

高応答ディーゼルコモンレールインジェクタを用いた ノズル噴孔径が噴霧と燃焼に及ぼす影響

Study of Spray and Combustion Using Fast Response Common Rail Injector with Micro Orifice Nozzle

加藤 彰*
Akira KATO

松浦 勝也*
Katsuya MATSUURA

吉見 泰広*
Yasuhiro YOSHIMI

要 旨

ディーゼルエンジンのさらなる有害排出ガスの低減を目指してノズル噴孔径の小径化について検討した。これには燃料噴射初期の噴射率傾きを従来の量産インジェクタに比べて約80%向上させたプロトタイプインジェクタを用いた。ノズルは油圧流量が同一で噴孔径と噴孔数のみ異なる0.08 mmから0.12 mmまでの三種類を準備した。噴霧計測をおこなった結果、小径化に伴いペネトレーション（貫徹力）は低下し、ザウタ平均粒径が小さくなる傾向を示すことが確認された。さらにエンジン燃焼試験をおこなった結果、ノズル噴孔の小径化と多孔化は、過濃な混合気の割合を増加させるため有害排出ガスの低減には寄与しないことがわかった。

ABSTRACT

Reduction of the nozzle hole diameter was investigated with the aim of further reducing harmful exhaust emissions from diesel engines. This investigation used a prototype injector with an injection rate gradient at the start of fuel injection that is approximately 80% greater than that of a conventional mass-production injector. Three types of nozzles were prepared that have the same hydraulic flow rate and only different numbers of holes and hole diameters from 0.08 mm to 0.12 mm. Spray measurement results confirmed that as the hole diameter becomes smaller, the spray penetration drops and the droplet Sauter mean diameter also becomes smaller. In addition, the results of engine combustion tests showed that reducing the nozzle hole diameter and increasing the number of holes increased the rich portion of the air-fuel mixture, so this does not contribute to the reduction of harmful exhaust emissions.

1. まえがき

近年の自動車の排出ガス規制は、従来からの有害排出ガスの規制に加えて、地球温暖化対策としてCO₂の排出規制が各国で実施され、さらなる強化が検討されている。CO₂排出低減において、ディーゼルエンジンは、ガソリンエンジンと比べて一般的に熱効率が低いという面で不利である。一方、排出ガスのクリーン化においては課題を有する。ディーゼル燃焼は基本的に希薄燃焼であるため、ガソリンエンジンのように三元触媒を利用してNO_xを低減することができない。希薄燃焼のためのNO_x排気後処理技術については進化を続けているものの⁽¹⁾、その浄化性能は十分とはいえない。NO_x低減のためにはエンジン燃焼時にEGRガスを導入し燃焼温度を低下させる必要がある。ところが、EGRガスの導入にともない過濃な混合

気の割合が増加するためParticulate Matter (PM)の増加を招く。このようにディーゼル燃焼ではNO_xとPMがトレードオフの関係にあり、その同時低減が求められている。この要求に対応するため、新たな過給技術とコモンレール方式を用いた燃料噴射技術⁽²⁾⁻⁽⁴⁾が導入されている。そして各国の厳しい排出ガス規制に適合するなど、排出ガスのクリーン化が進んでいる。今後のさらに厳しくなる排出ガス規制に対応して、予混合圧縮着火 (Premixed Charge Compression Ignition: PCCI) 燃焼やNO_xとPMの同時低減を目指した低温燃焼に関する研究⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾が多く報告されているが、HCやCOといった未燃ガスの排出量が増加することや、運転領域が限定されるなどの課題がある。

筆者らは、PCCI燃焼のように着火遅れ期間の増大を伴わない従来ディーゼル燃焼における排出ガス低減のため、

*四輪 R&D センター

燃料の高拡散を目指したインジェクタの噴射率に着目した。燃料噴射初期の噴射率傾きの向上(高噴射率化)による排出ガスの低減効果を確認した^{(9),(10)}。また、可視化エンジンにて、火炎挙動の観察および二色法による火炎温度、すす(Soot)濃度解析から高噴射率化による排出ガスの低減効果を明らかにした⁽¹¹⁾。

このプロトタイプインジェクタを用いた、さらなる排出ガス低減の手段として、ノズル噴孔径の小径化が挙げられる。ノズルの噴孔径を小径化すると噴霧の微粒化が促進し、NO_xとPMの同時低減に寄与することが知られている⁽¹²⁾。しかしながらノズル噴孔径を小径化すると噴射圧力が一定のもとでは噴霧のペネトレーションが低下するため、噴霧の混合気分布が高濃度化すると考えられる。したがって、ノズル噴孔径の小径化には、燃料噴霧の微粒化促進に起因した排出ガス低減とペネトレーションの低下に起因した排出ガス増加という二つの相反する事象が予測される。

本研究では、ノズル噴孔径の小径化が及ぼす影響を噴霧と燃焼の観点から定量的に明らかにすることを目的とした。噴孔径が異なるノズルを準備し、噴霧試験より、小径化が噴霧形状および粒径分布に及ぼす影響を調査した。さらに、ディーゼルエンジンを用いた燃焼実験より、小径化が燃焼特性に及ぼす影響を調査した。

