

ディーゼル噴霧粒子径の解析法とその応用

A Sizing Analysis On Atomized Diesel Sprays And Its Application

李 文哲, 鈴木 豊彦, 落合 義孝, 田邊 征一
 (Wenzhe LI)(Toyohiko SUZUKI)(Yoshitaka OCHIAI)(Seiichi TANABE)
 鳥取大(院) 鳥取大 鳥取大 鹿児島大
 (Tottori Univ.)(Tottori Univ.)(Tottori Univ.)(Kagoshima Univ.)

For the purpose of determining a diesel spray droplet size, a basic correlation between a droplet diameter and light attenuation was derived by using a low density spray of lacquer droplets and parallel light, which were, respectively, formed on a transparent picture film and produced by a dye-laser light system. The images of the droplets were taken on the film and afterwards digitized by a CCD camera and finally analyzed by a personal computer. By using this technique, diesel fuel droplet diameters in the region of the outer layer of the spray were determined under the various ambient gas pressures. The experimental results showed that the average diameter tends to increase with the increase in elapsing time after the injection and also increases further downstream the spray. It was also found that the larger droplets exist more frequently under the higher ambient pressure.

Key words: Diesel Engine, Fuel Injection, Diesel Spray, Droplet Diameter, Droplet Image, Image Analysis

1. まえがき

ディーゼル機関において噴射される燃料の微粒化特性は、機関内の混合気形成過程に影響する重要な特性である。このため、燃料噴霧の微粒化機構に関する研究がいくつか報告されている。近年、可視化技術の発達により影写真法などを利用して、特定の時間における液滴径の分布状態などを解明する^{(1)~(5)}試みがなされているものの、得られた写真の解析方法について検討した例が多いとは言えない。得られた写真を拡大して解析すると直接的、かつ容易に噴霧の粒度分布を求めることができるため期待が集まっている。特に、個々の液滴による光の減衰率から液滴径が求められれば有効性が極めて高い。

噴霧粒子の影写真撮影の場合、フィルム上に記録さ

れる各粒子像の写真濃度は回折のために粒径に依存して変化し、粒径が小さくなると、影写真の粒子像中心部濃度と背景の濃度の差は小さくなる。本報では、この現象に基づいて、粒子像と背景の濃度差とその粒子径との関係を実験的に解明し、粒子径の測定法を確立した。さらにこの方法で常温高压雰囲気下に噴射したディーゼル噴霧の粒径解析を試みた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 観察容器と噴射系

実験装置概略を図1に示す。噴霧を写真撮影するために使用した圧力容器は、内径が120mm、高さが270mmの円筒形である。雰囲気温度を室温とし、容器に窒素ガスを充填することにより常温高压(4.0MPa以下)雰囲気とした。容器の両側面には直径が共に50mmのレー

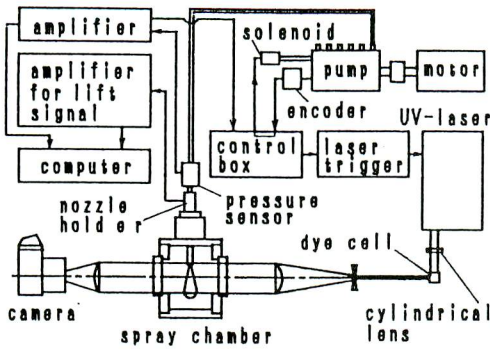


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

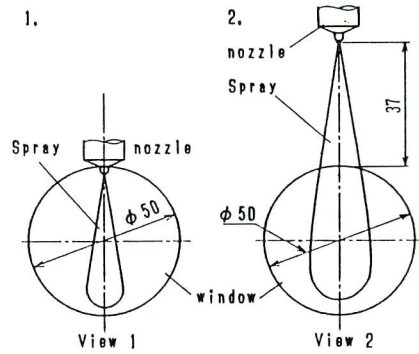


Fig.2 Schematic of nozzle arrangement

ザ光入射窓および観察窓を対面して固定した。容器上部には噴孔径が0.24mm、管長比が2.5の単孔ホールノズルを取り付けた。圧力容器に対するノズルの取り付け位置は図2に示すように選択可能となっている。ノズルを位置1に固定すると、噴射初期の噴霧全体、及び噴射中期以降の噴霧に対するノズル付近の撮影ができる。一方、ノズルを位置2に固定すると噴射中期の噴霧に対する噴霧先端部分の撮影ができる。この場合、ノズル先端から観察窓上端までの距離は37mmである。

燃料の軽油を圧送するための噴射ポンプにはボッシュ列型ポンプを使用し、モータにより600rpmで回転させた。コントロールボックスには1回噴射回路と、レーザー発光用のタイミング回路が内蔵されており、前者によって燃料を1回だけ噴射した。1回噴射回路に付属している手動スイッチをONにすると、噴射ポンプのカム軸に接続したロータリーエンコーダからの信号によって噴射ポンプのソレノイドが1度だけ作動し、容器内に燃料を1回だけ噴射する。レーザーの発光タイミングはノズル直前の管内圧センサからの管内圧信号により制御した。今回は軽油の噴射量を55mg、ノズルの開弁圧を24MPaとした。

