
Current Status and Future Aspect of Measurement of Drop Size by Using Laser

Kiyomi Kawamura

1. はじめに

噴霧技術は自動車に関連する燃料供給装置や塗装をはじめ、金属や粉体の製造過程で使われるなど、多くの分野で必要とされている。例えば、気化器、EFI、ディーゼル噴射弁等の燃料供給装置や車体の塗装用スプレーガンは、液体をいかにして用途に見合った特性の噴霧にするかが課題である。そして、これらの装置によって得られた噴霧の特性を正確に知ることが重要である。

噴霧特性としては噴霧形状、噴霧粒径、噴霧濃度などが挙げられる。このうち、噴霧粒径は噴霧の微粒化状態を表す特性値として重要な値である。しかし、数 μm ～数百 μm の粒子が無数に混在している噴霧粒子の粒径を測定し、その平均粒径や粒度分布を求めることは非常に困難なことである。そのため、多くの粒径測定法が提案されてきた。これまでは噴霧粒子をシリコンオイル等の捕集液で捕集し、その粒径を測定する方法が使われてきたが、最近ではレーザーの発達とともに光学的手法が主流になりつつある。ここでは、粒径測定法のうち光学測定法に重点をおき、各々の測定法の特質について紹介する。

2. 粒径分布の測定法

これまでに行われてきた粒径分布の測定法を大別すると、(1) 液浸法、(2) 痕跡法、(3) 固化法、(4) 沈降法、(5) 運動量法、(6) 電気的方法、(7) 光学的方法に分類できる。

液浸法は受止め液に噴霧粒子を捕集する方法、痕跡法は受止め液の代わりに吸取り紙やガラス板

にすずや酸化マグネシウムを塗って、その上に捕集する方法である。固化法は噴霧粒子を液体窒素等で凍結したり、噴霧液体の代わりに溶けた「ろう」を噴射し、固化させる方法¹⁾である。沈降法は10m程度の高所で液体を噴射し、粒径の違いによる終局速度の違いを利用する方法²⁾である。運動量法は粒子の持つ運動量の違いによって分級する方法である。電気的方法は粒径の違いによる静電容量の差などを利用する方法³⁾である。光学的方法は粒径に対する光の散乱や減衰の関係を利用する方法である。

これらの方法の中で液浸法は手軽に粒径を計測できるために、これまでによく用いられてきた。この方法はガラス板や浅い受け皿の上に受止め液を入れて、噴霧粒子を受け止める方法である。受止め液は噴射液体に応じて選択する必要があり、受止め液の満たすべき特性や種々の噴霧液体に対する適切な受止め液について多くの報告がある⁴⁻⁷⁾。受止め液としては、例えば、水に対してシリコンオイル、重油や軽油に対して界面活性剤であるペレックスが良好であるが、ガソリンのような揮発性の高い液体に対する受止め液は見当たらない。また、この方法では捕集時の受止め液との衝突による粒子の再分裂や受止め液内での粒子の合体⁸⁾、あるいは微小粒子のサンプリングもれ等の問題がある。

3. レーザを用いる方法
3.1 レーザ光回折法

レーザー光回折法はSwithenbankによって開発された方法であり⁹⁾、現在、世の中で広く用いられ

キーワード

レーザー、噴霧、粒径、濃度、計測、位相、光回折、光減衰、ホログラフィ、CT法

ている粒径分布測定法の一つである。この方法はMalvern社(英国)によって製品化されたが、最近では、国内でも東日コンピュータ社がほぼ同様な原理のものを製品化している。

Fig. 1に装置の構成を示す。平行レーザ光束中に噴霧粒子が入ると粒子によって光が回折する。この回折した光をレンズで集光するとレンズの焦点面に回折パターンが観察できる。この回折パターンは粒子形状が球であればレンズの焦点を中心とした同心円状の明暗の縞模様となる。このときの光の回折角度は粒径が小さなものほど大きいため、焦点から離れた位置に回折光が集まる。一般に、噴霧には粒径分布があるために、レンズ焦点面での光強度分布は種々の大きさの粒子からの回折光が重なり合ったものとなる。そのため、この回折光強度分布を測定し、あらかじめ仮定した粒径分布の噴霧による回折光強度分布と比較して最も一致度のよい粒径分布を見だし、それを測定値としている。実際の測定装置では回折光強度分布を同心円状に30分割されたディテクタで測定し、それと同じ光強度分布を示すような粒度分布をパーソナル・コンピュータによって算出している。また、Swithenbankの報告では定常噴霧を対象としたが、その後、Sangeorzanら¹⁰⁾によって非定常噴霧にも適用できるように改良されたもの

が報告された。

この方法の長所は光学系の調整や操作が簡単であり、光路中の噴霧の粒径分布を一括して瞬時に測定できることである。ただし、噴霧濃度が高い場合には多重散乱の影響を受け、測定誤差が大きくなる。多重散乱が生ずると測定結果は実際の粒径と比べ、(1) 粒径分布が広くなり、(2) 平均粒径が小さくなることが中山らやFeltonらによって報告されている^{11,12)}。この方法で多重散乱の影響が大きく現れない噴霧濃度の限界は $2 \times 10^3 \sim 10^5$ 個/ccであることが中山によって報告されている¹¹⁾。これに対して、多重散乱が生ずるような高噴霧濃度場でも光回折法が適用できるように、多重散乱に対する補正式をFelton¹²⁾やDodge¹³⁾が報告した。これらの補正式は噴霧濃度の指標を平行光の透過率(噴射時と非噴射時のディテクタ中心での光強度の比)で表し、これを基にして補正するものである。

