

(32) 岩盤内地下水に対する地化学的評価法の適用について

鹿島技術研究所 正会員 日比谷 啓介

鹿島技術研究所 正会員 ○升元 一彦

Application of Geochemical Method for Evaluation of Groundwater Flow in Rock Mass

Keisuke HIBIYA, Kajima Technical Research Institute

Kazuhiko MASUMOTO, Kajima Technical Research Institute

Abstract

The recent plans for various utilization of underground space is promoting the development of advanced methods for surveying groundwater movement in the rock mass. Especially, the construction of the underground repository of high level radioactive waste requires the detailed and accurate evaluation of the deep and regional groundwater flow in the surrounding rock mass to assure the performance of natural barrier. The only prospective technique is geochemical method, which makes it possible to get the information such as recharge area, resident time, and source of groundwater by means of the analysis of dissolved chemical components.

Some useful results of the geochemical method applied to the tunnel under construction are shown in this paper. In the conclusion, the multivariate analysis for the major dissolved ions and the quantitative analysis of environmental isotopes leads to the successful understanding of groundwater flow and its change in the rock mass in broader area.

1. はじめに

近年の岩盤構造物の用途、規模の多様化に伴い、岩盤内の地下水に関連する技術的検討課題も多様化している。例えば、トンネルや地下発電所の施工時には、坑内湧水対策や地表沢の枯渇等の周辺地表環境への影響対策が必要であり、水封方式の燃料類地下備蓄空洞等の地下水を利用した構造物では、さらに地下水位を制御する対策が必要である。また、現在、岩盤内に建設が予定されている高レベル放射性廃棄物地層処分場については、以上の検討課題に加えて、サイトの選定や天然バリアとしての岩盤の評価という観点から、これまであまり問題にされなかった地下深部における地下水挙動の高精度な調査が必要になっている。

これらのニーズに対しては、透水試験等による岩盤の透水特性の把握の他に、地下水の涵養域、起源、滞留時間といった、広域における地下水流動の実態に関する情報が有用であることは既に指摘されている¹⁾。また、定量的評価を行うためには、岩盤内の地下水流動をモデル化し数値解析を行う方法が有効であるが、この場合、実際の岩盤内の流動に関する情報を元に、いかに自然の流動現象に合致したモデル化を行うかといったことが重要である。局所的な岩盤内の流動の実態については、トレーサー試験等から亀裂内における透水チャンネルの存在の重要性が認識され²⁾、そのモデル化が検討されている³⁾が、広域、深部における岩盤内の流動の実態に関する報告例はまだ少ない⁴⁾。

本論文では、特に高レベル放射性廃棄物地層処分場の建設時に問題となる広域・深部における岩盤内の流動の実態を把握するための地下水の地化学的特性に着目した評価方法を適用した事例について述べる。

2. 地化学的評価方法

地下水は岩盤内を流動するに伴い、岩盤からのイオンの溶出、イオン間の交換反応、他の地下水との混合等の要因により地面に浸透した時に持っていた地化学的特性を変化させていく。そのため、地下水の溶存イオン、同位体、ガス等の地化学的特性はその地下水の起源となる水の相違や流動過程により多様な性質を示

すことになる。このことを利用し、得られた地化学的データを総合的に解析、解釈することにより、涵養域、起源、滞留時間等の地下水流動の実態に関する情報を把握することが可能になる。

今回、岩盤内地下水流動評価における地化学的手法の適用性を検証するため、地表地形が比較的単純で、岩盤もほぼ均質な岩体中に掘削中のトンネルサイトにおいて原位置採水及び水質、環境同位体分析を実施し、その分析結果について以下の検討を行った。

- 1) 主要イオンの多変量解析（主成分分析）を行い山体内の地下水間の関係を明らかにする。
- 2) 酸素の安定同位体の高度効果に着目して地下水の涵養域の違いを把握する。
- 3) 1)、2)の経時変化からトンネル掘削に伴う地下水流動形態の変化を把握する。

