

令和 6 年度～ 7 年度

一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成報告書

助成番号：JTA-R6-助 2

地下水水質を用いたトンネル前方の地質構造推定の精度向上

令和 8 年 3 月 31 日

助成研究者氏名：太田岳洋

所属機関名称：山口大学

## 研究概要

### 目的

一般に、トンネル工事における高圧多量な湧水による掘削面の崩壊や水源の枯渇などは、事前調査時や施工時の切羽前方の地質構造把握の困難さが原因と考えられる。一方、地下水水質が地質構造によって変化することがいくつかのトンネル工事の現場において観測されている。そこで本研究では、地下水水質を用いて切羽前方の地質構造推定の精度向上を目的とする。

### 研究方法

研究は以下の方法を組み合わせて行った。

- ① トンネル周辺の地下水水質と地質構造・鉱物組合せとの関係性を、水質分析及び岩石分析から把握する。
- ② トンネル周辺の地下水水質、酸素水素同位体比と周辺の地質構造などから、帯水層の涵養源と地下水流動経路を把握する。
- ③ 溶出実験や PHREEQC によるモデル計算から、トンネル周辺地下水の水質形成過程を明らかにし、それに基づいた水理地質構造の推定精度向上手法を検討する。

### 調査、実験等の結果

- 1) 火山噴出物を掘削対象とするトンネルでは、岩石ごとに地下水水質が異なり、PHREEQC により地下水水質や溶出水水質を再現できた。この方法をトンネル湧水に適用することにより、トンネル周辺地質の透水性などの水理特性を推定、比較することが可能であることが分かった。
- 2) 断層帯を掘削するトンネルでは、断層部以外と断層部、断層破碎帯の粘土化部（DL 級岩盤部）の前後で湧水の水質が異なり、PHREEQC で再現することにより、トンネル周辺に分布する断層帯の空隙の状態がある程度推定できる可能性が示された。
- 3) 花崗岩を主な掘削対象とするトンネルでは、熱水変質を受けた花崗岩周辺の流紋岩体の集水や溶出水は  $\text{SO}_4$  に富むようになることから、探り削孔などからの湧水の水質により、切羽前方の地質体を予測できることが分かった。

### 結論

トンネルに分布する岩石と湧出する地下水の水質から、周辺の地質体を推定でき、PHREEQC 解析により、水理地質特性を推定することが可能であることが示された。

### 今後の課題

解析による水質の再現精度にはまだ不十分の点もあるため、今後はこの再現精度の向上を図り、トンネル周辺の水理地質特性の把握への実装を目指す。

## 1. はじめに

トンネル工事では地下水に起因した掘削面の不安定化や、トンネルへの湧出による水源の枯渇などの問題が生じることが多い。一般的には先進ボーリングなどによる水文地質調査や物理探査により水理地質構造を把握し、前述の問題の解決を図っているが、特に火山岩分布域では困難である場合が多い。また、堆積岩地域や花崗岩地域においても、断層に規制された水理地質構造の推定は困難である場合が多い。一方、地下水水質は流動経路である帯水層の諸条件（岩質、含有鉱物、間隙率、透水性、流速、流量）を反映しているため、地下水水質から帯水層の水理特性や水理地質構造の推定精度を向上させることが期待できる。そこで本研究では、先進ボーリングによる岩質判定に加えて、地下水水質と帯水層の鉱物組合せの関係から帯水層の透水特性を推定する方法を検討し、地下水水質を用いて水理地質構造の推定精度を向上する手法を構築することを目標とする。

## 2. 調査対象トンネル

調査対象のトンネルは以下の通りとした。

- ① 火山岩を掘削対象としたトンネル：北海道新幹線羊蹄トンネル、北海道新幹線内浦トンネル東川工区
- ② 断層帯を掘削するトンネル：中央アルプストンネル山口工区
- ③ 花崗岩類を掘削対象としたトンネル：山陰道木与第1トンネル

## 3. 調査結果

### 3.1 火山岩地域のトンネル

#### 3.1.1 羊蹄トンネル

##### (1) 羊蹄トンネル周辺の地質概要とトンネル諸元

羊蹄火山は、北海道南西部の東北日本弧と千島弧の会合部に位置する成層火山である（図1）。山麓部の標高は約200mで、山頂標高は約1800mである（上澤ほか，2016）。山体西麓には山頂火口から噴出した溶岩流や側火山である火砕丘が分布する（図1；勝井，1956）。山麓には広く火山麓扇状地堆積物が分布し、南西麓には岩屑なだれ堆積物が分布する（図1；守屋，1983）。

これらの火砕物層が透水層となり帯水層を形成している（北海道開発局，1984）。羊蹄山麓には多くの湧水が分布し、北東麓の京極町にはふきだし公園という湧水と湧水地を観光資源とする公園がある。この湧水の水温や水質は一定であるが、イオン濃度は帯水層の地質を反映して、各湧水点で異なるとされている（鶴巻，1989）。さらに、1070年代からは硝酸イオンが検出されており、農地における施肥の影響が指摘されている（鶴巻，1989）。

北海道新幹線羊蹄トンネルは、北海道ニセコ町から倶知安町に至る約9.7kmの山岳トンネルである。本トンネルでは前述の通り周辺に豊富な地下水が分布することから、トンネル湧水による切羽の不安定化、地表面陥没や利水されている湧水の枯渇などが懸念されたた

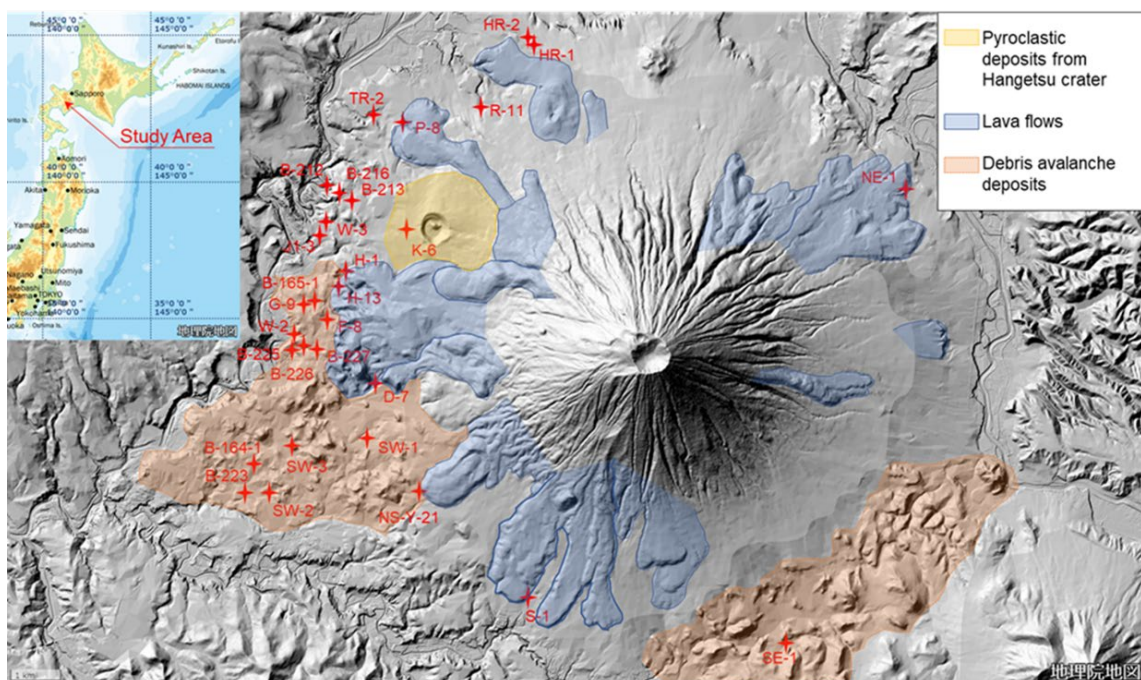


図1 羊蹄トンネル周辺の地質

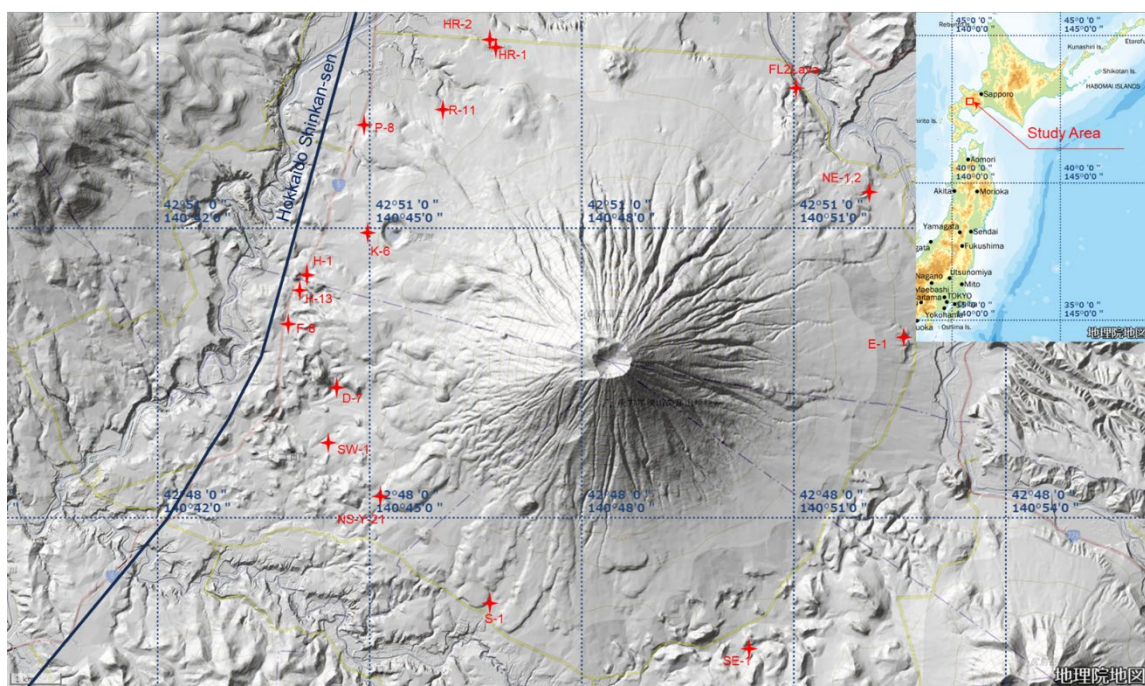


図2 羊蹄トンネル周辺の地表湧水地点位置

め、有島工区と比羅夫工区の2工区に分け、ともにSENS工法で掘削されている。

## (2) 調査方法

羊蹄トンネル周辺の水位観測孔9箇所(うち2箇所カ所は2深度)、湧水地点21箇所(図2)およびトンネル坑内の湧水13箇所(図3)について、現地で水温、pH、電気伝導率(EC)、酸化還元電位(Eh)を測定した。また、羊蹄山麓の標高約300mの箇所で降水試料を2試