ところで、光回折法は光路中の粒子群を一括して瞬時に測定できる反面、噴霧の局所的な粒径の測定は困難である。これに対して、Yuleら¹⁴⁾やHammondら¹⁵⁾は軸対称噴霧を対象として、噴霧半径方向の回折光エネルギー分布や粒径分布を測定し、それらをAbel変換して局所での粒径を求める手法を報告した。この方法は光回折法で得られる回折光エネルギー分布や粒径分布が、光路全体にわたって積算された値であることを利用している。

一方、筆者は非軸対称噴霧の局所粒径も測定できるように、光回折法で測定した平均粒径と光減衰法で測定した噴霧粒子の散乱断面積(粒子の投影断面積)に対してCT処理(Computed Tomography)する方法を開発した¹⁶⁾。この方法はFig. 2に示すように、S方向に光学系をスキャンさせてS方向の平均粒径と透過率の分布を測定した後、噴霧を θ 方向へ回転させて再びS方向の平均粒径と透過率の分布を

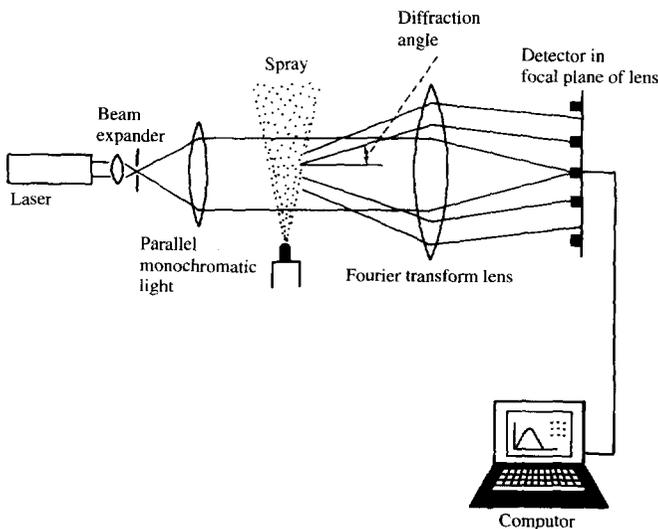


Fig. 1 Schematic of laser diffraction method.

測定する。ここで、透過率 (I/I_0) は式(1)に示すように光路中の全粒子の散乱断面積の総和 $\{\sum n \cdot (\pi \cdot d^2/4)\}$ に相当する。

$$\log(I_0/I) = R_t \cdot K_s(\alpha) \cdot (\pi/4) \cdot \sum(n \cdot d^2)_i \cdot \Delta x \tag{1}$$

- I_0 ; 入射光強度
- I ; 透過光強度
- R_t ; 光学系の係数
- $K_s(\alpha)$; 全散乱係数
- n ; 粒子数
- d ; 粒子直径
- Δx ; 微小距離

また、光路中のザウタ平均粒径 (d_{32}) は式(2)で表され、式(1)と式(2)の積は式(3)に示すように光路中の粒子体積の総和 ($\sum n \cdot d^3$) に相当する。

$$d_{32} = \sum(n \cdot d^3)_i / \sum(n \cdot d^2)_i \tag{2}$$

$$d_{32} \cdot \log(I_0/I) = R_t \cdot K_s(\alpha) \cdot (\pi/4) \cdot \sum\{n \cdot d^3\}_i \cdot \Delta x \tag{3}$$

ここで、式(1)、式(3)の関係をFig. 2に示したS方向とθ方向から求めると、これらの関係式はそれぞれ $(n \cdot d^2)_{i,j}$ と $(n \cdot d^3)_{i,j}$ の多元一次式であるので、これを解くことによって空間的な $(n \cdot d^2)$ と $(n \cdot d^3)$ の分布を求めることができる。この関係式をそのまま解くことは煩雑であるため、これと等価なCT法¹⁷⁾を用いて解いた。このようにして求めた $(n \cdot d^3)_{i,j}$ を $(n \cdot d^2)_{i,j}$ で割ることによって局所の平均粒径を求めることができる。また、 $(n \cdot d^3)$ は噴霧濃度に相当するものである。この方法で測定した噴霧内部の平均粒径の空間分布の一例をFig. 3に示す。

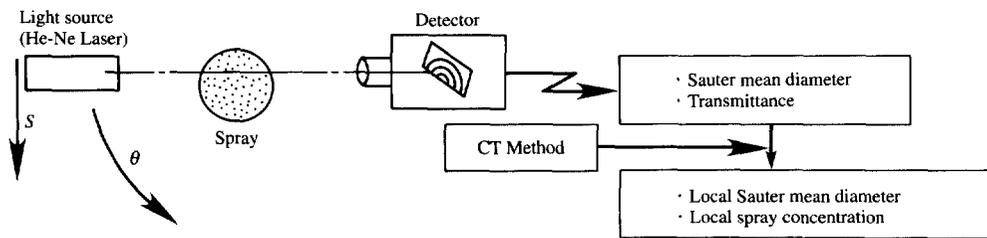


Fig. 2 Schematic of laser extinction / diffraction computed tomography method.

