

## 平成 30 年度日本海学研究グループ支援事業 報告書

研究課題名：高低差 4000m の富山～森から海への物質循環像～

片境 紗希（富山大学大学院 理工学教育部 地球生命環境科学専攻 博士課程 1 年）

増田 亮介（富山大学大学院 理工学教育部 生物圏環境科学専攻 修士課程 2 年）

野嶋 航太（富山大学大学院 理学部 生物圏環境科学科 学部 4 年）

松野 諒大（富山大学大学院 理学部 生物圏環境科学科 学部 4 年）

### 【はじめに】

森林地帯から供給される栄養塩類は河川水や海底湧水によって富山湾へ供給され、沿岸域の生態系を支えている。このように森と海はつながっており、水は「森－海」をつなぐコンベアーベルトである。しかし近年、地球温暖化や土地利用の変化による、水循環系の変化に伴う栄養塩供給の変動が沿岸域の生態系に大きな影響を及ぼすことが予想されている。本研究では水循環を基軸とする森から海への物質循環像を明らかにすることを目的とし、以下の観点から研究を行った。

- ① 河川源流域における植生及び藻類と河川水中のミネラル・栄養塩の関係を把握する。（増田担当）
- ② 現場観測と過去データから平野部の河川水と地下水の水質形成と流動系を把握する。（片境担当）
- ③ 河川を通じて陸域から沿岸海域へ供給される物質量の把握および沿岸環境のモニタリングを実施する（野嶋・松野担当）。

### 【試料採取・分析項目】

本研究は大きく分け（1）河川現流域、（2）平野部、（3）沿岸域の 3 つを対象とした。

まず、（1）河川現流域は、富山県東部の常願寺川、角川、早月川において上流域周辺で田畑や住宅地のない地点を設定し、河川水試料と河川内の付着藻類を採取し、調査は融雪期の 5 月と渇水期の 10 月に行った。（2）平野部は、陸上の地下水と連動している海底湧水が存在する片貝川扇状地を重点調査地域に設定し、浅層地下水 18 地点および観測井 2 地点と河川 1 地点を対象とした。また、海底湧水は片貝川扇状地の沖合海域にある魚津市青島沖水深約 8 m で湧出しているものを調査対象とした。これらの地点において地下水・河川水は計 5 回採取し、2018 年 9 月にスキューバダイビングにて海底の潜水調査および海底湧水の直接採取を実施した。加えて（3）沿岸域では、陸域から富山湾への栄養塩などの物質供給量黒部川、片貝川、早月川、常願寺川、神通川、庄川、小矢部川の 7 河川の河口にて 2018 年 4～7、9～11 月の期間で月 1 回、計 7 回実施した。

採取した地下水、河川水、海底湧水の試料は現場でただちに水温、pH、電気伝導度を測定し、実験室にて主要化学成分濃度（栄養塩、陽イオン、陰イオン）を測定した。また、同位体分析は、総合地球環境学研究所所有の水同位体比分析装置（Picarro 社製・L2120-i, L2130-

i) にて水素・酸素安定同位体比 ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) を測定し、付着藻類、河川水中の懸濁態有機物 (Particulate Organic Matter : POM)、生物試料、堆積物は適宜前処理を行った後に、燃烧型元素分析計 (Flash EA1112) に接続された IRMS (DeltaV Advantage) にて測定を行なった。また、片貝川扇状地の観測井 (Fig.1(b) : D1, D2) における 2005~2015 年の水質モニタリングデータは魚津市、各河川の河川流量データは富山県および河川事務所から 1990~2018 年のデータを開示・提供していただいた。

## 【結果・考察】

### 1. 河川源流域における水・物質輸送状況の把握

#### 1-1. 水素・酸素安定同位体比からみる河川源流域の水の起源

一般的に河川水の起源は森林で涵養された降水であり、河川水の水素・酸素安定同位体比は降水がとりうる天水線 ( $\delta D = 8\delta^{18}O + d$ ) 上にプロットされる。さらに、富山県においては、夏季は太平洋由来の雨雲、冬季は大陸由来の雨雲によって降水がもたらされるため、夏季の降水は  $d=10$  の直線上、冬季の降水は  $d=30$  の直線上にプロットされることが知られている (水谷・佐竹 1997)。本研究では、中間の  $d=20$  の直線上にプロットされたことから、夏季と冬季の降水が地下に浸透し、十分に混合して河川水を形成していることが示された。

