



薄肉プレートノズルによる微粒化 (第2報, 多噴孔噴射弁)

Atomization by Thin Plate Nozzle (Part2 : Multi Hole Nozzle)

壹岐 典彦,
(Norihiro IKI)
産総研
(AIST)

江原 拓未,
(Takumi EBARA)
元産総研
(AIST)

清水 大輔
(Daisuke SHIMIZU)
元工学院大学大学院
(Kogakuin Univ.)

A thin plate nozzle is made by electroforming process for basic research of multi-hole nozzle. Its thickness is 0.02mm; hole diameter is 0.01mm or 0.02 mm. Fluorine coating is processed on both sides of plate. Ion-exchanged water is injected vertically downward into ambient air. Injection pressure P_i is below 1MPa, atomization phenomena were observed using a YAG laser sheet and a digital camera, and Sauter mean diameter SMD were measured by laser diffraction method. Velocities of droplets are measured by PIV method. At 6mm of Lx (distance from the nozzle hole exit), liquid jet is already disintegrated into droplets. 0.02mm-91 holes nozzle can inject 0.8g/s of water at $P_i=1.0$ MPa. SMD with multi-holes nozzle increases simply with Lx although SMD with single-hole nozzle varies complicatedly with Lx . Some droplets may coalesce because the relative velocity of droplets is small. SMD with multi-holes nozzle approximately agrees with SMD with single-hole nozzle at small Lx . Circumference air of droplets are accelerated by spray. Hence The relative velocities between the droplet and the circumference air with the multi-holes nozzle are smaller than those with the single-hole nozzle. Velocities V with multi-holes nozzle are larger than V with single-hole nozzle. V of droplets decrease with increase of Lx . $1/V$ with 91-holes nozzle increases linearly with Lx .

Keywords: Atomization, Plain-orifice Nozzle, Laser Diffraction Method, Pressure Atomization, Diameter, MEMS, Liquid Jet Breakup, PIV

1. はじめに

MEMS 技術の進展により、微細加工によるコストは削減されており、微細加工により多噴孔の噴射弁を作成すれば噴孔径により噴霧の粒径をほぼ決定し、多噴孔化により噴霧の分散や流量の特性を決めることにより、所定の特性の噴霧を設計できる可能性がある。内燃機関用の微細加工噴射弁としては、デンソーのシリコンプレートノズル⁽¹⁾⁽²⁾やウィスコンシン大学の LIGA プロセスノズル⁽³⁾の研究開発が行われた。更に、群馬大学でも超音波を利用したガソリン用の多噴孔噴射弁が研究されている⁽⁴⁾。ただし、どのような現象が起こるのかは未だ十分には解明されていない。そこで著者らはまず多噴孔型のプレートノズルをエレクトロフォーミングで作成することを想定して、薄肉のプレートノズルの微粒化状態を調べた⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。単噴孔噴射弁の噴霧の形成状態について既に 0.01~0.07mm の単噴孔噴射弁でイオン精製水の微粒化特性を調べてきた。その結果、噴射後すぐにほぼ均一な液滴列が形成され、噴孔から離れるとともにザウタ平均粒径 SMD が大きくなり液滴の速度が減速していくこと、噴孔付近で測定した SMD は噴孔径 D_n に対し、噴射圧 P_i が低い場合はほぼ直線的に増加することなどがわかった。本報では試作した多噴孔噴射弁の微粒化特性について報告する。

2. 実験装置

供試薄肉プレートノズルは、材質がニッケルで、エレクトロフォーミングによって厚さ $t=0.02$ mm のシート状に作成されており、表面にはフッ素コーティングが施されている。供試薄肉プレートノズルは、図 1 のように 2 パターン試作して試験を行った。まず微細噴孔が多噴孔化の効果を確認するために、0.01mm の噴孔 16 個を正方形に配置したパターンを試作した。次に燃料噴射弁として十分な流量が得られることを確認するために、噴孔数が多いパターンを試作した。2 μ m の焼結金属フィルターを介することで、目詰まりを防止してきたが、0.01mm 噴孔の場合には長時間実験を行った場合、目詰まりすることがあった。そこで、目詰まりを避けながらもなるべく細かな噴霧が得られるように、0.02mm の噴孔を選択し、内径 0.02mm 噴孔 91 個を正三角形に配置した多噴孔噴射弁を試作した。91 噴孔ノズルの場合、噴孔長さと同径の内径の比は 1 である。また、噴孔の断面積の合計は、0.19mm の噴孔と同じとなり、ソフィア・プレジジョン製 J-850 ミニジェットエンジンの燃料噴射弁とはほぼ同程度である。各噴孔は加工上の制約によりテーパがついており、噴孔径が小さい側が精度面となっている。テーパは設計図上では片側 4~5° の傾きである。プレートノズルは精度面を上流側にして、粘着テープでニッケルガasket 上に貼り付け、ニッケルガasket に 2 枚の間に挟んで、管継ぎ手をホルダーとして内部に固定して、噴射弁とした。

