

## Super-resolution PTV の三次元拡張に関する実験的評価

## Estimation of 3D Super-resolution PTV

北海道大学大学院 工学研究科 ○学生員 秀島賢保 (Yoshiyasu Hideshima)  
 北海道大学大学院助手 工学研究科 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)  
 北海道大学大学院教授 工学研究科 フェロー 佐伯 浩 (Hiroshi Saeki)

## 1. はじめに

固液混相流のように、異なる二つ以上の相が混在する運動を検証する場合、それぞれの相の局所的かつ瞬時の相互作用が重要となる。特に碎波帯では、碎波に伴い、底質の巻き上げなど間欠的かつ局所的なイベントに連動して、固相と液相が混在し、相互に作用しながら複雑な混相乱流へと発達していく。従来なされてきたような濁度等の濃度による計測では、固相及び液相の相関量をモデル化することができない。運動方程式を統計的に評価するには、それぞれの相の運動学的情報が必要となる。

非接触・動画像計測をベースとした粒子速度取得のアルゴリズムとして、PIV(Particle Image Velocimetry)あるいはPTV(Particle Tracking Velocimetry)が有効である。一般に、これらの解析法により面的な速度分布を取得することはできるが、奥行き方向に局所的で大きな変化を伴うような流れ場を計測する場合には、三次元への拡張と非常に高いサンプリング周波数を持つカメラが必要となる。奥村ら(2001)は、三台のカメラの画像視差を利用し、非線形写像により三次元粒子速度計測を可能とする3D-Stereoscopic PTVを開発し、低粒子数密度での粒子運動に対しその精度を検証している。また、渡部ら(2003)は、奥村らの開発した3D-Stereoscopic PTV システムをフィルタリング、粒子抽出、粒子間リンクについて修正し、高粒子数密度の球形固体粒子運動に対しその精度を検証した。さらに、碎波帯における巻き上げ等の底質の挙動にも応用し、その適応性を議論している。一方、流れ場に対して精度良く流速あるいは粒子速度を得るには、PIVあるいはPTVの空間解像度を改良する必要があり、このことは乱流計測において重要である。高画像濃度PIVの空間解像度は、計測領域のサイズに依存し、 $x$ - $y$ 平面の平均変位および計測領域の奥行き幅よりも小さくなくてはならない。サブ領域の粒子追跡により粒子群の相関係数を求めてSuper-resolution PIV を用いて、管流の流速ベクトルを計測している(Keane et al. 1995)。また、Bastiaans et al.(2002)も、Super-resolution PIV を応用したPTVアルゴリズムにより、熱した円柱背後の流速ベクトルを計測している。

本研究では、3D-Stereoscopic PTVをベースに相互相関係数を用いて空間解像度の改良を行い、Super-resolution PTVを三次元に拡張して、その精度評価を行う。今回の実験では、高粒子数密度での固体粒子運動及び流体運動に適用し、個々の粒子に対する三次元瞬時速度ベクトルの時間変化から、固体粒子と流体との運動の差異を議論する。

## 2. 実験方法

## (1) 実験装置

延長800cm、奥行き25cm、高さ50cmの全面アクリル製の変換勾配水路が用いられ、水路上部には内径12mmの漏斗が設置される。光源として、アルゴンレーザーが水路斜め側方から照射される。同期された三台のデジタルビデオカメラ(以下DVと呼ぶ)は、水路側方に設置され、固体粒子の沈降速度がほぼ一様に安定する領域において、 $(x \times y \times z) = (8\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm})$ の範囲で撮影が行われた(図-1参照)。

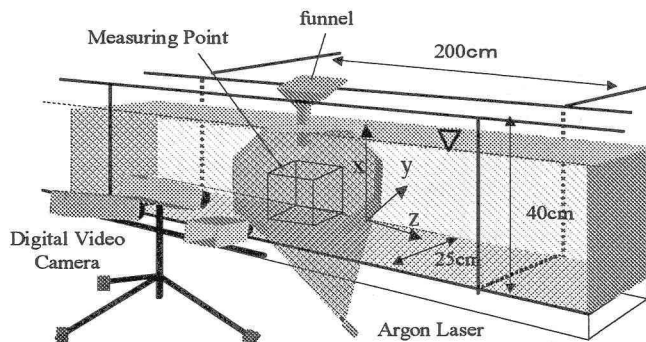


図-1 沈降実験装置

## 1-1) 固体粒子速度の検証実験

蛍光着色された粒子径1mm、比重2.65の球形ガラスビーズが、漏斗上端から連続して投入される。粒子の沈降の様子が同期された三台のDV(解像度1K×1K画素、サンプリング周波数30Hz)により撮影される(図-2参照)。あらかじめ相互相関の妥当性を検証する実験として行われた。

## 1-2) 固体粒子速度計測実験

漏斗上端から流水を供給し、漏斗内の水位をほぼ一定にした状態で、蛍光着色された粒子径1mm、比重2.65の球形ガラスビーズが投入され、その沈降の様子が撮影される。

## 1-3) 中立粒子速度計測実験

1-2)と同様の状態で、蛍光着色された粒子径100 $\mu\text{m}$ 、湿潤での比重1の中立粒子が投入され、その沈降の様子が撮影される。本ケースでは、中立粒子は流体運動を代表するトレーサーとして用いられる。

