

光学スキャナを利用した3次元画像処理流速計測法の開発

Development of 3D PTV Using Laser-Light Sheet Scannings

牛島 省*

Satoru Ushijima

This paper describes three-dimensional particle tracking velocimetry (3D PTV) technique, which enables us to obtain remarkably larger number of velocity vectors than previous techniques. In stead of the usual stereoscopic image recordings, the present 3D PTV technique visualizes an entire three-dimensional flow with the scanning laser-light sheets generated from a pair of optical scanners and the images are taken by a high-speed video system synchronized with the scannings. The digital image analyses to derive velocity components are based on the numerical procedure with sub-pixel accuracy. It is demonstrated that the 3D velocity components are satisfactorily captured and that they are in good agreement with the numerically predicted results.

Keywords: image analysis, 3D PTV, flow visualization, rotating fluid, optical scanner

1. はじめに

画像解析を利用して流体中に浮遊する個々のパーティクルを追跡することにより流速分布を求めるPTV手法は、多次元空間中の瞬時流速分布を把握するための有効な計測手法の一つであるとされている[1]。

近年このPTV手法は、3次元空間中の3方向の流速成分を取得するための計測手法、すなわち3D PTV手法へと発展されつつある[2],[3],[4]。しかしながら、これまでに提案されているほとんど全ての3D PTV手法の原理は複数台のビデオカメラを用いたステレオスコピックな画像計測法に基づくものであり、計測可能な流速ベクトルの最大数は数十から数百個程度であるため[5]、3次元空間中の流速分布を把握するためには空間的な分解能がきわめて低い。この原因の一つは、ステレオ画像に基づく3D PTV手法では、3次元空間中に散在するパーティクルの数が増加すると、複数台のカメラで記録した同一パーティクルの特定が困難になるためである。

本研究では、すでに著者ら[6]が画像処理による流速計測で利用した光学スキャナを2台利用して、それぞれ水平および鉛直なレーザライトシートを高速でスキャンさせ、実験水槽内の水平および鉛直断面内の流れを短時間のうちに連続して可視化するシステムを作成した。これを回転ディスクが上部に取り付けられた立方体形状の水槽内の流れに適用し、サブピクセル精度の重心点算定法などが用いられた画像処理手法[6]により流速ベクトルを求めた。その結果、十分短いサンプリング時間内に、多数の流速ベクトルが取得可能であり、従来の3D PTV手法よりも空間的な分解能が高い流速計測が行えることが明らかとなった。さらに、計測対象とした回転流動の3次元数値解析を行い流況を比較した結果、実験および数値解析結果は良く一致していることが示された。

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部流体グループ (〒270-11我孫子市我孫子1646)

E-mail: ushijima@abiko.denken.or.jp

2. 実験の概要

2.1 実験水槽と実験条件

回転する水平な円盤が上部に取り付けられた水槽内では、鉛直軸を有する旋回流が1次流として生ずるが、底面近傍ではエクマン境界層が発達するため、鉛直断面内に2次流が生じ、水槽内の流れは3次元的なものになる[7]。本研究で用いる実験水槽は、一辺が60mmの立方体の形状で、水槽の上部にはアクリル製の回転ディスクが取り付けられており、これが毎分16回転して水槽内の流体が流動する。また、回転ディスクの中心軸は、実験水槽の水平断面内の中央に位置している。

流れを可視化するために用いるパーティクルは、エスレン材でできており、蛍光染料を含んでいるのでレーザライトシートにより明瞭に可視化される。パーティクルの平均粒径とその標準偏差はそれぞれ0.40mm、0.041mmであり、密度は約 1.03g/cm^3 である。実験では、密度が適切に調節された食塩水を用いることにより、パーティクルが流体と同じ密度を有するものとした。

