

---

---

## 4章

# もっと知りたい同位体

---

---

「同位体環境学共同研究」(2012年度～)は、  
総合地球環境学研究所で行っている共同研究事業です。  
日本の大学・研究機関だけではなく、世界の大学・研究機関とも一緒に研究しています。  
一緒に研究を行っている研究者の方々から、研究内容を紹介させていただきます。





## 水循環過程

---

水は地球上をぐるぐると循環しています。蒸発した水蒸気は雲となり、雨や雪を降らせま  
す。雨は、川となって流れるとともに、地表面から染み込んで地下水としてもゆっくり流れ  
ます。蒸発や凝結によって、水がその状態を液体から気体へ、気体から液体へと変化させる  
ときには、水の水素・酸素安定同位体比が変化します。一方、地下水のように、状態変化を  
せずに流れる場合は、同位体比は変化せず、元の値を保ちます。このような原理をもとに、  
水の循環についてどのようなことがわかるのか、具体的な研究を見てみましょう。



# 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、雨を降らせませす。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のでしょうか？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  $^{16}\text{O}$  (同 99.762%)、 $^{17}\text{O}$  (同 0.038%)、 $^{18}\text{O}$  (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  $\delta$  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。

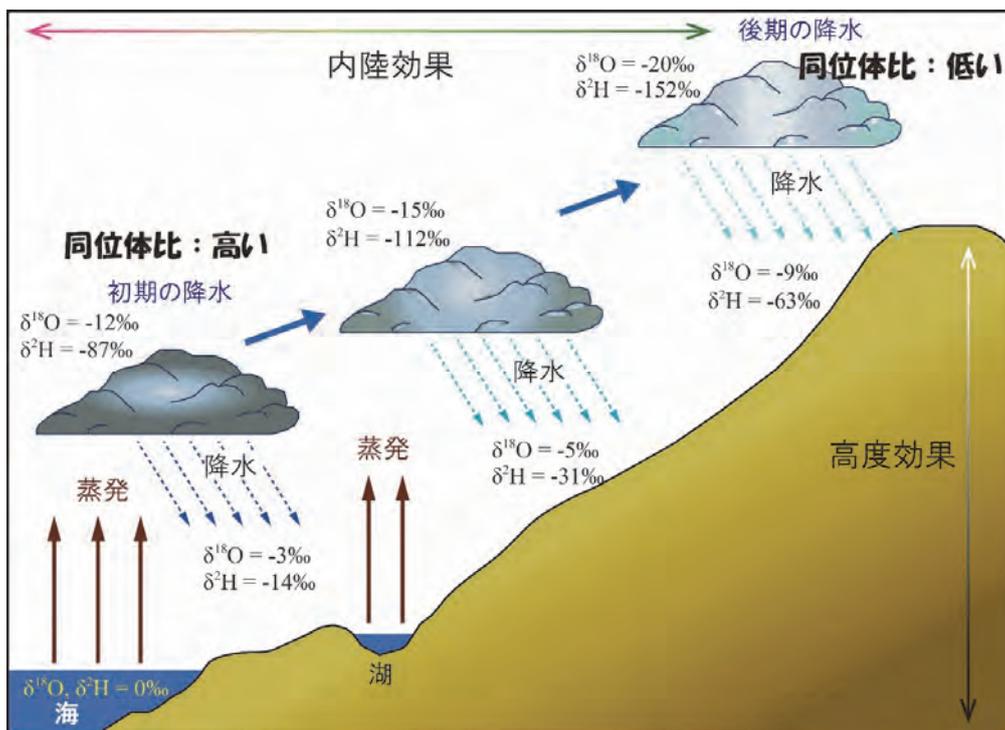


図1. 内陸効果、高度効果の概念図 (藪崎, 2021) の図を元に加筆

#### 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 $0.24\text{‰}$ 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 $-8.0\text{‰}$ 、 $\delta^2\text{H}$ が $-52\text{‰}$ 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 $-8.0\text{‰}$ 、 $\delta^2\text{H}$ が $-52\text{‰}$ 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。

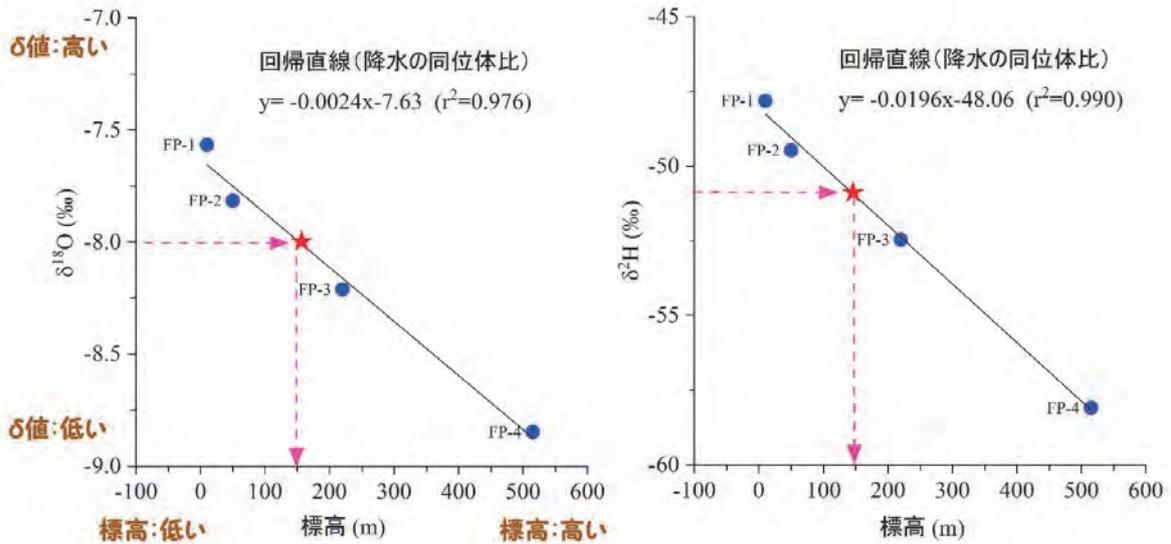


図3. 降水の同位体比と涵養直線

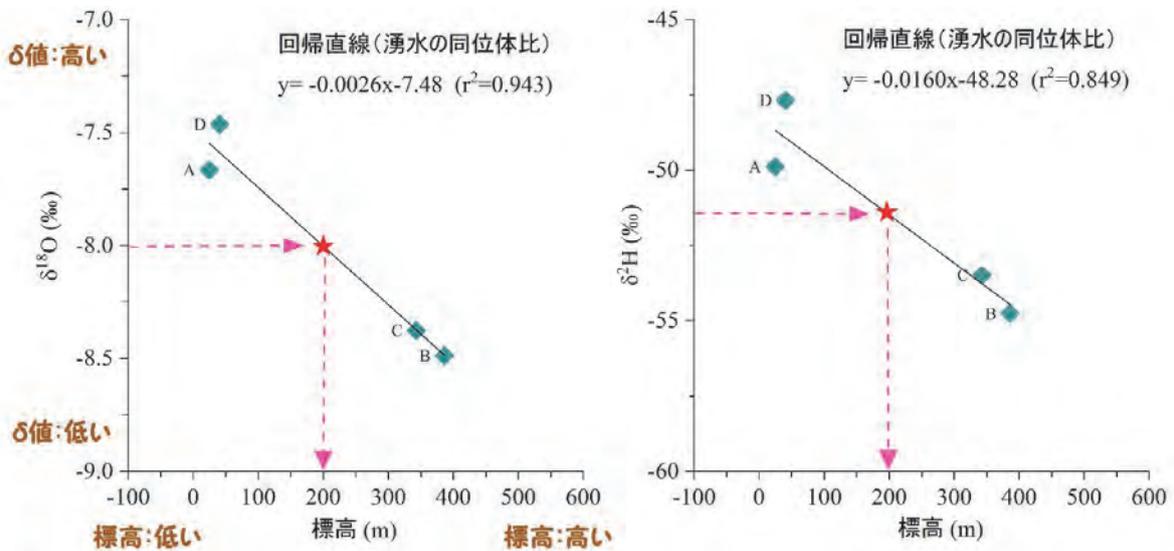


図4. 湧水の同位体比と涵養直線

### 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<sub>6</sub>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)

# 弘前の降雪の同位体比変動

谷田貝 亜紀代

(弘前大学大学院理工学研究科)

## 1. 弘前

青森県弘前市は、日本海側の豪雪地帯に位置する、落ち着いた城下町です。アメダス最大積雪深記録のある酸ヶ湯は、八甲田山系に位置し、弘前の東北東 30 km ほどの距離のところにあります (図 1)。日本海側の豪雪は、西高東低の冬型の気圧配置のときに冬季の季節風 (シベリアからの冷たく乾いた風) が日本海からの蒸発した水を含み、それが脊梁山脈により強制上昇してもたらされると誰もが聞いています。しかし、実際の気圧配置は日々かわります。たとえば新潟では、北西季節風が強い時の山雪と、日本海上空に寒気があるときに平地で雪の多くなる里雪があることは知られています (図 2)。弘前は、3 方を山に囲まれていますので、酸ヶ湯ほどの豪雪にはならないのですが、どういう気象条件の時にどこから来た水蒸気で降雪がもたらされるかを調べておくと、これから温暖化時の降水がどのように変化するかを予測したり、古文書や古気候の復元に用いる環境資料を解釈したりに役立つと思います。もちろん、土や水の溶存物質や年輪などの分析結果を解釈す

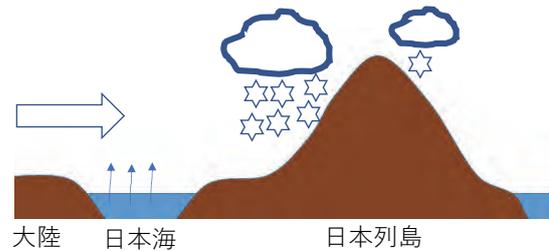


図 2. 山雪と里雪の模式図。(上) 強い北西季節風により山地で降雪が多くみられる。(下) 日本海上空の寒気により、平地で降雪が多くみられる。

るときにも、降雪の同位体比の結果は、参考になると思います。

## 2. 降水の同位体比

水や酸素の安定同位体比は古環境の復元に古くから用いられてきました。南極やグリーンランドの水河や、海洋底に沈む生物化石に含まれる酸素の同位体比は気候復元の重要な指標になっています。これらは地球全体の気候が温暖であったか寒冷であったかという指標となっています。

一方で、1960 年代から地球上の様々な場所で降水の同位体比が観測され、地理的な分布も国際的なネットワーク等で明らかになりデータの共有もすすんでいます。これら水 (酸素・水素) の同位体比と平均的な気象要素や空間的特徴との相関が発見・整理されて、それらは、温度効果、緯度効果、高度効果、内陸効果、降水量効果と呼ばれ

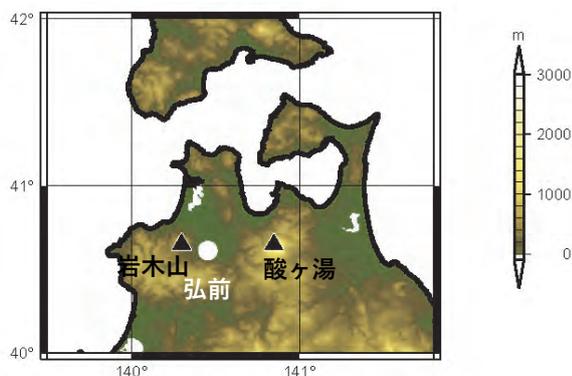


図 1. 青森県周辺の地形。カラーは標高(スケール参照)。○：弘前、▲：岩木山 (西側) と、八甲田山系の酸ヶ湯 (東側)

てきました。これらは、重い水、すなわち高い同位体比の水 ( $^{18}\text{O}$  の  $^{16}\text{O}$  に対する比が大きい、 $^2\text{H}$  の  $^1\text{H}$  に対する比が大きい) ほど先に凝結して降り、一方水面から蒸発するときには軽い水分子から蒸発するという原理から説明されています。例えば青森県の複数個所で2週間ごとの降水の同位体比変動を計測した研究 (Hasegawa et al.(2014)) では、八平地と八甲田山の同位体比は、高度効果で説明できる (平地が重く、山地である八甲田は軽い) としています。

このような分別には、温度の関数である平衡の同位体分別のほかに、動的同位体分別があります。この動的同位体分別は例えば激しい蒸発時に水面からの分子拡散速度の差により生じるもので、 $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta^2\text{H}$  の相対的な変動の差となって現れます。この指標として、天水線 ( $\delta^2\text{H}=8 \times \delta^{18}\text{O}+10$ ) からのずれを表す d-excess ( $\delta^2\text{H}-8 \times \delta^{18}\text{O}$ ) という値が用いられます。気象分野でも水安定同位体比が用いられるようになり、解説もされているので (芳村ほか 2009)、詳しく知りたい場合は読まれると良いと思います。

興味深いのは、冬季日本海の激しい蒸発をうけた水、すなわち日本海側の降雪は、d-excess が高いことが知られており (例えば芳村・一柳, 2009)、弘前の降雪には、非常に特徴的な d-excess を持つものと、気流系によってはそうでないものが混ざっていると考えられることです。そこで水蒸気輸送経路の違い、つまり水分子の通った履歴や混合過程の結果である日々の降雪水の同位体比変動や、年々の違いをみることは面白いし、前述のように、他の資料と比較することや、過去や将来を知るにも役立つと思って、この研究を行いました。

### 3. 大気循環と水循環の結果としての弘前の降水 ～ 2 冬季の結果から～

弘前で降雪のサンプリングは、大学の屋上にポリバケツを設置して、日本時間の 12 時にバケツを交換することで行いました。週末は計測せず金曜日から月曜日の降水をまとめて計測した時も

ありますが、3 年間の冬季に計測をしています。

- ・ 第 1 冬季 2019 年 12 月～2020 年 3 月初め
- ・ 第 2 冬季 2020 年 12 月～2021 年 2 月終わり
- ・ 第 3 冬季 2021 年 12 月～ (現在)

第 2 冬季の途中からは、水蒸気の同位体比の計測も行ったのですが、ここでは説明を省略します。

第 1 冬季は、暖冬小雪でした。これに対し、第 2 冬季は、弘前の降水量は平年並みでしたが、日本各地で豪雪被害がありました。第 3 冬季の現在と第 2 冬季は、ラニーニャの状態にあります。また、上記の観測期間には、雨として降った日もあります。溶ける時には同位体比は変わらないので、ここでは同様に降水として扱って示します。

図 3 は、第 1 冬季の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ )、水素同位体比 ( $\delta^2\text{H}$ )、d-excess を、図 4 は、第 2 冬季の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess を表しています。

まず、全体的な特徴として、 $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta^2\text{H}$  は似たような変動傾向をしていると言えます。また、それぞれの値の中でも同位体比が高い (水が重い) 時と低い (水が軽い) 時があり、1 週間から 10 日の間に次第に重くなるように見える時期があることです。

この両者の関係 (動的同位体分別の指標) である d-excess は、従来から言われているように、日本海からの激しい蒸発を受けたと考えられる高い値を示しています。また、芳村・一柳 (2009) は、中部地方・東北地方における降水・地表水の同位体比季節変化の報告 (早稲田・中井, 1983) を再考察し、北西季節風時に d-excess > 20、南岸低気圧通過時は d-excess = 20 との概念モデルを表していますが、ここでの d-excess の幅は 5～40 と大変大きく、北西風の強い時の多かった第 2 冬季では、d-excess が 40 を超えるときもありました。

それぞれの日の大気循環や水蒸気輸送過程との関係をすべて示すことは紙面の都合上難しいので、第 2 冬季の豪雪災害のあった日との対応と、第 1 冬季のだんだん重くなる時の例と、第 2 冬季の極端に軽い降水の日について簡単に紹介します。

第1冬季

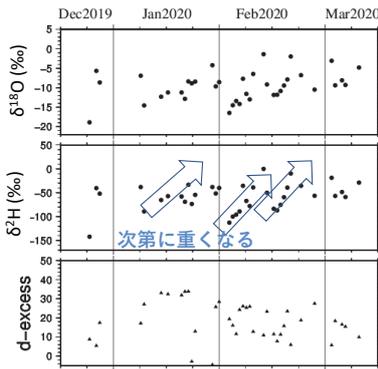


図3. 弘前における第1冬季（2019年12月～2020年3月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess。

第2冬季

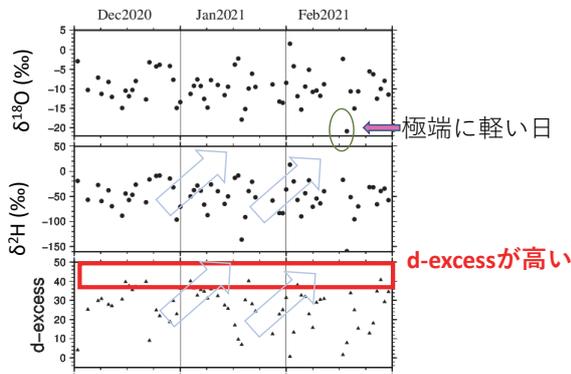


図4. 弘前における第2冬季（2020年12月～2021年2月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess

4. 豪雪災害のあった日

第2冬季に日本で豪雪災害が発生した主な期間と弘前の降雪同位体比の特徴を記します。

・2020/12/14-12/21

日本海側断続的豪雪。d-excessは高く、同位体比も高い。

・2021/1/7-1/11

秋田で強風、広範囲で大荒れ。d-excess高く、同位体比も高い

・2021/2/17

上越市高田で豪雪。d-excess高い。

2/15-16は同位体比が低かったが2/17は高くなった。

・2021/2/23-25

北海道岩見沢で豪雪。d-excess、同位体比とも次第に高くなる。

以上から、いずれも d-excess が高く、強い北西季節風で日本海から激しい蒸発による降雪が弘前でももたらされたことが推察されます。同位体比が高い原因、高くなる原因については今後の詳細な解析が期待されます。

