

# 重力変形斜面における地下水の水質変化に岩盤からの溶出イオンが与える影響

## THE EFFECT OF LEACHING ION FROM BEDROCK ON WATER QUALITY OF GROUND WATER IN GRAVITATIONAL DEFORMATION SLOPE

田中健貴<sup>1</sup>・木下篤彦<sup>2</sup>・小竹利明<sup>2</sup>・山田拓<sup>2</sup>・柴田俊<sup>2</sup>・  
窪田安打<sup>3</sup>・小松慎二<sup>3</sup>・林幸一郎<sup>3</sup>

Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Toshiaki KOTAKE, Taku YAMADA, Suguru SHIBATA,  
Yasuuchi KUBOTA, Shinji KOMATSU and Koichirou HAYASHI

<sup>1</sup>北海道大学 広域複合災害研究センター (〒060-8589 北海道札幌市北区北 9 条西 9 丁目)

E-mail: tanakay@cen.agr.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター  
(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々 3027-6)

<sup>3</sup>応用地質株式会社 (〒532-0021 大阪府大阪市淀川区田川北 2-4-66)

**Key Words:** deep-seated landslide, water analysis, electric conductivity, ion leaching, ground water

### 1. はじめに

2011 年台風第 12 号により、紀伊山地では深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が多発した<sup>1)</sup>。深層崩壊は、発生頻度は低い、被害は大きくなる場合が多い。深層崩壊による被害を防止あるいは低減するためには、深層崩壊が発生するおそれのある斜面(以後、危険斜面)を、事前抽出する必要がある<sup>2)</sup>。

これまで、危険斜面を抽出する方法として、調査対象斜面周辺の渓流水や、斜面における湧水の水質分析を行う方法が提案されてきた<sup>3)</sup>。この方法では、採水した試料の EC や溶出イオンに着目した分析を行う。この方法によって縦断的な渓流水の水質分析結果から、EC やイオン溶出量が大きくなる箇所が存在し、その要因として長期間にわたって地下に滞留した地下水が流出した可能性が考えられている<sup>4)</sup>。しかし、危険斜面周辺で EC が大きくなる詳細なプロセスについては、不明な点が多い。

これまで、紀伊山地では、危険斜面と考えられる斜面でボーリング調査が行われてきた。その結果、得られたボーリングコアに  $\text{CaCO}_3$  によって形成さ

れる白色脈が見られた。また、ボーリングコアを用いた溶出試験では、他イオンと比較して、 $\text{CaCO}_3$  から溶出した  $\text{Ca}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  が相対的に多く、これらの溶出イオンによって EC が大きくなる傾向が見られた<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>。以上を踏まえると、危険斜面内部の岩盤に  $\text{CaCO}_3$  が含まれる場合、 $\text{Ca}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  が溶出することによって、危険斜面周辺で湧水や渓流水の EC が大きくなるプロセスが仮説として考えられる。

そこで、上記仮説を検証する端緒として、危険斜面と考えられる重力変形斜面において、渓流水および地下水の EC の水質分析を行うこととした。これによって、渓流水および地下水の EC に影響を与える溶出イオンを分析し、岩盤に含まれる鉱物由来からの溶出イオンとの関係について検討することが出来ると考えられる。