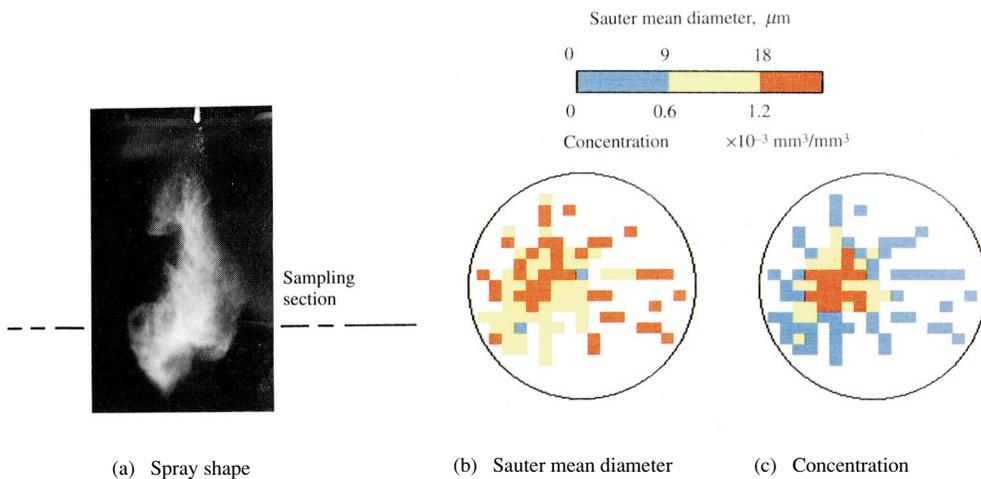


Fig. 3 Cross-sectional distribution of mean droplet size and concentration.

3.2 位相ドップラ法

位相ドップラ法の原理はDurstの「ドップラ信号を離れた二点で観測すると信号の位相のズレが球の直径の変化に比例する」というものである¹⁸⁾。この後、この考え方を発展させたのがSaffman, Bauckhage, Bachaloらであり¹⁹⁻²¹⁾、現在、AEROMETRICS社(米国)とDANTEC社(ドイツ)によって製品化されている。装置の構成はFig. 4に示すように、ドップラ信号の検出器を3個使用する以外は通常のレーザドップラ流速計(LDV)とほぼ同じ光学系である。二本のレーザビームの交差領域(測定体積)を通過する粒子によって各々の光線が散乱し、その散乱光によって干渉縞が形成される。粒子は動いているので検出器の位置では干渉縞が粒子速度に比例したドップラ周波数で動く。この干渉縞を離れた二点で観測すると、各々の位置でのドップラバースト信号は相対的な位相のズレを生ずる。この位相のズレはFig. 5に示すように粒子直径に比例するので、位相のズレを知ることによって粒径を知ることができる。位相のズレの検出にはドップラ信号のゼロクロスを検出するカウンタ法が用いられてきたが、S/Nの低い信号には弱いことから、相関法やFFT法を用いた信号処理法も報告されている²²⁻²⁵⁾。

位相ドップラ法は基本的にLDVと同じ光学系であるために、測定体積を通過する一粒ずつの粒子の粒径とともに粒子速度が同時に測定できる利点がある。さらに、位相情報を基にして粒径を決定するために、測定点をとりまく噴霧粒子によって散乱光強度が減衰しても測定結果への影響が少ない。そのため、比較的、高噴霧濃度場でも測定でき、測定可能な噴霧濃度の限界は 10^6 個/cc程度(カタログ値)である。ただし、検出器の感度レベルの設定によっては微小粒子からの信号がカットされる場合があり、その設定には注意を要することを吉津らが報告している²⁶⁾。また、ドップラ信号を前方散乱光から測定する場合には、レーザビームの直径程度かそれ以上の大きさの粒子が観測点からみて光軸の向こう側を通過すると粒径

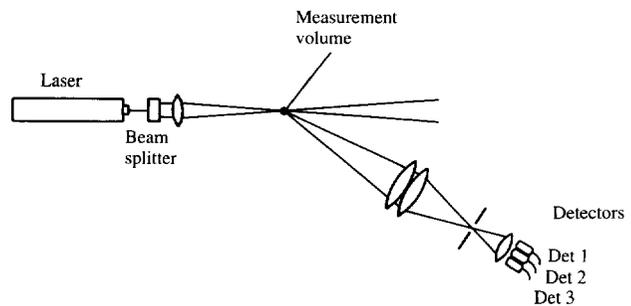


Fig. 4 Schematic of phase doppler method.

