

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05671

研究課題名（和文）深い地下水が関与した大規模崩壊の危険箇所抽出と警戒避難対応の確立

研究課題名（英文）Potential site prediction and warning of collapse caused by groundwater

研究代表者

地頭菌 隆（JITOUSONO, Takashi）

鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・教授

研究者番号：50145455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、気候変動等の影響による記録的な大雨の増加に伴って、深層崩壊に代表される深い地下水が関与した大規模な崩壊（地下水型崩壊）が目立っている。本研究では、渓流水の比流量を測定して、地下水の集中箇所を「流域」「斜面」のように段階的に絞り、地下水型崩壊の発生危険箇所を抽出する簡易な調査法を開発した。さらに、抽出した地下水集中箇所において、湧水を監視する装置で湧水流量から崩壊発生の危険性を判断する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒対応について水文学的アプローチで取り組んだものである。地形条件に基づいた土砂災害発生の恐れがある区域指定に地下水集中という水文条件を加えることは区域指定の精度を高める。また、土砂災害警戒情報は降雨ピークで発生することが多い表層崩壊を対象にしており、降雨後に発生することがある地下水型崩壊は含まれていない。湧水監視は地下水型崩壊が発生しやすい地域の防災対策を向上させる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, large-scale collapses caused by deep groundwater, such as deep-seated landslides, have been occurring frequently as heavy rainfall increases because of climate change. In this study, an investigation method was developed to identify areas at risk of large-scale collapse from the distribution of specific discharge. Additionally, a method for monitoring spring water was proposed to predict the risk of collapse.

研究分野：砂防学

キーワード：地下水型崩壊 土砂災害 水文調査 地形地質調査 崩壊発生予測 警戒避難対応

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2018年4月に大分県耶馬溪町の火砕流台地周縁で無降雨時に深い地下水が関与した大規模な崩壊(以下、地下水型崩壊と呼ぶ)が起こり、6人が亡くなった。2017年7月の九州北部豪雨の際は、福岡県朝倉市等の花崗岩や片岩からなる山地で表層崩壊、溪岸・溪床侵食が多発する一方、大分県日田市の火山性地質の地域(以下、火山地域と呼ぶ)では地下水型崩壊が降雨後しばらくして発生した。2016年4月の熊本地震の際は、阿蘇地域で多様な崩壊が発生した。特に溶岩や火砕物が幾層にも厚く堆積した緩斜面での崩壊は多量の地下水が集中している箇所が発生していた。阿蘇地域では2012年7月の九州北部豪雨の際も崖錐斜面で地下水型崩壊が多発した。2015年6月に記録的な大雨に見舞われた鹿児島県垂水市では、始良カルデラ壁において雨がやんでから地下水型崩壊が繰り返し発生した。火山地域は火山活動に伴う堆積物が幾層も重なっており、透水性の不連続な層の重なりが特徴的な地下構造となっている。地下水はゆっくり流動するために雨がやんで長時間が経過してから崩壊が発生した。このタイプの崩壊は2010年鹿児島県南大隅町の火砕流台地周縁でも発生している。

近年、火山地域において地下水型崩壊に伴う土砂災害が目立っている。地下水型崩壊は、崩壊深が大きいために土砂量が多く、また多量の地下水が影響して崩壊土砂が長距離を移動し、広範囲に被害を与えている。本研究は、地下水型崩壊の発生場所と発生時間を新たな手法で予測し、土砂災害を防止・軽減できないか、という喫緊の課題を解決するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の地形に基づく危険箇所抽出と降雨に基づく警戒避難対応に渓流水や湧水などの水文情報を加えて防災・減災効果を高めることである。具体的には、①渓流水の流量や電気伝導度を測定して地下水の集中箇所を抽出し、地下水型崩壊の発生危険箇所を抽出する調査法を確立する。②抽出した地下水集中箇所における湧水の流量変化をリアルタイムで監視し、崩壊発生の警戒避難対応の策定手法を確立する。

