

研究論文

高解像度撮影法によるディーゼル噴霧構造の可視化

Visualization of Diesel Spray by Using Direct Photography with High Spatial Resolution

鎌田 修次, 勝田 圭一, 堀 司, 千田 二郎, 藤本 元
 (Shuji KAMATA) (Keiichi KATSUTA) (Tsukasa HORI) (Jiro SENDA) (Hajime FUJIMOTO)
 同志社大学大学院 同志社大学大学院 同志社大学大学院 同志社大学 同志社大学
 (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.)

The objective of this work is to clarify the micro structure of the diesel spray. This paper describes measuring system of the whole region of the diesel spray with high spatial resolution by using a novel photographing system. The photographing system is composed of a specialized lens system and a large sized film. The diesel spray in constant volume vessel was examined with transmitted light photography. Light source is the second harmonic of 532 nm of an Nd:YAG laser. The speckle reduction device was applied to the optical setup for relaxation of coherence of the laser to restrain the speckle. To obtain the spatial spray characteristics, an image analysis method was developed to evaluate the droplet size and its location within depth of field. By measuring the spatial distribution of droplets in the whole spray region, the validity of this photography for droplet size measurement was investigated, and the micro structure of the diesel spray was visualized. The results showed that the system constructed in this study was effective to clarify the spatial distribution of fuel droplet in the whole spray region and the dispersion state of fuel droplets in large-scale vortex.

Keywords: Diesel Spray, Atomization, Flow Visualization, Droplet, Direct Photography

1. はじめに

ディーゼル機関は噴霧拡散燃焼を主体とする燃焼形態をとるため、NO_x や PM 等の有害物質の生成に、燃料噴霧の微粒化や噴霧内の燃料濃度の不均一分布などの噴霧構造が大きな影響を及ぼす。そのため、有害物質の低減を進める上で、燃料噴霧構造の形成機構を明らかにすることが重要となる。一方、ディーゼル噴霧の形成機構は、噴霧内に存在する大小様々なスケールの乱れ渦に、燃料液滴がそれぞれの粒径に応じて分散することに起因する^{(1)・(2)}と考えられる。したがって、ディーゼル噴霧の形成機構を把握するためには、噴霧全体における液滴の挙動を捉える必要がある。

一般に噴霧液滴の粒径・速度計測に用いられる位相ドップラ流速計(PDA: Phase Doppler Anemometry)は、液滴の粒径・速度を高時間分解能で同時計測が可能であり、流動場の乱れスケールなどが測定できる⁽³⁾。その反面、点計測であるがゆえに、PDA は時間平均データしか得られず、噴霧構造全体を空間的に理解することが困難である。これに対し面計測手法である直接撮影法^{(4)・(5)}では、拡大撮影により個々の液滴の位置・粒径を得られるため、液滴スケールで噴霧構造を把握することができる。しかしながら、ペロズ付き CCD カメラや長距離顕微鏡等を用いた既存の撮影系では、受光面積が小さいことから、噴霧全域を捉える際に液滴を認識するほどの解像度を維持することができない。

そこで本研究では、噴霧全域を液滴スケールの解像度で捉えるため、自作の特殊レンズ系と大判フィルムを用いた高解像度撮影法を提案する。実験は、定容容器内に形成されたディーゼル噴霧に透過光撮影を適用した。その際、背景照明に用いる光源を干渉性の影響を考慮して選定し、撮影画像から液滴の位置と粒径を算出する画像解析法を構築した。得られた解析結果を基に、噴霧全域における液滴の空間分布を測定することで、粒径計測に対する本撮影法の適用性を検討し、ディーゼル噴霧の構造について考察を行った。

2. 実験装置および条件

実験には、静止雰囲気における噴霧現象を調べるため、定容容器を使用した。図1に定容容器の概略を示す。容器内の空間は内径φ205 mm、高さ180 mmの円筒形状であり、観察領域において容器壁面と噴霧との干渉はない。容器内の圧力測定にはブルドン管圧力計(圧力範囲: 6 MPa)を用い、窒素を所定の圧力まで充填した時点で容器上部のインジェクタから燃料を単発噴射した。また、燃料噴射装置にはコモンレール式燃料噴射装置(DENSO: ECDU-2)を用いた。

実験条件を表1に示す。供試燃料にn-トリデカンを用い、雰囲気温度および密度は、それぞれ室温、 $\rho_a = 17.3 \text{ kg/m}^3$ とした。燃料噴射ノズルには単孔ホールノズル(噴孔径: $d_n = 0.20 \text{ mm}$ 、噴孔長さ: $L_n = 0.80 \text{ mm}$)を使用した。噴射圧力は $P_{inj} = 55, 77, 99 \text{ MPa}$ の3条件とし、噴射量が $Q_{inj} = 12 \text{ mg}$ となるように各噴射圧力において噴射期間を調節した。また、撮影時期は噴射

開始からの時間 t を噴射期間 t_{inj} で正規化した時間 $t/t_{inj} = 1.0$, すなわち、噴射終了時とした。受光面上における撮影倍率は $M = 2.7\text{-}3.0$ 倍とした。

3. 特殊レンズ系を用いた高解像度撮影法

本研究では、8×10 判大判フィルム(Kodak: TMAX100, 線解像度: 63 本/mm, 縦×横: 202×254 mm)上に特殊レンズ系により拡大した噴霧像を結像させる撮影法を構築した。受光面積の大きなフィルムを用いることで、1 枚の受光面に噴霧全体を収めつつ、液滴スケールの解像度を保持することができる。以下に、撮影法の概要を記す。

