高浮遊砂濃度の開水路流れにおける 粒子・流体の同時計測

SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF PARTICLE AND FLUID IN OPEN-CHANNEL FLOW WITH HIGH PARTICLE CONCENTRATION

野口和則¹·禰津家久² Kazunori NOGUCHI and Iehisa NEZU

 1学生員 京都大学大学院博士後期課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスタ)
 2フェロー会員,工博,京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

It is very important phenomenon that the particles on riverbed are lifted-up and convected by coherent eddies. The particle motion and fluid-particle interaction are one of the most challenging topics for predicting the bed configuration and the transport of suspended sediment in natural rivers. In order to clarify this significant topic, we conducted the simultaneous measurements of particle concentration and flow velocity by using 3D Acoustic Doppler Velocimetry (ADV). From the preliminary experiments, the particle concentration in the measuring area of ADV is in good proportion to the amplitude of reflected Doppler wave from the measuring area. Thus, simultaneous measurements of particle concentration and flow velocity in this study.

From these two simultaneous components of concentration and velocity, we calculated the sediment flux over flat bed condition with several kinds of particles. As the results, in the case of larger-size particle, the sediment flux was calculated larger than that of small-size particle, especially in sweep motions. Moreover, the value of von Karman constant (κ) in the case of suspended sediment-laden flow became smaller than that of clear-water flow (κ =0.412) due to the effects of suspended sediment.

Key Words : suspended sediment flows, sediment concentration, sediment flux, ADV

1. はじめに

粒子を伴う流れは工学的な現象において多数存在し、 各分野の研究者が注目してきた.水理水工学分野におい ては河川の土砂輸送がこれにあたり、非常に多くの実験 的および数値計算的既往研究が報告されてきた.数値計 算モデルではElgobashi(1994)¹⁾やCroweら(1996)²⁾が粒子・ 流体の相互作用の重要性を示唆し、一方で実験的研究で はBestら(1997)³⁾がphase-Doppler anemometerを使用し粒 子・流体の判別分離同時計測を行った. しかしながら, 粒子と流体の相互作用は多くの未解明点が存在する.特 に浮遊粒子濃度の大きな流れにおいては、大量に供給さ れる粒子に関する数値計算処理能力の限界や計測装置の 光学的限界もあり、詳細な考察には至っていない. そこ で本研究ではLDAでは計測できない高濃度浮遊砂流れに おける粒子・流体の同時計測手法の提案としてacoustic Doppler velocimetry (ADV)から得られる各種データに注 目し,計測を行った.

ADVは濁流やレーザー光が物理的に使えない計測環

境でも比較的高い精度での計測が可能であるという特性 を有し、実験室・野外計測両者で有用な計測機器である. ADV計測には超音波を使用するため、その受信強度を 上げるためには計測領域に適量の粒子があること望まし く、このことが粒子を含む流れの計測にADVが適する 一因となっている. ADVの計測精度に関する研究につ いては、Lohrmannら(1994)⁴がADVとLDAの同時計測 データを単純比較し、平均流速分布・レイノルズ応力分 布がほぼ一致することを示した. さらにGoring & Nikora(2002)⁵⁾はノイズの1種であるスパイクノイズの処 理としてu, Δu , $\Delta^2 u$ (uは流速成分, Δ は時間微分の意)3 成分の変動値を空間表示し、一定の球形領域から外れる データをノイズとする手法を提案した. さらに, ADV で粒子濃度を計測した例として, Kawanishi&Yokoshi (1997)⁶はADVの音響後方散乱エネルギーと濁度(粒子濃 度分布)が比例関係にあることを示し、ADVによる粒子 濃度測定の可能性を示唆した.本研究ではそれらを改良 し,実験室規模の流れに適用した.