2.2 ビームスキャニングを利用した可視化システム

本研究では、3次元空間内の3方向の流速成分を計測するため、光学スキャナを2台利用して、それぞれ水平および鉛直なレーザライトシートをスキャニングさせることにより、実験水槽内の水平および鉛直断面内の流れを短時間のうちに連続して可視化する。図1は、可視化と撮影方法の概略を示したものである。可視化される断面は、水平および鉛直方向それぞれ10セクションの計20セクションである。図1に示されるように、スキャナー1により可視化された鉛直セクション内のパーティクルは、実験水槽の側面から高速ビデオで撮影され、スキャナー2により可視化された水平セクション内のパーティクルは、水槽下部に設置した平面反射鏡を通じて同一の高速ビデオで記録される。2台の光学スキャナのミラーのステップ動作は、高速ビデオカメラのストロボ信号に基づいて制御されるので、スキャニングと高速ビデオによる撮影は同期がとれており、可視化された各断面のパーティクルの画像は、適切に所定のフレーム上に記録されるものとなっている[6]。

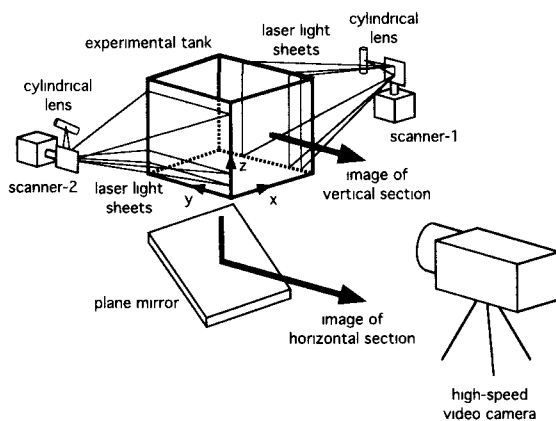


図1 可視化システム

撮影に利用される高速ビデオカメラシステムは、1秒間に500フレームの撮影を行うことが可能である。1フレームあたりの露光時間は電子シャッターにより200マイクロセカンドに設定されている。実験では、合計20セクションが可視化されるが、各セクションにおけるパーティクル画像を2フレームずつ撮影しているため、隣接するセクション間の時間間隔は4ミリセカンドである。また、あるセクションを可視化してから次に同一のセクションを可視化するまでの一連の可視化動作（1スキャニングサイクル）に要する時間、すなわちスキャニング周期は80ミリセカンドである。本研究では、あるセクション内における同一パーティクルの画像をトラッキングするフレームは、1スキャニングサイクルごとに撮影されたフレームとしている。このため、トラッキングを行うフレーム間の時間間隔は、スキャニング周期と等しい80ミリセカンドとなっている。可視化画像のサンプリングは、10スキャニングサイクル間行なった。従って、各セクションの画像はそれぞれ10フレームずつ、全体で200フレームの画像が得られている。これより、全体のサンプリング時間は、 $0.004 \times 199 = 0.796$ 秒と計算される。

3. 画像処理手法

3.1 前処理とパーティクル重心点の算出

高速ビデオで撮影された1フレームの画像は、1画素あたり256階調の 512×512 画素のデジタルデータに変換されて前処理が施された後、LANを経由してEWS上へ転送され、流速ベクトルを算出するための解析がなされる。

前処理では、まず原画像に平滑化フィルタとラプラシアンフィルタを利用した画像強調フィルタを作用させ、ノイズの除去とパーティクル画像の鮮鋭化をはかる。次に、パーティクルの画像を背景から分離する。まず、原画像の輝度分布に対して、1フレームの画像を 16×16 画素の小領域に分割し、それぞれの小領域ごとに判別分析2値化法[8]に基づいて最適なしきい値を定めて画像の2値化を行う。この2値化画像に対して、面積が不適切な画像の除去や円形粒子分離演算を行い、9画素の面積を有するパーティクルの画像を求める。そして、得られた2値化画像と原画像の論理積をとることにより、輝度分布を有するパーティクル画像を背景から分離する。このようにして得られたパーティクルの2次元的な輝度分布に対して最小2乗法による回帰曲面を算出し、その曲面が最大値を有する位置を求めることにより、パーティクルの重心点位置がサブピクセル精度で求められる[6]。

