

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

Resistance characteristic of hyperconcentrated-flow that has non-Newtonian properties

崔 志英*・大本照憲**・古賀 聖***

Zhiying Cui, Terunori Ohmoto and Satoru koga

*工修 熊本大学, 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**工博 熊本大学教授, 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***工修 (株) 東京建設コンサルタント (〒171-0014 東京都豊島区池袋 2-43-1)

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 problem. 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 rheological properties of mudflows that were investigated by using coaxial cylinder. Shear stress and viscosity of the experimental results have relation with shear rate, sediment concentration, temperature and particle size distribution. In addition the relation between shear stress and shear rate is described by Power law model at low shear rate that shear rate did not fit to Bingham model. It was clarified that the rheological properties of Poly sodium acrylic (PSA) solution was similar to mud flows.

Key Words: hyperconcentrated-flow, non-Newtonian fluid, Open-channel flow

1. はじめに

黄河は世界有数の高含砂河川であり, 特に洪水時には体積濃度が最大約 30% にもなる高濃度土砂流を形成すると報告されている^{1) 2)}. 一方, 微細な土砂や礫を高濃度を含む流れは泥流および土石流など土砂災害としても現れ, 近年では有明海湾奥部の感潮域のカタ土問題としても取り上げられている. これらの流れの構造を解明することは, 工学的には治水安全度や環境機能を高める上で重要となる.

高濃度土砂流のせん断特性については降伏応力に着目した Bingham model を適用する場合が多く, Yang, C.T (1996)²⁾ は黄河土砂懸濁液について Einstein の粘性係数の予測式に対し, 粒径が 0.025 mm 以下の粒子含有率を基に修正を加えた. Bradley & McCutcheon (1985)³⁾ は, 土砂体積濃度が 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% 以上の土砂流では非ニュートン流体特性を示すことを指摘している. 芦田ら (1985)⁴⁾ は高濃度土砂流をビンガム流体でモデル化し, 電気二重層を考慮した流体の粘性係数, 沈降速度について考察している. また, P. Coussot (1992)⁵⁾ は 3 つのパラメータを有する Herschel-Bulkley model を用いて高濃度土砂流におけるせん断応力とせん断速度の関係^{5,7)}を提示した. 著者ら⁸⁾は, 黄河下流域の済南市において採取した河床材料と市販の粘土 (カオリン) を用いた粘性実験で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ことを指摘した.

開水路における高濃度土砂流については計測の困難さにより詳細な流速変動の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抵抗や流れの内部構造に与える影響については不明な点が多く残されている. 芦田ら (1986)⁹⁾ は応用ピトー管法を用いて主流速の鉛直分布を計測した結果よりカルマン定数を評価し, カルマン定数は路床近傍において清水に比べて小さくなるものの, その外側においては清水とほぼ同様となり, 本質的には清水と同様の流れ構造を持つことを指摘した. Huang (1998)¹⁰⁾ らは流れを層流と仮定し Herschel-Bulkley model を用いて主流速の鉛直分布を理論的に導き, Xudong Fu (2005)¹¹⁾ は土砂流を流体と固体の二相流として捉え流体と固体粒子の速度を分けて扱い, 土砂濃度の鉛直分布に流体揚力および流砂応力勾配の効果を考慮している. また, 新井ら (2004)¹²⁾ は高分子剤を用いて粘性土石流の再現を試みた.

開水路における高濃度土砂流については計測の困難さにより詳細な流速変動の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抵抗や流れの内部構造に与える影響については不明な点が多く残されている. 芦田ら (1986)⁹⁾ は応用ピトー管法を用いて主流速の鉛直分布を計測した結果よりカルマン定数を評価し, カルマン定数は路床近傍において清水に比べて小さくなるものの, その外側においては清水とほぼ同様となり, 本質的には清水と同様の流れ構造を持つことを指摘した. Huang (1998)¹⁰⁾ らは流れを層流と仮定し Herschel-Bulkley model を用いて主流速の鉛直分布を理論的に導き, Xudong Fu (2005)¹¹⁾ は土砂流を流体と固体の二相流として捉え流体と固体粒子の速度を分けて扱い, 土砂濃度の鉛直分布に流体揚力および流砂応力勾配の効果を考慮している. また, 新井ら (2004)¹²⁾ は高分子剤を用いて粘性土石流の再現を試みた.

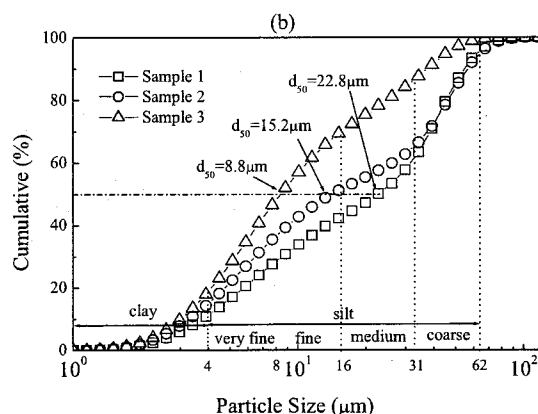
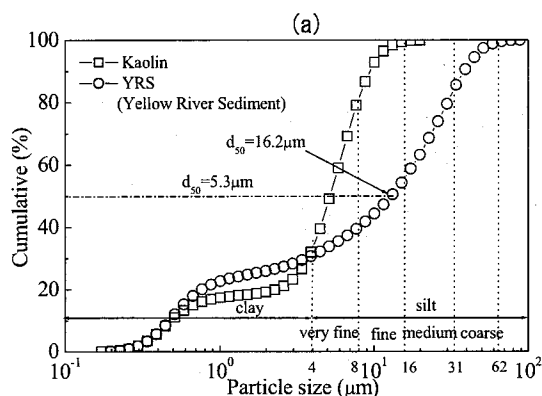


図-1 実験材料の粒度分布

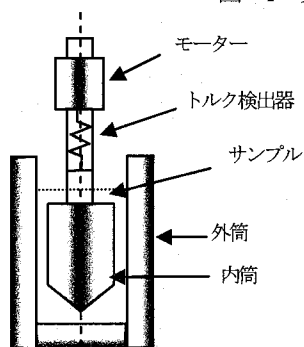


図-2 DV-II PRO Digital Viscometer

著者ら (2004)⁸⁾ は、体積濃度が 30% の黄河土砂懸濁液及び体積濃度 10% のカオリン懸濁液の非ニュートン流体特性に類似した傾向を有する模擬流体ポリアクリル酸ソーダ (PSA) 水溶液を用い開水路実験結果から、高濃度土砂流が清水に較べて抵抗が増大する原因は、レイノルズ応力が顕著に減少する反面、非ニュートン流体特性に伴う粘性応力の増大が主因であることを指摘した。

