

高拡散型燃料噴射ノズル(千鳥噴射ノズル)における 噴霧特性の基礎的解明

Fundamental Study on Fuel Spray Characteristics of High Dispersion Nozzle (Staggered Layout Nozzle)

古東 文哉, 森 一広, 久保 憲太郎, 千田 二郎, 藤本 元
(Fumiya KOTO) (Kazuhiro MORI) (Kentaro KUBO) (Jiro SENDA) (Hajime FUJIMOTO)

同志社大学大学院 同志社大学大学院 同志社大学大学院 同志社大学 同志社大学
(Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.) (Doshisha Univ.)

In order to improve the generation of diesel emissions, NO_x and PM, combination of constant pressure combustion and high-dispersion nozzle is effective. This combustion technology inhibits initial combustion and using high dispersion nozzle that has small diameter nozzle holes reduce the generation of smoke. The purpose of this study is to investigate the fuel injection characteristics and the macroscopic fuel spray characteristics of high-dispersion nozzle. In spite of the sub-hole diameter is smaller than main hole, spray tip penetration is larger than that of main hole because sub hole located downstream in sac. And, since the air-entrainment into sub and main spray are greater than other holes of conventional nozzles because of decreasing hole diameter, high-dispersion nozzle improves the utilization of ambient air compared with conventional nozzles.

Keywords: High-dispersion Nozzle, Diesel Spray, Fuel Injection

1. はじめに

ディーゼル機関はその高い熱効率による燃料経済性や地球温暖化防止の観点から、幅広い分野の動力源として用いられてきた。しかしながら、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物(NO_x)と、粒子状物質(PM)の同時低減や、燃費・出力のさらなる改善などの課題は今もって解決しておらず多くの研究者により様々なアプローチがされている。具体的な方策としては燃料高圧噴射やノズル小噴孔径化、筒内圧力の上昇による燃焼改善⁽¹⁾が挙げられるが、その中で異なる噴射角を持たせる事によって小噴孔径化および多噴孔化の限界を高めた高拡散型燃料噴射ノズルの使用が効果的であるとの報告がある⁽²⁾。これまで、噴霧の微粒化および混合気形成、ノズル噴孔の配置や噴孔径および噴孔数の最適化に着目し、着火遅れの短縮、初期燃焼の抑制およ

び後期燃焼を活性化させる研究が行なわれているが⁽³⁾、異なる噴射角を持つ燃料噴射ノズルにおける噴霧特性については不明な点が多いのが現状である。

本研究では、高拡散型燃料噴射ノズルにおける噴霧特性を基礎的に解明することを目的とした。噴霧特性の解明には、単噴孔燃料噴射ノズルを供試するケースが多いが本実験では異なる噴射角の噴孔位置による影響まで包括するため、実際にエンジンで使用される多噴孔ノズルを供試した。まず、高拡散型燃料噴射ノズルにおける噴射特性を燃料噴射率計測により調べた。その後、高拡散ノズルの非蒸発噴霧観察を行ない、噴霧形状、噴霧先端到達距離、噴霧体積を計測し、巨視的な特性を把握した。さらに、噴霧内における周囲気体導入状況を把握するために噴霧全体における平均空燃比を算出した。

2. 実験装置および実験条件

2.1 本実験で用いた供試ノズル

高拡散型燃料噴射ノズルおよび従来型ノズルの仕様を図 2-1 および表 2-1, 表 2-2 に示す. いずれのノズルも放電加工により噴孔を加工した後, 流体研磨により流量管理を行っている. 高拡散型燃料噴射ノズルは, 噴射角 160deg.に 8 噴孔(噴孔径 0.24mm, 以下主噴孔), 80deg.に 4 噴孔(噴孔径 0.20mm, 以下副噴孔)を互いに噴霧が干渉しないよう千鳥配列し設置されている. これらの噴孔配置は市販されている産業用エンジンスペックを参考にした⁽⁴⁾. また高拡散ノズルとの比較のため, 噴射角が一種類(160deg.)の従来型ノズルを用いた. 従来型ノズルとして 7 噴孔ノズル(噴孔径 0.30mm), 8 噴孔ノズル(噴孔径 0.28mm)および 9 噴孔ノズル(噴孔径 0.26mm)を用いた. 各ノズルにおいてほぼ同じ総噴孔断面積(0.49mm²)とすることで噴射量を同等とし噴霧性状の比較検討を行なった.

