

ビームスキャニングを利用した 粒子追跡流速測定法

牛島 省

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)

本研究では、3次元空間中における複数の2次元断面内の瞬時流速分布を計測するための可視化方法と画像処理法について考察を加えた。高速でスキャニングするレーザーライトシートにより、流体中の微小なパーティクルが連続的に可視化され、スキャニングと同期した高速ビデオシステムによりその画像が撮影される。流速ベクトルを算出するための画像処理では、可視化されたパーティクル画像の抽出とその重心点の算出、パーティクルトラッキング、統計処理などが高い精度で行われる。本手法を回転円盤が取り付けられた円筒容器中の過渡流動現象に適用し、非定常な流速分布が適切に計測されることが示された。

Key Words: *particle tracking velocimetry, image processing, laser beam scanning, flow visualization*

1. はじめに

画像処理による流速計測は、2次元あるいは3次元の領域内の瞬時流速分布を把握できるという利点があるため、点計測では捉えられなかった現象を解明するための有効な手法であると考えられている。画像処理を利用した一般的な流体計測法に関しては、Hesslink¹⁾が詳細なレビューを行っている。その中で、流体中にパーティクルを混入させて流れを可視化し、その画像を用いて流速計測を行う方法

(PIV)は対応できる流速の範囲が広く、液体のみならず気体の流れにも適用可能で、精度の高い計測が行える手法であると位置づけられている。本研究で扱う流速計測法は、PIV手法の中の1手法に分類されるPTVという方法であり、流体中に混入されるパーティクル数が比較的少なく、個々のパーティクルを画像処理により追跡して行くことで、流速を求めようとするものである。

本研究の流速計測手法の1つの特徴は、3次元空間中における複数の2次元断面内の流速分布を精度良く、しかもほぼ同時刻に計測するために、レーザービームのスキャニングを利用した可視化方法を用いることにある。この方法ではレーザーライトシートに直交する流速成分の計測は行えないが、複数台のカメラを用いて3次元場の3成分の流速計測を行う手

法²⁾と比べて、約1オーダー数多くの流速ベクトルを得ることができるため空間的な分解能が高い計測が可能である。

さらに、本研究では、流速ベクトルを既往の手法より精度良く算出するために、新たな画像処理手法を適用している。まず、パーティクル画像を背景から抽出する際に、1フレームを小領域に分離し、それぞれに対して判別分析2値化法³⁾を用いた合理的なしきい値の設定を行う。そして、最終的に輝度分布を保持した状態でパーティクル画像の分離が行われ、サブピクセル精度でそれらの重心点が求められる。得られた重心点に対して、探索領域を利用するトラッキングを行い、異なるフレーム上で同一の重心点を特定する。この処理においては、高・低流速が共存する流れにも適用できるように、トラッキングするフレーム数を可変とし、全ての結果を重ね合わせて流速ベクトルを求めるものとしている。また、流速ベクトルを決定する際には、始点と終点の重心点のみを利用するのではなく、トラッキングされた全ての重心点を利用して2次の回帰曲線を求め、その勾配から流速ベクトルの方向を定めている。さらに、ノイズ成分を合理的に除去するために、Agui & Jimenez⁴⁾により利用されているブートストラップ手法⁵⁾に基づき、過誤ベクトルの除去・補正を行うものとしている。

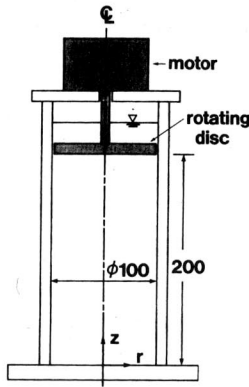


図-1 実験水槽

本研究では以上のような流速計測手法を、回転ディスクが取り付けられた円筒容器内の定常および過渡流動現象に適用する。最後に、既往の誤差の評価方法に基づき、本研究の流速計測手法に含まれる誤差を定量的に求める。

2. 実験水槽と可視化方法

本研究で用いる実験水槽は、図-1に示すような内径 D が100mmの円筒形の亚克力ル容器である。円筒容器の上部には亚克力ル製の回転ディスクが取り付けられており、これが回転することにより円筒容器内に流れが生ずる。実験では、毎分40回転の速度でディスクを十分長い時間回転させて、円筒容器内に定常流動を生起させた後、ディスクの回転方向を瞬間的に逆転させることにより、過渡流動現象を生じさせた。実験では、これらの定常流動と過渡流動を可視化して流速の計測を行う。

流れを可視化するために用いたパーティクルは、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ーライトシートにより明瞭に可視化される。パーティクルの粒径は約 0.40mm 、密度は約 1.03g/cm^3 である。実験では、パーティクルが流体と同じ密度を有するようにするため、比重が適切に調節された食塩水を用いている。