本研究では、高濃度土砂流の非ニュートン流体特性を power-law model によって表現できることを示し、そのパラメータと土砂体積濃度との関係を明らかにした。また、模擬流体 PSA 水溶液を用いた高濃度土砂流の再現性について抵抗則の視点から検討した。さらに、粒子画像流速計法 PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて高濃度土砂流の流動機構について考察した。

2. 粘性特性

高濃度土砂流の粘性特性を特徴付けるパラメータは土砂濃度、粒度分布、温度などが挙げられる。

2.1 実験材料及び条件

粘性実験には黄河土砂懸濁液、カオリン懸濁液およびカオリンが主成分で粒度分布の異なる 3 種類の Sample からなる懸濁液、および高分子剤水溶液を使用した。図-1 (a) に黄河土砂 (Yellow River Sediment : 図には YRS と示す) とカオリン (kaolin) の粒度分布を示す。黄河土砂は中国の黄河下流域に位置する済南市で採取した黄河河床材料である。黄河土砂の中央粒径が $d_{50} = 16.2 \mu\text{m}$ でカオリン

表-1 粘性実験条件

Sample	No.	中央粒径 d_{50} (μm)	均等係数 C_u	曲率係数 C_g	標準偏差 σ_ϕ	体積濃度 C_v (%)
Case1	1	8.8	7.7	0.67	32	15%
Case2	2	152	7.7	0.51	3.6	15%
Case3	3	228	3.9	0.80	2.8	15%
Case4	1	8.8	7.7	0.67	32	20%
Case5	2	152	7.7	0.51	3.6	20%
Case6	3	228	3.9	0.80	2.8	20%

の中央粒径が $d_{50} = 5.3 \mu\text{m}$ である。粒度分布よりカオリンは粒径がほぼ一様な材料であるのに対し黄河土砂は粒径にばらつきがあり自然砂の特徴を示している。次に、図-1 (b) にカオリンを主成分とした Sample の粒度分布を示す。Sample-1 については中央粒径 $d_{50} = 8.8 \mu\text{m}$ で、Sample-2 は $d_{50} = 15.2 \mu\text{m}$ 、また Sample-3 においては $d_{50} = 22.8 \mu\text{m}$ である。表-1 に Sample-1, 2, 3 を用いた粘性実験条件を示す。

高分子剤にはポリアクリル酸ソーダ (PSA) を使用した。PSA 水溶液は無色透明な流体である。

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 を用いた。図-2 に装置の基本構造を示す。DV-II Viscometer は共軸二重円筒型の回転式粘度計で低粘性、低せん断速度域の測定に優れている。温度の管理については水温精度が $\pm 0.3^\circ\text{C}$ を有する循環式恒温水槽から断熱性の高い管を粘度計に接続することにより調整が可能なものとなっている。

2.3 実験結果

(1) 粘性特性と体積濃度の関係

図-3 は $C_v = 10\%$ 及び 20% のカオリン懸濁液におけるせん断応力とせん断速度の関係を示したものである。また、図中の点線は各体積濃度に対して式 (1) に示す Bingham model を適合したものである。

$$\tau = \tau_y + \mu_B (du/dy) \quad (1)$$

ここに、 τ はせん断応力、 τ_y は降伏応力、 μ_B は見

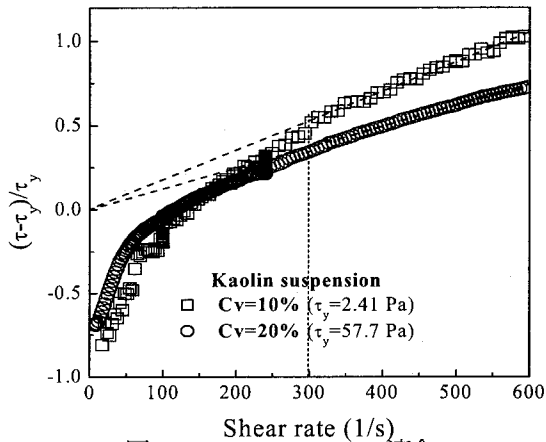


図-3 Bingham model の適合
(kaolin 懸濁液)

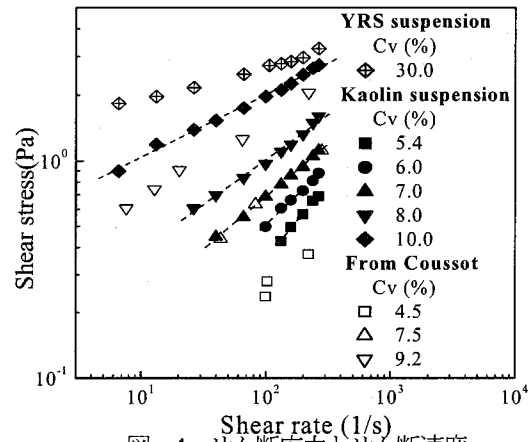


図-4 せん断応力とせん断速度
(kaolin 懸濁液)

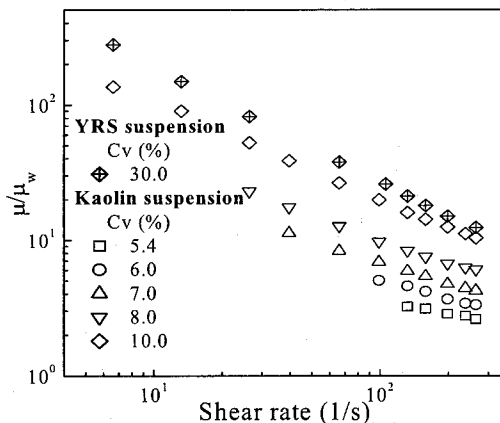


図-5 粘性係数とせん断速度
(kaolin 懸濁液)

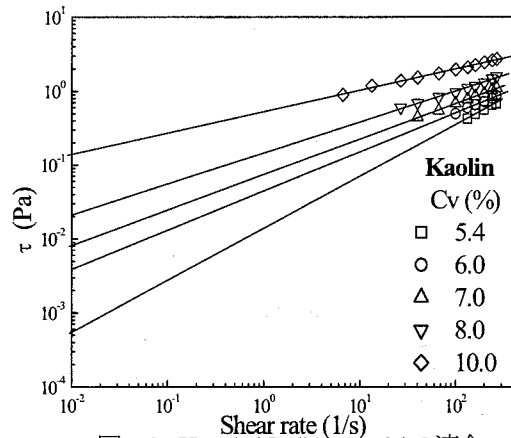


図-6 Herschel-Bulkley model の適合
(kaolin 懸濁液)

