

特集 多孔ノズルインジェクタの微粒化*

Fuel Atomization of a Multiple-hole Nozzle Injector

谷 泰臣
Yasuhide TANI

森 幸雄
Yukio MORI

望月 孝一
Kouichi MOCHIZUKI

鈴木 敦志
Atsushi SUZUKI

Fuel atomization is known as an effective means of reducing the exhaust emissions of internal combustion engines. We have focused on a multiple-hole nozzle as a cost-effective atomization method that does not require any auxiliary devices or an external energy source to carry out atomization.

In this report, we will discuss 1) how fuel atomizes according to the multiple-hole nozzle, 2) the atomization characteristics such as spray droplet diameter and spray spatial distribution when the factors which effect atomization with the multiple-hole nozzle are changed, and 3) a comparison of the HC reduction effect in an actual engine with a conventional air-assist injector.

Key Words : Port Injection, Atomization, Multiple-hole Nozzle, Flow Analysis, Flow Visualization, Emission Reduction, Air-assist, Injector

1. はじめに

この研究の目的は、自動車用エンジンに用いられるガソリン吸気管噴射用のインジェクタの燃料微粒化を改良することである。

これまで、ガソリン吸気管噴射で使われている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で150～300 μmであった。しかしながら、従来より低温時の未燃HC排出の抑制および始動性確保のために、燃料噴霧の微粒化改良が望まれている¹⁾。これまで多様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。

微粒化の方法は大きく2つに分類することができる。外部エネルギーを使う方法^{2),3),4)}と、燃料の流れ自身のエネルギーを利用する方法^{5),6),7)}である。

外部エネルギーを用いる微粒化手法の代表的なものとしては、エアアシスト方式が知られている。この方式では、微粒化用の空気はスロットルの上流から導入され、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。従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、微粒化が空気量で左右されることと、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。

私たちは多孔ノズルのこのような長所に着目し、微粒化性能を上げることに着目した⁸⁾。以下この研究では、3つの部分に分けて多孔ノズルインジェクタの燃料微粒化を説明する。

まず第1のパートでは、多孔ノズルインジェクタの微粒化性能を向上させるために、どのようにしてノズルで燃料が微粒化されるのか、単孔および4孔ノズルを用いて、現象論的に微粒化メカニズムの解明を試みる。4孔ノズルを用いたのは、4孔ノズルがガソリン吸気管用のインジェクタとして一般的に用いられているためである。

次に第2のパートでは、このような多孔ノズルインジェクタの微粒化性能について述べる。微粒化に影響のあると思われる要因として、ノズル数、燃料圧力、霧団気圧力、流量サイズを選んだ。次にこれらの特性を変えた場合に噴霧平均粒径がどのように変化するかを調べる。またノズル数による空間流量分布の違いを述べる。

最後に、今回新たに開発した12孔インジェクタと従来のエアアシストインジェクタの微粒化性能の違いによるエンジンでの排気性能の違いを述べる。

* SAEの了解を得て、SAE1999-01-0564(1999.3)を和訳し加筆転載

Reprinted with permission from SAE paper number 1999-01-0564(1999.3)

(© 1999 society of Automotive Engineers, Inc.)

2. 実験装置と方法

2.1 供試ノズル

供試ノズルは、ステンレス鋼製の4孔ノズルプレートに基づいており、試験は、ノズルの配置を変えたり、ノズルの孔数の微粒化に与える影響を調べるために8, 12, 18孔ノズルを用いて実施した。

これらのノズルは、静的噴射量が同一になるようにノズル径を調整した。またノズルの剥離条件が変わらないように、板厚/ノズル径を4孔を基準に合わせた。

2.2 試験油

すべての実験には、試験油としてノルマルヘプタンを用いた。ノルマルヘプタンを用いたのは、性状がガソリンに近く、かつ単一成分で安定しているためである。ノルマルヘプタンの密度と動粘度は、それぞれ20℃で、 684kg/m^3 および $0.606 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ である。

2.3 流れの可視化

流れの可視化のために、透明アクリル樹脂製の20倍の可視化モデルを制作した。このモデルは、ノズルの入り口部でレイノルズ数を合わせた。典型的なレイノルズ数は、約5600である。

撮影には、水+ポリスチレン粒子を流し、キセノン光源で背景側より照明し、ビデオカメラにより現象を観察した。

2.4 噴霧観察

供試ノズルプレートはデンソーC-III電磁式インジェクタに組み込まれ、噴孔をメタハライド光源で照明した。噴射直後の噴霧観察には、Kodak社Ecta-pro高速度撮影VTRを用いた。

一方、噴霧全体像の撮影には発光時間15μsのマイクロフラッシュを用いた。背景側より照明し、撮影する角度を選択することによって、噴霧の透過光像または散乱光像を撮影した。

