

# 地下水の涵養域・滞留時間の推定法 —水質，同位体を利用した調査の紹介—

藪崎志穂\*

## 1. 地下水の流れを把握する方法とは？

地下水とはその名の通り地面の下に存在する水であるため，水位の浅い井戸を覗くなどの方法を除き，ヒトの目で直接見ることは殆どできません。仮に井戸で水面が見えたとしても，大抵の場合，水は動かずその場にとどまっているように感じますが，地下水は常に流動しています。水の汚染や枯渇を招くこと無く地下水を利用するためには地下水の流れを把握することがとても重要ですが，上述したように通常は目視できないため，状況を把握することは中々困難です。地表面を流れる川のように，地下水の流れを直接観察することができればどれほど便利なことかと，幾度思ったか知れません。ところが，幸いなことに目に見えない水の流れを把握する方法は幾つかあるのです。

一つは，土の物理的な特徴，たとえば土の種類や透水係数（土中における水の動きやすさ），含水量（土に含まれる水分の量），間隙率（土壌中の隙間の割合）などを利用する方法があります。水が流れる母体である土の構造を把握することにより，間接的に水の流れる速さを推定します。しかし土の物理性は局所的に異なる場合もありますし，深度によっても変化するため，地下の構造が複雑な場合には水の流れの推定が難しくなります。

もう一つは，トレーサー（追跡子）を利用して水の動きを予想する方法です。トレーサーとして利用できる物質は複数ありますが，大きく2種類に区分できます。第一に，食塩や蛍光物質などの人工トレーサーを水中に投入する方法です。任意の地点に任意の濃度のトレーサーを投与するため，

より詳細な地下水流動を把握することができますが，多かれ少なかれ環境に影響を与えますので，現場の条件などを考慮して投入する物質や量などを調整し，適切に対応する必要があります。第二に，水に溶けている成分（無機イオンや微量元素など）や同位体（ $H \cdot O \cdot C \cdot N \cdot Sr$ などの安定同位体， $^3H \cdot ^{14}C$ などの放射性同位体）などの環境トレーサーを利用する方法です。この方法では自然状態の水に元々含まれている物質をトレーサーとしますので，環境に影響を与えることはありません。また， $H$ と $O$ は水を構成する元素ですので，これらの同位体をトレーサーとして利用することで水そのものを追跡できるため，水循環研究では特に効力を発揮します。地下水流動を把握することができる便利な手法ですが，単独のトレーサーの結果のみでは誤った解釈を導く危険性があるので，できるだけ複数のトレーサーを併せて利用すること（マルチトレーサー法の活用）が望ましいとされています。

## 2. 地下水の涵養域と滞留時間

涵養とは，降水・河川水・灌漑水などの地表水が，地下水系に吸収・付加される補給過程のこと<sup>1)</sup>で，涵養域とは地下水の涵養が生じる地域のことを意味しています。地下水を枯渇させることなく持続的に利用するためには，地下水がどこで涵養され，どのように流れてゆくのかを把握すると共に，地下水がどのくらいの時間をかけて流動しているのか（滞留時間）を知ることも有効な手段です。ところで，滞留時間には幾つかの意味が含

\*総合地球環境学研究所基盤研究部

まれています<sup>2)</sup>。一般的には、ある水体がすべて入れ替わるのに要する時間のことで、たとえばダムの水がすべて新しい水になるのに要する時間に相当します。その他に、ある場所に存在する水(井戸の水など)が地下水として涵養されてからどれくらいの時間が経過しているのか、いわゆる“水の年齢”としての意味合いで、水循環研究でよく用いられています。本稿では、滞留時間=水の年齢として用います。地下水の涵養域や滞留時間を求める方法は複数ありますが、水の化学成分を利用する方法について、以下に紹介します。

### 3. 地下水の涵養域の推定法

環境トレーサーの一つである水の酸素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) と水素安定同位体比 ( $\delta^2\text{H}$ ) には幾つかの特徴があることが知られており、降水量が多いほど同位体比は低くなる雨量効果 (amount effect), 気温が高いほど同位体比は高くなる温度効果 (temperature effect), 標高が高いほど同位体比は低くなる高度効果 (altitude effect), 内陸部ほど同位体比は低くなる内陸効果 (continental effect), 高緯度ほど同位体比は低くなる緯度効果 (latitude effect) などがあります<sup>3)</sup>。地下水や湧水の多くは降水(天水)由来であるため、条件にもよりますが、上記の特徴を利用して地下水や湧水の涵養域を把握することができます。

