

研究概要・成果の要旨

研究テーマ：溪流源頭部における土石流の発生・発達過程を考慮した流出土砂量の予測法開発

研究代表者：氏 名（所属）高山 翔揮（京都大学防災研究所）

【研究概要】（200 文字程度。この部分の記述は、中間評価・事後評価を公表する際に、評価コメントと併せてホームページで公開します）〔1 行 40 文字です。5 行程度を目安に記載してください。〕

河床勾配 20° 以上の溪流源頭部における土石流の発生・発達過程は未解明な部分が多く、溪流源頭部からの流出土砂量を正確に予測することは難しい。本研究では、大谷崩一ノ沢での現地観測と急勾配水路を用いた実験により土石流の発生・発達過程を解明し、その過程を予測できる数値モデルを開発する。これらの成果をもとに、溪流源頭部における不安定土砂の貯留状況と流出土砂量との関係性を考慮したハード・ソフト対策を検討する。

【研究成果の要旨】

(1) 溪流源頭部における土石流の発生・発達過程の解明

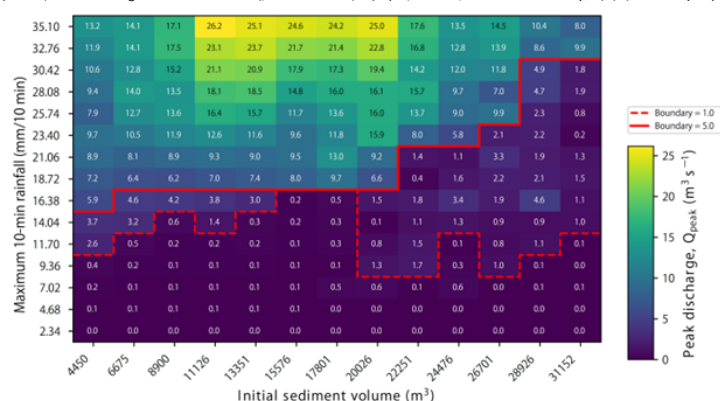
2023～2025 年に大谷崩一ノ沢での土石流観測および実験を行った。水圧センサ観測では 12 イベント中 7 件で過剰間隙水圧を確認したが、流下距離との明確な相関は認められなかった。4D-LiDAR 観測では土石流段波流下時の 3 次元点群データを取得し、表面位・河床位の変動や表面流速の時空間変化を把握した。さらに、土壌水分観測により土石流発生時においても流路溪岸部が不飽和の場合があることを示した。急勾配水路実験では、河床堆積物の含水率と細粒分の増加は土石流先頭部の流速を増加させることを示した。

(2) 溪流源頭部からの土砂流出量の予測法開発

粒子衝突応力とクーロン摩擦応力を考慮した既往の飽和流の抵抗則を基に、プラグ形成および間隙水位低下を考慮した不飽和流にも適用可能な抵抗則を提案した。この抵抗則を導入した地表面流モデルと、深さ平均 Richards 方程式による地下水流モデルを連成し、飽和・不飽和浸透過程を考慮可能な数値モデルを構築した。本モデルは、河床侵食に伴う不飽和流の発達過程や、表面位・間隙水位の時空間変化の水路実験結果と良好に再現した。

(3) 溪流源頭部の不安定土砂の貯留状況に応じたソフト・ハード対策の在り方の検討

提案モデルを大谷崩一ノ沢上流域に適用し、感度分析により降雨量と貯留土砂量が上流域出口におけるピーク流量に与える影響を検討した。その結果、小規模土石流（ピーク流量 $1.0 \sim 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の発生降雨閾値は貯留土砂量の影響をあまり受けない一方、大規模土石流（ピーク流量 $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上）の発生降雨閾値は貯留土砂量の増加に伴い高くなる傾向が確認された（右下図）。また、ピーク流量は、貯留土砂量が $10,000 \sim 20,000 \text{ m}^3$ 程度で最大となり、それより多くても少なくても低下した。ピーク流量と貯留土砂量との関係は単純な線形関係にないため、不安定土砂の貯留状況に応じた対策を行うには、本モデルにより貯留土砂量および降雨量とピーク流量との関係を事前に整理した上で、貯留土砂量の定期的なモニタリングに応じて砂防堰堤の除石工事や警戒避難情報の発令基準を適宜見直すことが有効であると考えられる。



河川砂防技術研究開発 【成果概要】

氏 名 (ふりがな)		所 属		役 職
①研究代表者		高山翔揮 (たかやましょうき)		京都大学 防災研究所
②研究テーマ	名称	一般型【溪流源頭部における土石流の発生・発達過程を考慮した流出土砂量の予測法開発】		
③研究経費 (単位: 万円)		令和5年度	令和6年度	令和7年度
※端数切り捨て。		1 7 1 万円	1 4 3 万円	1 8 4 万円
		総 合 計 4 9 8 万円		
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏 名		所属機関・役職 (※令和 年3月31日現在)		
今泉文寿		静岡大学学術院農学領域・教授		
⑤技術研究開発の目的・目標 (様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)				
【目的】				
山地溪流を流下する土砂量の予測は、合理的な砂防計画の策定のために不可欠である。しかし、河床勾配 20° 以上の溪流源頭部における土石流の発生・発達過程は未解明な部分が多く、溪流源頭部からの流出土砂量を正確に予測することができない。このことは、計画基準点まで流出する土砂量の予測を困難なものにし、効果的な砂防事業の実施の妨げとなっている。本研究では、現地観測と水路実験により溪流源頭部における土石流の発生・発達過程を明らかにし、その過程を予測できる数値モデルを開発することを目的とする。これにより、溪流源頭部からの流出土砂量の予測精度を格段に向上させ、溪流源頭部における不安定土砂の貯留状況をふまえた砂防計画の実現に繋げる。				
【目標】				
土石流の発生・発達過程の実態を解明するために、土石流が頻発する大谷崩一ノ沢源頭部において、ビデオカメラ等を用いた現地モニタリングとドローンを用いた地形計測を行う。そのうえで、溪流源頭部における土石流の発生・発達機構を明らかにするための水路実験を行う。この実験をベースに溪流源頭部における土石流の発生・発達過程を予測できる数値モデルを構築し、大谷崩での現地観測との比較を通じてその妥当性を検証する。これらの成果をもとに、溪流源頭部における不安定土砂の総量や分布を考慮したハード・ソフト対策法を提案する。				

