

掃流砂を伴う開水路流れにおける水と流砂の相互作用

INTERACTION BETWEEN FLUID AND SEDIMENT IN OPEN-CHANNEL FLOWS WITH BED-LOAD TRANSPORT

禰津家久¹・鬼束幸樹²・東良慶³

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA and Ryoukei AZUMA

¹フェロー 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正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻

³学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

Mean flow properties and turbulent characteristics in open channel flows are affected by the bed load motion. In this study, interactions between fluid fluctuations and sediment transport were investigated. Behavior of fluid and sand particles was measured with a laser Doppler anemometer. It could be conducted to separate fluid and sand particle motions by using of the amplitude of Doppler burst signals in an LDA system. In the bed-load layer, the Reynolds stress of fluid was decreased and that of sand was generated by the interaction between fluid and sand motions. It was found that the high momentum is transferred downward by the dropping particles, because the contribution rate to the Reynolds stress of the sweep is larger than that of ejection.

Key Words : sediment transport, laser Doppler anemometer, turbulence

1. はじめに

実河川において、掃流砂あるいは浮遊砂として土砂は運搬される。これに伴い、侵食あるいは堆積作用が生じ、流路形状や河床形状などの変化が引き起こされる。また、流砂の有無によって流れの抵抗則が変化することも指摘されている¹⁾。そのため、流れと流砂の相互作用を解明することが極めて重要であると認識されている。

掃流砂を伴う開水路流れの計測は、古くからピト管を用いて行われてきた²⁾。ただし、これは掃流砂が転動、滑動あるいは小跳躍している掃流層を除く領域における計測であり、掃流層内の計測は行われていない。また、熱線流速計を用いても掃流砂がプローブを破壊する危険性があるために、計測は不可能と言って良い。このように粒子と流体とが混在する流れ場の研究はその計測が困難であるため、実験よりも数値計算の方が先行した。後藤ら³⁾は、粒子と流体との相互作用の効果を運動方程式の外力項として加えたk-εモデルを開発した。彼らのシミュレーションによると、掃流層においては、水流から掃流砂に運動量が奪われるために、水流のReynolds応力が減少するとされている。これは、Bagnold⁴⁾の推定を

支持するものである。一方、混相流の分野においては、主流方向と重力方向が同一のもの、あるいは、逆方向のものについて集中的に研究がなされている。杉山ら⁵⁾はLES(Large Eddy Simulation)を用いて、また、瀧口ら⁶⁾はDNS(Direct Numerical Simulation)を用いて混相流をシミュレートした。その結果、粒子径がKolmogoroffスケールよりも小さい場合には乱れ強度が減少し、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などが指摘された。

このように、粒子と流体とが混在した流れにおける研究は数値計算が先行していたが、近年、計測も試みられるようになった。Song *et al.*⁷⁾や楊ら⁸⁾は超音波ドップラー流速計(ADVP)を用いて、平坦移動床上の流れを計測し、平均流速分布や乱れ強度分布が清水流のそれと比べ、ほとんど変化しないことを指摘した。ただし、彼らは掃流層内の計測は行っていない。小松ら⁹⁾は振動格子乱流中にポリスチレンが存在する流れをレーザードップラー流速計(LDA)を用いて計測した。ただし、LDA計測では、測定体積中を通過する微細粒子だけでなく、比較的大きなポリスチレン粒子によってもドップラーバースト信号が発

生する。そこで彼らは得られた時系列データにおいて、RMS値の4倍以上のものをカットして解析している。一方、神野ら¹⁰⁾は得られたドップラーバースト信号の振幅にあるしきい値を設けることによって信号を分離している。

本研究は掃流砂を伴う開水路流において、LDAを用いて乱流計測を行ったものである。解析する際に、神野ら¹⁰⁾の方法を採用し、流体と流砂との分離を行った。これによって、掃流層内における水流だけでなく、流砂の速度分布やReynolds応力分布などの計測に成功した。