### 2. 調査地および調査方法

調査は奈良県五條市赤谷地区に位置する 2 斜面(赤谷西 1, 赤谷西 2 と呼ぶ)で行った。当該地区では、2011 年台風第 12 号によって深層崩壊が発生

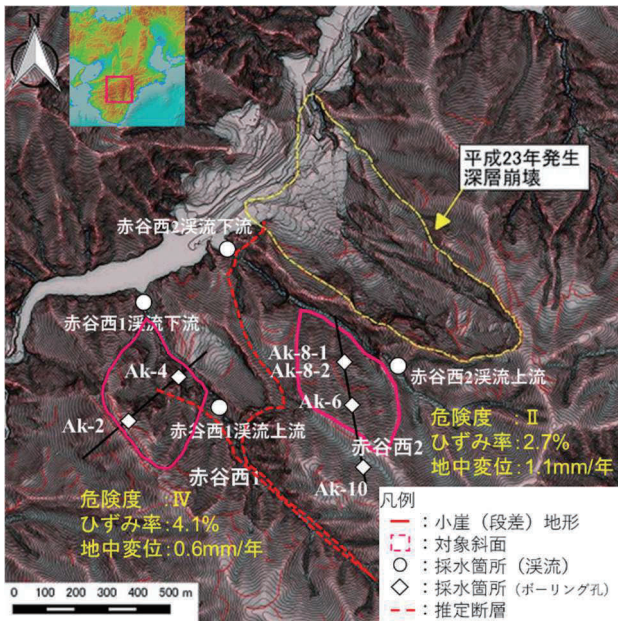


図-1 調査地概要

しており、調査は崩壊斜面の近傍で実施した(図-1)。また、調査地では衝上断層の存在が指摘されており、深層崩壊の発生に寄与したことが指摘されている<sup>7)</sup>。微地形に基づく危険度評価<sup>8)</sup>(図-2)では、赤谷西1は危険度IV、赤谷西2は危険度IIである。また斜面の変形の程度を示すひずみ率は、赤谷西1が4.1%、赤谷西2が2.7%である。これらのひずみ率は、2011年台風12号によって発生した深層崩壊の、崩壊前の地形から推定したひずみ率5~21%<sup>9)</sup>よりは小さいが、当該斜面では段差や小崖といった重力変形による深層崩壊の兆候は見られている。

これらの斜面では、ボーリング調査が実施されており、地下水の採水が可能である。ボーリング調査の位置を図-1に示す。また、これらのボーリングコアから推定される地質構造を図-3に示す。なお、ここで示す地下水位は観測期間中の最高水位を示す。また、断面測線は斜面の傾斜方向を基本とし、微地形から推定される斜面の変形方向で、重力変形斜面の概ね中心を通る測線で設定した。ボーリング孔の深さは、それぞれ赤谷西1においてAk-2は78m、Ak-4は53mであり、赤破線で示すように断層の存在が推定される。赤谷西2においてAk-6は85m、Ak-8-1は70m、Ak-8-2は47m、Ak-10は85mである。ここでは、赤破線のように断層が推定され、Ak-6以外は断層よりも深い範囲にボーリング孔が達している。なお、Ak-10は赤谷西2の重力変形と考えられる範囲のさらに上方に位置する。次に、ボーリング調査で得られたコアの状態について示す。Ak-2は全体として開口割れ目が多く見られた。また、風化が進んでおり、特に深度43.2~47.8m、70.1~73.6m

