

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がありますが、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とも場合があります。

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”と呼ばれていた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（ $\text{pH} < 7$ ）、中性（ $\text{pH} = 7$ ）、アルカリ性（塩基性）（ $\text{pH} > 7$ ）

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下にあるため、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（ミリジーメンズ／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となります。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

水では好氣的条件にあるため、ORP は 200 ～ 300 mV の相対的に高い値を示しますが、深い地下水など嫌氣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、みなさんもお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 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）、右側に陰イオン（上から Cl^- 、 HCO_3^- 、 $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ ）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、“ $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ” 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

Na- ($\text{Cl} + \text{HCO}_3$) 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ます。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」、

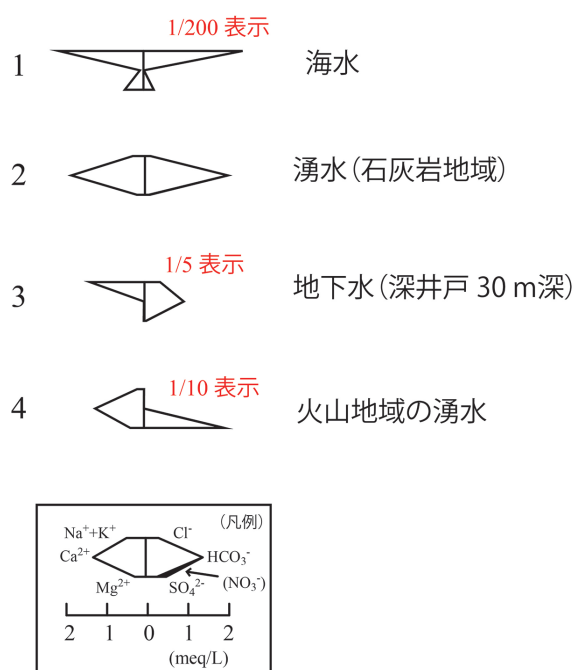


図 2. 水質組成図（シュティフダイアグラム）

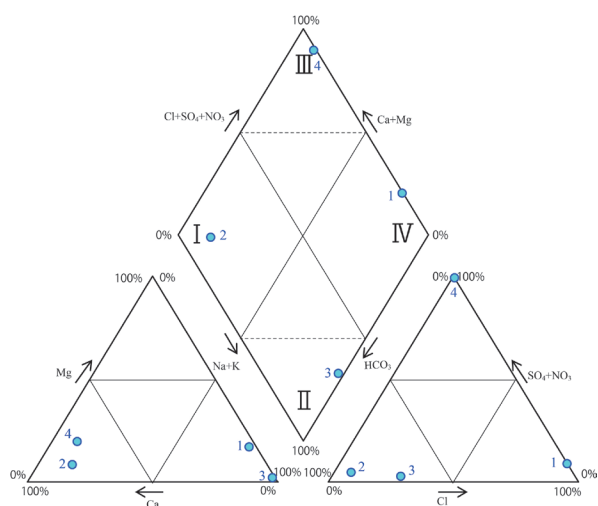


図 3. 水質組成図（トリリニアダイアグラム）

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の部分をも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。

それぞれの大きな特徴として、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、 $\delta^2\text{H}$ ）および酸素安定同位体（以下、 $\delta^{18}\text{O}$ ）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。

$\delta^{18}\text{O}$ および $\delta^2\text{H}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ 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、土壤中（土壌水）で蒸発の影響がお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、 $\delta^{18}\text{O}$ や $\delta^2\text{H}$ 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 ^3H や CFCs、 SF_6 を用いた推定方法がよく利用されています。

^3H 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 ^3He （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 ^3H 濃度が 10 Bq/L で、現在の ^3H 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。 ^3H 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。

SF₆ 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 SF₆ 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 SF₆ 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

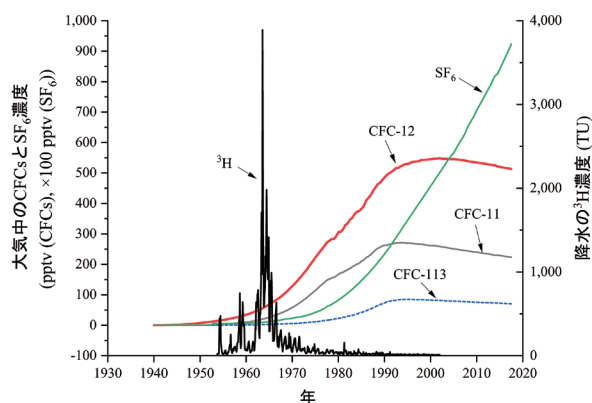


図 4. 降水の ³H 濃度、大気中の CFCs および SF₆ 濃度の経年変化 (藪崎, 2021 の図を一部加筆・修正)

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。

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。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

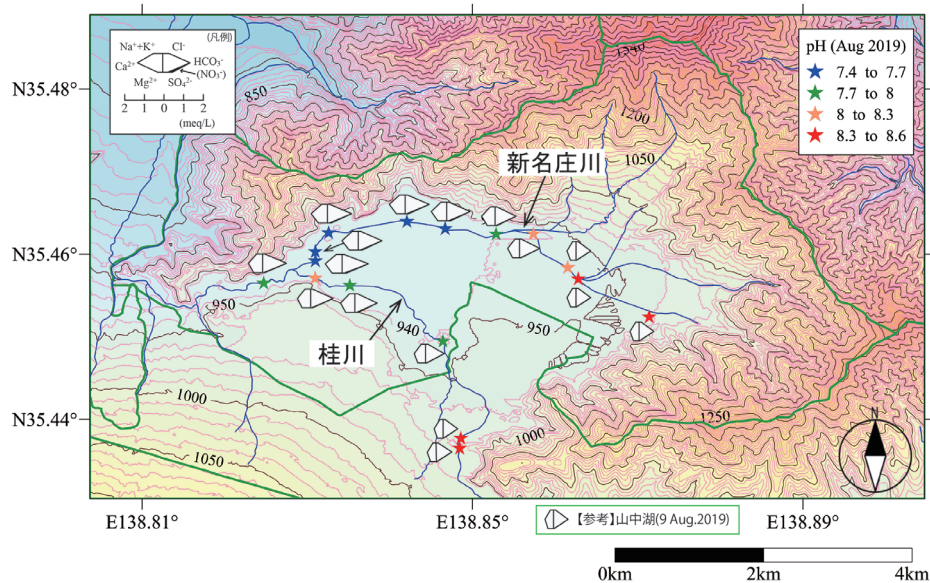


図 5. 河川水の pH と水質変化（山梨県忍野村の調査例）（藪崎，2020）

研究では比較的新しい項目である Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) や Pb 同位体比 ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 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 $\delta^{18}\text{O}$ 、縦軸 (y 軸) に $\delta^2\text{H}$ 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^{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・荏加泰司・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）