3. 原位置調査の概要

3. 1 調査地域

今回、調査を行ったトンネル周辺は南北に山地が連なり、トンネルに沿った断面ではほぼ左右対称の地形である。また、地質は花崗岩、花崗閃緑岩からなり、断層、破碎帯等の岩盤劣化部が数箇所確認されている（図-1）。トンネルは並行に2本掘削する計画で、1本は採水開始時に東側坑口から約2km掘削されており、もう1本は採水期間中掘削が行われていた。このトンネルの最大土かぶり厚は540mである。地下水位は、トンネル掘削前に地表からの数本のボーリングにより観測されており、山頂付近では地表から約150mの深度

にあった（図-2）。

3. 2 採水位置・分析項目

原位置採水は、図-1に示す箇所（坑内湧水6点、地表沢2点、降水3点）において、1993年2月から1994年9月まで計4回実施した（表-1）。なお、No.1では坑壁沿いのビニールシートからの滴

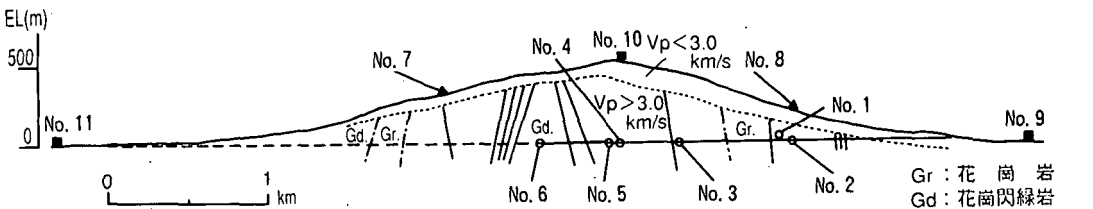
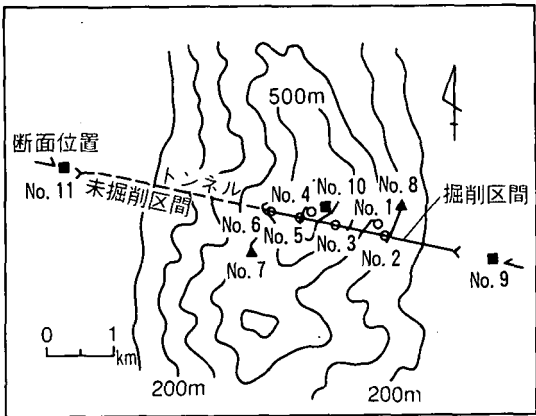


図-1 採水位置図

表-1 採水時期

採水日	'93.2.3	'93.7.2	'93.12.27	'94.9.22
坑内湧水○ No.1~6	◎	◎	◎	◎
地表沢▲ No.7,8	◎	◎	○	○
降水■ No.9~11	—	○ *6/8~7/2	○ *11/22~12/27	—

測定項目◎：一般水質+安定同位体+トリチウム
○：一般水質+安定同位体
*：降水の採水期間

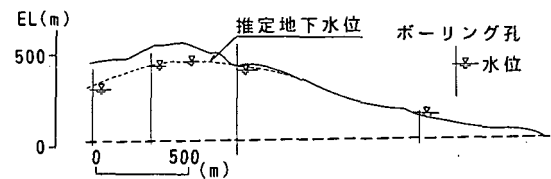


図-2 トンネル掘削前の推定地下水位

水、Na 2では坑壁の排水パイプからの湧水、Na 3、5、6では水平ボーリング孔湧水、Na 4では地表から貫通した鉛直ボーリング孔湧水をそれぞれ採取し、降水については約1ヶ月間の降雨を採取している。また、分析項目は、水温、pH、電気伝導度、主要溶存イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_2 , NO_3^-) と環境同位体 (^3H , ^{18}O , D) であった。

3. 3 分析結果

主要溶存イオンの分析結果を図-3のキーダイアグラム中表示する。この図から坑内湧水の分析結果は採水時期により多少の変動はみられるが、採水位置により分類されることがわかる。このことはイオン組成が、季節変動やトンネル掘削による影響よりも、その場所における地下水の特性を強く反映していることを示している。

また、一般に岩盤内の地下水では、岩石との接触時間が長いほど陽イオン間の交換反応が卓越するため、吸着力の弱いNaが解離することによって増加することが知られている⁵⁾。このことは、滞留時間の長い古い水ほど図-3のキーダイアグラム中で矢印の方向に変化していくことに対応しており、Na 2、3、6が比較的滞留時間の長い水であることがわかる。一方、Na 1はCaと HCO_3 の絶対量が非常に高く、電気伝導度も他と比べ

