

# 高濃度土砂流の抵抗特性について

## ON RHEOLOGY OF HYPERCONCENTRATED SEDIMENT-LADEN FLOW

大本照憲\*・崔志英\*\*・柿原ゆり\*\*

Terunori OHMOTO, Zhiying CUI and Yuri KAKIHARA

\*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 need to understand and predict flows that carry large suspended sediment 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 their rheological properties. This paper concerns an experimental study of the fully developed turbulent pipe flow with kaolin particles or silt particles deposited in lower region of the Yellow River Basin. The flow data include friction factor vs. Reynolds number, volumetric sediment concentration, mean flow velocity. In addition, the rheological properties of the mudflows were investigated by using both coaxial cylinder rheometer and parallel plate one. The experimental results stressed that at high sediment concentration mudflows did not fit to the Bingham model at low shear rates, the friction factor increased with the sediment concentration which result from the viscosity increase by two to three orders magnitude.

**Key Words:** *the Yellow River, Mudflows, non-Newtonian fluids, rotational shear rheometer*

### 1. はじめに

微細土砂を高濃度に含有する高濃度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濁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。特に黄河の中流域では、黄土高原からの大量の土砂の流入により下流域では天井川の傾向が年々強まり、治水安全度の低下をもたらしている。洪水時には、体積濃度で30%に達する高濃度土砂流となり、人々の暮らしを脅かしている<sup>1)</sup>。

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ことが知られている。銭寧<sup>2)</sup>らはビンガム流体モデルを、P. Coussot<sup>3)</sup>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と粒子濃度や粒度分布との数関係を求めた。芦田<sup>4,5)</sup>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<sup>6)</sup>らは従来の土石流の研究を基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。一方、添加剤を含む管路流れでは、Toms<sup>7)</sup>による直鎖状高分子剤をわずかに含む溶液の管路実験では、溶媒のみの場合に比べて著しい抵抗低減が見出され、トムズ効果として広く知られている。界面活性剤と高分子剤を用いた宗像<sup>8)</sup>による管路実験では最大70%の抵抗低減が観測されている。本研究では、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カオリンを用いて高濃度土砂流を管路に発生させ、その抵抗特性を明らかにした。さらに、高濃度土砂を伴う非ニュートン流体の流れの構造は、高濃度土砂流と類似の粘性特性を有する高分子溶液を用い、流速にはPIV(Particle Image Velocimetry)のデータを基に検討した。

### 2. 粘性実験

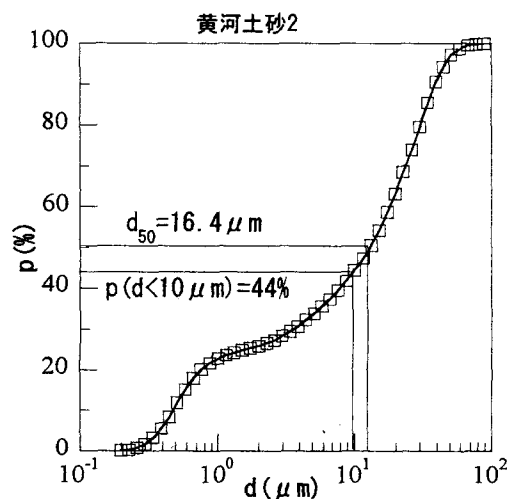
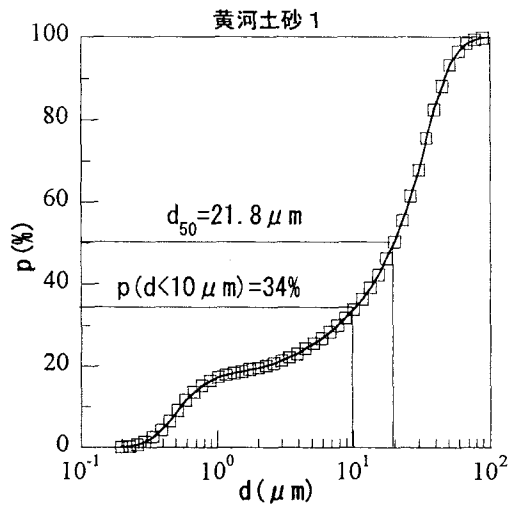


図-1 黄河土砂の粒度分布

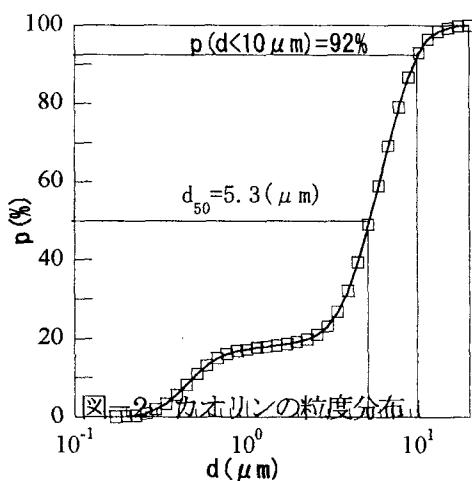
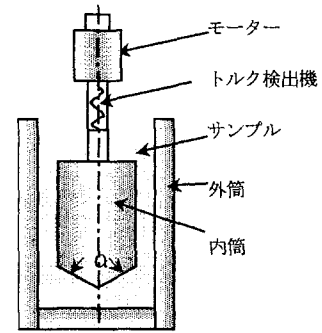


