



## 静電微粒化におけるノズル配置が粒径に与える影響

### Influence of nozzle arrangement on droplet diameter in electrostatic atomization

矢嶋 智郎,  
(Tomoro YAJIMA)  
群馬大学  
(Gunma Univ.)

小野里 亮人,  
(Akito ONOZATO)  
群馬大学  
(Gunma Univ.)

ゴンザレス ファン,  
(Juan C. GONZALEZ PALENCIA)  
群馬大学  
(Gunma Univ.)

荒木 幹也,  
(Mikiya ARAKI)  
群馬大学  
(Gunma Univ.)

志賀 聖一\*  
(Seiichi SHIGA)  
ものづくり研究機構  
(Monodzukuri Research Organization)

In electrostatic atomization, droplet diameter increases with the increment of the flow rate. Previous studies showed that increasing the nozzle number and decreasing the flow rate per nozzle is effective for better atomization. However, the flow rate is still small for engine applications. In order to solve this problem, some studies considered increasing the flow rate by using multiple nozzles. The objective of this research is to evaluate the impact of increasing the nozzle number and the nozzle arrangement on the atomization characteristics. Three nozzle configurations were considered, varying the nozzle arrangement, Linear and Cluster; and the nozzle pitch, 2 mm and 8 mm. The nozzle number was 7 for all configurations. In the experiment, ethanol flows between the nozzles and a stainless steel mesh electrode; and atomization occurs due to the application of a voltage between the nozzles and the electrode. Droplet diameter was measured using a Laser Diffraction Spray Analyzer (LDSA) system. It was found that nozzle multiplexing suppresses atomization regardless of the nozzle arrangement shape. In contrast, increasing the nozzle pitch improves atomization. For the flow rate of 0.4 ml/min, the smallest SMD, 11  $\mu\text{m}$ , was obtained for the Cluster configuration with the applied voltage of +10 kV. The SMD variation with the flow rate for individual nozzle could be formulated, and it was compared with previous studies.

Keywords: Electrostatic atomization, Ethanol, Multiple nozzle, Flow rate, Droplet diameter

## 1. 緒言

火花点火機関から排出される未燃炭化水素のほとんどは、触媒コンバーターが活性温度に達する前に排出される<sup>(1)</sup>。特にポート燃料噴射式(PFI)機関は、ポート壁面等への燃料付着が原因であり、付着量の低減が重要である<sup>(2)</sup>。

多くのポート燃料噴射(PFI)式火花点火機関で使用されている圧力噴射弁では、燃料圧力と微粒化程度は強い関係があり、微粒化程度を維持したまま燃料液滴の運動量を低下させることは困難である。そこで著者らは、圧力に依存しない微粒化の方法として、静電微粒化法に着目した。

寒川らは、マイクロコンバスタへの応用を念頭に、エタノールとヘプタンを用いた実験において液体の電気伝導率に着目し、電気伝導率の増大とともに生成される液滴径が減少し、100 % エタノール 1 ml/h (0.0167 ml/min)の時に SMD 14  $\mu\text{m}$  (PDPA)を得た<sup>(3)</sup>。Dimitriosらは、JP-08 (ジェット燃料)を用いた可搬動力装置のための燃焼器応用を目的として、静電微粒化実験を行った。1.1 g/h (approx. 0.0229 ml/min)の時に SMD 54  $\mu\text{m}$  となり、触媒グリッドバーナを用いて 99 %以上の燃焼効率を達成した<sup>(4)</sup>。Tang and Gomezは、水を用いた実験においてコーンジェットモードが観測された  $2.0 \times 10^{-3}$  ml/minの時に、平均粒径 1.5  $\mu\text{m}$ を得た<sup>(5)</sup>。Kangらは、エタノールを用いた 0.8 mm の 6 噴口から溝を伝わって流出するノズルの実験において、0.167 ml/min/orifice (1 ml/min/whole)の時に 22  $\mu\text{m}$ (PDPA)を達成し、均一度のきわめて高い噴霧生成が可能であると報告している<sup>(6)</sup>。

