

河川砂防技術研究開発
【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職					
		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】火山噴火後の土砂流出継続期間の検討							
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。		令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	総 合 計				
		172万円	165万円	159万円	498万円				
④研究者氏名									
氏 名		所属機関・役職（※令和6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									
長崎県水無川流域では、雲仙岳の活動休止後 25 年以上が経過した現在においても、炭酸谷・極楽谷において、土石流発生、土砂流出が継続している。これまでの申請者らの研究により、土石流発生及び土砂流出量予測モデルの構築が行われ、2017 年以降、土石流の発生及び土砂流出量は減少傾向にあることが見出だされたが、今後どの程度の期間、これらが継続するのかについて十分な知見はない。そこで本研究では、炭酸谷・極楽谷を対象にし、地形変化、水・土砂流出、植生変化のモニタリングを実施すると共に、土石流発生が収束した赤松谷左支溪との比較を通して、炭酸谷・極楽谷で土砂流出が収束したと判断できる地形・植生等の条件を提示し、それに至るまでの期間を予測することを目指す。									

⑥研究成果

1. 現地モニタリング

1. 1. インターバルカメラを用いたモニタリング

土石流及び出水の把握を目的とし、炭酸谷の6か所、極楽谷の2か所にインターバルカメラ（TLC200Pro, TLC2020, Brinno 社）を設置した（図1）。日の出から日の入りまで、1分毎に画像を記録し、データ回収後に、土石流・出水の有無を目視で確認した。計測は、2022年～2024年の降雨期（6月～9月）に行った。試験地から4km程度離れた雲仙岳（気象庁）の降水データを使い、3時間以上の無降雨で、降雨を区切り、降雨イベントとして定義した。インターバルカメラの画像から、降雨イベントを「土石流発生」「出水発生」「土石流・出水非発生」「判定不可」に分類した。

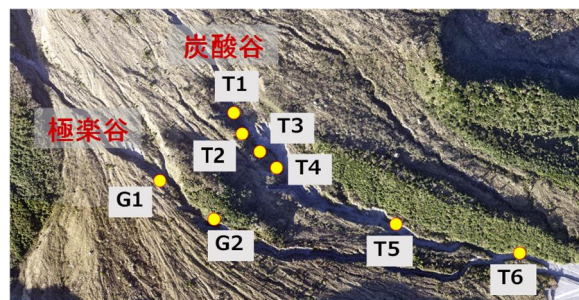


図1 インターバルカメラの設置場所

表1には、いずれかの地点で30分以上の出水が見られたイベントの一覧を示した。2021年の10イベント、2022年の7イベント、2023年の5イベントで出水が見られた。このうち、2021年の2イベント（No.7, 8）では、土石流が発生していた。

表1 出水が確認されたイベントの降雨特性と各観測ポイントにおける出水の発生状況（○：30分以上の出水，△：30分以下の出水，×：出水なし，－：データなし（未設置，カメラの不調等））。土石流発生イベントのNo.は赤色で、降雨の上位3イベントは黄色でハイライトした。

