

水路実験における画像の特徴量を用いた 土砂濃度の鉛直分布の把握

MEASUREMENT OF VERTICAL DISTRIBUTION OF SEDIMENT CONCENTRATION ON USING IMAGE FEATURES-BASED METHOD IN FLUME EXPERIMENTS

佐藤 光平¹・寺田 竜馬¹・内田 太郎²

Kohei SATO, Ryoma TERADA and Taro UCHIDA

¹筑波大学大学院理工情報生命学術院生命地球科学研究群 (〒305-0006 つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: koheisato.sabo@gmail.com

²筑波大学生命環境系 (〒305-0006 つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: uchida.taro.fw@u.tsukuba.ac.jp

Key Words: debris flow, sediment concentration distribution, image analysis, flume experiment

1. はじめに

近年、豪雨により土石流や土砂・洪水氾濫のような激甚的な土砂災害が毎年のように発生している。このような土石流や掃流状集合流動による災害の対策のためには、その流動の物理的な挙動を理解することが重要であるため、古くから水路実験が広く行われ、理論の構築や精度検証など多くの成果を上げてきた¹⁾²⁾³⁾。

水路実験では、流動深や流速などの流動に関わる物理量が詳細に計測されることが重要である。そのなかでも土砂濃度の鉛直分布の測定に着目すると、水路の下流端に仕切りを設ける方法²⁾や流れの中に水路床から様々な高さでピトー管を挿入する方法⁴⁾が存在するが、仕切りやピトー管による流れへの影響を完全に排除することや同時に多地点で計測することが難しい。

そこで、筆者らは従来の土砂濃度測定手法を補完するために、画像解析による土砂濃度測定に着目した⁵⁾。近年は 1080×1920 画素の高画質で 1000 fps 程度の高速撮影できるものもある。そのようなカメラを用いることで、空間解像度が 0.1 mm 程度で 1 秒間に 100 以上の時空間分解能の非常に高い解析ができる可能性がある。また実験系の外側から撮影する

ため、非接触の計測が可能になる。

筆者ら⁵⁾は水槽を用いて、粒径が 2.0 mm と 0.2 mm の均一な土砂を用いて、体積濃度が 0 ~ 0.20 の均一な土砂濃度場をそれぞれ作成し、カメラを用いて実験の映像を撮影し、土砂濃度と画像の特徴量の関係を検討した。その結果、検査領域内における画素値 (画像内の輝度を 0 ~ 255 の値に離散化したもの) の平均値 (輝度の大きさを表す) と最頻値画素率 (領域内で最も出現頻度が高い画素値を有する画素の割合、輝度分布の均一性を表す) が土砂濃度と相関を持つことを示した。土砂濃度が大きくなると、画素値の平均値は土砂濃度の変化に対する変化が小さくなり、どちらの粒径においても光学的距離 (体積濃度と検査領域の奥行に比例、粒径に反比例) が 15 以上 (奥行 10 cm では、2.0 mm の土砂では土砂濃度 0.10、0.2 mm では土砂濃度 0.1 に相当) になると変化がほとんど見られなくなった。一方、最頻値画素率は、土砂濃度の増加に対し、減少したあと増加する傾向を見せた。粗粒においてはその変化は小さかったが、細粒においては画素値の平均値がほとんど変化しない濃度においても直線的に増加した。

したがって、画像の特徴量を用いて、奥行が小さい場合、土砂濃度を把握できることが示唆される。また、画像解析では検査領域を任意に設定できるこ

とから、画像解析を用いることで粒径程度の解像度かつ高い時間分解能で土砂濃度分布を得られ、既往理論の詳細な検討や改良につながる可能性がある。

そこで本研究では、画像内の画素値から算出される簡易な画像の特徴量を用いて、石礫型土石流や乱流型土石流、掃流状集合流動、掃流（掃流砂・浮遊砂）の水路実験において、土砂濃度分布の計測が可能か、定性的に検証した。また、既往研究の実験結果や土砂濃度分布の理論と比較し、その整合性を検証した。

