

# 水質トレーサーによる地山構造の評価手法

並木 和人 桑原 徹  
鈴木 健一郎 平間 邦興

## Evaluation of Local Hydrogeology Using Tracer Reflected in Groundwater Components

Kazuto Namiki Tohru Kuwahara  
Kenichirou Suzuki Kunioki Hirama

### Abstract

This report studied the characteristics of local hydrogeology using a tracer reflected in the ground and surface water components of tunneling into Neogene volcanic layers. In the process of tunneling, the geological structure, local groundwater flow, infiltration from river to ground, and water inflow into the tunnel were discussed. Three-dimensional numerical analyses were carried out based on the hydrogeological mode introduced by the tracer data and water inflow was evaluated. Groundwater components were divided into three types, and this characteristic was concordant with the rock-water chemical reaction using a rock test sample. Local groundwater flow system was characterized as Rhyolitic layer (abundant water inflow) and Basaltic and Tuffaceous layers (little water inflow). Numerical analyses of water inflow were carried out based on the hydrogeological model between the river surface and tunnel face, and the relation between numerical data and observational data were evaluated. Finally, the reliability of the hydrogeological model inferred from tracer data using groundwater components was clarified.

### 概 要

今回の報告は、トンネルのTBM先進導坑一全断面掘削の設計施工に関連して、地山内の地下水の水質成分をトレーサーとみなして、地質・水文特性について検討した。トンネルの掘削過程を追いながら、地質構造、地山の地下水、河川水、およびトンネル湧水における相互関係について検討し、併せてこれらの結果から作成した地山モデルに基づき3次元浸透流解析を行い、トンネル湧水について検討した。地山の地下水水質特性は、カルシウム卓越型、ナトリウム・カリウム卓越型、炭酸卓越型の三つに分類でき、これらは岩石溶出試験などの結果とも対応した。調査結果より得られた水循環の特性は、坑内湧出量の多い流紋岩層と、少ない玄武岩・凝灰岩互層に分類された。これらに基づいたトンネル湧水の数値解析結果と現場状況との整合性からも、水質トレーサーを加えた地山モデルの妥当性が検証できた。

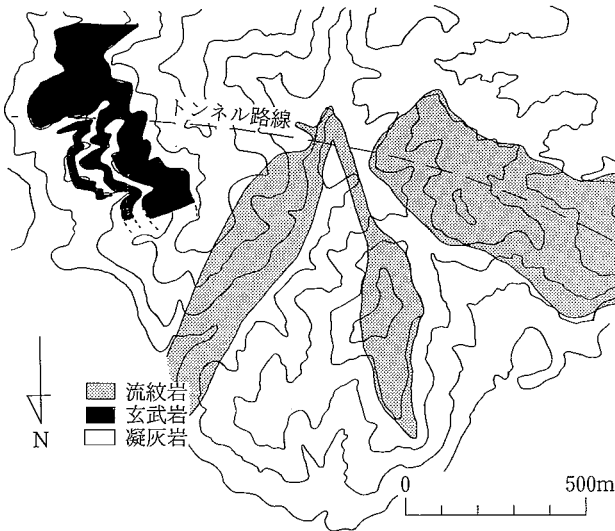
### 1. はじめに

大深度あるいは複雑な地質構造の岩盤における、効率的な設計施工のためには、事前に地質構造や岩盤の物性を十分把握しておくことが重要である。地下構造物構築等に係わる地山の調査手法として、物理探査、ボーリング調査およびボーリング孔を利用した物理検層・力学試験・透水試験などの手法が主に使われているが、最近注目されている手法に、地山内の地下水の水質をトレーサーとして、地質・岩盤構造および広域地下水特性を評価する方法がある。

