



高密度雰囲気下におけるディーゼル噴霧の流動に関する研究

Study on a diesel spray movement under high density surroundings

座間 淑夫 (Yoshio ZAMA) 群馬大学 (Gunma Univ.)	落合 渉 (Wataru OCHIAI) 群馬大学 (Gunma Univ.)	新井 雅隆 (Masataka ARAI) 群馬大学 (Gunma Univ.)
-------------------------------------------------	--------------------------------------------------	---------------------------------------------------

In a direct injection diesel engine, combustion characteristics are greatly influenced by the mixture formation behavior of the diesel spray. This behavior depends on various conditions such as an ambient gas density, nozzle geometry and injection pressure. Recently, the boost pressure and EGR ratio are set to increase for improving diesel engine performance. Consequently, a compressed air density in the cylinder is becoming high, and it seems that the compressed air density affects more strongly the mixing process of the diesel spray. Therefore, it is necessary to understand precise spray behavior under the high ambient air density condition. In this study, behavior of the diesel spray was visualized with shadow imaging and tomographic imaging methods. For quantified assessment of spray velocity, time-resolved particle image velocimetry (PIV) was applied to the sequential images of the diesel spray. As the results obtained, it was clear that local movement of spray periphery at the low ambient density showed different from that of the high ambient density and it became stagnated under the high ambient density condition. Moreover, the local position of the maximum velocity gradient shifted from outside to inside of the spray with an increase of the ambient air density.

Keywords: Diesel spray, High ambient density, Instantaneous velocity field, Time-resolved PIV

1. はじめに

ディーゼル機関の燃焼改善において燃料噴霧と空気との混合気形成は重要な要素であり、その混合気形成はノズルの形状、燃料噴射圧力、雰囲気圧力に依存することが知られている。したがって、燃焼改善を目的として小径のノズルや燃料の高圧噴射がディーゼルエンジンに適用される傾向にある。また、ノズル噴孔の小径化や燃料噴射圧力が燃料噴霧やディーゼル燃焼に及ぼす影響について、多くの報告がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。

近年、ディーゼルエンジンの燃焼効率の更なる改善を目的として過給圧が従来のエンジンと比較して高くなる傾向にある⁽⁹⁾。高過給により従来のエンジンに対して燃焼室内の雰囲気圧力が高くなり、その結果、雰囲気密度も高くなる。そのため、ディーゼル噴霧と空気との混合気形成の過程が異なると予想され、雰囲気高圧力下、つまり高密度雰囲気下における噴霧挙動についての調査が必要となる。

雰囲気密度と噴霧挙動に関する調査については、過去に多くの報告がなされている。特に、雰囲気密度が噴霧到達距離や噴霧角に与える影響について多くの知見が得られている⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾。最近の報告では、Roisman⁽¹²⁾らは、自然吸気エンジン相当の雰囲気密度条件下における噴霧到達距離に与える雰囲気密度の影響について実験的、理論的な観点から調査している。過給を考慮した雰囲気密度条件下での噴霧到達距離について、Svrcekら⁽¹³⁾は、可視化エンジンを用いて圧縮比 100:1 の条件

で調査している。Payriら⁽¹⁴⁾は、高過給時の雰囲気密度条件下における噴霧到達距離および噴霧角について調査している。著者らも、高過給を想定し、自然吸気エンジンの 4 倍程度の雰囲気密度での噴霧到達距離や噴霧角に関する調査を行ってきた⁽¹⁵⁾。一方、噴霧挙動について噴霧流動から調査した報告もなされており、例えば Caoら⁽¹⁶⁾は、PIVにより噴霧の速度場計測を行い、瞬時の速度場から噴霧内部の渦構造について報告している。Goldsworthyら⁽¹⁷⁾は、燃料の粘性が噴霧挙動に与える影響について噴霧の速度場計測から評価している。しかしながら、これらの報告では、自然吸気エンジン相当の雰囲気密度下での検討に限られている。このように、過去の報告では高過給エンジンを想定した高密度雰囲気下における噴霧到達距離や噴霧角についての検討は多くなされているが、噴霧流動に関する調査が十分になされていないように思われる。このような背景から著者ら⁽¹⁸⁾は自然吸気エンジンから高過給を想定した雰囲気密度の範囲で、雰囲気密度が噴霧流動に与える影響について PIV 法を用いて調査を行い、噴霧の平均速度分布から雰囲気密度の増加につれて噴霧中心と噴霧外縁との速度差が増すことを示した。しかしながら、雰囲気密度が噴霧流動へ及ぼす影響について詳細に検討するためには、噴霧の平均速度分布だけでなく、噴霧の非定常性を考慮し時系列の瞬時速度分布も評価する必要がある。そこで、本研究では時系列 PIV による噴霧の速度分布を解析し、噴霧の平均速度場だけでなく、噴霧の時系列瞬時速度場と平均速度場の両者から雰囲気密度が噴霧流動に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。本実験装置は、噴霧を形成するための燃料噴射装置と高压容器および、噴霧の挙動を観察するための撮像系から構成される。コモンレール式燃料噴射装置により高压容器内に燃料を噴射し、自由噴霧を形成した。また、直径 0.17mm の単噴孔ノズルを使用し、供試燃料として JIS2 号軽油を用いた。本実験では PIV 法を噴霧挙動の計測に適用するため、高压容器にアクリル製の可視化窓を設けてある。噴霧の可視化には、Ar⁺レーザーによる連続光を用いて、シリンドリカルレンズと凸レンズによりシート光(厚さ:1mm)を形成し、シート光で照明された測定領域の噴霧を高速デジタルビデオカメラ(Vision Research, Phantom V12.1)で撮影し、噴霧断面の時系列画像を得た。高速カメラと燃料噴射の同期はパルスジェネレータの信号により行った。