一方、針弁のリフト量に応じた信号が針弁リフトセンサから発せられる。この針弁リフト信号と前述の管内圧信号をコンピュータで記録した。なお、予備実験として噴射管内圧力およびノズル針弁リフト量を測定したところ、例えば図3のような再現性のある信号を得ることができた。

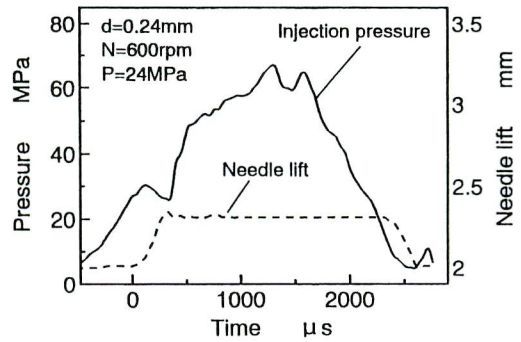


Fig.3 Injection pressure and needle lift

2.2 噴霧の撮影系

管内センサからの信号はコントロールボックスのレーザー発光用タイミング回路に送られる。あらかじめ設定した遅延時間を経た後にN₂レーザーへ信号が送られ、1回だけN₂レーザーが発光する。

使用したN₂レーザーは、波長が337.1nm(紫外光)、パルス時間幅が15nsのパルスレーザーである。N₂レーザーからのレーザービームをローダミン6Gの入ったダイセルに照射すると、波長が550nm(可視光)のレーザービームを得ることができる。このレーザービームを焦点距離がf=120mmの凹レンズとf=200mmの凸レンズによって平行光として容器内の噴霧に照射した。さらに、噴霧による透過光をf=170mmの凸レンズによって集光し、f=200mmのレンズが接続されている6×7判一眼レフカメラによって撮影し、ISO400のネガフィルム上に膜面倍率が1.32の噴霧の影写真を得た。

3. 微粒化の解析方法

3.1 解析系の概略

図4にネガフィルムの解析装置概略を示す。光源からの光をf=700mmの凸レンズによって平行光とし、ネガフィルムに照射した。ネガフィルムを透過した光をf=28mmのレンズと接写レンズの接続されたCCDカメラによって撮影することで、ネガフィルムの像を40倍に拡大した。なお、使用したCCDカメラの画素数は640×480画素である。また、CCDカメラの1画素は実寸の9μmに相当する。

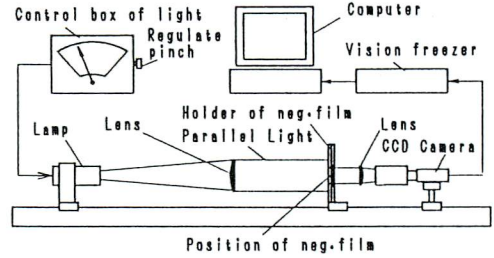


Fig.4 Analyzing apparatus for negative film

3.2 減衰率および粒子径の測定法

本解析方法を評価するために、透明なフィルムに固着したラッカ粒子を標準粒子として用いた。ラッカ粒子の一例を図5に示す。ラッカ粒子の直径Dは顕微鏡によって測定し粒子直径の標準とした。

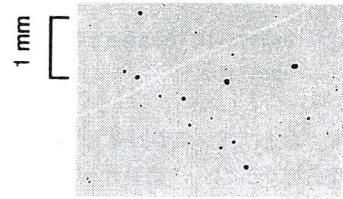


Fig.5 Lacquer droplets

一方、用いたラッカ粒子が固着されている透明フィルムを図1の撮影系における噴霧軸の位置に正確に固定するとともに、入射窓と観測窓をともに外して撮影し、得られたネガフィルムを図4の装置で解析した。図6に濃度レベルI_gを示す。ここで横軸はネガフィルム上における粒子像の中心画素を通る水平方向の位置Hを示している。図5のような透明フィルム上のラッカ粒子をネガフィルムに撮影して、このネガフィルムを図4で示したように光を照射したので、粒子像の部分は比較的光を透過しやすくなっている。よって粒子の部分における濃度レベルは大きく、ネガフィルムの背景における濃度レベルは小さくなる。図6の各曲線を模式的に描くと図7のようになる。ここで、I₀を背景の濃度レベル、Iを最大濃度レベルとして、ネガフィルムに平行光を照射したときの光の減衰率A_Tを次式のように定義する。

