

令和3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 理学部 生物圏環境科学科
- ・所属ゼミ:環境化学計測第二講座
- ・指導教員:張 勁
- ・代表学生:北澤 唯佳
- ・参加学生:張 芸馨、花村 虎太郎、山口 圭一、片境 紗希

【研究題目】

SDGsの視点で富山の地下水を科学する ～地下水年齢の把握と持続的地下水利用方法の検討～

1. 課題解決策の要約

本研究では魚津市において河川水・地下水・涵養田に着目し、地下水の流動・起源の評価を試みた。その結果、片貝川扇状地の浅層地下水は1年を通して安定して少なくとも3週間以上の滞留時間をもつことが分かった。また、深層地下水については浅層地下水からの涵養量よりも利用量の方が多いことが明らかとなり、深層地下水の減少につながっていると示唆された。地下水位低下を防ぐためには、地下水の適切な利用量の再検討や涵養事業が必要であると考えられる。浅層地下水の起源としては片貝川上流河川水の寄与率が大きく、さらに片貝川上流と同じ標高帯にある別又涵養田からの寄与も大きいことが化学データによって確認された。また、別又涵養田周辺の水質分析から、涵養田流入前と流入後では栄養塩濃度の減少がほとんどなく、別又涵養田は地下水量確保と地下水への栄養塩付加に貢献することが示唆された。また、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は、別又とその他の休耕田で地下水涵養事業を行うことで補うことができる可能性が考えられた。

2. 調査研究の目的

地下水は生活用水や工業用水として人の暮らしを支えたり、海底湧水として陸域起源の栄養塩を沿岸海域へ供給したりする役割をもっている。しかし近年、地下水が盛んに使われることにより地下水位の低下や深層地下水の自噴量減少などが問題となっている。直近では2021年1月の集中豪雪において、消雪用地下水の過剰な利用による地下水位の低下が大きな問題となった。持続的な地下水利用のためにも、地下水の流動状態の把握は不可欠である。また、地下水起源の栄養塩は富山湾沿岸域の基礎生産の繁栄にとって重要であることが実証されている(Hatta and Zhang, 2013; Guo et al., 2019)が、近年、少雪・多雨化などの気候変化や廃水処理技術の向上により富山湾への栄養塩供給量の減少も指摘されている(Katazanai and Zhang, 2021)。よって、地下水への栄養塩付加起源の評価は、沿岸海洋環境の保全のための重要な科学的知見でもある。そこで、本研究では魚津市片貝川扇状地において地下水の滞留時間や栄養塩の起源を明らかにすることを目的とした。

3. 調査研究の内容

地下水の滞留時間(地下水年代)とは、地上で水が浸透して地下水となってから湧出するまでの時間である。これを推定することは、地下水の涵養・流動・湧出までの一連の段階に時間軸を加えることとなり、地下水の適切な利用、地下水流動の解明、地下水の水質管理につながる。本研究では地下水の流動を把握するために、20

21年2月からほぼ月に1度の頻度で河川水・地下水の調査を実施した。採取した試料は現場にて水温、電気伝導度、pH、酸化還元電位の測定を行い、実験室にて主要イオン(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。これらの溶存成分から、水質の把握をすることができる。また、水の起源の指標として酸素・水素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)の測定を行った。地下水の滞留時間の推定には放射性同位体である ^{222}Rn 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra を用いた。

また、片貝川上流にある別又水源涵養田・自然観察池において表面水の溶存成分と酸素・水素同位体比、そして水中の粒子状有機物(POM)、堆積物、生物について炭素・窒素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)の測定を行った。図1に採取地点を示す。