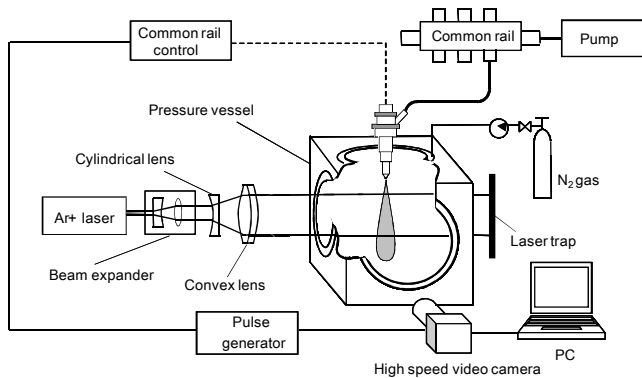


Fig. 1 Experimental apparatus

実験条件を表 1 に示す。高压容器内の雰囲気条件は常温(300K)で圧力 $P_a = 0.5, 1.0, 2.0, 4.0\text{MPa}$ の窒素雰囲気とし、この条件ではガス密度がそれぞれ $\rho_a = 5.8, 11.6, 23.2, 46.5\text{kg/m}^3$ である。なお、 $P_a = 1.0\text{MPa}$ のガス密度は自然吸気エンジンの着火時における雰囲気密度に相当する。一回の燃料噴射量を $M_{inj} = 31.5\text{mg}$ とし、その時の噴射期間を 3.2ms とした。また噴射圧力は $P_{inj} = 150\text{MPa}$ とした。

噴霧速度の解析には、時系列 PIV 法を適用した。PIV 解析には、2 時刻間における相関画像が必要なため、雰囲気密度に依存した噴霧速度の条件により高速カメラの撮影速度が決

Table 1 Experimental condition

Nozzle shape	Circular hole			
Nozzle hole diameter [mm]	0.17			
Ambient temperature [K]	300			
Ambient pressure P_a [MPa]	0.5	1.0	2.0	4.0
Ambient density [kg/m^3]	5.8	11.6	23.2	46.5
Injection mass M_{inj} [mg]	31.5			
Injection period [ms]	3.2			
Injection pressure P_{inj} [MPa]	150			
Test fuel	Diesel fuel (JIS.2)			

Table 2 Setting condition of camera

Ambient density ρ_a [kg/m^3]	1.1	5.8	11.6	23.2	46.5
Ambient pressure P_a [MPa]	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0
Frame rate [f.p.s]	-	583,333	341,463	130,232	130,232
Exposure time [μs]	-	0.5	1	3	3
Image size [pixel] (Height \times Width)	-	32 \times 128	64 \times 128	128 \times 256	128 \times 256

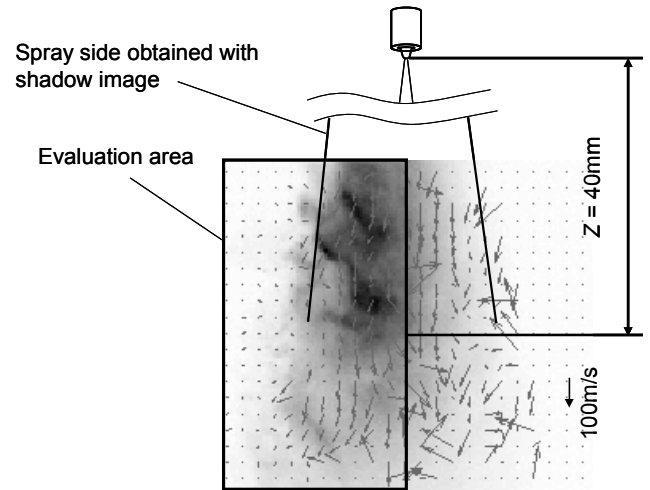


Fig. 2 Evaluation area for PIV measurement

定する。表 2 に高速カメラの設定条件を示す。全ての雰囲気密度条件で 0.1Mfps 以上の撮影速度で噴霧の時系列画像を撮影した。撮影速度と画像サイズは雰囲気密度の条件により異なるが、空間解像度は 0.157mm/pixel 一定とした。撮影された噴霧画像では、空間解像度の不足により噴霧液滴が解像されないため、液滴群が濃度分布として撮影される。したがって、PIV 解析から得られる速度は液滴群の濃度分布の速度に対応する。また PIV 解析には直接相互相関法を用いた。本解析では相関窓の大きさを 12pixel \times 12pixel (1.87mm \times 1.87mm) とし、グリッド間隔を 6pixel とした。

撮影領域についてはノズルからの距離 $Z = 40\text{mm}$ を中心とした領域を撮影した。本実験ではレーザーシート光を噴霧の左側から入射させたため、ノズル中心軸より右側では左側の噴霧による光の減衰から明瞭な噴霧の画像が得られなかった。よってノズル中心軸に対してレーザーの入射側の速度分布を評価の対象とした(図 2)。

燃料の噴射特性について Bosch 長管式噴射率計を用いて得られた噴射率の経時変化を図 3 に示す。燃料噴射の条件は、噴射圧力 $P_{inj} = 150\text{MPa}$ 、噴射期間 $t_{inj} = 3.2\text{ms}$ とし、長管内の背圧 P_b を 3MPa とした。図より噴射率波形の立ち上がり後、つまり 0.5ms 以降では波形に若干の変動をみることができ、著者ら⁽¹⁵⁾の過去の検討からその区間における噴霧角の変動は小さく、ほぼ一定の噴霧角を示す噴霧が形成された。そこで、以後の噴霧幅解析および速度場解析で時間平均処理を行う場合、噴射開始から 0.5ms 以降の噴霧について解析した。

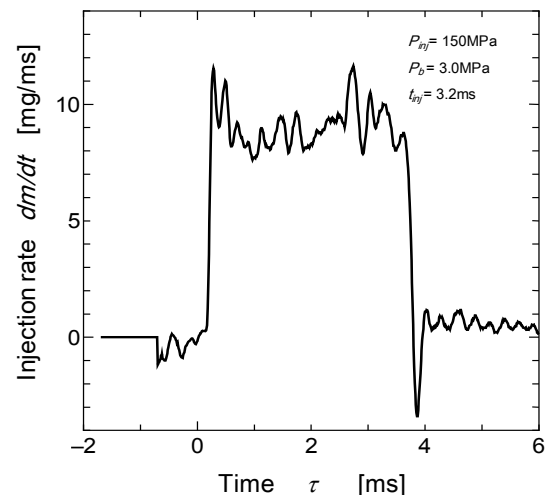


Fig. 3 Injection rate

3. 実験結果

3.1 影写真による噴霧幅解析

噴霧影写真に画像処理を用いることで、雰囲気圧力による噴霧幅の変化について検討した。図4は噴霧幅の解析手順となる。噴霧の影写真は、噴射開始から噴射終了まで撮影される。本解析では噴霧の平均的な外形から噴霧幅を評価するため、噴霧の時系列画像のうち噴射開始から0.5ms以降の画像を用いて平均画像を作製した。その平均画像の輝度値について閾値を設け噴霧のエッジ抽出処理を施し、噴霧幅を評価した。ここで、噴霧と背景を区別するため、影写真の輝度値の最大値と最小値の中央値を閾値として採用した。

