

殿上山断層のルートを追う

～地下水中の2つのイオンに着目した断層のルート調査～

[Abstract] We investigated the route of the Denjozan fault, which exists with the east-west direction of the middle of the Reihoku region in Fukui Prefecture, by using fluoride ions and bicarbonate ions as tracers. As a result, we found out that the Denjozan fault extends westward from the route shown on the active fault map by the Geospatial Information Authority of Japan. There may be another route on the south of its. This means that the Denjozan fault forms a fault zone. To clarify the details of this, we have been conducting the investigation.

1 はじめに

福井県嶺北地方には、活断層が何本も分布しており、福井市南部から越前市にかけて南北方向に伸びる鯖江断層もその1つである。この断層は西側が上がった逆断層で、最新活動は500～3000年前と考えられており、その後の活動記録はない。そのため、断層が存在すると考えられる一帯は、長年地震の発生が確認されていない地震の空白域として注目されている(岡本ほか, 2010)(図1)。

この鯖江断層に関しては、本校の先行研究において、地下水や湧水中のフッ化物イオン濃度を測定・比較することで、ルートが解明されていなかった範囲のルートをほぼ特定した(石塚ほか, 2020; 大友ほか 2021; 安達ほか 2022)。

また、鯖江断層周辺の地震の空白域に向かって、白椿山断層や殿上山断層が東西方向に伸びている。岡本らは、殿上山断層をはさんで、福井平野東縁断層帯の走向と根尾谷断層系の走向が変化することに注目し、殿上山断層が地震活動の境界として機能しているのではないかと指摘している(岡本ほか, 2008)(図2)。実際、1948年の福井地震や、1891年の濃尾地震では、殿上山断層を境界に、それより先へは断層破壊がお互いに進行していないことがわかっている(岡本ほか, 2008)。

殿上山断層は、福井市南東部から鯖江市東部にかけて伸びる、横ずれ成分をもつ北側上がりの逆断層である。岡本らは、この殿上山断層が、鯖江市長泉寺町の中道院(図2)付近で鯖江断層と交差しているのではないかと推測していたが、本校先行研究で、地下水や湧水に

含まれる、炭酸泉を起源とする炭酸水素イオンの濃度を測定・比較することで、断層が中道院の方向ではなく、鯖江市舟津町のサンドーム付近へ伸び、鯖江断層の直前で止まっていることを解明した(図3)。しかし、断層のルートに関しては、2本のライン(図4)が推定されたため、特定できなかったと報告されている(榎谷ほか, 2023)。

地震の空白域を伴う鯖江断層や丹南地域の防災を考える上で、鯖江断層の直前まで伸びている殿上山断層との関係は、共役関係や連動を考慮すると、極めて重要な情報となる。そこで、私たちは、殿上山断層の詳しいルートを解明し、研究過程で得られた情報を公開することで、地域住民の防災意識を高めるとともに、鯖江断層周辺の防災対策においても協力したいと考えている。

2 研究方法

断層の調査には、一般にボーリング調査やトレンチ調査といった大掛かりな調査が行われることが多く、このような調査方法は高校生には難しい。そこで、私たちは、高校生にもできる断層の調査方法を考え、2019年度から地下水や湧水中の特定のイオン濃度を調べることで、断層のルートを推定する研究を行っている。以下、これまでの結果を概略する。

2019年度: 鯖江断層の調査法としてフッ化物イオンの重要性を示し、湧水中のフッ化物イオン濃度を調べることで、鯖江断層が越前市村国山を通過していることを確認した(石塚ほ

か,2020)。

2020 年度:越前市村国山で鯖江断層の断層破砕帯の一部を発見するとともに、湧水中のフッ化物イオン濃度を測定・比較することで、村国山における鯖江断層のルートを解明した(大友ほか,2021)。

2021 年度:沖積層に覆われ、地表では断層の痕跡が確認できない断層であっても、地下水中の特定のイオン濃度の調査がルート解明に有効なことを示した。また、地下水中のフッ化物イオン濃度を比較することで、鯖江断層のルート未解明部のルートをほぼ解明した(安達ほか,2022)。

2022 年度:地下水中に含まれる炭酸水素イオン濃度を調べることで、殿上山断層のルート調査に、炭酸泉に由来する炭酸水素イオンが有効なことを示し、断層が国土地理院による活断層図に示されたルートよりも西側に伸びていることを指摘した。また、殿上山断層が、鯖江断層の直前で止まり、鯖江断層の方が優勢であることも解明した(榎谷ほか,2023)。

これらの先行研究により、鯖江断層のルートはほぼ解明できたと考えている。一方、殿上山断層に関しては、まだデータ数が十分ではなく、複数のルートが推測されている段階で、ルートの解明には至っていない。そこで、私たちは、先行研究の手法を引き継ぎ、地下水中の炭酸水素イオン濃度を測定することで、ルートが不明確だった箇所のデータを補い、殿上山断層のルートを解明しようと考えた。