高くなっており、採水時の状況からも坑壁の吹付コンクリートの影響を受けたものと判断できる。このためNa 1を除外してイオン組成の分布を検討すると、山頂直下のNa 4、5よりもその周辺のNa 2、3、6で比較的古い水が出ていることがわかる。このことは、このトンネル周辺岩盤内の大局的な流動形態を反映していると考えられる。

次に、安定同位体の分析結果を $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ ダイアグラムで表したものを図-4に示す。一般に、標準海水に対する降水中の安定同位体存在比の偏差 δD , $\delta^{18}\text{O}$ には、地球規模で見た場合、 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ の関係があることが知られている⁶⁾。図-4に示すように、今回の降水の分析結果もほぼこの関係を満足し坑内湧水もこの直線上にのることから、坑内湧水の起源は降水であると考えられる。また、坑内湧水は、降水の季節変動の影響がかなり小さくなっており、坑内湧水の滞留時間が比較的長く、混合の程度が大きいことを示している。

4. 岩盤内地下水流動形態の検討

4. 1 主要イオンの主成分分析による評価

主要イオン組成がどのような要因により形成されているかを推定し、それによって各サンプル間の関係を調べることを目的として、坑内湧水と地表沢について主要イオンの主成分分析を行った。表-2に因子

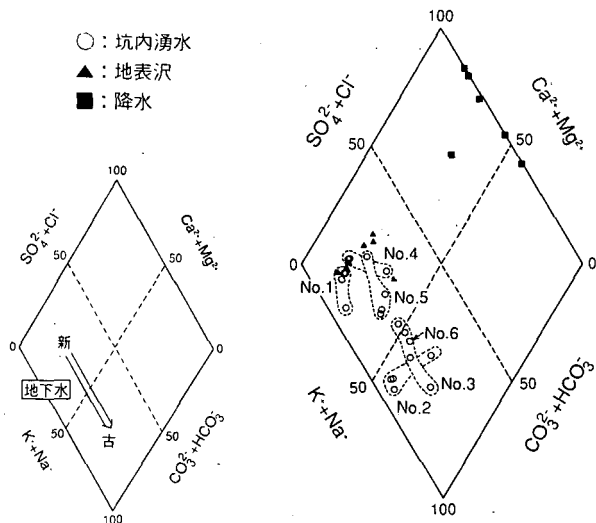


図-3 水質キーダイアグラム

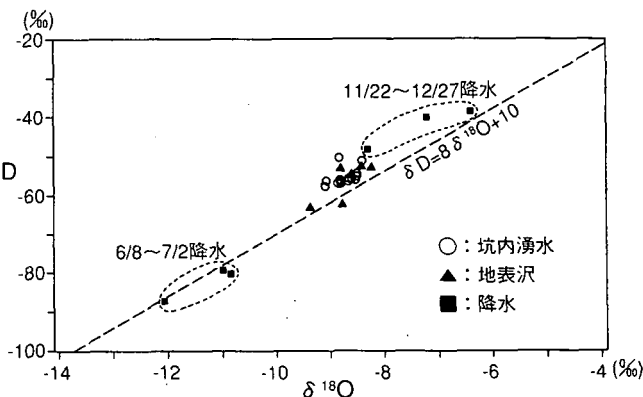


図-4 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ ダイアグラム

負荷量を、図-5に各サンプルの

第1、第2主成分スコアの散布図を示す。第1主成分 Z_1 の因子負荷量はNaが負で他の陽イオン(K, Ca, Mg)は正である。

これは第1主成分が陽イオン間のイオン交換反応を反映しており、陽イオン交換反応の卓越した古い水ほど主成分スコアが小さい値をとることを示している。一方、第2主成分 Z_2 の因子負荷量は陽イオンが全て正の値を示す。これは第2主成分が岩石からのイオン溶出反応を反映しており、イオン溶出反応の卓越した古い水ほど主成分スコアが大きい値をとることを示している。累積寄与率は、この第1、第2主成分で70%を超える寄与率を示していることから、主要イオン組成がこの2つの化学反応に大きく支配されていることがわかる。

