画像処理システムを用いた液滴粒度分布測定*

杉田 英昭** 中澤 武**
福原 昌三*** 小牟田 廣巳****

Determination of Droplet Size Distributions using Image Processing System

By Hideaki Sugita, Takeshi Nakazawa, Shozo Fukuhara, Hiromi Komuta

This paper describes the image processing system that automatically analyzes the size distributions in droplet video images.

This processing system, based on a conventional video camera, a digital image processor, a 32 bit personal computer and a monitor, is operated by a software written by the Basic of program language.

Images are generated by taking the microphotographs of the water droplets captured on a plate of glass coated with a slightly deteriorated cylinder oil. After image acquisition, the recorded video frames are replayed and analyzed under computer control.

The performance data are given from the experiment which is carried out to compare measurements of real spray distribution obtained by using the automatic system with those manually obtained from a microphotograph of water droplets.

Consequently, the accuracy for the both measurements is 7.54% in relative error for 290 water droplets used here being varied over the range of 3 to 136 μm in diameter.

Furthermore, it is found that by utilizing the image processing algorithm, the optimum threshold level is selected and this level is the value just before the black shadow begins to appear in the background of a monitor.

1. ま え が き

液滴の粒径測定はあらゆる工学分野において非常に重要でありこれまで種々の測定方法が試みられている。しかし、いずれの方法にもいくつかの問題点がありその測定法はいまだ確立されていない。例えば、沈降法、運動量法、光学的方法、固化法（凍結

法、Molten-Wax法）などの測定方法があるが、これらはいずれも装置が大形かつ複雑であったり、その構造上使用場所に制限がある。

そこで、一般に比較的操作が容易であるサンプリングによる方法が広く採用されており、その代表として液浸法がある。この方法は、ガラス板にシリンドラ油など適当な受け止め液を塗布しこれに液滴を付着させて顕微鏡撮影をするもので、わが国では特に多く用いられている方法である。この方法は、操作が簡単でかつ安価であり、液滴個々の寸法を直接測定するために比較的信頼性が高く、特にこの方法による測定範囲は1~1000 μm 程度であるので比較的広い範囲の工学分野に適している。

*原稿受付 平成7年8月31日

第54回学術講演（平成6年10月13日）

**正会員 神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

***正会員 東京電力(株)川崎火力発電所（川崎市川崎区千鳥町5-1）

****神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

そこでこれらの利点を考慮して、本研究では液浸法と画像処理技術とを組み合わせより効果的な粒径測定方法の開発を試みた。

従来、液浸法により顕微鏡撮影された液滴群の写真は印画紙上に拡大焼付けされ、得られた液滴の写真から直接デバイダー等を用いて粒径の測定を行っていた。しかし、この方法は多くの液滴を直接測定するためにかなりの時間と労力を要し、測定者による計測誤差も生じる可能性がある。また、液浸法では顕微鏡撮影を素早く行わないと液滴の蒸発の影響により粒径が変化し、正確な値が得られないことがある。そのため、短時間でしかもリアルタイムで粒径の測定ができる機器の開発が重要な課題となっている。

リアルタイムで液滴の粒径を測定する方法には、現在、画像処理技術を応用したものが用いられており、それによる粒径の測定精度を向上させる研究が行われている（例えば文献^{1)~4)}）。

Garyら¹⁾は、粒径が0~100 μ mの範囲の噴霧液滴群に対し、横から平行に光を当てて噴霧状況をビデオに録画した。そして、その再生画像を画像処理装置に通して液滴粒径を測定した値と、モニターに映っている液滴の画像からマイクロメータを使用して直接粒径を測定した値とを比較している。この結果、両者による測定値の誤差は2~16%の範囲内であると述べている。

Owら²⁾も同様の実験を行っているが、Garyらの研究と異なり、ビデオの再生画像に対して画像処理を行うのではなく、リアルタイム画像に対し画像処理を行い、その測定結果からこの方法が有効な手段であることを示している。

