

福島県滝坂地すべり地の地下水の水質とその変動

鈴木 将之*¹ ・ 佐藤 修*²

Chemical variation of groundwater in the Takisaka landslide area,
Fukushima Prefecture

by

Masayuki SUZUKI and Osamu SATO

Abstract

Groundwater samples were collected from a spring and drainage system such as drainage wells and boreholes in the Takisaka landslide area, Fukushima Prefecture. Major ion concentrations of the drainage were analyzed to investigate the effectiveness of existing measures on the landslide. Wells mainly drain shallow groundwater because drainage boreholes of wells are shallower than the slip surface. However, the higher chloride ion concentrations in the drainage suggest that deep groundwater is partially drained by drainage wells in Yudenosawa and Shimosawanome. The wells drain the deep groundwater that ascends along a fault several times every year, and contribute to reduce excess pore pressure. Discharge rate of Matsuzaka spring water increases remarkably during snowmelting, heavy rain and rainy season. However, its increase does not balance with increase of water supply into the catchment area. Groundwater should originate from outside of Matsuzaka watershed since the discharge is larger than recharge in the watershed. The rate of flow from Matsuzaka into Numata remains constant throughout the year. Numata drainage wells are effective in draining the water from Matsuzaka. Sodenosawa drainage tunnel mainly drains water from mud stone debris in Shimosawanome subsidence zone and contributes to stabilize the whole landslide.

Keywords : *origin of groundwater, chloride ion concentraion, seasonal change, drainage wells*
キーワード : 地下水の起源, 塩化物イオン濃度, 季節変化, 集水井

1. は じ め に

滝坂地すべり(福島県耶麻郡西会津町)は、グリーンタフ地帯の大規模な地すべりであり、すべり面は地表面下100m以深にある。この地すべりには1881年(明治21), 1905年(同38), 1949年(昭和24), 1960年(同35)に被害をともなう活動の記録がある。地すべり防止工事は、地すべり活動による阿賀川の閉塞を防ぐことを目的としている。

現在のところ、深いすべり面をもつ地すべりに対する効果的な防止策は確立されていない。滝坂地

*¹新潟大学大学院自然科学研究科

*²新潟大学積雪地域災害研究センター

すべり地では、集水井や排水トンネルによる、すべり面以浅の地下水排除工が主要な対策となっている。これらによる排水、とくにトンネルによる排水の開始後、滝坂地すべりの活動は抑制されている。こうした排水工事により、どのような水がどれほど排除されているかについての詳細は不明である。本研究では、集水井排水、トンネル排水、湧水の流量と水質を測定して、いつどのような地下水が排水されているかを推定する。その上で、浅い地下水の排除によって、地すべり活動がある程度抑制されていることの原因について考察する。

本研究においては水質の異同を区別するために、まず水の陰イオン組成、ことに日本の自然の環境では沈殿や吸着の起こりにくい塩化物イオンを指標とした。さらに、土壌、岩石との反応により変化する陽イオンの組成を解析し、水の流動経路について考察した。本研究に先立ち、地下水、河川水のトリチウム濃度、酸素同位体比の測定を行い、水分子の差異による地下水の区分を試みたが、滝坂地すべり地においては結果として有効な方法ではなかった(鈴木, 2000MS)。

2. 地質および地すべりの概要

2-1. 地形・地質

滝坂地すべり地付近は野沢盆地の末端の丘陵地帯に当たり、阿賀川は銚子ノ口と呼ばれる狭窄部を経て北東から北西に流れを変える(図1)。地すべり地南西は阿賀川の攻撃斜面で、増水時には著しい

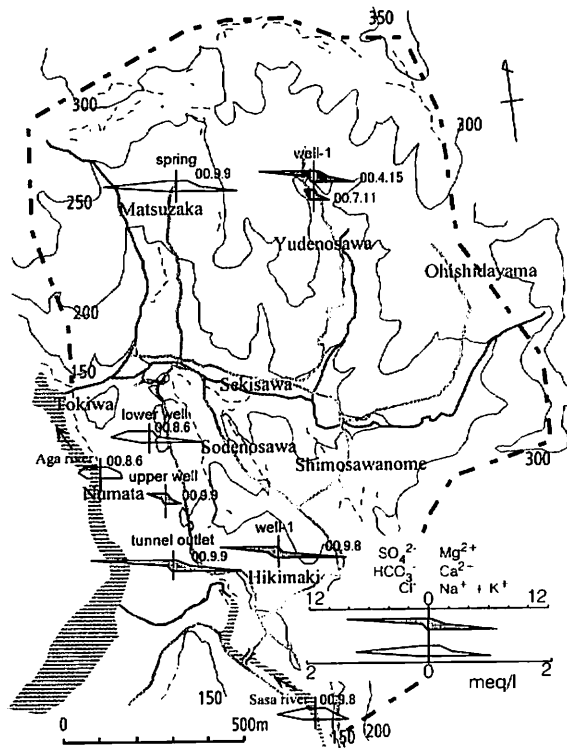


図-1 滝坂地すべり地付近の地形図ならびに代表的な地下水および河川水の水質

Fig.1 Topographic map of the Takisaka landslide area, showing pattern diagrams for major ions in groundwaters and river waters

浸食を受ける。地すべり地内では南北方向に地質構造に対応した3条の沢と尾根が配列し、中央を東から西に流れる堰沢が横切る地形となっている。

滝坂地すべり地の地質は先第三系の花崗閃緑岩を基盤として、下位より新第三系のアルコース砂岩、緑色凝灰岩、泥岩によって構成される(図2;柴田, 1972;砂防・地すべり技術センター, 1997)。泥岩は地すべり地中央部の湯出野沢, 下沢の目地区に分布する。下沢の目地区は陥没した上位の泥岩層が下位の凝灰岩層中に差し込んでいる。北西部の松坂地区は泥岩を欠いて崩積土がアルコース砂岩を覆い、北東部の大石田山地区は風化の著しい花崗岩が分布する。

