

研究報告

直噴ガソリンエンジン用スリットノズルの噴霧特性

河村清美，勝見則和，植田玲子

Spray Characteristics of Slit Nozzle for DI Gasoline Engines

Kiyomi Kawamura, Norikazu Katsumi, Reiko Ueda

要 旨

火花点火エンジンのさらなる燃費向上，排気浄化を目指して直噴ガソリンエンジンの開発が各社で進められている。これまでに開発された主なエンジンの混合気形成法は，スワールやタンブル等の空気流動を積極的に利用して点火栓近傍に混合気を導く方法であった。このような空気流動を発生させると体積効率の低下を招く。これに対して特別な空気流動発生機構を用いず，噴霧自身もつつ分散性や貫徹力，およびピストン形状の最適化で混合気形成を図り，広範囲の運転条件で成層運転を可能にする新コンセプトが提案され，実用化された。このコンセプトを成立させるために開発

したスリットノズルは，矩形の噴口形状をもち，偏平な扇状の噴霧（ファンスプレー）を形成させるものである。スリットノズルの噴霧特性を評価した結果，(1) 噴霧到達距離はスリット厚さの増加に伴って増加する，(2) 直噴ガソリンエンジンで使用される高噴射圧領域における噴霧粒径に対してスリット厚さの影響が小さい，(3) スワールノズルと比較して高微粒化，高分散，高貫徹力噴霧を形成できることが分かった。さらに，これらの実験結果を基にして噴霧到達距離と平均粒径に対する実験式を導いた。

キーワード

ガソリンエンジン，直噴，ノズル，噴霧，燃料噴射，噴霧特性，貫徹力，粒径，噴霧濃度

Abstract

Direct injection gasoline engines have been developed by several manufacturers for improvement of the fuel economy and exhaust emissions. These direct injection gasoline engines utilize air motion such as swirl or tumble to lead the mixture to the spark plug. However, the suction port generating the swirl or tumble sometimes produces a lower volumetric efficiency compared to the straight port. Therefore, a new combustion concept, which does not depend on air charge motion, was proposed. A slit nozzle was developed to realize this new concept. The nozzle has a rectangular

orifice and forms a thin fan-shaped spray. The spray characteristics of the slit nozzle were evaluated and compared to that of the swirl nozzle. The following results were obtained from the experimental analysis. (1) The spray penetration increases with increasing slit thickness. (2) The effect of the slit thickness on the spray drop size is small at the higher injection pressures. (3) The features of the slit nozzle include a high spray penetration, wide diffusion spray and fine atomization compared to the swirl nozzle.

Keywords

Gasoline engine, Direct injection, Nozzle, Spray, Fuel injection, Spray characteristics, Penetration, Drop size, Spray concentration

1. はじめに

火花点火エンジンのさらなる燃費向上、排気浄化を目指して直噴ガソリンエンジンの開発が各社で進められている。これまでに開発された主なエンジンの混合気形成法は、スワールやタンブル等の空気流動を積極的に利用して点火栓近傍に混合気を導く方法である。しかしこのような空気流動を発生させると、体積効率の低下を招く。これに対して特別な空気流動発生機構を用いず、噴霧自身がもつ分散性や貫徹力、およびピストン形状の最適化で混合気形成を図り、広範囲の運転条件で成層燃焼を可能とする新コンセプト^{1, 2)}が提案され、実用化された。このコンセプトを成立させるために開発したノズルは矩形の噴口形状をもつスリットノズルであり、偏平な扇状の噴霧（ファンスプレー）を形成するものである。

ところでファンスプレーの噴霧特性は1960年代にDombrowskiら³⁾によって理論的、実験的に解析されている。ただし実験範囲が直噴ガソリンエンジンの噴射圧力と比較して1桁以上低いこと、また定常噴霧流を対象に研究されたために、噴霧貫徹力に関する知見が得られていない。このようなことから、スリットノズルの高噴射圧時における噴霧特性を評価するとともに、これまでの直噴ガソリンエンジンで主に使用されているスワールノズルの噴霧特性と比較した。

2. スリットノズルの基本噴霧特性

Fig. 1に、スリットノズルの基本噴霧特性を評価

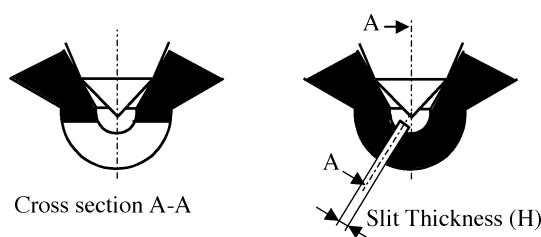


Fig. 1 Configuration of nozzle tip (Wire cut type).

