

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…？」と考えたそこのあなた。…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（CO₂）やメタン（CH₄）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¹⁾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。○ ○ノ型！ 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い

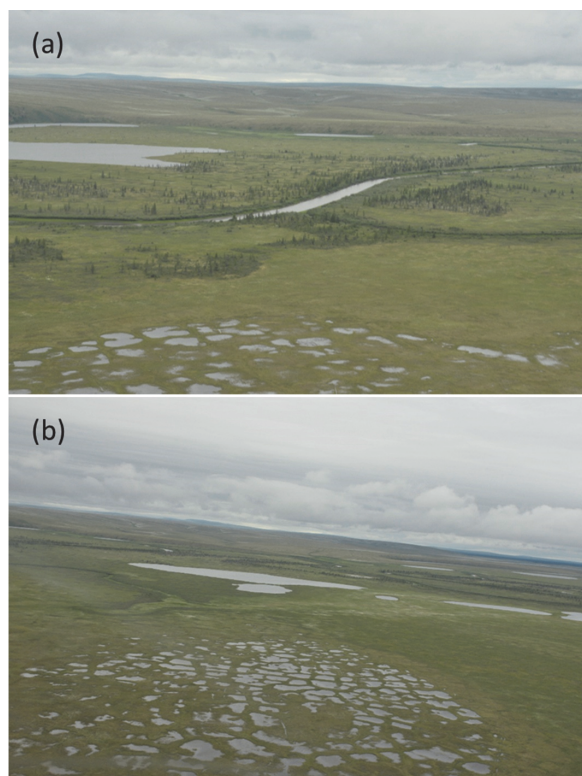


図 1. 北東シベリア・チョクダ周辺域におけるタイガ・ツンドラ境界 (a) とツンドラ湿地 (b)。タイガを構成する針葉樹（カラマツなど）とツンドラの背の低い草本類が交じり合って分布しています。ツンドラにはポリゴンという網目模様の微地形（地表面の凹凸）が見られ、凹みに水が溜まってツンドラ湿地を形成します。

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。日本でも近年暑いと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 ^{16}O と ^{17}O と ^{18}O が存在します。自然界の水分子は $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ 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 $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ と $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ が存在します（ $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$ や $^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ 、及び ^{17}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 $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ と $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ 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 ^1H に対する ^2H の存在比を“（水の）水素同位体比”、 ^{16}O に対する ^{18}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、 $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ に対する水同位体（ $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ と $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ ）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 ^1H や ^{16}O に対する ^2H と ^{18}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、 δ 値デルタを用いてももう少しわかりやすくします。この δ 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 δ 値のうち、 ^2H に関するものを $\delta^2\text{H}$ 、 ^{18}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得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発し、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

