

湖西地域の地下水・河川水の水質と活断層との関係

小泉 尚嗣・植田 雅大・三谷 寛人
環境生態学科 環境生態学科 大黒天物産

1. はじめに

活断層は大地震を発生させるので、一般に環境破壊リスクと認識される。しかしながら、活断層で大地震が発生するのは、数千年に1度というようなごく低頻度であり、それ以外の大半の期間において、むしろ活断層は環境を形成・維持しているともいえる。例えば、近畿で多数の人が住む大阪平野・京都盆地・奈良盆地は断層運動の累積の結果生まれたものであるし、琵琶湖も断層運動の累積の結果生まれた構造湖である。

断層面周辺では、繰り返しの破壊によって生じた高密度の割れ目が岩盤を含む地盤の透水性をあげるため、その部分が地下水の通路となる（例えば、Faulkner et al.,2010）。結果として、断層と地表が交差する部分に、周辺の地質・地形・降水状況に応じて、水・熱・物質が地下水によって安定的に供給される。たとえば、活断層周辺では、温泉が多数認められる（小泉・他，1986）。

湖西地域には、琵琶湖西岸断層（地震調査研究推進本部，2009）と花折断層（地震調査研究推進本部，2003）という2つの大きな活断層が走って

いる（図1）。また、琵琶湖に流入する河川の中で、長さでは野洲川について第2位の河川である安曇川は（滋賀県，2012）、中流部のほとんどの区間で花折断層と併走し、下流では琵琶湖西岸断層を横断する等、2つの活断層と位置的には密接な関係を持つ（図1）。また、安曇川は、滋賀県内の大規模河川としては、自然河川の性格を比較的良好に残しているとされる（琵琶湖流域研究会，2003）。さらに、扇頂部に琵琶湖西岸断層が通る安曇川扇状地では、安曇川伏流水を主な供給源とする地下水・湧水が豊富で、「かばた」と呼ばれる湧水を利用した独特の文化もある（高島市，2010）。

以上のことから、湖西地域は、活断層が地下水を通して周囲の環境にどのような影響を与えるかを調べる上で適した場所だと考え、2017年から調査を開始した。

2. 観測

2017年7月～12月と2018年4月以降に、月1回程度の頻度で、高島市周辺で地下水・河川水の現地調査および水のサンプリングを行った（図1）。2018年4月以降の調査では、同じ場所（図1のMTR・DIS・HRE・KWS・SNSという5カ所の地下水（湧水）とKTG・ADG・HRS・RYDという4カ所の安曇川河川水）でサンプリングを行って時間変化を追えるようにした。また、丸尾（2017）から、1996年～1998年の安曇川下流の1点（図1のADG）における水質データを手に入れた。晴天が続いて降雨が少なかった2018年8月12日～14日には、安曇川上流から河口付近までの20点で河川水の現地調査および水のサンプリングを行った（図1）。さらに、滋賀県の温泉台帳のリスト（源泉の住所を記したリスト）から、源泉の分布を調べると共に、安曇川周辺の源泉所在地で2017年以降に営業が確認できた所では、温泉分析表を手にし、可能な所では採水も行って水質の調査を行った。

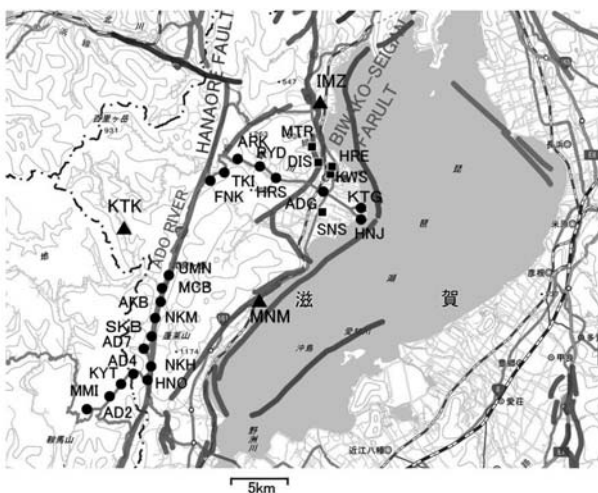


図1：地下水（湧水）調査地点（■）、河川水調査地点（●）と気象庁の気象観測点（▲）と活断層（太線）。安曇川上流のMMI～下流のARKまでの調査地点と河口のHNJでは、2018年8月12～14日に1回だけ測定を行っている。安曇川は河口直前で2つに別れるので、それぞれの河口付近に調査地点KTGとHNJを設けている。活断層データベース（産業技術総合研究所，2019）の図に加筆。背景の地図は地理院地図（国土院，2019）。