3. 研究の方法

図1は、渓流水や湧水を活用して、地下水の集中という視点で地下水型崩壊発生の危険箇所を段階的に抽出し、さらに危険箇所の湧水を監視して警戒対応を行う提案である。

「A 危険渓流の抽出」では、数 km² 未満の小流域を設定して、降雨が一週間以上なかった後に、溪床に基盤岩が露出しているなど、渓流水が伏流していない箇所で基底流量を測定する。この流量を流域面積で除した基底比流量が大きい流域は、地形的分水界より広い水文的分水界に規制された地下水が流域内に流入している可能性があり、地下水型崩壊の恐れのある流域として抽出する。また、流量測定時にポータブル電気伝導度計で渓流水の電気伝導度(EC)を測定して渓流水が深い地下水起源かを判断する。ECは渓流水中の溶存イオンの総量であり、地下水が流動する過程で岩石から溶出するイオンを取り込むことから、多量の深い地下水が流出している流域は渓流水ECが高くなる。

なお、渓流水ECは人家、畜産施設などの排水の影響を受けて高い値を示すことがあるため、渓流水が人為的な影響を受けている可能性のある箇所ではシリカ(SiO₂)濃度を活用して影響の有無を判断する。シリカ濃度は地下水が岩石と接触して起こる化学反応によって溶出することから、多量の深い地下水が流出している渓流水はECと同様に高くなる傾向がある。シリカ濃度の測定はEC測定に比べて手順が煩雑であるが、シリカはほとんどが鉱物由来であるために人為的な影響を受けにくいという長所がある。

「B 危険斜面の抽出」では、調査Aで抽出した流域において湧水の分布や流量等の調査を行う。湧水流量が多い斜面の背後には地下水が集中する地下構造が推定され、地下水型崩壊の恐れがある斜面と判断する。

以上の方法で深い地下水が集中する流域や斜面の分布図を作成し、地形・地質に基づく危険箇所と組み

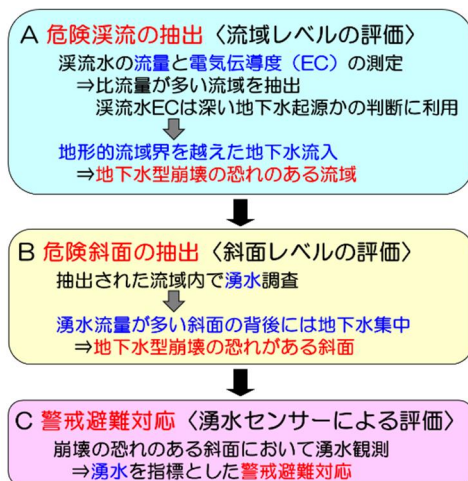


図1 渓流水・湧水を活用した地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒対応

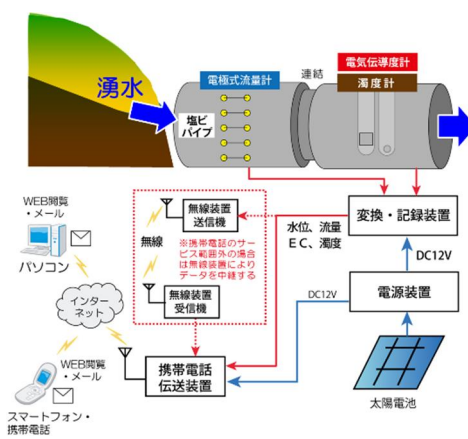


図2 湧水センサーのシステム構成

合わせて崩壊発生の危険箇所抽出の精度を高める。

「C 警戒避難対応」は、調査 B で見いだされた湧水を指標にして地下水型崩壊発生の危険性を判断するものである。そこで、湧水流量をリアルタイムで監視する装置（湧水センサー）を開発した。湧水センサーは、電極式流量計、変換・記録装置、電源装置、太陽電池、携帯電話伝送装置等から構成される（図 2）。電極式流量計は、塩ビパイプに取り付けた鉛直方向 1cm 間隔の電極によって測定される水位から流積を求め、流積に Manning 式による流速を乗じて湧水流量を算出する装置である。塩ビパイプ径の大きさは設置点の湧水流量で決定する。測定値は携帯電話を使ってリアルタイムでサーバーに送信され、インターネットを介してパソコンやスマートフォンで閲覧できる。

