

# 球状粗度河床における 非ニュートン流体流れについて

## FLOW STRUCTURE OF NON-NEWTONIAN FLUID IN GRAVEL BED OPEN CHANNEL

崔 志英<sup>1</sup>・大本 照憲<sup>2</sup>・馬場 太郎<sup>3</sup>  
Zhiyint CUI, Terunori OHMOTO and Taro BABA

<sup>1</sup>学生会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (同上)

Hyper-concentrated flows like mud flow and debris flow have been frequently observed in an upstream region of a river basin. Such flows showed non-Newtonian properties but remain poorly understood concerning the impacts of their rheological properties on fully developed turbulent flow structure.

In this paper, we experimentally investigated the effects of non-Newtonian fluid on resistance characteristics and flow structure over gravel bed by using Particle Image Velocimetry (PIV). The results showed that Kaolin water mixtures in gravel bed open channel flows considerably changed flow structures and took the form of resistance decrease with Kaolin fraction  $C_v$  in the region of  $C_v < 8\%$  and followed by a subsequent increase in the region of  $C_v > 8\%$ .

**Key Words :** *Hyperconcentrated flow, non-Newtonian fluid, gravel bed, open channel*

### 1. はじめに

河川上流部あるいは山間の溪流などの山地河川では、河床が礫または巨礫などにより構成され、粗度が河川の中・下流域のそれに比べ非常に大きい。また、このような山地河川は土石流、泥流などの高濃度土砂流が発生し易い場所でもある。そのため、粗度の大きい流れの抵抗特性や構造を把握することは工学的に重要な意味を持つ。

相対水深が十分大きい開水路流れについては水理学の基本的な問題として古くから多くの研究<sup>1,2,3</sup>がなされており、斎藤ら<sup>4</sup>は相対水深が4の場合、従来の抵抗則の適用限界であることを指摘した。神田ら<sup>5</sup>や中川ら<sup>6,7</sup>は相対水深の小さい流れでは、速度の対数則分布は成立しないことを報告した。禰津ら<sup>8</sup>や大本ら<sup>9</sup>は粗度近傍における乱流構造の解明を進めてきた。

一方、高濃度土砂流に関する研究も多くなされてきた。銭寧ら<sup>9</sup>や芦田ら<sup>11</sup>はその流動機構に関してはBingham流体としてとらえており、近年においてCousot, P.<sup>12</sup>より擬塑性流体モデルが提案された。開水路に関する実験的研究としては、芦田ら<sup>13</sup>やXudong Fu<sup>14</sup>の研究があり、

新井ら<sup>15</sup>は高分子剤を用いて粘性土石流の再現を試みた。Wangら<sup>16</sup>は粗度の大きい開水路における高濃度土砂流の抵抗は土砂濃度の増大に伴い清水のそれより減少すると報告した。しかし、計測の困難などにより、流速は計測できたものの、流れ構造の議論にまで至っていない。

著者らは既往の研究において高濃度土砂流の非ニュートン流体特性に注目し、その抵抗則および流れ構造の解明に努めてきた。その成果として微細土砂を多く含む高濃度土砂流はPower-lawモデルにより近似できる非ニュートン流体特性を有することを明らかにし、高濃度土砂流とポリアクリル酸ソーダ (PSA) 水溶液の粘性特性及び滑面開水路における抵抗特性が類似し、それらの濃度関係は直線関係にあることを明らかにした<sup>17</sup>。模擬流体としてPSA水溶液を用いることより従来の高濃度土砂流実験における計測の困難を克服し、滑面開水路<sup>17</sup>及び砂堆河床開水路<sup>18</sup>における流れ構造を明らかにした。

本研究は、球状粗度を用いて開水路流れの境界条件として粗度が水深に対して相対的に大きく、完全粗面を実現するために、礫のモデルとして直径 $d=15\text{mm}$ のガラスビーズを用いた。また、高濃度土砂流の模擬流体としてPSA水溶液を用いて完全粗面流れにおける非ニュートン

