粒子群の形状、寸法ごとの空間分布の 可視化*

清水 勲**

Visualization of Shape and Size Distribution of Particles

Isao SHIMIZU

1. まえがき

血球粒子の測定や非接触分別、粉粒体粒子群の篩分け性能の判定など、粒子の形状、寸法とその位置を直接に問題にする研究領域や、流れの可視化技術においてトレーサ粒子の密度や粒子の大きさによる流れへの追従性の問題、等で粒子群の形状、寸法ごとの空間分布を計測する必要がある。しかるに非球形粒子の形状識別法はもちろんのこと、球形粒子の寸法ごとの空間分布の測定法でさえ有効なものが見当たらない。ましてや形状や寸法ごとの粒子の空間分布測定法は筆者らの多重マッチトフィルタ法¹⁾以外に他に有効なものが見当たらないようである。

従来から非球形粒子の形状、寸法の測定法としては、二定角散乱光強度比法や通常のマッチトフィルタ法²⁾があった。しかしながら粒子からの散乱光強度の空間分布は粒子の形状、寸法と傾きに強く依存しており、単純に2定点における光散乱強度比などから粒子の形状を決定することは困難であったし、散乱光強度の空間分布を詳細に計算してそれをこの計測法に適用するためにはかなりの困難さがあった。マッチトフィルタ法では粒子の形状を識別するために各形状ごとの散乱光強度分布の複雑な計算をするという面倒さはないが、従来のマッチトフィルタ法では1枚のフィルタで一つの粒子形状しか識別できず、多数の異なる形

状の粒子を実時間的に同時に識別することはできなかった。そこで多数の異なる形状の粒子を各形状または寸法ごとに、しかもその空間分布を同時に瞬時に識別できる測定法の開発についての可能性が模索されてきた。

さて、マッチトフィルタ法では粒子が散乱する光強度や回折パターンに関する複雑な散乱計算をしなくてもマスタ形状粒子の光散乱パターンをフィルタ上にホログラムとして封じ込めてそれに粒子の形状や位置の情報を選別する機能を持たせることができるという特徴がある。しかし従来のマッチトフィルタ法では1枚のフィルタで一つの物体形状しか識別できず、この特徴を生かしきることができなかった。多数の異なる形状を持つ粒子群の形状と位置の情報識別能力を1枚のマッチトフィルタに持たせることのできる可能性が模索され、複数形状の同時識別にホログラフィの多重露光法を用いることが考えられた。しかしこの方法は多重露光の際写真乾板の各露光ごとの感度特性が異なるため、1枚のフィルタに同時識別機能を持たせることは非常に困難であった。そこでこれらの欠点を補うためにマッチトフィルタとして、レーザ光の広い平行光で測定視界をつくってその中に形状の異なるマスタ粒子をそれぞれ遠く離して配置し、ホログラムをつくれれば粒子形状は散乱光の空間分布すなわち回折パターンから求められ、各形状ごとの粒子位置はマスタ粒子の設置位置による回折光の位相偏移から求められることが明らかとなった³⁾。

清水らによって開発されたこの1度の露光で多

*原稿受付 1991年 5月10日

**正会員 茨城工業高等専門学校

数の物体形状とその位置を同時に識別する多重マッচিতフィルタ法¹⁾について基礎研究とその応用研究³⁾が行われた。この測定法の特徴は粒子の各形状ごとの回折パターンとその位相偏移すなわち多数の粒子の形状情報と位置の情報を1度の露光で同時に1枚のホログラムに記憶させ、そのホログラムの大容量データ処理機能を用いてデジタル処理では不可能である多数の画像の瞬時並列処理を複雑な計算をせずに行おうとするところであり、従来の測定法にみられない知能的情報処理とセンシングの技術が用いられている。すなわち、センシング技術として新しい点は粒子による前方微小角の散乱光強度分布をすべて有効に使ったことおよび粒子位置を光の位相偏移から求めたことであり、情報処理で特別に工夫のある点はホログラムを使って回折光中に含まれる粒子の形状、位置の膨大な量の情報を複雑な計算をせずかつ瞬時並列に処理することであり、さらに測定結果の表示には各形状または寸法ごとの粒子の空間分布を同時に瞬時に表示するという従来にない有効な機能を持たせたことである。このように本方法ではセンシング、情報処理およびデータ表示のそれぞれに独特の工夫が凝らされている。

