

特集 ガソリンエンジン用インジェクタの微粒化開発*

Development of Finer Spray Atomization for Fuel Injectors of Gasoline Engines

松尾 哲治

Tetsuharu MATSUO

沢田 行雄

Yukio SAWADA

富板 幸生

Yukio TOMIITA

This report describes the technology of Fuel Injectors – a critical part of the Electronic Fuel Injection system of gasoline engines. DENSO has developed finer spray atomization for fuel injectors using multiple-hole nozzles. Research was focused on the development of the internal fuel flow and the upper face of the nozzle. The developed injector has contributed to the reduction of gas emissions.

Key words : Gasoline engine, Fuel system, Engine component, Spray, Fuel Injector, Atomization, Nozzle

1. はじめに

排出ガス規制の強化，燃費向上，高性能化への要求が更に厳しくなる市場環境を受け，近年のガソリンエンジン用インジェクタには更なる高性能化，搭載性向上，信頼性向上，低コスト等が求められている。これらの課題に対応するため，部品メーカー各社が開発を進めてきている。その中で，デンソーでは「次のトレンドとなりえるインジェクタの開発」を進め，排出ガス規制に対応するために，世界に先駆けて多噴孔採用による高微粒化インジェクタを製品化した。

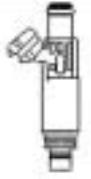
本稿ではガソリンエンジン用電子制御燃料噴射システムの基幹部品であるインジェクタ，特に微粒化技術について紹介するとともに，燃料噴射システムも含めた今後の微粒化向上について考案する。

2. インジェクタの概要

2.1 インジェクタ開発の変遷

デンソーにおけるインジェクタの変遷をTable 1に示す。近年の市場環境の変化に伴い，自動車用エンジンには排出ガス規制への対応，燃費向上，高性能化が求められ，ますます厳しい規制が要求されている。その中でガソリンエンジン用インジェクタも噴霧の微粒化，小型軽量化及び高応答性などの高性能化等の要求への対応の変遷をたどってきている。特にUC型においては，微粒化のみならず，磁気回路の高効率化や可動部軽量化による高応答化，流量調整方法の簡素化，構造の簡素化を実現した。

Table 1 Transition of injector development

	A type ('86-)	B type ('89-)	C type				UC ('02-)
			('96-)	('97-)		('99-)	
Figure							
Weight (g)	102	79	42				34
Nozzle shape spray direction	Pintle 1-Jet	1 hole 2-Jet	4 holes 2-Jet	4 holes 2-Jet	4 holes (Air assist) 2-Jet	12 holes (Straight nozzle) 2-Jet	12 holes (Taper nozzle) 2-Jet
Atomization SMD (μm)	250						50

* (社)自動車技術会の了解を得て，「自動車技術」Vol. 59, No. 2, 2005より一部加筆して転載

2.2 インジェクタの構成, 作動

Fig.1にガソリンエンジン用電子燃料噴射システムの構成図を示す。

インジェクタは吸気管またはシリンダヘッドに取り付けられ、ECUからの噴射信号に対応して燃料の噴射を行うもので、電気信号を燃料流量に変換するとともに、燃料を霧化して噴射するものである。

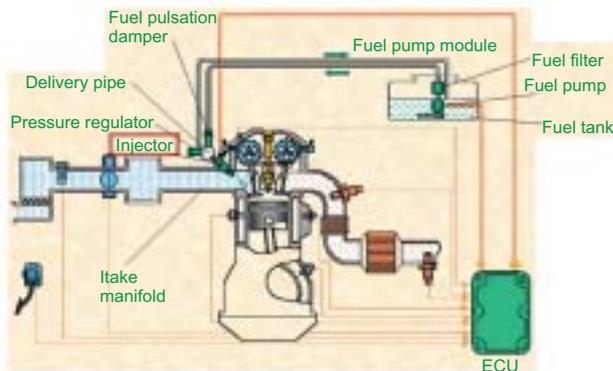


Fig. 1 Electronic Fuel Injection system for gasoline engine

Fig. 2にインジェクタの構造を示す。ソレノイドコイルに所定の時間電流が流れると、コアが吸引され、コアと一体になっているニードルは、ニードルのフランジがコネクタに当たるまで吸引されて全開し、燃料は矢印の通路を通り、プレートノズル部で燃料が微粒化され噴射される。また、ソレノイドコイルの電流が切れると、ニードルはスプリングの押し付け力により全閉となる。