そして、流量増大とともに粒径増大となる挙動にも言及している。Weiweiらは、エタノールを用いた実験において  $1.77 \times 10^{-3}$  ml/min/sourceの時に 5  $\mu\text{m}$ を得た<sup>(7)</sup>。多田らは、シクロヘキサノンを用いた内径 0.15-0.25 mm  $\times$  7本のマルチノズルの実験において 10.4 mg/min (approx. 0.013 ml/min)において、おおむね 14  $\mu\text{m}$ 程度の粒径となり、レーリーの限界帯電量を用いた微粒化に寄与できる電流の限界を考察している<sup>(8)</sup>。

しかしながら、上記のいずれの流量も、火花点火機関への応用の観点からは十分でない。

これまで著者らは、静電微粒化法における流量と粒径のトレードオフの改善には、ノズル本数の増加が有効である事を示した<sup>(9)</sup>。SUS304(外径 0.4 mm, 内径 0.22 mm)のノズル本数を 1本から同心円状に 3本、及び 6本とノズル本数を増やした。ここで、将来的なノズル本数の増加を見込み、ノズル多重化が行いやすいノズル配置を調べる必要がある。

本研究では、ノズル配置が、直線状(以降 Linear とよぶ)で等間隔に 2 mm, および千鳥状(以降 Cluster とよぶ)で等間隔に 2 mm となる 7本ノズルとした場合に加えて、千鳥状では、さらに間隔を 8 mm とした 7本ノズルを加えた。流量はすべて総流量で表し、総流量増大が粒径に及ぼす影響を明らかにした。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 供試液体及び液体供給方法

表 1 に供試液体であるクリンソルブ M の成分を示す。クリンソルブ M は、メタノールで変性した高濃度のエタノールであり、本研究においてはエタノールと呼ぶことにする。エタノールは、炭化水素系燃料の中でも電気伝導率が高く、静電微粒化を行いやすい液体であるとともに、ガソリンとの混合バイオ燃

原稿受付：2020年5月21日

\* 責任著者：正会員、(一財)地域産学官連携ものづくり研究機構 (〒373-0057 太田市本町 29-1)

E-mail: shiga@gunma-u.ac.jp

料として広く用いられてきている。しかも、機関の低温始動性を表すリード蒸気圧は 15 kPa ほどと夏季ガソリンと比べても 1/4 以下と低く、ガソリンへのブレンド割合が低温始動性で決まるといわれるほどであり、微粒化によって液滴の表面積を増大し、蒸発しやすくすることの重要性は高く、本研究の意義も高い。

実験装置概略を図 1 に示す。供試液体は、タンクから定量送液ポンプを用いてノズルへ供給する。流量は、定量送液ポンプで制御し、タンクと定量送液ポンプの間の三方弁で接続したピペットを用いて、容積式の流量計測から求めた。

### 2.2 ノズルおよび電極

表 2 にノズルの仕様を示す。ノズルは、六角形の快削黄銅製ベースに SUS304 製パイプ（外径 0.4 mm、内径 0.22 mm）を千鳥配置で等間隔 2 mm で植えた 7-nozzle（以降 7-Cluster-2 と呼ぶ）、千鳥配置で等間隔 8 mm で植えた 7-nozzle（以降 7-Cluster-8 と呼ぶ）、直線配置で等間隔 2 mm で植えた 7-nozzle（以降 7-Linear-2 と呼ぶ）の 3 種類を製作し、いずれにおいてもノズルの突き出し量は 20 mm とした。これらのノズルは、すべての条件で接地電極とした。

誘導帯電電極には、線径 0.4 mm、4 mesh/inch のステンレス鋼製メッシュを使用した。メッシュ電極は、ノズル先端から 20 mm 下方に設置した。電源装置は、松定プレジジョン製高圧電源 HAR-10P10（最大電圧 10 kV、最大電流 10 mA）である。