2.2 実験条件

本研究における実験条件を表 2-3 に示す. 実機関における上死点付近の空気密度 41.6kg/m³(1000K, 12MPa 相当)を模擬するため, 雰囲気気体の二酸化炭素で 2.3MPa まで加圧し, 非蒸発場で実験を行なった. 燃料噴射装置は電子制御型コモンレール式燃料噴射装置を用いた. 燃料噴射圧力は 100MPa とし, 供試燃料として軽油の 50%留出温度にほぼ等しい, n-トリデカンを用いた.

3. 実験方法

3.1 噴射率計測

高拡散型燃料噴射ノズルは, 多噴孔化する際に噴孔を異なる噴射角に配置しているため, その噴射特性はそれぞれ異なった現象となる. このため主噴孔および副噴孔それぞれの噴射率を計測する必要がある. そこで, 各噴孔における個々の噴射率を噴霧モーメント法により計測した. さらに各ノズルにおける噴射量を計測し, 各噴孔の流量係数を下式より算出した.

$$C_D = \frac{m}{\rho_f A \Delta t \sqrt{2(p_{inj} - p_a) / \rho_f}} \quad (3-1)$$

ただし, m は燃料噴射量 kg, A は噴孔断面積 m², Δt は噴射期間 s, p_{inj} は噴射圧力 Pa, p_a は雰囲気気圧 Pa, ρ_f は燃料密度 kg/m³ とする.

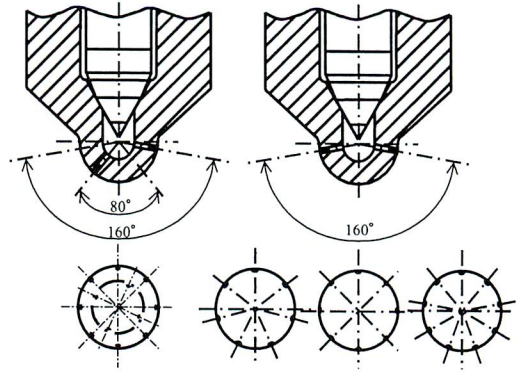


Fig. 2-1 Configuration of high dispersion nozzle and conventional nozzle

Table 2-1 Specifications of high dispersion nozzle

Number of main - sub holes		8 - 4
Nozzle hole diameter	$d_1 - d_2$ [mm]	0.24 - 0.20
Nozzle hole length	l [mm]	1.2
Nozzle spray angle	$a - b$ [deg.]	160 - 80
Needle Lift	L [mm]	0.35
Dimension of holes	S [mm ²]	0.49

Table 2-2 Specifications of Configuration Nozzles

Number of holes	7	8	9	
Nozzle hole diameter	d [mm]	0.30	0.28	0.26
Nozzle hole length	l [mm]	1.2		
Nozzle spray angle	a [deg.]	160		
Needle Lift	L [mm]	0.35		
Dimension of holes	S [mm ²]	0.49		

3.2 高拡散型燃料噴射ノズルにおける自由噴霧観察および巨視的特性

高拡散ノズルおよび従来型ノズルにおける噴霧の巨視的特性を調べるために背景光撮影を行なった. その際の光学系を図 3-1 に示す. 光源には Nd:YAG レーザの第二高調波 532nm を用い, 片凸レンズと拡散板を用いて入射する. いずれも撮影には CCD カメラを用いた.