2. 供試インジェクタ

2.1. 構造および流量特性

試験に使用したインジェクタ諸元をTable 1に、プロトタイプインジェクタの構造の断面図をFig. 1に示す。従来にない高噴射率性能を得るためにプロトタイプインジェクタではピエゾ素子によってコモンレール油圧をバルブで制御し、その制御された高圧の燃料油圧を用いてノズルニードルを直接開閉する方式が採用されている。また噴射初期の噴射率をさらに向上させるために、Fig. 2に示すようにノズルニードルのシート角度を量産タイプインジェクタに対し広げ、ニードルが低リフト時の開口面積の拡大を図った。Table 2に示す諸元のノズル装着時の流量特性試験結果をFig. 3に示す。Fig. 3よりシート角度を広げたことによりねらいどおりニードルの低リフト時における燃料流量が増加していることが確認できる。

2.2. 噴射率と噴霧特性

後述する噴霧特性およびエンジン燃焼試験時の噴射条件である燃料噴射量18 mm³/st.を噴射圧力100 MPaにて噴射した際の噴射率計測結果をFig. 4に示す。プロトタイプインジェクタの燃料噴射初期の噴射率傾きは量産タイプに比べて78%大きくなっており、今回採用した方式により噴射初期の噴射率が向上していることが確認できる。

Table 1 Specifications of common rail injection system

Injector	Mass production	Prototype
Max. pressure (MPa)	200	200
Max. injection events	5	5
Actuator	Piezo	Piezo
Needle actuation	Back pressure control	Fuel pressure direct control

Table 2 Specifications of injector nozzles

	Mass production	Prototype
Hole diameter (mm)	0.12	0.12
Number of holes	8	8
Spray hole angle (deg)	160	160
Flow rate (cm ³ /min)	740	740
Sac volume (mm ³)	0.17	0.40
Seat angle (deg)	30	60

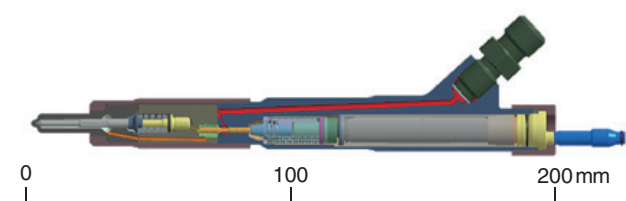


Fig. 1 Cross-section of prototype injector

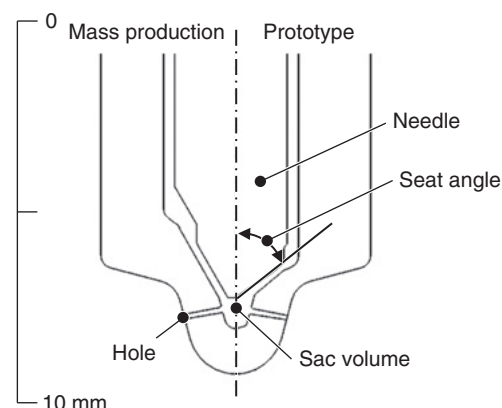


Fig. 2 Comparison of cross-section of special nozzle for fast common rail injector

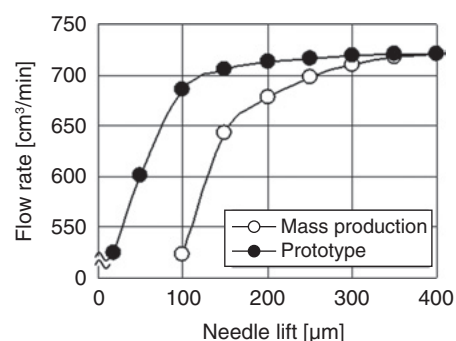


Fig. 3 Nozzle flow rate of two types of injector

噴射率を計測した燃料噴射量 $18 \text{ mm}^3/\text{st.}$ における噴射後 0.5 ms の噴霧画像を Fig. 5 に示す。また、その撮影された高速度ビデオ画像からペネトレーションと噴霧角度を時系列に数値化した結果を Fig. 6 に示す。なお、実験装置については次章で述べる。

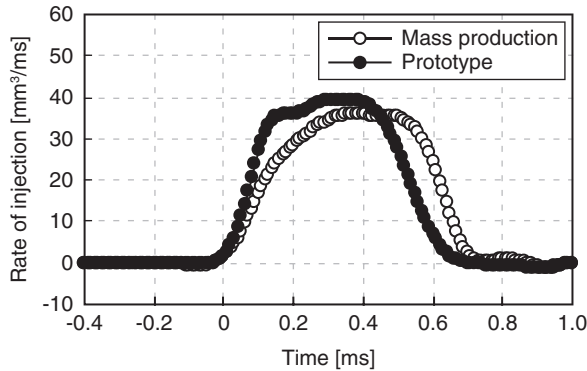


Fig. 4 Comparison of fuel injection rate profiles (1/4 engine load condition)