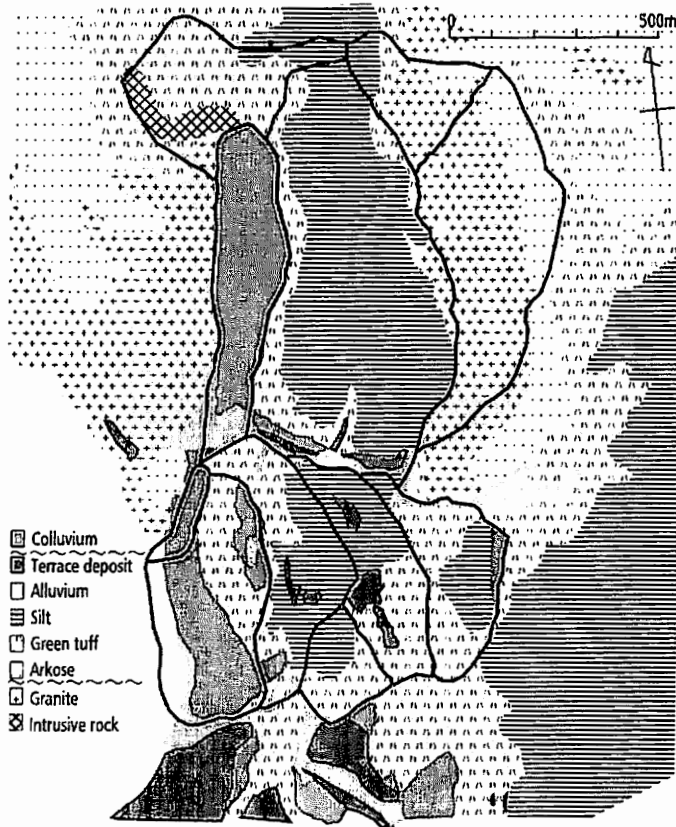


図-2 滝坂地すべり付近の地質図 (砂防・地すべり技術センター(未公表)を一部簡略化)

Fig.2 Geological map of the Takisaka landslide area
(modified after SABO Technical center, unpubl.)

2-2. 地すべりの概要

すべり面 活動状況に基づき堰沢を境に地すべりは南部・北部ブロックに大別され、南部のすべり面は阿賀川河床から東側に傾斜し、大石出口付近で地表に達する舟形の形状が想定されている。北部では、大石田山地区に滑落崖が連続し、すべり面は東西の端を湯出野沢と明ヶ沢の断層で規制された南東に緩く傾斜した形状が想定されている。滝坂地すべり地の北部では、すべり面は東に傾斜し、最も深いところでアルコース砂岩中の地表面下100m以深と想定されている。

対策の経緯 これまで滝坂地すべりの活動の主な誘因は、融雪期における地表水の地下への流入量増大による、すべり面に作用する間隙水圧の増大および陥没帯の側方水圧の増大であると考えられている(渡邊ほか, 1995)。1958年以来、滝坂地すべり地には地下水の排除を目的とした各種の対策工が施工されている(図3)。深さ15~27mの集水井は松坂, 常磐, 堰沢において早くから施工されてきた。近年は地下水位低下を目的とする深さ16.5~41mの集水井が地すべり地内の各地に施工されている。湯出野沢には7基の集水井が1986~88年に、沼田には4基の集水井が1996年に、引牧から下沢の目にかけては5基の集水井が1999年までに施工された。また最も活発に活動している南部の陥没帯に位置する下沢の目地区の排水を目的として、総延長785mの袖の沢排水トンネルが1996年までに掘削された。

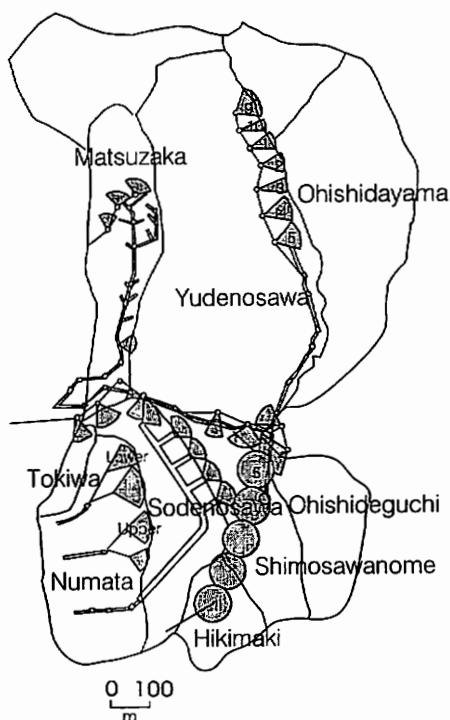


図-3 既設対策工位置図(建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所(1997)を一部簡略化)

Fig.3 Drainage system of the Takisaka landslide area
(modified after Aganogawa construction office, 1997)

2-3. 地下水質の全体的な分布

鈴木(2000MS)によれば、滝坂地すべり地の地下水の水質の分布は以下のように要約できる。南部ブロック 排水トンネル出口地点の水は硫酸-ナトリウム型であり、調査域内で最も濃度の高い水の1つである。沼田地区では、阿賀川の上流側の集水井排水が硫酸-ナトリウム型、下流側の集水井排水が炭酸水素-硫酸-ナトリウム型の組成である。下沢の目連続集水井の1つである、引牧地区の集水井well-1の水は、硫酸イオン濃度が7 meq/l程度の、滝坂では比較的高濃度の硫酸-ナトリウム型の水質である。

北部ブロック 湯出野沢連続集水井の1つである、湯出野沢地区の集水井well-1の水は、硫酸-ナトリウム型である。その濃度は季節によって数倍程度変動する。松坂地区の湧水は、調査期間を通じ濃度も成分組成も一定の炭酸水素-ナトリウム型であり、流量は季節によって50倍以上増減する特徴がある。北部ブロックの東西断面沿いのボーリング孔における掘削時の孔内水の水質は、断層沿いの大石田山地区で塩化-ナトリウム型から炭酸水素-ナトリウム型、泥岩分布域の湯出野沢中央地区で硫酸-ナトリウム型、松坂地区で炭酸水素-ナトリウム型で、地表にみられる南北方向の地形に規制された水塊に区分される。

3. 試料および分析方法

3-1. 分析方法

採水地点 地すべり地内の集水井排水と湧水を定点として継続的に採水し、分析した。北部では松坂の湧水、湯出野沢の集水井を定点とした。湯出野沢の7基の集水井の深さは上流から順に40.5m, 40.5m, 41.0m, 36.5m, 27.5m, 26.5m, 16.5mである。2000年は湯出野沢にある7基の集水井全てから採水したほか、一部は集水井に隣接する水位観測孔の底からも採水した。南部では袖の沢排水トンネルの出口地点、沼田地区の阿賀川の上流側と下流側にある2基の集水井、引牧の集水井well-1を定点とした。集水井の深さは沼田が約25m、引牧が約40mであり、トンネルからの集水ボーリングは下沢の目の地表面下約50mの深さにある。湯出野沢と引牧の集水井はそれぞれ連続しており、上流からの水が混合している。排水トンネルには4本の枝線があり、あわせて5地点の集水ボーリングからの水が混合している。集水ボーリング付近の岩相は崩積土、泥岩、凝灰岩である(図4)。湧水、排水トンネル出口地点の水は直接ボトルに採水し、集水井内の水は地上から採水器をおろして採水するか、あるいは集水井の排水口で採水した。

