

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01593

研究課題名（和文）深部基盤岩内部の水文力学的挙動の解明

研究課題名（英文）Elucidating the deformation of bedrock caused by hydromechanical processes

研究代表者

小暮 哲也（Kogure, Tetsuya）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・准教授

研究者番号：70534006

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：きわめて稀な豪雨により発生すると考えられる深層崩壊の発生機構を解明するため、斜面の地表から50mの深さまで観測孔を掘削し、地下水挙動と地盤変形との関係を調査した。地下水挙動と変形の監視には、温度とひずみの変化を検知可能な光ファイバケーブルを使用し、5cm間隔でデータを取得した。地下水挙動には温度変化、地盤変形にはひずみ変化のデータを利用した。本研究では、地下水が滞留または流動する場所では加熱したケーブルの熱が奪われ昇温しにくい性質を利用し、地下水の存在箇所を特定できた。また、ひずみの累積場所は地下水の付近であることがわかり、岩盤内の割れ目を通る地下水が地盤変形の原因となる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球温暖化に伴い短時間で非常に強い降雨現象が増えている。そうした降雨により通常の斜面崩壊より規模が大きい深層崩壊が発生する可能性が高まる。本研究では、深層崩壊が発生する地下数十メートルの深さでは日常的にどのような現象や変化が起きているか調べるため、深層崩壊の原因となる地下水の動きと地盤変形との関係を調べた。その結果、地下水の動きが活発な場所（恐らく岩盤の割れ目が多い場所）で地盤変形が生じやすいことを確認した。この成果は、地下水が流動しやすい場所をボーリング孔掘削により把握することで、将来の深層崩壊発生リスクすなわち斜面安定性を評価できる可能性を示す。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the relation between groundwater migration and bedrock deformation with drilling a 50 m-deep borehole to understand the occurrence mechanisms of deep-seated landslides which could be induced by extremely intense rainfall. Distributed fiber optic sensing, which detect the changes in temperature and strain, was adopted for the monitoring of water migration and bedrock deformation: spatial resolution along the borehole was 5 cm. Changes in temperature and strain obtained by cables allow us to understand water migration and bedrock deformation, respectively. Active-heating method, in which a metallic wire in a cable is heated, revealed water level because it shows a temperature distribution along the borehole, where the degree of temperature increase is lower around water due to thermal absorption by water. The depths of strain accumulation almost coincident with water depths, indicating groundwater migration through cracks might induce bedrock deformation.

研究分野：自然災害科学，地形学，応用地質学

キーワード：地下水挙動 ひずみ変化 斜面安定性 深層崩壊 割れ目

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化の影響によると考えられる降雨強度の増大が指摘されている。そのような降雨は通常の斜面崩壊に比べきわめて規模が大きい深層崩壊を引き起こす懸念がある。2011年9月に発生した紀伊半島豪雨災害では、複数の観測地点で降り始めからの期間降水量が1,500 mmを超え、深層崩壊が多数発生して甚大な被害をもたらした。このように、数十年に一度あるいは観測史上一位ときわめて稀な豪雨が深層崩壊を発生させることは明らかである。しかし、降雨時の地下水挙動と地盤変形との対応を実際の計測により捉えられている訳ではない。その理由は、既存の地盤変形計測技術が、地表から深さ50メートル付近までの変形計測に十分な空間解像度を有していなかったためである。地下水は地盤内の亀裂を通して移動するため、地盤内の亀裂発達状況の把握は重要である。地下の岩盤亀裂の発達状況の確認には、ボーリング孔掘削時に採取される岩石試料(コア)の観察が有効である。掘削後のボーリング孔にひずみ計、傾斜計、地下水位計を設置すればボーリング孔に沿った水文力学的データを取得できるため、こうした機器は地すべり挙動モニタリングに利用される。したがって、地表から深層崩壊が発生する深さまでこうしたデータを取得して経時変化をモニタリングすれば、亀裂の発達や変形状況を把握できると考えられる。しかし、これらの手法は測定のために各センサーが電源を必要とするため、センサーの設置数が多い、あるいは、設置深度が大きい場合には、電源ケーブルの取り扱いや処理が複雑となる。したがって、これらの手法により地表から地下50m程度までの区間において、地下水挙動や岩盤変形の検知に十分な空間解像度を持つデータの取得はきわめて難しい。

