
2章

私たちのくらしと同位体

「環境トレーサビリティ」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えますと、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」のようなものではありません。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、社会的認知度也没有ありません。

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に関しては、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に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ー概念」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ー手法の有効性を検

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、シンポジウムに会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）

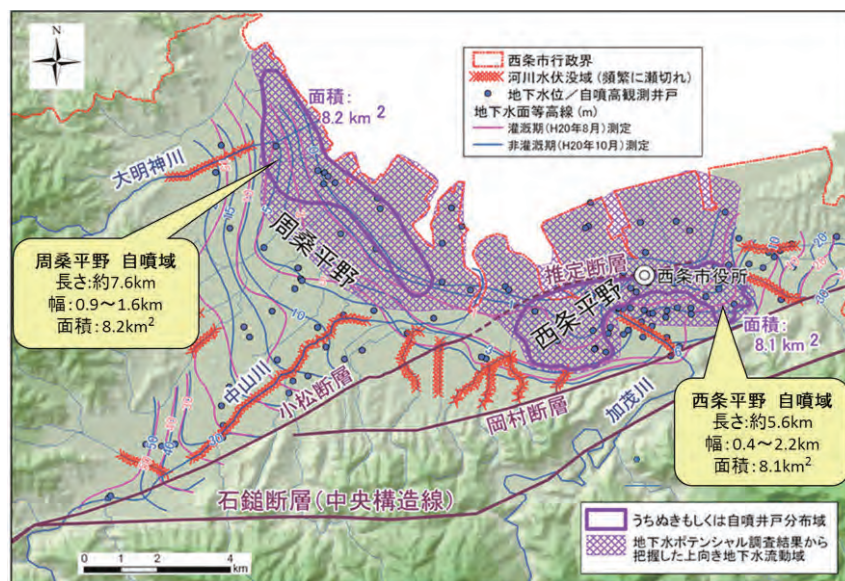
1. はじめに

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 km²、周桑平野には8.2 km²広がっています（図1）。銅管を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。



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

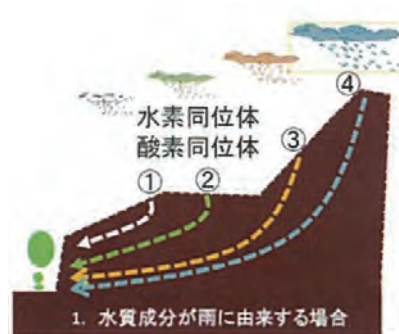


図 2. 水素・酸素同位体の地下でのフロー
(出典 中野ら (2015))

