PIVの基礎と応用^{*}

Fundamentals and Applications of PIV

山 本 富士夫^{**}
YAMAMOTO Fujio

植 村 知 正^{***}
UEMURA Tomomasa

Abstract Particle-Imaging Velocimetry(PIV) has advanced rapidly with the recent noticeable development of computers and image processors and the development and propagation of flow visualization techniques. The technique of PIV gives information on flow velocity, temperature and density through image analysis of visualized pictures and has been recognized as a strong new measuring tool in thermal and fluid engineering fields including multiphase flows. Its merits are : (1) simultaneous measurement of the whole flow field ; (2) easy information processing of the other physical values from its measurement. Such merits are not shared by one point measurement methods such as the Pitot tube, hot wire anemometer and LDV. This article presents not only a general introduction of some methods of PIV but also some details of the fundamentals and applications of typical methods such as laser speckle technique, four consecutive time step particle tracking technique, the cross-correlation method using brightness distribution patterns and the binary picture cross-correlation method using particle distribution patterns. Applications for these techniques are also suggested.

Keywords : Multiphase Flows, Particle-Imaging Velocimetry, Image Processing, Fluid Engineering, Flow Velocity Measurement

1. はじめに

最近のコンピュータや画像処理機器の急速な発達と可視化技術の発達、普及にともなって、流れの可視化画像から速度、温度、密度などを自動的に短時間で計測する画像計測法が、混相流を含む熱流体工学分野の新しい計

測ツールとして注目されるようになってきた。それは、全流れ場の同時計測が可能であること、得られた情報を加工して他の物理情報を得やすいことなど、従来の熱線流速計やLDVに代表される点測定法にない特徴を有している。

* 1992.2.4 受付

** 福井大学工学部 〒910 福井市文京3-9-1 TEL (0776)27-8534, FAX (0776)27-8748

*** 大阪大学基礎工学部 〒560 豊中市待兼山1-1 TEL (06)844-1151, FAX (06)845-3372

最近、アメリカ機械学会 (ASME) から実験流体力学のための粒子画像流速計測法

(Particle-Imaging Velocimetry = PIV) についてレビューが出された^{1),2)}。文献²⁾の中では、おそい流れから超音速流れまで流体の種類や流速に応じて適用できる各種の方法とそれらの原理、応用、およびそれぞれの関連の文献約100編が紹介されている。一方、国内でも、画像計測法に関する講習会が開催されていて^{3),4)}、いずれも、聴講者が多く集まっているようである。

本稿では、流体中にトレーサ粒子を注入して可視化された流れの画像解析によって流速を測定する、いわゆる PIV の基礎と応用について解説を行う。すなわち、PIV のいくつかの方法とそれぞれの原理と応用について述べる。特に著者らが開発してきた「二値化相関法」と言われている方法についてはかなりのスペースを使って解説を加える。

3次元の PIV も実験室レベルではできるようになっているが、これについては簡単に紹介するだけにとどめて、詳細な解説は別の機会にゆずりたい。

2. PIV の分類、各方法の原理と応用

PIV を分類するにあたり、以下では1枚の画像を用いる多重露光法と時系列画像を用いる方法とに大別しているが、このような大分類の方法は別に確立されたものでなく、著者らの便宜上のものであることをことわっておく。また、ここでは基礎的でよく知られた手法だけを取り上げるが、その他の多くの手法や応用事例については解説を割愛させて頂くことにする。

さて、PIV でいう速度とは厳密には個々の粒子の運動速度、あるいは粒子分布の濃度パターン (画面の輝度パターン) の移動速度を指しているが、実用上では粒子が流体の流れに満足できる程度に追従しているとして、これらの速度を流体の速度として扱うことも理解しておいて頂きたい。

なお、本稿では可視化技術や画像の記録方

法 (写真、ビデオ、光ディスク) については詳細な説明を省略するので、必要に応じて文献⁵⁾などを参照されたい。

2. 1 多重露光法

多重露光によって1枚の画面に写されたトレーサ粒子画像の位置とその撮影時間や露光時間から粒子の移動速度を測定する方法である。

(1) 流跡測定法

流跡測定法は、粒子運動の軌跡が短い流跡線となって撮影される程度の露光時間で粒子の運動を撮影し、画面上の流跡の長さを測定することによって速度を求める方法であり、原理的に簡単である。この方法には、(a) 流跡の輪郭を構成する画素の集合から最小二乗法によって流跡線の傾きを求め、流跡平均幅と構成画素数から速度を得る方法⁶⁾、(b) 流跡画像の細線化により骨格線を抽出してその長さや傾きから速度を求める方法⁷⁾、(c) 流跡輪郭の両端を円近似しその重心から速度ベクトルを求める方法⁸⁾などがある。