5. 重い日とだんだん重くなる時

第1冬季には、3回、だんだん同位体比が高くなる現象がありました。このうち2020年2/9から2/13への循環場の変化を図5に示します。

2/9は大陸から低温・乾燥した空気が弘前に流入していました。これは西高東低の冬型の時です。

一方、2/13には、南西からの湿った空気が弘前上空に来ています。この変化があった時、水が重くなっていく ( $\delta^{18}\text{O}$  上昇) と共に、d-excessは減少しました。これは、冬型（同位体比低く、

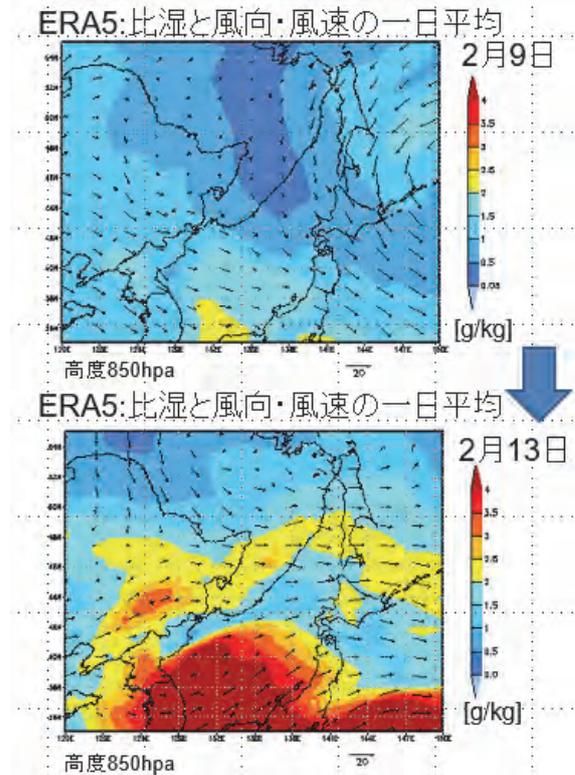


図5. ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）作成の大気再解析データによる850hPa高度面の比湿、風向・風速

d-excess 高い) がゆるみ移動性の低気圧による降水 (同位体比高く、d-excess 低い) に変わっていく際の、南西からの水蒸気の混合の結果と推察されます。このときの模式図を図6に示します。

1/10-1/14 の変化でも、次第に西から湿った空気が流入したのですが、この事例では、同位体比は高くなっていくものの、d-excess の変動は小さいものでした。

第2冬季の同位体比の変化 (図4) では、重くなっていく時に d-excess が高くなっていくようにも見えます。この解釈は別の機会に報告をしたいと考えています。

## 6. 特に軽い日

第2冬季の2/16、すなわち2/15の日本時間正午から2/16の日本時間正午に降った雪は、最も低い同位体比 (軽い水) でした。この事例で2/16正午に弘前上空850hPaにあった空気塊は、一日前 (降雪サンプリング開始時刻) 2/15 12JSTには朝鮮半島の付け根付近~中国東北にあり、非常に乾燥し、同位体比の低いものでした (詳しくは上野ほか (2021))。この空気塊は、2/15-16に

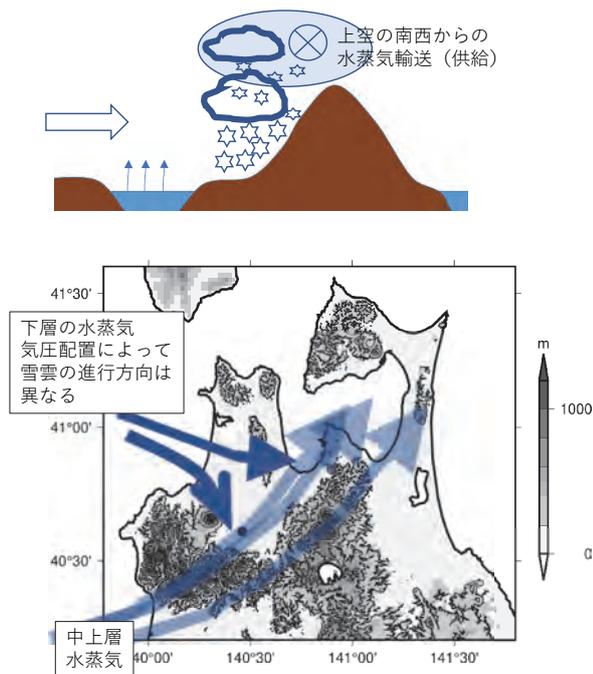


図6. 北西季節風に南西からの水蒸気輸送が混合する模式図

急発達した爆弾低気圧の西側で、圏界面が折れ曲がったもの (tropopause folding) でした。成層圏由来の乾燥した空気が700hPa付近まで下りてきており、これが弘前上空に移動したのです。

ただし成層圏の空気は乾燥していますので、それが豪雨豪雪の源とは考えにくいです。図4をよく見るとこの降水事例 (2/16) の前日と翌日のd-excessは高いのですが、このイベント (2/16正午に回収した雪) のd-excessは前後に比べて少し低くなっていて、日本海の激しい蒸発による水蒸気とは異なる起源でありそうです。低気圧が進行するときに日本の東側の太平洋からの蒸発とその凝結熱により、低気圧が急発達することがあります。その水蒸気による降水が軽い水の起源ではないかと考えています。

## 7. 今後の展開

降雪をもたらす水蒸気輸送源について示唆を与える水同位体分析が出来ましたが、降雪はあくまで蒸発や混合、そして凝結過程を経た履歴が重なっています。そのため、水蒸気同位体比の計測も行うことにし、水蒸気同位体比の連続観測も第3冬季に行っているところです。また今回書いていませんが、水同位体過程を組み込んだ数値モデルもあわせて実行して、比較検討を行っています。モデルは同位体比の相対的変動をよく表現できていますが、d-excessの絶対値はまだ表現が難しいようです (非常に高いd-excessを表現していません)。弘前での降雪・水蒸気同位体比の計測値は、モデルの開発にも役立つと考えています。

## 文献

- Hasegawa H, Akata N, Kawabata H, Sato T, Chikuchi Y, Hisamatsu S (2014) Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotope ratios in precipitation collected in a snowfall region, Aomori Prefecture, Japan, *Geochemical Journal* 48: 9-18. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0279>

上野優, 谷田貝重紀代, 芳村圭 (2021) 2020/2021年の弘前市における降水の安定同位体比の特徴について, 令和3年度日本気象学会東北支部気象研究会予稿集 P27-28

[https://www.metsoc.jp/tohoku/workshop/abstract\\_2021.pdf](https://www.metsoc.jp/tohoku/workshop/abstract_2021.pdf)

芳村圭, 一柳錦平 (2009) 東アジアにおける降水 d-excess 季節変動に関する再考察, 水文・水資源学会誌, 22, pp262-276.

芳村圭, 一柳錦平, 杉本敦子 (編) (2009) 「気象学における水安定同位体比の利用」気象研究ノート 第220号, 日本気象学会, 128pp.

早稲田周, 中井信之 (1983) 「中部日本・東北日本における天然水の同位体組成」地球化学, 17, 83-91.

## 著者情報



谷田貝重紀代 (弘前大学大学院理工学研究科教授) 1996年筑波大学大学院地球科学研究科修了、博士 (理学)。専門は気候・気象学。2002.3~2011.2 総合地球環境学研究所助教。中国、インド、トルコなどの学際調査に携わる傍ら、2016年からアジアの日降水量グ

リッドデータ (APHRODITE) を作成公開し、データは世界的に用いられる。

2016年に弘前大学に着任 (准教授)、2018年より現職。

(2022年3月31日掲載)

# 同位体の導く流域における降雪の影響度

川 越 清 樹

(福島大学共生システム理工学類)

## 1. はじめに

日本は、北半球の中緯度付近に位置するものの世界有数の積雪量の認められる稀有な国です。多積雪になることで産業発展の停滞や冬季の生活へ支障を受けることが認識されており、法律上でも豪雪地帯対策特別措置法が制定され、交通通信、農林業、義務教育、医療等の機能維持の対策を講じる取り組みが進められています。一方で、積雪による地上の水循環の一時的な貯留効果は、安定的な水供給への効用を持ち、灌漑、電力、上水道、鉱工業の多岐にわたる水資源の役割を担っています。これらはいくまで代表的な事例として説明したのですが、積雪は社会活動を行う上で多岐にわたる「正」と「負」の側面をもっているといえます。安全かつ安定的な社会活動を行うためには、今後の「正」に対しての持続的な運用、「負」に対しての対応、対策を検討しなければなりません。この検討を進めるために、①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？ ②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？ ③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？ を明らかにすることが必要とされます。

「どのような量になるか？」は、スーパーコンピュータの普及により GCM (Global Climate Model, General Circulation Model) と呼ばれる数値気候モデルから水と大気の流れを解析することで将来像を予測できるようになりました。最新の結果を参考にすれば、北海道の一部地域を除いて将来は温暖化の影響によって降雪・積雪は減少すると予測されています。一方で、10年に1度の大雪が現状以上に増加する地域も存在すること

が指摘されています。

「どのような質になるか？」は、雪に関すれば、例えば河川水ほど多地域、多地点で性質を同定するための取り組みが実施されていません。そのため、予測するためのベースとなる過去から現在までのデータが不足しています。データが不足していることから、大まかな範囲での積雪、および降雪の特徴を導くプロセスは解明されている一方で、地域の特徴を誘導するための積雪、および降雪の状態は未だ不明瞭な状態です。こうした地域特徴、特徴を導くプロセスに対して、安定同位体のデータを利用しています。安定同位体以外にイオン組成の化学的な性質も分析して雪の「質」のデータを整備しています。現在、取得されているデータの整備と検討により、地域の特徴を示す雪の質、および質に関連付けられる起源、プロセスの将来像を誘導することを目標にしています。

なお、「どのような量になるか?」、「どのような質になるか?」の結果が得られれば、いずれ、将来の「どのような地域の特徴を示すのか?」は明らかにされると考えられます。

## 2. 対象地域と降雪と積雪の関係

この研究の取り組みが、日本の積雪、降雪の地域の特徴を求めするための模式事例になることを目標に、代表的な豪雪地帯である阿賀野川流域を対象地域に設定しています(図1参照)。阿賀野川は、栃木県、福島県、山形県、新潟県の標高 2,000 m 級の急峻な山岳地を水源とした 243 の中小河川、猪苗代湖などの水域により構成されています。河川全長 210 km、流域面積 7,710 km<sup>2</sup> の日本上位の大規模流域として位置づけられています(全長

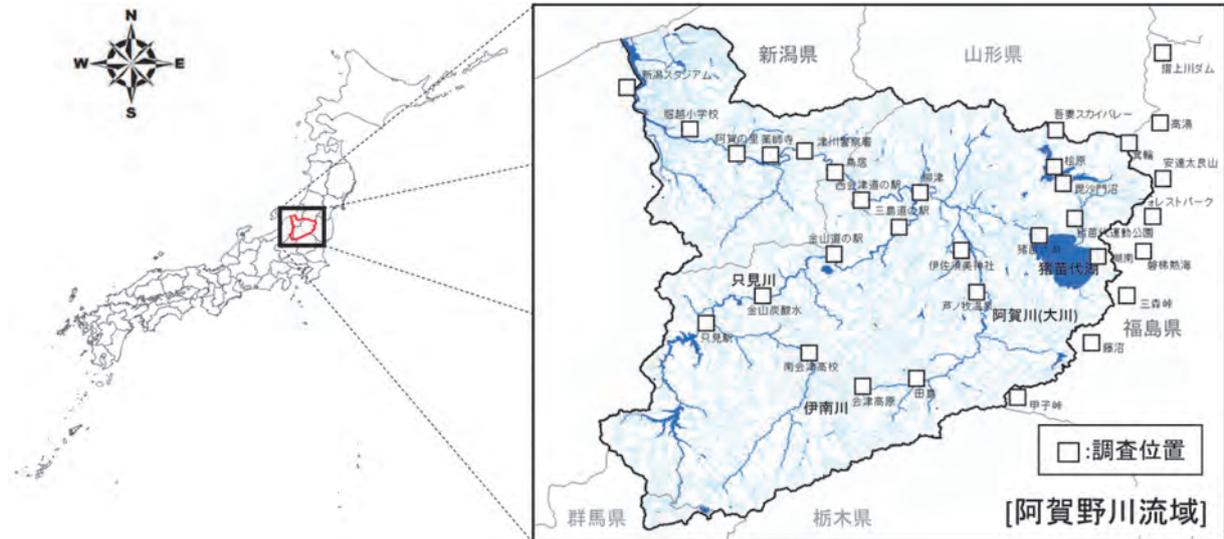


図 1. 研究対象位置図

10 位、流域面積 8 位)。なお、阿武隈川の流量は日本最大級（流量 4 位）であり、年間の流量の約半分が融雪時期の出水に関わることが知られています。この豊富な流量を利用して、流域内では日本最大級の稲作の生産、水力発電がなされています。また、流域の上流域には、磐梯朝日や尾瀬、日光など複数の国立公園が分布しています。いずれの国立公園とも積雪に関与する水の涵養より自然環境が形成されています。また、この自然環境に付随してエコツーリズムも確立されています。これらの状況より阿賀野川では、早急に積雪、降雪の地域特徴と将来に向けた環境遷移を把握しなければならない状況です。同時に積雪、降雪に関わるデータも特に整備していく必要のある地域といえます。なお、特徴や遷移を求める上では「量」だけでなく「質」も把握しなければなりません。「質」を得ることで、自然環境への負荷、もしくは養分の供給も捉えることができます。例えば、世界各地では、酸性雪による河川や湖沼の生物に与える悪影響の問題なども認められています。同様の環境問題が生じないようにするためにデータを蓄積して、①過去から現状を把握する、②将来を予測する、③地域の特徴を知り異常現象を察知する、ことに示される管理を行うことも必要です。

### 3. 日本列島が多積雪になるプロセスと考察

日本列島では、冬季に西側でシベリア高気圧と東側でアリューシャン低気圧がともに強まります。列島の周辺は西高東低の気圧配置となり、これらに挟まれる等圧線が南北方向へ縦横模様へ発達します。この気圧配置によりシベリアから乾燥した寒気が吹送されることとなります。寒気は温暖な日本海上を通過し、海から大量の水蒸気を補給します。補給された水蒸気はその近傍で降水として失われることなく、海上 2～3 km 以下の季節風の気層に蓄積されます。季節風は日本列島の脊梁山脈に当たり、地形性に応じた上昇気流が生じて雲を形成します。この雲の形成と寒冷化した日本列島陸域の状態に応じて降雪が生じます。この一連のプロセスにより日本列島、特に日本海側は世界有数の多積雪地帯になります（以上 図 2 参照）。ただし、稀に太平洋側を中心に多積雪になる事例も認められます。気温の低い冬季に日本の太平洋側北緯 30° 付近に発達した低気圧が東進する場合、関東、東海地方に北側から冷たい湿った空気が流入しやすくなり、大雪になる可能性が高くなります。この日本の南海上を主として東から北東方向に進む低気圧は、南岸低気圧と呼ばれます。以上に示す通り、日本列島は冬季に多積雪になる気象条件を含んでいますが、大気や海域の

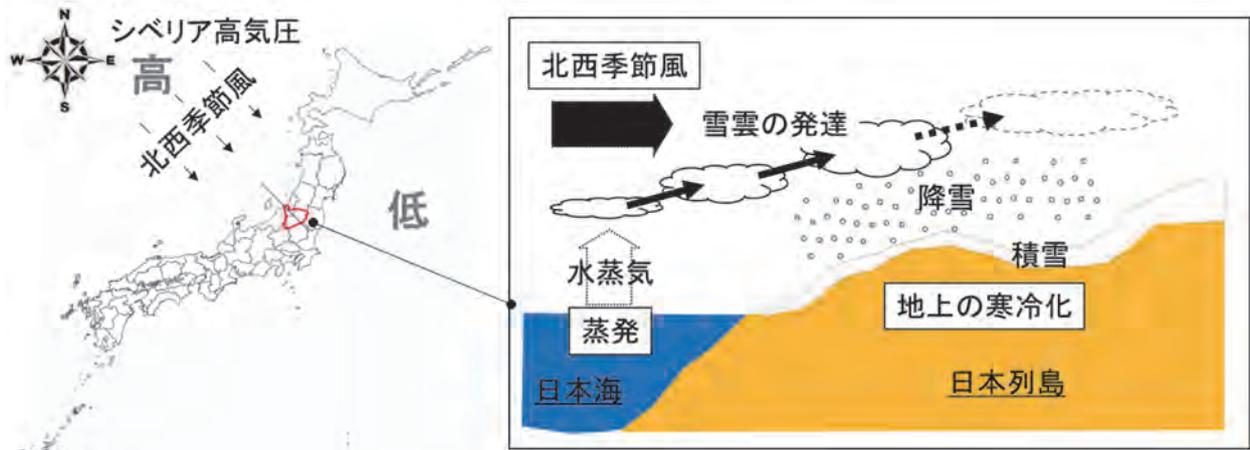


図2. 日本海起源の降雪プロセス

状況の変化により、積雪、降雪の状況は変動することも推測されます。なお、地上、および地上付近の大気の状態も積雪、降雪の条件に影響を与えます。現在までの経験上、地上の気温が2℃以下、上空約1,500 mが-4℃以下だと雪、それ以上の高い気温が認められた場合は雨になる可能性が高いことも知られています。これらの条件も気候システムの温暖化により大きく変化しうるものです。数値気候モデルより将来の積雪、降雪の予測もなされていますが、微妙な変化が生ずれば予測結果も変化する可能性をもちます。