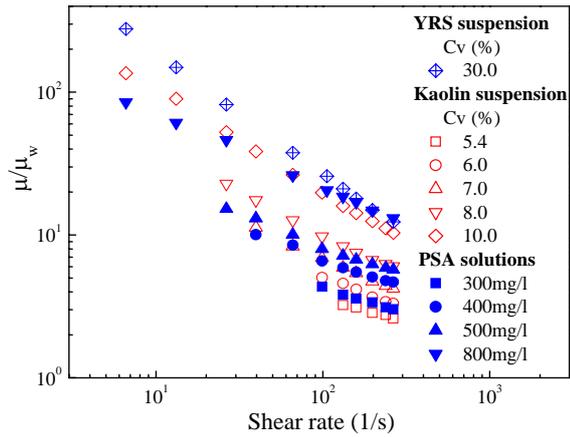


図-1 濃度と見かけの粘性係数の関係

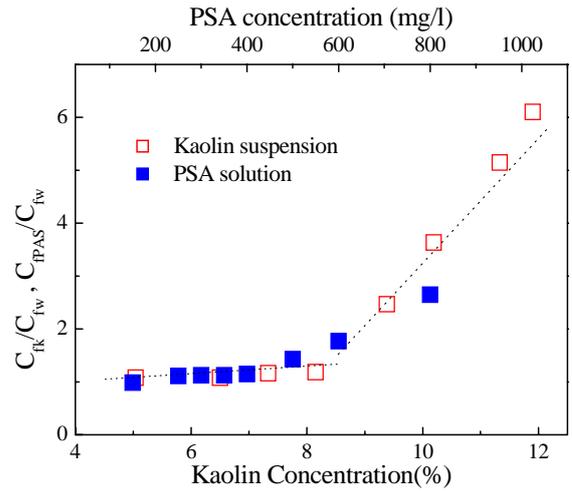


図-2 全抵抗係数と濃度の関係

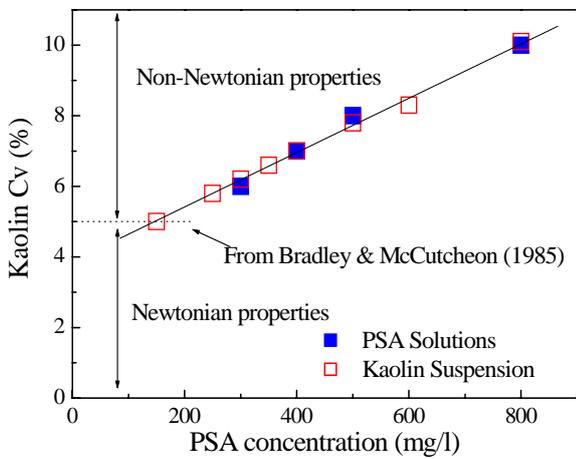


図-3 Kaolin土砂体積濃度とPSA濃度の関係

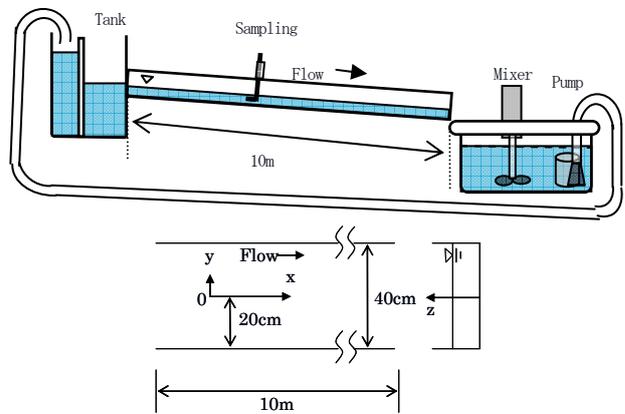


図-4 開水路概要

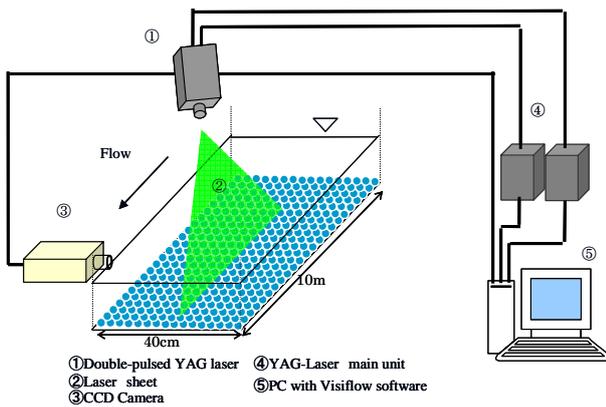


図-5 PIVシステム概要

流体流れの抵抗則及びその流れ構造の特性を解明することを目的とする。

## 2. 実験概要

### (1) 実験材料

既往の研究において図-1に示すように黄河土砂懸濁液 (YRS Suspension), Kaolin懸濁液およびPSA水溶液は共に粘性係数がせん断速度に依存する。滑面開水路におけるKaolin懸濁液およびPSA水溶液流れにおいては図-2に示すような全抵抗係数の関係を有することが明らかになった。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(1)で表される。

$$C_f = 2(U_* / U_m)^2 \quad (1)$$

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  $C_{fPSA}$  の割合  $C_{fPSA} / C_{fW}$  を示す。また、図-3に示すような濃度の対応関係が認められた。図中の縦軸はKaolin懸濁液の体積濃度、横軸はPSA水溶液の濃度である。そのために、本実験においてもKaolin懸濁液およびPSA水溶液を用いた。

### (2) 実験装置

図-4に開水路の概要を示す。長さ10m、幅0.4m、高さ

表-1 Kaolin懸濁液実験条件

体積濃度 (%)	流量 Q(l/s)	水路勾配 $I_0$	水深 H(cm)	平均流速 V(cm/s)	摩擦速度 $u_*$ (cm/s)	Fr数	粗度係数 n
