

滑面開水路乱流の壁面領域における粒子と流体の相互挙動に関する実験的研究

MUTUAL BEHAVIORS OF BOTH PARTICLES AND FLUIDS IN NEAR-WALL REGION OF SMOOTH OPEN-CHANNEL FLOW

瀬津家久¹・東良慶²
Iehisa NEZU and Ryoukei AZUMA

¹ フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 学生員 工(修) 京都大学大学院 環境地球工学専攻博士課程

The particle-laden flow has been investigated extensively. The wall friction and sediment transport rate are affected by the motions of bed-load particles. Therefore, mean flow properties and turbulence characteristics may be changed from those of clear-water flows. In this study, "Particle-Tracking Velocimetry (PTV)", which is one of visualization techniques, was used to measure the velocity of both fluids and particles in near-wall region including the viscous sublayer and buffer layer. It was found that the particle velocity is larger than the fluid velocity in the near wall-region ($y^+ \leq 20$). In contrast, these velocities are vice versa in the region of $y^+ > 20$. The relative velocity between particles and fluids increases with an increase of the particle diameter and its density.

Key Words : Particle-Tracking Velocimetry, near wall region, two-phase flow, relative velocity

1. はじめに

近年の計測技術の進歩に伴い、清水流の開水路等流に関しては、その乱流構造がほぼ解明されたと言ってよい。一方、粒子を伴う流れの乱流構造に関しては、計測技術が確立しておらず、研究者らによって様々な試みが数値計算的および実験的に行われてきた。

後藤ら¹⁾は個別要素法を用いて粒子の軌跡を追跡する方法を提案すると共に、PSI-セルモデルを用いて砂粒子と水流との相互作用をシミュレートした。杉山ら²⁾はLES(Large Eddy Simulation)を用いて、また、瀧口ら³⁾はDNS(Direct Numerical Simulation)を用いて混相流を解析し、粒子径がKolmogoroffスケールよりも小さい場合には流体の乱れ強度が減少し、エネルギースペクトルの高周波領域でエネルギーが増加すること、また、粒子径がKolmogoroffスケールよりも大きい場合はその逆の現象が生じることを指摘した。

近年、乱流計測も試みられるようになってきたが、計測に関して重要なことは、得られたデータにおいて適切に粒子と流体のデータを分離することである。

Kulick *et al.*⁴⁾は風洞中に銅粉あるいはガラス球を散布させ、レーザー流速計(LDA)を用いて計測を行い、測定体積の通過時間に基づいて流体と粒子のデータを分離した。Kaftori *et al.*⁵⁾はポリスチレンを含む滑面開水路乱流をLDA計測し、バースト信号の振幅にしい値を設けることで両者の同時計測を試みた。彼らは外層の流速分布が清水流のものから変化しないと述べている。一方、Best *et al.*⁶⁾はガラス球を壁面に付着させた粗面開水路乱流において、同様なガラス球を水路内に供給させた状態で、Phase Doppler Anemometer (PDA)を用いてガラス球と流体の同時計測を行い、また、Muste & Patel⁷⁾は流砂を伴う平坦移動床の上の開水路等流において、信号分離器を併用したレーザー流速計(DLDV)を用い、砂粒子と水流の同時計測を行った。その結果、Best *et al.*⁶⁾およびMuste & Patel⁷⁾はKaftori *et al.*⁵⁾の結果に反し、外層で粒子を伴う流れの主流速が清水流のものよりも低下すると述べている。また、最近、瀬津ら⁸⁾はKaftori *et al.*⁵⁾と同様な流れ場で画像計測を行い、撮影された対象粒子とトレーサー粒子をその占有ピクセル数に基づき分離し、スプリングモデル⁹⁾を用いたPTV法(Particle Tracking Velocimetry)で軌道追跡を行った。そ

ここで Kaftori *et al.*⁵⁾と同様の結論を得ている。このように、粒子を含む流れの外層の特性に関しては、未だ見解が統一されていない。

さらに、粒子を含む流れの壁面近傍(内層)の計測に関しては、計測の困難もありその例が極めて少ないのが現状である。Kulick *et al.*⁴⁾や Kaftori *et al.*⁵⁾は壁面近傍では、流体よりも粒子の方が高速になると指摘しているが、粒子の比重や粒径の影響については不明のままである。

