

PTVのための粒子画像抽出法に関する検討 —粒子マスク相関法について—

A study on particle identification in PTV

- particle mask correlation method -

江藤剛治*・竹原幸生**・道奥康治***・久野悟志****

by Takeharu ETOH, Kohsei TAKEHARA, Kohji MICHIOKU and Satoshi KUNO

Some algorithms for particle identification in PTV, which are classified in a category "particle mask correlation method", are presented and tested. A typical brightness pattern of a particle image is referred as a particle mask; it is placed on an image plane and correlation coefficient between the particle mask and the image is calculated; the particle mask is scanned on the plane with the calculation of correlation coefficient; the small subareas with high correlation value indicate central areas of particle images.

Keywords: particle mask, PTV, correlation, particle image

1. はじめに

時々刻々変化する流れの3次元的な構造の定量的な計測法として、現在のところ、PTV(Particle Tracking Velocimetry)が最も有望な手段である。3次元PTVのためにいくつかのアルゴリズムが提案されているが、最も基本的な問題点は、1枚の画像から抽出できる粒子数の不足による空間解像力の低下である。

例えば現在の技術では、ビデオカメラを用いる場合、最大限抽出できる粒子個数は1,000個のオーダーである。仮に1,000個の粒子が得られたとすると、2次元解析では約30(H)×30(V) (≒ 1,000)の解像力となり、通常の用途に対しては十分な解像力が得られる。3次元ではこれが10×10×10となり、流れの詳細な構造は把握できない。実際には現在の技術では、少し複雑な流れ場に対しては、様々の光学的な問題により、100個程度の粒子しか抽出できないのが普通である。

フィルムを使うと解像力の問題は大きく改善されるが、フレームレート(シャッター間隔の逆数)が小さいこと、および複数のカメラの同期が困難であることから、3次元運動の連続計測は困難である。

以上より、3次元PTVにおいては、アルゴリズムの最初の段階で、画像上に写っている粒子をもれなく抽出する技術を開発することが重要である。

本論文を含む一連の研究では、以下の経験に基づいて、新しい粒子抽出手法を開発することを目指している。

- ① 2値化すると、非常に薄く写っている粒子が消える。
- ② 2値化すると、明るいところ、あるいは多数の粒子が重なっているところでは輝度パターンの情報が消え、いわゆるダンゴになる。
- ③ 動いている画像上でははっきり粒子と認識できるのに、画面を静止させた瞬間に見えなくなる粒子がある。

* 正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科(〒577 東大阪市小若江 3-4-1)

** 正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科(〒657 神戸市灘区六甲台町)

**** 学生会員 神戸大学大学院(同上)

④境界線等の線形画像要素も2値化画像上に残り、粒子抽出処理の大きな妨げとなる。

次に2枚の画面上の粒子像の対応付けが問題になる。対応付けには2種ある。短い時間間隔で撮影された2枚の画像の場合と、立体視を目的として、同一時刻に撮られた2枚の画像上の粒子の対応付けである。3次元撮影では、焦点深度の深い光学系を用いない限り、奥行き方向に分布した全ての粒子に焦点を合わせることができない。絞りこんで焦点深度を大きくすると、撮像面への入射光量が小さくなるので、この方が撮影上の主要な制約になる場合も多い。むしろ、焦点が合った像、ボケた像、粒子サイズ、中心輝度等の粒子情報も積極的に利用して、粒子と粒子を対応付ける方が賢明である。著者らの提案したPTVのための粒子追跡アルゴリズム¹⁾では、これらの粒子情報が抽出されれば、すぐ組み入れられるようになっている。

