

浮遊砂流れのバースト現象における 粒子運動メカニズムに関する研究

BURSTING PHENOMENA AND SEDIMENT-FLUX MOTION IN PARTICLE-LADEN OPEN-CHANNEL FLOW

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)

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)

The present study describes an experimental investigation on effects of ejection and sweep motions to the local sediment concentration and turbulence structure in suspended sediment-laden open-channel flows by using both of discriminator particle tracking velocimetry (D-PTV) and discriminator particle image velocimetry (D-PIV).

As the results, the local lift-up of sediment occurred in the ejection event, and the increase ratio of local sediment concentration is larger in the stronger ejection event. These tendencies became more remarkable as the size of sediment is larger. In addition, the increase ratio of local sediment concentration is larger in the particle of $\rho_p=1.5$ than $\rho_p=1.2$. This difference is caused by the particle traceability to the flow.

Key Words : *suspended sediment flows, bursting phenomena, sediment concentration, D-PIV, sediment flux*

1. はじめに

実河川における粒子の輸送メカニズムは、流れ・粒子の挙動・河床形状の3者が複雑に絡み合うため非常に複雑であり、それゆえ河川工学分野において最も重要な研究テーマのひとつである。このテーマは古くから研究されており、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いるが、流れと粒子挙動の相互作用については多くの未解明点が存在する。この理由は、流れの構造と粒子の挙動との関係についての詳細な考察には両者の同時計測が必須であり、これは計測機器の発達した近年までほとんど行われてこなかったためである。

Rashidi et al.(1990)¹⁾が浮遊砂流れの外層において粒子速度と比べて流体速度が高速であると指摘して以降、固相・液相間の相互作用の重要性が認識され、粒子・流体の同時計測が盛んに行われるようになった^{2,3)}。また、Kulick et al.(1994)⁴⁾の実験は固気混相流であるが、 $y^+=10$ 程度まで内層の同時計測を行った。

しかしながら、多くの浮遊砂流れの研究は粒子として砂(比重 $\rho_p=2.6$)やポリスチレン(比重 $\rho_p=1.05$)を用いており、これらの粒子ではいくつかの問題点が生じる。

すなわち、砂を使用すれば浮上する粒子数が少ないため粒子濃度の変化に関する評価が難しい。一方ポリスチレンでは比重が水に近いため、流体トレーサ的な挙動を示し、比重効果が期待されない可能性がある。そこで本研究では、比重 $\rho_p=1.2$ のポリエキストラ粒子、および $\rho_p=1.5$ のポリプラス粒子を使用し、その粒径・粒子濃度を系統的に変化させることで流れの組織構造と粒子の浮上・沈降に着目した。

なお本研究ではPIV計測という特徴を生かすため、流れの組織構造と局所的な粒子濃度の変化を可視化し、組織渦の移流に伴う粒子濃度の空間的局所変化についても考察を行った。このような瞬間的な時空間データは、ある瞬間の1現象を捉えたものであるが、これと統計量的考察とを比較検討することにより、流れの組織構造と粒子の挙動の関係についてより詳細な考察が可能になると考えられる。

2. 実験概要

(1) 実験装置および計測手法

水路および実験装置図を図-1に示す。 x 、 y および z は

表-1 水理条件

series 1.2 ($\rho_p=1.2$)	U_m (cm/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	U^* (cm/s)	d (mm)	$\bar{C}$ ($\times 10^{-4}$)	series 1.5 ($\rho_p=1.5$)	U_m (cm/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	U^* (cm/s)	d (mm)	$\bar{C}$ ($\times 10^{-4}$)
clear water	30.0	5	5	0.43	1.41	—	—	clear water	30.0	5	5	0.43	1.41	—	—
PE25-A					1.34	0.25	3.04	PP25-a					1.24	0.25	5.02
PE25-B					1.28		10.2	PP25-b					1.19		10.4
PE25-C					1.23		31.6	PP25-c					1.15		17.3
PE37-A					1.39	0.37	2.94	PP37-a					1.36	0.37	4.94
PE37-B					1.36		10.5	PP37-b					1.33		9.77
PE37-C					1.34		30.8	PP37-c					1.31		16.4
PE50-A					1.46	0.5	2.83	PP50-a					1.50	0.5	4.82
PE50-B					1.50		9.87	PP50-b					1.53		9.64
PE50-C					1.53		30.3	PP50-c					1.54		15.9
PE100-A					1.52	1.0	3.07	PP100-a					1.52	1.0	3.93
PE100-B					1.59		10.1	PP100-b					1.55		7.87
PE100-C					1.64		29.4	PP100-c					1.57		13.1

