

し はじめに

画像情報を用いた、流体の計測、未知流動現象の解明など の研究は特に新しいわけではない。従来から、可視化した流 れの写真を利用して、流れ場の定性的な分析に関する論文や 報告などが文献としてたくさん報告されてきた1)。ところが、 近年のコンピュータハードウェアの進歩に伴い、画像処理技 術に基づく流れ場の定量的な計測が可能となってきた。従来 の写真撮影による定性的な観察に対して、流れの可視化画像 処理によって、速度、温度、密度などの物理量を短時間で計 測することができるようになった。特に「粒子画像流速測定 法」、いわゆる PIV (Particle Image Velocimetry) と呼ばれる 新しい計測法が急速に発展・普及してきている。この計測法 は、流れにトレーサ粒子や染料などを混入し、可視化した流 れの画像から画像処理技術によって流速を算出するものであ る。具体的に言えば、可視化した複数時刻の瞬間粒子像を記 録して、その局所的変位を検出し、得られた変位を画像記録 時間間隔で除して局所流速を計測するものである^{2,3)}。PIVは 新しい流れの計測方法として、従来の熱線流速計やレーザー ドップラー流速計 (LDV) などの代表的な点測定法に比べて、 全流れ場の瞬間速度を計測できる点が特徴である。PIVが提 案されてから約10年余りの間に、数多くの論文が発表され、 おそい流れから超音速流れまで、また単相流から混相流まで 様々な流体や流速に応じてそれぞれに適用可能な各種の方法 とそれらの原理、応用が発表されてきた。PIVは、流体の研 究における強力で、実用的なツールになってきた。そして、 この技術は10年間の開発と研究によって、より成熟する傾向 が強まってきている。

一方、PIVを実際の流れ場の計測に適用しようとすると、 それには様々な問題点があり、どんな流れでも計測できると いうことではない。PIVの精度の問題に関わらず、粒子の懸 濁法、粒子の追随性、照明方法、画像の前処理、誤対応速度

250

ベクトルの判定と削除、カメラの設定とレンズの補正、他の 物理量の再構成など多くの問題点をかかえており、これらの 問題は現在も未解決である。また各種流れに最適な手法の標 準化も確立されていない。気液二相流の場合は、単相流より、 もっと複雑である。主な問題点は二つある。第一は、照明の 問題である。分散相 (Dispersed Phase) が多い場合、照明 が十分でなくなってしまう、すなわち、光が流れを通過しに くい。一方、もし強い光源を用いれば、分散相の反射によっ て、画像に大きなノイズが生じる。特に、気液二相流の場合、 気泡は強い光にさらされると、乱反射が発生するが、これは 避けられない。第二は、各相の運動量を測るために、各相の 情報を一つの画像データから分離抽出しなければならない。 たとえば、気泡の運動速度は周囲の液体の速度に比べて高く、 常に速度差が存在している。液体の速度と気泡の速度を別々 に同時に測りたいとき、画像を粒子のみの画像と気泡のみの 画像の二つに分けるのがよい。

PIVの研究では、大別して二つの方法を選択する必要があ る。一つは、より速い高速撮影機器、より強いレーザ、より 強力なスーパーコンピュータ、制御コード付きのレーザ、ホ ログラム撮影機器など高価な設備を用いて、複雑な3次元の 流れの本格的な計測を行うものである^{4,5)}。もう一つは、PIV の実用性に注目し、普通のパーソナルコンピュータとビデオ を利用して計測を行うものである。このような計測には、ソ フトウェアの工夫が必要である。本稿では、後者に着目し、 最近開発されたPIVのアルゴリズムや処理手法などの概要に ついて述べ、その外に、PIVの気液二相流への応用を紹介す る。

