

地層境界が存在する那智川支川流域における 渓流水の水質形成機構と表層崩壊発生検知への 応用に向けた予察

STUDY ON WATER QUALITY FORMATION MECHANISM OF MOUNTAIN
STREAM WATER IN THE NACHI RIVER TRIBUTARY BASIN WHERE THE
GEOLOGICAL BOUNDARY EXISTS AND ITS APPLICABILITY FOR DETECTION
OF SHALLOW LANDSLIDE

竹下 航¹・巽 隆有²・豊福 恒平²・松澤 真³・北本 楽¹・木下 篤彦¹
Wataru TAKESHITA, Takakuni TATSUMI, Kouhei TOYOFUKU, Makoto MATSUZAWA,
Gaku KITAMOTO and Atsuhiko KINOSHITA

¹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）

²パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社（〒530-0004 大阪市北区堂島浜 1-2-1）

³公益財団法人深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込 2 丁目 13 番 12 号）

Key Words: *shallow landslide, electric conductivity, hydrological survey, geological boundaries*

1. はじめに

2011 年台風第 12 号に伴う大雨により、和歌山県東牟婁郡那智勝浦町を流れる那智川流域では、表層崩壊が多発し、下流域において甚大な被害が発生した¹⁾。土石流の多くは上流部の崩壊に起因しており、上流部において表層崩壊が発生するおそれのある斜面を抽出することや、表層崩壊により発生した渓流水内の土砂の堆積をいち早く捉えることが、被害軽減を図るために必要である。

那智川流域で発生した表層崩壊は、地層境界周辺で多数発生したことが指摘されている²⁾。また、地層境界がある場合、境界に沿った地下水の流れが生じ、地下水位が上昇することが浸透流解析によって示されている³⁾。このように那智川流域では、地層境界付近の水文挙動が表層崩壊の発生に大きく関係し、地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険箇所抽出について検討がされている⁴⁾。

那智川で表層崩壊が発生した場合、地層境界等の

斜面内部からの水の流入が発生している可能性があることに加え、崩土が渓流水内に堆積することや新鮮な基盤岩が露出するため、渓流水の溶存イオン濃度等の明瞭な水質変化が生じると想定される。このため、渓流水中の溶存イオンの総量である EC が変化すると考えられ、渓流出口や地層境界付近で簡易に EC を連続観測することで、土石流の発生源となり得る渓床堆積物の堆積状況等を把握できる可能性がある。

そこで本研究では、渓流水の水質調査や岩石試料の溶出試験を実施して、那智川流域鳴子谷川の水質形成機構と、水質観測による渓流水内の崩壊源の推定について検討するとともに、予察的に表層崩壊発生検知への利活用の可能性について検討した。

2. 調査地と調査方法

(1) 調査地の概要

那智川は、那智山を源流として那智湾へ注ぐ、和歌山県東牟婁郡那智勝浦町に分布する二級河川であ

る。地質図⁵⁾、人工改変地・溪床堆積物の分布⁶⁾を記した那智川流域の概要を図-1に示す。那智川流域の地質は、新第三紀堆積岩の熊野層群（泥岩・砂岩主体）の上に貫入岩である熊野酸性岩類（花崗斑岩）が覆う特殊な構造となっている⁷⁾。花崗斑岩が分布する上流域（高標高部）は起伏に富んでいることが特徴であり、一方で下流域（低標高部）は緩やかな地形を有している。これは地質分布に規制された地形発達であると考えられ、起伏に富んだ範囲は熊野酸性岩類（花崗斑岩）、緩やかな地形は熊野層群（堆積岩）から構成される。海成層である熊野層群の泥岩には、黄鉄鉱が含まれることが知られており、新鮮な泥岩が風化すると黄鉄鉱から硫酸が形成され、それに伴い、溶存イオン、pHに変化が生じる。そのため、崩壊により新鮮岩が露出した場合、花崗斑岩地域よりも溶存イオンに変化が生じる可能性が高い。そこで、泥岩が多く分布し、アクセス性の良い鳴子谷川を対象として調査を実施した。

