

4D-LiDAR 観測に基づく土砂濃度・流出土砂量の推定

岐阜大学大学院連合農学研究科 ○金子竜己, Dahal Samikshya
 静岡大学大学院農学領域 今泉文寿
 スイス連邦工科大学チューリッヒ校 Raffaele Spielmann
 京都大学防災研究所 高山翔揮

1. 研究背景・目的

土石流は、その土砂濃度に応じて、侵食・堆積傾向が大きく変化する。従来、土石流の土砂濃度や全応力などの内部情報を現地で観測する手法として、荷重計、圧力計、濁度計などが用いられてきた¹⁾²⁾³⁾。しかし、これらの直接計測手法には、礫の衝突による破壊により安定した計測が難しいといった課題があり、実際に現地で発生する土石流の土砂濃度等の内部情報の把握は未だ不十分である。近年、空間 3 次元情報を 0.1 秒間隔で時間情報とともに測定する LiDAR (Light Detection And Ranging) (4D-LiDAR) が登場し、これを用いた流速や流量の解析が行われている⁴⁾⁵⁾。一方、土石流では土砂濃度が流動抵抗や流速分布に大きく影響することから、これまでに土砂濃度を考慮した構成則が提案され、主として水路実験によりその適用性が示されてきた。これらの既往の構成則のうち、Takahashi (1978) が示した流速分布式では、4D-LiDAR 観測により取得可能な流速、流動深、水面勾配等の観測値を適用することで、土砂濃度の推定ができる可能性がある。そこで本研究では、土石流中の土砂濃度の新たな評価手法を構築する試みとして、4D (3 次元+時間) LiDAR 観測および Takahashi (1978) の構成則を組み合わせるにより、土石流イベント中の土砂濃度の推定を行った。加えて、本手法の検証のため、推定した土砂濃度から流出土砂量を算出し、その結果を UAV 写真測量に基づく土石流発生前後の地形変化量と比較を行った。

2. 方法

2-1. 調査地・観測方法

調査対象地は、年数回土石流が発生する静岡県中部、安倍川最上流部に位置する大谷崩、一の沢流域 (以下、一の沢) である。一の沢の流域面積は約 0.3 km²、流路長は約 1 km である。土石流観測は、一の沢内の扇状地の扇頂付近において行われた。観測地点の河床状態は、岩盤が露出しており、固定床とみなすことができる。観測には、4D-LiDAR (Livox Horizon)、ラズベリーパイ、プログラムリレーを主に構成された 4D-LiDAR 自動観測システムを用いて、発生した土石流の自動観測を行った⁷⁾。

2-2. 土砂濃度および流出土砂量の推定方法

土石流の土砂濃度推定は、観測した 4D-LiDAR データに基づく流動深、表面流速、水面勾配および本観測地での物性値、さらには複数の間隙流体密度の仮定値を用いて、Takahashi (1978) の流速分布式により行った。この流速分布式は Bagnold (1954) が示した構成則を開水路の定常条件下の流れに適用し、深さ方向に土砂濃度が一様であることを仮定したうえで、粒子と水の重量によるせん断応力との釣り合いから導出された。この流速分布式は定常等流を仮定しており、非定常状態の土石流を対象としたものではないものの、本研究では観測結果を準定常とみなすことで土砂濃度の推定を行った。また本研究は、固相と液相に分けて土砂濃度を考え、それぞれを全体の土石流体積に対する断面平均体積土砂濃度を推定した。具体的には、まず固相における土砂濃度 (以下、粗粒土砂濃度) について流れ表面 ($y=h$) において流速分布式を整理すると次式が得られる。

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{C_c + (1 - C_c) \rho_f \sigma^{-1}}{a_i \sin \alpha}} \left[\left(\frac{C_*}{C_c} \right)^{1/3} - 1 \right] - \frac{u_s}{\frac{u_*}{h}} = 0$$