表-2 浮遊粒子・トレーサーの特性

Particle kind	Diameter (mm)	Specific density
polyextra	0.25	1.2
	0.37	
	0.5	
	1.0	
polypuls	0.25	1.5
	0.37	
	0.5	
	1.0	
Nylon-12	0.025	1.02

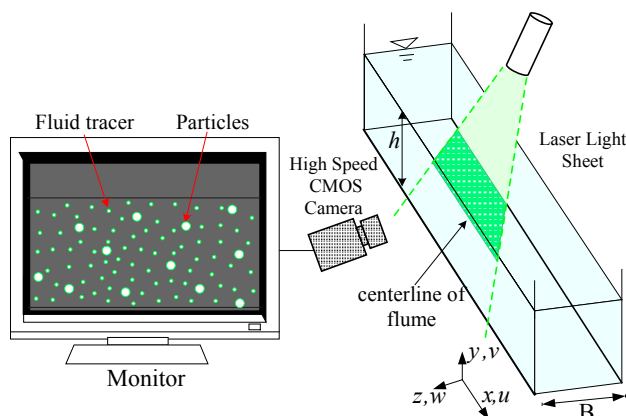
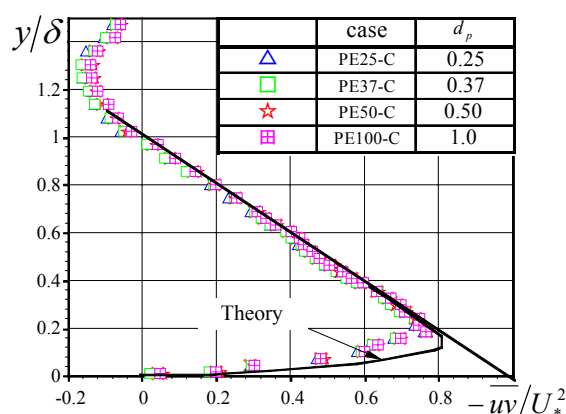


図-1 実験水路図

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。本実験で使用した水路は全長4m，幅5cmの亚克力製循環式直線水路である。水路中央を4mm厚のレーザーライトシート（LLS）で照射し，その断面に照らし出された浮遊粒子・トレーサーを水路側壁付近に設置された1280×1024ピクセルの高速度CMOSカメラによってx方向5.0cm幅を撮影した。時間間隔500Hzで2枚ペアの画像を取得し，それを100Hzごとにサンプリングした。

また表-2に示すように，浮遊粒子として最小粒径

図-2 レイノルズ応力分布と境界層厚 δ

$d_p=0.25\text{mm}$ の粒子($\rho_p=1.2$)を使用し，流体のトレーサーとして粒径0.025mmのナイロン12粒子($\rho=1.02$)を使用した。投影面積が80倍以上異なるため，粒子と流体の判別分離は容易であり，D-PIVおよびD-PTVによる判別分離法はすべてのケースにおいて良好に適用でき，粒子速度と流体速度の同時計測が可能であった。なお，本研究で用いたD-PIVおよびD-PTVの詳細は，文献5，6)を参照願いたい。

(2) 水理条件

表-1に水理条件を示した。ここで， $U_m=Q/Bh$ は断面平均流速， B は水路幅， h は平均水深， Fr はフルード数， U^* は摩擦速度， $\bar{C}$ は体積平均粒子濃度である。体積平均粒子濃度はLLSに照射された粒子数をカウントし，それが占める体積をLLS照射領域の流体体積で除したものである。