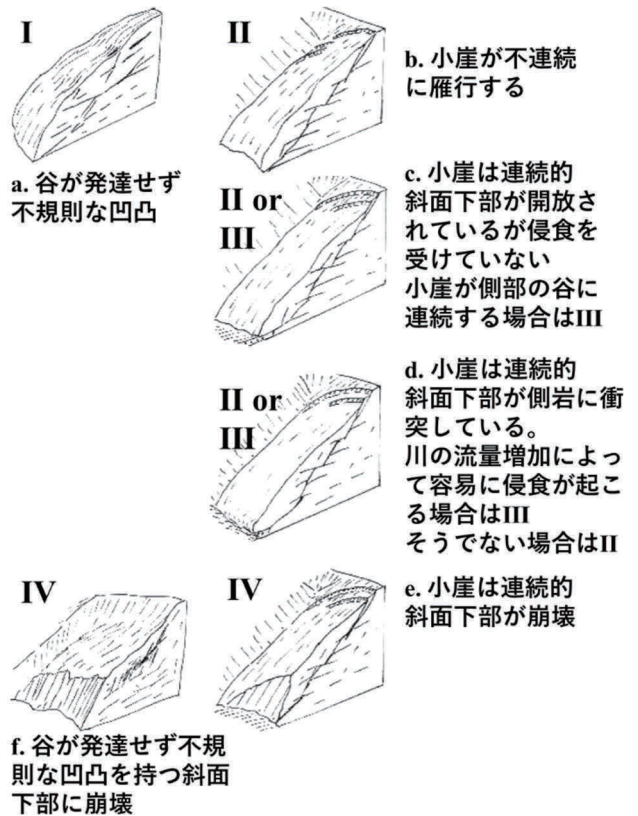


図-2 微地形による深層崩壊発生危険度<sup>8)</sup>

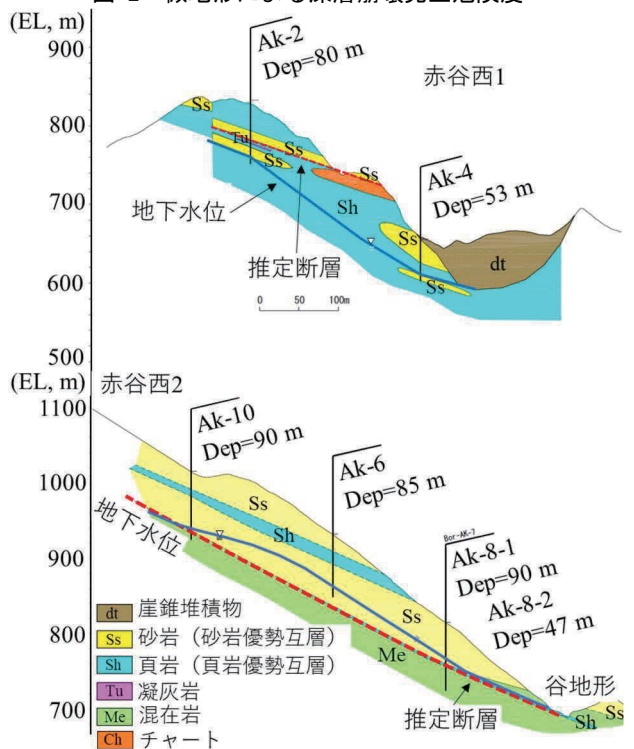


図-3 赤谷西1, 2の推定される地質構造

で特に風化が著しい様子が見られた。Ak-4は、32mより浅い範囲では開口割れ目が多く見られるが、33mよりも深い範囲では割れ目は見られない。また、32.3~32.6mで特に破碎が進行し、粘土化している様子が見られる。Ak-6は深度68m付近まで風化の進行や亀裂が多く見られ、69m付近から未溶脱の炭