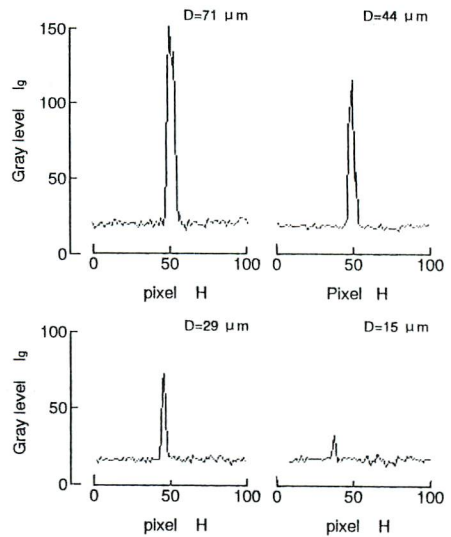


Fig.6 Gray levels of lacquer droplet

$$A_T = 1 - \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

A_Tは粒子像と背景とのコントラスト、つまりその両者の濃度差(I-I₀)を無次元化したものを示しており、A_T=0の場合は無減衰、A_Tは1に近づく場合は粒子による減光が大きくなることを示している。

図6では最大濃度レベルが粒子径とともに大きくなっており、減衰率も大きくなると考えられる。そこで個々の粒子に対する最大濃度レベルと背景の濃度レベルを式(1)に代入して、粒子の減衰率を求めると、図8のようになった。図から減衰率は液滴径の増加とと

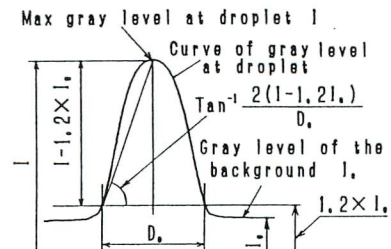


Fig.7 Schematic profile of gray level

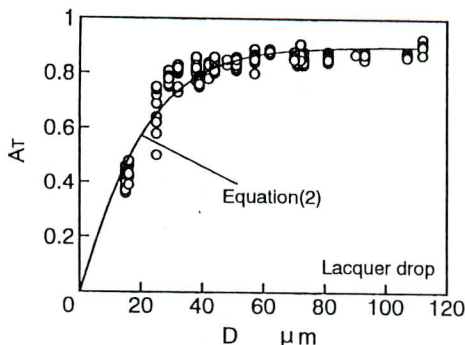


Fig. 8 Correlation of droplet diameter and attenuation of light intensity

もに大きくなっていることがわかる。そこで粒子径と減衰率との関係を次式のように仮定した。

$$A_T = 0.9 \left(1 - e^{-\left(\frac{D}{0.0606} \right)^{1.12}} \right) \quad (2)$$

ただし、Dの単位は μm である。式(2)は図8中の実線で示されており、測定結果とよく一致していることがわかる。この式を検証するために、 $15\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$ のガラスビーズ粒子による実験を行った結果、よい一致を示した。そこで、ラッカ粒子や後述するディーゼル噴霧のネガフィルムを解析して液滴径を求めるため、最大濃度レベルIと背景濃度レベルI₀を測定し、式(1)および式(2)を用いて液滴径Dを求めることとした。

3.3 粒子の焦点面からの位置が測定結果におよぼす影響

影写真撮影によって得たネガフィルムを画像処理するという方法で個々の粒子の粒径測定を行う場合、撮影系におけるカメラの被写体深度は重要となる⁽²⁾。例えば、噴霧液滴は3次元的に分布しているため、噴霧の中心軸をカメラの焦点面に一致させたとしても、焦点面から離れた位置に分布する粒子も存在することとなる。粒子が焦点面から大きく離れるとネガフィルムに撮影される粒子の像が明瞭でなくなる。このような粒子像を解析すると、たとえ同じ直径の粒子でも濃度レベルや減衰率が同一の値にならず、正しく粒子径を求めることが不可能になる。よってネガフィルムに撮影された液滴像の中で、焦点の合った液滴像を焦点の合っていない粒子像と区別する必要がある。そこで焦点面にある粒子と焦点面外の粒子とを識別する方法について検討することとした。

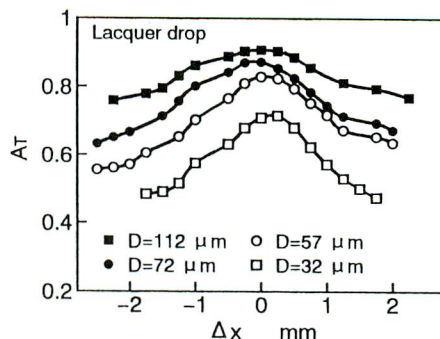


Fig. 9 Effect of depth of field on attenuation

ラッカ粒子を固着した透明フィルムを焦点面から光軸に沿って平行に移動させながら撮影し、得られたネガフィルムから粒子の減衰率をそれぞれ計算したところ図9となった。ここで横軸 Δx は焦点面から透明フィルムまでの距離であり、プラスは光源側、マイナスはカメラ側の位置を示している。この図を見ると焦点面からずれるにつれて減衰率が減少しており、焦点面において最大値となっていることがわかる。