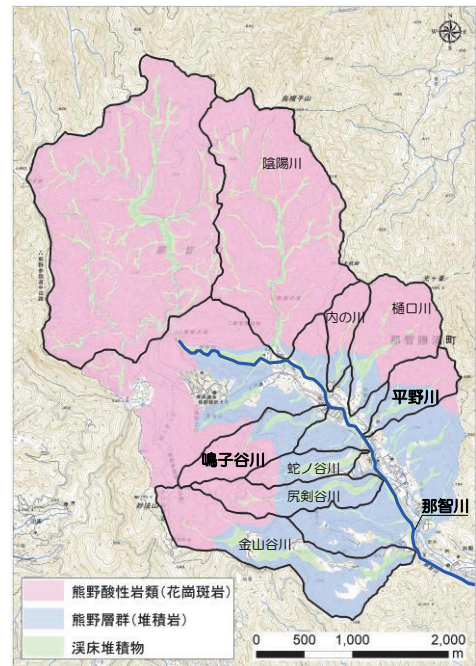


図-1 那智川流域の概要（地理院地図に加工）

(2) 調査方法

a) 渓流水の水質分析

鳴子谷川の渓流水の平常時の水質の経時変化を把握することを目的として、図-2に示した3箇所（①、②、③）で2020年8月～2022年4月にかけて定期的に採水を実施し、採水試料のpHおよびECの簡易水質分析を実施した。平常時との比較のため、台風接近時の2020年10月9日14時～10日13時までの間については1時間間隔で採水を実施し、同様の簡易水質分析を実施した。比較した期間の雨量の経時変化を図-3に示す。上流の地点①は花崗斑岩主体の地質、中流の地点②は花崗斑岩と泥岩の地層境界付近、下流の地点③は泥岩主体の地質となっている。

また、平常時と豪雨時における渓流水の水質を比較するため、図-2に示した3箇所（①、②、③）で平常時と豪雨時に渓流水を採水し、表-1に示す分析項目について水質分析を実施し、図-4に示すヘキサダイアグラムおよびトリリニアダイアグラムによる水質区分を行った。

b) 花崗斑岩・泥岩試料を用いた溶出試験

ECが高くなる要因としては、地下水が地山中を流下して地山中のイオン等を取り込むためであり、岩種によって湧水等に含まれる主要なイオンが異なることが想定される。また、風化の程度により岩石中の鉱物の崩壊状況が異なるため、各種イオンの溶解度が異なることが想定される。泥岩等の海成堆積岩は、堆積時に海水中の硫酸根等を取り込むことで黄鉄鉱を含有することがあり、新鮮な岩盤に亀裂等が

生じると、亀裂に沿って酸素や水が供給されることで黄鉄鉱が酸化され、硫酸酸性化を呈する可能性があり、これによりpHが変化して各種イオンの溶解度も異なることが想定される。このため、岩石の基礎的性状や岩種や風化の有無、酸性化等による溶出特性を把握するため、鳴子谷川から花崗斑岩と泥岩の岩石試料を採取（図-2）し、溶出試験を実施した。

花崗斑岩および泥岩ごとに簡易ボーリングマシンで試料採取を行った。採取した花崗斑岩は、灰色部、茶色部、皮殻部、マサ部の4つに区分⁸⁾した。泥岩は鳴子谷川の河床から採取し、灰色の新鮮な部分と若干白色に変質しているものを風化部に区分した。

区分した岩石試料ごとに、概ね1～2mm程度に破碎を行い、6試料に分取し、1試料は採取時点の状態を確認することを目的とし、溶出試験を実施した。残る5試料については、酸化と溶出傾向の関係を把握することを目的とし、日本土壤肥料学会の土壤分析法に示される保温静置法を参考とし、分取した試料ごとに加水しポリエチレン袋に入れ30℃の恒温器で保管し、各期日（1日、3日、7日、14日、28日）で溶出試験を実施した。