本研究の水理条件は断面平均流速 U_m を30cm/sで一定とし，清流を1ケース，浮遊砂流れを8ケース行った。浮遊粒子は2種類の比重($\rho_p=1.2, 1.5$)を用意し，各比重において粒径を $d_p=0.25, 0.37, 0.50, 1.0\text{mm}$ の4段階変化させた。また，粒子投入後，粒子濃度および流れ場が安定す

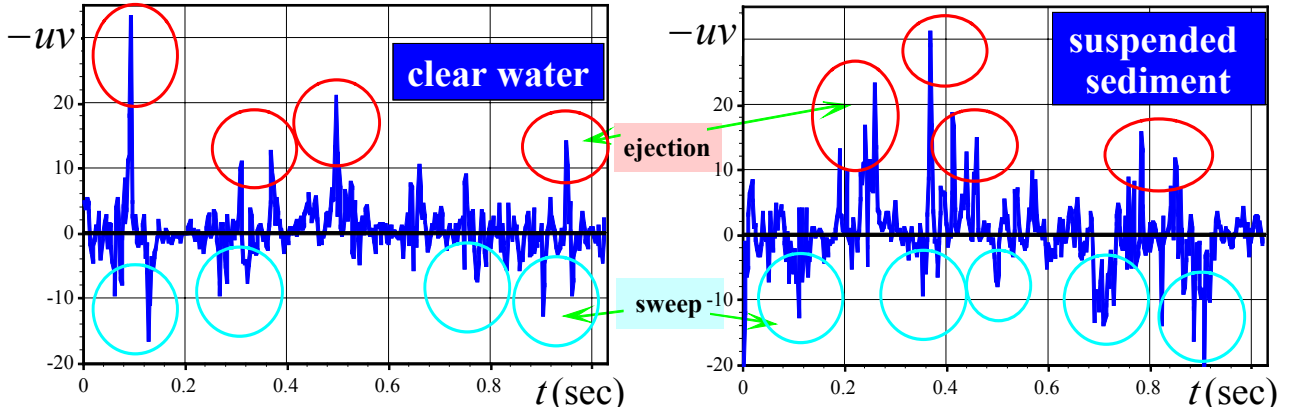


図-3 瞬間レイノルズ応力分布とEjection・Sweepの発生例

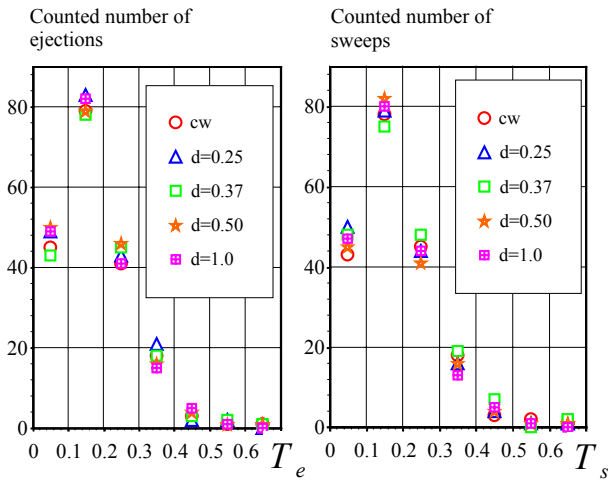


図-4 Ejection・Sweepの発生時間

るまで約1時間水流を循環させ、平衡に達した後に計測を行った。

本研究では、D-PIV、D-PTVにより粒子・流体の速度が同時に得られた。清流(clear water)、流体(fluid)、粒子(particles)の諸量にそれぞれ添字 $_{cw}$, $_{f}$, $_{p}$ を付加し区別する。例えば、 U_f は水流の平均流速を示す。

(3) 流れ場の2次元性の検証

浮遊砂流れを可視化する際、カメラとLLSとの間に大量の粒子が送流されるため、計測断面が前面の粒子に遮蔽され撮影が困難となり、エラーベクトルの増加につながる。そこで本研究では水路幅が小さいアクリル製水路($B=5\text{cm}$)を用いて計測を行った。その結果、2次流の影響により水面近くで最大流速が降下し、図-2に示すようにレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ が負になった。しかしながら、 $-\overline{uv}=0$ となる高さを δ ($=3.2\text{cm}$)とすると、 $y \leq \delta$ の領域で $-\overline{uv}$ はほぼ直線分布したため、 $y \leq \delta$ では2次元乱流が成立していると考えられる。

