

2022 年度日本海学研究グループ支援事業 報告書

研究課題名：海底湧水による富山湾沿岸の溶存 CO₂ 供給とその長期変化 ～富山県の少雪・多雨化に着目して

北澤 唯佳（富山大学 持続可能社会創成学環 グローバル SDGs プログラム 修士課程 1 年）
代表

片境 紗希（富山大学 学術研究部理学系）

【はじめに】

年間降水量（2000 mm 以上）が全国トップクラスである富山県では、冬季の降雪が年間降水量の 3～5 割を占め、その豊富な降雨・降雪は、河川水や地下水の形で、富山に豊富な水資源をもたらしている。しかし近年、地球温暖化の進行により、富山県では 1970-1980 年代と比較して平均降雪量の半減、冬季降雨量の倍増などの影響がみられており、富山県東部の片貝川扇状地では、この少雪・多雨化によって河川流量と淡水性海底湧水の湧出量が最大 3 割増加したことが示されている（Zhang et al., 2017）。この富山県の陸水における量的変化は河川水や地下水の水質に変化を引き起こし、流出先の沿岸域の生態系へ影響を及ぼすことが危惧されている。本研究の目的は、海底面から湧き出る陸上地下水（海底地下水湧出；以下、海底湧水）が確認されている富山県東部片貝川扇状地とその沿岸海域を対象に、海底湧水と河川からの物質供給量を明らかにし、気候変動への適応策を検討することである。2021 年度の調査では、淡水性海底湧水を中心とする陸水システムにおける涵養標高の上昇と地下水の酸性化および滞留時間の短縮が確認され、さらに陸から沿岸海域への栄養塩供給量が 20 年前と比較して減少していることが明らかとなった。今年度は以下の観点で研究を遂行し、気候変動への適応策を検討する。

①海底湧水系地下水の水質と起源を把握する。

②現在魚津市によって行われている地下水涵養事業の有効性を検討する。

【試料採取・分析項目】

1. 研究対象地域および試料採取

本研究の対象地点を図 1 に示す。海底湧水の存在が確認されている片貝川扇状地において水試料は扇頂部で片貝川河川水、また扇頂部の地下水の代表として 別又涵養田(図 1(c))の表層水を採取した。加えて扇中央から扇端にかけて浅層地下水を採取した(図 1(b))。採水は 2021 年 2 月から 2022 年 9 月の間で 1～2 ヶ月に 1 度行った。また別又涵養田にて水中の植物や昆虫等の生物、POM、堆積物の採取を行なった。

2. 試料分析

採取した試料は現場で水温, pH, EC, ORP を測定し、実験室に持ち帰り当日中に HCO_3^- 濃度の分析と濾過を行なった。その後主要溶存成分濃度(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) はイオンクロマトグラフ(Metrohm 883 Basic IC plus)を用い、栄養塩(SiO_2 , PO_4)濃度はオートアナライザー(QuAAtro 2-HR)で分析を実施した。これら溶存成分の分析精度は $\pm 5\%$ 以内であった。 ^{222}Rn 濃度は RAD7(DURRIDGE)の Big Bottle System(SD: $\pm 5\%$)、酸素・水素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$ ・ δD)は Picarro L2130-i (SD: $\delta^{18}\text{O} = \pm 0.13\%$ 、 $\delta\text{D} = \pm 0.17\%$)を用いて測定した。別又涵養田で採取した生物、POM、堆積物は凍結乾燥し粉砕した後、EA-IRMS によって炭素・窒素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$)を測定した(SD: $\delta^{13}\text{C} = \pm 0.12\%$ 、 $\delta^{15}\text{N} = \pm 0.24\%$)。

