

京都大学大学院 フェロー 榎津家久 京都大学大学院 正 員 鬼束幸樹
京都大学大学院 学生員 東 良慶 京都大学大学院 学生員 田中亮輔

1. はじめに 流砂量などの流砂問題の本質は、砂粒子とそれを移動させる周囲流体の挙動を解明することにある。従来の研究は、砂粒子あるいは流体のみの計測であり、両者を同時計測しかつ定量的に取り扱った研究はほとんどない。この背景としては、乱流計測の困難さが挙げられる。電磁流速計やホットフィルム流速計といった接触型流速計では固液混相流の計測がほぼ不可能であり、超音波流速計やレーザー流速計でも得られたデータから粒子と流体を識別することがそれほど容易ではない。一方、画像に写った粒子の軌跡を追跡する PTV 法(Particle Tracking Velocimetry)では粒子面積を利用することで固液データの識別が可能となる。本研究は、PTV 法的一种であるスプリングモデルを用いて固液混相開水路乱流において粒子と流体の同時計測を用い、その有用性を検討したものである。

2. 実験装置および実験条件 実験装置を図-1 に示す。本実験で用いた水路は長さ 12m, 幅 15cm の可変勾配型循環式直線水路である。2W のアルゴンイオンレーザーを光ファイバケーブルに通して、シリンドリカルレンズによって厚さ 2mm のレーザーライトシート(LLS)を作り、水路底面から垂直上方に照射した。撮影は水路側壁付近に設置された CCD カメラで行われ、光ディスクに一对の 512 × 480 ピクセルの画像を 1/30s ごとに記録した。計測時間 T は全ケースとも 60s とした。本計測では、1 ピクセルは 0.153mm に相当し、パルス間隔は 0.004s である。計測断面は水路上流端から約 7m 下流の位置で、底面および側壁は水理学的滑面である。水流に完全に追従すると考えられる粒径 0.1mm で比重が 1.02 のトレーサーは水路および低水槽を循環している。表-1 に実験条件を示す。対象固体粒子(ポリスチレン)の投入場所は水路上端付近である。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、 U_m は断面平均流速である。なお、計測断面における粒子の体積濃度は 0.3% 程度であった。

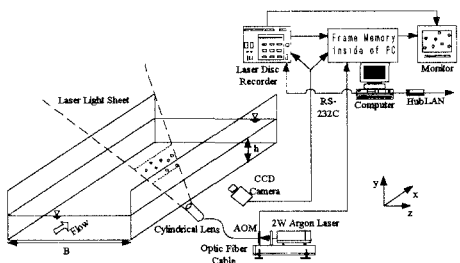


図-1 実験装置

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

3. PTVの画像解析方法およびスプリングモデル

粒子と流体の同時計測を行うには、①粒子データと流体データの分離、②粒子追跡の2つの作業を必要とする。粒子と流体との分離については本研究の場合、対象粒子としたポリスチレンの大きさは最も小さい場合でも中央粒径 $d_{50} = 0.3\text{mm}$ であり、トレーサー粒子よりも 10 倍程度以上の投影面積を有している。本実験では 1 ピクセルが 0.153mm となるように設定した。よって、トレーサー粒子は 1 ピクセルとなって撮影されるのに対し、最小粒径の 0.3mm 粒子でさえ 4 ピクセル以上となり、容易に粒子と流体の分離ができた。