PIVシステム

PIVシステムは四つの部分から成る。すなわち、照明、粒子の注入、撮影、画像処理である。照明方法としては、2次

元の場合、Fig.1に示すようにレーザ光を半円筒レンズによって薄い平面状のレーザライトシート(略してLLSということが多い)を用いることが多い。粒子の注入と撮影の問題点はほとんど解決されているが、画像処理、特に、画像データから速度ベクトルの抽出では、様々な手法が提案されており、どんな流れにも適用できる唯一の手法というものはない。ここでは、各種のPIVに関する手法をまとめておく。

2.1 PIVの手法とアルゴリズム

PIVの手法について、様々なアルゴリズムと処理方法が提 案されている。それらを大別すると2種類になる。すなわち、 高粒子密度画像と低粒子密度画像のそれぞれに相応しい手法 である。粒子画像の密度 (Particle Image Density) とは、 単位画像面積あたりの粒子の数であり、いくつかの定義式が 用いられている。ここでは、画像密度 ρ の定義として次式 を用いる。

ここで、rmax は画面における粒子の最大移動距離、No は全 画面内の粒子数、Α₀は画像の面積であり、 ρ は無次元量と なる。画像密度の意味は、画面上の粒子の最大移動距離と平 均粒子間の距離の比率である。 ρ ≥1の場合は高画像密度 と呼ばれ、 ρ <1の場合は低画像密度と呼ばれる。高画像 密度に適する処理手法では、個々の粒子の対応付け、または 追跡が不可能であるので、一般に画像の輝度値を用いて計測 領域内の局所の濃度パターン変位によってその局所領域の平 均速度を求める。この方法は濃度パターン法と呼ばれる。一 方、低画像密度を用いる手法では、個々の粒子の対応付け・ 追跡が可能である。従って、単一の粒子とその周りの粒子の 情報を用いて、粒子パターンを作り、この粒子パターンによ って、次の時刻の画像における粒子パターンとのマッチング から粒子の同定を行う。ここでは、各粒子は一連の滑らかな 曲線運動を行うので、粒子パターンの類似性が保存されるこ とを原理として、粒子の同定を行う。このような処理手法は、 PTV (Particle Tracking Velocimetry) と呼ばれる。



Fig.1 Optical configuration for two-dimension PIV system

2.1.1 高密度粒子画像に相応しいアルゴリズム

(1) 輝度分布相関法

輝度分布相関法³⁾はパターン追跡法と呼ばれることもあ り、PIVの代表的な手法として、様々な流れ場の計測に適用 されている。輝度分布相関法ではFig.2のように、P点を含 んでいるウィンドウWp(画像の小領域)内の高密度粒子画 像のパターンを用いる。次の時刻の画像内でP点をめぐる捜 査領域Wiを設け、Wi内の候補となるすべての点Qについて、 前述のようにWpをパターンとして構成する。Wpとすべて のWpの相関係数を計算し、最大相関計数値となる点Qmを 対応点として決定する。Wpの各要素値から構成されるマト リクスをf, Wpのそれをgとすると、相関係数rは次式で表 される。

あるいは次式がよく用いられる。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} (f_{ij} - \bar{f}) (g_{ij} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} (f_{ij} - \bar{f})^{2} \cdot \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} (g_{ij} - \bar{g})^{2}}} \dots \dots (3)$$

ここで、NとMはマトリクスの両辺の要素数であり、 $\bar{f} \ge g$ は相関領域における輝度の平均値である。なお、式(3)は 偏差 $f - \bar{f} \ge g - g$ に関する相関を評価するものであるのに 対して、式(2)は $f \ge g$ の相関を評価するものである。

輝度分布相関法は、類似性の評価に最も一般的な相関係数 を用いる。しかしながら、この方法は定義通りに計算すると 膨大な時間がかかる。実際の計測では、後述のMQD法と逐 次棄却法のほうが輝度分布相関法より計算時間が短いので、 これらを用いることもある。

(2) MQD法

MQD⁶⁾法とは、Minimum Quadratic Differenceを略し たものであり、輝度値の差の自乗という意味である。この方 法はMerzkirchらによって提案され、相関係数の計算の代 わりに、輝度値の差の自乗を類似性の指標として同一パター



Fig.2 *Wi* stands for the window of interrogation area. *Wp* stands for the window of a reference pattern. The two Fig.s stand for two consecutive images. *P* is the point where the velocity is to be calculated.