2.5 噴霧粒径測定

Fig. 1に噴霧粒径測定のための、実験装置概要を示す。噴霧粒径は、レーザ回折法により、自動光軸調整機能を有するMalvern社Mastersizer-Sで測定した。レーザ回折法を用いたのは、測定法が容易で、比較的誤差の要因が少ないためである。この装置は、18のレーザビーム内に含まれる広範囲の噴霧粒径を1回で調べることができる。

噴霧粒径は噴霧粒の全体的積を全表面積で割ったSMD (Sauter Mean Diameter)を用い、時間的に噴霧の空間濃度が最も大きいときの粒径値を代表値として選んだ。

説明図(FIGURES)

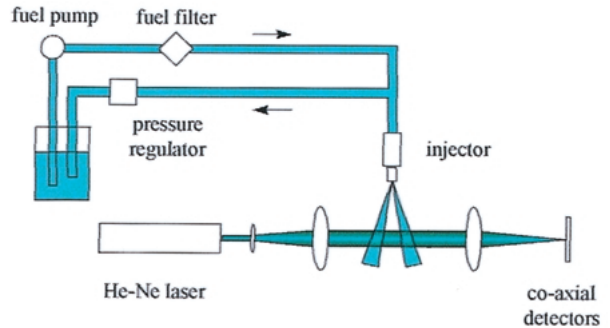


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (spray droplet size measurement)

2.6 空間分布測定

Fig. 2に噴霧空間分布測定のための、測定装置概要を示す。噴霧空間分布の測定は、インラインセル受け止め+CT処理法によった。この方法は、インジェクタノズル先端から100mm下方の位置で、1列に並べた5mm幅、180mm長の36個の矩形セルに燃料噴霧を受け止め、その量を測定する。このようなデータを噴射軸中心に回転させながら5度毎にサンプルし、結果を逆投影法により演算することによって、サンプル位置での2次元の流量分布を求めた。

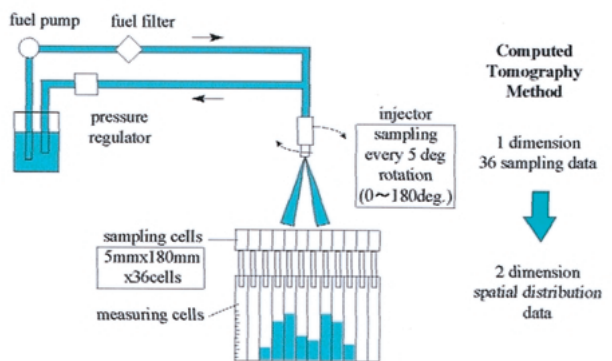


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus (spray spatial distribution measurement)

得られた結果は、空間流量分布として、インジェクタノズル先端から100mm下方の平面での、噴霧の体積率として表示した。

3. 流れの数値解析

ノズル上流の流れの解析には、市販の有限体積法 CFD (Computational Fluid Dynamics) コード Star-CD (Ver.3.0) を用い、流路部分の解析モデルを作り、ワークステーション上で実行した。

このプログラムでは、3次元 Navier-Stokes 方程式を扱い、標準 k-ε 乱流モデルを適用し、1次元風上スキーム法により、流れを非定常で解析した。時間刻みは 10 μs で、結果はタイムマーキング法により、計算開始より 1.1ms 後の流れの状態を表示した。解析条件は、主としてノズル上流の流れを解析するため、単相のガソリン流れのみを扱い、ノズル出口でのガソリンと空気の干渉は無視した。

Fig. 3 に解析モデルの例を示す。

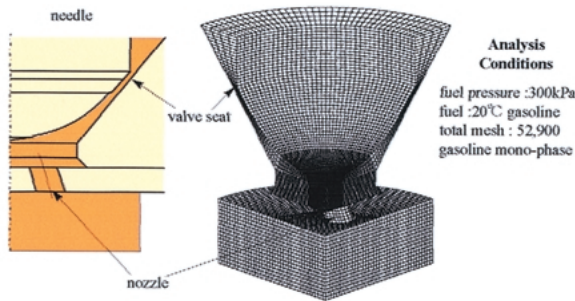


Fig. 3 Analysis model

4. 結果と考察

4.1 多孔ノズルインジェクタの微粒化メカニズム

この節では、微粒化に影響を及ぼすノズル上流流れと噴孔配置の影響について、実験および流れ解析によって調べた結果を示す。

4.1.1 ノズル上流流れの影響(単孔ノズル)

20倍可視化モデルと実物大の単孔ノズルを用いて、ノズル上流流れの影響を検討した。

Fig. 4 に、ノズル直上に平面底部有する円筒を配した場合と、円筒周囲にインジェクションバルブを模した円錐シートを配した場合の、ノズル上流流れとそのときの噴霧形状を示す。ビデオによる観察結果から、円錐シートがない円筒のみの場合には、ノズルプレート壁面で流れが停滞している部分すなわち境界層は厚く、流れはノズル周囲から均等にノズルに流れ込む。流れはノズル入口で剥離した後、乱れのない層流状の液柱になった。ところが、ノズル上流にシートを設けた場合には、シート後流で流れ直角方向の速度分布が

