

1. はじめに 清水流の開水路等流に関しては、その乱流構造がほぼ解明されつつある。一方、粒子を伴う流れの乱流構造に関しては、計測技術が確立しておらず、研究者らによって様々な試みが数値力学的および実験的に行われてきた。数値計算においては、最近、研究成果が多く報告されているが、粒子と流体を同時計測した実験的研究成果はあまり報告されていない。

そこで本研究では、滑面開水路の壁面領域における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 (poly-styrene) を、PM は PMMA/PS (poly-methyl methacrylate/polystyrene) を意味し、比重がそれぞれ 1.05 および 1.15 の球形粒子である。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、 $\bar{C}_v$ は $y < 1.75\text{cm}$ における粒子体積濃度 C_v の空間平均値である。PS および PM シリーズとはほぼ同様な水力条件で、対象粒子を含まない清水流を設定し、それぞれ Case NS, NM とした。表-2 に Case NS, NM の水力条件を示す。ここで、 U_m は断面平均流速、 $Re = U_m h / \nu$ 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 は重力加速度である。

測定方法は、レーザー光線をシリンダ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 1.02 のトレーサー) および固体粒子の速度追跡が行った。本研究では粘性底層を含む底面近傍を対象としたため、水深が 5cm の流れに対し、撮影領域は底面から約 2cm 四方とした。この場合、1 ピクセルは 0.0303mm (1/33mm) に相当する。計測時間はすべてのケースにおいて 60s 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、本研究の測定方法である PTV のスプリングモデルを用いた粒子追跡法の精度については、瀬津ら¹⁾によって検証され、主流速分布、乱れの 1 次相関および 2 次相関を議論する上で十分な精度を有していることが示されている。

3. 実験結果および考察 図-1 に粒子および流体の主流速分布を示した。同図には、粒径 0.28mm および 0.9mm のポリスチレン粒子が浮遊した開水路流を LDA 計測した Kaftori *et al.*²⁾の結果を PS05, PS08 のグラフに併示した。粒子を含む流れにおいて、カルマン定数の普遍特性が成立するかどうかは現在のところ明確ではない。バッファー層 ($y^+ \geq 20$) より上部の対数則領域では、流速分布 U が対数則にフィットしていることから、本実験のような低濃度の条件下では $\kappa = 0.41$ の普遍定数と考えてよい。粒子の速度分布も流体と同様に対数則に従っていることが確認できる。

表-1 混相流の水力条件

Case	d_{50} (mm)	ρ_p (g/cm ³)	B (cm)	h (cm)	$\bar{C}_v$ (%)
PS05	0.5	1.05	15.0	5.0	0.9
PS08	0.8	1.05			2.5
PM0	0.5	1.15			0.9
PM0	0.8	1.15			2.9

表-2 清水流の水力条件

Case	h (cm)	U_m (cm/s)	U_* (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr
NS	5.0	24.6	1.32	1.40	0.35
NM		50.0	2.33	2.83	0.71

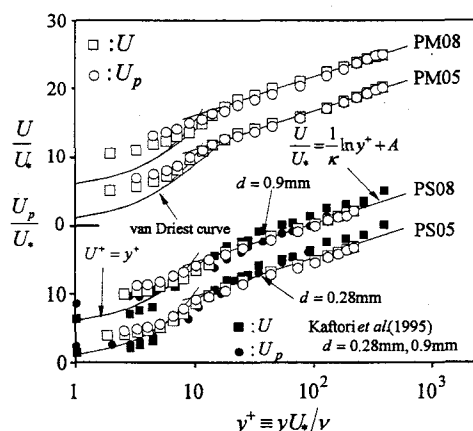


図-1 混相流の主流速分布

図-1 では粒子と流体の速度の相違が判別しにくいので、図-2 に両者の速度差を示した。およそ $y^+ \geq 20$ 領域では粒子速度が水流速よりも低速となっている。粒径の増加に伴い速度差が増加していることが観察され、Kaftori *et al.*の結果と一致し、注目される。さらに、同粒径の PS, PM シリーズの結果を比較すると、比重の増加に伴い速度差が増加していることがわかる。したがって、外層では粒子の方が流体よりも速度が小さく、その速度差は粒径および比重の増加に伴い顕著となることがわかった。一方、壁面近傍の $y^+ \leq 20$ では、粒子速度の方が水流速よりも高速となっており注目される結果である。また、粒子径および粒子比重の増加に伴い、両者の速度差が顕著となっている。これは、下降粒子が底面近傍に突入する際に粒径、粒子比重が大きい粒子ほど、大きな慣性力を有し、高運動量を保持しているからと考えられる。粘性底層における流速分布が $U^+ = y^+$ よりも高速側にシフトした理由として、この領域では粒子が流体に運動量を与えていることが考えられる。

