三次元点群データを用いた土石流の水位と流速の関係性の分析

ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN WATER LEVEL AND FLOW VELOCITY IN DEBRIS FLOW USING 3D POINT CLOUD DATA

金澤 瑛[1]・清水 武志[1]・梅谷 涼太[1]・坂井 佑介[1]
Akito KANAZAWA, Takeshi SHIMIZU, Ryota UMETANI and Yusuke SAKAI

[1]国立研究開発法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6）
E-mail: kanazawa-a573cp@pwri.go.jp

***Key Words**: debris flow, 3D LiDAR, water level, flow velocity, discharge*

1. はじめに

土石流の数値解析の高度化には，土石流の水位，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．土石流の流動特性を把握するため，既存の土石流の観測では，CCTV カメラなどの映像機器や非接触型の水位計や流速計が用いられる．しかしながら，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多大な費用や手間を要する．他方，近年，レーザー光で対象物までの距離を計測する LiDAR が安価に入手できるようになり，時間的・空間的に高解像度な点群データが比較的容易に取得できるようになってきた．特に最近では，時系列の三次元点群データを取得できる三次元 LiDAR（以下，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[1), 2), 3)]．しかしながら，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，土石流の詳細な流動特性に関する情報は未だ不足している．

そこで，本研究では，鹿児島県桜島の野尻川で LiDAR を用いて土石流の現地観測を実施することで，流動中の土石流の三次元点群データを取得した．そして，取得した三次元点群データを用いて土石流の水位，流速を計測し，それらの時空間的な関係性について分析した．

2. 方法

(1) 観測サイトと観測方法

桜島は，日本の九州南部に位置する活火山である．桜島の南西に位置する野尻川は，流域面積 2.73 km^2，流路長 5.9 km，平均河床勾配 10.5 度の渓流である[4)]．野尻川の源流部は，北岳山頂と南岳山頂の間の西側斜面であり，活発な火山噴火により火砕物が堆積している．野尻川では，降雨によって火砕物を多く含んだ土石流が頻発しており，2025 年には計 15 回土石流が発生した[5)]．

LiDAR（Livox 社製，AVIA）による土石流の観測は，野尻川に整備された野尻川 1 号砂防堰堤（以下，堰堤という）で実施した．堰堤の水通しの幅は，13 m である．LiDAR は，堰堤左岸袖部に立てられた観測支柱の水平アームに設置し，堰堤水通しの約 8 m 上空から俯角 45 度で堰堤水通しを通過する土石流を観測した．LiDAR の計測はシングルボードコンピュータで制御し，計測インターバルは 3 分毎の 2 分間（120 秒）とした．使用した LiDAR の点率は 240,000 ポイント/秒，視野角は水平 70.4°・鉛直 77.2°，最大測定距離は 450 m，重量は約 500 g，価格は約 17 万円（2026 年 5 月現在）である．本 LiDAR は，時間の経過とともに視野内の点群密度とカバー範囲が増加するスキャン技術を採用しており[6)]，本研究では視野の中心部が周辺部に比べてスキャン密度が高い

非反復走査モードで計測した．また，国土交通省大隅河川国道事務所が堰堤に設置したCCTVの映像データも収集した．

(2) 解析対象とした土石流

本研究で解析の対象とした土石流は，2025年9月13日15:50頃に発生した土石流である．土石流が発生した時刻までの1時間雨量と連続雨量は，それぞれ7.0 mm，14.0 mmであった[5]．野尻川では1号堰堤から約1.7 km上流の7号堰堤に，土石流検知用の三段のワイヤーセンサーが設置されており（設置高は，それぞれ0.6 m, 1.2 m, 1.8 m），当該土石流により二段目までのワイヤーセンサーが切断されたことから，比較的規模の大きな土石流であったと考えられる．なお，観測を実施した1号堰堤とワイヤーセンサーが設置された7号堰堤の間には複数の砂防堰堤が整備されており，堆砂敷に土砂が捕捉されることから，土石流の水位の観測値と切断されたワイヤーセンサーの高さは必ずしも一致しない．当該土石流のCCTVの画像を**図-1**に示す．