以上より、著者らは次のような方針で高性能粒子抽出アルゴリズムの開発を試みている(補遺1)。

①2値化は用いないか、もしくは粒子抽出アルゴリズムの最終段階で、ラベリング等のためにどうしても2値化が必要になった段階で用いる。

②粒子画像に特有の同心円状の輝度パターンを積極的に利用する。

③ボケ具合、中心輝度などの輝度情報を積極的に利用する。

④粒子が動いているという情報を積極的に利用する。

2. 粒子マスク法(PMM: Particle Mask Method)の概要

2. 1 粒子マスクの分類

単一粒子画像は中心輝度が大きく、周辺が暗い富士山状の輝度分布を持つ。著者らはこれを2次元正規分布関数で近似している(図-1)。牛島・田中²⁾(補遺II参照)はこれに2次関数をあてはめている。このような輝度パターンを粒子マスクと呼ぶことにする。2次元正規分布の場合のマスク・パターンは以下の式で表される。

$$f(x, y) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここに、 a は中心輝度、 σ は標準偏差(代表粒子直径の1/2)、 (x_0, y_0) は中心座標である。

2. 2 粒子マスクの当てはめ法の分類

粒子マスクを粒子画像に当てはめる方法として、基本的に次の2つの方法がある。

①マスク相関法(MCM: Mask Correlation Method)

②マスク適合法(MFM: Mask Fitting Method)

マスク相関法では、あらかじめマスク形状(マスク・パターンとサイズ)を決める。画面上の各ピクセル座標を中心として、マスク・パターンの範囲でマスク・パターンと画面の輝度分布との相関係数を計算する(補遺III参照)。マスク中心座標を全画面上で走査して、この計算を反復する。

全画面上の相関値が求まった後は、2値化処理により高相関小領域を抽出しても良い。相関係数値のピーク、もしくは高相関小領域の重心位置をもって粒子中心とする。この場合、粒子径等はあらかじめ

決めておくので、この段階では画像上の粒子の粒子径や輝度情報などは得られない。2値化後、近似的な粒子の中心座標と相対的な粒子サイズが求まる。中心座標と原画像から中心輝度を求めることができる。長所は計算アルゴリズムが比較的単純で、計算時間もマスク適合法と比べれば短いことである。

2値化を行うかわりに、マスク適合法を用いてもよい。この場合、中心輝度や粒子径等を未知数とし、粒

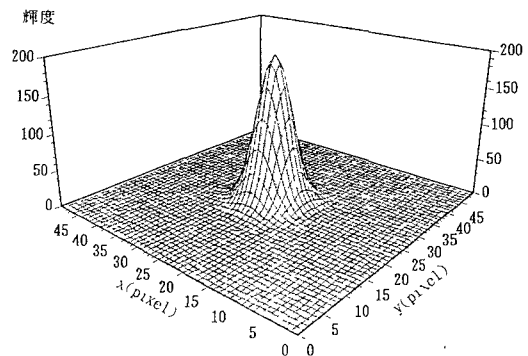


図-1 仮定した粒子画像の輝度分布
(2次元正規分布関数)

子マスクが画像上の粒子の輝度パターンに最もフィットするように未知数の値を決める方法である。マスク・パターンを2次関数とするときは、最小2乗法によりあてはめることができる。著者らは正規分布関数を用いているので、誤差の最小化にはPowell法を用いている。これにより、サブピクセル単位の高精度で中心輝度や粒子径等が求まる。

本論文ではマスク相関法を紹介し、その性能について基本的な検討を行う。今回は高相関領域の抽出の段階で2値化処理を用いる。

3. マスク相関法

3. 1 計算手法の概要

平均的な粒子径を前もって与える。ピーク値(式(1)のa)は1とする。このとき求めるパラメータは中心座標値(x_0, y_0)となる。すなわち未知パラメータは2個となる。アルゴリズムの概要は以下のとおりである。