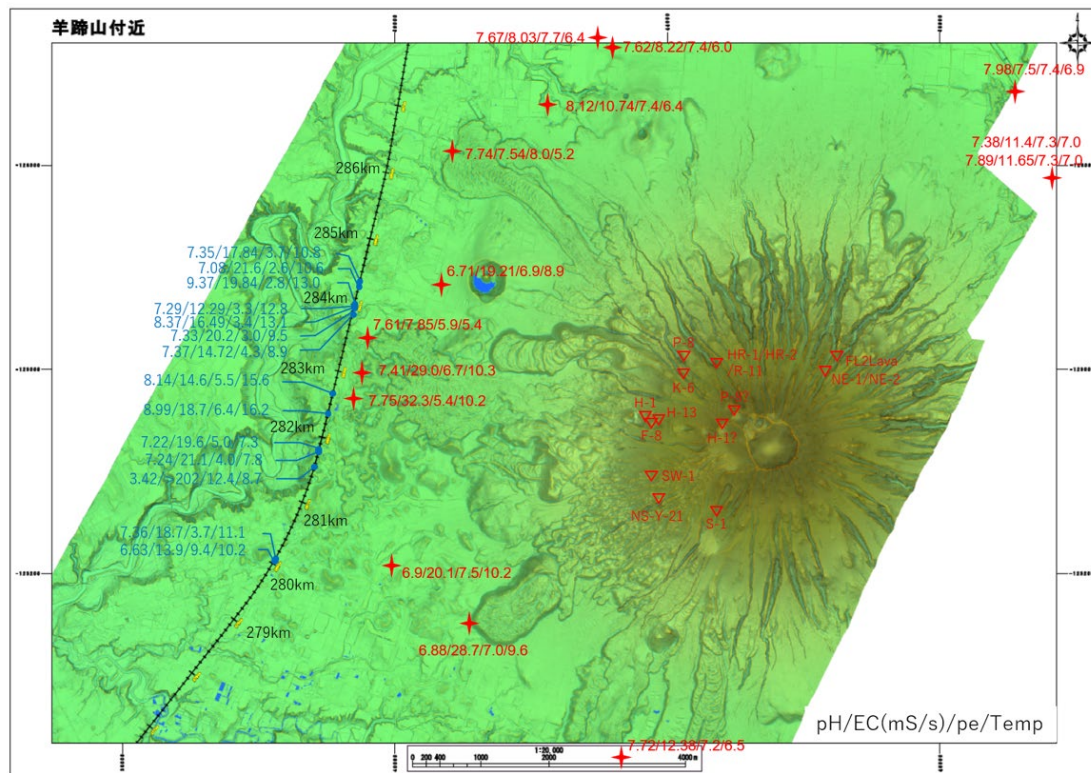


図3 羊蹄トンネル周辺地表湧水、坑内湧水採取位置と現地計測結果及び推定涵養源料採取した。それぞれの箇所では採取した水試料に対して、主要陽イオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) を ICP 発光分光法で、主要陰イオン ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ) をイオンクロマトグラフ法で、 $\text{HCO}_3^-$  を硫酸滴定法で測定した。また、一部の水試料については、酸素水素同位体比を測定した。

水質分析結果に対して、階層型クラスター分析を行い、水試料間の類似性を把握した。

羊蹄火山から噴出した 6 つの溶岩流から岩石試料を 7 試料、羊蹄トンネル掘削時の発生土から岩屑なだれ堆積物の岩石試料を 7 試料採取した。発生土の試料については、その掘削切羽の位置を把握している。これらの岩石試料について、顕微鏡観察により含有鉱物の組合せとおおよその粒径を確認し、主成分と微量成分の含有量を XRF により測定した。

地表湧水やトンネル湧水について後述するように涵養源を推定し、涵養源から湧出点までを 1 次元カラムと仮定して、PHREEQC によりモデル解析を行った。その際に、涵養源に涵養する降水の化学組成は分析値を設定した。通過するカラム内で水と反応する鉱物量は、岩石分析から得られた化学組成と鉱物組成から算出した。カラム内の固液比と流速等は試行錯誤的に設定した。

### (3) トンネル周辺地下水の化学的特徴とその起源及び涵養源

ここでは、トンネル周辺の湧水地から湧出する地下水の化学組成の特徴について記述する。現地で計測された水温、pH、電気伝導率 (EC)、酸化還元電位 (Eh) の結果を図 3 に示す。地下水の湧出地点は K-6、SW-1 以外はすべて溶岩流の末端崖に位置する。地下水の

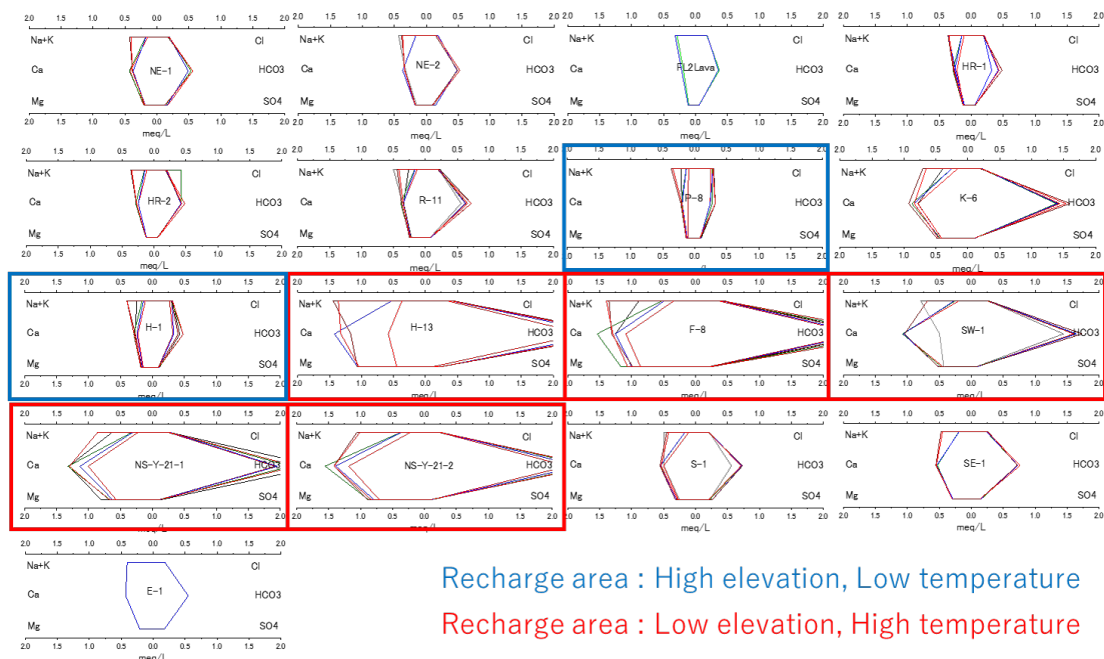


図4 羊蹄トンネル周辺地表湧水の主要イオン濃度

水温は、5～5.5℃、6～7℃、約9～約10℃の3つに大別される。pHは6.8～8.0未満で中性を示し、水温との関係は認められない。電気伝導率は水温が5℃程度の場合は7.5～7.9mS/m、6～7℃の場合は7.5～12.4mS/m、9～10℃程度の場合は19～33mS/mであり、水温との関係がみられる。酸化還元電位はpeに換算して5.4～8.0であり、FeイオンがFe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>のどちらにもなり得る酸化還元環境を示す。

各地表湧水地から湧出する地下水の主要イオン濃度を図4のヘキサダイアグラムに示す。ほぼすべての湧水がCa-HCO<sub>3</sub>型を示し、採水時期によりNa-HCO<sub>3</sub>型を示すことがある。また、イオン濃度は電気伝導率と同様に水温との関係が顕著に認められる。

採取された地下水試料の酸素水素同位体比組成を図5に示す。 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ との関係が全体的にある一定の傾きを有する線状に並び、その方向きが概ね天水線と同様であるこ

