

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

平成 19 年度

修士論文

ステレオレーザ干渉画像法によるエアブラスト燃料噴霧中の粒子の  
粒径及び 3 成分速度の同時計測とその燃焼場への適用

2008 年 2 月提出  
指導教員 林 茂 教授(JAXA)

66219 山口 健太

# 目次

記号.....	
第 1 章 序論.....	1
第 2 章 試験用エアブラスト燃料噴射弁.....	3
2.1 非燃焼試験用燃料噴射弁.....	3
2.2 燃焼試験用燃料噴射弁.....	4
2.3 試験用燃料噴射弁の空気流量.....	4
第 3 章 試験装置.....	6
3.1 非燃焼試験用噴霧装置.....	6
3.2 燃焼試験用噴霧装置.....	6
第 4 章 レーザ干渉画像法.....	8
4.1 計測原理.....	8
4.2 干渉縞像の光学的圧縮法.....	10
4.3 計測装置.....	11
4.4 ステレオレーザ干渉画像法への拡張.....	11
4.5 ステレオレーザ干渉画像法の燃焼場への拡張.....	12
4.6 取得データの処理.....	13
第 5 章 結果及び考察.....	14
5.1 非燃焼場における噴霧計測.....	14
5.1.1 液滴数空間分布.....	14
5.1.2 ザウタ平均粒径空間分布.....	16
5.1.3 粒径クラス別液滴数分布と 2 成分速度ベクトル.....	17
5.1.4 粒径クラス別周方向速度空間分布.....	23
5.1.5 粒径-速度相関および各速度.....	25

5.2 燃焼場における噴霧計測.....	27
5.2.1 火炎形状及び燃料液滴からの Mie 散乱.....	27
5.2.2 液滴数空間分布.....	28
5.2.3 ザウタ平均粒径空間分布.....	29
5.2.4 粒径クラス別液滴数分布と 2 成分速度ベクトル.....	30
5.2.5 液滴の挙動の AFR 及び霧化空気差圧への依存性.....	31
5.2.6 20 $\mu\text{m}$ クラスの液滴の周方向速度分布.....	33
第 6 章 結言.....	34
謝辞.....	35
参考文献.....	36
図題.....	37
付録 A.....	95
付録 B.....	97
付録 C.....	99

## 記号

<i>AFR</i> :	Air to fuel mass flow ratio
<i>d</i> :	Droplet diameter, $\mu\text{m}$
<i>m</i> :	Refractive index
<i>N</i> :	Fringe count
<i>SMD</i> :	Sauter mean diameter, $\mu\text{m}$
<i>W<sub>a</sub></i> :	Air mass flow rate, g/s
<i>W<sub>f</sub></i> :	Fuel mass flow rate, g/s
<i>p<sub>a</sub></i> :	Ambient pressure, Pa
<i>p<sub>t</sub></i> :	Total pressure, Pa
$\Delta p/p_t$ :	Pressure drop, %
<i>U<sub>0</sub></i> :	Characteristic velocity, m/s ( $U_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}}$ )
<i>V<sub>z</sub></i> :	Axial mean velocity of droplet, m/s
<i>V<sub>r</sub></i> :	Radial mean velocity of droplet, m/s
<i>V<sub>th</sub></i> :	Circumferential mean velocity of droplet, m/s
$\alpha$ :	Collecting angle, deg
$\beta$ :	Scattering angle, deg
$\theta$ :	Outer swirler vane angle, deg
$\lambda$ :	Wave length, nm
$\mu_c$ :	Air viscosity, Pa · s
$\rho_a$ :	Inlet air density, $\text{kg/m}^3$
$\rho_d$ :	Droplet density, $\text{kg/m}^3$

# 第1章 序論

近年，化石燃料枯渇への危惧の増大や地球温暖化問題への関心の高まりにより二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出削減，すなわち燃費の向上が輸送や発電において求められており，航空分野もその例外ではない．また，航空エンジンからの排出ガスに含まれる窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)は，光化学スモッグや酸性雨を引き起こす大気汚染原因物質であり，これについても人体や環境に与える影響から，排出量の低減が大きな課題となっている．

このような状況において，航空エンジンは燃費を向上させ，二酸化炭素の排出削減を実現するために，サイクルの高温高压化が図られてきているが，サイクルの高温化は窒素酸化物排出量の増加を伴う．航空エンジンに関する規制排出物としては窒素酸化物のほかに，一酸化炭素，すすなどが挙げられるが，なかでも窒素酸化物に関する規制は ICAO(国際民間航空機関)により段階的に強化される傾向にある<sup>[1]</sup>．

航空エンジンは，高空再着火のような低温低圧条件から離陸時のような高温高压条件にわたる広範な動作域における燃焼の安定性が要求され，なおかつ上述の排出規制を満たさねばならない．このため，より厳しい条件下での燃焼性能の向上が要求されており，窒素酸化物排出の削減を実現するための技術開発や研究が数多くなされている<sup>[2][3]</sup>．

窒素酸化物排出の削減の鍵は，空気と燃料の良好な混合である．窒素酸化物は，高温での燃焼時に多量に発生することが知られており，従って空気と燃料の混合により燃料噴霧を均一化し，希薄燃焼を行わせることで，火炎温度を下げる事が重要である．しかし，希薄燃焼は燃焼の安定性や着火性能に課題を

抱えており，航空機の安全な運行上，見過ごすことはできない．燃焼の安定性を保ち，かつ空気と燃料の良好な混合を得るため，燃料の微粒化と分散を行う燃料噴射弁の技術開発が重要視されている．

近年の高温化・高負荷化の傾向にある燃焼器には，微粒化性能に優れ，かつ燃料と空気の混合が強力に行われるエアブラスト噴射弁が圧力噴射弁に換わって使われるようになっている<sup>[4]</sup>．しかし，エアブラスト噴射弁による燃料噴霧についての研究としては文献[5]などが挙げられるが，その理解は未だ十分とは言えず，さらなる研究が必要である．

燃料噴霧の特性を明らかにし，優れた燃料噴射弁の設計・開発につなげるためには，精度の高い計測技術が必要である．また，噴霧特性の詳細な理解にはできるだけ多くの情報(燃料液滴の空間濃度，粒径，速度など)が同時に得られることが望ましい．さらに，計測技術一般に望まれる特性として，手法・設定が簡便であること，ノイズに強いこと，短時間で結果が得られること，現実の場あるいは現実に近い場での計測が可能なことなどが挙げられる．従来から工学の様々な分野で利用されているレーザを用いた光学計測技術は，上述の条件の多くを満たし，かつ非接触計測であるため，噴霧計測においても広く用いられている．光学的噴霧計測技術の一つとして，レーザ干渉画像法が挙げられるが，本手法をエアブラスト燃料噴霧に用いた例は少ない<sup>[6][7]</sup>．そこで本研究では以下の三つを目的に掲げる．

- [1]松浦らの確立したステレオレーザ干渉画像法を非燃焼場における燃料噴霧に適用し，噴霧分散構造を理解する
- [2]同手法を燃焼場に拡張し，燃焼場における計測技術を確立する
- [3]同手法を燃焼場における燃料噴霧に適用し，噴霧分散構造を理解する

## 第2章 試験用エアブラスト燃料噴射弁

本研究では、航空エンジンに用いられるエアブラスト燃料噴射弁による燃料噴霧の構造を解明するにあたり、試験用に製作したエアブラスト燃料噴射弁による噴霧の計測を行った。本章では、この燃料噴射弁の構造及び特徴について述べる。燃料噴射弁にはエアブラスト式以外にも種々のものがあるが、それについては文献[8]~[10]を参照されたい。

