高数密度粒子群に対する透過光減衰法の適用性に関する実験的研究*

神本 武征**, 神藤 英彦***, 小林 治樹**

An Experimental Study on the Applicability of the Light Extinction Method to a High Density Particle Cloud

Takeyuki KAMIMOTO, Hidehiko KANDO, and Haruki KOBAYASHI

The applicability of the light extinction method to a dense spray like diesel sprays was investigated experimentally using a glass bead-water suspension having a similar dimension to that of an ordinary diesel spray. The transmission was measured against particle concentration using the detection angle as a parameter. The results showed that the light extinction principle holds at a high particle concentration which is equivalent to that of diesel sprays, and that the apparent extinction coefficient, which was obtained experimentally, coincides within an accuracy of 5 percent with that theoretically calculated.

Key Words: Internal Combustion Engine, Optical Engineering, Diesel Spray, Particle Cloud, Light Extinction Method

1. ま え が き

噴霧内粒子の粒径や数密度の測定では回折法⁽¹⁾, 散乱法⁽²⁾のような光学的方法や, ホログラフィ法⁽³⁾, 直接写真法⁽⁴⁾のような画像計測法が一般に行われている。しかし, これらの方法が適用できるのは比較的粒子数密度の低い粒子群に限られるため, ディーゼル噴霧のようないわゆる濃噴霧にこれらの方法を適用しようとする, 噴霧周辺部や噴口からずっと下流の領域の測定しか行えない。このような事情から, 最近, ディーゼル噴霧全体の瞬間影写真を画像解析して, 透過光減衰法の原理に基づいて粒子数密度の高い領域の情報を得ようとする計測法が提案されている^{(5)~(7)}。しかしディーゼル噴霧の粒子数密度の高い領域では多重散乱が生じている可能性があり, 定量的測定法として影写真法の信頼性を高めるためには, ディーゼル噴霧相当の高粒子数密度の粒子群における多重散乱の影響を検討する必要がある。従来この点に関する研究は少なく⁽⁸⁾⁽⁹⁾, また実験条件も異なるので, 本研究では水に懸濁したガラス粒子群を対象にディーゼル噴霧相当の

条件で実験的検討を行った。

2. 透 過 光 減 衰 法

不規則に浮遊している同一の直径 D を有する多数の粒子群に強度 I の平行光が入射した場合の透過光の減衰を考える。個々の粒子の影が互いに重なり合わない程度に層の厚さ dl を薄くとれば, この層を透過する光の減衰 dI は次式で表される。

$$\frac{dI}{I} = -Q_{\text{ext}} \frac{\pi}{4} D^2 N dl \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで Q_{ext} は粒子 1 個当たりの減衰係数であり, 非吸収粒子の場合は散乱係数に等しい。つまり減衰は散乱に起因する。 N は粒子数密度である。式(1)を積分すると, Bouguer-Lambert-Beer の法則が得られる。

$$-\ln \tau = Q_{\text{ext}} \frac{\pi}{4} D^2 N l_{12} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし $\tau = I_2/I_1$ は透過率, 添字 1 は入射光, 2 は透過光を表し, l_{12} は光路長を表す。右辺は濁度または光学厚さと呼ばれる無次元数であり, 入射光に垂直な単位面積に対する光路 l_{12} 中に存在する全粒子の総減衰面積の比を表している。

式(1), (2)は入射光と平行な光の成分のみに注目している。透過光の検出角が有限な場合は, 後出の

* 昭和 61 年 10 月 7 日 第 64 期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 4 月 30 日。

