

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

SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF FLUIDS AND PARTICLES IN OPEN-CHANNEL
FLOW OVER SMOOTH BED BY USING A PTV METHOD OF SPRING-MODEL

瀬津家久¹・東良慶²・鬼束幸樹³

Iehisa NEZU, Ryoukei AZUMA and Kouki ONITSUKA

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 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

³ 正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻

In particle-laden open-channel flows, mean flow properties and turbulent structure may be affected by the particle motions. In this study, a visualization technique called the “Particle-Tracking Velocimetry (PTV)” was used to investigate the behaviors of both fluids and particles. The spring-model developed by Okamoto *et al.* was adopted in the present PTV. It is known that this PTV model can calculate the velocity with rotating particles. The particle-data and fluid-data were separated by an area size of the particle images. It was found that this method is highly accurate in comparison with LDA data. The fluid velocity distribution in a two-phase flow is well described by the log-law. The particle velocity is smaller than that of fluids in all layers. However, this difference velocity is not so large as compared with that of open-channel flows with bed load. This is because the specific density of particles is 1.15 in the present experiments.

Key Words : particle-tracking velocimetry, spring-model, two-phase flow, particle-motions

1. はじめに

粒子を伴う水流, すなわち, 固液混相流の取り扱い方法としては, ①粒子・流体モデル, ②1流体モデル, ③2流体モデルが挙げられる^{1),2)}. 粒子・流体モデルは粒子が水流中を運動する個々の離散的な固体粒子として扱い解析する方法である. Sekine & Kikkawa³⁾は, 平衡状態にある掃流砂流において, 砂粒子は水から受けたエネルギーを底面との衝突の際に消費することによって, 平衡状態を保ち, 水流はこの砂粒子へ供給したエネルギー分だけ清水流よりエネルギー勾配の大きな流れに変化すると指摘した.

1 流体モデルは粒子と流体の速度が等しいと仮定し解析する方法である. 江頭⁴⁾は1流体モデルの構成則を提案し, 掃流層厚の推定式および掃流層内の流速分布を導いた. このモデルは方程式の数が少なく, 取り扱いも他の方法と比べ簡便であるが, 粒子と流体の速度を同一であると仮定しているため, 両者の特性を分離して議論することは容易ではない.

2 流体モデルは水流, 粒子の両相ともそれぞれ連続体として取り扱う方法である⁵⁾. 2流体モデルでは両者の運動方程式中に粒子と水の相互作用を表現

する項が存在するが, この項を正確に評価することが流れの解明につながる. また, このインターアクション項によって流体の速度分布あるいは応力分布が影響を受けることは想像に難くない. しかし, 粒子を伴う流れの乱流計測は困難であるため, あまり多くの研究例はない. 楊ら⁶⁾はADV(Acoustic Doppler Velocimetry)を用いて掃流砂を伴う開水路流れの計測を試みたが, 掃流層より上部領域の計測は成功したものの掃流層内の計測には至っていない. 瀬津ら⁷⁾はLDA(Laser Doppler Anemometer)を用いて掃流層内の計測に成功した. 彼らは粒径0.2mmの掃流砂を伴う開水路流れをLDAを用いて計測し, 得られたドップラー信号電圧にしきい値を設けることで粒子と流体との分離を試みているが, 大粒径の粒子の場合この方法は適用が困難となる. 一方, 最近の画像解析手法の進展によって粒子を含む流れの解析が可能となりつつある. 例えば, 得られた瞬時画像から粒子の軌跡を追うPTV(Particle Tracking Velocimetry)はその代表である. 解析アルゴリズムとしてよく使用される方法は4時刻法である. Nezu *et al.*⁸⁾は4時刻法を用いて掃流砂の計測を行ったが, 砂粒子のみの計測である. また, 4時刻法を使用するうえで, 粒子