0.0	6	1/300	4.42	32.57	3.80	0.495	0.0222
1.4	6	1/300	4.30	33.44	3.75	0.515	0.0212
1.8	6	1/300	4.22	34.04	3.71	0.529	0.0206
3.2	6	1/300	4.20	34.20	3.71	0.533	0.0204
4.0	6	1/300	4.16	34.51	3.69	0.541	0.0201
5.2	6	1/300	4.06	35.33	3.64	0.560	0.0193
6.4	6	1/300	3.80	37.63	3.53	0.617	0.0173
7.5	6	1/300	3.44	41.37	3.35	0.712	0.0148
8.0	6	1/300	3.31	42.91	3.29	0.753	0.0139
8.5	6	1/300	3.94	36.35	3.59	0.585	0.0184
9.6	6	1/300	4.79	30.14	3.96	0.440	0.0253
10.6	6	1/300	5.76	25.23	4.34	0.336	0.0341

表-2 PSA水溶液実験条件

PSA濃度 (mg/l)	流量 Q(l/s)	水路勾配 $I_0$	水深 H(cm)	平均流速 V(cm/s)	摩擦速度 $u_*$ (cm/s)	Fr数	粗度係数 n
0	6	1/300	4.42	32.57	3.80	0.495	0.0222
200	6	1/300	4.24	35.38	3.72	0.549	0.0198
300	6	1/300	3.98	37.69	3.61	0.603	0.0179
400	6	1/300	3.52	42.61	3.39	0.726	0.0146
500	6	1/300	2.93	51.19	3.09	0.955	0.0107
600	6	1/300	2.90	51.72	3.08	0.970	0.0105
800	4	1/300	3.51	28.49	3.39	0.486	0.0217

