

超高解像度撮影法による時系列ディーゼル噴霧計測

The Time Sequence Measurement of Diesel Spray by Using of Super High Resolution Photography

丸林 直広, 矢野 哲也, 堀 司, 千田 二郎, 藤本 元
 (Naohiro MARUBAYASHI) (Tetsuya YANO) (Tsukasa Hori) (Jiro SENDA) (Hajime FUJIMOTO)
 同志社大学 同志社大学 大阪大学 同志社大学 同志社大学
 (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Osaka Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.)

In a diesel engine, the process to mix fuel with air has a strong influence on the characteristics of combustion and exhaust. Many researchers have been measuring a fuel spray of the diesel engine. Diesel sprays are unsteady phenomena form different structures at each fuel injection. Therefore, it is necessary to detect the distribution of spatial fuel droplets in the whole spray area of to investigate the characteristics of the fuel spray. In this report, a new photographing system (SHRLS: Super High Resolution Lens System) which has a high resolution and a wide measurement area was developed. The minimum detected size of fuel droplet is 5 μm . The droplets images are recorded by large size black-and-white films. The system was applied to a non-evaporating diesel spray injected into a high pressure chamber. As a result, spatial distributions of the droplets were over 5 μm were detected clearly for the whole diesel spray. The droplets in medium and small size present inside the vortex. The large size droplets distributed at the peripheral area of vortex and appeared at the tip region of the spray due to their large momentum. Additionally, diffusion processes of fuel droplets were measured by SHRLS using two wavelengths (532 nm and 600 nm) and large size color-film. In conclusion, SHRLS using two-wavelength could capture the behavior of fuel droplets in upstream of the diesel spray.

Keywords: Atomization, Diesel Spray, Optical Measurement, Fuel Droplet, Image Processing

1. 緒 言

ディーゼル機関では燃料噴霧の微粒化や燃料濃度の不均一分布などの噴霧構造が燃焼特性や排気特性に大きく影響を及ぼすことが知られている。そのため、NO_xやPM等の有害物質低減には、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。噴霧内の燃料液滴群は個々の液滴の大きさによって流れ場への追従性が異なり、大小様々なスケールの渦構造や枝状構造の形成に密接な関係を持つ⁽¹⁾。したがって、ディーゼル噴霧の形成機構を解明するためには、噴霧全域に分布する液滴の同時計測が有効な手段となる。

従来、高速間欠的なディーゼル噴霧に対し、微細な時空間現象を捕捉できるレーザー光技術を用いた粒径計測方法が用いられてきた。現在、噴霧の粒径計測に主に使用されているPDA(Phase Doppler Anemometry)⁽²⁾はレーザー光の干渉性を利用した粒径・粒速の同時計測法であるが、点計測手法であるため、任意の時間における広い領域の液滴分布を捉えることができない。また、面計測である蛍光・散乱光法⁽³⁾では、噴霧全域の局所サウタ平均粒径を計測できるが、局所における液滴群の空間平均情報であるため、燃料液滴群の空間的な構造を把握できなかった。そのため、噴霧全域の液滴を高解像度で評価可能な新たな計測手法が必要である。

そこで、本研究では噴霧全域に存在する個々の液滴を同時計測できる広視野・高解像度撮影法を提案している。本撮影系は特殊レンズ系および大判フィルムを用いることで、高解像度で捕捉した噴霧像の拡大結像を可能にする。既報⁽⁴⁾では、得られた噴霧画像から個々の液滴の空間分布を計測することで、噴霧各所に存在する大小様々なスケールの渦構造を顕在化できた。し

かしながら、噴霧中心部の液滴数密度が高い領域では複数の液滴が重なり合い、個々の液滴情報を得ることが困難であった。

本報では、現レンズ系に比べ高解像度かつ狭被写体深度の超高解像度レンズ系を撮影光学系に導入し、撮影対象を非蒸発パイロット噴霧として噴霧内部における燃料液滴群の二次元空間分布を計測した。計測結果から、各レンズ系により得た噴霧画像の比較を行い、燃料液滴群の噴霧内部構造を調べた。さらに、本報では噴霧構造の形成過程を捉えるため、任意の時間だけでなく、時系列計測手法を確立させることも目的とした。2波長のレーザー光を使用した高解像度計測を行い、得られた多重露光画像は画像処理によって波長毎に噴霧情報が抽出され、液滴の挙動が評価される。

2. 超高解像度撮影法

ディーゼル噴霧全体を高解像度で捉える本撮影法には、燃料液滴の粒径計測が可能な空間分解能と噴霧全域を捉える広い視野が求められる。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、広い視野を得ることが困難である。そのため、既報において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た拡大レンズ系を作製した。本報では、噴霧内部構造を把握するため、拡大レンズ系に比べ高解像度かつ狭被写界深度の超高解像度レンズ系を構築した。以下で、旧・拡大レンズ系および新・超高解像度レンズ系の比較説明を行う。

2.1 特殊レンズ系

2.1.1 拡大レンズ系⁽⁶⁾ 図1に屈折式望遠鏡の拡大原理を応用した拡大レンズ系の光路図を示す。拡大レンズ系は、2群のアクロマート対物レンズ、虹彩絞りおよび凹レンズ群に

より構成される。被写体を出た光は、一群目のアクロマート対物レンズ($\phi=150\text{ mm}$, $f=975\text{ mm}$, $F=6.5$)によって平行光となり、二群目のアクロマート対物レンズ($\phi=13\text{-}90\text{ mm}$)および、虹彩絞を経て凹レンズ群($f=-508\text{ mm}$)に入射され、拡大結像される。本特殊レンズ系は、3-5 倍程度の可動倍率、 $10\text{ }\mu\text{m}$ の空間分解能および $205\text{ }\mu\text{m}$ の被写界深度を有する。