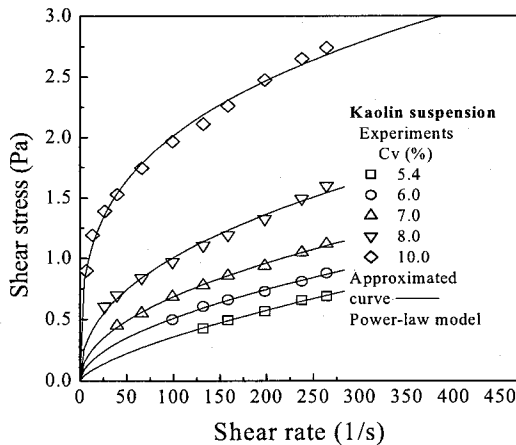


図-7 Power-law model の適合
(kaolin 懸濁液)

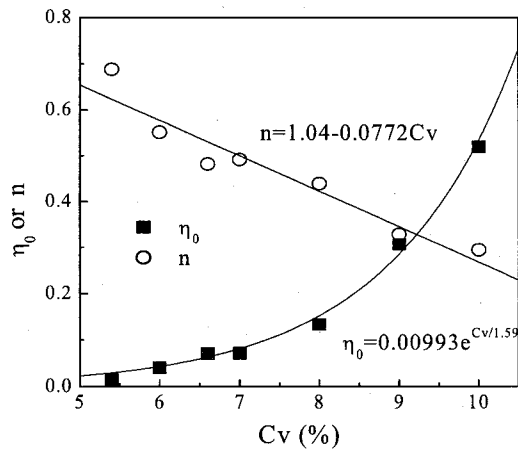


図-8 η_0 及び n の体積濃度 C_v との関係
(kaolin 懸濁液)

かけの粘性係数、 du/dy はせん断速度である。

図-3 において横軸はせん断速度であり、縦軸はせん断応力を Bingham model における降伏応力で無次元化した値としている。せん断応力とせん断速度の関係はせん断速度が約 300 1/s 以下の領域においては直線関係を示さず、Bingham model の近似曲線は実測値と一致していない。そこで、300 1/s 以下の低せん断速度領域における詳細なせん断応力及び見掛けの粘性係数を図-4 及び図-5 に示す。

図-4 はせん断応力と体積濃度の関係について実験値と P. Coussot⁶⁾ のデータを示したものである。せん断応力は体積濃度に依存し、同一せん断速度において体積濃度の増大に応じて増加傾向を示している。図-5 に見かけの粘性係数と体積濃度の関係について示す。横軸はせん断速度で縦軸は見かけの粘性係数を清水の粘性係数で無次元化してある。見かけの粘性係数はせん断速度の増加に伴い低下傾向を示し、体積濃度の増加により上昇傾向にある。

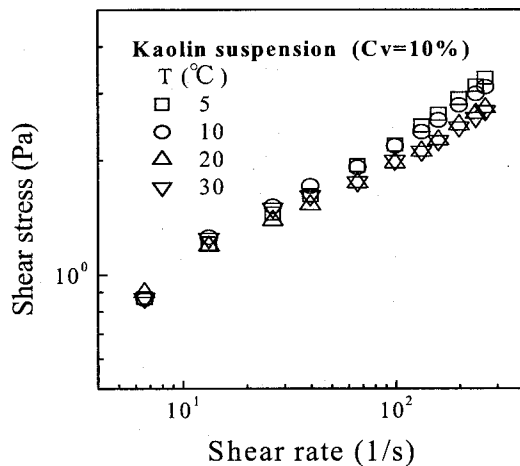


図-9 セン断応力と温度
(kaolin 懸濁液)

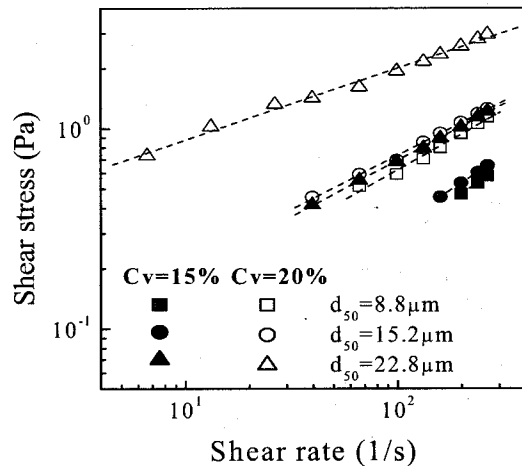


図-10 セン断応力と粒度分布
(kaolin 懸濁液)

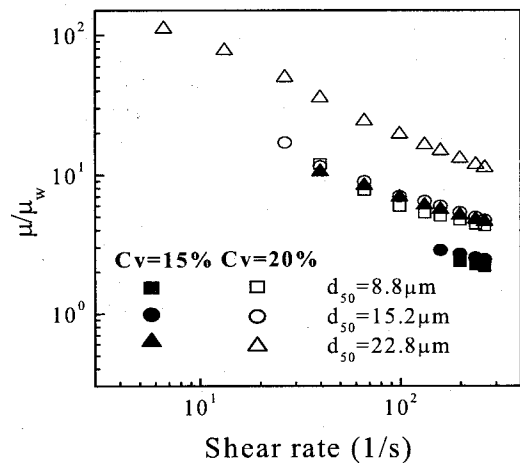


図-11 粘性係数と粒度分布
(kaolin 懸濁液)

Cv=5.4%の見かけの粘性係数は清水に対してせん断速度が264 1/sで2.6倍となり、Cv=10%においては清水のそれに対しせん断速度が6.6 1/sで約136倍にも達している。また、Cv=30%における黄河土砂懸濁液の見かけの粘性係数がCv=10%のカオリン懸濁液の傾向と類似している。

せん断応力及び見かけの粘性係数とせん断速度の関係は両対数表示において直線性を有していることより、図-6に式(2)に示すような降伏応力を考慮したHerschel-Bulkley modelを用いた。

$$\tau = \tau_y + k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2)$$

ここで、 τ_y は降伏応力、 k 、 n はパラメータであり、 $k \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$ は見かけの粘性係数である。

また、図-7に式(3)に示すような降伏応力を考慮しないべき乗則モデル(Power-law model)を適用した。

$$\tau = \eta_0 \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (3)$$

ここで、 η_0 、 n はパラメータであり、 $\eta_0 \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$ は見かけの粘性係数である。

