

研究論文

## 薄肉プレートノズルによる微粒化 (第1報, 単噴孔噴射弁)

### Atomization by Thin Plate Nozzle (Part1 : Single 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. Its thickness is 0.02mm; hole diameter is from 0.01mm to 0.07 mm. Fluorine coating is processed on both sides of plate. Injection pressure is below 2MPa, atomization phenomena were observed using a YAG laser sheet and a digital camera, and Sauter mean diameter **SMD** were measured by laser diffraction method. At 10mm of **Lx** (distance from the nozzle hole exit), liquid jet is already disintegrated into droplets. **SMD** decreases remarkably with increase of injection pressure **Pi** below 0.2MPa. **SMD** increases gradually with increase of **Lx**. However, **SMD** decreases suddenly due to fine droplets suspended circumference air flow when the injection pressure is high. Interval of droplets array increases with **Lx**. The sizes of droplets are not constant. Therefore, it seems reasonable to suppose that some droplets combine into one because the relative velocity of droplets is small. **SMD** near nozzle hole exit increase almost linearly with the diameter of the nozzle hole **Dn** at low **Pi**. **SMD** near nozzle the hole exit increase in kinked line with **Dn** at high **Pi**. Velocities of droplets are decrease with **Lx**.

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

## 1. はじめに

噴霧は燃焼だけでなく、加湿やミスト冷却など様々な用途で用いられており、噴霧粒径、噴霧の数密度、噴霧角など求められる特性は様々である。一般に圧力噴射弁は液体の加圧のみで使用でき、空気源などは不要であり、コスト的に有利であるため、実用ではよく用いられているが、噴射圧に対して流量と噴霧粒径が大きく変化し、噴霧特性の変化が用途と必ずしも合致するとはいえない。特に流量が少ない場合には噴射圧が低下して噴霧粒径が増大し、粗滴が発生しやすくなるが、噴霧燃焼を想定すれば流量が少なくとも、噴霧粒径は小さいことが望ましい。噴孔径を小さくすると、流量に対して高い噴射圧が必要となり、粗滴が発生しにくく噴霧液滴の径も小さくなると予想される。このように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。ただし、微細な噴孔を用いれば小流量でも微細な噴霧を得られる可能性があるが、燃料流量の大きな条件に対応させるには噴孔を多数作成しなければならないため、切削加工では作成が困難になる。一方、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、多噴孔噴射弁の試作が容易になるものと考えられる。このため、大量生産が見込めれば、従来の機械加工ではコストと精度の面で採用困難であった形状の噴射弁を低コストで提供できる可能性がある。既にインクジェットプリンターヘッドやネブライザーのノズルにおいて、エレクトロフォーミングを用いて製作された数

～数十ミクロンの噴孔の微細加工噴射弁が使用されている。また、内燃機関用としては、デンソーのシリコンプレートノズル<sup>(1)(2)</sup>やウィスコンシン大学のLIGAプロセスノズル<sup>(3)</sup>の研究開発が行われた。更に、群馬大学でもガソリン用の多噴孔噴射弁が研究されている<sup>(4)</sup>。ただし、ガスタービンのような連続燃焼を前提とした噴射弁の設計を考えた場合、微細な噴孔を用いた場合の微粒化特性のような基盤データすら未だ十分ではない。また、ガソリンエンジンではプレス加工による多噴孔噴射弁も実用化されており、小噴孔のものも可能性がある。MEMS技術やプレス加工において、平板状の噴射弁が基本的な形状となる。そこで、基礎的な二次元的形状を持つ薄肉プレートノズルを試作し、その噴射特性を調べた<sup>(5)</sup>～<sup>(8)</sup>。本報ではエレクトロフォーミングによって試作した単噴孔噴射弁の微粒化状態について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試作噴射弁

供試薄肉プレートノズルは、材質がニッケルで、(株)オプトニクス精密によりエレクトロフォーミングによって厚さ  $t = 0.02\text{mm}$  のシート状に作成した。図1のように表面にはフッ素コーティングが施されている。各噴孔はテーパがついており、精度面の噴孔径が小さくなっている。テーパは設計図上で片側  $4\sim 5^\circ$  の傾きがついている。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スケット上に貼り付け、ニッケルガスケット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。

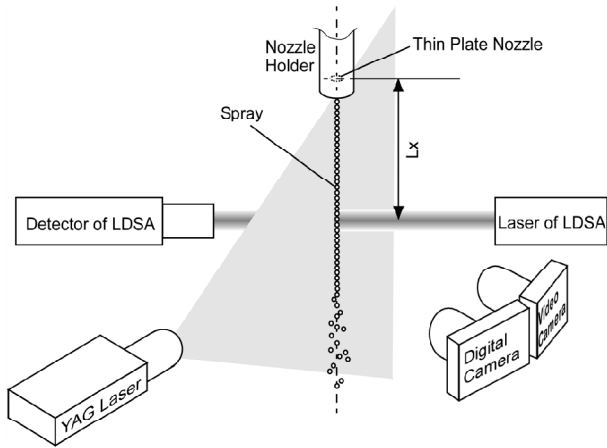
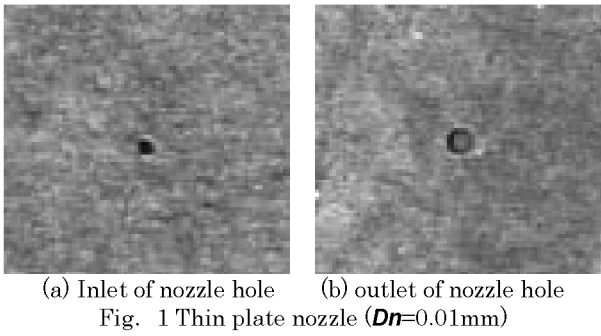