図1に、降水とその起源になっている水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の標高に伴う変化の模式図を示しました。この図で示しているように、海水が蒸発して形成された水蒸気の同位体比は相対的に高いため、沿岸付近の低標高地域に降る雨の同位体比も相対的に高い値を示します。降水によって水蒸気から重い同位体 ( $^{18}\text{O}$ や $^2\text{H}$ ) が減るので、水蒸気と同位体比は少し低くなり、そこから降る降水の同位体比も低くなります。従って、内陸の標高が高い地域に降る降水の同位体比は、沿岸域と比べて相対的に低くなります。この現象を高度効果と呼んでいます。なお、相変化に伴う同位体比の変動はレイリーの蒸留式<sup>4)</sup>であらわされます。

実際の活用例として、山地斜面の標高の異なる複数地点で降水を定期的に採取し、降水試料の同位体比を測定して、採取地点の標高と同位体比の関係式(涵養直線)を求め、涵養域を把握したい地下水の同位体比をそれに当てはめることで涵養標高を推定できます。図2の例では、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が $-8.0\text{‰}$ であれば、この地下水の涵養域は200mほどと推定できます。安定同位体比を用いて間接的に地下水の涵養域を把握できるとても便利な方法ですが、幾つか注意点があります。まず、降水の同位体比は降雨イベントごとの変動が大きいため、年間の加重平均値は年によって結構差が生じます。そのため、より安定した涵養直線を作

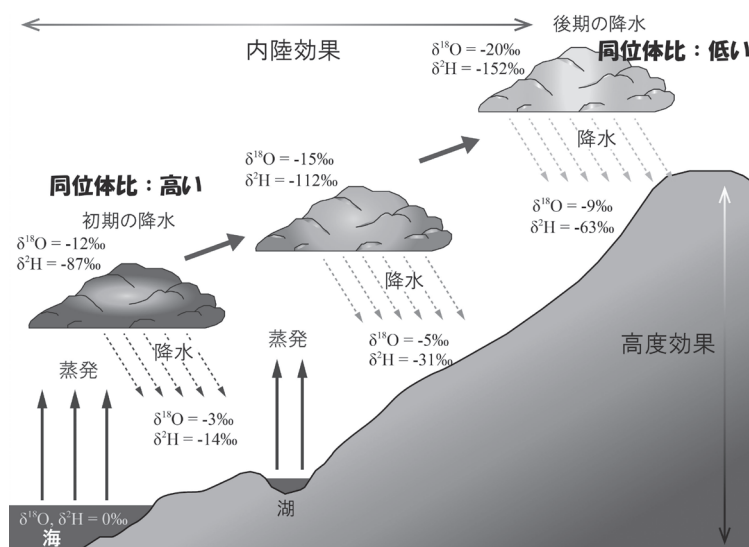


図1. 同位体の高度効果の模式図<sup>6)</sup>

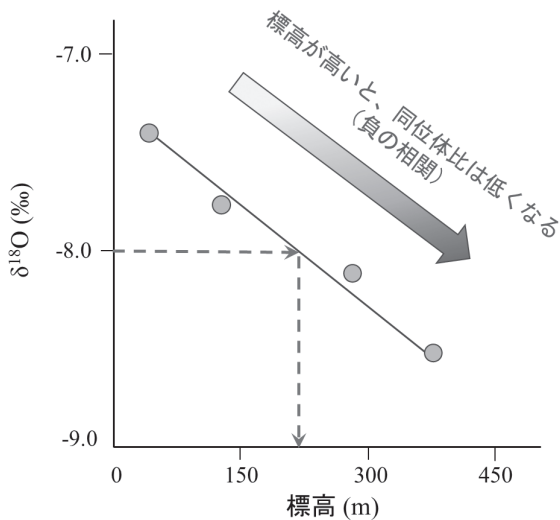


図2. 降水の酸素同位体比と標高の関係<sup>6)</sup>

成するためには、できれば2~3年ほどの降水データの平均を用いることが望ましいと言えます。次に、地表面に降った降水が土壌を浸透して地下水面に到達する過程で蒸発の影響を受ける場合があります。地表面から地下水面までの距離（不飽和帯）が厚い場合や、熱帯地域のように気温や地温の高い地域で影響が大きくなります。このような場合には、降水の代わりに湧水を利用する方法が効果的と考えられます。湧水の同位体比は上記に挙げた地中での同位体変化の影響をすでに受けており、また地中を流動する間にある程度混合して概ね一定した同位体比を示します。標高の異なる複数の湧水試料を採取することで、不飽和帯での同位体変化や季節変化の影響を考慮した涵養直線を得ることができます。ただし、著者が実施している福島県沿岸域の調査では、降水の同位体比を使用した場合と、湧水の同位体比を利用した場合では、両者の涵養直線はほとんど一致していましたので<sup>5)</sup>、不飽和帯が比較的薄く、気温もそれほど高くない地域では、地下水の涵養域推定に降水の安定同位体比を活用できると考えられます。