なお、本試験では、岩石試料からの溶出傾向を把握することを目的としていることから、短期溶出試験（建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）を参照）により溶出量を把握した。

c) 地下水試料の水質分析

渓流水の水質がどの層の地下水で構成されているか

を把握することを目的とし、花崗斑岩層および泥岩層の地下水を採水・分析した。鳴子谷川の近隣で地下水観測を実施している平野川流域では、花崗斑岩と泥岩の地層境界付近の地下水位を対象として、観測深度が異なる各4孔の観測孔がそれぞれ設置されている。これらの地下水観測孔のうち、花崗斑岩および泥岩層の地下水を採水できる箇所である「Bor-H29-Un-1」の観測孔から、地層境界付近の花崗斑岩層の地下水を把握できる H29-Un-1-2、泥岩層の地下水を把握できる H29-Un-1 より採水を行った(図-5, 6)。また、季節変動等を把握することを目的に、豊水期の2021年9月8日、渇水期の2021年12月6日に採水を行った。

3. 調査結果

(1) 渓流水の水質分析

鳴子谷川で採水した渓流水の簡易水質分析結果を図-7, 8に示す。pHは各地点ともに平常時と豪雨時で大きな変化はなかった。ECについては、平常時では、花崗斑岩が分布する上流部(地点①)で低く、地層



図-2 鳴子谷川における渓流水及び岩石試料採取箇所

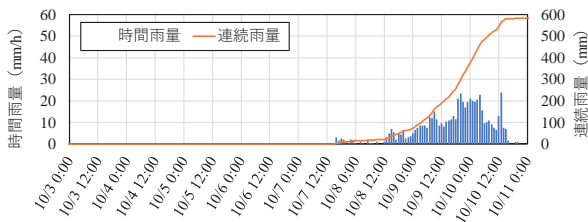
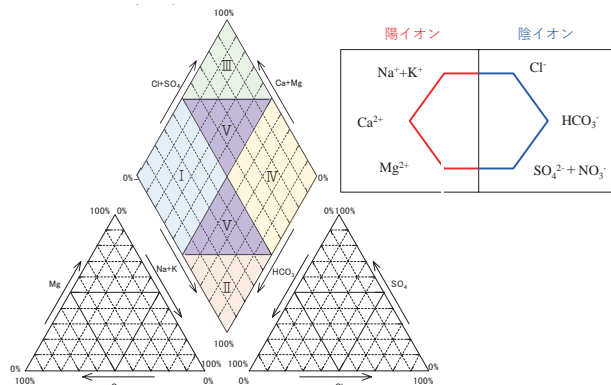


図-3 試料採水期間中の雨量経時変化図

表-1 水質分析項目

分析項目	分析方法
ナトリウムイオン	ICP発光分光分析法
カリウムイオン	ICP発光分光分析法
マグネシウムイオン	ICP発光分光分析法
カルシウムイオン	ICP発光分光分析法
塩化物イオン	JIS K 0102-35.3 イオンクロマトグラフ法
炭酸水素イオン	JIS K 0102-25.1 備考2 全炭酸濃度及びpHから計算
硫酸イオン	JIS K 0102-41.3 イオンクロマトグラフ法
硝酸イオン	イオンクロマトグラフ法
イオン状シリカ	ICP発光分光分析法



