

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> （ふりがな）	<b>所属</b>	<b>役職</b>	
	篠原 慶規 （しのはら よしのり）	国立大学法人 宮崎大学	准教授	
<b>②研究テーマ</b>	名称	雲仙普賢岳におけるガリーの長期的な発達を考慮した土石流発生予測手法の開発		
	政策領域	[分野] 地域課題分野（砂防）	融合技術	（リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等）
		[公募課題]		
<b>③研究経費</b> （単位：万円）	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総合計
※端数切り捨て。	168万円	165万円	144万円	482万円
<b>④研究者氏名</b>	（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・役職（※平成31年3月31日現在）			
経隆 悠	森林総合研究所・研究員			
ゴメス クリストファー	神戸大学・准教授			
<b>⑤研究の目的・目標</b> （申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）				
<p>1990年に噴火活動を開始した雲仙普賢岳の火砕流並びに土石流は、水無川流域を中心に大きな被害をもたらした。その後、導流堤や砂防ダムの整備が進められ、大規模な災害のリスクは着実に減少してきている。一方、噴火から25年経過した現在でも、火砕流堆積斜面においてガリーの発達が進行しており、それに起因すると思われる土石流が毎年のように発生している。本課題では雲仙普賢岳水無川流域において、ガリーの長期的発達、降雨流出過程等の水文プロセスを明らかにし、将来に渡って適用可能な土石流発生予測モデルを構築することを目的とする。</p>				

## ⑥研究成果

### 1. 過去のデータの取りまとめ

#### 1. 1. 土石流データ

1999年9月11日までに発生した土石流については、既往の研究で取りまとめが既に行われている。2000年以降は、雲仙復興事務所で土石流のデータが蓄積されてきたが、土石流発生の定義は、十分に統一されておらず、振動センサーを用いたもの、映像で確認されたもの、赤松谷床固群まで土砂が流出したものが混在していた。本研究では、炭酸谷及び極楽谷の出口より下流に約30,000 m<sup>3</sup>以上堆積したものを（大規模な）土石流と定義し、これらを取りまとめた（表-1）。2005年以降、7回の土石流が観測されているが、流出土砂量は最大で70,000 m<sup>3</sup>程度となり、1999年以前よりも1桁小さくなっていった。

表-1 2015年以降記録された土石流とその流出土砂量

日付	土砂流出量(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
2005/9/6 13:20	57
2010/6/30 8:54	38
2011/6/20 2:40	70
2012/6/24 6:00	30
2015/6/11 11:15	32
2015/8/25 5:35	43
2016/6/20 22:00	65

#### 1. 2. 降水データ

長期データが利用可能な気象庁雲仙岳測候所（現、雲仙岳特別地域気象観測所）の降水量と流域近傍の降水量を比較したところ、両者は、豪雨時も含め、比較的高い相関があった。これは、雲仙岳の降水量は、水無川流域の降水量をある程度、再現していることを示唆するものである。豪雨時に両者の降水量が近い理由としては、風向が関連していると考えられる。雲仙岳では、普段は西北西あるいは東南東の風が卓越していることが多いが、日降水量が100 mm以上の日のみを用いて解析を行った場合、風向の分布は極端に西南西に偏っていた。このことから、豪雨時に限れば、西南西の風が卓越しており、その方向が雲仙岳と水無川の関係と同じであるため、雲仙岳と水無川で降水量が比較的近いと考えられる。

### 2. インターバルカメラを用いた土石流・水文観測

降雨の水文応答並びに土石流の発生場を把握するために、インターバルカメラ（BR-TLC200Pro, Brinno社）を極楽谷3箇所、炭酸谷9箇所の計12箇所に設置し（図-1）、1分間隔で撮影を行なった。観測期間（2016～2018年）に、土石流が3回、出水が28回発生した。

