

重力変形斜面における降雨と岩盤内地下水の 水位変動および水質変化の関係

RELATION WATER LEVEL FLUCTUATION AND QUALITY CHANGE OF
GROUNDWATER IN GRAVITATIONAL DEFORMATION SLOPE BETWEEN RAINFALL

林 幸一郎¹・小松 慎二¹・窪田 安打¹・

木下 篤彦²・小竹 利明²・山田 拓²・柴田 俊²・田中 健貴³

Koichiro HAYASHI, Shinji KOMATSU, Yasuuchi KUBOTA, Atsuhiko KINOSHITA,

Toshiaki KOTAKE, Taku YAMADA, Suguru SHIBATA and Yasutaka TANAKA

¹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)

E-mail: hayashi-koichiro@oyonet.oyo.co.jp

²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)

³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)

Key Words: deep-seated landslide, rock deformation, hydrogeological structure, multi aquifer, electric conductivity

1. はじめに

深層崩壊による被害を軽減するためには、崩壊が発生する場所と規模を予測し、事前対策を検討する必要がある。これまでの研究により、深層崩壊発生斜面の周辺には特徴的な微地形・地質的構造が見られること¹⁾、崩壊前の斜面には重力変形が生じている場合があること²⁾、崩壊斜面は深層の地下水が集中する地下構造があること³⁾などが明らかになっており、深層崩壊発生前の地盤の特徴を整理し、崩壊が発生する危険度を評価する手法が検討されている。

このうち、深層の地下水が集中する地下構造を持った斜面を抽出する手法の検討では、溪流縦断方向の溪流水の電気伝導度 (EC) を測定して地下水が集中している流域や斜面を抽出する手法の検討⁴⁾、岩盤クリープ斜面から湧出する EC の高い湧水と河川の EC の経時的な相対変化を明らかにする検討⁵⁾などにより、比較的簡便で広域調査に適した地表水の EC 測定を用いた調査手法が検討されている。

さらに田中ら (2019)⁶⁾ は、深層崩壊が発生するおそれのある斜面として重力変形斜面に着目し、岩

盤に発達する亀裂や破碎状況による溶出イオンの溶出特性の違いを分析し、EC の高い湧水の起源となる地下水の水質が形成されるメカニズムの 1 つとして、岩盤の変形や脈状鉱物の溶脱による開口亀裂の形成と地下水へのイオン溶出過程を推定した。

ここで、溶脱の進行には、溶媒となる EC の低い地下水を供給する降雨が関係していることが推察され、危険度の評価に係る岩盤の強度低下の推定に降水量や斜面湧水の水質を指標とできる可能性があるが、どのような地下水水質変化をする斜面の危険度が高いのかなど不明な点が多い。そこで本研究では、田中ら (2019)⁶⁾ の検討対象である奈良県赤谷西地区の地中変位の速度が異なる 2 箇所の重力変形斜面において、降雨に対する地下水変動などの応答の比較を行った。まずは重力変形と地下水が集中する水文地質構造との関係性を分析するため、地形解析と、調査ボーリングによる重力変形斜面の背後斜面の地下水分布調査を行った。次に、重力変形と降雨に伴う岩盤内地下水の水位変動・水質変化の関係性を明らかにするため、降雨期を含めた地中変位観測、地下水位観測、地下水の水質観測を実施した。

2. 調査地の概要

平成 23 年に発生した深層崩壊箇所（赤谷地区）の西側に抽出されている重力変形斜面（赤谷西地区）を対象とした（図-1）。いずれの斜面でも、斜面上方の尾根には、重力変形により生じたと考えられる幅約 10 m の線状凹地が存在する。当該地域に分布する四万十帯日高層群美山層は、主に頁岩優勢砂岩頁岩互層、頁岩、砂岩からなり、チャート、緑色岩、酸性凝灰岩を伴っている。地層の走向は、東西方向および東北東-西南西方向で、傾斜は 40~60° 北落ちが卓越している。概ね斜面と平行した地質構造を有し、北向き斜面では流れ盤となっている。