先行研究(安達ほか,2022)で指摘されている内容を参考にすれば、鯖江市や越前市の東部で湧出している炭酸泉(図5)は、断層破砕帯の中を横方向にも広がりながら、地表付近に上昇してくる(図6)。また、断層の上に沖積層が堆積していると、断層破砕帯から地表に向かって堆積物にひび割れが生じやすく(岡田,1979)、断層破砕帯を上昇してきた炭酸泉は、このひび割れを通り地表に向かって上昇し、当該地域の地

下水中の炭酸水素イオン濃度を上昇させる。そして、炭酸泉が上昇する過程で、炭酸泉がひび割れの外側に移動しやすい堆積構造があると、炭酸泉はひび割れの外側にも広がり(図7)、各地点の地下水中の炭酸水素イオン濃度を上昇させる。一方、地下に断層破砕帯があっても、必ず地下水中の炭酸水素イオン濃度が高くなるとは限らない。その結果、地下水中のイオン濃度が高くなる地点が、実際の断層ルートから離れた箇所に出現したり、途切れたりすることがあり、ルートを推定しにくい部分が出てくる。そこで、私たちは、起源が異なるフッ化物イオンと炭酸水素イオンの次のような広がり方を利用し、地下水中の2つのイオンの濃度分布を併せて見ることで、さらに正確な断層のルートが判明するのではないかと考えた。

フッ化物イオン:フッ素は、蛍石などの特殊な鉱物に多く含まれる元素で、鯖江市や越前市の地表付近の岩石や堆積物には少ないため、地表付近の地下水や伏流水にはフッ化物イオンは僅かしか含まれていない。しかし、日本列島は、海洋プレートの沈み込みによって形成された付加体で、海底の堆積物が基盤となっているため、地下深くの地下水には海水の成分が多く含まれている。そのため、海水に多く含まれるフッ化物イオンも多く含まれている。地下深くの地下水は、岩盤に遮られて、通常は地表付近に上昇してくることはない。しかし、地下に断層があると、地下深部の圧力で、断層破砕帯を通過して地下水が上昇する。これに伴い、フッ化物イオンも、地表に向かって移動する。したがって、地下水に含まれるフッ化物イオン濃度が高い地点は、断層に沿って列状に並ぶと考えられる(石塚ほか,2020;大友ほか 2021;安達ほか 2022)。

炭酸水素イオン:炭酸泉は、マグマから発生する二酸化炭素が高濃度で地下水に溶け込んだもので、先行研究(榎谷ほか,2023)によれば、鯖江市や越前市の東部で湧出する炭酸泉(図5)

には、フッ化物イオンが含まれず、高濃度の炭酸水素イオンが含まれている(約 3,000mg/L)。この炭酸泉は、殿上山断層の断層破碎帯を通過して上昇していると考えられている。また、断層破碎帯の中を横方向にも広がっていき、地下水に混じり、地下水の炭酸水素イオン濃度を上昇させると考えられる。したがって、地下水に含まれる炭酸水素イオンの濃度が高い地点は、断層に沿って列状に並ぶと考えられ、先行研究(榎谷ほか,2023)で、炭酸水素イオンが殿上山断層のトレーサーとして有効であることが確認されている。

そこで、私たちは、調査地域の山林や民家をまわり、地下水や湧水のサンプルを採取し、含まれる炭酸水素イオンやフッ化物イオンなどの濃度を測定し、比較することで、殿上山断層を含む3本の活断層のルート进行调查した。なお、採水した地下水は 50mL の遠沈管に入れ、測定の日まで 5℃で冷蔵保存した。また、炭酸水素イオン濃度は、環境省自然環境局(2014)にしたがい、ブロモクレゾールグリーン/メチルレッド・エタノール溶液を試薬とし、0.1mol/L 塩酸を用いた中和滴定で分析を行い、その他のイオン濃度はイオンクロマトグラフィーで分析した。また、イオン濃度は2回ずつ測定し、平均値を求めた。

3 結果

本研究では、東西方向の走向をもつ、殿上山断層を含めた3本の活断層のルートを調べるために、図8に示した赤枠の範囲を調査した。また、地下水や湧水中の炭酸水素イオンやフッ化物イオンの濃度は、段階別に色分けして地形図上に記録した。図9は炭酸水素イオン濃度の段階区分、また図 10 はフッ化物イオン濃度の段階区分を示している。

