

勾配変化が石礫型土石流の流動形態および 粒度偏析に及ぼす影響

EFFECTS OF STREAM GRADIENT CHANGES ON DEBRIS-FLOW MODES AND SEDIMENT SORTING

和田 孝志¹・小林 和希²・三輪 浩³

Takashi WADA, Kazuki KOBAYASHI and Hiroshi MIWA

¹鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8550 鳥取市湖山町 4 丁目 101 番地)

E-mail: wada-t@tottori-u.ac.jp

²アサヒコンサルタント株式会社 (〒680-0911 鳥取市千代水 4 丁目 28 番地)

E-mail: k.kobayashi@asahic.co.jp

³鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8550 鳥取市湖山町 4 丁目 101 番地)

E-mail: miwa-h@tottori-u.ac.jp

Key Words: debris flow mode, sediment sorting, gradient change, sediment mixture, flume experiment

1. はじめに

豪雨時に山地溪流で発生する石礫型土石流は、水と砂礫が高濃度に混合しながら流下する現象であり、その流動形態は発生条件（供給流量、供給土砂量）、溪流条件（溪流幅、溪床勾配、溪床材料厚）、土砂の粒度構成などによって異なることが知られている¹⁾。このような土石流の内部では土粒子同士の衝突や接触により土粒子を分散させる力が生じるため、土粒子は適当な間隙を保持しながら流下する。土石流内部の土粒子の分散機構は土石流の流動形態を決定づける基本的な要素であり、重力の流れ方向成分および（流動深に対する）土粒子径の影響を強く受ける。したがって、これらに強く作用する「溪床勾配」および「土砂の粒度構成」は土石流の流動形態に影響を及ぼす主要な要素であると考えられる。

土石流は連続的に勾配が変化する山地溪流を流下するため、流下に伴って溪床勾配変化の影響を受けて流動形態がいくつかの段階に変化する。土石流流動域よりも緩い勾配（14～15°以下）においては、重力の流れ方向成分の減少により流動層全体の土粒子分散が維持できなくなるため、流動層の上部が水流層、下部が集合流動層を形成する流れ（掃流状集合流

動または土砂流）となる¹⁾。集合流動層の厚さは勾配が緩くなるほど薄くなり、さらに勾配が緩くなると掃流砂の形態（砂の移動層厚が粒径の 1～2 倍程度）に移行する。このことから、石礫型土石流は溪床勾配が緩くなる溪流出口（扇頂部）に到達した時点で全体的には掃流状集合流動（もしくは掃流砂）の流動形態になっていると考えられる。したがって、土石流氾濫被害をより厳密に予測するためには、山地溪流を流下する間に土石流の流動形態が溪床勾配変化によってどのように変化するかを把握し、溪流出口より供給される土石流の性状をより正確に捉える必要がある。既往研究により、土石流および掃流状集合流動の流動機構が明らかにされている^{2,3)}など。しかしながら、連続的に勾配が変化する場での流動形態の遷移については、急勾配（15°以上）領域の勾配変化を対象とした研究⁴⁾などがいくつか行われているものの、掃流状集合流動が卓越する 3～15°での勾配変化を対象とした研究は十分とは言い難い。

また、石礫型土石流は流下に伴って内部で粒度偏析が生じ、先頭部に比較的大きい砂礫が集積するという性質がある¹⁾。芦田ら⁵⁾の水路勾配 1～8°での混合砂礫を用いた実験により、掃流状集合流動においても流れ内部で粒度偏析が生じていることが明らか

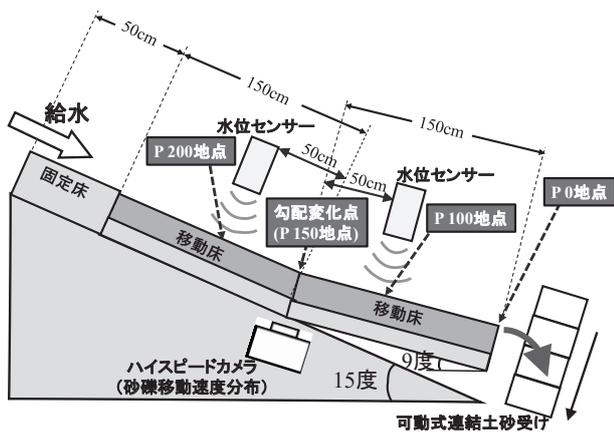


図-1 実験概要.

