

地盤工学会・技術者交流特別セッション
解説

地すべりを反映する地下水、微生物、粘土の特徴

高橋直人*・田崎和江**

*株式会社日さく北信越支社

〒950-0891 新潟県新潟市東区上木戸1-10-1

**金沢大学大学院自然科学研究科

〒920-1192 石川県金沢市角間町

Groundwater, Microbial Mats and Clays Reflect the Landslide Areas

Naoto TAKAHASHI*, Kazue TAZAKI**

*Nissaku Co., Ltd.

1-10-1 Kamikido, Niigata 950-0891

**Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192

Abstract

The colorful microbial mats formed and caused stoppage in all drainage pipes at several landslide areas in Niigata Prefecture. The water catchments worked well for a short period such as within three years after the construction. In this study, samples from the damaged areas showing reddish brown microbial mats with iron bacteria, and green microbial mats with diatoms were observed by optical and electron microscopy, XRF and XRD analyses. The green microbial mats were more remarkable in areas mainly containing smectite clays versus sandstone areas rich in ferrihydrite. The green microbial mats formed in areas where the concentration of dissolved oxygen (DO) was more than 8 mg/L, and the oxidation-reduction potential (Eh) was more than +300 mV. On the other hand, the reddish-brown microbial mats formed in areas where the DO was less than 6.2 mg/L, and Eh was less than +300 mV. The reddish-brown microbial mats consisted of ferrihydrite formed by iron oxidizing bacteria at the outlets of the drainage pipes. In landslide areas, we pointed out the necessity of maintenance based on groundwater, microorganisms and geological features which contribute to the spread of clays. We propose two methods to prevent the formation of biomats in landslide fields, such as connected pipes and different materials used for drainage pipes.

Keywords: Landslide, Microbial mats, Ferrihydrite

1. はじめに

日本列島は、国土の2/3が山地であり、平野が乏しいことから、経済社会活動を行ううえで、土地利用の高度化、多様化を余儀なくされている。したがって、土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が頻繁に発生し、甚大な被害を被っている¹⁾。土砂災害のうち、「地すべり」とは、斜面上にある地塊が、地下の地層中に円弧状または平面状に形成されるすべり面の上を数mm～数m/日の比較的ゆっくりとした速度で移動する現象と定義されている²⁾。地すべりは、発生地の地質学的特徴から、「第三紀層地すべり」「破碎帯地すべり」「温泉地

すべり」に大きく分類されている³⁾。いずれも、粘土などの滑りやすい地層の上部の土塊が、地下水の影響を受け、ゆっくりと動き出す現象を言う。第三紀層地すべりとは、新第三紀の泥岩・凝灰岩地帯の風化した粘土層がすべり面を形成し、活動する地すべりのことである³⁾。地すべりの中でも第三紀層地すべりがくり返し起こっている場所は、なだらかな斜面になっていることが多く、こうした土地には、棚田が多くつくられてきた。地すべり地の移動土塊には地下水が多く、湧水池なども多いため、農業用水が豊富である。このため、地すべり地には比較的古くから集落があり、特に新潟県中越地方では、地すべりの被害が数多く報告されている。

2008年（平成20年）8月19日受付，2008年9月12日受理

一般に、地すべりの活動は地下水位の上昇と密接な関係があり、融雪期や豪雨時には、地すべり面付近の間隙水圧が上昇して地すべりが発生することが多い。したがって、地すべりを抑制するためには、すべり面付近の地下水を排除し、間隙水圧を常に低い位置に保っておく必要がある。

そのため、地すべり地では、地上からの水抜きボーリングや集水井を施工し、排水路と連結させて地下水を人為的に排水する施設が多く建設されている。

瀬川 (2003) は、地すべり地において施工された水抜きボーリングにおいて、主に鉄酸化細菌による赤褐色のバイオマットが形成され、排水機能に障害が現れている事例を指摘している⁴⁾⁵⁾。微生物により形成された多様な物質は、バイオマットと呼ばれ、形成時の環境を知る上で有効な存在である⁶⁾。また、形成されたバイオマットは、水抜きボーリングや集水井のライフサイクルを縮める大きな要因になっている^{7,8)}。このようなバイオマットは、地すべり防止施設だけでなく、水井戸などの上水道施設にも見られることがあり、その除去に膨大な費用を費やしている⁹⁾。温泉や火山地帯など、目視により観察可能なバイオマットに比較して、井戸内部やボーリング孔などの地下構造物に形成されるバイオマットの研究は、その観察が困難である¹⁰⁾。本研究は、地すべり地の水抜きボーリング孔におけるバイオマットの形成例を示し、その中に生息する微生物、粘土鉱物、地質や地下水の水質との関係を総合的に検討したものである。

近年、新潟県を始め全国各地の地すべり対策工事そのものは終了しつつあり、今後はすでに建設された施設の維持管理が重要な課題となってくることが予想される。

地すべり防止施設の多くは、中山間地の斜面に施工されていることもあり、施設完成後、定期的な維持・管理ができていないところは少ない。したがって、地すべり対策事業においては、このようなバイオマットの形成環境およびその要因を明らかにし、排水機能を維持するための方策を検討することが重要な課題となっている。

2. 地質概要

本研究において調査対象としたのは、新潟県柏崎市の山中地すべり地帯である。この地すべりは砂岩・泥岩互層に発生する新第三紀層地すべりに分類される。

この山中地すべり地は、新潟県柏崎市南部の丘陵地帯に位置し、南北方向の背斜軸の軸上にあり、地質は椎谷層からなる。地すべりの範囲は山中集落を取り囲む南北約 800 m、東西約 400 m の範囲であり、広く浅い舟底状凹地の中に点在している。この凹地形の中央には馬の背状の尾根があり、その両側を2本の沢が北東方向に流下している。沢地形の最上流部は北東側に開いた幅約 250 m の馬蹄型を呈している。このうち南側の新屋敷・抜間・新場地区には、落差 20~30 m の急崖が連続している。一方、北側の向林沢はほぼ東西方向に延びた直線的な沢である。この沢底には幅 30~40 m の谷底低地が形成されている。山中集落は二つの沢の谷頭部あるいは中央の尾根上に点在している。この地区はかつて大規模な活動があり、江戸時代には柿の木が 20 m も動いた話が残っている。しかし、現在では地盤変状の兆候は認められない。この地域の地質は大きく2つに区分される。標高 200 m 以上の地すべり斜面上部および中部の山中