No.	開始時間	終了時間	総降水量 (mm)	10分最大降水量 (mm)	1時間最大降水量 (mm)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	G1	G2
1	2021/6/3 3:50	2021/6/4 15:30	148.0	7.0	27.0	○	○	○	○	○	-	○	-
2	2021/6/15 14:10	2021/6/15 23:40	45.5	3.0	11.0	○	×	○	△	×	-	×	-
3	2021/6/16 3:40	2021/6/16 8:50	34.0	2.5	13.5	○	×	○	○	○	-	○	-
4	2021/7/9 10:00	2021/7/9 13:20	26.5	9.0	23.0	○	○	○	○	○	-	○	-
5	2021/7/14 19:40	2021/7/14 20:20	77.5	29.0	77.5	○	○	○	-	○	-	○	-
6	2021/8/8 13:10	2021/8/9 9:50	177.0	7.0	36.0	-	○	○	○	-	-	○	-
7	2021/8/11 4:40	2021/8/15 3:20	935.5	17.5	81.0	-	○	○	○	-	-	○	-
8	2021/8/16 1:30	2021/8/17 19:50	284.5	11.0	57.0	-	○	○	○	-	-	○	-
9	2021/8/18 2:50	2021/8/18 21:30	69.5	14.0	18.0	-	○	○	○	-	-	○	-
10	2021/9/17 11:10	2021/9/17 21:30	51.0	4.5	17.0	-	△	○	○	-	-	×	-
11	2022/6/20 22:00	2022/6/22 10:20	178.0	8.0	29.5	-	-	△	○	○	-	○	-
12	2022/6/25 13:40	2022/6/25 15:00	15.0	8.5	14.5	-	-	△	○	○	-	△	-
13	2022/7/4 19:40	2022/7/5 12:20	104.0	14.5	46.0	-	-	○	○	○	-	○	-
14	2022/7/15 13:40	2022/7/16 2:20	91.0	13.0	35.5	-	-	○	○	-	-	△	-
15	2022/7/19 3:40	2022/7/19 19:10	83.5	11.0	34.0	-	-	○	○	-	-	○	-
16	2022/8/18 2:30	2022/8/18 8:20	54.5	11.0	30.5	-	-	○	○	○	-	△	-
17	2022/9/1 15:40	2022/9/1 16:10	18.5	8.5	18.5	-	-	○	○	△	-	×	-
18	2023/6/30 3:40	2023/7/1 18:30	125.0	9.5	22.5	-	×	△	○	-	-	×	△
19	2023/7/2 17:10	2023/7/3 14:10	105.5	8.0	24.5	-	○	○	○	-	-	○	○
20	2023/7/9 8:10	2023/7/9 11:40	29.5	7.0	27.5	-	△	○	○	-	-	×	○
21	2023/7/10 8:30	2023/7/10 10:40	34.0	7.5	27.5	-	△	△	○	-	-	×	△
22	2023/8/9 1:10	2023/8/10 10:00	219.5	8.0	27.5	-	△	○	○	○	△	○	○

2021～2023年の土石流発生状況を2020年以前と比較するために、各イベントの平均降雨強度（I; Intensity）と降雨継続時間（D; Duration）を計算し、その関係を2020年以前と比較した（図2）。比較する際、Tsunetaka et al. (2021)が水無川のデータから決めたIDラインを基準として用いた。2016年以前は、このライン付近のイベントで土石流の発生が見られ、2017～2020年は、このライン付近のイベントでも土石流が見られないイベントが多かった。これは、2017～2020年は、それ以前と比較し、土石流が発生しにくい環境であることを示唆している。2021～2023年は、多くの点がラインよりも下に位置しており、このことは、この期間、大きな降雨イベントが少ないことを示している。一方、ライン付近でも土石流発生が見られないイベントもあり、ラインよりも大きく上に位置するイベント（表1のNo.7）でも大規模な土石流は発生していないことから、土石流が発生しにくい環境は維持されていると考えられる。

