

1. はじめに 粒子を伴う流れを対象とする研究は、土木工学や機械工学などの分野において精力的になされてきた。しかし、計測が困難であるために粒子と流体を同時計測し、相互作用を定量的に評価した実験結果はあまりない。特に、土木工学では流砂とその周囲流体の挙動を把握することが望まれているが、この計測はかなり困難である。そこで本研究では、流砂機構を解明する第一歩として、比重が 1.05 のポリスチレン粒子を含む開水路流れにおいて、スプリングモデルを用いた PTV 法により粒子と流体を同時計測し、両者間の相互作用について検討した。

2. 実験装置および実験条件 実験条件を表-1 に示す。ケース名における PS はポリスチレンを意味し、数字は中央粒径を表している。N1 は粒子を伴わない流れ、すなわち清流である。ここで、 d_{50} は中央粒径、 ρ_p は粒子の密度、 B は水路幅、 h は水深、 $Re = U_m h / \nu$ はレイノルズ数、 $Fr = U_m / \sqrt{gh}$ はフルード数、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度、 U_m は断面平均流速である。レーザー光線をシリンドリカルレンズによって厚さ 2mm のシート状にした後、水路底面から鉛直方向に照射した。このとき映し出された画像を CCD カメラによって撮影し、スプリングモデルを用いた PTV 法(Particle Tracking Velocimetry)によって流体(粒径が 0.1mm で比重が 1.03 のトレーサー)およびポリスチレン粒子の速度追跡が行われた。計測断面における粒子体積濃度は約 0.3% であった。計測時間はすべてのケースにおいて 60s である。対象とした粒子は比重が 1.05、中央粒径 $d_{50} = 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.3\text{mm}$ の 5 種類の球形ポリスチレン粒子である。粒子の諸量については添字 p を付加して表示する。なお、実験装置の詳細については文献 1) を参照されたい。

3. 実験結果および考察 スプリングモデルによる粒子追跡法の精度について瀬津ら¹⁾によって検証されている。図-1 に液相および固相の時間平均速度分布を示した。固相の速度分布も流体と同様に対数則(図中に記載した式)に従っていることが確認できる。

これは、本実験では比重が水に近い(比重=1.05)ポリスチレン粒子を用いたため、流体への追従が比較的良好と考えられる。そのため、流速分布の形状が流体のそれと類似している。同図では、粒子の方が流体より若干速度が小さいことが分かるが、明確にはその速度差が定量把握できない。そこで、図-2 に粒子と流体の速度比 U_p/U を示した。同図より粒子と流体との間で相対速度が生じており、底面付近を除くと粒子の方が流体よりも速度が小さいことがわかる。また、粒径が大きくなるにつれて、流体との速度差が大きくなることが確認できる。比重が同じであっても粒径の大きい粒子は質量が大きくなるので慣性力も大きくなり、流体の挙動に追従できなくなるためと考えられる。一方、底面付近($y^+ < 20$)では粒子の方が流体よりも大きな値をもつことがある。これは、下降粒子が底面付近に突入する際に慣性力を有しているから高運動

表-1 水理条件

Case	d_{50} (mm)	ρ_p	B (cm)	h (cm)	Re $\times 10^4$	Fr
PS03	0.3	1.05	15.0	5.0	1.01	0.35
PS05	0.5				1.05	0.36
PS08	0.8				1.07	0.37
PS10	1.0				1.06	0.36
PS13	1.3				1.09	0.37
N1	0.1	1.02			1.15	0.40

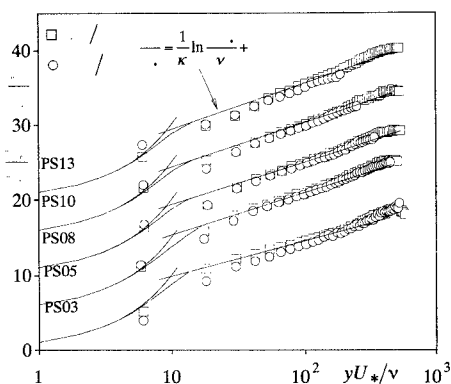


図-1 時間平均速度分布

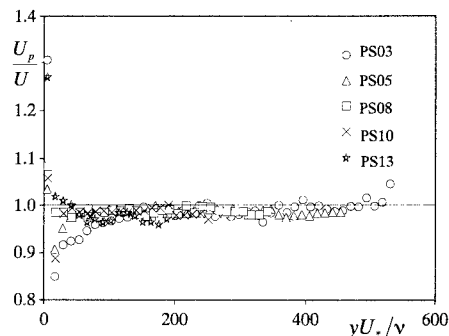


図-2 固相と液相の速度比

量を保っているのに対し、粘性が効く層（粘性底層）では流体がより低速になるためと考えられる。この結果は Kulick *et al.*²⁾や Best *et al.*³⁾の実験結果と一致する。