2. 実験方法

本実験で使用した水路は、長さ12m、幅50cmの可変勾配型循環式直線水路である。水路上流端より3mの位置から流下方向に長さ7mの区間について6号珪砂を厚さ4cmで平坦に敷いた。移動床区間の上流側3mおよび下流側1mの区間については水路床高さが移動床と同一になるように鉄板を設置した。この鉄板の表面には移動床区間に敷いた珪砂が固定されている。用いた珪砂は、中央粒径が $d_{50}=0.2\text{mm}$ で粒径のばらつきがほとんどない一様砂である。座標系は流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸を、そして水路横断方向に z 軸をとり、それぞれの流速値を $\tilde{u}=U+u$ 、 $\tilde{v}=V+v$ および $\tilde{w}=W+w$ 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。掃流砂の速度についてはサフィックス S を付加して表示する。

流れ場の設定方法を示す。下流堰を上げた状態で水路内に水道水を慎重に注水し、十分に水深を上げた後、徐々に流量を増加させて目的の流量に設定した。定常状態に達した後に、水路床勾配および堰を調節することにより平坦河床上に掃流砂の存在する等流を形成させた。

図-1に計測システムを示す。瞬間流速の測定には空冷式の4ビーム後方散乱型レーザー流速計を用いた。本実験システムでは得られたドップラーバースト信号の電圧を流速の時系列と同時に取り込めるようになっている。計測点移動については、コンピュータ制御による自動トラバース装置によって行われた。計測点は、鉛直方向に27点設け、掃流層を含む全域とした。また、流速の計測断面は上流端より8m下流の位置とし、掃流砂収集箱を流速計測断面から2m下流の位置に設置した。この掃流砂収集箱は、プラスチック製の箱で作られており、水路幅50cmを18分割することにより、掃流砂の絶対量のみならず、水路横断方向の流砂量分布も測定可能となっている。表-1に水理条件を示した。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Reynolds数、

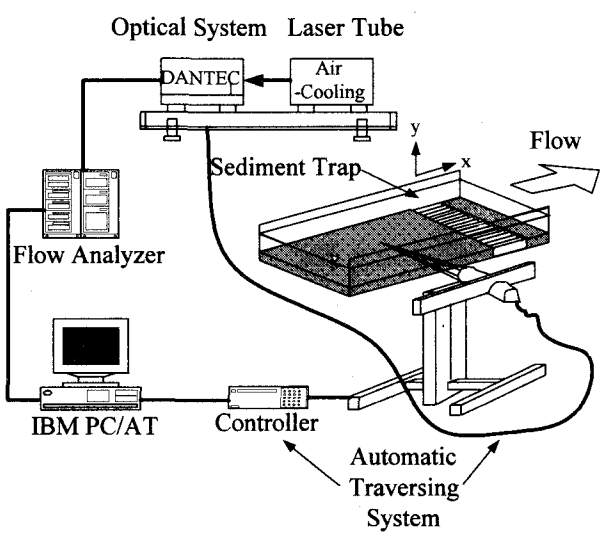


図-1 計測システム

表-1 水理条件

Case	h (cm)	Re $\times 10^4$	Sb	Fr	τ_* $\times 10^{-2}$
N1	6.0	0.94	1/1000	0.21	1.74
S1	6.0	1.65	1/300	0.36	5.31

$Fr \equiv U_m / \sqrt{gh}$ はFroude数、 S_b は水路床勾配、 $\Psi \equiv U_*^2 / sgd_{50}$ は無次元掃流力、 h は水深、 s は砂の水中比重、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。N1は掃流力が限界掃流力を下回っており、掃流砂を伴わない流れであり、S1は掃流砂を伴う流れである。計測時間は各測定点につきN1では120s、S1では60sとした。

