2 方向光散乱画像法による高濃度燃料噴霧の噴霧特性測定法*

清水 勲^{*1}, 江森 康文^{*2}, 安田 嘉純^{*2}

Determination of the Characteristics of High Concentration Fuel Spray by the Bidirectional Light Scattering Image Processing Method

Isao SHIMIZU, Yasufumi EMORI, and Yosizumi YASUDA

A new technique which combines the forward and backward light scattering method and an image processing method has been developed to measure the characteristics of high concentration fuel jet spray. The time histories of spatial distributions of droplet size and volume density in jet spray are obtained by this technique from two photographs of forward and backward scattering intensities of spray injected in the collimated pulsed laser light. The method demonstrated for measurement of Diesel fuel sprays under various injecting conditions. The distributions of the injected fuel volume obtained by this technique are compared with those calculated simply from injection rate and injecting velocity. The experimental results indicate that this technique is very effective for measuring the distributions of droplet size, volume density and behavior of high concentration sprays under various operating conditions.

Key Words: Fuel Spray, High Concentration, Light Scattering Method, Image Processing, Spatial Distributions, Droplet Size, Volume Density, Quantitatively

1. ま え が き

ディーゼル機関等の燃焼現象を明確に把握するためには噴霧燃料の供給状態すなわち燃料噴霧の粒径や濃度の空間および時間分布を明確に捉える必要がある。実際の燃料噴霧の濃度は、例えばディーゼル噴霧では長さ 100 mm 程度以下の燃焼筒内に燃料が噴射されることが多く、噴霧の拡散も少なく、そのため粒子濃度が非常に濃い。したがって 10^3 個/cm³ 程度の低濃度粒子の測定法である粒子カウンタ法⁽¹⁾やホログラフィ法⁽²⁾ではこのような高濃度の噴霧の粒径や濃度を測定することができない。またフラウンホーファ回折法⁽³⁾も高濃度の噴霧には用いられない。また前方透過光による高速度写真撮影法では高濃度噴霧の拡散や貫通度などの噴霧全体の動きは測定できるが、噴霧の粒径や濃度の定量測定はできない⁽⁴⁾。そこで時々刻々変動するディーゼル等の高濃度の燃料噴霧の粒径や濃度の空間分布を同時定量測定することのできる有効な測定法の開発が待たれていた。これに対して、噴霧の全体的な拡がりや動きを連続的に捉えたとともに噴霧各部

の粒径や濃度の分布を巨視的定量的に捉えることのできる高濃度噴霧の有効な画像計測法すなわち粒子群による光散乱理論と画像解析法を併用した有効な計測法が、清水らによって開発されてきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。この画像計測法は、従来測定が不可能であった比較的高濃度の噴霧の平均粒径や体積濃度を噴霧写真画像から定量的に測定でき、それらの分布をマップ化することができ

る。この測定法に関する研究は最初の研究発表以来一貫して同一噴射条件で実験研究が行われ、測定理論の修正や二画像の位置合せの精密化など測定装置の改良が続けられてきた。本研究はこの間に得られた知見と噴霧油量の空間分布や時間分布の測定値を他方法からの計算値と比較した最新のデータに基づいて検討された研究結果を集大成しようとするものである。ここでは測定法についての検討の結果とこの測定法を用いて得られた大気中に噴射したディーゼル噴霧の測定実験例について述べる。

2. 多分散粒子群の平均粒径、粒子濃度の光学測定法(2方向光散乱強度法)

2・1 多分散粒子群による光散乱理論 単位の強さの平行光束中に粒子が1個入ったときの全散乱光量

* 昭和62年4月2日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年9月22日。

*1 正員、茨城工業高等専門学校(〒312 勝田市中根深谷津866)。

*2 千葉大学工学部(〒260 千葉市弥生町1-33)。

は散乱係数 $K_s(a)$ と粒子の断面積の積で与えられる。 $K_s(a)$ は粒径パラメータ a の関数である。ここで a は粒子の半径 r , 入射光の波長 λ によって $a=2\pi \cdot r/\lambda$ と定義されている。