2. 研究の目的

深層崩壊の発生機構の解明という応用的なテーマ以前の課題として、基盤岩内の水文力学的挙動に関する基礎的な知見不足が挙げられる。具体的には、基盤岩の変形量、変形の季節変動や周期性の有無、亀裂位置と変形との対応関係、降水量と変形量との関係、などである。こうした問いに対する答えは、深層崩壊のみならず土木事業、資源開発、都市開発、インフラ整備といった地下空間や地下水の利用に関連する幅広い分野にとって有益である。そのため、地下水の流動位置とその場所におけるひずみ変化を計測可能な技術を確認し、より深部の水文力学的挙動を解明することに意義がある。そのため、本研究では、地表から地下50m程度までの区間における水文力学的データ取得方法の確立と、確立した手法による深層崩壊発生メカニズムの解明に向けた地下水挙動と地盤変形との関係の調査を目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、これまで困難であった地表から50m程度の水文力学的データの取得という技術的課題を克服して水文力学的挙動の解明に取り組むものである。この技術的課題の克服のため、本研究では既存のひずみ計と地下水位計に代わり、これらを長距離にわたり同時に計測できる光ファイバケーブルを使用した(図1)。光ファイバによる計測ではケーブルそのものがセンサーとなり電源を使用しないため、既存の計測手法で技術的制約の要因となっていた電源ケーブルの長さの問題が生じない。センサーとなるケーブルは直径5mmと細いものの補強用のピアノ線が複数包含されているため強度が大きい。したがって、ケーブルの先端にガイドとなる重りを付け、ボーリング孔へ降ろすだけで50mを超える深度にも容易に設置できる。

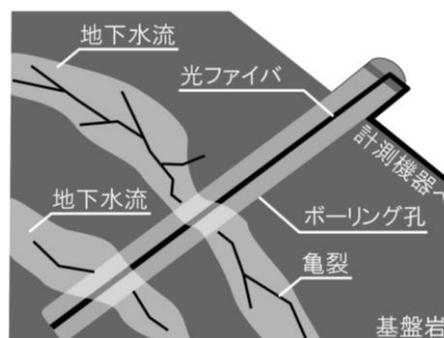


図1. 光ファイバによる計測の概念図。

3-1. ケーブル加熱による水の位置の特定試験

光ファイバはひずみ変化に加え、温度変化も計測可能である。本研究では、地下水流の有無によって温度変化速度が異なることを利用し、地下水流の位置の特定を試みた。現場での測定の前に、室内試験により水の場所を特定可能か確認した。

現場試験で使用するボーリング孔を模擬するため、塩ビ管の中に光ファイバケーブル(フジクラ社製FR-0G4ETINHE-SR15E×4C)を2本通し、直径77mm、長さ2mのコンクリート試験体を作成した。1本のケーブルはセンサー用途であり(図2のT)、もう1本はケーブルに内包された銅線をヒーターとして使用する加熱用途である(図2のH)。

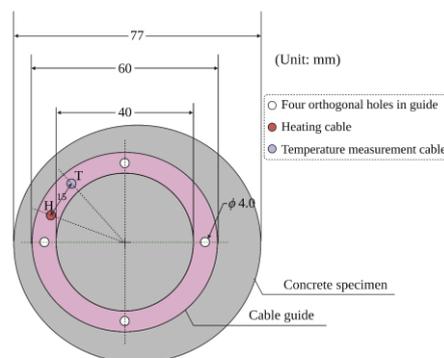


図2. コンクリート試験体の断面図。

コンクリート試験体の表面に乾いた区間と湿潤な区間を設定するため、試験体が2つの樹脂製容器を貫通した状態で固定した(図3)。試験時には試験体を横に寝かせ、2つの容器を水で満たした。加熱前にTケーブルにて光のスペクトラムを測定し、それを初期状態として記録した。加熱試験では、初期状態からTケーブル1m当たり1.6, 2.4, 3.5, 4.8, 6.2, 7.8Wと負荷する電力を6段階変化させた。それぞれの電力を付加させてから30分毎にスペクトラムを測定し、加熱後3時間で試験を終了した。試験終了後、試験体の温度が室温に下がるまで十分な時間を空けて、次の電力を負荷した。