なお摩擦速度 U_* の算出方法は、外層($y/h > 0.2$)におけるレイノルズ応力の直線分布を使用する方法が多く、研究者によって採用されている。よって本研究でもこの評価法を用い、算出された U_* の値を表-1に示した。

3. 実験結果及び考察

(1) EjectionおよびSweepの発生頻度

流体の瞬間レイノルズ応力 $w(t) \equiv -u_f(t)v_f(t)$ は、Ejection・Sweep発生時に大きな値をもつことが知られている⁷⁾。本研究では、Ejection・Sweep両者の瞬間レイノルズ応力を区別するため、以下のような操作を行った。

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

この手法により、 $w(t)$ はEjection発生時に大きな正値をもち、Sweep発生時には大きな負値をもつ。

図-3は上記の手法によって算出された $y^+=50$ の点における時系列データである。図より瞬間レイノルズ応力分布を用いてEjectionとSweepが確実に区別されていることが確認できる。この図を元にEjectionの発生時間 T_e と、Sweepの発生時間 T_s が算出された。ここで、Inward-outward interactions, またPIVデータのホール(Hole)ノイズを除去するため、閾値を $H=1$ と設定した。すなわち、瞬間レイノルズ応力 $w(t)$ が $H \cdot u'_{cw} v'_{cw}$ より大きいときのみEjectionやSweepとしてカウントされる。

図-4にEjection・Sweepの発生時間を示す。縦軸はEjection・Sweepの発生数、横軸は発生間隔である。図より、粒子を伴うことによる発生間隔の大きな変化は特に見られなかった。また、清流・浮遊砂流におけるEjection・Sweepの平均発生間隔は次のように求められた。

$$\bar{T}_e U_{\max}/h = 1.83, \quad \bar{T}_s U_{\max}/h = 1.85 \quad (2)$$

この結果はNezu & Nakagawa (1993)⁷⁾によって開水路乱流で求められた以下の式と非常に良く一致した。

$$\frac{\bar{T}_e U_{\max}}{h} \approx \frac{\bar{T}_s U_{\max}}{h} = (1.5 - 3.0) \quad (3)$$