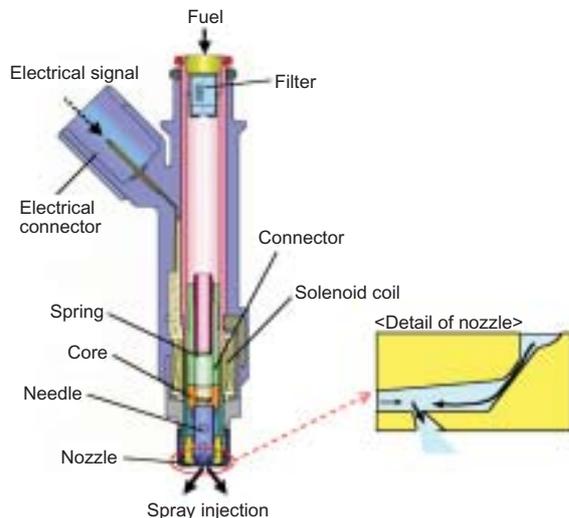


Fig. 2 Configuration of the injector

3. 微粒化インジェクタの開発

3.1 微粒化開発の狙い

ガソリンエンジン用電子制御燃料噴射システムでは、通常0.3MPa程度の噴射圧力において、燃料噴霧の平均粒径はSMD (Sauter Mean Diameter) で150~300 μ mであった。しかし、排出ガス規制強化の要求から、低温時の未燃HC排出の抑制及び始動性確保のために、燃料噴霧の更なる微粒化向上が望まれている。これまでも様々な微粒化手法が検討され、実用化されているが、低コストで良好な微粒化特性が得られるものはほとんど見受けられなかった。

微粒化手法は、外部エネルギーを利用する方法と、燃料の流れのエネルギーを利用する方法の二つに大きく分類できる。

外部エネルギーを用いる微粒化手法の代表例としては、エアアシスト方式 (Fig. 3) が挙げられる。

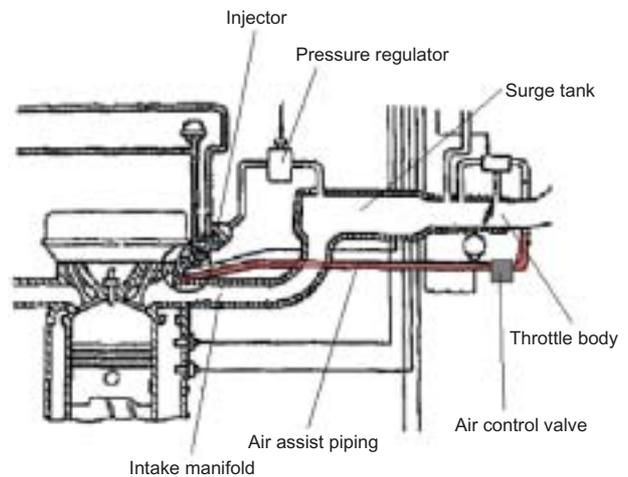


Fig. 3 Air assist system

この方式では、スロットルの上流から微粒化用の空気を導入し、エアコントロールバルブを介してインジェクタノズル部から吸気管内に放出される。スロットル上流と吸気管ノズル開口部の差圧により、空気が流れる。したがってスロットルの開度が大きいとき、または始動時のように吸気管圧力が高いときには微粒化に十分な空気量が得られない。また、必要のない時に空気が流れないようにするために、エアコントロールバルブを設けるのが一般的である。このように、微粒化が空気量で変化することと、エアコントロールバルブやエア配管がコストアップの要因になることが、この方式の特徴である。