水質区分	地下水の種類	ヘキサダイアグラムの形状
I	【アルカリ土類炭酸塩型】Ca-HCO ₃ タイプ 日本の循環性地下水の大半がこのパターンに該当し、浅い地下水、河川水など。	Ca-HCO ₃ タイプ
II	【アルカリ炭酸塩型】Na-HCO ₃ タイプ 停滞的な環境にある地下水がこのパターンに該当し、涵養されてから比較的長時間経過が長い水であり、被圧(深層)地下水など。	Na-HCO ₃ タイプ
III	【アルカリ土類非炭酸塩型】Ca-SO ₄ またはCa-Clタイプ 海岸地帯の初期段階の塩水化地下水など。鉱泉水・温泉水・化石水に多く見られる。一般的な河川水や地下水では特殊なケースであり、温泉水や工場排水等特殊な水の混入が考えられる。	Ca-SO ₄ タイプ Ca-Clタイプ
IV	【アルカリ非炭酸塩型】Na-ClまたはNa-SO ₄ タイプ 火山起源の温泉水、またはその影響を受けた地下水や海水が混入した塩水化地下水など。	Na-Clタイプ
V	【中間混合タイプ】 各タイプの中間的なパターンで、いくつかのタイプの水が混合した河川水、伏流水、浅層地下水など。	中間混合タイプ

図-4 ヘキサダイアグラムおよびトリリニアダイアグラムによる水質区分

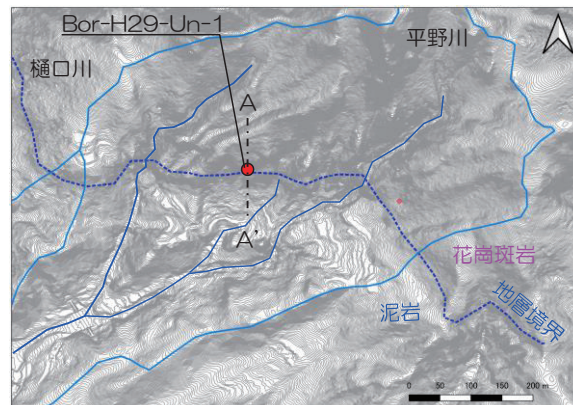


図-5 平野川流域における地下水試料の採水箇所

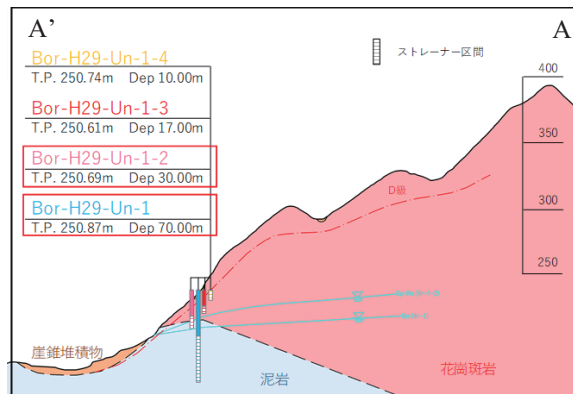


図-6 平野川流域における地下水試料の採水孔

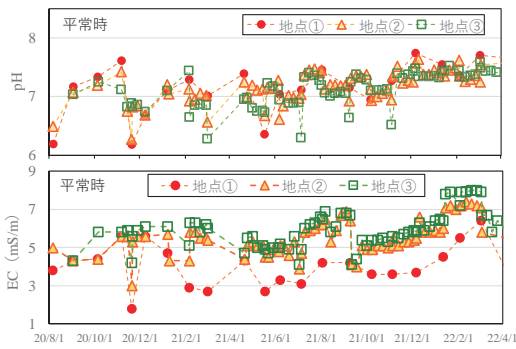


図-7 鳴子谷川の渓流水の簡易水質分析結果（平常時）

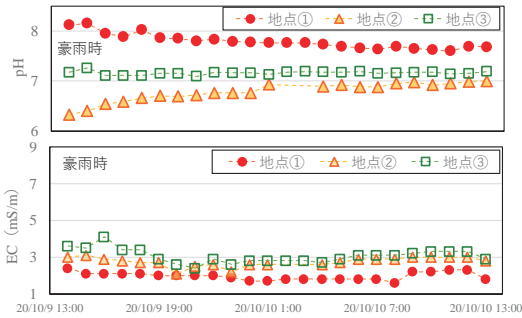


図-8 鳴子谷川の渓流水の簡易水質分析結果（豪雨時）

境界付近（地点②）では3～7mS/m程度で推移し、泥岩主体の下流側（地点③）では地点②と同様の傾向が確認された。一方、豪雨時では、各地点ともに1～4mS/mで推移し、平常時と比較してECが低い傾向を確認した。