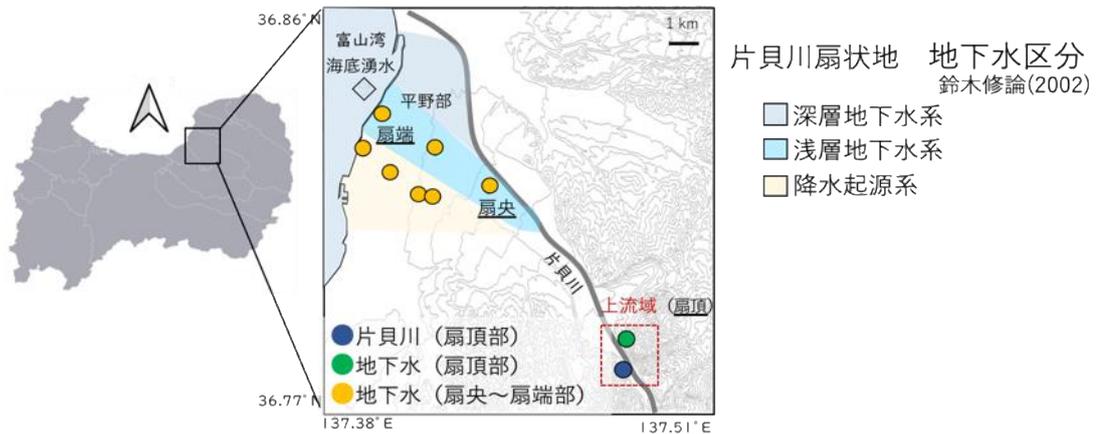


図1：採取地点



図2：採取現場の様子(左2枚：片貝川、右2枚：別又涵養田)

4. 調査研究の成果

4-1.放射性同位体を用いた片貝川扇状地における浅層・深層地下水の滞留時間と涵養量の推定

本研究で地下水の滞留時間の推定に用いたラドンは半減期が約3.8日の希ガスであり、堆積物中の ^{226}Ra からの生成、 ^{222}Rn から ^{218}Po への崩壊という過程を経て、扇状地の扇頂から扇端にかけて濃度が上昇していくという特徴を持ち、地下水流動のトレーサーとして利用される(例：松本ら,2005)。

$$C(t) = C_e \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad \dots(\text{式} 1)$$

地下水中の ^{222}Rn 濃度変化は(式1)によって表され、ここで $C(t)$:滞留時間が t の時の ^{222}Rn 濃度(Bq/L)、 C_e :その帯水層における平衡 ^{222}Rn 濃度(Bq/L)、 λ : ^{222}Rn の崩壊定数(0.18day^{-1})、 t :地下水の滞留時間(day)である。地下水中の ^{222}Rn 濃度は(式1)に従って増加し、約3週間で平衡状態に達する。よって、滞留時間が3週間以内の地下水ではその ^{222}Rn 濃度は3週間以内の外部からの水の流入に影響を受けることとなり、 ^{222}Rn 濃度は平衡状態に達せず濃度の減少が見られる。

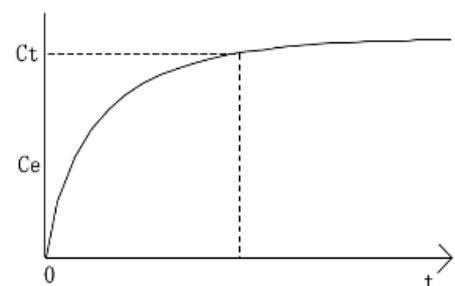


図3：地下水中のラドン濃度変化の例

図4に扇央と扇端の代表地点それぞれの地下水における ^{222}Rn 濃度の季節変化を示す。扇央の地下水では2月から4月にかけての ^{222}Rn 濃度の減少以外では、 ^{222}Rn 濃度がほぼ安定していた。また、扇端の地下水については1年を通して ^{222}Rn 濃度が安定していた。これらのことから、片貝川扇状地の扇央と扇端における地下水中の ^{222}Rn 濃度は平衡状態に達しており、滞留時間が少なくとも3週間以上あると推測された。

