

室内水路実験における画像解析を用いた土砂濃度の空間分布の把握

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

従来、土石流の水路実験における土砂濃度測定は水路下流端における直接採取により行われてきた（高橋，1977 など）。この手法で計測される土砂濃度は採取期間で時空間的に平均化された土砂濃度であり，土砂濃度の時空間分布は反映されていない。したがって，この手法を用いて，土砂濃度が時間的に変化する非定常状態における計測や土砂濃度の空間分布の把握は難しい。

筆者らは，従来手法を補完する方法として，画像解析に着目した。佐藤ら（2022）では，水槽を用いた実験を行い，土砂濃度が画像の特徴量に与える影響や土砂の粒径の違いが与える影響を解明した。

そこで，本研究では，水路実験における実用化を見すえ，直線矩形水路の土石流の実験において，同様の解析を行い，土砂濃度と画素値の平均値の関係を定式化した。また実用化の第一歩として，構築された測定式を用いた土砂濃度の垂直分布の推定を試みた。

2. 方法

2.1 実験方法

実験に用いた水路を図-1 に示す。水はポンプにより最大 $1540 \text{ cm}^3/\text{s}$ の流量で循環し，上流端 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 地点において土砂を一定速度で供給し，固定床条件において，土石流や掃流状集合流動を発生させた。実験には平均粒径 d が 3.1 mm の均一な白砂を用いた。水路勾配や土砂供給速度，水の流量を調整し，土砂濃度を $0 \sim 0.267$ に制御した。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青い画用紙を背景として貼り，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。

2.2 流量に基づく土砂濃度の測定方法

土砂濃度の測定は定常状態において，流量に基づき行った。定常状態の前後では，土砂の流量が増減すると仮定し，定常状態の土砂の流量 Q_S を求めた。土砂濃度 C は， $C = Q_S / Q_B$ で求めた。ここで， Q_B は砂礫移動層全体の流量であり，土石流の平均速度 U と平均砂礫移動層厚 h ，水路幅 D を用いて， $Q_B = U h D$ で求めた。

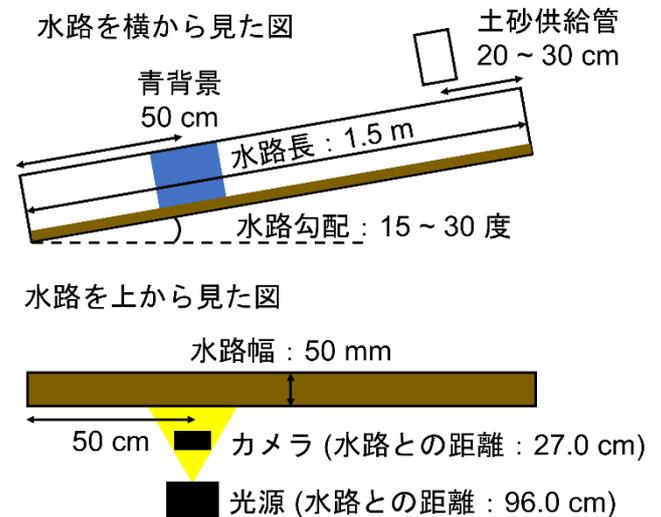


図-1 実験水路の概図

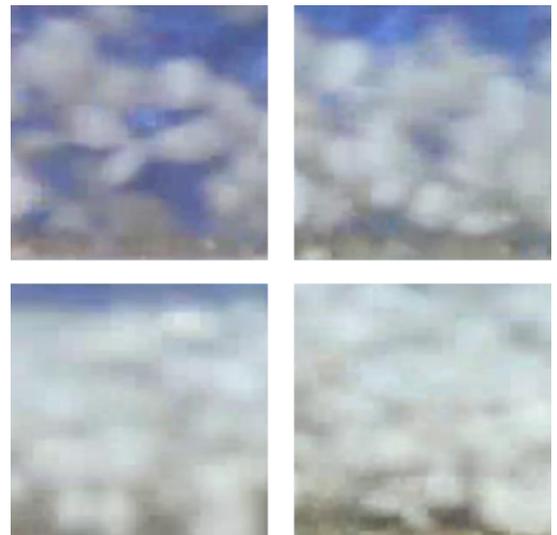


図-2 解析に用いた画像の一部

(左上： $C = 0.044$ ，右上： $C = 0.097$ ，左下： $C = 0.160$ ，右下： $C = 0.267$)

2.3 画像解析手法

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。水路床から砂礫移動層表面まで映るように一辺が $70 \sim 120$ 画素の正方形の領域を切り出した（図-2）。1 画素の一辺の大きさはおおよそ 0.2 mm だった。