- ①マスク相関値の計算：図-1、式(1)のような粒子マスクを1枚の静止画像上に置き、輝度分布との相関係数を求める。粒子マスクの中心座標をピクセル単位で動かし、全画面上でこの計算を行う。
- ②2値化処理：相関係数があるいき値以上の領域(1)と以下の領域(0)に2値化する。
- ③連結領域(粒子候補)の抽出： (x, y) 2次元平面上で、 x もしくは y 方向の隣接するピクセルが1であるとき、2次元平面上の連結した領域に属するとみなす。
- ④中心位置と粒子径：各々の連結領域について、重心座標、等価円半径(面積より)を求め、粒子中心の座標、および粒子径とする。
- ⑤中心輝度：粒子中心の原画像上での輝度を求め、その粒子の中心輝度とする。
- ⑥その他：以後の計算で必要であれば、各連結領域の長軸、短軸等を求めておく。

この手法の特徴は、2値化の前に粒子マスクと原画像との相関係数場を求めるところにある。これにより次のような長所が生じる。

- ①相対的にいかに薄い粒子画像であっても、輝度パターンが、中央がやや明るく裾が暗くなる山型になっておれば、中心付近の相関係数は1に近い大きな値となる。一方、強いコントラストを持つ明確な粒子像であっても、相関係数は1を超えない。すなわち、明るい粒子や暗い粒子が混在するような場(3次元撮影では多い)でも、粒子の中心位置の相関係数はほぼ1に規準化され、一定のいき値により、もれなく抽出できる。
- ②原画像を直接2値化すると、境界等の線形要素も残る。一方、後述のように線形要素と粒子マスクの相関係数は最大でも0.7程度となり、適当にいき値を選べば、2値化の時点で自動的に線形要素を消去できる。一方、以下の問題点がある。
- ①感度が高すぎて、粒子像以外の微弱な凹凸もピックアップする。
- ②非常に近接した2粒子の分解能が、マスク適合法よりは低い。

3. 2 マスク相関法の性能評価

(1) 検討手法

本節では1枚の静止画像の粒子像に対する粒子マスク相関法を対象として、粒子抽出性能の評価を行う。

本節では以下の検討を行う。

(1) マスクサイズ、(2) 線形要素の消去、(3) 近接する2粒子の分解能

まず、粒子マスク相関法ではマスクの大きさは仮定した値に固定する。このサイズについて検討する。

次に、計算機上で人工的に作成した画像に、この手法を適用する。通常の2値化による粒子抽出においては、境界などの線形要素も同時に抽出するので、これらを2値化後、消し去ると、境界付近の粒子も同時に消えてしまうなどの大きな問題点がある。よって人工的に作成した線形要素に、粒子マスク相関法をあてはめ、相関係数が最大どの程度になるか検討する。

同じく人工画像を用いて、近接して中心輝度の異なる2粒子があった場合、この2個を分離できる限界を明

らかにする。

(2) マスクサイズ

粒子マスクのサイズと粒子画像のサイズの関係を調べた。粒子マスクの幅を $\sigma_m=3$ ピクセルに固定し、粒子画像の幅 σ_p を $0.5\sim 15.0$ ($\sigma_p/\sigma_m=0.167\sim 5.0$)の範囲で変化させた。相関係数と σ_p/σ_m の関係を図-2に示す。図より以下のことがわかる。

① σ_p/σ_m が 0.167 から 1.0 にかけて相関値 r が急激に増加し、 $\sigma_p/\sigma_m=1.0$ で最大値 $r=1.0$ をとる。

$\sigma_p/\sigma_m>1$ では徐々に減少していく。

② 後述のように線形要素の消去のためのいき値として $r=0.7$ で2値化処理を行う場合、 $\sigma_p/\sigma_m\geq 1/3$ の粒子像はピックアップすることができる。特に、 $\sigma_p/\sigma_m>1$ の領域では問題なく2値化できる。

結論として、粒子マスクのサイズは一定としてよい。その $1/3\sim 5$ 倍以上のサイズの粒子画像はもれなく抽出できる。

(3) 線形要素の消去

画像要素として、点要素、線形要素、面要素がある。このうち面要素の境界は線形要素である。また線形要素と線形要素の交点は点要素となる。粒子マスク法ではこのうちある大きさの点要素の抽出を目的にしているので、線形要素を消去したい。このためには、線形要素と粒子マスクの相関をとり、起こり得る最大の相関係数値をいき値とすれば良い。

