

非ニュートン流体特性に着目した 砂堆河床上の高粘性流れについて

ON RHEOLOGY OF HYPERCONCENTRATED SEDIMENT-LADEN FLOW OVER DUNE TYPE BED IN OPEN CHANNEL

大本照憲*・崔志英**

Terunori OHMOTO and Zhiying CUI

*正会員 工博 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪 2-39-1)

**学生員 熊本大学大学院自然科学研究科環境土木専攻 (同上)

The necessity to understand and predict flows that carry large suspended sediment and wash loads has become acute in the Yellow 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 the effects of non-Newtonian fluid on the separation vortex over fixed dune type bed by using Particle Image Velocimetry(PIV). The results showed that rheological properties significantly dissipated the turbulent flow fluctuations over the dune bed and augmented the flow resistance by comparison with the clear water flow.

Key Words: non-Newtonian fluids, open channel flow, dune type bed, the Yellow River, Mudflows

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、有明海湾奥部の感潮域や黄河下流域の河川、土石流や泥流として観察されている。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。

高濃度土砂流の解釈は研究者により異なる。Bradley & McCutcheon(1985)¹⁾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%以下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。土砂濃度以外に粒子の大きさ、形状、粒度分布、土粒子中のミネラル含有量も、高濃度流を特徴付けるパラメータとなる。ミネラルを多く含んだ土砂が流れ込む黄河においては、濃度 200kg/m³、

体積濃度が約 8%以上を高濃度と定義されている²⁾。

高濃度土砂流の抵抗について、滑面開水路流れでは、中央粒径 d_{50} が 0.026mm 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³⁾や、逆に粘土を用いた Wang (1993)⁴⁾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、開水路流れおよび管路流れの何れにおいても濃度の増大に伴って抵抗が増大するか否かについての統一の見解は得られていない。更に、高濃度土砂流においては流れの詳細な実測データを捉えた研究例は少なく、非ニュートン流体特性が形状抵抗に与える影響や流れの内部構造については不明な点が多く残されている。

銭寧ら(1989)⁵⁾は高濃度土砂流をビンガム流体モデルで近似し、Coussot(1992)⁶⁾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

度分布との関係を求めている。

芦田ら(1986)⁷⁾はビンガム流体モデルを対象にして電気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。

著者等⁸⁾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。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大きな値を示す。

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比べて $10^2 \sim 10^3$ 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ことが認められた。

一方、添加剤を含む管路流れでは、直鎖状高分子剤をわずかに含む溶液では、溶媒のみの場合に比べて著しい抵抗低減が見出され、摩擦抵抗が減少するこのような現象はトムズ(1948)⁹⁾効果として広く知られている。

現在、機械系分野では直鎖状高分子剤だけでなく、界面活性剤、パルプ繊維、微細気泡にも類似の効果があることが明らかにされ、研究が進められている¹⁰⁾。しかしながら、抵抗増減のメカニズムに関しては、非等方粘性理論¹¹⁾、壁面における滑り¹²⁾、粘弾性理論¹³⁾、層流から乱流への遷移の遅れ¹⁴⁾等が指摘されているが、決定的なメカニズムの解明までには至っていない。

本研究では、高濃度土砂が砂堆河床の抵抗特性に与える影響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、流速計にPIV(Particle Image Velocimetry)を適用して、砂堆を模擬した固定波面上の流れ場を清水流との比較を通して詳細に検討した。なお、本論では高濃度土砂はウォッシュロードを対象としており、微細土砂は河床に体積せず、濃度分布は空間的に変化が小さいものとして扱われている。

2. 実験概要

2.1. 実験材料

粘度測定用の材料として黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液および高分子剤溶液としてポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液を用いた。黄河土砂は中国の黄河下流域に位置する済南市濰口水文観測所(河口より278km上流位置)における河床材料である。黄河土砂は中央粒径 $d_{50}=16.4 \mu\text{m}$ 、 $\rho_s=2.68 \text{g/cm}^3$ であり、カオリン(kaolin)は中央粒径 $d_{50}=5.3 \mu\text{m}$ 、密度 $\rho_s=2.7 \text{g/cm}^3$ である。

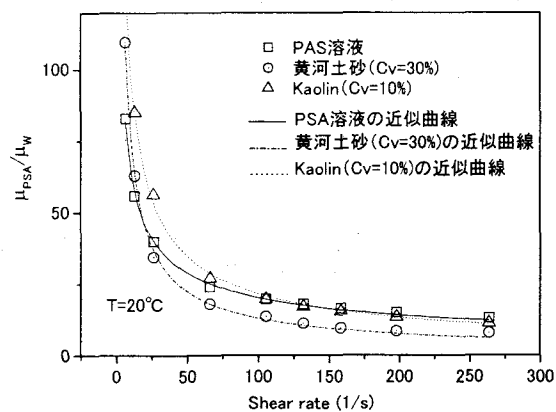


図-1 非ニュートン流体の粘性特性

表-1 粘性パラメータ

材料	η_0 (mPa · s)	n
PSA 溶液 (0.8g/l)	2.31	0.45
黄河土砂懸濁液(Cv=30%)	4.07	0.27
カオリン懸濁液(Cv=10%)	4.61	0.34

図-1は、黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液および高分子剤溶液としてポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液における見かけの粘性係数 μ とせん断速度との関係を示す。ここに、黄河土砂懸濁液およびカオリン懸濁液の体積土砂濃度 C_v はそれぞれ30%および10%であり、ポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液の重量濃度は0.8g/lである。

なお、粘度の計測に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。また、非ニュートン流体の粘度は温度依存性が高いことから、計測中の水温精度が約 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ を有する循環式恒温水槽から断熱性の高い管を回転式粘度計に接続し、サンプルの温度は安定的に 20°C に保たれている。