二つのモデルとも実験値を良好に表現しており、その

表-2 各モデルのパラメータ値

Cv(%)	Herschel Bulkley model			Power law model	
	τ_y (Pa)	k (Pa·s ⁿ)	n	η (Pa·s ⁿ)	n
5.4	0.0005	0.0146	0.693	0.0150	0.688
6	0.0024	0.0400	0.552	0.0403	0.551
7	0.0082	0.0743	0.483	0.0713	0.491
8	0.0210	0.151	0.413	0.133	0.439
10	0.120	0.537	0.287	0.519	0.294

パラメータは表-2に示す。 τ_y 、 k 、 η_0 及び n は近似曲線から得られた値である。特に τ_y は図-6に示すようにせん断速度が0.01 1/sでの値であり⁹⁾、Cv=5.4で0.0005 Pa、Cv=10%で0.12 Paと微小な値を示していることより、これ以後はパラメータの少ないPower-law modelを用いて議論を行う。

図-8はPower-law modelにおける η_0 及び n と体積濃度の関係を示したものである。Cv=5.4%から10%の範囲において η_0 は体積濃度の増加に伴い指数関数的に増大している。逆に n は体積濃度の増大に対して直線的な減少傾向を示している。各パラメータの体積濃度Cvへの依存性は以下の式(4)、(5)によって近似した。

$$\eta_0 = 0.00993e^{Cv/1.59} \quad (4)$$

$$n = 1.04 - 0.00772Cv \quad (5)$$

図よりこの関係はCv=5.4%から10%の範囲において適合性の高いことが認められる。

(2) 粘性特性と温度の関係

図-9はCv=10%のカオリン懸濁液におけるせん断応力の温度依存性を示している。せん断応力は温度変化に対して顕著な変化を示していない。図より30℃における見かけの粘性係数に対する5℃の見かけの粘性係数の比率はせん断速度が6.6 1/sにおいて、1.004倍となりほとんど差がなく、せん断速度が264 1/sにおいては1.23倍となり、

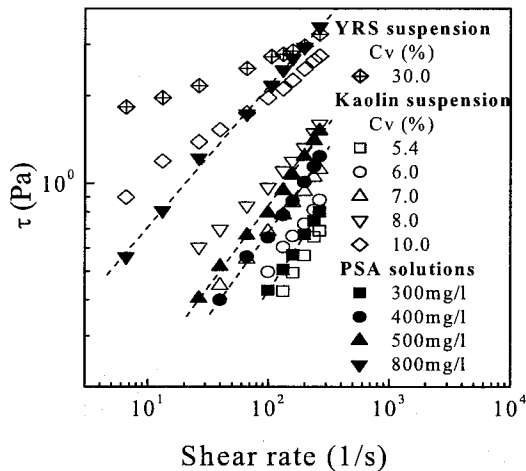


図-12 せん断応力とせん断速度

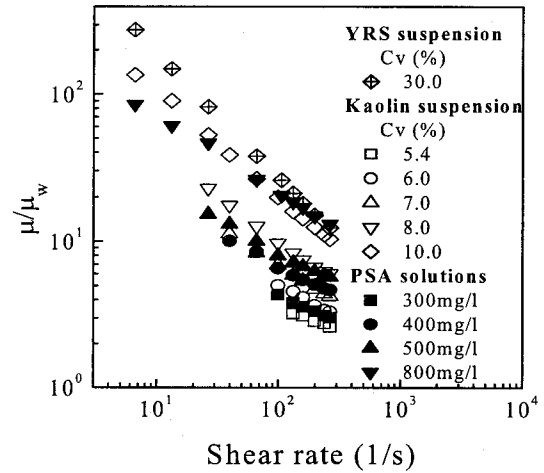


図-13 粘性係数とせん断速度

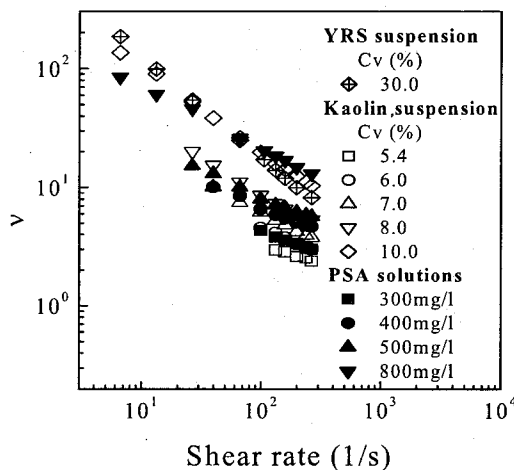


図-14 動粘性係数とせん断速度

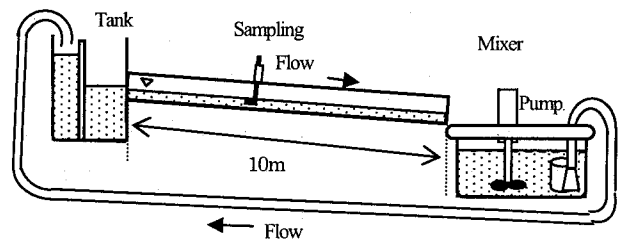


図-15 開水路実験概要

Medium silt以下の含有量が見かけの粘性係数に大きく影響を及ぼしていることが示唆される。

(4) PSA 水溶液の粘性特性

図-12および図-13は高濃度土砂懸濁液とPSA水溶液におけるせん断応力及び見かけの粘性係数のせん断速度依存性を示したものである。PSA水溶液におけるせん断応力及び見かけの粘性係数は両対数紙上においてせん断速度との間に直線関係を有しており、高濃度土砂懸濁液と類似の粘性特性を持つことが認められる。図-14によりカオリン懸濁液の動粘性係数及びPSA水溶液における動粘性係数のせん断速度依存性を示す。図よりPSA水溶液は、濃度300mg/l、400mg/l、500mg/l及び800mg/lにおける動粘性係数が、それぞれ、カオリン懸濁液の体積濃度Cv=6%、7%、8%及び10%における動粘性係数に近く、非ニュートン流体特性を示すことが認められる。

3. 抵抗特性と濃度分布

一般の浮遊砂流の領域においては、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¹³⁾や、逆に粘土を用いたWang (1993)¹⁴⁾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。

水の1.91倍に比べて小さい。故に、温度が低くなるとせん断応力が若干増大する傾向が見られるものの見かけの粘性係数の温度への依存は極めて微小であることが認められる。