一方、外部エネルギーを用いない多孔方式では、微

粒化はインジェクタのみで決まり、エアバルブやエア配管は不要である。当社では多孔ノズルのこのような長所に着目し、微粒化性能向上を進めてきた。

3.2 微粒化メカニズム

3.2.1 ノズル上流流れ

微粒化に影響を及ぼす因子について実験と数値解析を用いて検討した。

実際のインジェクタに用いられている4孔ノズルについて、ノズル上流流れと微粒化の関係を流れ解析により検討した。解析には有限体積法CFD (Computational Fluid Dynamics) コードStar-CD (Ver.3.0) を使用した。解析条件は、主としてノズル上流の流れを解析す

るため、ガソリンの単相流れを扱い、ノズル出口でのガソリンと空気の干渉は無視した。

従来の球面状のニードルと先端をフラット化したニードルによる解析を行い、ノズル上流流れに与える影響を検討した。解析結果をFig. 4に示す。

従来形状のニードルでは燃料流れは直接ノズルに向かって流れるのに対して、フラットニードルでは、ノズル上面に沿った流れが、ノズル直上で互いに衝突している。Fig. 5に実際のノズルでの噴孔部の様子と噴霧写真を示す。フラットニードルの場合は、噴孔出口部での縮流、噴霧の分散が大きく、良好な微粒化を示していることが観察された。

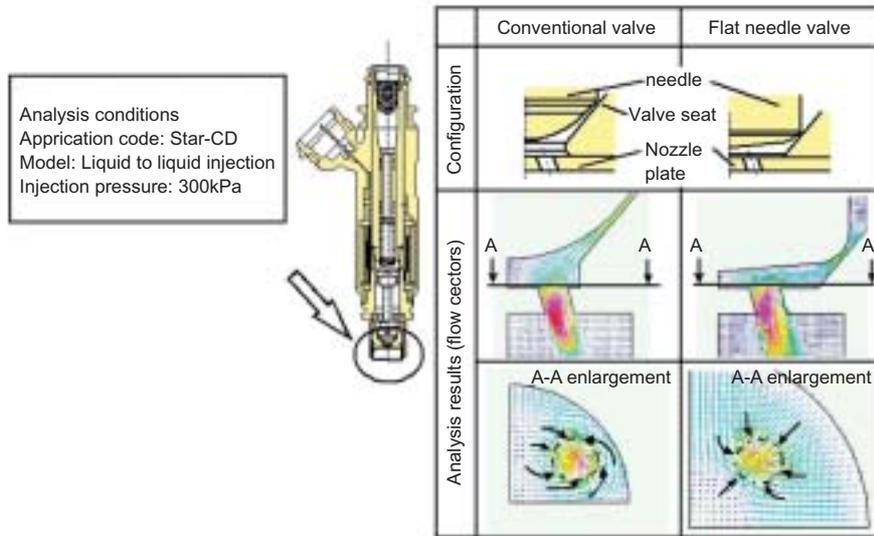


Fig. 4 Analysis results of the flow at the nozzle upper face (Comparison of spherical needle and flat tip nozzle)

