

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のでしょうか。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 ^1H （天然存在比は 99.984%）と ^2H （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、 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 、および $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 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。

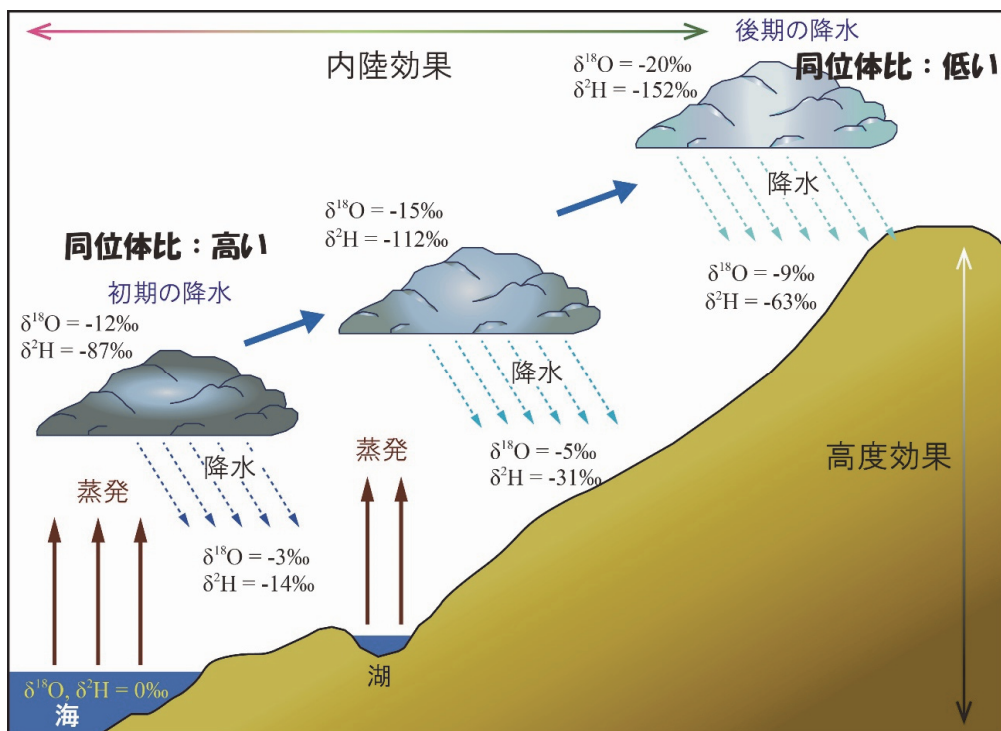


図1. 内陸効果、高度効果の概念図（藪崎，2021）の図を元に加筆

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 箇所設置し、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（ $\delta^{18}\text{O}$ ）と水素安定同位体比（ $\delta^2\text{H}$ ）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、 $\delta^{18}\text{O}$ では $-0.24\text{‰}/100\text{ m}$ （標高が 100 m 上昇すると $\delta^{18}\text{O}$ は 0.24‰ 低くなる



図 2. Picarro L2130-i（地球研設置）

ことを意味しています）、 $\delta^2\text{H}$ で $-2.0\text{‰}/100\text{ m}$ となりました。この結果を用いると、例えば、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 値が -8.0‰ 、 $\delta^2\text{H}$ 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）。

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、 $\delta^{18}\text{O}$ は $-0.26\text{‰}/100\text{ m}$ 、 $\delta^2\text{H}$ は $-1.6\text{‰}/100\text{ m}$ となり、仮に地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が -8.0‰ 、 $\delta^2\text{H}$ 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。