図-1より、黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液及びPSA溶液の何れも、せん断応力 τ とせん断速度 (du/dy) との関係を表す式(1)で定義された見かけの粘性係数 μ はせん断速度に依存し、せん断速度の増大に従って減少傾向を示す。

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1)$$

なお、図中の曲線は、式(2)によって表されたベキ乗則モデル(Power-law Model)を示す。

$$\mu = \eta_0 \left(\frac{du}{dz} \right)^{n-1} \quad (2)$$

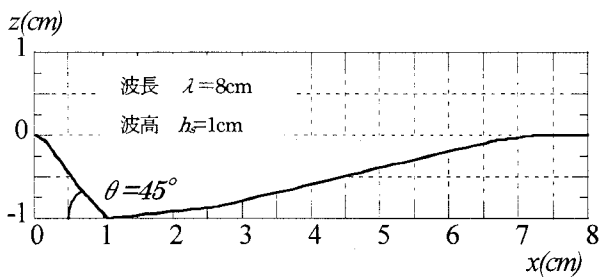


図-2 河床形状

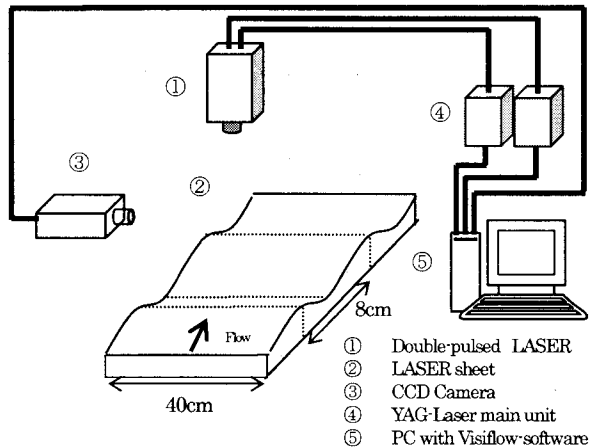


図-3 計測システムの概略

表-2 実験条件

	清水	PSA 溶液
流量 Q (l/s)	1.7	1.7
水深 H (cm)	2.5	3.5
断面平均流速 U_m (cm/s)	17.0	12.1
最大流速 U_0 (cm/s)	20.8	18.0
水路勾配 i_0	1/2000	1/2000
フルード数 Fr	0.34	0.21
レイノルズ数 Re	4250	

最小自乗近似によって得られた η_0 および指数 n を表-1 に示す。

黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液及び PSA 溶液の何れも、べき乗則モデルによって近似的には表現可能であることが認められる。すなわち、非ニュートン流体の擬塑性 (shear-thinning) 流体として扱う必要がある。また、重量濃度が 0.8g/l の PSA 溶液は、体積濃度 $C_v=30\%$ の黄河土砂懸濁液および体積濃度 $C_v=10\%$ のカオリン懸濁液と類似した粘性係数のせん断速度依存性を示すことが認められる。

2.2. 河床形状

砂堆を模擬した河床波の縦断形状を図-2 に示す。砂堆の波長および波高をそれぞれ $\lambda=8\text{cm}$ および $h_s=1\text{cm}$ とした。水深 H に対する砂堆の無次元波高 h_s/H

および無次元波長 λ/H は、各々、約 1/3 および 3 程度であり、若干、波長を短く取っている。砂堆の平面形状は、峰と谷が横断方向に一樣な二次元性の砂堆型河床を採用した。

2.3. 実験装置

本研究で用いた計測システムの概略を図-3 に示す。実験水路は長さ 10m、幅 40cm、高さ 30cm のアクリル樹脂製の循環型可変勾配水路である。連続砂堆河床を模擬するために、図-2 に示された河床波を水路上流端から流下方向に 6.4m の間に 80 波を設置した。

座標系は、水路上流端より 2m 下流位置の水路中央の砂堆型河床波の嶺部を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直上方に z 軸を設定し、それぞれに対応した流速変動成分を u 、 v および w とした。

PIV は光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザーを用いた。シート光の厚さを 1mm、幅を 10cm、パルス間隔を 1000 μsec にし、水路上方から底面に垂直下向きに照射した。レーザーシート内を通過する粒子の可視化像は水路側面に設置された CCD カメラ (Kodak Megaplus ES1.0 : 1008 $\times$ 1008 ピクセル) によって 2 枚の画像が撮影される。PIV 計測は、平衡状態の流れ場が形成された水路上流端から 2m の地点で一波長分の流れに対する計測を行った。流速のサンプリング周波数は 15Hz、一計測面において 1000 枚の画像データに関して統計処理を施した。

2.4. 実験条件

実験条件を表-2 に示す。実験は、清水と高濃度土砂流における抵抗特性の差違およびその原因である流れ構造を究明することを目的に実施した。

高濃度土砂流と類似の粘性特性を有する PSA 溶液を用いた実験では、水路勾配、流量および河床境界条件を清水と一致させ、水深に関しては下流端の堰操作による調整を行っていない。表中において清水と PSA 溶液の両方で水深が異なるのは、抵抗特性が異なるためである。何れのケースも計測区間は平衡場であった。

また、非ニュートン流体において動粘性係数 ν は流れ場の関数となり、レイノルズ数は実験前に条件設定出来ない量となる。なお、粘性の流体温度への依存性は大きいことから、ヘッドタンクには温度コントロールを取り付けることにより温度は $20\pm0.5^\circ\text{C}$ に設定した。

3. 実験結果

3.1. 抵抗特性

図-4 は、清水と PSA 溶液において単位幅流量 q に対する砂堆一波長間の平均水深 h_m の変化を示す。全般的に、高粘性流体である PSA 溶液の平均水深は、清水のそ

