

細粒土砂を含む土石流・掃流状集合流動の堆積現象に関する研究

立命館大学大学院理工学研究科 ○榊原颯輝

立命館大学理工学部 里深好文 藤本将光

1. はじめに

土砂・洪水氾濫は、土石流に比べ細砂を多く含んだ幅広い粒径の土砂が流下し、土石流等の急勾配区間から掃流砂の緩勾配区間まで移動・氾濫する。この土砂・洪水氾濫は、再現計算を行う際、急勾配区間と緩勾配区間の勾配変化点において、実現現象以上の異常な堆積量が計算される場合がある。この問題の要因は堆積速度であると考えられる。計算には、土石流の基礎方程式として堆積速度式（高橋式）を用いられるが、この式は単一粒径を元に導かれた式であり、異なる粒径間の影響に関しては考慮されていない。そのため混合粒径、特に細砂を多く含んだ土石流については堆積速度の結果と異なる可能性が考えられる。

$$i_b = \delta_d \frac{C_\infty - C_{all} q}{C_* h}$$

（ i_b :堆積速度, δ_d :堆積速度係数, C_∞ :平衡土砂濃度, C_{all} :土砂全体の土砂濃度, C_* :堆積土砂濃度, q :単位幅流量, h :水深）

本研究では、細砂を含む混合粒径の土石流・掃流状集合流動の堆積現象について水路実験を行い、ハイスピードカメラで撮影した映像から、堆積速度や堆積過程での粒子の挙動について、混合割合や細砂の粒径を変えることで比較検討した。

2. 実験方法と条件

可変勾配水路上に勾配が1度になるような三角形の台を設置することで、水路途中に急勾配（上流）から緩勾配（下流）へと変化する勾配変化点を設けた。水路は固定床である。勾配変化点の1m上流側に粗砂と細砂を混合した土砂を薄く堆積させ、上流側から給水することによって土石流及び掃流状集合流動を発生させた（図1）。上流の勾配 θ は7, 10, 15度とし、使用する土砂は粗砂として珪砂1号（6mm）、細砂として珪砂5, 6, 7号（0.7, 0.33, 0.18mm）のうち一つを用い、それらを混合させ3パターンの粗砂と細砂の組み合わせを作

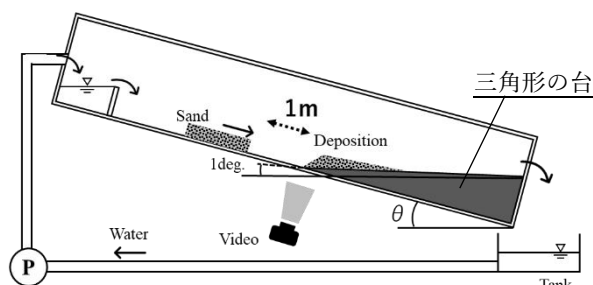


図1. 実験水路概要

表1. 粗砂と細砂の混合ケース

	粗粒土砂(珪砂1)	細粒土砂(珪砂5,6,7)
case1	100%	0%
case2	75%	25%
case3	50%	50%
case4	25%	75%
case5	0%	100%

った。土砂の全体量は一定で、粗砂と細砂は混合比率を25%ずつ変えて計5種類のケース（表1）で実験を行った。水路条件は流量1.25 l/s, 水路幅19.5 cmである。発生させた土石流及び掃流状集合流動は変化点下流で堆積運動をする。その様子をハイスピードカメラ（500 fps）で撮影した。撮影した映像から、堆積速度の計測や粒子の挙動の観察を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 細砂混合による堆積速度への影響

実測の堆積速度はハイスピードカメラの映像から測定した値である。図2, 3は、粗砂の混合割合が高いほどプロットサイズが大きくなるように、ケースごとにプロットサイズを変えている。また、上流の勾配によって色を分けた（7度：白、10度：灰色、15度：黒）。使用した三種類の細砂については、同じ大きさ、同じ色のプロットとして扱っている。

図2は輸送濃度に対する細砂の割合と堆積速度の関係である。粗砂の割合が高い場合は、堆積速度の値が大きいプロットが存在する。また、細砂の割合が高くなるほど堆積速度は小さくなるのがわかる。