	U_m (cm/s)	<i>h</i> (cm)	粒径 d_p (mm)	比重ρ	摩擦速度U*(cm/s)	体積平均粒子濃度
caseCW	10	8	-	I	0.562	-
case120A			0.25	1.2	0.542	10.5×10 ⁻³
case120B					0.554	3.11×10 ⁻³
case120C					0.56	1.23×10^{-3}
case120D					0.56	0.078×10^{-3}
case105A-S			0.33	1.05	0.55	9.61×10 ⁻³
case105B-S					0.555	2.98×10 ⁻³
case105A-M			0.56		0.546	7.43×10 ⁻³
case105A-L			0.68		0.543	9.1×10 ⁻³

表-1 水理条件



2. 実験概要

(1) 実験装置および水理条件

水路および実験装置を図-1に示す.x, y, zはそれぞ れ主流方向,鉛直方向,横断方向の座標軸である.U, VおよびWはそれぞれの軸に対応する時間平均流速を示 し、u, v, wはその乱れ成分である. 実験で使用した水 路は長さ10m,幅40cmの可変勾配型直線水路であり、粒 子は水路上流端から2mの位置で水面から一定量供給し た. 粒子は下流堰ですべて取り除かれ, 流体のみ一定流 量で循環させた. その際, ADV計測に必要な微小粒子 (ADV用トレーサー: YSIナノテック社製)は流体ととも に循環した. 図に示すように水面側からADVプローブ (Nortek製)を挿入し、プローブ先端から50mm先の領域の 流速分布を計測した. ADV計測領域の関係上, 水面側 から50mmの領域は計測できない.本研究で使用した ADVでは、3成分の瞬間流速、反射強度、SN比、 Correlationが同時に検出された.水理条件を表-1に示す. ここでUmは断面平均速度,Bは水路幅,hは平均水深, U*は摩擦速度, C は体積平均粒子濃度を示している.

摩擦速度はレイノルズ応力分布から求めた.本実験では 一定流量・一定水深の条件下で清流(clear-water)と浮遊砂 流との比較を行った.浮遊砂流において使用した浮遊粒 子はポリエキストラ粒子(不飽和ポリエステル, $\rho=1.2$: 三昌研磨剤),およびポリスチレン粒子($\rho=1.05$)である. 粒子の粒径は $d_p=0.25\sim0.7$ mm程度まで系統的に変化させ た.本実験では、浮遊粒子濃度を大きく設定することと、 後述の $y^+ < 15$ の領域での粒子・流体速度の逆転現象を ADVで捉え、ADVの精度検証としたかったこともあり、 表に示す実験条件とした.

本研究ではADV計測だけでなく,清流および低粒子 濃度のケースではLDA計測も行い,ADVデータとの比 較・検証を行った.この詳細は3.1節で記述する.

(2) ADVによる粒子濃度計測手法

粒子濃度計測はADVと画像計測を同時計測すること で算出された. すなわち, ADV反射強度の時系列デー タとADVの計測領域を可視化した画像上における粒子 数を比較することにより粒子濃度を算出した. 図-2に粒 子濃度とADV反射強度のデータ例を示す. 図の横軸は 画像計測から算出された計測領域における体積粒子濃度 C, 一方縦軸は反射強度Iである. 図に示されるように, 非常に高い相関関係が見られたが、体積平均粒子濃度 C=0.004付近で両者の関係が変化するように見える. そ のため本研究では、これらのC>0.004、C<0.004の2領域 においてそれぞれ検定曲線を近似直線で算出し、これを 用いて粒子濃度分布を算出した. データのばらつきや検 定関係の折曲はADVの超音波が粒子によって遮られた ことが大きな原因であると考えられる. なお, これらの 反射強度と粒子濃度の検定曲線は使用する粒子の粒径に よっても異なることが予想されるため、実験ケースごと に同時計測を数度行い検定した. 図-3において、この検 定曲線から算出された粒子濃度とRouse分布の比較を 行った.使用した粒子によって図中の両者の色を統一し ている.図より両者に若干のズレはあるものの、ほぼ同 様の分布を示すことから、この手法による濃度計測は妥 当であると考えられる.



図-2 ADV反射強度と粒子濃度の検定関係



3. 実験結果及び考察

(1) 粒子・流体の混合体としての流速分布

図-4に主流速方向の流速分布を示し、データの重なり を解消するため縦軸 U^{\dagger} を5ずつ変化させた。横軸は底面 からの無次元距離 $y^{\dagger} \equiv yU_*/v$,縦軸は無次元流速分布 $U^{\dagger} \equiv U/U_*$ である。図中の実線は次の3式で与えられる。

$$U^+ = y^+$$
 $(y^+ \le 5)$ (1)

$$\frac{dU^{+}}{dy^{+}} = \frac{2(1-y^{+}/R_{*})}{1+\sqrt{1+4l^{+2}(1-y^{+}/R_{*})}} \quad (5 \le y^{+} \le 30) \quad (2)$$

