

土砂流中の細粒土砂に対する浮遊砂理論の適用性の検討

国土技術政策総合研究所 (前：筑波大学大学院) ○佐藤 光平

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、被害の発生場は土砂流区間(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、土砂流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、土砂流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ほとんど見られない。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、二粒径の土砂流の水路実験を行い、光学理論に基づいた画像解析を用いて層別に泥水部分に占める細粒土砂の体積分率とその鉛直分布を計測する。それらと Rouse 分布などを比較し、古典的な浮遊砂理論の適用性を検証する。

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 800 g 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、1 mm の砂粒を張り付けた固定床上(マンシングの粗度係数 $n: 0.03 \text{ cm}^{-1/3}/\text{s}$)で土砂流を発生させた。実験には砂礫移動層の骨格を形成して層流状態で移動する土砂として粒径 3.1 mm の白い土砂(粗粒土砂)を乱流状態で水と一体となり「泥水」として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(8, 10, 12, 15度)や実験材料に占める細粒土砂の質量割合(細粒割合、1/5, 1/4, 1/3, 1/2)を調整し、各土砂の輸送量を制御した14ケースの実験を行った。ただし、水路勾配15度で細粒

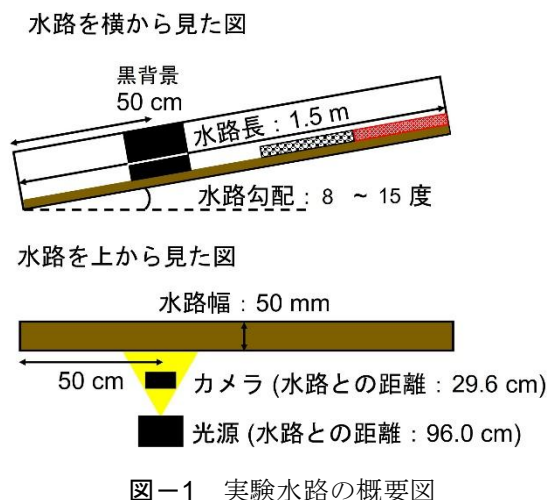


図-1 実験水路の概要図

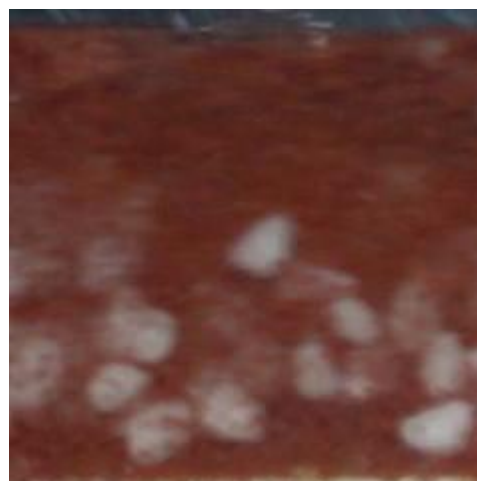


図-2 解析に用いた画像の例

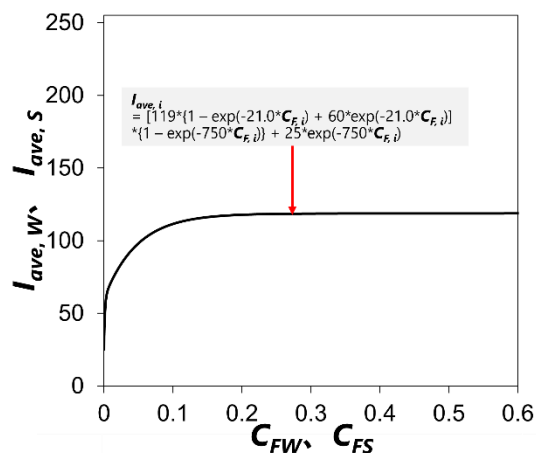
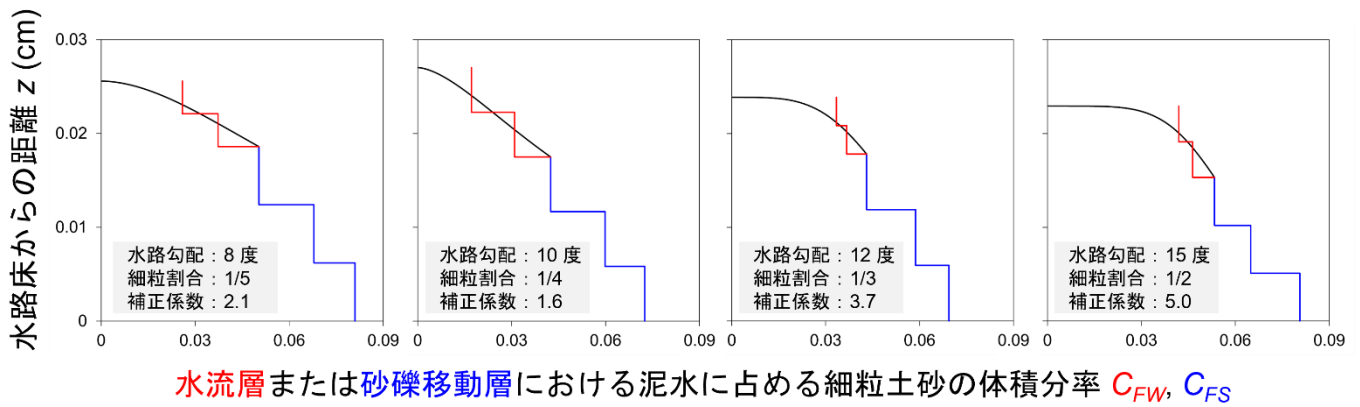


