L2F を用いたディーゼル燃料噴霧高数密度領域の 液滴質量分布の評価*

駒田佳介^{*1} 坂口大作^{*1}
植木弘信^{*2} 石田正弘^{*3}

Estimation of Mass Distribution of Diesel Fuel Spray in High-Number-Density Region by L2F

Keisuke KOMADA^{*1}, Daisaku SAKAGUCHI,
Hironobu UEKI and Masahiro ISHIDA

^{*1} Nagasaki University
1-14, Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521 Japan

A laser 2-focus velocimeter (L2F) has been applied for measurements of velocity and size of droplets in the dense region of diesel spray. Investigated was the fuel spray injected intermittently into the atmosphere from an injector nozzle with the orifice diameter of 0.113 mm. The injection pressure was set at 40 MPa by using a common rail system. The L2F had a micro-scale measuring volume which consisted of two foci. The focal diameter was about 3 μm , and the distance between two foci was 17 μm . The maximum data sampling rate of the L2F system was markedly high as 15 MHz. Measurement was conducted at 25 mm downstream from the nozzle. The local mass flow rate and the number density were calculated at several specified times from the measured velocity, size, and arrival time of droplets. It was clearly shown that the mass flow rate was higher at the spray front than the inside, and was higher at the spray center than the periphery. The accumulated mass flow rate in the spray section measured by the L2F was almost equal to the amount of injected fuel mass within 5%.

Key Words : Laser-Aided Diagnostics, Atomization, Nozzle, Liquid Droplet

1. まえがき

ディーゼル機関において、さらなる熱効率の向上と有害排気物質の低減が求められている。これらの達成のためには燃焼の適切な制御が必要であり、燃焼を支配する燃料噴霧特性の把握が重要な課題である。特に噴孔出口部あるいはその近傍の噴霧特性は、ノズル設計ならびに噴射条件等の制御パラメータの評価、噴霧分裂過程モデリングの基礎情報、および噴霧分裂シミュレーションの初期条件として注目されている⁽¹⁾。噴霧液滴の速度とサイズの測定方法として画像計測⁽²⁾、PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer)⁽³⁾、ILIDS (Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing)⁽⁴⁾などが有効であるが、数密度が高い噴霧内部における液滴の速度とサイズの計測例は少ない。ノズル噴孔近傍の液滴質量分布についてはシンクロトロンによる高強度X線を用いた計測により噴霧中心で質量流量が大きく外縁部では小さい結果⁽⁵⁾が報告されているものの、個々の液滴の速度とサイズは得られておらず、マクロ的な噴霧特性の把握にとどまる。

2つの焦点の間を液滴が飛行する時間を計測して速度を求めるレーザ2焦点流速計 (L2F; Laser 2-Focus velocimeter) は光学的 SN 比が高く、液滴数密度の高い噴霧計測において多重散乱の影響を受けにくいという特徴を有している。著者らは L2F に散乱時間計測機能を付加することによって速度とサイズの同時計測が可能であ

* 原稿受付 2010 年 3 月 26 日

^{*1} 正員, 長崎大学工学部(〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

^{*2} 正員, 長崎大学大学院生産科学研究科

^{*3} 正員, フェロー, 長崎大学大学院生産科学研究科

E-mail : komada@nagasaki-u.ac.jp

ることを示した⁽⁶⁾.

本研究では、レール圧を 40MPa に設定したコモンレールインジェクタから大気中に噴射される燃料噴霧液滴の速度とサイズの計測結果を基に、噴霧内部の質量流量を見積り、その空間分布の時間変化について評価した。

2. 実験装置および実験方法

2・1 レーザ 2 焦点流速計

L2F の測定体積を図 1 に示す。焦点直径 F は約 $3\mu\text{m}$ ，焦点長さ L は約 $20\mu\text{m}$ であり，焦点間距離 S は $17\mu\text{m}$ である。

図 2 は速度およびサイズの測定原理を示している。液滴が 2 つの焦点を通過する際の飛行時間 t_1 ，上流散乱時間 t_2 および下流散乱時間 t_3 を周波数 160MHz のクロックで計数する。速度は従来の L2F と同様に 2 焦点間距離 S

Fig.1 Measurement probe of L2F

Fig.2 Measurement principle of velocity and size

Fig.3 Flowchart of data acquisition procedure

Fig. 4 System diagram of L2F

を飛行時間 t_l で割ることにより求める.