平常時と豪雨時に採水した渓流水のヘキサダイアグラムおよびトリリニアダイアグラムを図-9 および図-10 に示す。豪雨時に採水した雨水のヘキサダイアグラムは、炭酸水素イオン、カルシウムイオン、硫酸イオンが少ない。地点①～③の各地点ともに豪雨時にはイオンバランスの形状が小さく、雨水の影響が大きいと考えられる。特に地点①では平常時と比較して炭酸水素イオンの減少が顕著であり、雨水が表流水として流出していることが想定される。地点②では、地点①や雨水と比較して炭酸水素イオンが発達していることが確認された。地点③も地点②と同様の傾向を示した。トリリニアダイアグラムでは、図-4 に示した5つのタイプのうち、地点①の豪雨時は領域IVに分類され、平常時は領域Vに近い領域IVに分類された。地点②と③は、平常時・豪雨時ともに領域Iと領域IVと領域Vの境界付近に分類されたことから、混合水に近い性状と考えられる。

(2) 溶出試験

花崗斑岩、泥岩の保温静置試料の溶出試験結果の経時変化を図-11 および図-12 に、採取直後の試料の溶出試験結果のイオンバランスを図-13 に示す。

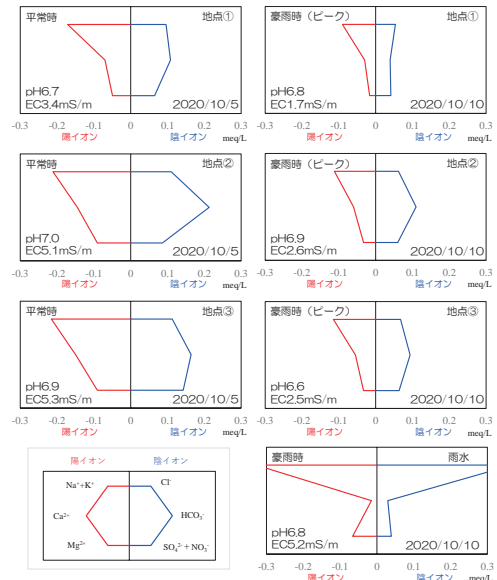


図-9 鳴子谷川の渓流水のヘキサダイアグラム

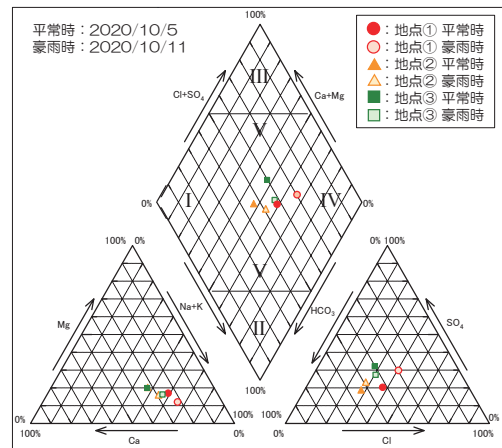


図-10 渓流水のトリリニアダイアグラム

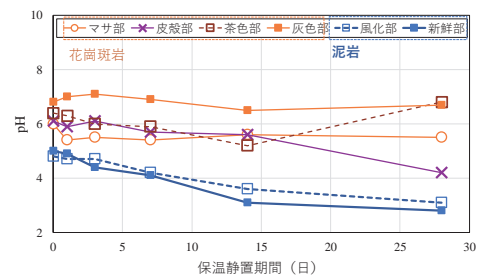


図-11 溶出液 pH の経時変化

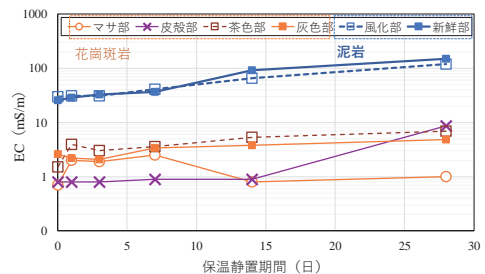


図-12 溶出液 EC の経時変化

