

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帯（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(50m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を行い、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。

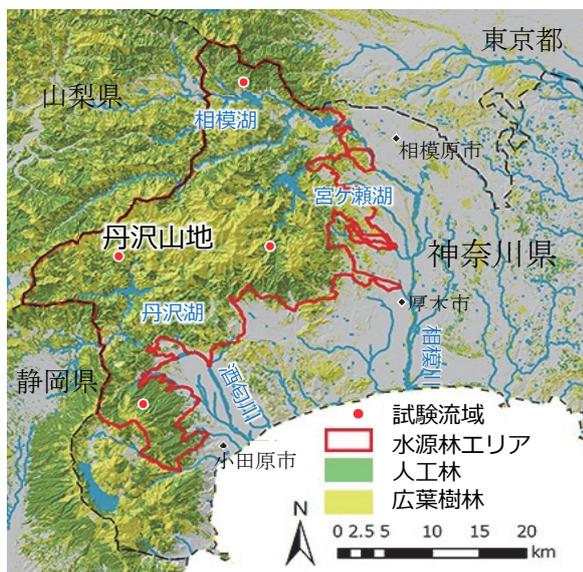


図1. 神奈川県の水源エリアと試験流域



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50m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50m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。

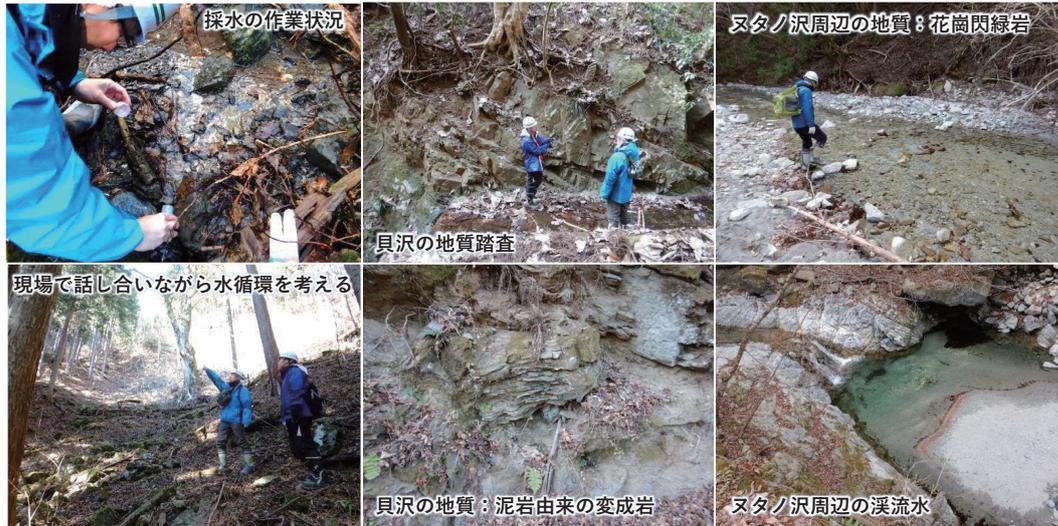


図3. 調査状況写真

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

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す。

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。

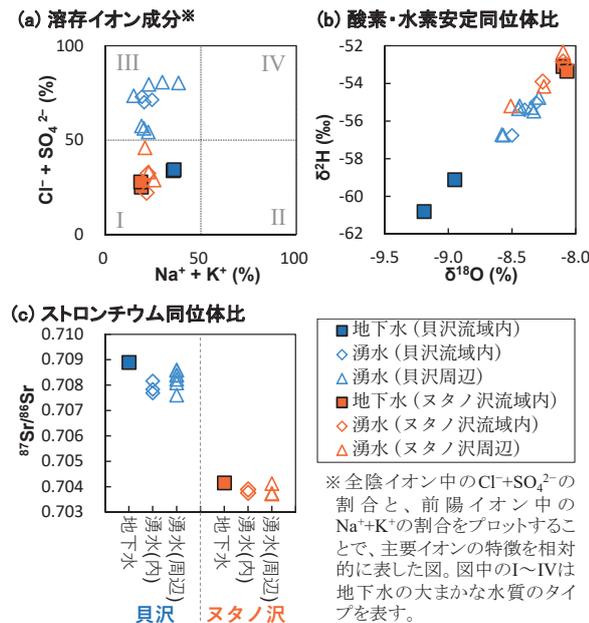


図4. 貝沢、ヌタノ沢における水質、酸素・水素安定同位体比、ストロンチウム同位体比の特徴

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50m）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50m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、50m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

- 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ため、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々です。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、

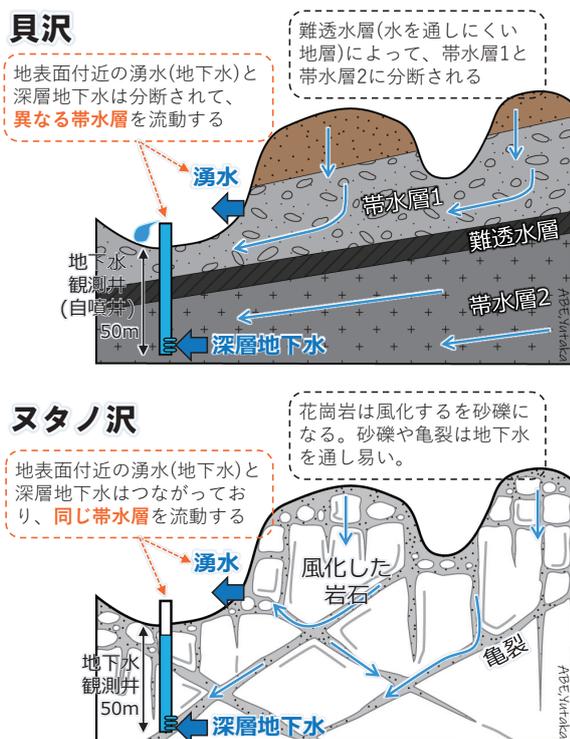


図5. 貝沢、ヌタノ沢の地下水流動の違いの概念図

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）