#### 4. 阿賀野川流域の積雪量の経験値

図3は、阿賀野川流域内の気象観測機器が流域全域で運用された1990年からの流域平均積雪深を示したグラフです。おおよそ1990～2020年までの流域平均積雪深の最大値は約164 cm (2015

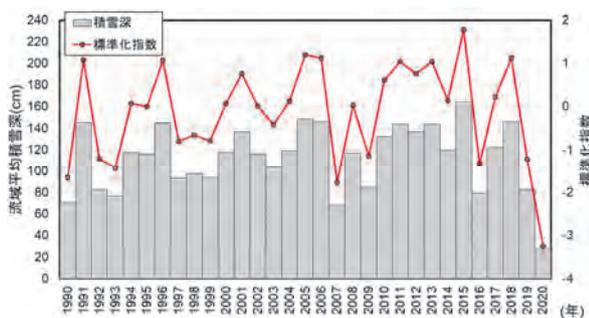


図3. 阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化

年)、最小値は約28 cm (2020年)、平均値は約115 cmで示されます。全期間を通じた変動傾向を捉えることは難しいですが、最近では、少雪年の出現が多くなっていると同時に、多雪年の出現するケースも認められています。極端な積雪深の変化が生じやすくなっているものと解釈でき、積雪、降雪の大小の変化に及ぼす気象要素が敏感に反応しているものと推測します。

過去の研究成果を参考にすれば、北日本の日本海側の流域の中で阿賀野川流域は、日本海の蒸発に関与する日本海表面海水温度と最も関係性が小さく、安定的に積雪の見込まれることが知られていました。このような特徴の示される流域で極端な積雪深の変化が認められている最近の状況は、経験則だけでは解釈しきれない影響要素が波及していること、なおかつ敏感に積雪、降雪に反応しやすくなっている可能性を示しています。

#### 5. 阿賀野川流域の安定同位体による降雪の影響

図4は、2014年から2020年まで継続して観測した積雪の安定同位体比のデータを用いて流域内の各地域に「どこを起源にした降雪が到達しているのか？」を求めた結果です。水素同位体比 $\delta^2\text{H}$ と酸素同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ の関係(天水の式)より求めることのできるd-excess値[%]より降雪の到達を推測しています。既に今までの研究成果か

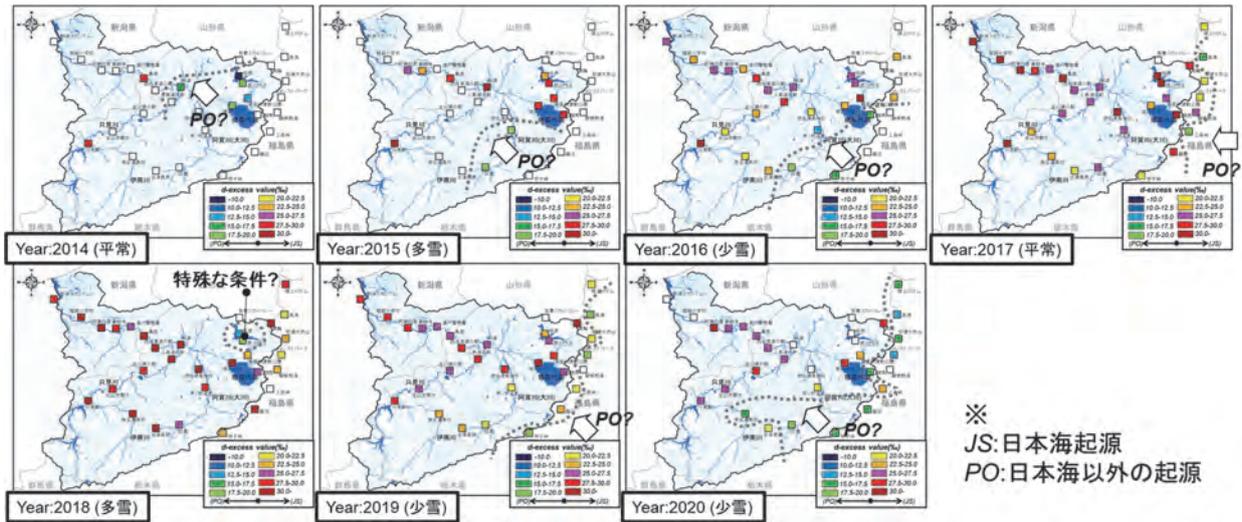


図4. 阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化



図5. 阿賀野川流域の積雪分析の統合結果図

ら得られている日本海起源は20%より大きな値、太平洋起源は10%より小さい値になる d-excess 値の基準より判別を行いました。結果として積雪の多い状態、少ない状態に関わらず日本海起源の影響が影響を及ぶ範囲は年々変化していることが明らかにされました。また、今までの日本海起源以外の影響を受けやすい地域が存在することも明らかにされました。具体的には、流域の南東部に位置する南会津地域と北東部に位置する猪苗代湖周辺の地域（図5参照）は日本海以外の影響も受ける結果を得ました。日本海から距離のある流域

の奥部では、日本海以外の降雪を起源とする降雪が寄与している結果を明らかにしました。南会津地域に関しては、比較的に太平洋側と距離が近いこと、南岸低気圧に伴う降雪の影響を受けやすい地域であることが推測されます。一方で、太平洋側から距離の離れた猪苗代湖周辺の地域に関しては、解釈の整理が難しい状況でした。

#### 6. 裏磐梯地域の安定同位体による降雪の影響

日本海起源以外の降雪の影響の生じる裏磐梯地域の降雪を調べるために裏磐梯地域内の松原、およびその近傍に位置する米沢(日本海側)、福島(太平洋側)の降雪日の降雪試料を2016年から2018年にかけてサンプリングし、それらの d-excess 値の推移を分析しました。その結果を図6に示しま

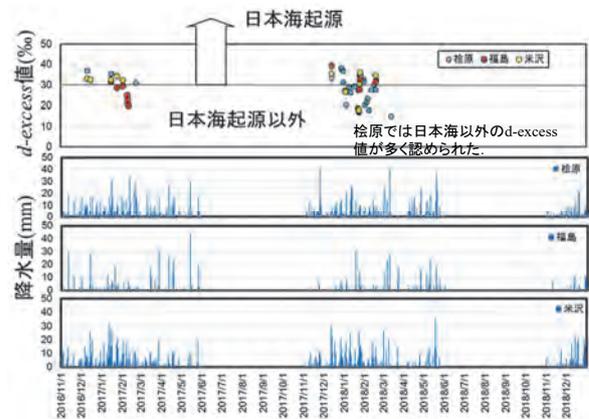


図6. 松原・米沢・福島の降雪日の d-excess 値の推移図

す。結果として、桧原は日本海起源以外の d-excess 値を示す降水が特に多く認められている結果を得ました。また、米沢、福島との比較より、桧原の地域のみ日本海起源以外の降雪が出現していることを把握しました。この結果は日本海起源、太平洋起源の影響を受けない地域固有の降雪の出現を示唆しています。桧原を含む裏磐梯地域は、急峻な山岳地に囲まれた高い標高の平地であり、特に日本海側から季節風の吹送される北西側には、飯豊山などの標高 2,000 m 級の山地が連なっています (図 5 参照)。こうした遮閉されやすい地形の高度条件が日本海外側からの影響を弱めると推測します。また、遮閉された地形の中で比較的解放された南側には日本最大規模水域面積 (面積 103.24 km<sup>2</sup>) の猪苗代湖が分布しています。日本海と同様に猪苗代湖の湖水温度による水蒸発気は降雪に変化している可能性も示されます。こうした大規模な水域面積の湖沼の水蒸気が降雪をもたらす現象は世界各地でも認められており、北米の五大湖付近の湖の熱変化の影響が降雪現象にまで及ぶことは有名です。なお、世界山岳気象観測史上 1 位の積雪深は琵琶湖北側に位置する滋賀県の伊吹山で記録されており、1927 年 2 月 14 日に 1,182 cm の積雪深となりました。湖沼の水蒸気の発生が降雪、積雪に影響することは有力です。地域としての降雪、積雪の特徴は、概ねの要素から説明できますが、そのプロセスは明確にされたわけではありません。そのため、このプロセスを明瞭にするための調査、分析を継続して実施しています。

## 7. おわりに

本文では「同位体の導く流域における降雪の影響度」として、研究対象地域にしている阿賀野川流域の研究事例を報告しました。①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？ ②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？ ③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？ の内の「質」

に対しての調査と分析を進めて、流域内の地域特徴を把握することができました。また、この研究から地形条件と大規模湖沼による降雪、積雪の影響を示す結果が明らかにされました。同位体がトレーサーとなり影響を誘導する結果が得られたものとなります。地上では水循環システムが形成されていますが、地球全体の規模で動く大規模循環の他に、ある程度の領域で動く中小規模のスケールの循環も存在しています。先に示した「量」の予測研究では数値気候モデルを解析することで将来を予測することを説明しました。しかしながら、このモデルは何百年にもわたる予測計算を行わなければならないため、スーパーコンピューターを用いても計算できる単位当たりの面積や、単位時間には限りがあります。现阶段の数値気候モデルの結果は地球全体の規模で動く大規模循環に特化する傾向に則した予測がなされているものと解釈できます。今後のスーパーコンピューターの進化にもよりますが、ある程度の領域を緻密に予測するためには、まだ、時間がかかるものと思います。この研究で示されるデータが予測を補完するものになります。また、将来的には予測された結果への検証の材料になることと思います。このような関係は、「質」の研究が「量」の研究を補完して、更に精度をたかめているような状況になると思います。結果的に「①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？」と「②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？」の個別の研究が相互作用し、「③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？」の精度を上げているものと捉えることができるかもしれません。また、この精度の向上が、地域の特徴を知ることによって反映されて、異常現象を察知できるような知見に繋がっているものと考えます。まだまだ、現在までの結果も途上段階です。引き続き研究を進めて、進化を図りたいと思います。

## 引用文献

文部科学省・気象庁 (2020) 「日本の気候変動」

[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020\\_honpen.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_honpen.pdf), Site Viewed: 2020/12/24.

Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu (2016) Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change* 139: pp. 265-278.

<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1781-3>

川越清樹, 鈴木絢美, 井上浩太, 神内亨太, 佐藤佑哉, 中村光宏 (2016) 「阿賀野川流域の積雪特性と水循環の関係性」 In: 裏磐梯・猪苗代地域の環境学、福島民報社、pp. 79-94

井上浩太, 鈴木絢美, 川越清樹 (2015) 東北地方日本海沿岸の積雪比較分析と考察. 土木学会論文集 G (環境) 71 (5) : I\_295-I\_304.

[https://doi.org/10.2208/jscejer.71.I\\_295](https://doi.org/10.2208/jscejer.71.I_295)

早稲田周, 中井信之 (1983) 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. *地球化学* 17 : pp. 83-91.

Dewey, K.F (1975) The prediction of lake Huron lake-effect snowfall system, *Journal of applied meteorology and Climatology* 14: pp. 3-7.

鈴木絢美, 川越清樹, 藪崎志穂 (2018) 化学分析による地域スケールに対する降雪イベントの特徴の同定. 土木学会論文集 G (環境) 74 (5) : I\_1-I\_9.

[https://doi.org/10.2208/jscejer.74.I\\_1](https://doi.org/10.2208/jscejer.74.I_1)

#### 著者情報



川越清樹 (福島大学共生システム理工学類教授)、博士 (環境科学)、2007年東北大学大学院環境科学研究科博士課程後期修了、2005年東北大学大学院環境科学研究科産学官連携研究員、2008年カーティン工科大学客員研究員、2009年福島大学共生システム理工学類准教授、2018年国立環境研究所客員研究員、2019年より現職。

(2021年3月31日掲載)

# 酸素と水素同位体比による水田が主体な扇状地の 地下水涵養源評価の可能性

吉岡有美  
(島根大学学術研究院)

## 1. 地下水とは？ 地下水は何の水か？

利用可能な淡水資源として、イメージされるものは、湖やダム、河川の水ではないでしょうか。しかし、淡水資源の98%を占めるのは、地面の下にある地下水なのです。地下水は、砂漠などの乾燥した地域では唯一の水資源であることも珍しくありません。将来的に、気候変動により洪水や渇水といった雨や河川の状況が不安定になれば、豊富な水量があり、安定的に利用できる地下水への需要が高まる可能性もあります。地下水は、管理や保全するのが困難なときもあります。3つの理由によるものです。1つ目はその流れや貯留されている様子が目に見えないこと、2つ目はときには数百や数千 km<sup>2</sup> のように広域に存在することです。3つ目は地下水の上、つまり地面にある雨や河川、田んぼの中に溜まった水などのいろいろな水が地面に浸透して、地下水となっていること（これを地下水涵養と呼びます）です。

扇状地は河川により運ばれた土砂が扇状に堆積した地形で、日本の低地の約半分がこの地形となっています。扇状地内を流れる河川の水を利用した水田農業が行われています。ある扇状地内の地下水を対象に、河川の水か、水田の水のどちらの水によってできているかを、酸素と水素の同位体によって調べることができるのではないかと考え、研究に取り組んでいます。

## 2. 重さの違いで水を見分ける？

水分子を形成している酸素と水素の同位体には、蒸発すると同位体の値（同位体比）が高くなる特徴があります。同位体比が高いとは、質量数

の大きい同位元素が多いことを意味しており、「重い水」という表現を使って表現されることもあります。同位体比を体重に置き換えて、「軽い水」が水面から蒸発しやすいため、残った水は「重い水」になると考えると捉えやすいかもしれません。稲の栽培のため水を溜める水田では、日中盛んに蒸発が生じています。したがって、地下水が水田の水でできている場合は、地下水は「重い水」になります。一方で、山から海へと短ければ数日で流れる河川の水は蒸発の影響が小さいため「軽い水」です。したがって、地下水が河川からの水でできている場合は、地下水は「軽い水」になります。地下水が水田と河川の水の半量ずつでできている場合は、「軽くも、重くもない水」となることができるでしょう。

## 3. 調査の目的と概要

2015年5月に石川県手取川上流の山地で大きな斜面崩壊が発生して、土砂が河川内に大量に堆積しました。その結果、河川の水に土砂が混ざり長期間、茶色く濁る問題が発生しました。河川からの浸透や、水田からの浸透、つまり地下水涵養の減少が懸念される事態となりました。そこで、同位体比を使った地下水涵養源の調査は、1回や数回のみ行われるのが一般的ですが、濁水が地下水涵養に影響しているのか、影響するならどのように、いつまで影響するのかなどを調べるために、同位体比の定期モニタリングを2016年4月より開始しました。

調査は、図2に示す石川県のほぼ中央に位置する手取川扇状地全域（約190 km<sup>2</sup>）の約35箇所

の井戸から地下水、そして地下水になる前の水、つまり涵養水源となりうる、3つの河川の水や水田の水（以下、田面水と呼びます）、雨などを定期的に採取しました。同じ地点の水について時期を変えて20回以上測定し、酸素・水素同位体比の変化を調べました。

この研究は、石川県立大学生物資源科学部瀧本裕士先生、京都大学農学研究科中村公人先生、大阪府立大学生命環境科学研究科中桐貴生先生および櫻井伸治先生と共同で行っています。

#### 4. モニタリング結果

同位体比は海水の中に含まれる同位元素の数を基準としていますので、海水の同位体比は0となります。また、%（百分率）と似た‰（千分率）という単位を使用します。日本のように中緯度の地域では、蒸発が進んだ水以外はマイナスの値となります。-5‰と-10‰の同位体比を比較するとき、-5‰の水を重いといいます。

図1は5月から8月までの河川水、田面水、地下水の酸素の同位体比の変化を示しています。石川県では4月下旬から5月中旬ごろが田植えの季節です。モニタリングをはじめた5月から6月にかけては緑線の田面水の同位体比は、青線の河川の水より4%以上高い（重い）日が多くなっています。田植えから約1カ月後の6月5日に2‰ともっとも重くなり、河川水との差は12.5‰にもなります。河川水を水田に入れる（灌漑する）と、

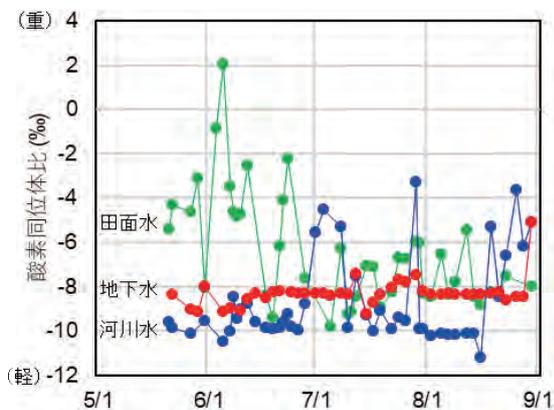


図1. 河川水（用水路で採取）、田面水、地下水の酸素同位体比の変化（2019年）

河川水と田面水に大きな違いが生まれることがわかります。6月以降は成長した稲に日射が一部遮断されて、蒸発が弱くなるため、徐々に田面水の同位体比は低下していきます。それでもほとんどの期間で河川水よりも2‰は重くなっています。つぎに、赤線の地下水は-8‰より少し小さい値となっており、重い田面水と軽い河川水の間にあります。井戸は河川より5kmほど離れていますが（図2の●地点）、上に述べたように田面水の値が重くなる時期においても、地下水の値は河川水より2‰ほどしか重くならないことから、河川水の影響も及んでいることがわかります。