表-1 実験条件.

Case	使用実験砂	供給流量 (cm ³ /s)	設定水路勾配 (°)
Case 1	粒径 3.0 mm の一様砂	2,000	(一様勾配) 9, 15
Case 2	粒径 7.1 mm の一様砂		
Case 3	3.0 mm : 7.1 mm = 4 : 1 の混合砂		
Case 4	粒径 3.0 mm の一様砂	1,000	(変勾配) 上流 15 下流 9
Case 5	粒径 7.1 mm の一様砂		
Case 6	3.0 mm : 7.1 mm = 4 : 1 の混合砂		

となっている。このことから、土石流氾濫被害をより厳密に予測するためには、連続的に勾配が変化する山地溪流を流下する間に、土石流内部で生じる粒度偏析が勾配変化によりどのような影響を受けるかについても把握する必要があると考えられる。以上を踏まえ、本研究では、厳密な土石流氾濫被害予測に繋がる土石流流入条件のより厳密な想定を可能とするため、勾配変化が土石流の流動形態および粒度偏析に及ぼす影響を2種類の水路勾配を設定可能な変勾配水路を用いた水路実験により把握した。

2. 実験概要

本研究で用いる実験水路(図-1)は、既存の可変勾配水路上に、水路長 350 cm (整流用の固定床部 50 cm を含む)、水路幅 10 cm の変勾配水路を設置することで作製した。変勾配水路の中央に勾配変化点 (P 150 地点とする) を設け、下流側の水路勾配を変化させることで上下流で2種類の水路勾配を設定可能とした。P 150 地点側方よりハイスピードカメラ (CASIO 社製, EXILIM PRO EX-F1) を用いて土石流を撮影し、土石流内部の砂礫移動速度を読み取った。P 150 地点より 50 cm 上下流の地点 (P 100, P 200

地点) では超音波水位センサー (OMURON 社製, E4C-DS30) で土石流流動深を計測し、下流端 (P 0 地点) では4つの採砂箱を連結した可動式連結土砂受けで土砂輸送濃度の時間変化を計測した。

実験条件は砂礫および供給流量の組み合わせにより表-1のように設定した。実験砂は平均粒径 3.0 mm, 7.1 mm の一様砂 (質量密度 $\sigma = 2.650 \text{ g/cm}^3$, 河床堆積物の容積濃度 $C^* = 0.575$, 内部摩擦角 $\tan\phi = 0.695$) と、粒径 3.0 mm と 7.1 mm を4対1で配合した混合砂を用い、P 150 地点から上下流 150 cm の移動床区間に厚さ 5 cm で敷き詰めた (空隙込み総体積 $15,000 \text{ cm}^3$)。供給流量は $2,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ および $1,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ とした。これらの設定条件に対して、水路勾配を 9° および 15° とした一様勾配条件、 $15^\circ \rightarrow 9^\circ$ とした変勾配条件を設定し実験を行った。なお、変勾配条件では、勾配変化点 (P 150 地点) での顕著な堆積が発生していないことを確認しており、本実験では土石流流動に対する勾配変化点での堆積による地形変化の影響は無視できると考えられる。