表3はノズル噴孔から40mm下流の位置における噴霧幅(2W_{shadow})である。表3の結果から、雰囲気圧力の増加に伴い噴霧幅が増加しており、雰囲気圧力の増加に伴い噴霧角が増加する傾向⁽¹⁵⁾と一致した。

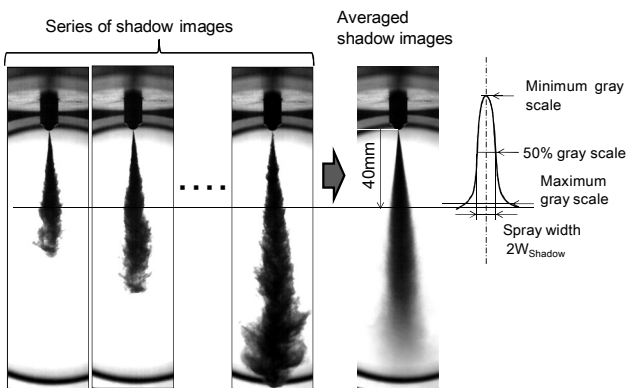


Fig. 4 Procedure for spray width analysis

Table 3 Spray width

Ambient pressuer P_a [MPa]	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0
Ambient density ρ_a [kg/m ³]	1.1	5.8	11.6	23.2	46.5
Spray width $2W_{shadow}$ [mm]	1.9	4.2	5.2	6.8	8.6

3.2 時系列における噴霧速度場

時系列 PIV 解析から得られた噴霧の時系列瞬時速度場を図5に示す。速度場の一例として、NAエンジンの雰囲気密度に相当する $\rho_a = 11.6\text{kg/m}^3$ と高過給時を想定した雰囲気密度 $\rho_a = 46.5\text{kg/m}^3$ の結果を示した。 τ は噴射開始からの経過時間を表す。PIVから得られた速度場は解析に使用した噴霧の画像と同時に示してある。噴霧先端付近について、噴霧が確認できない領域にも速度ベクトルが得られているが、その要因として相関窓内に噴霧先端近傍の輝度情報が含まれているため、速度算出がなされている。

NAエンジンの雰囲気密度に相当する条件(図5(a))では、噴霧外縁付近の噴霧は半径方向に広がりながら下流へと流動していることがわかる。NAエンジンの雰囲気密度に対して4倍程度の雰囲気密度(図5(b))になると半径方向に広がった噴霧により噴霧外縁付近に渦流れの構造($\tau = 0.627\text{ms} - 0.739\text{ms}$)が確認できる。このことから、雰囲気密度の増加により規模の大きな渦流れの構造が生じやすくなることがわかる。また雰囲気密度に依らず噴霧先端付近の速度が上流側の速度よりも遅くなる傾向が現れている。Zhuら⁽¹⁹⁾はPIV計測により噴霧の周辺雰囲気の流れについて解析しており、噴霧先端付近の雰囲気は噴霧により噴霧の進行方向に押し出されていることを明らかにしている。このことを考慮すると、噴霧先端付近では噴霧の持つ運動量が雰囲気との間で交換されたため、先端付近の速度が減少したと考えられる。また、噴霧中心軸近傍の速度に対して噴霧外縁付近の速度が減少していることから、雰囲気との運動量交換が行なわれていると考えられる。

3.3 噴霧の軸方向速度の半径方向分布

噴霧の平均軸方向速度について、半径方向分布を評価した。軸方向の平均速度の算出には、噴射率が定常な期間で撮影された時系列の噴霧画像に対してPIV解析を実施し、得られた瞬時の速度分布を平均した。さらに異なる3回の実験から得られた平均速度分布を平均した。結果的に、得られた平均速度は1000データ以上の平均から得られている。図6に各雰囲気密度におけるディーゼル噴霧の平均速度場を示す。図6の平均速度分布をもとに、噴孔から40mmにおける半径方向の

