

角柱粗度を有する開水路流れの抵抗特性および 流れ場に与える高濃度土砂の影響

熊本大学大学院 学生会員 西 将吾
熊本大学大学院 学生会員 LIANY HENDRATTA
熊本大学大学院 正会員 大本照憲

1. はじめに

微細土砂を大量に含有する高濃度土砂流は泥流や黄河流域の河川、有明海湾奥部の六角川河口域において渦土を含む潮流など様々な条件下において観察されている。また、熊本県の白川では昭和 28 年 6 月 26 日水害において土砂の体積濃度は 10%を示したことが報告されている。

土砂濃度の高い流れの動力学特性は、清水流とは大きく異なり、粘性や密度が増大すると同時に、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が変質することが予想されるが、その流動機構については不明な点が多い。

本研究では、形状抵抗に着目し二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂が流れの抵抗およびその流動機構に与える影響を検討した。なお流動機構についてはカオリンを用いた高濃度土砂流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、流速の計測に PIV (Particle Image Velocimetry) を適用して、流れ場を清水流との比較を通して詳細に検討した。

2. 実験装置及び実験方法

実験に使用した水路は、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。水路床およ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。

右手座標系を用い、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平均流速成分とする。粗度材料は、ステンレス製から成る一辺 $k=a=10\text{mm}$ の正方形断面および $k=5\text{mm}, a=10\text{mm}$ の長方形断面の角柱粗度を使用した。水路床は、水路上流端より 2m の位置から流下方向に 6m の長さに亘って配置した。

本実験では、カオリンを用いた体積土砂濃度 ($C_v=0\text{-}12\%$) およびポリアクリル酸ソーダ (PSA) 溶液の濃度 ($C_w=0\text{-}800\text{mg/l}$) を変え、縦断方向の粗度間隔 λ は $k=5\text{mm}$ では $\lambda/k=8$, $k=10\text{mm}$ では $\lambda/k=10$ に設定した。

3. 結果

本節では、 $k=10\text{mm}$ ($\lambda/k=10$) を用いた実験条件で得られた流れの計測結果から、高濃度土砂流における土砂が流れに与える影響につい

て考察する。なお、高濃度土砂流では流速の計測が極めて困難であることから、模擬流体として粘性特性が高濃度土砂流に類似する PSA 溶液を用いた。

図-1 は、清水流、PSA 溶液の濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ (カオリン土砂濃度 $C_v=6\%$ に相当) および $C_w=800\text{mg/l}$ (カオリン土砂濃度 $C_v=10\%$ に相当) における時間平均流の主流速成分のカラー・コンターを示す。

図より、清水流では粗度頂部から剥離した流線は、 $x/k=4.5$ において粗度キャビティの河床面に再付着していること、剥離線より下層では、循環流が形成されることが認められる。再付着点位置は一般的な砂堆の位置に近い。また、主流速の等値線は、粗度キャビティ内では下に凸、粗度上層では上に凸の形状である。一方、PSA 溶液の濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ および $C_w=800\text{mg/l}$ では、流線の剥離は認められず、粗度キャビティ内においても清水流に比べ流線は河床面に平行に近い。

主流速の等値線は、PSA 溶液の濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ では清水流と $C_w=800\text{mg/l}$ の中間のパターンを示し、 $C_w=800\text{mg/l}$ では清水流とは異なり流下方向に大きな変化は無く、 $C_w=300\text{mg/l}$ および $C_w=800\text{mg/l}$ では水面近傍で主流速は鉛直方向に変化は小さく plug flow に近い傾向を形成し、その傾向は $C_w=800\text{mg/l}$ でさらに強くなることが分かる。非ニュートン流体の特性を示す高濃度の土砂は、粘性抵抗の増大に加えて流線の剥離を抑制し、粗度近傍の運動量輸送を減少させる効果がある。

図-2 は、清水流、PSA 溶液の濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ および $C_w=800\text{mg/l}$ の直流速成分のカラー・コンターを示す。

全般的に鉛直流速成分 W は、粗度の直上流近傍で強い上昇流、直下流近傍で弱い上昇流、粗度キャビティ中央部で広い範囲に亘って下降流が共通して発生している。また、上昇流および下降流は、半水深より上層では無視出来る大きさである。清水流との比較では、 $C_w=300\text{mg/l}$ では上昇流は半減、下降流では 6 割程度にまで減少し、粗度キャビティ境界面における運動量輸送は小さく、特に $C_w=800\text{mg/l}$ では移流による運動量輸送は無視出来る程度である。