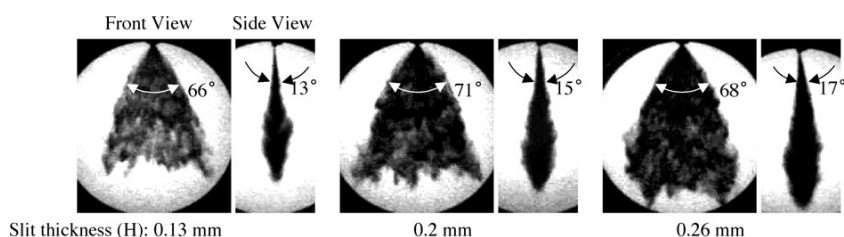


Fig. 2 Spray pattern ($\Delta P = 20\text{MPa}$, $P_a = 0.1\text{MPa}$).

するために使用したノズルの構造を示す。ノズル先端に放電加工（ワイヤカット）で一様な厚さのスリットを加工し、矩形の噴口を形成させた。これによって噴口入口から流出した燃料は、スリット噴口の長手方向に広がりながら偏平な扇状の噴霧（ファンスプレー）を形成する。スリット厚さ(H)は0.13mm, 0.2mm, 0.26mmの3種類に設定した（噴射率はスリット厚さに比例）。また、これらのノズルはスリットの切り込み深さを等しくして、スリット長手方向の噴霧広がり角がほぼ等しくなるようにした。

以下に噴霧特性の評価結果を示す。なお使用した燃料は全てノルマルヘプタンであり、常温場で評価した。

2.1 噴霧到達距離

Fig. 2に、スリット厚さ(H)に対する噴霧形状の変化を噴霧正面と側面から観察した結果の一例を示す。この写真は大气圧場での観察結果である。噴霧正面から観察した噴霧広がり（スリット長手方向）は3種類ともほぼ等しいが、側方から観察した噴霧角はスリット厚さが厚いほど大きくなることが分かる。このような噴霧写真を時系列で撮影し、スリット厚さに対する噴霧到達距離の変化を0.1MPaと0.5 MPa雰囲気場で測定した結果をFig. 3に示す。図中の記号は測定結果を表し、実線は後述の計算式での計算値を表す。この図から同じ雰囲気圧条件で比較すると、噴射初期にはスリット厚さが異なっても噴

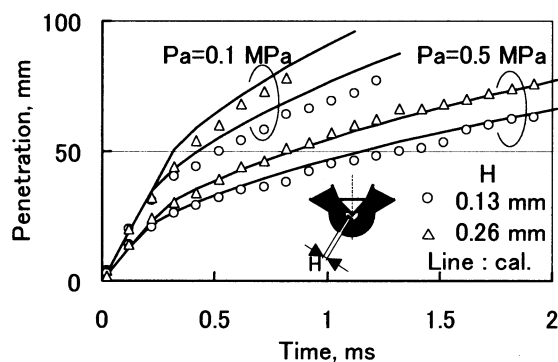


Fig. 3 Effect of slit thickness on spray tip penetration. ($\Delta P = 20\text{MPa}$)

霧到達距離に差がみられないが、それ以降はスリット厚さが厚いほど噴霧到達距離が大きくなることが分かる。このように噴射初期の噴霧到達距離が噴口の大きさに依存しないことは、ホールノズルでもみられる現象である⁴⁾。また、この図からスリットノズルの噴霧到達距離と経過時間との関係を整理すると、噴射初期の噴霧到達距離は経過時間に比例、それ以降は経過時間の0.5乗に比例することが分かった。この関係もホールノズルの場合と同じである⁴⁾。