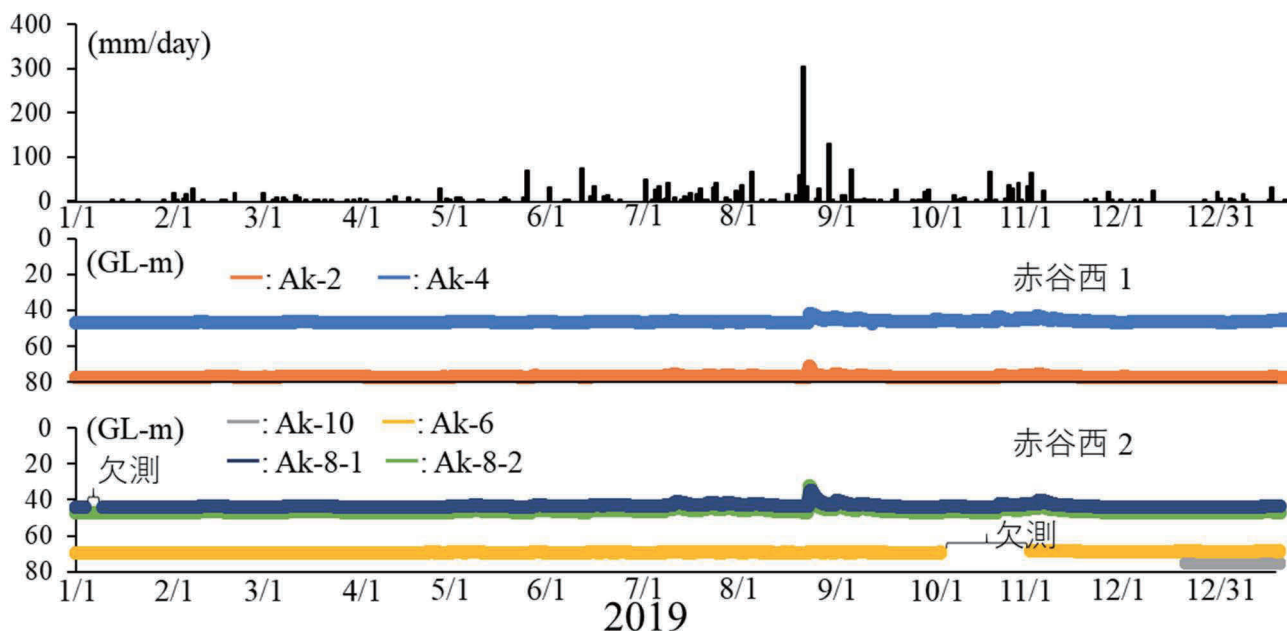


図4 調査地における降雨量（上段）およびボーリング孔内の地下水位挙動（中段：赤谷西1，下段：赤谷西2）

酸塩鉱物が混在するようになる。深度81mより深い深度では、新鮮で堅硬なコアである。Ak-8-1は深度54mから85m付近まで割れ目開口が見られるが、深度54mより浅い範囲ではより顕著に割れ目開口が見られる。Ak-10は全体で割れ目開口が見られるが、特に深度58mよりも浅い深度では風化が進んでいる。深度85mよりも深い深度では、亀裂が少ない。

採水は2020年1月11日午前11時に各採水箇所と同時に1回実施した。採水日の1週間前までの降雨状況は、1月8日に15mm/hr程度の時間雨量を記録している。採水は、ボーリング孔の地下水、斜面周辺の溪流で採水を実施した。ボーリング孔採水深度はAk-2：72～78m，Ak-4：32～46m，Ak-6：64～74m，Ak-8-1：56～70m，Ak-8-2：46～47m，Ak-10：75～85mであり、上記以外の区間は遮水している。地下水の採水は採水器（ベラー採水器φ40mm×91cm 950ml）を、渓流水の採水にはポリエチレン製容器(1000ml)を使用し、ポリエチレン製容器(1000ml)で保存して持ち帰った。水質分析項目はNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CL<sup>-</sup>、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、pH、ECである。分析にはJIS K 0101、JIS K 0102に基づき、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>はイオンクロマトグラフィー（ICS-1600）、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CL<sup>-</sup>はイオンクロマトグラフィー（ICS-2000）、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>は分光光度計(U-1500)、pHとECはpH/EC計(WM-50EG)を使用した。

### 3. 結果

#### (1) ボーリング孔内の地下水位

2019年1月1日から2020年1月11日までのボー

リング孔内における地下水位を図-4に示す。赤谷西1では上部のAk-2、下部のAk-4は同様の地下水位の上昇、低下を示している。一方で、赤谷西2では、斜面下部のAk-8-1とAk-8-2は同様の地下水位変化を示しているが、斜面中腹のAk-6はAk-8-1とAk-8-2とは異なる傾向を示す。例えば、8月16日（□で示す範囲）にAk-8-1とAk-8-2は地下水位が上昇しているが、Ak-6は明瞭な変化は見られない。なお、Ak-10は観測開始が2020年12月10日である。

#### (2) pHおよびECの分布

赤谷西1のpHおよびECは、斜面上方Ak-2でECが10.6mS/mおよびpHが7.6、斜面下方Ak-4でECが10.5mS/mおよびpHが7.1であり、斜面上方と下方でECの値はほぼ等しい。赤谷西2では斜面上方に位置するAk-10でECが4.7mS/mおよびpHが7、斜面中腹に位置するAk-6でECが3.3mS/mおよびpHが6.8、斜面下部に位置するAk-8-1およびAk-8-2では、より深い孔のAk-8-1でECが11.2mS/mでpHが7.5、浅い孔であるAk-8-2でECが4.4mS/m、またpHが6.9であった。つまり、赤谷西2においては、ECはAk-10からAk-6にかけて小さくなり、Ak-6からAk-8-1、Ak-8-2にかけて大きくなっている。

また、溪流での採水については、赤谷西1では沢地形は認められたが、流水は見られなかった。赤谷西2では溪流上部でECが3.3mS/mでありpHは6.9、溪流下部でECが4.4mS/mでpHは7.1であり、下部でより大きい傾向が見られた。