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

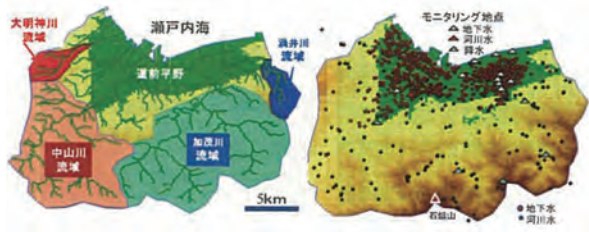


図 3. 西条市の河川流域（左）、地下水と河川水、降水の採水地点およびモニタリング地点（右）
（出典 中野ら（2015））

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

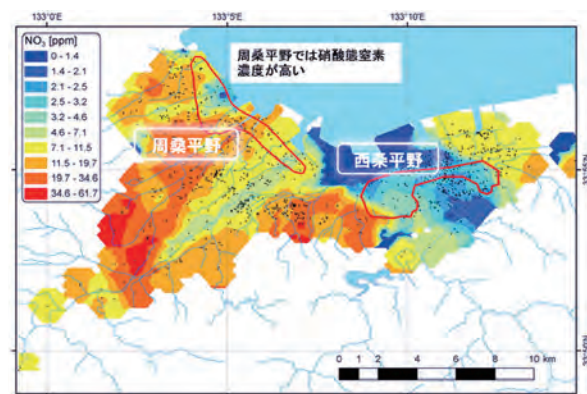


図 4. 地下水の硝酸態窒素濃度の分布
（出典 西条市（2017））

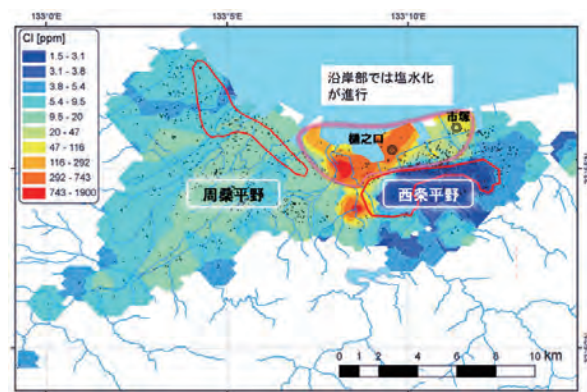


図 5. 地下水の塩化物イオン濃度の分布
（出典 西条市（2017））

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10m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 月に西条市地下水分保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^{れっか}裂罅水として、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）、西条市地下水分保管理計画

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：西条市ほか 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白・大白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たことから、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年が経過したと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 km²、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ような会社なのか、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」の藪崎研究員が行い、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考えています。

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よう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、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 km² 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なです。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（δ¹⁸O や δ²H）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、同位体比が有する高度効果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-SO₄型の水質組成を示し、δ¹⁸O と δ²H 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動線を作成して、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。

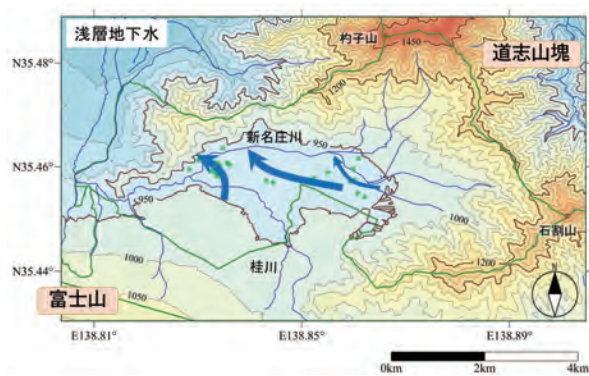


図 3. 忍野村の地下水流動（浅層地下水）

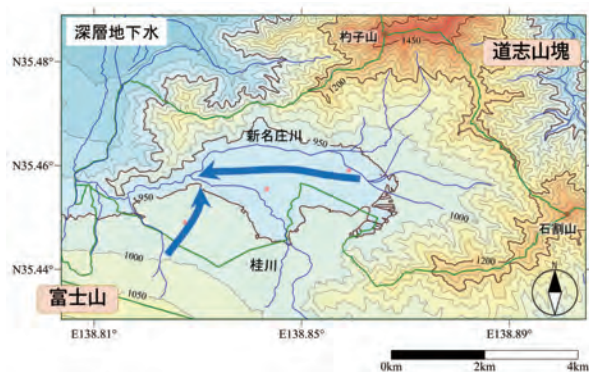


図 4. 忍野村の地下水流動（深層地下水）

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」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 km² 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」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」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 日程度でありましたが、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滲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と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を利用します。

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



埴山寿章（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 km²、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、細流の重要性を再発見しました。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性など、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性