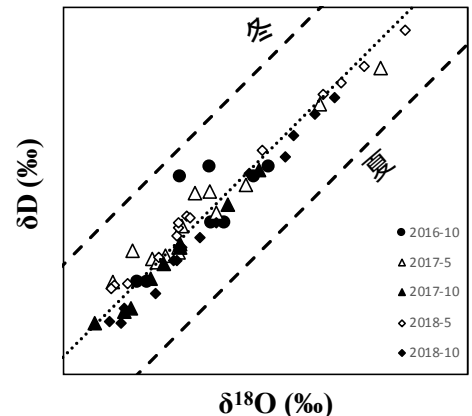


図 1. 河川源流域の水素・酸素安定同位体

#### 1-2. 森林を通過して河川へ供給される栄養素 (K, Ca, Na 等)

風化しやすい Ca に着目すると、Ca 濃度は  $HCO_3^-$  と高い正の相関関係を示し、炭酸塩鉱物 ( $CaCO_3$ ) の風化によって河川へ供給されていることが示された。 $CaCO_3$  は風化の過程で水と反応して  $Ca^{2+}$  と  $2HCO_3^-$  に変化することから、 $Ca^{2+}$  と  $HCO_3^-$  の濃度比によって「植生の影響を反映している地点」と「反映していない地点」を明らかにした。さらに植生の影響を反映している地点で Ca 濃度と  $HCO_3^-$  濃度の差を取り、植生割合との関係性を評価したところ、針葉樹割合と有意な正の相関関係を示した。また、Na, K, Mg についても、 $SiO_2$  濃度および針葉樹割合と正の相関関係を示した。一般的に、河川水中の  $SiO_2$  は、降水には含まれず岩石の風化由来であることが明らかになっており、風化の指標として用いられる (Gaillardet et al, 1999)。これらのことから、カチオン元素は岩石の風化によって河川へ供給されており、植生の違いは風化に影響を及ぼしていると考えられた。さらに、降水が森林域を通過し、河川水になる過程で、Ca で 200 倍、Na で 6 倍、K で 8 倍、Mg で 10 倍程度付加されていることが示された。Sheila et al. 2006 による研究では、近傍の 2 河川において行われ、母岩、傾斜、標高、流域面積等の地形的な差異はほとんど見られないにも関わらず、Ca 及びそのほかの

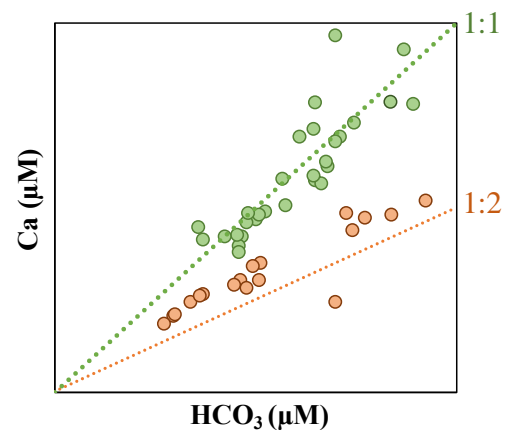


図 2. 河川水中の Ca,  $HCO_3^-$  濃度

カチオン元素の流出に違いが見られた。Sheila らは流出先の河川水中のカチオン濃度に違いが見られる原因として、植生の違いに起因する無機化・硝化率の違いが風化の進行度に影響を及ぼしたためであると説明している。さらに、Ohta et al (2017) でも、集水域内を針葉樹であるスギが優占する河川と常緑広葉樹が優占する河川を比較しており、集水域内にスギが優占している河川水でカチオン濃度が有意に高かった。本研究はこれらの結果と矛盾しない。また、樹種の違いによって根から放出される酸性物質の強さや放出量が異なるという報告 (Ohta and Hiura. 2016) やスギでは樹幹流の pH が他の種に比べて低いという報告がある (Kaneko and Kofuji. 2001)。植生の違いによる、無機化・硝化、植物から放出される酸性物質等の違いが河川への栄養塩流出に影響を及ぼした可能性が考えられた。