Fig. 2 Experimental apparatus

## 2.2 計測方法

噴射圧  $P_i$  が  $0.08\sim 2.0\text{MPa}$  の条件で、イオン精製水を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 にて撮影した。図3のような噴霧全体を撮影するのに 50mm 標準レンズ、図4のような拡大像を撮影するのに 85mm マクロレンズを使用した。YAG レーザーはニューウェーブ Solo120 (波長 532nm, 出力 120mJ) を用いた。西華産業製のシート光用レンズによりシート光とした。シート光の厚さ

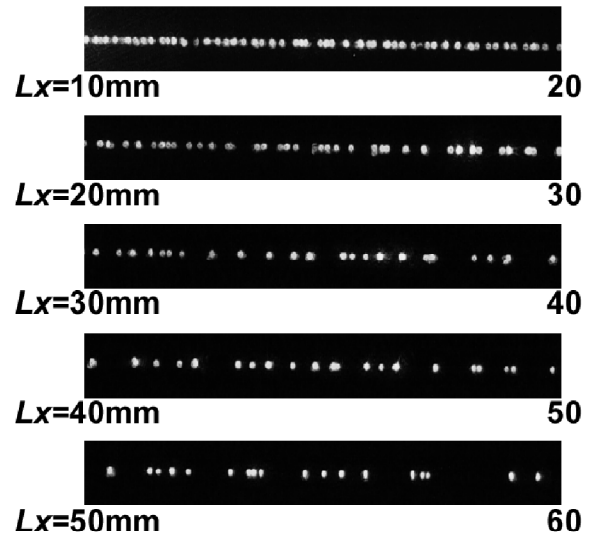


Fig. 4 Droplets array ( $D_n=0.04\text{mm}$ ,  $P_i=0.4\text{MPa}$ )

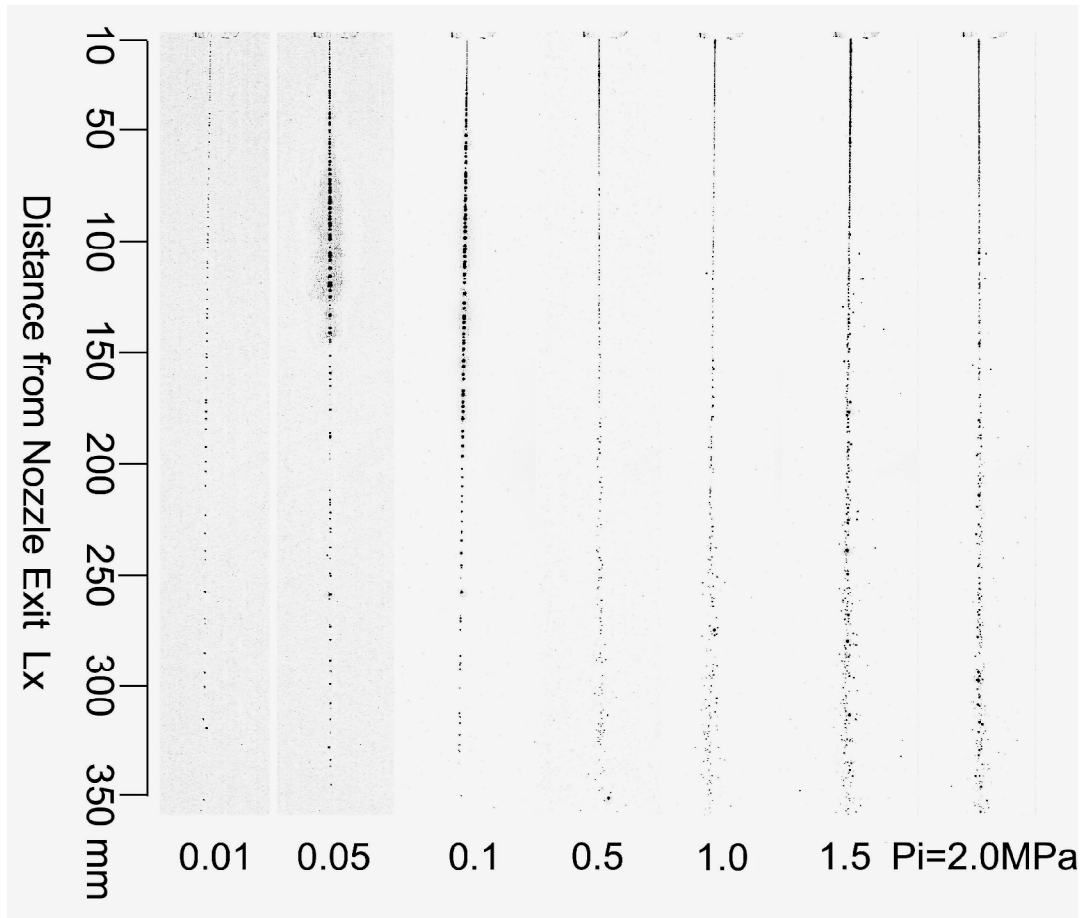


Fig. 3 Spray with thin plate nozzle ( $D_n=0.04\text{mm}$ )

