

三次元点群データを用いた土石流の流量推定

国立研究開発法人土木研究所 ○金澤瑛, 清水武志, 梅谷涼太, 伊藤誠記

1. はじめに

土石流の数値解析の高度化には、土石流の水深、流速、流量などの流動特性の詳細を把握することが重要である。既存の土石流観測では、非接触型水位計、CCTV カメラ、二次元 LiDAR などが用いられるが、昼夜問わず時間的・空間的に高解像度なデータを取得するためには、複数の計測機器を併用するなど費用と手間がかかる。近年、時間的・空間的に高解像度な時系列の三次元点群データを取得できる LiDAR (以下、3D-LiDAR という) の入手コストが低下し、国内外で土石流の観測にも利用されてきている (e.g., Aaron et al., 2023; 影山ら, 2025)。しかしながら、3D-LiDAR を利用した土石流の観測事例は限られた事例のみであり、土石流の流動特性を把握するための手法として適用性については、更なる情報の蓄積が必要である。そこで、本研究では鹿児島県桜島野尻川の砂防えん堤に 3D-LiDAR を設置して土石流の現地観測を実施し、取得した三次元点群データを用いて土石流の流量推定を試みたので、その結果を報告する。

2. 方法

2.1. 観測サイトと観測方法

活火山である桜島の南西に位置する野尻川は、流域面積 2.73 km²、流路長 5.9 km、平均河床勾配 1/5.4 の溪流であり、降雨によって火砕物を多く含んだ土石流が頻発している。3D-LiDAR (Livox AVIA) による土石流の観測は、野尻川 1 号砂防えん堤 (水通し横断幅 13 m) で実施した。3D-LiDAR の計測インターバルはデータ容量を考慮して 3 分毎の 30 秒間とした。使用した LiDAR の点率は 240,000 ポイント/秒、最大測定距離は 450 m、価格は約 17 万円 (2026 年 3 月現在) である。なお、野尻川 1 号砂防えん堤では国土交通省大隅河川国道事務所が CCTV を設置しており、解析対象とした土石流が発生した時刻の CCTV 映像データも収集した。

2.2. 計測データの処理、解析

本研究で解析の対象とした土石流は、2025 年 3 月 27 日 15:30 頃に発生した土石流である。土石流が流下した際の点群データには、計測 30 秒間のうち終了直前の約 4 秒間に土石流の流下が確認されたことから、土石流流下前の 4 秒間を含む計 8 秒間 (経過時間 $t=0-8$) を解析対象とした。解析対象の点群データは、専用フリーソフト (Livox Viewer 0.11.0) を用いて積算時間 0.2 秒、計 40 フレームのデータを抽出した。抽出した点群データは、原点を右岸側水通し下流端、x 軸を土石流流下方向、y 軸を水通し横断方向、z 軸を鉛直方向に座標を変換した。

土石流の流量は、断面積と流速から求めることとし、断面積と流速を以下の方法で算出した。はじめに、3D-LiDAR で計測した点群データから解像度 0.1 m の DSM (Digital Surface Model) を作成した。土石流の断面積は、DSM から $x = -1$ m の位置における時々刻々の yz 平面の断面図を作成し、初期時刻と任意時刻との断面図の差分面積を任意時刻の断面積として算出した (図-1)。土石流の流速は、連続する 2 時期の DSM を鉛直投影した画像を用いて、Dense Inverse Search Optical Flow (Kroeger et al., 2016. 以下、オプティカルフローという) によって 0.2 秒間の土石流の移動距離を算出することで求めた。土石流の流量推定に用いる流速は、水通し横断幅全体を流れる流れの速度とし、流量推定用領域 (x 軸長 6 m × y 軸長 13 m) において算出した (図-1)。なお、上記で求めた流速は表面流速であるため、0.7 を乗じて平均流速に換算した (水山・上原, 1984)。また、DSM から算出した表面流速 (以下、DSM 流速という) は、CCTV 映像でオプティカルフローによって算出した表面流速 (以下、CCTV 流速という) および CCTV 映像の目視確認によって算出した流速 (以下、CCTV 目視流速という) で検証した。検証領域は、CCTV 映像で確認できる水通し左岸側の x 軸長 6 m × y 軸長 6 m の領域とした (図-1)。CCTV 目視流速は、映像を見て土石流の先端部が流速検証領域の通過にかかる時間を計測することで求めた。さらに、DSM から陰影図と傾斜量図を作成し、オプティカルフローで算出した表面流速の結果を比較した (以下、それぞれ陰影流速、傾斜量流速という)。土石流の流量は、算出した断面積に水通し幅全体の平均流速を乗じることで求めた。

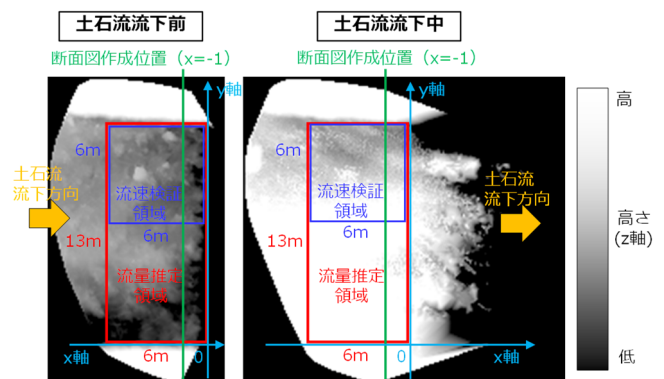


図-1 点群データから作成した DSM に示した断面図作成位置、流速検証領域、流量推定領域

3. 結果と考察

図-2 に断面積が最大となった時刻($t=5.2$)の断面図を示す。土石流の水位は砂防えん堤の右岸側で大きく、左岸側で小さいという傾いた形状をしており、最大で高さ 2.0 m 程度まで水位が上昇していた。これは、砂防えん堤の横断方向が上流の流路の方向に対して垂直ではなく、土石流が砂防えん堤を通過する際に右岸側側壁に衝突して流れが規制されたためだと考えられる。図-3(a)に土石流の断面積の時系列変動を示す。土石流流下中の断面積は 12.3 から 14.6 m^2 で小刻みに変動した。