採水期間 滝坂地すべり地内の定点の採水は98年6月から継続している。水位観測孔の孔内水を2000年8月・9月に採水した。湯出野沢地区の7基の連続集水井からの採水は、2000年4月から9月まで毎月1回計6回行った。

現地での測定 水温、pH、電気伝導度は現地で測定した。測定には堀場D-24 pH・電気伝導度計を用いた。トンネル出口にはジオテクサービスSEC-4電気伝導度・水温センサーを設置し、1999年8月14日から1時間(99年11月17日から2000年4月15日までは6時間)ごとに自動記録を行い、データ回収時に堀場D-24を用いて測定した値で校正した。定点では99年から順次可能なものについて採水時の流量も測定した。トンネル出口と湯出野沢流路工ではタマヤUC-2回転流速計により40秒間の平均の流速を測定し、流路の水深と幅を測定して断面積を求め、断面積に流速を乗じて流量を求めた。沼田の2つの集水井排水については容量1.8lのバットで、松坂流路工では6.5lのバケツが満水になるのに要する時間を計り流量を求めた。

室内分析 Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} のイオン濃度は島津HIC-6AならびにDionex DX-120高速液体クロマトグラフィー装置で分析した。分析条件は陽イオンに島津IC-C1カラム、陰イオンに島津IC-A1カラムを用い、移動相としてI価陽イオン分析は5mM硝酸溶液、II価陽イオン分析は4mM酒石酸・2mMエチレンジアミン混合溶液、陰イオン分析は2.5mMフタル酸・2.4mMトリスアミノメタン混合溶液を流速1.5ml/min.で流した。またDionex DX-120による陰イオン分析はAS12A4mmカラムを用い、2.7mM炭酸ナトリウム・0.3mM炭酸水素ナトリウム混合溶液を溶離相と

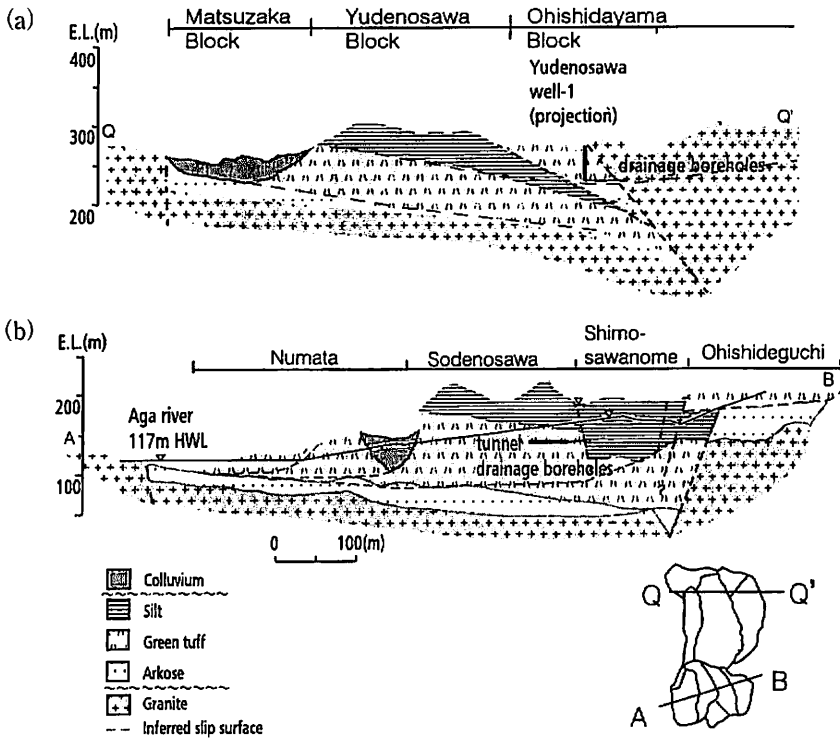


図-4 (a) Q-Q'測線および(b) A-B測線の断面の地質
(砂防・地すべり技術センター(未公表)を一部簡略化)

Fig.4 Cross sections of (a) northern and (b) southern blocks
(modified after SABO Technical center, unpubl.)

して流速1.2ml/min.で流した。HCO₃⁻イオン濃度はpH4.8アルカリ度によった。pH4.8アルカリ度測定には東亜AUT301自動滴定装置を用いた。

蒸発散量の推定 アメダス西会津の気温と降水量(気象庁, 1999, 2000)の値を用い, ソーンズウエイト式により最大可能蒸発散量を見積もった。

4. 結果と考察

4-1. 地下への水供給量と塩化物イオン濃度の基準

アメダス西会津の気温と降水量(気象庁, 1999, 2000)と, 最大可能蒸発散量を表1に掲げる。西会津では冬季の降水量が多いが, 蒸発散が著しく小さく, 多量の水が地下に供給されることになる。蒸発散が冬季に小さいのは調査地域の冬季の平均気温が0℃に近いためである。1998年8月には月間557mmの降水があり, 蒸発散量は月間130mmと推計されるから, 1ヶ月間に427mmもの水が地下に供給されたことになる。

一般に地下水に溶存する陰イオンと鉱物の間にはイオン交換反応が生じないので, 地下水の起源を知る上で陰イオン組成に着目した研究がなされてきた(佐藤, 1983など)。人為的な汚染のない地域における塩化物イオンの供給源として, (1)降水による海塩の供給, (2)火山地帯の遊離塩酸, (3)温泉

表一 アメダス西会津における降水量ならびに最大可能蒸発散量
気象庁(2000)のデータによる

Table 1 Precipitation in AMeDAS Nishiaizu site and calculated evapotranspiration
(after Japan Meteorological Agency, 2000)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1998													
Precipitation(P) [mm/month]	306	103	92	124	104	65	178	557	79	118	137	198	2061
Evapotranspiration(E) [mm/month]	0	0	8	51	88	104	139	130	103	60	18	5	705
Difference(P-E)	306	103	84	73	16	-39	39	427	-24	58	119	193	1356
1999													
Precipitation(P) [mm/month]	167	141	125	104	41	154	233	133	209	108	162	326	1903
Evapotranspiration(E) [mm/month]	0	0	8	39	73	107	139	149	105	55	21	3	698
Difference(P-E)	167	141	117	65	-32	47	94	-16	104	53	141	323	1205
2000													
Precipitation(P) [mm/month]	131	113	200	123	105								