ここに u_s は表面流速、 u_* は摩擦速度 ($u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$)、 h は流動深、 d は代表粒径、 C_c は固相に該当する体積土砂濃度、 ρ_f は間隙流体密度、 σ は土粒子の密度、 a_i は Bagnold の粒子衝突に関する実験定数、 α は粒子衝突角、 C_* は河床堆積物の容積土砂濃度、 θ は水面勾配である。粗粒土砂濃度に対して、この式からは解析解は得られないため、二分法により粗粒土砂濃度を求めた。また、液相の細粒分の土砂濃度 (以下、細粒土砂濃度) C_f は以下の式から、上記の推定した粗粒土砂濃度をもとに求められる。

$$C_f = (1 - C_c) \frac{\rho_f - \rho_w}{\sigma - \rho_w}$$

ここに、 ρ_w は清水の密度である。

土砂濃度の推定に使用した各パラメータを表 1 に示す。表面流速については、観測した点群データを陰影図に変換し、PIV (粒子画像流速測定法) により算出した⁴⁾。流動深は、4D-LiDAR データから得られた表面位と土石流発生前の河床位の差分として、土石流の流動深を PIV 解析と同様の解析範囲内において

表 1. 土砂濃度解析に使用したパラメータ

パラメータ	使用した値
代表粒径: d	0.15 (m) (Imaizumi et al., 2016)を参考
間隙流体密度: ρ_f	1250, 1500, 1750 (kg m ⁻³)
土粒子の密度: σ	2650 (kg m ⁻³)
Bagnoldの粒子衝突に関する実験定数: a_i	0.042
粒子衝突角: α	37.3° (Imaizumi et al., 2017)の崖錐安息角を参考
河床堆積物の容積土砂濃度: c_s	0.65
表面流速: u_s	LiDARデータをもとにしたPIVによる表面流速を使用 (m s ⁻¹)
摩擦速度: $u_* (= \sqrt{gh \sin \theta})$	θ は観測したLiDARデータに基づく水面勾配を使用 (°)
流動深: h	河床と観測したLiDARデータの差分結果を使用 (m)
清水の密度: ρ_w	1000 (kg m ⁻³)

算出した。間隙流体密度は、直接的に計測することが困難であるため、先行研究の観測事例をもとに、複数の値 (1250, 1500, 1750 kg m⁻³) を設定し、比較・検討した¹⁾¹¹⁾。また代表粒径についても、時系列的に変化することが考えられるが、直接的に観測することが技術的に難しいため、一定値を用いた。

流出土砂量の算出には、PIVによる表面流速および4D-LiDARデータによる土石流表面位と土石流イベント前の河床形状により算出した断面積を使用した。表面流速を断面平均流速に換算する係数は、Takahashi (1978)に基づく0.6として流量を求めた⁶⁾。

2-3. UAV 写真測量に基づく流出土砂量

推定した土砂濃度をもとにした総流出土砂量の検証のために、UAV-SfM (Structure from Motion)により土石流発生前後 (2024年8月16日, 9月11日)の地形データを取得し、観測地点より上流域全体の土石流による地形変化量を把握した。

3. 結果および考察

観測の結果、2024年8月31日に土石流を確認した。本イベントでは、最初の段波到達から約15分間にわたり、計26波の段波が確認された。これらの段波の到達時刻は、5波ごとに図1, 図2のグラフ上部に示している。粗粒・細粒土砂濃度について推定した結果、最後に確認された段波 (S26) 通過後を除き、それぞれの土砂濃度が段波毎に増減を繰り返す傾向がみられた。粗粒土砂濃度の増減については、流動深の増減と一致した。また粗粒土砂濃度のピークの多くは、段波先頭部から中部にかけてみられ、段波後続部にかけて次第に粗粒土砂濃度は減少した。それに

