

粗面開水路流れにおける高濃度土砂が抵抗特性および流れ場に与える影響

熊本大学 学生会員 近藤 嘉人 西 将吾 安達 幹治 正会員 大本 照憲

1. はじめに

高濃度土砂流の動力学特性は、清水流と大きく異なり、粘性や密度の増大に伴い乱れの強さ、土砂の濃度分布、流れの抵抗特性および土砂輸送能力の変質が予想されるが、流れの計測が困難であることからその流動機構については不明な点が多い。

Bradley&McCutcheon<sup>1)</sup>は、体積濃度が20%以下では密度や粘性への影響が小さい標準的な水流とし、20%以上でその特徴が現れ、特に、粘土やシルトの体積濃度が5%以上の土砂流では非ニュートン流体特性を示すことが指摘されている。

大本ら<sup>2)</sup>は、水路床の境界条件として礫床上流れの再現で基本となる球状粗度を用い、相対粗度が大きく最密充填配列された球状粗度上の流れをPIV法により計測し、粗度近傍に、安定した規則性の高い上昇流および下降流が存在することを発見した。その結果、Roughness sublayer内の流れにおいて平均流および乱れの水平面内における一様性が大きく崩れ、粗度の影響が強いことを指摘した。

本研究では、既存の研究では高濃度流での流速計測が十分に行われていないことからカオリンを用いた高濃度土砂と類似の粘性特性を有するポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液を用い、等流水深の計測と流速の計測にはPIVを適用し流れ場を清水流との比較を通して検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cm、高さ20cmの可変勾配型の循環式直線水路である。水路床及び側壁はアクリル樹脂製となっており、側壁からのカメラ撮影、レーザー光が照射可能となっている。

座標系は流下方向をx軸、水路横断方向をy軸、鉛直上向きをz軸とし、それぞれに対応した時間平均流速成分をU, V, W変動成分u', v', w'とする。座標系の詳細は図-1、粗度の縦列配列、横断配列を図-2に示す。粗度材料は直径30mmのガラスビーズを使用し、水路床に最密充填配列した。水路床は、水路上流端から流下方向に9mの長さに亘って配置した。

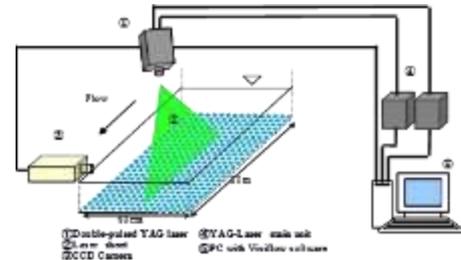


図-1 流れの計測システム

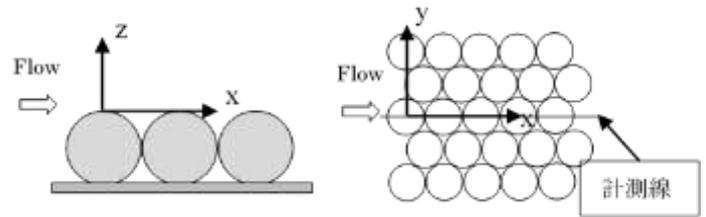


図-2 水路床の境界条件

表-1 流速計測の実験条件

	Case1	Case2	Case3
PSA 溶液濃度 $C_w$ (mg/l)	0	300	800
流量 $Q$ (l/s)	4	4	4
水路勾配 $I_0$	1/500	1/500	1/500
水深 $H$ (cm)	5	3.9	6.4
平均流速 $U_m$ (cm/s)	20.5	26.3	16.5
摩擦速度 $U_*$ (cm/s)	3.1	2.8	3.5
Fr 数 $U_m/\sqrt{gH}$	0.29	0.43	0.21
抵抗係数 $C_{fPSA}/C_{fw}$	1.0	0.47	1.9

流れは表-1に示すように所定の流量を通水し下流端の堰を操作することにより等流場を形成し、ポイントゲージを用いることで等流水深を計測した。水深は中川ら<sup>3)</sup>と同様に粗度頂部より計測した。

流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法であるPIV(Particle-Image Velocimetry)法を用いた。計測システムの概要を図-1に示す。測定位置は上流端より5mの等流場で行った。光源には空冷式の赤外線パルスレーザーを用い、シート光の厚さを1mm、パルス間隔を2000 $\mu$ sに設定し、水路上方から底面に垂直下向きに照射した。レーザー光とCCDカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、126fps(frame per second),

