

特集 多噴孔ノズルからの高圧噴射ディーゼル噴霧への エアエントレイン計測*

Air Entrainment Measurement of High Pressure Diesel Spray from Multi-hole Nozzle

山下 勇人

Hayato YAMASHITA

戸田 直樹

Naoki TODA

増田 誠

Makoto MASHIDA

It has been reported that increasing of injection pressure up to 300MPa is effective to reduce soot emission and fuel consumption¹⁾. The increasing air entrainment amount into spray, especially from nozzle tip to set-off length, is included as a factor of soot reduction. In order to verify the hypothesis, the air entrainment amount was quantitatively estimated from the air flow velocity surrounding the spray and spray superficial area. The measurement of the air flow was carried out at non-evaporating condition using consecutive PTV (particle tracking velocimetry) method with a high-speed camera and a high-frequency Nd : YAG laser. The soot reduction effect was considered by the estimated air entrainment amount.

Key words : Diesel Engine, Fuel Injection, Spray Combustion, Particle Tracking Velocimetry and Flow Visualization

1. 緒言

乗用車用ディーゼルエンジンにおいて量産エンジンにおいても予混合型の燃焼が採用され始めた²⁾が、中～高負荷領域では従来型のディーゼル燃焼が主体であり soot と NOx のトレードオフの改善が求められている。このトレードオフの改善手段の一つとして、EGR と過給増量に高圧噴射を組合せた手法があり、小島らは最大 300MPa の噴射系を開発し、等 NOx で soot 排出量が低減することを報告している¹⁾。

この従来型のディーゼル燃焼において、着火遅れ期間後に噴射された燃料は先に噴射された燃料が形成した火炎の中に突入していく。この着火遅れ期間後に噴射された燃料が突入する火炎の最もノズルに近い位置は、新井らにより set-off 長（可燃混合気が準備され燃焼が開始されるまでの距離）と定義されており³⁾、set-off 長が短いと周囲ガスを十分に取り込む前に燃焼するため soot 生成量は増加する。また、set-off 長が長くても、周囲ガスとの混合が悪い状態で火炎に突入すると soot が大量に生成される。よって従来型のディーゼル燃焼における soot 排出量低減には、着火遅れ期間後に噴射された燃料が火炎に突入するまでに周囲ガスを多く取り込むことが重要であり、小酒は急速圧縮装置の試験からこの関係の相関が高いことを報告している⁴⁾。

そこで本研究では高圧噴射時の soot 低減要因の一つとして、噴霧内に取り込んだ周囲ガス量（エアエントレイン量）の増加、特に set-off 長までのエアエントレイン量の増加があると考え、これを実証するため、噴射圧力をパラメータに噴霧へのエアエントレイン量を PTV 法（Particle Tracking Velocimetry）で計測した速度と噴霧表面積から定量的に求めた。量産エンジンのノズルは複数の噴孔を持ち、それぞれの噴孔から噴射された噴霧間の干渉により周囲ガスの挙動も変化すると考え、実際のエンジンと同様の多噴孔ノズルを用いた。計測した set-off 長までのエアエントレイン量を用い、高圧噴射時の soot 低減要因について考察した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置と条件⁵⁾

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。φ75mm×30mm の円筒状空間を持つ定容容器を用い、トレーサ粒子として平均粒径 80 μm のマイクロバルーンを用いた。トレーサ粒子は定容容器内に予め投入され、攪拌機により空間に均一に浮遊させた。攪拌機によるトレーサ粒子の移動速度は 0.1m/s 以下であり、燃料噴射による周囲ガスの移動速度（1～3m/s）に比べ十分に遅い。撮影は高速度カメラ（最大 50000fps, 解像度：512×208pixel）