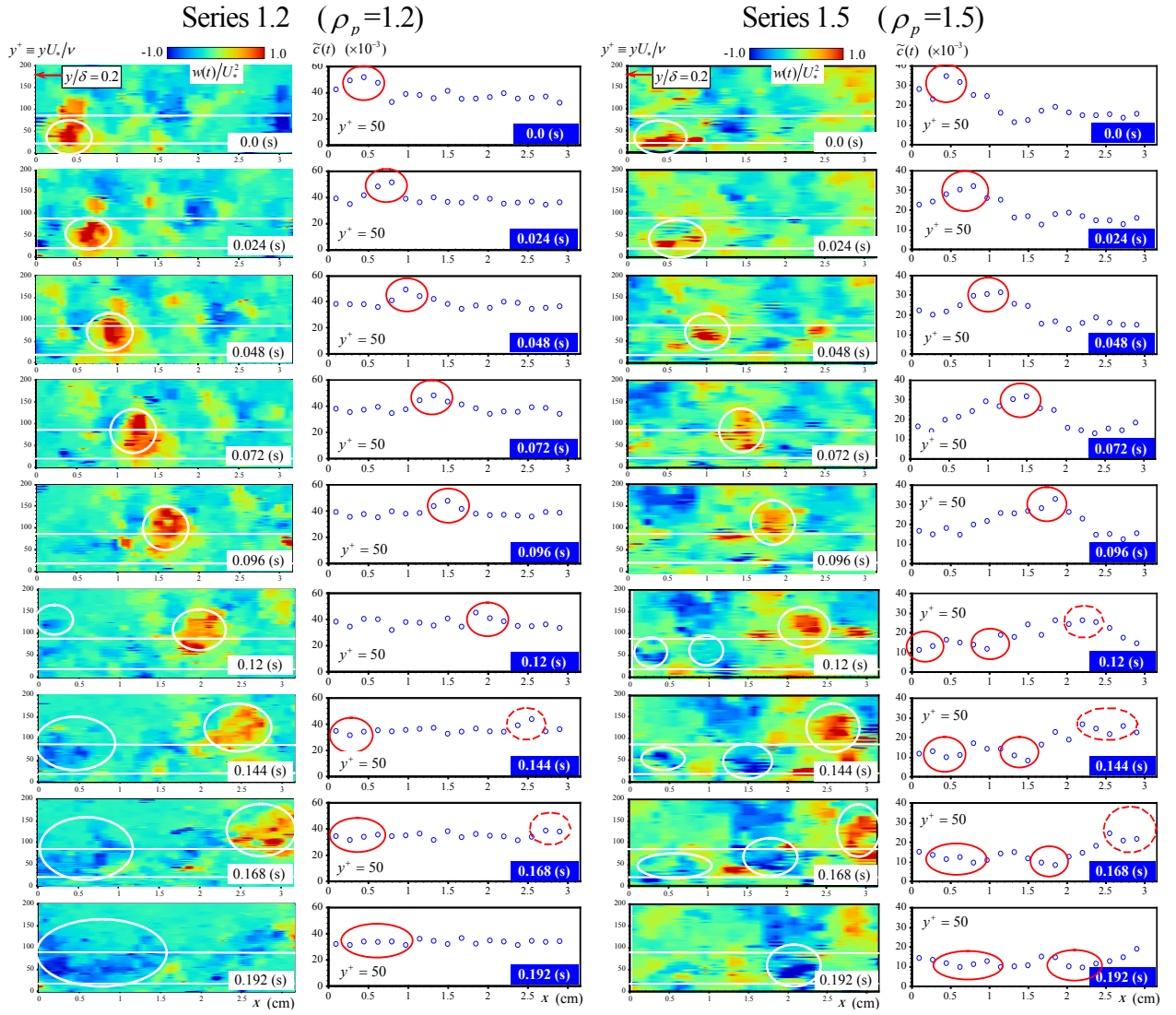


図-5 EjectionおよびSweep発生時の瞬間レイノルズ応力分布と瞬間粒子濃度分布

(2) EjectionおよびSweep発生時の粒子濃度変化

図-5は2種類の粒子($\rho_p=1.2, 1.5, d_p=0.25\text{mm}$)におけるEjection・Sweep発生時の瞬間レイノルズ応力 $w(t)$ のコンターと、コンター図内の白枠部付近($y^+=50$)の瞬間粒子濃度分布を併示したものである。これらの粒子濃度は水平方向4mm、鉛直方向1.5mmのメッシュ内に存在する粒子数から算出された。なお、各図の時間ステップは0.024秒、両図のx方向スケールは一致している。Series1.5に関する時間平均粒子濃度分布は前報を参照願いたい。

図-5のコンター図はseries1.2, series1.5ともにある空間におけるEjectionの発生と移流、その後のSweepの流入をとらえたものであり、Ejection・Sweepの領域を白色のサークルで示した。併示した粒子濃度分布においてEjection・Sweepの領域を赤色のサークルで示した結果、Ejection発生時には粒子濃度が周囲流体よりも増加し、逆にSweep発生時には減少することが確認された。また、 $\rho_p=1.2$ のケースと $\rho_p=1.5$ のケースで比較した結果、比

重の大きい $\rho_p=1.5$ のケースのほうが周囲流体からの増減が大きいことが確認された。粒子濃度変化の割合は、 $\rho_p=1.2$ のケースではEjection時に20~30%増、Sweep時に10%減、一方 $\rho_p=1.5$ のケースではEjection時に30~40%増、Sweep時に約40%減であった。これは、比重が小さな粒子ではEjectionのような強い上昇流発生時以外でも粒子の浮上が比較的活発であるため、Ejection・Sweep時の濃度変化の割合が小さくなったと考えられる。