2. 手法

(1) 水路実験とその撮影条件

直線矩形水路を用いて、土石流や掃流状集合流動を発生させる実験を行った（図-1）。多数の実験を比較的容易に実行できるように、水路長 L は 150 cm、水路幅 D は 5.0 cm とした。水路勾配 θ は 7.7~30.0 度の間で変化させた。水路の側壁はアクリル製であり、流動する土砂の様子が観察できる。水路下流端から 50 cm 上流の地点において、光が透過しないように青い画用紙を貼り、デジタルカメラで側壁方向から流れを撮影した。実験に用いた土砂は、既往研究⁹⁾に基づき、層流状態で移動するものとして平均粒径 $d=3.1$ mm の均一砂（細礫）と乱流状態で移動するものとして $d=0.20$ mm の均一砂（細砂）の2種類を選んだ。実験砂の色は、画像解析を簡単するため、白色である（図-2）。細礫を用いた実験時には、流速計測のためにトレーサーとして粒径・密度がほとんど同じ黒色の土砂を5~10個ほど混ぜた。土砂を直方体のアクリル容器に密に敷き詰められた際の体積分率 C^* は細礫では 0.607、細砂では 0.570 である。

実験では、水路勾配 θ 、供給する水の流量 Q_w 、単位時間当たりの供給土砂量 Q_i 、用いる土砂の量 W 、土砂の供給方法を変化させ、輸送土砂濃度が細礫では掃流~土石流を再現するように 0~0.512、細砂で

は掃流~乱流型土石流を再現するように 0~0.156 に制御した。土砂の供給方法は、水路内で水を循環させておき、上流端から 20~30 cm 地点において土砂を投下させる方法とあらかじめ水路床に土砂を敷き詰め水で侵食させる方法である。

実験の撮影は、部屋の照明を消し、外部の光を遮断した部屋で昼白色の光源をカメラと同方向に設置して行った（図-1）。カメラは青い画用紙が背景として貼られている水路下流端から 50 cm 付近に設置し、カメラと水路の距離は 27.0 cm である。照明はカメラの背後に設置し、照明と水路の距離は 96.0 cm である。その結果、画像内の 1 画素の大きさは、約 0.2 mm となった。

(2) 土砂濃度の測定方法

土砂濃度測定は、コマ送りにした画像を用いて、流動深と画素値の平均値がほとんど変化しない安定した時間において、土砂が分散する層（掃流状集合流動では砂礫移動層、それ以外では全層）に対し行った。土砂の流量は安定に至る前後では直線的に増減すると仮定し、安定した時間帯における土砂が分散する層中の輸送土砂濃度 C を求めた。

