

河川砂防技術研究開発
【成果概要】

		氏名 (ふりがな)	所属	役職	
①研究代表者		篠原 慶規 (しのはら よしのり)	宮崎大学 農学部	准教授	
②研究テーマ	名称	一般型 【テーマ名】土石流発生域の地形的特徴を考慮した土砂生産モデルの構築			
③研究経費 (単位: 万円)		令和元年度	令和2年度	令和 年度	総合計
※端数切り捨て。		257万円	240万円	万円	497万円
④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3年3月31日現在)			
堀田 紀文		東京大学農学生命科学研究科・准教授			
ゴメス クリストファー		神戸大学海事科学研究科・教授			
⑤技術研究開発の目的・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。)			
<p>砂防計画を策定する上で、土砂生産量（流出土砂量）を予測することは極めて重要であるが、新規火山堆積物で覆われた流域では、地形条件、水文環境が時間と共に変化し、その予測は困難である。このことが、新規火山堆積物で覆われた流域において、高度な砂防計画を策定する際の課題の1つとなっていた。雲仙岳の水無川流域においては、申請者のこれまでの研究等により、土石流発生域が特定され、土石流発生有無は予測されつつあるが、土砂生産量の予測には至っていない。そこで、本研究では、雲仙岳の水無川流域を対象とし、地中レーダーを用いた地下構造の把握、UAV（ドローン）とインターバルカメラを併用した地形変化のモニタリングを行い、地形変化プロセスを明らかにすることで、土砂生産モデルを構築することを目的とする。</p>					

2. UAVを用いた地形測量

炭酸谷，極楽谷において，RTK 可能なUAV (Phantom 4 RTK, DJI) を飛行させ空撮画像を取得した。飛行地点の近傍に設置した基準点に専用のGNSS 受信機 (D-RTK2) を設置し，リアルタイムで差分データを得ることで，空撮画像に高い位置精度の座標を付与した。飛行は手動で行い，オーバーラップ率は70%以上になるようにした。撮影は2019年8月1日，9月26日，2020年6月4日，8月6日～7日，10月27日に行った。空撮した画像は，SfM (Structure from Motion)-MVS (Multi View Stereo)ソフトウェアであるMetashape Professional (Agisoft LLC) に取り込み数値標高モデル (DEM) 及びオルソフォトを構築した (図2)。2019年度は炭酸谷・極楽谷全域で1つのモデルを構築し，2020年度は炭酸谷・極楽谷のそれぞれでモデルを構築した。



図2 構築したオルソフォトグラフの例 (2020/6/4)

予め設置してあった地上基準点 (GCP) の座標を用いて精度を検証した結果 (表2)，2020年8月6日の極楽谷及び2020年10月

表2 GCP 座標とモデル上の座標の差 (平均値と標準偏差)

調査日	範囲	検証点数	xy 方向 [m]	z 方向 [m]
2019/8/1	全域	24	0.06±0.02	0.07±0.05
2019/9/26	全域	24	0.05±0.03	0.06±0.04
2020/6/4	炭酸谷	10	0.10±0.01	0.07±0.07
2020/6/4	極楽谷	12	0.07±0.02	0.06±0.04
2020/8/7	炭酸谷	9	0.05±0.03	0.06±0.06
2020/8/6	極楽谷	10	7.33±4.23	8.95±3.30
2020/10/27	炭酸谷	9	0.49±0.19	0.99±0.78
2020/10/27	極楽谷	10	0.04±0.02	0.09±0.06

27日の炭酸谷を除いては，xy座標，z座標共に平均誤差が0.10 m以下となり，大きな幾何学的なずれは存在しなかった。2020年8月6日の極楽谷で誤差が大きくなったのは，UAVを飛行させる際，このフライトのみ，標高ではなく楕円体高を画像に付与したためであると考えられる。2020年10月27日の炭酸谷で誤差が大きくなったのは，早朝のフライトであり画像の品質が低かったことが要因の可能性はある。以下の解析では，これらのモデルは用いなかった。

3. 地中レーダーを用いた地下構造の把握

ガリーの縦断面に測線を設け，800 MHzのアンテナを搭載した地中レーダーを用い，深さ1～1.2 mの内部イメージを取得した (図3)。その結果，縦断面，横断面共に，礫を主体として層の上に，大きな礫を含まないいくつかの層が折り重なっていた。横断面の礫を主体とした層は，その形状から崖錐であると判断される。崖錐は，大規模な土石流が発生すると，土石流に取り込まれ，消失すると考えられる。そのため，現在の地形は，大規模な土石流発生後に，現在の河床よりも侵食された後，崖錐が形成され，その後，いくつかの層が堆積して形成されたと考えられる。崖錐が発達すると，一時的に縦断勾配が小さくなり，土砂が堆積しやすい環境になると考えられる。今回，調査を行った地点でも，崖錐が形成された後に，小規模な土石流もしくは，出水の際に発生した土砂が堆積していると考えられる。このように，ガリー内では，侵食と堆積が繰り返されていると考えられることが示された。