$$U^{+} = \frac{1}{\kappa} \ln y^{+} + A \qquad (y^{+} \ge 30) \qquad (3)$$

ここで $l^{+} = \kappa \cdot y^{+} \cdot \Gamma(y^{+})$ (Γ は粘性による減衰関数), R_{*} は摩擦レイノルズ数である.全ケースとも上式に良く一 致しているように思われるが,ケース120CのLDAデー タにおいて底面近傍の比較的粒子濃度の大きな領域で上 式からずれる傾向が見られた.粒子濃度を7.8×10⁵に低 下した場合(ケース120D)この傾向は確認できないことか ら,これはレーザー光が粒子によって遮られた影響であ ると考えられる.これより,Cintimes10⁴オーダー以上の高 粒子濃度においてはADV計測が望ましいと考えられる.



図-4 主流速分布U



ケース間比較の詳細としては、底面近傍領域において、 粒子を含む流れが清流の流速よりも若干高速となった. これは底面へと降下する粒子の影響で周囲流体が高速化 したためであると考えられ、この特性はKaftoriら(1994)⁷⁾ の結果と一致した.

次に、浮遊砂流れにおけるカルマン定数の変化につい て考察を行う.清流と同一水理条件下の浮遊砂流れにお いては粒子濃度の増加に伴い水流中の流速勾配が増大し、 その結果、浮遊砂流れにおけるカルマン定数が変化する ことが指摘されている.図-5に本実験ケースにおけるカ





ルマン定数κの変化を示した.図中には比較のためBest ら(1997)³,およびAzuma&Nezu(2004)⁸⁾の結果を併示した. すべてのケースで浮遊粒子濃度の増加に伴いκ値が減少 する結果となった.これは粒子・流体間の運動量交換が 行われている,すなわち粒子・流体の相対速度が顕著で あることが示唆される. κ値の変化は粒子・流体間の運 動量交換に関係するため,比重の大きな粒子(*p*=1.2)の ケースでκ値の変化が顕著となるように思われたが,本 実験において顕著な差異は見られなかった.

(2) 粒子・流体の同時計測

前述のようにADV信号の反射強度から粒子濃度を算 出することができたが、これは強い反射信号を受信した 際の流速データは粒子の速度データであることに他なら ない.一方で弱い反射信号を受信した際の流速データは 流れに追随するADV用トレーサーからの反射信号と考 えられるため、これは流体の速度データと見なせる.こ のように、図-2で示した反射強度にある閾値を設定する ことで粒子データと流体データを判別分離することが可 能であるため、ここでは粒子・流体の相対速度結果を野 口ら(2008)⁹⁰のPIV/PTVの計測結果と比較し、計測精度お よび判別分離手法の妥当性について考察を行う.図-2に おいて、低粒子濃度領域の検定直線の切片は85であった. そのため、ここでは反射強度(Int)が85以下のすべての データを流体のデータと見なし、それ以上のデータをす べて粒子と判別した.判別分離は次式の通りである.

 $\widetilde{u} \begin{cases} = \widetilde{u}_{f}, \widetilde{c} = 0 \quad (\text{Int} \le 85) \\ = \widetilde{u}_{p}, \widetilde{c} \ne 0 \quad (\text{Int} > 85) \end{cases}$ (4)

判別分離された瞬間流速値から時間平均値 U_p および U_f を計算し、粒子・流体間の相対速度を算出し、図-6(a)に示した.図-6(b)は野口ら(2008)⁹のPIV/PTVによる計測結果である。粒子は流体によって輸送されるため粒子速度はほとんどの領域で流体速度よりも低速であるが、



底面近傍において両者の速度が逆転することが大きな特 徴である⁹.図-6においてもこの特性は明確に示されて おり、粒子濃度が大きいケース、および粒径が大きな ケースにおいて相対速度はより顕著に現れる結果となっ た.流速の逆転位置に関してもPIV/PTVデータとほぼ一 致しており、このことからADV信号の反射強度によっ て粒子と流体を判別分離し、それぞれの速度を算出する 手法や粒子濃度を算出する手法が非常に有効であること がわかった.