以上の知見を踏まえて、スリットノズルの噴霧到達距離 y を推測するための計算式を導いた。計算式は和栗らが提案した運動量理論⁵⁾をベースにした。ただし運動量理論では経過時間に比例して噴霧到達距離が変化する噴射初期の領域を表すことができないため、その部分は式(1)に示す広安らが提案したホールノズルに対する計算式⁴⁾を用いた。ところで式(1)中の噴霧速度係数 c_s の値に対して広安らは、ディーゼル噴霧を想定した比較的に高い雰囲気気密度における実験から0.39の一定値としている。ただし直噴ガソリンエンジンの吸気行程噴射時のようにほぼ大気圧場に噴射するケースまでは想定外であると思われる。そこで雰囲気気密度と噴霧速度係数との関係を測定した。その結果、噴霧速度係数は雰囲気気密度の増加に伴って減少し、式(2)の関係式で表現することが分かった。一方、噴射初期以降の噴霧到達距離は和栗の運動量理論に基づき、ノズルから噴出する燃料がもつ運動量 M_0 とノズル下流の距離 y における運動量 M_y が等しいものとして導いた式(3)で表すことができる。この関係式は、噴霧到達距離が経過時間の0.5乗に比例しており、これは前述の測定結果で示した関係と等しい。また式(1)と式(3)の交点の時刻(t_c)は、式(4)のように表される。

(噴射初期の噴霧到達距離： $t < t_c$)

$$y = c_s \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_f}} \cdot t \quad (1)$$

$$c_s = c \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-0.25} \quad (2)$$

(噴射初期以降の噴霧到達距離： $t > t_c$)

$$y = \left(\frac{4 \cdot c \cdot A_e \cdot \Delta P}{\rho_a \cdot \tan \theta \cdot \psi} \right)^{0.25} \cdot t^{0.5} \quad (3)$$

$$t_c = \sqrt{\frac{c \cdot A_e}{\rho_a \cdot \tan \theta \cdot \psi \cdot \Delta P}} \cdot \frac{\rho_f}{c_s^2} \quad (4)$$

y : 噴霧到達距離

c_s : 噴霧速度係数

ΔP : 噴射差圧

ρ_f : 燃料密度

ρ_a : 雰囲気気密度

ρ_0 : 大気圧での空気密度

c : 流量係数

A_e : 噴口入り口面積

ψ : 噴霧広がり角(噴口長手方向)

θ : 噴霧角/2

t : 経過時間

Fig. 3に示したように、計算値(実線)と測定結果(記号)はよく一致しており、本計算式でスリットノズルの噴霧到達距離の推測が可能であることが分かる。

2.2 噴霧粒径

Fig. 4に噴射差圧に対する噴霧粒径の変化を測定した結果を示す。図には吸気管内噴射で使用される噴射圧レベルである0.2～0.4MPaと、直噴ガソリンエンジンで使用される噴射圧レベルである6～14MPaでの結果を示した。前者は液膜から液系が形成され、それがさらに液滴へと分裂する過程が写真観察で明確にとらえられる領域であるのに対して、後者は液膜や液系を明確にとらえることが困難な領域である。図から、いずれの噴射圧領域においても、噴射圧の増加に伴って粒径が減少することが分かる。また、この測定結果を基にして噴射圧と粒径との関係を求めると、低噴射圧領域では噴射圧の -0.25 乗、高噴射圧領域では噴射圧の -0.5 乗に粒径が比例する結果になった。このことから粒径に対する噴射圧の寄与度は、高噴射圧領域の方が大きいことが分かる。さらにこの図から、低噴射圧領域ではスリット厚さに対する粒径の変化が明確に現れているが、高噴射圧領域では粒径の変化がそれほど大きくないことが分かる。それぞれの噴射圧領域に対してスリット厚さと粒径との関係を求めると、Fig. 5に示すように、低噴射圧領域ではスリット厚さの0.3乗、高噴射圧領域ではスリット厚さの0.1乗に粒径が比例する

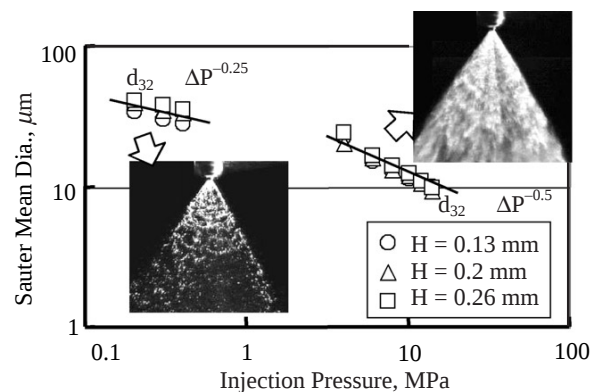


Fig. 4 Effect of injection pressure on Sauter mean diameter.

