

阿寺断層を貫くトンネル坑内湧水の水質と地質との関連性評価

Evaluating Relationship between Water Quality Obtained from Tunnel and Geology through Atera Fault

山下 慧 升元 一彦 石橋 正祐紀

要 約

トンネル施工において、断層や破砕帯は、切羽の崩壊・突発湧水など施工上の問題となる場合や、掘削に伴い、坑内に地表水を引き込む新たな水みちにより、地表における湧水など周辺環境へ影響を与える場合がある。これらのトラブルに対して適切に対処するためには、断層位置やその影響範囲を事前に予測し、対策を検討する必要がある。今回、坑内湧水の水質と断層との関連性からボーリング孔周辺の断層粘土の有無や分布を評価する手法の妥当性を確認するため、断層帯を掘削している中央アルプストンネル（山口工区）のトンネル坑内で湧出した地下水の水質に基づき検証を行った。湧水の水質分析結果と湧水箇所地質状況の比較に基づいて、地下水水質による断層範囲や地質性状の評価の可能性を検討した結果、湧水の $EC \cdot Na^+/Ca^{2+}$ 比から断層粘土の有無が評価できることから、施工上問題となる粘土を伴う断層を地下水質で把握できることが明らかとなった。

目 次

- I. はじめに
- II. 既往研究
- III. 調査サイトの概要
- IV. 調査方法・分析方法
- V. 結 果
- VI. 考 察
- VII. まとめ

I. はじめに

トンネル施工において、断層や破砕帯は、切羽の崩壊・突発湧水など施工上の問題となる場合や、水みちとなり坑内に地表水を引き込むことで、地表における湧水など周辺環境へ影響を与える場合がある。これらのトラブルに対して適切に対処するためには、断層位置やその影響範囲を事前に予測し、対策を検討する必要がある。

トンネル前方の断層性状を評価するために、ボーリング調査を実施する場合があるが、その際に断層粘土は削孔水や湧水とともに流出してしまう恐れがあり、直接的に断層性状を確認できない場合がある。また、ボーリング調査で取得した情報は、二次元的な情報であり、ボーリング調査のみでは、空間的な地質性状を評価することは難しい。一方で、地下水は地質や地形・圧力などの条件によって三次元的に流動しており、地下水水質も三次元的な広がりを持つ情報を有している

ため、トンネル周辺の断層性状を、地下水の水質分析結果から評価することは可能だと考えられる。

今回、ボーリング孔からの湧水の水質分析結果を用いて、ボーリング孔周辺の断層粘土の有無や分布を評価する手法の妥当性を確認するために、断層帯を掘削しているリニア中央新幹線中央アルプストンネル（山口工区）の調査結果により検証を行ったので報告する。

II. 既往研究

断層帯を掘削した際に発生したトンネル湧水に関する研究は古くから実施されている^{1) 2)}。笠間・鶴巻(1971)³⁾では、六甲山地(花崗岩系)において、断層粘土が分布する箇所からの湧水は、粘土鉱物とのイオン交換反応により、 Na^+ 、 Ca^{2+} 溶存量が多くなることを報告している。しかし、本報告では、3本のトンネル(阪神上水道送水トンネル:約19km, ②鈴蘭台一島原下水道トンネル:2.2km, ③北神上水道トンネル:2.9km)を対象としているが、分析試料は20サンプル程度と少なく、周辺の地質性状との詳細な比較ができていない。

木村(1990)では神戸層群の地すべり地域の地下水は、置換性Naを含むモンモリロナイトと $CaCO_3$ が存在し、この両者が地下水と反応することで高濃度 Na_2CO_3 型の地下水を形成していると結論づけている。しかし、地表からの鉛直ボーリング孔や集水井や井戸からサンプルした試料のみを対象としており、ボーリング孔周辺の3次元的地質情報は十分に把握できておらず、またボーリング湧水の水質がその地点の

キーワード : 地下水水質, 断層破砕帯, 断層ガウジ, 山岳トンネル, 陽イオン交換反応, 粘土鉱物

Keywords : chemical composition of groundwater, fault zone, fault gauge, mountain tunnel, cation exchange reaction, clay mineral