ンを決定するものである。具体的には、前述の輝度分布相関 法と同じ記号を用いれば、パターンの同定の指標rは次式で 表される。

$$r = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} (f_{ij} - g_{ij})^2 \cdots (4)$$

rが最小値を持つとき二つのパターンfとgは同一パターン であるとする。この方法の原理は輝度分布相関法とあまり変 わらないが、計算時間を著しく短縮することができる。

(3) 自己相関法

自己相関法の原理は、多重露光の同一画像上で自己相関係 数を計算し、その極大になる位置が原パターンの変位量に対 応することにある。一般にn回の多重露光画像では、自己相 関係数は原点上のピークの両側に2n-2個のピークが対称に 現れる。nが増えるに従ってピークの値が低下し、ピークを 検出するのが難しくなる。一般に2重露光で十分であり、3 重露光以上はあまり使われない。

自己相関法の最大の特徴は、もし露光時間間隔をコントロ ールできれば、速い流れの測定が可能であることである。相 関法系の手法の場合には、PIVの最大測定速度は、画像の時 間間隔によって制限される。そのため、速い流れの測定のた めには、高速撮影機器と映像記録装置が必要である。しかし ながら、自己相関法は、パルスの発生装置で数ナノ秒の露光 時間間隔を容易に実現できるので、より速い流れを計測でき る。

普通の自己相関法では変位量の方向の正負を決定できないため、正負の判別には何らかの工夫をする必要がある。いくつかの方法、たとえば、Adrianの提案した画像・シフト手法や (Image-shift technique)³⁾、植村らの提案した3重露光法⁷⁾などがある。

2.1.2 低密度粒子画像に相応しいアルゴリズム

(1) 二值化画像相関法

252

二値化画像相関法⁸⁾は輝度分布相関法と異なり、二値化し た画像を対象として個々の粒子の追跡を行う方法である。こ の方法では、二つの連続した画像に対して、しきい値によっ て画像を二値化し、個々の粒子をラベリングする。Fig.3に 示すように、第1画面内の一つの参照粒子と候補粒子のそれ ぞれの周りの粒子分布パターンの類似性を調べ、その類似性 が最も高い二つの粒子のペアを同一粒子とする。類似性の評 価には次の相関式を用いる。

$$r = \frac{A_{overlapping}}{A_{particle}\sqrt{NM}} \quad \dots \quad (5)$$

ここでAoverlappingは重なり面積で、Aparticleは単一の粒子の面積である。なお、ここで粒子はすべて同じ大きさのものを元

の粒子の重心位置に置いたものを用いる。このような粒子を 仮想粒子と呼んでいる。

(2) 速度勾配テンソル法

従来用いられている二値化画像相関法では、第1画像を第 2画像に平行移動して重ねる流体運動の並進のみを考慮した ものであり、回転、剪断、伸縮などの変形を含む実際の流れ 場において粒子の重なり状態によっては粒子パターンの類似 性の評価が信頼できなくなる。そこで流体の変形を考慮した アルゴリズムとして速度勾配テンソル法が考案された⁹。

この速度勾配テンソル法は、Fig.4に示すように、第1画 像の参照粒子 x_1 を第2画像の候補粒子 x_1 に平行移動し、さら に速度勾配テンソルにより流体変形を付加させることにより 計測精度を向上させている。実際には、速度勾配テンソル法 では次のように計算が行われる。第1画像の粒子 x_{11} は $u(x_{11})$ Δt 平行移動により第2画像の粒子 x_{11} に移動される。この2 粒子における粒子間距離 d_{11} は次のように与えられる。

$$d_{ij1} = \| x_{i1} + u(x_{i1}) \Delta t - x_{j1} \| = \dots$$
(6)

$$\| (\mathbf{x}_{I} - \mathbf{x}_{I}) - (\mathbf{x}_{i1} - \mathbf{x}_{i1}) + \delta u (\mathbf{x}_{I}) (\mathbf{x}_{i1} - \mathbf{x}_{I}) \Delta t \|$$