### 1-3. 付着藻類から読み取る森林から河川への栄養塩供給

本研究において、硝酸濃度と各植生割合の間に有意な相関関係は見られなかった。この理由として森林内での窒素循環の複雑さがあげられる。そこで、硝酸態の酸素安定同位体比を測定して得られる  $\Delta^{17}\text{O}$  という指標から河川水の気由来の硝酸と森林由来の硝酸の混合比を求めた。 $\Delta^{17}\text{O}$  は硝化によって生成する硝酸が環境中の酸素 ( $\text{O}_2$ ) や水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) の酸素原子に由来し  $\Delta^{17}\text{O}$  が 0 になるのに対して、気由来の硝酸は  $\text{NO}_x$  がオゾン ( $\text{O}_3$ ) との光化学反応を経て生成するため  $\Delta^{17}\text{O}$  が 1 よりも大きい値をとるため、硝化に由来する硝酸と気由来の硝酸を区別することが可能である。また、 $\Delta^{17}\text{O}$  の値は植物による同化や微生物による分解などの反応によって変化することはないため、硝化由来の硝酸と気由来の硝酸の混合比を反映した値となっており、気由来の硝酸の影響を評価することができる (Michalski et al. 2004, Tsunogai et al. 2010)。結果は、本研究地域の河川水中の硝酸は 9 割以上が森林由来であることが明らかになった。さらに、多くの地点で降水の加重平均値より低い濃度であった。これらのことから、降水中の硝酸の多くは森林内でトラップされ、再利用されたのちに河川へ流出していると考えられた。しかし、これらは瞬間的な情報であり、より長い期間で植生の影響を評価するために付着藻類の  $\delta^{15}\text{N}$  について評価した。付着藻類の  $\delta^{15}\text{N}$  と涵養源標高の間に、特徴的な傾向が見られた (図 4)。