線形要素の輝度パターンには、堤防状のもの(図-3)と階段状のものがある。粒子マスクとの相関係数値が高いのは当然堤防状のものであるので、この場合を検討する。

表-1に検討ケースを示す。粒子マスクのサイズを代表直径の $1/2$ 、すなわち $\sigma_m=3$ ピクセルに固定し、堤防状線形要素の半幅(σ_l)を $1\sim 10$ ピクセルの範囲で変化させる。粒子マスクの中心を線形要素に近づけ、線形要素の反対側まで移動させつつ、相関係数を計算する。

相関係数の計算結果を図-4に示す。得られた結果

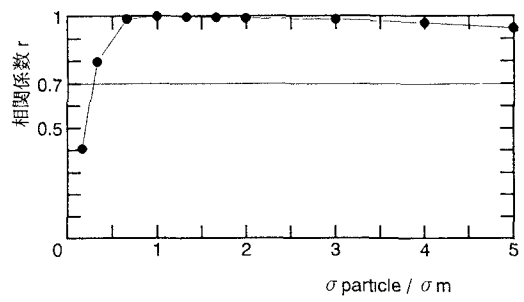


図-2 粒子マスクと粒子画像のサイズの比(σ_p/σ_m)と相関係数の関係

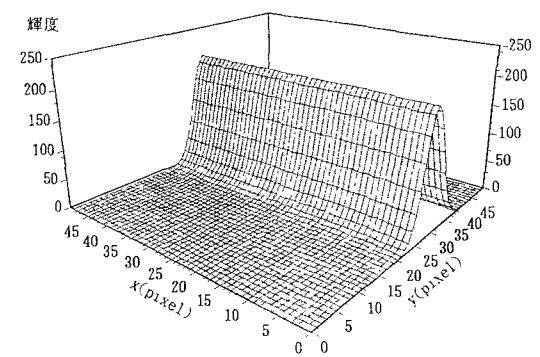


図-3 堤防状線形要素

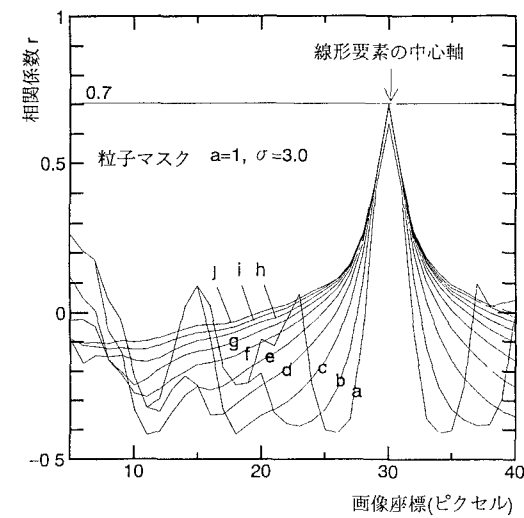


図-4 粒子マスクと線形要素の相関係数 $a\sim j$ はサイズ比(表-1)、画像座標は粒子の中心座標を表す。

表-1 検討ケース

堤防状 線形要素 の半幅	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
σ_l (pixel)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ_l/σ_m	1/3	2/3	1	4/3	5/3	2	7/3	8/3	3	10/3

は以下の通りである。

- ①粒子マスクと堤防状線形要素の位置が一致したとき（30ピクセル），相関係数値は最大となる。
- ②粒子マスクと線形要素との幅が等しい場合，相関係数値が最大となる（ケースc）。
- ③相関係数 r の最大値は約0.7である。
- ④堤防の幅が小さいとき（ケースa，b），計算上のノイズが生じている。しかし，ノイズによる相関係数の絶対値 $|r|$ は0.4を越えない。