⑥研究成果

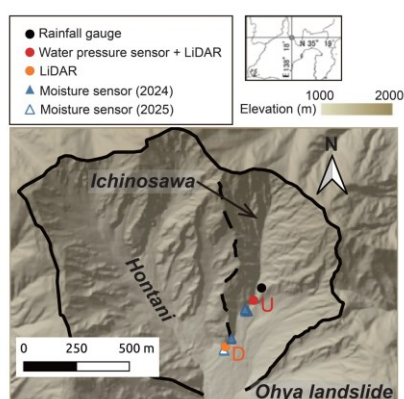
(1) 渓流源頭部における土石流の発生・発達過程の解明

(1-1) 大谷崩一ノ沢での現地観測

調査対象地は、静岡県の安倍川最上流部に位置する大谷崩一ノ沢である（図1-1）。一ノ沢は、流域面積約0.3 km²、流路長約1 km、溪床勾配は上流側の観測地点であるU地点では約20°、下流側の観測地点であるD地点では約15°である。地質は砂岩、頁岩および砂岩・頁岩の互層から構成されている。また、一ノ沢では年平均5回の土石流が発生しており、土石流観測の適地となっている。

本研究では、2023年～2025年にかけてドローンによる定期的な地形計測、降雨観測、タイムラプスカメラによる土石流観測に加え、土石流内部の間隙水圧観測、LiDARによる土石流観測、河床堆積物の体積含水率観測を実施した。観測期間中には、2023年に5回、2024年に5回、2025年に2回の計12回の土石流イベントが確認された。これらのうち、間隙水圧データは3イベント、LiDARデータは6イベント、体積含水率データは4イベントで取得できた。

(a)



(b)

土石流発生日	最大10分間雨量 (mm)	総雨量 (mm)	間隙水圧データ	LiDARデータ	体積含水率データ
2023/06/02	10.0	127.6	-	-	-
2023/06/09	19.0	119.0	○	-	-
2023/08/03	11.0	55.0	-	○	-
2023/08/09	7.0	16.0	○	-	-
2023/08/14	3.0	22.0	○	○	-
2024/06/28	6.4	113.6	-	-	-
2024/07/16	8.6	110.8	-	-	-
2024/08/31	13.0	109.0	-	○	○
2024/10/05	14.2	131.0	-	○	○
2024/11/02	-	-	-	-	-
2025/7/14	9.8	248.6	-	○	○
2025/9/5	5.8	163.4	-	○	○

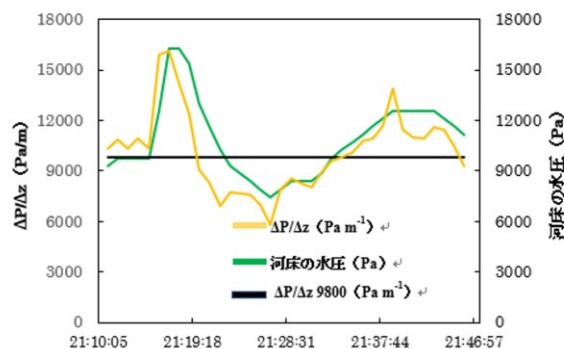
-: 欠損, ○: 取得

図1-1. (a) 大谷崩の地図と観測機材設置位置, (b) 土石流発生状況と観測データの取得状況

(1-1-1) 土石流内部の間隙水圧の観測

土石流内部の過剰間隙水圧の発生状況をモニタリングするため、露岩している流路側壁（図1-1のU地点）に孔を掘削し、深さ方向に複数の水圧計を設置して間隙水圧勾配 ($\Delta P/\Delta z$) を算出した。2023年8月14日の土石流イベントでは、21時17分で $\Delta P/\Delta z$ が16,130 Pa m⁻¹を示し、静水圧勾配 (9,800 Pa m⁻¹) を大きく上回った（図1-2a）。これは、細粒土砂の間隙水中の浮遊、レイノルズ応力、ダイレイタンスーなどにより過剰間隙水圧が発生したものと考えられる。2020～2023年に観測された12の土石流イベントのうち7イベントで、過剰間隙水圧を伴う段波が確認された。一方で、間隙水圧勾配と流下距離（U地点から停止地点までの距離）との間に明確な相関は認められず（図1-2b）、流下距離は間隙水圧だけでなく、降雨条件や河床堆積物の厚さ・飽和度など、複数の要因の影響を受ける可能性が示唆された。

(a)



(b)