図2は、扇状地全体の地下水の酸素同位体比のマップです。点在している井戸で採取した地下水の同位体比の値から、平面上のデータを持たない点の値を補間して作成しました。すべての図で共通している特徴は、扇状地の北、中央、南に3つの河川が流れていますが、このうち中央の河川（手取川）に沿ったエリアの地下水の同位体比がとく

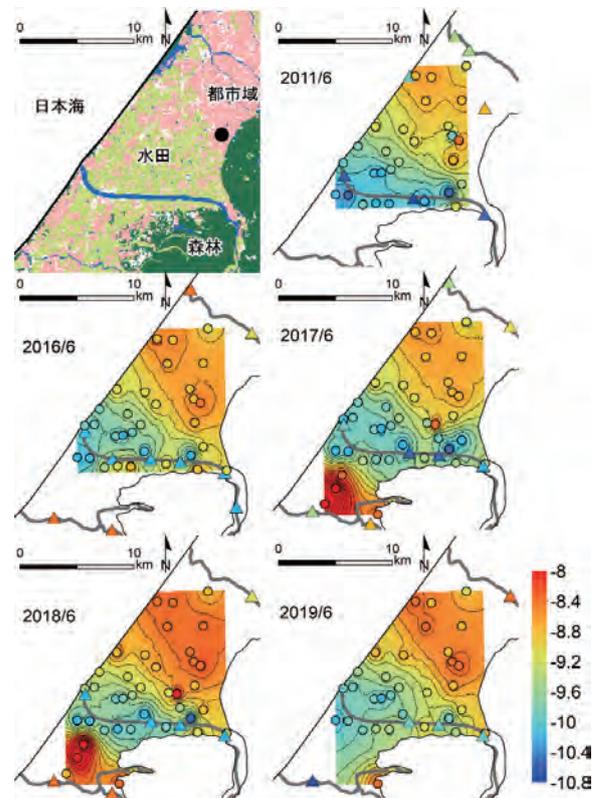


図2. 扇状地の土地利用と地下水の酸素同位体比  
○地下水、△河川水  
(赤：重い水、青：軽い水)

に低くなっています。中央の河川から南部へ、あるいは北部へと距離が離れるにしたがって、軽い同位体比を示す青色から重い同位体比を示す赤色へと変化するグラデーションがみてとれます。このような特徴は、4年間のモニタリング期間から6～10月の地下水でみられることがわかっています。図1に示したように同位体比の値は、河川水と田面水が区分できる程度に異なっていることから、河川に近い地下水の同位体比が小さくなるのは、この地点の地下水が同じ扇状地内の他の地下水と比較して、起源の多くが河川水であることを示しています。

斜面崩壊前の2011年6月のマップと比較すると、扇状地全体においては地下水の同位体比には顕著な変化はみられません。しかし、より小さいエリアの同位体比の変化について注目すると、2016年6月は河川の左岸域のごく河川に近い数地点の地下水の同位体比が上昇していることがわかりました。濁水の影響によって、河川水の影響が小さくなったために、水田水の影響が大きくなったことを示していると考えられます。さらに、モニタリングを継続すると、2017年以降は2011年と同じような値に戻っており、長期的な濁水の影響はなかったこともわかってき

ました。

現在は、水田内や地面に浸透した後に地下水に到達するまでに同位体比がどのように変化するかを、追加で検討しています。検討結果も踏まえて、図2に示した地下水の同位体比から地下水涵養源をより、正確に診断できるようなツールの開発に取り組む予定です。

## 文献

吉岡有美、伊藤真帆、中村公人、瀧本裕士、土原健雄 (2018) 酸素・水素安定同位体比からみた手取川扇状地の河川水-地下水の交流現象と地下水涵養源、地下水学会誌、60 (2) : 205-221

## 著者情報



吉岡有美 (島根大学学術研究院環境システム科学系助教) 2014年京都大学大学院農学研究科修了、博士 (農学)。鳥取大学農学部助教などを経て2019年より現職。

(2020年3月31日掲載)

(2020年4月7日改版)

# 地域の水循環に田んぼが果たす役割の評価

中 桐 貴 生

(大阪府立大学大学院生命環境科学研究科)

## 1. 水田における水利用

もし「日本の原風景とは？」と聞かれたら、皆さんはどういう光景をイメージされるでしょうか？ 日本で長く生活している人であれば、里山に水田が広がる光景、いわゆる田園風景を思い浮かべる人も少なくないと思います。日本では、古来より、各地で水田農業が広く営まれてきました。

ご存じの方も多いと思いますが、水田で稲を育てるためにはたくさんの水が必要となります。日本でのお米の収穫は基本的に年1回で、地域によって多少のずれがあるものの、3月下旬頃から田植えの準備が始められ、4月～5月に田植えを行い、9月下旬頃に稲刈りを行うというのが標準的で、このおよそ半年の間に必要とされる水の量は、降雨量と同じように水深で表すと、およそ2,000 mmに相当します。

日本で1年間に降る雨の量は、地域によってかなり大きなばらつきがありますが、全国で平均するとおよそ1,700～1,800 mmとされ、これは世界全体での平均年降雨量の約2倍にも相当します。水田の稲作には、半年でそれをも上回る量の水が必要とされるわけですから、その量がいかに多いかということがおわかり頂けると思います。そして、当然のことながら、これだけの量の水を天水、すなわち空から田面に降り注ぐ雨だけでまかなうことは困難です。このような場合、天水以外の水を水田に供給すること、すなわち“かんがい”が必要となり、日本のほとんどの水田にはそのための施設として水路や排水路などが設けられています。かんがいの用水源には、河川の水が利用されるケースがほとんどであり、河川から取水した水を、取水地点から分岐を繰り返しながら

各水田圃場まで繋がっている用水路に流すことによって各圃場へと水が供給される仕組みとなっています。水田が面積的に大きく広がった地域では、時には、河川の水がなくなりそうなほど取水されてしまうこともあります。

## 2. 水田に取り入れられた水のゆくえ

さて、それでは、水田に取り入れられた皆さんの水は、その後どうなるのか、皆さんご存じでしょうか？ 稲からの蒸散や、光合成による植物体内への吸収、あるいは田面に溜まっている間に生じる蒸発によってなくなってしまうと思われる人も少なくないかもしれませんが、実はそれらの量は割合的にはそれほど多くはなく、水田に入れられた水のほとんどは、排水路へと流れ出るか、底の土の中へ浸透していくかによって水田から出て行き、その後、下流にある河川へと流入したり、地下水の一構成成分となったりしています。

そして、水田から河川や地下水へと流出した水が、それより下流にある水田で再びかんがい用水として利用される例も少なくありません。これを専門用語で「反復利用」と言います。これは、少し極端な言い方をすれば、上流の水田が下流の水田の水源としての役割も果たしているとも言えます。

## 3. 水田農業と地域における水循環の関係

水田にはたくさんの水が取り入れられる一方で、それとあまり変わらない量の水がそこから出ていくのであれば、地域内に水田があろうがなかろうが、その地域における水の水循環過程、すなわち降雨として地表に到達した水が、河川や地下水へと流入し、最終的には海洋へと流出していく過

程において、さほど影響が無いように思えるかもしれませんが、しかし、トータルの量でみると水田への流入量と水田からの流出量に大きな差が無いにしても、水田に水が取り入れられるタイミングと、それが出て行くタイミングに差があるため、地域の水循環過程には少なからず影響を及ぼしている可能性があると考えられています。

わかりやすい例をあげると、たとえば大雨が降った時、水田は水が貯まりやすい構造になっているため、水田があれば、降った雨の一部がそこに貯まってしばらくの間留まり、直接流れ去るよりは長い時間をかけて水田の外へと流出していくこととなります。しかし、もしそこが水田でなければ、そのような一時的な水の貯留や流出の時間遅れは生じないため、河川に到達するまでの時間がより短くなり、水田がある場合に比べ、河川への流入が集中的となり河川流量が増大しやすくなります。近年、水田によるこうした機能が注目され、水田におけるこの特性を積極的に利用することで、大雨時の洪水を抑制しようとする取り組みが各地で実際に行われています。

また、水田に入れられた水には、砂時計から落ちる砂のように、時間をかけて少しずつ水田からしみ出ていくものがあり、しばらく降雨が無い時には、こうした水が河川の流量維持の役割を果たすことになるとも考えられます。

つまり、地域内に水田があるかないかによって、河川における流量の変化の仕方が異なってくると考えられます。

#### 4. 水田農業による地域水循環への定量評価

水田が地域における水の水循環過程に何かしらの影響を及ぼしうることは、ある程度認知されてきましたが、実際にそれがどの程度であるかについては、実はまだ明らかにはなっていません。このことを明らかにするためには、河川を流れる水や地下水の中に、水田から出てきた水がどれだけ含まれているかを知る必要がありますが、それはとても困難だからです。複数の色の絵の具をそれぞ

れ別に溶かした水のある割合で混ぜ合わせ、その混ざった状態の水だけから、ある色の水がどういう割合で混ぜられたかを特定するのは難しいというのと似ています。

ところで、ご存じの方も多いかもかもしれませんが、近年、日本ではとくに都市圏を中心に農地の宅地化が進み、また、山間部においても農業従事者の高齢化や担い手不足などによって耕作放棄が進んでおり、農地面積が年々減少の一途をたどっています。農地の減少によって、地域の水循環過程にも変化が生じる可能性があります。こういった変化がどの程度生じうるかはまだ不明のままです。しかし、農地の減少に伴って、たとえば河川流量が洪水時には増大しやすくなり、逆に渇水時には低下しやすくなるといった、水循環過程への悪影響が及ぶ可能性もあり、農地がなくなってしまっただけでは対策が困難となるということもあり得ますので、今のうちに、こうした評価ができるようになることはとても重要な課題といえます。そして、河川水や地下水の中に含まれる水田から出てきた水の割合を定量評価できるようになることは、その課題解決に向けての大きな第一歩となります。

#### 5. 水の酸素・水素安定同位体比を用いた定量評価

こうした中、地表水における酸素・水素安定同位体比の特性の違いを利用することによって、今まで困難とされてきたその定量評価の可能性が見出され、現在、検討を行っています。図1は、兵庫県西部にある千種川上流域において、2019年4月～11月にかけて、本流および支流の源流部および各地点の河川水と、流域内にある水田の田面水を採取し、酸素および水素の安定同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ )を分析した結果を $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ 座標上にプロットしたものです。プロットは、おおよそ直線状に散らばっており、田面水、源流水、河川水にグループ分けすると、分布の左端の両 $\delta$ 値とも小さい側(水の軽い側)に源流水のみが分布する比較的小さな領域があり、一方、右端の両 $\delta$ 値

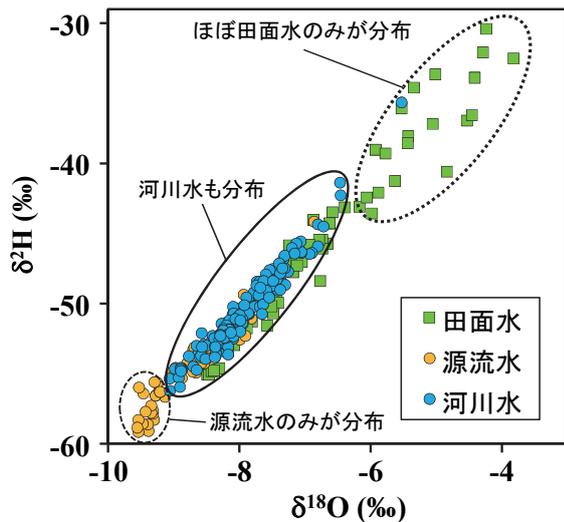


図1. 源流水、河川水、田面水の同位体比

とも大きい側（水の重い側）にはほぼ田面水のみが分布する領域があり、河川水は、それら2つの領域にちょうど挟まれる領域に分布するという興味深い結果が得られました。

水における  $\delta^{18}\text{O}$  および  $\delta^2\text{H}$  の値は、地表において蒸発作用（動的分別作用）を受けなければ、ほぼ変化することはない、一方、蒸発作用を受けると、酸素、水素それぞれ、質量数が相対的に小さく軽い  $^{16}\text{O}$  および  $\text{H}$  が水中から優先的に蒸発し、その結果、地表に留まった水の中の  $^{18}\text{O}$  および  $^2\text{H}$  の割合が増えて、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  とともに値が大きくなり、わずかながら水が重くなる側に変化することが知られています。つまり、この流域の水田では、かんがい用水として基本的には河川の水が利用されていますが、水田に入れられた水が田面に貯留されている間に蒸発作用を受けることによって、田面水の  $\delta^{18}\text{O}$  および  $\delta^2\text{H}$  が  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  座標上で源流水や河川水とは明確に区別できる程度まで値の大きな重い水へと変化することが図1からうかがわれます。ただし、田面水については、河川から取り入れたばかりの水の割合が多い時もあるため、プロットのちらばりが大きく、河川水の分布領域と重複しているものも見受けられます。

水は河川を流れている間にも蒸発作用を受ける

ため、 $\delta$  値はある程度変化しますが、日本の河川は基本的に短く、最上流部から河口まで流達するのにせいぜい1～2日程度であり、その間における  $\delta$  値の変化量は、夏季に水田内で変化する大きさに比べると小さいといえます。また、今回調査を行った千種川上流域では、河川水は図1で示された源流水の  $\delta$  特性をもつ支流からの流入と、水田から還元してきた水によって主に構成されることが現地調査を通じて確認されています。そこで、河川水における  $\delta$  値は、もともと源流水の  $\delta$  特性を有していた水が、河川への流入後、流下中の蒸発によってわずかながら変化するとともに、田面でより多くの蒸発作用を受けて重くなった水が河川へと還元し混合されることによって形成されたと考え、流域内で大きな支流にある調査地点を対象に、いくつかの前提条件の下で、調査を行った日における河川水に占める水田から還元してきた水の割合を試算したところ、図2に示すような結果が得られました。この河川地点における流域面積に対する水田面積の割合はたった0.7%に過ぎないにもかかわらず、かんがい期においては、河川水中に占める水田還元水の割合がその20倍以上となる16%にもなることがあり、非かんがい期になるとその割合はやはり小さくなるという傾向がみられました。まだデータ数が少なく、示された数値がどの程度の代表性をもっているかについては検討の余地がありますが、他の河川地点で試算を行ってもやはり同様の結果が得られてお

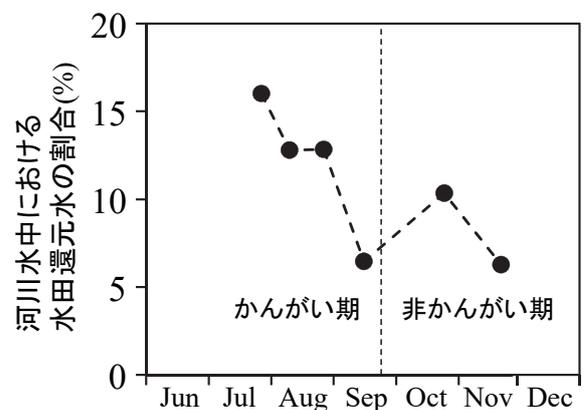


図2. 河川水における水田還元水の混合割合の試算結果

り、とくにかんがい期においては水田が河川流量に対して少なからぬ影響を及ぼしていることはやはり間違いなさそうです。今後、同様の調査を継続し、試算方法や推定結果の妥当性について引き続き検討を行いながら、水田が地域の水循環にどの程度寄与しているのかについて定量的に評価できるようにするところまで究めていきたいと考えています。

#### 文献

中桐貴生、松本武志、大串健一、吉岡有美、堀野治彦、藪崎志穂、陀安一郎、櫻井伸治 (2020)

「水の安定同位体比を用いた水田農業による河川流況への影響評価」2020年度（第69回）農業農村工学会大会講演会要旨集、農業農村工学会、pp. 469-470

#### 著者情報



中桐貴生（大阪府立大学大学院生命環境科学研究科准教授）1995年京都大学大学院農学研究科修了、博士（農学）。1997年大阪府立大学農学部助手、2008年より現職。

（2021年3月31日掲載）

# 大阪平野の降水起源の地下水の分布と残存する有機物汚濁

益田 晴恵<sup>1</sup>、根本 達也<sup>1</sup>、新谷 毅<sup>2</sup>  
 (1)大阪市立大学大学院理学研究科、(2)北海道立総合研究機構)

## はじめに

厚い堆積物からなる大阪平野は、我が国有数の地下水貯存地域です。地下水は優れた水資源ですが、地盤沈下や水質汚濁を避けて適正に利用するためには、水循環過程を正確に理解することが必須です。この報告では、大阪平野の地下水を可視化するために行った一連の研究の中で、地下水の起源を整理した研究の一部を紹介します。再生可能な現在の降水を起源とする地下水の地理的分布をお見せします。また、そのような地下水に見られる過去の汚染の残存状況も示します。これらの結果から、地下の水循環について考察しましょう。

## 降水を起源とする地下水

図1に大阪平野の表層地形と新生代の堆積物の分布を示しました。大阪平野は、大阪湾とともに周辺を低山地と淡路島に囲まれた大阪盆地を形成しており、その東半部を占めています。この盆地は3.3百万年～3.5百万年前に沈降を開始したとされており、堆積物の最大層厚は、平野部で約1,500 mに及びます。平野と周辺山地の境界は活断層です。また、平野中央部にも上町断層があり、この断層の活動によって形成された上町台地が大阪平野を東の河内平野と西の西大阪平野に分けています。表層堆積物の年代は中央の低地から外側