図 2 のように噴射圧 $P_i=0.1\sim 1.0$ MPa で、イオン精製水を

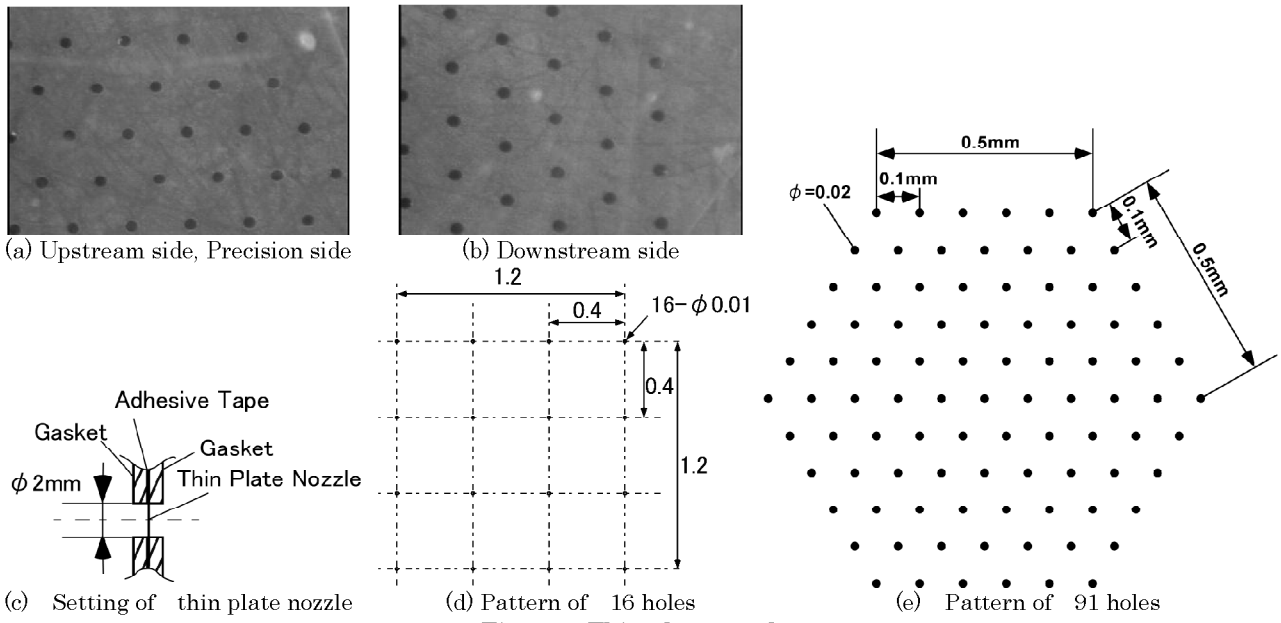


Fig. 1 Thin plate nozzle

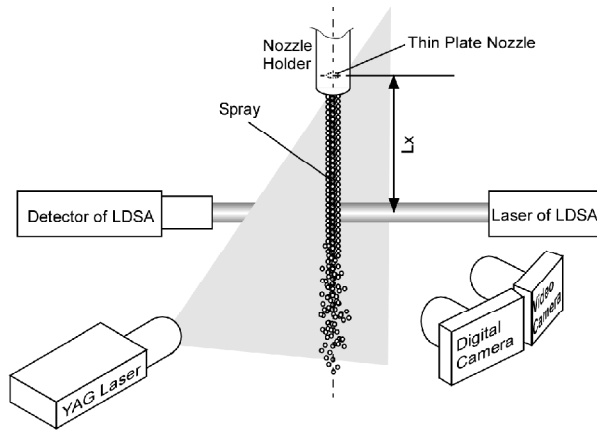


Fig. 2 Experimental apparatus

鉛直下方向に噴射した。微粒化状態は側方より YAG レーザーのシート光で図 2 のように照明し、デジタルカメラ Nikon D1X にて撮影し観察を行った。YAG レーザーはニューウェーブ Solo120 を用いた。噴霧液滴径は東日コンピューターアプリケーションズの LDSA1500A を用いて、レーザー回折法を用いて測定を行った。ヒストグラム・モードを用いてザウタ平均粒径を求めた。噴孔からの距離 $Lx=10\text{mm}\sim 200\text{mm}$ で測定を行った。

噴霧の移動速度はビデオカメラ (フォトロン FASTCAM-X1280PCI, 1280×1024 ピクセル, 8bit モノクロ) と YAG レーザーによる側方照明で PIV により測定した。発光タイミングはパルスディレイジェネレーター (BNC Model555-8c) を用いて調整し、フレームストロドル法で撮影した。PIV 処理には TSI 社製 Insight 3 を用いた。噴霧流の中心軸近辺を厚いレーザーシートで照明しており、中心軸付近の噴霧の数密度が高い範囲はカバーされている。1 フレーム目と 2 フレーム目での撮影画像のパターンのずれから、移動速度を求めるため、均一滴列状態の箇所では、誤対応を避けられず、測定が困難である。画像のずれについて、予め推定して、その近傍で 64×64 ピクセルの画像パターンについて、画像の相関を取って求めているので、推定値により測定結果が異なる。本測定が成り立つには、相関を調べる範囲では、個々の液滴の移動速度がほぼ等しいことが前提であり、