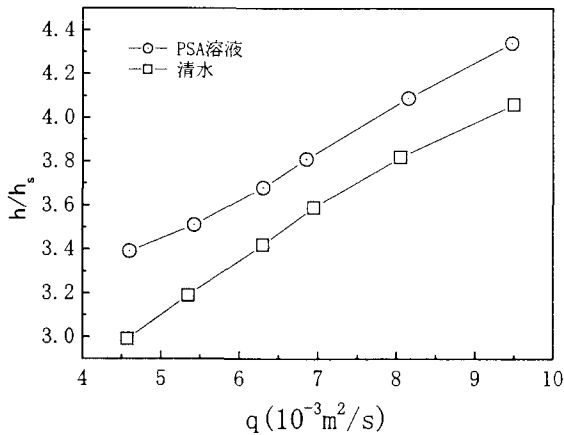


図-4 平均水深 h_m と単位幅流量 q との関係

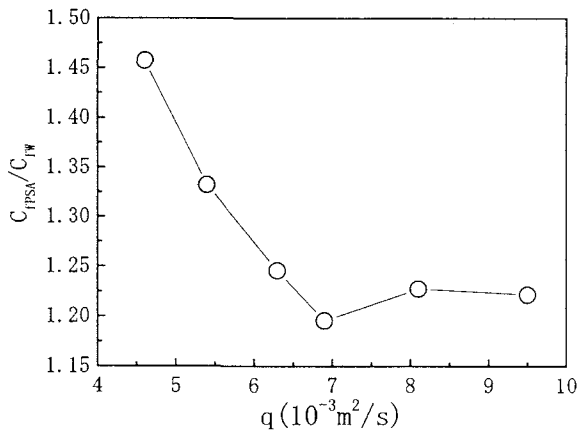


図-5 全抵抗係数と単位幅流量 q との関係

れに較べて大きく、1.06～1.13 倍の大きさになることがわかる。図-5 は、全抵抗係数 C_f と単位幅流量との関係を示す。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。

$$C_f = 2(U_* / U_m)^2 \quad (3)$$

ここに、 $U_* = \sqrt{g h_m i_0}$ 、 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。清水に対するPSA溶液の全抵抗係数 $C_{f,PSA}/C_{f,w}$ は、単位幅流量の増大に伴って減少傾向を示し、その値は1.22～1.46にある。

高粘性流体であるPSA溶液の全抵抗係数は清水に較べて、流量の実験範囲内では最大で1.46倍に達する。カオリンおよび黄河土砂を用いた前報⁸⁾の管路流れにおける摩擦損失係数は、清水流のそれに較べて大きくなり、砂堆河床を有する開水路流れにおいても類似の傾向を示すことが認められた。

3.2. 平均流特性

図-6 は式(4)で定義される流れ関数 Ψ の等値線を示す。

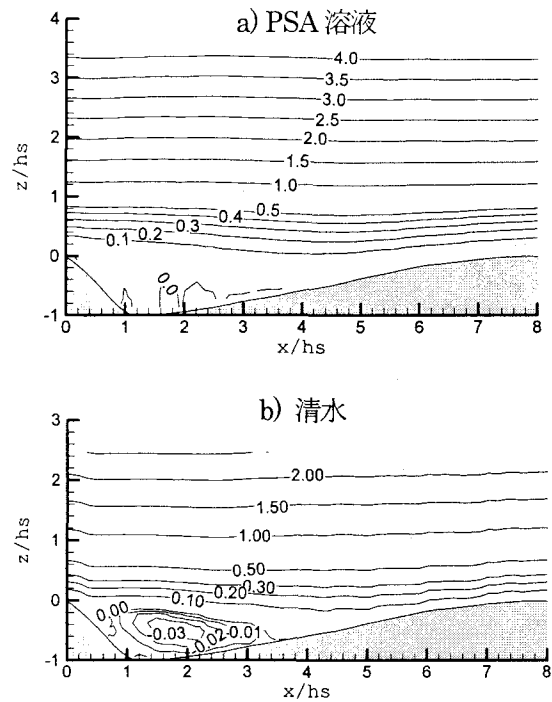


図-6 流れ関数の等値線

$$\psi(x, z) = \int_0^z U(x, \zeta) d\zeta \quad (4)$$

ここに、 U は時間平均流速である。図より、PSA溶液においては、 $\Psi < 0$ となる循環領域が嶺部背後の底面近傍に確認されるが、その領域が極めて小さく、再付着点位置が明瞭ではないことが認められる。清水の場合、 $x/h_s = 3.5$ で再付着点を持ち、剥離線下層では、循環流が形成されることが認められる。一般に再付着点位置は、1) 流れ関数の値がゼロになる流線と河床面の交点、2) 壁面付近で時間平均流速がゼロとなる位置、3) 壁面せん断応力がゼロとなる位置、4) 壁面上で順流と逆流の時間割合が等しくなる位置から同定され、本研究では1)を用いた。

図-7 は、清水とPSA溶液における主流速の鉛直分布が砂堆河床上において流下方向に変化する様子を示す。縦軸および横軸は、砂堆波高 h_s によって無次元化された。流速スケールは、嶺部上の最大流速 U_0 によって無次元化した。なお、縦軸は流下方向に $x/h_s = 0.5$ 単位で流下方向にずらして表示している。また、PSA溶液の場合、図中には、主流速の鉛直変化率が大きくなる領域を直線で近似した。

