

採石場の湧水からみた地質と地下水質との関係

—八溝山地周辺の例—

関 陽児* 金井 豊** 上岡 晃** 月村勝宏*
濱崎聡志* 金沢康夫* 中嶋輝允*

Yoji SEKI, Yutaka KANAI, Hikari KAMIOKA, Katsuhiko TSUKIMURA, Satoshi HAMASAKI, Yasuo KANAZAWA and Terumasa NAKAJIMA (1999) Relationship between geology and water quality of rock seepage from quarries—A case study around the Yamizo Mountains—. *Bull. Geol. Surv. Japan*. vol. 50 (11), p. 683-697, 6 figs., 7 tables.

Abstract: It is important to find the relationship between bedrock geology and underground water quality and to understand how the interaction proceeds when any underground construction is planned. For this purpose, water quality analysis of rock seepage from total of 9 quarries around the Yamizo Mountains was carried out together with bedrock description mainly by X-ray diffraction method.

25 rock seepage samples in total were collected from 2 sites in the region of dacitic pyroclastic flow (Shirakawa Welded Tuff), 2 sites in pre-Tertiary sedimentary rocks (Yamizo Group), 3 sites in pre-Tertiary metamorphosed rocks (Tsukuba and Hitachi Metamorphic rocks) and 2 sites in pre-Tertiary granitic rocks (Kabasan and Inada Granite).

Seepage waters from each background geology have distinct properties in water chemistry. Water samples from the metamorphic terrains possess the highest concentration of total dissolved solutes (mean total ion : 22 epm), mostly Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- , and show mildly acidic to alkaline pH values of 4 to 8. Water samples collected from the sedimentary terrains show slightly lower concentrations (13.5 epm) of similar dissolved ion species to those from the metamorphic terrains and slightly more alkaline pH value of 7 to 8. Lower concentrations (1 to 2 epm) of total dissolved solutes mainly of Na^+ , Ca^{2+} and HCO_3^- and neutral to slightly alkaline pH values of 7 to 8 are the characteristics of the water samples from both in granitic rocks and dacitic welded tuff.

Major rock types and constituent minerals of each geological unit are dacitic welded tuff composed of cristobalite and plagioclase for the Shirakawa Welded Tuff, sandstone and shale composed of quartz, plagioclase, muscovite, biotite and calcite with minor amount of pyrite for the Yamizo Group, metamorphosed sandstone, shale and volcanoclastic rocks composed of quartz, plagioclase, K-feldspar, muscovite, biotite, chlorite and pyrite for the Tsukuba and Hitachi Metamorphic Rocks, and biotite Granite of quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite and hornblende for Kabasan and Inada Granite.

Thus, the following reactions are inferred to play important roles based on the water chemistry and mineralogy of each rock type. In metamorphic rocks : decomposition of plagioclase and chlorite by sulfuric acid generated by pyrite oxidation. In sedimentary rocks : decomposition of plagioclase and calcite by sulfuric acid generated by pyrite oxidation. In granitic rocks and dacitic welded tuff : decomposition of plagioclase by carbonic acid.

要 旨

建設骨材や石材等の採石場では大規模な露天採掘に伴って岩盤湧水が生じていることが多く、それらは岩盤中の地下水の水質特性や水質の形成機構を考察する上で有用な情報をもたらすと考えられる。今回は八溝山地周

辺の採石場を対象に、岩盤湧水の水質分析と岩質の記載を行い、地質と地下水質との関連性を検討した。

調査では、白河溶結凝灰岩のデイサイト質火砕流から 2 カ所、八溝層群の堆積岩から 2 カ所、筑波・日立変成

* 資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)

** 地殻化学部 (Geochemistry Department, GSJ)

Keywords: water quality, groundwater, seepage water, weathering, Yamizo Mountains, Yamizo Group, Inada Granite, Kabasan Granite, Hitachi Metamorphic Rocks, Tsukuba Metamorphic Rocks, Shirakawa Welded Tuff

岩から3カ所、加波山・稲田花崗岩から2カ所の計9カ所の採石場を対象とし、各採石場で1～5点の計25点の岩盤湧水を採取し主要溶存成分を分析した。

岩盤湧水の水質成分は、地質ごとに固有の特徴が認められた。変成岩は全溶存成分濃度の平均が22.1 meq/lと最も高く、イオン構成はアルカリ土類非炭酸塩型を示す。電気伝導度の平均値653 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、 Ca^{2+} の平均値132 mg/l、 Mg^{2+} の平均値45 mg/l、 SO_4^{2-} の平均値509 mg/lはいずれも全ての地質中で最高を示す。pHは3.7-8.1と酸性からアルカリ性までの幅広い範囲をもつ。堆積岩は全溶存成分濃度が5.5-31.5 meq/lと変成岩に次いで高く、イオン構成はアルカリ土類非炭酸塩型を示す。 HCO_3^- の平均値は73.5 mg/lと全ての地質中で最高で、 Na^+ の平均値11.8 mg/lや Ca^{2+} の平均値116 mg/lも高い。pHは7.9-8.2と中性～弱アルカリ性を示す。花崗岩の全溶存成分濃度の平均は1.7 meq/lとデイサイトに次いで低い。陰イオンは HCO_3^- を、陽イオンは Na^+ と Ca^{2+} を主体とし、イオン構成はNa-Ca炭酸塩型を示す。pHは7.0-8.4と中性～アルカリ性を示す。デイサイト質火砕流は全溶存成分濃度が1.0-1.4 meq/lで最も小さく、アルカリ土類炭酸塩型を示す。電気伝導度の平均値45.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ は全ての地質中で最低を示す。陰イオンは HCO_3^- を、陽イオンは Na^+ と Ca^{2+} を主体とする。

それぞれの地質の代表的な岩石中には、以下の鉱物が普通に認められる。変成岩では、石英、斜長石、カリ長石、白雲母、黒雲母、緑泥石、黄鉄鉱。堆積岩では、石英、斜長石、白雲母、黒雲母、方解石、黄鉄鉱。花崗岩では、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母、角閃石。デイサイトでは、クリストバライト、斜長石、カリ長石、石英。

鉱物構成と水質上の特徴から、それぞれの地質では、以下に示す反応が重要な役割を担っていることが推定される。変成岩では黄鉄鉱の酸化で生じた硫酸による斜長石と緑泥石の分解、堆積岩では黄鉄鉱の酸化で生じた硫酸による斜長石の分解と方解石の溶解、そして花崗岩とデイサイトでは炭酸による斜長石の分解である。

1. はじめに

岩盤内部の地下空間の利用に際しては、地下に設けた人工構造物とその周囲の地下水との間に生じる化学的相互作用の予測や対策のために、岩盤中の地下水の水質やその形成機構についての理解が必要となる。岩盤中の地下水の水質に関する従来の研究事例としては、トンネル内部からの湧水を対象とした例がいくつかあり、地質と水質との関連(笠間・鶴巻, 1971; 黒田・他, 1981; 森田・他, 1991; 井伊・三沢, 1994)や滞留時間と水質との関連(三木・吉沢, 1977; 嶋田, 1985; 石橋・山田,

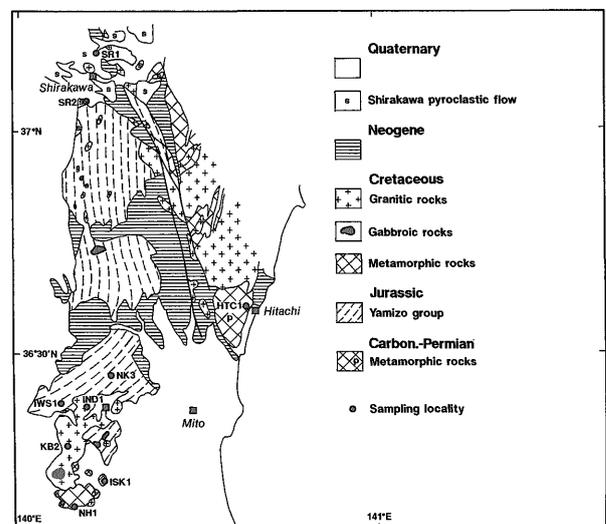
1986)などについての知見がある。しかしながら、大規模な土木・建設工事に際して得られてきたであろう岩盤湧水のデータは系統的に整理されてきたとはいえず(石橋, 1989)、この分野の知見は限られたものとなっている。

一方、建設用骨材の採石場や石材の石切場など(以下「採石場」と呼ぶ)では、原石からなる山体の山腹を露天採掘することが通例で、比高が100 mを超える大規模な露頭が人工的に形成されることも少なくない。そのような人工の大露頭の壁面は、多くの場合、従前の山腹斜面から大きく後退して形成されるために、自然状態での地下水面を切ることにより湧水を生じていることが多い。人工大露頭からの湧水の水質調査例は従来ほとんど知られていないが、トンネル内部の岩盤湧水と同様に、岩盤中の地下水の水質特性や水質形成機構を考える上で有用な情報をもたらすと考えられる。

茨城県西部、栃木県東部および福島県南部にまたがる八溝山地周辺地域では、市場に近く良質な原石に恵まれていることから比較的大規模な採石場が多数稼行している。そこで筆者らは、八溝山地とその周辺地域に位置する代表的な地質の採石場を対象として、人工露頭の岩盤からの湧水を採取・分析し、岩盤中の湧水の水質と地質との関連性について予察的な検討を行った。

2. 地質概要

調査対象の大半が含まれる八溝山地は、東の棚倉破砕帯と西の那珂川上流水系および鬼怒川水系からなる低地帯の間に挟まれ、南北約100 km、東西20 km前後の幅をもつ。山地は標高1022 mの八溝山を除くと、大部分は標高500 m以下の低山・丘陵地からなる。北より八



第1図 八溝山地周辺の地質および調査地点の位置。
Fig. 1 Regional geology around the Yamizo Mountains and localities of studied quarries.

溝、鷲ノ子、鷄足、筑波の4つの山塊から構成され、八溝、鷲子、鷄足山塊は砂岩、頁岩、チャートなどからなる非変成の中生代付加コンプレックスから、筑波山塊はそれらを原岩とする変成岩および白亜紀ないし古第三紀の花崗岩類などからなる。4つの山塊の間には、新第三系または第四系が切り込むように分布する(第1図; 滝沢・笠井, 1986; 通産省資源エネルギー庁, 1987)。

3. 調査および分析方法

今回の調査では、鷄足山塊の堆積岩、筑波山塊の花崗岩・変成岩、八溝山地北西側に分布する第四系白河層のデイサイト質火砕流堆積物、および八溝山地北東部に隣接する先第三紀の堆積岩を原岩とする日立変成岩の分布域内にある9箇所の採石場を対象とした。

それぞれの採石場では、露天採掘に伴って形成された急傾斜の岩盤露出面(残壁)からの湧水および湧水点近傍の岩石、細脈等の試料を採取した。調査地点を第1図に示す。残壁からの湧水が複数認められる場合は、現地での水質測定結果(水温, pH, 電気伝導度等)に基づいて、代表的な湧水を採取した。水試料はポリエチレン容器に採取し、陽イオン測定用試料の採取に際しては、0.45 μm のメンブランフィルターと手動式真空ポンプを用いた吸引濾過により懸濁物の混入を防ぎ、さらに容器壁への陽イオンの吸着を防ぐため6NのHClを1:100の割合で添加し、pHを2以下とした。

