

トンネル湧水の水質分析による
その発生形態同定についてSOME PROPOSALS ON THE IDENTIFICATION OF SEEPAGE IN
TUNNEL MINING BY THE ION CONTENTS ANALYSIS三木 一美*・吉沢 甫**
By Kuniyoshi MIKI and Hajime YOSHIZAWA

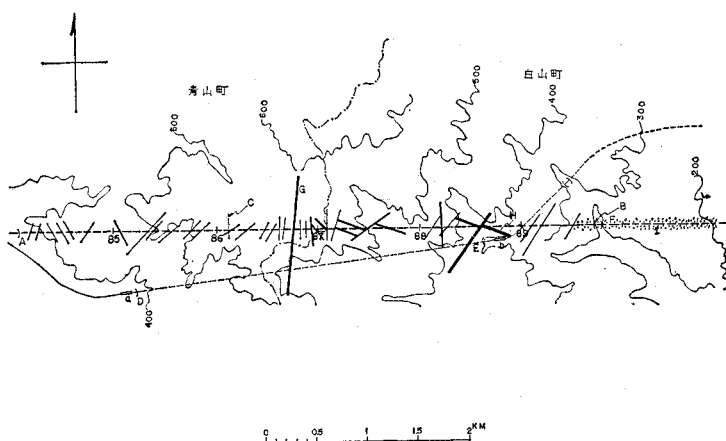
1. 研究の目的

この報文は、三重県鈴鹿・布引の分水界山脈を貫くトンネル工事において、トンネル軸線上の地表水、掘削中の各種湧水、および標高を異にする平行既設トンネルの諸湧水を水質化学的に分析し、これらの湧水と地質環境とを比較検討して溶出化学成分の特徴から湧水を分類したものである。さらに、その経月変化、鉛直方向の水質の化学勾配から地表水とトンネル湧水との関係、湧水の地中での動態を推定しようとしたものである。

2. トンネル工事と地質の概要

近畿日本鉄道では大阪線のうち、従来単線であった三重県一志・名賀両郡境に位する布引山脈の主分水界地区を複線化するため、現在の単線とは別に図-1に示すように西青山駅西方よりわかれて榊原温泉駅西方において再び合流する複線新ルートが設定され、その間に九基のトンネルが開削された。そのうち最長(5690m, 上本町駅基点 84.040~89.730 km) 新青山トンネルもまた49年10月に導坑が貫通、50年6月には全断面掘削を完了し、同年11月23日無事開通した。

このトンネルは、東坑口より導坑先進全断面、西坑口よりは上部半断面先進法をもって掘削された。また、トンネル工事は後に略述するように地質がおおむね良好であったこととともに、当初のルート選定の卓越、工事



数字は上本町駅(起点)よりの杆程
直線はトンネルレベルでの断層の位置。長さ、太さはその相対的規模を表わす。

- | | |
|---------------|---------------|
| a: 旧西青山駅 | E: 既設青山トンネル東口 |
| b: 旧東青山駅 | F: 新設垣内トンネル西口 |
| A: 新青山トンネル西口 | G: 分水界南北断層 |
| B: 新青山トンネル東口 | H: 東青山スラスト |
| C: 工区境 | I: 圧砕岩 |
| D: 既設青山トンネル西口 | |

図-1 青山トンネル地質構造図

管理の適切、施工技術の優秀などが相乗して、工事前の予想を裏切ることなく、終始順調に進行した¹⁾。

地質については、ここではその一般概要と、湧水の特徴の検討に必要と考えられる事項、およびこの調査において明らかになった地質構造上興味深い事項などについて述べる。

一般的にいえば、この地域は主として傾家変成岩帯に属し、強く花崗岩化を受ける古生代砂岩を主とし、板岩をも伴う堆積源岩類および花崗岩類よりなり、特徴的な広域高温交代作用を受けるミグマタイト質変成岩地帯である。

ミグマタイトの縞状構造の走向はおおむね $N70^{\circ}W$ で、傾斜は一般に北に急斜するが、傾斜の変動ははなはだしく一定しないし、また、褶曲構造を示すところも少

* 正会員 元全日本コンサルタント(株)代表取締役 現近鉄

** 理博 京都大学名誉教授 全日本コンサルタント(株)顧問

なくない。図-1に見られるように分水嶺には南北に走る顕著な断層(G)があり、これを境として地質からみると東西に二大別することができる。すなわち、東部地域は西北西に走るスラストとみられる緩傾斜断層を伴う擾乱地帯であって、北西ないしは北東方向の引張断層もしばしば認められ、この現象は上記の南北断層に近づくにつれて特に顕著になる。スラストと考えられるもののうち最も明瞭なものは東青山駅を通るもので、これは露頭も点在し広いところでは約50mに達する幅をもっている。これは東青山スラスト(H)と仮称された。この断層に比較的近接するところに片麻岩の角礫とこれを充填する角礫よりなる圧砕岩層(図中I, 層厚30m以上)がこのトンネルの東坑口付近からそれに東隣する新垣内トンネル(F)のほぼ全体にわたる長区間に連続して現われた。これは片麻岩中に介在するものではあるが、この付近は新第三系(中新統一志層群)の基底礫岩に近接し、両岩が混同されたためか、トンネル掘削までの地表調査ではこの圧砕岩層は未知の岩層であった。この岩の構造、成因の解明は今後の課題として興味深いものがある^{注1)}。西部地域は東部のそれに比してやや花崗岩に富むようであり、断層の近接して頻発するところもあるが、その規模はきわめて小さく、東部に比して安定した地質であり、これは坑内観察によっても明瞭である。

トンネル内および地表の観察から地質構造を考察すると、この地域では北東より加えられた営力により、褶曲、衝上が現われ、これが岩質的に境をなすとみられる主分水嶺に近接する東部地域において特に応力の影響が強く現われ、破碎作用が著しかったと考えられる。これに比して西部地域はやや岩の剛度が異なったため、応力発生当時緩慢な一種の“ワーピング”を行ったと考えられる。その後、この地域は全体として引張状態となり、北東・北西方向の引張断層が発生し、さらに、それ以後東西両地域を区分する南北方向の断層が完成したものと考えられる。この推論は西北西方向の衝上(H)、圧砕岩層などは第三系に現われておらず、第三系生成以前のものであり、一方、北東・北西方向の引張断層、およびこれらをも切る南北方向の断層などは第三系の内にも認められ、少なくとも第三系生成以後のものであるなどの地質調査結果に基づくものである。これらの点については三重県地質図²⁾などを参照されたい。

3. 湧水に関する地質的環境

前節で述べたように、東部と西部とでは地質の上に明瞭な差異がある。それぞれの地質環境と調和を示す湧水

事情について述べる。

(1) 新トンネル湧水

水資料採取区間は図-1に示すように、88.380~86.230 kmの約2.1 kmの間で、構築材料などからの混入不純物質に汚染されることなく、純粹にかつ容易に採取することのできる状態にある湧水が採集の対象となった。掘削中、湧水に遭遇する場合、すみやかに処置されることが多く、非汚染サンプルの採取が困難なこともしばしばあった。特に後述する既設トンネルではこの点恵まれなかった。

a) 89.730 km (東坑口)~88.680 km 区間 (第1区)

東坑口付近は既述の圧砕岩をはさむ片麻岩が主であるが、この圧砕岩は膠結度高く、かつ緻密であるため湧水は滲み出し程度であった(この岩の存在のため、新垣内トンネルの掘削は能率的に終始した)。ただ、坑口にごく近接する部分の土被りの薄い箇所より湧水があったが、地表水の混入が認められたので試料より除外した。

b) 88.680~88.550 km 区間 (第2区)

88.680 km 付近より以西約50mにわたって、東青山スラストの出現があり、地質は不良であったが、ここでもまた顕著な湧水はなく採水困難であった(実際のところ、このスラスト掘削後、湧水の化学組成の追求が実施されたといえることができる)。

c) 88.550~87.700 km 区間 (第3区)

この区間は第2区、第4区の両破碎帯にはさまれた地質の比較的安定したところで、しばしば遭遇する一種の破碎帯間の緩衝部と考えられる。この区間では岩石裂こからの湧水から2個の試料を採取した。この湧水は掘削後、日ならずして出水が止まったので、これは明らかに小規模の滞留水であったといえる。

d) 87.700~86.730 km 区間 (第4区)

この区間の西端は分水嶺付近の南北断層に相当する。この約1 kmの間は、このトンネルを掘削中、最も地質不良のところでは正、逆断層が頻発し、片麻岩の縞状構造面の変動も激しく、しばしば構造面の褶曲もみられたところで、岩の破碎も珍しくなかった。この地区の地質不良の事実は地表調査、ならびにこの区域に至るまでのトンネル掘進中の状況判断から予想されていたところであった。ここでは数個の水試料が断層およびその破碎部から採取された。これらの湧水には導坑掘削時より全断面掘削に至るまでの期間にたとえ少量であっても断絶することなく湧出したものが多かった^{注2)}。なお、この区間