$$u = \frac{S}{t_l} \quad (1)$$

また, 液滴サイズは, 2 焦点間距離 S と液滴サイズ dp + 焦点サイズ F の比が飛行時間 t_l と散乱時間の比に対応することから次式より求める. その際, 散乱時間は上流散乱時間 t_2 と下流散乱時間 t_3 の平均値を用いる.

$$dp = u \cdot \frac{(t_2 + t_3)}{2} - F \quad (2)$$

この測定原理は, 1 個の液滴が上流側および下流側の 2 つの焦点を通過する場合に有効である. 液滴数密度が高い場合には局所的な液滴間距離が 2 焦点間距離より短くなり, 上流焦点を通過した液滴が下流焦点を通過する前に, 別の液滴が上流側あるいは下流側の焦点を通過することが考えられる. このとき, 異なる液滴が両焦点を通過するため飛行時間は正しく測定されない. また, 液滴の飛行方向が時間的に変動している場合, あるいは液滴の飛行方向と 2 焦点を連ねる方向が一致していない場合にも同様の現象は起こりうる. これらのことを考慮して有効な飛行時間および散乱時間を測定するフローチャートを図 3 に示す. クロックの計数は上流焦点信号の検出によって開始され下流焦点信号の検出によって停止し, 計数値とともに上流・下流フラグが保存される. また, 上流信号が下流信号の検知前に検知される場合, 計数値とともに上流・上流フラグが保存される. 取得データ数 $N0$ は上流焦点を通過した液滴の数であり, 測定開始時にセットされる. 有効データは取得データの内, 上流・下流フラグを持つ液滴で, 測定終了後に抽出される.

図 4 は L2F の光学系および信号処理系を示す. L2F の光学系では最大出力 100mW, 波長 830nm の半導体レーザを光源とし, 収束レンズとして焦点距離が 8mm の非球面レンズを採用した. 全長 350mm の光学系により 2 つの焦点における液滴からの後方散乱光を別個の APD (Avalanche Photodiode) に導いて電気信号に変換した. 一对の電気信号パルスから FPGA(Field Programmable Gate Array)で構成したデジタルカウンタにより計数した飛行時間および散乱時間をパソコンに保存した. 信号処理系の最大データサンプリング周波数は 15MHz ある.

2・2 噴霧計測システム

図 5 は L2F による噴霧計測システムを示す. コモンレールにより供給される軽油を噴孔径 0.113mm の 5 噴孔インジェクタを用いて大気中に間欠噴射し, 計測はその内の一つの噴霧を対象に行った. 噴射毎の時間間隔は 330ms である. L2F のデータ取得に同期してインジェクタソレノイドに噴射開始信号を印加してからの経過時間を 6MHz のクロックで計数した. 測定点は, 噴霧軸に z 軸, L2F のレーザ光軸に y 軸をとり, yz 軸に垂直に x 軸をとった. x 座標は噴霧中心から半径外向きの距離を表し, 噴霧中心を原点にとって標記した. また, $z=0 \sim 40$ mm の噴霧を発光時間 2.4 μ s のストロボスコープで照明し, 600 万画素の CCD カメラで撮影した. 図 6 に噴霧画像お

Fig.5 Fuel spray measurement system
(measurement position ; $z=25$ mm)

Fig.6 Spray images and measurement positions

よび測定位置を示す。測定位置は噴孔出口からの距離 z が 25mm で、 $x = -1.5\text{mm}$ から 1.5mm までを 0.5mm 間隔、計 7 点とした。実験条件として、レール圧を 40MPa に設定し、ソレノイドに印加した噴射信号の期間は 1.0ms、実噴射期間は 0.87ms であった。1 つの噴孔から 150 回噴射された燃料を収集し算術平均した結果、1 回当たりの平均噴射量は 1.34mg であった。また、複数回の噴射によってデータは取得され、各測定位置での取得データ数 N_0 は 10,000 点である。

2・3 数密度および質量流量の評価

噴霧液滴の空間的な分散の状況把握は、高数密度場における液滴の分裂、蒸発ならびに燃焼の過程を理解する上で重要である。液滴間の飛行方向の距離 L_d は、液滴が測定点を通過した後、次の液滴が通過するまでの時間 ΔT と液滴の速度 u の積、すなわち、

$$L_d = u \cdot \Delta T \quad (3)$$

で推定できる。また、焦点の計測可能な面積は $(L+d_p) \cdot (F+d_p)$ であり、1 個の液滴が体積 $L_d \cdot (L+d_p) \cdot (F+d_p)$ の空間に存在すると考えられる。これらより単位時間当たりの平均液滴数密度 N_d は

$$\overline{N_d(x,T)} = \frac{1}{L_d \cdot (L+d_p(x,T)) \cdot (F+d_p(x,T))} \quad (4)$$