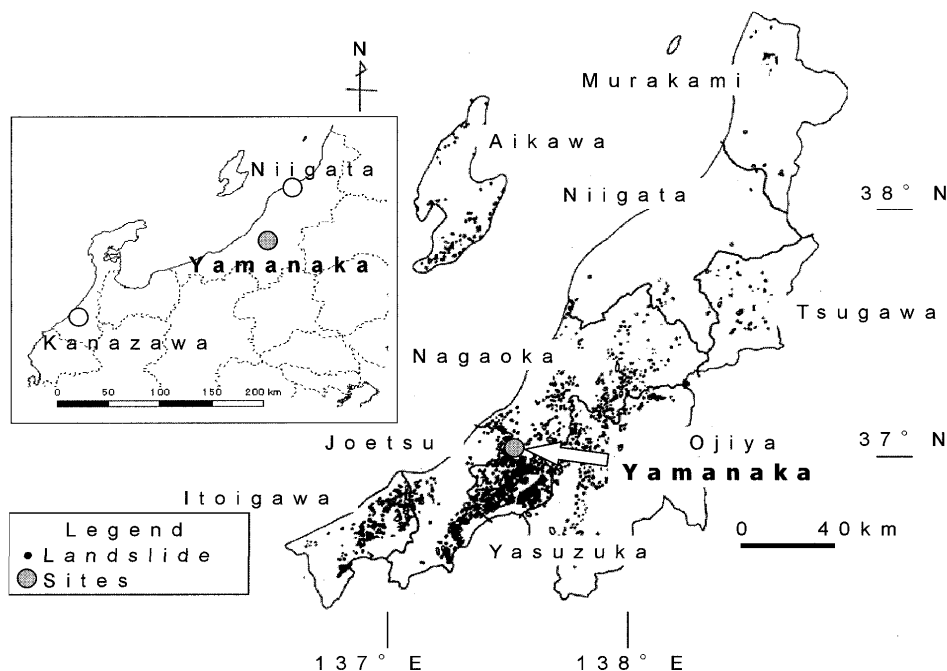


Fig. 1 新潟県における地すべり地帯の分布と調査対象の地すべり地の位置図

(斜面防災対策技術協会, 2006に加筆)

集落付近には、風化した砂岩層が 15~20 m の厚さで分布している。この地層は、過去の大規模地すべりの移動土塊と推定される。これに対し、標高約 200 m 以下の区域に風化砂岩層は分布しておらず、新鮮な泥岩が分布している。さらに、この部分にみられる二次地すべり地の中には、厚さ 5 m 程度の粘土を主体とする地層が分布し、地すべり移動土塊を構成している。このような地形・地質特性からみて、過去の大規模な地すべりは、標高約 180 m より高い部分と判断される。それより標高の低い部分は、その後侵食形成された 2 次地すべりによるものと推定される。

この地域では、1984~2000年にかけて 23群の水抜きボーリングと 7 基の集水井が施工されている。水抜きボーリング工とは、地表から仰角 1~3° で上方に向けて 5~10 群の水平ボーリングを扇状に施工し、保孔管を挿入するものである。水平ボーリングの長さは 40~70 m であり、すべり面と交差するように施工する (Fig. 2)。耐久性やコスト面から、塩化ビニル管を保孔管としている例が多い。水抜きボーリングの孔口には、コンクリート製の柵が設置されており、排水した地下水がふたたび地下に浸透することのないように、水路あるいは河川に排水される¹¹⁾。水抜きボーリングでは、施工直後からバイオマットの形成により排水機能に支障を来す場合がある。研究対象としたバイオマットの形成が著しい水抜きボーリングは、新潟県山中地すべり地帯に 1993 年に施工されたものである (Fig. 3)。

本研究では、各水抜きボーリングにおいてバイオマットの形成状況を目視により観察し、各孔からの湧水量、

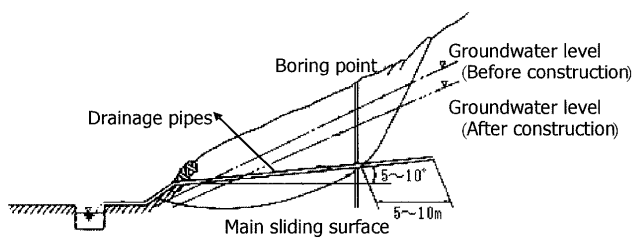


Fig. 2 水抜きボーリングの概念図

(斜面防災対策技術協会, 2006に加筆)

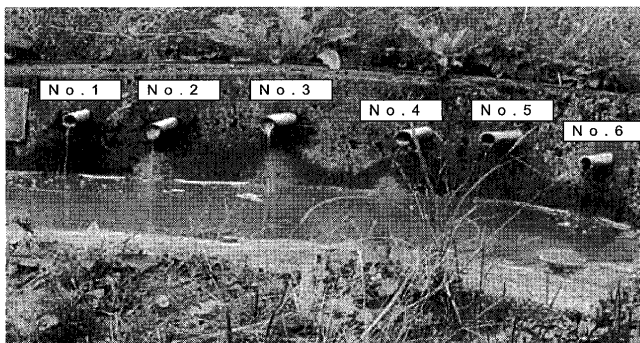


Fig. 3 新潟県山中地すべり地における赤褐色バイオマットにより排水機能に支障がある例（施工後10年）

水温、pH、電気伝導度 (EC)、溶存酸素濃度 (DO)、酸化還元電位 (Eh) について現地で計測を行った。現地の観察は 2003年 6月24日に行い、2004年 4月には、高圧水で孔内洗浄が行われた。このときの排水を観察し、孔内に形成されたバイオマットの観察・分析を行った。

3. 試料および実験方法

3.1 水質測定および試料採取

山中地すべり地の各水抜きボーリングに形成したバイオマットの形成状況を目視により観察し、各孔の湧水量、水温、pH、EC、DO、Eh について現地で測定を行い、試料の採取を行った。山中地すべり地では、2004年 4月の洗浄時の孔内からの排出物を X線粉末回折分析を行った。採取したバイオマットは、2.5% グルタルアルデヒドを添加して固定し、顕微鏡観察用試料とした。

pH および EC 測定は東亜電波社製 WM-22EP 型水質分析計を用い、DO メーターは DO-21P を用いた。また、ORP 電極を用いて比較電極電位を測定した値を、補正式 $Eh (mV) = ORP + 206 - 0.7 \times (水温 - 25)$ によって補正した。