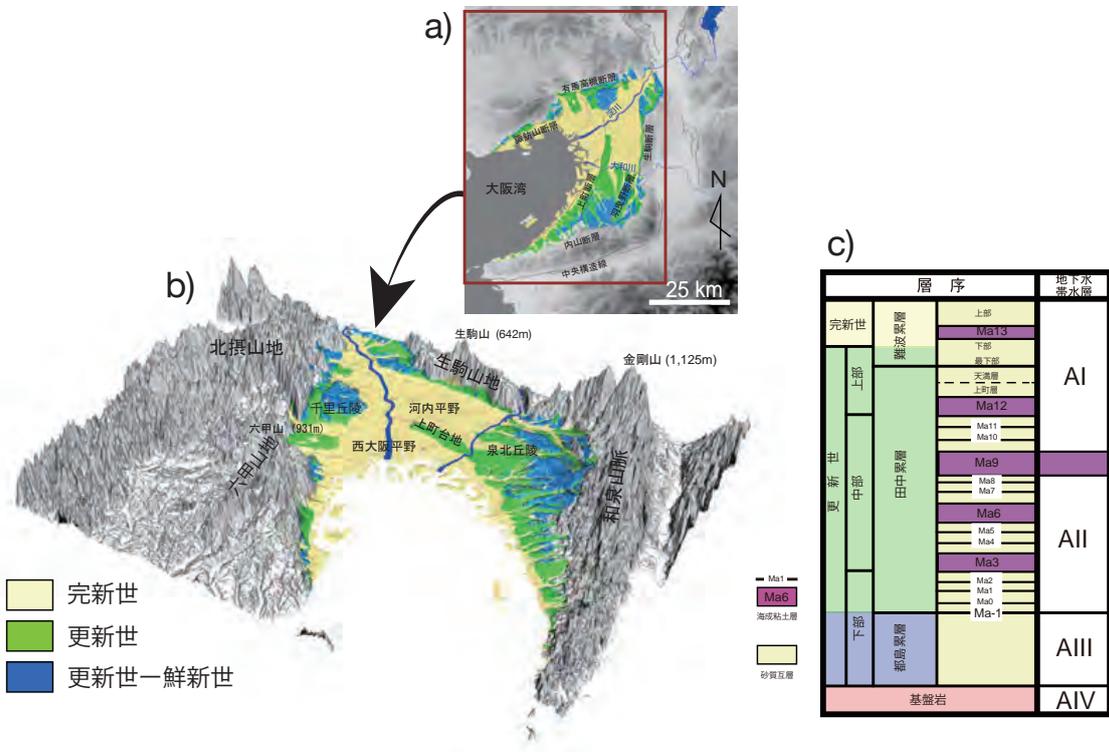


図1. 大阪平野の地質  
 a) インデックス図と活断層、赤四角で囲った部分 (90 km × 60 km) が b) で示す三次元地形図の範囲；  
 b) 3次元表層地質図、俯瞰図の原点は 34° 39′ 22.959″ N、135° 21′ 6.675″ E、北から時計回りに 52°、  
 俯角は 23°。；c) 平野中央部の地層区分と本報告の帯水層区分 (説明は本文を参照のこと)。

に向かって古くなります。図では表層地質を3つに分類しました。中央部は、縄文海進（最終氷期後の海進、約7000年前）以降の堆積物（クリーム色）が分布しています。その周辺には、およそ10万年周期で海進と海退を繰り返していた時代の堆積物（緑色）が、さらに外側には大阪盆地の水域が淡水の湖沼であった時代の堆積物（青色）が分布しています。また、平野の地下では、これらの堆積物が深度の増加とともに出現します。平野地下の地層と表層地質図を対比させたものが図1cです（表層地質図と同じ色を地層の年代と累層名に塗ってある部分に対応しています）。図1a)とb)の表層の緑色の地層は、c)の平野地下の層序の更新統上部・中部と下部の最下位の海成粘土層(海底に溜まった粘土の地層、Ma-1(エムエーマイナスワンと読む))より上位の地層に対応します。図1a)とb)の表層の青色の地層は、c)のMa-1より下位の地層に対応します。

ここでは、便宜的に地下水帯水層<sup>1)</sup>をAI～AIVの4つに分けました(図1c)。AIはMa9(43万年前の海成粘土層)より上位の帯水層です。この帯水層は海岸や河床底と直接接触している場所があり、地表水や海水が直接帯水層を涵養<sup>2)</sup>しています。その下位にあるAIIは、最下位の海成粘土層であるMa-1(124万年前)より上の淡水成の砂礫層が海成粘土層と繰り返して堆積している部分です。AIIIはMa-1より下の内陸の湖や河川に沿って堆積した淡水成の地層です。AIIとAIIIを構成する堆積物層は丘陵部に露出しているので、丘陵での降水が地下に浸透した地下水が見られます。AIVは基盤岩に滞水する地下水です。平野の堆積物の下にある基盤岩は花崗岩が最も多いのですが、南部では、火山岩や堆積岩なども見られます。また、中生代～古生代の堆積岩が多く分布する北摂山地や白亜紀の堆積岩が広く分布する和泉山脈などでは、山地の降水が岩石の割れ目を流れる地下水も見られます。

500点近い地下水の分析結果をもとに、地表か

ら涵養されている地下水(317点)だけを抽出して、酸素と水素の安定同位体比の関係を図2に示しました。酸素・水素の安定同位体比は、地下水の起源を推定するのに有効です。(実際には、安定同位体比とともに他の溶存化学成分も用いて統計学的処理を行っていますが、ここでは説明しません。)ここでは、地表から涵養されている水とは、大阪平野や周辺山地の降水や河川水・淀川や大和川などの大阪盆地外から流入する河川水と海水です。淡水の多くは、大阪府域の河川水の酸素・水素安定同位体比の範囲とほぼ一致しており、同じ起源を持つ水であることがわかります。また、4つの帯水層で、同位体比の分布にはほとんど違いが見られません。また、海水が混入している地下水では、酸素・水素安定同位体比が、海水混合線に沿って大きくなる傾向が見られます。

図3には海水を含む地下水と降水起源の淡水の地下水の地理的分布を3次元で示しました。この図には、表層(平野部は薄い色で表現してある)と堆積物を剥いだ平野地下の基盤岩の分布を示してあります。縦方向の縮尺が横方向の13倍あることに注意してください。

この図が示す重要なことは、現在の降水を起源とする地下水の多くが浅い深度に分布しているこ

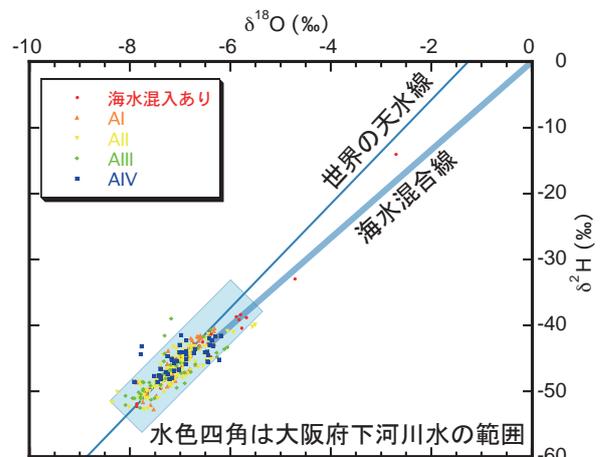


図2. 現在の降水と海水を起源とする地下水の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の関係  
海水が混入した地下水と、帯水層区分ごとの淡水( $\text{Cl}^- < 100\text{mg/L}$ )の地下水に分けて表示。

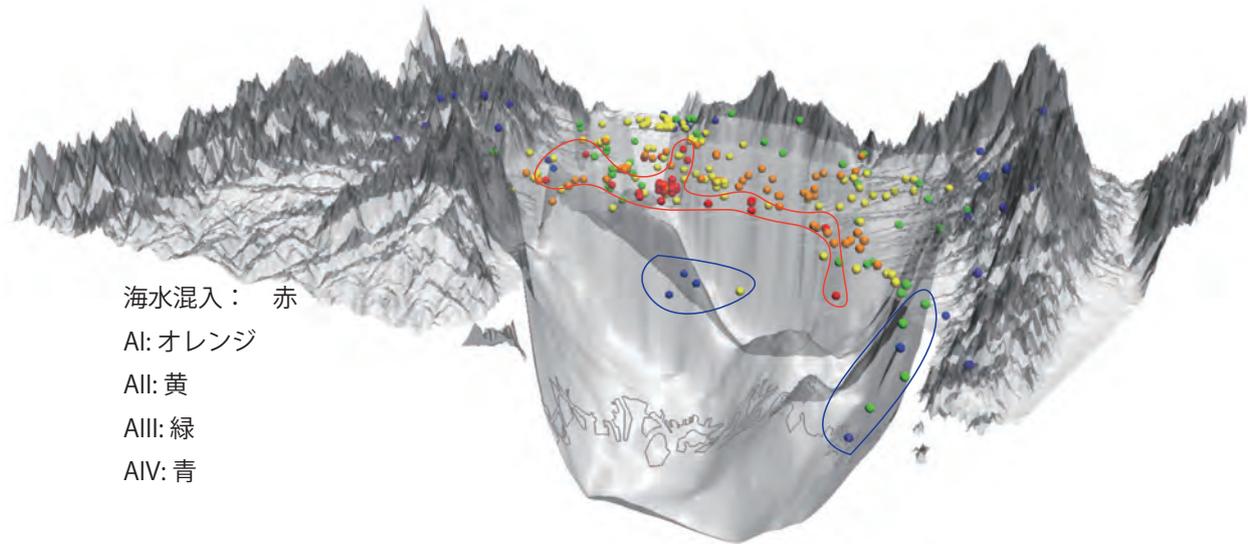


図 3. 現在の降水と海水を起源とする地下水の 3 次元分布図

俯瞰図の原点は 34° 39′ 22.959″ N、135° 21′ 6.675″ E、北から時計回りに 53°、俯角は 8°。標高の縮尺は水平方向の 13 倍。赤線と青線で囲ってある試料についての説明は本文を参照のこと。

とです。海水を含む地下水は、大阪湾の沿岸部の海拔 0 m 地帯に多く見られます（図 3 の赤で囲んだ地域）。また、淀川に沿った内陸部にも海水を含む地下水が見られます。淀川河口に近い大堰ができる以前は、京都府と大阪府の境に近い枚方大橋付近まで海水が遡上していたことが知られています。現在では、大堰に堰き止められて、淀川を海水が遡上することはありません。しかし、河床底地下の伏流水の水路を通じて、海水が遡上していることはあり得る話です。また、降水起源の AI ~ AIV の淡水地下水は、大雑把には平野の中央部から外側に向かって分布する傾向があります。AI（オレンジ色）の帯水層には平野での降水や平野を流れる河川水などが直接涵養しています。AII（黄色）は低地部との境界近い場所に分布する丘陵部や上町台地が涵養源です。AIII は山麓に広がる丘陵地に分布し、AIV は山地に分布しています。つまり、これらの地下水は、井戸のある地点から比較的近い場所で涵養されていると言えます。

降水を起源として流動する地下水は、平野の比較的浅い帯水層（最大でおよそ 100 m 以浅）にしか存在しません。AIII や AIV の地層は平野の低地部の地下にも分布しているのですが、丘陵部

や山地で涵養された地下水は、連続しているはずの平野深部にまでは流動していかないと言えます。例外的に、上町断層と内畑断層に沿って AIII と AIV の地下水が高深度で見られます（青で囲った部分）。これらは、わずかですが、断層を通じて降水が、ほぼ鉛直方向に地下の深部にまで浸透していることを示すものです。ここに示した地下水は再生可能な地下水資源ですが、そのような地下水が分布する深度は限定的です。

本報告の話題ではないので取り上げませんが、AIII や AIV には、縄文海進以前に涵養された淡水、化石塩水や有馬温泉の塩水と似た性質の塩水が多く見られます。そのような古い時代の水は、使えば無くなってしまいます。温泉水として使われていることが多くありますが、大切に利用して欲しいものです。

#### 地下水に残存する汚染物質

日本は環境政策における先進国です。大気汚染対策が功を奏して遠方の風景が美しく見えるようになりました。河川水も目に見えてきれいになっています。しかし、循環速度の遅い地下環境では、高度成長期から 1980 年代にかけて自然界に放出した汚染物質が残存していることが観察されま

す。その例を示しましょう。

揮発性有機炭素（Volatile Organic Compounds: VOC）は大気中で気体となる有機化合物の総称です。VOCの多くは、発がん性などの健康影響があり、光化学スモッグやオゾン層破壊の原因物質でもあります。これらは、1988年のモントリオール議定書により、自然界への放出が禁止され、日本でも翌年から排出規制が開始されました。ここでは、四塩化炭素（テトラクロロエチレン、PCE）とトリクロロエチレン（TCE）に注目してみましょう。これらの物質は、洗浄剤として工場やドライクリーニングなどで便利に用いられていました。また、これらの物質の地下での分解は、主として微生物によるものです。PCEはTCEに、TCEはジクロロエチレン（DCE）を経由して塩化ビニールモノマー（VC）へと変化します。地下水環境によりますが、PCE・TCEがDCEに変化するまで20～30年、VCに変化するまでは30～40年かかります。これらの物質の中で最も毒性の高いVCは無害なエタンと二酸化炭素に変化しますが、さらに30年以上が必要だと言われています。これらの物質は容易に光分解するため、揚水して日光に晒すことができれば、簡単に分解します。それなので、地表に取り出して処理すればいいのですが、地下に残存した状態で処理するのは簡単ではありません。

図4に、大阪府下の地下水中にVOCが検出される地点と、VOCの成分としてVCも含む地点を示しました（2017年）。これらの汚染が見られる地下水は、前述した降水を起源とする地下水です。地表から涵養されるということは、汚染物質も共に流入することがあるということなのです。検出地点は泉南の海岸部を除いては、内陸に多く分布していることがわかります。DCEからVCへ変化している地点は、大阪平野東側の河内平野と丘陵の谷部が多く、丘陵の開けた場所で採取された地下水ではDCEで止まっていることがわかりました。DCEは、少し還元的な環境での微生物活動でより活発に分解が進んでVCになること

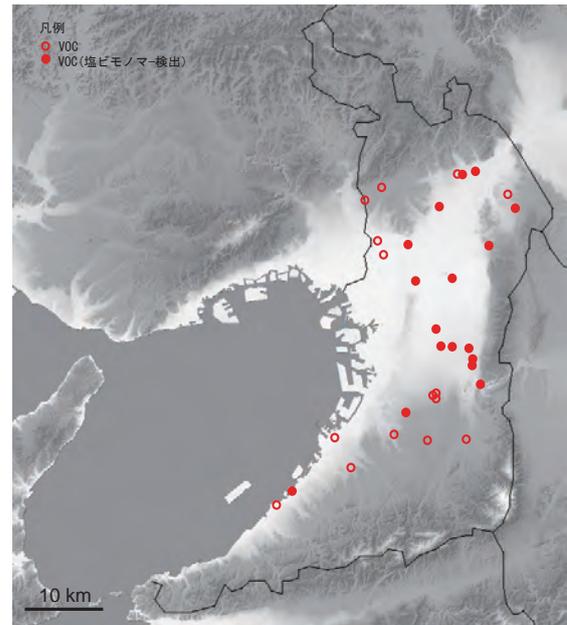


図4. 大阪府下で地下水中に揮発性有機炭素が検出された地点

が知られています。上町台地より西側の大阪市内でVOC汚染が見られないのは、海水を含む塩水が出入りすることで汚染された地下水が流出したのだろうと考えています。それなので、DCEが保存されている地下水の方が、VCにまで分解が進んでいる停滞的環境下にある地下水よりも短時間で汚染浄化される可能性があります。

VOC汚染された地下水は再生可能な地下水です。汚染物質ごと揚水して処理できれば、地下水環境を早く回復できます。

#### まとめ

地下水は、適切な管理のもとに利用すれば、良質の水資源です。日本全体が汚染の少ない自然環境になっている今日では、醸造や瓶詰めの水の製造など、良質の水を大量に利用する地方で、良好な水循環を保全する活動を官民協同で行っている自治体が多くあります。過去の汚染が残っている大都市圏では、きれいな地表水を地下に流して、残存している汚染物質を流失させることも可能でしょう。そのためには、降水起源の地下水をうまく利用したほうがいいと、私たちは考えています。

目に見えることの少ない地下水ですが、水質を

可視化し、マッピングすることで、地下水の置かれている状況を知ることができます。これを読んでいる皆さんには、地表だけでなく、地下の水循環にも興味を持っていただけると嬉しいです。

Southwest Japan. *Geochemical Journal*, 53: 235-247.

<https://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/2019e/53040235.pdf>

## 注釈

- 1) 帯水層：取水できる地下水を含む地層のことで、砂や礫などの粗粒の堆積物や、割れ目の多い岩石などからなっています。
- 2) 涵養：地表の水が地下浸透して帯水層に供給されること。

## 文献

井川怜欧・益田晴恵・新谷毅・三田村宗樹 (2019) 水文環境図 No. 11「大阪平野」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

<https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/contents/osaka/osaka.htm>

益田晴恵 (2018) 第7章 大都市の水環境 — 健全な利用を進める —. 公益財団法人日本生命財団編、「人と自然の環境学」、129-145. 東京大学出版会：ISBN 978-4-13-063371-0.