赤谷西 1 は、主に頁岩優勢の砂岩頁岩互層が分布し、破碎岩⁷⁾と開口亀裂が Ak-1 地点で深度 80.0 m 付近、Ak-3 地点で深度 90.0 m 付近、Ak-4 地点で深度 52.5 m 付近まで確認されている⁹⁾。地下水位は、Ak-1 地点で深度 77 m 付近、Ak-3 地点で深度 90 m 以深（調査深度までで水位が確認されない）、Ak-4 地点で深度 46 m 付近に確認されている。また地中変位は、Ak-1 地点で深度 78.75 m、Ak-3 地点で深度 84.75 m を下端とし 0.6 mm/年程度が観測されている⁸⁾。

赤谷西 2 は、主に砂岩優勢の砂岩頁岩互層が分布し、破碎岩⁷⁾と開口亀裂が Ak-5 地点で深度 80.2 m 付近⁹⁾、Ak-7 地点で深度 82.3 m 付近まで確認されている¹⁰⁾。地下水位は、Ak-5 地点で深度 69 m 付近、Ak-7 地点では深度 47 m 付近の水位と、深度 54~70 m 付近で深度 45 m 程度の水位が 2 層確認されている。また地中変位は、Ak-5 地点で深度 67.75 m を下端とし 1.1 mm/年程度が観測されている⁸⁾。

3. 調査手法

(1) 重力変形と水文地質構造との関係性を分析する手法

上記の通り、地中変位が異なる 2 斜面の水文的特点を把握するため、それぞれの地下水の集水域となっていると考えられる領域を抽出した。通常の地形を基にした集水域を求める手法では、検討対象の 2 斜面は尾根に囲まれた領域が集水域となる。一方で、過去の深層崩壊発生箇所において、透水性の高い地質構造により集水域外からの地下水が崩壊箇所に流入したと考えられる事例^{例えば 11)}があることから、重力変形斜面の地下水の集水域を推定するには岩盤内の水文構造も考慮する必要がある。そこで、トンネル湧水の流出範囲と湧水量を推定する方法¹²⁾を

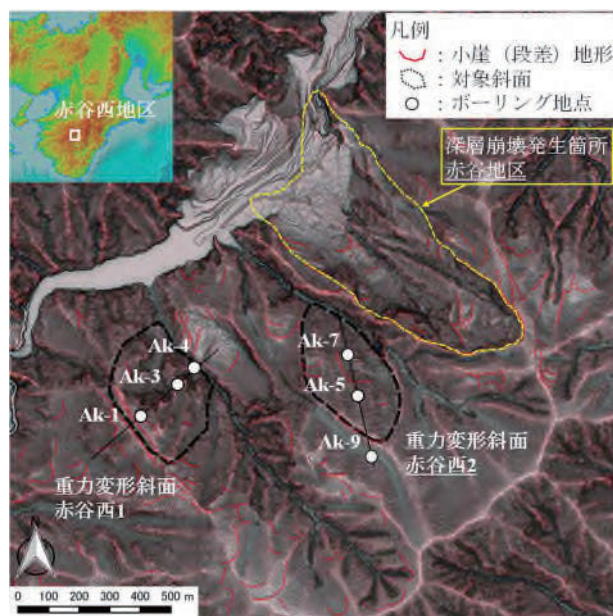


図-1 調査対象位置図

参考に、地形および岩盤の分布状況から斜面ごとの地下水の集水域を概略的に推定した。

その上で、重力変形斜面の地下水の集水域と考えられる地点 Ak-9（図-1）で調査ボーリング（深度 90 m、孔径 86 mm）を実施し、重力変形斜面に地下水を供給する岩盤性状かどうかを確認した。ボーリングコアを用いて地質、風化、破碎状況等の岩盤性状を確認し、ボアホールカメラ（応用地質株式会社製、深度方向の分解能 0.5 mm、円周方向の分解能 360 px）で得られた孔壁画像で地中での亀裂の開口状況を確認した。また地下水分布状況の調査は、削孔中の孔内水位を毎日の作業前後で測定し、試錐日報解析による水理地質の鉛直分布の調査¹³⁾を行った。

(2) 重力変形と降雨に伴う岩盤内地下水の水位変動・水質変化の関係性を分析する手法

(1) の分析も踏まえ、降雨に伴う地中変位や地下水の変化を把握するため、図-1 に示す地点での観測孔を用い、2019 年 1 月から 2020 年 5 月まで以下の観測を行った。