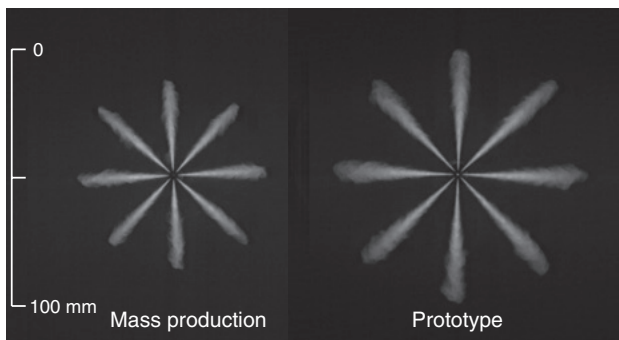


Fig. 5 Photographs of spray using high pressure vessel (0.5 ms after start of injection)

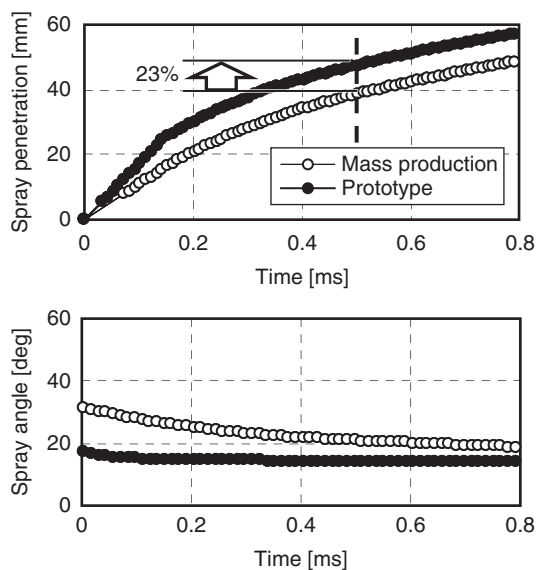


Fig. 6 Comparison of spray characteristics of two types of injector at 1/4 engine load

噴霧角度は噴霧の軸方向に沿ったノズル噴口の出口から 30 mm 下流の位置における角度を計測した。Fig. 6 から 2 本のインジェクタの異なった噴射率特性は噴霧に大きな差異をもたらし、噴射後 0.5 ms においてプロトタイプインジェクタのペネトレーションは量産タイプインジェクタに対し 23% 増加が確認できる。噴霧角度については、上記ペネトレーションの増加とは逆に、狭くなっていることが確認できる。これは、燃料噴射の高噴射率化は噴霧形状に大きく影響し、噴射された燃料は細くペネトレーションが長い噴霧形状になることを示すものである。

高噴射率特性が確認されたプロトタイプインジェクタを用いた単気筒エンジン燃焼試験において、 NO_x と Soot のトレードオフ関係が改善された。4 気筒エンジンの設定点における NO_x 排出点では、1/4 エンジン負荷相当において 35.2% 、1/2 エンジン負荷相当において 48.4% の Soot 低減効果が確認された。これは、燃料噴射の高噴射率化は、噴霧のペネトレーションの増加をもたらし、着火時期における噴霧中の燃料の混合気濃度が低下したことによるものと考えられる。

3. 噴霧と燃焼実験

3.1. インジェクタノズル

本研究に用いた三種類のノズル諸元を Table 3 に示す。ノズルの噴孔長はすべて 1.05 mm である。ノズルの噴孔径と数のみが異なり、油圧流量など他のパラメータは同一である。19 孔の噴孔を加工するために前章で用いたノズルとはニードルを含めて形状を変更している。これは製造技術上制約のある噴孔間距離の確保のため、サックボリュームを先に用いたプロトタイプノズルに比べて約 3 倍程度拡大している。これはプロトタイプノズルに比べて HC 増加の原因となるため課題である。なお、 0.08 mm のノズル穴加工は、通常用いられる放電加工機を用いた場合のほぼ限界である。

3.2. 供試燃料

Table 4 に計測に使用した燃料諸元を示す。比較的低セタン価燃料が市場に流通している米国等を考慮して、セタン価 43.2 の軽油を使用した。

3.3. 噴霧計測試験

噴霧特性の試験には定容圧力容器と株式会社フォトン製高速度ビデオカメラ (FASTCAM-APX RS) を用いた。Fig. 7 に計測装置の概要を示す。撮影は焦点距離 50 mm の株式会社ニコン製マニュアルフォーカスレンズ (Nikkor F f/1.2) を装着し、Table 5 に示すように撮影速度 10000 fps 、画像解像度 $512 \times 512 \text{ pixel}$ 、露光時間 $2 \mu\text{s}$ にておこなった。圧力容器内にはエンジン性能試験時に燃料が噴射さ

Table 3 Specifications of injector nozzles

	Nozzle A	Nozzle B	Nozzle C
Hole diameter (mm)	0.12	0.10	0.08
Number of holes	8	12	19
Spray hole angle (deg)	160	160	160
Flow rate (cm ³ /min)	740	740	740
Sac volume (mm ³)	1.23	1.23	1.23
Seat angle (deg)	60	60	60

Table 4 Measured properties of diesel fuel

Item	Test method	
Cetane index	ASTM D-976	43.2
Density (g/cm ³)	ASTM D-4052	0.852
Viscosity (mm ² /s)	ASTM D-445	2.2
T90 (°C)	ASTM D-86	306
Aromatic (vol%)	ASTM D-1319	28.4
LHV (kJ/kg)	ASTM D-3338	42838

