

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職
		地頭菌 隆 （じとうその たかし）	鹿児島大学	教授
技術研究 開発テーマ	名称	【テーマ名】九州における地下水が関与した大規模崩壊の警戒対応		
研究経費（単位：万円）		令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度
端数切り捨て。		257 万 円	122万円 円	114 万 円
研究者氏名		（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）		
氏 名		所属機関・役職（ 令和 年3月31日現在 ）		
研究の目的・目標（様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 九州では、火砕流台地周縁やカルデラ壁などの火山性地質の地域（火山地域と呼ぶ）において、地下水が関与した大規模な崩壊（地下水型崩壊と呼ぶ）が発生している。たとえば、2018年大分県耶馬溪町の火砕流台地周縁や2015年鹿児島県垂水市の始良カルデラ壁で発生した崩壊である。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。地層境界をゆっくり流動する地下水は、岩石を深層風化させ、また雨が止んで長時間が経過してから崩壊を引き起こすこともある。地下水が関与した崩壊は、土砂量が多くて被害が大きくなり、また無降雨時に発生して警戒対応が困難な場合もある。 本研究の目的は、地下水が関与した崩壊を対象にして、従来の地形地質に基づく危険箇所抽出と降雨に基づく警戒避難対応に、地下水という水文情報を導入して防災・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集中箇所を抽出し、崩壊発生危険箇所を絞り込む調査法を確立する。さらに、(2)抽出した地下水集中箇所において、湧水流量の監視に基づいた崩壊発生の警戒対応策を開発することである。目的(1)に関しては、これまで鹿児島県や大分県の火砕流台地やカルデラ壁で蓄積した水文データを活用して地下水が関与した崩壊の危険箇所を抽出する調査法のマニュアルを作成する。目的(2)に関しては、湧水流量の連続観測から地下水が関与した崩壊に対する警戒避難対応の基準を定める手法を提案する。 本研究成果は、住民の警戒避難、道路の通行管理、災害後の救助や復旧の活動時の二次災害防止にとって重要であり、九州地方整備局の「無降雨時等の崩壊研究会」において大規模崩壊の危険箇所抽出と警戒対応の検討にも反映させる。				

研究成果

図1は、地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒避難対応に水文情報を活用する方法の提案である。具体的には、渓流水や湧水を活用して、地下水の集中という視点で崩壊発生危険性がある斜面を段階的に抽出し、さらに危険斜面からの湧水を監視して警戒避難対応を行うものである。

(1) 崩壊危険箇所抽出手法の確立

面積が 1km^2 未満の小流域において、降雨が一週間以上なかった後に測定する渓流水の流量は地下水流量と考えてよい。電気伝導度（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、多量の地下水が流出している流域は渓流水 EC が高くなる。渓流水 EC が高くて比流量が大きい流域は、地形的流域界を越えた地下水が流域内に流入している可能性があり、地下水が関与する崩壊の恐れのある流域として抽出する（図1のA）。次に、抽出された流域内で湧水を調査する。湧水流量が多い斜面の背後には地下水が集中しており、地下水が関与する崩壊の恐れがある斜面と判断する（図1のB）。

鹿児島県や大分県の火山岩山地、火砕流台地周縁、カルデラ壁で蓄積してきた図1のAおよびBに関する調査結果をGISソフトで整理するとともに、さらに精度を高めるための補足調査を行った。

図2は、鹿児島県南大隅町の火砕流台地周縁に設けた42流域（流域面積 $0.001 \sim 1.20\text{km}^2$ 、平均 0.17km^2 ）の下流端で測定した渓流水の流量とECをプロットしたものである。42流域の渓流水ECは深い地下水起源と判断される 10mS/m 以上を示しており、流域内に深い地下水が流出していると判断される。一方、比流量は様な分布を示さず、台地周縁から多量の地下水が流出している流域とそうでない流域が存在する。深い地下水が関与する崩壊の恐れのある流域を地下水の集中という視点で抽出するにあたり、ここでは渓流水のECが 10mS/m 以上を抽出し、さらに比流量でランク付けした。ランク付けの区分は、42流域の平均比流量 $0.03\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ を基準にして、その2～4倍の値で区分した。比流量が大きい流域の台地周縁の急斜面（図2の黒色破線）は、深い地下水が多量に集まっていると判断されることから地下水型崩壊発生危険性がある。2010年と1966年に発生した崩壊はこれらの斜面に位置しており、抽出した斜面は地下水型崩壊発生危険性が高く、崩壊土砂が大量の地下水を含むと大規模な土石流となって流下する恐れがある。