さて、噴霧を図2に示すとき光学系で前方散乱画像 A と後方散乱画像 B を撮影するとき、入射光強度 I_0 , 噴霧粒子群中の半径 r (粒径パラメータ a) の粒子密度 $n(a)$, 噴霧厚さ l , 光路長の微小長さ dx , 透過光集光効率 R_t , 散乱光集光効率 R_b とすれば、平行光束中で $a>5$ 程度以上の粒子に対しては前方透過光強度 I_t , 後方散乱光強度 I_b は次のように与えられる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$(I_t/I_0) = \exp\left\{-\int_0^l \int_0^\infty R_t K_s(a) \pi r^2 n(a) da dx\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(I_b/I_0) = \int_0^l \int_0^\infty R_b S(a, \pi) n(a) da \times \left[\exp\left(-\int_0^x \int_0^\infty K_s(a) \pi r^2 n(a) da dx\right)\right]^2 dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし $S(a, \pi)$ は粒径パラメータの粒子が $\pi(180^\circ)$ 方向に散乱した光の後方散乱断面積である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

さて、式(1), (2)をさらに簡便に表すため、以下のように散乱光量の要素を ξ , 全散乱光量に対する後方散乱光量の比を ζ とおく。

$$\xi = \int_0^\infty K_s(a) \pi r^2 n(a) da \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\zeta = \frac{\int_0^\infty S(a, \pi) n(a) da}{\int_0^\infty K_s(a) \pi r^2 n(a) da} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、式(1), (2)において集光効率 R_b, R_t は細かくみれば光路上での粒子の散乱位置が異なるから各粒子に対して一定ではないが、噴霧粒子群を farfield で観察すれば R_t, R_b は各粒子に対してそれぞれ一定値であるとして差支えない。したがってこれらのことから式(3), (4)を用いて式(1), (2)をさらに簡単に表せば、次のようになる。

$$(I_t/I_0) = R_t \exp\left(-\int_0^l \xi dx\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$(I_b/I_0) = R_b \int_0^l \zeta \xi \left[\exp\left(-2 \int_0^x \xi dx\right)\right] dx \\ = \frac{R_b}{2} \left\{ \left[\zeta_0 - \zeta_l \exp\left(-2 \int_0^l \xi dx\right) \right] + \int_0^l \frac{d\zeta}{dx} \exp\left(-2 \int_0^x \xi dx\right) dx \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.2 平均粒径測定原理 式(5), (6)に示した (I_t/I_0) および (I_b/I_0) はそれぞれ粒子径、粒子数および噴霧厚さの関数として表されている。そこで、清水ら⁽⁹⁾⁽⁷⁾はこれらの式の関係性をさらに詳細に検討して噴霧の平均粒径および噴霧濃度を求める方法を案出し

た。

さて、式(5), (6)から平均粒径を求める操作は式(6)が複雑な形をしているため、非常に困難である。しかしながら ζ と平均粒径 r_{10} との関係は正比例の関係にあると報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。すなわち

$$\zeta \propto r_{10} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$r_{10} = \int_0^\infty r n(a) da / \int_0^\infty n(a) da$$

である。

過去の噴霧測定実験結果にみられる具体的な被測定噴霧⁽¹¹⁾の $\zeta_0, \zeta_l, d\zeta/dx$ にこの式(7)の関係を適用する。そしてそれらの値と ξ_x によって式(6)の簡略化を行った。図1に示すような $x=l/2$ において対称な粒度・濃度の分布を持つ噴霧に対しては式(6)は次式のように変形される。