2. 複数の粒子形状とその位置の同時識別の原理

レーザの平行光束中に数10 μ mから数mmの寸法の粒子が入ると、それぞれの粒子の形状に応じた回折パターンが生じる。図1に示す光学系において、P₁面に置かれた粒子(マスタ形状)の回折光を物体光とし、レンズの焦点P₂面で参照光と干渉させホログラム(マッচিতフィルタ)を作成する。このホログラムに元の粒子(マスタ形状)の回折パターンと同じ物体光をあてれば、レンズL₂の焦点面P₃に参照光の輝点が自己相関光として

現れる。これがマッচিতフィルタ法である。多重マッচিতフィルタ法は平行な物体光中のP₁面で複数のマスタ形状を互いに遠く離して配置し、1度の露光で多数の物体形状とその位置をマスタ物体群の回折パターンと位相偏移から同時に識別する方法である¹⁾。図1に示される実験装置概略図で、ハーフミラーHMに分けられ、ミラーM₂を通る光は形状識別フィルタ用ホログラムを作成するときに用いる参照光の光路であり、P₂面上で回折光像群の光軸と θ_x , θ_y だけ傾いて入射してホログラムをつくる。参照光はフィルタ作成時だけに用いられる。P₁, P₂, P₃面を含む下部の光学系がマッচিতフィルタを構成している。光源はHe-Neレーザの50mWや20mWが用いられ、レンズL₁, L₂は口径D=100mm, $f_1=f_2=500$ mmあるいは200mmが用いられた。またホログラム作成にはAgfa 8E75写真乾板、現像剤D-19、漂白剤5%フェリシヤン化カリウム水溶液が用いられた。フィルタ作成時にはレーザ光束は直径40mm以上と大きくとり、マスタ形状を互いに遠く離して配置した。これに対して粒子識別時には測定視界を20mm程度と小さくし、P₃面上での識別信号光が各形状ごとに互いに重ならないように配置されている。

n 個のマスタ形状粒子 $g_i(x, y)$, $i=1, 2, \dots$, n を光軸中心(基準位置)から (x_{ai}, y_{ai}) に互いに遠く離して配置し、多重マッচিতフィルタを作成する。そして測定視界中に m 個の被測定粒子 $g_l(x, y)$, $l=1, 2, \dots$, m を光軸中心から (x_{bi}, y_{bi}) の位置に入れるとP₃面上での自己相関光群はつぎに示す位置 (x_i, y_i) に出力される。

$$x_i = -(f_2/f_1)x_{bi} + (f_2/f_1)x_{ai} - f_2 \sin \theta_x$$

$$y_i = -(f_2/f_1)y_{bi} + (f_2/f_1)y_{ai} - f_2 \sin \theta_y$$

これをP₃面上で光軸が $(-f_2 \sin \theta_x, -f_2 \sin \theta_y)$

である1次回折光上で観測すれば g_i と g_l の自己相関による出力信号光はそれぞれ i 形状ごとに座標 $[(f_2/f_1)x_{ai}, (f_2/f_1)y_{ai}]$ を中心としてその識別信号が $[-(f_2/f_1)x_{bi}, -(f_2/f_1)y_{bi}]$ に出力される。 $f_2=f_1$ の場合には被測定粒子がマスタ形状と同一の形状があれば自己相関光として強い信号

図1 粒子の形状、寸法、位置の測定実験装置概略

光が1次回折光上で同一のマスタ形状設置位置(x_{ai} , y_{ai})を中心として物体存在位置(x_{bi} , y_{bi})とは点対象をなす位置($-x_{bi}$, $-y_{bi}$)に現れる。また自己相関と相互相関の判別はマッチと信号の光強度を適切な閾値で切ることにより行われる。

以上の関係を確認するため、四角形、三角形、円形の単純な形状の粒子モデルを用いて行った形状と位置の測定実験例を示す。図2には、マスタ粒子の形状とその配置を示す。図3(a)には、 P_1 面の光軸中心に入れたそれぞれの被測定粒子、

図2 粒子の形状と位置識別用のマスタ形状とその配置

図3 粒子の形状とその位置の識別結果
(a): P_1 面上での被識別物体とその配置
(b): P_3 面上の相関出力信号光とその配置

(b)には P_3 面上での自己相関光出力信号を表す。図3(b)の自己相関光出力信号は、マスタ形状粒子設定位置と同位置になっている。四角形粒子1個、三角形粒子2個、円形粒子1個を図4(a)の配置で P_1 面に入れる。このとき P_3 面上の出力を図4(b)に示した。図4(b)は被測定粒子群の輝点位置が図3(b)に示された P_3 面上での自己相関輝点の位置を各形状の識別領域の中心として点対称の位置に明確に出現することを示している。図5にマスタ形状の配置、被測定粒子群の配置および出力信号面の自己相関光出現位置等の関係を図式的に示した。

