マイクロノズルアレイを用いた超音波微粒化*

荒木 幹也^{*1}, 嶋津 有宏^{*2}, 小保方 富夫^{*1}
石間 経章^{*1}, 志賀 聖一^{*1}
増 渕 匡彦^{*3}, 杉本 知士郎^{*4}

Ultrasonic Atomization Using a Micro Nozzle Array

Mikiya ARAKI^{*5}, Tomohiro SHIMAZU, Tomio OBOKATA,
Tsuneaki ISHIMA, Seiichi SHIGA,
Masahiko MASUBUCHI and Tomojiro SUGIMOTO^{*5} Department of Mechanical Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Atomization characteristics of an ultrasonic fuel injector using a micro nozzle array were investigated experimentally. Micro nozzles whose exit diameter is $d=3, 6$ and $9\ \mu\text{m}$ are mounted on a thin metal film. The number of the micro nozzle is 2.0×10^4 . Using an ultrasonic oscillator, gasoline is periodically pushed out from the micro nozzles at the frequency of 63.6 kHz. A disk-type PZT is used as an ultrasonic oscillator, and the oscillation is amplified using a step-type horn. The input voltage is varied from 0 to 200 V. At the natural frequency, the oscillation amplitude of the horn is about $10\ \mu\text{m}$. The droplet diameter and velocity are measured with a phase Doppler analyzer at 15 mm downstream from the micro nozzle array. For $d=3\ \mu\text{m}$, the Sauter mean diameter (*SMD*) is about $10\ \mu\text{m}$, and the fuel flow rate is 0.023 cc/s. The *SMD* is much smaller when compared to conventional port fuel injectors. For $d=6\ \mu\text{m}$, the *SMD* is about 10 to $18\ \mu\text{m}$, and the fuel flow rate is 0.055 cc/s. For $d=9\ \mu\text{m}$, the *SMD* is about 16 to $28\ \mu\text{m}$, and the fuel flow rate is 0.41 cc/s. It is shown that, using the micro nozzle array, a uniform-diameter steady spray can be obtained without high-pressure fuel pump and nozzle type injectors.

Key Words: Liquid Atomization, Micro Nozzle Array, Ultrasonic Oscillator, Port Fuel Injector

1. 結 言

欧米, 特にカリフォルニア州を中心に, 自動車排気中の未炭化水素排出量の大幅な規制強化が進んでいる。未炭化水素の排出が集中する冷間始動時の排気特性改善が, 非常に大きな課題となっている。これには, 燃料噴霧特性の改善が鍵となる。

4ストロークサイクル火花点火機関の排気中に含まれる未炭化水素の多くは, 機関の冷間始動時に排出される^①。ポート噴射式火花点火機関の場合, 燃料は吸気ポートに噴射される。燃料噴霧の貫徹力のため, その一部は壁面に付着する。冷間始動時の場合, 壁面温度が低いので燃料の蒸発は遅く, 燃料は液膜として

壁面上にとどまる。シリンダに流入する燃料の量は噴射された量の40～50%にとどまり, 吸気ポートには「余剰な」燃料が10サイクル以上にわたって蓄積していく^②。このため燃料噴射量の増大が必要となり, 未炭化水素排出量は増大する。また冷間始動時の場合, シリンダ内の壁面上に付着した燃料液膜は, 燃焼過程初期までに完全には蒸発せず, また数サイクルにわたって蓄積していくことが知られている^{③④}。この問題を解決するには, 冷間始動時における燃料の蒸発促進, すなわち微粒化促進が必須となる。

本研究では, 従来とは全く異なる手法による, 低圧での効率的な微粒化法の開発を目論む。特に機関の冷間始動時に, ごく微細な燃料噴霧を供給する手法の開発を目論んでいる。液滴径の目標値は*SMD* (Sauter mean diameter) = $10\ \mu\text{m}$ である。金属薄膜上に, 膨大な数 (10^4 個のオーダー) のマイクロノズル (10^{-6} m のオーダー)^⑤を設ける。このマイクロ

* 原稿受付 2006年6月8日。

^{*1} 正員, 群馬大学工学部 (☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。^{*2} 群馬大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, トヨタ自動車(株) (☎ 410-1193 裾野市御宿 1200)。^{*4} トヨタ自動車(株)。

