角柱粗度を有する粗面乱流における高濃度土砂流の抵抗特性およびエネルギー収支

西将吾¹・大本照憲²

¹学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (〒860-8555熊本市中央区黒髪2丁目)

E-mail: snishi800@gmail.com

²正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (同上)

E-mail: ohmoto@kumamoto-u.ac.jp

高濃度土砂流は浮遊状態で大量のシルトや粘土を含むことから非ニュートン流体特性を示すが、高濃度土砂が十分に発達した開水路粗面乱流に与える影響については十分明らかにされていない。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エネルギー収支に与える影響を実験的に検討した。実験結果から角柱粗度において土砂流は清水流に較べて体積土砂濃度が $C_v < 8.5\%$ では抵抗が小さく、逆に $C_v > 8.5\%$ では抵抗が大きくなる。その原因として体積土砂濃度が $C_v < 8.5\%$ では乱れエネルギーの生成項の減少、 $C_v > 8.5\%$ では直接的粘性散逸の増大が挙げられた。なお、実験では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、流速の計測に粒子画像流速計測法(PIV)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。

Key Words : *non-Newtonian fluids, open channel flow, two-dimensional square ribs, PIV*

1. はじめに

Bagnold¹⁾の先駆的研究以来、浮流砂の体積濃度が比較的大きくなれば乱流構造が大きく変化することは知られていた。特に、レオロジー特性を有する非ニュートン流体の高濃度土砂流においては乱れが抑制される。乱れが低減する流れの事例として水中泥流(Subaqueous mudflows)、湖沼や沿岸の乱泥流(turbidity currents)、河川における高濃度土砂流(hyper-concentrated flows)、地表上の泥流(sub-aerial mudflows)、火山のラハール(ahars)が挙げられる。

しかし、高濃度土砂流の研究は乱れ特性量の取得が困難なため概念モデルを基にしたものが主流で実証性に乏しい。これらのモデルは、土砂濃度の増大に伴い急激な乱れの減衰を仮定している。しかし、モンモリロナイトやカオリンの粘土粒子を用いた実験的研究によって、層流と乱流の間に遷移乱流の存在することが指摘された。

Wang and Plate²⁾は、モンモリロナイト懸濁流の遷移流では河床近傍で強い乱れ、壁から離れた層流域での乱れの減衰に特徴があることを指摘した。Baas and Best³⁾は、カオリン粘土粒子を用いた滑面開水路流れにおいて体積土砂濃度2%~4%の範囲で乱流構造が大幅に変質しWang and Plateの遷移流に類似していることを見出した。

開水路流れにおける流れの抵抗は、流体それ自身の内部特性(密度、粘性)、水路の形状、曲がり、路床の粗

度(大きさ、形状、配列)、移動床であれば更に河床波の形状抵抗に規定される。

Z.Wang⁴⁾は、滑面、礫床(gravel bed)および巨礫床(stone bed)においてカオリン懸濁流の体積土砂濃度を9%の範囲で変化させ、抵抗係数は、礫床および巨礫床においては土砂濃度が3-9%の範囲では土砂濃度の増大に伴って明瞭な減少傾向を示し、滑面では微増することを示した。

高濃度土砂流に関する既往研究においては、定量的で客観的な実験データが少なく、特に乱流特性量については概念モデルに基づく議論が多く、レイノルズ応力の計測は皆無に等しく、その実態は不明な点が多い。

著者等⁵⁾は、高濃度土砂流における非ニュートン流体特性に着目し、黄河下流域の済南市で採取した河床材料と市販の粘土(カオリン)を用いて高濃度土砂流を管路流に発生させ、その抵抗特性を検討した。なお、カオリンの比重は2.6である。

黄河土砂とカオリンの何れも土砂濃度の増大に伴って摩擦損失係数は増大し、体積濃度が10%で清水に比べて黄河土砂で1.30倍、カオリンで1.28倍であり、若干黄河土砂の方で若干大きな値を示した。また、高濃度土砂流においては粘性係数のせん断速度依存性が強く現れ、低せん断速度においては高濃度土砂流の粘性係数は清水に較べて $10^2 \sim 10^3$ にまで達すること、および粘性係数のせん断速度依存性がビンガム流体モデルでは説明できない

