

第 部門 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

京都大学 学生員 中島与博
 フェロー 禰津家久
 学生員 野口和則

1. 緒言

浮遊粒子を含む開水路流れに関する研究は以前から数多く行われてきたが、粒子・流体間の相互作用については粒子・流体の同時計測による研究が行われ始めてから間もないため、あまり解明されていない。本研究では粒子投影面積判別手法(D-PTV¹⁾)およびそれを改良した D-PIV²⁾を用いて粒子速度と流体速度の同時計測を行い、粒径や粒子濃度を变化させることで粒子・流体間の相互作用による乱流変調について研究した。

2. 実験方法と水理条件

本実験で使用した水路は、長さ 4m、幅 5cm のアクリル製小型循環式直線水路である。計測区間は流れが十分に発達したと考えられる水路上流から 2.8m 下流の地点に設定され、その有効性はすでに検証されている。¹⁾

計測は画像撮影によって行われ、図-1 に示したように水路上部から 4mm 厚の LLS(出力 2W)によってトレーサーと粒子を照射し、それらを水路側壁付近に設置された CMOS カメラを用いて撮影を行い、1/100s のサンプリング間隔で 1280 × 1024 ピクセルのフレーム画像を時間間隔 Δt=1/500s で 2 枚ずつ記録した。時間差 Δt の 2 画像を用いて瞬間流速の算出を行った。瞬間流速の算出方法として D-PIV 解析と D-PTV 解析の 2 手法を併用した。すなわち、D-PIV では画像上で粒子画像を除去したトレーサーのみの画像データによって流体の瞬間流速を算出し、一方で D-PTV では、トレーサー画像を除去した粒子のみの画像データによって、粒子の瞬間流速を算出した。なお、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、浮遊粒子として比重 1.2 のポリエキストラ粒子を用いた。その粒径を 4 種類(d_p=0.25, 0.37, 0.50, 1.0mm)変化させ、粒子濃度も系統的に 3 段階変化させた。水理条件を表-1 に示す。

3. 実験結果および考察

各粒径の体積平均粒子濃度 $\bar{C} = 3.0 \times 10^{-3}$ のケースに関して流下方向および鉛直方向の流体の乱れ強度分布を求めたところ、図 2 のように $y/h < 0.6$ の領域で、 $d_p=0.50, 1.0\text{mm}$ のケースにおいては清流ケース($\bar{C} \equiv 0$)に比べて増幅されたが、逆に $d_p=0.25, 0.37\text{mm}$ のケースにおいては減衰した。重力効果のない鉛直管の固液混相流における既往研究では Kolmogoroff スケール を境に乱れ強度の増減が逆転することが指摘されている³⁾。そこで、式(1)を用いて Kolmogoroff スケール をスペクトル分布(図 3)から算出された から求めたところ、 $\lambda = 0.413\text{mm}$ であった。一方、本実験の乱流変調、すなわち浮遊砂流れの乱れ強度と清流の乱れ強度の

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, \quad \varepsilon = \frac{2\pi}{U} \left(\frac{1}{C} f^{5/3} S_u(f) \right)^{3/2} \quad (1)$$

表 1 水理条件

series30	d (mm)	\bar{C} ($\times 10^{-3}$)	U_m (cm/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	U_* (cm/s)
c3-clear	-	-	30	5	5	0.43	1.41
c3-25-1	0.25	0.304					1.34
c3-25-2		1.02					1.28
c3-25-3		3.16					1.23
c3-37-1		0.294					1.39
c3-37-2	0.37	1.05					1.36
c3-37-3		3.08					1.34
c3-50-1		0.283					1.46
c3-50-2	0.5	0.987					1.50
c3-50-3		3.03					1.53
c3-100-1		0.307					1.52
c3-100-2	1.0	1.01					1.59
c3-100-3		2.94					1.64