(3) 乱れ強度の分布

図-7に清流における流下方向(x方向),鉛直方向(y方向), 横断方向(z方向)の乱れ強度分布u',v'およびw'を示す. 図中の実線はそれぞれ以下の3式を図示したものである. これらは禰津(1977)¹⁰⁾が滑面開水路流れに関してk-eモデ ルの近似解と乱れの自己相似特性を用いて半理論的に求 めた普遍関数で,以下で示される.

$$\frac{u'_f}{U_{*0}} = 2.3 \exp(-y/h)$$
(5)

$$\frac{v'_f}{U_{*0}} = 1.27 \exp(-y/h)$$
(6)

$$\frac{w'_f}{U_{*0}} = 1.63 \exp(-y/h)$$
(7)

計測領域(0.2cm<y<3cm, すなわち0.025<y/h<0.375)においては比較的良好に普遍関数に一致する.また, u>w>v'の大小関係も成立している.しかしながら, ADVで計測した乱れ強度には計測システムの信号処理 等に起因するホワイトノイズ的な誤差が含まれることから確実な一致は見られず,特にプローブ軸に直角な水平 方向成分における乱れ強度, u'およびw'が若干大きく算 出され, プローブ軸に平行な鉛直方向成分の乱れ強度v' が若干小さく算出される結果となった.

(4) レイノルズ応力分布

本実験において表-1に示した摩擦速度は、時間平均されたレイノルズ応力分布から算出された.この分布を 図-8に示す.図に示すように、粒子を伴うことによって レイノルズ応力は若干低減し、この傾向はPIV計測とほ ぼ一致した.また、本研究におけるADV計測では水面 から5cmの領域を計測できなかったため、底面から3cm のデータ(y<3cm)しか得られないが、内層におけるレイ ノルズ応力の直線分布から U_* を求める手法により算出さ れた値は、水路勾配から算出された値 $U_* = \sqrt{ghI}$ とほぼ 一致した.このことから本実験ケースにおいてもこのレ イノルズ応力手法は妥当であると考えられる.

(5) 粒子フラックス

粒子の浮上・降下とEjection・Sweepの関係を詳細に考察 するために、4象限区分された鉛直方向粒子フラックス $\widetilde{cv}(y)$ を算出し、図-9に示した. ここで \widetilde{c} は反射強度 から式(4)で算出された粒子濃度の実測値、 \widetilde{v} は鉛直流 速の実測値である. どの実験ケースにおいても、底面近 傍ではEjection(Q2)における粒子フラックスが最も大きな 正値となり、Inward-interaction(Q3)はSweep(Q4)よりも若 干大きな負値となる特性となり注目される.

 $\tilde{c}\tilde{v}(y)_{i=2}$ については、Ejectionによって底面付近の粒 子が浮上することが報告されており⁸)、 \tilde{c} の大きな正値 と \tilde{v} の正値から特に粘性底層近傍で上述の結果が得られ たものと考えられる.次にInward-interactionとSweepとの 比較であるが、Inward-interactionは低速の下降流であり、 Sweepと比較して粒子濃度が若干大きい傾向にあった. これはEjectionによって浮上した粒子がInward-interaction において降下してくることを示唆している.さらに Sweep内部の粒子濃度がゼロとなる瞬間も見られたこと から上記のような結果が得られたと考えられる.水面付 近のQ4のデータ($\tilde{c}\tilde{v}(y)_{i=4}$)がゼロに漸近していることも この考察を裏付けるものであると思われる.以上より、 粒子の浮上に関して最も影響を及ぼしているのは Ejection運動であることがわかり、従来の低濃度浮遊砂 実験結果と一致した^{7,8)}.

次に、同様の手法で流下方向粒子フラックス $\widetilde{c}\widetilde{u}(y)$ を算出し、図-10に示した. ここで ữ は主流速の実測値 である.フラックス値の大小関係は、Q2>>Q1>Q3=Q4 のようになった.まず最も大きな値を持った $\widetilde{c}\widetilde{u}(y)_{i-2}$ (Q2)であるが、これはEjectionにおいて底面付 近から高粒子濃度塊が浮上するためと考えられる. 次に 底面付近において大きな値を持った Outwardinteraction($\tilde{c}\tilde{u}(y)_{i-1}$:Q1)に注目すると、降下してくる Sweepのフロント部分において底面付近に存在する粒子 が加速・浮上する現象が目視によって確認された. これ がOutward-interactionに対応し、上記のような結果となっ たと考えられる. 続いてInward-interaction とSweepがほ ぼ同じ値を持ったことについては, Inward-interactionに おいて粒子濃度が若干大きく, Sweepにおいて流速が大 きくなることから、これらの積である $\tilde{c}\tilde{u}(y)_{i-2}$ と $\widetilde{c}\widetilde{u}(y)_{i-1}$ がほぼ同程度の値となったと考えられる.