(3) 計測データの処理，解析，検証

本研究で実施した処理の工程を**図-2**に示す．LiDARで観測したデータには，三次元の点群の情報が時系列で保存されている．解析対象とした点群データは，土石流が流下している最中の15:55頃から15:57頃までの120秒間のデータであり，120秒間全体を解析期間（以下，期間という）とした（**図-2** ①）．非反復走査モードの点群密度は，視野の中心から半径10°の範囲内では，0.1秒以内の測定において従来の32ラインのLiDARに匹敵する[6]．そこで，本研究では一定程度の点群密度を確保するため積算時間を0.1秒とし，120秒のデータを計1200フレームに分割し，抽出した（**図-2** ②）．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変換を実施した（**図-2** ③）．解析に使用する土石流の水位と流速を算出するため，点群データから水通し部における解像度0.1 mのDSM（Digital Surface Model）を作成した（**図-1**，**図-2** ④）．また，土石流の横断方向に6箇所の解析領域（以下，領域という）を設定した（**図-1**）．領域は，2 m四方の区画を水通し下流端から上流に0.5 mから2.5 mの位置に，水通し横断方向に隣接するように6箇所設定した．領域名は，左岸側から順にそれぞれ領域1から6とした．なお，**図-1**の三次元点群に示すように，非反復走査モードの計測ではLiDARとの位置関係によって領域の点群密度が異なり，右岸側の点群密度が低かった．そのため，領域によってDSMの精度は異なると考えられる．各領域における土石流の水位は，土石流流下直前の点群データ（本解析対象とした点群データのひとつ前の時点に取得された点群データ）で作成したDSMと本解析対象のDSMの高さの差分の領域内の平均値とした（**図-2** ⑤）．なお，土石流流下直前の点群データやCCTV映像によると，堰堤天端には水は流れておらず，全領域にわたってほぼ水平かつ一様に数cm程度砂礫が堆積している程度だと考えられたため，砂礫の上面を水位の基準面とした．また，土石流流下中の河床変動を考慮な

