

# ドライミスト粒子の粒径・速度分布に関する研究

辻本研究室

4109613 加藤 史郎

## 1.研究背景・目的

ドライミストは従来用途である空気の冷却を目的とした半屋外空間や家庭用のシステムや、冷却に加え加湿を目的とした工業用や農業用のシステムなど、その用途は多岐に渡り、それぞれのシステムに適したドライミストの噴霧が必要とされている。そこで本研究では、噴霧圧力、使用ノズルごとのミスト粒子の粒径・速度の特性を把握することを目的としている。

## 2.PDPAを用いた粒径・速度測定

### 2.1 実験概要

本実験では PDPA (位相ドップラー粒径解析装置) を用いて、ミスト噴霧中のノズルから一定距離の各点において、通過する粒子 1 万個分の粒径、粒子速度を測定し、その分布について解析を行っている。

実験は図 1 に示す 2 種類のノズルを用いて行った。A 社ノズルは家庭用ドライミスト向けに開発されたノズルであり、B 社ノズルは愛知万博で使用された半屋外向けに開発されたノズルである。A 社ノズルに比べ、B 社ノズルはミストの噴霧される範囲が狭くなっている。

ドライミストの噴霧は鉛直下向きに行い、図 2 に示すノズルから一定距離の各点において測定を行った。ノズルの中心軸まわりにおける各点の分布の差異を調べるために、図 3 に示すように 0° を基準とし、60°、120° の点においても同様の測定を行った。また、噴霧圧力による影響も調べるために噴霧圧力を 6MPa、5MPa、4MPa と変化させた測定も行っている。表 1 に各実験の角度、圧力の条件を示す。

### 2.2 測定結果

#### (1)粒径の分布型について

粒子 1 万個分の分布型のうち特徴的であった 2 種類の分布型について図 4 に示す。中心軸付近では微小粒子にピークを持つ対数正規分布型の分布となり、外周部に近づくにつれて粗大粒子の占める割合が増加し微小粒子と粗大粒子の 2 点にピークを持つ二峰分布型となる傾向が見られた。この特徴は両社ノズルに関して測定された。これは中空噴霧の特性を表しており、質量の大きい粗大粒子はノズルから噴射された直後の速度成分を保持し噴霧外周部方向に飛散するため外周部付近に多く存在し、質量の小さな微小粒子ほど速度成分が保持されず広範囲に拡散するためであると考えられる。

#### (2)ザウター平均粒径について

6MPa で噴霧した際の A, B 両社のそれぞれの角度での各測定点のザウター平均粒径について図 5、図 6 に示す。

A 社ノズルは角度の違いによる平均粒径のばらつきが大きく、B 社ノズルは比較的小さくなっている。これは、ノズルから噴射された粒子が渦状の旋回流として飛散する際に、円周方向に存在する粒子が一定とならないためであると考えられる。このことから B 社ノズルに比べ A 社ノズルの方が角度ごとの粒子分布が均一でな