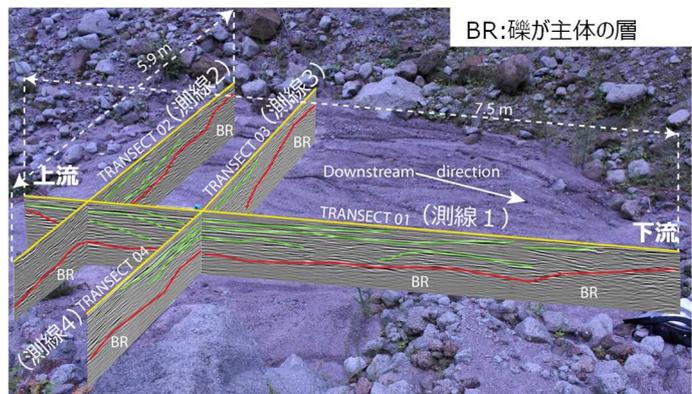


図3 極楽谷で取得された地下構造の解析図。赤線は，大きな礫を含む層とそうでない層の境界。黄緑線は，検出された層構造

4. 土砂生産量の把握

土砂生産モデルを構築する際は、土砂生産量のデータが必要となる。文献踏査及び本研究によって、2003年以降に計測された土石流は14イベントで、そのうち土砂生産量のデータが利用可能なものは、7 イベントに限られていた。そこで、多くのデータが利用可能なDEMを用いて、貯留土砂量の変化を調べ、土砂生産量の代用として、利用可能かどうか検証した。用いたDEMは19 時期のデータである。これらには、航空機レーザー測



図4 貯留土砂量の変化を計算したガリーの範囲(凡例の数字は右上の表のNo.に対応している)

量での計測結果(解像度1 m)及びUAV 測量での計測結果(解像度10 cm)の両方が含まれている。QGISに、すべての期間のDEMを読み込ませ、ラスタ計算機を用いて2 時期の差分を計算した。またオルソフォトも読み込ませ、オルソフォト及び差分値を参照しながら、炭酸谷と極楽谷のそれぞれでガリーの範囲を設定し(図4)、その範囲において、差分値から貯留土砂量の変化を計算した。その結果、炭酸谷・極楽谷の土砂減少量と同時期の土砂生産量には有意な正の相関があった(図5; t 検定, $P < 0.05$)。また、1時間最大降水量-39 mmを土砂移動の大きさを表す降水指標として、炭酸谷・極楽谷の土砂減少量との相関を調べたところ、有意な相関があった(図6; t 検定, $P < 0.05$)。このことから、本研究で提案した降水指標を用いれば、炭酸谷・極楽谷の土砂減少量ひいては土砂生産量が推定可能であると考えられる。

構築したモデルを用いて長期的な土砂生産量を予測した。1991年~2020年の1時間最大降水量データを用いて、各年の土砂減少量を予測し、土砂減少量と土砂生産量の関係から、各年の降雨条件における土砂生産量を予測した。ここで、土砂生産量がマイナスの場合は0として取り扱った。30年間で土砂生産量が0であった。最大は123千 m^3 であり、その年を除けば72千 m^3 であった。この30年間の合計の土砂生産量は738千 m^3 と予測されたことから、流域の状態が変化しないと仮定すると、246千 m^3 /10年程度の土砂生産が見込まれる。