3.1 特殊レンズ系

噴霧の拡大撮影に用いられるカセグレン光学系は 10 倍以上の高倍率での撮影に適するが、広視野の確保が困難である。そのため、カセグレン光学系に比べ視野の確保が容易な屈折式光学系の拡大原理を応用し、大口径レンズ系を作製した。図 2(a) に特殊レンズ系の概略、(b) に近軸レンズ公式に基づく拡大原理を示す。特殊レンズ系は 2 群の対物レンズ($\phi 150$ mm, $f = 975$ mm), 虹彩絞り($\phi 13\text{-}90$ mm)および凹レンズ群から構成される。図 2(b)に示すように、対物レンズにより形成される実像を、その像よりも前方に位置する凹レンズにより拡大し、凹レンズ後方 L_c に結像する。拡大レンズに凹レンズを用いることで、撮影系内での結像回数が 1 回となるため、空間分解能の低下を防ぐことができる。

本レンズ系には、色収差の対策として対物レンズにアクロマートレンズを使用している。その対物レンズは大口径かつ長焦点距離であるため、レンズの曲率が低く、球面収差の影響を受けにくい。また、レンズ系内で光が虹彩絞りを通することにより、収差の影響が大きいレンズ端を通る光が除去される。

なお、本レンズ系は各レンズと受光面間の距離を変えることで、倍率を 5 倍まで設定することが可能であり、 $10\ \mu\text{m}$ の空間分解能および 1000 mm の作動距離を有する。レンズ系の被写界深度(DOF: Depth of Field)は、以下の式から算出した⁶⁾。

$$DOF = \frac{sf^2}{f^2 - \delta Fs} - \frac{sf^2}{f^2 + \delta Fs} \quad (1)$$

ここで、 f : レンズの焦点距離、 s : レンズと被写体間の距離、 δ : 許容錯乱円である。 F 値はレンズが形成する像の明るさを表し、レンズの有効径 d_l を用いて $F = f/d_l$ と与えられる。本

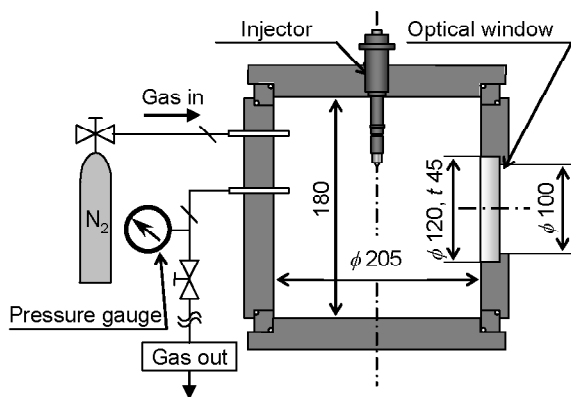


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

実験では、レンズへの入射光の直径が $\phi 100$ mm であることから $F = 9.75$ となり、 $f = 975$ mm, $\delta = 10\ \mu\text{m}$, $s = 1000$ mm とすると、レンズ系の被写界深度は $DOF = 205\ \mu\text{m}$ となる。

3.2 撮影光学系および方法

噴霧液滴の空間分布を把握するため、背景照明に Nd:YAG レーザの第 2 高調波(Spectra Physics: PIV400, 波長: 532 nm, 発光半値幅: 8 ns/pulse)を用いて、非蒸発噴霧の透過光撮影を行った。レーザ光のような干渉性の高い光を噴霧撮影に適用すると、スペックル模様と呼ばれる白黒の斑点模様が撮影画像に写り、スペックルと液滴像を区別することが困難となる。そこで、スペックル低減装置(ナノフォトン: SK-11)⁸⁾を撮影光学系に適用し、スペックルの抑制を図った。この装置内には、全長の異なる多数のファイバが設置されており、レーザ光が各ファイバを通過することで低干渉性の光となる。これらの光が形成する互いに異なるスペックル模様を平均化することによって、スペックルを低減している。

図 3 に撮影光学系の概略を示す。発振されたレーザ光はピンホールを介して、スペックル低減装置へ入射される。スペックル低減装置を通過した光は、3 枚の凸レンズ($f = 50, 100, 1100$ mm)により、 $\phi 100$ mm の平行光(平行度: 0.17 度)となる。定容容器内に形成された噴霧を透過した光は、特殊レンズ系に捉えられ、大判フィルム上に結像される。

Table 1 Experimental conditions

Fuel	n-tridecane			
Ambient gas	N ₂			
Ambient temperature	T_a [K]	room temperature		
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	17.3		
Ambient pressure	P_a [MPa]	1.50		
Injection pressure	P_{inj} [MPa]	55	77	99
Injection duration	t_{inj} [ms]	1.68	1.42	1.25
Injection quantity	Q_{inj} [mg]	12.0		
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	0.20		
Nozzle hole length	l_n [mm]	0.80		

