

流域における水循環系理解のための同位体技術の適用 —福井県大野盆地における事例—

池田 浩一

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 (〒305-0821茨城県つくば市天王台1-1-1)

地下水資源は有限であり、適切な管理が必要である。地下水は、地域特有の地質および水循環と人為的な水循環の影響を受け成り立っている貴重な水資源と認識することが極めて重要である。同位体技術を用いた検討では、山地から平野への地形的な変換域が地下水涵養域として重要であることが示され、これらを意識した理解が、持続可能性を検討する際には重要となる。

キーワード 地下水, 水循環, 水素・酸素安定同位体比, ストロンチウム同位体組成

1. はじめに

地下水資源は有限であり、適切な管理が必要である。しかし、近年、地下水位の低下に伴う井戸枯れ、湧水の枯渇、あるいは水質汚染などの問題が発生している。魅力的な地域づくりを進めるためには、地下水を将来にわたって活用できる状態にしていくことが不可欠である。

大野市では、1960年代から地下水位低下の問題が発生している。これは、上流域における電源・農業開発に伴う地下水涵養量の減少および下流域における繊維工業の発展に伴う地下水揚水量の増加が素因として影響していることが報告されている¹⁾。また、地下水による融雪を誘因として突発的に井戸枯れが発生していることが述べられている¹⁾。

そのため、近年、大野市では地下水が地域特有の地質および水循環と人為的な水循環の影響を受け成り立っている貴重な水資源と認識(図-1参照)し、「持続的な地下水の保全と利用の調和」を基本理念として、地域全体で保全対策に取り組んでいる²⁾。その一環として、大きな保水能力を持つ森林や水田の涵養機能を可能な限り保全していく施策が挙げられ²⁾、その過程において涵養による機能を最大限活用するためには、大野市全域を考慮した水循環系の理解が極めて重要になってくる。

そこで本稿では水の挙動に依存する特性を持ち、涵養標高や地下水流動過程を検討する際に用いられる水素・酸素安定同位体比と水中に溶存する形態で存在し、流域を構成する岩石の同位体比を反映するストロンチウム同位体組成(以下Sr同位体組成)を用いて、流域における水循環系の検討を行った事例について報告する。

2. 同位体技術の適用

水循環系の理解に用いられる水素・酸素安定同位体を含む軽元素同位体が、地表水や地下水などの各種環境水を対象に研究され始めたのは1960年代であり、主に国際原子力機関(IAEA)を中心に推進され、1970年代には同位体水文学という新しい学問分野を生み出した³⁾。

同位体は、同じ元素でありながら、質量が異なる原子を表しており、その同位体には、放射性を発生して壊変する不安定な放射性同位体と、常に安定な安定同位体が存在する。質量数の違いにより物質の物理的・化学的性質が異なる現象は同位体効果と呼ばれ、軽元素において顕著であることが知られている⁴⁾。一般的に地下水や地表水のトレーサーとして用いられる水素・酸素安定同位体比は、水の涵養源やプロセスなどを検討するために利用される⁵⁾。

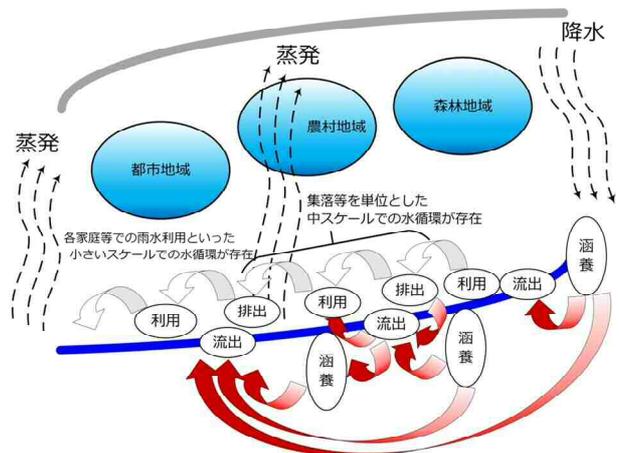


図-1 流域スケールにおける水循環系の概念

これは、同位体比における同位体分別を利用して、水が涵養された標高や地域、また、降水量による影響を検討するのに有効である⁶⁾。

近年では、水の挙動に依存する軽元素同位体とは異なる挙動を示すSr同位体がトレーサーとして利用されている⁷⁾。Sr同位体は水中に溶存する形態で存在し、軽元素安定同位体で見られるような蒸発・拡散・酸化還元といった物理化学過程や生物における代謝過程での同位体分別が無視できると考えられており、異なるSr同位体組成をもつ物質の混合過程によってのみ値が変化するという特徴がある。