の運動が複雑で鋭敏な場合はパルス間隔の設定に注意を要する。Nino & Garcia⁹⁾はガラス粒子および砂粒子を伴う流れにおいてビデオカメラを用いて粒子の挙動を計測したものの、流体の同時計測は行っていない。Rashidi *et al.*¹⁰⁾はポリスチレンを有する流れにおいて、流体を水素気泡法で、粒子を可視化法で追跡しているが、ポリスチレンは比重が 1.03 であるため中立浮遊粒子に近く、粒子の挙動は周囲流体の影響を敏感に受け、粒子に作用する重力の効果は小さいと考えられる。最近、鈴木ら¹¹⁾は鉛直管路下降流にナイロンおよびセラミックビーズを混入した流れを 3 台の CCD カメラによって撮影し、両者の運動を解析している。以上のように、粒子を含む流れの計測はある程度なされているものの、粒子と流体を同時計測し定量的に評価した開水路流れの研究はあまりなく、両者の挙動や相互作用に関しては不明な点が多い。

本研究では開水路流れにおいて底面付近における粒子と流体の同時計測を PTV 法を用いて行った。また、解析の際に得られたデータの面積 (pixel 数) によって粒子と流体のデータを分離し、続いてスプリングモデルを用いて速度の算出を行い、両者の挙動について検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

本実験で使用した水路は、長さ 10m、幅 40cm の可変勾配型循環式直線水路である。用いた粒子は、原材料が PMMA/PS (ポリメタクリル酸メチル/ポリスチレン) である。比重が 1.15、中央粒径が $d_{50}=1.2\text{mm}$ 、の球形粒子であり、沈降速度は 4.40cm/s である。座標系としては流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸をとり、それぞれの瞬間流速値を $\vec{u}=U+u$ および $\vec{v}=V+v$ とした。ここに、 $\sim$ 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 S を上記の記号に付加して表示する。

図-1 に計測システムを示す。2W 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、シリンジ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。撮影は水路側壁付近に設置された CCD カメラで行われ、光ディスクに一对の 512×480 ピクセルの画像を $1/30\text{s}$ ごとに記録した。本システムには NTSC 方式が用いられている。本計測では 1 ピクセルは 0.153mm に相当し、パルス間隔は 0.004s とした。

表-1 に水理条件を示す。ここで、 U_m は断面平均流速、 U_* は摩擦速度、 $Re \equiv U_m h/\nu$ はレイノルズ数、 $Fr \equiv U_m/\sqrt{gh}$ はフルード数、 h は水深、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。N1 は粒子を伴わない

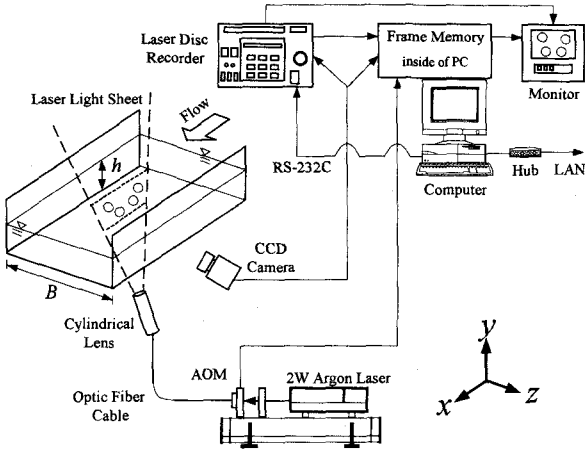


図-1 計測システム

表-1 水理条件

Case	h (cm)	U_m (cm/s)	U_* (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr
S1	4.5	28.5	1.54	1.28	0.43
N1	4.5	28.1	1.53	1.26	0.42

流れすなわち清流であり、S1 は粒子を伴う流れである。計測時間は両ケースとも 60s とした。また PTV 法の精度を検証するために、N1 と同一水理条件下でのレーザー流速計 (LDA) による計測も行った。なお、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付近である。計測断面における粒子体積濃度は 0.3% であった。