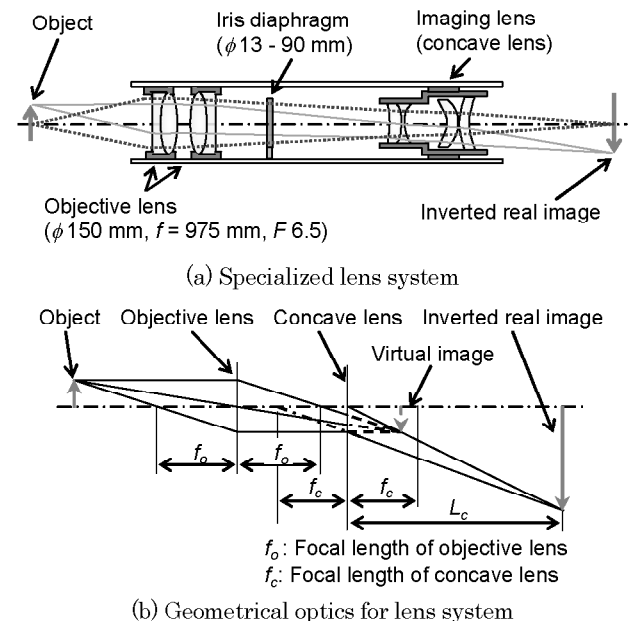


Fig.2 Schematic diagram of specialized lens system

3.3 本撮影法の検討

本節では、干渉性の異なる2種類の光源を用い、撮影画像に現れるスペックルの影響を調べ、本撮影法で得られる撮影画像について考察する。

2種類の光源から得られた、 $P_{mj} = 55 \text{ MPa}$, $M = 2.7$ における噴霧全体画像および噴霧先端の拡大画像を図4に示す。図4(a)と(i)はレーザー光を直接照射した場合(高干渉性の光)、(b)と(ii)はスペックル低減装置を適用した場合(低干渉性の光)の結果である。図4(a), (b)の噴霧全体像をみると、噴霧中流域(噴霧軸方向距離 $Z = 30\text{-}60 \text{ mm}$)においてAzetsu⁽⁹⁾らの提唱した枝上構造が存在し、噴霧下流域($Z > 60 \text{ mm}$)の液滴数密度の希薄な領域において大規模な渦構造が観察されるなど、レーザーシートによる散乱光撮影画像と似た様子が確認できる。これはレンズ系の被写界深度が $DOF = 205 \text{ }\mu\text{m}$ であることから、レーザーシート撮影のシート厚さ($200 \text{ }\mu\text{m}$)⁽⁹⁾程度の領域を捉えたためと考えられる。

次に、噴霧先端の拡大画像をみると、図4(i)では、光の干渉の影響によりスペックルが撮影画像に顕著に現れ、液滴とスペックルの区別が困難であることがわかる。これに対し図4(ii)では、光の干渉性が低下するため、スペックルの発生が抑制され、個々の液滴を認識することができる。

以上の結果を踏まえると、本撮影法の特徴は、液滴数密度の低い噴霧先端および外縁部で噴霧の断面情報を得られることである。さらに、背景照明に干渉性の低いレーザー光を使用することにより、液滴数密度の低い領域において液滴の認識が可能となる。

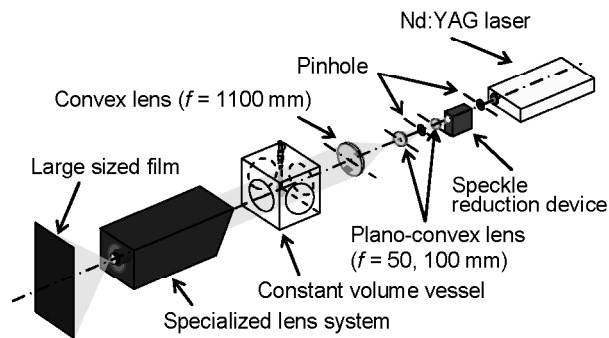


Fig.3 Optical setup for transmitted light photography

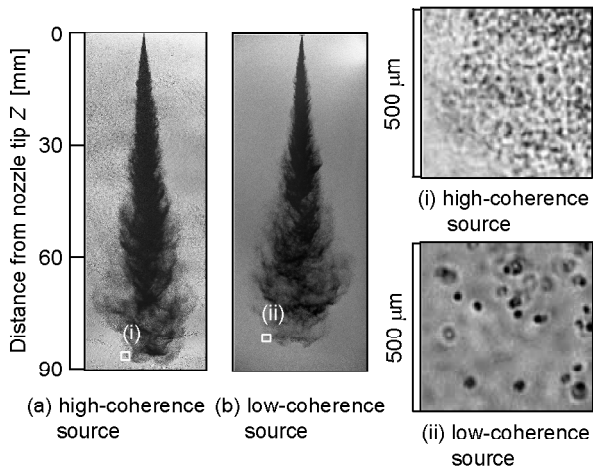


Fig.4 Spray images taken by transmitted light photography

4. 画像解析方法

4.1 解析法の概略

ディーゼル噴霧の空間特性を把握するため、劉らの液滴画像解析法⁽¹⁰⁾を基に、液滴の位置と粒径を算出する画像解析法を構築した。液滴の評価項目には、液滴の位置、粒径および形状の複雑さを表す指標として、液滴像のノズル中心からのXY重心座標、円相当径 D および相対分散度 L/L_0 をそれぞれ採用した。以下に、 D , L/L_0 の算出式を示す。

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{S^2 / A}{4\pi} \quad (3)$$

ここで、 A : 粒子像の面積, S : 周囲長, L : 分散度, L_0 : 真円の分散度である。液滴は $L/L_0 = 1$ であれば真円, L/L_0 が大きくなるにつれ細長い、または凹凸を有する形状となる。本報では、撮影画像と解析結果の比較から、 $L/L_0 \geq 1.5$ の粒子像は液滴数密度の高い領域を検出したものとみなし、計測から除外した。

図5に画像処理アルゴリズムのフローチャートを示す。フィルムスキャナ(EPSON: GT-X800)を用い、画素サイズを実寸で $2.65 \text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$ とし、大判フィルムから噴霧像をPCに取り込んだ。二値化により検出された液滴像に番号を付け識別した後、個々の液滴像の面積や周囲長などの特徴量を算出した。次節に記す被写界深度内外における液滴の判別や空間分解能を考慮した補正を行い、液滴情報を出力した。