以上の方法だけでは流れの方向を決定することができないという問題がある。流跡の方向を決めるために、比較的簡単な流れ場では隣接するいくつかの流跡線の傾きと速度の大きさを用いた渦度計算からそれぞれの流跡の方向を判定するアルゴリズム⁹⁾、撮影時に流跡の始点と終点に濃度差を与える方法¹⁰⁾、あるいはカラー情報を与える方法¹¹⁾、流れ場を初め二つの短いパルスで次に長いパルスで (流跡の撮影) 最後に短いパルスで多重露光するというコード化した照明を利用する方法¹²⁾などが提案されている。

Fig. 1 は小林ら¹³⁾の開発したトレーサ粒子の同定を行う「始点・終点・流跡独立撮影法」の手順を示したものである。この図において、粒子の同定のために、流跡輪郭座標位置と (a) 粒子を構成する全画素を比較する方法、(b) 粒子の重心位置を中心として画像中の粒子の平均直径に相当する画素のみを比較する方法とが示されているが、(a) の方が多くのベクトルが得られる。

Fig. 1 Method of particle identification¹³⁾
(Independent Photographing
technique of start point, end point
and pathline)

(2) ストロボ法

ストロボやレーザを用いてパルス的な照明を行って運動粒子を多重露光撮影すると、連続した点列が画面上に記録される。点間間隔が粒子寸法の10倍程度以上になるように撮影し、点間の距離を測定することにより速度を求める方法である。通常の写真の他にホログラムを用い、3次元測定を行った例もある。

点間距離が狭い場合には満足できる測定精度が得られないことがある。また、粒子が過密に分布する場合は粒子の対応付けが困難になる。

(3) レーザスペックル法

この方法の原理は次の通りである¹⁴⁾。Fig. 2に示すように、高密度の微細な粒子（数 μm ）でシーディングされた流体をレーザライトシート（LLSといわれる）でパルス的に照明することにより、粒子からの散乱光が不規則に干渉してランダムな斑点分布の像、すなわちレーザスペックルパターンが得られる。このようなスペックルパターン、または

Fig. 2 Lighting system and photograph system for specklegram¹⁵⁾

粒子像分布を微小時間間隔で同一フィルム上に二重または多重記録し、自己相関を求めることによりパターンの時間に対する移動の情報として粒子移動速度が求められる。

レーザスペックル流速計測ではFig. 2に示すような光学系が用いられる¹⁵⁾。スペックル写真の記録には、短い時間間隔で2回発振できるパルス状レーザ光源が必要である。自己相関から速度を求めるためにはスペックル写真の光学的フーリエ変換処理を行う。その一つはFig. 3に示すようなスペックル写真内の局所スペックル移動量を求めるヤング縞法で、もう一つはスペックル写真全体にわたってスペックル移動量の成分等高線が可視化される空間フィルタリング法である。

ヤング縞は、レーザビームの照射領域内にあるスペックルペア（二重露光写真中の同一粒子の組）からの回折光の干渉によって生じる。縞の方向はスペックルペアの方向、すなわち流速計測では散乱粒子の速度ベクトルの方向に垂直で、縞の間隔は、

Fig. 3 Young fringe optical system for local velocity measurement¹⁵⁾

$$d = \frac{f \lambda}{M v T} \quad (1)$$

で与えられ、レーザビーム照射位置における速度ベクトルの大きさと方向（符号を除く）が求められる。ここで、 f はレンズの焦点距離、 λ は光の波長、 M はスペックル写真の撮影倍率、 v は散乱粒子の速度、 T は発振時間間隔である。

川橋ら¹⁶⁾は、最近連続発振レーザを用いたデュアルビームスイープ照明法を開発し、高密度PIVによるエアロゾル噴流内の流速を測定した。Fig. 4 (a)はそのスペックル写真であり、(b)は速度ベクトル図である。

このレーザスペックル法の利点は、微小粒子を使うのでその流体の流れへの追従性がよいことと、そのため約100m/s程度の高速の

(a)

