ドライミスト粒子の粒径・速度分布に関する研究

東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 辻本研究室 4109613 加藤史郎

第一章 序論	
1.1 研究背景	•••••6
1.1.1 ドライミストの概要と現状	•••••6
1.1.2 液体の微粒化技術	•••••6
1.1.3 噴霧液体の微粒化過程	$\cdots 9$
1.1.4 粒子化特性の計測手法	•••• 9
1.2 研究目的	•••••11
1.3 研究の流れ	•••••11
第二章 PDPA を用いた粒径・粒子速度分布	
2.1 測定概要	•••••14
2.1.1 PDPA の原理	••••14
2.1.2 測定条件	••••16
2.2 粒径分布測定結果	•••••24
2.2.1 分布型について	•••••24
2.2.2 粒子 10000 個の粒径分布について	••••25
2.2.3 ザウター平均粒径について	•••••40
2.2.4 単位時間当たりの流量について	••••44
2.2.5 単位時間当たりの通過粒子数量について	$\cdots \cdot 47$
2.3 粒子速度分布測定結果について	•••••49
2.3.1 粒子 10000 個の速度分布について	$\cdots \cdot 49$
2.3.2 各測定点の平均速度について	•••••57
2.3.3 粒子径ごとの平均速度について	••••58
2.4 測定時の実験場内温湿度条件による測定結果への影響	••••60
2.5 まとめ	•••••61
第三章 PIV を用いた粒子速度分布	
3.1 測定概要	•••••64
3.1.1 PIV の原理	•••••64
3.1.2 測定条件	••••66
3.2 速度分布測定結果	•••••69
3.2.1 測定結果扱いについて	••••69
3.2.2 撮影画像について	••••70
3.2.3 平均速度コンター図	•••••72
3.3 PDPA 測定結果との比較	•••••74

目次

第四章 粒径分布の実測値と理論値の比較

4.1	数値計算によるドライミスト効果予測研究の現状	•	•	•	•	•	78
4.2	理論値計算方法	•	•	•	•	•	79
4.2.	1 蒸発に関する理論式	•	•	•	•	•	79
4.2.	2 粒子速度について	•	•	•	•	•	81
4.2.	3 測定点ごとの面積による重み付け方法	•	•	•	•	•	82
4.3	理論値計算結果	•	•	•	•	•	84
第五章	章 総括	•	•	•	•	•	88
参考	文献	•	•	•	•	•	90
謝辞		•	•	•	•	•	91
付録		•	•	•	•	•	93

第一章 序論

第一章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 ドライミストの概要と現状

ドライミストとは、水をポンプから圧送し特殊なノズルから微細な粒子として噴霧する ことにより、気化する際に空気より気化熱を奪うことにより空気を冷却するシステムであ る。低エネルギーで空気の冷却を行う本システムは、ヒートアイランド現象の緩和効果が 期待され、エアコンに代わる冷房システムとして注目されている。

ドライミストシステムは辻本(現東京理科大学教授)、奥宮(名古屋大学教授)らによっ て開発され、2005年に愛知万国博覧会『愛・地球博』にて初めて導入され、今日では六本 木ヒルズ、新丸ビルなどに設置された大規模施設向けのシステム、路面店やカフェ等の小 規模施設向けのシステム、さらには家庭用に開発された小型システムなど、徐々に普及が 進んでいる。また、冷却を目的としたこれらの従来システムに加え、加湿を目的とした工 業用や農業用のシステム、インフルエンザ対策とした消毒液散布用のシステムなどの開発 が進んでいる。このようにドライミストの用途は多岐に渡り、それぞれに適した噴霧シス テムが求められるようになっている。

1.1.2 液体の微粒化技術

微粒化技術は、エネルギーや化学工業、造粒技術などの工業分野のみではなく、製薬、 医療、食品、農業などの多くの分野で利用されている重要な技術となっている。液体を微 粒化して噴霧するノズルはその使用分野、用途等により様々な種類のノズルが開発され、 その微粒化方法用途等は多岐に渡る。本項では、それらの微粒化方法の一部について示す。

液体の微粒化装置としては、以下に示すように圧力エネルギーを利用する方法、気体エ ネルギーを利用する方法、遠心力を利用する方法になどに大別できる。

圧力エネルギー・・・単一噴孔ノズル、衝突型噴射弁

 ファンスプレーノズル、渦巻き噴射弁

気体エネルギー・・エアーアシストアトマイザー、エアーブラストアトマイザー
遠心力・・回転噴孔、回転円板、回転カップ、回転ホイール
振動エネルギー・・振動ノズル、超音波アトマイザー、音響アトマイザー
電気エネルギー・・・静電アトマイザー
熱エネルギー・・・蒸発凝縮法、減圧沸騰法

(i) 圧力エネルギーによる微粒化

液体に直接圧力をかけてノズルの先端の小孔から高速噴射させ、液柱や液膜の状態で微粒化させる方法であり、液体の微粒化の分野では最も多く用いられる方法である。

・単一噴孔ノズル

ノズルの噴孔から液体が噴出する際に微粒化するノズルである。噴霧後の液滴の分裂 速度の違いにより用途が異なり、インクジェットやディーゼルエンジンのホールノズ ルなどに使用される。微粒化の機構としては、図1-1に示すようにノズル内での乱れや キャビテーションの発生によるものであると考えられている。





流の挙動*1 図 1-2 単一噴孔

図 1-2 単一噴孔ノズルの微粒化画像※2

渦巻き噴射弁

中程度の圧力で広い流量範囲に渡って良好な噴霧状態を形成できるため、家庭用から 工業用機器まで最も多く使用されるノズルである。内部構造は図1-3に示すようになっ ており、噴霧前にノズル内部で旋回するために、噴霧後の粒子は噴霧口から軸方向と 接戦方向の速度成分をもって噴出し、円錐状の噴霧を形成する。噴霧口より霧化して いるように見えるが、微粒化機構としては図1-4のいずれかに属するとみられている。 本実験で使用したノズルもこの種類のノズルとなっている。



図 1-3 渦巻き噴射弁の構造*1







図 1-5 渦巻き噴射弁の微粒化画像※2

(ii)気体エネルギーによる微粒化

二流体微粒化方法とも呼ばれ、液体を高速気流によって微粒化する方法で、気体には空 気、ガス、蒸気が使われる。渦巻き噴射弁と同様に工業用から家庭用まで様々な分野に用 いられる。気体エネルギーの付加方法により多様なノズルの設計が可能でるため、最も種 類の多い微粒化法となっている。圧力エネルギーを利用したものに比べ、微粒化の制御は 容易であり、均一な粒子分布となる噴霧が可能であるが、噴霧に使用するエネルギーが大 きいといった難点もある。

(iii)遠心力による微粒化

高速で回転する物体に液体を供給することにより、物体の表面や縁から微粒化する方法 である。ボイラーや噴霧乾燥の分野で使用されるが、金属、セラミックなどの粉体製造に も利用されている。

(iv)その他の方法による微粒化

加振器によるノズル振動、磁歪振動子、圧電素子による超音波振動、空気流動による音響などのエネルギーで液体を微粒化する方法がある。均一径粒子や微細粒子などの特殊な 噴霧生成に用いられ、燃焼、空調、塗装、微粉末製造等に多く利用される。

1.1.3 噴霧液体の微粒化過程

まとまった状態の液体を細かな粒子にして、液体の噴霧を作り出すことを微粒化と呼ん でいる。ドライミストは前述のとおり、ノズルから水を微細な粒子として噴霧しているが、 その微粒化過程は非常に複雑なものとなっている。液体を微粒化することにより得られる 効果としては、液体表面積の増加による熱移動などの促進、粒子数増加による分散効果、 液滴系の微細化による混合の促進などの効果が表れる。

液体が微小な液滴へと変化する過程の概念図を図 1-6 に示す。ノズルから噴霧された液体 は液柱もしくは液膜状に広がる。液体自体の界面の不安定性や周囲気流の干渉により、液 柱、液膜は液糸を形成して、液滴へと分裂する。このような微粒化過程は一般に非常に複 雑であり、非定常性が高く、多くの現象が工学的な解明が行われていないのが現状である。



図 1-6 微粒化過程イメージ図※1

1.1.4 粒子化特性の計測手法

噴霧された粒子の評価要素としては、粒径分布、平均粒径、流束分布、質量流束分布な どの噴霧特性や液柱分裂長さ・時間、噴霧広がり角度などの連続体としての特性等が存在 する。これらの特性の計測方法としては機械的計測法と光学的計測法に大別される。レー ザー技術の発展に伴い近年はレーザー技術を用いた光学的計測法が多く開発されている。 (i)機械的計測法

計測法の特徴としては、粒子を直接採取することで、粒径に関する情報を抽出する点で ある。以下に機械的計測法の一例を示す。

・受止法

計測対象とする液体や粒子をなんらかの方法で受け止め、それを写真撮影や顕微鏡に より観察し、粒子それぞれの粒径を計測し、粒径分布等を求める。受け止め方法として は、液滴が溶解しない溶液による受け止めや、化学反応を利用し粒子の受け止め跡を可 視化する技術がある。

・固化法

測定対象の噴霧液滴を固化させて、それを採取して粒径を測定する。ロウを利用して 固化させる方法や、液体窒素などを利用して液滴を凍結させる方法がある。 (ii)光学的計測法

計測法の特徴としては、機械的計測法とは異なり粒子に接触することなく粒子の情報を 抽出する点である。噴霧の特性を知るためには非接触で計測することが望ましく、これら の計測には主にレーザー光源が用いられる。

・レーザー散乱計測

粒子に光が当たっておこる散乱過程を利用した計測法であり、入射波と同じ波長をも つ弾性散乱が生じる場合に、粒子の大きさや形、挙動や温度等について情報を得ること ができる。

・位相ドップラー法

レーザードップラーの位相原理を応用した粒子解析技術であり、粒子の大きさと同時 に粒子の速度を計測が可能である。本手法を用いた計測装置として PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)がある。詳細は 2.1.1 『PDPA の原理』に示す。

・フラウンホーファー回折法

物体が光源およびスクリーンから十分離れて置かれている場合に光が回折することを フラウンホーファー回折と呼び、この回折光の強さにより粒径を求める。

・画像による計測法

流れ場のある瞬間の速度分布を求める方法であり、1 枚の画像上の粒子の軌跡長さと露 光時間の比から流速を求める粒子軌跡流速計 (PSV)、流れ場の粒子密度が低い場合に用 いられ、ある連続画像から注目する粒子もしくは粒子群についての移動量を求める粒子 像追跡流速計 (PTV)、PTV では測定困難な粒子密度である場合に、連続する 2 画像か ら、検索範囲の空間相関をデジタル的に求めて移動量を求める粒子像相関流速計 (PIV)、 さらに、PIV でも測定困難である高密度の粒子群について測定する際には、光フーリエ 変換によりヤングの干渉縞を求めて、その間隔と角度から速度の大きさと方向を求める レーザースペックル流速計 (LSV) などがある。PIV の詳細は 3.1.1 『PIV の原理』に示 す。

·小径粒子計測法

噴霧の計測では、多くの場合は対象とする粒径は1µm以上であるが、エアロゾルの分野においてはそれ以下の粒子の測定も必要となる。それらの粒子の測定には偏光比法や動的光散乱法などが用いられる。

10

1.2 研究目的

ドライミストの噴霧効果を決定する要因のひとつとして、噴霧される粒子の粒径が挙げ られる。一定流量の水を噴霧する際には、粒径の大きな粒子を噴霧するのに比べ粒径の小 さな粒子を多数噴霧した方が、空気と接触する表面積が増加するため、水粒子が蒸発しや すくなる。粒子が蒸発しやすくなれば、より多くの水量を噴霧することが可能になり、高 い蒸散効果を得ることができると考えられる。粒子径が小さければ噴霧後すぐに蒸発する ことになり、ドライミストのコンセプトのひとつである『濡れない霧、』『化粧落ちしない』 という点に関して重要な要素となる。また、ノズルから噴霧されたミスト粒子の速度も噴 霧効果を決定する要因のひとつとなっており、粒子の速度が大きければ噴霧位置から離れ た位置であっても噴霧効果を期待することができる。

これらの要因は、ミストが噴霧される圧力やノズルの種類によって大きく変化し、使用 するノズルの特性と、噴霧圧の変化による粒径、粒子速度の変化の関係性を把握すること が重要となる。

そこで本研究では、近年発展している計測法の一種である PDPA と PIV を用いて粒子の 粒径、速度等について測定することにより、使用ノズル、噴霧圧力によるそれらの要因の 変化を評価することを目的としている。またそれらの実測結果からドライミストの効果予 測手段として研究が進められている数値計算の計算結果の評価も行うものとする。