3.2 地下水の化学組成

バイオマットの形成が著しい地点 (No. 2) と、バイオマットの形成が見られない地点 (No. 6) を選定し、地下水の採水を行った (Fig. 3)。島津製作所製 LC-10A システムを用いイオンクロマトグラフ法で Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の分析を行った。 HCO_3^- については、メチルオレンジ滴定法を用いて定量した。また、日立製作所製 180-50 型原子吸光/蛍光分光光度計を用いて Fe, Mn の定量を行った。

3.3 バイオマットの光学顕微鏡観察

ボーリング孔口から採取したバイオマットをスライドガラスにのせた後、DAPI (4', 6 diamidino-2-phenylindole dihydrochloride) 染色を行い、落射蛍光・微分干渉光学顕微鏡 (Nikon OPTIPHOT-2/LABOPHOT-2, EFD-3) によって試料中の鉱物・微生物を観察した。DAPI 染色を施し、蛍光下で観察を行うと、微生物の細胞中の DNA が染色され、青色の蛍光を発する。また、鉱物の一部も蛍光下では、黄色の自家蛍光を発する。なお、鉄酸化細菌の種の同定は、光学顕微鏡による形態観察から、日本水道協会 (1999) 「日本の水道生物」を参照して行った。

3.4 バイオマットの粉末 X線回折分析 (XRD)

バイオマット中の鉱物組成は、粉末 X線回折分析により同定した。分析には理学電機製 RINT1200・2000 型 X線回折装置を使用し、 $CuK\alpha$ 線を用いて電圧 40 kV、電流 30 mA で測定した。試料は自然乾燥させた後、メノウ乳鉢で粉碎しガラス板に詰めたものを使用した。

3.5 バイオマットのエネルギー分散型蛍光X線分析 (ED-XRF)

バイオマットの化学組成を, 日本電子製エネルギー分散型蛍光X線分析装置 JSM-3201, Rh-K α 線源を用い, 加速電圧 30 kV で FP (ファンダメンタルパラメーター) により半定量分析を行った. 分析には試料を自然乾燥させ, 乳鉢で粉末にし, ペレットを作製したものをを用いた.

4. 現地調査および分析結果

4.1 現地調査結果

山中地すべり地の, 南側の標高 230 m 付近の尾根直下から, 北東側の標高 100 m 付近の最下部まで, 23群の水抜きボーリング孔が施工されている. 1群あたりの水抜きボーリングの本数は 5~8 本, ボーリングの延長は 30~70 m である (Fig. 4). 保孔管は塩化ビニル製で, 孔口から 2 m 以奥はオールスクリーン構造となっている. バイオマットの分布は地質による特徴が見られ, 地すべり地域の中でも特に風化泥岩・粘土の分布する地すべり下部地域に施工された水抜きボーリング孔にバイオマットの形成が著しい. 一方, 風化砂岩の分布する地す

べり上部地域に施工された水抜きボーリング孔では, バイオマットの形成は見られないか, あっても小規模なものであった. また, 同一地点の水抜きボーリングでも, 集水ボーリングの方向により, バイオマットの形成状況は大きく異なっていた (Fig. 3, 4).

4.2 地下水の水質測定

水抜きボーリングからの湧水量は 0.26~0.98 L/min であり, ここでは湧水量とバイオマットの有無との相関は見られない (Table 1). 地下水温は 11.6~13.6 $^{\circ}$ C と幅のある値を示した. pH は 6.3~6.7 といずれも弱酸性を示した. EC は 32.5~52.8 mS/m の値を示し, バイオマットが形成されている水抜きボーリング孔の EC 値が高いことが特徴的である. 一方, DO は, バイオマットが形成されている水抜きボーリング孔で 3.0~6.2 mg/L と比較的低い値を示し, また Eh も +166~+244 mV と, バイオマットの形成が見られなかった孔の +278~+315 mV にくらべて低かった. 赤褐色バイオマットが形成されている水抜きボーリング孔 No. 2 の地下水は, Mg $^{2+}$, Ca $^{2+}$, HCO $_3^-$ など岩石風化に由来するイオン成分に富み, 総鉄濃度は, 21.0 mg/L と高い濃度を示した. これに対し, 緑色バイオマットの形成されるボーリング孔

