

地下水の安定同位体比から日本の気候変動を考えてみよう

勝山正則

(京都府立大学大学院生命環境科学研究科)

1. 水の循環と安定同位体比

地球上に存在している水は水(液体)、水蒸気(気体)、氷(固体)と形を変えながら、回り続けています。この動きを水循環と言います。循環なのでどこからスタートしてもいいのですが、例えば海をスタートとすると、海水が蒸発して雲になり、雲は降水(雨や雪)をもたらします。極地域や高山では雪は氷として貯留されることになります。雨は地表面に到達すると、一部はそこから蒸発します。森林など植生がある場所では葉にトラップされ、そこから直接蒸発する遮断蒸発や、根から吸収され葉の気孔から放出される蒸散などに配分されます。これらを総称して蒸発散と言います。水蒸気が大気中に戻る現象で再び雲の材料となります。一方で、蒸発散の影響を受けずに深部に浸透した水は地下水となり、湧き出して川となって、池や湖に注ぎ込み、やがては海に戻ります。

水循環には固体・液体・気体間の変化、つまり相変化を伴います。では、氷を水に、水を水蒸気に変えるにはどうすれば良いのでしょうか。温めれば良いですね。温めると言うことは別の言い方をすると熱エネルギーを与えることです。水蒸気を水に、水を氷に替えるときはその逆で、熱エネルギーを奪います。つまり、地球上の水循環は熱エネルギーの輸送を伴い、これによって地球上の気候が作られていると言えます。

ところで、水が相変化するときには、水分子の酸素・水素安定同位体比の値が変化します。従って、水循環を研究するときには水の安定同位体比が有効なツールとして利用できます。現在、地球では気候変動による気温の上昇が確認されていますが、これは水循環にどのように影響するのでしょうか？ ここでは、特に日本の地下水に着目した

研究例を紹介します。

2. 使用するデータと研究のきっかけ

ここでは、日本各地の地下水を収集し、その安定同位体比を測定して、空間分布や時間変動を見ます。日本全国の地下水を収集する必要がありますが、実際に全国を巡って採水するのは容易ではありません。そこで、ここでは一つのアイデアとして、比較的入手が容易な市販のミネラルウォーターをサンプルとして用いることとします。

水の安定同位体比の測定原理や表現方法などについては本書の他のページをご参照いただくとして、ここでは、ミネラルウォーターに着目したきっかけ、つまり研究のタネについて話をします。

水の安定同位体比に限らず、化学分析をする場合は値(同位体比、濃度など)が既知のスタンダード(標準物質)が必要です。このスタンダードに対して自分のサンプルがどれだけ離れているかで値を決めます。このスタンダードには市販のものを使うことも多いですが、水の安定同位体比の場合は非常に高額で、日常的には使えません。そのため、自分で同位体比が既知の水を大量に用意しておき、普段はこれを使います。これをワーキングスタンダードと呼びます。ワーキングスタンダードは広い値の範囲をカバーしていることが望ましいです。この研究を始めた当時、分析は京都大学生態学研究センターで行っていたのですが、ある時ここで準備されている同位体比の小さいワーキングスタンダードの残量がなくなってきました。もともとはロシアのヤクーツクに調査に行かれた先生が持ち帰られた水で、高緯度地域のため、緯度効果(後述)で同位体比が小さいと考えられます。代わりとなる水をそう簡単に現地に調達に行

けるわけもなく、さて、新しいのをどうやって調達しようということになりました。そこで思いついたのがペットボトルのミネラルウォーターです。ヤクーツクの水は市販品を見たことがありませんが、同じく高緯度地域のカナダの水は使えるのでは、高度効果（後述）を狙って富士山の水ならどうだろう、そもそも世界各地の水の同位体比に分布はあるのだろうか、など、興味が広がっていきましました。そこからは、なるべく多くのサンプルを収集する作業です。近所のスーパー等で購入、出張先・旅行先で購入、インターネットで購入したものに加え、友人・知人・研究者仲間が買ってきてくれるものもありました。海外の製品も数多く、特に海外出張や旅行に出かける際には、現地のスーパーを巡って調達します。ラベルに書かれた言語が読めなくても、今はオンライン辞書で簡単に翻訳できます。ここでご紹介するデータは、このようにして収集した、日本国内の地下水の同位体比の空間・時間分布です。ほとんどの製品で、ラベルには採水された市町村が書かれています。また、ウェブサイト調べれば情報が得られることもあります。別製品でも採水地が同じものについては除外します。これをもとに採水地の緯度、経度、標高を判別し、さらにその地点の気象データを収集しました。これにより、現時点で47都道府県から460のデータを収集しています。そんなに種類があるの？と思われるかもしれませんが、意外とあるものです。