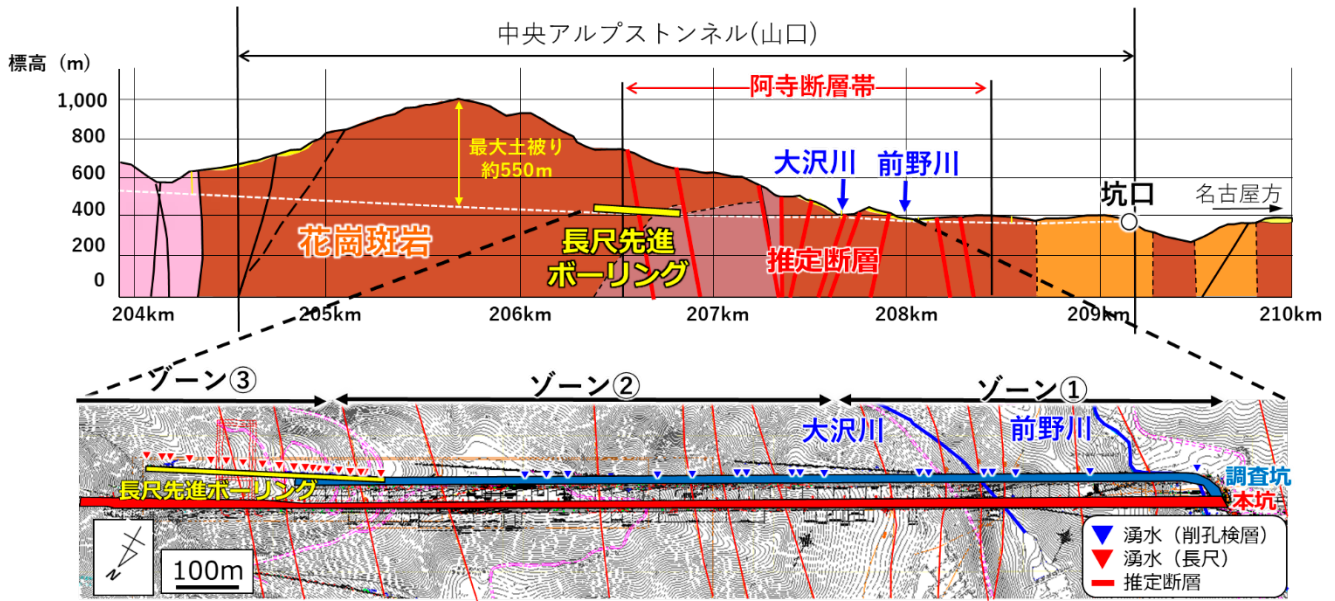


Fig.1 本調査地域の地質断面図と採水地点
(Geological Cross Section and Sampling Area)

地下水水質を代表しているかについては不明であり、地下水水質と地質状況の比較が十分になされているとは言えない。

以上より、断層帯から湧出するトンネル湧水・地下水は断層粘土のようなイオン交換能をもつ鉱物との反応により、地表水と比較して、水質が大きく変化することが知られているが、断層破碎帯の分布と地下水水質の関係性について明らかにされていない。

そこで、本研究では、掘削時に観察される地質状況とボーリング孔から湧出する地下水水質の詳細な比較をすることで、その関係性を明らかにし、ボーリング孔からの湧水の水質分析結果から、ボーリング孔周辺の断層粘土の有無や分布を評価する手法の妥当性を検証する。

Ⅲ. 調査サイトの概要

今回調査を行ったリニア中央新幹線中央アルプストンネル(山口工区)は延長約4.6kmの山岳トンネルである。当工区は、日本有数の活断層である阿寺断層と交差する位置関係にあるため、当初から切羽の不安定化や大量高圧湧水などの地質リスクが懸念されていた。そこで、本坑掘削に先立ち、阿寺断層帯の地質・地下水状況を事前に把握するために、調査坑および長尺先進ボーリングを施工することとした。