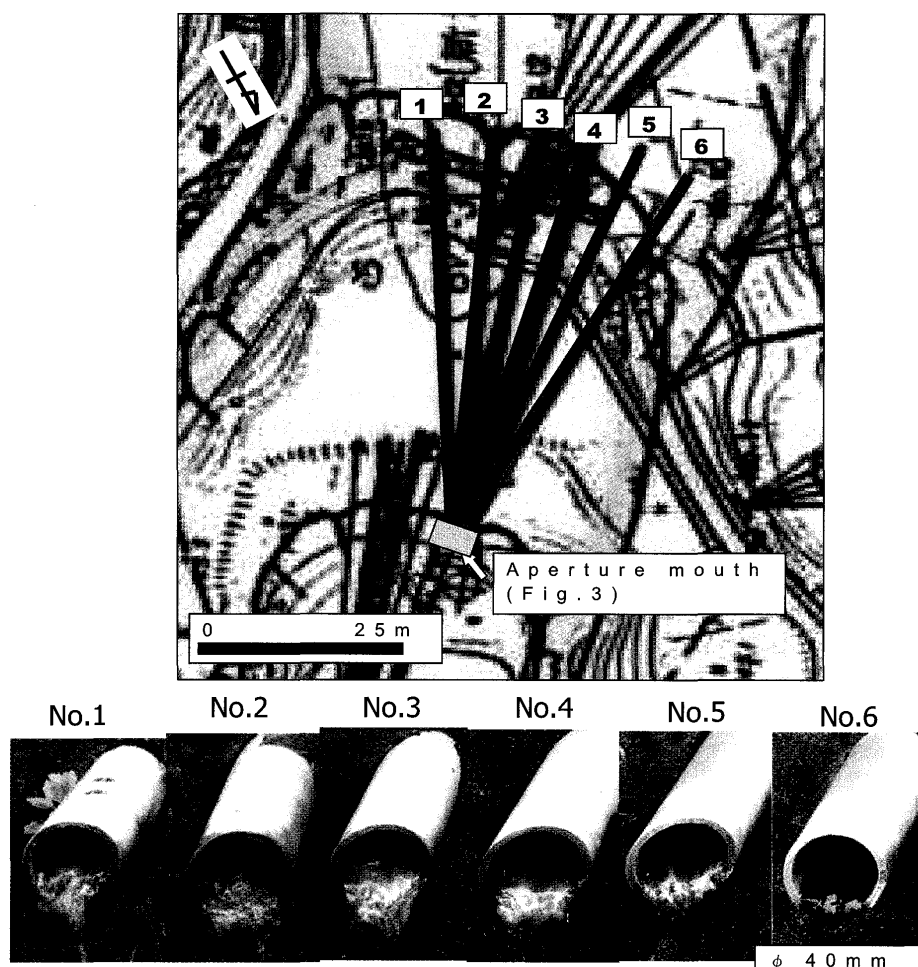


Fig. 4 新潟県柏崎市山中地すべり地域内におけるバイオマットの分布状況

Table 1 山中地すべり地における水抜きボーリングからの排水の水質測定および化学分析結果

No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Yield (L/min)	0.29	0.67	0.98	0.32	0.26	0.29
Water Temp. (°C)	13.5	13.6	13.6	13.2	12.5	11.6
pH	6.7	6.5	6.6	6.5	6.3	6.5
EC (mS/m)	40.0	32.5	37.0	24.8	21.4	21.1
DO (mg/L)	6.0	6.2	3.0	4.8	4.6	8.1
Eh (mV)	+ 234	+ 265	+ 289	+ 223	+ 299	+ 346

	No.2 (Reddish-brown biomats)	No.6 (Green biomats)
Na ⁺ (meq/L)	0.65	0.65
K ⁺ (meq/L)	0.06	0.10
Mg ²⁺ (meq/L)	0.70	0.55
Ca ²⁺ (meq/L)	0.45	0.33
Cl ⁻ (meq/L)	0.26	0.25
SO ₄ ²⁻ (meq/L)	0.35	0.40
HCO ₃ ⁻ (meq/L)	1.47	0.93
Total Fe (mg/L)	21.0	0.03

No. 6の地下水の総鉄濃度は 0.03 mg/L 未満ときわめて低かった (Table 1).

4.3 バイオマットの観察結果

水抜きボーリング孔 No. 1~No. 5ではバイオマットの形成が著しく, No. 6はバイオマットの形成がわずかであるか, またはほとんど見られなかった. バイオマットの形成が見られた孔の代表として No. 2を, 形成が見られなかった孔の代表として No. 6の観察結果を Fig. 6~7 および Table 2 に示す.

No. 2のバイオマットは主に代表的な鉄酸化細菌である *Toxothrix trichogenes* の代謝物である糸状体からなっている (Fig. 6-A). 走査型電子顕微鏡 (SEM) の観察結果からは, 直径が約 0.3 μm の糸状菌が束状になっているのが観察され, P と Fe が顕著である (Fig. 6-B, inset). これに対し, No. 6のバイオマットは, *Navicula* など珪藻類とクロロフィルを持つシアノバクテリアからなっており, 鉄酸化細菌はわずかししか認められない (Fig. 7-A). SEM 観察によれば, 25~30 μm の長い珪藻が薄膜に付着しており, EDX 分析では, その表面は Si の強いピークが検出された. また, 数μm の直径を持つ球状~円盤状~じゅず状の微生物も認められた (Fig. 7-B, inset). なお, *Navicula* 属は, 湧水や水田な

ど, 淡水中に広く生息する藻類として知られている¹²⁾. 水抜きボーリング孔 No. 1~No. 6のバイオマット中に認められた微生物や珪藻を Table 2 に示した. No. 1~No. 5と No. 6の生態系が大きく異なることが顕著である.

4.4 バイオマットの XRF および XRD 分析結果

バイオマットの形成が著しかった No. 2孔において, 孔口付近 (5 m) と奥 (40 m) の洗浄時の排出物について

Table 2 新潟県山中地すべりにおいて光学顕微鏡で認められた微生物の一覧

Name	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
<i>Leptothrix ochracea</i>	+++	-	-	+++	+++	-
<i>Toxothrix trichogenes</i>	++	++	++	++	++	-
<i>Gallionella ferruginea</i>	-	-	-	-	-	+
<i>Navicula</i>	-	-	-	-	+	+++
<i>Nitzschia</i>	-	-	-	-	-	+
<i>Pinnulalia</i>	-	-	-	-	-	+

+++; abundance
 ++; common
 +; trace
 -; not found

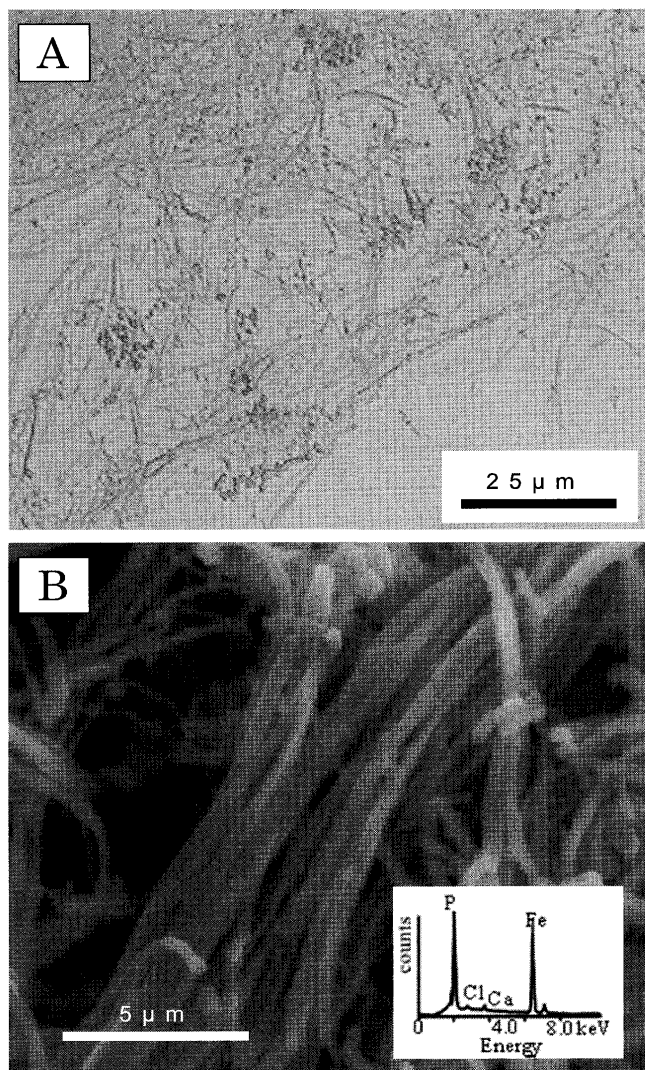


Fig. 6 新潟県山中地すべり地におけるバイオマットの光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡写真 (No. 2孔)

