

高濃度土砂が角柱粗度を有する開水路流れの抵抗に与える影響

熊本大学大学院 学生会員 西 将吾

熊本大学大学院 正会員 大本 照憲

1. はじめに

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、流れの計測が困難なことからその流動機構については不明な点が多い。

銭寧¹⁾らはビンガム流体モデルを、P. Coussot²⁾は降伏応力を持つ擬塑性流体モデルを用いて降伏応力や粘性係数が粒子濃度や粒度分布との関数関係を求めた。芦田³⁾らはビンガム流体モデルを対象として電気2重層の概念を用いて粒子同士の結合力を評価し、せん断に伴う結合の切断エネルギーに基づいて降伏応力や粘性係数の表示式を導いた。江頭⁴⁾らは従来の土石流の研究の元に非粘着性土砂流を研究対象とし、土砂濃度によるカルマン係数の変化に着目し構成方程式を導いていた。しかし、これらの研究は非ニュートン流体流れの構造や抵抗則については明らかにしていない。

Wang and Plate(1996)⁵⁾は、高濃度土砂流において乱流から層流への移行への中間領域に遷移流を提案した。J.Bass 等(2002)⁶⁾は、超音波流速計を用いた体積土砂濃度が2—4%、断面平均流速33cm/sの流れにおいて乱流が変動し、底面近傍で乱れが単純に減衰しないことを指摘した。

さらに、二次元角柱粗度を伴う高濃度土砂流の抵抗特性およびその流動機構を明らかにするために、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、粒子画像流速計法を適用して、清水流との比較によってその特性を検討した⁷⁾。しかし、抵抗則を規定する運動量輸送については詳細に検討していない。

本研究では、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運動量輸送に与える影響を検討した。なお運動量輸送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. 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は、長さ10m、幅40cm、高さ20cmの

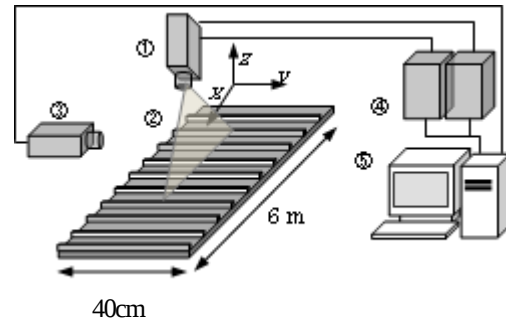


図1 流れの計測システム

- ① Double—pulsed LASER illumination System
- ② Laser sheet
- ③ CCD—Camera Kodak Megapix ES10
- ④ Pulse—Laser Main unit
- ⑤ PC with Visflow software (Timing control & Analyze)

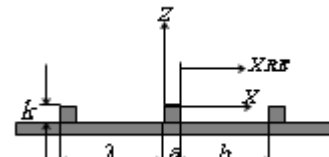


図2 水路床境界条件

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軸とする。

図1に座標系の詳細と流れの計測システムの概要を、図2に粗度の縦断配列を示す。図中の x_{RE} は、粗度後縁からの流下距離を示す。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の長さに亘り配置した。

土砂濃度が流れの抵抗に与える影響を検討した実験条件を表-1に示す。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($C_p=0\text{--}800\text{mg/l}$)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。また、土砂濃度が運動量輸送に与える影響を検討した実験条件を表-2に示す。

表-1 流れの抵抗に関する実験条件

Case		Concentration	Discharge (l/s)	Channel slope (I ₀)
Kaolin suspension	k= 5mm	C _v = 0 ~ 12 %	4	1/500
	k=10mm			
PSA solution	k= 5mm	C _w = 0 ~ 800 mg/l	4	1/500
	k=10mm			

表-2 流速計測の実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3
PSA concentration C _w (mg/l)	0	300	800
Discharge Q(l/s)	4.0	4.0	4.0
Flow depth H(cm)	7.96	7.19	9.61
Roughness high k(mm)	10	10	10
Mean flow velocity U _m (cm/s)	12.56	13.91	10.41
Friction flow velocity U _* (cm/s)	3.95	3.75	4.34
Maximum flow velocity U ₀ (cm/s)	16.24	19.45	19.18
Channel slope I ₀	1/500	1/500	1/500
Froude number U _m (gH) ^{1/2}	0.14	0.17	0.11
Reynolds number U _m H/ν	10000	-	-

3. 実験結果

図 3 にカオリン懸濁液及び PSA 水溶液を用いた開水路実験の全抵抗係数と濃度との関係を示す。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、 $U_* = \sqrt{gh i_0}$ 、 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。