図-1 流れの計測システム

図-2 水路床境界条件

ことが認められ、低せん断速度領域においてPower-lawモデルにより近似できることを明らかにした。また、高濃度土砂流と類似な粘性特性を持つ高分子剤を用いた滑面開水路流れにおいて強い粘性により乱れが抑えられ層流化されることが明らかになった。

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⁾。さらに、抵抗則を規定する運動量輸送について詳細に検討した⁸⁾。

なお、ポリアクリル酸ソーダ（PSA）溶液は、高濃度土砂流と類似の粘性特性を有し、粒子画像流速計法を適用できる利点がある。この他、無色、無臭、食品や化粧品にも用いられ無害、耐熱性、耐塩性を持つことが知られている。

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エネルギー収支式における乱れの生成項および粘性散逸項に与える影響を検討した。なお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（ x_1 軸）、水路横断方向をy軸（ x_2 軸）、

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	$k=5\text{mm}$	$C_v=0\sim12\%$	4	1/500
	$k=10\text{mm}$			
PSA solution	$k=5\text{mm}$	$C_p=0\sim800\text{mg/l}$	4	1/500
	$k=10\text{mm}$			

表-2 流速計測の実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3
PSA concentration C_p (mg/l)	0	300	800
Discharge Q (l/s)	4.0	4.0	4.0
Flow depth h_0 (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_b (cm/s)	16.24	19.45	19.18
Channel slope I_0	1/500	1/500	1/500
Froude number $Um/(gH)^{1/2}$	0.14	0.17	0.11
Reynolds number UmH/ν	10000	-	-

鉛直上向きをz軸（ x_3 軸）とし、それぞれに対応した平均流速成分を $U(U_1), V(U_2), W(U_3)$ 、変動成分を $u'(u'_1), v'(v'_1), w'(w'_1)$ とする。座標系の詳細は図-1、粗度の縦断配列を図-2に示す。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の長さに亘って配置した。

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（ $C_v=0\sim12\%$ ）およびポリアクリル酸ソーダ（PSA）溶液の濃度（ $C_p=0\sim800\text{mg/l}$ ）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。上記 λ/k の値は、著者等⁸⁾の実験によれば清水流における二次元角柱粗度の縦断間隔 λ の変化に対して抵抗係数が最大値を示したためである。

流れは所定の流量を通水し下流端の堰を調節することにより等流場を形成し、ポイントゲージを用いて等流水深を計測した。なお、粗度配置区間は6mで、その上流端および下流端近傍では不等流となるが中央部の3m～4mの間では水深はほぼ一様であり等流場と判断出来た。

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。後述する様に高濃度土砂流を模擬した

図-3 高濃度土砂が水深に与える影響 (滑面)

図-4 高濃度土砂が水深に与える影響 (粗面)

図-5 高濃度土砂が抵抗係数に与える影響 (滑面)

図-6 高濃度土砂が抵抗係数に与える影響 (粗面)

ポリアクリル酸ソーダ (PSA) 溶液の濃度 $C_p=300 \text{ mg/l}$ および 800 mg/l は、ほぼ同一の抵抗係数および粘性係数から試算すればそれぞれ、カオリンの体積土砂濃度 $C_v=6\%$ および 10% に相当する。

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、粗面先端より 4 m 下流位置の等流場で行った。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 1 mm 、パルス間隔を $1000 \mu\text{s}$ 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、 100 fps (frame per second) 960×1018 (pixel) のモノクロビデオ画像としてコンピュータ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。レンズは点距離が 50 mm のものを用い、 1 pixel の最小サイズは 0.06 mm である。流速のサンプリング周波数は 100 Hz 、1 計測面での画像データは 2000 枚、計測時間は 20 sec であった。なお、トレーサーとして粒径 $30 \mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子をアルコール液で十分に攪拌して水中に注入した。