注1) この圧砕岩は中央構造帯のミロナイトとは、少なくともも方向性を持たない点で明瞭に異なる岩種である。

注2) この区間には試料以外に多数の湧水箇所があったが、工事上の処置がすみやかであったため、非汚染水サンプルを採取することができなかった。

では浸み出し程度の水は全体にわたって認められたが、必要採水量(1L)をうるための時間的、場所的余裕がほとんどなかった。

e) 86.730~86.263 km (工区境) 区間 (第5区)

この区間は前節において述べたように、縞状構造の走向、傾斜ともに変動の少ない地質的に安定した地区であるが、小規模の断層は少なくなく、また、平行断層が密生する部分のあることは地表調査でも、つとに知られていた(これより以西では破碎帯に乏しく、湧水箇所も僅少であった)。

この地区には岩石裂こならびに小断層からの湧水が認められ、それらの数個について採水が行われた。東西両工区境の湧水は導坑掘削当初(49年3月)120 l/minに達したが、その後急激に40 l/min程度の減り、以後50年3月に至る間に1~2 l/minに漸減した。また、86.400 kmのものは導坑掘削時には浸み出し程度であったが、50年5月、全断面掘削時には2昼夜にわたって1 m³/minの出水が見られたが、3日後には200 l/minに急減し、以後漸減しつつ6月には数 l/minに至った。この湧水は、上述の並走断層の集約するところにあたっており、出水量としてはこのトンネル工事においては有数のものであった。

しかし、一般にこの地区の湧水は掘削当初は顕著であっても短時日のうちに浸み出し程度の量に減少した。要するに、この地区の湧水は、地層中の滞留水が掘削によりトンネル内に流出したもので、小規模の空隙、すなわち裂こ水起源の滞留水と考えられる。ただし、86.400 kmのような停滞性湧水で一時的に多量の出水を招来したのは、既述のように、小規模ではあれ集約する裂こ群に基づく岩の総間隙が大きかったことによると考えられるが、さらに、当初の湧水状態から、裂こ水に若干の断層水が混入したことも推測される。

湧水を通覧すると、このトンネルにおいては東部地域に主として発達する断層起源の湧水と、東部地域の一部および西部地域に主として発達する滞留水起源のものとの2種の地下湧水の存在が、掘削に伴う地質調査によって確認された。

(2) 既設トンネル湧水

ここでは、その掘削当時の工事記録¹⁾から新トンネルの断層に対応すると思われる地点の側壁にある2~3 cm径の排水孔、およびマンホール奥地山壁面よりの湧水から採水が行われた。しかし、遺憾ながら後に示すように、特にCa²⁺の著しく多いものが多く、コンクリートの溶出およびトンネル内空気中のCO₂などによると思われる汚染のおそれが考えられたので、そのうち側壁にふれない地山部分よりの湧水のみを検討の対象とし

た注³⁾。これらはすべて、4.で後述するように断層湧水の領域に属するものであった。僅少の汚染の問題はあるが、水質と地質環境との間には少なくとも矛盾はなかったといえるであろう。

(3) 分水嶺付近の地表水、および榊原温泉水

分水界付近の河川に設置された四角堰その他から若干の水試料が採取された。これには第三系と片麻岩との不整合面からの湧水も含まれている。なお、分水界東方約9 kmの榊原温泉よりの旧泉(花崗岩起源)、新泉(第三系起源)からそれぞれ若干の水試料を採取した。

(4) 湧水環境の地質的要約

ここでみられる花崗岩、片麻岩のような岩体に含まれる地下水には表層風化部の地下水を除いては岩体中の断層破碎帯と、一般の節理、まれにはガマのような空洞を充填するものなどが考えられる(深部より上昇する温泉水の影響はここではないと筆者らは考えている)。

上述の第2区、第4区のものは断層破碎帯に生成した破碎物集合体の間隙を充填した地下水であって、これは明らかに断層水である。また、第3区のような非破碎帯の節理その他の裂こ、ときにみられる小断層面に存在する地下水がある。前者は一般に地表水と明らかな通路をもち、流動性に富み、トンネル掘削などの場合には多量かつ長期間にわたって湧出することが普通である。これに反し、後者は地表水との連結も、より不良であり、より停滞、滞留する傾向の高いものであり、トンネル工においても、その量少なく、よりすみやかに減衰することが考えられる。

これは、このトンネル掘削工事を通じて、確認された事実であって、その概要は上述したところである。

しかしながら、たとえ非破碎帯であっても、小規模な断層が頻発するような場合には、小規模断層に伴う地下水と断層に関連しない裂こ水とが混合してトンネル湧水として現われる場合も考えられる。これが第5区の湧水である(しかしながら、断層水がなんらかの条件で流動性に乏しく停滞するような場合には、滞留水の性格をおびることも考えられるが、この種のものは大規模の断層では考え難い)。

この断層水と滞留水との地質的事実に基づく分類は、その水質の化学性とも完全な調和関係にある。このことについては後述する。

4. 湧水の水質分析

採取した水試料の化学分析結果を湧水の地質環境別に注³⁾ 試料は若干の汚染はまぬがれなかったようである。

表一 青山トンネル採水試料一覧

分類	記号*	試料番号	採水位置	注
表流 水 (表-2)	×	4	サニービラ	プール 四角ゼキ 第三系と花崗岩と の境の湧水 沢水
		5	(分水嶺)	
		22	"	
		17	東青山駅付近	
既設トンネル湧水 + 沢水	☒	16	東青山駅付近	
既設トンネル湧水 (表-3)	□	12	1250.2 m	西坑口よりの距離
		13	1695.8 m	"
		15	3261.9 m	"
新 ト ン ネ ル 水 (表-4)	●	21	87 290 km	1 回目 2 回目
		20	87 300 km	
		26	"	
		9	87 320 km	
		8	87 363 km	
		7	87 480 km	
		新 滞 ト ン ネ ル 水 (表-5)	◎	1
23	"			2 回目
27	"			3 回目
24	86 399.9 km			断層水の混入が認められる
29	86 552 km			"
28	86 587.2 km			"
25	86 644.2 km			断層水の混入が認められる
2	87 770 km			
3	88 380 km			
榊原 温泉 水	△			32
		33	清少納言	
		34	神湯館	
	+	31	神社裏	
		35	大和館	

* 分類記号は各図に共通

整理したものが表-2~5 であり、参考資料として榊原温泉水のそれを示したものが表-6, 7で、表-1 はそれらの総括である。これらの表を通覧すると、地表水、既設および新トンネル湧水すべてを通じて重要な溶出成分は、陰イオンとしては、 HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , 陽イオンとしては、 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , であり、可溶性 SiO_2 もまた顕著である。これらのうち特に、 HCO_3^- , $\text{Na}^+(\text{K}^+)$, Ca^{2+} , などは風化生成粘土鉱物との関連において、近年水質の理論的検討の主要素となっている^{4)~6)}。

5. 水質の経月変化

湧水の水質は同一地点であっても時間とともに変化すると考えられるので、86.263 km の停滞起源と考えられるものについては 3 回、87.300 km の断層起源と考えられるものについては 2 回の採水が経月的に行われた(表-4, 5, 10 および 図-2)。

その結果を通覧すると、時間とともに Na^+ の減少および Ca^{2+} の増加が顕著である。 HCO_3^- その他のイオンについては、その変化はそれほど顕著でない。この Na^+ , Ca^{2+} の変化傾向は明らかに時日の経過とともに滞留の性格が弱められ、断層湧水のそれに近接する傾向を示すと考えられる注4)。

6. 湧水の鉛直(深さ)方向の化学勾配

① 分水嶺付近の地表水(表-8 (1)), およびほぼその鉛直下に位置し、滞留水を混入すると考えられる断層水(86.522 km, 表-8 (3)), およびこの断層の延長位置と推測される既設トンネル湧水(No. 12, 表-8 (2))の三者の間、ならびに

② 新トンネル断層湧水のうち 87.300~87.320 km の湧水(表-9 (5))と、この断層群の延長と推定される既設トンネルの湧水(No. 15, 表-9 (4))との二者の間で、主成分 HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} などについて海拔差による鉛直方向の化学勾配を試算した。

その結果を見ると地表と地下諸レベルとの比較では、その数値は一定しないが、 Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- の三成分はともに地下に向か