水および古海水が挙げられる。本地域は火山地帯ではないので、供給源の候補として海塩の供給、温泉水と古海水が残る。滝坂地すべり地で涵養された地下水の塩化物イオン濃度を推定するには、地すべり地における降水の化学分析値が必要であるが、滝坂周辺では降水の化学分析が行われていない。ここでは、玉置ら(1991)の日本における降水の平均平均化学組成を利用して、先に求めた最大可能蒸発散量から地下に供給される塩化物イオン濃度を推定する。年間最大可能蒸発散量は1998年が705mm、夏季が高温であった1999年は698mmであった。この地域の降水量は1998年が2061mm、1999年は1903mmであるから、おおよそ降水の3分の1が蒸発散により失われ、降水に含まれていた塩化物イオン濃度は1.5倍に濃縮されて、地下に供給されることになる。玉置ら(1991)のデータによれば、降水の平均的塩化物イオン濃度は3.82mg/lであるから、それが濃縮されて、5.73mg/lの塩化物イオン濃度の水が空から地下へ供給される。滝坂の沼田地区河岸で1998年から2000年にかけて毎月2回ないし1回採水した阿賀川河川水の塩化物イオン濃度は平均6.4mg/lであった。これは阿賀川の上流域における人間活動、温泉を含めた流域全体の平均である。蒸発散による濃縮からの推定値と、阿賀川の塩素濃度には大きな差はない。以下では、塩化物イオン濃度が6.4mg/lを上回る水を地下深部から供給された水とする。

4-2. 袖の沢排水トンネル

袖の沢排水トンネルの出口地点における水質変動 排水トンネル出口地点の水は硫酸ナトリウム型であり、調査域内で最も濃度の高い水の1つである(図5)。図6は自動記録による1999年8月14日13時から2000年9月9日9時までの排水トンネル出口における電気伝導度である。この期間の採水時における電気伝導度は最低が1999年8月21日の733 μ S/cm、最高は2000年4月15日の1144 μ S/cmであった。採水時の流量は最低が2000年6月18日、7月11日、8月6日の0.1ton/min.、最高は2000年4月15日の1.7ton/min.である。アメダス西会津によれば2000年春は3月28日に雪が消えた。自動記録によれば融雪期の電気伝導度の上昇は消雪の約半月後の4月19日頃にピークとなった。4月15日の採水時の電気伝導度、流量ともこの期間中の最高値であった。トンネル排水のI価陽イオンとII価陽イオンの比は1998年8月14日、8月22日、2000年4月15日にそれぞれ1.5、1.9、7.3となったのを除くと、

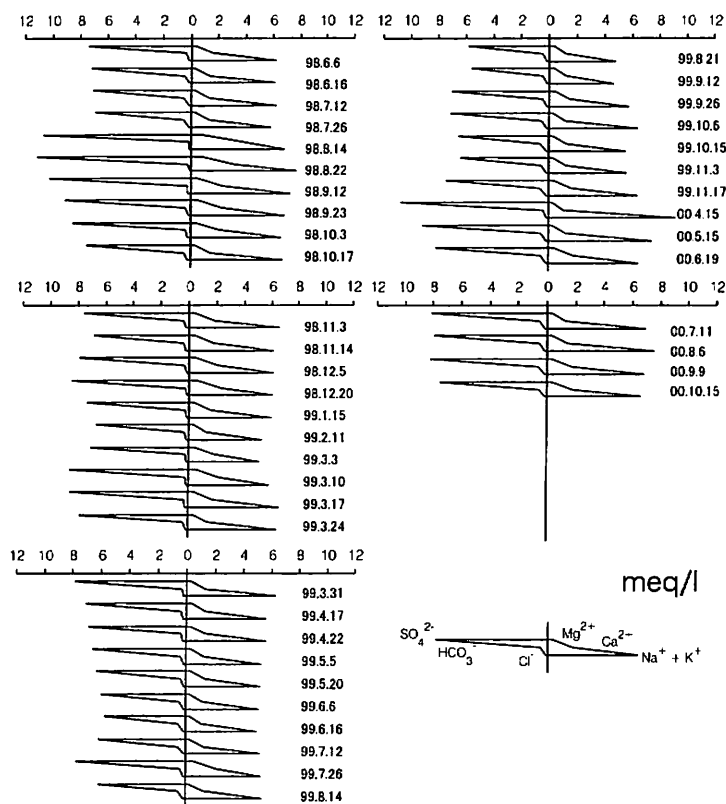


図-5 1998年から2000年にかけての袖の沢排水トンネル出口地点における水質
 Fig.5 Major ion concentrations of water from Sodenosawa drainage tunnel outlet

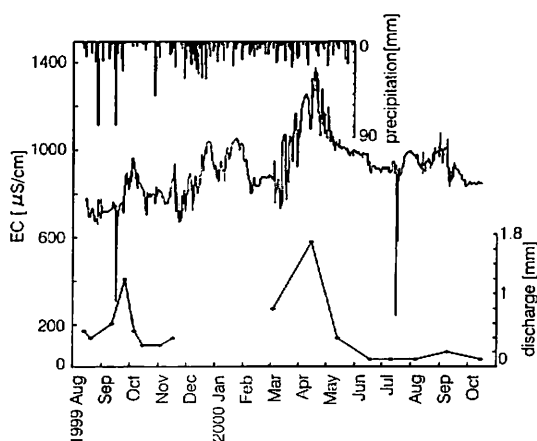


図-6 袖の沢排水トンネル出口地点における電気伝導度，採水時の流量，ならびにアメダス西会津の降水量 アメダス西会津の降水量は気象庁(2000)による
 Fig.6 Electric conductivity and discharge measured at Sodenosawa drainage tunnel outlet, and precipitation of Nishiaizu AMeDAS site
 Precipitation data after Japan Meteorological Agency (2000)

調査期間を通じて3.3前後で推移している。

トンネル排水に寄与する水 堰沢および下沢の目地区からの水を集める排水トンネルの水質は季節的に、あるいは1998年8月豪雨のような異常気象時に変動すると考えられる。出口地点におけるI価陽イオンとII価陽イオンとの濃度比は一定ではない。これまでにI価陽イオンとII価陽イオンとの濃度比が大きく変動した例として、1998年夏と2000年春が挙げられる。前者は豪雨後で、後者は急激な融雪の後である。アメダス西会津によると1998年夏は7月28日から8月14日にかけて347mmの大雨が降り、2000年春は3月10日にあった53cmの積雪が3月23日に消えている。この豪雨と融雪のあとで、とくにII価陽イオンの濃度に大きな違いが現れた。1998年8月にはII価陽イオンの比率が高く、逆に2000年4月はI価陽イオンの比率が高くなった。砂防・地すべり技術センター(未公表)はトンネルの枝線ごとに水質分析し、下沢の目地区中央付近に近づくほどカルシウムイオン濃度が高いという結果を得た。枝線ごとに水質が異なるとすれば、1998年8月の豪雨後と2000年春の融雪後では枝線ごとの水の動きに違いがあったと考えられる。陰イオンでは、塩化物イオン濃度が1998年8月の豪雨後から次第に増加し始め、11月14日には9.5mg/lにまで達した。その他の時期には排水トンネル出口地点の塩化物イオン濃度はほとんど増減がみられない。