ら微小擾乱を生じ、ノズルプレート上流での境界層が薄くなると共に、噴孔から剥離した流れが分裂しやすくなっているのが観察された。

このことから、多孔ノズルの微粒化に対しても、ノズル上流流れが影響を与えることが容易に推測される。

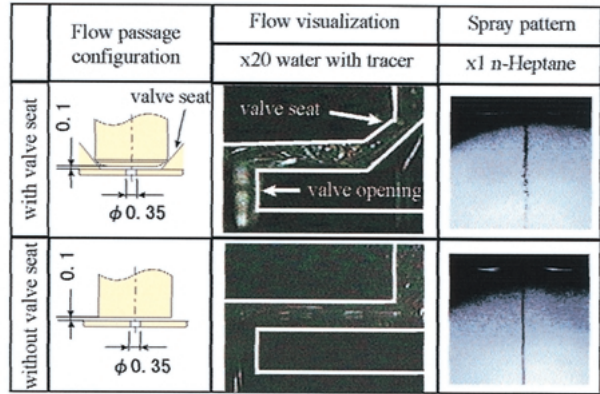


Fig. 4 Flow visualization and spray pattern using single hole nozzle

4.1.2 ノズル上流流れの影響(4孔ノズル)

そこで、実際のインジェクタに用いられている4孔ノズルを用いて、ノズル上流流れを変えるために、ニードル先端形状を変えて微粒化の関係を調べてみた。

Fig. 5 に、従来形状のニードルと先端をフラット化したニードルとのノズル上流流れ解析結果を示す。従来形状のニードルでは燃料流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、ノズルプレート上面に沿った流れが、ノズル直上で互いに衝突している様子がわかった。

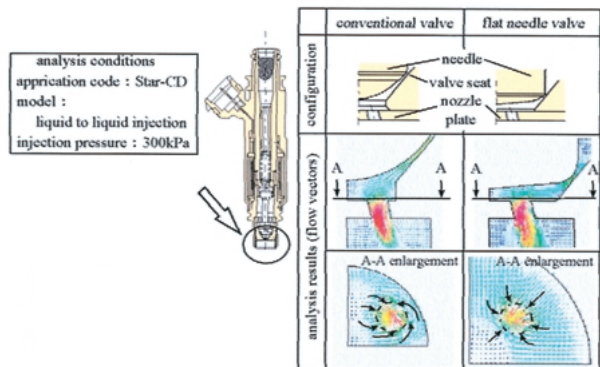


Fig. 5 Flow analysis result (effect of needle tip configuration using 4-hole nozzle)

Fig. 6 は、実際のノズルでの、噴霧写真と噴孔部の様子を示す。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様子が観察された。

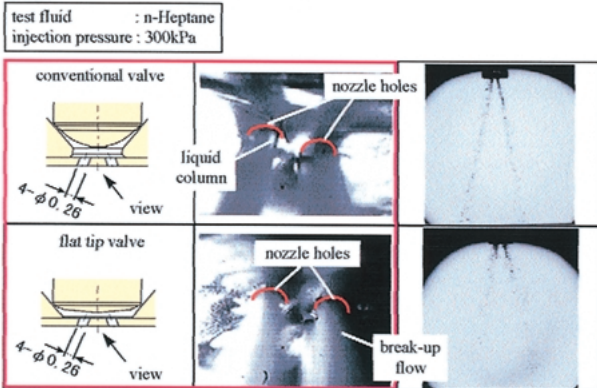


Fig. 6 Spray pattern (effect of needle tip configuration using 4-hole nozzle)

4.1.3 噴孔の配置の影響(4孔ノズル)

ノズル直上で水平流を十分に衝突させるためには，ノズル回りに特定の空間が必要になると考えられる。そこで，前述の先端フラットニードルを用いて，4孔ノズルの配置を変え，ノズル周囲に充分に空間のある場合と隣接するノズル間距離が近い場合の上流流れと，実際の噴霧を調べた。

Fig. 7に，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およびザウター平均粒径を示す。この結果，不等ピッチではノズル直上での対向する流れ同士の正面衝突が起こりにくく，図中に矢印で示したように，渦流れが生じた。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起こった。

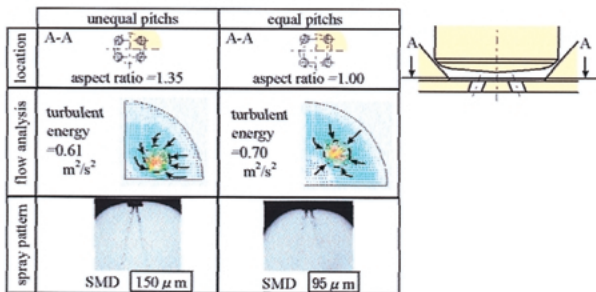


Fig. 7 Flow analysis result and spray pattern (effect of nozzle location using 4-hole nozzle)