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、

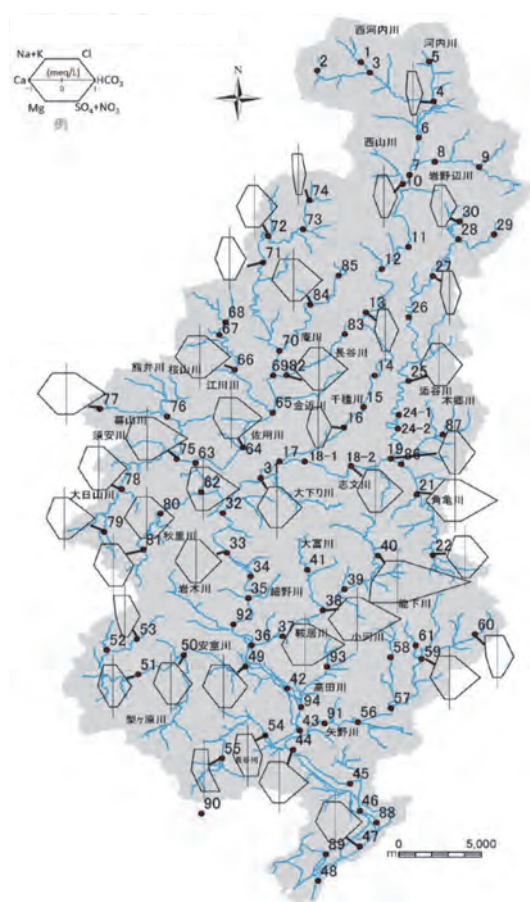


図 1. 千種川流域の水質（ミネラル成分）の分布と特徴（山本 2016）

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

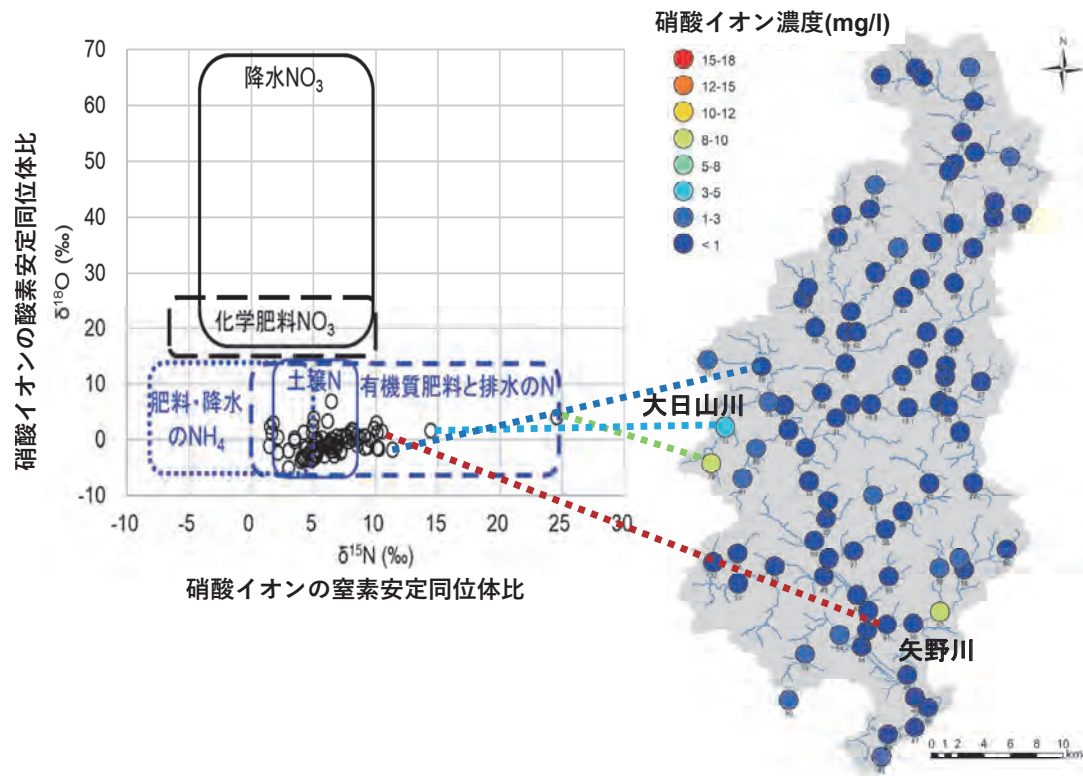


図 2. 安定同位体分析を用いた、千種川流域の硝酸イオンの起源推定（右の図は、2018 年 8 月の千種川流域の硝酸イオン濃度の空間分布。左の図は、安定同位体分析 1) を通した硝酸イオンの起源推定に用いる図）