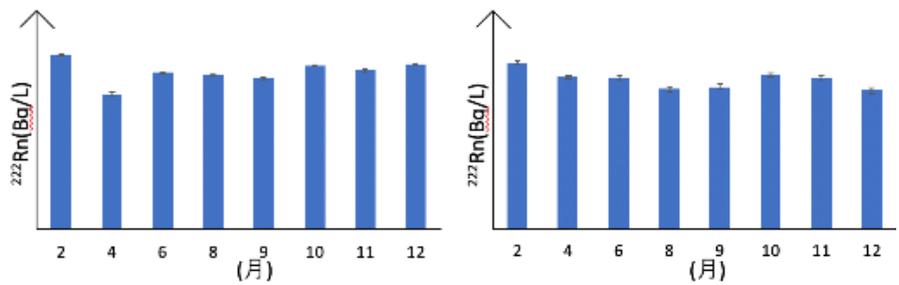


図4：2021年における地下水中 ^{222}Rn 濃度の季節変化(左：扇央、右：扇端)

次に、深層地下水の滞留時間に着目すると、放射性同位体を用いた先行研究(Suzuki and Zhang, 2005; 谷口卒論, 2021)では、深層地下水の滞留時間が10~30年であることが明らかとなっている。さらに、この滞留時間から試算された浅層地下水から深層地下水への年間涵養量は、魚津市における深層地下水の年間利用量よりも約1/4~1/2少ないことが示唆された。この試算によって求められた深層地下水の減少量は、実際の深層地下水の自噴量の減少量と一致していた。したがって、本研究の調査結果は、魚津市における深層地下水の減少の要因のひとつを科学的に裏付けると考えられる。地下水の減少を防ぐためには、地下水の適切な利用量の再検討や涵養事業の実施が必要だと考えられる。

4-2.酸素・水素安定同位体比とCIを用いた地下水起源の解析

地下水の涵養源を把握することは、地下水位低下への対策や水質管理のために不可欠である。地下水の起源やその季節変化を把握する上で重要な酸素・水素安定同位体比を用いて、地下水の起源解析を行った。図5に扇頂、扇央、扇端の浅層地下水の酸素・水素安定同位体比の関係を示す。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 $\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ 、冬季は $\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 30$ の直線上に分布することが知られており(水谷・佐竹, 1997)、この直線のことを天水線という。図5から2021年の片貝川扇状地浅層地下水は夏季と冬季の天水線の間で分布していることがわかる。これは、片貝川扇状地の地下水が夏の降水と雪解け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、異なる時期で採取した地下水でもその酸素・水素安定同位体比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。

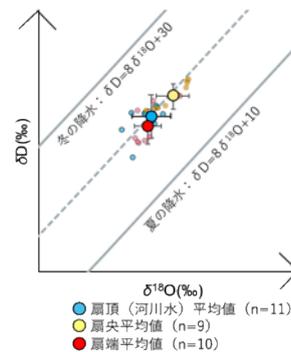


図5：浅層地下水の酸素・水素安定同位体比

さらに、図6に地下水、河川水、涵養田表面水の Cl^- 濃度と酸素安定同位体比の関係を示す。 Cl^- は地下水の端成分であり、地下水起源のトレーサーとして使われる。図6から、地下水のプロットが河川水上流、扇頂地下水、降水由来の地下水という3つのプロットに囲まれており、片貝川扇状地の地下水が片貝川河川水と降水、さらに涵養田の表面水を起源にもつことが明らかとなった。涵養田は片貝川上流にある。表面での水の蒸発は多少あるが、図6から涵養田の水も地下水の起源と考えられる。

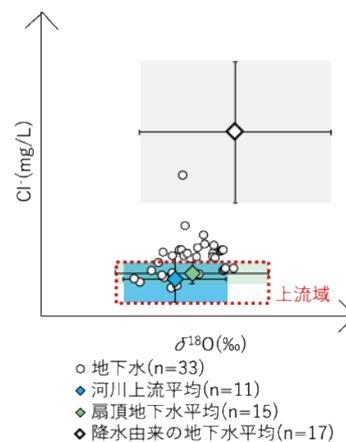


図6：酸素安定同位体比と塩化物イオンのグラフ

そこで地下水、河川水、涵養田表面水、降水起源の地下水それぞれの酸素安定同位体比と Cl^- 濃度の平均値を用いて、下記の連立方程式から3つの起源の混合比を求めた。