1.3 研究流れ

本論文は以下の構成から成り立つ。第二章では PDPA を用いた測定より、噴霧しよう/ ズルや噴霧圧力を変化させた場合の粒径、速度分布の特性等について、測定結果から考察 を行う。第三章では PIV を用いた画像解析より、PDPA では測定できない粒子速度の方向、 また点ではなく全体としての粒子流れの特徴について考察する。第四章では、PDPA、PIV の両測定の結果より、数値解析で用いる理論式を用いた場合の粒子の分布と実際の分布と の差について考察する。第五章では、総括として本稿全体を通じての成果と課題について 記述を行う。

引用文献

※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 鈴木孝司、液体微粒化の基礎、<u>http://www.ilass-japan.gr.jp/activity/other/12th suzuki.pdf</u>

第二章 PDPA を用いた粒径・粒子速度分布

第二章 PDPA を用いた粒径・粒子速度分布について

2.1 測定概要

2.1.1 PDPA を用いた測定の原理

PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)とは、位相ドップラー粒径解析装置を意味し、 空間中のある一点での粒径、粒子速度を計測する手法の一つである。

PDPA は図 2-1 に示すように、レーザー発光器と、それにより発光われたレーザー光線を 受ける受光器の二つの道具から成り立つ。2本のレーザー光を交差させることにより互いの レーザーの波が干渉して、図 2-2 に示すように干渉縞が形成され干渉波が発生する。この干 渉縞を粒子が通過すると、通過する粒子の粒径や粒子速度により干渉波に一定の乱れが生 じる。受光器でこの干渉波の乱れを検知し分析することによって粒径、粒子速度を求める ことが可能となる



図 2-1 PDPA 測定機器

図 2-2 干渉波の形成

粒径の測定は、受光器に到達する2つのレーザー光の波長の差から求めることができる。 図 2-3 にしめすようにレーザー光の光路上に透明粒子が存在すると粒子内部を通過する際 に屈折を起こす。この屈折により図 2-4 に示す受光点において測定される 2本のレーザー 光の波長には位相差Φが生じる。レーザー光の屈折率は、通過する粒子の大きさによって 異なるために、受光点に生じる位相差Φも異なり、この位相差Φについて通過粒子やレー ザー光、受光器の物性を定め解析することによって、粒径が求まる。



図 2-3 液滴の大きさとレーザー光の屈折



流速は、図 2-2 で示した干渉縞を粒子が通過した際には、散乱光が強度変化することによ り図 2-5 に示すようなバースト状のドップラー信号を生じる。干渉縞の間隔は、レーザー光 の交差角と波長から幾何学的に表現でき、ドップラー信号からドップラー周波数を検出し、 干渉縞の間隔から速度を求めることができる。この原理は、LDV(レーザートップラー 流速計)の原理を利用したものであり、PDPAはLDVの原理を拡張し粒径解析の機能 を同時に可能とした測定装置となっている。



図 2-5 干渉縞に生じるドップラー信号

2.1.2 測定条件

(i) 測定使用ノズルについて

測定は特徴の異なるA社製、B社製の2種類のノズルを使用して行った。

A社ノズル、B社ノズル共に渦巻き噴射弁という構造を持ち、ノズルから噴霧された液体 は中心部が空洞になった円錐状(ホローコーン状)の噴霧を形成するものである。

A 社製ノズル(図 2-6)は現在家庭用ドライミストのノズルとして使用されており、B 社 製ノズル(図 2-7)は愛知万博グローバルループなどの半屋外空間で使用されたノズルであ る。両ノズルは共に製品公称値としてザウター平均粒径が 16µm として与えられており、 それぞれのノズルの特徴の大きな違いはノズルから出るミストの噴霧角度にある。A 社製ノ ズルは家庭用に改良されており、周囲を均一に冷却するために図 2-8 のように比較的角度が 広く噴霧するように設計されているのに対し、B 社製ノズルはテントから遠くまで行きわた らせるために図 2-9 のように角度が狭く噴霧するように設計されている。



図 2-6 A 社製ノズル



図 2-8 A 社製ノズル噴霧時



図 2-7 B 社製ノズル



図 2-9 B 社製ノズル噴霧時

(ii) 実験場所、実験日時

実験は 2009 年 10 月 1 日、2 日に、兵庫県丹波市にある A 社ノズル工場で行われた。以下の図 2-10 は、実験施設の平面図と各機器の概要である。測定時の室内の温湿度条件を測定するために、図中に示す赤丸の点に温湿度計を設置して各測定開始時の温湿度状況の測定も行っている。PDPA 測定装置、温湿度計については、以下の図 2-11、図 2-12 に写真を、表 2-1、表 2-2 に仕様を示す。



図 2-10 実験場平面図

PDPA レーザー解析装置



図 2-11 レーザー解析装置写真

・温湿度計(温度とり Jr.)



図 2-12 温度とり Jr.写真

表 2-2 温度とり Jr.仕様

取扱会社	株式会社 テイアンドデイ								
製品番号	Thermo Recorder RTR-53								
測定チャンネル	温度(チャンネル1)	湿度(チャンネル2)							
外付温湿度センサ	0∼55°C	10~95%RH(結露なきこと)							
測定精度	平均±0.3℃	±5%RH(25℃50%RH 時)							
測定·表示分解能	0.1°C	1%							
センサ仕様	サーミスタ	高分子湿度センサ							
記録容量	8000 7	データ×2 チャンネル							
本体寸法	高さ62>	<幅 47×奥行き 19mm							
本体動作環境		−30°C~80°C							

表 2-1 レーザー解析装置仕様

メーカー	TSI						
型式	FSA4000						
レーザー種類	4W アルゴンレーザー(水冷式)						
レーザー光径	1.77mm						
測定領域	6.58 × 10 ⁻⁸ m ²						
解析ソフト	FlowSizer						

(ⅲ) 測定位置について

ノズルから鉛直下向きにミストを噴霧し、ノズルから一定距離の各点において測定を行った。ある測定点おいて、粒子 10000 個分の粒子径と粒子速度を測定することを1回の測定 として、各測定点において1回~3回の測定を行った。

測定点の詳細については、以下の図 2-13 の左部に示す通りであり、ノズルの中心軸回り 円周方向に 60°,120°と回転させ同様の測定を行った。また、噴霧圧力を 6MPa,5MPa,4MPaと変化させた場合、同一規格のノズルで別固体のもの用いた場合の測定 も行った。実験日時と測定条件の詳細は次頁の表 2-3 に示す。実験条件ごとの測定順序は表 2-4 に示すように、ノズルから垂直距離が近い Z=50mm 上の測定点の中心軸上の点から測 定を開始し、半径方向に順に測定、そして Z=50mm 上の点の測定を終了後、Z=100mm 上 の測定点、Z=150mm 上の測定点と順に測定を行った。



図 2-13 PDPA 測定点

顺序		测宁图检	測中效フ	測定内容					
順序	口 1·J	測正開始	測正於」	ノズル種類	角度	圧力			
1	2009/10/1	10:43	11:47			6MPa			
2	2009/10/1	12:48	13:19		0°	5MPa			
3	2009/10/1	13:22	14:01			4MPa			
4	2009/10/1	14:10	14:47			6MPa			
5	2009/10/1	14:52	15:41		60°	5MPa			
6	2009/10/1	15:43	17:00	A 社		4MPa			
7	2009/10/1	17:03	18:56			6MPa			
8	2009/10/1	18:58	19:25		120°	5MPa			
9	2009/10/1	19:26	20:09			4MPa			
10 ^{%1}	2009/10/2	8:51	10:58			5MPa			
11 ^{**}	2009/10/2	11:03	12:06			4MPa			
12	2009/10/2	12:13	12:50		0°				
13	2009/10/2	12:52	13:25	B 社	60°	6MPa			
14	2009/10/2	13:26	14:11		120°				
15	2009/10/2	14:24	4:24 14:56 A 社−別固体 — ^{※2}			6MDc			
16	2009/10/2	14:59	15:25	B 社−別固体		owra			

表 2-3 実験条件詳細

※1 順序 8、9の一部の測定点((150,20)、(150, 30)、(150, 40)、(200, 20)、(200, 30)、(200, 40))は時間の関係
上次の日に測定を行った。これが順序 10、11の測定内容である。

※2 別固体においてはノズル角度を回転させた測定を行っていない。

表 2-4 測定順序

	X軸0(mm)			10			20			30			40		
測定回数	一回目	二回目	三回目	一回目	二回目	三回目	一回目	二回目	三回目	一回目	二回目	三回目	一回目	二回目	三回目
7軸50(61)	10.45	11.68	11.55	10.11	10.09	9.58	19.15	19.38	18.93	32.08	32.02	32.13			
1002	16.05	14.02	12.94	10.82	10.77	10.54	15.26	16.71	14.45	25.75	23.29	25.39			
1500	15.83	14.87	16.89	14.43	14.30	13.19	15.18	15.99	16.05	20.72	23.01	21.84	32.45	\sim	\sim
1500														•	
000	22.65	20.31	21.30	15.10	16.21	15.67	15.56	16.88	15.57	19.53	19.40	22.18	26.66	27.40	26.15
200(4)															
	22.03	18.85	24.83												
2500															
	22.37	22.37	23.59												
3000															

注)(150mm,40mm)の点を見ると測定は一回となっているが、これは粒径が大きくなりそれにともなって測定時間が著しく長くなったため時間の都合上測定回数を減らした。

(iv) 実験場内の温湿度状況

実験を行った2日間の実験場内の温湿度の変化を以下の図2-9に示す。温湿度データは毎時間のデータではなく各測定点の測定開始時に記録しているため、各実験条件ごとに測定開始時を測定点(0,50)の温湿度、測定終了時を測定点(0,300)の温湿度としてグラフを作成している。また、別固体ノズルを使用した実験に関しては記録がなかったため記載されていない。それぞれの実験条件での各点測定時の温湿度状況は表2-5~表2-8に示す。

図中の青の時間帯を角度 0°、赤の時間帯を 60°、緑の時間帯を 120°として表しており、同じ色内で 6MPa、5MPa、4MPa と圧力を変化させて噴霧し測定を行っている。

両日の温度を比較すると、2日目の温度が低く、最大5℃程度の差が生じている。また、 10月2日は外部が雨だったこともあり、相対湿度も非常に高くなっている。

また、測定角度ごとの差としては A 社ノズルの 0°、60°での測定に比べ 120°での測 定時の温度が低くなっていることが分かる。しかし、この温度差は測定結果には大きな影 響は与えていないと考えられる。詳細は『2.4 測定時の実験場内温湿度条件の違いによる 測定結果への影響』で述べる。



図 2-14 実験場温度変化

	A社ノズル6MPa													
	X軸(mm)	(0	1	0	2	0	3	0	4	0			
Z軸(mm)	角度	気温℃	湿度%											
	0°	26.7	69	26.7	68	26.3	66	27.4	64					
50	60°	28.7	56	28.7	56	28.7	56	28.7	55					
	120°	27.1	62	27.1	62	27.0	63	27.0	62					
	0°	26.2	70	26.3	68	26.3	67	26.4	67					
100	60°	28.6	56	28.6	56	28.6	56	28.6	56					
	120°	26.9	63	26.9	63	26.9	63	26.8	63					
	0°	27.6	64	27.6	64	27.6	63	27.6	62	27.7	62			
150	60°	28.5	56	28.5	56	28.5	57	28.5	57	28.4	58			
	120°	26.5	66	26.4	66	26.4	67	26.4	68	25.9	67			
	0°	28.0	60	28.2	60	28.1	59	28.1	59	28.2	58			
200	60°	28.4	58	28.4	57	28.4	57	28.5	57	28.5	57			
	120°	25.2	72	25.2	73	25.2	73	25.1	74	24.9	72			
	0°	28.4	57											
250	60°	28.7	57											
	120°	24.7	72											
	0°	28.4	58											
300	60°	28.7	57											
	120°	24.6	73											

表 2-5 測定時温湿度状況(A 社-6MPa)

表 2-6 測定時温湿度状況(A社-5MPa)

A社ノズル5MPa													
	X軸(mm)	()	1	0	2	0	3	0	4	0		
Z軸(mm)	角度	気温℃	湿度%										
	0°	28.7	58	28.8	58	28.8	58	29.1	57				
50	60°	28.7	57	28.7	57	28.7	57	28.7	57				
	120°	24.6	73	24.6	74	24.6	73	24.6	73				
	0°	29.3	57	29.2	57	29.1	57	29.2	57				
100	60°	28.7	57	28.7	57	28.7	57	28.7	57				
	120°	24.6	74	24.6	74	24.5	74	24.5	74				
	0°	29.2	56	29.2	56	29.1	56	29.0	57	29.0	58		
150	60°	28.8	57	28.8	57	28.8	57	28.8	57	28.9	56		
	120°	24.5	75	24.5	75	23.1	86	23.0	87	23.8	88		
	0°	29.0	59	29.0	58	29.1	59	29.1	58	29.1	58		
200	60°	28.5	57	28.5	57	28.6	57	28.5	59	28.2	57		
	120°	24.5	74	24.5	74	23.5	87	23.5	85	23.9	85		
	0°	29.2	58										
250	60°	28.1	59										
	120°	24.5	74										
	0°	29.2	58										
300	60°	28.2	59										
	120°	24.5	74										