湧水流量から次のような崩壊発生の警戒対応を考えている（図 3）。湧水が増加中の場合は、雨が止んだ後も基岩内の地下水位が上昇中であり、崩壊の危険性が増加中、また、湧水が多いまま頭打ち状態が続く場合は地下水排水システムの能力を超えた地下水が集中している可能性があり、基岩内の地下水位が上昇して崩壊の危険性が継続している。さらに、湧水が急激に減少した場合は山体の地下水排水システムが地下侵食等で破壊された可能性があり、基岩内の地下水位が急上昇して崩壊発生の恐れがある。以上の状況が降雨終了後もみられる時は警戒対応を継続しなければならないと考えている。

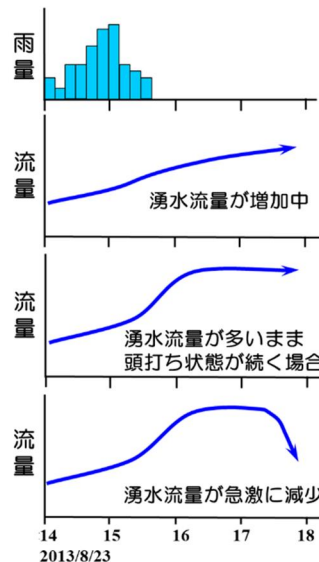


図3 湧水を指標にした崩壊危険度の評価

4. 研究成果

(1) 地下水型崩壊の危険箇所抽出の事例

1977年6月、鹿児島市竜ヶ水において、始良カルデラ壁の急斜面が大規模に崩壊し、崩壊土砂が土石流となって下流を襲い、9人が亡くなった（図4）。崩壊発生時は大雨ではなかったが、発生前の1カ月間に700mm近くの降雨があった。斜面からは湧水があり、その上部の溶結凝灰岩層が崩壊したものであった。

図5は、始良カルデラ西壁の61流域（面積0.01~0.57km²）の比流量と渓流水ECの分布である。竜ヶ水付近と白浜の北側に位置する流域は、渓流水ECが高く比流量が大きく、水文的分水界に規制された広い範囲の地下水が集中していると考えられる。竜ヶ水付近の流域において湧水調査を実施した（図6）。No. 32流域は、1977年に地下水型崩壊が発生した流域であり、標高214m付近の溶結凝灰岩の割目から多量の湧水がみられ、湧水の流量とECは0.8L/s、14mS/mであった。No. 32流域の下流端で測定した渓流水の流量とECは0.8L/s、13mS/mであり、流域の基底流量は崩壊地からの湧水に依存していることがわかる。No. 32流域の1977年崩壊斜面の背後には地下水が集中する地下構造が推定され、湧水付近の侵食が進んで上部層が不安定になると再び崩壊が起こる可能性がある。No. 30流域では、標高197m付近の溶結凝灰岩の割目からの湧水は少なく、標高78m付近の安山岩の割目から多量の湧水が見られた。No. 32流域とNo. 30流域は隣接しているが、多量の地下水が流出している地層は異なり、地下水を集水する地下構造も異なることが推定され、地下水が関与する崩壊タイプも異なると思われる。

