

平成29年度学生による地域フィールドワーク研究助成事業 研究成果報告書

- 機関及び学部、学科等名： 富山大学大学院 理工学教育部
- 所属ゼミ等： 環境化学計測第2講座
- 指導教員： 張 勁
- 代表学生： 片境 紗希（生物圏環境科学専攻 修士課程2年）
- 参加学生： 神林 翔太（地球生命環境科学専攻 博士課程3年）
増田 亮介（生物圏環境科学専攻 修士課程1年）

【研究題目】

「恵みの水循環」のビジュアル化
～水循環を軸とした自然と人の富々富な社会 “水の王国とやま”の構築に向けて～

1. 課題解決策の要約

本研究では山地から沿岸海域までに存在する水、河川水・地下水・海底湧水に着目し、それらの特徴および関係性の把握を通して、富山の水循環の評価を試みた。その結果、片貝川扇状地の地下水の起源は森林地帯であると推測され、海底湧水も同様の特徴があることが分かった。したがって、森林域の保全は、平野部の地下水だけではなく海底湧水、さらには沿岸海洋環境の保全につながる事が明らかになった。また、海底湧水や河川から富山湾へ供給される栄養塩量を算出すると、過去と現在で差がみられないことが推定され、富山の水循環は平野部に豊かな水を育むだけでなく、沿岸生態系も支えていることが明らかになった。

2. 調査研究の目的

水は大気-陸地-海の間を循環し、繰り返し利用される公共性の高い資源である。富山の水の恵みは、自治体による水の販売や清水の観光資源化、県内企業の産業基盤等様々な形でPRされている。しかし、科学的な水循環の現状把握が不十分であり、科学的な根拠の追求がより効果的なPRのために不可欠である。そこで、本研究では県東部を中心として山地から沿岸海域までに存在する水の特徴を把握し、「森-里-川-海」のつながりにおける富山の水循環の構造を可視化することを目的とした。

3. 調査研究の内容

富山県は、3000 m級の立山連峰から沿岸海域までの環境がわずか数十 kmに収まるといった非常に急峻な地形をもつ。その特異的な環境の中で、水は河川水・地下水といった複数の経路を経て森林域から海へと流入する。この一連の水循環の流れを把握するために、地下水・河川水の調査を実施した。地下水は、県東部に位置する片貝川扇状地において、2017年7～9月、11月の4回16地点で調査を行い(図1(a))、河川水は片貝川の河口にて2017年6～9月、11月の5回調査を実施した。採取した試料は現場にて水温、電気伝導度、pH、酸化還元電位の観測を行い、実験室にて主要イオン成分(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)や栄養塩(リン、ケイ酸、硝酸)の測定を行った(図2)。また、水素・酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$ ・ δD)は、総合地球環境学研究所にて測定を実施した。これらの調査・化学分析の結果を用いて、溶存主成分は水質を評価し、水素・酸素安定同位体比は水の起源の指標として、片貝川扇状地の地下水の起源の詳細や栄養塩の輸送状況の把握を試みた。さらに、研究室および市町村に蓄積されている化