本研究ではポリスチレン粒子および PMMA/PS 粒子を伴う開水路滑面流れにおいて、特に粘性底層を含む底面近傍の粒子と流体の運動に注目した。測定法としては、撮影された対象物のピクセル数に基づいて粒子と流体を分離する方法と、2時刻 PTV による軌跡追跡を組み合わせた手法で解析した⁸⁾。

なお、著者らの研究目標は、掃流砂および浮遊砂を網羅した粒子混入混相流の水利特性の解明であるが、現時点では比重 2.65 の砂を投入した可視化 PTV 計測はきわめて困難である。そこで第一段階として、ポリスチレンや PMMA/PS 粒子といった比重の軽い粒子を用い、その運動特性の計測を行った。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

図-1 に計測システムを示す。使用した水路は、長さ 10m、幅 15cm の可変勾配型循環式直線水路であり、流下方向に x 軸、 x 軸に直角上向きに y 軸、水路横断方向に z 軸をとった。 h は水深、 B は水路幅である。2W のアルゴンイオンレーザーを光ファイバーケーブルに通し、シリンドリカルレンズによって厚さ 2mm のレーザーライトシート(LLS)として水路底面から垂直上方に照射した。計測断面は水路上流端から約 7m の位置で、底面および側壁がガラス製の滑面状態であり、粒子の投入場所は水路上流端である。撮影は水路側壁付近に設置された CCD カメラで行い、光ディスクに一对の 512×480 ピクセルの画像を 1/30s ごとに記録した。本研究では粘性底層を含む底面近傍を対象としたため、水深が 5cm の流れに対し、撮影領域は底面から約 2cm 四方とした。この場合、1 ピクセルは 0.0303mm (1/33mm) に相当する。

(2) 水利条件

表-1 に粒子を伴うケースの水利条件を示す。ケース名における PS はポリスチレン (poly-styrene) を、PM は PMMA/PS (poly-methyl methacrylate/polystyrene) を意味し、比重がそれぞれ 1.05 および 1.15 の球形粒子である。 d_{50} は中央粒径、 ρ_p は粒子の比重、 U_* は摩擦速度であり、 U_* の算出方法については後述する。 $\bar{C}_v$ は $y < 1.75$ における粒子体積濃度 C_v の空間平均値である。 x 軸および y 軸方向の瞬間流速成分を

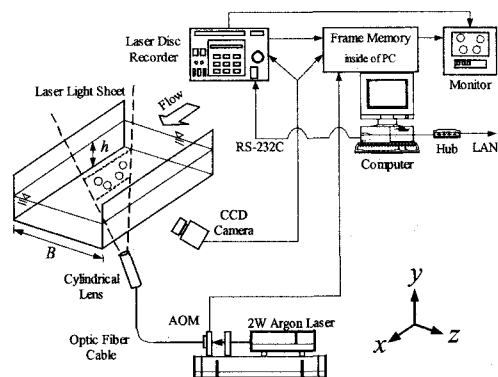


図-1 計測システム

表-1 混相流の水利条件

Case	d_{50} (mm)	ρ_p (g/cm ³)	B (cm)	h (cm)	U_* (cm/s)	$\bar{C}_v$ (%)
PS05	0.5	1.05	15.0	5.0	1.30	0.9
PS08	0.8	1.05			1.34	2.5
PM05	0.5	1.15			2.38	0.9
PM08	0.8	1.15			2.35	2.9

表-2 清水流の水利条件

Case	h (cm)	U_m (cm/s)	U_* (cm/s)	$Re \times 10^4$	Fr
NS	5.0	24.6	1.32	1.40	0.35
NM		50.0	2.33	2.83	0.71

$\tilde{u} = U + u$ および $\tilde{v} = V + v$ とした。ここに、 $\tilde{}$ は瞬間流速を、大文字は時間平均流速を、小文字は変動成分を示す。粒子の速度については添字 p を下付表示して表す。なお、計測を行う際に、粒径が約 100 μ m で比重が 1.02 のナイロン 12 粒子を水流のトレーサーとして用いた。このトレーサー粒子は本実験条件においては、水流に十分追従することが既に証明されている⁸⁾。