地中変位は、それぞれの地点に埋設したガイド管の変形を挿入式孔内傾斜計（応用地質株式会社製デジタル Q ティルト）で測定し、2019 年 1 月を初期値とし深度 0.5 m 区間ごとの変位を 1~3 ヶ月間隔で観測した。

地下水位変動は、上下に遮水構造を設けた区間水位の観測孔を用いて、水圧式水位センサ（株式会社オサシ・テクノス製 DS-1）により 1 時間間隔で観測した。地点ごとの観測深度は、Ak-1 : 72~78 m, Ak-4 : 32~46 m, Ak-5 : 64~74 m, Ak-7 : 46~47 m, 56~70 m,

Ak-9 : 75~85 m である。このうち、Ak-4 の観測深度は溪流床より 40 m ほど深く、地下水は溪流の影響も受けている可能性がある。

地下水の水質変化は、2019 年 8 月 7 日より、地下水位観測孔の Ak-5, Ak-7 の 2 深度で、水温、EC を 1 時間間隔で観測した。

4. 重力変形と水文地質構造との関係性の分析結果

(1) 岩盤内地下水の集水域の推定

地形と現地状況から推定した、斜面ごとの地下水集水域を図-2(a)に示す。観測された地下水位までトンネルに等しい透水層が存在すると仮定し、水文学的考察¹²⁾で算出した推定地下水面(図-2(b),(c))のうち、地質学的考察¹²⁾により溪流に向かう推定地下水面より低くなる範囲を集水域として推定した。

その結果、図-2(a)に示す通り、赤谷西1に比べ、地中変位の速度が速い赤谷西2の方が地下水の集水域が広がった。ただし、高橋(1965)¹²⁾が指摘して

いる通り、断層などが地下水流動に不連続性を与えている場合があるため、実際は調査で確認されていない地質構造の影響が含まれる可能性がある。

(2) 重力変形斜面の地下水の集水域の岩盤性状

赤谷西2の地下水の集水域と考えられる背後斜面の地点 Ak-9 (図-2(a))において、調査ボーリングを実施し、岩盤性状を確認した。その結果、Ak-9 地点では砂岩主体の砂岩頁岩互層が分布し、深度 72.3~74.8 m 付近、深度 81.0~82.2 m 付近に破碎部が認められ、深度 85.5m 付近まで開口亀裂が分布していた(図-3)。また岩盤内の裂罅水とみられる地下水層が少なくとも 3 層存在することを確認した(図-4)。

これらのことから、赤谷西2の岩盤内地下水への集水域と推定される Ak-9 地点においては、岩盤内に破碎部や開口亀裂、およびそれらの間隙に保持された地下水層が分布することが確認された。ただし、実際に地下水の集水域で確認された地下水層から重力変形斜面内へ地下水が供給されているかどうかは、岩盤の透水性を調査した上での解析や、地下水流動