学分析データ(図1(b))の再解析も行うことで、過去と現在の地下水および河川水から海へ輸送される栄養塩量の比較を行った。

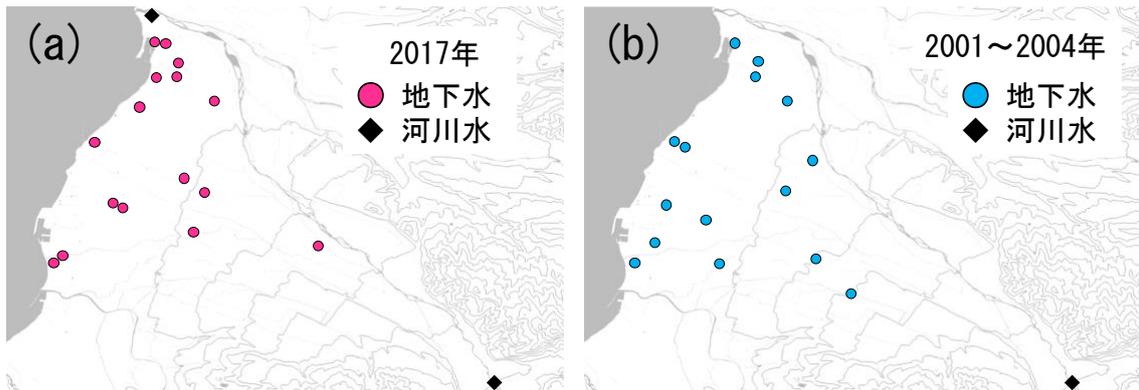


図1：試料採取地点



図2：試料採取・分析の様子

4. 調査研究の成果

4.1 山から里へのつながり～片貝川扇状地の地下水の起源と涵養状況の把握～

図3にモニタリング井の地下水位から標高を考慮し算出した2001年における地下水位等高線の分布を示す。片貝川扇状地の地下水は矢印の方向に流動しており、特に地下水位等高線の間隔が広い扇状地の北部～中央部では、より多くの水が供給されていることが示唆された。このような場所での地下水位の違いは、降水や河川水の浸透程度の違いによるものと考えられたことから、地下水の涵養源や季節変化を把握する上で重要な情報である水素・酸素安定同位体比を使って、地下水の起源解析を行った。

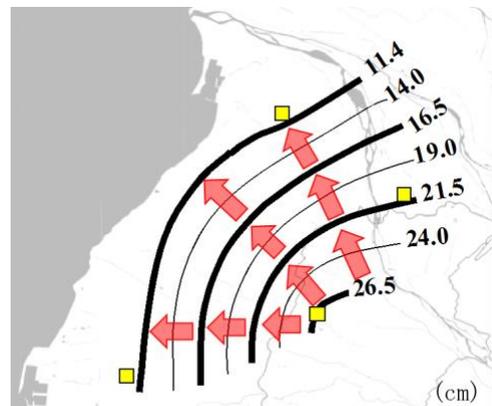


図3：地下水位等高線

図4に片貝川と地下水の水素・酸素安定同位体比の関係を示す。富山県の降水の水素・酸素安定同位体比は季節によってその値が異なり、夏季は $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 、冬季は $\delta D = 8\delta^{18}O + 30$ の直線上に分布することが知られており(水谷・佐竹, 1984)、この直線式のことを一般的に天水線と呼ぶ。また、富山県の降水起源の地下水の一年の平均値は、 δD は $-48 \sim -50 \text{ ‰}$ 、 $\delta^{18}O$ は $-8.7 \sim -8.9 \text{ ‰}$ であることが報告されている(水谷・佐竹, 1997)。これらの先行研究と本研究で得られた結果を比較すると、片貝川扇状地の地下水のプロットは夏季と冬季の天水線の間分布することがわかった。このことから、片貝川扇状地では、夏の降水と雪解け水がよく混合して地下水となっていることが明らかとなった。さらに、この片貝川扇状地の地下水は、降水起源の地下水と片貝川の河川水の間プロットされていることから(図4)、この両者が地下水の涵養源であることが示唆された。そこで、2001～2002年と2017年のそれぞれの酸素同位体比の平均値から、(式1)を用いて河川水の寄与を算出した。

$$\text{River contribution} = \frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{sample}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{rain}}}{\delta^{18}\text{O}_{\text{river}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{rain}}} \dots (\text{式 1})$$

River contribution、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sample}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{rain}}$ および $\delta^{18}\text{O}_{\text{river}}$ はそれぞれ河川寄与率、試料、降水および河川水の酸素・水素安定同位体比を表す。図 5 に河川水の寄与率を示す。北部から中央部にかけて、河川水の寄与率が非常に高かった。図 2 に示した地下水の流動方向の結果と合わせると、片貝川扇状地の北部から中央部では片貝川の河川水が浸透し、地下水を形成していることが明らかとなった。

さらに、水の起源となる標高を求めるために水谷・佐竹 (1988) の式 (式2) を用いて、2001~2002 年における地下水の酸素同位体比の平均値から算出した。

$$\delta^{18}\text{O} = -(0.00236 \pm 0.00016)h - (8.68 \pm 0.22) \dots (\text{式 2})$$