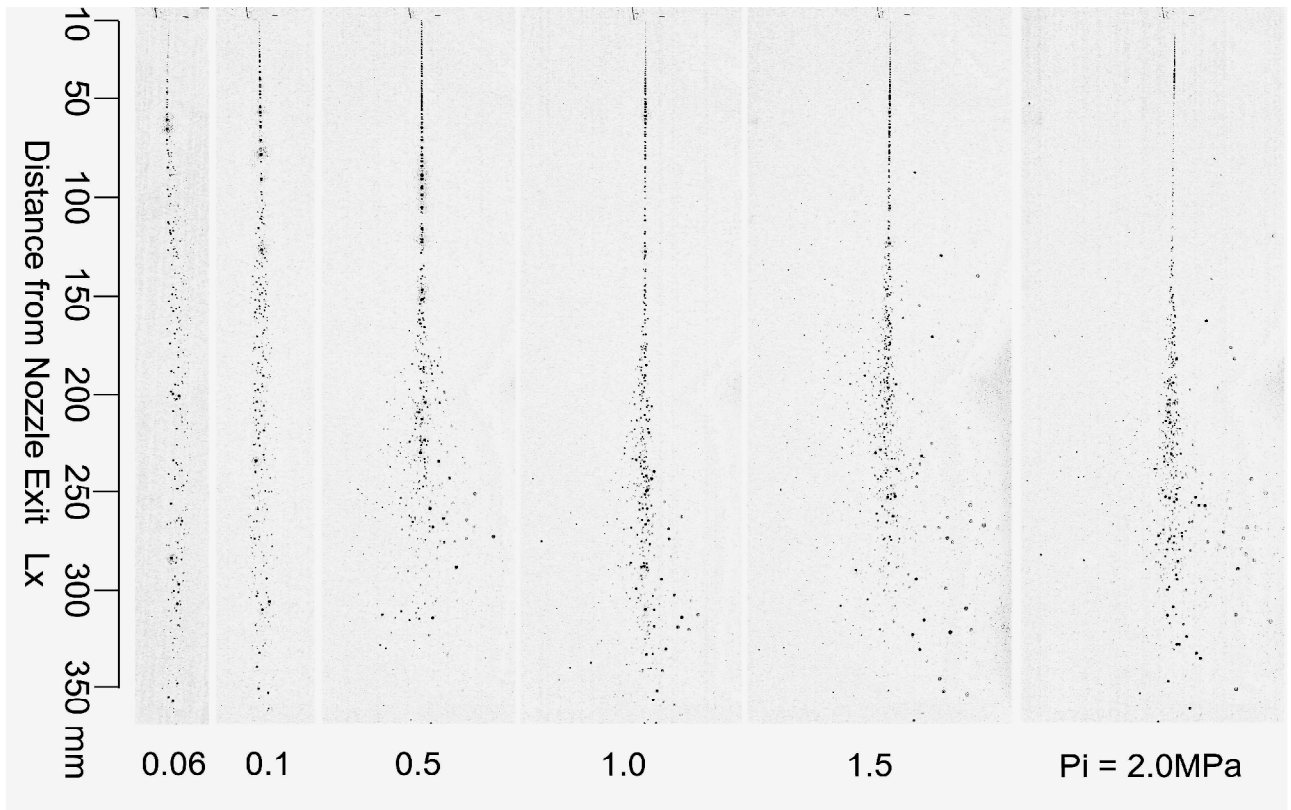


Fig. 5 Spray with thin plate nozzle ( $D_n=0.01\text{mm}$ )

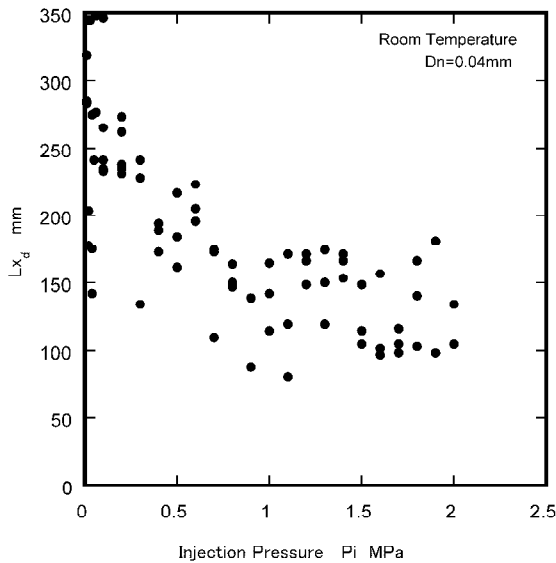


Fig.6 Position of wobbling droplet ( $D_n=0.04\text{mm}$ )

は4~10mmである。カメラのシャッタースピードを1~2秒としてシャッター開放中にパルスディレイジェネレーター (BNC Model555-8c) によりレーザーの発光タイミングの同期を取って撮影した。

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LDSA1300およびLDSA1500Aを用いて、レーザー回折法により測定を行った。ヒストグラム・モードを用いてガウタ平均粒径を求めた。噴孔からの距離  $L_x=10\text{mm}\sim 210\text{mm}$  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, 1280x1024ピクセル, 8bitモノクロ) と YAG レーザーによる側方照明で撮影した画像を用いて、