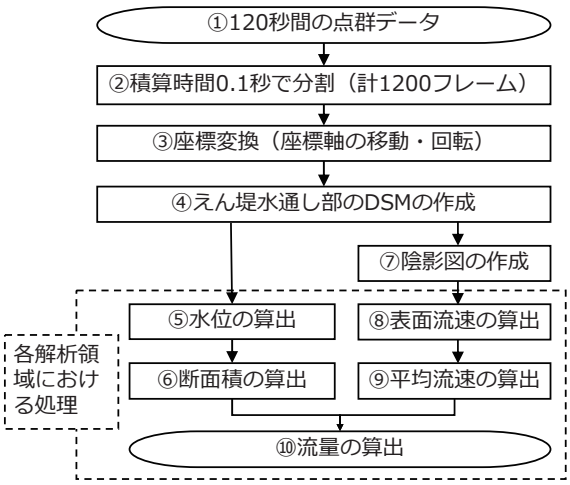


図-2 本研究の処理工程のフローチャート

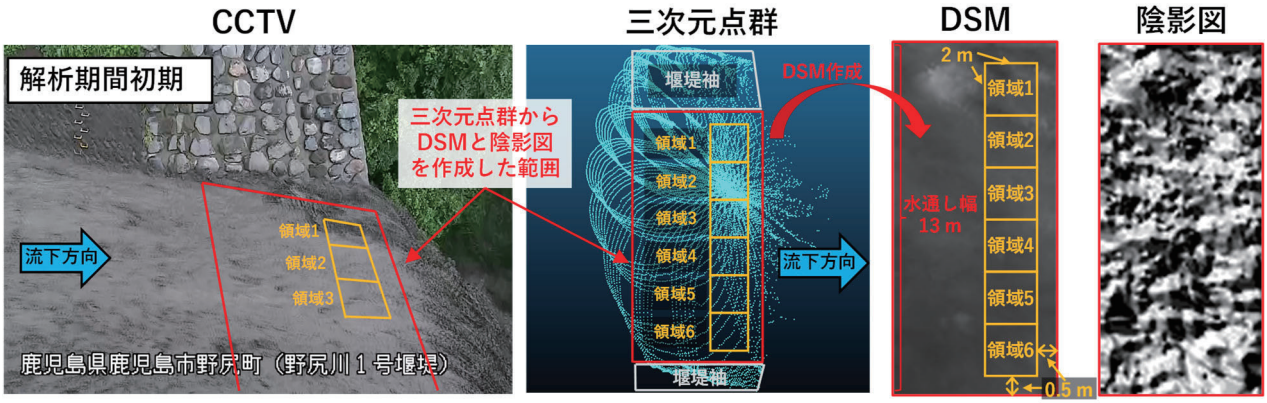


図-1 解析期間初期の土石流のCCTV画像，三次元点群，DSM，陰影図．橙色の枠は解析領域を示す．

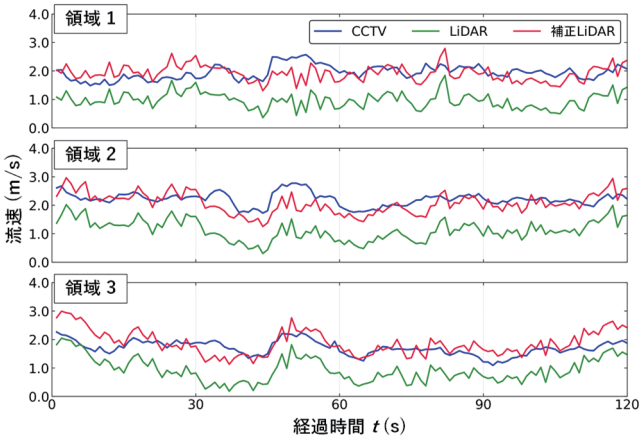


図-3 領域 1，2，3 における CCTV，LiDAR，補正した LiDAR の流速の時系列変動

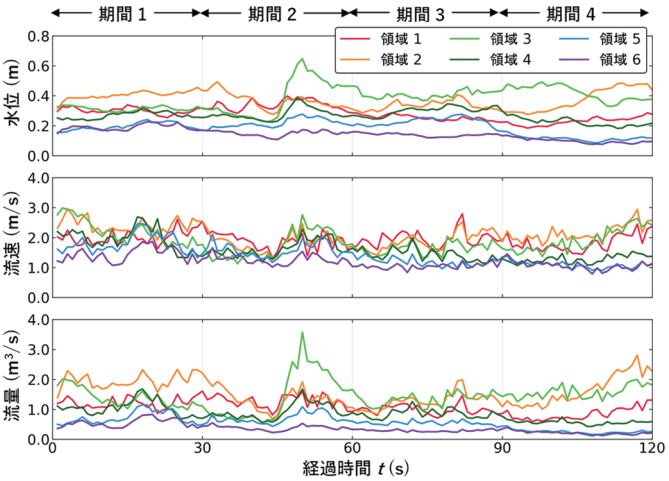


図-4 各領域における水位，流速，流量の時系列変動

表-1 各領域における水位，流速，流量の最大値，平均値，最小値．最大値と最小値の（）内の値は，それらの値が観測された経過時間 t を表す．

領域	水位 (m) 最大値	平均値	最小値	流速 (m/s) 最大値	平均値	最小値	流量 (m^3/s) 最大値	平均値	最小値
1	0.40 (47)	0.28	0.18 (95)	2.79 (82)	1.91	1.30 (44)	1.61 (30)	1.08	0.59 (96)
2	0.49 (33)	0.37	0.27 (95)	2.96 (3)	2.07	1.25 (44)	2.81 (117)	1.56	0.69 (44)
3	0.65 (50)	0.38	0.23 (43)	2.99 (2)	1.87	1.13 (37)	3.57 (50)	1.44	0.53 (42)
4	0.39 (49)	0.27	0.18 (113)	2.69 (17)	1.57	1.07 (93)	1.68 (18)	0.85	0.43 (107)
5	0.28 (50)	0.19	0.08 (109)	2.46 (18)	1.41	0.90 (110)	1.15 (18)	0.55	0.16 (108)
6	0.23 (19)	0.14	0.08 (110)	1.87 (20)	1.20	0.78 (108)	0.83 (20)	0.36	0.12 (108)