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

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。求めた混合比を図 7 に示す。地点によって異なる割合を示したものの、涵養田の寄与率は最大で 4 割ほどであった。ここで、採水標高がほぼ同程度である片貝川上流の河川水と別又涵養田表面水を合わせて「河川上流域」起源として捉えると、片貝川扇状地浅層地下水の 7~9 割を占めることが明らかとなった。これらの化学データから、片貝川上流付近の別又涵養田における涵養事業は地下水涵養に有効である可能性が示唆された。

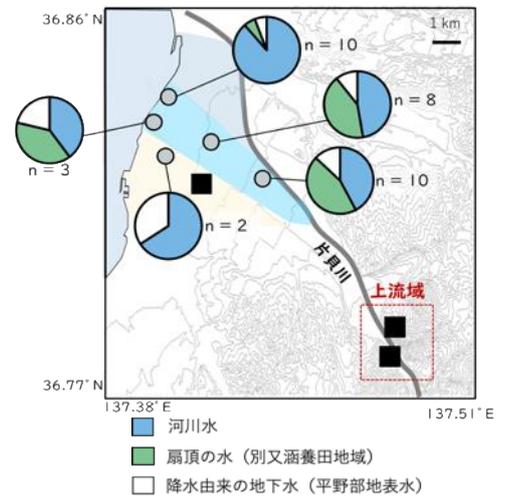


図 7：地下水の起源別寄与率

4-3. 別又涵養田における栄養塩の動態

片貝川扇状地地下水の涵養源のひとつとして示唆された別又水源涵養田・自然観察池の生態系や栄養塩の動態を把握するために、涵養田の水の栄養塩、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。この涵養田で水は 6~8 月に、堆積物と粒子状有機物(POM)は 10 月に、生物は 8 月に魚津水族館の協力を頂いて採取した。採取した生物はカエルの幼生やマツモムシ、ミズカマキリ、各種トンボのヤゴなどである。植物はマツバイを採取した。

炭素・窒素安定同位体比は「食う-食われる」の関係にある生物間で一定の幅を持って変化するため、食物網の解析等で利用されることが多い。栄養段階が 1 つ上昇するごとに炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ では 0~1‰、窒素安定同位体比 $\delta^{15}\text{N}$ では 3‰程度の上昇があることが明らかとなっている(Post, 2002; Brauns et al, 2018)。このことから、炭素安定同位体比は変化がわずかであるため餌源の推定に、窒素安定同位体比は変化が大きいため栄養段階の推定に有効である。

生物、堆積物、POM の炭素・窒素安定同位体比の測定結果を図 8 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る。しかし、基礎生産を支えているのは涵養田に存在している栄養塩であり、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。図 9 に栄養塩の濃度を示す。このグラフを見ると、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はほとんど減少しておらず、涵養田に栄養塩が残っていることがわかる。また、図 10 に用水と涵養田表層水の酸素・水素安定同位体比を示した。3つある涵養田について、上流側から①、②、③とした。水は蒸発