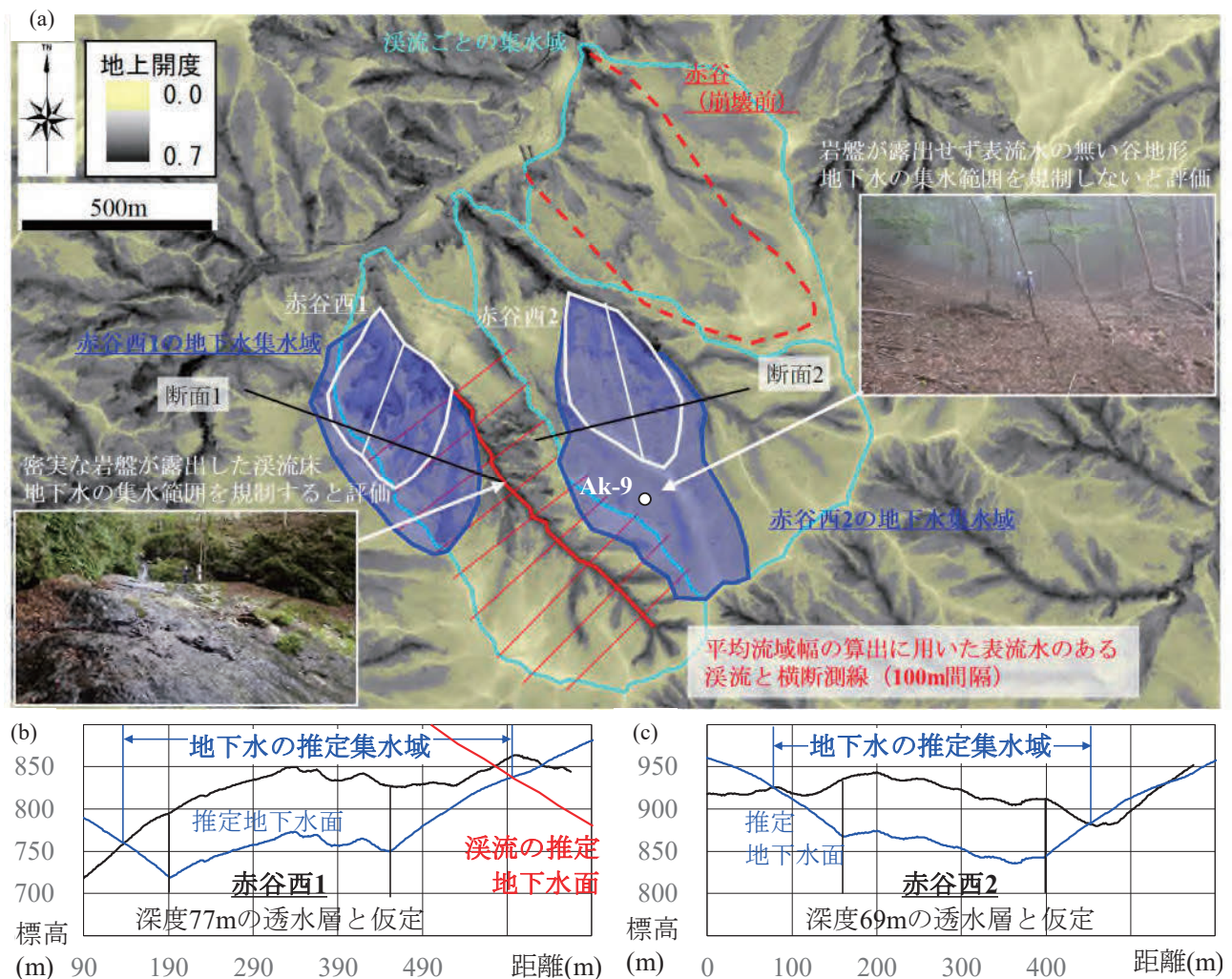


図-2 (a) 地形量図 (地上開度図¹³⁾, 2009 年度測量) と斜面ごとの地下水の推定集水域, (b) 集水域の計算断面例 (赤谷西1, 断面1), (c) 集水域の計算断面例 (赤谷西2, 断面2)