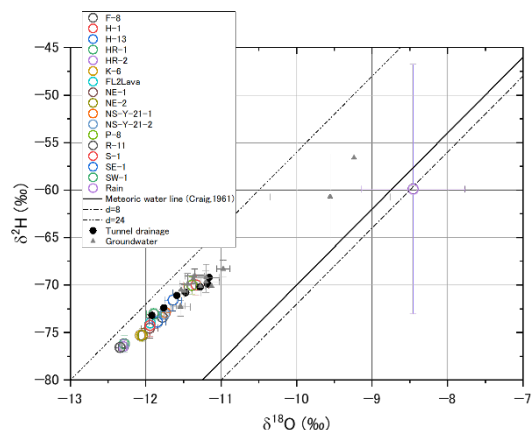


図5 羊蹄トンネル周辺地表湧水の酸素水素同位体比

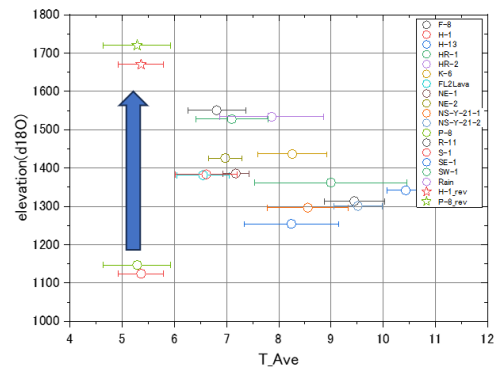


図6 推定涵養標高と水温

とから、天水起源の地下水であることが推定される。

地表湧水について、水温、酸素水素同位体比と地形の特徴からそれぞれの湧水の涵養域を推定した。図 6 に湧水の水温と酸素同位体比から算出される涵養標高の関係を示す。水温の低い H-1、P-8 を除くと両者に負の相関がみられることから、これら 2 地点以外について、推定涵養標高付近の山体上部の地形から、それぞれの湧水地点について山体内の谷地形や火口地形を涵養源と推定した（図 3）。H-1、P-8 については、推定された涵養標高よりもさらに山体の上部にいずれも明瞭な火口地形が認められ（図 3）、それがそれらの湧水地点となる溶岩流の噴出口を推定されることから、この火口地形を涵養源と推定した。推定された涵養源の標高と酸素同位体比との関係を図 6 に示すと、他の湧水地点での関係の延長上に位置し、涵養標高の推定の妥当性が示された。

#### (4) トンネル湧水の化学的特徴

ここでは、トンネル坑内において採り削孔などから湧出する地下水の化学的特徴について記述する。現地で計測された水温、pH、電気伝導率（EC）、酸化還元電位（Eh）の結果を図 3 に示す。水温は 7.3～13.1℃を示し、地表湧水よりも高い傾向がみられる。pH は 6.6～9.4 を示し、地表湧水より高い傾向がある。電気伝導率は 12～21mS/m を示し、地表湧水で見られた低い電気伝導率の地下水は認められない。酸化還元電位は pe に換算して 2.6～5.5 が大部分であり、地表湧水より明瞭に低く、より還元的な環境の地下水であることが推定される。

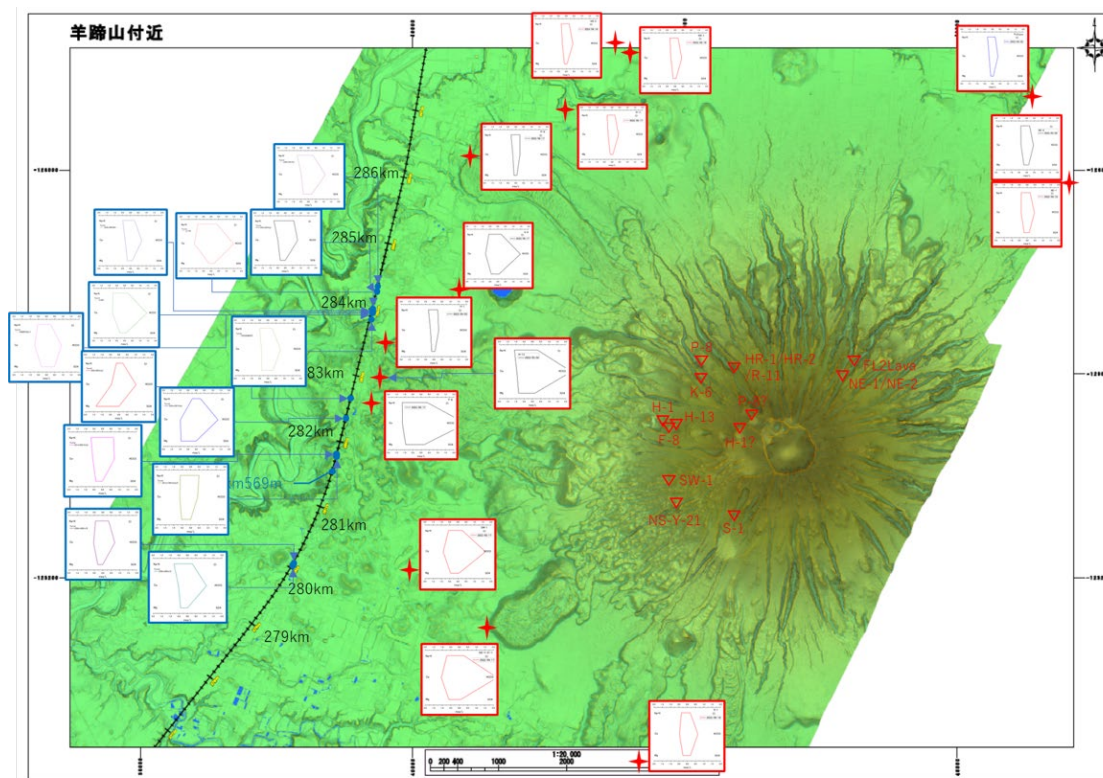


図 7 羊蹄トンネル坑内湧水及び周辺地表湧水の主要イオン濃度の空間分布

図 7 にトンネル坑内湧水のイオン濃度の空間分布を、地表湧水とともにヘキサダイアグラムの形で表した。地表湧水はおおむね Ca-HCO<sub>3</sub>型を示したが、トンネル坑内湧水は特定の湧水型を示さず、陽イオンでは Ca に対して Mg に富むものや Na+K に富むものも認められる。陰イオンに関しては、基本的に HCO<sub>3</sub>に富むが、一部に Cl に富むものもみられる。

(5) 化学的特徴から見たトンネル湧水と周辺地下水の関係

以上 (3) (4) で述べたことから、トンネル坑内湧水は地表湧水と水質においては異なった地下水と考えられる。これは、地表湧水の大部分が溶岩流の末端から湧出していることから、羊蹄火山山体から流下する溶岩流の噴出口から涵養された地下水が溶岩流底部の多孔質で透水係数の高いクリンカー部を流下して、山麓の末端部で湧出した地下水であるのに対して、トンネル坑内湧水は羊蹄火山の中腹から山麓の岩屑なだれ堆積物に涵養された地下水が地下に浸透したものと推定される。従って、地表湧水とトンネル坑内湧水とは、その涵養から貯留、流出までの過程が異なった地下水であると考えられる。

(6) 羊蹄トンネル及びその周辺に分布する岩石の特徴

羊蹄トンネルの周辺及び坑内で採取した岩石試料の全岩化学組成を表 1 に、鉱物組合せを表 2 に示す。地表で採取した溶岩試料（表 1, 2 の上段 7 試料）は安山岩質からデイサイト質であり、羊蹄火山の比較的後期の活動の噴出物である。一方、トンネル坑内から採取さ

表 1 羊蹄トンネル坑内及び周辺に分布する岩石の全岩化学組成

| 測定試料名        | 地質         | 地質<br>ステージ | SiO2  | TiO2  | Al2O3 | Fe2O3* | MnO   | MgO   | CaO   | Na2O  | K2O   | P2O5  | Ba     | Cr    | Nb     | Ni   | Rb    | Sr    | V     | Y    | Zn    | Zr    | Total  |
|--------------|------------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|
|              |            |            | wt. % | wt. % | wt. % | wt. %  | wt. % | wt. % | wt. % | wt. % | wt. % | wt. % | wt. %  | ppm   | ppm    | ppm  | ppm   | ppm   | ppm   | ppm  | ppm   | ppm   | ppm    |
| 2022102301-1 | Mi-LF      | II -3      | 64.57 | 0.86  | 16.67 | 5.91   | 0.19  | 1.46  | 4.27  | 4.91  | 1.57  | 0.31  | 1002.7 | 124.1 | 8.5    | 64.8 | 27.9  | 371.8 | 27.1  | 45.4 | 79.3  | 197.6 | 100.83 |
| 2022102401-1 | Ni-2 LF    | II -3      | 56.48 | 1.00  | 18.45 | 7.87   | 0.19  | 2.31  | 7.12  | 4.16  | 1.05  | 0.36  | 666.0  | 3.3   | 5.1未検出 | 16.8 | 484.8 | 93.9  | 40.8  | 74.8 | 128.9 | 99.07 |        |
| 2022102307-1 | TS-LF      | II -3      | 57.94 | 0.98  | 18.26 | 7.03   | 0.19  | 1.97  | 6.58  | 4.49  | 1.14  | 0.42  | 684.6  | 145.1 | 6.4    | 74.6 | 19.7  | 484.9 | 58.6  | 43.5 | 75.2  | 142.1 | 99.12  |
| 2022102302-1 | 502MLF     | II -2      | 58.61 | 1.27  | 15.36 | 10.05  | 0.25  | 2.54  | 5.83  | 4.28  | 1.17  | 0.59  | 736.2  | 170.7 | 5.8    | 87.5 | 19.2  | 385.4 | 86.9  | 47.2 | 109.6 | 153.6 | 99.66  |
| 2022102402-1 | FK-1 LF    | II -2      | 67.04 | 0.65  | 15.19 | 5.04   | 0.18  | 0.86  | 3.43  | 4.73  | 1.60  | 0.17  | 929.3  | 89.5  | 11.6   | 43.7 | 29.1  | 300.2 | 14.8  | 60.5 | 88.5  | 250.0 | 99.42  |
| 2022102304-1 | Ni-1 LF    | II -1      | 57.09 | 1.03  | 18.47 | 8.18   | 0.20  | 2.32  | 7.27  | 4.20  | 0.89  | 0.36  | 591.6  | 56.1  | 5.0    | 27.9 | 14.6  | 468.2 | 85.5  | 44.1 | 86.2  | 115.5 | 99.78  |
| 2022102303-1 | Ni-1 LF    | II -1      | 56.05 | 1.00  | 18.13 | 8.15   | 0.20  | 2.35  | 7.29  | 4.18  | 0.89  | 0.36  | 537.3  | 43.1  | 5.2    | 20.3 | 13.0  | 468.0 | 83.1  | 41.1 | 87.8  | 117.1 | 98.44  |
| 283837-M2    | Yo-da(Anc) | I          | 54.16 | 0.86  | 17.94 | 9.48   | 0.20  | 4.39  | 8.50  | 2.94  | 0.71  | 0.22  | 416.8  | 62.3  | 2.9    | 33.2 | 13.2  | 450.1 | 191.3 | 31.4 | 83.4  | 89.7  | 99.57  |
| 283837-M1    | Yo-da(Anc) | I          | 53.34 | 0.85  | 17.79 | 9.50   | 0.20  | 4.44  | 8.75  | 3.05  | 0.70  | 0.21  | 418.3  | 85.8  | 3.2    | 43.3 | 8.8   | 455.9 | 194.3 | 33.0 | 83.1  | 88.4  | 98.62  |
| 841-2        | Yo-da(Anr) | I          | 54.44 | 0.87  | 18.06 | 9.61   | 0.20  | 4.50  | 8.62  | 3.02  | 0.70  | 0.22  | 408.5  | 31.4  | 2.8    | 15.3 | 10.4  | 448.9 | 195.4 | 32.4 | 86.0  | 88.6  | 100.03 |
| 283833-2     | Yo-da(Anr) | I          | 54.31 | 0.85  | 18.07 | 9.31   | 0.20  | 4.33  | 8.59  | 3.07  | 0.72  | 0.22  | 386.5  | 76.3  | 3.0    | 37.9 | 11.4  | 454.5 | 189.3 | 33.9 | 84.0  | 89.5  | 99.89  |
| 283840-M     | Yo-da(Anr) | I          | 54.07 | 0.86  | 17.86 | 9.49   | 0.20  | 4.43  | 8.49  | 3.05  | 0.75  | 0.22  | 423.9  | 55.6  | 2.7    | 28.8 | 12.7  | 449.4 | 178.8 | 32.5 | 83.3  | 89.1  | 99.70  |
| 283752-2     | Yo-da(Tg)  | I          | 58.93 | 0.87  | 16.75 | 7.41   | 0.20  | 2.44  | 6.29  | 4.07  | 0.95  | 0.27  | 586.9  | 44.0  | 4.8    | 19.9 | 16.4  | 436.9 | 119.7 | 38.9 | 86.7  | 129.5 | 98.45  |
| 283752-M     | Yo-da(Tg)  | I          | 55.53 | 0.76  | 15.60 | 6.64   | 0.18  | 2.29  | 10.02 | 3.51  | 1.03  | 0.18  | 494.4  | 20.6  | 3.9    | 7.9  | 20.1  | 418.4 | 128.9 | 47.5 | 130.4 | 127.2 | 98.80  |