A 危険渓流の抽出〈流域レベルの評価〉

渓流水の流量と電気伝導度（EC）の測定
⇒比流量が多い流域を抽出
渓流水ECは深い地下水起源かの判断に利用

地形的流域界を越えた地下水流入
⇒地下水型崩壊の恐れのある流域

B 危険斜面の抽出〈斜面レベルの評価〉

抽出された流域内で湧水調査

湧水流量が多い斜面の背後には地下水集中
⇒地下水型崩壊の恐れがある斜面

C 警戒避難対応〈湧水センサーによる評価〉

崩壊の恐れのある斜面において湧水観測
⇒湧水を指標とした警戒避難対応

図1 渓流水と湧水を活用した崩壊発生危険斜面抽出と警戒避難対応

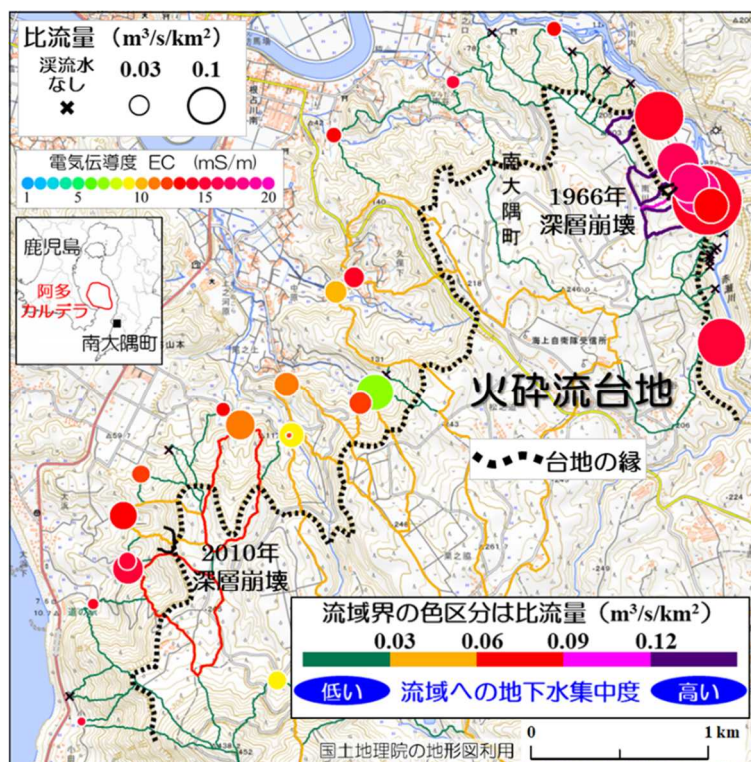


図2 鹿児島県南大隅町の火砕流台地周縁における地下水型崩壊発生危険斜面の抽出例

図3は、大分県耶馬溪町の火砕流台地周縁に設けた90流域（流域面積0.004～2.07km²，平均0.10km²）の下流端で測定した渓流水の流量とECをプロットしたものである。さらに、90流域の平均比流量0.005m³/s/km²を基準として、流域への地下水の集中度をランク付けした。比流量が大きい流域は地形的流域界を越えて地下水が集中する地下構造を有すると推定され、その多くは台地の東側に分布している。これらで最も比流量が大きい溪流で2018年に大規模な崩壊が発生して6人が亡くなった。

図4は、鹿児島湾の始良カルデラ西壁の61流域（流域面積0.01～0.57km²，平均0.08km²）の下流端で測定した渓流水の流量とECをプロットしたものである。カルデラ壁の渓流水ECは10mS/m以上の流域が多いが、比流量は大きい溪流と小さい溪流が分布し、台地に浸透した雨水は地形的分水界とは異なる水文的分水界（地下水の分水界）に規制されて流動し、カルデラ壁から流出していることがわかる。渓流水ECが10mS/m以上を抽出し、さらに比流量でランク付けした。ランク付けの区分は、61流域の平均比流量0.01m³/s/km²を基準にして、その2～5倍の値で区分した。