ただし、 $u(x_{i1})$ は粒子 x_{i1} の速度、 $\delta u(x_1)$ は粒子 x_1 における 速度勾配テンソルである。



Fig.3 The left two groups of particles stand for the patterns of particles in two images. The right one stands for the overlapping form of two groups of particles. Here the radii of all particles are assumed to be the same.



Fig.4 Schematic diagram of the velocity gradient tensor method

ここで、近傍粒子すべてにおいて上式の二乗総和*E*_{ijk}は次 式で表される。

$$E_{ijk} = \sum_{k=1}^{n} d_{ijk}^{2} = \sum_{k=1}^{n} \| (x_{I} - x_{I}) - (x_{jk} - x_{ik}) + \\ \delta u (x_{I}) (x_{ik} - x_{I}) \Delta t \|^{2} \qquad (7)$$

上式を最小二乗法により、最適な速度勾配テンソルを算出 する。次に得られた速度勾配テンソルを用いて上式の二乗総 和を算出し、すべての候補粒子に対して最小となる二乗総和 を対応粒子対として決定される。

また連続の式を導入し、速度勾配テンソルの算出における 未知数を減少させ、計算の簡単化を行っている。

(3) デローニー追跡法

デローニー追跡法¹⁰⁾は基本的に粒子パターン法の一つで あり、他の粒子パターン法と異なることは、デローニー三角 分割法を用いて、粒子の追跡の代わりに、三つの粒子から作 った三角形の追跡を行うことである。Fig.5に示す。デロー ニー追跡法の原理は、任意散乱した粒子の位置から、最適か つ唯一な三角形の格子系を形成できることにある。最適な格 子系とは、三角格子系の各三角形の内角が大きすぎたり、辺 の長さも長すぎたり、短すぎたりすることが少ないという意 味である。デローニー分割法がPIVに適用される最も重要な 性質はその唯一性である。唯一性とは、三角形の分割の結果 が処理する粒子の順番に依存しない、言い換えれば、短い時 間間隔の二つ画像の粒子に対して三角格子系を作るとき同じ 格子系を形成するということである。この性質から、ある捜 査領域内において最も似ている形状を持つ二つの三角形が見 つかれば、それらは同一三角形であると判定することができ る。三角形の類似度の評価には次式を用いる。

~	$\underline{Area(A \cap B)}$	
/—	$\sqrt{Area(A) \cdot Area(B)}$	(0)

ここで、AとBが二つの三角形を表し、A∩Bは両三角形が



Fig.5 The triangular net is generated by Delaunay tessellation. Particle tracking is performed by tracking each triangle.

重なる部分であることを示す。

デローニー追跡法は二値化画像相関法に比べて、流れの回 転がある場合にも、正しい粒子の対応付けが可能である点で 優れている。その理由は、対応する三角形を探すとき、三角 形の形状を重視し、二つの三角形をすべて回転させた後類似 度を計算するからである。また、デローニー追跡法は二値化 画像相関法と比べて計算時間がはるかに短く、得られた速度 ベクトル場の補間と再配置も簡単にできる。しかし、デロー ニー追跡法は、画像にノイズが多い場合、誤対応が起こりや すく、プログラミングも複雑で、3次元への拡張が難しいと いう問題点を持っている。