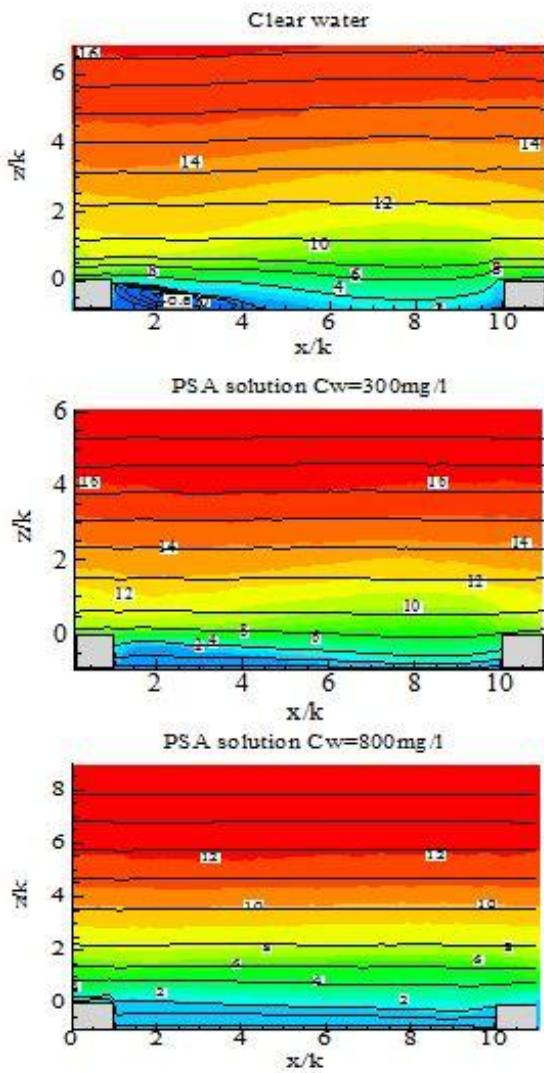


図-1 主流速

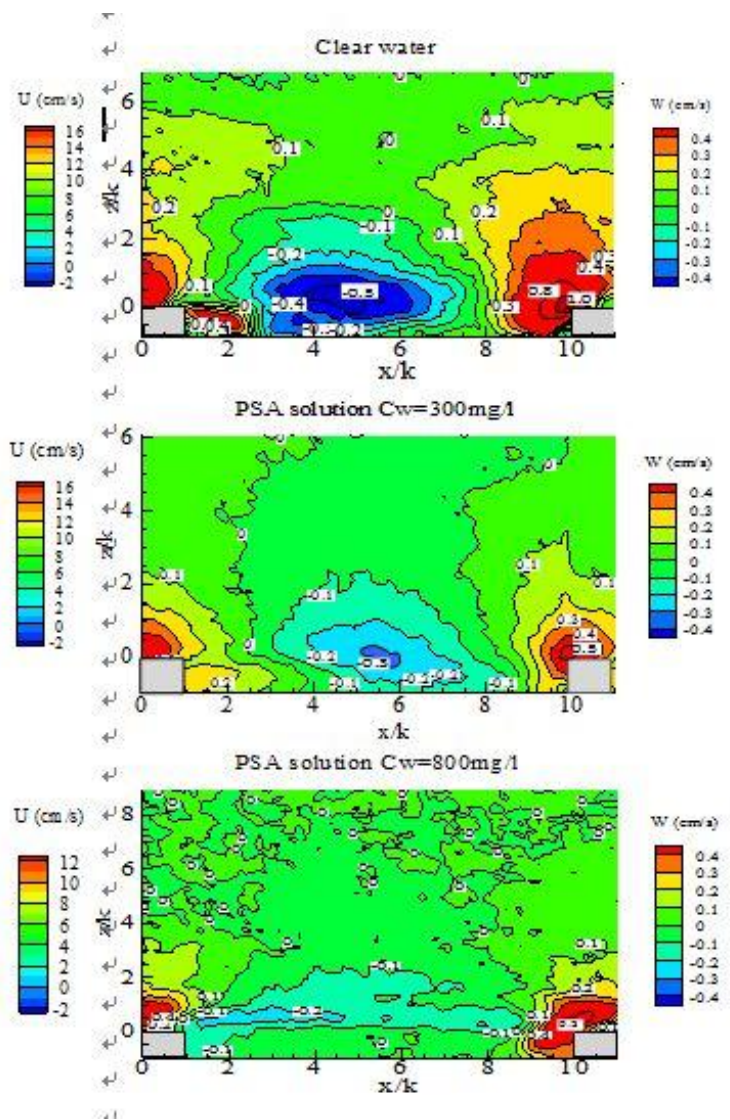


図-2 鉛直流速成分

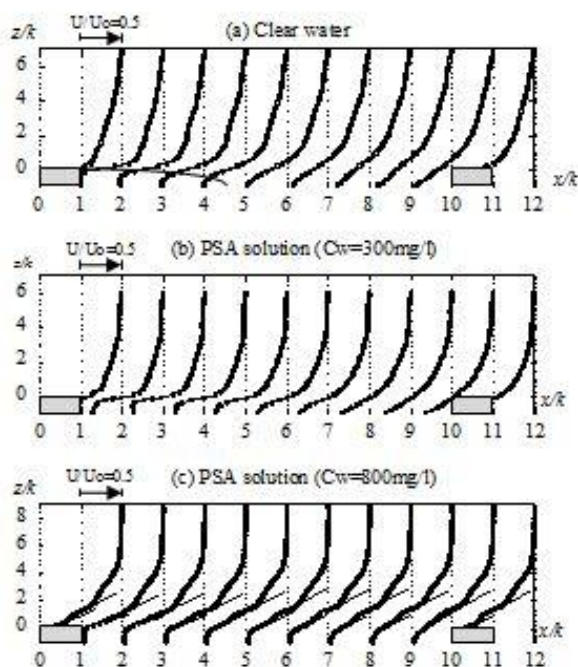


図-3 主流速の流下方向変化

図-3 は、清水流、PSA 溶液濃度 $C_w=300\text{mg/l}$ および $C_w=800\text{mg/l}$ における主流速の鉛直分布が流下方向に変化する様子を示す。主流速の鉛直分布は、粗度背後において自由混合層の特徴を示し、更に下流では、河床面に沿った内部境界層の発達および順圧力勾配による加速流の影響を受けていることが読み取れる。特に PSA 溶液 $C_w=800\text{mg/l}$ では、清水流とは異なり PSA 溶液ではせん断速度の大きい領域が 2 箇所明瞭に認められ、高粘性の影響が示唆される。なお、清水流における図中の実線は流れの剥離線を示す。PSA 溶液においては、流れの剥離およびそれに伴う循環流の形成は顕著ではないことが認められる。