

流路勾配変化に伴う土石流流動特性の段階的遷移過程

鳥取大学大学院工学研究科 ○三島大侃, 和田孝志, 三輪 浩

1. はじめに 土石流被害をより厳密に予測するためには、山地溪流の出口より氾濫場に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。このためには、縦断的に多様な勾配変化を有する山地溪流を流下する間に、土石流の性状がこれらの勾配変化によってどのような影響を受け、どのように変化するかを把握することが重要である。本研究では、2種類の勾配を設定可能な変勾配水路を用い、水路上流側を土石流が発生・流下する急勾配（15°）、水路下流側を掃流状集合流動となる緩勾配（9°）にそれぞれ設定し、供給流量、土石流粒度構成の条件をそれぞれ変化させる水路実験を行うことで、規模や粒度構成が異なる土石流の「流動形態（輸送土砂濃度、流動深）」と「土石流内部の粒度偏析」が流路勾配変化によってどのような過程を経て変化するかを把握した。

2. 実験概要 実験に使用する水路は、図1に示す水路長350cm、水路幅10cmの変勾配水路であり、当該水路の下流から150cm地点を境界として上下流の勾配をそれぞれ別個に設定可能である。本実験では、上下流勾配を15°一様、9°一様、15°→9°の変勾配に設定した。なお、変勾配においては下流側の流下距離を50cm、70cm、100cm、150cmの4種類に変化させ、それぞれの下流端で4つの採砂箱を連結した可動式連結土砂受けを用いて土石流を捕捉し、輸送土砂濃度および各粒径砂礫の存在割合を計測した。また、勾配変化点から下流方向を正として+10cm、+50cm、+70cm、+100cmの位置に超音波水位センサーを設置し、土石流流動深を計測した。土石流の粒度構成は表1に示す6種類（Case1～6）とし、供給流量は2.0L/sec、1.0L/secの2種類とした。なお、上記条件の結果の一部には和田ら¹²⁾の結果を引用している。

3. 実験結果と考察 表2は、粒度構成（Case）別の各計測地点（+50cm、+70cm、+100cm、+150cm）における4つの採砂箱で捕捉した土石流の平均輸送土砂濃度 \bar{C} を供給流量別に示している。この表より、全ての条件で勾配変化点からの距離が大きくなるほど下流側勾配の輸送土砂濃度に遷移していることがわかる。また、粒度構成が比較的小さく、土石流規模が大きいほど、上流側勾配の輸送土砂濃度を維持していることがわかる。これは、土石流の運動エネルギーが大きい場合は勾配変化点通過後も流動層中の砂礫の分散が維持されるが、砂礫の運動エネルギーが小さい場合は勾配変化により砂礫にかかる重力の鉛直下向き成分が増加することで流動層中の分散を維持できず土砂輸送形態が掃流状集合流動に早く遷移するためと考えられる。

平均輸送土砂濃度、4つの採砂箱で捕捉した土石流の平均大粒子存在割合、先頭部到達から3秒間の平均土石流流動深について、一様勾配15°および9°の値 \bar{C}_{15° 、 \bar{C}_{9° 、

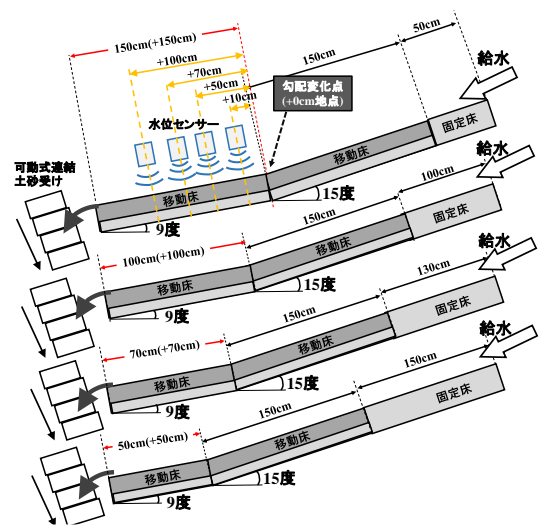


図1 実験水路

表1 実験条件

Case	使用実験砂	供給流量	設定水路勾配
Case 1	粒径 10.7 mm の一様砂	2.0 L/s 1.0 L/s	(一様勾配) 9°, 15° (変勾配) 上流 15° 下流 9°
Case 2	粒径 7.1 mm の一様砂		
Case 3	粒径 3.0 mm の一様砂		
Case 4	粒径 1.4 mm の一様砂		
Case 5	7.1 mm : 3.0 mm = 4 : 1 の混合砂		
Case 6	7.1 mm : 3.0 mm = 1 : 4 の混合砂		