主流速の鉛直分布は、嶺部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、清水とは異なりPSA

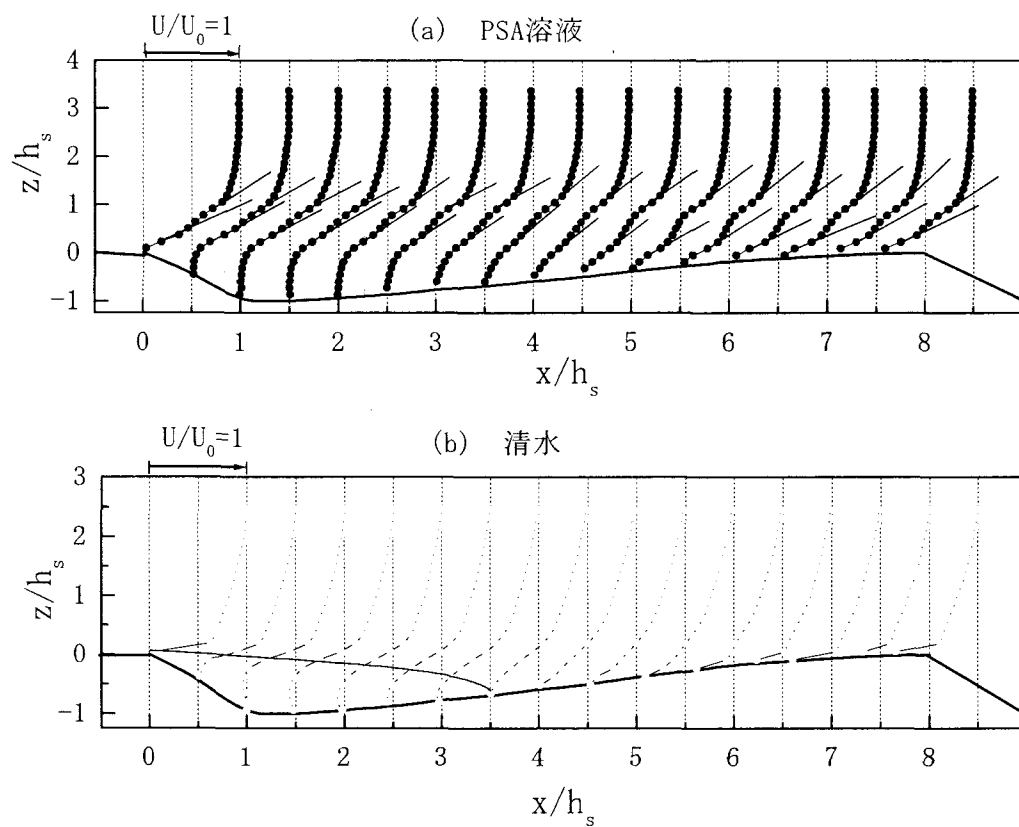


図-7 主流速 U の流下方向変化

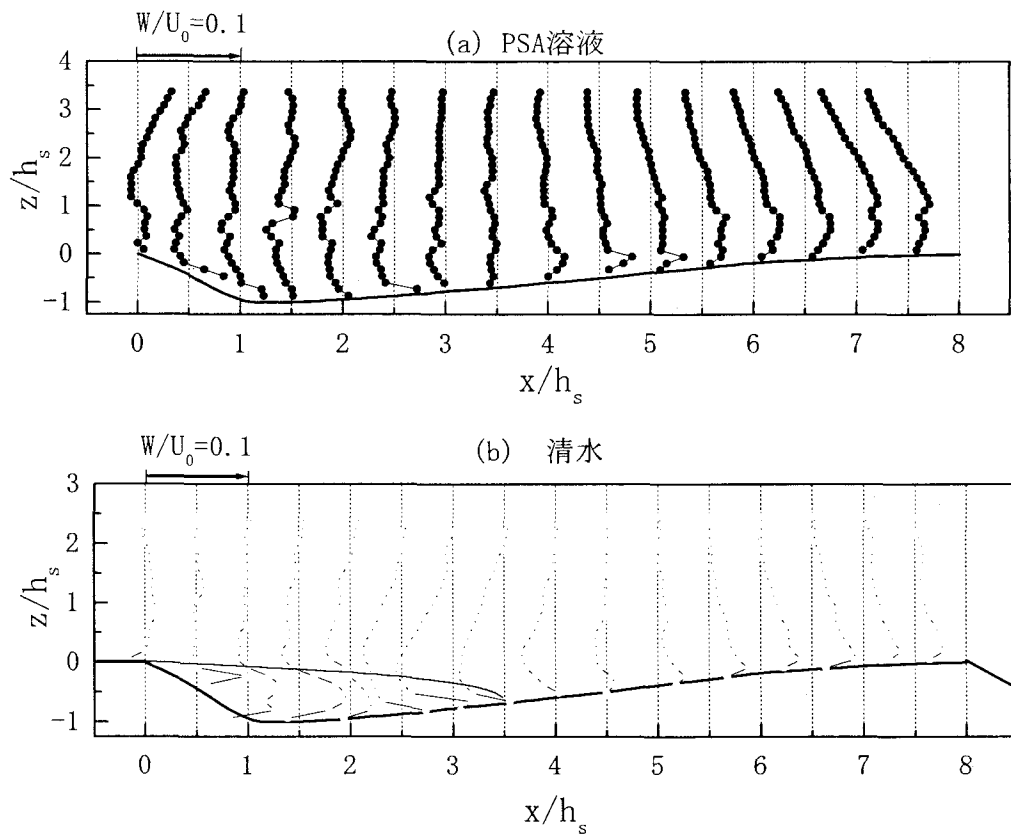


図-8 鉛直流速成分 W の流下方向変化

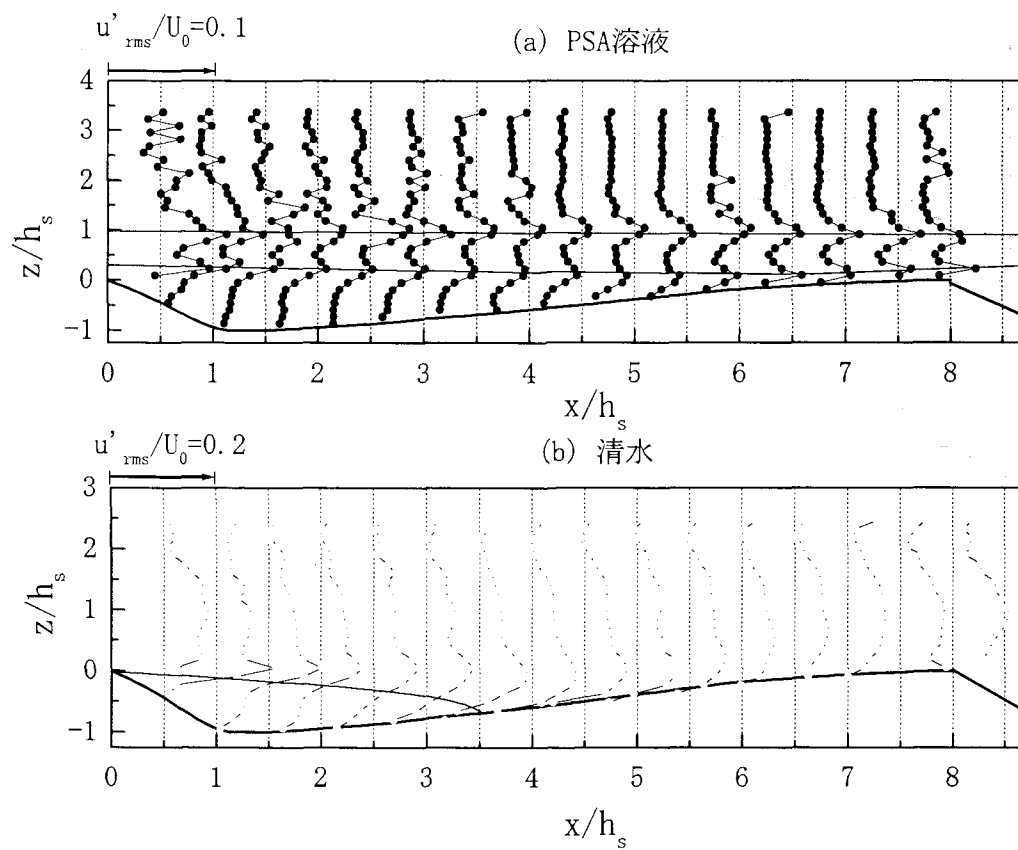


図-9 流下方向乱れ強度 u'_{rms} の流下方向変化

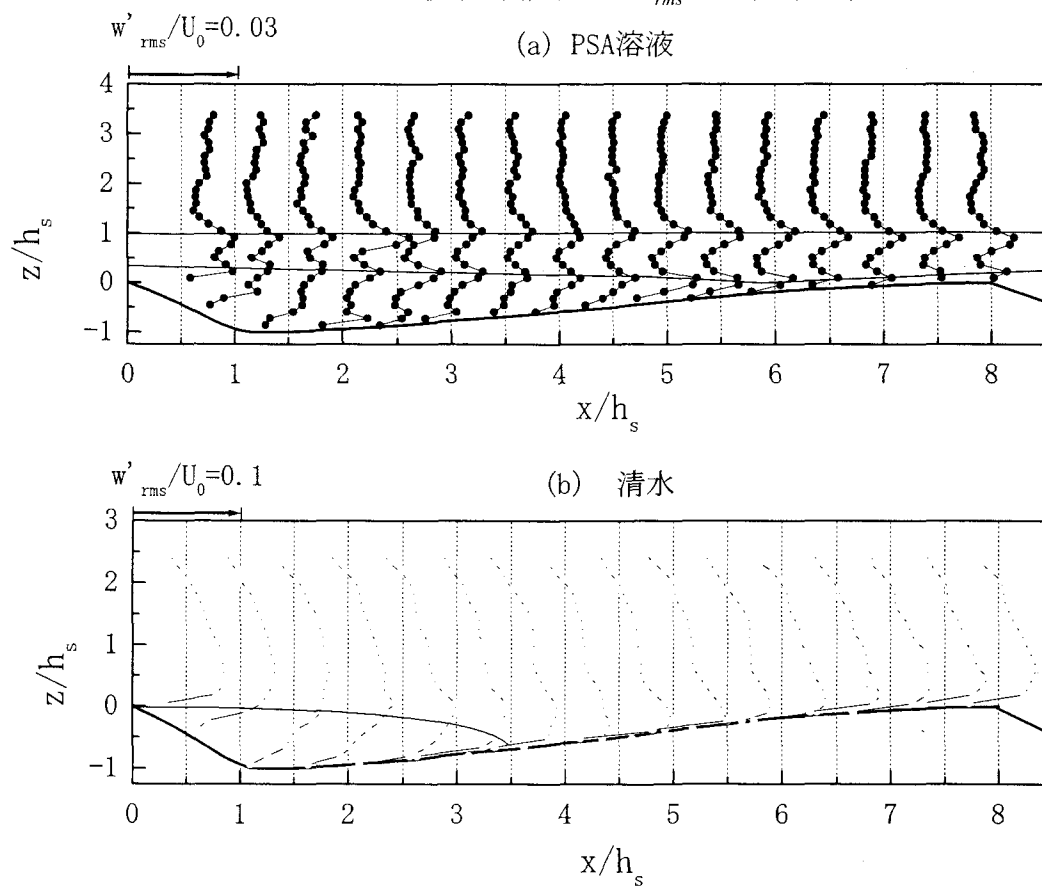


図-10 鉛直方向乱れ強度 w'_{rms} の流下方向変化

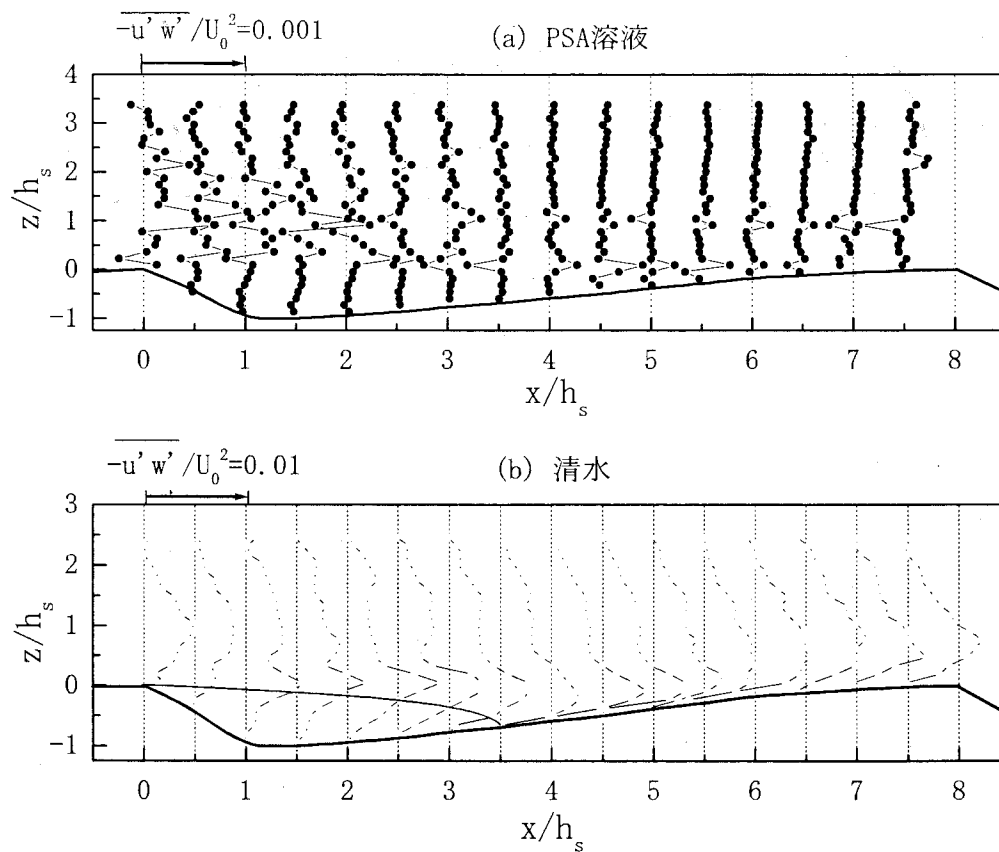


図-11 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化