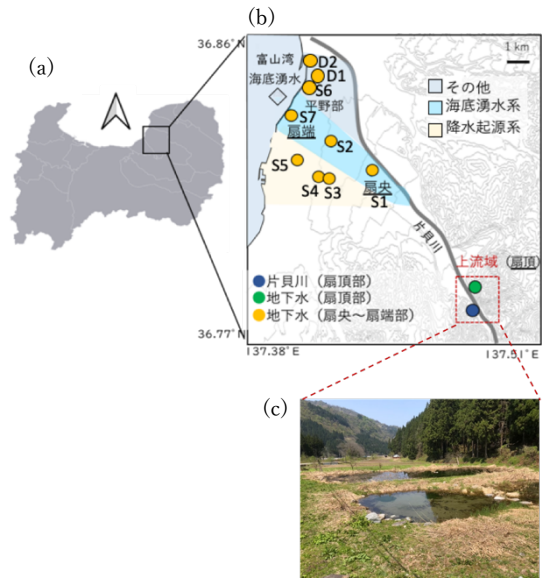


図 1. 採取地点と涵養田の様子

【結果・考察】

1. 溶存成分と酸素・水素安定同位体比を用いた地下水の起源評価

主要溶存成分からみた浅層地下水の水質は Ca-HCO_3 型であり、1年を通して安定していることがわかった。また富山県の降水の酸素・水素安定同位体比は季節によって値が異なり、夏季は $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 、冬季は $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 30$ の直線上に分布することが知られているが(水谷・佐竹,1997)、本研究で得られた片貝川扇状地浅層地下水は夏季と冬季の天水線の間に分布していること図 2 からわかる。これは、片貝川扇状地の地下水が夏と冬の降水がよく混合した水であることを意味する。また、異なる地点、時期で採取した地下水試料でも酸素・水素安定同位体比の値が類似していることから、扇頂から扇端にかけて地下水の水質や起源が安定していることが示唆された。また、酸素・水素安定同位体比の値から、その涵養標高は現在地下水涵養

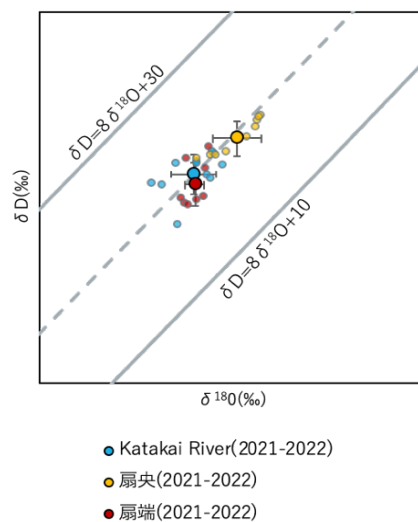


図 2. 酸素・水素安定同位体比の分析結果

事業が行われている扇頂部から中山間地域の標高であることが明らかとなった。涵養標高

の推定には、水素・酸素同位体比の分析値と下記の経験式（水谷・佐竹，1984）を用いた。

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

さらに、天然放射性同位体である ^{222}Rn は堆積物中の ^{226}Ra からの生成と ^{218}Po への崩壊を繰り返し、一般的に河川水など表層を流れる水では濃度が低く、地下水中には高くなるという性質があり、地下水流動のトレーサーとして利用される。（例：松本ら，2005）本研究では地下水中の ^{222}Rn 濃度は1年を通して安定しており、扇央と扇端の海底湧水系地下水で類似していた。この結果は、平野部において海底湧水系地下水への新たな水の流入が極めて小さいことを示す。

これらの結果から、片貝川扇状地の海底湧水系地下水は1年を通して扇頂から中山間部を起源とし、平野部での水の流入はほとんどないということが考えられた。

2. 酸素・水素安定同位体比と Cl⁻を用いた地下水起源の解析

海底湧水系の地下水における各起源の寄与率を推定するために、酸素・水素安定同位体比と Cl⁻濃度を用いて起源解析を行った。先行研究によって片貝川扇状地地下水の起源として明らかとなっている片貝川上流の河川水、平野部の降水起源の地下水、それに本研究で注目している別又涵養田の表層水を加えて、下記の連立方程式から3つの起源の寄与率を求めた。

$$\begin{cases} a+b+c=1 \\ \text{Cl}^-_{\text{河川水}} \times a + \text{Cl}^-_{\text{涵養田}} \times b + \text{Cl}^-_{\text{降水起源地下水}} \times c = \text{Cl}^-_{\text{地下水}} \\ \delta^{18}\text{O}_{\text{河川水}} \times a + \delta^{18}\text{O}_{\text{涵養田}} \times b + \delta^{18}\text{O}_{\text{降水起源地下水}} \times c = \delta^{18}\text{O}_{\text{地下水}} \end{cases}$$

a、b、c はそれぞれ河川水、涵養田表面水、降水由来の地下水の混合比を表す。求めた寄与率を図3に示す。地点によって起源ごとの寄与率は異なるものの、採水標高がほぼ同程度で水質の似ている片貝川上流と別又涵養田の表層水を合わせて「河川上流域」とすると、その寄与率は最大で9割にも及ぶということが明らかとなった。これらの化学データから、現在河川上流域にて行われている地下水涵養事業は、地下水の水質管理において効果的である可能性が考えられた。

