

水の酸素安定同位体の水文地質調査への適用

サンコーコンサルタント株式会社 ○徳永 貴大, 飯野 竜一, 渡辺 喜彦

1. はじめに

建設工事では、地下掘削や地形改変により周辺水源に影響が生じることが多々ある。工事との関連性を把握するための一般的な水文調査として、流量、水位、簡易水質測定その他、溶存イオンの水質分析が行われるが、従来から地下水の涵養源と流動機構の解明に使用されてきた水の酸素・水素安定同位体は、まだメジャーな手法として取り扱われていない。

本稿では、水の酸素安定同位体について、日本各地のデータを用いて特性をとりまとめた上で、水文地質調査へ適用した事例について述べる。

2. 水の酸素・水素安定同位体について

水を構成する酸素と水素は、質量数の異なる安定同位体が存在し、水が蒸発する際に軽い同位体から選択的に水蒸気となり、水蒸気が凝縮する際に重い同位体から選択的に水となる特性（同位体分別）がある。これにより降水の同位体比の空間的な分布に差異が生じ、大陸～地球規模では、低緯度地域から高緯度地域に向かって同位体比が低下する（緯度効果・温度効果）。流域～大陸規模では、海岸部から内陸部に向かって同位体比が低下する（内陸効果）。また局所的な規模では、山地の低標高域から高標高域に向かって同位体比が低下する（高度効果）¹⁾。一方、同位体比は地下水の流動過程において変化しないため、地下水の起源、涵養した環境、貯留・流動中の混合の検討に有効なトレーサーとして利用される。

しかしながら、安定同位体が各水質基準項目でないことや地形条件に適用性があることなどから、水文調査業務の中で容易に利用できる段階まで至っていない。本稿では、適用条件と効率化を考慮して、より実績が多い酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）に焦点をあてた内容を記載する。

3. 日本各地の酸素安定同位体比

(1) 降雨・沢水・湧水・地下水の時系列変動

図-1は、九州地方および中部地方における酸素安定同位体比の時系列変動図であり、降水の同位体比は降雨イベントによって大きく変化しているが、沢水・湧水・地下水の同位体比は、降水と比較して安定している。これは、水が地下で混合し、降水が持つ同位体の季節変化などが打ち消されるためである¹⁾。図-2のとおり、地表水や浅層地下水に関しては、日本全国の同位体比分布が示されており、同位体比が地域によって異なることがわかる。

