

# 流れの可視化・解析技術の開発

## Development of a General Purpose Full-field Velocity Measurement System

津 田 宜 久<sup>(1)</sup>  
Nori-hisa  
TSUDA

波 江 野 勉<sup>(2)</sup>  
Tsutomu  
NAMIENO

佐 賀 徹 雄<sup>(3)</sup>  
Tetsuo SAGA

小 林 敏 雄<sup>(3)</sup>  
Toshio  
KOBAYASHI

### 抄 録

工業の広い分野で非常に重要な位置を占めている流れ場解析において、複雑な流れ場の空間構造が把握可能で、かつ空間内の同時多点計測が可能なPIV (Particle Image Velocity: 粒子画像流速測定法)が注目されている。この技術は流れ場計測における新たな計測手段として、急速に発展している。新日本製鐵では、汎用PIVシステムを開発し、鉄鋼プロセスの流体力学的諸問題を実験的に解明するための基盤技術として、既に社内の重要な開発テーマの実行に適用している。本稿では、1)新日本製鐵と東京大学生産技術研究所で開発した“汎用画像処理流速計Current”の概要、2)水流への適用、3)気流への適用、4)気液二相流への適用例について述べた。

### Abstract

In various industrial field, analysis of complex flow fields is an important role for a rational design and effective operation of facilities. The Particle Image Velocimetry (PIV) is an innovative flow visualization technique which allows the instantaneous and simultaneous measurement of velocity vectors over a full flow field. The techniques have been rapidly progressing as a powerful tool to analyse a complex flow field. As the fundamental experimental technique for analysing the industrial problems, a general purpose PIV system has been developed, and the system was applied to various hydrodynamic problems in steelmaking process at the Nippon Steel. In this paper, the “Current”, a general purpose PIV system developed at Nippon Steel and the University of Tokyo is briefly introduced, and its applications to a water flow, an air flow and a gas-liquid two-phase flow are described.

#### 1. はじめに

流れ場の現象を解明することは、工学の広い分野で非常に重要な位置を占めており、流れ場を解析するために、レーザ流速計や熱線流速計を用いた各種計測技術が古くから研究され、技術の蓄積がなされている。また、近年、強大な能力を持ったコンピュータが我々の身近なものになり、これらを用いた流れ場の予測手法が盛んに研究され、その実用化が期待されている。

今回報告する“流れの可視化・解析技術”は、流れ場の可視化画像をデジタル処理し、速度を計測する新しい流体計測法で、瞬時に二次元・三次元の多点の速度情報を採取できる有効な計測技術として大変注目されている<sup>(1)</sup>。この計測技術は画像処理流速計と呼ばれ、その応用範囲は広く、各種プラント、自動車、船舶、航空機、建築物などの開発過程あるいは半導体やバイオ技術における流れ場の制御等の基礎・応用研究等に広く用いられるようになってきている。この画像処理流速計の構築にあつては、迅速に実験結果を処理できること、及び多様な流れ場に適用できるシステムであることが最重要課題となっている。Currentは、このニーズに応えるべく開発されたものであり、この開発により各種研究が迅速にかつ効率的に遂行されるようになった。

#### 2. 画像処理流速計

画像処理流速計は、流れ場に予め混入したトレーサ粒子の動きを時々刻々追跡して速度を計測するPTV (Particle-Tracking Velocimetry)と異なる時間でトレーサ粒子の分布パターン類似性から流速を計測するPIV (Particle-Imaging Velocimetry)及び流れ場の散乱粒子のスペckルパターンを二重露光のスペckル写真として記録し、このスペckル写真からスペckルパターンの移動量を計測するLSV (Laser Speckle Velocimetry)に大別される。これらの計測システムの特徴は、第一に流れ場の多点において同時計測ができることであり、工学の分野で取り扱われる複雑な流路形状を有する三次元流れの計測には非常に有効な手法である。第二の特徴は、速度の二成分ないしは三成分の同時計測ができる点である。乱流モデルの開発や検証を行う上では、レイノルズ応力テンソルやより高次の乱流統計量に関する情報が有用であり、速度の多成分の同時計測に関する要求は極めて高い。

鉄鋼プロセスの実機現象を把握するための模型実験において、これらの計測技術を実用的に適用するためには、流れの可視化において処理の面倒さのないPTVやPIVが非常に有効である。君津製鐵所では、液流における速度計測技術としてCurrent PTVを、また空

<sup>(1)</sup> 君津製鐵所 生産技術部 掛長

<sup>(2)</sup> 君津製鐵所 設備部 部長

<sup>(3)</sup> 東京大学 生産技術研究所

気流における速度計測技術としてCurrent PIVを開発し、各種模型実験に適用している。以下、開発したPTVシステム及び開発中のPIVシステムの概要と流れ場の計測結果について述べる。

### 3. 開発したPTV・PIVシステム

開発したシステムは光学系と処理系から構成されており、光学系は、レーザーライトシートとNTSC (National Television System Committee)方式のTVカメラで、処理系は、パーソナルコンピュータをベースに構成した。システムの開発には、以下の点を特に考慮した。