$\delta^{18}\text{O}$ および h は酸素同位体比および河川の集水域の平均高度を表す。算出された値から、河川水の寄与率が低い地下水は標高 300~400 m、河川水の寄与率が高い地下水では標高 550~800 m が起源であると推定された。これらの標高には森林が存在しており、特にミズナラ・ブナが優占種であることが報告されている (中島・小林, 2014)。以上より、片貝川扇状地の地下水は、平野部よりも標高が高いミズナラ・ブナ林が起源であることが示唆された。

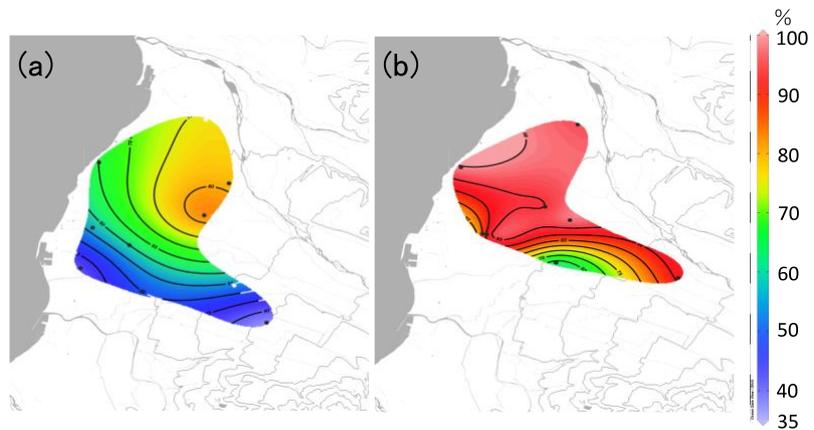


図5：不圧地下水の河川寄与率 (a) 2001~2002年平均、(b) 2017年平均

4. 2 里から川・海へのつながり～陸域から富山湾沿岸域へ供給される栄養塩量の把握～

富山県東部では、陸域の地下水が直接海底から湧出する海底湧水の存在が確認されており、本研究の対象地域である片貝川扇状地の沿岸域における海底湧水は、平均標高 850 m の地域から浸透した水が 10~20 年後に海底で湧出していることが明らかにされている (Zhang and Satake, 2003)。また富山湾では、海底湧水の湧出量が河川水流入量の約 0.3 倍であるのに対し、供給する栄養塩量は河川水の 1.2~2 倍であり、海底湧水は富山湾の生態系を支えていることが科学的に実証されている (八田ら, 2005; Hatta and Zhang, 2013)。この海底湧水と陸域の地下水の関係性を把握するために、研究室に蓄積されている化学分析データの再解析を行った。図 5 に 2004 年に測定された海底湧水・地下水・片貝川河川水の酸素同位体比、硝酸態窒素の窒素同位体比、硝酸イオン濃度の関係性を示す。図 5 から、海底湧水は窒素同位体比および硝酸イオン濃度が低く、片貝川河川水や地点 1 の値と類似していることが明らかになった。硝酸態窒素の窒

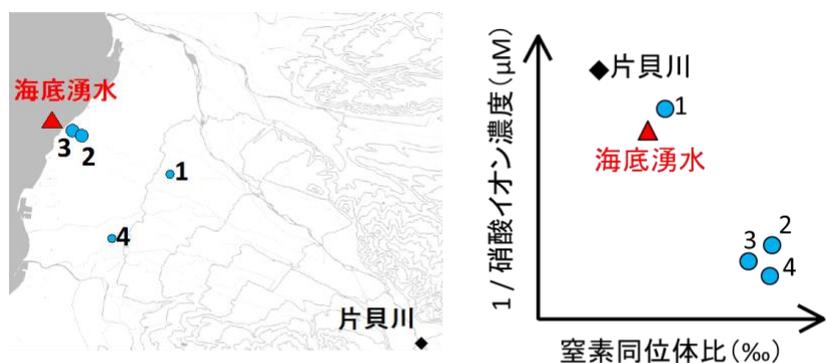


図6：窒素安定同位体比と硝酸イオンのグラフ

素同位体比、硝酸イオン濃度の関係性を示す。図 5 から、海底湧水は窒素同位体比および硝酸イオン濃度が低く、片貝川河川水や地点 1 の値と類似していることが明らかになった。硝酸態窒素の窒