3. 大野盆地および周辺地域概要

福井県大野市で利用される地下水は大部分が不圧（浅層）地下水であり、市街地において盛んに利用されている。市街地には名水百選の一つである「御清水」や、イトヨの生息地として国の天然記念物に指定されている「本願清水」をはじめ、数多くの湧水が点在する。

福井県地方気象台の観測によると、大野市は年間2368mm（昭和52年～平成13年平均値）の降水があり、全国平均の約1800mmを大きく上回っている⁸⁾。

大野市で見られる地形は、山地、段丘、および低地に大別される⁸⁾。図-2に示すように山地は大野盆地の周囲を占め、北東部は加賀越前山地、南部は美濃越前山地、西部は越前中央山地が連なる。また、大野盆地は主に段丘（中位・低位面）と岩層なだれ（火山性泥流堆積物）、氾濫原により構成される。表層地質についてみると、大野盆地の四囲の山地を構成する地質は図-3に示すように、飛騨片麻岩・結晶片岩地から成る変成岩類、砂岩・頁岩などの堆積岩、これらに貫入する花崗岩・閃緑岩、あるいは安山岩ならびに火山性碎屑岩類などから構成される⁸⁾。また、中生代より古い地層は大野盆地の東～南域に分布し、新第三紀以降の安山岩やこれに伴う火山性碎屑岩類は分地の北～西域に広く分布する⁸⁾。盆地内を流れる九頭竜川、真名川、清滝川、赤根川の4河川について地形的流域で分類し、各々の流域面積を算出すると、それぞれ597.66km²、259.85km²、40.48km²、44.53km²となる。

4. 調査概要

同位体技術の適用による水循環系の理解の手法において、現地調査、室内分析、降水採取を行い、それらの結果を基に解析を行った。詳細については、以下に示す。

(1) 現地調査

調査は2013年10月21日から11月21日にかけて実施した。

地下水255地点、湧水3地点、地表水112地点を対象に調査を行った。採水地点については、図-2に示しており、赤い●印は地表水調査地点を、黒い●印は地下水調査地点を示す。

(2) 室内分析

現地で採取した水試料について、水素・酸素安定同位体比は、水同位体アナライザー（Picarro L2130-i）を用いて $\delta^{18}\text{O}$ および δD の同位体比を測定した。また、Sr同位体組成は、高分解能マルチコレクターICP-MS（サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社二重収束型マルチコレクターICP-MS NEPTUNE）を用いて $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ について測定した。