2.1.2 超高解像度レンズ系 図2に本報において構築した超高解像度レンズ系の概略および光路図を示す。超高解像度レンズ系は形状の異なる複数のレンズにより構成されており、被写体より出た光を大判フィルム上に拡大結像させる。また、レンズ系筒内には虹彩絞りが設置されており、レンズ外縁部を通る収差の影響が大きい光を除去することができる。レンズ系の全長は拡大レンズ系に比べ大幅に縮小され、焦点距離が短縮されたことにより、実験装置系全体のダウンサイジングが可能になった。表1に超高解像度レンズ系の光学性能を示す。光学設計によって収差の影響を最小限に抑え、全波長対応のレンズコーティングを施すことで撮影系の空間分解能が拡大レンズ系に比べ向上した。さらに、被写界深度が $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるため、噴霧断面の情報を取得でき、より噴霧内部の燃料液滴の空間的構造を計測できると考えられる。

2.2 画像解析法

本画像解析法では液滴の評価項目として、液滴像の(1)位置、(2)円相当直径、(3)相対分散度および(4)液滴像外周の平均輝度勾配を算出する。その後、各液滴像の(2)-(4)を用いて、ぼやけ

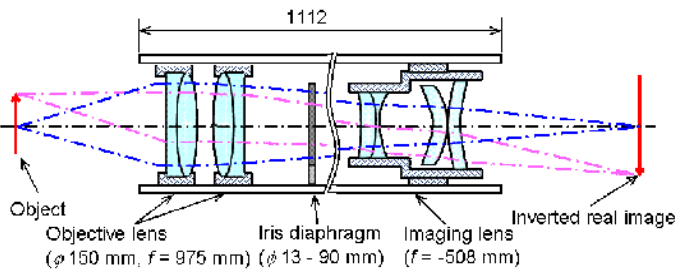


Fig.1 Schematic diagram of magnified lens system

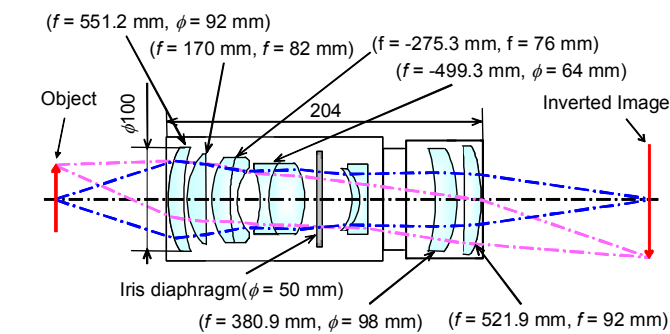


Fig.2 Schematic diagram of super high resolution lens system

Table1 Optical performance of specialized lens system

Lens system	MLS	SHRLS
Spatial resolution [μm]	10	5
Working distance [mm]	1,000	400
Magnification	3 - 5	2.7, 3, 4, ...
Depth of field l [μm]	205	100

MLS ... Magnified Lens System

SHRLS ... Super High Resolution Lens System

た液滴像および背景ノイズと見なした液滴情報を計測結果から除外した。円相当直径 D は、以下の算出式で示される。

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{1}$$

ここで、 A は液滴像面積である。また、相対分散度 L/L_0 (⁴⁾は、等周不等式 $s^2/A \geq 4\pi$ (真円なら等式が成立)を用いて、

$$\frac{L}{L_0} = \frac{S^2/A}{4\pi} \tag{2}$$

とした。上式中の、 S : 周囲長、 L : 分散度、 L_0 : 真円の分散度である。液滴像は L/L_0 の増加に伴い細長い、または凹凸を有する形状となる。本研究では、 $L/L_0 \geq 1.2$ の液滴像は重なった液滴、または背景ノイズとみなし計測対象から除外した。

画像解析アルゴリズムのフローチャートを図3に示す。本画像解析法では、フィルムスキャナ(EPSON: GT-X970)を用いて噴霧画像をPCに取り込み、解析プログラムによる画像処理を行った。画像入力の分解能は実寸法で1pixelあたり $1.85\text{ }\mu\text{m}$ に設定した。また、超高解像度レンズ系を用いた噴霧撮影画像の解析の際には、粒径が $5\text{ }\mu\text{m}$ の液滴像を評価するため、画像入力の分解能を実寸法で1pixelあたり $0.98\text{ }\mu\text{m}$ とした。

噴霧画像において、被写体深度外にあるぼやけた液滴像は個々の液滴計測の妨げとなるため、液滴像外縁の平均輝度勾配(ADG: Average Intensity Gradient)を用いて被写界深度外にある液滴を除去した。なお、解析に用いた計測領域は超高