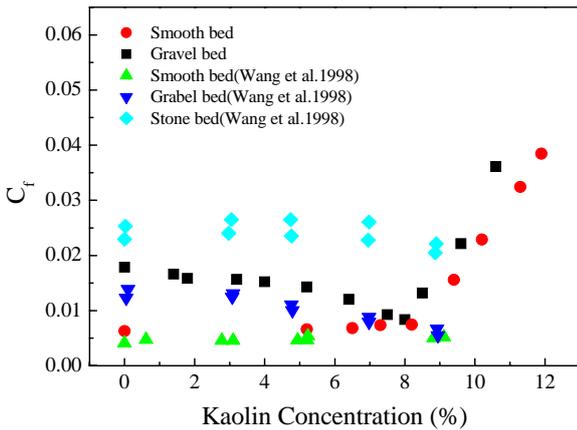


図-6 Kaolin体積濃度と全抵抗係数

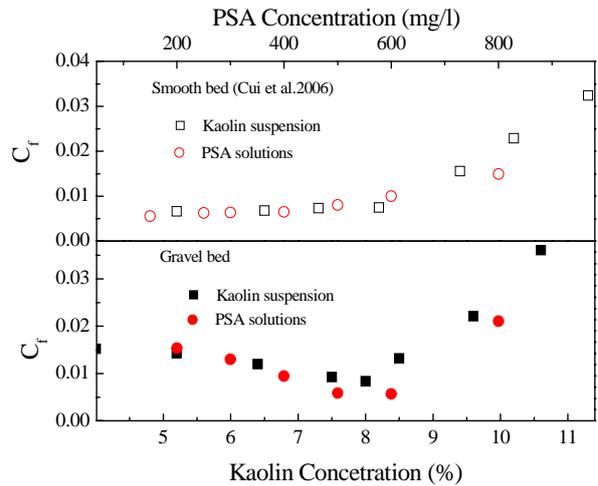


図-7 Kaolin及びPSAの抵抗特性

0.2mのアクリル樹脂製の循環式可変勾配水路にKaolin懸濁液及びPSA水溶液を流した。下流端のタンクに攪拌機を取り付けることより濃度の均一性を保障した。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。流れの計測には図-5で示すPIVシステムを用いた。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1000  $\mu$  secに設定し、水路中央y=20cmの地点において水面から水路床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画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5  $\mu$  m、比重1.02のナイロン粒子を使用した。礫のモデルには直径d=15mmのガラスビーズを用い、水路底面に細密分布に配置した。水深は中川ら<sup>7)</sup>と同様に粗度頂部より計測した。実験条件はそれぞれ表-1及び表-2に示す。粗度係数 n はManningの粗度係数である。

### 3. 抵抗特性

図-6及び図-7にKaolin懸濁液及びPSA水溶液の開水路における抵抗特性を示す。Kaolin懸濁液の場合、滑面水路で抵抗の増加が顕著でない $C_v < 8\%$ の範囲においてWangら<sup>16)</sup>の実験結果と同様に粗面水路における抵抗は濃度の増加とともに滑面水路のそれと同レベルまでに減少するが、濃度がさらに増加するとWangらの実験では見られなかった抵抗の急激な増大傾向を見ることができた。 $C_v = 8\%$ 以上において抵抗が急激に増大する傾向は滑面開水路流れにおいても観察されており、その原因として粘性の増大により、粘性抵抗が卓越したことが考えられる。PSA水溶液の抵抗特性は滑面水路における場合と同様にKaolinの抵抗特性と類似している。つまり、球状粗度水路に置いても図-3に示すような濃度の対応関係が成立しており、PSA水溶液は高濃度土砂流のモデル流体として可能であることが示唆される。また、清水流 (図-6の $C_v = 0\%$ ) に比較してKaolin懸濁液 $C_v = 8\%$ で抵抗係数は43.1%、PSA水溶液600mg/lで抵抗係数は26.0%までに低減された。