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で、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（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ ）を用いました。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 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 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 値を持つので、供給源と河川の $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 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のよ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、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 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、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 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。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 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っても大変で、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

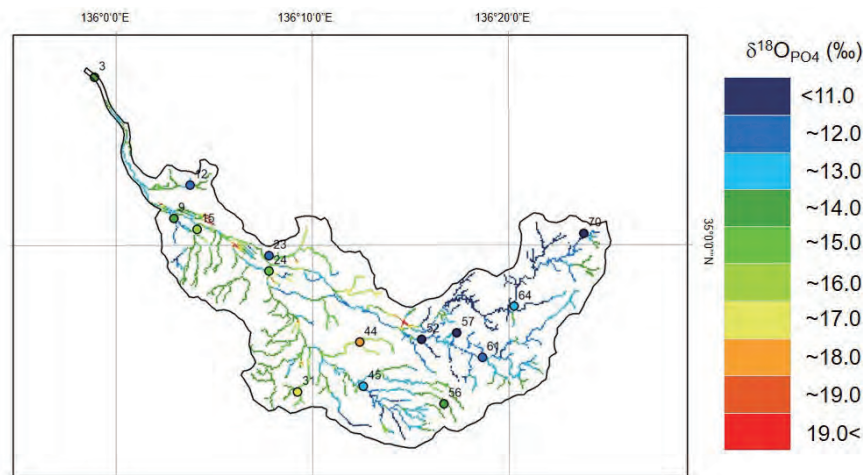


図 1. 野洲川のリン酸酸素安定同位体比の同位体地図。色の違いはリン酸酸素安定同位体比の違いを示している。○で示しているのが実際の調査地点で、ラインになっているものが予測した河川のリン酸酸素安定同位体比を示している。

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取得す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 $\delta^{18}\text{O}_{\text{P}_{\text{O}_4}}$ 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 $\delta^{18}\text{O}_{\text{P}_{\text{O}_4}}$ 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、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{P}_{\text{O}_4}}$ 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 $\delta^{18}\text{O}_{\text{P}_{\text{O}_4}}$ 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 IBB, 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的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

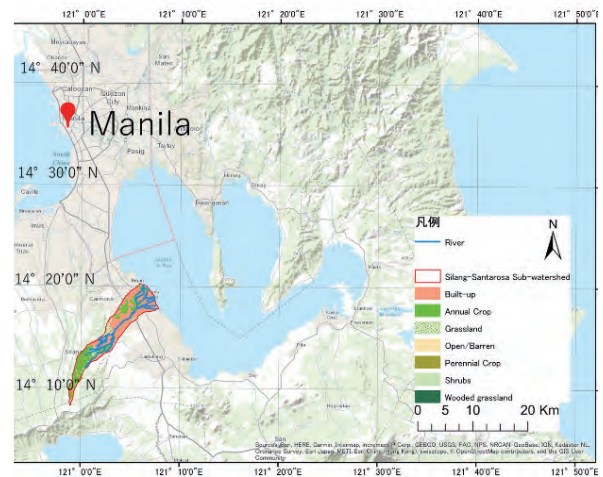


図1. シラン・サンタローサ流域の位置



図2. 中流域の様子

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

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について、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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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