一般に、可視化手法を用いて計測を行う場合、種々のパラメーターの設定が不適切であると算出結果に大きな誤差を伴い、精度の検証が不可欠である。しかし現段階では、固液混相流の粒子と流体の両者を高精度に計測できる手法が確立されておらず、本システムの精度を直接検証することはできない。そこで、PS および PM シリーズとほぼ同様な水利条件で、対象粒子を含まない清水流を設定し、それぞれ Case NS, NM とした。両ケースではトレーサー粒子のみを投入し、PTV および LDA 計測を行った。表-2 に Case NS, NM の水利条件を示す。ここに、 U_m は断面平均流速、 $Re = U_m h / \nu$ はレイノルズ数、 $Fr = U_m / \sqrt{gh}$ はフルード数、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。計測時間は全ケースにおいて 60 s とした。

(3) 画像解析手法

混相流を画像解析する際に必要なことは、得られた画像において対象粒子とトレーサー粒子とを識別

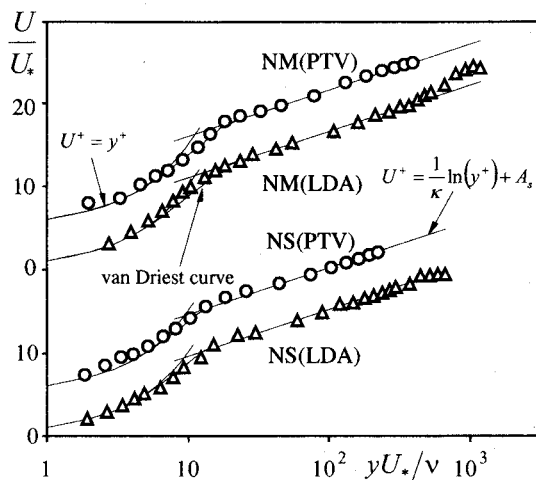


図-2 主流速分布

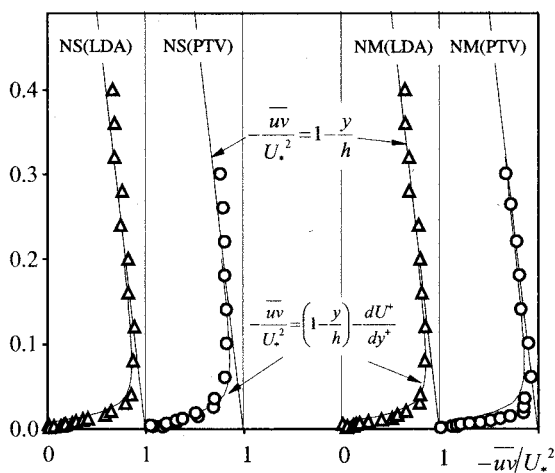


図-3 レイノルズ応力分布

すること、および両者の速度を追跡することである。前者については、撮影された粒子が占有するピクセル数にしきい値を設けることで分離を行った⁸⁾。PS および PMMA/PS 粒子の直径はそれぞれ 500, 800 μm であるのに対し、トレーサー粒子の粒径は 100 μm である。対象粒子の投影面積はトレーサー粒子より 20 倍以上の大きさを有しており、明確な面積の相違が期待できる。実際に撮影された混相流画像において、両者の面積差が明確だったため、両者の分離が容易であった。

軌跡追跡法としては、Okamoto *et al*⁹⁾が開発した 2 時刻スプリングモデルを用いた。このモデルは被写体の分布が平行移動する場合だけでなく、回転する場合でも良好に流速を算出することが知られている。