図-2は、可視化システムを示すものである。可視化される断面は、5枚の水平断面であり、下から順にセクション1~5とナンバリングされている。各セクションの高さ $z(\text{mm})$ は、順に20, 60, 100, 140, 180である。ここでは、互いに平行なレーザーライトシートを発生させるため、図-2のような可視化システムの構成としたが、可視化するセクションの間

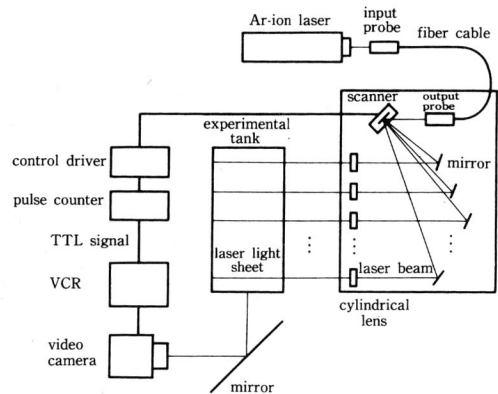


図-2 可視化システム

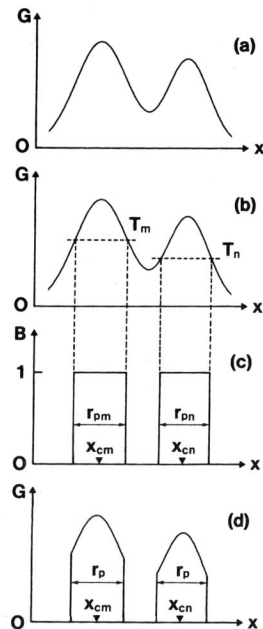


図-3 画像の抽出

隔をより短くする必要がある場合には、レーザーライトシートそのものをスキャニングする方法も考えられる。可視化された流体中のパーティクルは、実験水槽の下方に置かれた平面反射鏡を通じて、高速ビデオカメラによりビデオテープ上に記録される。レーザービームのスキャニングは、高速ビデオカメラのストロボ信号によって制御されているので、スキャニングと撮影は同期が取られている。利用した高速ビデオカメラでは、1秒間に500フレームの撮影が可能であり、電子シャッターにより露光時間は200マイクロセカンドに設定されている。実験では、各セクションの画像を4フレームずつ撮影しているの

セクション間の時間間隔は 8 ミリセカンド、スキャニング周期 T_c は 40 ミリセカンドである。またトラッキングを行うフレーム間の時間間隔 Δt は、スキャニング周期と等しい 40 ミリセカンドとしている。

3. 画像処理手法

(1) パーティクル画像の抽出と重心点の算出

撮影されたビデオ画像は、1 フレームが 512×512 画素、1 画素が 256 階調の輝度からなるデジタルデータに変換される。

このデータに対し、まず平滑化フィルタとラプラシアンフィルタを作用させ、ノイズの除去と画像の鮮鋭化を図る。次に、図-3 に概略的に示すような手順で、パーティクルの画像を背景から抽出する。この方法では、1 フレームに単一のしきい値を用いるのではなく、それを 16×16 画素からなる小領域に分割し、その小領域ごとに判別分析 2 値化法³⁾を利用して最適なしきい値を求めて

画像の 2 値化を行う。この 2 値化画像に対して、画像の縦横比に基づき、円形画像を分離する処理等を施した後、パーティクル画像の重心点を求め、画像どうしが接触しないような条件の下で膨張処理を行い、各パーティクルが 9 画素から構成される画像として表されるものとする。このパーティクルの構成画素数は、別途求めたパーティクルの平均画素数に基づいて定めたものである。そして、この 2 値化画像と原画像の論理積を取ることで、図-3 (d) に示すように、輝度分布を有するかたちでパーティクルの画像が背景から分離されることになる。

このようにして得られた各パーティクルの 2 次元的な輝度分布に対して、最小 2 乗法に基づいた最適な回帰曲面を求め、その曲面が最大値を有する位置を重心点座標とする。この方法では、2 値化された画像から重心点を求める方法よりも高い精度、すなわちサブピクセル精度で重心点位置が求められる。

以上のようにして算出されたパーティクルの重心点位置は、画素を単位とする平面上で得られたものである。実空間上における座標を求める必要がある。ここでは、21 個のパーティクルが所定の位置に固定された基準点プレート⁴⁾を可視化される断面上に順次設置して、その画像上の位置と実際の位置の関係を求めた。その際には、両者の位置の関係を単に線形関係とするのではなく、画像の歪やスケールの相違を除去するため、3 次の回帰式を最小 2 乗法を利用して求め、画像上の重心点位置を実空間上の座標へと変換した。