よって線形要素を自動的に除去するには，相関係数0.7をいき値として高相関域を抽出すればよい。

（4）近接する2粒子の分解能

図-7に示すように直径が等しく，中心輝度の等しい2個の粒子像が近接している場合を考える。図-5は2個の粒子の輝度を加えたときの粒子の中心線に沿う，輝度の断面図を示したものである。中心間距離の異なる10ケースを重ねて示している。1つの粒子を $x=15$ ピクセルに固定し，もう一方の粒子を16ピクセルから25ピクセルまで移動させた。相関係数の計算では，同じ大きさの粒子マスクを移動させ，相関係数を計算する。

中心輝度が等しい場合の2個の粒子の中心軸に沿って粒子マスクを移動させたときの相関係数値の変化を図-6a)に示す。2個の粒子画像の中心と粒子マスクの中心が一致するとき大きな相関係数値をとるので2個の大きなピークを持つ。粒子マスクが2個の粒子画像の midpoint にあるとき極小値をとる。2個の粒子画像が近いほどこの極小値は大きくなる。いき値を0.7とすれば，この極小値が0.7となるときの中心間距離が解像力となる。

以下，中心間距離はピクセル単位(L)と，それを粒子代表直径($2\sigma_p$)で割って規準化した長さ($L/(2\sigma_p)$)で示す。得られる解像力も規準化中心間距離で表される。

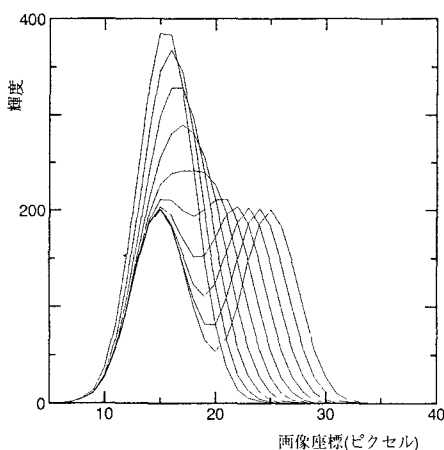
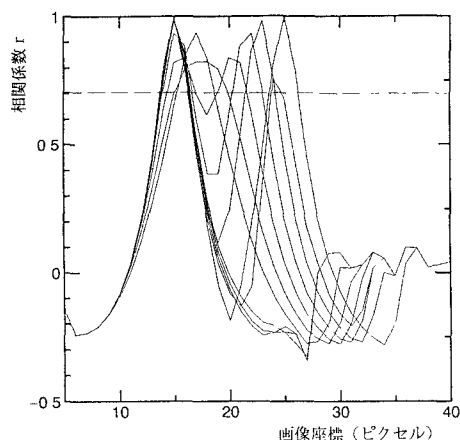
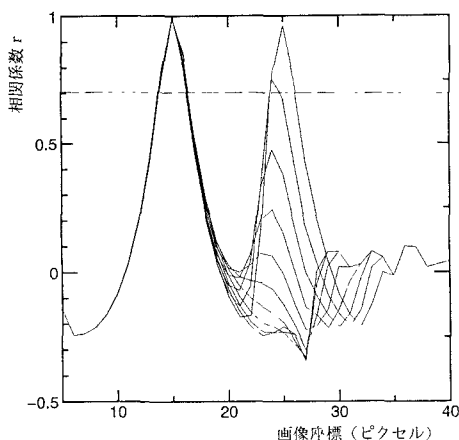