E-mail: araki@me.gunma-u.ac.jp

ノズルから、超音波周波数 (10^5 Hz のオーダー) で周期的に燃料を押し出すことで、微細燃料噴霧を形成する。高圧燃料ポンプや高圧燃料噴射弁を用いることなく、効率的な微粒化が可能になると期待される。このような微粒化法は、呼吸器疾患の医療器具であるネブライザで用いられ始めている。しかしながら、液体流量が極めて小さく、部材に耐油性がないなどの理由から、自動車用燃料噴射弁として、そのまま適用することは不可能である。本研究では、この新しい手法を応用した自動車用燃料噴射弁を試作し、その微粒化特性について実験的に検討を行う。燃料液滴の粒径および速度、燃料流量について計測を行い、自動車用燃料噴射弁としての適用可能性を検討する。

2. 実験装置および方法

2・1 燃料噴射弁 燃料には市販のレギュラーガソリンを用い、ヘッドタンクから供給される。マイ

A-A section

Fig. 1 Schematic of the fuel injector.

Fig. 2 Schematic of the micro nozzle array.

クロノズルアレイの目詰まりを防ぐため、燃料フィルター (ろ過精度 $10 \mu\text{m}$) を設置した。燃料は、配管中に設けた容積式流量計を通り、フロート室に送られる。燃料の供給圧力を一定とするため、フロート室を設置した。フロート室を出た後、燃料は噴射弁へと送られる。

図 1 に、燃料噴射弁の概略を示す。燃料噴射弁は、超音波振動子、マイクロノズルアレイ、筐体から構成される。超音波振動子が、 $f=63 \sim 64 \text{ kHz}$ の周波数で振動する。超音波振動子とマイクロノズルアレイの間の燃料は、マイクロノズルから周期的に押し出され、噴霧が形成される。

超音波振動子は、PZT およびホーンからなる^⑤。直径 30 mm 、厚さ 2.7 mm の円盤状の PZT を用いた。PZT は、印加する電圧に応じて厚さ方向に伸縮する。PZT を周期的に伸縮させるため、印加する電圧波形を方形波とした。印加電圧の全振幅 V_0 を、 $0 \sim 200 \text{ V}$ の範囲で変化させた。印加電圧周波数 f はホーン/PZT 系の共振周波数に対応している。

PZT の振動振幅を増幅するため、軸対称ステップ型ホーン^⑥を用いた。ホーンは全長 36 mm 、大端部直径 30 mm 、小端部直径 10.5 mm である。PZT は、ホーン大端部に固定される。PZT が振動するとホーン全体も振動する。この際、中央が「節」、両端が「腹」となる。面積比から求める振幅拡大率^⑦は 8.2 であり、ホーン小端部は大端部の 8.2 倍の振幅で振動する。振動の「節」であるホーン中央のフランジ部が、筐体に固定される。

図 2 に、マイクロノズルアレイの概略を示す。マイクロノズルアレイは、厚さ $30 \mu\text{m}$ のニッケル箔製で、 $70 \mu\text{m}$ 間隔の千鳥配列で軸対称四分円ノズルが設けられている。ホーン小端部に接する部分のノズル数は 2.0×10^4 個である。ノズル出口直径を、 $d=3, 6, 9 \mu\text{m}$ の 3 種類とした。ノズル開口率は、 0.17% ($d=3 \mu\text{m}$ の場合) $\sim 1.5\%$ ($d=9 \mu\text{m}$ の場合) である。

燃料噴射弁は、噴射軸が水平となるように設置される。マイクロノズルアレイ表面中心を原点とし、噴射軸方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸、水平方向に y 軸を設定した。

2・2 計測法 フラッシュランプ (菅原研究所, MS-230A) および CCD カメラ (Nikon, D100) を用い、噴霧の瞬間像を取得した。閃光時間は約 $2 \mu\text{s}$ であり、現象の瞬間像を得るのに十分に短い時間である。

図 3 (a) に、粒径測定的光学系配置を示す。位相ドップラ法 (Aerometrics 社, PDPA-100A) を用い、生成された液滴の粒径、 x 軸 (噴射軸) 方向速度成分