3. 解析方法

本実験に用いたレーザードップラー流速計（DANTEC社製）の測定原理としては以下のである。アルゴンイオンレーザー光源から発光したレーザー光線は、青（波長488nm）および緑（514.5nm）に分光され、ビームスプリッターによって2つの光線群にそれぞれ強度が等しくスプリットされ、さらに、スプリットされた片方の光線は40MHzの周波数シフトを受ける。これらの4本の光はそれぞれ光ファイバーを通過した後、水中に発せられる。このとき光が交差した部分に干渉縞が発生する。測定体積中に散乱粒子が通過するとドップラーバースト信号が発生し、これをフォトマルが検出し、処理機によって散乱粒子の速度が計算される。清水中の測定の場合は、水中に含まれる微細粒子または人工的に投与された直径数 μm のトレーサーによってバースト信号が発生する。このような微細粒子の場合は粒子が十分に周囲流体の挙動に追随しているため、粒子

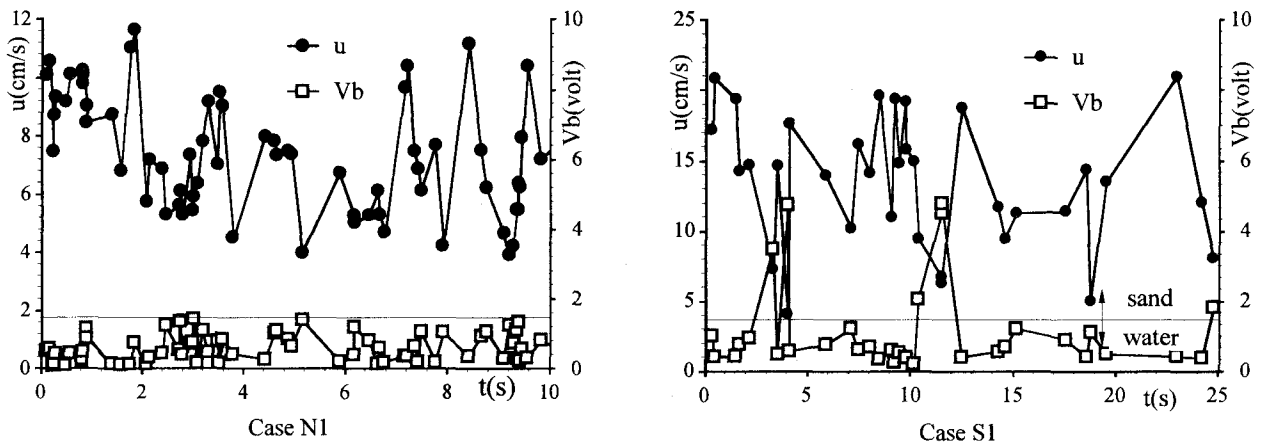


図-2 主流方向の瞬間速度とバースト電圧の時系列

の挙動を流体の挙動ととらえて差し支えない。しかし、粒子の比重が1よりかなり大きな場合や粒子径が大きな場合、あるいは、高速流の場合は粒子の挙動が流体の運動に追従できなくなるので、これらの粒子による信号を分離する必要がある。

小松ら⁹⁾は振動格子乱流場に粒径が0.41mm～2.44mmの7種の中立浮遊粒子を混入させて、レーザー流速計によって計測した。彼らは、まず得られた時系列において無条件に平均値およびRMS値を求め、次に平均値からRMS値の4倍以上離れているデータがポリスチレン粒子による異常値としてカットして統計解析を行った。一方、神野ら¹⁰⁾は比較的大きな粒径の散乱粒子から発せられるドップラーバースト信号の振幅が、小さな粒径のそれよりも大きな事に着目し、得られたドップラーバースト信号にあるしきい値を設けることによって流体と粒子の分離を行った。本実験で用いたトレーサー（水性ペンキ）は直径数 μm であるため、掃流砂の直径0.2mmよりも2桁オーダーが異なるため、ドップラーバースト信号の振幅に相違が期待できる。