図中の縦軸は清水の全抵抗係数 c_{fw} に対するカオリン懸濁液の全抵抗係数 c_{fk} の割合 c_{fk}/c_{fw} および PSA 水溶液の全抵抗係数 c_{psa}/c_{fw} を示す。なお、図中には滑面開水路におけるデータも補足している。抵抗係数 c_{fk}/c_{fw} はカオリン懸濁液 $C_v=4\sim8\%$ 範囲では、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では $0.54\sim0.98$ の範囲、粗度高さ $k=10\text{mm}$ では $0.65\sim0.91$ の範囲で変化し、土砂流は清水流に較べて小さいことが分かる。特に、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では、 $C_v=4\%$ で $c_{fk}/c_{fw}=0.54$ 、 $k=10\text{mm}$ では、 $C_v=6\%$ で $c_{fk}/c_{fw}=0.66$ である。一方、PSA 溶液の全抵抗係数 c_{psa}/c_{fw} は、PSA 溶液の濃度 $C_w=200\sim600\text{mg/l}$ の範囲では、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では $0.72\sim1.0$ の範囲、粗度高さ

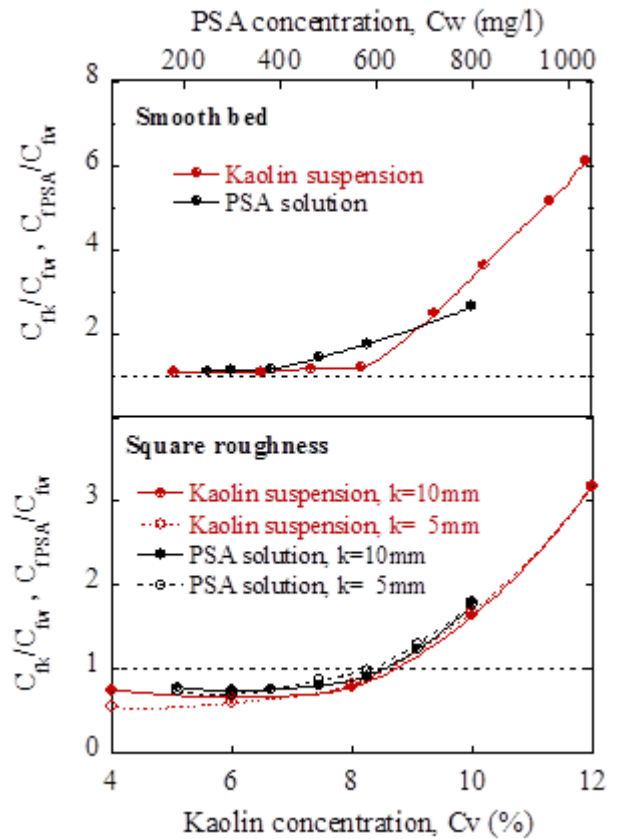


図 3 土砂濃度が抵抗係数に与える影響

$k=10\text{mm}$ では $0.74\sim0.91$ の範囲で変化し、土砂流と類似の傾向を示す。

なお、滑面開水路におけるカオリンの土砂流では、抵抗係数 c_{fk}/c_{fw} は、 $C_v<8\%$ ではほぼ 1 に近く、清水流と大差は無く、 $C_v>8\%$ では土砂濃度に比例して増大する傾向がある。二次元角柱粗度においては土砂は、形状抵抗を大幅に削減することが示唆される。

参考文献

- 1) 銭寧, 高含沙水流運動, 清华大学出版社, 1989.
- 2) P.Coussot : Rheology of debris flow – Study of concentrated suspensions. Ph.D. thesis, INPG, Grenoble, France (in French), 1992
- 3) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸: 高濃度流れに関する研究(1) – 粘性係数と沈降速度 –, 京都大学防災研究所年報, No. 28, B-2, 1985, pp367-377
- 4) 江頭進治・芦田和男・田野中新・佐藤隆宏: 泥流に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No.35,B-2, pp79-88, 1992
- 5) WANG, Z. AND PLATE, E.J: A preliminary study on the turbulence structure of flows on non-Newtonian fluid: Journal of Hydraulic Research, v. 34, p. 345-361, 1996
- 6) Jaco H. BAAS, James L. BEST, Jeffrey PEAKALL, and Mi WANG : A Phase Diagram for Turbulent, Transitional, and Laminar Clay Suspension Flows, Journal of Sedimentary Research, 2009, v. 79, 162-183
- 7) 大本照憲・Liany Hendrata・西将吾: 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, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.70, No.4, I_655-I_660, 20142