当工区の地質は、中生代白亜紀の花崗斑岩が主体で、新鮮なものは一軸圧縮強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の硬質な岩盤であるが、断層活動に起因した破碎部や粘土化帯が発達しており、硬軟の激しい地山である。特に、事前の地質調査結果では、14本の主断層が推定され、約 $208\text{k}300\text{m}\sim 206\text{k}840\text{m}$ ($L=1,460\text{m}$)が阿寺断層帯と報告されている (Fig.1)。

上記のように、本調査地域には、大規模な断層帯が分布しており、断層帯の影響を受けた湧水が出現する可能性が高い

ため、ボーリング孔からの湧水の水質分析結果から、ボーリング孔周辺の断層粘土の有無や分布を評価する手法を検証するために適したサイトであると考えられる。

Ⅳ. 調査方法・分析方法

1. 試料採取

地下水試料の採取は、調査坑で実施した削孔検層のボーリング孔と調査坑 TD.1,270mから実施した長尺先進ボーリングを対象に実施し、それぞれ 20 試料、26 試料を採水した (Fig.1)。削孔検層のボーリング孔からの湧水 (以下、「湧水(削孔検層)」とする) は、削孔のために使用した工事用水が混入しないように、削孔から 1 時間後に採水した。長尺先進ボーリング時の湧水 (以下、「湧水(長尺)」とする) は、排水量の変動や濁りの有無を目安に、最低 15 分待機して採水した。また、トンネル周辺の河川水 (大沢川) も採水した。

2. 分析方法

採水地点にて pH、電気伝導率 (EC)、酸化還元電位、水温を測定した。また、採水した試料の Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- の 7 成分は、実験室にてイオンクロマトグラフィーにより測定を行った。分析の前処理として、粒子状物質を取り除くために、 $0.02\mu\text{m}$ のマイクロフィルターで濾過を行った。 HCO_3^- は、 H_2SO_4 滴定により測定を行った。

Ⅴ. 結果

湧水 (削孔検層)、湧水 (長尺) 中の、EC と $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比の分析値から、今回取得した試料をゾーン①～③に分類した (Table 1)。各ゾーンにおいて、化学分析の結果と掘削時に観察される地質状況 (岩級区分や断層破碎帯の性状) を比較し、断層帯からの湧水と水質の関係性について検討した。

Table 1 各ゾーンのTDと水質の特徴
(Depth of Excavation and Chemical Composition of Each Zone)

	ゾーン①	ゾーン②	ゾーン③
TD	0m~650m	650m~1,390m	1,390m~
EC (mS/m)	低 (<15mS/m)	高 (>15mS/m)	高 (>15mS/m)
Na/Ca比 (当量)	低 (<5)	高 (>5)	低 (<5)

1. ゾーン① : TD. 0m~TD. 630m

(1) 地質

前野川より手前の区間は、土被りが小さく (30m~50m), Fig.2 のように、切羽全面に表層風化の影響を受けた地山である (DH 級主体)。前野川を超えてからは、断層部の影響を受けた脆弱な地山となる (DL 級主体)。

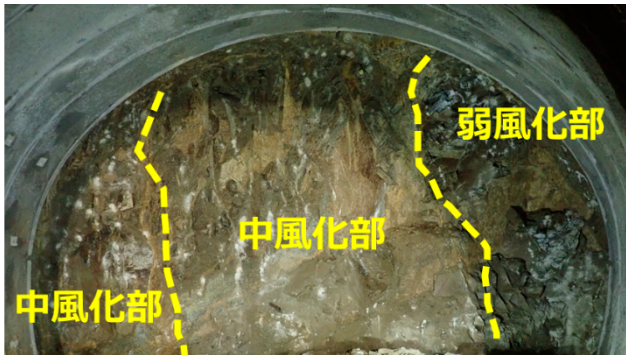


Fig.2 切羽写真 (TD.22m)
(Tunnel Face Picture at TD.22m)