竜ヶ水地区の流域において、図1の「危険斜面の抽出 斜面レベルの評価」に関する湧水調査を実施した。

図5は、竜ヶ水地区の流域における湧水調査の結果である。図中の青色矢印は湧水点であり、矢印の大きさは流量の大小を示している。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付近の花倉層の上位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

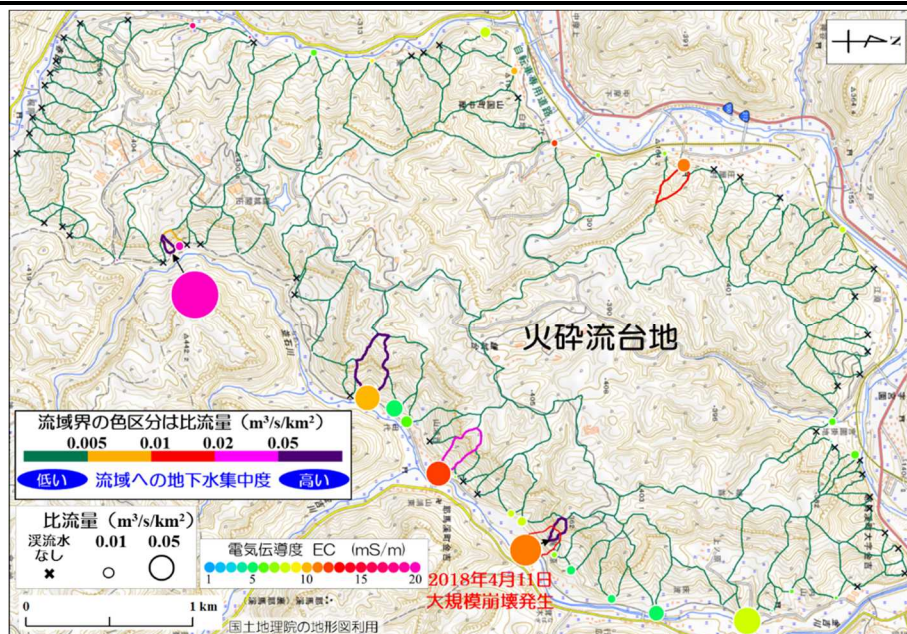


図3 大分県中津市耶馬溪町の火砕流台地周縁における地下水型崩壊発生危険流域の抽出例



図4 始良カルデラ西壁における地下水型崩壊発生危険流域の抽出例

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。

(2) 崩壊発生警戒対応策の開発

地下水型崩壊がいつ起こるかという時間の予測に係る警戒避難対応を策定することを目的とする(図1のC)。このタイプは雨が止んで長時間経過して発生することがあり、警戒避難対応には時間経過の条件も考えなければならない。崩壊発生危険箇所を抽出する水文調査で見いだされた湧水を指標にして地下水状態を把握し、崩壊発生の危険度を判断する装置(湧水センサー)を開発した(図6)。測定された湧水流量の変化から次のような崩壊発生の警戒対応を考えている(図7)。1) 湧水が増加中の場合: 雨が止んだ後でも基岩内の地下水位が上昇中であり、崩壊の危険性も増加中と判断。2) 湧水が多いまま頭打ち状態が続く場合: 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と判断。3) 湧水が急激に減少した場合: 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と判断。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。警戒対応の解除は、湧水流量が初期の流量にゆっくりともどった時と考えている。