排水トンネル出口地点の水は融雪期、夏季、初冬期に硫酸イオンおよびナトリウムイオン濃度が増加する傾向にある。1998年8月以降のII価陽イオンと塩化物イオンの濃度上昇は、8月の豪雨の影響とみられる。

4-3. 沼田地区

沼田地区では、阿賀川の上流側の集水井排水が硫酸-ナトリウム型、下流側の集水井排水が炭酸水素-硫酸-ナトリウム型の組成である(図1)。

沼田上流集水井の水質変動 上流側の硫酸イオン濃度は1.9meq/l程度、ナトリウムイオン濃度は1.4meq/l程度である。また0.1meq/l程度の硝酸イオンを含む。I価陽イオンとII価陽イオンの濃度の比は1.8程度で、観測地点の中では変動が比較的小さい。1999年と2000年の採水時の流量は、1999年7月12日の27l/min.が最大、1999年6月6日の1.3l/min.が最小であった。

沼田下流集水井の水質変動 下流側は、1998年には硫酸イオン濃度が炭酸水素イオン濃度を若干上回っていた。しかし、1999・2000年には炭酸水素イオン濃度が0.6meq/l程度、硫酸イオン濃度が0.3meq/l程度となり、逆転が生じた。I価陽イオンとII価陽イオンの濃度比は5.2程度で、下流側のII価陽イオン濃度は上流側に比べ少ない。1999年と2000年の採水時の流量は、1999年7月26日の7.7l/min.が最大、2000年8月6日の1.0l/min.が最小であった。

沼田地区の水供給 沼田地区の阿賀川上流側の集水井と下流側の集水井はともに地すべり地末端の崩積土中の水を排除しているが、2つの集水井では水質とその変動の様子が異なっている。上流側の集水井排水は硫酸-ナトリウム型で、観測地点の中では水質変動が比較的小さい。下流側の集水井排水は1998年には炭酸水素-硫酸-ナトリウム型であったが、1999年以降は炭酸水素-ナトリウム型となっている。下流側のII価陽イオンは上流側のII価陽イオンに比べ少ない。ナトリウムイオンに比べカルシウムイオンは濃度の増減の程度が大きく、I価陽イオンとII価陽イオンの濃度の比は上流側より大きく変動する。松坂の湧水と比較すると、流量変化は小さくイオン組成の変化は大きい。沼田の上流側、下流側集水井とも1998年8月の豪雨後、明らかな水質変化は見られなかった。沼田の上流側集水

井と下流側集水井では集水域が独立しており、下流側への松坂地区からの水の寄与はあったにしても影響は少ない。

4-4. 引牧地区

引牧well-1の水質変動 引牧地区の集水井well-1は、下沢の目連続集水井の1つである。以下引牧well-1と表記する。引牧well-1の水は、硫酸イオン濃度が7 meq/l程度あり、滝坂では比較的高濃度の硫酸-ナトリウム型の水質である。また各イオン濃度の変動はトンネル排水よりも大きい(図7)。引牧well-1では、I価陽イオンとII価陽イオンの濃度比は99年9月12日の採水開始以来、99年11月17日、2000年9月8日にそれぞれ12.4、12.3となり、トンネル排水よりII価陽イオン濃度の増減が著しい。塩化物イオン濃度は、2000年8月6日に滝坂では最高の値(28.8mg/l)となった。また塩化物イオン濃度とカリウムイオン濃度がほぼ1:1の関係になっているのも特徴である。

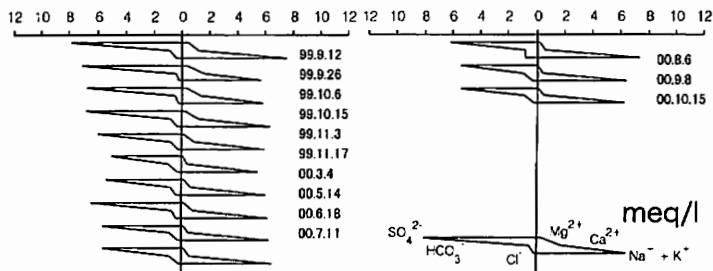


図-7 1998年から2000年にかけての引牧集水井well-1における水質

Fig.7 Major ion concentrations of water from Hikimaki drainage well number 1

下沢の目連続集水井の水とトンネルの水の比較 引牧地区の集水井well-1は、下沢の目の5基の連続集水井の最も下流の集水井である。集水井の内部では下沢の目地区と引牧地区の地下水を混合している。トンネル出口地点と比較すると、引牧well-1の水は調査期間を通じて塩化物イオン濃度が高く、II価イオンの濃度は一定せずかつトンネル出口地点より低い。II価イオン濃度の高い水がトンネルに近い側に、塩化物イオン濃度の高い水が連続集水井側に存在する可能性がある。

下沢の目地区と湯出野沢の塩化物イオン濃度 2000年の引牧well-1では、8月に塩化物イオン濃度が極大となった。同じ期間における湯出野沢上流の集水井well-1では、塩化物イオン濃度は7月と9月の2つのピークがある。さらに、1999年11月半ばから2000年6月までの期間で見ると、引牧well-1の水は湯出野沢の集水井well-1の水より塩化物イオン濃度が高い。すなわち引牧well-1と湯出野沢のwell-1の水の塩化物イオン濃度の増減の時期は一致せず、むしろどちらかが増加するときどちらかが減少する傾向がある。一方、引牧well-1の水と湯出野沢中流の集水井well-5の水は、2000年8月とともに塩化物イオン濃度が増大した。このとき、引牧well-1の方が湯出野沢のwell-5よりも高い濃度となっていた。湯出野沢のwell-5からの排水は、地表の流路工に導かれ、堰沢を経由して最終的には阿賀川に捨てられているので、途中少々逸水することはあっても、湯出野沢のwell-5の排水がそのまま下沢の目の地下へ供給されることはない。したがって、2000年8月には、下沢の目の連続集水井の集水域を中心として、湯出野沢の集水井well-5の集水域にかけての一帯で、地下水の塩化物イオン濃度が上

昇する現象が起こった。

4-5. 湯出野沢地区

湯出野沢地区の水質変動 湯出野沢地区の集水井well-1は、湯出野沢連続集水井の1つである。以下湯出野沢well-1と表記する。湯出野沢well-1の水は98年8月の豪雨を境に全イオン濃度が直前の5倍に増大し、硫酸-ナトリウム型の水質となった(図8)。その後の継続観測によれば、湯出野沢well-1の水は、初冬と融雪期、夏の豪雨期にかけて、多量の降雨や融雪に対応して硫酸イオンとナトリウムイオンの濃度が増大するパターンを繰り返している。

