

粒子の運動特性に着目した土石流の堆積速度に関する検討

立命館大学大学院理工学研究科 ○榊原 颯輝

立命館大学工学部 里深 好文

藤本 将光

1. 背景と目的

土石流の堆積機構を明らかにすることは、到達範囲を正しく推定する上で非常に重要である。また、土石流に含まれる土砂は、複数の粒径階の粒子で構成されるため、土砂に含まれる粒径や混合粒径によってその堆積機構が異なり、堆積形状や到達範囲に違いが表れる可能性がある。非定常で非平衡である堆積現象は、平衡状態との差分量で決まる堆積速度式を用いて連続式を解くが、この堆積速度式は粒径や混合粒径について十分に検討されていない。本研究では、水路実験によって粒径や混合粒径が堆積に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

実験水路は長さ 8m 幅 0.2m の可変勾配水路である。堆積実験を行うために水路下流部に流動勾配 (10,15 度) から堆積勾配 (1 度)、と変化する勾配変化点を設けた。また、河床材料は使用する土砂の粒径に比べ十分大きく、河床との土砂の交換は卓越しないとして、流動、堆積区間ともに固定床とした。土砂を勾配変化点の 1m 上流側に薄く均し、上流側から水で侵食させることで土石流を発生させた。勾配変化点付近をハイスピードカメラやビデオカメラで記録し、堆積速度や流動深を映像から読み取った。

3. 混合割合と堆積速度の関係

混合割合と堆積速度の関係について、2 種類の粒子 (表 1) を用い、その混合割合を変えて堆積速度の変化を調べた。相対水深 h/dm と堆積速度 i (cm/s) の関係をそれぞれ図 1 に示す。Cf/C は輸送濃度に対する細粒土砂の割合である。 h/dm が大きいほど堆積速度 i (cm/s) は減少することがわかる。また、 $h/dm < 10$ に細粒土砂の割合が 60% 以下のケース、 $h/dm > 20$ に 60% 以上のケースが分布した。 h/dm が 20~30 で流動状態が層流から乱流へ遷移する⁽¹⁾ことが報告されており、適応範囲を流動から堆積へ拡張する仮定を含むが、堆積過程においても細粒土砂の割合が 60% 以下のケースでは粗粒土砂の

粒子間応力によって支持される層流状態で流下・堆積し、60% を超えるようなケースでは細粒土砂が (特に上層で) 乱流状態で流下・堆積したと考えられる。したがって、細粒土砂の混合割合は、層流状態と乱流状態の流動状態の違いを生じさせ、堆積速度に影響を与えるといえる。また、堆積した土砂の横断面 (図 2) を見ると、細粒土砂の割合が 20~40%、40~60% では粗粒土砂が骨格構造を形成しているのに対して、60~80% では細粒土砂が骨格構造を形成しており、流動状態で骨格構造を支配する粒径階が変化する可能性がある。

4. 粒径と堆積速度係数の関係

各粒径と堆積速度の関係について、単一粒径の堆積実験を行った。図 3 に高橋の堆積速度係数と相対水深の関係を示す。堆積速度係数を用いたのは、実験ごとに土砂濃度が異なることへの対処と実験結果を高橋の堆

表 1. 混合粒径の実験で使した土砂

	粗粒土砂		細粒土砂	
	珪砂1号	珪砂5号	珪砂6号	珪砂7号
代表粒径 D60 (mm)	6.00	0.70	0.33	0.18
土粒子密度 (g/cm ³)	2.58	2.58	2.56	2.66

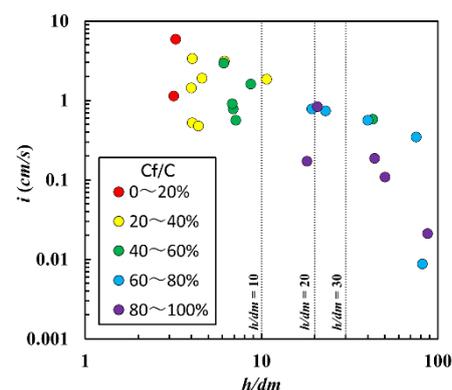


図 1. 相対水深と堆積速度

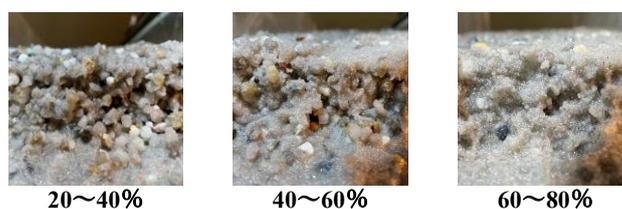


図 2. 堆積断面

積速度式⁽²⁾へ適用させるためである。図3からは、堆積速度係数と相対水深に反比例の関係が見られた。この結果を高橋の堆積速度式に適用すると次のように表現できる。

$$i = \delta' \frac{C_\infty - C q d}{C_* \frac{h}{h}}$$

δ' は係数で本実験では $\delta' = 0.48$ となった。この式は分母が h の2乗の形であるが、ダイラタント型の流速分布を使用する場合、流量と堆積速度の相関は従来の式と変わらない。また、高橋の堆積速度式を使用する際、 q/h の分母 h の代わりに粒径 d を使う場合もあるが、本実験では正反対の結果を示した。