水試料については、水温を水銀温度計により、水素イ

オン濃度(pH)と酸化還元電位(ORP)を横河電機(株)製PH-82型により、電気伝導度(Cond)を同SC-82型により、溶存酸素濃度(DO)を電気化学計器(株)製HDO-110型によりそれぞれ現地で測定した後、実験室に持ち帰った試料の陽イオンを原子吸光法(日本ジャーレルアッシュ社製AA-11)により、陰イオンをイオンクロマトグラフ(横河電機(株)製IC-7000)により定量した。重炭酸イオンについては、採水後24時間以内に希硫酸滴定法により定量した。

岩石試料については、偏光顕微鏡による薄片観察と粉末X線回折法により構成鉱物を同定した。粉末X線回折法はリガク製ロータフレックスRAD- γ Aを用い、測定条件はX線源: Cu-K α , 出力: 40 kV-120 mA, 2θ 走査速度: 8°/分, 時定数: 0.1秒で行った。

4. 調査地点の地形、地質および湧水状況

調査対象とした9カ所の採石場について、その位置、地質、岩石種を第1表に示す。それぞれの調査地の地形、地質、湧水状況の概要、岩石の構成鉱物などを以下に述べる。

1) 福島県西白河郡大信村内の石切場(SR1)

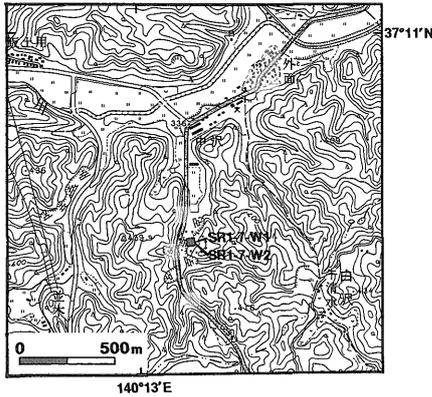
大信村中沢南方約500mの国道294号線の東に面した、幅約50m、奥行約50m、比高約30mの石材採掘場である(第2-1図)。採掘対象は白河溶結凝灰岩(吉田・高橋, 1991)のデイサイト質火砕流堆積物で、残壁の最上部約1mは茶褐色のローム質土に覆われる。残壁の主

第1表 調査対象の位置、地質および岩石種。

Table 1 Location, geology and rock type of each site.

採石場記号 Name	採試地点 Locality	地層名 Formation	岩石名 Rock type
SR1	福島県大信村中沢南方 S. of Nakasawa, Taishin v. Fukushima pref.	白河層 Shirakawa Fm.	デイサイト質溶結凝灰岩 Dacitic welded tuff
SR2	栃木県那須町明神南方 S. of Myojin, Nasu t. Tochigi pref.	白河層 Shirakawa Fm.	デイサイト質溶結凝灰岩 Dacitic welded tuff
IWS1	茨城県岩瀬町富谷 Tomiya, Iwase T. Ibaraki pref.	八溝層群 Yamizo Gp.	砂岩優勢砂岩頁岩互層 Alternation of sst. and mst.
NK3	茨城県七会村徳蔵 Tokura, Nanakai v. Ibaraki pref.	八溝層群 Yamizo Gp.	砂岩優勢砂岩頁岩互層 Alternation of sst. and mst.
ISK1	茨城県石岡市龍神山 Ryujinyama, Ishioka c. Ibaraki pref.	筑波変成岩 Tsukuba Metamorp.	砂岩頁岩互層起源変成岩 Metamorp. (alt. sst. and mst. origin)
NH1	茨城県新治村小高 Kotaka, Niihari v. Ibaraki pref.	筑波変成岩 Tsukuba Metamorp.	砂岩頁岩互層起源変成岩 Metamorp. (alt. sst. and mst. origin)
HTC1	茨城県日立市滑川本町 Namerikawa-honmachi, Hitachi c. Ibaraki pref.	日立変成岩 Hitachi Metamorp.	火山岩起源変成岩 Metamorp. (volcanics origin)
KB2	茨城県真壁町加波山 Kabasan, Makabe t. Ibaraki pref.	加波山花崗岩 Kabasan Granite	黒雲母花崗岩 Biotite granite
IND1	茨城県笠間市稲田 Inada, Kasama c. Ibaraki	稲田花崗岩 Inada Granite	黒雲母花崗岩 Biotite granite

部はほぼ垂直で、最下部は直近の地表より約5m掘下っている。正面南側の最下部から約1m上方より1.3 l/min.(SR 1-7-W 1)と北側の約5m上方より6.0 l/



第2-1図 調査地点の地形図(SR 1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“上小屋”(白河13号-2)を使用.

Fig. 2-1 Topography around the site SR1.

min.(SR 1-7-W 2)のいずれも開口割れ目からの湧水があり、掘下がりに設置されたポンプにより場外へ排水されている。割れ目の傾斜はいずれも80°以上で、開口幅は1-2cmである。湧水点付近の岩石はクリストバライトと斜長石を主な構成鉱物とし、カリ長石、角閃石を含むものもある。石英はごく少量ないし皆無である(第2表)。

2) 栃木県那須郡那須町内の石切場(SR 2)

那須町明神南方約500mの国道294号線の東に面した、幅約50m、奥行約100m、比高約40mの石材採掘場である(第2-2図)。採掘対象は白河溶結凝灰岩(吉田・高橋, 1991)のデイサイト質火砕流堆積物で、残壁の最上部約1mは茶褐色のローム質土に覆われる。残壁主部の下半はほぼ垂直、上半は階段式採掘されており、底部は周囲の地表より5-10m掘下っている。正面残壁の底部より約15m上方の中段右(南)端より0.65 l/min.(SR 2-1)、正面残壁の最下部より約0.3m上方より14 l/min.(SR 2-2)の、いずれも岩盤の割れ目からの湧水が

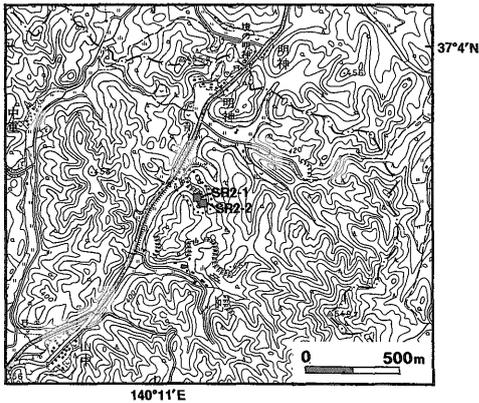
第2表 岩石の粉末X線回折結果.

略号: Qz: Quartz(石英), Cr: Cristobalite(クリストバライト), Pl: Plagioclase(斜長石), Kf: K-Feldspar(カリ長石), An: Anorthite(灰長石), Mus: Muscovite(白雲母), Bt: Biotite(黒雲母) Ch: Chlorite(緑泥石), Sm: Smectite(スメクタイト), Hb: Hornblende(角閃石), Ep: Epidote(緑レン石), St: Stilbite(東沸石), Lm: Laumontite(濁沸石), Cc: Calcite(方解石), Py: Pyrite(黄鉄鉱)表中の数字はそれぞれの鉱物の相対強度を示し、数字が大きい程含有量が多い。

Table 2 XRD results of rock samples from each quarry.

Numbers mean relative abundance of each mineral (4 is most abundant).

Sample No.	Locality (level)	Rock	Qz	Cr	Pl	Kf	An	Mus	Bt	Ch	Sm	Hb	Ep	St	Lm	Cc	Py
SR1-5-R	Taishin (GL-2m)	dacitic tuff	1	4			4										
SR1-M-R	Taishin (GL-10m)	dacitic tuff	2	4		2	3				1						
SR1-6-R	Taishin (GL-20m)	dacitic tuff		4		2	4										
SR1-7-R	Taishin (GL-35m)	dacitic tuff		4			4					2					
SR2-1-R	Nasu (GL-25m)	dacitic tuff		4			4										
SR2-2-R	Nasu (GL-40m)	dacitic tuff		4		1	4				1						
IWS1-10L-R1	Iwase (GL-120m)	Sandstone	4		3		4		3								
IWS1-10L-R2	Iwase (GL-120m)	Siltstone	4		3	2			4								
IWS1-3L-R	Iwase (GL-190m)	Sandstone	4		2		3		4			2				3	
IWS1-2L-R1	Iwase (GL-200m)	Sandstone	4		4	3			4								
IWS1-2L-R2	Iwase (GL-200m)	Sandstone	4		3				4								
IWS1-2L-V1	Iwase (GL-200m)	vein	4		2	2		1								2	
IWS1-2L-V2	Iwase (GL-200m)	vein													4		
NK3-1-R	Tokura (GL-70m)	Mudstone	4		3		2	3		3	2					2	
NK3-2-R	Tokura (GL-70m)	Sandstone	4		4		4	3		3						2	
NK3-V	Tokura (GL-70m)	vein	4		4		2										
ISK1-1-R1	Ishioka (GL-100m)	Mudstone	4		3	2		4									
ISK1-1-R2	Ishioka (GL-100m)	Sandstone	4		4	2			4								1
ISK1-1-V	Ishioka (GL-100m)	vein	4														
ISK1-2-V	Ishioka (GL-100m)	Sandstone	4														
NH1-1-R1	Niihari (GL-40m)	Sandstone	4		4			3	3								
NH1-1-R2	Niihari (GL-40m)	Aplite	4		4	4		4									
NH1-2-R	Niihari (GL-125m)	Sandstone	4		4	3	3	3	4	3							
NH1-3-R	Niihari (GL-125m)	Sandstone	4		4	4		2	4								
NH1-4-R	Niihari (GL-125m)	Sandstone	4		4	2			4								
HTC1-3-R1	Hitachi (GL-35m)	Schist	4		4					3			1			4	1
HTC1-3-R2	Hitachi (GL-35m)	Schist	4					4					3				
HTC1-4-V	Hitachi (GL-50m)	vein	4														
HTC1-5	Hitachi (GL-70m)	Schist	4		3			1		4		3	2				2
KB2-2-R	Kabasan	Granite	4		4	4			4	2							
KB2-2-V	Kabasan	vein	3		4			2						4			
IND1-R3	Inada (GL-30m)	Granite	4		3	3			2					4			
IND1-R2	Inada (GL-60m)	Granite	4		4	4			3			1					
IND1-R1	Inada (GL-60m)	Granite	4		4	4			4			3					

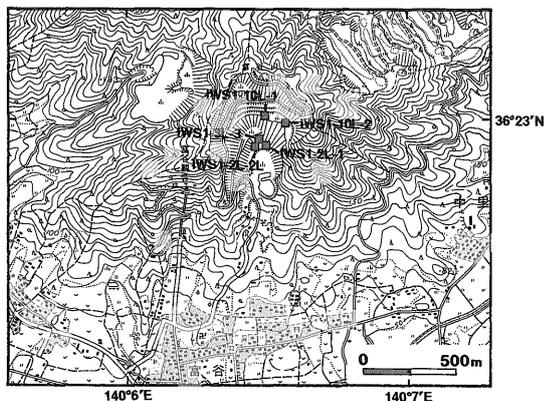


第2-2図 調査地点の地形図(SR2).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“旗宿”(白河14号-2)を使用。
Fig. 2-2 Topography around the site SR2.