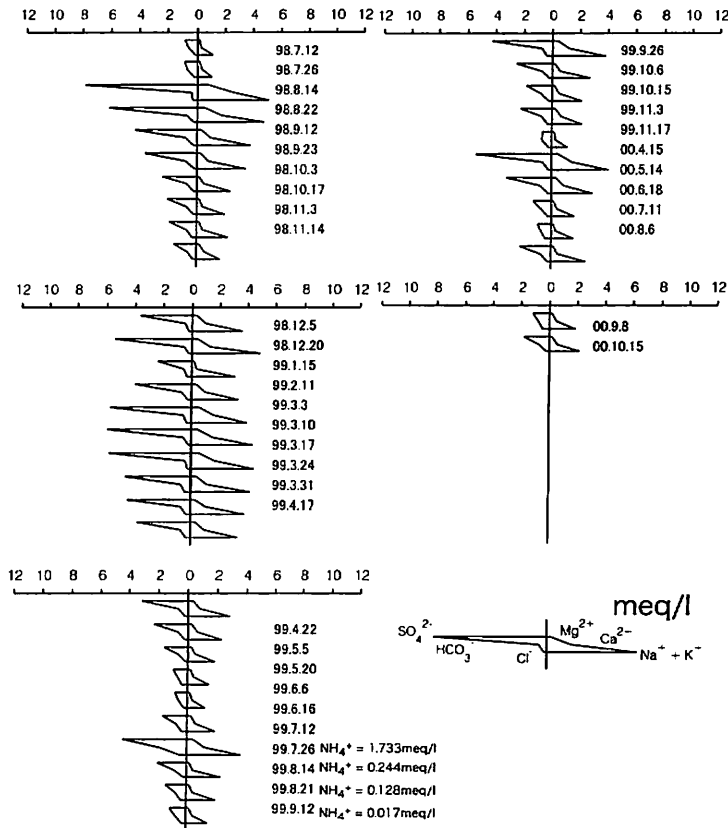


図-8 1998年から2000年にかけての湯出野沢集水井well-1における水質

Fig.8 Major ion concentrations of water from Yudenosawa drainage well number 1

2000年4月から10月までの湯出野沢連続集水井7基の水の塩化物イオン濃度を図9に表す。流域の平均である阿賀川の水の塩化物イオン濃度が6.4mg/lであるので、湯出野沢連続集水井の水の塩化物イオン濃度は流域の平均をおおむね上回っており、滝坂地すべり地の中で最も高い塩化物イオン濃度となることがしばしばある。6月には4・5月に他の集水井より高かったwell-9, well-3の塩化物イオン濃度が低下し、各集水井ではほぼ一定の濃度になった。7月にはwell-1, 2, 3で、8月にはそれまでほかより低い濃度で推移していた最下流のwell-5で、際だった濃度の増大が起こった。9月には

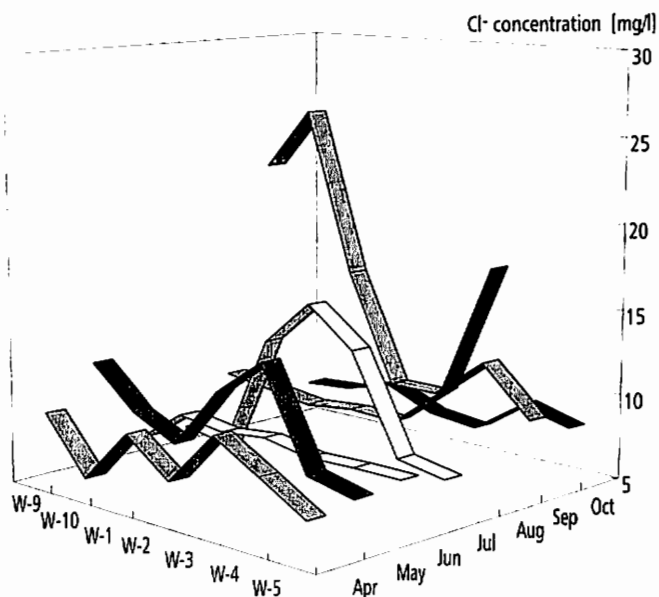


図-9 2000年の湯出野沢の各集水井における塩化物イオン濃度

Fig.9 Chloride ion concentrations from Yudenosawa drainage wells in the year 2000

well-9, 10でそれぞれ22.0mg/l, 25.0mg/lと4月以来最大の濃度になった。10月には各集水井ではほぼ一定の濃度となった。

湯出野沢集水井への深層地下水の寄与 湯出野沢連続集水井7基の水にみられる塩化物イオン濃度の変動は、消雪後から秋季までの期間中、湯出野沢の各地で間欠的に深層からの水供給があったことを示唆する。いずれの集水井も深層地下水をとらえたが、その時期は一致せず、1つの集水域の中でも深層からの水の挙動は異なると推定される。

湯出野沢集水井と水位観測孔の水の比較 集水井が排水している水と集水井近くの地下水の異同を検討する目的で、湯出野沢の集水井に隣接するCH-10, 1, 3, 5の水位観測孔から採水を行い、分析した。番号は隣接する集水井の番号に対応する。これらの水位観測孔の水は、集水井の水とは異なる水質を有することがある(図10)。

番号10, 3, 5ではいずれも観測孔の水の方が集水井の水より炭酸水素イオン濃度が低い。とくに9月のCH-10とCH-3の水の炭酸水素イオン濃度は塩化物イオン濃度よりも小さく、これらの水が硫酸酸性の環境にあったことを示唆している。9月のCH-1の水の炭酸水素イオン濃度は湯出野沢well-1の水より高かった。9月のCH-1の水の炭酸水素イオン濃度は0.944meq/lで、98年6月以来の湯出野沢well-1における炭酸水素イオン濃度の平均(およそ0.7meq/l)に比べてかなり高い。

CH-10孔内水と湯出野沢well-10の水 2000年8月は、両者はほぼ同じ濃度である。9月, 10月は湯出野沢well-10の水のイオン濃度は低下しているが、CH-10の方はむしろ上昇し、10月には硫酸およびナトリウムイオン濃度について2倍もの違いがでた。9月に湯出野沢well-10の水の塩化物イオン濃度が25.6mg/lと顕著に増大したとき、CH-10においてもその濃度が13.6mg/lに増大しており、このことは注目に値する。