(b)

Fig. 4 (a) Picture of a part of aerosol jet¹⁶⁾
(b) Velocity vector diagram of aerosol jet by dual beam laser speckle technique¹⁶⁾

噴流や非定常乱流境界層などの計測に適用可能であること、複雑な計算機処理を必要としないこと、単純な光学系により2次元の等成分速度線分布画像が得られること、さらに密度分布計測も可能であることなどである。欠点はフィルム上にスペックルパターンの移動を記録しなければならないことである。

2. 2 時系列画像を利用する測定方法

粒子や煙、着色液などのトレーサによって可視化された流れを短い一定時間間隔で撮影された複数の時系列画像を用いて、個々の粒子が各時系列画面のどこに移動したかを追跡してその移動距離と時間間隔とから速度を求める方法（粒子追跡画像計測法、Particle Tracking Velocimetry=PTV）と、可視化画像の空間的な濃度や輝度分布のパターンの対応付けに基づく移動距離と時間間隔とから速度を求める方法とがある。これらの方法はいずれも、短時間内では強い回転や滑りがなく流れ速度が時間的にも空間的にも急激に変化しないということを前提にしている。

これらの方法は、流れの方向を容易に決定でき、流跡線の交差などの問題がないなどの特徴があり、現在最も広く適用されている。問題点は、短い時間間隔で画像を連続的に取得できる速度の限界があることや、粒子追跡の同定に誤対応を生じて異常な速度ベクトルが発生することがあるのでこれを修正する必要があること、などである。以下に今日計測ツールとして注目されるようになったいくつかの代表的な方法について簡単に説明する。

(1) 4時刻追跡法

上述の前提のもとでは、各粒子は連続した4画面を通じて接続される一連の滑らかな曲線を描く粒子の組を構成できるので、このような粒子の組ができるとき粒子の同定ができたとする方法である。¹⁰⁾

Fig. 5に基づいて小林らの論文¹⁰⁾を引用して粒子追跡の原理を説明しよう。まず、第1時刻の画面（第1画面）内の1つの粒子に着目すると、その粒子は第2時刻の画面（第2画面）では第1画面内のある位置から一定の

Fig.5 Particle tracking using four consecutive time steps¹⁰⁾

距離の範囲内にあるはずである。適当に定めた予想移動距離内にある第2画面内のすべての粒子を候補粒子として抽出する。次に第1画面の着目粒子と第2画面内の1個の候補粒子とを結ぶ延長線上に第3画面での予想移動領域を定め、第3画面上に該当する粒子があれば、さらに同じ手順で第4画面上に粒子を求める。第1画面から第4画面まで滑らかに接続できる経路を持つ粒子が存在すれば、これらの粒子は同一粒子であると判定される。ここで、「滑らかな経路」を定量的に評価するには、ある粒子の4時刻間のいくつかの組について移動距離の分散と移動角度の分散とを計算してその合成値を用いる。すなわち、その値が最も小さい組の粒子経路が滑らかで、同一粒子の軌跡であると認定する。

この方法に基づく実時間計測方法を開発してきた最新の小林ら^{17)~19)}の解析システムはFig. 6の通りである。流れ場はTVカメラで

Fig.6 Image processing system¹⁷⁾

撮影され、直接にあるいは間接にビデオレコーダあるいは光ディスクを通して画像処理装置(NEXUS6410)へ入力される。ビデオ信号は高速A/D変換器で $512 \times 480 \times 8\text{bit}$ の白黒のデジタル画像に変換されイメージメモリに格納される。画像処理装置は16画面分のイメージメモリを装備しておりパイプライン型イメージプロセッサにより2値化、エッジ検出、画像強調、空間フィルタ、画像分離、フレーム間演算、ラベリング、任意階調の画素数係数などの基本的な画像処理演算をハードウェア上で高速に実行する。イメージメモリの出力部にルックアップテーブル(階調変換用の超高速RAM)を接続して階調変化や強調処理、フレーム間の画素演算、空間フィルタリングなどの処理を高速に行うようにしている。ホストコンピュータには1MBのフレームメモリ、高速演算用のトランスペュータと数値演算処理装置、RAMを装備したパーソナルコンピュータを用い、GP-IBインターフェイスを介して画像処理装置と接続されて、システムの制御、画像処理プログラミングの実行などを行う。

Fig.7 Velocity vectors around a circular cylinder obtained by four consecutive time step particle tracking technique
(Presented by Saga, T.)

