

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が噴霧特性に与える影響
— 第一報 複数の噴射弁形態の比較による考察 —

松浦 一哲, 丸永 拓哉, 鈴木 俊介, 須田 充
井戸 教雄, 黒澤 要治, 牧田 光正, 林 茂

2007年3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が 噴霧特性に与える影響

－ 第一報 複数の噴射弁形態の比較による考察 －

Effects of Design Parameters and Operating Conditions on Spray
Characteristics of Annular-Liquid-Film-Type Airblast Atomizers
- First Report: Comparison among Atomizers with Different Designs -

松浦 一哲^{*1} 丸永 拓哉^{*2} 鈴木 俊介^{*3} 須田 充^{*3}
井戸 教雄^{*4} 黒澤 要治^{*1} 牧田 光正^{*1} 林 茂^{*1}

Kazuaki MATSUURA^{*1} Takuya MARUNAGA^{*2} Shunsuke SUZUKI^{*3} Mitsuru SUDA^{*3}

Norio IDO^{*4} Yoji KUROSAWA^{*1} Mitsumasa MAKIDA^{*1} and Shigeru HAYASHI^{*1}

* 1 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム
Clean Engine Team, Aviation Program Group

* 2 東京電機大学大学院, JAXA 技術研修生 (現 スズキ株式会社)

* 3 法政大学大学院, JAXA 技術研修生

* 4 法政大学工学部, JAXA 技術研修生 (現 富士重工業)

2007年3月

March 2007

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. はじめに	2
2. 供試噴射弁形状・試験条件・計測系の概要	2
2.1 噴射弁Aの噴霧試験の概要	9
2.2 噴射弁Bの噴霧試験の概要	9
2.3 噴射弁B2の噴霧試験の概要	10
2.4 噴射弁Cの噴霧試験の概要	11
3. 結果と考察	11
3.1 噴射弁Aの噴霧特性	11
3.1.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響	11
3.1.2 流路形状が噴霧特性に与える影響	18
3.1.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響	24
3.1.4 気液質量流量比が噴霧特性に与える影響	24
3.2 噴射弁Bの噴霧特性	24
3.2.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響	24
3.2.2 噴射弁形状が噴霧特性に与える影響	29
3.2.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響	31
3.2.4 液体流量が噴霧特性に与える影響	31
3.3 噴射弁B2の噴霧特性	31
3.3.1 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響	31
3.3.2 流路形状が噴霧特性に与える影響	40
3.3.3 液体流量が噴霧特性に与える影響	40
3.3.4 雰囲気圧力が噴霧特性に与える影響	40
3.4 噴射弁Cの噴霧特性	43
3.4.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響	43
4. 試験結果の総括	46
4.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響に関するまとめ	46
4.2 流路形状が噴霧特性に与える影響に関するまとめ	48
4.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響のまとめ	48
4.4 液体流量あるいは気液質量流量比が噴霧特性に与える影響のまとめ	48
4.5 雰囲気圧力が噴霧特性に与える影響のまとめ	49
4.6 総括の補足と今後の研究の方向性について	49
4.7 優れた微粒化性能をもつ噴射弁の設計指針	52
5. おわりに	52
参考文献	52

液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が噴霧特性に与える影響*

－ 第一報 複数の噴射弁形態の比較による考察 －

松浦 一哲^{*1}, 丸永 拓哉^{*2}, 鈴木 俊介^{*3}, 須田 充^{*3}
井戸 教雄^{*4}, 黒澤 要治^{*1}, 牧田 光正^{*1}, 林 茂^{*1}

Effects of Design Parameters and Operating Conditions on Spray Characteristics of Annular-Liquid-Film-Type Airblast Atomizers *

- First Report: Comparison among Atomizers with Different Designs -

Kazuaki MATSUURA^{*1}, Takuya MARUNAGA^{*2}, Shunsuke SUZUKI^{*3}, Mitsuru SUDA^{*3}
Norio IDO^{*4}, Yoji KUROSAWA^{*1}, Mitsumasa MAKIDA^{*1} and Shigeru HAYASHI^{*1}

Abstract

The effects of design parameters and operating conditions on spray characteristics of annular-liquid-film-type airblast atomizers are currently under investigation to obtain insights into the development of high-performance aero-engine fuel injectors. As the first attempt of a series of studies on this issue, this paper provides a review of results obtained by the authors, on atomizers of different designs for both practical and research use. Comparison of the experimental results shows that counter-swirl combinations of airflow sandwiching an annular liquid film result in narrower spray dispersion than co-swirl cases, but the trend with respect to atomization characteristics is not as clear as is seen in some literatures. The results on a non-prefilming atomizer show that, with counter-swirl combinations of airflow, the case in which the liquid-swirl direction is the same as that of the outer air swirl shows better atomization performance than its counterpart. The designs causing acceleration of air velocity near the atomizer lip seem to improve atomization but also to result in narrower spray angles. The atomization performance is improved by increasing normalized air pressure drop across atomizers or by increasing ambient pressure and their effects on the spray dispersion pattern could be explained by simple Stokes number analysis. On the other hand, the effect of the air-to-liquid mass flow rate ratio is small and sometimes unclear. In the paper, a problem on the evaluation of atomization performance by using concentration-based measurement techniques is also briefly discussed. Finally, suggestions for future work are made, including more systematic approach for better physical understandings, and some strategies for good atomizer designs are also proposed.

Keywords: Aero Engine Fuel Injector Design, Fuel Atomization, Spray Dispersion, Nozzle Pressure Drop, Air-Liquid Mass Flow Rate, Swirl Combination, Ambient Pressure

* 平成19年3月1日受付 (received 1 March 2007)

*1 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム (Clean Engine Team, Aviation Program Group)

*2 東京電機大学大学院, JAXA技術研修生 (現 スズキ株式会社)

*3 法政大学大学院, JAXA技術研修生

*4 法政大学工学部, JAXA技術研修生 (現 富士重工業)

1. はじめに

航空エンジン燃焼器で利用される燃料噴射弁には、高空再着火時等の低温低圧条件から離陸時等の高温高圧条件までの幅広い作動範囲において、着火性・火炎安定性・燃焼効率・排気特性等の様々な性能が要求される。近年の排気規制強化の動きに伴いその要求はさらに厳しいものとなっており、中でもエンジンの高温高圧化に伴い排出量の増加する窒素酸化物（NOx）の削減が重要視されている。このような背景の下、宇宙航空研究開発機構の推進する「クリーンエンジン技術の研究開発計画（TechCLEAN）^(1,2)」では、他の燃焼性能を保持もしくは向上させつつもNOx排出の削減を実現するための燃焼技術の研究開発を実施しているが⁽³⁾、その中でも微粒化特性並びに燃料と空気の混合特性に優れた燃料噴射弁の開発は重要課題の一つとして位置づけられている。

一方、航空エンジンをはじめとしたガスタービン分野では、優れた燃料／空気混合特性が得られることから、気流微粒化式⁽⁴⁾の噴射弁が広く用いられており、その中でも特に、円環状の液膜を内側と外側から（通常旋回成分を伴う）気流で挟み込んで微粒化する方式が多用されている。このような液膜式気流噴射弁の噴霧特性が、噴射弁の各部の形状・旋回気流発生用の旋回翼の角度・内側と外側の旋回方向の組み合わせ等の設計パラメータに対してどのように影響を受けるかを理解することは、優れた性能を持つ噴射弁を効率的に開発する上で重要である。また、噴射弁性能は作動条件によっても変化するので、その影響も合わせて理解する必要がある。

液膜噴射弁の設計パラメータや作動条件が噴霧特性に与える影響については、これまでも多くの研究がある⁽⁵⁻¹¹⁾。しかし、例えば噴射弁の流路形状が変われば旋回の組み合わせや旋回角の影響の出方も変わり、また1つのパラメータを変えると微粒化特性や噴霧分散特性に影響を与える様々な要因が同時に変化してしまうことが多く、噴射弁形状によらない普遍的な傾向を見出すための系統的な研究は一般に困難である。

一方、噴射弁開発の観点からは、できるだけ類似のコンセプトに基づく多様な形状の噴射弁に関して、基礎・実用問わずに設計データベースを構築し、これらから共通な傾向を見出し、それを理解することによっても有用な情報が得られる。この方法によれば、試行的に行われた試験、異なる調査対象を目的とした各試験、噴射弁開

発の途中で随時必要に応じて行われた試験等により得られた、必ずしも系統立てられていない試験結果も、設計データベースとして利用可能であり、今後の噴射弁開発の際の有用な指針をあたえることになる。この際に肝要なことは、これらの個々の試験結果をある段階で総括的視点から検討しなおす作業を行っておくことである。

以上のような観点から、筆者らは、上記の作業の第一段階として、2004～2006年度の間にTechCLEANプロジェクトの中で行われた燃料噴霧関連研究のうち、液膜式気流噴射弁に関するもの⁽¹²⁻¹⁸⁾について、その一連の試験結果を総括的な視点から見直し、今後の液膜式気流噴射弁開発上有用と思われる共通の傾向（あるいは共通しない傾向）を見出すことを試みたので、本稿ではその結果について報告する。特に、本稿は第一報であるので、上記の主旨に基づいて、多少計測の信頼性や噴射弁自体の完成度に問題のあるデータについても、データ解釈上注意すべき点を指摘した上で掲載し、結果としてできる限り多くのデータを掲載するように努めている。

尚、本稿の構成は、これまでの各研究の主要な結果について述べた後で、これらの結果を一部補足の議論を加えながら総括し、さらに今後必要となる研究課題について言及した上で、最後に優れた性能を有する噴射弁を設計するための指針をまとめる構成となっている。

2. 供試噴射弁形状・試験条件・計測系の概要

はじめに、本稿にて結果検討を行う一連の研究で用いた供試噴射弁の形状、試験装置、計測系、研究の対象とした設計パラメータ・作動条件、及び噴霧特性評価に利用した計測法の一覧を図1～7、及び表1～3に示す。尚、表1において、霧化空気差圧は、噴射弁上流空気全圧と背圧の差 Δp を上流空気全圧 p_t で無次元した値（ $\Delta p/p_t$ ）を示しており、また有効開口面積は、噴射弁からの気流体積流量を、上記の空気差圧 Δp からベルヌーイの定理により算出される気流速度にて除した値を示している。また、有効開口面積の欄において、土により示される値は、噴射弁の流路形状や旋回翼の変更により、最大どの程度有効開口面積が変わるかを目安として示している。一般に微粒化特性をはじめとする噴霧特性は空気流量に依存するため、噴射弁形状による影響を議論するためには、形状の変更に伴う有効開口面積（あるいは各霧化空気差圧条件における空気流量）の変化の影響も合わせて考慮する必要がある。

表1 試験条件一覧

		噴射弁A	噴射弁B	噴射弁B2	噴射弁C
噴射弁タイプ		prefilming タイプ	non-prefilming タイプ（基準）	non-prefilming タイプ	non-prefilming タイプ
		3重スワラタイプ	prefilming タイプ 2重スワラタイプ	2重スワラタイプ	2重スワラタイプ
有効開口面積の範囲		416mm ² ±3%	74mm ² ±3%	93mm ²	155.5mm ² ±7%
供試液体		精製水	精製水	灯油	灯油
設計パラメータ	旋回組み合わせ	アウトースワラ：±45deg. インナースワラ：＋45deg. センタースワラ：±45deg. 液膜旋回：＋90deg.（供給孔角度）	アウトースワラ：－60deg. インナースワラ：±45deg. 液膜旋回：－45deg.	アウトースワラ：－60deg. インナースワラ：＋45deg. 液膜旋回：－45deg.	アウトースワラ：0，±45deg. インナースワラ：0，±45deg. 液膜旋回：＋45deg.
	流路形状	インナーリング装着有無 アウトーリング装着有無	フレア有無 アウトシュラウド長さの長短 液膜リップ形状（prefilming タイプ と non-prefilming タイプ）	フレア有無（回折法大気圧計測時のみ）	
作動条件	霧化空気差圧	4%（基準），8%	2%，3%，4%	2%，3%，4%，5%（干渉画像法大気圧試験時） 1%，2%，3%，5%，7%（回折法大気圧計測時） 12.4%（雰囲気圧依存性試験時）	2%，3%，4%
	気液質量流量比（ALR） または液体流量（Qf）	ALR＝9.8（基準），6.5，19.6	Qf＝1，3cc/s	ALR＝9.5（干渉画像法大気圧試験時） Qf＝1，2，3cc/s（回折法大気圧計測時） ALR＝4.1，24.6（雰囲気圧依存性試験時）	ALR＝9.5
	雰囲気圧力	0.1MPa	0.1MPa	0.1MPa（共通試験条件） 0.1，0.23，0.42，0.63，0.82MPa（雰囲気圧依存性試験時）	0.1MPa
	雰囲気温度	293K	293K	293K	293K
	噴射弁入口気流温度	343K	293K	293K	293K
噴射方向		水平方向	鉛直下向き方向	鉛直下向き方向	鉛直下向き方向
計測手法		干渉画像法（ILIDS）	レーザ回折法（LDSA）	干渉画像法（ILIDS） レーザ回折法（LDSA） レーザーシート法	レーザ回折法（LDSA）
測定領域		軸方向位置　： $z=0\sim50\text{mm}$ 半径方向位置： $x=-100\sim0\text{mm}$ zx 平面（水平面）内	軸方向位置　： $z=15, 20\text{mm}$ 半径方向位置： $x=-60\sim0\text{mm}$ xy 平面（水平面）内	干渉画像法（大気圧試験）： 軸方向位置　： $z=0\sim45\text{mm}$ 半径方向位置： $x=0\sim70\text{mm}$ zx 平面（垂直面）内 レーザ回折法（大気圧試験）： 軸方向位置　： $z=10\text{mm}$ 半径方向位置： $x=-50\sim50\text{mm}$ xy 平面（水平面）内 レーザーシート法（雰囲気圧依存性試験時）： レーザーシート厚み：1mm 軸方向視野　： $z=0\sim50\text{mm}$ 半径方向視野： $x=-50\sim50\text{mm}$ zx 平面（垂直面）内 レーザ回折法（雰囲気圧依存性試験時）： 軸方向位置　： $z=15, 30\text{mm}$ 半径方向位置： $x=-56\sim56\text{mm}$ xy 平面（水平面）内	軸方向位置　： $z=5, 20, 40\text{mm}$ 半径方向位置： $x=-40\sim40\text{mm}$ xy 平面（水平面）内
粒径測定可能範囲		15～200 μm	1.4～1000 μm	15～200 μm （干渉画像法） 1.4～1000 μm （レーザ回折法）	1.4～1000 μm
備考		周方向一様性が悪い 気流温度343K	周方向一様性は良好	周方向一様性は良好	液体の筋が見られる 周方向一様性が悪い

表2 噴射弁Aの形状パラメータの組み合わせ

Name	Center Swirler	Inner Swirler	Outer Swirler	Inner Ring	Outer Ring
PPP	+ 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.	×	×
PPM	+ 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.	×	×
MPP	− 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.	×	×
MPM	− 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.	×	×
PPP-I	+ 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.	○	×
PPP-O	+ 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.	×	○
PPP-IO	+ 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.	○	○
PPM-I	+ 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.	○	×
PPM-O	+ 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.	×	○
PPM-IO	+ 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.	○	○

表3 噴射弁Cの形状パラメータの組み合わせ

Name	Inner Swirler	Liquid Slit	Outer Swirler
PPP	+ 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.
PPN	+ 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.
NPP	− 45deg.	+ 45deg.	+ 45deg.
NPN	− 45deg.	+ 45deg.	− 45deg.
PPZ	+ 45deg.	+ 45deg.	0deg.
NPZ	− 45deg.	+ 45deg.	0deg.
ZPP	0deg.	+ 45deg.	+ 45deg.
ZPN	0deg.	+ 45deg.	− 45deg.

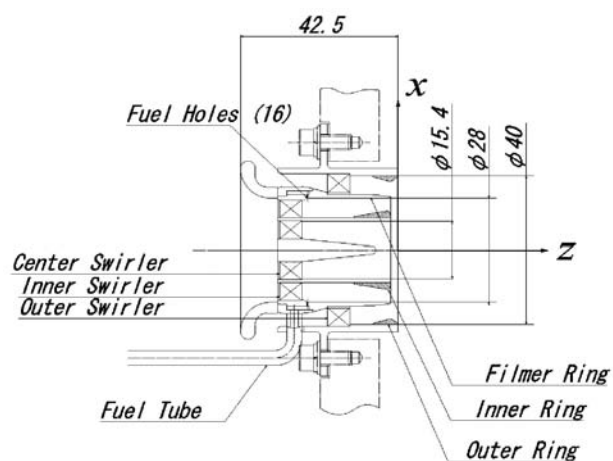


図1 噴射弁Aの形状

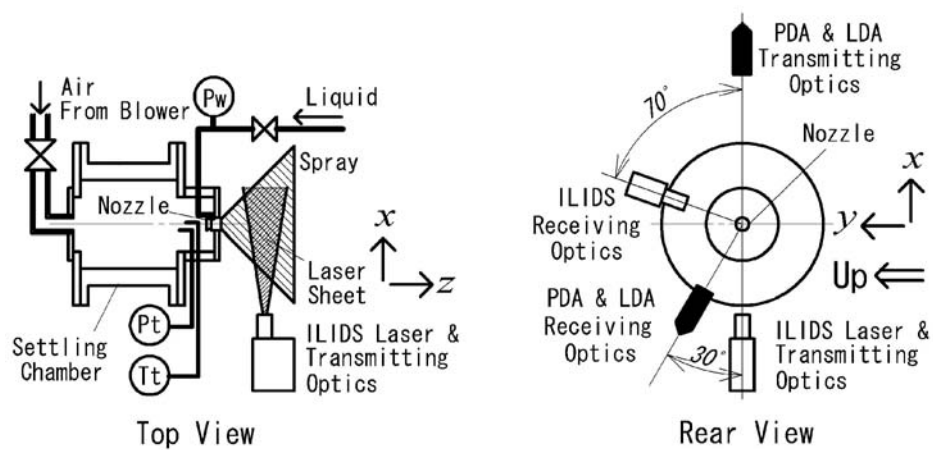


図2 噴射弁Aの噴霧試験装置及び計測系

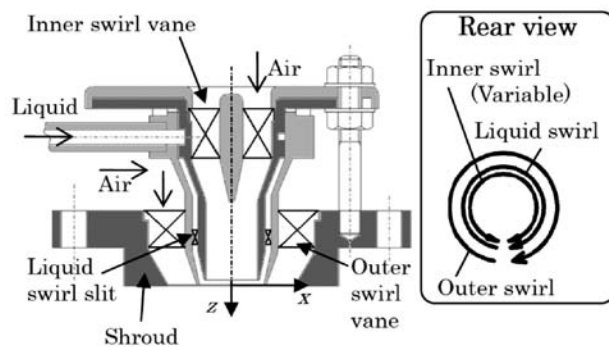
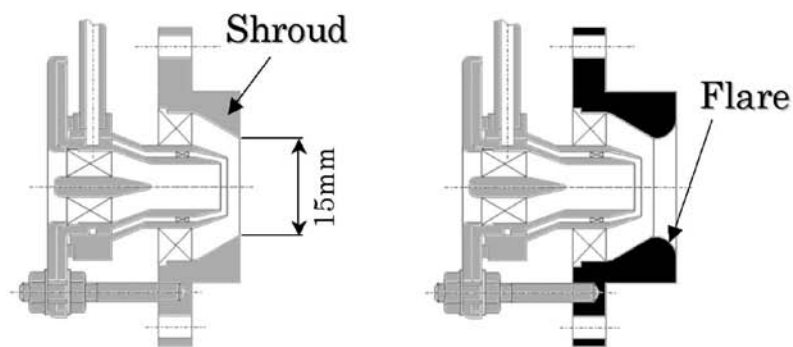
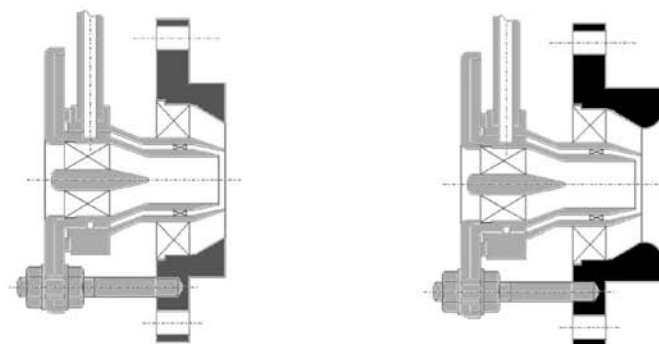


図3 噴射弁B及びB2の構造



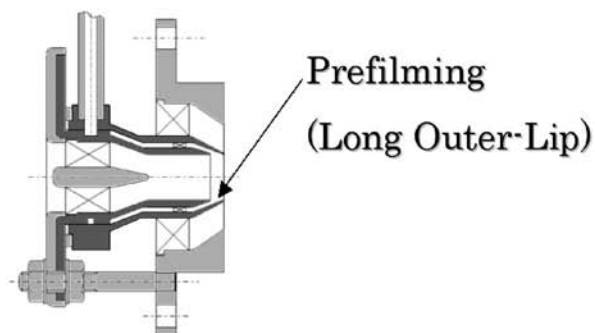
a. LS (Long Shroud type)

b. LSf (Long Shroud flare)



c. SS (Short Shroud type)

d. SSf (Short Shroud flare)



e. SSp (Short Shroud prefilming, -LN: Liquid Swirl - 45deg. -LP: Liquid Swirl + 45deg.)

図4 噴射弁Bの形状

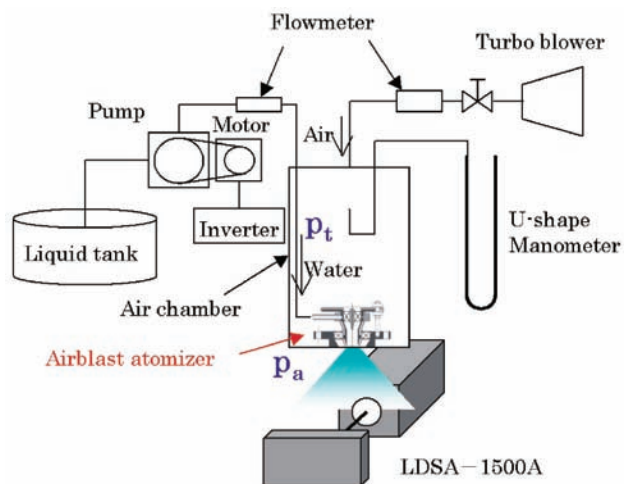
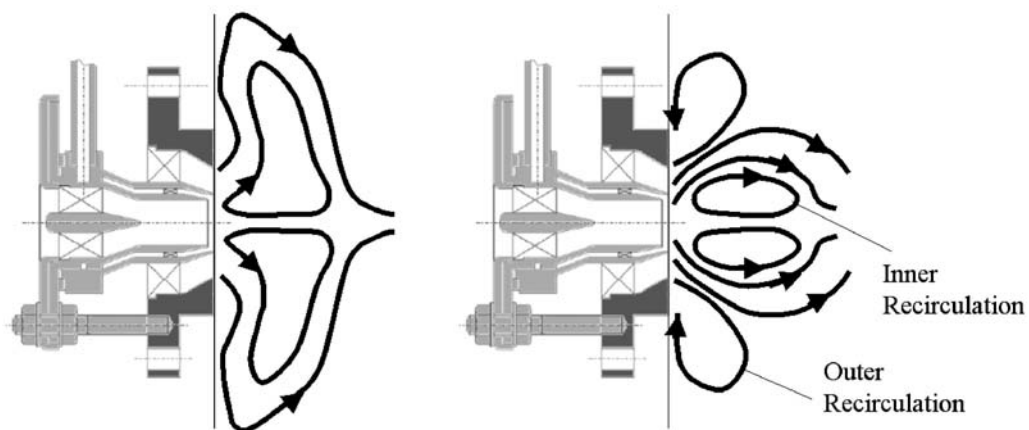


図5 噴射弁Bの噴霧試験装置及び計測系



Atomizer B (SS)

Atomizer B2

図6 噴射弁B (SSタイプ) 及びB2の流れ場の違いの概念図

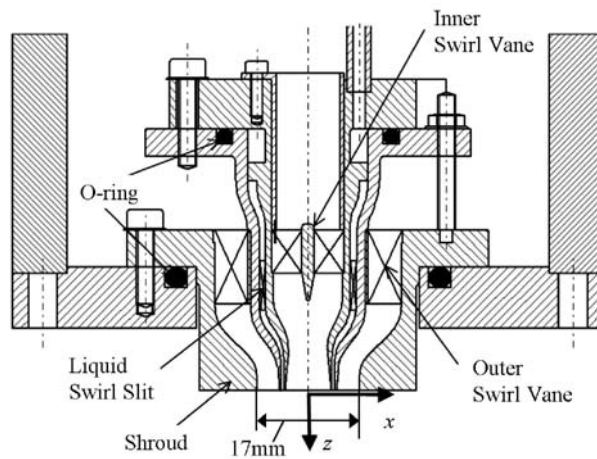


図7 噴射弁Cの形状

2.1 噴射弁Aの噴霧試験の概要⁽¹²⁻¹⁴⁾

噴射弁Aは3重の同軸旋回翼（スワラ）をもつプレフィルミング（prefilming）タイプの気流噴射弁であり（図1）、微粒化の機構は以下の通りである。まず、微粒化用空気がブローワから供給され、チャンバー内で静定した後、噴射弁を介して大気中に噴射される（図2）。一方液体は、図中のインナースワラとアウトースワラを仕切る円管部の内側（フィルマー部）に設けられた16個の孔（直径0.4mm）から供給され、これが内側の空気流により壁に沿って環状に引き伸ばされる（prefilming）。この孔は、孔出口における液体の初速が周方向成分速度のみを持つように開けられており、その旋回方向はインナースワラと同方向であるので、表1の液膜旋回の欄には旋回角が+90deg.と記されている（符号の定義に関しては後述）。生成された環状液膜は最終的に円管部出口（フィルマーリップ）で内側と外側の空気流に挟み込まれて微粒化される。尚、本試験では精製水を供試液体として用いている。

本試験においては図中のセンタースワラ、インナースワラ、アウトースワラの旋回方向の組み合わせの噴霧特性への影響、並びに着脱可能なインナーリング、 OUTERリングにより変更可能な流路形状の噴霧特性への影響について調べた。表2にそのリストを示す。ここで、本稿における旋回角の定義については、噴射弁を下流側から見たとき（後視，rear view）の旋回流の方向が左回転の場合を正とし、旋回翼の迎え角で定義している。本試験で用いたスワラの旋回角は+45deg.または-45deg.であり、前者をP、後者をMの記号で表わしている^{§1}。従って例えば、センタースワラ、インナースワラ、アウトースワラの順に旋回角が+45deg., +45deg., -45deg.の組み合わせの場合には、PPMと表記している。また、PPPとPPMについては、インナーリング（記号I）及びアウトerring（記号O）をそれぞれ装着した場合としない場合の計4通りについて試験を行った。これらについては、例えばPPPにインナーリングのみを装着した場合はPPP-I、両リングを装着した場合はPPP-IOと呼ぶことにする。尚、本試験における全ての噴射弁形態において、有効開口面積の差は±3%以内となっており（表1）、同じ霧化空気差圧条件におけるデータを比較する際には、各噴射弁の空気流量の差が噴霧特性へ与える影響は小さいと考えられる。