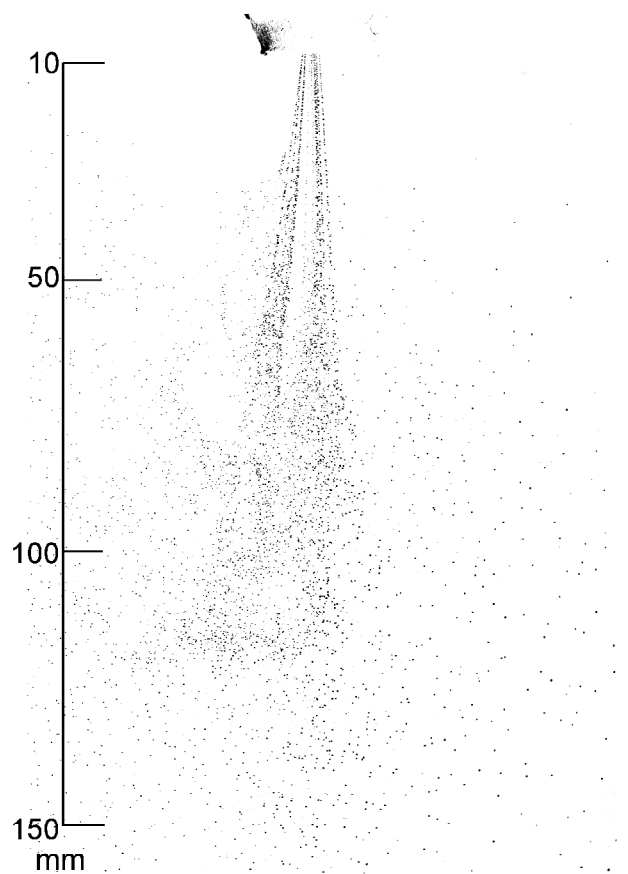


Fig. 3 Spray of 16 holes nozzle, $Dn=0.01\text{mm}$, $Pi=0.3\text{MPa}$

液滴の移動速度の変化も急激でないことが必要である。個々の液滴はほぼ球形なので周囲の液滴との相互位置関係のパターンで液滴を識別している。したがって、 Lx に対して、速度の変化が大きき場合には、画像のずれの推定値を、上流から下流まで数回変更した測定を行い、移動速度が Lx に対して連続的に変化するようにした。測定は 512 組分の画像を処理し

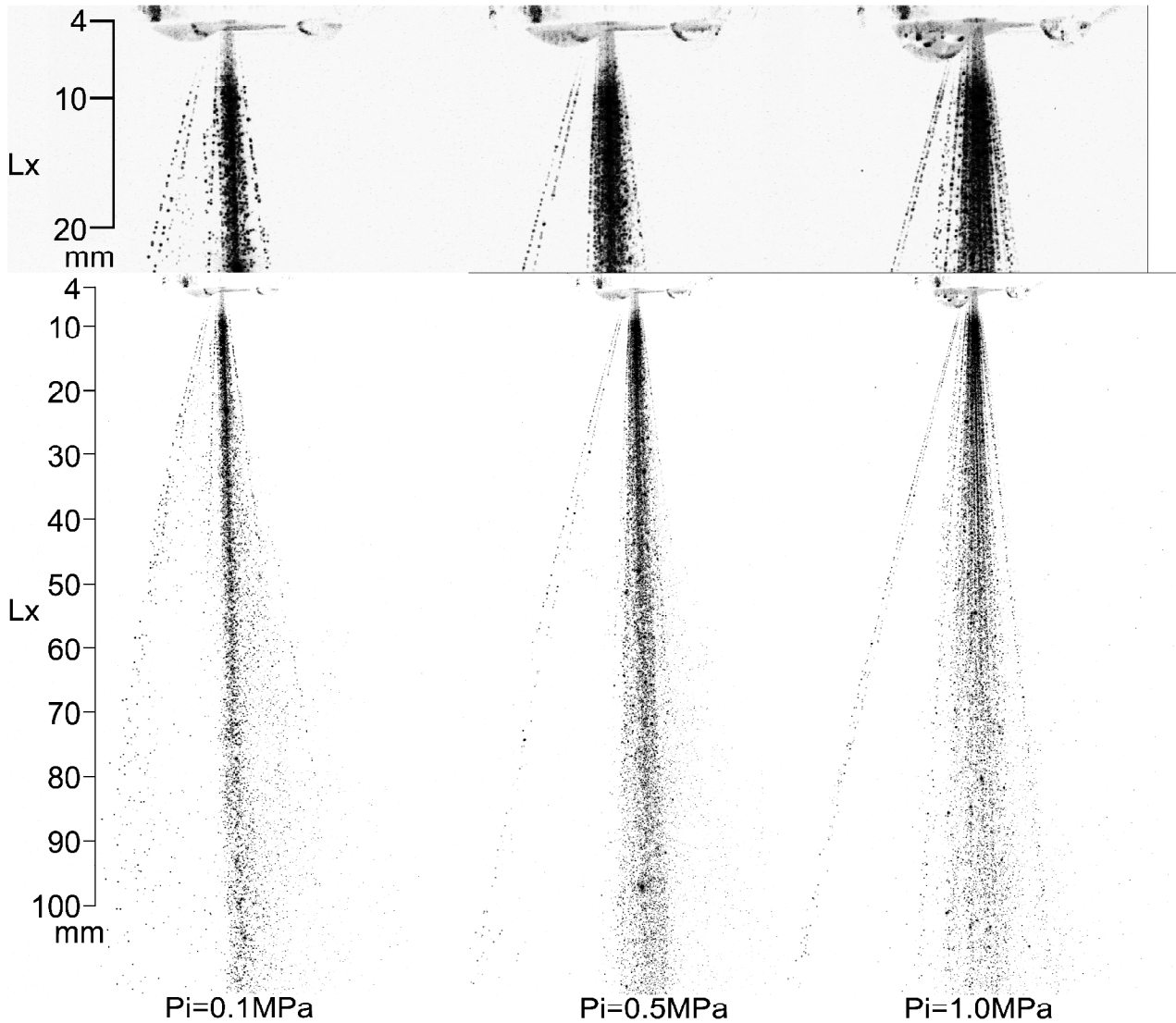


Fig. 4 Spray of 91 holes nozzle, $D_n=0.02\text{mm}$

て得られた速度分布について平均値で表した。

3. 結果と考察

図3に0.01mm・16噴孔噴射弁の微粒化状態を示す。個々の液滴の像を明示するため、明暗を反転して表示した。各噴孔から直線上に液滴列が噴出しており、多噴孔噴射弁でも前報⁽⁸⁾の単噴孔噴射弁と類似の液滴列状の噴霧が得られることがわかる。噴孔からの距離 L_x が大きくなると、液滴の間隔が広がってくる。噴霧全体としては広がりはあるが、噴射弁が高い噴射圧のため、ややドーム型に組成変形したことから、噴射弁が変形に応じて広がって噴霧されたものと考えられる。このことから平板型のノズルでもドーム型に塑性加工することで広がりがある噴霧を得られることがわかる。