小林ら^{17)~19)}は4時刻追跡法を円柱まわりの流れ解析に適用した。その例をFig. 7に示す。この図に見られるように、最初速度ベクトルは粒子の存在したところで得られるが、粒子の存在しない場所での速度情報については補間する必要がある。補間メッシュを作成して流線や流脈線、渦度などを得ることができる。彼らは、可視化した流れ場のPIV計測結果をさらに情報加工して再び動画化した画像を制作している¹⁹⁾が、このようなプレゼンテーションは流れに対する理解を大いに助ける最新の方法として注目されている。

4時刻追跡法はアルゴリズムが簡単で、特に比較的粒子数が少ない場合には誤対応が起こらず良好な測定ができるので、市販品が出るなど現在広く使われている。

(2) 輝度（濃度）分布パターン相関法

短い時間間隔において得られた2枚の画像の局所的空間的輝度分布パターンの中で類似性の高い対応部分を求めることによって、その部分の移動距離から速度を測定する方法である。Fig. 8はその原理を示したもので、以下に木村ら²⁰⁾の論文を引用して説明しよう。

Fig. 8 Principle of cross-correlation method based on density distribution patterns²⁰⁾

いま、第1時刻($t=t_0$)で画面内のある点 $P(0, 0)$ を中心とする $n \times n$ マトリクス F の小領域を考える。それを基準マトリクスとして第2時刻($t=t_0 + \Delta t$)の画面内で点 p の近傍の任意の点 $q(k, l)$ を中心画素位置とする $n \times n$ マトリクス G の小領域(図中の破線で囲まれた領域)との間で次式で定義される輝度分布パターンの相互相関関数 $C_{fg}(k, l)$ を計算する。

$$C_{fg} = \frac{\int f(x, y) \cdot g(x, y) dS}{\sqrt{\int \{f(x, y)\}^2 dS \cdot \int \{g(x, y)\}^2 dS}} \quad (2)$$

ここで、 f と g は、マトリクス F と G の要素となる各画素の輝度値であり、 F と G 内の番号 i の画素の輝度をそれぞれ f_i 、 g_i 、 $\bar{f}$ と $\bar{g}$ をそれぞれの平均値としている。もし点 $q_s(k_s, l_s)$ に対する C_{fg} が最大値をとるならば、マトリクス F で与えられるパターンが点 q_s を中心とするマトリクス G のパターンへ移動したとして、その移動距離から速度ベクトルを計算できる。

この方法の利点は、可視化画像の種類や範囲に対する制限がないこと、2時刻の2枚の画像から測定できること、空間的に高密度の計測ができること、原理的に流れ場の既知情報を必要としないこと、などである。しかし欠点としては、相関マトリクスの大きさを試行錯誤的に決めざるを得ないこと、発生する誤対応ベクトルの補正や除去などの処理が必要であること、などがあげられる。

Fig. 9はこの方法による測定例である²⁰⁾。この図に見られるように4時刻追跡法に比べてずっと多くの速度ベクトルを得ることができる。

榊原ら^{21), 22)}は、この手法を円管内流路の上段側に高温流体を、下段側に低温流体を導き、初めは均一なステップ状の速度および温度分布を与えた成層流の2次元・時系列測定を行った。彼らは、式(2)の相互相関係数の計算を

Fig.9 Velocity vectors around a circular cylinder obtained by cross-correlation method²⁹⁾

高速に行うためにDSP (Digital Signal Processor, TI TMS320C25) をパーソナルコンピュータに組み込んだ。約1400枚の画像を短時間で処理して温度と流れの乱流特性とを調べることができたとしている。

(3) 2 値化相関法 (粒子分布パターン相関法)

著者らは、相関法によって個々の粒子を追跡する 2 次元 2 値化相関法 PTV と称する高速アルゴリズムを発表し、いくつかの流れの画像解析行ってきた^{20), 24)}。この方法は、粒子の同定に相関法を用いるが、上記の輝度分布 (濃度分布) パターンの相関法とは異なる。以下でこの方法について説明する。