次に、図-5の第1、第2主成分スコアの散布図において、イオン組成の異なるNa1を除くと、第1主成分が正に、第2主成分が負に向かう右下がりの傾向が読み取れる。その方向はイオン交換反応、イオン溶出反応の少ない新しい水になることと対応している。この結果、Na2、3、6はNa4、5と比較して古い水であったことがわかり、キーダイアグラムから推定された結果とも一致している。また、Na4が地表沢に近い所に分布していることは、このボーリング孔が地表から貫通しているため、地表近くの水を比較的多く混入している可能性を示している。

この散布図において経時的な変化を見てみると、Na2、5は第1主成分が大きくなり、イオン交換反応が減少していることを示している。また、Na3については、第1主成分は小さくなっているが、第2主成分も小さくなっており、イオン溶出反応が減少していることを示している。このことから、山体内の地下水が経時的に比較的新しい水に入れ替わりつつあることがわかる。

4. 2 酸素の安定同位体の高度効果による評価

酸素と水素の安定同位体には高度による依存性（高度効果）があることが知られている⁷⁾。これはある水蒸気団が山体を上昇して雨を降らせていく間に、レーリーの凝縮過程により重い同位体から凝縮されていくためと説明されている。図-6に示すように、この地域における降水の $\delta^{18}\text{O}$ は季節による変動が大きい、同一時期では高度100m当り $-0.20 \sim -0.28\text{‰}$ の変動が認められる。これは中部日本の降水において得られた高度100m当り -0.25‰ の値とほぼ一致している⁸⁾。地表沢にもこの傾向がみられ集水域の平均高度を反映しているものと考えられる。一方、坑内湧水については季節変動がほぼ平滑化されているため、涵養域の平均高度を反映した高度効果があることが期待できる。図-7によれば、採水

表-2 因子負荷量

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₃ ⁻	寄与率
Z1	-0.708	0.463	0.061	0.460	0.211	0.141	-0.008	0.068	-0.011	42.6%
Z2	0.416	0.679	0.352	0.394	-0.207	-0.177	0.104	-0.047	-0.001	28.4%
Z3	0.786	0.546	-0.107	-0.145	0.177	0.074	-0.095	-0.082	-0.015	12.5%
										累積寄与率 83.5%

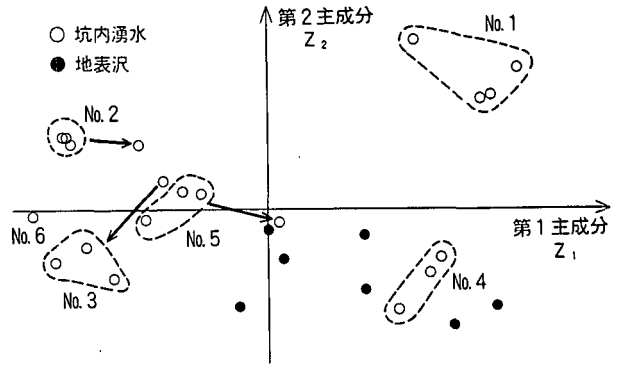


図-5 主成分スコアの散布図

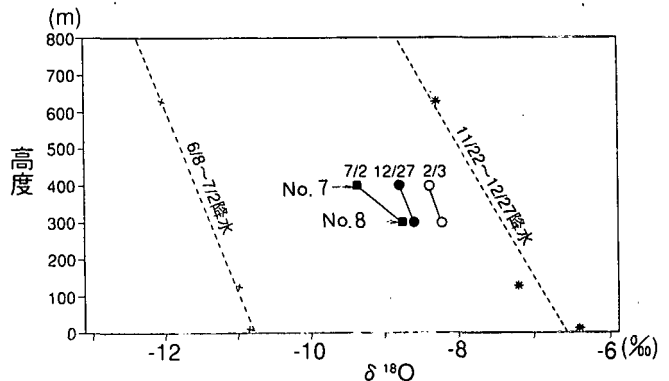


図-6 降水、地表沢の $\delta^{18}\text{O}$ の高度効果

時期により変動がみられるものの、大局的には坑内採水地点のNo.2からNo.5の順で $\delta^{18}\text{O}$ が小さい値を示している。これはトンネルの坑口から山体の奥側へ行く程平均涵養高度が高くなることを示しており、このことから山体に降った水が岩盤中の高度の低い方へ混合しながら流れていることが推定される。