$$(I_b/I_0) = \frac{R_b}{2} \left\{ \bar{\zeta} \left[1 - \exp\left(-2 \int_0^l \xi dx\right) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $\bar{\zeta}$ は光路上での ζ_x の平均値である。図1に示した対称噴霧からの散乱光強度を式(6)と近似式(8)から計算し比較する。均一な粒径の噴霧に対しては式(8)から計算された散乱光強度は式(6)から計算された値と厳密に等しくなる。また伊藤の実験結果⁽¹¹⁾で得られた不均一な粒径の対称噴霧〔図1(b)に示す〕に対しては式(8)の近似は10%程度以下の誤差範囲で成り立つ。また図1の(c)以下に示す極端な噴霧粒径分布、濃度分布で比較的高濃度しかも噴霧幅の厚い噴霧についても、式(8)の近似はおおむね20%程度以下の誤差範囲内で成り立つ。以上の結果から、後方散乱光強度の計算式には式(8)を用いた。

さて、平均粒径と散乱光強度の関係を求めるため、式(5), (8)から噴霧厚さ l の項 $\int_0^l \xi dx$ を消去すれば、

$$\bar{\zeta} = (2R_t^2/R_b)(I_b/I_0)/[R_t^2 - (I_t/I_0)^2] \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。式(5)において、集光レンズ口径は入射平行光束よりも大きく、噴霧を透過した平行入射光束は全てレンズで受けられると仮定すれば $R_t=1$ となる。これらの式(9)と(7)の関係から光路中の平均粒径 r_{10} を求めれば

$$r_{10} = A_1 \frac{(I_b/I_0)}{[1 - (I_t/I_0)^2]} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。比例定数 A_1 が決定されれば前方透過光と後方散乱光強度から噴霧厚さ l に関係なく、平均粒径が定量的に得られる。

2.3 体積濃度測定原理 式(3)の $K_s(a)$ は、 $a \geq 30$ に対してほぼ一定値 2 をとるから⁽¹²⁾⁽¹³⁾式(3)の ξ は面積平均粒径 r_{20} と単位体積中の全粒子数 N に比例する。また多くの研究者の実験によると種々の自然界の霧について $r_{10} \propto r_{32}$ となるから⁽¹⁰⁾式(3)、(4)、(7)と合わせて、噴霧体積濃度 $M \left(\int_0^\infty r^3 n(a) da \right)$ と定義する)は次のような関係で表わされる。

$$M = r_{32} r_{20} N \propto r_{10} r_{20} N \propto \xi \quad (11)$$

ただし

$$r_{32} = \frac{\int_0^\infty r^3 n(a) da}{\int_0^\infty r^2 n(a) da}, \quad r_{20} = \frac{\int_0^\infty r^2 n(a) da}{\int_0^\infty n(a) da}$$

$$N = \int_0^\infty n(a) da \quad (12)$$

である。

粒度分布 $n(a)$ の光路上での算術平均分布をとり、

$$\bar{\xi} = \int_0^\infty \xi dx/x, \quad \bar{\zeta} = \int_0^\infty \zeta dx/x$$

と定義すれば、式(5)、(8)および式(11)の関係から光路上の平均体積濃度 $\bar{M}$ は前方散乱光強度 (I_f/I_0) 、後方散乱光強度 (I_b/I_0) および噴霧厚さ l によって、 A_2 を比例定数として、次のように表される⁽⁷⁾。

$$\bar{M} = A_2 \frac{(I_b/I_0)}{[1 - (I_f/I_0)^2]} \cdot \frac{\{-\log(I_f/I_0)\}}{l} \quad (13)$$

図1 対称な粒子・濃度の分布を持つ噴霧例

画像濃度による粒子群の平均粒径および体積濃度の空間分布の測定は上述の式(10)および式(13)の関係をを用いて次のように行われる。散乱光強度を画像濃度から求めるとき、フィルム濃度 F_0 はフィルムのガンマ値を γ とすれば、散乱光強度 I_s と露光時間 T との積で $F_0 = \gamma \log(I_s \cdot T)$ と与えられる。そこで噴霧の前方と後方の散乱光 I_f, I_b を単位時間だけフィルム上で露光し、その映像をとれば、画像上の $(I_f/I_0), (I_b/I_0)$ が求まり、式(10)および式(13)の $\bar{r}_{10}$ および $\bar{M}$ の分布が画像的に求められる。