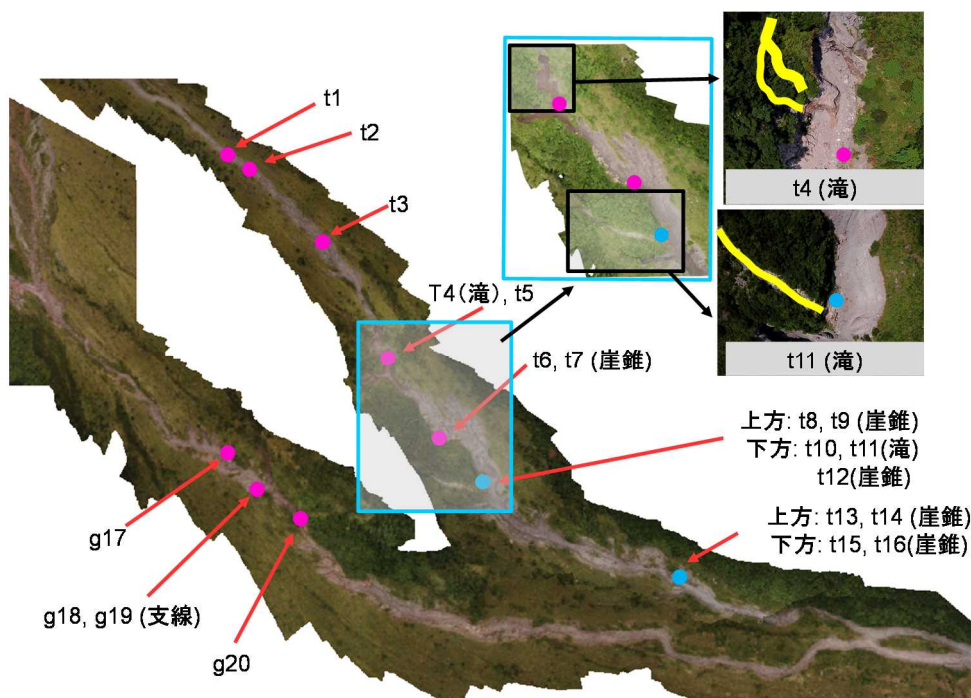


図-1 インターバルカメラの設置場所と観測ポイント。ピンクで示した点は1個、水色で示した点は2個カメラを設置した。特に明記のない観測ポイントはガリー中央部の流路

## ⑥研究成果 (つづき)

出水や土石流をもたらした降雨の特徴について、雲仙岳で観測された降雨データ（時間分解能 10 分）を用いて整理した。無降雨時間が 3 時間を超えた場合にその前後を独立した降雨イベントに分割した。各降雨イベントの比較から、土石流発生降雨の最大 10 分間雨量は、いずれも 20 mm 以上と非常に高いことが分かった (図-2a)。同様に最大 1 時間雨量も土石流発生降雨では 50 mm 以上と非常に高かった (図-2b)。一方で、出水発生降雨の総雨量は、土石流発生降雨の総雨量を上回る場合があった (図-2c)。このことは、比較的短い期間に強い雨が集中することが、土石流の発生に不可欠であることを示唆している。

図-3、図-4 には、10 分間降雨強度とインターバルカメラで確認された土石流および出水の発生タイミングを示した。土石流の発生タイミングは 10 分間降雨強度のピークによく対応していた。出水の発生タイミングや継続時間は地点毎に異なったが、これらも 10 分間降雨強度のピークに対応して発生した。比較的小さな降雨では、炭酸谷または極楽谷のどちらかでのみ出水が発生したが、土石流発生降雨など降雨強度の大きい降雨では、両ガリーのより多くの地点で出水が発生した。

出水は計 28 の降雨で発生したが、滝 (図-1) からの出水が 30 分以上継続した降雨は 8 つの降雨イベントのみであり、その内の 3 つの降雨で土石流が発生した。2018 年 6 月 29 日の降雨では、上流で流下した土石流は下流へ伝搬しておらず、滝より上流で土石流が流下する以前に、滝よりも下流で土石流が発生・流下した。以上の結果は、降雨中の 10 分間降雨強度のピークに反応して出水が発生し、土石流の発生・流下を引き起こすこと、特に滝からの継続的な出水が、大規模な土石流発生 of 直接的な要因となっていることを示唆していると考えられる。