3. 土砂濃度が抵抗特性に与える影響

滑面開水路の浮遊砂流においては、高濃度土砂流の抵抗は、中央粒径 d_{50} が 0.026 mm のシルトを用いた実験では土砂濃度の増大に伴って抵抗が減少傾向を示す場合⁹⁾や、逆に粘土を用いた Wang⁴⁾ の実験では体積濃度が約 9% で若干増大することが報告され、現在の所、粘土やシルトを高濃度に含む土砂流に関しては、体系的な実測データは得られておらず、濃度の増大に伴う抵抗の増減についての統一の見解は得られていない。

図-3 および 4 は、それぞれ、滑面および二次元角柱粗度における土砂濃度 C_v およびポリアクリル酸ソーダ (PSA) 溶液の濃度 C_p が等流水深に与える影響を示している。なお、図の縦軸は土砂流および PSA 溶液の等流水深と清水流の等流水深との差を清水流の等流水深によって無次元化した次式で与えた。

$$\begin{aligned} \Delta h / h_0 (C_i = 0) \\ = \{h_0 (C_i) - h_0 (C_i = 0)\} / h_0 (C_i = 0). \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、土砂流においては $C=C_v$ 、PSA 溶液の流れにお

いては $C=C_p$ である。

図-3より滑面においては体積土砂濃度が8%以内では土砂濃度の増大に伴って水深は微増しているが大きな変化は無く、体積土砂濃度が8%以上になると急激に水深が増大し、抵抗が大きくなることが分かる。

PSA溶液においては、重量濃度が400mg/ℓ以内では土砂濃度のケースと同様に水深は微増しているが大きな変化は無く、重量濃度が400mg/ℓを超えると急激に水深が増大し、抵抗が大きくなる。

角柱粗度においては、図-4より粗度高さ $k=5\text{mm}$ ($\lambda k=8$)および $k=10\text{mm}$ ($\lambda k=10$)の何れにおいても土砂流は清水流に較べて体積土砂濃度が $C_v<8.5\%$ では等流水深が小さく抵抗の小さくなること、逆に $C_v>8.5\%$ では等流水深が大きく抵抗の大きいことが認められる。特に、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では $C_v=4\%$ で極小値を示し、 $\Delta h/h_0(C_v=0)=-0.16$ 、 $k=10\text{mm}$ では $C_v=6\%$ で極小値を示し、 $\Delta h/h_0(C_v=0)=-0.15$ であり有意な差が現れている。体積土砂濃度 $C_v=10\%$ においては $k=5\text{mm}$ で $\Delta h/h_0(C_v=0)=0.19$ 、 $k=10\text{mm}$ で $\Delta h/h_0(C_v=0)=0.15$ となることから水深の増加が著しい。

熊本県の白川では昭和28年6月26日水害において新規火山灰(ヨナ)の体積濃度が10%であったために河道計画では水量に加えて土砂量10%を加えた3400m³/sを基本高水に設定している。阿蘇火山灰が大量に混入した高濃度土砂流においては単に流量が増加するだけでは無く、抵抗が大幅に増大することに留意する必要がある。

図-4より粗度高さ $k=5\text{mm}$ ($\lambda k=8$)および $k=10\text{mm}$ ($\lambda k=10$)の何れにおいてもPSA溶液の濃度 C_p が等流水深に与える影響は、カオリンを用いた土砂濃度 C_v の影響に類似した傾向を示している。具体的には土砂PSA溶液の流れは清水流に較べて $C_p<600\text{mg}/\ell$ では等流水深が小さく、 $C_p>600\text{mg}/\ell$ では逆に等流水深が大きくなる傾向を示す。なお、PSA溶液の濃度 $C_p=600\text{mg}/\ell$ は、カオリンの土砂濃度 $C_v=8.5\%$ に相当する。粗度高さ $k=5\text{mm}$ および 10mm においてPSA溶液の濃度 $C_p=300\text{mg}/\ell$ で極小値を示し、 $k=5\text{mm}$ では $\Delta h/h_0(C_p=0)=-0.10$ 、 $k=10\text{mm}$ では $\Delta h/h_0(C_p=0)=-0.11$ でありカオリンの土砂流と類似している。PSA溶液の濃度 $C_p=300\text{mg}/\ell$ は、カオリンの土砂濃度 $C_v=6\%$ に相当する。