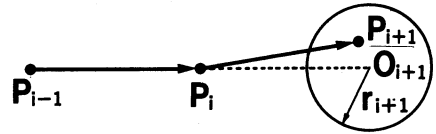


図-4 探索領域を利用するトラッキング方法

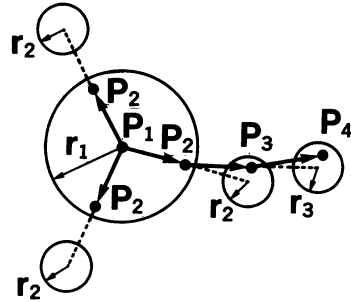


図-5 最初のフレーム上でのトラッキング方法

(2) パーティクルトラッキング

パーティクルトラッキング法では、同一パーティクルの画像を異なる時刻に得られたフレーム上で特定してゆくことにより、流速ベクトルを算出する。このトラッキングの方法としては、パーティクルの画像を重ね合わせることによって得られる流跡画像を利用する方法⁶⁾などもあるが、探索領域を設ける方法^{7), 8)}は適用範囲がより広いと、本研究でもこの方法に基づいてトラッキングを行う。

図-4 に示すように、 i 番目のフレームまで同一のパーティクルのものと考えられる重心点の候補 ($P_1, P_2, \dots, P_{i-1}, P_i$) が得られている場合、 $i+1$ 番目のフレーム上の重心点を見いだすために、半径 r_{i+1} 、中心 O_{i+1} の円形の探索領域内に含まれる $i+1$ 番目のフレーム上の重心点を探す。ここで、探索領域の中心点 O_{i+1} の位置は、重心点 P_{i-1}, P_i の位置ベクトル P_{i-1}, P_i を用いて、 $2P_i - P_{i-1}$ で与えられるものとしている。一方、探索領域の半径 r_{i+1} の値は、Dracos & Malík⁸⁾の方法を参考にして、 $i+1$ 番目のフレーム上のパーティクルの平均間隔の $1/3$ としている。このような探索領域内に重心点が 1 つだけ含まれる場合にはその点を $i+1$ 番目のフレーム上の重心点の候補 P_{i+1} とする。また、重心点が探索領域内に 1 つも存在しない場合には、これまで得られた重心点 ($P_1, P_2, \dots, P_{i-1}, P_i$) は棄却される。さらに、探索領域内に複数個の重心点がある場合には、点 P_{i-1} と P_i 、 P_i と P_{i+1} から得られる 2 つ

の局所流速の大きさの変化が小さい方を選択することとしている。

最初のフレームでは、図-5に示すように、重心点 P_1 を中心として半径 r_1 の円を描き、この中に含まれる2番目のフレーム上の重心点 P_2 を探す。半径 r_1 の値は、最初のフレームのパーティクルの平均間隔の $1/2$ とした。2番目のフレーム上の重心点がこの探索領域内に1つも含まれていない場合には最初のフレーム上の重心点は棄却されるが、図-5に示すように複数個の重心点が領域内に含まれているときには全ての重心点を同一パーティクルの重心点の候補と考え、前述した方法に基づいて3番目以降のフレーム上の重心点を次々トラッキングしてゆく。重心点をトラッキングしてゆく過程で、誤って選択されたほとんどの重心点は棄却されることになるが、最終的に同一の P_1 を始点とする複数の重心点群が得られることがあった場合には、それらの重心点を順に連ねることにより得られる局所流速ベクトルの大きさの分散が最小である組を有効なものとして判断するものとした。

可視化された領域内に、高・低流速の流れが共存している場合には、トラッキングするフレーム数 N (N は3以上) の値を変化させて流速ベクトルを求める方法が有利である。この場合に、トラッキングフレーム数 N の最小値と最大値をそれぞれ N_{T1} 、 N_{T2} とし、解析対象となる全フレーム数を N_S とすれば、トラッキングする先頭のフレーム数を1つずつシフトさせてゆくことにより、次式で与えられる合計 L 回のトラッキングが行われることになる。

$$L = (N_S + 1)(N_{T1} - N_{T2} + 1) - \sum_{k=N_{T1}}^{N_{T2}} k \quad (1)$$

(3) 流速ベクトルの算出

パーティクルトラッキングにより、異なる時刻に得られたフレーム上で同一のものと特定された重心点を利用して、流速ベクトルが算出される。図-6に概略的に示したように、トラッキングされた N 個の重心点に対して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を定める。また、流速ベクトルの始点の座標は N 個のパーティクルの重心点の座標の平均値から算出する。パーティクルの移動距離を求める際には、これを単純に最初と最後のパーティクルの位置の直線距離とするのではなく、 N 個の重心点を順次結んだ際の距離の和として求め、全体の時間差 $(N-1)\Delta t$ を用いて、流速ベクトルの大きさが定められる。