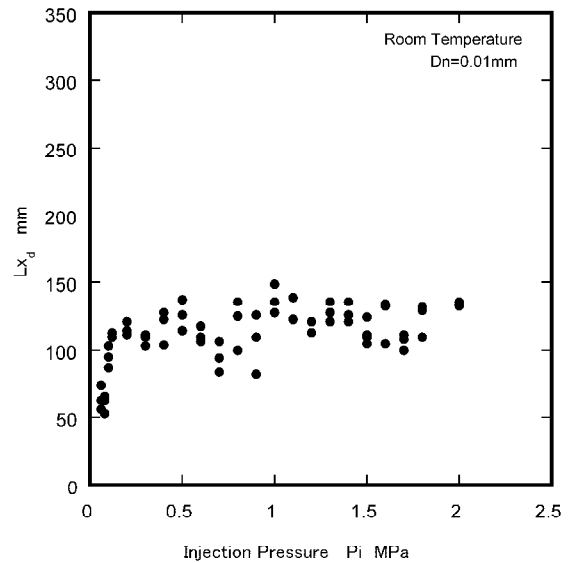


Fig.7 Position of wobbling droplet ( $D_n=0.01\text{mm}$ )

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、フレームストラドル法で撮影した。PIV処理には TSI 社製 Insight 3 を用いた。約  $0.05\text{ mm/pixel}$  で  $50\sim 200\mu\text{sec}$  の時間間隔で二重露光撮影した 512 組の画像に対し測定を行い、その平均値を求めた。従って、個々の液滴の速度ではなく、液滴列の画像としての平均速度を求めたことになる。

### 3. 結果と考察

本噴射弁での微粒化状態をパルスレーザーシートにより撮

影し、白黒反転したネガ画像を図3に示す。噴孔径  $D_n$  が 0.04mm の場合は図3のように噴射圧  $P_i=0.01\text{MPa}$  のときは噴孔から 10mm ほど下流では既に液滴列に微粒化していることがわかる。 $P_i \leq 0.1\text{MPa}$  では各液滴はきれいに一列に並んでおり、噴孔からの距離  $L_x$  が增大するとともに、液滴の間隔が不均一になるとともに間隔が広がっている。更に拡大して撮影したポジ画像では、図4のように液滴径は一定ではなく、一部の液滴は合体して液滴径も増加しているように見える。さらに  $P_i \geq 0.5\text{MPa}$  では図3では下方に行くに従って軸上から外れていく液滴が見られるようになる。

噴孔径  $D_n$  が 0.01mm の場合の微粒化状態は図5のように噴射後すぐに液滴列になっており  $D_n$  が 0.04mm と同様であるが、噴射圧  $P_i$  が高い条件で液滴が周囲に広がっている。そこで、液滴列の中心軸から液滴がずれて観察される位置を調べた。その結果を図6、7に示す。 $L_{x_d}$  はパルスレーザーシート光による撮影画像で噴霧の中心軸上から 1mm 外れる液滴のうち最も噴孔に近いものの位置を示している。 $D_n=0.04\text{mm}$  の場合には、 $P_i$  が低い場合に噴孔から遠くまで液滴が軸上を外れずに移動しているが、 $P_i$  が高くなると軸上から外れる液滴が上流でも見られるようになってくる。一方、 $D_n$  が 0.01mm と小さい場合には、 $P_i$  が低い場合には噴孔近くで軸上から外れる液滴が観察されるが、 $P_i$  が高くなると軸上から外れる液滴は噴孔付近にはなくなり、 $P_i$  の上昇に対しては  $L_{x_d}$  ほぼ一定の値となる。

図8は噴孔径  $D_n$  が 0.04mm の場合の噴射圧  $P_i$  に対するザウタ平均粒径  $SMD$  の変化を示す。 $P_i \leq 0.2\text{MPa}$  の場合は  $P_i$  の上昇に対して著しく  $SMD$  が減少している。 $L_x \leq 100\text{mm}$  では  $P_i$  が 0.2 から 2MPa まで  $P_i$  が上昇するのに対して  $SMD$  は徐々に減少する傾向を示す。 $L_x=80\text{mm}$  では約  $140\mu\text{m}$  から約  $110\mu\text{m}$  へ徐々に減少する。ところが、 $L_x \geq 120\text{mm}$  では、 $SMD$  が  $100\mu\text{m}$  以下になる条件があり、特に  $L_x=160\text{mm}$  では  $P_i$  が高い条件では  $30\mu\text{m}$  以下となっている。そこで、 $SMD$  の変化を噴射弁からの距離  $L_x$  に対して整理して図9に示す。 $SMD$  は  $L_x$  の増大とともに徐々に増加していく。しかし、 $P_i$  が高い場合には  $L_x \geq 120\text{mm}$  で  $SMD$  が突然減少する。例えば  $P_i=2.0\text{MPa}$  では  $L_x=120\text{mm}$  で  $SMD$  は  $50\mu\text{m}$  を下回る。噴孔径  $D_n$  が 0.01mm の場合には図10のように噴射弁からの距離  $L_x$  に対する  $SMD$  の変化は複雑になる。 $SMD$  は  $L_x$  の増大とともに徐々に増加していく傾向があるものの、 $P_i$  が高い場合には  $L_x=40\sim 60\text{mm}$  で  $SMD$  が突然減少する。そして  $L_x \geq 100\text{mm}$  の下流で  $SMD$  は再び増大する。