(4) バネモデル法

岡本¹¹⁾が提案したバネモデル法、また、スプリングモデ ル法と呼ばれる手法は元々クラスタのような運動物体(例え ば、人の顔)の認識のための類似度評価の一つとして、提案 されたものであり、PIVシステムの粒子同定にも利用できる。 Fig.6に示すように、バネモデル法では、同定したい粒子と その周りの粒子とでクラスタを構成し、仮想的なバネをおい て各粒子間を接続する。第1画像において、粒子間の張力と バネ全体の荷重をゼロとする。第2画像では、各粒子が運動 するために、粒子間がずれるに従い張力が増えると考える。 クラスタ内のバネにかける荷重の総和を類似度の評価に用 い、その値が最も小さくなるような粒子クラスタの場合に粒 子の対応がとれたとする。

(5) 4時刻追跡法

17

西野ら¹²⁾や、小林ら¹³⁾が提案した4時刻追跡法の原理は、 前述の類似度に基づく手法と異なり、各粒子は連続した4画 面を通じて滑らかな曲線を描く粒子の組を構成できることに ある。

Fig.7を用いてその手順を説明しよう。まず、第1画面内 の一つの粒子に着目すると、その粒子は第2時刻の画面では 第1画面内のある位置から一定の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 面での予想移動距離領域を定め、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見なされ る。

ここで、「経路の滑らかさ」を定量的に評価するために、 ある粒子の4時刻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、 その合成値が最も小さい組の粒子経路が滑らかで、同一粒子 の軌跡であると判定する。Fig.7に示す記号に従い、 x_i 、 x_j 、 x_k 、 x_i はそれぞれあらかじめ予想された同一粒子が4時刻画 面内の座標で、 $d_{ij} \epsilon_{x_j} - x_i$ 、 $\theta_{ik} \epsilon d_{ij} と d_{jk} 間の角度とする$ $と、「経路の滑らかさ」の定量的な評価は、次式の<math>\sigma_i$ の値が 小さいほど滑らかであるとするものである。



Fig.7 Schematic diagram of the 4-frame PTV algorithm

$$Z Z \mathcal{C}, \qquad d_{m} = \frac{1}{3} (d_{ij} + d_{jk} + d_{kl}), \ \theta_{m} = \frac{1}{2} (\theta_{ik} + \theta_{jl}) \\ \sigma_{l} = \sqrt{\frac{1}{3} (|d_{ij} - d_{m}|^{2} + |d_{jk} - d_{m}|^{2} + |d_{kl} - d_{m}|^{2})} \\ \sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{2} (|\theta_{ik} - \theta_{m}|^{2} + |\theta_{jl} - \theta_{m}|^{2})} \end{cases} \cdots (10)$$

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ほとんど起こらず良好な測定がで きる。この方法は広く使われている。しかし、「経路の滑ら かさ」という条件が厳しすぎる場合や、粒子が4時刻の画面 の内の一画面に撮影されなかった場合には、対応をとれない 欠点がある。

(6) その他

PIVでは他の処理手法もある。たとえば、相関係数の計算 には多大な計算時間を必要とするため、フーリエ変換法を用 いる方法が有効である。また、情報科学によく使われる遺伝 的アルゴリズムや、ニューラルネットワークなどの手法が PIVに応用されている例も少なくない。PIVにおいて各手法 及び適用範囲についてTable1にまとめられる。

気液二相流へ応用

液体中の気泡運動に関する研究は、これまで数多く行われ てきたが、気液の密度差や気液界面の変形に起因する複雑・ 不規則な流動特性が存在するために、依然として包括的な解 明には至っていない。PIVの気液二相流への拡張には、多く