図 11 は、採水した 122ヶ所の採水地(●で表示)と、先行研究(榎谷ほか,2023)の 111ヶ所の採水地の位置(●で表示)を示したものである。

また、表1は各採水地での地下水や湧水中のフッ化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度を示したものである。この結果を図9、図 10 の区分にしたがって色分けし、地形図上に記録したところ、炭酸水素イオンは図 12、フッ化物イオンは図 13 に示す結果となった。なお、採水した地下水を 1ヶ月間、5℃で冷蔵保存しても、炭酸水素イオンとフッ化物イオンの濃度はほとんど変化しなかった。

4 考察

(1) 炭酸水素イオンのトレーサーとしての有効性

調査した地域には、東西方向に北から白樺山断層、殿上山断層、松ヶ谷断層が分布している。図 12 を見ると、殿上山断層が通過していると考えられる一帯には、地下水中に高濃度の炭酸水素イオン(地形図上の濃度分布が局所的になる濃度、101mg/L 以上)を含む地点が多数分布し、その地点が列状に並んでいるように見える。昨年度の研究(榎谷ほか,2023)で、殿上山断層のルート追跡に炭酸水素イオンが有効であることが示されているが、私たちの研究で、そのことがさらに明確になったと考える。ただ、国土地理院による活断層図に示された殿上山断層の周辺からは、高濃度の炭酸水素イオンを含む地下水や湧水は見つかっていない。当該地域が山中のため、調査しにくいこともあるが、標高が 200~600mと高く、地下水が上昇しにくいことも考えられるため、調査方法の検討が必要であると考ええる。

一方、白樺山断層と松ヶ谷断層が通過していると考えられている一帯からは、地下水中に高濃度の炭酸水素イオンを含む地点は見つかっていない。調査した範囲では、高濃度の炭酸水素イオンは、殿上山断層の断層破碎帯を上昇してくる炭酸泉が起源となっているため、白樺山断層と松ヶ谷断層は、炭酸水素イオンでは追跡できない可能性がある。

(2)フッ化物イオンで殿上山断層のルート追跡は可能か

上河内鉱泉(図8)を起源とする炭酸泉にはフッ化物イオンが含まれていない。しかし、地下に断層破碎帯があると、本校の先行研究(石塚ほか,2020、大友ほか,2021、安達ほか,2022)で示されているように、炭酸泉とは別に、地下深部からフッ化物イオンを多く含んだ地下水が上昇し、地表付近の地下水のフッ化物イオン濃度が上昇する場合がある。伊自良(いじら)温泉やラポーゼかわだの温泉(図8)に、炭酸水素イオンのほかに高濃度のフッ化物イオン(それぞれ0.872mg/Lと1.701mg/L)が含まれているのはこのためであると考えられる。私たちの研究では、山中でのルート追跡はできなかったが、山の周辺部や平地では、地下水に含まれるフッ化物イオン濃度が高い(地形図上の濃度分布が局所的になる濃度、0.051mg/L以上)地点が列状に並び、炭酸水素イオン濃度が高い地点の分布とほぼ一致した(図13)。したがって、フッ化物イオンでも殿上山断層のルート追跡は可能であると考えられる。

(3)殿上山断層のルート

地下水中の炭酸水素イオンの濃度分布を示した図(図12)を見ると、国土地理院による活断層図に示された殿上山断層の西端から西側に向かって、高濃度の地点が湾曲しながら列状に並んでいるのが確認できる(図12中の茶色の曲線)。また、フッ化物イオンの濃度分布を示した図(図13)を見ても、高濃度の地点が列状に並び、これらの地点を結ぶと、炭酸水素イオンの場合とほぼ同じ曲線を描くことができる(図13中の茶色の曲線)。したがって、この曲線に沿って地下に断層破碎帯が存在していると考えられる。

一方、国土地理院による活断層図に示された殿上山断層のルートは、図12・13中に示された茶色の曲線の東側の山中に存在する。そして、このルートは、私たちが利用した2つのイオン

では追跡できていない。しかし、図12・13中の茶色の曲線は、明らかに活断層図の殿上山断層の延長線上に位置するため、殿上山断層は、図12・13中の茶色の曲線のルートで西側に伸びていると考えられる。

(4)殿上山断層帯は存在するか

炭酸水素イオンもフッ化物イオンも、地下水の移動に伴い、断層破碎帯や地下水が通りやすい部分を通して移動するため、地下の構造を反映していると考えられる。そこで、2つのイオンの濃度分布を重ね合わせて断層のルートを推定するために、図11に示された233ヶ所の採水地の中で、前述した炭酸水素イオン濃度が高いと判断できる101mg/L以上の地点、および、フッ化物イオン濃度が高いと判断できる0.051mg/L以上の地点を赤のプロットで表示した(図14)。この図を見ると、図12・13から考えられる殿上山断層のルート(茶色の曲線)の南側に、紫色の点線で示した列状に並んだように見える赤のプロットの配列が確認できる。活断層図には、この場所に断層を示すラインは引かれていないが、もしこの地点に断層が存在すれば、炭酸水素イオンで追跡できる断層が雁行することになり、殿上山断層が断層帯を形成していることになる。ただ、当該地域では、それを確認するだけの十分なサンプルが得られていないため、継続調査が必要である。