#### (3) 溶出イオン濃度

2020年1月11日に各採水箇所と同時に採水した

試料を、イオン当量濃度をヘキサダイアグラムに整理した結果を図-5に示す。赤谷西1のボーリング孔 Ak-2, Ak-4 はともに  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{Cl}^-$  と比較して  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  が相対的に多い。また, Ak-2, Ak-4 を比較すると,  $\text{Ca}^{2+}$  が Ak-2 で 1.0 meq/L, Ak-4 が 0.8 meq/L,  $\text{HCO}_3^-$  については Ak-2 で 1.0 meq/L, Ak-4 が 0.72 meq/L であった。赤谷西2では, Ak-10 は  $\text{HCO}_3^-$  が 0.36 meq/L と相対的に多いが, Ak-6 は, 特徴的に多いイオンは見られない。Ak-8-1, Ak-8-2 は Ak-2, Ak-4 と同様に  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  が相対的に多く,  $\text{Ca}^{2+}$  が Ak-8-1 で 0.9 meq/L, Ak-8-2 が 0.55 meq/L,  $\text{HCO}_3^-$  については Ak-8-1 で 0.75 meq/L, Ak-8-2 が 0.56 meq/L であり, 深い孔である Ak-8-1 で溶出イオン濃度が多い傾向が見られる。つまり, 斜面上方 Ak-10 と斜面下方 Ak-8-1, Ak-8-2 は Ak-6 よりも溶出イオン濃度が大きい傾向が見られる。

次に, 赤谷西の渓流水については, 溪流の上流では相対的に濃度が大きいイオンは見られない。溪流の下流では, 上流と比較すると,  $\text{Ca}^{2+}$  (上流: 0.13 meq/L, 下流: 0.22 meq/L) および  $\text{HCO}_3^-$  (上流: 0.18 meq/L, 下流: 0.23 meq/L) が多い。

また, 2020年1月11日に行った採水結果を基に, 各分析対象イオンのイオン当量濃度と EC の関係を図-6に示す。  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{HCO}_3^-$  の溶出量が大きいと, EC が大きい傾向が見られた。また,  $\text{SO}_4^{2-}$  が Ak-4 および Ak-8-1 で他の採水場所と比較してイオン当量濃度が大きい。他の溶出イオンについては, イオン当量濃度と EC の関係は明瞭ではない。イオン状シリ

カ ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) は, 相対的に Ak-6, Ak-10 で大きく, 渓流水では上流側でやや大きい傾向が見られたが, 今回の採水では, 明瞭な関係は見られなかった(図-7)。

#### 4. 考察

##### (1) 地下水位の挙動と EC の変化

Ak-6 よりも Ak-8-1, Ak-8-2 で, 地下水位の変化が大きい傾向が見られた。これは, 断層による影響<sup>10), 11)</sup>を受けたと考えられる。つまり, 図-3 に赤破線で示す断層が不透水層の役割を果たし, 断層の上部と下部では, 地下水の流れが異なる可能性がある。また, 赤谷西2において EC や溶出イオン濃度が Ak-10 から Ak-6 にかけて小さくなり, Ak-6 から Ak-8-1, Ak-8-2 にかけて大きくなる傾向が見られた。ここで一般に, 地下水が未溶脱の炭酸塩鉱物に触れる時間が長い斜面下部の方が, EC や溶出イオン濃度は大きくなる<sup>12)</sup>。このことも, Ak-10 と Ak-6, また Ak-6 と Ak-8-1 および Ak-8-2 では異なる地下水の流れが存在する可能性があり, 断層が影響を与えたことを示唆する。EC は, 赤谷西1では斜面上部と下部で同等であり, 赤谷西2では斜面下部で大きい傾向が見られた。また, Ak-8-1 と Ak-8-2 の比較から, より深い孔で EC は大きい傾向が見られた。つまり, 同じ斜面内でも, 採水箇所によって EC の傾向は異なる場合がある。このことは, 水質分析による危険斜面抽出を行う上で, 採水箇所選定が重要であることを示唆する。