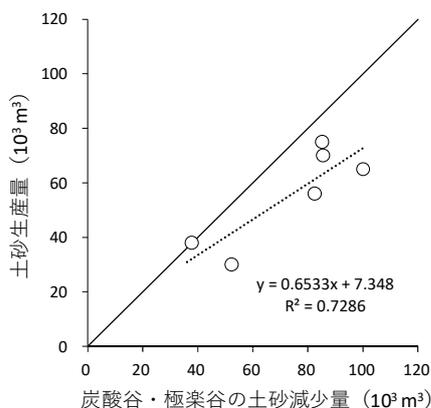


図5 炭酸谷・極楽谷からの土砂生産量とDEMから算出した土砂減少量の比較。実線は1:1、点線は回帰直線を示す

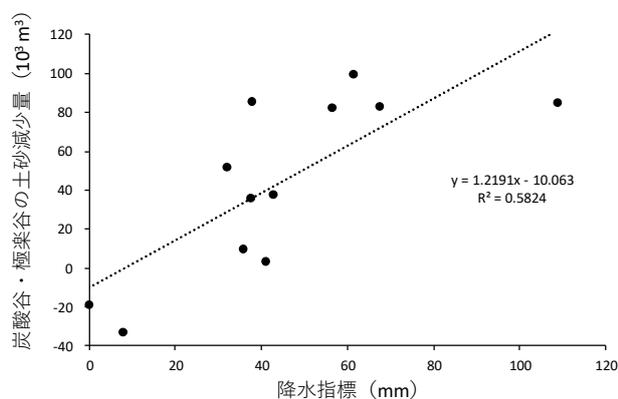


図6 各期間の降水指標(1時間最大降水量-39 mm)の合計と炭酸谷と極楽谷の土砂減少量の比較。点線は回帰直線を示す

5. 近年の流域の変化

5. 1. 土石流発生

今年度は1時間最大降水量が大きい降雨があったにもかかわらず、土石流の発生が見られなかった。そこで、土石流発生条件が変化している可能性について検証した。検証には、実効雨量を用いた。時間 t (h)の時点での半減期 M (h)の実効雨量 $X(M, t)$ は下記の式で表される。

$$X(M, t) = X(M, t-1)e^{\alpha} + R(t)e^{2/\alpha}$$

$$\alpha = \ln(0.5)/M$$

ここで、 $R(t)$ ；時刻 $t \sim t-1$ の間の雨量 (mm)， α ：減少係数 (h^{-1}) である。 $E(M, t)$ は、半減期の最大値に対する現在の割合で、下記の式で示される (小杉, 2015)。

$$E(M, t) = X(M, t)/X_{\max}(M)$$

ここで、 $X_{\max}(M)$ ：半減期 M の実効雨量の既往最大値である。本研究では、小杉 (2014) にならい $0.1h \sim 2784h$ の 401 通りの半減期について、2019 年までの土石流が発生していないイベントのデータを用いて $X_{\max}(M)$ を決め、土石流が発生したイベントの $E(M, t)$ を算出した。

図 7 には、2018 年までに発生した土石流における半減期と $E(M, t)$ の関係を示した。小さい半減期の実効雨量では、ほぼすべてのイベントの $E(M, t)$ は 1 以上となっていた。このことから、1 時間以下の半減期の実効雨量を用いれば、土石流発生を明確に予測できると考えられる。図 8 は、2020 年の降雨イベントのうち、降雨強度が大きかった 8 イベントについて、半減期と $E(M, t)$ の関係を示している。これを見ると、3 イベントで、半減期 1 h 以下の際に $E(M, t)$ が 1 を上回っている。これは従来であれば、土石流が発生する程度の降雨があったにもかかわらず、土石流が発生していないことを示している。このように 2020 年は、土石流発生の閾値が従来よりも高くなっていたと考えられる。

5. 2 土砂減少量

図 9 は、3. で計算された炭酸谷・極楽谷の土砂減少量のデータを使って算出された貯留土砂量の変化を示した。2016 年までは一貫して減少 (侵食) 傾向であったが、それ以降は大きな変化が見られないのがわかる。また図 6 の中で、2017 年以降のデータは、回帰直線よりも下にプロットされており、降水指標の割には、土砂減少量が小さいことがわかる。このことから、土石流発生有無だけでなく、土砂の挙動についても、変化している可能性があり、この点について今後解明することが望まれる。

引用文献：小杉賢一郎：斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法：砂防学会誌，Vol.67 No.5, 12-23, 2015.