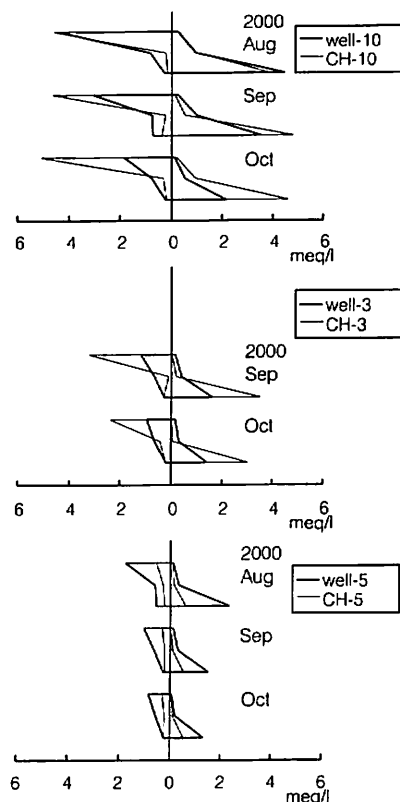


図-10 湯出野沢集水井内の水と隣接する水位観測孔内水の水質

Fig.10 Major ion concentrations of water from Yudenosawa drainage wells and neighboring Boreholes

CH-3孔内水と湯出野沢well-3の水 全イオン濃度はCH-3の水の方が2倍近く高い。9月から10月にかけて、CH-3の水、湯出野沢well-3の水ともに全イオン濃度が減少し、減少の程度はCH-3の方が著しい。

CH-5孔内水と湯出野沢well-5の水 CH-5の水は、湯出野沢well-5の水に比べてイオン濃度が低く、その濃度は湯出野沢の地表水と同程度である。CH-5の水は2000年8月、9月、10月の期間ほぼ一定のイオン組成で、8月に湯出野沢well-5の水の塩化物イオン濃度が18.4mg/lに増加したときにも変動がなかった。

湯出野沢well-5の集めている水 CH-5の水と湯出野沢well-5の水とでは、水質が大きく異なる。その理由として、湯出野沢well-5は上流の集水井で集められた高濃度の地下水が通過する井戸となっていて、周閉の地下水系から孤立した井戸となっているとも考えられる。しかしながら、8月に現れた湯出野沢well-5の塩化物イオン濃度の顕著な増加は、湯出野沢well-5が上流の井戸とは別個に地下水を集めていることを示唆する。したがって、集水井にはより深部の地下水が供給されていて、集水井の近傍では上下方向で地下水塊が異なることがある、と考えられる。いずれにしても一連の集水井において上流側から下流側に向かって同じ地下水が流下しているとは考えにくい。

4-6. 松坂地区

松坂地区の湧水の水質および流量 1998年からの調査によれば、松坂地区の湧水の水質は期間を通じ一定に近い炭酸水素-ナトリウム型であり、その流量は季節的に50倍以上増減するという特徴がみられる(表2)。流量は融雪期において顕著に増大するものの、イオン濃度はわずかに低下するのみである。1998年8月の豪雨後に炭酸水素イオン濃度が低下し、硫酸イオン濃度が増加したことを除くと、水質は流量によらず一定で、滝坂地すべり地内に決めた観測地点の中では最も安定している。

松坂湧水の供給源 松坂湧水の流量は、融雪期のみならず豪雨および長雨の後にも増加し、降雨や融雪の影響を強く受けている。一方、湯出野沢の集水井では、降雨や融雪の後に硫酸イオン濃度が上昇するが、松坂ではほとんど水質変化がみられない。1999年6月6日から8月21日までに実施した計6回の調査の間、流量が直線的に増加ないし減少したと仮定すると、この期間の松坂湧水の流量は 5.7×10^3 ton程度と見積もられる。アメダス西会津によるこの期間の降水量は418mmである。それ以前の30日間の最大の雨量は10mm、総計は24mmにとどまる。蒸発散量を差し引いて、松坂湧水より上方の幅250m、長さ500mの長方形で囲まれる地域を地形的集水域と考えるとこの期間の涵養量は 1.2×10^3 tonとなる。検討している期間には推定された涵養量の4.8倍も流出があった可能性があり、松坂地区は集水域外から水の集まる地域であることになる。松坂湧水の陰イオン組成はつねに炭酸水素イオンが卓越しており、年間を通じて硫酸ナトリウムを主成分とする湯出野沢地区の泥岩と反応した水に由来していない。

表-2 地下水の流量ならびに電気伝導度

Table 2 Discharge and electric conductivity of groundwater

	Sodenosawa drainage tunnel		Numata Upper drainage		Numata Lower drainage		Matsuzaka spring		Yudenosawa drainage
	ton/min.	μS/cm	liter/min.	μS/cm	liter/min.	μS/cm	liter/min.	μS/cm	
99.4.17	1.1	825		278		102.4		162.5	
99.4.22	0.9	878		326		135.4		170.7	
99.5.5	0.8	786	6.7	303	5.3	133.1		158.5	
99.5.20	0.6	776	2.1	402	3.1	112.0	30.0	155.1	0.9
99.6.6	0.6	757	1.3	436	3.3	151.5	3.2	245	0.9
99.6.16	0.5	718	1.5	332	2.8	127.9	15.6	154.6	0.7
99.7.12	0.5	747	27.0	319	3.6	137.0	65.0	199	1.8
99.7.26	1.7	855	7.7	379	7.7	143.8	130	156	0.6
99.8.14	0.5	768	2.2	377	3.0	144.3	12.6	211	0.3
99.8.21	0.4	733	1.7	360	2.8	134.2	5.7	202	0.5
99.9.12	0.6	737	1.9	353	2.7	149.0	2.5	225	0.6
99.9.26	1.2	862	7.2	392	7.2	122.0	97.5	195	1.1
99.10.6	0.5	890	2.6	418	3.9	203.0	19.5	265	0.8
99.10.15	0.3	813	1.8	376	2.7	148.9	5.3	194.4	0.8
99.11.3	0.3	810	4.3	269	3.4	130.2	48.8	191	0.8
99.11.17	0.4	866	7.2	248	2.9	126.1		189	0.3
00.3.4	0.8		8.3	477	5.7	372		231	
00.4.15	1.7	1144					390	150.2	
00.5.14	0.4	1033	4.9	287	6.4	119.7	55.7	142.8	1.5
00.6.18	0.1	916	2.3	243	3.3	115.2	8.0	150.4	1.4
00.7.11	0.1	910	2.6	240	1.4	113.6		147.9	0.7
00.8.6	0.1	978	2.8	316	1.0	114.6		251	1.1
00.9.9	0.2	950	1.5	301				165.2	0.5
00.10.15	0.1	851						162.5	0.3