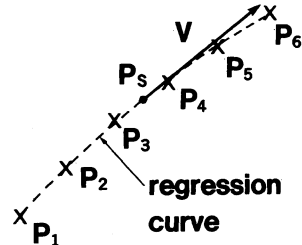


図-6 流速ベクトルの決定方法

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⁵⁾を利用したフィルタリングを行う。この手順は以下のようにまとめられる。

- 1) 1つのセクションで得られた流速ベクトルの数が n_v であるとき、これらをオリジナル・サンプルとする。乱数を利用して、このオリジナル・サンプルから n_v 個の流速成分 U_k ($k = 1, 2, \dots, n_v$) を選び、人工的なサンプル S_k^1 をつくる。オリジナルなサンプルから選出される流速成分は、一般的にはあるものは複数回選ばれ、他のものは全く選ばれないものとなる。
- 2) 上記1)の操作を n_s 回行って、人工的なサンプル群 S_k^i ($k = 1, 2, \dots, n_v$; $i = 1, 2, \dots, n_s$) を生成する。本研究では、 n_s の値は20としている。
- 3) 人工的なサンプル S_k^i に含まれる流速成分をすべて利用して、後述するような重み付けのある空間内挿を行い、オリジナルなサンプル中のある流速成分 U_k が存在する点 P_k における流速成分を算出する。同様の操作を、 n_s 個の人工的なサンプル群 S_k^i を利用して行うことにより、位置 P_k において、 n_s 個の流速成分が得られることになる。
- 4) 点 P_k における n_s 個の流速成分を用いて、頻度分布が得られるので、これより平均値 μ_k と標準偏差 σ_k を算出する。点 P_k におけるオリジナルなサンプル中の流速成分 U_k が、バンド幅 $\mu_k \pm 3\sigma_k$ の中に入っていない場合は、流速成分 U_k はノイズ成分と判断され、平均値 μ_k と置き換えられる。
- 5) 上記3)、4)と同様の操作を対象とするセクション上のすべての流速成分が存在する点 P_k ($k = 1, 2, \dots, n_v$) で行い、ノイズ成分があれば、同様の置き換えを行う。
- 6) 上記1)から5)の操作を、他の方向の流速成分 V_k に対しても同様にを行う。
- 7) 他のセクション上の結果に対して、上記1)か

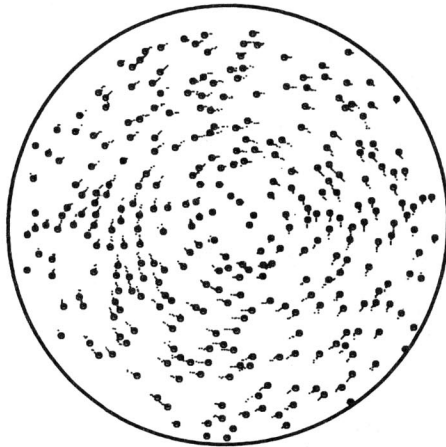


図-7 トラッキングされた重心点の分布

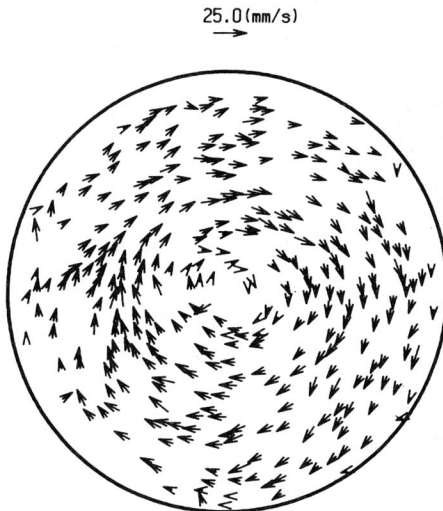


図-8 重心点から求められた流速ベクトル

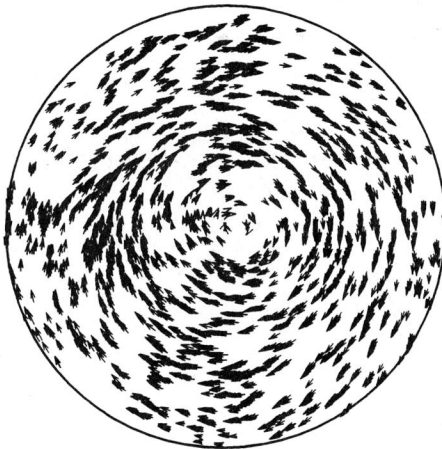


図-9 ブートストラップ適用後の結果

ら6)の操作を同様に行う。

このようにして得られた結果の例を図-7から図-9に示す。図-7は、トラッキングフレーム数 N を6とした場合の重心点の分布を示すもので、図中の白丸が最初のフレーム上の重心点を表している。また図-8は、図-7の結果から求めた流速ベクトルの分布を示すものである。図-9は、式(1)において、 $N_S = 15$, $N_{T1} = N_{T2} = 6$ とした時に得られた流速ベクトルを重ね合わせ、それらにブートストラップ手法を適用した結果を示すものである。

