

多数のトレーサー粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発
A New Algorithm for Automatic Tracing of Particles

近畿大学理工学部 江藤剛治 Takeharu ETOH
近畿大学理工学部 竹原幸生 Kosei TAKEHARA

The aim of this research is to develop new techniques for tracking particles in fluid. They consist of three elements, as follows. In the first part, a method to make microcapsules which are filled with pure water and covered with thin film of polystyrene was developed. Their mean specific gravity and mean diameter were 1.0046 and 673 μm , respectively. In the second part, a new method was proposed to objectively determine the threshold of brightness, which separates particle-images from background. Finally, a new algorithm is now under development for tracking particles. It is composed of Kalman's filtering theory to predict location and brightness of each particle in the next frame and χ^2 -test to evaluate the probability that a pair of particle-images in the successive frames are the same one.

Keywords: particle tracing, microcapsule, determination of threshold,
Kalman's filtering theory, χ^2 -test

1. はじめに

流れ場の3次元構造や境界極近傍の流速分布などの詳細な測定が重要な課題となっている。従来用いられている熱線・熱膜流速計やレーザードップラー流速計では流速場を1点でしかとらえることができず、直接瞬時の空間分布を得ることができない。また、これらの流速計では、センサーの回りの乱れ、光束の拡散や反射などのために、境界極近傍の測定が困難である。これらの問題点を解消する方法として、画像処理技術を用いて流れの可視化法を定量的測定に用いようとする研究が活発に行われている¹⁾。この流速測定法でステレオ画像2枚とそれらと直角な面の画像1枚を用いればトレーサー粒子の3次元空間の位置を求めることができる。よって、そのようにセットされた3台のビデオカメラ装置を同期させ、連続画像が得られれば、トレーサー粒子を追跡することにより、3次元空間の流速分布を求めることができる。また、境界極近傍の測定には、ビデオカメラ装置に長作動距離顕微鏡を取り付けることにより、境界極近傍の撮影が可能となる。しかし、この方法はまだ実用化には到っていない。その主な問題点として次の3つが挙げられる。

- 1) トレーサー粒子：トレーサーとして粒子を用いる場合、その径、比重、個数が流れに影響を及ぼす。定量的測定に用いるためには、この影響が無視できるものでなければならない。
 - 2) 画像解析における2値化：2値化のしきい値の決定は、現在のところ人の主観によるところが大きい。
 - 3) 複数画面の同一粒子の対応付け：多数のトレーサー粒子に対して実用に耐えうる方法がない。
- 特に、詳細な測定には多数のトレーサー粒子が必要となり、これらの問題がより厳しくなってくる。

今後この測定装置を実用的なものにするには、できる限り水の比重に近いトレーサー粒子の開発、および2値化からトレーサー粒子追跡までを自動的に行うアルゴリズムを開発することが必要であるが、現段階ではそれぞれの要素技術を精密化することが必要である。本研究ではトレーサー粒子の開発、2値化の客観的しきい値の決定法、および多数のトレーサー粒子の追跡法の各々の要素について検討を行った結果を述べる。

2. トレーサー粒子の開発

トレーサー粒子の運動によりその場の流速を測定しようとする際、厳密にはトレーサー粒子の比重は水の

比重と等しくなければならない。またそのスケールは水運動の最小スケールよりも十分小さいものでなければならない。今回、著者らは内部がほとんど不純物を含まない水、外側に薄いポリスチレンの膜のマイクロカプセルを作ること成功した。その顕微鏡写真を写真-1に示す。マイクロカプセルとは、径が数 μm から数百 μm の球形のカプセルで、その内部の芯物質が外部の皮膜により保護されているものである。マイクロカプセルの皮膜は、原理的に膜を形成する性質の材料であれば何でもよいが、