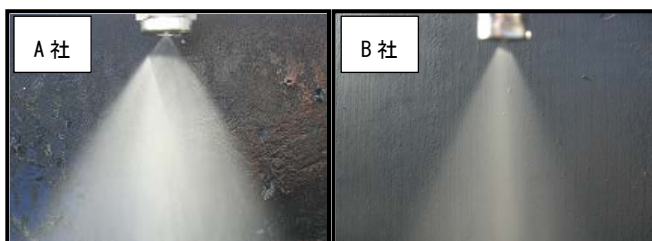


図 1 実験使用ノズル

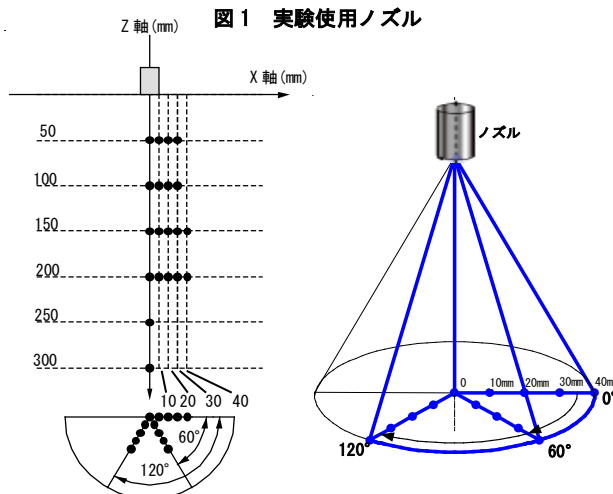


図 2 測定点図—1

図 3 測定点図—2

表 1 実験条件一覧

|            | 噴霧圧力 | ノズル角度 | PDPA | PIV |
|------------|------|-------|------|-----|
| A社ノズル      | 6MPa | 0°    | ○    | ○   |
|            |      | 60°   | ○    | ○   |
|            |      | 120°  | ○    | ○   |
|            | 5MPa | 0°    | ○    | ○   |
|            |      | 60°   | ○    | ×   |
|            |      | 120°  | ○    | ×   |
| 4MPa       | 0°   | ○     | ○    |     |
|            | 60°  | ○     | ×    |     |
|            | 120° | ○     | ×    |     |
| B社ノズル      | 6MPa | 0°    | ○    | ○   |
|            |      | 60°   | ○    | ○   |
|            |      | 120°  | ○    | ○   |
| A社ノズル(別固体) | 6MPa |       | ○    | ×   |
| B社ノズル(別固体) | 6MPa |       | ○    | ×   |

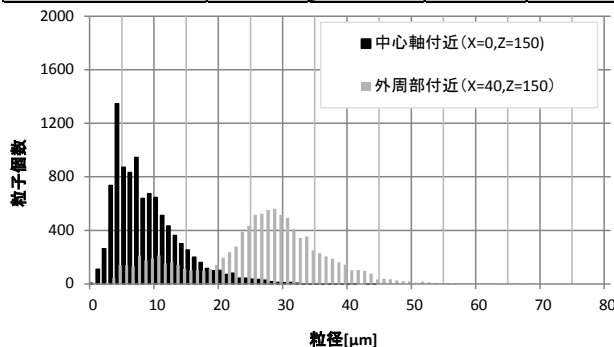


図 4 粒子分布-A社ノズル 0° (6MPa)

いと考えられる。

また、A、B 両社に共通して、ノズルから遠ざかるにつれ、全体的に平均粒径が大きくなっているが、これは微小粒子に比べ粗大粒子ほど蒸散しにくく、より遠くまで飛散するためであると考えられる。各点での平均粒径を比較するとノズルの中心軸付近(X=0, 10mm)では B 社ノズルの粒径が小さい傾向が見られ、その差は最大約  $5\mu\text{m}$  となっている。しかしその外側の測定点(X=20, 30, 40mm)においては角度により差はあるものの A 社ノズルの方が平均粒径が小さい傾向があり、その差は最大約  $10\mu\text{m}$  となっている。この結果は、B 社に比べ A 社の方が噴霧角度が広いために、より広範囲に微小粒子が噴霧されていると考えられる。

また、A 社ノズルのノズル角度  $0^\circ$  での測定圧力ごとの平均粒径を図 7 に示す。中心軸付近では、圧力の差による平均粒径の差は小さいが、中心軸から離れるにつれて、噴霧圧力が下がると平均粒径が大きくなる傾向がある。この特徴は  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  の角度での測定結果でも明確に表れていた。

### (3) 流量分布と各測定点での速度分布について

測定された粒子を完全球体であると仮定し、測定された全粒子の体積の合計と測定に要した所要時間から、単位時間あたりに測定点を通過する流量を求める。各点の通過流量は  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  での測定結果の平均から算出した。ノズルからの垂直方向の各距離における通過流量の半径方向の分布を図 8 に示す。また、両社のノズルの各点における平均粒子速度を図 9 に示す。