#### 4. 地下水の滞留時間の推定法

地下水の滞留時間の推定では、従来は放射性同位体を用いる方法がよく行われてきました。これ

は、放射性同位体が放射性壊変により別の核種に変化する、すなわち時間と共に放射性同位体の濃度が減少する特徴を利用したものです。濃度が半分減るまでに要する時間を半減期と呼んでおり、水循環研究では<sup>3</sup>H（半減期 12.32 年）<sup>7)</sup> や<sup>14</sup>C（同 5,730 年）、<sup>36</sup>Cl（同 301,000 年）などがよく用いられています。特に日本の浅層地下水のように流動が比較的早いような場合は、<sup>3</sup>Hが多く利用されてきました。大気中の<sup>3</sup>H濃度は時期によって大きく変動しており、1950~1960年代に大気圏内で行われた核実験により大気中に多量の<sup>3</sup>Hが放出され、降水の<sup>3</sup>H濃度は1960年代初頭にピークに達しており（図3）、その痕跡を利用することにより比較的年齢が若い地下水の滞留時間を精度よく推定することができました。地下水のほかに、土壌コアから抽出した土壌水の<sup>3</sup>Hプロファイルを作成して、不飽和帯の水の挙動について示した研究も行われています。その後、降水の<sup>3</sup>H濃度は徐々に低下し、60年以上が経過した現在では核実験が行われる以前の天然レベルに近い値で一定しているため、<sup>3</sup>Hを利用して地下水の詳細な年代を把握するのが難しくなっています。

こうした状況の中、滞留時間を推定する新しい手法として、水試料に含まれるCFCs（クロロフルオロカーボン類；CFC-11, CFC-12, CFC-113）やSF<sub>6</sub>（六フッ化硫黄）を用いた推定が行われるようになりました<sup>8-10)</sup>。CFCsは冷却剤や洗浄剤など、SF<sub>6</sub>は電気および電子機器の絶縁材などの用

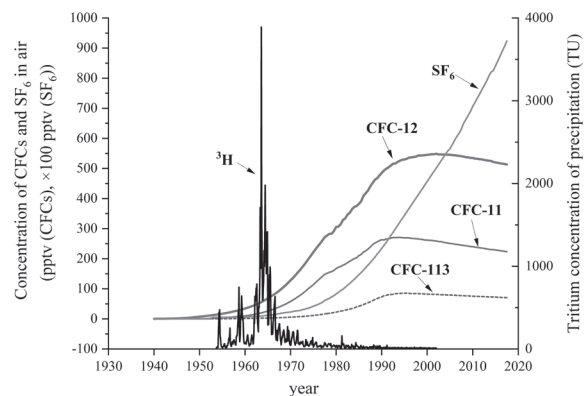


図3. 大気中のCFCs, SF<sub>6</sub>, および降水の<sup>3</sup>H濃度の時系列変化<sup>12)</sup>

途として人工的に合成された物質で、いずれも化学的に安定しています。大気中の濃度は、CFCs は 1940 年代～1990 年代まで、SF<sub>6</sub> は 2010 年代後半においても単調増加しており（図 3）、この特徴を利用して地下水や湧水の滞留時間を推定しています。また、この方法は 0～70 年程度の滞留時間の推定に適しており、日本の浅層地下水や湧水のように比較的流動が早い水体を対象とした場合に効果を発揮します。注意点として、CFCs や SF<sub>6</sub> は大気中に多く含まれているため、大気に触れないように採水する必要があります。図 4 の模式図に示したように、ナイロンチューブを井戸のできるだけ深い位置に入れて（湧水であれば湧出箇所のできるだけ奥のほうに入れて）、チューブポンプで水をくみ上げ、採水瓶を入れたステンレス製の容器に水を流し入れ、暫くオーバーフローさせてから水中で採水瓶のフタをしめます。こうすることで、空気に触れずに対象とする水を採取することができます。通常、CFCs 分析用として 250 mL 容器で 2～3 本、SF<sub>6</sub> 分析用として 500 mL 容器で 3～4 本採取します。採取した試料