で求められる。

液滴数密度の測定限界は式(4)に示した数密度の定義から評価できる。すなわち、焦点長さ $L = 20\mu\text{m}$ 、焦点直径 $F = 3\mu\text{m}$ 、液滴サイズ $d_p = 10\mu\text{m}$ 、液滴速度 $u = 200\text{m/s}$ のとき、液滴が計測システムの最高サンプリングレートで計測される場合を考えると時間間隔 $\Delta T = 0.067\mu\text{s} = 1/(15\text{MHz})$ であり、測定限界の数密度 $N_d = 108,000 \text{ 1/mm}^3$ となる。

噴霧内の質量流量は燃料当量比分布の基礎情報として重要である。噴霧の質量流量 m_f は、単位時間に測定点を通過する各液滴の質量の総和である。直径 F 、長さ L の焦点をサイズ d_p 、体積 V_p の液滴が通過するとき、質量流量は次式により算出できる。

$$m_f(x,T) = \frac{\rho \cdot \sum V_p(x,T)}{\sum (\Delta t(x,T) \cdot (L+d_p(x,T)) \cdot (F+d_p(x,T)))} \quad (5)$$

3. 結果および考察

3・1 噴霧液滴の速度とサイズの時間変化および空間変化

本研究で用いる L2F は測定点を液滴が通過する毎に飛行時間、散乱時間および出現時刻の記録を順次行い、液滴の速度とサイズを求めている。図 7 および図 8 は $x = 0\text{mm}$ における速度とサイズのプロットを示す。横軸はインジェクタのソレノイドに噴射信号を印加してから経過時間である。本報告ではレール圧を用いてパルススイの定理から求めた速度を超えると判断されたデータを除去している。また、時間窓 0.1ms ごとの平均値、標準偏差、50%信頼区間とデータ数を図 9 および図 10 に示す。 $T = 1.0\text{ms}$ における 50%信頼区間は平均液滴速度に対して $\pm 10.5\text{m/s}$ 、平均液滴サイズに対して $\pm 0.6\mu\text{m}$ であった。

図 11 は $x = 0\text{mm}$ 、 $\pm 0.5\text{mm}$ および $\pm 1.0\text{mm}$ における液滴速度を示しており、時間窓 0.1ms 毎に算術平均し時間変化として示した。図中のプロットは取得データの内、上流および下流の両焦点を通過したと判断された有効データを基に算出した。液滴は噴霧中心である $x = 0\text{mm}$ において、最も早く測定点に出現している。この時の液滴平均速度は約 138m/s であり、噴霧の画像計測より求めた噴霧先端速度 140m/s に比べ 2%程度低い値であった。平均液滴速度は $x = 0\text{mm}$ において $T = 1.0\text{ms}$ から 1.2ms、 $x = \pm 0.5\text{mm}$ において $T = 1.1\text{ms}$ から 1.2ms で増加し、その後 $T = 1.2\text{ms}$ から 1.5ms では時間変化が小さい。また、 $x = \pm 1.0\text{mm}$ では $T = 1.0\text{ms}$ から 1.5ms において期間を通して時間変化が小さい。その後、各計測点において平均液滴速度は急激に減少している。このように噴射終了にともなう低速域が高速域に続いて現れる傾向は、PDPA を用いて行われた噴射圧 105MPa、噴孔から 30mm の位置での Hung らによる測定結果⁽⁷⁾、ならびに噴射圧 60MPa、噴孔から 58mm の位置での Lacoste らによる測定結果⁽⁸⁾

にも見られる。本報告において高速域、つまり $T = 1.0\text{ms}$ から 1.5ms が噴霧頭部、 $T = 1.5\text{ms}$ 以降が噴霧尾部に当たる。噴霧中心からの距離が等しい2点の平均液滴速度は、ほぼ同じ時間変化を示し、測定点ごとの液滴速度の相違は噴霧頭部において維持されている。