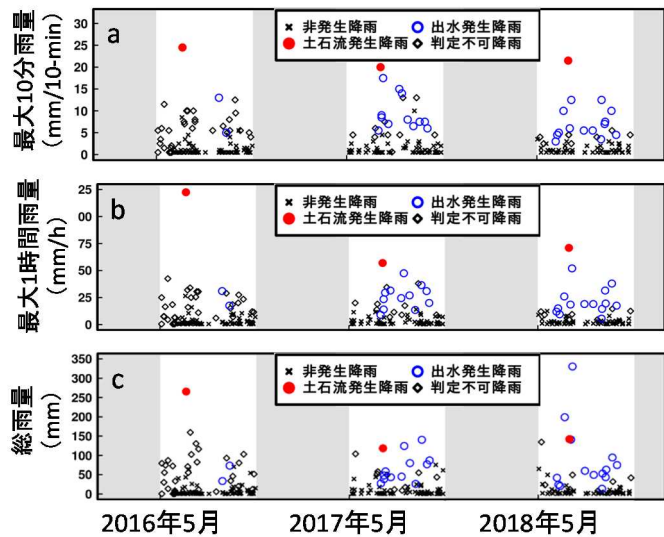


図-2 2016-2018 年の(a)最大 10 分間雨量, (b)最大 1 時間雨量, (c)総雨量

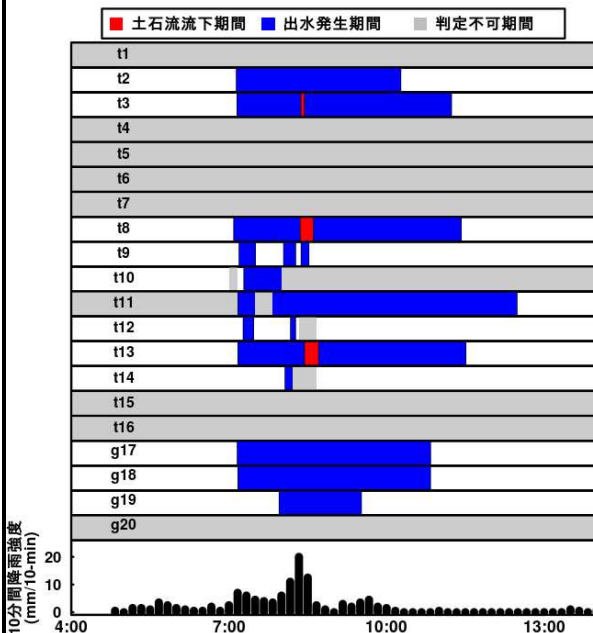


図-3 2017年7月4日の各カメラ設置地点での出水および土石流の発生タイミング

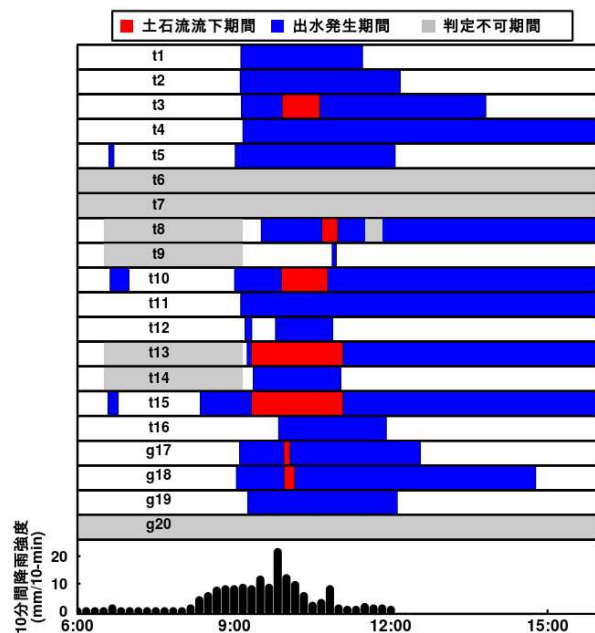


図-4 2018年6月29日の各カメラ設置地点での出水および土石流の発生タイミング

## ⑥研究成果 (つづき)

### 3. 極楽谷・炭酸谷の地形的特徴とその変化

極楽谷と炭酸谷に、地上基準点を設置し、UAVを用いた空撮を計8回行った。取得した画像は、SfM-MVS(多視点写真測量)処理ソフト (PhotoScan Professional, Agisoft LLC) を用いて解析し、DSM (数値表層モデル) とオルソ画像を作成した。