図4は0.02mm・91噴孔噴射弁の微粒化の状態であるが、一部の噴孔からは斜めに噴出するが、ほとんどの噴孔からは下方向に噴出している。 $L_x=6\text{mm}$ 付近で液滴に微粒化している。 $L_x<6\text{mm}$ では液滴の間隔が密なのか、まだ分裂していないのか区別できない。 L_x が大きくなると、液滴の間隔が広がってくる。単噴孔噴射弁や16噴孔噴射弁も L_x とともに液滴の間隔が広がっており、おおよそ類似の変化を示している。噴霧が濃く見える部分は、噴射圧 P_i が高くなると幅が広がってくる。ノズルホルダーの出口に水滴が付着しており、ホルダ

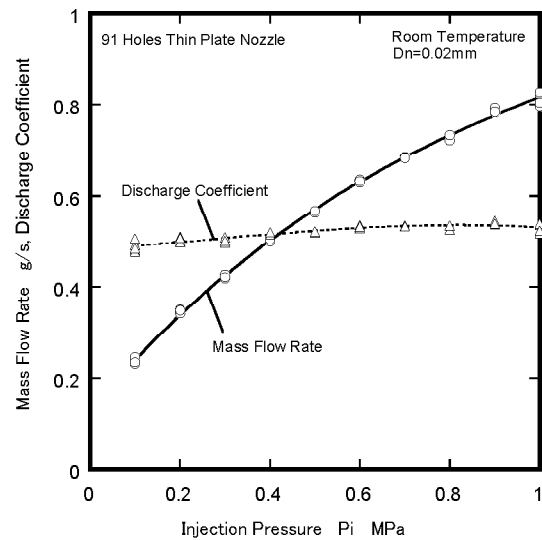


Fig. 5 Flow rate of 91 holes nozzle, $D_n=0.02\text{mm}$

一形状の改良が必要である。

図5は0.02mm・91噴孔噴射弁の流量を示す。1.0MPaで

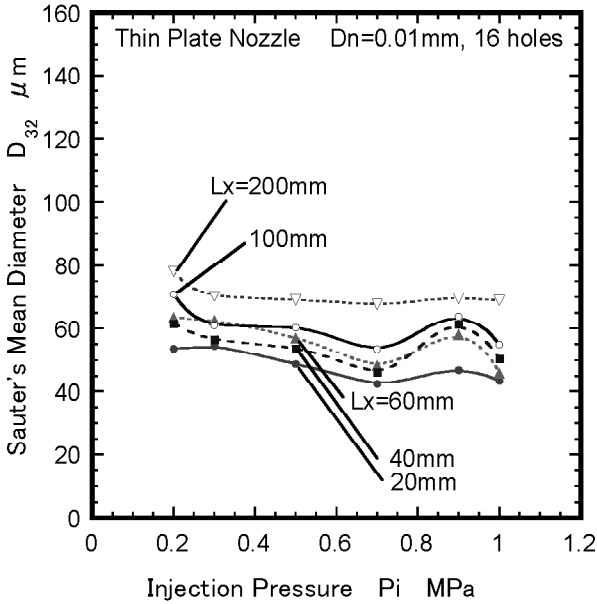


Fig. 6 P_i vs Sauter's mean diameter

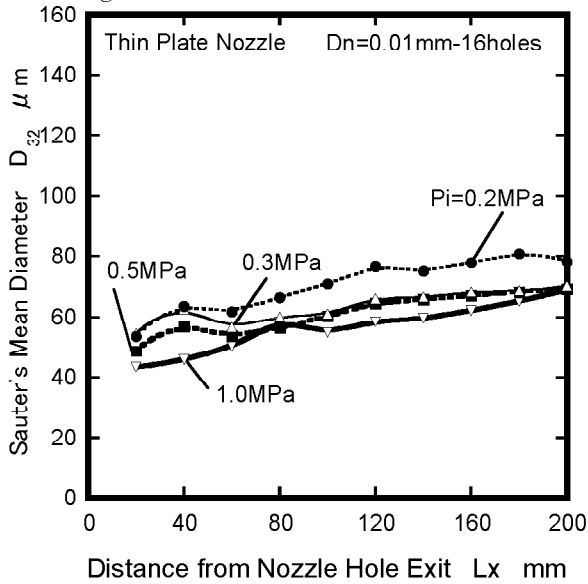
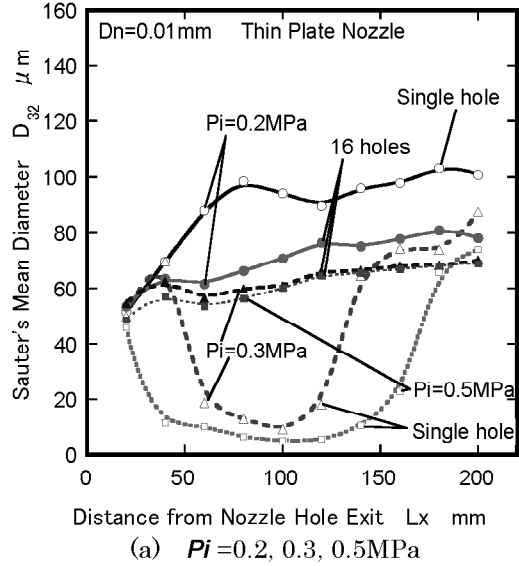