しかし、これらの研究は画像処理による測定の根幹となる画像の二値化処理の際のスレシヨルドレベルの最適値の決定については明確な定義をしていない。このことは液滴群を統計的に分析するために必要な数多くの画像データを処理する場合、光量等が必ずしも一定とはいえない撮影条件のもとで、確実に迅速な測定を行う際の障害となることが考えられる。

これらの状況のもと、本研究は液滴群の粒径を画像処理により測定する技術の確立を目的として行った。

2. 測定装置及び測定方法

2.1 画像認識及び処理システム

図1に画像上にとらえられた液滴の大きさや個数を測定するための画像認識及び処理システムのブロックダイヤグラムを示す。このシステムは、ビデオカメラ、画像処理装置、32ビットのパーソナルコンピュータ（PC98-FA）及びモニターから構成され、Basic言語で記述されたソフトで作動する。視野の設定やスレシヨルドレベルの変更などの具体的な操作はモニター上に映し出された画像を見ながらマウスとキーボードから行う。液膜上に捕獲された液滴群の状態は顕微鏡を介してCCD（Charge Coupled Device）カメラによりアナログ信号に変換され、8ビットの二進数でデジタル化され、256段階の輝度レベルに分割される。それらのデジタル画像は、適当なスレシヨルドレベルによって二値化処理される。

画像処理装置として採用したイメージメイトN（日本アビオニクス社製）は、汎用目的に設計されたもので、PC9800シリーズのパーソナルコンピュータ拡張用スロットに専用インターフェース基板を挿入実装して、画像データに直接アクセスできるフレームメモリユニットである。画像メモリ（フレームメモリ、オーバレイメモリ）及び濃度エンハンスルックアップテーブルはPC-9800のメモリ空間に直接マッピングされているため、各種画像処理や解析を容易に行うことができる。

2.2 ソフトウェアの構成

(1) ソフトウェアの概要 画像処理用言語としてBasicを用いた。ただし、これにはC言語で記述された画像ライブラリソフトが組み込まれており、こ

図1 画像処理システムブロックダイヤグラム

図2 イメージメイトNの画像処理ソフトの概要

のサブルーチンを必要に応じてコマンドとして使用した。図2に画像処理ソフトのブロックダイアグラムを示す。図中に示した動作手順の概要は以下の通りである。

手順1) は画像入力、入力条件設定で、画像のフレームメモリへの取り込み、カメラのチャンネル設定、ゲイン、オフセット設定などカメラとのインターフェースにかかわる部分を制御する。

手順2) は表示制御で、モニターテレビへの表示画面指定、オーバーレイ画面のON/OFFなどモニターテレビとのインターフェースにかかわる制御を行う。

手順3) は濃淡画像処理（実画像表示処理）で、濃淡画像の変換、演算など解析前に必要となる濃淡画像変換処理を行う。

手順4) は二値化処理で、濃淡画面（実画像表示画面）から二値画面を作成する。

手順5) は二値画像解析で、二値画像を解析し、特徴量を算出する。

手順6) は画面アクセス処理で、指定画面に画素単位またはライン単位で直接アクセスする。

手順7) は描画処理で、二値、実画像画面へ指定形状の描画を行ったり、文字列の表示を行う。

(2) 画像処理アルゴリズム

① 二値化処理 液膜状に捕獲された液滴の輪郭のように、その対象物と背景の輝度レベルの差が大きい場合には一般に次のような方法によってスレシヨルドレベルTを判別する。

$$\eta(T) = \{\sigma_B^2(T) / \sigma_W^2(T)\}_{max} \dots \dots \dots (1)$$

$\eta(T)$ は任意のスレシヨルドレベルTに対する分散比で、級間分散 $\sigma_B^2(T)$ と級内分散 $\sigma_W^2(T)$ の比で示される。

$$\sigma_B^2(T) = \sum_{k \in N_n} n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2 / \sum_{k \in N_n} n_k \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_W^2(T) = \sum_{k \in N_n} \sum_{l \in N_l} (x_{kl} - \bar{x}_k)^2 / \sum_{k \in N_n} n_k \dots \dots \dots (3)$$

