

溶存成分組成から見た山地の水循環における水質変化 —新潟・山形県境金丸地域の例—

奥澤康一¹・関 陽児¹・内藤一樹²・亀井淳志³・
鈴木正哉¹・竹田幹郎¹・竹野直人¹・渡部芳夫²

Koichi Okuzawa, Yoji Seki, Kazuki Naito, Atsushi Kamei, Masaya Suzuki, Mikio Takeda, Naoto Takeno and Yoshio Watanabe (2008) Changes of geochemical characteristics of water in hydrological cycle in mountainous region—an example from the Kanamaru area, Niigata and Yamagata Prefectures, northeastern Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59(5/6), p. 271-298, 15 figs, 6 table.

Abstract: In order to clarify the change in the geochemical characteristics of water during hydrological cycle in mountainous and forested region, we studied chemical compositions of precipitation, streamwater, spring water and groundwater in the Kanamaru area, northeastern Japan, since 2002 to 2005. The groundwater was taken from 50 meters deep nine wells in a foot part of mountainous region where the Cretaceous granites and overlying Miocene sedimentary rocks are distributed. Each well was drilled through both the sedimentary rocks and granitic basement. The precipitation, streamwater and spring water were collected from the area surrounding the wells. The precipitation, streamwater and spring water show seasonal change in electric conductivity (EC) and concentrations of Cl^- and Na^+ ; they are higher in the winter season and lower in the summer and snow-melt seasons. The geochemistry of groundwater is characterized by increase of pH, EC and concentrations of Ca^{2+} and HCO_3^- and decrease of dissolved oxygen and Eh with increasing depth.

Keywords: water quality, groundwater, streamwater, spring water, precipitation, bore-hole, water cycle, mountains, Kanamaru area

1. はじめに

山地及び丘陵地は我国の国土面積の7割以上を占めており、山地を流下する渓流水の水質に関する知見は、水利用、防災、環境モニタリング等さまざまな分野に役立つ。それゆえに、山地渓流水の研究例は多く、インプットである降水から土壌下層に至る区間における水質転換過程の理解はかなり進んできた(田中・山崎, 1985; 平田・村岡, 1988; 内田ほか, 2001など)。

一方、降雨後の溪流の流量経時変化の観察(ハイドログラフ解析)からは、渓流水は降水が地表面を流下して到達した「表面流出」、地中に浸入した後に比較的浅い土層を流下して到達した降水からなる「中間流出」及びより深部に浸透した後に長い時間をかけて流出する降水からなる「地下水流出」の3つの成分があることが知られている(丸山・三野, 1999)。中間流出は更に「速い中間流出」と「遅い中間流出」に分けられるが、この「遅い中間流出」と「地下水流出」が、湧水期にも維持される溪流の基底流量を維持する「基底流出」を構成していると考えられている(丸山・三野, 1999)。基底流出の

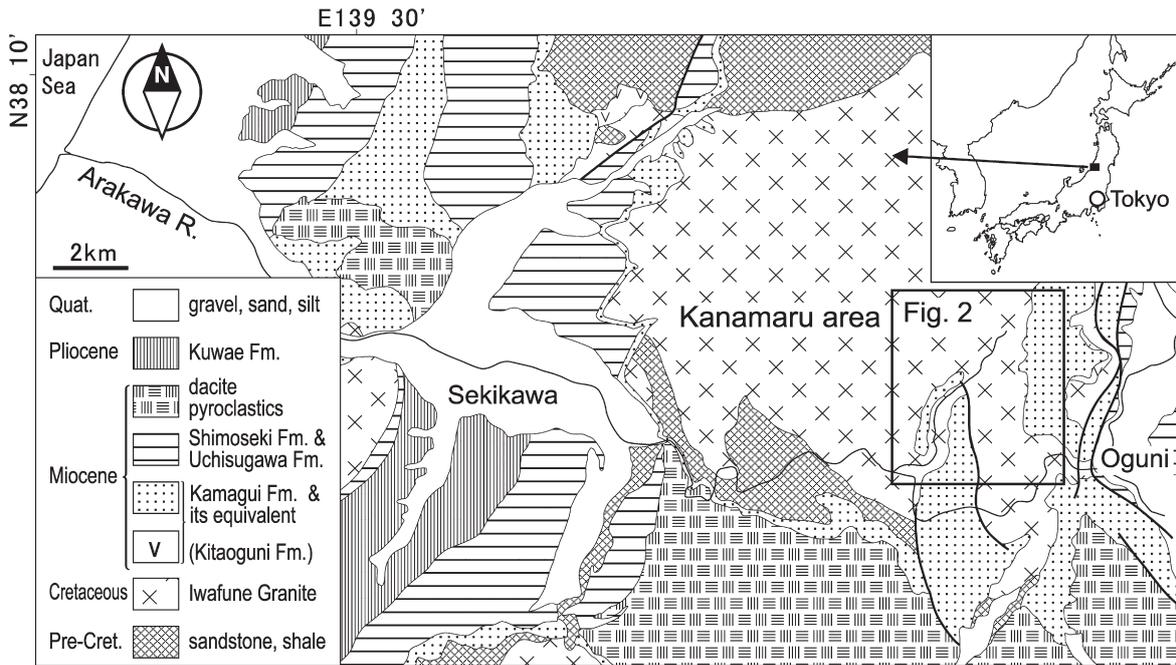
供給源となっている水は、岩盤風化部あるいはより深部の岩盤中に貯えられた地下水であろうと考えられている(Mulholland, 1993など)ものの、水循環の観点からその実態を捉えた研究例は少ない(例えばトンネル湧水水質の検討例: 嶋田, 1985; 井伊・三沢, 1994)。したがって、渓流水の水質形成機構の全貌を理解するためには、従来あまり研究されてこなかった岩盤風化部及び更に深部の岩盤中の地下水の水質と水理の実態を把握する必要がある。

そのため筆者らは、降水、渓流水、湧水に加えて、岩盤風化部を貫通してより深部の新鮮な岩盤まで掘削された孔井から得られた地下水をも対象とし、山地の渓流水の水質形成機構の全体像を明らかにすることを試みている。本論は、経済産業省受託研究の平成16年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査(放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分にかかる地質情報データの整備)報告書(深部地質環境研究センターによって新潟・山形県境の金丸地区(第1図)で行われていた研究)を基に、2005年末までに得られた降水、渓流水、湧水、孔内水試料の水質測定結果を含めて報告するものである。

¹地圏資源環境研究部門(Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)

²地質調査情報センター(Geoinformation Center, GSJ)

³高根大学総合理工学部(Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University)



第1図 金丸地域地質図 (内藤ほか, 2006 を一部改変) .

Fig. 1 Geological map of the Kanamaru area (Modified from Naito *et al.*, 2006).

2. 金丸地域の概略及び掘削エリアの地質

金丸地域 (第1図) は, 雨量年間約2900mm, 年平均気温約11℃ (金丸地域から最も近い気象庁のアメダス設置地点「小国」における平年値: 気象庁, 2001) の湿潤温暖気候下にある山岳森林地域である. 12月後半から3月前半には最大で2~3mの積雪があり, 3月後半から5~6月にかけてが融雪期となる. また, 金丸地域は温暖積雪地 (鈴木・遠藤, 1991) に相当し, 春の融雪期のみならず, 冬季間にも融雪が頻発する. 金丸地域の標高は海拔150~800mの間にあり, 孔井が掘削された地区 (以下「掘削エリア」と呼ぶ) の標高は270~320mである. 金丸地域の中心を荒川支流の上ノ沢がおおむね南南東方向に流下する (第2図).

調査地域周辺の地質は, 足尾帯に属する先白亜系の堆積岩類とそれらを貫く岩船花こう岩に対比される花こう岩類を基盤とし, その上に中新統・鮮新統の堆積岩類が載る (第1図). 金丸地域では主にアルコース質の砂岩, 礫岩が基盤の花こう岩類を覆っており, 今市砂岩礫岩互層と呼ばれている (島津ほか, 1963). 本層は中部中新統とされており (島津ほか, 1963), 本地域西方の関川周辺の釜杭層 (西田・津田, 1961) 及び新潟油田地域の津川層 (門田ほか, 1961) に対比されている. 釜杭層や今市砂岩礫岩互層中には, 主に1960年代に行われたウラン探鉱によりウランの濃集部が認められている (佐藤ほか, 1960; 門田ほか, 1961; 浜地・五十嵐, 1963; 浜地・小尾, 1969など).