3. PTV の画像解析方法

粒子を含む流れにおいて粒子と流体の同時計測を行うには次の二つのステップを踏む必要がある。1. 粒子と流体の分離、2. 粒子追跡法。まず、粒子と流体の分離については、流体に追従する微細トレーサー粒子と測定対象とする粒子の色で識別する方法や投影面積で識別する方法がある。本研究では後者を採用した。そのため、流体に追従するトレーサー粒子として直径が約 $100\mu\text{m}$ 、比重が 1.02 のナイロン 12 粒子を用い、対象粒子として、直径 $1200\mu\text{m}$ の PMMA/PS 粒子 (比重 $=1.15$) を用いた。よって、対象粒子の投影面積はトレーサー粒子より 100 倍以上の大きさを有しており、画像解析の際に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に確認できたため、容易に両者の分離が可能であった。

続いて、粒子追跡法について述べる。粒子を含む流れの PTV 計測は、既に著者ら⁸⁾によって 4 時刻法を用いて行われている。この方法は、連続的に得られた 4 枚の画像を用いて粒子の軌跡を追跡するもの

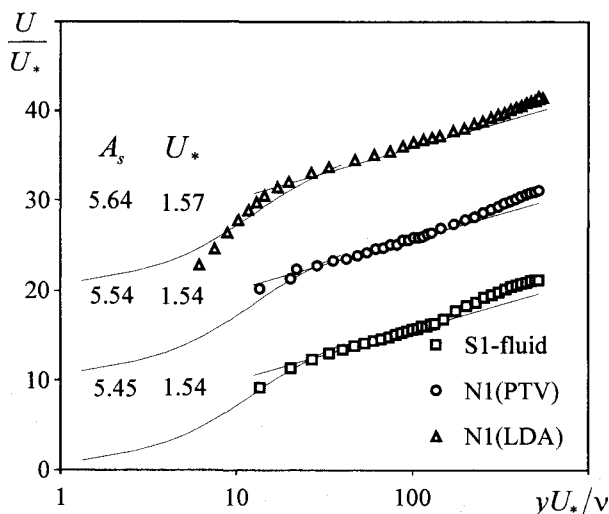


図-2 主流速分布

である。4枚の画像を用いるので、対象とする粒子の挙動が不規則で動きが速い場合、パルス間隔に注意を要する。しかも、同一の画像中に高速粒子と低速粒子が混在する場合は、高速粒子に適したパルス間隔で撮影すると、低速粒子の重心位置の算出精度が低下する。そのため、壁面乱流のような急激に変化する速度分布を有する流体中での4時刻法の使用には細心の注意が必要である。このため、Okamoto *et al.*¹²⁾は2時刻法であるスプリングモデルを開発した。このモデルは物理的意味があいまいであること、単一粒子しか存在しない場合は計算不可能であることなどの欠点を有しているが、撮影された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速度を算出することが知られている¹²⁾。

4. 実験結果および考察

(1) 精度の検証

実験結果の検討に入る前に、撮影された粒子の面積でトレーサー粒子と対象粒子を分離し、さらにスプリングモデルを用いて算出された流速の精度を検証する必要がある。しかし、ケースS1のような固液混相流において両者の速度を高精度に計測する方法がほとんどなく、直接精度の検証をすることは現段階では困難である。そこで、ケースS1と同様な水理条件でトレーサー粒子のみを混入して単相流を作った(ケースN1で清流のこと)。この流れをLDA計測すると共に、微細トレーサー粒子を混入して画像計測を行い、スプリングモデルを用いた解析を行った。図-2に流速分布を示す。N1(PTV)はスプリングモデルを用いたPTV算出結果で、N1(LDA)はLDAによって得られた結果である。また、図-2の縦軸はそれぞれ10ずつシフトさせており、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)で算出される内層の速度分布を曲線で示している。