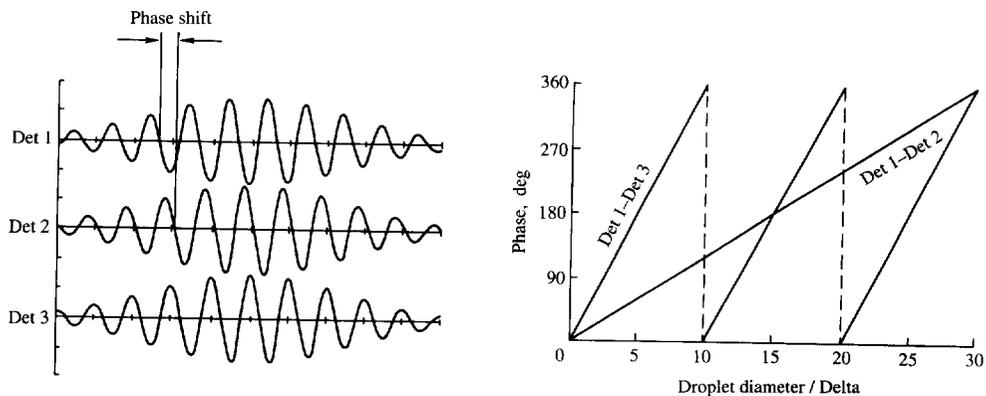


Fig. 5 Relation between droplet size and phase shift.

を誤認する可能性があることを岡本やGrehanらが報告している^{27, 28)}。前方散乱で計測するときは粒子によって屈折された光の散乱パターンを基にして粒径と位相のズレとの関係を決定している。しかし、レーザービームがガウス分布の場合には粒子が通過する位置によっては反射の影響が強く現れ、屈折と反射とでは粒径と位相のズレとの関係が異なるために誤認する可能性があるようである。さらに、この方法では測定体積が小さいので局所空間の粒径を測定できる反面、噴射条件によっては時間当たりの測定粒子数が少なく、測定時間を長くすることが必要な場合がある。

3.3 ホログラフィ法

ホログラフィ法は被写体の三次元情報を記録する写真撮影法の一つである。ホログラフィ法は大きく分けて、インライン型とオフアキシス法とがあるが、ここでは粒子計測によく用いられるインライン型について紹介する。

インライン型ホログラフィ撮影装置の一例をFig. 6に示す。噴霧にレーザー光を照射し、その後方に記録媒体（乾板やフィルム等）を置くと、被写体によって散乱される光と被写体の周囲を通過して直接に記録媒体に到達する光との干渉縞が記録される。この干渉縞が記録された記録媒体はホログラムと呼ばれる。なお、光源には高速運動する

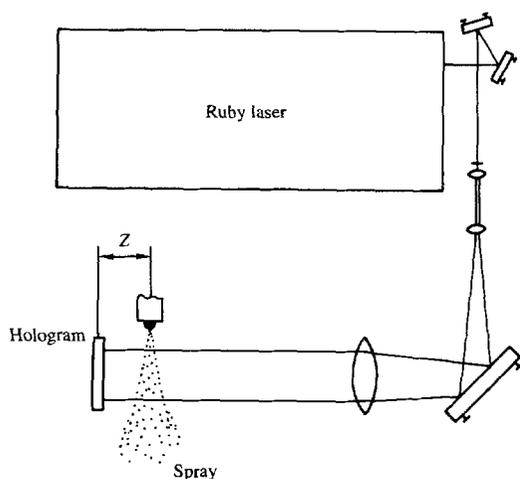


Fig. 6 Schematic of holography method.

噴霧粒子の瞬間像を記録できるように、ルビーレーザーのようなパルスレーザーが用いられる。干渉縞が記録されたホログラムにレーザー光を照射すると、ホログラムは回折格子として働き、噴霧粒子像が再生される。この再生像を顕微鏡拡大することによって粒子一粒ずつの粒径を測定することができる。

ところで、ホログラム撮影時の噴霧と記録媒体との距離の設定は良好な干渉縞を記録するうえで重要な要素である。この距離によって回折の様式が変わり、噴霧と記録媒体との距離が離れるにつれてフレネル回折からフラウンホーファ回折へと変化する。噴霧に適用する場合にはフラウンホーファ回折の領域がよく使われる。回折の様式を表す指標に式(4)に示すファーフールド数がある。

$$N = \lambda \cdot Z / d^2 \quad (4)$$

N ; ファーフールド数

λ ; 光の波長

Z ; 粒子と記録媒体との距離

d ; 粒子直径

フラウンホーファ回折は $N > 1$ の領域であり、良好なホログラムを得るには N が大きいほどよい。しかし、 N が大きくなると干渉縞の間隔が大きくなる反面、濃度差が小さくなるために再生不良の原因になる場合がある。良好なホログラムを得るためのファーフールド数の範囲に定まった値はないが、村上ら²⁹⁾は $2 < N < 8$ 、Thompsonら³⁰⁾は $1 < N < 50$ を推奨している。

Fig. 7にディーゼル噴霧の再生像とその一部を拡大した結果の一例を示す。ホログラフィ法ではこのような再生像から粒子そのものの大きさを測定できるので正確な方法である。しかし、噴霧粒子の再生像からの粒径測定を人手で行うと多くの時間と労力を要する。これに対して、Okadaらはこの部分を画像処理で行うことを試みている³¹⁾。また、ホログラムを再生することなく、ホログラムに記録されている干渉縞を画像処理で解析し、粒子の直径と位置を求める方法を村上らが報告している³²⁾。これらの方法は一粒ずつの粒径を測定する方法であるが、Ewanらはホログラムを3.1節で述べた光回折法を用いて多くの粒子の粒径を一括して測定する方法を提案している³³⁾。この