3.2 パーティクル重心点のトラッキング

PTV手法では、同一パーティクルの画像を異なる時刻に撮影されたフレーム上で特定してゆくが、このトラッキングの方法としていくつかのものがこれまでに提案されている。本研究では、対象とするフレーム上のパーティクル数やトラッキングされた局所流速を利用して探索領域を設定する方法をとり[6]、これより同一のパーティクルの重心点を特定する。流速ベクトルを算出する際には、特定された重心点群に対して、2次の回帰曲線を最小2乗法に基づいて導出し、その1階微分を求めて流速ベクトルの方向とした。また、流速の大きさは、各フレームの重心点の移動距離の総和としている。以上の解析により得られた結果には、誤ったトラッキングにより生ずる少数の流速ベクトルが含まれることがある。このノイズ成分を合理的に除去するために、ブートストラップ手法[9]を利用したフィルタリングを行っている。

3.3 流速ベクトルの空間内挿

以上の方法により算出された流速ベクトルは、パーティクルの位置に応じてランダムに分布しているので、これらを空間内挿して3次元空間内に等間隔で配置する格子点上の流速ベクトルとする。本研究では、立方体形状の3次元の水槽内を、壁面上の格子点も含めて $13 \times 13 \times 13$ の等間隔の格子点で分割する。隣接する格子点の間隔は5mmとなるが、この間隔は、内挿する前の流速ベクトルどうしの平均間隔 δ_v の2倍よりはるかに大きいので、Nyquistサンプリング条件は満足されるものとなっている。なお、流速ベクトルを空間内挿する際には、Agui&Jimenez[10]により提案されている $1.24\delta_v$ のウインドウの幅を有するガウシアン分布を重み付けとして利用した。本研究では、まず水平および鉛直セクション内の格子点上の流速成分が空間内挿されるが、その際に、ブートストラップ手法を適用して、内挿された流速成分に対する頻度分布が求められ、頻度分布の平均値とバンド幅が合わせて算出される。また、スキャニングされるレーザーシートは互いに平行ではないので、これを補正するために、z方向およびy方向に3次スプライン内挿を行い、格子点上の流速成分を求めた。さらに、先に推定したバンド幅も同様にスプライン内挿され、規則的に配置する格子点上において各流速成分に対するバンド幅を算出した。

3.4 流体の連続性に関する補正

3次元空間中で規則的に配置する格子点上に内挿された3次元の流速成分には、わずかな誤差が含まれるため、厳密には流体の連続性を満足しない。このような計測・実測などによって得られた3次元の流速成分を流体の連続性が満足されるように補正する方法として、変分法に基づく解析手法 (Mass-Consistent Model) が提案されている[11]。

この手法では、次式の積分値を最小にする修正された流速成分を求める。

$$E(u_i) = \int_V \left[\alpha_i^2 (u_i - u_{i0})^2 + \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] dx dy dz \quad (1)$$

ここに、 u_{i0} は、格子点上で得られた x_i 方向の流速成分であり($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$)、 u_i は連続性を満たすように修正された x_i 方向の流速成分を表す。また、 λ はラグランジュ乗数、 α_i は計測における誤差の標準偏差の逆数に比例する係数である。本研究の計測結果に関しては、各方向の流速成分の誤差の標準偏差の値は、その方向に依存せず、いずれもほぼ同程度であると考えられるので、 $\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = \alpha_3^2 \equiv \alpha$ とすることができる。(1)式の値を最小にする解は、オイラー・ラグランジュ方程式から得られるが、それらの方程式から変数 λ を求めるための次式が得られている。

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x_1^2} = -2\alpha^2 \frac{\partial u_{1,0}}{\partial x_1} \quad (2)$$

上式は有限差分法により離散化され、SOR法等による収束計算によって解くことができる。なお、以上のような流量補正を行う前後の流速成分の変化量の平均値は、代表流速と比較して無視できるものであった。