*（社）日本機械学会の了解を得て「2014年 第25回内燃機関シンポジウム」講演論文集より一部加筆して転載

と光源にNd:YAGレーザー（最大50000Hz、波長532nm、発光時間20ns）を用い、これらを25000Hzで同期させ可視化した。

Table 1に実験条件を示す。条件は中～高負荷相当の値を設定した。ソレノイド駆動インジェクタを用い、噴孔径φ0.16mm、噴孔数8のノズルを用いた。噴射圧力は100～300MPaまで変化させ、噴射量は55mm³/stとした。雰囲気気場は密度20kg/m³とし、空気を容器内に充填した。

Table 1 Nozzle hole specification and Experimental condition

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Nozzle hole diameter | φ0.16 |
| Nozzle hole number | 8 |
| Nozzle type | Mini Sac |
| Injector type | Solenoid |
| Injection pressure | 100, 200, 300MPa |
| Injection quantity | 55mm ³ /st |
| Ambient density | 20kg/m ³ |
| Ambient temperature | 293K |
| Ambient gas | Air |

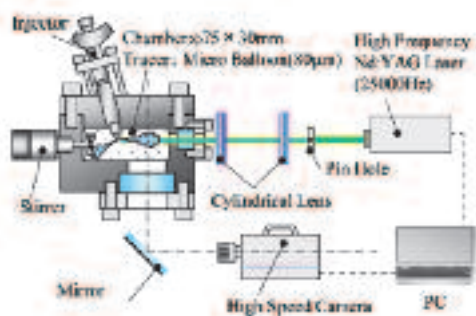


Fig. 1 Schematic diagram of Experimental Apparatus

2.2 PTV法によるエアエントレイン量計測

エアエントレイン量の計測方法として、空間に浮遊させたトレーサ粒子の速度から求める方法が知られている^{6) 7)}。速度はPIV (Particle Image Velocimetry) 法やPTV法などにより定量化されている。本研究では高

速度カメラと高繰返しNd:YAGレーザーを用いて可視化し、PTV法により1噴射中の個々のトレーサ粒子の速度と方向を時系列に計測した。噴霧に取り込まれる寸前の周囲ガスの速度を計測するため、レーザーは噴霧外縁に沿って厚さ1mmのシート状にして入射させた。このときレーザーが隣り合う噴霧に散乱するとトレーサ粒子が散乱光に隠れ、認識できなくなるため、レーザーシートは一旦拡大した後、再度集光することで先細り形状とし、隣り合う噴霧への照射を抑制した (Fig. 2)。撮影された画像は画像処理によりトレーサ粒子のみが抽出され、それぞれの粒子の1コマ毎の移動量から速度を求めた。同条件で複数回撮影、解析を行ない、噴霧外縁から0.5mm離れた2×1mmの領域に入った粒子の平均速度をその位置におけるエアエントレイン速度と定義した。エアエントレイン速度は噴霧外縁に対し垂直な方向 (Normal) とノズルに向かう方向 (Tangential) に成分を分解した。エアエントレイン量はそれぞれの位置のNormal方向の速度成分と噴霧表面積を乗算して求めた。噴霧表面積は噴霧を円錐状と仮定して求めた。

3. 結果

3.1 噴射率、噴霧形状およびset-off長

本研究で使用したインジェクタ、ノズルの噴射率特性とシャドウグラフ法で可視化 (室温、密度15kg/m³、アルゴンガス充填) した噴霧先端到達距離、噴霧画像を Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5に示す。Fig. 4には広安ら⁸⁾が提案する式で計算した噴霧先端到達距離もあわせて示す。噴霧先端到達距離は噴射圧200MPaに対し300MPaは長くなっており、計算結果と良い一致を示している。Fig. 5より各噴孔からの噴霧はアンバランスなく噴射していることから8噴孔の中から平均的な1噴孔を選び、その噴孔からの噴霧へのエアエントレイン速度を計測しこれを代表値とした。