さらに、研究の広がりとして、日本コカ・コーラの協力を得て、同社が各地で販売している水源地の異なる製品「いろはす」を毎月提供していただきました。近所のスーパーやコンビニで簡単に購入可能な製品ですが、実は水源地は日本に6箇所（2023年1月現在）あり、地域によって販売されている製品が異なります。例えば京都市内では500 mlサイズの製品は鳥取県の水、350 mlサイズの製品は山梨県の水が販売されています。各製品には賞味期限がありますから、逆算すればいつ頃採取された水かが判断可能です（実は、い

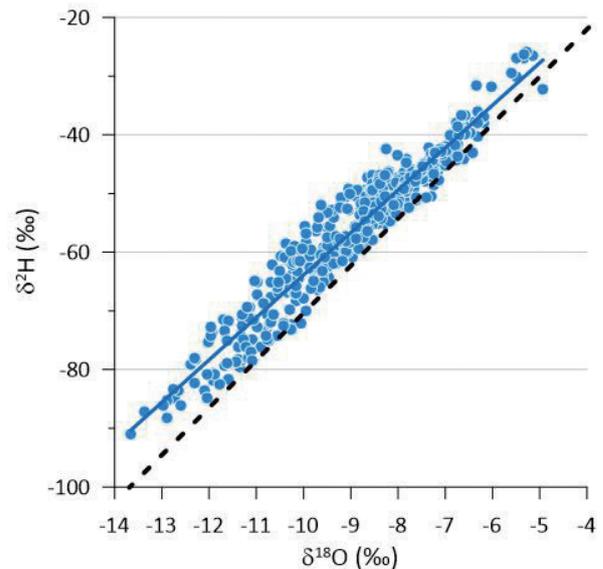


図1. 地下水の酸素と水素の安定同位体比の関係性
 図中の青い実線は近似直線を、黒い破線は天水線を示す

ろはすは刻印を読み解くと採水日までわかります)。これにより、時系列変化も把握できました。このように、1つのきっかけ、アイデアから次々と展開できるのは研究の醍醐味です。

3. 地下水の酸素と水素の安定同位体比の関係

図1に酸素と水素の安定同位体比の関係を示しました。酸素と水素には明確な関係性が見られ、近似直線は

$$\delta^2\text{H} = 7.23\delta^{18}\text{O} + 8.42 \quad (r^2 = 0.93)$$

となりました。このように明確な直線関係があるということは、どちらか一方の値が決まれば他方も決まることを意味しています。よって、これ以降の議論では主に酸素安定同位体比を使って進めますが、水素でも同様と考えて構いません。

4. 地下水の酸素安定同位体比の空間分布

図2に (a) 緯度、(b) 標高、(c) 平均気温のそれぞれと $\delta^{18}\text{O}$ との関係を示しました。緯度との関係を見ると、高緯度、つまり北の方のサンプルほど $\delta^{18}\text{O}$ が小さい傾向が見られます。緯度が 1° 大きくなると $\delta^{18}\text{O}$ は 0.365‰ 小さくなる関係です。この関係性は緯度効果¹⁾ と呼ばれます。ただし、北緯 36 度付近には特に同位体比が小さいデー

タが見られます。標高との関係を見ると、標高が高いほど同位体比が小さい傾向（高度効果²⁾）があります。標高が100 m上昇すると0.29%小さくなる関係でした。ただし、標高が低い地点ではばらつきが大きいために、関係は明瞭ではありません。北緯36度付近で同位体比が小さいデータは、この付近に存在する日本アルプス一帯で採取されたサンプルです。つまり、緯度効果の図には、