作動条件については、噴射弁下流を大気開放の状態で行い、霧化空気差圧（ $\Delta p/p_0$ ）が4%、気液質量流量比（ALR）が9.8の条件を基準条件として試験を行った。基

準条件の設定（特に気液質量流量比）については、本試験が大気圧試験であることを考慮し、着火条件やアイドル条件等の実用噴射弁における低負荷条件をある程度模擬できるように定めている。但し、PPMについては、霧化空気差圧8%の条件及び気液質量流量比が6.5, 19.6の条件においても試験を行い、これらの条件の変化による噴霧特性への影響を調べた。尚、本実験ではブローワから供給される空気をそのまま噴射弁に供給しているため、気流温度が343Kと高くなっており、本稿では蒸発の影響は議論されないものの、特に小粒径液滴の結果については、厳密には蒸発の影響を考慮すべきであることを言及しておく。

また、表1に示す通り、本実験では試験装置の便宜上噴霧の噴射方向を水平方向としたが、これにより、重力の影響に起因する噴霧の周方向の偏りが見られており、定量的観点から考察を行う際にはその影響を考慮する必要がある。

噴霧の評価については、干渉画像法⁽¹⁹⁻²⁰⁾による市販の粒子解析装置（日本カノマックス社製ILIDS System）を用いて評価を行った。干渉画像法（ILIDS: Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing）は球形光透過性液滴の個々の粒径・速度の同時面計測が可能な方法である。本システムは前田らの提案したOptical Compression法⁽¹⁹⁻²⁰⁾に基づく受光系、及びソフトウェアを装備しており、視野内粒子数の増加に対して、従来法よりも適用範囲が広い。特に本試験で用いるような旋回成分の強い噴射弁に関しては、レーザシート面に垂直な速度成分が大きく、レーザシートを厚くする必要があり（本試験では2.5mm程度）、必然的に撮影される粒子数が増加するため、本手法の適用は有効である。本試験における主な光学設定パラメータは、有効視野10mm×10mm、受光光学系作動距離211mm、睨み角70deg.（散乱角）、集光角6.8deg.であり、本光学設定における計測可能粒径範囲は15～220 μ mとなる。

尚、噴射弁Aに関する研究においては、レーザドップラ法及び位相ドップラ法による計測を併用して、噴霧分散メカニズムのより詳細な調査を行っており、図2にはその光学系配置も合わせて示されているが、その計測結果に関する詳細な議論⁽¹⁴⁾は本稿においては省略し、3.1.1節において検討結果のみを示すこととする。

2.2 噴射弁Bの噴霧試験の概要⁽¹⁵⁾

噴射弁B（後述の噴射弁B2も同様）は噴霧口上流で空気流路と燃料流路が壁を介して独立しているParker-

§1 本稿では、旋回方向を旋回角の符号で表わす際に、“+”を示す記号としてPを、“-”を示す記号としてMまたはNを用いている。後者については、各噴射弁に関する研究実施期間の違いから、定義が統一されていないため、本稿ではMとNが混在して使用されているが、定義上の問題であり、両者は実質的に同意である。

Hannifin 型⁽²¹⁾ の噴射弁で、現在TechCLEANプロジェクトの中で行われている小型航空機エンジン用燃焼器の研究において、Makida⁽²²⁾ により設計され、燃焼試験に使用されたものである^{§2}。図3に噴射弁の基本構造を示す（この図は後述の図4のSSに対応している）。噴射弁Aとの違いは、スワラの数が2組であること、及び、後述の図4-eのSSpタイプを除いて、気流に液膜が挟まれるリップ（環状液膜室出口）位置まで液体が双方の気流にさらされずに環状液膜室内にあるような構造（non-prefilming）となっている点である。また、環状液膜室内には幅0.5mm、深さ0.8mm、角度 -45deg. の溝状のスリットが等間隔に8本設けられており、これにより液体に旋回成分を与えて周方向の均一性を向上させている。尚、本試験においても液体は精製水を用いている。

図4に本試験で用いた供試噴射弁の図を示す。はじめに図4-a～dに示される噴射弁について記述する。図において、LS（Long Shroud）とSS（Short Shroud）は、シュラウド長さの長短を変えた噴射弁となっており、さらにそれぞれについて拡大流路（フレア）を設けたLSf（Long Shroud flare）及びSSf（Short Shroud flare）を加えた、4種類の流路形状の噴射弁について試験を行えるようになっている。旋回翼については、アウトースワラの旋回角は -60deg. であり、インナースワラ（旋回角 $+45\text{deg.}$ 及び -45deg. ）を組み替えることにより、各噴射弁に対して、旋回方向の組み合わせを逆方向旋回（Counter-swirl, Ct）及び同方向旋回（Co-swirl, Co）の両ケースにつき試験できるようになっている。以下噴射弁の表記については、例えばLSの逆方向旋回組み合わせの場合はLS-Ctと表記する。次に、図4-eの噴射弁について記述する。SSp（Short Shroud prefilming）は、環状液膜室の出口において、外側壁が若干（約2mm）内側よりも下流に出張っており、この壁面（prefilming surface）上で液膜が内側空気流路からの旋回気流によりある程度引き伸ばされた後で、外側空気流路からの気流にさらされて微粒化されるように設計された、prefilmingタイプの噴射弁である。但し、噴射弁Aと比べるとprefilming surfaceが短いのが特徴となっている。このSSpと先のSSを比較することで、prefilmingの有無の影響を確認することができる。SSpについては、液膜室のスリットを -45deg. （記号LN）の他に $+45\text{deg.}$ （記号LP）のものを用意し、逆方向旋回（Ct）の条件で、液膜の旋回方向を外側にあわせた場合と内側にあわせた場合の噴霧特性の違いを調べた。尚、SSpの表記につ

いては、例えば液膜の旋回方向を外側気流と合わせて（スリット角 -45deg. ）、気流旋回の組み合わせを逆旋回とした場合、SSp-CtLNと表記することとする。

次に、図5に実験装置の概略を示す。装置構成は図2の噴射弁Aの場合と概ね同様であるが、噴霧の噴射方向が本装置では鉛直下向きとなっており、噴霧の軸対称性は良好であった。また、図には示されないが、本試験においてはブローワ（噴射弁Aの試験で利用したものに同じ）から吐出される気流の温度を熱交換器により常温（295K）まで下げ、蒸発の影響をほとんど無視できる条件で試験を行っている。

噴射弁の作動条件については、噴射弁Aの試験と同様に噴射弁下流を大気開放の状態で行い、霧化空気差圧が2%、3%、4%、液体流量が1cc/s、3cc/sの条件において試験を行った。霧化空気差圧が4%の場合、液体流量が1cc/sの時の気液質量流量比は7.3となり、噴射弁Aの気液質量流量比の基準条件より若干小さいものの同程度の値となる。尚、上記霧化空気差圧条件において、噴射弁LS、SS、SSpの有効開口面積の差は最大7%程度（SSが最大で 76mm^2 、LSとSSpは 72mm^2 ）であり、またフレアの有無及び旋回方向による空気流量の差は無視できる程度であった。

噴霧の計測にはレーザ回折法⁽²³⁻²⁵⁾を利用した粒径測定装置（東日コンピュータアプリケーションズ製LDSA-1500A, LDSA: Laser Diffraction Spray Analyzer）を用いた。レーザ回折法はレーザビーム上に存在する液滴群の前方散乱光を捉えることにより、その粒度分布、濃度等を測定する方法である。本試験では、噴霧の軸対称性を仮定して、軸方向位置 $z = 15\text{mm}$ 、 20mm における噴霧断面を $x = -60 \sim 0\text{mm}$ の範囲において2mm間隔（一部のデータについては5mm間隔）でトラバース測定し、断面全体のザウタ平均粒径（Sauter mean diameter, SMD）及び噴霧体積濃度分布の広がりにより噴霧を評価した。本試験で用いた光学系設定は、レーザビーム径5mm（ $1/e^2$ 径^{§3}）、受光レンズ口径100mm（有効径95mm）、受光レンズ焦点距離300mmであり、粒径測定可能範囲は $1.4 \sim 1000\mu\text{m}$ である。

2.3 噴射弁B2の噴霧試験の概要^(16,17)

噴射弁B2の形状は、製作図面上は図4のSSにおいて空気流を逆方向旋回とした場合（SS-Ct）と全く同様であり、噴射弁加工を依頼した製作会社のみが異なる。しかし、有効開口面積を検定したところ、表1のように

§2 Makidaらは、小型航空機エンジン用燃焼器の研究において、後述の図4に示す各噴射弁に対して燃焼試験を実施し、研究開発中の燃焼器の目標性能の達成に向けて最適な噴射弁の選定を行っている⁽²²⁾。本報告における議論の主眼は各噴射弁単体の噴霧特性（非燃焼場）に置かれているが、一部については上記燃焼試験結果と噴霧特性の関連についても議論がなされる（後述）。

§3 目視上は $1/e^2$ 径の1.5倍程度以上に見える。後述するもうひとつのレーザ回折法装置LDCT-2000のレーザ光源も同様。

20%ほど異なる結果が得られ、また定性的な気流の流れ場観察により、噴射弁Bの方が気流の広がりや噴射弁B2と比較して極端に大きくなっていることがわかった(図6)。現状ではこの差の理由は明らかにすることができていないが、各々の噴射弁とも試験中の流れ場の様子は安定していたため、本稿では事実上異なる特性を持つ噴射弁としてデータの解析を試みることにした。

噴射弁B2による試験には液体として灯油燃料を使用した。作動条件については、噴射弁下流を大気開放の状態で行い、気液質量流量比が9.5の条件で霧化空気差圧が2%、3%、4%、5%の場合について試験を行った。実験装置は空気源と液体供給の方法が異なるほかは、図5のものと同様の装置を利用した。噴霧計測は干渉画像法を用い、噴射弁Aの試験と同じ光学系設定条件により計測を行った。計測領域については、噴霧が噴射弁の中心軸(z軸)周りに回転対称であると仮定し、噴霧断面(図3のzx断面)の半分($x > 0$)の領域について計測を行った。

尚、噴射弁B2については、レーザ回折法を用いた粒径計測を別途行った。本試験のみ、噴射弁B2に2.2節と同形状のフレアを装着したタイプ(SSf-Ctに相当)を追加して計測を行った。噴射弁実験装置は上述の通りであり、霧化空気差圧条件は1%、2%、3%、5%、7%、液体流量条件は1cc/s、2cc/s、3cc/sとした。レーザ回折粒径測定装置は東日コンピュータアプリケーションズ製LDCT-2000を用い、軸方向位置 $z = 10\text{mm}$ における噴霧断面を $x = -30 \sim 30\text{mm}$ の範囲において1mm間隔でトラバース測定し、断面全体のザウタ平均粒径により評価を行った。このLDCT-2000装置は粒径計測のみならずCT測定による噴霧断面の各点の濃度や粒度分布、平均粒径の計測が可能であるが⁽²⁶⁾、本試験では計測時間の短縮のため、CT機能を用いずに通常のレーザ回折法装置としての機能のみを用いた。本試験で用いた光学系設定は、レーザビーム径2.65mm ($1/e^2$ 径)、受光レンズ口径100mm (有効径95mm)、受光レンズ焦点距離300mmであり、粒径測定可能範囲は $1.4 \sim 1000\mu\text{m}$ である。

さらに、噴射弁B2については、噴霧特性の雰囲気圧力依存性を調べるために、筆者らが開発した高圧噴霧試験装置^(26,27)により、雰囲気圧力(噴射弁背圧)を0.1～0.82MPaまで変化させた場合の噴霧分散及びザウタ平均粒径への影響について調べた。試験は噴霧分散を調べるためのレーザシートによる噴霧断面像撮影とザウタ平均粒径の雰囲気圧力依存性を調べるためのレーザ回折法による粒径測定を行った。レーザシートによる噴霧断面像撮影試験においては、実機の高負荷条件を想定して、霧化空気差圧が12.4%、気液質量流量比 $ALR = 4.1$ の場合について試験を行った。また、レーザ回折法による粒径測定では、霧化空気差圧は同じく12.4%としたが、

気液質量流量比については、レーザ回折粒径測定装置の計測可能噴霧濃度限界(後述の3.3.4節参照)を考慮して、 $ALR = 24.6$ の条件において試験を行った。粒径測定は上述のレーザ回折粒径測定装置LDCT-2000を用い、軸方向位置 $z = 15\text{mm}$ 、 30mm における噴霧断面を $x = -56 \sim 56\text{mm}$ の範囲において2mm間隔でトラバース測定し、断面全体のザウタ平均粒径により評価を行った。

尚、上記において、霧化空気差圧が通常の実機の平均的な値と比較して大きな値となっているのは、常温の気流条件において、微粒化特性上重要なパラメータである気流の密度と速度を高負荷条件(高温高圧)とあわせるように条件設定したためであり、実機と試験における気流の温度条件の違いによるものである。

2.4 噴射弁Cの噴霧試験の概要⁽¹⁸⁾

噴射弁Cの形状を図7に示す。噴射弁Cは噴射弁B、B2と微粒化コンセプトが同じであるが、気流の旋回方向が噴霧特性に与える影響をできるだけ単純化して理解できるよう、燃料流路が噴射軸とほぼ平行になるように設計されている。本試験は主に旋回の組み合わせの噴霧特性への影響に着目して行われ、表3には試験した旋回の組み合わせが示されている。本試験においては、液体の旋回とこれを挟む内外の旋回気流の旋回方向の組み合わせについても調査を行った。表3に示す通り、旋回角は+45deg. (記号P)、-45deg. (記号N)、及び0deg. (記号Z)のいずれかとなっており、例えばインナースワラ、液体流路スリット、アウトースワラの順に旋回角が-45deg.、+45deg.、0deg.の場合にはNPZと表記している。尚、噴射弁の有効開口面積は、旋回角の組み合わせにより最大で14%程度の差(例えばPPZ: 166mm^2 , ZPP: 158mm^2 , PPP: 145mm^2)が見られたが、旋回方向による差(例えばPPPとPPN, PPZとNPZ等)は見られなかった。

噴射弁Cによる試験には液体として灯油燃料を使用した。作動条件については、噴射弁下流を大気開放の状態で行い、気液質量流量比が9.5の条件で霧化空気差圧が2%、3%、4%の場合について試験を行った。実験装置・計測装置は図5のものと同一装置を利用した。計測は軸方向位置 $z = 5\text{mm}$ 、 20mm 、 40mm における噴霧断面を $x = -40 \sim 40\text{mm}$ の範囲において2mm間隔でトラバース測定し、噴射弁Bの場合と同様の方法により微粒化性能や噴霧の広がりやを評価した。

3. 結果と考察

3.1 噴射弁Aの噴霧特性

3.1.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響^(12,14)

気液質量流量比9.8、霧化空気差圧4%の条件において、

旋回方向の組み合わせが噴霧中の液滴数並びにザウタ平均粒径の空間分布に与える影響をそれぞれ図8及び図9に示す。

先述の通り、本図における座標は図1により定義され、分布図は $x < 0$ の領域のみ描かれている。フィルマーリップの位置は $x = -14\text{mm}$ の位置に相当する。また、図において、噴霧外側の白いブロック状の領域は、噴霧液滴数が少ないため計測を行わなかった領域を示している。尚、本図は以下のような統計処理のもとに描かれている。即ち、まず各トラバース位置（トラバース間隔は 10mm おき）において、有効視野 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の撮影条件にて取得した200組の画像から得られた個々の液滴の位置、粒径、速度等のデータを統合して計測領域内の噴霧液滴の全ての情報を持つ情報データファイルを作成する。次に、新しく定義された 3.3mm 間隔の各格子点における統計量（例えば平均粒径）を、各格子点を中心とする $6.7\text{mm} \times 6.7\text{mm}$ のサンプル領域内に存在する液滴を母集団として算出し、これを空間分布としてプロットする。このサンプル領域の広さは、信頼性のある統計量を得るためのサンプル液滴数を確保でき、且つ結果の空間分布が必要以上に鈍ってしまわないように配慮して決めている。

はじめに液滴数空間分布（図8）に着目して記述する。ここで液滴数空間分布は、先述の通り、200組の画像から得られた合計の液滴数である。液滴数は測定体積や取得画像枚数に依存するが、この条件は噴射弁Aに関する各試験条件で共通であるので、相対比較を行う上では、本図は液滴数密度空間分布と等価であるといふことができる。まず、外側2流路の旋回組み合わせ、即ちインナースワラとアウトースワラの旋回組み合わせに着目すると、これが逆方向旋回の場合（PPM, MPM）、対応する同方向旋回の場合（PPP, MPP）と比較して、液滴数の多い領域が噴霧内側まで存在することがわかる（例えば図中a部）。さらに、前者は後者と比較して、各軸方向位置（ z ）における半径方向（ x 方向）の液滴数極大点をつないだ液滴数分布の尾根線（図中のRidgeline）の上流部における z 軸に対する角度（噴霧角に相当）が小さくなっている（例えば図中b部）。一方、内側2流路の旋回組み合わせ、即ちセンタースワラとインナースワラの旋回組み合わせに着目すると、これが逆方向旋回の場合（MPP, MPM）、対応する同方向旋回の場合（PPP, PPM）と比較して、特に下流 $z = 50\text{mm}$ 付近の領域において、やはり噴霧液滴を噴霧内側へと誘引するような傾向が見られる（例えば図中c部）。しかしこの傾向は外側2流路の旋回組み合わせによる違いと比較すると小さく、この理由としては、センタースワラを有する中心流路がフィルマーリップから離れており、

しかも中心流路を通る空気流量の全体に占める割合も小さい故に、全体の流れ模様や液滴の運動に与える影響が小さいためと考えられる。

一方、ザウタ平均粒径の空間分布（図9）についてであるが、まず外側2流路の旋回組み合わせが同方向旋回の場合には、MPPの噴霧中心付近の領域（図中a部）を除けば、噴霧外側に行くに従って粒径が増加する傾向を示すことがわかる。一方、外側2流路の旋回組み合わせが逆方向旋回の場合には、ザウタ平均粒径の空間分布は液滴数分布の尾根からやや内側に相当する部分に半径方向の粒径極大部（図中b部）を持ち、その後外側に向けて一度減少した後再度増加する傾向を示す。この粒径極大部を持つ傾向については、Zhengら⁽⁸⁾の結果にも見られ、逆方向旋回の組み合わせを用いたこのタイプの燃料噴射弁に共通した傾向と考えられる。一方、内側2流路の旋回組み合わせの影響については、図を見る限り、やはり逆方向旋回の場合には、半径方向に極大となる部分があり（図中a）、特にMPMの場合には一見半径方向に、上記のa部、b部に相当する2つの極大部があるようにも見受けられる（図中c）。但し、a部に相当する極大部については、噴霧内側の部分は液滴数が少ないため、統計誤差に起因したものである可能性もある。これについては、取得画像枚数を増やして液滴サンプル数を増やし、より統計的信頼性の高いデータを慎重に吟味する必要がある。

次に、以上で述べたような傾向が得られる原因を調べるために、粒径別の液滴の運動に着目して議論する。以下では、特に2つの粒径クラス、即ち粒径が $15\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ 及び $65\mu\text{m} \sim 75\mu\text{m}$ の大きさに属するクラスに着目する。便宜上それぞれ $20\mu\text{m}$ クラス、及び $70\mu\text{m}$ クラス、あるいは小粒径クラス及び大粒径クラスと呼ぶことにする。前者は本実験で用いた干渉画像法の光学系により計測可能な最小の粒径クラスであり、気流との干渉が最も複雑な粒径クラスである。一方後者は大粒径液滴の運動の特徴をよく表し、しかも統計量の信頼性を確保するのに最小限必要な液滴サンプル数を含んでいると考えられるクラスであり、気流の影響を受けにくい粒径クラスである。尚、本稿では詳細な議論は省略するが、この粒径に依存する気流との干渉の度合いの評価は、ストークス数⁽²⁸⁾を指標として判断することが可能である⁽¹⁴⁾。

図10にこれら2つの粒径クラスの液滴数並びに平均速度ベクトルの空間分布を示す。まず、小粒径クラスの液滴は、旋回流れの気相速度場に特徴的な中心軸付近の再循環流構造⁽²⁹⁾（各図の $|x| < 25\text{mm}$ の領域参照）の影響を大きく受け、下流領域において噴霧内側へと偏向していることがわかる。また、少数ではあるが、このクラスの液滴は再循環流構造に乗って、中心軸付近では下流か

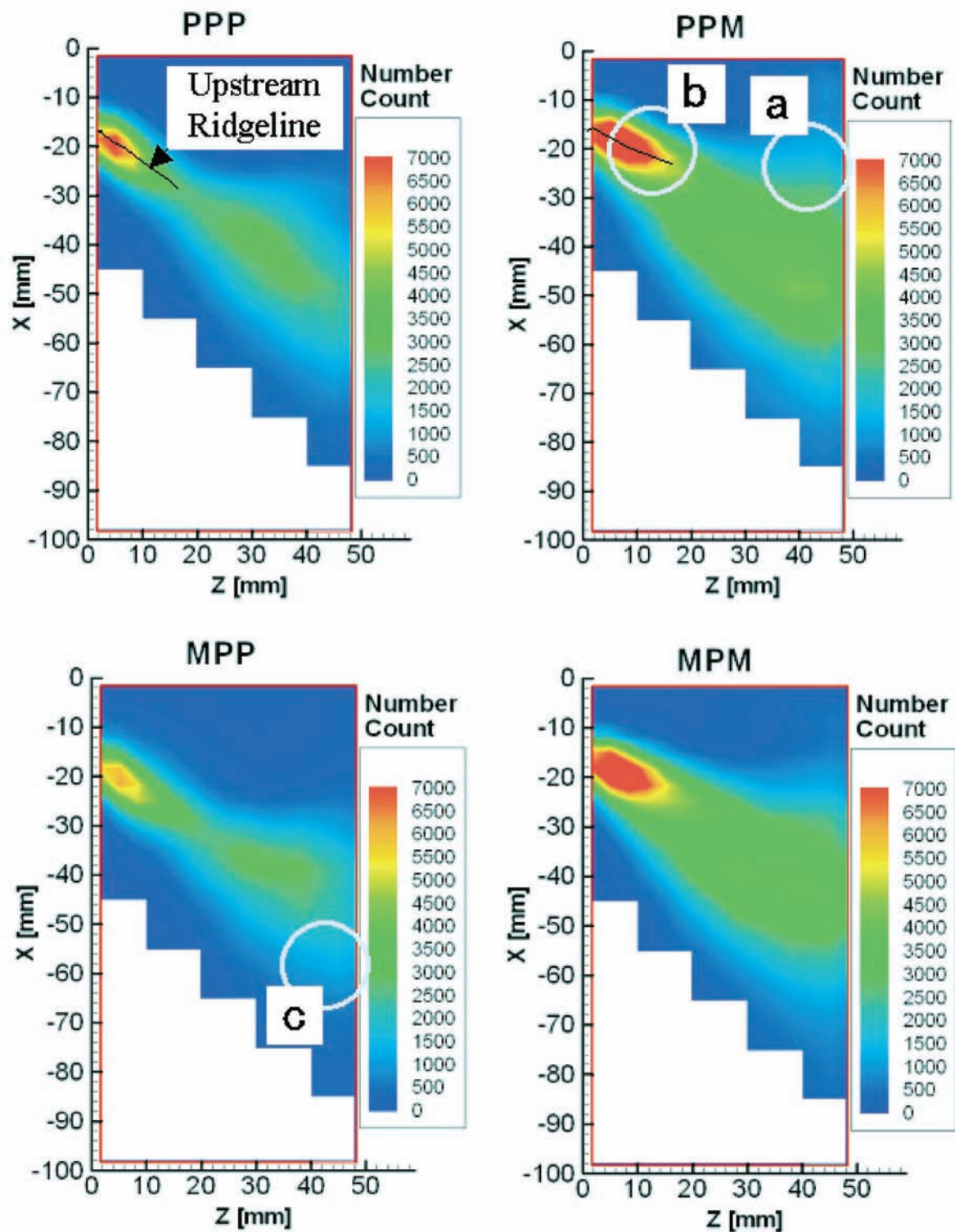


図8 旋回方向組み合わせの液滴数空間分布への影響 (噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$)