あり、堀下がりに設置されたポンプにより場外へ排水されている。SR 2-1はほぼ水平な開放割れ目からの、SR 2-2は傾斜60-80°で幅1-2cm開口する急傾斜割れ目からの湧水である。湧水点付近の岩石の構成鉱物はクリストパライトと斜長石を主とし、カリ長石、角閃石を含むものもある。石英はごく少量ないし皆無である(第2表)。

3) 茨城県西茨城郡岩瀬町富谷の採石場(IWS 1)

富谷山(山頂標高365.1m)の南斜面を開削した、幅300-600m、奥行約600m、比高約220mの骨材採石場である(第2-3図)。地形的に独立性の高い山体の南側ほぼ全面を各段約10mの階段式採掘法により掘削し、平均斜度約50°の大残壁をもつ。八溝層群国見山層(通産省資源エネルギー庁, 1987)の砂岩優勢砂岩頁岩互層を採掘する。最下部から約150m上方までは青灰色の新鮮堅硬部、それより上位が茶褐色の風化部で、最上部の2-3mは赤城鹿沼降下軽石(阿久津, 1957)を挟む茶褐色

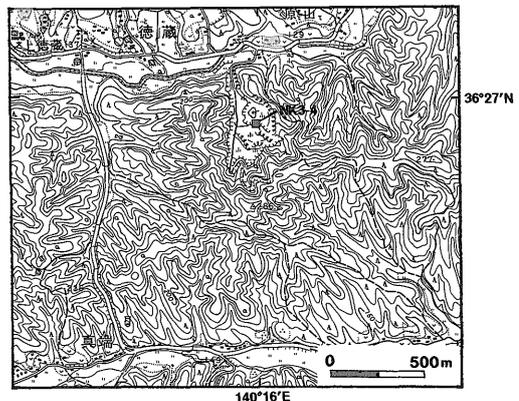


第2-3図 調査地点の地形図(IWS1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“岩瀬”(水戸14号-4)を使用。
Fig. 2-3 Topography around the site IWS1.

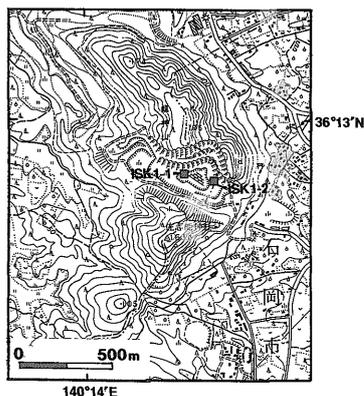
ローム質土に覆われる。また、最下部の地表下約50mには花崗岩が伏在することがボーリングにより確認されている(二宮元一氏私信)。最下部より約100m上方までの間の10カ所以上から湧水があり、集水されて場内下部の沈殿池に導入された後、場外へ排水される。調査対象とした岩盤湧水は、最下部より約100m上方からの1.0 l/min.(IWS 1-10 L-1)と3.0 l/min.(IWS 1-10 L-2)、約30m上方からの0.3 l/min.(IWS 1-3 L-3)、および約20m上方からの1.0 l/min.(IWS 1-2 L-1)と8.4 l/min.(IWS 1-2 L-2 L)の、いずれも亀裂の発達した泥質岩から湧出する計5点である。この採石場の大部分を占める砂岩の構成鉱物は、石英、斜長石、黒雲母を主としカリ長石、灰長石、角閃石を含む。岩体の亀裂を充填する細脈には方解石を含むものと濁沸石を主体とするものが認められた(第2表)。

4) 茨城県西茨城郡七会村徳蔵の採石場(NK 3)

七会村徳蔵の標高286.2mの三角点をもつ尾根から北に向かう谷沿いに開削された、幅200-300m、奥行約500m、比高約100mの骨材採石場である(第2-4図)。やや不規則な形の階段式採掘法による平均傾斜40-60°の残壁をもつ。八溝層群国見山層(通産省資源エネルギー庁, 1987)の頁岩優勢砂岩頁岩互層を採掘の対象とする。最下部から約70m上方までは青灰色ないし暗灰色の新鮮堅硬部、それより上位が茶褐色の風化部で、最上部の約2mは赤城鹿沼降下軽石(阿久津, 1957)を挟む褐色ローム質土に覆われる。最下部より約30m上方の亀裂の発達した黒色頁岩より1 l/min.前後の湧水があり(NK 3-4)、場内最下部に導水された後、ポンプにより場外へ排水されている。この湧水については、水質の経時変化をみるために1997年7月から1998年6月までの1年にわたり毎月1回計12回の分析を行った。湧水点付近の岩石の構成鉱物は、石英、斜長石、白雲母、緑泥石を主とし方解石を含む。頁岩にはスメクタイトや

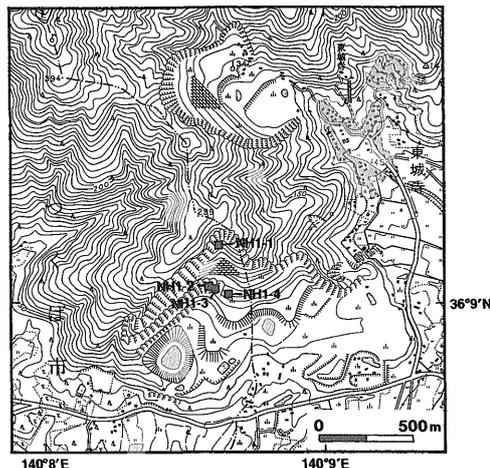


第2-4図 調査地点の地形図(NK3).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“徳蔵”(水戸10号-3)を使用。
Fig. 2-4 Topography around the site NK3.



第2-5図 調査地点の地形図(ISK 1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“柿岡”(水戸15号-2)を使用.

Fig. 2-5 Topography around the site ISK1.



第2-6図 調査地点の地形図(NH 1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“常陸藤沢”(水戸16号-1)を使用.

Fig. 2-6 Topography around the site NH1.

黄鉄鉱も含まれる(第2表).

5) 茨城県石岡市石岡の採石場(ISK 1)

石岡市の龍神山(山頂標高約180m)中央部をV字型に開削した、幅300-400m、奥行約500m、比高約120mの骨材採石場である(第2-5図)。東西に伸びた場内の北側と南側に階段式採掘法による平均傾斜50-60°の残壁をもつ。筑波変成岩類の砂岩優勢砂岩頁岩互層を原岩とする変成岩(宮崎・他, 1996)を採掘対象とする。最下部から約80m上方までは青灰色ないし暗灰色の新鮮堅硬部、それより上位が茶褐色の風化部で、最上部の約2mは赤城鹿沼降下軽石(阿久津, 1957)を挟む褐色ローム質土に覆われる。北側残壁の最下部付近の数カ所より湧水があり、場内北東に導水された後、ポンプにより排水されている。調査対象とした岩盤湧水は、残壁西側からの0.6 l/min.(ISK 1-1)と東側からの1.2 l/min.(ISK 1-2)の、いずれも岩盤亀裂から湧出する計2点である。湧水点付近の岩石の構成鉱物は石英、斜長石、白雲母または黒雲母を主としカリ長石と少量の黄鉄鉱を含む。岩体の亀裂を充填する細脈には石英を主とするものが認められた(第2表)。

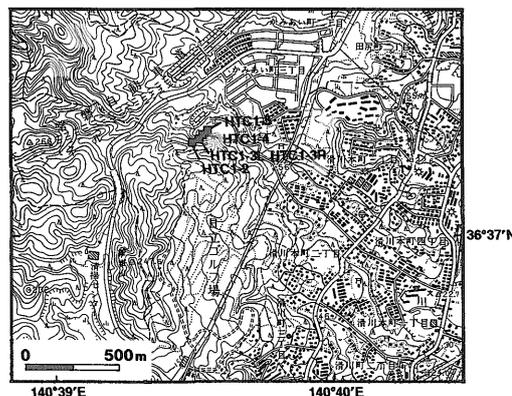
6) 茨城県新治郡新治村小高の採石場(NH 1)

筑波山塊南西部の標高299mの尾根から南へ広がる斜面を開削した、幅約1200m、奥行約800m、比高約200mの骨材採石場である(第2-6図)。階段式採掘法により南ないし南東に向けた平均傾斜50-60°の残壁をもつ。筑波変成岩類の砂岩優勢砂岩頁岩互層を原岩とする変成岩(宮崎・他, 1996)を採掘対象とする。残壁中央付近では、最下部から約150m上方までは青灰色の新鮮堅硬部、それより上位が茶褐色の風化部だが、旧地表面に近い部分ではより深くまで風化部が分布する。最上部の約2mは赤城鹿沼降下軽石(阿久津, 1957)を挟む褐色ローム質土に覆われる。残壁の下半部は最大厚さ約3mの多数の緩傾斜アプライト脈に貫かれる。標高220

m付近より下位の数カ所の岩盤亀裂から湧水があり、場内下部の沈殿地に導水された後、場外へ排水される。調査対象とした岩盤湧水は、標高220m付近からの0.08 l/min.(NH 1-1)および標高135m付近からの1.2 l/min.(NH 1-2), 1.36 l/min.(NH 1-3)と0.3 l/min.(NH 1-4)のいずれも岩盤亀裂から湧出する計4点である。湧水点付近に卓越する砂質変成岩の構成鉱物は石英、斜長石を主とし白雲母、黒雲母、カリ長石を含む(第2表)。

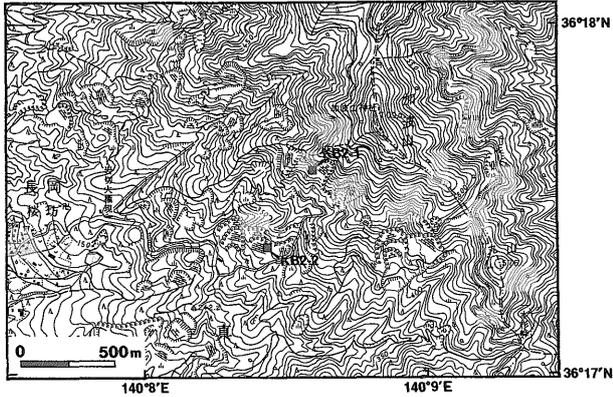
7) 茨城県日立市滑川本町の採石場(HTC 1)

鞍掛山(標高247.6m)の北北東約700mに位置し、常磐自動車道鞍掛山トンネルの北西方を源流域とする小河川に南接する。北東に開いた馬蹄形をなし、幅100-200m、奥行約200m、比高約70mの骨材採石場である(第2-7図)。落差15ないし20mのベンチ3段



第2-7図 調査地点の地形図(HTC 1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“日立”(水戸5号-1)を使用.

Fig. 2-7 Topography around the site HTC1.



第2-8図 調査地点の地形図(KB2).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“加波山”(水戸15号-1)を使用。

Fig. 2-8 Topography around the site KB2.