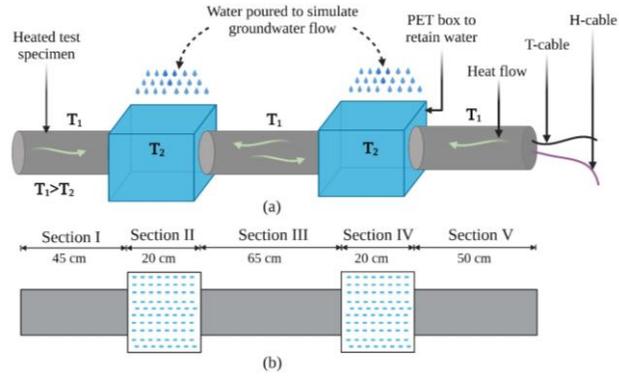


図3. コンクリート試験体と樹脂製容器の固定状況。

3-2. 島根大学松江試験地における野外実験

島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター森林科学部門が管理する松江試験地(松江市坂本町)において直径66mm、深さ50mのボーリング孔を掘削し、地下水挙動と地盤変形の関係を明らかにするための実験を行った。掘削作業期間は、2021年12月7日~2022年2月10日である。後述する多点温度検層の実施後のボーリング孔内に、ひずみ測定用ケーブルとHケーブル(図4のSとH、フジクラ社製FR-0G4ETINHESR15E×4C)、およびTケーブル(日鉄溶接工業株式会社製”ピコケーブル”)をそれぞれ2本、計6本埋設した。ピコケーブルとは、直径1.8mm(内径1.4mm)のステンレス管(SUS316)に保護用のPE樹脂(被覆外径3.5mm)が被覆されたケーブルである。本研究では、ピコケーブル内にシングルモード素線を4本挿入した。ピコケーブル内は中空であるため、内部の素線はステンレス管の動きに追従しない。そのため、ピコケーブル内の素線は温度変化のみを測定可能である。Hケーブルの加熱用電源にはズーム電源(高砂製作所製ZX-S-1600M)を使用し、負荷電力を9.1W/mとした。

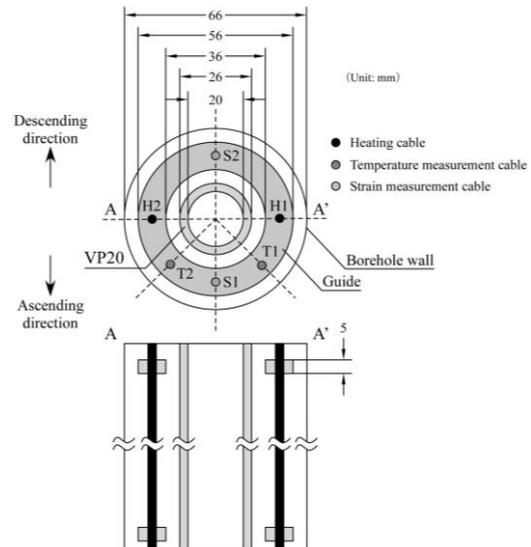


図4. ボーリング孔内への光ファイバケーブルの埋設状況。

2022年2月18日には、ボーリング孔内の地下水水位や湧出箇所の特定のため、多点温度検層を実施した。試験方法は、次の通りである：①試験開始前に自然状態の孔内の温度分布を測定、②孔内に温水を注入し、全深度の温度がほぼ均一になるように加熱(今回の試験では45℃程度)、③加熱停止後の温度変化を測定。地下水流動層の深さでは、孔内の水の温度が流動する地下水によって奪われるため、地下水流動が無い層に比べ自然状態の温度へ急速に回復する。これにより、ボーリング孔内の地下水流動層の位置を特定できる(図5)。