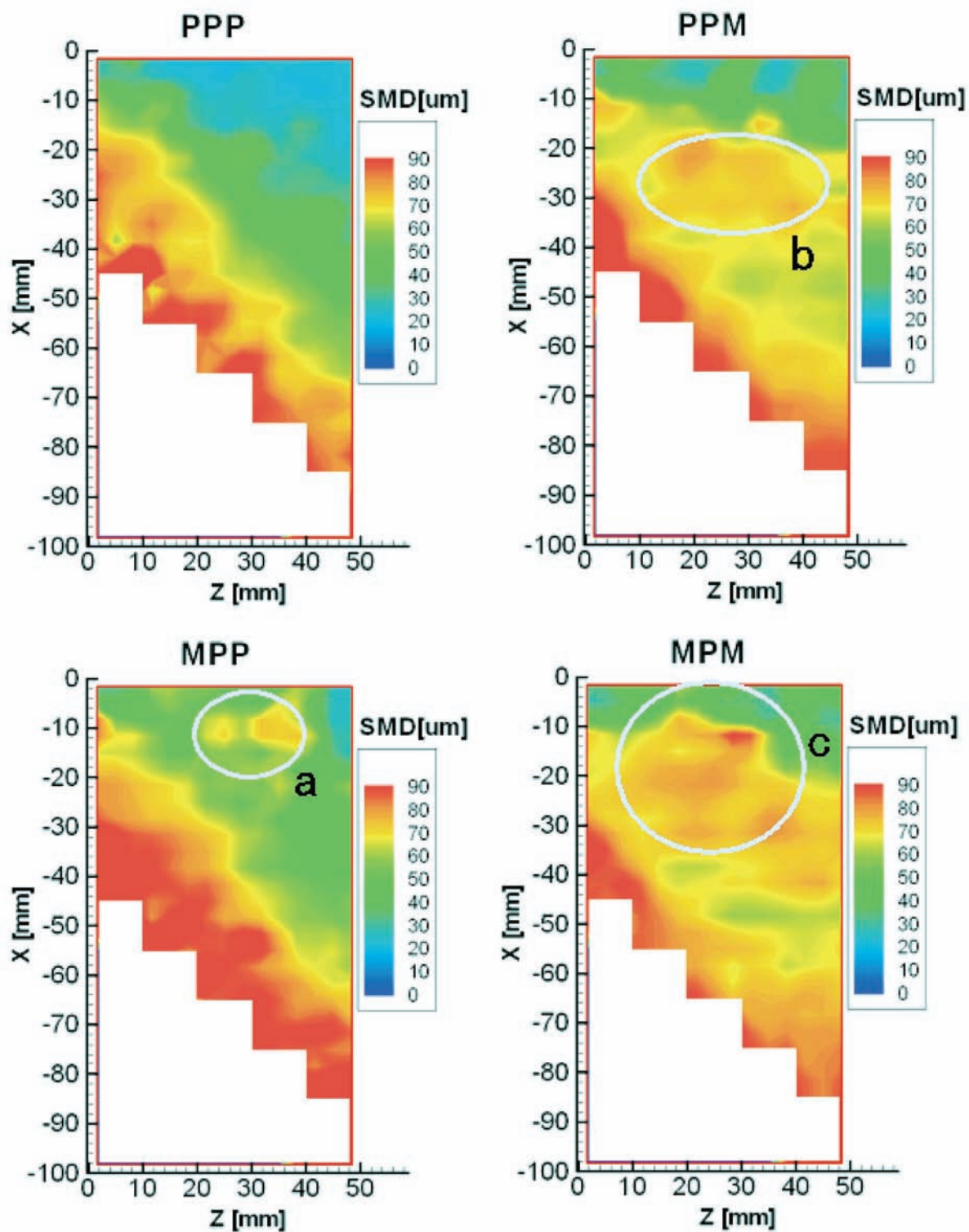
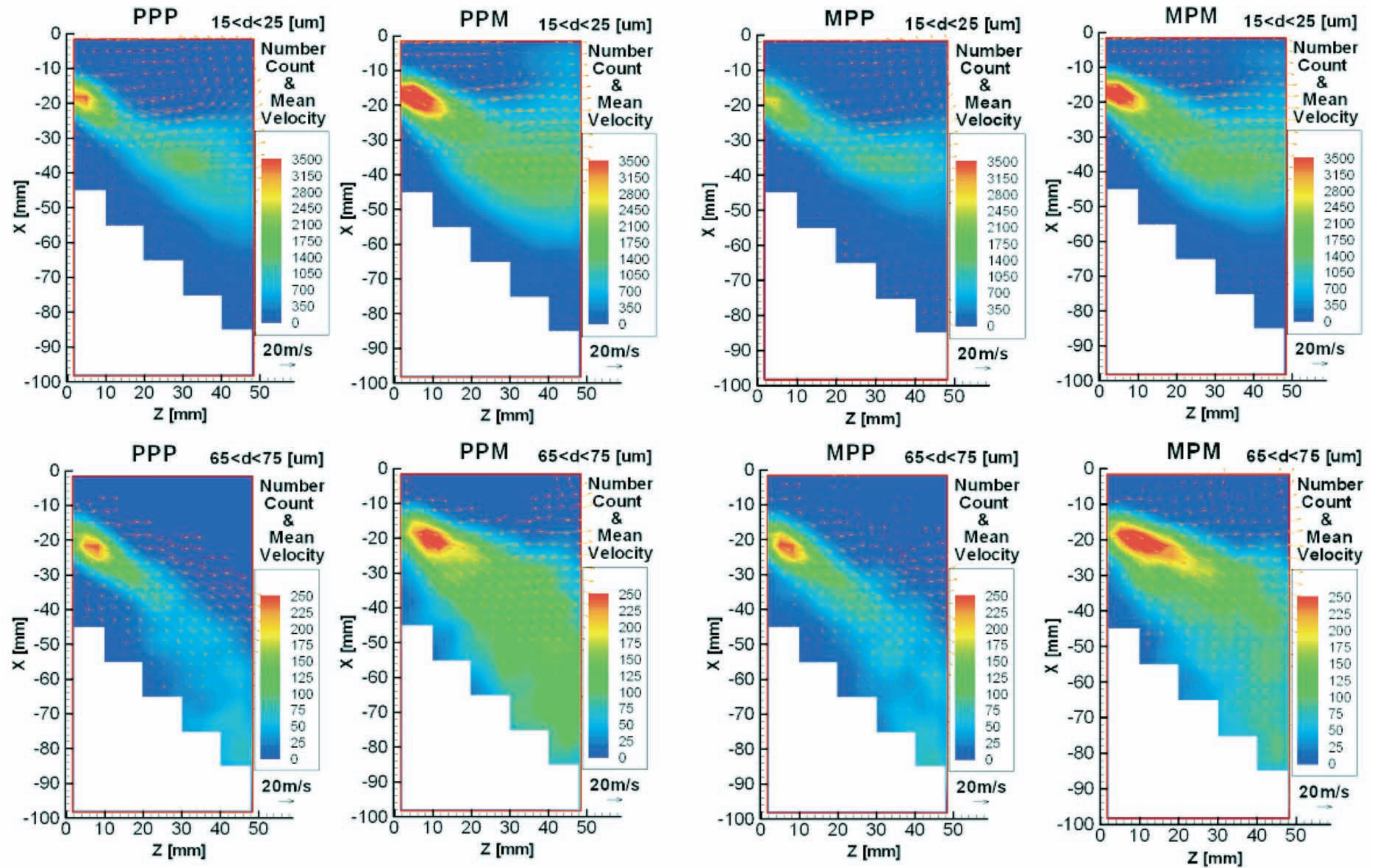


図9 旋回方向組み合わせのザウタ平均粒径空間分布への影響 (噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$)

図10 旋回方向組み合わせの影響：粒径別の液滴数空間分布並びに平均速度ベクトル図（噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$ ）

ら上流へと逆流していることがわかる。この小粒径クラスの液滴速度ベクトル図から推測できるように、外側2流路の旋回組み合わせが逆方向旋回の場合は、同方向旋回の場合と比べて、再循環領域が小さくなっていると考えられる。この理由としては、逆方向旋回の場合には双方の旋回が打ち消しあうので、流れ場全体としての旋回強さが、同方向旋回の場合よりも小さくなり、気流が旋回の作り出す遠心力により拡大する効果がより小さくなるためと考えられる。この速度パターンにより、逆方向旋回の場合の方が比較的上流の段階から液滴が内側へと偏向するため、噴霧内側において同方向旋回の場合より液滴数が多い結果が得られると考えられる。また、この傾向は図8に示す全粒径に関する液滴数空間分布についても同様のことが言えるが、これは液滴数分布には液滴数の多い小粒径クラスの液滴分布が支配的と考えられることから説明できる。一方、内側2流路の旋回組み合わせの影響についても同様のことが言えるが、図8の場合と同じく、その影響は外側2流路の旋回組み合わせを変えた場合と比較すると小さい。

一方、大粒径クラスの場合は、空気抵抗に対して液滴の慣性力が卓越するため、内側へ偏向する気相流の影響を受けにくく、 zx 断面内の速度はより弾道的なベクトルを示している。また、外側2流路の旋回組み合わせが逆方向旋回の場合は、同方向旋回の場合と比較して、大粒径クラスの液滴がより噴霧内側の領域に存在していることがわかる。さらに、上流部において各粒径クラスの液滴数分布の尾根線が z 軸となす角は、逆方向旋回の場合は大粒径の方が若干小さいのに対し、同方向旋回の場合は大粒径の方が大きくなっており、逆の傾向を示している。図11は、各粒径クラスの液滴数分布の直線 $z = 18.3\text{mm}$ 上における半径方向極大位置とフィルマーリップを結ぶ直線が z 軸となす角度の2倍を“粒径クラス別の噴霧角”として示したものであるが、これにより上記の傾向がより定量的に確認できる。一方、内側2流路

の旋回組み合わせの影響は、図10,11に見られるように、小粒径の場合と同様に顕著ではない。

以上により、特に液膜をはさむ外側2流路の旋回方向組み合わせの違いにより、噴霧の分散メカニズムは大きく異なることがわかる。Matsuura⁽¹⁴⁾は、このような旋回組み合わせの違いに起因する粒径別の液滴の運動や結果としての粒径別液滴数空間分布の違いをより詳細に理解するために、PPPとPPMの2つの組み合わせについて、気相並びに上記2つの粒径クラスの周方向（時間平均）速度の半径方向分布をレーザドップラ法及び位相ドップラ法により計測し、旋回に起因する遠心力が粒径別の液滴の運動に与える影響を調べている。その結果を要約すると、まず同方向旋回（PPP）の場合には上流（ $z = 8.3\text{mm}$ 付近）の位置において両粒径クラスの液滴数極大位置（半径方向）と周方向速度絶対値の極大位置がほぼ一致しており、即ち多くの液滴がすでに大きな旋回速度を獲得している状態にあるため、さらに下流に行くに従って、より気流に追従しにくい大液滴の方が遠心力の効果により噴霧外側に運ばれやすい。この結果として、ザウタ平均粒径の空間分布が半径方向に単調増加を示すものと考えられる。一方、逆方向旋回（PPM）の場合、上流（ $z = 8.3\text{mm}$ 付近）の位置において、両粒径クラスの液滴数極大位置を示す半径方向位置はやはり一致しているが、その位置は周方向速度絶対値の非常に小さい気相逆旋回剪断層の中心位置付近にあり、多くの液滴が遠心力により外側へ飛ばされる効果を受けにくい状態にある。このような状況では、むしろ気流に追従しやすい小液滴の方が早く周方向速度を獲得する結果、遠心力の効果により大液滴と比較してより外側へ広がりやすくなると考えられる。一方で、中心軸の近傍では逆流により運ばれる小粒径液滴が多く存在することから、この結果として、ザウタ平均粒径分布は半径方向に極大値を示すような分布となることがわかる。尚、逆方向旋回の場合でもさらに外側では粒径が再び増加しているが、この領域は液滴自体がほとんど存在しない領域であるので、気流に逆らって貫通してきた極小数の比較的大粒径の液滴しか存在し得ないことによるものと考えられる。

以上の議論で示した通り、図8, 9に示される旋回の組み合わせによる噴霧分散メカニズムの違い、及びその結果としての液滴数分布及びザウタ平均粒径分布の違いは、上記に示した2つの粒径クラスの結果の単純な足し合わせを考慮すればその多くの部分を理解できる。このことから、旋回の組み合わせの影響は、気相速度場の違い、及び気相流れへの追従性の違いに起因する大粒径と小粒径の液滴運動の違いを定性的に考慮することで多くの部分を説明できることがわかる。

最後に、外側2流路の旋回組み合わせが同方向旋回の

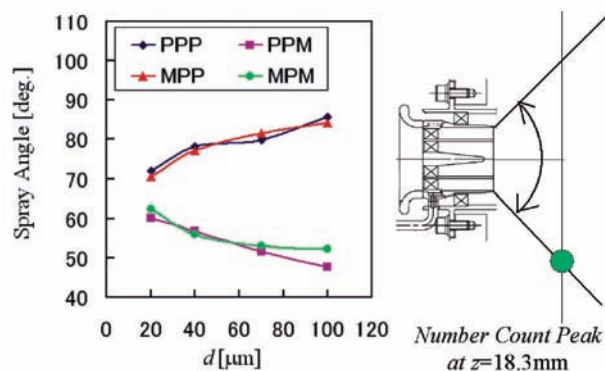


図11 旋回の組み合わせが粒径別の噴霧角に与える影響（噴射弁A）

場合と逆方向旋回の場合、即ちPPPとPPMの2つのケースに関して、 z 軸に垂直な断面上のザウタ平均粒径の比較を行った結果を図12に示す。ここで示されるザウタ平均粒径は、液滴空間分布を軸対称と仮定して、各 z 位置において、 $z-3.3$ [mm] $\sim z+3.3$ [mm] の間の領域内において計測された全液滴のデータを、半径方向位置の重みを考慮して統計処理することにより求めたものであり、厳密には断面上ではなく6.6mmの有限幅をもつ領域内の液滴を母集団としているが、便宜上例えば $z=10$ mm断面におけるザウタ平均粒径などと呼ぶことにする。尚、図12には、PPMに関して作動条件を変えた場合の結果についても合わせて示されているが、これについては3.1.3節及び3.1.4節において改めて議論する。さらに、ここに示される結果は、図8、9に示される結果と試験条件等は同一であるが、データを取得した時期が異なっており、完全に同じデータから算出された結果でないことを記しておく。これについては、3.1.2節において、再現性の問題も含めて再度触れることとする。

図12によれば、旋回方向組み合わせのザウタ平均粒径への影響は顕著でない。Aigner and Witting⁽⁵⁾らは、逆方向旋回の場合、液膜や分裂過程の粗大液滴に作用する周方向の剪断力が強く働き、乱れ強度も大きいとされており、実際そのような傾向は彼らの試験結果にも見られているが、同時に、本試験における旋回角(45deg.)のように旋回角が大きくなると、両者の差は小さくなると指摘している。このような結果を示す理由として、フィルムリップの外側面(外側流路の内壁側)付近の剪断力の影響が挙げられる。即ち、外側流路の旋回強度が強い場合、外側流路の流れが遠心力の効果により流路外側へ偏り、フィルムリップの外側面付近における壁面剪断応力が弱まるので(極端な場合剥離を起こす場合

もある)、このようなケースでは、外側旋回の方が微粒化へ及ぼす影響は小さくなると考えられる。

3.1.2 流路形状が噴霧特性に与える影響⁽¹³⁾

以下では、インナーリング及びアウターリングのそれぞれの装着の有無による流路形状の変化の影響について議論する。尚、試験は3.1.1節の議論における基準条件と同じ気液質量流量比9.8、霧化空気差圧4%の条件にて行い、旋回の組み合わせについてはPPPとPPMの2つの旋回組み合わせについて行ったため、全試験条件は計8ケースである。まず、図13、14に、液滴数空間分布及びザウタ平均粒径の空間分布をそれぞれ示す。これらは図8、9と全く同様の方法により処理を行った結果得られたものであり、両リング装着なしの場合の結果は図8、9に示されるものと全く同じものであるが、比較の便宜上再度本図に掲載してある。

まず、インナーリングを装着した場合、旋回方向及びアウターリングの有無に関わらず、液滴数分布の尾根線(図中のRidgeline, 3.1.1節参照)周辺の顕著に液滴数の多い領域(図の赤色の部分)が下流まで延びている。また、概してインナーリング装着時の方が上流領域における噴霧角(3.1.1節同様、ここでも液滴数分布の尾根線と z 軸のなす角とする)が小さくなる。一方、アウターリング装着の場合にも、旋回方向及びインナーリングの有無に関わらず、尾根線周辺の液滴数の多い領域が下流まで延びている傾向が見られるが、全体的に液滴数分布への影響はインナーリングと比較して顕著ではない。リングの装着により噴霧角が減少する理由としては、液膜リップ付近における有効旋回角が減少することが理由として挙げられる。即ち、スワラ出口直後の速度と比較して、リングの流路絞りの効果により液膜リップでの軸方向気流速度は加速される(質量保存則による)。一方、円管流路中心の半径座標(円管流路の半径方向位置の代表値)はスワラ出口直後と液膜リップ付近でほとんど変わらないため、角運動量保存則が成り立つとすると、周方向速度はほとんど変化しないので、結果として液膜リップ部の有効旋回角が減少することになる。実際に質量保存則と角運動量保存則をもとに計算した液膜リップ部の有効旋回角は、インナーリング装着時のインナー流路の旋回角が32.0deg., アウターリング装着時のアウター流路の旋回角が33.7deg.となる。この液膜リップ部の有効旋回角の減少により、液膜や分裂液滴の初期速度も有効旋回角が小さくなり、噴霧角が減少すると考えられる。

次に、ザウタ平均粒径の空間分布についてであるが、3.1.1節参照における外側2流路の旋回組み合わせに関する議論と同様の傾向が見られる。即ち、流路形状に関わ

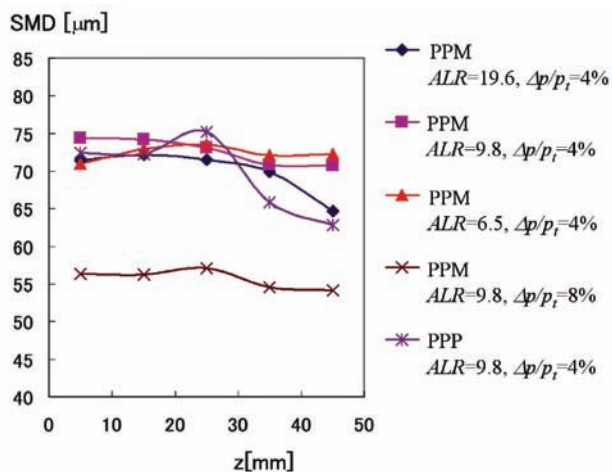


図12 旋回方向の組み合わせ及び作動条件がザウタ平均粒径に与える影響(噴射弁A)

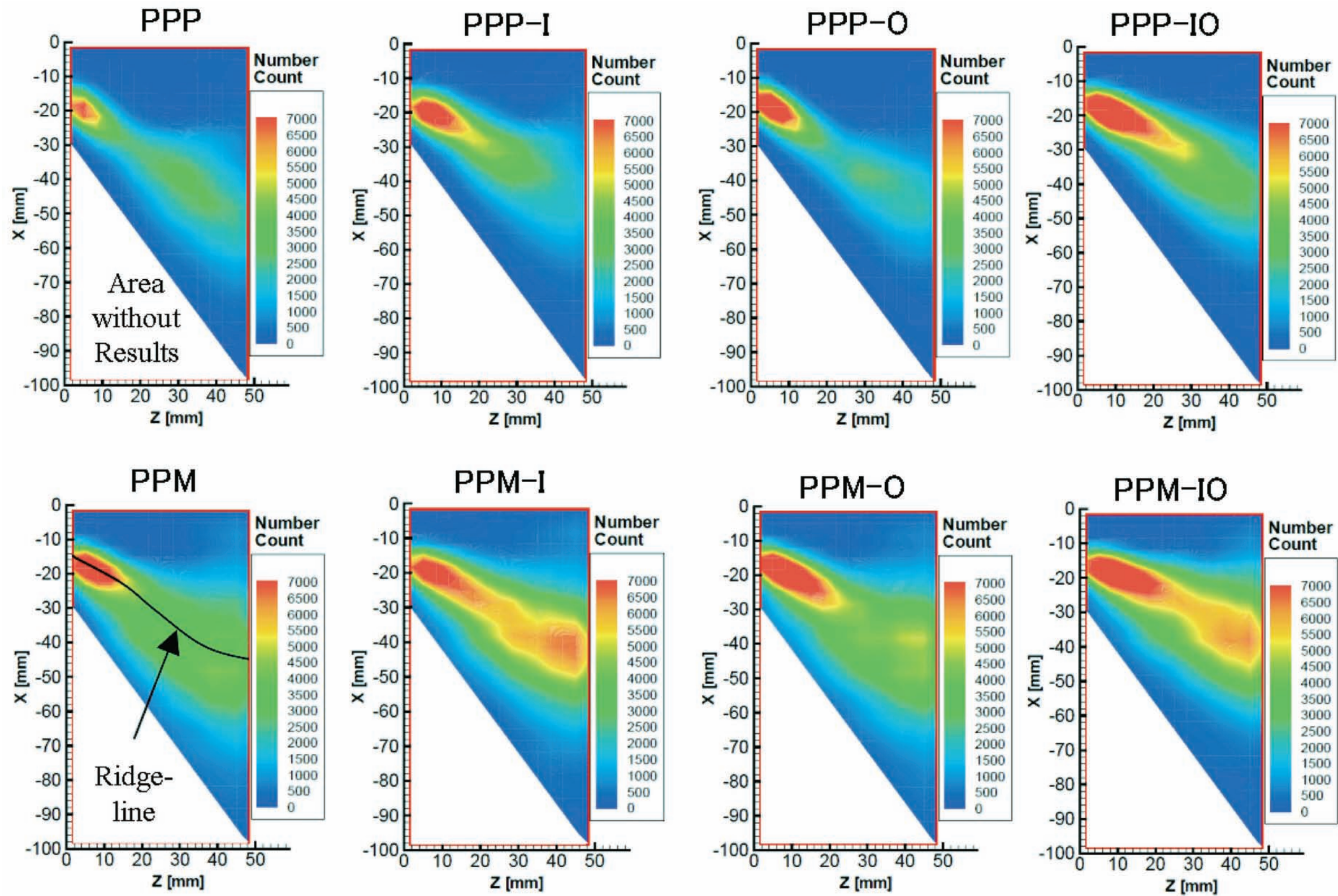


図13 流路形状の液滴数空間分布への影響 (噴射弁A, $\Delta p/p_i = 4\%$, $ALR = 9.8$)

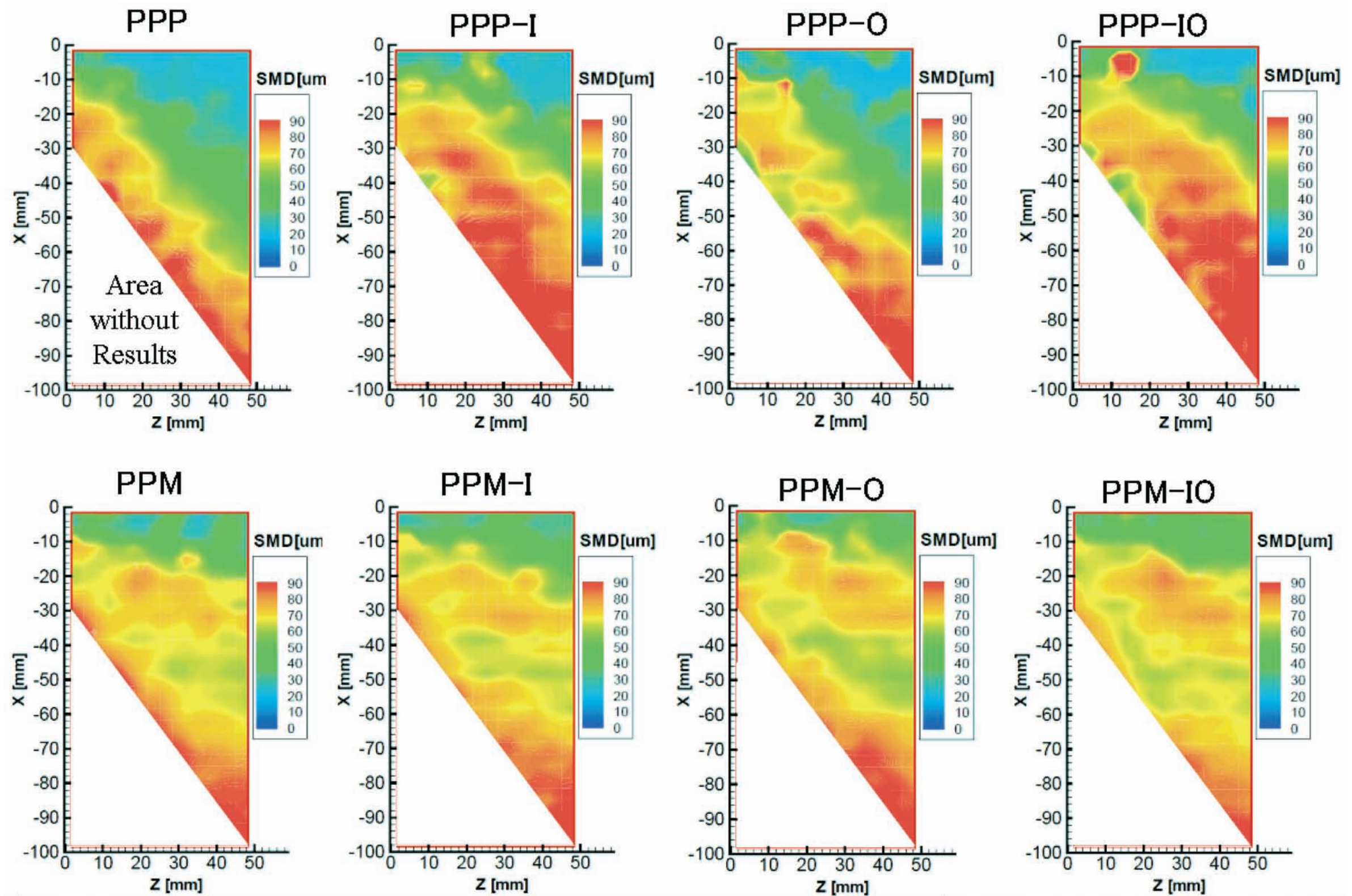


図14 流路形状のザウタ平均粒径空間分布への影響 (噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$)

らず、逆方向旋回の場合は半径方向の粒径極大部の存在が確認できる。また、同方向旋回の場合には、遠心力に支配される典型的な旋回流中の液滴分散メカニズムにより、噴霧の外側に行くほど平均粒径が大きくなる傾向が特に中流領域以降で顕著に見られる。但し、特にインナーリングを装着したPPP-IまたはPPP-IOの場合に顕著であるように、平均粒径の空間分布は湾曲した形状となっている。これは、先述の通り、液膜や分裂液滴の初速が軸方向に加速された結果、「大きな液滴が旋回速度を得て、その zx 断面内の見かけの飛行方向が（遠心力の効果により）噴霧外側に偏向するまでの時間」がリングなし（PPP）の場合と比較して長くなるためと推測される。尚、例外的にPPP-IOの図で中心軸付近に大きな粒径の領域が見られるが、3.1.1節でも議論したように中心軸付近は特にサンプル液滴数が少ないため、統計的信頼性に問題がある可能性があるため、ここではこれ以上の議論を避ける。

次に z 軸に垂直な各断面上のザウタ平均粒径に対するインナーリングとアウターリングの装着の影響を図15に示す。この図に関する統計処理の方法は図12と同様である。尚、図12及び図15にはPPP及びPPMに関して、同一条件に対する結果が示されているが、先述の通り、図8、9、13、14のプロットに使用したのと同ーデータから得られた結果が図15に示されており、一方図12に示される結果は同一条件における別試験のデータによるものである。これらの比較から、本処理における統計サンプル量においては、ザウタ平均粒径結果は、再現性に関して、 $\pm 3.5\%$ 程度の誤差を含んでいることがわかり、評価の際にはこの点を考慮する必要がある。以上を踏まえて本結果を検討すると、図15において、各リング装着の効果により、上流部において、概ね平均粒径は減少している。これを説明する1つの理由として、液膜

リップ周辺の気流の加速による微粒化特性の改善の可能性が挙げられる。一方、特に同方向旋回の場合には、インナーリングの装着によりノズル直下を除いて平均粒径が顕著に増加すること、また特に逆方向旋回の場合は各リング装着の効果はそれほど明確に現れないこと等がわかる。また、同方向旋回のケースについては、アウターリングを装着した場合についても、図における最下流領域において平均粒径の増加が確認できるが、その増加量は小さい。一般に、このような軸方向位置による平均粒径の変化は、液滴の再分裂や合体の影響により議論されることが多いが、本結果における軸方向位置による平均粒径の変化については、「液滴と気相の干渉状態の変化」に依存するところが大きいと考えられる。例えば、噴射弁により大液滴と小液滴が同じ割合で“生成”されても、噴射弁出口での気流拡大により空気抵抗の効果の大きい小液滴の方が先に減速された場合、数密度流束の保存を考えれば、小液滴の数密度が先に増加して空間平均により算出された平均粒径は一旦小さくなるが、さらに下流では今度は大粒径も減速をうけるので、再び平均粒径が増加することになる。よって、空間平均（“Flux”基準ではなく“Concentration”基準による平均）に基づく平均粒径により微粒化性能そのものを評価する場合には、軸方向位置による平均粒径の変化が大きい領域では、上記の効果を考慮の上で判断を行わないと正しい評価ができなくなる^(30,31)。このような観点から本図を吟味すると、アウターリングの装着は微粒化を促進する効果があると考えて差し支えないように思われるが、特に同方向旋回の場合におけるインナーリングの装着の微粒化促進効果については、今後より詳細な検討が必要になると考えられる。