	X軸(mm)	()	10		20		30		4	0			
Z軸(mm)	角度	気温℃	湿度%											
	0°	29.4	57	29.3	56	29.3	56	29.2	56					
50	60°	28.2	60	28.2	60	28.2	60	28.1	59					
	120°	24.5	74	24.5	74	24.5	74	24.5	74					
	0°	29.0	56	28.9	56	28.9	57	28.9	57					
100	60°	28.1	59	28.1	60	28.1	60	28.1	59					
	120°	24.5	73	24.5	75	24.5	75	24.4	76					
	0°	28.8	57	28.8	57	28.8	57	28.7	57	28.7	57			
150	60°	28.2	61	28.2	60	28.2	60	28.0	58	27.8	64			
	120°	24.3	77	24.3	77	23.9	85	23.9	85	24.0	86			
	0°	29.0	56	29.0	57	29.0	56	29.1	56	29.1	55			
200	60°	27.7	64	27.6	63	27.6	62	27.6	62	27.5	63			
	120°	24.3	76	27.1	76	27.1	86	24.2	85					
	0°	29.2	56											
250	60°	27.1	63											
	120°	24.3	75											
	0°	29.1	55											
300	60°	27.0	62											
	120°	24.3	76											

表 2-7 測定時温湿度状況(A社-4MPa)

表 2-8 測定時温湿度状況(B社-6MPa)

B社ノズル6MPa													
	X軸(mm)	(0	1	0	20		30		4	0		
Z軸(mm)	角度	気温℃	湿度%										
	0°	24.5	81	24.5	81	24.4	81						
50	60°	24.3	81	24.3	81	24.3	81						
	120°	24.2	85	24.2	85	24.2	85						
	0°	24.3	81	24.3	82	24.3	82	24.3	82				
100	60°	24.3	81	24.3	81	24.3	81	24.3	83				
	120°	24.1	86	24.1	85	24.2	85	24.1	85				
	0°	24.2	82	24.2	82	24.2	82	24.2	81	24.1	81		
150	60°	24.2	84	24.2	83	24.2	83	24.2	83	24.2	82		
	120°	24.1	86	24.1	85	24.1	85	24.0	83	24.0	85		
	0°	24.2	78	24.2	78	24.2	79	24.2	80	24.2	79		
200	60°	24.2	82	24.2	83	24.2	83	24.2	84	24.2	84		
	120°	24.0	86	24.0	86	24.0	86	42.1	86	42.1	86		
	0°	24.2	80										
250	60°	24.2	85										
	120°	24.2	86										
	0°	24.2	80										
300	60°	24.2	85										
	120°	24.2	86										

2.2 粒径分布測定結果

2.2.1 分布型について

本項では、測定全体を通じて粒径の個数分布で特徴的であった 2 種類の分布型について 説明を行う。なお測定点ごとの分布型の詳細については後述の 2.2.2 で述べる。

(i)対数正規分布

ノズルを用いた液体の噴霧では微小な液滴ほど個数が多くなるのが一般的である。その ため、個数分布としては微小粒子群に最頻値を持ち、粒子が粗大になるに従い個数が減少 する分布となる。

そのような分布を表す分布関数として対数正規分布がある。対数正規分布は、確率変数 X の対数値 lnX が正規分布となる分布であり、分布関数は式-2.1 で表現される。

$$f_{X}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^{2}\right] \cdot \cdot \cdot \overrightarrow{x} - 2.1$$

ここで、 λ 、 ζ はそれぞれ lnX の平均値と lnX の標準偏差を表しており、この分布の特性 を表すパラメーターである。また、 λ 、 ζ と X の平均値 μ 、X の標準偏差 σ の関係は、以 下の式-2.2、式-2.3 で表される。

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^{2}\right) \cdot \cdot \cdot \vec{x} - 2.2$$
$$\lambda = \ln\mu - \frac{1}{2}\sigma^{2} \cdot \cdot \cdot \vec{x} - 2.3$$

(ii)二峰型分布

ノズルを用いた液体の噴霧において粒子の分布は対数正規分布を示すと述べたが、今回 の測定結果では、一部の測定点において微小粒子と粗大粒子に分布のピークを持つ分布が 見られた。一般的に、二峰性分布は二つの異なる特性を持つ分布が重なり合わさってでき たものと考えられている。 2.2.2 粒子 10000 個の粒径分布について

本項では、各測定点で測定を行う10000個の粒子の粒径の分布について検討を行う。 (i)測定の再現性について

図 2-16 に A 社製ノズル、測定角度 0°、6MPa で噴霧した際の各測定での粒径分布の全体像を示す。図内の各グラフの配置位置はノズルとの位置関係を示しており、グラフは右下に示すように、横軸に粒径、縦軸に測定個数を示している。測定個数は1µmごとに粒径を区分している。

一部の測定点を除いて、測定ごとの値はほぼ同じ分布を示していることが分かる。図 2-16 に示す測定点(30,150)や測定点(30,100)のように測定ごとに分布に僅かに生じている点もあ る。このような測定点はいずれの噴霧条件での測定においても 1~2 点存在するが、噴霧の 外周部付近に集中していた。これは外周部付近の測定点を通過する粒子個数が少ないため に、室内に発生している僅かな気流の影響で分布が変化してしまったために生じる差であ ると考えられる。



図 2-15 測定ごとの分布に差が生じる測定点

測定ごとに結果に差が生じることはあるが、ほとんどの測定点で測定ごとの結果は一致 しており、生じている差も小さいことから、測定の再現性は高いと考えられる。



(ii)角度ごとの差について

一定圧力下においてノズルを円周方向に 0°,60°,120°と回転させた場合の、ミスト粒子の粒径分布の変化について考察する。なお、各測定角度における粒径の分布は各測定点における全測定の平均を算出し、比較を行っている。

図 2-20 に 6MPa で A 社製ノズルからミスト粒子を噴霧した際の全測定点での角度ごとの 粒径分布の全体像を示す。図内の各グラフの配置位置はノズルとの位置関係を示しており、 グラフは右下に示すように、横軸に粒径、縦軸に測定個数を示している。測定個数は 1 µ m ごとに粒径を区分している。以下に特徴的であった分布傾向について測定点ごとの粒径分 布を抜粋し説明する。

図 2-17 は中心軸上の測定点(0.50)(0.300)の測定結果を示したものである。

全ての角度に関してノズル中心軸上では、 $4\sim 5\mu$ mの粒子を最頻値に持つ対数正規分布 となっている。中心軸上での分布の変化としては、噴霧直後の測定点(0,50)ではほぼすべ ての粒子が 20μ m以下に分布しており、ノズルから垂直方向に遠方になるに従って徐々に 20μ m以上の粒子が増加し、測定点(0.300)ではわずかではあるが 40μ m 程度の粒子も 測定されるようになる。しかし、 20μ m以上の割合は僅かであり、中心軸上では 20μ m以 下の微小粒子が分布の大半を占めていることがわかる。



図 2-17 中心軸上の測定点の粒径分布(A 社-6MPa)

図 2-18 は Z=50mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,50)、(30,50)を、図 2-17 は、Z=200mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,200)、(40,200)の粒径分布を示したものである。

半径方向の分布の変化に着目すると、図 2-18 に示す噴霧直後の Z=50mmの測定点では 中心軸から遠方の測定点になるにつれて、微小粒子の割合が徐々に減少し、粗大粒子の割 合が増加しており、分布の型が対数正規分布から二峰型へと変化していることが分かる。 これはノズルの特徴のひとつである中空噴霧ノズルの特性を表れた結果であると考えられ、 質量の大きき粗大粒子はノズルから噴霧され直後の速度成分を保持し噴霧外周部方向飛散 するため外周部に多く存在し、質量の小さい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。

この傾向はノズルから垂直距離が離れた点に関しても測定されているが、図 2-19 に示す ように Z=200mmの測定点では 120°での測定を除いて、外周部に近づくにつれて粗大粒 子の割合は増加するもの外周部付近の測定点(40,200)でも分布型は対数正規分布であった。

また、中心軸上の測定点(0,50)では角度ごとに分布に差がほとんど見られなかったのに 対し、中心軸より外側の測定点では角度ごとに分布に差が生じている。この傾向はノズル からの垂直距離が離れた点に関しても測定されており、分布の差は垂直距離の離れた測定 点の方が顕著に表れていることが分かる。



図 2-19 Z=200mmの測定点の粒径分布(A 社-6MPa)



また、同様に図 2-24 に 6MPa で B 社製ノズルからミスト粒子を噴霧した際の全測定点での角度ごとの粒径分布の全体像を示す。図の説明については図 2-20 と同様である。以下に特徴的であった分布傾向について測定点ごとの粒径分布を抜粋し説明する。

図 2-21 に中心軸上の測定点(0.50)(0.300)の測定結果を示す。B 社製ノズルに関しても、A 社製ノズルと同様に中心軸上の測定点では 4~5 µ mの粒子を最頻値に持つ対数正規分布と なっている。中心軸上での分布の変化の特徴もA 社製ノズルと同様であった。



30

図 2-22 は Z=50mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,50)、 (20,50)を、図 2-23 は、Z=200mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測 定点(0,200)、(40,200)の粒径分布を示したものである。

半径方向の変化に関しても、外周部付近に近づくにつれて微小粒子の割合が減少し、粗 大粒子の割合が増大する、分布型も対数正規分布から二峰性分布になるという A 社製ノズ ルと同様の特徴を得られた。このことに関しても中空噴霧ノズルの特性が表れた結果と考 えられる。

角度ごとの差については、A 社製ノズルとは多少異なる結果となった。中心軸から半径方 向に遠方になるほど測定角度ごとに差が生じる傾向は A 社製ノズルと同様であるが、全体 的に角度ごとの分布の差が小さい。また、A 社製ノズルのように決まったひとつの角度が常 に異なった分布にはならず、測定点によって異なった分布となる角度が違っていた。また、 ノズルから垂直方向に一定の距離をおいた Z=200mm上の測定点においては、ノズルの角 度ごとの差は測定されなかった。

各点での A,B 社製ノズルの分布の比較をすると、中心軸付近の測定点には明確な差は確認できないが、外周部付近の測定点において、二峰性分布の粗大粒子の最頻値の粒径が A 社製ノズルに比べ、B 社製ノズルのほうが大きくなっていることが分かる。









(ⅲ)噴霧圧力ごとの差について

噴霧圧力を変化させた場合の、ミスト粒子の粒径分布の変化について考察する。なお、 各圧力における粒径の分布は各測定点における全測定の平均を算出し、比較を行っている。

図 2-27 に A 社製ノズル円周方向角度 0°において噴霧圧力を 6MPa,5MPa,4MPa と変化 させミストを噴霧した際の全測定点の圧力ごとの粒径分布の全体像を示す。図の説明につ いては図 2-20 同様である。

図 2-25 は Z=100mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点 (0,100)、(30,100)を、図 2-26 は、Z=200mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定 点として測定点(0,200)、(40,200)の粒径分布を示したものである。

分布型としては、中心軸上ではいずれの距離においても最頻値を 4~5 µ mに持つ対数正 規分布であり噴霧圧力ごとに大きな差は生じていない。

しかし、中心軸から外周部付近の測定点に近づくに従い、噴霧圧力ごとに異なった分布 が見られるようになる。分布型自体は、噴霧圧力ごとに大きく異なっている測定点は少な かったが、外周部に近づくにつれて粗大粒子の占める割合が増える傾向はどの圧力におい ても測定されたが、噴霧圧力が低いほど粗大粒子群の最頻値の値がより大きな粒径をとる ようになっていることが分かる。

これは、A 社製ノズルの測定角度 60°、120°の測定に関しても共通する特徴であった。



図 2-26 Z=200mmの測定点の粒径分布(A 社-0°)



(iv)ノズルの個体差について

同一規格のノズルで別固体ノズルを使用して噴霧した場合の、ミスト粒子の粒径分布の 変化について考察する。なお、粒径の分布は各測定点における全測定の平均を算出し、比 較を行っている。

図 2-32 にA 社製ノズルの別固体を用いて噴霧圧力を 6MPa でミストを噴霧した際の全測 定点の粒径分布の全体像を示す。図の説明については図 2-20 同様である。

図 2-28 は Z=50mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,50)、 (20,50)を、図 2-29 は、Z=200mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測 定点(0,200)、(20,200)の粒径分布を示したものである。中心軸上の測定点の粒径分布の変化 の傾向として、ノズルから離れても対数正規分布型の分布をとるものの粗大粒子の個数が 僅かに増加する点、噴霧外周部の測定点では、粗大粒子の割合が大きくなり二峰型の分布 となる点は別個体ノズルにおいても測定される結果となった。