を計測した。光源は出力 10 mW の He-Ne レーザである。受光系は、レーザビーム進行方向から 30 度の位置に設置した。計測位置は $x = 15 \text{ mm}$ である。送光系、受光系の位置は固定されており、燃料噴射弁の位置を上下に微動することで、 z 軸（高さ）方向の分布を取得した。

図 3 (b) に、ホーン小端部の振幅測定の光学系配置を示す。レーザドップラ流速計 (LDA : Laser Doppler anemometer) を使い、ホーン小端部の振動振幅の計測を行った。マイクロズルアレイを取り外し、燃料を供給しない状態で計測を行った。レーザ交差体積がホーン小端部中心に当るように、送光系を設置する。ホーン小端部が振動すると、その速度に応じたドップラ信号が検出される。受光には光電子増倍管を、信号処理には BSA (Dantec 社, F80) を用いた。

ホーン小端部が正弦波で振動すると仮定すると、その変位 x は、以下で与えられる。

$$x = A \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

A は振動振幅、 f は印加電圧周波数を表す。この時、ホーン小端部の速度 (dx/dt) は、以下で与えられる。

$$\frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (2)$$

ホーン小端部の速度振幅 ($2\pi f A$) を LDA にて計測し、振動振幅 A を算出した。

LDA 計測のデータレートは、最大で 100 kHz 程度であった。この値は、ホーンの振動周波数 63 ~ 64 kHz よりは大きいものの、ホーン小端部の速度変動波形をとらえるには不十分である。本研究では、ホ

(a) Phase Doppler analysis

(b) Oscillation amplitude measurement

Fig. 3 Schematics of the optical setup.

(a) $d = 3 \mu\text{m}$

(b) $d = 6 \mu\text{m}$

(c) $d = 9 \mu\text{m}$

Fig. 4 Instantaneous direct images of the fuel spray.

ーン小端部が正弦波で振動すると仮定し、振動振幅 A を算出した。

3. 実験結果および考察

3・1 噴霧瞬間像 図4に、燃料噴霧の瞬間像を示す。印加電圧 $V_n = 150$ Vである。図4(a)～(c)はそれぞれ、ノズル出口直径 $d = 3, 6, 9$ μm の場合である。流れは左から右向きである。

図4より、マイクロノズルアレイから燃料噴霧が噴出する様子が分かる。マイクロノズルアレイと超音波振動子の組み合わせで、連続的な燃料噴霧の形成が可能であることが示された。通常のポート噴射用燃料噴射弁では、燃料噴射期間は数ms～数十msであり、この間燃料は連続的に噴射される。一方、超音波振動子を用いた場合、微視的には燃料は間欠的に押し出される。しかしながらその振動周波数は63～64 kHzであり、1回の押し出しに要する特性時間は16 μs 程度と極めて短い。このため、巨視的には連続噴霧ととらえることができる。

また図4より、ノズル出口直径 d の増大とともに液滴の粒径が増大し、噴出速度が大きくなる様子が伺える。液滴径、液滴速度、燃料流量の計測結果については後述する。

3・2 ホーン小端部振幅 図5に、速度振幅より求めたホーン小端部の振動振幅 A と、印加電圧周波数 f との関係を示す。印加電圧 V_n を0～200 Vの範囲で、印加電圧周波数 f を63.2～64.0 kHzの範囲で変化させた。

印加電圧周波数 f を変化させていくと、ホーン小端部の振幅 A も変化し、 $f = 63.6$ kHzにおいて、振幅は最大値をとる。この点がホーン/PZT系の共振周波数である。また印加電圧 V_n を増大していくと、振幅

Fig. 5 Oscillation amplitude of the small end of the horn.

(a) $d = 3$ μm

(b) $d = 6$ μm

(c) $d = 9$ μm

Fig. 6 Droplet diameter distributions for $V_n = 150$ V.