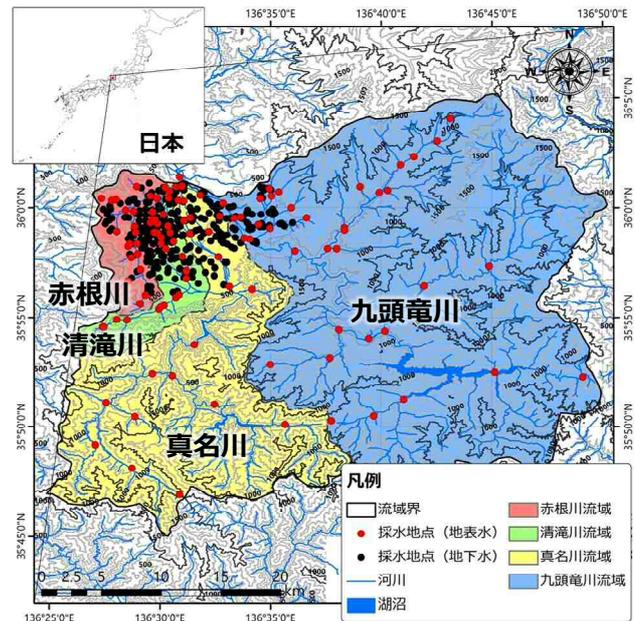


図-2 大野盆地を含む流域の地形図

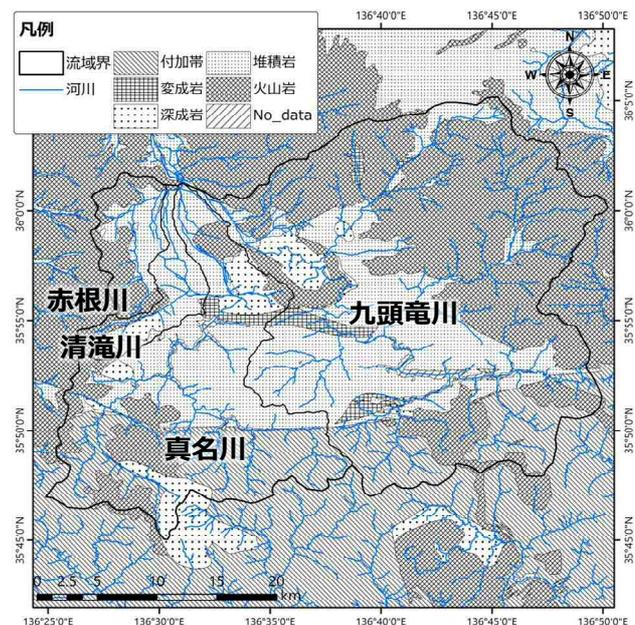


図-3 大野盆地を含む流域の地質図
(産業総合研究所より作成⁹⁾)

5. 同位体マッピングによる水循環系の把握

(1) 涵養域における地表水の同位体の特徴

a) 酸素安定同位体比の空間分布

各流域の地表水の酸素安定同位体比は、涵養された平均標高を反映する。複数の支流が流下し、さらに本流と合流する過程において各々の河川の同位体比が特徴づけられる。図-4で示すように、標高が低い赤根川で最も高い値を示し、東に進むに従い同位体比は低くなり、九頭竜川において最も低い値を示す。

b) Sr同位体組成の空間分布

Sr同位体組成は、地質の形成年代に依存し、形成年代の若い火山岩地域が卓越する赤根川流域において、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は低い値を示す。形成年代の古い地質が卓越する地域において $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は高くなる。同様に、形成年代の若い火山岩が卓越する九頭竜川支流の唐谷川流域において、0.7072-0.7076程度を示す。堆積岩や付加帯が卓越する地域において、相対的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高い値を示す傾向にあるが、流域全体の示す傾向として、地質の形成年代が西から東に向かって古くなる傾向に則り、赤根川において $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が低い値を示し、東に進むに従い高くなり、九頭竜川において最も高い値を示す。

(3) 盆地域における地下水の同位体の特徴

a) 酸素安定同位体比の空間分布

大野盆地における地下水の酸素安定同位体比の空間分布を図-5に示す。赤根川流域は、盆地南部において河川から涵養が強い傾向がみられ、流域の涵養標高により特徴づけられた地下水の流動が支配的である。ただし、赤