Table 5 Conditions of spray measurement experiment

Recording speed (fps)	10000
Shutter speed (μs)	2
Resolution (pixel)	512 × 512
Ambient gas	N ₂
Ambient pressure (MPa)	1.4
Ambient temperature (K)	298

れるタイミングと同じ雰囲気密度となるよう 1.4 MPa の N₂ ガスを封入し試験を実施した。試験は、燃料噴射量 18 mm³/st., 噴射圧力 100 MPa にて容器内に燃料を噴射し、高速度ビデオカメラにて撮影をおこない、得られた画像からペネトレーションと噴霧角度を求めた。

3.4. 粒径計測試験

噴孔径違いの燃料噴霧の微粒化特性を比較するため、ダンテック・ダイナミクス株式会社製 Phase Doppler Anemometry (PDA) を用いて各ノズルの粒径を計測した。本実験装置の概要を Fig. 8 に示す。定容圧力容器内の密度と温度などの雰囲気条件は噴霧計測時と同一とし、計測はノズルの噴孔位置から 60 mm 下流の位置にておこなった。

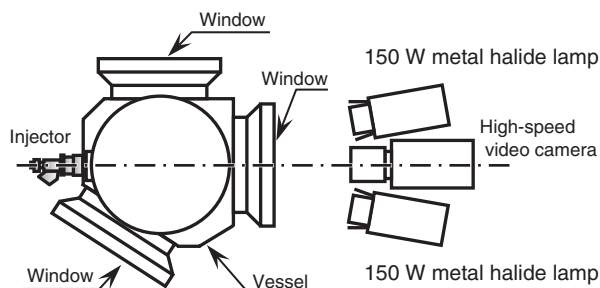


Fig. 7 Schematic diagram of spray measurement

Table 6 Specifications of single-cylinder engine

Engine type	4-st. single cylinder
Displacement volume (cm ³)	550
Bore × Stroke (mm)	85.0 × 97.1
Compression ratio	17.2
Fuel injection system	Piezo common rail
EGR rate	Continuously variable

3.5. 単気筒エンジンを用いた燃焼試験

単気筒エンジンの諸元を Table 6 に示す。本単気筒エンジンは、欧州排出ガス規制 EURO 5 に適合している 4 気筒ディーゼルエンジン⁽¹³⁾をベースに製作されたものである。なお、この単気筒エンジンのシステム全体構成を Fig. 9 に、エンジンの燃焼室形状を Fig. 10 に示す。Fig. 9 に示すように吸気はスーパチャージャにより過給されるとともに、吸気温度はヒータまたはインタクーラにより所定の温度に制御される。また排気は設定された排気圧力に圧力調整弁によって制御される。これにより、この単気筒エンジンシステムは、4 気筒エンジンにおける実際の運転条件を再現可能な構成となっている。なお、排出ガスの各種成分分析のため株式会社堀場製作所製排出ガス分析計 (MEXA-7100DEGR) と AVL 社製スモークメータ (415S) を、上記

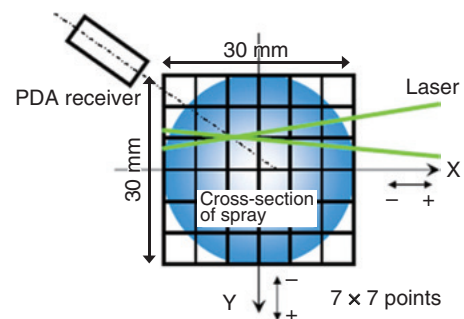


Fig. 8 Outline of droplet size measurement using PDA

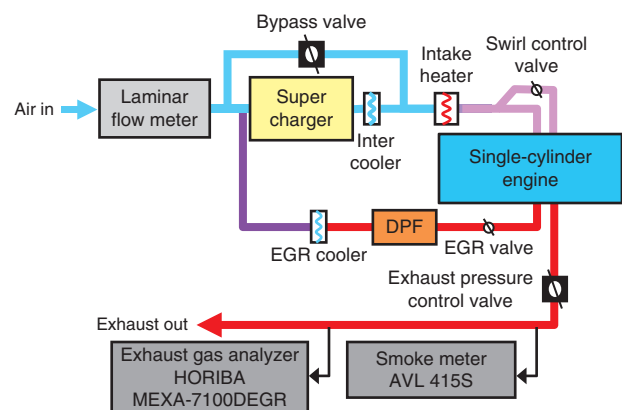


Fig. 9 Schematic diagram of single-cylinder engine system

Table 7 Conditions of engine combustion experiment

Nozzle hole diameter (mm)	0.12		0.10		0.08	
Engine speed (rpm)	1500		1500		1500	
Load	1/4	1/2	1/4	1/2	1/4	1/2
Injection pressure (MPa)	100	110	100	110	100	110
Intake air temperature (K)	343	333	343	333	343	333
Cooling water temperature (K)	353	353	353	353	353	353
Total injection quantity (mm ³ /st.)	18	32	18	32	18	32
Pilot injection timing (deg ATDC)	-8.0	-16.6	-8.5	-16.5	-8.7	-17.6
Main injection timing (deg ATDC)	5.8	4.0	6.0	4.1	6.5	4.0