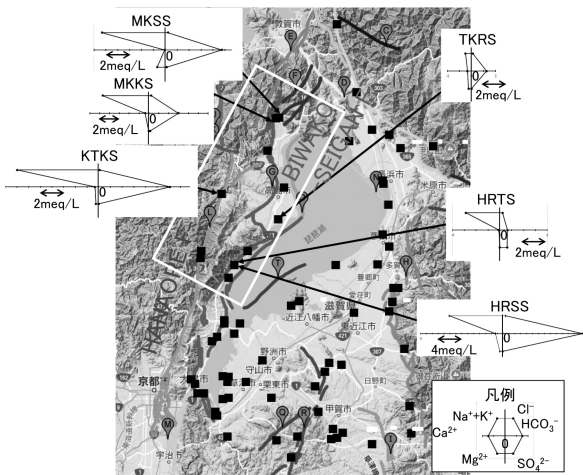


図2：滋賀県の温泉台帳に基づく温泉の分布（■）と活断層。白い枠の中の温泉で、2017～2018年時点で確認できたものについて水質を示している。背景の地図と活断層の分布は活断層データベース（産業技術総合研究所，2019）による。ヘキサダイアグラムで K^+ と Na^+ を加えた濃度が示されているが、その大部分は Na^+ の濃度である。

3. 結果

3.1 湖西地域の温泉

温泉台帳のリストに掲載されている100余りの源泉の多くが、滋賀県の活断層沿いに分布している。琵琶湖西岸断層や花折断層周辺にもいくつかの温泉が存在している（図2）。安曇川周辺の温泉の水質を調べて見ると、陽イオンでは Na^+ の濃度が卓越し、陰イオンでは HCO_3^- 濃度が卓越するいわゆる $Na-HCO_3$ 型であった（図2）。また、その濃度は、後述する安曇川や安曇川扇状地内の地下水のイオン濃度より数倍～数十倍大きい。一般に、通常の状態での浅層地下水は、 $Ca-HCO_3$ 型（陽イオンでは Ca^{2+} 濃度が卓越、陰イオンでは HCO_3^- 濃度が卓越するタイプ）となることが知られている（日本地下水学会，2011）。河川は、渇水期には浅層地下水から主に水が供給されるので、降水の少ない時期には、浅層地下水も河川水も $Ca-HCO_3$ 型になることが予想される。それに対して、琵琶湖西岸断層や花折断層経由で $Na-HCO_3$ 型で濃度の高い温泉水が関与すれば、水質の型が場所や時間によって変化することが期待出来る。なお、温泉といっても、図2で水質を示した各温泉の水温は、最高のHRSS（深さ1,050mのボーリング孔から湧出）でも $38^{\circ}C$ で、それ以外は $15^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ であって特に高温ではない。

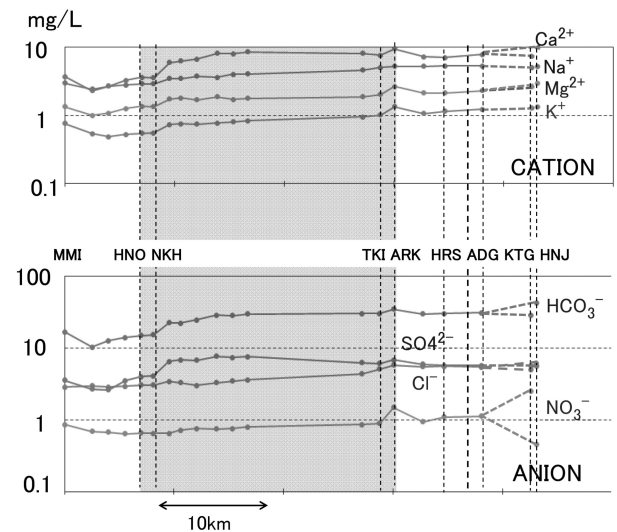


図3：2018年8月12～14日の調査における安曇川の上流（左側）から下流（右側）にかけてのイオン濃度変化。横軸は、各採水地点（図1）の2点間の直線距離を積算したもの。影の部分は、安曇川が花折断層と合流している部分。HRSとADGの間の太い破線は、琵琶湖西岸断層と安曇川が交差している部分。