ここで、Nは測定サンプル数、 n_k はk番目の集合のサンプル数、 $\bar{x}_k$ は集合kの輝度レベルの平均値、 x_{kl} は集合kのl番目のサンプルの輝度レベル、 $\bar{x}$ は全輝度レベルの平均値を示している。

判別されるスレシヨルドレベルTは(2)、(3)式及び(1)式により計算された分散比の値が最大になる輝度レベルの値が用いられる。

② 輪郭点抽出 測定する液滴の画像は、中央の画素が黒から白に変化することにより周辺の黒画素間の連結が絶たれる場合がある。このため輪郭抽出を行う方法として「輪郭追跡法」を採用した。

これは図3に示すように、まず画面の左上から右下に向かって画素を一つ一つ探索し、最初の一画素を見つける。次にこの点を出発点として時計回りに輪郭画素を見つけていくという方法である。このときのアルゴリズムを次に示す。

出発点 P_1 の座標(i, j)を記憶しておく。まず、 P_1 の上、次に右、下の順に一画素がないかどうかを調べる。もし、まったくなければ追跡を終了する。あれば、その点 P_2 の座標を記憶する。 P_{k-1} から P_k に進んできたら、進行方向の左、前、右、後の順に周辺の一画素の有無を探索し、最初に見つかった一画素に探索の中心を移す。この手順を繰り返し、出発点 P_1 の画素に戻ったら探索を終了する。

③ 重心点の検出 重心点は図形のモーメントを計算することにより求めた。二値化処理した後の、現時点では各々の画素は1, 0のいずれかの

図3 輪郭点追跡

値しかもたない。ここで、画素値1の画素が質量1、画素値0の画素が質量0をもつものとして機械工学でいうモーメントを求める。

モーメントMは次式で表される。

$$M(p, q) = \sum \sum A(i, j) i^p j^q \dots\dots(4)$$

ここで、Aはこの図形の面積で画素数で表示される。

種々の特徴量は(p, q)の組合せにより決まる。

$M(0, 0)$ はこの図形の面積Aであり、 $M(1, 0)$ 及び $M(0, 1)$ はそれぞれi軸(X軸)、j軸(Y軸)に対するモーメントを表すから、この図形の重心の座標(X_c, Y_c)は、

$$\left. \begin{aligned} X_c &= M(1, 0) / M(0, 0) \\ &= \sum \sum A(i, j) i \\ Y_c &= M(0, 1) / M(0, 0) \\ &= \sum \sum A(i, j) j \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

と表すことができる。

④ 長径、短径の探索 長径と短径に対しては次のように探索する。すなわち、抽出された輪郭内において、先に求めた重心点を通る直線と当該サンプルの輪郭線とが交差する二点間の距離が最も長い画素数が長径であり、最も短い画素数が短径である。

なお、「輪郭点検出」、「重心点の検出」、「長径・短径の検出」の処理の後、モニターにオーバーレイメモリ上の画像が表示される。図4の液滴サンプルに対するこのオーバーレイメモリ上の画像を図5に示す。

(3) 液滴粒径の計算 具体的な液滴粒径の計算の手順は次の通りである。

図4 液滴サンプルの顕微鏡写真

図5 オーバレイ画面表示の様子

まず、濃淡処理による実画像を表示し、画像上の基準寸法の設定を行う。この時点で解像度G(画素/ μm)が定まり、液滴の個数と各々の液滴の面積が算出される。そして、重心点を検出し、その重心を通る長径と短径の抽出を行う。これを画像上の基準寸法の設定においてすでに決定された解像度で割って長径と短径の測定値を算出する。