### 2.1 非燃焼試験用燃料噴射弁

図 2-1-1 及び図 2-1-2 に、非燃焼試験に用いた燃料噴射弁の外観写真と断面図を示す。エアブラスト燃料噴射弁の特徴は、燃料の噴流あるいは膜に空気流のせん断力が作用し、それにより微粒化がなされることである。本研究では、燃料に強いせん断力を与え、効果的な微粒化を行うため試験用燃料噴射弁は二つの空気流路と、それらに挟まれた環状の燃料流路を持つ形状となっている。二つの空気流路にはそれぞれ同軸に旋回羽根(ヘリカルスワラ)が取り付けられており、これらにより空気は旋回速度成分を与えられる。旋回方向は、噴射弁下流から見て反時計回りを正とする。図中の内側の旋回羽根をインナスワラ、外側の旋回羽根をアウトスワラと呼び、試験用燃料噴射弁のインナスワラ、アウトスワラの旋回角はそれぞれ、 $-45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$  に固定とする。なお、旋回角は羽根のミッドスパンにおける角度で定める。これらを通じた空気は、互いに逆方向の旋回成分を得ることとなり、スワラの取付け角を同方向とした場合と比較し、二つの空気流の境界にはより大きなせん断力が存在することになる。

一方、燃料は二つの空気流路に挟まれた環状流路内で液膜を形成し、流路出

口において前述の旋回空気流に挟み込まれるようにして噴出し微粒化される。このような気流微粒化燃料噴射弁は特に Parker-Hannifin タイプと呼ばれる<sup>[11]</sup>。燃料流路には 2 箇所スリットが設けられている。上流のスリットは、燃料が供給管から噴射弁内の環状流路に入る際の流路形状の変化による乱れを整える。下流のスリットは $-45^\circ$ の角度が付けられており、ここを通過した燃料は、さらに整流されると同時に旋回成分を与えられ、周方向に一樣な液膜を形成する。

## 2.2 燃焼試験用燃料噴射弁

図 2-2-1 及び図 2-2-2 に燃焼試験に用いた燃料噴射弁の断面図とアウトスワローの外観写真を示す。基本的な構造及び特徴は前述の非燃焼試験に用いた燃料噴射弁と共通である。大きく異なる点としてインナスワローの取付け位置が下流に移動していること、アウトシュラウドの出口形状が曲率を持った形状になっていること、燃料流路の出口が軸と平行になっていることが挙げられる。空気流の旋回の強さ及び方向の組み合わせは、2 つのヘリカルスワローを交換することで変更することが可能である。なお、旋回方向の違いにより微粒化特性<sup>[12]</sup>及び火炎の安定性<sup>[13][14]</sup>が変化するという研究結果が報告されている。燃焼試験においては、インナスワロー及び燃料スリットはそれぞれ、 $-45^\circ$ 、 $45^\circ$ に固定し、アウトスワローは  $48^\circ$ 、 $60^\circ$ の 2 パターンとする。

非燃焼場、燃焼場ともに以降の実験結果ではアウトシュラウド面、噴射弁中心軸を原点とし、半径方向を  $r$ 、軸方向を  $z$ 、周方向を  $\theta$  とする。

## 2.3 試験用燃料噴射弁の空気流量

ここで、噴射弁スケールの参考のため、いくつかの旋回角について、本噴射



弁の燃焼時における空気流量を図 2-2-3 に示す。Y 軸に空気質量流量  $W_a$  を，X 軸にアウトスワローの旋回角を用いている。なお，図中の 1~5% の値は霧化空気差圧というパラメータであり，以降でその定義を述べる。図から，アウトスワローの旋回角が大きくなると空気流量が減少することが分かる。これは，ある旋回角における流路面積が，旋回角の増大により減少するためである。

## 第3章 試験装置

試験装置は空気供給系，燃料供給系，及び燃料噴射弁を取り付けたエアチャンバ一部から成る噴霧装置と光学計測装置から構成される．光学計測装置については次章で詳細に述べることとし，本章では噴霧装置に関して述べる．

### 3.1 非燃焼試験用噴霧装置

図 3-1-1 及び図 3-1-2 に非燃焼試験に用いた，噴霧装置の空気-燃料供給系統図とエアチャンバの外観写真を示す．空気は，コンプレッサより供給され，レギュレータにより調圧され(0.4MPa)された後，流量調整バルブを経て空気静定用のエアチャンバ内へ送られる．エアチャンバ端面のフランジには，燃料噴射弁が取り付けられており，空気は先述の旋回羽根を通過し，大気中に流出する．また，燃料噴射弁上流の全圧と背圧の差圧を，U 字管マンオメータにより測定している．本研究では燃料噴射弁上流の全圧  $p_t$  と，背圧(今回は大気圧)の差圧  $\Delta p$  を， $p_t$  により無次元化した値  $\Delta p/p_t$  を霧化空気差圧と定義し，これを試験パラメータの一つとしている．また，空気と燃料の質量流量比，AFR(Air-Fuel Ratio)も試験パラメータとしている．

一方，燃料(灯油)は，燃料タンク内に供給される窒素により加圧され，フィルタを通過した後，バルブ，流量計を経て燃料噴射弁内に供給される．

### 3.2 燃焼試験用噴霧装置

図 3-2-1 及び図 3-2-2 に燃焼試験に用いた，噴霧装置の空気-燃料供給系統図と可視化矩形燃焼器の外観写真を示す．基本的な装置の構成は非燃焼試験と同じ

であるが、噴射弁を取り付けたフランジ面に可視化矩形燃焼器が取り付けられている。矩形燃焼器の断面形状は一辺 100mm の正方形であり、4 本の支柱に厚さ 8mm の観測窓が 4 枚取り付けられている。観測窓には石英ガラスを用いており、これを利用してレーザの送光・受光および火炎の観察が行える。また、観測窓及び燃焼器支柱の過熱を防ぐため、冷却システムが取り付けられている。燃焼ガスは、燃焼器上部に設置された排気ダクトを通過し、外部へ排出される。本研究で用いた燃焼器は、点火装置を持たないため燃焼器上部の開口端からガスバーナの火炎により、トーチ点火を行う。なお、燃焼試験においても燃料噴射弁は大気に開放されているため、霧化空気差圧の定義は非燃焼試験における定義と同じである。

## 第4章 レーザ干渉画像法

本研究では、燃料噴霧粒子の計測にレーザ干渉画像法(Interferometric Laser Imaging Droplet Sizing :ILIDS)を用いた。レーザ干渉画像法は、レーザシート面内の個々の液滴の粒径及び速度の同時計測が可能な光学的計測法である。同じく面計測である粒子画像流速測定法<sup>[15]</sup>(Particle Image Velocimetry:PIV)では流れ場全体の構造を把握することが容易であるが、空間平均的な速度算出処理を行うために個々の粒子に関する情報を得ることはできず、また一般的に粒子の粒径を計測するためには用いられていない。レーザ干渉画像法の他に液滴の粒径及び速度の同時計測法として、位相ドップラー法<sup>[16]</sup>(Phase Doppler Anemometry:PDA)が挙げられる。位相ドップラー法はレーザビームを交差させた点を通る粒子について粒径と速度を高分解能にて計測することができるが、点計測法であるため、粒子間の空間的な相互関係の把握や間欠噴霧などの非定常な流れ場の解析は困難である。以上のような理由から、個々の粒子に着目し瞬時の空間的な粒径及び速度分布を高時間高空間分解能で計測する手法の開発が望まれていた。従って、瞬時の液滴の粒径及び速度情報を空間的に捉えることのできる本手法は、噴霧分散構造を理解するうえで、非常に利用価値の高い計測法であるといえる。以下に、このレーザ干渉画像法の計測原理及び装置の構成を述べる。

### 4.1 計測原理

レーザ干渉画像法の計測原理<sup>[17][18]</sup>について述べる。レーザ干渉画像法は透明な球形粒子にレーザ光を照射したときの散乱光(Mie 散乱)から粒径を求める手法である。本手法では、粒子にレーザ光を照射したときの散乱光のうち、気液界

面で反射した光(0次反射光)と、気液界面で二度屈折した後に放出される光(1次屈折光)を利用する。図 4-1-1 に 0 次反射光と 1 次屈折光の光路図を示す。微小粒子にレーザ光を照射すると、受光睨み角  $30^\circ < \beta < 80^\circ$  の領域においては、これらの反射光と屈折光が支配的となり、より高次の屈折光よりも強い。これら二つの光を焦点面で捉えると、それぞれの光による二つの輝点が観測されるが、非焦点面で捉えると、二つの光の光路差により生じる位相差が存在するため、干渉縞が観測される。この干渉縞の本数(N)と、粒径(d)には、幾何光学から導かれる以下の式 2.1 のような比例関係がある。