いこととしたため，水位と水深は必ずしも一致しない可能性がある．流量を算出するため，求めた水位に領域の横幅（2 m）を乗じることで断面積を算出した（**図-2 ⑥**）．次に，各領域における土石流の流速を算出するため，DSM から陰影図を作成した（**図-1**，**図-2 ⑦**）．そして，作成した陰影図を用いて土石流の表面流速を求めた（**図-2 ⑧**）．土石流の表面流速は，連続する 2 時期の陰影図を用いた Dense Inverse Search Optical Flow[7]（以下，オプティカルフローという）によって 0.1 秒間の土石流表面の移動距離を算出することで求めた．オプティカルフローで算出された表面流速の領域内の平均値を，領域における表面流速とした．水位や表面流速は，各領域内で平面的な分布を有すると考えられるが，本研究では水しぶき等のノイズを低減しつつ，比較的巨視的な視点で土石流の横断方向の流動特性の差異を把握するため，領域内の平均値を使用した．平均流速は，表面流速に 0.7 を乗じることで換算した[8]（**図-2 ⑨**）．以下，平均流速のことを単に流速という．流量は，断面積と流速を乗じることで算出した（**図-2 ⑩**）．水位，流速，流量は，0.1 秒ごとに算出されるが，解析では，時系列に並んだ 10 点のデータを平均し，1 秒間の平均値として使用した．

上記の LiDAR の流速を検証するため，射影変換し鉛直に投影した CCTV 画像を用いてオプティカルフローで流速を算出し，それぞれの結果を比較した．検証した領域は，CCTV に写る領域 1，2，3 とした．

また，全ての領域の水位と流速の時系列変動において周波数（周期）を解析したところ，全てのデータで 30 秒以上の周期であった．そこで，期間 120 秒（経過時間 t = 1～120 s）を 30 秒ごとに 4 つの期間に区分し，経過時間順にそれぞれ期間 1（t = 1～30 s），期間 2（t = 31～60 s），期間 3（t = 61～90 s），期間 4（t = 91～120 s）として解析を実施した．

3. 結果と考察

(1) LiDAR を用いて算出した流速の検証

図-3 に，領域 1，2，3 における LiDAR と CCTV から算出した流速の時系列変動を示す．それぞれの変動は，t = 30～60 にかけての増減の変化など類似した傾向を示しており，LiDAR による流速の計測が一定程度有効であることが確認された．ただし，LiDAR の流速は CCTV の流速よりも常に低い値を示した．そこで，領域 1，2，3 における CCTV と LiDAR の流速の差分の平均値 0.95 を全領域の LiDAR の流速に加えることで，LiDAR の流速を補正した．以降の解析では，補正した LiDAR の流速を用いた．なお，LiDAR の流速が CCTV の流速よりも低い値を示す原因は現段階では不明であるため，原因の解明は今後の課題である．

(2) 水位，流速，流量の時系列変動

図-4 に，各領域における水位，流速，流量の時系列変動を，**表-1** に各領域における水位，流速，流量の最大値，平均値，最小値とそれぞれの最大値，最小値が観測された経過時間を示す．水位，流速，流量ともに，各領域で細かく様々な変動をしており，最大値が観測されたタイミングも，水位では t = 19～50 s，流速では t = 2～82 s，流量では t = 18～117 s