各測定点の個体同士の粒径分布に着目すると、角度ごとの粒径分布が一致していた測定 点に関しては、別個体の測定でも近い粒径分布を示している。図 2·30 に示す測定点(10,100) では別個体の粒径分布は、120°の測定角度での粒径分布と類似している。また、図 2·31 に示す測定点(20,150)での粒径分布のように、いずれの角度とも類似しない測定点もある。 しかし、全体の分布の傾向としては 120°の測定と類似する分布となっていた。A 社ノズル の円周方向に分布が均一でないという特徴を考慮すると、A 社ノズルはノズル同士の個体差 は小さい可能性がある。




図 2-32 粒径分布(A 社·別個体)

B 社製ノズルの別個体を用いた測定での粒径分布の全体像について図 2-35 に示す。

中心軸上の分布の変化の傾向、外周部付近に近づくと対数正規分布から二峰型分布に変 化する傾向ともに、別個体ノズルでも測定される傾向であった。

A 社ノズル同様に、測定角度ごとの粒径分布が一致していたような測定点に関しては、別 個体の測定に関しても粒径分布は一致する結果となった。図 2-33の測定点(10,50)の粒径分 布のように角度ごとの分布が異なっていた測定点に関しても、0°の分布が別個体と類似す る分布となっていたが、図 2-34 の測定点(20,100)の分布のように別個体の測定点と一致す る測定角度がない測定点も存在していた。



別個体では測定結果が一致しない点もあるが、分布の傾向が全く異なっている点は少な く、分布が一致する測定点は多いことから、ノズルの個体差は小さいと考えられる。

38

60 70 80

0

測定点(20,100)の粒径分布比較(B社-6MPa)

0

10 20

30 40 50

粒径[μm]

60 70 80

0

0 10 20

30 40 50

粒径[μm]

図 2-34



2.2.3 ザウター平均粒径について

本項では、測定結果よりザウター平均粒径を算出し、その結果について考察を行う。 (i)ザウター平均粒径とは

液滴の平均粒径は算術平均やザウター平均などいくつかの計算方法があり、使用する目 的によって使い分けが行われている。以下に平均値の一般式と、それぞれが用いられる分 野について記す。

$$D_{mn} = \left[\frac{\sum(N_i \cdot d_i^n)}{\sum(N_i \cdot d_i^m)}\right]^{\frac{1}{m-n}}$$

上記式において、(m,n) に訂正な数値を入れると、様々な種類の平均となる。以下の表 2-9 に入れる数値と平均の名称、用途等について示す。

m	n	名称	説明·使用分野
1	0	長さ平均粒径	粒径の算術平均。蒸発機構に使用。
2	0	面積平均粒径	表面積支配過程、吸収機構に使用。
3	0	体積平均粒径	全粒径の累積質量50%になる粒径。体積支配過程、陸水学に使用。
2	1	面積長さ平均粒径	表面積/直径比で重みづけした平均。吸収機構に使用。
3	1	体積長さ平均粒径	体積/直径比で重みづけした平均。蒸発、分枝拡散機構に使用。
3	2	体表面積平均粒径	体積/表面積比で重みづけした平均。蒸発、反応、物質伝達機構に使用。
4	3	質量平均粒径	De Brokuckere平均。燃焼平行過程に使用。

表 2-9 平均方法と使用分野

以上のように、平均粒径は使い分けられている。ドライミストの平均粒径としてはザウタ ー平均粒径(体表面積平均粒径)が使用されるのが一般的である。ザウター平均粒径は断 面積や表面積で重みづけしていることから、それらが感度のパラメーターとなるような反 応プロセスにおいて用いるのが正しい用途といえる。また、ほとんどのノズルは最大と最 小の液滴系に大差があるが、ザウター平均の計算式では数千個の液滴の中にわずかに異常 な粗大粒子が含まれているだけでも平均粒径に大きな影響を与えることになる。よって粒 径分布の測定結果より、最大径付近の粒子が少なく、より小さい平均径のノズルを見つけ ることも可能となる。

ドライミストは空気中でほぼすべての粒子が蒸発すること、肌に触れても濡れないとい うコンセプトの基に開発されたものである。よって、液滴の蒸発は、粒子が空気と触れる 面積、つまり粒子の表面積に依存しているのでミスト粒子の平均粒径を評価する際にザウ ター平均粒径を用いるのは適切であると考えられる。 (ii)角度ごとの差について

測定された粒径分布のデータよりザウター平均粒径(以下平均粒径)の算出を行った。A 社製ノズルを用いて 6MPa で噴霧した際の平均粒径算出結果を図 2-36 に、B 社製ノズルを 用いて 6MPa で噴霧した際の平均粒径算出結果を図 2-37 に示す。図は原点(0,0)をノズル噴 霧点、横軸をノズルからの半径方向距離[mm]、縦軸をノズルからの垂直距離[mm]とし、 それぞれの測定点での平均粒径の大きさをバブル図で示したものである。右側の数値は各 点における平均粒径[μm]を示したものであり、上から 0°,60°,120°のときの値を示すも のである。また、角度ごとの粒径分布の値は、全測定の平均から算出している。

A 社製ノズルは中心軸上で、ノズルから近い測定点(0,50)で最も平均粒径が小さく、垂 直方向に遠方になるに従い、徐々に大きくなっている。半径方向での変化を見てみると、0° の測定点に関しては、中心軸から半径方向に 10mmの測定点で最も小さくなっているが、 全体の傾向としては中心軸上で最も小さく外周部に近づくにつれて平均粒径は大きくなる 傾向を示した。また、角度ごとに比較すると、0°,60°が近い値を示し、120°が大きな値 となっている測定点が多く、角度ごとの差も噴霧点から遠ざかるに従い大きくなっている。。 これらの傾向は、2.2.2 の粒子 10000 個の粒径分布の結果が表れた結果となっている。

B 社製ノズルでも測定点ごとの変化の特徴は A 社製ノズルと同様の傾向である。さらに 角度ごとの差を見てみると、いずれの測定点においても大きな差が見られておらず、ノズ ルから最も遠方の測定点においても差は 1.5 μ m程度と小さな値となっている。

A 社と B 社を比較すると、中心軸付近では B 社ノズルの方が平均粒径が小さく、噴霧外 主部に近づくに従い、A 社ノズルの方が平均粒径の値が小さくなっていることが確認できる。 これは、A 社ノズルが家庭用ドライミスト用に開発された経緯から、少ないノズル数でも広 範囲を均一に冷やせるようにするために、ノズルからの噴霧角度が広く設計されており、 より広範囲に微小粒子を噴霧できるようになっているためと考えられる。また、それとは 逆に B 社ノズルは半屋外使用を目的として開発され、複数個のノズルを使用して空間を冷 やすことを主用途としているため、一つのノズルでの分布としては均一になっていないの ではないかと考えられる。

また、ザウター平均粒径が一致していても、全体の粒径分布は一様になっていない例を 以下の図 2-38、図 2-39 に示す。図 2-28 に示すのは A 社製ノズルの測定点(20,50)における 60°の粒径分布と測定点(0,300)における 120°の粒径分布である。図 2-29 に示すのは B 社 製ノズルの測定点(10,50)における 60°の粒径分布と測定点(0.100)における 0°の粒径分布 である。

図 2-28 に示す 2 点での平均粒径はそれぞれ 22.30 µ m,22.05 µ mとなった 2 点、図 2-29 には 15.06 µ m,15.04 µ mとなった 2 点である。平均粒径は近い値を示しているが、分布型 は大きく異なっていることが分かる。微小粒子と粗大粒子では蒸発の過程も違うと考えら れるので、平均粒径が同じであっても全く同じ特性を持つ測定点であると判断できるとは 一概には言えないことが分かる。



図 2-39 B 社製ノズル

(ⅲ)噴霧圧力ごとの差について

以下の図 **2**·40 に、A 社製ノズル円周方向角度 0° において噴霧圧力を 6MPa,5MPa,4MPa と変化させた場合のザウター平均粒径の分布を示す。



図 2-40 ザウター平均算出結果(A 社-0°)

中心軸上では噴霧圧力が下がるほど平均粒径が大きくなる傾向が見られたが、噴霧圧力 によって平均粒径に大きな差は生じておらず、X=10mm上の測定点においても大きな差は ない。

しかし、半径方向に外周部に近づくにつれてその傾向は徐々に明確に表れるようになり、 噴霧圧力が下がるにつれて平均粒径が大きくなっており、その差は測定点(40,200)で最 大となり約 10 µ m となっている。 2.2.4 単位時間当たりの流量について

本項では各測定点において測定される粒子の流量について検討を行う。

(i)単位時間当たりの流量算出方法

算出は測定された粒子の粒径分布の結果より以下の式-2.4 に従い算出を行った。測定された粒子を完全球体であると仮定し、測定全粒子の容積の総和を測定所要時間と測定点面積で除した値となる。

$$F = \frac{\sum_{3}^{4} \pi \left(\frac{D_{p}}{2}\right)^{3} \times 10^{-12}}{t} \quad \cdot \quad \cdot \quad \overrightarrow{\pi} - 2.4$$

F:単位時間当たりの流束[cc/s] D_p:粒子径[μm] t:測定所要時間[sec]

(ii)角度ごとの差について

以下の図 2-41 に A 社ノズルの単位時間当たりに測定点を通過する粒子の流量についてノ ズルからの角度ごとのに図示する。

噴霧直後の Z=50mm 上の測定点では、中心軸上で最も流量が少なく、外周部に近づくに つれて流量が増加する傾向が見られたが、120°に関しては、X=10mm 上の測定点で最も 流量が多くなる結果となった。この、外周部に近づくと流量が増加する傾向は、 Z=100mm,150mm,200mm と垂直距離が遠ざかるにつれて傾向が弱くなり、中心軸で最も 流量が多く、外周部へ向かうに従い流量が減少する傾向へと変化する。また、中心軸付近で は距離が離れても流量が増加していることがあるが、それ以外の点では距離が離れるにつれ て通過流量が減少している。

角度ごとの流量を比較すると、0°、60°では、ほぼ値は一致していたが、120°での測 定に関しては流量が明らかに少なくなっている。120°での場合のみ測定結果が異なる特徴 は、2.2.2 での粒子 10000 個分の分布に関しても言えることであったが、単位時間あたりの 流量に換算しても共通する特徴となった。



図 2-41 単位時間当たり流量(A 社-6MPa)

また、同様に図 2-42 に B 社ノズルの単位時間当たりに測定点を通過する粒子の流量についてノズルからの距離別に図示する。

噴霧直後の Z=50mm 上の測定点では、噴霧外周部の測定点に近づくにつれて流量が増加 する傾向は A 社と同様であったが、A 社ノズルに比べて、中心部と外周部の流量の差が大 きかった。しかし、Z=100mm 上の測定点になると、外周部ほど流量が多いという傾向は 明確になくなり、外周部では中心部に比べて流量が少なくなっていることが分かる。 Z=150mm,200mm 上の測定点に関しても外周部では流量が少なくなっていた。また、A 社 ノズルのように角度ごとの流量差は小さく、単位時間当たりの流量に関しても 2.2.2 での粒 子 10000 個分の分布での傾向と同様に、角度ごとの差が小さいという結果が得られた。

A社ノズルと流量を比較すると、いずれの角度に関しても X=30mm より中心軸側の測定 点での流量が多くっている。測定点(40,150)(40,200)などに関しては、角度によっては B社 の方が流量が少なかった。しかし、3つの角度の合計値を比較するとほぼ同等の値となって いた。B社ノズルは噴霧の広がり角度が狭いため、粒子がほとんど通過しない測定点(30,50) では測定を行うことができなかったが、その分狭い範囲にミスト粒子が集中して噴霧されて いることが分かった。

いずれのノズルに関しても噴霧直後では中心軸からの距離による流量の違いが大きかったが、一定距離の離れた測定点では半径方向に流量の差は小さくなっていた。



図 2-42 単位時間当たり流量(B 社-6MPa)

(ⅲ)噴霧圧力ごとの差について

A社ノズルを0°の状態で、圧力を変化させて噴霧した際の単位時間当たりの流量分布について図 2-43 に示す。

6MPaの傾向は(ii)で示した通り、噴霧直後は外周部で流量が多く、ノズルから遠ざかる とノズル中央部から外周部に近づくに従い、噴霧流量が少なくなる傾向である。5MPaに関 しては、6MPaでの噴霧と同様の傾向であった。4MPaに関しては、Z=50mm上の測定点 で明らかに傾向が変化していることが分かる。Z=50mm上では、外周部に近づくにつれて 流量が増加しているものの、最も外周部にあたる測定点(30,50)では流量が減少している。

測定点(20,50)に着目すると、流量は 4MPa で最も多く、5MPa,6MPa と減少しているこ とが分かる。このことと 4MPa での測定点(30,50)の流量が減少したことから、噴霧圧力が 減少すると、噴霧流量のピークが中心軸側に移動し、噴霧の広がり角度が小さくなる傾向が あることが推測できる。