3. 実験結果および考察

(1) 土砂輸送濃度に対する勾配変化の影響

a) 土砂輸送濃度に関する本実験結果の妥当性

図-2 および図-3 に、一様砂 7.1 mm および混合砂を対象とした場合の P 0 地点における土砂輸送濃度 C_s の時間変化を供給流量別に示す。なお、本稿では、土石流中で砂礫が比較的集積しやすく、勾配変化の影響を受けやすいと考えられる土石流先頭部 (計測地点通過から3秒間に含まれる土石流とする) を対象として考察を行う。同図には水山²⁾による掃流状集合流動における C_s の実験式(1) ($0.05 < \tan\theta < 0.25$) の値も示している。なお、式(1)は勾配 15° ではわずかに適用範囲外となるが参考値として示す。

$$C_s = \frac{q_s}{q} = 5.5(\tan\theta)^2 \quad (1)$$

ここに、 q_s : 単位幅流砂量, q : 単位幅土石流 (水+土砂) 流量, θ : 水路勾配である。

これらの図に示されるように、一様勾配 9° では、実験結果と式(1)の C_s が概ね一致したことから、本実験結果は妥当であると考えられる。ただし、比較的水深粒径比 h/d が小さい Case 5 では実験結果の方が式(1)の C_s よりも小さくなった。これは、水山の実験に比べて Case 5 の h/d が最大でも $1/4$ 程度しかなく、砂礫が持つ体積によって流動層内の砂礫の存在が制限される影響 (排除体積効果) が大きかったことが

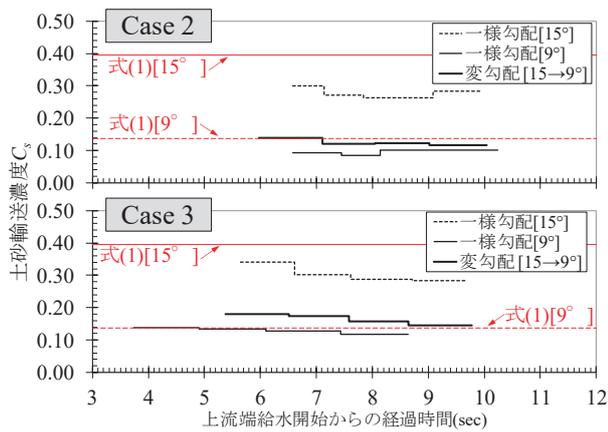


図-2 P 0 地点の土砂輸送濃度時間変化 (流量 2,000 cm³/s).

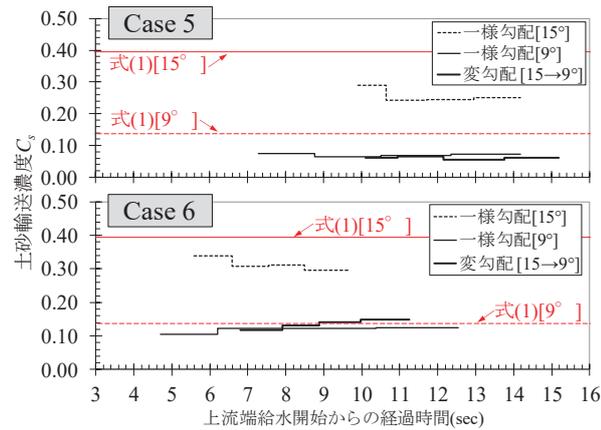


図-3 P 0 地点の土砂輸送濃度時間変化 (流量 1,000 cm³/s).

原因と考えられる。また、参考値ではあるが一様勾配 15°で比較すると、全ての Case で式(1)の C_s より実験結果の方が小さくなっている。これは、本実験の移動床長さが水山の実験の移動床長さよりも短く、水山の実験と比べて土石流先頭部の土砂集積が十分ではなかった可能性がある。ただし、本実験結果は、勾配 15°、移動床長さ 175 cm での混合砂礫土石流に関する既往実験結果⁹⁾の先頭部 C_s と類似していることから、本実験結果は妥当であると考えられる。以上より、 C_s に関する本実験結果の妥当性が確認されたことから、本実験の C_s 計測結果をもとに勾配変化による流動形態および粒度偏析への影響を考察する。

b) 勾配変化による土砂輸送濃度への影響

図-2 および図-3 より、勾配変化の有無別に本実験結果を比較すると、変勾配条件の P 0 地点では多くの Case で一様勾配 9°の条件での C_s に近くなった。このことから、勾配変化点より 150 cm 下流地点では下流側勾配 9°に沿った流動形態が形成されることがわかる。ただし、供給流量が大きい場合 (Case 2 および Case 3) は一様勾配 9°の条件よりもやや C_s が大きく、P 0 地点でも上流側勾配 15°の影響が残っていると考えられる。これは、供給流量が大きい方が慣