微小時間差 Δt を有する 2 つの 2 次元流れ内の粒子の画像が Fig. 10(a) と (b) のように得られたとする。各粒子の 2 時刻間の対応付けの原理は、第 1 画面内の一つの参照粒子とそれに対する候補粒子のそれぞれのまわりの粒子の分布パターンの類似性が最もよく保たれているペアを捜して粒子の同定を行うことにある。2 つの分布パターン F と G の類似性の評価に式 (2) で定義された相互相関係数を用いればよいが、定義通りにその計算を行うと時間がかかる。そこで、多数のトレー

Fig.10 Images of particle distribution
(a) first picture
(b) second picture

サ粒子画像をあるしきい値で2値化すると、 f と g は粒子の内部で1、外部で0という値を持つ2値関数となる。いま、参照粒子 i と候補粒子 j とを中心に置いた2つのパターンIとJを重ねると、2つの2値化画像における相互相関係数 C_{ij} は次式のように簡単になる。

$$C_{ij} = \frac{L}{\sqrt{mn}} \quad (3)$$

ここに、 m と n はそれぞれ第1画面と第2画面内の相関小領域内にある粒子の数で、 L は2値化関数 f と g の論理積の総和となる。 L は、具体的に重ねられた2つのパターン内の粒子の重なり面積の合計を意味する。

Fig. 11に2値化相関法の流れ図を示す。ある参照粒子に対して複数の候補粒子が選ばれるが、それらの中で C_{ij} の値が最大になる

Fig.11 Flow chart of binary picture corss-correlation method

Fig.12 Image processing system

候補粒子を正対応粒子として、ペアを決める各ペア粒子の移動距離 $\Delta \vec{S}$ （重心間距離）から速度を計算する。すなわち、

$$v = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} \quad (4)$$

対応付けられたすべての粒子ペアから流れ場全体の速度ベクトルの分布を得ることができる。

なお、著者らが使っている画像計測システムはFig.12の通りであり、低価格のものである。

2. 3 P T Vの適用事例

以下に、主として、著者らの発表論文の中からいくつかの適用事例を紹介する。

Fig.13は、水槽における2次元非定常粘性拡散自由ダブレットの流れを水素気泡法で可視化したものである²⁵⁾。これだけではダブレットの存在しかわからないが、PTVを適用するとFig.14のような速度ベクトル図を

(a) $t = 2.46s$

(b) $t = 2.56s$

Fig.13 Flow visualization of viscous diffusing free doublet flow by hydrogen bubble technique²⁵⁾

(a) $t = 2.51s$

(b) $t = 4.01s$

Fig.14 Velocity vectors of viscous diffusing free doublet flow²⁵⁾

(a) $t = 2.51s$

(b) $t = 4.01s$

Fig.15 Vorticity contours of viscous diffusing free doublet flow²⁵⁾

得ることができる。これより、ダブルレットの前方の流体は巻き込まれ、後方の流体は押し出されることがわかる。さらに速度の回転 $\text{rot } v$ を計算して Fig. 15 のような等渦度線図を得ることもできる。同図の (a) と (b) の比較より、時間経過にともなって等渦度線の山の位置が流下し、渦度が拡散していることがわかる。

Fig. 16 は、急拡大部分における水流をプラスチック粒子で可視化し、流速を求めたものである²⁶⁾。急拡大後の逆流域におけるおそい流れと上部の平行な速い流れが混在する流れ場であるが、速度ベクトルの大きさと方向は満足できる程度に測定されている。このような流れ場の測定では、相関小領域の大きさのとり方に工夫が必要である。

Fig. 17 は、円盤上に糊のついた白色粒子を散布・固定し、円盤を回転させたときの粒子の速度を求めたものである²⁶⁾。このような実験は、一つの検定試験となる。すなわち、各粒子の速度は、円盤の回転速度とそれぞれの半径位置とから既知量となっているから、それと PTV の測定結果とを比較すれば、誤対応の存在や、測定精度の検討ができる。上述の相関法 PTV をそのまま適用しただけでは多少の誤対応の発生は避けられない。そこで、著者らは、相互相関係数 C_{ij} が最大のペアだけでなく、2 番目、3 番目に大きいペアについても、対応付けの信頼性を別の角度から評価するダブルチェックの方法を提案してきた²⁶⁾。同図の (a) ではダブルチェックの

Fig. 16 Velocity vectors of flow in suddenly expanding channel²⁶⁾

(a)

(b)