掘削エリアは上ノ沢中流, 東岸側支流の崩沢の右岸

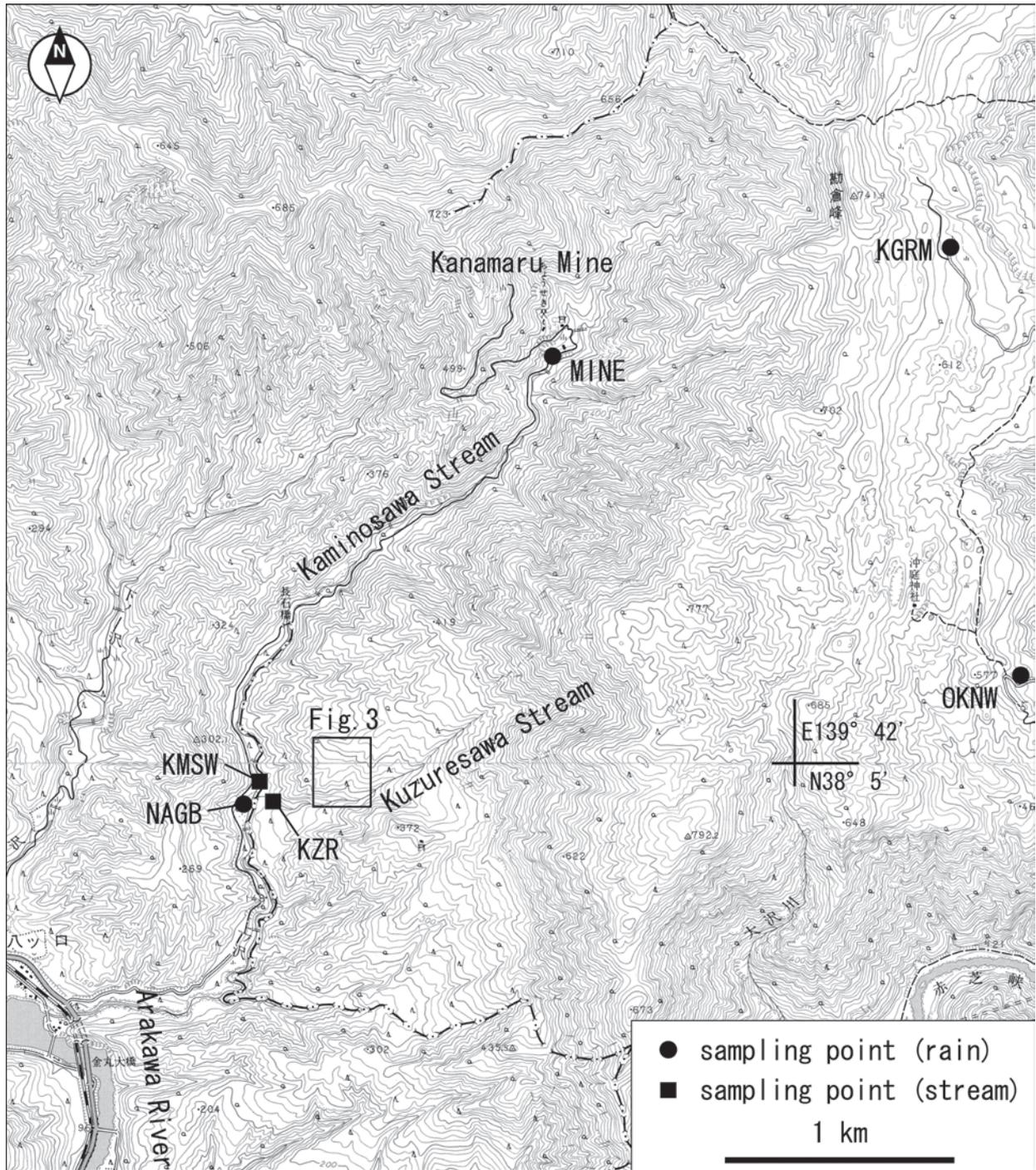
(北) 側に位置し (第3図), 12本の孔井が掘削された. 孔井はすべて鉛直に掘削され, ウラン鉱徴が知られているH露頭 (佐藤ほか, 1960) の北方約30mを南端として, おおよそN20° E方向に沿って展開され, 東西に走る小尾根までの間に配置されている (第3図). 基盤の花こう岩は, カリ長石の斑晶を含む斑状黒雲母花こう岩からなり, 不整合面直下には厚さ5m程度で測方連続性のよい赤褐色の風化部が認められる. この風化部には赤鉄鉱によって充填される微細な割れ目が発達する.

掘削エリア内に分布する今市砂岩礫岩互層は, アルコース質の含礫粗粒砂岩, 花こう岩・変成岩を主な礫として含む細~中礫岩, 暗灰色シルト岩, 及びそれらの互層から構成されており, 岩相の側方変化に富む (第4図). 不整合面及び今市互層の層理面は, 全体として掘削エリアの地形と調和的にゆるく南に傾斜している.

Br. M2よりも南側の井戸では, 深度10.5m付近に厚さ10cm程度の暗灰色シルト岩がはさまれる. このシルト岩中には直径最大数mmの自形の黄鉄鉱結晶及び黒色炭化物の細片が認められ, 最大90ppmに達するUの濃集が認められている (渡部ほか, 2003). 小尾根上で掘削されたBr.4では, 不整合面直下の花こう岩 (深度33.5m付近) 中に最大250ppmに達するUの濃集が認められている (渡部ほか, 2003).

3. 調査及び分析方法

降水, 渓流水, 湧水, 孔内水を対象とし, 異なる気象水文条件に対応して出現すると予想される様々な水質の



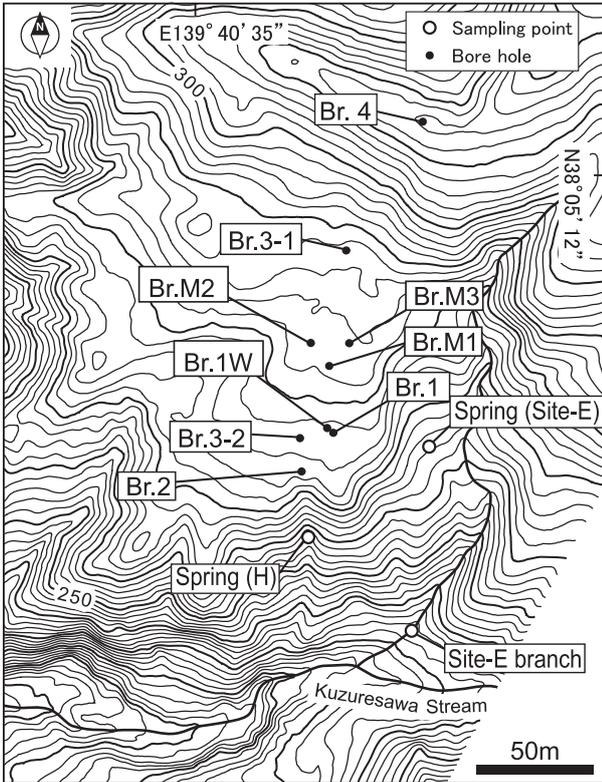
第2図 水試料採取地点. 基図は国土地理院発行 1:25,000 地形図「船渡」及び「小国」.

Fig. 2 Localities of the sampling points. Base map is taken from Geographical Sheet maps of 1:25,000 Funato and Oguni by the Geographical Survey Institute.

全容を把握することを目的として、1～2ヶ月に1回の頻度で水質測定と採水を行った。水温、pH、電気伝導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位の測定にはマルチ水質プローブ（堀場製作所製、W-22XD）を使用した。溶存成分分析に使用する水試料は、採取当日に0.45 μmのメンブレンフィルターを用いてろ過した。HCO₃⁻濃度は、pH4.8-アルカリ度から計算した。主要陰イオン

濃度 (F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) の分析にはイオンクロマトグラフィー（島津製作所製、PIA-1000）を用いた。主要陽イオン濃度 (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) 及び微量溶存成分濃度 (Al, Si, Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Pb, Zn, As, Br, Rb, Sr, Y, Sb, I, Cs, Ba, Th, U) の分析にはICP-MSを使用し、測定はカナダのActlabs社で実施した。ICP-MSで分析した項目のうちCa²⁺の検出限界は突出

して高い (0.7mg/l) ため、 Ca^{2+} 濃度が検出限界付近 (2.0mg/l 以下) の試料については、原則として ICP (セイコー電子製, SPS7000) を用いて Ca^{2+} 濃度の再分析を行った。各試料の採取地点及び採取方法を以下に述べる。



第3図 金丸掘削エリアの孔井配置及び水試料採取地点。

Fig. 3 Bore-hole arrangement and sampling locations.