A、B 両社に共通して噴霧直後の Z=50mm の点では、中心部に比べて外周部の通過流量が多くなっているのに対し、Z=100mm 以降の各距離では、中心部付近でほぼ一定の流量となり外周部へ近づくと減少する傾向が見られた。さらに中心軸上の流量は噴霧直後が最も少なく徐々に増加している。このことからノズルが中空噴霧タイプのノズルであっても、ノズルから 100mm 程度距離の離れた点においては半径方向には均一の分布へと近づく特徴があることが分かる。また、A 社ノズルに比べ B 社ノズルは通過流量が全体的に多く、ノズルから離れた Z=200mm 上の測定点まで噴霧された粒子が蒸散せず到達していることが分かる。また各点における速度を比較すると、A 社ノズルの速度が B 社ノズルの速度に比べて 2 倍近い値となっていることが分かる。

以上のことより、B 社ノズルは A 社ノズルに比べてミスト粒子を蒸散しない状態でノズルから遠方へと飛散させることが可能であり、比較的距離の離れた範囲でもミストの蒸散効果を得ることができると考えられる。そのため、B 社ノズルは従来用途である半屋外向けの噴霧に対して適したノズルであると判断できる。

### (4) 粒子径ごとの粒子個数・速度の分布について

A 社ノズルを用いて 6MPa で噴霧を行った際の単位時間当たりの粒子径ごとの粒子個数を図 10 に、粒子径ごとの平均速度を図 11 に示す。0~ $10\mu\text{m}$  の微小粒子は噴霧直後の Z=50mm 上では中心軸上に多数存在し、中心軸から離れるとその個数は大きく減少する。粒子径が大きくなると微小粒子とは逆に中心軸上から離れた点での個数が増える。また、噴霧位置から離れた Z=200mm 上の測定点では水平方向に均一の分布となっており、微小粒子は蒸発しながら、粗大粒子は大きく個数が増えることなく遠方へ飛散することが分かる。

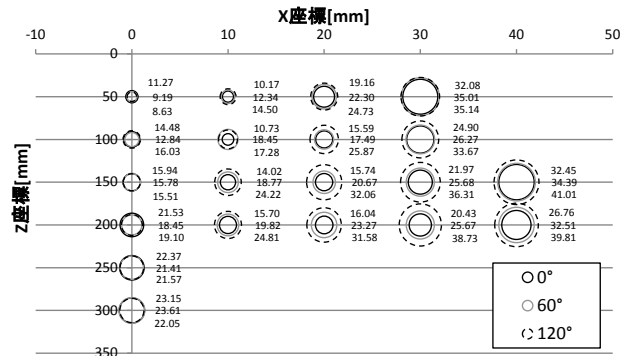


図 5 各点の平均粒径-A 社ノズル (6MPa)

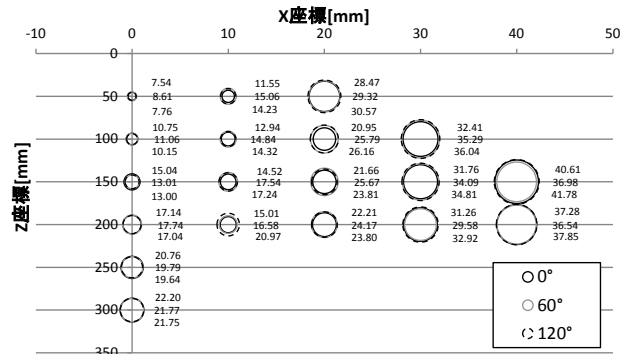


図 6 各点の平均粒径-B 社ノズル (6MPa)

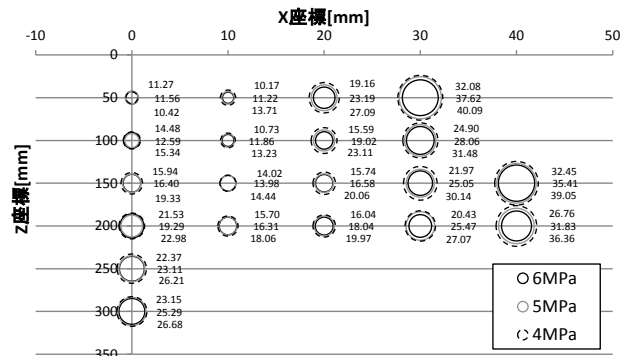


図 7 噴霧圧力ごとの平均粒径-A 社ノズル ( $0^\circ$ )