てXRFとXRD分析を行い比較した。その結果、長さ50 mの水抜きボーリングのうち、比較的孔口に近い部分(孔口から5 m)の排出物は、Feが顕著であり、0.25 nmと0.15 nmにブロードな反射がみとめられることからferrihydriteと同定した(Fig. 8)。NaOH処理を施すことにより、0.25 nmと0.15 nmの2つの反射がより鮮明になった(Fig. 8)。なお、褐色の噴出物は、孔口から15 m付近まで見られ、それより奥ではほとんど見られなかった。一方、No. 2の孔口から40 mの排出物は、Feの他にSiが主な成分であり0.15 nm, 0.10 nm, 0.07 nmに反射が認められた。EG処理により、0.15 nmの反射は0.17 nmにシフトしたのでスメクタイトと同定した。また、0.10 nmは雲母類粘土鉱物、0.07 nmはカオリン鉱物と同定した(Fig. 9)。一方、緑色バイオマットを形成しているNo. 6孔洗浄時の排出物のXRD分析結果により、いずれも0.33 nm, 0.43 nmに石英、0.32 nmに長石類の反射が認められた。さらに、0.4 nm付近にブロードな反射が認められることから非晶質シリカの

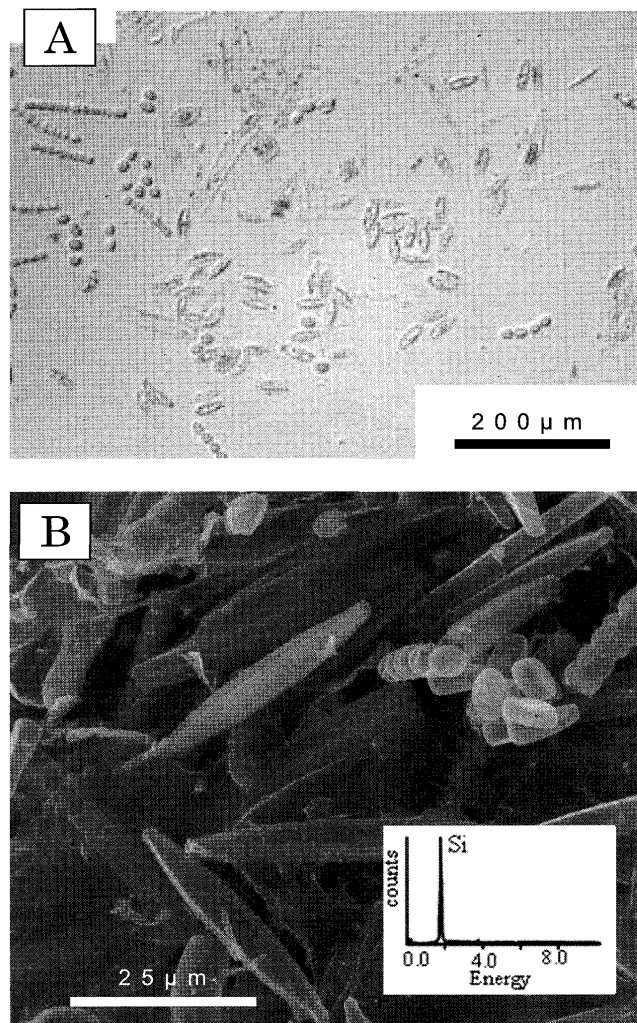


Fig. 7 新潟県山中地すべり地におけるバイオマットの光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡写真 (No. 6孔)

存在が示唆された(Fig. 10)。イライトと思われる0.09 nmの小さな反射も認められた。赤褐色バイオマットは主にferrihydrite、緑色のバイオマットは主に石英、長石類をともなった非晶質シリカから構成されることが明らかとなった。

5. 考察

新潟県の代表的な地すべり地における水抜きボーリングから出る地下水の性質、洗浄時に排出される物質の粘土鉱物組成、色の異なるバイオマット中の微生物について、それらの相互関係、エコシステムなどの考察を行う。

5.1 地すべり地帯の地下水の水質

第三紀泥岩地域の地すべり地において、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} などの溶存成分は、地すべりにより攪乱された黄鉄鉱から溶出したものである¹³⁾。本研究のTable 1で示したように、粘土主体の地質環境下において掘削された水抜きボーリング孔からの地下水は、岩石風化に由来す

孔口より5 m (No. 2)

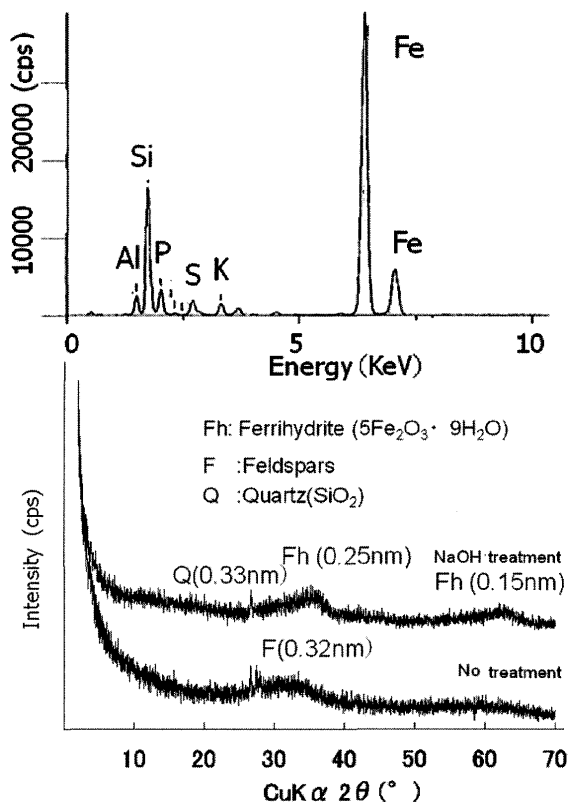


Fig. 8 新潟県山中地すべり地における水抜きボーリング洗浄時に噴出した物質の蛍光X線分析(上)および粉末X線回折分析(下)(山中No. 2孔口から5 m)