図-2はN1およびS1における主流方向の瞬間速度およびバースト電圧の時系列を示したものである。ただし、縦軸に関しては瞬間速度が左軸を、バースト電圧が右軸に従うものとする。掃流砂を伴わないN1の時系列に着目すると、速度およびバースト電圧が多少変動していることが観察される。N1におけるバースト電圧の上限値は約1.8vである。一方、流砂の存在するS1に着目すると、バースト電圧がS1のケースとほぼ同様な値の変動が続いた後、時折突発的に増加している状態が観察される。このとき瞬間速度はかなり減少していることが確認できる。このような突発的な電圧上昇は掃流層よりも上部のデータには見られなかったことから、この信号は流砂によるものと考えられる。そこで、本実験においてはバースト電圧が1.8vよりも大きなものを流砂、それ以下のものを流体の挙動ととらえ統計解析する。ただし、

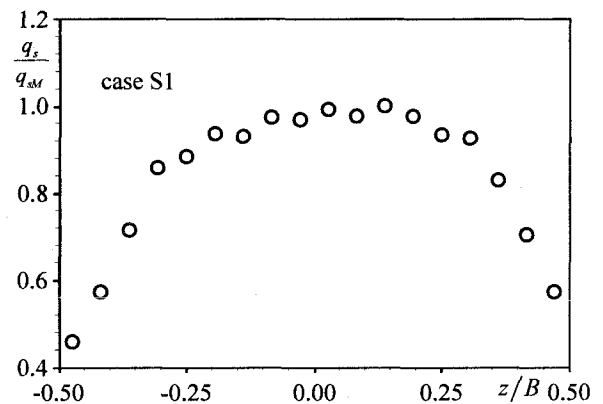


図-3 流砂量分布

本実験システムで発せられる元々のバースト信号は極めて微弱であるため、AD変換する際に分解能が下がる危惧がある。そこで、本実験ではアンプを用いてバースト信号の振幅を増幅している。また、予備実験を行った結果、レーザー光線の出力値を変化させるとバースト電圧も全体的にシフトするが、本計測においてはN1およびS1共に、同一のレーザー出力および同一のアンプ倍率を用いて計測したため、両者から出力されるバースト電圧値を直接比較することができる。しかし、本実験で用いたしきい値の絶対値に意味はなく、任意性のあるものといわざるを得ない。今後、改良していく必要がある。

4. 実験結果および考察

(1) 流砂量分布

流れが3次元である場合、乱流統計量は流れのパラメータだけではなく3次元性にも影響を受ける。Nezu & Nakagawa¹¹⁾はアスペクト比（水路幅／水深）を系統的に変化させた開水路等流の主流速分布および2次流などの計測を行い、アスペクト比が5以上であれば水路中央部で2次元流れが発生することを証