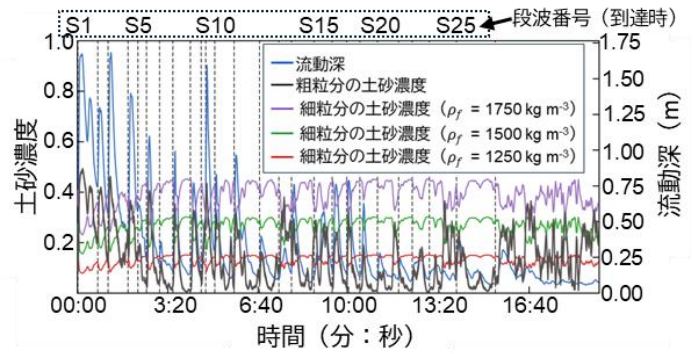


図 1. 推定した粗粒・細粒成分の土砂濃度

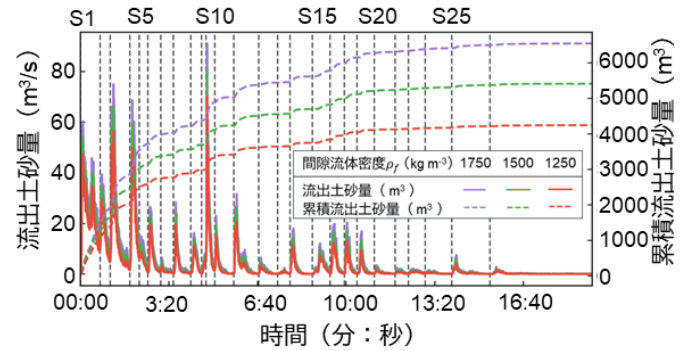


図 2. 間隙流体密度 $\rho_f = 1250, 1500, 1750 \text{ kg m}^{-3}$ の場合の流出土砂量および総流出土砂量

対し、細粒土砂濃度は、段波先頭部から中央部において低く、後続部に向かって高くなる傾向を示し、粗粒土砂濃度とは逆の変化を示した。

推定した土砂濃度に基づき算出した流出土砂量の結果を図2に示す。比較・検証として実施したUAV写真測量による土石流前後の地形変化量は、空隙を含む見かけの体積で11,014 m³であった。ここで、河床堆積物の容積土砂濃度を0.65と仮定すると、総流出土砂量は7,159 m³であると考えられる。推定土砂濃度から求めた総流出土砂量は、間隙流体密度1250 kg m⁻³の場合は4241 m³, 1500 kg m⁻³の場合は5411 m³, 1750 kg m⁻³の場合は6546 m³となった。したがって、推定結果はいずれの条件でもUAV測量結果を下回ったものの、1750 kg m⁻³の条件ではUAV測量による推定値に比較的近い結果が得られた。これらの差異の要因としては、本観測で捉えた土石流の流動形態が、Takahashi (1978)の流速分布式が前提とする流れの条件と必ずしも一致していない可能性がある。また今回の結果は、単一の土石流イベントに基づくものであるため、今後、複数イベントに対する検証を通じて、本手法の適用性や妥当性について検討する必要がある。

引用文献: 1) Mc Ardell et al. (2007), Geophysical Research Letters, 34(7); 2) Osaka et al. (2014), Interpraevent, 107–116; 3) 宮田秀介ら (2021), 砂防学会誌 74, 42–47; 4) Aaron et al. (2023), Geophysical Research Letters, 50; 5) Spielmann and Aaron (2024), Engineering Geology, 329, 10738; 6) Takahashi (1978), Journal of the Hydraulics Division, 104, 1153–1169; 7) Kaneko et al. (2025), Geomorphology, 482, 109800; 8) Bagnold (1954), Proc R Soc Lond A Math Phys Sci, 225, 49–63; 9) Imaizumi et al. (2016), Journal of Mountain Science, 13, 213–222; 10) Imaizumi et al. (2017), Natural Hazards and Earth System Sciences, 17(11), 1923–1938; 11) Mc Ardell (2016), International Journal of Erosion Control Engineering, 9, 194–198