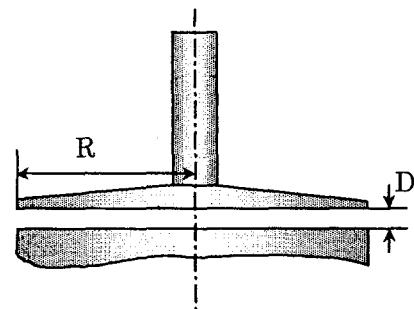
図-2 カオリンの粒度分布

### 2.1. 実験材料

粘度測定用の材料としては黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液、高分子剤溶液を用いた。黄河土砂は中国の黄河下流域に位置する济南市濼口水文観測所（河口より278km 上流位置）における河床材料を細かいふるいにかけて、少量の粘性粒子( $d < 10 \mu\text{m}$ )の含有量が異なる sample を2組作った。それぞれ黄河土砂1と黄河土砂2とする。黄河土砂1は中央粒径  $d_{50} = 21.8 \mu\text{m}$ 、粘性



(a) DV-II + PRO Digital Viscometer



(b) R/S Controlled Stress Rheometer

図-3 粘度計の基本構造

粒子( $d < 10 \mu\text{m}$ )の含有量は34%、黄河土砂2は中央粒径  $d_{50} = 16.4 \mu\text{m}$ 、粘性粒子の含有量は44%である。粒度分布は図-1 同様である。カオリン (kaolin) は密度が  $\rho = 2.7 \text{g/cm}^3$ 、平均粒径が  $d_{50} = 5.3 \mu\text{m}$  であり、その粒度分布を図-2 に示す。粒度分布はレーザ散乱式粒度分布測定装置を用いて測定した。高分子剤はPSA (ポリアクリル酸ソーダ)を用いた。

### 2.2. 実験装置

粘度の計測には Brookfield 社製の粘度計 DV-II + PRO Digital Viscometer と R/S Controlled Stress Rheometer の2種を用いた。図-3は粘度計の基本構造を示す。DV-II Viscometer は共軸二重円筒型の回転式粘度計で低粘性、低せん断速度の測定用に優れ、R/S Rheometer は平行円盤型の回転式粘度計で高粘性、高せん断速度の測定に有効である。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  $20^\circ\text{C}$  に保たれている。

### 2.3. 実験結果

図-4 (a), (b) および (c) は、各々、黄河土砂

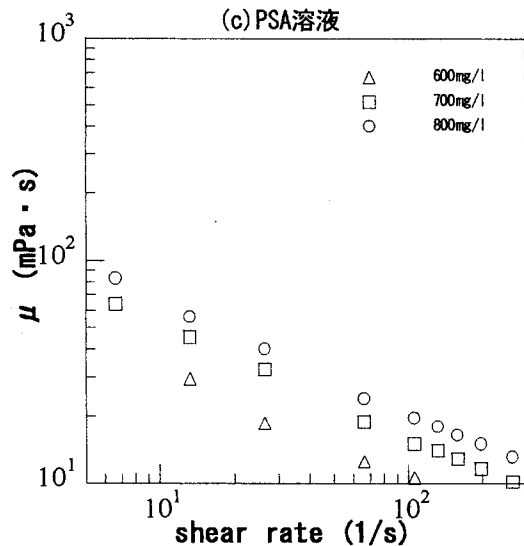
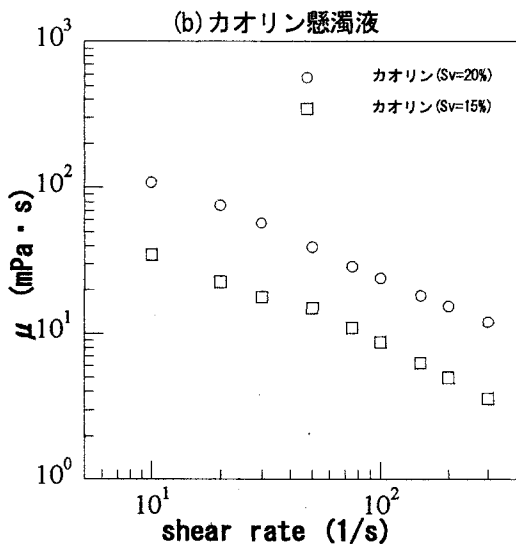
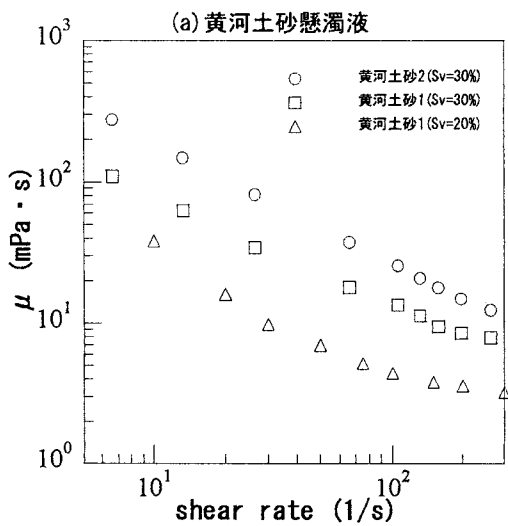