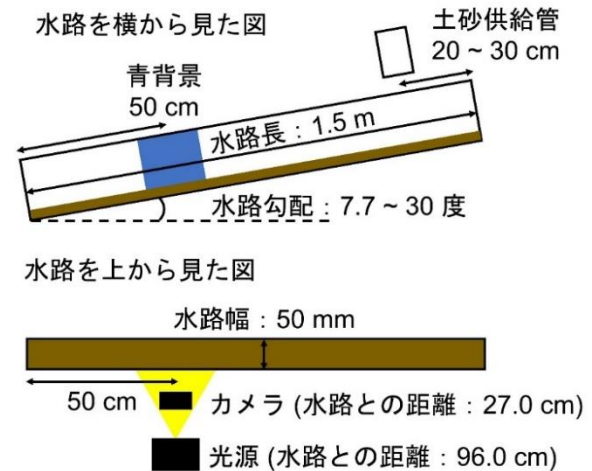


図-1 実験水路の概要

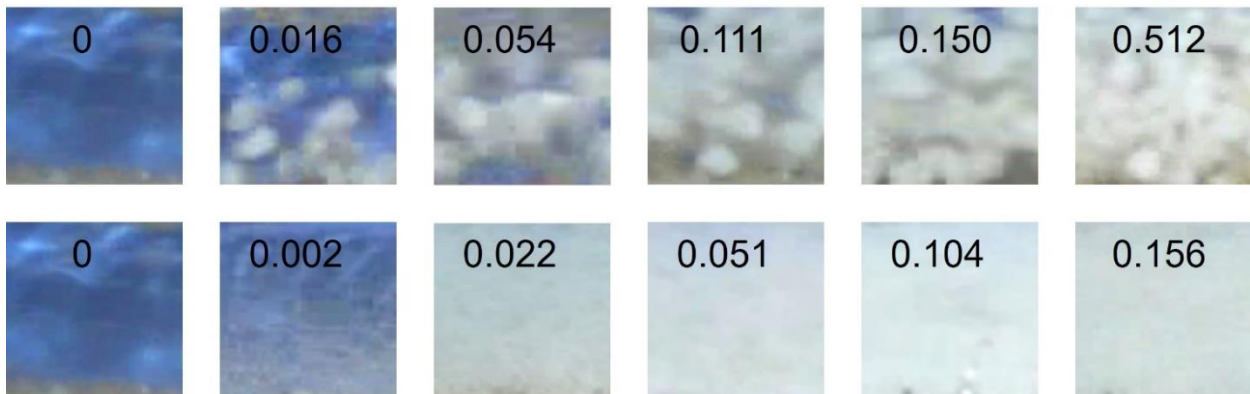


図-2 画像解析に用いた画像の例（上段：細礫，下段：細砂，数字は輸送土砂濃度を表す）

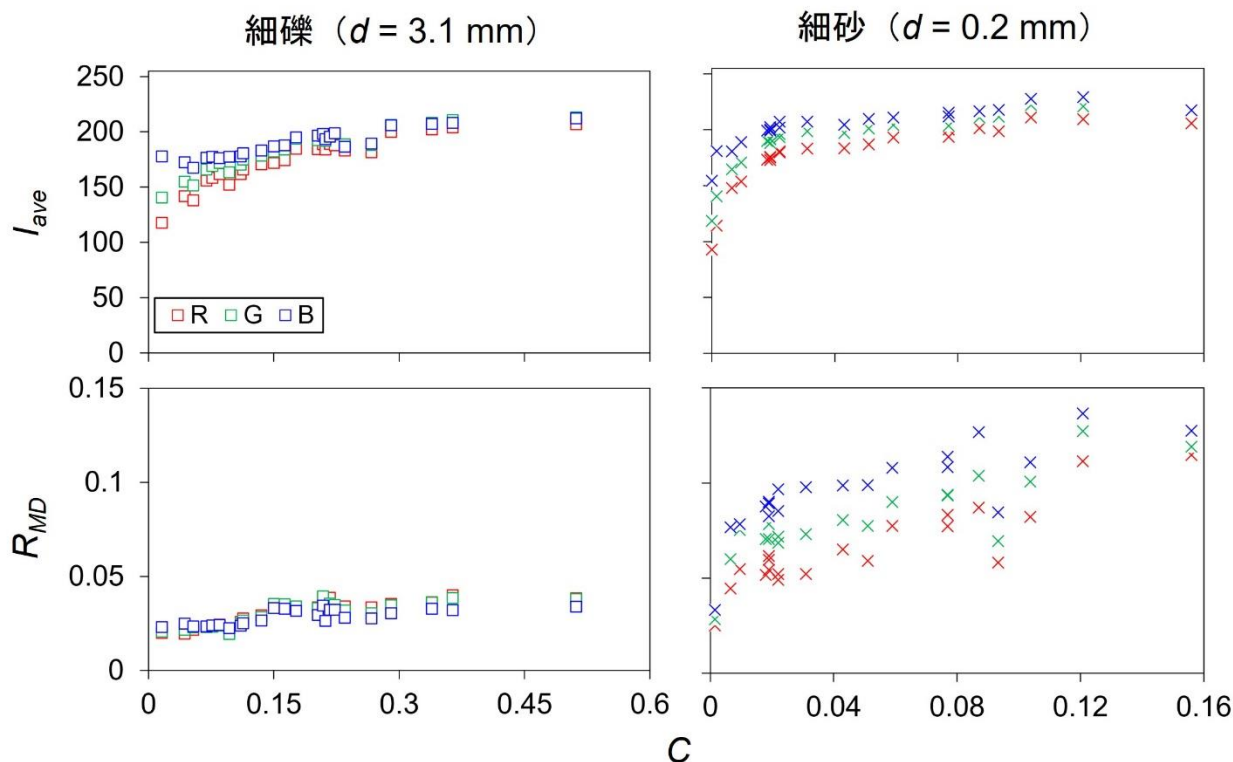


図-3 土砂濃度と画像の特徴量の関係（上段：画素値の平均値 I_{ave} ，下段：最頻値画素率 R_{MD} ）

(3) 画像解析方法

撮影した動画を1フレームごとのRGB画像に切り出し、水路下流端から50 cm上流の地点において土砂が分散する層が全て映るように一辺47~110画素の正方形の領域を抜き出した(図-2)。切り出した領域の一辺の大きさは実寸で0.832 cm~2.23 cmであった。よって切り出した領域の解像度は、約0.2 mm/pixとなった。

画素値の平均値 I_{ave} と最頻値画素率 R_{MD} を画像の特徴量として取得し、土砂濃度 C との関係解析した。ここで、最頻値画素率とは、画像内の全画素数に対する画素値が画像内の最頻値である画素の割合である。 I_{ave} は画像内における輝度の大きさを表す指標であり、 R_{MD} は画像内における輝度の均一性を表す指標である。 I_{ave} や R_{MD} は安定した状態において時間平均したものをを用いた。土砂や背景の色の特徴を検討するため、全ての色チャンネルについて調べた。