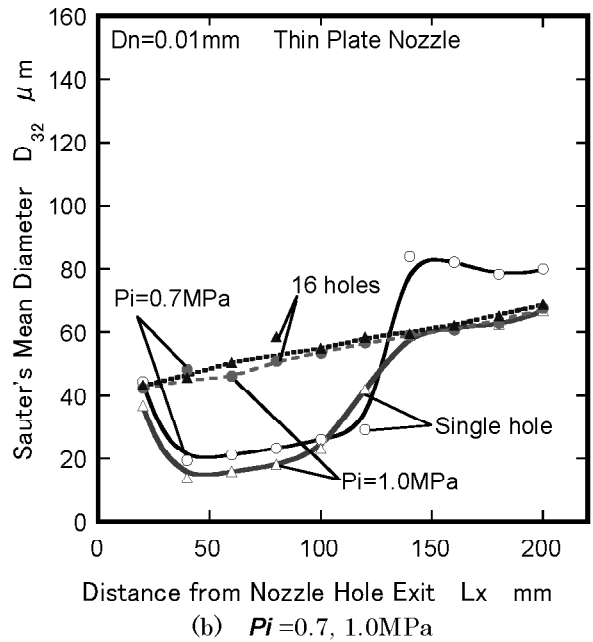
Fig. 7 L_x vs Sauter's mean diameter

0.8g/s となり、噴孔の数を増やすことで、燃料噴射弁として十分な流量が得られることが示された。またレーザー顕微鏡の計測機能を用いて噴孔の径を求めたところ、噴孔の平均径は設計時の 20 μ m ではなく、21.9 μ m であったので、流量係数は、0.5 前後となり、断面積比の小さいオリフィスや入口オリフィスなどの 0.6 よりやや小さめの値となった。数十ミクロンの噴射弁では独特の現象がある可能性もあるが、一部の噴孔の目詰まりや液膜付着による流量低下の可能性も否定できない。

0.01mm・16噴孔噴射弁の場合ザウタ平均粒径SMDは図6のように噴射圧 P_i が高いほど小さくなる傾向があり、また噴射弁からの距離 L_x が増大すると、図7のように単純に増大する傾向がある。一方、単噴孔噴射弁の場合、前報⁽⁸⁾のように微細な噴霧の滞留によりSMDが著しく減少する領域があるなど複雑に変化している。そこで単噴孔噴射弁との比較を図8に示す。 $L_x=20$ mmの噴孔近辺では単噴孔噴射弁も多噴孔噴射弁もSMDはほぼ等しいが、噴孔から離れると単噴孔噴射弁と多噴孔噴射弁の噴霧のSMDに大きな差が現れる。 $P_i=0.2$ MPaと噴



(a) $P_i=0.2, 0.3, 0.5$ MPa



(b) $P_i=0.7, 1.0$ MPa

Fig. 8 Comparison of the 16-holes nozzle with the single-hole nozzle

射圧が低い場合には単噴孔噴射弁の噴霧のSMDが L_x とともに急速増大するのに対し、多噴孔噴射弁の方は徐々にしか増大しない。噴射圧 P_i が0.3MPa以上では単噴孔噴射弁の噴霧ではSMDが微細な液滴の滞留により著しく減少する領域があるのに対し、多噴孔噴射弁では L_x に対して単調に徐々に増加している。ただし、微細な液滴の滞留がないところでは単噴孔噴射弁の方のSMDが多噴孔噴射弁に対して大きいか、ほぼ等しい。前報において単噴孔噴射弁のSMDが L_x とともに増大するのは液滴同士の合体により引き起こされていると考えられるが、多噴孔噴射弁でも同様の現象が起きていると考えられる。この場合、単噴孔と多噴孔との相違は噴孔近辺では見られず、下流で顕著であるので、液滴周囲の状態の相違が大きく影響していると考えられ、多噴孔噴射弁では液滴により周囲の空気が加速され、単噴孔噴射弁に比べて液滴と周囲空気との相対速度が小さくなっていることが推定される。このことにより、多噴孔噴射弁では単噴孔噴射弁に比べて液滴の減速が少なく、16噴孔噴射弁のように噴孔が密ではない場合には液滴の合体が起こりにくいものと考えられる。また、前報におい