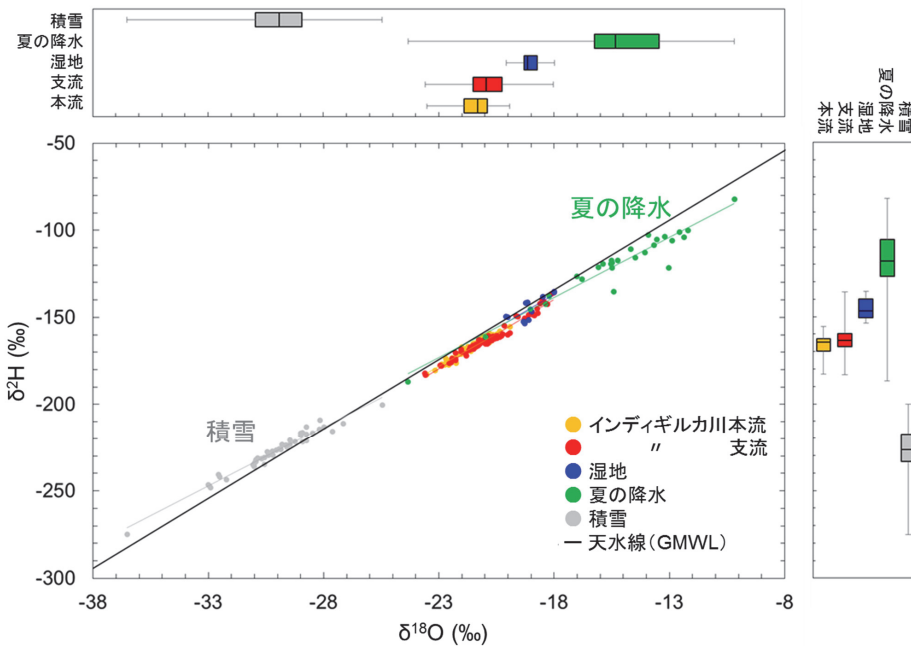


図2. チョクダ周辺域で採取した様々な水同位体比($\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ 座標)。インディギルカ川本流が黄、支流が赤、湿地が青、夏の降水を緑、積雪を灰で色分けしました。

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。

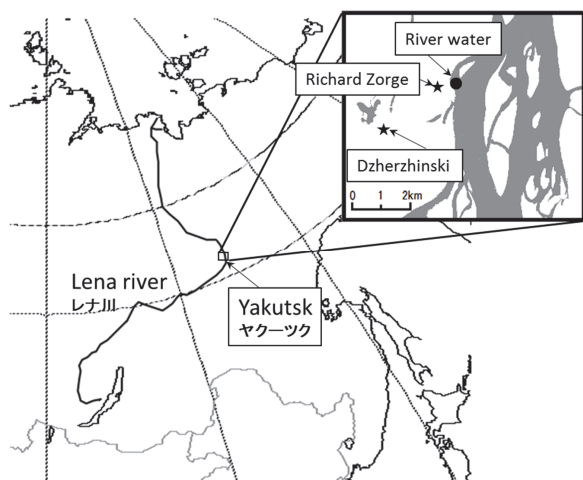


図3. 東シベリア・ヤクーツクとレナ川。右上のパネルはヤクーツク市内でのレナ川河川水と井戸水（Richard ZorgeとDzherzhinski）の採取地点を示しています。

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

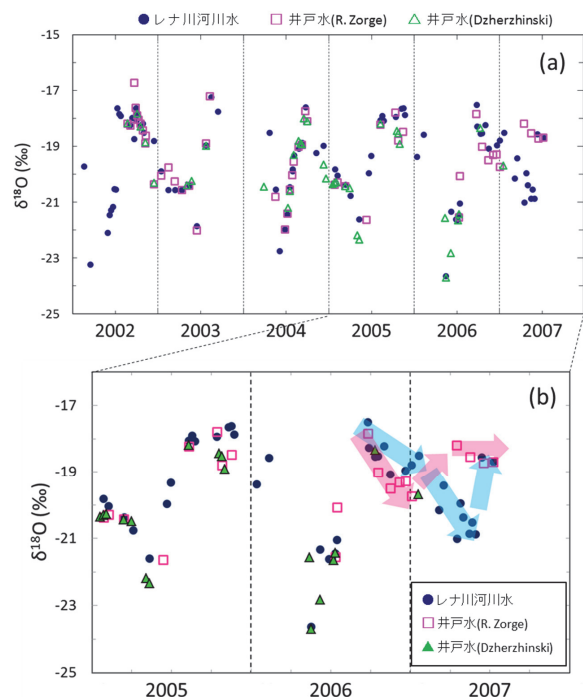


図4. レナ川と井戸水の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変化（鷹野卒論より一部改変）

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 δ 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 δ 値の春の急低下は融雪水（低 δ 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 δ 値）の流入によって引き起こされたと推定されます。

一方、ヤクーツ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 δ 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 δ 値が低下し、逆にレナ川の δ 値が急低下した 2007 年春（融雪期）には井戸水の δ 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 δ 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。