極楽谷では顕著な地形変化は見られなかった一方で、炭酸谷では特に中流部において、顕著なガリー側壁の後退が見られた。図-5に2017年9月~2018年5月および2018年5月~8月までの炭酸谷のDSMの差分結果を示す。全体的に見ると、前者の土石流非発生期間(図-5a)と比較し、1度小規模な土石流が発生した後者の期間は、およそ2か月という短期間であるにもかかわらず、炭酸谷中流部で5mにおよぶ顕著な侵食・堆積が生じるなど大きな地形変化が見られた(図-5b)。

顕著な側壁の後退が見られた2地点(図-5b中のAおよびB領域)の地形変化に着目すると、両者のガリー側壁後退部の直下には、土砂が堆積し崖錐が形成されていた(図-6, 7)。A領域は、集水地形が発達しつつあり(図-6a-f)、土石流非発生期間にはほとんど地形変化が見られなかったのに対し(図-6g)、土石流発生降雨後には上部に侵食痕が生じていた(図-6h)。これらは、崖錐Aは豪雨時のみ崖錐上部から出水が発生し、土砂と水が供給されることを意味している。一方で、B領域は、ガリー側壁が90度近い状態のまま後退しており(図-7a-f)、集水地形は見られなかった。土石流発生降雨後に顕著なガリー側壁の後退が見られ、多くの崩落土砂が直下に厚さ5m以上で堆積していることから、降雨中にほぼ土砂のみが供給されたと推察される(図-7h)。また、土石流非発生期間であっても側壁の後退が見られた。このことは、比較的弱い雨や無降雨時であってもガリー内部への土砂供給が生じることを示唆している(図-7g)。このように、様々な要因により、炭酸谷の地形は大きくかつ複雑に変化していることがわかった。