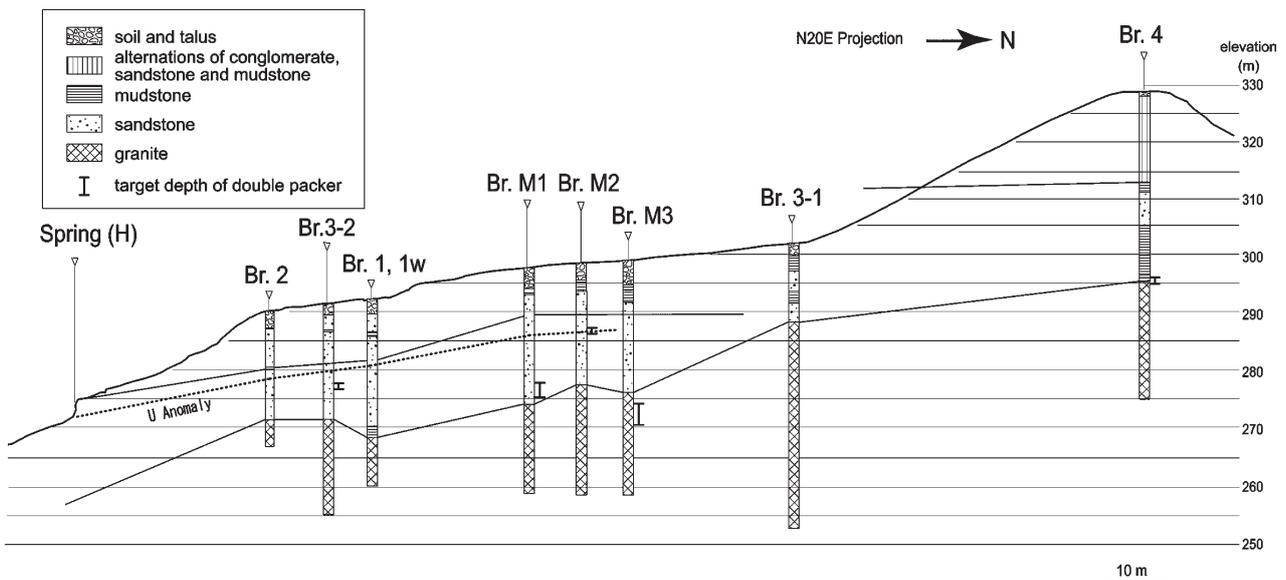
3.1 降水

地域差及び標高の違いによる組成変化を検討するため、互いに2~3km離れた4地点にて雨水試料を採取した (第1表, 第2図)。掘削エリアに近く、もっとも標高の低い調査地点が上ノ沢第2砂防ダム付近 (NAGB)、上ノ沢の源流部に近く NAGB よりもやや標高の高い地点が金丸鉱山入口 (MINE)、崩沢の源流部に近く標高の高い地点が沖庭地区 NHK 電波中継所 (OKNW)、最も標高の高い調査地点が勘倉嶺 (KGRM) である。上空が十分に開き、直達雨のみを捕集できる地点を選び、500ml のポリエチレン製試料瓶 (以下「試料瓶」と呼ぶ) を接続した直径18cm のプラスチック製ロートを用いて雨水を捕集した。1回の降雨イベントにつき1回または2回雨水を採取し、降雨中ないし降雨終了後24時間以内に回収した。雨水試料の pH 及び電気伝導度は試料採取当日に測定された。

降雪試料は、掘削エリアの Br. M1, Br. M2, Br. M3 の中間点付近 (第3図) の上空が開けた地点で、降雪中もしくは降雪終了直後の融雪開始前に、積雪の表層から採取した。採取した雪は試料瓶の栓を閉じたまま室温で溶かし、採取当日に pH 及び電気伝導度の測定を行った。

3.2 渓流水

渓流水試料の採取は、掘削エリア近傍の湧水が流入している2つの渓流及び金丸地区の主要な渓流である上ノ沢の計3渓流において行った (第2表, 第2図)。調査地点は、掘削エリアの南を西流する崩沢の流末 (以下「崩沢流末」と呼び、略号を KZR とする)、崩沢が流入する直上流の上ノ沢 (以下「上ノ沢基準点」と呼び、略号を KMSW とする)、サイト東湧水が合流した後の、掘削エリア東方を南流する崩沢の枝沢の流末である (以下



第4図 金丸掘削エリアの地質断面図。

Fig. 4 Geological section of the Kanamaru drilling site.

「サイト東枝沢」と呼び略号を Site-E branch とする)。それぞれ試料瓶に直接採水すると同時に、マルチ水質プローブを溪流に投入して水温、pH、電気伝導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位の測定を行った。

3.3 湧水

湧水試料の採取は、掘削エリア近傍の湧出箇所2地点において行った(第3表)。一つは、H露頭のウラン濃集部直下の湧水であり、以下「H露頭湧水(Spring(H))」と呼ぶ。他は掘削エリア東側を流れる小枝沢の源流であり、以下「サイト東湧水(Spring(Site-E))」と呼ぶ(第3図)。H露頭湧水での採水には、ポーラスカップを使用した。ポーラスカップは先端に透水性セラミックカップを装着した長さ1mの樹脂製ロッド(廣瀬, 1996)で、湧出箇所の風化岩盤にハンドオーガーで掘削した直径約2cm、奥行き約1mの水平孔に挿入した。水試料は、ポーラスカップと、手動式真空ポンプを用いて減圧吸引されたガラス製フラスコを接続した状態で1~3日間放置して採取した。試水のpH及び電気伝導度は、採試当日測定された。

サイト東湧水は、今市砂岩礫岩互層の砂質岩から湧出

第1表 降水採取地点の概略。

Table 1 Description of sampling sites of precipitation.

Name of sampling point	Description of sampling point	Elevation of sampling point (m)
OKNW	Okiniwa relay station NHK	540
KGRM	End of forest road at Kangramine	630
NAGB	Second sediment control dam of the Kaminosawa Stream	170
MINE	Entrance of the Kanamaru mine	330
Snow	Boring site	280

第2表 湧水採取地点の概略。

Table 2 Description of sampling sites of spring water.

Name of sampling point	Description of sampling point	Elevation of sampling point (m)	Catchment area (km ²)
KZR	End of the Kuzuresawa Stream	170	1.01
KMSW	Midstream of the Kaminosawa Stream just upstream of the confluence with the Kuzuresawa Stream	170	3.24
Br. Site-E branch	End of the stream east to the boring site	233	0.03

第3表 渓流水採取地点の概略

Table 3 Description of sampling sites of streamwater.

Name of sampling point	Description of sampling point	Elevation of sampling point (m)	Way of sampling
Spring (H)	Outcrop "H" (Sato et al., 1960)	258	porous cup
Spring (Site-E branch)	End of forest road at Kangramine	265	bottled directly from the spring

しており、同層を集水域に持つ溪流の典型的な源頭湧水であると考えられる。サイト東湧水では、定常的な湧出地点にて採水すると同時に、マルチ水質プローブを湧水に投入して水温、pH、電気伝導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位の測定を行った。

3.4 地下水

掘削エリアでは地表面と堆積岩の層理面のいずれもが南南西方向に向かって緩傾斜しているため(第4図)、地下水もその構造と調和的に北北東から南南西方向に流れていると予想される。地下水を採取した孔井の深さは30~55mで、H露頭を通る北北東—南南西方向に展開されている(第3図)。

この報告では、2002年度に掘削した3本(Br. 1, Br. 1W, Br. 2)と、2003年度に掘削した6本(Br. 3-1, Br. 3-2, Br. 4, Br. M1, Br. M2, Br. M3)の計9本の孔井から採取した地下水試料を扱う(第4表、第3図)。Br. 1, Br. 1W, Br. 2, Br. 3-1は、有孔塩化ビニール管を用いて岩着深度以深をストレーナー仕上げとした(第4表)。Br. 3-1では深部の花こう岩中の開放亀裂から顕著な逸水が生じたため、2003年10月に深度15mに止水パッカーを設置した上で、その上部の深度14.5mまでを有孔塩化ビニール管を用いてストレーナー仕上げとして水質観測、試料採取を行った。また、Br. 3-1には地表付近の崩落防止のための鉄製ケーシングを深度3.6mまで挿入した。Br. 1, Br. 1W, Br. 2, Br. 3-1ではマルチ水質プローブを用いて水質検層を行った。水質検層は、孔内水位面直下にプローブを降ろし、最低30分間孔内水に浸してセンサーの安定を確認した後、毎分0.25~0.5mの速度で降下しつつ、0.25~0.5m間隔で実施した。水質検層を行った結果水質の成層構造が認められた場合には各層の代表的深度から、成層構造が認

第4表 金丸掘削エリアの各孔井の概略. 孔井頂部の標高は, Br. 2を基準 (0m) としている. ST: ストレーナー仕上げ, DP: ダブルパッカー設置.