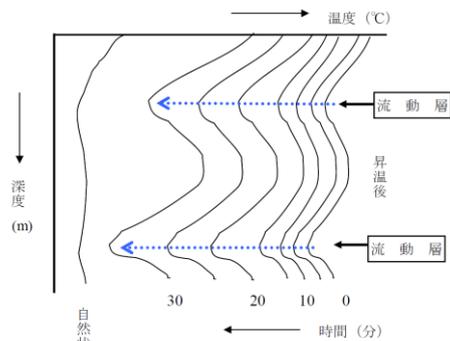


図5. 多点温度検層の原理。

4. 研究成果

4-1. ケーブル加熱による水の位置の特定試験

結果を図6に示す。Tケーブルに電力を負荷すると試験体内部が加熱され、その熱が試験体表面に伝播する。負荷電力が大きくなるにつれて試験体表面の温度が大きくなり、7.8W/m負荷時には、最大温度が90℃近くに達した。BOXIおよびBOXIIで示される水で満たされた区間では、表面が乾いた区間と比べ温度上昇が小さい。これは、試験体内部から表面に伝播した熱が水に奪われたためと考えられる。加熱時間が経過するにつれ、また、負荷電力が大きくなるにつれて表面の水の有無による温度上昇の差は大きくなり、水が存在する区間の特定が容易になる。ただし、負荷電力3.5W/mまでは温度上昇の差がやや不明瞭である。このことから、より大きい電力を負荷することで、水の位置を検知するための信頼性が向上することが分かった。