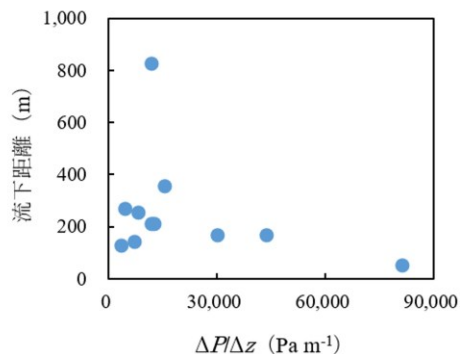


図1-2. 土石流内部の間隙水圧勾配の観測結果 (a) 2023年8月14日の間隙水圧勾配 ($\Delta P/\Delta z$) と河床面に作用する水圧の時間変化、(b) 間隙水圧勾配と大谷大滝からの土石流流下距離との関係

(1-1-2) 4D-LiDAR による観測

土石流の表面位および表面流速の時空間的变化を把握するために、1秒間に72万点の座標値を取得可能な4D-LiDARをU地点およびD地点（図1-1a）に設置した。2023年8月14日の土石流イベントでは、D地点において高い時空間分解能をもつ土石流の表面位データを取得した（図1-3a）。また、取得した点群データから陰影図を作成し、PIV（粒子画像流速測定法）を適用することで、土石流の表面流速の時間変化を定量化した（図1-3b）。この表面流速は、ビデオカメラ映像から礫の移動を追跡して求めた表面流速と概ね一致した。さらに、土石流段波の停止に伴い、逆勾配を形成しながら堆積が上流側へ遡上する過程を定量的に捉えることができた（図1-3c）。

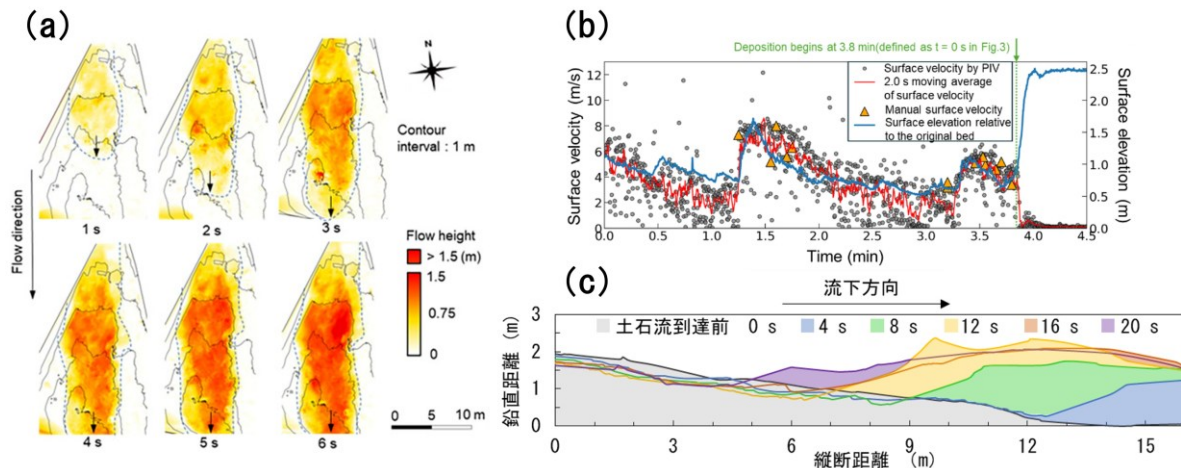


図1-3. 2023年8月14日のD地点におけるLiDAR観測結果 (a) 流動深の時空間的变化, (b) 表面流速と表面位の時間変化, (c) 土石流堆積過程の縦断面図

(1-1-3) 河床堆積物内部の水分動態の観測

急勾配溪流における河床堆積物の含水率の実態を明らかにするため、一の沢の土石流扇状地にTDR式土壌水分計を設置した。土石流扇状地上流部にNo. 1-4の土壌水分計を設置し、土石流扇状地下流部の流路右岸側斜面にNo. 5-8の土壌水分計を設置した（図1-1a）。図1-4に2024年8月2日から2024年10月18日までの河床堆積物の体積含水率の時間変化を示す。土壌水分計毎に体積含水率の値は大きく異なるが、10分間雨量の時間変化に連動して体積含水率が変動した。8月31日、10月5日の両方のイベントにおいて、No. 1、2は最大体積含水率が0.30以下と明らかな不飽和状態であるのに対し、No. 5-8の多くは体積含水率が0.30以上と飽和に近い状態まで上昇した。