図-4 粘性係数とせん断速度の関係

懸濁液、カオリン懸濁液およびPSA溶液における見かけの粘性係数とせん断速度との関係を示す。黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液及びPSA溶液の何れも、見かけの粘性係数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。また、両者は、黄河土砂

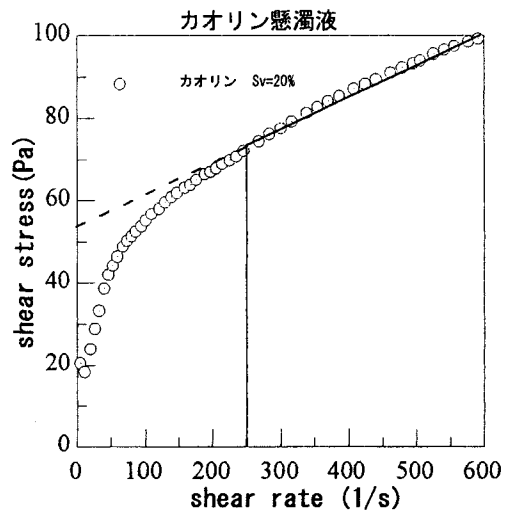


図-5 せん断応力とせん断速度関係  
カオリン懸濁液

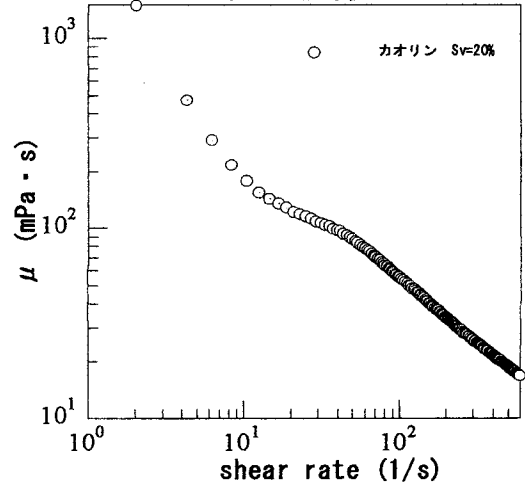


図-6 粘性係数とせん断速度関係

の濃度が20%の場合を除いて、両対数グラフにおいて直線関係を有することから式(1)<sup>9)</sup>で表すべき乗則モデル(Power-law model)により近似可能である。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、粘性は濃度の増大及び粘性粒子の含有量の増大に伴って増加することが認められる。

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

ここに、 $\tau$  : せん断応力、 $\eta$  : 見かけの粘性係数

$$\eta = \eta_0 \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1}, \quad du/dz : \text{せん断速度である。}$$

図-5は、体積濃度が20%におけるカオリン懸濁液のせん断応力とせん断速度との関係を示す。非ニュートン流体の特性として、せん断速度が250 (1/s)以上では、近似的には直線関係が成立し、式(2)で表す<sup>9)</sup>

ビンガム流体によるモデル化が可能であるが、それ以下の低せん断速度では直線関係は成立していない。

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dz} \quad (2)$$

ここに、 $\tau$  : せん断応力,  $\tau_B$  : 降伏応力,  $\eta$  : 見かけの粘性係数,  $du/dz$  : せん断速度である。

図-6は、体積濃度が20%のカオリン懸濁液における見かけの粘性係数のせん断速度に対する依存性を示す。せん断速度が10 (1/S) 以下の低せん断速度では、見かけの粘性係数は、清水に比べて100~1000倍の範囲にあり、せん断速度が2 (1/S) で1500倍に達することが認められる。

図-6は、体積濃度が20%のカオリン懸濁液における見かけの粘性係数のせん断速度に対する依存性を示す。せん断速度が10 (1/S) 以下の低せん断速度では、見かけの粘性係数は、清水に比べて100~1000倍の範囲にあり、せん断速度が2 (1/S) で1500倍に達することが認められる。

### 3. 管路実験

粘性実験において高濃度流の粘性特性が明らかになり、その結果の基に管路における高濃度流の抵抗特性について実験的に解明を求めた。

#### 3.1. 実験材料

実験材料の一つとして、中国の黄河下流域に位置する済南市濼口水文観測所（河口より278km上流位置）における河床材料を用いた。密度は $\rho=2.678\text{g/cm}^3$ 、平均粒径は $d_{50}=44\mu\text{m}$ であり、その粒度分布を図-7に示す。もう一方の実験材料は粘性実験で用いたカオリンである。