3.2 安曇川

2018年8月12～14日に行った調査の結果では、20点すべてにおいて水質のタイプは $Ca-HCO_3$ 型の水であった。水源付近のMMIから、花折断層と安曇川の合流直後のNKHまでは、それぞれのイオン濃度は概ね一定で、NKH以降、（安曇川が花折断層から離れる前の）TKIまで徐々に増加し、それ以降は河口近くのADGまではほぼ一定で、河口のKTGとHNJでは一部のイオンが局所的に大きく変化した（図3）。ただし、HNJでは河川水が流れていたが、KTGでは河川水がほとんど流れていない状況であった。また、TKIから1つ下流側のARKでも、ほぼ全てのイオン濃度が局所的に増加した。花折断層との合流部で、特に増加したのは Ca^{2+} 濃度と HCO_3^- 濃度であった。他方、琵琶湖西岸断層を挟むHRSとADGの間でイオン濃度の変化は特に認められなかった。

RYD・HRS・ADG・KTGでの水質のタイプは、主要イオン濃度の分析がほぼ終わっている2017年7月～12月と2018年4月～8月の期間の調査時においては一貫して $Ca-HCO_3$ タイプであった（図4）。 NO_3^- を除くと、各イオン濃度は、少雨の時

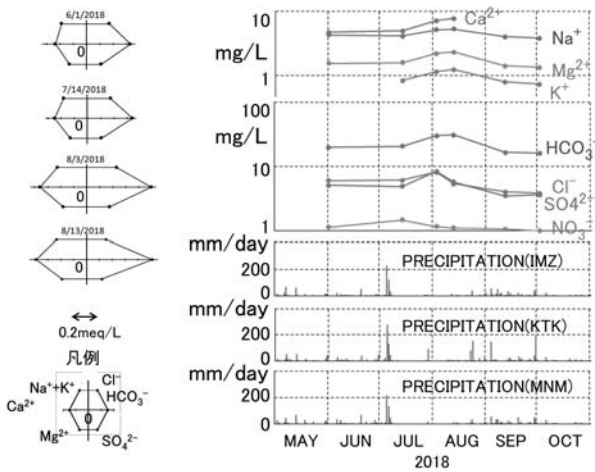


図4：ADGにおける水質変化とIMZ・KTK・MNMにおける日雨量。Ca²⁺とK⁺の濃度については、測定できていない時期がある。2018年6月1日、7月14日、8月3日、8月13日のサンプルのヘキサダイアグラムを左に示す。

期（2018年8月）に高く、それ以外の時期には低いという傾向が認められた。

3.3 高島市周辺の地下水・湧水

安曇川扇状地内で安曇川をはさんで北側にある湧水（HRE・KWS）ではCa-HCO₃型を示した。安曇川扇状地内で安曇川をはさんで南側にある湧水のSNSではNa-HCO₃型となった（図5）。安曇川扇状地の扇頂部付近で琵琶湖西岸断層直上の湧水であるMTR・DISは、陽イオンではNa⁺濃度が卓越し陰イオンではCl⁻濃度が卓越するいわゆるNa-Cl