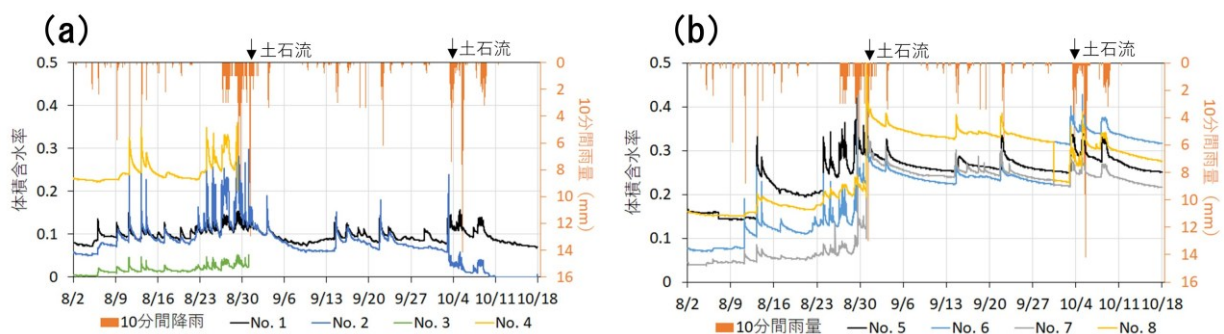


図1-4. 2024年8月2日から10月18日までの河床堆積物の体積含水率の時間変化 (a) 土石流扇状地上流地点、(b) 土石流扇状地下流地点

(1-2) 急勾配水路を用いた実験

急勾配溪流における土石流の発生・発達過程を模擬する水路実験を行った。全長3.6 m、幅0.1 m、勾配25°の開水路を使用した（図1-4a）。水路下流部の計測地点には底部に水圧計を設置して水路床に作用する間隙水圧を計測し、上部には超音波水位計を設置して流れ

の表面位を計測した。また、水路側方にビデオカメラを設置し、土石流の発生・発達過程を撮影した。実験では、まず土砂を水路床に厚さ3 cmで敷き均した。次に、土砂が移動しない程度の弱い流量の水を上流端から供給して河床堆積物の体積含水率を調節した。その後、上流端から160 cm³ s⁻¹の水を供給し、土石流を発生させた。河床堆積物の体積含水率と細粒分の割合が異なる条件下で実験を行い、各実験で少なくとも3回以上繰り返した。

上流端から供給された水が河床堆積物を侵食して土石流が発達した。計測された間隙水圧および静水圧は、土石流先頭部が計測地点を通過したタイミングに急激に上昇した（図1-4b）。間隙水圧が静水圧を下回っている時間帯は不飽和流が通過していたと考えられる。河床堆積物の体積含水率および細粒分の割合が大きいほど、土石流先頭部の流速は大きくなった（図1-4c, e）。一方、これらの条件は相対間隙水位にはほとんど影響を与えなかった（図1-4d, f）。この結果は、不飽和流内部の間隙水位は主として水路勾配に支配される可能性を示唆している。

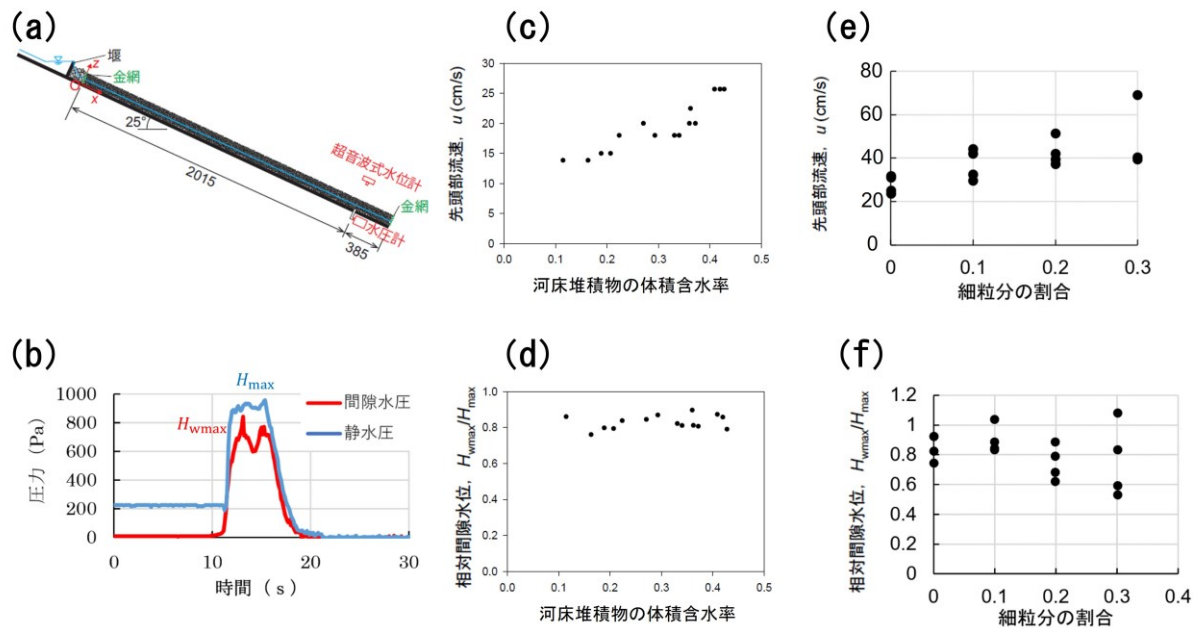


図 1-4. 実験概要と結果 (a) 実験水路概要図、(b) 表面位と間隙水位の時間変化の一例、(c) 河床堆積物の体積含水率と先頭部流速との関係、(d) 河床堆積物の体積含水率と相対間隙水位との関係、(e) 土石流に含まれる細粒分の割合と先頭部流速との関係、(f) 土石流に含まれる細粒分の割合と相対間隙水位との関係

(2) 溪流源頭部からの土砂流出量の予測法開発

河床勾配 20° 以上の急勾配溪流では、不飽和河床堆積物上を不飽和流が発達する現象が頻繁に観察される。本研究では、飽和・不飽和流の双方を扱える抵抗則を新たに提案し、その抵抗則を用いた地表面流（飽和・不飽和流、土砂流、掃流砂流）を表す浅水流方程式と地下水流を表す深さ平均された Richards 方程式の連成モデルを構築した。