#### 3.2. 実験装置

図-8に実験装置の概略を示す。実験に使用した円管は長さ4m、内径 $d=20\text{mm}$ の水理的に滑らかな透明の塩化ビニル管である。水槽には土砂の沈積を避け、管路へ

の流入濃度を一定に保つために攪拌機を設置した。流量はポンプ直下流のバルブによって調整し、定期的な流量の安定性について確認を行っている。ポンプによる懸濁液の温度上昇を避け、水温を一定に保つために水槽には恒温装置を設置し、温度変化は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内であった。摩擦損失水頭は、測定区間 $l$ を清水では2000mm、

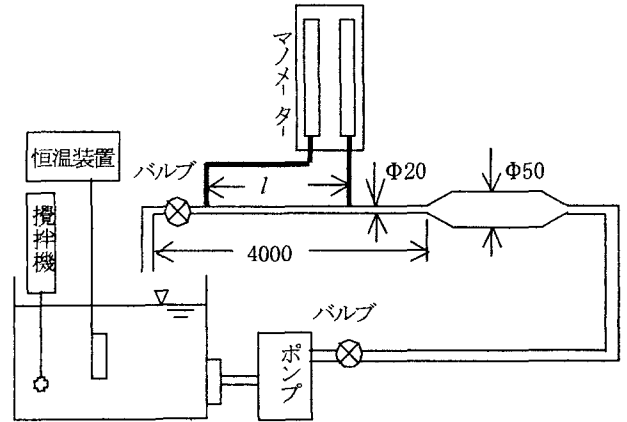


図-8 管路実験装置概略図

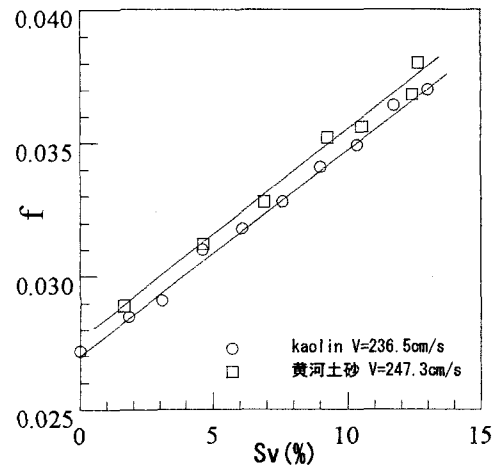


図-9 抵抗係数と体積濃度

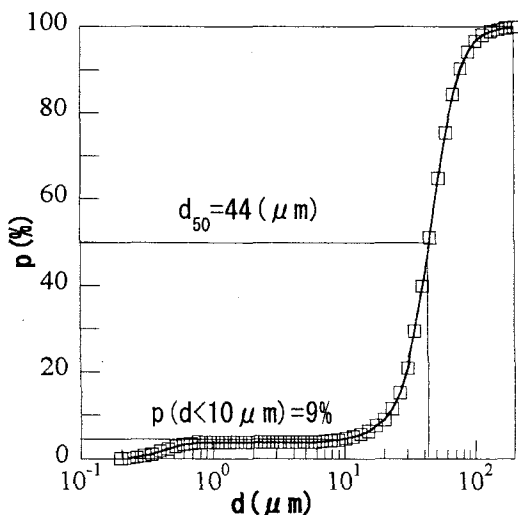


図-7 黄河土砂の粒度分布

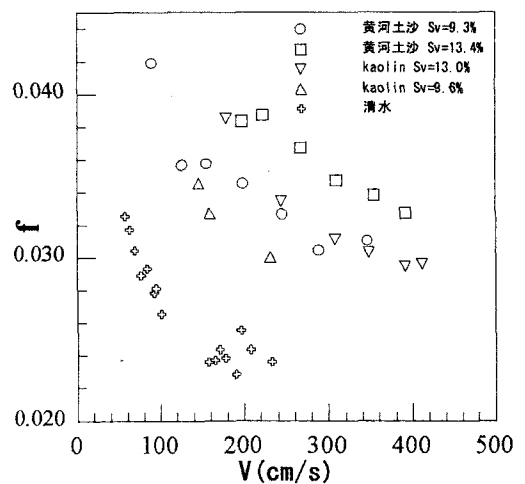


図-10 抵抗係数と流速

土砂流では500mmとし、マンローターを用いて計測した。

### 3.3. 実験方法

摩擦損失係数の土砂濃度への依存性は、流量を一定に保ち土砂濃度を段階的に増加させ、流速への依存性は土砂濃度を一定に保ち流量を段階的に増加させて、検討を行った。摩擦損失係数  $f$  は式(3)により求められた。

$$f = h_f \frac{D}{l} \frac{2g}{v^2} \quad (3)$$

ここに、 $h_f$  : 摩擦損失水頭、 $D$  : 円管直径、 $v$  : 断面平均流速、 $g$  : 重力加速度、 $l$  : 計測区間の長さである。