(3) 粒子濃度変化とEjection・Sweep強度

Ejection・Sweepの強度と粒子濃度についてより詳細に考察を行うため、ゾーン平均された粒子濃度 C_H を以下のように定義した。

$$C_H \equiv \frac{1}{T_H} \int_{T_H} \tilde{c}(t) dt \quad (6)$$

ここで $\tilde{c}(t)$ は瞬間粒子濃度、 T_H はある閾値 H におけるEjection・Sweepの継続時間である。本研究では、閾値 H

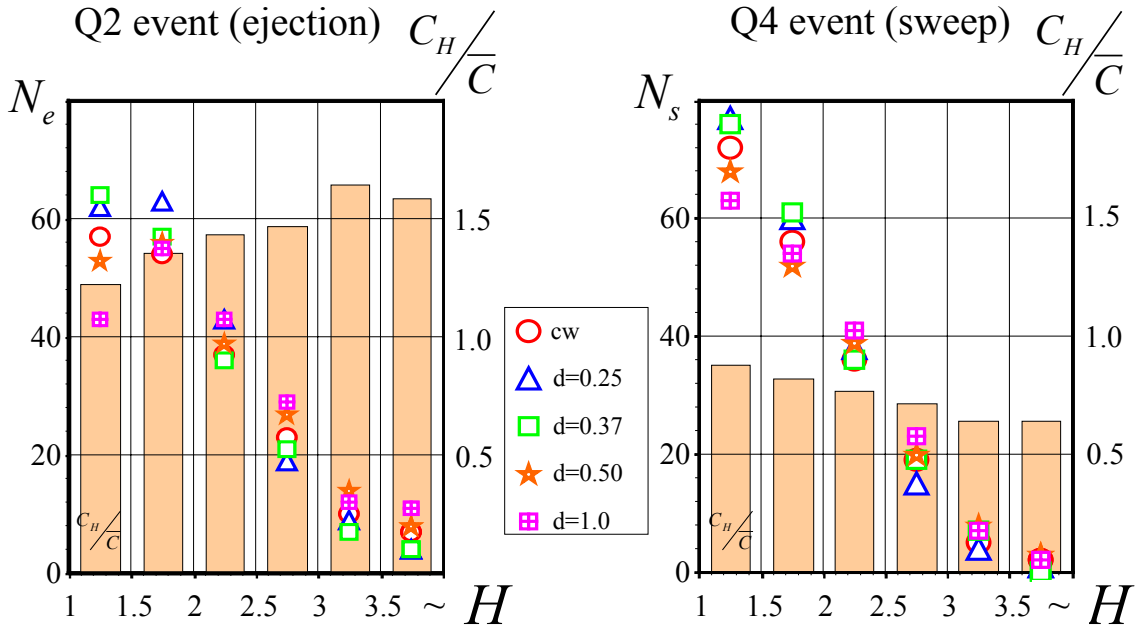


図-6 ゾーン平均された粒子濃度 C_H と Ejection・Sweep の発生数 (N_e , N_s)

を0.5間隔で設定した。

図-6の棒グラフは各閾値 H における粒子濃度の変化率 $C_H/\bar{C}$ を示す。また、図-6のプロットは各閾値 H における Ejection・Sweep の発生数である。図より強度の大きな Ejection・Sweep において粒子濃度の変化率が大きいことが確認された。この傾向は、Breugem & Uijttewaai(2006)⁸⁾によって示唆されている。また、粒径 $d_p=0.25\text{mm}$ のケースと比較して、 $d_p=1.0\text{mm}$ のケースでは強度の高い Ejection・Sweep が若干多い結果となった。これは、大粒径の粒子では清流と比較して乱れ強度やレイノルズ応力が増大する特性⁹⁾と一致する。

(4) 4象限区分された粒子フラックス $\overline{cv}(y)$

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象限区分された粒子フラックス $\overline{cv}(y)$ を算出し、図-7に示した。