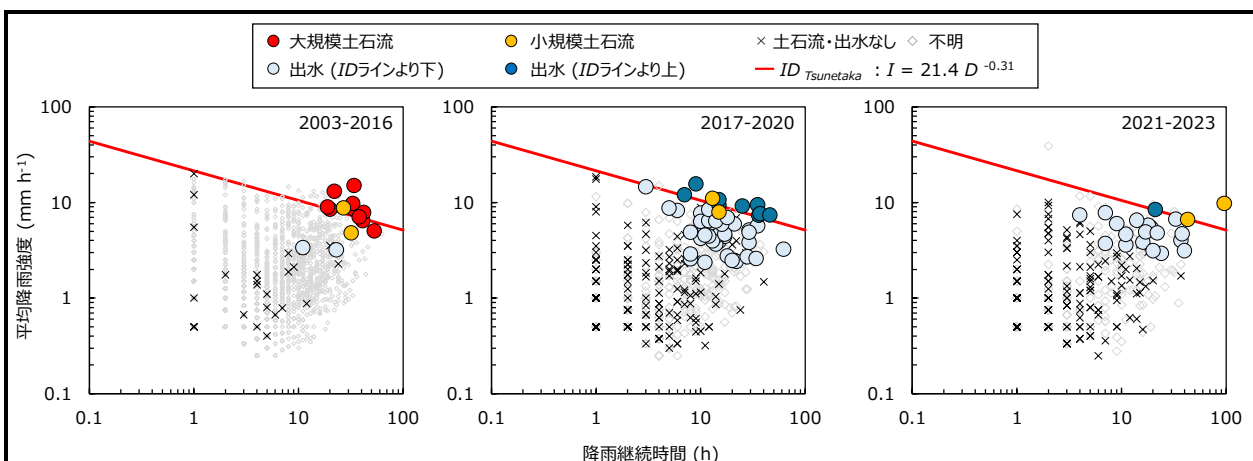


図2 2003～2016年, 2017～2020年, 2021～2023年における降雨イベントの平均降雨強度 (I) と降雨継続時間 (D) の関係. Tsunetaka et al. (2021)のIDラインも示している

1. 2. UAVを用いた地形測量

炭酸谷, 極楽谷において, RTK測位可能なUAV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, 2021年～2023年に年4回, 計12回行った。2021年は手動飛行させ, 2022・2023年は自動飛行させた。ガリー河床に対して高度を100 mに保つと共にオーバーラップ率が80%以上になるようにした。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。なお, 2021年の2回 (5月26日と9月21日) は撮影条件が悪く極楽谷ではモデルの作成ができなかったため, 炭酸谷のみでモデルを構築した。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 (図3), xy 方向, z 方向共に概ね10 cm以下の誤差であった。2021年9月21日のみ, おそらく強風の影響を受けて誤差が大きくなったが, それでも15～25 cm程度であった。このように, 精度の高いDEMやオルソフォトを12時期に渡り構築することができた。

これらを用いて差分解析を行ったところ, 2011年の土石流が発生した期間のみ5 mを超える大きな変化が見られた (図4)。左岸側, 右岸側共に崖の崩落がみられると共に, 谷部に土砂の堆積が見られた。一方, それ以外の期間の変化は大きくても2 m以内であった (図5)。毎年, 冬季には崖から土砂が供給されることで, ガリー内に崖錐が発達し, 梅雨時期には, 出水の影響を受けて, 崖錐の土砂が侵食されていた。ただし, 流下距離は長くない, ガリー内に堆積していた。

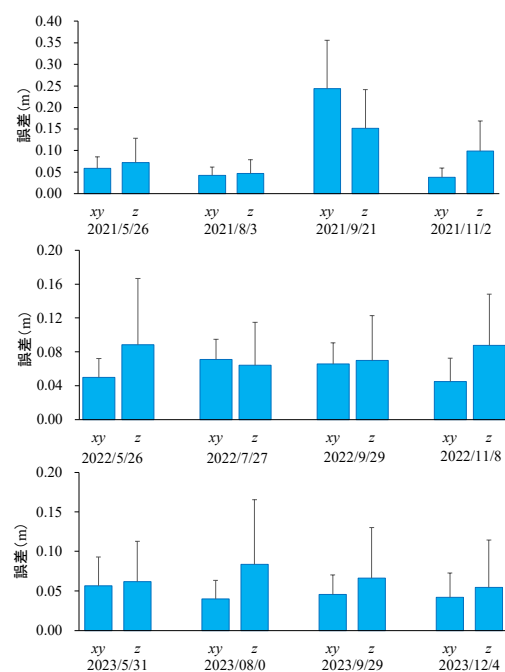


図3 GCP 座標とモデル上の座標の差 (平均値と標準偏差)