方法は光回折法の測定位置にホログラムを置き、その再生像からの散乱光をレンズで集光し、その焦点面での回折パターンから粒径を測定するものである。この方法は光路中の粒子を一括して測定できるために、測定時間が大幅に短縮できる。

以上のように、ホログラフィ法は噴霧を時間的に凍結し、粒子そのものの大きさを測定できる。そのため、正確な粒径測定が可能であることから粒径測定の前器として位置付けられる。ただし、現時点では再生像から粒径を測定するときによくの時間を要することから、この部分を画像処理によって自動計測できることが望まれる。

3.4 レーザ光減衰CT法

レーザー光減衰CT法は噴霧粒径ではなく、噴霧濃度（単位体積中に占める燃料量）の空間分布を測定する方法である。この方法は可視光を噴霧に照射し、その減衰量を基にCT法（Computed Tomography；医学分野で人体の断層像の撮影に使われている）で処理することによって噴霧の断層像を計測するものである³⁴⁻³⁶。

噴霧に平行な可視光を照射すると、噴霧粒子によって光が散乱され、平行光線の光強度が減衰する。測定領域をFig. 8に示すように分割し、入射光強度 (I_0) と透過光強度 (I) との関係を第1列について求めると、式(5)のようになる。

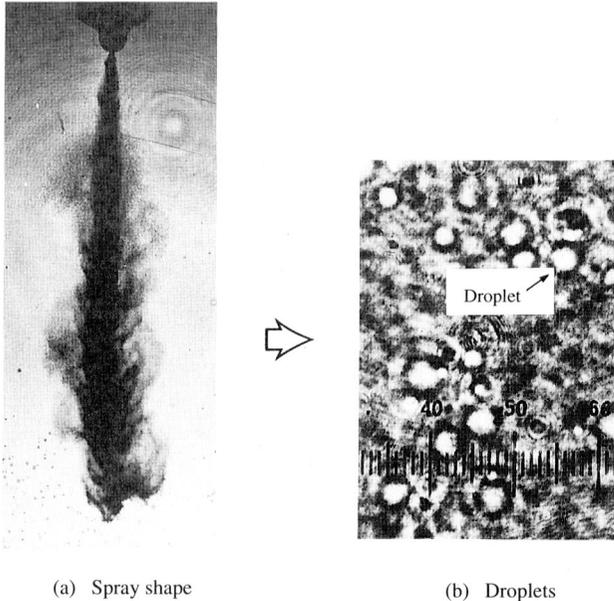


Fig. 7 Reconstructed image of spray.

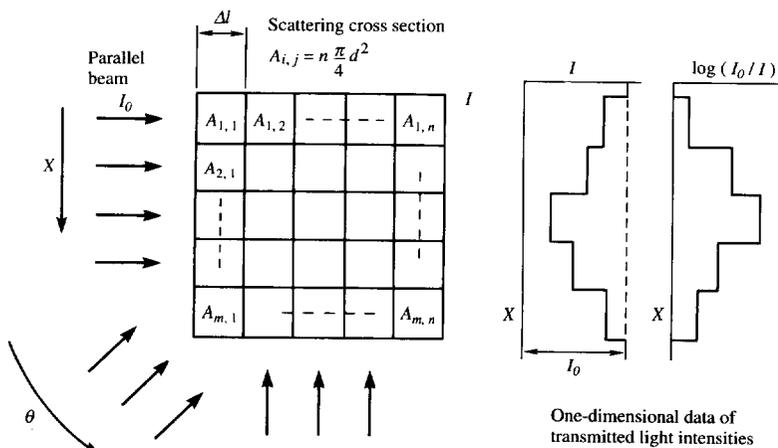


Fig. 8 Measurement of transmitted light intensity (I).

$$\log(I_0/I) = R_t \cdot K_s(\alpha) \cdot (\pi/4) \cdot \Sigma(n \cdot d^2)_i \cdot \Delta x \quad (5)$$

R_t ; 光学系の係数

$K_s(\alpha)$; 全散乱係数

n ; 粒子数

d ; 粒子直径

Δx ; 微小距離

このようなデータをX方向から測定した後、光学系あるいは噴霧を θ 方向に回転させて多方向から測定すると、これらの関係式は $n \cdot d^2$ の多元一次式であるのでこれを解けばその解である $n \cdot d^2$ を求めることができる。

また、単位体積内での噴霧濃度は式(6)で表すことができる。

$$C_{i,j,k} = \{ \rho_f \cdot \pi \cdot (n \cdot d^2)_{i,j,k} \cdot d_{32i,j,k} \} / (6 \cdot v) \quad (6)$$