図-5および6は、それぞれ、滑面および二次元角柱粗度における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式(2)で表される。

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

ここに、 $U_* = \sqrt{ghI}$ 、 g は重力加速度、 I 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_{fPSA}/C_{fW} を示す。

図-5より滑面においては、抵抗係数は体積土砂濃度が8%以内では土砂濃度の増大に伴って微増しているが大きな変化は無く、体積土砂濃度が8%以上になると急激が増大し、体積土砂濃度が10%では清水流に較べて約3.6倍に達することが分かる。PSA溶液では抵抗係数は、重量濃度が400mg/ℓ以内では土砂濃度のケースと同様に水深は微増しているが大きな変化は無く、重量濃度が400mg/ℓを超えると急激に水深が増大し、重量濃度が800mg/ℓにおいて2.6倍に達することが分かる。

Z.Wang⁴⁾の滑面開水路の実験では摩擦損失係数は体積土砂濃度が9%以内では土砂濃度の増大に伴って微増するが殆ど変化は無く、類似した傾向を示すことが認められた。

図-6より角柱粗度を有する粗面において抵抗係数 C_{fK}/C_{fW} はカオリン懸濁液 $C_v=2\sim 9\%$ 範囲では、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では0.55-0.98の範囲、粗度高さ $k=10\text{mm}$ では0.66-0.91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_{fPSA}/C_{fW} は、PSA溶液の濃度 $C_p=200\sim 600\text{mg}/\ell$ の範囲では、粗度高さ $k=5\text{mm}$ では0.69-1.0の範囲、粗度高さ $k=10\text{mm}$ では0.74-0.91の範囲で変化し、土砂流と類似の傾向を示す。

体積土砂濃度 $C_v=10\%$ において抵抗係数 C_{fK}/C_{fW} は、 $k=5\text{mm}$ で1.68、 $k=10\text{mm}$ で1.63であり、滑面開水路では3.63であることから抵抗増大が著しい。体積土砂濃度 $C_v=10\%$ に相当する $C_p=800\text{mg}/\ell$ のPSA溶液の全抵抗係数は、 $k=5\text{mm}$ で1.79、 $k=10\text{mm}$ で1.76であり、滑面開水路では2.65であることから二次元角柱粗度では類似の傾向であるが滑面においては小さな値となる。

水路測岸の粗度キャピティの目視観察から二次元角柱粗度ではカオリンを用いた土砂流では粗度背後に若干カオリンの堆積が見られ、このことがPSA溶液に較べて抵抗係数が若干小さくなった原因と推察される。一方、滑面開水路では底面近傍の目視観察は不可能ではあった。

4. 土砂濃度がエネルギー収支に与える影響

カオリン粘土粒子を用いた高濃度土砂を有する滑面開水路流れにおいて体積濃度10%以内では、土砂濃度はほぼ鉛直方向に一樣であった⁹⁾。角柱粗度を有する粗面流れにおいて土砂濃度が空間的に一樣であると仮定すれば

主流方向の流速成分 U_1 に対するエネルギー収支式は以下の様に表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U_1^2}{2} \right) + \bar{U}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{U_1^2}{2} \right) = & gIU_1 - U_1 \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{\rho} U_1 \bar{p} \right) + U_1 \overline{u'_1 u'_j} - \nu \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_j} \right) \right] \\ & - \left(\overline{u'_1 u'_j} \right) \frac{\partial U}{\partial x_j} - \nu \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_j} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、下添字 j はアインシュタインの縮約が行われ、上付きバーは時間平均、 g は重力加速度、 ρ は高濃度土砂流の密度、 p は圧力、 ν は高濃度土砂流ではせん断速度に依存する動粘性係数である。式(3)の左辺第1項は局所的時間変化項で定常場ではゼロで、左辺第2項は移流項、右辺第1項および第2項は平均流に対する外部エネルギー生成項、右辺第3項は、拡散項または空間輸送項と呼ばれ平均流エネルギーの再配分項であり、角柱粗度間での体積積分は、ガウスの発散定理により境界上の表面積分に変形できる。境界条件として水面でせん断応力ゼロ、固体境界面で粘着条件から流速ゼロ、更に流れ場は平衡条件を満たしていることから上流角柱粗度から流入する右辺第3項のエネルギー輸送は、下流角柱粗度から流出するエネルギー輸送に等しい。そのため、式(3)の右辺第3項は粗度間での体積積分がゼロとなるため、エネルギー収支に寄与しない。右辺第4項は平均流エネルギーから乱れエネルギーへの変換項（乱れエネルギー生成項）、右辺第5項は平均流から熱エネルギーに散逸される直接的熱散逸項である。