図-3(b)に CCTV 流速、DSM 流速、陰影流速、傾斜量流速の時系列変動を示す。CCTV 目視流速の結果は 5.8 m/s であったため、CCTV 流速は、概ね土石流の表面流速の実態を捉えていると考えられた。そこで、CCTV 流速を基準に DSM 流速、陰影流速、傾斜量流速を比較した。DSM 流速は、CCTV 流速と比べて低く算出される傾向や変動幅が大きい傾向があるものの、土石流流下中に徐々に流速が大きくなる傾向や小刻みな経時的な変動は類似していた。陰影流速は、CCTV 流速と比べて経時的な変動は類似しているものの、土石流流下中に徐々に流速が大きくなる傾向は見られなかった。傾斜量流速は、CCTV 流速と比べて経時的な変動は類似している部分があるものの、変動幅は DSM 流速よりも大きかった。また、CCTV 流速に対する DSM 流速、陰影流速、傾斜量流速の RMSE は、それぞれ 1.84、2.79、1.99 であり、DSM 流速の結果が最も低くなった。このことから、本事例においては、DSM から算出した表面流速が土石流の表面流速の変動を最もよく捉えていると考えられた。ただし、DSM から算出した表面流速の値は過小評価の可能性が示唆された。

図-3(c)に断面積と DSM 流速から算出した流量の時系列変動を示す。土石流流下中の流量は、流速の変動の傾向に大きく影響されて変動しており、10~40 m^3/s 程度で変動していた。また、本事例では、流量は、土石流流下中徐々に上昇する傾向を示しており、ピーク流量には達していないことが推察された。

4. おわりに

本研究では、3D-LiDAR で取得した三次元点群データを用いて土石流の断面積、流速、流量を推定した。その結果、土石流の DSM を作成することで、断面積、流速、流量を概ね推定することが可能であり、3D-LiDAR が土石流の詳細な流動特性を把握する手法として一定程度有効であると考えられた。現在、3D-LiDAR を用いた土石流観測の事例は限られているため、土石流観測手法としての 3D-LiDAR の適用性については、今後さらに観測データを蓄積していくこととともに、既存の手法の観測結果と比較し、検証することが重要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、大隅河川国道事務所、電通工業株式会社に多大なご協力賜りました。

参考文献

- 1) Aaron, J., Spielmann, R., Mc Ardell, B. W., & Graf, C. (2023). High-frequency 3D LiDAR measurements of a debris flow: A novel method to investigate the dynamics of full-scale events in the field. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102373. <https://doi.org/10.1029/2022GL102373>
- 2) 影山大輔, 池島剛, 清水武志, 伊藤誠記 (2025). 三次元 LiDAR による土石流流量計測の試み. 令和 7 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 53-54.
- 3) Kroeger, T., Timofte, R., Dai, D., & Gool, L.V. (2016). Fast optical flow using dense inverse search. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision, ECCV*, <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1603.03590>
- 4) 水山・上原 (1984). 土石流の水深と流速の観測結果の検討. *砂防学会誌*, 37, 4, pp. 23-26.

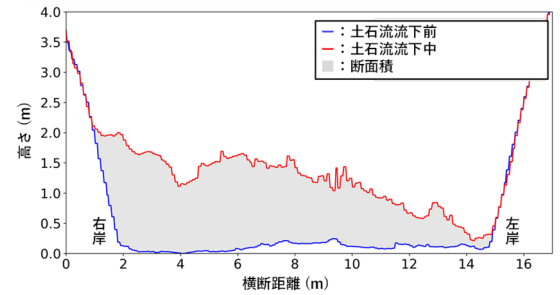


図-2 土石流の断面図 ($t=5.2$)

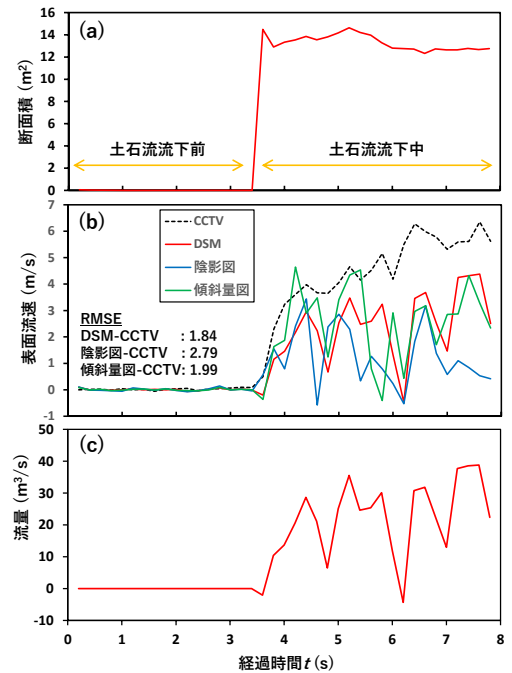


図-3 (a) 断面積, (b) 表面流速, (c) 流量の時系列変動