TD.630m の切羽 (Fig.3) では、中央に大規模で粘土質な断層ガウジが分布していることが観察された。また、調査坑に平行して掘削されている本坑でも、同様の断層ガウジが走向の延長線上に分布していることが確認され (Fig.4, 5), 調査と本坑を横切る形で連続性のある断層が分布していることがわかった。

(2) 水質

河川水とゾーン①の湧水 (削孔検層) の EC と化学組成 (ヘキサダイアグラム) を Fig.6 に示す。TD.650m より手前の区

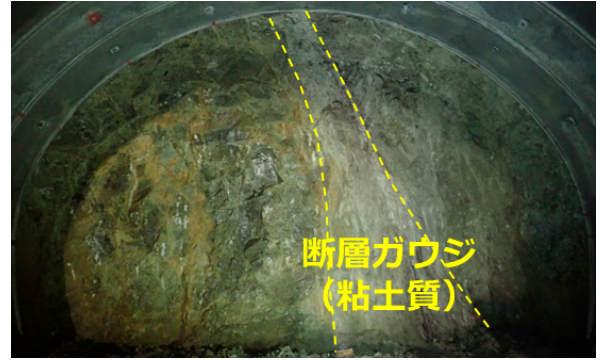


Fig.3 切羽写真 (TD.630m)
(Tunnel Face Picture at TD.630m)



Fig.4 本坑の切羽写真
(Tunnel Face Picture of Main Tunnel)

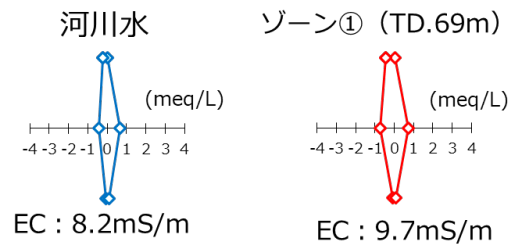


Fig.6 地表水とゾーン①の水質分析結果
(Water Quality Analysis Results for Surface Water and Zone 1)

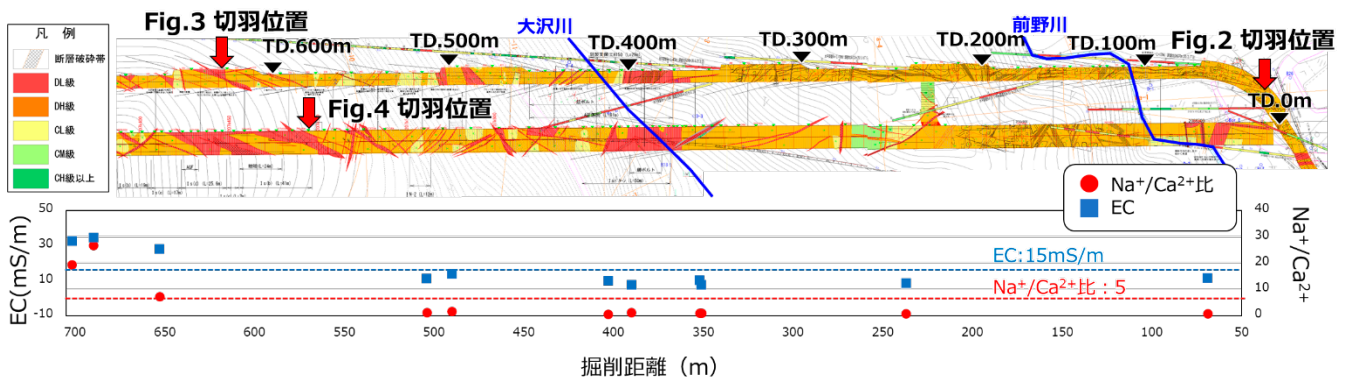
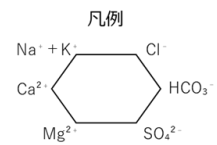


Fig.5 ゾーン①の地質断面図と水質分析結果
(Geologic Cross Section and Water Quality Analysis Results for Zone 1)