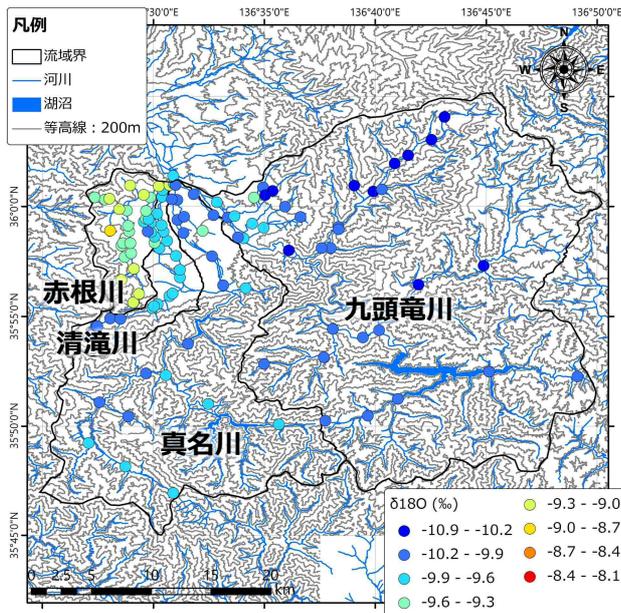


図-4 涵養域における地表水の酸素安定同位体比

根川流域の地下水および河川水と降水の $\delta^{18}\text{O}$ の差が小さいことから、明瞭な差があるように見えない特徴を有する。清滝川流域は、盆地南部において、降水と河川水との混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられ、地形勾配に則り、南から北へ向かう地下水の流動が支配的であることが示唆される。真名川流域は、左岸と右岸では地形的特徴が異なるため、各々考察する必要がある。左岸側は地形区分では氾濫原として、右岸側は段丘の中位面として扱われている⁹⁾。左岸は清滝川流域のプロセスと同様に、盆地南部において相対的に同位体比の低い河川水と降水の $\delta^{18}\text{O}$ の混合により地下水の同位体比が特徴づけられ、それらが地形勾配に則り、南から北に向かう地下水の流動が支配的である。右岸は局所的に $\delta^{18}\text{O}$ の高い地点が確認され、降水による涵養の影響が強く見えるが、詳細については検討が必要である。九頭竜川流域においても左岸と右岸では地形的特徴が異なるため、各々考察が必要である。左岸側は氾濫原として、右岸側は火山泥流により形成される地域として扱われている⁹⁾。左岸側は盆地南部において相対的に $\delta^{18}\text{O}$ の低い河川水と降水の同位体比の混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられ、それらが地形勾配に則り、南から北に向かう地下水の流動が支配的である。右岸側は、上流域で涵養され特徴づけられた地下水が地形勾配により東から西に向かって流下し、その後標高の低い地点において降水との混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられる。また盆地北部において、河川水に比べて相対的に $\delta^{18}\text{O}$ の高い地下水が河川へ流入することにより、河川水の値が高くなる地点が確認された。