表2 粒度構成別・供給流量別の平均輸送土砂濃度

		1.0L/s					
	計測地点 (cm)	勾配15度一様の輸送土砂濃度	勾配変化点からの距離				勾配9度一様の輸送土砂濃度
			50cm	70cm	100cm	150cm	
一様砂礫	Case1	0.186	0.065	0.060	0.057	0.031	0.065
	Case2	0.256	0.133	0.136	0.110	0.061	0.071
	Case3	0.326	0.203	0.189	0.178	0.152	0.123
	Case4	0.353	0.192	0.202	0.196	0.209	0.143
混合砂礫	Case5	0.259	0.163	0.132	0.121	0.074	0.062
	Case6	0.308	0.221	0.182	0.175	0.135	0.136

		2.0L/s					
	計測地点 (cm)	勾配15度一様の輸送土砂濃度	勾配変化点からの距離				勾配9度一様の輸送土砂濃度
			50cm	70cm	100cm	150cm	
一様砂礫	Case1	0.255	0.148	0.129	0.134	0.110	0.104
	Case2	0.278	0.158	0.146	0.156	0.126	0.097
	Case3	0.258	0.161	0.157	0.156	0.156	0.130
	Case4	0.278	0.160	0.156	0.157	0.161	0.123
混合砂礫	Case5	0.253	0.166	0.158	0.150	0.129	0.111
	Case6	0.300	0.199	0.156	0.148	0.163	0.129

\bar{P}_{L15° , \bar{P}_{L9° , \bar{h}_{15° , \bar{h}_{9° (流動深については高橋の土石流断面平均流速式³⁾と連続式により算出) と各計測地点での計測結果 \bar{C}_x , \bar{P}_{Lx} , \bar{h}_x から以下の式を用いて, 勾配変化点からの流下距離別の遷移完了割合 $I_{\bar{C}x}$, $I_{\bar{P}Lx}$, $I_{\bar{h}x}$ を求めた.

$$I_{\bar{C}x} = \frac{\bar{C}_x - \bar{C}_{15^\circ}}{\bar{C}_{9^\circ} - \bar{C}_{15^\circ}} \quad I_{\bar{P}Lx} = \frac{\bar{P}_{Lx} - \bar{P}_{L15^\circ}}{\bar{P}_{L9^\circ} - \bar{P}_{L15^\circ}} \quad I_{\bar{h}x} = \frac{\bar{h}_x - \bar{h}_{15^\circ}}{\bar{h}_{9^\circ} - \bar{h}_{15^\circ}}$$

図2は, \bar{C} を指標とした供給流量別の遷移完了割合を表している. 輸送土砂濃度では, 上述の通り, 運動エネルギーが小さい条件(土石流規模が小さく, 粒度構成が粗い条件)では流下距離の増大に対する遷移完了割合の変化量が大きく, 勾配変化点より比較的近い距離で遷移が完了する傾向が見られる. 反対に運動エネルギーが大きい条件では流下距離によらず比較的一定の輸送土砂濃度となり, 遷移の進行が顕著でない. また, どちらの供給流量の場合でも, 勾配変化点から50cmの地点ですでに6~8割程度遷移が完了していることが示唆される. 図3は \bar{C} を指標とした供給流量1.0L/sでの遷移完了割合を表しているが, 粒度偏析においては勾配変化点から100cm~150cmの区間で大きく遷移が進行している. 図4に示す \bar{h} を指標とした供給流量1.0L/sでの遷移完了割合をみると, バラつきは大きいものの, \bar{C} を指標とした場合と同様に, 運動エネルギーが小さい条件ほど流下距離の増大に対する遷移完了割合の変化量が大きく, 勾配変化点より比較的近い距離で遷移が完了する傾向が見られた. ただし, 勾配変化点から50cmの地点での遷移完了割合は \bar{C} と比較してやや小さく, \bar{h} の遷移は \bar{C} の遷移よりも遅れて現れる可能性が示唆される. 以上のことから, 勾配変化に伴って, まず土石流内部の砂礫移動厚(土砂濃度)が減少し, 流動深の減少, そして先頭部粒度偏析の増大へと移る過程を経ることで土石流の流動形態遷移が進むことが示唆された.