3. 実験結果および考察

(1) 乱流計測の精度検証

前報⁸⁾では本計測システムを用いてポリスチレンを含む流れを計測し、その計測精度が十分高いこと

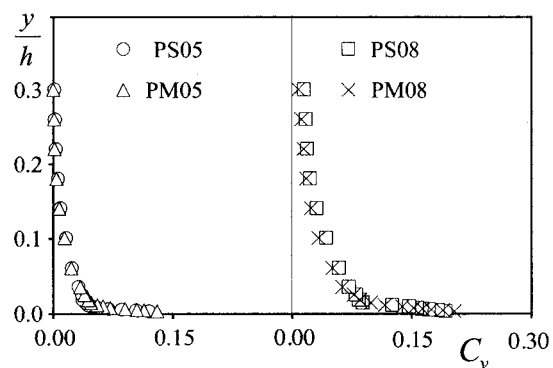


図-4 粒子体積濃度

を示したが、粘性底層よりかなり離れた領域を計測したに過ぎない。一方、本実験が対象とする領域は粘性底層およびバッファー層であり、速度勾配が大きく、しかもハレーションも発生しやすく計測が困難な条件である。したがって、本計測の精度を再度検証する必要がある。

図-2 に清水流の Case NS, NM について PTV および LDA 計測で得られた流速分布を示す。なお、PTV の結果についてはそれぞれ 5 ずつ縦軸をシフトして表示している。同図には式(1)で示される対数則を右上がりの直線で、式(2)を数値積分して得られる内層の速度分布を曲線で、 $y^+ (\equiv U_* y / \nu)$ が 10 以下の領域において式(3)を曲線で示している。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A_s \quad (1)$$

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2(1-\xi)}{1 + \sqrt{1 + 4\ell^{+2}(1-\xi)}} \quad (2)$$

$$U^+ = y^+ \quad (3)$$

無次元混合距離 ℓ^+ は次式で示される。

$$\ell^+ = \kappa y^+ \Gamma \quad (4)$$

$$\Gamma = 1 - \exp(-y^+/B) \quad (5)$$

ここに、 $\xi \equiv y/h$, $U^+ \equiv U/U_*$, Γ は van Driest のダンピング関数、 B はダンピング係数、 A_s は積分定数、 κ はカルマン定数である。Case NS, NM の両者とも PTV, LDA の流速分布が良好に一致している。

図-3 に Case NS, NM のレイノルズ応力の計測値を示す。開水路等流で成立する理論式(6)を曲線で、粘性応力を無視した式(7)を直線で併示した。

$$\frac{-\overline{uv}}{U_*^2} = 1 - \frac{y}{h} - \frac{dU^+}{dy^+} \quad (6)$$

$$\frac{-\overline{uv}}{U_*^2} = 1 - \frac{y}{h} \quad (7)$$

両ケースとも PTV の計測結果は LDA のものとほぼ一致しており、粘性底層といった計測困難な領域で平均流速のみならず乱れの 2 次相関までもが良好に計測されているといえる。

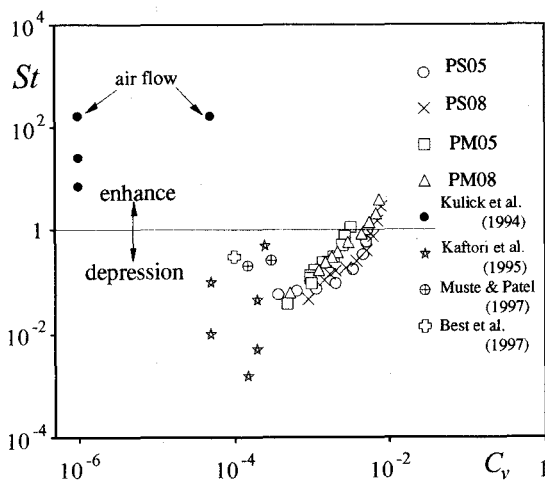


図-5 粒子を伴う流れの分類

(2) 固液混相流の分類

Elgobashi¹⁰⁾はストークス数 St と粒子体積濃度 C_v によって分類を行っている。ストークス数は $St = t^*/t_e$ と定義され、 $t^* = \rho_p d_p^2 / 18 \rho_f \nu_f$ は粒子緩和時間、 $t_e = l/u'$ は渦の時間スケール、 u' は流下方向の乱れ強度である。渦の長さスケール l として、積分スケール L_x が定義されることが多いが¹¹⁾、本研究ではスペクトル解析を行っておらず、 L_x が算定できない。本研究では混合距離 $\sqrt{-uv}/(dU/dy)$ を用いて、第一次の近似とした。

