

京都大学
京都大学
京都大学

学生員 ○野口和則
フェロー 榊津家久
学生員 中島与博

1. はじめに

近年、浮遊砂流れにおける粒子・流体間の相互作用の重要性が指摘され、粒子・流体の two-phase 的なアプローチによる研究が活発的に行われている¹⁾。本研究では画像解析における粒子投影面積判別手法(D-PIV²⁾・D-PTV³⁾を用いて流体速度と粒子速度の同時計測を行い、開水路浮遊砂流れにおける組織乱流構造およびそれが及ぼす浮遊砂濃度への影響について検討した。

2. 実験手法および水理条件

本実験で用いた水路は、長さ 4m、幅 5cm のアクリル製小型循環式直線水路である。実験水路と水理条件は他の論文⁴⁾に掲載しており、参照願いたい。全ケース流量は一定とし、浮遊粒子としてポリエキストラ粒子(比重 $\rho_p=1.2$)を投入した。その粒径 d_p を 0.25, 0.37, 0.50, 1.0mm の 4 種類変化させ、さらに各粒径において粒子濃度を 3 段階に変化させた。また、流体挙動を代表するトレーサーとして、直径 0.025mm、比重 1.02 のナイロン 12 粒子を用いた。計測区間は浮遊砂流れが十分に発達したと考えられる、水路上流端から 2.8m 下流の地点に設定した。画像計測は水路側壁付近に設置された High Speed CMOS カメラによって行われ、1/100s ごとに 1280×1024pixel の画像を時間間隔 $\Delta t=1/500$ s で 2 枚ずつ記録した。瞬間流速の算出についても文献⁴⁾と同様であるが、粒子速度算出に使用した D-PTV では、画像中の粒子数をカウントすることにより瞬間粒子濃度の算出が可能であった。

3. 実験結果および考察

浮遊砂流 4 ケースについて粒子濃度分布を図-2 に示した。図中には Rouse の粒子濃度分布を併示した。Rouse 式は以下で示される。

$$\frac{C}{C_a} = \left(\left(\frac{h_p - y}{h_p - a} \right) \left(\frac{a}{y} \right) \right)^z, \quad Z = \frac{w_s}{\beta \kappa U_{*0}} \quad (1)$$

ここで、 h_p は浮遊粒子層厚、 C_a は $y=0.05h_p$ における基準面粒子濃度、 $a=0.05h_p$ である。パラメータ β が既知であればラウス式は確定するが、ここでは式(1)が粒子濃度の実測値に最も一致するように β の値を算出し図中に示し、これを β_R とした。本研究では、D-PTV によって粒子のレイノルズ応力も計算できるため、 β の実測値($\beta_R = \varepsilon_s / \varepsilon_m$)も図中に示す。これを β_E とする。渦動

粘性係数 ε_m 、渦動拡散係数 ε_s はそれぞれ次式で定義される。

$$\varepsilon_m = \frac{-\overline{(u_f v_f)}}{(\partial U_f / \partial y)}, \quad \varepsilon_s = \frac{-\overline{(u_p v_p)}}{(\partial U_p / \partial y)} \quad (2)$$

粒子が浮上・拡散しにくい $d_p=1.0$ mm のケースにおいて $\beta_R=2.94$ 、 $\beta_E=1.15$ と差が見られたが、他のケースでは $\beta_R \approx \beta_E$ と比較的一致していることから、画像から得られた粒子濃度の精度上の問題がないことが確認された。

図-2 に浮遊砂流($d_p=0.25$ mm, $\bar{C}=3.16 \times 10^{-3}$)における ejection および sweep 発生時の瞬間レイノルズ応力分布 $w(t) \equiv -u_f(t)v_f(t)$ のコンター図と同時刻同位置の粒子濃度分布を示した。右側の粒子濃度図は左図の白枠で囲まれた部分の粒子濃度分布を示したものであり、その横軸は瞬間レイノルズ応力分布の横軸(x 軸)と一致させている。

瞬間レイノルズ応力において ejection($v_f \geq 0$) と sweep($v_f \leq 0$)を区別するために条件付区分を行った。

$$w(t) = \begin{cases} w(t) & \text{for } v_f \geq 0 \\ -w(t) & \text{for } v_f \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