図12は液滴サイズを時間窓1ms毎に算術平均し時間変化として示した。各半径位置で最初に噴霧液滴が現れる $T = 1.0\text{ms}$ から 1.1ms は噴霧の前面に当たり、噴霧頭部における平均液滴サイズは噴霧前面が最も大きく、時間が経過するにつれ徐々に減少している。この傾向は噴射圧 39MPa 、噴孔から 24mm の位置での Chryssakis らによる計測結果⁹⁾にも見られ、その報告の中では噴射期間の大部分でザウタ平均液滴サイズが $10\mu\text{m}$ を示している。これより算術平均液滴サイズは $5\mu\text{m}$ 程度と考えられ、本報告の測定結果と同程度であると考えられる。また、速

Fig.7 Time-resolved velocity
(measurement position; $x=0\text{mm}$)

Fig.8 Time-resolved size
(measurement position; $x=0\text{mm}$)

Fig.9 Mean and standard deviation of velocity
(measurement position; $x=0\text{mm}$)

Fig.10 Mean and standard deviation of size
(measurement position; $x=0\text{mm}$)

Fig.11 Arithmetic mean velocity

Fig.12 Arithmetic mean size

度の時間変化と同様に測定点ごとの相違が期間を通して維持されており、期間を通して外縁部に比べて噴霧中心で液滴サイズが大きい。しかし、噴霧尾部では液滴サイズの時間的・空間的な変化は大きくない。

図 13 は噴霧頭部における液滴の算術平均速度および算術平均サイズの空間分布を示す。平均速度は噴霧中心で最大となり、噴霧外縁部に向かうに従い減少している。平均サイズも同様の傾向を示し、平均速度および平均サイズの空間分布はともに $x=0\text{mm}$ に対してほぼ軸対象の値を示している。

図 14 は噴霧頭部における液滴速度の確率密度分布を示す。 $x=0\text{mm}$ では 170 から 210m/s が最も高く、 $x=\pm 0.5\text{mm}$ では 130 から 170m/s、 $x=\pm 1.0\text{mm}$ では 90m/s の確率密度が高くなっており、測定点が噴霧中心から離れるに従い確率密度のピークが低速側に移っている。つまり外縁部に比べ噴霧中心近傍では速度の高い液滴の割合が多い。

図 15 は噴霧頭部における液滴サイズの確率密度を示す。5 つの測定点全てにおいて $5\mu\text{m}$ 以下の液滴サイズの確率密度が最も高く、液滴サイズが大きくなるに従い確率密度が低くなっている。また、噴霧中心近傍に比べ外

Fig.13 Spatial distribution of mean velocity and size

Fig.14 Probability density of droplet velocity

Fig.15 Probability density of droplet size

Fig.16 Time interval between droplets

Fig.17 Data ratio of valid data and all data

縁部では $3\mu\text{m}$ 以下の液滴が多く存在しており、これは分裂した小サイズの液滴が存在するためと考えられる。

3・2 液滴数密度と噴霧質量流量の評価

図 16 は測定点を通じた液滴間の時間間隔 Δt を時間窓 0.1ms 毎に算術平均し時間変化として示した。各測定点における平均時間間隔は噴霧前面で最も短く、時間経過とともに長くなっている。特に、噴霧尾部では顕著に長くなっていることがわかる。

全測定データ数と有効データ数の差は図 3 で示された無効データである。高数密度液滴を計測する際に無効データと判断されたデータについても液滴が上流焦点を通過したこと、すなわち液滴の存在が確認されたことには変わりなく、液滴数密度の評価および質量流量の評価においてこれらを考慮する必要がある。各計測点において、 $T=0\text{ms}$ から液滴がほとんど確認されなくなった $T=3.0\text{ms}$ の間における全測定データ数と有効データ数の比を図 17 に示す。また、 $x = \pm 2.0\text{mm}$ では液滴が測定されず、噴霧画像からも液滴が確認できなかったため、 $x = \pm 2.0\text{mm}$ を外縁と判断した。

全測定データ数と有効データ数の比 $N_{\text{all}}/N_{\text{valid}}$ を、有効データのみを用いて算出した液滴間の時間間隔に掛けることにより測定点に現われた全液滴の平均時間間隔を求める。

図 18 は時間窓 0.1ms 毎に算術平均した液滴数密度の空間変化を示す。数密度は $30,000 \text{ l/mm}^3$ 以下であり、前述した測定限界の約 30% 程度である。噴霧先端が測定点に到達した時刻 $T = 1.0\text{ms}$ では $x = 0\text{mm}$ のみに液滴が現れているが、それ以外の時刻では、噴霧中心近傍から外縁部に向かうに従い数密度は増加している。これは図 15 で示したように、噴霧中心近傍ではサイズの大きい液滴が存在し、分裂した小サイズ液滴が噴霧周辺部に現れたためと考えられる。