図-3 は、固相および液相の流下方向速度変動の RMS 値（乱れ強度）と鉛直方向速度変動の RMS 値の比を示したものである。図中の右下がりの曲線は清流の開水路乱流で成立する禰津⁴⁾の普遍関数式である。底面付近を除くと、粒子の値の方が流体よりも小さく 1 に近いので、粒子の方が流体よりも等方化指向が強いと考えられる。壁面乱れは一般に異方性であり、流下方向乱れ強度 u' は鉛直方向乱れ強度 v' の約 2 倍の値となる。一方、粒子は固体であるため流下方向の変動強度を鉛直あるいは横断方向への変動に変化しやすいと推察される。また、同図より、底面付近では粒子のほうがより大きな値となっていることが観察される。これは壁面による鉛直乱れのダンピングの影響を、流体よりも粒子の方が大きく受けるためと考えられ、今後、詳細に検討する必要がある。

流体における条件付きレイノルズ応力は第 2, 第 4 象限でそれぞれ RS2（イジェクション）および RS4（スウィープ）と呼ぶ。同様に、条件付き粒子レイノルズ応力をそれぞれ $-\overline{u_p v_p}$ (RS2) ($u_p < 0, v_p > 0$), $-\overline{u_p v_p}$ (RS4) ($u_p > 0, v_p < 0$) と記述する。図-4 は、第 2 象限における粒子と第 4 象限における粒子とのレイノルズ応力の比 $-\overline{u_p v_p}$ (RS4) / $-\overline{u_p v_p}$ (RS2) を表したものである。同図より、底面近傍ではスウィープの寄与が支配的であり、その領域より上層ではスウィープよりイジェクションの寄与の方が大きいことや、粒径が大きくなるにつれて応力比が 1 に近づくことがわかる。すなわち、粒径が大きくなるにつれてスウィープの寄与が相対的に増加していることを示している。これは、粒径の増加に伴い粒子に作用する質量の影響が増加するためと考えられる。ところで、Nezu *et al.*⁵⁾はレーザ流速計を用いて比重が 2.6 という本研究が対象とした粒子よりもはるかに重い粒子（砂粒子）を含んだ掃流砂の開水路乱流を計測し、イジェクションよりもスウィープの方がより寄与が大きいことを示した。これは本研究の特性と一致せず、比重の影響や乱れスケールの変調と考えられる。

4. おわりに 本研究は、比重が 1.05 のポリスチレン粒子を伴う開水路乱流をスプリングモデルを用いた PTV 法により計測し、粒子と周辺流体の同時計測を行ったものである。底面付近においてスウィープの寄与が大きいこと、それより上層ではイジェクションの寄与が卓越することなどが明らかとなった。固相の比重を 1~2 と変化させ、固液混相流のメカニズムを詳細に解明していきたい。

参考文献

- 1) 禰津家久, 鬼束幸樹, 東良慶, 田中亮輔: スプリングモデルを用いた PTV 法による開水路流れ粒子・流体混相流の乱流計測, 平成 13 年度土木学会関西支部年次学術講演会, II, 2002 (印刷中) .
- 2) Kulick, J.D., Fessler, J.R. and Eaton, J.K.: *J. Fluid Mech.* Vol.277, pp.109-134, 1994.
- 3) Best, J., Bennett, S., Bridge, J. and Leeder, M.: *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol.123, No.12, pp.1118-1129, 1997.
- 4) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *IAHR-Monograph*, Belkema, Netherlands, 1993.
- 5) Nezu, I., Onitsuka, K. and Azuma, R.: *Proc. of 3rd Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows*, in CD-ROM, Fukui, Japan, 2001.

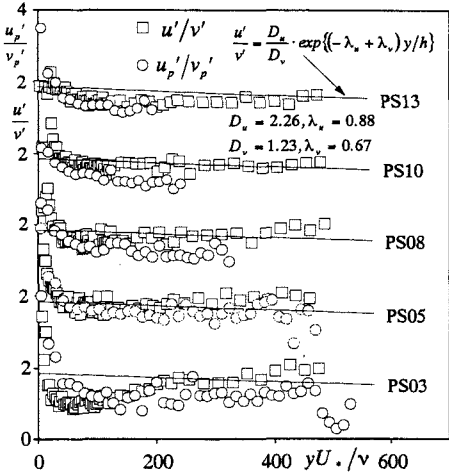


図-3 速度変動 RMS 値の比

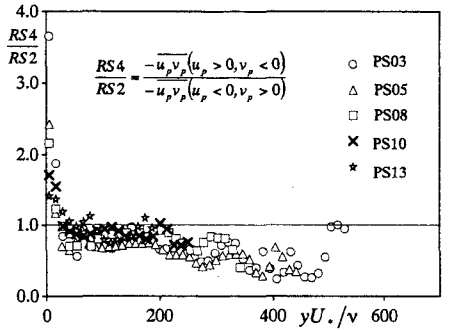


図-4 条件付レイノルズ応力分布