図-4 に粒子体積濃度 C_v の鉛直分布を、図-5 に本実験および粒子を伴う流れに関する既往の実験の C_v とストークス数 St との関係を示した。図-4 より、各ケースでは底面に近づくにつれ粒子体積濃度が増加することがわかる。一方、図-5 より、粒子体積濃度の増加に伴いストークス数 St が大きくなり、底面付近では $St > 1 (t^* > t_e)$ となり、粒子による乱れの方が流体の乱れスケールよりも支配的であることを意味している。また、底面から離れると $St < 1$ となり、その逆となる。よって本計測では底面近傍では粒子による乱れが支配的であり、それらを除く領域では流体の乱れが支配的であると予測される。

(3) 混相流中の流体および粒子の平均速度分布

図-6 に固液混相流中の粒子 (U_p) と流体 (U) の平均速度分布を示す。同図には、粒径 0.28mm および 0.9mm のポリスチレン粒子が混入した開水路流を LDA 計測した Kaftori et al.⁵⁾ の結果を PS05, PS08 のグラフに併示した。また、PS08 および PM08 の縦軸はそれぞれ 5 ずつシフトして表示している。粒子を含む流れにおいて、カルマン定数の普遍特性が成立するか否か¹²⁾は現在のところ明確ではないが、本研究ではカルマン定数を $\kappa = 0.41$ の一定値として摩擦速度 U_* を算出した。

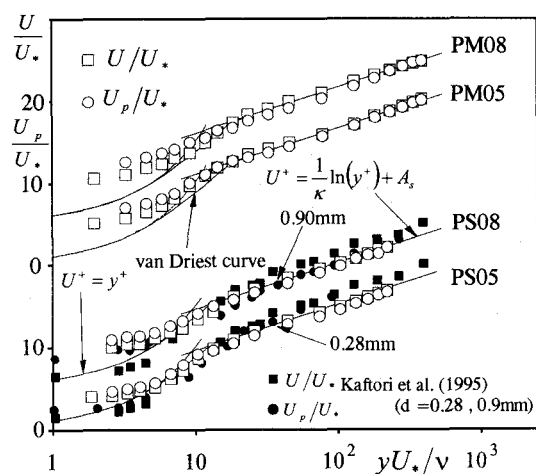


図-6 混相流中の粒子と流体の主流速分布

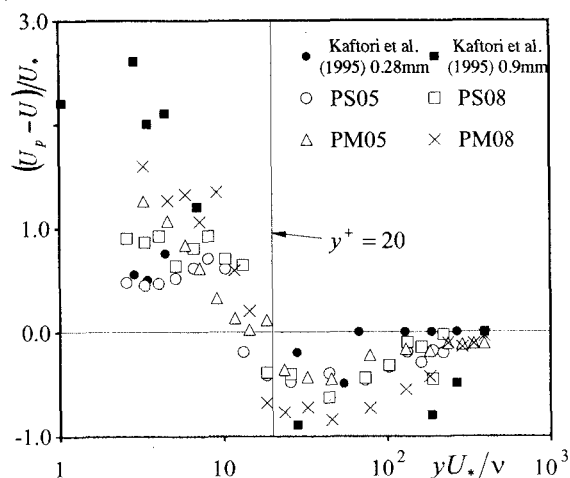


図-7 粒子と流体の速度差

まず、流速分布 U に着目すると、バッファ層 ($y^+ \geq 20$) より上部の対数則領域では、式(1)の対数則にフィットしている。すなわち、本実験のような低濃度混相流では $\kappa = 0.41$ の普遍定数と考えてよく、この結果は従来の結果⁷⁾と一致する。一方、バッファ層以下では清流と同様にダンピングする傾向にあるが、式(3)よりは高速となっている。

