スワール噴射弁における燃料噴射率と噴霧性状の相互評価法の研究*

石間 経章^{*1}, 助 名 亮 一^{*2}, 小保方 富夫^{*1}河内 勝義^{*3}, 小林 一 光^{*4}

Study on Diagnostic Methods to Evaluate the Relationship Between Fuel Injection Pattern and Spray Characteristics at the Swirl Nozzle Injector

Tsuneaki ISHIMA^{*5}, Ryoichi SUKENA, Tomio OBOKATA,
Katsuyoshi KAWACHI and Kazumitsu KOBAYASHI^{*5} Gunma University, Dept. of Mechanical System Engineering, 1-5-1 Tenjin, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Characteristics of spray injected from the five types of swirl nozzle, which were the same design however differed in the static flow rates as 600, 700, 800, 900 and 1 000 cc/min respectively, have been evaluated by a phase Doppler anemometer (PDA) and a flow rate meter based on laser Doppler anemometer (LDA flow rate meter). The experiments were mainly made under the injection pressure of 7.0 MPa, injection frequency of 16.7 Hz and fuel amount of 8.6 and 24.4 mg/cycle. The lateral position of peak in the radial distribution of mean droplets velocity was increasing with the nozzle static flow rate. The modified time dividing analysis for intermittent spray flow was proposed and applied to the results. It was well explained by the both measurements of PDA and LDA flow rate meter that the instantaneous fuel flow rate at the initial stage of the valve opening duration affected the spray characteristics of droplet diameter and velocity.

Key Words: PDA, LDA/LDV, Spray Characteristics, Fuel Injection System, Gasoline Direct Injection Engine, Flow Rate Measurement, Swirl Nozzle

1. 結 言

近年, 燃費向上と有害排出ガスの低減のために, 筒内直接噴射式ガソリンエンジン(Gasoline Direct Injection System: GDI)が提案^{(1),(2)}され実用化されている。本方式では, 高圧ガソリン噴霧と筒内ガス流動を利用して, 平均空燃費が大きくても点火と燃焼を確実にすることで, 燃費改善と排出ガス低減を両立させるものである。筒内の混合気形成は燃焼効率, 排出ガス生成に大きく関わるため, 混合気形成構造を詳細に理解することが今後の機関改善のために重要となる。そのため, 燃料噴霧に関する多くの実験が行われており, GDI用の新しい噴射弁の製作^{(1),(2)}, 粒径測定に関する新手法の提案⁽³⁾, 噴霧液滴粒径を考慮した流動特性評価⁽⁴⁾, 非定常噴霧の時間分割評価⁽⁵⁾などがある。これらの研究に加えて, 噴射パターンが噴霧性状に与える影響を評価することは, 噴霧と燃焼の制御のために非常に重要となる。

一方, 著者らのグループでは, レーザドップラ流速計を利用した流量計(以下, LDA流量計)を試作し, 噴霧の燃料流量を計測してきた^{(6),(8)}。本方式は, インジェクタ上流に設けた透明石英管からなるテストセクションの中心軸上の一点の流速を実時間計測して, 管断面の瞬間流量を計算で求めるものである。著者らは, これらの研究の中で, インジェクタの構造が同じで, バルブリフト量のみを変化させた場合の瞬間燃料流量の変化を検討している⁽⁸⁾。

本研究では, 位相ドップラ流速計(Phase Doppler Anemometer: PDA)を利用し, GDI用スワールインジェクタによる燃料噴霧の, 粒径および流速分布を求めるとともに, LDA流量計により燃料噴射率を求め, 噴射量と噴霧性状の関係を評価するための方法を提案することを目的とする。使用するインジェクタは, 前報⁽⁸⁾同様, 構造が同じで, バルブリフト量のみを変えて静的流量が異なるインジェクタ5種類であり, 本研究では噴射量と噴霧性状の関係を調べた。なお, LDA流量計は, 流れに非接触で瞬間流量を計測できるものであり, 本研究では, 噴射位相角をそろえて, PDA計測とLDA流量計測実験を別々に行い, 両測定結果の関係を検討する。