(1)既に開発されているPTVシステムは、比較的低いレイノルズ数の流れに対しては有効であるが、高いレイノルズ数の流れに対しては計測が困難な場合が多い。これは、画像の入力装置として機能性、汎用性の優れているNTSC方式(フレームレート:1/30秒)のTVカメラや録画再生装置でシステムを構成するためである。このシステムでは、フレームレートに起因して、可視化空間におけるトレーサ粒子の移動速度が早い場合には、トレーサ粒子の追跡が不可能になる。開発したシステムでは、レーザーライトシートを流体中に間欠照射し、得られる1フレームの画像からトレーサ粒子を追跡することで、高いレイノルズ数の流れ場の計測を可能とした。

(2)PTVにおいては、計測精度を良好に保つため、密度が流体とほぼ同程度で、しかも十分小さな粒子径のトレーサ粒子を選択することが要求される。しかし、NTSC方式のTVカメラや録画再生装置を使用する限り、トレーサ粒子像がTVカメラのCCD素子の分解能と同程度かそれ以下の場合には、トレーサ粒子の位置を検出できないという問題がある。開発したシステムでは、1フレームの画像にTVカメラの空間分解能より小さなトレーサ粒子像を画像化し、得られる微弱な画像から新たに開発した画像改善アルゴリズムにより正確にトレーサ粒子位置を検出可能とした。

(3)空気流れの可視化実験から速度を計測するため $1\mu\text{m}$ 以下のトレーサ粒子で可視化した画像から濃度相関法を用いて速度計測を可能とした。

(4)PTV、PIVシステムでは、可視化空間の瞬時の速度から、時間平均速度、乱れ強度、レイノルズ応力及び圧力を計測するため、格子上的補間アルゴリズムやポアソン方程式及びラプラス方程式の高速演算アルゴリズム等を開発した。

(5)パーソナルコンピュータをベースにした安価な処理システムを構築した。システムでは、処理の高速化と開発の柔軟性を考慮して、C言語とASM言語で記述されたソフトウェアで処理を実行する方式を採用した。また、パーソナルコンピュータを用いるために生じるメモリ制約やグラフィックス制約を緩和するため、独自に開発したWINDOWSシステムを採用することで、10MB程度のソフトの実行を可能とした。

### 4. PTV・PIVシステムの構成

本計測手法は、流れに注入した多数のトレーサ粒子の運動を二次元的に追跡して、短時間内の速度の二成分を計測するものである。低速から高速で移動するトレーサ粒子の運動を解析するため以下のような可視化システム、画像処理システムを構成した。

#### 4.1 可視化システムの構成

図1は、光学系、画像処理入力・記録装置及びそれらの制御装置

からなる可視化システムである。光源には4Wのアルゴンレーザーを用いた。レーザー光は音響光学セル(AOM)を通り、ここでの超音波のドップラ効果により散乱したレーザーの一次の散乱光が光ファイバーへと導かれる。すなわちAOMをオン・オフ制御することにより短時間内の流れ場への間欠的なパルス照射を行うことができる。光ファイバー先端から出射したレーザー光は、2枚のシリンダリカルレンズと複数の光学レンズにより、厚さ数mmのレーザーライトシート(LLS)として形成される。AOMとTVカメラを外部制御装置で制御することでカメラの垂直・水平同期に対するLLSの照射タイミングが設定される。

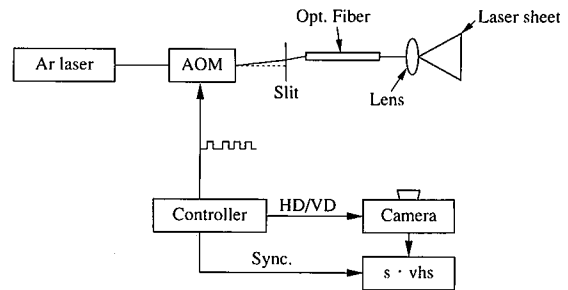


図1 可視化光学系

図2は、LLSの照射タイミングの一例を示したものである。第1フィールドの前半で1度、第1フィールドの後半に3度の瞬間的な間欠照射が行われている。LLSの照射時刻 $T_i$ と照射間隔 $d_i$ は流れの速度に応じて $10\mu\text{s}$ 単位で制御することが可能であり、照射回数も適宜選択することが可能である。

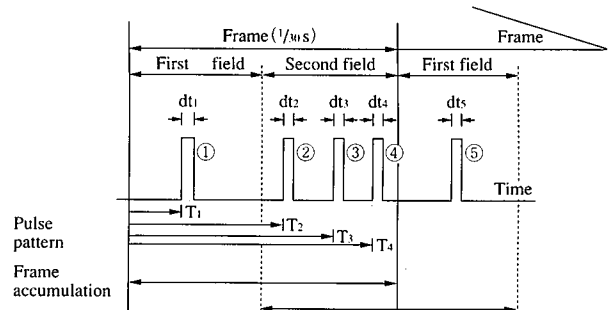


図2 LLSの照射コード

PTV手法を用いて可視化画像を処理するためには、TVカメラでは、図2に示すようなフレーム蓄積方式を採用している。すなわち、第1フィールドのCCD素子に対しては、第1フィールドの開始から第2フィールドの終了までの1/30秒間が、第2フィールドのCCD素子に対しては、第2フィールドから次のフレームの第1フィールドの終了までの1/30秒間での光の蓄積が行われる。従って、上記照射コードを用いた場合、時刻 $T_1$ と $T_5$ で照射されたトレーサ粒子像は、第1フィールドのフォトセンサに対してのみ記録される。一方、時刻 $T_2 \sim T_4$ でのそれは、フレーム積分の時刻が重複しているので、両フィールドのフォトセンサに記録されることとなる。PTV処理においては、トレーサ粒子の代表位置を粒子像の重心位置として定義する。従って、速度の算出は、重心位置の計測精度の高い時刻 $T_2 \sim T_4$ までの粒子像の重心位置を用いることとする。