の実測などの手法で評価する必要がある。

5. 重力変形と降雨に伴う水位変動・水質変化の関係性の分析結果

(1) 観測期間中の降雨

観測地点（赤谷地区：赤谷西地区から 2km 以内）

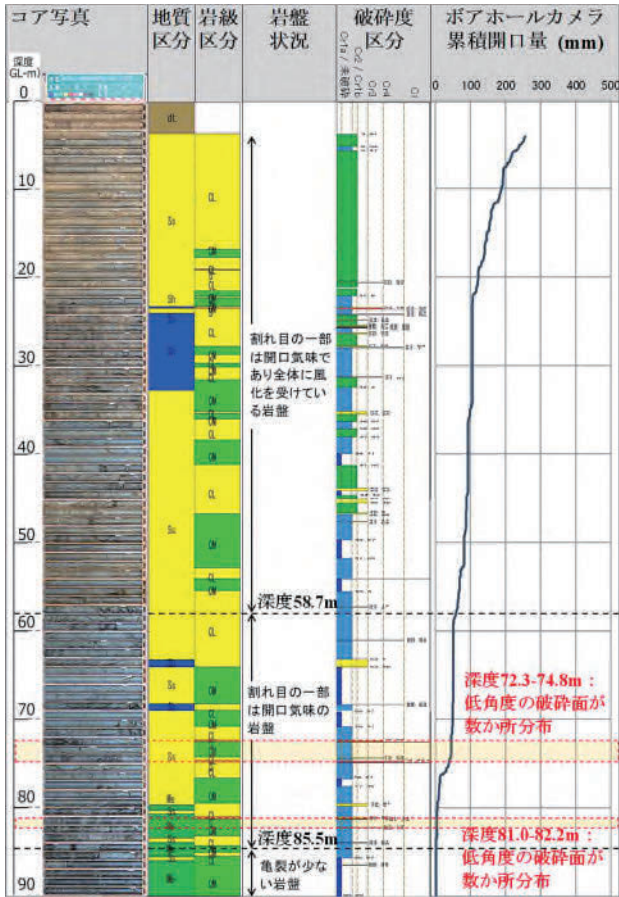


図-3 Ak-9 地点の調査ボーリング結果

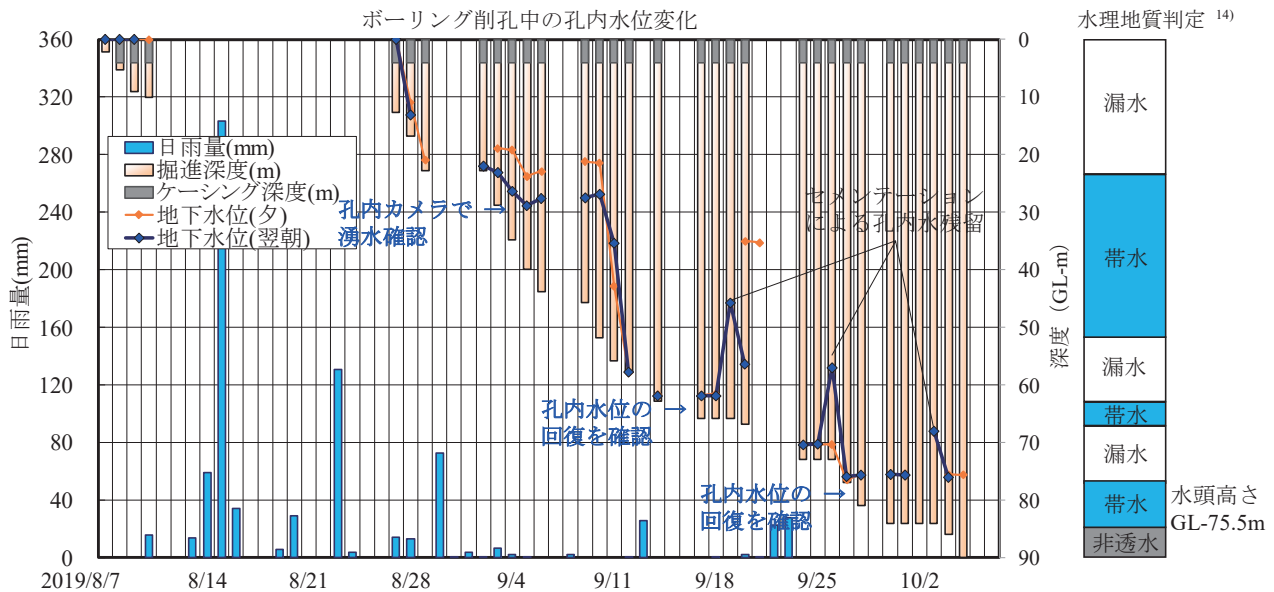


図-4 赤谷西 2 の背後斜面 (Ak-9 地点) での地下水分布調査結果 (水理地質判定の帯水を地下水層と評価)

では、観測期間内 (2019 年 1 月～2020 年 5 月) において、最大累積雨量 410 mm (2019 年 8 月 13～16 日) の降雨が観測された。

(2) 地中変位の観測結果

観測期間内 (2019 年 1 月～2020 年 5 月) において、それぞれ変形領域下端付近の地中変位速度は、赤谷西 1 は 0.6 mm / 年程度 (Ak-1 地点、深度 78～79 m)、赤谷西 2 は 1.6 mm / 年程度 (Ak-7 地点、深度 47～54.5 m)、であった (図-5)。これまでの観測結果⁸⁾と同様に、赤谷西 2 の方が地中変位の速度が速く、また累積雨量 410 mm の降雨を含む期間においては一時的に加速する傾向が確認された。