図-5 中心輝度が等しい2個の粒子の輝度の和の中心線上の輝度分布
(1個の粒子の中心位置は15ピクセル，他方は16～25ピクセル)



a) 中心輝度比 1/1



b) 中心輝度比 1/10

図-6 中心間距離と相関係数の関係

図より以下のことがわかる。

- ①図-5より，中心間距離 L が6ピクセル($L/(2\sigma_p)=1.2$)までは，重ね合わせた粒子画像に凹状の窪みがある。
- ②図-6a)より，相関係数値についても， $L/(2\sigma_p)\geq 1.2$ までは極小値を持つ。幸い，この極小値は $L/(2\sigma_p)=1.2$ まで約0.6であり，いき値 $r=0.7$ よりも小さい。
- ③以上より，同一形状(粒子幅，および中心輝度が等しい)の2個の粒子画像が近接する場合の，マスク相関法の限界解像力は $L/(2\sigma_p)\approx 1$ である。すなわち，中心間距離が粒子代表直径にほぼ等しい場合である。

限界解像力のときの2個の粒子が重複した画像を図-7に示している。このように粒子を重ねた図上に凹部がある限り，マスク相関法による粒子の分離が可能である。

参考のためにマスク適合法を適用した例を図-8に示す。2個の粒子の中心位置(x_0, y_0)，サイズ σ_p ，中心輝度 a 等のパラメータを与えて原画像を作成した。これらのパラメータの初期値を与えた値から離れた値に設定し，原画像とマスクの誤差の自乗和が最小になるようなパラメータ値をPowell法により求めた。図-8中の表に示すように，パラメータの適合結果は原画像のそれに完全に一致している。このようにマスク適合法は重ね合わせ像の頂部に凹部が見られない場合でも，2つの粒子を完全に分離できる。一方，オーバーフィッティングの可能性も生じる。

次に，2個の粒子サイズは等しいという条件下で，中心輝度の比を1~1/20まで変えて，同様の計算を行った。結果の例(中心輝度比1/10)を図-6b)に示している。この図より次のことがわかる。

- ①いき値を0.7とすると，中心間距離 L が9ピクセル($L/(2\sigma_p)=1.8$)までは分解できる。
- ②相関係数値に極小値が存在するのは，中心間距離が6ピクセル($L/(2\sigma_p)=1.2$)までで，これは中心輝度が等しい場合と同じ結果になる。しかし，このケースでは計算ノイズが生じており，実際の画像解析において，このような極小値が有意であるかどうか判定することは事実上できない。

図-9は2個の粒子の中心輝度比が1/1，1/2，1/4，1/10，1/20の場合の限界解像力を計算した結果を示す。図中の○印はいき値0.7で2値化処理を行う場合の2つの粒子が分離可能であることを示しており，●印は分離が不可能な場合を示している。

図より得られた結果を以下に示す。

- ①中心輝度比が減少する(変わる)にともない，限界解像力は低下する。
 - ②中心間距離 $L/(2\sigma_p)=2.0$ (粒子直径の2倍)までは，輝度に大きな差(中心輝度比が1/20)があっても分離可能。
4. 適用例

写真-1a)の画像にマスク相関法を適用した。粒子マスクのピーク(式(1)の a)は1，半径(式(1)の σ)は3ピクセルとした。いき値は0.7~0.9まで変化させた。

写真-1b)には，いき値が0.7で2値化した画像を示す。粒子と判断された，もしくは粒子と思われる部分は

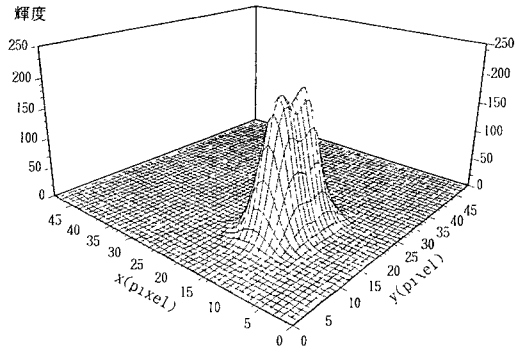
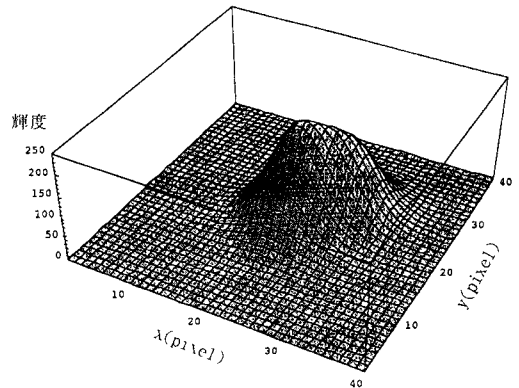