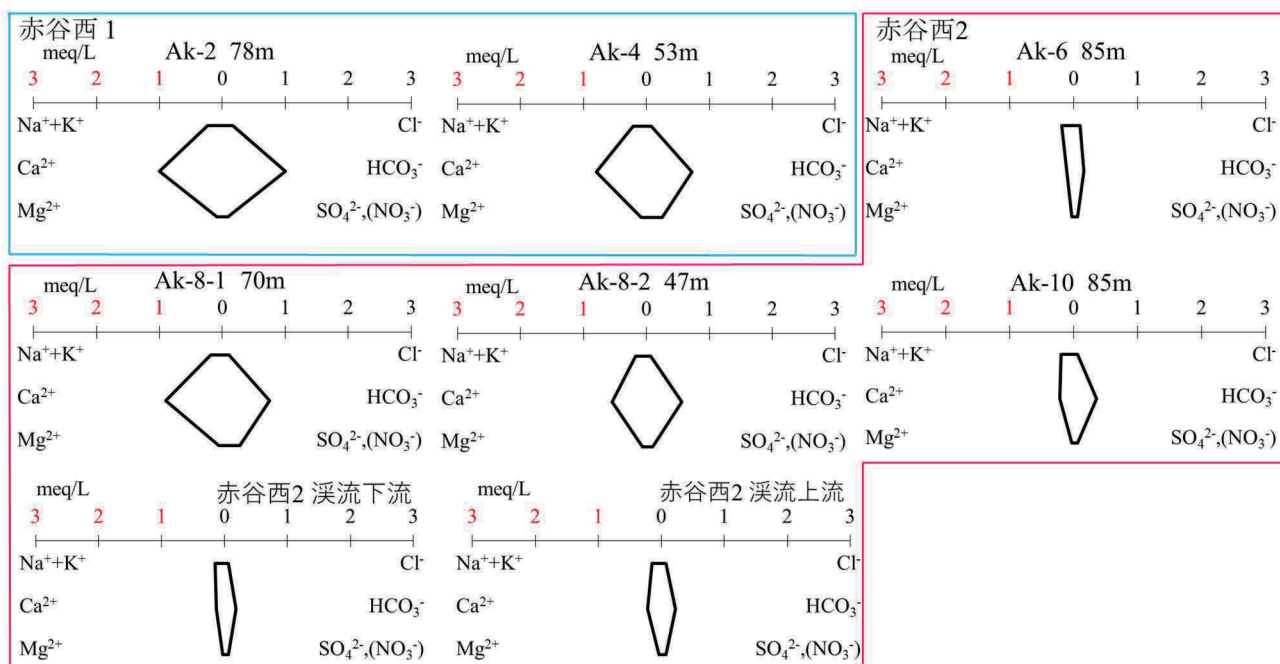


図-5 地下水および渓流水のヘキサダイアグラム

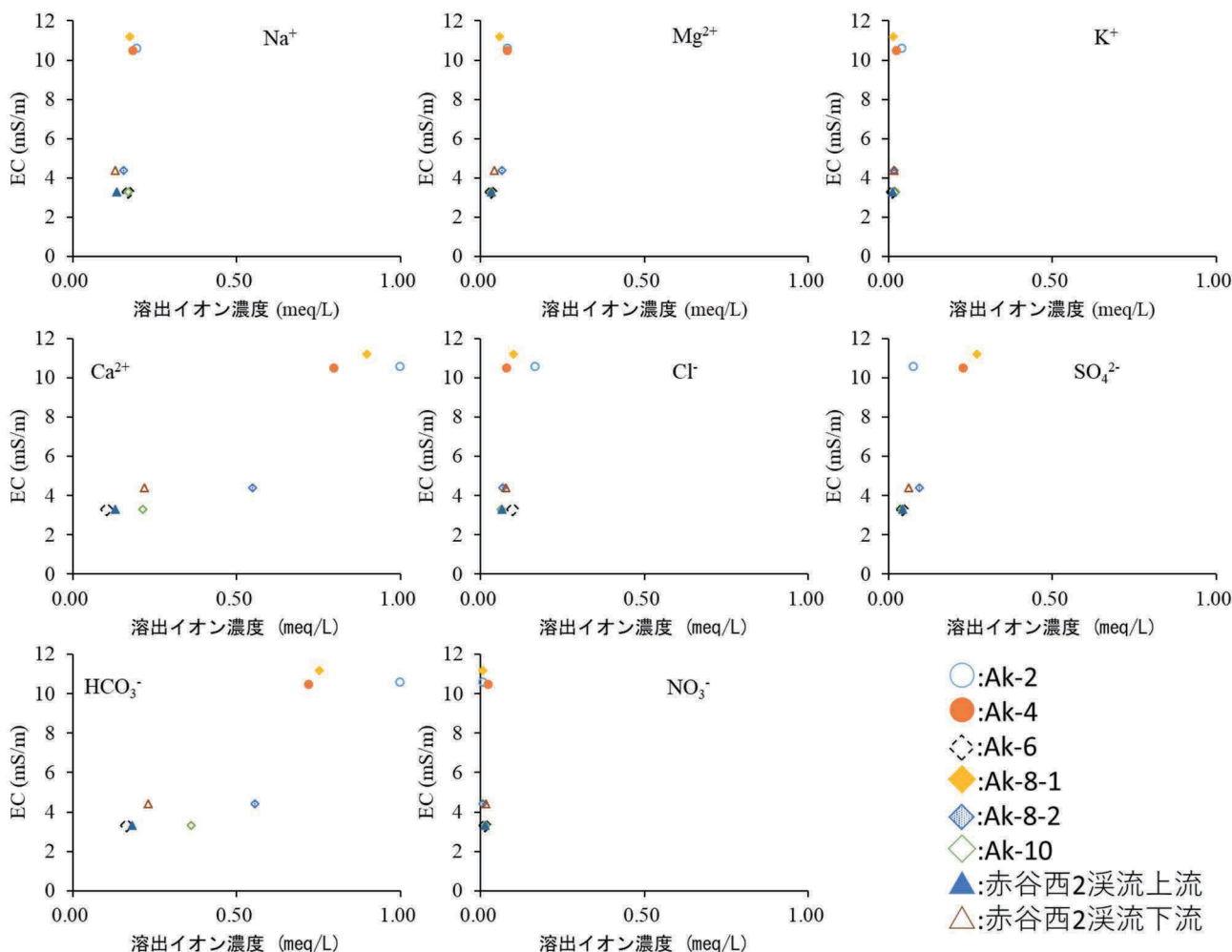


図-6 溶出イオンと EC の関係

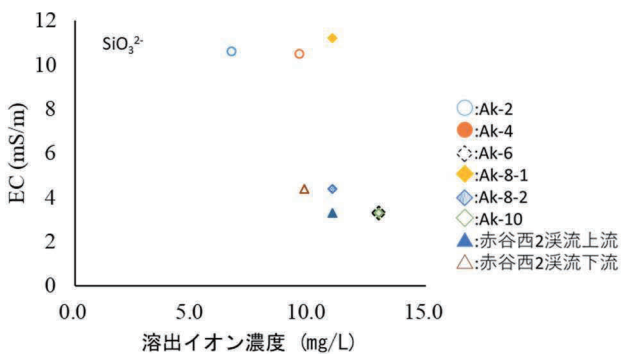


図-7 イオン状シリカ溶出量と EC の関係

(2) EC の変化と溶出イオン

ヘキサダイアグラムの結果 (図-5) から、EC を上昇させている主な溶出イオンは  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  と考えられ、 $\text{CaCO}_3$  が溶出した可能性が考えられる。このことは、既往研究における、紀伊山地での岩盤に含まれる鉱物のイオン溶出プロセス<sup>9)</sup>を支持する結果であるとされる。

また、このプロセスを踏まえ、赤谷西2において

は、次に示すような地下水流下が想定される。Ak-8-1 および Ak-10 は、それぞれ岩盤に割れ目開口が多く見られ、また白色脈として観察される炭酸塩鉱物 ( $\text{CaCO}_3$ ) が含まれる範囲が存在し。