P I V手法を用いて可視化画像を処理するためには、可視化空間でのトレーサ粒子の移動量が小さい場合には、TVカメラではフィールド積分法を採用し、第2フィールドで1度のLLSの照射が行われ、フレーム単位の2時刻の画像からトレーサ追跡により速度が計測される。これに対して、可視化空間でのトレーサ粒子の移動量が大きい場合には、光の蓄積をフィールド積分法を採用している。すなわち、流れ場からの光は第1フィールドのCCDに対しては第1フィールドの開始直後から第1フィールドの終了までの1/60秒間を、第2フィールドのCCDに対しては、第2フィールドの開始直後から第2フィールドの終了までの1/60秒間での光の蓄積が行われる。LLSの照射タイミングは、第1フィールドと第2フィールドで1度づつ照射され、連続するフィールド単位の画像からトレーサ追跡により速度が計測される。

照射コードに基づくLLSの照射は、連続するTVフレームで実行される。このTVカメラの出力はNTSC規格のコンポジット信号として録画装置に転送・記録される。

#### 4.2 画像処理システム

このようにして得られたビデオ信号は、一旦光ディスクに選択的に録画される。次に、光ディスクのビデオ信号はフレーム単位で図3に示す画像処理システムのフレームボードに入力され、512×480画素、8ビットの入力画像にA/D変換される。TVカメラの出力は、直接画像処理装置のフレームメモリに入力することも可能である。画像処理システムは32ビットのマイクロコンピュータをベースに構成されており、NTSC規格に準ずるフレームボード、演算結果を表示するフルカラーボード、計算結果を保存するための外部磁気ディスク装置が取り付けられている。

システムで実行される処理は大別して、(1)可視化画像の入力、画像の改善、ノイズ除去、トレーサ粒子の重心位置計測(P T Vの場合)、(2)トレーサ粒子の追跡、速度ベクトルの算出、任意ワイヤフレームへの補間演算処理、各種物理量への変換処理、及び(3)処理結果のコンピュータグラフィックスである。

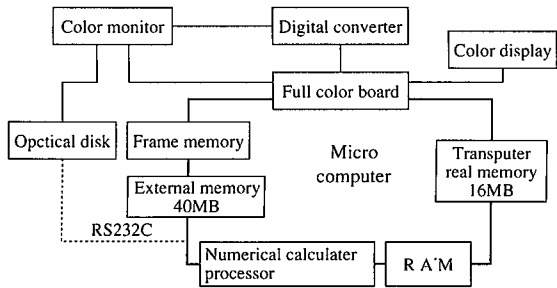


図3 画像処理システム

### 5. P T Vにおける画像処理と速度計測

上述の可視化システムにより画像化されたトレーサ粒子画像には、まず画像の改善、ノイズ処理等の画像の前処理が施される。次に、この画像を用いたトレーサ粒子の運動解析により速度ベクトルの計測が行われる。本P T Vにおいては、コード化されたLLSにより多重露光された1フレームの入力画像の情報をもとに二次元速度ベクトルの決定がなされる。計測された速度ベクトルからは、格子点上の速度ベクトルが予測され各種物理量へと変換され、それらの結果が表示される。

#### 5.1 画像の前処理

図4は白色のトレーサ粒子(ナイロン12)を流路に注入し、入力画像上での粒子像の濃度値を調べたものである。横軸はLLSの照射時間dtで1H=63.56μsである。縦軸は入力画像上での濃度値である。この可視化においては、以下のような実験条件が設定されている。レーザの出力は2Wに、LLSの厚みは2mmに設定した。TVカメラは観測面と垂直に約1mの距離に設定されている。観測面の大きさは100mm×100mmである。図からは、粒子径及びLLSの照射間隔の減少に伴って画像上での粒子像の濃度値が低下していく(暗くなる)ことが分かる。例えば、上記の条件では、数m/sの速度計測をおこなう場合には、LLSの照射時間は、瞬間的な画像を得るためには数H程度に設定する必要がある。更に、トレーサ粒子の流体中への追従性を考慮すると50μm以下のトレーサを選択する必要がある。このような条件では、画像上で得られるトレーサ粒子の濃度値は、かなり低いものとなり背景画像との濃度差は小さくなる。従って、このような画像が単純な背景処理と二値化処理だけで粒子像を背景から分離することは困難で、また得られる粒子もごく限られた数になってしまう。