全期間を通して pH は花崗斑岩の方が高く、EC は泥岩の方が高い傾向を示した。なお、一般的に花崗斑岩は岩石を構成する鉱物が明瞭で安定しているた

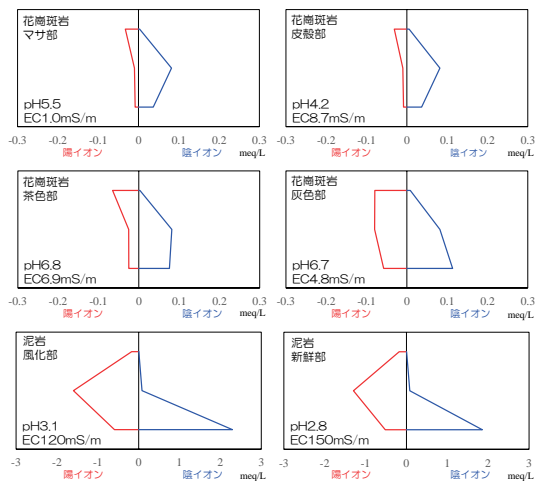


図-13 採取直後試料のイオンバランス

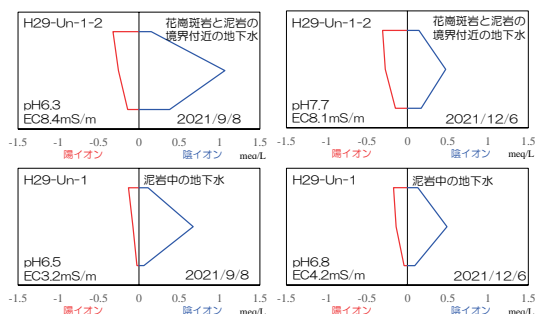


図-14 地下水試料のイオンバランス

め、イオン等は溶出しにくく、堆積岩は間隙中等にイオン等が含まれるため溶出しやすい傾向がある。区分した試料毎にみると、花崗斑岩（マサ部）は、1日保温静置後にpHが減少し、ECが上昇した。その後、7日後から14日後にかけてECが減少した。花崗斑岩（皮殻部）は、14日後から28日後にかけてpHが減少し、ECは大きく上昇した。花崗斑岩（茶色部）は、1日保温静置後にECが上昇し、その後概ね横ばいであった。また14日後から28日後にかけてpHが上昇した。花崗斑岩（灰色部）は、酸化（保温静置）に伴いpHとECともに概ね横ばいであった。一方、泥岩は、風化部および新鮮部のいずれも酸化（保温静置）に伴いpHは低下し、ECは上昇した。

(3) 地下水分析

ボーリング孔で採取した地下水試料の水質分析結果に基づき整理したイオンバランスを図-14に示す。花崗斑岩と泥岩の地層境界付近、および泥岩中の地下水は、ともに炭酸水素イオンが卓越する形状であった。また、図-13の溶出試験結果と比較すると、花崗斑岩のマサ土や皮殻部のイオンバランスの形状に近いことから、地下水は花崗斑岩層の表層の風化したところを流れ、泥岩からの溶脱等は少ないことが推定される。以上から、中流の地層境界付近から湧