### 2.3 噴霧の可視化および粒径計測

噴霧は、図 1 に示したように、短時間露光バックライト法による写真によって観察した。光源には、公称発光時間 180 ns の菅原研究所製ナノパルスライト NP-1A を用いた。光は、トレーシング紙を介して一様光とした後に噴霧へ照射し、発光と同期した Nikon 製デジタル一眼レフカメラ D7000（レンズ：AF Nikkor 180 mm 1:2.8 D）で撮影した。

粒径計測は、日機装製 Microtrac LDSA（Laser Diffraction Spray Analyzer）-SPR1500A（以降 LDSA と称す）を用いて行った。計測位置は、ノズルベース中心軸上、ノズル先端から 10 mm 下方とし、測定領域は直径 8 mm のレーザ光路内であり、液滴径は、SMD で評価した。

### 2.4 実験手順

供試液体であるエタノールは、燃料タンクから定量送液ポンプを用いてノズルに供給した。ノズルに供給される流量は、ポンプについている目盛で調整し、燃料タンクと定量送液ポンプの間に設けたメスピペットとストップウォッチで実測した。

エタノールが、ノズルから一定量を流出するようになった後、電源装置を用いてリング電極へ最大 10 kV の電圧を印加し、粒径計測と噴霧の可視化を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 ノズル配置が粒径に及ぼす影響

図 2 に、ノズル配置の違いによる印加電圧と SMD の関係を示す。この時、流量は、小流量である 0.4 ml/min、0.5 ml/min と大流量である 3.0 ml/min、3.1 ml/min に設定し、ノズルは、7-Linear-2 と 7-Cluster-2 を使用した。

Table 1 Components of CLYNSOLVE-M<sup>(10)</sup>

Test liquid	Component		
	Ethanol (%)	Methanol (%)	Water (%)
CLYNSOLVE-M	96.9 ± 1.0	3.1 ± 0.3	≤ 0.2

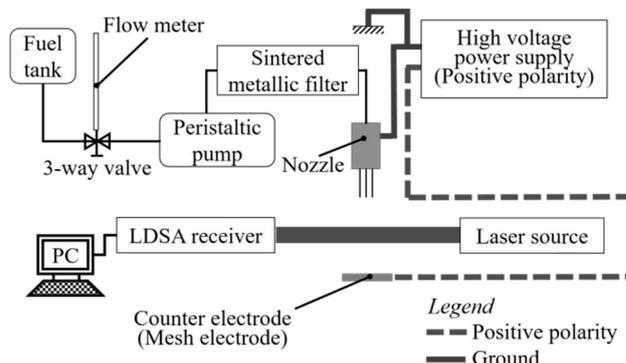


Fig. 1 Experimental set-up

Table 2 Nozzle configurations

ID mm	OD mm	Extruding amount mm	Nozzle number	Pitch mm	Nozzle arrangement
0.22	0.4	20	7	2	Cluster  7-Cluster-2
				8	Cluster  7-Cluster-8
				2	Linear  7-Linear-2

小流量(白抜き)では、7-Cluster-2 の SMD は、8 kV で 11 μm と最も小さくなり、それより電圧を増大させて 10 kV にしてもほとんど変わらない。一方 7-Linear-2 の SMD は、印加電圧の増加

に従っていったん減少して 20  $\mu\text{m}$ ほどになるが 10 kV ではむしろ増大した。また、どの印加電圧の条件でも、7-Cluster-2 の SMD が、7-Linear-2 の SMD よりも小さくなった。

大流量(黒塗り)では、7-Cluster-2 の SMD は、印加電圧の増加に従ってむしろ増大している。一方 7-Linear-2 の SMD は、印加電圧の増加に従って 7-Cluster-2 とは異なり極大傾向を示し、印加電圧 10 kV のみ 7-Cluster-2 より SMD は小さい。このように、大流量の場合の複雑な挙動は、微粒化パターンの変化が関係しており、写真観察において考察するが、大流量の 7-Cluster-2 は中心ノズルの周りにあるノズルからの噴霧が、外側に向かって大きく広がるため、微小粒子が LDSA の測定領域を超えてしまい、結果的に SMD をより大きく評価してしまうことなどが影響している可能性がある。