表-2 土石流先頭部の平均土砂輸送濃度 \bar{C}_s (P 0 地点)。

Case	一様勾配 15°	一様勾配 9°	変勾配 15°→9°
Case 1	0.276	0.132	0.157
Case 2	0.279	0.095	0.125
Case 3	0.304	0.130	0.164
Case 4	0.337	0.126	0.156
Case 5	0.257	0.070	0.061
Case 6	0.313	0.119	0.135
実験式 ²⁾	0.395(参考値)	0.138	—

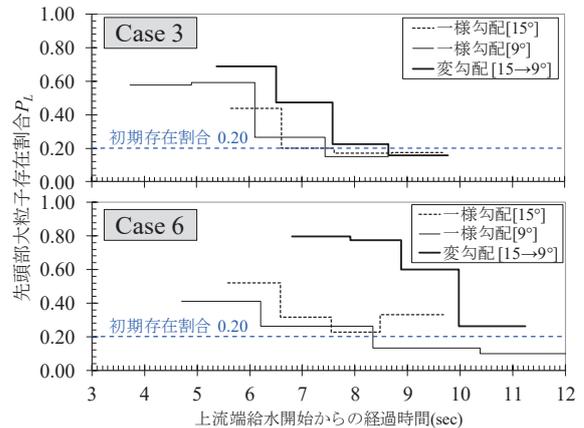


図-4 混合砂礫から成る土石流の先頭部大粒子存在割合 (P 0 地点)。

性が大きく、流動形態の遷移に対してより長い流下距離が必要となるためと考えられる。表-2 に、P 0 地点における土石流先頭部より 3 秒間の平均土砂輸送濃度 \bar{C}_s を Case 別に示す。この表より、変勾配条件での P 0 地点の \bar{C}_s は全ての Case で一様勾配 9°の条件の \bar{C}_s に近く、P 0 地点では下流側勾配 9°に沿った流動形態が形成されていることがわかる。このことから、本実験条件では、粒度構成および流量にかかわらず勾配変化点 (P 150 地点) ~ P 0 地点で流動形態が遷移していることが推察される。

図-4 に、混合砂条件の Case 3 および Case 6 の P 0 地点における大粒子存在割合 P_L の時間変化を示す。同図に示されるように、Case 3 では変勾配条件での P_L が一様勾配 15°よりも 9°の条件の P_L に近づいている。これは、先頭部の粒度偏析も勾配変化点通過後に下流側勾配 9°に沿った形態に遷移することを示唆している。一方、供給流量 (すなわち慣性力) が小さい Case 6 の変勾配条件では、一様勾配 9°や 15°の条件よりもさらに P_L が大きくなった。これは、勾配変化により重力の流れ方向成分が減少し、重力方向成分が増大したことにより、芦田ら⁹⁾が示すように、流れ内部の砂礫が形成する間隙を通過しやすい小粒子がより多く落下し、落下した小粒子が大粒子の遮蔽により上昇を阻害されることで、小粒子の移動が相対的に遅くなり、先頭部に大粒子が集積しや

すくなかったことが原因と考えられる。

(2) 勾配変化による土石流流動深への影響

a) 土石流流動深に関する本実験結果の妥当性

図-5 および図-6 に、一様砂 7.1 mm および混合砂を対象とした場合の P 100 地点における土石流先頭部の流動深 h の時間変化を供給流量別に示す。なお、これらの図に示す h は計測地点の河床侵食等による地形変化の影響を受けていない先頭部通過から 3 秒後までのものとする。同図には高橋 η による土石流の断面平均流速に関する理論式(2)および連続式(3)より求めた h も示している。なお、式(2)は流動層全層に土粒子が分散した定常状態の流れを想定しており、本研究の勾配 9° で形成される掃流状集合流動は適用範囲外であるが参考値として示している。