(4) 格子点上での流速成分の算出

これまでの方法により算出された流速ベクトルは、流体中のパーティクルの位置に依存してランダムに分布しているため、これらを生挿して規則的な格子点上の流速ベクトルとする。実験で可視化された領域は円形であるため、この中で格子点をなるべく均等に分布させるため、境界適合座標系⁹⁾を用いた格子点の生成を行った。格子点数は144であり、これらの格子点の間隔は、生挿する前の流速ベクトルどうしの平均間隔 δ_v の2倍より十分大きいので、Nyquistサンプリング条件は満足されている。これらの格子点における流速ベクトルを求める際には、Agui & Jimenez⁴⁾により提案されているガウシアン分布を利用する方法をとった。ガウシアンウィンドウの幅 H_w は、流速ベクトルの平均間隔 δ_v を考慮して、次式で与えられる⁴⁾。

$$H_w = 1.24 \delta_v \quad (2)$$

このような空間内挿を行う際に、上述のブートストラップ手法を再び適用して、生挿された流速ベクトルに対する誤差範囲を、信頼度68%のバンド幅として求めている。

4. 画像処理手法の適用性

(1) 解析条件

実験では、2.で述べたように、まず十分長い時間をかけて回転ディスクを一定の角速度で回し続け、定常状態を円筒容器内につくりだした。この定常流況を30秒間撮影した後、ディスクの回転方向を逆転させて、定常状態に続く約6分間の過渡流動をビデオテープ上に記録した。このようにして得られた画像に対して、次のような2種類の解析を行った。Case-Aでは、セクション1のみを対象として、過渡流動時の流速ベクトルの変化を時間的に細かい間隔