また、実寸で約3 mmの幅になるように切り出した画像を鉛直方向に5~6等分し、それぞれの高さの領域において、 I_{ave} や R_{MD} を取得し、これらの鉛直分布を取得した。その後、土砂濃度と各画像の特徴量の関係を用いて、定性的に土砂濃度分布の検討を行った。

3. 結果

(1) 土砂濃度と画像の特徴量の関係

図-3の左図に細礫における土砂濃度 C と画素値の平均値 I_{ave} と、画像内の最頻値画素率 R_{MD} の関係を示す。RGB画像のRチャンネルとGチャンネルでは、土砂濃度が増加すると、 I_{ave} は単調増加し、 C の増加とともに I_{ave} の変化率は小さくなり、 $C=0.30$ 付近で I_{ave} は土砂濃度の増加に対し頭打ちになった。一方、Bチャンネルでは、 $C<0.054$ では C の増加に対し減少となったが、それ以上の土砂濃度ではほかの色チャンネルと同様の傾向を示した。

RGB画像の色チャンネルによらず、 $C<0.10$ では土砂濃度が増加しても画像内の最頻値画素率 R_{MD} はほぼ一定の値となった。 $C=0.10\sim0.35$ では土砂濃度の増加に伴い R_{MD} は増加した。 $C>0.35$ では再度、土砂濃度の増加に対し、 R_{MD} はほとんど変化しなかった。

図-3の右図に細砂における C と I_{ave} および R_{MD} の関係を示す。RGB画像の色チャンネルによらず、土砂濃度が増加すると、 I_{ave} は単調増加し、 C の増加とともに I_{ave} の変化率は小さくなり、 $C=0.10$ 付近で I_{ave} は土砂濃度の増加に対して頭打ちになった。一方、画像内の最頻値画素率 R_{MD} は、RGB画像の色チャンネルによらず、 C の増加に対し単調増加した。