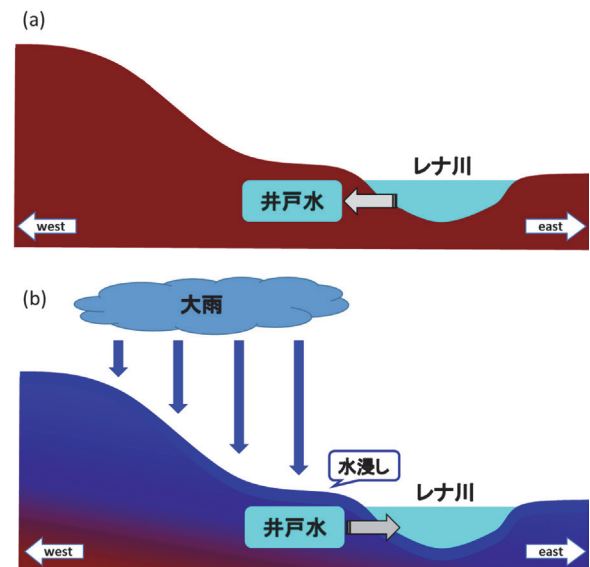


図 5. レナ川流域の断面図、通常の水の移動 (a) と 2006 年の大雨後の水の移動 (b)（鷹野卒論より一部改変）

5. 極北の地チョクルダ、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²⁾ 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ルダという村があり（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）、学術的にとても貴重且つ価値のある研究対象地域です。このチョクル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

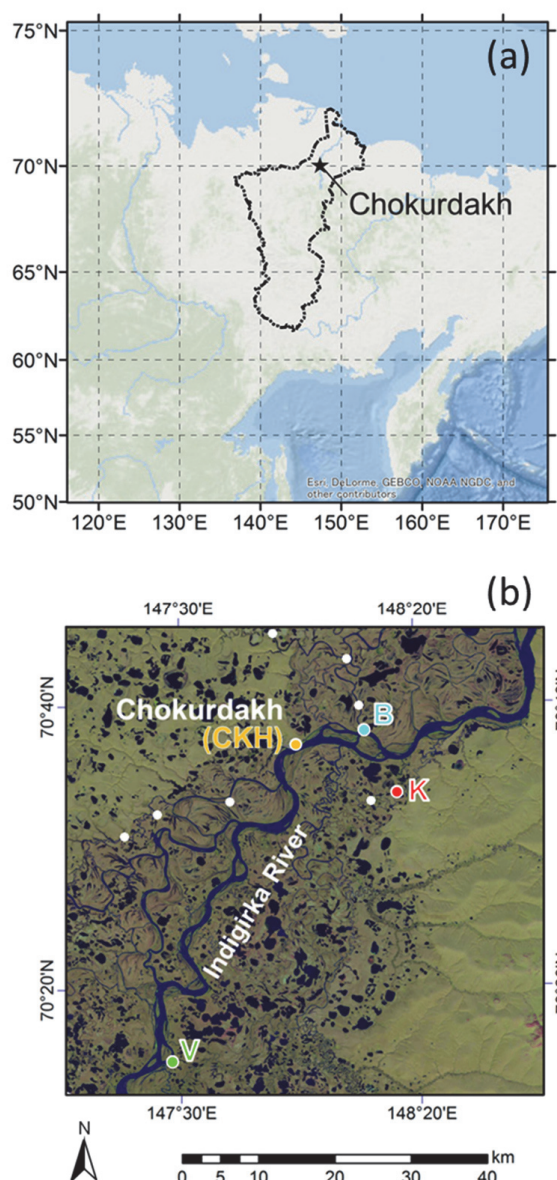


図 6. 北東シベリア・チョクルダとインディギルカ川。
(a) 内の実線はインディギルカ川の分水嶺を示しています。

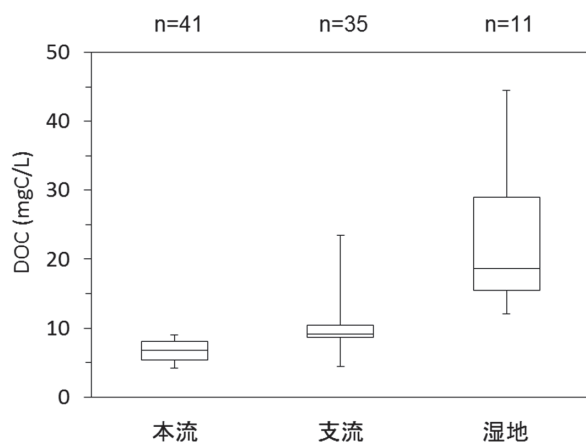


図 7. インディギルカ川本流と支流、湿地の DOC 濃度

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 δ 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 δ 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 δ 値の座標で示唆されましたが、本流と支流の夏期 δ 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 δ 値が本流よりも常に高く、共に δ 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)³⁾ 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 δ 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