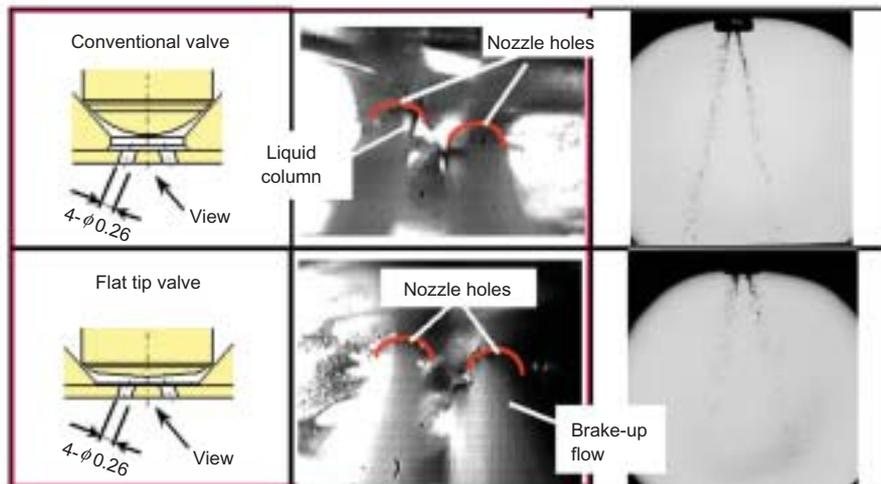


Fig. 5 Actual condition at the nozzle hole and spray pattern

次に、噴孔配置の影響について検討した。4孔ノズルを等ピッチで配置した場合と、不等ピッチ（矩形の頂点）に配置した場合の、上流流れの解析結果と噴霧写真及び平均粒径SMDをFig. 6に示す。不等ピッチではノズル直上での対向する流れ同士の衝突が発生しにくく、図中の矢印で示したように渦流れが生じている。一方、等ピッチでは、矢印で示したようにノズル周囲で均等な正面衝突が発生している。

	Unequal pitches	Equal pitches
Arrange.	A-A Aspect ratio=1.35	A-A Aspect ratio=1.00
Flow analysis	Turbulent energy =0.61m ² /s ²	Turbulent energy =0.70m ² /s ²
Spray pattern	SMD 150μm	SMD 95μm

Fig. 6 Analysis results of the flow at the nozzle upper face and spray patterns (Comparison of unequal pitches and equal pitches)

以上の解析及び実験結果から、多孔ノズルでの微粒化向上を図るためには、シート通過後に生じる微小擾乱とノズル直上において水平流が均等に衝突することが必要なことが明らかになった。これらの結果を基に微粒化メカニズムを以下のように推定した。

バルブシートを通過した流れ(①)は、ノズル上面に衝突する(②)ことにより、擾乱が誘起される(③)。擾乱が誘起された流れは、ノズル上面に沿ってノズルへと向かい、ノズル直上で等方的に対向する流れ同士の衝突が起こる(④)。流れはノズル入口端部から剥離すると共に、急激に曲げられ圧力が一気に解放される(⑤)。そこで液流はノズル上流で得たエネルギーにより自ら分裂する。従って、ノズル上流で発生した擾乱エネルギーを有効に使う燃料を噴射することが、微粒化向上には重要であると考えられる (Fig. 7 参照)。

得られた知見を基に噴孔数を変化させ噴孔配置を最適化した結果、噴孔数が12孔の場合が最も微粒化が向上することが分かった¹⁾

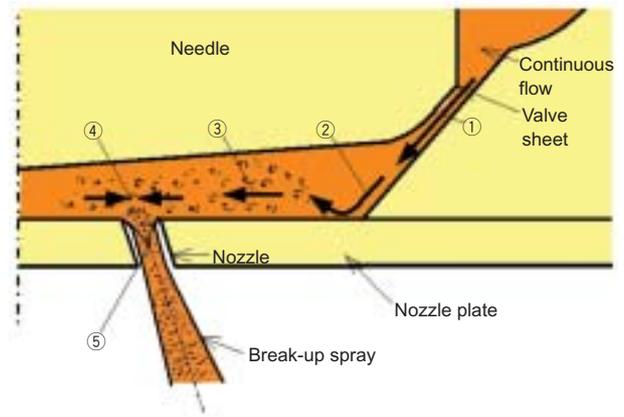


Fig. 7 Mechanism of spray atomization

3.2.2 ノズル内流れ

更なる微粒化向上を図るために、ノズルから噴射された噴霧と微粒化の関係について検討した²⁾。単孔から噴射される噴霧の分裂状態を観察し考察した。観察結果をFig. 8に示す。