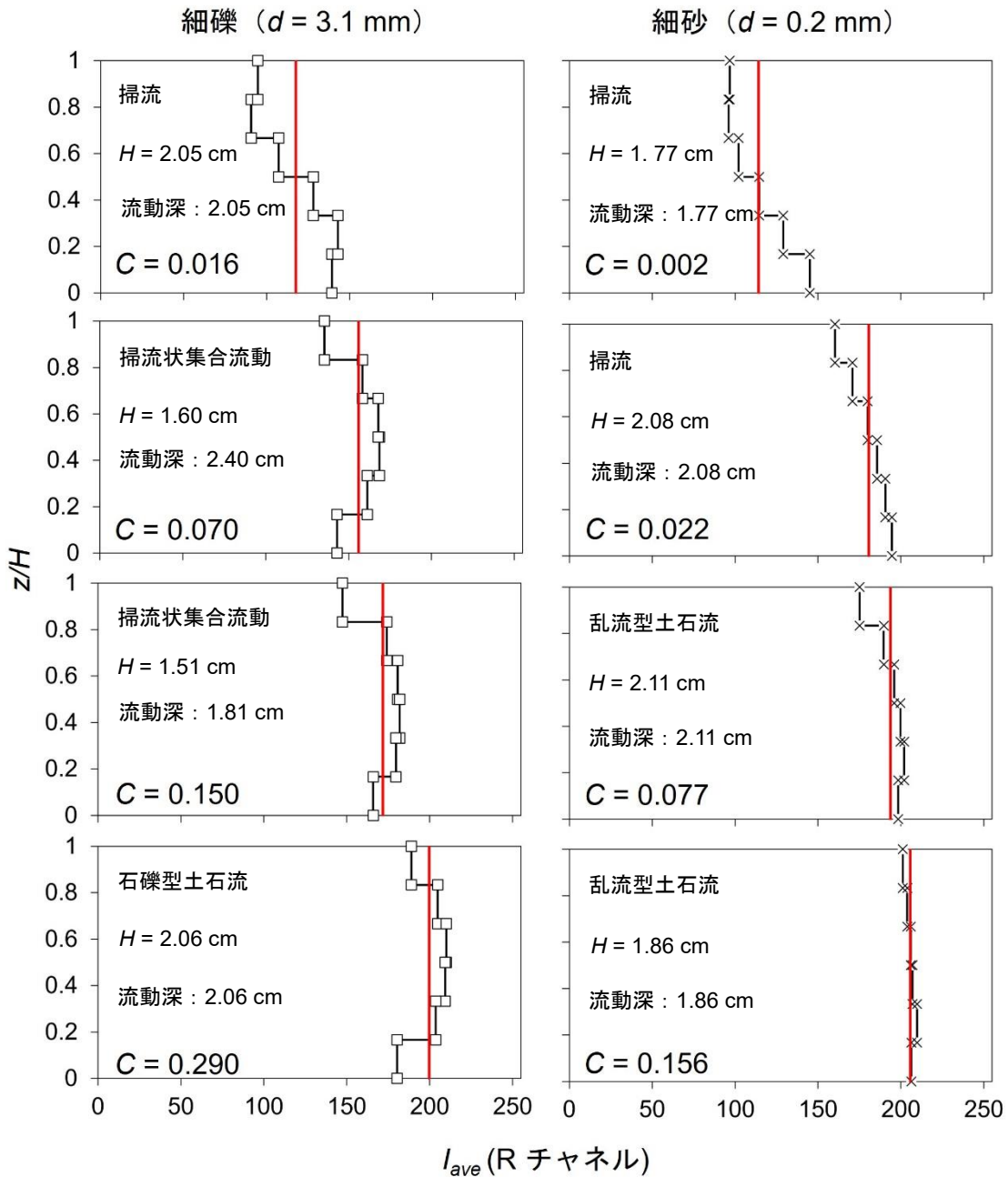


図-4 Rチャンネルにおける画素値の平均値 I_{ave} の鉛直分布 (左: 細礫, 右: 細砂, 赤線は全体の平均)