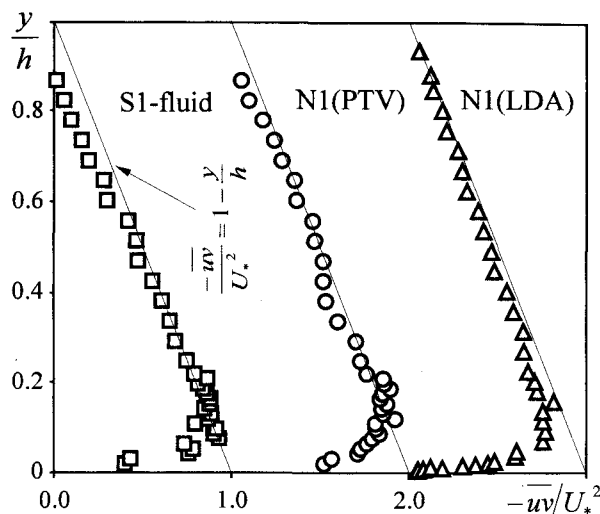


図-3 レイノルズ応力分布

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yU_*}{\nu} + A_s \quad (1)$$

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

混合距離 ℓ^+ は次式で示される。

$$\ell^+ = \kappa y^+ \Gamma \quad (3)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (4)$$

Γ はvan Driestのダンピング関数で、 B はダンピング係数、 A_s は積分定数、 κ はカルマン定数、 $\xi \equiv y/h$ 、 $y^+ \equiv yU_*/\nu$ 、 $U^+ \equiv U/U_*$ である。Nezu & Nakagawa¹³⁾は、境界層流、管路流および開水路流れにおいてもゼロ圧力勾配または等流ではカルマン定数が $\kappa=0.41$ の普遍定数となることを指摘している。本研究のような粒子を伴う流れにおいても普遍特性が成立するかは現在のところ不明であるが、ここではカルマン定数を $\kappa=0.41$ の一定値として解析する。まず、LDAの結果に着目すると、バッファー層($y^+ \leq 30$)付近で対数則から下方にシフトしており、式(2)に近づいていることがわかる。また、バッファー層より上部の内層($y/h \leq 0.2$)ではほぼ対数則で分布形状が記述できることから、測定断面において十分に発達した乱流が形成されていることがわかる。次に、PTVで得られたN1の分布を見ると、バッファー層を除く内層ではやはり対数則に従い、また、得られた摩擦速度および積分定数もかなり一致しており、スプリングモデルを用いたPTVは精度が高いことがわかる。

図-3はレイノルズ応力分布を示したものである。同図には高レイノルズ数の開水路等流で理論的に成立する次式も直線で示している。

$$\frac{-uv}{U_*^2} = 1 - \frac{y}{h} \quad (5)$$

LDAデータは粘性の効く底面付近を除いて水面まで

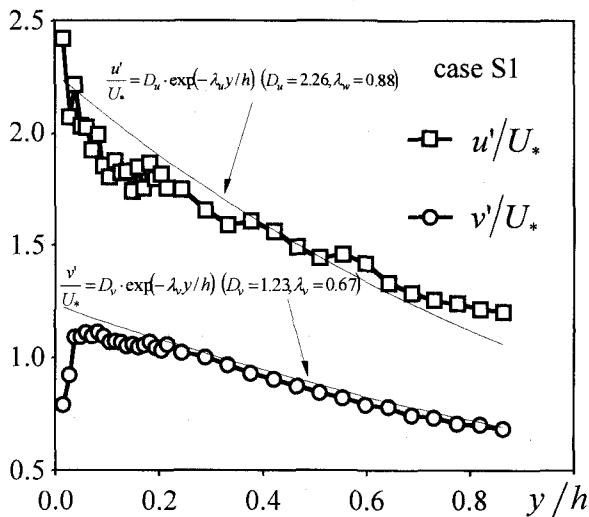


図-4 乱れ強度分布

ほぼ式(5)に従っている。この結果は、 $\kappa=0.41$ において対数則から算定した摩擦速度 U_* が妥当な値であることを示している。N1のPTVの結果を見るとLDAデータとほぼ同じ分布となっており、時間平均流速のみならず、乱れの2次相関までかなり高精度で計測されているといえる。