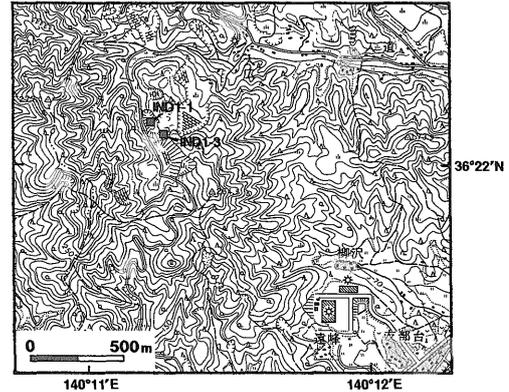
からなる階段式採掘で稼行されている。日立変成岩大雄院層の火山岩起源の変成岩(Tagiri, 1971)を採掘対象とする。最下部から約40m上方までは緑灰色の新鮮堅硬部、それより上位が茶褐色の風化部で、最上部の約2mは褐色ローム質土に覆われる。各段より湧水があり最下部レベルより場外の沈殿池へ自然流下する。調査対象とした湧水は、最下部より約50m上方からの0.23 l/min. (HTC 1-2)、約35m上方からの0.42 l/min. (HTC 1-3 L)と1.1 l/min. (HTC 1-3 R)の、いずれも岩盤亀裂と連絡した発破孔から湧出するもの、および最下部より約18m上方(HTC 1-4)と最下部(HTC 1-5)からの、いずれも岩盤亀裂から湧出するもの計5点である。湧水点付近の岩石の構成鉱物は、石英、斜長石、緑泥石を主とし、緑簾石を含むほか、白雲母、角閃石、黄鉄鉱を含むものもある。岩体の亀裂を充填する細脈には石英を主とするものが認められた(第2表)。

8) 茨城県真壁郡真壁町の石切場(KB2)

加波山(山頂標高709.0m)の西側斜面に開削された黒雲母花崗岩を採掘する石切場2カ所で採水した。いずれも幅・奥行が約100m、比高約50mである(第2-8図)。加波山山頂から南西約500mの地点に位置する石切場では、残壁上端から約8m下の岩盤亀裂からの0.41 l/min.の湧水(KB2-1)を、また山頂から南西約900mの地点の石切場では、残壁最下部の岩盤亀裂からの0.07 l/min.の湧水(KB2-2)を分析した。湧水点付近の岩石の構成鉱物は石英、斜長石、カリ長石、黒雲母を主とし、緑泥石を含む。岩体の亀裂を充填する細脈には東沸石を主とするものが認められた(第2表)。

9) 茨城県笠間市稲田の石切場(IND1)

稲田西方の標高264.5mの山頂から北へ向かう沢に沿って開削された、幅約80m、奥行約200m、比高約80mの石材の石切場である(第2-9図)。2, 3段のベンチを挟むほぼ垂直な残壁をもち、底部は周辺の地表より



第2-9図 調査地点の地形図(IND1).
建設省国土地理院発行1/2.5万地形図“羽黒”(水戸14号-2)を使用。

Fig. 2-9 Topography around the site IND1.

20-30m掘下がっている。稲田花崗岩類(通産省資源エネルギー庁, 1987)の中粒黒雲母花崗岩を採掘対象とする。下位から上位に向かい約20mの新鮮堅硬部、約30mの弱風化部、亀裂が発達し強度の低下した10-15mの風化部、20-30mのマサ化花崗岩へと移化し、最上部の約2mは赤城鹿沼降下軽石(阿久津, 1957)を挟む褐色ローム質土に覆われる。最下部から約50mの範囲の数カ所の亀裂から湧水があり、場内最下部に導水された後、ポンプにより場外へ排水される。調査対象とした岩盤湧水は、最下部より約20m上方(IND1-1)および約50m上方(IND1-3)から湧出する計2点である。湧水点付近の岩石の構成鉱物は石英、斜長石、カリ長石、黒雲母を主とし角閃石を含むほか、東沸石を含むものも認められた(第2表)。

5. 岩盤湧水の水質

対象とした25点の岩盤湧水の水質測定・分析結果を第3表に、各項目・成分の平均値、標準偏差、変動係数(=標準偏差/平均値)等の統計量を第4表に、各項目・成分間の相関を第5表に、水質各成分の濃度別ヒストグラムを第3図にそれぞれ示す。それぞれの水質項目の統計上の特徴・項目相互の相関について以下に述べる。

水温：範囲は5.9-20.9°C、平均値が12.3°Cである。水温の標準偏差は4.9であり、気温の標準偏差7.9よりも約40%小さい。水温、気温ともにそれらの平均値は調査地域の年間平均気温(水戸：13.2°C、理科年表)に近い。

pH：範囲は3.7-8.6、平均値が7.3である。pH7ないし8台の中性ないし弱アルカリ性を示す湧水が調査地点の約70%と多数を占める一方、約15%がpH6未満の酸性を示す。水素イオン濃度としては5桁の変動範囲となり、全ての成分中で最も濃度の変動幅が大きい。

第3表 岩盤湧水の水質分析結果。

略号: Tw: 水温, Ta: 気温, Q: 流量, Cond: 電気伝導度, ORP: 酸化還元電位, DO: 溶存酸素濃度, Apx. Dep.: 残壁最上部から採水地点までの鉛直距離。

Table 3 Water quality of rock seepage collected from the Yamizo region.

Tw: water temperature, Ta: air temperature, Q: water flow, Cond: electric conductivity, ORP: oxidation-reduction potential, DO: dissolved oxygen, Apx. Dep.: approximate vertical distance from the top of artificial cliff of each quarry.

Sample No.	Apx. Dep.	Date	Weath.	T wat °C	T air °C	Q l/min	pH	Cond. μS/cm	ORP mV	DO mg/l	HCO3- mg/l	F- mg/l	Cl- mg/l	Br- mg/l	SO4-- mg/l	NO3- mg/l	Na+ mg/l	K+ mg/l	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	t.Fe mg/l	Mn++ mg/l
SR1-7-W1	GL-30m	3/27/98	Rain	12.1	6.7	1.3	7.57	52.6	184	10.2	36.9	0.07	1.72	0.00	1.5	1.35	4.47	1.61	6.69	1.38	0.00	0.00
SR1-7-W2	GL-25m	3/27/98	Rain	11.3	6.7	6.0	7.31	47.1	211	10.6	31.7	0.03	1.97	0.00	2.0	0.87	4.16	1.38	6.39	1.27	0.08	0.02
SR2-1	GL-25m	3/27/98	Rain	10.5	7.6	0.7	6.53	38.7	181	11.0	25.3	0.00	2.28	0.00	0.8	0.91	3.18	0.73	4.91	1.42	0.00	0.00
SR2-2	GL-40m	3/27/98	Rain	12.9	7.6	14.0	6.88	43.8	197	10.4	30.5	0.04	1.51	0.00	1.2	0.23	3.46	0.69	5.78	1.41	0.01	0.00
IWS1-2L-1	GL-200m	1/21/98	Clear	7.4	9.4	1.0	8.16	182.2	119	10.2	58.0	0.08	6.12	0.00	67.6	1.18	8.82	1.22	46.86	2.52	0.00	0.00
IWS1-2L-2L	GL-200m	1/21/98	Clear	6.0	9.5	8.4	8.13	357.0	114	10.4	75.0	0.07	4.03	0.00	207.6	3.35	14.00	2.02	111.80	7.28	0.00	0.00
IWS1-3L-3	GL-190m	1/21/98	Clear	5.9		0.3	8.06	778.0	133	12.3	74.7	0.10	6.52	0.00	659.6	2.70	17.60	1.54	281.00	17.46	0.00	0.00
IWS1-10L-1	GL-120m	1/21/98	Clear	9.8	6.8	1.0	7.93	308.0	148	12.2	82.7	0.13	4.65	0.00	139.5	0.37	7.35	0.71	86.37	5.60	0.00	0.00
IWS1-10L-2	GL-120m	1/21/98	Clear	6.8	7.3	3.0	7.96	310.0	144	11.6	46.7	0.10	5.18	0.00	179.4	7.55	15.50	3.61	76.55	9.33	0.00	0.00
NK3-4 (ave.)	GL-70m	See Tab. 6		15.0	19.1	5.1	8.10	409.3	129	5.3	103.7	0.10	2.20	0.00	178.1	0.20	7.30	1.40	95.80	14.00	0.00	0.10
ISK1-1	GL-120m	3/20/98	Clear	15.9	18.4	0.6	6.75	691.0	38	5.9	4.9	0.20	4.35	0.02	538.0	0.17	15.30	5.44	112.10	38.28	1.17	3.54
ISK1-2	GL-120m	3/20/98	Clear	15.0	18.2	1.2	8.12	1031.0	123	8.6	117.1	0.13	6.28	0.00	884.6	4.83	7.56	4.07	232.70	53.51	0.00	0.00
NH1-1	GL-50m	4/22/98	Clear	19.5	24.8	0.1	7.84	258.0	127	5.9	22.6	0.22	8.79	0.00	109.2	0.00	10.31	2.39	32.90	7.83	0.00	0.00
NH1-2	GL-135m	4/22/98	Clear	17.2	24.4	1.2	7.64	468.0	259	6.9	29.9	0.39	5.98	0.00	313.8	0.22	8.82	3.31	91.74	15.28	0.00	0.00
NH1-3	GL-135m	4/22/98	Clear	18.1	23.4	1.4	5.92	434.0	278	7.2	0.0	0.40	5.93	0.00	287.8	0.52	9.14	3.82	67.38	17.51	0.00	0.32
NH1-4	GL-135m	4/22/98	Clear	18.8	23.4	0.3	3.67	645.0	446	7.8	0.0	0.47	5.21	0.00	399.6	1.04	6.61	2.69	72.65	27.28	0.95	1.96
HTC1-2	GL-20m	1/20/98	Clear	6.1	4.7	0.2	5.84	180.5	216	11.0	2.0	0.10	7.04	0.00	94.8	4.74	9.98	0.72	25.74	12.10	0.03	0.19
HTC1-3L	GL-35m	1/20/98	Clear	9.9	4.7	0.4	4.23	556.0	353	9.9	0.0	0.00	7.28	0.04	412.9	0.00	8.33	1.47	98.85	34.69	1.88	2.59
HTC1-3R	GL-35m	1/20/98	Clear	11.3	4.7	1.1	6.91	254.0	52	12.1	32.3	0.16	7.25	0.04	115.2	0.00	7.99	1.05	40.93	13.70	0.36	1.00
HTC1-4	GL-50m	1/20/98	Clear	8.9	5.9		7.73	1827.0	185	11.8	38.4	0.40	6.91	0.00	1716.8	0.07	23.50	5.74	443.00	213.66	0.00	13.06
HTC1-5	GL-70m	1/20/98	Clear	6.2	5.9		7.92	843.0	116	12.6	63.4	0.13	6.54	0.02	723.0	3.17	14.60	7.21	230.00	60.79	0.00	1.37
KB2-1		1/27/98	Clear	13.9		0.4	8.32	64.8	185	9.8	25.0	0.12	8.66	0.01	5.9	0.15	7.88	0.53	5.73	0.88	0.00	0.00
KB2-2		1/27/98	Clear	7.1	2.6	0.1	7.00	37.5	261	12.0	16.5	0.19	6.33	0.01	2.3	0.08	6.52	0.30	2.65	0.50	0.01	0.00
IND1-1	GL-60m	6/15/98	Cloudy	19.7	21.7	0.4	8.44	136.9	127	4.1	86.6	0.29	1.48	0.00	1.8	1.59	13.05	1.69	20.81	1.64	0.46	0.01
IND1-3	GL-30m	6/15/98	Cloudy	20.9	21.7	0.2	8.44	45.3	92	4.4	26.8	0.26	1.16	0.00	1.8	0.00	6.04	1.15	2.75	0.35	0.00	0.00