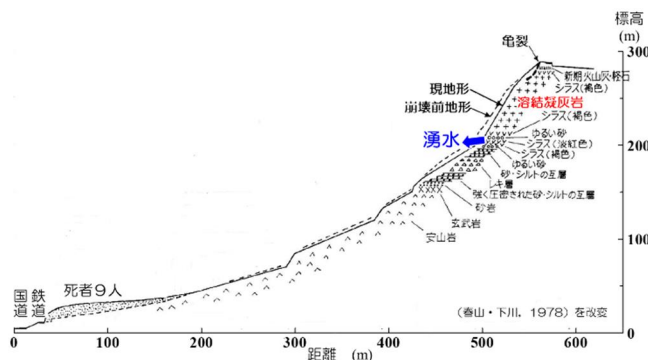


図4 鹿児島市竜ヶ水の始良カルデラ壁で発生した崩壊

(2) 地下水型崩壊の発生機構

図7は、九州の火砕流台地周縁、カルデラ壁、火山岩山地で発生した代表的な地下水型崩壊を模式的に示したものである。火山性地質の地域は、火山活動に伴う堆積物が幾層も重なっており、透水性の不連続な地層構造が特徴的である。このような地域において、深い地下水が集中している箇所では、①地下水排水システムの破壊による地下水圧上昇に伴う風化層からの崩壊、②地下水排水能力を超えた地下水集中による地下水圧上昇に伴う風化層からの崩壊、③湧水箇所の地下水による侵食に伴う風化層の崩壊、④地下水集中により常時飽和している崖錐堆積物の崩壊などのタイプがみられた。タイプ①の排水システムの破壊は、長年の岩石劣化や地下侵食、地震等が考えられる。タイプ②③④は近年の記録的な大雨の増加により発生頻度が増している。タイプ①~④により生産された土砂は、発生場所や地下水量によっては土石流化して下流の広範囲に被害を及ぼす可能性がある。

図1に示した調査によって地下水集中箇所が抽出されたら、そこで起こりうる崩壊の発生機構を明らかにし、有効な土砂災害対策を検討することが重要であると考えられる。

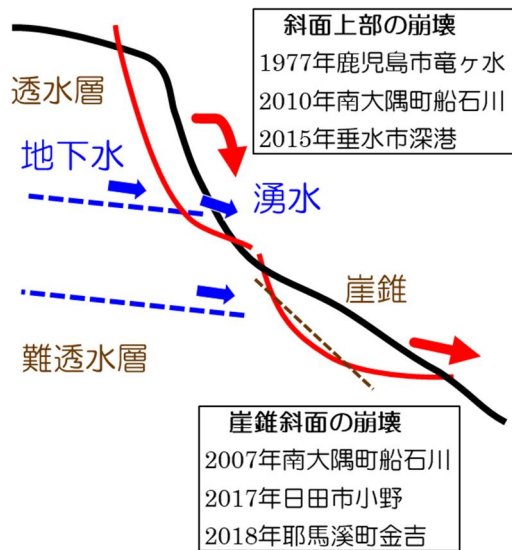


図5 始良カルデラ西壁における地下水型崩壊危険渓流の抽出



図6 竜ヶ水付近の流域における湧水調査

火砕流台地周縁、カルデラ壁



火山岩山地

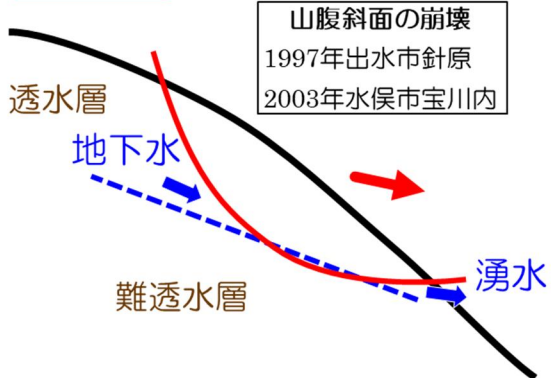


図7 九州で発生した地下水型崩壊のタイプ

(3) 地下水型崩壊の警戒避難対応の事例

南大隅町の火砕流台地周縁や始良カルデラ壁において抽出した地下水集中箇所湧水センサーを設置した(図8)。これらの地域は透水層と難透水層の互層からなる地下構造を呈し、地層境界を流動した地下水が崩壊発生に関与している。この地下構造に1段タンクモデルを適用して降雨と地下水流出の応答を解析した。タンクモデルの流出孔(湧水)と浸透孔(深部浸透)の係数は湧水センサーの観測データから同定した。この地下水流出モデルを用いて既往の崩壊発生時の湧水流量を求め、崩壊の警戒避難基準を策定した。

図9は、2019年に記録的大雨に見舞われた南大隅町火砕流台地の湧水センサーの観測データである。南大隅町では、土砂災害警戒情報が7月3日15時10分に発表され、雨が止んだ後の4日6時に解除された。一方、湧水流量も3日に地下水型崩壊の警戒避難基準を超過したが、雨が止んだ後も2日間は超過状態が続いた。地下水型崩壊による土砂災害の警戒には地下水状態を表す湧水流量のような情報も必要である。