得られた長径をaとして短径をbとすると楕円の面積Aは、

$$A = \pi \cdot a \cdot b / 4 \dots\dots\dots(6)$$

で表される。

微小液滴においては表面張力の影響でその形状はほとんどすべて円形となる。写真及びモニター上に映し出された液滴のサンプルは実際にほとんど円形であった。従って、楕円の面積と円の面積は等しいとし、液滴の粒径Dを $\pi \cdot a \cdot b / 4 = \pi \cdot D^2 / 4$ の関係より、

$$D = (a \times b)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

から求めた。

液滴粒径のデータ採取後は、 $5 \mu m$ ごとの個数に

分割され、質量分布を計算の上、Rosin-Rammler線図上にプロットするプログラムとリンクさせている。

3. 最適スレシヨルドレベルの決定

3.1 最適スレシヨルドレベル 写真画像またはビデオの再生画像による液滴の粒径は、二値画像を解析し液滴粒径を画素数で表した後、決定された解像度により求まる。それ故、測定を正確に行うためにはカメラにより定められた視野がその視野において解像度を満たしているかどうか確認し、スレシヨルドレベルを適切に設定することが不可欠となる。

二値化の際、ライブラリソフトによる分散の最大値をスレシヨルドレベルとしたが、測定の結果その値は必ずしも最適であるとはいえないことがわかった。そこで、スレシヨルドレベルを様々に変化させることによって画像検知能力について改めて検討した。

3.2 測定の手順 図4に示す粒径が $28\mu\text{m}$ から $61\mu\text{m}$ の範囲の12個の液滴の顕微鏡写真のサンプルを用いて、種々なスレシヨルドレベルのもとで画像検知能力を調べた。

スレシヨルドレベルと解像度を決定するためにLeeら³⁾により提唱された次の3つの式、(8)、(9)、(11)式を採用した。

個数について評価するための式

$$N_o/N_m > 0.95 \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 N は液滴の個数で、添字 m は画像処理によるもの、添字 o は実測値である。以下についても同様である。

液滴の体積分布(質量分布)の誤差の許容範囲について評価するための式

$$\sum \{R_m(D_{pi}) - R_o(D_{pi})\}^2 < 0.1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 R はRosin-Rammler分布式による積算残留率である粒径 D_p 以上の粒径が全液滴の質量に対して占める割合を示し、次式で表される。

$$R = \exp(-D_p/D_o)^n \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 D_o は代表粒径、指数 n は分布指数で分布のばらつきの程度を表す。

個数頻度について評価するための式

$$|(S_m - S_o)| \times G < 1 \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 S は次式で表される体表面積平均粒径、

図6 個数、質量分布、個数頻度について評価するための図

G は解像度である。

$$S = \sum D_{pi}^3 n_i / \sum D_{pi}^2 n_i \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 D_{pi} は液滴の粒径、 n_i は粒径 D_{pi} の液滴の個数である。

3.3 液滴サンプルの測定結果 図6の(a), (b), (c)は、(8)、(9)、(11)式を用いて種々なスレシヨルドレベルにおける画像検知能力を評価した結果である。

図6(a)は(8)式をもとに計算した結果を示す。縦軸は(8)式の左辺、すなわち実際の液滴の個数を画像処理装置によりカウントされた数値で割った比を表しており、斜線部内が有効な範囲であることを示している。このときのモニター画面は、図7のような最適な状態を示す。また、図6(a)によるとスレシヨルドレベルが0.43を超えた辺りから N_o/N_m の値が急に小さくなっていることがわかる。このとき、モニター画面は白から黒に移り変わるにつれて周りから

図7 最適スレシヨルドレベル時の二値化処理の様子

図9 スレシヨルドレベルを上げすぎたときの二値化処理の様子

図8 モニターに影ができ始めたときの二値化処理の様子

影ができ始める状態となり、それが図8に示すように小さな黒い点としてモニターに表示される。画像処理するにはそれが個数の一つとして数えられ、 N_m の値が大きくなる。(8)式を満たすにはモニター上に影ができないようにすることが必要である。