### 3.2 ノズル配置の違いによる噴霧の写真観察

ここでは、ノズル配置の違いが微粒化に及ぼす影響を可視化写真から考察する。

図 3 に印加電圧増加に伴う微粒化様式の変化を、7-Linear-2、7-Cluster-2 の大流量条件である約 3 ml/min について示す。図 2 中の黒塗りプロットに相当する。なお、図中の矢印は中心ノズルである。

7-Linear-2、7-Cluster-2 のいずれにおいても、中心ノズルからは粗大な液滴が生成されている。そして、外側ノズルでは、中心ノズルよりも微細な液滴が生成されている。このような微粒化現象がノズルによって顕著に異なるのは、ノズル配置の影響に違いなく、とくに Cluster では奥行き方向に存在するノズルがさらに影響を及ぼして、中心ノズルでの静電微粒化を抑制したためであると考えられる。このことは、7本のマルチノズルを用いた多田らの研究<sup>9)</sup>でも報告されている。外側ノズルでは、印加電圧が増大するに従って、液糸がメニスカスから伸長し、先端で微細な微粒化が行われている。この2重構造が図2の複雑な SMD の挙動をつくっていたと考えられる。つまり、外側ノズルで生成した微細液滴が測定体積にどれだけ入るかによって平均粒径が大きく影響を受けたと思われる。

たとえば、図2において流量 3.1 ml/min、印加電圧が増加した時の 7-Cluster-2 は、SMD が単調に増加する傾向となった。図3の 7-Cluster-2 の可視化写真からは、外側ノズルで生じたメニスカスによる液糸が、伸長してしまい、微細な液滴がノズルから離れた空間で生成されていることがわかる。Linear 配置でも似た現象は認められるが、Cluster においては、中心ノズルからの粗大液滴生成や周囲ノズルから流出した液糸の広がりも顕著である。微細な液滴群の多くは計測体積である中心付近を通過せず、したがって LDSA が計測したのは測定体積である直径 8 mm の光束内であることから、中心付近のノズルで生成した多くの液滴と、周囲ノズルで生成した微細な液滴群のうち、8 mm のレーザー光束内に存在していたものとなり、相対的には中心付近の粗大液滴の貢献が大きくなると推定される。印加電圧の増大は、静電微粒化の促進とともに、微細液滴群の周辺への分散を促進する。したがって、上述のように、LDSA の計測範囲に入る微細な液滴の割合が印加電圧の増大とともに減少して、中心ノズルから生成される粗大液滴が計測されやすくな