(2-1) 飽和・不飽和流の抵抗則

粒子衝突応力とクーロン摩擦応力を考慮した既往の飽和流抵抗則（高橋ら，京大防災研年報，1996）を基に、プラグ形成および間隙水位低下を考慮した不飽和流にも適用可能な抵抗則を提案した。断面平均流速（ $\bar{u}$ ）を表す式は次のように表される：

$$\bar{u} = \frac{2}{5} \sqrt{G} h^{1.5}; \quad G = \frac{\rho_m g \sin \theta}{\lambda^2 d^2 \sigma a \sin \phi} \left\{ 1 - f_{cs} \left[1 - \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{h_w}{h} \right)^2 \right] \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right\} \quad (1)$$

ここに、 h は流動深、 ρ_m は流れの密度、 λ は線濃度、 d は粒径、 σ は粒子密度、 a はBagnoldの粒子衝突係数、 ϕ は内部摩擦角、 h_w は間隙水位、 f_{cs} は粒子圧力の中での静的圧力の割合である。

既往の定常等流条件下における不飽和流（Plug flow）、飽和流（Mature flow）、土砂流（Sheet flow）の実験（Larcher et al., J Hydraul Res, 2007）との比較により、提案した抵抗則の妥当性を検証した。Bagnoldの粒子衝突係数（ a ）が0.55のとき、飽和・不飽和流（Plug and

Mature flow) の断面平均流速は実験と良好に一致した (図2-1a)。

(2-2) 数値モデル開発と実験との比較

本研究は地表面流と地下水流の連成モデルを構築した。地表面流モデルはTakahashi et al. (J Hydraul Eng, 1992)により構築された飽和流、土砂流、掃流砂流を考慮した数値モデルが基に、本研究の抵抗則を導入して不飽和流を考慮可能にした。地下水流のモデルは、Pan et al. (J Hydrol., 2015)の深さ平均Richards方程式を用い、河床堆積物の飽和・不飽和浸透過程を効率的にシミュレートした。河床面を介する浸透流束はダルシー則で表した。

数値モデルは、水路上流端から供給された表流水が河床堆積物を侵食して不飽和流が発達するプロセスを表現した (図2-1b)。その流れの表面位と間隙水位の時空間変化は、本研究の実験と良好に一致した (図2-1c)。

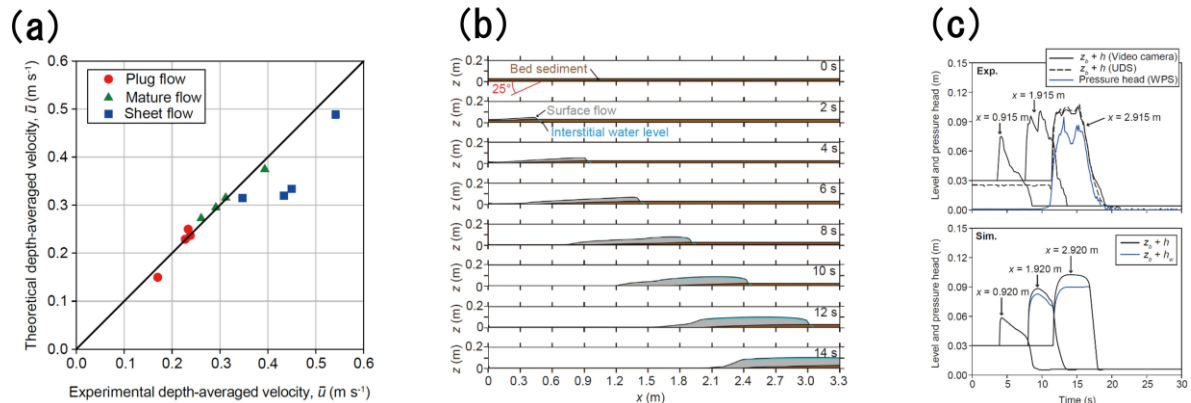


図 2-1. モデルと実験との比較結果 (a) 抵抗則と実験の断面平均流速の比較、(b) 不飽和流の発達過程に関する計算結果、(c) 実験と計算の流れの表面位と間隙水位

(2-3) 大谷崩一ノ沢へのモデル適用

本研究で開発した数値モデルを2021年7月13日の土石流イベントに適用した。本計算では、土石流発生域である一ノ沢上流域 (大谷大滝 (図1-1のU地点) より上流側) を計算範囲とし、一ノ沢上流域における土石流の発生・発達過程をシミュレートした。計算に用いた降雨条件は一ノ沢上流域での転倒ます型雨量計による観測結果であり (図2-1a)、地形条件は2021年7月12日にUAVにより地形測量で得られた地形データである (図2-2b)。河床堆積物の保水性や透水性に関するパラメータは一ノ沢で採取した土砂の土質試験結果を使用し、それ以外のパラメータは一般値を与えた。

本計算は流路に沿った一次元の計算のため、降雨は瞬時に流路に集まるものと近似し、各地点の集水面積で重み付けして降雨を与えた。

$$P_i = \frac{P_{\text{minute}} N \Delta A}{60000 L_x B} \quad (2)$$

ここに、 P_i は各計算点の降雨量[m/s]、 P_{minute} は1分間雨量[mm/min]、 N は計算点の数、 ΔA は上流計算点からの集水面積の増分、 L_x は流路長、 B は流路幅である。

図2-3にシミュレーションの結果を示す。降雨ピーク (4000秒) に伴う地下水位上昇により発生した表流水が河床堆積物を侵食し、ピーク流動深2.5 m、ピーク流量12 m³/sの不飽和流の発達過程が再現された (図2-3)。現地観測のビデオ映像では、ピーク流動深が3.4 mを確認しており、流動深は過小評価しているものの、不飽和流の発達自体は一致している。計