は増大する。振幅は最大で10 μm 程度である。

3・3 液滴の粒径分布 図6に、液滴の粒径分布を示す。図6(a)～(c)はそれぞれ、ノズル出口直径 $d = 3, 6, 9$ μm の場合である。横軸は粒径を、縦軸は位相ドップラ法のデータカウント数を示す。印加電圧は $V_n = 150$ Vである。計測位置は $x = 15$ mmである。 z 軸(高さ)方向に計測位置を変化させた。 $z = \pm 5$ mmはホーン外縁、 $z = 0$ mmはマイクロノズルアレイ中心に対応する。

図6(a)より、ノズル出口直径 $d=3\mu\text{m}$ の場合、粒径分布のピークは $5\sim 7\mu\text{m}$ にあり、大部分の液滴は $10\mu\text{m}$ 以下であることが分かる。粒径分布の幅は小さく、均一に近い粒径の液滴が得られている。測定位置によらず粒径分布はほぼ同じであり、噴射弁全体から均一な液滴が生成されている。マイクロノズルアレイを用いることで、このように非常に微細で、かつ粒径のそろった液滴が生成できることが示された。これらの特徴は、従来のポート噴射用燃料噴射弁と大きく異なるものである⁶⁾。

図6(b)より、ノズル出口直径 $d=6\mu\text{m}$ の場合、粒径分布のピークは $6\sim 9\mu\text{m}$ にあり、粒径分布の幅はやや大きくなることが分かる。測定位置によって粒径分布は若干変化し、マイクロノズルアレイ中心で粒径がやや大きくなる。

図6(c)より、ノズル出口直径 $d=9\mu\text{m}$ の場合、粒径分布のピークは $7\sim 13\mu\text{m}$ にあり、粒径分布の幅はより大きくなることが分かる。測定位置によって粒径分布は変化し、マイクロノズルアレイ中心では第2のピークが現れる。このようにノズル出口直径 d は、液滴の粒径およびその均質性に影響を及ぼすことが分かる。

今回の位相ドップラ法による測定では、液滴の粒径は $10\mu\text{m}$ 以下の領域に集中している。この値は、本研究で用いた位相ドップラ法での液滴径の測定下限の領域である。液滴の滴径が小さくなるほど、つまり散乱光強度が小さくなるほど液滴を検出することが難しくなる。このため、小粒径液滴を十分にカウントできていない可能性があり、噴霧の平均粒径を大きめに見積もっている可能性があると考えられる。粒径測定法の検討が、今後のひとつの課題である。

図7に、マイクロノズルアレイ表面の模式図を示す。噴射弁を駆動している間、マイクロノズルアレイ表面に液膜が形成される様子が観察された。液膜はマイクロノズルアレイ中心付近に形成され、その大きさ

Fig. 7 Schematic of the liquid film on the micro nozzle array.

はノズル出口直径 d の増大とともに大きくなる。ノズルから染み出した燃料が、マイクロノズルアレイ表面にたまったものと考えられる。

図6で、マイクロノズルアレイ中心において粒径が増大、あるいは粒径分布に第2のピークが現れることが示された。マイクロノズルアレイ上の液膜は、ノズルからの燃料噴出を抑制し、またホーンの超音波振動によって直接微粒化（毛細波微粒化）される⁷⁾。異なる微粒化機構が重畳し、マイクロノズルアレイ中心における微粒化特性の悪化を招いたと考えられる。

(a) $d=3\mu\text{m}$

(b) $d=6\mu\text{m}$

(c) $d=9\mu\text{m}$

Fig. 8 Mean droplet diameters.

3・4 液滴の平均粒径および平均速度

図 8 (a) ~ (c) に、液滴の平均粒径 D_{50} および SMD を示す。横軸は z 軸 (高さ) 方向位置を示す。印加電圧 V_a を 100 ~ 200 V の範囲で変化させた。計測位置は、 $x=15\text{ mm}$ である。

図 8 (a) より、ノズル出口直径 $d=3\text{ }\mu\text{m}$ の場合、 D_{50} 、 SMD は計測位置によらず一定の値をとることが分かる。また印加電圧 V_a を変化させても、平均粒径はほとんど変化しない。 D_{50} は $6\sim7\text{ }\mu\text{m}$ 程度、 SMD は $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度であり、目標とする非常に微細な噴霧の形成が可能であることが示された。

図 8 (b) より、ノズル出口直径 $d=6\text{ }\mu\text{m}$ の場合、 D_{50} 、 SMD は計測位置によらずほぼ一定の値をとることが分かる。また印加電圧 V_a を変化させても、平均粒径はほとんど変化しない。 D_{50} は $7\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 程度、 SMD は $11\sim18\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。

