

高濃度土砂流の摩擦損失特性と流動機構の解明

熊本大学工学部 学生会員 ○河野 綾子
 熊本大学工学部 正会員 大本 照恵
 熊本大学大学院 学生会員 崔 志英
 熊本大学大学院 学生会員 古賀 聖

1. はじめに

粘土やシルトを高濃度に含有する高濃度土砂流は、有明海湾奥部の干潮域や黄河下流域の河川、土石流や泥流として確認されている。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共に、乱れの強さ、土砂の濃度分布、流れの抵抗特性及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。

高濃度流に関しては従来様々な研究がなされており、高濃度流は非ニュートン流体である事が知られている。本研究は、滑面開水路における高濃度土砂流の抵抗特性及びその流動機構を明らかにするために、高濃度土砂流における非ニュートン流体特性に着目し、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(PAS)溶液を用い、流速にはPIV(Particle Image Velocimetry)のデータを基に検討した。

2. 実験装置及び条件

本実験で用いた実験装置は、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。図-1に計測システムの概略図を示す。測定断面の座標系は、水路中央を原点に取り、流下方向を x 軸、縦断方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、それぞれに対応した流速成分を U, V, W とする。水路勾配はジャッキにより $i=1/1000$ に設定し、等流場を形成した。PIV 法では、光源には YAG レーザーを用い、シート光の厚さを 1mm、流速のサンプリング周波数は 15Hz、1 計測断面での画像データは 1000 枚、計測時間は 33.3sec であった。

実験試料には、¹⁾図-2に示すように高濃度土砂流と類似した粘性特性を持つ PAS 溶液を使用した。表-1に実験条件を示す。各濃度に対応する土砂懸濁液の体積濃度は、粘性試験により類似した粘性特性を示すことが明らかとなっているものである。

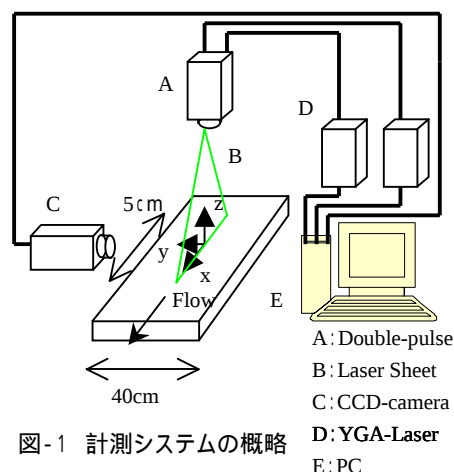


図-1 計測システムの概略

表-1 実験条件

濃度[mg/l]	300	400	500	600	800	0
流量 Q[l/s]	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
水深 H[cm]	2.63	2.65	2.85	3.06	3.50	2.53
水路勾配 i	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
摩擦速度 U _* [cm/s]	1.65	1.90	2.10	2.00	3.50	1.80

3. 実験結果と考察

図-2は PAS 溶液の各濃度における全抵抗係数 C_f を、それぞれ清水と比較したものである。全抵抗係数は、流体の慣性力に対して摩擦抵抗に形状抵抗を加えた全抵抗の比として定義され、次式によって表される。

$$C_f = 2(U_* / U_m)^2 \quad (1)$$

この時、 U_* は摩擦速度、 U_m は断面平均流速である。これより、清水に対して PAS 溶液の全抵抗係数は、濃度の増加に伴い増大する傾向にあることがわかる。

水面付近の最大流速 U_{max} と水深を用いて無次元化された主流速の鉛直分布を、図-4に示す。PAS 溶液の流速分布は、PAS 濃度 400mg/l から同様の分布を見せる。

図-5は清水および各濃度の PAS 溶液の流速分布を片対数表示したものである。この時、壁面のごく近傍での粘性抵層では、次式で表される直線流速分布の関係が成り立っている。

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{U_* y}{\nu} \quad (2)$$

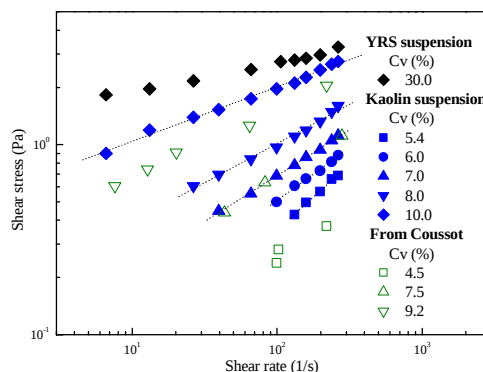


図-2 黄河土砂及びカオリン懸濁液におけるせん断応力と体積濃度の関係

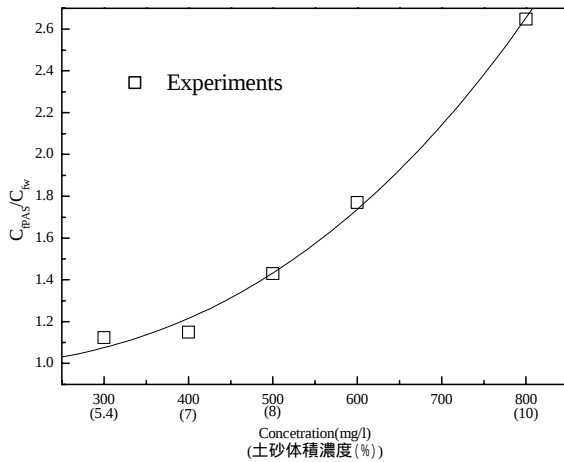


図-3 清水に対しての全抵抗係数

この時、 $\nu = \mu / \rho$ は動粘性係数、 μ は見かけの粘性係数でさる。また、乱れ状態を示す領域では、次式で表される滑面での対数分布則に従い直線に近似される。