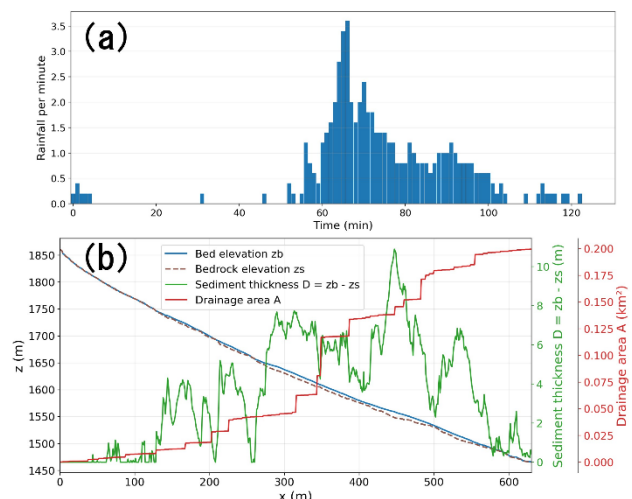


図 2-2. 計算の (a) 降雨条件、(b) 地形条件

算は流路幅を5 m一定としたが、観測地点は約3 mの狭窄部であり、これが過小評価の主要因の可能性がある、流路幅の縦断変化を考慮することが今後の課題である。

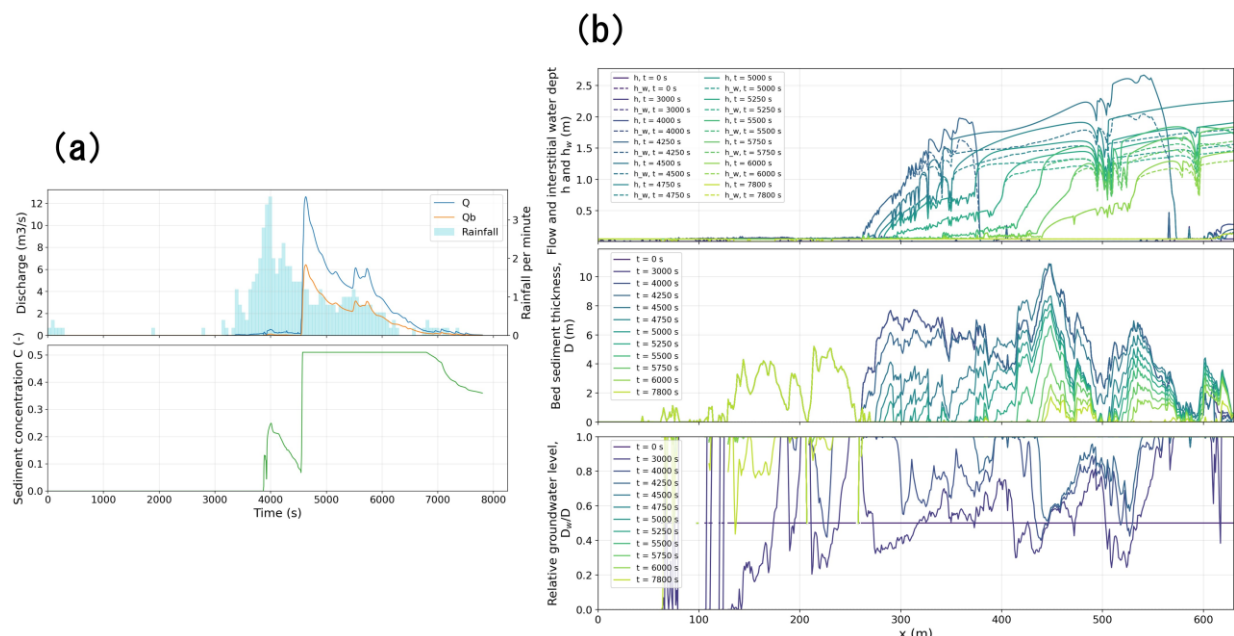


図 2-3. 大谷崩一ノ沢を対象としたシミュレーションの結果 (a) 一ノ沢上流域出口における流量 Q ・流砂量 Q_b ・土砂濃度 C の時間変化、(b) 流れの流動深 h ・間隙水深 h_w 、河床堆積物の厚さ D 、相対地下水位 D_w/D の時空間変化

(3) 渓流源頭部の不安定土砂の貯留状況に応じたソフト・ハード対策の在り方の検討

2-3 節の大谷崩一ノ沢のシミュレーションを基に、一ノ沢上流域における降雨量と貯留土砂量が、上流域出口のピーク流量および累積流出土砂量に与える影響を検討した。降雨量は図 2-3a のハイトグラフを 0.1~1.5 倍、河床堆積物厚さ D は 0.4~2.0 倍に変化させた。解析の結果、小規模土石流（ピーク流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 超）の降雨閾値は貯留土砂量の影響をあまり受けない一方、大規模土石流（ $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 超）の降雨閾値は貯留土砂量の増加に伴い高くなる傾向が確認された。また、ピーク流量および累積流出土砂量は、貯留土砂量が $10,000 \sim 20,000 \text{ m}^3$ 程度で最大となり、それより多くても少なくても低下した（図 2-4）。ピーク流量と貯留土砂量との関係は単純な線形関係にないため、源頭部の貯留土砂量を考慮した砂防事業を検討するためには、本研究で提案した数値モデルを用いて、事前に源頭部からの土砂流出シミュレーションを実施し、源頭部の貯留土砂量および降雨量に対する土石流ピーク流量の関係（例：図 2-4）を整理しておくことが有効である。その上で、渓流源頭部における貯留土砂量の定期的なモニタリングを行い、その変動に応じて砂防堰堤の除石工事や警戒避難情報の発令基準を適宜見直すことが、効果的なソフト・ハード対策の実施につながると考えられる。