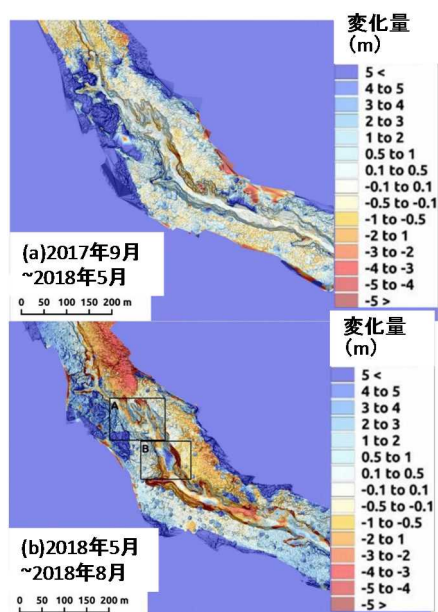


図-5 炭酸谷のDSMの差分結果 (a) 2017年9月から2018年5月の変化、(b) 2018年5月から8月の変化

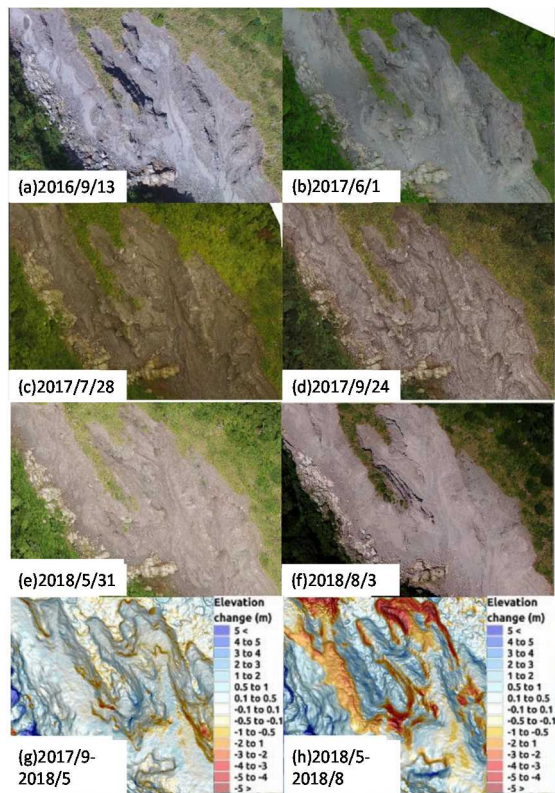


図-6 各写真測量時期のA領域のオルソ画像(a-f)および2017年9月から2018年5月の地形変化(g)、2018年5月から8月の地形変化(h)

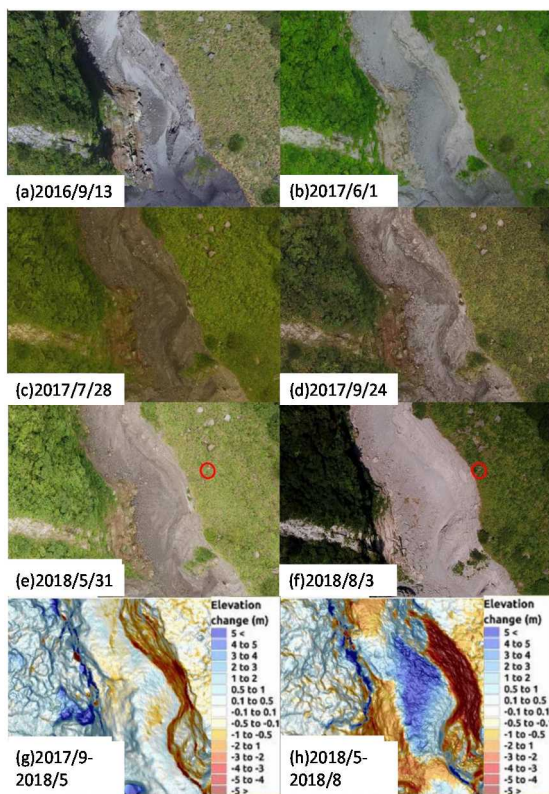


図-7 各写真測量時期のB領域のオルソ画像(a-f)および2017年9月から2018年5月の地形変化(g)、2018年5月から8月の地形変化(h)

## ⑥研究成果 (つづき)

### 4. 土石流発生予測モデリング

これまで行なってきた現地計測を踏まえ、土石流発生予測モデルの構築を行なった。ここでは、3. 1. で取りまとめた大規模な土石流を予測対象とした。土石流発生予測モデルは、ロジスティック回帰分析を用いた。ロジスティック回帰式を用いると独立変数  $y$  (土石流発生が 1, 発生無しが 0) は下記の式で表現される。

$$\log(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + e \quad (1)$$

ここで、 $\beta_0$  は定数、 $x_i$  は  $i$  番目の説明変数、 $\beta_i$  は  $i$  番目の説明変数の係数、 $e$  は残差である。独立変数  $y$  の発生確率 ( $p$ ) は下記の式で表される。

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + e)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + e)} \quad (2)$$

本章では、1990 年以降を 2 つの期間に分けて、それぞれでロジスティック回帰分析を行なった (期間 I, 期間 II)。期間 I は、1991 年から 1999 年、期間 II は、2005 年から 2016 年である。説明変数として、解析開始日からの積算日数 ( $D_{total}$ )、土石流が発生してから経過日数 ( $D_{interval}$ ) を用いた。それに加え、総降水量 ( $R_{total}$ )、10 分間最大降水量 ( $R_{10min-max}$ )、1 時間最大降水量 ( $R_{1h-max}$ )、3 時間最大降水量 ( $R_{3h-max}$ ) のうち 1 つを説明変数として用いた。説明変数は、赤池情報量基準 (AIC) に基づいてステップワイズした。最終的には、AIC が最も小さくなる説明変数の組み合わせを期間 I と期間 II のそれぞれで求めた。