3. 測定実験

3.1 測定実験装置 測定実験光学系は図2に示すときのものである。フィルムA上には光減衰による影絵写真が得られ、フィルムB上には後方散乱光強度画像が得られる。実験では L_2, L_3, L_4, L_5 は $\phi 60$ 焦点距離 200 mm のレンズを用いた。式(1)、(2)中の散乱係数 $K_s(a)$ を定数として取扱い⁽¹²⁾⁽¹³⁾、また多重散乱の影響を排除するためには、前方散乱画像撮影光学系のレンズ L_3 の焦点位置にダイヤフラム D_1 を挿入して平行散乱光だけをとることが必要である。光源には発光時間幅 30 ns, 700 mJ のパルスレーザーを用いた。レーザーの発振はノズルから噴霧が発射された瞬間から数えて任意の遅れ時間で設定されたトリガ信号によって行われる。入射光の強度分布が空間的に均一でないときには入射光の強度分布をあらかじめ求めておき、測定データからその不均一を補正する。画像上の光強度の値を定量的に求め、かつフィルム感度変化(ガンマ値)を正確に求めるためには段階的な光透過度を持つ検定済みグレースケール[Kodak ステップタブレット]を噴霧撮影時に噴霧と一緒に写し込む。用いられた写真フィルムは 35 mm Kodak Trixpan, Recording 2475 である。画像解析には CCD カメ

図2 測定光学系と画像処理装置の概略図

ラ (NEC TI-22 A 形), フレームメモリ 256×256 画素 (三谷商事 IMF-PC, FE) および、マイクロコンピュータを使った自作の画像解析機を用いた。

3・2 被測定噴霧および噴霧測定実験 ディーゼル用ホールノズルの4孔のうちの1孔, $\phi 0.39$ の噴孔から2号軽油の噴霧を大気中に水平方向に噴射する。噴射ポンプは Bosch P 形, プランジヤ径 $\phi 12$ が用いられた。実験はポンプ回転数 500 rpm, 噴射量 120.0 mm³/stroke, ノズルの開弁圧 21.6 MPa で行われた。噴射率並びに噴射圧力の時間的経過を図3に示した。図3においては横軸は噴霧がノズル噴孔から出始める時刻を基準としてとった経過時間である。縦軸は噴射圧力と噴射率を示す。これらの値から計算すると(噴射率/噴射圧力)は最初の 100 μ s 以外はおおよそ一定値をとり, 噴射率は噴射圧力によってその大きさが左右されている。

噴霧撮影は噴霧がノズルから出た瞬間から正確に 100 μ s ごとに前方と後方の写真画像を同時撮影する。

3・3 粒径, 濃度分布の画像解析 図4には噴射ポンプ回転数 500 rpm, 噴射後 0.5 ms 時の噴霧の強度をそれぞれ CCD カメラで読み込み, ノズル先端から 5 mm ずつの位置でのそれらの値を表示したものの一例を示した。図中には (I_i/I_0) または (I_b/I_0) のスケールが示してある。平均粒径分布および体積濃度分布は図4に示すとき光強度分布を式(10), (13)の関係に入れて計算される。

図5には求められた平均粒径分布と体積濃度分布の一例を示す。ここで表示された平均粒径分布および濃度分布は光路上における粒径と粒子濃度の平均値を光軸と直交する断面に投影したものとなっている。図5(a)は平均粒径分布の投影断面図を表している。縦軸は噴霧幅を, 横軸はノズル先端からの噴霧位置と粒径および体積濃度の大きさを示している。これらの測定値は噴射ノズル先端から 5 mm ごとでの位置で示されているが, 任意の位置での平均粒径および噴霧濃度分布の解析も可能である。噴霧の体積濃度を求め