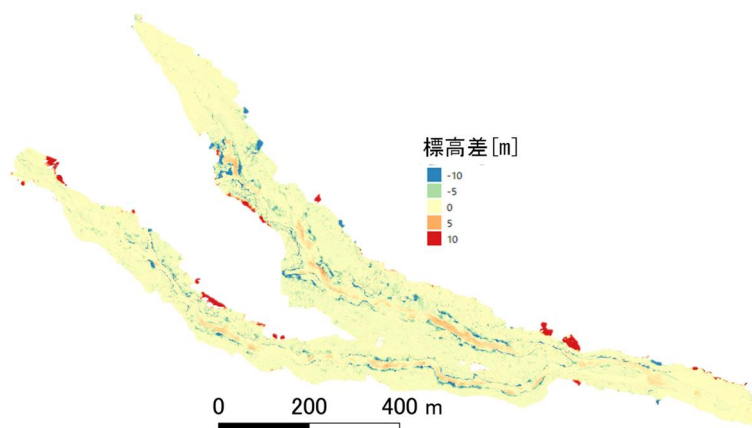


図4 2021/8/3～11/2の標高差分

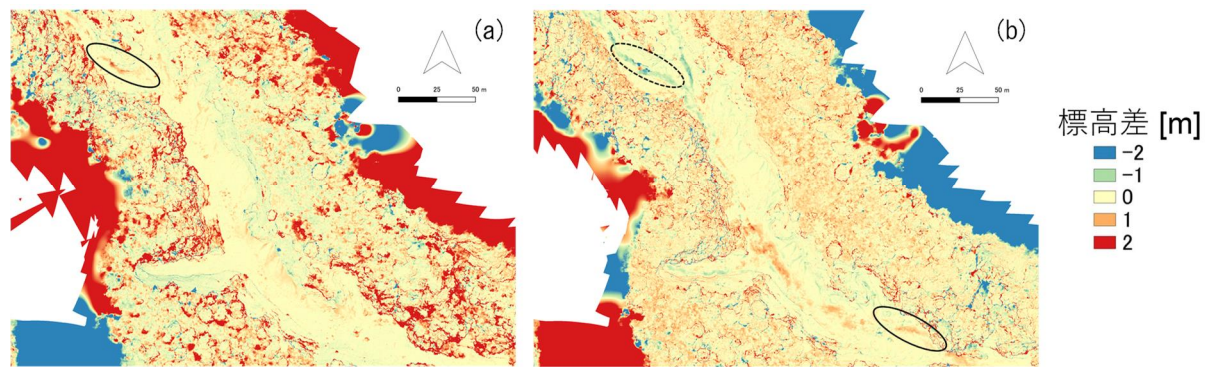


図5 炭酸谷中流部における 2022/11/29~2023/5/31(a), 2023/5/31~8/1 (b) の標高差分. 点線と実線は、それぞれ侵食箇所、堆積箇所の一例

2. 土砂移動収束要因の解明

2. 1. 地形変化

2003 年~2020 年の 16 時期に航空機レーザー測量によって得られた DEM を用いて、炭酸谷・極楽谷のガリーの傾斜、形状について解析を行った。ガリーの 100 m 毎に横断面を設定し、縦断勾配、幅・深さ・面積及び有効形状指標（通常、0.5~1 の値を示し、値が低いほど V 形状に近く、値が大きいほど U 形状に近い）を計算した。

縦断勾配は、2014 年までは大きな変動はなかったが、2015 年に大きく上昇し、2016 年以降、減少傾向が見られた（図 6a）。ガリーの横断面積は、2003 年~2014 年まで増加していた。2015 年は大きく増加した後、2016 年以降大きな変化は見られなかった。有効形状指標は、2016 年までは徐々に減少していたが、2017 年に上昇し、その後は高い値で安定していた（図 6b）。これらの変化は、いずれも図 6 に示した炭酸谷の方が、極楽谷よりも顕著であった。

2015 年と 2016 年は、土石流が計 3 回発生したが、これらのイベントの 1 時間最大降水量は、2004 年~2014 年のどのイベントよりも大きかった。強い降雨があった 2015 年~2016 年を境にし、土石流が発生しにくい形状にガリーが変化したと考えられる。

2. 2. 細粒土砂の変動

2016 年~2022 年に UAV を用いて構築した 18 時期のオルソフォトを用いて、細粒土砂の分布の変化について調べた。細粒土砂で覆われている部分は、色が均一であり、粒径の大きい素材で覆われている部分は、影などの影響を受け色が不均一であるという性質を利用し、画像処理を行うことで、炭酸谷において、表面が細粒土砂に覆われている部分の面積を推定した（図 7）。