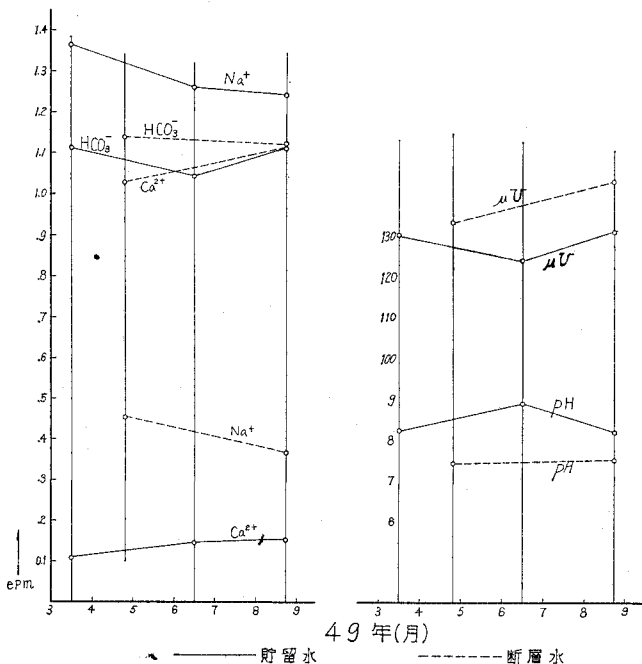


図-2 湧水の水質の経月変化(2例)

注 4) なお、各レベルの採水日が同一でないため、この鉛直方向の化学変化率を求めることには表-10 に示した経月変化率からみて問題はあるが、地表と新トンネル両レベルの鉛直方向の変化率は同一地点での経月変化より求めた日割変化率よりもはるかに大きいようである。

表-2 表 流 水

試料 No.	4		5		22		17		平 均	
採水地点	サニーピラ		サニーピラ		第三系と花崗岩との境の湧水		東青山駅付近沢水		—	
採水日	—		—		—		—		—	
TP	527m		509m		—		—		—	
電導度 $\mu\text{U}/18^\circ\text{C}$	40.5		43.3		43.5		39.0		41.6	
pH	6.5		6.7		6.5		6.7		6.6	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	13.42	0.220	16.47	0.270	8.54	0.140	11.00	0.180	12.36	0.203
CO ₃ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻	2.80	0.079	2.70	0.076	3.85	0.109	2.78	0.078	3.03	0.086
SO ₄ ²⁻	3.80	0.079	3.00	0.063	8.00	0.167	4.15	0.086	4.74	0.099
NO ₃ ⁻ -N	0.09	0.006	0.06	0.004	0.04	0.003	0.20	0.014	0.05	0.007
F ⁻	0.02	0.001	0.02	0.001	0.04	0.002	—	—	0.03	0.001
陰イオン合計	—	0.385	—	0.414	—	0.421	—	0.358	—	0.396
NH ₄ ⁺ -N	—	—	—	—	0	0	0.05	0.004	—	—
Na ⁺	2.90	0.126	3.40	0.148	3.30	0.143	3.10	0.135	3.18	0.138
K ⁺	0.71	0.018	0.70	0.018	0.58	0.015	0.50	0.013	0.62	0.016
Ca ²⁺	3.97	0.198	4.00	0.200	4.13	0.206	2.73	0.136	3.71	0.185
Mg ²⁺	0.67	0.055	0.68	0.056	0.50	0.041	1.02	0.084	0.72	0.059
陽イオン合計	—	0.397	—	0.422	—	0.405	—	0.372	—	0.398
SiO ₂	10.80	0.180	8.40	0.140	9.60	0.16	12.40	0.210	10.30	0.170
Fe	0.07	—	0.22	—	0.06	—	0.01	—	0.09	—
K/Na×100	24.5	—	20.6	—	17.5	—	16.2	—	19.5	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}} \times 100$	43.8	—	46.7	—	45.6	—	48.7	—	46.2	—
Na/Ca×100	73.0	*1.27	85.0	1.48	80.0	1.39	113.55	1.99	85.71	1.49
HCO ₃ /SiO ₂	—	*1.22	—	1.93	—	0.88	—	0.86	—	1.19

* Na/Ca, HCO₃/SiO₂のepmの欄はモル比(各表とも同じ)

表-3 既設トンネル湧水

試料 No.	12		13		15		平 均		16	
採水地点	西坑口より 1250.2m		1695.8m		3261.9m		—		東青山駅付近 トンネル湧水+沢水	
採水日	—		—		—		—		—	
TP	354.3m		339.4m		287.3m		—		—	
電導度 $\mu\text{U}/18^\circ\text{C}$	99		146		174		140		48.5	
pH	7.6		7.6		7.6		7.6		7.1	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	43.30	0.710	59.80	0.980	68.30	1.120	57.13	0.937	14.6	0.24
CO ₃ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻	1.80	0.051	1.93	0.054	2.05	0.058	1.93	0.055	2.83	0.080
SO ₄ ²⁻	15.20	0.317	29.00	0.604	36.00	0.750	26.73	0.557	5.80	0.121
NO ₃ ⁻ -N	0	0	0	0	0.03	0.002	—	—	0.25	0.018
F ⁻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
陰イオン合計	—	1.078	—	1.638	—	1.930	—	1.549	—	0.459
NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.08	0.006	0.08	0.006	0.08	0.006	0.03	0.002
Na ⁺	6.70	0.291	11.50	0.500	16.30	0.709	11.50	0.500	3.70	0.161
K ⁺	1.80	0.045	2.17	0.055	2.24	0.057	2.07	0.053	0.75	0.019
Ca ²⁺	12.95	0.646	19.78	0.987	20.48	1.022	17.74	0.885	4.08	0.204
Mg ²⁺	1.14	0.094	1.49	0.123	1.33	0.109	1.32	0.109	1.02	0.084
陽イオン合計	—	1.077	—	1.671	—	1.903	—	1.553	9.58	0.470
SiO ₂	26.6	0.443	26.2	0.436	24.4	0.406	25.7	0.428	12.6	0.210
Fe	0.015	—	0.195	—	0.255	—	0.155	—	0.05	—
K/Na×100	26.9	—	18.9	—	13.8	—	18.0	—	90.69	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}} \times 100$	37.7	—	39.1	—	45.9	—	41.5	—	46.45	—
Na/Ca×100	51.74	0.901	58.14	1.01	79.59	1.39	64.83	1.12	90.69	1.58
HCO ₃ /SiO ₂	—	1.603	—	2.25	—	2.76	—	2.19	—	1.14

表-4 新トンネル断層水

試料 No.	21		20		26		9		8		7		平均	
採水地点	87 290 km		87 300 km		87 300 km		87 320 km		87 363 km		87 480 km		—	
採水日	—		S 49.4.22		S 49.8.22		—		—		—		—	
TP	246.7		246.5		246.5		246.0		245.0		242.8		—	
電導度 $\mu\text{U}/18^\circ\text{C}$	146		133		143		139		129		126		136	
pH	7.4		7.4		7.5		7.4		6.4		7.5		7.3	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	73.80	1.21	69.50	1.139	73.20	1.200	72.00	1.180	57.30	0.939	64.70	1.061	67.46	1.122
CO ₃ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻	2.48	0.07	2.86	0.081	1.73	0.049	2.64	0.074	2.75	0.078	1.62	0.046	2.47	0.066
SO ₄ ²⁻	15.20	0.317	14.00	0.292	10.87	0.308	15.50	0.323	16.10	0.335	13.70	0.285	14.90	0.310
NO ₃ ⁻ -N	0	0	0	0	0	0	0.04	0.003	0.03	0.002	0	0	0.01	0.001
F ⁻	0.05	0.003	0.08	0.004	0.08	0.004	0.05	0.003	0.10	0.005	0	0	0.06	0.003
陰イオン合計	—	1.600	—	1.516	—	1.516	—	1.583	—	1.359	—	1.392	—	1.502
NH ₄ ⁺ -N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.22	0.016	—	—
Na ⁺	10.30	0.448	10.50	0.457	8.50	0.370	11.20	0.487	13.40	0.583	16.80	0.730	12.44	0.513
K ⁺	1.00	0.026	1.05	0.027	1.23	0.031	1.27	0.032	0.82	0.021	0.47	0.012	0.92	0.025
Ca ²⁺	20.42	1.019	20.62	1.029	22.26	1.111	20.54	1.025	15.17	0.757	12.63	0.630	17.88	0.929
Mg ²⁺	0.74	0.061	0.52	0.043	0.62	0.051	0.57	0.047	0.32	0.026	0.19	0.016	0.47	0.041
陽イオン合計	—	1.554	—	1.556	—	1.563	—	1.591	—	1.387	—	1.404	—	1.508
SiO ₂	23.60	0.393	24.00	0.400	25.20	0.42	24.40	0.406	24.00	0.40	22.20	0.37	23.90	0.398
Fe	0.12	—	0.01	—	—	—	0.23	—	0.12	—	0.05	—	0.11	—
K/Na×100	9.70	—	10.00	—	—	—	11.40	—	6.20	—	2.80	—	7.40	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}} \times 100$	34.90	—	35.40	—	—	—	37.20	—	47.90	—	57.00	—	42.20	—
Na/Ca×100	50.44	0.88	50.92	0.89	38.19	0.67	54.53	0.95	88.33	1.54	133.02	2.32	69.57	1.10
HCO ₃ /SiO ₂	—	3.08	—	2.85	—	2.86	—	2.91	—	2.35	—	2.87	—	2.82