図3 噴霧の噴射率と噴射圧の時間的変化

るとき, 噴霧厚さ l は画像から読んで求める。実際の噴霧では噴霧厚さが噴霧中心部が最も厚いとは限らない。しかしながら画像から噴霧厚さを求める場合には噴霧軸に直交する噴霧断面は円形であると仮定し, 噴霧厚さは噴霧中心で写真画像幅と等しい厚さとなると仮定して求めた。図5(a)の円形断面はそれぞれの平均粒径での噴霧厚さ l を求めるための過程を示した。

3・4 較正実験 噴霧の平均粒径分布と体積濃度分布をそれぞれ絶対値で確定するため, 式(10)と式(13)の比例定数 A_1 と A_2 を確定することが必要となる。

平均粒径の較正は次のように行われた。噴霧画像 A 上では噴霧濃度の薄いところでは粒子がホログラムの再生像として得られる。したがって本測定法とホログラフィ法とで測定した噴霧濃度の比較的薄い部分での粒径を比べて比例定数 A_1 を決定した。この A_1 の値はやや粒径の揃った2種類のガラスビーズを測定することによりほぼその適正さが確かめられた。

体積濃度の較正実験では本画像計測法で得られた噴

図4 噴霧の前方散乱(a)と後方散乱(b)の光強度の空間分布 (500 rpm, 0.5 ms)

図5 噴霧の平均粒径の空間分布(a)と体積濃度の空間分布(b) (500 rpm, 0.5 ms)

霧油量と噴射率曲線から算出された噴霧油量とが等しいとにおいて A_2 が求められた。本測定法から得られる噴霧油量は例えば図 5 (a) に例示した噴霧断面で長さが 5 mm ずつの円筒の一部に近似した噴霧体積にそれぞれの位置での濃度分布を掛け、それら全体を加えて噴霧画像全体に含まれる全噴霧油量が求められる。実際に噴射された噴霧油量は図 3 に示される噴射率曲線を積分して求められる。このようにして求められた比例定数 A_2 値は表 1 に示され、噴射開始後 0.6 ms 時の測定値を基準にして種々の条件下での値が比較され、それらはよく一致している。なお、噴霧油量の比較にあたっては被測定噴霧の全体が測定視界内にある時期の噴霧が用いられた。

4. 噴霧測定結果

4.1 平均粒径および体積濃度の空間分布測定結果

噴霧の平均粒径分布と体積濃度分布の測定結果の一例として噴射初期 (0.5 ms)、噴射中期 (1.2 ms)、噴射後期 (1.8 ms) の噴霧測定結果の三次元表示を図 6 に示した。図 6 の左列はそれぞれの測定時の前方透過光強度写真、中間列は噴霧濃度の空間分布を、図の右列は平均粒径分布を示している。噴霧濃度は噴射初期ではノズル先端付近で高く、噴霧の先頭に行くに従って低くなってゆくが、噴霧の最先端では空気抵抗のために噴霧濃度がさらに高くなっていることが明確に定量測定されている。噴射中期では噴霧油量の増加に伴って噴霧の体積濃度は全体的に高くなっている。噴射後期

では噴射油量の減少に伴って体積濃度は非常に小さくなっていく。

粒径分布は噴霧燃料の多少によって粒径の大きさは異なるが、噴射条件ごとに噴射軸方向にはほぼ一定の値をとり、噴霧の体積濃度分布の傾向と著しく異なる。高濃度の噴霧の非接触の粒径測定法が本方法以外に他にないため、この高濃度のディーゼル噴霧の瞬時の平均粒径の空間分布測定値はその適正さを他の方法で検定することができない。しかしながら画像法ではないが、同じ 2 方向光散乱法を用いてガラスビーズの約 40 μm から 200 μm までの 6 種類の平均粒径を測定し、顕微鏡測定の結果と比較したところ⁽¹⁴⁾、それらは非常によく一致したことから判断して、本測定結果はほぼ適正な結果が得られているであろうことが推察される。