最後に、噴霧分散パターンに関してリング装着の効果が顕著であった同方向旋回の場合について、同じく特に

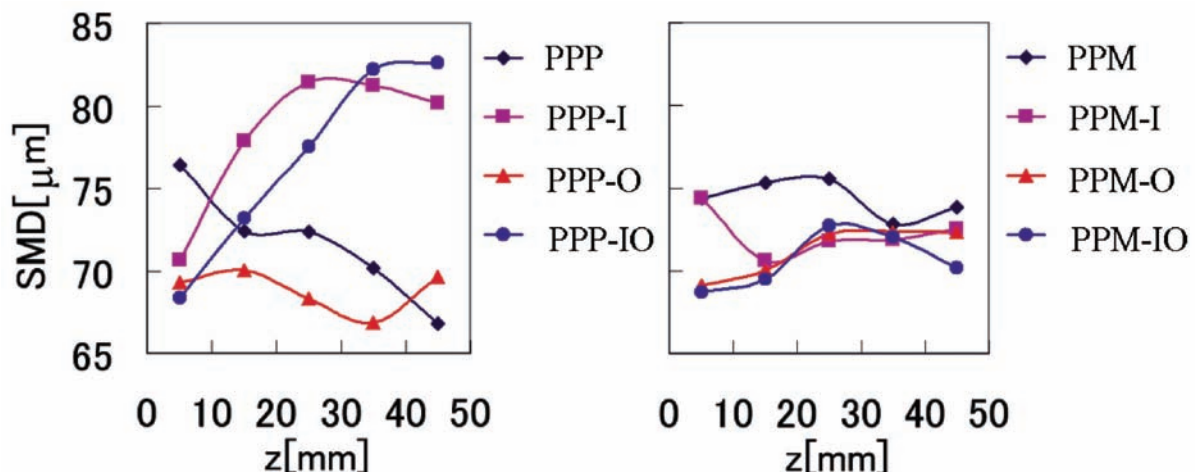


図15 流路形状がザウタ平均粒径に与える影響（噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$, 図中左：旋回組み合わせ PPP, 図中右：旋回組み合わせ PPM)

傾向が顕著であるリング無し（PPP）及びインナーリングのみ装着した場合（PPP-I）の各ケースにおける粒径別の液滴数と平均速度の空間分布を可視化した結果を図16に示す。これらの液滴径依存性については、3.1.1節の議論と同様である。流路形状の影響については、図に示される全粒径クラスに共通して、インナーリング装着の場合の方が噴霧角が小さく、分布の尾根線上の液滴数の多い領域が比較的下流まで延びていることがわかる。また、大きな粒径クラスの粒子が後流まで比較的多く存在しており、これが平均粒径を増加させている要因と考えられる。

3.1.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響⁽¹²⁾

先述の図12には、PPMに関して、霧化空気差圧が z 軸に垂直な断面上のザウタ平均粒径に与える影響が示されている。これによれば、霧化空気差圧4%と8%の場合のザウタ平均粒径の違いは顕著である。Lefebvre⁽⁴⁾、Aigner and Witting⁽⁵⁾等によればザウタ平均粒径は霧化空気差圧の平方根にほぼ反比例（即ち気流流速にほぼ反比例）するとされ、これによれば、霧化空気差圧8%のケースでは4%のケースに対してザウタ平均粒径が0.7倍程度に改善されることになるが、本結果では0.8倍程度に改善されており、10%程度の誤差範囲で簡易概算値と一致している。

3.1.4 気液質量流量比が噴霧特性に与える影響⁽¹²⁾

図12には、PPMに関して、気液質量流量比が z 軸に垂直な断面上のザウタ平均粒径に与える影響が合わせて示されている。この図より、本試験範囲では気液流量比の影響は顕著には見られないことがわかる。Lefebvre⁽⁴⁾によれば、噴射弁Aと同様のPrefilmingタイプの噴射弁に対して、液体粘性の影響が小さい場合、ザウタ平均粒径は $(1+ALR^{-1})^n$ に比例し、指数 n は0.5～1程度とされるが、これに従えば、本試験の試験条件範囲内ではザウタ平均粒径は大きく見積もっても10%程度に留まるため、先述の再現性（±3.5%、即ちデータ間で最大7%の誤差）を考えれば、本結果は妥当なものと考えられる。

3.2 噴射弁Bの噴霧特性⁽¹⁵⁾

3.2.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響

外側と内側の旋回方向の組み合わせが逆方向旋回と同方向旋回の場合のザウタ平均粒径の比較を図17に示す。これによれば概ね同方向旋回の方がザウタ平均粒径が小さい傾向にある。シュラウドが短いタイプ（SS）については $z=15\text{mm}$ で逆の傾向を示すものの、これについても、 $z=15\text{mm}$ から $z=20\text{mm}$ にかけて同方向

旋回の場合のザウタ平均粒径が逆方向旋回の場合と比較して減少幅が大きく、結果として $z=20\text{mm}$ では平均粒径が同じ、もしくは小さくなっている。この傾向はAigner and Witting⁽⁵⁾の結果並びに考察に反するものとなっている。このような結果を示す理由は明らかではないが、考えられる理由としては、まず、外側気流の旋回角が大きいため、3.1.1節の議論と同様の理由により旋回方向の組み合わせの効果が現れにくい可能性がある。また、「気流速度場と液膜・液糸・粗大液滴の分裂が起こる場所との位置関係」の問題も考えられる。すなわち、“気流と液膜の空間位置関係のバランスが良好で、液膜分裂・微粒化が起こる「場所」において液膜厚さが十分薄くなり、しかもその場所周辺における気流速度や乱れが高い”状態に、むしろ同方向旋回の場合の方が近い可能性がある。これについても検証が必要であるが、例えば一般に気流ジェットのコア部から液膜や液糸が外れると微粒化が悪化することが知られているので、今後は液膜の存在位置と高速気流・高乱れ強度の位置、さらに微粒化特性との関連を詳しく見ていく必要があると考えられる。一方、上述のシュラウドが短いタイプ（SS）の場合のように、軸方向位置における傾向の逆転が見られることから、3.1.2節で述べた「液滴と気相の干渉状態の変化」の効果も考慮しておく必要がある。特に旋回による気流拡大が比較的大きい同方向旋回の場合、気流が軸方向に急激に減速し、これに追従した小粒径液滴を選択的に計測した結果、同方向旋回の方が平均粒径が小さくなった可能性もある。これについては、軸方向位置による平均粒径の変化を確認することである程度予測がつくと考えられるが、本試験では噴霧の広がりや激しく、 $z=20\text{mm}$ 以上の位置における計測は困難であったため、これを検証することが難しかった。

以上の3つの「可能性」について、どの効果が真の、あるいは支配的な理由かについては、現時点では定かではなく、詳細な検証試験が必要になる。しかし、いずれにしても、微粒化特性に関しては、明らかに粒径の大小の関係が現れる場合を除いて、慎重にデータを吟味することが必要であることがわかる。

旋回方向の組み合わせが噴霧分散パターンに与える影響を図18に示す。図には噴霧計測試験で得られた $x=-60\sim 0\text{mm}$ での噴霧体積濃度（Concentration, CNC）及びレーザ光透過率（Transmittance, TRM）分布が示されている。前者は液滴体積の和、後者は液滴表面積の和に対応する量であり、粒度分布にもよるが、概ね噴霧の濃いところでは前者の値は大きく、後者の値は小さくなる。尚、CNCに関しては単位はArbitrary Unitであり、噴霧体積濃度に比例する量が示されている。また、これらの図に示される値は、レーザ光路上のすべての噴

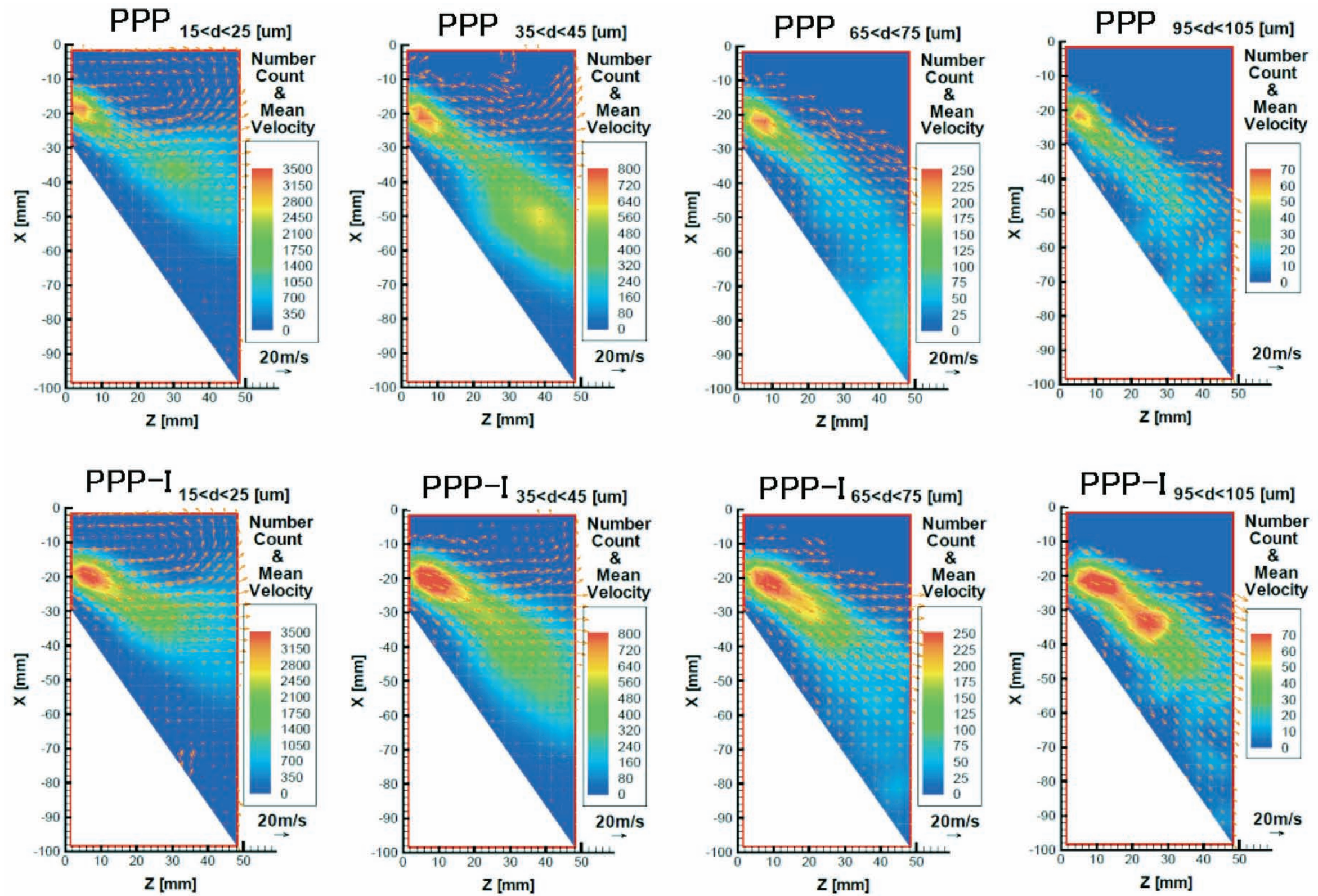


図16 流路形状の影響：粒径別の液滴数空間分布並びに平均速度ベクトル図（噴射弁A, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.8$ ）

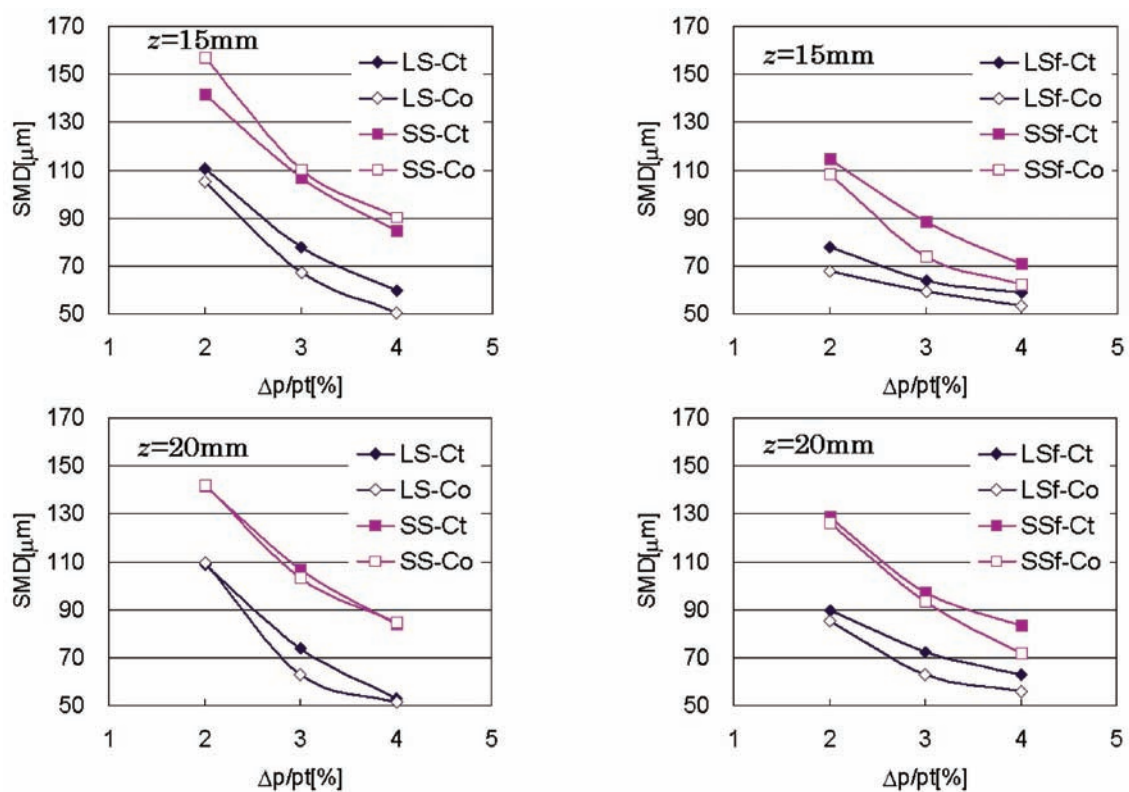


図17 旋回方向の組み合わせによる断面ザウタ平均粒径への影響 (噴射弁B, $Q_l=3.0\text{cc/s}$, 図中左: フレア無し, 図中右: フレア有り)

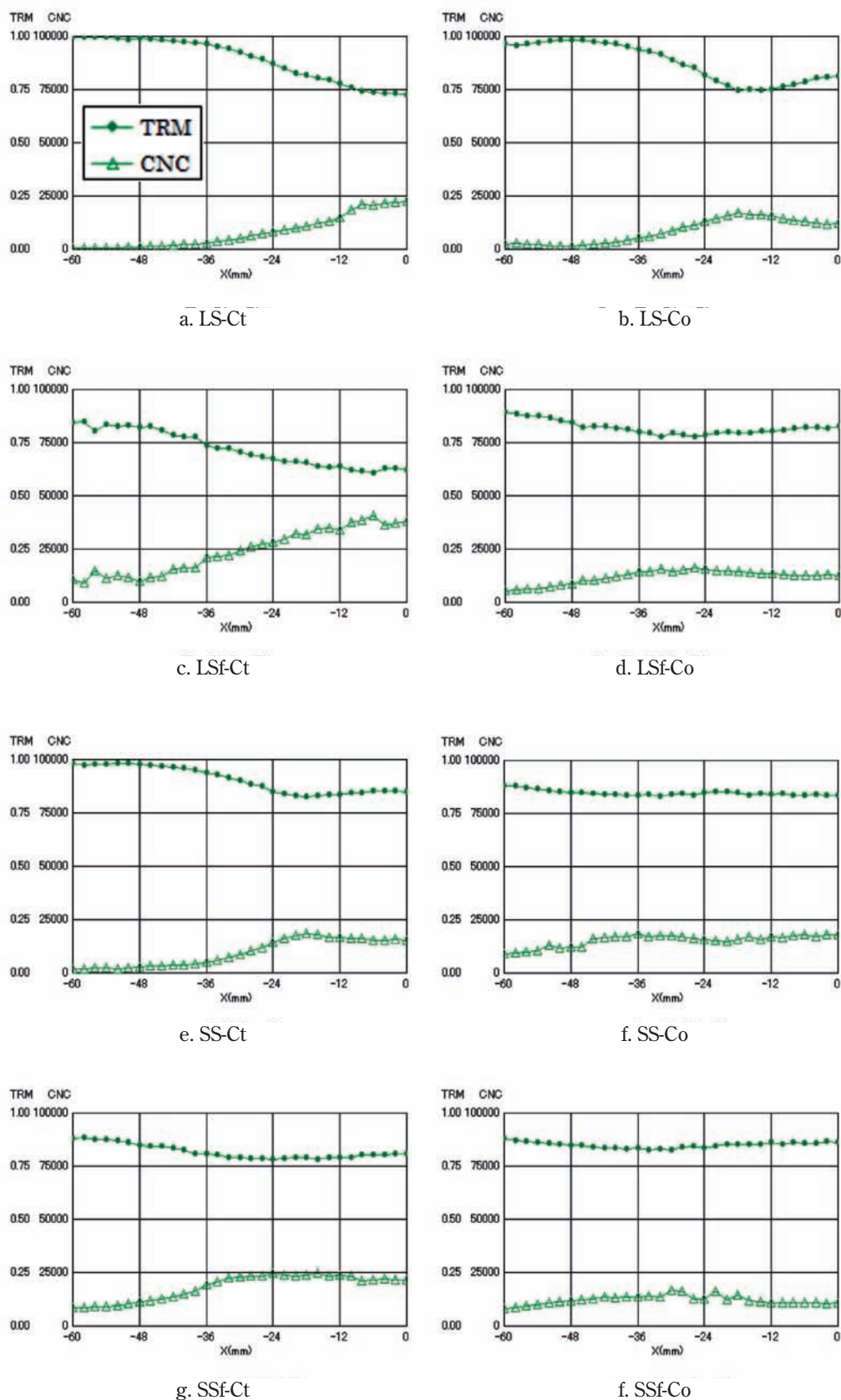


図18 旋回方向・流路形状（フレアの有無・シュラウド長さの違い）の噴霧分散パターンへの影響（噴射弁B, $z = 20\text{mm}$, $\Delta p/p_t = 4\%$, $Q_l = 3.0\text{cc/s}$ ）

霧粒子の情報を積算した値であり(“line-of-sight”), 点情報でないことに注意が必要である。この図から、逆方向旋回の場合は同方向旋回に比べ噴霧の広がり小さくなるのがわかる。この傾向は3.1.1節の議論と同様の考察により説明できる。この傾向は、霧化空気差圧、液体流量、軸方向位置(z)によらず同様であった。

3.2.2 噴射弁形状が噴霧特性に与える影響

本節では噴射弁形状が噴霧特性に与える影響について述べるが、はじめに流路形状、即ちフレアの有無とシュラウドの長さの影響について記述し、その後で液膜リップ形状の影響(prefilming 及び non-prefilming)の影響について記述する。

まず、フレアの有無とシュラウドの長さの違いによるザウタ平均粒径の比較結果を図19に示す。

はじめに、フレアの有無について着目すると、フレアを設けることによって概ねザウタ平均粒径が小さくなる傾向にあり、特にシュラウドが短いタイプの $z=15\text{mm}$ ではその傾向は顕著である。このような傾向は過去の研究にも見られ、例えばJohnson⁽¹¹⁾によれば、今回のフレア流路に相当するようなベンチュリ形状の延長流路を追加することで粒径が減少するとされている。この理由としては、液膜リップの直下流では、フレアによる流路延長の効果により気流の広がり抑制され

るため、液膜に作用する気流速度が高い状態で微粒化が行われていることが一因として挙げられる。但し、フレア有りの場合は、 $z=15\text{mm}$ から $z=20\text{mm}$ にかけて、粒径の増加が見られ、結果として $z=20\text{mm}$ の位置ではフレアの有無の差は概ね小さくなる傾向を示す。このように軸方向位置において粒径計測結果が大きく異なるのは、先述の「液滴と気相の干渉状態の変化」によるものと考えられる。即ち、フレア有りのケースでは噴射弁出口後流での気流の拡大が激しく、軸方向位置によって気流と液滴運動の干渉状態が大きく異なるものと推測される。

一方、フレア有りの場合にザウタ平均粒径が小さくなるという上述の傾向は、霧化空気差圧が高い条件で小さくなる場合が見られ、特にシュラウドが長いタイプについては逆にザウタ平均粒径が大きくなるケースも見られた。噴霧の目視観察によれば、フレア有りで霧化空気差圧が高い条件の場合、フレア壁面への液滴付着が見られており、このような液滴は集合して大液滴となってから放出されるケースが多いため、これがザウタ平均粒径が大きくなる一因として考えられる。

フレアの有無が噴霧分散パターンに与える影響については、図18に示されており、これによれば、フレア有りの場合には外側の空気がフレアに沿って流れるので、フレア無しの場合に比べて噴霧の広がり大きいこ

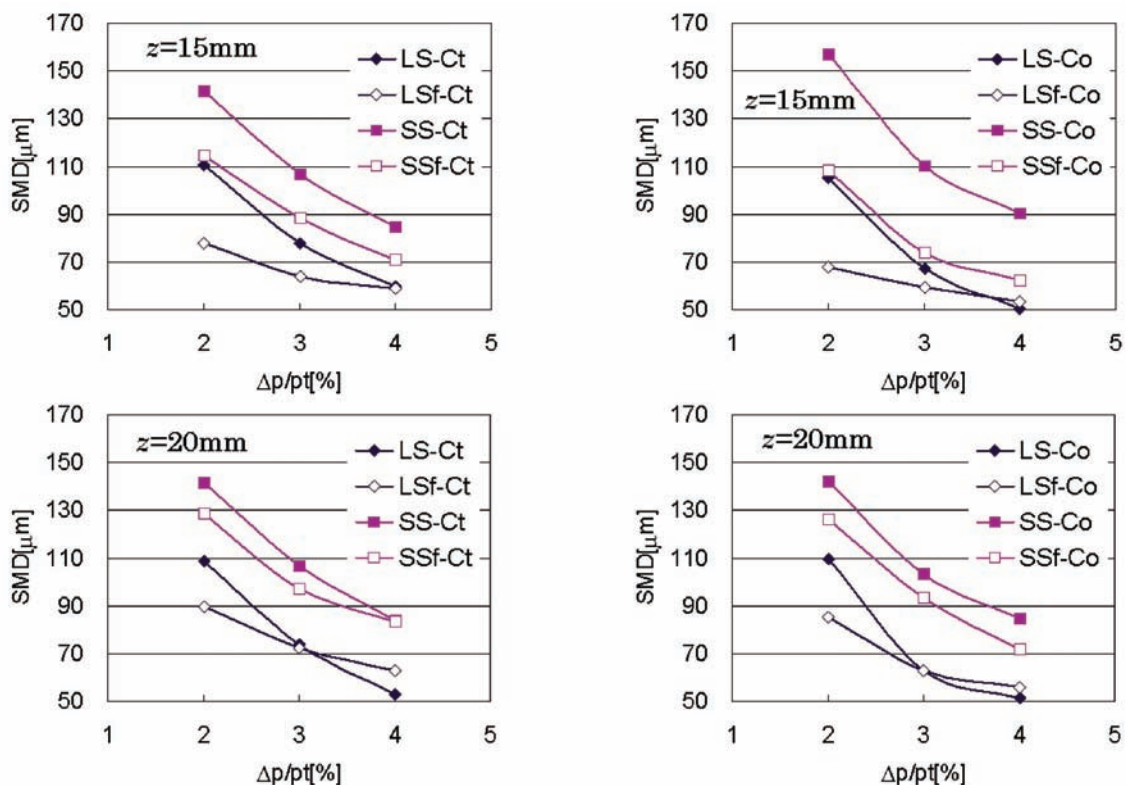


図19 流路形状(フレアの有無・シュラウド長さの違い)の断面ザウタ平均粒径への影響(噴射弁B, $Q_l=3.0\text{cc/s}$, 図中左:逆方向旋回, 図中右:同方向旋回)

とがわかる。尚、この傾向は、霧化空気差圧、液体流量、軸方向位置 (z) によらず同様であった。

次に、シュラウドの長さによる粒径の違いに着目して図19を検討すると、シュラウドが長いタイプの方が短いタイプに比べ各条件においてザウタ平均粒径が小さくなっている。これは、上記のフレアの有無の場合の議論と同様に、シュラウドが長いタイプの方が外側の空気の早い段階での広がりを抑えることができ、結果として外側の空気を液膜の微粒化に効果的に作用させる事ができたためと考えられる。この効果により、フレア無しでは、シュラウドが長いタイプの方が短いタイプに比べ、全ケースで30～50 μm のSMD改善が見られるが、フレア有りの場合は、先述のフレア壁面への液滴付着による影響により、特に霧化空気差圧が高い

ケース (4%) でのザウタ平均粒径の改善は20 μm 程度に留まっている。

シュラウド長さが噴霧分散パターンに与える影響についても図18に示されており、これによれば、シュラウドが長いタイプの方が噴霧の広がりが狭い傾向にあることがわかる。これは液膜リップ周辺の気流がシュラウドが長い場合の方がより内側に向き、その後の気流の広がりもシュラウドが短い場合と比べて抑えられることが理由として考えられる。尚、この傾向は、霧化空気差圧、液体流量、軸方向位置 (z) によらず同様であった。

最後に、液膜リップ形状が噴霧特性に与える影響を図20に示す。本試験は逆方向旋回の組み合わせの場合に限定して行っている。図によれば、 $z=15\text{mm}$ の霧化空気差圧の大きい側で傾向がはっきりしないデータが見