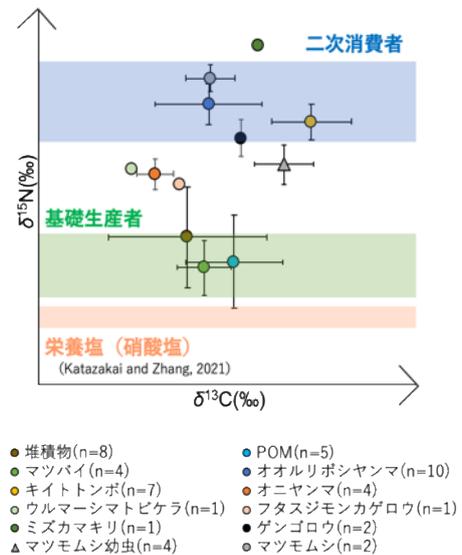


図 8：窒素・炭素安定同位体比のグラフ

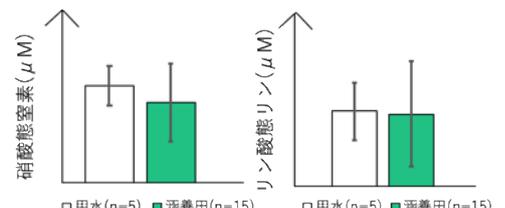


図 9：用水と涵養田の栄養塩濃度

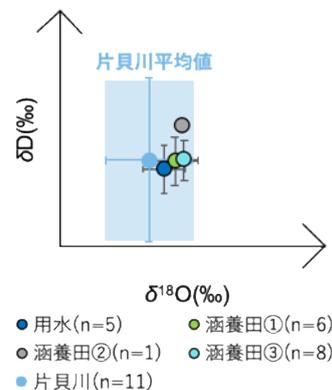


図 10：用水と涵養田の酸素・水素安定同位体比

図 10 に用水と涵養田表層水の酸素・水素安定同位体比を示した。3つある涵養田について、上流側から①、②、③とした。水は蒸発

の影響を受けた場合、その酸素・水素安定同位体比が高くなるが、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。

栄養塩付加量 = 栄養塩濃度 × 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 あることがわかった。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という結果が本研究で得られた。

5. 調査研究に基づく提言

本研究では、持続的な地下水利用と沿岸海洋環境の保護を目的として、片貝川扇状地の浅層地下水の流動状況や別又水源涵養田・自然観察池の栄養塩の動態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。

①地下水の ^{222}Rn 濃度分析結果から、片貝川扇状地の浅層地下水は3週間以上の滞留時間をもつことが明らかとなった。また先行研究により深層地下水の滞留時間は10~30年であり、それから求めた深層地下水の涵養量は利用量よりも1/4~1/2少ないことが示唆された。

②酸素・水素安定同位体比と塩化物イオン濃度から、片貝川扇状地の地下水は夏季の降水と雪解け水が混合した水であった。また地下水の起源評価から、片貝川扇状地の地下水において片貝川上流と別又涵養田地域を起源とする水が7~9割を占めることが明らかとなった。したがって片貝川上流付近である別又涵養田での涵養事業は、片貝川扇状地における地下水量の保全に効果的である可能性がある。

③別又涵養田の生物の炭素・窒素安定同位体比から、涵養田内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。

④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。

これらのことから、地下水を持続的に利用するためには、地下水の適切な利用量の再検討、そして結論②から片貝川上流の標高帯において涵養事業を行い、地下水の涵養量を確保することも有効だと考えられる。また、片貝川上流域での涵養事業は地下水への栄養塩付加にも貢献すると考えられ、現在、減少傾向にある沿岸海域への栄養塩供給における不足分の補填にもつながると考えられる。

6. 課題解決策の自己評価

本研究では、片貝川扇状地の地下水や河川水、別又涵養田の表面水などを対象に地下水流動や栄養塩の動態の評価を目的とし、持続的な水利用や沿岸海洋環境の保全に向けた科学的なデータを提供することができた。今後は地下水のより詳細な滞留時間や涵養田の栄養塩濃度の夏季と冬季の変化などについて調査し、地下水利用方法や沿岸基礎生産の保全に向けたより具体的な策を提言できると考えられる。

【謝辞】

本研究は、「令和3年度 学生による地域フィールドワーク研究助成事業」を受け実施いたしました。また、魚津市別又水源涵養田・自然観察池での生物試料採取にご協力頂きました魚津水族館稲村 修館長、不破 光大様に深く感謝申し上げます。また、片貝川上流域の休耕田面積を求めるにあたって、衛星画像をご提供いただいた NREC Yuhwan SEO 博士研究員に深く感謝申し上げます。なお、本研究における酸素・水素・炭素・窒素安定同位体比分析は、総合地球環境学研究所「同位体環境学共同研究事業」の御支援の下、実施いたしました。

【参考文献】

1. 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. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20184>
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. Katazakai, 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. 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.tzk.or.jp/econowa/detail.php?id=100021#./_upload/100021/kankyous_pic1.jpg (2022/2/18)