* 原稿受付 2002年4月11日。

^{*1} 正員, 群馬大学工学部(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*2} 学生員, 群馬大学工学部。^{*3} (株)日立ユニシアオートモティブ(☎372-0023 伊勢崎市粕川町1671-1)。^{*4} 正員, (株)日立ユニシアオートモティブ。

E-mail: ishima@me.gunma-u.ac.jp

2. LDA 流量計の原理⁽⁶⁾

LDA 流量計の原理の詳細は、文献(6)に詳しく記述されているので、ここでは簡単に示す。本 LDA 流量計はナビエ・ストークス方程式を、円管内層流の脈動流の条件で解いた Lambossy の解⁽⁹⁾を利用している。実験で得られる円管の中心軸上の一点の流速は

$$U_0(t) = \frac{C_2}{2} + \sum_{n=1}^N (C_n e^{in\omega t} + C.C.) \quad \dots \dots (1)$$

と表される。ここで、 i は虚数単位、 ω は角速度、 $C.C.$ は共役複素数、 C_2 、 C_n は定数である。この結果から、円管内流速分布を求め、積分することで瞬間流量を得る。得られた瞬間流量を時間積分することで、全体の積分流量

$$m(t) = \rho \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt \quad \dots \dots (2)$$

が求められる。

本方式では、流れが層流で、変動も大きくないということが管断面平均流速分布が得られる条件となる。これらは、管直径と平均流速を代表長さとして場合のレイノルズ数が 2300 以下、ストークスの境界層厚さ ($\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$) を代表長さとした場合のレイノルズ数が 700 以下であれば適用ができるといわれている⁽¹⁰⁾。

3. 実験装置および方法

3.1 LDA 流量計実験装置 図1に LDA 流量計による実験装置を示す。本装置のテストセクションは、内径 3.5mm、全長 300mm の石英ガラス管とし、管内の中心軸上の流速を計測することにより、瞬間燃料流量を求める方式である。LDA は、出力 16mW の He-Ne レーザを光源とし、30 度前方散乱方式とした。レーザ光は全角 10.54° で交差し、長さ約 100 μ m×直径 46 μ m の測定体積を形成する。ドップラ信号はフォトマルチプライヤ(Dantec: 55X09)にて光電変換され、カウンタ型信号処理器(DISA:55L90a)にて処理され、パーソナルコンピュータにて統計計算される。パーソナルコンピュータには、エンコーダによる位相角情報を同時に取りこみ、位相角によって流速情報を整理した。LDA は原理上何らかの散乱粒子(トレーサ粒子)が必要だが、本研究では高圧ポンプへの影響を考え、特に散乱粒子は添加していない。ドップラ信号は、フィルタ(5 μ m)を通過できる微細なほこりや気泡などで発生しており、これらの微細なほこりや気泡は平均流、乱れともに十分に追従している。なお、瞬間流量、

Fig. 1 Schematics of LDA flow rate meter.

Fig. 2 Experimental apparatus for PDA.

積分流量とともに、シフト周波数の微妙なずれによる誤差を少なくするため、前報⁽⁷⁾で示した、0 度から開弁開始までの流量が 0 になるように、流速値を補正する方法を用いている。

3.2 PDA 実験装置 図2に位相ドップラ流速計(PDA)による実験装置を示す。現在までの LDA 流量計による瞬間流量計測では、弁が閉じたあとに大きな脈動流が観察されたが、それらはインジェクタ固有のものではなく、燃料配管系の影響であることが示された^{(6),(7)}。そこで、配管変更を最小限にして、ほぼ同条件にて PDA 計測を行うため、図2に示したように LDA 流量計のテストセクションを直立させ、鉛直下方噴射を行った。

位相ドップラ流速計はエアロメトリックス社の PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer: PDPA 3100)を使用した。30 度の前方散乱方式とし、予備実験から、フォトマルの高圧電源は 390V、計測流速範囲は-5.0~126.79m/s、粒径範囲は 3.4~120.2 μ m と設定した。

3.3 燃料噴射装置 本研究では、筒内直接噴射ガソリン機関用スワールインジェクタを使用し、噴射管内の瞬間燃料流量を計測する。インジェクタの容量(静的流量)と噴射パターン及び噴霧性状の関係を明らかにするため、構造が同じでバルブリフト量異なるイ

Table 1 Injection conditions.