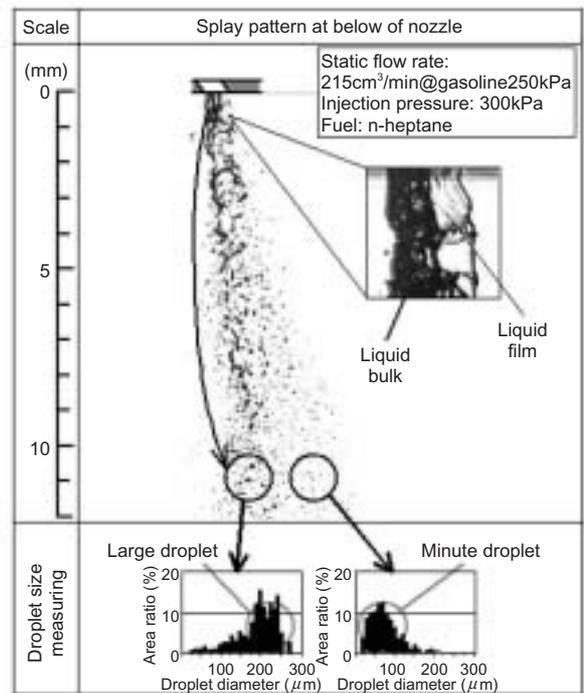


Fig. 8 Break-up pattern of the spray injected from a single hole

ノズル直下での噴霧は、液柱状になっている部分が多く存在し、この液柱部の分裂は下方においても粗い噴霧粒子が残った状態であるのに対し、液柱部以外の液膜状になった噴霧は、分裂が促進され微小な粒子となっている。このように噴霧粒子の分裂状態を特徴づ

ける液柱状及び液膜状の噴霧は、その直上流にあるノズル内の流れに支配されていると考えられる。そこでCFD解析を用いてノズル内流れの明確化について検討した。解析には、有限体積法CFDコードStar-CD (Ver.3.1.A)を用い、高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用し、非定常解析を実施した。ノズル内は燃料が剥離し、気体と液体が混在する流れとなるため、燃料と空気の気液2相流解析とした。

解析結果例をFig. 9に示す。ノズル入口部ではほとんどが燃料で満たされているのに対し、ノズル中心部での流れは、剥離が生じ縮流していることが分かる。更にノズル下流部の出口部では、縮流した流れがノズル内壁面を伝い液膜状になっていることが確認できた。

ここでノズル出口部での流れの方向に着目すると、出口部ではZ軸（インジェクタ軸線方向）に対し横方向の成分を有した流れが多く存在し、この流れが液膜状の流れを形成していることが分かった。このことから、分裂が促進した部分の噴霧は、ノズル内壁面に沿った横方向の流れが広げられることにより液膜化した燃料であると考えられる。液柱状の燃料に対し、液膜状の燃料では表面積が増加する。これにより、液膜状の燃料は、ノズル上流で発生した擾乱エネルギーを有効に活用できるため分裂が促進され、均質な微小粒子となり微粒化が向上する。従って、多孔ノズルにおける微粒化向上には、ノズル内壁面に沿う横流れを効果的に発生させ、液膜生成を促進することが重要であることが分かった。

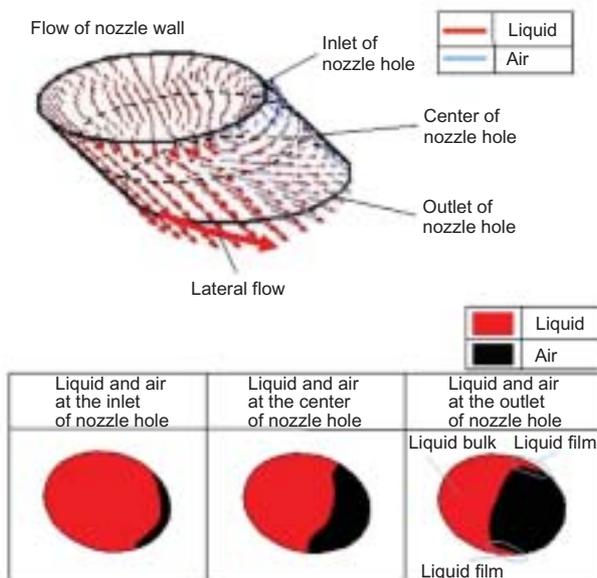


Fig. 9 Analysis results of fuel flow in nozzle

3.3 ノズル形状の改良, 最適化

液膜生成を促進し微粒化向上を実現できるノズル形状について検討した。

ノズルに流入し、急激に曲げられ壁面に押し付けられた流れを、より効果的に液膜状にするには、下流にいくに従い連続的に壁面に沿う横流れを発生できるような形状が有効であると考えられる。そこで液膜生成を促進するノズル形状として、下流にいくに従い壁面の面積が徐々に広がっていくような末広がりテーパノズル形状を考案した。その有効性について検証するために噴霧分裂状態を評価した。Fig. 10に従来の円筒ストレートノズルとテーパノズルの形状を、観察結果をFig. 11に示す。