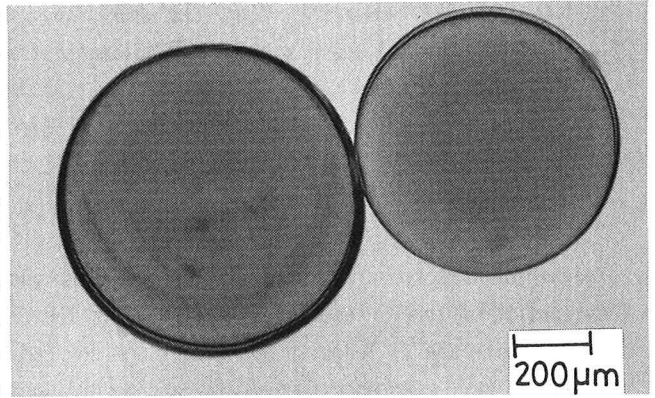


写真-1 マイクロカプセル

実用的には、天然および合成高分子が使用される。またマイクロカプセルの径、膜厚はその製法により変えることができる。これらの性質を用いて芯物質を観測流体と同じ流体にすることができれば、そのマイクロカプセルは周囲流体とほぼ同じ比重になる。また、マイクロカプセルの特徴として、芯物質に液体ばかりではなく、カプセル内部に自由に物質を封じ込められることが挙げられる。例えば、現在用いられているものとして、マイクロカプセル中に感温液晶を入れ、温度分布を可視化するトレーサー等がある。よってマイクロカプセルは、トレーサー粒子として、通常用いられているものよりも有用なものになる可能性が高い。

2.1 マイクロカプセルの製法

以下のマイクロカプセルの一般的製法に関しては文献2)を引用した。

製法には大別すると、化学的方法、物理化学的方法、および物理機械的方法がある。今回用いられた方法は、物理化学的方法の中の界面沈澱法と呼ばれるものであり、この製法について以下に述べる。

マイクロカプセル化において液体を芯物質とする場合、エマルジョン（互いに混じり合わない液体の一方が他方の中に分散した系）の調整が必要である。水と混和しない溶剤に皮膜物質を溶かし、その溶剤中に水のエマルジョンを形成させる。これを再度乳化させ、溶剤を取り除けば、芯物質の水が薄い膜で覆われたマイクロカプセルが形成される。マイクロカプセルの作成手順は次の通りである。

- (1) 沸点が 100°C 以下で、蒸気圧が大きくて水と混和しない溶剤を選び、この中に皮膜形成能のある疎水性高分子を溶かす。今回は溶剤としてジクロロメタン（沸点 40.21°C ）、皮膜材としてポリスチレンを用いた。
- (2) 高分子溶液に芯物質となる水を加え、よく攪拌して(W/O)型のエマルジョンを作る。
- (3) このエマルジョンを、よく攪拌している保護コロイドを含むカプセル化媒体である別の水溶液に加えて[(W/O)/W]型の複合エマルジョンとする。
- (4) 皮膜生成は、この系に加温、減圧、溶媒抽出、冷却、冷凍、乾燥などの操作を行って、高分子の溶媒を除去する。

ただし、ここでWは水相、Oは油相を表している。

芯物質に水だけを用いる場合、常温でポリスチレンのジクロロメタン溶液中に水を分散させることは難しい。一般に乳化剤を用いて、エマルジョンの形成を安定化させる。また、水の粘性を大きくすることによりエマルジョンを安定にすることもできる。例えば、椿原ら³⁾は、水の粘性を大きくするために、ゼラチン水溶液を用いてエマルジョンを形成させた。著者らの経験では、常温でマイクロカプセルを作成する場合、ゼラチン溶液の濃度は最低2%必要であった。

今回、筆者らは、次の点に着目し、芯物質がほとんど不純物を含まない水であるマイクロカプセルの製法を開発した。水の性質として水温が低くなれば粘性が大きくなるということを利用し、水の温度を 0°C 付近

