

4D-LiDAR により観測された土石流の発達・停止特性

静岡大学大学院山岳流域研究院○金子竜己

静岡大学農学部 長田知也

日本工営株式会社 高橋英成

静岡大学学術院農学領域 今泉文寿 高山翔揮

1. はじめに

土石流は、波高や流速などが時空間的に急激に変化する流下特性をもつ。近年 LiDAR 技術が急速に進歩したことから、そのような特性を 4 次元 (3D+time) 観測することが可能となった。Aaron et al. (2023) や Spielmann and Aaron (2024) は、4D-LiDAR による観測結果に基づき、流速や流量を算出した。しかしながら、Aaron et al. (2023) や Spielmann and Aaron (2024) は、砂防堰堤付近にて観測しており、自然流路における 4D-LiDAR を用いた土石流の流下実態の観測事例は未だ乏しい。加えて、流下・堆積する土石流の 3 次元表面形状に着目した研究事例についても少ない。そこで本研究では、土石流が発生する急勾配溪流における土石流の三次元表面形状から土石流の流下・堆積特性を明らかにするため、4D-LiDAR を土石流溪流の上流側と下流側の計 2 地点に設置して観測を行った。

2. 調査地と方法

調査対象地は静岡県中部、安倍川最上流部に位置する大谷崩、一の沢である(図 1)。一の沢は、流域面積 0.3 km²、流路長約 1 km、溪床勾配は上流側において 25° 以上、下流側においては 15° ~20° となっている。主な地質は砂岩、頁岩、砂岩・頁岩の互層である。一の沢では定期的な現地調査から、年平均 5 回 (2016 年~2023 年) の土石流が発生する。一の沢において発生する土石流は、土石流の内部間隙が上層まで泥水で満たされている飽和土石流と土石流の内部間隙が上層まで満たされていない不飽和土石流が発生する (Imaizumi et al., 2017)。また、観測機器を上流側の U 地点と下流側の D 地点の計 2 地点に設置した(図 1)。U 地点と D 地点の距離は約 200 m 離れており、U 地点は土石流扇状地の扇頂よりやや上流側に、D 地点は土石流扇状地内の流路沿いに位置している。両地点とも移動床である。

観測に用いた機器は、4D-LiDAR 自動観測システムおよびビデオカメラである。降雨データは、大谷崩の下流部に位置する国土交通省の雨量データを使用した。4D-LiDAR 自動観測システムは、LiDAR (livox horizon)、ラズベリーパイ、プログラムリレーから構成されている。この 4D-LiDAR をビデオカメラとともに U 地点と D 地点に設置した。あらかじめ現地にて長径約 30 cm の石にロープを巻き付け、土石流によりロープが引っ張られることで、プログラムリレーに接続した導線が切断される。この導線は常に電流が流れており、導線が切断されることで電流の変化をプログラムリレーが感知し、4D-LiDAR およびビデオカメラを作動する仕組みとなっている。また、取得した LiDAR データから水位データおよび表面形状、土石流の縦横断形状を抽出した。これらのデータの解析には、Python, CloudCompare, QGIS を使用した。水位データおよび表面形状については、常に流れのある範囲 (約 1.5 m×1.5 m) を解析対象とした。また様々なグリッドサイズの DEM から粗度を求め、空間平均値と標準偏差を計算することで、土石流の表面形状に影響を与える要因 (例えば、粒径など) を検討した。粗度は、3×3 個の中心とまわりのセルの最大の差によって計算された。

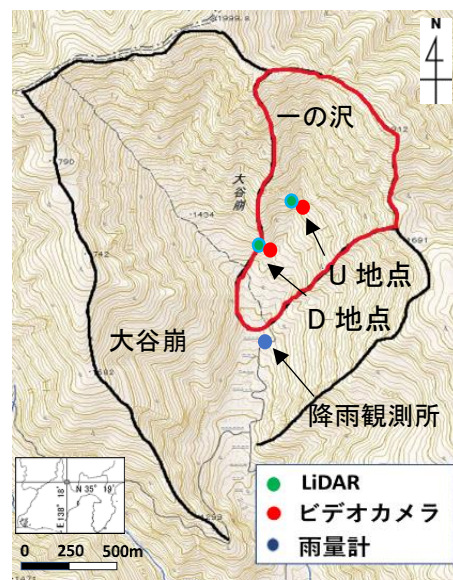


図 1. 調査地位置図および観測地
(国土地理院地図を一部改変)

3. 結果および考察

2023 年 8 月 3 日の総雨量 66 mm, 最大降雨強度 11 mm/10 min の降雨および同年 8 月 14 日の総降雨量 155 mm, 最大降雨強度 11 mm/10 min の降雨により土石流が発生し, 4D-LiDAR を用いた土石流観測に成功した。8 月 3 日はビデオカメラ映像についても取得したが, D 地点まで土石流が到達しなかったため, U 地点のみのデータとなっている。8 月 14 日は夜間に土石流が発生したため, 4D-LiDAR のみのデータとなっている。