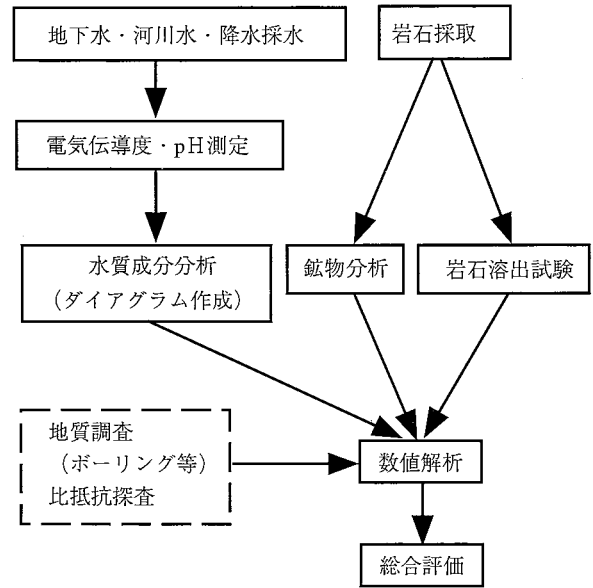
降水の溶存成分は極めて少ないが、降水が地下水や河川水となる過程において、様々な物質が長時間にわたり徐々に取り込まれ、独特の水質が形成されていく。すなわち、水が降雨として地下に浸透した場合、時間とともに

に地層から鉱物成分がイオンとして地下水中に溶け出し、溶存成分を多く含んだ地下水へと変化していく。このため、地山中には地質鉱物に特徴づけられた様々な成分特性を持つ地下水が存在している。この水質を天然のトレーサーとみなし、時間的および空間的な変化を明らかにすれば、特定の地域の地質特性や水循環機構を解明することができる。この調査の目的は大きく、①地質構造特性、地下水のかん養および循環機構の解明などの、自然状態を対象としたものと、②地下水の利用の適否、汚染状態の把握などの人為的な対象とに分類される。

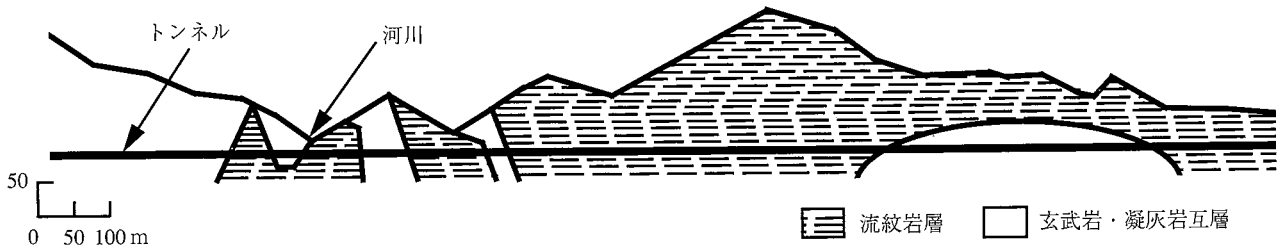
今回の報告では、長大トンネルのTBM先進導坑一全断面掘削の設計・施工技術確立の一手段として、水質トレーサーによる地質・水文特性把握について検討した。トンネルの掘削過程を追いながら、地質構造特性、地山の地下水流動、河川水、およびトンネル湧水の相互関係



図一1 調査地域および概略地質平面



図一3 実施フロー



図一2 調査地域の概略地質断面

について検討した。併せて、これらの結果から作成した地山モデルに基づき3次元浸透流解析を行い、掘削時のトンネル湧水について検討した。

## 2. 地質概要と調査試験の流れ

今回の調査地域の平面図を図一1に、概略地質断面図を図一2に示す。地質的には、新第三紀、グリーンタフと呼ばれている堆積性軟岩～中硬岩の凝灰岩層と玄武岩層の多層構造の互層に、中硬岩の火山岩である流紋岩が溶岩ドーム上に貫入した複雑な地質構造が形成されている。また、流紋岩は部分的に変質作用を受けて粘土化した部分も存在し、変質部には鉱床が存在している。

水質トレーサー調査の実施フローを図一3に示す。今回は、水質試験(成分分析、電気伝導度およびpH測定)に加えて、室内溶出試験および鉍物分析を実施して、水質成分の変化過程を検証した。

## 3. 現地調査結果

### 3.1 成分分析結果

トンネル坑内の湧水の分析のために、トンネル路線を横切る小河川、掘削前の前方探査ボーリング時の湧水、トンネル坑壁からの湧水、および降水より採水を行った。トンネルからの採水は掘削の進捗とともに実施したため、時期は一致していない。採水にはポリ容器を用い、採水

後速やかに主要水質成分である  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}_2^+$ 、 $\text{Mg}_2^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  の分析を実施した。