(a) The composition of input objects

(b) The identification signals in the output plane

図4 粒子の形状、位置およびその数の同時識別結果

図5 マスタ形状の配置、被測定粒子群の配置、および出力信号面の自己相関光出現位置等の関係

3. 形状・寸法ごとの空間分布測定例

図6は，○，□，△の多数の粒子群を識別した例である。図6(a)は，マスタ形状物体とその配置，図6(b)は被測定物体群，図6(c)，(d)は，それぞれ P_3 面上の零次回折光と1次回折光である。図6(e)は，CCDカメラで得られた図6(d)の相関光出力を適切な光強度の閾値レベルで切ったときの出力結果を示している。図6(a)で示されるマスタ形状の位置を中心として各形状ごとの粒子群の空間分布が明確に識別される。なお，各形状識別領域の中心点を重ね合わせると全形状の粒子の空間配置が分かる。図7は，図6(d)に示される各形状ごとの粒子位置とその相関光強度をマイクロコンピュータによってデジタル的に表

図6 粒子の形状ごとの空間分布測定結果

示したものである。表示S，R，Tは，それぞれ円形，四角形，三角形の粒子群の測定領域を表し，各粒子の位置はそれぞれの形状粒子測定領域の中心からの座標（点対称表示であるが）が表示されている。また，自己相関光強度も同時に表示されている。なお，マツチフィルタでは，単純形状に対してはおおよそ ± 7.5 度程度の傾き角偏移に対しても同一形状物体として識別されることが多い。そのため，一つのフィルタで同一形状のマスタ形状を15度程度の傾き角で配置すると傾き角に依存しないで粒子の形状が識別できる³⁾。

さらに，実際の球形粒子の空間分布の測定を想定して白抜き円形を使って行われた粒子の各寸法毎の空間分布測定例を図8に示した。図8(a)には，4種類の寸法のマスタ形状粒子の配置，図8(b)には，被測定粒子の配置を点対称にしたものを示した。図8(c)には， P_3 面上に現れるそれぞれの寸法ごとの粒子の空間分布の測定結果が示されている。ここで，図中の座標は，後から書き加えられたものである。一つのマスタ形状で測定可能な寸法範囲は円形（球形）だけの測定では相関出力信号の閾値レベルを60%程度まで下げれば，15%ずつの寸法偏差をもつ粒子まで同一サイズの粒子として認識される。もちろん P_3 面上の相関出力信号光を高い閾値レベルで識別すれば粒子を小さな寸法偏差で識別できる。

(c) Auto-correlation peaks processed by a threshold value

図8 球形粒子の各寸法ごとの空間分布

なお、ここでは粒子形状として35mm写真フィルムに焼き付けた単純な形状が用いられているがこの技術は実物体の計測に適用できる。それは被測定物として不透明な実物体の代わりにこれと同じ形の写真フィルム上の開口を用いても回折パターンは実物体と同じ形となる（バビネの定理）⁴⁾、

また球形粒子による前方微小角散乱光は粒子と同じ直径の不透明な円板または円形開口の縁での回折光分布とほぼ等しくなる⁵⁾、ためである。なお、さらに本技術を用いれば粒子の形状または寸法ごとの粒子の挙動や速度も同時に測定され、二相流計測に新局面を開くことができると考えられる。

4. まとめ

従来は、不可能であった異なる形状・寸法の粒子群の各形状、寸法ごとの空間分布を1枚のマッチトフィルタを用いて同時に瞬時に識別表示する手法について、その原理と粒子の形状別空間分布測定結果を示した。この識別法は、粒子の形状、寸法、位置のセンサー部、多数の粒子の形状、寸法、位置の情報を瞬時、並列に処理する情報処理部および測定結果表示部のそれぞれに知恵を働かせて開発された総合的な知能的センシング技術である。ここでは、開発された新たな形状識別粒子の空間分布測定法について概説した。

参考文献

- 1) 清水, 浅川, 亀丸: 光学 Vol. 17, No.7, 361 (1988)
- 2) Fujii, H., S.P. Almeida and J.E. Dowlig: Appl. Opt. Vol. 19, No.7, 1190 (1988)
- 3) 清水, 大竹, 浅川, 亀丸: 日本機械学会論文集 (C編), 55巻 513号 1235 (1989)
- 4) 久保田広: 波動光学, 岩波書店, p237 (1971)
- 5) H. C. Van de Hulst: Light scattering by small particles, John Wiley, p108 (1957)