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left( \cos \frac{\beta}{2} + \frac{m \sin \frac{\beta}{2}}{\sqrt{m^2 + 1 - 2m \cos \frac{\beta}{2}}} \right)^{-1} \dots \dots (2.1)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $m$  はそれぞれ、集光角、受光睨み角、レーザ波長、および液滴の周囲媒体に対する相対屈折率(本研究で用いた灯油の相対屈折率は(1.45)である。図 4-1-2 に焦点面及び非焦点面における撮影画像と、各パラメータを示す。波長及び角度は送光及び受光光学系により決定されるパラメータであるから、干渉縞の本数情報(N)を得ることで、各液滴の粒径を算出することができる。なお、干渉縞像の円の大きさはレーザシート面内での粒子の位置の違いによるピントの違いによるもので、粒子の粒径とは関係がない。また、本研究での光学系設定において、粒径の解像度は試験条件によって若干異なるもののほぼ一定で  $4.9\mu\text{m/fringe}$  である。

本手法において、粒子の速度の算出を行うため干渉縞画像の撮影は微小な時間間隔を置いて 2 度行っている。この二枚一組の画像において対象となる粒子

の対応付けを行い，それぞれの画像中の位置を求める．その粒子の移動量を撮影時間間隔で除することでレーザシート面内 2 成分速度を得る．レーザ干渉画像法では，一枚目の取得画像において粒子の位置と粒径を算出し，それに対応する粒子を二枚目の取得画像から探索して対応付けを行うため，速度の算出方法は粒子追跡法(Particle Tracking Velocimetry :PTV)に相当するものである．従って，2 時刻の画像間の粒子の対応付けの際に，輝度の空間分布情報だけでなく粒径情報も利用することが可能である．

## 4.2 干渉縞像の光学的圧縮法

従来のレーザ干渉画像法では，取得した画像内で，図 4-1-2 に示した円形の干渉縞像が複数重なり，粒子の検出が不可能になってしまう問題があった．この問題を解決し，実用的な噴霧計測を可能なものとするため，干渉縞像の光学的圧縮法が前田らにより考案された<sup>[19]~[22]</sup>．以下に本手法について述べる．

図 4-2-1 に光学的圧縮法を用いた受光光学系の概要を示す．受光光学系は，結像レンズと CCD カメラによる通常の構成に加え，矩形スリット及びシリンドリカルレンズ(円筒面レンズ)からなる光学的圧縮機構を備える．シリンドリカルレンズは焦点距離の符号の異なる二枚一組を用いる．二枚のレンズ間距離は可変となっている．このレンズ間距離を変化させることにより，焦点距離を一方向のみ変化させることができる．二枚のレンズ間距離が 0 のときは，これらのレンズによる影響はないが．レンズ間距離を増していくと，水平画素方向にのみ集光レンズの焦点距離から外れる．この操作による垂直画素方向の合焦点結像への影響はない．水平方向にのみ非焦点状態とすることにより，円形の干渉縞像は，垂直方向に圧縮された線上に連なる輝線となる．この輝線は，円形の干渉縞像と同等の情報を持つため，その個数を数えることで粒径の算出が可能と

なる。

矩形スリットは CCD カメラの水平画素方向に長辺をもつ。矩形開口長辺の長さは集光角 $\alpha$ を決定し、これにより粒径の測定レンジ及び分解能が定まる。一方、矩形開口短辺は、通常の光学系と同様、被写界深度を深くし垂直画素方向の焦点領域を確保する絞りの役目を果たしている。図 4-2-2 に本手法による画像と従来の干渉画像法による取得画像の比較を示す。光学的圧縮法により干渉縞像の重なりが著しく減少しており、これによりデータ取得率が飛躍的に向上し実用的な高密度の噴霧計測が可能となっていることが分かる。

#### 4.3 計測装置

次に、計測装置の構成について述べる。図 4-3-1 はレーザ干渉画像法の実験装置図である。本研究では KANOMAX 社製 ILIDS システムと KODAK 社製 ES1.0 の CCD カメラ(1000×1016pixel)を用いた。レーザは、波長 532nm の Nd-YAG レーザを用い、レーザヘッドに取り付けられたシリンドリカルレンズによりレーザシートを生成する。本計測設定において、レーザシートの厚みはスケールによる実測値で約 3mm である。受光レンズ (Nikon, Nikkor 105mm F2.5) には、上述の光学的圧縮法を用いており、シリンドリカルレンズの焦点距離は  $f=100$  と  $f=-100$ 、矩形スリットは長辺 25mm、短辺 4mm である。

#### 4.4 ステレオレーザ干渉画像法への拡張

本研究で用いているエアブラスト燃料噴射弁による噴霧は、軸方向、半径方向に加え、周方向の旋回速度成分を伴っており、噴霧分散構造を理解するためには液滴の 3 成分速度を計測することが重要である。このため、本研究では、

松浦らにより考案されたステレオレーザ干渉画像法を用いた。本計測法は、ステレオ視の原理を用いており、受光カメラを二台用いて計測を行う。計測装置の拡張点としては、受光カメラを2台用い、これらをレーザシートに対し、対称となるような位置に配置する点である。本手法の光学系配置図を図4-4-1に示す。

なお、本手法の妥当性については、位相ドップラー法(PDA)との比較により検証がなされており、エアブラスト燃料噴射弁の噴霧計測に十分適応することが実証されている<sup>[23]</sup>。

#### 4.5 ステレオレーザ干渉画像法の燃焼場への拡張

本研究では、より実際に近い場での噴霧計測を行うためステレオレーザ干渉画像法の燃焼場への拡張を行った。燃焼場でのレーザ干渉画像法の適用としては Fujisawa ら<sup>[24]</sup>によるものが挙げられるが、これは単純なガンタイプバーナを用いたもので、光学アクセス用の観測窓も用いておらず、また受光系が一つの従来の干渉画像法である。従って、エアブラスト燃料噴霧にステレオレーザ干渉画像法を用いた研究は私の知るところこれまでになされていない。

本手法を燃焼場に適用するにあたり問題となるのは火炎の発光による信号の劣化である。特に輝炎は幅広いスペクトル分布を持ち、本研究において用いたレーザの波長とも重なっている。輝炎の発光強度はレーザ光よりも弱いですが、受光系の露光時間が長いため、蓄積されたノイズが信号を劣化させることになる。そこで、本研究においては、輝炎が発生しない、あるいは発生しても、それによる信号の劣化を許容できるような火炎を形成する試験条件とした。また、受光系前部には干渉フィルタ(CVI Laser Optics, F03-532.0-4-2.00)を取り付け、レーザ波長以外の光を除去できるようにしている。光学アクセスには、信号劣化の



少ない平面状のガラスを用いる必要があるため，第3章で述べた，可視化矩形  
燃焼器を用いた．

#### 4.6 取得データの処理

取得した画像データの処理について述べる．取得した画像データは，非燃焼  
場で  $9\times 9\text{mm}$ ，燃焼場で  $8\times 8\text{mm}$  の有効視野を持ち，それぞれこの間隔でトラバ  
ースを行った．各トラバース点において 3000 組の画像を取得し，粒径及び速度  
の算出，実座標との対応付けを行う．粒径の算出は干渉縞の輝度の空間周波数  
を FFT(fast Fourier transform)演算により算出し，それに干渉縞の長さ(pixel)を乗じ  
ることによってなされるが，干渉縞が 3 本以下の場合には演算がなされない．このた  
め，本研究における計算可能な粒径の最小値は約  $15\mu\text{m}$  である．速度の算出は粒  
径の相関が取れた液滴について干渉縞信号の中心位置の移動を 1 組の画像から  
算出し，画像取得の時間間隔で除してなされる．次に計算された全トラバース  
点からのデータを一つにまとめ，新たに軸方向及び半径方向に  $3\text{mm}$  間隔で設定  
したノードに再分配する．各ノードについて平均粒径などの統計データはその  
ノードの周囲の  $6\times 6\text{mm}$  の参照領域内の液滴から得る．粒径に関するデータは一  
組の画像のうち，一枚目の画像から得られた結果を用いるが，流速に関するデ  
ータは一组の画像において一枚目と二枚目で相関が取れた液滴についてのみ算  
出する．さらにステレオ計測で周方向速度を算出する場合には左右のカメラの  
画像について相関のとれた液滴についてのみステレオ視の原理を用いて算出す  
る．各ノードにおける平均速度を算出するのに十分な数の液滴について相関が  
とれる必要があるため，3000 組のデータを取得しているが，これには膨大な計  
測及び処理時間がかかる．このため，燃焼場でのステレオ計測における一部の  
データについては，データ生産性の観点から，画像の取得を 500 組とした．こ