このような複雑な  $SMD$  の変化となる原因は図11、12に示した粒度分布からわかるように微小な液滴が計測されることが原因で、噴射圧  $P_i$  が高いところでは図6の  $L_{x_d}$  が  $100\sim 160\text{mm}$  であり、このあたりで液滴列に乱れがあることと併せて考慮すると、 $D_n=0.04\text{mm}$  の場合には  $P_i \geq 0.4\text{MPa}$  かつ  $L_x \geq 120\text{mm}$  で微小な液滴が主流を外れて滞留しているが、Weber 数は 1 未満であるため、ここで二次微粒化が起こっているかどうかは疑問が残る。一方、 $D_n=0.01\text{mm}$  と小さい場合にはより噴孔に近いところで微小な液滴が発生しているものと考えられるが、 $P_i$  が高いところでは図7の  $L_{x_d}$  が  $80\sim 150\text{mm}$  であり、 $SMD$  が急に減少する位置よりも下流であることから、このような微小な液滴が、噴流周囲にある逆流により上流に運ばれ滞留することが考えられる。このような微小な液滴は周囲雰囲気静止雰囲気であるため、長く滞留しており  $SMD$  の計測影響を与えているだけで、質量流量としてはわずかなため、燃料噴射弁のような用途においては無視できる。

噴孔から離れた  $L_x$  が大ききなところでは、 $L_x$  とともに  $SMD$  が大きくなる傾向があり、上述のように周囲空気流などの影響を受けていると考えられ、噴孔径  $D_n$  の影響を比較したい。そこで、図13のように  $L_x=20\text{mm}$  と噴孔近くの  $SMD$  を用い

て  $D_n$  の影響を比較した。噴射圧  $P_i$  が低い条件では、図13(a)のように  $D_n$  の増大に伴いほぼ直線的に  $SMD$  も増加するが、 $D_n=0\text{mm}$  でも  $SMD$  は  $40\mu\text{m}$  以上となる直線と

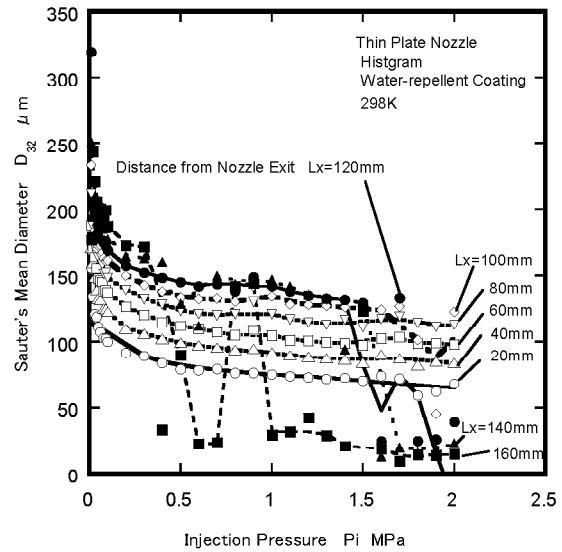


Fig. 8  $SMD$  with thin plate nozzle ( $D_n=0.04\text{mm}$ )

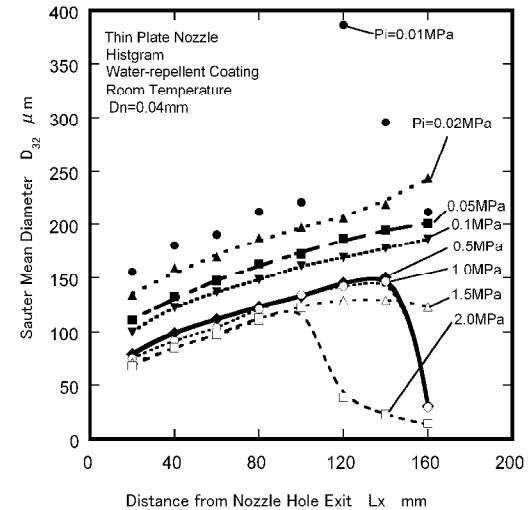


Fig. 9  $SMD$  with thin plate nozzle ( $D_n=0.04\text{mm}$ )

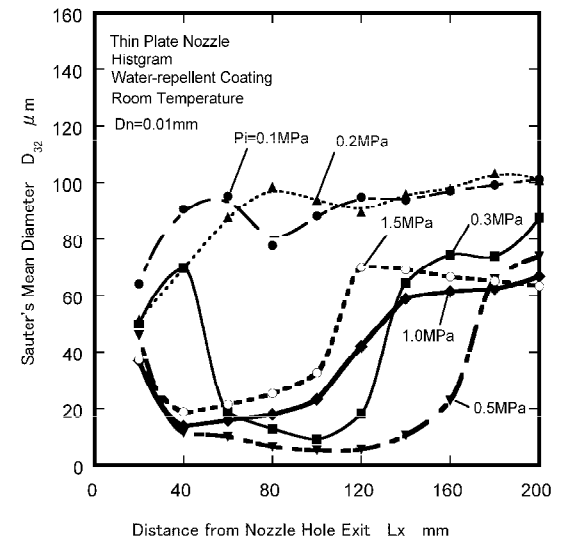
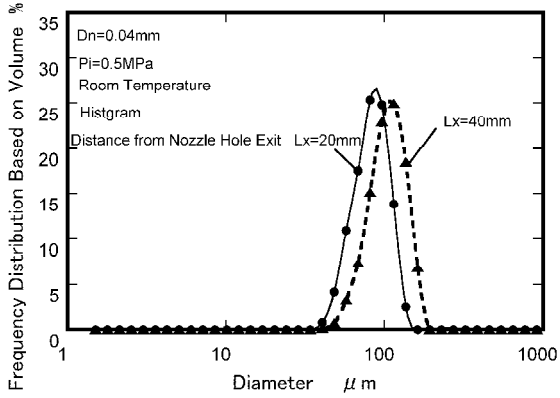
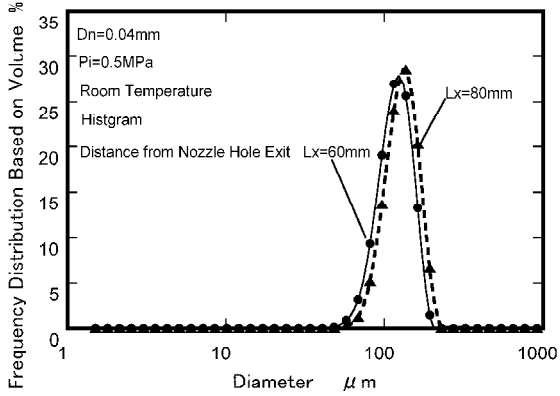