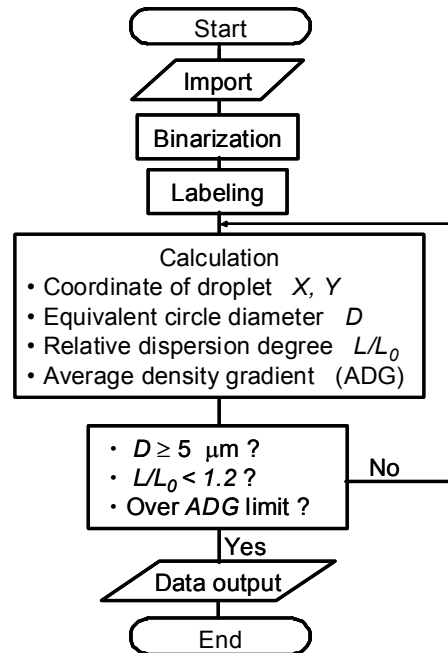


Fig.3 Flowchart of image processing algorithm

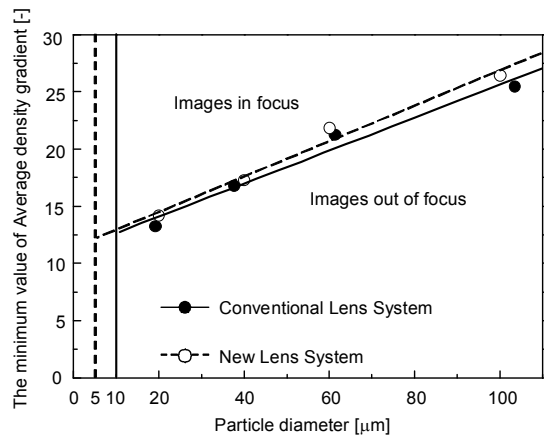


Fig.4 Droplet processing region for analysis

解像度レンズ系の被写界深度が 100 μm, 拡大レンズ系の被写界深度が 205 μm 程度であることから, それぞれ焦点面から ±50 および 100 μm の範囲を画像解析の処理領域と定めた.

図 4 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)から得られた被写界深度内の各粒子像外縁における平均輝度勾配の最小値を示す. 図中の実線および破線は拡大レンズ系と超高解像度レンズ系の処理領域の閾値をそれぞれ示している. 平均輝度勾配の近似直線は最小二乗法により導出し, 超高解像度レンズ系では

$$ADG = 0.1551D + 11.42 \quad (3)$$

で与えられ, 拡大レンズ系においては,

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

で表される. 本画像解析法では, 図 4 における実線の上側領域の液滴を解析対象とした.

3. 実験装置および条件

本研究で作成した拡大レンズ系を使用し, 噴霧撮影を行なった. 各々のレンズ系において, 光学系を最適化し, 実験は行なわれる. また, 本報では, 時系列計測を行なうため, 超高解像度レンズ系を用いて, 2 波長の多重露光光学系を構築した.

3.1 撮影光学系

3.1.1 拡大レンズ系 図 5 に本撮影系の概略を示す. 光源には, ナノセックオーダの発光半値幅を有する Nd:YAG レーザ(Spectra Physics: PIV400, 波長: 532 nm, FWHM: 8 ns/pulse)の第 2 高調波を用いた. 光源から出たレーザー光は, スペックル低減装置(ナノフォトン: SK-11, φ = 10 mm)⁽⁵⁾を通過し, 三枚の凸レンズ($f = 50, 100, 1000$ mm)により φ 100 mm の平行光となり, 噴霧に照射される. 噴霧を通過した光は特殊レンズまたは超高解像度レンズ系を経て拡大され, 大判フィルム(Kodak: TMAX100, 線解像度: 63-200 本/mm, 縦×横: 254×202 mm)に結像される.

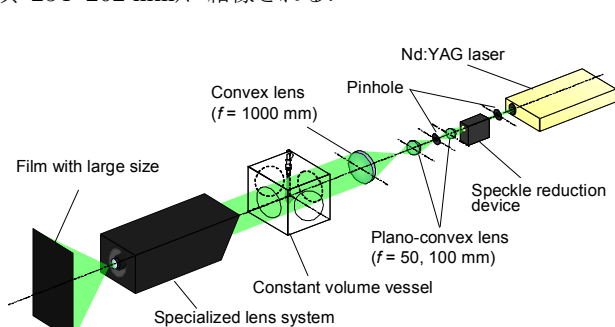


Fig.5 Optical setup for photography using MLS

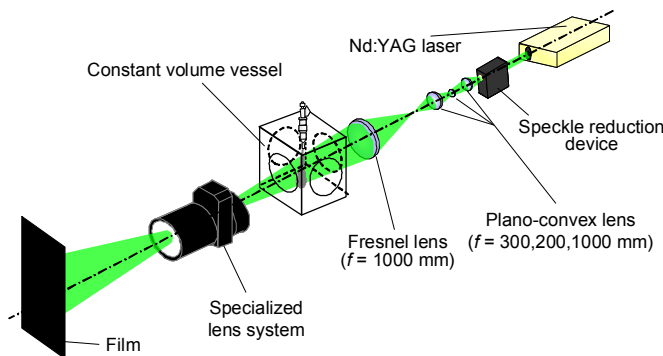


Fig.6 Optical setup for photography using SHRLS

3.1.2 超高解像度レンズ系 図 6 に超高解像度撮影系の概略を示す. 発振されたレーザー光は, スペックル低減装置(ナノフォトン: SK-11, φ = 10 mm)を通過した後, 三枚の凸レンズ($f = 300, 200, 1000$ mm)およびフレネルレンズ($f = 1000$ mm)の順に通過し, レーザ光のビーム径がノズル直下で約 φ 100 mm, 超高解像度レンズ系の絞りにおいて φ 50 mm となるように光学系が調節される. このように使用することで, 画像周辺部であっても鮮明な画像を得ることができる. 噴霧を通過した光は超高解像度レンズ系を経て拡大され, 大判フィルムに結像される.

3.1.3 多重露光撮影系 図 7 に本撮影光学系の概略を示す. 多重露光を行なうため, 光源には, レーザを 1 台追加し, 2 台の Nd:YAG レーザ(Spectra Physics: PIV400, Beam Lok, FWHM: 各 8 ns/pulse)の第 2 高調波($\lambda_L = 532$ nm)および第 3 高調波($\lambda_L = 355$ nm)を用いた. 多重露光の順序は, 緑色である $\lambda_L = 532$ nm を第 1 露光とし, 第 2 露光には 355 nm の光を波長変換素子(Spectra Physics: OPO システム basiScan/170)によって変換した赤色の $\lambda_L = 640$ nm と設定した. なお, 640 nm の波長はカラーフィルムの分光感度を考慮した値であり, 2 つの光はパルスジェネレータを用いて遅延時間が与えられる. 2 台のレーザーから発振された光はビームスプリッターにより同軸の光路とされた後, スペックル低減装置(ナノフォトン: SK-11)に入射される. その後の光路は超高解像撮影系と同様であり, フィルムには大判のカラーフィルム(Kodak: ポートラ 160VC, 線解像度: 200 lp/mm, 縦×横: 254×202 mm)を用いた.