間では EC・化学組成はほぼ河川水に近い値であった。土被りも小さいため、ゾーン①は地表水の水質に近い地下水が賦存している区間だと考えられる。Fig.5 にゾーン①の地質断面図と水質分析結果を示す。Fig.5 に示すとおり、TD.650m 付近で EC・Na⁺/Ca²⁺比ともに上昇し、地表水とは明らかに異なる水質であった。これは、Fig.3~5 で確認した連続性のある大規模な断層が地下水流動を遮断し、独立した帯水層が構築されているためと考えられる。

2. ゾーン② : TD. 630m~TD. 1, 315m

(1) 地質

TD.630m~TD.1,150m 区間では DH~DL 級の切羽が続き、一部硬質な岩盤も含まれるが、風化部や粘土など断層運動の影響を受けた岩盤が切羽の大部分を占めている。この区間の代表的な切羽写真を Fig.7 に示す。

TD.1,150m 以降は DL 級の粘土混じりの破碎部が続き、TD.1,260m 付近から赤色の粘土層が出現した (Fig.8)。TD.1,150m~TD.1,300m では、DL 級の切羽が 100m 程度続き、より破碎した脆弱な切羽が出現していることから、当区間が阿寺断層の本体部 (F-4 断層) だと考えられる。

(2) 水質

ゾーン②の TD. 860m と TD. 1,058m の 2 箇所 で採水した湧水 (削孔検層) のヘキサダイアグラムを Fig.9 に示す。Fig.6 に示した水質と比較して、EC や HCO₃⁻が高いことから、ゾーン②の湧水は、水-岩石反応がより進んだ深層地下水であると考えられる。

また、ゾーン②の湧水は、ゾーン①の湧水と比較して、高 Na⁺/Ca²⁺比、高 EC の湧水が湧出している (Fig.9, 10)。また、TD.1,050m~1,100m で Na⁺/Ca²⁺比が一度減少したが、それ以降は高 Na⁺/Ca²⁺比の水質を示す湧水が湧出している。

3. ゾーン③ : TD.1,315 m~

ゾーン③では、TD.1,270 m から切羽前方に実施した長尺先進ボーリングで採取したコアと湧水の水質分析結果を比較する。

(1) 地質

TD.1,375m 付近より手前の区間と奥の区間の代表的な長尺

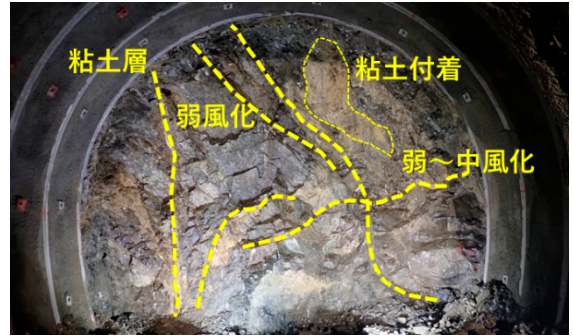


Fig.7 切羽写真 (TD.860m)
(Tunnel Face Picture at TD.860m)



Fig.8 切羽写真 (TD.1,274m)
(Tunnel Face Picture at TD.1,274m)

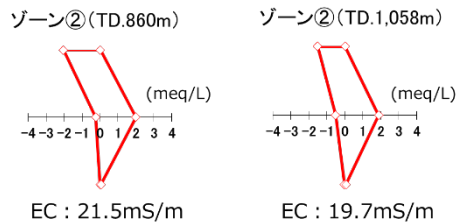


Fig.9 ゾーン②の水質分析結果
(Result of Water Quality Analysis for Zone 2)