Fuel flow rate [mg/cycle]	24.4	12.1	8.6	7.5	6.1	
Valve opening duration	Ti [ms]					
Nozzle [cc/min]	600	3.53	1.87	1.35	1.22	0.99
	700	3.3	1.75	1.37	1.17	0.94
	800	2.88	1.56	1.15	1.04	0.86
	900	2.55	1.42	1.06	0.94	0.79
	1000	2.36	1.37	1.05	0.94	0.83

Table 2 Physical properties of n-heptane and gasoline.

	n-heptane	Gasoline
Density kg/m ³	684	745
Kinematic viscosity m ² /s	0.61×10^{-6}	0.54×10^{-6}
Refractive index	1.385	1.410
Surface tension N/m	20.9×10^{-3}	22.5×10^{-3}
Volume expansion rate K ⁻¹	1.22×10^{-3}	0.83×10^{-3}

ンジェクタを 5 種類用意した。これらのインジェクタは、バルブ全開状態での静的流量が、600, 700, 800, 900 および 1000cc/min であり、噴孔径はすべて 0.87mm で共通である。

噴射条件は、噴射周期 16.7Hz、燃料圧力 7.0MPa、燃料噴射量は、6.1, 7.5, 8.6, 12.1 および 24.4 mg/cycle とした。静的流量が異なるインジェクタを使用しているため、燃料噴射量は開弁時間を変更することで調節する。それぞれのインジェクタでの開弁時間は、予備実験から表 1 のように決定した。実験における燃料の統一性と安全性のためにガソリンの代替燃料として、ノルマルヘプタンを使用した。表 2 にノルマルヘプタンとガソリンの主な物性値を示す。

4. 結果及び考察

4.1 間欠噴霧の定常流的評価 間欠噴霧は 1 周期中に速度と粒径が時間的に変化するが、本節ではその時間的な変化を無視し、全液滴からの情報を粒子数平均して噴霧を評価する。図 3 は静的流量 700cc/min のインジェクタにより 1 回の噴射量を変化させた場合の、噴射方向の各測定位置 (z) における軸方向平均噴霧流速の半径方向 (r) 分布である。噴射量は 6.1, 8.6 および 24.4 mg/cycle の 3 条件である。噴霧流速の分布形状はスワール噴霧の特徴から、中心軸上に最大流速がなく、極大値が 2 箇所ある形状となった。測定位置最上流である $z = 10\text{mm}$ において、各条件では噴射量の増加とともに、噴霧最大流速は増加しているが、噴霧が最大流速となる半径位置は変化しない。その後、 z の増加とともに噴霧は広がり、噴射量の増加とともに噴霧流速最大の半径位置は噴霧外縁側に移行する。

Fig. 3 Radial distributions of mean velocity at the fuel amount of (a) 6.1mg/cycle, (b) 8.6mg/cycle and (c) 24.4mg/cycle.

これは、スワールインジェクタにおける燃料流量とスワール強さの関係に依存しているものと思われる。下流では、噴霧外縁の噴霧流速が減少するものの、噴霧中心軸付近では、流速の減衰が比較的緩やかであり、 $z = 50\text{mm}$ 以降では中心軸上に極大値を持つ正規分布形状に近づく。

図 4 に図 3 と同条件で得られたザウタ平均粒径を示す。ザウタ平均粒径には、噴射量による分布特性の傾向の変化はほとんど無いが、噴射量が増加するとザウタ平均粒径は少し増加している。ザウタ平均粒径の分布は、中心軸上が比較的小さく、噴霧流速が最大となる半径位置付近で大きな値をとっている。本インジェクタによる噴霧は既報⁽¹¹⁾の可視化実験で示したように、噴射初期に噴霧角が小さく流速が比較的大きな先立ち噴霧 (Core jet) が噴射され、続いて大きな噴霧角で傘状の主噴霧 (Umbrella spray) が噴射される。両者は時間的には連続して噴霧される。図 3, 4 から、主噴霧中に存在する液滴が、平均流速、ザウタ平均粒径

Fig. 4 Sauter mean diameter at the fuel amount of (a) 6.1mg/cycle, (b) 8.6mg/cycle and (c) 24.4mg/cycle.