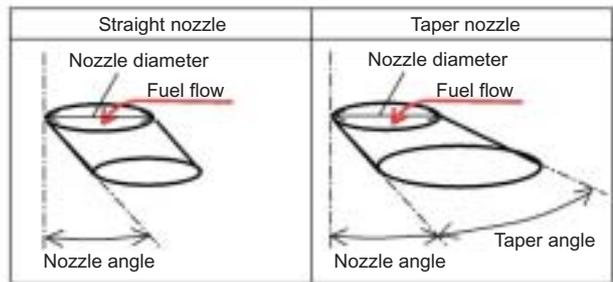


Fig. 10 Shape of straight nozzle and taper nozzle

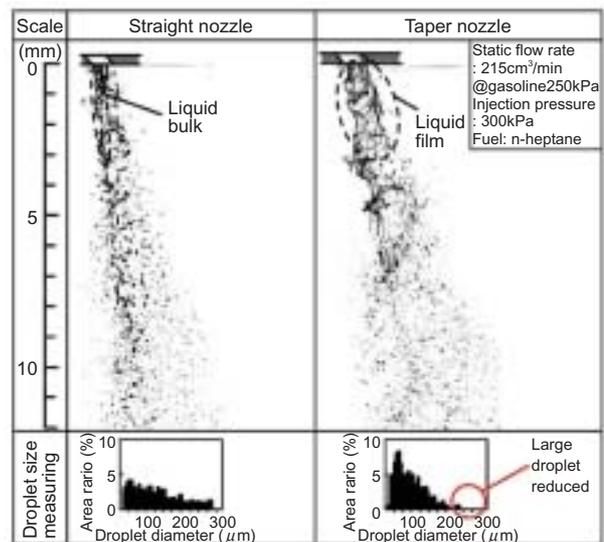


Fig. 11 Break-up pattern of the spray injected from a single hole (Comparison of straight nozzle and taper nozzle)

Fig. 11より、テーパノズルではノズル直下に液膜状の噴霧が観察され、粒径分布も粗い粒子が減少し、より均質な微粒化噴霧となっていることが確認された。

次に、テーパ角度を最適化したノズルを用いたインジェクタにより、噴霧特性を評価した。ノズルの噴孔数は12孔とし、噴孔の配置及び角度は噴霧干渉による噴霧粒径の悪化が生じない設定とした。評価結果をFig. 12に示す。ノズル形状をテーパ化することにより、従来のストレートノズルを使用したインジェクタに対して、SMDが65 μm から50 μm に改良された微粒化インジェクタを開発できた。また、粗い噴霧粒子の減少により噴霧の均一性についても従来品の噴霧に対して向上していることが確認された。