湧水の分析調査結果を主要6成分のヘキサダイアグラムとして、坑内地質・湧水状況と対照させて図一4に示した。トンネル坑内で採取されたものは、総じて降水や河川水に比べ総イオン量が多いという結果が示された。特にヘキサダイアグラムの相似性に注目すると、坑壁湧水は、以下の三つの水質タイプに分類できる。

Type ①；カルシウム卓越型

Type ②；ナトリウム・カリウム卓越型

Type ③；炭酸卓越型

これら3タイプの水質成分の湧水の出現地点を、掘削時の坑壁地質観察記録データと対比すると、Type ①は凝灰岩・玄武岩互層部に、Type ②は流紋岩部に良く対応している。Type ③については、坑壁地質との明確な対応が認められない。

### 3.2 電気伝導度測定結果

電気伝導度(比抵抗値を逆数で表したものは成分分析前に測定した。トンネル坑内で採取されたものは、総じて降水や河川水に比べ値が高いという結果が示され、成分分析結果との整合が示された。また凝灰岩・玄武岩互層部で採水されたものの方が流紋岩部のものより値が大きいという特徴が現れた。

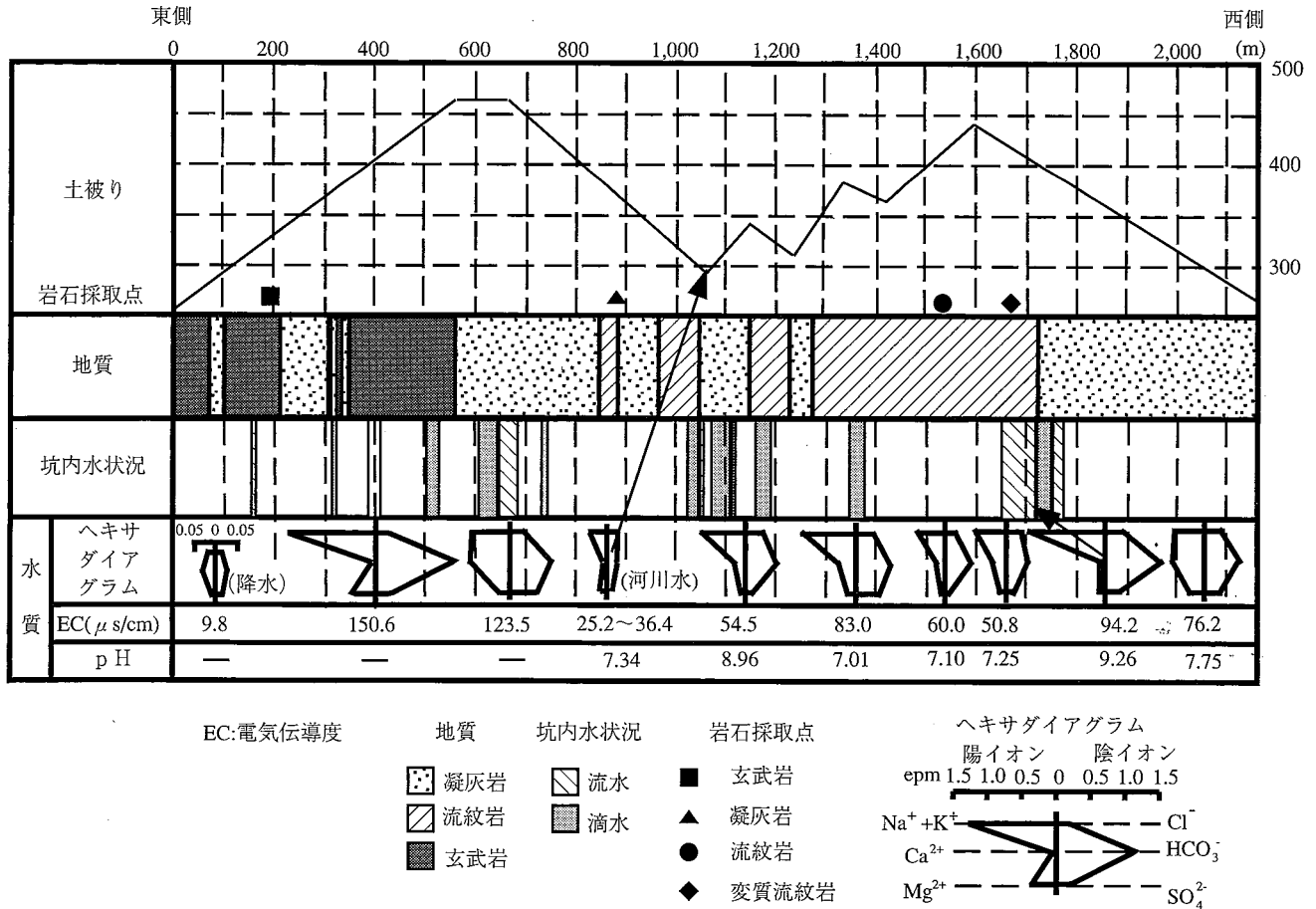


図-4 現地調査結果

### 3.3 pH 測定結果

pH (水素イオン指数) は成分分析前に測定した。凝灰岩・玄武岩互層部で採取されたものに一部9程度の強アルカリ性を示すものが存在したが、河川水・降水を含むのほとんどは7~8を示した。

### 4. 岩石溶出試験

岩石種と湧水の関係について、現地調査結果を補足および検証するために、トンネル坑内で採取した岩石を利用して、室内での岩石溶出試験を実施した。

#### 4.1 試験方法

試験は、トンネル坑内の4地点(図-4参照)より採取した4種類の岩石(玄武岩、凝灰岩、流紋岩、変質流紋岩)を用いて、次の手順で実施した。