Shintani T, Masuda H, Okazaki K, Even E, Ono M, Marui A (2019) Characterization of groundwater based on  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\text{Cl}^-$  concentration beneath the Osaka Plain,

## 著者情報



益田晴恵 大阪市立大学大学院理学研究科・教授。専門は環境地球化学、水圏地球化学。水循環に伴う水質汚濁、海洋地殻内の続成作用に伴う水-岩石反応などに関する研究を行ってきた。



根本達也 大阪市立大学大学院理学研究科・准教授。専門は情報地質学。地理情報、地質情報などのデータベースを用いた3次元可視化の手法開発などを研究してきた。



新谷 毅 北海道立総合研究機構・研究員。専門は環境地球化学、地下水学。環境同位体と水質を用いた地下水流動系の評価を研究対象としてきた。

(2022年3月31日掲載)

# シベリアの河川と水循環

## — レナ川とインディギルカ川の不思議な流れ —

鷹野真也  
(総合地球環境学研究所)

### 1. 地球は水循環＝水の呼吸の使い手？

“水循環”とは何か、皆さんご存知ですか？「水が循環すること…？」と考えたそのあなた。…正解です。完璧です。もう少し詳しく言うと、雨（水）が降って、溜まって、流れて、蒸発して、また降って…と文字通り“水”が地球上をぐるぐると“循環”すること、それが“水循環”です。我々はその水循環を研究しています。

では何故その水循環を研究する必要があるのでしょうか？それは水が色々なものを運ぶからです。水の流れに乗って運ばれるものもあれば、水の中に溶けて運ばれたりもします。もちろん目に見えるものもあれば、見えないものもあります。例えば、炭素や熱（エネルギー）がそれらに当たります。炭素や熱が水によって動かされるというのは実はとても大変なことで、もしバランスを保っていたものが崩れると様々な弊害が起こります。炭素は有機態として植物や土壌中に多く存在しますが、その陸域にストックされていた有機炭素が水と共に川や海へ流れ出てしまうことがあります。この流れ出た炭素によって、陸からだけでなく川や海からも二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）やメタン（CH<sub>4</sub>）といった温室効果ガスが大気中に放散される恐れがあり、地球温暖化や海洋酸性化<sup>1)</sup>への寄与が危惧されています。また海の水の流れ、つまり海流は、海水の密度の違いによって生まれ、地球全体をぐるぐる回り熱などを輸送します。これを熱塩循環と呼ぶのですが、この熱輸送は気候に影響を与えてしまうほど大きなものです。何かの拍子に水循環が変化してしまうと（具体的には海への淡水の供給量が変化すると）、海流とそれ

に伴う熱の輸送システムも変化してしまい、ひいては気候変動まで引き起こされてしまいます。このように水の流れは連鎖的に他の物質の流れも生み出すことが多く、一例として昨今の温暖化・気候変動を考える上でも、水循環研究は非常に重要な役割を担っているわけです。

水は自然の中で廻り続けています。まるで地球が呼吸をするように。まさに水の呼吸ですね。○／型！なんてものは出てきませんが、水の水循環にもパターン（型）はあります。その型がどう変わったのか（これからどう変わるのか）、云わば地球の“水の呼吸”の真髄と変化を調べるのが水循環研究です。同じ水循環研究でも、水質や水環境の汚染など水資源利用の観点からの研究も沢山ありますし、先述した温暖化・気候変動に関連する研究もあります。ここでは後者について紹介したいと思います。

### 2. なぜシベリアの水循環？

私が今からするのは、シベリアでの水循環研究のお話です。皆さんは“シベリア”と聞いて何を思い浮かべるでしょうか？多くの方は、漠然と極寒の地とかシベリア鉄道などのイメージを持っているのではと推測しますが、そもそもシベリアってどこ？という方も少なくないと思います。定義が色々あるようですが、一般的にはユーラシア大陸の北東部、ロシア連邦の中央部から東側のとても広い地域を“シベリア”と呼びます。実際に行ったことがある方はあまりいないかもしれませんが、社会科の教科書で、タイガやツンドラといった植生（図1）と永久凍土が広がって

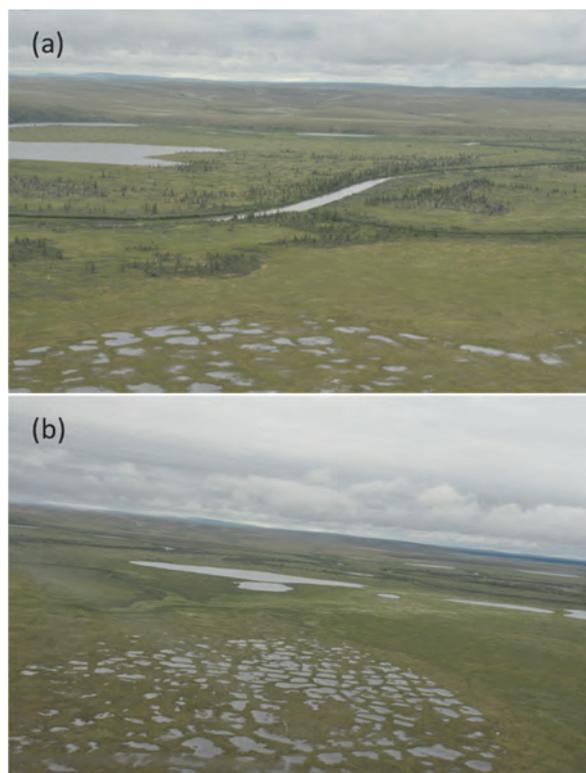


図1. 北東シベリア・チョクダ周辺域におけるタイガ・ツンドラ境界 (a) とツンドラ湿地 (b)。タイガを構成する針葉樹（カラマツなど）とツンドラの背の低い草本類が交じり合って分布しています。ツンドラにはポリゴンという網目模様の微地形（地表面の凹凸）が見られ、凹みに水が溜まってツンドラ湿地を形成します。

る、という記述を一度は目にしたことがあるかもしれません。いずれにしても日本に住んでいる人々にはあまり馴染みのない土地であり、実はロシアの人々にとってもまだまだ未知の世界とされている、そんなシベリアでの水循環とは一体何なのでしょう。

まず何故そんな日本から遠いところの研究をしているのかというと、理由は地球温暖化にあります。日本でも近年暑いなど感じている方もいるかもしれませんが、シベリアを含む北極域では世界（地球全体）平均の約2倍の温暖化が起きている（これから起こる）とされています。その温暖化によって様々な問題が生じるのですが、大きな問題の1つとして永久凍土の融解が懸念されています。

シベリアには広く永久凍土が分布しており、中でも東シベリアは世界最大・最深の永久凍土帯といわれています（ちなみに永久凍土とは“2年”

以上0℃を上回らない土壌のことで、永久に凍った土壌ではありません。夏に融解・冬に凍結というサイクルを繰り返す土壌は季節凍土（活動層）と呼ばれます。凍土には土壌中の水分を氷として一時貯留させておくりザーバーのような性質があり、加えて凍土中の氷が物理的なバリアになって水の浸潤を妨げ地下水・土壌水の動きを制限するなど、凍土はシベリアの水循環システムにおいて重要な役割を担っています。先述のようにシベリアにはタイガ林やツンドラ湿地といった植生が広がっていますが、これらは気温や土壌中の水分量に非常に敏感で、ちょっとした変化によって植生の枯死や種類の変化が引き起こされてしまいます。また、その植生の下には泥炭という有機物（炭素）を沢山含んだ土壌が堆積・凍結しています。つまり永久凍土が融解すると、これまでの水循環のバランスが崩れ植生に影響を与えるのと同時に、地中に冷凍保存されていた有機物（炭素）も解放され、水と共に河川や海へ流出してしまう恐れがあるのです。

これは温暖化、及び永久凍土の融解によって起こり得る問題のほんの一例に過ぎませんが、シベリアの“水の呼吸”の乱れは地球規模で影響を及ぼしかねない可能性を秘めています。その影響の範囲や大きさを予測しないと、地球の未来のために対策さえできません。そのためには生態系のベースとなる水循環とは何かを知ることが第一歩となります。現在の水循環システムを理解し、温暖化により今起きていること・これから起こり得ることを調査し、気候や生態系へどのように影響するのか予測する、それがシベリアの水循環研究の目的です。

### 3. 水循環研究の秘密兵器 “水同位体比”

水循環研究を行う上で、便利且つ有効なツールが水の安定同位体比です。ここでは水同位体比について、またその使い方を簡単に説明します。

水 ( $H_2O$ ) は水素 (H) と酸素 (O) からなる分子で、水素の安定同位体には  $^1H$  と  $^2H$  (D)、

酸素の安定同位体には<sup>16</sup>Oと<sup>17</sup>Oと<sup>18</sup>Oが存在します。自然界の水分子は<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>Oがほとんどですが、それに次いで、比率としてはわずかではあるものの<sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>Oと<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>Oが存在します(<sup>2</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>Oや<sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>18</sup>O、及び<sup>17</sup>Oを含む水分子は更に存在量が小さいためここでは無視します)。本来、同位体とは原子について用いる言葉ですが、水分子の、さらにその内の<sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>Oと<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>Oを“水(の安定)同位体”と便宜的に呼んでいます。

そして、水分子中の<sup>1</sup>Hに対する<sup>2</sup>Hの存在比を“(水の)水素同位体比”、<sup>16</sup>Oに対する<sup>18</sup>Oの存在比を“(水の)酸素同位体比”と呼び、それらを総称して“水(の安定)同位体比”といいます(少しややこしいのですが、<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>Oに対する水同位体(<sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>Oと<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>O)の存在比ではないことに注意してください)。しかし水分子中の<sup>1</sup>Hや<sup>16</sup>Oに対する<sup>2</sup>Hと<sup>18</sup>Oの存在比(水同位体比)は値がとても小さく比較しづらいため、 $\delta$ 値デルタを用いてももう少しわかりやすくします。この $\delta$ 値とは、簡単に言うと、「調べようとしている水試料」と「基準とする特別な海水」の水同位体比はどれだけ違うか(偏差)、を表しています(詳しくは第3章「元素の同位体比」と「軽元素同位体」をご覧ください)。その $\delta$ 値のうち、<sup>2</sup>Hに関するものを $\delta^2\text{H}$ 、<sup>18</sup>Oに関するものを $\delta^{18}\text{O}$ と表記します。

この水同位体比が水循環研究に有効なツールである理由は、水同位体の性質にあります。水同位体比が変化するのは、主に①水が相変化した時、②分子拡散時、③異なる同位体比を持つ水同士が混合した時です。つまり水同位体比を観測することで、その水が経てきた相変化や循環過程を推定することが可能になるのです。また、試料採取や分析が比較的容易であることも理由の1つとして挙げられます。

一概に水同位体比を用いた水循環研究といっても、その使い方は研究対象や目的によって様々です(本当に色々あるので、本章の他の研究例とも見比べてみてください)。今回私が紹介するシベリアの研究例は“河川水”に主に焦点を当てたも

のです。河川水とは一般的に、水循環の中の「雨(雪)が降って、土壌を経由し、河川へ流れる」という過程を経て集まった水です。同じように流れているように見えても、その過程のちょっとした変化によって河川水の水同位体比も変化します。この水同位体比の変動から、どの水がどのように河川に流れているかを推定します。先述したように水同位体比は「③異なる同位体比を持つ水同士が混合した時」に変化するので、上記の過程に含まれる色々な種類の水の水同位体比がわかると推定の精度が上がります。特にそれらの水の大量ともいえる降水(雨や雪)の水同位体比は非常に重要な情報となります。

図2は北東シベリア・チョクルダ(北緯70度、東経148度)における降水や河川水等の水同位体比をまとめたものです。この図から、夏の降水が最も高く、冬の積雪(降雪ではなく“積雪”であることに注意してください)が最も低い水同位体比を示すことが認められます。これは“温度効果”と呼ばれる降水同位体比の特徴の1つで、気温との相関により夏に最高値・冬に最低値となる周期性を持つことがわかっています(その他の効果については第3章「軽元素同位体」と「同位体地図(Isoscape)」を参照してください)。この結果を踏まえて、シベリアの河川水同位体比変動と水循環過程を考えていきます。

#### 4. 東シベリア・サハ共和国の首都ヤクーツクの 水循環過程 — レナ川と井戸水

ここからはより具体的で、少し専門的なお話になります。シベリアの水循環過程の研究例として、まず東シベリアを流れるレナ川の水同位体比季節変動を紹介します。(※以降の研究例紹介では、水同位体比の議論に酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )のみを用います。水素同位体比( $\delta^2\text{H}$ )を用いても議論の結果・本質は変わらないのでご了承ください。)

レナ川はバイカル湖西側のバイカル山脈に源を發し、東シベリア・サハ共和国最大の都市であるヤクーツクを通して北極海へ注ぐ(図3)、流域

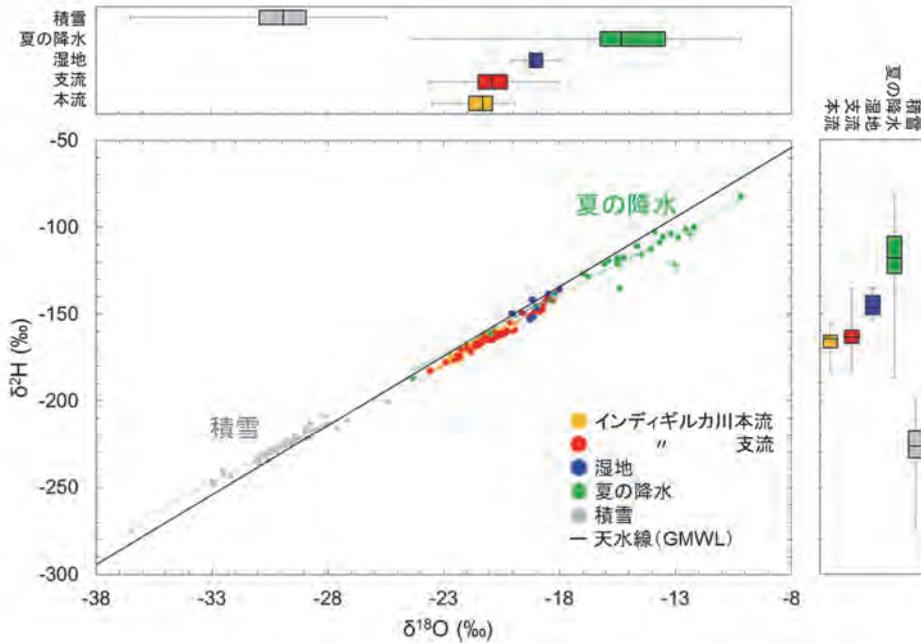


図2. チョクダ周辺域で採取した様々な水同位体比( $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 座標)。インディギルカ川本流が黄、支流が赤、湿地が青、夏の降水を緑、積雪を灰で色分けしました。

面積世界第8位のとても大きな河川です。永久凍土帯を流域に広く含む大河川として、また北極海への淡水の大きな供給源として世界的に注目されており、多くの研究が行われています。冬には車が走れるほど川面が凍結し（分厚い氷の下では水が流れています）、春（融雪期）になると流域の融雪水が一気に流入してちょっとした洪水・氾濫を引き起こし、夏から秋にかけて段々流量が減っていきます。

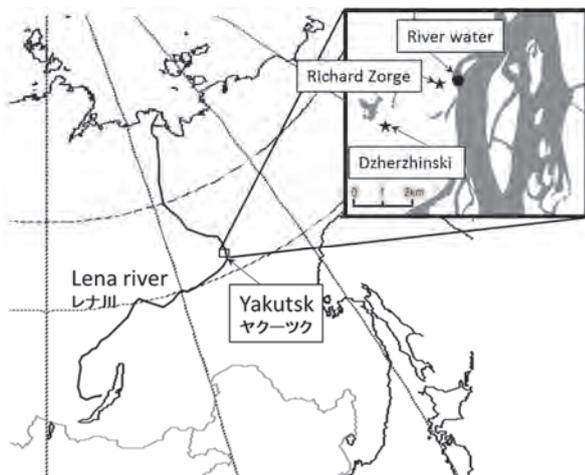


図3. 東シベリア・ヤクーツクとレナ川。右上のパネルはヤクーツク市内でのレナ川河川水と井戸水 (Richard Zorge と Dzherzhinski) の採取地点を示しています。

このように1年のうちに凍結・融解し、流量も大きく変動するレナ川ですが、その河川水の水同位体比も大きな季節変動を示します。図4はヤクーツクで採取したレナ川河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変化を示しています。図中の青プロットがレナ川の $\delta^{18}\text{O}$ で、1年周期で規則的に値が上がったり

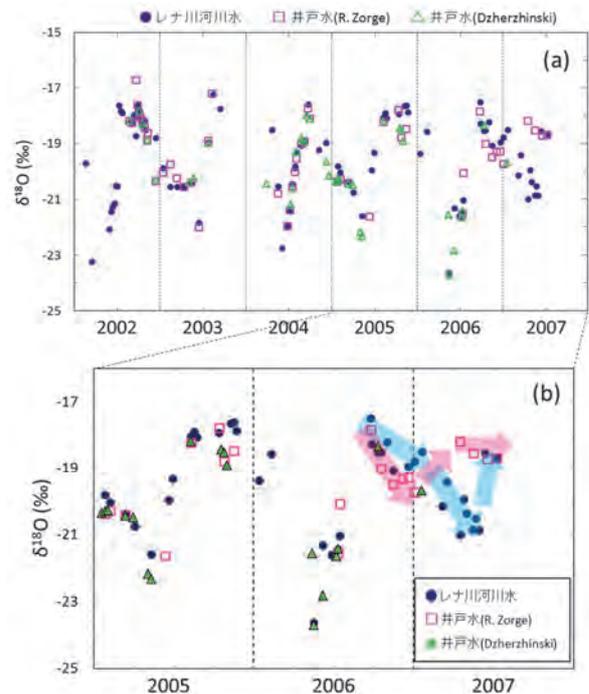


図4. レナ川と井戸水の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変化（鷹野卒論より一部改変）

下がったりを繰り返していることが見て取れると思います。もう少し詳しく見ると、春に急低下し、夏に上昇、秋から冬にかけて徐々に低下していることがわかります。この変動は、レナ川に流入する流域の降水の  $\delta$  値が季節によって異なる値（夏に最高値、冬に最低値）を持つことに主に起因し、その周期性を反映していると考えられます。つまりレナ川  $\delta$  値の春の急低下は融雪水（低  $\delta$  値）の流入を示唆し、夏の上昇は融雪水流入の減退とそれに代わる流域の夏の降水（高  $\delta$  値）の流入によって引き起こされたかと推定されます。