$$U_m = \frac{2}{5d} \left[\frac{g \sin \theta}{\alpha_i \sin \phi} \left\{ C + (1-C) \left(\frac{\rho_m}{\sigma} \right) \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (2)$$

$$q = U_m h \quad (3)$$

ここに、 U_m : 土石流の断面平均流速、 d : 粒径 (Case 3 および Case 6 の場合は実験砂の平均径)、 g : 重力加速度、 α_i : 係数 (=0.042)、 C : 平衡土砂濃度、 ρ_m : 間隙流体 (水) の質量密度 (= 1.0 g/cm³) である。なお、 C は土石流の動的平衡状態における河床面上の力のつり合いから導出される式 η より求める。

これらの図に示されるように、一様勾配 15° の条件では、Case 5 を除いて理論式と実験結果の h が近くなったことから、本実験結果は妥当であると考えられる。さらに、P 100 地点では土石流は十分に発達し定常状態に近い状態となっていたと推察される。

Case 5 では理論式による h よりも実験結果の方が小さくなったが、これは前述のとおり排除体積効果により土砂輸送濃度が低下し、土石流流動に対する砂礫の影響 (すなわち抵抗力) が比較的小さかったことが原因と考えられる。なお、Case 3 では土石流が P 100 地点に到達してから 1 秒後より徐々に流動深が低下しているが、これは図-2 に示すように後続部ほど土砂輸送濃度が低下していることから、後続部ほど土石流流動に対する抵抗力が小さくなったことが原因と考えられる。一様勾配 9° の条件では、適用範囲外であるものの、全ての Case で理論式と実験結果の h が近い値となった。これは、勾配 9° の条件では $h/d = 2.7 \sim 5.6$ となり、排除体積効果が大きく、流動層全層に土粒子が分散した土石流状態で流下したことが原因と考えられる。このことから、一様勾配 9° の条件においても本実験結果が妥当であると考

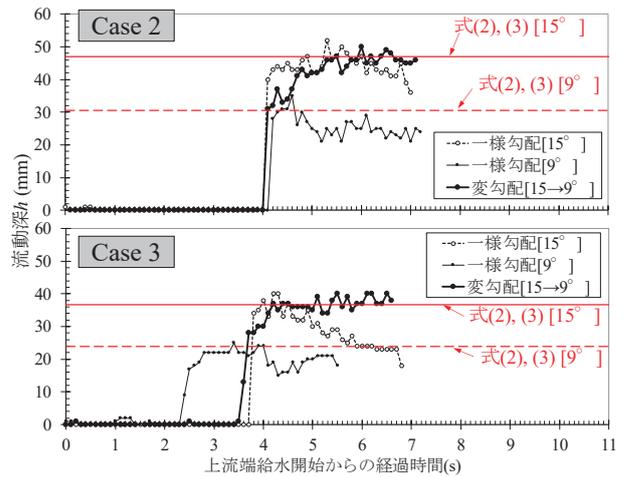


図-5 P 100 地点の土石流先頭部の流動深 h の時間変化 (流量 2,000 cm³/s).

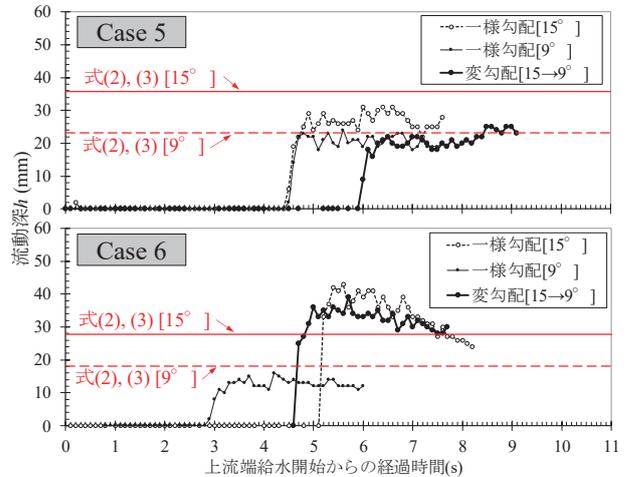


図-6 P 100 地点の土石流先頭部の流動深 h の時間変化 (流量 1,000 cm³/s).