の排気圧力調整弁の下流に設置した。

燃焼試験はモード試験において使用頻度が高いエンジン回転数 1500 rpm、1/4 および 1/2 負荷相当条件にて実施した。Table 7 に本試験のエンジン運転条件を示す。噴射パターンは従来ディーゼル燃焼の標準的な噴射方式であるパイロットとメインの2段噴射を用いている。ディーゼルエンジンの燃焼騒音の指標となる $dP/d\theta_{max}$ を同等とすることを目的にパイロット噴射の熱発生量を同一の値に合わせた。また、メイン噴射においては着火時期を合わせるよう、それぞれの燃料噴射量および噴射タイミングを調整した。なお、燃料噴射圧力の増大は燃焼騒音や機械損失の増加を招くため今回の検討から除外し、三つのノズルの試験では燃料噴射圧力は同一とした。

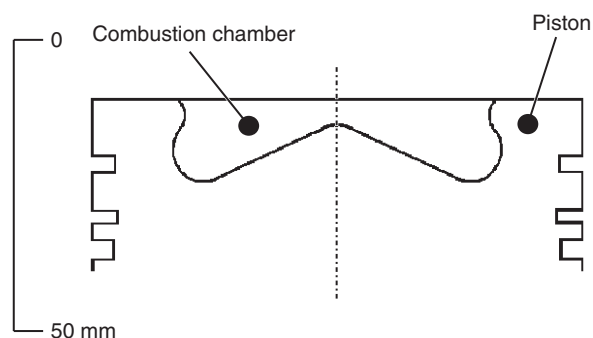


Fig. 10 Combustion chamber shape

4. 結果と考察

4.1. 噴霧計測試験結果

高速度カメラにより撮影した噴霧画像を Fig. 11 に、ペネトレーションと噴霧角を時系列で数値化したものを Fig. 12 に示す。この計測実験は 10 回おこない、すべての噴孔の噴霧データについて平均化処理をしている。噴霧角度は噴霧の軸方向に沿ったノズル噴口の出口から 30 mm 下流の位置における角度を計測した。

Fig. 12 から、ノズルの小径化に伴いペネトレーションは低下し、噴霧角は狭くなることがわかる。噴射開始 0.5 ms 後において、最小の 0.08 mm ノズルは 0.12 mm ノズルに比べて、ペネトレーションが 17.5%、噴霧角度は 14.5% 低下している。なお、噴射初期における噴霧角度の計測にはばらつきが大きいため、噴射後約 0.2 ms までのデータは除外した。

4.2. 粒径計測試験結果

粒径分布の計測結果を Fig. 13 に、三種類のノズルのザウ

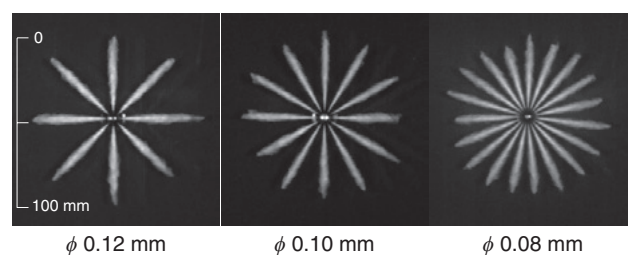


Fig. 11 Photographs of spray with three types of nozzles (0.5 ms after start of injection)

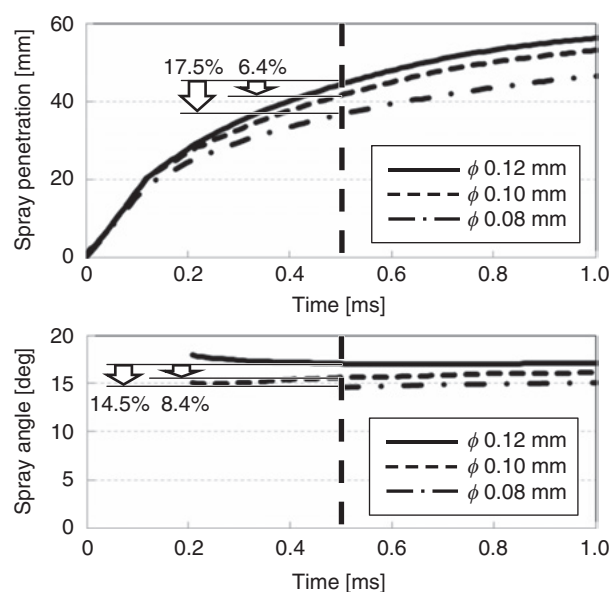


Fig. 12 Numerical comparison of spray penetration and spray angle

タ平均粒径 (Sauter mean diameter: d32) を Fig. 14 に示す。粒子の蒸発や揮発では粒子表面積が重要であり、平均粒径には表面積が考慮されたザウタ平均粒径を用いた。Fig. 13 からノズル噴孔径の小径化に伴い、粒径の分布は小さい粒径側にシフトしていることがわかる。ザウタ平均粒径は、ノズルの小径化に伴い低下していることが確認できる。噴孔径を 0.12 mm から 0.10 mm に小径化することによってザウタ平均粒径は 2.6%, 0.08 mm では 6.7% 低下し、ノズル噴孔径の小径化による燃料の微粒化が確認できた。