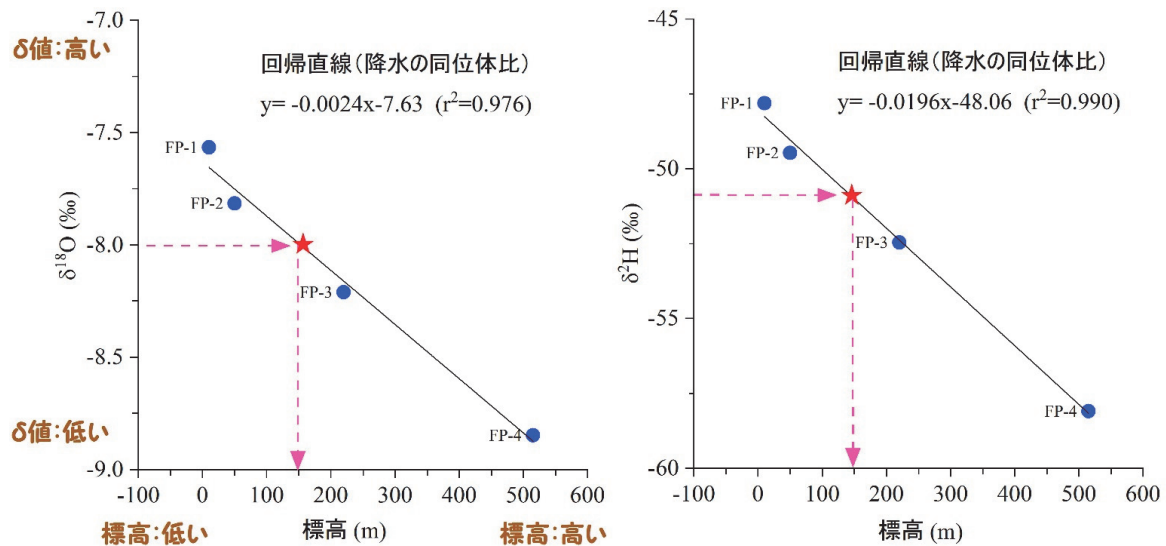


図 3. 降水の同位体比と涵養直線

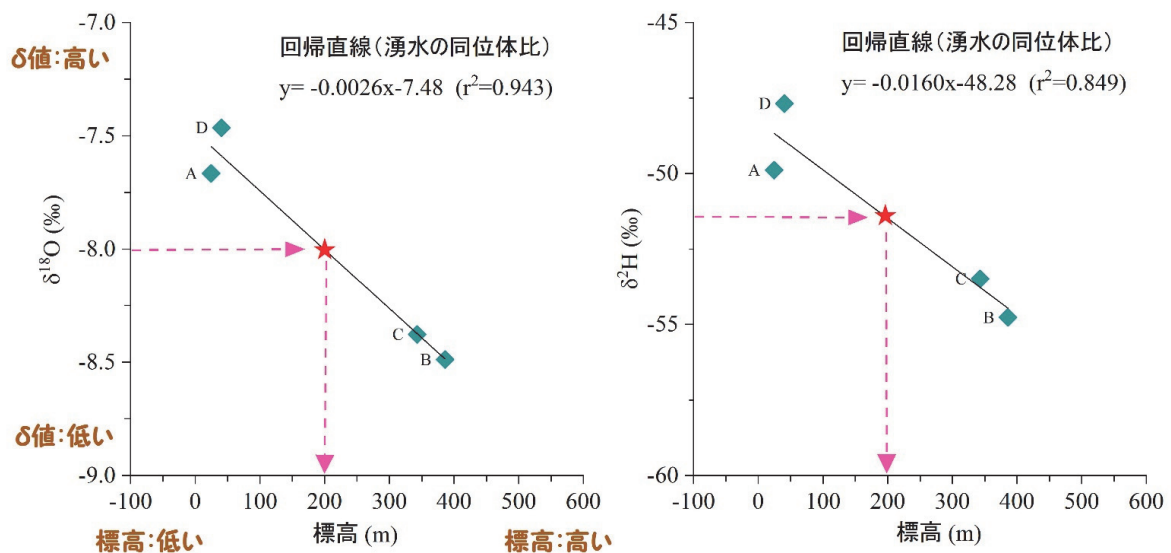


図 4. 湧水の同位体比と涵養直線

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）