また、焦点面近傍にある粒子径だけを求めるため、平均濃度こう配を粒子の最大濃度レベルIから背景濃度レベルまでの濃度こう配の平均値と定義して焦点に合った粒子と合っていない粒子を区別するのがよいと考えられる。しかし図6のように焦点が合った液滴の像を解析したとしても、背景における雑音や、撮影時および解析時の光の散乱の影響で、CCDカメラで取り込んだ粒子のデジタル画像には濃度分布の曲線にすそ野部分ができて、粒子像が明瞭でなくなる。そして、このすそ野両端間の距離は粒子径よりも一般に大きい。そこで、平均濃度こう配Gを次式のように定義した。

$$G = \frac{2(I - 1.4I_0)}{D_0} \quad (3)$$

$$D_0 = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここでAは噴霧粒子像の面積であり、濃度レベルが $1.4I_0$ 以上である画素の数を数えて求めた。このようにして得た粒子像面積を式(4)に代入して粒子の面積円相当径 D_0 を求め、式(3)に代入して平均濃度こう配を求めた。ただし、面積円相当径を解析の結果求めた粒子径としなかったのは、CCDカメラでコンピュータに

粒子像を入力するとき、回折光の影響でデジタル粒子像の面積円相当径が粒子の実寸法というより画素単位で大きくなり、特に粒子径の小さい粒子に対し、直接粒子像から精度よく求まらないためである。

つきに、濃度こう配の計算結果を図10に示す。黒丸は透明フィルムを焦点面に固定した場合($\Delta x = 0$)、白丸は透明フィルムが焦点面から離れている場合($\Delta x \neq 0$)の平均濃度こう配である。図からわかるように、焦点の合っている粒子と合っていない粒子との境界は明瞭になっている。しかも、この境界は粒子径に依存している。よって、粒子径に対する平均濃度こう配を次式のように仮定した。

$$G = 18.5(1 - e^{-0.0235D^{1.04}}) \quad (5)$$

式(5)の計算結果を図10の実線で示しており、この式によって粒子が焦点面にあるか焦点面外にあるかを識別できることがわかる。そこでディーゼル噴霧の液滴径を求める際にも、図10中の実線すなわち式(5)を濃度こう配の条件とし、それ以上の濃度こう配を持つ像のみを解析対象とした。

3.4 解析系が測定結果におよぼす影響

3.2節で述べたように、本解析では式(1)と式(2)とによって粒子径を求める。その場合、ネガフィルムを解析するときの背景濃度レベル I_0 が異なると最大濃度レベル I も違う値になり、同一のネガフィルム上の同じ粒子像を解析したとしても背景濃度レベルと最大濃度レベルの比が異なった値となって、同じ粒子径が得られなくなる恐れがある。そこで背景濃度レベルが最大濃度レベルにおよぼす影響を調べたところ図11のようになった。これらは、いずれも同一のネガフィルムから得たものである。この図からわかるように、直径 D が $42\mu\text{m}$ 以下の粒子、あるいは直径が $71\mu\text{m}$ 以上の粒子であって背景濃度レベルが20より小さいときには、最大濃度レベルは背景濃度レベルに比例して増大している。ところが、直径が $71\mu\text{m}$ 以上の粒子であって背景濃度レベルが20より大きくなると、最大濃度レベルの増加量が小さくなっている。そこで背景濃度レベルが20を越えないようにすることとした。

反対に背景濃度レベルを小さくすると、小さい粒子の検出ができなくなる恐れがある。そこで背景濃度レベルを小さくしていったときに得られるラッカ粒子の直径 D を図12に示すこととする。この結果は図11と同一のネガフィルムから得たものである。液滴径は背景濃度レベルの増加に伴って増大しているが、いずれの粒子とも背景濃度レベルが20の付近になると一定に近