このようにノズル上流での最大限の衝突を得るには，このような正面衝突が最も効率的であると考えられる。

4.1.4 微粒化メカニズムの考察

以上の実験結果より，多孔ノズルで微粒化を改良するために，シートによる後流に生じる微小擾乱とノズル直上で水平流が均等に衝突することが要素として必要なことがわかった。これらのデータを元に微粒化メカニズムを推定すると以下ようになる。

シートを通過した流れは，ノズルプレート上面に衝突することにより，擾乱が誘起される。擾乱が誘起された流れは，ノズルプレート上面に沿って，ノズルへと向かう。このとき，ノズル周囲に充分な空間があるため，流れは等方的にノズル中心へと向かう。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。流れはノズル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。そこで液流は大変不安定になり，自ら分裂する。

従って，流れ自身のエネルギーを使って，いかに有効に流れを衝突させるかが，微粒化にとって重要であると考えられる。

4.2 多孔ノズルインジェクタインジェクタの微粒化特性

この節では，前章で得られた知見をもとにノズルを実用化する上で問題になる噴孔数および噴射エネルギーの影響を主として実験的に調べた結果を示す。

4.2.1 噴孔数の影響

基礎検討で得られた知見を元に，噴孔上流での水平衝突流を作り，噴孔を幾何学的に均等に配するという条件で，噴射流量を変えずに，噴孔数を増やして粒径の変化を調べた。

Fig. 8に，それぞれの噴孔の配置，ノズルピッチ間距離と解析から求めた相対的な乱流エネルギーを示す。ただし，12孔以上では，単ピッチ円に噴孔を配すると隣り合う噴孔同士の距離が小さくなるため，2重ピッチ円とした。

Fig. 9に，噴霧粒径の測定結果と代表的な噴霧写真を示す。噴孔数の増加と共に，SMDは小さくなって微粒化が良くなった。ここでレイノルズ数が噴孔径の減少とともに小さくなっているにもかかわらず，微粒化が促進されることは注目に値する。

また18孔では当初は図中の点線のように粒径が小さくなることが期待された。ところが実際は逆に12孔よりも粒径が悪化した。この理由は二つ考えられる。

一つは、制限された幾何学的形状の中に噴孔を配しているため、ノズル間のピッチが小さくなって、十分な衝突が得られないためである。またもう一つは、噴射後の噴霧が互いに干渉して噴霧粒の再合体を生じているためである。

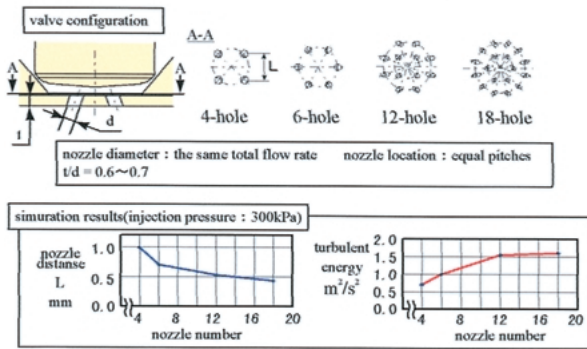


Fig. 8 Examination of nozzle number

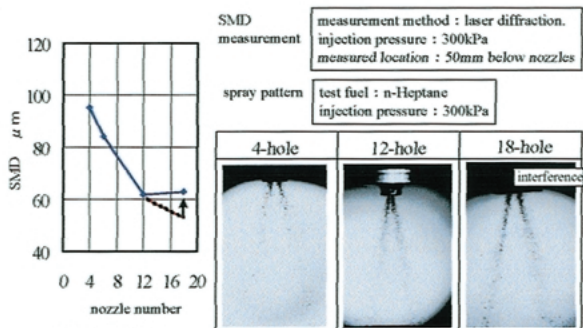


Fig. 9 SMD measurement result and spray pattern (effect of nozzle number)

この結果、テストに使用した寸法諸元では、ノズルの2重ピッチ配列の12孔が最適であることがわかった。ただしインジェクタの噴射量が変われば、この最適ノズル数も変わることが容易に推定される。

Fig. 10に、単ピッチ配列と2重ピッチ配列の12孔の上流流れの解析結果を示す。2重ピッチ配列では4孔の時と同様に、それぞれのノズルの回りで矢印で示したように等方的な流れの衝突が見られた。

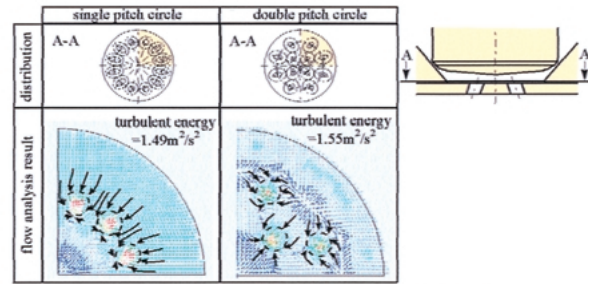


Fig. 10 Flow analysis results (12-hole nozzle on single pitch circle and on double pitch circles)