細粒土砂に覆われた面積は、年々小さくなる傾向にあった。2016 年時点では 50% 以上が細粒土砂で覆われていたのに対し、2020 年以降は、最大でも 30% 以下となった。また、細粒土砂面積は、冬季に大きくなり夏季に小さくなるという傾向があった。これは、冬季は乾燥や強風により、側壁からガリー内に細粒土砂が供給され、夏季は、出水により細粒土砂が流出しているためであると考えられる。近年、細粒土砂が減少している要因としては、側壁の安定化により、冬季における側壁からの土砂供給が減少しているためであると考えられる。

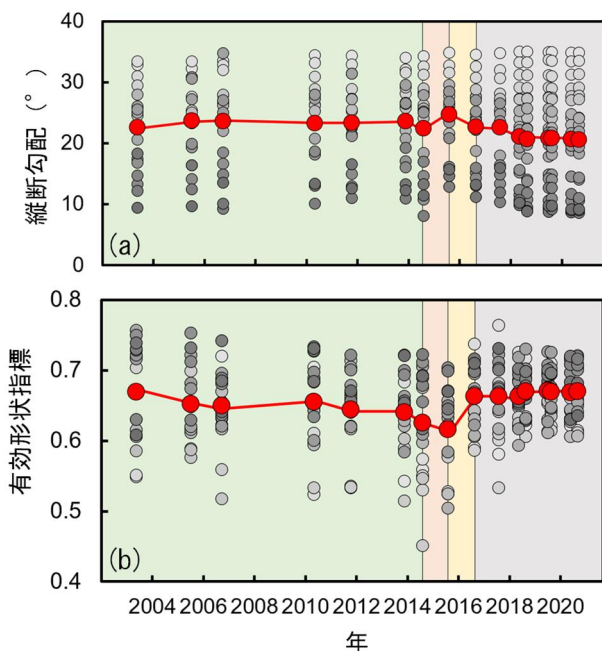


図6 炭酸谷における縦断勾配と有効形状指標. シンボルの色は上流で色が薄く、下流で濃くなっている。赤線は平均値

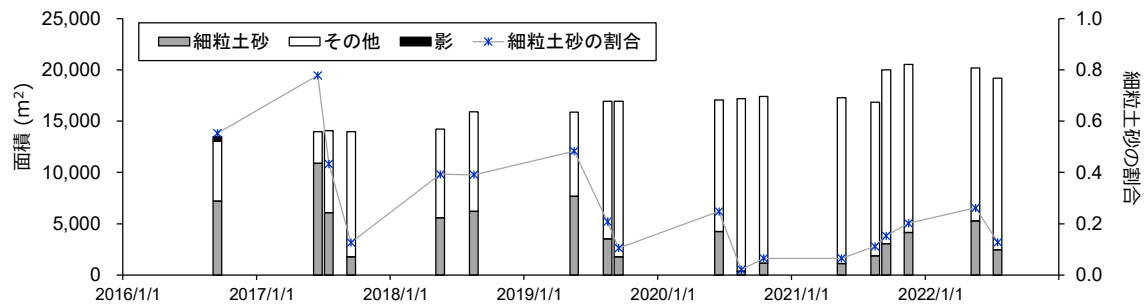


図7 炭酸谷における細粒土砂に覆われた面積及び全体の面積に占める割合（影は解析対象外）

3. 土砂流出予測モデル

土砂流出が減少している要因として、地形条件や細粒土砂の変化が考えられたが、将来的な地形や細粒土砂の状況を予測するのは困難である。そこで、簡易的に得られる指標を説明変数として、土砂流出量（ V ）を予測できる一般化線形モデルを構築した。土砂流出量は、航空機レーザー測定の成果から算出した。説明変数として降雨、解析日数（1 時期前のデータセットからの日数）（ D_d ）、ガリーの種類（炭酸谷か極楽谷か）（ G_c ）を用いた。さらに、土砂の収束を示す説明変数として、解析開始日からの日数（ D_s ）（モデル1）または NDVI（正規化植生指数）（モデル2）を加えた。降雨については、総降雨量、1 時間最大降雨量、3 時間最大降雨量、 I （平均降雨強度）- D （降雨継続時間）ラインからの距離を説明変数の候補とした。それぞれ 10 段階の閾値の候補を設け、閾値より値が大きいイベントについて、閾値との差分を足し合わせ、対象期間で合計した。赤池情報量基準（AIC）を使って、モデルの選択を行ったところ、下記のモデルが最終的に選択された。