次に、粒子の速度分布 U_p に着目する。バッファ層より上部領域 ($y^+ \geq 20$) に注目すると、全てのケースにおいて流速よりも粒子速度の方がわずかに低速になりつつも対数則に平行な分布となっている。これは Kaftori et al.⁵⁾, Rashidi et al.¹³⁾ および Nino & Garcia¹⁴⁾ の結果と定性的に一致する。一方、Itakura & Kishi¹⁵⁾ は混相開水路流に対して log-linear 則を提案しているが、本実験条件のような低濃度では log-linear 則の妥当性は検証できなかった。

図-6 では粒子と流体の速度の相違が読みとりづらいため、図-7 に両者の速度差を示した。図中に Kaftori et al.⁵⁾ の実験結果も併示した。およそ $y^+ \geq 20$ 領域では粒子速度が流速よりも低速となっている。PS シリ

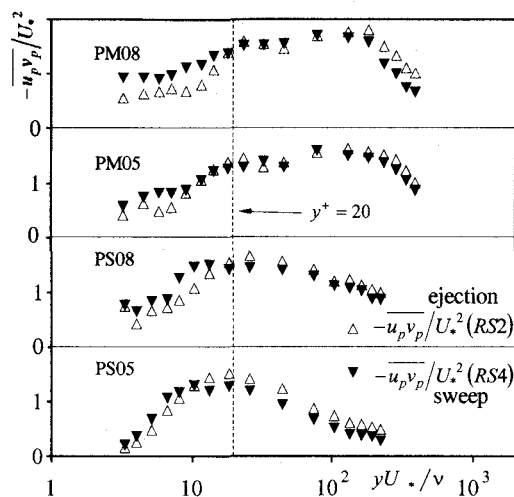


図-8 条件付レイノルズ応力分布

ーズでは定かではないが、PM シリーズに着目すると、粒径の増加に伴い速度差が増加していることが観察され、Kaftori *et al.*⁵⁾の結果と一致する。さらに、同粒径のPSシリーズおよびPMシリーズの結果を比較すると、比重の増加に伴い速度差が増加していることがわかる。以上のことから、外層では粒子の方が流体よりも速度が低く、その速度差は粒径および比重の増加に伴い顕著となることがわかった。

一方、壁面近傍の $y^+ \leq 20$ では、粒子速度の方が流速よりも高速となっており注目される。また、粒子径および粒子比重の増加に伴い、両者の速度差が顕著となっている。これは、下降粒子が底面近傍に突入する際に慣性力を有し、高運動量を保持しているからと考えられる。こうした結果は Kulick *et al.*⁴⁾や Best *et al.*⁶⁾の実験結果と一致する。また、粘性底層における流速分布が式(3)よりも高速側にシフトした理由として、この領域では粒子が流体に運動量を与えていることが考えられる。

(4) 条件付レイノルズ応力

以上のように、混相流においては、慣性力をもった粒子が底面近傍に突入するので粘性底層における粒子速度が流体よりも増加することが示唆された。そこで、鉛直方向の運動量輸送について着目する。こうした解析は、Gyr & Schmid¹⁶⁾がLDAとVTRを用いて水流および粒子をそれぞれ計測して行っているが、両者を同時計測し解析した例はない。一般に、流体のバースト運動は、流下方向変動成分 $u(t)$ および鉛直方向変動成分 $v(t)$ を4象限区分して定義される。第2象限($u < 0, v > 0$)のイジェクションは低運動量を上方に輸送する運動で、第4象限($u > 0, v < 0$)のスweepは高運動量を下方に輸送する運動である。粒子の運動に関し、第2および第4象限の条件付き無次元相関値をそれぞれ $-\overline{u_p v_p} / U_*^2$ (RS2), $-\overline{u_p v_p} / U_*^2$ (RS4)