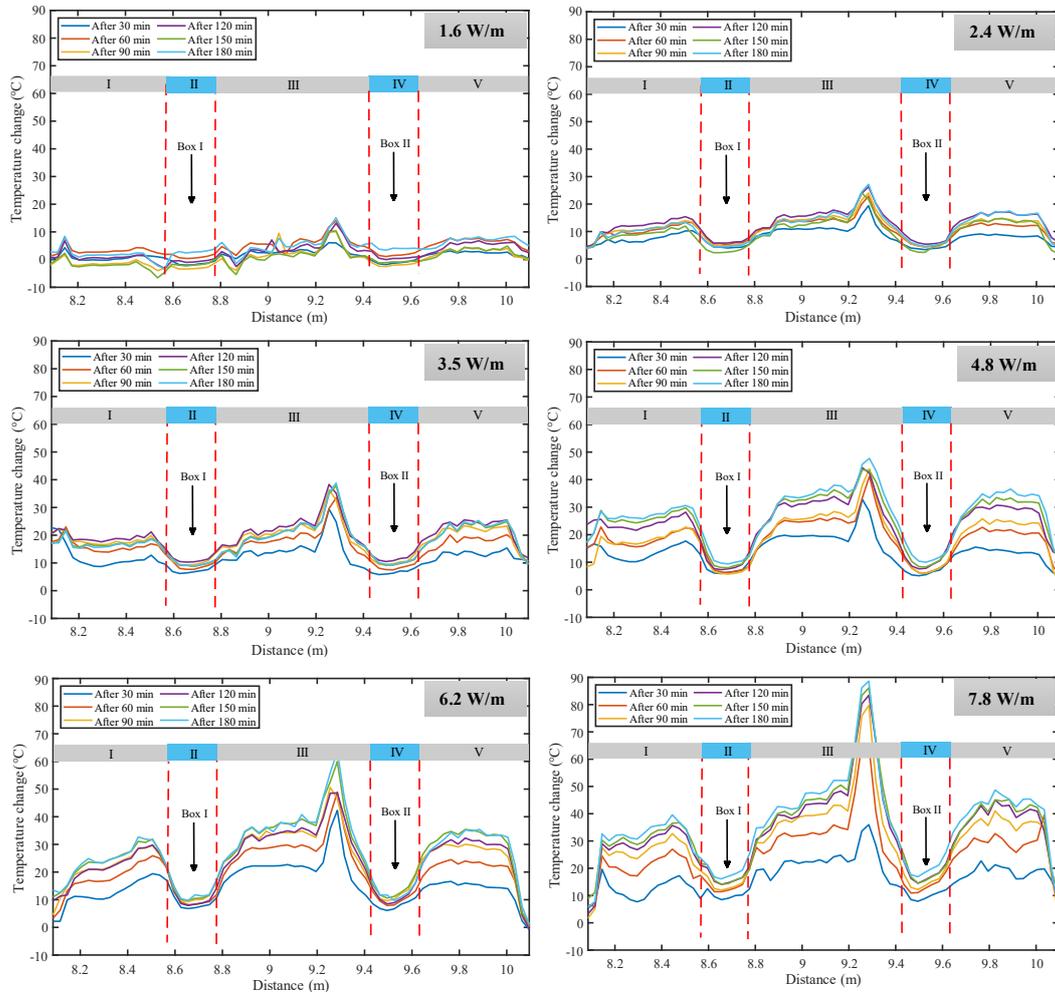


図 6. コンクリート試験体内部の温度変化.

4-2. 松江試験地における野外実験

4-2-1. 多点温度検層による地下水流動検知

多点温度検層の結果を図 7 に示す。試験開始前の地下水位深度は 44.45 m であり、湯入直後は 35.23 m まで上昇した。また、検層開始後 30 分では 35.75 m だった。したがって、本ボーリング孔の地下水位は通常孔内下部に位置し、地下水流動の影響を受ける範囲はおおよそ深度 35 m 以深であると考えられる。湯入後の 35 m 以深の水温復元率(湯入直後の温度-任意の経過時間

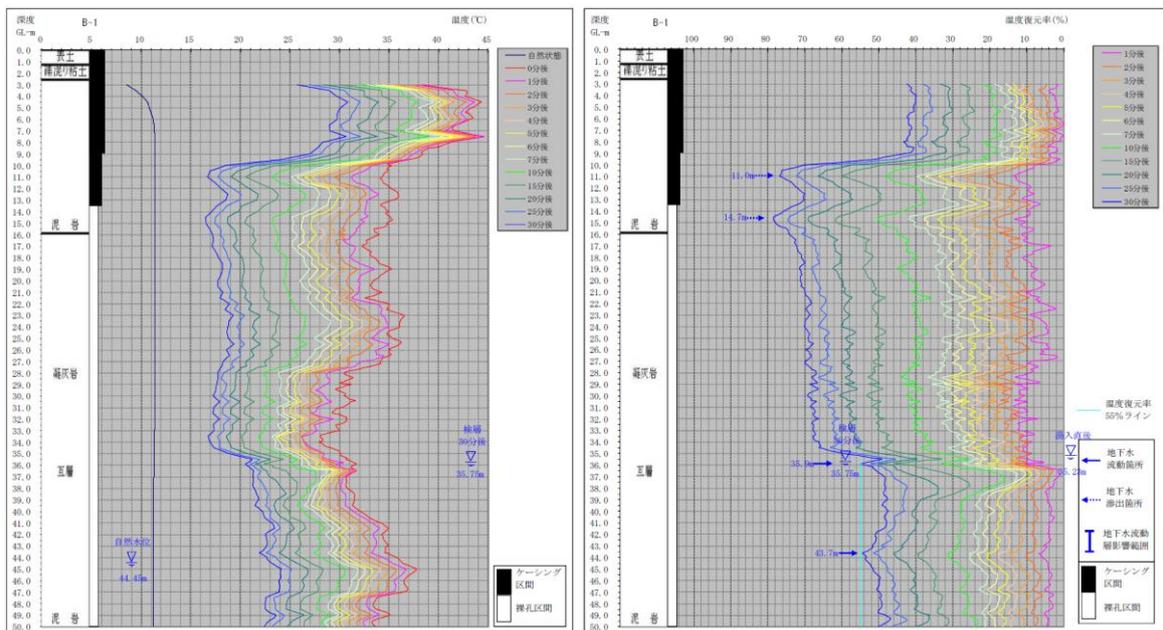


図 7. ボーリング孔内の水温および水温復元率と深度との関係.