4. 結果および考察

4.1 噴射率および流量係数

高拡散型燃料噴射ノズルにおける主噴孔および副噴孔それぞれの噴射率測定結果を図4-1に示す。噴射初期において、副噴孔の噴射率の立ち上がりが主噴孔よりも早い。また、主噴孔における噴射率の立ち上がりが鈍く、ピーク値まで緩やかに上昇していることがわかる。これは主噴孔入口部における縮流の影響であると考えられる。ニードルが低リフトの時には縮流が大きく噴孔の有効面積が小さい。リフト量が増加するに従い有効面積が確保され、主噴孔の噴射率は徐々に増加しているものと推察できる。

次に、主・副噴孔および従来型ノズルの各噴孔における流量係数を算出した。結果を図4-2に示す。副噴孔の流量係数が他の噴孔に比べ高い値を示している。これは副噴孔がノズル下部に設置されており、ノズル内部においてシート部から噴孔への燃料流動がスムーズであり、噴射量が面積比以上に副噴孔側に偏っていることが原因であると考えられる。これらの理由により副噴孔は噴射角の大きな他の噴孔に比べ噴射率の立ち上がりが早くなったものと考えられる。

4.2 噴霧先端到達距離と燃料噴出速度

背景光撮影画像から得られた従来型各ノズルの1噴孔、高拡散型燃料噴射ノズルにおける主・副噴孔の噴霧先端到達距離の計測値、および和栗ら⁽⁵⁾の実験式により計算される値を図4-3に示す。計算値においては噴孔径の増加に伴い先端到達距離は増加している。しかしながら従来型ノズルにおける計測値に着目すると、噴孔径の増加に伴う有意な差は認められない。さらに、高拡散ノズル副噴孔において噴孔径が最も小さいにもかかわらず、噴射初期から他のノズルに比べ噴霧の発達が大きいの。その後、発達は抑制され約1.6msで他の噴孔とほぼ等しくなる。

噴射初期の噴霧先端到達距離には噴射角および燃料噴射率が大きく影響していると考えられる^{(6),(7)}。次式より噴射速度は噴射率に比例することから、得られた噴射率波形より各時間において算出した噴出速度を図4-4に示す。

Table 2-3 Experimental Conditions

Fuel oil		n - Tridecane
Ambient gas		CO ₂
Ambient temperature	T _a [K]	300
Ambient density	ρ _a [kg/m ³]	41.6
Ambient pressure	p _a [MPa]	2.3
Injection pressure	p _{inj} [MPa]	100
Injection duration	t _{inj} [ms]	2.5