に保ちながらエマルションを形成させた。この製法により、常温で2%ゼラチン水溶液を用いて行ったときと同程度の径、個数のマイクロカプセルが得られた。

2.2 今回の製法によるマイクロカプセルの比重、および粒径分布

マイクロカプセルの比重の測定法としては、塩水により検定液を比重0.001間隔で作し、その検定液中で表面に浮いたマイクロカプセルの個数を数えた。なお、水温は14℃、水の比重は0.998であった。また、径の測定法としては顕微鏡写真にマイクロスケールとマイクロカプセルを写すことにより測定した。サンプル数は比重の測定では435個、径の測定では150個であった。

図-1にマイクロカプセルの比重のヒストグラムを示す。比重の間隔の中央値を用いて計算した平均値は1.0046、標準偏差は0.0014であった。現在用いられているトレーサー粒子として、ポリスチレン、ナイロン12、キシレン等の粒子がある。比較のために値を示すと、ナイロン12の比重は1.02程度、ポリスチレンの比重は1.03程度である。また、芯物質が2%のゼラチン水溶液のマイクロカプセルの比重は約1.01であった。これらと比較して、かなり水の比重に近いものであることがわかる。

図-2にマイクロカプセルの径のヒストグラムを示す。径の平均値は673μmと、かなり大きいものを作ることができた。標準偏差は142μmであった。これ以下の径のものを作るのは簡単である。

3.2 値化法の開発

粒子の写った画像から粒子部分のみを取り出すために2値化処理が必要である。現段階での2値化のアルゴリズムでは、背景と粒子部分のコントラストがはっきりとしている場合を除いては、客観的にしきい値を決定する方法がない。一般的な画像としてはコントラストのよい画像を得るためには多大な労力を払わなければならない。また、光源むらにより背景に輝度分布が生じたり、時間的に輝度が変動したりする場合には、ほとんど対応できるものがない。このような問題に対処するために次のような方法を提案する。

3.1 客観的しきい値の決定法

原理的には、画像にノイズが含まれていなければ粒子の写った画像から背景画像を差し引けば粒子部分のみの画像が得られる。現実にはノイズが含まれており、また背景画像の輝度分布も時間によって変化する。本研究では次の考え方をういた。粒子部分を取り除いた背景だけの画像が得られたとする。この背景の局所的な平均値からのずれ(絶対値偏差)が得られれば、その背景画像の雑音成分がその絶対値偏差の4倍を越える確率はほぼ0である。これを越えるものを粒子とみなす。具体的には次のような手順で行う。

- (1) 粒子部分の輝度を0とした画像を作る。
- (2) 図-3のような S_0 の空間で平均操作を行う。この場合、粒子部分の面積(S_1)を除いた平均操作を行う。つまり、次式で計算される。

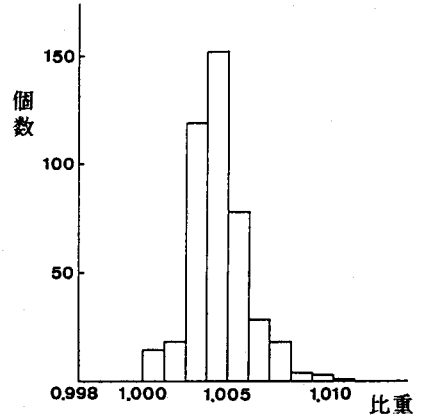


図-1 マイクロカプセルの比重分布

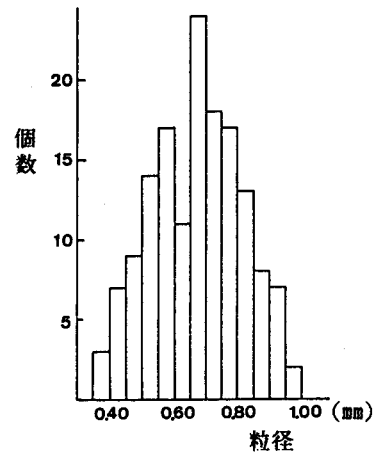
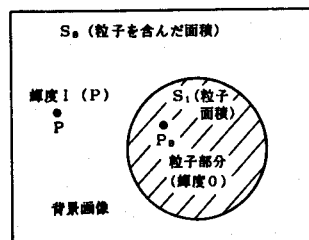