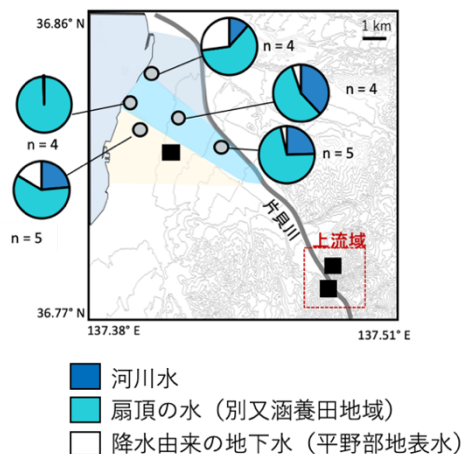


図 3. 地下水の起源別寄与

3. 別又涵養田における地下水涵養事業の効果検証

片貝川扇状地地下水の主な起源のひとつとして考えられた別又涵養田の生態系や栄養塩の存在量を把握するために、涵養田の表層水の栄養塩濃度、生物や堆積物の炭素・窒素同位体比を測定した。別又涵養田は別又谷川の右岸側にある棚田状の休耕田を利用し2014年に造成され、それ以降肥料散布などの人為的管理は行われていない。

炭素・窒素安定同位体比は食物網における栄養段階が1つ上昇するごとに一定の幅で上昇があることが明らかとなっている (Post, 2002; Brauns et al, 2018)。生物、堆積物、POMの炭素・窒素安定同位体比の測定結果を図4に示す。このグラフから、別又涵養田で採取した試料は餌源を示す炭素安定同位体比と栄養段階を示す窒素安定同位体比の両方でその値に幅があり、別又涵養田では小規模ながら多様な基礎生産が存在していることが考えられた。しかし、基礎生産を支えるためには涵養田に存在する栄養塩が必要であり、

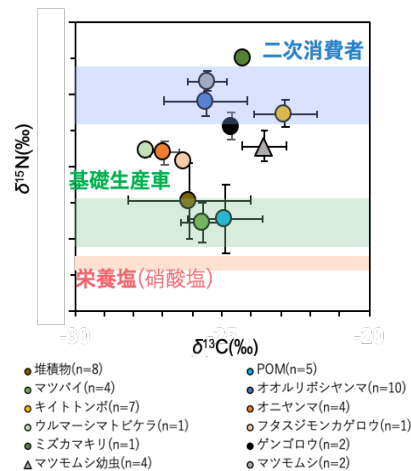


図4. 炭素・窒素安定同位体比の分析結果

多様な基礎生産が存在するということから、それらに消費される栄養塩の量が増えるということが考えられ、結果的に涵養田に残る栄養塩が減少する可能性がある。そこで、涵養田で採取した水の化学分析を行った。その結果、涵養田に流入する前の用水と流入後の涵養田表層水で水の栄養塩濃度 (SiO₂, PO₄) はほとんど減少しておらず、涵養田内に栄養塩が残っていることがわかる。また、涵養田内での水の蒸発の程度を把握するために用水と表層水の酸素・水素安定同位体比を測定した。水は蒸発の影響を受けた場合、酸素・水素安定同位体比の値が大きくなるが、用水と涵養田表層水は類似した値をとっていることから、蒸発の影響は極めて小さいと考えられる。以上から、別又地域を代表とした片貝川上流域での地下水涵養事業は、地下水量と栄養塩の両方の確保に有効であると考えられた。