### 3.4. 実験結果

図-9 は、断面平均流速を一定に設定した場合の摩擦損失係数と土砂濃度との関係を示す。黄河土砂とカオリンの何れも、土砂濃度が13%までの範囲では濃度の増大に伴って摩擦損失係数は直線的に増大し、濃度が10%においては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、若干黄河土砂の方が大きな値を示す。この傾向は、今本・大年<sup>10,11)</sup>による開水路滑面流れにおける摩擦損失係数が濃度の増大に伴って増大することと対応している。なお、断面平均流速は黄河土砂で247.3cm/s、カオリンで236.5cm/s、に設定されており、管路底面への土砂の堆積は観察されていない。

図-10 は、体積濃度を一定に設定した場合の摩擦損失係数と断面平均流速の関係を示す。体積濃度は、黄河土砂では13.7%と9.5%、カオリンでは13.0%と9.7%に設定した。カオリンのデータはかなりばらついてはいるが、摩擦損失係数は全体的に両者とも流速の増大に伴って減少傾向を示し、図-9と同様にカオリンに比べて若干黄河土砂の方が大きくなる傾向が認められる。また、カオリンおよび黄河土砂を含んだ流れは清水流に比べて摩擦損失係数は大きい。

高濃度土砂流における抵抗則を検討するためには、レイノルズ数を算定する必要がある。高濃度土砂流においては粘性係数がせん断速度に依存することから、本研究では次式に示す様に代表的せん断速度として壁面せん断速度を用いた。壁面せん断速度  $\gamma_w$  は、非ニュートン流体の管路流れにおいて適合性の高い Rabinowitsch の式(4)<sup>9)</sup>から求めた。

$$\gamma_w = \frac{3}{4} \frac{4Q}{\pi R^3} + \frac{\tau_w}{4} \frac{d}{d\tau_w} \left( \frac{4Q}{\pi R^3} \right) \quad (4)$$

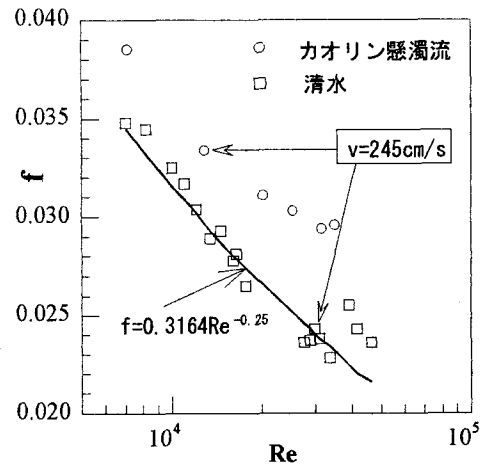


図-11 管路における摩擦損失係数とレイノルズ数との関係

ここに、 $Q$ 、 $R$ および $\tau_w$ は、各々、流量、管径および壁面せん断応力である。各せん断速度に対応した粘性係数  $\mu$  から得られた Reynolds 数と摩擦損失係数  $f$  との関係を図-11に示す。清水の場合ブラジウスの1/4乗則にしたがっていることから実験精度は確認された。また、壁面せん断速度を用いた場合、カオリン懸濁流は清水に比べて摩擦損失係数が大きくなることと同一の流速(245cm/s)において Reynolds 数が減少したことが認められる。よって、図-9に示された土砂濃度の増大による摩擦損失係数の増大傾向は、土砂により粘性係数と動粘性係数が増大し、レイノルズ数が相対的に低下したためであると考えられる。なお、高分子剤添加に起因する抵抗低減効果は、水の粘性の数倍程度において表れている<sup>8)</sup>。本実験では水の粘性に対して10~10<sup>3</sup>倍の範囲であり、特に低せん断速度における粘性効果の増大が抵抗増に寄与したものと予測される。

## 4. 開水路実験

本実験は高濃度土砂流の非ニュートン特性に着目し、管路実験の結果を基に、滑面開水路における非ニュートン流体の流れの構造について検討した。

### 4.1. 実験材料

実験材料は前節において述べたように黄河土砂(1)の体積濃度が  $S_v=30\%$ における粘性に近い特性を持つ PSA 溶液を用いた。ポリアクリル酸ソーダ等のアクリル系吸水性樹脂は、生理用品、おむつ、使い捨て雑巾等の衛生用品を始めとして、食品添加物、農園芸用品等として用いられてきている<sup>12)</sup>。

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  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  に設定した。