このようにして流体の連続性に関する補正がなされた流速ベクトルが得られるが、その結果に対して、スムージングを行う。スムージングは、流速成分を変数とするラプラス方程式を解くことにより行われるが、無制限に平滑化するのではなく、各格子点上で推定されたバンド幅の内部に、スムージングされた結果が包含されるような制限が課せられる。スプライン内挿により求められたバンド幅には、上記の流量補正分が考慮されていないため、次式のようにシフトされたバンド幅 err_{lmn}^i を新たに求める。

$$\text{err}_{lmn}^i = \mu_{lmn}^i + \frac{1}{2\alpha^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x_1} \pm \varepsilon_{lmn}^i \equiv \mu_{lmn}^{*i} \pm \varepsilon_{lmn}^i \quad (3)$$

ここで、 $\mu_{lmn}^i \pm \varepsilon_{lmn}^i$ は、格子点 P_{lmn} における x_1 方向の流速成分に対するバンド幅である。このバンド幅を用いれば、ラプラス方程式の繰り返し計算において、 $n+1$ ステップにおける x_1 方向の流速成分が $\bar{u}_{1,lmn}^{n+1}$ と表される場合、次式の値が、格子点 P_{lmn} に設定される。

$$\bar{u}_{1,lmn}^{n+1} = \max \left\{ \mu_{lmn}^{*i} - \varepsilon_{lmn}^i, \min \left(\mu_{lmn}^{*i} + \varepsilon_{lmn}^i, \bar{u}_{1,lmn}^n \right) \right\} \quad (4)$$

4. 画像処理による3次元流速成分の計測

4.1 画像解析結果

本研究における画像データの解析結果は以下の通りである。

- (1) 1 セクションあたりの重心点数：3 3 9.8 個
- (2) 得られた流速ベクトルの総数：8 2, 1 8 9 個
- (3) 1 セクションあたりのベクトル数：4, 1 1 0 個
- (4) 1 回のトラッキング処理で得られるベクトル数：3, 2 8 8 個

流速ベクトルを求めるためのトラッキング処理では、トラッキングフレーム数を3から6と変化させて複数回処理が行われているため、1回のトラッキング処理により得られる流速ベクトル数を計算すると、上記のように3,300個に近い値になっている。従来の3次元PTV手法で得られていた流速ベクトル数が10から500個程度であったことを考慮すると、空間解像度がここでは大幅に改善されたことがわかる。

4.2 流速ベクトルの計測結果

図2は、3次元空間中の格子点上で得られた流速ベクトル分布を示したものである。回転ディスクの中心が水槽の中央に位置するため、 x - y 平面内では回転軸を中央に有する旋回流が生じている。この旋回流は、回転ディスクに近い断面では、中心から外側へ発散する流れとなっている。一方、底面に近い断面では、いわゆるエクマン境界層が発達しており、流速の絶対値が低減するとともに、エクマン境界層内の流動現象の特徴である、回転の中心に向かう流れが生じていることが計測結果に明瞭にとらえられている。 x - z 平面における結果では、回転ディスク中心軸を含んだ $y=30\text{mm}$ の断面において、中央で鉛直な上昇流があり、その左右に一对の弱い旋回流が発生している。このような鉛直断面内の2次流の発達は、エクマン境界層を伴う回転流体に見られる典型的な流動現象であり、本研究の3D PTV手法により、それらが適切にとらえられている。これらのことから、水槽の中央付近で回転ディスクに向かう鉛直な上昇流、その周辺では旋回を伴う上昇流が発生しており、水槽側壁面近くでは、旋回する下降流が生じていることがわかる。

図3は、2方程式乱流モデルを用いて、計測対象とした回転流動を3次元解析した結果を示すものである。数値解析では、解析領域を $25 \times 25 \times 25$ の等メッシュに分割し、既報[12]と同様の解析手法を用いて流況が定常状態となるまで計算を続けた。3D PTV手法による計測結果と比較すると、流速ベクトルを内挿する際の格子点間隔が異なることなどから、容器壁面近傍の流速ベクトルに相違が見られるが、両者は良く一致していると考えられる。