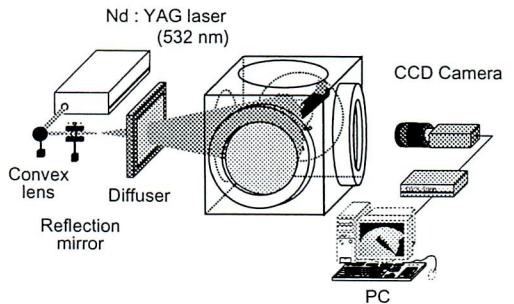


Fig.3-1 Optical setup for back light illumination method

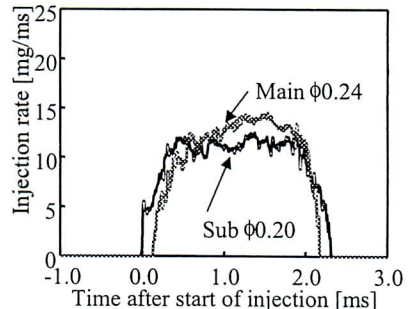


Fig.4-1 Injection Rate of Staggered Layout Nozzle

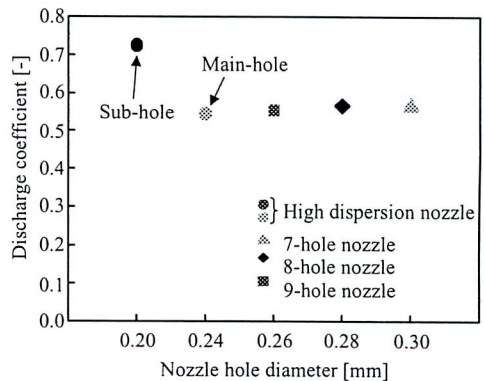


Fig.4-2 Discharge coefficient of test nozzle

$$u_0 = \frac{\dot{M}_f}{\rho_f (\pi/4) d^2} \quad (4-1)$$

ただし、 \dot{M} :噴射率 kg/s, d :噴孔径 m, ρ_f :燃料密度 kg/m³, u_0 :噴出速度 m/s とする。

副噴孔の噴出速度は他の噴孔よりも早く立ち上がり、噴射初期から噴出速度が大きい。また、従来型ノズルおよび主噴孔の噴出速度は噴射開始からほぼ等しい。このことから、噴射圧力が同じ場合の噴出速度は、噴射角に大きく影響を受けることがわかる。主噴孔入口部の縮流により副噴孔へ流入する燃料量が増え、副噴孔の燃料噴射量が増したため、上式で定義される噴出速度も増加し、噴霧の発達が促進されたと考えられる。燃料噴射後 0.4ms までの低リフト領域において主と副噴孔の差が大きいのはこのためであると推察できる。一方、噴射角の大きい他の噴孔では上記の理由により噴射初期では噴霧の発達が抑制されるが、噴射中期以降においては噴出速度がピークを迎えるために噴霧の発達が活発化したと考えられる。

噴射率から得られた各時刻の噴出速度を考慮し、運動量理論から再び噴霧先端到達距離を計算した。結果を図 4-5 に示す。噴射初期において、実験結果とほぼ一致していることがわかる。しかしながら、噴射後 0.5ms 以降は実験値が大きい。これは、先に噴射された噴霧液滴が周囲気体とのせん断作用により噴射方向への運動量を失い噴霧外縁部に滞留するため、後続の噴霧液滴が周囲気体と十分な運動量交換を行えなかったためと考えられる。これらのことから、噴射角の違いによる燃料噴射率の立ち上がりの早さと噴出速度が噴霧先端到達距離に大きく影響を与えると考えられる。

4.3 周囲気体導入特性

背景光撮影画像から噴霧体積を算出した。噴霧体積は噴霧を円錐および半球で構成されていると仮定し、それらの体積の合計とした。高拡散型燃料噴射ノズルおよび従来型ノズルにおけるそれぞれ 1 噴孔の噴霧体積を図 4-6 に示す。噴孔径の増加に伴い、噴射率が増大するため噴霧体積は増加している。しかしながら、副噴孔の噴霧体積が噴射初期から主噴孔に比べて大きい。噴射初期においては副噴孔の噴霧貫徹力が大きいことから、より早い段階から周囲気体とのせん断作用によ

り運動量交換および周囲気体導入が行なわれ、混合が促進していると考えられる。しかしながら、噴射中期以降では副噴孔の体積増加が抑制され、他の噴孔の噴

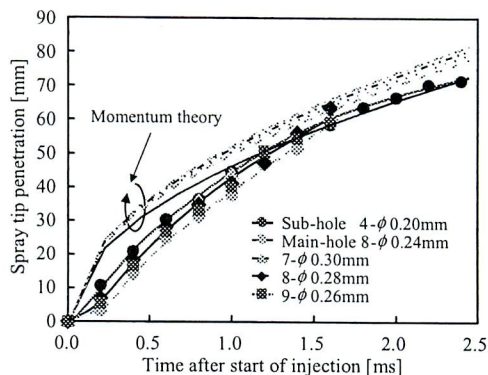


Fig.4-3 Temporal change in spray tip penetration for each hole diameter ($p_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^3$)

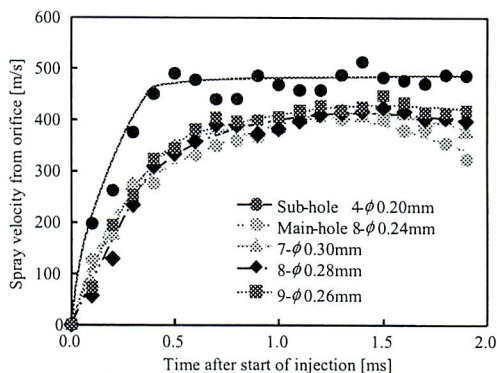


Fig.4-4 Temporal change in injected spray velocity for each hole diameter ($p_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^3$)