- ① 自然乾燥した岩石を乳鉢ですりつぶして粉末にし、さらに炉乾燥によって水分を取り除く。
- ② 岩石粉末2.0グラムを純水800ccとともに容器に入れ、1分間攪拌する。
- ③ 3日後まで電気伝導度とpHをモニターした後に、水質の成分分析を実施する。

#### 4.2 試験結果

電気伝導度とpHのモニター結果を図-5および図-6に示す。3日後の電気伝導度の測定値は坑内湧水の値と比較すると小さいが、これは岩盤中での地下水の滞留

時間との違いを表しているものと考えられる。玄武岩・凝灰岩と流紋岩・変質流紋岩との間では、電気伝導度は5倍以上の違いが、またpHも1程度の違いが現れている。

試験結果のヘキサダイアグラムを図-7に、湧水の分析結果と溶出試験の結果をトリリニアダイアグラムにまとめたものを図-8に示す。溶出時間が3日間と短いため、溶出イオン量は少ないが、溶出の傾向は坑内湧水の分析結果と良く対応しており、実際の岩盤中での溶出過程をかなり正確に再現しているものと判断できる。

ヘキサダイアグラムの形状を現地調査のもの(図-4)と比較すると、以下のような特徴がある。

- ① 凝灰岩はType①に類似している。
- ② 流紋岩、変質流紋岩はType②に類似している。
- ③ 玄武岩は、カルシウムおよび炭酸成分が他の成分より優勢という点がType③と対応している。

またトリリニアダイアグラム上においても、Type②と流紋岩、Type③と玄武岩はそれぞれ近い位置にプロットされている。

これらより、坑内湧水調査により分類された三つの水質タイプは、岩石溶出試験で得られた、凝灰岩(Type①)、変質部を含む流紋岩(Type②)、および玄武岩(Type③)の3タイプと、それぞれ良く対応していると結論される。