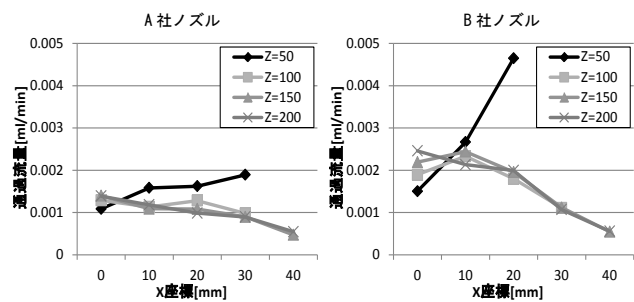


図 8 単位時間当たり測定点通過流量

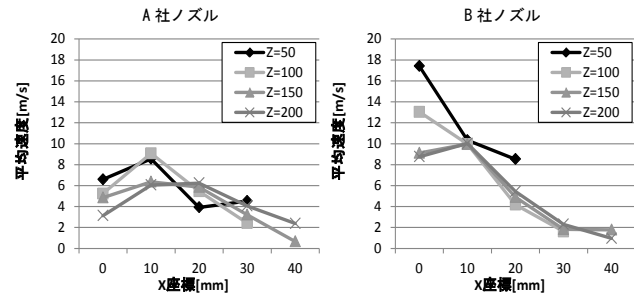


図 9 ノズルごとの平均速度比較

また粒子径ごとの速度分布に関しても、噴霧直後の外周部付近では粒子径ごとに速度差があったが、中心軸付近や Z=200mm 上の測定点においてはどの粒子の速度も一定であった。

### 3.PIVを用いた粒子速度測定

#### 3.1 実験概要

本実験では、ノズルから噴霧されたミスト粒子の速度分布の変化を、PIV（粒子画像相関法）を用いて解析を行っている。PDPA との違いは PIV では粒子の速度だけでなく、速度方向を捉えることができる点である。また、PDPA のように一点を通過する粒子に関してのみ測定を行うのではなく、全体の分布を捉えることが可能なため、ノズルからの距離による速度の変化を詳細に捉えることが可能である。

噴霧は鉛直下向きに行い、図 12 に示すようにノズルから鉛直方向に PDPA での測定点を含むように、重なりを持つ 3 範囲について画像撮影を行った。また表 1 の右列に示す実験条件のように、噴霧角度、圧力を変化させて実験を行ったが、PDPA 測定を行ったノズルと PIV 測定を行ったノズルは同一個体ではない。使用システムの詳細は表 2 に示す通りである。

#### 3.2 測定結果

##### (1) 測定データ扱いについて

PIV の解析では、測定対象としているミスト粒子以外にも、空気中の微細な粉塵や撮影画像への背景の写り込み等により実際にはミスト粒子が存在していない点の流れを算出してしまい、明らかに周囲とは速度の異なる誤ベクトルが解析結果として出力されることがある。また、相関法にて分布区画の移動を解析する際に実際的なミスト粒子の挙動とは異なった点に区画同士の相関のピークが発生した場合にも誤ベクトルとして解析してしまうことがある。これらの誤ベクトルを除去するために各測定点の結果から以下のような条件のデータを除いたものを解析結果としている。

① X 方向の速度  $V_x$  と Y 方向の速度  $V_y$  が以下の値となるデータを除去し、サンプル数(N=30or90)を減らす。

$$V_x \geq 10[m/s], V_x \leq -10[m/s] \quad V_y \geq 20[m/s], V_y \leq -10[m/s]$$

② ①で除外するデータが元のサンプル数のうち 3 割以上である点は、測定自体が困難である点として全サンプルを除去する。

##### (2) ノズルごとの速度分布について

以上の処理を行った解析結果を図 13、図 14 に示す。図は速度コンター図と速度ベクトルを重ねた図である。

A 社 B 社ノズルともに、噴霧直後はミスト粒子が多数存在し、それらの粒子が様々な方向に飛散するために粒子の動きを捉えることはできなかった。この傾向は噴射角度が狭い B 社ノズルの方が顕著に表れている。