第4表 水質成分の統計量。S. D.: 標準偏差。その他の略号は第3表と同じ。

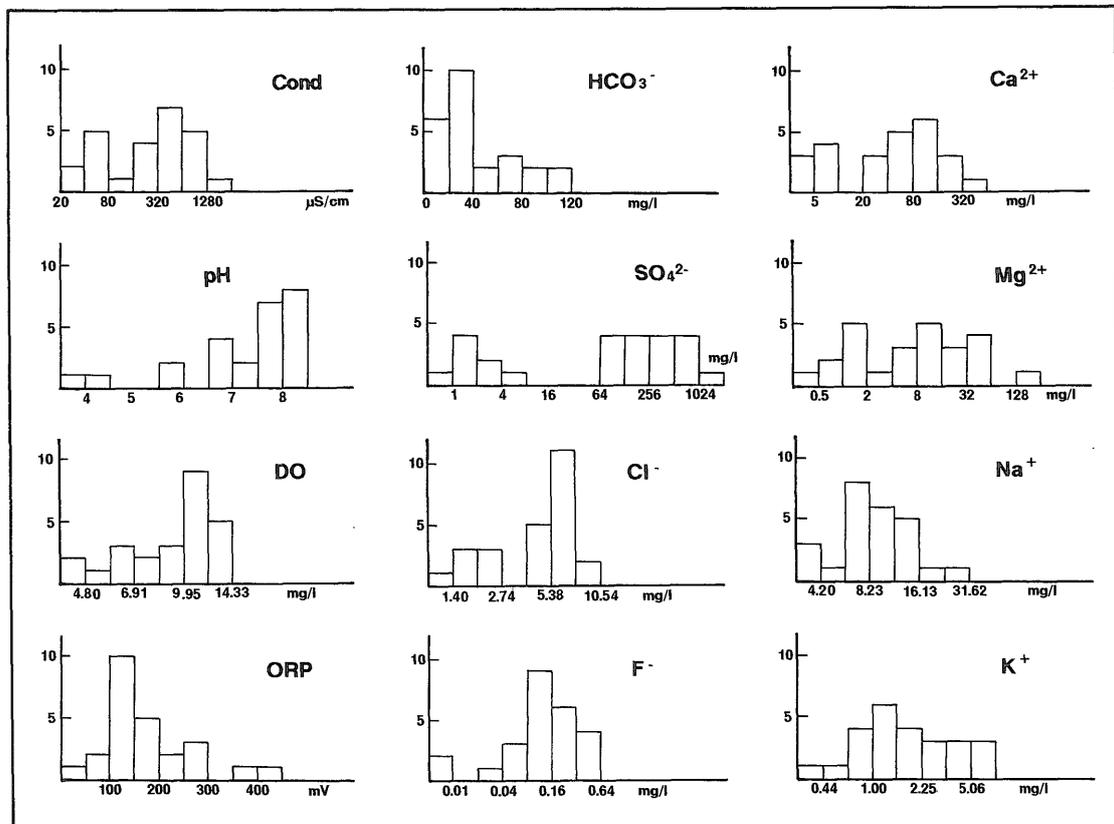
Table 4 Means and standard deviations for the concentration of each component in rock seepage in relation to geology. S. D.: standard deviation. The other abbreviations are in Tab. 3.

Sample No.	Number of Samples	Number of Sites	Tw C	Ta C	Q l/min	pH	Cond μS/cm	ORP mV	DO mg/l	HCO3- mg/l	F- mg/l	Cl- mg/l	Br- mg/l	SO4-- mg/l	NO3- mg/l	Na+ mg/l	K+ mg/l	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	t.Fe mg/l	Mn++ mg/l	t.lon meq/l
Whole	N=25	N=9	12.25	12.40	2.10	7.26	399.9	176.7	9.36	41.2	0.17	5.01	0.006	281.8	1.41	9.66	2.26	88.08	22.39	0.20	0.97	13.48
S. D.			4.90	7.90	3.35	1.24	410.6	90.8	2.66	33.3	0.13	2.35	0.012	391.0	1.94	4.87	1.06	106.09	43.17	0.46	2.69	17.02
S. D. / mean			0.400	0.637	1.600	0.171	1.027	0.514	0.284	0.807	0.791	0.470	2.130	1.387	1.376	0.505	0.804	1.204	1.928	2.345	2.781	1.26
maximum			20.9	24.8	14.0	8.4	1827.0	446.0	12.6	117.1	0.47	8.79	0.04	1716.8	7.6	23.5	7.2	443.0	213.7	1.9	13.1	77.94
Minimum			5.9	2.6	0.1	3.7	37.5	38.0	4.1	0.0	0.00	1.16	0.00	0.8	0.0	3.2	0.3	2.7	0.4	0.0	0.0	0.97
Dacitic tuff	N=4	N=2	11.70	7.15	5.49	7.07	45.6	193.3	10.52	31.10	0.04	1.87	0.000	1.37	0.84	3.82	1.10	5.94	1.37	0.02	0.01	1.21
S. D.			1.03	0.52	6.16	0.46	5.83	13.72	0.33	4.76	0.03	0.33	0.000	0.53	0.46	0.60	0.46	0.79	0.07	0.04	0.01	0.16
S. D. / mean			0.088	0.073	1.122	0.065	0.128	0.071	0.031	0.153	0.825	0.177	####	0.385	0.549	0.157	0.420	0.132	0.050	1.717	2.000	0.13
maximum			12.9	7.6	14.0	7.6	52.6	211.0	11.0	36.9	0.07	2.28	0.00	2.0	1.4	4.5	1.6	6.7	1.4	0.1	0.0	1.39
Minimum			10.5	6.7	0.7	6.5	38.7	181.0	10.2	25.3	0.00	1.51	0.00	0.8	0.2	3.2	0.7	4.9	1.3	0.0	0.0	1.03
Sedimentary	N=6	N=2	8.48	10.42	3.13	8.06	390.8	131.2	10.33	73.45	0.10	4.78	0.000	238.63	2.56	11.76	1.75	116.40	9.37	0.00	0.02	13.49
S. D.			3.49	5.00	3.12	0.09	204.11	13.40	2.61	19.81	0.02	1.56	0.000	211.85	2.75	4.50	1.01	83.50	5.52	0.00	0.04	9.14
S. D. / mean			0.412	0.480	0.997	0.012	0.522	0.102	0.253	0.270	0.214	0.327	####	0.888	1.075	0.382	0.575	0.717	0.590	####	2.449	0.68
maximum			15.0	19.1	8.4	8.2	778.0	148.0	12.3	103.7	0.13	6.52	0.00	659.6	7.6	17.6	3.6	281.0	17.5	0.0	0.1	31.46
Minimum			5.9	6.8	0.3	7.9	182.2	114.0	5.3	46.7	0.07	2.20	0.00	67.6	0.2	7.3	0.7	46.9	2.5	0.0	0.0	5.51
Metamorphic	N=11	N=3	13.35	14.41	0.72	6.60	653.4	199.4	9.07	28.23	0.24	6.51	0.011	508.70	1.34	11.10	3.45	131.64	44.97	0.40	2.18	22.22
S. D.			5.04	9.10	0.49	1.53	467.85	126.7	2.52	35.94	0.15	1.18	0.016	473.42	1.94	4.95	2.07	125.17	58.58	0.65	3.80	21.30
S. D. / mean			0.377	0.631	0.682	0.231	0.716	0.635	0.278	1.273	0.650	0.181	1.504	0.931	1.443	0.445	0.600	0.951	1.303	1.621	1.738	0.96
maximum			19.5	24.8	1.4	8.1	1827.0	446.0	12.6	117.1	0.47	8.79	0.04	1716.8	4.8	23.5	7.2	443.0	213.7	1.9	13.1	77.94
Minimum			6.1	4.7	0.1	3.7	180.5	38.0	5.9	0.0	0.00	4.35	0.00	94.8	0.0	6.6	0.7	25.7	7.8	0.0	0.0	5.03
Granite	N=4	N=2	15.40	15.33	0.25	8.05	71.1	166.3	7.58	38.74	0.22	4.41	0.005	2.94	0.46	8.37	0.92	7.99	0.84	0.12	0.00	1.70
S. D.			6.32	11.03	0.15	0.70	45.33	73.90	3.97	32.23	0.08	3.69	0.006	2.00	0.76	3.21	0.63	8.67	0.58	0.23	0.01	1.13
S. D. / mean			0.410	0.719	0.581	0.087	0.637	0.444	0.524	0.832	0.353	0.838	1.155	0.679	1.668	0.384	0.684	1.086	0.684	1.944	2.000	0.66
maximum			20.9	21.7	0.4	8.4	136.9	261.0	12.0	86.6	0.29	8.66	0.01	5.9	1.6	13.1	1.7	20.8	1.6	0.5	0.0	3.35
Minimum			7.1	2.6	0.1	7.0	37.5	92.0	4.1	16.5	0.12	1.16	0.00	1.8	0.0	6.0	0.3	2.7	0.4	0.0	0.0	0.97

第5表 水質成分相互の相関。略号は第3表と同じ。

Table 5 Correlation coefficients among the concentrations of each component of rock seepage taken from the Yamizo region. Abbreviations are the same as in Table 3.

	Mn	t. Fe	Mg	Ca	K	Na	NO3	SO4	Br	Cl	F	HCO3	DO	ORP	Cond	pH	Q	Ta
Tw	-0.102	0.162	-0.145	-0.288	0.031	-0.291	-0.436	-0.160	-0.153	-0.241	0.560	-0.134	-0.876	0.100	-0.118	-0.063	-0.162	0.891
Ta	-0.157	0.044	-0.124	-0.069	0.203	-0.016	-0.189	-0.014	-0.337	-0.081	0.629	0.044	-0.891	0.054	0.043	0.045	-0.216	
Q	-0.204	-0.209	-0.214	-0.099	-0.123	-0.188	0.046	-0.194	-0.198	-0.452	-0.351	0.181	0.134	-0.070	-0.197	0.110		
pH	-0.132	-0.675	-0.017	0.143	0.043	0.240	0.153	-0.010	-0.349	-0.154	-0.167	0.672	-0.059	-0.764	-0.041			
Cond	0.792	0.142	0.908	0.955	0.742	0.716	0.108	0.991	0.069	0.370	0.398	0.192	0.130	0.022				
ORP	0.073	0.358	0.024	-0.108	-0.123	-0.278	-0.148	0.004	-0.039	0.134	0.314	-0.499	0.049					
DO	0.143	0.129	0.187	0.263	-0.045	0.126	0.286	0.183	0.206	0.315	-0.426	-0.003						
HCO3	-0.161	-0.388	0.036	0.343	0.061	0.167	0.326	0.163	-0.283	-0.212	-0.231							
F	0.388	0.136	0.378	0.243	0.404	0.292	-0.243	0.358	-0.193	0.170								
Cl	0.219	0.101	0.287	0.335	0.223	0.079	0.079	0.357	0.366									
Br	0.138	0.159	0.064	0.006	0.088	0.030	-0.231	0.062										
SO4	0.817	0.100	0.933	0.960	0.732	0.712	0.105											
NO3	-0.200	0.118	-0.031	0.186	0.238	0.303												
Na	0.623	0.030	0.662	0.766	0.627													
K	0.522	0.152	0.649	0.666														
Ca	0.708	-0.021	0.852															
Mg	0.946	0.065																
t. Fe	0.216																	



第3図 湧水水質各成分の頻度分布図。

Fig. 3 Frequency diagrams for the concentration of each dissolved component in rock seepage (in mg/l). Abbreviations -Cond: electric conductivity, DO: dissolved oxygen and ORP: oxidation-reduction potential.