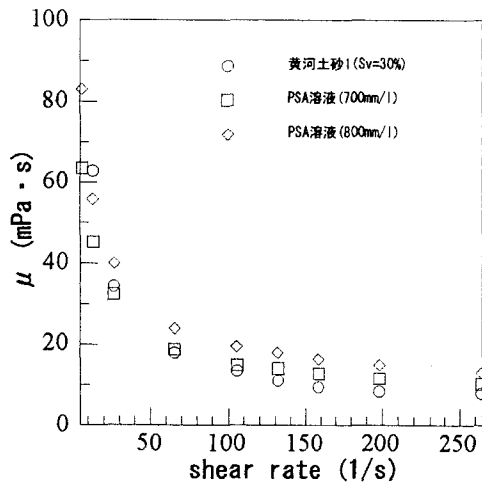


図-12 黄河土砂とPSA溶液の粘性特性の比較

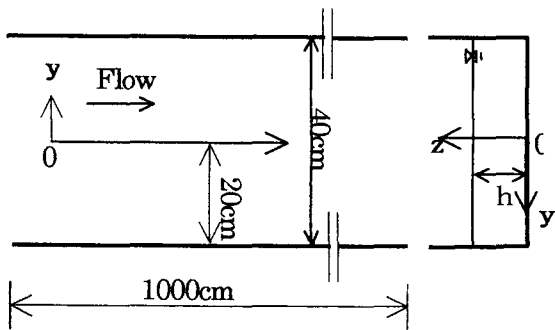


図-13 実験水路の概要

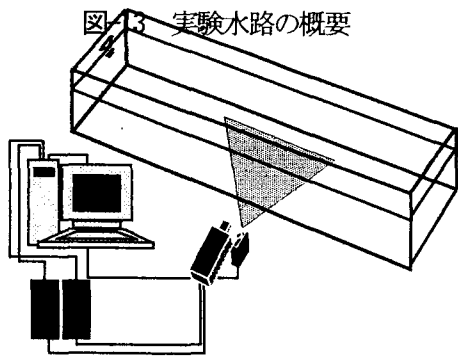


図-14 PIVシステムの概要

図-12は20℃における黄河土砂懸濁液とPSA溶液の粘性特性を示したものである。これより開水路に流したPSA溶液の濃度は700mg/lにある。また、その粘性特性は黄河土砂1 (Sv=30%)の粘性特性と同じ傾向を示し、PSA溶液で黄河土砂懸濁液の粘性特性を再現するのは可能であることを示す。

#### 4.2 実験装置及び方法

実験には長さ10m、幅0.4m、高さ0.2mの亚克力樹脂製の循環式可変勾配水路を用いて水とPSA溶液に

表-1 開水路実験条件

		Q (l/s)	U (cm/s)	H (cm)	I	Fr
PSA 溶液	case1	4.0	20.0	5.0	1/1000	0.286
	case2	4.0	50.0	2.0	1/100	1.129
清水	case3	4.0	20.0	5.0	1/1000	0.286
	case4	4.0	66.7	1.5	1/100	1.739

対してそれぞれ流量をQ=4(1/s)に設定し、面的計測が可能なPIV法を用いて流速分布の計測を行った。図-13および図-14は実験装置の概要を示す。光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザを用い、シート光の厚さを1mm、幅を8cm、パルス間隔を常流には600μs、射流には200μsに設定し、水路側方から流れ方向に垂直に照射した。レーザ光とCCDカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、30fps (frame per second)、960×1018 (pixel)のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV法によって処理された。ここに画像の1pixelサイズは、0.093mmである。流速のサンプリング周波数は15Hz、1計測面での画像データは1000枚、計測時間は33.3secであった。なお、トレーサとして粒径30μm、比重1.02のナイロン粒子を使用した。CCDカメラには50mmと200mmの2種類のレンズを使用した。前者は全体像(画角50mm×50mm)を、後者は空間分解能を高めて壁面近傍の流れ場(画角15mm×15mm)を詳細に捕らえるためのものである。

座標系は水路中央部底面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軸をとり右手系とし、それぞれの流速成分をu, v, wとあらわす。