結果になった。以上の結果から、直噴ガソリンエンジンで使用される高噴射圧領域における粒径は、低噴射圧時と比較してスリット厚さの寄与度が減少し、噴射圧（噴霧速度）の寄与度が増加することが分かる。

ところでDombrowskiらはファンスプレーの粒径に対して、液膜振動によって液系に分裂し、それがさらに液滴へと分裂する液膜分裂モデルを提案し、Squireが導いた液膜に発生する振動波長の理論式⁶⁾を組み込んだ関係式として報告している。それによれば、本報告の低噴射圧領域での条件における粒径は噴射圧の -0.33 乗、スリット厚さの 0.33 乗に比例することになる。これに対して本報告の結果は、前述のようにそれぞれ -0.25 乗と 0.3 乗であり、ほぼそれに準じた結果になっている。一方、本報告の高噴射圧領域での条件に対するDombrowskiらの粒径の関係式は、噴射圧の -0.4 乗、スリット厚さの 0.5 乗になる。これに対して本報告の測定結果は噴射圧の -0.5 乗、スリット厚さの 0.1 乗であり、噴射圧の寄与度の違いはそれほど大きくないが、スリット厚さの寄与度が大きく異なる。この原因については、次のようなことが考えられる。Dombrowskiらは、液膜振動による分裂のみを考慮した理論解析結果に基づいてスリット厚さと粒径との関係を導いている。しかしスリット厚さが約20%異なる2種類のノズルで実験検証しているのみである。そのため、スリット厚さの検証が十分になされているとは言い難い。また理論解析では、粒径は噴射圧に依存しない結果になるが、実験結果ではこの項の影響が大きく無視できないために、これを付加した関係式を提案している。このことから高噴射圧領域では単純な液膜振動による分裂のみではなく、噴流速度が速いために周囲気体からのせん断力による微粒化も複合され、噴射圧（噴流

速度）の項を付加する必要を生じたものと考えられる。このように高噴射圧領域では、液膜振動のほかに周囲気体からのせん断力による分裂も重畳されるために、液膜振動による分裂のみを考慮した理論解析結果とは異なる傾向を示したものと思われる。

次に、雰囲気気圧に対する噴霧粒径の変化を測定した結果をFig. 6に示す。雰囲気気圧の増加に伴って噴霧粒径が増加し、この図から雰囲気気圧（密度）と噴霧粒径との関係を求めると、噴霧粒径は雰囲気気圧（密度）の約 0.33 乗に比例することが分かった。なお、この値はDombrowskiらの実験結果から導かれた 0.25 乗よりやや大きい、それほど大きな差ではない。

以上の測定結果からスリットノズルの噴霧粒径(d_{32})に対する関係式をまとめると式(5)、(6)のようになる。なお、本報告はスリットノズルを直噴ガソリンエンジンに適用する場合の噴霧挙動を把握することを主眼としたために、低噴射圧時における雰囲気気密度(ρ_a)の影響については評価しなかった。そのため、式(5)には雰囲気気密度の項が入っていない。

（低噴射圧時：吸気管内噴射時相当）

$$d_{32} \propto \Delta P^{-0.25} \cdot H^{0.3} \quad (5)$$

（高噴射圧時：筒内直噴時相当）

$$d_{32} \propto \Delta P^{-0.5} \cdot H^{0.1} \cdot \rho_a^{0.33} \quad (6)$$

3. スワールノズルとの比較

量産化に向けて開発された直噴ガソリンエンジン用のスリットノズルとスワールノズルの噴霧特性を比較した。開発されたスリットノズルは、Fig. 7に示すように、噴口入口から噴口出口に向かって扇状に広がっていく形状のものである⁷⁾。