ρ_f ; 液体密度

v ; 単位体積

d_{32} ; ザウタ平均粒径

一方、噴霧全体でのザウタ平均粒径 (d_{32}) は

式(7)に示すように、噴射量 (q_f) と噴霧全体の散乱断面積の総和から求められることが神本らによって報告されている^{3,5)}。

$$d_{32} = \Sigma(n \cdot d^3)_{i,j,k} / \Sigma(n \cdot d^2)_{i,j,k} \\ = (6 \cdot q_f) / \{ \pi \cdot \Sigma(n \cdot d^2)_{i,j,k} \} \quad (7)$$

噴霧全体が均一な粒径であると仮定すれば、式(6)に式(7)を代入することによって噴霧濃度を求めることができる。

Fig. 9に測定装置の構成を示す。光学系は焦点影写真法と同じ配置であり、光源にHe-Neレーザーを用い、透過光強度を高速シャッター機能のついたTVカメラで二次元的に測定する。このような透過光強度分布を多方向から測定するために噴霧を中心として光学系を回転させる。このデータに対して重畳積分法というCT処理を行って噴霧濃度の空間分布を求める。

Fig. 10に、この方法で測定したディーゼル用渦巻弁からの噴霧の断層像の一例を示す。このように、この方法は非接触で非軸対称噴霧の内部状態を把握できる利点があるが、多方向からの光減衰

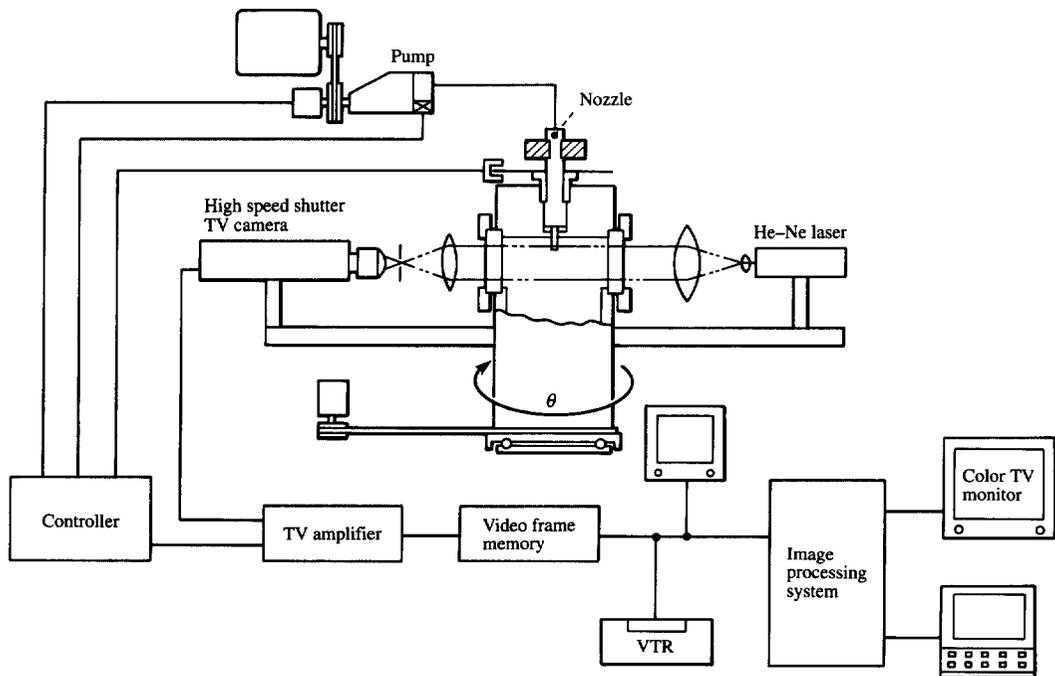


Fig. 9 Schematic of laser light computed tomography method.

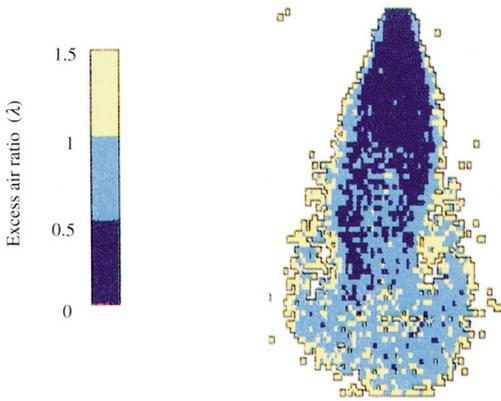


Fig. 10 Structure of spray injected from swirl type nozzle.

量の測定に時間を要するために、非定常噴霧を対象とする場合には噴霧の再現性が問題となる。ただし、通常の噴霧形状は軸対称であることが多いため、一方向からの光減衰量の測定データから噴霧の断層像を求める方法も報告されている^{37, 38)}。この方法では対象とする噴霧が限られるが、測定時間、計算時間ともに大幅に短縮できる。なお、これらの方法では光減衰量をTVカメラやフィルムで記録し、それを画像処理することが多い。そのため、光減衰量の測定にはダイナミックレンジの広い機器を用いることが測定精度の向上につながる。

4．粒径測定の今後の課題

ここでは現在、粒径測定装置として広く使用されるようになった光回折法、位相ドップラ法、および粒径測定の前器的な存在であるホログラフィ法について紹介した。それらの方法にはそれぞれの特徴があり、この特徴を生かして使用することが重要である。各々の測定法の特徴についてまとめると次のようになる。

