

4D-LiDAR 観測による土石流流速の把握

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

静岡大学農学部 長田知也

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. はじめに

土石流は流速や水位が1秒以下の短い時間間隔で急激に変化する。しかしながら、従来の観測手法では1秒以下の時間間隔で流速や流動深を観測することが難しく、土石流の動態について未解明な点が多く残っている。そのような中、LiDAR (Light Detection And Ranging) 技術が進歩し、三次元的な形状の計測に加え、計測間隔1秒以下の時間軸を加えた4D(3D+time)-LiDARによる土石流観測が可能となった(Aaron et al., 2023; 金子ら, 2024)。Aaron et al. (2023)は、観測した4D-LiDARデータを陰影図に変換し、流速を算出する方法を考案した。加えて、4D-LiDARデータから土石流の流動深を解析することも可能であり、これらのデータを組み合わせることで土石流の動態のさらなる解明が期待される。しかしながら、Aaron et al. (2023)の観測は砂防堰堤付近で行われており、4D-LiDARにより自然流路上の土石流の動態は未だ明らかにされていない。本研究では、自然流路における土石流の動態解明を目的とし、土石流頻発溪流において4D-LiDAR観測を行い、得られた0.1秒間隔の流速と水深をもとに土石流の特性について検討した。

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、流域面積約0.3 km²、流路長約1 km、溪床勾配はU地点において約20°、D地点においては約15°となっている(図1)。地質は主に砂岩、頁岩、砂岩・頁岩の互層である。一の沢では、定期的な現地調査結果から、年平均5回(2016年～2023年)の土石流が発生する。観測機器は、河床の礫にロープを巻き付け、土石流が発生した際に自動的に観測およびデータの記録を行う4D-LiDAR (Livox Horizon) 自動観測システムを使用した(金子ら, 2024)。また観測機器の設置地点は、上流側のU地点と下流側のD地点の計2地点である。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。観測期間は2023年8月～2024年11月である。U地点は2023年8月3日に発生した土石流により露岩していた河床が埋没し移動床となったが、2024年8月31日に発生した土石流により再び露岩し、固定床となった。D地点については常に移動床であった。

観測した4D-LiDARデータから土石流の流速を算出するため、4D-LiDARデータを0.1秒間隔で陰影図に変換し、PIV(粒子画像流速測定法)により土石流の表面流速を算出した。算出した表面流速にはノイズが含まれていたため、1秒毎の上位75%以上の値のみ解析に使用した。あわせて目視で礫を追跡し、その礫の移動距離を移動時間で割った流速(以下、マニュアル流速)を算出することで、PIVにより算出された表面流速の検証を行った。また、観測した4D-LiDARデータをもとに、土石流の水位をPIV解析と同じ0.1秒間隔で算出した。そして、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、土石流発生域(U地点よりも上流)の溪床堆積物量の変化を把握した。

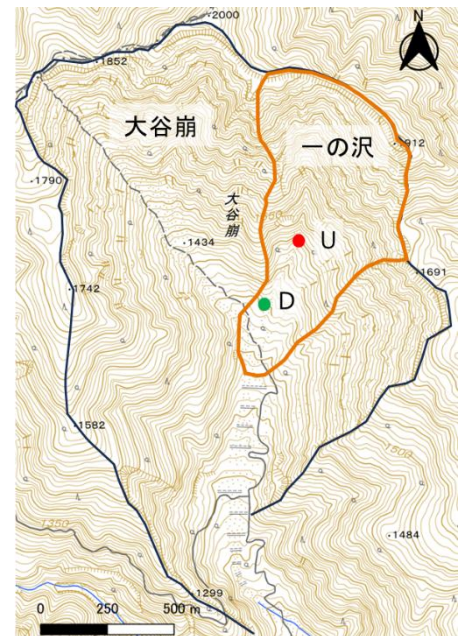


図1. 調査地位置図および観測地点
(国土地理院地図を一部改変)

3. 結果および考察

観測の結果、2023年8月～2024年11月の計5回の土石流イベントにおいて4D-LiDARを使用した土石流観測に成功した。観測した4D-LiDARデータからPIVにより算出した表面流速を図2に示す。図2よりマニ