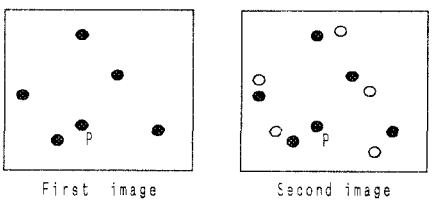


図-2 2つの画像における粒子の位置

次に、粒子追跡法について述べる。本研究では 2 時刻法である Okamoto *et al.*¹⁾ の考案したスプリングモデルを用いて粒子追跡を

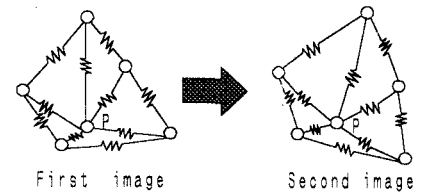


図-3 スプリングモデル

lehisane NEZU, Kouki ONITSUKA, Ryoukei AZUMA and Ryousuke TANAKA

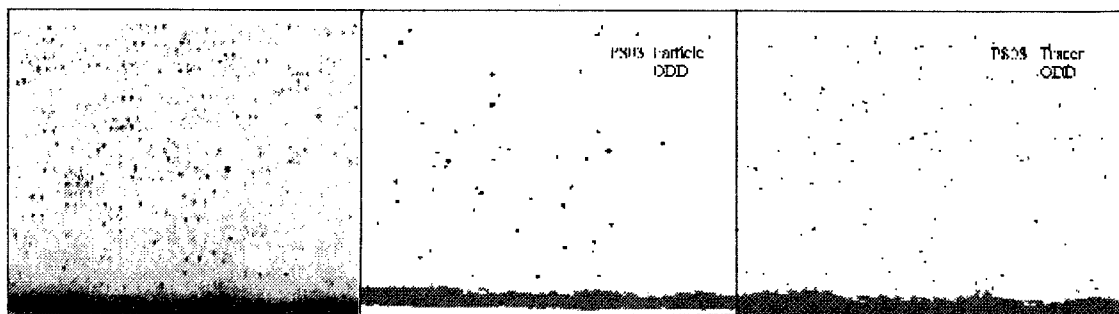


図-4(a) 原図(PS03)

図-4(b) 対象粒子のみ(PS03)

図-4(c) トレーサー粒子のみ(PS03)

行った。図-2 の左図のように第1画像においてある特定の粒子のターゲットPを含む粒子群が、図-3 のように架空の弾性ばねでつながっていると仮定する。この時ばねの持つエネルギーはゼロとする。次に第2画像では架空の弾性ばねの連結するパターンは様々な形が考えられるが、その種々のパターンにおけるバネエネルギーの総和を計算する。そして、バネエネルギーが最小となるパターンを真値とする。スプリングモデルは物理的な意味合いが曖昧であるという欠点を有しているが、移動距離がゼロに収束する場合、バネエネルギーもゼロに収束するので物理的に極端に逸脱したモデルとはいえないと考えられる。また、粒子が画像内で消滅したり新たに発生したりする流れ場でも有効である。さらに、濃度相関法を用いるPIV法があまり得意としない回転流れ場でも対応できる。

4. 精度の検証 本来、スプリングモデルを用いたPTV法による固液混相流計測の精度を検証するには、同じ流れにおいて粒子と流体の速度を別の高精度な方法で計測し比較することが必要であるが、現時点でそのような計測は困難である。そこで、ここでは粒子を含まない清流をつくり、PTV法およびレーザー流速計(LDA)によって計測し比較する。図-4に撮影された原画像、粒子面積によって分離された対象粒子画像およびトレーサー粒子画像の一例(ケースPS03)を示す。良好に両者の分離ができたことが確認される。

図-5にPTVおよびLDAによって得られた主流速分布を示す。ただし、LDAについては上方にシフトして表示した。LDAの結果に注目すると粘性低層、バッファ層、対数則領域にわたって図中の直線あるいは曲線で示した理論曲線と一致することから、測定断面において十分に発達した乱流が形成されていることがわかる。また、PTVによる結果がLDAの結果とほぼ一致していることがわかる。

図-6はレイノルズ応力分布を示したものである。LDAデータの結果に注目すると、全水深にわたってほぼ理論曲線に従っていることがわかる。また、底面近傍では粘性の影響で急激に値が減少しており、バッファ層以下の領域も良好に計測できていることが確認される。一方、PTVの結果に関しては、多少のばらつきはあるものの、ほぼ理論値にしたがっているといえる。バッファ層においても理論値やLDA計測結果とよく一致し、スプリングモデルを用いたPTV法は時間平均流速のみならず乱れの2次相関まで高い精度で計測できている。

5. おわりに 本研究では、開水路流れにおける粒子と流体との同時計測をスプリングモデルを用いたPTV法で行ったものであり、その精度の高さが確認できた。この手法を用いて固液混相の開水路乱流のメカニズムの解明を鋭意行っていきたい。

参考文献

- 1) Okamoto, K, Hassan, Y.A, and Schmidl, W.D., *Experimental Fluids*, Vol.19, pp.342-347, 1995.

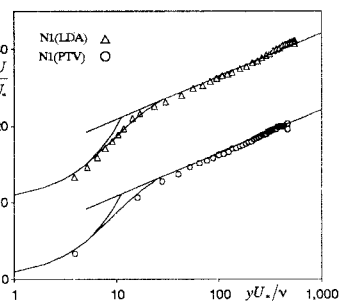


図-5 主流速分布

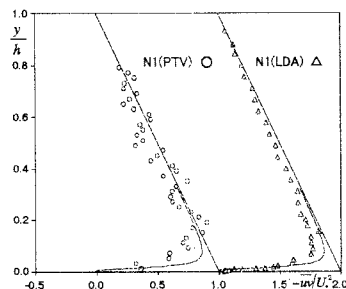


図-6 レイノルズ応力分布