湧水監視に基づいた崩壊発生の警戒対応策を開発するために、始良カル

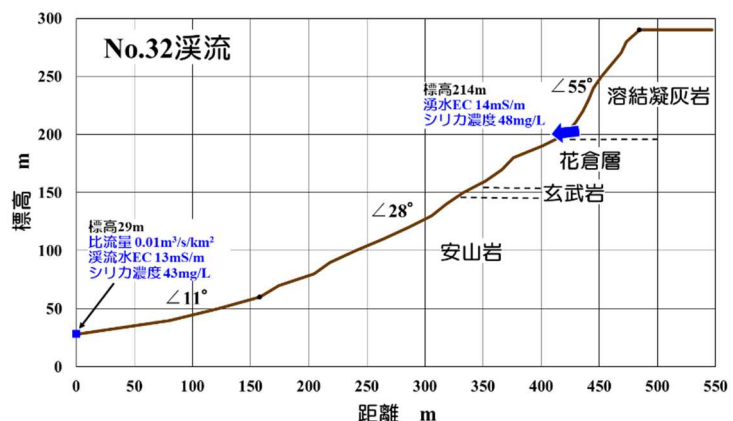
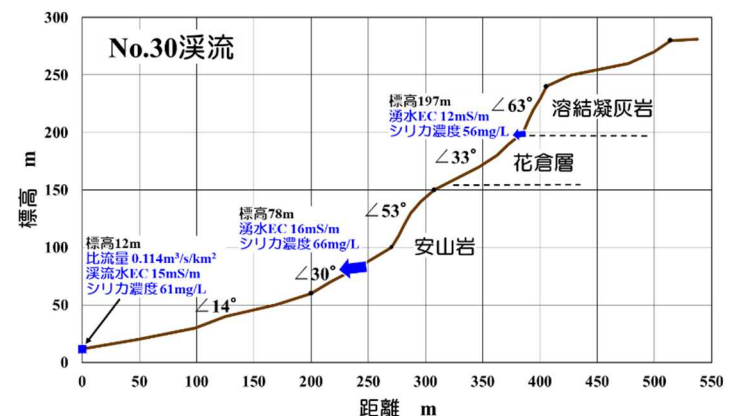
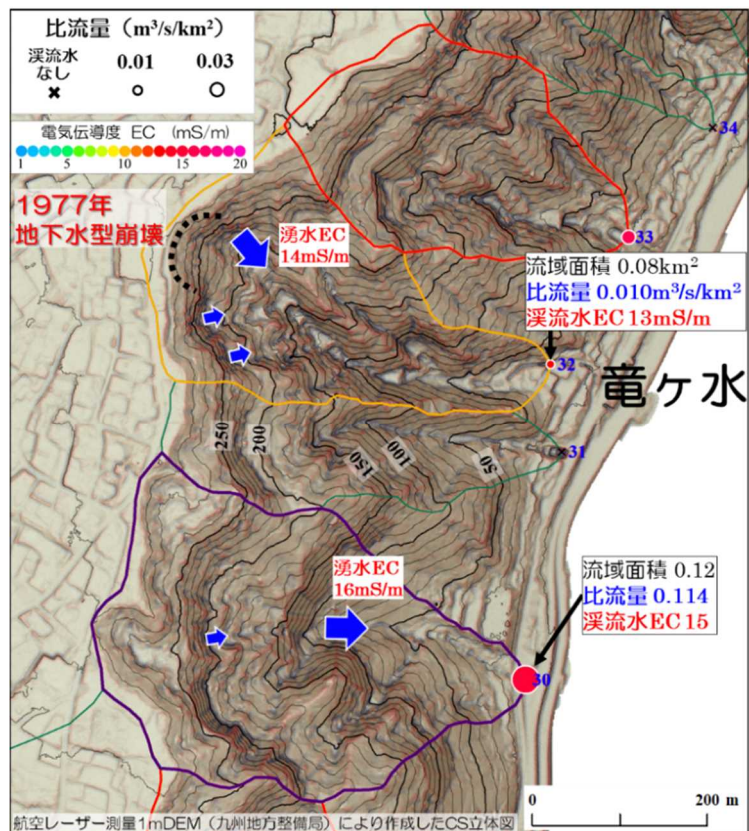


図5 始良カルデラ西壁の竜ヶ水地区における湧水調査

デラ、南大隅町火砕流台地、出水市火山岩山地における湧水センサーの実証実験を行った(図8)。湧水センサーで得られた湧水流量と雨量の応答関係を解析して流出モデルを構築した。既往の地下水型崩壊発生時の雨量から警戒避難対応の基準流量を検討した。以下、南大隅町の火砕流台地の例を説明する。

火砕流台地の地下構造は、上層が柱状節理の発達した亀裂の多い溶結凝灰岩、その下層が非溶結凝灰岩であり、溶結凝灰岩層は透水層、非溶結凝灰岩層は難透水層の役割をしている。台地に降った雨は浸透して地下水となり、これらの地層境界を流動して台地周縁の急斜面から湧出している。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計算し、崩壊の警戒避難基準を策定する。調査地の台地西側に位置する船石川流域では、2010年6月～7月の大雨で崩壊が発生した。この時の湧水流量を地下水流出モデルで計算すると10L/s程度となり、この値を地下水が関与する崩壊発生の危険性が高まる基準値とした。