(3) 粘性特性と粒度分布の関係

図-10にせん断応力と粒度分布の関係、図-11に見かけの粘性係数と粒度分布の関係を示す。まず、せん断応力及び見かけの粘性係数はせん断速度に依存し非ニュートン流体の特性を示す。また、体積濃度について見るとCv=15%と比較してCv=20%が大きな値を示すことより体積濃度の変化が見かけの粘性係数に強い影響を及ぼしていることが伺える。次に、粒度分布の異なる3種のSampleの粘性特性について見ると、せん断速度が264 1/sにおいてCv=15%の見かけの粘性係数は $d_{50} = 15.2\mu\text{m}$ の場合 $d_{50} = 8.8\mu\text{m}$ の1.13倍と近い値を示し、 $d_{50} = 22.8\mu\text{m}$ は $d_{50} = 8.8\mu\text{m}$ の2.1倍で比較的大きくなるという傾向を有している。この傾向はCv=20%の場合についても同様である。ここで図-1(b)の粒度分布を見ると、Sample-2の粒径 $d = 31\mu\text{m}$ 以下の割合がSample-1の1.08倍、Sample-3の粒径 $d = 31\mu\text{m}$ 以下の割合はSample-1の1.46倍となっている。これより粒径 $d = 31\mu\text{m}$ の

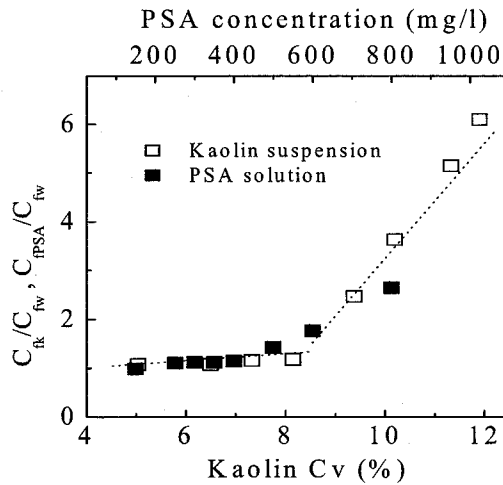


図-16 濃度と全抵抗係数の関係

表-3 カオリン開水路実験条件

	Cv (%)	流量 Q(l/s)	水路勾配 I_0	水深 H(cm)	断面平均流速 U_m (cm/s)	Fr 数
清水	0	6.0	1/400	3.07	48.9	0.891
	5.04	6.0	1/400	3.15	47.6	0.857
	6.50	6.0	1/400	3.15	47.6	0.857
Kaolin 懸濁液	7.33	6.0	1/400	3.23	46.4	0.825
	8.15	6.0	1/400	3.25	46.2	0.818
	9.38	6.0	1/400	4.15	36.1	0.567
	10.2	6.0	1/400	4.72	31.8	0.467
	11.3	6.0	1/400	5.30	28.3	0.393
	11.9	6.0	1/400	5.61	26.7	0.361

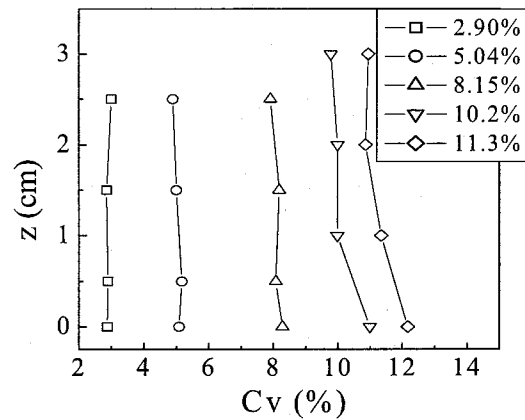


図-17 土砂体積濃度の鉛直分布

表-4 PSA 開水路実験条件

Case	濃度 (mg/l)	流量 Q(l/s)	水路勾配 I_0	水深 H(cm)	断面平均流速 U_m (cm/s)	Fr 数
W1	0	3.0	1/1000	2.53	29.6	0.595
P-a1	400	10.0	1/1000	5.20	48.1	0.674
P-b1	250	3.0	1/1000	2.62	28.6	0.565
P-b2	300	3.0	1/1000	2.63	28.5	0.562
P-b3	400	3.0	1/1000	2.65	28.3	0.555
P-b4	500	3.0	1/1000	2.85	26.3	0.498
P-b5	600	3.0	1/1000	3.05	24.5	0.448
P-b6	800	3.0	1/1000	3.50	21.4	0.366

3.1 実験概要

図-15に実験の概要を示す。長さ10m、幅0.4m、高さ0.2mのアクリル樹脂製の循環式可変勾配水路に粘性実験に用いたカオリン懸濁液及びPSA水溶液を流した。実験条件はそれぞれ表-3及び表-4に示す。抵抗はポイントゲージで等流場の水深を計測することにより算定した。さらにカオリン懸濁液の濃度分布の均一性を確認するために河床面より水面までの間で4点の試料を採集した。

3.1 抵抗特性

図-16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(6)で表される。

$$C_f = 2(U_* / U_m)^2 \quad (6)$$

ここで、 $U_* = \sqrt{ghi_0}$ 、 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_{fPSA}/C_{fw} を示す。抵抗係数 C_{fk}/C_{fw} は1.08から6.10の範囲で変化し、カオリン懸濁液 $C_v=5.04\sim 8.15\%$ 範囲では

顕著な変化はなく、 $C_v=8.15\sim 11.9\%$ 範囲では直線的な増加傾向を示す。この体積濃度が増大と伴に抵抗係数が増大する傾向は、著者らの管路実験結果⁸⁾及び細砂を用いた開水路実験において粒子輸送濃度が大きくなると抵抗が大きくなるという江頭ら¹⁵⁾の結果と類似している。模擬流体としてPSA水溶液を用いた流れの全抵抗係数はPSA水溶液400mg/l以上で急激な上昇を示す傾向及びその増加傾向がカオリンを用いた高濃度土砂流の抵抗特性に類似していることがわかる。図中に示す点線は最小二乗近似により求められた近似曲線である。

3.2 濃度分布

図-17はカオリン懸濁液を用いた高濃度土砂流の鉛直方向への体積濃度分布を示している。近年の研究の一例としてXudong Fu¹¹⁾は、粒径が0.15mmの細砂を用いた浮流砂流の実験結果に対して、流体揚力および流砂の法線応力勾配の効果を考慮することにより特に河床近傍の土砂濃度および主流速の鉛直分布を良好に再現できることを指摘した。しかし、本研究が対象とする粘土を主体とする高濃度土砂流においては、カオリン粒子の中央粒径 $d_{50}=5.3\mu m$ の静水中の沈降速度は0.25cm/sであることから流体と土砂粒子の相対速度は小さい。図-17では、土砂濃度の鉛直方向変化は、若干路床近傍で大きくなって