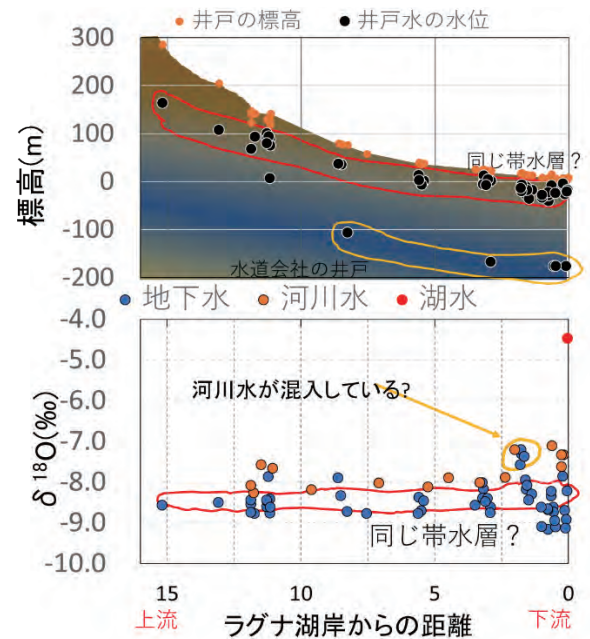


図3. 聞き取り調査から得られた井戸の深さ（上図）と水の酸素安定同位体比（下図）

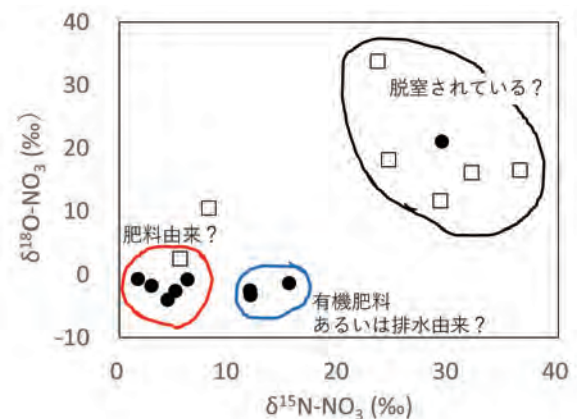


図4. 硝酸態窒素の窒素と酸素の安定同位体比

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. *Limnologia* 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）。

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、森林管理が溪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、溪流水の流出量を 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、溪流水流出量、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、前後の溪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 1. 神奈川県の水源エリアと試験流域