### 4. 流れ構造

3章に述べたように高濃度土砂流は粗面流れにおいて $C_v < 8\%$ の濃度範囲において抵抗の減少傾向を示してお

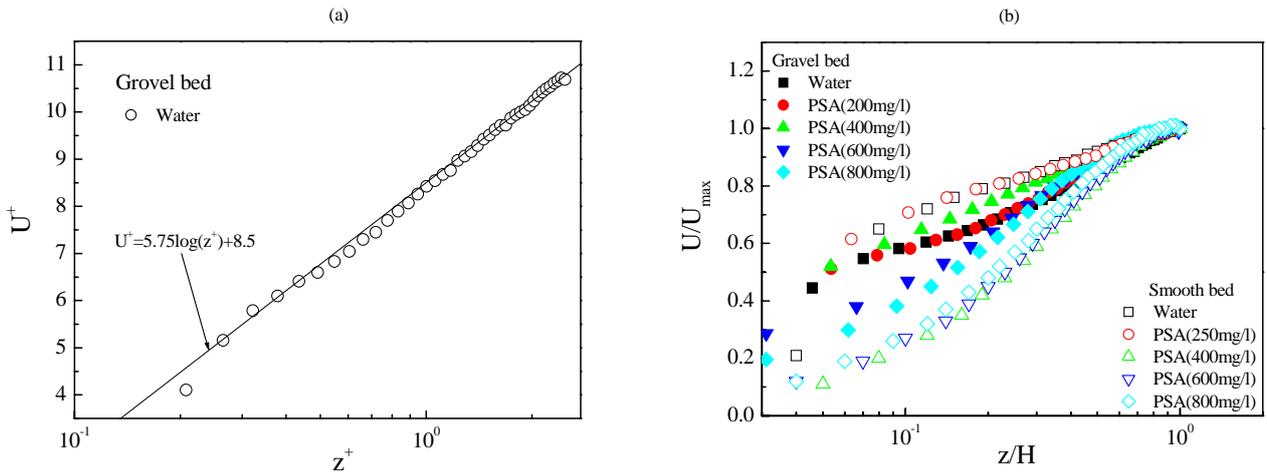


図-8 主流速の鉛直分布

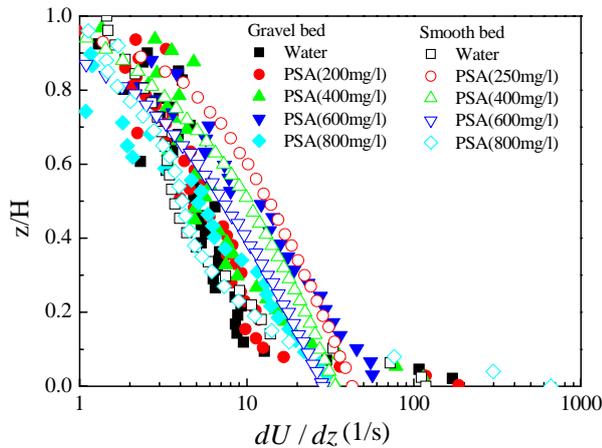


図-9 せん断速度の鉛直分布

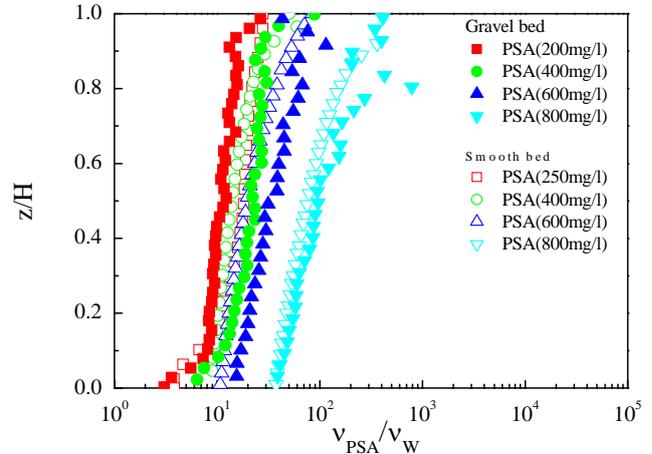


図-10 動粘性係数の鉛直分布

り、その流れ構造を明らかにすることは工学的に重要であると考えられる。また、粗面開水路に置いてPSA水溶液はKaolin懸濁液と類似の粘性特性及び抵抗特性を持つことより、PSA水溶液を模擬流体として用いて流れの計測を行った。