表-3 土石流先頭部の平均流動深 (P100 地点) 【単位: mm】.

Case	一様勾配 15°	一様勾配 9°	変勾配 $15^\circ \rightarrow 9^\circ$
Case 1	30.5	16.7	34.0
Case 2	42.6	25.6	43.0
Case 3	29.1	19.2	33.9
Case 4	35.6	15.6	27.6
Case 5	25.1	19.4	20.5
Case 6	34.4	11.9	32.1

えられる。以上より、妥当性が確認された本実験結果の流動深をもとに勾配変化による流動形態および粒度偏析への影響を考察する。

b) 勾配変化による土石流流動深への影響

図-5 および図-6 より、勾配変化の有無別に本実験結果を比較すると、変勾配条件では、下流側勾配 9° 上の P 100 地点で一様勾配 15° の条件に近い h となった。このことから、勾配変化点から 50 cm 流下後も上流側勾配 15° に沿った流動形態が維持されており、上流側勾配の影響が強く残っていると推察され

る。ただし、Case 5 では一様勾配条件 9° の h に近くなっていたことから、供給流量（すなわち慣性力）が小さく流動に対する砂礫の影響（すなわち抵抗力）が大きい場合は比較的短い流下距離で流動形態の遷移が進行すると推察される。表-3 に、P 100 地点における土石流先頭部より 3 秒間の平均流動深 \bar{h} を Case 別に示す。この表より、供給流量が比較的大きい Case 1~3 における変勾配条件の \bar{h} は一様勾配 15° の条件の \bar{h} に近く、P 100 地点では上流側勾配の影響が強いと考えられる。Case 4 における変勾配条件での \bar{h} は一様勾配 15° と 9° の条件の \bar{h} の中間値であるが、これも Case 5 と同様に短い流下距離で流動形態の遷移が進行した結果と考えられる。なお、Case 6 では供給流量が小さいにもかかわらず P 100 地点で上流側勾配 15° の \bar{h} が維持されているが、図-4 に示したように土石流先頭部の大粒子集積が勾配変化によってさらに顕著になり、流動に対する抵抗力が増大したことが原因と考えられる。以上のことから、勾配変化による流動形態の遷移区間は供給流量および粒度構成によって異なると考えられる。

(3) 勾配変化による砂礫移動速度への影響

a) 砂礫移動速度に関する本実験結果の妥当性

図-7 に、供給流量 $1,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ 時の勾配変化点（P 150 地点）における土石流先頭部の砂礫移動速度を示す。これらの移動速度は計測地点の河床侵食等による地形変化の影響を受けていない先頭部通過から 3 秒後までのものとする。変勾配条件における移動速度は勾配変化点下流側の勾配 9° の河床面を基準とした座標系をもとに算出している。同図には高橋ら⁸⁾による土石流の理論流速分布（土砂濃度が $0.2 \sim 0.15$ 以下となる水流層領域の分布は表示していない）も合わせて示している。

図-7 より、一様砂を用いた Case 4 および Case 5 の一様勾配条件では、実験結果のバラツキは大きいものの、実験結果と理論流速分布の分布傾向は概ね一致しており、本実験結果が妥当であることがわかる。一方、混合砂を用いた Case 6 の一様勾配条件では、 3.0 mm の一様砂における理論流速分布の方が実験結果に近くなっているが、これは土石流を構成する支配的な粒径を対象とした理論流速分布に実験結果が近くなったものと考えられ、混合砂を用いた実験結果も妥当であると考えられる。なお、流れ内部で大小粒子が流動深方向に分離せず存在高さが重複しているのは、流動深に占める砂礫の体積が大きく上下層への大小粒子の分離が起こりにくかったことが原因と考えられる。以上を踏まえ、妥当性が確認