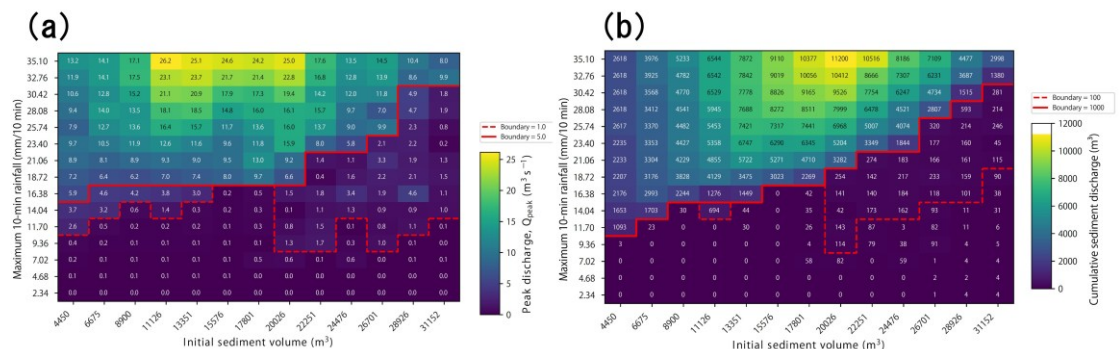


図 2-4. 一ノ沢上流域における降雨量および貯留土砂量が一ノ沢上流域出口からの (a) ピーク流量、(b) 累積流出土砂量に与える影響

次に、一ノ沢上流域下流端に砂防堰堤を設置した場合の効果を数値モデルにより検討した。ダム高を 0～15 m に変化させた結果、堰堤なしの場合に $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$ であったピーク流量は、ダム高 3 m で $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ まで低減した（図 2-5）。ダム高の増加に伴い、ピーク流量および侵食量はいずれも単調に減少した。源頭部では大規模な砂防堰堤の施工は一般に困難と考えられるが、ダム高 3 m 程度の小規模な堰堤であってもピーク流量が 40% 低減することが確認されており、小規模堰堤の整備は現実的かつ有効なハード対策の一つと考えられる。

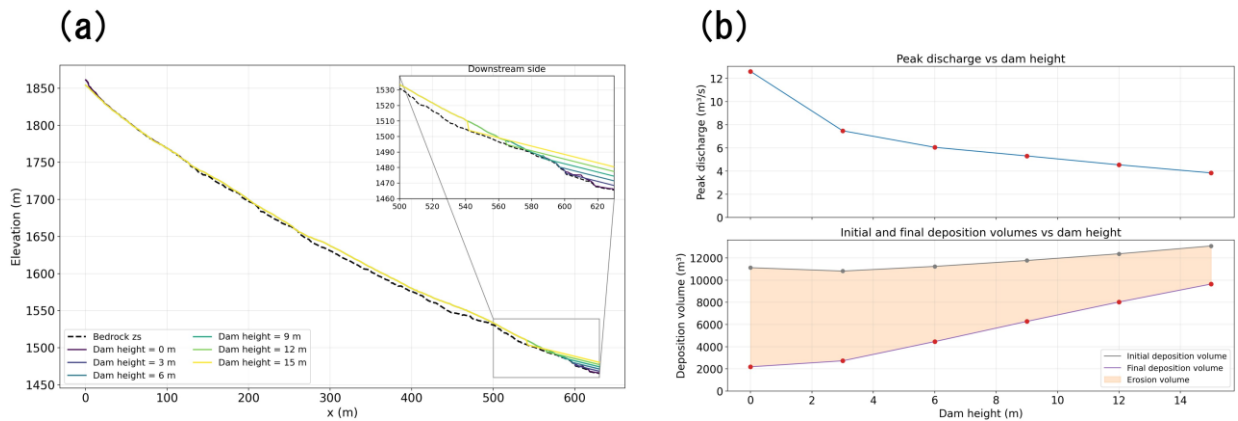


図 2-5. 源頭部への設置を想定した砂防堰堤の効果 (a) ダム高が 0 m、3 m、6 m、9 m、12 m、15 m のときの河床高の縦断分布. (b) ダム高が土石流のピーク流量と侵食量に与える影響

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・ これまでに発表した代表的な論文
- ・ 著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)
- ・ 国際会議、学会等における発表状況
- ・ 主要雑誌・新聞等への研究成果発表
- ・ 学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・ 研究成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・ 企業とのタイアップ状況
- ・ 特許など、知的財産権の取得状況
- ・ 研究成果による受賞、表彰等

高山翔揮・今泉文寿(2023) 溪流源頭部における土石流の発生・発達過程に関する研究, 令和5年度砂防学会研究発表会概要集, 105–106

金子竜己・長田知也・今泉文寿・高橋英成・高山翔揮(2024) 4D-LiDARにより観測された土石流の発達・停止特性, 令和6年度砂防学会研究発表会概要集, 67–68