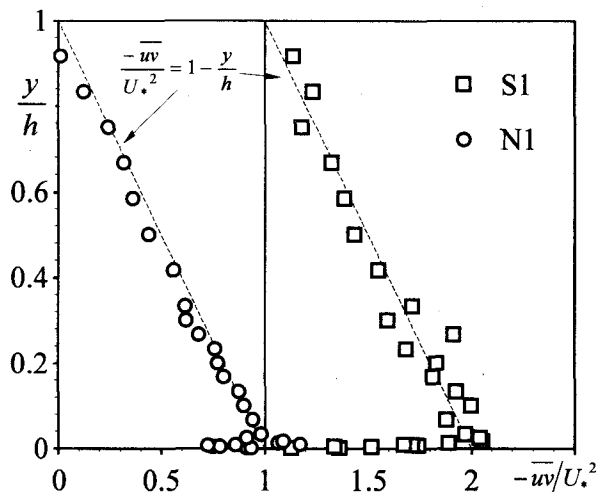


図-4 Reynolds応力分布

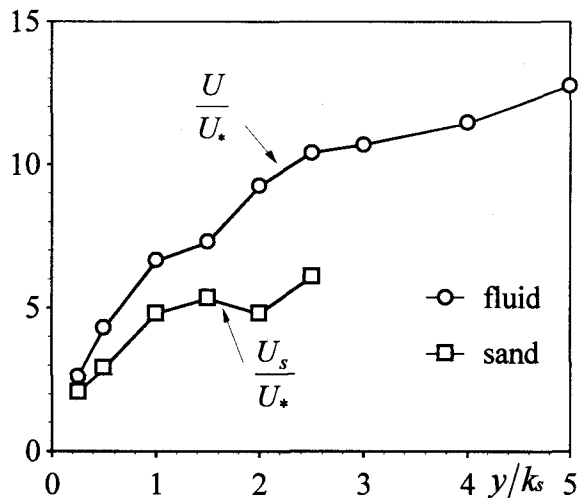


図-6 S1の底面付近における速度分布

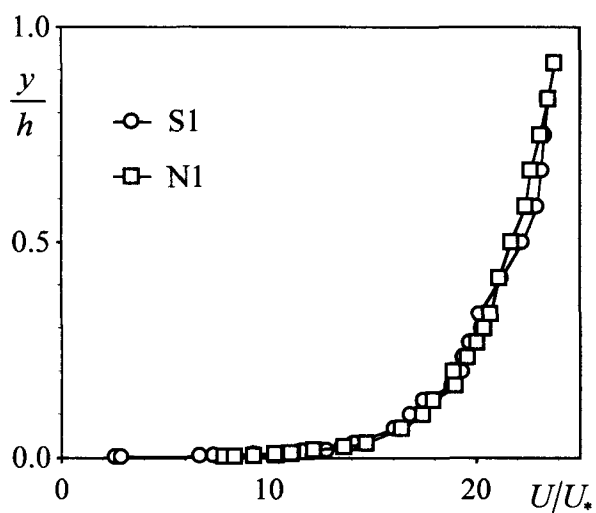


図-5 平均流速分布

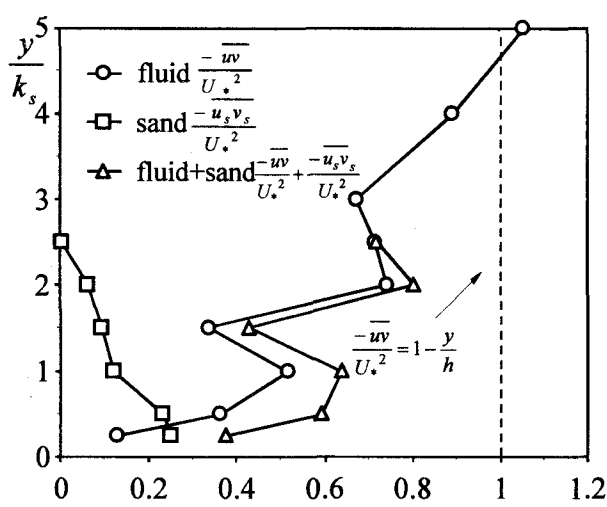


図-7 S1の底面付近におけるReynolds応力分布

明した。ただし、この基準は滑面流れのものであり、本実験のような移動床に適用できる保障はない。最近、楊ら⁸⁾はアスペクト比を1.47～1.73に変化させた平坦移動河床の形状変化を測定し、横断方向河床形状が非対称となる場合があることを指摘している。そこで、本研究においては水路幅50cmに対し、水深を6cmとしてアスペクト比を8.3に設定した。

図-3に水路横断方向の流砂量分布を示す。水路中央を中心にした分布形状を示し、楊ら⁸⁾の指摘したような2、3個の山形を有する非対称な分布は示さなかった。また、水路中央付近においては流砂量分布が横断方向にほとんど変化していないことから、ここでの流れ場は2次元性を保持していると考えられる。

(2) 摩擦速度の算出

粗面開水路等流における摩擦速度 U_* の算出には頻繁にlog則が用いられる。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + \Delta y}{k_s} + A_r \quad (1)$$