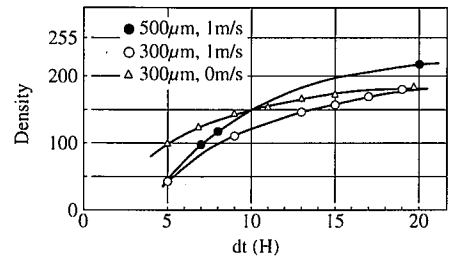


図4 トレーサ粒子形と画像濃度の関係

そこで、以下のようなトレーサ粒子画像の改善アルゴリズムを開発した。本画像改善アルゴリズムは、(1)個々のトレーサ粒子の濃度値が背景画像の濃度値に比べ顕著でない場合、(2)背景画像の濃度値が空間的・時間的に異なり、二値化レベルが空間的に異なる場合に有効な手法である。まず、可視化画像は1/30秒単位のフレーム画像としてフレームボードに取り込まれる。画像入力時のA/D変換におけるコンポジットビデオ信号は入力電圧の0~1Vの任意の範囲を0~255階調のデジタル量に変換される。この画像に対して画像改善のために次の処理が施される。

まず、1)入力画像に図5に示す3×3のマスクを用い、(1)式による平均化操作を行う。

$$g_0 = (f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8) / 9 \quad \dots (1)$$

ここでg<sub>0</sub>は平均化演算処理を施した出力画像のマスクの中心位置での濃度値である。次に2)平均化画像に対して(2)式によるラプ

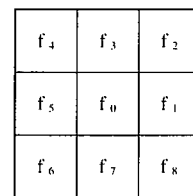


図5 3×3マスク

ラシアン・フィルタリングを行う。

$$g_0 = (f_1 + f_3 + f_5 + f_7) - 4f_0 \quad \dots\dots(2)$$

次に、3)このフィルタリング処理された画像の負の濃度領域の値のみを残す処理を施し、最後に平均化画像からフィルタリング処理された画像の負の濃度領域の値のみ差し引く。この1)~3)の処理を入力画像の濃度値に応じて数回繰り返すことによりトレーサ粒子部に対する画像の濃度が強調される。

図6に画像改善例を示す。図6(a)は入力画像の一部とその画像中の一定線上の濃度分布で、(b)は画像改善後のそれを示している。濃度分布の鋭い部分がトレーサ粒子に相当する部分である。図からも明らかなように、トレーサ粒子と背景画像の濃度差が少なく、かつ空間的に背景の濃度値が異なる画像において本画像改善処理が有効に機能していることが示されている。

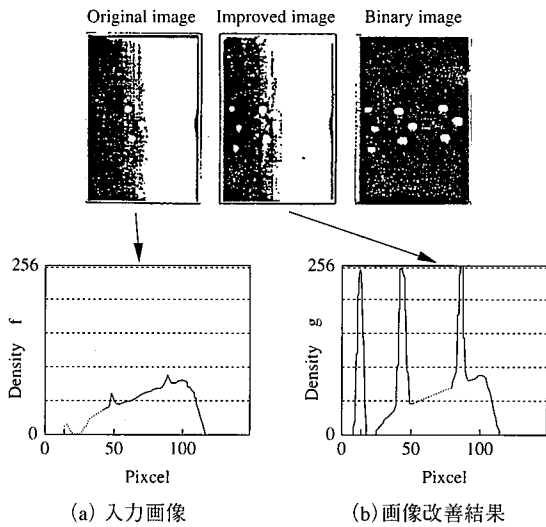


図6 トレーサ粒子画像と画像改善画像

5.2 処理画像の作成

本画像解析では、同一フレームの入力画像から処理画像を作成する。トレーサ追跡アルゴリズムによって用いる画像が異なるが、ここでは高速で移動する微小トレーサ粒子の速度計測を行うための処理画像の作成について述べる。画像改善が施されたフレーム画像からは、2枚のフィールド画像が分離作成され、1枚のフレーム画像と2枚のフィールド画像を用いて速度ベクトルが決定される。フィールド画像の作成においては、まずフィールド分離マスクを用いて第1フィールドと第2フィールドに分離される。つづいて、この分離により空になったそれぞれの画像のフィールドの画素の濃度値を、図5のマスクを用い(3)式の補間演算で求める。

$$f_0 = (f_2 + f_3 + f_4 + f_6 + f_7 + f_8) / 6 \quad \dots\dots(3)$$

次に、この3枚の画像に対して2値化処理が施され、トレーサ粒子部が背景画像から分離・抽出される。この画像から個々のトレーサ粒子の重心が計測され、画像処理装置の外部記憶装置に保存される。

5.3 速度ベクトルの決定

上述の手順で作成された処理画像と計測されたトレーサ粒子の重心位置情報を用いて、短時間内の粒子の運動を解析し速度を計測するアルゴリズムを以下に示す。本節では、高速で移動する比較的大きなトレーサ粒子(外形100μm程度)の追跡アルゴリズムのみについて説明する。微小なトレーサ粒子の追跡方法等に関しては、文献5, 6, 9)を参照頂きたい。