光回折法は光学系の調整や取扱いが簡単で、噴霧粒子群を一括して測定できるが、高噴霧濃度粒子群への適用には多重散乱の影響を避けることが必要である。一方、位相ドップラ法は粒子直径と粒子速度を同時に測定でき、粒子一粒ずつ測定するので比較的正確に粒径が測定できる。ただし、

検出器の感度の設定が不適切な場合には、微小粒子からの信号がカットされる場合があり、その設定には注意を要する。また、測定体積内を通過する粒子の位置によってはドップラ信号が歪み、粒径を誤認する場合がある。これに対してはレーザービームを均一にすれば防止できることから、トップハット分布のレーザービームの採用が有効であると思われる。また、データレートを向上するためには、信号処理部の改良が必要である。ところで、これらの方法は粒径の情報を回折パターンやドップラ信号の位相のズレに置き換えて測定する。これに対してホログラフィ法は再生像であるが、粒子そのものを測定することができる。そのため、ホログラフィ法は粒径測定の前器として位置付けられる。ただし、粒径の測定には多くの時間と労力を要する。そのため、この部分の自動化の確立が望まれるが、画質の影響を強く受けるので一般的に適用することは難しい。

ところで、これまで紹介した粒径測定は常温雰囲気で行われることが多い。しかし、燃料噴霧を対象とする分野では高温雰囲気や火炎内での噴霧粒子の状態を知ることが重要となってくる。このような雰囲気場は雰囲気密度の空間的な変化が測定する散乱光に影響し、測定結果にも影響することが考えられる。高温雰囲気場での粒径測定についての報告は既に数例³⁹⁻⁴¹⁾みられるが、問題点も指摘されている。粒径測定結果に対する測定雰囲気場の影響度と、その適用限界の明確化が今後の課題であるものと思われる。

5．おわりに

液体の噴霧技術は様々な分野で主要な要素技術として使われており、その噴霧特性を知ることが重要である。しかし、噴霧は数万～数億個の大小様々な大きさの粒子が混在しているために、全ての粒子を正確に測定することは困難である。そのため、種々の特色のある計測法が開発されてきた。今後もこれらの計測法の改良や新たな計測法の開発が進められると思われるが、いずれも場を乱さない非接触式のレーザー技術や画像処理技術を基本とした計測法が主流となるであろう。また、計測法の改良や開発とともに、高温雰囲気場等の