噴霧形状の比較をFig. 8に示す。このときの測定条件は、噴射圧12MPa、雰囲気気圧0.1MPa、0.5MPaである。スワールノズルは、従来からいわれているよ

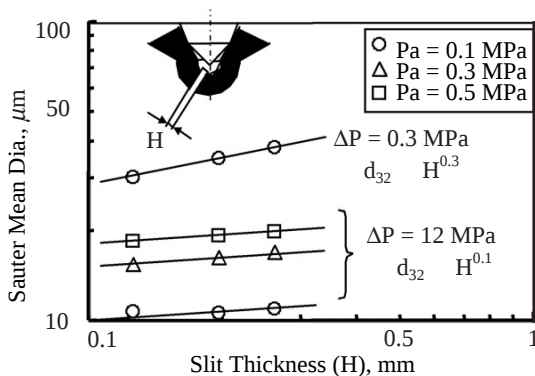


Fig. 5 Effect of slit thickness on Sauter mean diameter.

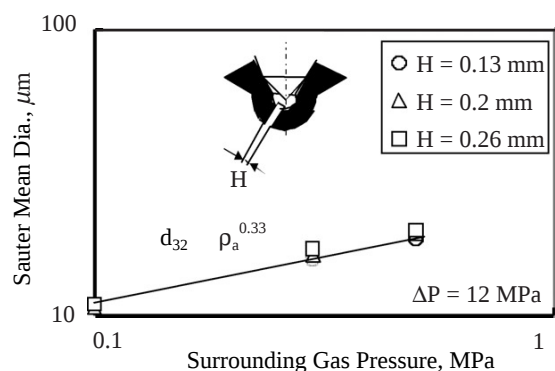


Fig. 6 Effect of surrounding gas pressure on Sauter mean diameter.

うに、雰囲気気圧の増加に伴って噴霧の広がりが減少する⁸⁾。これに対してスリットノズルは、噴霧厚さ方向の広がり（噴口長手方向に対して直角方向）が雰囲気気圧の増加に伴って大きくなることが分かる。

Fig. 9に噴霧写真から噴霧到達距離を測定した結果を示す。図には雰囲気気圧が0.1MPa（吸気行程噴射時を想定）と0.5MPa（圧縮行程噴射時を想定）の場合を示した。この図から、いずれの雰囲気気圧においてもスリットノズルは、スワールノズルと比較して高貫徹力噴霧が形成されることが分かる。例えば噴射開始後1msにおけるスリットノズルの噴霧到達距離は0.1MPa雰囲気気場ではスワールノズルの約1.5倍、0.5MPa雰囲気気場では約1.2倍である。なお、雰囲気気圧が高くなると両者の噴霧到達距離の差が小さくなるのは、和栗の運動量理論から明らかなように、雰囲気気圧の増加に伴って噴霧広がり（噴霧横断面積）が減少するスワールノズルの方が、噴霧の厚みが増加して噴霧横断面積が増加するスリットノズルよりも、噴霧貫徹力の減少の程度が小さくなるためである。ところで、Fig. 9には前章で述べた計算式で噴霧到達距離を計算した結果も併せて示したが、前章のノズルとは噴口形状がやや異なる量産化ノズルに対しても測定結果をよく表すことが分かる。

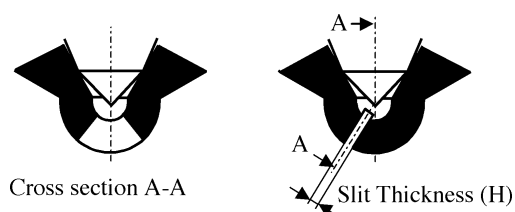


Fig. 7 Configuration of slit nozzle (on the market).