$$V = 0.57R_{1.9} - 0.006D_s + 13.80G_c + 33.07 \quad (\text{モデル1})$$

$$V = 0.52R_{1.6} - 115.57N_{NG} + 10.16G_c + 42.81 \quad (\text{モデル2})$$

ここで、 $R_{1.9}$ 、 $R_{1.6}$ は1時間最大降雨量 58.0 mm、49.4 mm を閾値とした降雨指標、 N_{NG} は非成長期の NDVI である。図8では、土砂流出量の実測値と推定値を比較した。モデル1、2共に、1:1の線付近にデータが分布しており、両モデルは実測値をある程度再現できていることがわかる。モデル1、2の決定係数（ R^2 ）は、それぞれ 0.57、0.50 となり、モデル1の方がモデル2より高かった。両モデル共に、炭酸谷において、計測値を大きく過小評価したデータがあるが、そのうち1つは、2016年4月14日に発生した熊本地震の影響を受けた可能性がある。

モデル1及び2を用いて炭酸谷・極楽谷の土砂流出収束時期の予測を行った。降雨データは、 $R_{1.9}$ 、 $R_{1.6}$ の最大値が得られた2014年11月～2015年11月の値を用いた。 N_{NG} は、現在の NDVI の回復傾向が将来も続くことと仮定し決定した。それぞれの年で、10月31日の土砂流出量を予測し、土砂流出量が0以下と推定される年を土砂流出が収束する年とした（図9）。モデル1を用いた場合、炭酸谷では2041年、極楽谷では2034年に初めて0を下回った。モデル2を用いた場合、炭酸谷では2056年、極楽谷では2040年に初めて0を下回った。このように、極楽谷では2034～2040年、炭酸谷では2041～2056年での土砂流出収束が予測された。