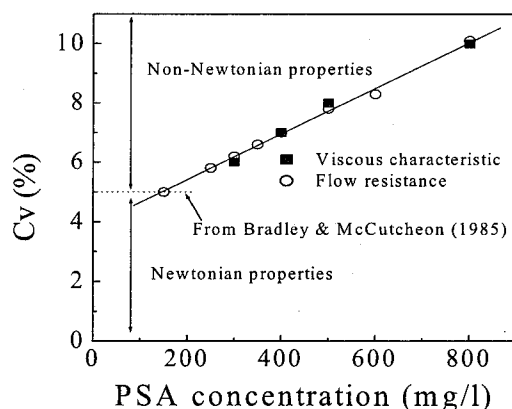


図-18 濃度の対応関係

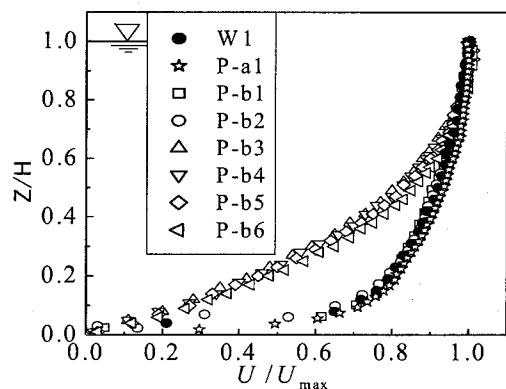


図-20 主流速分布

いるが、比較的一様な分布となっている。このことより、粘土粒子を多く含む高濃度土砂流においては近似的に一流体モデルを適用することに大きな矛盾を生じないことが考えられる。

4. PSA水溶液の流れ構造

4.1 高濃度土砂流とPSA水溶液の類似性

2章および3章で述べたとおりカオリン懸濁液とPSA水溶液では非ニュートン流体特性および開水路における抵抗特性の面から類似した傾向を有することを指摘した。図-18に示されたカオリン懸濁液の土砂濃度とPSA水溶液の濃度の関係は、図-12及び図-13から非ニュートン流体特性に類似性の高い両者の濃度を、また、図-16から抵抗特性に類似性の高い濃度を抽出して得られたものである。実験条件の範囲でカオリン懸濁液とPSA水溶液の濃度は、非ニュートン流体特性および抵抗特性の面から直線関係にあることが分かる。なお、カオリン懸濁液の土砂体積濃度が5%以下においては非ニュートン流体の特性が現れていないと考えられる³⁾ことから、この直線関係が成立する領域は、少なくとも土砂体積濃度が5%以上である。

4.2 実験概要

上記よりPSA水溶液は模擬流体として高濃度土砂流を再現することが可能であることから、PSA水溶液の開水路流れにPIV法を適用して流速変動の計測を行った。図-19

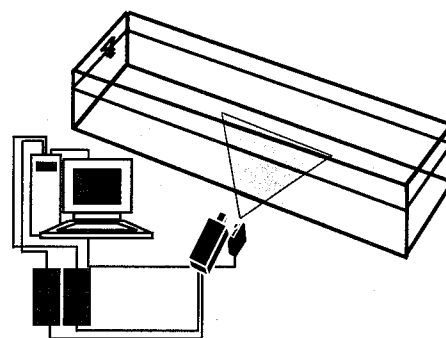


図-19 PIVシステムの概要

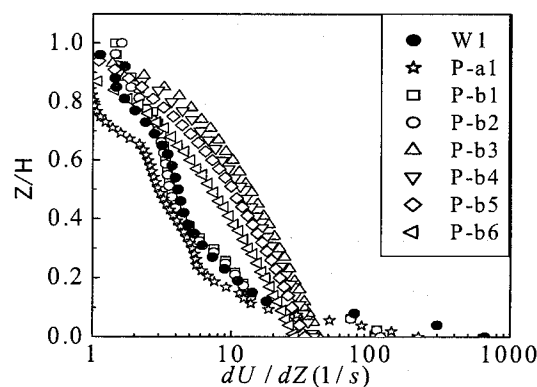


図-21 せん断速度分布

にPIVシステムの概略を示す。座標系は、等流場が形成された水路中央の路床を原点とし、流下方向をx軸、横断方向をy軸、鉛直方向をz軸に設定し、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。シート光は、厚さ1mm、幅10cm、パルス間隔1000μsecに設定し、水路中央y=20cmの地点において水路底面から水面に垂直上向きに照射した。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 ES1.0:1008×1008ピクセル)によって2枚1組の画像として撮影される。流速のサンプリング周波数は15Hz、一計測面で1000枚の画像データに関して統計処理を施した。なお、トレーサとして粒径5μm、比重1.02のナイロン粒子を使用した。表-4に実験条件を示す。

4.3 主流速及びせん断速度分布

図-20に主流速を最大流速 U_{max} で無次元化した値の鉛直分布を示す。図よりP-a1, P-b1及びP-b2において主流速分布は清水のそれと近い分布になっており、P-b3～P-b6においては清水流と大きく異なり、主流速は底面近傍で抑さえられ、なだらかな曲線分布をとる。主流速の空間分布はPSA水溶液の濃度が300mg/lから400mg/lに増大する中で急激に変化していることから、流れの内部構造が大きく変質したことが示唆される。