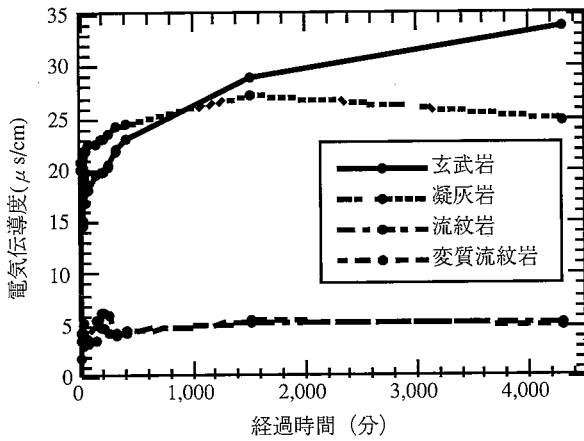


図-5 溶出試験，電気伝導度測定結果

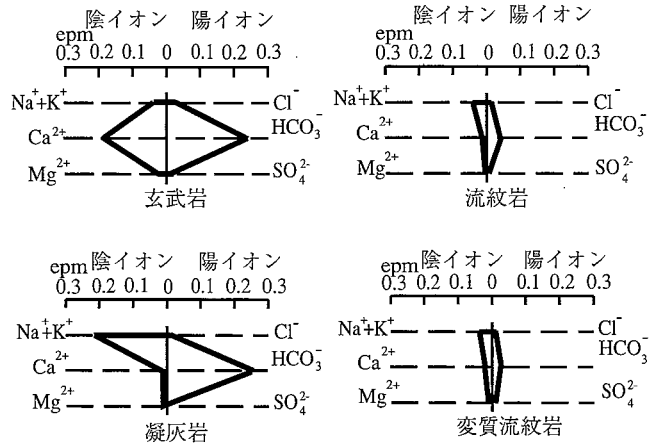


図-7 溶出試験，水質成分分析結果  
(ヘキサダイアグラム)