電気伝導度：範囲は 37.5-1827 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、平均値が 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、現地測定項目の中では水素イオン濃度に次ぐ大きな変動範囲をもつ。50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 付近と 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 付近にそれぞれピークをもつバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。 SO_4^{2-} と 0.99, Ca^{2+} と 0.96, Mg^{2+} と 0.91, Na^+ と 0.72, K^+ と 0.74 の正相関を示す。

酸化還元電位：範囲は -3-446 mV、平均値は 177 mV であり、変動係数は 0.51 と小さい。pH と -0.76 の負相関を示す。

溶存酸素濃度：範囲は 2.2-12.6 mg/l、平均値が 9.4 mg/l であり、全項目中最も小さい変動係数(0.28)を示す。水温と -0.88, 気温と -0.89 のそれぞれ強い負相関を示す。

HCO_3^- ：範囲は 0.0-117 mg/l、平均値が 41.2 mg/l である。pH と 0.67 の弱い正相関を、酸化還元電位と -0.50 の弱い負相関を示す。

F^- ：範囲は 0.00-0.47 mg/l、平均値が 0.17 mg/l である。どの溶存成分とも +/-0.5 よりも強い相関を示さない。

Cl^- ：範囲は 1.2-8.8 mg/l、平均値が 5.0 mg/l であり、変動係数は 0.47 と溶存酸素に次いで小さい。1-3 mg/l のグループと 6 mg/l 付近にピークをもつグループからなるバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。どの溶存成分とも +/-0.4 よりも強い相関を示さない。

Br^- ：範囲は 0.00-0.04 mg/l、平均値が 0.006 mg/l である。分析成分中で平均値が最も小さく、分析対象の 80%弱が定量下限値を下回る。変動係数は 2.13 とかなり大きく、どの溶存成分とも +/-0.4 よりも強い相関を示さない。

SO_4^{2-} ：範囲は 0.8-1717 mg/l、平均値が 282 mg/l であり、分析成分中で平均値が最も大きい。変動係数は 1.39 と比較的大きい。1-10 mg/l と 100-1000 mg/l に分析値が集中するバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。電気伝導度と 0.99, Ca^{2+} と 0.96, Mg^{2+} と 0.93, Na^+ と 0.71, K^+ と 0.73 の正相関を示す。

NO_3^- ：範囲は 0.00-7.55 mg/l、平均値が 1.4 mg/l であり、変動係数は 1.38 と比較的大きい。IWS 1, ISK 1, HTC 1, IND 1 などに見られるように、ひとつの採石場内の湧水間の変動が他の成分と比較してかなり大きい。どの溶存成分とも +/-0.5 よりも強い相関を示さない。

Na^+ ：範囲は 3.2-23.5 mg/l、平均値が 9.7 mg/l であり、変動係数は 0.51 と比較的小さい。3 mg/l 付近にピークをもつ集団と 7 mg/l 付近にピークをもち高濃度側ヘテールをもつ集団からなるバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。電気伝導度と 0.72, SO_4^{2-} と 0.71, Ca^{2+} と 0.77 のやや強い正相関を示す。

K^+ ：範囲は 0.3-7.2 mg/l、平均値が 2.3 mg/l であり、変動係数は 0.80 と比較的小さい。電気伝導度と

0.74, SO_4^{2-} と 0.73 のやや強い正相関を示す。

Ca^{2+} ：範囲は 2.7-443 mg/l、平均値が 88.1 mg/l であり、陽イオン中で平均値が最も大きい。変動係数は 1.20 と比較的大きく、10 mg/l 以下のグループと 100 mg/l 付近にピークをもつグループからなるバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。電気伝導度と 0.96, SO_4^{2-} と 0.96, Mg^{2+} と 0.85, Na^+ と 0.77 の正相関を示す。

Mg^{2+} ：範囲は 0.4-214 mg/l、平均値が 22.4 mg/l であり、変動係数は 1.93 と比較的大きい。1 mg/l 付近と 10 mg/l 付近にそれぞれピークをもつバイモーダルな頻度分布をなす(第3図)。電気伝導度と 0.91, SO_4^{2-} と 0.93, Ca^{2+} と 0.85 の正相関を示す。

t.Fe：範囲は 0.00-1.88 mg/l、平均値が 0.21 mg/l であり、分析対象の 60%強が定量下限値を下回る。変動係数は 2.29 とかなり大きい。t.Fe を溶存する湧水の多くは低 pH であり、pH とは -0.68 の負相関を示す。

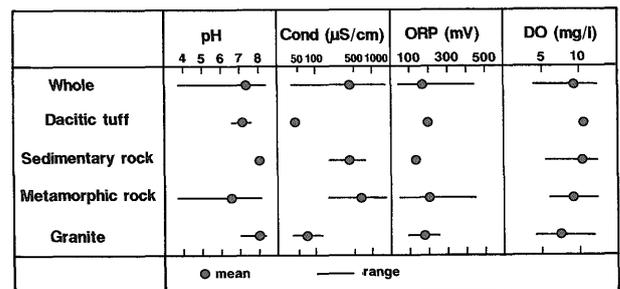
Mn^{2+} ：範囲は 0.00-13.06 mg/l、平均値が 0.97 mg/l である。分析対象の 60%弱が定量下限値を下回る一方、最高値が突出しているため、変動係数は 2.78 と全項目中で最大を示す。 Mg^{2+} と 0.95, SO_4^{2-} と 0.82, 電気伝導度と 0.79, Ca^{2+} と 0.71 の正相関を示す。

6. 考 察

6.1 地質別にみた水質の特徴

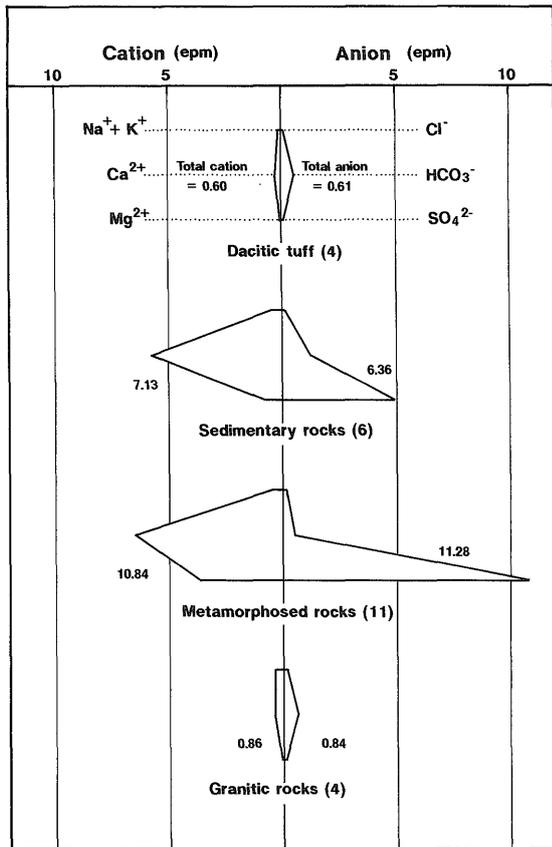
湧水の水質分析結果に基づいて、デイサイト質火砕流堆積物(SR 1, SR 2), 堆積岩(IWS 1, NK 3), 変成岩(ISK 1, NH 1, HTC 1), 花崗岩(KB 2, IND 1)の地質(岩型)別に計算したそれぞれの平均値, 標準偏差, 変動係数等の統計量を第4表に, 地質別の主要水質指標の平均値を第4図に, 地質別の主要溶存イオンの平均値から描いたヘキサダイアグラムを第5図に, 全ての湧水の陰イオン, 陽イオンの構成比を示すトリリニアダイアグラムを第6図にそれぞれ示す。

採石場の岩盤湧水の水質は, 地質ごとに大きく異なる。



第4図 地質別の湧水の主要水質指標平均値。

Fig. 4 Mean values of pH, electric conductivity (Cond), dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP) for rock seepage in each geology.



第5図 湧水の地質別平均値のヘキサダイアグラム。
Fig. 5 Hexadiagrams for average water quality of rock seepage in each geology.

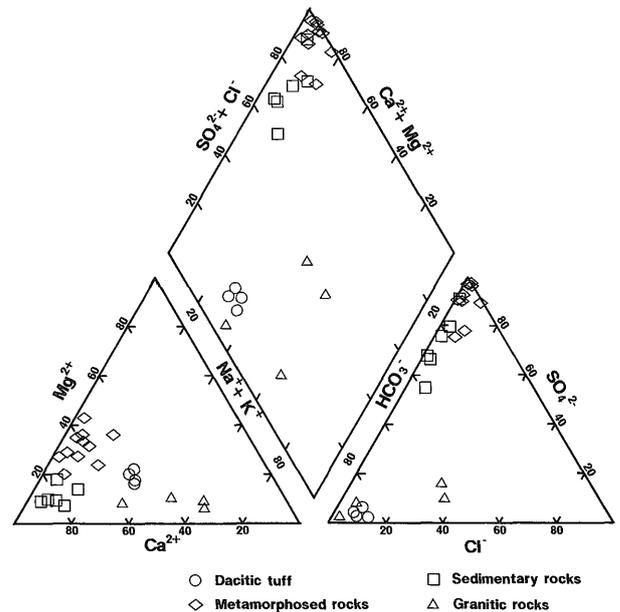
以下に、地質ごとに水質成分の平均値、変動係数等を比較し、その特徴を述べる。

総溶存イオン量：分析した全ての溶存イオンの当量合計である総溶存イオン量の平均値は、変成岩の22.2 meq/lが最も大きく、堆積岩の13.5 meq/lがそれに次ぎ、花崗岩とデイサイト質火砕流堆積物(以下“デイサイト”と呼ぶ)はそれぞれ1.7 meq/lと1.2 meq/lであり、前二者と比べて一桁小さい。変動係数は変成岩の0.96が最大で、デイサイトの0.13が最小である。

水素イオン濃度(pH)：堆積岩と花崗岩がともに8.1で最も高く、デイサイトの7.1、変成岩の6.6の順に低くなる。地質グループ内での変動係数は変成岩の0.23が突出しており、堆積岩の0.01が最小である。

電気伝導度(Cond)：変成岩と堆積岩がそれぞれ653 μ S/cmと391 μ S/cmの高い値を示すのに対して、花崗岩とデイサイトはそれぞれ71 μ S/cmと46 μ S/cmであり1桁低く、ヒストグラム上のふたつのピークに対応している。変動係数はデイサイトの0.13のみが低く、他は0.5-0.7の範囲にある。

酸化還元電位(ORP)：変成岩とデイサイトが190-200 mVと高く、花崗岩の166 mV、堆積岩の131 mVの順



第6図 湧水のトリリニアードイアグラム。
Fig. 6 Trilinear diagrams for water quality of rock seepage.

に低くなる。変動係数は0.64の変成岩と0.44の花崗岩が高く、他は0.1以下である。

溶存酸素濃度(DO)：7.6 mg/lの花崗岩がやや低く、他は10 mg/l前後である。変動係数は花崗岩の0.52が高く、堆積岩と変成岩は0.25前後で同程度、デイサイトは0.03と極端に低い。DOは地質とは無関係に気温・水温と強い負相関を示しており、測定時の温度に対する酸素の溶解度に強く規定されているように見える。

HCO₃⁻：堆積岩の73 mg/lが最も高く、花崗岩の39 mg/lがそれに次ぎ、デイサイトと変成岩は30 mg/l前後とやや低い。変動係数は変成岩が1.27と最も高く、花崗岩の0.83、堆積岩の0.27、デイサイトの0.15の順に低くなる。主要陰イオン中、地質グループ間での変動幅が最も小さい。

F⁻：変成岩と花崗岩が0.2 mg/l程度と高く、堆積岩の0.1 mg/l、デイサイトの0.04 mg/lの順に低くなる。変動係数はデイサイトの0.83が最高で、変成岩の0.65、花崗岩の0.35、堆積岩の0.21の順に低下する。

Cl⁻：変成岩の6.5 mg/lが最も高く、4.5 mg/l前後の堆積岩と花崗岩、1.9 mg/lのデイサイトの順に低下する。変動係数は花崗岩の0.84が突出しており、堆積岩の0.33がそれに次ぎ、デイサイトと変成岩がともに0.18と低い。

Br⁻：デイサイトと堆積岩についてはほとんどの試料が定量下限値未満であり、変成岩と花崗岩でそれぞれ0.011 mg/lと0.005 mg/lの平均値が得られた。変動係数は変成岩の1.50と花崗岩の1.16で大差ない。