図 2-43 単位時間当たり流量(A 社-0°)

2.2.5 単位時間当たりの通過粒子数量について

粒子 10000 個の測定に要した所要時間より、単位時間あたりに測定点を通過する粒子の 流量を算出する。

次頁の図 2-44 は A 社ノズルを 6MPa で噴霧した際の、粒子径ごとの粒子通過数量の比率 をバブル図で示したものである。

0~10 μ m の粒子についての個数分布ではノズル中心軸付近かつ噴霧直後である点であ るほど粒子数が多い傾向が見られた。噴霧直後の Z=50mm 上の測定点では明確に中心軸上 の測定粒子個数が多く、外周部に近づくとほとんど粒子が測定されていないことが分かる。 また、Z=200mm 上では半径方向にあまり粒子数に変化は見られなかった。

 $10~20 \,\mu$ m の粒子数は、噴霧直後の Z=50mm 上の測定点では $0~10 \,\mu$ m の粒子の分布 に比べて均一になっており測定点(10,50)で最も多くなっている。垂直方向の距離が大きく なると分布が均一になっていく傾向は $0~10 \,\mu$ m の粒子と同様であった。

20~30 µm、30 µmの粒子数の個数分布では、噴霧直後 Z=50mm上の中心軸付近ではほ とんど粒子が存在していないが、外周部に近づくと多くの粒子が測定されていることが分 かる。この外周部において粒子が多い傾向はノズルからの垂直距離が離れるに従い徐々に なくなり Z=200mm上の測定点ではほぼ均一な粒子個数の分布となっていることから、粗 大粒子は外周部方向へ飛散し続けるのではなく、噴霧領域内部方向にも飛散するようにな ることが分かる。

これらのことより、噴霧直後ではノズルの中心軸からの距離によって、存在する粒子の 割合に差が生じているが、ノズルから垂直方向に一定距離離れると、均一な分布に近づい ていくことが分かる。

角度ごとに比較すると、角度によって測定される粒子個数に差が生じているが、ノズル からの距離による個数分布の変化の傾向に違いは生じていない。

次頁図 2-45 は、各測定点の全角度の単位時間当たりの粒子個数を平均しノズルからの距離 Z=50mm と Z=200mm 上の測定点ごとにまとめたものである。なお Y 軸の個数に関して は対数軸となっている。

噴霧直後の Z=50mm のノズル中心軸付近の測定点に関しては、粒子径が小さい粒子の個数が圧倒的に多くなっていることが分かる。外周部に近づくと徐々にその個数は近づき外周部では微小粒子と粗大粒子の個数が逆転している。また、総個数として比較すると、ノズル中心軸付近での粒子個数が圧倒的に多いことが分かる。これは、噴霧外周部に近づくほど拡散する面積が増加するためである。

なお、B社ノズルに関しても粒子個数ごとの特徴が得られた。





2.3 粒子速度分布測定結果について

2.3.1 粒子 10000 個の速度分布について

本項では測定された粒子 10000 個の速度の分布について検討を行う。

(i)角度ごとの差について

一定圧力下においてノズルを円周方向に 0°,60°,120°と回転させた場合の、ミスト粒子の速度分布の変化について考察する。なお、各角度における速度分布は各測定点における全測定の平均を算出し、比較を行っている。

図 2-49 に 6MPa で A 社製ノズルからミスト粒子を噴霧した際の全測定点の角度ごとの速 度分布の全体像を示す。図内の各グラフの配置位置はノズルとの位置関係を示しており、 グラフは右下に示すように、横軸に粒子速度、縦軸に測定個数を示している。測定個数は 1m/s ごとに個数を区分している。以下に特徴的であった分布傾向について測定点ごとの粒 径分布を抜粋し説明する。

図 2-46 は中心軸上の測定点(0.50)(0.300)の測定結果を示したものである。

中心軸上での粒子速度分布の変化の傾向を見てみると、垂直距離が離れるにつれて粒子 速度が遅くなる傾向が見られる。また測定角度ごとの速度差は小さくなっていることがわ かる。

図 2-47 は Z=50mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,50)、(10,50)、(30,50)を、図 2-48 は、Z=100mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定 点として測定点(0,100)、(10,100)の速度分布を示したものである。

ノズルからの垂直距離ごとの半径方向への変化を見てみると、図 2-47 に示す Z=50mm 上の測定点では、速度の最頻値が最も速くなっていたのは、60°、120°では中心軸上の測 定点(0,50)であったが、0°の場合測定点(10,50)であった。さらに外周部に近づいた測定点 では速度の最頻値は遅くなっているが、測定点(30,50)などでは、粒子の速い速度も多数測 定されており、様々な速度の粒子が存在していることがわかる。図 2-48 に示す Z=100mm 上の測定点では、60°、120°では外周部に近づくに従いするのに速度が遅くなるのに対し、 0°では測定点(10,100)で速度が最も速く、さらに外周部へ近づいた測定点では速度が遅く なっていた。この傾向は Z=50mm 上の測定点と同様であり、Z=150mm,Z=200mm 上の測 定点に関しても同様の傾向が見られた。また、速度の変化傾向が同様であった、60°、120° の測定結果を比較すると、全体的に 120°での粒子速度が遅くなっており、変化の傾向は似 ているものの同様の測定結果とはならなかった。

粒径の分布では、0°、60°での測定結果が同様の傾向を示し、120°での測定結果が異なる傾向を示したA社製ノズルであるが、速度の分布に関しては、0°、60°、120°と測定角度ごとにそれぞれ異なった傾向となっていた。





図 2-49 粒子速度分布 (A 社-6MPa)

また、同様に 6MPa で B 社製ノズルからミスト粒子を噴霧した際の全測定点の角度ごと の粒子速度の分布の全体像を図 2-53 に示す。図の説明については図 2-49 と同様である。 以下に特徴的であった分布傾向について測定点ごとの粒径分布を抜粋し説明する。

図 2-50 は中心軸上の測定点(0.50)(0.300)の測定結果を示したものである。中心軸上での 粒子速度分布の変化の傾向を見てみると、垂直距離が離れるにつれて粒子速度が遅くなる 傾向が見られる。また測定角度ごとの差は多少あるものの、ほぼ同様の速度分布となって いた。



図 2-50 中心軸上の測定点の速度分布(B 社-6MPa)

図 2-51 は Z=50mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定点として測定点(0,50)、 (10,50)、(30,50)を、図 2-52 は、Z=150mm の測定点のうち中心軸上と外周部付近の測定 点として測定点(0,150)、(10,150)の速度分布を示したものである。

ノズルからの垂直距離ごとの半径方向への変化を見てみると、Z=50mm上の測定点では、 A 社ノズルとは異なり、中心軸上での速度が最も速くなっており外周部へ近づくにつれて遅 くなる傾向が見られた。A 社ノズルと同様に外周部に最も近い測定点(20,50)においては速 度の最頻値は遅い速度であるものの、速度の速い粒子に関しても測定されており分布のば らつきが大きかった。Z=100mm上の測定点でも、外周部に近づくにつれて速度が遅くなる 傾向は、すべての角度に関して共通していたが、図 2-53 に示すように Z=150mm、200mm 上の測定点では 0°の測定に関しては、中心軸上の速度よりも、X=10mm上の測定点の方 が速度が速くなっている。しかし、それぞれの角度ごとの速度分布の差は A 社製ノズルの 場合よりも小さい。



図 2-52 Z=150mmの測定点の速度分布(B社-6MPa)

B 社製ノズルは粒径の分布に関しても、角度ごとのばらつきが少ないという結果を得ており、粒子速度のばらつきも少ないことから粒子円周方向に均一に噴霧されていると判断できる。

A 社、B 社のノズルに共通して、ノズル近くの外周部付近の測定点を除いて、速度の分布 は、最頻速度を中心に遅い速度側と速い速度側に均等に分布する傾向がみられ、速度に関 しては正規分布を示していた。



図 2-53 粒子速度分布(B 社-6MPa)

(ii)噴霧圧力による違いについて

噴霧圧力を変化させた場合の、ミスト粒子の速度分布の変化について考察する。なお、 各圧力における速度の分布は各測定点における全測定の平均を算出し、比較を行っている。

図 2-54 に A 社製ノズル円周方向角度 0°において噴霧圧力を 6MPa,5MPa,4MPa と変化 させミストを噴霧した際の全測定点の圧力ごとの速度分布の全体像を示す。図の説明につ いては図 2-49 と同様である。

噴霧圧力の違いによる粒子速度の分布に大きな違いはないが、噴霧圧力高いほど粒子の 速度が高い傾向があった。



図 2-54 粒子速度分布(A 社—0°)

2.3.2 各測定点の平均速度について

2.3.1 で示した各点での分布について平均速度でデータを整理し検討を行う。

以下の図 2-55、図 2-56 は、A 社、B 社それぞれのノズルを 6MPa で噴霧した際の各測定 点での平均速度である。ノズル噴霧直後の Z=50mm 上の測定点では、速度の最頻値は外周 部ほど遅くなる傾向があることを、2.3.1 の考察で示したが、平均値で比較すると、A 社ノ ズルに関してはすべての角度で、B 社ノズルに関しては 60°、120°の角度で外周部の平 均速度が僅かに速くなっている。これは速度の最頻値としては遅いものの、最頻値よりも 速い速度の粒子が多数存在しているためである。

中心軸上の平均速度を比較すると、A 社ノズルが噴霧直後で約 8m/s なのに対し、B 社ノ ズルでは約 16m/s となり、約 2 倍の速度で粒子が飛散している。また垂直距離の離れた Z=200mm上の測定点でもA 社ノズルの約 4m/s に比べ、B 社ノズルは約 9m/s となってお り、やはり約 2 倍の速度となっている。外周部に着目すると、噴霧直後の Z=50mm 上の測 定点では B 社ノズルの方が速くなっているが、Z=200mm などのノズルから垂直距離が離 れた点では、2m/s 前後となりほぼ同値となっている。

中心軸付近では、B 社ノズルは A 社ノズルに比べて約 2 倍の速度を持つが、外周部付近 ではあまり速度が変わらないという結果が得られた。B 社ノズルは半屋外使用を目的として いることから、より遠くへ粒子が遠くまで飛散するように設計されていると考えられる。



2.3.3 粒子径ごとの平均速度について

A 社ノズルをノズル角度 0°、噴霧圧力 6MPa で噴霧した際の各測定点における粒子径 ごとの平均速度を以下の図 2-57 に示す。平均速度は、 $0\sim30\,\mu$ m の範囲の粒径の粒子に関 しては $10\,\mu$ m ごとに、 $30\,\mu$ m 以上の粒子に関しては、 $30\,\mu$ m 以上のすべての粒子につい て平均したものを平均速度としている。

図 2-57 左上に示す Z=50mm 上の粒径ごとの平均速度では、粒子径ごとに明確に平均速 度に差が生じていることが分かる。測定点(0,50)(10,50)では粒径ごとの速度差は約 2m/s で あり、測定点(0,50)での 30 µ m 以上の粒子を除いては粒子径が大きいものほど粒子速度が 遅くなっている。測定点(0,50)では、30 µ m 以上の粒子の測定数が少なく、存在した粒子の 速度が速い粒子に集中したため、平均速度が速くなっていると考えられる。測定点(20,50) では 30 µ m 以上の粒子の速度が他の粒径の粒子に比べ、3m/s 以上速くなっている。また、 測定点(30,50)ではその差はさらに大きくなり、5m/s 以上速くなっていることが分かる。こ れは、中空噴霧の特徴を表しており、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に外周部付近で速度の速い粒子が存在 していると考えられる。

図 2-57 の左下に示す Z=100mm 上の粒径ごとの平均速度では、測定点(10,100)において 30 μ m 以上の粒子の平均速度が 20~30 μ m の粒子の平均速度を上回っている以外は、すべ ての測定点で粒子が小さいほど平均速度が 1m/s ほど速くなっているものの、すべての粒子 の平均速度が同じ速度となっており、各測定点の速度の変化傾向も類似している。さらに 右上に示す Z=150mm 上の測定点、右下に示す Z=200mm 上の測定点ではすべての測定点 において粒径が小さい粒子の平均速度が 0.5~1m/s ほど速くなっているもののすべての粒 子の平均速度が近い値となっている。

同様に、図 2·58 に B 社ノズルをノズル角度 0°、噴霧圧力 6MPa で噴霧した際の各測定 点における粒子径ごとの平均速度を示す。

左上に示す Z=50mm 上の測定点では、測定点(0,50)では 20~30 μ m、30 μ m 以上の粒径 の粒子は測定されていないが、粒径ごとの平均速度の変化をみると、外周部で 30 μ m 以上 の粒子の速度が最も速くなり、20~30 μ m の粒子の平均速度が速くなっている。また、左 下に示す Z=100mm 上、右上に示す Z=150mm 上、右下に示す Z=200mm上では粒径が小 さい粒子の速度が速いものの、ほぼすべての測定点で粒子の平均速度は近い値となってい る。この傾向は A 社ノズルと共通している。