一般に、流体のバースト運動は流下方向および鉛直方向の速度変動成分により4象限区分して解析できる。第2象限 (RS2) のイジェクションは低運動量を上方に輸送する運動で、第4象限 (RS4) のスイープは高運動量を下方に輸送する運動である。これと同様に粒子の運動に関しても、第2および第4象限の条件付き相関値をそれぞれ $(RS2)_p$ 、 $(RS4)_p$ と定義した。

図-3 は、粒子運動の第2象限および第4象限における相関値の比 $(RS4)_p / (RS2)_p$ を表したものである。この図から全ケースにおいて、 $y^+ \geq 20$ においてはイジェクションの方がスイープよりも寄与が大きい $((RS4)_p / (RS2)_p < 1)$ ことがわかる。また、壁面近傍の $y^+ \leq 20$ では逆の結果 $((RS4)_p / (RS2)_p > 1)$ となりスイープの寄与の方が大きくなる。粒径の増加に伴いその傾向が顕著となっていることも観察された。このスイープとイジェクションの寄与が逆転する境界は図-2 で観察された流速差が逆転する境界とちょうど一致する。すなわち、 $y^+ \leq 20$ では上方から突入してきた粒子が高運動量をもたらし、また、粒径および比重が増加すると慣性力も増加するためにこうした特性が顕著となると考えられる

4. おわりに 本研究では、比重が 1.05 および 1.15、粒径が 0.5 および 0.8mm の合計 4 種の固体粒子を用い、滑面開水路における壁面領域の粒子と流体の挙動を、PTV 法により同時計測し、面積判別法で流体と固体に区分して解析したものである。壁面近傍の $y^+ \leq 20$ では粒子速度が流体速度よりも高速となり、スイープの寄与がイジェクションよりも卓越することが明らかとなり、今後の固液混相流のモデル化へ重要な知見が得られた。

参考文献

- 1) 瀬津家久, 東良慶, 鬼束幸樹: スプリングモデルによる PTV 法を用いた滑面開水路流れの固体粒子と流体の同時計測, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.565-570, 2002.
- 2) Kaftori, G. Hetsroni, G. and Banerjee, S.: Particle behavior in the turbulent boundary layer. II. Velocity and distribution profiles, *Phys. Fluids*, Vol.7, pp.1107-1127, 1995.

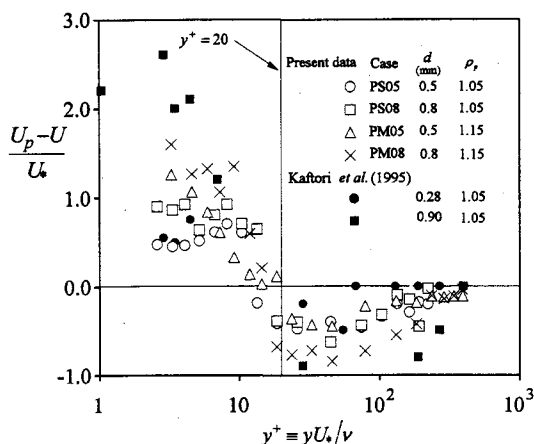


図-2 固相と液相の速度差

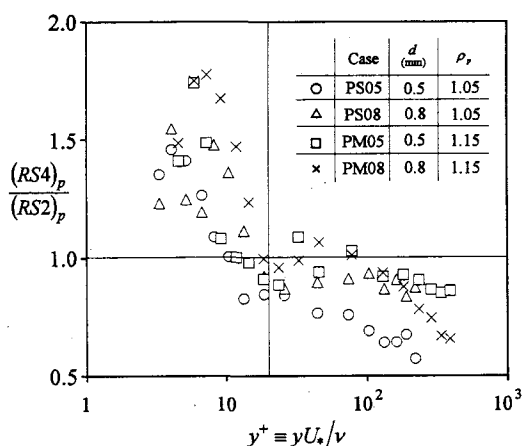


図-3 条件付レイノルズ応力分布