3.2 実験条件

表 2 に実験条件およびノズル諸元を示す. 供試燃料には n-トリデカンを用い, 定容容器内温度は室温とした. また, 雰囲気気密度は $\rho_a = 39.5$ kg/m³ とし, ディーゼルエンジンの過給条件を模擬した. 噴射圧力は $p_{inj} = 87.5$ MPa, 噴射期間は $t_{inj} = 0.23$ および 0.46 ms に設定し, 燃料噴射ノズルには単孔ホールノズル(噴孔径: $d_n = 0.20$ mm, 噴孔長さ: $L_n = 0.80$ mm)を用いた. また, 撮影時期は, 噴射開始からの期間 t を噴射期間 t_{inj} で正規化した値を設定し, 拡大レンズ系を用いた実験では $t/t_{inj} = 10.0$,

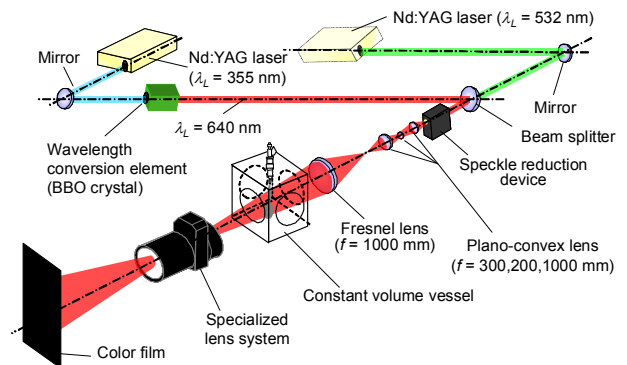


Fig.7 Optical setup for double exposure photography

Table 2 Experimental conditions

Fuel oil	n-tridecane	
Ambient gas	CO ₂	
Ambient temperature	T_a [K]	room temperature
Ambient pressure	p_a [MPa]	2.0
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	39.5
Injection pressure	p_{inj} [MPa]	87.5
Injection duration	t_{inj} [ms]	0.23 0.46
Injection fuel amount	m_f [mg]	1.76 3.67
Nozzle type	Single hole nozzle	
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	0.20
Nozzle hole length	L_n [mm]	0.80

超高解像度レンズ系では $t/t_{inj}=3.0, 5.0, 7.0$ とした。

さらに、多重露光の実験では $t/t_{inj}=1.5, 3.0, 5.0, 7.0$ の4条件を第1露光の撮影時期とした。第2露光の撮影時期は、第1露光から $500\mu s$ だけ遅延させた条件を設定した。

4. 実験結果および考察

4.1 高解像度撮影法における噴霧計測可能領域

図8(a), (b)に $t_{inj}=0.46\text{ ms}$, $t/t_{inj}=10.0$ における噴霧画像と液滴の空間分布をそれぞれ示す。この画像は拡大レンズ系を用いて撮影され、計測最小粒径は $10\mu m$ である。図8(b)には計測した液滴径から $10\text{-}20\mu m$, $20\text{-}30\mu m$, $30\mu m$ -にクラス分けして液滴像の重心座標を二次元表示した。

図8より、高解像度撮影法をパイロット噴霧に適用し、焦点面から前後約 $100\mu m$ の噴霧断面における $10\mu m$ 以上の液滴を計測することで、噴霧外縁部の渦構造を顕在化できることがわかる。しかしながら、噴霧中心部や噴霧外縁部の渦構造内において液滴を計測できていない領域が確認された。これは液滴数密度が高い領域、あるいは計測可能液滴が存在しない領域と考えられる。

図9(i), (ii)に、図8における噴霧中心部(A)を拡大した画像およびその画像を2値化した画像を示す。図9(i)に示すように、噴霧中心部では液滴が高数密度で存在することが確認できる。このため、被写体深度外の液滴像がぼけて画像に写りこむことで画像のコントラストが低下し、図9(ii)に見られるように個々の液滴像と背景を分離することが困難となる。また、図10(i), (ii)に図8における噴霧下流の大規模渦構造(B)を拡大した画像およびその液滴の空間分布を示す。この領域は図9に見られるように液滴の高数密度領域ではないため、空間分解能である $10\mu m$ 以下の液滴を検出して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ため、渦状分布に空隙がみられるのは、 $10\mu m$ 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。そのため、噴霧下流における渦中心部には、液滴の存在しない空隙領域があると考えられる。