における温度)/(湯入直後の温度-自然状態の温度)を見ると、35.9 mおよび43.7 mの深さで復元率が他の深度より大きいことがわかる。復元率は約55%であり、これは地下水流がきわめて遅い、または、ほぼ滞留状態の水の温度拡散率を基に計算した場合の昇温停止後30分での復元率と一致する。したがって、これらの深度では地下水が滞留またはきわめて低い速度で流動していることが分かった。

4-2-2. 光ファイバケーブルの加熱による地下水流動検知

松江試験地のHケーブルの加熱による地下水流動検知の結果を図8に示す。多点温度検層とは異なり、Hケーブルを用いた加熱試験では3時間の測定時間中に加熱し続けた。したがって、どの深度においても温度は上昇し続けた。地表付近を除けば、温度上昇は最大約20°Cだった(一部深度で40°C近く)。しかし、深度4-6 m、10.5-12.0 m、16-18 m、22-26 m、36-37.5 m、46-47.5 mなど温度上昇が5°C以下であった。室内でのケーブル加熱試験の結果から、これらの区間では地下水の滞留や流動が示唆される。これらの区間には上述した多点温度検層により地下水流動区間と判断された深度が含まれる、あるいは両者の結果が近い値を示すことから、どちらの手法も地下水の位置を検知できていると考えられる。多点温度検層が2月、Hケーブルの加熱試験が5月に実施されたことを考慮すると、両手法により検知された深度の違いは地下水の季節変動を捉えた可能性がある。

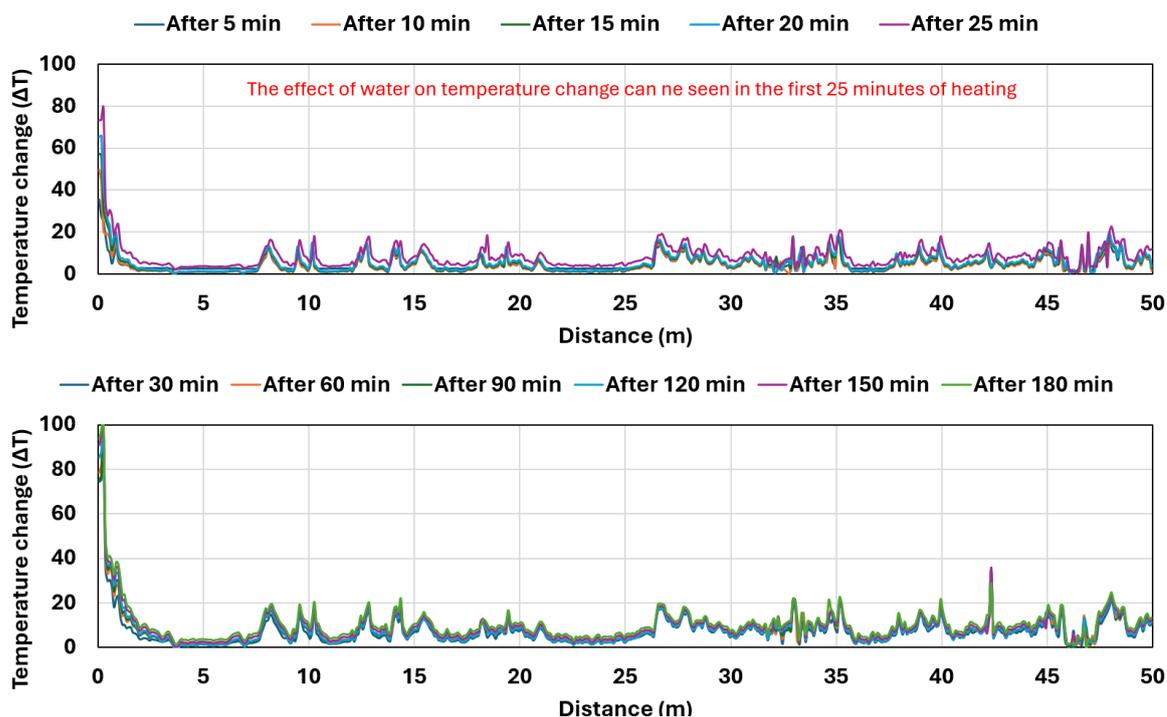


図8. Hケーブル加熱後の孔内温度分布の時間変化.