素同位体比や硝酸イオン濃度は、自然由来では値が低く、肥料や生活排水などの人為的影響が加わると値が高くなる特徴をもつ（永田・宮島，2008）。したがって、片貝川扇状地の沿岸海域に存在する海底湧水は、森林域から浸透した水が人為的影響をほとんど受けずに湧出した水であることが示唆された。しかし、地下水は地点1から地点3の方向へと流動しているのに対し、海底湧水の地点に近い地点2・3の地下水の値が大きく異なっていた。このことから、海岸線付近の地下水流動は深度によって複雑であることが推測された。今後は、井戸深度と地質情報を加味し、より詳細な解析をする必要がある。

さらに本研究では、海底湧水と河川から富山湾へ供給される栄養塩量を見積もり、過去と現在の栄養塩供給量の比較を行った。海底湧水の湧出量は Zhang et al. (2017)によって報告されたモデル計算された値を使用し、河川流量は国土交通省

(<http://www1.river.go.jp>) および魚津市から提供していただいた値を使用した。算出の結果は図6および図7に片貝川および海底湧水から供給される栄養塩量を示す。片貝川や海底湧水から供給される硝酸態窒素は誤差の範囲内で横ばいであるのに対し、リン酸態

リンは、片貝川で減少し、海底湧水では増加していた。陸域から供給される栄養塩は主に河川から海へ供給されているが、河川水と海水の密度差が大きいため多くの季節で栄養塩が海の表層付近にのみ供給され、より深い場所では供給されにくい。しかし、栄養塩濃度の高い海底湧水は、海底付近での栄養塩の不足を補うことができる。さらに海洋植物プランクトンの一次生産過程における栄養塩元素比は、Redfield et al. (1963)によって $N : P = 16 : 1$ と報告されており、主に N や P などの供給量によって一次生産過程が制限される。片貝川から供給される栄養塩の場合 $N : P = 156 : 1$ 見積もられたことから、栄養塩供給源が河川のみの場合リンが植物プランクトンの制限因子であることが推察された。しかし、海底湧水によって多量のリンが富山湾へ供給されていることから、これが片貝川扇状地沿岸の一次生産に重要な役割を果たしていることが示唆された。

5. 調査研究に基づく提言

本研究では富山の水循環の特徴を把握および評価を行うために、片貝川と片貝川扇状地を対象としてフィールド調査を行い、河川水と地下水を採取した。試料の化学分析と研究室および市町村に蓄積されている化学分析データの再解析を通じて得られた結論は以下の通りである。

- ① モニタリング井の地下水位結果および化学分析結果から、片貝川扇状地の地下水は主に片貝川から供給されており、夏の降雨と春の雪解け水がよく混合して形成されていることが明らかとなった。
- ② 酸素同位体比の結果から、扇状地の地下水起源は標高 300～800 m の森林域(ミズナラ・ブナ林)であることが分かり、森林域が平野部の地下水と密接に関係があることが示された。ま