図7に速度ベクトルを算出するための基本アルゴリズムを示す。コード化されたL L Sの照射とTVカメラのフレーム積分により同一トレーサ粒子の像は、例えば、図7の上を示すようにフレーム画像Gでは粒子像[1]~[5]が、第1フィールドの画像G 1上と第2フィールドの画像G 2上には[1]~[4]及び[2]~[5]がそれぞれ得られる。ここに[1]から[5]はそれぞれ時刻T1~T5で照射されたL L Sによるトレーサ粒子像である。粒子の追跡とトレーサ粒子の決定は画像G上で行われるが、この画像には時刻情報が存在しない。そこで画像G 1と画像G 2が情報が用いられる。すなわち、画像G 1と画像G 2を差し引くことで両画像に共通な粒子JからLは消去され、粒子Iと粒子Mのみが抽出される。このとき、正の濃度値を持つ粒子は画像G 1に存在していた粒子であるのでこれが始点粒子と判断される。この情報をもとに画像G上でのトレーサ粒子の追跡を行うことで速度を計測することができる。トレーサ粒子の追跡方法に関しては文献10)に記述されている。

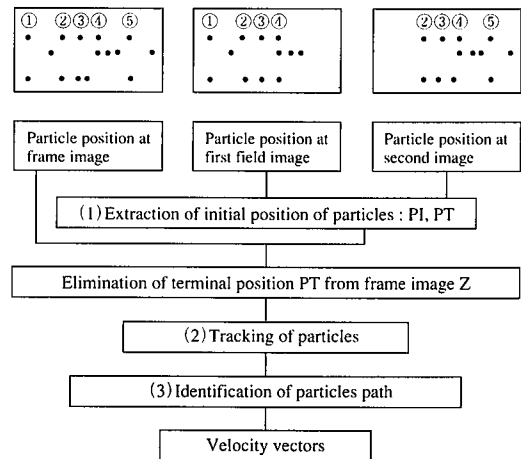
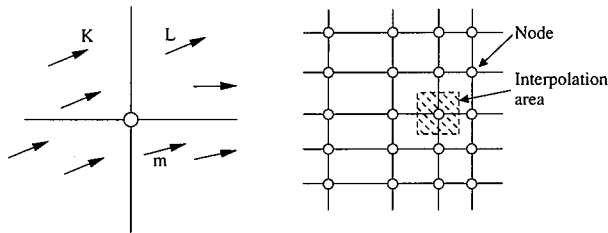


図7 速度ベクトルの決定方法

5.4 格子点速度の予測

上述の処理で得られた速度ベクトルは測定領域の任意点に散乱するため、流れ場に等間隔及び非等間隔のワイヤフレームを形成し、格子点上の速度ベクトルを予測した。図8に示すように格子点周りに補間領域を設定し、そこに存在する速度ベクトルから格子点上の速度を以下のように補間して求めた。補間領域は、格子点周りの隣合う上下、左右に格子点間距離の1/2以内の矩形領域とした。補間領域内に存在するn個の速度ベクトルから任意の3組の速度ベクトルを組み合わせ(4)式のマトリックス計算を行う。

ここに $U_k, U_L, U_M$ は補間領域内の任意の三組の速度ベクトルで、 $U, du/dx, du/dy$ は補間される格子点での値である。同様の計算を領域内の $nC_3$ 通りの組み合わせに対して行う。得られた $nC_3$ 通りの補間結果から平均値を求め、格子上の速度ベクトルとした。



(a) 格子点回りの速度ベクトル (b) 補間領域

図 8 格子点回りの速度ベクトルの予測

$$U_i = U + \frac{du}{dx} dx + \frac{du}{dy} dy$$

$$\begin{bmatrix} 1 dx_k dy_k \\ 1 dx_L dy_L \\ 1 dx_m dy_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ \frac{du}{dx} \\ \frac{du}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_k \\ U_L \\ U_m \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

6. PTVシステムの適用例

まず、PTVシステムの実用性を示す。図9は水モデル実験装置での可視化写真である。実験装置は鉄鋼プロセスの連続铸造機の1/7模型で、流れの可視化には、ナイロン12を採用した。実験装置の断面形状が34mm×212mmの矩形で、その上部には断面形状が円径(内径10mm, 外径20mm)の浸漬管が深さ30mmの位置まで挿入されている。浸漬管の先端付近には直径10mmの吐出孔が2個、管軸と垂直方向に15°の角度で開けられている。流れは浸漬管上部に取り付けられた長さ1mの円管内で十分発達し、浸漬管を通り実験装置内に吐出する。浸漬管内での平均流速は1m/secである。また、浸漬管吐出部での最大流速は、1.75m/secである。浸漬管から吐出した流れは側面に衝突した後、壁面に沿って上下に分離して流れる。その一部は、上部にキャビティ流れを形成し、他は実験装置下部(重力方向)へ流れる。

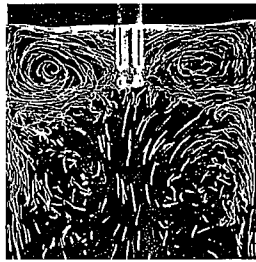


図 9 トレーサ粒子による可視化画像

表1は、LLSの照射コードを示す。LLSは厚さ1mmになるように調整されており、浸漬管先端付近の100mm×100mmの測定領域中には流速の早い領域と、流速の遅い領域が混在しているため、3水準のLLSの照射コードで入力画像を作成した。