4.2.2 燃料噴射圧力の影響

これまでのテストはすべて実際の燃料噴射圧力を模したものであったが、噴射エネルギーを変えた場合に微粒化がどのように変化するかを調べた。まず同じノズルを用いて、燃料噴射圧力を上げた場合を調べた。この場合には、結果として噴射流量は増加することになる。

Fig. 11に、4孔ノズルと12孔ノズルの場合のSMDの測定結果と、12孔の代表的な噴霧写真を示す。燃料噴射圧が大きくなるに従って、SMDの減少度合いは小さくなった。

この場合に留意すべきことは、燃料噴射圧力の増加とともに、噴射流量が増加しているにもかかわらず、微粒化が改良されていることである。もし噴射流量を保つように、ノズル径を小さくしながら、燃料噴射圧力を上げた場合には、さらに微粒化が良くなることが期待される。

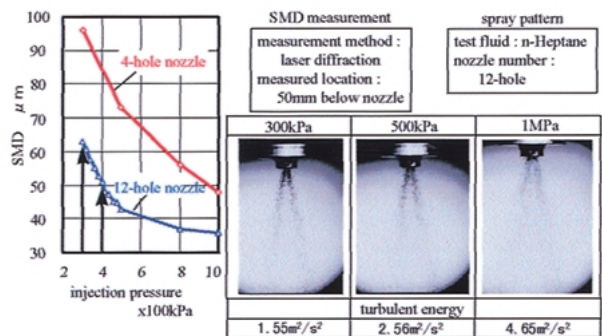


Fig. 11 SMD measurement result and spray pattern (effect of injection pressure)

4.2.3 霧団気圧の影響

これまでの議論してきたように、微粒化がノズル上流側の要因で起こるのであれば、噴射霧団気圧が微粒化におよぼす影響は小さいはずである。そこで、エンジンのアイドルから全開加速までの吸気管内の圧力条件を参考として、噴射霧団気圧34 ~ 101kPaでの、微粒化の変化を調べた。

Fig. 12は、4孔および12孔ノズルの噴射霧団気圧に対するSMDの変化を示す。図から多孔ノズルでは、微粒化におよぼす噴射霧団気の影響は小さいことがわかった。

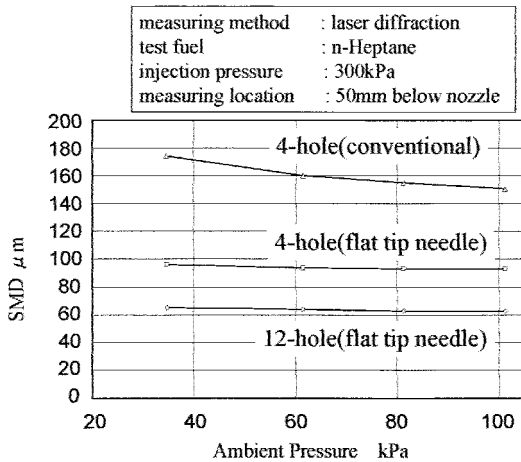


Fig. 12 Effect of Ambient Pressure

4.2.4 噴霧の空間分布

Fig. 13に4孔ノズルと12孔ノズルの代表的な噴霧パターンとそれぞれの噴霧の空間流量分布を示す。

噴霧空間分布は、前述のように燃料噴霧を微小セルに受け止めて、捕集量を測定した結果から得られたもので、ノズル下方100mmの位置での噴霧体積率として表してある。

これから、二つの特徴的な事実が読みとれる。一つは12孔噴霧と4孔噴霧は噴霧の広がり大きな違いはないということである。微粒化噴霧は一般的には広噴霧角になるが、12孔ノズルでは噴霧角を抑えることができる。

もう一つは12孔噴霧は噴霧流内での流量分布が4孔噴霧よりも均一であることである。噴霧写真からも、4孔では噴霧の中心付近に噴霧密度の高い部分が見られたが、12孔噴霧は比較的均一に見えた。

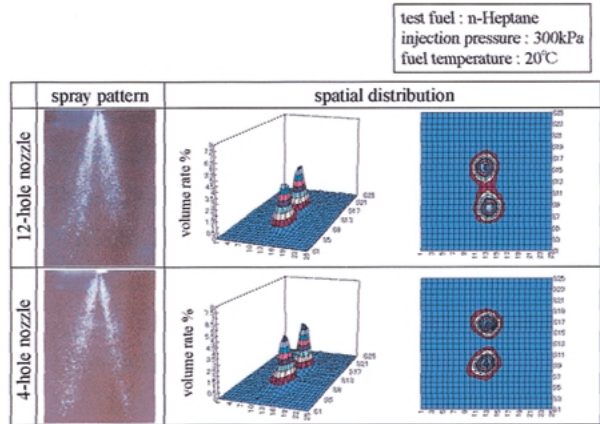


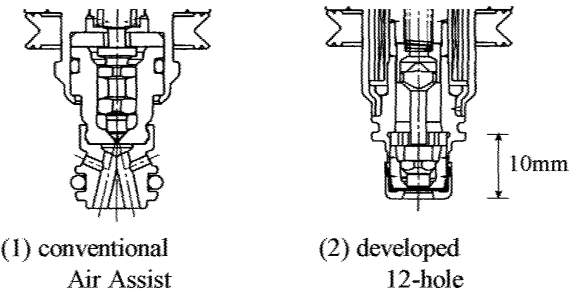
Fig. 13 Spray pattern and its spatial distribution (comparison of 4-hole nozzle)