れについては周方向速度を算出するにあたり，左右のカメラでの液滴の対応付けは行わず，個々のカメラにより得られた各ノードにおけるレーザシート内の2成分の平均速度から，ステレオ視の原理により算出した．

## 第5章 結果及び考察

### 5.1 非燃焼場における噴霧計測

本節では、非燃焼場において霧化空気差圧が液滴運動に及ぼす影響について考察する。噴霧燃料液滴をその粒径の大きさにより分類し、気流への追従性の異なる各粒径クラスの液滴が霧化空気差圧の違いによってどのような挙動を示すのかを詳細に検討する。試験条件は霧化空気差圧 2, 4, 5%とし、AFR は一定(9.5)とした。

#### 5.1.1 液滴数空間分布

図 5-1-1~図 5-1-3 に各霧化空気差圧における液滴数の分布を示す。図における液滴数は撮影した画像により得られる液滴数の 1000 枚の積算値である。レーザーは噴射弁の中心軸を含む平面を照射しており、データ取得は  $r=4.5\sim 76.5\text{mm}$  ,  $z=0\sim 45\text{mm}$  の範囲でなされている。半径方向外側の白い領域は液滴数の非常に少ない領域であるため結果を示していない。ただし、同様に液滴数が少ない噴霧軸付近については再循環領域などの重要な噴霧構造が見られる領域のため、結果を示している。また、噴射弁近傍の  $z=0\sim 4.5\text{mm}$  の領域は前述のデータ処理法のため空白となっている。

まず各霧化空気差圧において、燃料噴射弁出口近傍から噴霧は半径方向外側に広がり、下流では噴霧軸方向に偏向することが分かる。これは、液滴が、燃料噴射弁出口における拡大流れと、噴霧軸中心が負圧になることにより形成される再循環流れに追従した結果と考えられる。液滴数のピークが  $z=20\text{mm}$  付近に存在することが、特に  $\Delta p/p_i=4, 5\%$  で顕著であるが、これは液滴の減速や微粒化の進行による液滴数自体の増加によるものと考えられる。 $\Delta p/p_i=4\%$  と  $5\%$  を比

較すると、 $\Delta p/p_i=5\%$ のほうが、より上流域で液滴数の多い領域が見られる。過去の研究から、霧化空気差圧の増加により、微粒化は促進されることが明らかとなっており、これを反映し液滴数が増加していると考えられる

なお、霧化空気差圧の増加により、微粒化性能が向上するにも関わらず、 $\Delta p/p_i=5\%$ において $\Delta p/p_i=4\%$ よりも液滴数が少ないのは、 $\Delta p/p_i=5\%$ では本研究におけるレーザ干渉画像法の計測可能粒径範囲よりも小さい液滴が多く存在し、計測不可能な液滴が多いためであると考えられる。

### 5.1.2 ザウタ平均粒径空間分布

図 5-1-4~図 5-1-6 に各霧化空気差圧におけるザウタ平均粒径(Sauter Mean Diameter:以下 SMD)の空間分布を示す。SMD とは全液滴の総体積を総表面積で除した値で表される平均粒径である。

これらの図から、前節で述べたように霧化空気差圧の増大により微粒化が促進されることが明らかである。また、霧化空気差圧によらず、燃料噴射弁近傍の  $z=20\text{mm}$  付近までは SMD は大きく、下流へ進むにつれ微粒化が促進されること、SMD の大きい領域は上流の噴射弁直後と下流の噴霧外側に見られることが共通の特徴として挙げられる。噴射弁直後の SMD の大きな領域は霧化空気差圧の増加により噴霧軸から離れる傾向にあるが、これは大きな液滴が霧化空気差圧の増大による半径方向速度の増大により噴霧外側へ広がるためと考えられる。

### 5.1.3 粒径クラス別液滴数分布と2成分速度ベクトル

燃料液滴の運動は、その大きさにより大きく異なるため、噴霧構造を理解するためには、燃料液滴をいくつかの粒径クラスに分けて考える必要がある。本研究では、燃料液滴を  $10\mu\text{m}$  ごとに分けてその挙動を考察する。各粒径クラスは  $\pm 5\mu\text{m}$  の幅を持っており、例えば  $20\mu\text{m}$  クラスは  $15\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$  の液滴を含んでいる。粒径クラス別の液滴運動の考察にあたり、今回の分類は  $20, 30, 40, 50\mu\text{m}$  の4クラスとした。これは前述のように計測可能粒径が  $15\mu\text{m}$  であり、また  $50\mu\text{m}$  以上の液滴は非常に少ないためである。図 5-1-7~図 5-1-18 に各霧化空気差圧における粒径クラスごとの液滴数分布と2成分速度ベクトルを示す。

まず、 $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$  クラスの小さな燃料液滴に注目すると、その液滴数分布は5.1.1節に示した全液滴数空間分布とよく似ており、この粒径クラスが液滴数としては圧倒的であることが分かる。また、速度ベクトルに注目すると、燃料噴射弁直後に半径方向外側に飛行し、その後下流で噴霧内側の再循環領域に引き込まれているのが分かる。特に最も小さい  $20\mu\text{m}$  クラスの液滴は上流へ向かう速度ベクトルを持っており、気流の再循環流れの影響を顕著に受けている。

次に、 $40\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$  クラスの大きな燃料液滴に注目すると、それらの液滴数分布は全液滴数空間分布とは大きく異なり、より半径方向外側に液滴数ピークを持つことが分かる。このことにより、SMDの空間分布が半径方向外側で大きな値を持つことが説明できる。すなわち、SMDはその特質として大きな液滴の影響を受けやすいことが挙げられるので、相対的に大粒径の液滴の多い噴霧外側で大きな値を持つ。速度ベクトルは小粒径の液滴とは異なり、噴射弁直後から下流まで直線的に飛行している。 $z=20\text{mm}$  より上流の噴霧軸付近では、噴霧軸に平行なベクトルは見られるが、内側へ偏向し、気流の再循環流れに追随するような液滴は非常に少ない。

また、霧化空気差圧によらず、粒径が大きくなると液滴数のピーク位置は下流へ移動し、また、分散も大きくなる傾向にあることが分かる。

以上に述べた結果は、気流への追隨性が粒径により異なることで説明ができる。液滴の気流への追隨性を考慮するうえでの指標となるのが、ストークス数である。これは液滴の気流への追隨時間(緩和時間)と気流の特性時間の比[(緩和時間)/(特性時間)]で表される無次元数であり、定性的にはこの値が小さいほど気流への追隨性がよく、大きいほど悪いと言える。液滴の緩和時間は粒径の 2 乗に比例するため、大粒径液滴ほど気流への追隨時間は長くなり、追隨性は悪くなる。従って、定性的に大粒径液滴ほどストークス数は大きく、追隨性が悪く、小粒径液滴ほどストークス数は小さく、追隨性がよいといえる。例えば、霧化空気差圧が同じ条件では気流の特性時間は同じであるから、粒径が 2 倍異なると追隨性は 4 倍異なることになる。

相対的にストークス数の小さな 20  $\mu\text{m}$  , 30  $\mu\text{m}$  クラスの液滴は、噴射弁出口直後の拡大流れと、噴霧軸付近の再循環流れに素早く追隨した挙動を示し、その結果、液滴数分布も噴霧内側に寄った傾向となっている。また、このクラスの液滴は全液滴数に対し圧倒的に多いため、噴霧の分散構造はこれと似通ったものとなっている。他方、ストークス数の大きな 40  $\mu\text{m}$  , 50  $\mu\text{m}$  クラスの液滴は上述の再循環流れには追隨できず、噴射弁直後の拡大流れによる弾道的な飛行を下流まで続けている。この結果、液滴数分布は噴霧外側に寄り、この領域での SMD 増加の原因となっている。また噴霧軸方向の気流速度の減速への追隨性も悪いため、大粒径液滴の軸方向速度の減速は遅く、結果として液滴数ピーク位置は大粒径液滴ほど下流となっている。