3節で論じた高濃度土砂流における摩擦損失係数の力学的内部構造を論じる上で、高濃度土砂が平均流エネルギーに対する右辺第4項の乱れエネルギー生成項および右辺第5項の直接的熱散逸項に与える影響が本質となり、本論では清水流との比較から考察する。

$$Total\ Loss = \left(\overline{-u'_1 u'_j} \right) \frac{\partial U_1}{\partial x_j} + \nu \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_j} \right)^2 \quad (4)$$

$$G = \left(\overline{-u'_1 u'_j} \right) \frac{\partial U_1}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$E = \nu \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_j} \right)^2 \quad (6)$$

式(4)の各項を考察する前に、式中の物理量 U 、 $\frac{\partial U}{\partial z}$ 、 $\overline{-u'_1 w'}$ 、 $\overline{u'^2}$ 、 ν について検討する。

図-7は、清水流、PSA溶液濃度 $C_p=300\text{ mg/l}$ および

$C_p=800\text{ mg/l}$ 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。縦軸および横軸は、粗度高さ k によって無次元化された。流速スケールは、自由水面近傍の最大流速 U_0 によって無次元化した。なお、縦軸は流下方向に $x/k=1.0$ 単位で流下方向にずらして表示している。また、PSA溶液 $C_p=800\text{ mg/l}$ の場合、図中には、主流速の鉛直変化率が極大値を示す3箇所の位置を実線で示した。

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 $C_p=800\text{ mg/l}$ 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明瞭に3箇所で見られる点は興味深い。なお、清水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。

即ち、高粘性のPSA溶液においては、清水流に較べて流れの剥離およびそれに伴う循環流の影響が顕著でないことから、相対的に形状抵抗は小さくなることが示唆される。

図-8は、動粘性係数がせん断速度に依存することからPSA溶液濃度 $C_p=300\text{ mg/l}$ および $C_p=800\text{ mg/l}$ における主流速の鉛直変化率の鉛直分布が流下方向に変化する様子を示す。PSA溶液における主流速の鉛直変化率は、全般的に $0 \sim 15(1/s)$ の範囲にあり、 $C_p=300\text{ mg/l}$ は、清水流に類似して $x/k < 6$ では粗度頂部近傍、 $x/k > 7$ では底面付近で大きくなる。PSA溶液濃度 $C_p=800\text{ mg/l}$ では明瞭な極大値の発生場所は、 $z/k=0.2, z/k=1.4$ の2箇所であり、 $z/k=3.59$ においては値は明瞭とは言えない。

図-9は、レイノルズ応力 $\overline{-u'_1 w'}/U_0^2$ の鉛直分布が流下方向に変化する様子を示す。

清水流においては、主流速の変曲点近傍の $z/k=0$ で大きな値を示し、極大値の大きさは再付着点下流で流下方向に増大する傾向がある。

PSA溶液の濃度 $C_p=300\text{ mg/l}$ において、レイノルズ応力の極大値は $x/k < 4$ の領域では流下方向に増大傾向をしめすが、それより下流で減少傾向を示し、 $x/k > 7$ ではその大きさ清水流の50%程度である。一方、PSA溶液の濃度 $C_p=800\text{ mg/l}$ においては、レイノルズ応力 $\overline{-u'_1 w'}/U_0^2$ は、極めて小さく乱れによる運動量輸送は無視出来る。