4.2 被写界深度内外に位置する液滴の判別

背景照明による噴霧画像から粒径計測を行う場合、被写界深度外にある液滴は撮影画像がぼけるため、正確な粒径を求めることが困難である。劉ら⁽¹⁰⁾は液滴像内部から外部にかけての輝

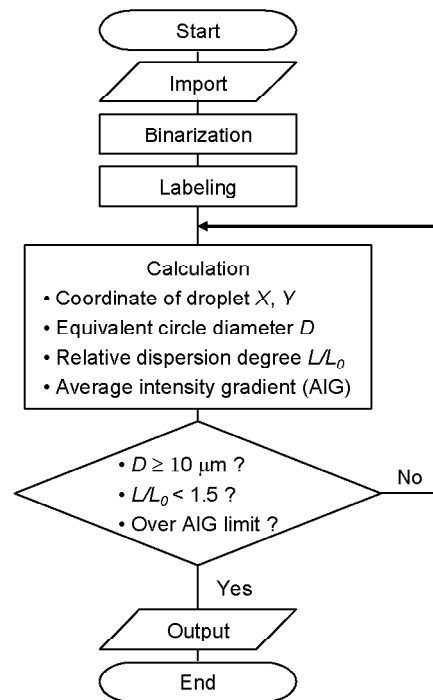


Fig.5 Flowchart of image processing algorithm

度勾配の最大値を用い、解析処理領域を限定することで、被写界深度内外に位置する液滴を判別できることを示した。本研究では、背景ノイズの影響を考慮し、液滴像外縁に沿って輝度勾配を空間的に積分した平均輝度勾配(AIG: Average intensity gradient)を用いて被写体深度内の液滴を判別した。

図6に、粒径の異なる透明なガラスビーズ(日本粉体工業技術協会, 粒径: 20, 40, 60, 100 μm)から得られた粒子像の平均輝度勾配と焦点面からの距離の関係を示す。焦点面から離れるほど、また、粒径が小さいほど、平均輝度勾配が低下するため、粒径ごとにしきい値を決めることで測定領域を制限できる。本報では、レンズ系の被写界深度が 205 μm 程度であることから、焦点面から±100 μm の範囲を画像解析の処理領域と定めた。

図7に処理領域における平均輝度勾配の最小値と粒径の関係を示す。図中の破線はレンズ系の空間分解能限界である $D=10 \mu\text{m}$ を表し、図6より求めた処理領域内の最小平均輝度勾配をプロットした。実線は最小二乗法より求めた近似直線であり、

$$AIG = 0.1444D + 11.21 \quad (4)$$

で与えられる。本解析法では、液滴像外延の平均輝度勾配が図中の網掛けの領域に達した液滴のみが解析の対象となる。

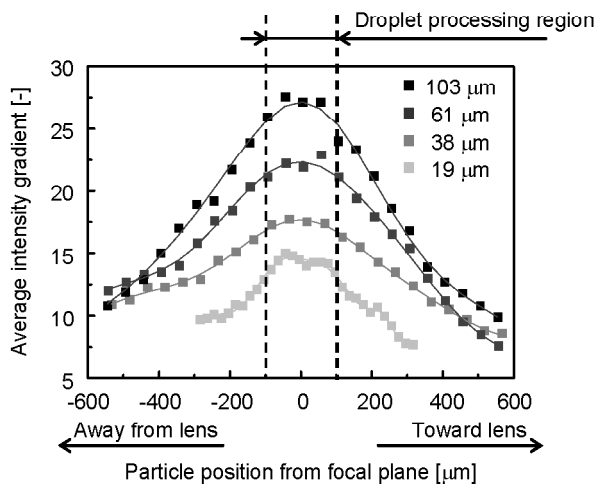


Fig.6 Correlation between average intensity gradient and particle position from focal plane

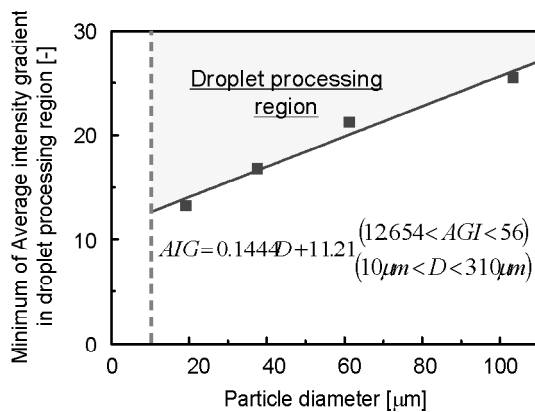


Fig.7 Droplet processing region for analysis

5. 実験結果および考察

本実験では、ディーゼル噴霧の微細構造を把握するため、燃料噴霧の微粒化特性に影響を与える噴射圧力を実験パラメータにとり、定容容器内における非蒸発ディーゼル噴霧の透過光撮影を行った。得られた撮影結果をもとに、記述した液滴画像解析法を用いて噴霧全域における液滴の位置と粒径情報を調べた。ただし、以下の結果は、図8に示すように液滴数密度の低い噴霧先端部と外縁部における液滴から得られたものである。