表 1 本光学測定法と噴射率から計算された測定視界中に存在する全噴射油量の比較により求められた比例定数 A_2 値

Experimental condition		Measured value			Comparison	
Pump Speed	Lapse of Time	Fuel Volume by Picture	Injected Fuel Volume		A_2 Value	$A_2 - (A_2)_{0.6}$
rpm	ms	$\times A_2 \text{ mm}^3 \text{ fuel}$	mm^3	%	$\text{mm}^3 \text{ fuel}$	%
500	0.5	231	224	-24.8	0.97	-3
	0.6	298	298	0	1.00	0
	0.7	36.5	37.5	+25.8	1.03	+3
	0.8	42.6	45.2	+51.7	1.06	+6
1200	0.4	309	282	-54.6	0.91	-9
	0.5	47.8	42.2	-41.6	0.88	-12

Forward scattering image. Distributions of volume density. Distributions of droplet diameter.

図 6 噴霧の時間経過による前方透過光画像 (左列)、体積濃度の空間分布 (中列)、平均粒径の空間分布 (右列) の変化 (500 rpm; 0.5 ms, 1.2 ms, 1.8 ms)

測定結果の確からしさを調べるため、噴射条件と噴霧の体積濃度および平均粒径の空間分布、時間分布測定結果とを比較した。図7には一例として噴射後期(1.8 ms 時)の噴霧の軸上でノズル先端から5 mm ずつの位置の噴霧の体積濃度と平均粒径の分布測定結果と噴射条件との関係を示す。噴射条件は噴射率と噴射圧力曲線が時間経過軸を逆向きにとって同時に示されている。これはノズル噴孔からつぎつぎと噴射された噴霧が噴霧先端の移動距離から測定された平均速度で飛翔し、噴霧撮影時にはノズル噴孔付近から噴霧先端まで逆噴射率曲線に沿って噴霧油量が空間に分布していると考えられるからである。噴霧の体積濃度分布は噴射率曲線と非常に大きな相関があることが実験結果から認められた。

4.2 噴射油量の空間分布 噴射開始後一定時刻ごとの噴射軸に垂直な断面上の空間に分布する噴霧油量を、本測定法によって得られた体積濃度分布値から計算する。そして図7に示すごとき逆噴射率曲線および平均速度からノズル先端から噴射軸に沿って分布する噴射油量を計算から求めて比較する。図9には2方法によって得られた1.8 ms 時の噴射油量の空間分布を示した。図8には噴射開始後0.8 ms 時の噴射油量の空間分布を示した。0.8 ms 時の噴霧は全噴霧が測定視界中にある。本測定法による測定結果からは噴霧先端では噴霧が空気抵抗によりつぶれ、そこに溜る状態が明確に定量化されることが明らかとなった。図9に示される噴射後期(1.8 ms)では測定視界内の噴霧は先行する噴霧に沿って流れ、噴霧油量の空間分布は噴射率曲線から推測される空間分布と非常に一致を示している。なお、ノズル先端から5 mm の位置での体積濃度の測定値は噴霧のコアが微粒化していないの