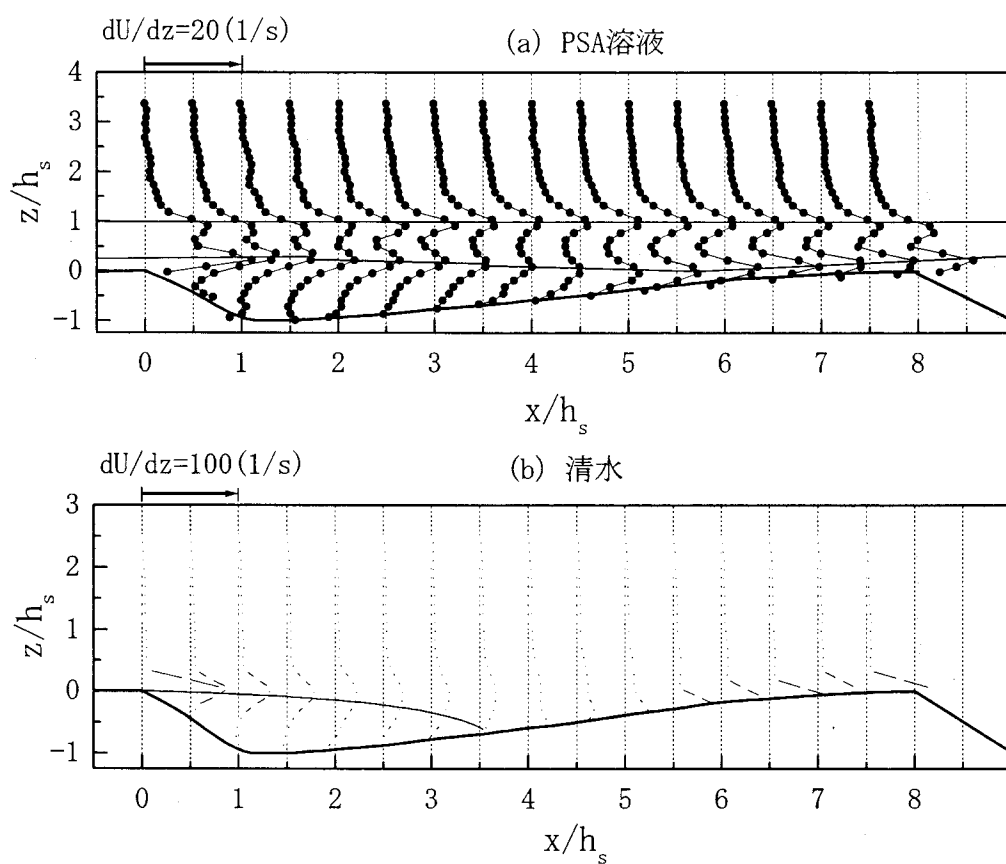


図-12 せん断速度 dU/dz の流下方向変化

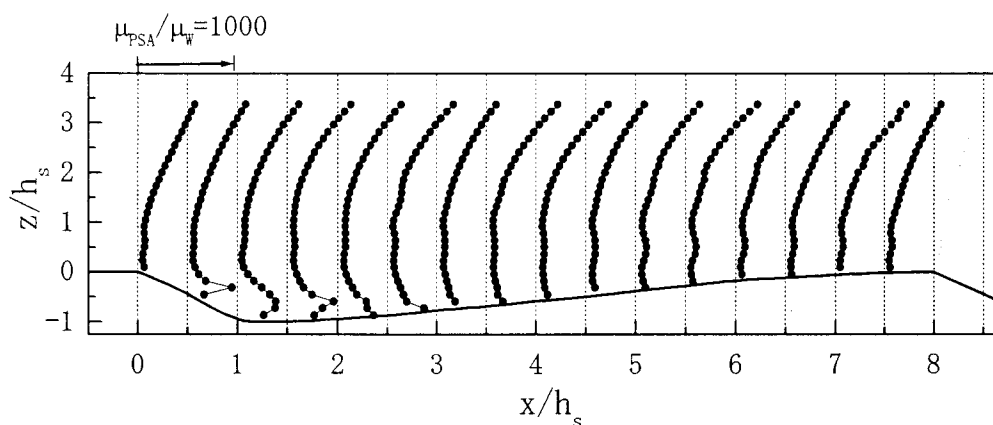


図-13 見掛けの粘性係数の流下方向変化

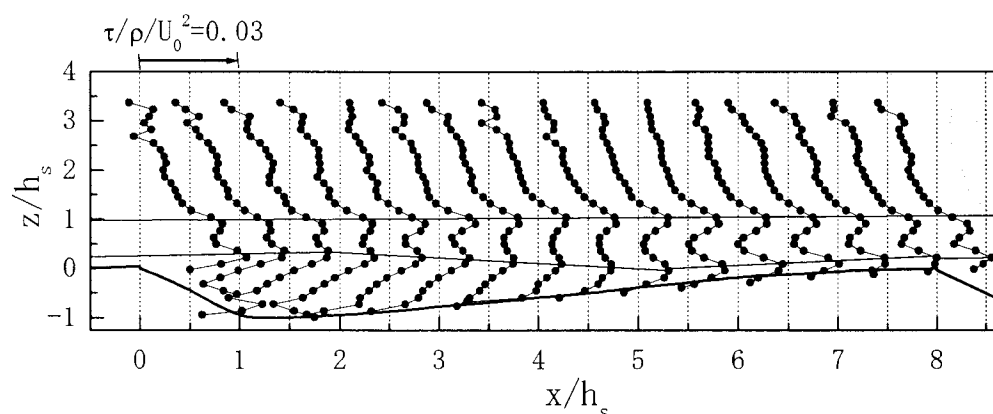


図-14 粘性応力の流下方向変化 (PSA 溶液)

溶液ではせん断速度の大きい領域が明瞭に2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。

図-8は、鉛直方向の平均流速成分 w の流下方向変化を示す。全般的に、清水に較べて高粘性のPSA溶液においては鉛直流速成分は小さくなる傾向を示す。清水において循環流の形成された領域において、清水では強い上昇流が発生しているが、PSA溶液においては全般的には下降流が卓越していることがわかる。