表-2 には期間 I と期間 II のそれぞれで選択された説明変数を示した。期間 I では、ステップワイズの結果、 $D_{total}$  が負の係数と共に選択された。負の  $D_{total}$  は噴火終了後の浸透能の回復と関連していると考えられる。 $D_{interval}$  は期間 I では選択されなかったが、期間 II では正の係数と共に選択された。正の  $D_{interval}$  は、土石流発生から経過するに従って、次の土石流発生確率が高まることを示唆している。土石流発生に至るプロセスは、その流域が、土石流の土砂が常に豊富にあって閾値以上の降雨発生が制限要因となっているか (輸送制限)、土砂が十分には存在せず、土砂が経時的に増加することにより初めて土石流発生が可能になるか (供給制限) によって、異なると考えられる。 $D_{interval}$  が説明変数として選択されたということは、土砂の供給が土石流発生に少なからず影響していることを示唆している。

現地計測による結果から、土砂の供給源としては、ガリー側壁からの土砂供給、水流出や小規模な土石流発生による土砂供給の 2 つが考えられる。前者は、インターバルカメラの結果より、乾燥により促進されることが予想される。72 時間の実効雨量が 50 mm 以下の時間を乾燥と定義し、その積算を求めて、乾燥の指標とした。後者は、インターバルカメラの観測結果より、1 時間最大降水量が 14.5 mm 以上の時に水流出・小規模な土石流が発生すると仮定し、これらを積算した。

(大規模な) 土石流の発生が見られた場合は、これらの指標は、値をリセットした。

図-8 には、 $D_{interval}$  と乾燥時間の積算、水・土砂流出イベントの積算を比較した。 $D_{interval}$  と乾燥時間の積算、水・土砂流出イベントの積算は、ほぼ同様の挙動を示すことがわかった。このことから、土砂供給が土石流発生に影響を与えていると考えられるものの、乾燥による土砂供給、もしくは水流出及び小規模な土石流発生に伴う土砂供給のどちらが支配的かは判別できなかった。これらが明らかになることで、より効果的なモデルが構築できると考えられる。

表-2 選択された説明変数とその係数、並びに  $P$  値

期間	説明変数	係数	$P$ 値
I	$D_{total}$	$-1.54 \times 10^{-3}$	<0.001
	$P_{3h-max}$	0.088	<0.001
	切片	-3.36	<0.001
II	$D_{total}$	$1.15 \times 10^{-3}$	0.114
	$D_{interval}$	$3.84 \times 10^{-3}$	<0.05
	$P_{1h-max}$	0.17	<0.01
	切片	-16.41	<0.01

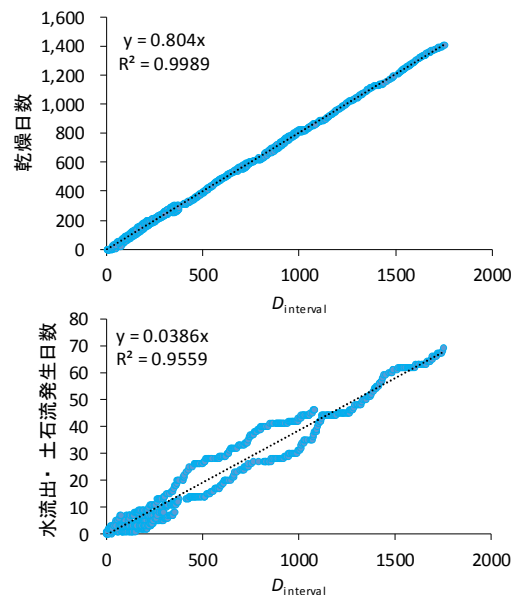


図-8 期間 II における  $D_{interval}$  と乾燥日数の積算、水・土石流発生イベントの積算の関係

## ⑦研究成果の発表状況

### 【学会発表】

篠原 慶規, 経隆 悠, 堀田 紀文, 北本 楽, 植野 利康, 光武 久修. 雲仙普賢岳水無川流域における土石流発生メカニズムの解明に向けて, 2017年5月, 砂防学会研究発表会.