この操作により、ejection は $w(t)$ の大きな正值で、sweep は大きな負値で示される。図間の時間ステップ Δt は 0.024sec であり、ejection 発生後 sweep が発生している様子を可視化できている。

さらに、粒子濃度分布図から ejection 発生時に粒子濃度分布が周囲流体と比較して増加していることが図中の赤サークルに示すように確認された。すなわち、ejection に追従して粒子が浮上することがわかった。

一方 sweep 発生時では、外層の低粒子濃度の高速流体が降下し、粒子濃度が減少すると予想されたが、ここで

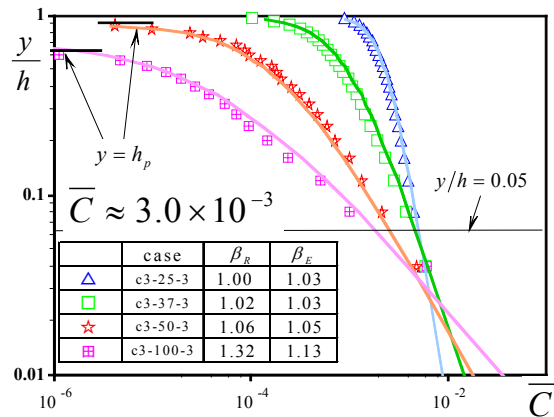


図-1 粒子濃度(実測値)と Rouse 分布

はあまり減少しなかった。この原因は、比重 $\rho_p=1.2$ と非常に軽く浮上しやすい粒子を用いたため、外層においてもある程度高い粒子濃度であったからであると推測される。

次に粒子の輸送現象に大きな関わりを持つ **ejection・sweep** の発生が、粒子を伴うことによってどのように変化するかに注目した。図-3 には清流・浮遊砂流($d_p=0.25\text{mm}$)における $w(t)$ の時系列分布を示し、**ejection** および **sweep** の発生の一例を示した。なお、図-3 は清流・浮遊砂流とも $x=1.0\text{cm}$, $y^+=50$ の点における時系列データである。図-2 から示されるように、 $y^+=50$ は **ejection・sweep** がともに確認できる領域である。図-3 から清流および浮遊砂流における **ejection・sweep** の発生頻度分布および平均発生周期が求められ、それを図-4 に示した。図からは粒子を伴うことによる **ejection・sweep** の発生周期の変化はほとんど見られず、清流・浮遊砂流ともに Nezu&Nakagawa(1993)⁵⁾ が示した **ejection・sweep** の平均発生周期の式

$$\frac{\bar{T}_B U_{\max}}{h} \approx \frac{\bar{T}_e U_{\max}}{h} \approx \frac{\bar{T}_s U_{\max}}{h} = (1.5-3.0) \quad (2)$$

と一致し、本研究においてはどの実験ケースにおいても $\bar{T}_e U_{\max}/h, \bar{T}_s U_{\max}/h = (1.78-1.85)$ であった。

しかしながら、本研究における **ejection・sweep** のサンプル数は各ケースとも約 180 個程度と少なかったため発生周期に関する詳細な考察はできないが、長時間計測、**ejection・sweep** の抽出方法にきい値を導入することによって今後さらに検討する必要がある。

4. おわりに

本研究は、粒子濃度の局所変化および流れ構造について D-PIV および D-PTV を用いて考察を行い **ejection・sweep** の組織渦と浮遊砂濃度との関係について考察を行った。

参考文献

- 1) Muste, M. (2002) : Sources of bias errors in flume experiments on suspended-sediment transport, Journal of Hydraulic Research, vol.40, pp.695-708.
- 2) 棚津家久・野口和則・山上路生 (2006) : 河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が液相の乱流構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, vol.9, pp.951-958.
- 3) Nezu, I., and Azuma, R. (2004) : Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open-channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.130, pp.988-1001.
- 4) Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993) : Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- 5) 中島与博・棚津家久・野口和則 (2008) : 浮遊粒子を含む滑面開水路流れにおける乱流変調に関する研究, 土木学会関西支部 (投稿中)