さらに、清水では再付着点 $x/h_s=3.5$ の上下流付近 $x/h_s=2.5\sim4$ で水深の増大に伴う顕著な下降流が見られるのに対して、PSA溶液においては嶺部背後の水深拡大部 $x/h_s=0.5\sim3$ の範囲において相対的に一様に下降流が生じている。

図-6, 7および8から、高粘性のPSA溶液においては、清水流に較べて循環流の影響は小さいことが予想され、相対的に形状抵抗は小さくなることが示唆される。

3.3. 乱れ特性

図-9および10は、それぞれ、主流方向および鉛直方向の乱れの強さ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、各流下距離における乱れ強

さの極大値を連ねたものである。

PSA溶液においては、乱れの強さの極大値は、主流方向および鉛直方向成分ともに高さが $z/h_s=1$ および $z/h_s=0.2\sim0.3$ の2箇所の位置で認められる。

清水においては、乱れの強さは嶺部から再付着点までの減速域では増大傾向を示し、 $z/h_s=4$ から下流の嶺部までの加速域では河床付近において顕著に減少している。

清水と較べて高粘性のPSA溶液では、乱れの強さは主流方向成分で約50%、鉛直方向成分で約30%に低減している。また、PSA溶液における乱れの強さの鉛直分布は、剥離と河床の内部境界層のせん断変形を受け2箇所で極大値を伴い、清水のそれと大きく異なる。

図-11は、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の空間変化を示す。

清水においては、主流速の変曲点近傍および再付着点下流では河床近傍で大きな値を示す。PSA溶液においては $-\overline{u'w'}$ は清水のそれに較べて極大値が約10%以下であることから、乱れによる運動量輸送およびエネルギー損失は極めて小さい。

3.4. せん断速度およびせん断応力

図-12は、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 $0\sim20(1/s)$ の範囲にあり、乱れ