表-5 新 ト ン

試料 No.	1		23		27		24		29	
採水地点	(1回目) 86 263 km		(2回目) 86 263 km		(3回目) 86 263 km		86 399.9 km		86 522 km	
採水日	S 49.3.15		S 49.6.15		S 49.8.22		S 50.5.22		S 49.9.20	
TP	270.1 m		270.1 m		270.1 m		267.0 m		264.2 m	
電導度 $\mu\text{U}/18^\circ\text{C}$	130		124		131		143		121	
pH	8.2		8.9		8.2		7.5		7.1	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	67.71	1.110	63.56	1.042	67.71	1.110	75.64	1.24	56.73	0.930
CO ₃ ²⁻	—	—	1.98	0.066	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻	2.50	0.071	2.15	0.061	2.15	0.061	2.75	0.078	2.30	0.065
SO ₄ ²⁻	12.80	0.267	12.00	0.250	12.50	0.260	14.8	0.308	13.10	0.273
NO ₃ ⁻ -N	0.02	0.001	0.14	0.010	0.08	0.006	0.02	0.001	0.17	0.012
F ⁻	0.12	0.006	0.09	0.005	0.12	0.006	0.10	0.005	0.10	0.005
陰イオン合計	—	1.455	—	1.434	—	1.443	—	1.632	—	1.285
NH ₄ ⁺ -N	0	0	0.36	0.026	0	0	0.18	0.013	0	0
Na ⁺	31.30	1.361	28.95	1.259	28.60	1.243	33.7	1.465	19.90	0.815
K ⁺	0.34	0.009	0.35	0.009	0.40	0.010	0.53	0.014	1.22	0.031
Ca ²⁺	2.20	0.110	2.95	0.147	3.05	0.152	2.49	0.124	6.90	0.344
Mg ²⁺	0.04	0.003	0.00	0	0.05	0.004	0.10	0.008	0.22	0.018
陽イオン合計	—	1.483	—	1.441	—	1.409	—	1.624	—	1.208
SiO ₂	13.20	0.220	15.10	0.251	17.00	0.283	14.5	0.241	15.20	0.253
Fe	0.04	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—
K/Na×100	1.1	—	1.2	—	1.4	—	1.6	—	6.2	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}} \times 100$	93.4	—	89.9	—	90.4	—	92.6	—	74.8	—
Na/Ca×100	1422.73	24.75	981.36	17.13	937.70	16.37	1353.41	23.63	288.41	4.74
HCO ₃ /SiO ₂	—	5.05	—	4.15	—	3.92	—	5.15	—	3.68

表-6 榊原温泉水 (花崗岩よりのもの)

試料 No.	32		33		34		平均	
採水地点	榊原館		清少納言		神湯館		—	
採水日	—		—		—		—	
TP	—		—		—		—	
電導度 μU 18°C	367		374		363		368	
pH	9.6		9.5		9.5		9.5	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	76.86	1.260	95.77	1.570	87.84	1.440	85.82	1.424
CO ₃ ²⁻	32.40	1.080	30.00	1.000	27.60	0.920	30.00	1.000
Cl ⁻	41.52	1.171	36.30	1.024	41.25	1.164	39.69	1.120
SO ₄ ²⁻	18.30	0.381	19.50	0.406	17.30	0.360	18.37	0.383
NO ₃ ⁻ -N	0	0	0.06	0.004	0	0	0.02	0.001
F ⁻	3.15	0.166	2.70	0.142	2.85	0.150	2.90	0.153
陰イオン合計	—	4.058	—	4.146	—	4.034	—	4.081
NH ₄ ⁺ -N	0.15	0.011	0.09	0.006	0.17	0.012	0.137	0.010
Na ⁺	92.50	4.022	95.00	4.130	92.50	4.022	93.33	4.058
K ⁺	0.54	0.014	0.80	0.020	0.69	0.018	0.68	0.018
Ca ²⁺	0.51	0.025	0.38	0.019	0.47	0.023	0.45	0.023
Mg ²⁺	0.01	0.001	0.03	0.002	0.03	0.022	0.02	0.002
陽イオン合計	—	4.073	—	4.177	—	4.077	—	4.101
SiO ₂	35.6	0.590	35.4	0.590	36.2	0.60	35.7	0.59
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—
K/Na×100	0.6	—	0.9	—	0.8	—	0.8	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}} \times 100$	99.3	—	99.5	—	99.3	—	99.5	—
Na/Ca×100	18137.25	321.76	25000.00	437.74	19680.85	349.74	20733.33	352.87
HCO ₃ /SiO ₂	—	2.14	—	2.66	—	2.40	—	2.41

ネル滞留水

28		25		2		3		平均	
86587.2km		86644.2km		87770km		88380km		—	
S 49.9.3		S 49.8.13		—		—		—	
262.0m		261.4m		235.8m		221.9m		—	
120		128		142		182		136	
8.2		7.1		7.6		9.5		8.0	
ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
62.22	1.020	64.05	1.050	78.69	1.290	75.64	1.240	68.49	1.115
—	—	—	—	—	—	10.20	0.340	6.09	0.203
2.55	0.072	3.64	0.103	2.45	0.069	2.40	0.068	2.543	0.072
10.60	0.221	11.60	0.242	12.00	0.250	15.40	0.321	12.756	0.266
0	0	0	0	0.03	0.002	0.04	0.003	0.071	0.005
0.12	0.006	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.106	0.005
—	1.319	—	1.400	—	1.616	—	1.977	—	1.507
0	0	0	0	—	—	—	—	0.27	0.020
24.60	1.070	26.20	1.139	35.20	1.530	44.00	1.913	30.272	1.311
0.35	0.009	1.04	0.027	0.25	0.006	0.17	0.004	0.517	0.013
3.40	0.170	3.95	0.197	1.53	0.076	0.75	0.037	3.024	0.151
0.20	0.016	0.58	0.048	0	0	0	0	0.198	0.016
—	1.265	—	1.411	—	1.612	—	1.954	—	1.490
13.20	0.220	12.80	0.213	13.30	0.221	14.00	0.233	14.256	0.237
—	—	—	—	0.18	—	0.04	—	0.095	—
1.5	—	4.0	—	0.8	—	0.4	—	1.7	—
87.4	—	85.8	—	95.9	—	98.4	—	89.9	—
723.53	12.59	663.29	11.56	2300.65	40.26	5866.67	103.41	1001.06	17.36
—	4.64	—	4.93	—	5.84	—	5.32	—	4.70

表-7 榊原温泉水 (第三系よりのもの)

試料 No.	31		35		平均	
採水地点	神社うら		大和館		—	
採水日	—		—		—	
TP	—		—		—	
電導度 $\mu\text{U}/18^\circ\text{C}$	296		346		321	
pH	9.4		8.8		9.1	
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm
HCO ₃ ⁻	104.31	1.710	175.63	2.880	140.00	2.295
CO ₃ ²⁻	26.40	0.880	8.40	0.280	17.40	0.580
Cl ⁻	5.39	0.152	8.32	0.235	6.86	0.194
SO ₄ ²⁻	29.50	0.615	32.52	0.677	31.00	0.646
NO ₃ ⁻ -N	0.05	0.004	0.29	0.021	0.17	0.013
F ⁻	0.76	0.040	0.30	0.016	0.53	0.028
陰イオン合計	—	3.401	—	4.109	—	3.756
NH ₄ ⁺ -N	0.13	0.009	0	0	—	—
Na ⁺	76.30	3.317	85.80	3.730	81.05	3.524
K ⁺	0.34	0.009	1.66	0.042	1.00	0.026
Ca ²⁺	0.91	0.045	4.14	0.207	2.53	0.126
Mg ²⁺	0.04	0.003	0.86	0.071	0.45	0.037
陽イオン合計	—	3.383	—	4.050	—	3.713
SiO ₂	27.4	0.46	47.4	0.79	37.4	0.63
Fe	—	—	—	—	—	—
K/Na×100	0.5	—	0.2	—	1.3	—
$\frac{\text{Na}+\text{K}}{\Sigma\text{Cation}}\times 100$	98.7	—	94.6	—	96.5	—
Na/Ca×100	8384.62	147.42	2072.46	36.04	3203.56	55.94
HCO ₃ /SiO ₂	—	3.72	—	3.65	—	3.64

って正(増加)勾配を示すのは当然であるが、新トンネルと既設トンネルとの両レベル間の比較では、HCO₃⁻、Na⁺は深部へ向かって正勾配を示すが、Ca²⁺は逆に負勾配をとるような結果を示している。これは既設トンネルの水試料がトンネル構築材その他より汚染をうけることに基因するものと考えられ、したがって、化学勾配の検討には、地表と新トンネル表-8(1)~(3)間の変化が有効な資料として考えられる。なお、新・既設両トンネルの水質化学勾配の変動は、試料の汚染もさることながら、両トンネルが約500mの水平間隔をもっており、さらに、たとえ確実に同一断層内湧水であるとしても、鉛直方向で岩石組成成分の規則的層状配列が行われているか否かに疑問もあり、この方面の解明は両トンネル間の直接弾性波、同位元素探査等も含めて今後の精密な研究に待ちたい。