## 1-4) 固液混相流体での中立粒子速度計測実験

1-2)と同様の状態で、粒子径1mm、比重2.65の透明なガラスビーズと粒子径100 $\mu\text{m}$ 、湿潤での比重1の中立粒

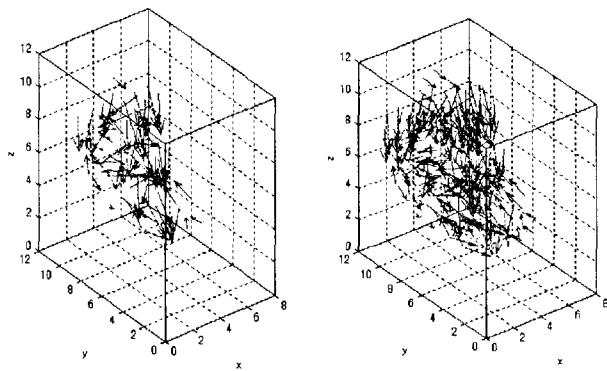


図-2 グリッド速度ベクトル

( a : 最大相互相関より求めたグリッド速度ベクトル、b : 中央値を用いたグリッド速度ベクトル)

子を混在して投入する。固相および液相が混在した状態で相互に作用しながら沈降するが、DVのレンズにはハイパスフィルタが通してあるので、蛍光着色された中立粒子の運動のみが撮影可能となる。

## (2) 解析手順

### 2-1) フィルタリング

同期された三台のDVから取得された画像は、その前処理としてフィルタ操作が行われる。まず、ガウシアンフィルタにより相対的に小さなノイズを除去した後、直径5画素の円形トップハットフィルタにより、その面積以下の励起光領域と背景との分離を行う。さらに、画像濃度勾配を乗じた後の画像濃度ピークを重心位置として、近隣画素における相対閾値を用いて二値化される。

### 2-2) 粒子位置の決定

三次元物体を撮影する場合、一般に焦点から離れるに従い、レンズの影響から奥行き方向に非線形となる。本PTVでは、粒子の実座標 $(X, Y, Z)$ は画像座標 $(x, y, z)$ を用いて、奥行き方向の非線形性を考慮した三次代数方程式で決定される。

### 2-3) 誤ベクトルの処理

個々の粒子を精度良く抽出できないと間違っただリンク付けを行ってしまい、誤ベクトル発生の原因となる。特に、粒子数密度が大きい場合には顕著となる。本研究では、計測領域を $1\text{cm}^3$ のグリッドに分解し、相互相関を用いて、フレーム間における相互相関係数を求める。最大相互相関係数を与えるフレーム間距離を単位フレーム時間で割り、その値をグリッドの重心が持つ三次元速度と仮定する。相互相関係数は、前段階で決定した重心位置を元に、粒子の重心間距離のみの関数として以下の式で与えている。さらに、隣接する6つのグリッド(上下・左右・前後)の速度に対して、その中央値を最終的なグリッド速度として決定する。ここで求めたグリッド速度を予測領域の範囲として、多時刻追跡法で個々の粒子の三次元瞬時速度計測に用いる。

### 2-4) 流速及び軌道の計算

各フレームでの個々の粒子実座標位置とグリッド速度を元に、最小加速度原理を用いてフレーム間にわたり同

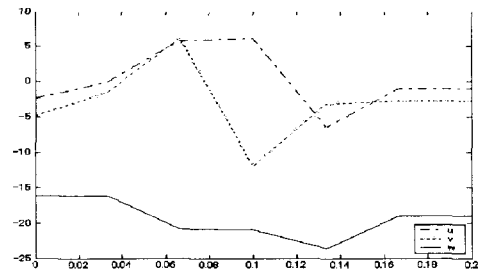


図-3 三次元グリッド速度集合平均の時系列

一粒子のリンク付けが行われる。三時刻追跡法を採用し、リンクに用いられる予測領域の範囲は、グリッド速度の $\pm 10\%$ とした。

## 3. 結果

図-3は、ある6フレームにおける三次元固体粒子のグリッド速度のベクトルを表したものである。そのグリッド流速集合平均の時系列をとったものが図-4である。ここで $u$ 及び $v$ 方向に対して比較的大きい速度が検出されており、最大相関係数の適用範囲等、さらなる改良が必要である。

## 4. 結論

3D-Stereoscopic PTVシステムを空間解像度に関して修正し、その問題点について検討した。粒子のリンクに関して相関解析では、その最大相関係数の範囲を的確に選ぶ必要がある。

## 参考文献

- 1) 奥村悠樹、渡部靖憲、佐伯浩：砕波帯の3次元流速の実験的評価、海岸工学論文集、第48巻、pp.96-100,2001
- 2) 渡部靖憲、秀島賢保、佐伯浩：砕波乱流下の底質粒子の三次元的挙動及び巻き上げに関する実験的研究、海岸工学論文集、第50巻、pp.446-450,2003
- 3) 木村一郎、植村知正、奥野武俊 著：可視化情報計測、近代科学社、2001
- 4) 日本流体力学会 編集：混相流体の力学、朝倉書店、1991
- 4) Keane R.D., R.J. Adrian, and Y. Zang: Super-resolution particle imaging velocimetry, Meas. Sci. Technol., No.6, pp.754-768, 1995
- 5) Bastiaans R.J.M., G.A.J van der plas, and R.N. Kieft: The performance of a new PTV algorithm applied in super-resolution PIV, Experiments in Fluids, No.32, pp346-356, 2002