中空噴霧ノズルの特性上、噴霧直後は中心軸と噴霧外周部に粒子ごとに速度の差が生じるが、ノズルから離れた Z=150mm、Z=200mm 上の点では、ほぼすべての粒子が同一測 定点内では同じ値をとるようになる。







図 2-58 粒子径ごとの平均速度(B 社-6MPa、0°)

2.4 測定時の実験場内温湿度条件の違いによる測定結果への影響

『2.1.2 測定条件』の項目(iv)実験場内の温湿度状況で述べた通り、A 社ノズルの測定に 関しては、0°、60°の測定時の実験場内の温湿度条件と120°の測定を行った際の温湿度 条件には差があり、0°、60°の測定時に比べ、120°の測定時は温度が高く、相対湿度が 高くなっていた。このことが測定結果に与える影響について考察する。

『2.2.2 粒子 10000 個の分布について』での考察では、0°、60°での測定結果に比べ、 120°の測定結果は異なった傾向が示されていた。また、『2.2.3 ザウター平均粒径につい て』での考察では、120°の測定時の各測定点でのザウター平均粒径は0°、60°に比べて 大きくなっているという結果を得た。

以上の測定結果より、以下のような仮定を立てることができる。

仮定:120°での測定では実験場内の温度が低く相対湿度が高かったために、噴霧したミスト粒子が蒸散せずに大きい粒径の状態で測定点に達した。そのために分布の型が異なり、ザウター平均粒径も大きくなる結果となった。よって、粒径分布の測定結果には測定時の温湿度状況が大きく影響している。

次に、『2.2.4 単位時間当たりの流量について』の考察を見てみると、120°の測定では 測定点によっては流量が多くなっている点もあるが、他の角度に比べて明らかに流量が少 なくなっていた。また『2.2.5 単位時間当たりの通過粒子数量について』の結果としても、 一部の測定点を除いて、他の角度よりも粒子数が少ないという結果となっている。

もし仮定が正しいとするならば、粒子が蒸発しないで粒子として存在するため測定点を 通過する流量は多くなり、測定粒子数も多くなるはずである。このことから、120°の測定 結果が0°、60°の結果と異なるのは、円周方向に均一でないというノズルの特性によるも のであり、実験時の温湿度状況による影響ではないという判断ができる。

60

2.5 まとめ

本章では、PDPAの原理、及び実験内容、実験結果について示した。

実験結果より A 社ノズルの特徴として、噴霧ノズルから一定距離のある点において測定 される流量が少なく、粒子の速度が遅い、粒子径も小さい粒子が分布しているという特徴 があった。このことより、ノズルからの距離が近い点においても、ミストによる濡れが発 生しないということが考えられる。よって、A 社ノズルは噴霧ノズル付近に人や物がいる環 境、つまり家庭や小規模店舗等での噴霧に向いていることが考えられる。ミスト粒子自体 の速度が遅いことから外部風等の影響を受けやすいことも考えられ、設置時にはそのよう な影響が小さくなるような配慮が必要であると考えられる。

B社ノズルの特徴として、噴霧ノズルから一定距離のある点において測定される流量が多 く、粒子の速度が速いという特徴があった。このことより、ノズルから距離の遠い点にお いても、ミストが粒子として存在するため、遠い点でも蒸散効果を得ることができると考 えられる。よって、B社ノズルは屋外や大規模空間等の噴霧に適していると考えられる。A 社ノズルに比べ濡れが発生しやすいため、設置の際にはノズル近くに人や物が来ないよう に設置するように配慮する必要がある。

噴霧圧力を変化させた測定の結果では、粒径の分布や速度等が大きく変化することはな いが、噴霧圧力が小さくなるほど粒径は大きくなり、速度は遅くなる傾向があった。圧力 が低くなるほどミスト粒子が蒸散しにくくなることが考えられるが、大きく変化すること はなかったので、噴霧目的や外気条件などよっては噴霧圧力が低くても十分に噴霧効果を 期待できると考えられる。

同一規格ノズルの個体差に関しては、A 社、B 社ともに別個体での測定結果と分布が類似 している測定角度がある。このことより A 社、B 社ともに個体の違いによる分布の差は小 さい可能性が高い。

今後の課題の課題として、中心部付近の測定点の分布は対数正規分布型であったのに対 し、外周部付近では急激に粗大粒子が増加し、明らかに異なった分布を示すようになって いる。このことより外周部付近での分布の変化についてさらに明確にする必要があり測定 点の間隔を狭めて測定を行う必要がある。また、今回は鉛直下向きに噴霧した際の測定を 行っているが、実際に噴霧を行う際には、水平方向や斜め上向き噴霧が行われる場合もあ る。そのような場合の粒径分布等の変化についても検証を行う必要がある。

第三章 PIV を用いた粒子速度分布

3.1 測定概要

3.1.1 PIV の原理

PIV (Particle Image Velocimetry) は、流れの可視化技術にデジタル画像処理技術を加 え、流れ場の瞬時速度、多点速度情報を抽出する方法で、流れの速度分布を調べる方法と して利用されている計測方法である。

図 3-1 に PIV の原理を模式的に示す。

ある流れ場の中に微細なトレーサ粒子を混入させ、これをパルスレーザーなどの光源で 瞬時的にシート状に照明する。照明は流れの画内で微小な時刻差の連続する時刻(時刻 to と時刻 t₁)で行われる。この2時刻の瞬間の画像を CCD 素子などの撮影装置を用いて記録 媒体に記録し、処理することにより流れの速度を求める。

画像の処理の概念を、図 3-2 に示す。連続する 2 時刻の画像上のトレーサ粒子像を画像 解析を用いて画像上の移動量 ΔX を求め、これと画像撮影の間隔 Δt(=t1-t0)および画像の変 換係数 α から、流れ場の局所の速度 u を求める。以下の式 3-1 に式を示す。

$$u = \alpha \frac{\Delta X}{\Delta t} \cdot \cdot \cdot \vec{x} \, 3.1$$

ここでαは撮影した画像内での距離と実寸の比率を表す係数である。このときトレーサ粒 子は局所の流速の流れと共に移動すると仮定し、全てのトレーサ粒子の速度を求めること により全体の流れ場を算出する。

また、画像解析手法としては、『画像相関法』と『粒子追跡法』の2種類に大別される。 図 3-2 に示すように粒子の粒子が右上に移動しているときに、その移動を破線で囲った位置 への領域の移動と考える手法が『画像相関法』であり、中心にある1個のトレーサ粒子に 関する移動と考える手法が『粒子追跡法』である。

本実験では画像解析に、画像相関法を用いており、その概要を記す。画像相関法は前述 の通り、領域が移動するものとして考える手法であり、撮影画像を細かい分布区画に分割 し、それぞれの区画の分布パターンが微小時間Δtの間にどこへ移動したかを解析する。

分布区画を区画内の画像の明暗の輝度により数値パターン化し、撮影画像内においてその数値パターンと最も相関値の高い、つまり輝度の数値パターンの最も類似している分布 区画を割り出すことで、区画の移動距離ΔXを決定している。





3.1.2 測定条件

(i) 実験場所、日時

実験は、2010年11月8日~10日に、東京理科大学火災科学研究センター実験棟内2階 実験室(13.2m×7.8m、天井高:約10m)で行った。以下の図3-3に測定器具の写真を、 表3-1にそれぞれの測定器具の詳細を示す。



図 3-3 測定使用器具写真 図 3-1 実験器具詳細

装置	型番	仕様
レーザー光源	DPGL-100MW (OXFORD LAZERS 製)	ダブルパルス YAG レーザー(532nm)
同期装置	TC-5 ユニット(OXFORD LAZERS 製)	_
カメラ	PIV Cam 1600(OXFORD LAZERS 製)	撮影画素数 1600 × 1200pixel
解析ユニット	Vid PIV(OXFORD LAZERS 製)	—

(ii) 測定位置について

PDPA 測定での実験と同様にノズルから鉛直下向きにミストを噴霧し、PDPA 測定で検 証した測定点が含まれるような各領域に画像撮影範囲を設定し、測定を行った。また、ノ ズルについても A 社、B 社製の2 種類のノズルを使用し、それらのノズルを中心軸まわり 円周方向に、60°,120°と回転させた場合の測定、噴霧圧力を 6MPa,5MPa,4MPa を変化 させた場合の測定も同様に行っている。行った実験条件とセット数を表 3・2 に示す。実験条 件についてはは実験進行上困難であったため、PDPA 測定で行った実験パターンをすべて 行うことはできなかった。また、本実験で使用したノズルは、PDPA 実験で使用したノズ ルと同一規格のノズルであるが、同一個体ではない。

画像撮影範囲は図 3-4 に示すようにノズルから距離 Z=50mm,100mm を含む範囲 A、 Z=150mm,200mm を含む範囲 B、Z=250mm,300mm を含む範囲 C の 3 範囲に分けて撮影 を行った。微小時間 Δt の間隔で連続する 2 画像を撮影する作業を 1 セットとして、各範囲 において N(=30or90)セットの画像の撮影を行った。ひとつの噴霧条件内での測定手順とし ては、まず初めに範囲 A において N セットの画像を撮影、その後範囲 B における N セッ ト画像を、最後に範囲 C における N セットの画像を撮影した。



図 3-4 PIV 測定点

	噴霧圧力	ノズル角度	PIV	セット数(N)
	6MPa	0°	0	90
		60°	0	30
		120°	0	30
	5MPa	0°	0	90
A 社ノズル		60°	-	-
		120°	_	-
	4MPa	0°	0	90
		60°	_	-
		120°	-	-
	6MPa	0°	0	30
B 社ノズル		60°	0	30
		120°	0	30
A 社ノズル(別固体)	6MPa		_	-
B 社ノズル(別固体)	6MPa		_	-

表 3-2 実験条件詳細

(iii) 撮影画像について

本実験での撮影画像は解析ソフト『Vid PIV』により解析を行い、その解析結果は Microsoft Excel のデータとして出力することが可能である。その出力項目としては画像上 の座標(x,y)とその点における水平方向速度 V_x[m/s]と垂直方向速度 V_y[m/s]である。

以下の表 3-3 に 1 セットの画像撮影の詳細を示す。表中 α は画像上 1 pixel あたりの実寸 での長さを示す長さであり、本測定では 1 pixel あたり 0.107mm となっている。分布解析 区画は分布の移動距離を解析する際の 1 分布の範囲を示し、本解析では 16 pixcel × 16 pixel として解析を行っている。

画像撮影間隔	63 μ sec		
撮影画像画素数	1200×1600 pixel (約 125mm×約 170mm)		
分布解析区画	16×16pixel (約 1.7mm×約 1.7mm)		
出力データ数	75×100=7500 データ		

表 3-3 実験条件詳細

3.2 速度分布測定結果

3.2.1 測定結果扱いについて

以下の図 3-5 はある時刻における撮影画像の一部分とその解析結果の粒子の動きをベク トルで表現したものである。画像を比較するとミスト粒子が存在していない画像左上部や 右上部にもベクトルが存在していることが分かる。これは、画像撮影時の状況により生じ る不具合が原因であると考えられ、粒子以外の物体の写り込みや画像ノイズ等の発生によ り、ミスト粒子以外のものを粒子として認識して解析を行ってしまっていることによる。 また、ミスト粒子が目視で確認できる領域内部にも周囲の速度ベクトルと明らかに異なる 方向に向かうものが確認できる。これらは、解析を相関法で行う上で生じる誤差の一種で あり、時刻 t における分布区画内の分布とほぼ同様の分布が時刻 t+ Δt において発見され た場合に、実際の粒子とは異なる動きを解析結果として出力してしまうためである。その ため、ミスト粒子の個数濃度が高いミスト噴霧直後の点などでは、速度ベクトルの方向が 一定にはならず、正しい解析結果として扱えないものが多数存在している。



図 3-5 撮影画像と解析結果

ここで、これらの測定結果を扱う際には間違いである可能性の高いこれらの速度ベクト ルを除去して考える必要がある。そこで、以降の測定結果の考察には、出力された測定デ ータに以下のような処理を行ったものを解析結果とし考察を行っている。

①X 方向の速度 Vx と Y 方向の速度 Vyが一定範囲外であるデータについて除去する。除外する条件は以下に示すいずれかの条件にあてはまる測定データである。また X 方向は右向き正であり、Y 方向に関しては下向き正となっている。

X方向速度: V_x≧10[m/s] ,V_x≦-10[m/s]

Y 方向速度: V_y≥20[m/s] , V_y≤-10[m/s]

②また①の条件にあてはまる測定データが全測定データ N 個のうち3割以上測定される点 に関してはその測定点自体が PIV 測定ができない点として、考察する測定データの点がか ら除外した。 3.2.2 撮影画像について