また、片貝川上流域から地下水への栄養塩付加量を下記の式によって試算した。

$$\text{栄養塩付加量} = \text{栄養塩濃度} \times \text{水の浸透量}$$

この計算において、栄養塩濃度は本結果を、水の浸透量は同じく片貝川上流域の東蔵地域での観測値を使用した。その結果から、魚津沖海底湧水において過去20年間で減少している富山湾への栄養塩供給量を補うためには、片貝川上流域(扇頂部)において約20ha分の地下水涵養事業を行う必要があることが示唆された。そこで、衛星画像を用いて片貝川上流域にある休耕田の面積を確認した結果、約20~30ha存在していることがわかった。以上から、別又地域とその他の休耕田にも地下水涵養事業を広げることで、魚津沖海底湧水で減少している栄養塩供給量を補える可能性が高いことが本研究で明らかとなった。

【まとめ】

本研究では、気候変動による地下水から沿岸への物質供給量変化に対する適応策検討を目的として、片貝川扇状地の浅層地下水の流動状況や別又涵養田における地下水涵養事業の効果について解析を行った。それによって得られた結論は以下の通りである。

・海底湧水系の地下水は扇頂から中山間地域の標高を主な起源とし、河川上流域の水の寄与率が最大で 9 割あることが明らかとなり、現在別又涵養田で行われている地下水涵養事業は地下水の水質管理に有効であると考えられた。

・片貝川上流域から地下水への栄養塩付加量を試算した結果、魚津沖海底湧水で減少している富山湾への栄養塩供給量を補うためには、約 20ha 分の地下水涵養事業が必要であるということが示唆され、別又とその他の休耕田にも地下水涵養事業を広げることで、その減少分を補填することができる可能性が考えられた。

以上より、河川上流部での地下水涵養事業は地下水量の確保だけでなく、水質管理にも有効であり、地下水への栄養塩付加の能力により沿岸域での炭素固定に貢献することで、気候変動への対策やカーボンニュートラルの推進につながると考えられる。

【本研究における 2021 年度成果物】

学会等発表

1. 北澤 唯佳, 張 勁, 片境 紗希, 谷口 耕一 (2022) : 片貝川扇状地地下水の流動状況解析及び扇頂部休耕田涵養実験の速報～少雪・多雨化に伴う地下水中の栄養塩減少に対する適応策検討に向けて～, 日本地下水学会 2022 年秋季講演会, 10 月. (口頭発表) 若手優秀講演賞受賞
2. 北澤 唯佳, 張 勁 (2022) : Water quality and origin of shallow groundwater in the Katakai River fan area and nutrient dynamics in the Betsumata paddy field, GENERAL LECTURE University of Toyama -JAPAN-, Jenderal Soedirman University, 12 月

【参考文献】

1. 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(7), 3417-3425.
2. Guo, X., Mano, T., Takayama, T., & Yoshida, T. (2019). Integrated numerical model for Toyama Bay. In Yanagi, T. (Eds.), *Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi: Restoring Estuaries and Bays*, (1st ed., pp. 206–211). Elsevier, Amsterdam.
3. Katayama, S., Zhang, J. (2021) . A Shift from Snow to Rain in Midlatitude Japan Increases Fresh Submarine Groundwater Discharge and Doubled Inorganic Carbon Flux over 20 Years Environ. Sci. Technol. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05108>
4. 水谷義彦, 佐竹洋 (1997) . 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. 日本地下水学会誌第 39 巻第 4 号 287-297(1997)

5. 松本大毅,広城吉成,堤敦,神野健二,新井田浩(2005).ラドンおよびトリチウムによる地球科学的手法と地下水流動計算による湧水の滞留時間と集水域の推定.水工学論文集,台 49 巻,2005 年 2 月
6. David M.Post(2002).Using stable isotopes to estimate trophic position:models, methods and assumptions.Ecology,83(2002),pp.703-718
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0703:USITET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2)
7. Mario Brauns, Iola G. Iola G. Boëchat, Ana Paula C. de Carvalho, Daniel Graeber, Björn Gücker, Thomas Mehner, Daniel von Schiller(2018). Consumer-resource stoichiometry as predictor of trophic discrimination($\Delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{15}\text{N}$) in aquatic invertebrates. Freshw.Boil.,63(2018),pp.1240-1249
<https://doi.org/10.1111/fwb.13129>
8. エコノワとやま 魚津市-1 (地下水涵養事業)
http://www.t kz.or.jp/econowa/detail.php?id=100021#/_upload/100021/kankyou_pic1.jpg
(2023/3/25)