(3) 地下水位の観測結果

観測期間内 (2019 年 1 月～2020 年 5 月) において、いずれの斜面も、降雨に伴う水位上昇と、その後 1 週間程度での水位低下の変動が観測された (図-6)。水位上昇はいずれも累積雨量 410 mm の降雨に伴うものが最大で、赤谷西 1 では Ak-1 地点で 6.3 m、Ak-4 地点で 5.1 m の水位上昇が、赤谷西 2 では Ak-5 地点で 0.8 m、Ak-7 地点で 14.7 m、9.2 m の水位上昇が観測された。赤谷西 2 の方が降雨に対する最大の水位上昇が大きい傾向が確認された。

また、赤谷西 2 の地中変位が加速した累積雨量 410 mm の降雨の前後では、渓流水の影響がある Ak-4 を除き、赤谷西 2 (Ak-7) の地下水位の方が、赤谷西 1 (Ak-1) よりも降雨後の水位低下が緩やかであった (図-7)。さらに Ak-7 地点では、深度 56～70 m の地下水位の方がその傾向は顕著であった。

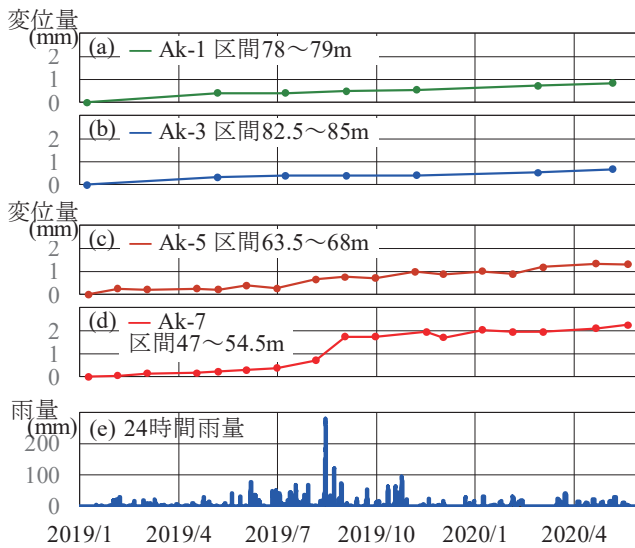


図-5 地中変位の観測結果 (a) (b) 赤谷西 1, (c) (d) 赤谷西 2, (e) 雨量 (赤谷地区)

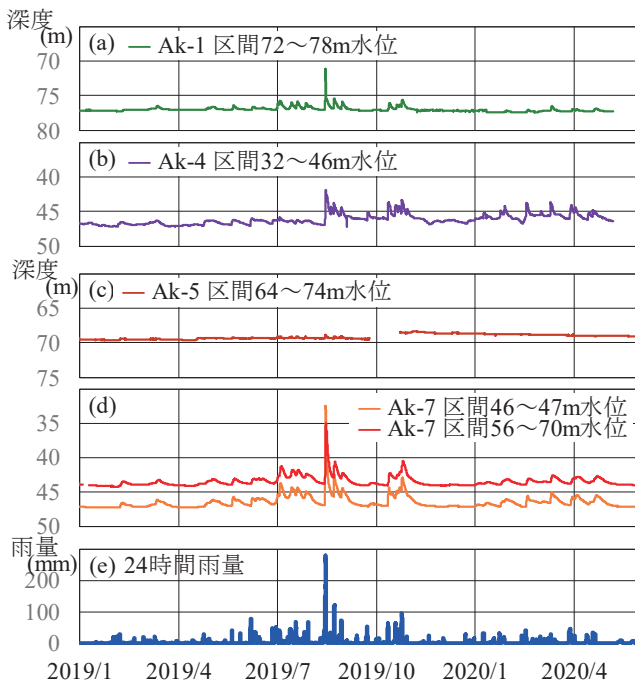


図-6 地下水位の観測結果 (a) (b) 赤谷西 1, (c) (d) 赤谷西 2, (e) 雨量 (赤谷地区)

(4) 地下水の水質変動の観測結果

降雨に対する地中変位と地下水位の応答が強い赤谷西 2 の Ak-7 地点の深度 46~47 m , 56~70 m で水質を連続観測した結果, 累積雨量 410 mm の降雨後に EC が上昇する傾向が観測された(図-8). EC の変化は, 深度 46~47 m で最大約 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の上昇, 深度 56~70 m で最大約 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の上昇であった. また深度 56~70 m の方は, EC のピークが概ね地下水位のピークと同時期であった.