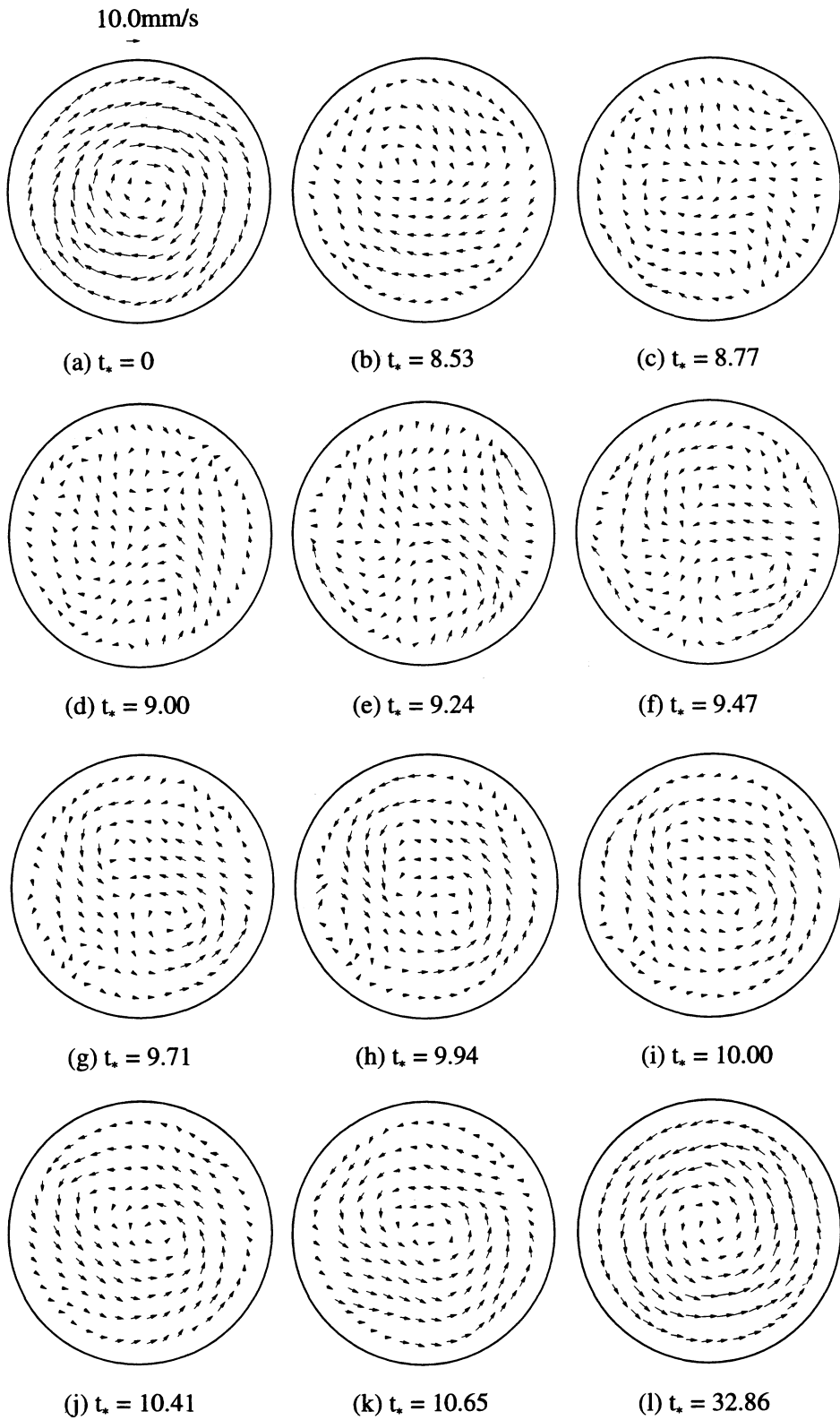


図-10 セクション1における過渡流動時の流速ベクトル

表-1 解析条件

実験ケース	Case-A	Case-B
解析対象となる 1セクション のフレーム数 N_s	5	10
サンプリング 周波数 (1/sec)	25.0	25.0
サンプリング 時間 (sec)	0.16	0.36
トラッキング フレーム数 N	3~5	3~6
流速ベクトルの 計算回数 L	6	26

で求めた。また、Case-Bでは、セクション1から5までの流速ベクトルの時間的な変化を求めた。2種類の解析では、流速ベクトルを算出するための画像データのサンプリング時間、トラッキングフレーム数などの条件は、表1のように設定した。なお、表-1中の流速ベクトルのトラッキング回数 L は、式(1)で与えられるものである。

定常状態におけるCase-Bの解析から得られた、セクション1から5にわたる平均的な計測結果は以下の通りである。

- 1) 1セクションあたりの平均的なパーティクルの個数：332.6個
- 2) L 回のトラッキング処理により得られた1セクションあたりの平均的な流速ベクトルの数：4620個
- 3) 流速ベクトルの平均的な大きさ U_0 ：11.1mm/s

(2) 計測結果

図-10に、Case-Aの解析で得られたセクション1の流速ベクトルの時間的な変化を示す。このうち、定常状態の結果を示す図-10(a)と、最後の時刻の図-10(l)の結果はCase-Bの解析で得られたものである。図-10中の時刻 t^* は、定常流動時の代表時間 $T_0 = 9.01$ (sec)で正規化したものである。時刻 $t^*=0$ は、回転ディスクが逆転した瞬間の時刻に相当する。ディスクが反転してから $t^*=8.53$ 後の流況を示す図-10(b)では、回転方向は定常状態の図-10(a)の流れと同方向であるが、流速が全体に低下して、中心位置も偏心したような状態になっている。