4.3. エンジン燃焼試験結果

単気筒エンジンを用いた燃焼試験結果を Fig. 15 (1/4 エンジン負荷, 燃料噴射量 18 mm³/st.) および Fig. 16 (1/2 エンジン負荷, 燃料噴射量 32 mm³/st.) に示す。実験は EGR バルブを全閉から徐々に開弁し EGR 還流率を増加させて実験をおこない、NO_x を横軸に、各計測データを縦軸に示した。量産エンジンの適合点である NO_x 値での各計測データを比較すると (Fig. 15 および Fig. 16 の灰色線位置), 1/4 エンジン負荷条件では、Soot 排出量は 0.10 mm ノズルが最小であるが、さらなる小噴孔径ノズルである 0.08 mm

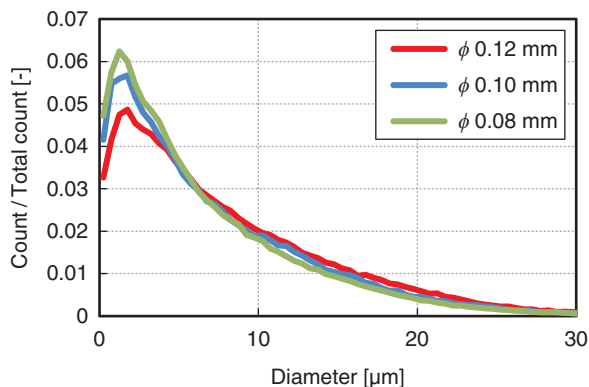


Fig.13 Comparison of droplet size distribution with three types of nozzles

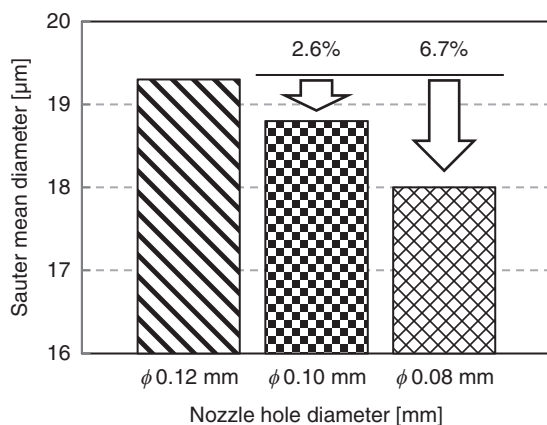


Fig. 14 Comparison of droplet Sauter mean diameter with three types of nozzles

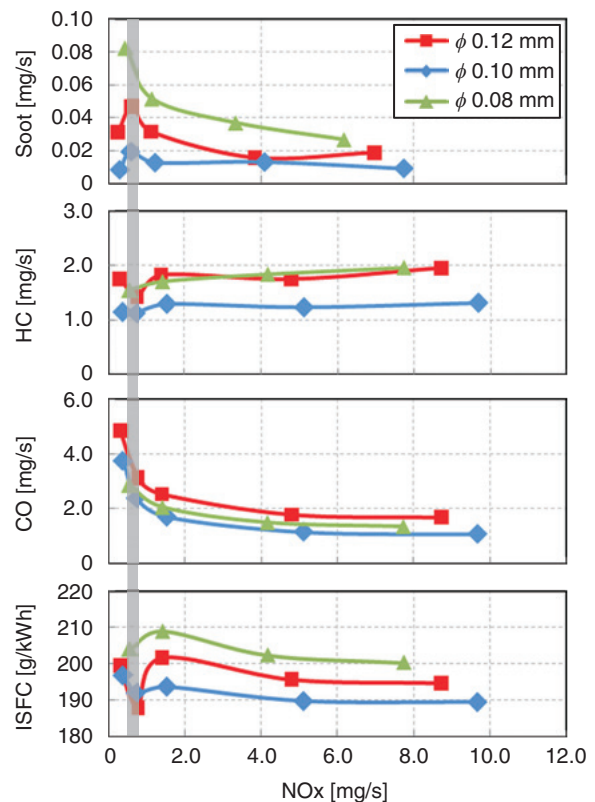


Fig. 15 Exhaust gas emissions at 1500 rpm, 1/4 engine load using three types of micro hole nozzles

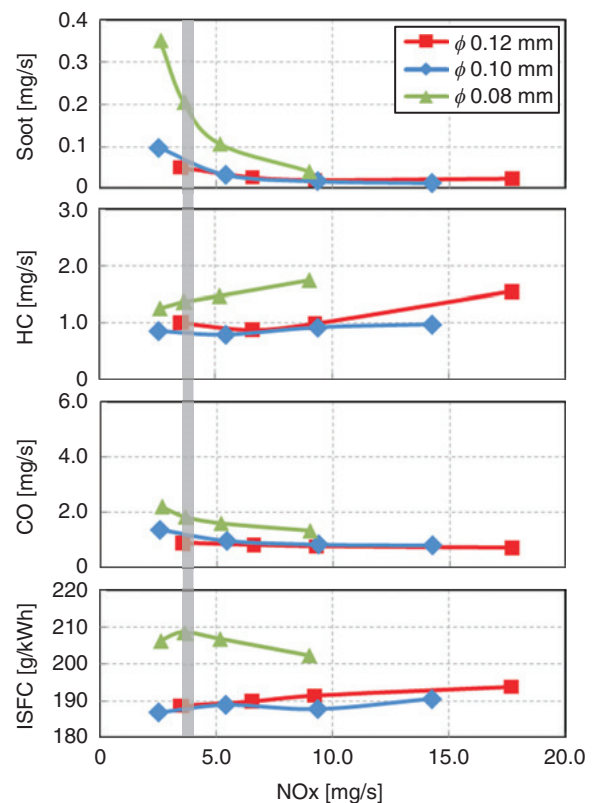


Fig. 16 Exhaust gas emissions at 1500 rpm, 1/2 engine load using three types of micro hole nozzles