か理由は明らかではないが、測定値が実際の値よりも低くでているように推測される。

4.3 2方法によって得られる全噴霧油量の比較と噴霧油量の時間分布 全噴霧が測定視界内にあるとき、本測定法によって測定された全噴霧油量と同一噴射条件下での噴射率から計算された全噴霧油量とがそれぞれ比較された。測定視界からはみ出した噴霧は比較に用いない。これらの実験結果を表1に示した。式(13)の比例定数 A_2 は噴霧の体積濃度の較正に用いられたが、表1に示した種々の条件下での A_2 値はこの光学測定法の確からしさと精度を調べるために用いられた。比例定数 $(A_2)_{0.6}$ は噴射ポンプ回転数 500 rpm, 0.6 ms 時の値であり、これを基準に比較した。表1に示された条件下での噴霧は同一ポンプ回転数ではそれぞれ噴射時期が近いからそれらの噴霧形状は非常に似ているであろうと一般的には想像されるが、実際にはこれらの噴霧形状は大きく異なる。それにもかかわらず、これらの A_2 値は $(A_2)_{0.6}$ とよく一致し、種々の条件下で15%以下の誤差範囲にある。このことは本光学測定法が高濃度噴霧の測定に対して充分有効であることを示している。

さてさらに、噴射始めから噴射終わりまで0.1 ms

図8 2方法によって得られた噴射初期における噴射油量の空間分布の比較

図9 2方法によって得られた噴射後期における噴射油量の空間分布の比較

図7 噴霧の体積濃度と平均粒径の空間分布測定結果と噴射条件(噴射率と噴射圧力)の比較

ずつの時間経過に従って噴射された測定視界中にある全噴霧油量を本光学測定法で測定し、噴射率曲線から推測される全噴射油量の時間分布と比較した。図 10 にその結果を示す。500 rpm の噴射ポンプ回転数では噴射開始後 0.8 ms までの噴霧は噴霧先端が測定視界中にある。表 1 に示したごとく 2 方法で測定された噴霧油量は 0.4 ms 以前のものを除いてはすべてよく一致している。0.4 ms 以前の噴霧は噴霧幅が非常に狭く、本光学測定法でも測定誤差が大きくなり適さないようである。0.9 ms 以降の噴霧は噴霧先端が測定視界からはみ出しているため、噴射率から計算される測定視界内の噴霧油量は、例えば 0.9 ms 時または 1.0 ms 時にはそれぞれ 0.9 ms 時の全噴射油量から 0.1 ms 時の噴射油量を差し引いた値、または 1.0 ms 時の全噴射油量から 0.2 ms 時の噴射油量を差し引いた値などと仮定して求められた。これらの値と本光学測定法によって測定された値とを比較すると噴射初期、中期、後期ともに噴霧油量の時間分布が非常によく一致していることが認められた。

図 10 2 方法によって得られた時間経過に従って変化する測定視界中の全噴射油量の比較

5. ま と め

(1) 高濃度の多分散粒子群の粒径および体積濃度の空間分布を非接触で定量的に求めることのできる方法として開発された 2 方向光散乱画像法の基礎的事項について検討を続け、その測定法を確立した。

(2) この測定法の適正さは画像濃度から計算された噴霧油量と噴射率曲線から算出された噴霧油量とがほぼ等しいことを実験的に確かめることにより確認された。

(3) この測定法の開発確立により、従来の測定法では不可能であったディーゼル等の高濃度噴霧の噴霧特性の測定が可能となった。

(4) 高濃度のディーゼル噴霧測定に本測定法を適用した結果、噴射率や噴射圧などの噴射条件の変化、噴霧の流れ変化や干渉から生ずる噴霧粒径や濃度などの空間分布状態が非常に明確に測定され得ることが明らかとなった。

本研究の一部は文部省科学研究費、特定研究「燃焼現象のレーザ計測とモデリング」の援助により行われた。本研究での測定法の改善にあたり、東京工業大学工学部 松岡信名誉教授、越後亮三教授、神本武征助教授、安秀吉氏に有益なご教示をいただいた。実験に際しては日野自動車工業(株) 鈴木孝、下田正敏氏に