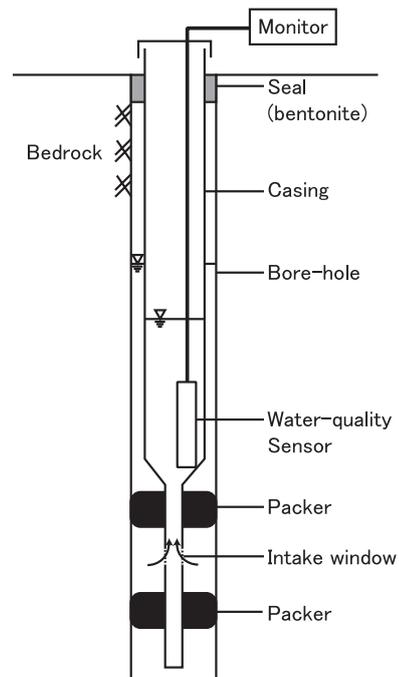
Table 4 Description of wells in the Kanamaru site. ST: strainer, DP: double packer.

Bore-hole No.	Drilling period	Bottomhole Depth (GL-m)	Wellhead elevation* (m)	Installation	Drilling bit diameter (mm)	Casing	Outline of Geology
Br. 1	Sep. 2002	35.7	2.06	ST (Bottom of ST: GL-29.3 m)	165 (GL-0 to 13 m), 123 (GL-13 to 28 m), 105 (GL-28 to 35.7 m)	VP100	0.0-0.6 m: soil, 0.6-2.6 m: pebbly siltstone, 2.6-26.0 m: arkosic pebbly sandstone intercalated with mudstone, 26.0-35.7 m: granite
Br. 1W	Oct. 2002	28.0	2.06	ST (Bottom of ST: GL-28.0 m)	165 (GL-0 to 7 m), 123 (GL-7 to 22 m), 105 (GL-22 to 28 m)	VP100	0.0-0.6 m: soil, 0.6-2.6 m: pebbly siltstone, 2.6-26.0 m: arkosic pebbly sandstone intercalated with mudstone, 26.0-28.0 m: granite
Br. 2	Sep. 2002	30.0	0.00	ST (Bottom of ST: GL-29.3 m)	123	VP100	0.0-0.5 m: soil, 0.5-3.0 m: pebbly siltstone, 3.0-18.6 m: arkosic pebbly sandstone, 18.6-20.0 m: granitic conglomerate, 20.0-30.0 m: granite
Br. 3-1	Jul-Aug. 2003	50.0	11.43	ST (Bottom of ST: GL-14.5 m)	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-2.4 m: talus, 2.4-5.6 m: mudstone, 5.6-8.4 m: arkosic pebbly sandstone, 8.4-10.3 m: mudstone, 10.3-13.9 m: arkosic pebbly sandstone, 13.9-50.0 m: granite
Br. 3-2	Aug-Sep. 2003	23.0	2.24	DP (Packer section: GL-14.1 to 15.2 m (open crack in sandstone))	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-2.7 m: talus, 2.7-19.6 m: arkosic pebbly sandstone, 19.6-23.0 m: granite
Br. 4	Jul-Aug. 2003	55.0	38.16	DP (Packer section: GL-32.9 to 34.0 m (U concentrated granite))	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-1.0 m: talus, 1.0-16.0 m: alternations of conglomerate, sandstone and mudstone, 16.0-18.0 m: mudstone, 18.0-24.0 m: arkosic pebbly sandstone, 24.0-33.1 m: mudstone, 33.1-33.5 m: arkosic sandstone, 33.5-55.0 m: granite
Br. M1	Jul-Aug. 2002	40.0	7.59	DP (Packer section: GL-19.5 to 22.0 m (fresh sandstone))	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-3.8 m: talus, 3.8-4.7 m: sandstone, 4.7-13.0 m: arkosic pebbly sandstone intercalated with thin layers of mudstone, 13.0-13.7 m: mudstone, 13.7-24.3 m: arkosic pebbly sandstone, 24.3-40.0 m: granite
Br. M2	Aug-Sep. 2003	39.8	7.50	DP (Packer section: GL-9.9 to 10.9 m (U concentrated layer in sandstone))	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-3.0 m: talus, 3.0-5.0 m: mudstone, 5.0-21.3 m: arkosic pebbly sandstone intercalated with thin layers of mudstone, 21.3-39.8 m: granite
Br. M3	Aug-Sep. 2003	40.6	8.25	DP (Packer section: GL-24.8 to 28.5 m (upper granite))	86	VP65	0.0-0.2 m: soil, 0.2-4.2 m: talus, 4.2-7.3 m: mudstone intercalated with sandstone, 7.3-22.6 m: arkosic pebbly sandstone intercalated with mudstone, 22.6-40.6 m: granite

* Wellhead elevation indicates relative elevation from the wellhead of Br. 2.

められない場合は, 上部・下部の2深度もしくは上部・中部・下部の3深度からメッセジャー式任意深度採水器 (東京硝子器械製, ISM-400) (内藤ほか, 2006) を用いて採水した.

本掘削エリアでは, 深部に向かって段階的に地下水の水理水頭 (=位置水頭+圧力水頭) が低下するため, 孔井を通じて堆積岩部の地下水が花こう岩中へ流れ込んでしまうことがある (内藤ほか, 2006). そこで, 原位置の地下水水質を把握するために, Br. 3-2, Br. 4, Br. M1, Br. M2, Br. M3には, それぞれのターゲット深度にダブルパッカーを設置した (第4表). Br. 3-2及びBr. 4は, 掘削直後は有孔塩化ビニール管を用いたストレーナー仕上げとし, マルチ水質プローブを用いて0.25 m 間隔で水質検層を行い, 2深度もしくは3深度から地下水試料を採取した. その後, 掘削から2~3ヶ月経過した2003年12月からダブルパッカーを設置した. 一方, Br. M1, Br. M2, Br. M3では, 掘削直後に透水試験等の水理実験を実施し, 2004年12月にダブルパッカーを設置して採水・水質測定を開始した. ダブルパッカーのターゲットは, Br. 3-2では堆積岩中の透水性亀裂部, Br. 4では花こう岩最上部のウラン濃集部, Br. M1では堆積岩下部, Br. M2では堆積岩中のウラン濃集部, Br. M3では花こう岩上部である (第4図). ダブルパッカーを設置した孔井では, 2つのパッカーによって挟まれた区間の地下水が無孔塩化ビニール製のケーシングに流入する構造とした (第5図). マルチ水質プローブがパッ



第5図 ダブルパッカー設置孔井の概要図.
Fig. 5 Sketch of the double packer system.

カー区間のケーシングよりも太いため、水温、pH、電気伝導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位の測定はパッカー区間の直上で行い(第5図)、採水は井戸用採水器(東京硝子器械製、IS-200)を用いてパッカー区間内のストレーナー位置まで採水器を降ろして実施した。Br. 3-2及びBr. M2は排水後の水位の回復が早いので、測定前におよそ10L排水し、より新鮮な地下水をケーシング内に呼び込んでから水質測定及びサンプリングを行った。

なお、各孔井の掘削時には、地下水への掘削水の混入程度を評価できるようにするため、掘削水中のヨウ素イオン濃度が約50ppmになるようにヨウ化カリウムを投入した。

4. 水質測定結果

金丸地区の降水、渓流水、湧水、地下水の各調査地点における水質項目・溶存成分濃度の平均値、標準偏差、変動係数(=標準偏差/平均値)等の統計値を第5、6表に示す。

4.1 降水

計4地点で採取された雨水の各地点での試料数は、6ないし27であり、合計66試料の水質が測定された。これらのpHの範囲は3.9～6.0、平均値は4.8である。大気中のCO₂と純水とが平衡に達した場合のpHである5.6よりも低いpHを示す雨を酸性雨と呼ぶが、雨水試料に占める酸性雨の割合は93%に達する。電気伝導度(EC25)の範囲は4～89μS/cm、平均値は22μS/cmである。溶存成分総量は0.0～0.7me/lの範囲にある。主要溶存成分組成は、各地点ともに陰イオンがCl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻を主体とし、陽イオンがNa⁺を主体とする。同時に採取した雨水の主要溶存成分の地点間の差は小さいが、同一地点であっても採取時期が異なると溶存成分濃度の変動幅は大きく、渓流水、地下水と比較してすべての溶存成分の変動係数が高い(第5表)。微量溶存成分組成は、Zn、Cu、Alに比較的富む傾向がある(平均で10μg/l以上)。各地点間で濃度が似ている成分が多いが、地点間で差がみられる成分もあり、ZnとCu濃度は、標高の高いOKNW及びKGRMにて採取した雨水の方が他の2地点よりも高い傾向が見られた(第6表)。

降雪水は、掘削エリアで採取した計3試料を測定した。これらは3年間の各冬季の典型的な冬型気圧配置下で採取されたものである。これらのpHの範囲は4.6～6.2、平均値は4.6である(第5表)。電気伝導度(EC25)は97～114μS/cm、溶存成分総量は1.2～1.3me/lの範囲にあり、いずれも雨水と比べて数倍高い。主要溶存成分組成は、陰イオンがCl⁻を主体とし、陽イオ