次に、新トンネルのみに限定して、これに現われた諸断層および岩石裂きなどよりの湧水の主成分、pH、電導度を総括したものが図-3であり、海拔に基づく鉛直成分変化率を試算したものが表-11である。この場合、停滞するものと断層内を流動するものとの両者に分類して計算した(なお、このトンネルの

表-8 ほぼ同一と考えられる断層内の流動地下水中の諸成分の鉛直変化率(第1例)

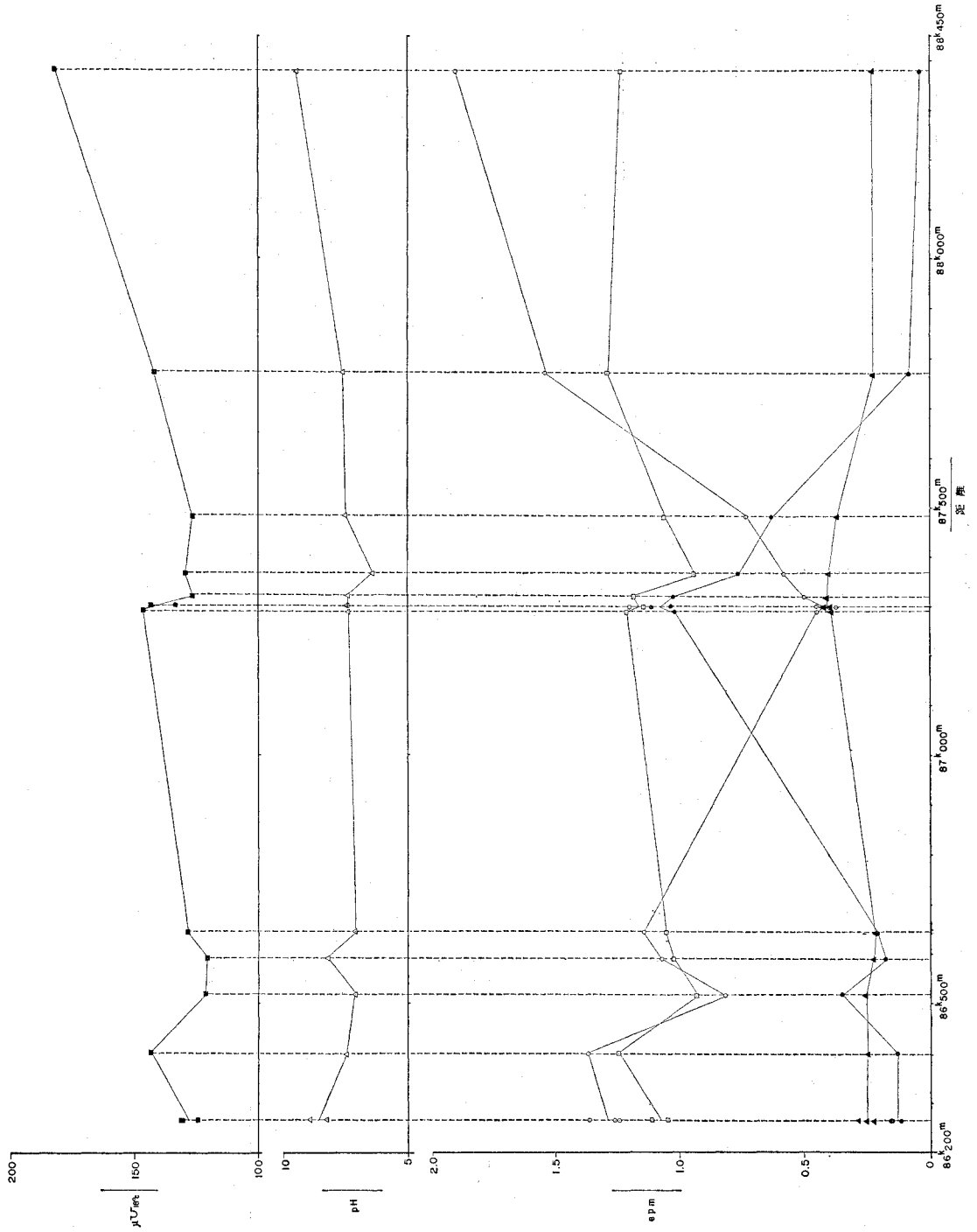
	(1)	(2)	(3)	m当り変化率*					
				(1)~(2)の差	(2)~(3)の差	(1)~(3)の差	(1)~(2)	(2)~(3)	(1)~(3)
	地表水 プールNo.4 (四角ゼキNo.5) 2個平均	既設トンネル 試料 No.12	新トンネル 86522km						
TP	518m	354.3m	264.2m	163.7m	90.1m	253.8m	—	—	—
μU	41.9	99	121	+57.1	+22.0	+79.1	+0.349	+0.244	+0.312
pH	6.6	7.6	7.1	+1.0	-0.5	+0.5	+0.006	-0.006	+0.002
HCO ₃ ⁻	0.245epm	0.710epm	0.930epm	+0.465epm	+0.220epm	+0.685epm	+0.003epm	+0.002epm	+0.003epm
Cl ⁻	0.078	0.051	0.065	-0.027	-0.013	-0.000	-0.000	+0.000	-0.000
SO ₄ ²⁻	0.071	0.317	0.273	+0.246	-0.044	+0.202	+0.002	-0.001	+0.001
NO ₃ ⁻ -N	0.005	0	0.012	+0.005	+0.012	+0.007	-0.000	+0.000	+0.000
F ⁻	0.001	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ⁺	0.137epm	0.291epm	0.815epm	+0.154epm	+0.524epm	+0.678epm	+0.001epm	+0.006epm	+0.003epm
K ⁺	0.018	0.046	0.031	+0.028	-0.015	+0.013	+0.000	-0.000	+0.000
Ca ²⁺	0.199	0.646	0.344	+0.447	-0.302	+0.145	+0.003	-0.003	+0.001
Mg ²⁺	0.068	0.094	0.018	+0.026	-0.076	-0.050	+0.000	-0.001	-0.000
SiO ₂	0.160mmol	0.443mmol	0.253mmol	0.283mmol	-0.190mmol	+0.093mmol	+0.002mmol	+0.002mmol	+0.000mmol

(* +は下方に向かって増を意味する。表-8, 9, 10, 11も同じ)

表-9 ほぼ同一と考えられる断層内の流動地下水中の諸成分の鉛直変化率(第2例)

	(4)	(5)	m当り変化率			
			(4)~(5)の差	(1)~(5)の差*	(4)~(5)	(1)~(5)*
	既設トンネル 試料 No.15	新トンネル 87300~87320km (3個平均)				
TP	287.3m	246.3m	41m	271.7m	—	—
μU	174	138.3	-35.7	+96.4	-0.871	+0.355
pH	7.6	7.4	-0.2	+0.8	-0.005	+0.003
HCO ₃ ⁻	1.120epm	1.173epm	+0.053epm	+0.928epm	+0.001epm	+0.003epm
Na ⁺	0.709	0.438	-0.271	+0.301	-0.007	+0.001
Ca ²⁺	1.022	1.055	+0.033	+0.856	+0.001	+0.003
SiO ₂	0.406mmol	0.409mmol	+0.003mmol	+0.249mmol	+0.000mmol	+0.001mmol

(* (1)は表-8のそれに同じ)



黒四角：電導度
 白三角：pH
 白四角：HCO₃⁻
 白丸：Na⁺
 黒丸：Ca²⁺
 黒三角：SiO₂

図-3

新トンネル内の主要湧水位置と諸成分の濃度変化

表一〇 新トンネル内、同一地点湧水の経日水質変化率
(1日あたり epm 比)

	86 263 km		87 300 km
	滞 留 水		断 層 水
試 料 番 号	No. 1 ↔ No. 23 ↔ No. 27		No. 20 ↔ No. 26
採水日 (昭. 49)	3月15日—6月15日—8月22日		4月22日—8月22日
日 数	92	68	122
電 導 度 μU 18°C	-0.0650	+0.1029	+0.0820
pH	+0.0076	-0.0103	+0.0008
HCO ₃ ⁻	-0.0007	-0.0010	-0.0005
CO ₃ ²⁻	+0.0070	-0.0010	0
Cl ⁻	-0.0001	0	-0.0003
SO ₄ ²⁻	-0.0002	0	+0.0001
NO ₃ ⁻ -N	+0.0001	-0.0001	0
F ⁻	-0.0000	0.0000	0
陰イオン合計	-0.0002	0	0
Na ⁺	-0.0011	-0.0002	+0.0007
K ⁺	0	+0.0000	+0.0000
Ca ²⁺	+0.0004	+0.0001	+0.0007
Mg ²⁺	-0.0000	+0.0001	+0.0001
陽イオン合計	-0.0004	-0.0005	+0.0001
SiO ₂ (mmol)	+0.0003	+0.0005	+0.0002