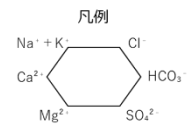


Fig.8 切羽位置

Fig.7 切羽位置

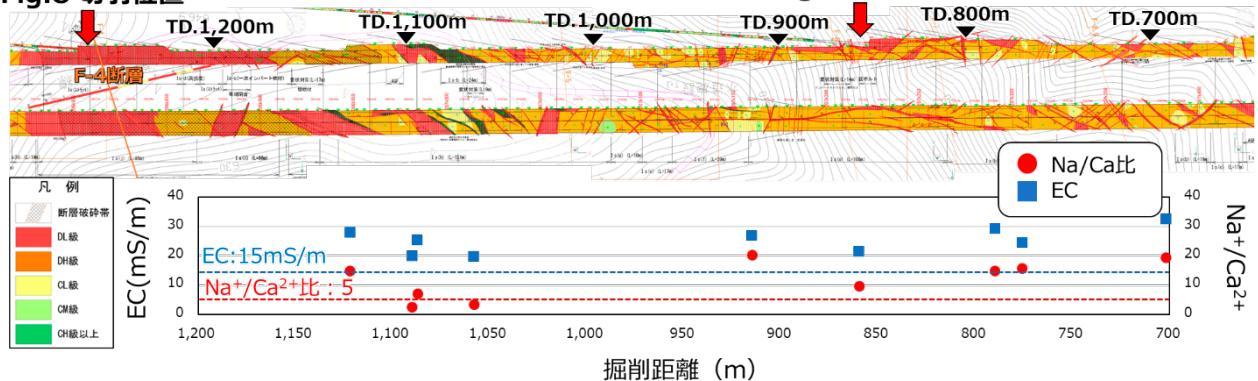


Fig.10 ゾーン②の地質断面図と水質分析結果
(Geologic Cross Section and Water Quality Analysis Results for Zone 2)

先進ボーリングのコア写真を Photo 1, 2 に示す。(コア写真の掘削距離は Fig.11 中に記載) TD.1,375m より手前の区間では、粘土主体のコアや粘土混じりの角礫状のコアなど断層運動が想定される地質性状であったが、TD.1,375m 付近から CL 級の硬質で新鮮な岩盤が出現した。

(2) 水質

湧水(長尺)の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と EC を Fig.11 に示す。TD.1,375m より手前の区間では、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比、EC とともにゾーン②よりも高い値を示した。しかし、TD.1,375m より深部の区間では、EC も $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比も小さい値となったが、特に $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比が小さくなる傾向が見られた。

VI. 考察

1. ゾーン1からゾーン2の水質変化メカニズム

ゾーン①では、 $\text{EC} \cdot \text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比いずれも地表水と同程度であったが、ゾーン②から $\text{EC} \cdot \text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比ともに上昇した。EC が上昇した原因は、ゾーン②では地表水よりもイオン濃度の高い、より岩石と反応した地下水が滞留していたと考えられる。また、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比が上昇した要因は、この地下水中の Ca^{2+} が粘土鉱物中の Na^+ とイオン交換したことが要因だと考えられる。当該工区の地山は、掘削当初から断続的に粘土を挟み、割れ目の多い破碎帯が広範囲に分布していた。また、実際に本坑の TD.820m 付近の断層破碎帯から採取した断層粘土の XRD 分析を実施したところ、陽イオン交換能を有するスメクタイトが多量に含まれている(ピーク強度>5,000以上)ことがわかった。以上より、断層粘土のイオン交換反応により、 Na^+ 濃度が上昇し、 Ca^{2+} 濃度が減少した可能性が高いと考えられる。

2. ゾーン2からゾーン3への水質変化メカニズム

湧水(長尺)のうち、ゾーン③の水質は EC が 15mS/m 以上と比較的高い値であるが、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比は 5 以下と低い値であった。ゾーン③では CM 級以上の硬質で新鮮なコアが確認されたことから、断層運動による断層粘土がほとんど分布しないため、上述のイオン交換反応が起こらず、低 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比の水質が形成されたと考えられる。

VII. まとめ

今回、中央アルプストンネル(山口工区)において、坑内から湧出する湧水と地質性状を比較し、坑内湧水の水質形成メカニズムについて考察した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

- a. 本調査地域では、断層粘土により地下水流動が遮断され、地表水の影響が大きい領域(ゾーン①)と、地表水の影響が小さい領域(ゾーン②, ③)が形成されている。
- b. EC 値が地表水と比べて十分に高いことは、地表水と遮断された深層地下水だと判断することができるため、EC 値を確認することで、トンネル掘削時の地表水の引き込み程度を評価できる可能性がある。
- c. 本調査地域の断層帯から湧出するトンネル湧水・地下水は、断層粘土のようなイオン交換能をもつ鉱物との反応に