b) Sr同位体組成の空間分布

赤根川流域は、盆地南部において河川から地下水へ涵養され、それが流下する傾向と、西側山地から地質を反

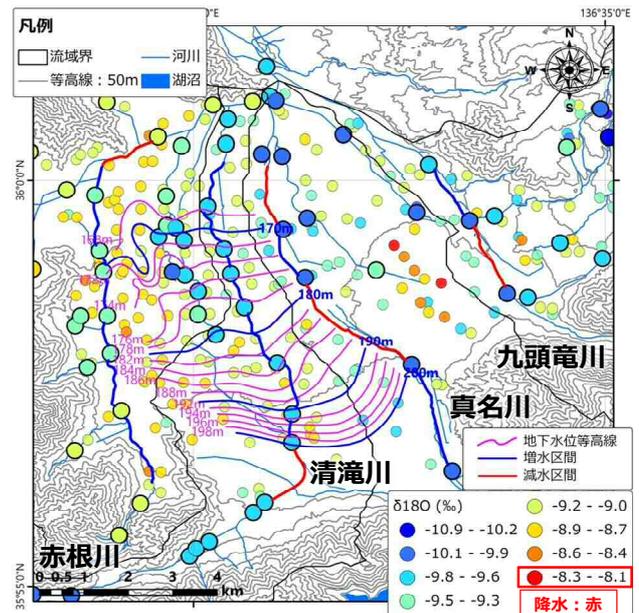


図-5 大野盆地における地下水の酸素安定同位体比

映した地表水および地下水の流入により流域内の地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられている。清滝川流域は、盆地南部において、河川水と降水との混合により地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられ、地形勾配に則り、南から北へ流下する。盆地中央部において、真名川流域で特徴づけられた地下水の影響により、盆地中央部から北部の狭窄部に向けて高い値を示す。酸素安定同位体比では変化が明瞭に見られなかったが、清滝川の河川水は真名川流域の地下水の影響により、流下に伴い河川水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高くなる傾向を示す。また、これらは現地で測定した地下水位の空間的な特徴および河川流量の状況から見られる結果と概ね一致している。真名川流域の左岸側は、盆地南部において河川から涵養が強い傾向がみられ、降水との混合により特徴づけられた地下水の流動が支配的である。右岸側では、段丘の中位面の南部に位置する荒島岳において特徴づけられた地下水が段丘方向に流下し、その後、降水との混合により、段丘の地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられている可能性が示唆されるが、詳細については検討が必要である。九頭竜川流域の右岸側は、地質を反映した $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の低い地下水が東から西に向かう流動が支配的であると示唆される。また酸素安定同位体比の傾向と同様に、盆地北部において、河川水に比べて相対的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が低い地下水が河川へ流入することにより、河川水の値が低くなる地点が確認された。左岸側では、盆地南部で河川水と降水との混合により特徴づけられた地下水が南から北に向かって流下する。後に盆地北部において河川から地下水への涵養が支配的な地点が見受けられ、その影響により特徴づけられた地下水が、狭窄部に向かう流動が支配的であることが示唆される。

5. まとめ

各同位体より推定される大野盆地における各河川とその近傍の地下水の関係について、以下のような特徴を持つ。

- 1) 赤根川流域の地下水は、盆地南部で涵養された地下水と西側山地より流下する地表水および地下水を受け特徴づけられている。
- 2) 清滝川流域の地下水は、盆地南部において河川水と降水の混合により特徴づけられ、それらが南から北へ向かう流動が支配的である。盆地中央部において真名川流域の地下水の影響を受けている傾向がみられ、それらの地下水が河川に流入することにより、河川の同位体組成は流下に伴い変化する。よって、清滝川は得水河川として機能している可能性が示唆される。
- 3) 真名川流域の左岸側の地下水は、盆地南部において南から北へ向かう流動が支配的である。右岸側の地下水は、段丘南部に位置する荒島岳から流下する地

下水が、段丘地域において降水による涵養の影響を受けている可能性が示唆されるが、詳細については更なる検討が必要である。

- 4) 九頭竜川流域の左岸側地下水は、盆地南部において河川水と降水の混合により特徴づけられ、盆地中央部に向けて南から北に向かう流動が支配的である。盆地中央部にて、河川からの涵養による影響を受けた地下水が、狭窄部に向かう流動が支配的であることが示唆される。右岸側は、標高の高い地域で涵養された地下水が、地形勾配に則り東から西に向かう流動が支配的である。
- 5) 河川からの影響度合いは各々の河川により異なるが、盆地南部、すなわち山地から平野への地形的な変換域が地下水涵養域として重要である。これらを意識した水循環系の理解が、水資源の持続可能性を検討する際には重要となる。

謝辞：大野市役所 産経建設部の職員の方々をはじめ、地下水調査にご協力いただいた大野市の住民の方々、分析にご協力いただいた総合地球環境学研究所の中野孝教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 杉谷 隆 (2001) : 福井県大野盆地の家庭浅井戸枯渇問題に見る住民の環境認識. 地学雑誌, 110 (3), 339-354.
- 2) 大野市役所生活環境課 (2006) : 大野市地下水保全計画. 41p.
- 3) 水谷義彦 (1989) : 環境水の地球化学的研究における水素同位体の役割. 富山大学トリリウム科学センター研究報告. 9, 23-37.
- 4) 松尾禎士 (1989) : 地球化学. 講談社, 266p.
- 5) 田瀬則雄 (2003) : 水文学における環境同位体の利用. 工業化学, 67, 97-99.
- 6) Tsujimura, M., Ikeda, K., Tanaka, T., Janchivdorj, L., Erdenchimeg, B., Unurjargal, D. and Jayakumar, R. (2013) : Groundwater and surface water interactions in an alluvial plain, Tuul River Basin, Ulaanbaatar, Mongolia. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 5 (1), 126-132.
- 7) Nakano, T., Saitoh, Y., Tokumasu, M. (2008) : Geological and human impacts on the aquifer system of the Saijo basin, western Japan. *Proceedings of 36th IAH Congress*.
- 8) 大野市 (2003) : 大野市地下水総合調査業務概要報告書, 57p.
- 9) 産業技術総合研究所 (2014) : 日本シームレス地質図. <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2015/6/5 閲覧) .