図-7 中心輝度，サイズが等しい場合の限界解像力時の輝度分布



	(粒子1)				(粒子2)			
	x_0	y_0	a	σ_p	x_0	y_0	a	σ_p
原画像	20.0	20.0	200	3.5	25.0	25.0	150	3.5
適合結果	20.0	20.0	200	3.5	25.0	25.0	150	3.5

図-8 マスク適合法の一例

全てピックアップされている。また、問題点として、多数のノイズをピックアップしている。

写真-1c)にはいき値を0.8で2値化した画像を示す。写真-1b)と同様に粒子と判断された、もしくは粒子と思われる部分は全てピックアップされており、さらにかなりのノイズが消去されている。

以上より、実用上、 $r=0.8$ をいき値に設定すれば良い。

5. まとめ

PTVのための粒子画像の新たな2値化法を提案し、その性能を検討した。結果を以下にまとめる。

- ①高性能粒子抽出アルゴリズムとして粒子マスク法を提案した。
- ②線形要素の自動消去には、理論上、粒子マスクとの相関値 $r=0.7$ をいき値として2値化すれば良い。
- ③ノイズ除去等も考慮すると、実用上、いき値は $r=0.8$ に設定すれば良い。
- ④粒子マスク相関法で、近接する粒子の分離が可能な限界相対中心間距離（解像力）を明かにした。中心輝度、サイズが等しい2つの粒子の解像力は粒子直径に等しい。また、粒子サイズが等しく、中心輝度に大きな差がある場合でも粒子直径の約2倍の中心間距離があれば分離できる。

さらに引き続き以下の検討が必要がある。

- ①粒子マスク適合法と組み合わせた、さらに高性能の粒子抽出アルゴリズムの開発。
- ②線形要素近傍に中心輝度の小さな粒子がある場合の解像力等の検討。

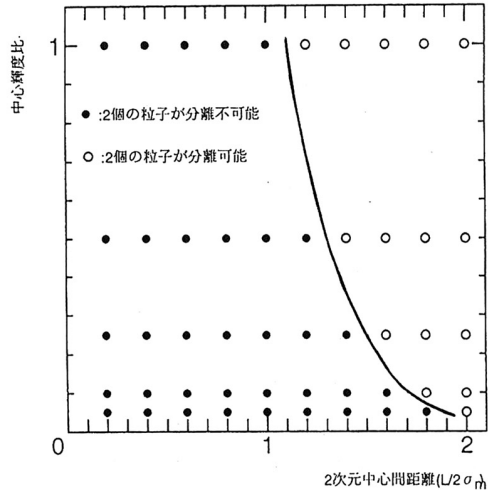
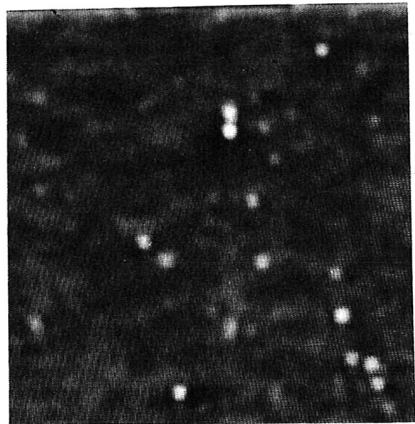
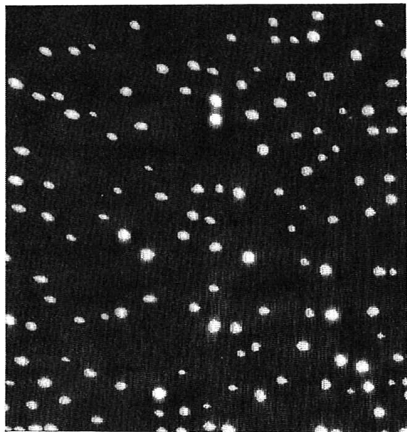