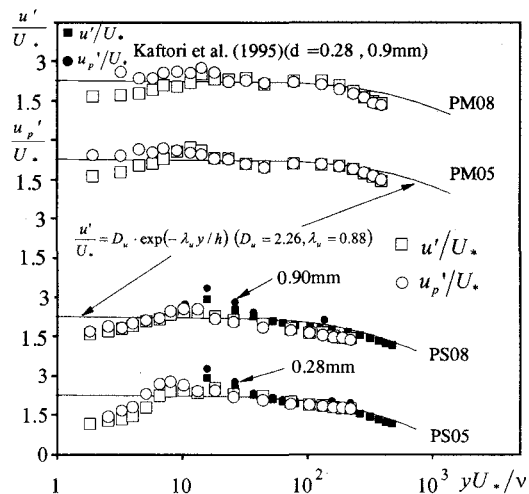


図-9 流下方向乱れ強度

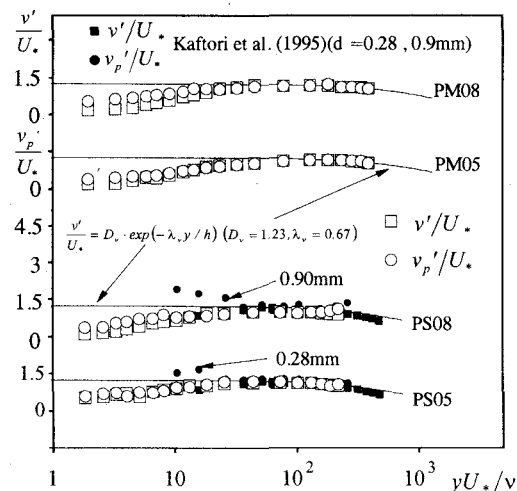


図-10 鉛直方向乱れ強度分布

と記述する。図-8に両象限における無次元相関値を示す。PS, PMシリーズの全ケースにおいて、 $y^+ \geq 20$ においてはイジェクションの方がスweepよりも寄与が大きいことがわかる。また、壁面近傍の $y^+ \leq 20$ では逆の結果となっており、粒子径の増加に伴いその傾向が顕著となっていることもわかる。この値が逆転する境界は図-6および図-7で観察された流速が逆転する境界と一致する。すなわち、 $y^+ \leq 20$ では上方から突入してきた粒子が高運動量をもたらす、また、粒子径および比重が増加すると慣性力も増加するためにこうした特性が顕著となると考えられる。

(5) 混相流中の速度変動

図-9に摩擦速度 U_* で無次元化された粒子の流下方向流速変動のRMS値 u_p' および水の流下方向乱れ強度 u' 分布を示し、図-10に鉛直方向に関する同様な諸量を示した。両図には瀬津¹¹⁾によって提案された等流で成立する普遍関数を曲線で示している。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad D_u = 2.26, \lambda_u = 0.88 \quad (8)$$

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad D_v = 1.23, \lambda_v = 0.67 \quad (9)$$

図-9に着目すると、バッファー層よりも上部領域において、 u_p' 、 u' とも欄津の普遍式(8)とほぼ一致していることがわかる。また、粒子の u_p' が流体の u' より僅かに小さな値となっている。これは、粒子の運動が周囲流体の運動に完全には追従できないことが原因であると考えられる。バッファー層より下部領域では、上部領域とは逆に u_p' が u' より大きい値となっている。これは、流体の変動は粘性効果で抑制されるのに対し、粒子については高運動量を保持したまま上方から突入してくること、および高速粒子が底面と衝突し、再び上昇することが原因と考えられ、事実こうした現象を観察できた。また、底面近傍における粒子と流体の乱れ強度の差がPSシリーズと比較してPMシリーズの方が大きくなっている。これは、ポリスチレン粒子の方がPMM/PS粒子よりも比重が大きく慣性力が大きいためと考えられる。

図-10の鉛直方向成分に着目すると、流下方向成分と同様に、外層では $v_p' < v'$ で、壁面近傍では $v_p' > v'$ となっているが、その差は流下方向成分のものより小さな結果となっている。菱田ら¹⁷⁾は固液鉛直管路下降流にセルロースあるいはガラスを投下した流れをPIV計測し、Kulick *et al.*⁴⁾は固気鉛直管路下降流にガラスあるいは銅粉を投下した流れをLDA計測することによって同様な結論を得ている。