ただし、沢水・湧水・地下水の同位体比は安定するものの、蒸発や他水系からの流入によって大きく変動する場合があるため、調査時期などには留意する必要がある。

逆に言えば、他水系からの混合などを検討する場合に有効なトレーサーであるともいえる。

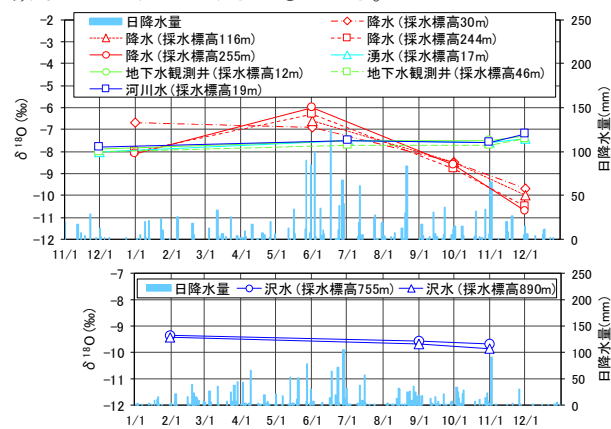


図-1 酸素安定同位体比の時系列変動図²⁾

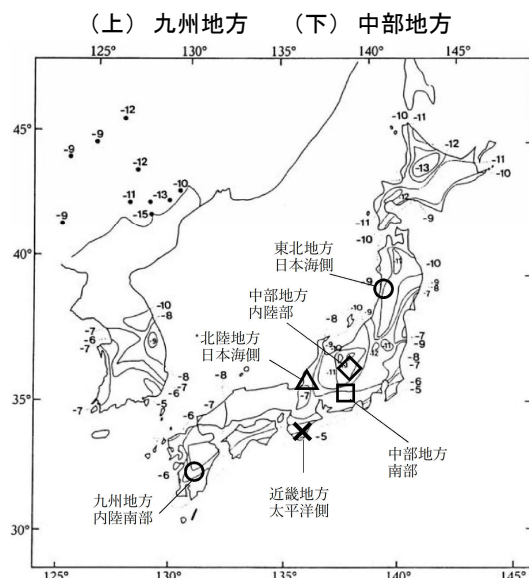


図-2 日本における地表水・浅層地下水の酸素安定同位体比の分布および本発表で調査した対象地区³⁾

(2) 地表水の酸素安定同位体比を用いた高度効果

高度効果や地下水流動において同位体分別が生じないことを利用して、地下水の平均涵養標高を求める調査や研究が多く行われている。以下に地下水の同位体比と標高との関係式（地下水涵養線）を求める方法を示す⁴⁾。

- ① 地形的に判断して集水域が限定される湧水・沢水を標高別に選定する。
- ② 集水域の平均標高（平均涵養標高）を求める。
- ③ 同位体比と涵養標高との関係式を作成する。

図-3は、日本各地の地表水の酸素安定同位体比と採水流域平均標高の関係図に近似式から求まる地下水涵養線をプロットした図である。図から中部地方内陸部の同位体比は内陸効果とみられる低い値を示す。また、各地域の地表水の涵養線は $\delta^{18}\text{O}$: $-0.30 \sim -0.08\text{‰}/100\text{m}$ であり、

地域によって異なる傾向を示す。なお、地表水の涵養線は、日本海側で傾きが小さく、太平洋側で傾きが大きい傾向がみられたが、全国的な傾向であるかは不明である。

ここで、一般的な酸素安定同位体比の分析誤差は±0.1‰程度であることから、今回対象とした地域の地表水の高度効果の誤差を試算すると、±20～100m 程度の誤差が生じることとなる。これを考慮すると、採水地点と涵養地点の標高差が最低でも200m 程度ないと有効な検討ができない可能性がある。

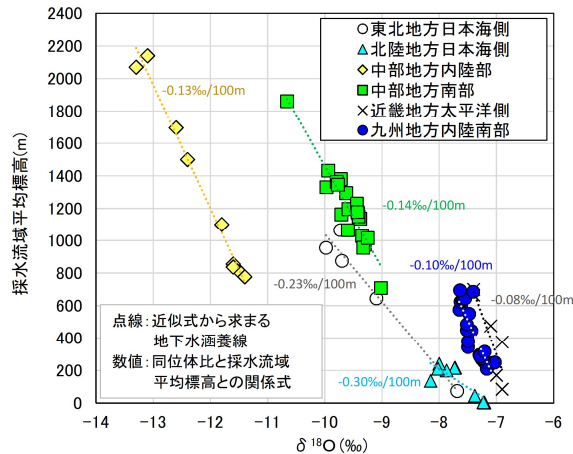


図-3 酸素安定同位体比と採水流域平均標高の関係図

4. 水文地質調査への適用例

水文地質調査では、水文地質・地下水流動特性を把握することで工事による影響を予測するとともに、対策検討に資する情報を取得しなければならない。ここでは、酸素安定同位体を併用したことで、解明できた地下水流動や工事との関連性を評価した事例を述べる。

図-4は、採水地点の標高と酸素安定同位体比の関係図である。前述したとおり、調査対象水源の酸素安定同位体比を地下水涵養線と比較することで、水源水の平均的な涵養標高を把握することが可能になる。例えば、湧水Aの平均涵養標高は1700m 程度と推測できる。