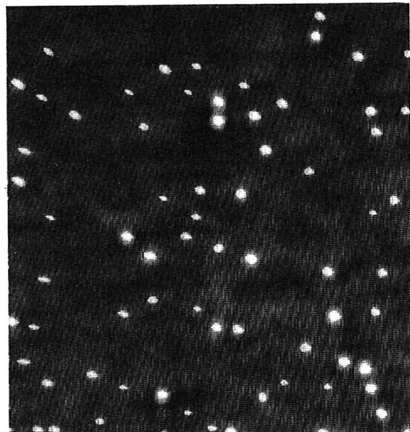
図-9 中心輝度比と中心間距離に対する2個の粒子の分解能



a) 原画像



b) 2値化画像($r=0.7$)



c) 2値化画像($r=0.8$)

写真-1 粒子マスク法の適用例

[補遺Ⅰ]

著者らが開発を行っている高性能粒子抽出アルゴリズムは、著者らが「粒子マスク法(PMM: Particle Mask Method)」と名付けた一連の画像処理手法である。これを分類したものを表-2に示す。

[補遺Ⅱ]

牛島ら²⁾の方法と著者らの方法の差異の例を示す。彼らの方法では得られた画像を一旦2値化する。最初の2値化の段階で各小領域を対象としてその小領域内の輝度の頻度分布に基づき各小領域ごとに2値化のいき値を決めている。これにより、中心輝度が小さい粒子像等も抽出することができる。しかし、中心輝度の大きい粒子と小さい粒子が近接して存在する場合や、境界等の線形要素に近接して粒子が存在しているような場合には、この手法による粒子画像の抽出は困難であると考えられる。

著者らは正規分布の粒子マスクを用いているが、牛島らと同様に2次曲面を用いる方がよい場合もある。

[補遺Ⅲ]

粒子マスク相関法は「マッチドフィルタ定理」を最も効果的に利用した粒子抽出手法であると言える。「マッチドフィルタ定理」は、「画像から抽出しようとする対象物の形がわかっているとき、これをテンプレートとして画像と相互相関係数をとると、画像情報の中身である信号パワーとノイズパワーの期待値の比を最大にする。」という定理である^{3), 4)}。通常は、テンプレートのサイズや回転方向等を変えないと、画像中の対象物の形状に合わせることができない。粒子マスクの場合、回転によって形状は変わらない。また、図-2からわかったようにサイズの変化に対して相関係数値の変化は極めて鈍感である。また、 $r \leq 1$ の規準化された相関係数値によるので、中心輝度によらず、粒子像中心付近の相関係数値は約1となる。従って、粒子マスク相関法では、テンプレートの①回転、②サイズ、③輝度、の3パラメータを無視し、2個の位置パラメータだけを変数とすることができるので、極めて効果的に「マッチドフィルタ定理」の利点を利用することができた。

[参考文献]

1) Etoh, T. and Takehara, K.: Development of a new algorithm and supporting technologies for PTV, Proc. of the International Workshop on PIV-Fukui '95, pp.91-106, 1995.
2) 牛島省・田中伸和：レーザビームスキャニングを利用した画像処理による流速計測法，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，第2部(A)，pp. 382-383，1995.
3) Brown, L.G.(白井良明訳)：画像の位置合せ手法の概観，コンピュータ・サイエンス，bit別冊，pp. 77-119，1994.
4) Rosenfeld, A. and Kak, A.C.: Digital picture processing. Vol.I and Vol.II, Academic Press, Orlando, Fla, 1982.

表-2 粒子マスク法の分類