ンがNa⁺を主体とする。それぞれ雨水と比べて10倍以上の高い濃度で含まれる。その他の主要イオン濃度も、HCO₃⁻を除けば雨水よりも高い。微量溶存成分組成は、ほとんどの元素が雨水と似た濃度を示すが、Br、Srに比較的富む傾向がある。降雪水の試料数は少ないものの、電気伝導度や溶存成分組成のばらつきは非常に小さい。

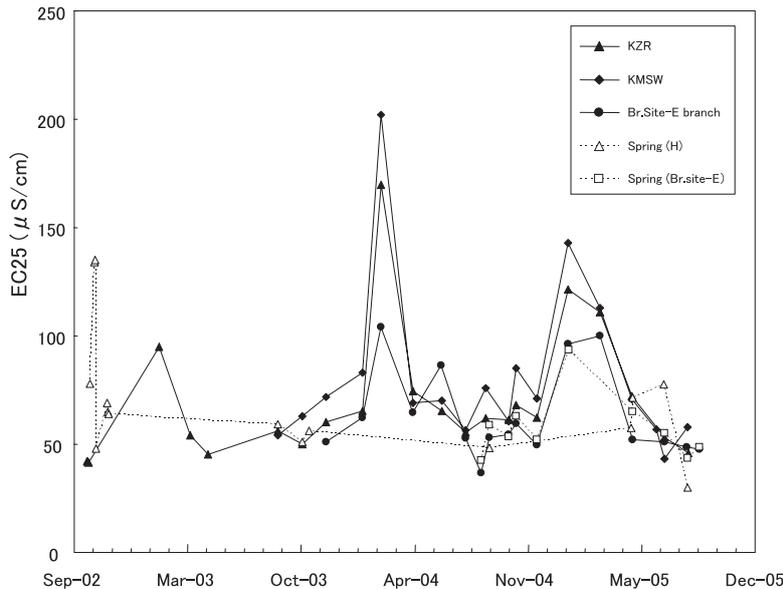
降雪水は、雨水と比べて溶存成分総量が大きく、特にNa⁺、Cl⁻濃度が高い特徴を持つ(第5表)。金丸地域における流域への水のインプットは、冬季及び融雪期にはNaCl濃度の高い融雪水、夏季にはNaCl濃度の低い雨水によって構成される。

4.2 渓流水

計3地点で採取された渓流水の各地点での試料数は17ないし25であり、合計63試料の水質が測定された。これらのpHの範囲は5.7～6.9、平均値は6.3である(第5表)。また、pHの季節的な変化は認められない。電気伝導度(EC25)の範囲は37～202μS/cmであり、電気伝導度の経時変化は各水系とも類似した季節変化を示す。渓流水の電気伝導度は冬季に高い傾向があり、100μS/cmを超えるのは1～3月の冬季に採取された試料に限られるが、冬季でも電気伝導度が低いこともある(第6図)。溶存成分総量は0.5～1.3me/lの範囲にある。pH、電気伝導度、溶存成分総量ともに上ノ沢基準点と比較的高く、サイト東枝沢が最も低い傾向がある。陰イオンはHCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻を主体とし、陽イオンはNa⁺、Ca²⁺、Mg²⁺を主体とする。HCO₃⁻とCa²⁺濃度は水系ごとに異なり、pH、電気伝導度と同様に上ノ沢で濃度が高く、サイト東枝沢で最も低い。微量溶存成分組成は、水系間でそれほど変わらないが、上ノ沢基準点でU濃度が高い傾向がある。流域に掘削エリアを含まない上ノ沢のI濃度は数μg/l程度であり、サイト東枝沢のI濃度も上ノ沢の渓流水と同程度であった。

4.3 湧水

湧水は、2箇所10及び24試料が採取され、水質が測定された。なお、両地点とも冬季は積雪のために観測が困難なため、試料の大半は、夏季及び融雪期に得られたものである。これらのpHの範囲は4.0～6.7、平均値は5.3である(第5表)。電気伝導度(EC25)は30～135μS/cmの範囲にある。サイト東湧水の電気伝導度は冬季に高く、各渓流水と類似した季節変化を示す。一方、H露頭湧水は夏季に高い値を示すなど、渓流水とは異なる経時変化を示す(第6図)。溶存成分総量は0.4～1.0me/lの範囲にある。pH、電気伝導度、溶存成分総量ともにH露頭湧水の方が、サイト東湧水よりも高い傾向がある(第5表)。両湧水ともに主要溶存成分はCl⁻、SO₄²⁻、Na⁺を主体とするが、Cl⁻以外の各イオン濃度は、H露頭湧水の方がサイト東湧水よりもやや高



第6図 金丸地域の渓流水及び湧水の電気伝導度の経時変化。

Fig. 6 Temporal change of electric conductivity (EC25) of streamwater and spring water in the Kanamaru area.

い傾向がある。微量溶存成分組成は、両地点とも、Si, Al, Br 濃度が比較的高いが、各成分ともに H 露頭湧水の方が高い傾向がある。特に、Fe, Cu, Pb, Zn, Sb, Th, U 濃度は、H 露頭湧水の方が著しく高い。孔井の掘削水にトレーサーとして投入した I 濃度は、H 露頭では最大で $175 \mu\text{g/l}$ と高く、掘削水の混入が認められた。一方、サイト東湧水の I 濃度は渓流水とほぼ同じであり、掘削水の明らかな混入は認められなかった。

4.4 地下水

地下水試料は計9本の孔井から合計263試料が採取された。地下水の水質パラメーターや溶存成分組成は、孔井や深度に応じて異なる傾向を持つが、掘削エリアの南部に掘削された孔井群 (Br. 1, Br. 1W, Br. 2, Br. 3-2) の地下水は、おおよそ互いに類似した水質を持つ。そのため、地下水質は掘削エリアの南部と北部に分けて記載する。

4.4.1 掘削エリア南部の地下水

掘削エリア南部の孔井群 (Br. 1, Br. 1W, Br. 2, Br. 3-2) から得られた地下水の pH の範囲は $3.4 \sim 6.5$ 、電気伝導度 (EC25) の範囲は $21 \sim 799 \mu\text{S/cm}$ 、溶存酸素濃度 (DO) の範囲は $3.0 \sim 11.8\text{mg/l}$ 、酸化還元電位 (Eh) の範囲は $-4 \sim +669\text{mV}$ である (第5表)。岩着深度以深をストレーナー仕上げとした孔井 (Br. 1, Br. 1W, Br. 2 及びダブルパッカーが設置される前の Br. 3-2) では、水質パラメーターや溶存成分組成の深度方向への変化が見られることが多い (第7～10図)。すなわち、深度方向に溶存酸素濃度、Eh が低下し、pH、電気伝導度が上昇する。各水質パラメーターは深度方向へ段階的に変化し、地下水質が成層構造を持つこ

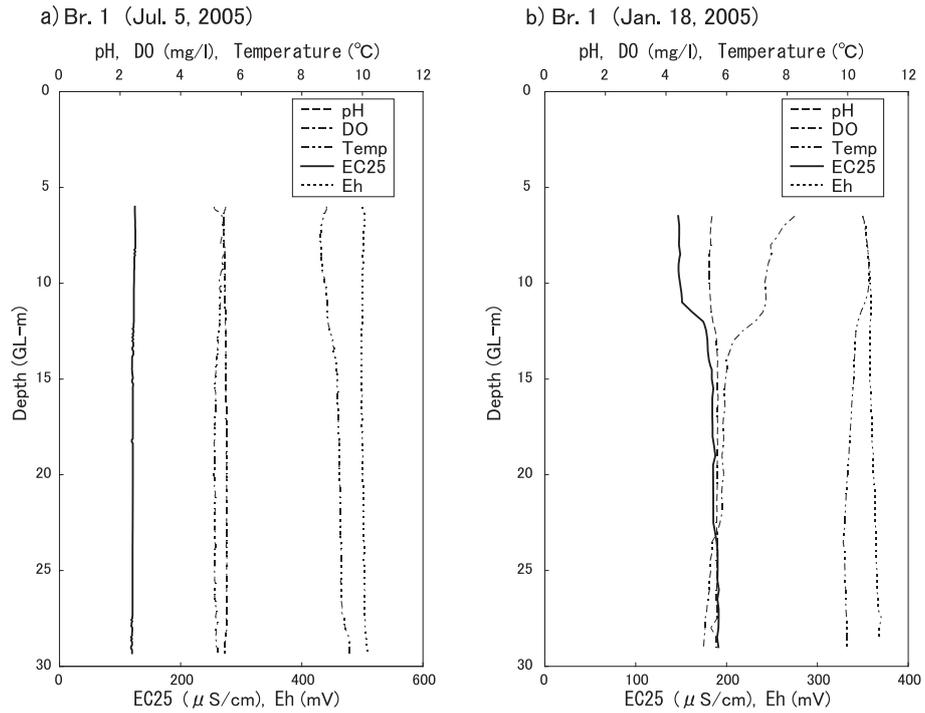
とを示す。これらの4本の孔井では GL-11～13m 付近と GL-22～23m 付近で水質が急激に変化することが多い。これらの深度はそれぞれ堆積岩中のウランが濃集している泥岩及び不整合面直下の風化花こう岩の深度に相当する。4本の孔井のうち、Br. 1と Br. 2は、渇水期 (数十日間の先行累積雨量が少ない時期や冬季) には水質パラメーターや溶存成分組成の深度方向への変化が見られるが、豊水期 (雨期や融雪期) にはそれらの変化がほぼ認められなくなる (第7, 8図)。内藤ほか (2006) は、この理由としてこれらの孔井が浅部の高水頭の地下水を深部の低水頭部分へ送り込む、いわゆる「注入井戸」であるために、深部でも浅部と同様の水質となっているものと考えた。