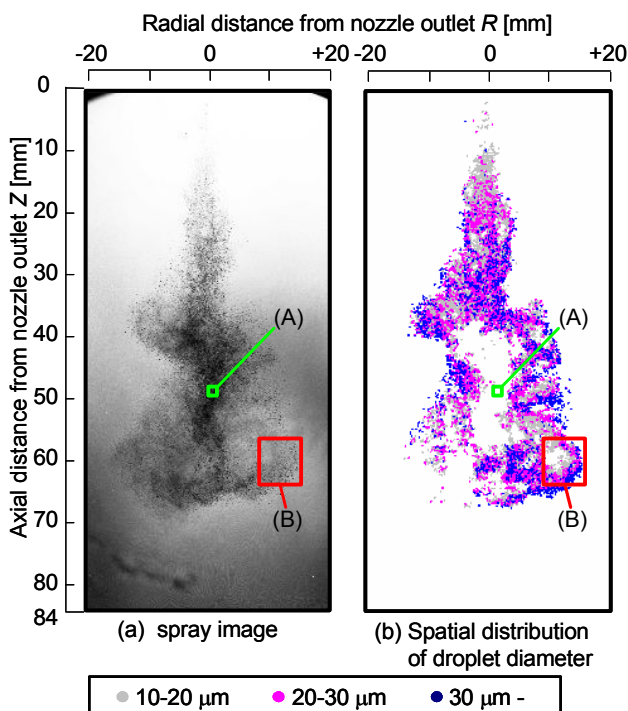


Fig.8 Micro structure of diesel spray visualized by spatial distribution of droplet diameter

以上より、高解像度撮影法を噴射終了後における十分拡散した噴霧に適用すると、液滴群の高密度領域を除いて噴霧内の広範囲で噴霧構造を把握できることがわかった。

4.2 噴霧各所における渦構造内の液滴径分布

本撮影法を用いて噴霧計測を行うことで、噴霧各所における様々なスケールの渦構造を可視化できる。図11に噴霧上流、中流および下流における渦構造の拡大画像と液滴の空間分布をそれぞれ示す。なお、流れ場に追従する液滴群の先端部を渦中心と定義した。上流および中流に位置する渦構造に比べ、噴霧下流ではスケールが大きく、内部の空隙領域が広い渦構造を確認できる。図12に各渦構造の中心からの距離に対する液滴径分布を示す。それぞれの渦構造の中心は上流では噴霧軸方向距離 $Z=22\text{ mm}$, 噴霧半径方向距離 $R=2\text{ mm}$, 中流では $Z=40\text{ mm}$, $R=9\text{ mm}$, 下流では $Z=60\text{ mm}$, $R=12\text{ mm}$ と仮定した。図12より、噴霧下流では大粒径の液滴が渦の中心から比較的離れた位置に集積していることが確認できる。これは、液滴径毎の流動場に対する応答時間の差異によるものと考えられる。Crow⁽⁶⁾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 : 雰囲気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、流動場に追従し易いことがわかる。このため、小粒径の液滴は中心へ向かう渦流れに従って渦の内側に分布すると考えられる。また、大粒径の液滴は、その応答時間が比較的長いため、渦の外側に分布するものと推測される。さらに、上流部および中流部の渦構造においても同様の傾向が見て取れる。

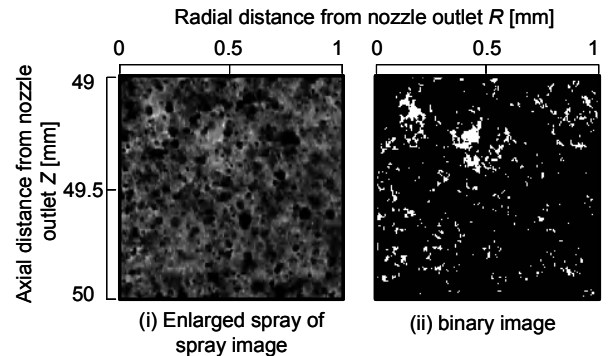


Fig.9 High droplet number density region in the center of diesel spray (A)

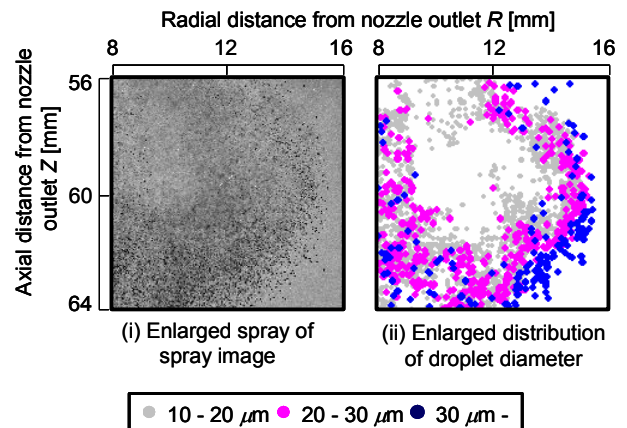


Fig.10 Vortex structure in spray edge (B)

4.3 超高解像度レンズ系による噴霧構造の観察

本節では高密度領域における液滴や噴霧内に多数存在すると考えられる $10\ \mu\text{m}$ 未満の液滴を捉えるため、超高解像度レンズ系を用いて、パイロット噴霧撮影を行った。図 13(a), (b) に $t/t_{inj} = 0.23\ \text{ms}$, $t/t_{inj} = 5.0$ における超高解像度レンズ系を用いて撮影した噴霧画像と液滴の空間分布をそれぞれ示す。計測最小粒径は超高解像度レンズ系の空間分解能である $5\ \mu\text{m}$ とした。図 13(b)には計測した液滴径から $5\text{-}10\ \mu\text{m}$, $10\text{-}20\ \mu\text{m}$, $20\text{-}30\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ -に 4 つのクラスに分け、各液滴像の重心座標を二次元表示した。

図 13(b)から液滴の空間分布画像に着目すると $20\ \mu\text{m}$ 以下の小粒径および中粒径の液滴は、噴霧全域に分布しているのに対し、 $20\ \mu\text{m}$ 以上の液滴は渦構造の外縁部および噴霧の先端領域に集中していることがわかる。また、図 13 の枠線で囲まれた領域の拡大図を図 14 に示す。図 14 において、小粒径の液滴は渦中心部まで存在しており、大粒径の液滴は画像周辺部にしか存在しない。以上のことから、本レンズ系を用いて得られた結果は 4.2 節で述べた粒子の挙動をより顕著に表していると考えられる。