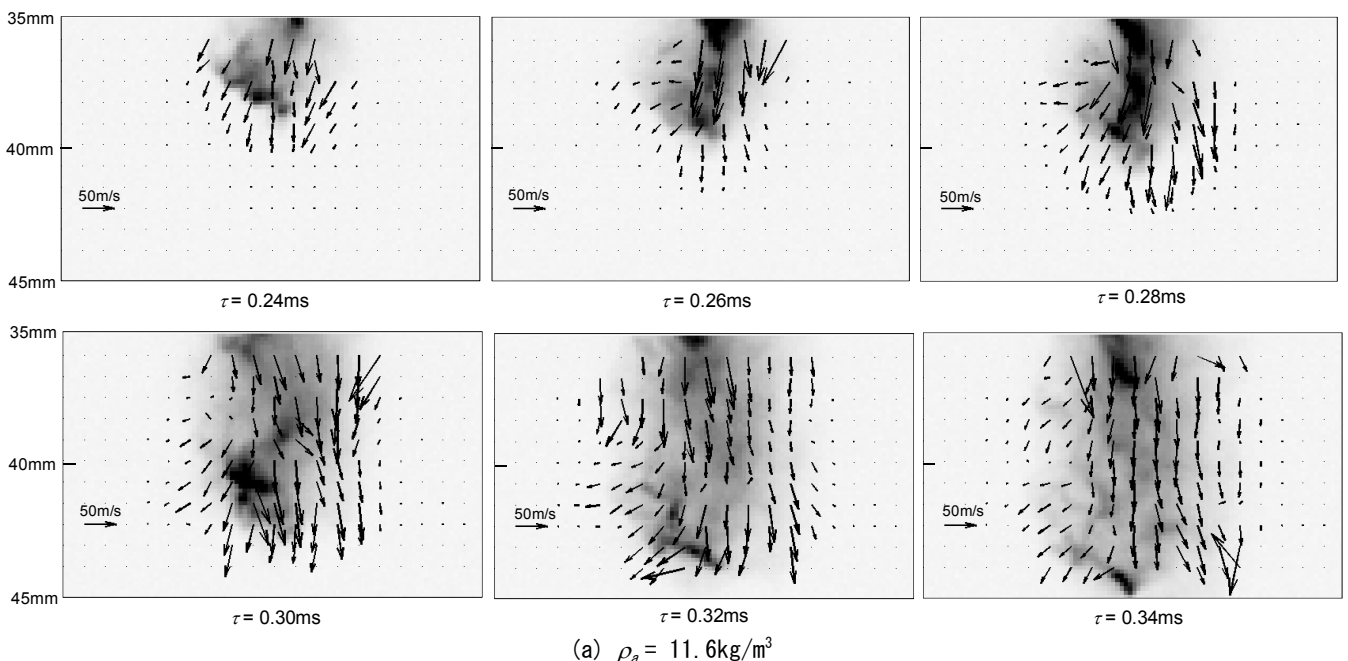
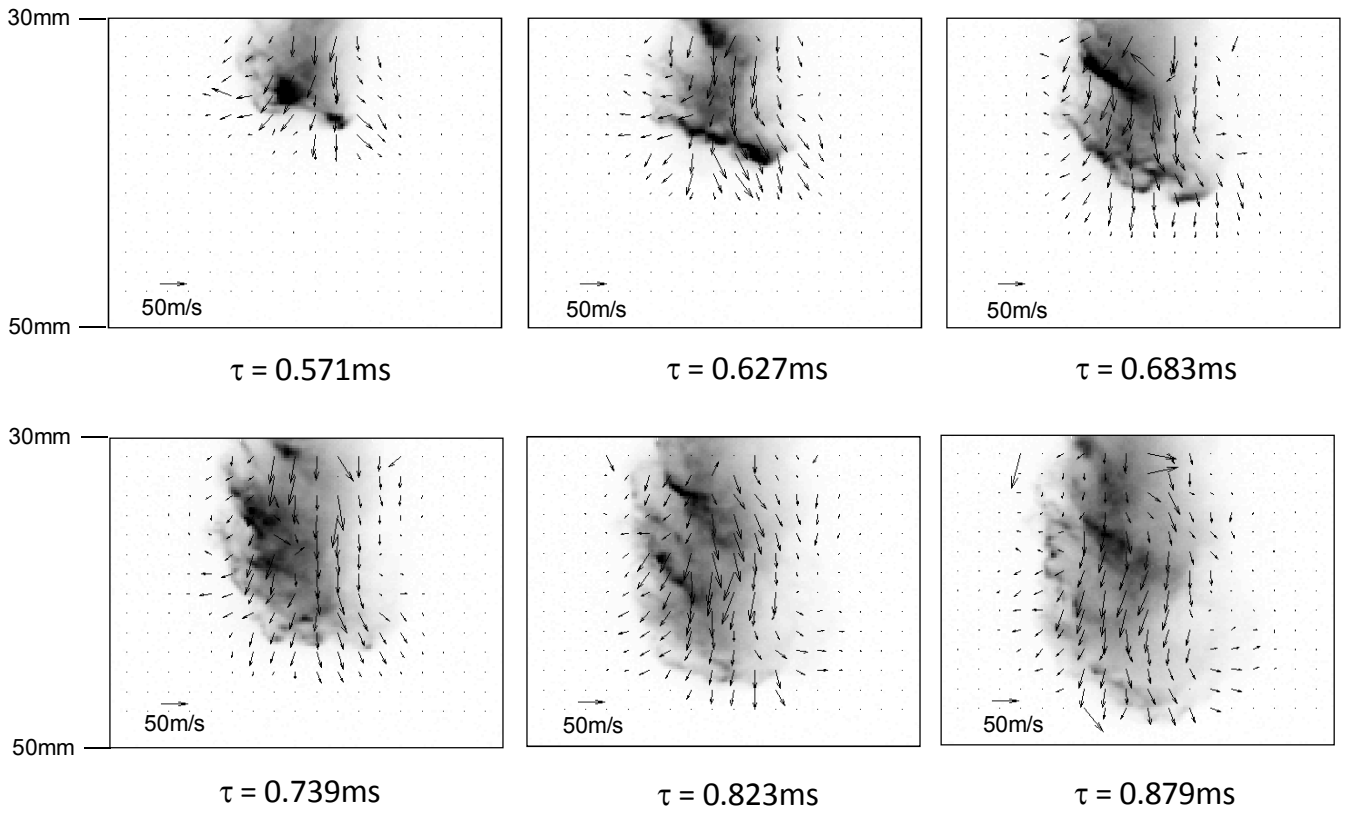