次に、粒径クラス別の液滴運動をより詳細に検証するために、図 5-1-19 に  $z=13.5$  および  $34.5\text{mm}$  の断面における液滴数の半径方向分布を示す。クラス分けは  $20, 30, 40, 50\mu\text{m}$  となっている。各点における値は、それぞれの断面における液滴数の最大値で無次元化したものである。なお、図において液滴数 100 以下の点のデータは信頼性が低いため削除している。

まず  $20\mu\text{m}$  クラスの液滴は  $z=13.5\text{mm}$  において霧化空気差圧の増加に伴い、相対的に噴霧内側で相対的な液滴数が減少し外側では増加していることが分かる。下流の  $z=34.5\text{mm}$  の位置についても同じ傾向が認められるが、液滴数の多い領域は半径方向に広がり。また、液滴数ピーク位置は霧化空気差圧の増加により、外側に移動している。

次に、 $30\mu\text{m}$  クラスの液滴については、 $z=13.5\text{mm}$  において噴霧内側で、 $20\mu\text{m}$  クラスとは異なる傾向が見られ、霧化空気差圧の増加に伴い、液滴数が増加していることが分かる。噴霧外側では霧化空気差圧により液滴数分布はほぼ変わらないが、全体的に  $20\mu\text{m}$  クラスよりも分散が大きくなっている。 $z=34.5\text{mm}$  においては  $20\mu\text{m}$  クラスと同様、霧化空気差圧の増加により、液滴数ピーク位置が外側へ移動する傾向を示すが、その傾向はより顕著になっている。

$40\mu\text{m}$  クラスは、 $z=13.5\text{mm}$  で噴霧内側では霧化空気差圧に依らないが、外側では 2%、3%のときに、液滴数が多くなっている。 $z=34.5\text{mm}$  では、 $30\mu\text{m}$  クラスと同様の傾向を示し、その分散はさらに広がっている。

$50\mu\text{m}$  クラスでは  $z=13.5\text{mm}$  で  $40\mu\text{m}$  クラスと同様の傾向である。 $z=34.5\text{mm}$  では、霧化空気差圧によらず、液滴数ピーク位置はほぼ一定である。

次に、これらの結果を前節と同様、ストークス数の概念を用いて考察する。前述のようにストークス数とは液滴の緩和時間と、気流の特性時間の比である。液滴の緩和時間は、液滴の密度と粒径、さらに気流の粘性係数に關係する。液



滴の密度と気流の粘性係数を一定とすれば、緩和時間は粒径のみの関数である。よって同一粒径の液滴の緩和時間は霧化空気差圧に依存しない。他方、気流の特性時間は、霧化空気差圧の増加に伴い、気流速度が増加するため短くなる。よって同一粒径の液滴については霧化空気差圧が増加するとストークス数が増大し、気流への追従性は悪化する。以上の概念を用いて、先の結果について考察する。

まず  $20\ \mu\text{m}$  クラスの小さな液滴については、霧化空気差圧が増大すると追従性が悪化するため、相対的に内側に引き込まれる液滴が減っている。また、噴霧外側では、噴射弁直後で半径方向外側へ飛行した液滴は、その後内側へ偏向する流れに追従できず、相対的に噴霧外側で液滴数が多くなっている。この傾向は下流の  $z=34.5\text{mm}$  でも見られ、霧化空気差圧の増加に伴い、相対的に外側の液滴数が増大することが分かる。

次に  $30\ \mu\text{m}$  クラスの液滴を考える。このクラスの液滴は  $z=13.5\text{mm}$  でストークス数が大きい(霧化空気差圧が大きい)ほど内側に多く存在することが分かる。これは、ストークス数が大きい場合、噴射弁出口の拡大流れに追従できず、液滴が噴霧内側に存在するためと考えられる。逆にストークス数の小さい場合、拡大流れによく追従するため、相対的に噴霧内側の液滴数は減少する。

比較的粒径の大きな  $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$  クラスの液滴について考える。このクラスの液滴の運動は慣性力が大きいため、特に  $z=13.5\text{mm}$  の内側領域で霧化空気差圧による影響は小さい。しかし、外側では霧化空気差圧の小さいとき、拡大流れに追従する液滴が増えるため液滴数分布に差が見られる。 $z=34.5\text{mm}$  においては、 $40\ \mu\text{m}$  クラスの液滴は  $30\ \mu\text{m}$  クラスの液滴と似た分布を示している。しかし、その分散は噴霧外側へわずかに広がっており、これは、 $30\ \mu\text{m}$  クラスの液滴と比べ大きな慣性力を持つためであると考えられる。 $50\ \mu\text{m}$  クラスの液滴については、

さらに慣性力が大きくなるため、噴霧内側において霧化空気差圧による影響は認められない。噴霧外側においては 30, 40  $\mu\text{m}$  クラスと同様の傾向を示し、その分散はあまり変わらない。

次に粒径クラス別の軸方向速度と半径方向速度を液滴数分布と同じ断面において考察する。図 5-1-20 に軸方向速度分布、図 5-1-21 に半径方向速度分布を示す。各値は、それぞれの霧化空気差圧における代表気流速度により無次元化している。なお、液滴数分布と同様に図において液滴数 100 以下の点のデータは信頼性が低いため削除している。

まず、軸方向速度分布について考える。20  $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$  クラスの液滴は気流への追従性が非常によいため、霧化空気差圧によらず、ほぼ同じ分布を示している。この傾向は  $z=13.5$ 、34.5mm 両方に共通であるが  $z=34.5\text{mm}$  では 30 $\mu\text{m}$  クラスの液滴にやや違いが認められる。また、 $z=13.5\text{mm}$  において 20 $\mu\text{m}$  クラスの液滴には負の軸方向速度が見られ、燃料液滴が再循環流れに乗り、噴射弁方向へ移動していることが分かる。軸方向速度は  $r=12\text{mm}$  付近で極大値を持ち、噴霧内側では再循環流れが形成されることにより、噴霧外側では気流の減速により、急速に 0 に近づく。よってこれらの領域では燃料液滴は気流中を漂うように存在していることが推測される。

40 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$  クラスの液滴では、 $z=13.5\text{mm}$ 、34.5mm いずれにおいても、噴霧外側において霧化空気差圧の増加により、軸方向速度が増加していることが分かる。また、特に  $z=34.5\text{mm}$  では、最大値の位置も噴霧外側に移動している。これは、ストークス数の大きな条件では、噴霧外側における気流速度の減速、あるいは気流の内側への偏向の影響を受けにくく、噴射弁直後に得た速度を保ったまま、飛行するためと考えられる。

次に、半径方向速度分布について考える。 $z=13.5\text{mm}$  において、20 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$

クラスの液滴には、噴霧軸方向への速度が認められるが、それ以上の大きな液滴については認められない。また、軸方向速度に関して述べたことと同じ理由で、霧化空気差圧の増加により、半径方向速度が増加していることが分かる。最大値の位置が噴霧外側へ移動しているのも、これと同じ理由と考えられる。z=34.5mm においては 20 $\mu$ m, 30 $\mu$ m クラスで z=13.5mm と同程度の噴霧軸方向速度が見られるが、外側方向への速度のピークは存在せず r=20mm 以降でほぼ 0 となっている。また、40 $\mu$ m, 50 $\mu$ m クラスについては、z=13.5mm と同様な傾向が見られるが、噴霧軸方向速度が認められる点が異なる。これは、緩和時間が長く、ストークス数の大きな大粒径の液滴が、下流において送れて再循環流れに追従したためと考えられる。