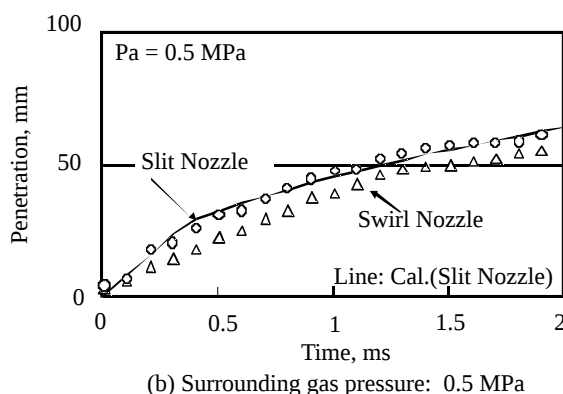
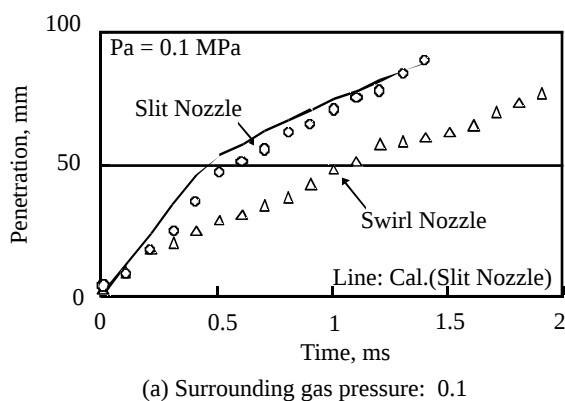


Fig. 9 Comparison of spray tip penetration between slit nozzle and swirl nozzle.($\Delta P = 12\text{MPa}$)

Fig. 10に噴霧粒径の比較を示す。スリットノズルはスワールノズルと比較して噴霧粒径がやや小さい。また雰囲気気圧の増加に伴って噴霧粒径が増加する現象は両者ともにみられる。

Fig. 11に噴霧濃度分布の縦断層像の比較を示す。ここで示した噴霧濃度は単位体積中に占める燃料粒子の総散乱断面積（投影面積）である。この図から、雰囲気気圧が変化してもスリットノズルの噴霧濃度にそれほど大きな差がみられないのに対して、スワールノズルは雰囲気気圧の増加に伴って噴霧濃度が高くなる傾向を示すことが分かる。そのために大気圧場では両者の噴霧濃度にそれほど大きな差がみられないが、0.5MPa雰囲気気場ではスリットノズルの方が噴霧濃度が低く、高拡散噴霧が形成されることが分かる。これはFig. 8に示したように、雰囲気気圧が高くなるとスリットノズルは噴霧の厚さ方向の広がりが増加するのに対して、スワールノズルは噴霧がしばらく燃料が密集しやすいことによると考えられる。

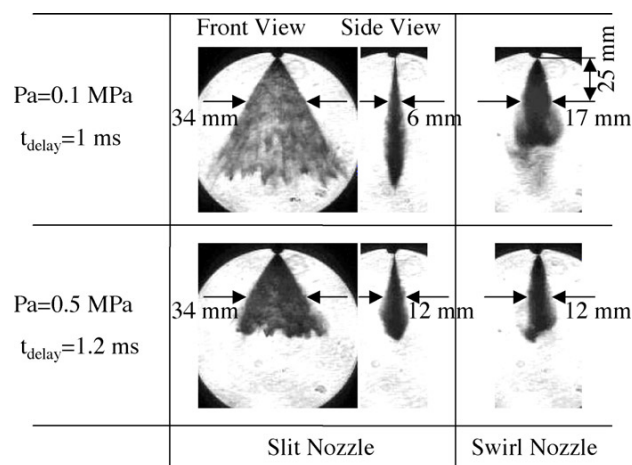
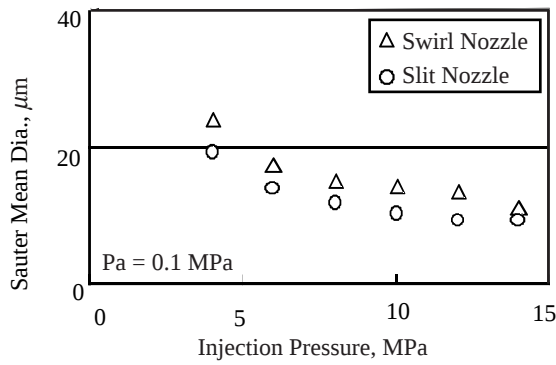
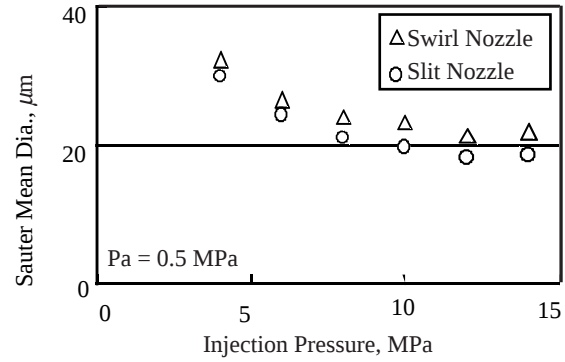