4. 結論

本研究では、ADV計測によって得られた流速データ とADV信号の反射強度を応用し、流体速度・粒子速 度・粒子濃度を同時計測する手法を考察した. さらにそ の手法を用いて粒子・流体間の相対速度や粒子フラック スの算出を行い、PIV/PTVのデータと比較検討を行った. 本研究で得られた主な成果は以下の通りである.

- ADV信号の反射強度と粒子濃度の画像計測の相関 が非常に大きいことが確認された.また、ADV信号 から算出された粒子濃度がRouse分布とほぼ一致し たことからも本研究の計測手法は妥当であると考え られる.
- 2) ADV信号の強度に閾値を設定し、粒子・流体デー タを判別分離する手法を試み、得られた結果から相 対速度を算出し、PIV/PTV手法から得られた相対速 度と比較した結果、非常によく一致した.これにより、本研究で使用した閾値による粒子・流体判別分 離手法が妥当であると考えられる.
- 3) 清流・浮遊砂流れにおける流速分布は、従来の結果 と非常に良く一致した. さらにカルマン定数κ値が 清流のデータ(κ=0.412)と比較して浮遊砂流れでは減 少し、粒子濃度の増加に伴ってκ値の変化は顕著と なった. この傾向は他の研究者の傾向とほぼ一致し た.
- 4) 4象限区分された鉛直方向粒子フラックス $\tilde{c}\tilde{v}(y)$ を算出し、粒子の浮上に関して最も影響を及ぼして いるのはEjection(Q2)であることが示された.また、 フラックスの値からEjectionによって浮上した粒子 がInward-interaction(Q3)において降下してくることが

示唆された.

5) 4象限区分された流下方向粒子フラックス $\widetilde{cu}(y)$ を算出し、粒子の輸送に関して最も影響を及ぼして いるのはEjection(Q2)であることが示された.また、 鉛 直 方 向 フ ラ ッ ク ス と は 異 な り Outwardinteraction(Q1)においても比較的大きな値をもった. これは、降下してくるSweepのフロント部分におい て底面付近に存在する粒子が加速・浮上する現象が Outward-interactionに対応するためであると考えられ る.

本研究ではADVでの粒子速度・流体速度の計測精度 の検証にも重きを置いたため、使用する粒子の比重を水 に近いものとせざるを得なかった. ADV計測精度にお いては平均流速に関して正確に計測できていることから、 実現象に近い高粒子濃度の浮遊砂流れも扱うことが出来 ると考えており、今後の課題としたい.

参考文献

- Elgobashi, S. : On predicting particle-laden turbulent flows, *Appl.Sci. Res.*, Vol.52, No.4, pp.309-329, 1994.
- Crowe, C.T., Troutt, T.R. and Chung, J.N. : Numerical models for two-phase turbulent flows, Ann. Rev. Fluid Mech, vol.28, pp.11-43, 1996.
- 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.
- Lohrmann, A., Cabrera R., Kraus, N. : "Acoustic Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use. Proc. Symp. on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation", ASCE, New York, pp.351-365, 1994.
- Goring, D. G., and Nikora, V. I. : "Despiking acoustic dopplervelocimeter data", J. Hydraul. Eng., vol.128(1), pp.117-126, 2002.
- Kawanisi,K., and Yokosi, S. : "Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer.", Contin. Shelf Res., vol.36(1), pp.69-75, 1997.
- 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.
- Azuma, R. and Nezu, I. : Velocity profiles and von Karman constant in open-channel flows with suspended sediment, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Vol.2, pp.2213-2220, 2004.
- 9) 野口和則, 禰津家久, 山上路生:浮遊砂流れにおける乱流 変調と局所的な粒子濃度変化に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.733-738, 2008.
- (禰津家久: "開水路乱流の乱れ強度に関する研究", 土木学 会論文集, 261, pp.67-76, 1977.

(2009.9.30受付)