#### 5.1.4 粒径クラス別周方向速度空間分布

図 5-1-23~図 5-1-33 に 20, 30, 40, 50  $\mu\text{m}$  クラスの周方向速度分布を示す。噴射弁のインナスワローラ, アウタスワローラは逆旋回であるので, 噴射弁を通過した気流は出口近傍において, それを反映した速度分布を持つと考えられる。しかし, 20~50 $\mu\text{m}$  の液滴全てにわたって, 明確に逆旋回気流を見出すことはできず, ほぼ全ての計測領域で旋回成分は正の値を持っている。これは外側の旋回羽根による旋回の効果であり, 計測領域の最も上流部から  $z=10\text{mm}$  付近までにその効果が現れている。これから, 内側の旋回羽根による旋回気流に追随する液滴はほぼないと考えられる。また, 周方向速度は外側旋回羽根による旋回成分が  $z=10\text{mm}$  付近から減衰した後,  $z=20\text{mm}$  で再び正の値を持つことが分かる。これは噴射弁上流では, インナスワローラによる気流の旋回とアウタスワローラによる気流の旋回は拮抗しているが, 流量の少ないインナスワローラによる旋回は減衰してしまい, その後液滴は残っているアウタスワローラによる旋回に追随するためと考えられる。

図 5-1-31 に, 5.1.3 節と同様の方法で粒径クラス別周方向速度の半径方向分布を示す。まず, 20, 30 $\mu\text{m}$  クラスの小粒径の液滴については  $z=13.5\text{mm}$  で逆旋回気流の影響が認められる。20 $\mu\text{m}$  クラスについては  $r=9\text{mm}$  付近の周方向速度の窪みの部分, また 30 $\mu\text{m}$  クラスについては同位置のなだらかな部分である。

この影響は, 霧化空気差圧 4, 5% で顕著であるが, これはストークス数の大きな液滴が噴射弁からの拡大流れにできず追随せず, 噴霧内側に存在し, インナスワローラによる旋回の影響を受けやすくなるためと考えられる。また, 噴霧内側では霧化空気差圧によらず, 小さな液滴の方がより大きな周方向速度を持つ傾向がある。これは, 大きな液滴は慣性力の効果が大きいいため, 噴射弁直後

の半径速度を維持したまま飛行するため、気流の周方向速度成分には追従しないからであると考えられる。z=13.5mm において、r=20mm よりも噴霧外側では周方向速度はほぼ 0 に減衰しており、液滴が気流の旋回成分を維持するのは、非常に狭い領域内に限られることが分かる。z=34.5mm の位置においては、粒径クラスに関わらず、速度分布は、霧化空気差圧の変化に対してほぼ相似形である。また、z=34.5mm では、z=13.5mm の位置におけると同等か、それ以上の周方向速度のピークを持ち、その位置は噴霧の内側へ移動している。これは、液滴が噴射弁近くでもっていた大きな慣性力を失い、再び下流でアウトスワールによる旋回気流に追従するようになるためと考えられる。Fig .5-1-21 において、z=34.5mm で半径方向速度成分が大きく減衰していることから、このことが推測される。これより、気流そのものは下流においてもその旋回成分を維持していることが示唆される。

### 5.1.5 粒径-速度相関および各速度成分相関

図 5-1-35~図 40 に霧化空気差圧 2.4%における  $z=13.5\text{mm}$   $r=6\text{mm}$  及び  $z=13.5\text{mm}$  ,  $r=24\text{mm}$  での粒径と速度の相関と各速度成分の相関図を示す。図のプロットは個々の粒子の持っている粒径及び速度である。図 5-1-35 及び図 5-1-38 から負の軸方向速度( $V_z$ )を持つのは小さい液滴がほとんどであることが分かる。霧化空気差圧の違いによって半径方向内側の軸方向速度の最大値は大きく変わらないが、外側では霧化空気差圧の増大により軸方向速度が増大する傾向が明らかである。霧化空気差圧 4%では大きな液滴ほど大きな軸方向速度を持つ傾向にあり、これは液滴の慣性力の効果であると考えられる。

半径方向速度( $V_r$ )に関しては大きな差は見られないが、やはり霧化空気差圧 4%の半径方向外側で大きな液滴ほど大きな速度を持つ傾向にある。

周方向速度( $V_{th}$ )は噴霧内側で特に小さい液滴が負の速度を持っているが、全体的には正の速度を持ったものが多く、アウトスワラによる気流に追随している。しかし、個々の液滴に注目すればどちらの気流に追随する液滴も存在するため、この位置では液滴は非常に複雑な運動をしていると考えられる。

噴霧外側ではほとんど旋回の影響は見られず、粒径にかかわらず周方向速度は 0 に近い正の値を持つものが多い。

次に、図 5-1-36 と図 5-1-39 に注目すると  $r=6\text{mm}$  では  $20\mu\text{m}$  クラスの液滴に関して霧化空気差圧に関わらず、負の周方向速度を持っている液滴は正の軸方向速度を持っているものが多いことが分かる。これは再循環流れに追随し、上流へ向かう液滴はインナスワラの気流に追随していないことを意味している。この点については今後詳細な分析が必要である。 $40\mu\text{m}$  クラスの液滴は  $20\mu\text{m}$  クラスの液滴よりも分散が広がり、速度成分に明確な相関は見出せない。しかし、 $20\mu\text{m}$  クラスの液滴の周方向速度成分が極端に正に偏っているのに対し、 $40\mu\text{m}$

クラス液滴では負の周方向速度を持つ液滴が相対的に増えていることが分かる。r=24mm では各速度成分は非常に小さくなり、分散は小さい。特に 40 $\mu$ m クラスでは負の周方向速度を持つ液滴はほとんどなくなり、アウトスワラの影響が支配的であることが分かる。また、霧化空気差圧によらず 20, 40 $\mu$ m の液滴はどちらも軸方向速度と半径方向速度に強い相関があり直線的な飛行をして噴霧軸からおよそ 45° の方向に直線的な飛行をしている。

## 5.2 燃焼場における噴霧計測

### 5.2.1 火炎形状及び燃料液滴からの Mie 散乱

図 5-2-1 に炎の発光と燃料液滴からの Mie 散乱の同時撮影写真を示す。Mie 散乱の光源には前述の NdYAG レーザを用い、瞬時の燃料液滴の空間分布を撮影している。写真の撮影にはデジタルカメラを用いた。カメラの設定は全て共通で露光時間 50ms，絞り値 8 である。

写真より，燃料流量が多くなると，下流に輝炎が発生すること，霧化空気差圧が大きくなると火炎が外側に広がった形状になり，発光強度が増すことなどが確認できる。この火炎を噴射弁下流から観察すると中空であり，噴霧軸付近に火炎は存在しない。

以降の噴霧計測は写真に示した条件で行った。

なお今回結果として示すのはアウトスワロー 48°のもののみとする。



## 5.2.2 液滴数空間分布

図 5-2-2 に液滴数の空間分布を示す。非燃焼場と同様，計測液滴が少なく，データの信頼性が低い領域は表示していない。霧化空気差圧が 4% のものは画像の積算枚数が 1000 枚であるのに対し，2%，3% のものについては，画像の積算枚数が 500 枚であるため計測液滴数が少ないが，分布の形状は全ての計測条件についてよく似た形となっており，図 5-2-1 に示した Mie 散乱の写真とよく一致する。また，分布を詳細に検討すると，霧化空気差圧の上昇，あるいは燃料流量の減少(すなわち AFR の増加)に伴い，液滴の分布は噴霧軸から離れる傾向にある。この点については以降で詳細に検討する。液滴数のピーク位置に注目すると，霧化空気差圧が大きくなるとピーク位置は下流に移動することが分かる。これは霧化空気差圧の増大に伴い，大きな速度を持った燃料液滴が空気流の減速に追従するのが遅れ，下流で減速し多く計測されるためだと考えられる。

### 5.2.3 ザウタ平均粒径空間分布

図 5-2-3 にザウタ平均粒径の空間分布を示す。一部データに不自然な領域が見られるが、これは液滴の少ない領域や燃料噴射弁直後の非常に燃料の濃い領域であり、信頼性は低いと考えられる。しかし、全体的な傾向に注目すると、AFR の変化によって SMD はあまり変化しないことが分かる。SMD は火炎面の位置で小さく(20 $\mu\text{m}$  程度)であり、火炎の内側の領域(噴霧軸付近)で大きくなっている(30 $\mu\text{m}$  程度)。この領域は液滴数の非常に少ない領域であるため、少数の大粒径液滴が SMD に大きな影響を与えていると考えられるが、これに加え、火炎面を通過した後も燃え残った液滴が存在するためと考えられる。また、霧化空気差圧が SMD に与える影響は、非燃焼場と同様に大きく、霧化空気差圧の増大により SMD は著しく減少する。