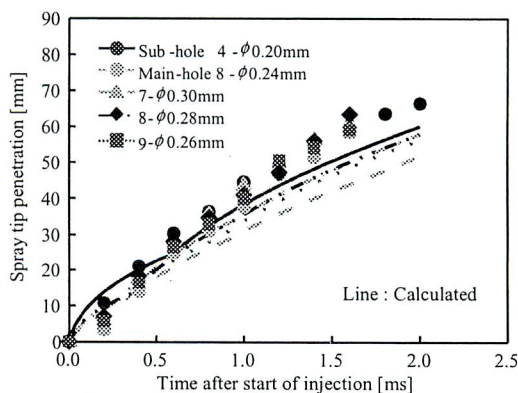


Fig.4-5 Comparison of calculated spray tip penetration with experimental result ($p_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^3$)

霧体積が増加している。これは、噴射中期において従来型ノズルおよび主噴孔における燃料噴射率が、副噴孔よりも大きくなると同時に最大値となることで大幅に噴霧体積が増加したためと考えられる。

噴霧内への周囲気体導入状況を調べるため、噴射後 1.6ms の噴霧内部における周囲気体および噴霧内燃料質量より平均空燃比を算出した。結果を図 4-7 に示す。噴霧内に導入された周囲気体質量は、噴霧体積に周囲気密度を乗じることで導入気体量を算出した。また、噴霧内燃料質量は燃料噴射率波形から得られる 1.6ms までの積算値とした。従来型ノズルの噴霧内空燃比はほぼ等しいが、高拡散型ノズルでは主噴霧、副噴霧ともにほぼ全領域で大きい。主噴孔は噴孔径縮小に伴い、噴霧内への周囲気体導入が大きくなったこと、および副噴孔は小噴孔径化に加え、前述のように噴射速度の増大に伴う貫徹力の増加によって噴霧全体で周囲気体導入が促進されていると考えられる。

噴霧内空気導入量を表す実験式として、和栗ら⁽⁸⁾の運動量理論より得られる噴霧内空燃比との比較を行なった。運動量理論より得られる次式から噴霧内部における平均空燃比を算出し図中に併記した。

$$\frac{M_{gas}}{M_{fuel}} = \frac{2 \tan \theta}{\sqrt{c}} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \frac{x}{d} \quad (4-2)$$

ただし、 M_{gas} 、 M_{fuel} :噴霧内気体質量、燃料噴射量 kg、 d :噴孔径 m、 ρ_f :燃料密度 kg/m³、 ρ_a :周囲気密度 kg/m³、 x :噴孔からの距離 m とする。収縮係数 c は 0.8 とした。

噴孔近傍部においては、各ノズルとも計算値より低い値となっている。前述のように噴射中期以降においては噴射初期に噴射された燃料が噴霧外縁部に滞留し、後続の噴霧が周囲気体と十分な運動量交換ができず、周囲気体導入が抑制されたためと考えられる。また、噴霧下流部における空燃比が計算値よりも大きくなっている。これは噴霧先端部の滞留領域において大規模なスケールの渦が噴射期間中に成長し、噴霧先端における体積が増加したためと考えられる⁽⁹⁾。

各ノズルにおいて全噴孔における噴霧を同一と仮定し、高拡散ノズル、および従来型ノズルの 1 噴孔毎の体積から総噴霧体積を算出した。また得られた総噴霧体積と総噴射量から、それぞれの噴霧内平均空燃比の