図6(b)は(9)式をもとにスレシヨルドレベルに対する左辺の値の変化を表したものである。図中、質量分布の誤差の許容範囲は水平線より下の斜線部内において有効であることを示している。これによるとスレシヨルドレベルは、最低でも0.2以上が必要であり、それがここでも0.43を超えた辺りから有効領域を離れていることがわかる。

図6(c)は(11)式をもとにスレシヨルドレベルに対する左辺の値の変化を表したものである。これによるとスレシヨルドレベルが0.38以上のところで条件を満たしている。なお、スレシヨルドレベルが0.5以上においては図9に示すように二値化処理した状態がほとんど黒に近く、サンプルの液滴を完全に覆っ

図10 スレシヨルドレベルと相対誤差の関係

てしまうため測定を行うことができなかった。

さらにスレシヨルドレベルと、実際の液滴粒径と画像処理装置による測定値との相対誤差の関係について計算した結果を図10に示す。ここでいう相対誤差とは、12個のサンプルの液滴粒径の各々の相対誤差を求めそれについて平均したものである。これによると、画像検知能力が最もよいのはスレシヨルドレベルが0.43付近である。

図6(a)及び図8より、この値を超えるとモニター上に影ができ始めることから、最適なスレシヨルドレベルはモニター画面に影ができ始める直前の値及びその付近であることがわかった。

また、液滴同士が接近しすぎると輪郭追跡時に「8の字」としてトレースされ、このため最適なスレシヨルドレベルまで値を上げることができないことがある。この場合は図10から判断してスレシヨルドレベルを最適なレベルよりも少し低いレベルにおいて二値化を実行し、この後測定された値に補正値を掛ければよいことがわかる。0.43より低いスレ

ショルドレベルにおいては測定値は実測値よりも小さいので、例えばスレショルドレベルが0.25のときは測定値を1.12倍すれば正確な粒径が得られることがわかる。

スレショルドレベルを0.43と設定して測定を行い実測値との相対誤差を表1に示す。表から明らかにように実測値と比較すると、画像処理による測定値は個々の液滴に対して0～6%の範囲にあり、全体の平均相対誤差も約2.6%で非常に正確であることがわかる。

4. 実際の液滴群の測定

これまでは画像処理法による液滴群の粒径測定技術の基本となるスレショルドレベルの決定について評価したが、ここでは実際の気流中に同伴する液滴群を対象とし、画像処理による測定精度の評価を行った。

先に求めたスレショルドレベルの値を用いて、図11に示す液滴の写真に対して粒径測定を行い、その結果を図12のヒストグラムで示す。実線が実測値、破線が画像処理による値である。

表1 最適スレショルドレベルによる画像処理と実測値の比較

画像処理の値	実測値	相対誤差
27.63 μm	28 μm	1.32%
29.13	30	2.90
30.43	32	4.90
44.36	43	3.16
44.35	47	5.64
49.92	51	2.12
51.22	52	1.50
52.70	54	2.41
54.01	54	0.02
55.48	55	0.87
58.06	59	1.59
63.82	61	4.62
各々の相対誤差の平均		2.59%

また、測定値をRosin-Rammler線図上にプロットしたところ(9)式を満たしており、画像処理による測定はこの広い視野においても有効であることが示された。なお、測定に要した時間は、手作業において60分であったのに対して画像処理では5分ときわめて短時間で測定できた。

次に、実測値と画像処理による値との差について評価する。最適スレショルドレベルは、既出のようにモニターに影がかかる前の値としたが、実際の液滴群においては液滴同士がかなり近接しているのが現状である。図10により、二値化する際少し低いスレショルドレベルで行うため、測定値は実測値よりもわずかに小さくなる。このことから実測値を正しいものとして、再生画像から画像処理した値と、同じ場面を撮影した写真からデバイダーで測定した値とを比較した。