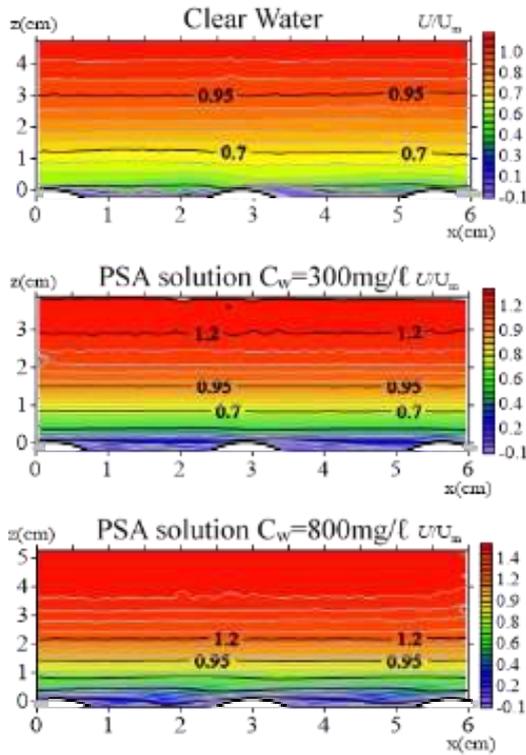


図-3 主流速のコンター

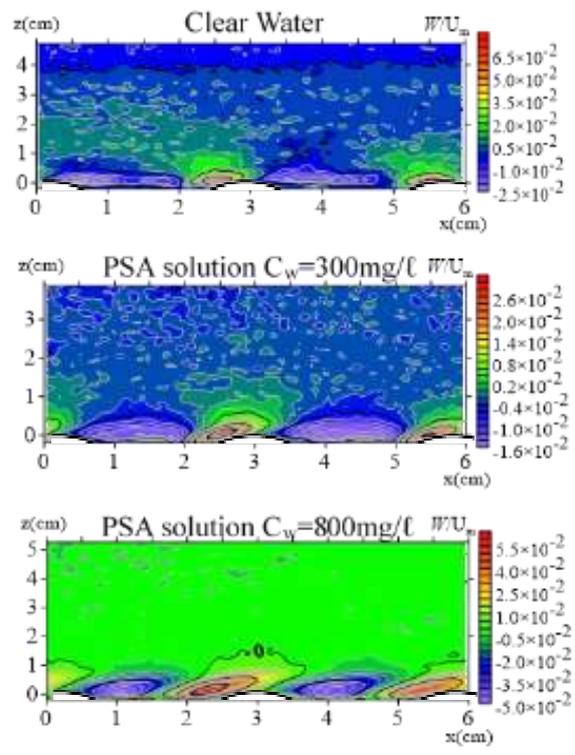


図-4 鉛直流速成分のコンター

1008×1008(pixel)のモノクロビデオ画像としてコンピューターのハードディスクに記録され、PIV法により画像処理された。計測時間は40sec、流速のサンプリング周波数は100Hz、1計測面での画像データは4000枚であった。なお、トレーサーとして粒径100μm、比重1.02のナイロン粒子を用いた。

3. 実験結果

表-1にPSA水溶液を用いた開水路実験の全抵抗係数と濃度の関係を示す。全抵抗係数は、流体の慣性力に対する全抵抗の比として定義され次式で表される。

$$C_f = 2(U_* / U_m)^2$$

ここに、 $U_* = \sqrt{gHi_0}$ 、 $g$ は重力加速度、 $i_0$ は水路勾配、 $U_m$ は断面平均流速である。表には清水の全抵抗係数 $C_{fW}$ に対するPSA水溶液の全抵抗係数 $C_{fPSA}/C_{fW}$ を示す。表-1より、抵抗係数の大小関係は、 $C_{fPSA}(300\text{mg/l}) < C_{fW} < C_{fPSA}(800\text{mg/l})$ となる。また、表-1より抵抗係数は $C_w=300\text{mg/l}$ で清水流の場合の0.47倍、 $C_w=800\text{mg/l}$ で清水流の場合の1.9倍となる。

図-3は清水流、PSA溶液濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ および $C_w=800\text{mg/l}$ における時間平均流の主流速成分、図-4は鉛直流速成分のカラーコンター図を示す。また、図中の主流速、鉛直流速成分の値は各濃度の平均流速で除し無次元化している。図-3より主流速は粗度近傍ではいずれの場合も粗度頂部より上流側で減速域、下流側で加速域がみられた。また、 $C_w=300\text{mg/l}$ および

$C_w=800\text{mg/l}$ では水面近傍で主流速の鉛直方向変化は小さくなる。図-4より鉛直流速成分は粗度頂部より上流側で上昇流、下流側で下降流が形成される。また、濃度が増大するに伴い鉛直流速成分はより規則性の高い傾向を示すことがわかる。これは、濃度の増大に伴う乱れの低減が影響したと示唆される。また、既往研究<sup>2)</sup>と同様に粗度近傍では規則性の高い上昇流および下降流が形成されたことから主流速との相関が強いことがわかる。

4. おわりに

本研究では、球状粗度を有する開水路流れの高濃度土砂流が抵抗特性および流れ場に与える影響についてPSA溶液を用い、PIV法を用い清水流との比較によってその特性を検討した。今後の検討としては運動量輸送やエネルギー収支、粘性底層の観点から高濃度土砂流における抵抗特性の関係性の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) Bradley, J. B. and McCutcheon, S. C: The effects of high sediment concentration on transport processes and flow phenomena, proc. Conf. Erosion, Debris prevention, Japan. 1985
- 2) 大本照憲・柿原ゆり・崔志英: 相対粗度の大きい開水路流れの乱流特性について, 水工学論文集, 第49巻, pp.511-516, 2005.
- 3) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦: 相対水深の小さな流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第423号, pp.73-81, 1998.