** 正員, 東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*** 東京工業大学大学院。

式(3)に示すように Q_{ext} に修正係数をかければよい。しかし粒子数密度が高くなると検出角内に多重散乱光が入り込み、透過率の対数と濁度との間に直線的な関係が成り立たなくなる恐れがある。ところで、ディーゼル噴霧についてレーザ光減衰法により透過率を測定してみると、図1に示すように噴射期間中の濁度は4に達する。この濁度について粒径を $30\mu\text{m}$ 、噴霧巾を 4mm と仮定すると粒子間隔/粒子直径 ≈ 3 、 $N \approx 10^{12}$ となる。多重散乱が生じる条件については、従来の考え方によれば、式(2)の右辺の光路長 l_2 を除いた部分の逆数、つまり、 $4/(\pi Q_{ext} D^2 N)$ は光子の平均自由行程を表すから、平均自由行程が光路長 l_2 より小さければ、すなわち濁度が1以上なら多重散乱が起こることになる⁽¹⁰⁾。また、数個の粒子がレイリ散乱している場合、粒子間隔/粒子直径が3以下になると、粒子まわりの電場の相互干渉が無視できなくなるとの理論もある⁽¹⁰⁾。しかし、粒子数が多い場合はすべての粒子からの振動が積算されるので、もっと大きな粒子間隔でも電場が乱されるかもしれない。実験的には、Dobbinsらは⁽⁸⁾、 $23.9\mu\text{m}$ のガラス粒子群で濁度が2.0を越すと散乱光強度分布に多重散乱の影響が現れると報告し、また Woodward⁽⁹⁾ は直径 $2.89\mu\text{m}$ のポリスチレンラテックス粒子について粒子間隔/粒子直径 ~ 100 ですでに散乱光強度分布に多重散乱の影響が現れたと述べている。以上の研究によればディーゼル噴霧の条件では多重散乱は明らかに生じていることになるが、多重散乱は粒子のアルベドや粒子と波長の比によって異なるため、従来の研

究からディーゼル噴霧において多重散乱が透過光減衰法に及ぼす影響を定量的に推定することは困難である。以上より本研究では、水に懸濁するガラス粒子群を用いてディーゼル噴霧に相当する高数密度まで式(2)の関係が成り立つかどうかを実験的に検討することにした。

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置 ガラス粒子としては、屈折率1.92、密度4.3のものを用いた。水との相対屈折率は1.443となり、空気中の n -トリデカン $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ の屈折率1.426にほぼ等しい。図2にガラス粒子の粒度分布(サンプル数600個)を示す。ザウタ平均粒径 D_{32} は $51.4\mu\text{m}$ である。このガラス粒子を、図3のような内側寸法厚さ 4mm 、幅 5mm 、高さ 75mm のガラス板と透明アクリル板で作られたセル内の水に懸濁させて試料とし、図に示すように直径 60mm の平行光を入射する。粒子群中の1個の粒子が全粒子から受ける電場の乱れの影響、つまり多重散乱の影響は、粒子群の大きさ、数密度、粒子1個当たりの減衰係数の3者の

図1 レーザ光減衰法によるディーゼル噴霧中心軸方向の濁度分布
(噴射条件: 噴口径 0.14mm 、平均噴射圧 22.8MPa 、噴射期間 3ms 、雰囲気密度 17.3kg/m^3)

図2 ガラス粒子の粒径分布

図3 水に懸濁したガラス粒子群の試料セル

積に比例するので⁽¹¹⁾、セルの大きさは通常のディーゼル噴霧に近い大きさとした。

図4に光学系を示す。光源には500 W クセノンランプを使用し、放電部の実像の位置に設けたφ2.0 mmのピンホールとレンズにより平行度0.0063°以下、光量ムラ10%以下の平行光を得た。この平行光中にガラス粒子懸濁液のセルを垂直に置く。

透過光はアクロマートレンズ1により集光され、焦点面に置いたアパーチャを通過する。 Q_{ext} は入射光と平行な成分の光の減衰について定義されているが、実際の光学系ではアパーチャは有限な大きさを持ち、またその大きさによって多重散乱の影響が異なることが予想されるので3種類の寸法のアパーチャを用意した。空気中での検出半角を θ_a 、アパーチャの半径を r 、レンズ1の焦点距離を f_1 とすると $\theta_a = r/f_1$ と表されるので、水中での検出半角 θ_w は水の屈折率を n_w として $\theta_w = r/(f_1 \cdot n_w)$ となる。使用したφ2.0, 9.0, 28.0 mmの各アパーチャに対する θ_w は各々0.10°, 0.50°, 1.44°である。アパーチャを通過した透過光と検出半角 θ_a 内の散乱光はアクロマートレンズ2により集光され、焦点面のピンホールを通過して光電子増倍管により検出される。ピンホールのサイズはφ0.18 mmであり、これは光軸上のφ0.25 mmの粒子群が視野であることを意味する。

ピンホールの直前に置いたガラスフィルタ（東芝：V-R 63, ハイパスカット波長≒630 nm）、クセノンランプ、光電子増倍管（東芝：PM 55）3者の分光特性を掛けあわせて、総合分光特性（波長域：610~790 nm）を求め、有効波長は678 nmと決定した。