5. 粒径と堆積による濃度減衰の検討

堆積速度係数は、土石流が緩勾配の平衡濃度に即座に対応できないことから、平衡状態へ到達するまでの遅れ時間として設定された。これは、粒子の持つ慣性力や間隙流体の乱れの影響に起因すると考えられる。まずは遅れ時間を把握するため、堆積区間において流動距離と堆積による濃度の減衰の関係を各粒径について実験した。堆積区間の濃度を測定するのは難しいため、初期値として流動区間の輸送濃度を測定し、流砂量の保存則から Δx 区間ごとの濃度を算出した。概要を図4に計算方法は下記に記す。なお、土石流は定常な流れであると仮定する。

$$Q_{sout} = Q_{sin} - V$$

$$C' u' h' B \Delta t = C u h B \Delta t - C_* \Delta x \Delta z B$$

$$C' = \frac{C q_w - C_* (1 - C) \Delta A / \Delta t}{q_w - C_* (1 - C) \Delta A / \Delta t}$$

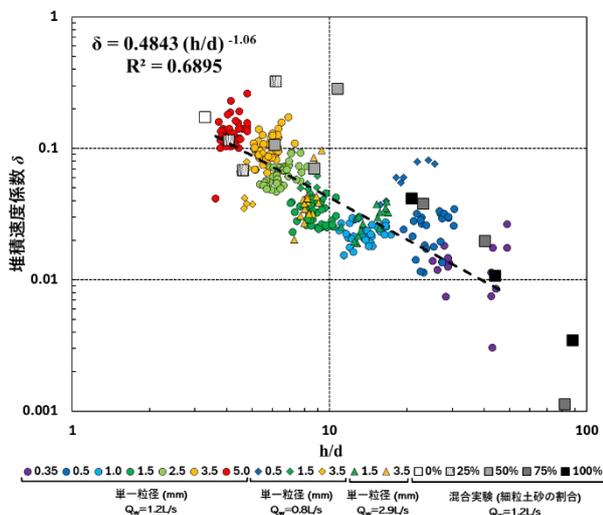


図3. 相対水深と堆積速度係数の関係

差分表示にして

$$C_{i+1} = \frac{C_i q_w - C_* (1 - C_i) \Delta A / \Delta t}{q_w - C_* (1 - C_i) \Delta A / \Delta t}$$

(Q_{sin}, Q_{sout} : 検査領域に対する流入流出土砂量, V, A : $\Delta x, \Delta t$ 間の堆積土砂の体積・面積, C : 断面平均土砂濃度, u : 流速, h : 流動深, B : 流動幅, q_w : 単位幅流量)

図5に各粒径の濃度減衰率を示す。 C_0 は流動区間の輸送濃度であり、 $x=0$ で C/C_0 が1でないケースが存在するのは、変化点上流部に堆積が遡上したためである。図に示すように減衰率は線形で表現できることがわかる。この結果を元に、減衰勾配と堆積速度、相対水深の関係を図6に示す。減衰勾配と堆積速度の関係は、砂礫の質量保存則を元に線形で近似した。また、減衰勾配と相対水深の関係は、 $R^2 = -0.88$ の強い負の相関が見られた。

6. 参考文献

- 1) 堀田 (2009) : 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集, P-137
- 2) 高橋 (2004) : 土石流の機構と対策, 近未来社, pp.309-315

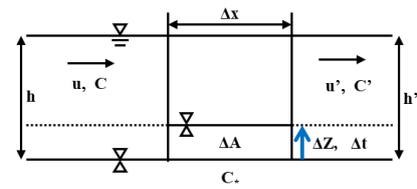


図4. 減衰実験の概要

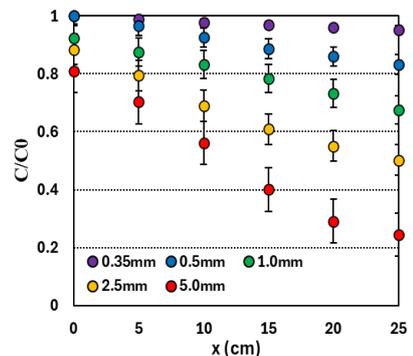


図5. 堆積距離と減衰率の関係

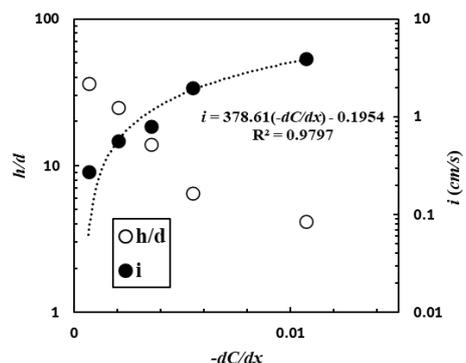


図6. 減衰勾配と $h/d \cdot i$ の関係