表 2 羊蹄トンネル坑内及び周辺に分布する岩石の鉱物組合せ

| 測定試料名        | 地質         | 地質ス<br>テージ | 斜長石 |     | 単斜輝石 |     | 斜方輝石 | 不透明鉱物 |     |
|--------------|------------|------------|-----|-----|------|-----|------|-------|-----|
|              |            |            | 斑晶  | 石基  | 斑晶   | 石基  | 斑晶   | 斑晶    | 石基  |
| 2022102301-1 | Mi-LF      | II -3      | +++ |     | ++   |     | ++   | ++    |     |
| 2022102401-1 | Ni-2 LF    | II -3      | +++ |     |      |     | ++   | +     |     |
| 2022102307-1 | TS-LF      | II -3      | +++ |     | +    |     |      | +     |     |
| 2022102302-1 | 502MLF     | II -2      | +++ |     | ++   |     | +    | ++    |     |
| 2022102402-1 | FK-1 LF    | II -2      | +   | +++ | +    | +++ |      | +     | +++ |
| 2022102304-1 | Ni-1 LF    | II -1      | +++ |     | ++   | +++ | +    | ++    |     |
| 2022102303-1 | Ni-1 LF    | II -1      | +++ |     | ++   | +++ | ++   | +     |     |
| 283837-M2    | Yo-da(Anc) | I          |     |     |      |     |      |       |     |
| 283837-M1    | Yo-da(Anc) | I          |     |     |      |     |      |       |     |
| 283841-2     | Yo-da(Anr) | I          | +++ | ++  | ++   | ++  | +++  | ++    | ++  |
| 283833-2     | Yo-da(Anr) | I          | +++ |     | ++   |     | +    | ++    | ++  |
| 283840-M     | Yo-da(Anr) | I          |     |     |      |     |      |       |     |
| 283752-2     | Yo-da(Tg)  | I          | +++ |     | ++   | ++  | ++   | ++    |     |
| 283752-M     | Yo-da(Tg)  | I          | +++ |     | +    |     | +++  | ++    |     |

れた試料は地表の溶岩流よりも苦鉄質な安山岩質の岩屑なだれ堆積物中の岩石であり、初期の活動による噴出物である。いずれの岩石試料も斜長石斑晶に富み、単斜輝石、斜方輝石、不透明鉱物（主に磁鉄鉱）の斑晶を含み、石基には斜長石、単斜輝石、不透明鉱物が含むか、ガラス質である。

#### (7) PHREEQC による周辺地下水の水質形成モデルと再現性

代表的な地表湧水の水質について、PHREEQC の SOLUTION、EQUILIBRIUM\_PHASES、KINETICS、TRANSPORT の各コマンドを用いて、涵養域から湧出域までの地下水流動に伴う水質変化を、動的に再現することを試みた。

羊蹄火山の新しい活動による溶岩流末端の湧水地点 P8 の水質の再現を試みた。本湧水の涵養源は標高 1725m 付近の火口地形と推定された（図 3）。この涵養源から湧出点までの距離は約 6460m である。本湧水の水質は水温が低く、溶存イオン濃度も低い（図 3, 4, 7）。流動経路となる溶岩は表 1, 2 の試料

2022102307-1 であり、全岩の  $\text{SiO}_2$  量が 57.9 wt.%,  $\text{CaO}$  量 6.58 wt.%,  $\text{MgO}$  量 1.97 wt.%,  $\text{Na}_2\text{O}$  量 4.49 wt.% である。また、含有鉱物は斜長石、単斜輝石、不透明鉱物（磁鉄鉱）である。これらの含有鉱物の含有量を、各鉱物の化学組成を用いて、最小二乗近似により算出した。それぞれの鉱物の大きさは、斑晶と石基の含有量を勘案して、およそその平均粒径とした。PHREEQC では流動はカラムとしてモデル化されるため、面積  $40\text{m}^2$  で厚さ 10m のセルが連続するモデルとした。この場合のセル数は 646 セルとなる。間隙率を 0.5 と設定し、流速を変えて、実測値に近い計算値えられる組合せを求めた。その結果、流速を  $2.08 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  の時に、K 濃度が低く算出されたが、他のイオン濃度および pH はおおむね湧水の水質を再現できた（図 8）。

次に、羊蹄火山の初期の活動による溶岩集末端の湧水地点 F8 の水質について、P8 と同様の手法で再現を

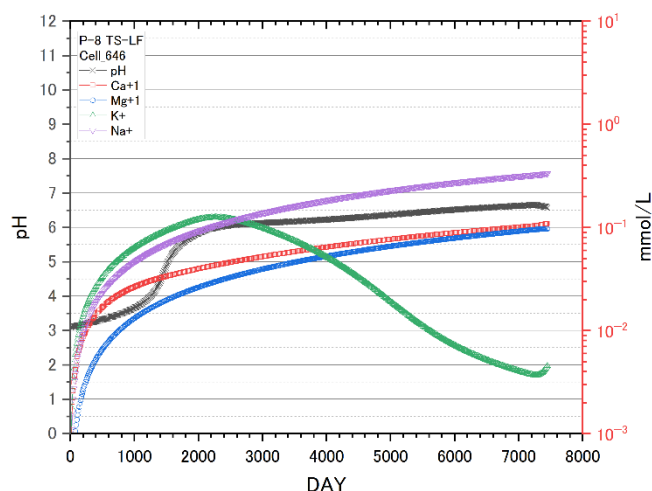


図 8 湧水点 P8 の水質の再現結果

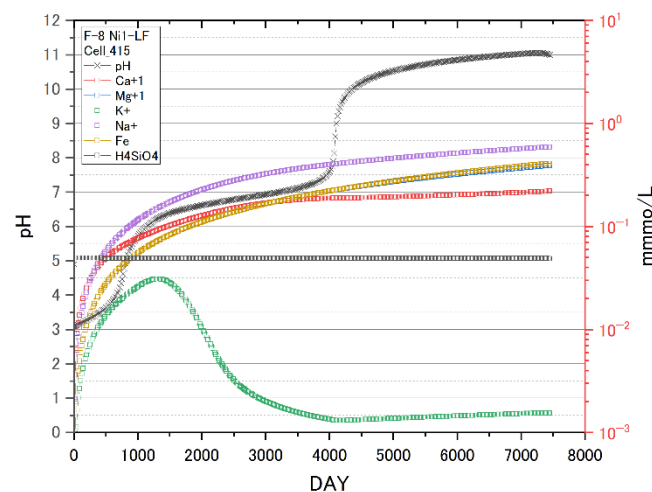


図 9 湧水点 F8 の水質の再現結果

試みた。本湧水の涵養源から湧出点までの距離は約 4150m と推定され、水温、溶存イオン濃度ともに高い特徴を有する(図 3, 4, 7)。流路経路となる溶岩は表 1, 2 の試料 2022102303-1 であり、全岩の  $\text{SiO}_2$  量が 56.05 wt.%,  $\text{CaO}$  量 7.29 wt.%,  $\text{MgO}$  量 2.35 wt.%,  $\text{Na}_2\text{O}$  量 4.18 wt.% である。含有鉱物は斜長石、単斜輝石、斜方輝石(直方輝石)、不透明鉱物(磁鉄鉱)である。鉱物含有量の推定等やセルの設定は、P8 と同様に行った。セル長を 10m と固定したため、流路長に応じてセル数は 415 となる。間隙率を 0.5 として、流速を変化させて再現計算を行った。その結果、pH や K 濃度に実測との乖離がみられるが、流速が  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  の時に湧水水質とイオン濃度の値が近くなった(図 9)。