2019年7月、鹿児島県本土は総雨量400mm以上の記録的な大雨に見舞われた。南大隅町火砕流台地の湧水センサーの流量は警戒対応基準(10L/s)を超過し、雨が止んでも2日間湧水流量が多い状態が続いた(図9)。南大隅町の防災担当者は湧水センサーweb画面を監視し、火砕流台地周縁の集落に対して自宅周辺の湧水量に急激な変化が見られないかなどを呼びかけた。

2020年7月も鹿児島県各地で総雨量400mm以上の大雨を記録した。図10は始良カルデラ壁(垂水市仏石川流域)に設置した湧水センサーの観測記録である。7月6日に雨が止んだ後も2日間程度湧水流量が多い状態が続いている。2019年南大隅町の火砕流台地と同様の観測データが得られた。

2021年は総雨量400mmを超えるような事例は観測されなかった。

本事業期間に得られた総雨量400mmを超えるデータから判断すると、雨が止んでから湧水流量が多い状態が続く期間は、出水市の火山岩山地で1日程度、南大隅町の火砕流台地および垂水市の始良カルデラ東壁で2日程度であり、地下水型崩壊の警戒対応を継続する時間の目安が得られた。

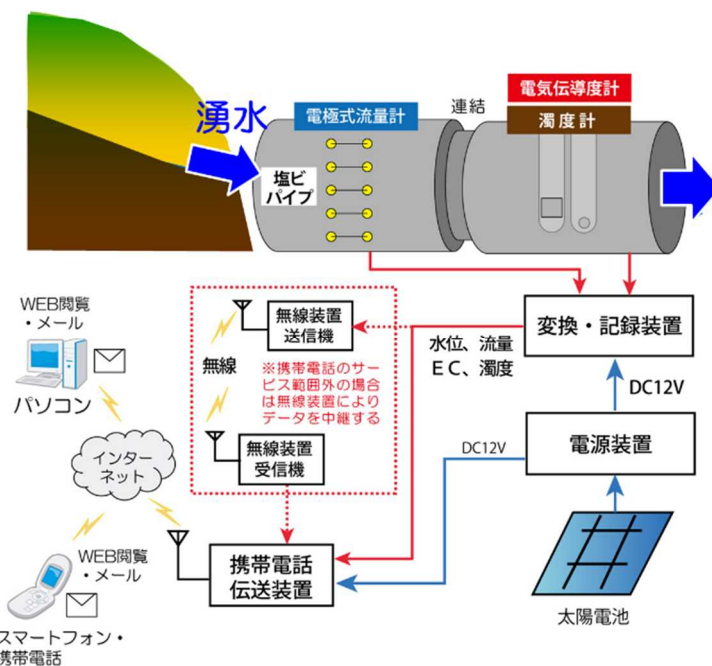


図6 湧水センサーのシステム構成

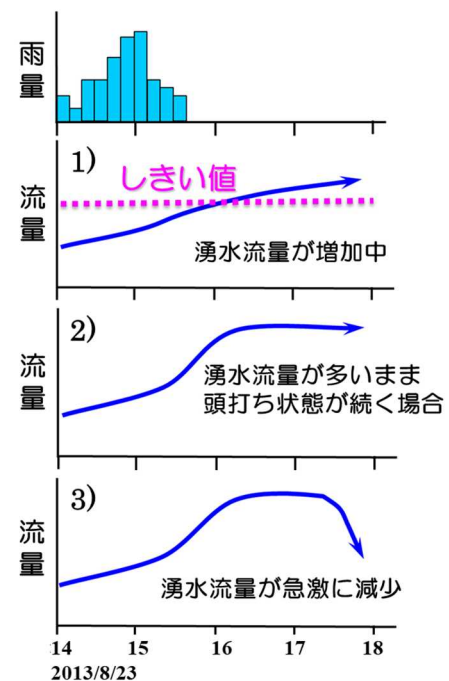


図7 湧水を指標にした崩壊危険度評価



図8 始良カルデラ壁(垂水市仏石川)に設置した湧水センサー