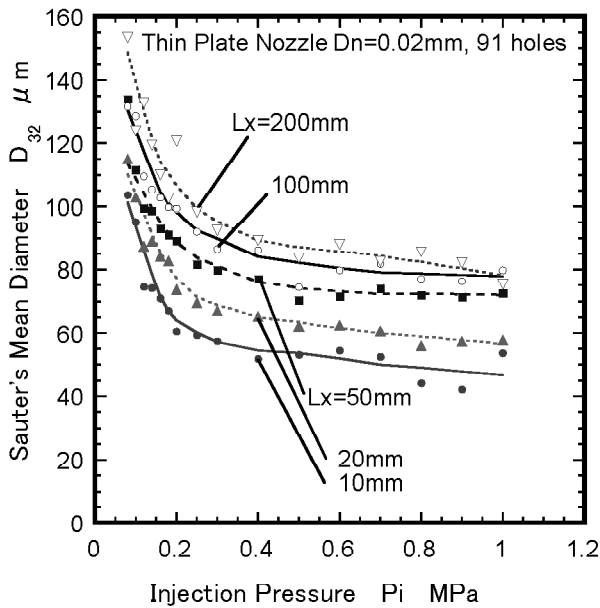


Fig. 9 P_i vs Sauter's mean diameter

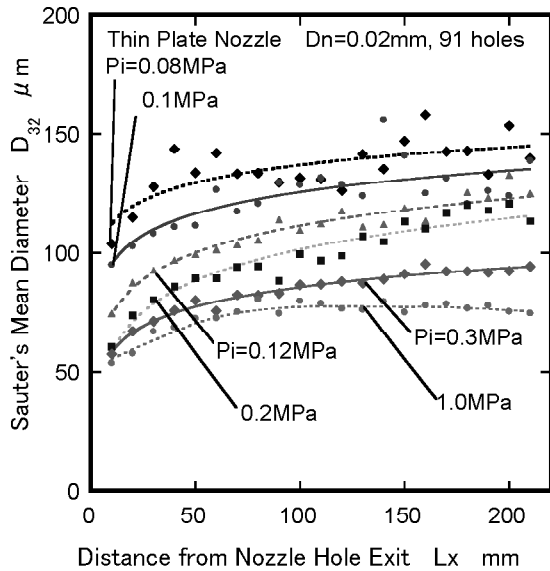


Fig. 10 L_x vs Sauter's mean diameter

て0.04 mm単噴孔噴射弁では $L_x < 120$ mmにおいてSMDに微細な液滴の滞留の影響が無く、 L_x とともにSMDが増大することを示したが、 $L_x = 20$ mmにおいてSMDは70~90 μm であり、0.01mm・16噴孔噴射弁のSMDの倍近い。このことから噴孔の総面積を維持したままの多噴孔化によりSMDが減少できることを確認できた。

一方、0.02mm91 噴孔噴射弁においても、ザウタ平均粒径SMD は図9のように噴射圧 P_i が高いほど小さくなる傾向を示す。 $P_i < 0.2$ MPaでは P_i の低下とともに急にSMDが大きくなる。逆に、 $P_i > 0.4$ MPaでは P_i の上昇に対し、SMDの減少はわずかであり、安定している。また、SMDは、噴射弁噴孔からの距離 L_x の増大に伴い、図10のように $L_x < 40$ mmでは急速にその後は徐々に大きくなっていく。

91 噴孔噴射弁と単噴孔噴射弁のザウタ平均粒径を比較して図11に示す。(a)のように噴射圧 P_i が低い場合には91 噴孔噴射弁の方が L_x に対するSMDの変化は小さく、 L_x が小さい場合に単噴孔噴射弁よりSMDが小さい。 P_i が高くなると、(b)のように L_x が小さいノズル近辺では91 噴孔噴射弁と単噴孔

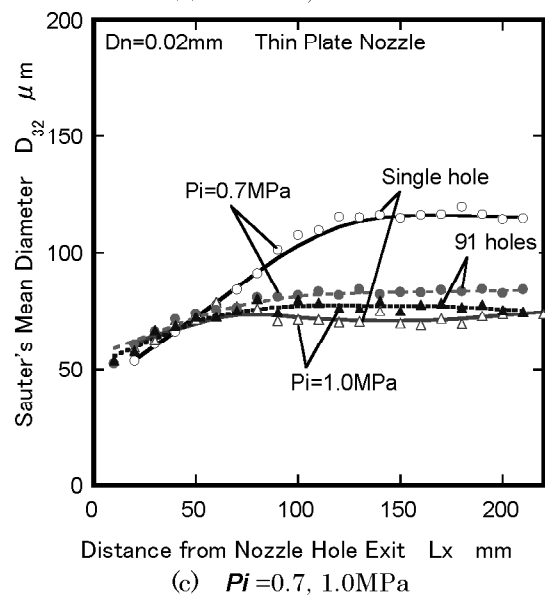
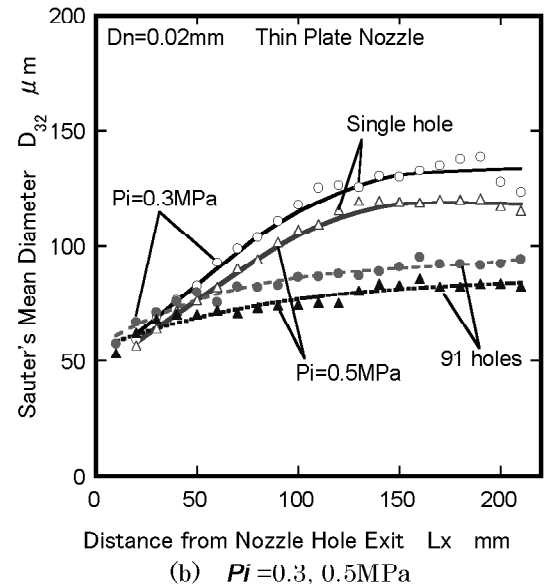
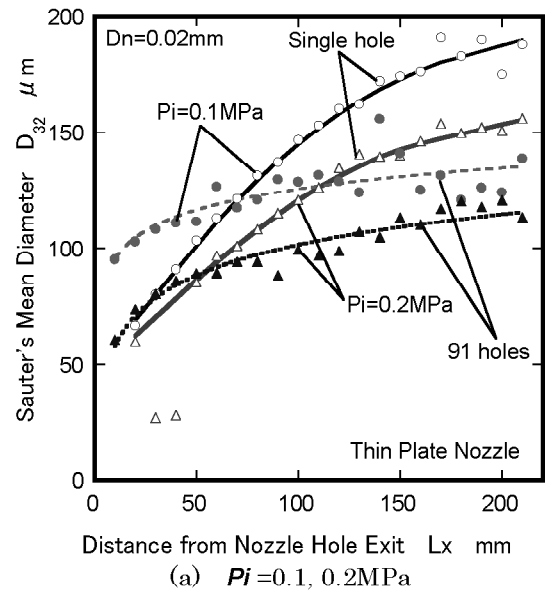