これらの箇所では、割れ目開口を介した地下水流入によって、岩盤に含まれる  $\text{CaCO}_3$  が溶脱し、徐々に斜面下方へ流下すると考えられる。このことによって、渓流水は斜面下方で、斜面上方に比べて、EC がより大きくなることと推定される。ここで、Ak-6 や Ak-8-2 も斜面下方の渓流水の水質形成に寄与した可能性もあるが、地下水位の挙動や水質分析から、Ak-10 や Ak-8-1 と比べ、EC が小さいため、渓流水への影響はより深い地下水で比較的大きいとされる。

(3) 今後の課題

ここまで示してきた地下水および渓流水の水質分析結果から、岩盤に含まれる鉱物が地下水および渓流水の水質に影響を与える可能性が示された。しかしながら、危険斜面における EC の上昇、地下水流

下を把握する上で、以下の課題が残された。

・地下水に含まれる溶出イオン濃度は、地下水と岩盤の接触面積および接触時間による影響を受ける。既往研究で実施された溶出試験では、試料であるボーリングコアを粉砕した上で試験が行われている<sup>5)</sup><sup>6)</sup>。一方で、自然状態では長い時間をかけて、溶出が生じていると考えられる。EC と溶出イオンの関係をより詳細に把握する上で、より自然に近い状態での溶出プロセスについて検討する必要がある