測定値の補正には、最小二乗法を用いた。

求める回帰曲線の式を、

$$Y = f(X) \\ = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots + a_n X^n \quad \dots\dots\dots(13)$$

とし、二変量の測定値を (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , $\dots\dots (X_n, Y_n)$ としたとき、

図11 実際の視野で撮影した液滴写真

図12 実際の視野でとらえた液滴のヒストグラム

$$E = \sum_{i=1}^n \{ (Y_i - f(X_i))^2 \} \dots\dots\dots(14)$$

に対して、

$$\delta E / \delta a_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots; \text{これは } a_1, a_2, \dots, a_n \text{ の一次式}) \dots\dots\dots(15)$$

より求められる $a_1, a_2, \dots, a_n$ を最適値とする。ただしここでは二次式における回帰曲線を求めた。

図13は、横軸に画像処理装置で測定した粒径、縦軸に実測値を画像処理による測定値で割った比をプロットしたものである。実測値は液滴写真による測定値であり、写真撮影を行った後でCCDカメラによる撮影及び録画を行っている。その時間差は5秒であった。

この図からわかるように、粒径が小さいほど時間経過における蒸発の影響が大きくなるので、縦軸の比が大きくなっており、回帰曲線はゆるやかな減少関数となっている。その関数は、横軸に画像処理による手法で測定した粒径 X 、縦軸 Y にデバイダーにより測定した実測値で割った比をとると、

$$Y = 1.24 - 3.39 \times 10^{-3} X + 1.15 \times 10^{-5} X^2 \dots\dots\dots(16)$$

で表される。

この Y を粒径 X に対する補正定数とし、この補正値をもとに計算した値を「補正後の値」とし、相対誤差は実測値と「補正後の値」を利用して求めた。

粒径が $3 \mu\text{m} \sim 136 \mu\text{m}$ の範囲の290個のデータに対して測定した結果、相対誤差の平均は7.54%であり、個々の液滴においてきわめて正確に測定できることがわかった。

図13 液滴粒径と補正値の関係

5. ま と め

本研究において、画像処理装置を用いて液滴の粒径測定を行った結果をまとめると次のようになる。

- (1) 画像処理装置で二値化するには最適なスレシヨルドレベルが存在し、その値はライブラリソフトで定められているサンプルエリア内の各々の画素の輝度レベルの分散の最大値ではなく、モニターに影ができ始める直前の値である。
- (2) 液滴同士が近接する場合、最適なスレシヨルドレベルにおいては「8の字」として認識するので最適スレシヨルドレベルより低い値を用い、測定値に補正定数を掛ける必要がある。
- (3) 画像処理装置を用いることにより、きわめて短時間に、多量の液滴の粒径を精度高く測定することができる。

6. あとがき

本研究において、画像処理装置を用いた測定方法によりきわめて短時間に、多量の液滴サンプルの粒径を精度高く測定することが確認できた。

本装置は汎用のビデオカメラやパソコンをベースにしており、他の機器も特殊でなくまた安価であるので、本測定方法が関係分野で少しでも役に立てれば幸いである。

最後に、本研究の遂行に当たって前川技術開発の前川清氏には画像処理のソフトの開発に関して多大

のご協力とご指導を賜りました。心からお礼申し上げます。また、卒業研究としてデータ採取など熱心に協力していただいた門脇健史君（現東京電氣工務所）及び田巻正生君（現R. K.エクセル）に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Gary, P. B., Larry, M. O. and Young, H. L.,
Optical Engineering, 24-3 (1985-5/6),
464.
- 2) Ow, C. S. and Crane, R. I., Journal of the
Institute of Energy, (1981-9), 119.
- 3) Lee, S. Y., Par, B. S. and Kim, I. G.,
Atomizing and Sprays, 1 (1991), 389.
- 4) Kim, I. G. and Lee, S. Y., Experimental
Thermal and Fluids Science, (1990-3), 214.