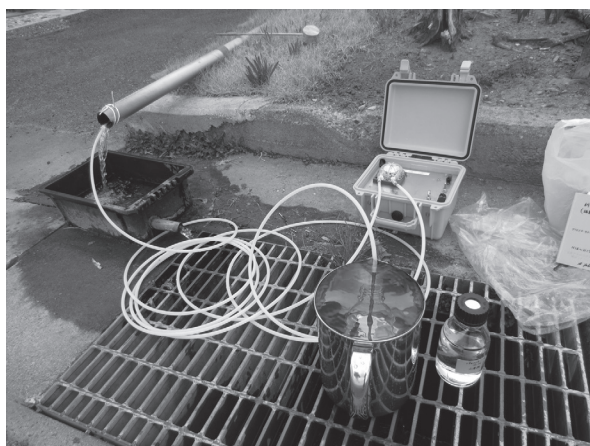
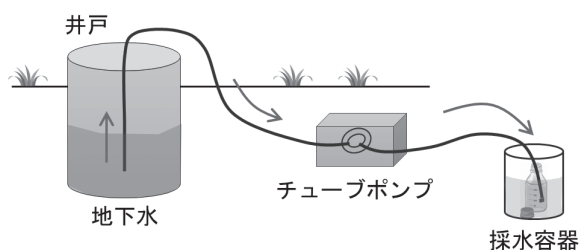


図 4. CFCs, SF<sub>6</sub> 分析用試料の採水方法  
（上：模式図，下：実際の採水時の様子）

は前処置を行い、ECD- ガスクロマトグラフによって分析し、各濃度を求めます。分析で得られた試料水の濃度と、大気中の濃度変化（図 3）を比較することにより、試料水の滞留時間を把握することができます。この方法を福島県沿岸域の調査で利用した結果、湧水と地下水の滞留時間は約 15～45 年、自噴井（被圧地下水）は約 50～70 年で、相対的に自噴井の滞留時間が長いことを明らかにしました<sup>11)</sup>。採水条件により適用できない場合もありますが、国内では富士山や鳥海山、阿蘇山など複数の地域でこの手法が活用され、データが蓄積されつつあります。今後の水循環研究でも有効活用されていくことが期待されます。

## 5. 結び—今後の発展について—

本稿では、見えない地下水の流れを化学分析のデータを用いて把握する方法の一例を紹介しました。水の酸素と水素の安定同位体比の分析では、従来の質量分析法では時間や技術を必要とされましたが、技術の発展に伴い、CRDS（Cavity ring-down spectroscopy）による分析装置が開発されて以来、非常に簡単かつ短時間で質量分析法と遜色ない質の高い同位体データを得ることができるようになりました。また、CFCs や SF<sub>6</sub> のような新しい手法を水循環研究に取り入れることで、さらに多くの知見を得ることができると考えられます。地下水は自治体の水道水源や簡易水道水源、家庭用の井戸、農業用水や工業用水などとして多く利用され、また災害時には貴重な水源にもなります。こうした地下水資源を枯渇させることなく持続的に利用するための情報収集のツールとして、今後も複数の化学成分をトレーサーとして活用し、データの蓄積や解析を行ってゆきたいと思っています。

## 参考文献

- 1) 地学団体研究会・最新地学事典編集委員会編 (2024)「最新 地学事典」. 平凡社, 1648p.
- 2) 山中 勤・辻村真貴 (2020) 滞留時間に関する

- る諸概念と用語法. 水文・水資源学会誌, 33, 156-163.
- 3) Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
  - 4) 酒井 均・松久幸敬 (1996) 安定同位体地球化学. 東京大学出版会, 418 p.
  - 5) 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, 449-471.
  - 6) 藪崎志穂 (2021) 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 -. 陀安一郎・申 基澈 編「同位体環境学がえがく世界: 2021年版」, 総合地球環境学研究所, 67-71.
  - 7) MacMahon, D. (2006) Half-life evaluations for  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , and  $^{90}\text{Y}$ . *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 1417-1419.
  - 8) Busenberg, E., and Plummer, L. N. (1992) Use of chlorofluorocarbons as hydrologic tracers and age-dating tools. *Water Resources Research*, 28, 2257-2283.
  - 9) Busenberg, E., and Plummer, L. N. (2000) Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resources Research*, 36, 3011-3030.
  - 10) 浅井和由・辻村真貴 (2010) トレーサーを用いた若い地下水の年代測定法 - 火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用 -. *日本水文科学会誌*, 39, 67-78.
  - 11) Yabusaki, S., and Asai, K. (2023) Estimation of groundwater and spring water residence times near the coast of Fukushima, Japan. *Groundwater*, 61 (3), 431-445.
  - 12) 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,  $\text{SF}_6$  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.