SO₄²⁻：変成岩と堆積岩がそれぞれ509 mg/lと239

mg/lの高い平均値をもつのに比べ、花崗岩とデイサイトはそれぞれ2.9 mg/lと1.4 mg/lであり2桁以上も低く、ヒストグラム上のふたつのグループに対応する。地質グループ間での変動幅が最大のイオン種である。変動係数は平均値の高い変成岩と堆積岩がそれぞれ0.93と0.89と高く、花崗岩の0.68、デイサイトの0.39の順に低くなる。

NO₃⁻: 堆積岩の2.6 mg/lが最も高く、変成岩の1.3 mg/l、デイサイトの0.8 mg/l、花崗岩の0.5 mg/lの順に低下する。変動係数はデイサイトの0.55が最低で、花崗岩の1.67、変成岩の1.44、堆積岩の1.08がやや高い。

Na⁺: 堆積岩と変成岩がそれぞれ11.8 mg/lと11.1 mg/lと高く、花崗岩の8.4 mg/l、デイサイトの3.8 mg/lの順に低くなる。変動係数は変成岩の0.45が最高で堆積岩と花崗岩の0.38、デイサイトの0.16の順に低くなる。

K⁺: 変成岩の3.5 mg/lが最も高く、堆積岩の1.8 mg/l、デイサイトの1.1 mg/l、花崗岩の0.9 mg/lの順に低下する。変動係数は最高の花崗岩(0.68)と最低のデイサイト(0.42)との間に大きな差がない。

Ca²⁺: 変成岩と堆積岩がそれぞれ131 mg/lと116 mg/lと高いのに対して花崗岩の8.0 mg/lとデイサイトの5.9 mg/lは二桁小さく、ヒストグラムにおけるバイモーダルな分布に対応する。変動係数は花崗岩の1.09が最高で変成岩の0.95、堆積岩の0.72の順に低下し、デイサイトは0.13と極端に低い。

Mg²⁺: 変成岩の55.0 mg/lが突出して高く、堆積岩の9.4 mg/l、デイサイトの1.4 mg/l、花崗岩の0.8 mg/lの順に低くなる。Ca²⁺とともに地質グループ間の変動幅が最も大きい陽イオン中である。変動係数は変成岩の1.30が突出して大きく、花崗岩の0.68と堆積岩の0.59がそれに続き、デイサイトは0.05と極めて小さい。

t.Fe: 変成岩が0.4 mg/lとやや高いほかは、いずれも0.0~0.1 mg/lと低い。

Mn²⁺: 変成岩が2.2 mg/lと突出して高いほかは、いずれも0.00~0.02 mg/lと低い。

このような湧水水質の特徴を地質グループ別にまとめると、以下ようになる。

1) デイサイト質火砕流堆積物: 総溶存イオン量(1.2 meq/l)と電気伝導度(46 μS/cm)が最も小さいほか、F⁻(0.04 mg/l)、Cl⁻(1.9 mg/l)、SO₄²⁻(1.4 mg/l)、Na⁺(3.8 mg/l)、Ca²⁺(5.9 mg/l)も他のいずれの地質グループよりも小さい。pHは7.0+/-0.5と中性で、酸化還元電位、溶存酸素濃度ともに比較的高い。主要陰イオンはHCO₃⁻で陰イオンの84%を占める。陽イオンの主体は構成比49%を占めるCa²⁺だがNa⁺(同28%)とMg²⁺(同19%)の割合も比較的高い。全般に変動範囲が狭く、電気伝導度、酸化還元電位、HCO₃⁻、SO₄²⁻、

Ca²⁺、Mg²⁺など多くの成分で最も小さな変動係数をもつ。トリリニアードイアグラム(第6図)上では、全ての測定値がアルカリ土類炭酸塩型の領域内にプロットされる。

2) 堆積岩: 総溶存イオン量(13.5 meq/l)と電気伝導度(391 μS/cm)は変成岩に次いで高い。HCO₃⁻(73.5 mg/l)、NO₃⁻(2.6 mg/l)、Na⁺(11.8 mg/l)は他のいずれの地質よりも高い。pHは8.0+/-0.2と弱アルカリ性を示し、酸化還元電位は比較的低く、溶存酸素濃度は比較的高い。陰イオンでは構成比78%のSO₄²⁻が、陽イオンでは構成比81%のCa²⁺がそれぞれ卓越するほか、HCO₃⁻(同19%)、Mg²⁺(同11%)の割合も多い。比較的大きな変動係数をもつ成分が多い。トリリニアードイアグラム(第6図)上では、全ての測定値がアルカリ土類非炭酸塩型の領域内にプロットされる。

3) 変成岩: 総溶存イオン量(22.1 meq/l)と電気伝導度(653 μS/cm)が最も大きいほかF⁻(0.24 mg/l)、Cl⁻(6.5 mg/l)、SO₄²⁻(509 mg/l)、K⁺(3.5 mg/l)、Ca²⁺(132 mg/l)、Mg²⁺(45 mg/l)も他のいずれの地質よりも大きい。pHは3.7-8.1と酸性から弱アルカリ性までの広い範囲を示す。酸化還元電位、溶存酸素濃度ともに比較的高い。陰イオンでは構成比94%のSO₄²⁻が卓越し、陽イオンでは構成比61%のCa²⁺と同34%のMg²⁺が優勢である。全般に変動範囲が大きく、pH、電気伝導度、酸化還元電位、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Mg²⁺など多くの成分で最も大きな変動係数をもつ。トリリニアードイアグラム(第6図)上では、全ての測定値がアルカリ土類非炭酸塩型の領域内にプロットされる。

4) 花崗岩: 総溶存イオン量(1.7 meq/l)と電気伝導度(71 μS/cm)がデイサイトに次いで小さいほか、NO₃⁻(0.46 mg/l)、K⁺(0.92 mg/l)、Mg²⁺(0.84 mg/l)も他のいずれの地質よりも小さい。pHは7.0-8.4と中性ないし弱アルカリ性で、酸化還元電位、溶存酸素濃度ともに比較的低い。主要陰イオンは構成比76%を占めるHCO₃⁻で、陽イオンではCa²⁺(同47%)とNa⁺(同43%)が優勢である。溶存酸素濃度、Cl⁻、NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺などの成分では大きな変動係数をもつ。トリリニアードイアグラム(第6図)上では、アルカリ炭酸塩型とアルカリ土類炭酸塩型の領域にまたがって測定値がプロットされる。

このように地質ごとに湧水の水質に差を生じる理由としては、構成鉱物や岩石の組織・構造などの違いに起因する地下水と周辺母岩との水-岩石反応の違いによる本質的な差以外にも、1) 地質の違いに関連した採掘法や採掘規模など操業上の相違点によって生じた水理条件の違いなどに起因する間接的・表面的な現象、2) 採水前の降雨状況、地形などの違いや人為的負荷などに起因する系統的な誤差、などの可能性も考えられる。まず1) について検討する。堆積岩や変成岩では対象とした採石

場の規模が相対的に大きいのに対し、デイサイトや花崗岩では比較的小規模な採石場が多い。採石場の規模の違いが試料採取の条件にもたらし得る最大の差は地表から採試地点までの深度、すなわち採取された湧水が岩盤内を通過する距離である。例えば調査対象中最も大規模な採石場 IWS 1 では残壁の比高が 220 m に達するのに対し、最も小規模な SR 1, SR 2 の比高は 30-40 m に過ぎず、両者には 5 倍以上の隔りがある。そのため、試料の湧水を採取した深度(残壁最上部から採取地点までの鉛直距離)についても IWS 1 では 120-200 m であるのに対し、SR 1, SR 2 では 25-40 m であり、やはり 5 倍程度の開きがある。しかし一方、深度 30 ないし 50 m で得られた各地質からの湧水(SR 1-7-W 1, SR 2-2, NH 1-1, HTC 1-3 L, HTC 1-4, KB 2-2, IND 1-3) 相互を比較すると、ほぼ同じ深度からの湧水であるにもかかわらず、その水質は前述した各地質グループの湧水の特徴を明瞭に示している。したがって、今回の調査全体を通じて得られた地質グループ間にみられた湧水水質の相違の原因は、その一部が採水深度の違いを反映したものである可能性を完全には排除できないものの、主として湧水が形成される場の地質の違いに求められるのが妥当であろう。つぎに 2) について検討する。まず、降雨状況などの水文条件の違いから発生し得る系統的な誤差については次項“湧水の水質変動の評価”で述べる同一湧水(NK 3-4)の 1 年間 12 回に及ぶ観測結果が参考になる。後述するように定点観測した NK 3-4 湧水では多くの溶存成分濃度の最大/最小比は 2 倍から 5 倍の間にあるものの、季節や降雨量と水質との明瞭な相関は見出せない。また、仮にそれらの間に相関が存在したとしても、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などの主要溶存成分に関して異なる地質グループ間にみられる 20 倍ないし 370 倍という大きな濃度差(第 6 表)は、定点観測でみられた変動幅(たかだか 5 倍)をはるかに上回っている。したがって、今回の調査全体を通じて得られた地質グループ間の湧水水質の差を、降雨状況などの水文条件の違いにより説明することは不可能である。また、地形の効果については評価が難しいが、水文条件と同様、いくつかの成分に関して地質グループ間にみられる大きな濃度差の主因を地形に求めるのは困難であろう。人為的負荷については、起砕用発破に用いられる硝酸爆薬によると思われる

NO_3^- 濃度の分析値の乱れが認められるが、その他の成分については問題ないと考えられる。以上をまとめれば、今回の調査で明らかになった地質グループ間にみられる湧水水質の差異は、地質以外の要因による系統的な誤差を原因とするのではなく、構成鉱物や岩石の組織など地質の違いに起因する地下水と周辺母岩との水-岩石反応の違いが原因となって生じたものであるといえる。

6.2 湧水の水質変動の評価

今回の調査では、NK 3-4 を除き、それぞれの湧水は 1 回の採水で得た試料のみが分析された。一般に湧水の水質は表流水の水質よりも変動幅が小さいが、1 回のみでの採水試料相互の水質比較がどの程度の範囲で有効かを知るために、調査対象の湧水から 1 カ所(七会村徳蔵の湧水: NK 3-4)を選び、1 年間にわたる 12 回の採水試料を分析しデータの変動幅を検討した。NK 3-4 の水質測定・分析結果と統計量を第 7 表に示す。

各成分の変動係数をみると、最も大きいのは NO_3^- の 1.84 で、 Br^- の 1.52、 SO_4^{2-} の 0.78 がそれに続く。多くの成分の変動係数は 0.5 から 0.2 の間にあり、最も小さいのは pH の 0.03 である。最大/最小比をみると、 NO_3^- と Br^- は最小値が定量限界以下のため算定できず、 SO_4^{2-} は 7.9 倍である。pH の最大/最小比は 1.1 倍であるが水素イオン濃度比にすると 7.4 倍となる。多くの溶存成分濃度の最大/最小比は 2 倍から 5 倍の間にあり、最も小さいのは Na^+ の 1.5 倍である。したがって、NK 3-4 での変動状態が他の地点の湧水と同程度であると仮定すれば NO_3^- や Br^- を除くほとんどの成分について、異なる湧水間の特定の成分に約 5 倍を超える濃度差がみられた場合、有意の差があると思なしてよいであろう。さらに、NK 3-4 湧水は、実際には採掘進行中の場所であったために、採水の都度湧水地点の位置や水みち、周囲の起砕状況などが異なっていた。したがって採掘が終了ないし休止中のより安定した条件の下にある湧水であれば、変動範囲はさらに小さいと推測される。なお、変動幅が最も大きい NO_3^- は、操業に用いられる爆薬の影響(小野, 1983)を受けている可能性が高い。