流砂を伴わない流れにおいては、Karman定数 κ および原点補正量 Δy をそれぞれ0.41および粒径の1/4の普遍量とし、積分定数 A_r および摩擦速度 U_* を未知量として求める。しかし、流砂を伴う流れにおいては原点補正量 Δy の値がそれほど解明されておらず、原点補正量も未知量として扱うと式が閉じない。そこで本研究ではReynolds応力分布より摩擦速度を求める。なお、底面の位置は移動していない粒子頂部より粒径の1/4下方とした。

図-4にN1およびS1のReynolds応力 $-\overline{uv}$ の分布を示した。ただし、摩擦速度 U_* は底面付近を除いた領域において次式から求めた。

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

ケースN1では底面近傍でReynolds応力が式(2)より若干減少している。これは、粗度要素の背後から発生

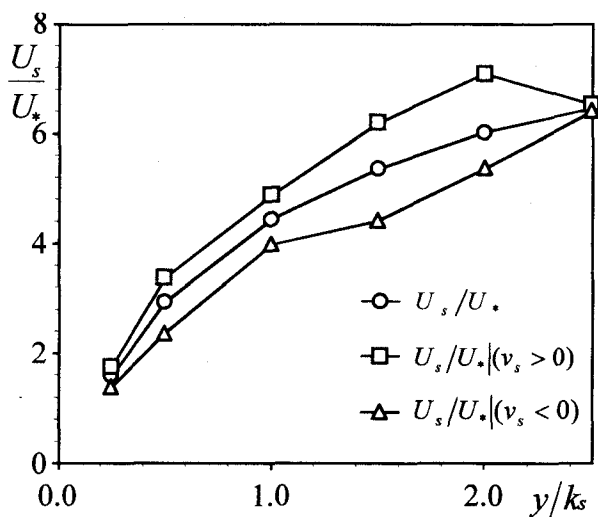


図-8 砂粒子の流下方向平均速度分布

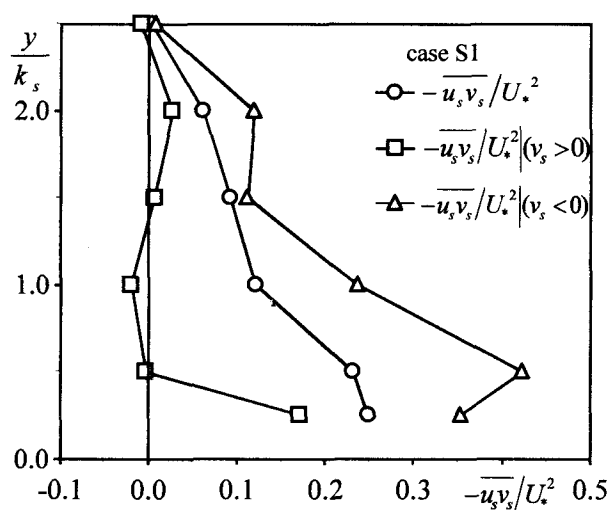
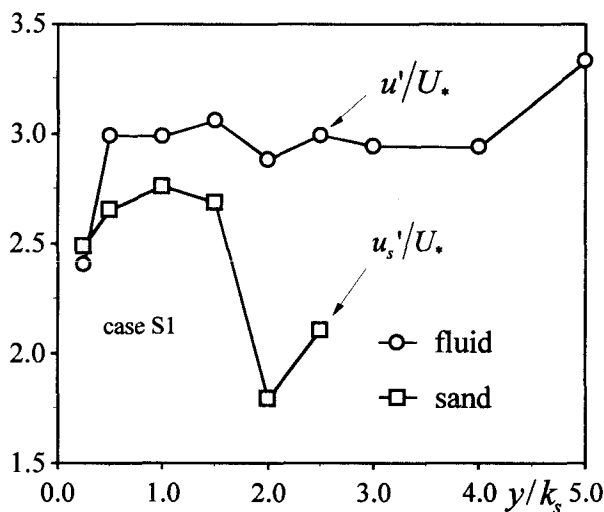
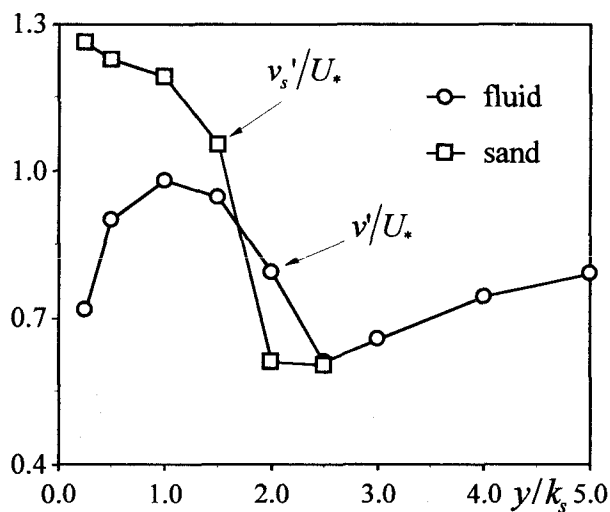