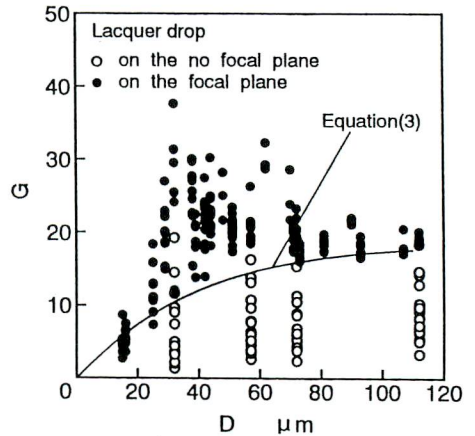


Fig.10 Limit of the range for measuring

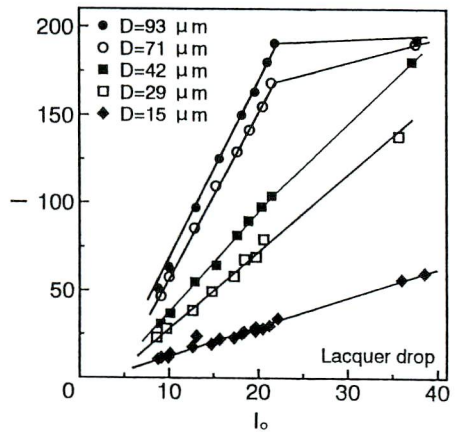


Fig.11 Correlation between max gray level and the background gray level

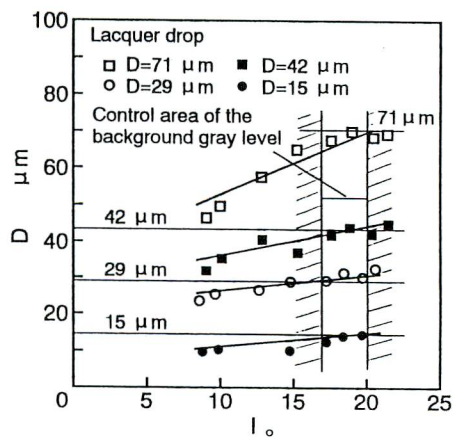


Fig.12 Effect of background gray level on drop diameter

くかつ顕微鏡で得た粒子径に近くなっている。よって図12中に実線で示す範囲、すなわち背景濃度レベルを17~20にするように解析装置の光源強度を調整すれば、粒子径を正しく求めることができる。

また、撮影系のN₂レーザのパルスごとの出力変動やフィルムの現像処理などの原因でネガフィルムごと、あるいは同じネガフィルムでも局所的に背景濃度が異なることが考えられる。そこで同一のラッカ粒子が固着されている透明フィルムから得た多数のネガフィルムに解析装置の光源の光量を一定として光を照射したときの、背景濃度レベルI₀および解析して求めた粒子径Dとの関係を調べたところ図13となった。図に示すように背景濃度レベルが粒子径におよぼす影響は顕著でないことがわかる。

顕微鏡によって測定したラッカ粒子の直径と本解析法によって求めた粒子径を比較すると図14のようになった。測定対象とした粒子径15μm~72μmのラッカ粒子について、解析結果と顕微鏡で測定した結果との残差は、図14に示しているように粒子径によって異なるが、92%の粒子の残差の相対値が15%以下であり、測定対象となった粒子全体に対する残差相対値の平均値は10.3%であった。したがって、本方法による粒子径の測定は供試粒子径の範囲、つまり15μm~72μmの範囲で、上述の精度で可能であることがわかる。

3.5 本解析法の評価

最後にディーゼル噴霧に対して本解析方法を適用したときの評価を行なった。圧力容器内でディーゼル噴霧を噴射した場合、前述したようにレンズおよび窓ガラスの汚れなどの原因で、ネガフィルム面にノイズが生じるため、このノイズを除去するためにしきい値を設定して、粒子像とノイズを区別した。しきい値を設定するために多数のネガフィルムのノイズレベルの大きさを調べたところ、背景濃度レベルの1.1~1.35倍程度以下であった。そこで、しきい値を背景濃度レベルの1.4倍に設定した。

式(2)はラッカ噴霧の粒子によって導かれたものであるので、実際の噴霧粒子径を解析するときにも適用できるかを検討する必要がある。そこで噴霧を撮影して図16や図17の写真に対応したネガフィルムを作り、噴霧周辺の液滴密度が小さい部分を対象に本解析法の検定を行った。その結果を図15に示す。ただし、基準とした液滴径は、ネガフィルムに撮影された液滴像を顕微鏡で測定したものである。図からわかるように、解析結果は、ネガフィルムに写った液滴径に比較的近