Fig. 17 Particle velocities on a rotating disc²⁶⁾

(a) before double checking

(b) after double checking

前でいくつかの誤対応ベクトルが見られるが、(b) ではダブルチェックの効果があって誤対応ベクトルは正対応ベクトルに置き換えられている。

Fig. 18 は、水槽内の吸い込み流れをプラスチック粒子で可視化し、速度を求めたものである²⁷⁾。同図 (a) はダブルチェックの前で、かなりの誤対応ベクトルが見られる。その理由は吸い込み口の近傍で流速が早くなり、粒子画像同士の接合が生ずるからである。このような誤対応ベクトルは、同図 (b) のよう

(a)

(b)

Fig.18 Velocity vectors in sink flow²⁴⁾
(a) before double checking
(b) after double checking

にダブルチェックによって正対応ベクトルに置き換えられる。

Fig.19 は、運動する球の後流の測定例である。このような3次元物体のまわりの流れは、3次元流れ場の一部を有限の厚さの光スリット（光帯）で照明し、 Δt 時間の間その光帯内に残存する粒子像を捕らえて、3次元速度ベクトルの光帯平面への射影成分として測定される。しかし、このような場合には、Fig.20 からわかるように、 Δt 時間内にそのような2次元光帯を大きい速度で横切ったり

Fig.19 Velocity vectors of flow after a moving sphere²⁴⁾

Fig.20 Particle motions in a light sheet

突入してきたり、あるいは、抜け出て行くような粒子を追跡することはできない。このような粒子は測定から除外される。その頻度は低くないと考えるべきであるから、得られた測定結果は平均速度が実際よりおそいものになってしまう。3次元性のある流れ場の測定ではこのことに十分注意する必要がある。

Fig. 21 Flow Visualization of mixing flows with air bubbling jet in a cylindrical bath by plastic particles²⁷⁾

Fig. 21 は、円筒容器内の底吹き噴流による気泡混合流れの可視化写真である²⁷⁾。トレーサはプラスチック粒子（直径 0.8mm）である。このような画像51フレームを連続的に取り込み、隣合う連続2画面の間で画像解析を繰り返し、50枚の瞬間速度ベクトル図を得た。Fig. 22 は、そのうちの一つである。同図 (a) は各粒子の位置におけるベクトルを、同図 (b) は格子点上に再配置された速度ベクトルを示している。いずれの図でも、上部に大きな循環流が見られ、その左側の流れは左右に変動しながら上昇する流れとなっていることがわかる。50枚の速度ベクトル図から時間平均速度を求めた結果を Fig. 23 に示す。この図では、左右に変動しながら上昇するジグザグの流れは見られない。Fig. 24 は、容器内で半径方向と深さ方向にいくつかの格子点を設定して各点における変動速度の RMS 値を求めた結果である。容器の上部には大きな循環流があるので、そのまわりの RMS 値は大きい、底部のそれは小さい。なお、この

(a)

(b)

Fig. 22 Instantaneous velocity vectors of the mixing flows as shown in Fig. 21²⁷⁾

- (a) Velocities at particle positions
- (b) Velocities arranged at grid points

(a)

(b)

Fig.23 Time mean velocity vectors of the mixing flows as shown in Fig.21²⁷⁾

(a) in upper part of the bath

(b) in lower part of the bath

流れ場は乱流であるが、計測は2次元の光帯を使って、以上のような変動流れと循環流が底吹き気泡噴流による混合を促進するという機構を明らかにすることができた。

3. 3次元の画像計測の動向

2台または3台のカメラを使う3次元の粒

Fig.24 RMS values of fluctuating flows as shown in Fig.21²⁷⁾

子追跡画像計測法は西野ら²⁸⁾によって乱流計測に、加賀ら²⁹⁾によってモデル室内気流の計測に開発されている。また著者ら^{30),31)}も3次元2値化相関法とステレオマッチングのアルゴリズムについて提案してきた。本稿ではスペースがないので、笠木ら³²⁾の解説記事のあることを紹介しておく。しかし、その後においても3次元画像計測技術の発展には著しいものがあるので、機会を改めてその動向などを述べたいと思う。

4. まとめ

本稿では、PIVのいくつかの方法の基礎と応用について解説したが、適用する流れ場に依じて方法の選択をする必要がある。できればいくつかの方法を試みて流れ場の解釈に誤

りを来さないようにすべきである。

いわゆる画像処理の前処理などは市販されている画像処理ボードにハード的に標準装備されている上に、いずれの方法もむずかしいアルゴリズムがあるわけではないので、今や、混相流関係の研究と機器の開発に PIV を新しい計測ツールとして適用しやすい段階に入っていると言えよう。