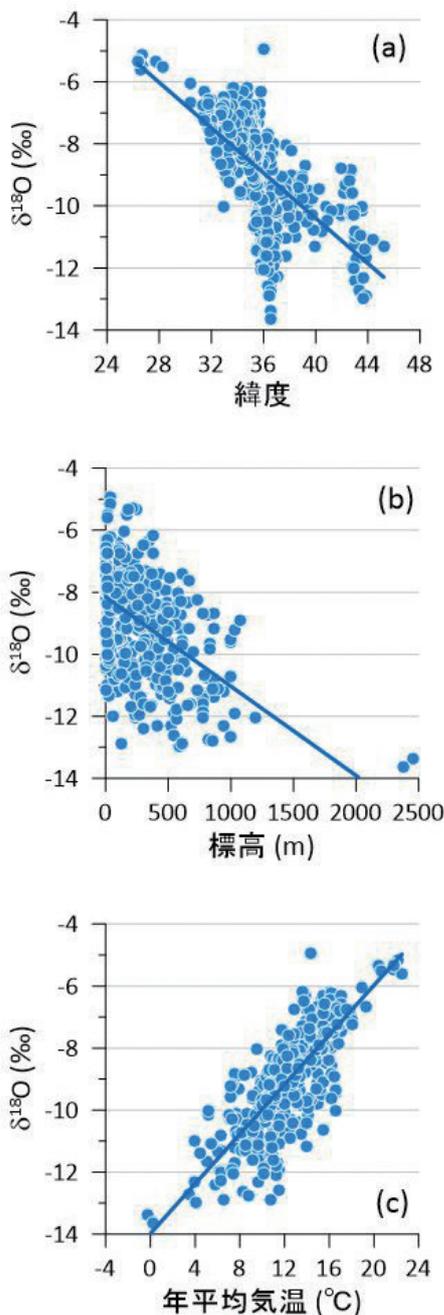


図2. (a) 緯度、(b) 標高、(c) 平均気温と地下水 $\delta^{18}\text{O}$ との関係

高度効果が重なっていることとなります。平均気温との関係では、気温が高いほど同位体比が大きい関係が明瞭に現れます。気温が1℃上昇すると $\delta^{18}\text{O}$ は0.4%大きくなる関係でした。この関係は温度効果³⁾と呼ばれます。ただし、データ数が多い10℃から17℃程度の範囲では、ばらつきも大きくなっています。つまり同じ平均気温でも同位体比が異なる地点があります。これは、日本列島スケールで考えるときには気温が重要な要素であるが、より小さなスケールで考える場合は別の要素も考える必要があることを意味しています。

これら3つの「〇〇効果」は、実際にはそう簡単に切り分けることができません。高緯度地域では気温も低くなりますし、標高の高い地域でも同様です。言い換えると、水の同位体比には水循環が発生する場所の温度条件を強く反映しているということができます。

5. 地下水と降水の関係性

3. で酸素と水素の同位体比の関係を式で示しました。この式では傾きが7.23、切片が8.42となっています。世界中の降水を測定し、同じようにグラフに載せると、傾き8、切片10の直線付近にプロットされることが知られており、この直線は天水線と呼ばれます。この天水線と、ここで示した地下水の近似線とは傾きと切片が比較的よく似ています。また、地下水の酸素安定同位体比の空間分布として「緯度効果」「高度効果」「温度効果」という用語を使いましたが、これらはもともと降水の安定同位体比分布に使用される用語です。ここで示した図はすべて地下水の結果です。つまり降水で見られた情報が、地中に浸透して地下水となっても保存されていることを意味しています。また、これまでの研究により、渓流水・河川水でも同様の関係が見られることが示されています (Katsuyama et al., 2015)。