soot排出量に寄与するset-off長までのエアエントレイン

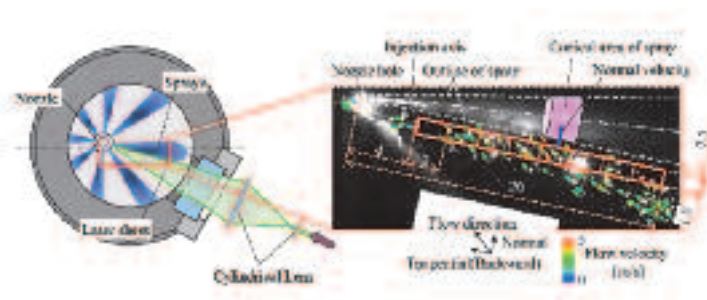


Fig. 2 Measurement section of air flow rate into spray

ン量を求めるため、高温高圧場での燃焼可視化試験を実施しset-off長を求めた (Fig. 6)。予燃焼式の定容容器⁹⁾を用い、充填した予混合気を点火プラグで着火、燃焼させて高温高圧場を形成した。予燃焼用の混合気はn-Propane, 酸素, 空気を予燃焼後に酸素濃度16%となるように調合した。雰囲気密度はエアエントレイン量計測と同じ 20kg/m^3 とし、雰囲気温度は従来型のディーゼル燃焼となる 1100K とした。set-off長は撮影したRGB画像のRの輝度値が閾値を超えた領域におけるノズルに最も近い位置として定義した。Fig. 6より本条件において、set-off長の平均値は噴射圧100MPaで12.3mm, 200MPaで13.9mm, 300MPaで15.8mmであり、噴射開始から0.55~1.2msの期間で観察された。この結果を基に、エアエントレイン速度、エアエントレイン量を計測した。

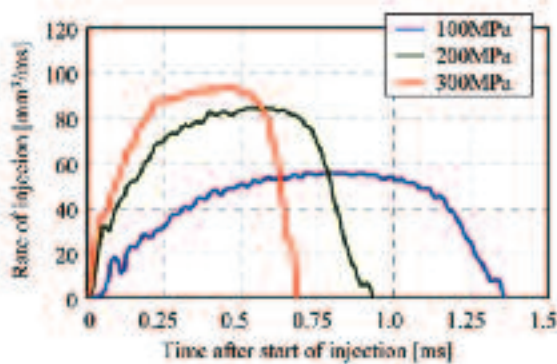


Fig. 3 Injection rate

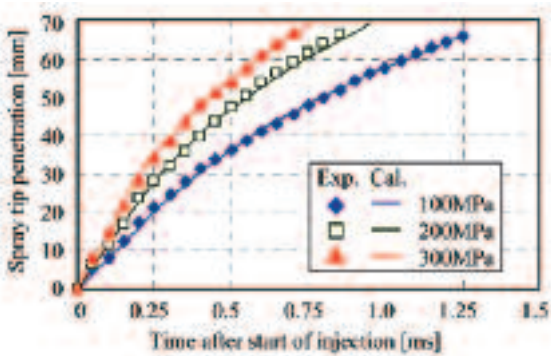


Fig. 4 Spray tip penetration

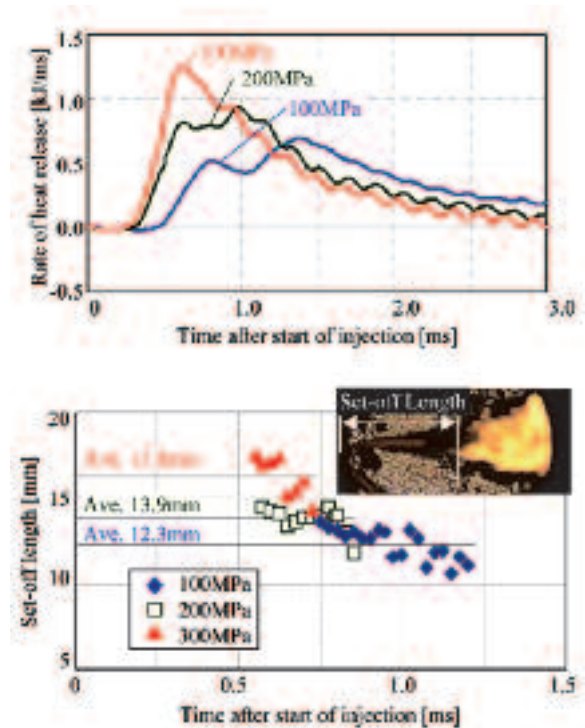


Fig. 6 Rate of heat release and set-off length @ Ambient condition : 6.3MPa , 1100K , 20kg/m^3 , $\text{O}_2 16\%$