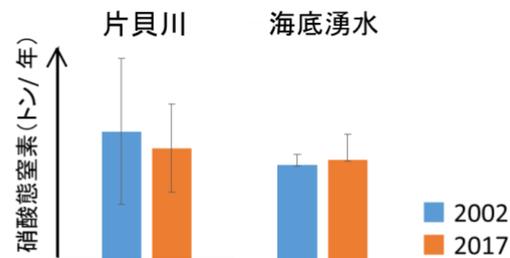


図7：片貝川および海底湧水から供給される硝酸態窒素供給量

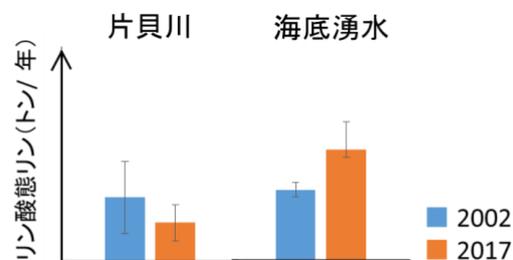
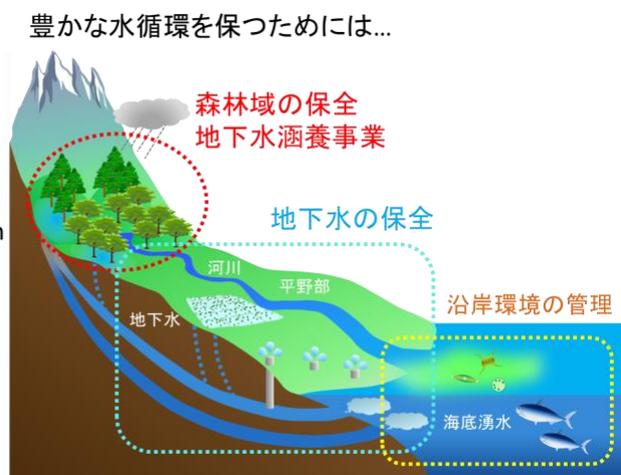


図8：片貝川および海底湧水から供給されるリン酸態リン供給量

た、片貝川扇状地の沿岸海域に存在している海底湧水の起源は、地下水と同じであることが分かった。

- ③海底湧水や河川から富山湾へ供給される栄養塩量を、過去と現在で比較した結果、片貝川のリン酸態リンの供給量は減少しているのに対し、海底湧水によるリン酸態リンの供給量が増加している可能性が示された。

これらのことから、富山の水循環は平野部に豊かな水を育むだけでなく、沿岸生態系も支えていることが明らかとなった。すなわち、森林域を管理・保全を行うことが、平野部の地下水だけではなく海底湧水の保全につながり、さらには沿岸海洋環境の保護につながると言える。



6. 課題解決策の自己評価

本研究は、地下水の起源評価や栄養塩供給量を算出することで、山地から沿岸海域までに存在する水の特徴を把握し、「森-里-川-海」のつながりにおける富山の水循環の構造を可視化することを目的とした。森林域の保全など具体的な保全対象の提案を行ったが、今後は海底湧水の実測をはじめ、さらに化学データを蓄積していくことで、地球温暖化などの気候変化や土地利用・地下水利用状況などの変化との関係性を明らかにしていきたいと考えている。その結果をもとに、持続可能な水利用のより具体的な対応策を提案することを目指していきたい。

謝辞

本研究は、「平成 29 年度学生による地域フィールドワーク研究助成事業」を受けたものである。また、データ提供をして頂いた魚津市役所に深く感謝申し上げます。

引用文献

1. 佐竹 洋, 向井 利明, 水谷 義彦(1984): D, T, $\delta^{18}\text{O}$ から見た北陸地方の降水と河川水の水文学的特徴, 富山大学トリチウム科学センター研究報告, 3, 45-56.
2. 水谷 義彦, 佐竹 洋(1988): 地下水かん養源の指標としての河川水の水素および酸素同位体組成, 39巻 4号, 287-297.
3. 中島 春樹, 小林 裕之(2014): 富山県における植生図から区分した森林タイプ別および民有林と国有林別の森林分布, 富山森林研究所研究報告, 6, 1-12.
4. 八田 真理子, 張 勁, 佐竹 洋, 石坂 丞二, 中口 謙(2005): 富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス, 地球化学, 39 巻 3号, 157-164
5. Zhang, B., Zhang, J., Yoshida T. (2017): Temporal variations of groundwater tables and implications for submarine groundwater discharge: a 3-decade case study in central Japan, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3417-3425.
6. Hatta, M., Zhang J. (2013): Temporal changes and impacts of submarine fresh groundwater discharge to the coastal environment: A decadal case study in Toyama Bay, Japan, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 118 5, 2610-2622.
7. Redfield, A.C., Ketchum, B.H. and Richards, F.A. (1963): The Influence of Organisms on the Composition of the Sea Water. In: Hill, M.N., Ed., *The Sea*, 2, Interscience Publishers, 26-77.