5.1 噴霧先端および外縁の粒数頻度とザウタ平均粒径

図9に $M=3.0$, $t/t_{inj}=1.0$, $P_{inj}=55, 77, 99 \text{ MPa}$ における噴霧全域の粒数頻度分布 Dn/n_s および総粒子数 n_s を示す。これらの結果は各噴射圧力条件において5枚の噴霧画像から集計したものであり、粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上の液滴を計測対象としている。図9より、 $10 \mu\text{m}$ 程度の液滴の頻度が噴射圧力の増加に伴い上昇し、 $20 \mu\text{m}$ 以上の液滴の頻度が低下することがわかる。これは、噴射圧力が増加するにつれて大粒径の液滴の微粒化が促進されるためと考えられる。

図10に各噴射圧力における噴霧先端および外縁部のザウタ平均粒径(SMD: Sauter Mean Diameter)を示す。SMDは以下の式を用いて算出した。

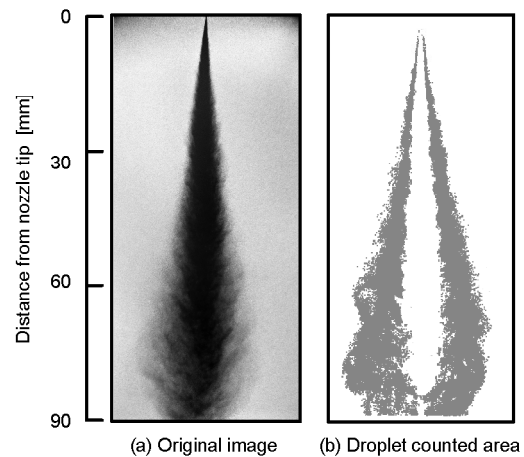


Fig.8 Droplet counted area in a spray injected through one hole nozzle

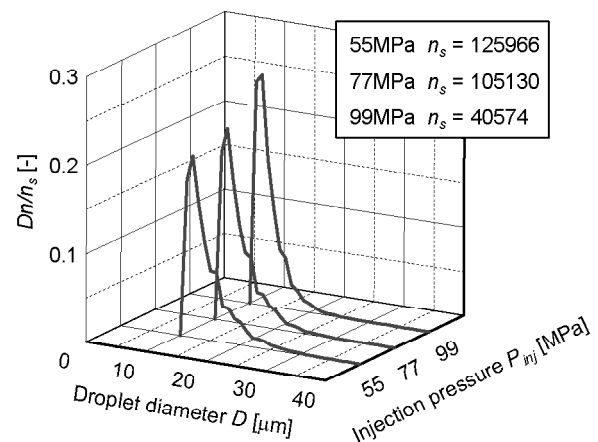


Fig.9 Droplet size distribution and droplet number in spray tip and outer edge region for three injection pressures

$$SMD = \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i^2} \quad (4)$$

ここで、 D_i : 粒径、 n_i : 液滴個数である。図 10 より、噴射圧力が増加するに伴い、SMD が減少することがわかる。これは、図 9 に示すように、噴射圧力の増加に伴う微粒化の向上によって、SMD の上昇に寄与する 20 μm 以上の液滴の頻度が低下するためである。

また、これらの結果は撮影系の空間分解能の限界から、粒径が 10 μm 以上の液滴を計測対象としたが、噴霧内には 10 μm 以下の液滴が多数存在し、図 9 の頻度分布は実際の現象と定量的に一致しないと考えられる。しかしながら、SMD に大きく影響を与える大粒径の液滴は計測可能であることから、噴霧特性の定性的な傾向は得ることができる。

5.2 局所サウタ平均粒径および液滴の空間分布

$M=3.0$, $t/t_{inj}=1.0$, $P_{inj}=55, 77, 99$ MPa の条件下における局所 SMD と液滴の空間分布を算出した。計測領域は噴霧軸方向距離 $Z=0\text{--}80$ mm, 噴霧半径方向距離 $R=-18\text{--}18$ mm である。図 11(a)に噴霧の代表画像、(b)に局所 SMD の空間分布図および(c)に液滴の空間分布図を示す。これらは、5 枚の噴霧画像から積算した結果を表す。局所 SMD の空間分布図は計測領域を 1 mm 角に分割し、各領域の SMD を(4)式より求め、粒径によらず液滴が検出された領域を全て表示した。液滴の空間分布図に関しては、液滴像の重心座標を粒径 10 μm ごとにクラス分けして表示した。

図 11(b)の局所 SMD 分布図より、 $P_{inj}=55, 77$ MPa の条件下では噴霧外縁における SMD が高いことがわかる。これは、葉ら⁽¹¹⁾が蛍光・散乱光法を用いて噴霧内部の局所 SMD を計測した結果と定性的に一致している。また、図 11(c)の液滴の空間分布図より、撮影法の特長から高液滴数密度の領域内の液滴を補足できないため噴孔近傍および噴霧中心部において測定された粒子数は少ないが、各噴射圧力において小粒径の液滴($D=10\text{--}20$ μm)が噴霧全域にわたり存在する。さらに、 $P_{inj}=55, 77$ MPa の条件において、大粒径の液滴($D \geq 30$ μm)が $Z=60\text{--}80$ の噴霧外縁部に分布するため、図 11(b)において噴霧先端や外縁部の SMD が上昇し、粒径により噴霧内に分布する位置が異なる様子が伺える。この理由として、小酒ら⁽¹²⁾が示したように、個々の液滴の持つ運動量と粒径の違いによる渦流動への追従性の差異⁽²⁾が考えられる。つまり、小粒径の液滴は運動量が小さ

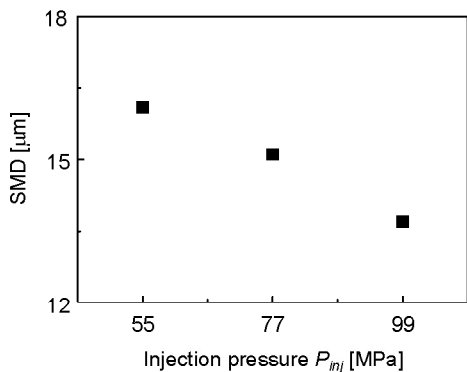


Fig.10 Sauter mean diameter in spray tip and outer edge region for three injection pressures