B 社ノズルを角度ごとに比較すると、速度の速い粒子の存在する領域は、すべての角度に共通してノズル中心軸から僅かに右側に分布している。これは、実験室内に僅かに発生している気流が原因であると考えられる。それに対し、A 社ノズルは速度の速い粒子が存在する領域が  $0^\circ$  ではノズルの左側、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  では右側に分布しており、角度ごとに異なっている。このことは PDPA での実験結果より得られた A 社ノズルは角度ごとに粒子の分布が均一ではない結果と一致している。

速度の速い粒子は中心軸付近に集中して分布し、外

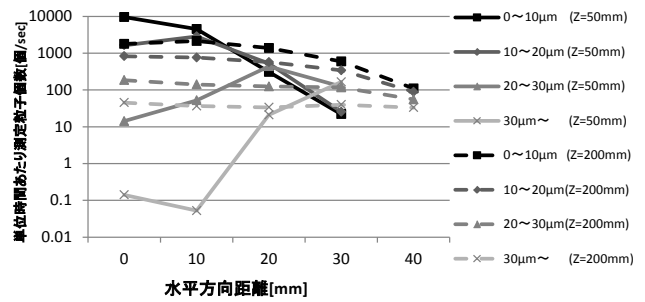


図 10 単位時間当たりの粒子個数分布

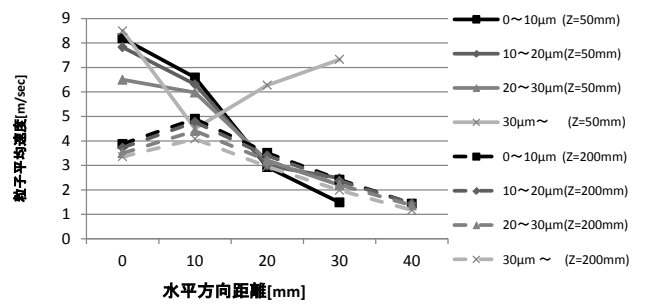


図 11 粒子径ごとの平均速度

表 2 PIV 使用システム詳細

| 使用システム      | VisVector DP2D<br>(OxfordLasers社製)    |
|-------------|---------------------------------------|
| レーザー種類      | YAGレーザーシート                            |
| 画像撮影間隔      | 63 $\mu$ SEC                          |
| 撮影画像<br>画素数 | 1200 × 1600pixel<br>(約125mm × 約170mm) |
| 画像処理ソフト     | VidPIV                                |
| 解析手法        | 画像相関法                                 |
| 分布解析区画      | 16 × 16pixel<br>(約1.7mm × 約1.7mm)     |