8 月 3 日に観測した土石流のうち最大規模であった土石流の縦横断面図に示した(図 2)。横断形状では, 土石流段波の先頭部(1 s, 2 s)が凸状であり, 3 s 以降が平滑であった。縦断形状では, 1 s, 2 s に土石流の先頭部が確認され, ロープ状であった。3 s 以降に徐々に水位が上昇した。凸状の横断形状は同日の段波において 8 段波中 3 段波で確認され, それらは全て不飽和土石流であった。土石流の凸状の横断形状の形成には, レオロジーの違いや壁面・河床との摩擦が影響している可能性がある。土石流の凸状の横断形状は, スイスの Illgraben においても 3D-LiDAR(2D+time)により観測されており(Jacquemart et al., 2017), 一の沢の土石流のみで見られる固有の現象ではない。

土石流段波の表面形状を先頭部・中部・後続部に分け, 粗度に変換した(図 3)。粗度の平均値は, 土石流の先頭部と中部ではグリッドサイズと比例関係があったが, 後続部ではグリッドが 0.3 m 付近から比例関係に近い直線を描きながらもバラつきがあった。土石流の先頭部と中部における粗度の標準偏差は, グリッドサイズ 0.1 m 付近まで上昇し, グリッドサイズが 0.1 m 以上になると一定になりつつも, グリッドサイズが大きくなるにつれてバラつきが大きくなった。後続部における粗度の標準偏差はグリッドサイズが大きくなるにつれて上昇傾向にあり, バラつきも大きくなった。ビデオ映像から, 土石流の先頭部は層流であり, 中部は層流と乱流が入り混じり, 後続流は乱流であった。土石流の表面形状は, 層流の場合は礫の凹凸を示しており, 乱流の場合は乱れた泥水の水面を示している可能性がある。

8 月 14 日に D 地点において土石流の堆積過程が 4D-LiDAR によって観測された(図 4)。堆積開始から 8 s 後までは, 段波の先端部付近で多くの礫が堆積し, その後の 20 s まで堆積の遡上がみられた(図 4)。堆積時には流路勾配に対して逆勾配の地形を確認した。この土石流段波の堆積は 8 s までは比較的堆積速度が速いことから, 後続流に比べて土砂濃度が高かったと考えられる。

引用文献 Aaron, J., Spielmann, R., McArdeell, B.W., Graf, C., 2023. Geophys Res Lett 50; Imaizumi, F., Hayakawa, Y.S., Hotta, N., Tsunetaka, H., Ohsaka, O., Tsuchiya, S., 2017. Natural Hazards and Earth System Sciences 17, 1923–1938. Jacquemart, M., Meier, L., Graf, C., Morsdorf, F., 2017. Natural Hazards 89, 785–800; Spielmann, R., Aaron, J., 2024. Eng Geol 329, 107386.

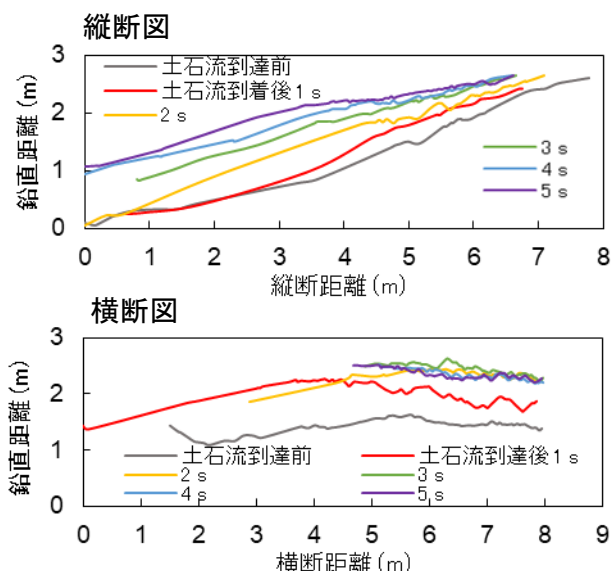


図 2. 流下する土石流の縦横断面図

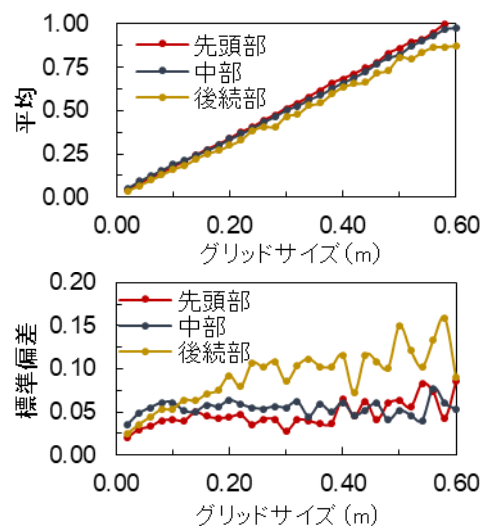


図 3. 土石流の表面形状(粗度の平均と標準偏差)

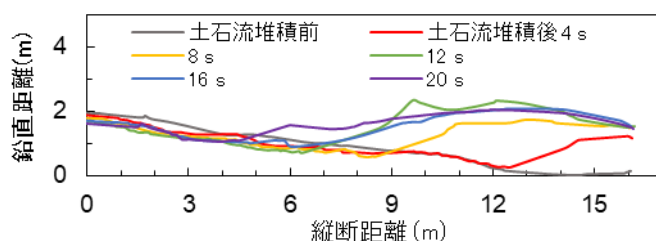


図 4. 土石流堆積時の縦断形状の時系列変化