蓄積された湧水センサーの観測データによると、雨が止んでから2日程度は湧水流量が多い状態が続いており、地下水型崩壊の警戒対応を継続する時間の目安になると考えている。



図8 始良カルデラ壁に設置した湧水センサー

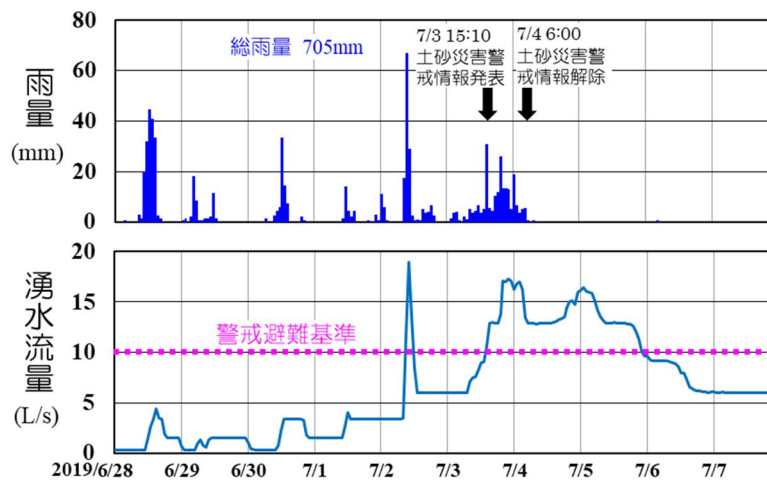


図9 南大隅町火砕流台地縁の湧水センサーの観測データ

(4) おわりに

地下水型崩壊発生の危険箇所の抽出と警戒避難対応に関して水文学的アプローチによる研究を進めた。現在、土砂災害発生の恐れがある区域指定（土砂災害警戒区域等）は、主に地形条件に基づいている。2012年および2017年の九州北部豪雨の際は、地下水型崩壊が危険箇所として指定されない30度未満の斜面で発生した。地下水集中の水文条件を加えることは土砂災害の危険区域指定の精度を高めることになり、これまでの手法では抽出されなかった危険斜面が抽出できる可能性がある。

一方、豪雨時に土砂災害発生の恐れが生じたときに発表される土砂災害警戒情報は、降雨ピークで発生することが多い表層崩壊や土石流を対象にしており、地下水型崩壊のように時間差がある崩壊は含まれていない。湧水流量の変化をリアルタイムで把握することは、地下水型崩壊が発生しやすい地域における防災対策に有効である。