図-2 マイクロカプセルの粒径分布

$$I_{AV} = \frac{\int_{S_0} I(P) ds}{S_0 - S_1} \dots (1)$$

ここで、 $I(P)$; 点Pにおける輝度
 I_{AV} ; 点 P_0 における S_0 の空間平均輝度
 S_0 ; 空間平均の対称となる全面積
 S_1 ; 粒子部分を除いた面積



(3) (2) で求めた背景の空間平均画像と原画像より、粒子部分を除いた背景領域の雑音の絶対値成分を求め、(2)と同様な操作により、**図-3 粒子面積を除いた平均操作**この雑音の絶対値成分の空間平均値を求める(絶対値偏差)。

(4) この値を4倍したものを(2)で求めた背景の空間平均画像に加え、これをしきい値として2値化を行う。実際、4倍でやってみると一部のノイズを拾ったので今回は8倍とした。

以上の操作を各タイムステップごとに行えば、粒子の写った画像から平均化された背景画像を得ることができ、各画素ごとに時間的な輝度分布の変動に対応できるしきい値を求めることができる。

3.2 画像処理システム

今回用いた画像処理装置としては(株)柏木研究所製のnexus6510で、ホストコンピュータとしてはNEC9801VM2を用いた。そのシステムの概略図を図-4に示す。対象としては、回転円盤上に粒子を貼付け約1分間に33回転させ、それをCCD8ミリビデオカメラで撮影し、ビデオテープに録画した。録画された画像は1/30秒間隔でADコンバータにより8ビット(256階調)、512(H)×480(V)ドットのデジタル画像に変換され、画像処理装置のイメージメモリーに転送された後、処理された。

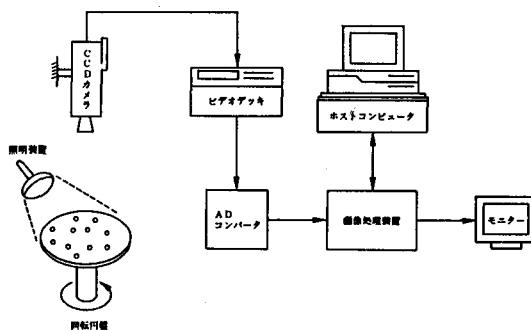


図-4 画像処理システムの概略図

3.3 画像処理結果

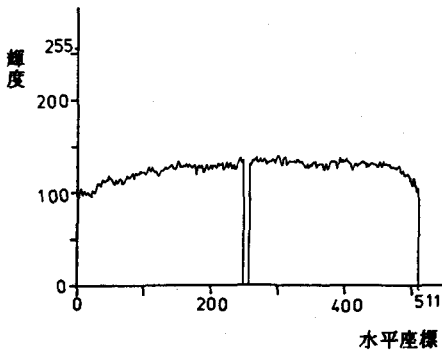
特異なノイズを除去するため入力画像に3×3の空間平均を施したものを原画像とし、空間平均を行う領域としては15×15とした。2値化処理の結果の例を示す。以下の図では画像における水平位置278の走査線における輝度分布を示す。図-5(a)に1タイムステップ前の粒子部分を除いた画像と、図-5(b)にいま対象としている画像を示す。図中の矢印は粒子部分を示す。図-6には、図-5(a)の粒子画像を除いた空間平均操作を施したものを示す。これを背景の空間平均画像とする。図-7には、図-5(a)の画像と図-6の画像との差の絶対値を求め、その画像に粒子部分を除いた平均操作を行なった絶対値偏差の画像を示す。図-8には、絶対偏差の画像を各画素ごとに8倍した画像と背景の空間平均画像の和を示す。この画像をしきい値として2値化した画像が図-9である。粒子部分をうまく取り出しているのがわかる。

