

## 水路実験を想定した画像解析による土砂濃度測定手法の検討

筑波大学大学院環境科学学位プログラム ○佐藤光平  
筑波大学生命環境系 内田太郎

## 1. はじめに

これまで土石流や掃流状集合流動を対象にした水路実験では、水路下流端において土砂と水を直接採取することで土砂濃度測定を行われてきた（高橋，1977 など）。この手法は定常・平衡状態では有効であるが、勾配変化点などの非定常・非平衡状態における土砂濃度の測定は難しい。

また、これまでの水路実験において、画像は流動深や流速分布を把握するために用いられてきているが、土石流や掃流状集合流動に関する水路実験において、画像解析から土砂濃度を推定した検討はほとんど存在しない。しかし、画像解析により土砂濃度計測をできれば、多くの利点があると考えられる。例えば時空間的に高解像度なデータの取得ができ、実験系の外から撮影するため、非接触な測定が行えるため、非定常・非平衡状態における現象解明に役立つことが期待される。

本研究では、水槽を用いて、2つの異なる粒径の土砂に対し、0～20%の均一な土砂濃度場を作成する実験の撮影を行い、画像の特徴量を用いた土砂濃度測定の可能性を検討した。また、土砂の粒径が画像の特徴量に与える影響を検討した。最後に、放射伝達理論から導かれる式と実験結果の比較を行った。

## 2. 方法

## 2.1 実験方法

実験には10 cm×30 cm×10 cm（幅×高さ×奥行）の亚克力製の水槽を用いた。水槽には土砂を撮影したとき背景が一様な条件になるように2つの側面に青い画用紙が貼った。既往の土石流の水路実験の条件を参考にし、粒径が2 mm（粗粒）と0.2 mm（細粒）の白色の土砂を用いた。実験は各土砂・各濃度に対し3回ずつ行い、その様子を、デジタルカメラを用いて、動画として記録した。撮影は外部の光を遮断した実験室で照明を消し、光源を水槽の正面に設置し行った（図-1）。

## 2.2 粗粒における土砂濃度の制御方法

粗粒を用いた実験では、水槽に高さ20 cmまで水を張り、土砂供給管の下口を段ボールの板で塞ぎ、乾燥した土砂を供給管内に溜め、板を引き抜き水槽に土砂を供給した（図-1）。用いる土砂供給管とふるいの目の大きさやこれらの組み合わせを変え、土砂濃度を0～18%に制御した。