堆積岩中の透水性亀裂部中の地下水質把握を目的としてダブルパッカーが設置された Br. 3-2では、ダブルパッカー設置後に pH、電気伝導度はやや上昇し、溶存酸素濃度、酸化還元電位は低下した (第11図)。ダブルパッカーの設置後はより深い地下水に特徴的な水が得られていることから、ダブルパッカーの設置によって孔井内を通じた鉛直方向の地下水の流れが遮断され、原位置の組成に近い地下水が得られているものと推測される。

溶存成分総量は $0.4 \sim 2.2\text{me/l}$ の範囲にある。陰イオンは HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} を主体とし、陽イオンは Na^+ , Ca^{2+} を主体とする。 HCO_3^- 及び Ca^{2+} 濃度は深部ほど高いことが多い (第12図)。微量溶存成分組成は、Si, Br, Ba, Sr, Zn に比較的富む (第10図)。また、Br. 1の U 濃度は平均で $1.3 \mu\text{g/l}$ と他の孔井よりもやや高い。Zn 濃度は深部ほど低くなる傾向がある。

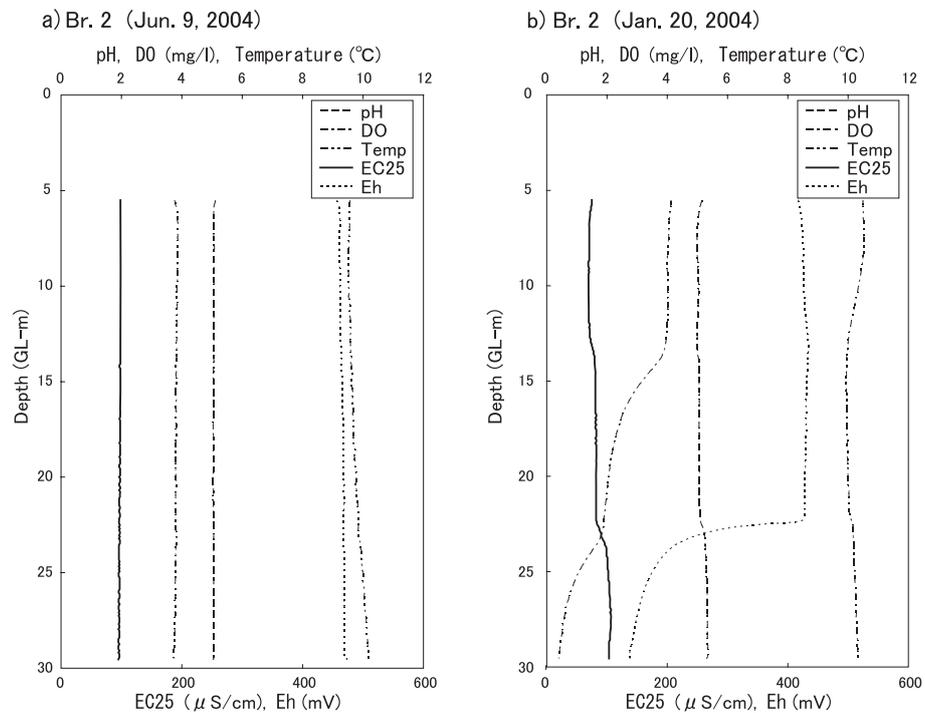
掘削水にトレーサーとして投入した I 濃度は、孔井ごとに異なる傾向を示した。Br. 3-2では、掘削直後に I

溶存成分組成から見た山地の水循環における水質変化(奥澤ほか)



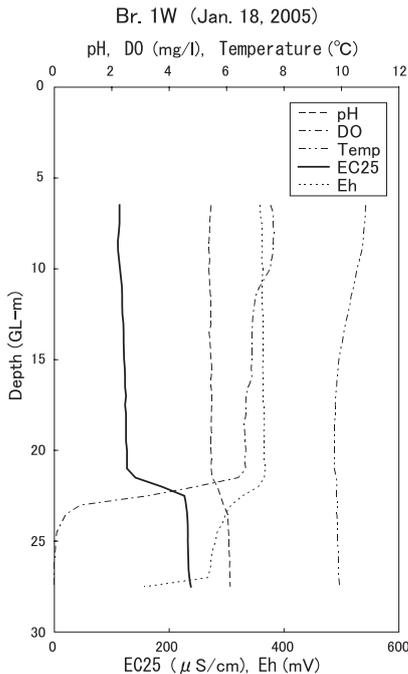
第7図 Br. 1の典型的な水質プロファイル。a) 豊水期, b) 渇水期。

Fig. 7 Representative water quality profiles for groundwater of Br. 1. a) high water level period; b) low water level period.

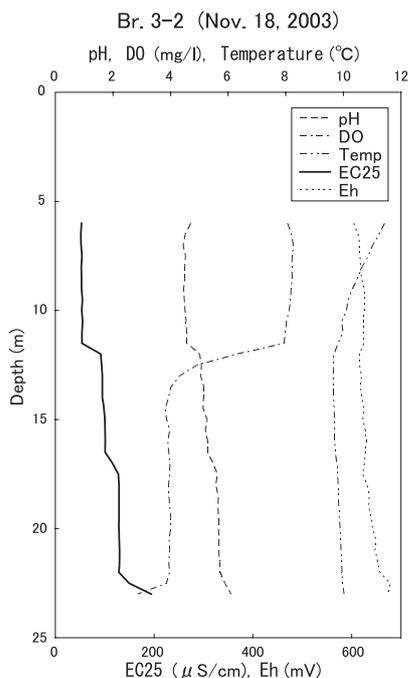


第8図 Br. 2の典型的な水質プロファイル。a) 豊水期, b) 渇水期。

Fig. 8 Representative water quality profiles for groundwater of Br. 2. a) high water level period; b) low water level period.



第9図 Br. 1W の典型的な水質プロファイル。
 Fig. 9 Representative water quality profile for groundwater of Br. 1W.



第10図 Br. 3-2 の水質プロファイル。
 Fig. 10 Water quality profile for groundwater of Br. 3-2.

濃度が最も高く、その後単調に低下した。一方、Br. 1では、掘削直後から調査期間を通じてバックグラウンド値とほぼ同じであった。Br. 1W 及び Br. 2では、掘削直後はI濃度が高く、その後減少したものの、掘削から一年以上経過した2003年10月に深部でピークを示した。Br. 1W では、更に2005年1月に最深部で再び小さなピークが認められた。

4.4.2 掘削エリア北部の地下水

掘削エリア北部に掘削された孔井群のうち Br. M1, Br. M2, Br. M3 孔は、互いに近接した位置にあり、それぞれ異なる深度にダブルパッカーが設置されていて、3本の孔井の水質から掘削エリア中央部の地下水水質の鉛直方向の変化を把握することができる。そこで、この3本の孔井の水質測定結果はまとめて扱う。一方、Br. 3-1 及び Br. 4 は他の孔井とは位置も水理地質学的条件も異なるため、別個に記載する。