Fig. 11 Comparison of the 91-holes nozzle with the single-hole nozzle

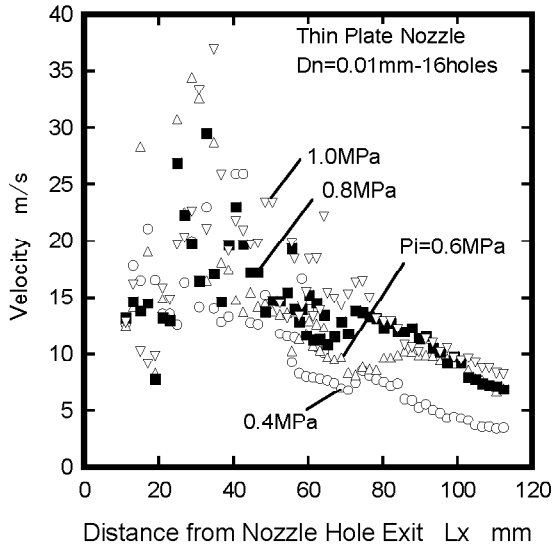


Fig. 12 Velocity of spray of 16 holes nozzle, $Dn=0.01mm$

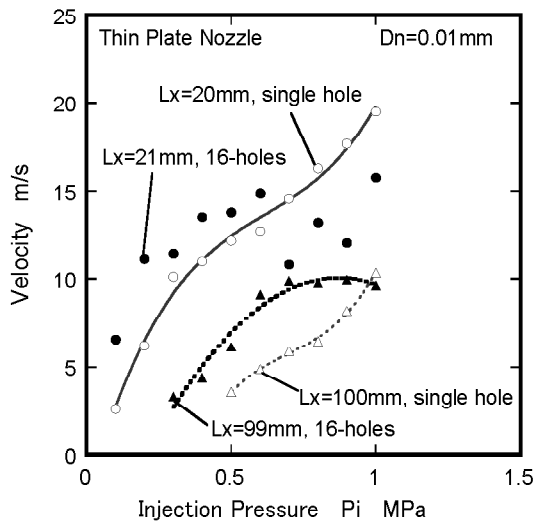


Fig. 13 Comparison of velocities of sprays of single hole nozzle and 16 holes nozzle, $Dn=0.01mm$

噴射弁の SMD が同程度となる。 Lx が大きくなると SMD が増大していくが、単噴孔噴射弁の方が91噴孔噴射弁よりも SMD が大きい。 Pi が 1.0MPa と高くなると(c)に示されるように単噴孔噴射弁の SMD が小さくなる。以上の比較から、単噴孔噴射弁の SMD から多噴孔噴射弁の SMD を単純には推定できないことが明らかとなった。ただし、 $Pi \geq 0.3MPa$ では $Lx < 40mm$ で91噴孔噴射弁の SMD が単噴孔噴射弁と同程度なので、生成する液滴列の粒径は同程度でその後の周囲の空気の流動により差が生じているものと考えられる。また Pi が 0.1MPa と低い場合には91噴孔噴射弁の SMD が大きくなっているため、噴射弁出口に液膜が付着している可能性がある。

図 12 に PIV により測定した 16 噴孔噴射弁の噴霧の移動速度を示す。噴射弁噴孔からの距離 $Lx < 70mm$ において、速度のばらつきが顕著であり、誤対応が起こっているものと考えられる。これは噴霧が密であり、ほぼ均一に並んでいるため、個々の液滴の識別が困難であることが原因だと考えられる。 Lx の増大に伴い、速度が減衰する傾向がある。

図 13 に単噴孔噴射弁と 16 噴孔噴射弁の噴霧の速度の比較を示す。噴射圧 $Pi \leq 0.6MPa$ では $Lx=20mm$ の噴孔付近では単噴孔噴射弁の方が液滴の速度が小さい。 $Lx=100mm$ の下流