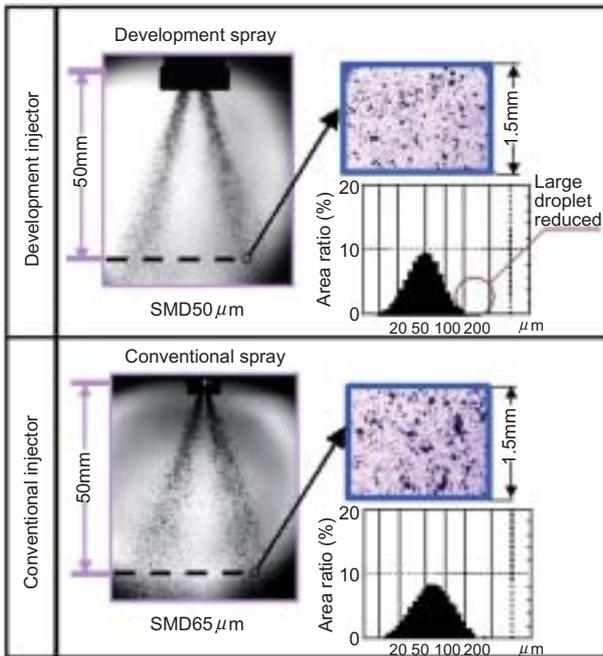


Fig. 12 Spray pattern of injector using 12 holes nozzle

4. 微粒化向上についての考察

前述したようにインジェクタの噴霧微粒化には、微粒化メカニズムに基づきノズル上流で発生した擾乱エネルギーを活用すること、またノズル形状の最適化により噴孔内で燃料を液膜状にし表面積を増加させることが有効である。そのことから、前者には燃料噴射システムの高燃圧化、後者には噴孔径の微小化が有効であると考えられる。高燃圧化によりノズル上流で発生する擾乱エネルギーを増加させることができる。噴孔径を小さくすることにより、噴孔内で生成される液柱状の燃料を減らし液膜生成を促進できる。また、高燃圧化により同一の流量を確保するための噴孔径を小さくできるので更なる微粒化向上を実現できると考えられる (Fig. 13参照)。

5. おわりに

本稿では、ガソリンエンジン用電子制御燃料噴射システムの基幹部品であるインジェクタの開発の変遷と、現在また今後も最重要課題である排出ガス規制の達成に貢献するための微粒化向上技術を中心に解説した。環境改善に対する要求は、今後もますます厳しくなっていくため、更なる微粒化向上に取り組んでいくことが重要と考えている。

<参考文献>

- 1) Y. Tani, et al.: Fuel Atomization of Multiple-hole Nozzle Injection, SAE Paper1999-01-0564
- 2) 原田, 他: ポート噴射インジェクタの噴霧微粒化開発, 2002年自動車技術会秋季大会前刷集, 20025624

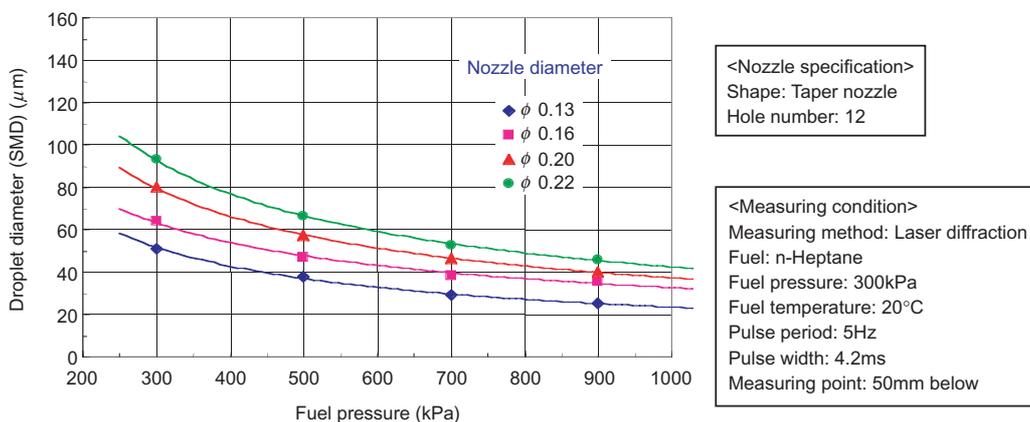


Fig. 13 Influence of fuel pressure and nozzle diameter on droplet diameter



<著 者>



松尾 哲治
(まつお てつはる)
ガソリン噴射技術部
ポート噴射用インジェクタの
開発・設計に従事



沢田 行雄
(さわだ ゆきお)
ガソリン噴射技術部
ガソリン燃料系コンポーネント
設計を統括



富板 幸生
(とみいた ゆきお)
ガソリン噴射技術部
ポート噴射用インジェクタの
開発・設計に従事