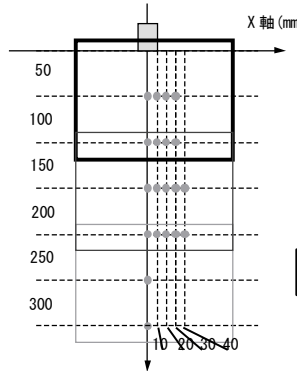


図 12 PIV 解析範囲

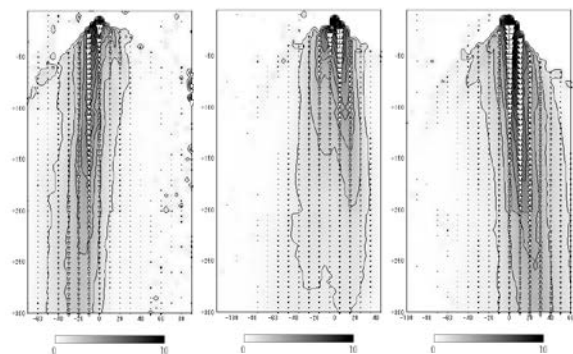


図 13 A 社ノズル速度コンター・ベクトル図

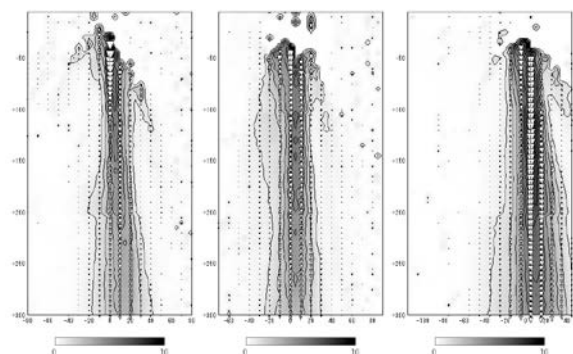


図 14 B 社ノズル速度コンター・ベクトル図

周部に近づくにつれて減少する傾向は PDPA での測定結果と一致した。また、噴霧外周部においては Z=100mm あたりの距離までは僅かながら周囲より速度が速くなっていることが確認できる。速度の方向は、個々の時間帯の画像によっては、ミスト噴霧の噴流が周囲の空気を巻き込むエントレインメントによる渦の発生が確認され、上向きの速度成分を持つ粒子も確認された。しかし、全測定の平均としては鉛直下向きとなるベクトルが主であった。

### (3) PDPA 実験結果との差について

図 15 に PIV と PDPA の各点での平均速度を示す。測定結果と比較すると、A 社ノズルは速度に大差はなく、中心軸上から水平方向にずれた点に速度のピークを持つことから PDPA での測定結果と PIV の測定結果は一致していると考えられる。しかし、B 社ノズルに関しては速度が中心軸上で最も速いという特徴は一致したものの PDPA での結果の約半分程度の速度となっている。垂直距離の離れた Z=200mm 上の測定点に関しては両測定での粒子速度が近い値となっていることから、噴霧直後の点では、ミスト粒子が密集しており正しい速度が測定されていない可能性がある。

ミスト粒子の密集した領域の粒子の挙動を調べるためには撮影範囲を狭め、分布区画内に存在する粒子の個数を減らし、より正確に分析を行う必要がある。さらに、外周部においては粒径の大きい粒子は PDPA 測定においては速度 20m/s を超えるような速い粒子の存在も稀に確認されており、今回のデータ処理では誤ベクトルとして除去してしまっている可能性もある。今後はこのような粒子についても粒子の挙動を解析する必要があるであろう。

### 4. 蒸発理論式との比較

PDPA での測定結果と、CFD などの数値計算で用いられる計算手法での粒子の蒸発理論式での粒子の変化について比較を行う。今回はノズル自体から噴霧される粒子の分布自体の違いではなく、ある分布がノズルから噴射された後に移動と共に蒸発する過程で、実測と理論計算でどのような差が生じるかの比較検討を行う。粒子個々の質量の時間変化は以下に示す式に従う。

$$m(t + \Delta t) = m(t) - N_i A_p M_i \Delta t \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$N_i = k_c \left[ \frac{P_{\text{sat}}(T_p)}{RT_p} - X_i \frac{P_g}{RT_g} \right] \quad \dots \text{式 (2)}$$

$$k_c = \frac{D_{i,m}}{d_p} \left( 2.0 + 0.6 \text{Re}_p^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \right) \quad \dots \text{式 (3)}$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad \dots \text{式 (4)} \quad \text{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{i,m}} \quad \dots \text{式 (5)}$$

m(t):時刻 t における粒子の質量[kg] Ni:水蒸気モル流束[mol/m<sup>2</sup>s]  
 Ap:粒子表面積 [m<sup>2</sup>] Mi:水の分子量[kg/mol] kc:物質移動係数[m/s]  
 Tp:粒子の絶対温度[K] Psat(Tp):Tp における飽和水蒸気圧[Pa]  
 R:気体定数[Pa・m<sup>3</sup>/mol・K] Xi:水のモル分率  
 Pg:空気の絶対圧[Pa] Tg:空気の絶対温度[K] dp:粒子の直径[m]  
 Di,m:水蒸気の拡散係数[m<sup>2</sup>/s]Re<sub>p</sub>:粒子と相対速度によるレイノルズ数[-]  
 Sc:シュミット数 [-] ρ :空気密度 [kg/m<sup>3</sup>] up:粒子速度[m<sup>2</sup>/s]  
 u:空気速度 [m/s] μ :空気の粘性係数 [Pa・s]