4. 多数のトレーサー粒子の追跡法

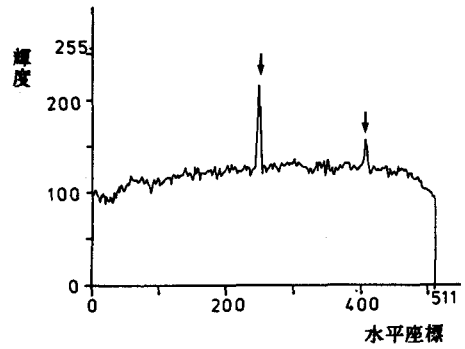
2値化処理によって、得られた各々のトレーサー粒子の情報から各タイムステップ毎に同一のトレーサー粒子の対応付けを行い、追跡して行かなければならない。この追跡法に関して種々の方法が提案されているが、追跡できるトレーサー粒子の個数は数百個程度であり、詳細な測定に十分なものとは言えない。著者らは、カルマンフィルターと χ^2 検定を用いてより多数のトレーサー粒子が追跡できる方法を開発している。

4.1 カルマンフィルターと χ^2 検定を用いた追跡法

現在開発中であるので、以下に示すのは開発途中段階のシステムである。



(a) 1タイムステップ前の粒子部分を除いた画像



(b) 処理対象の画像

図-5 既知の画像

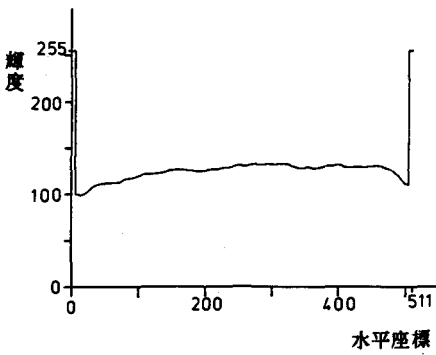


図-6 空間平均操作を施した画像

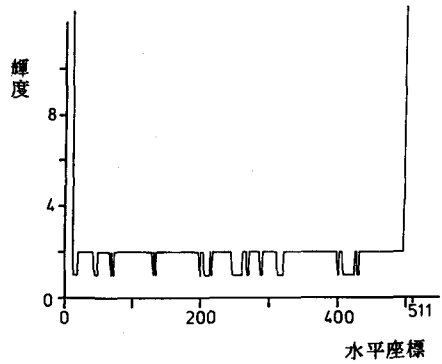


図-7 ノイズの絶対値偏差の画像

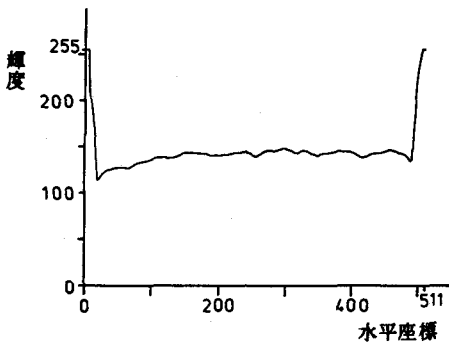


図-8 しきい値の画像

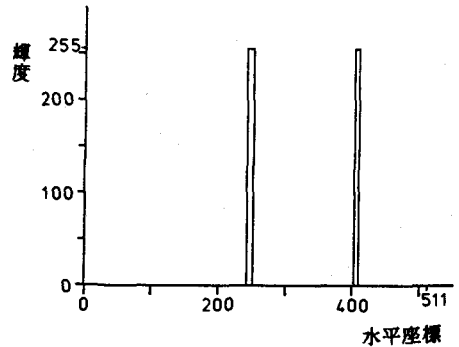


図-9 2値化結果の画像

カルマンフィルターを用いて、いま対象としているタイムステップの粒子情報を、それ以前の粒子情報から推定する。線形動的システムの基礎式は、

$$\text{観測方程式 } Z(t+1) = M(t+1)h(t+1) + \varepsilon(t+1) \quad \dots (2)$$

$$\text{状態方程式 } h(t+1) = \Phi(t+1; t)h(t) + \zeta(t+1) \quad \dots (3)$$

ここで、 $Z(t)$; t ステップにおける観測量を表すベクトル

$h(t)$; t ステップにおける状態量を表すベクトル

$M(t)$; t ステップにおいて観測量と状態量を結ぶマトリックス

$\Phi(t+1; t)$; t ステップの状態量を $t+1$ ステップのものへ遷移させるマトリックス

$\varepsilon(t)$, $\xi(t)$; 誤差ベクトル

で表される。

本研究では、観測量ベクトル Z として位置情報 (x, y, z) と粒子面積を選んだ。観測方程式(2)を

$$Z(t+1) = \alpha_1 Z(t) + \alpha_2 Z(t-1) + \alpha_3 v_s'(t) + \varepsilon(t+1) \quad \dots (4)$$