一方、ヤクーツク市内のレナ川氾濫原に位置する井戸水 (Richard Zorge, Dzherzhinski; 図 3) の  $\delta^{18}\text{O}$  は、レナ川河川水の  $\delta^{18}\text{O}$  とほとんど同じ時間変化を示しました (図 4)。これはレナ川河川水と井戸水が同じ起源であることを示唆しています。ヤクーツクは年降水量が 300 mm 程度の非常に乾燥した気候のため、通常はレナ川から氾濫原の地下へ水が浸み出して井戸水となっていることが考えられます。しかし、2006 年の秋から 2007 年の春にかけて、井戸水の  $\delta$  値変動がレナ川河川水の規則的な変動からズレる結果が得られました。具体的には、2006 年 10 月から 2007 年 1 月にレナ川よりも井戸水の  $\delta$  値が低下し、逆にレナ川の  $\delta$  値が急低下した 2007 年春（融雪期）には井戸水の  $\delta$  値はやや上昇し比較的高い値を保ち続けました (図 4b)。この変動のズレは、ヤクーツクにおける 2006 年夏期の記録的な大雨が関係している可能性が考えられます。元々レナ川から氾濫原の地下へ水が浸潤していたものが、2006 年夏期の過剰な降水があったことで水のポテンシャルが逆転し、氾濫原の井戸水側からレナ川の方へ水が流れた（井戸水が流域の土壌水の  $\delta$  値を反映した）のだと推測されます (図 5)。このような大雨に伴う水文過程の変化は、降水量増加が予測されている近い将来に、物質循環や生態系へ大きな影響を与える可能性が懸念されます。

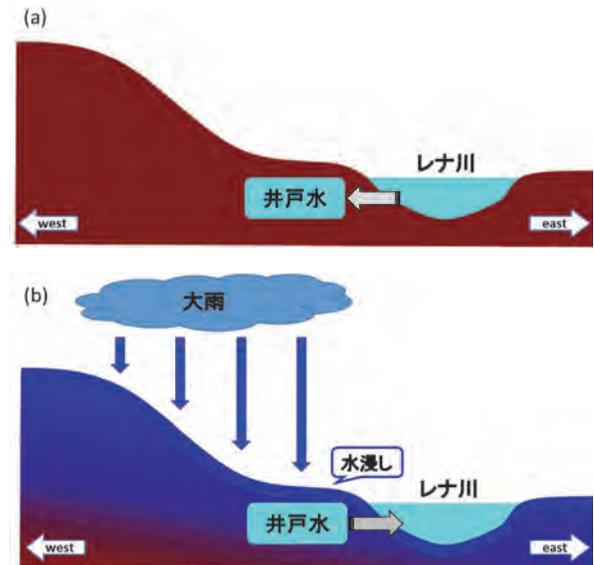


図 5. レナ川流域の断面図、通常の水の移動 (a) と 2006 年の大雨後の水の移動 (b) (鷹野卒論より一部改変)

## 5. 極北の地チョクダ、インディギルカ川への DOC 流出

もう 1 つの研究例として、北東シベリアのインディギルカ川<sup>2)</sup> における水循環過程研究を紹介します。インディギルカ川はレナ川と比べると小さいですが、流域の大部分が北極域に位置し、温暖化の影響や有機物（炭素）の流出を評価するために非常に重要な河川の 1 つです。このインディギルカ川の下流域にはチョクダという村があり (図 6)、この周辺はタイガ林とツンドラ湿地の境界域となっていて (図 1)、学術的にも貴重且つ価値のある研究対象地域です。このチョクダ以北に広がるツンドラ湿地には多くの泥炭（炭素）が堆積しており、湿地の水は DOC (Dissolved Organic Carbon; 溶存有機炭素) という水の中に溶けた状態の有機態炭素を沢山含んでいます (図 7)。つまりツンドラ湿地からの排水は北極域河川や北極海にとって有機態炭素の重大なソース (起源) になり得ます。これまで述べてきたように北極域永久凍土帯の水循環過程は少し複雑になっているので、どんな状況・タイミングでこの湿地の水が流出するのかを水同位体比を用いて考えます。

まずインディギルカ川本流の水同位体比時間変

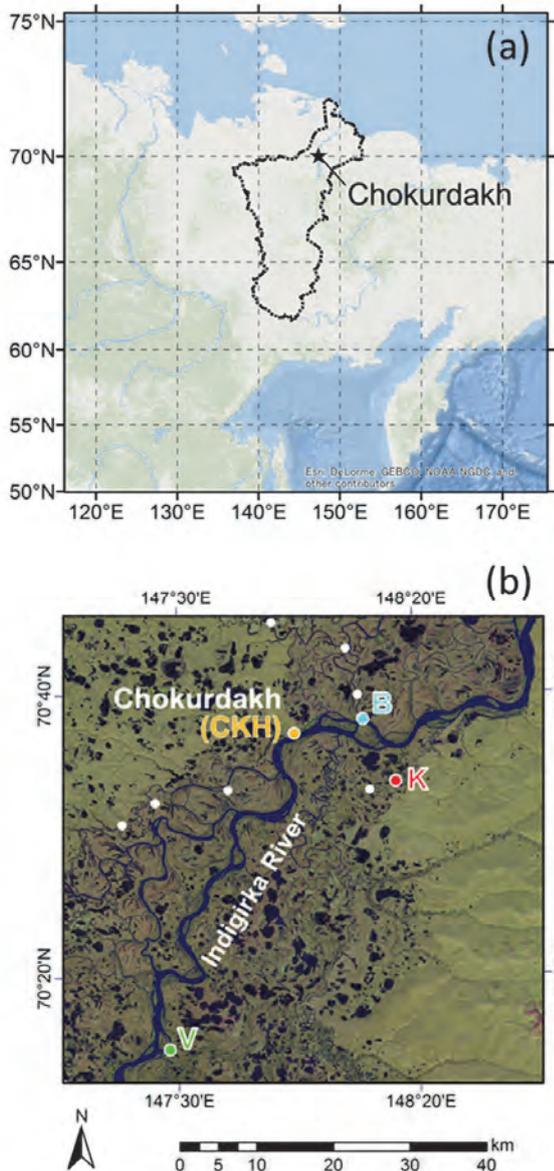


図6. 北東シベリア・チョクルダとインディギルカ川。(a) 内の実線はインディギルカ川の分水嶺を示しています。

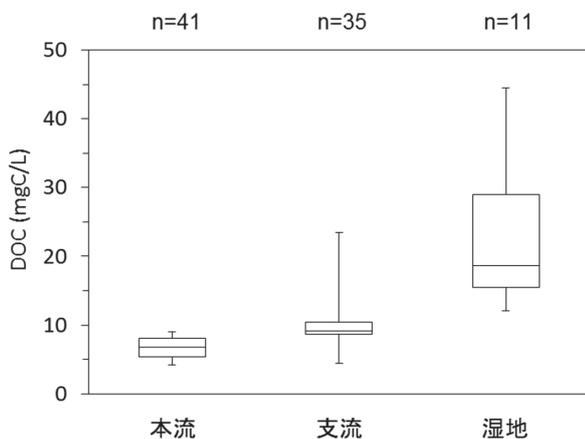


図7. インディギルカ川本流と支流、湿地のDOC濃度

化を見ると、レナ川と同様の規則的な季節変動が認められました(図8)。この変動はレナ川の水同位体比変動でも説明したように、図2で示した降水同位体比の季節変動と流入のタイミングを反映していると考えられます。また、夏期(7月前後)に採取したインディギルカ川本流とチョクルダ周辺の支流、ツンドラ湿地の水同位体比を図2にプロットしました。この3種類の水の $\delta$ 値を比べると、インディギルカ川本流が最も低く、支流の値が本流と同じかやや高く、湿地の水が最も高いことがわかります。これは湿地の水が支流に排水され、その支流の水が本流へ流入し、本流の夏期の $\delta$ 値上昇傾向に寄与していることを示唆しています。

以上のように「湿地→支流→本流」というごく一般的な水の流れが $\delta$ 値の座標で示唆されましたが、本流と支流の夏期 $\delta$ 値時間変化からはまた違った側面が見えてきます。図9はインディギルカ川本流と支流の $\delta^{18}\text{O}$ の夏期時間変化(2011～2013年)で、2012年は支流の $\delta$ 値が本流よりも常に高く、共に $\delta$ 値が徐々に上昇していることから、先述の水の流れを裏付ける結果となりました。しかし2011年と2013年の変動を見ると、本流と支流が途中まで(2011年はday-of-year (DOY)<sup>3)</sup>203(7月22日)まで、2013年はDOY 183(7月2日)まで)同等の値を示し、その後支流の値が本流よりも上昇しました。2013年に限っては、その後DOY 202(7月21日)以降に再び両者が同等の値を示すようになりました。この支流の $\delta$ 値変動のタイミングはインディギルカ川本流の水位変動と完全に一致しており、本流の水位が高いと

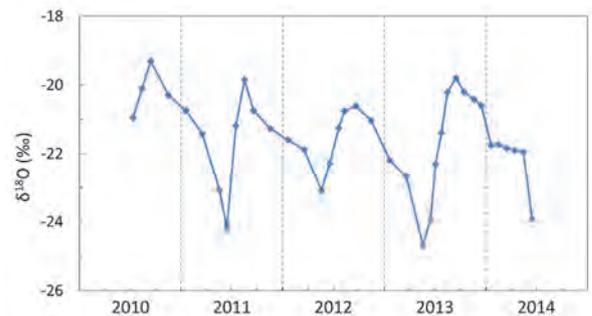


図8. インディギルカ川本流の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変化

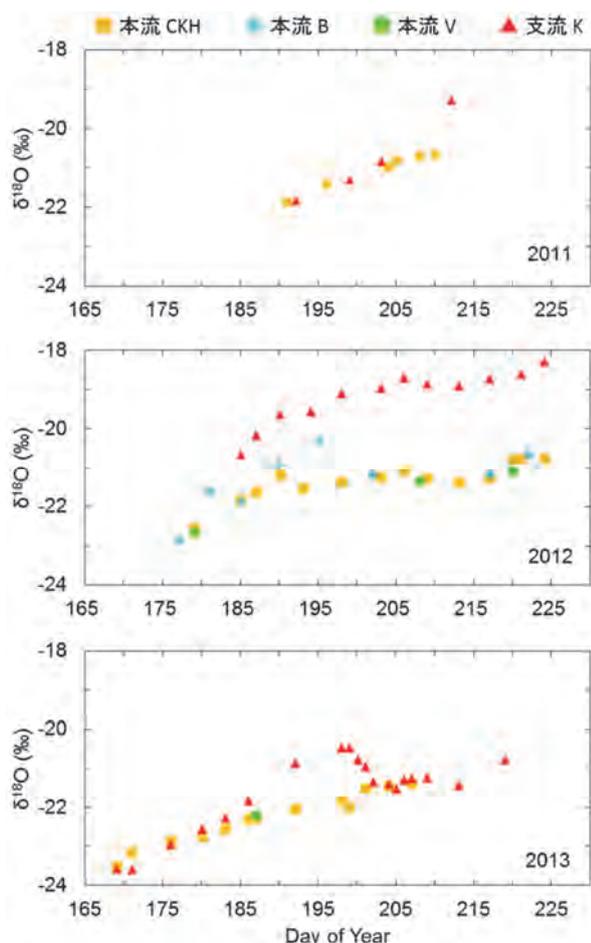


図 9. インディグルカ川本流と支流の  $\delta^{18}\text{O}$  の夏期時間変化

き支流の  $\delta$  値は本流と同等の値を示し、水位が低くなると支流の  $\delta$  値が高い値を示しました (図 10)。

この  $\delta$  値時間変化と河川水位変動の関係は、本流の水位が高いときには「本流→支流」の方向に水が逆流し、支流内には本流由来の水が優位になり、下流域の湿地由来の排水を妨げていることを示唆しています。対して、本流の水位が低くなったときに湿地水が支流へ排水されるようになり、その水が支流から本流へ流入すると考えられます。すなわち下流域の湿地水は、融雪期及び夏期高水位時の後、河川水位が下がったとき (つまり晩夏から秋にかけて；図 10) 流出が最大となり、北極域河川 DOC の主要なソースの 1 つになり得ることを暗示しています。

## 6. おわりに

本研究では、水同位体比の情報からシベリアの

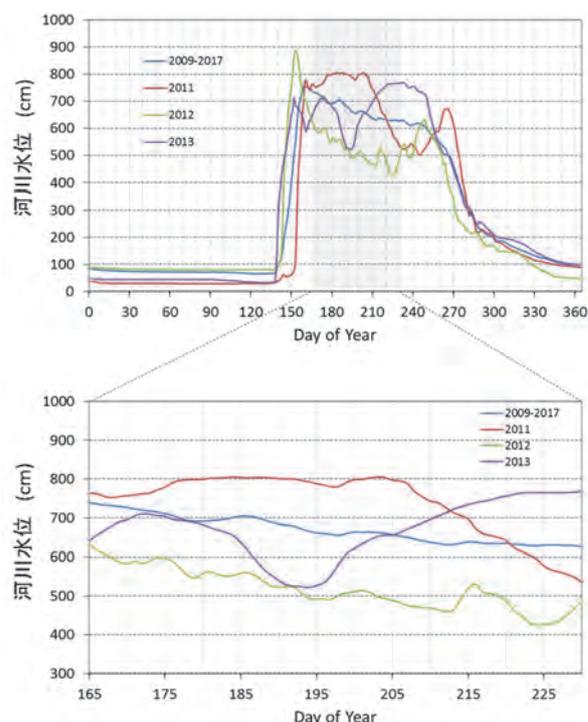


図 10. インディグルカ川本流の水位変動

水循環過程を推測しました。このように遠く離れた地域の、目に見えない「水の呼吸」がデータを通して見えるようになること、それがツールとしての水同位体比の利便性・強みです。しかし私の師匠はこうも言いました、「己の足で赴き、目で見て、肌で感じるフィールドワークは、自然科学分野の研究にとって必要不可欠である」と。目に見えるものが全てではないが、それは逆もまた然りであり、1つの視点にとらわれず広い視野を持って取り組むことの重要性を説いた有り難いお言葉です。我々総合地球環境学研究所が提案する“環境トレーサビリティ研究”は、研究者と行政や民間・地域の方を含むステークホルダーの方々を繋ぐ超学際的研究を目指しています。師の教えを胸に、地球研が提供する同位体研究を基盤とし、ステークホルダーの方々に寄り添った多角的な視点を持つ共同研究を推し進めていければと、常々心掛け取り組んでいます。このシベリア水循環過程の研究例が、そんな環境トレーサビリティ研究を世間の方々に知って頂くきっかけ・一助となれば幸いです。

## 注釈

- 1) 海洋が大気から二酸化炭素を吸収し、海水中の二酸化炭素濃度が高まり、海水の pH が低くなることをいいます。これにより炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の殻・骨格を持つプランクトンやサンゴ等がダメージを受け、海洋生態系に深刻な影響を及ぼすことが懸念されています。
- 2) インディギルカ川とは現地の言葉で「魚が湧き出てくる川」というような意味合いを持っているようで、実際に漁業が盛んで現地民の主食になっています。そのため河川水中に有機物が多く、茶色いのが特徴です。現地調査時はこの川の水を飲むのですが、紅茶を入れて、これは紅茶の茶色だと自分に思い込ませて飲みます。「紅茶を飲めば浮かぶ、インディギルカ川の情景」シベリアの切ない思ひ出が今でも蘇ってきます。
- 3) day-of-year (DOY) とは年間通算日のこと。日付がその年の1月1日から数えて何日目かを表しています。1月1日が DOY 1、12月31日は DOY 365 (閏年は 366) となります。

## 文献

Takano S, Yamashita Y, Tei S, Liang M, Shingubara R, Morozumi T, Maximov T C, Sugimoto A (2021) Stable Water Isotope Assessment of Tundra Wetland Hydrology as a Potential Source of Arctic Riverine Dissolved Organic Carbon in the Indigirka River Lowland, Northeastern Siberia, *Frontiers in Earth Science*.

<https://doi.org/10.3389/feart.2021.699365>

鷹野真也 (2011) 東シベリア永久凍土帯から流出する水の同位体比, 卒業論文.