4-7. 断層沿いの深層地下水の供給の可能性

湯出野沢well-1に現れる地下水の塩化物イオンと硫酸イオンは増減の時期が異なっている。こうした時期の違いは、これらのイオンが異なる水塊に由来することを示唆している。2000年の湯出野沢連続集水井7基の水質調査によると、塩化物イオン濃度の増減は沢全体で一様ではなかった。また2000年8月6日に湯出野沢well-5の水と引牧well-1の水がともに高い塩化物イオン濃度となり、とくに引牧well-1の塩化物イオン濃度は滝坂で最高の濃度となった。湯出野沢連続集水井と引牧well-1の水の塩化物イオン濃度の顕著な増加と、大石田山地区ボーリングBV224における採水深度29.5mと80.0mの孔内水に塩化物イオン、ナトリウムイオンが多い(鈴木, 2000MS)ことは、断層沿いに深層地下水が供給されていることによるであろう。

4-8. 滝坂地すべりの地下水のイオン供給源

地下水の陽イオン組成は鉱物とのイオン交換反応によって多様に変化するので、地質を反映するものではないが、トンネル排水のカルシウムイオン濃度は地すべり地の中で最も高く、下沢の目地区中央付近にカルシウムイオンの供給源があるものと推定される。陰イオンは、塩化物イオン、硫酸イオン、炭酸水素イオンに卓越する地下水が、それぞれ大石田山地区、湯出野沢地区、松坂地区に分布する。また季節によって塩化物イオン濃度は湯出野沢の集水井と引牧well-1において通常の数倍程度にも及ぶ高い濃度となることがある。湯出野沢と下沢の目においては、断層を通じて上昇する深層地下水に呼応して塩化物イオンが供給されていると考えられる。高濃度の硫酸イオンは湯出野沢、下沢の目の泥岩分布地帯の水にみられ、泥岩中の黄鉄鉱の酸化に起因する。湯出野沢の水位観測孔の一部においては炭酸水素イオン濃度が塩化物イオン濃度を下回り、硫酸酸性の環境を示唆する。炭酸水素イオンは、水への炭酸ガスの溶解が供給源であるが、典型的な炭酸水素-ナトリウム型の松坂湧水の場合、その豊富な流量は湧水の上流域における地表面からの涵養だけでは説明できない。地形学的分水界と地質学的分水界が大きく異なるか、多量の地下水の貯留を考慮する必要がある。松坂地区の外部からの地下水も寄与しているながら、松坂湧水の水質が一定であることは、泥岩との反応が進行していない地下水が多量に存在することを示唆している。

4-9. 既存の対策工が地下水に及ぼしている影響と活動を抑制している原因

湯出野沢では連続集水井によって、年間数回にわたって上昇する深層地下水を排水することにより、過剰間隙水圧の発生を防いでいる。沼田地区においては、松坂地区からの地下水の寄与が、1998年8月豪雨時も含めて顕著に増大することがないので、集水井によって排除される崩積土中の水の供給源に大幅な変化が生じない。このため、地すべりの活動が抑制されている。袖の沢排水トンネルによって深層地下水は排除されていないが、陥没帯の下沢の目中央部における泥岩中の地下水を排水することにより、袖の沢のみならず滝坂全体の地すべり活動を抑制している。

5. 結 論

1998年6月から2000年10月まで滝坂地すべり地の湧水、集水井排水などの採水調査を実施し、次の結論を得た。

- (1) 融雪期・夏季・初冬期に湯出野沢地区および下沢の目地区では泥岩中の水が、沼田地区では崩積土中の水が、地下に浸透した融雪水や多量の降水によって押し出され、排水施設に到達し、排水中の硫酸イオンおよびナトリウムイオンの濃度を上昇させる。
- (2) 出水期に増大する松坂湧水の湧出量については、松坂地区の上流の集水域以外で涵養した水が集中することを考慮する必要がある。
- (3) 沼田地区では、深層地下水の供給を示唆する水質の変動がみられない。沼田地区では少なくとも阿賀川の上流側、下流側で水塊が区分され、松坂地区から下流側への流入の程度は、1998年8月の豪雨時を含め大きく変化しない。このため、集水井による崩積土中の排水が効果をあげている。
- (4) 袖の沢地区の、堰沢および下沢の目地区との境界を排水している袖の沢排水トンネルの出口地点の水は、泥岩と反応して形成された水である。袖の沢排水トンネルは、断層沿いの深層地下水の寄与はほとんどなく、大部分は陥没帯を排水することにより、滝坂地すべり全体の活動を抑制している。
- (5) 南部ブロックにある下沢の目連続集水井の集水域を中心として、北部ブロックにある湯出野沢連続集水井の集水域まで延びる断層上の一帯では、断層を通じた深層地下水の供給により、地下水の塩化物イオン濃度が上昇することがある。とくに湯出野沢においては、地下深部からの水の供給が、沢全体一様ではないうえに、集水井の集水ボーリングより上部に到達しない場合がある。湯出野沢の集水井は、断層から水を集めることにより、過剰間隙水圧の発生を防いでいる。

謝 辞

建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所並びに(財)砂防・地すべり技術センターには未公表資料の使用を許可していただきました。ご厚意に深謝申し上げます。

新潟大学積雪地域災害研究センターの渡部直喜博士には粗稿を読んでいただき、有益なご指摘をいただきました。記して感謝の意を表します。

文 献

気象庁 (1999) : アメダス観測年報1998.

気象庁 (2000) : 気象月報.

建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所 (1997) : 阿賀野川流域の直轄地すべり対策事業赤崎と滝坂 (パンフレット).

佐藤 修 (1983) : 虫亀地すべり地の地下水のアニオンの起源—地すべり地の陸水の水質3—, 新潟大学積雪地域災害研究センター年報, 5, 33-42.

佐藤 修・青木 滋 (1990) : 地すべり地内外の水質の特徴—第三系泥岩地帯の地すべりを例として—, 地すべり, 27-1, 27-33.

柴田豊吉 (1972) : 福島県耶麻郡西会津町滝坂付近の地すべりについて, 東北大学地質古生物研邦報, 73, 123-131.

- 鈴木将之 (2000MS) : 福島県滝坂地すべり地の深層地下水の研究, 新潟大学大学院自然科学研究科修士論文.
- 鈴木将之・佐藤 修 (1999) : 滝坂地すべり地の地下水の構造の考察, 第38回地すべり学会研究発表講演集, 493-496.
- 鈴木将之・小松原岳史・佐藤 修 (2000) : 水質による連続集水井の集水範囲の推定, 第39回地すべり学会研究発表講演集, 197-198.
- 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, 5, 667-674.
- 渡邊一也・坪井正由・根本正一 (1995) : 東北の巨大地すべり—滝坂地すべり—, 地すべり, 32-3, 55-70.