とおくことにより、状態量ベクトル h を $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, 観測量と状態量を結ぶマトリックス M として $(Z(t), Z(t-1), v_s')$ を選んだ。ここで、 v_s' は $Z(t) - Z(t-1)$ の空間平均からのずれである。

同一粒子の対応付けは次のような方法で行う。位置情報 (x, y, z) , 粒子面積などの粒子情報が互いに独立であるとすれば、推定された粒子情報と実際に観測された粒子情報との誤差の2乗和は χ^2 分布に従う。よって、 χ^2 検定により1ステップ隔てた同一粒子の対応付けを行う。

4.2 追跡結果

追跡対象は2次元とし、3. で得られた2値化結果を用いた。また、第1ステップでは、それ以前の粒子情報がないので人為的に第2ステップと対応付けを行った。また、状態量の初期値としては $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (2, -1, 0)$ とおいた。図-10に結果を示す。図中の実線の矢印は実際に観測されたベクトル、破線に丸印は推定されたベクトルである。推定値と観測値の誤差がステップとともに減少しているのがわかる。

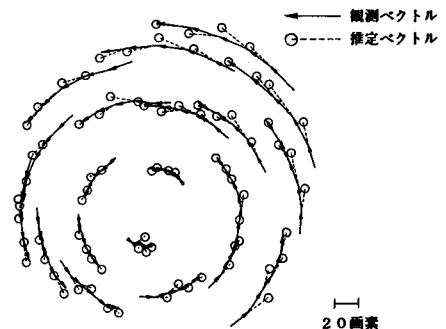


図-10 カルマンフィルタと χ^2 検定を用いた粒子追跡結果

5. おわりに

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- (1) マイクロカプセルの製法を用いて、内部にほとんど不純物を含まない水、外側に薄いポリスチレンの膜のトレーサ粒子を開発した。比重の平均は1.0046, 径の平均は673 μm であった。
- (2) 2値化法として、統計的な考察に基づき、客観的なしきい値の決定法を開発した。
- (3) カルマンフィルタと χ^2 検定を用いたトレーサ粒子の追跡法を提案した。

今後、各々についてさらに詳細な検討が必要である。また、実用的な測定装置とするための2値化から粒子追跡までを1つにしたアルゴリズムを構築する必要がある。

最後に、マイクロカプセルの製法に関して椿原啓講師(近畿大学理工学部電気工学科)に有益なご助言をいただいた。また、マイクロカプセルの作成および2値化処理において井上繁則君, 樋口宗司君, 森本滋君, 宮原和仁君の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 西野耕一・笠木伸英・平田賢・佐田豊: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 55巻, 510号, pp. 404-412, 1989.
- 2) 近藤保・小石真純: 新版マイクロカプセル その製法・性質・応用, 三共出版, 1987.
- 3) 椿原啓・久保宇市: レーザ核融合用多重PMBターゲットの開発, 近畿大学理工学部研究報告, 第16号, pp. 119-125, 1981.