### (1) 主流速

図-8の (a) に清水流における主流速分布を示す。ここで、 $U^+ = U/U_*$ 、 $z^+ = z + \Delta z/k_s$ 、 $U_* = \sqrt{gHl_0}$ 、 $\Delta z = 0.2d$ 、 $k_s$  は相当粗度である。図中の実線は式(2)に示すような粗面流れの対数分布則である。

$$U/U_* = 5.75 \log\{(z + \Delta z)/k_s\} + 8.5 \quad (2)$$

図に示すように清水流における主速度分布は対数分布則に良好に対応する。

図-8の (b) は最大速度 $U_{max}$ で無次元化した主流速の鉛直分布を滑面開水路と比較したものである。滑面水路における実験値は参考文献(16)を参考にした。粗度流れにおけるPSA濃度400mg/lを除いて全体的に片対数紙においてPSA濃度の増大に伴い勾配が大きくなる。また、清水流の場合、中川<sup>3)</sup>らの実験と同様に滑面流れより粗

面流れの方が勾配が大きい。滑面流れの計測結果から、PSA濃度300mg/l~400mg/lの間において乱流から層流に遷移することから、粗面流れにおいても流れの内部構造がより複雑であり、乱流から層流に遷移していることが示唆される。

### (2) せん断速度及び動粘性係数

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無く、せん断速度に依存した状態変数となるために容易に予測できない。そのため、図-9にせん断速度 $dU/dz$ の鉛直分布を示す。せん断速度は、滑面開水路の場合とは異なり、抵抗が増大したPSA濃度800mg/l以外においては、PSA濃度の増加に伴って系統的に増加する傾向を示している。また、PSA濃度400mg/l及び600mg/lにおいては、清水流と同様に底面から水面に向けて $z/H = 0.2$ までに急激に減少する。図-10に動粘性係数の分布を示す。動粘性係数は図-9のせん断速度分布を図-1の粘性係数とせん断速度の関係に代入して計算したもので、清水の動粘性係数を用いて無次元化した。動粘性係数の分布は滑面開水路と同様に、PSA濃度の増大に伴って系統的に増加している。せん断速度の分布に対応して底面付近で最小値、水面付近で最大値をとる。