実験条件は表-1に示している。PSA溶液と水に対してそれぞれ常流と射流の等流場を設定した。PSA溶液の常流と射流を、各々、case1, case2, 水の場合の

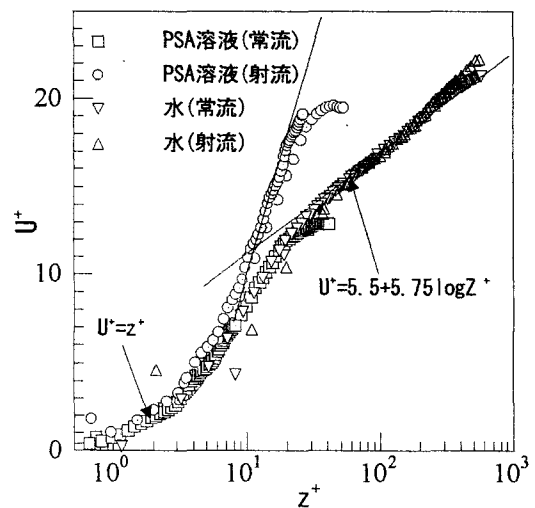


図-15 開水路における主流速分布

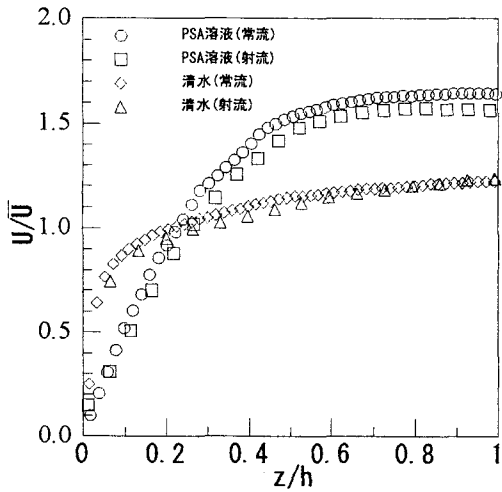


図-16 開水路における主流速分布  
常流

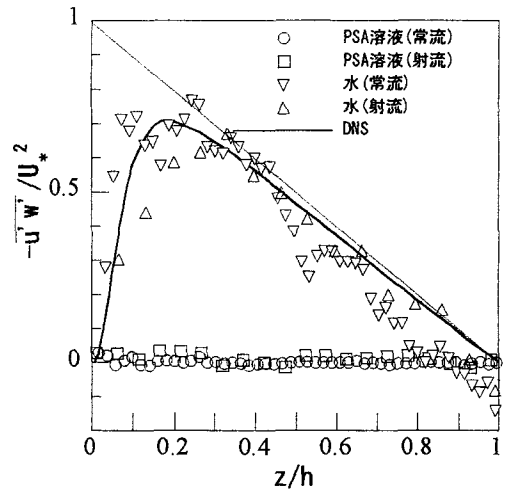


図-19 レイノルズ応力分布図

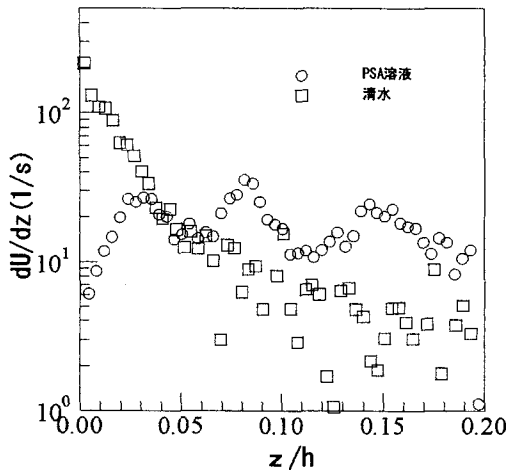


図-17 常流におけるせん断速度分布

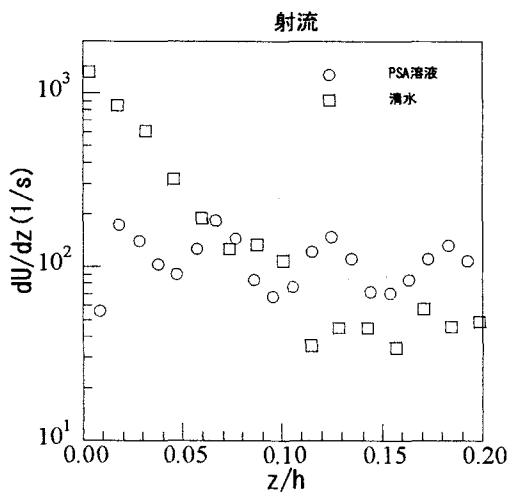


図-18 射流におけるせん断速度分布

常流と射流を、各々、case3, case4 とした。常流は水路勾配  $I=1/1000$  に設置し、下流端のゲート操作より水深 5cm を調整した。射流においては水路勾配  $I=1/100$  に調整し、ゲートは全開で操作無しとした。何れのケースも計測区間は等流場であった。

### 4.3. 実験結果

図-15 は、高粘性流体である PSA 溶液を用いた主流速の鉛直分布を示す。図中  $U^*=U/U_*$ ,  $Z^*=Z \cdot U_*/\nu$ , ただし、 $Z$  は底面からの距離、 $U_*$  は摩擦速度、 $\nu$  は溶液の底面におけるせん断速度に対応する動粘性係数である。図中の清水は、高粘性流体の特性を相対的に議論するためのものである。ゲート操作を行わなかった射流の場合には、表-1 から明らかな様に、高粘性流体で清水に較べて水深で 33% 増大、摩擦速度で 15% 増大することが分かる。図-15 より、高粘性流体である PSA 溶液を用いた主流速は、清水に較べて粘性底層 ( $z^+ < 5$ ) では類似の傾は向を示すが、バッファー層 ( $5 < z^+ < 30$ ) および対数則域 ( $30 < z^+$ ) では大きな値を示し、その差は自由水面に近づくに従って増大傾向を有することが認められる。また、バッファー層において PSA 溶液を用いた主流速は、片対数紙上で直線性が認められることから、対数則を適用すればカルマン定数  $\kappa=0.08$  となり、従来の浮流砂流におけるカルマン定数  $\kappa$  の減少傾向と対応している。また、その上層の水面付近では、主流速は一様化を示し、直線分布から大きく偏倚することが分かる。断面平均流速と水深を用いて無次元化された主流速の鉛直分布を図-16 に示す。常流および射流の何れにおいても高粘性流体である PSA 溶液を用いた主流速は、清水に較べて内層 ( $z/h < 0.2$ ) では、小さく、外層 ( $0.2 < z/h$ ) では大きくなる傾向を持ち、清水とは大きく異なることが認められる。