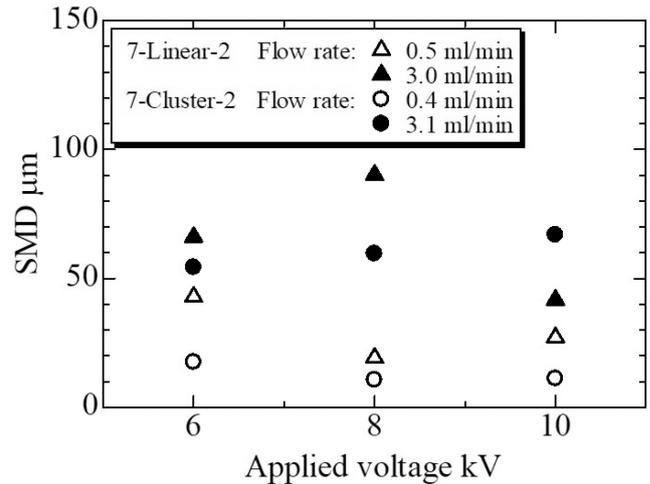


Fig. 2 Effect of the applied voltage on SMD for two kinds of nozzle arrangements

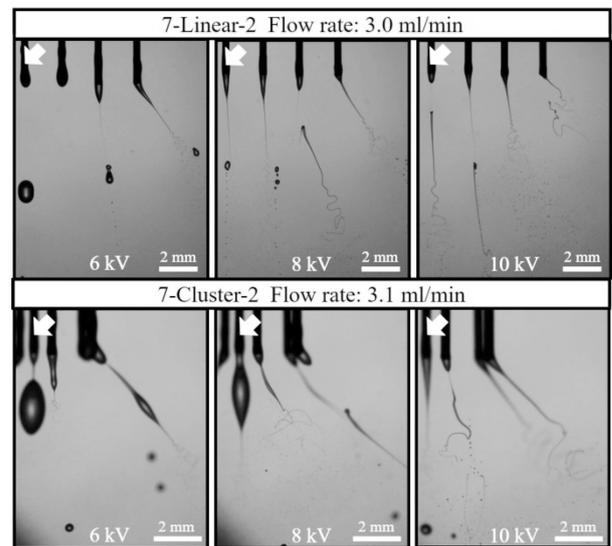


Fig. 3 Instantaneous shadowgraphs of atomization for two kinds of nozzle arrangements in higher flow rate corresponding to the condition in Fig. 2

なったと考えられる。

このように、ノズル多重化は、中心ノズルほど電界強度が小さくなり、微粒化の抑制が起こることが明らかとなった。したがって、7-Cluster-2 は、7-Linear-2 よりも中心ノズルが少ない配置形状のため、ノズル多重化が行いやすいと言える。

### 3.3 ノズル間隔が粒径に与える影響

ここでは、ノズル多重化が行いやすいと考えられる Cluster 形状のノズルについて、そのノズル配置間隔が粒径に与える影響を検討する。

図4にノズル間隔の違いによる印加電圧と SMD の関係を示す。この時、流量は、小流量である 0.4 ml/min と大流量である 2.7 ml/min、3.0 ml/min とし、ノズルとしては、7-Cluster-2 と 7-Cluster-8 を使用した

図4より、小流量では、7-Cluster-2、および7-Cluster-8のSMDの変化は、印加電圧の増加に従って単調に減少している。印加電圧6kVにおいて、7-Cluster-8が、7-Cluster-2よりもSMDは約10μm大きくなったが、それ以外では絶対値もほぼ一致しており、小流量ではノズル間隔の影響はほぼないと言える。小流量(0.4 ml/min)、印加電圧8kV以上では、前述のようにCluster配置では、SMDが11μmとなり、圧力微粒化では相当な高速でないといえない微粒化程度である。

大流量では、7-Cluster-2、及び7-Cluster-8のSMDの変化は、逆転している。これは、ノズル間隔が2mmから8mmへ増加したことにより、中心ノズルの電界強度低下が少なくなったことに関係しているが、後述する写真観察で考察する。いずれにせよ、微粒化の観点からは、ノズル間隔は、大きい方が望ましいと言える。大流量(2.7 ml/min)、印加電圧10kVの条件で7-Cluster-8は、SMD 37μmとなった。

### 3.4 ノズル間隔が微粒化に及ぼす影響の写真観察

ここでは、ノズル間隔の違いが微粒化過程に及ぼす影響を可視化写真から考察する。

図5に印加電圧の変化に伴う7-Cluster-2と7-Cluster-8の微粒化過程の可視化写真を示す。図中の矢印は、中心ノズルを示す。条件は、粒径の結果を示した図4のうち大流量のものである。また、7-Cluster-2は図3下に示したと同じ写真である。ノズル間隔の小さい条件は、前述のようにとくに中心ノズルで顕著であるが、ノズル外径の数倍にも達する液体のかたまりを生成しており、粗大液滴の原因となっている。

これに対して、ノズル間隔の大きい7-Cluster-8では、ずっと微細な液滴を生成していることがわかる。しかも間隔の狭い場合と対照的に、印加電圧が増加するに従って、中心ノズルの比較的粗大であった液滴は小さくなっていく。そして、外側ノズルと中心ノズルとで噴霧形状に大きな違いが見られなくなっていく。このようなことのために、7-Cluster-8では、印加電圧の増加に従ってSMDが大きく減少したと考えられる。