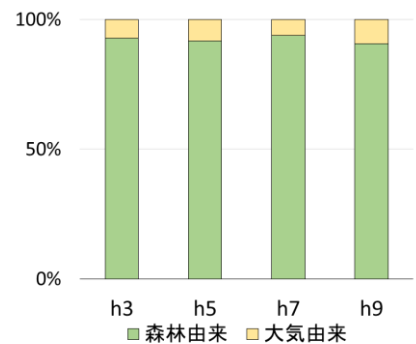


図 3. 河川  $\Delta^{17}\text{O}$  から算出した気由来及び森林由来の硝酸の各割合

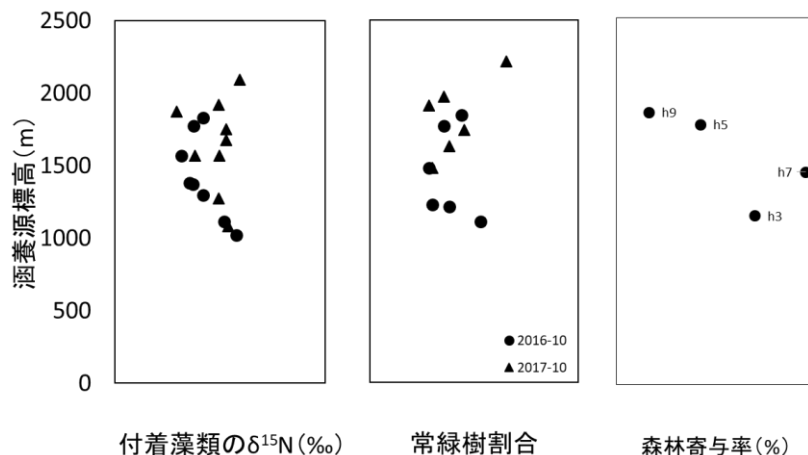


図 4. 涵養源標高と付着藻類の  $\delta^{15}\text{N}$ 、常緑樹割合、森林寄与率

また、植生と付着藻類の  $\delta^{15}\text{N}$  については、常緑樹割合と正の相関関係を示し、植生は河川への硝酸流出に影響を及ぼしていると考えられた。Smith et al (2016) は落葉広葉樹林と常緑針葉樹林を比較した研究で、広葉樹は分解されやすいリターを供給することで窒素循環の回転率（無機化→吸収および流出）の上昇を示した。これは、落葉広葉樹林では、常緑針葉樹林に比べて  $^{14}\text{N}$  の流出が大きいことを意味している。本研究では常緑針葉樹割合の高い河川で  $^{14}\text{N}$  の流出が減少し、相対的に同位体比が高くなったと考えられた。以上の結果から付着藻類は上流の針葉樹割合を反映していると考えられた。

## 2. 平野部から沿岸海域への水・物質輸送状況の把握

### 2-1. 水素・酸素安定同位体比からみる河川水・地下水の起源とその変化

河川水の  $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$  値は季節変化がみられたものの、 $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+20$  の天水線上に分布し、河川ごとにまとまった値を取った。この結果から、富山県の河川水は夏季と冬季の降水がよく混合し平均化された水であり、また各河川の同位体比の違いは、集水域の平均高度の違いによるものであると示唆された。さらに、本研究の結果と過去に本研究室で分析された結果を河川ごとと比較すると、すべての河川で過去よりも現在の方が同位体比は低くなっており、複数の河川では夏季の天水線 ( $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ ) に近く傾向がみられた。これは富山県の降水量の変化が大きく関係していると考えられる。実際、富山県では過去 30 年間で降雪量が約 6 割減る一方、降水量は約 3 割増加している（富山地方気象台データ）。この変化を考慮すると、富山県では山間部で降るはずだった雪が雨に変わり標高の高い場所を起源とする水が増加したことで同位体比の低下が起り、さらに河川水中の雪解け水が減少することで冬季の影響が弱まっていると考えられる。同様の変化は、片貝川扇状地の地下水でも確認された。したがって、平野部の地下水も河川水と連動して同位体組成が大きく変化していることが明らかとなった。

### 2-2. 富山県の陸域から富山湾沿岸海域への栄養塩輸送状況とその変化

河川水および地下水の  $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$  値から、それらの水の起源は過去と比較して大きく変化していることが分かった。つまり、水の起源が変化すれば陸域から沿岸海域へ供給される物質も変化している可能性がある。そこで、本研究では、富山県全体の陸域から沿岸海域への物質供給量、特に栄養塩に着目して供給量の算出およびその変化の特徴の評価を行った。

算出に使用する富山県の水収支は、八田ら (2005) の報告値を基準として河川水量、海底湧水湧出量を設定した。まず、本研究で対象とした 1 級河川の黒部川、常願寺川、神通川、庄川、小矢部川の河川流量は、富山県の陸域における河川水全体量の約 65% を占めることが分かっている（富山湾水質保全研究会, 2001）。この報告値を用いて、5 河川で実際観測された河川流量から富山県の全河川流量を算出した。この時、河川流量は降雪量の変動に合わせ、(1) 1997-2007 年と (2) 2007-2016 年の 2 シーズンに分け月別河川流量を算出した。また、海底湧水湧出量は八田ら (2005) で報告されている河川水量の 25% を採用した。

これらの条件で算出した河川水量、海底湧水湧出量を用いて、陸域から沿岸海域への溶存栄養塩供給量を見積もった。算出時に使用する河川水および海底湧水の溶存栄養塩濃度 ( $\text{NO}_3$ 、 $\text{PO}_4$ ) だが、(1)1990-2007 年については富山湾漁場環境総合調査 (2005) と小山ら

(2003) の報告値を、(2)2007-2016 年は本研究の分析値を用いて計算した。

算出結果から、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{PO}_4$  ともに、陸域から富山湾への供給量が激減しており、 $\text{NO}_3$  は最大 5 割、 $\text{PO}_4$  は最大 9 割減少していることが示された。このように減少した原因として、これまで議論してきた降雨量増加も関係していると考えられるが、それに加えて河川整備工事や農耕地の減少といった土地利用の変化が効いている可能性が高い。今後はそれらとの関係性も考慮した上で定量的な影響評価を実施したいと考えている。