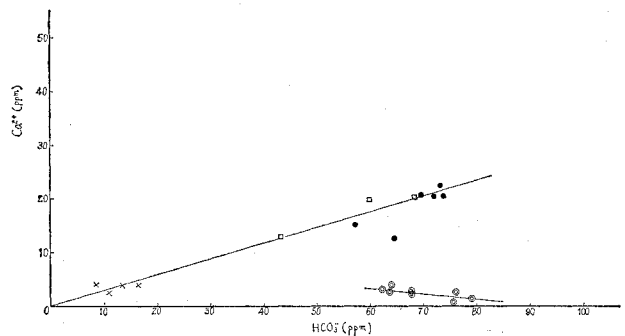
勾配は、22.8% である). この表をみると断層湧水の変化率が滞留水 (断層水の混入すると考えられるものを除去した) のそれに比して数値ならびにその増、減方向ともに変動が著しいのに反して、滞留水の変化率は、値が小さく方向的にもより安定しているといえる. しかしながら、この表を熟覧して最も顕著な事実、滞留水については、下方に向かって単調に Na⁺ が増加し、Ca²⁺ が減少するのに対して、断層水については、上部では Na⁺、Ca²⁺ の増減およびその勾配に乱れがあるが、下部では滞留水と同一傾向を示すことである.

一般的にいて、この原因は種々考えられるが、滞留水は流動が少なく長時間同一位置に停滞し、周囲の岩石との化学反応が全体にわたって十分に行われたためであり、断層水は水の移動 (流下を含む) が激しく、特に地表近くの上部では組成の変動が激烈、不規則であるが、流下するに従って時間の経過とともに化学反応も進み、滞留水と漸次類似の傾向を示すに至るものと考えられる. これらの推理は断層湧水の変化率の絶対値の

大きいこととも符合するであろう. なお、トンネルの海拔と地表GLとの間隔、すなわち、土被りの鉛直厚さをもってこの変化率を計算してみたが、まったく不規則、無統制な結果を得た. これは地表水が地下に流入するとしても、一部は再び各側面から地上に流出 (二次流出水) することなどが考えられ、地表水が地下水となる過程の複雑さを物語るものであろう.

7. 水質による滞留水と断層水の識別

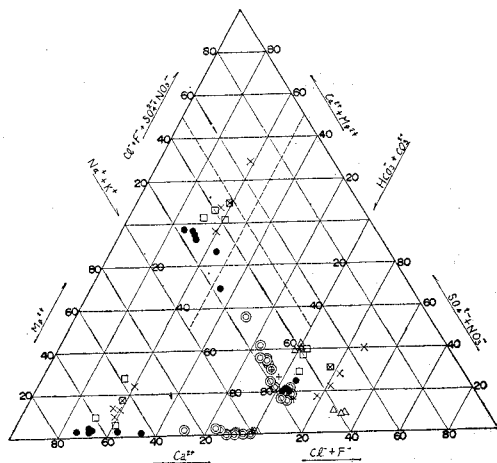
本トンネル工に見られた湧水の特長として、既述のように、滞留および断層両起源の水分類が地質の上でいかに表現されるかに着目して、湧水の水質の比較検討を行った. すなわち、本地域の岩石風化の場合、北野^{(1),(5)}らの主張するように、水と炭酸ガスの作用が岩石成分の溶出をもたらすと考えて、特徴的な溶出 Ca²⁺ と生成 HCO₃⁻ との関係を図示すると図一四のようになり、また、水質組成のパターン認識が容易であるキーダイヤグラムにより、各種湧水を図示すると図一五のようになる. 図一四においては、地表、断層、滞留各種水の差異はまことに明らかで、地表、断層両種水は、HCO₃⁻ の増加に比例して Ca²⁺ が増加する一方、滞留水は HCO₃⁻ 濃度が高いにもかかわらず Ca²⁺ の濃度が低く、かつ HCO₃⁻ の増加に比例して Ca²⁺ が減少している. 図一五においては、新トンネルの湧水は、富 Ca²⁺ の種 (断層水) と富 Na⁺ の種 (滞留水) とを両端成分としての



図一四 地表水、湧水の Ca²⁺-HCO₃⁻ の関係

表一〇 新トンネル内の主要湧水相互間の成分の鉛直変化率 (m あたり・トンネル勾配による)

	断 層 湧 水				滞 留 水			
	湧水点の間隔 87 290 ~ 87 300 km	87 300 ~ 87 320 km	87 320 ~ 87 363 km	87 363 ~ 87 480 km	86 263 ~ 86 399.9 km	86 399.9 ~ 87 770 m	87 770 ~ 88 380 km	
TP 差	+0.2 m	+0.5 m	+1.0 m	+2.2 m	+3.1 m	+31.2 m	+13.9 m	
2 点間の m あたり 変化率	μU	-40.0	+2.0	-10	-1.4	+4.8	-0.00	+2.9
	pH	-0.3	-0.1	-1.0	+0.5	-0.3	+0.00	+0.14
	HCO ₃ ⁻	-0.20 epm	+0.02 epm	-0.24 epm	+0.06 epm	+0.05 epm	+0.00 epm	-0.00 epm
	Na ⁺	-0.17	+0.15	+0.10	+0.07	+0.06	+0.00	+0.03
	Ca ²⁺	+0.26	-0.09	-0.27	-0.06	-0.00	-0.00	-0.00
SiO ₂	+0.085 mmol	-0.01 mmol	-0.01 mmol	-0.01 mmol	-0.00 mmol	-0.00 mmol	+0.00 mmol	



図—5 主成分のイオン濃度の相互関係

混和関係にあるか、または一方より他方へ比較的簡単な連続変化関係にあるかと思わしめるパターンをとっていることは注目に値する。次に、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/$ (全陽イオン)、 K^+/Na^+ などの諸比についても、両者の間にきわだった特性が認められた(表—2~5 参照)。すなわち、滞留水と断層水とを比較すると、前者は後者に対して $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ および $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/$ (全陽イオン) はともに明らかに大で、 K^+/Na^+ はきわめて小である。これは新トンネルの湧水ばかりでなく、既設トンネル湧水(既述のように断層水と断定)にも適合している。南北断層より以西の地区の滞留水において、これらの値が軽微ながら断層水のそれにやや近づくものがあるが、この値と断層水のそれとの間にはなお明瞭な差異が認められる。この水質の軽微な変化は、滞留水が掘削によりその付近にしばしば認められる小断層裂を伝って湧き出したもので、断層水との若干の混合があったと見るべきことは地質の項で述べたところと完全に符合する。

さらに、水質の経月変化、および鉛直方向の化学勾配で述べたように、表流水が地下に降下して行くとき、岩体の条件によって停滞するか否か、換言すると、すみやかに移動するか否かによって、ここでいう意味での断層水と滞留水との差異が生ずるといふ推定は、上述の水質の差異が明瞭に存在することからも是認できるであろう。

これらのことを総合して、滞留水と断層水、換言すると、たとえ、ともに地表に補給源があったとしても、岩石の裂いで少なくともある時間停滞した地下水と、流動性の断層地下水との区分が水質から推測し得るとの見解に、筆者らは立つに至った。なお、これら両地下水は地表水よりも溶解成分の総量において一般に多いこと、また、上記の Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などの量的割合が、滞留水よりも断層水の方が地表水により近いことなどの事実も

上の推測を支持するものである。

この化学的特徴をもつ湧水は、国鉄六甲トンネルおよびその付近の調査においても鶴巻⁹⁾によって認められており、 Na^+ の増加、 Ca^{2+} の減少は陽イオン交換 ($\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$) によるとの化学的見解が提起されているが、湧水の水質とその地質との関連については触れられたものはまだ知らない。イオン交換については後述することとし、ここではこの種、 Na^+ に富む湧水の水質分析上の同定とともに、土木地質の見地から岩の空隙を充填する滞留水との断定がなされたのである。なお、この地域のこの深度においては、地下深部からの物質の上昇は考え難い。榊原温泉のうち少なくとも花崗岩より湧水する温泉とは無関係のものである(トンネル湧水は温泉より鉛直方向 3~400 m 高位にある)。

8. 粘土の同定とイオン交換について

7. で述べたように、滞留・断層兩種水はその水質に明瞭な差異が存在する。この原因については、一部上述のほか母岩の組成、水と岩との変質反応、生成鉱物、反応時間、反応が開放系か閉鎖系か、など種々の問題が錯そうし明確には解明し得ないが、ここではその主要因の一つであろうと考えられる生成鉱物(粘土)とその二次反応(イオン交換)について検討を行う。