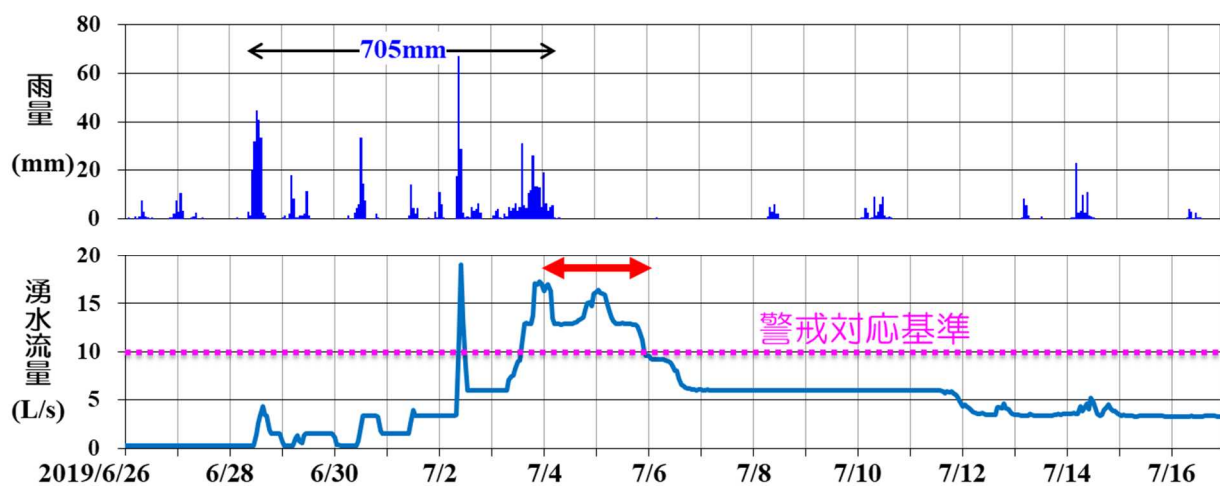


図9 2019年7月大雨時の南大隅町火砕流台地における湧水センサーの記録

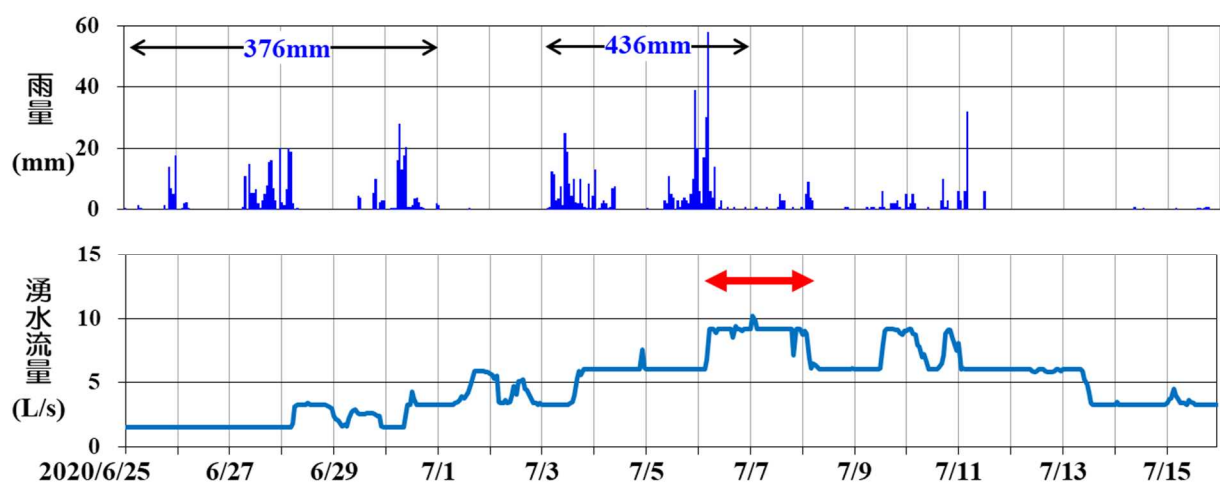


図10 2020年7月大雨時の始良カルデラ垂水市仏石川流域における湧水センサーの記録

研究成果の発表状況・予定

JITOUSONO T. et al. (2021) : The July 2020 Rainfall-Induced Sediment Disasters in Kumamoto Prefecture, Japan , International Journal of Erosion Control Engineering 13 (4) , 76-83

地頭園隆ほか(2021) : 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 , 砂防学会研究発表会概要集 , 283-284

天野祐一朗・地頭園隆ほか(2021) : 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 , 砂防学会研究発表会概要集 , 503-504

清崎淳子・地頭園隆ほか(2021) : 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 , 砂防学会研究発表会概要集 , 527-528