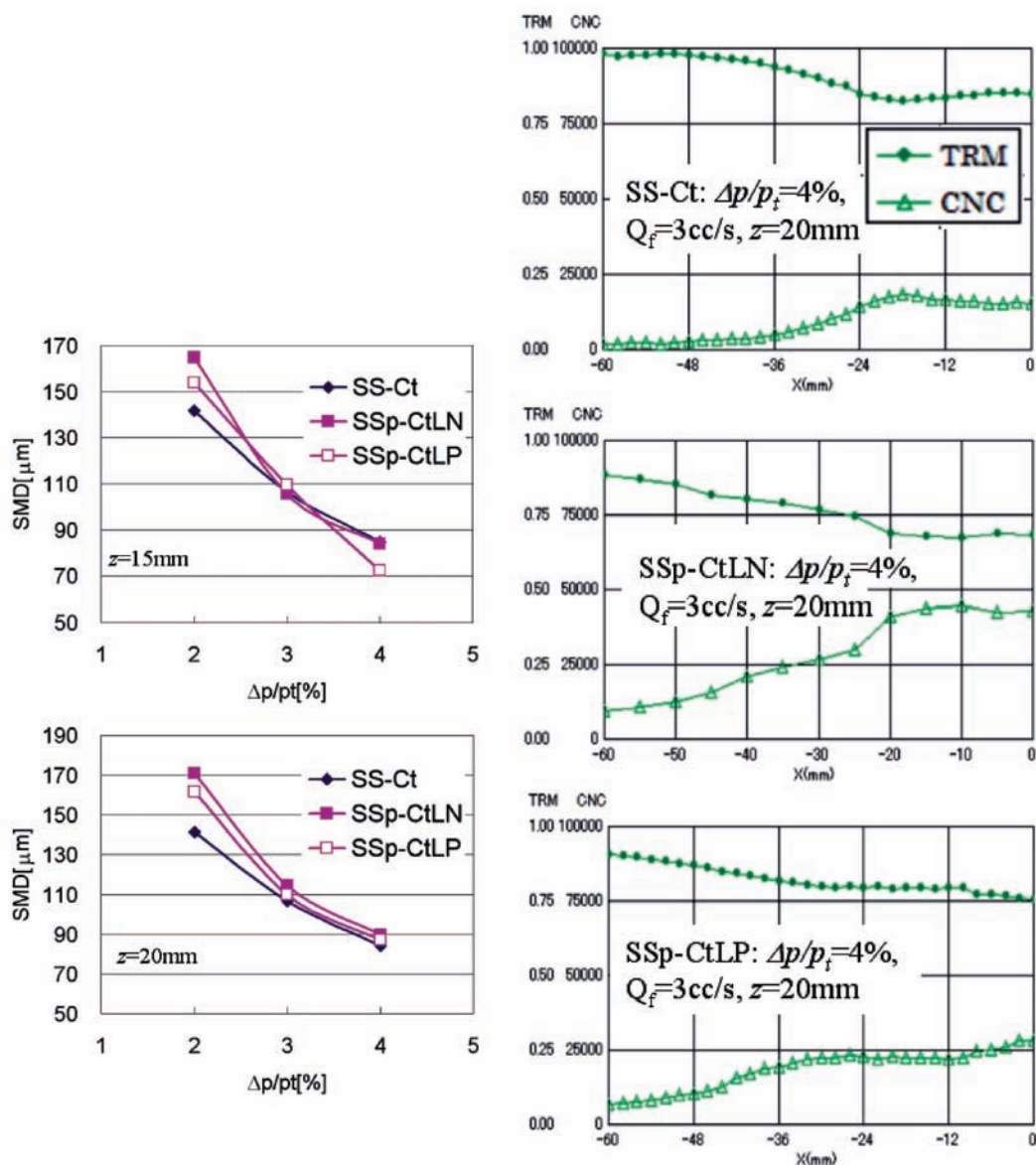


図20 液膜リップ形状 (prefilming タイプと non-prefilming タイプ) の断面ザウタ平均粒径及び噴霧分散パターンへの影響 (噴射弁 B, $Q_l=3.0\text{cc/s}$)

られるものの、概ねnon-prefilmingタイプ(SS-Ct)が一番粒径が小さく、次いでprefilmingタイプで内側気流の旋回と液膜旋回を同方向としたタイプ(SSp-CtLP)となっており、外側内側気流の旋回と液膜旋回を同方向としたタイプ(SSp-CtLN)が粒径が一番大きい結果となっている。また噴霧分散については、SS-CtとSSp-CtLNが比較的類似したパターンを示しているのに対し、SSp-CtLPは噴霧の広がりが大きくなっている。SSp-CtLPは、液膜の旋回速度成分を微粒化前に内側気流がさらに加速するので、遠心力の効果により液膜が広がりやすくなり、結果として、内側気流が液膜を“逆撫で”して遠心力の効果を弱める形となるSSp-CtLNと比較して広がりが大きくなると考えられる。

尚、上記の試験において、non-prefilmingタイプについては、液膜の旋回を外側気流と合わせた場合のみで試験を行っている。この理由は、Makidaら⁽²²⁾が行った着火試験により本組み合わせの方が性能が良好であったことから、このタイプを研究開発燃焼器用噴射弁の標準型としたことに由来しているが、後の3.4.1節で記述するように、non-prefilmingタイプの噴射弁Cに関して、逆方向旋回の場合には液膜の旋回を外側気流と合わせた場合の方が粒径が小さくなっていることから、本組み合わせが微粒化性能向上及び結果としての着火性能向上に有効である可能性がある。一方、SS-Ctがprefilmingタイプの2つの噴射弁に対して、ザウタ平均粒径が比較的小さい結果を示している理由については現在のところ明らかにできていない。Bhayaraju⁽³²⁾らは、二次元形状の気流噴射弁の研究において、prefilmingタイプの方がnon-prefilmingタイプよりも微粒化性能に優れるとしており、その理由として、液膜リップ以前のprefilming surfaceの部分で削ぎ取られた(“surface stripping”)小径液滴が粒径の減少に寄与していると考えている。しかし噴射弁Bに関する本結果はこれと反しており、旋回成分の有無をはじめとする円管状液膜と平面状液膜の違い、供試液体の違い等を注意深く考慮する必要があると考えられ、今後より詳細に調査する必要がある。

3.2.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響

図17, 19には、霧化空気差圧がザウタ平均粒径に与える影響が示されている。3.1.3節の結果と同様に、霧化空気差圧の増大に伴い微粒化性能は大きく改善されることがわかる。本試験では気液質量流量比ではなく液体流量を固定して試験を行ったため、3.1.3節で行ったような他の文献との直接比較は難しいが、次節で述べる通り、液体流量の影響は比較的顕著でないため、気液質量流量比を固定して試験した場合も霧化空気差圧

の影響に関してはその傾向に大きな差は見られないと考えられる。また、図19において、フレア有りの場合は粒径の霧化空気差圧依存性が小さいように見受けられるケースが多いが、これについては、主に霧化空気差圧が高い場合において噴霧のフレア壁面への付着が見られているので、これにより発生する大液滴が霧化空気差圧増大による微粒化改善効果を打ち消す効果を示し、結果として粒径の霧化空気差圧依存性に影響を与えていると考えられる。

尚、本稿には示されないが、レーザ回折法の結果によれば、霧化空気差圧が噴霧分散に与える影響は顕著ではなかった。但し、後の3.3.1節に示すような詳細な吟味を行うと、その傾向が明らかになる可能性があると考えられる。

3.2.4 液体流量が噴霧特性に与える影響

図21にシュラウドが短い噴射弁(SSタイプ)の場合の液体流量によるザウタ平均粒径の違いを示す。これらは本実験において液体流量による差が一番大きく現れた条件であるが、それでも差は最大10%程度に収まっており、3.1.4節の結果と同様に、液体流量がザウタ平均粒径に与える影響は顕著でなく、またその傾向もはっきりしなかった。

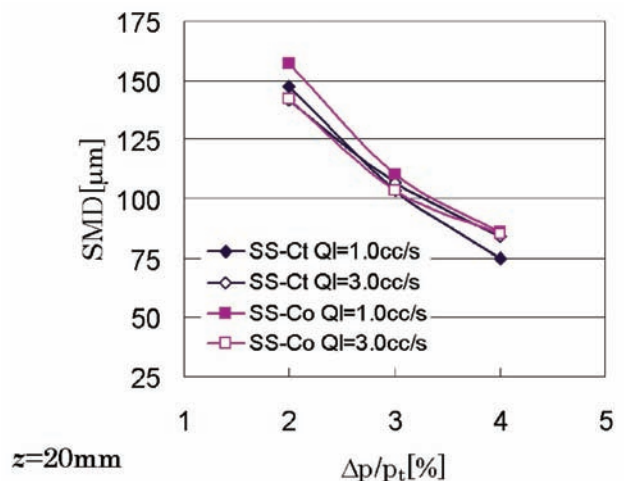


図21 液体流量がザウタ平均粒径に与える影響(噴射弁B, SSタイプ)

3.3 噴射弁B2の噴霧特性

3.3.1 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響

図22に干渉画像法により測定された各霧化空気差圧条件における液滴数とザウタ平均粒径の空間分布を示す。本空間分布をプロットする際の統計処理の方法は3.1.1節に準じているが、新しく定義した格子点の間隔を3mm、サンプリング領域を6×6mm、取得画像枚数を300枚とし、 $x > 0$ の領域を計測領域とした点が異な

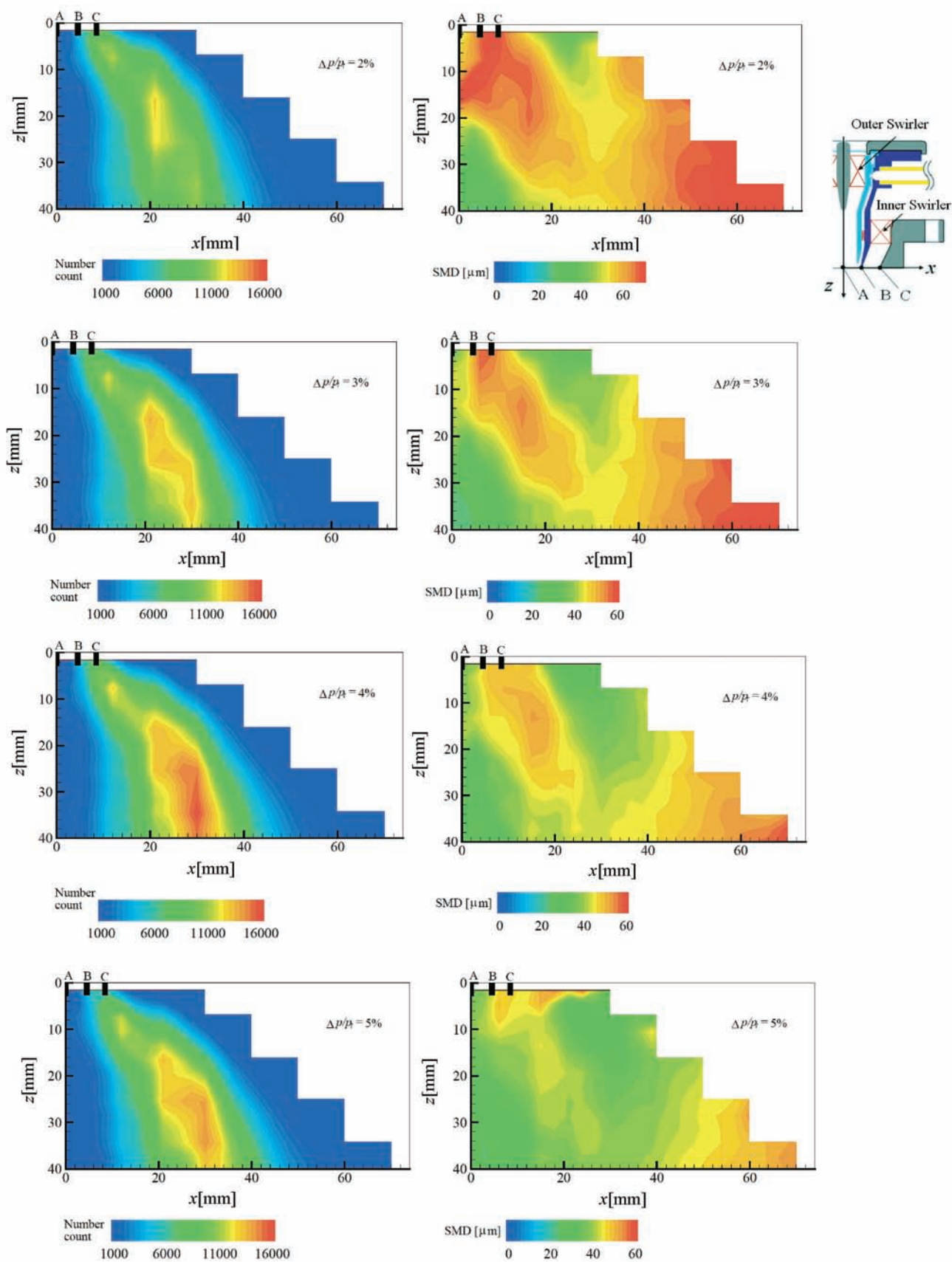


図22 霧化空気差圧が液滴数空間分布及びザウタ平均粒径空間分布へ与える影響（噴射弁B2, $ALR = 9.5$ ）

っている。尚、図中 $z=0$ の位置に示されている表記A, B, Cは、図中右上の噴射弁図に示される各位置に対応している。

図より、液滴数分布が下流に向かうに従って噴霧内側に偏向する様子や、上流領域において液滴数の半径方向極大値の若干内側にザウタ平均粒径の極大値が存在する様子等は、霧化空気差圧によらず共通の特性であるといえる。また、ザウタ平均粒径の半径方向極大値の存在については、3.1.1節で述べた外側2流路の旋回組み合わせが逆方向旋回の場合（PPM）の場合と同様の傾向であり、逆方向旋回の場合に特有な平均粒径分布の特徴と考えられる。

また、霧化空気差圧の増大に伴う気流速度的増加によって、微粒化が促進され、平均粒径が小さくなっていることがわかる。図23にノズル出口からの距離 $z=13.5\text{mm}$ の位置におけるザウタ平均粒径及びその霧化空気差圧への依存性を示す。気流速度的増加による微粒化促進の効果は、特に2%から3%にかけて顕著である。本結果ではザウタ平均粒径は霧化空気差圧の -0.45 乗にほぼ比例しており、Lefebvre⁽⁴⁾、Aigner and Witting⁽⁵⁾等の文献に示される液膜式気流噴射弁の一般的な傾向（約 -0.5 乗）とほぼ一致する。尚、本試験で用いた干渉法の光学設定による粒径計測可能限界（下限）は $15\mu\text{m}$ であるので、本結果についてはこれ以下の小径液滴の寄与が考慮されていないことを指摘しておく。但し、ザウタ平均粒径は大液滴の存在に対してより敏感であるため、霧化空気差圧に対する傾向はある程度正確に見積もることができていると考えられる。

噴射弁B2の噴霧特性について、丸永ら^(16,17)は、霧化空気差圧の影響をより詳細に調べるため、噴霧液滴を

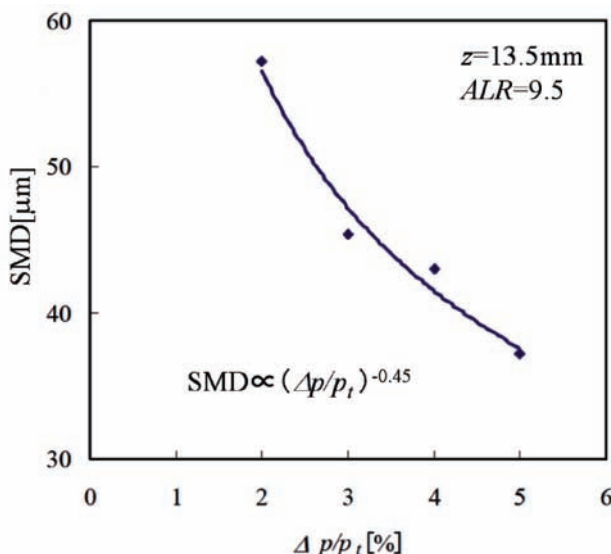


図23 断面ザウタ平均粒径の霧化空気差圧依存性（噴射弁B2, $ALR=9.5$ ）

液滴径別に分類し解析を試みている。図24は各霧化空気差圧における $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ クラスの液滴に関する液滴数空間分布（カラープロット）と zx 面内の平均速度（ベクトル）を示したものである。ここで、各粒径クラスは $\pm 5\mu\text{m}$ の幅を持ち、例えば $20\mu\text{m}$ クラスは $15\sim 25\mu\text{m}$ の液滴から構成される。また、図25には、より定量的な議論のために、 $z=13.5\text{mm}$ 及び 34.5mm の2箇所の位置において、各霧化空気差圧における半径方向の規格化された液滴数分布（半径方向の最大値 n_{max} にて規格化）が示されている。図24、25によれば、まず、霧化空気差圧によらず、全体的な傾向として、 $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ クラスの小液滴の分布は、ノズル出口直下から比較的大きく広がるが、下流では z 軸方向もしくは噴霧内側へと偏向することがわかる。これは旋回気流により生じる出口直後の流れの拡大と、中心が負圧になることで生じる中央の再循環領域の存在を特徴とする、気相の流れ場の影響を反映した空間分布である。一方、気流の影響を受けにくい $50\mu\text{m}$ クラスの大きな液滴は、上流では噴霧内側に位置するが、下流では逆に外側に位置している。これらの分布は、各粒径クラスの zx 面内の平均速度ベクトル方向の定性的傾向からも推測することが可能である。

次に霧化空気差圧の粒径別液滴数分布に対する影響についてであるが、図24によれば、図22の液滴数分布の偏向の様子は、主に $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ クラス等、比較的液滴数が多い、粒径の小さな液滴群の分布と類似していることがわかる。図25に示す定量的な半径方向分布により、霧化空気差圧の増大による影響を詳細に調べてみると、まず $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ クラスについては、 $z=13.5\text{mm}$ において、噴霧内側に存在する液滴数の相対的な増加が顕著であることがわかる。一方、 $z=34.5\text{mm}$ においては、逆に外側に存在する液滴が相対的に増加する。これは以下のように説明できる。即ち、霧化空気差圧が増大すると、気流の速度が増すため、気流と相対速度を持つ液滴が空気抵抗により気流に追従するまでの間に、液滴はより下流まで進んでしまうことになる。言い換えれば、霧化空気差圧の増大により、追従のために必要な時間が与えられなくなるので、液滴の運動の気流に対する追従性が悪くなる。結果として、まず上流においては、旋回による拡大気流に追従できず、より内側に存在することになる。一方、下流においては、液滴は旋回速度成分をある程度獲得するが、逆に遠心力の作用により気流の曲率に追従できず外側へ飛ばされることになる。以上の議論は、厳密には液滴レイノルズ数（後述）が十分小さい場合にのみ成立するものであるが、これについては後述のストークス数に関する議論において再度触れる。

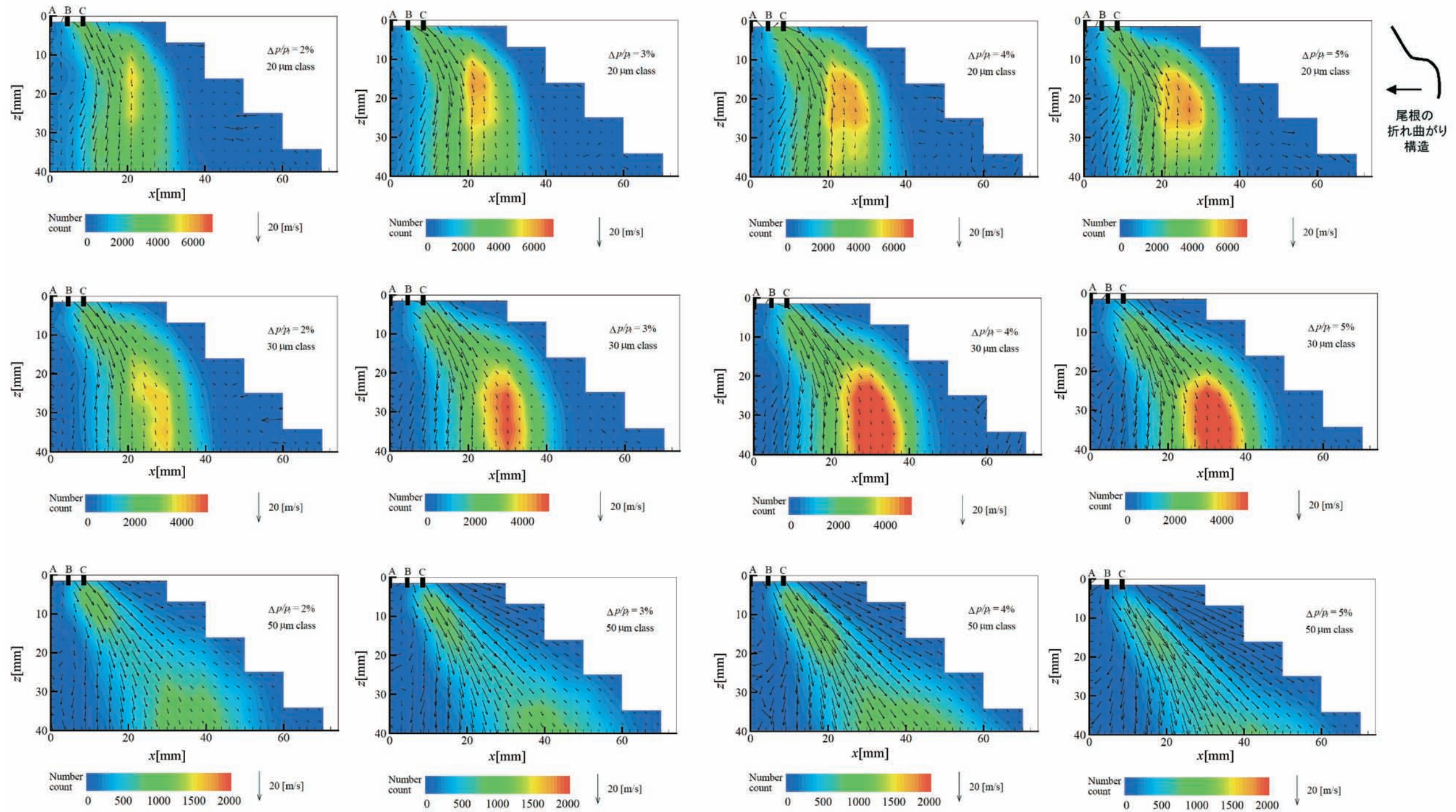


図24 霧化空気差圧の影響：粒径別の液滴数空間分布並びに平均速度ベクトル図（噴射弁B2, $ALR = 9.5$, 図中左より順に $\Delta p/p_0 = 2, 3, 4, 5\%$ ）

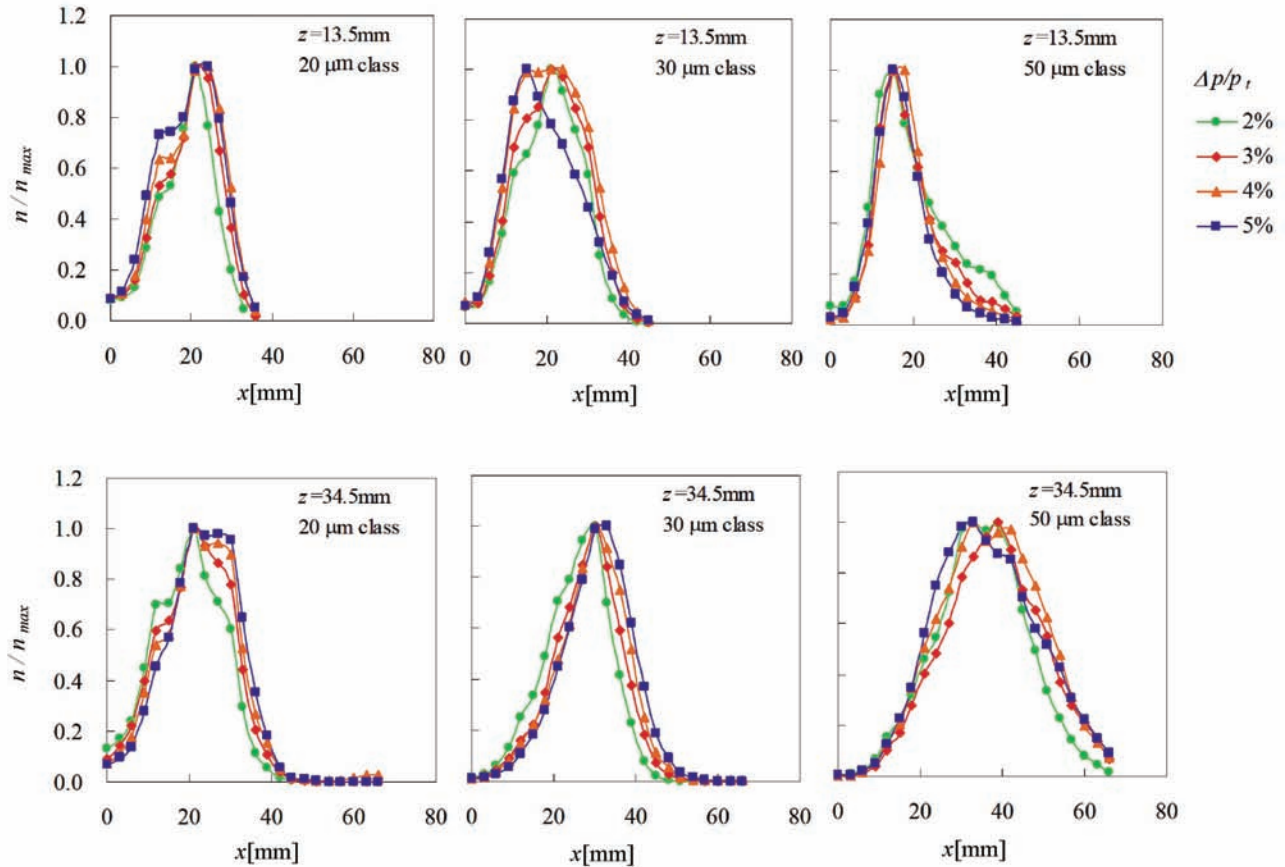


図25 霧化空気差圧の影響：粒径別の液滴数半径方向分布（噴射弁B2, $ALR = 9.5$, 図中左より 20, 30, 50 μm クラス）

尚, $z = 13.5\text{mm}$ における 20 μm , 30 μm クラスの分布には, 液滴数の極大値が2箇所存在するが, これは周方向の液滴速度分布が気流の逆方向旋回剪断層の速度分布を反映した分布を持った場合, 剪断層付近の液滴にかかる遠心力（周方向速度の2乗に比例）の半径方向の変化が単調ではなく, 極小値を持つことに起因するものであると考えられる。図26は, 旋回方向の組み合わせと半径方向の気流周方向速度分布並びに気流遠心力分布の関係を模式的に表わしたものである。逆方向旋回の場合には下流の $z = z_c$ の位置においてもなお, 気流遠心力分布は極小値をもっている。液滴にかかる遠心力は気流にかかる遠心力と完全に相似ではないが, ここで問題としている比較的小粒径液滴に関しては, 気流の傾向をある程度反映した分布を示すものと予測される。

また, 同様の理由により, 特に気流の影響を受けやすい小液滴の場合, 噴霧外側へ向かう液滴運動の傾向が急激に変化する部分が存在し, この周辺で液滴分布の尾根線に折れ曲がりを生じる（例えば図24の霧化空気差圧 5%, 20 μm クラスの図, さらに図13の PPM-I の結果も合わせて参照）。これも逆方向旋回流れ中の液滴運動の特徴的な傾向である。

一方, 50 μm クラスについては, 上流の $z = 13.5\text{mm}$ においては霧化空気差圧の分布への影響は比較的小さ

い。よって, この領域においては気流に比較的影響されず, 相対的に慣性力に支配された運動を行っていると考えられる。一方, 下流の $z = 34.5\text{mm}$ の位置では霧化空気差圧条件による差異が見られるが, その傾向は複雑である。このような複雑な依存性を示す理由としては, 下流では気流の減速により上流と比べて大きな液滴も相対的に気流の影響を受けやすくなり, 気相と液滴の干渉状態がより複雑となることが理由として考えられる。

以上のように, 噴霧分散パターンの霧化空気差圧依存性については, 液滴を粒径クラス別に分類し気流への追随性を評価することで理解できる。ここでは, 液滴の流れへの追随性の指標としてストークス数⁽²⁸⁾ St を用いた簡単なモデルを利用してさらに検討を試みる。ストークス数は気流と相対速度を持つ液滴が気流に追随するのにかかる特性時間（緩和時間） τ_d と流れの特性時間 τ_f の比であり, 仮に液滴周りの気流がストークス流れの条件を満たすとして液滴レイノルズ数（液滴径と気流液滴相対速度を用いて定義されるレイノルズ数）の効果を無視すると,

$$St = \frac{\tau_d}{\tau_f} = \left(\frac{\rho_d d^2}{18\mu} \right) \frac{V}{L} \propto d^2 \left(\frac{\Delta p}{p_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