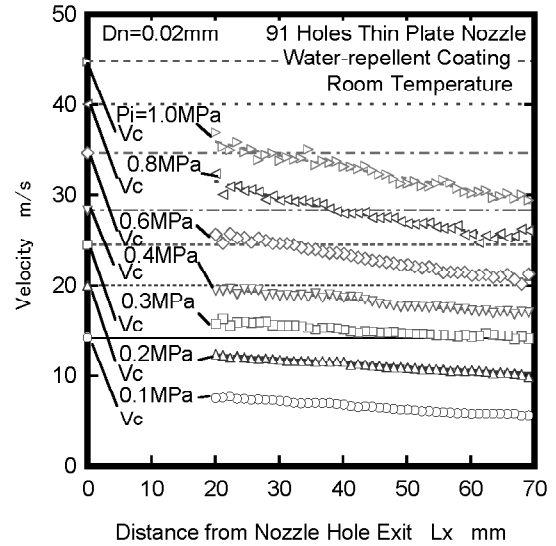


Fig. 14 Velocity of spray of 91 holes nozzle, $Dn=0.02mm$

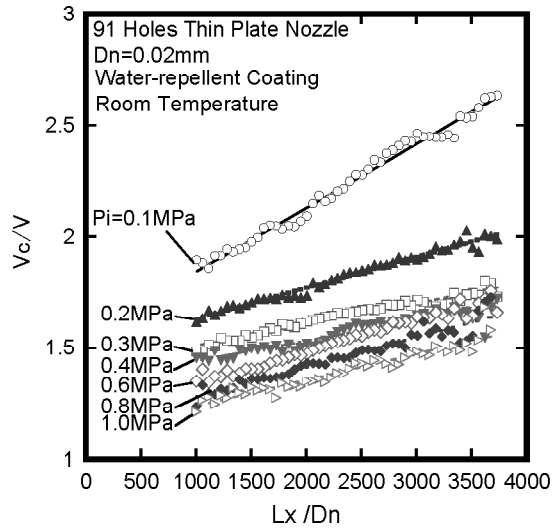


Fig. 15 Velocity of spray of 91 holes nozzle, $Dn=0.02mm$

付近でも単噴孔噴射弁の方が液滴の速度が小さく、速度の減衰が大きい。

図 14 に 91 噴孔噴射弁の噴霧の速度を示す。噴射弁噴孔からの距離 $Lx < 20mm$ において、液滴が密に並んでいるため、今回の撮影条件では、誤対応を避けられなかった。 $Lx > 20mm$ では、 Lx とともに、徐々に移動速度が減少しており、噴射圧が高い条件、つまり、速度が速い条件ほど、速度の低下が大きい。縮流時の速度補正を行って整理すると、補正後の噴出速度 Vc に比べて、噴射圧が低いほど測定された速度が低い。一定速度 U_0 で吹き出す直径 Dn の軸対称噴流について、噴流内の速度の最大値 u_m は噴射弁噴孔からの距離 Lx に対して、 $U_0 / u_m \propto Lx / Dn$ の関係があることが知られている⁽⁹⁾。そこで、液滴の移動速度 V について補正後の噴出速度 Vc を U_0 の代わりに用いて整理して図 15 に示す。 V の逆数が Lx に対して直線的に変化するよう V が減速しており、減速の様子は気体の噴流など似ているが、 $U_0 / u_m = 0$ となる噴流の仮想原点が $Lx / Dn = 0$ 近傍に見出せず、独自のモデルが必要であることがわかった。

4. まとめ

エレクトロフォーミングにより作成した内径 0.01mm-16 噴孔および 0.02mm-91 噴孔の多噴孔プレートノズルを用いて、イオン精製水の微粒化状態を調べ単噴孔噴射弁の結果と比較した。その結果、微細な噴孔を用いた多噴孔化によりザウタ平均粒径を小さくしながら大きな単噴孔噴射弁と同等の流量を得られることが確認された。また次のことがわかった。

- (1) 噴孔出口からの距離 Lx が 6mm 付近で既に液滴に微粒化している。
- (2) 多噴孔噴射弁のザウタ平均粒径 SMD はノズル近くでは単噴孔噴射弁の SMD とほぼ等しい。
- (3) 単噴孔噴射弁の SMD が Lx に対して複雑に変化するのに対して、多噴孔噴射弁の SMD は増大とともにザウタ平均粒径が単調に増大する。
- (4) 16 噴孔噴射弁の液滴の速度 V は噴射圧 $Pi \leq 0.6MPa$ では単噴孔噴射弁より大きく、 Lx に対する減速も小さい。
- (5) 91 噴孔噴射弁について V の逆数が Lx に対して直線的に変化するように V は低下する。

謝 辞

本研究における噴孔の形状計測は AIST ナノプロセッシング施設 (Nano-Processing Facility: NPF) の設備を利用して行われた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 谷泰臣ほか：日本機械学会論文集(B)編, 69-681 (2003), 1290-1295.
- (2) 谷泰臣ほか：日本機械学会論文集(B)編, 69-682 (2003), 1521-1526 .
- (3) P. Ravi, J. Blanchard and M. Corradini, Diesel Spray Behavior with 3-Dimensional Micro-Nozzles, *Proc. of ICLASS 2003*, 1433(2004), 1-8.
- (4) 荒木幹也ほか：マイクロノズルアレイを用いた超音波微粒化, 日本機械学会論文集(B)編, 73-726 (2007), 622-630 .
- (5) N. Iki, T. Ebara and D. Shimizu, Atomization Using Thin Plate Nozzle, *Proc. of ILASS - Asia 2003*, (2003), 83-90.
- (6) 壹岐典彦, 江原拓未, 清水大輔, 薄肉プレートノズルによる液滴の形成と合体, 第13回微粒化シンポジウム講演論文集 (2004), 201-204.
- (7) N. Iki, T. Ebara and D. Shimizu, Droplets from a Thin Plate Nozzle Fabricated by Electroforming, *Proc. of ILASS - Asia 2005*, (2005), 348-353.
- (8) 壹岐典彦, 江原拓未, 清水大輔, 薄肉プレートノズルによる微粒化 (第1報), 微粒化 (投稿中)
- (9) N ラジャナトラム原著：噴流, 森北出版 (1981)



壹岐典彦
 (独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 主任研究員
 〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1,
 Tel. 029-861-7255,
 Fax. 029-861-7275
 略歴：1990年東北大学大学院工学研究科博士課程満期退学, 同年東北大学助手, 1993年学位取得, 1994年工業技術院機械技術研究所 (現(独)産業技術総合研究所) 入所, 主としてガスタービン関連の研究に従事



江原拓未
 丸和電機(株)技術部燃焼システム課
 〒277-0814 千葉県柏市正連寺253
 Tel. 0471-32-0013(代)
 Fax. 0471-32-5703
 略歴：1999年群馬大学大学院工学研究科博士課程修了, 同年工業技術院機械技術研究所 (現(独)産業技術総合研究所) にてポスドク. 2005年より現職. 主として燃焼器の研究開発に従事



清水大輔
 (株)ケーヒン 技術開発部第三研究課
 〒329-1233 栃木県塩谷郡高根沢町宝積寺2021-8
 Tel. 028-680-1544
 Fax. 028-680-1411
 略歴：2005年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年より現職. 主として各種噴射弁の研究開発に従事