ノズルでは Soot 排出が増加している。しかしながら 1/2 エンジン負荷条件においては 0.12 mm ノズルが Soot 排出で最小となり、0.08 mm ノズルが 0.12 mm に比べ約 4 倍増加しており最大であり、HC、CO および Indicated specific fuel consumption (ISFC) も増加している。

Fig. 17 に量産エンジンの適合点である NO_x 値 (Fig. 15 の灰色線位置) の 1/4 エンジン負荷、燃料噴射量 18 mm³/st. における熱発生率 (Rate of heat release: ROHR) を示す。この熱発生率によると、排出ガス性能に支配的である主燃焼の熱発生率のピークは噴孔径 0.10 mm ノズルが一番大きく、噴孔が一番小さい 0.08 mm ノズルが最も小さい。また、ATDC 30 deg 以降の燃焼後期において噴孔径 0.08 mm ノズルでは燃焼が継続しており燃焼の遅延化が確認できる。

4.4. 考察

噴霧計測試験により、ノズル噴孔径の小径化が、燃料噴霧の低ペネトレーション化と噴霧角の狭角化を招くこと、噴射された燃料粒径の低下、すなわち燃料の微粒化を促進していることが確認できた。

エンジン燃焼試験の結果からは、燃料の微粒化性能の向上を確認できた 0.08 mm ノズルを用いた燃焼において 1/4 および 1/2 の負荷ともに Soot 排出量が最大である。この結果から噴孔径の小径化によって燃料噴霧内での混合気分布が高濃度化していることが推測される。この原因は、噴孔径を小径化したために噴霧のペネトレーションが低下した狭い噴霧角という噴霧形状に原因があると考えられる。ノズル噴孔径の小径化に伴って噴霧内の燃料の微粒化は促進するものの、その反面ペネトレーションの低下を招き、燃料噴霧の噴射初期の燃料と空気との混合が低下し、さらに噴霧の燃焼室壁面との衝突によって生じると考えられる空気と燃料の混合する割合も低下する。これにより噴射された燃料が燃焼室内の狭い範囲で存在し、高濃度の噴霧が燃焼したことが Soot および HC の増加の原因であると考えられる。熱発生解析で確認できた 0.08 mm ノズルにおける燃焼の遅延化からも、燃料噴霧内での混合気分布の高濃度化が確認できる。

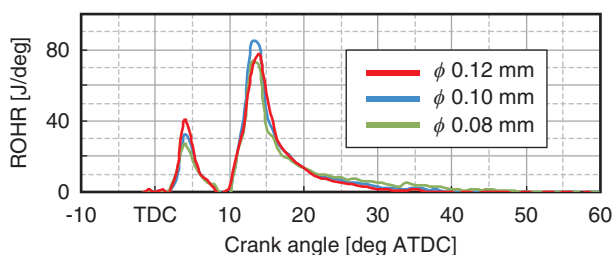


Fig. 17 Comparison of heat release at 1500 rpm, 1/4 engine load using three types of micro orifice nozzles

1/4 エンジン負荷時における 0.10 mm ノズルの Soot 排出量最小化であるが、1/2 負荷に比べて燃料噴射量が小さいため噴射期間が短くなり、ペネトレーションも 1/2 負荷に比べて短くなる。その結果ペネトレーション増大による空気を取り込む効果に対して、噴孔径を小径化したことによる微粒化による空気と燃料の混合促進効果が燃焼により大きく影響したため、0.10 mm ノズルが Soot 排出量の比較では最小となったと考えられる。これは、排出ガス性能に支配的である主燃焼の熱発生率のピークが 0.10 mm ノズルが一番高いことから、微粒化効果によって早期の燃焼が活性化していることが確認できる。

以上により、同一噴射圧力条件下ではノズル噴孔径の小径化により燃料の微粒化が促進されるものの、ペネトレーションが低下し壁面衝突の効果も含めて噴霧内の混合気濃度が高濃度化するため、排出ガス低減には適正なバランスが存在するものと考えられる。また、そのバランスが噴射量や噴射圧力により変化すると考えられるため重要視するエンジンの運転条件を定めて、バランスに配慮したノズル噴孔径の設定が必要である。

なお、19 孔の噴孔の多孔化によりエンジン燃焼室内で噴射された燃料の噴霧間干渉による影響については、Fig. 11 に示すように定容圧力容器内の試験において 0.08 mm ノズルでは各噴孔からの噴霧に干渉は確認できず可能性は低い。