(2) 混相流における水の平均流速分布

混相流における水の平均流速分布はすでに図-2に示した。S1-fluidがそれに該当する。バッファー層を除く内層では、流速分布が対数則に従っていることが観察される。摩擦速度は粒子を含まない流れ(N1およびLDA-data)とほぼ同様な結果となった。これは、粒子量をあまり多くすると撮影画像上で粒子が重なり解析が困難となるので、本実験では粒子量がそれほど多くない流れを対象としたためと考えられる。積分定数については、浮遊砂流れでは底面付近の濃度がわずかに2%になっただけで5.3から1.8程度まで急激に減少するとの森ら¹⁴⁾の指摘もあるが、本実験では明確な変化は見られなかった。水面付近ではやや流速の増加傾向が見られるが、ウェイクが増加したものか、カルマン定数が変化したことを示しているかは現在不明であり、今後の検討課題である。

(3) 混相流における水のレイノルズ応力分布

混相流における水のレイノルズ応力は図-3に示した。式(5)の直線分布にほぼ一致するが、水面付近では若干減少傾向が観察される。水面付近では粒子がほとんど存在しないため、これは粒子の影響とは考えにくく、今後の課題である。

(4) 混相流における水の乱れ強度分布

図-4にケースS1の乱れ強度分布を示す。同図には瀬津¹⁵⁾によって提案された等流で成立する普遍関

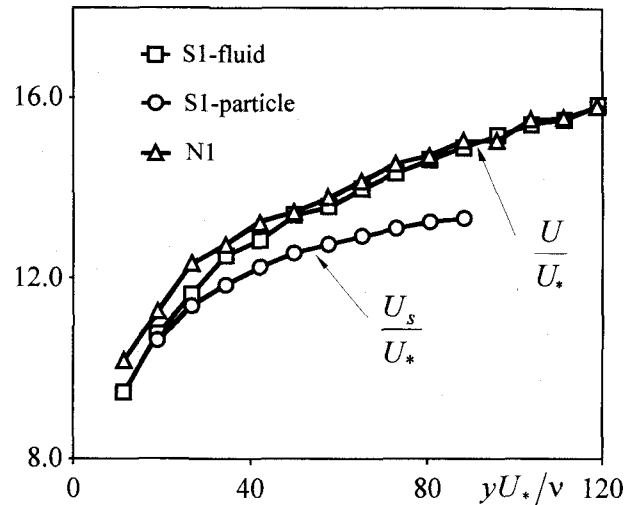


図-5 底面付近の流下方向流速

数を曲線で示している。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad (6)$$

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad (7)$$

単相流の2次元開水路等流では、 $D_u=2.26$ 、 $D_v=1.23$ 、 $\lambda_u=0.88$ 、 $\lambda_v=0.67$ の普遍値であることをNezu & Rodi¹⁶⁾は明らかにした。流下方向乱れ強度 u'/U_* および鉛直方向乱れ強度 v'/U_* の分布形状は式(6)および式(7)の普遍関数とほぼ一致している。しかし、 u'/U_* の値は、底面付近で式(6)の普遍関数よりも若干小さめであり、水面付近では増加傾向にある。底面付近の減少は、粒子を浮遊させるために水流の運動量が消費されたためと類推される。水面付近の増加はレイノルズ応力と同様に今後の検討課題である。