また、坑内での採水時期による $\delta^{18}\text{O}$ の変動が降水の季節変動を反映していると考えられる。図-7によれば、坑内湧水No.2は地表沢No.7、8と同じように変動しているが、No.3、5は1993年2月から7月にかけて地表沢の変動とは逆に $\delta^{18}\text{O}$ が増加している。No.3、5はそれ以降地表沢の変動と同じ動きをしていることから、No.3、5付近の地下水の流動形態が1993年7月まで大

きく変化しており、その後変化が少なくなったことを示している。1993年7月までは $\delta^{18}\text{O}$ が増加していることから涵養高度が低くなったものと判断される。すなわち、トンネルの掘削に伴う水位の低下によりNo.3、5付近では涵養高度の高い地下水の水平流動が減少し、採水位置直上からの鉛直流動が増加したと考えられる。また、No.3のトリチウム濃度がNo.2、5と比べて大きくなっていることも、特にNo.3付近における比較的新しい水の混入率の増加を示すものと思われ、水位が近傍で低下しているものと推定される。

5. おわりに

地化学的手法により地下水の流動の実態に関する情報が得られ、これを用いることにより、広域における岩盤内地下水流動評価を行える見通しが得られた。

今後の課題として、この手法を用いて、より広域、深部の領域を対象とした詳細検討を行う場合には、分析する地化学的項目を目的に応じて増やす必要があると思われる。例えば、溶存炭酸の挙動、供給源は地下水に関する新たな情報を与えると思われ、そのためには ^{13}C といった指標が必要であり、トリチウムより古い滞留時間の地下水に対しては ^{14}C や ^{36}Cl についての分析が必要であろう。また、これらにより得られた情報を元に、新たな地下水流動に関するモデルを構築することが望まれる。

参考文献

- 1) 例えば本島他；水質および環境同位体を利用した地下水調査法，電力土木，218，pp.131-142，1989.
- 2) Abelin；Final Report of Migration in a Single Fracture-Experiment Results and Evaluation，TR85-03，p.102，1985.
- 3) Tsang et al.；Channel Model of Flow through Fracture Media，Water Resour. Res.23，pp.467-479，1987.
- 4) 例えば森田他；深部結晶質岩中の地下水の化学的特性とその挙動，応用地質，32(4)，pp.11-22，1991.
- 5) 三木他；トンネル湧水の発生形態と水質変動について，土木学会論文報告集，282，pp.31-43，1979.
- 6) Craig；Isotopic variation in meteoric waters，Science，133，pp.1702-1703，1961.
- 7) Dansgaard；Stable isotopes in precipitation，Tellus，16，pp.436-468，1964.
- 8) 早稲田他；中部日本・東北日本における天然水の同位体組成，地球化学，17，pp.83-91，1983.

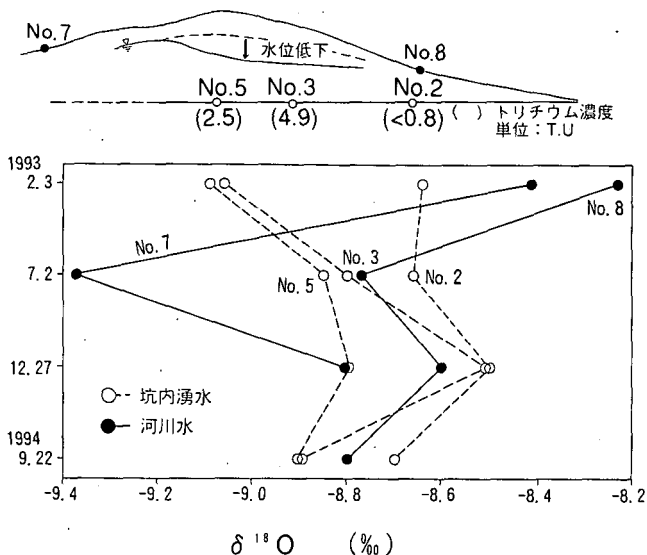


図-7 坑内湧水の $\delta^{18}\text{O}$ の経時変化