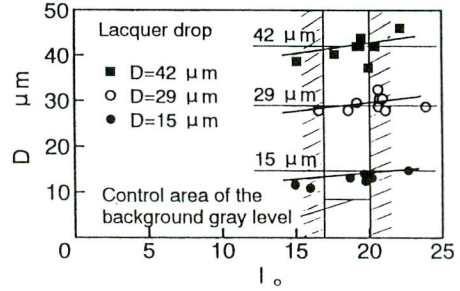


Fig. 13 Dependence of attenuation on background gray level of film

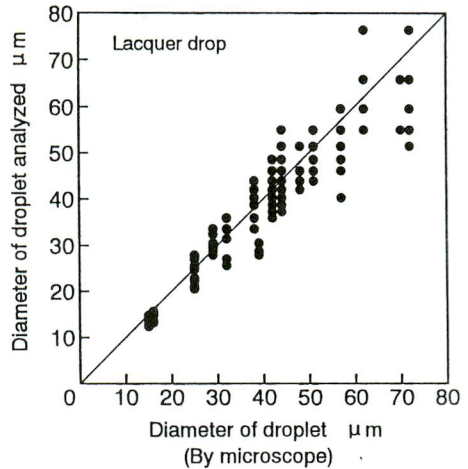


Fig. 14 Measuring error in diameter caused by attenuation instability

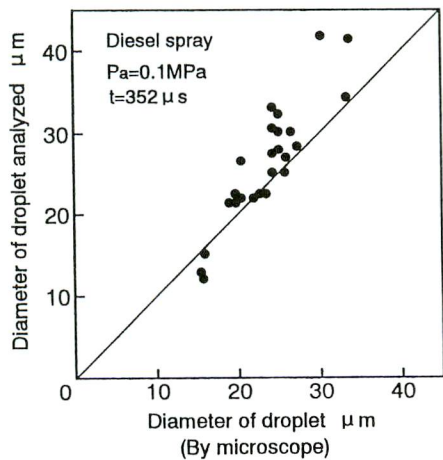


Fig. 15 Aberration of the measure

い値となっている。なお、検定対象とした粒子径 $12\sim 42\mu\text{m}$ のディーゼル噴霧粒子について、顕微鏡で測定した結果との残差の相対値が $3\sim 29\%$ となり、 20% 以下の残差相対値を持つ粒子は 76% であり、検定対象の液滴全体に対する残差相対値を平均すれば 14% となった。

また、本計測法はデジタル画像中心部の最大濃度レベルと背景濃度レベルの差に基づいたものである。ネガに写った粒子像をデジタル化するときの回折光の影響を無視でき、かつしきい値の大きさと計測結果の粒子径との関係がないので、背景濃度の不均一の影響は小さくなる。なお、粒子像の最大濃度レベルを読み取ることは容易であるため、処理の手順を大幅に短縮出来、大量にデータを処理するのに有利である。

4. 噴霧粒子径の解析

雰囲気圧力が、噴射初期における噴霧形状におよぼす影響を図16(視野1における撮影結果)に示す。雰囲気圧力 P_a が 2.0MPa および 4.0MPa の高圧雰囲気中での噴霧は噴射開始から同一時刻 $t=486\mu\text{s}$ における写真である。また比較のために常圧雰囲気下における噴霧も示した。ただし、高圧雰囲気中における両噴霧と到達距離がほぼ等しいものを選択した。 $P_a=0.1\text{MPa}$ の場合、ノズルからの距離が約 20mm より下流において、大きな塊(液滴の数密度の高い部分、例えば図16の P_1, P_2)が比較的明瞭に見えており、噴射方向に伸びていることがわかる。これらの塊と塊の間にも粒子群が低数密度で存在している。それに対し、 $P_a=2.0\text{MPa}$ および 4.0MPa の場合には、噴霧周辺にはともに空気の巻き込み

により生じた渦状あるいは枝状の突起(例えば図16の P_3, P_4, P_5, P_6)が見えている。

雰囲気圧力が発達した噴霧の下流部の形状におよぼす影響を図17(視野2における撮影結果)に示す。図16の場合と同様に、高圧雰囲気下での噴霧はともに噴射中期($t=1120\mu\text{s}$)の写真であり、比較のために示した常圧雰囲気下での噴霧は高圧雰囲気下における両噴霧と到達距離がほぼ等しいものである。 $P_a=0.1\text{MPa}$ の場合、図16の場合と同様に塊(例えば図17の P_7, P_8)が液体の噴射方向に伸びている。このような塊と塊の間には粒子群が低数密度で存在している。一方、 $P_a=2.0\text{MPa}$ および $P_a=4.0\text{MPa}$ の場合は図16同様に、噴霧周囲の液滴の数密度の大きい枝状の突起は空気を巻き込む

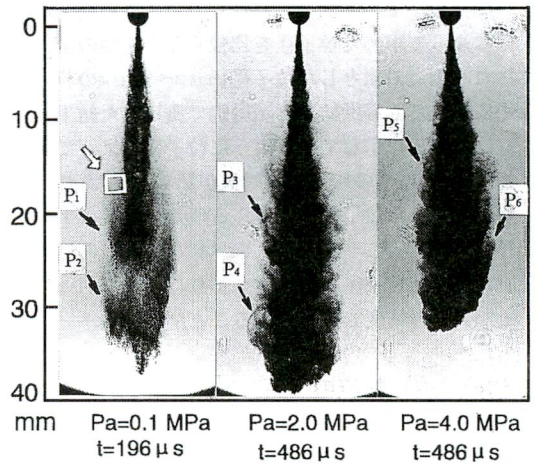


Fig. 16 Diesel spray (View 1)