経隆 悠, 堀田 紀文, 今泉 文寿, 早川 裕式, 篠原 慶規, 酒井 佑一. 3次元計測技術の土石流研究への適用性と課題, 2017年5月, 砂防学会研究発表会.

北本 楽, 経隆 悠, 篠原 慶規, 堀田 紀文, Gomez, C., 酒井 佑一, 矢野 敦久. 雲仙普賢岳における土石流と崖錐発達を観測, 2018年5月, 砂防学会研究発表会.

Gomez, C., Shinohara, Y., Hotta, N., Tsunetaka, H., Yano, A., Sakai, Y., Kitamoto, G., Sakamoto, M. Internal Architecture of Lahar and Side-wall Collapses from GPR Survey at Mount Unzen, 2018年5月, 砂防学会研究発表会.

Gomez, C., Tsunetaka, H., Sakamoto, M., Shinohara, Y., Hotta, N., Sakai, Y., Yano, A., Kitamoto, G. Controls on boulders distribution in the Tansan-dani at Mount Unzen: UAV-based photogrammetry and Ground Penetrating Radar Survey, 2018年5月, 日本地球惑星科学連合2018年大会.

Shinohara Y., Tsunetaka H., Gomez C., Kitamoto G., Hotta N., Sakai Y., Sakamoto M. Development of a model for estimating the occurrence of debris flows at Mt. Unzen, 2018年8月, 16th International Symposium on Geo-disaster Reduction.

Gomez, C., Hotta, N., Tsunetaka, H., Shinohara, H., Sakai, H., Kitamoto, G., Sakamoto, M. In 27 years, lahars have reached some maturity at Unzen Fugendake: geophysical and geomorphometric evidences, 2018年8月, 16th International Symposium on Geodisaster Reduction.

Shinohara, Y., Tsunetaka, H., Kitamoto, G., Hotta, N., Mitsutake, H., and Ueno, T. The Development Conditions of Debris Flows at Mt. Unzen Fugen-Dake, 2018年10月, INTERPRAEVENT International Symposium 2018.

阪本実紀, Gomez Christopher, 篠原慶規, 経隆悠, 堀田紀文, 酒井佑一, 北本楽. 雲仙普賢岳ガリー内の局所地形における土砂流出現象の観測, 2019年5月, 砂防学会研究発表会, 発表予定.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

該当なし

## ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧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。)

該当なし

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の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。)

本研究によって、降水量だけでなく、土石流発生後の経過日数を考慮することで、土石流の発生予測の精度が向上することがわかった。土石流発生後の経過日数は、土石流の非発生期間においてみられる地形変化（ガリー内への土砂供給）に対応する可能性が高いことを、観測により明らかにすることができた。一方で、対象地は、高頻度で複雑な地形変化が起こるため、本課題で行なった年3回程度の観測では、ガリー内の土砂供給を決定する主要因までは特定できなかった。本研究で行った計測を継続すると共に、より高頻度にデータを取得することで、土砂供給の主要因が特定され、さらに高い精度の土石流発生予測モデルが構築されることが期待される。

また、本研究の成果を土砂管理に応用していくためには、土石流の発生有無だけでなく、土砂生産量の予測も重要である。土砂供給の主要因が特定され、ガリー内の土砂量が土石流の発生及び規模に与える影響が明らかになれば、土砂生産量の予測も可能になると期待される。

## ⑪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。)

砂防事業の大多数を占める土石流危険溪流対策において、通常は、災害をもたらすような大雨で発生する土石流が主な計画対象とされる。一方、中小出水でも土砂移動が見られる水無川のような新規火山堆積物からなる流域では、砂防施設の規模や除石計画を検討する際、中小出水による土砂流出量も適切に算定する必要がある。本研究で土石流発生予測精度が向上することで、砂防計画策定技術の中でも、このような流域における中小出水を含んだ中長期的な流出土砂量予測に応用が期待される。