図-9 砂粒子のReynolds応力分布



流下方向



鉛直方向

図-10 底面付近の乱れ強度

するはく離渦によって生じたものと考えられる¹²⁾。ケースS1については底面付近でかなりの減少傾向が観察される。これについては後に考察する。両ケースとも底面付近を除くと式(2)に従っていることが観察される。

(3) 水の平均流速分布

図-5は平均流速分布を示したものである。摩擦速度で無次元化流速分布は両ケースでほぼ同一の分布となっている。また、図-4よりReynolds応力分布も底面付近を除くと両ケースで同様な分布であることから、掃流砂の影響は底面付近の掃流層のみであり、掃流層より上部の領域では平均流および乱れ特性は掃流砂の影響を受けないと考えられる。

(4) 水および砂の速度分布

図-6にS1の底面付近における水および流砂の速度

分布を示す。流速は鉛直方向に徐々に増加している。砂の速度も同様に鉛直方向に増加しているが、その値は水のものよりも小さい。これにより水と流砂との間に相対速度が生じ、運動量交換がなされることが推定できる。また、 y/k_s が2.5より上部の領域では流砂は計測されなかった。

(5) 水および砂のReynolds応力分布

流砂を伴う流れにおいて、水流の運動量を流砂が奪うために、掃流層においては水流のReynolds応力が減少するであろうとBagnold⁴⁾は推測した。その後、後藤ら³⁾は流砂と水流との間に行われる運動量交換の効果を運動方程式の外力項として評価し、 $k-\epsilon$ 法を用いてBagnoldの推測を裏付けた。しかし、これらを実証した実験結果はほとんど存在しない。

図-7は底面付近における水と流砂のReynolds応力および両者を加算したReynolds応力分布を示したも

のである。同図には、式(2)を点線で示している。水のReynolds応力 $-\overline{uv}$ は式(2)よりも減少している。一方、流砂のReynolds応力 $-\overline{u_s v_s}$ は鉛直方向に減少している。これは、掃流層の上に行くに従い、流砂が水流に及ぼす影響が減少していることを示している。流砂量が増すと流砂のReynolds応力の増加が予想されるが、これは今後の研究課題としたい。

(6) 流砂による混合作用

流砂は上昇あるいは下降しながら跳躍している。そのため、鉛直方向の混合作用を促進すると予想される。そこで、流砂の鉛直方向変動成分 v_s が正のものと負のものとで、それぞれ流下方向平均速度 U_s を求め、図-8に示す。下降粒子($v_s < 0$)は無条件平均速度 U_s よりも大きく、上昇粒子($v_s > 0$)は U_s よりも小さな値となっている。つまり、流砂が下降する場合は高運動量が下方の領域に運ばれ、上昇する場合はその逆であることを表している。