(5) 水および粒子の速度分布

図-5にN1の流速分布およびS1の水および粒子の速度分布を示す。混相流の流体速度に関しては、単相流のものと比較し、顕著な差は認められない。粒子速度については、鉛直方向に徐々に増加する傾向が認められる。最近、著者ら¹⁷⁾によって得られたスプリングモデルを用いたPTVによる掃流砂の速度分布とはかなり異なる傾向を示している。すなわち、比重2.65の掃流砂では粒子は底面付近で速度分布がほぼ一定となり、粒径の数倍離れた領域から急に速度が増加し、変曲点を有するような分布形状となるが、本実験結果では流体の速度分布と類似した形状となった。このような相違は粒子の比重および壁面境界条件の相違によると考えられる。前報¹⁷⁾は珪砂を用いているため比重が大きいが、本実験ではPMMA/PS粒子を用いているため流体への追従が比較的敏感である。そのため、流速分布が水流と類似

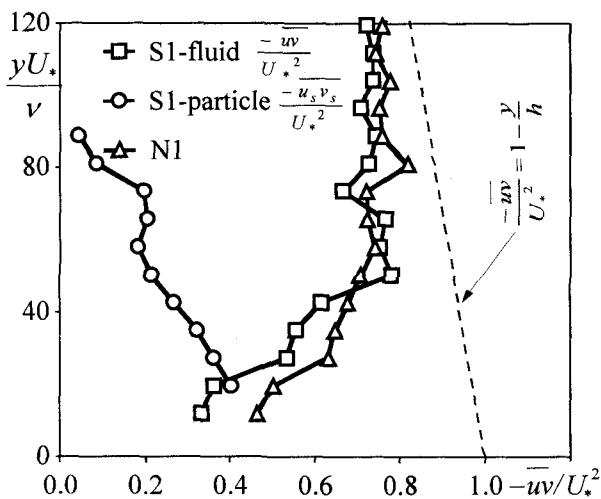


図-6 水と粒子の応力分布(底面付近のみ表示)

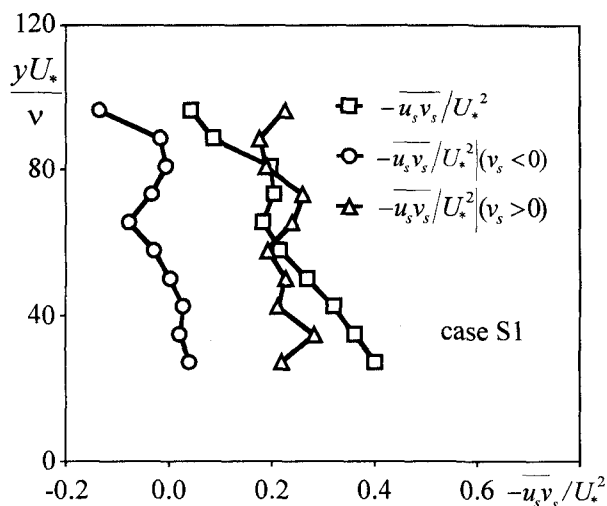


図-7 粒子の応力分布

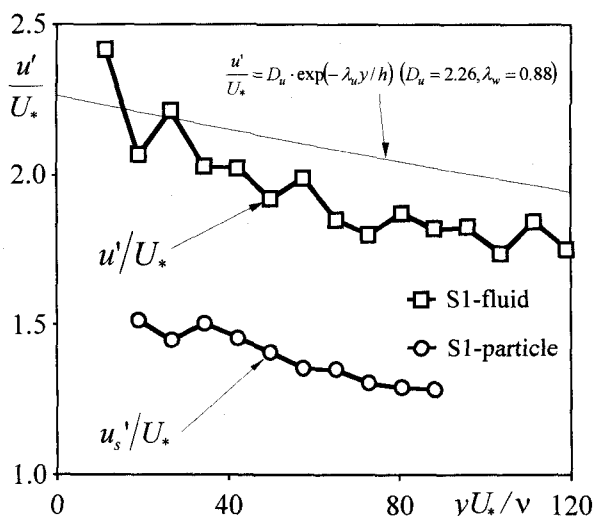


図-8 流下方向乱れ強度(底面付近のみ表示)