本稿に対するご批判・お問い合わせを期待してこれを閉じたい。

謝 辞

本稿に貴重な資料を提供されました小林敏雄氏・佐賀徹雄氏（東京大学）、川橋正昭氏（埼玉大学）、木村一郎氏（神戸大学）に深謝の意を表します。

参考文献

- (1) Hesselink, L., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 20, pp. 421–485 (1988).
- (2) Adrian, R. J., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp. 261–304 (1991).
- (3) 日本機学会講習会教材「フレッシュメンセミナー“流れをとらえる”」、No. 910–40 (1991).
- (4) 可視化情報学会第 3 回手法別講習会「相関法—画像相関を利用した速度ベクトルの計測—」(1991).
- (5) 流れの可視化学会編、新版流れの可視化ハンドブック、朝倉書店(1986).
- (6) Imaichi, K. and Ohmi, I., *J. Fluid Mech.*, 129, pp. 283–311 (1983).
- (7) 高木、富田、第 11 回画像処理コンファレンス論文集、9, pp. 12 (1984).
- (8) 小林、吉武、機械学会論文集(B) 51–466, pp. 1966–1970 (1985).
- (9) Dimotakis, P. E., 他 2 名、*Physics of Fluids*, 24–6, 995–999 (1981).
- (10) 小林、佐賀、他 2 名、機械学会論文集(B), 55–509, pp. 107–115 (1989).
- (11) 藤原、西原、広瀬、機械学会論文集(B), 53–493, pp. 2762–2770 (1987).
- (12) Khalighi, B. and Lee, Y. H., *Appl. Opt.*, 28–20, pp. 4328–4332 (1989).
- (13) 小林、科学研究費報告書「デジタル画像処理による流れ場解析システムの開発」(1988).
- (14) 川橋、流れの可視化、7–25, pp. 84–89 (1987).
- (15) 川橋、可視化情報学会第 3 回手法別講習会「相関法—画像相関を利用した速度ベクトルの計測—」, p. 58–60 (1991).
- (16) Kawahashi, M. and Hosoi, K., *Exp. Fluids*, 11, pp. 278–280 (1991).
- (17) 津田、小林、佐賀、可視化情報学会誌, 11, Suppl. No. 1, pp. 181–184 (1991).
- (18) Kobayashi, Y., Saga, T. 他 2 名, *ASME–FED*, Vol. 128, pp. 9–14 (1991).
- (19) 津田、小林、佐賀、流れの計測大阪シンポジウム講演要旨集, pp. 47–52 (1991).
- (20) 木村、高森、井上、計測自動制御学会論文集, 23–2, pp. 101–107 (1987).
- (21) 榊原、他 4 名、可視化情報学会誌、可視化情報学会誌, 11, Suppl. No. 1, pp. 157–160 (1991).
- (22) Kobayashi, K. 他 3 名, *ASME–FED*, Vol. 128, pp. 155–162 (1991).
- (23) Yamamoto, F., 他 4 名, *Proc. of 2nd FLUCOME*, pp. 184–188 (1988).
- (24) 植村、山本、幸川、可視化情報、10–38, pp. 196–202 (1990).
- (25) Yamamoto, F., 他 4 名, *Proc. of 5ISFV*, pp. 514–519 (1989).
- (26) Uemura, T., 他 2 名, *Proc. of 5ISFV*, pp. 228–233 (1989).
- (27) Uemura, T., 他 2 名, *Proc. of 5th Intl. Symp. on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics and Workshop on the Use of Computers in Flow Measurements*, § 18.6, 1–5 (1990).
- (28) 西野、笠木、他 2 名、機械学会論文集(B), 55–510, pp. 404–412 (1989).
- (29) 加賀、科学研究費報告書（課題番号 6355

- 0429) 「画像処理を用いる低速気流の速度計測システムの開発に関する研究」(1989).
- (30) 山本、植村、他 2 名、機械学会論文集(B), 57-543, pp. 3832-3836(1991).
- (31) Yamamoto, F., Uemura, T. 他 2 名, ASME-FED, Vol. 128, pp. 23-28(1991).
- (32) 笠木、西野、流れの計測, 8-11, pp. 2-11(1990).