・他流域からの地下水流入の影響を検討する必要がある。今回は、斜面外からの地下水の流入の可能性について検討出来ていないが、斜面下部や渓流水の水質形成に、他斜面からの地下水流入は影響を与えている<sup>13)</sup>ことが予想される。渓流水の水質分析を危険斜面抽出に応用するためには、他斜面からの地下水流入が、水質形成に与える影響を明らかにする必要がある

## 5. まとめ

本稿では、危険斜面抽出方法の1つである水質分析の応用を踏まえ、危険斜面周辺で EC が大きくなる要因を、地下水と渓流水の水質変化に着目して分析した。その結果、以下のことが示された。

・微地形判読に基づく危険度がより高い斜面（赤谷西1）で、EC や  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  の溶出イオン濃度が大きい傾向が見られた

・本研究の調査地では、地下水に  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  が相対的に多く含まれる地点が見られた。また、相対的に斜面下部や深部で、EC が大きい傾向があった

・既往研究と合わせて考えると、 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  は岩盤に含まれる  $\text{CaCO}_3$  から溶出している可能性がある

・水質分析による危険斜面抽出にあたっては、同一斜面内でも EC が変化するため、斜面全体の水質の傾向を捉えるような採水箇所設定の必要がある

・今回の調査では、詳細な地下水の流れについて、明らかにすることが出来ていない。危険斜面周辺での水質形成、特に EC が上昇するプロセスを明らかにするためには、詳細な地下水の流下過程を明らかにする必要がある

今後、ボーリング孔への食塩投入といったトレーサー試験を行うことで、地下水流下過程の解明を試みたい。また、危険斜面抽出を目指し、水質分析の試料を採取する位置や長期的な観測の考え方について整理し、現場での応用を進めたい。

## 参考文献

- 1) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英二, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智:2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.45-53, 2012.
- 2) 蒲原潤一, 内田太郎:深層崩壊対策技術に関する基本的事項, 国総研資料第807号, 2014.
- 3) 地頭菌隆: 渓流水の電気伝導度を用いた深層崩壊発生場の予測. 砂防学会誌 Vol. 66, No. 6, pp.56-59, 2014.
- 4) 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳:深層崩壊発生場予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—, 砂防学会誌, Vol.59, No.2, pp.5-12, 2006.
- 5) 森加代子・林幸一郎・木下篤彦・水野秀明・今森直紀・田中健貴・小川内良人: 岩盤クリープ斜面を構成する岩石からのイオン溶出特性, 平成29年度砂防学会研究発表会概要集, pp.418-419, 2017.
- 6) 田中健貴, 木下篤彦, 吉村元吾, 菅原寛明, 小川内良人, 横山修: 重力変形斜面の岩盤に発達する亀裂が溶出特性に与える影響, 日本地すべり学会誌, Vol.56, No.1, pp.1-7, 2019.
- 7) Arai, N. and Chigira, M.: Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan. Isl. Arc, 27, e12245, 2018
- 8) 千木良雅弘: 深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について, 応用地質, Vol.56, No.5, p.200-209, 2015.
- 9) 千木良雅弘・松四雄騎・ツノウチンイン・平石成美・松澤真・松浦純生: 2011年台風12号による深層崩壊, 京都大学防災研究所年報, No.55 A, p.193-211, 2012
- 10) 森屋洋, 荻田茂, 山田孝雄, 阿部真郎: 東北地方における断層周辺の第三紀層地すべり. 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.4, pp.248-253, 2007.
- 11) 川上浩: 断層によるせき止め地下水を原因とする地すべり2例. 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.4, pp.237-240, 2007.
- 12) 吉岡龍馬: 地すべり(4) 地すべりと水-地球化学的調査(その1), 地下水学会誌, Vol. 32, No. 3, pp. 147-162, 1990.
- 13) 日浦啓全, 末峯章, 前田寛之, 王功輝, 古谷元: 四国の結晶片岩地すべりにおける地下水の水文地質学, 日本地すべり学会誌, vol.55, No.4, pp.153-162, 2018.

(2020.7.1 受付)