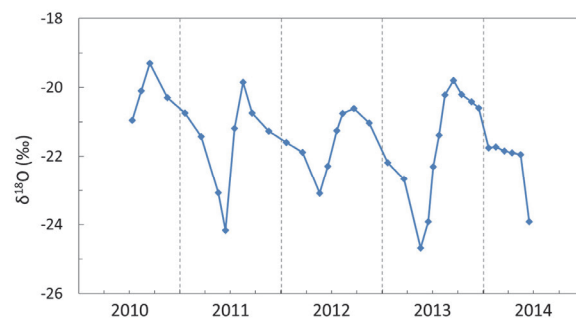


図 8. インディギルカ川本流の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変化

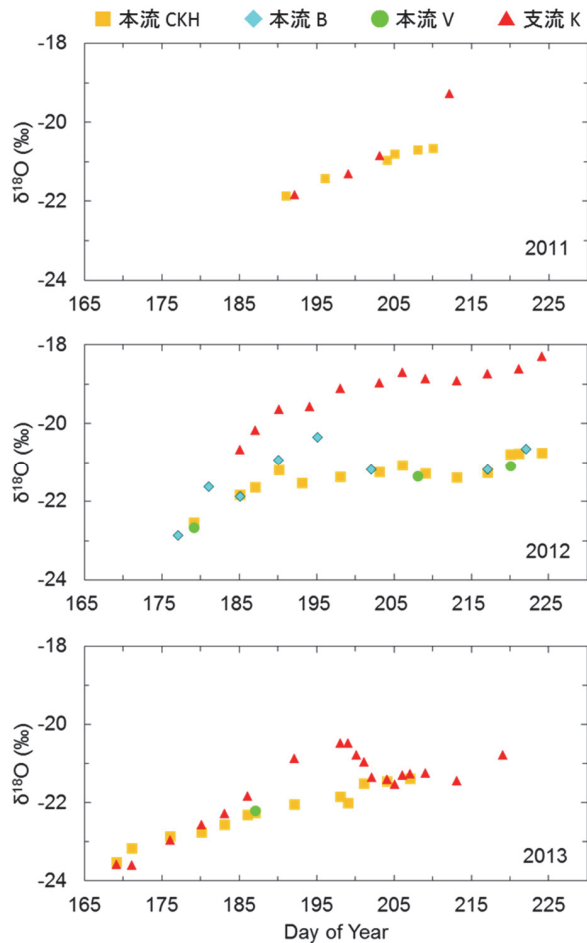


図 9. インディギルカ川本流と支流の $\delta^{18}\text{O}$ の夏期時間変化

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

この δ 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

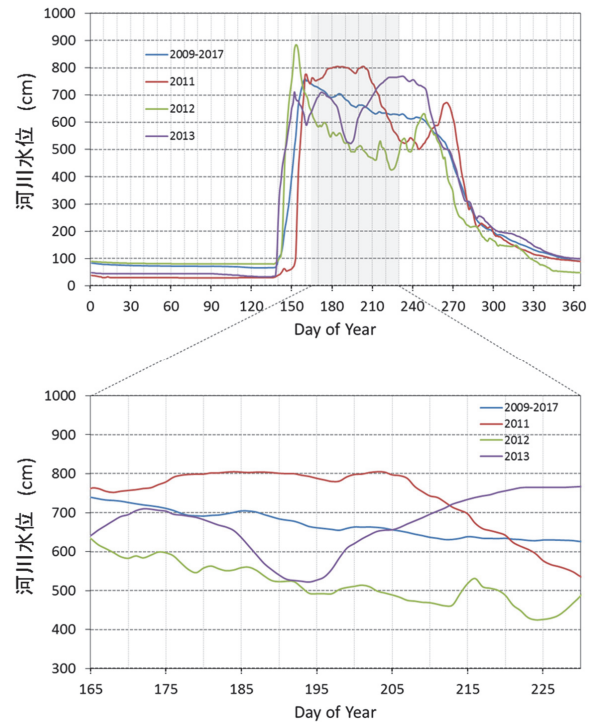


図 10. インディギルカ川本流の水位変動

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、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つ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 (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）