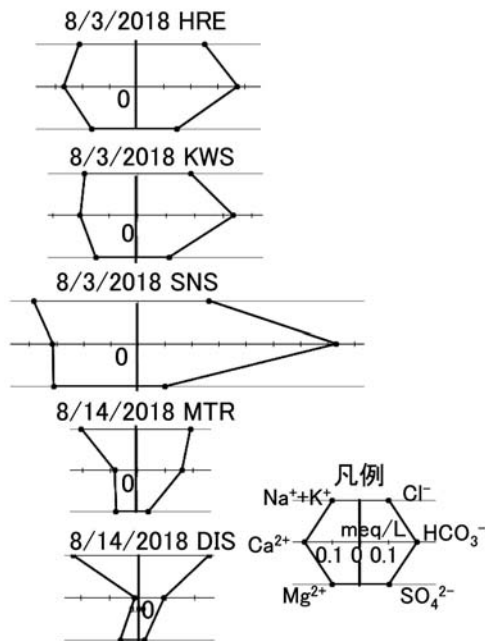


図5：HRE, KWS, SNS, MTR, DISの水質。ヘキサダイアグラムの上部の数字はサンプリングした日付。

型であったが、全般的に濃度が低かった。MTR・DISはNa-Cl型となるが、安曇川扇状地内のCa-HCO₃型の水と比べると、Na⁺濃度やCl⁻濃度は同程度であり、Ca²⁺濃度やHCO₃⁻濃度が低いという状況である（図5）。

以上の水質の型については、2017年7月～12月と2018年4月～8月の期間の調査時においては時間的な変化は認められなかった。

4. 考察

4.1 安曇川

花折断層と安曇川が合流している部分（図1のHNO～ARK）で、イオン濃度が全般的に増加していることから、安曇川の水質形成に花折断層が寄与していることが示される。ただし、当初想定していたNa-HCO₃型の温泉水の付加ではなく、NO₃⁻を除く各イオンが全般的に増え、特にCa²⁺とHCO₃⁻の濃度が増えた。花折断層付近の温泉では、北部の1点（図2のKTKS）で湧出するものの水質がNa-HCO₃型とわかっているだけなので、それより南部のHNO～UMN付近ではCa-HCO₃型の温泉水があるのかもしれないし、Ca-HCO₃型の浅層地下水が、花折断層と安曇川の合流部でより多く供給されているのかもしれない。

安曇川のRYD・HRS・ADG・KTKでは、2017年7月～12月と2018年4月～8月の期間の調査時においては、水質のタイプはCa-HCO₃タイプで変化はなかった。他方、1996年～1998年に、ADGで水質測定を行った丸尾（2017）の結果では、Ca-HCO₃型からNa-HCO₃型やNa-Cl型に時間変化する傾向が認められた（図6）。2017年8月～2018

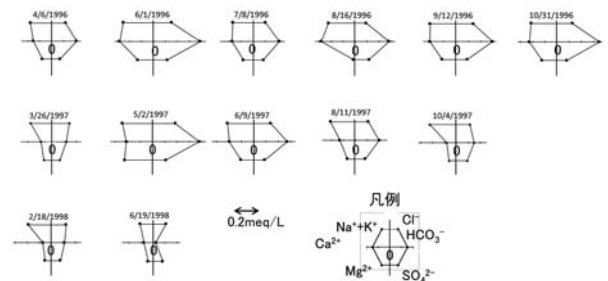


図6：ADGでの1996年4月～1998年6月の安曇川の水質。ヘキサダイアグラムの上部の数字はサンプリングした日付。

年8月という観測期間は、1996年～1998年の2年間に比べて短い。2018年9月以降も約1ヶ月間隔で同様の調査を安曇川で継続しているので、サ

ンプリングした河川水の分析を行い、1996年～1998年に生じた水質の変化が再び生じるかどうかを確認する予定である。

4.2 地下水・湧水

安曇川扇状地内で安曇川をはさんで北側にある2つの湧水（HRE・KWS）の水質については、安曇川と同じCa-HCO₃型であるが、南側にある1つの湧水（SNS）についてはNa-HCO₃型である。もちろん、安曇川の水が伏流水となってSNSに到達するまでは、数年以上かかっている可能性があるため、現在の安曇川の水質と一致する必要はない。安曇川の北側と南側で、湧水の形成機構に違いがあることは確かなようである。