図-10は、主流方向の乱れの強さ $\overline{u'^2}/U_0^2$ の鉛直分布が流下方向に変化する様子を示す。図中の実線は、清水流においては剥離線、PSA溶液 $C_p=800\text{ mg/l}$ では各流下距離における極大値を連ねたものである。

乱れの強さの極大値の流下方向に平均した発生位置は、清水流では $z/k=0.27$ に対してPSA溶液 $C_p=300\text{ mg/l}$ においては粗度頂部近傍の $z/k=0.25$ 、PSA溶液 $C_p=800\text{ mg/l}$ では

図-7 主流速の鉛直分布の流下方向変化

図-8 主流速の鉛直変化率の流下方向変化

図-9 レイノルズ応力の鉛直分布の流下方向変化

図-10 主流方向の乱れの強さ

図-11 粘性係数の鉛直分布の流下方向変化

図-12 粘性応力の鉛直分布の流下方向変化

流下方向にその高さが若干上昇する傾向にあるが、平均的には $z/k=0.27$, $z/k=1.44$ および $z/k=3.59$ の3箇所の位置で認められ、主流速の変曲点とほぼ対応している。

乱れの強さは、清水流と較べて高粘性の PSA 溶液 $C_p=300\text{mg/l}$ においては、粗度キャビティー近傍では類似の傾向を示すが、 $z/k>3$ の領域では急減し、水面近傍では50%程度、 $C_p=800\text{mg/l}$ においては、極大値は清水流の場合の20%程度まで低減し、水面付近では極めて小さいことが認められる。

図-11は、低せん断速度の測定用に優れた Brookfield 社製の粘度計 DV-II+ PRO Digital Viscometer を用いた粘性実験を基に、水の粘性係数 μ_w によって正規化された

PSA 溶液における粘性係数 μ_{PSA} の空間変化を示す。PSA 溶液濃度 $C_p=300\text{mg/l}$ では $\mu_{\text{PSA}}/\mu_w=0\sim80$ であるのに対して、 $C_p=800\text{mg/l}$ では $\mu_{\text{PSA}}/\mu_w=0\sim600$ の範囲にある。

清水流において循環流の形成された領域および水面近傍で大きな値を示し、全領域でせん断速度に依存していることが分かる。

図-12は、PSA 溶液濃度 $C_p=300\text{mg/l}$ および $C_p=800\text{mg/l}$ における粘性応力の空間分布を示す。粘性応力はベキ剰則モデル (Power-law Model) を基に式(7)及び(8)より求めた。

$$\tau_\mu = \mu \left(\frac{dU}{dz} \right) \quad (7)$$

$$\mu = \eta_0 \left(\frac{dU}{dz} \right)^{n-1} \quad (8)$$

なお、 μ は見かけの粘性係数、 η_0 および指数 n は、実験から最小自乗近似によって得られた実験値を用いた。

粘性応力は、乱れの強さやせん断速度の空間分布と類

図-13 乱れエネルギーの生成項の空間分布

図-14 直接的粘性散逸の空間分布

似した傾向を有することが認められる。

図-13は、式(5)を基に図-9のレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 、図-10の主流方向の乱れの強さ u'_{rms} および主流速に対して鉛直方向変化率、流下方向変化率を用いて得られた乱れエネルギーの生成項を示す。乱れの生成項は清水流においては $1 < x/k < 8$ では z/k が 0.4 近傍で極大値、PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ においては $1 < x/k < 8$ では z/k が 0 近傍で極大値を示すことが認められ、全般的にはレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ が極大値の位置と対応している。しかし角柱粗度の直上層では清水流の $x/k = 9$ および 10 および PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ の $x/k = 10$ において負の領域は認められるが、これはこの領域では $dU/dx > 0$ の加速域であり乱れから平均流にエネルギーが輸送されたことが分かる。PSA 溶液濃度 $C_p = 800 \text{ mg/l}$ においては清水流に較べてレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ および乱れの強さ u'_{rms} は極めて小さいために乱れエネルギーの生成項は小さく、若干バラツキが大きいものの $1 < x/k < 7$ では z/k が 1 ~ 1.6 の範囲で極大値が見出される。 $x/k = 10$ において PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ と同様に角柱粗度の直上層で負の領域が認められる。乱れの生成項 G の大小関係は、