図 8 (c) より、ノズル出口直径 $d=9\text{ }\mu\text{m}$ の場合、 D_{50} 、 SMD は計測位置によって変化し、マイクロノズルアレイ中心付近で増大することが分かる。中心付近での平均粒径の増大は、マイクロノズルアレイ上の液膜のためと考えられる。 D_{50} は $7\sim15\text{ }\mu\text{m}$ 程度、 SMD は $16\sim28\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。

従来のポート噴射式燃料噴射弁の場合、 SMD は $50\text{ }\mu\text{m}$ 程度である⁶⁾。これに対し、マイクロノズルアレイを用いた場合、高圧噴射などの手段を用いることなく、非常に小さい燃料液滴を生成できることが分かる。ポート噴射用燃料噴射弁として、特に冷間始動時の未炭炭化水素排出量を低減する手法として、大きな可能性を秘めていると考えられる。

図 9 (a) ~ (c) に、液滴の x 軸 (噴射軸) 方向平均速度を示す。横軸は z 軸 (高さ) 方向位置を示す。印加電圧 V_a を 100 ~ 200 V の範囲で変化させた。計測位置は、 $x=15\text{ mm}$ である。

図 9 (a) より、ノズル出口直径 $d=3\text{ }\mu\text{m}$ の場合、平均速度分布は放物線となることが分かる。また印加電圧 V_a を変化させても、平均速度はほとんど変化しない。平均速度は最大で 1.2 m/s 程度である。従来の圧力微粒化の場合、 $SMD=10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の噴霧を生成するためにはかなりの高圧噴射を用いる必要がある。噴霧の貫徹力は非常に大きく燃料の壁面付着が問題となるため、ポート噴射用燃料噴射弁に適用することはできない。これに対しマイクロノズルアレイを用いた燃料噴射弁の場合、噴霧の貫徹力は非常に小さく、実機へ適用した場合には燃料の壁面付着を大幅に抑制できると考えられる。

(a) $d=3\text{ }\mu\text{m}$

(b) $d=6\text{ }\mu\text{m}$

(c) $d=9\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 9 Mean droplet velocity.

図 9 (b) より、ノズル出口直径 $d=6\text{ }\mu\text{m}$ の場合、平均速度分布は放物線となることが分かる。また印加電圧 V_a を変化させても、平均速度はほとんど変化しない。平均速度は最大で 1.7 m/s 程度である。

図 9 (c) より、ノズル出口直径 $d=9\text{ }\mu\text{m}$ の場合、平均速度分布は M 字型となることが分かる。マイクロノズルアレイ中心の液膜が、燃料の噴出を妨げていると考えられる。平均速度は最大で 4 m/s 程度である。

液滴の平均速度は、ノズル出口直径 d の増大とともに大きくなる。液滴の噴出速度は、燃料がノズル出

口を通過する際の抵抗に依存すると考えられる。抵抗の大きさは、表面張力による力で決まると考えられる。表面張力による力は、ノズル出口円周長さに比例する。一方、燃料供給圧力による力は、ノズル出口面積に比例する。ノズル出口直径 d の増大とともに、表面張力による力の貢献が、相対的に小さくなると考えられる。

3・5 液滴径の決定機構 図 10 に、マイクロノズルからの液滴生成機構を模式的に示す。現象の場が非常に小さくかつ高速であるため、現状では、液滴生成機構の詳細は分かっていない。ここでは、予想される流れを模式的に示す。

[1] ホーンは下死点から上死点へと変位する。ホーンの行程は $2A$ であり、印加電圧 V_a の増大とともに増大する。ホーンとマイクロノズルアレイの間にある燃料は圧縮され、マイクロノズルから液柱となって噴出する。ノズル開口率は $0.17\% \sim 1.5\%$ と非常に小さいため、ノズルから流出できる燃料はかなり少ないと考えられる。また、マイクロノズルアレイの厚さはわずか $30\ \mu\text{m}$ で剛性はほとんど無い。このため、ホーンが変位すると、マイクロノズルアレイも一緒に変位していると思われる。

[2] ホーンが上死点に達すると、液柱はちぎれ液滴が生成されると考えられる。この際、サテライト液滴が生成されるか否かは明らかでない。マイクロノズルアレイはホーンとともに変位し、「実質的な」行程は、ホーンの行程 $2A$ より小さいと推定される。