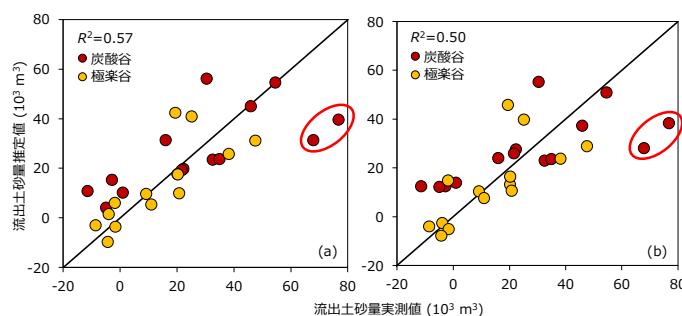


図8 モデル1(a)とモデル2(b)を用いた場合の実測値と推定値の比較。実線は1:1の線を示す。大きく過小評価した2つのデータは赤で囲んだ

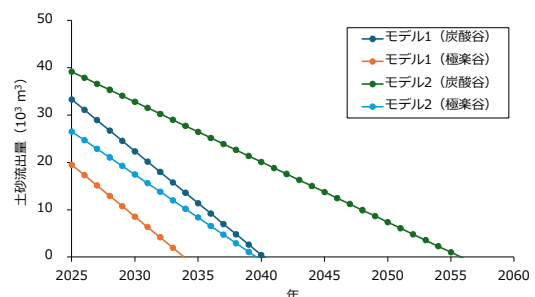


図9 将来の土砂流出量の最大値の予測

⑦研究成果の発表状況・予定

[これまでに発表した代表的な論文] 研究代表者は二重下線, 共同研究者は下線を付記

1. Gomez C., Shinohara Y., Tsunetaka H., Hotta N., Bradak B., Sakai Y. 2021. Twenty-five years of geomorphological evolution in the gokurakudani gully (Unzen volcano): Topography, subsurface geophysics and sediment analysis. *Geosciences*, 11, 457.
2. Tsunetaka H., Shinohara Y., Hotta N., Gomez C., Sakai Y. 2021. Multi-decadal changes in the relationships between rainfall characteristics and debris-flow occurrences in response to gully evolution after the 1990–1995 Mount Unzen eruptions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 2141–2162.
3. 金井彩佳, ゴメス クリストファー, 篠原慶規, 堀田紀文 (2022) 画像処理による自動解析を用いた堆積物の粒子トレーシング, 砂防学会誌, 74(6), 32–40
4. Gomez C., Hotta N., Shinohara Y., Park, H.Y, Tsunetaka, H, Zhang, M, Bradak, B, Hadmoko, D.S, Budi Widowo, S, Daikai, R, Yoshida, M. 2022. Formation Processes of Gully-side Debris-Cones Determined from Ground-Penetrating Radar (Mt. Unzen, Japan), *Journal of Applied Geophysics*, 104919, 1–10.
5. Park J.H., Shinohara Y., Gomez C., Hotta N. 2024. Factors controlling volcanic debris flows two decades after the 1990–1995 eruption at Mount Unzen in Japan. *Geomorphology*, 453, 109119.

[国際会議、学会等における発表状況] 研究代表者は二重下線, 共同研究者は下線を付記

1. Park J.H., Shinohara Y., Hotta N., Gomez C. Recent decrease in debris-flow activity in the Tansan-dani at Mt.Unzen, 砂防学会研究発表会 (2021年5月)
2. Park J.H., Shinohara Y., Hotta N., Gomez C. Effect of Topographical changes on debris flow reduction at Mt. Unzen, 砂防学会研究発表会 (2022年5月)
3. 大海陸人, ゴメス クリストファー, 堀田紀文, 篠原慶規. SfM-MVS を用いた堆積物密度推定と温度との関連性に関する研究, 砂防学会研究発表会 (2023年5月)
4. 篠原慶規, 堀田紀文, 経隆悠, ゴメス クリストファー. 雲仙岳炭酸谷における細粒土砂で覆われた面積の経年変化, 砂防学会研究発表会 (2023年5月)
5. 大海陸人, ゴメス クリストファー, 堀田紀文, 篠原慶規. 雲仙・普賢岳の水無川(炭酸谷)における堆積物の密度・粒径の変化, 砂防学会研究発表会 (2024年5月)

⑧研究成果の社会への情報発信

火山防災協議会に参画する火山専門家等の連携会議(第6回)において話題提供を行った。(2021年11月12日)

参考URL : <http://www.bousai.go.jp/kazan/senmonka/20211112kaigisiryoku.html>

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、大きな降雨イベントがトリガーとなり、地形や河床材料が変化し、土砂移動収束に向かっている可能性が示された。噴火後、長期間にわたる土砂移動のモニタリング事例は世界的にも稀なため、現在のところ、この現象が、どの程度一般的なのか、わからない。今後、他の火山等においても、長期的に土砂移動をモニタリングすることで、雲仙岳で見られた現象の一般性を確かめることが望まれる。

また、本研究では、簡易的なモデルを用いて土砂流出を予測したが、一連のモニタリングを通して、土砂移動現象は非常に複雑であることも明らかとなった。ガリー内では、降雨イベント中に堆積・侵食が繰り返されると共に、乾燥による側壁の崩壊など、様々な現象が絡み合い、現在の土砂移動形態が形作られている。より高い次元で、土砂移動の形態が明らかとなれば、物理的背景に基づいた確実性の高いモデルを構築できる可能性がある。現地において、引き続き、土砂移動のメカニズムについても研究が進むことが望まれる。

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たが、溶岩ドーム崩落の懸念等もあることから引き続き直轄管理が実施されている。現地は警戒区域に設定されており、土砂移動発生域の状況把握が難しい環境にあるが、本研究のインターバルカメラ及びUAVを使ったモニタリングにより、土砂移動発生域の状況を、定期的に管理者（長崎河川国道事務所雲仙砂防管理センター）に情報提供することができ、砂防施設の管理計画立案等に活かされていると考えている。また、本研究により、今後の土砂移動の見通しについて明らかとなったことから、長期的な土砂管理計画を立案する際にも、参照される可能性が高い。

本研究では、植生の回復と、土砂流出の収束について結びつけたが、この関係は、雲仙特有のものではなく、他の火山等にも適用できる可能性がある。今後、様々な場所において、検証を行うことで、対策が必要な溪流の選定及び優先順位付けなどにも活用できれば、砂防政策の質の向上につながると考えられる。