0～10%では水槽の全幅に土砂が広がるように供給し、投下開始から終了まで水槽内では時間的・空間的に均一に供給できていると仮定し、式(1)から土砂濃度

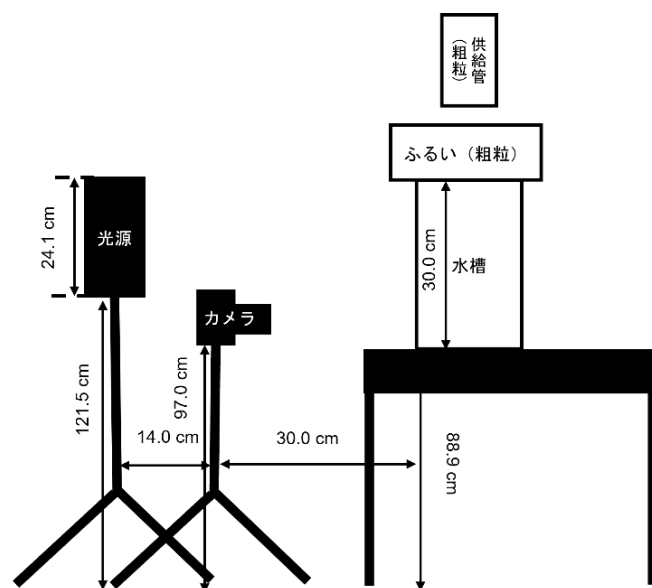


図-1 実験における光源とカメラ，実験装置の位置

を算出した。

$$C = \frac{W_c}{\sigma V_c} \times \frac{t_1}{t_2} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $C$ : 土砂容積濃度 (%),  $W_c$ : 土砂供給管への供給土砂量 (200 g または 400 g),  $\sigma$ : 土砂の密度 ( $2.6 \text{ g/cm}^3$ ),  $V_c$ :  $1000 \text{ cm}^3$ ,  $t_1$ : 土砂の先頭部が水槽の底からの高さ 15 cm 地点を通過してから土砂の先頭部が高さ 5 cm 地点を通過するまでの時間 (s),  $t_2$ : 土砂の先頭部が水槽の底からの高さ 15 cm 地点を通過してから土砂の末端部が高さ 15 cm 地点を通過するまでの時間 (s) である。

14, 18% では水槽の全幅で土砂濃度を制御するが難しかったため、土砂供給管と水槽の間にふるいを設置せず、土砂を片側に集中させるように供給し、集中して投下した土砂が分散する範囲では土砂濃度が均一だと仮定して、土砂濃度を計算した。投下した土砂がすべて水中に存在し水槽の底に達していない画像内で分散する面積  $S$  ( $\text{cm}^2$ ) を1つや複数の台形に近似して求めた。水槽の奥行方向には前壁から後壁まで一様に投下できていることを別の角度の映像から確認した。よって、土砂の分散する体積は  $S$  に水槽の奥行  $D$  (10 cm) を乗算したものとした。したがって 14, 18% では  $C$  (%) は式(2)を用いて求めた。

$$C = \frac{W_c}{\sigma S D} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

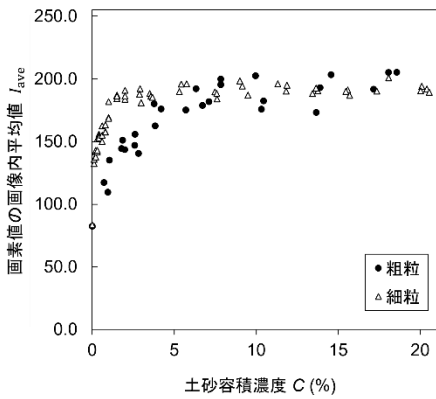


図-2 土砂濃度と平均値の関係

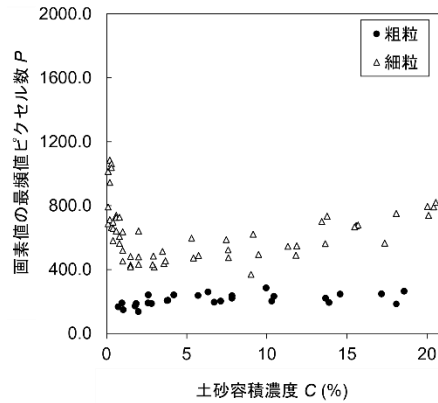


図-3 土砂濃度と最頻値ピクセル数の関係

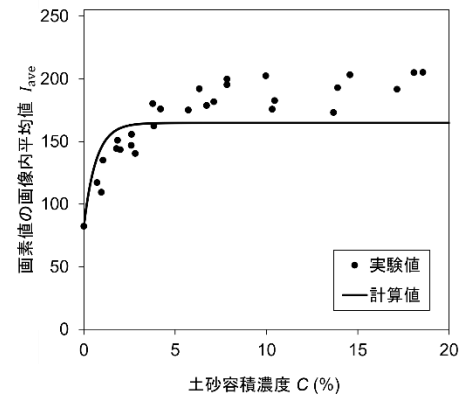


図-4 実験値と計算値の比較

### 2. 3 細粒における土砂濃度の制御方法

細粒を用いた実験では、粗粒の実験に用いたものと同じ水槽の底に土砂を敷き、深さ 10 cm まで水を注ぎ、土砂と水が静止した状態から金網を用いて、水槽内を攪拌し、土砂を巻き上げた。土砂が十分に水中で分散したのを確認し、金網を引き上げ、金網に引っかかった土砂の量を計測した。水槽の底に敷く土砂の量を変え、土砂濃度を 0 ~ 20 % に制御した。