(1) 粘土鉱物の同定

東青山駅付近の東青山スラスト露頭からのものを含めて、トンネル内の断層からの粘土試料十数個の採集が行われた。これらの粘土は一般には岩層の間を充填するもので、比較的少量のことが多く採取が困難なこともしばしばであった。

粘土は灰白色のものが多かったが、露頭のものおよびトンネル内の若干には、黒色のものがあった。この黒色部分は有機物および長石、石英の細粒のほか、マンガ質泥のあることが顕微鏡下での微化学試験で判定された。

これらの粘土について、成分鉱物を同定するため X線回折像が求められ、白、黒両色粘土を通じて、石英、長石、雲母などの花崗岩、片麻岩の主成分鉱物のほかに、絹雲母またはイライト(Illite)、緑泥石およびモンモリロン石が検出されたが、カオリン石は検出されなかった(カオリン石と緑泥石とは類似した回折ピークを示すので、さらに念のため精査を考えている)。また、それぞれの試料の処理、機器の調節などが定性的であったため、粘土鉱物相互の量比は決定し得なかった。しかし、定性的ではあるが、膨潤性を試験した結果、膨潤性はほとんど認められず、さらにまた、トンネル施工時の

ライニング、支保工での粘土の膨潤には見るべきものがなかったため、モンモリロン石の含有割合は少なかったと判定しうる。

よく知られているように膨潤の最も顕著な粘土鉱物にはシート構造をもつものが多く、それによる膨潤性、イオン交換性があり、これらの性質をもつ最たるものはモンモリロン石であることが知られている。粘土鉱物の共生関係については、ギブサイト→カオリン石→モンモリロン石への一連の変成が知られており、これらが水質（溶出イオン）の変化に大きな影響を与えることは論をまたない⁹⁾。これについては改めてふれるつもりである。ただ、ここについては上述のようにカオリン石が含有されていないようであることは一つの問題である。しかし、pHの高い地下深部のトンネル湧水近傍では当然とも考えられる。すなわち、たとえ最初カオリン石が生成したとしても深部で不安定となり、モンモリロン石、緑泥石などに変化したとも考えられる。

(2) イオン交換について

この地域の花崗岩、片麻岩の斜長石組成は An_{28-40} である⁹⁾。これに対して SO_4^{2-} 、 Cl^- などの作用が微弱であるとすると、地下水に含まれる Na^+ 、 Ca^{2+} の大部分は、 CO_2 を含む降水の斜長石に対する変質作用に由来する。雲母、アルカリ長石からの Na^+ 、 Ca^{2+} イオンの導入も考えられるが、これらの主成分の一つである K^+ が湧水中にきわめて微量であることからみて、これらの鉱物を一応除外して論じても大きな過誤はないと考えられる。図-6 は、斜長石が CO_2 を含む水と反応する場合

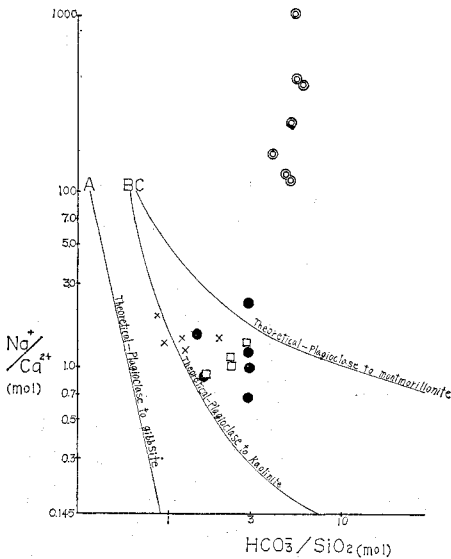


図-6 斜長石に対するギブサイト、カオリン石、モンモリロン石の理論曲線に対する湧水との関係位置図（縦軸は Na^+/Ca^{2+} 、横軸は HCO_3^-/SiO_2 、ともにモル比）

水に供給するイオンのモル比、 Na^+/Ca^{2+} と HCO_3^-/SiO_2 （可溶性）との関係を示したもので、A, B, C は斜長石が風化によって生成する粘土鉱物（ギブサイト、カオリン石、モンモリロン石）の理論曲線である⁹⁾。これからみると断層湧水は、 $Na^+/Ca^{2+}(\text{mol})=0.7\sim 2.0$ 、 $HCO_3^-/SiO_2(\text{mol})=1.5\sim 3.0$ で、母岩の主成分である斜長石の An 成分と大体調和的なモンモリロン石～カオリン石領域に占位するのに対して、滞留水は、 $Na^+/Ca^{2+}(\text{mol})=12\sim 100+$ 、 $HCO_3^-/SiO_2(\text{mol})=4.0\sim 5.9$ で、モンモリロン石理論曲線を遠く離れたところに分布し、 CO_2 を含む水による反応過程のみでは説明できない。湧水中の Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ などの挙動について、関⁹⁾は青函トンネル海底湧水の化学分析の結果から、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} と Cl^- との関係を示し、水が岩盤の中を移動する際に起きる水-岩石相互作用の観点から分析を試みている。 Na^+ は一般に相互作用の進行に伴い減少するが、 Cl^- が 150 epm 以下の陸水の湧水については逆に増加することを示し、 K^+ については Cl^- のいかにかわらず、ほとんど常に減少することを示している。また、 Ca^{2+} についても、海水、陸水またはその混合水であっても岩盤との間の化学反応によって常に増加することを示している。このことは Cl^- の低い陸水では、 Na^+/Ca^{2+} の値が異常に高くなりやすいことを示唆している。本トンネルの湧水は Cl^- のきわめて低い陸水であることを考慮すれば、図-7 に見られるように、 Na^+ は水-岩石相互作用の進行に伴い増加し、 K^+ は総量としては微量であるが減少の傾向を示すことは関の指摘と合致している。しかし、 Ca^{2+} については相互作用の開始後、初期の段階では急激な増加を示すが進行に伴い逆に減少に転じていることは関の指摘に反している。この原因については、上述の水-岩石相互作用のみでなく、その過程において風化生成した粘土鉱物と水とのイオン交換が主要な原因の一つとして考えられる。すでに

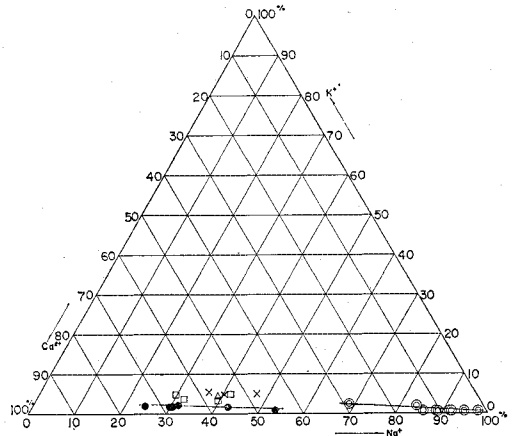


図-7 湧水の Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 成分相互関係

ふれたように Na^+ に富む地下水に対して、その産状をはなれて水質の点のみから、鶴巻らは Na^+ - Ca^{2+} 間のイオン交換を提唱しているが、ここで扱った滞留水も、その化学組成においてイオン交換を裏づけているといえる。しかし、一般に、この種イオン交換が溶出 Na^+ の 20~30% 程度のことが多いことに比較して、本ケースでの $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}(\text{mol})$ は異常に高い値を示している。これは滞留水の一部(表-5 参照)には、 CO_3^{2-} の存在するものもあり、 CO_3^{2-} があれば、pH が高いので方解石(CaCO_3) が生成して、この反応系のほかに沈澱逸脱し、それが $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}(\text{mol})$ の異常値をもたらすとともに、滞留による濃集効果が Na^+ の絶対値の増加をもたらすことも、この一因をなしているとも考えられる。

9. 電導度と pH, およびこれによる簡易識別法

このトンネル(新・既とも)からの湧水全般の電導度~pH の関係を図示したものが図-9 である。これから明らかなことは電導度(μU)は地表水では 100 μU 以下、トンネル湧水では 100~180 μU 、参考を示した榊原温泉水では 300 μU 以上の値となり、電導度が溶解する物質の量、すなわち、イオンの量によって支配されていることを示している。一方、pH については、滞留水と断層水とを比べると前者の pH は後者のそれに比してやや高いことが明らかである。これは、湧水の含有 CO_2 と母岩鉱物との化学反応に基づく HCO_3^- , CO_3^{2-} などの炭

酸イオン量によって pH が支配されることを考えると、当地域では化学変化の反応程度の高い停滞水系の pH が流動水系の断層水のそれに比べて高い値を示したものと見なされる。

また、電導度(ET)と全溶存成分(T)の濃度¹⁰⁾とは図-8 に示すように、概括すると全体として両者は一次関数の関係にあるように見えるが、少なくとも地表水とトンネル湧水の電導度-全溶存成分線が同一線であると考えるににくい。この問題には母岩の化学組成その他、複雑な要素が考えられる。