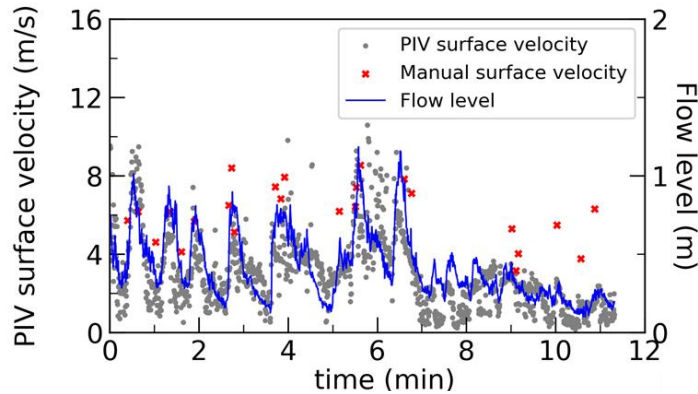


図2. 2024年10月3日U地点にて観測したPIV土石流による表面流速、水位、マニュアル流速

マニュアル流速とPIVにより算出した表面流速はおおむね一致した。その一方で、PIVにより算出した流速とマニュアル流速の値に誤差がみられる時間帯があり、特に後続流部において顕著であった。これは、礫の混入が乏しい流れではPIVによる礫の追跡が難しいこと、あるいは水しぶきの影響で流れの形状が鮮明でなかったことが誤差の拡大につながった可能性がある。また、図2では土石流段波毎に流速と流動深がほぼ同時に増減していることを確認した。次に、流速と流動深の関係に着目する。固定床であった計3回の土石流イベントにおいて、流速と流動深の関係の時系列的な変化を5分間ごとの回帰直線とともに図3、4、5に示す。2024年8月31日の土石流イベントでは、5分間ごとの回帰分析の結果、決定係数は0.3~0.64の範囲であり、いずれも有意であった($p < 0.01$; 図3)。そして、回帰直線の傾きが時間経過とともに増加しており、土石流の流動性が時間とともに高くなったことが示唆される(図3)。その後の2つの土石流イベント(2024年10月3日、11月2日)では、決定係数が0.09~0.50の範囲にあり、いずれも有意であった($p < 0.01$; 図4、5)。回帰直線の傾きの時間変化は、8月31日のように時間経過とともに傾きが大きく変化することはなかった(図4、5)。このような土石流イベント間、あるいは土石流イベント内での回帰直線の傾きの変化には、土石流内の土砂濃度の変化が影響した可能性がある。そして、この土砂濃度の時系列的な変化には、土石流発生に伴う溪床堆積物量の変化や(8月31日と10月3日それぞれ16,814 m³、10,080 m³)、降雨パターンなどが影響を及ぼす要因として考えられる。

4. おわりに

本研究では、土石流頻発溪流において4D-LiDAR観測を実施し、得られた0.1秒間隔の流速と水深をもとに土石流の動態解明を行った。その結果、4D-LiDAR観測は土石流の動態を知る上で有効な観測手法であることがわかった。今後、データの蓄積や他の観測機器との組み合わせにより、土石流の動態に影響を与えている要因が明らかになると考えられる。

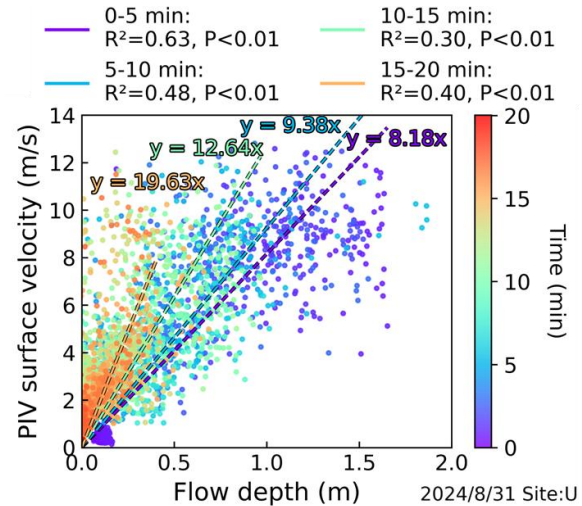


図3. 2024年8月31日U地点の土石流イベントの流速と流動深の時系列的対比

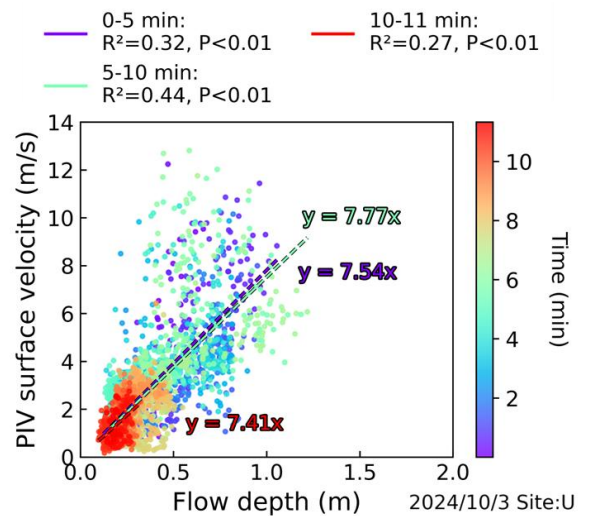


図4. 2024年10月3日U地点の土石流イベントの流速と流動深の時系列的対比

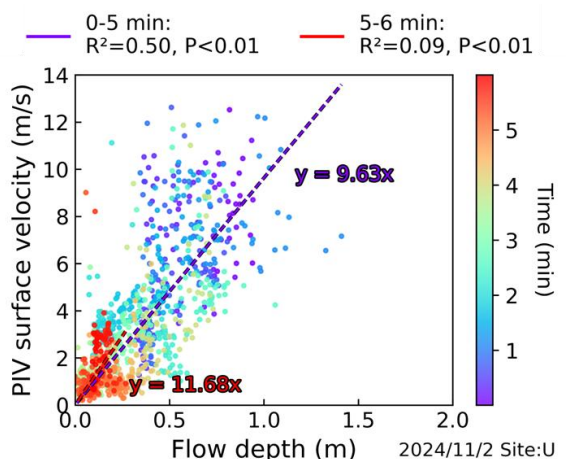


図5. 2024年11月2日U地点の土石流イベントの流速と流動深の時系列的対比

引用文献 Aaron J, Spielmann R, McArdell BW, Graf C (2023). Geophysical Research Letters 50: e2022GL102373; 金子竜己, 長田知也, 高橋英成, 今泉文寿, 高山翔揮 (2024). 中部森林研究, 79: 49-53