Fig. 5 Instantaneous velocity field of spray inside



(b) $\rho_a = 46.5\text{kg/m}^3$

Fig. 5 Instantaneous velocity field of spray inside

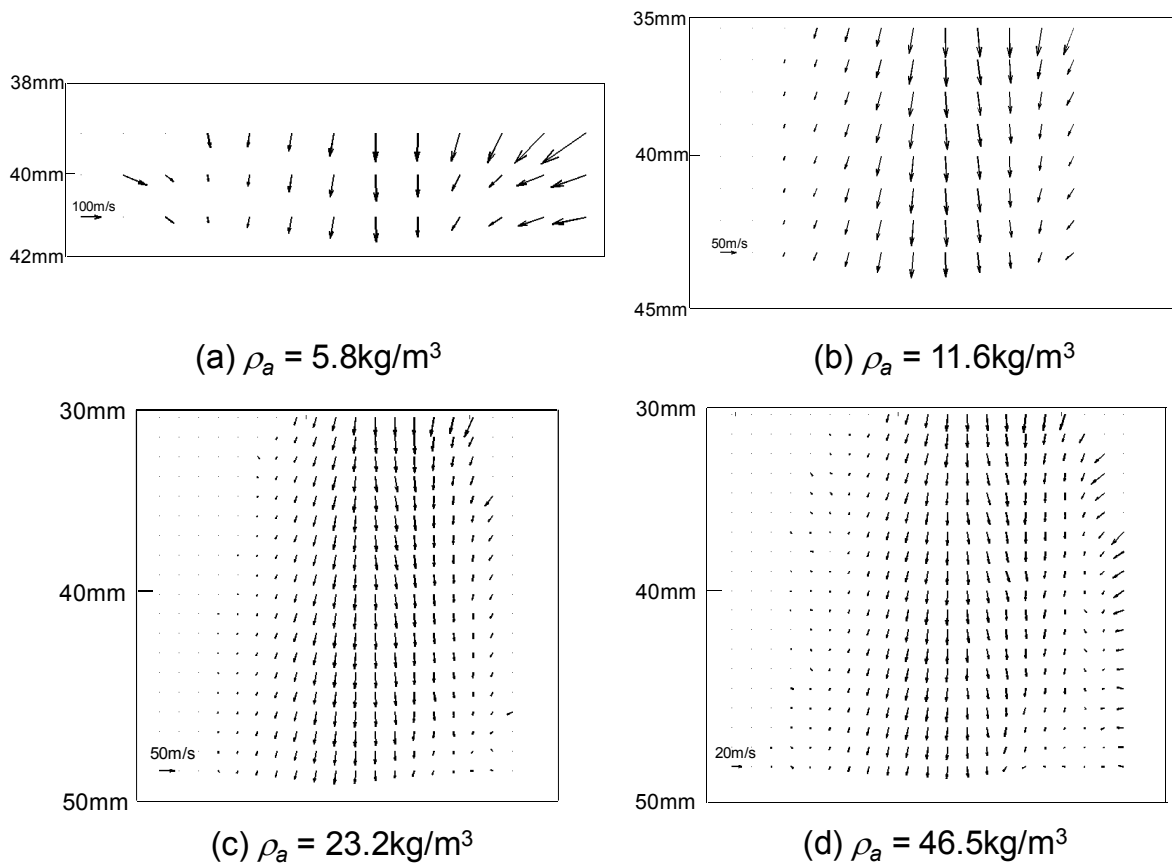


Fig. 6 Ensemble mean velocity field of diesel spray

軸方向平均速度分布を図7に示す。半径方向の原点($r = 0$)は、PIV から得られた速度の最大値を示す位置とした。ここで、図7の速度分布について、式(1)に示すガウス関数を導入した。 U_m は軸方向速度の最大値、 r_c は実験値を式(1)で近似した原点、 σ は標準偏差となる。

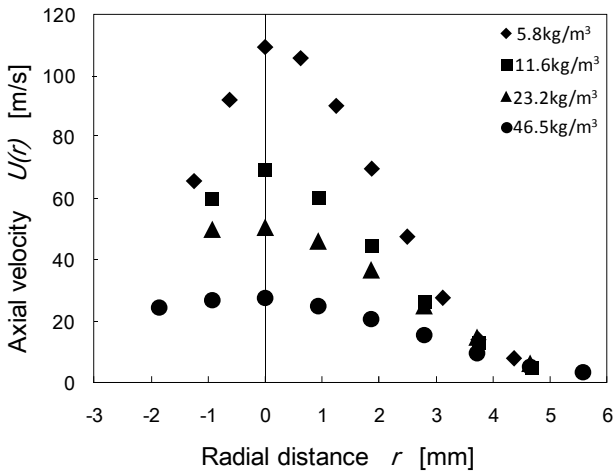


Fig. 7 Mean axial velocity distribution at Z=40mm

$$U(r) = U_m \exp\left(-\frac{(r-r_c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

図7の速度分布に最小二乗法を適用し、式(1)の U_m , r_c , σ を決定した。

次に便宜上、式(1)について $r-r_c$ を r_s と置き、式(2)を実験値の近似に適用した。

$$U(r_s) = U_c \exp\left(-\frac{(r_s)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 U_c は半径方向の軸を r_s で置き換えた後の噴霧軸上の速度となる。

r_s 軸に置き換えた図7の実験値のプロットと式(2)で近似される速度分布を図8に示す。また、同時に式(2)の標準偏差も図中に示した。

図8より速度分布と標準偏差は雰囲気密度により変化し、

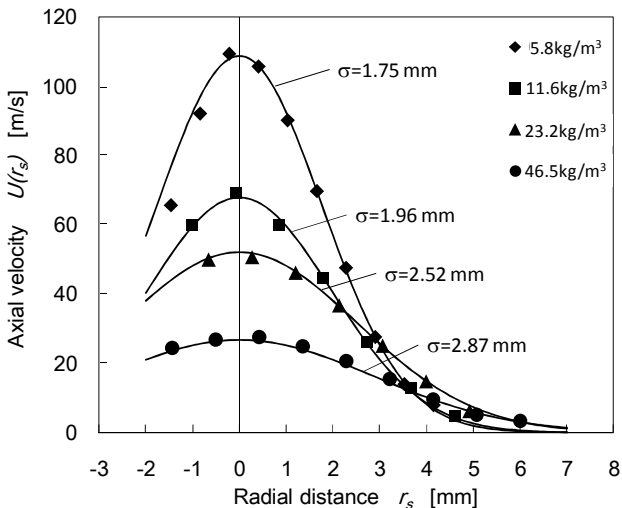


Fig. 8 Axial velocity distribution fitted with an axisymmetric Gaussian function

標準偏差は雰囲気密度の増加につれて増加した。ここで、ガウス関数内の標準偏差はガウス分布の広がり表わす指標である。つまり、速度分布の広がりを表わす標準偏差が雰囲気密度の増加とともに大きくなるということは、噴霧幅も増加することに一致する。言い換えれば、速度分布の標準偏差の物理的な意味は、噴霧角に相当するといえる。