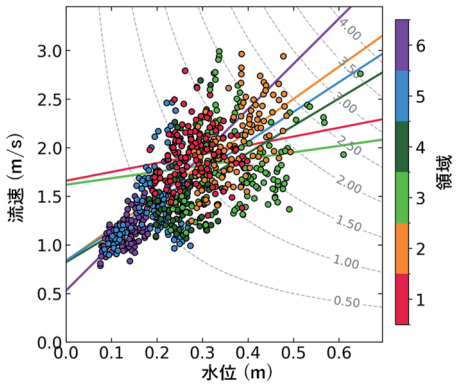


図-5 期間全体における各領域の水位と流速の関係．カラーの直線は，各領域の単回帰分析による回帰直線を表す．灰色の点線は，水位と流速から算定される等流量線を表す．

表-2 各領域の期間全体または各期間における水位と流速の関係の回帰直線の傾き，決定係数 R^2，グループ

領域	期間	傾き	R^2	グループ
1	全体	0.91	0.03	-
	1	2.23	0.04	4
	2	0.04	0.00	3
	3	2.32	0.02	4
	4	5.91	0.31	5
2	全体	3.33	0.28	-
	1	0.05	0.00	3
	2	2.41	0.21	4
	3	3.33	0.13	4
	4	2.30	0.42	4
3	全体	0.67	0.02	-
	1	14.16	0.28	5
	2	3.12	0.81	4
	3	2.62	0.09	4
	4	-5.61	0.56	1
4	全体	2.81	0.10	-
	1	6.05	0.14	5
	2	4.73	0.51	4
	3	0.10	0.00	3
	4	-2.47	0.22	2
5	全体	3.06	0.19	-
	1	10.05	0.62	5
	2	3.44	0.18	4
	3	-2.44	0.28	2
	4	5.53	0.65	5
6	全体	4.66	0.56	-
	1	8.83	0.57	5
	2	4.37	0.26	4
	3	-0.12	0.00	2
	4	7.24	0.64	5

とそれぞれ異なっていた．ただし，水位の最大値では領域 3, 4, 5 が 1 秒の差であり，流速の最大値では領域 2 と 3，領域 4，5，6 がそれぞれ 1 あるいは 2 秒の差，流量の最大値では領域 4，5，6 が 2 秒の差であった．このことから，最大値が観測されたタイミングは，全領域でみるとばらつきがあるものの，隣接する領域間であれば類似する傾向があることが分かった．全領域で最大の水位，流速，流量はいずれも領域 3 で記録されており，かつ最大の水位と流量は同じタイミングで記録された．**図-4** において，$t = 50$ s 付近で領域 3 の水位，流速，流量に山型の変化が見られており，この時期に土石流の流動形態に大きな変化があったと考えられる．