4. あとがき 本研究で行った実験結果から, 土石流の運動エネルギーと流動形態の遷移速度との関係が定性的に明らかになった. また, 流路勾配変化によって, 上流側勾配を流下した土石流の輸送土砂濃度, 先頭部粒度偏析, 流動深がどのような順序で変化し, 下流側の流動形態に遷移するかについて把握できた. 特に, 先頭部粒度偏析の遷移は, 勾配変化点通過後しばらく経過してから遅れて発生する傾向が見られ, 先頭部粒度偏析への勾配変化の影響は輸送土砂濃度や流動深等の基本的水理量の変化に伴う二次的なものである可能性が示唆された.

上記の推察は, 輸送土砂濃度, 先頭部粒度偏析, 流動深の変化過程を独立と見なしているが, これらはそれぞれ密接に関連したものである. したがって, これらの推察の妥当性については土石流流動メカニズムに基づく更なる検証が必要である.

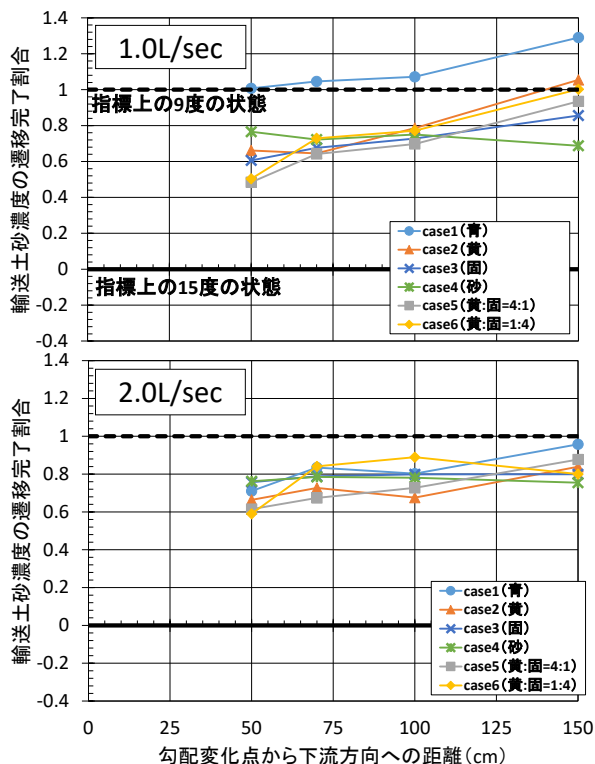


図2 \bar{C} を指標とした遷移完了割合

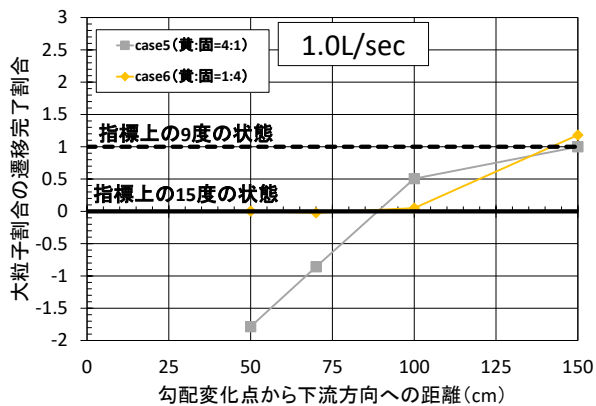


図3 \bar{P}_L を指標とした遷移完了割合 (1.0 L/s)

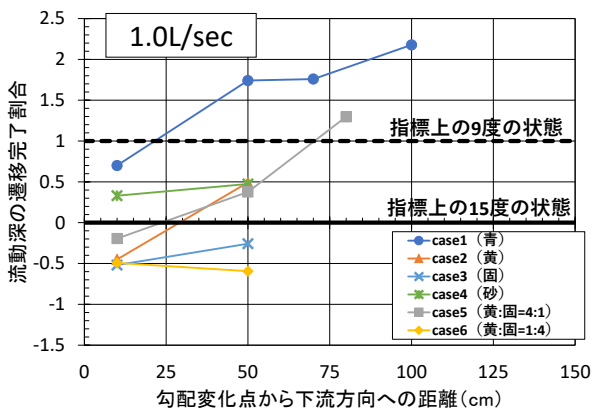


図4 \bar{h} を指標とした遷移完了割合 (1.0 L/s)

参考文献 1) 和田・小林・三輪：第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.139-144, 2020. 2) 和田・竹村・三輪：第73回土木学会中国支部大会発表概要集, pp.125-127, 2021. 3) 高橋：京都大学防災研究所年報第20号B-2, pp.405-435, 1977.