

## 二粒径材料の掃流状集合流動の水路実験における画像解析

筑波大学大学院 ○佐藤光平

知立市 (前：筑波大学大学院) 寺田竜馬

筑波大学生命環境系 内田太郎

## 1. はじめに

近年、激甚的な豪雨により土砂・洪水氾濫が頻発している。災害後の現地調査によれば、被害の発生場は掃流状集合流動区間(約2~8度)と掃流区間(約2度以下)であり、乱流状態で流下すると考えられる粒径の小さい土砂(細粒土砂)による被害が顕著である(海堀ら, 2018)。したがって、比較的勾配が緩い場所を流下する細粒土砂の挙動を明らかにすることが土砂・洪水氾濫の対策を講じるうえで重要である。

従来、掃流状集合流動に関する機構解明を目的に、多くの水路実験が実施され、平衡濃度や砂礫移動層に関するデータが得られてきた(高橋, 1982 など)。一方で、掃流状集合流動区間において細粒土砂の挙動は十分に水路実験でも検討されてこなかった。特に二粒径以上の材料では実験事例が見られない。検討が進まなかった一因として、従来の土砂濃度の計測方法では、層別・粒径別の測定が難しいことにあると考える。

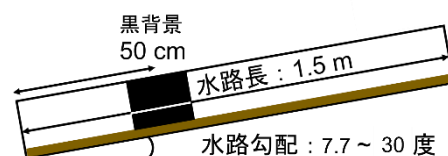
本研究では、二粒径の掃流状集合流動の水路実験を行い、画像解析を用いて層別・粒径別に土砂輸送濃度、平均流速、各層の深さを計測し、それらと水路勾配や土砂の混合比との関係を検討した。

## 2. 方法

実験に用いた水路を図-1に示す。水はポンプにより $1540 \text{ cm}^3/\text{s}$ の流量で循環し、上流端0~80 cm地点において土砂をあらかじめ800g敷き詰め、ポンプで水を供給して土砂を浸食させることにより、掃流状集合流動を発生させた。実験には砂礫移動層の骨格を形成する土砂として粒径3.1 mmの白い土砂(粗粒土砂)を乱流状態で移動する土砂として粒径0.2 mmの赤い土砂(細粒土砂)を用いた。水路勾配や混合比を調整し、各土砂濃度を变化させた。水路下流端から50 cm地点にカメラと照明を設置し、カメラを設置した側と逆側に暗幕を背景として貼り、遮光し室内の照明を消した部屋で実験とその映像の撮影を行った。

撮影された実験の映像を一コマずつTIFF形式の画像

水路を横から見た図



水路を上から見た図

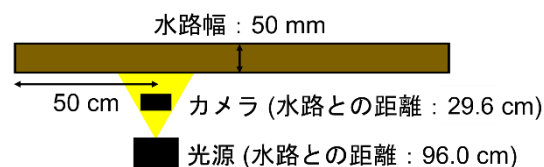


図-1 実験水路の概図

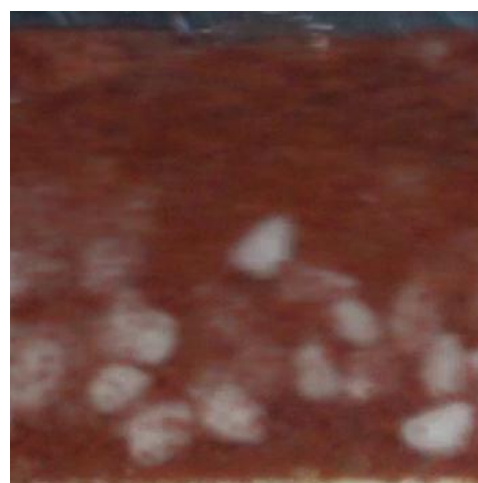


図-2 解析に用いた画像の例

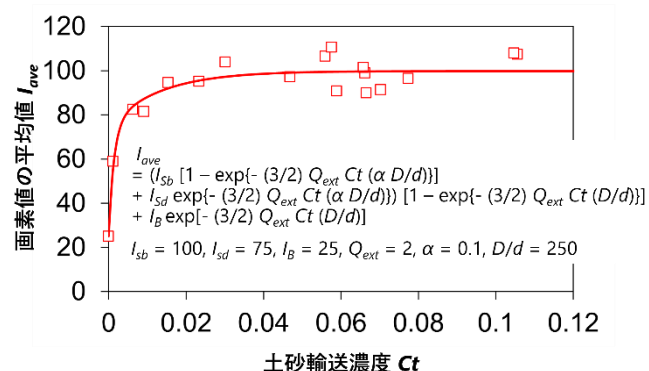
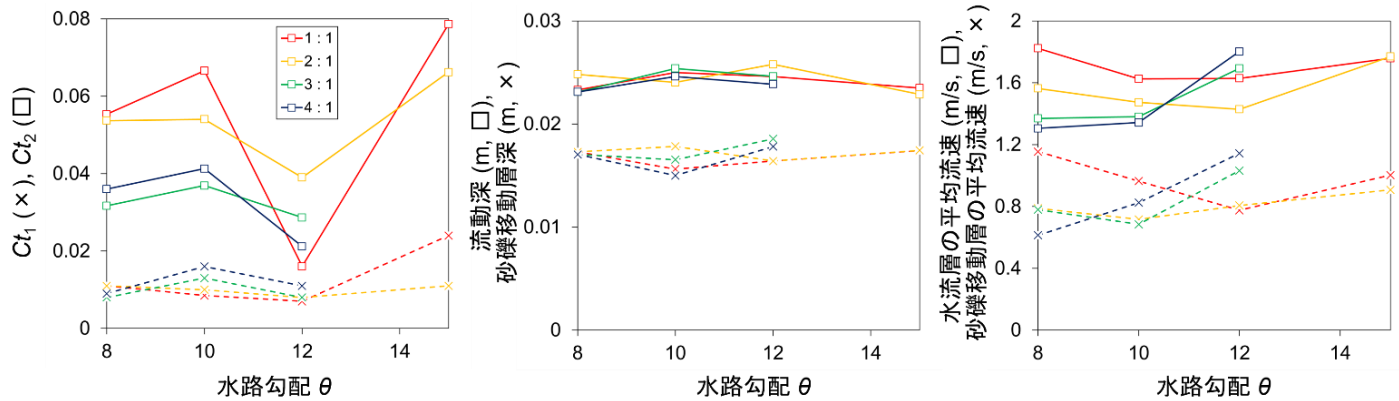