表 1 LLSの照射コード

Code	T1	T2	T3	T4	dt
1	220H	270H	300H	330H	10H
2	100H	200H	400H	510H	10H
3	100H	—	356H	—	10H

図10は入力画像からトレーサ粒子を追跡したものである。表1の照射コードで得られたトレーサ追跡結果から時間基準を線型的に7msに合わせ可視化空間に重ね合わせたものである。1秒間(60フィールド)の画像を用いた結果、約600個のトレーサ追跡結果が得られた。図11は、31×31の格子点上へ先に示した補間方法で補間演算を行った結果である。流れの可視化から補間演算に要した時間は約10分程度であり、本PTVシステムの有用性が示されている。

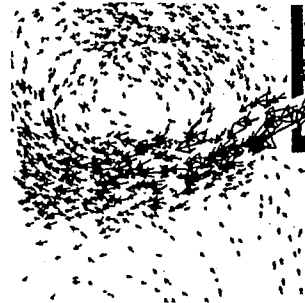


図 10 トレーサ追跡結果

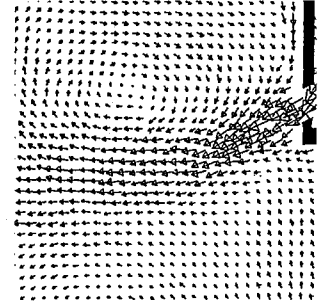


図 11 格子点上速度

次にPTVシステムの測定精度を示す。計測対象とする流れ場は図12に示す後方ステップをもつチャンネル内の乱流である。ステップ上流には一辺が0.1mの正方形断面を持つ長さ1.5mの矩形管が、また、下流には0.1m×0.15mの長方形断面を持つ長さ2.0mの矩形管が取り付けられている。ステップ上流での主流の平均速度U0は0.8m/sである。

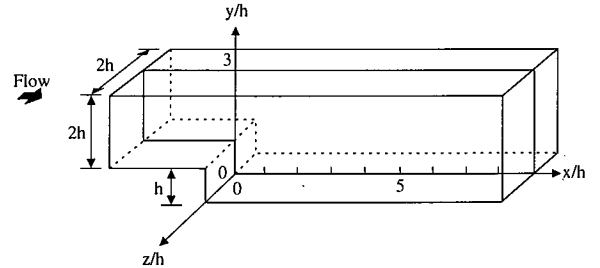


図 12 後方ステップ流れの速度計測

流れ場の可視化は管路中央のx-y断面とし、この断面を管路上部からLLSで照射し、測定断面に垂直な方向からカメラで画像を可視化した。可視化に用いたトレーサ粒子は平均粒径50μm、比重1.02のナイロン粒子である。

図13(a)に格子上的速度ベクトルを、図13(b)に速度情報から楕円

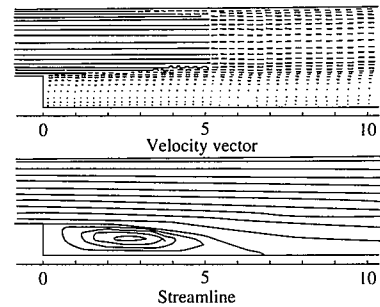


図 13 バックステップ回りの速度計測

形ポアソン方程式により算出した流れ関数を示す。

本実験における再付着点は $x/h \sim 6.8$ である。つぎにこの測定結果をLDVの測定結果と比較した。図14は、 $x/h=6.22$ における速度分布である。図中、黒丸はPTVの計測結果を、破線はLDVの計測結果を示している。縦軸は $U_0$ で無次元化されている。せん断層や再循環域で幾分の相異が認められるものの、両者の測定結果はよく一致している。これらのことから本PIVによる速度計測は、高い信頼性を持っていることが分かる。

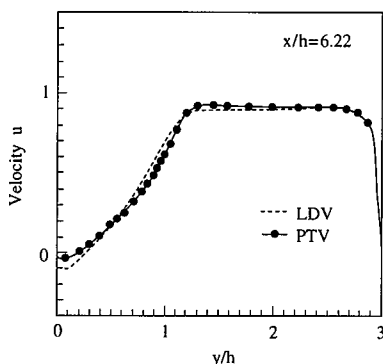


図14 PIVとLDVの測定結果

## 7. PIVにおける速度計測

PTVは各時刻でのトレーサ粒子位置から独自に開発したトレーサ追跡アルゴリズムにより速度計測を行う手法である。PTV計測技術は、上述に示したように、時間平均速度の計測を行う上では非常に有効な計測技術である。しかし、この計測技術には、(1)各時刻でのトレーサ粒子の位置から速度を計測するため、サブミクロンのトレーサ粒子を用いた可視化には適用が困難であること、(2)瞬時の速度を計測するためには、可視化空間に均一にトレーサ粒子を混入する必要がある等の制約がある。著者らは、サブミクロンのトレーサ粒子で画像化した可視化画像から速度を計測する技術としてPIV手法の開発に着手している。PIV手法は、2時刻の画像の濃度分布の相似性から速度を計測する画像処理計測技術であり、既に、2時刻の可視化画像の濃度分布から速度を計測するアルゴリズム開発している。本章では、PIV手法による速度計測と空気流れでの基礎実験への計測例について述べる。

