、黄砂や海底堆積物と比べて重い同位体に富んでいました（図 2）。この重い同位体の起源として考えられるのが、有機物粒子です。有機物粒子は、おもに植物プランクトンの死骸から成り、沈降中に微生物によって分解されるため、水深が深くなるにつれて減少します。有機物粒子は、植物プランクトンが取り込んだ微量金属を含み、さ

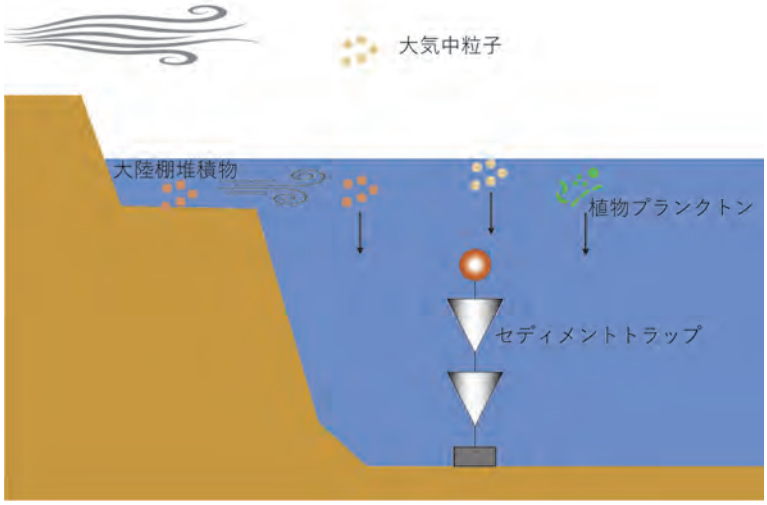


図 1. 沈降粒子とそのサンプリング

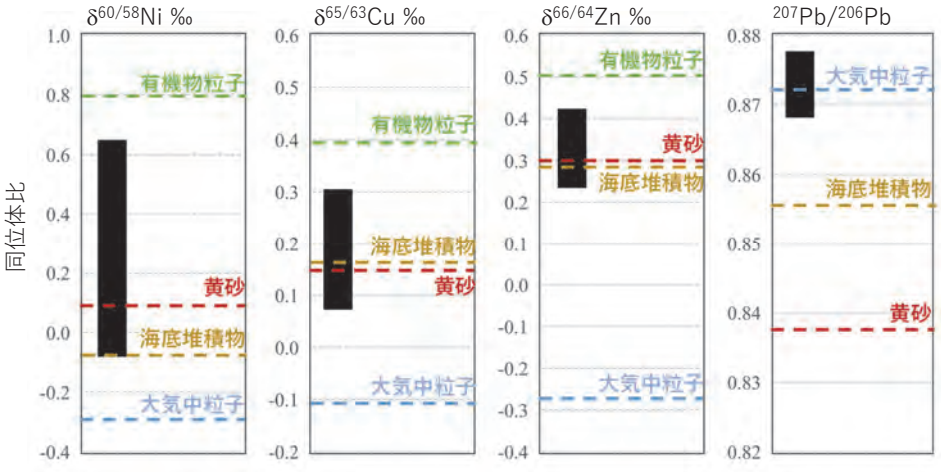


図 2. 日本海における沈降粒子中のニッケル、銅、亜鉛、鉛同位体比（黒色の四角）。ニッケル、銅、亜鉛の同位体比は δ 値で表記してある。δ 値が大きいと重い同位体に富み、小さいと軽い同位体に富む。沈降粒子の起源となりうる有機物粒子、黄砂中の同位体比を以下の論文から推定し、その推定値を点線で示す（Cameron et al., 2009; Little et al., 2018; Schleicher et al., 2020; Takano et al., 2020; Wu et al., 2011; Zhang et al., 2021）。日本海の海底堆積物と日本海沿岸でとられた大気中粒子中の同位体比もともに示す。これらの値は、本研究の分析によるもの。