[3] ホーンは上死点から下死点へと変位する。新しい燃料が、ホーンとマイクロノズルアレイの間隙を通過して供給される。

図 11 に、マイクロノズルから噴出する液柱と、生成される液滴の模式図を示す。液柱と液滴の体積は同じなので、

$$\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 L = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \quad (3)$$

ここで、 d はノズル出口直径、 L は液柱長さ、 D は液滴径である。これより、以下の関係が導かれる。

$$D = 1.14 \cdot d^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

したがって液滴径 D は、 $d^{\frac{2}{3}}$ および $L^{\frac{1}{3}}$ に比例し、液柱長さ L は、「実質的な」行程に依存すると考えられる。ただし、マイクロノズルアレイの変位が不明のため「実質的な」行程は明らかでなく、現状では L を決定することはできない。

Fig. 10 Droplet formation mechanism.

Fig. 11 Liquid column and droplet injected from a micro nozzle.

図 8 に示したように、印加電圧 V_a が変化しても液滴径はほとんど変化しない。つまりホーンの行程が変化しても、液滴径はほとんど変化しない。このことから、「実質的な」行程は常に一定で、液柱長さ L も大きく変化しないと予想される。

図 12 に、式 (4) から予測された液滴径と、実測された平均粒径 D_{50} の比較を示す。縦軸は液滴径を、横軸はノズル出口直径 d を示す。予測された液滴径を実線および破線で示す。液柱長さ L を $5 \sim 15\ \mu\text{m}$ の範囲で変化させた。実測された平均粒径をプロットで示す。破線で囲んだ部分は、液膜生成が顕著になり粒径分布に第 2 のピークが現れた条件を示す。

実測された平均粒径 D_{50} は、ノズル出口直径 d の増大とともに緩やかに増大する。液膜生成が顕著な条件を除けば、予測された液滴径と実測された平均粒径は、

Fig. 12 Comparison between the estimated and measured droplet diameters.

Fig. 13 Fuel flow rate.

おおむね一致する。指数が $1/3$ と比較的小さいため、液柱長さ L の影響は小さい。液柱長さ L は、 $10 \mu\text{m}$ のオーダーであると予想される。また、式 (4) を用いることで、生成される液滴径を、概略ではあるが予想できるといえる。

3・6 燃料流量 図 13 に、ノズル出口直径 d と燃料流量 q との関係を示す。印加電圧 V_0 を $100 \sim 200 \text{ V}$ の範囲で変化させた。印加電圧周波数は、 $f = 63.6 \text{ kHz}$ である。

燃料流量 q は、ノズル出口直径 d の増大とともに急激に増大する。燃料流量 q は、印加電圧 V_0 が変化してもほとんど変化しない。液柱長さ L が一定であると仮定すると、燃料流量 q はノズル出口面積に比例する、つまりノズル出口直径 d の 2 乗に比例する。図 13 より、 $d = 3, 6 \mu\text{m}$ の場合、燃料流量 q はノズル出口直径の 2 乗に比例する。しかしながら、 $d = 9 \mu\text{m}$ の場合、燃料流量 q は予測値よりはるかに大きくなる。 $d = 9 \mu\text{m}$ の場合、マイクロノズルアレイ上の液膜生成が顕著になり、ホーンの超音波振動により液膜が直

接微粒化される。 $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 程度の粒子が生成され、燃料流量を一気に引きあげたと考えられる。

実機関への適用、特に冷間始動時の未燃炭化水素排出量低減を考えた場合、 SMD をいかに小さくできるかが鍵となる。またこれと同時に、実用に見合う燃料流量が必要となる。例えば気筒当りの行程容積 400 cc の 4 ストロークサイクル火花点火機関の場合、冷間始動時 (吸気管圧力 0.5 気圧 、機関回転数 900 rpm と仮定) ^④ には、定常噴射で 0.1 cc/s のオーダの燃料流量が必要となる。この値が、まずは目標となる。