以上のように、PHREEQC により地下水水質の形成過程を再現することが可能であり、その際に実測される流路の岩石中の鉱物組合せと含有量とともに設定される流路中の流速が、水質形成に関与することがわかった。このことから、PHREEQC で湧水の水質を再現することにより、得られる流路(帯水層)の流速、つまり透水性が求められ、帯水層の水理地質特性を求めることができることが明らかとなった。

#### (8) PHREEQC によるトンネル湧水からの周辺水理地質特性の推定

上記(7)において確立した PHREEQC による地下水水質再現方法を、トンネル湧水と切羽地質に適用し、トンネル周辺の水理地質特性の推定を試みた。対象とした切羽は 283km841m 付近の羊蹄火山の初期の活動による噴出物の二次堆積物からなり、岩石試料は表 1, 2 の 283841-2 Yo-da(Anr) である。当該試料の全岩の  $\text{SiO}_2$  量が 54.44 wt.%,  $\text{CaO}$  量 8.62 wt.%,  $\text{MgO}$  量 4.50 wt.%,  $\text{Na}_2\text{O}$  量 3.02 wt.% である。トンネル湧水として、TD83m 短尺水抜き孔試料の水質の再現を試みた。湧水の酸素水素同位体比から涵養標高を推定し、その標高地点からトンネル湧水位置までの距離を約 5,000m と推定した。計算の結果、流速を  $4.17 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  の時に最も湧水水質と近い値となった(図 10)。

以上のことから、トンネル湧水の水質と切羽岩石の全化学組成を測定し、PHREEQC による水質再現計算を行うことにより、トンネル周辺の水理地質特性をある程度推定することが可能であることが明らかとなった。

#### 3.1.2 内浦トンネル東川工区

##### (1) 内浦トンネル周辺の地質概要とトンネル諸元

北海道新幹線内浦トンネルは、北海道寿都郡黒松内町から磯谷郡蘭越町にかけて位置しする延長約 15.6km のトンネルである。本トンネルは幌内工区、東川工区、静狩工区

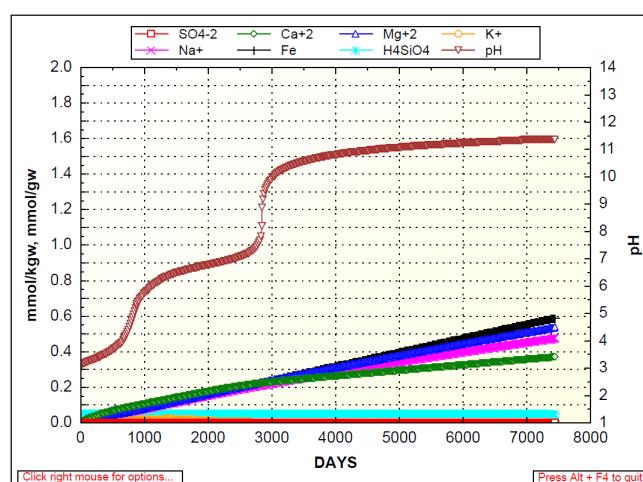


図 10 トンネル湧水の水質の再現結果

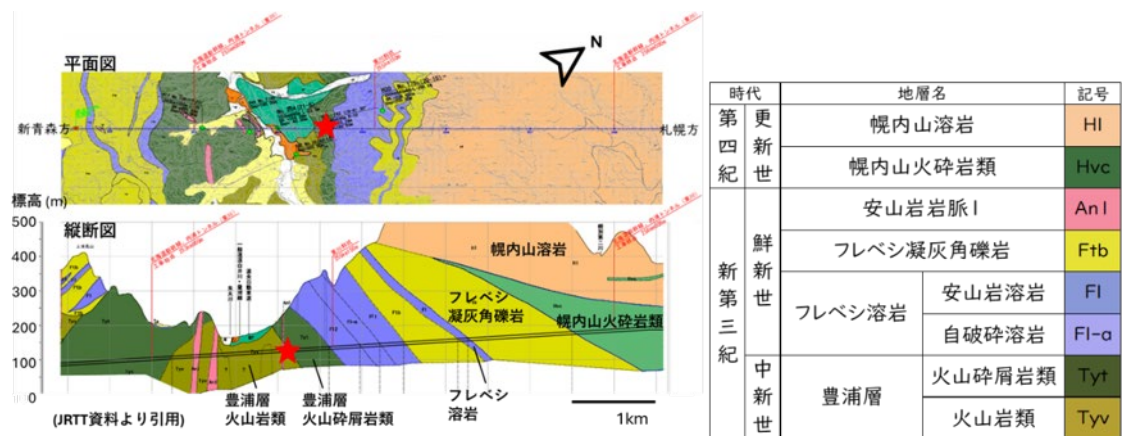


図 11 内浦トンネル東川工区周辺の地質平面図と地質縦断面図  
(鉄道運輸機構資料に加筆)

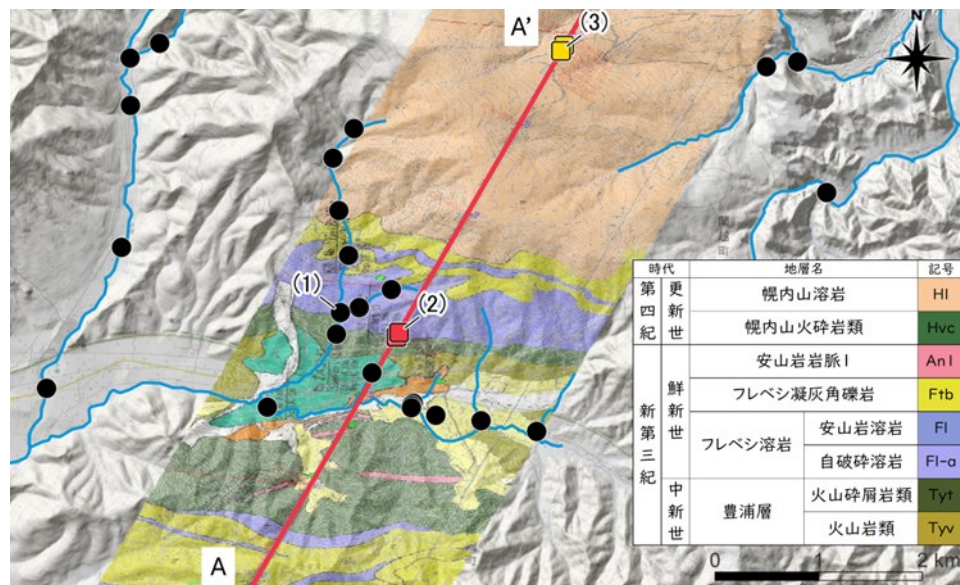


図 12 内浦トンネル東川工区周辺における採水位置

黒丸：河川水、四角：トンネル坑内湧水

に分けられており、本研究は東川工区を対象とした。

図 11 に東川工区の計画段階における地質平面図および地質縦断面図を示す。調査時の切羽に露出していた地質は、函館方が新第三紀中新世の黄鉄鉱を含む変質安山岩、札幌方が新第三紀鮮新世の凝灰角礫岩であった。札幌方の凝灰角礫岩の透水係数は  $5.2 \times 10^{-5} \sim 8.9 \times 10^{-4}$  cm/s と比較的高い透水性を有し、掘削において多量の湧水が発生し、最大で毎分約 1400L に達した。

## (2) 調査方法

東川工区周辺の河川水 27 箇所、およびトンネル坑内の湧水 9 箇所（図 3）について、現地で水温、pH、電気伝導率（EC）、酸化還元電位（Eh）を測定し、水試料を採取した（図 12）。採水は 2024 年 10 月、2025 年 3 月、2025 年 6 月、2025 年 8 月に実施した。それぞれ

れの箇所では採取した水試料に対して、主要陽イオン（ $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ）を ICP 発光分光法で、主要陰イオン（ $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ）をイオンクロマトグラフ法で、 $\text{HCO}_3^-$  を硫酸滴定法で測定した。また、2024 年 10 月および 2025 年 3 月に採取した水試料については、酸素水素同位体比を測定した。

函館方および札幌方それぞれの切羽から岩石試料を採取し、XRF により化学分析を行い、XRD により含有鉱物を確認した。また、それぞれの岩石試料について、2mm 以下に粉碎し、環境省告示第 46 号に準拠した溶出試験を実施した。

### (3) トンネル湧水と周辺河川水の水質

内浦トンネル東川工区は黒松内町と蘭越町にまたがり、その境界の稜線を分水界として朱太川の水系と昆布川の水系に分けられる。朱太川水系の内川、小川、朱太川の河川水と昆布川水系各支流の河川水の水質をトリリニアダイアグラムで示す（図 13）。いずれの河川水も類似した組成比を有しており、アルカリ非炭酸塩型から中間型にあたる。

一方、当工区における坑内の湧水の水質は、札幌方と函館方で大きく異なり、函館方がアルカリ土類非炭酸塩型に近い中間型からアルカリ土類炭酸塩型であるのに対して、札幌方はアルカリ炭酸塩型を示す（図 14）。これらの水質は、地表の河川水とは異なり、河川水が降水に近いと考えると、降水により涵養された地下水がトンネルの湧水に至るまでに岩石