断層直上の湧水（DIS・MTR）については、全体としてのイオン濃度が低いことから、断層沿いの水ではあるが、3.1の温泉水のように地下深部から来た水とは考えにくく、比較的表層付近の水ではないかと考えられる。活断層は、周辺部分は破碎によって一般に透水性が増すが、断層の中心部分は粘土化してむしろ透水性が低くなることも多い（Faulkner et al., 2010）。したがって、山地から流れてきたごく表層の地下水が断層でせき止められた形になって湧出している可能性がある。水中のCO₂が、土壌や岩石中のCaCO₃等と反応して生まれるのがCa²⁺やHCO₃⁻なので、扇状地内湧水に比べて、断層直上の湧水の滞留時間が短いことが、Ca²⁺濃度やHCO₃⁻濃度が低い要因かもしれない。

5. まとめ

2017年8月以降に、湖西地域の温泉水・河川水・地下水（湧水）の調査を行った。2018年8月までの結果をまとめると以下の通りである。

湖西地域の安曇川周辺の温泉水は、琵琶湖西岸断層・花折断層ぞいに分布していて、水質はNa-HCO₃型である。濃度は、浅層地下水や安曇川河川水の数倍～数十倍である。したがって、これらの活断層経由の温泉水が、周囲の浅層地下水（湧水）や河川水に影響を与えるとすると、それらの水の中のNa⁺やHCO₃⁻濃度が増えることが考えられる。

安曇川の水質は、2018年8月の渇水期の測定では、上流～下流にいたるまでCa-HCO₃型である。花折断層と合流している上流～中流部において、イオン濃度が上昇する傾向が認められたが、全般

的に増えている、特にNa⁺やHCO₃⁻の濃度が増える傾向は認められなかった。

安曇川河口付近の水質について、2017年8月～2018年8月の期間は、Ca-HCO₃型で変化はない。ただし、1996年～1998年のデータでは、Na-HCO₃型やNa-Cl型になっていたため今後とも時間変化の有無を注視する必要がある。

安曇川扇状地周辺の地下水（湧水）は、扇頂付近の断層直上でNa-Cl型、扇端部かつ安曇川の北側でCa-HCO₃型、扇端部かつ安曇川の南側でNa-HCO₃型であった。2017年8月～2018年8月の期間について、これらの水質の型に時間変化は認められない。それぞれの地下水（湧水）の形成機構が異なると考えられる。

6. 謝辞

本研究について、環境生態学科の丸尾雅啓博士には貴重なデータを頂いた。環境生態学科2017年度卒業生の森あずみさん・安食拓海さん、および、2018年度卒業生の田中達也さん・箕手慎介さんには現地調査と水質分析を手伝っていただいた。高島市の住民の皆様には、調査に協力していただいた。以上の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 琵琶湖流域研究会, 2003, 琵琶湖流域を詠む(上), サンライズ出版, 269pp.
- Faulkner, D.R., C.A.L. Jackson, R.J. Lunn, R.W. Schlische, Z.K. Shipton, C.A.J. Wibberley, M.O. Withjack, 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones, *J.Struct.Geol.*, 32, 1557-1575.
- 地震調査研究推進本部, 2003, 三方・花折断層帯の長期評価, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/73_mikata_hanaore.pdf, 2019年2月確認.
- 地震調査研究推進本部, 2009, 琵琶湖西岸断層帯の長期評価(一部改訂), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/65_biwako-seigan_2.pdf, 2019年2月確認.
- 小泉尚嗣・吉岡龍馬・赤松信・西村進・岸本兆方, 1986, 山崎断層周辺の温鉱泉について, 京都大学防災研究所年報, 29B-1, 59-66.

- 国土地理院, 2019, 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/>,
2019年2月確認.
- 丸尾雅啓, 2017, 私信.
- 日本地下水学会, 2011, 水質に関する説明,
[http://www.jagh.jp/content/shimin/
images/wakimizu/20111002/suishitu.pdf](http://www.jagh.jp/content/shimin/images/wakimizu/20111002/suishitu.pdf), 2019
年4月確認.
- 産業技術総合研究所, 2019, 活断層データベース,
[https://gbank.gsj.jp/activefault/index_
gmap.html](https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html), 2019年2月確認.
- 滋賀県, 2012, 琵琶湖ハンドブック改訂版, 琵琶
湖と河川, [http://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/
kankyoshizen/biwako/11344.html](http://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/biwako/11344.html), 2019年2月
確認.
- 高島市, 2010, 「高島市針江・霜降の水辺景観」
保存活用事業報告書, 215pp