図3は実験値である堆積速度と計算式から求めた堆積速度の比較である。左図は細砂を固相として扱った

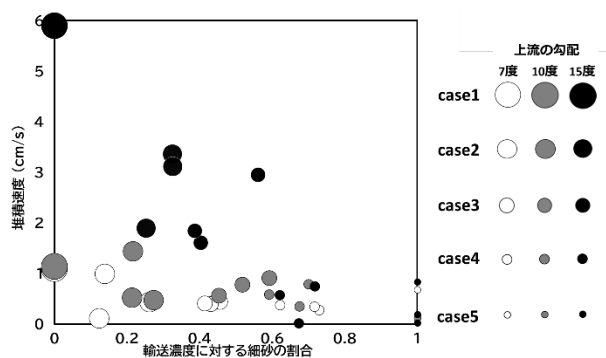


図2. 輸送濃度の細砂割合と堆積速度

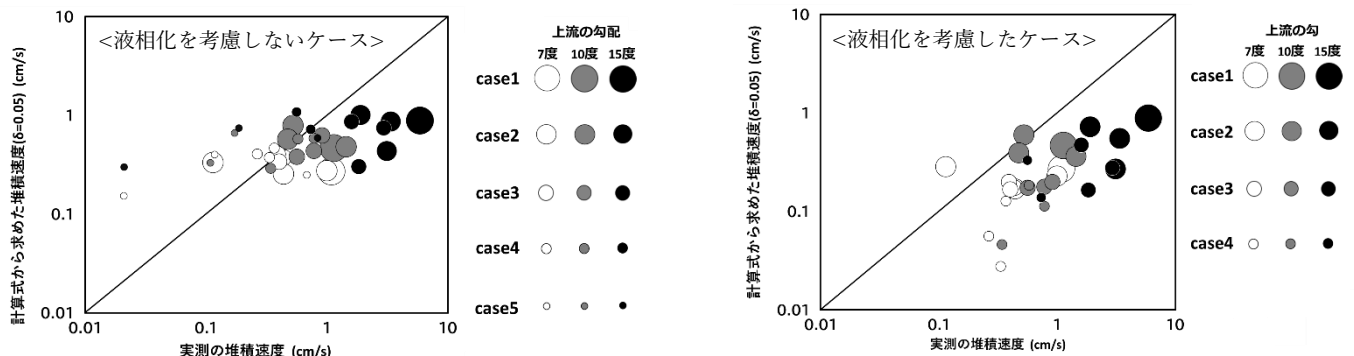


図3. 堆積速度の実測値と計算値の比較

場合の結果である。右図は細砂を液相（液相化）として扱った場合の結果である。液相化を考慮した堆積速度は、液体密度を細砂濃度分だけ上昇させて、また輸送密度を細砂分だけ減少させた。なお case5 は細砂のみのケースであり、液相化を考慮した場合、細砂は堆積しない計算となるため、右図から case5 のプロットを抜いている。液相化を考慮していない左図では、横方向に分布しているのに対して、液相化を考慮した右図では、実験値と計算値が対応する線とほぼ平行に分布している。これらのことより、液相化を考慮し、既存の堆積速度式にある物理量を掛け合わせることで、混合粒径の堆積速度に対しても精度の良い結果が計算式から得られる可能性がある。

3.2 堆積現象の観察

ハイスピードカメラで撮影した映像は図4、5に示す。また、粗砂と細砂の相互作用については図6に模式図として示した。図(a)は掃流状集合流動（ $\theta = 7, 10$ 度）、図(b)は土石流（ $\theta = 15$ 度）で流した時の堆積時における粒子の挙動である。認められた作用の詳細は表2に示す。いくつかの作用のうち、粗砂の回転運動による細砂の攪拌や粗砂の移動による細砂の押し出しはよく確認された。これらの運動によって、細砂の堆積は阻害されていると考えられる。

加えて、ハイスピードカメラの映像から、粗砂と細砂は同時に堆積せず、粗砂が堆積してから細砂が堆積する様子が見られた。

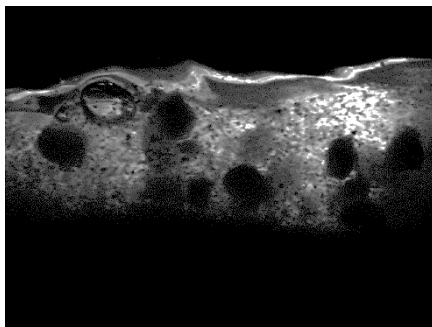


図4. 掃流状集合流動の堆積の様子(レーザー光)

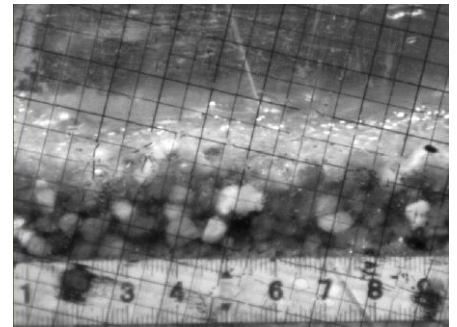


図5. 土石流の堆積の様子(白熱光)

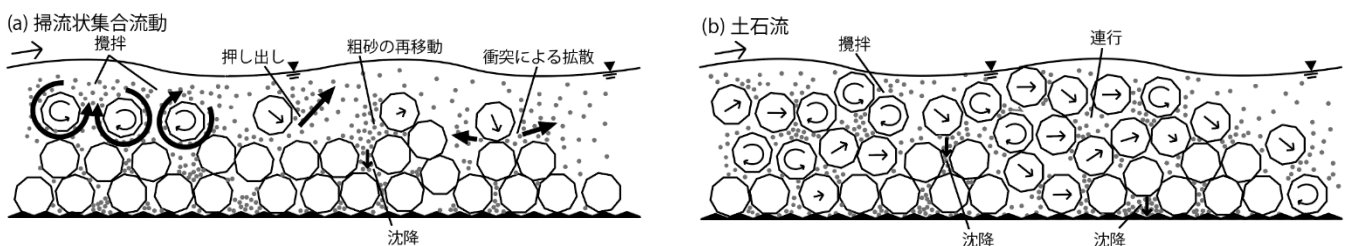


図6. 実験で確認された粗砂と細砂の相互作用の模式図 (a: 掃流状集合流動, b: 土石流)

表2. 実験で確認された粗砂と細砂の相互作用の詳細

作用	説明
攪拌	粗砂の回転運動を受けて細砂がかき混ぜられ浮上する。
押し出し	粗砂や粗砂に押された流体により粗砂の進行方向前方にある細砂が押し出される。
衝突による拡散	細砂が堆積した河床表面に粗砂が衝突することで、細砂が巻き上げられ浮遊する。
連行	粗砂の間隙同士の隙間は狭く細砂の移動は難しい。そのため、粗砂の進行方向前側にある細砂は粗砂に押されるようにして連行される。
沈降	粗砂が停止すると細砂も停止・沈降する。また粗砂による遮蔽によって細砂の流れが阻害され細砂が沈降する。(細砂の粒径が小さい場合は停止した粗砂の間隙内であっても移動し得る。)
粗砂の再移動	粗砂が安定した状態で堆積する前に細砂が隙間に入り込むため、粗砂が再移動しやすくなる。