降雨を起源とする水質変化であれば, 西岡ら(2016)⁵⁾により斜面の湧水で確認された通り EC は低くなると考えられる. 累積雨量 50~150 mm 程度の降雨

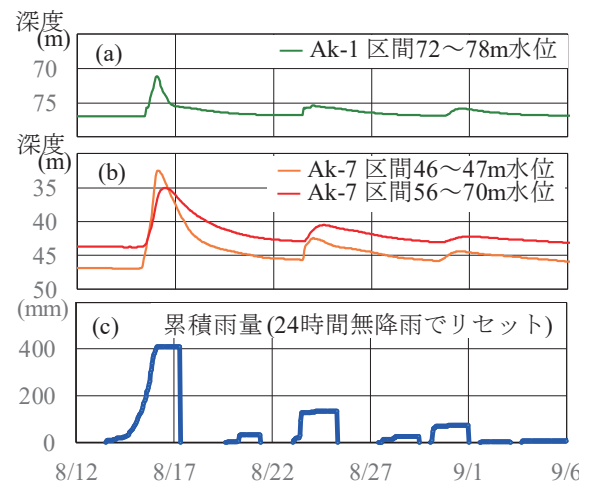


図-7 2019年8月13~16日の降雨に伴う地下水位変化 (a) 赤谷西 1 (Ak-1) (b) 赤谷西 2 (Ak-7), (c) 雨量 (赤谷地区)

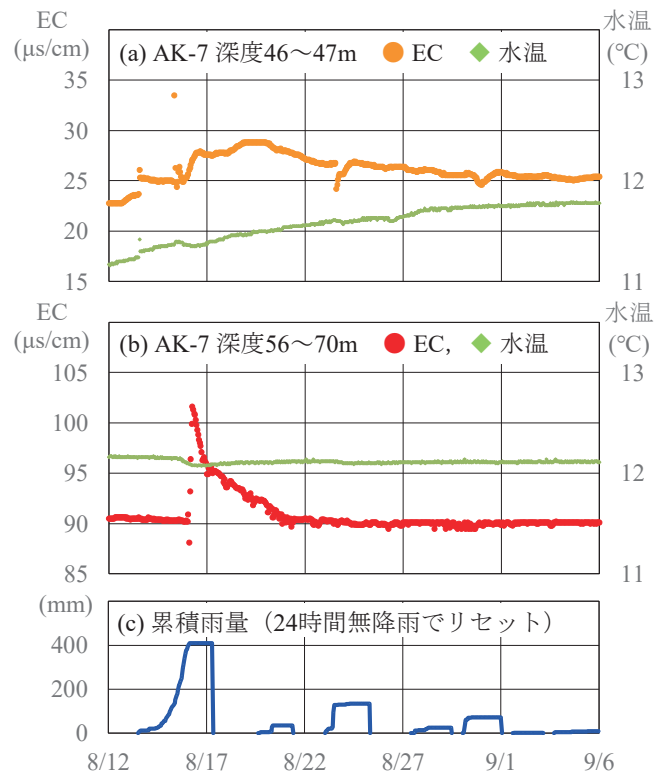


図-8 降雨時の地下水の水質変化 (a) (b) 赤谷西 2, (c) 雨量 (赤谷地区)

では深度 46~47 m でも一時的な低下が確認されるものの, 累積雨量 410 mm の降雨に限り逆の傾向であった. 赤谷西 2 斜面の地下水より高い標高で, このような EC の変化をもたらす高 EC の水は確認されていないため, 地下に存在する未確認の高 EC 地下水の流入が考えられる. 高 EC 地下水の起源としては, 鉱泉など溶存物質の多い地下水や, 田中ら(2019)⁶⁾で推定される破碎や開口亀裂が発達したイオン溶出が進行している領域の地下水などが想定される. それらが, 累積雨量 400 mm を超える降雨に伴った水位上昇による水圧の変化で流動する過程