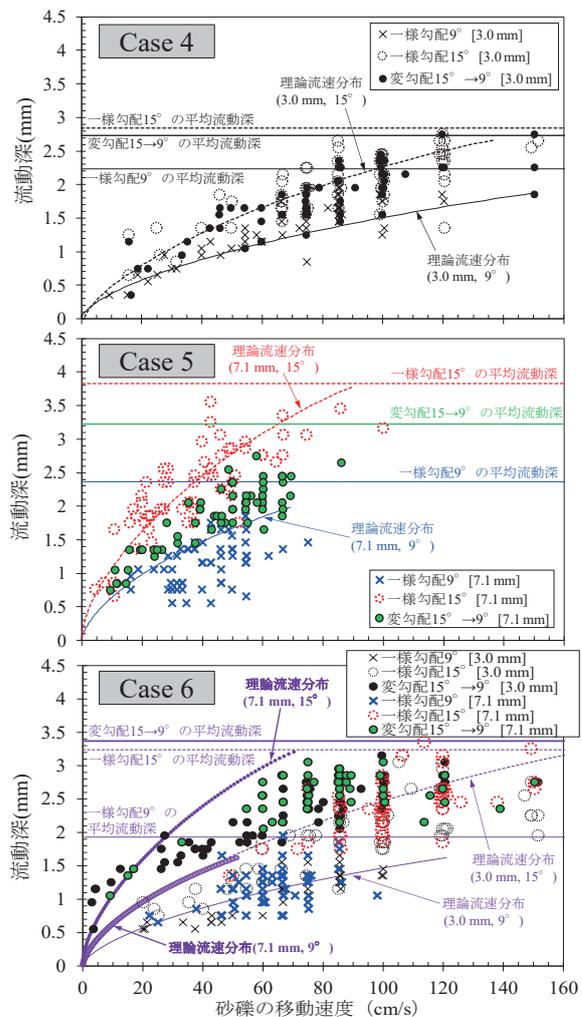


図-7 勾配変化点（P 150 地点）における土石流先頭部の土粒子移動速度分布（流量 $1,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）。

された本実験の砂礫移動速度をもとに勾配変化による流動形態および粒度偏析への影響を考察する。

b) 勾配変化による砂礫移動速度への影響

図-7 より、勾配変化の有無別に本実験結果を比較すると、一様砂を用いた Case 4 および Case 5 では、変勾配条件での移動速度分布および先頭部流動深が一様勾配 15° と 9° の条件における分布の間に位置しており、勾配変化点において既に流動層内部で流動形態の遷移が発生していることがわかる。また、比較的 h/d が小さく、土石流流動に対する砂礫の影響が大きい Case 5 の方が一様勾配条件 9° の結果により近くなっている。これらのことから、流動形態の遷移は、勾配変化点での流れ内部の砂礫移動速度および流動深の変化が契機となっており、土石流流動に対する抵抗力が大きい条件ほどその変化が大きくなると考えられる。

混合砂を用いた Case 6 では、変勾配条件の砂礫移動速度分布が一様勾配条件 15° よりも小さい範囲に分布し、変勾配条件の先頭部流動深は一様勾配条件

15°の結果よりもさらに大きくなった。これらの結果は、図-4に示したように、土石流先頭部の大粒子集積が勾配変化によってさらに顕著になったことで、先頭部の流動に対する抵抗力が増大したことが原因と考えられる。これらのことから、混合砂から成る土石流の勾配変化による流動形態の遷移過程は、土石流内部の粒度偏析の影響が付加された過程となることが推察される。

(4) 勾配変化による土石流流動形態の遷移過程

各 Case の実験結果より、勾配変化に伴う土石流流動形態の遷移過程を推定した。推定結果を図-8に示す。一様砂条件で供給流量（すなわち慣性力）が比較的大きい Case 1～3 は、流動形態の遷移区間が比較的に長いため、P 100 地点では流動形態の遷移がまだ十分進んでおらず上流側勾配 15°に沿った流動が維持される。その後、P 0 地点まで流下する間に流動形態が遷移し、下流側勾配 9°に沿った流動形態が形成されたと推定される。一方、供給流量が小さい Case 4 および Case 5 は流動形態の遷移区間が比較的に短く、Case 4 は勾配変化点～P 0 地点の区間で、流動に対する砂礫の影響（すなわち抵抗力）が大きい Case 5 は勾配変化点～P 100 地点の区間で流動形態が遷移したことが推察される。