$$G(C_p = 0) > G(C_p = 300 \text{ mg/l}) \gg G(C_p = 800 \text{ mg/l})$$

であることが認められる。

図-14は、式(6)を基に主流速の鉛直方向変化率、流下方向変化率および図-11の粘性係数を用いて得られた平均流エネルギーの直接的粘性散逸を示す。

清水流においては、直接的粘性散逸は角柱粗度の後端から剥離した流線が再付着する $x/k = 4.5$ の範囲内では比較的せん断速度が大きい $z/k = 0$ 近傍で相対的に大きな値を示すが、乱れエネルギーの生成項との比較では無視出来る値である。

PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ の直接的粘性散逸は、 $1 < x/k < 7$ では z/k が 1 の近傍で極大値を示し、清水流に較べて約 2 倍強の大きさではあるが、その数値は乱れの生成項の 30% 程度と小さい。このことからエネルギー損失の主因は乱れエネルギーの生成項であることが分かる。

図-4および図-6から清水流に較べて PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ における抵抗低減の原因は、直接的粘性散逸は大きく増大せず、乱れエネルギーの生成が減少したことが挙げられる。

PSA 溶液濃度 $C_p = 800 \text{ mg/l}$ の直接的粘性散逸は、その空間分布は dU/dx に類似した傾向を持ち、極大値の発生場所は、 $z/k = 0.4$, $z/k = 1.5$ の 2 箇所に変曲点位置に対応している。その大きさは、清水流の直接的粘性散逸に較べて約 17 倍程度、清水流の乱れエネルギー生成項との比較では約 4 倍程度であることが分かる。図-4および図-6から清水流に

較べて PSA 溶液濃度 $C_p = 800 \text{ mg/l}$ における抵抗増大の原因は、乱れエネルギーの生成は抑制されたものの、直接的粘性散逸が大幅に増大したことが挙げられる。三者の直接的粘性散逸の大小関係は以下の様になる。

$$E(C_p = 0) < E(C_p = 300 \text{ mg/l}) \ll E(C_p = 800 \text{ mg/l})$$

さらに、図-13および14を用いて式(4)の Total Loss を角柱間で底面から水面まで空間積分し面積平均した値を以下に示す。

$$\begin{aligned} \int_0^\lambda \int_{-k}^{h_0-k} \text{Total Loss}(C_p = 0 \text{ mg/l}) dx \cdot dz / U_0^2 / h_0^2 / \lambda &= 0.0022 \\ \int_0^\lambda \int_{-k}^{h_0-k} \text{Total Loss}(C_p = 300 \text{ mg/l}) dx \cdot dz / U_0^2 / h_0^2 / \lambda &= 0.001 \\ \int_0^\lambda \int_{-k}^{h_0-k} \text{Total Loss}(C_p = 800 \text{ mg/l}) dx \cdot dz / U_0^2 / h_0^2 / \lambda &= 0.0053 \end{aligned}$$

平均流のエネルギー損失は、PSA 溶液濃度 $C_p = 300 \text{ mg/l}$ で最も小さく、続いて清水流、PSA 溶液濃度 $C_p = 800 \text{ mg/l}$ で最も大きい関係が、図-4および図-6における抵抗特性と対応していることが明らかにされた。