5. まとめ

排出ガス低減効果を確認した高噴射率性能を有するプロトタイプインジェクタを用いて、さらなる排出ガス低減を目指して同一油圧流量のノズルである 0.12 mm から 0.08 mm までの三種類を用いて各種実験をおこない、下記の知見を得た。

- (1) ノズルの噴孔径の小径化に伴い、噴射される燃料噴霧は狭く低ペネトレーションの噴霧形状となった。
- (2) 噴孔径の小径化に伴い、燃料噴霧の粒径は小さくなった。0.08 mm と 0.12 mm ノズルを比較するとザウタ平均粒径が 6.7% 低下した。
- (3) 単気筒エンジンを用いた中および低エンジン負荷での燃焼実験結果では、0.12 mm と 0.10 mm ノズルに比べて 0.08 mm ノズルを用いた燃焼では Soot 等の排出ガスの増加が確認された。この 0.08 mm ノズルによる Soot の排出増加は、ノズル小径化による噴霧のペネトレーション低下によって空気との混合が低下し、燃料噴霧内での混合気分布が高濃度化したものである。
- (4) 低エンジン負荷条件での燃焼においては、ノズル噴孔径の小径化による燃料の微粒化効果が燃焼に影響し、0.10 mm ノズルの Soot 排出量が他の 0.12 mm および 0.08 mm の燃焼結果に比べて最小となる。エンジン

負荷を下げると噴射時間が短くなるためペネトレーションが短くなり、燃焼に及ぼす噴孔径の小径化による微粒化効果がペネトレーション低下の影響を上回するため、0.10 mm ノズルの Soot 排出量が最小となる。

謝辞

本研究の共同研究者として重要なノズル設計を担当した片野貴博氏に感謝し、ご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- (1) Morita, T., Suzuki, N., Satoh, N., Wada, K., Ohno, H.: Study on Low NO_x Emission Control Using Newly Developed Lean NO_x Catalyst for Diesel Engines, SAE Technical Paper, 2007-01-0239, p. 1-7(2007)
- (2) Miyaki, M., Fujisawa, H., Masuda, A., Yamamoto, Y.: Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines, SAE Technical Paper, 910252, p. 1-17(1991)
- (3) Nagata, K., Tanaka, Y., Yano, K.: Technologies of DENSO Common Rail for Diesel Engine and Consumer Values, SAE Technical Paper, 2004-21-0075, p. 1-7(2004)
- (4) Akiyama, H., Yuasa, H., Kato, A., Saiki, T., Sanada, K., Kado, N.: Precise Fuel Control of Diesel Common-Rail System by Using OFEM, SAE Technical Paper, 2010-01-0876, p. 1-10(2010)
- (5) Shimazaki, N., Akagawa, H., Tsujimura, K.: An Experimental Study of Premixed Lean Diesel Combustion, SAE Technical Paper, 1999-01-0181, p. 1-10(1999)
- (6) Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., Aiyoshizawa, E.: Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards, SAE Technical Paper, 2001-01-0200, p. 1-10(2001)
- (7) Hasegawa, R., Yanagihara, H.: HCCI Combustion in DI Diesel Engine, SAE Technical Paper, 2003-01-0745, p. 1-8(2003)
- (8) Kanda, T., Hakozaiki, T., Sono, H., Uchimoto, T., Hatano, J., Kitayama, N.: PCCI Operation with Early Injection of Conventional Diesel Fuel, SAE Technical Paper, 2005-01-0378, p. 1-12(2005)
- (9) Kato, A., Matsuura, K., Hakozaiki, T., Suzuki, O., Haraguchi, S., Yoshimi, Y., Hashimoto, T., Katano, T.: Influence of a Fast Injection Rate Common Rail Injector for the Spray and Combustion

Characteristics of Diesel Engine, SAE Technical Paper, 2011-01-0687, p. 1-11(2011)

- (10) Haraguchi, S., Nishimura, Y., Yoshimi, Y., Katano, T., Suzuki, O., Matsuura, K., Hakozaiki, T., Kato, A.: Effects of Spray Characteristics and Combustion Chamber Geometry on Emission Performance in Diesel Diffusion Combustion Using a Fast-Injection-Rate Injector and the Latest Common Rail Light-Duty DI Diesel Engine, Proceedings of Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, THIESEL 2010, p. 253-276(2010)
- (11) Matsuura, K., Suzuki, O., Kato, A.: In-cylinder Optical Investigation of Combustion Behavior on a Fast Injection Rate Diesel Common Rail Injector, Transactions of SAE International, Journal of Fuels and Lubricants, January 2012, Vol.5, Num.1, p. 88-97(2012)
- (12) Pickett, L. M., Siebers, D. L.: Non-Sooting, Low Flame Temperature Mixing-Controlled DI Diesel Combustion, SAE Technical Paper 2004-01-1399, p. 1-19(2004)
- (13) Matsui, R., Shimoyama, K., Nonaka, S., Chiba, I., Hidaka, S.: Development of High-performance Diesel Engine Compliant with Euro-V, SAE Technical Paper, 2008-01-1198, p. 1-8(2008)

■ 著 者 ■



加 藤 彰



松 浦 勝 也



吉 見 泰 広