4-2-3. Sケーブルによるひずみ変化測定結果(地盤変形)と地下水挙動との関係

斜面変動を引き起こす降水量とひずみ変化量との関係および、降水が発生してから斜面変動が発生するまでの時間の関係を調べたところ、深さによっては降水発生とひずみ発生とが必ずしも明確に対応しないことが明らかになった。雨や雪が降ると地表から1m付近までの主に土壌からなる区間でひずみが発生(変形)した。ひずみ発生に最低限必要な降水量は、最大時間降水量が3mm程度かつ総降水量が10mm程度であった。地表から1mより深い場所では、降水とひずみ発生との関係が不明瞭だった。ボーリング孔から得られたコアには多くの割れ目が存在すること、また、このボーリング孔内の地下水面は地表から40mより深い場所にあることから、通常の雨や雪は斜面変形に十分な地下水面の上昇に寄与しないことが示唆された。そのため、今回の研究期間内で記録されたものより降雨強度が大きいイベント、あるいは「この地域におけるきわめて稀な豪雨」時の降水量、ひずみ変化量、地下水上昇量のデータを取得できると、岩盤深部の変形と地下水挙動との関係性をより明確に理解できる可能性があることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Acharya, A. and Kogure, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Recent advances in fibre-optic-based slope reinforcement monitoring: a review of current status and prospects	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Acharya A., Kogure T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of novel distributed fibre-optic sensing for slope deformation monitoring: a comprehensive review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13762-022-04697-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Doi Issei, Matsuura Sumio, Osawa Hikaru, Shibasaki Tatsuya, Tosa Shinichi	4. 巻 81
2. 論文標題 Effects of slope instability on coseismic landslide susceptibility during earthquakes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of Engineering Geology and the Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10064-022-03015-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 土井一生・川方裕則・中山雅之・高橋直樹	4. 巻 80
2. 論文標題 表層崩壊模擬実験による透過弾性波を用いた地盤内部モニタリングの試み	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 立命館大学理工学研究所紀要	6. 最初と最後の頁 57-66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ashis Acharya, Daiki Tanimura, Chao Zhang, Fumihiko Ito, Toshihiro Sakaki, Mitsuru Komatsu, Issei Doi, and Tetsuya Kogure
2. 発表標題 Distributed temperature sensing for seepage detection using Rayleigh-based optical frequency-domain reflectometry: from laboratory feasibility study to field investigation
3. 学会等名 14th Asian Regional Conference of IAEG (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柴崎達也・松浦純生・土井一生・大澤光
2. 発表標題 すべり面粘土のせん断時における摩擦熱計測
3. 学会等名 公社) 日本地すべり学会第62回(2023年度)研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Acharya, A., Tanimura, D., Zhang, C., Ito, F., Sakaki, T., Komatsu, M., Doi, I., Kogure, T.
2. 発表標題 Experimental demonstration of temperature variation sensing employing optical frequency-domain reflectometry based on Rayleigh backscattering aiming seepage flow monitoring in slopes.
3. 学会等名 Japanese Geomorphological Union 2022 Fall Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Acharya, A., Tanimura, D., Zhang, C., Ito, F., Sakaki, T., Komatsu, M., Doi, I., Kogure, T.
2. 発表標題 An experimental analysis to assess temperature distribution using Rayleigh-based optical frequency-domain reflectometry: a step towards groundwater flow monitoring in vulnerable slopes.
3. 学会等名 35th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土井一生・松浦純生・大澤光・岡本隆・柴崎達也・土佐信一
2. 発表標題 不安定化が促進した海岸地すべりにおける地すべり土塊の変形特性
3. 学会等名 公社) 日本地すべり学会第60回(2021年度)研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	土井 一生 (Doi Issei) (00572976)	京都大学・防災研究所・助教 (14301)	
研究分担者	小松 満 (Komatsu Mitsuru) (50325081)	岡山大学・環境生命自然科学学域・教授 (15301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	榊 利博 (Sakaki Toshihiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------