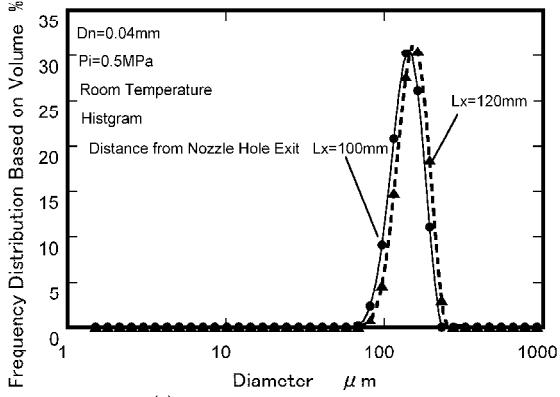
Fig. 10  $SMD$  with thin plate nozzle ( $D_n=0.01\text{mm}$ )



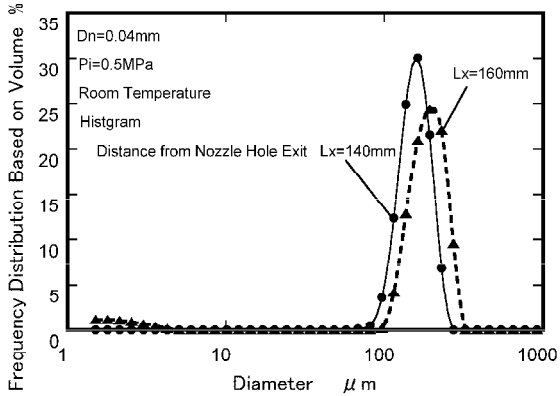
(a)  $Lx=20\text{mm}, 40\text{mm}$



(b)  $Lx=60\text{mm}, 80\text{mm}$

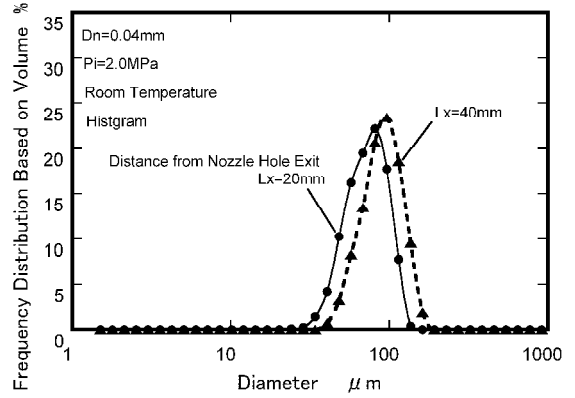


(c)  $Lx=100\text{mm}, 120\text{mm}$

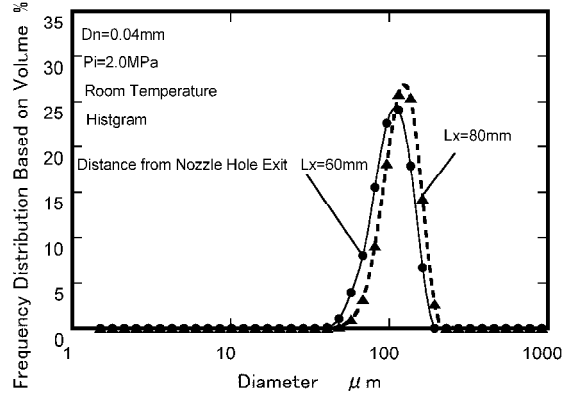


(d)  $Lx=140\text{mm}, 160\text{mm}$

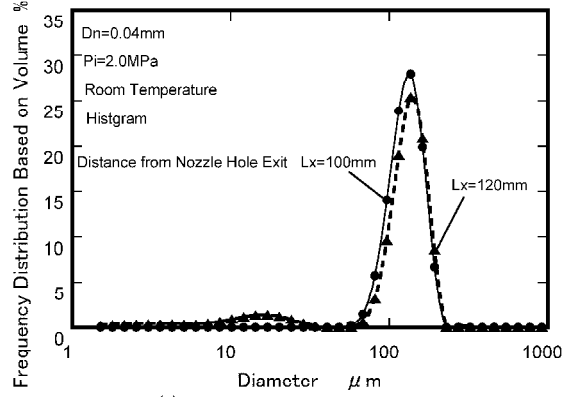
Fig. 11 Particle size distribution at  $Pi=0.5\text{MPa}$