図-9は上昇粒子と下降粒子の流砂Reynolds応力を示したものである。これより、上昇粒子よりも下降粒子の方がReynolds応力に対する寄与が大きな事がわかる。これは、イジェクションよりもスweepの方が寄与が大きな事を示唆している。つまり、底面付近でほぼ停滞している粒子が移動を開始する際に周囲流体から受け取る運動量よりも、一度跳躍を開始した後に底面からある程度離れたときに水流から受け取る運動量の方が大きいことを表している。

(7) 乱れ強度分布

図-10は水および流砂の流下および鉛直方向乱れ強度分布を示したものである。流下方向乱れ強度に関しては水と流砂との間に大きな差が認められる。一方、鉛直方向乱れ強度に関しては、底面付近で流砂の方が水流よりも大きな値を示している。これは、停滞していた粒子が移動を開始する場合には平均速度 V_s が小さいのに対し、高速な流砂が上方から底面方向に下降してくる場合は平均速度 V_s がかなり大きいために生じたものと考えられる。また、底面から離れるにつれて流砂の鉛直方向乱れ強度が水流のそれとほぼ同様な値を有していることが観察される。これは、流砂の鉛直方向の挙動が水流に追従したのではないことを示唆している。つまり、流砂の流下方向速度は水流の相対速度によって発生するが、一度、跳躍を開始した流砂は重力の作用によって下降を開始し、上方で受け取った運動量を下方に運ぶ役割を持っていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、開水路流れにおける掃流砂の運動およびそれが乱流構造に与える影響を解明するためにLDAを用いて水および流砂の挙動を測定したものである。

(1) 得られたLDAのドップラーバースト信号の振幅にしきい値を設けることによって流砂と水流との分離に成功した。

(2) 掃流層を除いた領域の平均流構造および乱流構造は流砂の影響を受けず、固定された粗面上の流れのそれとほぼ同様である。

(3) 掃流層において水流のReynolds応力が減少し、流砂のReynolds応力が発生することを実験的に初めて明らかにした。

(4) 流砂Reynolds応力にはエジェクションよりもスweepの方が寄与が大きい。つまり、上方の高運動量が下降粒子によって下方にもたらされる。

(5) 移動を開始した流砂は主流方向の相対速度によって運動量を水流から受け取りつつ上昇する。その後、重力の作用によって下降する。そのため、流砂の流下方向乱れ強度は水流のそれよりもやや小さいが、鉛直方向乱れ強度はほぼ同様な値を示す。

謝辞：本実験を行うに当たり、データ解析に協力いただいた本学4回生の西村宗倫氏に感謝する。

参考文献

- 1) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986.
- 2) Guy, H.P., Simons, D.B. and Richardson, E.V.: Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1965-61, *USGS Prof. Paper 462-I*, pp.1-96, 1966.
- 3) 後藤仁志, 辻本哲郎, 中川博次: 流体・粒子相互作用系としての掃流層の数値解析, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.11-19, 1994.
- 4) Bagnold, R.A.: The flow of cohesionless grains in fluids, *Philosophical Trans., Royal Soci. of London*, vol.249, pp.235-297, 1957.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Song, T., Graf, W. H. and Lemmin, U.: Uniform flow in open channels with movable gravel bed, *J. Hydr. Res.*, vol.31, No.6, pp.861-876, 1994.
- 8) 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.
- 9) 小松利光, 押川英夫, 竹内美礼: 中立浮遊粒子を含む乱れ場の乱流空間特性, 水工学論文集, 第40巻, pp.395-400, 1999.
- 10) 神野健二, 初井和朗, 上田年比古: レーザ流速計による固液2相流及び粒子速度の同時測定について, 第28回水理講演会論文集, pp.635-640, 1984.
- 11) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 12) 中川博次, 辻本哲郎, 清水清彦: 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, No.423/II-14, pp.73-81, 1990.

(2000. 10. 2受付)