### 7.1 処理画像の作成

本画像解析では、2時刻の画像から速度を計測する。まず、図1に示す可視化光学系を用いてサブミクロンのトレーサ粒子を画像化し、図3の画像処理システムに取り付けられたフレームボードに入力する。先にも述べたように、可視化空間上でのトレーサ粒子の移動距離が大きい場合には、TVカメラでの光の蓄積方法をフィールド単位とし、第1フィールドで照射されたLLSによるトレーサ粒子像と第2フィールドで照射されたLLSによるトレーサ粒子像から速度を計測する。また、トレーサ粒子の移動距離が小さい場合には、TVカメラでの光の蓄積方法をフレーム単位とし、第2フィールドで1度のLLSの照射を行い、得られたフレーム単位の画像を用いてトレーサ追跡を行う。フィールド単位の画像を用いたトレーサ追跡においては、フレーム単位の入力画像を第1フィールドと第2フィールドに分離する必要があるが、分離には、図5の3×3のマスクを用い、(3)式の演算により行う。

## 7.2 速度ベクトルの決定

上述の手順で作成されたトレーサ粒子画像は、画像処理システムフレームメモリ上にTVカメラの出力を水平方向及び垂直方向に対して512×480ピクセルに8ビット256階調の画像としてA/D変換し、2時刻の画像を入力画像(時刻T1で画像化された可視化画像をF1、時刻T2で画像化された可視化画像をF2と呼ぶ)を作成する。PIVシステムでは、この8ビット256階調の濃度画像に対して濃度相関計算を行い、濃度相関計算のピーク位置を速度ベクトルとする。以下、サブミクロンのトレーサ粒子で画像化した可視化画像から速度を計測するアルゴリズムについて説明する。まず、時刻T1の画像上に任意の大きさを持つテンプレート領域を決定する。次に、このテンプレートと同じ大きさを持つ領域を時刻T2の画像上で動かし、(5)式の濃度相関計算を行う。

$$CR = \frac{\sum XY - \frac{1}{n} \sum X \cdot \sum Y}{\sqrt{\sum X^2 - \frac{1}{n} (\sum X)^2} \sqrt{\sum Y^2 - \frac{1}{n} (\sum Y)^2}} \quad \dots (5)$$

ここで、 $X_{i,j}$ 、 $Y_{i,j}$ は時刻T1、T2での各画素での画像濃度である。得られた濃度相関分布からは、相関分布に対して統計的な処理が施され、相関分布のピーク位置を検出する。速度ベクトルの決定は、時刻T1のテンプレート領域の中心と相関分布のピーク位置から決定する。この計算を時刻T1の画像上の任意の位置で行うことにより、可視化空間の任意の位置における速度計測を行うものである。この計算は、例えば、テンプレート領域が50×50、計測する速度ベクトルが可視化空間で31×31ならば、 $6 \times 10^{11}$ の計算を式(5)に対して繰り返しい行う必要がある。計算速度の高速化を図る上では、取り扱う画像データを構造体にするにより計算機内部で発生するスタック量を小さくするとともに、加算と乗算を同時に実行できるDSPによる処理を行った。なお、プログラムはすべて機械語で記述されている。

## 8. PIVシステムの適用例

### 8.1 空気流れの計測<sup>1)</sup>

開発したPIVシステムを用いて空気流れの計測を行った実験結果について示す。実験対象は、円柱後方のカルマン渦の流れである。可視化は、断面形状が10cm×10cm、長さ2mの矩形管に設置された直径20mmの円柱周りをTVカメラで画像化した。円柱直径と主流速度に基づくReは260である。図15に流れの可視化画像を示す。可視化に用いたトレーサ粒子は、外形が0.3μmのタバコの煙である。濃度相関法による速度計測においては、トレーサ粒子の画像処理空間での移動量が比較的小さいので、TVカメラでの電子

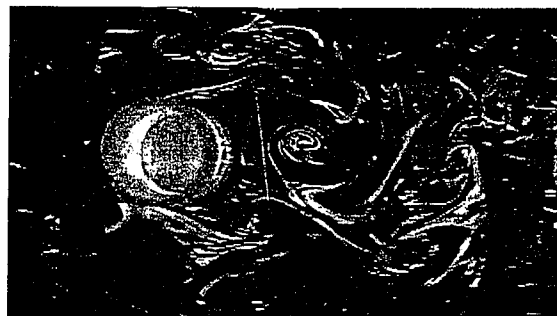


図15 円柱後方のカルマン渦可視化画像

シャッタを用い、1フレーム内に2時刻のトレーサ粒子画像を画像化し、フレーム・フィールド分離により瞬時画像を作成した。得られた2時刻の画像から速度の計測においては、41×41のテンプレート領域を用いた。

図16は、PIV手法により計測された瞬時の速度ベクトルである。速度ベクトルは可視化空間に調和関数理論に基づいた構造径の格子を形成し、濃度相関法で速度を計測した後、31×31の等間隔格子上に(4)式の方法で空間補間した。本PIV計測手法では、レーザー光をシート上に広げ、得られた可視化画像から速度を計測したが、可視化に用いるトレーサ粒子がサブミクロンの大きさであることから、濃淡画像を得ることが困難な場合が多い。この問題を解決するため、著者らは、レーザスイープ方式による可視化光学系の開発に着手し、100mW程度のレーザー光でも濃淡の鮮明な画像を可視化することに成功していることを付け加えておく。