手法	画像密度	画像数	回転対応	次元	原理	特徵
輝度分布相 関法	高	2		2	輝度値の相関	汎用性,多大な計算
MQD	高	2		2	輝度差の平方	汎用性
自己相関法	高	1		2	輝 度 値 の 自 己 相 関	汎用性,高速流れ対応,正負方向の判別必要
二 値 化 画 像 相 関 法	低	2, 3	ない	2, 3	粒 子 パ タ ー ン の 相 関 , 仮 想 粒 子	高速処理
デ ロ ー ニ ー 追 跡 法	低	2	ある	2	粒 子 パ タ ー ン (三 角 形)の 追 跡	高速処理,回転対応
速 度 勾 配 テ ン ソ ル 法	低	2	ある	2, 3	速 度 勾 配 テ ン ソ ル	高速処理,回転,剪断, 膨張対応
バ ネ モ デ ル 法	低	2	ある	2, 3	仮 想 バ ネ	回 転 , せ ん 断 , 膨 張 対 応
4 - P T V	低	4	ない	2, 3	滑らかな流跡線	汎用性,誤対応少ない

Table1 Comparison of algorithm/method for PIV

の問題点がある。たとえば、トレーサ粒子または染料を水に 注入すると、気液の表面の界面張力への影響が不可避である。 個々の気泡を計測するとき、気泡画像が重なることが多く、 その分離処理をしなければならない。また、気相と液相を同 時に計測したいとき、気泡画像と注入された粒子画像を分離 しなければならない。気泡流の計測は、気液二相流の研究に おいて重要な課題の一つであり、従来の点計測型の計測方法 では、全流れ場の速度分布や、気泡流の非定常変化などの情 報がほとんど得られなかった。このような問題を解決する必 要があり、PIVは、全流れ場の同時計測が可能であるという 特長を有するため、気液二相流の計測に適用されるようにな ってきた。ここでは、PIVの気液二相流への応用のために必 要な基礎的な若干の処理方法を例をあげて紹介する。

3.1 重なり円の分離

気泡流における個々の気泡の運動は複雑で、3次元的であ るので、気泡画像が重なる場合が多い。個々の気泡の運動を 計測するために、重なり気泡を検出し、重心位置を算出しな ければならない。

気泡の形状は不規則で、流れによって形状が変わりやすい。 しかし、気泡の形状を、円または楕円のように単純化するこ とが多い。重なった円・楕円の検出に関する理論研究はほと んど完成しているが、それらを実用化するとき、PIVでは誤 対応が多くて、完全な復元は現在でもできていない。ここで、 宋ら^{14,15)}が開発した重なり円をモデルとして検出の方法に ついて説明しよう。

重なり円の検出には二つの過程がある、すなわち、画像上 に円のエッジ(境界という意味である)を検出することと、 エッジの情報によって、同一円に属する可能なピクセルから クラスタを作る。エッジの検出は若干方法がある、1ピクセ ルから成る細線のようなエッジが望ましい。

エッジは、画像上に輝度値が急に変化しているところであ る。従って、エッジを検出するには、空間微分を行って、輝 度値の変化しているところを見つければよい。Canny¹⁶法で は、あらかじめエッジの方向とその法線方向nを見積もるこ とができる。nは次式で表される。

ここで、Gはガウスオペレータ、Iは画像の輝度分布、x、 yは画像の座標、*はコンボリューション、 σ は分散である。

Cannyオペレータは次式で表される。

Cannyオペレータは、まずガウスオペレータを用いて画

像の平滑化作用を行い、平滑化された画像をあらかじめ推定 されたエッジの法線方向で2回微分して、ゼロ交差点をエッ ジの位置とするものである。さらに、Canny法で得られた エッジを細線化する。すなわち、1ピクセル程度の細いエッ ジを得ることができる。

エッジの情報を用いて、同一曲線に属するピクセルを平滑 化してから、局所の曲率及び中心座標を計算し、最小自乗法 などの方法よって、円を復元できる。この手法では、ある円 弧から円の半径と中心座標を推定でき、重なり円の検出にも 適用できる。ところが、楕円の場合には、円の場合の三つの パラメータと比較して、五つのパラメータが必要である。

Fig.8は電子顕微鏡で撮影された石炭灰の写真である。画面上の円が輝度値と大きさが違うので、普通の二値化・ラベリング処理や、テンプレート法などで重なり円の検出ができない。Fig.9は、上述のCanny法によって円を復元した結果である。まだ誤対応がかなり残っているが、この方法は気液二相流の場合にも適用される。