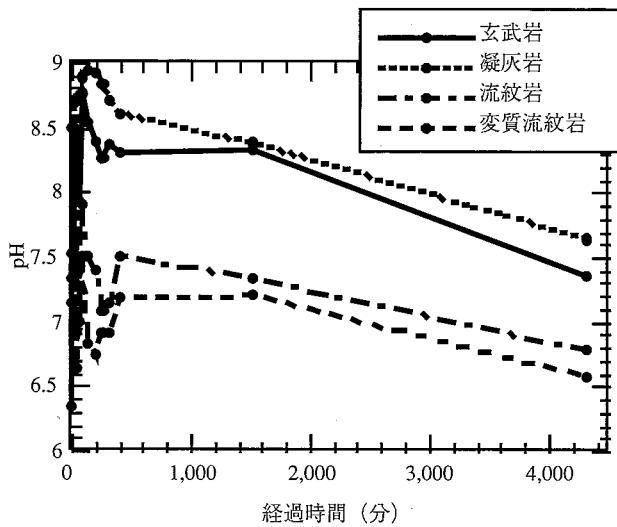


図-6 溶出試験，pH 測定結果

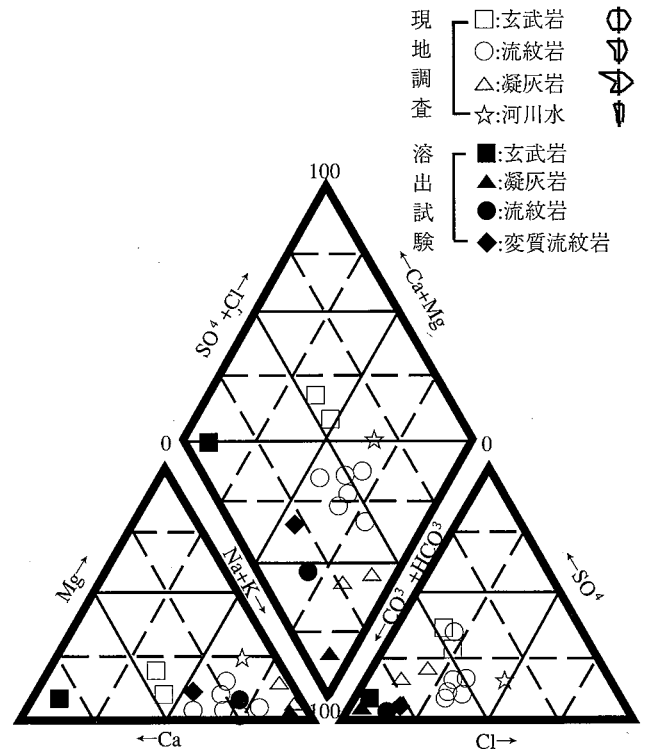


図-8 トリリニアダイアグラムによる分析結果の表示

### 4.3 岩石試料の化学組成

溶出試験を行った4種類の岩石について、X線回折試験によって構成鉱物を明らかにするとともに、蛍光X線分析により化学組成の定量把握を行った。

4.3.1 X線回折試験 今回の試験は全岩に対する主要な鉱物の量比を把握するため、全岩破碎による不定方向法で実施した。試験結果は表-1に示す。特徴は以下の通りである。

(1) 玄武岩と凝灰岩は、粘土鉱物であるスメクタイトを多量に含んでいるが、流紋岩と変質流紋岩にはほとんど含まれていない。

(2) どの岩石も長石類を多量に含有し、玄武岩と凝灰岩はカルシウム質の灰長石を含んでいる一方で、流紋岩と変質流紋岩はナトリウム質の曹長石を含む。

4.3.2 蛍光X線分析 粉末ペレット法による試験結果を表-2に示す。特徴は以下の通りである。

(1) X線回折試験同様、玄武岩・凝灰岩と流紋岩類との2タイプに分類される。両者における大きな違いは、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaOの含有量である。

(2) 玄武岩と凝灰岩は組成が似ているが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oに若干の組成の差があり、これが水質組成の違いを生じているものと推定できる。

(3) 変質流紋岩と流紋岩の間には、CaO、K<sub>2</sub>Oにわずかに組成の差があるが、ほぼ同じ組成と判断できる。

4.3.3 化学組成と水質の関係 溶出試験結果では、凝灰岩・玄武岩と流紋岩との間に、溶存イオン総量および電気伝導度の違いが顕著に認められる。これは岩石中のスメクタイトの有無に起因すると思われる。この違いは現地採水調査ではあまり大きくないが、溶出試験は岩石を粉末化して行ったために、粘土鉱物がいっそう水に溶解しやすい状態になったためと考えられる。

表一1 X線回折試験結果

	玄武岩	凝灰岩	変質流紋岩	流紋岩
石英	+		++	
灰長石	+++	+++		
曹長石			++	+++
スメクタイト	+++	+++	-	

+++：多量 ++：普通 +：少量 -：僅か 無印：検出されず

表一2 X線蛍光分析試験結果

	玄武岩	凝灰岩	変質流紋岩	流紋岩
SiO <sub>2</sub>	50.7	53.1	76.3	76.0
TiO <sub>2</sub>	1.2	1.9	0.3	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.5	12.2	13.6	13.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.3	9.4	0.6	0.5
MnO	0.1	0.1	0.2	0.1
MgO	9.3	6.9	0.6	—
CaO	7.1	6.0	1.5	1.8
Na <sub>2</sub> O	3.1	2.0	2.9	2.0
K <sub>2</sub> O	0.2	1.2	3.4	2.3
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.1	0.1	—
合計	94.6	92.9	99.5	96.7

以上の結果から、降雨が地下に浸透した後、ある特定の岩質によって特徴づけられた水質成分の地下水が、坑壁湧水として流出していることが示唆される。

### 5. 地山地下水の流動メカニズムに関する考察

今回の一連の調査において、以下のような地山内部の地下水流動メカニズムが推定される。

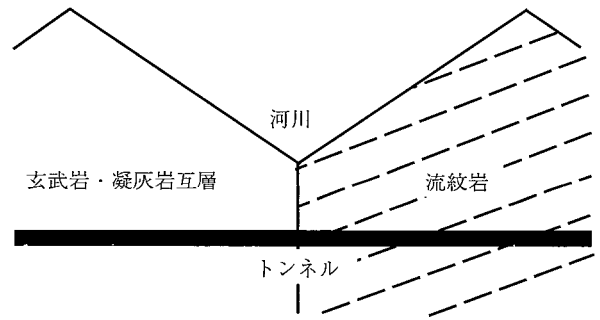
(1) 流紋岩層 坑内への浸出量が比較的多く、水質成分分析結果がイオン総量が少ないことを示していることより、間隙やき裂の多い透水ゾーンと推定される。河川と接触しているような箇所では、降雨時には地山から河川への流出が、また湧水時には河川から地山への水の流入、浸透が行われる。

(2) 玄武岩・凝灰岩互層 坑内への浸出量は流紋岩に比べ少ないが、イオン総量は逆に多い。これより、間隙やき裂は少ないと推定され、河川と接触するような箇所においても、降雨時と湧水時での流量変化は小さいと推定できる。