いため、噴霧内の各所に存在する大小様々なスケールの渦に取り込まれ、噴霧全域に運ばれる。一方、大粒径の液滴は運動量が大きいため噴霧前方まで到達し、その領域において自身の有する運動量を失った液滴が、大規模渦の流れにより噴霧外縁に輸送されると考えられる。

図 11(c)より、噴射圧力が増加するに伴い、噴霧中心軸付近の

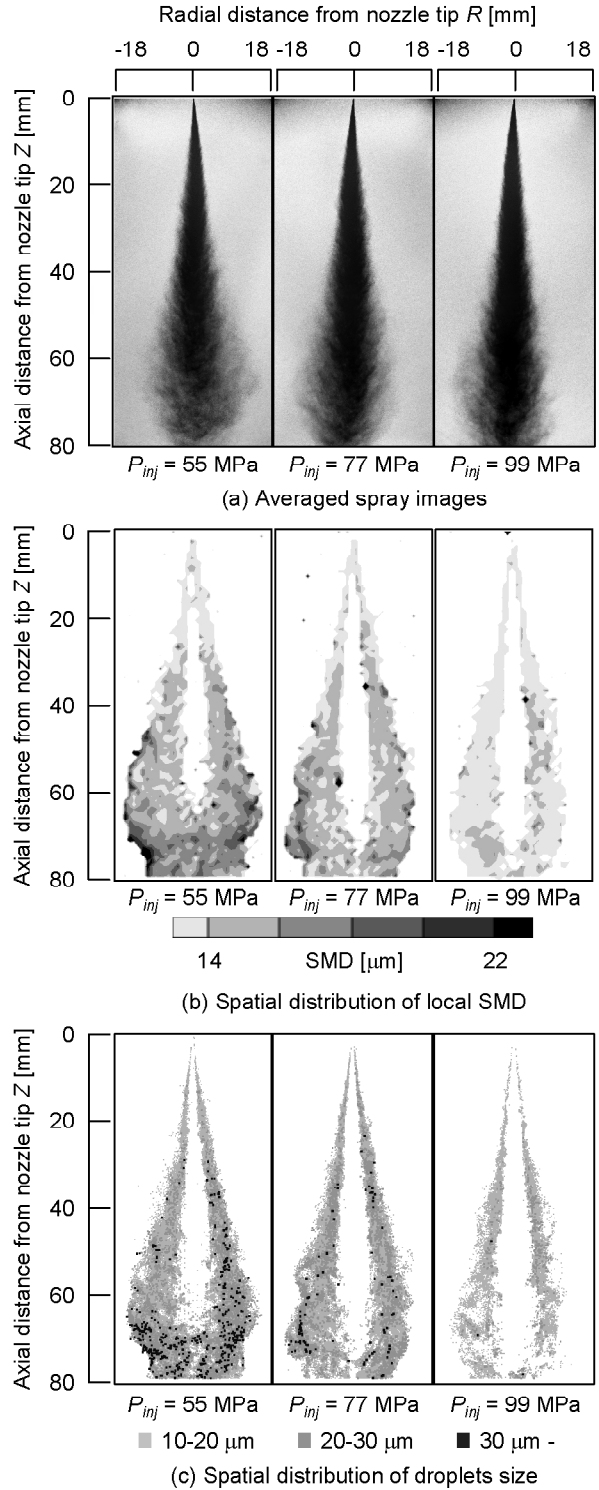


Fig.11 Effect of injection pressure on local SMD and spatial distribution of droplet size ($\rho_a = 17.3$ kg/m³, $t/t_{inj} = 1.0$, $M = 3.0$)

液滴の未検出領域が拡大する。これは、図 11(a)において、噴射圧力が増加するにつれて、光の透過率が低い領域が大きくなることから明らかなように、噴射圧力の増加に伴う微粒化の促進により、噴霧内の液滴数密度が高くなるため、噴霧中心軸付近の光の透過率が低下し、液滴の未検出領域が拡大したためと推測される。

5.3 噴霧の微細構造の可視化

図 12(a), (b)に $M=3.0$, $P_{inj}=55 \text{ MPa}$, $t/t_{inj}=1.0$ における 1 枚の噴霧画像と液滴の空間分布をそれぞれ示す。同図(i), (ii)には、噴霧外縁における大規模渦の拡大画像と液滴の空間分布を併記する。図 12(b), (ii)においては、5.2 節と同様に粒径を $10 \mu\text{m}$ ごとにクラス分けして表示した。

図 12(a)の透過光撮影画像に破線で示した噴霧中流域($Z=40\text{--}60 \text{ mm}$)では認識しづらい噴霧外縁部の大規模渦構造が、図 12(b)の液滴の空間分布図の噴霧中流域では明確に現れる。このことから、噴霧画像において奥行き $200 \mu\text{m}$ 程度の空間内に存在する液滴像の座標を二次元表示することによって、撮影画像から認識が困難な噴霧内の渦構造を抽出できると考えられる。