4.3 排気に関する微粒化の効果

この節では、実際のエンジンを用いて、もともと搭載されていたエアアシストインジェクタと今回開発した12孔インジェクタを用いて、米国カリフォルニア州のFTPに準拠したLA#4モード・エミッションテストを実施した結果を紹介する。

4.3.1 供試インジェクタおよびエンジンの仕様

Fig. 14に、供試インジェクタの仕様、および表1に、供試エンジンの仕様を示す。



spray angle	23° (spray to spray)
static flow rate	235 cm ³ /min @ drysolvent 300kPa

Fig. 14 Specifications of test injectors

Table 1 Specifications of test

displacement volume	2.2 L	compression ratio	9.8
bore	87 mm	maximum torque	191 Nm
stroke	91 mm	maximum power	103 kW

エアアシストインジェクタは、単孔ノズルからの燃料を2噴霧セパレータによって2方向に分ける際に、アシストエアを当てるタイプのものである。アシストエアはスロットル上流より導入され、吸気管内との圧力差によりエア流が生じる。

12孔インジェクタは、6孔のセットで、1方向の噴霧を形成するタイプである。

エンジンは、排気量2.2Lで、量産されているものである。フロントA/FセンサとリアO₂センサを用いたフィードバックコントロール付きで、触媒はマニバータ、アンダーフロアとも5万マイル劣化触媒を用いた。

4.3.2 テスト条件

Fig. 15にFTP・LA#4モードテストの走行パターン、および表2に米国カリフォルニア州の排気規制値を示す。

テストパターンは、コールド、ホット1、ホット2の三つの部分から構成され、市街地と高速走行を想定した走行モードになっている。また今回は、インジェクタの差によるエミッションを正確に取るため、加速時増量値をA/Fリーンピークが同等になるように調整した。

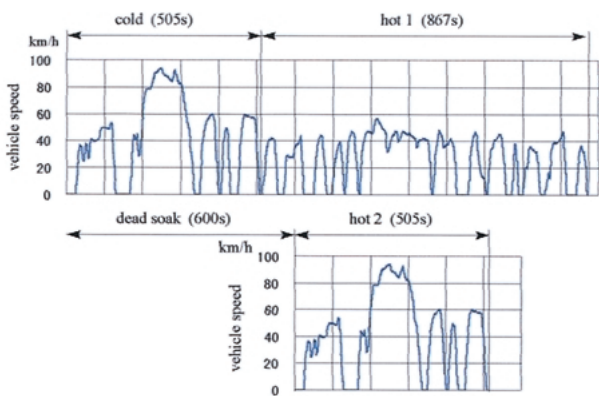


Fig. 15 LA#4 mode

Table 2 Low emission regulations in California,

	94MY normal	TLEV 94MY-	LEV 97MY-
NMOG*	0.25**	0.125	0.075
CO	3.4	3.4	3.4
NOx	0.4	0.4	0.2

* non methane organic gas unit: g/mile
**non methane HC

4.3.3 テスト結果

Fig. 16に従来エアアシストインジェクタと12孔インジェクタを用いた場合のHC, CO, およびNOxのエミッション測定結果を示す。この結果から、12孔インジェクタは、従来エアアシスト以上のHC低減ポテンシャルを持っていることがわかった。

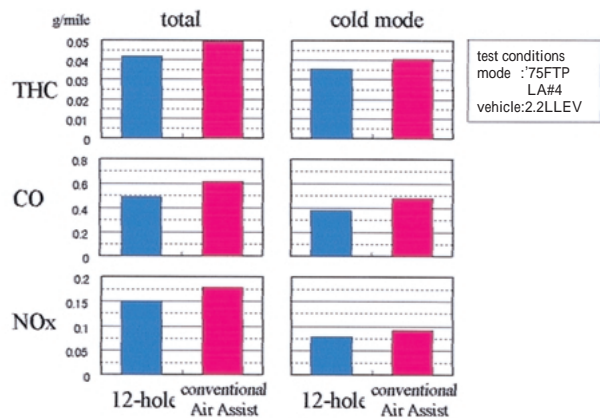


Fig. 16 Emission test results

この中でも特に、コールド時のHC排出量が多いので、コールドモードのHCを詳しくみてみた。Fig. 17にコールド時のHC排出量を示す。この図から、排出の積算値はエアアシストインジェクタの方が大きいこと、およびインジェクタにかかわらずHC排出がコールド初期に発生していることがわかった。