混合砂条件かつ供給流量が小さい Case 6 では、勾配変化によって土石流先頭部の大粒子集積がさらに進行することで、砂礫移動速度の低下および先頭部流動深の増大が発生し、P 100 地点でも先頭部大粒子集積の影響を受けて比較的大きい流動深が維持される。このように、混合砂条件での土石流流動形態の遷移過程は土石流内部の粒度偏析の影響が付加されたものとなると考えられる。

4. おわりに

本研究では、上下流で2種類の水路勾配を設定可能な変勾配水路を用いた水路実験により、一様砂および混合砂から成る土石流の流動形態および粒度偏析に勾配変化が及ぼす影響を把握した。その結果、土石流の流動形態は、勾配変化点通過後、流れ内部の砂礫移動速度および流動深が流下とともに下流側勾配に沿った形態に変化することで進行し、土石流の慣性力が小さい条件ほどその遷移区間が短くなることがわかった。また、混合砂から成る土石流では、慣性力が小さい場合、勾配変化によって先頭部の大粒子集積がさらに進行するため、流動形態の遷移過程に土石流内部の粒度偏析の影響が付加されたもの

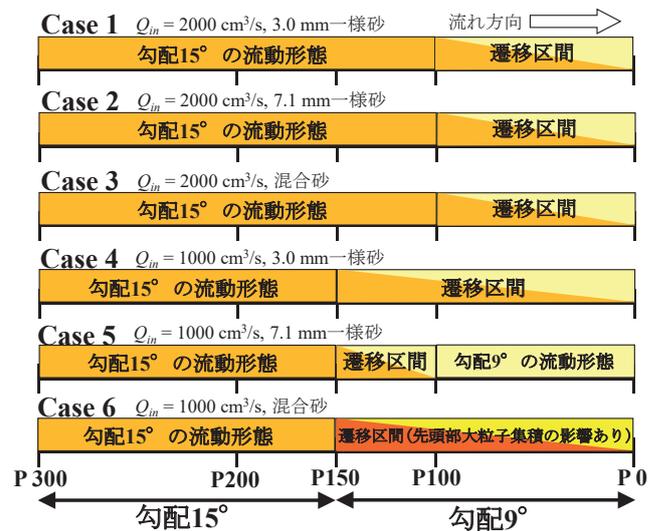


図-8 本研究により推定される勾配変化による土石流流動形態の遷移過程。

となることを推察された。上記の推察を検証するため、今後、勾配変化点下流側のより多くの地点で砂礫移動速度分布や流動深を計測し、流下に伴う段階的な流動形態の遷移過程を調べる必要がある。また、勾配変化および土石流粒度構成について様々な設定条件で実験を行い、これらの結果をもとに検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 芦田和男：土石流概論，砂防学会誌（新砂防），Vol.44, No.6, pp.41-47, 1992.
- 2) 水山高久：土石流から掃流に変化する勾配での流砂量，砂防学会誌（新砂防），Vol.33, No.1, pp.1-6, 1980.
- 3) 橋本晴行，平野宗夫：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集，No.545, pp.33-42, 1996.
- 4) 高橋 保，匡 尚富：変勾配流路における土石流の形成，京都大学防災研究所年報，Vol.29, B-2, pp.343-359, 1999.
- 5) 芦田和男，高橋 保，水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究，砂防学会誌（新砂防），Vol.30, No.4, pp.9-17, 1978.
- 6) 和田孝志，古谷智彦，中谷加奈，水山高久，里深好文：土石流先頭部における大粒子集積に影響を及ぼす要素に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.67, No.6, pp.56-63, 2015.
- 7) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，Vol.20, B-2, pp.405-435, 1977.
- 8) 高橋 保，里深好文，千代啓三：土石流の慣性領域での流動則，京都大学防災研究所年報，Vol.39, B-2, pp.333-346, 1996.

(2020. 7. 1 受付)