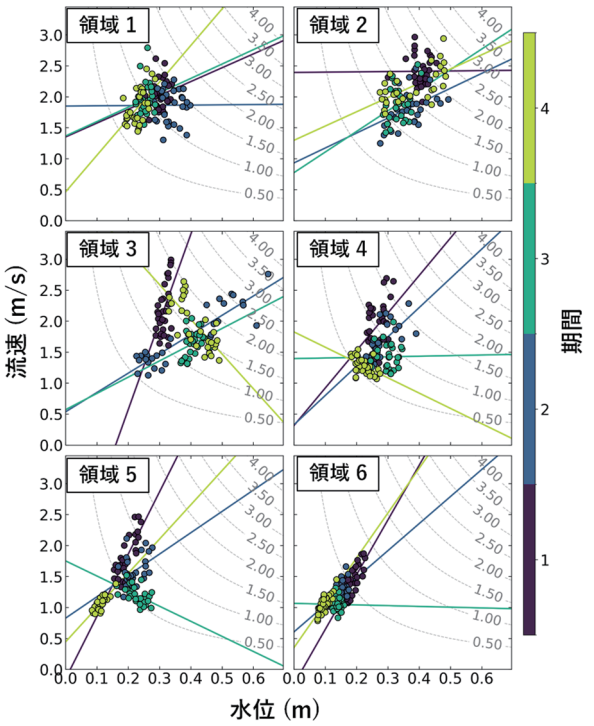


図-6 各領域，各期間の水位と流速の関係．カラーの直線は，各期間，各領域の単回帰分析による回帰直線を表す．灰色の点線は，水位と流速から算定される等流量線を表す．

また，右岸側の領域 5，6 の水位は，中央や左岸側に比べて小さい傾向にあった．これは，堰堤上流の流路が湾曲していることにより，偏流が発生したためだと考えられる．

(3) 期間全体の水位と流速の関係

図-5 に，期間全体における各領域の水位と流速の関係を示す．また，**表-2** に，**図-5** で示す水位と流速の関係における単回帰分析による回帰直線の傾きと決定係数 R^2 を示す．なお，水位と流速の関係性は必ずしも一次関数で表わされる単純な比例関係ではないと考えられるが，本研究では大凡の傾向を把握するため単回帰分析を実施した．**図-5** から，全体として，水位と流速に正の相関関係があるものの，水位が大きい場合，流速のばらつきも大きい傾向にある．これは右岸側より中央や左岸側の方が，偏流によって水位が大きくなり流れが乱れていたためだと考えられる．**図-5** や**表-2** から，各領域で，回帰直線の傾きや決定係数 R^2 は様々であるものの，領域 1 と 3 や，領域 2，4，5 では，それぞれ類似した傾きの傾向を示した．また，決定係数は領域 6 が最も高かった．これは偏流による流れの乱れが小さく，流速のばらつきが小さかったためだと考えられる．

(4) 各期間の水位と流速の関係

図-6 に，各領域，各期間の水位と流速の関係を示

表-3 グループの分類基準（回帰直線の傾きの符号と絶対値）と該当する領域・期間のケース数

グループ	回帰直線の傾きの符号	回帰直線の傾きの絶対値	該当する領域・期間のケース数
1	負（水位と流速の関係に負の相関）	大（水位の変化に対する流速の変化の感度が高い）	1
2	負（水位と流速の関係に負の相関）	小～中程度（水位の変化に対する流速の変化の感度が低～中程度）	3
3	正（水位と流速の関係に正の相関）	小（水位の変化に対する流速の変化の感度が低い）	3
4	正（水位と流速の関係に正の相関）	中程度（水位の変化に対する流速の変化の感度が中程度）	10
5	正（水位と流速の関係に正の相関）	大（水位の変化に対する流速の変化の感度が高い）	7

す．また，**表-2** に，**図-6** で示す水位と流速の関係における単回帰分析による回帰直線の傾きと決定係数 R^2 を示す．**図-6** から，水位と流速の関係性は，全ての領域で期間を通して一定の関係性である訳ではなく，時間の経過とともに関係性が変化していることが分かった．また，**表-2** から，各領域で，回帰直線の傾きや決定係数 R^2 は様々であるものの，傾きの傾向として同様の傾向をもつ領域や期間があることが分かった．そこで，回帰直線の傾きの特徴（傾きの符号と絶対値）をもとに，各領域，各期間のデータを 5 つのグループに分類した．**表-3** に，グループの分類基準と該当する領域・期間のケース数を，**表-2** に，各領域，各期間のグループ分けの結果を示す．

グループ分けの結果から，各領域，各期間の全 24 ケースのうち 20 ケースが，回帰直線の傾きの符号が「正」であるグループ 3，4，5 に分類され，大凡の傾向としては，期間全体でみた場合と同様，水位と流速に正の相関関係があることが分かった．しかし，詳細にみると回帰直線の傾きの符号が「負」である領域・期間や，傾きが「正」であっても傾きの絶対値が変化している領域・期間がみられた．このことは，流下中の土石流には，水位と流速に負の相関関係がある領域や期間があることや，水位と流速が正の相関関係であったとしても，水位の変化に対する流速の変化の程度が変化していることを示している．したがって，土石流の流動特性は，流下中に一様ではなく，数十秒という小さな時間スケールで変化していると考えられる．なお，本研究で扱った水位は，土石流流下中の河床変動を考慮しない水位であるため，河床変動の状況によっては水位と流速の関係性は変化する可能性が考えられる．現時点では河床変動の影響は評価していないため，水位と流速の関係性を正確に把握するためには，河床変動の評価は今後の課題である．また，右岸側の点群密度が低いため，算出した流速の精度も右岸側が低い可能性がある．グループ 2 に分類された領域 4，5，6 の 3 ケースは，**図-6** では回帰直線の傾きが「負」であるものの比較的プロットが密集していることから，算出した流速の精度の問題で回帰直線の傾きが「負」になった可能性も考えられる．

表-4 各領域における期間ごとのグループの推移

	期間 1	期間 2	期間 3	期間 4
領域 1	4	3	4	5
領域 2	3	4	4	4
領域 3	5	4	4	1
領域 4	5	4	3	2
領域 5	5	4	2	5
領域 6	5	4	2	5