主流速の空間分布が大きく異なることの主因として、運動量の輸送形態が大きく変化したことが考えられる。具体的には、清水流に近い場合には流れは乱流状態に有り、

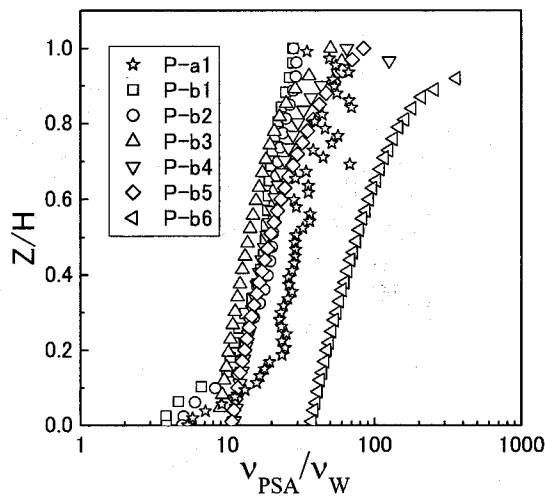


図-22 動粘性係数分布

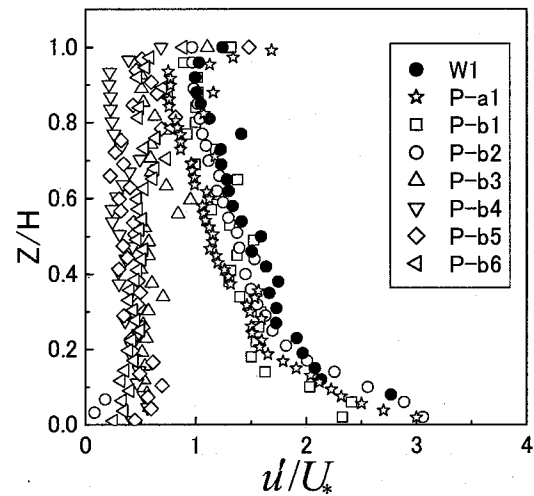


図-23 乱れ強度 u'_{rms} 分布

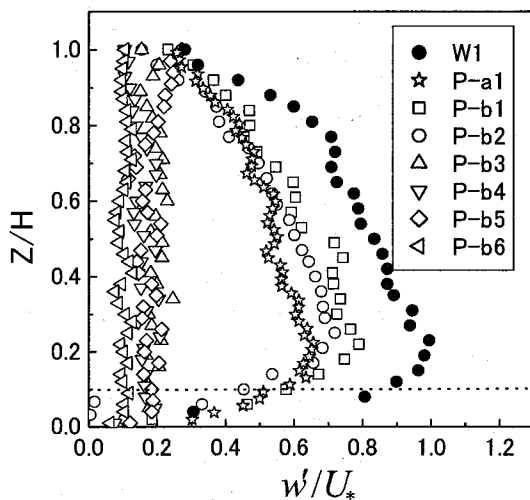


図-24 乱れ強度 w'_{rms} 分布

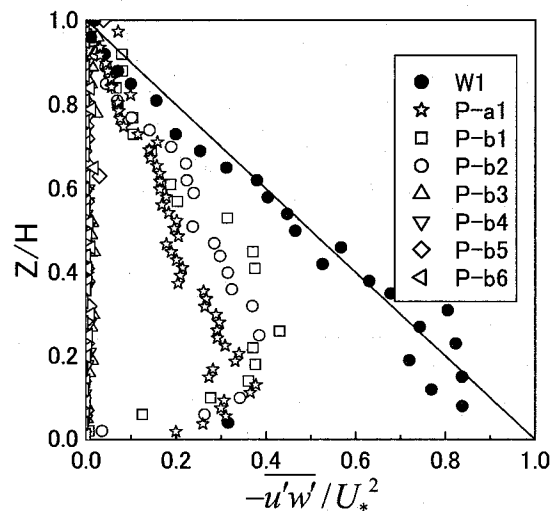


図-25 レイノルズ応力 $-u'w'$ 分布

PSA 水溶液の濃度の増大に伴って乱流から層流に遷移したことが示唆される。流れ場を判別する指標であるレイノルズ数は、非ニュートン流体においては動粘性係数が物性値ではなく、せん断速度に依存した状態変数となるために容易に計算できない。そのため、図-21 にせん断速度 dU/dz の鉛直分布を示す。P-b3~P-b6 の場合のせん断速度は、その鉛直分布が相似であり、PSA 濃度の増加に伴って系統的に減少している。また、清水流に類似した主流速の鉛直分布を有する P-b1 および P-b2 の場合には、清水流に類似したせん断速度の鉛直分布であることが分かる。また、P-a1 の場合の底面せん断速度は清水流に比べて相対水深 z/H が 0.1 以下で類似し、それより上層では小さくなることが分かる。

4.4 動粘性係数分布

非ニュートン流体である PSA 水溶液の粘性係数はせん断速度に依存し、その動粘性係数は渦動粘性係数と同様に流れ場の関数となる。図-22 は、図-21 のせん断速度分布を図-14 の動粘性係数とせん断速度の関係に代入して得られた動粘性係数の鉛直分布を示す。なお、動粘性係数は

清水の動粘性係数により無次元化した。動粘性係数はせん断速度の大きさに対応して底面近傍で最小値、水面付近で最大値を示し、底面付近では PSA 水溶液の濃度の増加に伴いその値が大きくなる傾向を示す。また、PSA 水溶液の動粘性係数は清水に較べて底面付近で 3.8~38 倍、低せん断速度の水面付近では最大 360 倍にまで達する。

4.5 乱れ特性及びレイノルズ応力

図-23、図-24 は流れ方向乱れ強度 u'_{rms} 及び鉛直方向乱れ強度 w'_{rms} の鉛直分布を示す。図-25 はレイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布を示す。全体的には、乱れ強度及びレイノルズ応力は PSA 水溶液の濃度の増大に伴い減少する傾向を示す。特に主流速の鉛直分布が清水流とは大きく異なった P-b3~P-b6 においては乱れ強度およびレイノルズ応力共に鉛直方向に変化は小さく、レイノルズ応力はほぼゼロに近い値を示す。これは、流れ場は動粘性係数及び渦動粘性係数両方に影響し、またその影響を受けるものの、底面動粘性係数が約清水の 10 倍以上においては粘性応力

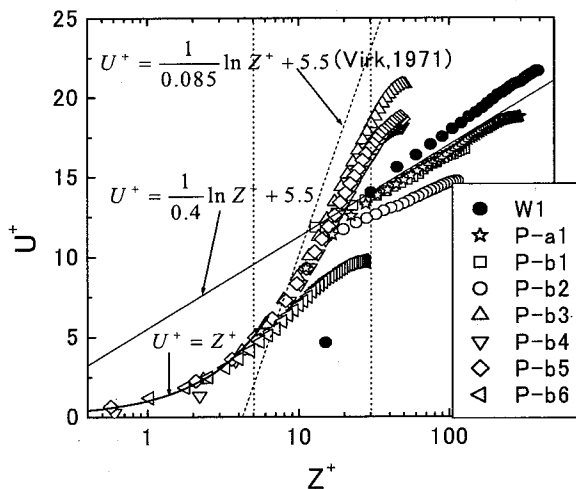


図-26 主流速の対数分布

が支配的な抵抗となり、流れ場は層流化されることを示唆する。これは抵抗特性とも対応する。

4.6 層流及び乱流の速度分布

図-26は、表-4の各実験条件における主流速の鉛直分布を片対数紙上に示す。ここで、 $U^+ = U/U_*$ 、 $Z^+ = Z \cdot U_*/\nu$ 、 $U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 、 $\tau_0 = \mu(dU/dZ)|_{Z=0}$ 、 $\nu = \mu/\rho$ 、 $\mu = \eta_0(dU/dZ|_{Z=0})^n$ である。図中の破線はVirk (1971)¹⁶⁾により提案された最大抵抗低減漸近線である。流れが層流化されていないCase P-a1、P-b1およびP-b2は路床からの高さが $Z^+ > 30$ の領域では対数則で近似できる。一方、流れが層流化したCase P-b3では見かけのカルマン定数 κ は減少し、Virk¹⁶⁾の最大抵抗低減漸近線に近づき、PSA水溶液の濃度の濃度がさらに大きくなるに従って、見かけのカルマン定数 κ は増大傾向を示す。また、層流化された速度分布は清水流において粘性低層及びバッファ層となる $Z^+ < 30$ の範囲内に分布している。