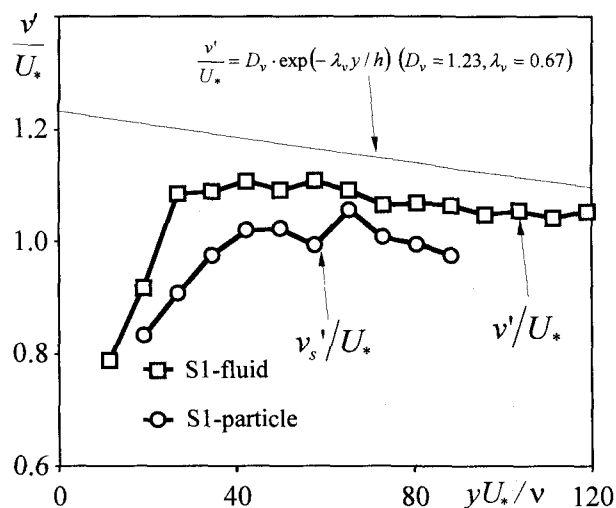


図-9 鉛直方向乱れ強度(底面付近のみ表示)

した分布となったと考えられる。また、底面に関しては、前報¹⁷⁾では移動床であるのに対して、本実験では滑面を用いている。さらに、図-5より流体と粒子との相対速度が y 軸方向に増加していることがわかる。このように、分布形状は流体と類似しているものの相対速度を生じているといった結果は、Rashidi *et al.*¹⁰⁾によって得られたポリスチレンの結果と一致している。

(6) 水および粒子の応力分布

連続体における速度変動成分の相関は一般にレイノルズ応力と呼ばれる。離散的に存在する粒子の速度変動成分の相関はレイノルズ応力ではないが、2流体モデルに基づく取り扱いを行う上では、レイノルズ応力と呼ばれることがある⁵⁾。

図-6は底面付近における水と粒子の応力分布を示したものである。同図の点線は式(5)を示す。N1のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ は式(5)よりも減少している。これ

は、粘性によるものである。混相流の水のレイノルズ応力については、N1よりも若干小さい。これは、上述したように粒子浮遊に費やされた結果であると推測される。一方、粒子の応力 $-\overline{u_s v_s}$ は鉛直上向き方向に減少している。これは上部では粒子濃度が減少し、水に対する影響が減少することが原因と考えられる。

(7) 上昇および下降粒子による混合作用

粒子は上昇あるいは下降しながら移流している。そのため、鉛直方向の混合作用を促進すると予想され、上昇・下降粒子の運動特性を解明することが重要である。

図-7は上昇粒子($v_s > 0$)と下降粒子($v_s < 0$)の条件付の応力 $-\overline{u_s v_s} / U_*^2$ を示したものである。上昇粒子よりも下降粒子の応力の方が常に大きな値を示している。つまり、下降粒子の方が上昇粒子よりも運動量を輸送する寄与が大きいことを示している。こうした結果は、著者らの0.2mmの掃流砂を含むLDA計測⁷⁾、

スプリングモデルを用いたPTVによる1.8mmの掃流砂の計測¹⁷⁾およびGyr & Schmid¹⁸⁾によるLDAとビデオを同時使用した結果と一致する。

(8) 速度変動のRMS値

図-8は水の流下方向乱れ強度分布 u' および粒子の流下方向流速変動のRMS値 u_s' を示したものである。同図の曲線は普遍式(6)を表示したものである。水と粒子との間に大きな差が認められる。本研究で用いた粒子は比重が1.15であるが、粒径が1.2mmであり、乱流スケールよりもはるかに大きいので、流体挙動に追従できなかったために粒子の流速変動RMS値が流体のそれより小さくなったものと考えられる。