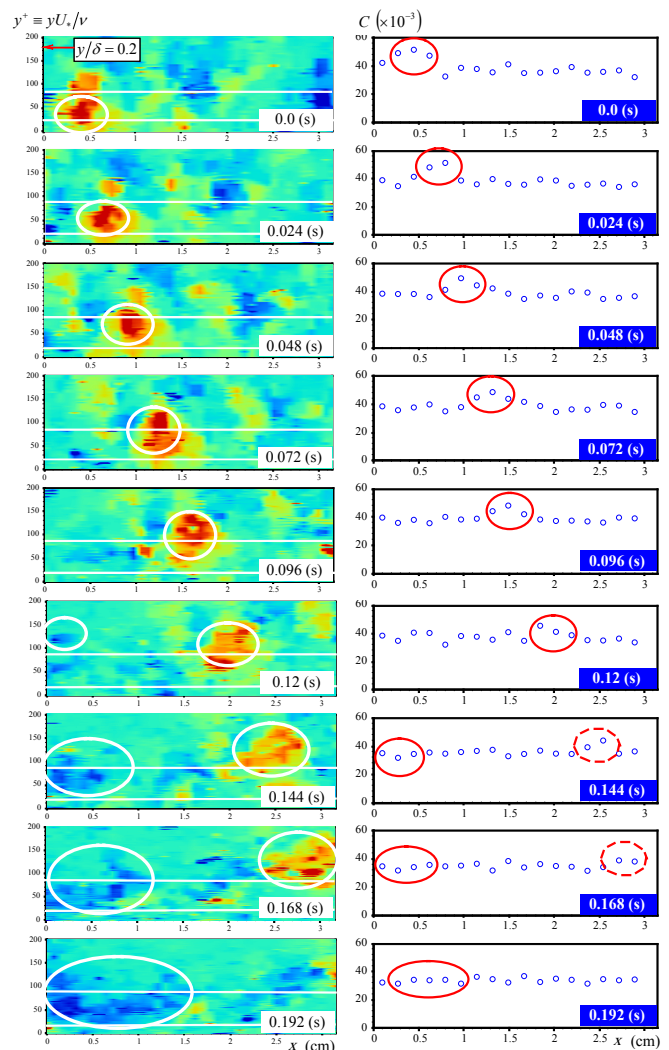


図-2 **ejection・sweep** 発生時の瞬間レイノルズ応力と粒子濃度

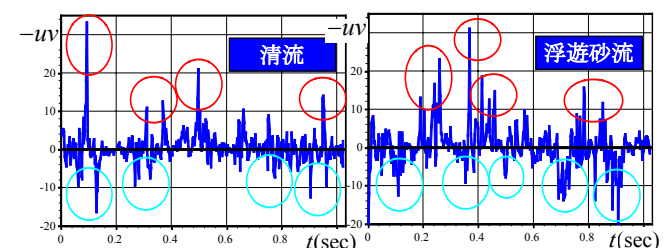


図-3 条件付き区分された瞬間レイノルズ応力の時系列分布

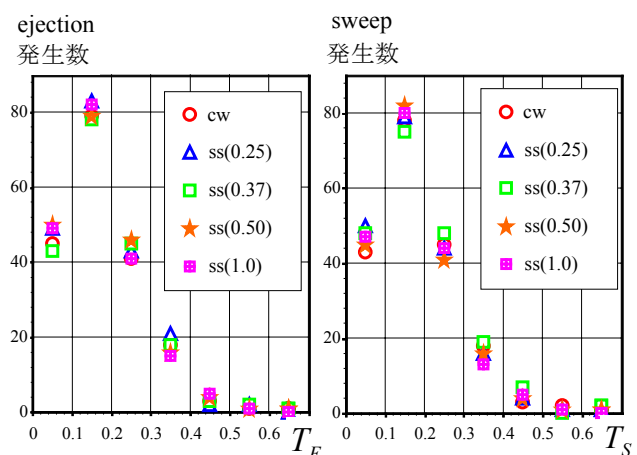


図-4 清流・浮遊砂流における **ejection・sweep** の発生頻度分布