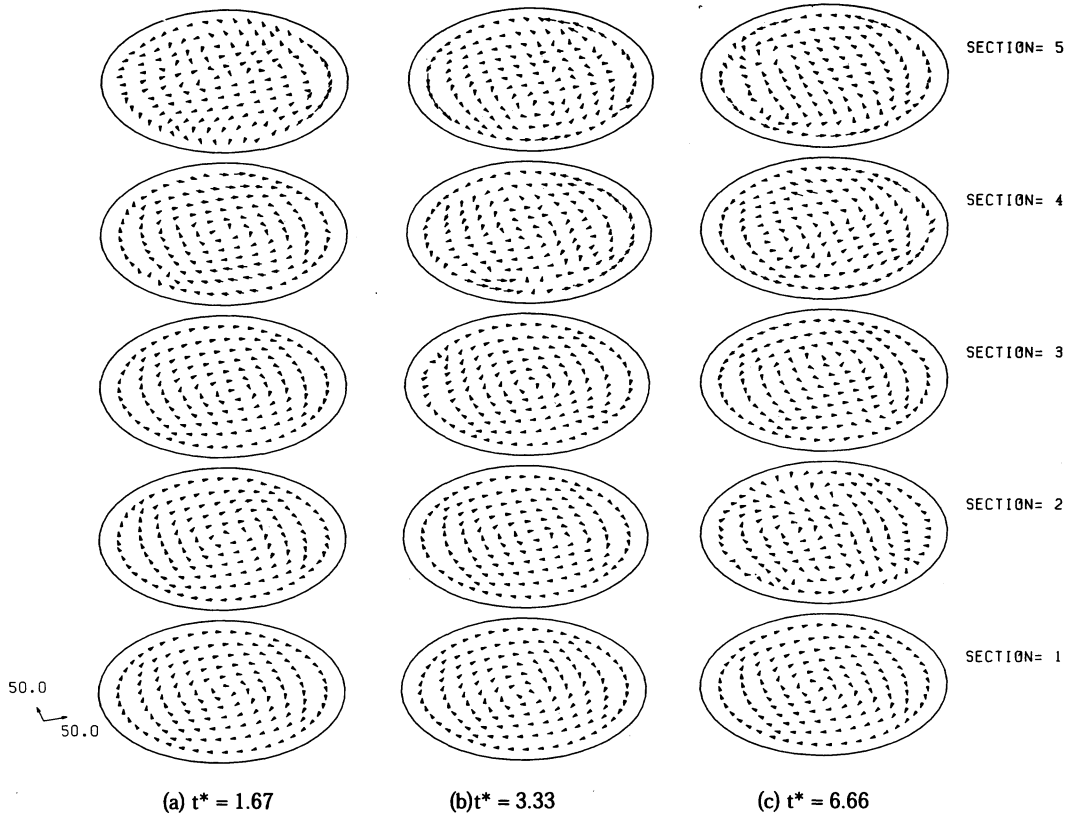


図-11 セクション1から5の過渡流動時の流速ベクトルの分布

その後、残存する定常状態の回転方向の流れと、しだいに支配的なものとなってゆく逆方向に回転する上方の流体のせん断力の影響が共存するような形で、流況は空間的に複雑に変化してゆく。そのような過渡流動の状況がとらえられているので、流況が時間的に連続して変化してゆく状態が把握できる。図-10(k)に示された時刻 $t^*=10.65$ では、流れは定常状態と反対方向のものになっているが、流れは蛇行しており、スケールの大きい乱れがなお存在している。そして、図-10(l)の時刻になると、流速も増加して、再び定常状態に近い流況になっている。

図-11には、Case-Bの解析で得られた流速ベクトルの分布を示した。これらの結果は、過渡流動状態のセクション1から5までの流況を斜め上方から見る鳥瞰図として示したものである。回転ディスクに最も近いセクション5からセクション1へ回転ディスクの逆転の影響が時間の経過とともに進行して行く状態が明瞭に把握されている。

(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きている^{4)・6)}。ここでは、これらの評価法に基づいて、本研究の画像処理手法の計測誤差を検討する。Agui & Jimenez⁴⁾に従えば、考慮すべき誤差として、可視化誤差、サンプリング誤差、そして内挿誤差があげられる。

このうち、可視化誤差は、パーティクルの位置決め誤差とパーティクルの流体への追従性(トレーサビリティ)に由来する誤差から構成される。パーティクルの位置決め誤差 ε_η は次式で与えられる⁴⁾。

$$\varepsilon_\eta = \eta^* U_0 \quad (3)$$

ここで、 η^* は、パーティクルの平均的な移動距離で正規化されたパーティクルの重心点位置の正確度である。本研究の計測条件では、内径100mmの円筒容器の直径が約400画素の画像として記録されているので、1画素あたりの長さスケール Δ_p は約0.25mmである。また、パーティクルの平均的な移動距離 Δ は、 U_0 とトラッキングを行うフレーム間の時間間隔(40ms)、そして平均的なトラッキングフレーム数(ここでは4とする)より、1.8mmと計算される。本研究では、重心点座標が2次の精度で得られているので、 ε_η は次のように評価される。

$$\varepsilon_\eta = \eta^* U_0 = \left(\frac{\Delta_p}{\Delta} \right)^2 U_0 \approx 1.92 \times 10^{-2} U_0 \quad (4)$$

次に、パーティクルのトレーサビリティに起因する誤差 ε_f は次式で評価される⁴⁾。

$$\varepsilon_f = 1.8 \times 10^{-2} \frac{\gamma_p U_0^2}{S_0} \quad (5)$$

ここで γ_p は流体中におけるパーティクルの重量密度、 S_0 はストークス数である。実験では、比重が適切に調整された食塩水を用いているため、 γ_p は十分0に近く、 ε_f は無視できる。

サンプリング誤差 ε_{SAM} は次式で評価される⁴⁾。

$$\varepsilon_{SAM} = u' \left(\frac{3\eta^* U_0}{D u'} \right)^{(m-1)/(m+1)} \quad (6)$$

本研究で対象とするような過渡流動現象に関しては、アンサンブル平均に対する変動流速 u' の特性を評価するのは困難であるので、Agui & Jimenez⁴⁾と同様に $m=5/3$ 、 $u'/U_0=0.1$ と仮定すれば、

$$\varepsilon_{SAM} = 2.5 \times 10^{-2} U_0 \quad (7)$$

と評価される。

最後に、本研究で内挿時に用いているガウシアンウインドウの定め方や、クラス3のブートストラップ手法を利用していることなどを考慮すれば、内挿誤差はAgui & Jimenez⁴⁾が評価した値(3%)とほぼ同等であると考えられる。以上の全ての誤差が独立であると仮定すれば、それらの2乗和を求めることにより、全体の誤差 ε_T は次のように算出される。

$$\varepsilon_T = 4.4 \times 10^{-2} U_0 \quad (8)$$

以上のように、得られた計測結果には4.4%程度の誤差が含まれていることになるが、この値は計測結果に伴う誤差の大きさとしては十分小さく、実用上問題ないものであると考えられる。