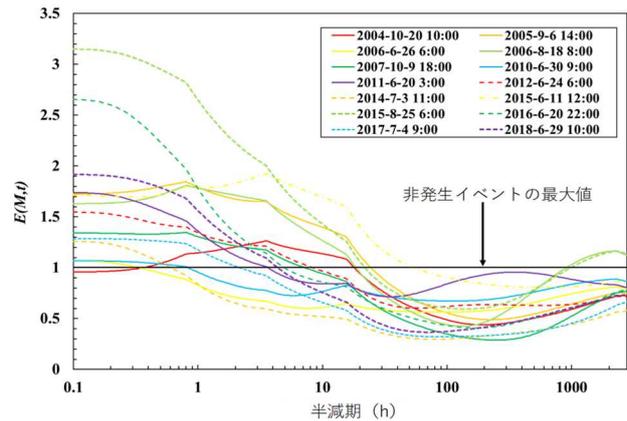


図 7 土石流発生イベントの 401 通りの半減期と $E(M, t)$ の関係

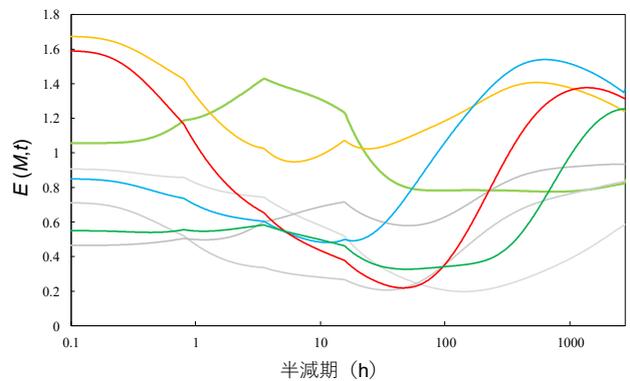


図 8 2020 年に発生した降雨イベントにおける半減期と $E(M, t)$ の関係

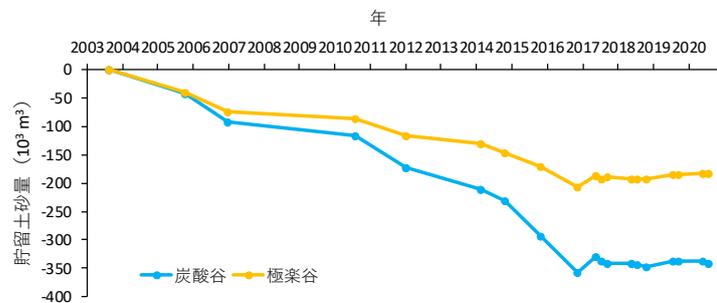


図 9 炭酸谷と極楽谷の貯留土砂量の変化 (2003 年 8 月を 0 と仮定している)

⑦研究成果の発表状況・予定

Gomez, C., Hotta, N., Shinohara, Y., Tsunetaka, H. Grain-size Distribution Change at Unzen Volcano & Impact on Lahar Triggering and Flowage, 2019年5月, 砂防学会研究発表会.
阪本実紀, Gomez, C., 篠原慶規, 経隆悠, 堀田紀文, 酒井佑一, 北本楽. 雲仙普賢岳ガリ一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.
Gomez, C., Hotta, N., Shinohara, Y., Tsunetaka, H. In-flow Sediment Fragmentation of Debris-flow Material - Rolling Tumbler Experiments with Stratovolcanic Dacite -, 2019年10月, 9th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters
篠原慶規, 堀田紀文, Gomez, C., 経隆悠. 水無川流域における土砂流出量の予測に向けて, 2020年5月, 砂防学会研究発表会.
Park, J.-H., Shinohara, Y., Hotta, N., Gomez, C. Characteristics of water and sediment discharge in Tansan-dani gully of Mt. Unzen, 2020年5月, 砂防学会研究発表会.
Park, J.-H., Shinohara, Y., Hotta, N., Gomez, C. The recent decrease in debris flow in Tansan-dani gully at Mt. Unzen, 2021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

該当なし

⑨表彰、受賞歴

該当なし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

本研究により土砂生産モデルが構築され、長期的な土砂生産のポテンシャル量を予測することができた。一方で、今年度は、強い雨が観測されたにもかかわらず、土石流発生が見られないなど、近年、土砂流出が従来とは変化してきている可能性が示された。そのため、土砂生産のポテンシャル量は経年的に変化していく可能性がある。今後は、この要因を突き止めることで、土砂生産の継続性について明らかにすることが望まれる。そうすることで、当該地域において行われる手厚い砂防管理が必要な期間の目安が示さるだけでなく、他地域において新規火山噴火後に立案する砂防計画にも生かされることが期待される。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究で対象とした水無川流域では、1990年～1995年の雲仙普賢岳噴火以来進められてきた砂防堰堤の整備が完了しつつある。新規火砕流堆積物に覆われた水無川流域は、通常の土石流溪流対策の対象地とは異なり、比較的短い頻度で土砂流出が発生する。そのため、長期的な土砂生産量を把握することは、適切な維持管理計画を立てるために極めて重要である。本研究で構築した土砂生産モデルは、水無川における砂防堰堤の維持管理計画の策定に資するものであると考えている。

霧島連山の新燃岳や阿蘇山など、九州を中心に、活火山は数多く存在する。噴火後の砂防堰堤の整備も進められる中、本研究の成果は、他地域のへ適用されることも期待される。