降水と地下水、渓流水とに明確な繋がりがあることがわかりました。水の安定同位体比は、サンプルさえあれば比較的容易に分析ができます。で

は、水の入手しやすさを考えるとどうでしょうか？ 降水は漏斗をつけたボトルで集めます。ここでは詳細を示しませんが、毎回の降水ごとに同位体比の変動が大きく、平均的な値を知るには年間を通じて観測する必要があります。これは、特に雪の多い地域では容易ではありません。一方で、地下水や渓流水は過去の様々な時点の降水が混合したものであることから、多少の季節変動はあるものの、その地域の平均的な値になっていると考えられます。したがって、年間を通じた観測は必要ありません。また、降水にしても地下水・渓流水にしても、その場所に行って採取するのは難しい場合もありますが、ここで示したように市販のペットボトルのミネラルウォーターが使えるのであれば、サンプル採取は容易になります。これは、データを広く集める上で大きな利点となります。

6. 気候変動と地下水

図2(c)で示した平均気温と酸素安定同位体比の関係をもう一度見てみましょう。日本の地下水の同位体比には、その地点の平均気温と明確な関係があることがわかります。ご承知のとおり、現在、地球上では気候変動が進行中です。気候変動は地球温暖化とも言われますが、地球上の平均気温が将来にわたって上昇することが指摘されています。仮にある地点で平均気温が上昇した場合、その地点の地下水同位体比は図2(c)上で右上の方向に移動するのではないかと想像されます。これは、気温が上昇すると、海からの蒸発を促すエネルギーが増え、質量の大きい ^{18}O がそれまでより容易に蒸発できるようになり、水蒸気中の ^{16}O を持つ水分子の数に対する ^{18}O を持つ水分子の数の割合、すなわち同位体比が大きくなるためです。同位体比の大きい降水が増えて、その水が地下水になるなら、地下水の同位体比も大きくなっていくのではないかと考えられます。

果たして、そんなに単純でしょうか。長期間の観測結果から検証してみましょう。図3には北海道札幌市、山梨県北杜市、鳥取県西伯郡で採取さ

れた地下水の同位体比の約10年間の時系列変化を示しました。この3地点では、前述のストーリーのとおり同位体比が上昇しているのは山梨だけ(1年あたり0.05%の上昇傾向)で、札幌はほぼ変化がありません(1年あたり0.006%の上昇傾向)。さらに、鳥取では同位体比が低下傾向です(1年あたり0.02%の低下傾向)。これは何を意味しているのでしょうか？

それぞれの地点の気温の変動を調べるとたしかに上昇傾向にありました。したがって、降水の同位体比も上昇していると考えられます。では、なぜそれが地下水に反映されないのか。ここには、最初に述べた水循環の仕組みが関係していると考えています。気温の上昇は降水の同位体比だけでなく、降水量や、短時間に強い雨が降る回数の変化など雨の降り方のパターンにも影響します。これはその後の循環にも影響を与えます。蒸発散によって大気に水蒸気として戻る水と、浸透して地下水になる水の量の比率も変わるかもしれません。結果として、循環の速度も変わるでしょう。さらに、これらの変化の現れ方は、地域によって異なります。現在までの解析で、同位体比に変化がほとんど見られない札幌では、降水量が増加した分が浸透して地下水になる水に多く配分されていることが影響しているのではないかと考えています。また、山梨と鳥取の違いは、太平洋側と日本海側の気候・気象の違いが影響していると思われます。日本では豪雪地域を除くと夏季に降水量が多いので、地下水も夏季の影響をより大きく受けます。日本列島では夏季は太平洋高気圧を中心とした南東方向からの大気・水蒸気の流れに強く影響されますが、太平洋側でその影響を直接受けやすい山梨と、四国山地や中国山地を越えて乾燥した大気の影響を受けやすい鳥取とでは条件が異なります。この違いが同位体比の変動パターンに現れているのではないかと考えているところです。このパターンの違いは、気候変動に対して、その地域ごとの影響の受けやすさの違いを反映しているとも考えられるでしょう。