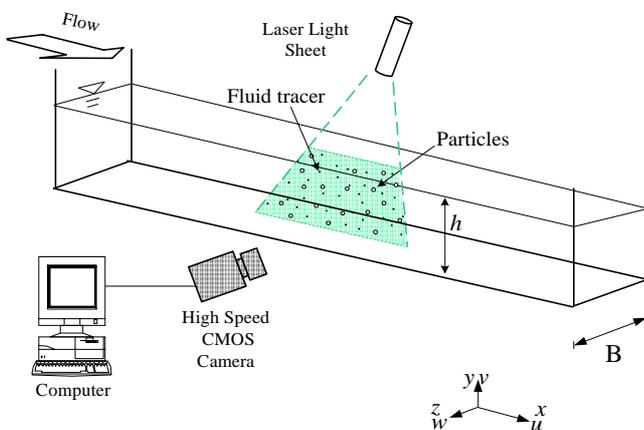


図 1 実験装置図

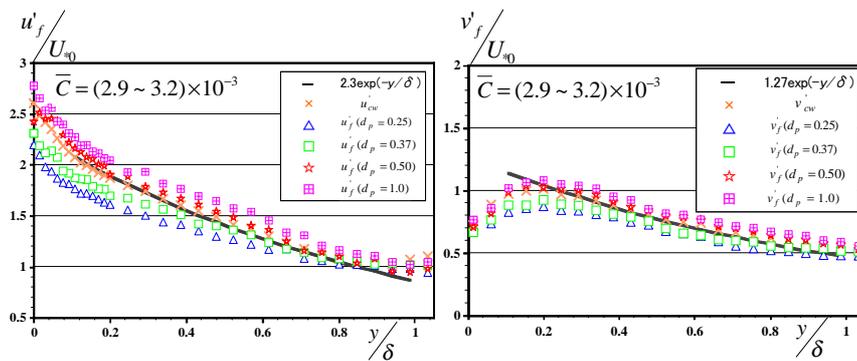


図2 乱れ強度分布

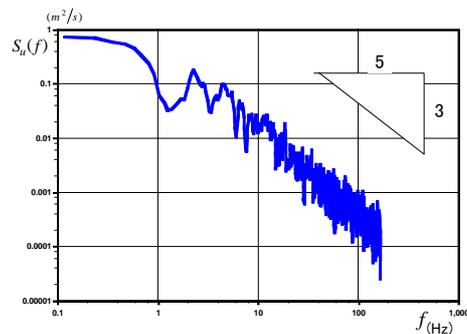


図3 スペクトル分布

比(u'_f/u'_{cw})と粒径 d_p の関係をプロットしたものを図4に示す。乱流変動の増幅・減衰が逆転する粒径を各粒子濃度について実験的に求めたところ全ケースとも $d_p = 0.44\text{mm}$ となり、両者は非常に良く一致した。したがって開水路流れにおいても Kolmogoroff スケールを用いて乱流変動を区分することは妥当と考えられる。

次に粒子濃度 \bar{C} と内層($0.05 < y/\delta < 0.2$)における平均乱流変動について、粒子の粒径ごとに図5に示した。どの粒径ケースにおいても \bar{C} が大きくなるにつれて乱流変動が大きくなった。これは、粒子数が増加することで粒子と流体との相互作用が活発になり、乱流変動が顕著に現れたものであると考えられる。さらに、野口ら(2007)⁴⁾の $\rho = 1.5$ のケースのデータを併示し比較した結果、どの粒径ケースについても粒子の比重が大きいケースにおいて乱流変動が大きくなった。これは、粒子が重くなることにより粒子の慣性力が大きくなり、粒子の流体への追従性が小さくなったため粒子・流体間の相互作用が活発になったものと考えられる。さらに、横軸を対数表示するとどの粒径ケースも直線分布を示すという非常に興味深い結果が得られ、今後、この理論展開をしていきたい。

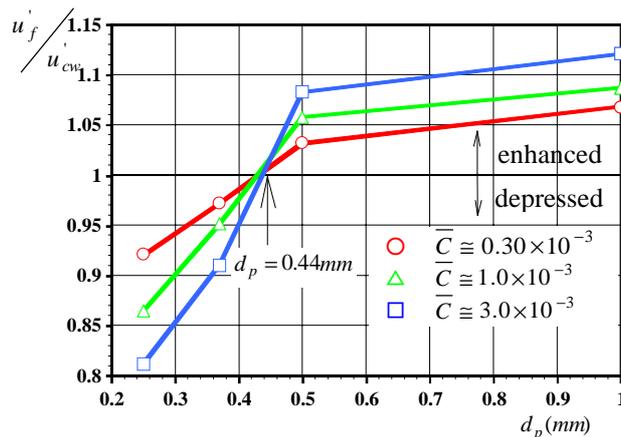


図4 粒径と乱流変動の関係

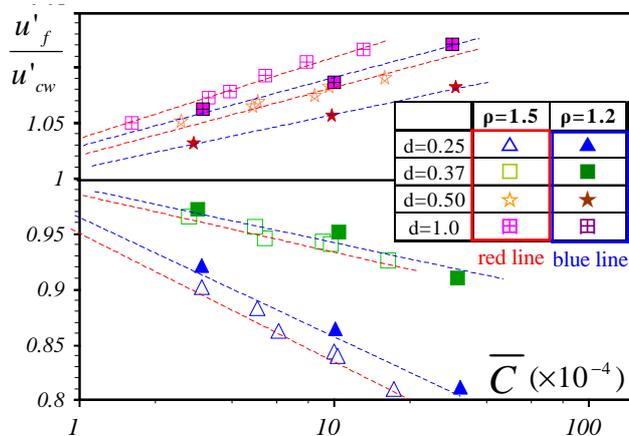


図5 粒子濃度と乱流変動の関係

4. おわりに

本研究では PIV および PTV を用いて粒子・流体の同時計測を行い、粒径や粒子濃度の変化に伴う粒子・流体間の相互作用による乱流変動への影響を時間平均的な観点から考察した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 禰津家久・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) 瀧口智志, 梶尾岳夫, 三宅裕(2000) : "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.
- 4) 野口和則・禰津家久・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.