最近の土砂災害をみると、明らかに大規模な土砂移動現象が多発している。気候変動等の影響による集中豪雨、局地的大雨、大型台風等の増加に伴って、これまでに経験したことがない大規模な土砂災害の発生リスクが各地で高まっている。降水予測の精度がさらに高まれば、予測される降水量に合わせて土砂災害の警戒区域の範囲や警戒体制のレベルを設定する仕組みも必要になると考えられる。たとえば、「今後400mmを超えるような大雨が予想される」等が発表された場合は、警戒区域や警戒体制を拡大して大規模災害に備える、同時に住民にどのような対応を求めるか、などを具体的に検討する時代に入ったと思っている。そういった具体的な対策に寄与するために、本研究で進めた大規模土砂災害を引き起こす地下水型崩壊の発生場と発生時期の予測研究をさらに推進する必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 清水収, 地頭園隆, 執印康裕, 水野秀明, 秋田寛己, 天野祐一朗, 植弘隆, 大石博之, 岡野和行, 小野貴稔, 影山大輔, 加藤卓也, 菊池英明, 木藤賢一, 木原早紀, 佐藤厚慈, 篠原慶規, 田方智, 竹林洋史, 千葉幹, 鳥田英司, 中濃耕司, 西脇彩人, 平川泰之, 福池孝記, 福塚康三郎, 本田健, 本多泰章, 光永海斗, 山越隆雄, 矢渡岳, 吉永子規, 吉野孝彦	4. 巻 76(4)
2. 論文標題 2023年7月の大雨により福岡県久留米市と佐賀県唐津市で発生した土砂災害	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 33-43
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 地頭園隆	4. 巻 135
2. 論文標題 渓流水・湧水を活用した土砂災害予測の研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 (一財) 砂防・地すべり技術センター機関誌sabo	6. 最初と最後の頁 2-7
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 JITOUSONO1, IGURA, UE, OHISHI, KAKIMOTO, KITOU, KOGA, SAKAI, SAKASHIMA, SHINOHARA, SHIMIZU, TAGATA, TERAMOTO, TORITA, NAGATANI, NAKANO, NISHIWAKI, HIRAKAWA, FUKUZUKA and MIZUNO	4. 巻 13(4)
2. 論文標題 The July 2020 Rainfall-Induced Sediment Disasters in Kumamoto Prefecture, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Erosion Control Engineering	6. 最初と最後の頁 76-83
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 地頭園隆・清水収・大石博之・岡野和行・坂島俊彦・鳥田英司・吉永子規	4. 巻 なし
2. 論文標題 (公社)砂防学会 令和3年8月豪雨災害に係る緊急調査 - 九州地方で発生した土砂災害について -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砂防学会HP	6. 最初と最後の頁 1-15
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 山地災害と防災対策
3. 学会等名 鹿児島県山地防災ヘルパー連絡協議会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 平成5年鹿児島豪雨災害と防災研究
3. 学会等名 （公社）日本地すべり学会九州支部（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 九州で発生した土砂災害を調査して～その特徴と対策～
3. 学会等名 国土交通省（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 近年の山地災害の特徴と対策
3. 学会等名 宮崎県（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 災害現場から生まれた砂防研究
3. 学会等名 NPO法人 鹿児島砂防ボランティア協会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 滝澤雅之・岡野和行・佐藤厚慈・地頭園隆・由永尚暉・常盤井佑太・笹川優希・真茅奈央
2. 発表標題 大規模崩壊が発生した斜面の特徴に関する一考察-令和2年7月豪雨により球磨川支川で発生した大規模崩壊（川内川を事例として）-
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 由永尚暉・地頭園隆・笹川優希・常盤井佑太・真茅奈央・園田明花里・清崎淳子
2. 発表標題 屋久島花崗岩山地で発生した深層崩壊
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永子規・地頭園隆・清水収・大石博之・岡野和行・鳥田英司・坂島俊彦
2. 発表標題 令和3年8月豪雨により長崎県雲仙市で発生した土砂災害
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 九州における地下水が関与した大規模崩壊の警戒対応
3. 学会等名 国土交通省（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 土砂災害の発生メカニズムと防災対策
3. 学会等名 鹿児島地方気象台（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山越隆雄・坂井佑介・西脇彩人・永谷直昌・地頭園隆・垣本毅・伊倉万理
2. 発表標題 令和2年7月豪雨により発生した土砂・洪水 氾濫（球磨川水系川内川）
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 地頭園隆・天野祐一朗・由永尚暉・白藤雄也
2. 発表標題 令和2年7月豪雨により球磨川流域で発生した大規模崩壊
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 天野祐一朗・地頭園隆・由永尚暉・白藤 雄也・清崎淳子
2. 発表標題 火山性地質の地域における地下水型崩壊 発生の警戒対応
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清崎淳子・地頭園隆・宮本祐成・天野祐 一郎
2. 発表標題 阿蘇カルデラにおける地下水型崩壊発生 の危険箇所抽出
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 由永尚暉・地頭園隆・天野祐一朗・白藤 雄也・清崎淳子
2. 発表標題 始良カルデラ壁における地下水型崩壊発 生の予測
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 九州における土砂災害研究から表層崩壊・深層崩壊を考える
3. 学会等名 砂防学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 九州における地下水が関与した 大規模崩壊の警戒対応
3. 学会等名 国土交通省（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 地頭園隆
2. 発表標題 水文調査から土砂災害を予測する
3. 学会等名 砂防学会（招待講演）
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

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