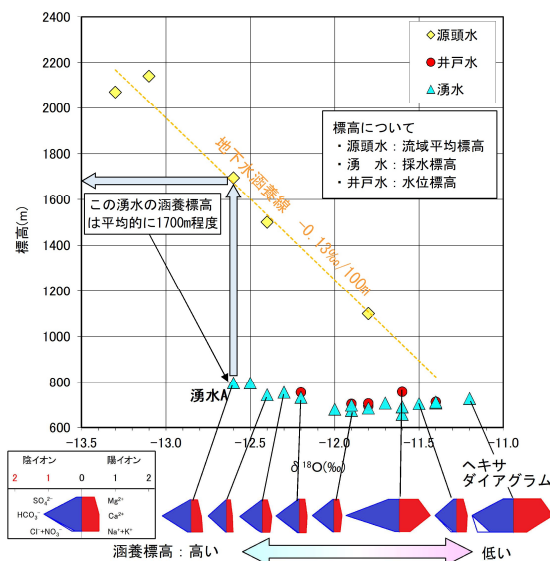


図-4 酸素安定同位体比による涵養標高とヘキサダイアグラム

涵養標高とヘキサダイアグラムの関係を見ると、涵養標高の低い湧水・井戸は溶存成分が多いものも含む。標高の低い地下水には、循環の遅い地下水、溶出性の高い地質の存在、人為的現象などの要因が考えられる。

一般に地下流動期間が長い地下水ほど溶存成分が多くなると解釈することもあるが、溶存イオンの他に酸素安定同位体分析を併用することにより、涵養標高や循環性を含めた地下水の性状を区分することが可能になる。

地下水の性状を把握することは、工事との関連性を検討する際に非常に有効である。例えば、図-5に示す条件の場合、地下水系統の区分結果と工事域でのボーリング調査・地下水観測孔による帯水層深度・水位・酸素安定同位体比の比較により、工事との関連性を評価できる。

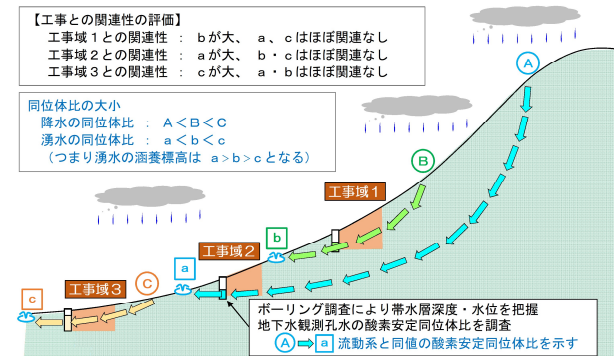


図-5 地下水流動と工事位置の模式図

5. まとめ

本稿では、日本各地の酸素安定同位体比のデータを取りまとめて、水文地質調査による適用事例を紹介した。以下に酸素安定同位体の適用性についてまとめる。

- ① 沢水・湧水・地下水の酸素安定同位体比は年間を通じて安定しており、地下水流動特性や涵養標高の検討に資する情報などを効果的に取得できる。
- ② 分析誤差を考慮すると、採水地点と涵養地点の標高差が200m 以上あれば適用性が高い。
- ③ 水文地質調査時に酸素安定同位体を併用することで、地下水系統を区分し、工事との関連性をより詳細に解明できる可能性がある。

《引用・参考文献》

- 1) 林武司 (2005) : 酸素・水素安定同位体比を用いた地下水調査, 地下水技術, 第47巻, 第8号, 27
- 2) 気象庁アメダス : (最終閲覧日2025. 5. 15), <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 3) Mizota. C., Kusakabe. M. (1994) (に加筆) : Spatial distribution of δD - $\delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, Geochemical Journal, 28, pp.387-410
- 4) 中井信之・菊田直子・土 隆一 (1995) : 富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学への応用, ハイドロロジー, 25 (2), 71-81