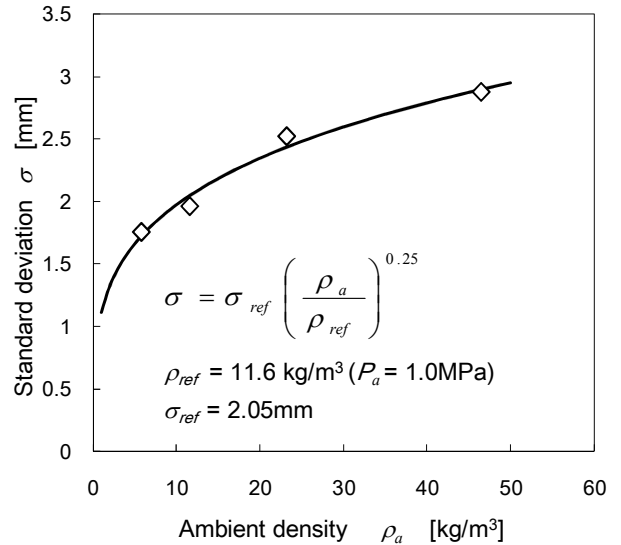


Fig. 9 Ambient density vs. standard deviation

次に、雰囲気密度と標準偏差との関係を図9に示す。図中のプロットは、図8から読み取れる標準偏差となる。ここで、両者の関係について、式(3)の関係式を導入する。

$$\sigma = \sigma_{ref} \left(\frac{\rho_a}{\rho_{ref}}\right)^n \quad (3)$$

ρ_a は雰囲気密度、 ρ_{ref} は雰囲気密度 ρ_a を無次元化するための雰囲気密度、 σ_{ref} は ρ_{ref} における標準偏差となる。

前述したように、式(2)中の標準偏差は物理的な意味として噴霧角に相当する。廣安ら⁽²⁰⁾はディーゼル噴霧における雰囲気密度と噴霧角の関係について実験式を提案しており、彼らの式によれば噴霧角が雰囲気密度の0.25乗に比例することが示されている。そこで、本研究においても、式(3)について $n = 0.25$ を採用した。 $\rho_{ref} = 11.6 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_{ref} = 2.05 \text{ mm}$ とすると、図中の実線で示される通り、雰囲気密度と標準偏差との関係が式(3)によってよく表現されることがわかった。

$$U(r_s) = U_c \exp\left(-\frac{(r_s)^2}{2\sigma^2}\right) = U_c \exp\left\{-\frac{(r_s)^2}{2\sigma_{ref}^2 \left(\frac{\rho_a}{\rho_{ref}}\right)^{0.5}}\right\} \quad (4)$$

ここで、式(2)に式(3)を代入することで式(4)の関係が得られる。式(4)の速度分布の式から速度勾配が最大となる半径方向の位置について検討を行った。

式(4)の二階微分を0と置くことで速度勾配が最大となる r_s

が求まる (式(5)). このとき速度勾配が最大となる $r_s = \sigma$ で, 中心速度で無次元化された噴霧速度は式(6)のように 0.606 となった.

$$\frac{d^2}{dr_s^2} \left(\frac{U(r_s)}{U_c} \right) = 0 \quad (5)$$

$$r_s = \sigma$$

$$\left. \frac{U(r_s)}{U_c} \right|_{r_s=\sigma} = 0.606 \quad (6)$$

速度勾配が最大となる位置の物理的な解釈として, せん断力が最も高くなる位置に相当する. つまり, 混合層がその位置の付近に形成されると考えられる.

そこで速度勾配が最大となる半径方向の位置と噴霧との位置関係を調べた. 噴霧の中心速度で正規化した軸方向速度の半径方向分布と噴霧影写真から得られた輝度分布との比較を図 10 に示す. 図中の●印は PIV 解析から得られた軸方向速度分布を示し, 実線はその速度分布を式(4)で近似した曲線となる. また, ■印は噴霧影写真から得られた輝度の最大値で無次元化された輝度分布となる.

ここで, 影写真法で撮影される噴霧画像は, 噴霧内の光路で積算された噴霧濃度に相当するため, シート光による二次元断面から得られる噴霧幅と異なることが懸念される. そこで, 3.1 節の方法に準じて PIV 解析に用いた噴霧の断面画像

から噴霧幅を算出した. 具体的には, 時間平均画像を作成し, 50%の輝度を閾値とした. ただし, 前述したように中心軸に対して光源の入射と反対側では明瞭な噴霧画像が取得できなかったため, 直接, 噴霧の幅を解析することは困難であった. そこで, 速度分布のガウス関数近似から求められた中心軸の位置を基準として光源入射側の噴霧外縁までの距離(噴霧幅の半分)を算出した.

噴霧断面画像から得られた噴霧幅を図 10 に点線矢印で示す. 雰囲気密度 $\rho_a = 11.6 \text{ kg/m}^3$ の値が影写真から得られた値と異なるが, 他の条件では概ね一致した. したがって, 影写真から得られた噴霧幅は断面における噴霧幅とほぼ同等であると考えられる. そのため, 本解析においては影写真から得られた噴霧幅を採用した.

3.1 節で求めた噴霧幅の解析では, 輝度分布の 50%を噴霧の外縁として評価した. その 50%の輝度となる半径方向の位置と速度勾配が最大となる半径方向の位置を比較すると, 雰囲気密度の増加に従い噴霧外縁に相当する 50%輝度の半径方向の位置に対して速度勾配が最大となる半径方向の位置が噴霧の内側に移行する傾向が観られた. ただし, 表 3 から雰囲気密度により噴霧の幅が異なることから, 噴霧外縁に対する速度勾配が最大となる位置を異なる雰囲気密度条件との間で比較するには, 半径方向の軸を噴霧幅で正規化し比較する必要がある. そのため, 半径方向を噴霧影写真から得られた噴霧幅の半値 (W_{shadow}) で無次元化し, 噴霧軸上の軸方向速度で無次元化した軸方向速度の半径方向分布を図 11 に示す. 図中のプロットは PIV 解析から得られた速度分布を示し, 実線は式(4)から得られた速度分布となる. 雰囲気密度 1.1 kg/m^3 の条件では, 噴霧の液滴数密度が高く高速であったため, PIV 解析