多大のご協力をいただいた。本研究は茨城工業高等専門学校の学生の努力により推進された。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 清水, 機論, 47-424, B (昭 56), 2369.
- (2) Murakami, T., ほか 2 名, *Proc. 1st ICLASS*, (1978), 317.
- (3) Switchenbank, J., ほか 4 名, *AIAA Paper*, 76-69 (1976), 421.
- (4) Kamimoto, T., ほか 4 名, *SAE Paper*, No. 840276 (1984).
- (5) Shimizu, I., ほか 3 名, *SAE Tech. Paper Series*, 820355 (1982), 155~164.
- (6) Shimizu, I., ほか 3 名, *Proc. Inter. Sympo. on Flow Visualization*, (1983), 358~364.
- (7) Shimizu, I., ほか 4 名, *Combust. Flame*, 59-1 (1985), 69~80.
- (8) Gumprecht, R. O. ほか 1 名, *J. Phy. Chem.*, 57 (1953), 90.
- (9) Twomey, S., ほか 1 名, *Appl. Opt.*, 4-4 (1965), 501.
- (10) 清水・ほか 2 名, 応用物理, 47-1 (昭 53), 30~36.
- (11) 伊藤, 機論, 36-285 (昭 45), 759~780.
- (12) Sinclair, D., *J. Opt. Soc. Am.*, 37-6 (1947), 475~480.
- (13) Lothian, G. F. and Chappel, F. O., *J. Appl. Chem.*, (1951), 475~482.
- (14) Shimizu, I., Yasuda, Y. and Emori, Y., *Proc. of 2nd Internat. Aerosol Conference*, (1986-9), 991.

討 論

〔質問〕 藤 本 元〔同志社大学工学部〕

(1) 透過率の低い場合、たとえば噴口付近では貴方法によっても誤差が大になるはずである。その傾向が図8の噴口から20 mm 以下の場合のデータに表れているようだが、お考えはいかがか。

(2) 噴射率計算時に用いる平均速度は、燃料噴口出口速度と噴霧先端速度の平均をとるべきと思われるが、いかがか。

(3) 噴口から5 mm の位置の体積濃度が低いのは、コアでの未微粒化を原因とされているが、貴方法では光路長平均の測定値なので、むしろ(1)の透過率の問題と思われるが、いかがか。

(4) 画像明暗は平均粒径に本来関係ないにもかかわらず、図6, 7では画像の暗い部分で平均粒径が大になっている。この理由は何によるものか、お考えを伺いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のように透過率の低い場合には誤差が大になる傾向がある。特に図8の5 mm 以下のところではそのようである。しかしながら、図8での噴孔から20 mm 以下のところの値すべてがその傾向にあるとは限らない。噴射率などから計算した噴霧油量分布が実際の分布と異なっていることは確かで、それらの値が実際の値よりも大きな値を示していることもある。

(2) ご質問の「噴射率計算時に用いる平均速度と

は」を噴霧油量の空間分布を計算する場合に用いる平均速度という意味と解釈するが、その速度は本研究では噴霧の先端が測定視界中に存在する期間中に噴射開始後0.1 ms 間隔で写真画像から測定した噴霧先端速度の平均値を用いている。いずれにしてもある瞬間に噴孔から出た噴霧が正確にどこに到達するかは現在のところ計算の仕様がなから、平均的な速度で計算した噴霧油量の空間分布のおおよその傾向と比較することにとどめておけばよいと考えた。なお、図8に示されるような発達段階の噴霧では、本測定法で測定された噴霧油量の空間分布は当然単純な計算値とは一致しない。図9に示される例のごとく平均速度が視界中でほぼ一定となる場合は測定値と計算値とは比較的良好に一致する。本研究では噴霧先端が測定視界中にあるときの油量の時間分布の比較結果がよく一致することにも注目していただきたい。

(3) 5 mm の位置での値が低いのは噴霧の未微粒化とか、透過率とか、写真の分解能など種々の原因が考えられ、現段階では透過率の影響が数量的に最も大であるとは明言できない。

(4) 式(1), (2)に示されるように画像の明暗は場所的な平均粒径分布とそれらが分布する位置の関数となっている。平均粒径の大きさは画像の明暗に影響を与える。