(2) 画像の特徴量の鉛直分布

まず、細礫において、 I_{ave} の鉛直分布を見る (図-4, 左)。ここで z は計測地点の計測地点からの高さ、 H は土砂が分散する層の厚さである。 $C=0.016$ のケースでは、 I_{ave} は河床に近い範囲 (下層, $z/H=0\sim 1/3$) で大きく、流れの中心付近 (中層, $z/H=1/3\sim 2/3$)、水面または水流層付近 (表層, $z/H=2/3\sim 1$) の順に小さくなった。 $C=0.070$ と 0.150 のケースでは、 I_{ave} の大きさは中層、下層、上層の順になった。 $C=0.290$ のケースでは、 I_{ave} の大きさは中層、上層、下層の順になった。また異なる C のケースで比較すると、Rチャンネルでは、 C が大きくなるにつれて、層によら

ず I_{ave} が大きい方向に移動していることが分かった。

R_{MD} の鉛直分布 (図-5, 左) を見ると、おおむね土砂が存在する層全体でみた場合の R_{MD} よりも各層の R_{MD} が大きいことが分かる。 $C=0.016$ では、 $z/H=1/2\sim 1$ の方が $z/H=0\sim 1/2$ よりも R_{MD} が大きくなっている。 $C>0.070$ ではおおむね中層の R_{MD} が上層・下層の R_{MD} よりも大きかった。また、 $C=0.070$ と $C=0.150$ のケースを比較すると $z/H=0\sim 1/6$ を除いた層において R_{MD} が増加したが、 $C=0.016$ と $C=0.070$ のケース、 $C=0.150$ と $C=0.290$ のケースをそれぞれ比較すると R_{MD} の大きさやその分布形に大きな差は見られなかった。