4.4 各撮影時期における噴霧特性の把握

図 15 はパイロット噴霧に対して撮影時期 t/t_{inj} を 3.0, 5.0, 7.0 と変更させた場合の撮影結果および噴霧液滴の空間分布を示したものであり、図 16 は各撮影時期における粒径ヒストグラムである。図 16 中の n_d は各粒径の液滴数を、 n_g は総液滴数をそれぞれ表す。図 15 の画像より、撮影時期が遅延する

に伴い、噴霧は全体的に拡散し、渦構造はより大規模構造となり、粒子の散在していない空隙領域が鮮明になっている。また、 $t/t_{inj}=3.0$ から $t/t_{inj}=5.0$ にかけて、計測可能な $20\ \mu\text{m}$ 以上の比較的大粒径の粒子数は増加しているが、 $t/t_{inj}=5.0$ から $t/t_{inj}=7.0$ にかけては低下している。これは大粒径の粒子ほど保有している運動量が大きく、時間の経過とともに噴霧軸方向および噴霧半径方向へ移動、拡散したことで、被写界深度の $100\ \mu\text{m}$ より外側へ移動したためだと考えられる。

4.5 高解像度撮影法を用いた多重露光撮影

図 17 は、本撮影手法を用いて撮影したパイロット噴霧の多重露光画像である。撮影画像から、噴霧形状や噴霧外縁部に発達する渦構造、内部の枝上構造などが可視化できていることがわかる。また、これらの噴霧画像は第 1 露光である緑成分および第 2 露光である赤成分のみの背景ではないため、2 波長で露光されていると考えられる。図 18 に液滴の挙動について議論するため、第 1 露光が $t/t_{inj} = 7.0$ における噴霧画像の拡大図を示す。なお、図 18(i)および(ii)は噴霧上流境界部の枠線で囲った領域を画像処理によって色別に抽出した画像である。それぞれの画像は赤および緑成分のみを抽出した画像であり、赤成分の画像が第 1 露光、緑成分が第 2 露光に対応している。この画像処理によって、2 波長で露光された画像を波長毎に分離することが可能である。

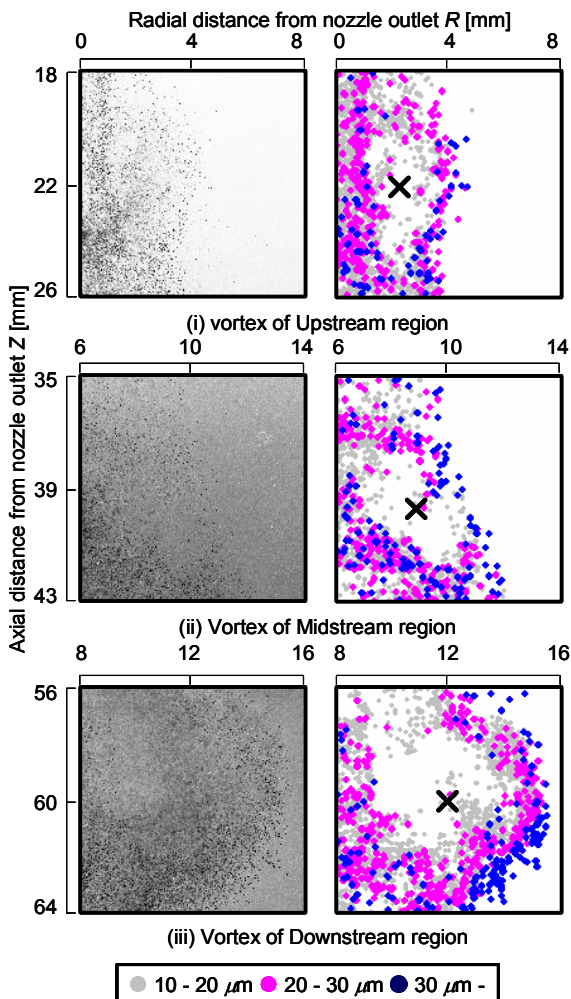


Fig.11 Vortex structure in upstream, midstream and downstream region of pilot spray

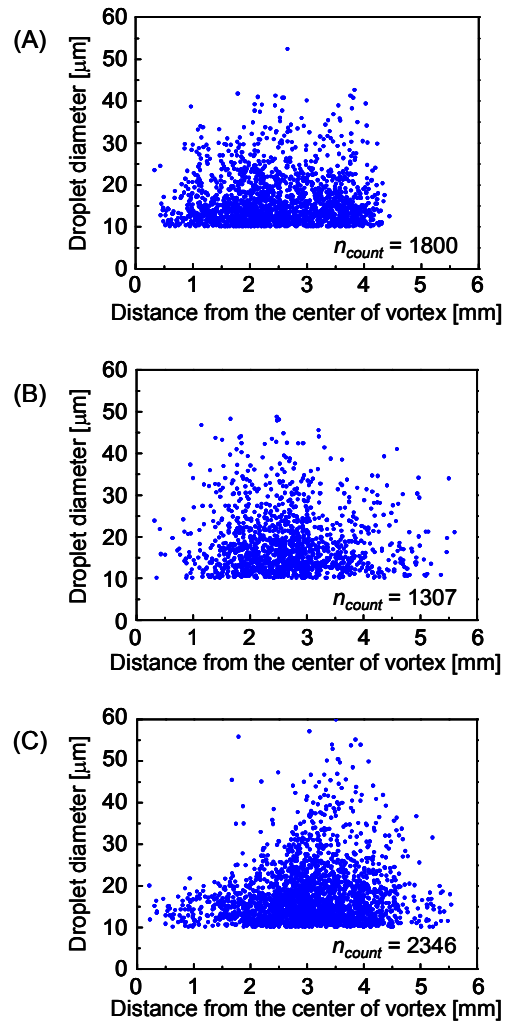


Fig.12 Relation between droplet diameter and distance from the center of vortex in (A) Upstream region, (B) Midstream region and (C) Downstream region