孔口より40 m (No. 2)

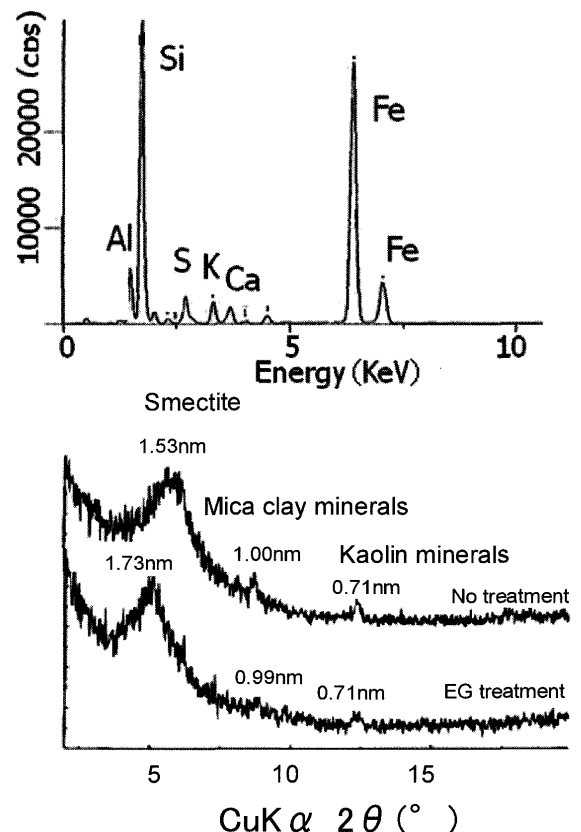


Fig. 9 新潟県山中地すべり地における水抜きボーリング洗浄時に噴出した物質の蛍光X線分析(上)および粉末X線回折分析(下)(山中No. 2孔口から40 m)

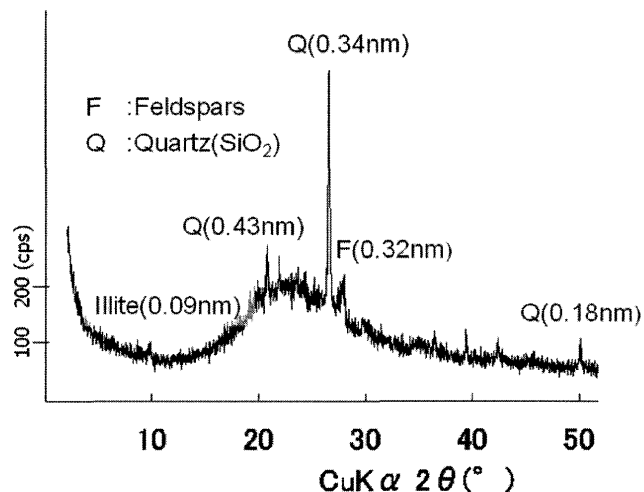


Fig. 10 新潟県山中地すべり地における水抜きボーリング洗浄時に噴出した物質のXRD分析結果(山中No. 6)

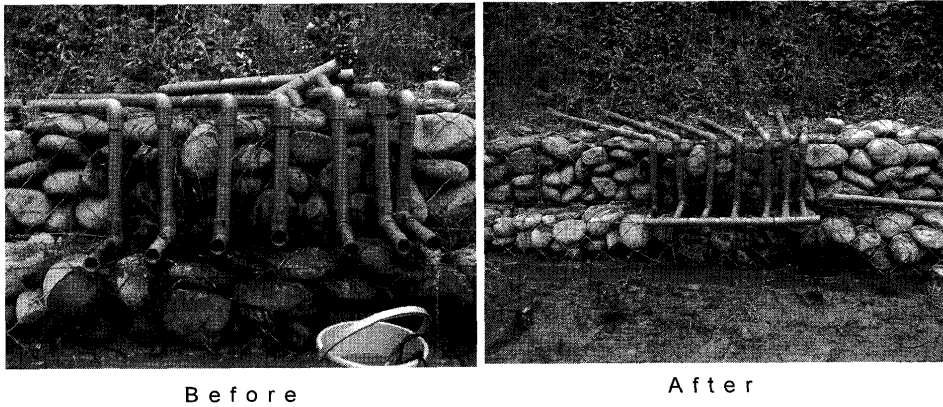
る溶存成分を多く含んでおり^{14,15}、その中にはバイオマットの形成に大きな影響を与える鉄も多く含まれていた。なお、第三紀層地すべり地域においては、砂質岩よりも泥質岩地域でバイオマットの付着度が大きい傾向が認められる¹⁶。山中地すべり地においても、砂岩主体の

地質環境下の水抜きボーリングではバイオマットの形成が見られず、珪藻類が卓越していた。バイオマットの種類や形成状況を決定する要素として、DOやEhの他に地下水中に含有するFeイオンなどが重要な要素となっている¹⁷。地下水のDOが8 mg/L以上で、Ehが+300 mV以上の酸化環境下では、珪藻による緑色バイオマットが形成されている。DOが3.0~6.2 mg/Lで、Ehが+100~+300 mVの環境下では、鉄細菌による赤褐色バイオマットが形成されていた。このようなボーリング孔からの地下水中の鉄濃度は、21.0 mg/Lと高い濃度を示した。すなわち、水質、特にDO、Ehの環境と水中の溶存イオン、特にFeやSiは形成するバイオマットと生態系に強く影響を及ぼすことが明白である。

5.2 バイオマットの組成

洗浄時の排出物の分析結果から、No. 2孔口付近の赤褐色バイオマットは鉄酸化細菌により形成されたferrihydriteから構成されるが、孔口40 mの奥からは、スメクタイト、雲母類粘土鉱物、カオリン鉱物が排出された。赤褐色バイオマットは孔口から15 m付近のところまで分布していた。緑色バイオマットが形成されたNo. 6からの噴出物は主に石英、長石をともなった非晶