なお、この関係は、母岩鉱物、風化生成鉱物、溶出イオン、地下水中の炭酸ガス量およびその補給の良否、透水系数などに密接な関係を有しているので、この方面の定量的な扱いは、トンネル施工の実績、実験と相まって今後研究すべき課題である。

また、7. で述べたように、分水嶺(南北断層)付近の湧水では滞留、断層兩種水が混合しているものもあり、これらの pH は、兩種水それぞれの pH を兩極値とする中間の値を示すと考えられるので、図-9 の pH=7.0~7.8(縦軸)において、兩種水が混在するのは当然のことであろう。このような場合を除くと、湧水の中の Na^+ , Ca^{2+} の分析を行わずとも、pH, μU の測定が行われると、トンネル掘進中の現場調査と相まって、滞留水と断層水とは比較的簡単に判別することが可能である。

また湧水の電導度およびこれに伴う pH は、電気探査の基礎となるものであり、ここに化学分析の協力が得られると電気探査の応用範囲、精度の拡大向上が期待される。

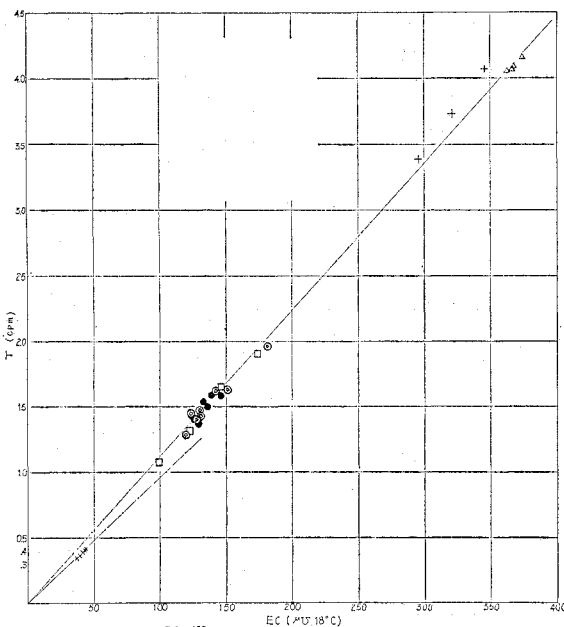


図-8 湧水の電導度(ET)と溶存成分の全イオン濃度との関係

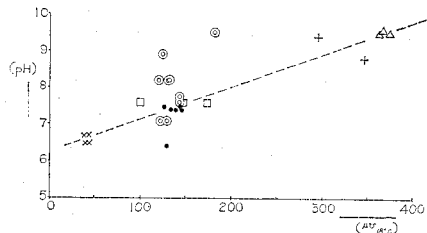


図-9 湧水の電導度(μU)と pH との関係

10. 結 語

この報文は、トンネル掘削による地質判断から、その湧水は、地表水が断層破砕帯を通して比較的短時間に降下する流動的な水と、断層を一時的に通ることがあったとしても比較的長時間岩石の空隙に停滞する水とに形態上大別されるが、これらの兩種水は、水-岩石-風化生成粘土各相互間の化学作用によって、それぞれ特徴的な水質変化を受け、これらが化学分析を主体として、pH, 電導度の測定を補助として識別できることを示した。すな

わち、

(1) トンネル湧水は、各種湧水を通じて水-岩石-風化生成粘土との相互作用から、特に HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などの溶出イオンに顕著な特性が見出される。

(2) 断層湧水は、本地域の母岩が水と炭酸ガスの作用による風化に起因する溶出 Ca^{2+} と生成 HCO_3^- とに特徴があり、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} とともに高い濃度を示している。

(3) 滞留水は、 HCO_3^- の濃度が高いにもかかわらず Ca^{2+} の濃度増加が見られず、むしろ HCO_3^- の増加に反して Ca^{2+} が減少している一方 Na^+ が著しく増加している。

(4) 滞留水に断層水が混入したと思われる湧水は、断層水(富 Ca^{2+})と滞留水(富 Na^+)とを両端成分とした混和成分を示し、混入度によって成分が線形連続変化するパターンをとっている。

(5) 滞留水、断層水の溶出成分量比、特に $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 Na^+/K^+ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ 、の諸比は前者と後者の差異はきわめて顕著で、滞留水の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}=12\sim 100$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2=4.0\sim 5.9$ であるのに対し、断層水はそれぞれ $0.7\sim 2.0$ 、 $1.5\sim 3.0$ とはるかに小さい値を示している。これは、単に水-岩石風化作用だけでは説明できず、風化による生成粘土と滞留水のイオン交換、さらに滞留水にはしばしば CO_3^{2-} の存在することから Ca^{2+} の反応系外への逸脱を示唆している。

(6) 滞留、断層兩種水の海拔に基づく鉛直方向の成分変化は、断層湧水の変化率が数値ならびにその増減方向とも変動が激しいのに反し、滞留水のそれは値が小さく、かつ安定している。特に滞留水は下方に向かって Na^+ が単調に増加し Ca^{2+} が減少するのに対し、断層水は上部で Na^+ 、 Ca^{2+} の増減およびその勾配に乱れがあるが下方にいくにしたがって滞留水と同一傾向を示している。このことは、断層水は地表近くの上層では移動(流下)が速く、その組成の変動も激しいが、下方では移動が遅く反応の熟成が進み、漸次、滞留水に類似してゆくことを示唆している。

(7) 滞留、断層兩種水の経月変化については施工の関係上資料が乏しいが、全般に成分変化はきわめて微量である。しかし、時間とともに Na^+ の減少および Ca^{2+} の増加が見られ湧水流出による地下水の降下移動が生じ、水-岩石相互作用特に風化作用が進んでいることを示している。

(8) 湧水の電導度は溶解イオン量によって支配され概括的に反応熟成度を、また、pH は当地域では Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} が少ないため、湧水の含有 CO_2 と母岩鉱物との化学反応に基づく HCO_3^- 、 CO_3^{2-} などの炭酸イオン量によって支配され主として風化作用を表わすと考えられるので、pH と電導度(ET)と現場における地質判

断から兩種水の混和などの特殊な場合を除き、比較的簡易な湧水識別が可能であることを示した。

しかしながら、今後の問題として、

(1) 滞留水と断層水との差異はこの研究からみて、岩体内を通過する地下水の流速、岩との接触表面積に大きく支配されることが推測されるが、今後岩の透水性と水質の関係を施工実績および実験により定量的に処理して、湧水の地中での動態解明の手がかりを得たい。

(2) さらに、両者の差異には母岩の組成、溶出反応、生成鉱物、その二次反応(イオン交換など)の要因が錯綜するが、各種の湧水とその地質環境の資料を集積し、さらに水質化学的見地の検討を加えて、これらによる土木地質探査法の開発を期したい。

なお、この地下水調査は当初トンネル掘削時の湧水排除の地表への影響、たとえば、補償問題を考慮してなされたものであるが、その解明に役立ったことはもちろん、その後遭遇した湧水に対し、施工上の有用な判断を提供し得た。

謝 辞：本研究にあたっては、近鉄(株)中川工事事務所、(株)大林組、鹿島建設(株)のご好意をいただいた。水試料は坑内調査に努力した全日本コンサルタント(株)米田、白神阿氏および京大員外研究員 早津氏らによって湧出のつど採取された。また、試料の化学分析は大阪市立大学理学部 鶴巻助教授により、粘土鉱物の同定は工業技術院地質調査所大阪出張所長 宮村技官ならびに小林技官によって好意的に行われた。これら各位に対し、深甚の謝意を表する次第である。最後に本報文の校閲を賜り、種々ご教示をいただいた大阪大学工学部室田教授に対し衷心よりの感謝を捧げて本報告を終わることとする。

参考文献

- 1) 青山トンネル工事誌, 1930.
- 2) 三重県地質図(三重県鉱業会), 1965.
- 3) 吉沢 甫ほか: 近畿地方領家帯の研究(京大理学部紀要 B, 32, 14) 英文, 1966.
- 4) 水野 康: 水の科学(日本放送協会) そのほか, 1969.
- 5) 地下水の研究(施行技術, 特集号), 1973.
- 6) 鶴巻道二: 六甲山地のトンネル湧水と表流水の水質(施行技術, 6, 6, pp. 35~44), 1973.
- 7) Tardy, Y.: Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of water from some European & African crystalline massifs, 1971.
- 8) Garrls, R.M.: Genesis of some ground waters from igneous rocks, Research in Geochemistry II, pp. 405~420, 1967.
- 9) 関陽太郎: 青函トンネルの湧水の起源、存在状態および化学成分範囲(埼玉大学理工学部地盤水理実験施設年報, Vol. 2), 1976.
- 10) 鶴巻道二: 電導度と天然水の溶存成分濃度の関係(水処理技術 10, 11, pp. 19~27), 1969.

(1976.5.29・受付)