5. おわりに

本研究では、二次元角柱粗度を伴う開水路において高濃度土砂流の抵抗特性および高濃度土砂がエネルギー収支に与える影響について検討した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 滑面開水路流れにおいては、体積土砂濃度が $C_v < 8.0\%$ では抵抗に変化は無く、逆に $C_v > 8.0\%$ では抵抗が大きくなる。
- 2) 粗度高さ $k = 5 \text{ mm}$ ($\lambda/k = 8$) および $k = 10 \text{ mm}$ ($\lambda/k = 10$) の角柱粗度において土砂流は清水流に較べて体積土砂濃度が $C_v < 8.5\%$ では抵抗が小さく、逆に $C_v > 8.5\%$ では抵抗が大きくなる。
- 3) 体積土砂濃度 $C_v < 8.5\%$ において抵抗は粗度高さ $k = 5 \text{ mm}$ では $C_v = 4.6\%$ で極小値を示し、 $C_{JK}/C_{JW} = 0.54$, $k = 10 \text{ mm}$ では $C_v = 6\%$ で極小値を示し $C_{JK}/C_{JW} = 0.66$ で有意な抵抗減となる。
- 4) 体積土砂濃度 $C_v = 10\%$ において抵抗係数 C_{JK}/C_{JW} は、 $k = 5 \text{ mm}$ で 1.68, $k = 10 \text{ mm}$ で 1.63 であることから清水流に較べて高濃度土砂流の抵抗の増加が著しい。
- 5) 体積土砂濃度 6% の粘性係数に相当する PSA 溶液濃度

$C_p=300\text{ mg}/\ell$ の開水路流れにおいて直接的粘性散逸は微増であり、乱れエネルギーの生成が顕著に減少した。抵抗が減少したのは、レイノルズ応力による乱れエネルギー生成の減少に起因することが示された。

6) 体積土砂濃度10%の粘性係数に相当するPSA溶液濃度 $C_p=800\text{ mg}/\ell$ の開水路流れにおいて直接的粘性散逸は微増であり、乱れエネルギーの生成が顕著に減少した。抵抗が増大したのは、直接的粘性散逸が主因であることが示された。

参考文献

- 1) Bagnold, R.A. : Experiments on a gravity-free dispersion of large, solid spheres in a Newtonian fluid model shear. Royal Society of London, Proceedings, v. A225, pp.49–63, 1954.
- 2) 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, pp. 345–361, 1996.
- 3) Baas, J.H., and Best, J.L. : Turbulence modulation in clay-rich sediment-laden flows and some implications for sediment deposition: Journal of Sedimentary Research, v. 72, pp.336–340, 2002.
- 4) Wang, Z.Y., Larsen, P., Nesimann, F., and Dittich, A. : Resistance and drag reduction of flows of clay suspensions: Journal of Hydraulic Engineering, v. 124, pp.41–49, 1998.
- 5) 大本照憲・崔 志英・柿原ゆり：高濃度土砂流の抵抗特性について，応用力学論文集 Vol7, pp979-986, 2004.
- 6) 崔 志英・大本照憲・古賀 聖：非ニュートン流体特性を有する高濃度土砂流の抵抗特性，応用力学論文集 Vol9, pp.883-892, 2006.
- 7) 大本照憲・Liany Hendratta・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
- 8) 大本照憲, Sukamo Tohirin, Liany Hendratta : 角柱粗度を有する開水路粗面乱流における抵抗則と運動量輸送，土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I_901-I_906, 20132
- 9) Yang, C.T. and X. Kong : Energy Dissipation Rate and Sediment Transport, Journal of Hydraulic Research, Vol.29, no.4, pp.457-474

(2016. 6. 24 受付)

EFFECTS OF HYPER-CONCENTRATED SEDIMENT ON ENERGY BUDGET IN AN OPEN CHANNEL WITH SQUARE RIBS

Shogo NISHI and Terunori OHMOTO

The necessity to understand and predict flows that carry large suspended sediment and wash loads has become acute in the Shirakawa River Basin where significant erosion and siltation associated with hyperconcentrated flood give rise to many river problems. Mud flows, debris flows or slurries, made up of a large amount of clay and/or silt particles suspended in water, often show non-Newtonian properties but remain poorly understood concerning the impacts of their rheological properties on fully developed turbulent structure.

In this paper, we experimentally investigated resistance and energy budget of hyper- concentrated sediment laden-flow in an open channel with two-dimensional square ribs by using Particle Image Velocimetry(PIV). The results showed that rheological properties significantly diminished energy transfer between mean flow and turbulence by flow fluctuations in cases where the volumetric sediment concentration C_v is lower than 8.5% and augmented distinctly the dissipation of mean flow energy by viscosity when C_v is higher than 8.5%. in comparison with the clear water flow.