Fig. 5 Radial distribution of mean velocity with all nozzles at $z = 25\text{mm}$.

ともに大きいことが分かる。

図 5 に静的流量が異なる 5 種類のインジェクタによる噴霧平均流速の比較を示す。測定位置は噴孔出口から 25mm、燃料噴射量は 8.6mg/cycle でそろえてある。噴霧流速分布は、最大値は噴霧軸上に存在せず、 $r = 10 \sim 15\text{mm}$ 程度の場所にあり、静的流量が 900cc/min までは静的流量が増加するとともに、噴霧流速の最大値の位置は噴霧外縁側に移行するが、1000cc/min のインジェクタでは噴霧軸側に戻り、700cc/min のインジェクタとほぼ同程度の位置となった。なお、図 3 と同様に流速分布は軸対称ではなく、すべてのインジェクタ

Fig. 6 Mean velocity and Sauter mean diameter along the center line.

Fig. 7 Radial distributions of particle mean velocity.

で r が正の領域で速度が大きい。インジェクタ内には針弁ガイドがあり、燃料流路は数個に分かれているが場所は固定されず、また、流路の影響が残ることは考えにくい。PDA 測定上の問題としては、送光及び受光光路上に存在する高濃度液滴群の影響が予想されるが現状では未確認であり、今後の検討課題とする。

図 6 に 700 および 1000cc/min のインジェクタによる中心軸上平均流速およびザウタ平均粒径を示す。燃料噴射量は、6.1、8.6 および 24.4mg/cycle である。インジェクタによる違いは、700cc/min のインジェクタが、 $z = 15 \sim 40\text{mm}$ の付近で、平均流速が小さくザウタ平均粒径も少し小さいが、下流では、両者はほぼ同程度となる。なお、上流では、700cc/min のインジェクタによる噴霧が平均流速、ザウタ平均粒径とも若干大きい、この噴孔直後の領域では計測時のデータの有効率が低く、有意な差とは断定できない。

図 7 に 700 および 1000cc/min のインジェクタによる平均流速の半径方向分布図を示す。燃料噴射量は、24.4mg/cycle である。同じ測定距離 (z) では、700cc/min のインジェクタによる平均噴霧流速の方が外側に最大値がある。これは、噴霧角のわずかな違い

Fig. 8 Spray droplets velocity with phase angle.

によるものであり、同じ噴射量では、700cc/min のインジェクタの噴霧の方が空間的な広がり大きい。また、 $z = 50\text{mm}$ では、700cc/min のインジェクタによる噴霧は外縁部に極大値を持つが、1000cc/min による噴霧では確認できなかった。

4・2 間欠噴霧の時間分割評価 間欠燃料噴霧では、その時間的・空間的特性がより重要であり、前節の実験結果を再整理する。図 8 に 700cc/min のインジェクタの $z = 25\text{mm}$, $r = 10, 0, -10\text{mm}$, 噴射量 8.6mg/cycle における、噴霧流速と噴射位相角の関係を示す。本図では、PDA 計測で得られた有効データのすべてが含まれており、一つの点が一つの液滴の流速結果である。横軸の噴射位相角は時間経過に相当し、1 周期 (= 60 ms) が 360 度となるよう設定した。 $r = 0\text{mm}$ では、噴霧は位相角 55 度付近から観察されるが、その後、56 度付近で計測液滴数が減少し、位相角 60 度前後では、液滴流速が計測されない。その後位相角 63 度付近から再度計測されるようになる。 $r = 10\text{mm}$ 及び -10mm では、噴霧は若干遅れて到達し、 $r = 0\text{mm}$ で噴霧液滴数が減少する位相角約 56 度から、噴霧が観測されはじめる。その後、噴霧流速は増加し、位相角 61 度付近で最大値となった後、減少する。これらの結果から、本インジェクタによる噴霧は、噴霧初期に非常に短期間に先立ち噴射が行われ、その後広い角度で中空の主噴霧が発達することが分かる。ここで、先立ち噴霧は、単体では非常に小さな噴霧角を持ち、噴霧中心軸付近以外には到達しない。なお、図 3, 5 で示したように、本実験では噴霧流速は、左右非対称であり、本図でも