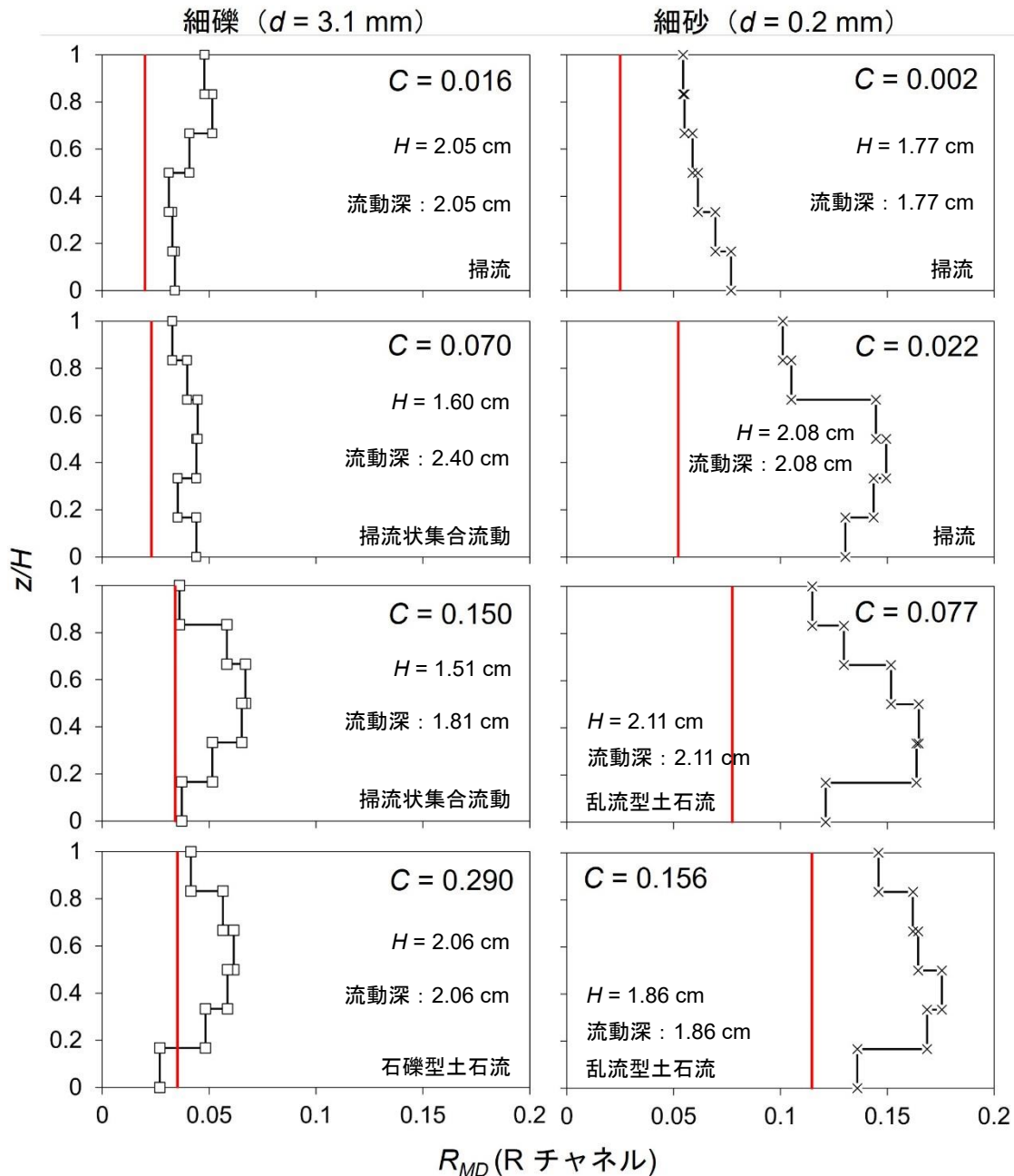


図-5 Rチャンネルにおける最頻値画素率 R_{MD} の鉛直分布 (左: 細礫, 右: 細砂, 赤線は全体の平均)

次に細砂において、 I_{ave} の鉛直分布を見る (図-4, 右). $C=0.002$ または 0.022 のケースにおいては、表層に近づくにつれて、 I_{ave} が小さくなった. $C=0.077$ または 0.156 のケースでは $z/H = 1/6 \sim 1/3$ の層で I_{ave} がもっとも大きくなり、底面や水面に近づくにつれて、 I_{ave} は小さくなった. また異なる C のケース間を比較すると C が大きくなると、層によらず I_{ave} の大きい方向に移動し、各層の差が小さくなることが分かった.

R_{MD} の鉛直分布 (図-5, 右) を見ると、流動深全体で見た場合の R_{MD} よりも各層の R_{MD} が大きいことが分かる. $C=0.002$ のケースでは、水面に近づくにつ

れ、 R_{MD} が小さくなっている. $C > 0.022$ のケースでは、 $z/H = 1/6 \sim 2/3$ で R_{MD} が大きくなり、水面や底面に近づくにつれ、値が小さくなっている. また、 C が大きくなるにつれ、層によらず、 R_{MD} が大きい方向に移動していることが分かった.

4. 特徴量と土砂濃度の分布の整合性の検証

まず、細礫の $C=0.016$ のケースにおいて、砂礫移動層の上半分と下半分で、 I_{ave} と R_{MD} がともに値が大きく異なった (図-4 と 図-5). これは $C=0.016$ が高橋らのモデルでは掃流の土砂濃度の領域であり⁷⁾,

流れの下部で輸送される土砂が多く、 C が大きいと考えると考えられる。これは下半分では滑動や転動している土砂が映るが、上半分では跳動する土砂が映るもののほとんどの時間において青い背景のピクセルが映り込んでいるためだと考えられる。次に、 $C > 0.070$ のケースでは、掃流状集合流動または石礫型土石流であり、中層に対し表層・下層の I_{ave} と R_{MD} がともに小さかった。下層でこのような結果が得られたのは、固定床における土石流では、水路床で C が小さい層が存在するためであると考えられる⁸⁾⁹⁾。上層では、水面や水流層に向かって連続的に土砂濃度が小さくなっているためだと考えられる²⁾¹¹⁾。