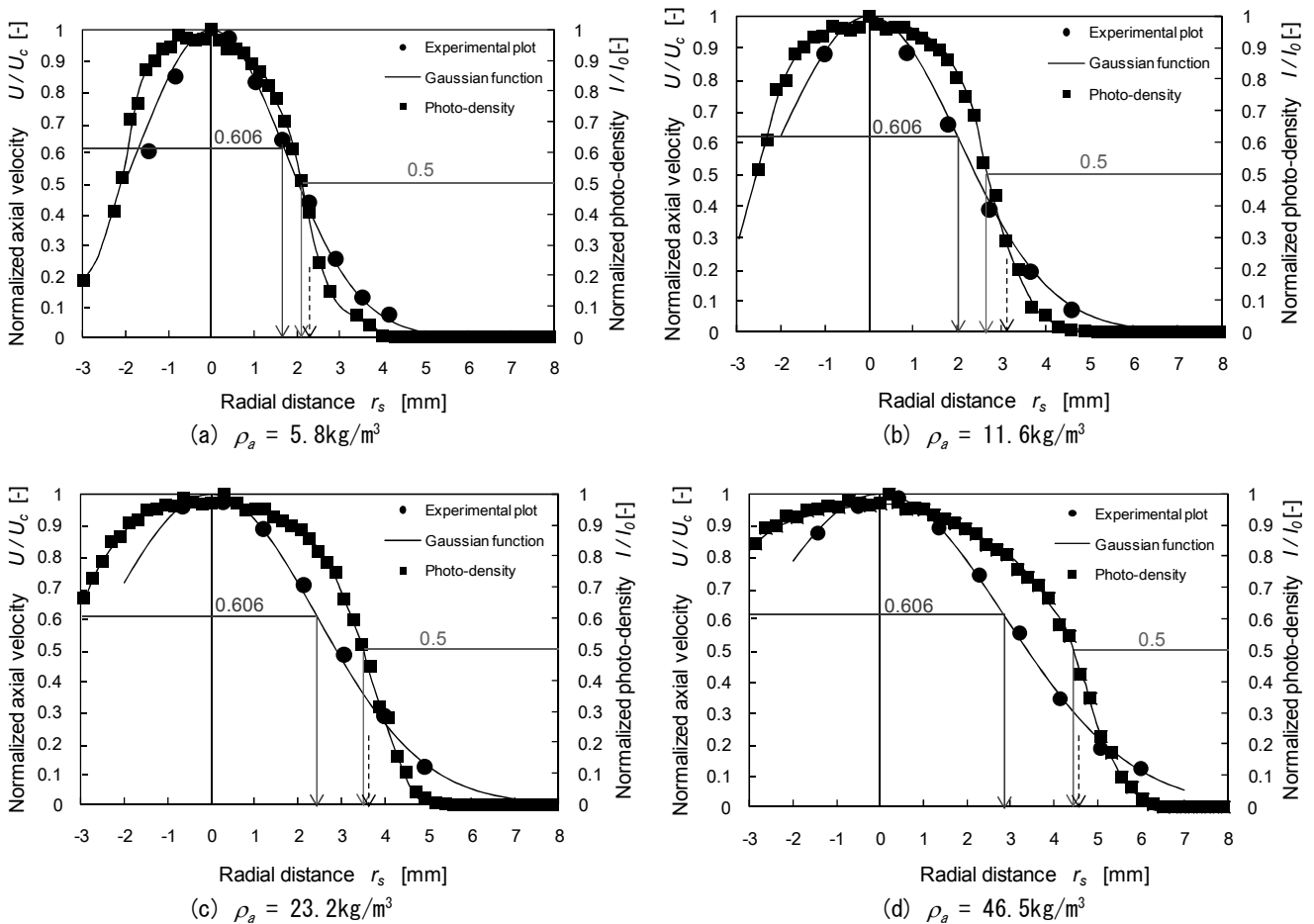


Fig. 10 Photo-density distribution vs. axial velocity distribution

が困難であった。そのため、式(4)から得られた速度分布(点線)のみ図中に示してある。

図 11 より噴霧軸上の中心速度に対する噴霧外縁の速度を比較すると、霧囲気密度 1.1kg/m^3 では中心速度に対して 72%、 5.8kg/m^3 で 45%、 46.5kg/m^3 では 30%となっており霧囲気密度の増加に従い中心速度と外縁速度との差が増加することがわかった。したがって、高密度霧囲気では噴霧と高密度の霧囲気との運動量交換により噴霧外縁の速度が減少しやすくと考えられる。次に速度勾配が最大となる位置について、中心速度が 0.606 となる半径方向の位置に着目すると、霧囲気密度の増加に従い、噴霧外部から内部へと速度勾配が最大となる位置が移行することがわかった。つまり、混合層の位置が霧囲気密度の増加に従い噴霧外部から内部へと移行すると考えられる。噴霧影写真に対して 50%画像濃度閾値で決定した噴霧幅で評価した場合、霧囲気密度 1.1kg/m^3 では、混合層の位置が噴霧の外部 ($r_c / W_{shadow} > 1$) に存在することから、噴霧と霧囲気との混合効果が弱くなると考えられる。

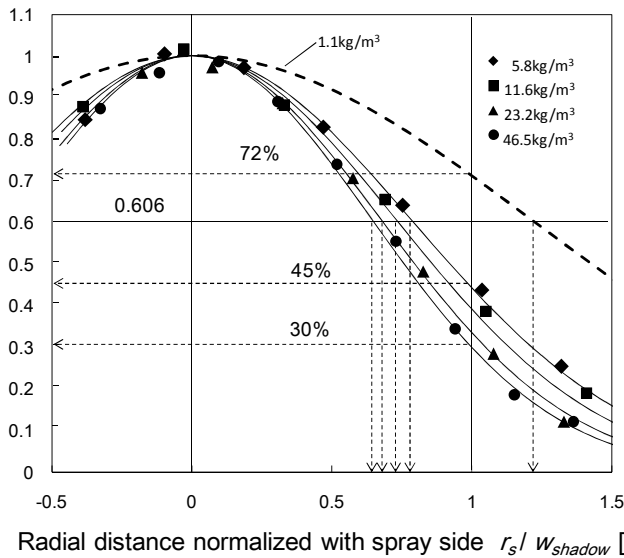


Fig. 11 Axial velocity distribution normalized with center velocity

3.4 噴霧の混合層モデル

前節 3.3 の結果から推測される混合層を考慮した噴霧モデルを図 12 に示す。霧囲気密度が低い場合、混合層は噴霧の外

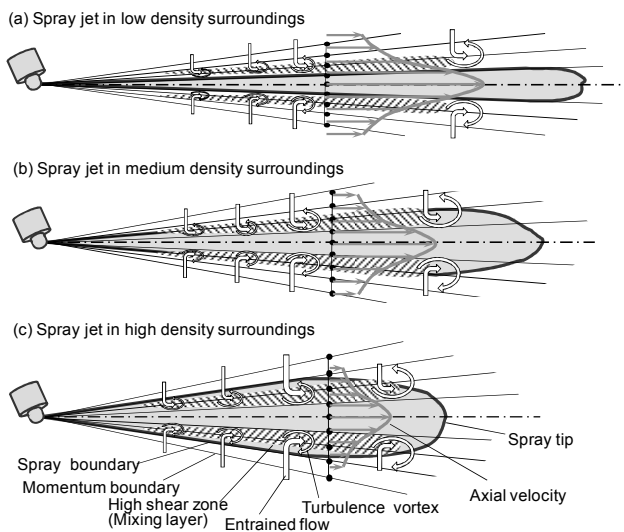


Fig. 12 Spray model with mixing layer

部に存在する。霧囲気密度が中程度での噴霧は、混合層が噴霧外縁の近傍に存在するため、噴霧と空気との混合気形成にとって有利となると考えられる。また、高密度霧囲気下では、混合層が噴霧内部に存在することから噴霧内部の均一性が増すと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下の通りとなる。