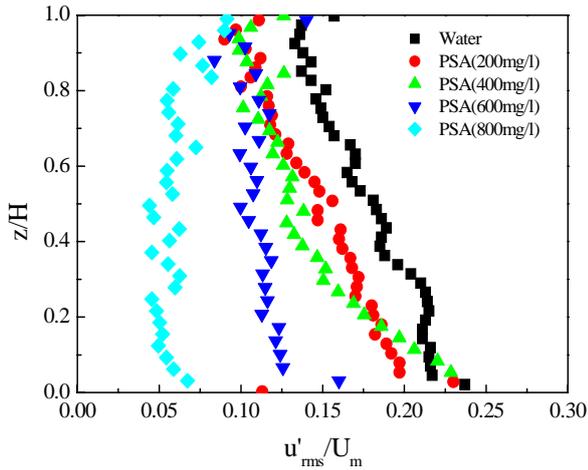


図-11 主流方向乱れ強度  $u'_{rms}$  分布

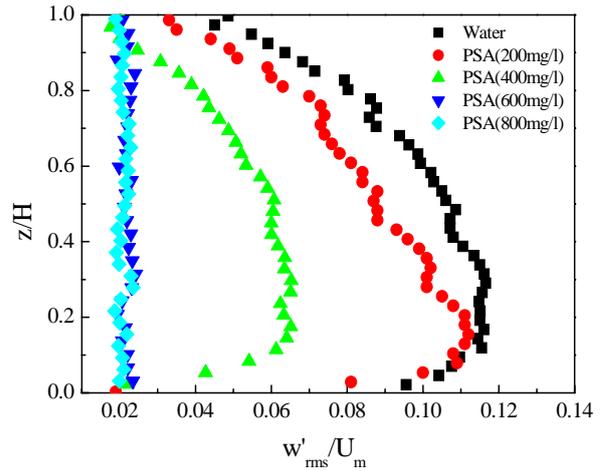


図-12 鉛直方向乱れ強度  $w'_{rms}$  分布

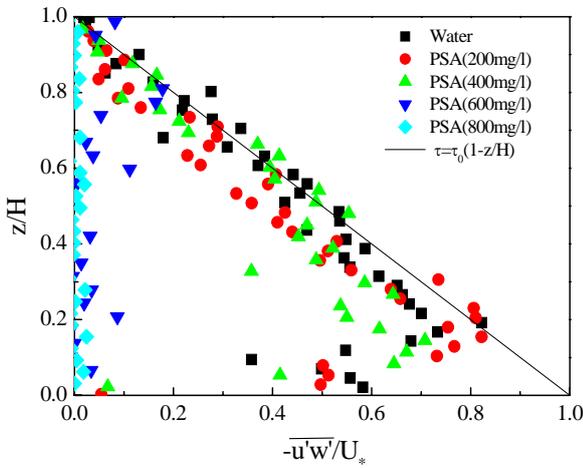


図-13 レイノルズ応力分布

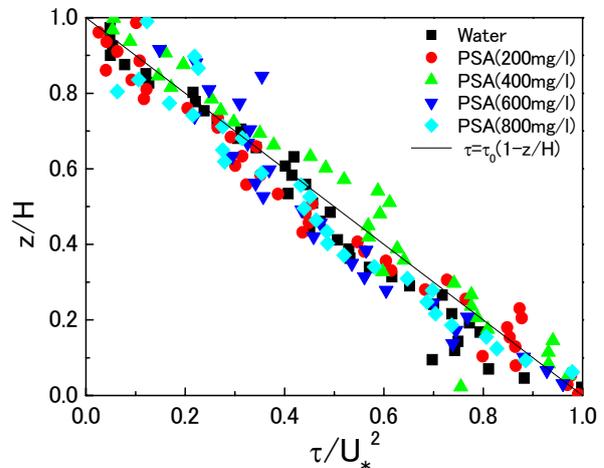


図-14 全せん断応力分布

### (3) 乱れ統計量分布

図-11, 図-12は平均流速より無次元化された主流方向乱れ強度  $u'_{rms}$  及び鉛直方向乱れ強度  $w'_{rms}$  の鉛直分布を示す。全体的には、滑面開水路と同様に主流方向乱れ強度  $u'_{rms}$  は底面付近で最大値となり、鉛直方向乱れ強度  $w'_{rms}$  は  $z/H = 0.2$  付近で最大値をとる。また、乱れ強度はPSA水溶液の濃度の増大に伴い系統的に減少する傾向を示す。特に抵抗係数が滑面の場合の抵抗係数に近いPSA濃度600mg/l及び抵抗係数が急激に増大する800mg/lにおいては鉛直方向に変化は小さい。

### (4) レイノルズ応力分布

図-13にレイノルズ応力  $-\overline{u'w'}$  の鉛直分布を示す、図中の実線は式(3)に示すような全せん断応力の理論値である。レイノルズ応力  $-\overline{u'w'}$  は乱れ強度の分布に対応し、系統的に減少する。PSA濃度800mg/lの場合、レイノルズ応力  $-\overline{u'w'}$  はゼロに近い値となり、流れ場はPSA濃度の増大に伴い乱流から層流に遷移することを示唆する。滑面開水路の場合、PSA濃度300mg/lから400mg/lの間においてレイノルズ応力は顕著に減少した<sup>17)</sup>のに対して粗度流れでは400mg/lから600mg/lで顕著となった。特に抵抗係数が滑面の場合の抵抗係数に近いPSA濃度

600mg/lの場合においては、滑面の場合のそれと異なり、若干のレイノルズ応力の存在は認められた。つまり、粗度流れの場合、滑面流れより乱れは発達しており、滑面流れより大きいPSA濃度で乱れは完全に抑制されることになる。

$$\tau = \tau_0(1 - z/H) \quad (3)$$

ここで底面せん断応力  $\tau_0 = \rho U_*^2$  である。

開水路等流場では、非ニュートン流体においても重力の流れ方向成分と全せん断応力は釣り合い状態に在り、そのために全せん断応力は直線分布を呈する。本研究では、レイノルズ応力および粘性応力を各々計測し、その和である全せん断応力  $\tau$  を式(4)により求め、その分布を図-14に示す。