4. おわりに

本研究は、粒子を伴う開水路滑面流れにおいてPTV法を用い、底面近傍における粒子と流体の運動の同時計測を行ったものである。本研究で得られた結論は以下のである。

- (1) 粒子を伴う混相流の水流の流速分布は、清水流のものと同様に内層では対数則に従う。一方、粒子の速度分布は対数則と平行で若干低速な分布となる。よって、本流れを1流体として捉えた場合、摩擦抵抗は清流のものより増加すると考えられる。
- (2) $y^+ \geq 20$ では粒子速度の方が流速よりも若干小さくなり、 $y^+ \leq 20$ では逆に大きくなる。こうした傾向が粒径および粒子比重の増加に伴い顕著となる。
- (3) 壁面から離れた領域の高速粒子が壁面に下降することにより、高運動量を輸送する。その結果、 $y^+ \leq 20$ では粒子のejectionよりもsweepの寄与が大きくなり、その結果、粒子速度がそこで水流よりも増加することが解明された。
- (4) 速度変動のRMS値は、 $y^+ \leq 20$ において、流下方向、鉛直方向どちらにおいても粒子の速度変動

RMS値の方が流体の乱れ強度よりも大きくなり、 $y^+ \geq 20$ ではこの逆となる。この原因も(3)と同様であることが明らかとなった。

今後は本研究で用いた粒子よりも、より比重が大きい粒子を用いた計測に挑みたい。

謝辞：本研究を行うに当たり、粒子の製造および提供をいただいた積水化成工業(株)の尾崎益教および尾原佳信の両氏に謝意を表する。また、貴重なコメントをいただいた九州工業大学の鬼束幸樹助手に謝意を表する。

参考文献

- 1) 後藤仁志, Abbas YEGANEH-BAKHTIARY, 酒井哲郎: 混合流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.17-26, 2000.
- 2) 杉山和靖, 高木周, 松本洋一郎: LESによる微細粒子を含む壁面乱流の数値解析, 日本機械学会論文集(B編), 66巻, 641号, pp.103-112, 2000.
- 3) 瀧口智志, 梶尾岳夫, 三宅裕: 固体粒子による鉛直平行平板間乱流の変調, 日本機械学会論文集(B編), 66巻, 648号, pp.1998-2005, 2000.
- 4) Kulick, J.D. Fessler, J.R. and Eaton, J.K.: Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.277, pp.109-134, 1994.
- 5) Kaftori, G. Hetsroni, G. and Banerjee, S.: Particle behavior in the turbulent boundary layer. II. Velocity and distribution profiles, *Phys. Fluids*, Vol.7, pp.1107-1127, 1995.
- 6) Best, J., Bennett, S., Bridge, J. and Leeder, M.: Turbulence modulation and particle velocities over flat sand beds at low transport rate, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.1118-1127, 1997.
- 7) Muste, M. and Patel, V.C.: Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment, *J. Hydraulic Eng.*, Vol.123, ASCE, pp.742-751, 1997.
- 8) 欄津家久, 東良慶, 鬼束幸樹: スプリングモデルによるPTV法を用いた滑面開水路流れの固体粒子と流体の同時計測, 水工学論文集, 第46巻, pp.565-570, 2002.
- 9) Okamoto, K., Hassan, Y.A. and Schmidl, W.D.: New tracking algorithm for particle image velocimetry, *Experimental Fluids*, Vol.19, pp.342-347, 1995.
- 10) Elgobashi, S.: On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl. Sci. Res.*, Vol.52, No.4, pp.309-329, 1994.
- 11) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 12) 日野幹雄: 固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化, 土木学会論文集, No.92, pp.11-20, 1963.
- 13) Rashidi, M., Hetsroni, G. and Banerjee, S.: Particle-turbulence interaction in a boundary layer, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.16, No.6, pp.935-949, 1990.
- 14) Nino, Y. and Garcia, M.H.: Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport, *J. Fluid Mech.*, Vol.326, pp.285-319, 1996.
- 15) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *Proc. ASCE*, Vol.106, HY8, p.1325-1343, 1980.
- 16) Gyr, A. and Schmid, A.: Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes, *J. Hydraulic Research*, IAHR, Vol.35, pp.525-543, 1997.
- 17) 菱田公一, 半澤陽, 榊原潤, 佐藤洋平, 前田昌信: 固液二相矩形管内流の乱流構造, 機械学会論文集(B編), 第62巻, 593号, pp.18-25, 1996.

(2002. 9. 30受付)