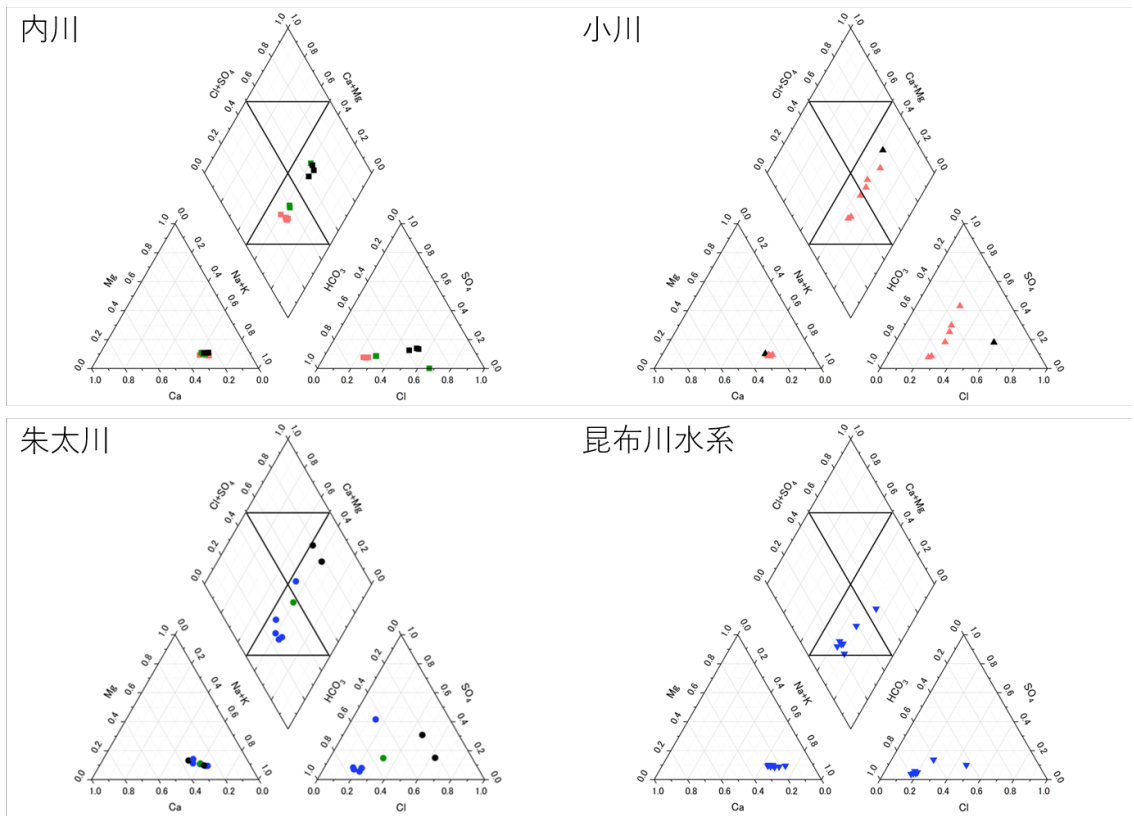


図 13 内浦トンネル東川工区周辺の河川水の水質

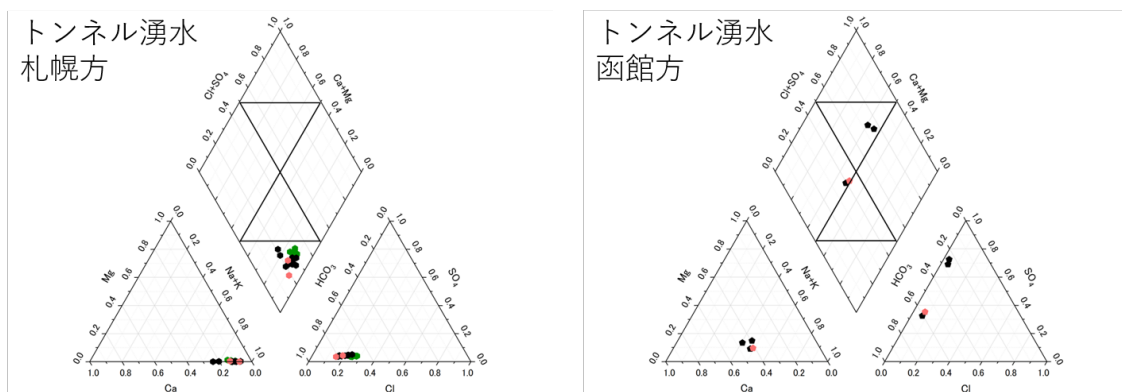


図 14 内浦トンネル東川工区坑内湧水の水質

と反応したことが示唆される。札幌方のトンネル坑内湧水はアルカリ炭酸塩型であり、一般的には低体制の地下水と考えられる。一方、函館方のトンネル坑内湧水はアルカリ土類非炭酸塩型に近いことから、熱水活動の影響を受けた可能性がある。

トンネル坑内湧水及び河川水の一部の試料について測定した酸素水素同位体比の結果を図 15 に示す。河川水が天水線に沿った分布を示すことは、河川水がほぼ降水起源と考えられることと矛盾しない。一方、トンネル坑内湧水は河川水が作る  $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) との関係線上に分布することから、これらの湧水も降水起源と推定することができる。

#### (4) 内浦トンネル東川工区に分布する岩石の特徴

東川工区の札幌方及び函館方から採取した岩石試料の全岩化学組成を表 3 に示す。 $\text{SiO}_2$  量からデイサイト質安山岩と判断される。函館方の試料は S を 2wt.%以上含んでおり、また  $\text{K}_2\text{O}$  を 9.7wt.%と非常に高いため、熱水変質を受けた可能性が考えられる。

XRD 回折試験において、札幌方の試料では、長石、石英が顕著に認められた。ほかにスメクタイトや赤鉄鉱、方解石のピークも認められたため、中性の弱い熱水変質あるいは属性変質を受けたことが推定される。函館方の試料では、長石、石英が確認されたほか、スメク

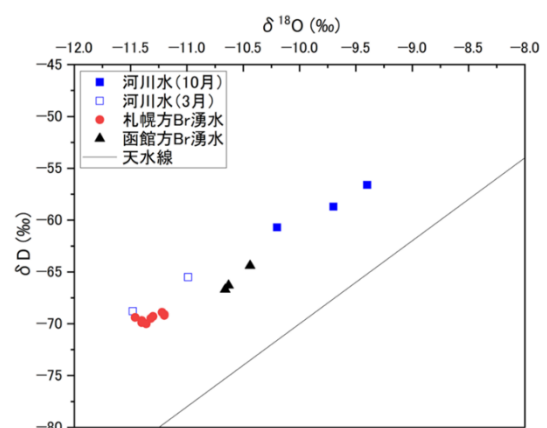


図 15 内浦トンネル東川工区の坑内湧水と周辺河川水の酸素水素同位体比

表 3 東川工区の岩石の全岩化学組成

|       |       |                         | 札幌     | 函館     |
|-------|-------|-------------------------|--------|--------|
| 主成分元素 | wt. % | $\text{SiO}_2$          | 59.07  | 62.38  |
|       |       | $\text{TiO}_2$          | 0.95   | 0.70   |
|       |       | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 14.46  | 20.23  |
|       |       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 12.49  | 1.70   |
|       |       | MnO                     | 0.19   | 0.02   |
|       |       | MgO                     | 2.77   | 2.21   |
|       |       | CaO                     | 6.93   | 1.83   |
|       |       | $\text{Na}_2\text{O}$   | 1.93   | 1.07   |
|       |       | $\text{K}_2\text{O}$    | 1.01   | 9.73   |
|       |       | $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.20   | 0.13   |
|       |       | Total                   | 100.00 | 100.00 |
| 微量元素  | wt. % | S                       | < DL   | 2.23   |

タイト、イライトまたは白雲母、カオリナイトまたは緑泥石のピークが認められ、黄鉄鉱のピークも確認できた。このことから、函館方の試料は熱水変質を受けたかの世が高いと考えられる。

#### (5) 溶出試験結果

内浦トンネル東川工区の札幌方と函館方で採取した岩石試料について実施した溶出試験の結果を図16のヘキサダイアグラムで示す。溶出水の水質は、それぞれの切羽周辺で採取した坑内湧水と類似した傾向を示すが、札幌方では湧水に比べてCa、Mgが多く、Naが少なく、函館方ではイオン濃度の比は同様であるが、その総量は湧水に比べて小さい。これらの相違は、坑内湧水の水質は水-岩石反応が化学平衡に近い状態に達しているのに対して、溶出試験では化学平衡には達していないためと考えられる。

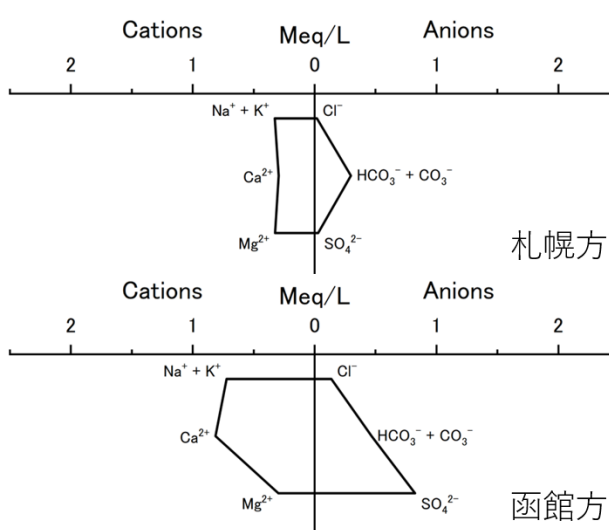


図16 内浦トンネル東川工区の岩石試料の溶出試験結果

#### (6) PHREEQCによる溶出試験の再現実験

上記の溶出試験について、PHREEQCによる再現を試みた。溶出試験は大気平衡状態であるため、GAS\_PHASE コマンドでO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>を設定した。全岩化学組成からノルム計算により算出した含有鉱物について、KINETICS コマンドで速度論的に溶解現象を扱った。XRD回折試験でスメクタイトが確認されたので、EXCHANGE コマンドで陽イオン交換反応をモデル化した。計算結果を図17に示す。

札幌方試料、函館方試料ともにpHは溶出水よりも高い計算値となった。札幌方試料では、設定解析時間100日までにおおむね平衡状態に達していると判断できる。Na、Mgが