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + A_s \quad (\text{滑面}) \quad (3)$$

この時、 κ は Karman 定数、 A_s は滑面における定数であり、清水のとき $A_s=5.5$ となる。図中に示した粘性低層 ($4 < U_* y / \nu < 4$)、バッファ層(中間域)($4 < U_* y / \nu < 30 \sim 70$)、乱流域($30 \sim 100 < U_* y / \nu$)の領域は、それぞれ清水時のものである。直線流速分布に当てはまる範囲で、PAS 溶液の 400mg/l 以上の濃度における分布はほぼ同じであることがわかる。

図-6 は、レイノルズ応力を摩擦速度 U_* の 2 乗で無次元化した値の鉛直分布である。これより、溶液の濃度が 400mg/l 以上では、レイノルズ応力はほぼ 0 に近い値をとることがわかる。図-7 は、各濃度における動粘性係数 $\nu = \mu / \rho$ を清水の動粘性係数で無次元化した値の鉛直分布である。次式で表される Power-law model を用いて求めることができる。

$$\tau = \eta_0 \left(\frac{du}{dz} \right)^n \quad (4)$$

$$\mu = \eta_0 \left(\frac{du}{dz} \right)^{n-1} \quad (5)$$

この時、 τ はせん断応力、 μ は見かけの粘性係数、 du/dz は降伏応力である。動粘性係数は清水中では一定の値を示すが、PAS 溶液中においては流れ場の関数であり、水面に近づくにつれて、その値が増大していくことがわかる。

4. まとめ

乱れが十分に小さく、粘性によって抵抗が変動するという高濃度流体の特徴は、PAS 溶液においては 400mg/l の濃度から表れ始めることが示唆される。高濃度流体の流動機構を解明するためにも、乱流から層流化される段階について検討していく必要があると思われる。

参考文献: 1) 崔志英・古賀聖・大本照憲: 高濃度土砂流の非ニュートン特性について, 水工学論文集, 第 50 巻, 2006 年 2 月。

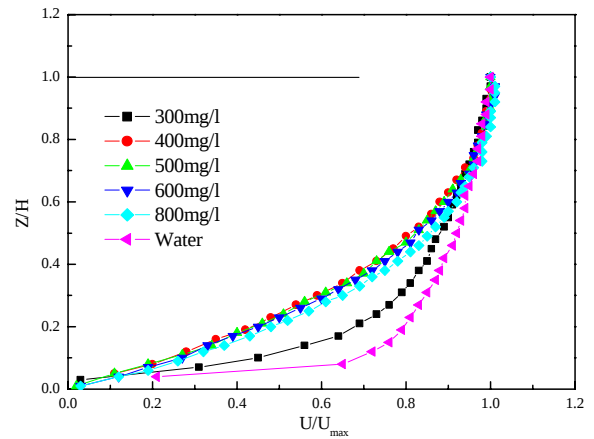


図-4 主流速の鉛直分布

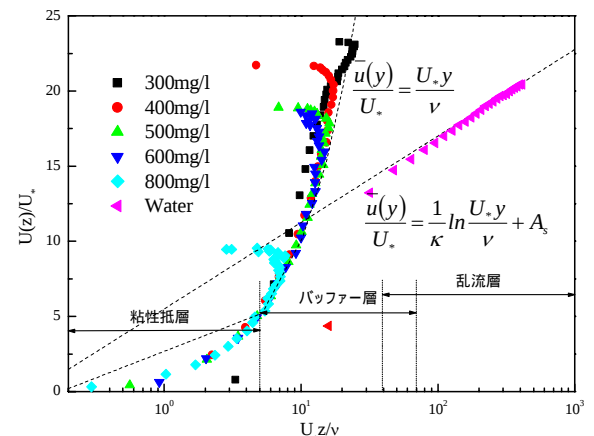


図-5 流速分布

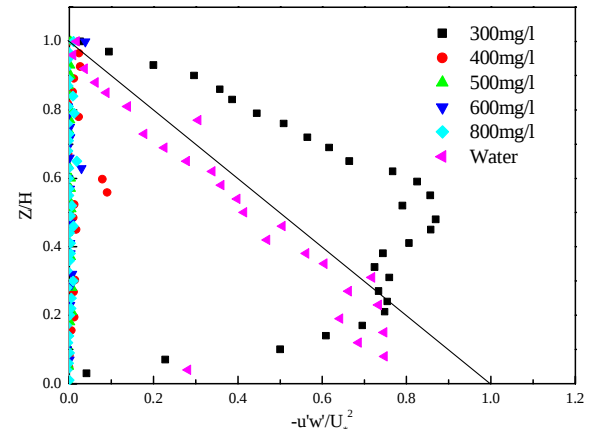


図-6 レイノルズ応力の鉛直方向変化

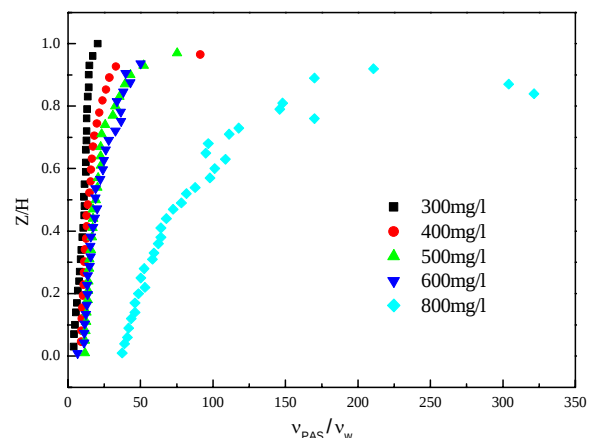


図-7 動粘性係数の鉛直方向変化