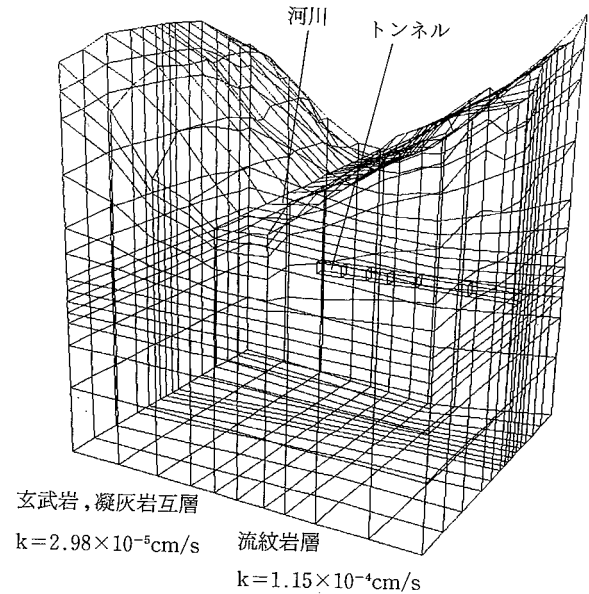
水質トレーサー調査の結果からは、ボーリング孔を利用した原位置透水試験ではとらえにくい地山単位の異方性のような、広域的な地下水流動の把握が可能である。その反面、流量の算定のような定量把握は不可能であるという一長一短が存在している。

### 6. 数値解析によるトンネル湧水評価

#### 6.1 解析の目的



図一9 概念モデル



図一10 解析メッシュモデル

既往の調査結果に加え、水質トレーサーによる地質地下水特性を加味して、より妥当な地山モデルを作成し、トンネル湧水に関して数値解析的に評価を行った。水質の成分分析の結果(図一4)によると、河川とその直下付近の土被りの薄い区間とで、水質組成が類似している。このような区間では掘削時の出水の危険性予測は重要であるので、水質トレーサーによるモデル化に基づき、河川と坑壁湧水との関係を浸透流解析により予測し、実測データとの関係から地山モデルの妥当性を検討した。

#### 6.2 解析条件

図一9に、地山の概念モデルを示す。モデルでは河川を挟んで、東側の凝灰岩・玄武岩互層と西側の流紋岩の二つのブロックの存在を想定し、これを地表地形、河川、トンネル坑道を考慮した三次元モデルに拡張した。モデル化は東西方向および最大深度とも各約100mの範囲について行った。作成されたFEMメッシュモデルおよび解析条件を図一10に示す。解析パラメータは既往調査結果を基に設定した。解析は、施工前の状態および導坑掘削時について実施した。