図-17 および 18 は、各々、常流および射流における底面付近のせん断速度と水深との関係を示す。せん断速度は、清水においては底面近傍で最も大きく、壁から離れるに従って減少傾向を示すのに対して、PSA 溶液を用いた高粘性流体では、層流化の傾向が強く現れ、常流および射流とも鉛直上方に向けて顕著な減少傾向を示さず、波状性を示している。また、その値は、常流では 5~40 (1/s)、射流では 50~200 (1/s) の範囲に

ある。図-12 から粘性係数は、清水に較べて Case1 の常流では代表的せん断速度を 20 (1/s) とした場合に約 40 倍、Case2 の射流では代表的せん断速度を 100 (1/s) とした場合には約 20 倍である。なお、この波状性については、層流化した流れの中に大規模な渦が間歇的に発生した可能性も考えられ、興味深い現象として今後の検討課題としたい。

図-19 は、レイノルズ応力の鉛直分布を示す。清水においては、開水路滑面流れの DNS 結果と類似の傾向を示しているのに対して、PSA 溶液を用いた高粘性流体ではレイノルズ応力はほぼゼロに近く、乱れによる運動量輸送は無視できる。即ち、図-15 に示された高粘性流体における対数則の適用は便宜的なものであり、Case1 および Case2 の流れ場は乱流場とは見なされないことが分かる。黄河土砂を用いた体積土砂濃度が 30% の場合には、高粘性流体である PSA 溶液と類似の粘性特性を有することから、高濃度土砂流においても低せん断速度においては乱流場を形成していないことが示唆される。

## 5. おわりに

以上、本研究では黄河下流域の済南市で採取したシルト性の河床材料、カオリン粘土及び高分子剤を用いて高濃度土砂流の抵抗特性および粘性特性について検討した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 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、若干黄河土砂の方が大きな値を示す。
- 2) 高濃度流及び高分子剤溶液は非ニュートン流体の特性を示し、せん断速度 250 (1/s) 以上の流れではビンガム流体によって近似できるが、それ以下の低せん断速度では見かけの粘性係数  $\mu$  はせん断速度への依存性が強く、べき乗則モデル (Power-law model) に従う。
- 3) 高濃度土砂を伴う管路流における摩擦損失係数の増大は、その原因の一つとして、高濃度土砂が粘性係数  $\mu$  を増大させ、Reynolds 数が減少したことが考えられる。

4) 高粘性流体の開水路滑面流れでは、管路流れと同様に抵抗が増大し、射流では水深および摩擦速度が増大した。その原因として、低せん断速度においては粘性が増大し、層流化現象に伴ってレイノルズ応力は無視できる反面、粘性応力が卓越したことが挙げられる。

本研究は、科学技術振興事業団・戦略基礎研究「黄河流域の水利用・管理の高持続性化」(代表:楠田哲也)の支援を受けている。記して、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 趙文林, 黄河泥沙. 黄河水利出版社, 1996.
- 2) 銭寧, 高含沙水流運動, 清华大学出版社, 1989.
- 3) P.Cousot : Rheology of debris flow - Study of concentrated suspensions. Ph.D. thesis, INPG, Grenoble, France (in French), 1992
- 4) 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
- 5) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸: 高濃度流れに関する研究(2)―流動機構―, 京都大学防災研究所年報, No.29,B-2,1986,pp361-375
- 6) 江頭進治・芦田和男・野田中新・佐藤隆宏: 微細砂を高濃度に含む流れの特性, 水工学論文集, 第 37 巻, 1993, pp517-522
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 中村喜代次, 非ニュートン流体力学, コロナ社, 1997.
- 10) 今本博健・大年邦雄: 固液混相開水路流れの水力特性に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, No.22,B-2,1979,pp453-468
- 11) 今本博健・大年邦雄: 固液混相開水路流れの水力特性に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, No.23,B-2,1980,pp373-392
- 12) 和田 翼: 工業所有権法レポート(吸着剤), <http://t-kimura03.cc.yamaguchi-u.ac.jp/classic/kaizen01/h13-5c/5c40c.htm>

(2004 年 4 月 16 日受付)