Fig. 9 Time dividing analysis at $r = 10$ and 0mm and $z = 25\text{mm}$.

$r = 10\text{mm}$ と -10mm では時間的な傾向は同じであるが、絶対値には差がある。

著者らは、間欠噴霧を効果的に評価するため、時間分割法を提案した⁽⁵⁾。時間分割法は、噴霧の中心軸上の位相角による流速情報を指標として、噴霧を各部分に分けて評価するものである。しかし、図 8 に示したように、本噴霧の場合、中心軸上では主噴霧が連続して計測できないため、従来法はそのままでは適用できない。そのため、従来の方法を、主噴霧の影響が最も大きいと考えられる噴霧流速の最大値をとる半径位置の噴霧に適用し、その位相情報を同じ測定横断面の他の計測点にも使用することとした。この修正した時間分割法の具体的な定義を図 9 に示す。図 9(a)は、図 8 の $r = 10\text{mm}$ での結果である。この図から、最大流速を求め、その最大流速の半分よりも大きな流速の区間を $T_{0.5}$ と定義する。 $T_{0.5}$ を 3 等分し、前から F, C と定義する。その次の区間は F, C の 2 倍の位相角区間を R と定義し、残りの部分を T と定義する。これらは、噴霧の先端の発達過程 (F)、噴霧の中心区間 (C)、弁が閉じ噴霧が減衰する区間 (R) および残りの区間 (T) と考える。図 9(b)は、この位相角情報を $r = 0\text{mm}$ に適用した結果である。ここでは先立ち噴霧があり、F 以前に液滴が計測されるので、この部分を便宜的に F' と定義した。なお、前節で示した、時間分割によらない、全粒子データを使った平均値を A として表す。

図 10 に 700 および 1000cc/min インジェクタでの中心軸上の各区間の平均流速を示す。燃料噴射量は、24.4mg/cycle に設定した。本図において、C の値は

Fig. 10 Mean velocity on the spray axis for 700 and 1000 cc/min injector.

Fig. 11 Sauter mean diameter on the spray axis for 700 and 1000 cc/min injector.

1000cc/min の 15~35mm および 700cc/min の 35mm では計測されていない。これは、図 8 に示したように、中心軸上では先立ち噴霧と主噴霧との間で液滴が存在しないためである。また、下流において、1000cc/min の 75mm 以降の F' は、先立ち噴霧が主噴霧にとり込まれて識別できないため、実験点のプロットがない。700cc/min のインジェクタによる噴霧は、上流で F' の速度減衰が小さく大きな流速を保つが、 $z = 35\text{mm}$ 以降では減衰し、両インジェクタでもほぼ同様な傾向を示す。F では上流で高い流速を持つが、減衰が F' より

Fig. 12 Mean velocity at the maximum mean velocity position for 700 and 1000 cc/min injector.