となる。ここで, ρ_d, d, V, μ, L はそれぞれ液滴の真密

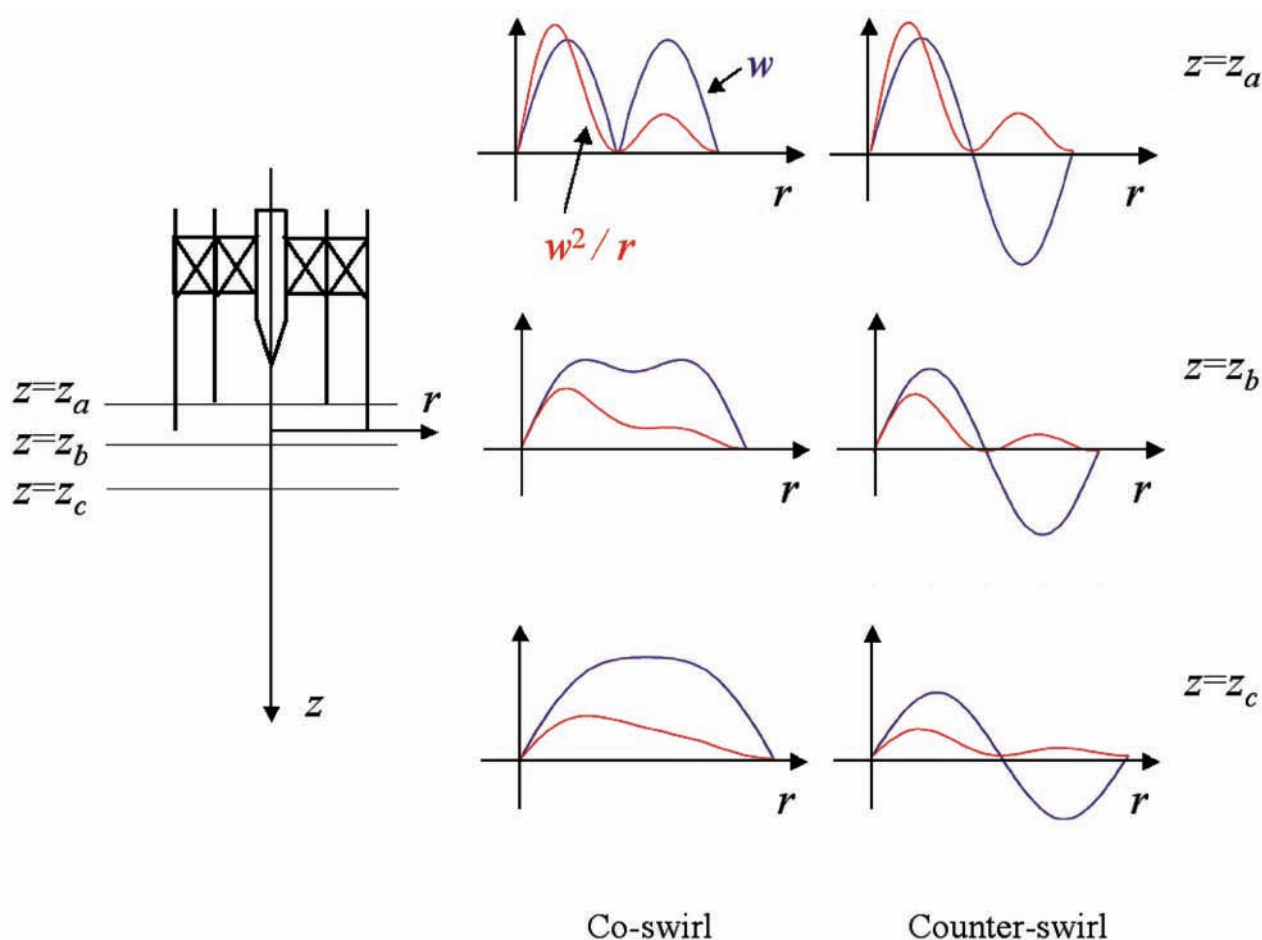


図26 旋回方向の組み合わせと半径方向の気流周方向速度分布並びに気流遠心力分布の関係の概念図

度、液滴径、気流代表速度、空気粘性、流れの代表長である。尚、本ケースでは実際には液滴レイノルズ数の効果は無視できない領域にあり、厳密には補正⁽²⁸⁾を加えるべきであるが、後述するように本簡易モデルによっても、ここで問題としている噴霧現象の多くを説明できることが確認されているので、ここではモデルの複雑化を防ぎ、理解を容易にする目的で、上記の補正は行っていない。ストークス数については、これが大きな値となる程液滴が気流に追随しにくくなることになり、本稿では定量的な議論は行わないが、例えば旋回流に関する Dring and Suo⁽³³⁾の研究によれば、 $St < 0.1$ では粒子は気流にほぼ完全に追随する一方、 $St > 10$ では粒子の慣性が卓越して気流の影響はほとんど無視できる。

式(1)によれば、気流の追随性に関する限り、霧化空気差圧の増大は粒径の増大と同じ効果があり、液滴の運動は同粒径について比較する限り、より気流の影響を受けにくいことになる。しかし、式(1)に示されるように、ストークス数の霧化空気差圧依存性は粒径依存性に比べて顕著に弱く、このため図24、25に示される霧化空気差圧の影響は、同図における粒径の影響と比較すると小さくなっている。

もしストークス数により噴霧分散パターンが整理できるとすると、霧化空気差圧を変化させても、それぞれの条件で同じストークス数となる粒径クラスの液滴は、同様の分散パターンを示すはずである。そこで、霧化空気差圧5%における $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ クラスの液滴と同じストークス数となる各霧化空気差圧における粒径クラスをそれぞれA, B, Cクラスと呼ぶことにし、各クラスに属する粒径範囲を霧化空気差圧ごとにまとめたものを表4に、それらの半径方向の規格化された液滴数分布を描いたものを図27に示す(表4において、例えばAクラスの下限粒径は、5%において $15\mu\text{m}$ であるから、2%については、式(1)より $19\mu\text{m}$ となる)。これによれば、上流側 $z = 13.5\text{mm}$ におけるA, Bクラスの霧化空気差圧5%のデータと下流側 $z = 34.5\text{mm}$ のCクラスのデータのような例外はあるものの、概して同じストークス数の液滴は同様の液滴数分布を示す傾向にある。

以上の議論では、液滴径別に分類して気流への追随性のみを議論する比較的単純なモデルによる考察を行った。噴霧の非定常性・気流の乱れ等を考慮していないこと、あるいは気液干渉モデルを非常に単純化して議論を行っているため、噴霧が複雑な振る舞いを示す領域に

表4 ストークス数別の粒径クラス分け

A class

$\Delta p/p_t$	Lower droplet size [μm]	Upper droplet size [μm]
2%	19	31
3%	17	28
4%	16	26
5%	15	25

B class

$\Delta p/p_t$	Lower droplet size [μm]	Upper droplet size [μm]
2%	31	44
3%	28	40
4%	27	37
5%	25	35

C class

$\Delta p/p_t$	Lower droplet size [μm]	Upper droplet size [μm]
2%	57	70
3%	51	62
4%	48	58
5%	45	55

については、その現象を十分説明できない部分もあるが、液滴径別の噴霧分散パターンに対する霧化空気差圧の影響に関して、その多くの部分を説明できることがわかる。

最後に、霧化空気差圧の変化による全液滴数分布の変化について簡単に考察する。各霧化空気差圧において、粒度分布を特徴づける代表粒径を d_0 とし、 d_0 の霧化空気差圧依存性が

$$d_0 \propto \left(\frac{\Delta p}{p_t} \right)^n \quad (2)$$

と表されるとすると、代表粒径に対するストークス数は、

$$St \propto d_0^2 \left(\frac{\Delta p}{p_t} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\Delta p}{p_t} \right)^{(2n + \frac{1}{2})} \quad (3)$$

となる。仮に粒度分布の形状自体は霧化空気差圧により変化しないとすると、あらゆる代表粒径はザウタ平均粒径と同じ霧化空気差圧依存性（同じ n の値）を示すことになる。Lefebvre⁽⁴⁾、Aigner and Witting⁽⁵⁾及び本試験結果によれば、ザウタ平均粒径に対して $n = -0.5$ 程度であるので、

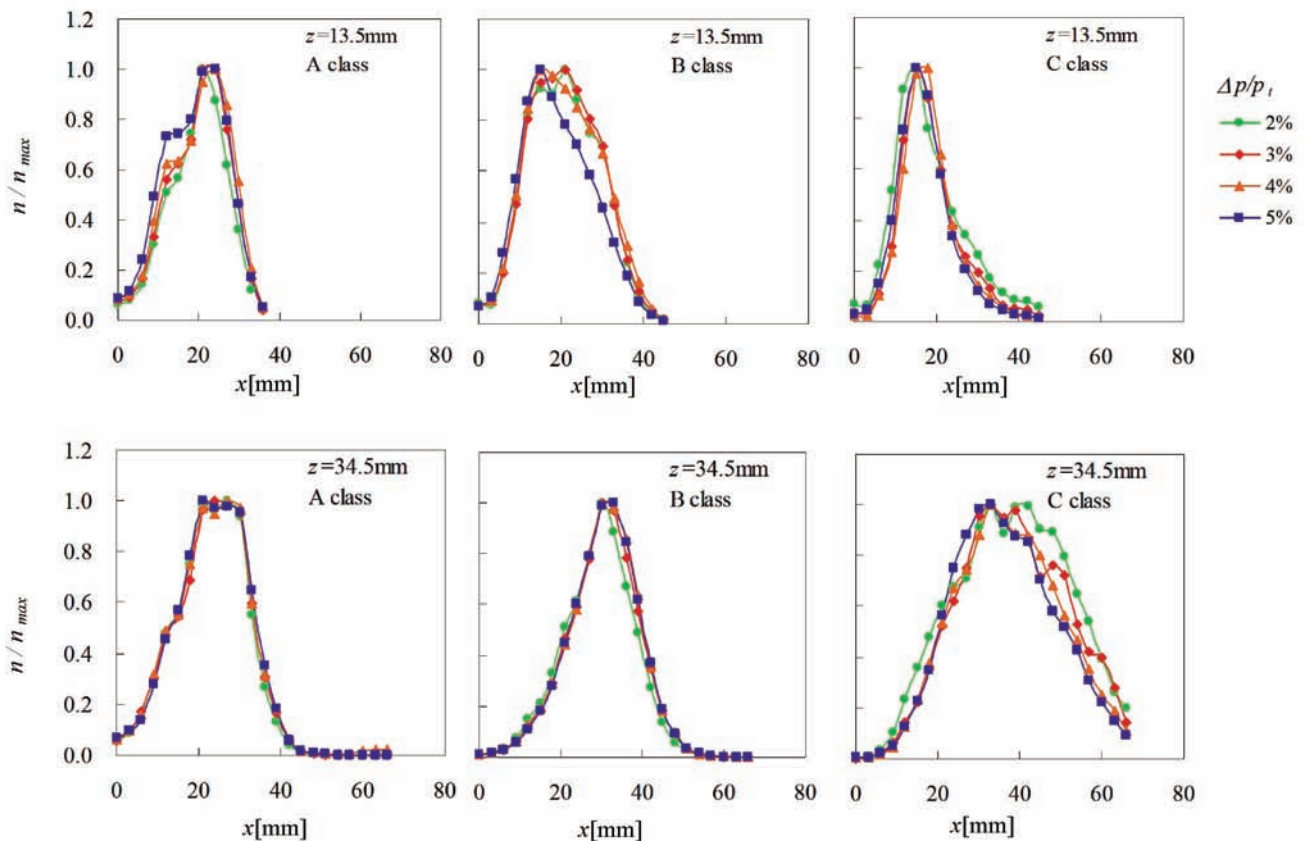


図27 霧化空気差圧の影響：ストークス数別の液滴数半径方向分布（噴射弁B2, $ALR = 9.5$, 図中左よりA, B, Cクラス）

$$St \propto \left(\frac{\Delta p}{\rho_i} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

となり、霧化空気差圧の増大に伴い代表粒径のストークス数は減少する、即ちその運動はより気流の流れ模様と類似したパターンを示すようになることが予想される。この理由は、上式から明らかなように、霧化空気差圧増大による微粒化改善効果が流れの特性時間を短縮する効果を上回るからである。結果として、噴霧内の全液滴数空間分布は、より気相の流れ場を反映したものになると予想される。但し、その影響は、後述するように、雰囲気圧力の影響等と比較すると小さいと予測される。実際、図22の液滴数空間分布において、霧化空気差圧の影響が顕著に見られないのは、この理由によるものと考えられる。これについては、霧化空気差圧の試験範囲を広げるなどして、今後さらに検討する予定である。

以上では干渉画像法による計測結果に基づき霧化空気差圧の影響を議論した。一方、噴射弁B2については、レーザ回折法による粒径測定も合わせて行ったので、以下ではその結果についても簡単に議論する。レーザ回折法により計測した $z=10\text{mm}$ における断面ザウタ平均粒径の霧化空気差圧依存性を図28に示す。ここでは噴射弁B2の基本形状に加えて、フレアを装着したタイプについての結果が示されている。図によれば、3.2節の結果と同様に、同じ液体流量に対しても、ザウタ平均粒径は霧化空気差圧の増加により減少する傾向を示すことがわかる。尚、フレア無しの霧化空気差圧4%、燃料流

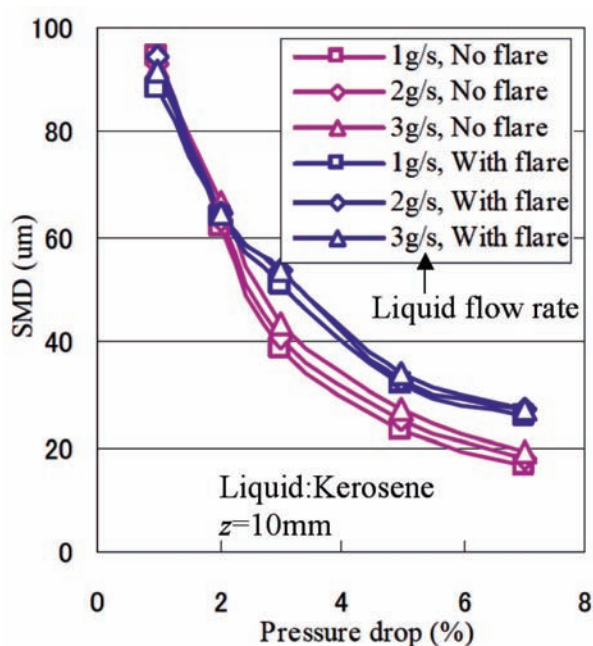


図28 霧化空気差圧・流路形状・液体流量の断面ザウタ平均粒径への影響（噴射弁B2）

量1cc/sのケースは、図23の $ALR=9.5$ とほぼ同じ条件であるが、本結果の方が粒径が小さくなっている理由としては、先述の通り粒径計測可能下限が干渉法の方が大きいためであると考えられる。

3.3.2 流路形状が噴霧特性に与える影響

図28によれば、フレアを装着したタイプの方が装着しないタイプと比べて、霧化空気差圧が高いケースにおいてザウタ平均粒径が大きくなっている。これについては、3.2節の場合と同様に、特に霧化空気差圧が3%以上の高いケースの場合、フレアへの噴霧液滴の付着が多く見られ、一方フレア壁から二次的に放出される液滴粒径は比較的大きいことから、フレア壁への噴霧液滴への付着が主要な理由として考えられる。また、3.2節で見られたようなフレアによる粒径改善効果は、本結果には見られなかった。

3.3.3 液体流量が噴霧特性に与える影響

図28によれば、霧化空気差圧1%の場合を除いて、液体流量の増加に伴ってザウタ平均粒径が大きくなっている。これは同じ液量に対して、利用可能な空気（微粒化の原動力）が少なくなることから容易に予測される結果である。また、液体流量の増加は液体噴出速度あるいは液膜厚の増加をもたらすが、前者の場合気液の相対速度が減少するので微粒化特性が悪化し、また後者の場合、分裂時の液膜厚が増えれば粒径が増大するので、このような考え方からも上記の傾向は理解できる。霧化空気差圧1%の場合において例外的な結果が得られている理由としては、空気の流速が低いいため空気力の効果が十分でなく、気流微粒化噴射弁として十分機能しない領域であったからであると考えられる。

ここで特筆すべき点は、液体流量の影響は噴射弁A, Bの場合ははっきりしなかったのに対し、試験を行った ALR 範囲自体は噴射弁Bのケースとそれほど変わらないにもかかわらず、本試験結果においてはその傾向がはっきりと現れていることである。本試験では噴射弁A, Bの試験と異なり、灯油燃料を利用しているので、理由は定かではないが、これがひとつの要因として考えられる。但し、いずれにしても、上述の霧化空気差圧1%の場合を除いては、液体流量の影響は粒径について最大15%であり、液体流量が3倍程度変わっていることを考えれば、少なくとも今回の試験範囲において液体流量の影響は小さいと結論できる。

3.3.4 雰囲気圧力が噴霧特性に与える影響

図29に雰囲気圧力が噴霧空間分布に与える影響を示す。図中雰囲気圧力の増加に伴い噴霧画像の対称性が著

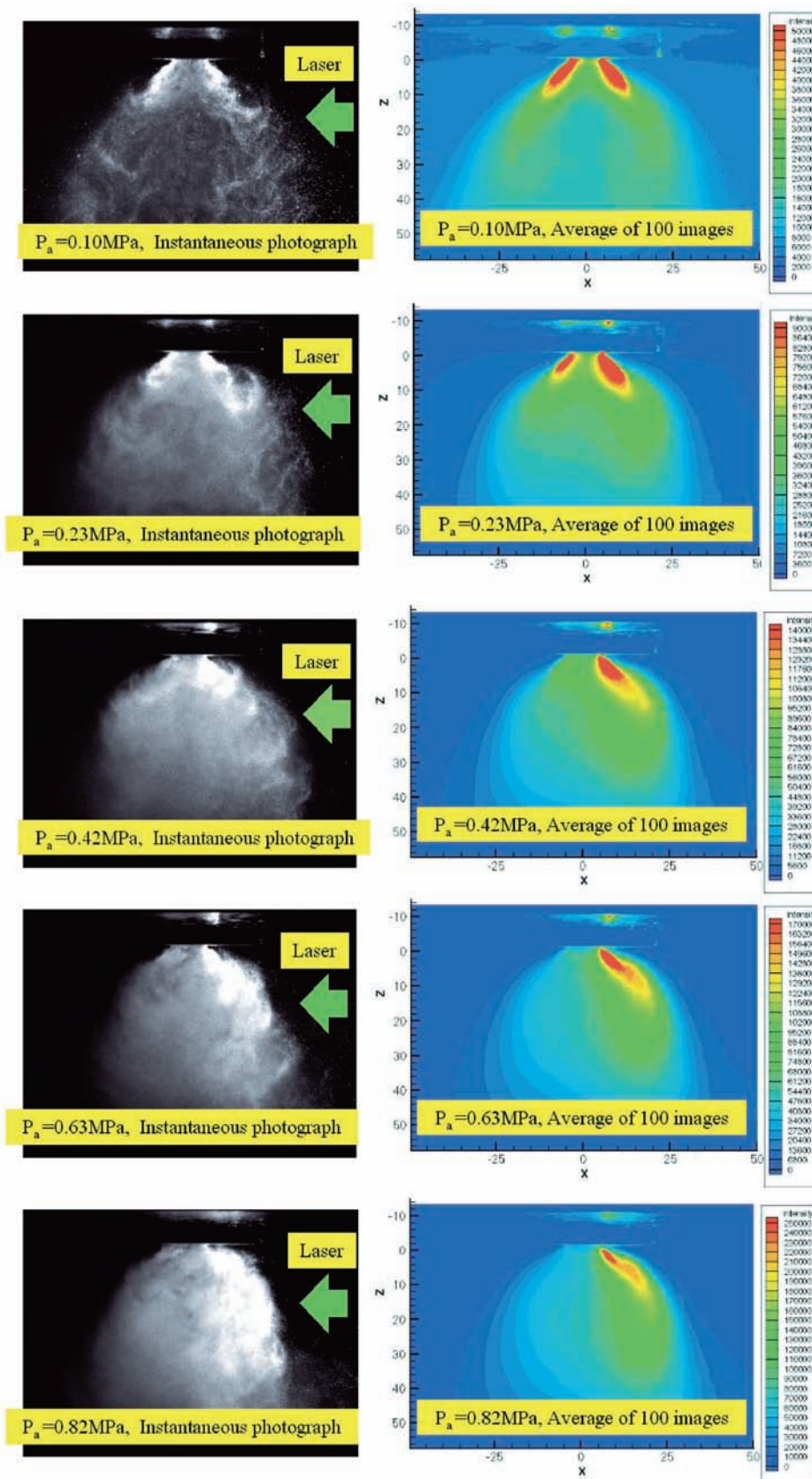


図29 雰囲気圧力の噴霧空間分布への影響 (噴射弁B2, $\Delta p/p_t = 12.4\%$, $ALR = 4.1$)

しく崩れているが、これは図中右側から入射したレーザー光が噴霧の高濃度化により激しく減衰するためである。雰囲気圧力の増加に伴い噴霧が高濃度化する理由は、空気密度・更には空気力の増大による微粒化促進により液滴数が増加し、更に気液質量流量比を保ちながら気流圧力を増加させることに伴って液体体積流量もあわせて増加するためである。この雰囲気圧力増加による高濃度化に伴う光の減衰、あるいは多重散乱のために、昇圧雰囲気下での噴霧光学計測は定量的な計測が困難となる（これについては更に後述する）。しかし、図29の右側半分の部分に着目すれば、定性的ではあるが噴霧構造を把握できる。これによれば、雰囲気圧力の増加に伴い、噴霧構造は上流側では広がりが大きくなるが、外側境界はすぐに z 軸に平行な方向へと偏向し、噴霧の広がりが抑えられるような分布となっている。また、特に図中の赤もしくは黄色で表される上流の高濃度領域も、雰囲気圧力の増加に伴い徐々に広がり、0.63MPa及び0.82MPaのケースでは、図24の小粒径クラスの折れ曲がり構造に類似した構造が現れている。

以上の傾向は、3.3.1節の議論におけるストークス数の効果により説明できる。即ち、雰囲気圧力の上昇により微粒化が促進されるため、ストークス数が減少して液滴の気流への追随性が増し、上流では旋回気流に追随して噴霧は広がるが、下流では再循環領域周辺の流れ模様に従い、上流と比較して相対的に内側へと偏向するような分布を示す。3.3.1節と同様にして、雰囲気圧力のストークス数への影響を見積もると、まず粒度分布を特徴づける代表粒径 d_0 の雰囲気圧力 p_a に対する依存性が、

$$d_0 \propto p_a^n \quad (5)$$

と表されるとすると、代表粒径に対するストークス数は、

$$St \propto d_0^2 = p_a^{2n} \quad (6)$$

となる。仮に粒度分布の形状自体は霧化空気差圧により変化しないとすると、あらゆる代表粒径はザウタ平均粒径と同じ霧化空気差圧依存性（同じ n の値）を示すことになる。液膜式気流噴射弁に対する n の値については、Lefebvre⁽⁴⁾によれば噴射弁により $-0.3 \sim -1$ と大きくばらつきがあり、Zhengら⁽⁸⁾は噴射弁B2のような“High Shear Design”と呼ばれるタイプの噴射弁では n は非常に小さい値を示す（彼らの試験結果によれば -0.05 ）としている。但し、ここでは後述する試験結果とLefebvre⁽⁴⁾の論文を根拠に、 $n = -0.5$ と見積もることになると、結局式（6）は

$$St \propto p_a^{-1} \quad (7)$$

となる。これにより、ストークス数が液滴数空間分布を支配する主要パラメータであると考えれば、雰囲気圧力の増加に伴い噴霧分布がより気流運動を反映したものになることが説明できる。また、式（4）と（7）を比較すると、噴霧分布の雰囲気圧力依存性は霧化空気差圧依存性よりも大きいことになるが、3.3.1節と本節の噴霧分散パターンに関する結果を比較すると、予測通りになっていることがわかる。尚、実際に上記の傾向が明確に現れるのはストークス数が0.1～10程度の気流と液滴の運動の干渉が複雑となる条件（3.3.1節参照）の場合であるが、本稿で扱っている噴霧の場合には多くの場合この条件を満たしていることを言及しておく。また、雰囲気圧力の増加は液滴レイノルズ数を増大させるため、実際には液滴レイノルズ数の影響の補正が問題になるが、この補正により液滴の空気抵抗係数は大きくなるため、より液滴が気流に追随しやすい方向となるので、上記の傾向に変わりはない。

尚、特に上流側の噴霧の広がりが雰囲気圧力の増加に伴い増大する理由として、Zhengら⁽⁸⁾は、気液質量流量比を保ったまま雰囲気圧力を増加した場合、気液運動量比が小さくなり（液相の運動量が相対的に大きくなる）、旋回液膜の気流に対する貫通力が増すためとしているが、ストークス数の効果と運動量比の効果のどちらが支配的かについては検討を要する。

次に、図30にレーザー回折法により計測した断面ザウタ平均粒径の雰囲気圧力依存性を示す。霧化空気差圧が大きいので、既に大気圧においても高い微粒化性能を示しているが、すでに議論した通り、雰囲気圧力の増加に伴いさらに粒径は減少することがわかり、その減少の度合いが式（5）に従うとして指数 n を求めると、 $z = 15, 30\text{mm}$ の位置についてそれぞれ $-0.55, -0.44$ となり、 n は -0.5 に近い値を示す。

但し、ここで言及しておかなければならないことは、本試験の気液質量流量比は $ALR = 24.6$ であり、大気圧においては低濃度の噴霧であるにもかかわらず、雰囲気圧力の上昇により濃度が飛躍的に上昇し、レーザーの透過率が激減していることである。レーザー回折法の場合、透過率が50%未満となる場合には、粒径を小さく見積もる傾向があるので、粒径計測誤差を慎重に吟味しなければならない⁽²⁵⁾。図30右は、レーザー回折法によるトラバース時に最もレーザー光の減衰が強い位置における透過率を TRM_{\min} としてプロットしたものである。これによれば、本噴霧の場合、既に0.2MPaにおいて透過率0.3以下、0.4MPaでは0.1以下となっている。よって、本結