## 著者情報



鷹野真也 (総合地球環境学研究所ポスト・コアプロジェクト「環境トレーサビリティに基づく研究基盤の応用」研究員) 2019年北海道大学大学院環境科学院博士後期課程単位取得退学。2020年学位取得 (環境科学)。北海道大学学術研究員を経て、2021年より現職。

(2022年3月31日掲載)

# アフリカ熱帯高山の消えゆく氷河

## — 氷河と山麓水資源の関係性の解明 —

大谷 侑也

(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)

### 1. 消えゆく熱帯の氷河

気候変動は近年の人類が直面している喫緊の問題です。その中でも特に影響が大きいと考えられているのが氷河です。世界各地の山岳氷河は1900年代から急速に縮小していますが、最も顕著なのは熱帯アフリカの高山が有する氷河です。アフリカにはキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の3つの高山があり(図1)、それらの頂上付近には氷河が存在します。しかし、いずれも気候変動の影響により10~20年後には消失するとの予測がなされています。中でも、世界遺産に指定されているケニア山の氷河は年約7~10mの非常に速いスピードで縮小しています(図2)。今すぐ現地に行ってモニタリングを開始しなければ氷河の縮小と周辺の水環境の関係性を記録することができなくなると考えました。

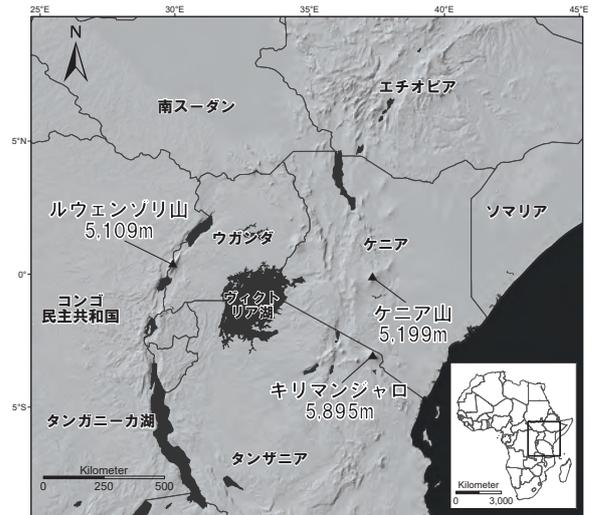


図1. 東アフリカのキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の位置図

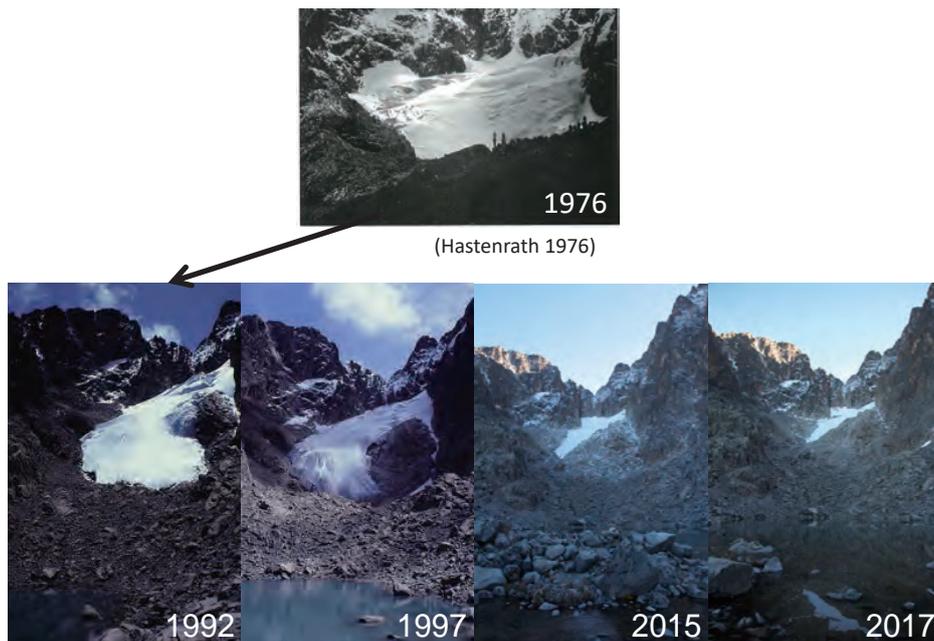


図2. ケニア山のティンダル氷河の縮小 (左から1992、1997年は水野一晴撮影、2015年、2017年は著者撮影)

そこで、アフリカのケニア共和国（以下、ケニア）へ調査に行くことになりました。私の想像のなかでアフリカは灼熱の大地というイメージがあったのですが、ケニアの首都ナイロビに初めて降り立ったとき感じたのは「涼しい！」でした。これはケニアが「アフリカ大地溝帯」に位置し標高が高いからです。アフリカ大地溝帯は地球の表面を覆うプレート（岩盤）とプレートの境界であり、アフリカ大陸を南北に貫く幅 35～100 km、総延長が 7,000 km にもおよぶ世界でも有数の地溝帯です。プレートの境界はマグマができやすく、地下深くで、ある一定以上の量が溜まると地上に噴出（噴火）します。そのためアフリカ大地溝帯には多くの火山が形成されています。

今回、調査対象としたケニア山 (5,199 m) をはじめ、アフリカ大地溝帯が擁する高山は上昇気流を発生させ、多くの雨をもたらします。そのためこれらの山は概して降水量が少ないサバンナにとって貴重な存在であり、地元の人達は山を「Water Tower（給水塔）」と呼んだりします。一方、この給水塔の役割を果たすケニア山は、乾季には雨が少なくなり、山麓地域の水資源は雨季に比べて減少するのですが、現地を観察すると川の水や湧き水はある一定の量を保ち続けていました。そこで私はこれら 2つの山が持つ氷河の融け水（氷河融解水）に注目しました。氷河は「天然のダム」とも言われます。これは雨の少ない乾季において氷河の融けた水が、一定量、氷河の下流域に供給され続けるからです。このような氷河と山麓の水資源の研究は、とても大きな氷河が残るヒマラヤやヨーロッパアルプス等では展開されてきましたが、それら地域と比べ雨が少なく、また赤道直下の熱帯高山の氷河に焦点を当てた研究はほとんど見当たりませんでした。

これまでの研究から、マグマが冷えて固まった玄武岩質の火山の上部で取り込まれた水は地下深くまで浸透しやすく、浸透した水は地下水となって山麓で湧き出すことがわかっています。一方、山体の中腹以下の降水は溶岩流のち密な部分に阻

まれて山体の内部に浸透することができず、表流水や浅い地下水となって山麓に流下することも明らかになってきています。このことから、玄武岩でできたケニア山の山麓の湧水は、山体中腹の降水よりむしろ、山体上部の氷河融解水が起源になっている可能性が高いと考えました。

## 2. 水の「重さ」の違いから麓の水の起源を調べる

氷河と山麓の河川・地下水の水の酸素同位体を分析して、河川水や湧水がどの標高から流れてきているのか（涵養標高）を調べることで、氷河と山麓の水資源の関係性の解明を試みました。ここで少し安定同位体の説明をしておきます。元素には陽子は同じですが中性子の数が異なるため質量数（重さ）の異なる原子が存在し、これを同位体といいます。そのうちの多くは時間の経過とともに崩壊し他の核種に変化する放射性同位体ですが、安定同位体は時間が経過しても不変です。また、安定同位体は自然界の様々な物質の循環過程のなかでその同位体比が変化します。そして質量数の大きい同位元素が多ければ同位体比が高い＝重いと表現され、それと比較して同位体比が低ければ「軽い」と表現されます。これらの同位体比の「重さ」を詳しく分析・比較することにより、自然界の物質の循環内での位置付けや、生成経路を明らかにする研究が多くなされてきました。

降水中の酸素同位体比は、同位体高度効果（標高が高くなるにつれ同位体比が低くなる効果）を示します。これは、水蒸気が雨滴として凝結する際に重い同位体が濃縮するため、残された水蒸気の同位体が軽くなるというメカニズムに基づきます。これを図で示しますと、雲が山麓に流れ込んでくると、標高の低い地域では同位体比の高い（重い）水を含んだ雨が選択的に先に降ります（図3の①）。

重い同位体を含む雨が先に降り、水蒸気の同位体比が軽くなることで、高い標高帯で降る降雪や山体上部の氷河ほど水の同位体比は低く（軽く）なっていきます（図3の②）。

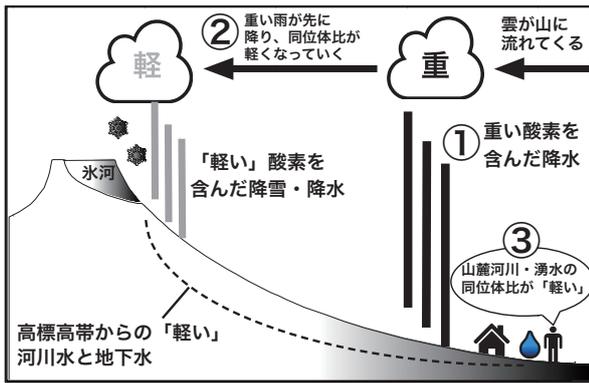


図3. 同位体高度効果と水の起源把握のメカニズム

本研究では、この高度効果による氷河・積雪と、山麓の降水の同位体比の違いを利用して、山麓湧水・河川水の涵養標高の推定を実施しました。もし、ケニア山の山麓の河川水と地下水の同位体比が、山麓の降水と比較して低く(図3の③)、高標高帯の氷河や積雪の値に近ければ、山麓湧水・河川水は氷河地帯から流れてきていることがわかります。

以上のメカニズムを利用し、山麓の湧水・河川水がどの標高帯から流れてきているかを推定し、麓の水資源の起源を明らかにしようと考えました。

### 3. 山麓の河川水・湧水の涵養標高の推定

実際にケニア山に登り、フィールドワークを行いました。まず驚いたのは標高によって自然環境が目まぐるしく変わることでした。4,000 m以上の高山帯では岩盤から開放されたばかりの大きな岩や氷河・積雪があり(図4:a)、4,000~3,200 mではジャイアント・セネシオといった半木本植物が多く見られました(図4:b)。3,200~2,300 mではジメジメとした湿気の高い森林帯(雲霧帯ともいう)があり(図4:c)、そこを抜けると山麓帯があり、乾いた大地が広がります(図4:d)。

ケニア山の標高ごとに採水した降水サンプルの酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )は、標高が高くなるにつれ低くなる高度効果を示しました。そこから高度効果直線を算出しました(図5)。この直線により山麓の水の涵養標高を推定することができました。山麓の湧水の $\delta^{18}\text{O}$ の平均値(-3.73%)を高度効果直線に代入すると(図5の①)、涵養標高は4,916 mとなり、また山麓の河川水(-3.03%)の涵養標高は4,650 mと推定されました(図5の②)。

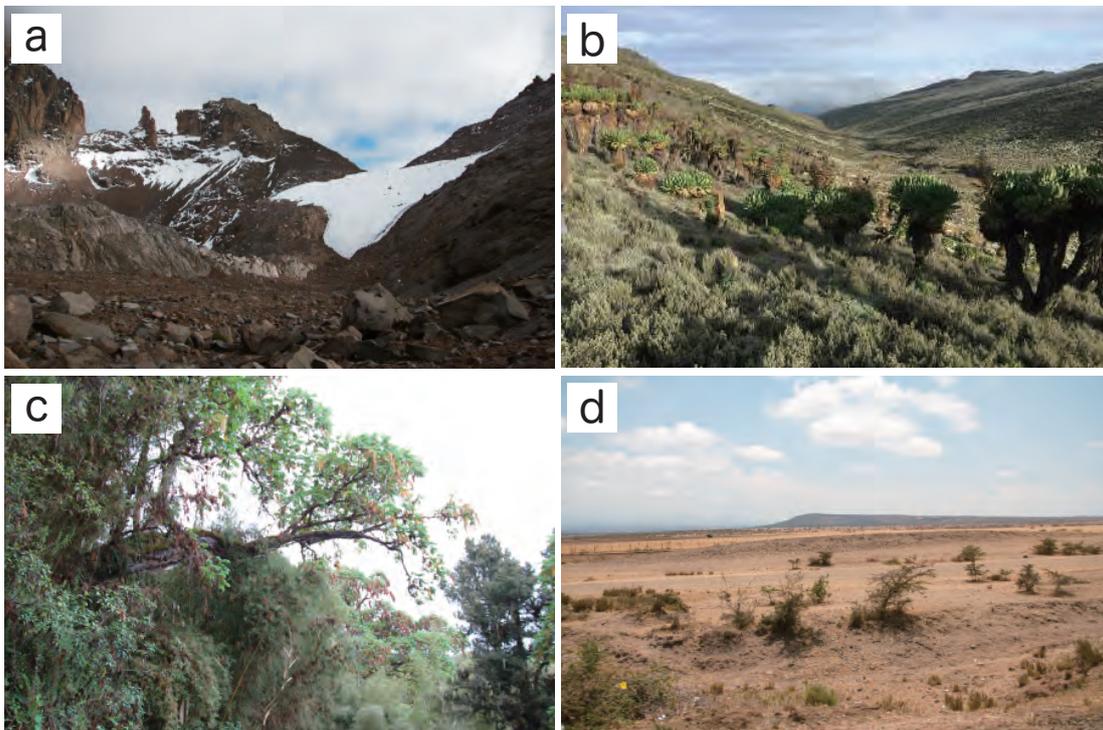


図4. ケニア山の標高ごとの風景。a) 高山帯 (>4,000 m)、b) ヒース・湿地帯 (3,200-4,000 m)、c) 森林帯 (2,300-3,200 m)、d) 山麓帯 (<2,300 m)

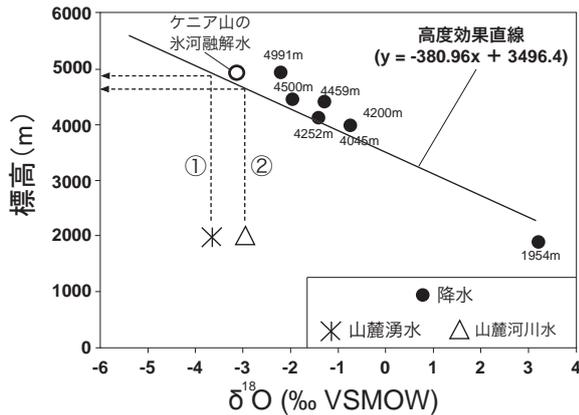


図5. ケニア山の高度効果と山麓の湧水と河川水の涵養標高の推定

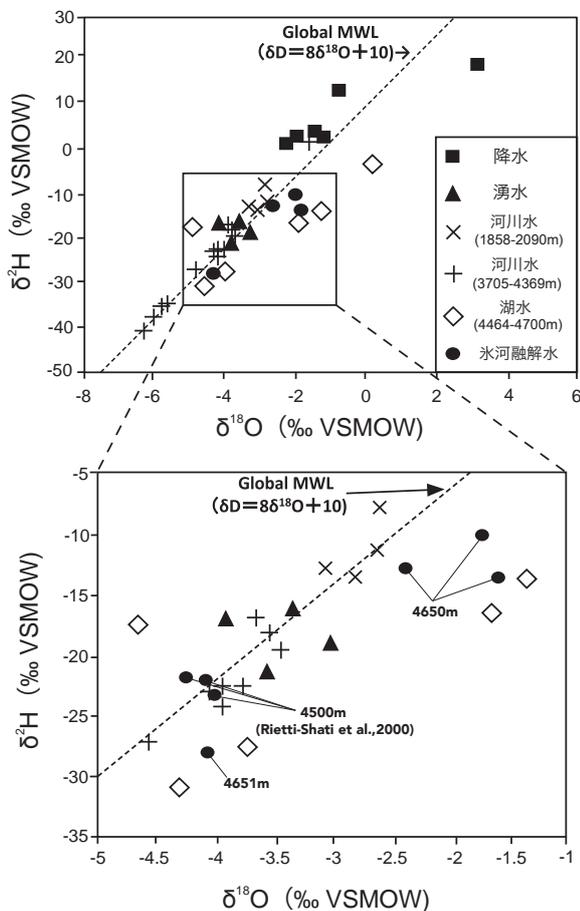


図6. ケニア山で採水された各種水サンプルの水素(δ²H)・酸素同位体比(δ¹⁸O)

また、降水、湧水、山麓の河川水(1,858 m-2,090 m)、高標高の河川水(3,705 m-4,369 m)、湖水(4,464 m-4,700 m)の $\delta^{18}\text{O}$ と水素同位体比( $\delta^2\text{H}$ )をプロットしたものが図6です。各サンプルのデータはおおよそGlobal MWL(天水線)に沿うことが分かりました。天水線とは世界各地で採水

された降水や河川水、湖水といった循環する水の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の間の一定の関係を示す直線のことです。プロットされたデータを見てみると、山麓の湧水や山麓の河川水、高標高の河川水は降水よりもむしろ氷河融解水の値に近いことがわかりました。山麓を流れる水が完全に氷河由来である、ということまでは言い切れませんが、これらの結果から、乾季の山麓湧水と山麓河川水は、中腹の降水よりも、氷河地帯の水が涵養源となっている可能性があることがわかりました(大谷, 2018)。

#### 4. 山麓湧水の年代測定

4,900 m以上の高山帯が涵養源とわかった乾季の山麓湧水に対して、トリチウムという放射性同位体とフロン類を用いた年代測定を行いました。その結果、湧水は山体(約4,900 m以上)で取り込まれてから山麓で湧き出すまでに約40~50年かかることがわかりました。図2からもわかるように40~50年前のケニア山の4,900 m付近にはまだ広大な氷河が存在していました。したがって現在の山麓湧水には過去のケニア山の氷河融解水が寄与している可能性があります。氷河は10年以内に消滅する可能性が高いため、それは山麓湧水の涵養源が大きく失われることを意味します。つまり50~60年後、地域住民にとって重要な山麓湧水に大きな影響が出てくることが予想されます。

今後は同位体を使った調査のみならず、氷河が失われることで山麓の水資源が量的にどの程度減るのかを水循環モデルを用いて解明しようと考えています。

尚、本研究は筆者の大学院在籍時の研究業績であり、現所属先とは一切関係がありません。

#### 文献

- 大谷侑也(2018):ケニア山における氷河縮小と水環境の変化が地域住民に与える影響. 地理学評論, 91(3), 211-228.
- Hastenrath S(1976): Weitere beobachtungen zu bodenfrosterscheinungen am Mount Kenya.

Zeitschrift für Geomorphologie, 20: 235-239.

Riatti-Shati M, Yam R, Karlen W, Shemesh A  
(2000) Stable isotope composition of tropical  
high-altitude fresh-waters on Mt. Kenya,  
Equatorial East Africa. Chemical Geology  
166 (3-4): 341-350.

[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00233-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00233-8)

#### 著者情報



大谷侑也 (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) 2020年京都大学大学院文学  
研究科地理学専修修了、博士(文  
学)。2020年より現職。

(2022年3月31日掲載)