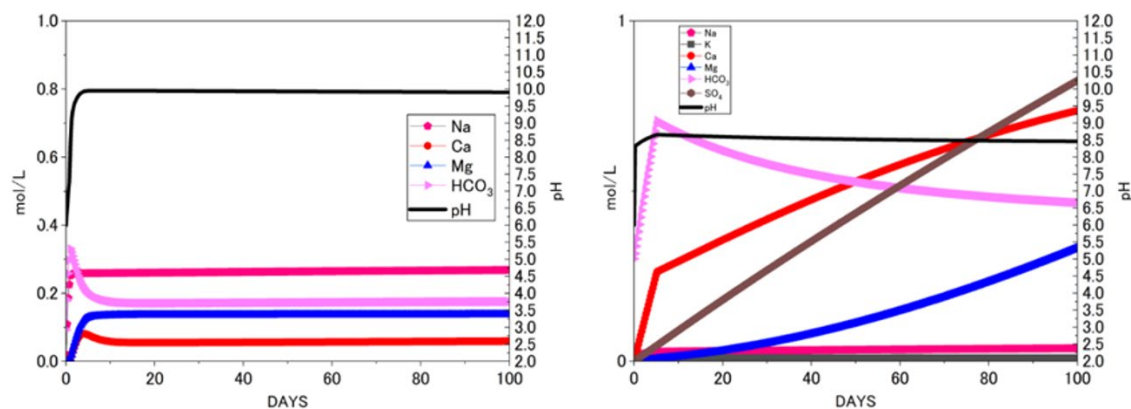


図17 溶出試験のPHREEQCによる再現結果

左：札幌方試料、右：函館方試料

溶出水とほぼ同等のモル濃度が算出され、 $\text{HCO}_3$  はやや低い値となった。Ca はおよそ半分のモル濃度が算出された。一方、函館方試料の計算では、設定解析時間 100 日ではまだ平衡状態に達していない。Ca と  $\text{SO}_4$  が高いモル濃度が算出されており、この傾向は溶出試験と整合する。 $\text{HCO}_3$  濃度も試験結果と概ね整合的である。しかし、Na 濃度は計算ではほとんど算出されず、溶出試験の実測とは一致しない。

### 3.2 断層帯のトンネル

#### (1) 中央アルプストンネル山口工区周辺及び坑内の地質状況と採水位置

調査対象のトンネルの地質縦断図およびトンネル平面図を図 18 示す。トンネル周辺及び坑内には主に中生代白亜紀の花崗斑岩や花崗岩が分布する（山下他，2022）。また、阿寺断層の活動に伴って形成されたと考えられる複数の破碎帯が確認されており、これらの破碎帯の走向は概ね NW-SE 方向で、トンネル線形とほぼ直交する（山下他，2022）。

本トンネルの調査坑 TD で見ると、TD.0m～TD.650m の区間は割れ目も少なく、DH 級から CM 級の岩盤が分布する。TD.650m～TD.1390m 区間は割れ目が発達し、DL 級の岩盤が多く分布する。この区間が阿寺断層による破碎帯であると考えられる。TD.1390m～は割れ目が認められるものも岩級区分としてはほとんどが CL 級以上である。

今回の調査では、調査坑 TD.69m～ TD.1122m 区間にて掘削が進む毎に壁面湧水を採水した。また、調査坑 TD.1270m から、調査坑掘削前に長尺先進調査ボーリング（ $L=450\text{m}$ ）を実施しており、削孔中のボーリング孔からの湧水を採水した。採水した湧水に対し、現場分析（pH、EC、ORP）、主要イオン分析（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ）を実施した。採取した湧水試料に対して、酸素水素同位体比の測定も行った。

また、代表的な箇所から岩石試料を採取し、XRD 回折試験により、含有鉱物をそれらの相対的な量比を把握した。

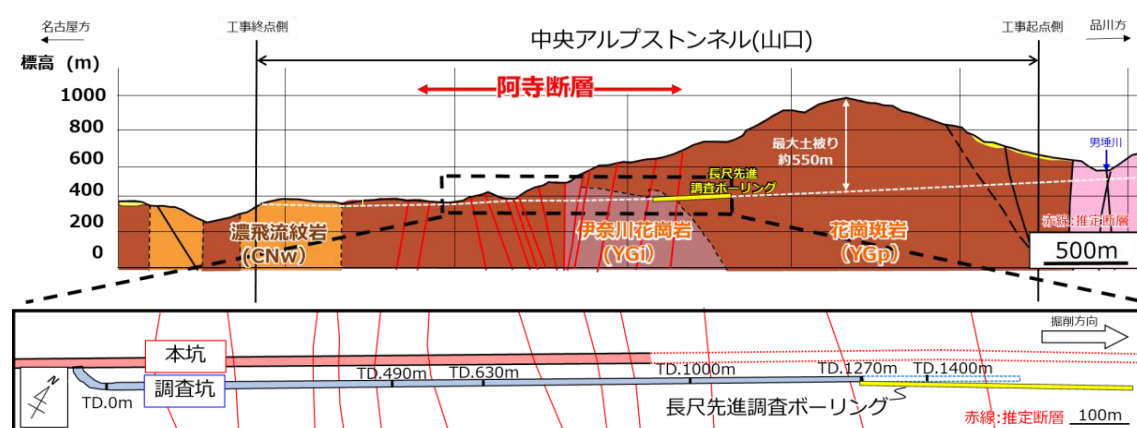


図 18 中央アルプストンネル山口工区の地質縦断図とトンネル平面図（山下他,2022）

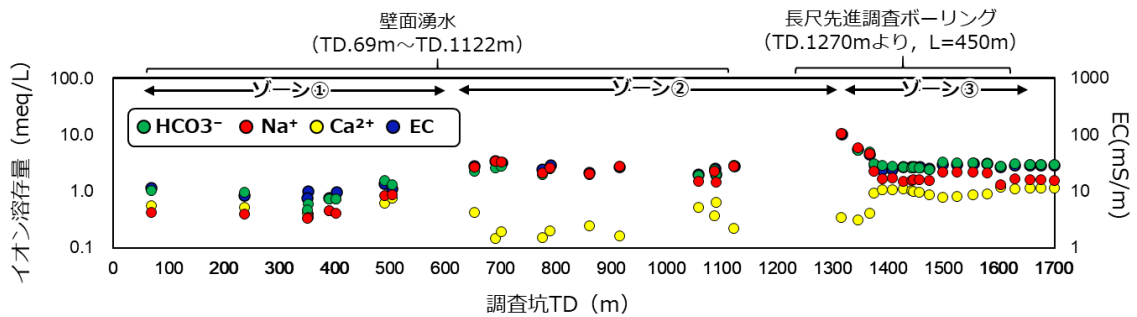


図 19 調査坑 TD に対する壁面湧水と長尺先進調査ボーリング湧水のイオン濃度  
(山下他,2022)

## (2) トンネル湧水の特徴と地質状況との対応

トンネル湧水のイオン濃度の空間的变化を図 19 に示す。ほとんどの湧水がアルカリ炭酸塩型に分類される。TD.650m までは電気伝導率が概ね 15mS/m 以下と低く、Na/Ca 比も 3 未満と低い。TD.650m~TD.1390m 区間の割れ目が発達し、岩盤状態の悪い範囲では、電気伝導率が 15~110mS/m と高く変動幅も大きく、Na/Ca 比も大きい。TD.1390m~の良好な岩盤が分布する区間では、電気伝導率が 20~30mS/m でほぼ一定値を示し、Na/Ca 比が 10 未満と小さい。

本トンネルの湧水の酸素水素同位体比から、湧水箇所の岩盤性状や断層破碎帯との位置関係に関わらず、すべてが天水沿いにプロットされることから、いずれの湧水も降水起源と推定される。

断層破碎帯以外の範囲の硬岩試料、断層破碎帯内の硬岩試料及び断層破碎帯中の断層粘土について行った XRD 回折試験を行った。硬岩試料は断層体内に関わらず同様に鉱物組合せを示し、その量にも大きくは異ならない。一方、断層粘土試料はカリ長石、角閃石、緑泥石が認められず、スメクタイトが硬岩より増加し、雲母-スメクタイト混合相鉱物や黄鉄鉱が含まれる。

## (3) PHREEQC によるトンネル湧水水質形成条件の推定

本トンネルの坑内湧水は、 $\text{HCO}_3^-$  濃度に対して Na+Ca 濃度がおおむね単調に増加する傾向が認められる。これは地下において岩盤中の鉱物が地下水中の  $\text{CO}_2$  との反応により、鉱物中の Na または Ca が放出されるとともに  $\text{HCO}_3^-$  が生成されることを示唆する。そこで PHREEQC により水-鉱物反応に対する地下水中の  $\text{CO}_2$  濃度の影響を化学平衡論的に計算した。その結果、 $\text{CO}_2$  分圧を  $10^{-2}$  程度とすると、おおむね当該区間の地下水中の  $\text{HCO}_3^-$  (Na+Ca) の関係が説明できることがわかった。しかし、断層破碎帯内の一部の地下水試料では、 $\text{CO}_2$  分圧がおおむね大気と等しい  $10^{-3.5}$  程度とした場合に、地下水試料の水質が説明できることがわかった。削孔検層により採取された断層内地下水は TD.650m~TD.1100m に分布し、長尺ボーリングにより採取された断層内地下水は TD.1300m~TD.1400m に分布する (図 19、20)。