したがって、ノズル間隔を大きくすることで、中心ノズルと外側ノズルとの電界強度が近づき、印加電圧の増大とともに微粒化が促進されることが明らかとなった。このように、ノズル間隔は、大きい方が静電微粒化には好ましいと言える。

### 3.5 ノズル配置の違いによる流量と粒径の関係

静電微粒化の現象では、粒径と流量にある関係をいかに小粒径にするかが重要である。ここでは、ノズル配置の違いが、粒径の流量による変化に及ぼす影響を考察する。図6に印加電圧10kV時、本研究における3種類のノズルにおける流量とSMDの関係を示す。7-Cluster-2及び7-Cluster-8は、最小流量(0.4 ml/min)の条件で本研究では最も小さいSMDである11μmを実現した。

一方で、7-Cluster-2は、最大流量(3.1 ml/min)の条件において最も大きいSMD 67μmとなり、全体的な傾向からも粗大側に位置している。これは、前述のように、図4において、印加電圧の増加に従って伸長した液糸により、噴霧全体がLDSAの計測範囲に入らず、粗大液滴が計測されやすくなったためと考えられる。

全体的には、Cluster形状のノズルは、Linear形状のノズルよりも粒径が小さい傾向が認められる。とくに、ノズル間隔の大

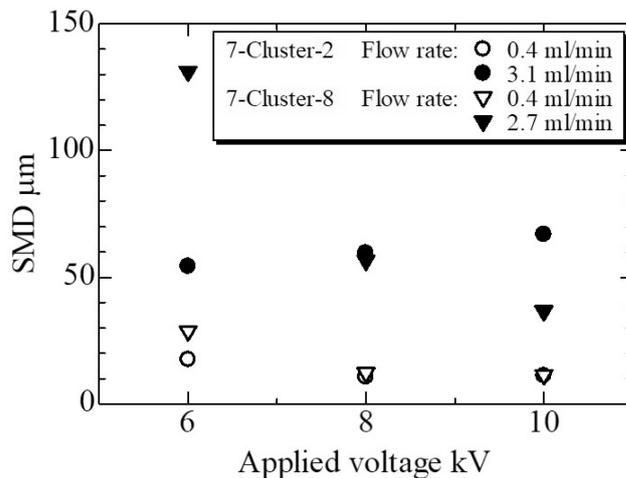


Fig.4 Effect of applied voltage on SMD in two kinds of nozzle spacing

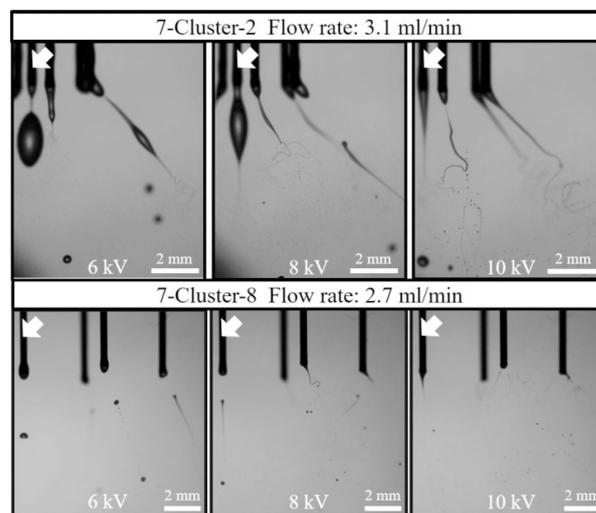


Fig.5 Instantaneous shadowgraphs of atomization for two kinds of nozzle spacing corresponding to the condition in Fig.4