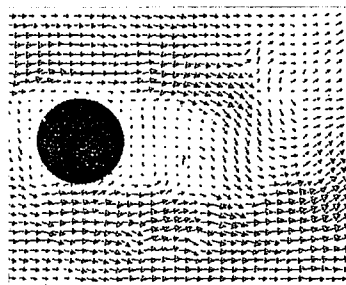


図16 格子点上の速度ベクトル

### 8.2 気液2相流中の液速度計測<sup>(2,13)</sup>

最後に、PIV手法を用いた気液2相流中の液速度計測例について述べる。上述したようにPTV、PIV手法は、複数の時刻間でのトレーサ粒子の位置から速度を計測する技術である。この計測技術を気液2相流中の液速度の計測に適用する場合、トレーサ粒子と気体を区別するためには、何らかの画像処理技術を用いる必要がある。著者らは、既に円形度や、散乱波長の差を用いたトレーサ粒子と気体の分離アルゴリズムを開発しているが、このアルゴリズムを用いた場合でも、微細気泡とトレーサ粒子の区別が困難となる。本節では、紙面の関係上、レーザ誘起蛍光法に基づいた流れの可視化技術の概要とレーザ誘起蛍光法を気液2相流中へ適用した結果について述べる。

本計測技術は、蛍光物質を流体中に混入し、蛍光物質の励起蛍光を画像化することで流れ場を可視化する。例えば、ZnSは、315nmのレーザー光を吸収し励起蛍光するが、蛍光光は数秒の残光特



図17 LIFによる励起蛍光画像

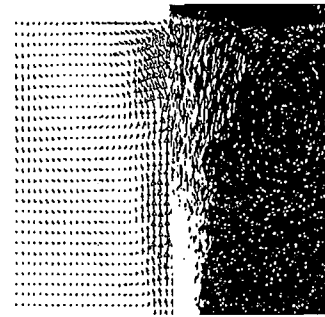


図18 気液2相流中の液速度の計測結果

性を示す。この蛍光光のみを画像化することで、気体が発する散乱光と液体が発する励起光を分離し、液速度のみを計測するものである。著者らは、この残光特性を気液2相流中の液速度の計測に適用する研究を行っている。取鍋1/25模型で行った励起蛍光画像と処理結果を図17、18に示す。図18では、図中左に液速度の計測結果を、図中右にはハロゲンランプで可視化した気泡画像を示す。本技術では、気体と液体が混相する場での液側の速度が計測されていることが分かる。

### 9. おわりに

可視化システム、画像処理システム及び画像解析ソフトウェアからなるPIVシステムを開発し、幅広い流れ場のオンライン速度計測を実現した。

### 謝 辞

本研究の一部は平成3年度科学研究費試験研究(B)“乱流数値シミュレーションライブラリの構築”の助成を受けて行われた。また、本研究に対して科学研究費総合研究(B)“PIVの実用化に関する調査研究”の助成を受けて行われた。記して謝辞を表す。

### 参考文献

- 1) Hesselink, L.: Annu. Rev. Fluid Mech. 20, pp.421~485 (1998)
- 2) Adrian, R.J.: Annu. Rev. Fluid Mech. 23, pp.261~304 (1991)
- 3) Khaligi, B., Huebler, M.S.: A Transient Wate Analog of a Dual-Intake-valve Engine for Intake Flow Visualization and Full-Field Vector Measurements, SAF Tech. Paper Series. 880519 (1988)
- 4) Adamczyk, A.A., Rimal, L.: Reconstruction of 3 Dimensional Flow Field from Orthogonal View of Seed Track Video Images, Exp.Fluid. 6(1988), pp.380~386
- 5) Tsuda, N., Kobayashi, T., Saga, T.: Development of A Real-Time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using Digital Image Processing Design, Experimental and Numerical Flow Visualization. ASME, (1992), pp.9~14
- 6) 津田, 小林, 佐賀: 高速流れ場の実時間画像処理システムの開発. 文部省総合研究(B) 1992-03352018 pp.42~49
- 7) 津田: 可視化画像の処理とCG. 流れのコンピュータグラフィックス講習会資料, JSME(1992)
- 8) 津田, 小林, 佐賀: 日本機械学会講演論文集. 68(1991), pp.316~318
- 9) 津田, 小林, 佐賀: 日本機械学会講演論文集. 910-50(1991), pp.293~295
- 10) 津田, 小林, 佐賀: 流れの計測. vol.10-13, pp.10~17(1992)
- 11) 小関, 津田, 小林: 濃度相関法により速度計測システムの開発. 第71機機械学会講演論文投稿中。
- 12) 大場: レーザ誘起蛍光法による流れの可視化流れの可視化. Vol.9(1987), pp.7~13
- 13) 富野, 津田, 大場: レーザ誘起蛍光法による気液2相流の計測. 第71機機械学会講演論文投稿中。