実験に先立ち光検出系の直線性のチェックを行った。すなわち、光路中に透過率の異なるニュートラルデンシティフィルタをそう入することにより光検出系への入射光強度を変化させ、入射光強度と電気系出力の関係を調べた。この際、光電子増倍管の出力はローパスフィルタ（NF：E-3201）で数 Hz 以上の成分をカ

ットして平滑化したのち、感度を切り換えながらウェーブメモリ（NF：WM-840）にメモリし、X-Yレコーダに出力した。光電子増倍管の印加電圧900 Vにおいて、X-Yレコーダの出力電圧で0.001~2.0 Vの範囲で良好な直線性が得られた。

3.2 実験方法 約1 gのガラス粒子群の重さを精度0.1 mgで秤量し、これを水に加えて粒子濃度を变化させた。ガラス粒子が水に均一に混ざるように、セルの上側の出口を通して懸濁液をビーカーに導き、懸濁液をスターラでかくはんしながらビーカー内の小形ポンプでセル下側の入口へと圧送した。クセノンランプの光量が時間的に変動するので、ガラス粒子濃度を变えて測定を行うたびに入射光の強度を測定した。

4. 実験結果と考察

実験データの整理にあたっては、式(2)の右辺に相当する項を以下のように変形した。粒径分布がある場合、式(2)は一般的に次のように書ける。

$$\ln r = -\sum \left\{ R(\alpha_i, \theta) Q_{\text{ext}}(\alpha_i) \times \frac{\pi}{4} D_i^3 \Delta N_i l \right\} \dots (3)$$

ここで $\alpha_i = \pi D_i / \lambda$ で、 λ は波長、 $R(\alpha_i, \theta)$ は検出角が零でないための $Q_{\text{ext}}(\alpha_i)$ の修正係数で1~0.5の値、 l は光路長(=4.0 mm)である。図2の粒子群については α_i は240~370と大きな値をとるので $Q_{\text{ext}}(\alpha_i) = Q_{\text{ext}} = 2.0$ となり、また α_i の幅は先に述べたパラメータ θ の変化に対して小さいので、 $\bar{\alpha} = \pi D_{32} / \lambda$ として $R(\alpha_i, \theta) = R(\bar{\alpha}, \theta)$ と置いてよい。さらに c を粒子濃度、 ρ を粒子の密度とすると

$$c = \rho \sum \frac{\pi}{6} D_i^3 \Delta N_i$$

と書けるので、結局、式(3)は次のようになる。

$$\ln r = -R(\bar{\alpha}, \theta) Q_{\text{ext}} \frac{3}{2} \frac{c}{\rho} \frac{l}{D_{32}} \dots (4)$$

c は懸濁液中のガラス粒子の総質量を水の体積で除して与えた。ガラス粒子群の体積は水の体積に比べて最大でも2.5%であるので無視した。

図5に検出半角 θ_w をパラメータにとり、粒子濃度に対する透過率の変化を示す。横軸を約2倍した値が濁度に相当する。横軸には、粒子間隔 L と粒子直径 D_{32} の比も併記してある。図から、いずれの検出半角においても L/D_{32} の値が2.7の高粒子濃度の範囲まで $\ln r$ と粒子濃度の間には直線関係が保たれることがわかった。次に各 θ_w に対する直線のこう配を図から求めると表1のようになる。これらの値が式(4)の $R(\bar{\alpha}, \theta) Q_{\text{ext}}$ とどの程度一致するかについて検討する。ガラス粒子1個の散乱光強度分布をミーの散乱理論の

図4 光学系

表 1 $R(\bar{\alpha}\theta)Q_{\text{ext}}$ の理論値と実験値の比較

θ_w	$R(\bar{\alpha}\theta)Q_{\text{ext}}$ Experimental	$R(\bar{\alpha}\theta)Q_{\text{ext}}$ Theoretical
0.10°	1.83	1.92
0.50°	1.31	1.24
1.44°	1.19	1.09

図 5 ガラス粒子濃度と透過率の関係
(パラメータ：検出半角)