表-4 に，各領域における期間ごとのグループの推移を示す．隣接する領域や期間において，グループ番号の近い，すなわち水位と流速における回帰直線の傾きの特徴（傾きの符号と絶対値）が類似したグループが並んでいる．このことは，土石流の流動特性が，各領域，各期間でランダムに決定されている訳ではなく，空間的・時間的自己相関を有し，隣接する領域や期間の流動特性に相互に関連して決定されていることを示唆している．

4. 結論

本研究では，LiDAR によって観測した土石流の三次元点群データを用いて，土石流の水位，流速を算出し，それらの時空間的な関係性を分析した．その結果，期間全体でみた場合，水位と流速に正の相関関係があった．ただし，期間を分割して，詳細に水位，流速の関係性を分析したところ，全ての領域で期間を通して一定の関係性である訳ではなく，時間の経過とともに関係性が変化していることが分かった．また，水位と流速の関係における回帰直線の傾きの特徴でグループ分けしたところ，大凡の傾向としては水位と流速に正の相関関係があるものの，領域・期間によっては負の相関関係を示すことや，水位の変化に対する流速の変化の程度が変化することも確認された．さらに，各領域における期間ごとのグループの推移を確認したところ，土石流の流動特性が空間的・時間的自己相関を有し，隣接する領域や期間の流動特性に相互に関連して決定されていることが示唆された．

これらのことから，土石流の流動特性は，概して

水位と流速に正の相関関係があるものの，その関係性は一様ではなく，隣接する領域や期間の流動特性に影響を受けて小さな時間・空間スケールで変化することが明らかとなった．

ただし，本研究では，LiDAR の流速が CCTV の流速よりも常に低い値を示すことや LiDAR との位置関係によって点群密度が異なり流速の精度が異なること，また河床変動の影響を評価できていないことが課題であった．今後，さらに詳細にかつ精度よく土石流の流動特性を把握するためには，これらの課題解決に向けた検討が必要である．

謝辞：本研究の実施にあたり，多くの関係者にご協力頂きました．国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所には，観測の便宜を図って頂くとともに，各種データをご提供頂きました．電通工業株式会社には，観測機器のデータ回収やメンテナンスにご協力頂きました．過年度に土木研究所火山・土石流チームに所属していました前上席研究員伊藤誠記氏（現国土交通省砂防部），影山大輔氏（現国土交通省北海道開発局），池島剛氏（現日本工営株式会社）には，研究の方向性等のご助言や観測体制の構築にご協力頂きました．現火山・土石流チーム各位には，解析結果の議論や現地調査の実施にご協力頂きました．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) Aaron, J., Spielmann, R., McArdell, B. W., and Graf, C.: 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, Vol. 50, e2022GL102373. https://doi.org/10.1029/2022GL102373, 2023.
2) Spielmann, R. and Aaron, J.: A new method for detailed discharge and volume measurements of debris flows based on high-frequency 3D LiDAR point clouds; Illgraben, Switzerland, Engineering Geology, Vol. 329, 10.1016/j.enggeo.2023.107386, 2024.
3) Kaneko, T., Imaizumi, F., Osada, T., Yousefi, S. and Takayama, S.: Monitoring debris flow dynamics: insights from 4D-LiDAR observations in Ohya landslide, Central Japan, Geomorphology, Vol. 482, 10.1016/j.geomorph.2025.109800, 2025.
4) 国土交通省九州地方整備局大隅工事事務所:桜島の砂防，2001.
5) 国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所：令和８年土石流調査情報（桜島地域），第１報 令和８年８月１日８時現在, https://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/files/Content/1590/pdf/20260108report.pdf，2026. 05. 22.
6) Livox Technology Company Limited: Livox AVIA User Manual v1.0, 2020.
7) Kroeger, T., Timofte, R., Dai, D., and Gool, L.V.: Fast optical flow using dense inverse search, Proceedings of the European Conference on Computer Vision, ECCV, https://doi.org/10.1007/978-3-319-46493-0_29, 2016.
8) 水山高久，上原信司：土石流の水深と流速の観測結果の検討，砂防学会誌，37 巻，4 号， pp. 23−26，1984.

（2026.5.29 受付）