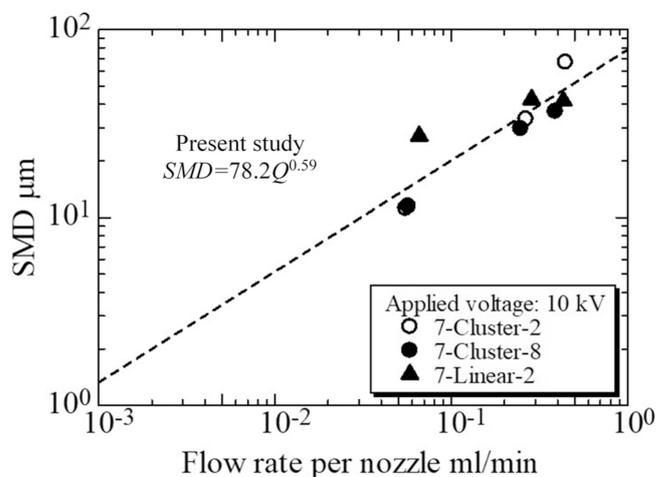


Fig.6 Variation of SMD with the flow rate per nozzle for three kinds of nozzle arrangements occupied in this study

きな7-Cluster-8は傾向線の下側にあり、静電微粒化に適していることがわかる。このように、ノズル配置は、ノズル多重化に

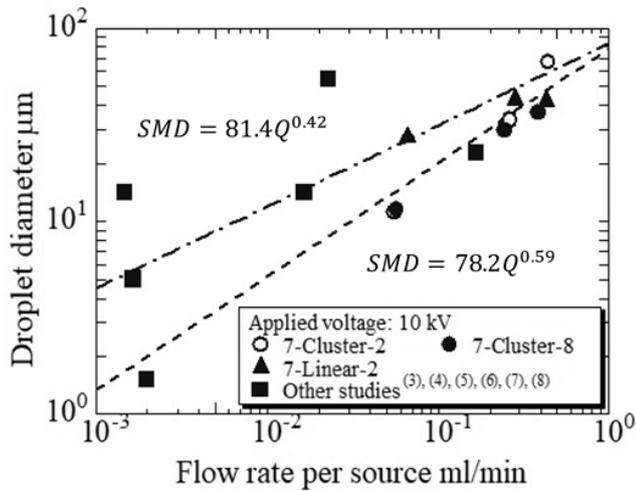


Fig.7 Comparison with other studies

よる中心ノズルの電界強度の低下を配置によって改善できると考えられる。また、同じノズル配置でも、間隔を大きくとれば中心ノズルの微粒化を促進できることもわかった。

静電微粒化は、粒径と流量にべき関数的な関係性があることが分かっている<sup>(11)</sup>。本研究において、計測条件などが良好でない条件を除くと、おおむね以下の式で表される。

$$SMD = 78.2Q^{0.59} \quad (1)$$

ここで、 $Q$ ：ノズル 1 本あたりの流量 [ml/min]、 $SMD$  [μm] である。

### 3.6 他の研究との比較

図 7 に他の研究における粒径の流量による変化をあわせて示す。

他の研究では、ノズル本数、電極形状、印加電圧等はさまざまであり、粒径についても  $SMD$  で評価しているものは多くない。 $SMD$  が算術平均粒径の 2 倍ほどであることを考慮すると、本研究の平均粒径はほかの研究に比較して、過大となる傾向にあるべきである。いずれにしても、粒径と流量の間には一定の関係があると見る事ができる。ほかの研究については、おおむね 3 つの傾向線に分かれるように見える。低流量で大粒径の 2 点、そして中程度で本研究の一部も含まれる次式で表された 4 点、そして(1)式で表される、最も粒径の小さい 1 点鎖線である。

$$SMD = 81.4Q^{0.42} \quad (2)$$

ここで、 $Q$ ：ノズル当たりの流量 [ml/min]、 $SMD$ ：[μm] である。

今回比較した他の論文は、ノズル本数、電極形状、印加電圧等異なっているにもかかわらず、このような 3 種類の傾向が確認できた。しかも本研究の  $SMD$  はほかの研究よりも過大に評価している可能性が高いにもかかわらず、最も粒径の低い傾向にあることが明らかとなった。このことは、前述した測定体積の問題があることから、より全体像をとらえることができれば、さらなる  $SMD$  の低下をもたらすと期待され、今後の課題である。また、Linear 配置のように従来の研究の水準に近い条件も