図-9は水の鉛直方向乱れ強度分布 v' および粒子の鉛直方向流速変動のRMS値 v_s' を示したものである。底面付近では流体および粒子は共に減少傾向が観察される。これは、壁面の影響によりダンピングした結果である。変動成分のRMSに関して、粒子と流体の差は流下方向流速変動のものより小さな結果となっている。菱田ら¹⁹⁾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.*²⁰⁾は固液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。

5. おわりに

本研究は、比重1.15、粒径1.2mmの粒子が混入した開水路滑面流れにおいて、水と粒子の挙動をPTV法で同時計測したものである。本研究で得られた結論は以下のようである。

- (1) 得られた画像から粒子の面積の大小によって流体に追従する微小粒子と対象とする大径粒子を分離した。この方法は比較的容易であり、任意性が関与する影響はほとんどないと考えられる。
- (2) スプリングモデルを用いた解析法はシアアの存在する壁面乱流にも適用可能であり、その有用性が示された。
- (3) 粒子の濃度が低い場合の平均流速分布は粒子を含まない単相流のものと比べ、それほど大きな変化は見られない。水面付近においてウェイクの増加が観察されたが、普遍性があるかどうか現在不明であり、さらなる検討を要する。
- (4) 上昇粒子よりも下降粒子の方が運動量を輸送する寄与が大きい。この結果は掃流層で得られた結果と一致する。

謝辞：本実験を行うに当たり、積水化成品工業（株）総合研究所の尾崎益教氏にPMMA/PS粒子の提供を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 水理委員会固液混相流の力学小委員会：水工学における

固液混相流，土木学会論文集，No.351/II-2，pp.41-58，1984。

- 2) 芦田和男，江頭進治，佐々木幹夫，清水義彦，関根正人，玉井昌宏，藤田正治，宮本邦明，森明巨：固液混相流における支配方程式とその適用性，水工学論文集，第39巻，pp.537-550，1995。
- 3) Sekine, M. and Kikkawa, H.: Mechanics of Saltating Grains, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, pp.536-558, 1992.
- 4) 江頭進治：土石流の流動機構，ながれ，日本流体力学会，Vol.19，pp.74-80，2000。
- 5) 福島祐介，福岡捷二：浮遊砂を含む流れの二相流的取り扱いに基づく流速分布と濃度分布，第23回水理講演会論文集，pp.139-144，1979。
- 6) 楊永荻，平野宗夫，羽田野袈裟義：平坦な移動床流れの抵抗則，水工学論文集，第39巻，pp.483-488，1995。
- 7) 棚津家久，鬼束幸樹，東良慶：掃流砂を伴う開水路流れにおける水と流砂の相互作用，水工学論文集，第45巻，pp.643-648，2001。
- 8) Nezu, I., Esaki, K. and Onitsuka, K.: Interaction between turbulent structure and bed-load transport in open-channel flows, *Hydraulic Modeling*, (eds. Singh *et al.*), Water Resources Publications, Colorado, USA, pp.63-76, 1999.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 鈴木雄二，池谷基史，笠木伸英：高精細三次元粒子追跡流速計を用いた混相乱流計測，機械学会論文集(B編)，第66巻，652号，pp.3063-3070，2000。
- 12) Okamoto, K., Hassan, Y.A. and Schmidl, W.D.: New tracking algorithm for particle image velocimetry, *Experimental Fluids*, Vol.19, pp.342-347, 1995.
- 13) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 14) 森明巨，小林知恵，板倉忠興：滑面浮遊砂の底面近傍の乱流構造，水工学論文集，第40巻，pp.1145-1148，1996。
- 15) 棚津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1977。
- 16) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 17) Nezu, I., Onitsuka, K. and Azuma, R.: Turbulence measurements of open-channel flows over gravel bed, *Proc. of 3rd Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows*, Fukui, Japan, pp.266-272, 2001.
- 18) Gyr, A. and Schmid, A.: Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes, *J. Hydraulic Research*, IAHR, Vol.35, pp.525-543, 1997.
- 19) 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。
- 20) 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.

(2001.10.1受付)