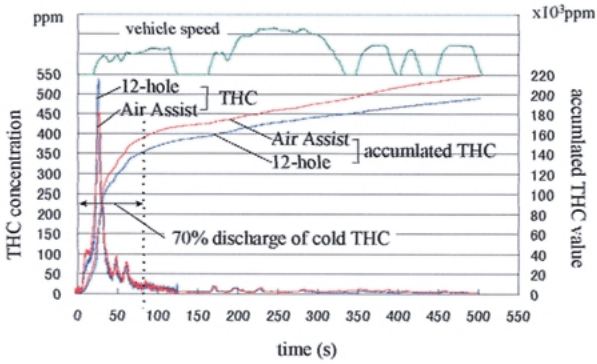


Fig. 17 Cold mode HC emission test results

次に、エアアシストと12孔インジェクタのHCの積算排出量の違いについて考察する。Fig. 18にコールド1山目のHC分析結果を示す。図の中の、A点はHC排出ピークの位置、B点は触媒温度が623Kに達するポイントを示す。図から、HC排出に差が出るのは、始動からA点の区間とA点からB点の間であることがわかる。

まず始動からA点の間では、エアアシストの場合、エアアシスト量が少なく微粒化効果の少ないクランキ

ング時に吸気管内付着燃料や燃料液滴から発生した未燃焼HCが、一旦触媒に捕捉された後に、徐々に排出されるのではないかと考えられる。一方、12孔の場合には、粒径は吸気管負圧によらず、燃焼に有効な燃料供給ができるため、HC排出量が少ないのではないかと考えられる。

次に、A点からB点の間では、エアアシストの場合吸気管圧力が80kPa程度で、エアアシスト量が減少する急加速域では同様に噴霧粒径が大きくなり、吸気管内に付着する燃料量も増加すると考えられる。その直後に、吸気管圧力が60kPa程度に低くなる急減速をした場合、付着した燃料がエンジンシリンダに吸入されて減速リッチにな、未燃HCが排出されやすくなると考えられる。