図 18 の領域内において、図 18(i)の位置にあった液滴が 500 μ s 後の図 18(ii)では、異なる位置にある。また、他の撮影条件においても、第 1 露光と第 2 露光の噴霧液滴を分離することができ、液滴の移動速度を求めることが可能であった。したがって、噴霧上流部の噴霧境界においては、液滴が飛行している様子および移動速度を把握することができ、時系列に変化する噴霧構造を解明するために本計測手法が有効な方法であると考えられる。

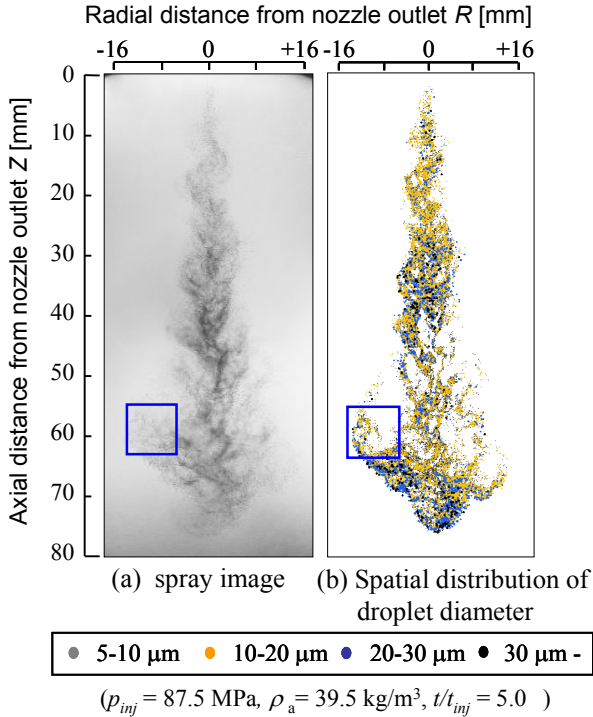


Fig.13 Droplet processing region for analysis

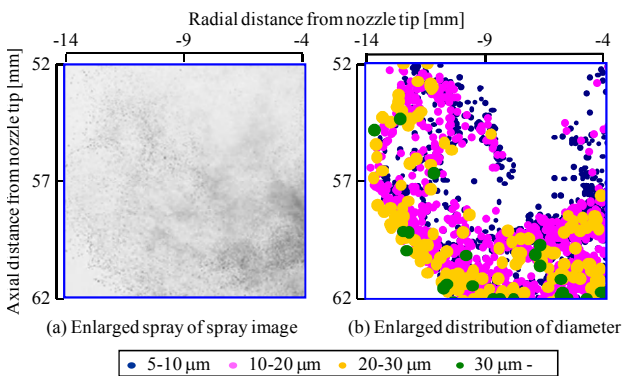


Fig.14 Micro structure of diesel spray distribution of droplet diameter by SHRLS

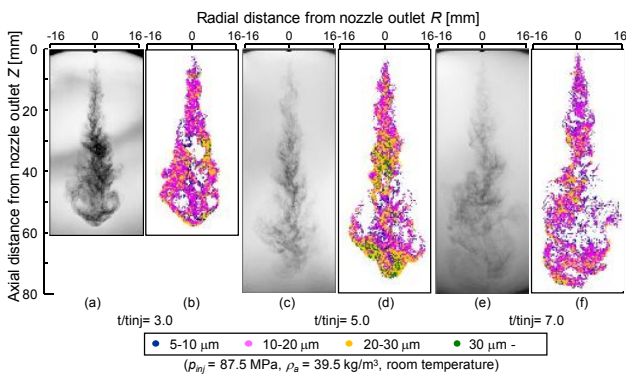


Fig.15 Spatial distribution of droplet diameter by SHRLS

図 18 で用いた噴霧画像の噴霧中心部付近(a)および先端部(b)の画像を図 19 に示す。これらの画像は液滴を可視化できているのにも関わらず、画像処理によって同一の液滴を露光毎に分離することができなかった。噴霧中心部付近の画像(a)では、液滴数が非常に多いため、光が多重散乱し、コントラストの

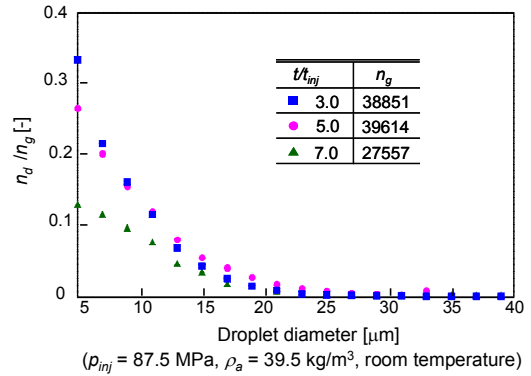
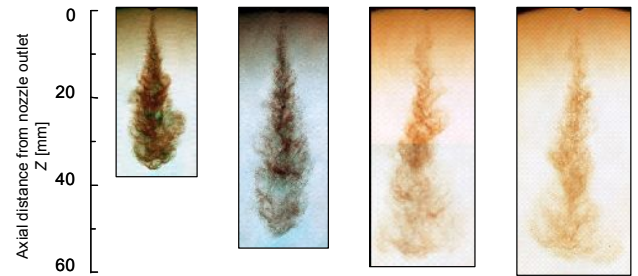