図-3 泥水に占める細粒土砂の体積分率 (C_{FW}, C_{FS}) と泥水部分の画素値の平均値 ($I_{ave, w}, I_{ave, s}$) の関係



水流層または砂礫移動層における泥水に占める細粒土砂の体積分率 C_{FW} , C_{FS}

図-4 泥水に占める細粒土砂の体積分率 (C_{FW} , C_{FS}) の鉛直分布 (赤い実線が水流層、青い実線が砂礫移動層) と Rouse 分布 (黒い実線) の比較

割合が 1/3 または 1/2 のケースでは土砂流ではなく土石流が発生したため、検討から除外した。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よそ 7.0×10^{-2} mm だった。

まず、実験映像から定常状態と見なせる時間帯を読み取った。その時間帯に対し、各層の厚さ (H_W , H_S) を映像上のスケールから判読した。その後、水路床に垂直な方向に水流層は 2 分割、砂礫移動層は 3 分割した。分割した各 Window に対し、泥水に占める細粒土砂の体積分率 (C_{FW} , C_{FS}) を、二値化処理により抽出した泥水部分 (図-2 の赤い部分) の画素値の平均値 ($I_{ave, W}$, $I_{ave, S}$) を用いて、光学理論 (ランベルト・ベールの法則と多重散乱) にもとに、画像に映る要素を明るい土砂、暗い土砂、背景の 3 つとしたモデル (佐藤ら、2022) を用いた理論式から算出した (図-3)。ここで、添え字の W は水流層、 S は砂礫移動層における物理量を意味する。

3. 結果

泥水に占める細粒土砂の体積分率 (C_{FW} , C_{FS}) は、水路床 (図-4 の下方) に近いほど大きく、解放面 (図-4 の上方) に近づくほど小さくなった。水路勾配や細粒割合が大きいほど、各 Window の値が大きく、水流層における鉛直方向の差が小さかった。

砂礫移動層の上端の Window と水流層の下端の Window における泥水に占める細粒土砂の体積分率の差は小さく、泥水に占める細粒土砂の体積分率は砂礫移動層と水流層の境界面を挟んでも急激な変化は見ら

れず、連続的に変化した。

4. 浮遊砂理論の適用

細粒土砂の沈降による下方向のフラックスと乱流拡散による上方向のフラックスが釣り合っているとした Rouse 分布および Lane-Kalinske 分布と水流層における泥水に占める細粒土砂の体積分率 (C_{FW}) の鉛直分布を比較する。

境界条件として、基準面高さは砂礫移動層と水流層の境界面の高さ (つまり H_S)、基準面濃度は砂礫移動層の上端の Window における泥水に占める細粒土砂の体積分率とする。その結果、Rouse 分布と Lane-Kalinske 分布どちらも適切な水の乱流拡散係数に対する土砂の乱流拡散係数の補正係数を設定することで実験結果を再現できた (図-4)。どのケースにおいても補正係数は 1 より大きく、同じ水路勾配では細粒割合が大きいほど大きくなった。

5. 結論

固定床上を流下する二粒径の土砂流の水路実験を行い、画像解析を用いて泥水に占める細粒土砂の体積分率の鉛直分布を取得した。その結果、泥水に占める細粒土砂の体積分率は砂礫移動層と水流層で連続的に変化した。Rouse 分布と Lane-Kalinske 分布どちらも適切な水の乱流拡散係数に対する土砂の乱流拡散係数の補正係数を設定することで実験結果を再現できた。

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