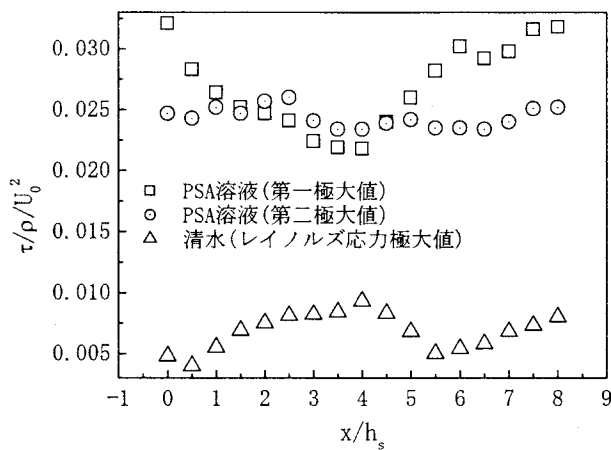


図-15 せん断応力の極大値の流下方向分布

の強さと同様に、その極大値が $z/h_s=1$ および $z/h_s=0.2\sim0.3$ の2箇所の位置で認められる。

清水においては主流速の鉛直変化率は、計測範囲内で100(1/s)以内に収まっていることおよびその極大値の発生が概ね1箇所であることがわかる。

図-13は、図-1の粘性実験を基に、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。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おり、 $\mu_{PSA}/\mu_w=50\sim820$ の範囲にある。

図-14は、PSA溶液における粘性応力の空間分布を示す。粘性応力は式(1)及び(2)より求めた。粘性応力の鉛直分布が流下方向に変化する様子は、乱れの強さやせん断速度の空間分布と類似した傾向を有することが認められる。図-15は、せん断応力 τ の分布を示す。せん断応力 τ は式(5)より求められる。

$$\tau = -\rho u'w' + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (5)$$

PSA溶液の場合は、 $z/h_s=0.2\sim0.3$ の近傍の極大値を第一極大値、 $z/h_s=1$ の近傍の極大値を第二極大値にする。清水におけるせん断応力は再付着点付近で最大値を持つことに対して、PSA溶液においては、せん断応力の第一極大値は清水における再付着点付近で小さくなり、第二極大値は全波長区間において変化は顕著ではない。また、本実験条件でPSA溶液におけるせん断応力の極大値は、清水におけるその約2.2～7倍にまで達している。

高粘性流体であるPSA溶液の全抵抗係数が、レイノルズ応力が減少したにも関わらず清水に較べて最大で1.46倍に達した主因は、非ニュートン流体の擬塑性(shear-thinning)効果による粘性抵抗の増大にあることが考えられる。

4 おわりに

本研究では、砂堆型河床波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。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 体積土砂濃度 $C_v=30\%$ の黄河土砂懸濁液および $C_v=20\%$ のカオリン懸濁液に類似の粘性特性を有するPSA溶液の全抵抗係数は、清水に較べて、砂堆型河床上において最大で1.46倍に達した。
- 2) 清水流とは異なり高粘性の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無く、せん断速度の大きい領域が $z/h_s=1$ および $z/h_s=0.2\sim0.3$ の2箇所で認められた。
- 3) 清水と較べて高粘性のPSA溶液では、乱れの強さは主流方向成分で約50%、鉛直方向成分で約30%、レイノルズ応力で10%にまで低減した。また、PSA溶液における乱れの強さの極大値は、せん断速度の極大位置とほぼ一致し、空間分布は、清水のそれと大きく異なる。
- 4) PSA溶液における粘性応力の空間変化は、乱れの強さやせん断速度の空間分布と類似した傾向を有し、せん断応力の第一極大値は清水における再付着点付近で最小値になり、第二極大値は全波長区間において変化は顕著ではない。また、本実験条件ではPSA溶液におけるせん断応力の極大値は、清水におけるその約2.2～7倍に達した。
- 5) 高粘性流体であるPSA溶液の全抵抗係数が、清水に較べて最大で1.46倍に増大した主因は、非ニュートン流体の擬塑性(shear-thinning)効果による粘性抵抗の増大にあることが明らかにされた。

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) Z.Y.Wang: 1993b. Structural features of turbulent flow of clay suspensions over rough boundary. Research Report, Inst.f.Wasserbau and Kulturtechnik, University of Karlsruhe, 1993
- 3) yang, C.T. and X.Kong: Energy Dissipation Rate and Sediment Transport, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.29, no.4, pp.457-474
- 4) Z.Y.Wang: 1993a. A study on debris flow surges, *Hydraulic Engineering '93*, Vol.2, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 1616-1621
- 5) 銭寧, 高含沙水流運動, 清华大学出版社, 1989.

- 6) P.Coussot : Rheology of debris flow – Study of concentrated suspensions. Ph.D. thesis, INPG, Grenoble, France (in French), 1992
- 7) 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
- 8) 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 Vol.7, pp.979-986
- 9) Toms,B.A. : Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers, *proc. First Intern. Congr. On Rheology*, Vol. II, pp.134-141,North Holland Amsterdam, 1948
- 10) 宗像瑞恵, 2002, 学位論文「添加剤による抵抗低減流れに関する研究」, pp.47-74
- 11) Dodge, D.W., and Metzner, A.B., “Turbulent Flow of Non-Newtonian System”, *A.I.Ch.E.J.*, Vol..5, No.2, 1959
- 12) Oldroyd, J.G., “A Suggested Method of Detecting Wall Effects in Turbulent Flow Thorough Pipes”, in *Proc.First Intern.Congr.on Rheol.*, pp.130-134, Vol. II , North Holland, Amsterdam, 1948
- 13) Metzner, A.B., and M.G. Park, “Turbulent Flow Characteristics of Viscoelastic Fluids”, *J.Fluid.Mech.*, Vol.20,p.291,1964
- 14) Hershey,H.C., and Zakin,J.L., “Existence of Two Type of Drag-reduction in Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions”, *Ind.Eng.Chem.Fundamentals*, Vol.6, No.23, p.381,1967

(2005 年 4 月 15 日受付)