一方12孔の場合には、先程のケースと同様に粒径は吸気管負圧によらないため、このような加速減速によるHCへの影響は少ないものと考えられる。

Fig. 19に、雰囲気気圧に対するエアアシストおよび12孔インジェクタのSMDの変化を示す。

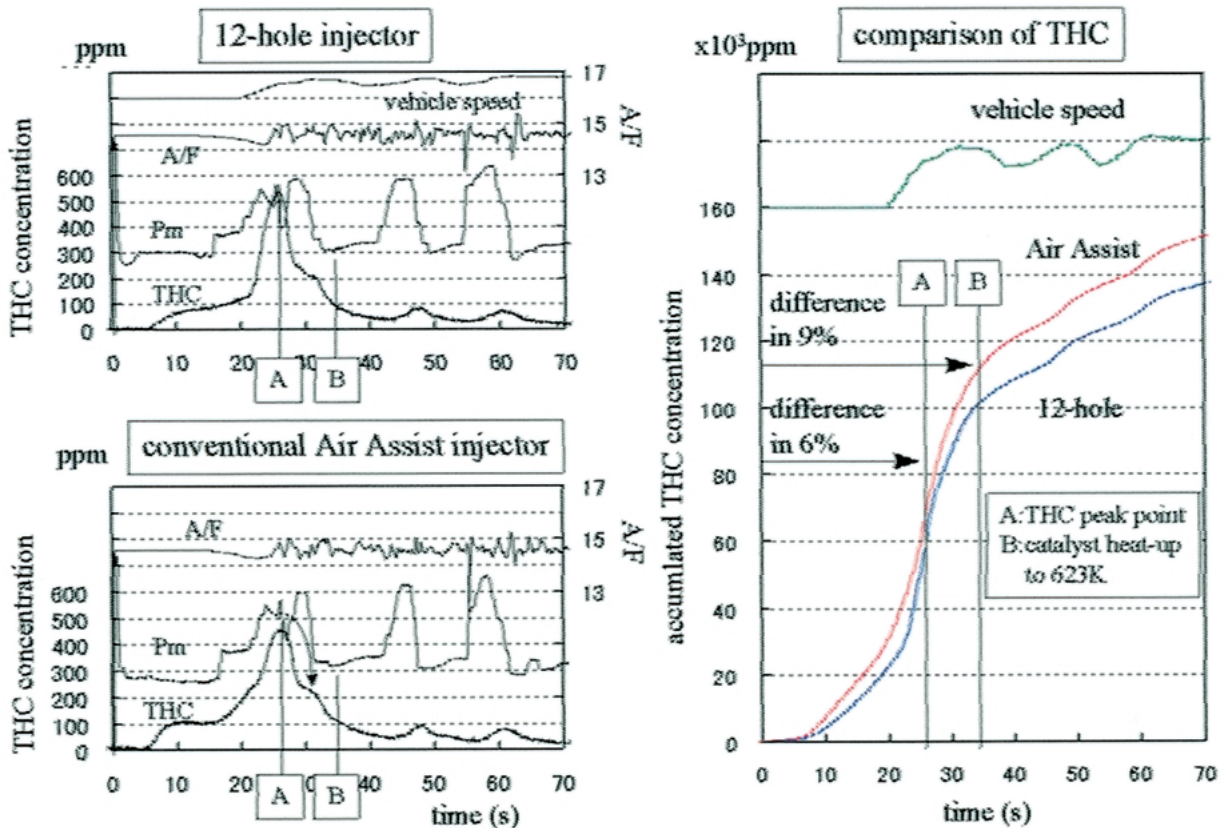


Fig. 18 Analysis of cold mode HC emission test results

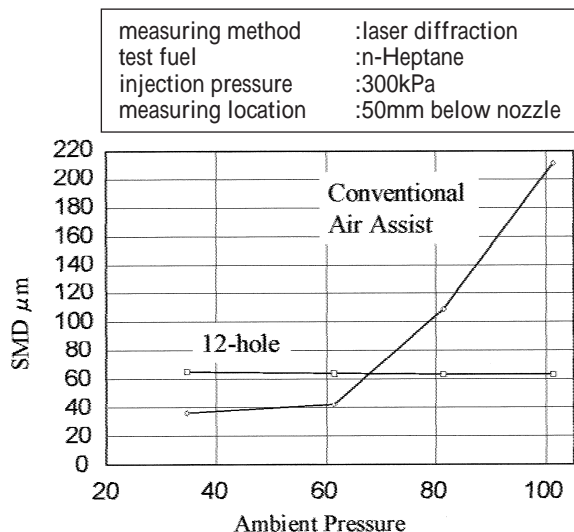


Fig. 19 Effect of ambient pressure

5. おわりに

多孔ノズルを用いて、噴孔の配置・噴孔数といった幾何学的形状と、上流流れを調整することによって、比較的容易に噴霧の微粒化を制御することができることがわかった。特に微粒化については、ノズル上流流れの影響が大きく、ノズル直上で水平流れを等方的に衝突させる場合に最も微粒化が発達する。

微粒化は上の条件で、噴孔数を増すとさらに発達するが、ノズルの物理的な寸法制限のため、噴孔数の最適値が存在する。

この研究で調べられた12孔ノズルとフラットニードルの組合せを使うと、通常の燃料噴射圧300kPaでSMD60 μmが得られる。またこの12孔ノズルインジェクタを用いれば、実際のエンジンにおいては、従来エアアシストインジェクタ以上のHC低減ポテンシャルがあることがわかった。

ルがあることがわかった。

今後は、さらに詳細に微粒化の要因について調べ、解析的に微粒化現象を捕らえることを検討する。

<参考文献>

- 1) K. Takeda, T. Yaegashi, K. Sekiguchi, K. Saito, and N. Imatake, " Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-valve Engine with Port Injection during Cold Starting and Warm-up ", SAE Paper 950074, 1995.
- 2) A. Saito, K. Kawamura, and Y. Tanasawa, " Improvement of Fuel Atomization in Electronic Fuel Injector by Air Flow ", ICLASS- '88, P.263, 1988.
- 3) G. Saikailis, R. Byers, and T. Nogi, " Study on Air Assist Fuel Injector Atomization and Effects on Exhaust Emission Reduction " , SAE Paper 930323, 1993.
- 4) Von J. Abthoff, D. Huttebraucker, W. Zahn, and H. Bockel, " Die neuen Vierventil-Ottomotoren fur die mittlere Braureihe von Mercedes-Benz (Germany) ", MTZ 53, P.496, 1992.
- 5) S. M. Rivette and L. W. Evers, " Compound Port Fuel Injector Nozzle Droplet Sizes and Spray Patterns ", SAE Paper 960114, 1996.
- 6) J. Heyse, F. Schats, B. Ader, J. Schlerfer, and S. Haubold, " Electroformed Multilayer Orifice Plate for Improved Fuel Injection Characteristics ", SAE Paper 971070, 1997.
- 7) C. Arcoumanis, M. Gavaises, J. M. Nouri, E. Abdul-Wahab, and R. W. Horrocks, " Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi Hole Diesel Engine Injector ", SAE Paper 98811, 1998.
- 8) Y. Tani, Y. Mori, and K. Mochizuki, " Multiple-hole Nozzle Atomization for SI Engines ", SAE Paper 1999-01-0564, 1999.

<著者>



谷 泰臣
(たに やすひで)
エンジン機器技術2部
ガソリンインジェクタ開発に従事。



森 幸雄
(もり ゆきお)
エンジン機器技術2部
ガソリン燃料系コンポーネント設計を総括、部長。



望月 孝一
(もちづき こういち)
エンジン機器技術2部
ガソリンインジェクタ開発に従事。



鈴木 敦志
(すずき あつし)
パワトレイン制御開発部
エンジンマネジメントシステム開発に従事。