細砂において、 $C = 0.002$ と $C = 0.022$ のケースでは z/H が小さいほど、 I_{ave} が大きくなった。これは、 C が小さい細粒土砂の流れにおいて、自由水面に近づくにつれて、 C が小さくなるためであり、土砂濃度の基準面が $z/H = 1/6$ より小さいためである⁴⁾¹¹⁾。 R_{MD} においては、 $C = 0.002$ のケースでは I_{ave} と同様に土砂濃度の鉛直分布を反映していると考えられるが、 $C = 0.022$ のケースでは、 $C = 0.02$ 付近で R_{MD} は複雑な傾向を示し(図-3)、土砂濃度分布の影響を評価するのは難しいと考えられる。 $C = 0.077$ と $C = 0.156$ のケースでは、 I_{ave} と R_{MD} ともに中層で大きく、水面や底面に近づくにつれそれらの値が小さくなった。水面付近で I_{ave} と R_{MD} の値が小さくなったのは、これらのケースでは、上部に土砂濃度が小さい乱流状態の流れ、下部に土砂濃度が大きい層流状態の流れが存在しているためだと考えられる⁴⁾。底面付近で土砂濃度が小さくなったのは、固定床の影響が表れたためだと考えられる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

なお、本研究の実験水路は小規模であり、その影響が懸念されるが、応力や時間スケールに関する無次元数¹²⁾が、既往の実験や観測結果とほとんど同じオーダーであることを確かめた。

5. 結論

石礫型土石流や乱流型土石流、掃流状集合流動、掃流(掃流砂・浮遊砂)の実験を撮影し、画像の特徴量の鉛直分布を取得した。その結果、固定床の直上における土砂濃度の低下や水面(石礫型土石流や乱流型土石流、掃流の場合)や砂礫移動層と水流層の境界面(掃流状集合流動の場合)に近づくにつれて土砂濃度が減少することなど既往研究で示された土砂濃度の鉛直分布の実験結果に良く整合した。したがって、画像の特徴量を用いて、定性的に土砂濃度分布を把握することが可能であることを示した。

謝辞：本研究は、河川砂防技術開発公募「豪雨時の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態解析手法の提案」、科学研究費(21H01597)およびJST次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2124の支援を受けたものです。ここに記して、謝意を示します。

参考文献

- 1) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研所年報，第20号，B-2，pp.405-435，1977.
- 2) 椿東一郎，橋本晴行，末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，pp.79-91，1982.
- 3) 江頭進治，芦田和男，矢島啓，高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京大防災研所年報，第33巻，B-2，pp.487-501，1989.
- 4) 平野宗夫，橋本晴行，寺中孝司：急勾配水路における浮遊砂濃度分布に関する研究，水工学論文集，第41巻，pp.759-764，1997.
- 5) 佐藤光平，内田太郎，権田豊，里深好文：画像解析を用いた土砂濃度測定手法の基礎的検討，砂防学会誌，75巻，4号，pp.3-13，2022.
- 6) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，432 pp，2004.
- 7) 高橋保，中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，44巻，3号，pp.12-19，1991.
- 8) 平野宗夫，岩本賢，猿渡裕明：固定床における土石流の流動特性について，第15回自然災害科学総合シンポジウム，pp.483-484，1978.
- 9) 伊藤隆郭，江頭進治，宮本邦明：土石流の流れに及ぼす固相・液相の材料特性，水工学論文集，第44巻，pp.677-682，2000.
- 10) Armanini, A., Capart, H., Franccarollo, L., Larcher, M. : Rheological stratification in experimental free-surface flows of granular-liquid mixtures, Journal of Fluid Mechanics, vol.532, pp.269-319, 2005
- 11) 芦田和男，道上正規：浮遊砂に関する研究(1)河床付近の濃度，京大防災研所年報，第13号，B，pp.1-10，1970.
- 12) Iverson, R. M., Denlinger, R. P. : Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory, vol.106, No. B1, pp.537-552, 2001

(2024. 5. 31 受付)