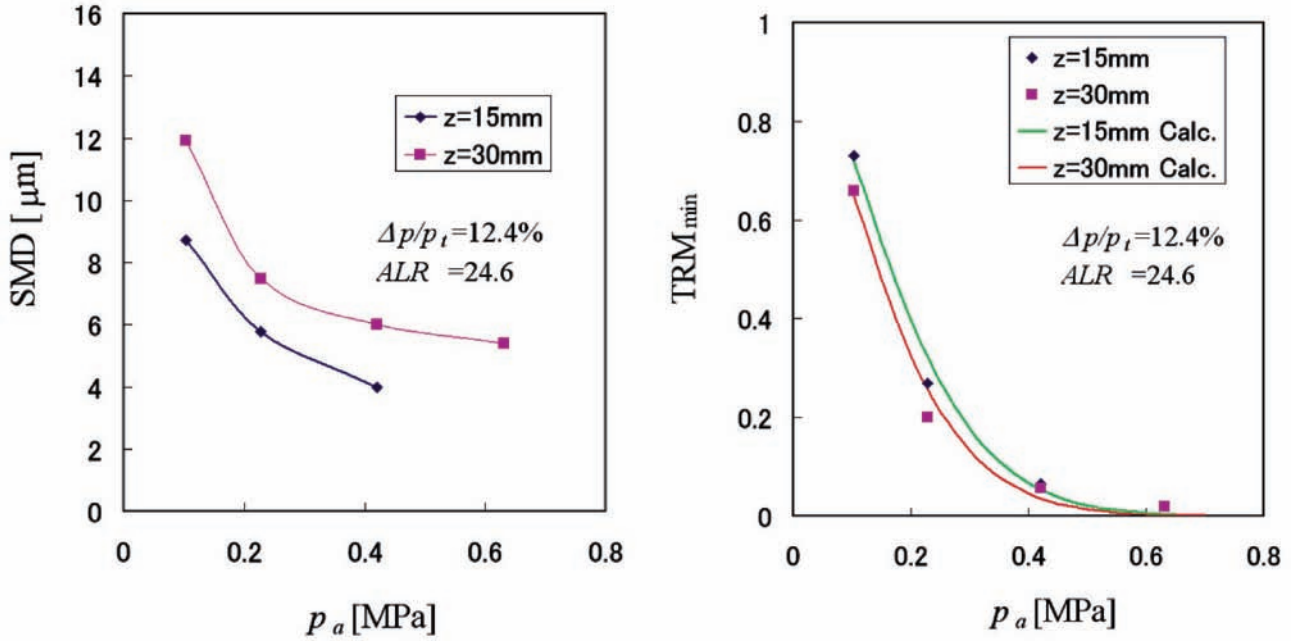


図30 雰囲気圧力の断面ザウタ平均粒径及び最小レーザ透過率への影響（噴射弁B2, $\Delta p/p_t = 12.4\%$, $ALR = 24.6$ ）

果により計測された指数よりも雰囲気圧力依存性は小さい可能性がある。今後は位相ドップラ法による計測などを併せて行い、クロスチェックにより計測誤算の程度を把握する必要がある。

最後に、光学計測による粒径評価に重大な影響を及ぼす噴霧の光減衰効果が雰囲気圧力に対して強い依存性を示す理由を定量的に説明しておく。今、簡単のために噴霧内の液滴径は全て d_0 で同一とし、噴霧内において液滴数密度 n_d は空間位置によらず一定とする。また、液滴の散乱係数 Q_{ext} を一定と仮定し、噴霧のレーザ方向の厚みを L_s とすると、Bouguer-Lambert-Beerの法則により透過率 α は以下を満たす⁽³⁴⁾。

$$\log \alpha = -Q_{ext} n_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) L_s \propto -n_d d_0^2 \quad (8)$$

今、気液質量流量比と気流速度（あるいは無次元化された霧化空気差圧）は固定しているので、雰囲気圧力 p_a と液体流量は比例し、さらに液体流量と噴霧内の液滴全体積 V は比例するので、結果として p_a と V は比例関係にある。これと体積の定義により、

$$V = \frac{n_d \pi d_0^3}{6} \propto p_a \quad (9)$$

更に、式 (5) が成り立つとすると、式 (8), (9) により、結局

$$\log \alpha \propto -n_d d_0^2 \propto -\frac{V}{d_0} \propto -\frac{p_a}{p_a^{1/n}} = -p_a^{1-n} \quad (10)$$

または

$$\alpha \propto \exp(-p_a^{1-n}) \quad (11)$$

となり、先の議論より $n = -0.5$ 程度であるから、透過率が強い雰囲気圧力依存性を示すことがわかる。図30右には、各軸方向位置における雰囲気圧0.1MPaでの最小透過率 TRM_{min} 及び図30左から求めた先述の指数 n を用いて、式 (11) の比例定数を求めた上で、これを曲線として描いたものが合わせて示されているが、これにより上記の簡易モデルによって透過率の雰囲気圧力依存性の傾向を適切に見積もることができていると考えられる。

3.4 噴射弁Cの噴霧特性

3.4.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響⁽¹⁸⁾

はじめに、軸方向位置 $z = 20\text{mm}$ 及び 40mm の断面におけるザウタ平均粒径の旋回方向の組み合わせによる違いを図31に示す。また、粒径測定試験を行った旋回組み合わせの内の一部については、背景光照明による写真撮影を行ったので、以下の議論で参考とするため、図32に霧化空気差圧4%の場合の噴霧写真を示す。図31に見られるように、本試験においては、調査を行った全ての旋回方向の組み合わせの中で、燃料の旋回方向に対してアウトースワラを同方向、インナースワラを逆方向に組み合わせたNPPが最もザウタ平均粒径が小さくなるという結果を得た。但し、図32に見られるように、

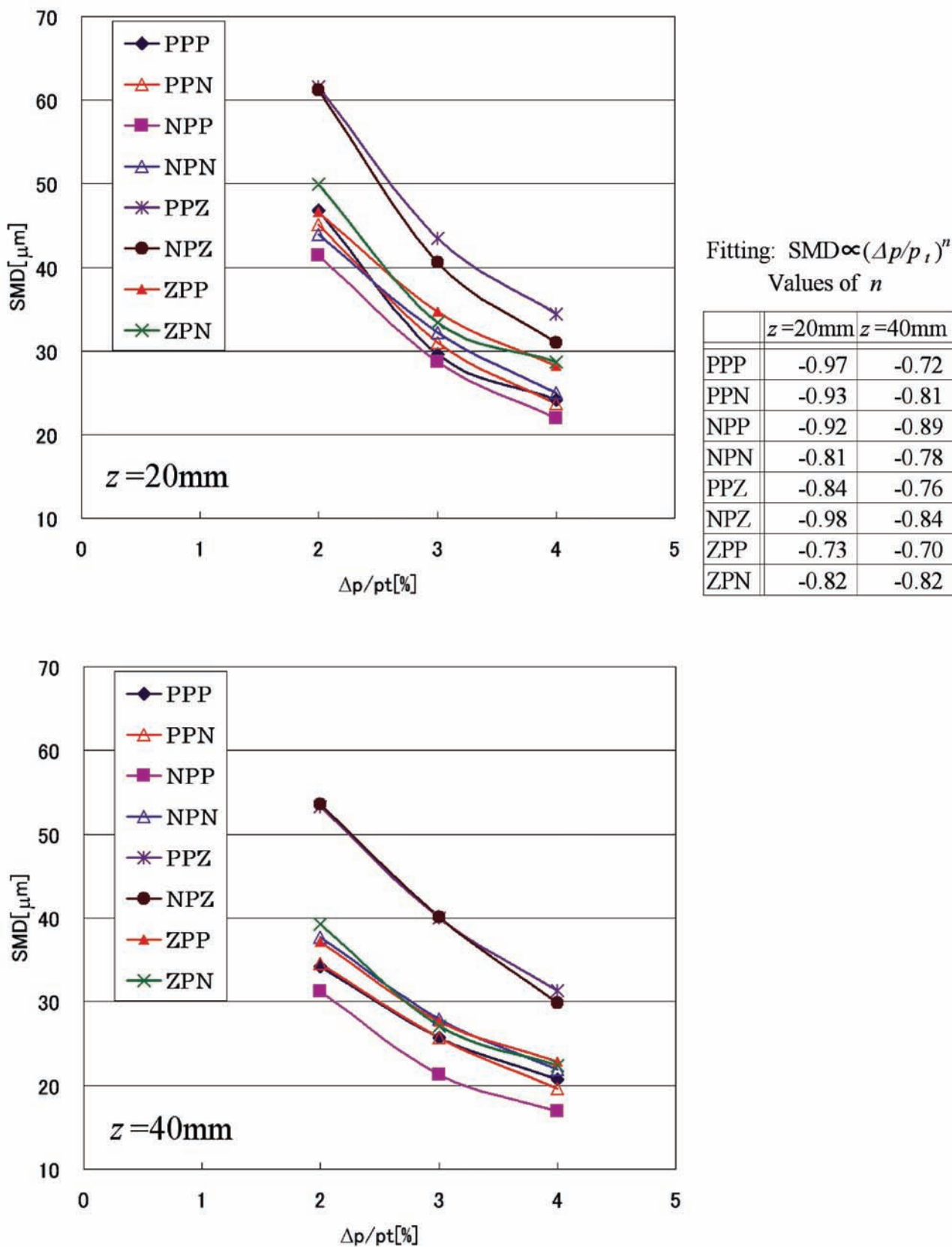


図31 旋回方向の組み合わせによる断面ザウタ平均粒径への影響 (噴射弁C, $ALR = 9.5$, 図中上: $z = 20\text{mm}$, 図中下: $z = 40\text{mm}$)

本噴射弁Cは多くの旋回組み合わせにおいて噴霧が筋状となっており、以下ではこの周方向非一様性の影響も考慮して議論を進める必要がある。尚、噴霧が筋状になる理由としては、液膜室内のスリットから出口までの距離が比較的長く、形状としても絞り込まれているため、液膜の旋回が弱まり、十分な一様性が得られなかったためと考えられる。現在周方向の一様性を確保するためにスリットの位置、本数、断面積、旋回角などを調整して改良を進めており、今後一様性が確保されている条件でも図31と同様の傾向が見られるか調査する予定である。

以下、図31について粒径が大きい側から見ていくと、まず外側気流に旋回をかけない2ケースにおいて、ザウタ平均粒径が他のケースと比較して顕著に大きい結果を示していることがわかる。また、上記のケースほど顕著ではないものの、これに次いで、内側旋回をかけない2ケースのザウタ平均粒径が比較的大きな値を示す傾向にある。このことから、気流の旋回が微粒化に大きく寄与していることがわかり、旋回により液膜に作用する剪断力や乱れ強度が強くなっていることがその理由として推測される。

次に、内外両側の気流に旋回がかかっている場合（旋回翼の角度はいずれも $+45\text{deg.}$ もしくは -45deg. ）には、燃料の旋回方向に対してアウトースワラを同方向、インナースワラを逆方向に組み合わせたNPPが最もザウタ平均粒径が小さくなり、一方例外はあるものの、燃料の旋回方向に対してアウトースワラとインナースワラを共に逆方向に組み合わせたNPN（気流同士は同方向旋回）は概して粒径が大きくなる傾向を示した。また、PPPとPPN、即ち燃料の旋回方向を内側と合わせた場

合の、同方向旋回気流と逆方向旋回気流の組み合わせについては、これらは概してNPPとNPNの間に位置するが、両者の粒径の違いに関する傾向は顕著でなく、その差も小さい。

NPPのザウタ平均粒径が小さくなる理由としては、図32に見られるように、他の組み合わせと比較して筋状の部分が比較的是っきりしないことから、局所的に液膜の厚い部分、あるいは粗大液滴の多い部分ができにくいためであると考えられる。即ち、このNPPの組み合わせが、本噴射弁においては最も筋状の部分を周方向に広げるのに効果的であったものと推測される。逆方向旋回気流による強い剪断場、乱れ強度も同じく粒径が小さくなる要因として考えられるが、PPPとPPNの比較結果の差が顕著でないことから、これは主要因としては考えにくい。いずれにしても、今後この要因を解明するため、周方向一様性が保証された噴射弁を用いて同様の試験を行うと同時に、旋回角を変えるなどして、液膜と気流速度の初期相対速度の影響を吟味する必要があると考えられる。尚、3.2節で述べた通り、このNPPに相当する組み合わせは、噴射弁Bに関するMakidaら⁽²²⁾の着火特性試験でPPNに相当する組み合わせのものと比較して着火特性が優れており、噴霧粒径に関する本試験の傾向からの推測とも傾向が一致する。よって、「気流旋回組み合わせが逆方向旋回であるnon-prefilmingタイプの噴射弁について、燃料の旋回を外側に合わせた方が噴霧粒径が小さくなる」という傾向は、多くの噴射弁に共通の傾向である可能性があり、噴射弁設計ノウハウとして留意しておきたい点である。

尚、上の議論では、3.1節、3.2節で度々指摘してきた、

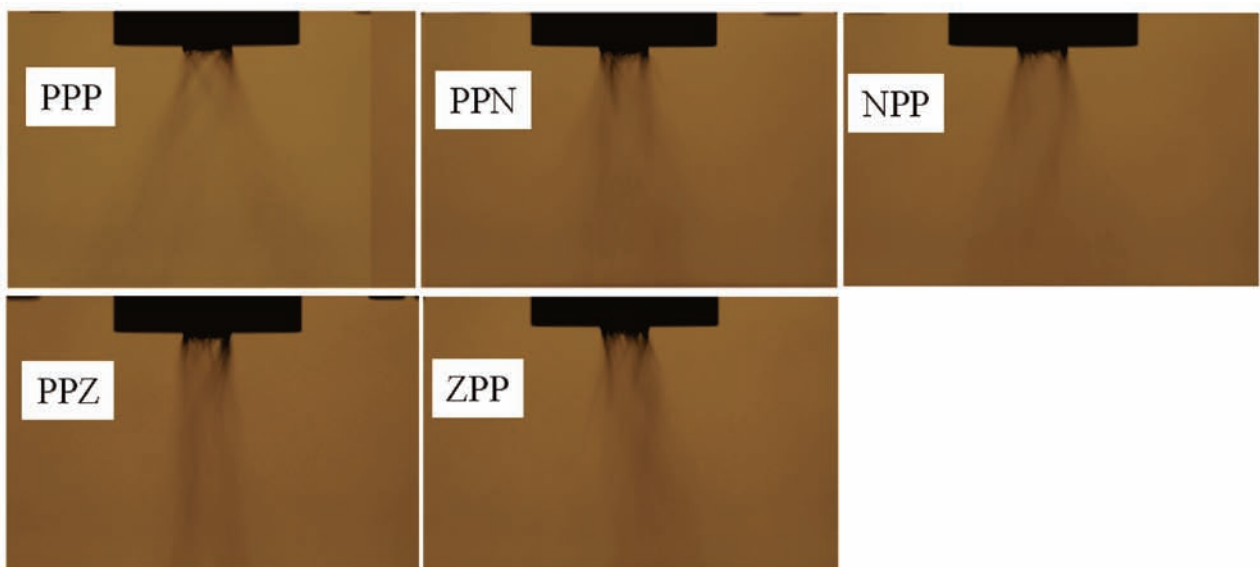


図32 噴霧の背景光照明撮影写真（噴射弁C, $\Delta p/p_i = 4\%$, $ALR = 9.5$, シャッタースピード 1/8000, 絞り # 4）

「液滴と気相の干渉状態の変化」によるザウタ平均粒径への影響について特に議論を行っていない。この理由は、 $z=20\text{mm}$ と $z=40\text{mm}$ の各霧化空気差圧条件において、上で議論された傾向が共通であったことから、図31の結果から各旋回組み合わせにおける微粒化特性の優劣を決めても判断を誤る可能性は小さいと考えたからである。但し、実際に軸方向位置で平均粒径は変化しているの、詳細検討を行うことが望ましいことになりはしない。

一方、NPNの組み合わせにおいてザウタ平均粒径が大きくなる理由は、本噴射弁では液膜自身が持つ周方向速度を両気流が逆撫でするような流れとなり、一様な液膜の生成を妨げるためと考えられる。この液膜の非一様性は、後述する図33における噴霧分散パターンにおいても顕著に現れており、下流 $z=40\text{mm}$ の位置においても尚、非対称性が残っていることが確認できる。

尚、図31には、各断面におけるザウタ平均粒径の霧化空気差圧依存性が合わせて示されている。これによれば、ザウタ平均粒径は霧化空気差圧の $-0.7 \sim -1$ 乗に比例しており、Lefebvre⁽⁴⁾、Aigner and Witting⁽⁵⁾等らの報告や3.3節の噴射弁B2に関する結果と比較して大きな値となっている。一部の旋回組み合わせについては本データには示されない霧化空気差圧条件5%の条件についても追加してデータ点数を増やして再評価したが、これによっても指数は0.03程度しか変化しなかったため、上記の値の信頼性は高いと考えられる。このように本噴射弁について霧化空気差圧依存性が大きい理由は現在のところ明らかになっていない。但し、 $z=20\text{mm}$ と $z=40\text{mm}$ の位置の比較からは、霧化空気差圧依存性は下流に向かうにつれて減少する傾向にあるため、軸方向位置の依存性についても調査してみる必要がある。

次に噴霧計測試験で得られた $x=-40 \sim 40\text{mm}$ での噴霧体積濃度分布(CNC)の比較を図33に示す。尚、これらは3.2節で得られた結果と同様に、レーザ光路上のすべての噴霧液滴の情報を積算した値であり点情報でないことに注意が必要である。また、一部の図中に見られる左右の非対称性は先述の筋状噴霧に起因するものと考えられるが、これにより分布の広がり傾向を誤って判断する可能性は少ないと考えられる。

まず燃料とアウトースワラの旋回角を $+45\text{deg.}$ に固定したNPP、ZPP、PPPの3ケースについて噴霧体積濃度の比較を行うと(図中の上段左)、NPPとZPPの分布は、 $z=20\text{mm}$ では若干ZPPのほうが中心が濃い分布となっているが、下流ではほぼ類似した分布を示していることがわかる。一方で、PPPはNPPとZPPに比べ、特に下流に行くほど分布の広がりが大きくなるがわかる。

一方、燃料とインナースワラの旋回角を $+45\text{deg.}$ に

固定したPPN、PPZ、PPPの3ケースについて、噴霧体積濃度の比較を行うと(図中の上段右)、噴霧の広がりはPPZ、PPN、PPPの順で大きくなるがわかる。これは、アウトースワラの旋回成分がない場合には気流の拡大が抑制され、またこれがインナースワラの旋回成分と逆の場合は、噴射弁出口を過ぎた初期の段階を除いて、内外の旋回成分が打ち消しあうことで流れ場全体としての旋回が減衰し、同方向の場合と比較して気流自体の広がりが小さくなるためと考えられる。

また、図中の中段及び下段に示された各結果より、噴霧分散については気流旋回の組み合わせの効果が支配的であり、液膜の旋回方向による影響はほとんど無視できることがわかる。但し、先述の通り、液膜の旋回方向は微粒化特性には影響を与える場合がある。この理由については、微粒化特性を決める液膜・液糸分裂過程の振る舞いは、液膜出口近傍の局所的な気流と液膜・液糸の干渉の兼ね合いにより決まるのに対し、噴霧の分散過程については、本試験範囲においては液相の初期運動量が空気の全体的な流れや気流との干渉に大きな影響を与えることはないためと考えられる。但し、prefilmingタイプに関する3.2節の結果ではその影響が現れており、噴射弁の設計(prefilming, non-prefilmingの選択)や、液膜旋回の強さの影響についても今後検討する必要がある。

4. 試験結果の総括

本節では、第3節にて議論した各噴射弁に関する結果を総括して示し、また一部の結果については総括的な視野から再度補足を加えながら議論し、今後のより詳細な理解のための研究の方向性についてまとめる。また、最後に、本稿で扱った試験結果を元に得られた、優れた噴射弁を設計するための指針についてもまとめる。尚、本節では主に結果や全体的傾向、例外となるケース等について議論する。個々の結果に対する現象の解釈については、第3節を参照されたい。

4.1 旋回の組み合わせが噴霧特性に与える影響に関するまとめ

本稿では、旋回の組み合わせについて、液膜を挟む気流の旋回が同方向旋回の場合と逆方向旋回の場合の違いを中心に議論を行い、以下のことがわかった。

- (1) 噴霧液滴の空間分布について、逆方向旋回の組み合わせの場合、同方向旋回の場合と比べて、より噴射弁中心軸の側(内側)に噴霧液滴が分布する。
←全噴射弁共通
- (2) 粒径別の噴霧の広がり方(噴霧角)については、同

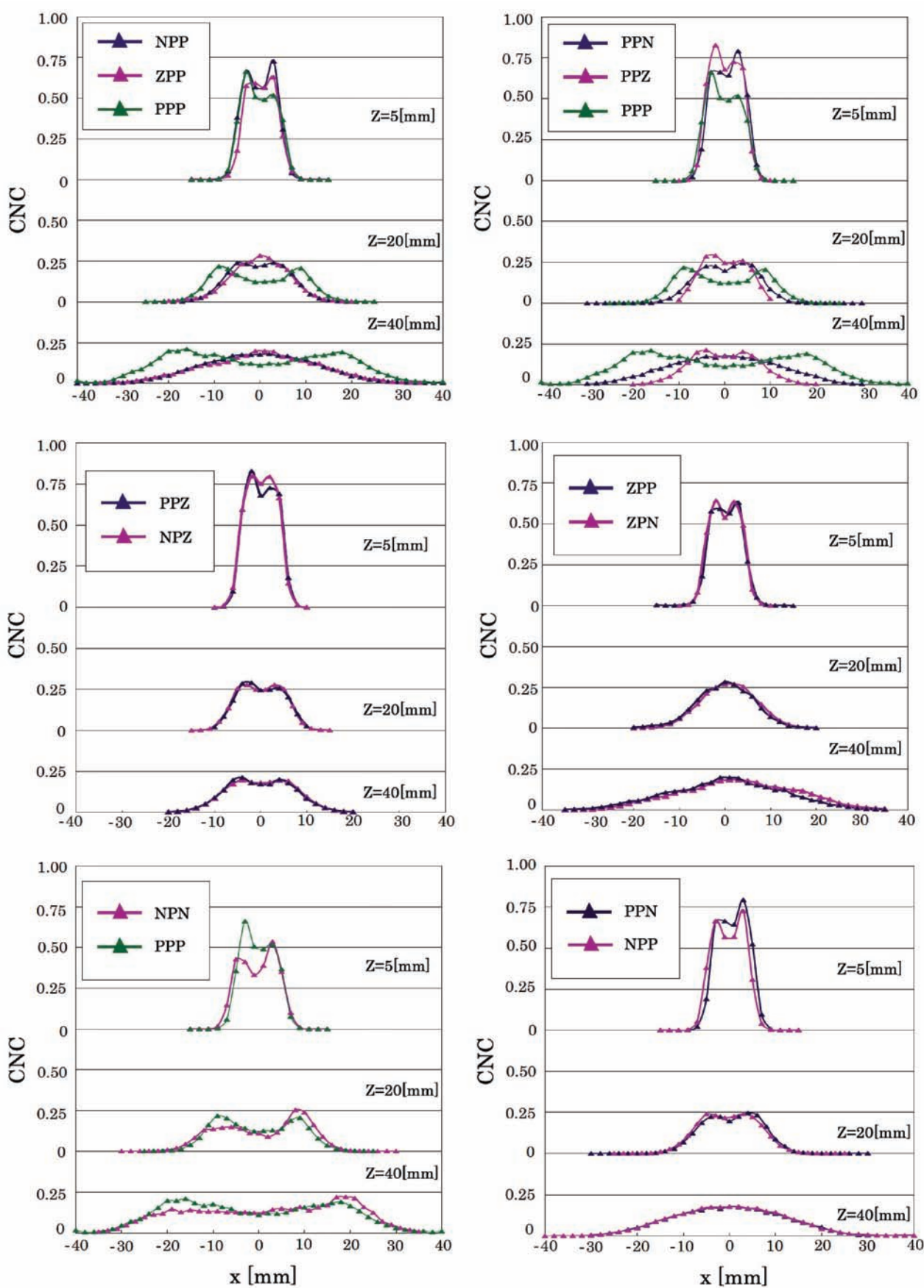


図33 旋回方向の組み合わせによる噴霧分散パターンへの影響 (噴射弁C, $\Delta p/p_t = 4\%$, $ALR = 9.5$)

方向旋回の場合は粒径の増加に伴いより外側に広がるようになるが、逆方向旋回の場合はより噴霧内側に位置するようになる。←噴射弁A, B2の結果より

- (3) ザウタ平均の空間分布は、同方向旋回の場合は比較的噴射弁の近傍から、半径方向に単調増加する傾向にあるが、逆方向旋回の場合は、半径方向分布に極大部が存在する。←噴射弁A, B2の結果より
- (4) non-prefilmingタイプの噴射弁において、気流の旋回方向が逆方向旋回の場合、液膜の旋回は外側と方向を合わせた方が噴霧粒径が小さくなる。特にこの組み合わせは、噴霧液体の筋が見られる噴射弁において、噴霧の周方向一様性を改善する方向に働いているように見える。←噴射弁Cの結果より（この他噴射弁Bに関するMakidaら⁽²²⁾の着火試験結果から類推される傾向にも一致、3.2.2節参照）
- (5) （念のため別の噴射弁での検証が必要であると考えられるが）prefilmingタイプの噴射弁においては、気流の旋回方向が逆方向旋回の場合、液膜の旋回は内側と方向を合わせた方が噴霧粒径が小さくなる傾向にある。また、本タイプの噴射弁は液膜の運動が内側旋回気流に大きく影響を受けるため、内側の気流と液膜の旋回方向が同方向か逆方向かにより噴霧分散パターンに大きく差が現れる。←噴射弁Bの結果より
- (6) 内外双方、特に外側の気流に旋回をかけることで微粒化性能は向上する。但し、外側に強い旋回をかけすぎると、気流が外側流路の外壁側に向かうため、液膜リップ外側の流れが液膜に及ぼす剪断力が弱まり、微粒化は悪化する可能性がある。←噴射弁A, Cの結果より
- (7) 旋回方向の組み合わせが微粒化特性に与える影響は傾向がはっきりしない。水を使用した噴射弁Bの試験においては同方向旋回の方が粒径が小さくなるケースがみられたが、全体的には両者の粒径の違いは小さく、また灯油を利用した噴射弁Cの試験については、液膜の旋回を外側気流に合わせ、気流を逆方向旋回とした場合に、粒径が小さくなった。
←全噴射弁の結果より

4.2 流路形状が噴霧特性に与える影響に関するまとめ

流路形状が噴霧特性に与える影響について、各噴射弁に関する試験結果から、以下のことがわかった。

- (1) 液膜リップ位置において内側流路を外側に向けて絞り込むベンチュリ形状にすると、噴霧角が狭くなる。また、気流が同方向旋回の噴射弁の場合、噴射

弁下流に向かうに従ってザウタ平均粒径が増加する傾向が顕著となる。←噴射弁Aの結果より

- (2) 液膜リップ位置において外側流路を内側にむけて絞り込むベンチュリ形状にすると、噴霧角が若干狭くなるが、その影響は(1)の内側流路を絞り込む形状にした場合と比較して顕著ではない。また、ザウタ平均粒径は主に上流付近で、絞りのない形状と比較して小さくなる。←噴射弁Aの結果より
- (3) 噴射口にフレア状の拡大延長流路を設けた場合、水を使用した噴射弁Bの試験においては、特に霧化空気差圧の小さい条件において、ザウタ平均粒径が小さくなるケースが見られたが、本傾向は灯油を利用した噴射弁B2の試験においては現れなかった。一方、霧化空気差圧の大きい条件においては、フレアに液滴の付着が見られる。この付着液滴は再度フレア壁から離れる際に大液滴として放出され、これがザウタ平均粒径に影響を及ぼす。←噴射弁B, B2の結果より
- (4) 外側流路の外側壁（シュラウド）を延長して液膜リップ付近の下流においても流速の速い領域をつくるようにすると、ザウタ平均粒径が小さくなる。
←噴射弁Bの結果より
- (5) 液膜リップをnon-prefilmingタイプとした方がprefilmingタイプの噴射弁に比べて平均粒径が小さくなった。但し、逆の結果を得ている文献⁽³²⁾もあり、供試噴射弁も1種類であるので、別の噴射弁による検証も含め、更なる検討を要する。←噴射弁Bの結果より