Fig. 8 Comparison of spray pattern.($\Delta P = 12\text{MPa}$)

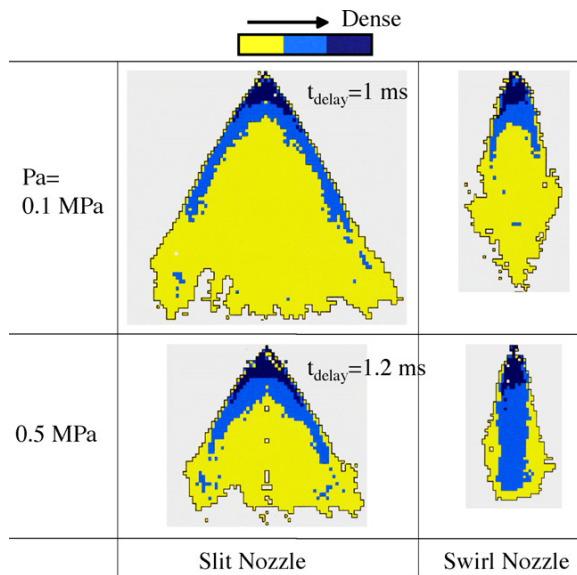


(a) Surrounding gas pressure: 0.1 MPa



(b) Surrounding gas pressure: 0.5 MPa

Fig. 10 Comparison of Sauter mean diameter between slit nozzle and swirl nozzle.

Fig. 11 Comparison of spray concentration.
($\Delta P = 12 \text{ MPa}$)

参考文献

- 1) 小池誠, 斎藤昭則, ほか2名: 自動車技術会学術講演前刷集, 69-99(1999), 1
- 2) 神田睦美, 清水里欧, ほか4名: 自動車技術会学術講演前刷集, 69-99(1999), 5
- 3) Dombrowski, N., et al.: Chem. Eng. Sci., 17(1961), 291
- 4) 広安博之, 新井雅隆: 自動車技術会論文集, 21(1980), 5
- 5) 和栗雄太郎, 藤井勝, ほか2名: 日本機械学会論文集 (第2部), 25-156(1959), 820
- 6) Squire, H. B.: British J. Appl. Phys, 4(1953), 167
- 7) 杉本知士郎, 武田啓壮, ほか4名: 自動車技術会学術講演前刷集, 21-00(2000), 9
- 8) De Corso, S. M., et al.: Trans. ASME, (1957), 607

(2001年8月28日原稿受付)

著者紹介



河村清美 Kiyomi Kawamura

生年: 1956年。

所属: エンジン機能研究室。

分野: 燃料噴射・噴霧技術。

学会等: 日本機械学会, 自動車技術会, 日本液体微粒化学会会員。
工学博士。

勝見則和 Norikazu Katsumi

生年: 1961年。

所属: 動力システム研究室。

分野: 燃料噴射・噴霧技術。

学会等: 日本液体微粒化学会会員



植田玲子 Reiko Ueda

生年: 1963年。

所属: エンジン機能研究室。

分野: 燃料噴射・噴霧技術。

4. まとめ

スリットノズルの噴霧特性を評価した結果, (1) 噴霧到達距離はスリット厚さの増加に伴って増加する, (2) 直噴ガソリンエンジンで使用される高噴射圧領域における噴霧粒径に対してスリット厚さの影響が小さい, (3) スワールノズルと比較して高微粒化, 高分散, 高貫徹力噴霧を形成できることが分かった。さらに, これらの実験結果を基にしてスリットノズルの噴霧到達距離と噴霧粒径に対する実験式を導いた。