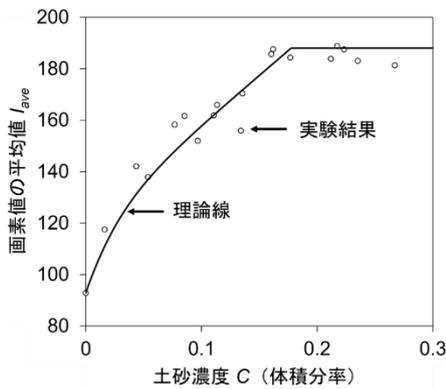


図-3 C と I_{ave} の関係

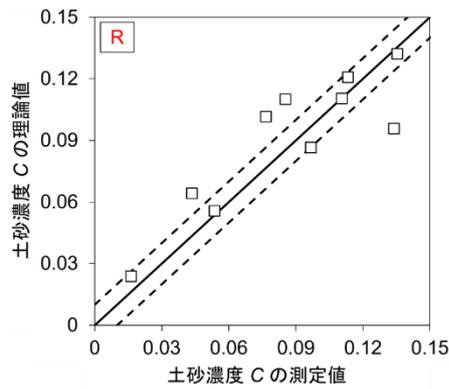


図-4 C の測定値と理論値の比較

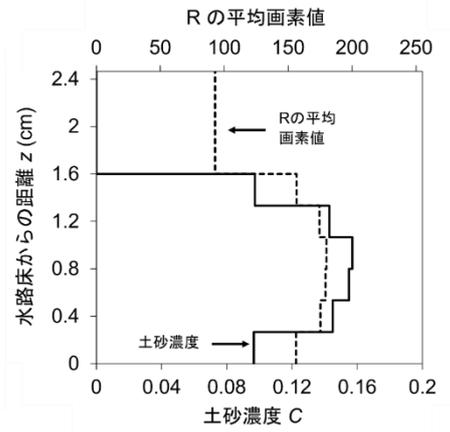


図-5 画素値の平均値と土砂濃度の垂直分布

切り出された領域の画素値（画素の相対的な明るさ）の平均値 I_{ave} を画像の特徴量として取得し、 C との関係解析した。

2.4 画像解析による土砂濃度の測定方法

図-3 に R チャンネルにおける土砂濃度 C と画素値の平均値 I_{ave} の関係を示す。 I_{ave} は C の増加に対し単調に増加し、 $C=0.16$ において、ほぼ頭打ちとなった。ここで、掃流状集合流動の理論的な土砂濃度の最大値は約 0.15 であるため（高橋，2004），本研究の手法を用いて、全ての掃流状集合流動の土砂濃度測定が可能であることが示唆された。

著者らは佐藤ら（2022）において、 I_{ave} が変化するのは、 C の変化に伴って、土砂、背景の明るさ I_S 、 I_B 、領域内の土砂、背景が映る画素の割合 F_S 、 $F_B (=1-F_S)$ が変化するためであると指摘し、 $I_{ave} = I_S F_S + I_B (1-F_S)$ と表されることを示した。ここで、 I_S と C の関係は、神田ら（1999）と同様に $I_S = k_1 C + k_2$ とした。ここで、 k_1 と k_2 は定数であり、R チャンネルにおいて、384 と 120 である。 F_S と C の関係は、放射伝達理論に基づき、 $F_S = \exp\{-(3/2) Q_{ext} C (D/d)\}$ と表した。また、 Q_{ext} は消散係数であり、ミーの散乱理論より 2 とした。 I_B は定数 (=93) とした。ここで I_{ave} は $C = 0 \sim 1$ において 93 ～ 504 の値を取れるが、上限は土砂の明るさになるため、188 を最大値とし、それ以上の領域では土砂濃度測定は不可能とした。

3. 結果

3.1 土砂濃度測定の精度検証

図-4 において、流量に基づく土砂濃度の測定値と節 3.2 の式を用いた土砂濃度の理論値を比較した。図中の

実線は 1:1 の線、破線は絶対誤差が ± 0.01 の線である。その結果、 $C=0 \sim 0.15$ において、概ね測定誤差が ± 0.01 の高精度で測定できることが示された。

3.2 土砂濃度の空間分布の推定

節 3.2 の式を用いて、土石流や掃流状集合流動の土砂濃度の垂直分布を推定した。まず、解析する領域を砂礫移動層と水流層に分けた。つぎに、砂礫移動層を平均粒径 d 程度の大きさになるように垂直方向で 6 分割した。

図-5 において、画素値の平均値と推定された土砂濃度の垂直分布の一例を示す。いくつかの異なる土砂濃度を持つ画像についても同様の解析をすると以下のことが分かった。①河床近傍には土砂濃度が小さい層が見られた。これは本実験が固定床条件で行われたためであると考えられる。②砂礫移動層中の土砂濃度は垂直方向の中心で最も大きいことが多く、そこからは上下に離れると緩やかに減少する傾向が見られた。③垂直方向において土砂濃度の最大値は最小値の 2 倍程度の値だった。

4. 結論

土砂濃度 $0 \sim 0.267$ の値を持つ土石流の実験とその撮影を行い、画素値の平均値と土砂濃度の関係を解析し、その関係を定式化した。その結果、構築された理論式を用いて、絶対誤差 ± 0.01 程度の高精度で土砂濃度の推定ができた。また、これまで測定が難しかった土砂濃度の垂直分布の測定ができる可能性が示唆された。

引用文献

- 神田ら（1999），水工学論文集，第 43 巻，p. 767-772
- 佐藤ら（2022），砂防学会誌，vol. 75，No.4，p. 3-13
- 高橋保（1977）：京大防災研年報，第 20 号，p. 403-435
- 高橋保（2004）：土石流の機構と対策，近未来社