噴霧の拡大画像に着目する。図 12(ii)より、小粒径の液滴($D=10\text{--}20 \mu\text{m}$)は、画像の上方向に向けて巻き上がるように分布する。中粒径の液滴($D=20\text{--}30 \mu\text{m}$)は、小粒径の液滴よりも外側に位置し、大粒径の液滴($D \geq 30 \mu\text{m}$)は画像の下方向に集積する。これは液滴径によって、流動場に対する応答時間に差異があるためと考えられる。Crow⁽¹³⁾らによれば、自由せん断流における粒子の流れ場に対する応答時間 τ_A は、

$$\tau_A = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_g} \quad (5)$$

で示される。ただし、 ρ_p : 粒子の密度、 d_p : 粒子の直径、 μ_g : 霧閉気体の粘性係数を表す。式(5)から粒子の密度が一定ならば、粒径が小さくなるほど、流動場に追従し易くなる。ゆえに、小粒径の液滴は流動場への応答性が良好なため、渦流動に追従して巻き上がるように分布したと考えられる。中粒径の液滴に関しても同様の傾向が見られるが、中粒径の液滴は遠心力の影

響を受け、小粒径の液滴よりも外側に位置したと考えられる。一方、大粒径の液滴は、応答時間が比較的長く、渦の流れに遅れるように撮影画像の下方向に集積したと推測される。

また、図 12(ii)の(α)では、渦状分布の内部には空隙が存在することが確認できる。これには処理補正のため $10 \mu\text{m}$ 以下の液滴を検出していない影響が考えられる。しかし、大部分の噴霧液滴は渦管内部ではなく、渦管に沿うように分布すると考えられる⁽¹⁴⁾ため、渦状分布に空隙がみられるのは、 $10 \mu\text{m}$ 以下の液滴が検出されないためではなく、渦状分布内部に液滴が存在しないためと推察される。また、図 12(ii)の(β)に示した領域においても多数の液滴径を認識できていない。これは、図 12(i)の(α)を見ると液滴数密度が高く、解析処理過程においてノイズとして計測から除外されたものと考えられる。

以上より、本計測法は噴霧内の液滴数密度が低い領域ではあるが、噴霧全体像から個々の液滴の位置および粒径を認識可能であることから、噴霧微細構造の評価に適用性があるといえる。

6. おわりに

ディーゼル噴霧構造を把握することを目的に、噴霧全体を液滴スケールの解像度で可視化する撮影法を構築した。本撮影法を用いて噴射終了時の非蒸発噴霧に対し透過光撮影を行い、撮影画像から液滴の位置および粒径情報を解析した。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 下渉性の低いレーザ光、特殊レンズ系および大判フィルムを用いることで、噴霧全体を 1 枚の受光面に収めつつ、噴霧外縁や噴霧下流域などの液滴数密度の低い領域において液滴を可視化することができる。
- (2) 奥行き $200 \mu\text{m}$ 程度の空間内に存在する噴霧各所における液滴の座標を抽出することによって、撮影画像から確認が困難な渦構造が顕在化するため、噴霧内における大小様々なスケールの渦に対する液滴の空間分布を評価できる。
- (3) $10\text{--}20 \mu\text{m}$ の液滴は噴霧全域に、 $30 \mu\text{m}$ 以上の液滴は噴霧先端部に分布する。つまり、液滴は粒径により噴霧に分布する位置が異なる。

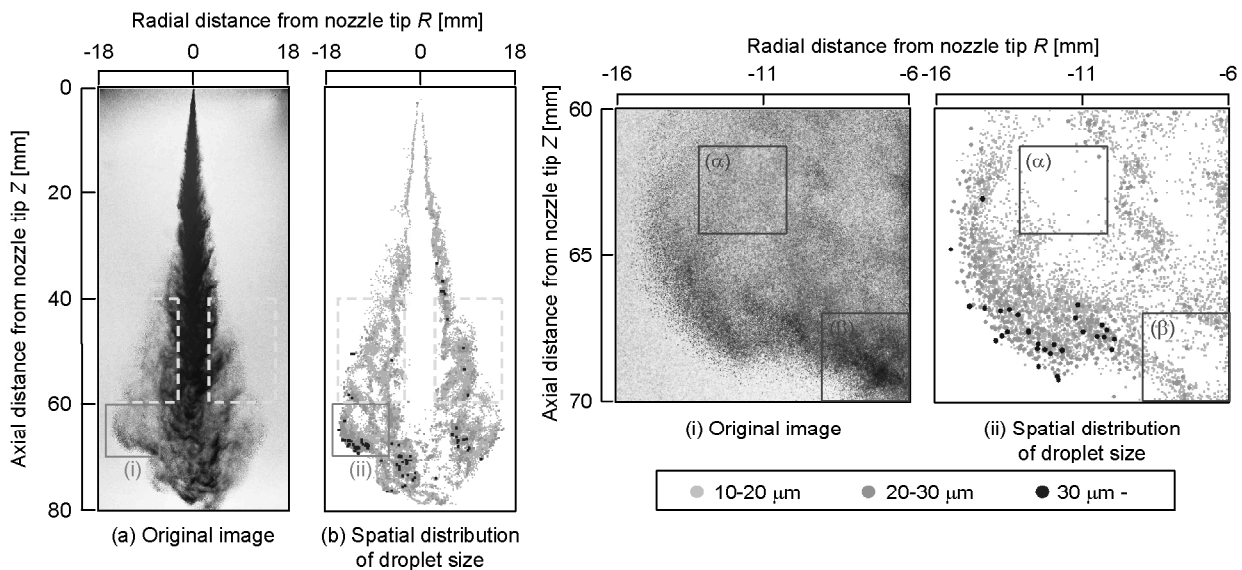


Fig. 12 Micro structure of diesel spray visualized by spatial distribution of droplet size ($\rho_a = 17.3 \text{ kg/m}^3$, $t/t_{inj} = 1.0$, $M = 3.0$)