解を利用して計算すると図6のようになる。これからわかるように前方への散乱光強度が支配的であるため、 θ をわずかに大きくしただけでも $R(\bar{\alpha}\theta)$ は 1.0 より小さくなる。 $R(\bar{\alpha}\theta)$ は次のように表される⁽¹²⁾。

$$R(\bar{\alpha}\theta) = 1 - \frac{2}{Q_{\text{ext}}} \frac{1}{\bar{\alpha}^2} \int_0^\theta F(\psi) \sin \psi d\psi \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで ψ は散乱角度、 $F(\psi)$ は図6で示される散乱光強度分布である。式(5)により計算した理論値を表1の実測値と比較すると両者はほぼ±5%の精度で一致する。以上より、いずれの検出半角 θ_w においても $L/D_{32} \sim 3$ の濃度まで式(4)の関係が成り立つことが確認された。

ところで実験の際、粒子濃度を高くしてゆくとセルの中で光の入射しない領域の粒子群(図3参照)からも散乱光が観察され、現象的には多重散乱が生じていることは明らかであった。しかし上述のような結果が得られたのは、多重散乱光のうち入射光とほぼ平行な

図 6 ガラス粒子の散乱光強度分布
($\alpha=317$, $n=1.44$, $\lambda=510 \text{ nm}$)

成分の光の強度が透過光強度に比較して無視できるほど低かったためと解釈される。

5. ま と め

ディーゼル噴霧とほぼ同等の濁度(あるいは光学的厚さ)と寸法を有するガラス粒子群(ザウタ平均径 $51.4 \mu\text{m}$)と水の懸濁液に平行光線(波長 678 nm)を入射し、透過光減衰法に多重散乱の影響が現れるか否かについて実験的な検討を行った。その結果、検出半角が $0.10 \sim 1.44^\circ$ の範囲では、粒子間隔と粒子直径の比が 2.7 の高い粒子濃度まで透過光減衰法に及ぼす多重散乱の影響が無視できることが明らかとなった。また、見かけの減衰係数 $[=R(\bar{\alpha}\theta)Q_{\text{ext}}]$ の理論値と実測値は±5%の精度で一致した。

文 献

- (1) Swithenbank J., ほか 4 名, *AIAA Paper*, 76-69 (1976), 421.
- (2) 清水, 機論, 47-424, B (昭 56), 2369.
- (3) 石川・村上, 光学, 13-6 (昭 59), 497.
- (4) 竹内・ほか 3 名, 機論, 48-433, B (昭 57), 1801.
- (5) Kamimoto, T., ほか 4 名, *SAE Paper*, 840276 (1984).
- (6) Nakayama, M. and Araki, T., *Proc. Int. Symp. on COMODIA*, (1985), 131.
- (7) Shimizu, I. and Emori, Y., *Proc. Int. Symp. on COMODIA*, (1985), 125.
- (8) Dobbins, R. A., ほか 2 名, *AIAA J.*, 1-8 (1963), 1882.
- (9) Woodward, D. H., *J. Opt. Soc. Am.*, 54-11 (1964), 1325.
- (10) Bayvel, L. P. and Jones, A. R., *Electromagnetic Scattering and Its Applications*, Applied Science Publishers, (1981), 68.
- (11) 文献(10)の 70 ページ.
- (12) Gumprecht, R. O. and Sliepcevich, C. M., *J. of Phys. Chem.*, 57-1 (1953), 90.

討 論

〔質問〕 神 本 武 征〔広島大学工学部〕

粒子群の測定に透過光減衰法を適用する際に問題となる種々の基本的事項について新しい知見を与えられたことに対し敬意を表す。

(1) 数密度が時間的, 空間的に変動する恐れはないのか。

(2) 結論に述べておられる粒子間隔/粒子直径 ≥ 2.7 というのは粒子径が小さくあるいは大きくても成立するのか。

(3) 表1の計算値を得るのに用いられた Q_{ext} は2だろうか。

〔回答〕 (1) 図3に示す観測部($\phi 0.25$ mm)に

おいて数密度は時間的に若干変動するが, 光電子増倍管出力の数 Hz 以上の成分をローパスフィルタを用いて除去した。

(2) 本結論は本実験で行った $\alpha=317$ の場合についてのみ確認された結果である。散乱光強度分布が図6の分布($\alpha=317$)とあまり変わらないような α については図5の結果が成り立つと思うが, α が317と大きく異なるような粒子径の場合について本結論が成り立つかどうかは不明である。

(3) Q_{ext} の値は厳密には2.05だが表1の計算では2.0とした。