#### 6.3 解析結果

トンネルを含む断面について、①導坑掘削前と②導坑掘削の河川直下への到達時の地下水の位置水頭および

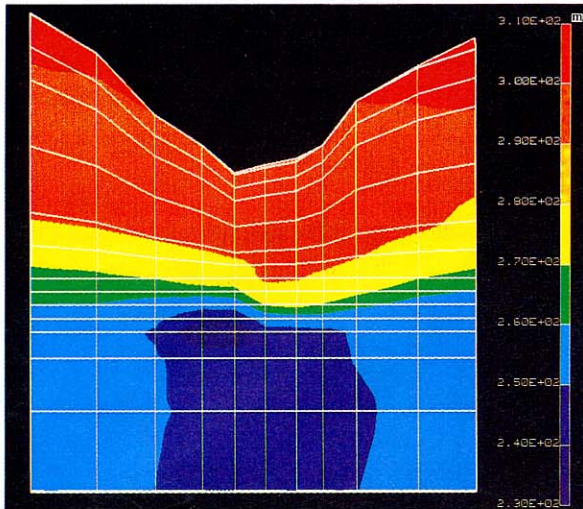


図-11 自然状態における水頭分布

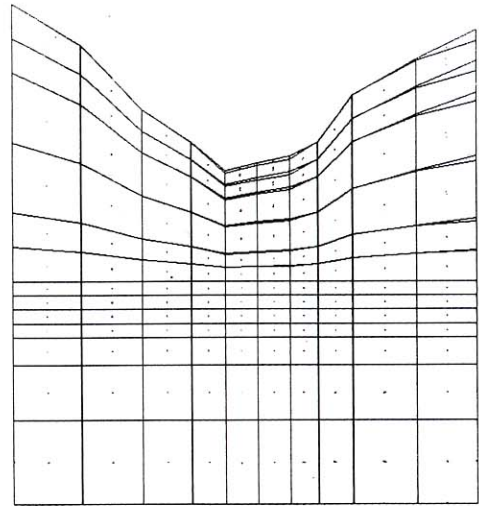


図-12 自然状態における流速分布

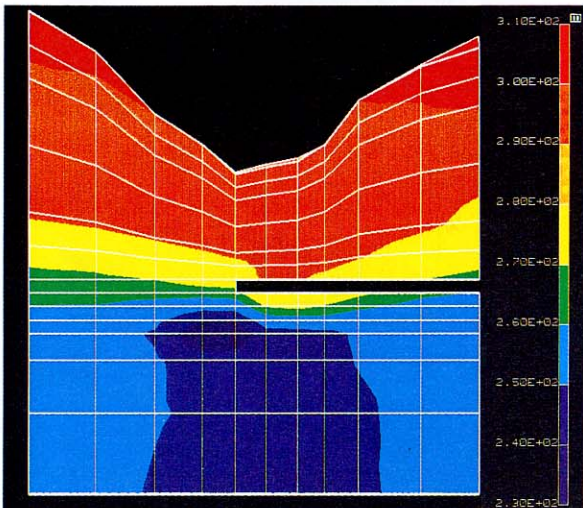


図-13 掘削時における水頭分布

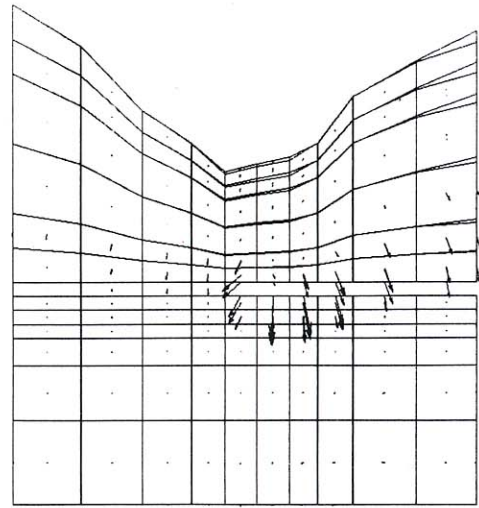


図-14 掘削時における流速分布

流速ベクトルの状況を図-11～図-14に示す。掘削前の状態(図-11および図-12)では、玄武岩・凝灰岩互層の方が流紋岩部より水頭値がやや高く、全体的に目立って大きな流れを持った地下水流は生じていない状況が示されている。これは岩盤の透水性自体が低いことが影響しているものと思われる。導坑到達時の図-13および図-14では掘削によりトンネルに地下水が流入している状況が示されている。このとき流速は掘削前に比べ、最大値で1オーダーの増加を示しているが、水頭値の減少はわずかなものにすぎない。これより、掘削時に河川水が急激に引水される事態は否定される。掘削前後で河川水の流況に著しい変化がみられなかったことが確認されており、解析結果は実際の地下水の流動状態と整合しているものと推論される。

## 7. まとめ

今回、水質の成分分析を中心とした水質トレーサー調査の実施により、複雑な構造の地山特性の把握を行った。現地調査結果による地山の水質特性は、室内要素試験

結果とも整合し、また湧水の数値解析結果と現地状況との整合性からも、水質トレーサーを用いた地山モデルの妥当性が検証できた。

今後は、調査手法の確立、水質成分の生成機構の解明、様々な地山構造、漏水や汚染調査等を通じて、地山特性および広域水循環の評価技術として確立していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 建設省河川局監修：地下水調査および観測指針(案)，山海堂，p.205～214，(1993)
- 2) 並木，他：グリーンタブ地域における水質調査(その1)，日本地下水学会1994年秋季講演会講演要旨，p.110～113，(1994)
- 3) 並木，他：水質トレーサー調査の地山評価への適用，第30回土質工学研究発表会講演論文集，p.255～256，(1995)
- 4) 並木，他：グリーンタブ地域における水質調査(その2)，日本地下水学会1995年春季講演会講演要旨，p.82～85，(1995)