3.2 粒子画像と気泡画像の分離

気相と液相の速度を同時に測りたいとき、画像を気泡のみ



Fig.8 Original image of coal-ash Type A, image size : 701×507 , 8-bit. (1 μ m = 13.74pixel)



Fig.9 Extracted result and original image (The extracted circles are drawn on their original image)

の画像と粒子のみの画像に分離することが必要である。モノ クロ画像で撮影された画像の前処理段階における、気泡とト レーサ粒子の効果的な識別方法とその画像分離法について述 べる。気泡とトレーサ粒子が混在する画像の例をFig.10に 示す。気泡と粒子が同時に撮影されている画像を、気泡のみ の画像と粒子のみの画像に分離する手順を以下に示す。

- (1) 原画像におけるノイズをスムージング、またはメディア ンフィルタなどのアルゴリズムによって取り除く。
- (2) 原画像から大津の方法¹⁷⁾に従って二値化画像を作る。
- (3) 二値化した画像に対して、気泡と粒子をオブジェクトとし、ラベリング処理を行う。
- (4) ラベリングした各オブジェクトの面積、平均輝度値、輝 度値の標準偏差などのパラメータを算出する。
- (5)オブジェクトのパラメータを選んで、大津の方法により ヒストグラムから適当なしきい値を算出し、気泡と粒子 を分離する。

実験データによる分離例を気泡像(Fig.11)・粒子像 (Fig.12)に示す。新しい気泡・粒子分離のための画像処理 手法を提案し、その有効性を実験的に確認した。



Fig.10 Original image (640 × 480 × 8bit) Particles and bubbles are all in this image.



Fig.11 Image of bubble Bubbles are extracted from the original image.

3.3 気液二相流のPIV計測

上昇気泡流中の気相と液相の速度場をPIVで同時に計測す ることができる。画像処理手法としては上述の3.2節と同じ く、原画像を二値化し、気泡と粒子をオブジェクトとしてラ ベリングする。各オブジェクトに対して3つのパラメータ (絶対値、平均輝度値、輝度値標準偏差)を計算し、その値 にしきい値を設けて気泡画像と粒子画像に分離する。得られ た粒子画像と気泡画像をマスク手法 (Mask Technique) に よってMQD法で気泡と液体両方の速度を計算する。

Fig.13は原画像、Fig.14は気泡のみ画像、Fig.15は粒子のみ画像、Fig.16は算出した気泡と液体の速度場である。

3.4 上昇気泡の3次元の計測

宋ら¹⁸⁾が研究した上昇気泡の3次元の計測をここで例として紹介しよう。3次元のPIV計測は、2次元の計測と異なり、 複数のカメラを用いて計測を行う。このため、使用するカメ ラのパラメータの決定が必要である。カメラのパラメータを 決める方法は村井の方法¹⁹⁾がよく知られた手法である。3次



Fig.12 Image of particle Particles are extracted from the original image.



Fig.13 Original image of bubble and particle

20



Fig.14 Image of bubble Bubbles are extracted from the original image



Fig.15 Image of particle Particles are extracted from the original image

元の計測の場合に、ステレオペアマッチング法を用い、複数 の画像のトレーサ粒子像(3次元座標の復元)を対応付ける 必要がある。しかし、粒子数の増加に伴いカメラ間の粒子像 の3次元座標の復元は困難となる。ステレオペアマッチング の対応の正解率を向上させ、速度ベクトル数の増大をはかる ために、3時刻の画像を用い2次元の二値化画像相関法とス テレオペアマッチング法を融合させた「3時刻追跡ステレオ 法」というものである。この方法は、2台のカメラから撮っ た画像に対してそれぞれ二値化画像相関法を適用して、2次 元の速度を求め、二つの速度ベクトルマップから3次元に復 元するものである。また、この方法は、従来の3次元座標復 元・速度算出法に比べて、良い測定結果を得られ、さらに後 処理(たとえば、誤対応ベクトルの削除)にも効率的である。