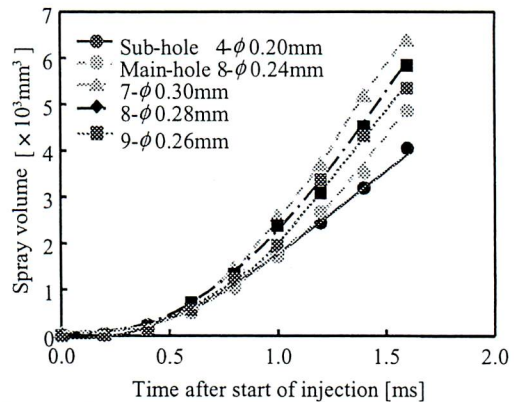


Fig.4-6 Temporal Changes of Spray Volume Comparing with Nozzle Hole Diameters

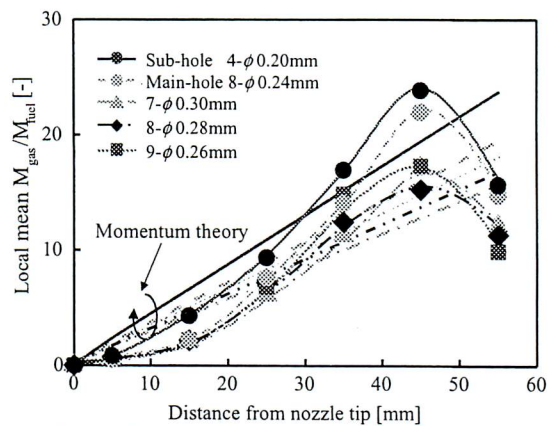


Fig.4-7 Effect of test nozzles and momentum theory on local mean M_{gas}/M_{fuel} ($p_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^{-3}$)

時系列変化を求めた。結果をそれぞれ図 4-8、4-9 に示す。総噴霧体積において、噴射初期はほぼ同一であるが、噴射中期以降、高拡散ノズルにおける噴霧体積が増加している。これにより噴霧への周囲気体導入が促進され、ノズルとしての周囲気体利用率の向上につながっていると考えられる。また、各時期における平均空燃比に着目すると、噴射初期からほぼ全ての時期において高拡散型噴射ノズルの空燃比が最も高い値を示している。各ノズルの総噴射量が同じであることから、単位燃料噴射量あたりの気体導入量は高拡散ノズルが最も高いと考えられる。これは多噴孔化、小噴孔径化により燃料噴霧への気体導入が促進されたためと考えられる。特に副噴霧においては、噴射初期から噴出速度が高く噴霧貫徹力が大きいため、噴霧先端外縁部に

おける周囲気体との運動量交換が早い段階で活発化し、小噴孔径化による乱流混合の促進で気体導入が高拡散型燃料噴射ノズルの周囲気体導入量増大に大きく影響を与えていると考えられる⁽¹⁰⁾。

ディーゼル機関では、高圧燃料噴射化および小噴孔径化により、粒子状物質が低減されることが報告されている⁽¹¹⁾。本研究で用いた高拡散ノズルにおいても、小噴孔径化による粒子状物質低減が可能であると考えられる。また異なる噴射角に噴孔を配置している副噴孔では、小噴孔径化だけでなく、噴出速度が大きいことから混合気形成過程における周囲気体との混合を促進することができると考えられる。これらのことから着火遅れ期間が短縮すること、初期燃焼が抑制されることが期待できる。

4. 結言

従来の燃料噴射ノズルにおける噴射角に加え、噴射角の小さい噴孔を千鳥配列し小噴孔径化および多噴孔化された、高拡散型燃料噴射ノズルにおける噴霧特性を調べた。

- (1) 高拡散ノズルの副噴孔は、噴孔がサック下部に設置されており、ノズル内部のシート部から噴孔への流動がスムーズであるため主噴孔および従来型ノズルよりも早く噴射率が立ち上がる。
- (2) 副噴霧は従来型ノズルおよび主噴孔からの噴霧に比べ、噴射初期における噴出速度が高く貫徹力も大きく、噴霧と周囲気体とのせん断作用をより強く受け運動量交換が活発化するため噴霧内全体で空燃比が大きく周囲気体との混合が促進されている。
- (3) 高拡散型燃料噴射ノズルにおいては、主噴孔および副噴孔の小噴孔径化により他のノズルよりも周囲気体導入が促進される。

参考文献

- (1) 中北清己ら, “高圧噴射ディーゼル機関の燃焼解析”, 第11回内燃シンポ論文集, (1993), pp.19-24.
- (2) Par Bergstrand, “The Effects of Multirow Nozzles on Diesel Combustion”, SAE paper, 2003-01-0701
- (3) 庄司武志, 神本武征, “組合せ噴孔ノズルによる直接噴射式ディーゼルエンジンの燃焼改善”, 機論(B編), 64-620, (1998-4), pp.1268-1273.
- (4) エンジンテクノロジー, November 2000, pp.45