3.2 エアエントレイン速度

Fig. 7にPTV法による計測結果を示す。掲載画像はそれぞれの噴射圧においてset-off長の平均値となる時期の画像である。画像中の矢印の方向が流れの方向を示しており、矢印の色は速度を示している。

噴霧から離れた位置では周囲ガスは噴霧先端側からノズルへ向かって流れており、噴射方向に対し逆流している様子が観察された。噴霧の近くでは噴霧外縁に向かう流れとなっており噴霧に周囲ガスが取り込まれる様子が観察された。また噴射圧の増加に対し、周囲ガスの移動速度は速くなっていることが分かった。

噴霧内へのエアエントレイン速度を得るため、噴霧外縁に垂直な向きに速度成分の時間変化を求めた結果をFig. 8に示す。ノズルに近い領域 (ノズルから噴霧先端方向に4~12mm) とノズルから離れた領域 (ノズルから噴霧先端方向に12~20mm) について、その領

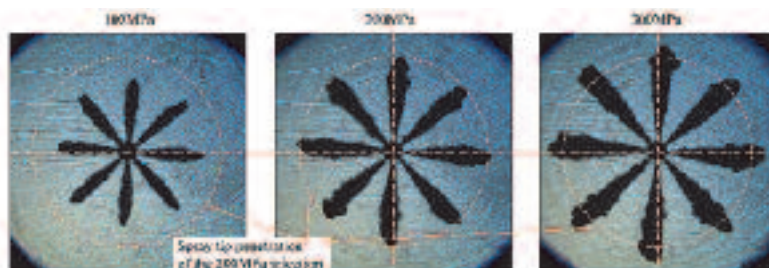


Fig. 5 Spray images @0.5ms after start of injection, Ar gas

域内の平均速度を求めた。Fig. 8よりset-off長が観察された噴射開始から0.55~1.2msの期間 (Fig. 6参照)において、エントレイン速度の時間変化は小さくなった。これはノズルニードルが十分リフトし、定常的に噴射された燃料の通過により発生したエントレインが計測されたためと考える。この速度の時間変化が少ない期間において、ノズルからの距離に対する噴霧外縁に垂直な向きの成分 (エントレイン速度) と平行な向きの成分 (逆流速度) とを計測した結果を Fig. 9に示す。ノズルに近い領域 (~12mm) では噴射圧200MPaに比べ、300MPaのエントレイン速度は遅いが、ノズルから離れた領域では噴射圧300MPaのエントレイン速度が速い結果が得られた。逆流速度も同様にノズルに近い領域 (~12mm) では噴射圧200MPaに比べ、300MPaの逆流速度は遅く、離れた領域では噴射圧300MPaの逆流速度は速い結果が得られた。

ノズルに近い領域において、噴射圧200MPaに比べ、300MPaの速度が遅くなる理由として隣り合う噴孔からの噴霧の影響が考えられる。多噴孔ノズルでは放射状に燃料を噴射するため、ノズルに近いほど隣り合う噴孔からの噴霧との距離が近くなり噴霧間の領域は減る。この噴霧間の領域の空気は2つの噴霧に取り込まれるため、その領域の圧力は減圧される。この減圧領域に向かい、ノズル方向への逆流が生じると考えられる。噴射圧300MPaでは高速に燃料が噴射されるため、減圧分の空気の供給が不十分で、噴霧内へのエントレインが減少したものと考える。