4.4.2.1 Br. 3-1

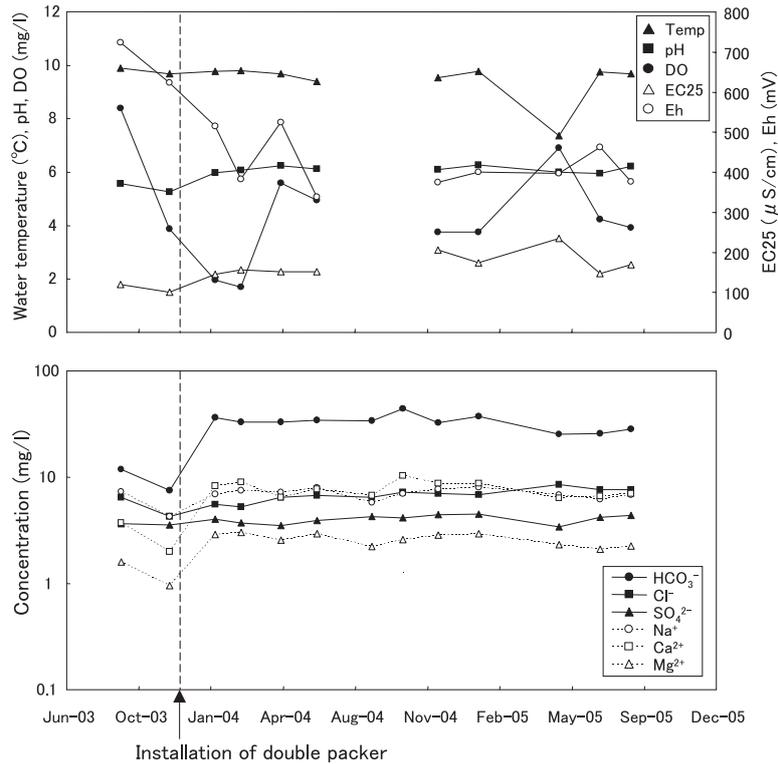
前述の通り Br. 3-1 孔では逸水を防ぐための止水パッカーを設置している。ここでは止水パッカー設置後の水質について記述する。本孔の地下水計の pH の範囲は 5.1 ~ 6.9, 電気伝導度 (EC25) の範囲は 145 ~ 462 μ S/cm である。溶存酸素濃度 (DO) の範囲は 0.0 ~ 4.7 mg/l であるが、パッカー設置直後を除けば、全深度で 0.0 ~ 0.2 mg/l と低い。酸化還元電位 (Eh) の範囲は -81 ~ +290 mV である (第5表)。Br. 3-1 の各水質パラメーターは、豊水期には Br. 1 及び Br. 2 と同様に深度方向への顕著な変化を示さない (第13a 図) が、渇水期には2ないし3つのユニットからなる成層構造が認められ、深部に向かって段階的に pH, 電気伝導度が上昇、酸化還元電位が低下する (第13b 図)。

溶存成分総量は 1.4 ~ 4.3 me/l の範囲にあり、その平均値は各孔井の中でも Br. 4 に次いで高い (第5表)。主要溶存成分組成は、陰イオンは HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- を主体とし、陽イオンは Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} を主体とする。 HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 濃度が深部ほど高い傾向があり、 SO_4^{2-} 濃度は深部ほど低い傾向が見られる (第12図)。他の孔井と比べ、 SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} 濃度が最も高い。微量溶存成分組成は、Si, Mn, Fe, Ba, Sr, Br, Zn に比較的富み、Si, Mn, Fe 濃度は北部孔井群の中で最も高い。Sr, Ba 濃度は深部ほど高い傾向があり、Zn は深部ほど低い傾向がある。掘削水にトレーサーとして投入された I 濃度は、止水パッカー設置直後の 2003 年 10 月に各深度にて最大値を示し、それ以降は掘削トレーサーの混入を示唆する I 濃度は検出されなかった。

4.4.2.2 Br. 4

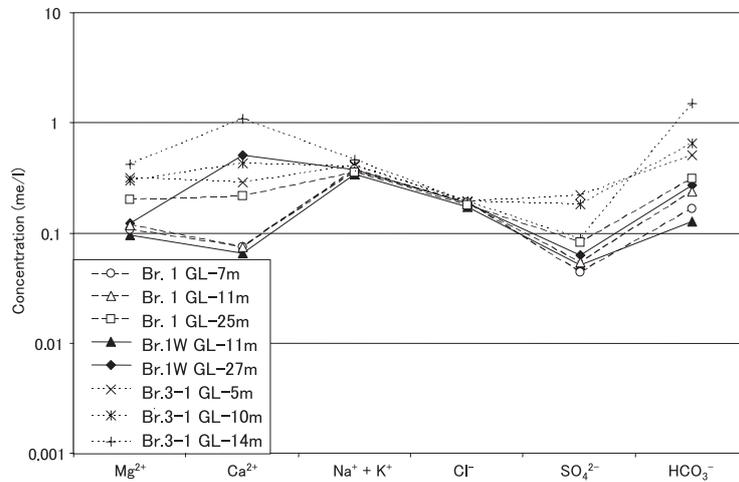
ダブルパッカー設置前に行った水質検層では、1ないし2つのユニットからなる成層構造が認められ、Br. 1W 等と同様に、深部に向かって段階的に pH, 電気伝

溶存成分組成から見た山地の水循環における水質変化(奥澤ほか)



第 11 図 Br. 3-2 (GL-12.5 ~ 15m) の水質経時変化.

Fig. 11 Temporal change of groundwater quality of Br. 3-2 (GL-12.5 ~ 15 m).



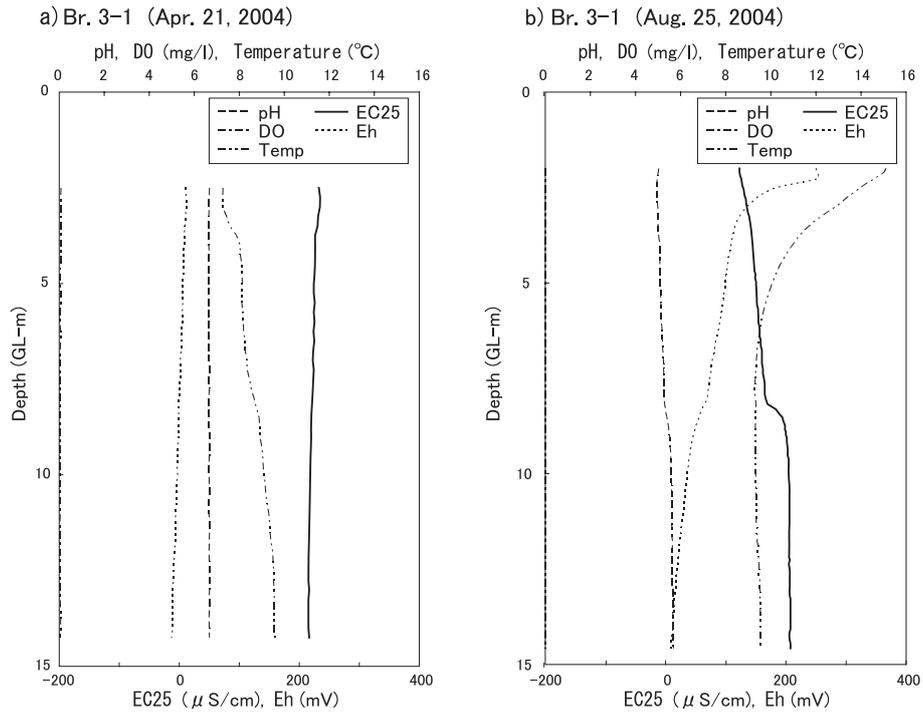
第 12 図 Br. 1, Br. 1W 及び Br. 3-1 の湧水期 (2004 年 11 月) における孔内水の主要溶存成分組成の深度変化.

Fig. 12 Vertical concentration changes of dissolved major ions within groundwater of Br. 1, Br. 1W and Br. 3-1 during low water level period (Nov. 2004).

導度が上昇, 溶存酸素濃度, 酸化還元電位が低下した (第 14 図). また, HCO_3^- と Ca^{2+} 濃度は Br. 1W と同様に深部ほど高い傾向が観察された.

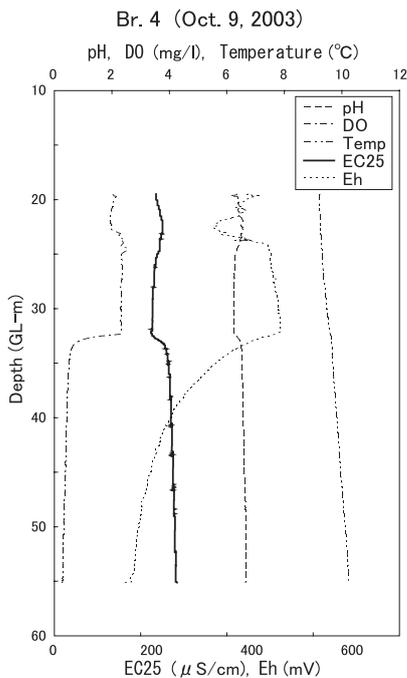
ダブルパッカー設置後に得られた地下水試料の pH, 電気伝導度, 溶存酸素濃度, Eh の範囲は, それぞれ 6.0 ~ 7.0, 66 ~ 318 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0.0 ~ 5.3 mg/l, +263 ~ +504 mV, である (第 5 表). ダブルパッカー設置前後

の水質パラメーターを比較すると, Br. 3-2 と同様に pH, 電気伝導度はやや上昇したが, 溶存酸素濃度, 酸化還元電位は低下した後に上昇した (第 15 図). pH や電気伝導度が上昇していることから, ダブルパッカー設置後には, 設置前よりも原位置の地下水の組成に近い試料が採取されたと考えられるが, 溶存酸素濃度や酸化還元電位が上昇した原因は不明である.