本項では実験時撮影し、解析を行った画像の一例を示す。

A 社ノズルを用い 6MPa で噴霧を行った際の、角度ごとの画像を図 3-6 に示す。画像は、 範囲 A、B、C のうち撮影範囲が重らないように、画像を重ね合わせたものである。また、 重ね合わせた画像は各測定で 1 枚目に撮影されたものを重ね合わせているため、各画像の 撮影時刻は同時刻ではない。

ノズル角度 0°では、粒子の密度が濃いために明るく写っている領域がノズル左側に分布 しているのに対し、60°、120°ではノズルのやや右側に分布していることが目視で確認で きる。この傾向はいずれのサンプル画像においても確認されている。

同様に B 社製ノズルに関しても図 3-7 に示す。ノズルから噴霧されたミスト粒子の広が りは範囲 A の画像上では直線的に左右対称の広がりが確認できるが、範囲 B の画像では広 がりが緩やかに変化し、方向によっては狭まっていることが確認できる。

また、B 社製ノズルに関しては、A 社製ノズルと同様にミスト粒子の広がりは噴霧直後は 直線的に広がっていることが確認できる。また、噴霧直後のミスト粒子の広がりは、A 社製 ノズルに比べて狭くなっていることがわかる。粒子の密度が濃い領域に関しては、A 社製ノ ズルのように左右に分かれることなく一定であった。

また、範囲 B などでは噴霧外周部でミストの流れが乱れていることが確認できる。これ は、静止流体である周辺空気の中を速度を持ったミスト粒子が通過することにより、速度 を持ったミスト粒子は速度が遅くなり、周辺空気を巻き込むことにより渦が生じているた めである。



図 3-6 撮影画像角度ごと比較(A 社)



図 3-7 撮影画像角度ごと比較(B 社)

3.2.3 平均粒子速度・速度方向について

本項では解析結果として算出されたすべてのデータについての平均し、その速度分布、 速度方向について考察する。

図 3-8 は、A 社製ノズルを使用した際の形跡結果について速度コンター図で表現したもの である。速度コンター図の上にはその速度方向を示すベクトルを重ねている。

0°に関してはX座標がマイナス側に速度が速い領域が分布しており、60°、120°座標 がプラス側に速度の速い領域が分布していることが分かる。これは撮影画像においてミス ト粒子が濃い領域が分布していた傾向と一致している。このことは PDPA 測定の結果より 得た、A 社製ノズルは角度によりミスト粒子の分布が一定ではないという結果と一致してい る。噴霧外周部に着目すると、僅かではあるが周囲より粒子速度が速くなっていることが 確認でき、PDPA での測定と一致する結果となった。

また、粒子の速度方向に着目すると、いずれの点においてもほぼ鉛直下向きの速度方向 となっている。個々の時間帯に着目して結果を見てみると上向きの速度を持った粒子も測 定されていたが平均としては下向きの速度方向となっていた。

B社製ノズルに関しても、A社製ノズルと同様に速度コンター図を図 3-9 に示す。

0°、60°、120°全ての角度に共通して、粒子速度の速い領域は中心軸から中心軸よりや やプラス側に分布していた。これは、実験時に実験室内に僅かに発生している気流による 影響であると考えられ、ノズル角度ごとの分布の差が小さいことが確認された。噴霧外周 部に関しては A 社ノズルと同様僅かながら速度が速くなっていることが確認できる。この 傾向もやはり PDPA の結果と一致している。

粒子の速度方向に関しては A 社製ノズルと同様に平均としては、ほぼすべての測定点で 下向きの速度方向となっていた。

両社ノズルに共通して、噴霧直後は測定不可能な点としデータが除去されていることが 分かる。特に B 社製ノズルの噴霧直後の点は A 社製ノズルに比べて、ノズルから離れた範 囲で測定不可能な点となっていることが分かる。これは、A 社製ノズルに比べ、B 社製ノズ ルが噴霧の広がり角度が狭くなっておりミスト粒子の密度が濃くなったために正確な測定 結果が得られていないためである。

また外周部に関しては、PDPA 測定では粒径の大きい粒子では 20m/s を超えるような速度を持つ粒子も確認されており、今回のデータ処理に関しては誤ベクトルとして除去されている可能性もある。


図 3-9 速度コンター図(B 社)

3.3 PDPA 測定結果との比較

『3.2.3 平均速度コンター図』では全体での速度分布について考察を行った。本項では、 PIV での平均速度と、PDPA での平均速度の違いについて検討を行う

図 3-10 左列にA社ノズル各噴霧角度での平均速度を右列にB社ノズル各噴霧角度での平均 速度について示す。なお平均速度を求めた測定点は、X方向が5mmごと、Y方向に50mm ごととなっている。

A 社製ノズルに関しては、コンター図より角度により粒子の速い領域の分布に差が生じて いることという結果が得られており、図 3-10 からも読み取ることができる。また、ノズル からの垂直距離が離れるにつれて、速度のピークが半径方向へ外側へ近づきながら、速度が 半径方向に一定になる。PDPA 測定に関しても同様の傾向が測定されている。ノズルから それぞれの距離における速度の大きさ自体も、角度によっては PIV での結果と差はあるも のの 1~2m/s 程度の差となっており、PIV と PDPA の実験結果には再現性があると判断で きる。

B 社製ノズルに関しては、PDPA 測定では A 社製ノズルの約 2 倍の粒子速度を測定した のに対し、PIV の結果では A 社製ノズルとほぼ同等の値となっている。ノズル角度 60°で の測定結果で Z=50mm において X=5mm の点が測定できない点として平均速度が求まって いないことからも分かるよう、に B 社製ノズルは噴霧角度が狭く中心軸付近にミスト粒子 が集中するために、PIV での噴霧直後の速度は正確な値を示していない可能性がある。ノ ズルから一定距離が離れた Z=200mm などの点に関しては、PDPA 測定の結果と近い値を 示しており、今回の B 社製ノズルのノズル近くの点での測定結果は正しい値でない可能性 がある。



図 3-10 PIV 測定各点平均速度

3.4 まとめ

本章では、PIV の原理、及び実験内容、実験結果について示した。

PDPA の実験結果より予想された A 社ノズルの円周方向の分布が均一でないということ が、撮影画像の考察、実験結果の考察より明確にされた。噴霧されたミスト粒子は、周辺 空気を巻き込みながら拡散していくことが予測され、個々の時間帯の画像について解析す ると、ミスト噴霧による渦の形成が確認されている。しかし、全サンプルを平均した結果 では、粒子の飛散する方向はほぼ一定であり、渦の形成による噴霧流れへの影響は小さい ことが考えられる。

PIV と PDPA の両実験の結果の比較では、速度に関して噴霧直後に関しては一致しない 点もあったが、ノズルからの距離が離れた点においては両測定に関して近い値を示してい た。これは、噴霧直後のミスト粒子の密度が高いために正しく測定できなかった結果であ ることから、両実験結果を合わせてノズルの解析を行うことは可能であるということを示 した。

今後の課題として、密度が高すぎて測定できなかった点に関して、画像撮影範囲をさら に狭めることにより分布解析区画内に存在するミスト粒子の個数を減らし、より正確に分 析を行う必要がある。また、外周部付近において PDPA 測定のように明確に粒子速度が速 いという結果が得ることができなかったことから、データの除去において除外してしまっ ている可能性も考えられる。このような粒子についてデータ除去条件の変更、もしくは粒 子追跡法などの異なる解析方法を用いる必要があると考えられる。 第四章 粒径分布の実測値と理論値の比較

第四章 粒径分布の実測値と理論値の比較

4.1 数値計算によるドライミスト効果予測研究の現状

ドライミストの普及に伴い、様々な設置条件下において効果的な噴霧を予測する手段の ひとつとして数値計算を用いた手法が提案され、さまざまな研究が開始されている。

数値計算によりドライミストの噴霧効果を予測するには、多くの研究が進められている冷 気の拡散について解くだけではなく、連続相である空気と分散相であるミストの液滴のそ れぞれの相互変化について考慮しなくてはならない。相互変化を起こす項目としては、運 動量変化による粒子や周辺空気の速度変化、熱移動による温度変化、蒸発による粒子の蒸 発による質量変化など、様々な項目に渡り、連続相について解く場合に比べて複雑な計算 を要する。しかし、既往研究では、主に温度変化に着目して結果の分析を行っており、ミ スト粒子の蒸発過程等についてはあまり着目していない。

本項では、粒子の蒸発に着目し、PDPA での測定結果での粒子の個数変化、流量変化が 数値計算で用いられる理論計算がどの程度一致するか、またどのような差が生じるかにつ いて検討を行う。 4.2 理論值算出方法

4.2.1 蒸発に関する理論式

蒸発に関する理論式は、数値計算ソフト『FLUENT6.3.26』で用いられている蒸発に伴う質量変化の式を採用している。

(i)時刻 t+Δt における液滴の質量

ある粒子の時刻 t+ Δ t における質量は、時刻 t における質量から微小時間 Δ t の間に蒸発した水の質量を除いたものであり、以下の式-4.1 に示すとおりである。

(ii)単位時間当たりの水の蒸発速度 Ni の算出

水の蒸発速度は、液滴表面の水蒸気濃度と周辺空気の水蒸気濃度の差に比例する。単位 時間当たりの水蒸気のモル流束 Ni は以下の式-4.2 より算出する。

$$N_i = k_c \left[\frac{P_{sat}(T_p)}{RT_p} - X_i \frac{P_g}{RT_g} \right]$$
 · · · 式-4.2
 k_c :物質移動係数 [m/s]
 T_p : 粒子の絶対温度 [K]
 $P_{sat}(T_p)$: T_p における飽和水蒸気圧 [Pa]
R: 気体定数 [Pa · m³/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]

(iii)物質拡散係数 kc の算出

物質拡散係数 kcはランツ・マーシャルによるシャーウッド数の式より、以下の式-4.3 を 解いて求める。

dp:粒子の直径 [m] D_{i,m}:水蒸気の拡散係数 [m²/s] Red: 粒径と相対速度によるレイノルズ数 [-] Sc: シュミット数 [-] (iv)相対レイノルズ数 Rep の算出

相対レイノルズ数 Repは、以下の式-4.4 より算出する

$\operatorname{Re}_{\mathrm{p}} = \frac{\rho \mathrm{d}_{\mathrm{p}} \mathrm{u}_{\mathrm{p}} - \mathrm{u} }{\mu} \cdot \cdot : \overrightarrow{\operatorname{T-4.4}}$	
ρ :空気密度 [kg/m ³]	
up:粒子速度[m²/s]	
u:空気速度 [m/s]	
μ:空気の粘性係数 [Pa・s]	

(v)シュミット数 Sc の算出

シュミット数 Sc は、以下の式-4.5 より算出する。

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{i,m}} \quad \cdot \quad \cdot \quad : \vec{x} - 4.5$$

以上の式を用いて、 t 秒後の分布について検討を行う。

蒸発速度は粒子径 d_pに依存しており、時間の経過とともに変化する。そのため計算間隔を 0.001 秒とし、蒸発により減少した粒径を次のサイクルに反映させる差分法を用いて粒子径 の算出を行った。また、粒子の蒸発による周辺空気状態の変化は考慮していない。

用いた物性値を表 4-1 に示す

表 4-1 物性值一覧

空気密度 <i>ρ</i>	1.184	[kg/m3]	理科年表(1989年、国立天文台編、丸善)
粘性係数 μ	1.82E-05	[Pa∙s]	理科年表(1989年、国立天文台編、丸善)
水蒸気の拡散係数Di,m	2.34E-05	[m2/s]	
飽和水蒸気圧	*	[Pa]	Tentesの式
気体定数R	8.31451	[Pa•m3/mol•K]	
空気の絶対圧Pg	101325	[Pa]	
空気の絶対温度Tg		[K]	測定時空気温度
粒子の絶対温度Tp		[K]	空気の絶対温度と同等と仮定
水の分子量Mi	0.018	[kg/mol]	
水のモル分率Xi		[-]	測定時空気温湿度より算出

※温度 T_p[K]における飽和水蒸気圧は Tetens の式より以下の式-4.6 より算出する。

$$P_{sat}(T_p) = 6.11 \times 10^{\left[\frac{7.5 \times (T_p - 273.15)}{T_p - 35.85}\right]} \times 100 \quad \cdot \quad \cdot \quad \vec{\pi} \; 4.6$$

4.2.2 粒子速度について

粒子速度は PDPA, PIV の測定結果より、測定点により大きく変化し、同一測定点内であっても粒子の粒径ごとに異なった値を示していた。そこで粒子の速度変化については以下のような過程を行い、計算を行った。

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。今回の計算では 5µm ごとの平均速度を求め、各測定点での各粒子の速度を求めた。

②PIV 測定での結果より、全粒子の速度方向を鉛直下向きであると仮定し、Z 方向への運動 しか行わないとする。つまり、PDPA での測定点(10,50)で測定された粒子はすべて測定点 (10,100)へ移動し、X 方向に隣である測定点(0,100)や測定点(20,100)へと拡散することはな いと仮定する。