出する渓流水（地点②）は、今回採水した地下水のイオンバランスに近いため、主に花崗斑岩を通過した地下水で構成されているものと考えられる。

4. 鳴子谷川における水理地質構造と水質形成機構の検討

これまでの調査結果をふまえ、鳴子谷川における水理地質構造について検討した結果を図-15に示す。

鳴子谷川上流の花崗斑岩斜面の渓流水は、年間を通してECが低く、水質区分の結果からも雨水の影響が大きいと考えられた。また、花崗斑岩層の地下水は花崗斑岩のマサ等の風化したところを流れたものと推定された。これより、斜面の表層がマサ等の透水係数が高いもので覆われているため降雨は浸透が主体となり、伏流した状態で流下するため、花崗斑岩斜面の渓流水は雨水が主体となると想定される。

中流の地層境界付近の渓流水は、平常時の水質は典型的な地下水に分類されたことから、花崗斑岩の方が泥岩よりも透水係数が大きいため、花崗斑岩斜面を伏流した水が地層境界付近より湧水し、上流からの渓流水と合流することとなり、渓流水は湧水が主体で、ECが若干高く、花崗斑岩由来の炭酸水素イオンを含むことが想定される。

泥岩の溶出試験では酸化に伴いECは上昇したが、泥岩斜面の渓流水は、中流の水質と同様の傾向でECの顕著な上昇はなかった。このため、強風化部は薄く緻密な状態のため、降雨は浸透しにくく表面流出が主体となり、渓流水は地層境界から流出した湧水と雨水の混合状態となり、ECは若干高く、泥岩由来と考えられる硫酸イオンを含むことが想定される。

以上の水理地質構造の推定と調査結果をふまえると、花崗斑岩が分布する上流で表層崩壊が発生して土砂が渓流内に堆積した場合には、堆積した土砂が渓流水が伏流するため、イオンバランスが変化することが想定され、ECも若干上昇する可能性がある。また、泥岩が分布する斜面が不安定化した場合には、泥岩斜面内に新たに亀裂等が発生し、溶出試験の結果から泥岩の酸性化の影響により局所的に高EC・低pHの渓流水を形成する可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究では、那智川流域鳴子谷川の水質形成機構と、水質観測による渓流内の土砂堆積状況推定手法について検討し、予察的に表層崩壊発生検知への利活用の可能性について検討を行った。得られた結論