高橋英成・大屋俊介・今泉文寿・高山翔揮(2024) 荒廃溪流源頭部における土石流流下特性と間隙水圧との関係, 中部森林研究, 72:45–48

金子竜己・長田知也・今泉文寿・高橋英成・高山翔揮(2024) LiDAR自動観測システムを用いた荒廃地源頭部における土石流観測, 中部森林研究, 72:49–53

金子竜己・今泉文寿・長田知也・高山翔揮(2025) 荒廃溪流源頭部における4D-LiDARを用いた土石流の侵食・堆積特性, 中部森林研究, 73:26–29

Oya S, Imaizumi F, Takayama S (2024) Field monitoring of pore water pressure in fully and partly saturated debris flows at Ohya landslide scar, Japan. Earth Surf Dynam 12:67–86. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-67-2024>

Takayama, S., Karasawa, R., Imaizumi, F. (2024) Depth-averaged mixture model for development processes of debris flows over a steep unsaturated mobile bed. Landslides 21, 1173–1187. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02202-8>

Kaneko T, Imaizumi F, Osada T, et al (2025) Monitoring debris flow dynamics: insights from 4D-LiDAR observations in Ohya landslide, Central Japan. Geomorphology (Amst) 482:109800. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109800>

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

2023年7月18日に静岡市アザレアで開催されたGTフレーム技術講習会(参加者50名)において、「土石流の発生過程の実態」というタイトルで、大谷崩一ノ沢での研究成果についても発表し、社会への情報発信を行った。

2025年8月5日に静岡商工会議所で開催された令和7年度安倍川流域大規模土砂災害対策検討会 防災講演会(参加者58名)において、「安倍川流域における土砂移動特性と土砂災害」というタイトルで、大谷崩一ノ沢での研究成果について情報発信を行った。

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

第13回中部森林学会学生発表奨励賞，防災部門，高橋英成（静岡大学総合科学技術研究科），
荒廃溪流源頭部における土石流流下特性と間隙水圧との関係

第14回中部森林学会学生発表奨励賞，防災部門，金子竜己（静岡大学総合科学技術研究科），
荒廃溪流源頭部における4D-LiDARを用いた土石流の侵食・堆積特性

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果

- 大谷崩一の沢において、水圧計、4D-LiDAR、TDR式土壌水分計を用いた現地観測を行い、4D-LiDARにより土石流の表面位と表面流速を高時空間分解能で計測可能なことを実証し、源頭部における土石流の間隙水圧、侵食・堆積過程、河床堆積物の含水率変化の実態を明らかにした。
- 急勾配溪流における土石流の発達過程を模擬する水路実験により、河床堆積物の材料および含水率が土石流の発達特性（先頭部流速、流動深、間隙水位など）に与える影響を定量的に解明した。
- 地表面流（飽和・不飽和流、土砂流、掃流砂流）を表す浅水流方程式と地下水流を表す深度平均Richards式を連成する数値モデルを開発した。本モデルは急勾配溪流における土石流の発達過程に関する水路実験結果を良好に再現し、一の沢上流域への適用を通じて、降雨量や貯留土砂量が土石流の発生降雨閾値およびピーク流量に与える影響を定量化した。

今後の課題・展望等

- 4D-LiDARで取得した土石流の流動深、表面流速、水面勾配を土石流の構成則に与えることで、容積土砂濃度の時系列変化を推定する手法を考案し、その検証を進めている。
- 開発した数値モデルは、源頭部における不飽和流の発達過程を良好に再現した一方で、不飽和流が土石流扇状地に流出し、停止・堆積する過程については十分な検証が行えておらず、今後の課題である。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

4D-LiDAR自動観測システムを大谷崩一の沢に設置し、溪流源頭部において急激に変化する土石流の表面位・河床位や表面流速の時空間的变化を計測可能なことを実証した。この4D-LiDAR自動観測システムは、安価であり、電源供給がないエリアに設置することができるため、山地の自然溪流や砂防堰堤堆砂数などの河床変動を計測するうえで非常に有用であり、広く普及する可能性がある。

また、本研究では、源頭部における貯留土砂量の変動が土石流の発生降雨閾値とピーク流量に大きく影響することが明らかとなった。大規模な土石流の発生に対応する降雨閾値は、貯留土砂量の増加に伴い上昇する傾向が定量的に確認された。一方で、貯留土砂量と土石流ピーク流量との関係は単純ではなく、中程度の貯留土砂量の条件下で最も大きなピーク流量が発生しやすいことが示された。これらの結果は、従来のように降雨量のみを基準とした評価に加え、源頭部における貯留土砂量を考慮した土石流リスク評価の必要性を示唆している。そのため、砂防事業の計画・運用においては、本研究で構築した数値モデルを活用し、あらかじめ貯留土砂量および降雨量に対する土石流ピーク流量の応答関係を整理しておくことが有効であると考えられる。さらに、源頭部における貯留土砂量の継続的なモニタリングを実施し、その変動に応じて砂防堰堤の除石計画や警戒避難情報の発令基準を柔軟に見直すことにより、より実効性の高いソフト・ハード対策の運用が可能になると考えられる。

加えて、源頭部における砂防堰堤の整備は、河床勾配の緩和を通じて土石流のピーク流量を低減する有効な手段であることが示された。源頭部では大規模構造物の施工が制約を受ける場合が多いものの、本研究ではダム高3 m程度の小規模な堰堤であってもピーク流量が約40%低減することが確認されており、小規模堰堤の段階的な整備は現実的かつ有効な対策オプションとなり得る。