5. おわりに

本研究ではレーザービームのスキニングと、これに同期した高速ビデオ撮影により、3次元流体中の複数の2次元断面内の流況をほぼ同時刻に可視化するシステムを作成した。高速ビデオにより取得された画像データに対して画像処理を施すことにより、可視化された断面内の流速ベクトルが算出される。

特に、本研究の画像処理手法では、パーティクル画像の抽出方法や重心点の定め方、ブートストラッ

ブ手法の適用, 流速ベクトルの方向の決定方法などが精度良く行えるものとなっている。

上記の可視化システムと画像処理法を, 回転ディスクが取り付けられた円筒容器内の流速計測に適用した。実験では, 定常流動と, ディスクの回転方向を逆転させた後の過渡流動を可視化し, 複数の水平断面内の流速をほぼ同時刻に計測した。その結果, 過渡流動時の流速分布の時間的・空間的な変化が連続してとらえられ, 本画像処理手法により過渡流動現象の流況の把握が適切に行えることがわかった。また, 既往の誤差評価方法に基づいて計測精度を算出した結果, 誤差の大きさは十分小さいことが確認された。

以上のように, 本研究では, 3次元流体中の複数の2次元断面内の流速分布を良好に計測できる手法を提案したが, 一般的な実用性という観点から見た場合, 実験水槽が可視化に適した形状であることが必要であり, さらに可視化に用いる機器の仕様等に応じて, 対象となる流れの時間的・空間的スケールなどに関連した適用限界が存在することは明らかである。今後は, 3次元流速成分の計測などを含めて, このような計測手法の適用範囲を拡張してゆくとともに, 画像処理に関する各要素技術を改良して精度の向上をはかる予定である。また, 他の計測手法や数値解析結果との比較なども行いたいと考える。

参考文献

- 1) Hesselink, L.: Digital image processing in flow visualization, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 20, 421-485, 1988.
- 2) Kasagi, N. and Sata, Y.: Recent developments in three-dimensional particle tracking velocimetry, *Proc. 6th Int. Symp. on Flow Visualization*, Springer-Verlag, 1992.
- 3) 大津 展之: 判別および最小2乗規準に基づく自動しきい値選択法, 電子通信学会論文集, Vol.D, J-63, No.4, 349-356, 1980.
- 4) Agui, J. and Jimenez, J.: On the performance of particle tracking, *J. Fluid Mech.*, Vol.185, 447-468, 1987.
- 5) Efron, B.: Estimating the error rate of a prediction rule: Improvement of cross-validation, *J. American Statistical Association, Theory and Methods Section*, Vol.78, No.382, June, 1983.
- 6) Kobayashi, T., Yoshitake, Y., Saga, T. and Segawa, S.: An image processing technique for determining two-dimensional flow fields with reverse flow, *Proc. ASME Symp. on Physical and Numerical Flow Visualization*, 39-46, 1985.
- 7) Dracos, T. and Malik, N.A.: 3D particle tracking velocimetry - its possibilities and limitations, *Proc. 6th Int. Symp. on Flow Visualization*, Springer-Verlag, 1992.
- 8) Sata, Y. and Kasagi, N.: Improvement toward high measurement resolution in three-dimensional particle tracking velocimetry, *Proc. 6th Int. Symp. on Flow Visualization*, Springer-Verlag, 1992.
- 9) Thompson, F., Thames, F.C. and Mastin, C.W.: Numerical solution for viscous and potential flow about arbitrary two-dimensional bodies using body-fitted coordinate system, *J. Comput. Phys.*, 24, 1977.

(1995.8.14受付)

PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY USING LASER BEAM SCANNING

Satoru USHIJIMA

A particle tracking velocimetry (PTV) system has been developed to obtain instantaneous two velocity components on several sections in three-dimensional space. The flow visualization is conducted by means of parallel laser-light sheets created by a scanning laser beam and the visualized particle images are taken by a high-speed video system synchronized with the scanning. In order to obtain higher accuracy in velocity measurements than usual PTV, some improvements are made on the analyzing procedures: the extraction of particle images, the determination of their center points, the derivation of velocity components and others. The present PTV was applied to the transient flows in a cylindrical tank with a rotating disc. As a result, two-dimensional transient flow patterns with large scale disturbances are continuously captured in three-dimensional space.