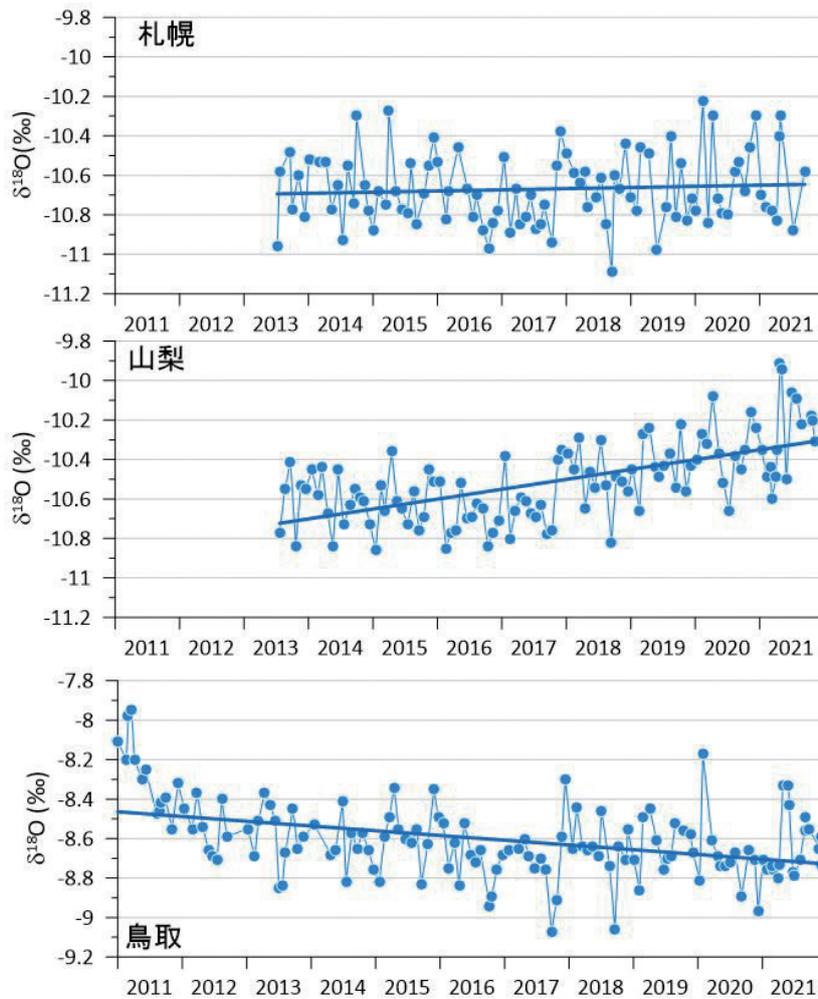


図3. 札幌、山梨、鳥取の地下水の地下水 $\delta^{18}\text{O}$ の時系列変化

ただし、ここまで書いてきたことには想像も多く含まれます。例えば、本当に降水の同位体比は気温の上昇に伴って上昇傾向なのか。これは実際に降水を定期的に採取して調べないと証明できません。一方で、地下水は我々人類にとっても重要な水資源です。将来、この水資源はどうなるのでしょうか。同位体比に見られる変動は、この水資源の危機を反映しているのでしょうか？これを考えるためにも、データを今のうちからしっかりとっておくこと、それを継続していくことは大変重要なのです。今回用いた、ペットボトルのミネラルウォーターをサンプルとする方法は、誰にでも真似のできる方法です。科学の世界の用語でいうと、これは再現性の検証できる可能性が高いということになります。

もともとはなくなりそうなワーキングスタンダー

ドの代わりに探すことから始まった研究ですが、色々集めて色々調べると、面白さが増すと同時にわからないことも増えていきます。ここではお示ししませんでした。世界の地下水を見ても、面白そうなことが見えてきています。小さな研究のタネが、どんな芽を出し、どんなふうにつくか、それを追いかけることこそが科学の醍醐味です。

注釈

- 1) 高緯度ほど、同位体比が小さくなる現象
- 2) 標高が高くなると、同位体比が小さくなる現象
- 3) 温度が高くなると、同位体比が大きくなる現象

文献

Katsuyama, M., Yoshioka, T., Konohira, E. (2015) Spatial distribution of oxygen-18 and

deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 1577–1588. DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.

著者情報



勝山正則 京都府立大学大学院生命環境科学研究科 教授。海外出張は現地のスーパーめぐりとセットで、水採取用のボトルを持っていく。専門は森林水文学。

(2023年3月31日掲載)