ノズル出口直径 $d = 3 \mu\text{m}$ の場合、本研究で目標とした $SMD = 10 \mu\text{m}$ の非常に微細な噴霧を形成することができた。噴霧の貫徹力は小さく、燃料の壁面付着を大幅に抑制できると考えられる。ただしその時の燃料流量は 0.023 cc/s であり、このままでは気筒当り複数の噴射弁が必要となる。液滴の粒径を保ったまま燃料流量を増大するため、(i) マイクロノズル形状の変更、(ii) マイクロノズル配置パターンの変更、(iii) ホーン形状・寸法・材質の変更、(iv) PZT の変更などについて、現在検討を行っている。今後、燃料流量を現状の数倍程度まで増大していく計画である。

一方ノズル出口直径 $d = 9 \mu\text{m}$ の場合、 SMD は $16 \sim 28 \mu\text{m}$ 程度となる。この値は、従来のポート噴射式燃料噴射弁と比較した場合、まだ十分に小さい^⑥。噴霧の貫徹力は小さく、燃料の壁面付着を抑制できると考えられる。またその時の燃料流量は 0.41 cc/s であり、現状でも、ある程度の負荷・回転数までは対応可能であると考えられる。機関暖気後であれば、排気特性の悪化を伴うことなく、従来の燃料噴射弁と同様に使用できる可能性があると考えられる。

現在著者らは、異なる出口直径のマイクロノズルを、機関の運転条件に応じて連続的に切り替える機構について検討を行っている。機関運転条件に応じて液滴粒径を変化することで、マイクロノズルアレイの利点を最大限に活かした利用が可能となると考えている。

4. 結 言

マイクロノズルアレイを用いた超音波燃料噴射弁の微粒化特性について実験的に検討を行った。ノズル出口直径、PZT への印加電圧および周波数を変化させ、液滴径、液滴速度、燃料流量、ホーン振動振幅におよぼす影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) ホーン振動振幅は、印加電圧、印加電圧周波数に依存する。共振周波数における最大振幅は $10\ \mu\text{m}$ 程度である。
- (2) ノズル出口直径 $3\ \mu\text{m}$ の場合、液滴の粒径分布の幅は小さく、測定位置によらず均一な粒径の噴霧が生成される。 SMD は約 $10\ \mu\text{m}$ である。
- (3) ノズル出口直径 $6\ \mu\text{m}$ の場合、液滴の粒径分布の幅はやや広がり、中心付近で粒径がやや増大する。 SMD は $11\ \mu\text{m} \sim 18\ \mu\text{m}$ である。
- (4) ノズル出口直径 $9\ \mu\text{m}$ の場合、液滴の粒径分布の幅は大きく広がり、中心付近で粒径が増大する。 SMD は $16\ \mu\text{m} \sim 28\ \mu\text{m}$ である。
- (5) 液滴の粒径は、ノズル出口直径の $2/3$ 乘におおむね比例する。燃料流量は、ノズル出口直径の 2 乘におおむね比例する。

謝 辞

本研究は、トヨタ自動車(株)と群馬大学との共同研究として実施された。マイクロノズルの製作には(株)オプトニクス精密 絹田 精鎮氏に協力を頂いた。実験の実施にあたり、群馬大学 中村 壽雄 技術専門職員、楊 宏宇 君の協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) Cheng, W. K. et al., An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanism in Spark-Ignition Engines, *SAE Paper 932708*, (1993).
- (2) Witze, P. O. and Green R. M., LIF Visualization of Liquid Fuel in the Cylinder of a Spark Ignition Engine, *Proc. 8th Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, (1996), pp. 13-3-1 - 13-3-8.
- (3) Witze P. O. and Green R. M., LIF and Flame Emission Imaging of Liquid Fuel Films and Pool Fires in an SI Engine during a Simulated Cold Start, *SAE Paper 970866*, (1997).
- (4) Iki, N. et al., Formation and Coalescence of Droplets with a Thin-Plate Nozzle, *Proc. 13th Symp. (ILASS-Japan) on Atomization*, (2004), pp. 201 - 204.
- (5) Shimakawa, S., *Ultrasonic Engineering*, (1975), Kogyo Chosakai Publishing, pp. 118 - 122.
- (6) Matsuo, T. et al., Gasoline Engine: Development of Spray Atomization of Fuel Injector, *J. Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 59, No. 2 (2005), pp. 39 - 43.
- (7) Kurabayashi, T., *Liquid Atomization Technology*, (1995), IPC Publishing, pp. 89.