図-7に見られるように、粒子フラックスが最も大きい正值を持ったのは Ejection(Q2)であり、次に Sweep(Q4)であった。これらは上昇流($v>0$)発生時に粒子濃度が増加し、下降流($v<0$)発生時に粒子濃度が減少したことを意味し、図-5の瞬間可視化データとよく一致した。なお、Inward-outward interactions(Q1, Q3)についてはほぼ0付近に分布する結果となった。これらの特性は Cellino & Lemmin (2004)¹⁰⁾のデータと非常に良く一致した。

この結果は Ejection・Sweep が粒子の浮上・降下に大きな影響を及ぼすことを示している。また、この結果から Ejection 時の粒子濃度変化が Sweep 時よりも大きいことがわかる。さらに、粒子フラックスにおける粒径効果およ

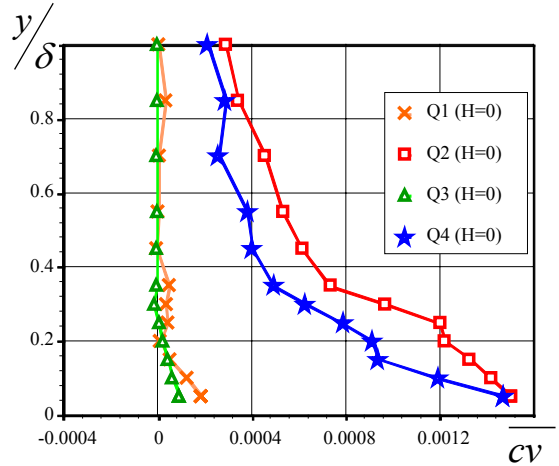


図-7 4象限区分された粒子フラックス

び粒子比重効果を考察するため、Ejection(Q2)・Sweep(Q4)それぞれの無次元化された粒子フラックス ($\overline{cv}(y)_{Q2}/\bar{C}U_*$, $\overline{cv}(y)_{Q4}/\bar{C}U_*$) を算出し、比較検討を行った。

図-8に Ejection 時の粒子フラックスを示す。図より、粒子濃度と上昇流の相関が最大のケースは $d_p=0.25\text{mm}$ 、最小のケースは $d_p=1.0\text{mm}$ であり、比重の違いによる差はほとんど見られなかった。この結果から、粒子の浮上においては比重よりも粒径の効果が大きいことがわかる。

同様に図-9に Sweep 時の粒子フラックスを示したが、傾向はほぼ同じであった。すなわち、 $d_p=0.25\text{mm}$ のケースで相関が大きく、 $d_p=1.0\text{mm}$ で相関が小さい結果となった。しかしながら、Ejection 時と比較して比重の効果が大きく表れており、比重が大きい粒子において相関が増大した。これは比重の大きな粒子は降下しやすく、

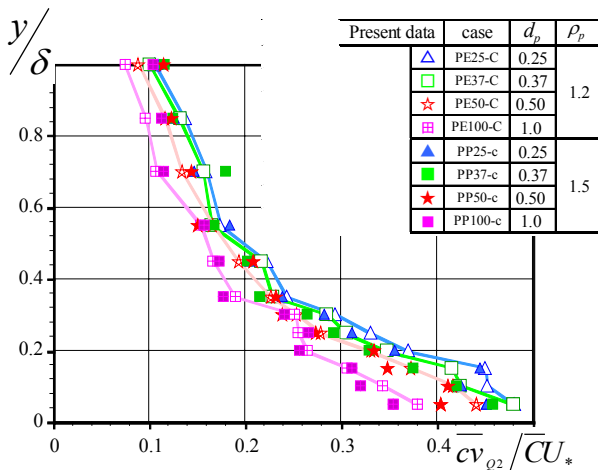


図-8 無次元化された粒子フラックス(Ejection)

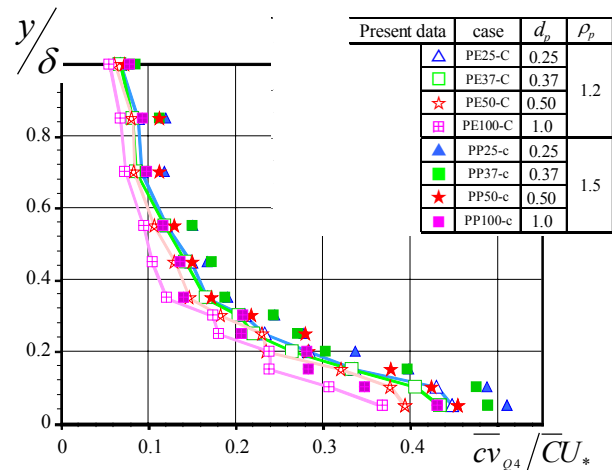


図-9 無次元化された粒子フラックス(Sweep)