## 5.2.4 粒径クラス別液滴数分布と2成分速度ベクトル

図 5-2-4~図 5-2-6 に粒径クラス別液滴数分布と2成分速度ベクトルを示す。噴射弁が異なるため単純な比較はできないが、まず  $20\mu\text{m}$  クラスでは非燃焼場で存在した負の軸方向速度が存在しなくなっている。この理由として、燃焼場では粒径は蒸発-焼過程により変化していくため、 $20\mu\text{m}$  として計測された液滴も噴射弁直後ではもっと大きな粒径を持っており、大きな慣性力を持って噴霧された可能性が考えられる。また液滴が火炎を通過することによる膨張により軸方向へ加速しているためだとも考えられる。しかし、 $z=20\text{mm}$  以降の下流では噴霧軸方向へのベクトルが見られ、液滴は再循環流れに追随していると考えられる。これらのことから火炎の連続的な着火源となっているのは、再循環流れに乗って噴射弁近傍へ戻ってくる高温の液滴ではなく、既に燃えた燃料の燃焼ガスあるいは燃料蒸気であると推測される。次に  $30\mu\text{m}$  クラスではその液滴数が極端に減っており、最も微粒化の悪い霧化空気差圧 2% でもその数は非常に少ない。これは液滴の蒸発によるものであると考えられる。また、噴霧軸付近では内側へ偏向するベクトルは見られるものの、その成分は  $20\mu\text{m}$  と比較して非常に小さくなっている。 $40\mu\text{m}$  クラスはさらに液滴数が少なく分布が荒れた形状になっている。またベクトルも噴霧軸付近で不自然なものとなっているところがあり、データの信頼性に注意が必要である。全体的な傾向として霧化空気差圧が大きいほど、あるいは粒径クラスが大きいほど液滴数のピーク位置は下流に移動する傾向があり、このあたりは非燃焼と共通の傾向と言える。

### 5.2.5 液滴の挙動の AFR 及び霧化空気差圧への依存性

図 5-2-7~図 5-2-9 に  $z=9, 21, 30\text{mm}$  の位置において AFR をパラメータにとった粒径クラス別の液滴数, 軸方向速度, 半径方向速度の分布を示す。なお, データ整理の方法は非燃焼場での方法と同じである。

まず, 図 5-2-7 から, 上流では AFR が小さくなると液滴が内側で相対的わずかに多くなることが分かる。これは  $20, 30\mu\text{m}$  に共通の傾向である。しかし, 下流の  $z=30\text{mm}$  ではそのような傾向は見られず, 分散も小さくなっている。

図 5-2-8 及び図 5-2-9 の軸方向速度, 半径方向速度に関しては AFR の依存性は小さい。しかしわずかではあるが, AFR15 で軸方向速度が大きい傾向にある。

次に図 5-2-10~図 5-2-12 に  $z=9, 21, 30\text{mm}$  の位置において霧化空気差圧をパラメータにとった粒径クラス別の液滴数, 軸方向速度, 半径方向速度の分布を示す。まず,  $z=9, 21\text{mm}$  の上流では霧化空気差圧が増大すると相対的に噴霧外側の液滴数が増えることが分かる。これは非燃焼場と同様の傾向であり, 前述のようにストークス数の概念を用いて理解できると考えられる。また下流では霧化空気差圧が小さいほど分散が大きいが, これは霧化空気差圧が大きい場合液滴は噴射弁から直線的に飛行し, 形成されている火炎に進入するため広がらないからであると考えられる。軸方向速度と半径方向速度は霧化空気差圧が増大すると相対的に大きくなる傾向にある。これは燃焼負荷の増大により燃料蒸気の膨張が著しくなるためであると考えられる。

次に霧化空気差圧を一定(4%)とし, AFR と粒径をパラメータとした液滴数分布を図 5-2-13 に示す。図から AFR によらず大きな液滴ほど相対的に噴霧内側に多く存在することが分かる。これは先述の SMD の分布とも一致している。下流の  $z=30\text{mm}$  でも大きな液滴が噴霧内側に存在しているのは, 燃え残っただけでなく, 蒸発による粒径の減少もあまりみられていないということであり, 良好

な燃焼特性にとって好ましくない結果となった。

### 5.2.6 20 $\mu\text{m}$ クラスの液滴の周方向速度分布

図 5-2-14 に 20 $\mu\text{m}$  クラスの液滴の  $z=9, 21\text{mm}$  における周方向速度の半径方向分布を示す。前述のように 30 $\mu\text{m}$  クラスになると極端に液滴数が減少するため、現段階では 20 $\mu\text{m}$  クラスについてのみしか結果は得られていない。

$Z=9\text{mm}$  の噴霧内側領域ではインナスワラとアウトスワラの影響を受けて液滴の運動は複雑になっており、傾向は見出せない。しかし、 $r=6\sim 9\text{mm}$  の領域では周方向速度が 0 に近い値でなだらかになっておりこの領域でインナスワラとアウトスワラの旋回が拮抗していると考えられる。それよりも噴霧外側ではアウトスワラの影響が支配的となり急激に大きな負の値を持つようになっている。 $Z=21\text{mm}$  ではほとんど周方向速度を持っておらず、旋回成分は減衰していると考えられる。

## 第 6 章 結言

本研究ではステレオレーザ干渉画像法を非燃焼場および燃焼場の噴霧計測に適用し、以下の結論を得た。

非燃焼場において

- ( ) 燃料液滴の挙動はその粒径により大きく異なり、 $20\mu\text{m}$  クラスは再循環流れに追随するが  $30\mu\text{m}$  クラスは追随していない。
- ( ) インナスワラによる旋回の液滴の挙動への影響は噴射弁のごく近傍に限られ、下流及び噴霧外側ではアウトスワラによる旋回の影響が支配的である。

燃焼場において

- ( ) 今までなされていなかったステレオレーザ干渉画像法による燃焼場における噴霧計測を行い、計測が可能であることを実証した。
- ( ) AFRの変化による液滴数挙動への影響は非常に小さい。
- ( ) 大きな液滴は噴霧内側に多く存在し、この領域における SMD を高めている。

## 謝辞

本研究は，独立行政法人宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency）のご支援のもと成しえたものであり，研究を行うにあたり多くの方々から多大なご協力を頂いたことに，この場をお借りして感謝を述べます．

まず，林茂チーム長（環境適応エンジンチーム）には2年間 JAXA で研究を行わせていただき，終始ご指導賜りました．林先生とのディスカッションはもちろんのこと，何気ないお話の中にも色々な深い事柄や考えさせられる内容が含まれていて，私にとって大変貴重な時間でありました．ここに深く感謝致します．

松浦一哲主任研究員は右も左も分からない私を親身になって本気で指導して下さいました．私よりも遥かにお忙しい身でありながら，夜遅くまで実験のサポートやディスカッションを行って頂き非常に感謝しております．松浦様なくしては私の研究は到底成しえなかったことと思います．研究に対する取り組み方の姿勢はもちろんのこと，就職してからのことも案じて頂いたこと，深く御礼申し上げます．できの悪い私ではありましたが，松浦様から頂いた助言を活かして頑張っていきたいと思います．

また，立花繁主任研究員，吉田征二研究員には本研究で使用した光学計測に関する装置の多くを快く貸して頂きました．お忙しいところ大変迷惑だったか



と思いますが、おかげで本研究を行うことができ、深く感謝致しております。  
山田秀志主幹研究員、黒澤要二主任研究員をはじめ、JAXA で研究を行うにあたって本当に多くの方のお世話になりました。お世話になった全ての方にここに深く感謝の意を表します。

レーザ干渉画像法による実験においては、日本カノマックス株式会社様の多大なお力添えがありました。ILIDS システムを大変な長期間にわたってお貸しいただいたばかりでなく、計測法に関するご質問にも親切に対応して頂き、貴重なアドバイスを授けてくださったことに深く感謝の意を表します。