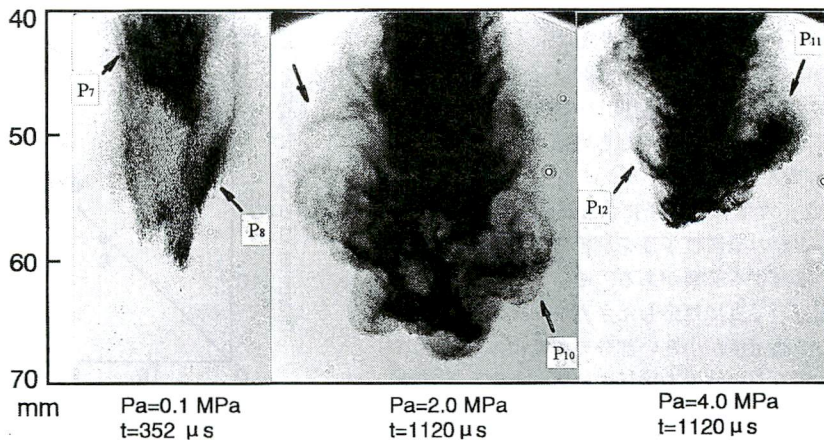


Fig. 17 The leading tips of diesel sprays (View 2)

ような形状 (例えば図17のP₉, P₁₀, P₁₁, P₁₂)となっている。このような枝状突起はP_a=2.0MPaの場合の方がP_a=4.0MPaの場合に比べて大きくなっていることがわかる。

つぎに、噴霧周辺部を画像解析して液滴径を求めた。例えば、図16の白い矢印で指示しているような部分であり、この部分を拡大すると図18となる。この図からわかるように、噴霧の周辺にも極めて多数の燃料液滴が存在してはいるものの、個々の液滴を認識でき、解析が可能である。まず図16のような噴霧に対し、それぞれノズルから約10mmのところから約30mmまでの間の噴霧側部周辺を測定範囲として、計測サンプル数を470~1200について計測を行った。図19に求めた粒径頻度qを示す。初期の噴霧の場合、周辺において直径Dが約10~20μmの液滴が多く存在している。P_a=4.0MPaの場合には、P_a=0.1MPa及び2.0MPaの場合よりも大きい液滴が少なく、小さい液滴が多いというものの、顕著な差ではない。

さらに、図17の視野2で撮影した噴霧の先端部を除いて、噴霧下流の側部周辺における計測できる粒子をそれぞれ1200~4000個サンプルして解析すると図20となった。噴射初期に比べて発達した噴霧の下流部において直径の大きい粒子が多くなり、分布も広がっている。この理由はつぎのように考えられる。噴射初期に形成された液滴のうち小さい液滴は直ちに減速するとともに噴霧の中心軸付近から噴霧の側方に追いやられやすい。一方、初期に形成された大きい液滴は減速量が小さいため噴霧下流に達しやすい。このような液滴が後続の液滴との衝突して液滴径が大きくなったものと思われる。

図19の説明で述べたように雰囲気圧力が噴射初期における液滴径におよぼす影響は顕著でなかった。しかし図20の場合には雰囲気圧力が増加すると大きい液滴の数が増加している。これは、広安ら⁽⁶⁾が指摘しているように雰囲気圧力が大きくなると、雰囲気気密度、粘度が大きくなるために噴霧の到達距離の増加割合が減少して、液滴の衝突頻度が増えることで液滴同士が合体した結果、粒子径が大きくなったと考えられる。

5. まとめ

影写真撮影した噴霧のネガフィルムを画像解析して粒子径を測定するという方法を開発した。本方法は粒子径がネガフィルム上の粒子像の光減衰量に対応していることを利用した粒子径の測定法であり、ネガフィルムを解析用光学系により解析して粒子径を求めた。まず、この方法を検定し、つぎの結論を得た。