③Z 軸方向の各測定点間での速度の変化はないものとし、Z=50mm 上の測定点での速度を 保持したまま Z=100mm上の測定点へ到達、到達後はその時点での粒径に対応した Z=100mm 上での粒子速度で Z=150mm まで到達するというように、測定点に到達するご とに変化するものとする。

④蒸発に伴う粒子径の変化により対応する平均速度が変化した場合には、変化後の粒径に 対応した平均速度で計算を行うものとする。 4.2.3 測定点ごとの面積による重み付け方法

PDPA 測定では半径方向に一定距離ごとの測定点にて測定を行ったが、ノズルから断面 方向距離ごとの総流量などを求める際には、ノズル中心からの半径方向距離ごとに面積に よる重み付けが必要となる。本項では各測定点の重み付けの倍率の算出方法について示す。

0mn

0mm

0mm

10mr

 30°

 30°

40

10mm 20mm 30mm

10mm 20mm 130mm 40mm

30mm

20mm

40mm

各測定点の担う範囲の面積は以下の手順で算出を行った。 ①ノズル角度0°の測定点が担う範囲を以下のように設定する。 範囲は、各測定点をノズル中心軸として両円周方向の両側に 30°回転させた範囲とする。

②X=0mmの測定点の担う面積 S₀と、X=10mmの測定点の担う
 面積のうち X=10mm より内側の面積 S_{10内}が等しくなるように
 面積を定める。
 つまり、S₀と S_{10内}は、

 $S_0 = S_{10 \text{ p}} = (10 \times 10 \times \pi \times 60/360) \div 2 = 25 \pi/3$

③次にX=10mmの測定点の担う面積のうちX=10mmより外側の面積 S_{10外}と、X=20mmの測定点の担う面積のうち X=20mmより内側の面積 S_{20内}が等しくなるように面積を定める。
 つまり、S_{10内}と S_{20外}は、

 $S_{10 \text{ p}} = S_{20 \text{ p}} = ((20 \times 20 - 10 \times 10) \times \pi \times 60/360) \div 2$ =25 π

よって、S10はS10内とS10外の合計となるので S10=S10内+S10外=25 π/3+25 π=100 π/3 ④同様にしてそれぞれの測定点の担う面積を算出し、それぞれの測定角度ごとの範囲についても同様に算出する



⑤さらにこの半円を180°回転させた方向に同様の分布を持つと仮定して面積を算出する。 算出結果は表 4-2 に示す通りである。なお、測定点の単位面積は 6.58×10⁻⁸ m²であること からそれぞれの測定点の倍率が求まる。



表 4-2 各測定点担当面積

測定点[mm]	0	10	20	30	40
担当面積[mm ²]	157	628	1256	1884	2512
倍率	2386	9544	19088	28632	38176

4.3 理論值算出結果

A 社製ノズル、6MPa で噴霧した際の Z=50mm 断面上での粒子の分布より、Z=200mm 断面上の分布の理論値を算出し、実測との違いを比較する。

以下の図 4-1 は、断面を通過するミスト粒子について、横軸に粒径を、縦軸にそれぞれの 粒径の粒子ごとの流量をとったものである。データは Z=50mm と Z=200mm 断面上を通過 する粒子の実測値と、Z=50mm の分布から算出した理論値である。また、図 4-2 は図 4-1 で示した結果についての累積値を示すものである。

Z=50mm では 30 μ m の粒子が最も流量が多く、Z=200mm の実測値では 25 μ m へと変 化する。それに対し理論値では、流量自体は異なっているものの、最も流量の多い粒子は 27 μ m となっており近い値を示している。10 μ m 以下の粒子について着目すると、実測で の流量に比べ理論値での流量が少なくなっていることから、微小粒子に関しては理論値で の蒸発速度の方が速くなっていると考えられる。

また図 4・2 に示す累積値を見てみると、かなり近い値を示しており、表 4・3 に示す各断面 での合計流量を比較すると、実測値での 13.64g/min に対し理論値では 13.41g/min となり、 近い値となった。ドライミストの空気冷却効果は、蒸発する水の量により決定することか ら、蒸散効果に関しては理論式に従う結果となった。

ミストノズルの単位時間当たり流量 50g/min に対して、ノズルに最も近い断面 Z=50mm の実測結果においても約三分の一になっている。これは測定点の単位面積が、噴霧された ミストの通過断面積に比べ微小であるために、僅かな測定点単位面積のわずかな誤差によ っても、全体の総流量に大きな影響を与えてしまうためであると考えられる。しかし、今 回の計算では流量の値こそ違う値になるものの、それぞれの流量や粒子数などの計算結果 の比率に関しては変化しないので、実測値と理論値を比較するという目的に対しては問題 とはならないと考えられる。

以上より、今回の測定点の範囲上では、実測値と理論値での蒸散量はほぼ等しくなった ため、蒸散効果は理論式に従うと判断することができる。しかし、Z=200mm上を通過して から一定時間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って しまうことが予測される。

84







図 4-2 各粒子の粒子数の流量累積値(A 社-6MPa)

表 4-3	各断面の総流量

	合計流量[g/min]
Z=50mm:実測値	17.94
Z=200mm:実測値	13.64
Z=200mm:理論値	13.41

第五章 総括

第五章 総括

本研究では、ドライミスト噴霧時に噴出される粒子の粒径、粒子速度に着目し、PDPA、 PIV といった近年発展が目覚ましい光学的計測法を用いてそれらを評価している。粒径、 粒子を決定する要因として、噴霧に使用するノズルと噴霧圧力が挙げられ、2種類のノズル と噴霧圧力を変化させて噴霧を行うことで、ノズルの特性と噴霧圧による変化について考 察を行っている。また、計測結果より近年研究が進んでいる数値解析によるドライミスト 効果の予測の算出方法の一部に着目し、検討を行っている。

第二章では、PDPAを用いて2種類のノズル性能の特徴および噴霧圧力の差による粒径 分布、速度分布の違いについて様々な解析条件により考察を行った。A社製ノズルは、目視 でも確認できたように、噴霧されたミスト粒子の広がり角度が広く、半径方向に平均粒径 に差の小さい噴霧が可能であるが、円周方向に一定の噴霧にはならない特徴が得られた。 流量の分布としては、円周方向に一定とはならないものの半径方向に均一に分布し、一点 にミスト粒子が集中することはない。粒子の速度も遅くなっていることを考慮すると、人 や物がノズル近くに存在する可能性があるような場所、つまり家庭や小規模店舗などでの 噴霧に適したノズルである。B社製ノズルは円周方向での分布の差は小さいが、ザウター平 均粒径が噴霧外周部では大きくなり、その流量も多くなっている。噴霧された粒子の速度 が速いことから、ミスト粒子を蒸散せずにノズルから遠方へと飛散させることが可能であ る。このことより B 社製ノズルは、ノズルから対象とする冷却地点までの距離が遠いよう な場所、つまり大規模空間や屋外での噴霧に適しているノズルであった。圧力を変化させ た場合には、粒径は大きくなり、粒子の速度は遅くなる傾向があった。圧力が高くなるほ ど素散しやすい微小な粒子を噴霧することが可能であるが、その噴霧目的や、外気条件に よっては、低い圧力であっても十分に効果を得ることが可能であると考えられる。

第三章では、PIV を用いて PDPA 測定では測定できなかった噴霧されたミスト粒子の速 度の流れ場を連続の流れ場として解析した。連続での流れ場を解析することにより、A 社製 ノズルが円周方向に均一の分布となっていないということを明確にすることができた。目 視による確認ではミスト粒子の流れは複雑であり、周辺空気を巻き込み、渦を形成しなが ら拡散していることが予測された。しかし、実際には渦の形成によるミスト粒子の流れ場 への影響は小さく、ほとんどの粒子が一つの方向へ向かっていることが分かった。PDPA との比較では、一部を除いて測定結果が一致したことから、PDPA、PIV の両測定を用いて より詳細な解析が行える可能性を示した。

第四章では、既往の数値計算研究では、あまり着目されていない蒸発による粒子の変化 について着目し、PDPA、PIV 測定から得た実測値と数値計算で使用される理論式を解いた 理論値との比較を行った。本実験の条件下では、蒸散量という点に着目すると実測値と理 論値に大きな違いはなく、理論式に従う結果であった。しかし、実測値と理論値に生じて いた差について考慮すると、さらに時間が経過した場合には差が大きくなり異なる結果と なる可能性があった。

今後の課題として、今回の PDPA を用いた測定結果より噴霧外周部付近では粒径分布の 急激な変化や、粒子速度の上昇などの現象が測定された。今後の測定では外周部付近の現 象を詳細に測定するために、測定点間を狭めて粒径分布などの測定を行う必要がある。ま た、今回は鉛直下向きの噴霧のみについて測定を行ったが、実際にドライミストを設置す る際にはノズルは横向きや斜めなどに設置されることが多い。そのようなノズル設置角度 の条件での測定も行うべきであろう。

PIV の測定では、今回の解析では測定結果より誤ベクトルと予測されるものについて除 去しているが、正しいベクトルを除去している可能性もある。今後は誤ベクトルの扱いに ついて検討を行う必要がある。また今回の画像では分布区画に存在する粒子が多すぎるた めに解析を行えなかった点が多数存在した。今後は画像の画素数を増やす、画像撮影範囲 を絞るなどの工夫が必要となる。

粒子の蒸発理論値の算出では、算出に用いる粒子分布や速度は実測値を用いている。今 後はノズルから噴霧される粒子分布自体の算出理論、粒子の運動等に関する理論式との照 合も必要となる。また、今回測定を行った二種類のノズルとは異なった特徴となると予測 される種類の異なるノズルに関しての測定も行う必要がある。

以上、本研究により得ることができた成果と課題について記述した。本研究の成果が、 今後ドライミストシステムの開発、改良を進める上で、使用分野、使用環境に適した噴霧 ノズルの選定、ミスト噴霧圧力の制御等の指標として生かされることを期待したい。

参考文献

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

水谷幸夫、燃焼工学、森北出版、1977

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

伊藤政志、混合正規分布によるエアロゾルの粒径分布解析、Japan society for Atmospheric environment

金田尚久、新居玄武、混合分布問題、学習院大学経済論集第46卷第1号、2009.4

可視化情報学会、PIV ハンドブック、森北出版、2002

水野吉崇、ドライミストの粒径分測定実験、2009

石井智洋、住戸向け細霧冷房の設計手法に関する研究、2009

河原伸幸、富田栄治、位相ドップラ法を用いた噴霧粒子径および速度の同時計測、ながれ 27、2008

河原伸幸、富田栄治、燃料噴霧とその計測技術、Journal of the Japan Institute of energy、 2008

大久保陽一郎、井戸田芳典、野村佳洋、カスタービン用低エミッション燃焼技術、豊田中 央研究所 R&D レビューVol.32 No.3 、1997.9

利光和彦、円弧翼および円柱周り流れ場の PIV 測定、九州大学工学集報第72巻第4号、 1999.7

姉崎幸信、レーザーホログラフィ法による噴霧計測、デンソーテクニカルレビューVol.8、 2003

Ansys-Japan, Fluent6.3.2 User Manual

株式会社日本レーザーホームページ、http://www.japanlaser.co.jp/

鈴木孝司、液体微粒化の基礎、http://www.ilass-japan.gr.jp/activity/other/12th_suzuki.pdf

謝辞

本研究を進める過程、および本研究をまとめるにあたり東京理科大学 辻本誠教授には 大変お世話になりました。筆者が研究の方向性を見失う度に的確な助言を頂き、このよう な形で論文をまとめることができました。西田幸夫先生にも、研究を進めるにあたり多く の助言を頂き、大学生活の様々な面でお世話になりました。筆者はゼミなどの度に先生方 に御迷惑お掛けしていたにも関わらず、その度に懇切丁寧に指導して頂き、研究内容以外 のことに関しても様々な知識を御教授して下さいました。この場を借りてお礼を申し上げ ます。

本研究を進めるに当たり、実験の協力、および情報の提供をしてくださった株式会社共 立合金製作所の大江正和様、エバーロイ商事株式会社 岡田茂樹様、行政多見氏様には深 く感謝致します。また、実験時にはお忙しい中ご協力頂いた東京理科大学 松山賢先生に も深く感謝致します。

本研究室で共に学んだ川村淳之佑氏、前川結宇理氏の御二人とは研究内容こそ違いまし たが、楽しく充実した院生生活を共に送ることができました。日々の生活でお世話になっ たのは当然ながら、川村氏の社会人としての視点や考え方、前川氏の仕事をこなす姿勢な どから、筆者は多くの刺激を受け、人間として成長できたと感じております。深く感謝致 します。辻本研究室松浦郁実氏、紅谷真司氏、千葉周平氏、卒研生の皆様にも、研究内容 および日常生活において、大変お世話になりました。深く感謝致します。

2011年3月 加藤 史郎

付録