図-3 細粒土砂における土砂輸送濃度と画素値の平均値の関係と理論線 (□: 実験値, 実線: 理論値)



図－4 水路勾配と各層の細粒土砂の輸送濃度（左）、深さ（中央）、平均流速（右）の関係

に変換した。流動深全体が映るように正方形の領域を切り出した（図－2）。1画素の一边の大きさはおおよそ 0.07 mm だった。

土砂輸送濃度と流速，流動深は流れが安定している状態のときに測定した。水流層中の細粒土砂の輸送濃度  $C_{t1}$  は，輸送度土砂濃度と放射輝度（画素値）の平均値の関係を検証する実験を，細粒土砂の単一粒径条件で同じ実験水路を用いて行い，放射伝達理論（ランベルト・ベールの法則と多重散乱）から画像に映る要素を明るい土砂，暗い土砂，背景の3つとした（佐藤ら，2022）モデルを用いた理論式から求めた（図－3）。砂礫移動層中の細粒土砂の輸送濃度  $C_{t2}$  と砂礫移動層中の粗粒土砂の輸送濃度  $C_{t3}$  は，安定状態において砂礫移動層中のそれぞれの流砂量を間隙水も含めた砂礫移動層全体の流量で除すことにより，それぞれの土砂輸送濃度を算出した。

砂礫移動層の平均流速は，砂礫移動層中の粗粒土砂を 10 個程度追跡し求めた。水流層の平均流速は，浮子の追跡による平均表面流速と砂礫移動層上端に位置する粗粒土砂の追跡による平均界面流速の平均として算出した。また各層の深さは画像計測から求めた。

### 3. 結果

図－4 に水路勾配と各層の細粒土砂の輸送濃度，深さ，平均流速の関係を示す。図中の比は，実験に用いた「粗粒土砂の体積：細粒土砂の体積」を表す。左図より，水流層中の細粒土砂の輸送濃度  $C_{t1}$  はおおよそ 0.01～0.02 となった。一方，砂礫移動層中の細粒土砂の輸送濃度  $C_{t2}$  はおおよそ 0.02～0.08 となったが，混合比 1:1（赤）においてばらつきが大きかった。同じ混合比で比較する

とどちらの土砂輸送濃度も水路勾配と明確な関係が見られなかった。一方，同じ水路勾配で比較すると，細粒土砂の割合が大きいほど  $C_{t1}$  は大きい，細粒土砂の割合が大きいほど  $C_{t2}$  は小さくなるという傾向が見られた。また  $C_{t1}$  に対し  $C_{t2}$  は 2～5 倍程度の大きさになった。

図－4 の中央より，水路勾配，土砂の混合比によらず，流動深は 2.4 cm，砂礫移動層の深さは 1.6 cm 程度，水流層の深さは 0.8 cm 程度となった。砂礫移動層の深さは水流層の深さの 2 倍程度の大きさになった。

図－4 の右より，いずれの水路勾配，土砂の混合比においても水流層の平均流速のほうが，砂礫移動層の平均流速よりも大きくなった。混合比 3:1（緑）と 4:1（紺）の粗粒土砂が多いケースでは水路勾配が大きいほど各層の平均流速が大きくなった。

### 4. まとめ

本研究では，2 粒径の土砂を用いた掃流状集合流動の水路実験を行い，これまで測定困難であった層別・粒径別の土砂輸送濃度を含め，流れの状態の検討に必要な物理量をすべて画像解析により測定した。その結果，砂礫移動層中の細粒土砂の輸送濃度は水流層中の細粒土砂の輸送濃度の約 2～5 倍の大きさを持つことが分かった。この結果は画像解析を用いることで明らかになったことを強調したい。

### 参考文献

- 海堀ら（2018），砂防学会誌，Vol. 71，No. 4，p. 49－60
- 佐藤ら（2022），砂防学会誌，Vol. 75，No. 4，p. 3－13
- 高橋（1982），京大防災研究所年報，第 25 号，B－2