図 19 は時間窓 0.1ms 毎の質量流量の空間分布を示す。噴霧前面の質量流量は噴霧内部に比べて大きい。また、噴霧外縁部に比べて噴霧中心部の質量流量が比較的大きく、各時間においてほぼ軸対称である。

xy 面内において噴霧中心から距離が等しい 3 点について、噴霧頭部の軸方向速度および液滴サイズの算術平均値は平均値 $\pm 9\%$ 以内であった。このことから質量の空間分布が軸対称に近いと判断し、噴射期間にわたる全燃料質量 M を次式によって見積った。

$$M(x, T) = \sum_x \sum_t m_f(x, T) \Delta A(x) \Delta T \quad (6)$$

ΔA は幅 Δx のリング状断面であり、

$$\Delta A(x) = 2\pi x \Delta x \quad (7)$$

で求められる。本報告において $\Delta x = 0.5\text{mm}$ である。

図 19 の質量流量分布を用いて噴射された燃料質量の積分値を見積ると 1.28mg/injection であり、重量法で求めた燃料質量 1.34mg/injection に比べ約 5% 小さい値であった。

Fig.18 Spatial distribution of number density

Fig.19 Spatial distribution of mass flow rate

4. まとめ

レール圧を 40MPa に設定し、コモンレールインジェクタから大気中に間欠噴射される噴霧液滴を、噴孔から 25mm 下流の位置において L2F を用いて計測した。液滴の速度およびサイズの時間変化および空間変化を調べ、単位時間に観測される液滴数から質量流量分布の評価を行い、以下の事項が明らかになった。

- (1) 噴霧頭部の液滴の平均速度と平均サイズは噴霧中心で最大となる。
- (2) 質量流量は噴霧内部に比べ前面で大きくなり、噴霧外縁部に比べ中心近傍で大きい。
- (3) 液滴数密度は噴霧中心近傍で低く、外縁部に向かうに従い増加する。
- (4) 噴霧尾部において液滴のサイズおよび数密度の時間的、空間的な変化は大きくない。
- (5) 測定点を通じた全液滴を考慮して見積もられた液滴総質量は噴射量の約 95% であり、提案する方法で質量流量を評価することができると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、平成 19～20 年度科学研究費基盤研究 C(課題番号：19560176)の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Han, J-S., Lu, P-H., Xie, X-B., Lai, M-C., Henein, N.A. : Investigation of Diesel spray Primary Break-up and Development for Different Nozzle Geometries, SAE Paper , No.2002-01-2775 (2002), pp.2528-2548.
- (2) Choongsik, B., Jun, Y., Jangsik, K., Kyeong, O, L. : Effect of Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray, SAE Paper , No.2002-01-1625 (2002).
- (3) Takeda, T., Okumura, N., Senda, J. : Study on Droplet Measurement of Unsteady Diesel Spray Using Phase Doppler Anemometry (PDA) , Proceedings of ICLASS- 2006, ICLASS-06-118 (2006), p.233.
- (4) 柳昌成, 森吉泰生, 青柳友三, “改良型干渉画像法を用いたディーゼル噴霧の二次元粒度分布・速度分布の同時計測”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 73, No. 725 (2007), pp. 380-386.
- (5) A. L. Kastengren, C. F. Powell, K.-S. Im, Y.-J. Wang, J. Wang. : Measurement of Biodiesel Blend and Conventional Diesel Spray Structure Using X-Ray Radiography, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.131 (2009), pp.0628021-0628027.
- (6) Ueki, H., Ishida, M., Sakaguchi, D., : Simultaneous Measurement of Particle Size and Velocity by Laser 2-Focus Particle Analyzer, Proceedings of ICLASS 1994, ICLASS-94 (1994), pp.483-490.
- (7) Hung C.C., Martin J.K., Koo J.Y. : Injection Pressure Effects Upon Droplet Behavior in Transient Diesel Sprays, SAE Paper , No.970053 (1997) , pp168-181 .
- (8) Lacoste, J., Crua, C., Heikal, M., Kennaird, D., Gold, M. : PDA Characterisation of Dense Diesel Sprays Using a Common-Rail Injection System, SAE Paper , No.2003-01-3085 (2003), pp.2074-2085.
- (9) Christos, C., Dennis, N., Choongsik, B. : Development and Validation of a Comprehensive CFD Model of Diesel Spray Atomization Accounting for High Weber Numbers, SAE Paper , No.2006-01-1546 (2006).