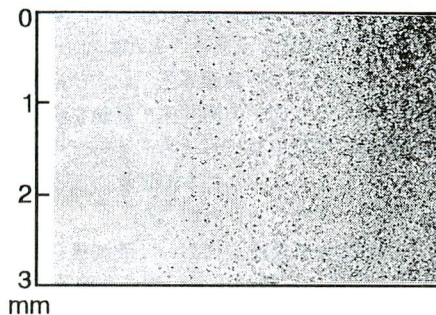


Fig. 18 The enlarged picture of the part shown by an arrow of Fig. 16

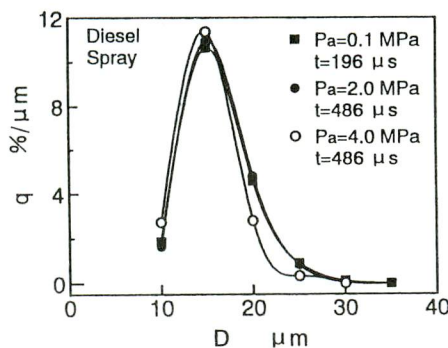


Fig. 19 Number frequency of droplet diameter

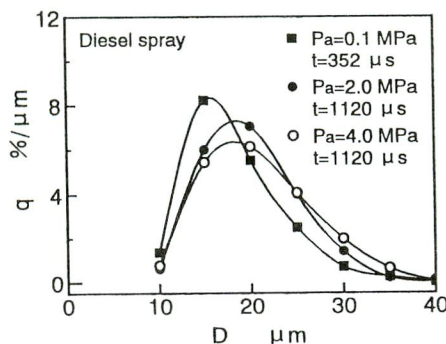


Fig. 20 Number frequency of droplet diameter

(1) 透明なフィルムに固着したラッカ粒子を標準粒子として、ネガフィルムに撮影し、このネガフィルムを解析した。この際、本方法で測定結果に影響する、撮影系の被写体深度、解析の際に用いる光源からの光の強度、ネガフィルムの現像による影響について検討した。すると、顕微鏡から求めた粒径に対して10%の平均誤差で粒子径が測定できることがわかった

(2) 圧力容器中の噴霧液滴を撮影して得たネガフィルムを解析して求めた液滴径と、顕微鏡を用いてネガ

フィルムから測定した液滴径を比較した。すると、14%の平均誤差で液滴径が求まることがわかった。

つぎに、4.0MPa以下の常温高圧、および常温常圧の窒素雰囲気に対して同一の開弁圧で軽油を噴射したときの噴射初期、噴射中期におけるディーゼル噴霧の影写真のネガフィルムに対して本測定法による解析を試みたところ、つぎのことがわかった。

(3) 噴射初期の噴霧周辺において液滴径を測定すると10~20 μ m程度の比較的小さい液滴が多く存在していることがわかった。それに対して発達した噴霧下流の周辺における液滴径を測定したところ、直径の大きい液滴が多くなり、粒数頻度の分布幅も大きくなった。

(4) 噴射初期では雰囲気圧力による粒度分布の差は顕著でなかった。それに対して噴射中期になり噴霧が発達すると、雰囲気圧力の増加とともに直径の小さい粒子の割合が減少し、直径の大きい粒子が多くなった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、御協力頂きました本学学生 柘山博章氏（現近畿工業）と佐伯文浩氏に感謝の意を表します。加えて、本原稿の作成にあたり、貴重な御意見・御助言を戴いた鳥取大学工学部小田哲也講師に心より謝意を表します。

文 献

- (1) 石山拓二, 三輪恵, 鴨川正博, 劉育民, 宮城勢治 : ナノスパーク光源によるディーゼル噴霧の微細構造の観察, 日本機械学会論文集, 60-570B(1994), 715-721.
- (2) 竹内貴一郎, 吉原福全, 千田二郎, 齊藤栄 : ディーゼル機関燃焼室内の噴霧液滴の挙動について, 内燃機関, 18-220(1979), 9-19.
- (3) 竹内貴一郎, 村山博美, 千田二郎, 山田耕司 : 高圧容器内のディーゼル噴霧の粒度分布について, 日本機械学会論文集, 48-433B(1982), 1801-1810.
- (4) 劉育民, 石山拓二, 三輪恵 : ディーゼル噴霧における初期燃料液滴の形成に関する研究, 日本機械学会論文集, 61-587B(1995), 2731-2737.
- (5) 石川直也, 新村恵一 : LIFを用いたディーゼル噴霧粒子の粒径計測, 第4回微粒化シンポジウム講演論文集, (1995), 196-201.
- (6) 広安博之, 角田敏一 : ディーゼル機関の燃料噴霧の粒度分布, 日本機械学会論文集, 42-353B(1976), 290-298.



李 文哲

鳥取大学・大学院・工学研究科
情報生産工学専攻

動力工学研究室

〒680 鳥取市湖山町南4-101

Tel 0857-31-5203

略歴：現在、鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程に在学。ディーゼル噴霧に関する研究に従事。



鈴木 豊彦

鳥取大学・工学部・教授

〒680 鳥取市湖山町南4-101

Tel/Fax 0857-31-5202

略歴：1964年名大航空学科卒、1972年ニューヨーク大学大学院博士課程修了、液滴燃料噴霧の群燃焼に関する研究、往復動機関のピストンスラップに関する研究、乱流せん断流の研究に従事。



落合 義孝

鳥取大学・工学部・機械工学科
助手

〒680 鳥取市湖山町南4-101

Tel 0857-31-5203

略歴：1967年大阪工業大学卒
鳥取大学助手
往復動機関のピストンスラップ・潤滑に関する研究に従事。



田辺 征一

鹿児島大学・教育学部・技術科
教授

〒890 鹿児島市郡元1-20-6

Tel/Fax 099-285-7870

略歴：1964年立命館大学理工学部卒業、京都大学工学部・助手
鳥取大学工学部・助教授、エンジンシリング内ガス流動、熱・流体の計測に関する研究に従事。