層流流れの速度分布については理論的に求められ¹⁷⁾、Bingham modelを用いると式(7)のようになる。

$$U = U_p \left(1 - z/h_s\right)^2 \quad (7)$$

ここで、 U : 主流速、 U_p : Plug層の流速、 $h_s = H - h_p$: せん断層の厚さ、 H : 水深、 h_p : Plug層の厚さである。

また、Power-law modelを用いると式(8)になる。

$$U = U_{\max} \left(1 - z/H\right)^{(n+1)/n} \quad (8)$$

ここで、 $U_{\max}$: 最大主流速、 n : Power-law modelの粘性パラメータである図-27は、Case P-b6における主流速の実測値および式(7)および(8)より求められた理論値を示す。Power-law modelから得られた理論値は実測値を良好に再現していることが分かる。しかし、Bingham modelから得られた理論値は実測値との適合性が相対的に

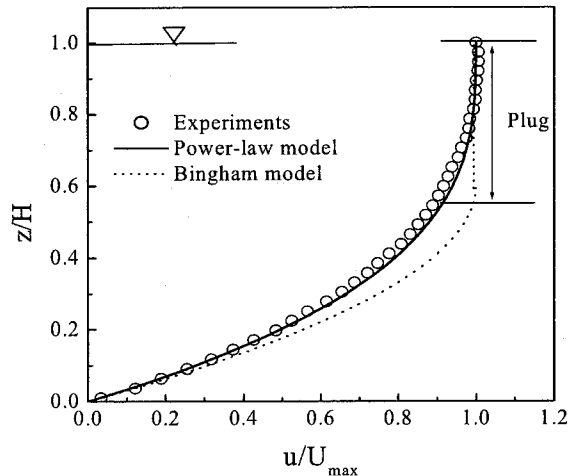


図-27 主流速の鉛直分布の実験値と理論値の比較

低く、実測値にはBingham modelから想定されるPlug層の存在は認められない。

5. おわりに

本研究では、高濃度土砂流およびPSA水溶液の粘性特性と抵抗特性について詳細な検討を行い、高濃度土砂流を模擬することが可能なPSA水溶液を用いて高濃度土砂流の内部構造の解明を試みた。得られた知見を列挙すれば下記の通りである。

- (1) 高濃度土砂流の非ニュートン流体特性をPower-law modelによって表現できることを示し、そのパラメータである η_0 と n を土砂体積濃度の関数で表現した。
- (2) PSA水溶液の濃度300mg/l、400mg/l、500mg/lおよび800mg/lの動粘性係数は、それぞれ、カオリン懸濁液の体積濃度 $C_v=6\%$ 、7%、8%、および10%の動粘性係数に近い非ニュートン流体特性を示す。
- (3) 模擬流体としてPSA水溶液を用いた流れの全抵抗係数はPSA水溶液濃度が400mg/l以上で急激な上昇を示す傾向およびその増加傾向がカオリンを用いた高濃度土砂流の抵抗特性に類似した。
- (4) 動粘性係数はせん断速度の大きさに応じて底面近傍で最小値、水面付近で最大値を示し、底面付近ではPSA水溶液の濃度の増加に伴いその値が大きくなる傾向を示す。
- (5) 全体的には、乱れ強度及びレイノルズ応力はPSA水溶液の濃度の増大に伴い減少する傾向を示す。特に主流速の鉛直分布が清水流とは大きく異なったCase P-b3~P-b6においては清水流に比べて乱れ強度およびレイノルズ応力は極めて小さく、鉛直方向に一様化し、レイノルズ応力はほぼゼロに近く、層流化されていることが示された。
- (6) Power-law modelから得られた理論値は層流化した主流速の実測値を良好に再現し、Bingham modelから得

られた理論値は実測値との適合性が相対的に低く、実測値には Bingham model から想定される Plug 層の存在は認められないことを示した。

なお、レイノルズ応力が卓越してくる条件については、今後の検討課題にする。

謝辞：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) 中国水利学会：Proc. of the International Symposium on River Sedimentation, 1980
- 2) Yang.C.T：Sediment Transport in the Yellow River, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.122, 2004, pp237-244
- 3) Bradley, J. B. and McCutcheon, S.C：The effect of high sediment concentration on transport processes and flow Phenomena, proc.Conf. Erosion, Debris prevention, Japan.1985
- 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）京都大学防災研究所年報，No.28,B-2,1985,pp367-377.
- 5) Coussot, P.：Rheology of debris flow-Study of concentrated suspensions.Ph.D.thesis, INPG, Grenoble, France, 1992
- 6) Coussot,P. and Boyer, S：Determination of yield stress fluid behavior from inclined plane test. *Rheol.Acta*,34,534-543, 1995.
- 7) Coussot,P. and Piau,J.M：On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol.Acta*, 33, 175-184,1994.
- 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, pp979-986, 2004
- 9) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸：高濃度流れに関する研究（2）京都大学防災研究所年報，No.28,B-2, pp367-377, 1985.
- 10) Xin Huang and Marcelo H. Garcia：A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. *J.Fluid. Mech.*vol374, pp305-333, 1998.
- 11) Xudong Fu：Vertical Dispersion of Fine and Coarse Sediments in Turbulent Open-Channel Flows. *J. Hydraulic Engineering*. ASCE. pp. 877-888, October. 2005.
- 12) 新井宗之・劉雪蘭・原田伸彦：粘性土石流の発生機構に関する検討，応用力学論文集 Vol.7, pp813-820, 2004
- 13) yang,C.T. and X.Kong: Energy Dissipation Rate and Sediment Transport, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.29,no.4,pp.457-474
- 14) 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
- 15) 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
- 16) Virk,P.S.：An Elastic Sublayer Model for Drag Reduction by Dilute Polymer Solutions, *J.Fluid. Mech*, Vol.45,pp417-440, 1971
- 17) 中村喜代次：非ニュートン流体力学，コロナ社

(2006年4月13日 受付)