逆に隣り合う噴孔がなくなれば、噴霧間の領域の減圧は1噴霧分となり、四方から空気が供給されるためノズルに向かう逆流は減り、減圧分の空気の供給も十分となる。結果、エントレイン速度も速くなると推測できる。この仮説を検証するため、隣り合う噴孔のない単噴孔ノズル (噴孔数1) のエントレイン速度を計測した結果を Fig. 10に示す。単噴孔ノズルはノズルに近い領域 (4~12mm) には逆流はなく、ノズルから離れた領域 (12~20mm) においても逆流速度が遅い結果が得られ、仮説通りとなった。一方エントレイン速度はどの位置でも速くなっており、ノズルに近い領域でのエントレインには、隣り合う噴孔からの噴霧の影響を強く受けることが分かった。これらの影響は、噴孔数が増えるなど噴霧間の領域が狭くなるほど強くなると考えられる。

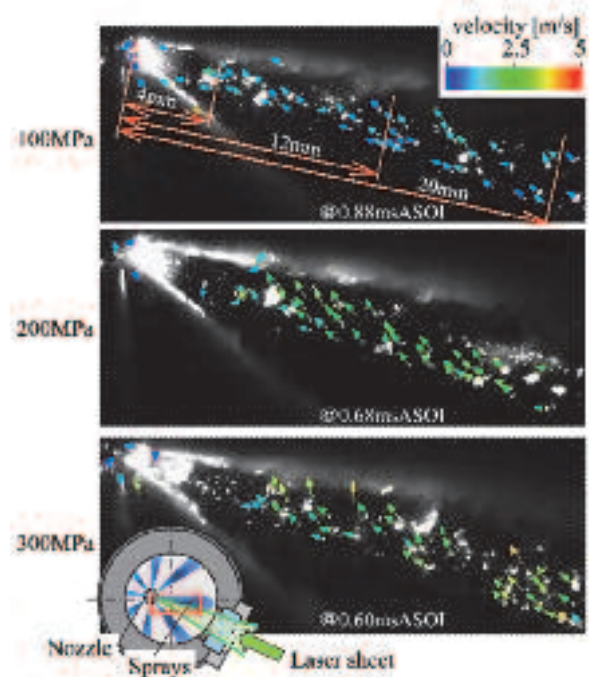


Fig. 7 Flow velocity for different injection pressures

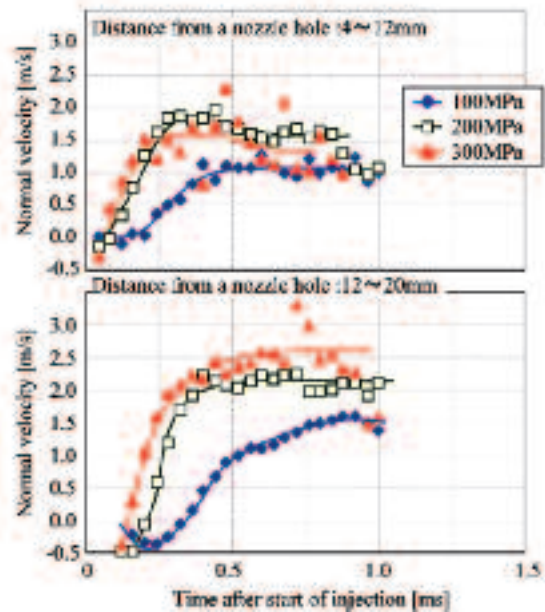


Fig. 8 Temporal change of the normal velocity for different injection pressures

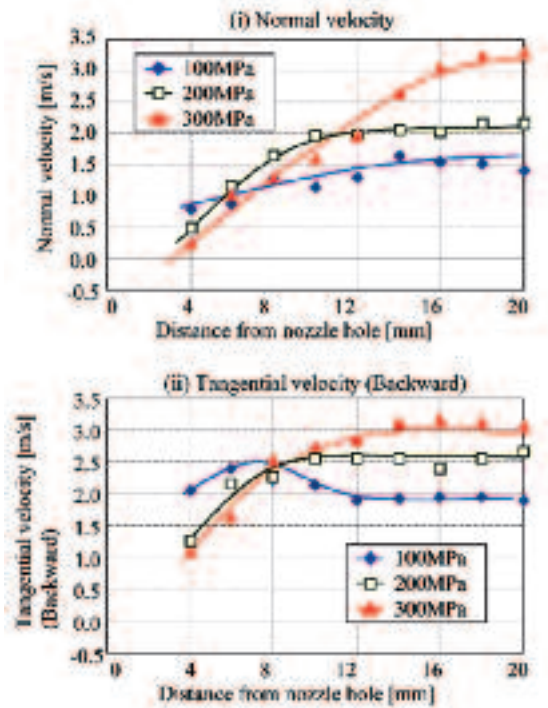


Fig. 9 Variation of normal and tangential velocity for different injection pressures