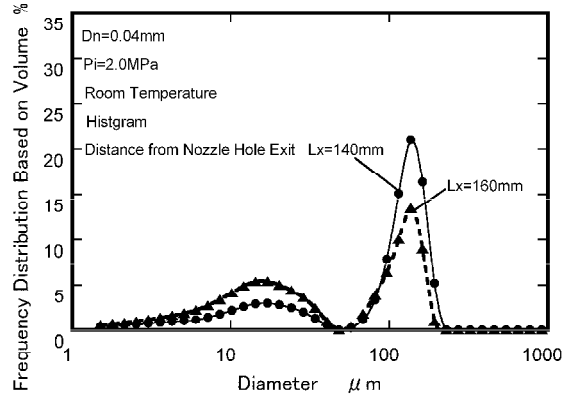
(a)  $Lx=20\text{mm}, 40\text{mm}$



(b)  $Lx=60\text{mm}, 80\text{mm}$



(c)  $Lx=100\text{mm}, 120\text{mm}$



(d)  $Lx=140\text{mm}, 160\text{mm}$

Fig. 12 Particle size distribution at  $Pi=2.0\text{MPa}$

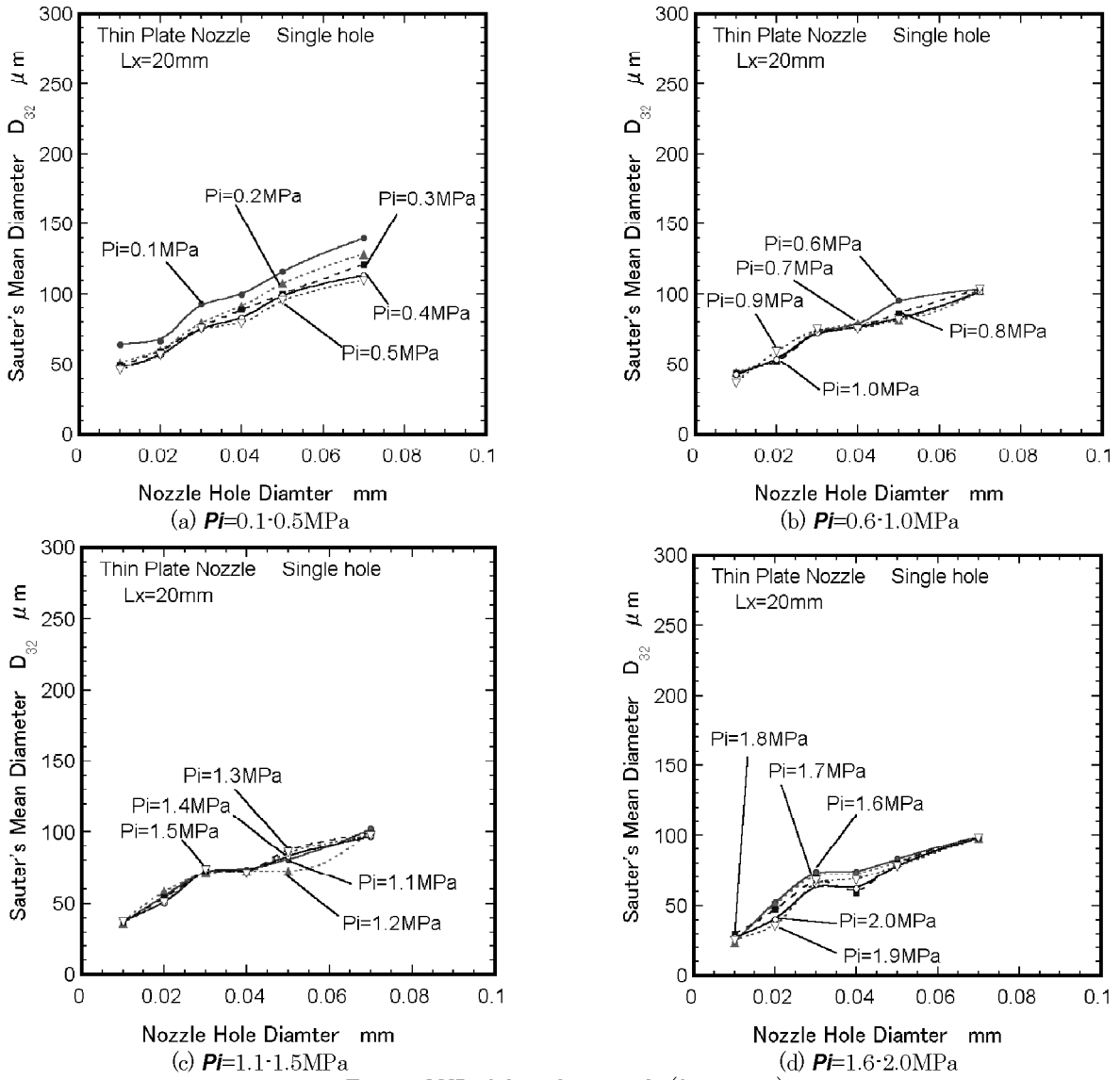


Fig. 13 SMD of thin plate nozzle ( $L_x=20\text{mm}$ )