あり、パラメータの多い多重ノズルにおける静電微粒化現象の複雑さも示されており、これまで行われていない電界強度や帯電量の評価の必要性も示されたと言える。

## 4. 結言

静電微粒化のノズル多重化において、ノズル配置およびノズル間隔の影響を実験的に検討した結果、得られた知見は以下の通りである。

1. ノズル配置は、Cluster が Linear よりも静電微粒化によってより小さな粒径を生ずる。これは、多重ノズルで電界強度が低下する中心側のノズルが Linear 形状よりも少ないためである。
2. ノズル間隔は、大きいほうが微粒化を促進する。これは、ノズル多重化に伴う電界強度が低下する傾向が抑制されるためである。
3. 静電微粒化においては、粒径と流量の関係は、べき関数で表すことができる。本研究においては、 $SMD = 78.2Q^{0.59}$  の関係がある。他の研究では、 $SMD = 81.4Q^{0.42}$  の関係があり、本研究の一部の条件もほかの研究の傾向に一致した。さらに、粒径の大きな研究結果も確認でき、現状では 3 種類の傾向が存在することが分かった。そのなかでも、本研究の多くの条件は最も微小な粒径を実現できた。
4. 小流量 (0.4 ml/min)、印加電圧 10 kV の条件で Cluster 形状は、 $SMD$  約 11 μm となった。また、大流量 (2.7 ml/min)、印加電圧 10 kV の条件で 7-Cluster-8 は、 $SMD$  36.7 μm となった。このように、多重ノズルの適用は、静電微粒化の生成流量増大に有効である。

## 文 献

- (1) 久保修一：ガソリンエンジンシステムにおける未燃炭化水素の生成・排出挙動解析，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol. 30，No. 2，(1995)，23-33
- (2) 高橋幸宏，中瀬善博，加藤雄一：ポート噴射エンジンにおける付着燃料の液膜厚さ解析，デンソーテクニカルレビュー，Vol. 13，No. 1，(2008)，44-51
- (3) 寒川博司，Lilis YULIATI，瀬尾健彦，三上真人：エタノール/ヘプタン混合割合が静電微粒化の噴霧特性に及ぼす影響，日本機械学会論文集(B編)，77巻，773号，(2011)，129-137
- (4) Dimitrios C. Kyritsis, Bruno Coriton, Fabien Faure, Subir Roychoudhury, Alessandro Gomez: Optimization of a catalytic combustor using electrosprayed liquid hydrocarbons for mesoscale power generation, Combustion and Flame, 139, (2004), 77-89
- (5) Keqi Tang, Alessandro Gomez: Generation of Monodisperse Water Droplets from Electrosprays in a Corona-Assisted Corn-Jet Mode, Journal of Colloid and Interface Science, 175, (1995), 326-332
- (6) Joon Sang Kang, Inyong Park, Jae Hee Jung, Sang Soo Kim: Free-surface electrospray technique using a multi-hole array, Journal of Aerosol Science 55 (2013) 25-30
- (7) Weiwei Deng, C.Mike Waits, Brian Morgan, Alessandro

- Gomez: Compact multiplexing of monodisperse electrosprays, *Journal of Aerosol Science*, 40, (2009), 907–918
- (8) 多田一幸, 川本広行: マルチノズル静電インクジェットによる機能性材料のマイクロ成膜, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 79 巻, 800 号, (2013-4), 113–123
- (9) 小野里亮人, 渡邊泰孝, ゴンザレスファン, 荒木幹也, 志賀聖一: 静電微粒化におけるノズル多重化が流量と粒径に及ぼす影響, *第 25 回微粒化シンポジウム講演論文集*, (2016), 104–107
- (10) 日本アルコール販売株式会社, CLYNSOLVE M, (online)  
<http://www.aruhan.gr.jp/aruhan/d1a.html>
- (11) Keqi Tang, Alessandro Gomez: Monodisperse electrosprays of low electric conductivity liquids in the cone-jet mode, *Journal of Colloid and Interface Science*, 184, (1996), 500–511