下降流に追従しやすいためであると考えられる。

4. おわりに

本研究はD-PIV/PTV計測を使用し、開水路等流におけるバースト現象(Ejection・Sweep)発生時の浮遊粒子の浮上・降下に関して、粒子濃度の局所的な変化・粒子フラックスから考察したものである。得られた主要な成果は以下である。

- 1) 瞬間レイノルズ応力 $w(t)$ 分布からEjection・Sweepの抽出を行い、発生頻度分布を求めた結果、Nezu & Nakagawa(1993)⁷⁾が示したejection・sweepの平均発生周期の式とよく一致した。また両者の発生頻度分布は、対数正規に似た分布形状となった。
- 2) Ejection・Sweep発生時の瞬間レイノルズ応力 $w(t)$ の空間分布と粒子濃度の局所変化の同時計測を行い、Ejectionにより底面付近の粒子が浮上し、Sweepにより外層の低粒子濃度塊が降下する様子が可視化された。また、比重の大きい粒子の方が粒子濃度の変化率が大きい結果となった。
- 3) Ejection・Sweepの強度と粒子濃度の変化率の関係が示され、粒子の浮上には高強度のEjectionが大きな影響を及ぼしていることが示された。また、粒径 $d_p=0.25\text{mm}$ のケースと比較して、 $d_p=1.0\text{mm}$ のケースでは強度の高いEjection・Sweepが若干多い結果となった。
- 4) 4象限区分された粒子フラックス $\overline{cv}(y)$ を算出し、 $\overline{cv}(y)_{Q2}/\overline{CU}_* > \overline{cv}(y)_{Q4}/\overline{CU}_*$ が示された。この傾向はCellino & Lemmin(2004)¹⁰⁾のデータと非常に良く一致した。さらに、Q2・Q4ともに $d_p=0.25\text{mm}$ のケースで相関が大きく、 $d_p=1.0\text{mm}$ で相関が小さい結果となった。さらにQ4では、比重の大きい粒子において相関が増大した。

参考文献

- 1) Rashidi, M., Hetsroni, G., and Banerjee, S. (1990) : Particle-turbulence interaction in a boundary layer, Int. J. Multiphase Flow, vol.16, pp.935-949
- 2) Kaftori, G., Hetsroni, G., and Banerjee, S. (1995) : Particle behavior in the turbulent boundary layer. II. Velocity and distribution profiles, Phys. Fluids, vol.7, pp.1107-1127.
- 3) Kaftori, G., Hetsroni, G., and Banerjee, S. (1998) : The effect of particles on wall turbulence, Int. J. Multiphase Flow, vol.24, pp.359-386
- 4) Kulick, J. D., Fessler, J. R., and Eaton, J. K. (1994) : Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow, J. Fluid Mech., vol.177, pp.133-166.
- 5) 瀬津家久, 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.
- 6) Nezu, I. and Azuma, R. (2004) : Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open-channel flows, J. Hydraulic Eng, ASCE, vol.130, pp.988-1001.
- 7) Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993) : Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- 8) Breugem, W. A., and Uijttewaalt, W. S. J. (2006) : A PIV/PTV experiment on sediment transport in a horizontal open channel flow, River Flow 2006, Proc., 3rd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, pp.789-798.
- 9) 野口和則, 瀬津家久, 山上路生 (2008) : 浮遊砂流れにおける乱流変動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.
- 10) Cellino, M., and Lemmin, U. (2004) : Influence of coherent flow structures on the dynamics of suspended sediment transport in open-channel flow, J. Hydraulic Eng, ASCE, vol.130, pp.1077-1088.

(2008. 9. 30受付)