由永尚暉・地頭園隆ほか(2021) : 始良カルデラ壁における地下水型崩壊発生の予測 , 砂防学会研究発表会概要集 , 535-536

地頭園隆(2021) : 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 , (公社)砂防学会中四国支部令和3年度シンポジウム

地頭園隆(2021) : 九州における地下水が関与した大規模崩壊の警戒対応 , 国土交通省土砂災害防止法に基づく緊急調査研修

地頭園隆(2021) : 自然災害のしくみと防災対策 - 風水害・土砂災害 - , 鹿児島市安心安全アカデミー

地頭園隆(2021) : 水文調査から土砂災害を予測する , (公社)砂防学会講習会

地頭園隆(2021) : 地域防災と人材育成に貢献する大学の役割 , 砂防と治水 54(5) , 17-19

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(2021) : 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 - , 砂防学会HP , 1-15

地頭園隆(2022) : 風水害に備える , 鹿児島市における災害時の協力協定団体等意見交換会

研究成果の社会への情報発信

NHK情報WAVEかごしま「熊本地震がもたらした土砂災害」で本研究成果に基づき説明した , 2021年4月14日

NHK , KKB , KYTなどニュース , 「鹿児島市の梅雨・台風前の災害対策訓練」で竜ヶ水において起こる土砂災害など , 本研究成果に基づき説明した , 2021年5月10日

NHK情報WAVEかごしま「大雨対策」で本研究成果に基づき説明した , 2021年5月19日

NHK「データ×防災」で本研究成果が紹介された , 2021年6月4日

NHK情報WAVEかごしま「土砂災害のリスク」で本研究成果に基づき説明した , 2021年7月6日

NHK情報WAVEかごしま「身近に潜む土石流のリスク」で本研究成果に基づき説明した , 2021年7月13日

朝日新聞「(長雨、各地で記録的雨量 岩盤ごと崩れ、「深層崩壊」の危険指摘も)で本研究成果に基づき説明した , 2021年8月18日

南日本新聞「雨やんでも数日は油断禁物 深層崩壊、どこで起きても 湧き水の量減る、濁る—は予兆の可能性」で本研究成果に基づき説明した , 2021年8月19日

西日本新聞「時間差災害 気を付けて 長雨で地下水たまる」で本研究成果に基づき説明した , 2021年8月20日

MBCニュース「扇山土砂災害から28年」で本研究成果に基づき説明した , 2021年9月3日

表彰、受賞歴

(単なる成果発表は に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

本研究の協力者(学生)による発表

令和3年度砂防学会若手優秀発表賞

由永尚暉(鹿児島大学農学部)「始良カルデラ壁における地下水型崩壊発生の予測」

研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本事業をすすめた2019年から2021年においても、毎年のように、各地で総雨量400mm以上の記録的な大雨が出現し、深い地下水が関与した大規模な崩壊が発生した。今後も、砂防等の政策に活用できるように、各地において、本研究で進めたデータを蓄積して地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒対応の精度を高める必要がある。さらに、九州だけでなく、ほかの火山性地質地域への展開も検討すべきである。

研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

近年の記録的な大雨により地下水型崩壊の発生頻度が増している。地下水型崩壊は、地下水が集中する箇所が発生するために地表面の地形情報だけでは危険箇所を抽出することが困難である。また、雨が止んで長時間が経過してから発生することがあり、降雨情報からの警戒避難対応には限界がある。

本研究では、地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒避難対応に水文情報を活用する方法を提案している。具体的には、渓流水や湧水を活用して、地下水の集中という視点で崩壊発生の危険性がある斜面を段階的に抽出し、さらに危険斜面からの湧水を監視して警戒避難対応を行うものである。本研究成果は、地下水型崩壊を対象にして、従来の地形情報に基づく危険箇所抽出と降雨情報に基づく警戒避難対応に、地下水という水文情報を導入して防災・減災効果を高め、砂防政策の質の向上に貢献できると考えている。

本研究成果は、九州地方整備局が進めてきた「無降雨時等の崩壊研究会」(2018年～2020年)にも反映できた。また、川辺川ダム砂防事務所の「渓流水調査による地下水集中領域の調査検討手法」、阿蘇砂防事務所「阿蘇カルデラ内斜面崩壊調査検討業務」、鹿児島国道事務所「国道10号竜ヶ水地区の防災に関する技術検討」、鹿児島国道事務所「国道10号花倉地区の防災対策」においても本研究成果に基づいて提案した。