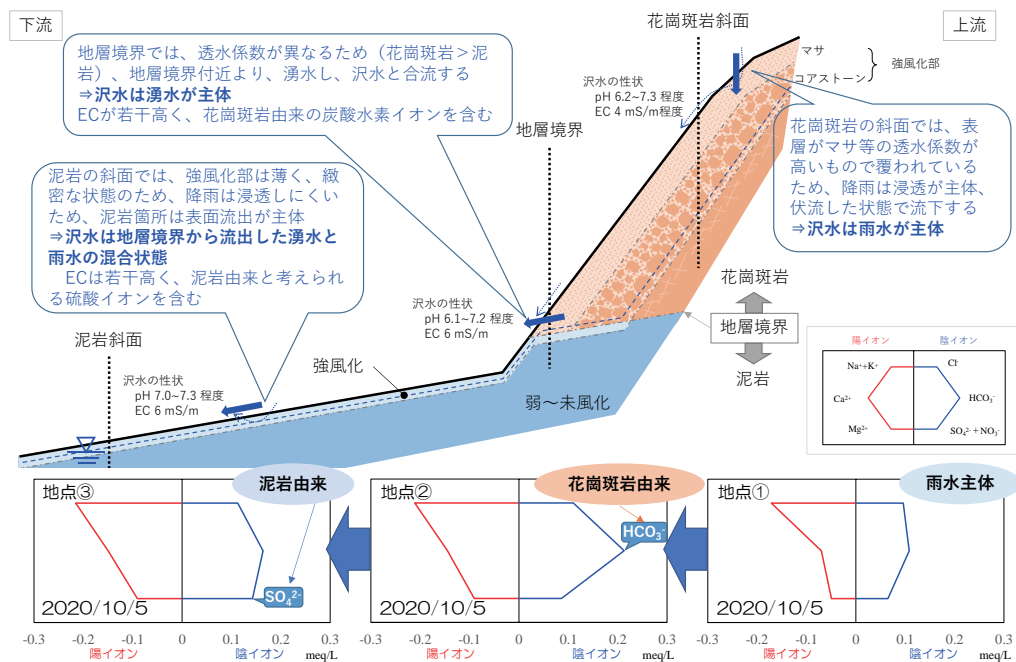


図-15 鳴子谷川の水利地質構造と水質形成機構

は以下の通りである。

- ・ 渓流水採水結果から、表層崩壊の発生を伴わない場合の EC は一定程度で推移するものの、豪雨時には EC が低下した。
 - ・ 泥岩の溶出試験では、酸化に伴い EC の顕著な上昇を確認した。このため、渓流水の EC を連続観測し、泥岩の新規亀裂発生に伴う EC の上昇を検知することにより、崩壊監視や土石流発生の前兆現象を捉えられる可能性が考えられる。
 - ・ EC の上昇等の変化が認められた際に、詳細なイオン分析を行うことで、炭酸水素イオンを多く含む場合は花崗斑岩由来、硫酸イオンを多く含む場合は泥岩由来と推定できるため、どの地質の斜面の安定性が低下しているか推定が可能と考えられる。
- 本調査期間では対象溪流における大きな崩壊現象は確認されていないが、引き続き溶存イオン観測を実施し、崩壊現象に伴う渓流水の水質把握を行い、水文観測や流砂観測等の他の観測データも踏まえて溪流内の表層崩壊発生を総合的に検知し、土石流発生可能性の高まった流域の監視への活用に向けて検討してまいりたい。

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, 長野英次, 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. 43-53, 2012.

2) 柳井一希, 笠井美青: WOE法及びロジスティック回帰法による和歌山県那智川流域における表層崩壊危険度分布, 日本地すべり学会誌, 57巻, 3号, pp. 90-98, 2020.

3) 田中健貴, 木下篤彦, 小竹利明, 柴田俊, 山田拓, 松澤真, 伊藤達哉: 地質構造に起因する透水性境界上の浅層地下水位上昇を再現した浸透流解析～2011年台風12号による那智川流域での表層崩壊の事例～, 日本地すべり学会誌, 59巻, 2号, pp. 60-66, 2022.

4) 榎原伴樹, 崎山朋紀, 坂口武弘, 岸畑明宏, 田中健貴, 木下篤彦, 野池耕平, 松澤真, 河戸克志: 地質境界が存在する斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評価手法の提案, 河川技術論文集, pp. 687-692, 2019.

5) 野池耕平, 木下篤彦, 水野秀明, 今森直紀, 西岡恒志, 島田徹: 球状風化を呈した地質帯における表層崩壊発生場の特性と土層厚推定手法の検討, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 103-108, 2016.

6) 松澤真, 伊藤達哉, 南智好, 木下篤彦, 山田拓, 柴田俊, 田中健貴: 地形・地質的特性に基づく豪雨による崩壊危険度評価の試みー平成23年紀伊半島大災害時の那智川流域を対象としてー, 砂防学会誌 (投稿中).

7) 久富邦彦: 紀伊半島南部の熊野層群の地質と堆積, 地質学雑誌, Vol. 87, pp. 157-174, 1981.

8) Hirata, Y., Chigira, M., Chen, Y.: Spheroidal weathering of granite porphyry with well-developed columnar joints by oxidation, iron precipitation, and rindlet exfoliation, Earth Surface and Processes Landforms, Vol. 42, No. 4, pp. 657-669, 2016.

(2022. 5. 30 受付)