上昇気泡の計測の装置図とその結果をそれぞれFig.17と Fig.18に示す。この方法によって、速度分布から流れ場の



Fig.16 Velocity vectors of bubbles and particles



Fig.17 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring the rising bubbles



Fig.18 3-D velocity field of particles and bubbles The bigger circles stand for the bubbles

瞬時運動エネルギー分布を抽出することができた。具体的な 処理手法と計測の結果は文献18) に報告されている。

4 まとめ

PIVアルゴリズムの基本的な分類と、気液二相流への応用 例について解説した。しかし現時点ではPIVは決して汎用的 なツールとは言い難く、計測精度は流れ場の種類や照明方法 に依存している。今後、画像処理機器、コンピュータなどの 高性能化により、さらに実用化が進めば、新技術の創出など に大きな貢献ができると期待される。

参考文献

258

- Adrian RJ : Bibliography of particle velocimetry using imaging methods : 1917-1995, TAM Report No. 817, University of Illinois at Urbana-Champaign, (1996), 5.
- Adrian RJ : Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow-a review, Int J Heat Fluid Flow, 7, (1986), 127.
- Adrian RJ : Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annu Rev Fluid Mech, 23, (1991), 261.
- 4) Barnhart DH, Adirian RJ, and Papen G: Phaseconjugate holographic system for high-resolution particle-image velocimetry, Applied Optics, 33 (1994) 30, 7159.
- 5) Pu Y and Meng H : An advanced off-axis holographic particle image velocimetry (HPIV) system, Exp Fluids, (to be published).
- 6) Gui LC and Merzkirch W : Generating arbitrarity sized interrogation windows for correlation-based analysis of particle image velocimetry recordings, Exp Fluids 24, (1998), 66.
- 7) 植村知正,井口 学:粒子分布密度の高い画像に適した粒子追跡法の高速アルゴリズム,可視化情報学会誌, 13 (1993), SN2, 125.
- 14
 14
 14
 14
 15
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16
 16

- 9) Song X, Yamamoto F, Iguchi M and Murai Y : A new tracking algorithm of PIV and removal of spurious vectors using Delaunay tessellation, Exp Fluids, 26, (1999), 371.
- 10) Ishikawa M, Yamamoto F, Iguchi M, Murai Y and Wada A: A Novel PIV System Using Parallel Processing of Flow Analysis and Image Analysis, Proceedings of International Conference on Fluid Engineering, II (1997), 657.
- 11) 岡本孝司:バネモデル法粒子追跡アルゴリズム,可視 化情報学会誌,15 (1995), SN2, 193.
- 12) Nishino N, Kasagi N and Hirata M : Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, J. of Fluids Eng., 111 (1989), 384.
- 13)小林敏雄,佐賀徹雄,瀬川茂樹,神田 宏:機械学会 論文集(B),55-493 (1989),107.
- 14) Song X, Yamamoto F, Iguchi M, Shen L, Ruan X and Ishii K : A method for measuring particle size in overlapped particle images, ISIJ int., 38 (1998) 9, 971.
- 15) Shen L, Song X, Yamamoto F and Iguchi M : A method for recognizing particles in overlapped particle images, Pattern Recognition Letters, 21 (2000), 21.
- 16) Canny J : A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8 (1986) 6, 679.
- 大津展之:判別及び最小2乗規準に基づく自動しきい値 選定法,電子通信学会論文誌,J63-D (1980) 4,349.
- 18) Song X, Yamamoto F, Iguchi M, Koketsu M and Chen G: 3-D PTV measurement of bubble rising flow in cylindrical vessel, ISIJ Int, 36 (1996), S54.
- 19) 村井俊治:解析写真測量,日本写真測量学会,(1983),19.

(2000年4月27日受付)