6.3 それぞれの地質で卓越する水質形成プロセス

それぞれの地質グループからの湧水の水質と湧水箇所

第 6 表 デイサイトで基準化した地質別の湧水の水質成分。略号は第 3 表と同じ。

Table 6 Dacite-normalized values for the concentration of each component in rock seepage for each geology. Abbreviations are the same as in Tab. 3.

	pH	Cond	ORP	DO	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
Dacitic tuff	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sedimentary	1.14	8.57	0.68	0.98	2.36	2.50	2.56	174.18	3.05	3.08	1.59	19.60	6.84
Metamorphic	0.93	14.33	1.03	0.86	0.91	6.00	3.48	371.31	1.60	2.91	3.14	22.16	32.82
Granite	1.14	1.56	0.86	0.72	1.25	5.50	2.36	2.15	0.55	2.19	0.84	1.35	0.61

第7表 定点(NK3-4)での水質分析結果とその統計量。略号は第3表と同じ。

Table 7 Temporal variation and statistical summary of each component in rock seepage taken from point NK3-4. Abbreviations are the the same as in Table 3.

year/month	Tw	Ta	Q	pH	Cond	ORP	DO	HCO3-	F-	Cl-	Br-	SO4--	NO3-	Na+	K+	Ca++	Mg++	t.Fe	Mn++
	C	C	i/min		μS/cm	mV	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l									
NK3-4-9707	24.1	24.9	33.1	8.63	336.0	165	8.5	109.0	0.08	2.44	0.02	68.7	1.23	6.29	1.88	57.20	8.59	0.00	0.00
NK3-4-9708	14.7	30.0	8.6	8.10	291.0	116	4.3	66.2	0.03	2.19	0.00	134.7	0.00	7.61	1.08	71.30	9.03	0.00	0.04
NK3-4-9709	18.6	22.4	5.0	7.89	499.0	157	5.7	119.6	0.07	2.43	0.00	162.7	0.49	7.41	2.15	98.10	13.56	0.00	0.00
NK3-4-9710	14.4	21.6	1.3	8.27	247.0	139	3.2	68.6	0.07	2.06	0.00	79.5	0.00	6.24	0.87	50.41	6.59	0.00	0.02
NK3-4-9711	13.2	13.8	3.0	8.31	411.0	212	9.5	119.3	0.05	2.27	0.00	164.1	0.01	7.35	1.22	91.47	14.52	0.00	0.00
NK3-4-9712	13.7	9.1	3.0	8.39	374.0	-3	3.3	67.7	0.06	2.11	0.00	163.3	0.00	7.09	1.02	84.54	10.65	0.00	0.07
NK3-4-9801	11.0	5.4	0.7	8.03	778.0	240	6.5	89.7	0.03	1.34	0.00	540.7	0.07	8.90	1.54	213.00	32.40	0.00	0.00
NK3-4-9802	10.8	11.2	1.1	7.88	293.0	150	5.2	135.7	0.05	2.48	0.02	106.3	0.02	7.02	0.94	68.63	12.71	0.00	0.01
NK3-4-9803	10.8	14.5	0.6	7.81	303.0	140	2.2	130.5	0.03	2.46	0.03	111.2	0.00	6.60	0.79	69.04	11.80	0.00	0.00
NK3-4-9804	13.0	25.5	0.7	8.18	317.0	65	5.1	117.4	0.07	2.86	0.07	117.5	0.95	7.12	0.97	74.59	11.24	0.00	0.00
NK3-4-9805	20.0	24.4	2.3	8.37	341.0	73	7.4	112.9	0.05	2.79	0.03	108.7	0.02	6.83	1.35	62.41	11.45	0.00	0.00
NK3-4-9806	15.4	26.0	2.0	7.76	721.0	96	2.8	107.4	0.07	1.18	0.00	380.1	0.00	9.58	2.49	209.30	25.06	0.00	0.00
NK3-4 mean	14.98	19.07	5.12	8.14	409.25	129.2	5.30	103.7	0.06	2.22	0.014	178.1	0.23	7.34	1.36	95.83	13.97	0.00	0.01
S. D.	4.06	7.89	9.10	0.27	172.18	65.97	2.32	24.64	0.02	0.51	0.022	139.7	0.43	0.99	0.55	55.55	7.40	0.00	0.02
S. D. / mean	0.271	0.414	1.778	0.033	0.421	0.511	0.437	0.238	0.324	0.230	1.519	0.784	1.840	0.135	0.404	0.580	0.530	#####	1.893
maximum	24.1	30.0	33.1	8.6	778.0	240.0	9.5	135.7	0.1	2.9	0.1	540.7	1.2	9.6	2.5	213.0	32.4	0.0	0.1
minimum	10.8	5.4	0.6	7.8	247.0	-3.0	2.2	66.2	0.0	1.2	0.0	68.7	0.0	6.2	0.8	50.4	6.6	0.0	0.0
max/min	2.23	5.56	58.07	1.11	3.15	####	4.31	2.05	2.67	2.42	####	7.87	####	1.54	3.15	4.23	4.92	#####	####

の周辺から採取した岩石の構成鉱物(第2表)に基づいて、各地質グループに特徴的な水質形成の主要なプロセスについて考察する。

変成岩グループは、溶存イオン総量が最も大きく、主要陰イオンとしてSO₄²⁻を、主要陽イオンとしてCa²⁺とMg²⁺を含む湧水を生じている。変成岩には、石英、斜長石、カリ長石、白雲母、黒雲母などの他に微粒の黄鉄鉱が含まれることが多い。黄鉄鉱は岩石の風化に際して、その酸化により関与する地下水を硫酸酸性化させ、緑泥石の分解などを促進させることが知られている(千木良, 1988, 1992)。変成岩からの湧水に含まれる多量のSO₄²⁻はこの黄鉄鉱の酸化で生じた硫酸根であり、同時に生じたH⁺は斜長石などの分解により消費され、その結果湧水中のCa²⁺濃度が増加したと考えられる。さらに、HTC1のように湧水中のMg²⁺濃度が高く岩石中に緑泥石を含む場合は、硫酸酸性水による緑泥石の分解も加わっていると思われる。一部の湧水は、黄鉄鉱の酸化により生じた硫酸のH⁺が消費の途上にあるため、低pHとなっていると考えられる。

堆積岩グループは、変成岩に次いで溶存イオン総量が大きく、主要陰イオンとしてSO₄²⁻とHCO₃⁻を、主要陽イオンとしてCa²⁺、Mg²⁺を含む湧水を生じている。堆積岩の構成鉱物は石英、斜長石、白雲母、黒雲母などを主とする他、黄鉄鉱や比較的多量の方解石が含まれることが多い。堆積岩に含まれる黄鉄鉱は、変成岩におけると同様、酸化により硫酸酸性水を生じて斜長石の分解や方解石の溶解を促進していると考えられる。また方解石は硫酸のH⁺を速やかに消費することによりpHを中性に維持するとともに、Ca²⁺とHCO₃⁻の濃度を増加させていると考えられる。

花崗岩とデイサイトはいずれも溶存イオンが微量であり、それらの電気伝導度は降水の全国平均値である10-15 μS/cm(玉置ほか, 1991)と比較しても数倍程度でしかない。斜長石、曹長石が主要な構成鉱物として含まれ、湧水の主要陰イオンがHCO₃⁻、主要陽イオンがNa⁺とCa²⁺であることから、炭酸による長石類の分解がこれらの地質における主要な水質形成プロセスと考えられる。

7. おわりに

今回の調査では、種々の地質の岩盤湧水の水質が、それぞれの地質グループに固有の特徴をもつことが明らかになった。地質ごとに特有な湧水の水質を形成するメカニズムについてはある程度予想はできるものの、それを実証するためには、より詳細なフィールドデータの収集とそれに基づく考察が必要であろう。また、今回の調査では酸化還元電位・溶存酸素濃度が高い試料が多いことから、比較的浅層の風化フロント周辺における周囲の母岩と反応中の地下水をみたものと考えられる。今後は、深度方向での水質変化の詳細な追跡、それらが地下で累帯分布をなしているであろう水-岩石相互作用のどのゾーンに相当する水か、そのような地下水の移動・進化に伴って岩石の構成鉱物がどのように変化するかなどを調査する必要がある。

謝辞 操業現場への立ち入り許可、調査へのご協力を頂いた(有)鈴木石材店、(有)益子商店、桜井産業(株)、新宿産業(株)、日本砕石(株)、塚田陶管(株)、多賀砕石工業所(株)、(有)山一鈴木、(有)山勝産業の関係者各位に

深謝申し上げる。

文 献

- 阿久津純(1957) 宇都宮付近の関東ローム(火山灰)層。地球科学, **33**, 1-11.
- 千木良雅弘(1988) 泥岩の化学的風化-新潟県更新統灰爪層の例-。地質学雑誌, **94**, 419-431.
- 千木良雅弘(1992) 建設工事における風化・変質作用の取扱い方 4. 軟岩の風化作用。土と基礎, **40(8)**, 71-79.
- 井伊博行・三沢伸也(1994) 松本トンネルの湧水とその周辺地下水の水質について。地下水学会誌, **36**, 13-29.
- 石橋弘道(1989) 水文地質調査の着眼点。地質と調査, 1989(3), 39-43.
- 石橋弘道, 山田憲夫(1986) トンネル湧水の湧出機構と水質-恵那山トンネルの場合-。ハイドロロジー, **16**, 18-26.
- 笠間太郎・鶴巻道二(1971) 六甲山地のトンネル湧水状況とその水質。応用地質, **12**, 16-28.
- 黒田和男・坂巻幸雄・望月常一・小尾五明(1981) 断層帯を伴う花崗岩に付随する地下水・湧水の水質について。応用地質, **22**, 118-131.
- 三木一美・吉沢 浦(1977) 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。土木学会論文報告集, **265**, 47-60.
- 宮崎一博・笹田政克・吉岡敏和(1996) 真壁地域の地質。5万分の1地質図幅, 地質調査所, 103p.
- 森田誠也・嶋田 純・長 久(1991) 深部結晶質岩中の地下水の化学的特性とその挙動(その1)-岩手県釜石鉱山大峰地域における地下水の水質と分類-。応用地質, **32**, 155-166.
- 小野武美(1983) 武甲鉱山の総合開発。石灰岩, **204**, 12-23.
- 嶋田 純(1985) 筑波トンネルの掘削に伴う結晶質岩中の地下水挙動と水質変化。ハイドロロジー, **15**, 42-54.
- Tagiri, M. (1971) Metamorphic rocks of the Hitachi district in the southern Abukuma Plateau. J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol., **65**, 77-103.
- 滝沢文教・笠井勝美(1986) 八溝山地。大森昌衛, 端山好和, 堀口万吉(編)日本の地質3-関東地方-, 共立出版, 63-66.
- 玉置元則, 加藤拓紀, 関口恭一, 北村守次, 田口圭介, 大原真由美, 森 淳子, 若松伸司, 村野健太郎, 大喜多敏一, 山中芳夫, 原 宏(1991) 日本の酸性雨の化学。日本化学会誌, 1991(5), 667-674.
- 通産省資源エネルギー庁(1987) 昭和61年度稀少金属鉱物資源の賦存状況調査報告書-笠間地域-, 175p.
- 吉田英人・高橋正樹(1991) 白河火砕流東部地域の地質。地質学雑誌, **97**, 231-249.

(受付: 1999年6月23日; 受理: 1999年9月3日)