大きく、両者ともほぼ同程度の値をとる。C は噴霧が途切れて計測不可能な領域があるため、一概にはいえないが、下流域では両者とも同程度の流速である。R は 700cc/min のインジェクタによる噴霧の方が全域で流速が小さい。A および T は両者とも同様に変化が少なく、低い値をとっている。特に、噴霧の全体粒子を平均した A では、間欠噴霧の特徴が十分には評価できないことが分かる。図 11 に図 10 と同一条件におけるザウタ平均粒径の変化を示す。ザウタ平均粒径は、両者でほぼ同程度の値となるが、 $z = 35\sim 50\text{mm}$ 付近の F' および $z = 35\text{mm}$ より上流での F は 700cc/min のインジェクタによる噴霧の方が大きな値となっている。

図 12 に 700 および 1000cc/min での最大流速の位置における各区間の平均流速を示す。燃料噴射量は同じく 24.4mg/cycle である。噴霧流速は、本実験での最上流計測点である $z = 10\text{mm}$ において、700cc/min のインジェクタによる噴霧はいずれの区間でも大きな平均流速となっている。C については、その後もほぼ同様に常に高い流速を示している。測定位置 $z = 15\text{mm}$ において、700cc/min での結果は 1000cc/min での結果と比較して、F は小さく R は大きい、 $z = 60\text{mm}$ 以降の下流では、両者は同様な値を示している。なお、図示していないが、ザウタ平均粒径は上流で違いがあり、 $z = 15\text{mm}$ で 700cc/min での値は 1000cc/min での結果よりも F で小さく、R では大きかった。

図 13 に最大平均流速をとる半径 (r) 位置を示す。最大平均流速をとる半径は、すべての測定位置 (z) において 700cc/min のインジェクタによる噴霧の方が

Fig. 13 Maximum velocity position.

Fig. 14 Penetration length obtained by PDA.

大きい。インジェクタの静的流量が噴霧角度に影響すると思われる。

図 14 に噴霧到達距離を示す。この図も従前と同様に 700 および 1000cc/min のインジェクタを用い、噴射量 24.4mg/cycle で得られた結果であり、噴霧の F' および F が測定位置で確認された位相角から求めたものである。この図から、噴射初期は F' および F とともにインジェクタの差はほとんどないが、位相角 60 度付近で、1000cc/min のインジェクタによる噴霧は F が F' に一致している。これは、前述のように先立ち噴霧が主噴霧に追いつかれ、とりこまれたためである。

4.3 燃料噴射量と噴霧性状の関係 図 15 に、噴射量 24.4mg/cycle の場合の燃料瞬間流量(dQ/dt)および噴霧の時系列流速測定結果を示す。噴霧流速は、700cc/min インジェクタにおいて $z = 10\text{mm}$ で $r = 0$ と 6mm, $z = 15\text{mm}$ で $r = 8\text{mm}$ の各点、および 1000cc/min インジェクタでの $z = 10\text{mm}$ で $r = 0$ と 6mm, $z = 15\text{mm}$ で $r = 6\text{mm}$ の各点で計測したものである。これらの点は、噴霧軸上および噴霧平均流速が最大となる点である。噴霧軸上の (b) と (c) において、前節の F' に相当する先立ち噴霧は、ほぼ同程度の流速を示すが、700cc/min のインジェクタによる噴霧流速の方が、F' が観測される時間が早くなっている。これは、瞬間燃料流量 (a) の開弁直後の挙動から、700cc/min の方が噴射率が大きいことに関係すると思われる。また、主噴霧が観測されはじめる位相角は、700cc/min のイン

Fig. 15 Relationship between instantaneous fuel flow rate and droplet velocity

ジェクタ場合 (d) が最大噴射量の大きい (e) の場合より遅れている。ただし、ここで観察される主噴霧の流速はほぼ同様である。なお、噴射率波形 (a) にみられる閉弁後の噴射管内に残る脈動流は、噴霧流としては検出されないことが確認される。

両インジェクタの (d) と (e) で示される $z = 10\text{mm}$, $r = 6\text{mm}$ の測定において、噴霧が存在する期間は、ほぼ開弁期間に対応していることが分かる。ここで、噴

Fig. 16 Correlations between droplet diameter and velocity.