Example-1: Connected pipes



Example-2: Material of pipes

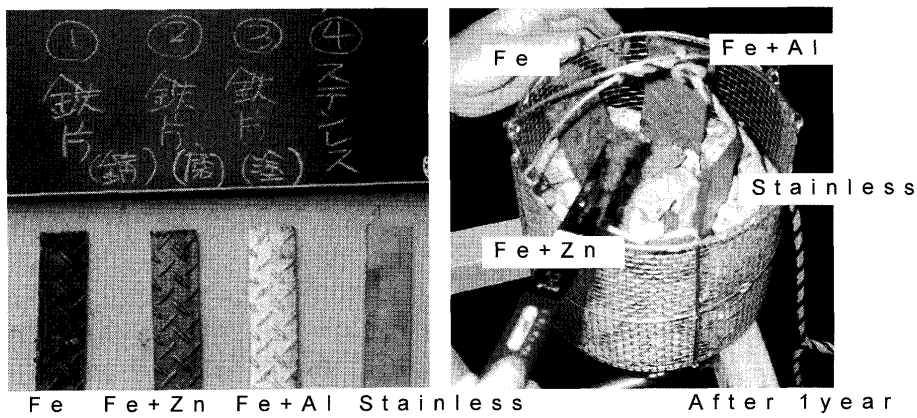


Fig. 11 現場におけるバイオマット付着防止対策例

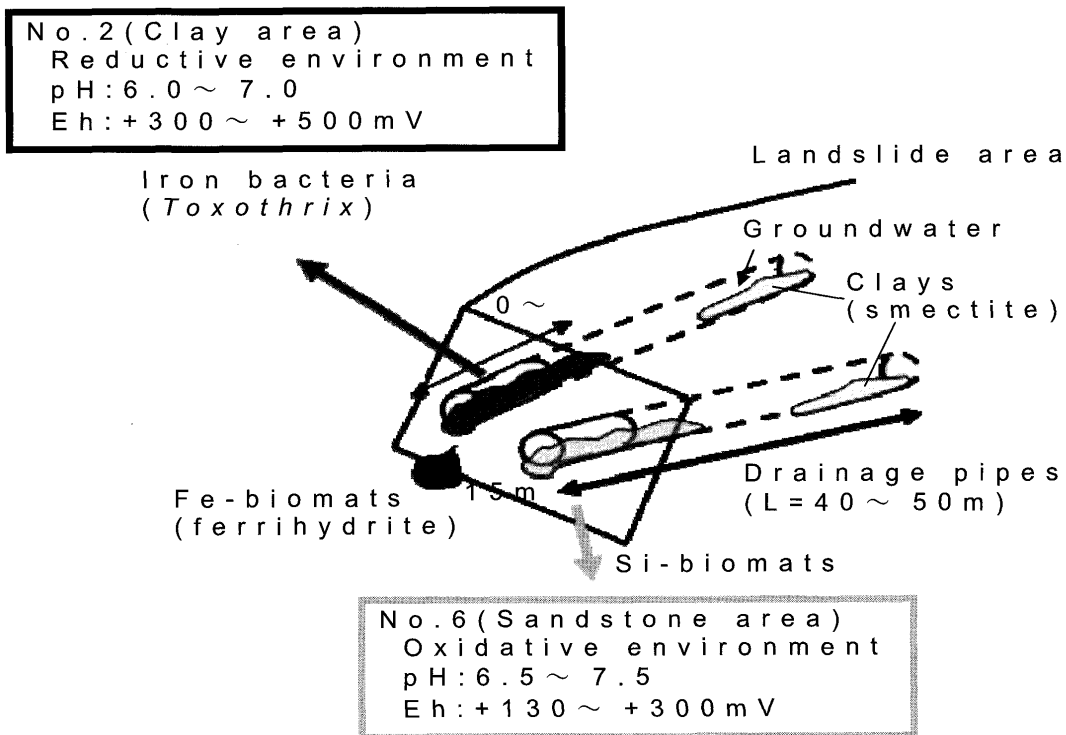


Fig. 12 水抜きボーリングにおけるバイオマットの発生状況模式図

質シリカから構成されることが明らかとなった。小島(2004)は、バイオマットの形成が見られた水抜きボーリング孔を小型TVカメラによって観察し、孔口付近でスケールの付着度が大きかった点を指摘している¹⁸⁾。本研究における洗浄時の観測結果は、その結果と一致するが、バイオマットは孔口付近のみならず15m付近まで形成されて集水管の目詰まりを起こしていることが明らかになった。このことは、粘土・泥岩地域の還元的な地下水が大気に触れ、孔口付近で急激に酸化状態になるような環境下においてバイオマットが形成されるのみならず、DOやEhが低く、常に還元的な水抜きボーリングの奥(孔口から15m)までバイオマットが形成されることを示している。奥部では鉄還元細菌などの働きでバイオマットの形成が行われることを示唆している。一方、常に酸化的な砂岩地域の水抜きボーリング孔口では、珪藻類やシアノバクテリアの繁殖が見られ、緑色バイオマットが形成されているが、孔の奥深くには形成されていない。太陽光線の届く範囲で光合成を行うシアノバクテリアや珪藻類のみが生息できる環境を示しているため、孔の閉塞を生じさせない主な要因である(Fig. 12)。

5.3 微生物の生育環境

赤褐色バイオマットは、主に *Toxothrix trichogenes* と *Leptothrix ocheracea* の代謝物である糸状体およびチューブ状物質で構成されている。これらの鉄酸化細菌は、地下水や河川水などの淡水中に広く分布する種として知られている¹⁹⁾。また、本研究では、直径が1~2μmの *Leptothrix ocheracea* の代謝物である鞘や *Toxothrix trichogenes* の代謝物が多く存在していた。これに対し、緑色バイオマットが形成される水抜きボーリング孔No. 6では、*Navicula* など、多種多様の珪藻やシアノバクテリアが生息し、鉄酸化細菌はみられなかった。すなわち、Table 2に示したように鉄酸化細菌と珪藻の棲み分けは比較的明瞭であり、赤褐色バイオマットの形成が顕著なボーリング孔No. 1~No. 4では、鉄酸化細菌と珪藻は共存せず、No. 5孔にのみ若干の共存が見られた。

ひとたび赤褐色のバイオマットが形成されると、鉄細菌の活動により地下水中の鉄分の集積や、溶存酸素の消費や酸化還元電位の低下がおり、その環境がさらにバイオマットの形成を進行させる循環が生じているものと考えられてきた^{20, 21)}。しかし、本研究にて明らかにしたように、水抜きボーリング孔の15m奥まで赤褐色バイオマットが形成されている事実は、孔口周辺の鉄酸化細菌とは別の鉄還元細菌が孔の奥深くへ進入していくことも考えられる(Fig. 12)。