Fig.16 Droplet number frequency distribution and droplets diameter



1st (t/t_{inj})	1.5	3.0	5.0	7.0
2nd (delay)	500 μ s	500 μ s	500 μ s	500 μ s

Fig.17 Double-exposure spray images at the different photographic conditions

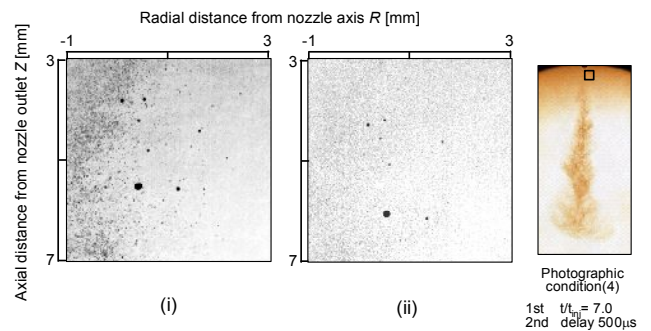


Fig.18 Extraction image of (i) red component, (ii) green component in enlarged spray image

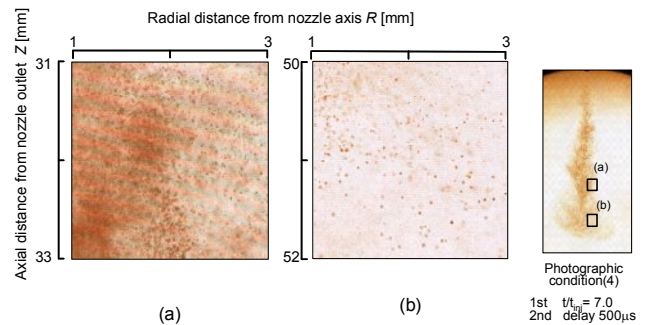


Fig.19 Enlarged image in (a) central region, (b) spray tip region

低下および各波長の情報が低下してしまったと考えられる。また、噴霧先端部(b)では撮影条件が噴射後期であることが要因として考えられる。噴射初期の液滴は、大きな運動量を与えられるものの、時間の経過とともに速度が低下する。そのため、噴射後期における液滴の移動距離は非常に小さく、本撮影条件と遅延時間を考慮すれば液滴はほぼ停滞していると考えられる。結果として、2回目に露光される液滴が1回目に露光された液滴に重なることによってコントラストが低下したと考えられる。以上のことが影響し、噴霧中心部および先端部では時間毎に噴霧を分離できなかった。

以上より、噴霧上流部においては、パイロット噴霧における時系列計測が可能であった。しかしながら、噴霧先端部および中心部では、液滴の挙動を十分に捉えることが困難であった。そのため、今後は一枚の記録材料に記録するのではなく、複数枚で記録するなど、多重露光および高数密度場での液滴の重なりを防ぐための光学系の構築が課題となる。

5. 結 言

本研究では、噴霧全域における液滴の可視化を目的とし、特殊レンズ系および大判フィルムを用いた高解像度撮影手法を提案している。本報では、高解像度撮影手法をパイロット噴霧に適用し、噴霧各所に存在する渦構造の考察を行った。また、拡大レンズ系に比べ高解像度および狭被写体深度を有する超高解像度レンズ系を用いて噴霧計測を行い、さらに時系列計測手法を確立させるため、多重露光の光学系を構築した。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 高解像度撮影法を噴射終了後における十分拡散した噴霧に適用すると、液滴群の高密度領域を除いて噴霧内の広範囲で噴霧構造を把握できる。
- (2) 噴霧下流の大規模渦構造において、大粒径の液滴は小・中粒径の液滴に比べ、渦中心からの距離が離れた位置に分布する。
- (3) 超高解像度レンズ系を用いて噴霧撮影を行うことで、噴霧内部における粒径 $5 \mu\text{m}$ 以上の燃料液滴群の空間的構造を把握できた。
- (4) 多重露光による高解像度計測手法を行なうことで、液滴群の高密度領域を除いた、噴霧上流境界部では液滴挙動を把握することができる。

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(同志社大)」ならびに文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号20360105)の支援を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 段智久, 高岸佐代, 大石直己, 千田二郎, 藤本元, “高圧燃料噴射時のディーゼル噴霧構造に関する研究”, 日本機械学会論文集(B編)62巻 597号, (1996-5), 401-407.
- (2) 池田裕二, 中島健, 細川茂雄, 関原深, “Cycle-resolved PDAを用いた噴霧の計測”, 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集(96-7), 329-334.
- (3) 葉啓南, 小酒英範, 神本武征, “蛍光・散乱光法による非常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巻 568号, (1993-12), 4008-4013.
- (4) 鎌田修次, 勝田圭一, 堀司, 千田二郎, 藤本元, “高解像度撮影法によるディーゼル噴霧構造の可視化”, 微粒化, vol.17, No.58, (2007), 59-66.

- (5) 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.
- (6) B. Dingel et al.: Speckle Reduction with Virtual Incoherent Laser Illumination Using a Modified Fiver Array, *Optik*, 94, 3, (1993), 132-136.
- (7) 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.
- (8) 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.



丸林 直広

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 : 2010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

非常噴霧や噴霧燃焼場の光学的計測に関する研究に従事。



矢野 哲也

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 : 2011年 同志社大学大学院 工学研究科
博士課程前期課程 修了



堀 司
大阪大学 大学院
工学研究科 特任助教
〒565-0871
大阪府吹田市山田丘2-1
TEL&FAX : 06-6875-8650

略歴 :

2009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 千葉大学大学院工学研究科特任研究員
2010年 大阪大学大学院工学研究科特任助教



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 米国ウィ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ズラウルステン
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.