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'w'} + \frac{\mu}{\rho} (du/dz) \quad (4)$$

ここで  $\mu = \eta_0 (dU/dz)^n$ ,  $\eta_0$ ,  $n$  は図-1より求めたパラメータである。

図より全せん断応力が重力の流れ方向成分と釣り合うことが示された。このことは、レイノルズ応力および粘性応力の計測結果に妥当性を有することが傍証できたも

のと考える。

## 5. おわりに

本研究は粗度流れを対象に、礫のモデルとして直径15mmのガラスビーズを、高濃度土砂流の模擬流体としてPSA水溶液を用いて球状粗度流れにおける非ニュートン流体流れの抵抗則およびその流れ構造を解明するために、粒子画像流速計法を適用して、清水流及び滑面水路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) 粗度流れにおける高濃度土砂流の抵抗はKaolin体積濃度 $C_v < 8\%$ の範囲内においては滑面水路と同程度までに減少し、 $C_v > 8\%$ の範囲においては増大する傾向を持つ。また、その抵抗係数は最大43.1%に低減される。
- 2) 乱れ強度及びレイノルズ応力分布より粗度流れの場合、滑面流れより乱れは発達しており、滑面流れより大きいPSA濃度で乱れは完全に抑制されることが明らかになった。
- 3) せん断速度分布は、滑面開水路におけるその分布と異なり、清水流と同様に底面から水面に向けて $z/H = 0.2$ までに急激に減少する。動粘性係数の分布はそれに対応し、 $z/H = 0.2$ 以上で大きな値を示す。
- 4) 粘性実験によって得られた粘性係数を用いて求めた全せん断応力は重力の流れ方向成分と概ねつりあう。特にせん断速度が小さい $z/H = 0.2$ 以上において粘性の効果は大きいと推測され、それが抵抗低減の原因と考えられる。

## 参考文献

- 1) Chow, V.T. : Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill, 1959.
- 2) 山田正, 川端規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第325号, pp.81-91, 1982.
- 3) 中川博次, 禰津家久, 富永晃宏: 各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造, 京都大学防災研究所年報第24号B-2, 1981, pp.315-338.

- 4) 齊藤隆・羽田野袈裟義・蒲地政文・佐賀孝徳・大成博文: 相対粗度の大きい流れの抵抗則, 水理講演会論文集, 第30巻, pp. 85-90, 1986.
- 5) 中田徹, 鈴木勝士: 球状粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第357号, pp.65-74, 1985.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾: 礫床河川の流砂過程解明に果たす流れ構造の意義, 第32回水理講演会論文集, pp.535-540, 1988.
- 7) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦: 相対水深の小さな流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第423号, pp.73-81, 1990.
- 8) 禰津家久, 中山忠信暢, 藤田正樹: 粒径の大きな粗度上の開水路流れの乱れと水面変動, 応用力学論文集, Vol.1, pp.709-718,1998.
- 9) 大本照憲, 柿原ゆり, 崔志英: 相対粗度の大きい開水路流れの乱流特性について, 水工学論文集, 第49巻, pp.511-516,2005.
- 10) 銭寧: 高含沙水流運動, 清華大学出版社, 1989.
- 11) 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,pp.367-377.
- 12) Coussot, P. : Rheology of debris flow-Study of concentrated suspensions.Ph.D.thesis, INPG, Grenoble, France, 1992.
- 13) 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, pp.367-377, 1985.
- 14) Xudong Fu : Vertical Dispersion of Fine and Coarse Sediments in Turbulent Open-Channel Flows. *J. Hydraulic Engineering*. ASCE. pp. 877-888, October. 2005.
- 15) 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.
- 16) Zhaoyin Wang and Peter Larsen : Turbulent Structure of Water and Clay Suspensions with Bed Load. *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 120, pp. 577-600 (1994).
- 17) 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, Vol.9, pp.883-892,2006.
- 18) 大本照憲, 崔志英: 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, 応用力学論文集, Vol.8, pp.855-864,2005.

(2006. 9. 30受付)