らに有機物粒子の表面には、海水に溶けている微量金属が吸着します。沈降粒子の元素濃度・同位体比を詳しく解析すると、沈降粒子中のニッケル、銅、亜鉛は、その 30 ～ 80％が有機物に由来することがわかりました。今回分析した沈降粒子は、水深 1,000 ～ 3,000 m の深海で採られたため、浅海のものに比べて有機物の含有量は少ないですが、沈降粒子中のニッケル、銅、亜鉛の起源としては、大きな割合を占めていることが明らかになりました。

日本海沈降粒子中の鉛の同位体比は、黄砂と大きく異なり、日本海沿岸の大気中粒子と同程度でした。大気中粒子は、化石燃料の燃焼などの人間活動によって大気へ放出された鉛を多く含むことが知られています。そのため、沈降粒子中の鉛は、人間活動によって放出された鉛の粒子が、日本海で降下し、深海まで沈降したものであると考えられます。データの詳細な解析によって、人間活動に由来する鉛が沈降粒子中鉛の 80 ～ 90％を占めることがわかりました。

今後の展望

沈降粒子は長年にわたって海底に降り積もることで堆積物を形成します。沈降粒子の微量金属の同位体比がどのような要因によって変動するかを解明できれば、海底堆積物から人間活動による汚染の推移や過去の海洋における生物生産を明らかにできるかもしれません。

文献

Cameron V, Vance D, Archer C and House CH (2009) A biomarker based on the stable isotopes of nickel. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(27): 10944–10948.

Little SH et al. (2018) Paired dissolved and particulate phase Cu isotope distributions in the South Atlantic. Chemical Geology.

Otosaka S et al. (2004) Lithogenic flux in the Japan Sea measured with sediment traps. Marine Chemistry, 91(1): 143–163.

Schleicher NJ et al. (2020) A Global Assessment of Copper, Zinc, and Lead Isotopes in Mineral Dust Sources and Aerosols. Frontiers in Earth Science, 8(167).

Takano S et al. (2020) Sources of particulate Ni and Cu in the water column of the northern South China Sea: Evidence from elemental and isotope ratios in aerosols and sinking particles. Marine Chemistry, 219: 103751.

Wu F, Ho SSH, Sun Q and Ip SHS (2011) Provenance of Chinese Loess: Evidence from Stable Lead Isotope. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 22: 305–314.

Zhang Y et al. (2021) The isotopic composition of sedimentary organic zinc and implications for the global Zn isotope mass balance. Geochimica et Cosmochimica Acta, 314: 16–26.

著者情報



高野祥太朗（京都大学化学研究所水圏環境解析化学領域助教）、2015 年 3 月京都大学理学研究科化学専攻博士後期課程修了、2015 年 4 月より現職。

（2022 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・分析室

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・分析室

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・分析室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 2022 年度までに、国公立大学 54 機関、私立大学 16 機関、国立・地方の研究機関 29 機関、海外の大学・研究機関 19 機関の合計 118 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・分析室と密に連携した新しい分析手法の開発などをおこなう「計測・分析室共同研究」を募集しています。2023 年度からは人間文化研究機構広領域連携型基幹研究プロジェクト「人新世に至る、モノを通した自然と人間の相互作用に関する研究（略称：人・モノ・自然プロジェクト）」と連携した「人・モノ・自然プロジェクト」連携公募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、「同位体環境学ガイダンス」（毎年度前半に開催）によって機器の特徴や必要な前処理などを理解していただき、「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」相談窓口を設けています。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、ホームページ版「同位体環境学がえがく世界」（https://www.environmentalisotope.jp）の連絡先にお問い合わせください。

改訂版一覧



同位体環境学がえがく世界　2020 年版
表紙写真：千種川
撮影地：兵庫県赤穂郡上郡町





同位体環境学がえがく世界　2021 年版
表紙写真：新名庄川
撮影地：山梨県南都留郡忍野村





同位体環境学がえがく世界　2022 年版
表紙写真：富士川
撮影地：山梨県南巨摩郡身延町





同位体環境学がえがく世界　2023 年版
表紙写真：真名川
撮影地：福井県大野市



同位体環境学がえがく世界：2023 年版

令和 5 年 3 月 22 日　印刷
令和 5 年 3 月 31 日　発行

編集者　陀安一郎、申基澈、鷹野真也
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 978-4-910834-17-7





Research Institute for
Humanity and Nature
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

ISBN 978-4-910834-17-7