5 結論・課題

本研究では、地下水に含まれる炭酸水素イオンとフッ化物イオンの濃度を測定し、比較することで、殿上山断層のルートに関して次の3点を明らかにすることができた。

- ・殿上山断層のトレーサーとして、炭酸水素イオンのほかにフッ化物イオンも有効なこと。
- ・殿上山断層は、国土地理院による活断層図に示されたルートのさらに西側に伸びていること。
- ・殿上山断層は、2本の断層を含む断層帯を形

成している可能性があること。

一方で、まだ解明できていない次の点を今後の課題とする。

- ・地下水中のイオンで追跡できていない山中での調査法の考案
- ・殿上山断層帯の明確化
- ・白椿山断層と松ヶ谷断層のルートの解明

参考文献

安達美悠ほか,2022. 地下水の分析は断層のルート解明に有効である ～沖積層に覆われた断層のルート解明に挑む～. 武生高校課題研究論文集:28-37.

石塚千夏ほか,2020. 動き出した？ 鯖江断層ー湧き水を用いて断層のルートを探るー. 武生高校課題研究論文集:26-35.

環境省自然環境局,2014. 鉱泉分析法指針(平成 26 年改訂):163pp.

榎谷ほか,2023. 殿上山断層は鯖江断層と交差するか ～炭酸水素イオンをトレーサーとした断層のルート追跡～. 武生高校課題研究論文集:22-29.

岡田篤正,1979. 愛知県の地質・地盤(その4). 愛知県防災会議地震部会.

岡本拓夫ほか,2008. 2007 年 12 月 21 日に鯖江市東部付近で発生したM4.5 について. 月刊地球,30(10):431-438.

岡本拓夫ほか,2010. 福井県鯖江市付近に認められる低地震活動域とそのテクトニクス. 福井高専研究紀要(44):35-40.

大友奈々ほか,2021. 鯖江断層は越前市村国山を通るー湧き水を用いて村国山における断層のルートを解明ー. 武生高校課題研究論文集:28-31.

<https://www.gsi.go.jp/top.html>(国土地理院ホームページ)

謝辞

本研究を進めるにあたり、地震や断層に関する多くの御教示をいただいた福井工業高等専門学校岡本拓夫名誉教授、湧き水のイオン分析でお世話になった福井県教育総合研究所理科教育課の今澤泰秀課長にお礼申し上げます。

図表・画像

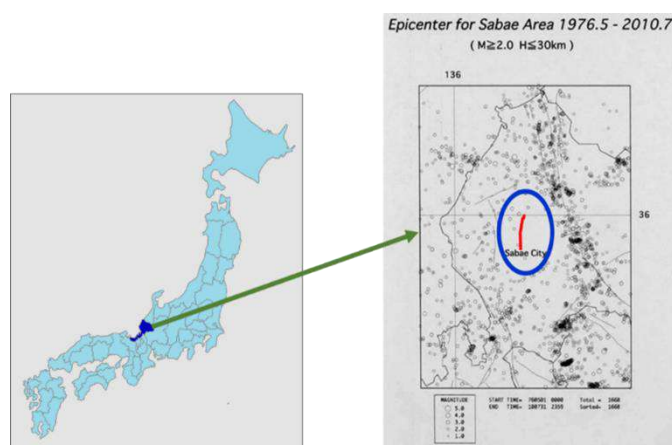


図 1. 鯖江断層周辺の地震の空白域
(岡本ほか,2010 より引用)

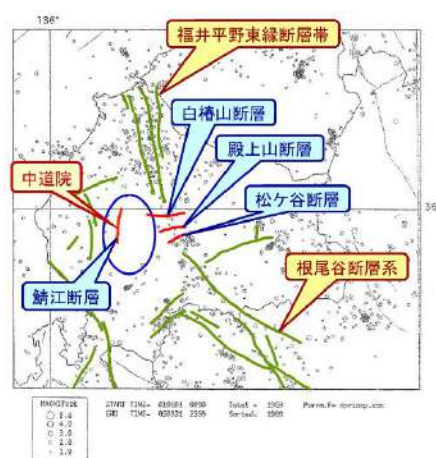


Fig. 6 Distribution of earthquakes with $M \geq 1.0$, $h \leq 30$ km after Okamoto et al., 2007

図 2. 福井県嶺北地方の活断層
(岡本ほか,2008 より引用)