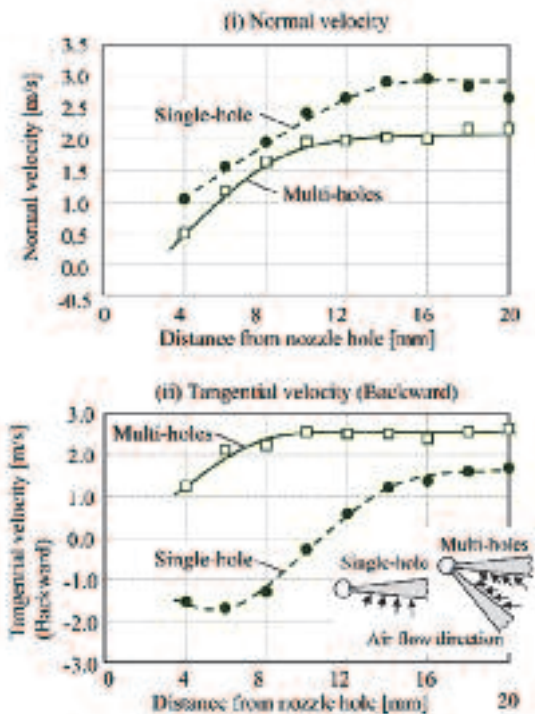


Fig. 10 Variation of normal and tangential velocity between single-hole and multi-hole @200MPa

4. 考察

以上の結果から、高圧噴射時のsoot低減効果を考察するため、set-off長までのエアエントレイン量を単位時間あたりの量として求めた結果をFig. 11に示す。set-off長が観察された期間において、エントレイン速度およびset-off長の時間変化は小さいため (Fig. 6, Fig. 8参照), エントレイン量はこの期間中のエントレイン速度の時間平均にFig. 2に示す噴霧表面積を乗算することで求めた。上段はノズルからの位置毎のエアエントレイン量を, 下段は上段をノズル出口からset-off長まで積分した結果である。Fig. 11の下段より単位時間当たりのエントレイン量は噴射圧200MPaに比べ, 300MPaは43%増加した。これにより混合気が希薄化しsootは低減すると考えられる。Fig. 11の上段より, その寄与度はエントレイン速度 (the normal velocity) の増加に比べ, set-off長の増加の影響が大きいことが分かる。エントレイン速度の影響の寄与が小さくなった要因は前記の隣り合う噴孔からの噴霧の影響でノズルに近い位置でのエントレインが制限されたためと考える。