4.3 霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響のまとめ

霧化空気差圧が噴霧特性に与える影響について、各噴射弁に関する試験結果から、以下のことがわかった。

- (1) 霧化空気差圧の増大に伴い微粒化特性は向上する。気液質量流量比を固定した場合、断面ザウタ平均粒径は霧化空気差圧の $-0.5 \sim -1$ 乗に比例して減少する。←噴射弁A, B2, Cの結果より
- (2) 霧化空気差圧の増大に伴う噴霧分散パターンの変化は小さい。気流への追随性を考慮した簡易理論モデルによれば、微粒化促進効果と流れの特性時間の短縮の効果が相殺する結果、噴霧パターンはより気流の流れ場を反映した形状に近づく方向ではあるが、その影響は顕著ではないと予測される。←噴射弁B2の結果より

4.4 液体流量あるいは気液質量流量比が噴霧特性に与える影響のまとめ

液体流量あるいは気液質量流量比（以下誤解の恐れのない場合はまとめて液体流量と称する）が噴霧特性に与える影響について、各噴射弁に関する試験結果から、以下のことがわかった。

- (1) 本試験で行った液体流量の範囲においては、液体流量によるザウタ平均粒径の変化は15%以下であり、液体流量を3倍の範囲にわたって変化させたことを考慮すると、本試験範囲内における液体流量の影響は小さいと結論できる。 ←噴射弁A, B, B2の結果より
- (2) 液体流量による粒径への影響は、水を供試液体として使用した噴射弁A, Bに関する試験結果においては傾向をつかむことが難しいが、灯油を使用した噴射弁B2に関する試験結果においては、液体流量の増加に伴い粒径が増加する傾向が見られた。 ←噴射弁A, B, B2の結果より

4.5 雰囲気圧力が噴霧特性に与える影響のまとめ

雰囲気圧力が噴霧特性に与える影響について、噴射弁B2に関する試験結果から、以下のことがわかった。

- (1) 気液質量流量比を保ったまま雰囲気圧力を増大させると、微粒化は促進される。また、微粒化促進と液体流量自体の増加に伴い、噴霧濃度は飛躍的に上昇する。気液質量流量比の大きい条件における結果によれば、断面ザウタ平均粒径は雰囲気圧力の -0.5 乗程度に比例して減少する。 ←噴射弁B2の結果より
- (2) 気液質量流量比を保ったまま雰囲気圧力を増大させると、噴霧分散のパターンはより気流の流れ場を反映した形に近づく。即ち、噴射弁近くではより広がる傾向にあるが、その後の広がりには抑制される傾向にある。 ←噴射弁B2の結果より

4.6 総括の補足と今後の研究の方向性について

本節では、上記の総括に対する多少の補足と今後の研究の方向性・課題について記述する。

(1) 噴射弁性能としての微粒化特性の評価について

噴霧特性は通常微粒化特性と噴霧分散特性の2つの特性に大きく分けられる。本稿の議論に当たって用いた試験結果によれば、噴射弁の設計パラメータ・作動特性に対し、噴霧分散特性に関してはその相関の傾向が比較的顕著に現れ、その傾向は定性的に予測が可能なものであった。これに対し、微粒化特性については、粒径計測結果を見る限り、設計パラメータ・作動特性との相関が非

常に複雑である。この理由として、微粒化機構自体が非常に複雑で、高速かつミクロな現象であり、噴射弁の細かい形状の違いや液膜の周方向非一様性、スワラの後流の影響など様々な要因に影響を受けることが挙げられる。

上記に加えて問題になるのが、“計測された平均粒径が小さい噴射弁＝微粒化性能（細かい霧を作る能力）に優れた噴射弁”という関係が必ずしも成り立たないことである。本稿で扱った試験については、その簡便性・高いデータ生産性から、レーザ回折法を主に用い、また一部については面計測の利便性から干渉画像法を利用しているが、いずれも単位検査体積内の液滴を計測対象とする“Concentration”基準の計測法であるため、3.1.2節に示した例で明らかのように、「液滴と気相の干渉状態」が各軸方向位置により異なる、言い換えれば粒径速度相関が各位置で異なることにより、粒径計測結果が左右されることになる。従って、生成される液滴径の差が元々小さい噴射弁同士において、その微妙な優劣を問題にする場合には、この問題をよく考慮しなければならない。これは、単位検査体積内の統計量（“Concentration”基準）ではなく、単位検査面を単位時間に通過する液滴母集団による統計量（“Flux”基準）にて評価することで原理上は解決できる^(30,31)。即ち、対策としては、位相ドップラ法を用いる、あるいは干渉画像法の結果を、速度計測結果を用いて“Concentration”基準から“Flux”基準にデータを変換してから統計量を求める等の方法が考えられる。

以上のように“Concentration”基準により微粒化性能を判断する際に問題が生じる可能性はある程度は予測できたものであった。しかし、開発・基礎試験を問わず、噴射弁形態を次々と組み替えて試験を行い、その傾向を見るような試験においては、高いデータ生産性が求められるため、レーザ回折法は特に魅力的であり、また圧力噴射弁の単体試験や気流パターンがそれほど複雑でない噴射弁の場合には、噴射弁の性能評価が十分可能であるため、本方法は頻繁に用いられており、本稿で取り扱った噴射弁についても、その延長という形で試験を行っている。しかし、気流噴射弁の場合は複雑な気流パターンが噴射弁の本質的な要素であるため、今回の総括された結果を踏まえて、今後は、特に気流と液滴運動の干渉が強く、噴射弁形状と粒径の関係が明確でない場合には、既に文中で述べた通り、軸方向位置による粒径の変化の傾向を慎重に確認する、あるいは“Flux”基準のデータも合わせて取得し検討する等、より慎重にデータを吟味すべきであることがわかる。例えば、噴射弁A, B2に関する干渉画像法のデータを“Flux”基準に変換し、再度データを吟味することも有効であると考えられる。

尚、上記の視点は、過去の文献調査の際にも重要であると考えられる。即ち、粒径計測値やその各作動条件依存性を示す指数等の結果については、計測位置依存性、計測手法なども考慮しながら慎重に吟味することが必要である。今後の試験においては、“Concentration”基準と“Flux”基準を併用し、液滴と気相の干渉の影響などを正しく判断しながら噴射弁特性を評価していく等のアプローチが必要となると考えられる。

(2) 周方向一様性の確保によるデータ信頼性の向上

噴霧現象の理解を深めるために、周方向にできるだけ液膜が一様な基礎噴射弁を製作する必要がある。これは、現象の理解のためだけでなく、実用上優れた噴射弁を開発するためのノウハウとしても重要である。どのような設計の場合に周方向の一様性が確保されるのかについても明らかにしておくことが望ましい。

(3) 計測の信頼性について

データの信頼性の問題は、噴射弁設計の他に、計測側でも問題になる。本稿で扱った試験においては、特に雰囲気圧力の影響を見る際に、高圧で噴霧が高濃度になり、計測の信頼性の確保が難しいことが大きな問題であった。これについては、先に述べた通り、例えば、レーザ回折法と位相ドップラ法による計測を併用して、クロスチェックにより計測誤算の程度を把握する必要がある。また、同様にこれについても、過去の文献を調査する際には、計測法、計測位置、条件、計測精度を慎重に吟味する姿勢が重要である。例えば、先述の通り高濃度でレーザ回折法は粒径を小さく見積もりがちになる一方で、位相ドップラ法は信号ノイズ比の高い大液滴を選択的に捕らえる可能性があるため、前者は粒径の雰囲気圧力依存性を大きく見積もり、逆に後者は小さく見積もる可能性がある。従って、両者の併用により真値がどの範囲にあるか予測がつくと考えられる。但し、両者のデータ比較の際には、“Concentration”基準と“Flux”基準の変換を行わないと現象を見誤ることになるので注意を要する。

(4) 旋回角の影響について

本稿では、旋回方向の組み合わせの影響に関して議論したが、旋回の強度の影響については議論を行っていない。今後は旋回角の異なる旋回翼を用意し、これを細かく変化させて、その傾向を調べ、今回得られたのと同様の結果が他の旋回角において得られるのか確認する必要がある。また、液膜の旋回角についても、本稿により噴霧分散や微粒化特性への影響があることがわかったので、液膜スリットの設計を変えて数条件を試し、一様

な液膜が形成される条件を探すと同時に、その噴霧特性への影響を更に調べる必要がある。また、これらの旋回の組み合わせの影響については、液膜と気流の周方向と軸方向の相対速度も考慮して今後整理すべきである。

尚、4.1節の(4)については、噴射弁CのNPPに相当する旋回方向の組み合わせに関する最近の試験において、アウトスワラの旋回角を60deg.とすると、噴霧の周方向の非一様性が見られなくなることがわかっている。他の旋回方向の組み合わせにおける検討が必要であるが、少なくとも外側気流の旋回が噴霧の周方向一様性に影響を及ぼしていることがわかる。

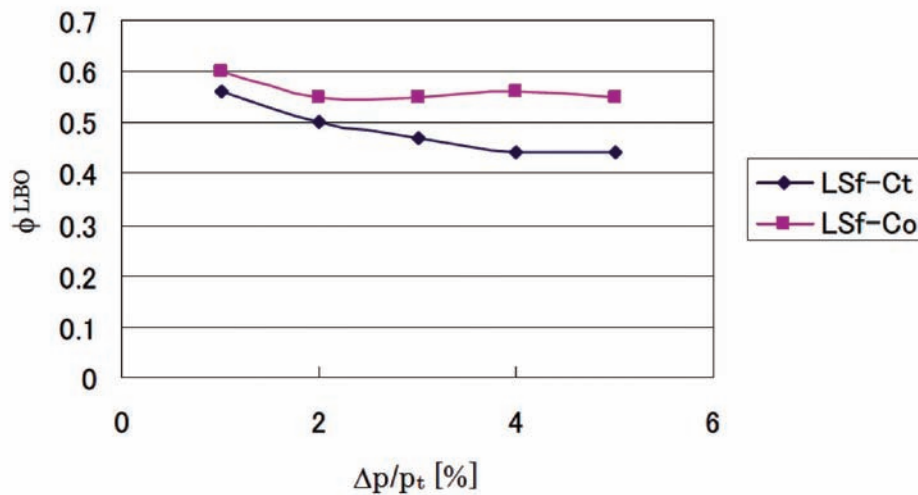
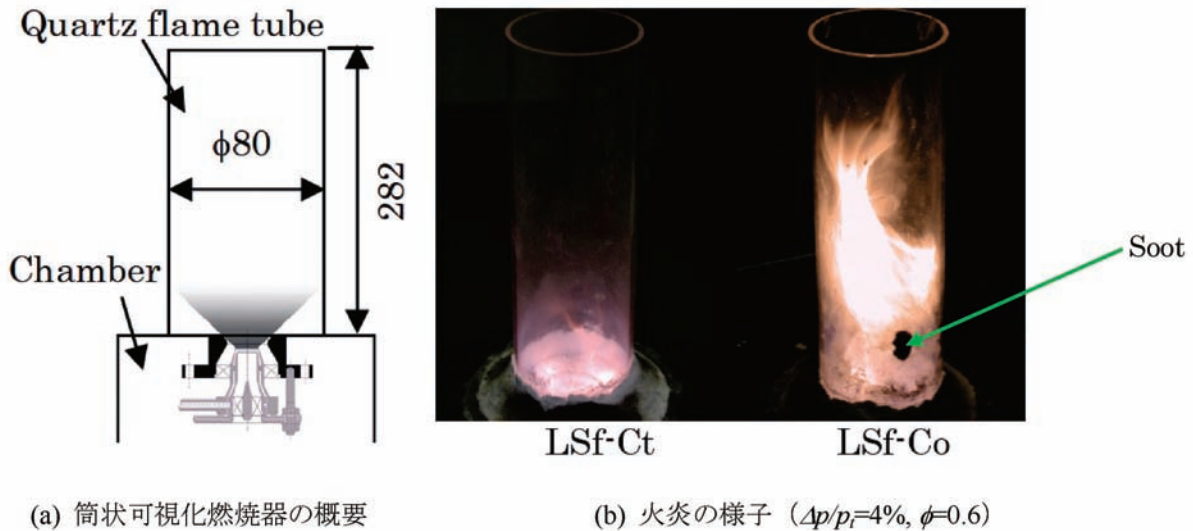
ここで旋回方向の組み合わせと噴霧特性、燃焼特性の関連について言及しておく。噴射弁BのLSfタイプについて、鈴木ら⁽¹⁵⁾は円筒ガラス型燃焼器による燃焼試験により火炎観察と希薄側吹き消え限界の調査を行った。その結果を図34に示す。図において、当量比 ϕ は、噴霧試験においてパラメータとした気液質量流量比（空燃比）の逆数に比例し、灯油燃料の場合以下の関係にある。

$$\phi = \frac{1}{0.0677ALR} \quad (12)$$

図34の結果によれば、逆方向旋回の方が吹き消え特性に優れ、また火炎も強い輝炎等は見られず燃焼状態は良好であったのに対し、同方向旋回の場合は極端に偏った強い輝炎が見られ、吹き消え特性も悪かった。また同方向旋回の場合には、燃焼状態にあっても燃焼器壁に液滴の付着が見られた（燃焼器入口温度は常温）。3.2.1節の結果によれば、噴霧粒径は同方向旋回の方が小さかったにも関わらず、このような傾向を示す理由として、同方向旋回の場合は逆方向旋回の場合と逆に、特に大きな液滴が外側へ向かう傾向があるので、火炎の外側を大液滴が通過してそのまま壁にあたり、多くの燃料が燃焼に有効に使われていないことが、吹き消え特性が悪い原因と考えられる。このように、燃焼特性を把握するには、噴霧粒径、噴霧空間分布の他に、粒径別の液滴運動の傾向も把握しておく必要がある。

(5) 供試液体の影響について

本稿で扱った試験結果においては、水を供試液体に用いた場合、設計パラメータや作動条件の影響がはっきりしないことが多かった。これに対し、灯油を用いた試験では、条件による違いが微小であっても、その傾向は比較的現れやすいように思われる（例えば3.3.3節の液体流量依存性や3.4.1節の旋回組み合わせに対する依存性）。また、取り扱いの容易さから噴射弁選定の試験において水を使用する場合があるが、水と灯油では粒径自体も大きく異なり、また結果として噴霧分散パターンも



(c) 希薄側吹き消え当量比の比較

図34 筒状可視化燃焼器による燃焼試験：旋回方向組み合わせの影響（噴射弁B, LSfタイプ）

異なり、場合によっては全く異なった現象を判断することになりかねない。従って、特に実用噴射弁の噴霧試験は出来る限り灯油、あるいは低粘性で表面張力がこれと近い液体で行うべきである。

また、本稿では、同一噴射弁に関して液体物性を変えてその影響を見る試験は行っていないが、液体の物性もエンジン作動条件により変化するので、そのような試験も今後検討する必要がある。

(6) 霧化空気差圧の影響について

今回の結果では噴射弁Cに関するザウタ平均粒径の霧化空気差圧依存性の指数が-1に近い大きな値を示した。通常は-0.5程度であるので、液膜の状態の詳細観察や、他の計測手法の併用などにより、指数が大きい理由を確認しておく必要がある。

(7) 噴霧角について

噴霧角については、本稿では噴射弁Aのみに関して議論を行ったが、このような噴霧空間分布を表わす適当な特徴量を用いて、粒径と共に噴霧の分散をあわせて整理しておく、データベースとして便利であると考えられる。但し、気流噴射弁の場合は気流により噴霧の外側境界線が湾曲するため(特に雰囲気圧力が高圧の場合等)、噴霧角の定義が曖昧であり、噴霧角と等価な情報を表わす適切な特徴量を別途定義することが必要になるかもしれない。

(8) 二次元噴射弁による基礎実験

旋回の影響は模擬できないが、現象の理解のためには、二次元噴射弁による基礎実験も合わせて行うことが望ましいと考えられる。

(9) 液膜分裂位置・粗大液滴存在領域と気流の位置関係

液膜分裂位置や粗大液滴の存在する領域において、気流と液相の相対速度が大きいこと、乱れ強度が高いことが微粒化を促進する重要な要素と考えられる。例えば、乱れの強い逆旋回剪断層が存在しても、粗大液滴の多くがその領域の外にあるような噴霧分布をしている場合は、噴霧粒径は小さくならないと考えられる。噴射弁の設計と噴霧特性の相関を理解するには、このような気流と噴霧の位置関係を詳しく見ていく必要があると考えられる。

4.7 優れた微粒化性能をもつ噴射弁の設計指針

本稿で扱った試験結果をまとめると、優れた性能をもつ噴射弁を設計するためには、以下の項目に留意すべきであると考えられる。

- ・ non-prefilming タイプにおいては、気流を逆方向旋回とし、液体の旋回方向を外側気流と合わせると噴霧粒径が小さくなる。
- ・ アウタシュラウドは液膜リップよりも長くして気流速度の速い状態をできるだけ保つ。あるいは液膜リップ付近の若干下流まで流れを絞り込む。この際、流路の設計によっては見かけの旋回角が弱まり、噴出後の気流が広がりにくくなることがあるので注意する。
- ・ 外側気流の旋回を必要以上に強くしない。さもないと、極端な場合には液膜リップ付近で外側気流が剥離し、外側気流の剪断応力が液膜に対して有効に機能せず、微粒化性能が悪化する。但し、ある程度の旋回強度は微粒化の促進に効果的である。また、2重スワラ噴射弁の場合、保炎のためには外側旋回の強度はある程度必要である。
- ・ 気流を広げたい場合にはフレアを設ける。フレアは拡大気流を生むが、同時に流路の延長効果を持つので、液膜リップ付近の流れが急拡大するのを防ぎ、結果として高速気流により微粒化を促進できる可能性もある。但し、フレアに液滴が付着すると噴霧粒径が増大するので、適度な曲率と長さのものを選択することが必要である。
- ・ 旋回の組み合わせについては、逆方向旋回の場合、燃焼しにくい大粒径液滴ほど噴霧内側の高温部に存在する噴霧パターンとなるため、大粒径液滴が外側へ行きやすい同方向旋回と比べ、液滴径別の分散パターンとしては逆方向旋回の方が望ましいと考えられる。但し、気流を広げたい場合等、望ましい流れ模様をつくるのに同方向旋回の方が有効である場合もあるので、適宜使い分けることが必要である。
- ・ 噴射弁特性がよくわかっていない開発初期段階にお

いては、微粒化特性の雰囲気圧力依存性、霧化空気差圧依存性について、ザウタ平均粒径が前者については -0.5 乗程度、後者については $-0.5 \sim -1$ 乗程度に比例すると考えて、それらの効果を見積もるのがよいと考えられる。また、噴霧分散特性への上記作動条件の影響については、上記の微粒化特性への影響と、流れ場の特性時間への影響を考慮してストークス数を吟味することである程度予測が可能である。

尚、ここに示した設計指針はあくまで本稿で示した試験結果に基づく提案であり、本稿で試験されなかった条件において保証されるものではないことを言及しておく。今後別の噴射弁や作動条件におけるデータを追加し、吟味しながら徐々に指針提案の精度を向上させる作業を行っていく予定である。

また、最初の項目についてはnon-prefilming タイプの場合のみに言及しているが、non-prefilming タイプとprefilming タイプの優劣の選択に関しては、噴射弁のサンプルを増やして検証することが必要であると考えている。

5. おわりに

液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が噴霧特性に与える影響について、その第一報として、複数の噴射弁形態における噴霧試験結果を比較しながら総括的に検討し、共通する傾向（あるいは共通しない傾向）を見出すと共に、今後のより詳細な理解のための研究の方向性について提案した。また同時に、本稿で取り扱った試験結果を元に得られた、優れた性能をもつ噴射弁の設計指針をまとめた。

本稿をまとめるに当たり行った過去のデータの再検討の過程において、今後より系統立った研究を行う上での留意点が明らかになったと同時に、特に微粒化性能の評価に関する問題が改めて認識された。今後は本稿で提案した方向で研究を継続し、液膜式気流噴射弁の設計データベースをできるだけ多く、より系統立った形で蓄積し、高性能燃料噴射弁の設計ノウハウの取得を目指す予定である。

参考文献

- [1] 林 茂, 「クリーンエンジン技術計画の概要」, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 第1回総合技術研究本部公開研究発表会前刷集, pp.11-16 (2004).
- [2] 林 茂, 柳 良二, 二村尚夫, 福山佳孝, 「JAXA 航空エンジン環境技術研究開発プロジェクト (TechCLEAN) の概要」, 第47回航空原動機・宇

- 宙推進講演会講演論文集, No.B22 (2007).
- [3] 山本 武, 牧田光正, 松浦一哲, 山田秀志, 下平一雄, 黒澤要治, 吉田征二, 飯野 淳, 「JAXA TechCLEANにおける低NO_x燃焼技術の研究開発」, 第47回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, No.B29 (2007).
- [4] 例えば Lefebvre, A. H., "Airblast Atomization," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 6, pp. 233-261 (1980).
- [5] Aigner M. and Witting, S., "Swirl and Counterswirl Effects in Prefilming Airblast Atomizers", ASME 87-GT-204 (1987).
- [6] Wang, H., Y., McDonell, V., G. and Samuelsen, G. S., "Influence of Hardware Design on the Flow Field Structures and the Patterns of Droplet Dispersion: Part I – Mean Quantities," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 117, p282-289 (1995).
- [7] McDonell, V., G., Seay, J. E. and Samuelsen, G. S. "Characterization of the Non-Reacting Two-Phase Flow Downstream of an Aero-Engine Combustor Dome Operating at Realistic Conditions," ASME 94-GT-263 (1994).
- [8] Zheng, Q. P., Jasuja, A. K. and Lefebvre, A. H., "Structure of Airblast Sprays under High Ambient Pressure Conditions," ASME 96-GT-131 (1996).
- [9] Jasuja, A., K., "Behaviour of Aero-Engine Airblast Sprays in Practical Environments," Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2006, Paper No.06-287 (2006).
- [10] Hadeif, R., "Dynamics of an Airblast Spray in a Double Swirled Stabilized Flame," Int. J. Fluid Mechanics Research, Vol.28, No.6, pp.735-746 (2001).
- [11] Johnson, S. M. "Venturi Nozzle Effects on Fuel Drop Size and Nitrogen Oxide Emissions," NASA TP 2028 (1982).
- [12] 松浦一哲, 黒澤要治, "航空エンジン用エアブラストノズル研究へのレーザ干渉画像法の適用" 第13回微粒化シンポジウム講演論文集 (2004).
- [13] 松浦一哲, 黒澤要治, "航空エンジン用エアブラスト燃料噴射弁の噴霧特性の可視化", 第33回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp.453-456 (2005).
- [14] Matsuura, K. and Kurosawa, Y., "Effect of Swirl Combinations on Spray Dispersion Characteristics of a Multi-Swirl Airblast Atomizer," Proc. 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Europe (ILASS-Europe 2005), Orléans, France, pp.355-360 (2005).
- [15] 鈴木俊介, 須田 充, 松浦一哲, 牧田光正, 林 茂, "エアブラスト燃料噴射弁の形状が及ぼす微粒化特性への影響", 第15回微粒化シンポジウム講演論文集, pp.39-42 (2006).
- [16] 丸永拓哉, 岩本順二郎, 牧田光正, 松浦一哲, "航空エンジン用エアブラスト燃料噴射弁の噴霧特性に対する霧化空気差圧の影響", 第15回微粒化シンポジウム講演論文集, pp.73-78 (2006).
- [17] 丸永拓哉, "航空エンジン用エアブラスト燃料噴射弁の噴霧特性に関する研究 ～干渉画像法による粒径速度同時計測～", 2006年度東京電機大学大学院工学研究科修士論文 (2007).
- [18] 井戸教雄, "航空ガスタービン用気流微粒化燃料ノズルの微粒化特性に関する研究", 平成18年度法政大学卒業論文 (2007).
- [19] Maeda, M., Kawaguchi, T., and Hishida, K., "Novel Interferometric Measurement of Size and Velocity Distributions of Spherical Particles in Fluid Flows," Meas. Sci. Technol., Vol.11, No.12, pp.L13-18 (2000).
- [20] Kawaguchi, T., Matsuura, K., Ueyama, K. and Maeda, M., "Diagnostics of Sprays with Wide Droplet-Size Distribution by Novel Interferometric Laser Imaging Technique," Proc. 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2003, Sorrento, Italy (2003).
- [21] Simmons, H. C., Conrad, R. R. and Orav, M., "Air-Atomizing Fuel Nozzle," United States Patent, 3980233, Sep. 14 (1976).
- [22] Makida, M., Yamada, H., Kurosawa Y., Yamamoto, T., Matsuura, K. and Hayashi, S., "Preliminary Experimental Researches to Develop a Combustor for Small Class Aircraft Engine Utilizing Primary Rich Combustion Approach," ASME GT2006-91156 (2006).
- [23] Swithenbank, J., Beer, J., M., Taylor, D., S., Abbot, D. and McCreath, G., C., "A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution," Prog. in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 53, p.421-447 (1976).
- [24] Hayashi, S., "Measurements of Absolute Concentration and Size Distribution of Particles by Laser Small Angle Scattering," Optical Particle Sizing, Theory and Practice (Gouesbet, G., and Grehan, G., eds), p.549, Plenum Press (1987).

- [25] 林 茂, 「レーザ回折法による測定」, 第8回微粒化フォーラム ―噴霧特性の測定原理と実習― テキスト, 日本液体微粒化学会, pp.39-53 (2000).
- [26] 松浦一哲, 黒澤要治, 山田秀志, 林 茂, “航空エンジン用燃料噴射弁評価のための高圧噴霧試験設備の開発”, JAXA-RM-06-010 (2007).
- [27] 松浦一哲, 黒澤要治, 山田秀志, 林 茂, “航空エンジン用燃料噴射弁評価のための高圧噴霧試験設備の開発”, 第14回微粒化シンポジウム講演論文集, pp.97-98 (2005).
- [28] 例えば Crowe, C., T., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., “Multiphase Flows with Droplets and Particles,” CRC Press LLC (1997).
- [29] Beer, J., M. and Chiger, N., A., “Combustion Aerodynamics,” Krieger Pub. Co. (1983).
- [30] Lefebvre, A., H., “Atomization and Sprays,” Hemisphere Pub. (1988).
- [31] 松浦一哲, 「計測方法の概要とデータ評価方法」, 第2回微粒化セミナー ―液体微粒化の基礎と計測技術― テキスト, 日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会, pp. 18-29 (2006).
- [32] Bhayaraju, U. C., Giuliani, F., and Hassa, C., “Planar Liquid Sheet Breakup of Pre- and Nonprefilming Airblast Atomizers at Elevated Ambient Air Pressures,” Proc. 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Europe (ILASS-Europe 2005), Orléans, France, pp. 445-450 (2005).
- [33] Dring, R. P. and M. Suo, “Particle Trajectories in Swirling Flows,” J. Energy, Vol.2, No.4, pp.232-237 (1978).
- [34] 千田二郎, 「微粒化測定法と測定データの整理」, 第8回微粒化フォーラム ―噴霧特性の測定原理と実習― テキスト, 日本液体微粒化学会, pp.11-26 (2000).

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-014

発 行 平成19年3月30日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL：029-868-2079 FAX：029-868-2956

©2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