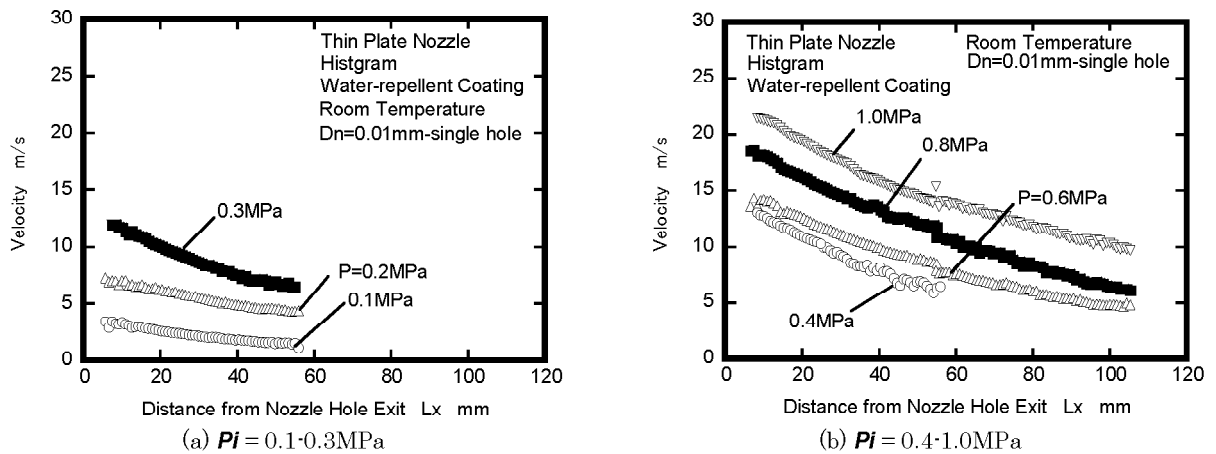


Fig.14 Velocity of droplets of spray from a thin plate nozzle

なる。  $Pi$  が高いほど  $SMD$  は小さい。  $Pi$  が高くなると、  $Pi$  の上昇による  $SMD$  の減少は図 1 3 (b)(c) のようにわずかとなり、  $Dn$  に対する  $SMD$  の変化は  $Dn=0.03\text{mm}$  で折れ曲がった二本の直線で近似できる。  $Pi$  が更に高くなると図 1 3 (d) のように  $Dn=0.03\text{mm}$  以下の場合の  $SMD$  は  $Dn=0\text{mm}$  で  $0\mu\text{m}$  に近づくようなかたちとなる。

噴孔径  $Dn=0.01\text{mm}$  の場合について液滴の移動速度を PIV により測定すると図 1 4 のように噴射圧  $Pi$  が高いほど速度がはやいものの、  $Lx$  とともに減少していく。従って、先行する液滴に上流の液滴が追いついてくるので、  $Lx$  の増大とともに液滴の間隔が狭くなっていくものと推定されるが、図 4 のようにノズル噴孔付近で液滴の間隔は均一で密であるのに対し、  $Lx$  の増大とともに液滴の間隔がまばらに広がっている。

以上の結果から推測すると、  $Dn=0.01\sim 0.07\text{mm}$  の薄肉プレートノズルを用いてイオン精製水を静止雰囲気中に噴射した場合には、液体の噴流は直線の液滴列に分裂し、その後、下流において速度が減速し  $SMD$  が大きくなる傾向があり、その原因として液滴の衝突が考えられる。特に衝突する液滴同士の相対速度の差が小さいために、分裂せずに合体したままとなっている確率が高いのではないだろうか。また下流においては微小な液滴が滞留し  $SMD$  の測定値を小さくする場合がある。

## 7. おわりに

以上述べたように、エレクトロフォーミングを用いて薄肉プレートノズルを試作し、静止雰囲気中にイオン精製水を噴射して観察を行った結果以下のことがわかった。

- (1) 液体噴流は噴射後すぐに直線の液滴列に分裂する。
- (2) 噴孔からの距離  $Lx$  が増大するとともにザウタ平均粒径  $SMD$  は徐々に増大する。その理由として液滴の衝突・合体が考えられる。
- (3)  $Lx$  が増大するとともに液滴の移動速度は徐々に低下する。
- (4)  $Lx=20\text{mm}$  の噴孔付近で測定したザウタ平均粒径  $SMD$  は噴孔径  $Dn$  に対し、噴射圧  $Pi$  が低い場合はほぼ直線的に増加する。ただし、  $Dn=0\text{mm}$  でも  $SMD$  は  $40\mu\text{m}$  以上となる直線となる。
- (5)  $Pi$  が高いほど  $Lx=20\text{mm}$  での  $SMD$  は小さいが、  $Pi$  が高くなると、  $Pi$  の上昇による  $SMD$  の減少はわずかとなり、  $Dn$  に対する  $SMD$  の変化は折れ曲がった二本の直線で近似できるようになる。  $Dn=0.03\text{mm}$  以下の場合の  $SMD$  は  $Dn=0\text{mm}$  で  $0\mu\text{m}$  に近づくようなかたちとなる。

## 謝 辞

本研究の一部は経済産業省産業技術総合研究所委託費「分散型エネルギーシステムの平準化基盤技術研究開発」にて行われ、林修一氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 文 献

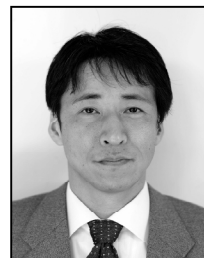
- (1) 谷泰臣ほか: 組合せシリコンプレートノズルの開発, 日本機械学会論文集(B)編, 69-681 (2003), 1290-1295.
- (2) 谷泰臣ほか: シリコンプレートノズルを用いた液体微粒化, 日本機械学会論文集(B)編, 69-682 (2003), 1521-1526 .
- (3) P. Ravi, J. Blanchard and M. Corradini, Diesel Spray Behavior with 3-Dimensional Micro-Nozzles, Proc. of ICLASS 2003, 1433(2004), 1-8.
- (4) 荒木幹也ほか: 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 ICLASS - 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 ICLASS - Asia 2005, (2005), 348-353.
- (8) N. Iki, Water Spray from Several Tens Micrometer Holes, Proc. of ICLASS - Asia 2007, (2007) ,155-159.



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