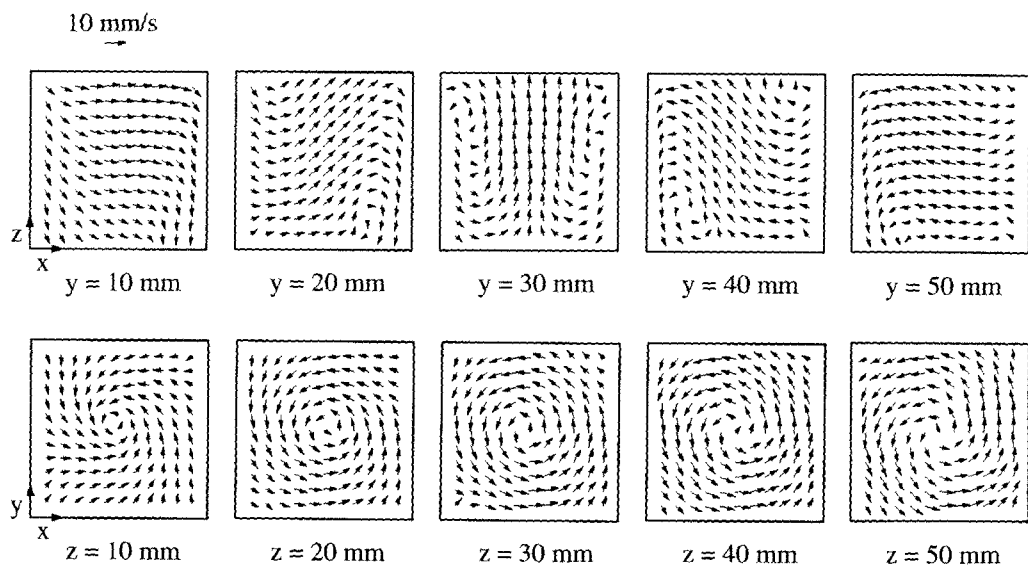


図2 3D PTV手法により計測された流速ベクトルの分布

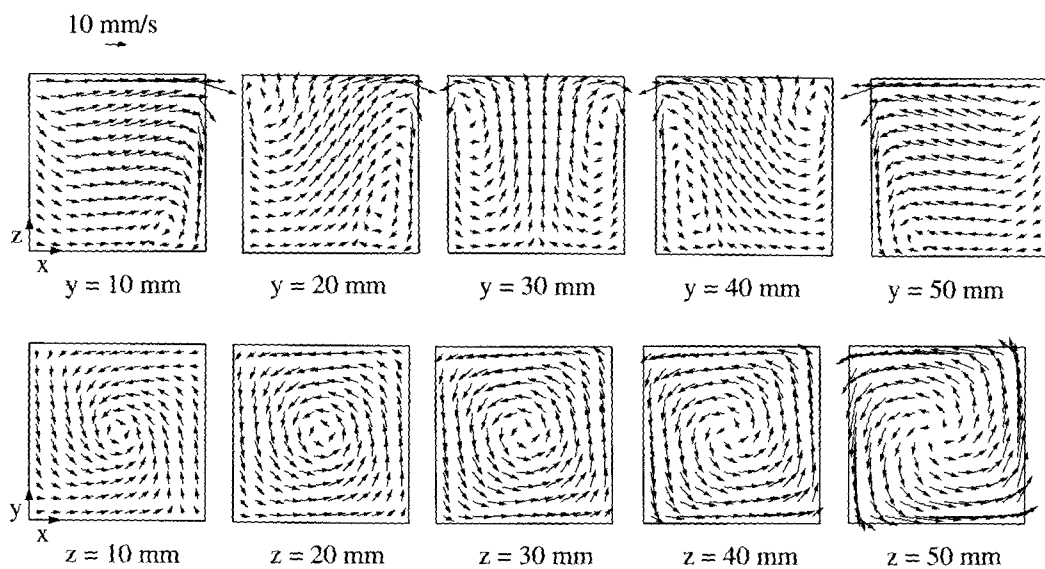


図3 数値解析により得られた流速ベクトルの分布

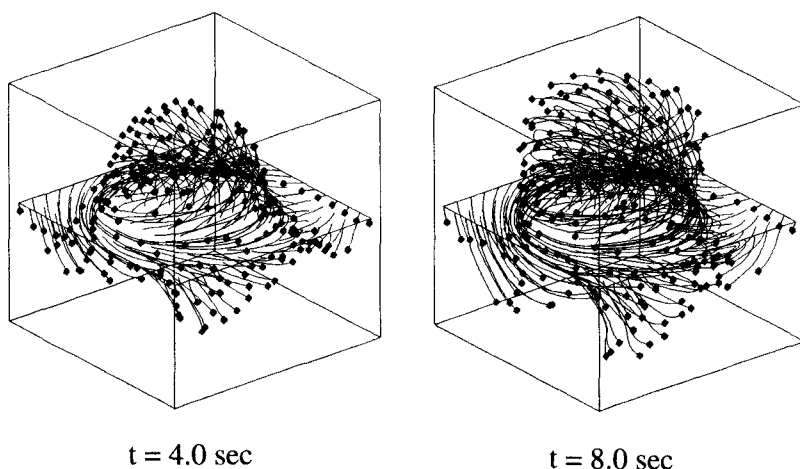


図4 計測された流速分布から得られた実験水槽内の流況

また、図4は、計測された流速ベクトルが定常的に与えられた場を仮定した場合の流況を示したもので、水平断面上に置かれたパーティクルが時間の経過とともに移流されて行く状態を表している。

4.3 計測誤差の評価

パーティクルトラッキング法により計測された流速成分に対する誤差の原因やその定量的な大きさに関しては、これまでに多くの検討がなされている。ここでは、従来提案された計測誤差の評価法に基づいて、文献[6]に示されるのと同様の方法により、本研究の画像処理手法の計測誤差を求めることができる。また、内挿誤差に関しては、Agui&Jimenez[10]が評価した値とほぼ同程度（代表流速に対して3%）であると仮定すれば、本研究の手法では、全体として代表流速の4.2%程度の誤差が含まれていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、3次元空間中の3方向の流速成分を計測するため、光学スキャナを2台利用して高速でスキャンする水平および鉛直なレーザライトシートを発生させ、実験水槽内の流れを短時間のうちに連続して可視化するシステムを作成した。このような可視化システムを回転ディスクが取り付けられた立方体形状の水槽内の流れに適用した結果、0.796秒間のサンプリング時間内に、1回のトラッキング処理あたり約3,300個の流速ベクトルを計測できた。このことから、本研究の手法は、従来のステレオ画像計測に基づく手法より高い空間的な分解能を有すること、さらに、得られた流速計測結果は、数値解析結果と良く一致することが示された。

参考文献

- [1] Adrian, R. J., Annu. Rev. Fluid Mech., 23, (1991), pp.261-304.
- [2] Chang, T.P. and Tatterson, G.B., Proc. 3rd International Symposium on Flow Visualization, (1983), pp.266-273.
- [3] Racca, R.G. and Dewey, J.M., Exp. Fluids, Vol.2, (1988), pp.22.1.1- 22.1.6.
- [4] Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M., J.Fluids Eng., Vol.111, (1989), pp.384-391.
- [5] 笠木伸英・西野耕一, 「流れの計測」, Vol.8, NO.11, (1990).
- [6] Ushijima, S. and Tanaka, N., J. Fluids Eng., Vol.116, (1994), pp.265-272.
- [7] Greenspan, H. P., "The theory of rotating fluids", (1968), Cambridge Univ. Press.
- [8] Otsu, N., Proc. 4th International Joint Conference on Pattern Recognition, (1978), pp.592-596.
- [9] Diaconnis, P. and Efron, B., Scientific American, Vol.248, No.5, (1983), pp.96-109.
- [10] Agui, J. and Jimenez, J., J.Fluid Mech., Vol.185, (1987), pp.447-468.
- [11] Sherman, C. A., J. Applied Meteorology, Vol.17, (1978), pp.312-319.
- [12] Ushijima, S., International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.19, 647-665, 1994.