以上のことから、当該地域の地下水は基本的に  $\text{CO}_2$  分圧が高い状態で化学平衡に達して

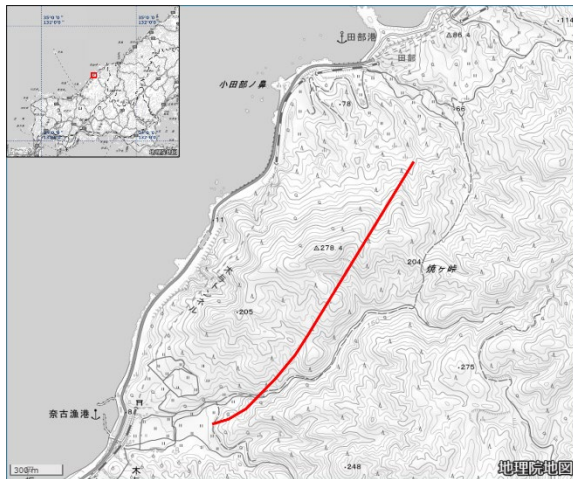


図 20 木与第 1 トンネルの位置と地形



図 21 木与第 1 トンネル周辺の地質

いたと推定され、断層破碎帯内の一部区間の地下水のみ大気と同等の  $\text{CO}_2$  分圧で化学平衡に達していたと推定される。

### 3.3 花崗岩地域のトンネル

#### (1) 木与第 1 トンネル周辺の地質概要

木与第 1 トンネルは、山口県阿武町に位置するトンネルである（図 20）。当該地域は標高 300m 前後の丘陵地形をなし、急崖斜面が日本海に面している。急崖斜面は、波浪の浸食作用により形成された海食崖と推定されており（清水ほか, 2020）、その海岸線を通り国道 191 号線はたびたび斜面崩壊などの災害を被っているため、本トンネルは防災対策事業として建設が進められている。

本地域の地質は、中生代白亜紀の阿武層群福賀累層に相当する流紋岩類と中生代白亜紀後期に福賀累層に貫入した花崗岩類からなる（図 21）。花崗岩類は、流紋岩類の下底に水平な板状形態を有して貫入するため、流紋岩類はループペンダント状に花崗岩の上に分布し、これらの流紋岩類は著しい接触変成作用を受けている（神谷, 1974）。

#### (2) トンネル湧水の水質の特徴

本トンネルの湧水について、3 箇所から採取し、イオン濃度分析を行った。また、トンネルに近接する木与川の河川水も 3 箇所から採取し、同様に分析を行った。

トンネル湧水の水質は、場所により異なり、東側坑口から 890m では  $\text{Na-SO}_4/\text{Cl}$  型、989m では  $\text{Na/Ca-HCO}_3$  型、1126m では  $\text{Na-HCO}_3/\text{Cl/SO}_4$  型を示す。一方、木与川河川水はいずれの箇所においても  $\text{Na-Cl}$  型を示す。

### (3) 木と第1トンネル周辺の岩石による溶出試験結果

トンネル湧水水質の形成への水-岩石反応の影響を検討するために、トンネル周辺で採取されたボーリングコアを用いて溶出試験を行った。ボーリング柱状図を図22に示す。地表面から深度2mまでは表層土が分布する。そこから深度20mまでは福賀層の流紋岩が分布し、下部は花崗岩の貫入により鉍化変質を受け、一部に黄鉄鉱が認められる。深度20m～35mは風化花崗岩が、それ以深では花崗岩が分布する。このコアから、深度4.1m、5.5m、9.8m、15.0m、16.0mから流紋岩試料を、深度22.7m、25.7m、29.8m、32.2m、36.5m、40.0mから花崗岩試料を採取した。

これら11試料の溶出試験における溶出水のイオン濃度を図23に示す。深度4.1～9.8mの流紋岩試料の溶出水のイオン濃度は低い。深度15.0m、16.0mの流紋岩試料では、上部に比べてSO<sub>4</sub>濃度が高く、熱水変質の影響により黄鉄鉱が含まれた影響と推定される。花崗



図22 ボーリング柱状図

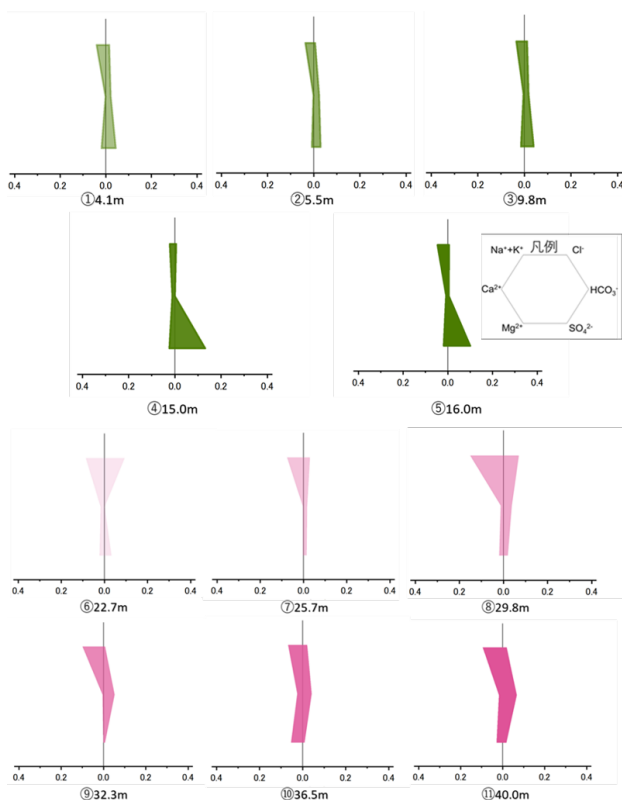


図23 溶出水のイオン濃度

岩試料の溶出水のイオン濃度は、全体的に上部の流紋岩試料よりも高い傾向を示し、深度 30m よりも浅い風化花崗岩では Na-Cl 型の水質を示す。深度 30m 以深の花崗岩試料の溶出水では Cl 濃度が低くなり、Na-HCO<sub>3</sub> 型の水質を示す。

#### (4) トンネル湧水水質と溶出水水質の比較

トンネル湧水水質と岩石の溶出試験による溶出水水質を比較した。トンネルの東坑口から 890m 地点の湧水水質は、溶出試験における深度 15.0m、16.0m の鉍化変質した流紋岩試料の溶出水水質と近いイオン濃度比を示している。これは 890m 地点付近に鉍化変質した流紋岩が分布していることを示唆する。また、989m、1126m 地点の湧水水質は風化花崗岩試料の溶出水水質と類似したイオン濃度比を示すことから、この区間には風化花崗岩が分布すると推定される。

本トンネルでは、掘削断面位置の想定地質は花崗岩とされていたが、花崗岩の上部に流紋岩類はルーフペンダント状に分布するため、想定されていない流紋岩が掘削面に出現した。上記のように、流紋岩と花崗岩では溶出水水質が異なり、地下水水質も異なる。このことから、探り削孔などで湧水を採取し、水質を把握することで切羽前方の地質体を予測することが可能である。

#### 4. まとめ

地下水水質を用いてトンネル切羽周辺の水理地質構造の推定精度の向上することを目的として、火山地域のトンネル 2 カ所、断層帯のトンネル 1 カ所、花崗岩地域のトンネル 1 カ所において、地質・岩石調査、水質調査を行い、いくつかのトンネルを対象に PHREEQC を用いた地下水水質シミュレーションを実施し、水理地質構造推定手法を検討した。結果は、以下の通りである。

- 4) 第四紀の火山噴出物を掘削対象とする羊蹄トンネルでは、周辺の地表湧水は地下水が流動する経路となる溶岩ごとに水質が異なり、流路での水-岩石反応と流速等をモデル化し、PHREEQC で再現することで水質形成を再現できた。この方法をトンネル湧水に適用することにより、トンネル周辺地質の透水性などの水理特性を推定、比較することが可能であることが分かった。
- 5) 新第三紀の火山岩類を掘削対象とする内浦トンネル東川工区では、岩石の変質程度により湧水水質が異なり、湧水水質と溶出試験の溶出水とが類似した水質を呈し、PHREEQC により溶出水の形成がある程度再現できることを確認した。
- 6) 断層帯を掘削する中央アルプストンネル山口工区では、断層部とそれ以外で地下水水質が異なること、断層部でも断層破碎帯の粘土化部(DL 級岩盤部)を境に湧水の HCO<sub>3</sub>-Na+Ca 関係が異なることが分かった。後者の相違は湧水に関与する CO<sub>2</sub> の分圧の違いによることが PHREEQC による解析で明らかになり、地下水水質を PHREEQC で再現することにより、トンネル周辺に分布する断層帯の空隙の状態がある程度推定できる可能性を示した。

- 7) 花崗岩を主な掘削対象とする木与第 1 トンネルでは、花崗岩と接触する流紋岩が熱水変質の影響で黄鉄鉱を含有するため、切羽が流紋岩に接近した時あるいは流紋岩を掘削した時の湧水が SO<sub>4</sub> に富むようになり、これらの水質が溶出試験の溶出水の水質と類似した傾向を示すことが分かった。このことから、探り削孔などからの湧水の水質により、切羽前方の地質体を予測できることが分かった。

以上のように、トンネルに分布する岩石と湧出する地下水の水質から、トンネル周辺の地質体を推定でき、さらに PHREEQC を用いた解析を行うことで、水理地質特性を推定することが可能であることが示された。解析による水質の再現精度にはまだ不十分の点もあるため、今後はこの再現精度の向上を図り、トンネル周辺の水理地質特性の把握への実装を目指す。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、鉄道・運輸機構、羊蹄トンネル比羅夫工区 JV、奥村組、羊蹄トンネル有島工区 JV、熊谷組、内浦トンネル東川工区 JV、鉄建建設、中央アルプストンネル山口工区 JV、鹿島建設、国土交通省山陰西部国道事務所、戸田建設、宇部建設コンサルタントの関係各位には、現地の資料をご提供いただくとともに、現地調査の際の便宜を図っていただいた。鹿島建設 山下慧氏、元山口大学大学院生（現前田建設）村尾駿太郎氏、元山口大学学生（現 JR 東海）平山稜悟氏には、共同研究者として現地調査、各種実験や分析を行っていただいた。ここに記して謝意を表する。

以上