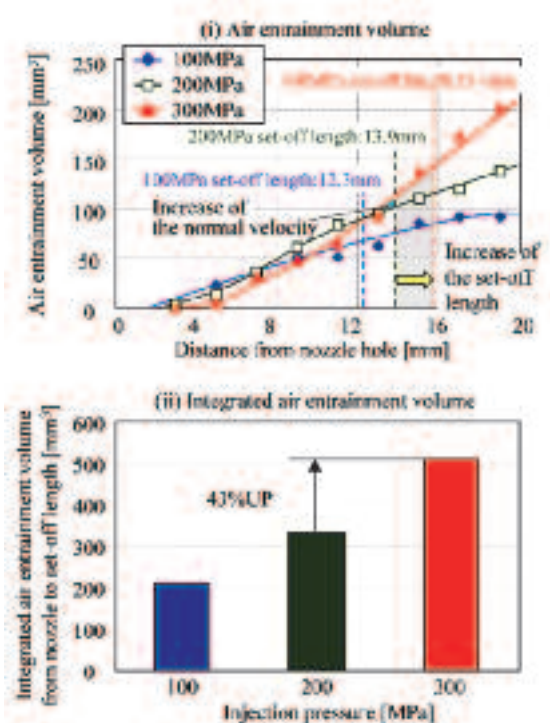


Fig. 11 Comparison of air entrainment volume for different injection pressures

5. 結言

ディーゼル燃焼のsoot生成量に寄与する噴霧へのエアエントレイン量をPTV法で計測した速度と噴霧表面積から定量化した結果、以下の知見を得た。

- ・多噴孔ノズルにおいて、周囲ガスは噴霧から離れた位置では噴霧先端側からノズルへ向かう方向に流れており、噴霧に対し逆流する。噴霧近傍では噴霧に向かって流れ、噴霧内に取り込まれていく。
- ・噴射圧の増加に対し、周囲ガスの移動速度は速くなりノズルから離れた位置ほどその増加率は大きくなる。
- ・多噴孔ノズルでは隣り合う噴孔からの噴霧の影響でエアエントレインが制限され、ノズルに近い領域における周囲ガスが噴霧内に取り込まれる速度は遅くなる。
- ・高圧噴射により噴霧内に周囲ガスを取り込む速度とset-off長が共に増加することで、set-off長までのエアエントレイン量は増加する。その寄与はset-off長の増加の影響が噴霧内に周囲ガスを取り込む速度の増加の影響に比べ大きい。

<参考文献>

- 1) 小島昭和, 内山賢, 増田誠, 伊達健治, 堀内康弘, オラフ E. ハーマン, ヘルマン J. ラウメン, “ディーゼル噴射系の進化—超高压噴射が拓く世界—”, 自動車技術会論文集, Vol.43 No.6 (2012), pp. 1269-1274.
- 2) 旗生篤宏, 丹羽靖, 丸尾幸治, 出口博明, 寺沢保幸, “乗用車用新世代クリーンディーゼルエンジン” 自動車技術会論文集, Vol.44 No.1 (2013), pp. 27-32.
- 3) 新井雅隆, “ディーゼル噴霧とその燃焼”, 微粒化, Vol. 22, No. 77 (2013), pp. 189-202.
- 4) 小酒英範, “霧困気の空間的不均一性がディーゼル燃焼に与える影響機構”, 第22回内燃機関シンポジウム論文集, 2011, pp.55-60.
- 5) Toda, N., Yamashita, H., and Mashida, M., “PTV analysis of the entrained air into the diesel spray at high-pressure injection”, *Proceedings of International Conference on Optical Particle Characterization*, (2014).
- 6) Zhu, J. and Kuti, O. A. and Nishida, “Effects of Injection Pressure and Ambient Gas Density on Fuel - Ambient

Gas Mixing and Combustion Characteristics of D.I. Diesel Spray”, K., SAE Paper 2011-01-1819, 2011

- 7) Thim, D. R. and Farrell, “Air Flow Characteristics Surrounding Evaporating Transient Diesel Sprays”, P. V., SAE Paper 01-0499, 2002.
- 8) 広安博之, 新井雅隆, “ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角”, 自動車技術会論文集, Vol.21 (1980), pp. 5-11.
- 9) Yamashita, H., Suzuki, T., Matsuoka, H., Mashida, M., Kitano, K., “Research of the DI Diesel Spray Characteristics at High Temperature and High Pressure Ambient”, SAE Paper No. 2007-01-0665 (2007).

<著 者>



山下 勇人
(やました はやと)
総研 研究1部
ディーゼル噴霧・燃焼システム
の開発に従事



戸田 直樹
(とだ なおき)
総研 研究1部
ディーゼル噴霧・燃焼システム
の開発に従事



増田 誠
(ましだ まこと)
パワートレインシステム開発部
ディーゼル次期型システム開発
に従事