粒子速度の時間変化は、次のように仮定した。

①PDPA 測定での速度と粒径の対応から各測定点での粒径ごとの平均速度を求める。今回は 5 μm ごとの平均速度を用いた。

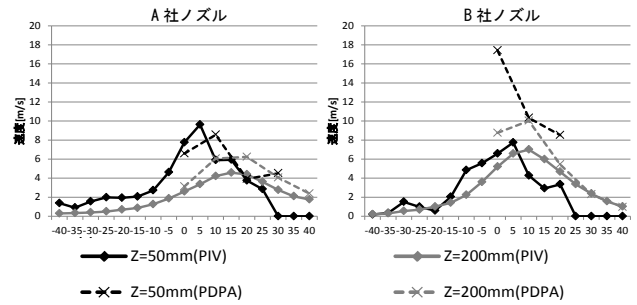


図 15 PIV・PDPA 速度差

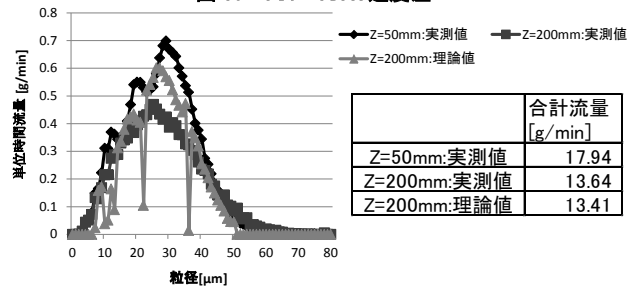


図 16 実測流量と理論流量

②PIV 測定での結果より、粒子の速度方向をすべて鉛直下向きであると仮定し、Z=50mm 上の測定点の粒子が Z=100mm 上に到達するまでは Z=50mm 上の測定点での平均速度を保持するとし、Z=100mm へ到達後は Z=100mm 上の測定点での速度で Z=150mm 上まで運動を行うものとした。粒子の移動時には粒子径の変化も伴うため、計算間隔を 0.001 秒とした差分法を用いて計算し、変化した粒子径に対応した速度で計算を行った。

図 16 は Z=50mm、Z=200mm 上の実測値の粒子の流量分布と、Z=50mm 上の分布より理論式により算出した Z=200mm 上の流量分布である。10 μm 以下の粒子の流量が理論値では少なくなっている。また、流量自体には多少差が生じているものの、流量のピークは実測値の 25 μm に対し、理論値では 27 μm となり近い値を示している。このことより理論式では微小粒子の蒸発速度は実測よりも多少速いものの、粗大粒子に関しては、理論式に従って変化している。流量の合計では実測値、理論値ともに近い値を示し、同様の蒸散量を得られていることから、蒸散効果は理論式に従うと判断できる。しかし、Z=200mm 上を通過してから一定時間が経過し微小粒子の割合が増加してくると、実際とは異なった蒸散量となることが予測される。

### 5. まとめ

PDPA 測定を用いて、2 種類のノズルについての特徴、噴霧圧力変化に伴うミスト粒子の変化を把握することができた。PIV の測定では、PDPA では困難であった連続での全体の流れ場の速度分布について把握することができた。しかし、測定手法やデータ処理についての課題が残る結果となった。理論式からの分布の予測では、今回の測定点上では実測と近い算出結果となり、理論式に従う結果となった。今後は、ノズルから噴霧される粒子自体の算出理論式、粒子の運動に関する理論式との照合も必要となる。

参考文献

- 1) 日本液体微粒化学会、アトマイゼーション・テクノロジー、森北出版、2001
- 2) 水谷幸夫、燃焼工学、森北出版、1977
- 3) 植村聡、電子デバイス製造用クリーンルームの湿度制御の省エネルギー化に関する研究、2008
- 4) 可視化情報学会、PIV ハンドブック、森北出版、2002
- 5) 水野吉崇、ドライミストの粒径分布測定実験、2009