測定環境が各々の計測法の測定結果に及ぼす影響や、適用限界の明確化も重要な課題であるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 棚沢泰, 広安博之: "溶けたろうによる噴霧の粒度分布測定法", 日本機械学会論文集, 26-162(1960), 224
- 2) 棚沢泰, 広安博之: "沈降塔による液体噴霧の粒度分布測定法", 日本機械学会論文集, 29-198(1963), 377
- 3) 玉野和保, 北山正文: "静電容量の変化を利用した液滴の粒径とその速度の測定法の研究(1)", 第12回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1975), 341
- 4) 棚沢泰: "微小液滴の大きさの測定法について", 機械及電気, 2-2(1937), 337
- 5) 棚沢泰, 武野真也: "燃料油粒などの直径測定用受止め液について", 日本機械学会論文集, 35-276(1969), 1741
- 6) 神本武征, 松岡信: "非定常燃料噴霧に関する研究", 日本機械学会講演論文集, 720-5(1972), 169
- 7) 佐賀井武: "重油噴霧の微粒化性と添加物による影響", 工業化学雑誌, 65-11(1962), 1761
- 8) 倉林俊雄, 小林孝徳, 柄沢隆夫: "液浸法による噴霧粒径測定の際の粒子の合体について", 第6回液体の微粒化に関する講演会論文集, (1977), 65
- 9) Swithenbank, J., et al.: "A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution", Experimental Diagnostics in Gas Phase Combustion Systems, Progress in Astronautics and Aeronautics, 53 (1976), 421, AIAA
- 10) Sangeorzan, B. P., Uehara, O. A. and Myers, P. S.: "Time-Resolved Drop Size Measurements in an Intermittent High-Pressure Fuel Spray", SAE Tech. Pap. Ser., No.841361, (1984), 19p.
- 11) 中山満茂, 荻原五郎: "フラウンホーヘル回折理論による粒子径測定法(空間粒子濃度の検討)", 第10回液体の微粒化に関する講演会論文集, (1982), 59
- 12) Felton, P. G., Hamidi, A. A. and Aigai, A. K.: "Measurement of Drop Size Distribution in Dense Sprays by Laser Diffraction", Proc. 3rd ICLASS, (1985), IVA/4/1, Inst. Energy (London)
- 13) Dodge, L. G.: "Change of Calibration of Diffraction-Based Particle Sizers in Dense Sprays", Opt. Eng., 23-5(1984), 626
- 14) Yule, A. J., et al.: "Laser Tomographic Investigation of Liquid Fuel Sprays", 18th Symp. Combustion, (1981), 1501, Combustion Inst.
- 15) Hammond, D. C., Jr: "Decomvolution Technique for Line-of-Sight Optical Scattering Measurements in Axisymmetric Sprays", Appl. Opt., 20-3(1981), 493
- 16) 河村清美, 斎藤昭則: "レーザ光減衰/回折CT法による噴霧断面粒度分布測定法の開発", 第1回微粒化シンポジウム, (1992), 131, 日本微粒化学会
- 17) 岩村喜典: CTスキヤナ, (1980), 288p., コロナ社
- 18) Durst, F. and Zare, M.: "Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows", Proc. LDA Symp., Copenhagen, (1975), 403
- 19) Saffman, M., et al.: "Simultaneous Measurement of Size, Concentration and Velocity of Spherical Particles by a Laser Doppler Method", Proc. 2nd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, (1984), 8.1
- 20) Bachalo, W. D. and Houser, M. J.: "Phase Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions", Opt. Eng., 23-5(1984), 583
- 21) Bauckhage, K. and Schoene, A.: "Measurement of Velocities and Diameters of Small Particles by Using Fast Digital Circuits for One-Line Evaluation of Laser-Doppler-Signals", Part. Charact., 2(1985), 113
- 22) Lading, L., et al.: "A Covariance Processor for Velocity and Size Measurements", 4th Int. Symp. on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, (1988), 4.8
- 23) Domnick, J., et al.: "Proc. of Phase/Doppler Signals Using the Cross Spectral Density Function", Selected Pap. from 4th Int. Symp. on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, (1988), 473, Springer Verlag
- 24) Maeda, M., Kobashi, K. and Hishida, K.: "Measurement of Spray Mist Flow by a Compact Fiber LDV and Doppler Shift Detector with a Fast DSP", Selected Pap. from 4th Int. Symp. on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, (1988), 224, Springer Verlag
- 25) Maeda, M., Kobashi, K. and Hishida, K.: "Improvement of LDA/PDA Using a Digital Signal Processor (DSP)", 3rd Int. Conf. on Laser Anemometry-Advances and Applications, (1989), S2.1
- 26) 吉津文嗣, 新井雅隆, 中山茂満: "レーザ回折法とPLDV法による粒子測定の相関に関する研究", 日本機械学会全国大会講演会講演論文集, B-900-59, (1990), 509
- 27) 岡本達幸, 高城敏美: "レーザビーム強度分布を考慮した位相ドブブラ法の検討", 第29回燃焼シンポジウム, (1991), 496
- 28) Grehan, G., et al.: "Evaluation of Phase Doppler System Using Generalized Lorenz-Mie Theory", Int. Conf. on Multi-phase Flows, (1991), 291
- 29) 村上昭年: "レーザによる微粒子の画像計測", 化学光学, 47-9(1983), 552
- 30) Thompson, B. J., et al.: "Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis", Appl. Opt., 6-3 (1967), 519
- 31) Okada, T., et al.: "The Automatic Measurement of the Drop Size and Its Position by In-Line Holographic Method", Proc. 4th ICLASS, (1988), 297
- 32) 村上昭年, 石川宗晴, 谷口尚郷: "インラインホログラムのデジタル解析による微粒子の計測", 第10回液体の

- 微粒化に関する講演会論文集, (1982), 73
- 33) Ewan, B. C. R., et al. : "Measurement of Tranjent Spray Size Distributions", Opt. Eng., 23-5(1984), 620
- 34) 河村清美, 斎藤昭則, 棚沢泰 : "レーザー光減衰CT法による噴霧濃度分布の測定", 自動車技術会論文集, 27 (1983), 48
- 35) Nakayama, M. and Araki, T. : "Visualization of Spray Structure by Means of Computed Tomography", COMODIA-85, (1985), 131
- 36) Kawamura, K., Saito, A. and Tanasawa, Y. : "Measurement of Fuel Concentration in Sprays by Laser Light Computed Tomography", Proc. 4th ICLASS, (1988), 311
- 37) 神本武征, 安秀吉, 張英俊, 小林治樹, 松岡信 : "写真の画像解析によるディーゼル噴霧の液滴径と燃料濃度の測定" : 第11回液体の微粒化に関する講演会論文集, (1983), 81
- 38) 坂根篤, 利岡才次, 住本哲宏, 浜本嘉輔 : "ディーゼル燃焼に及ぼす燃料噴射圧力の影響", 日本船用機関学会学術講演会, (1987), 9
- 39) Yule, A. J., et al. : "Sprays, Drops, Dusts, Particles ; A Study of Vaporizing Fuel Sprays by Laser Techniques", Combust. Flame, 44(1982), 71
- 40) 坪井秀文, 田嶋孝二, 太田弘水 : "噴霧燃焼式バーナの燃焼場解析", 第27回燃焼シンポジウム, (1989), 335
- 41) 中山満茂, 荻原五郎 : "噴霧火炎内粒子径の挙動に関する研究 (PLDV, レーザ回折法による検討)", 第29回燃焼シンポジウム, (1991), 103

著者紹介



河村清美 Kiyomi Kawamura

生年：1956年。

所属：燃料制御研究室。

分野：噴霧計測，解析。

学会等：日本機械学会，自動車技術会，微粒化学会会員。