金網による攪拌終了直後は水槽内で均一に分散していると仮定した。攪拌終了直後の画像からそのときの水深  $h_f$  (cm) を読み取り、水槽の底面積  $100 \text{ cm}^2$  と乗算して土砂の分散する体積を求めた。その体積内に底に敷いた量  $W_f$  (g) から水槽から引き上げる際に金網に引っかかった量  $W_r$  (g) を引いた量の土砂が分散していると、土砂濃度  $C$  (%) を式 (3) により求めた。

$$C = \frac{W_f - W_r}{100\sigma h_f} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

### 2. 4 画像解析の方法

撮影した映像を 1 フレームごとの RGB 画像に切り出し、流れが安定している時間帯の画像から水槽の底から粗粒では 8 ~ 10 cm、細粒では 4 ~ 6 cm の高さで中央左寄りの場所から連続 6 フレーム (0.05 秒間) を  $100 \text{ p} \times 100 \text{ p}$  で抜き出した。抜き出した画像ごとに、RGB 画像の各ピクセル・各色の画素値とそれぞれの画像内の画素値の平均値や標準偏差、最頻値とそのピクセル数を画像の特徴量として取得した。

### 3. 結果および考察

図-2 に粗粒と細粒の R 画像における土砂濃度と画素値の平均値の関係を示す。土砂濃度が大きくなるにつれ、平均値が単調増加し、徐々に頭打ちになるという傾向は共通した。しかし、平均値が頭打ちになる土砂濃度は粗粒では 4 % 程度であったが、細粒では 2 % 程度と細粒の方が粗粒より小さい土砂濃度で頭打ちになった。これは同じ体積濃度において光源光の消散の程度は粒径が小さいほど顕著であるためだと考えられる。

図-3 に粗粒と細粒の R 画像における土砂濃度と画素値の最頻値ピクセル数の関係を示す。粗粒では、土砂

濃度に対し、最頻値ピクセル数はほとんど変わらなかった。細粒では最頻値ピクセル数は同じ土砂濃度ではつねに粗粒より大きい値を取り、土砂濃度が 2 % 程度までは単調に減少し 2 % 以上では直線的に増加し、粗粒と傾向が異なった。これは粒径とピクセルの大きさの比の違いによる画素値の平均化の程度の大小によると考えられる。さらに平均値と異なり 2 % 以上でも値が変化し続けた。

次に、放射伝達理論に基づき、土砂濃度と画素値の平均値の関係を算出した。ここでは、背景と土砂粒子の画素値は変化しないと仮定し、放射伝達理論により式 (4) を導いた。

$$I_{ave} = I_s - \frac{I_s - J}{\exp\left(\frac{3}{2}Q_{ext}C_d^2\right)} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $I_{ave}$ : 画素値の画像内平均値、 $I_s$ : 十分に光があたったときの土砂の画素値で背景が見えなくなった土砂濃度 4 % 程度の実験値を参考に設定 (165)、 $J$ : 背景の画素値 (82.4)、 $D$ : 水槽の奥行 (100 mm)、 $d$ : 土砂の粒径 (2 mm) である。 $Q_{ext}$  は消散効率と呼ばれ、ミーの散乱理論により、2 となる (Petty, 2019)。

図-4 に実験値と計算値を示した。実験値と計算値を比較すると若干計算値は過大評価であるが、4 % 以下では概ね整合したが、4 % 以上では計算値は実験値を過小評価した。これは 4 % 以上の領域では、土砂が背景を完全に遮断したうえで水槽前壁付近に存在する光源光を強く反射する土砂の増加を式 (4) では表現できないためだと考えられる。

### 4. 結論

粗粒では平均値、細粒では最頻値ピクセル数を用いた土砂濃度測定の可能性が示唆され、土砂の粒径はどちらの特徴量にも影響した。実験値を説明できる理論式の導出は今後の課題である。

#### 参考文献

Petty, G. W. (近藤・茂木訳) (2019) : 詳解 大気放射, 東京大学出版会, 419 pp.  
高橋保 (1977) : 土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 20 号, B-2, p.405-435