が観測された可能性があるが、詳細は不明である。

6. 考察とまとめ

分析の結果、以下の点が明らかになった。

- ・赤谷西地区の重力変形斜面において、より地中変位の速度が速い赤谷西2の方が、岩盤内地下水の集水域が広い可能性がある。
- ・地下水の集水域と考えられる Ak-9 地点では、破碎部や開口亀裂が深度 85 m 付近まで分布し、また地下水層が複数存在し、重力変形斜面に地下水を供給するポテンシャルがある岩盤性状であると考えられる。
- ・赤谷西2の方が、降雨に伴う地中変位の加速傾向が顕著であった。
- ・赤谷西2の方が、降雨に伴う水位上昇の程度が大きく、また降雨後の水位低下が緩やかな傾向が認められた。
- ・赤谷西2では、観測期間中においては累積雨量 410 mm の降雨と水位上昇にのみ伴って、降雨後の EC 上昇が認められた。

これらの結果から、赤谷西地区においては、地中変位の速度が速い方の斜面が、岩盤内地下水の集水域が広く、そのため降雨に伴う岩盤内地下水への供給量が多く地下水位が上昇し、また水位上昇の影響も残り易く、地中変位速度も加速する傾向があるという関係性が示唆された。また、重力変形斜面の地下水流動経路には高 EC の地下水が存在し、一定以上の降水量にのみ流動（流下）している可能性が考えられる。

これらを活用し、机上や地表での調査により崩壊が発生する危険度を評価する手法として、地下水の集水域に着目した地形判読と、湧水の水質観測で、降雨に伴い地中変位が進みやすい斜面を抽出する方法が考えられるが、水ミチとなる断層の評価方法や、降雨に伴う地下水と湧水の挙動の違いに不明確な点が残る、評価手法として確立するためにはこの点を明らかにする必要がある。

今後は、岩盤内地下水の流動経路や水質形成のプロセスを明らかにするため、トレーサー試験、水質分析を行うとともに、他地域での適用性を検討する。

参考文献

- 1) 横山修, 内田太郎, 田村圭司, 鈴木隆司, 井上亨郁: 宮崎県鰐塚山地における深層崩壊と微地形・地質的特徴の関係, 砂防学会誌, Vol.63, No.5, p.3-13, 2011.

- 2) 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.
- 3) 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, p.5-12, 2006.
- 4) 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.65, No.6, p.56-59, 2014.
- 5) 西岡恒志・筒井和男・福田和寿・坂口武弘・木下篤彦・森加代子・高原晃宙: 深層崩壊危険斜面における水文・水質特性に関する研究, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.109-114, 2016.
- 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, p.1-7, 2019.
- 7) 脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之: 地すべり移動体の特徴づける破碎岩—四万十帯の地すべりを例として—, 応用地質, Vol.52, No.6, p.231-247, 2012.
- 8) 木下篤彦・田中健貴・桜井亘・内田太郎・林幸一郎・窪田安打・河戸克志・奥村稔: 赤谷西地区岩盤クリープ斜面の変動と空中電磁探査による比抵抗分布特性について, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, p.327-328, 2019.
- 9) 林幸一郎・武澤永純・石井靖雄: 破碎度と開口亀裂の評価に基づく奈良県赤谷西地区における重力変形領域の推定, 2018年度砂防学会研究発表会概要集, p.167-168, 2018.
- 10) 林幸一郎・窪田安打・小松慎二・橋本裕司・菅原寛明・田中健貴・木下篤彦: 奈良県赤谷西地区の重力変形斜面におけるゆるみ域の性状と、変形機構の推定, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, p.371-372, 2019.
- 11) 小松慎二・村重直邦・伊藤正美・山根誠・今森直紀・北垣啓文・平野剛・小杉賢一朗: 北股地区深層崩壊地における水理地質構造の検討(その2)—集水域外からの地下水流入実態の検証—, 2016年度砂防学会研究発表会概要集, p.B118-119, 2016.
- 12) 高橋彦治: トンネル湧水の特性と問題点, 応用地質, Vol.6, No.1, p.25-52, 1965.
- 13) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.4, p.26-34, 1999.
- 14) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 部分ストレーナ孔による間隙水圧観測の手引き(案), 土木研究所資料第4283号, 21p, 2014.

(2020.7.1 受付)