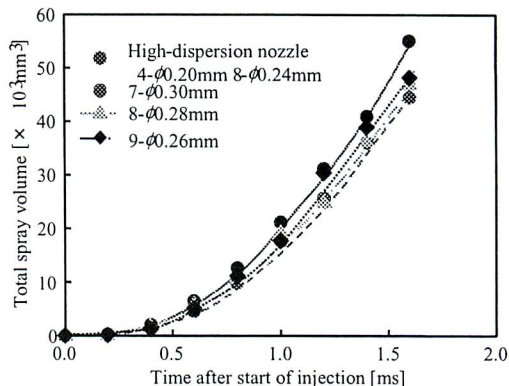


Fig.4-8 Total spray volume of test nozzles $\rho_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^3$

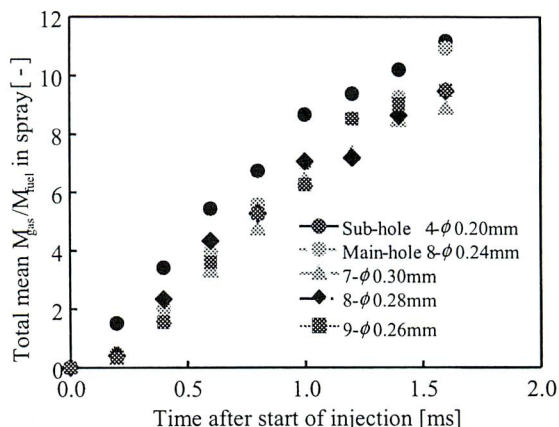
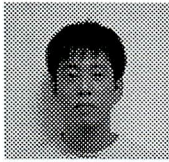


Fig.4-9 Total mean Gas/Fuel of test nozzles $\rho_{inj} = 100\text{MPa}$, $t_{inj} = 2.5\text{ms}$, $\rho_a = 41.6\text{kgm}^3$

- (5) 和栗雄太郎他, “ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究”, 機論(第2部), (1972), pp.672-683.
- (6) 神本武征ら, “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”, 機論(第2部), (1958), pp.820-826.
- (7) 河村清美, 斎藤昭則, 都築尚幸, 渡部哲, “高圧ディーゼル噴霧の特性解析”, 自動車技術会論文集 Vol.23 No.4, (1992), pp.20-24.
- (8) 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒屋礼二郎 “ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究”, 日本機械学会論文集(第2部), (1958), pp.820-826.
- (9) Tomohisa Dan et al., “Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray”, SAEpaper970352.
- (10) 石川直也, 張端, “ディーゼル噴霧への周囲気体導入特性に関する研究”, 日本機械学会論文集(B編), 65-633, (1999-5), pp.325-333.
- (11) 石田正弘, 坂口大作, “ディーゼル機関のすす粒径に及ぼすノズル噴孔径の影響”, 日本機械学会論文集(B編), 67-653, (2001-1), pp.280-287



古東 文哉
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 在学
京都府京田辺市多々羅都
谷1-3
Tel. 0774-65-7742
Fax. 0774-65-7743

略歴

平6月 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



久保 憲太郎
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
京都府京田辺市多々羅都
谷1-3
Tel. 0774-65-7742
Fax. 0774-65-7743



森 一広
平16 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
京都府京田辺市多々羅都
谷1-3
Tel. 0774-65-7742
Fax. 0774-65-7743



千田 二郎
同志社大学・工学部・教授
京都府京田辺市多々羅都
谷1-3
Tel. 0774-65-7742
Fax. 0774-65-7743

略歴

昭60年3月 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
平10年4月～現在 同志社大学工学部教授
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
燃焼法の提案などを行っている



藤本 元
同志社大学・工学部・教授
京都府京田辺市多々羅都
谷1-3
Tel. 0774-65-7742
Fax. 0774-65-7743

略歴

昭39年3月 慶應義塾大学工学部機械工学
科卒業
昭60年4月～現在 同志社大学工学部教授

主に, ディーゼル噴霧の微粒化, 燃焼過程の
研究を行っている。