出噴霧流がほぼ定常状態と考えられる位相角約 58~72 度(700cc/min)と 58~66 度(1000cc/min)での結果を比較すると、700cc/min インジェクタの噴霧の方が噴霧流速の変動が少なく、流速も大きい。なお、流速の絶対値は、半径方向のわずかなずれが結果に影響するので詳細な解析は困難であり、相対比較にとどめている。

$z = 15\text{mm}$ での噴霧平均流速の最大値となる測定点では、700cc/min のインジェクタによる噴霧 (f) では、噴霧が観測され始めた直後からの流速の増加が鈍化している。これに対し、1000cc/min のインジェクタによる噴霧流速 (g) では、噴霧観測直後の流速増加率が $z = 10\text{mm}$ の (e) と同様である。

上記現象を考察するため、図 16 に 700 cc/min における (a) : $z = 10\text{mm}$, $r = 6\text{mm}$, (b) : $z = 15\text{mm}$, $r = 8\text{mm}$ および 1000 cc/min における (c) : $z = 10\text{mm}$, $r = 6\text{mm}$ の各 F の部分での液滴粒径と流速の相関を示す。どの結果においても、負の相関が観察される。また、図 16 (a) では、 $40\mu\text{m}$ 前後の液滴で大きな流速を持つ集団が観察されるが、この液滴群は図 16 (b) になると数が減っている。これらの流速は、噴孔から斜め方向に噴出する液滴の軸方向速度成分を計ったものであり、速度の大きさ、液滴飛行方向の変化、周囲流巻き込みによる粒径選別等が複雑に関係しているものと考えられ、現状では原因を断定できない。一方

1000cc/min のインジェクタでは、図 16(a)で確認された、流速の大きな液滴群はほとんど存在しない。

5. 結言

燃料噴射弁のリフト量のみ変化させて静的流量を変えた 5 種類のインジェクタを使用し、燃料噴射量を変化させながら、位相ドップラ法により噴霧の流速と液滴粒径を計測し、さらに LDA 流量計を使用して瞬間流量（噴射率）を計測した結果、以下の結言を得た。

1. 静的流量の大きい噴射弁ほど、噴霧流速の最大値の半径位置は、一部の例外を除いて半径方向に増加する。これは静的流量変化で噴霧角が変化することによるものと思われる。
2. 燃料噴射量が増加すると、噴霧流速の最大値は大きくなり、また噴霧角も大きくなる。しかし、ザウタ平均粒径には大きな影響を与えない。
3. 本スワールインジェクタ噴霧に対して、新しい時間分割法を提案した。この手法により間欠噴霧の時間的な構造が分かり、主噴霧の各部分及び先立ち噴霧において平均流速とザウタ平均粒径が評価できた。
4. 燃料の瞬間流量（噴射率）と噴霧性状には関係があり、両者を比較して議論する新しい噴霧評価手法が提案できた。

最後に LDA 流量計に関しては、日本学術振興会招聘研究者として滞在した Ismailov 博士に多くのご助力をいただいた。また、本研究費の一部は文部科学省の科学研究費補助金、基盤研究 (C) (2) 11650206c によるものである。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

1. Iwamoto, Y. ほか 4 名, *SAE Paper* 970541 (1997).
2. Tomoda, T. ほか 4 名, *SAE Paper* 970539 (1997).
3. Sankar, S.V., ほか 3 名, *Proceedings of ICLASS-'97*, Seoul, (1997) 649.
4. Ikeda, Y., *Proceeding of the 8-th Int. Symp. on Appl. of LDA Techniques to Fluid Mech.*, Vol. 1, (1996) 13.6.1.
5. Obokata, T., Long, W., Ishima, T., *SAE Paper* No.960772 (1996).
6. Ismailov, M., ほか 4 名, *JSME International Journal*, B, 42-1 (1999) 39.
7. 石間, ほか 5 名, 機論, 69-678, B (2003), 掲載予定
8. Ishima, T., ほか 3 名, *Proc. 5th Int. Symp. COMODIA*, (2001) pp. 493.
9. Lambossy, P. *Oscillations, Helv Phys. Acta* 25, (1952) 371.
10. Hanjalic, K., Jakirlic, S., Hadzic, I., *Turbulent Shear Flows 9, Selected Papers*, Springer Verlag, (1993) 323.
11. Ismailov, M., ほか 5 名, *JSME International Journal*, B, 41-4 (1998) 983.