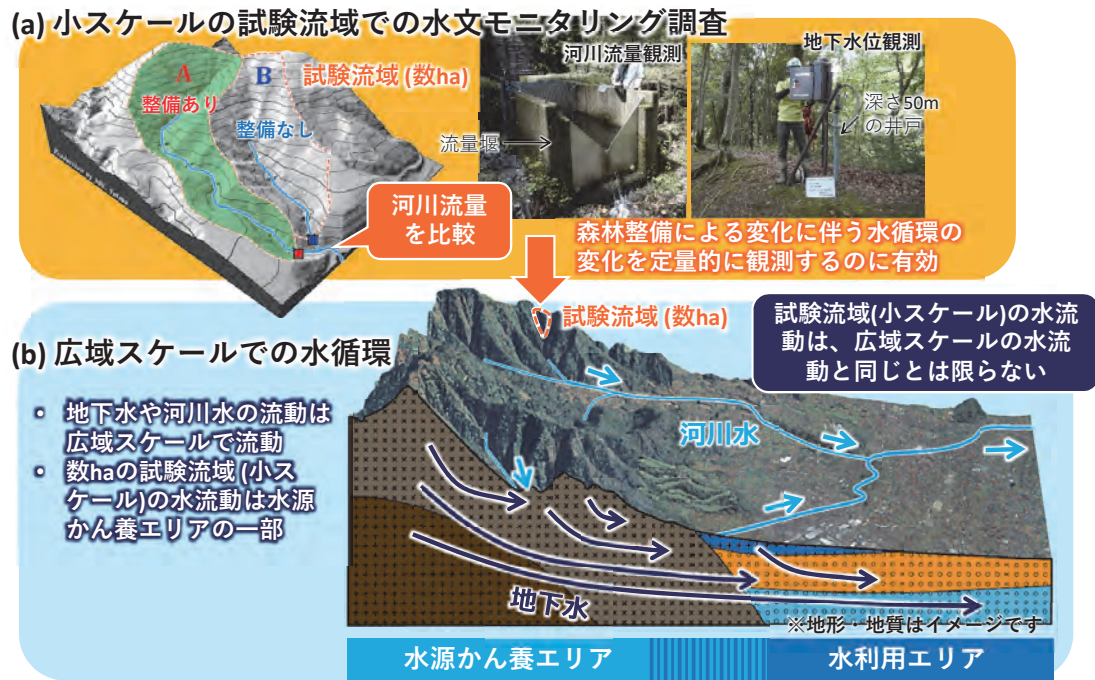


図 2. 小スケール試験流域と広域スケールの水循環の概念図

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の説明したり、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本がないように、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（ $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ）、ストロンチウム同位体比（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）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た。

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。

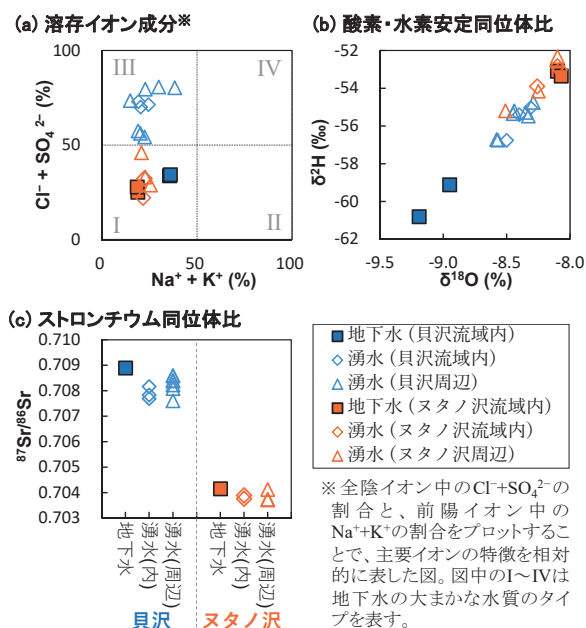


図 4. 貝沢、ヌタノ沢における水質、酸素・水素安定同位体比、ストロンチウム同位体比の特徴

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。

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感じています。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。神奈川県での取り組みは 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、

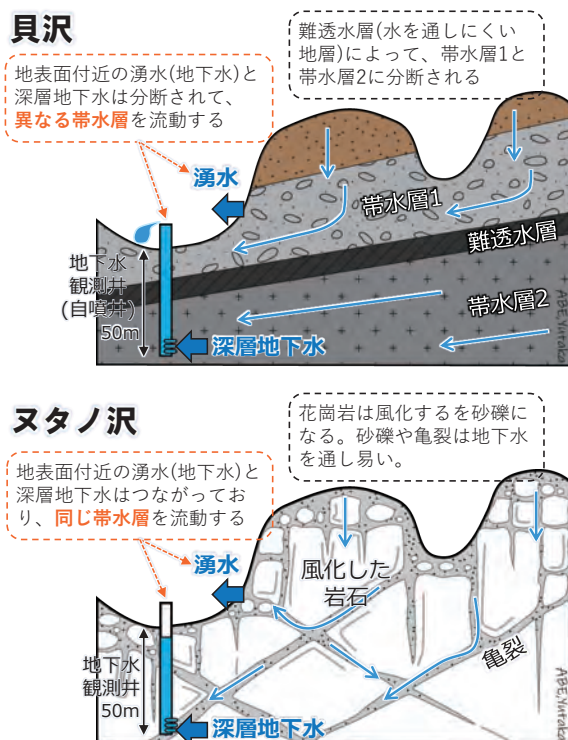


図 5. 貝沢、ヌタノ沢の地下水流動の違いの概念図

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）