- (4) 噴霧先端の大規模渦において、液滴は渦の流動に追従するように分布し、大粒径の液滴ほど渦の外側に位置する。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」、ならびに、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号 18560213)の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Ishikawa, N., Nimura, K.: Analysis of Diesel Spray Structure Using Magnified Photography and PIV, SAE Technical Paper, (1996), No.960770.
- (2) Chung, J.N., Troutt, T.R., Crowe, C.T.: Modelling of Droplet-Gas Interaction in a Spray Combustion Engine, International Symposium COMODIA 90, (1990), pp.601-605.
- (3) Ikeda, Y., Hosokawa, S., Sekihara, H., Nakajima, T.: Cycle-Resolved PDA Measurement of Size-Classified Spray Structure of Air-Assist Injector, SAE Technical Paper, (1997), No.970631.
- (4) Takeuchi, K., Senda, J., Shikuya, M.: Transient Characteristics of Fuel Atomization and Droplet Size Distribution in Diesel Fuel Spray", SAE Technical Paper, (1983), No.830449.
- (5) 石山拓二, 劉育民, 鴨川正博, 宮城勢治, 三輪恵: ナノスケール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 B編, 60, 570, (1994), 715-721.
- (6) 村田和美: 光学, サイエンス社, (1979), 230-231.
- (7) 辻内順平他: 最新 光学技術ハンドブック, 朝倉書店, (1976), 505-507.
- (8) B. Dingel et al.: Speckle Reduction with Virtual Incoherent Laser Illumination Using a Modified Fiver Array, Optik, 94, 3, (1993), 132-136.
- (9) Azetsu, A., Dodo, S., Someya, T., and, Oikawa, C.: A Study on the Structure of Diesel Spray (2-D Visualization of the Non-Evaporating Spray), International Symposium COMODIA 90 (Kyoto), (1990), 199-204.
- (10) 劉育民, 石山拓二, 三輪恵: ディーゼル噴霧の液滴画像解析法に関する研究, 日本機械学会論文集 B編, 61, 585, (1995), 113-139.
- (11) 葉啓南, 小酒英範, 神本武征: 蛍光・散乱光法による非蒸発噴霧のザウタ平均粒径測定に関する研究, 日本機械学会論文集 B編, 59, 568, (1993-12), 308-313.
- (12) 小酒英範, 鈴木貴雄, 神本武征: 離散渦法による非定常噴霧内の渦運動と液滴拡散に関する研究, 第 12 回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1995), 1-6.
- (13) Crowe, C.T., Gore, R.A., Troutt, T.R.: Particle Dispersion by Coherent Structures in Free Shear Flows, Particulate and Science Technology, 3, 3-4, (1985), 149-158.
- (14) 堀司, 田中博, 勝田圭一, 鎌田修次, 堀司, 千田二郎, 藤本元: 分裂モデルがディーゼル噴霧の LES 解析に与える影

響, 第 16 回微粒化シンポジウム講演論文集, (2007), 78-85.



鎌田 修次

同志社大学 大学院
工学研究科 機械工学専攻
博士課程前期課程 修了

〒610-0321
京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
Tel: 0774-65-7742
Fax: 0774-65-7743

略歴: 2008年 同志社大学大学院 工学研究科
博士課程前期課程 修了



勝田 圭一

同志社大学 大学院
工学研究科 機械工学専攻
博士課程前期課程 在学

〒610-0321
京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
Tel: 0774-65-7742
Fax: 0774-65-7743

略歴: 2007年 同志社大学 工学部
エネルギー機械工学科 卒業

現在 同志社大学大学院 工学研究科
博士課程前期課程 在学
ディーゼル噴霧の新撮影法に関する研究に従事。



堀 司

同志社大学 大学院
工学研究科 機械工学専攻
博士課程後期課程 在学

〒610-0321
京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
Tel: 0774-65-7741
Fax: 0774-65-7743

略歴: 2006年 同志社大学大学院 工学研究科
博士課程前期課程 修了

現在 同志社大学大学院 工学研究科
博士課程後期課程 在学
非定常噴霧や噴霧燃焼場の光学的計測, モデリングおよび数値解析に関する研究に従事。



千田 二郎

同志社大学 理工学部 教授
〒610-0321
京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
Tel: 0774-65-6405
Fax: 0774-65-6405

略歴:

- 1985年 同志社大学大学院 工学研究科
機械工学専攻 博士課程後期課程 修了
 - 同年 ヤンマーディーゼル(株)入社
 - 1990年 同志社大学工学部機械系学科専任講師
 - 1992年 同志社大学工学部機械系学科助教授
 - 1994年 米国ウイスコンシン大学客員助教授
 - 1998年 同志社大学工学部機械系学科教授
- 非定常噴霧や噴霧燃焼場の光学的計測, モデリング, 燃料設計手法による低エミッション燃焼法の提案, 水素ディーゼル機関, バイオディーゼル燃料に関する研究に従事.



藤本 元

同志社大学 理工学部 教授
〒610-0321
京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
Tel: 0774-65-6404
Fax: 0774-65-6404

略歴:

- 1966年 (株)三井造船内燃機研究室研究員
 - 1973年 慶應義塾大学工学部助手
 - 1979年 三重大学工学部助教授
 - 1982年 ドイツ連邦共和国クイザースラウルステン
大学工学部客員教授
 - 1984年 同志社大学工学部機械系学科助教授
 - 1985年 同志社大学工学部機械系学科教授
- 主に, ディーゼル噴霧の微粒化, 燃焼過程の研究に従事.