第13図 Br. 3-1の典型的な水質プロファイル。a) 豊水期, b) 渇水期。

Fig. 13 Representative water quality profiles for groundwater of Br. 3-1. a) high water level period; b) low water level period.



第14図 Br. 4の水質プロファイル。

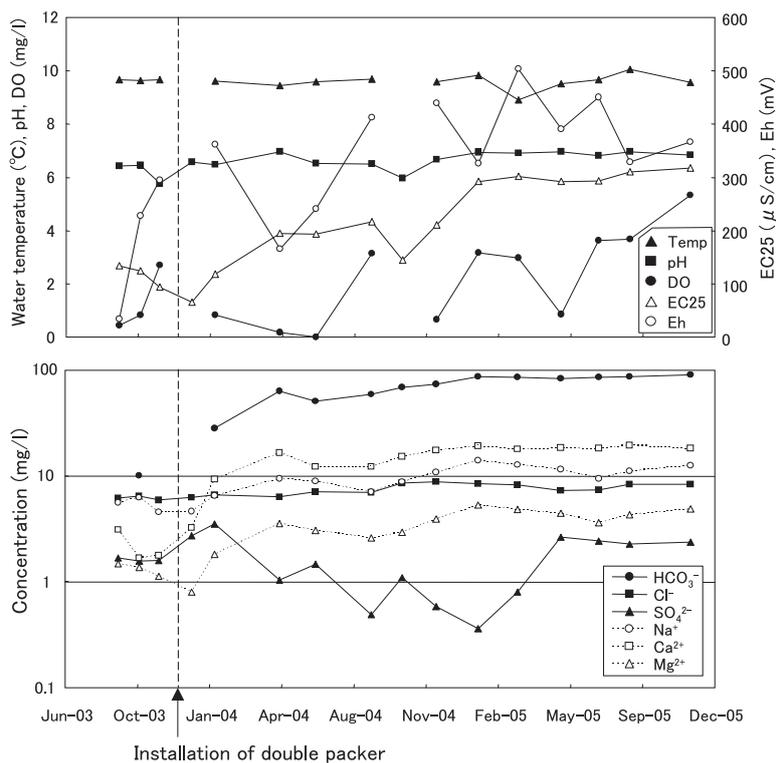
Fig. 14 Water quality profile for groundwater of Br. 4.

溶存成分総量は0.8～3.6me/lの範囲にあり、その平均値は各孔井の中で最も高い(第5表)。主要溶存成分組成は、陰イオンは HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} を主体とし、陽イオンは Ca^{2+} 、 Na^+ を主体とする。 SO_4^{2-} 濃度は各孔井の中で最も低く、 HCO_3^- 、 K^+ 濃度は最も高い。Br. 3-2と同様にダブルパッカー設置後に HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度が増加し、その後の濃度変化は小さい(第15図)。微量溶存成分組成は、Si、Mn、Sr、Ba、Zn、Br、Fe、Uに比較的富み、U濃度は各孔井の中で最も高い。Mn、Pb、As、Sr、Ba、U濃度もダブルパッカー設置後に増大した。掘削水にトレーサーとして投入したI濃度は、Br. 4孔掘削直後に最大値を示した後に低下したが、掘削から2年以上経過した2005年11月の時点でも、 $129 \mu\text{g/l}$ と比較的高い値を維持している。

4.4.2.3 Br. M1, Br. M2, Br. M3

Br. M1は堆積岩下部を、Br. M2は堆積岩上部のウラン濃集部を、Br. M3は花こう岩部をそれぞれ、ターゲットとしてダブルパッカーが設置されている。これらは互いに深度が違うので、3本の孔井の水質から掘削エリア中央部の地下水水質の鉛直方向の変化を知ることができる。3本の孔井の地下水試料のpH、電気伝導度、溶存酸素濃度、Ehの範囲は、それぞれ6.1～7.2、63～218 $\mu\text{S/cm}$ 、0.0～4.5mg/l、+86～+537 mV(第5表)である。Br. M2の孔内水は、掘削エリア南部の孔井群で観察された堆積岩中の地下水と比較して溶存酸素濃度や酸化還元電位が低く、Br. 3-1と同様の特徴を示

溶存成分組成から見た山地の水循環における水質変化(奥澤ほか)



第15図 Br. 4 (GL-33 m) の水質経時変化.

Fig. 15 Temporal change of groundwater quality of Br. 4 (GL-33 m).

す(第5表)。電気伝導度はBr. M2で低くBr. M3で高い傾向があり、他のストレーナー孔井と同様に深度方向に高くなる。しかしながら、Br. M1ではpH、溶存酸素濃度、酸化還元電位がBr. M2よりも高い傾向がある。

溶存成分総量は1.0～1.8me/lの範囲にある。主要溶存成分組成は、陰イオンは HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} を主体とし、陽イオンは Ca^{2+} 、 Na^+ を主体とする。微量溶存成分組成は、Si、Zn、Br、Mn、Sr、Baに比較的富む。掘削水にトレーサーとして投入したI濃度は、掘削後1年以上経過した2005年5月に各孔井ともに最大値を示し、その後減少傾向を示した。

5. まとめ

新潟・山形県境部に位置する金丸地域を対象として、降水、湧水、渓流水、深度50m付近までの孔井を用いた地下水の水質・主要・微量成分組成の観測を2002年秋から2005年末までに行い、以下の結果が得られた。

- 1) 雨水、渓流水、地下水の順で、溶存成分量が増加する。
- 2) 降水の水質は雨水と降雪水で異なり、降雪水は電気伝導度や Cl^- 、 Na^+ 濃度が高い。
- 3) 湧水及び渓流水の水質は、夏季及び融雪期は電気伝導度や Cl^- 、 Na^+ 濃度が低く、冬季に増大する。
- 4) 地下水は深度方向にpH、電気伝導度、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 濃度が増加し、溶存酸素濃度、酸化還元電位

が低下する。

文献

浜地忠男・五十嵐俊雄(1963)新潟・山形県境小国・金丸地区の含ウラン鉱床について。地調月報, 14, 873-884.

浜地忠男・小尾五明(1969)新潟県岩船郡関川村中東地区の含ウラン燐鉱。地調報告, no. 232, 595-601.

平田建正・村岡浩爾(1988)森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響。土木学会論文集, 399 / II-10, 131-140.

廣瀬 孝(1996)水文観測器具の作り方。恩田裕一(編)水文地形学, 古今書院, 246-254.

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.

門田長夫・佐藤源郎・東郷文雄・中村穎三(1961)東北日本羽越山塊の小国・金丸ウラン鉱床。日本原子力学会誌, 3, 422-429.

気象庁(2001)気象庁観測平年値(CD-ROM)。気象業務支援センター。

丸山利輔・三野 徹(1999)地域環境水文学。朝倉書店, 東京, 175p.

Mulholland, P. J. (1993) Hydrometric and stream

- chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed. *J. Hydr.*, **151**, 291-316.
- 内藤一樹・関 陽児・亀井淳志・塚本 齊・奥澤康一・渡部芳夫, 2006, 全深度ストレーナー孔井の通年水質観測による原位置地下水質の推定—山形県金丸地区での適用例—. *資源地質*, **56**, 155-168.
- 西田彰一・津田禾粒 (1961) 新潟県坂町付近の新第三系. 横山次郎教授記念論文集, 107-113.
- 佐藤源郎・東郷文雄・門田長夫 (1960) 小国・金丸地域の堆積型ウラン鉱床について. *鉱山地質*, **10**, 408-410.
- 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. *水文学*, **15**, 42-54.
- 島津光夫・徳永重元・小関幸治 (1963) 新潟・山形両県境小国・金丸地区ウラン鉱床—とくに周辺の地質について—. *地調月報*, **14**, 103-118.
- 鈴木啓助・遠藤八十一 (1991) 十日町市における酸性の融雪水. *森林立地*, **33**, 71-75.
- 田中 正・山崎 崇 (1985) 森林小流域の水循環過程における水質特性—多摩丘陵源流域を例として—. *水文学*, **15**, 21-32.
- 内田太郎・浅野友子・大手信人・水山高久 (2001) 山地源流域の湧水の形成過程に及ぼす岩盤地下水の影響. *日本水文学会誌*, **31**, 59-72.
- 渡部芳夫・関 陽児・内藤一樹・鈴木正哉・亀井淳志・中嶋輝允 (2003) 山形県金丸地域新第三系における地下浅部ウラン濃集現象: 核種地下水移行現象のナチュラルアナログ研究. *日本地質学会第110年学術大会講演要旨*, 302.

(受付: 2008年3月19日; 受理: 2008年7月31日)