5.4 水抜きボーリングの閉塞対策と今後の課題

水抜きボーリングの閉塞を阻止するための対策として、管材質や形状の検討などが今後の課題である。現状では、このようなバイオマットの形成に対する対策とし

て、水抜きボーリング孔内に高圧水を噴射して洗い流す作業が定期的に行われている。洗浄作業により一時的には集水ボーリングの孔口からバイオマットが除去されている。しかし、バイオマットの形成速度は速く、数週間後には孔口に新たなバイオマットの形成が始まる。洗浄から6ヶ月~1年後には、孔口がほぼ閉塞するところまで形成が進んでいる²²⁾。他の事例では、山形県の平根地すべり地において洗浄工実施後約3年間にわたって排水量の増加と地下水位の低下が維持されており、洗浄工の効果は2~3年と評価されている²³⁾。

バイオマットは還元的な環境と、酸化的な環境が接する場にて形成されることから、その形成阻止のための施工上の具体的な対策として、Fig. 11-1に示すように配管を連結させて空気に触れない配管を行うことが挙げられる。また、その孔口を直接池や河川の水中深部に設置することにより効果が期待できる。一方、Fig. 11-2に示したように、Fe, Fe+Znメッキ, Fe+Al塗装, ステンレスのようなテストピースによる付着実験を行うと、ステンレス製の板には、比較的バイオマットの付着が見られない傾向が認められた。しかし、積雪時における施設の維持や、設置にかかるコスト面も考慮すると、バイオマットの形成に対して著しい効果のある構造、材質は未だ提唱されていないのが現状である。今後は、水抜きボーリングの管材質、管構造の物理的対策のみならず、化学的、微生物学的方法を検討することで、バイオマットが形成されにくい環境をつくりだすことが必要である。

6. まとめ

本論文は、地すべり地帯の水抜きボーリング孔口における鉄酸化細菌バイオマットと珪藻バイオマットの形成事例を示し、その形成状況、形成条件について特徴を述べた。

赤褐色の鉄酸化細菌バイオマットが形成される地下水のpHは6.0~7.5の範囲であり、酸化還元電位は+100~+300mVの範囲を示した。地下水中の溶存酸素は、3.0~6.0mg/Lの微好気的な環境下で形成される。地下水中の総鉄濃度は、21mg/Lであり、赤褐色バイオマットは主にferrihydriteから構成され、鉄酸化細菌である *Leptothrix ocheracea* や *Toxothrix trichogenes* が生息している。一方、緑色バイオマットには、*Navicula*をはじめ多様な珪藻類やシアノバクテリアが生息し、Siを主成分とする石英や非晶質物質からなる。すなわち水抜きボーリングにおいて、鉄酸化細菌と珪藻類やシアノバクテリアの棲み分けは明瞭である。両者は酸化還元電位と溶存酸素に代表される地下水環境と水中の主成分により棲み分けられている。地すべり地帯における水抜きボーリング孔の閉塞対策として、管材や管構造が挙げられるが、今後、物理、化学的に加えて微生物学的な視野に立った対策が必要である。本研究の結果に基づき、あ

らかじめ地質・地下水状況からバイオマットの形成が予測できれば, その箇所における持続可能な維持管理について検討を行うことが可能になる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 故白石秀一氏には, 研究計画の立案・対象地区の選定を始め多大なご協力をいただいた。金沢大学大学院(現日東分析センター)の瀬川宏美氏には, バイオマットの光学, 電子顕微鏡写真の撮影にご協力をいただいた。また, 新潟県柏崎地域振興局からは水源施設, 観測施設の立ち入り許可を受けるとともに, 資料の提供を受けるなどご協力いただいた。厚く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 建設省河川局(1984) 砂防広報センター, 91.
- 2) 植村 武(1975) 第三紀層の地すべり発生と予測の研究 pp. 3-12.
- 3) 日本地すべり学会(2004) 地すべり—地形地質的認識と用語— pp. 29-45.
- 4) Segawa, H., Sato, K., Shiraishi, S., Takahashi, N. and Tazaki, K., (2003). In Tazaki, K. ed., Water and Soil Environments., 63-74.
- 5) Segawa, H., Sato, K., Shiraishi, S., Takahashi, N., Kanemoto, T. and Tazaki, K. (2003) In Tazaki, K. ed., Water and Soil Environments., 310-321.
- 6) 田崎和江編(1997) 橋本確文堂 pp. 1-91.
- 7) 丸山清輝・安藤達弥・飯田正巳(2003) 地すべり 39, 23-29.
- 8) 小嶋伸一・佐藤宗吾・丸山清輝・武士俊也(2004) 地すべり 41, 389-392.
- 9) 松本昌雄(1972) 水道協会雑誌 451, 42-44.
- 10) 高橋直人・榎本正嗣・名倉利樹・稗田佳彦・田崎和江・片桐憲一(2001) 日本地下水学会誌43, 71-88.
- 11) 新潟県斜面防災対策技術協会(2006) 地すべりに関する基本事項資料集, pp. 1-12.
- 12) 日本水道協会(1993) 日本水道生物—写真と解説 pp. 169-176.
- 13) 佐藤 修(1993) 地すべり技術 20, 146-167.
- 14) 保谷 勲・大森晃治・田崎和江(1998) 粘土科学 37, 153-163.
- 15) 今井真之(1996) 応用地質 37, 2-17.
- 16) 岸 智・浅野将人・河野剛士・森田健太郎(2006) 地すべり 43, 1-8.
- 17) Ghiorse, W. C. (1984) Annual Review of Microbiology., 38, 515-550.
- 18) 小島貞夫・須藤隆一・千原光雄(1995) 環境微生物図鑑 pp. 758.
- 19) 日本水道協会(1999) 深井戸の管理技術マニュアル pp. 138-149.
- 20) Holden, B., Greetham, M., Croll, B. T. and Scutt, J. (1995) Water Science and Technology., 32, 213-220.
- 21) Sand, W. (1997) International Biodeterioration and Biodegradation., 40, 183-190.
- 22) 高橋直人・瀬川宏美・田崎和江(2007) 日本地下水学会誌 49, 115-137.
- 23) 長谷部美樹・小松順一・山田孝雄(2006) 地すべり 43, 9-16.
- 24) 新潟県斜面防災対策技術協会(2006) 地すべりに関する基本事項資料集 pp. 1-12.