Photo 1 TD. 1,375m までの代表的なコア (Representative Core Photo after TD. 1,375m)



Photo 2 TD. 1,375m 以降の代表的なコア (Representative Core Photo before TD. 1,375m)

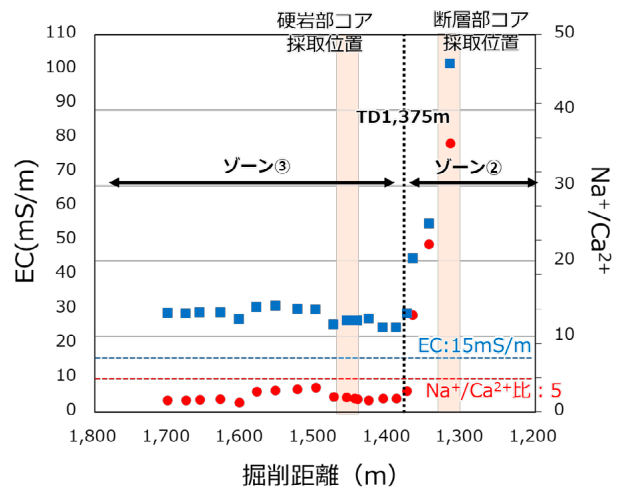


Fig.11 ゾーン③の水質分析結果 (Result of Water Quality Analysis for Zone 3)

より、水質が大きく変化することがわかった。

- d. 断層粘土が分布している区間（ゾーン②）では、湧水の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比が高くなる（ >5 ）傾向があり、断層粘土が分布していない区間（ゾーン③）では、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比が低くなる傾向がある（ <5 ）。

今回の調査結果から、ボーリング孔からの湧水の水質分析を実施することで、ボーリング孔周辺の断層粘土の有無や分布を評価できる可能性があることがわかった。これは、断層粘土が削孔水や湧水で流出してしまい、地質性状が直接的に確認できない場合や、コアが取得できないようなボーリングを実施する場合に、ボーリング孔周辺の地質性状を確認する手法として活用できると考える。今後は、母岩・断層粘土の溶出試験を実施することで、断層分布域からの湧水の、より詳細な水質形成メカニズムについて検討する予定である。

参考文献

- 1) 吉岡龍馬；六甲山系の地下水の水質特性について，日本地下水学会誌，第26巻，第4号，1984，pp147-166.
- 2) 北裕一郎ほか；活断層周辺における地下水の挙動—岐阜県茂住断層の例—，日本地球化学会年会講演要旨集，第48巻，2001，p.200.
- 3) 笠間太郎ほか；六甲山地のトンネル湧水の状況とその水質，応用地質，vol12，No.1，1971，pp.16-28.
- 4) 木村耕治ほか；神戸層群の地すべり地に存在する高濃度 Na-HCO_3 型地下水の形成機構，日本地下水学会誌，第32巻，第1号，1990，pp.5-16.

Evaluating Relationship between Water Quality Obtained from Tunnel and Geology through Atera Fault

Kei Yamashita, Kazuhiko Masumoto and Masayuki Ishibashi

In tunnel construction, faults and fracture zones can cause construction problems such as collapses and sudden water inflows, or they can draw surface water into the tunnel and affect the surrounding environment by causing drought on the ground surface. To deal with these problems appropriately, it is necessary to predict in advance the distribution of faults and the range of their influence and to consider countermeasures. To evaluate the relationship between the water quality of underground water and faults, we analyzed the water quality of water gushing from a tunnel wall and a long advanced boring in the Chuo-Alps Tunnel (Yamaguchi section), which is excavated through a fault zone. From the results of the water quality analysis and a comparison of the geological conditions of the spring water, we examined the possibility of evaluating the extent of fault and geological properties on the basis of groundwater quality. Our findings indicate that faults with clay, which can be a problem during construction, can be identified by groundwater quality evaluation using the EC (Electric Conductivity) and $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ratio of spring water.