1. 噴霧影写真から 50%画像濃度閾値で定義される噴霧幅は、霧囲気密度の増加につれて増大する。
2. 時系列の瞬時速度場から霧囲気密度が高くなると、規模の大きな渦流れ構造が現れる。
3. 軸方向速度の半径方向分布についてガウス関数で表わされることが確認され、速度分布に与える霧囲気密度の影響がガウス関数に基づく実験式で表現されることがわかった。
4. 速度分布の広がり指標となる標準偏差の値は、霧囲気密度の 0.25 乗に比例する。
5. 噴霧外縁の動きが高密度の霧囲気により抑制され、噴霧中心と噴霧外縁の速度差が霧囲気圧力の増加とともに大きくなる。
6. 軸方向速度の半径方向分布から、混合層の位置が霧囲気密度の増加に従い噴霧外部から内部へと移行することがわかった。

5. 謝辞

本研究で用いた高速度カメラは、株式会社ノビテックに提供していただいたものである。ここに記し、謝意を表す。

文 献

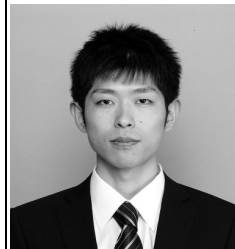
- (1) Tabata, M., Hiroyasu, H., Arai, M. :Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray, SAE paper, No.890464(1989), 97-106.
- (2) Soteriou, C., Andrews, R., Smith, M. :Further Studies of Cavitation and Atomization in Diesel Injection, SAE paper, No.1999-01-1486(1999)
- (3) Katsura, N., Saito, M., Senda, J., Fujimoto, H. :Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a wall, SAE paper, No.890264(1989), 191-207.
- (4) Zurlo, J. R., Chigier, N. :Impinging Diesel Spray Dynamics, Atomization and Spray, 1 (1991), 303-318.
- (5) Tanabe, N., Takahashi, M., Sato, G. T., Kato, S., Onishi, S.: Experimental Study on Unsteady Fuel Spray Impinging onto a Projection on a Wall, Proceedings of COMODIA-94(1994), 379-384.
- (6) Fujimoto, H., Hyun, G. S., Nogami, M., Hirakawa, K., Asai, T., Senda, J. :Characteristics of Free and Impinging Gas Jets by Mean of Image Processing, SAE paper, No.970045(1997), 11-25.
- (7) Lopez, J. J., Pickett, L. M. :Jet/Wall Interaction Effects on Soot Formation in a Diesel Fuel Jet, Proceedings of COMODIA-2004(2004), 387-394.
- (8) Lopez, J. J., Pickett, L. M. :Jet/Wall Interaction Effects on Diesel Combustion and Soot Formation, SAE paper, No.2005-01-0921(2005), 75-89.
- (9) Kobayashi, M., Aoyagi, Y., Adachi, T., Murayama, T., Noda, A., Goto, Y., Suzuki, H., Effect of high boost and high EGR on the super clean diesel engine, Proceedings of COMODIA-2008(2008), 129-136.

- (10) 廣安博之, 角田敏一, 田坂真一:ディーゼル噴霧の到達距離に関する研究, 日本機械学会論文集, 44-358(1978), 3208-3219.
- (11) 神本武征, 松岡信, 志賀聡:ディーゼル機関の燃料噴霧の噴射初期における到達距離, 日本機械学会論文集, 41-342(1975), 672-683.
- (12) Roisman, I. V., Araneo, L., Tropea, C. :Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray, Int. J. Multiphase flow, 33(2007), 904-920.
- (13) Svrcek, M. N., Miller, S. L., Edwards, C. F. :Diesel spray behavior at compression ratio up to 100:1, Atomization and spray, 20-5(2010), 453-465.
- (14) Payri, R., Tormos, B., Salvador, F.J. Araneo, L. :Spray droplet velocity characterization for convergent nozzles with three different diameters, Fuel, 87(2008), 3176-3182.
- (15) 真中佑太, 座間淑夫, 新井雅隆, ディーゼル噴霧の噴霧角に対する雰囲気圧力の影響, 第19回微粒化シンポジウム, 東京, 2010, 12月
- (16) Cao, Z., Nishino, K., Mizuno, S., Torii, K., PIV measurement of internal structure of diesel fuel spray, Exp. in Fluid, 29(2000), S211-S219.
- (17) Goldsworthy, L. C., Bong, C., Brandner, P. A., Measurements of Diesel spray dynamics and the influence of fuel viscosity using PIV and shadowgraphy, Atomization and Spray, 21-2(2011), 167-178.
- (18) 座間淑夫, 真中佑太, 新井雅隆, ディーゼル噴霧構造に与える雰囲気圧力の影響, 自動車技術会論文集, 43-2(2012), 407-412.
- (19) Zhu, J., Nishida, K., Ambient gas mixing process of D.I. Diesel spray, 第20回微粒化シンポジウム, 広島, 2011, 12月20日.
- (20) Hiroyasu, H., Arai, M. :Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines, Trans. JSAE, 21(1980), 5-11.



座間 淑夫
 群馬大学大学院 工学研究科
 機械システム工学専攻・助教
 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1
 Tel.0277-30-1520
 Fax.0277-30-1521

略歴：2006年埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程修了
 主としてディーゼル噴霧と燃焼, 流れの可視化に関する研究に従事



落合 渉
 群馬大学大学院 工学研究科
 機械システム工学専攻
 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1
 Tel.0277-30-1524
 Fax.0277-30-1521

略歴：2010年より群馬大学大学院工学研究科博士前期課程に在籍。主としてディーゼル噴霧流動に関する研究に従事



新井 雅隆
 群馬大学大学院 工学研究科
 機械システム工学専攻・教授
 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1
 Tel.0277-30-1522
 Fax.0277-30-1521

略歴：1977年東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了
 主として微粒化機構, ディーゼル噴霧と燃焼, 高温燃焼, 過重力下での燃焼に関する研究に従事