また、JAXA で共に研究をおこなった他大学の学生の皆様にも大変お世話になりました。東京電機大学の丸永拓哉氏には干渉画像法の実験方法やデータと取り扱いについて教えて頂きました。ご就職された後も私の相談に乗って頂いたこと、深く感謝しております。東京大学の中島良文氏、早稲田大学の西本佳祐氏には研究面だけでなく、就職活動の相談に乗って頂いたこともありました。おかげで充実した研究生活を送ることができたことを非常に感謝致しております。早稲田大学の鮎田篤氏、鈴木一弘氏には一年間ではありましたが、実験のサポートやデータの処理などに尽力頂いたことに感謝致します。4年生でありながら2人の頑張りには目を見張るものがありました。これからもっともっと活躍していくことと思います。同学年でありました東京大学の平松昌人氏、法政大学の鈴木俊介氏、須田充氏には大変なご迷惑をお掛けしてきたことをお詫びするとともに、研究から生活まで多大な力になって頂いたことに深く感謝致します。彼らのような素晴らしい方たちと友人となり、共に研究に励めたことを幸せに思います。私の後輩である仁田耕造氏にはほとんど何も指導すること

ができず残念に思います。ひとえに私の力不足であり、申し訳なく思っております。今後存分に自分の力を発揮して研究に打ち込まれることを期待しています。

大学とは全く異なる環境の中で多くの時間を過ごしたこの2年間は私にとってかけがえのない貴重なものとなりました。JAXA でお力添えを頂いた全ての方々に改めて感謝の意を述べるとともに、みなさまの益々のご活躍を心よりお祈りしております。

## 参考文献

- [1] 日本航空機開発協会, 2007, 平成 18 年度版民間航空機関連データ集, <http://www.jadc.or.jp/jadccdata.htm>
- [2] Yamada, H., Hayashi, S. and Makida, M., 1999, Application of Short-Flame/Quick-Quench Combustion Concept to Ultra-Low NO<sub>x</sub> Gas Turbine Combustor, Proceedings of the International Gas Turbine Congress, pp.741-746
- [3] Lefebvre, A. H., 1995, The Role of Fuel Preparation in Low-Emission Combustion, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power Vol.117, pp.617-654
- [4] 佐藤幸徳, 藤秀実, 渡辺猛, 新岡嵩, 液膜式気流微粒化燃料噴射弁の噴霧特性に関する実験的研究, 日本ガスタービン学会誌 Vol.29 No.3 2001.5, pp61-69
- [5] Hadeif, R. and Lenze, B., 2005, Measurements of droplet characteristics in a swirl-stabilized spray flame, Experimental Thermal and Fluid Science 30, pp.117-130
- [6] Matuura.K, Kurosawa.Y, Effect of Swirl Combustion on Spray Dispersion Characteristics of a Multi-Swirl Aiblast Atomizer, Proceedings of the 20<sup>th</sup> ILASS-Europe Meeting 2005
- [7] 丸永拓哉, 岩本順二郎, 牧田光正, 松浦一哲, 2006, 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
- [8] Lefebvre, A. H., 1999, Gas Turbine Combustion 2nd edition, **Talor&Francis**
- [9] Lefebvre, A. H., 1989, **Atomization and Sprays, Hemisphere Pub. Corp.**
- [10] 日本液体微粒化学会編, アトマイゼーション・テクノロジー, 森北出版 (2001)
- [11] Simmons, H. C., Conrad, R. R. and Orav, M., 1976, Air-Atomizing Fuel Nozzle, United States Patent 3980233
- [12] Aigner, M. and Wittig, S., 1988, Swirl and Counterswirl Effects in Prefilming Airblast Atomizers, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol.110, pp.105-110
- [13] Merkle, K., Haessler, H., Büchner, H. and Zarzalis, N., 2002, Effect of Co- and Counter-Swirl on the Isothermal Flow and Mixture-Field of an Airblast Atomizer Nozzle, In Proceedings of the 5th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurement, pp.535-544

- [14] Großschmidt, D., Merkle, K., Büchner, H. and Zarzalis, N., 2003, Influence of Co and Counter Swirl on Lean Stability Limits of an Airblast Nozzle, ASME Turbo Expo - Power for Land, Sea and Air, pp.16-19
- [15] M. ラッフエル, C. E. ヴィラート, J. コンペンハンス 著, 岡本孝司, 川橋正昭, 西尾茂 訳, 2000, PIVの基礎と応用 - 粒子画像流速測定法, シュプリンガー・フェアラーク東京
- [16] H.-E.Albrecht, M.Borys, N.Damaschke, C.Tropea, Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Technique, Springer
- [17] Glover, A. R., Skippon, S. M. and Boyle, R. D., 1995, Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems, Applied Optics Vol.34 No. 36, pp.8409-8421
- [18] G.KÖNIG, K.ANDERS and A.F.ROHN, A NEW LIGHT-SCATTERING TECHNIQUE TO MEASURE THE DIAMETER OF PERIODICALLY GENERATED MOVING DROPLETS, J.Aerosol Sci., Vol.17, No2, pp157-166, 1986
- [19] 川口達也, 小林俊弘, 前田昌信, 2002, レーザ干渉画像法による噴霧液滴・速度の面的同時計測の開発, 日本機械学会論文集 (B 編) 68 巻 666 号, pp.431-438
- [20] Maeda.M, Kawaguchi.T, Hishida.K, Novel interferometric measurement of size and velocity distribution of spherical particles in fluid flows, Meas.Sci.Technol.11(2000), L13-L18
- [21] Maeda.M, Aksaka.Y, Kawaguchi.T, Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray, Experimental in Fluids 33(2002), pp125-134
- [22] Takeuchi.G, Kawaguchi.T, Hishida.K, Maeda.M, Martin Sommerfeld, Spatial distributions of droplet size and velocity in air heated spray Measured by interferometric laser imaging technique
- [23] Matsuura, K., Zarogoulids, K., Hardalupas, Y., Taylor, A. M. K. P., Kawaguchi, T., Sugimoto, D. and Hishida, K., 2006, Simultaneous Planar Measurement of Size and Three-Component Velocity of Droplets in an Aero-Engine Airblast Fuel Spray by Stereoscopic Interferometric Laser Imaging Technique, Proceedings 10th ICLASS
- [24] Fujisawa.N, Hosokawa.A, Tomimatsu.S, Simultaneous measurement of droplet size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion, Meas.Sci.Technol.14(2003)1341-1349

## 圖題

Fig. 2-1-1 Airblast fuel atomizer(for cold flow).....	42
Fig. 2-1-2 Schematic drawing of airblast fuel atomizer.....	42
Fig. 2-2-1 Airblast fuel atomizer(for combustion flow).....	43
Fig. 2-2-2 Outer swirl vane.....	43
Fig. 2-2-3 Comparison of air mass flow rate for different pressure drop.....	44
Fig. 3-1-1 Block diagram of experimental apparatus.....	45
Fig. 3-1-2 Photograph of air chamber with spray.....	45
Fig. 3-2-1 <b>Block diagram of combustion experimental apparatus</b> .....	<b>46</b>
Fig. 3-2-2 square type combustion chamber for visualization.....	46
Fig. 4-1-1 Beam pass of external reflection and direct refraction.....	47
Fig. 4-1-2 Basic configuration of interferometric laser imaging technique.....	47
Fig. 4-2-1 Schematic drawing of optical compression technique.....	48
Fig. 4-2-2 Optical compression of fringe image.....	48
<b>Fig. 4-3-1 Experimental set up of interferometric laser imaging technique</b> .....	<b>49</b>
Fig. 4-4-1 Experimental set up of stereoscopic interferometric laser imaging for droplet sizing.....	49
Fig. 5-1-1 Spatial distribution of droplet number count at $\Delta p/p_t=2\%$ .....	50
Fig. 5-1-2 Spatial distribution of droplet number count at $\Delta p/p_t=4\%$ .....	50
Fig. 5-1-3 Spatial distribution of droplet number count at $\Delta p/p_t=5\%$ .....	51
Fig. 5-1-4 Spatial distribution of Sauter mean diameter at $\Delta p/p_t=2\%$ .....	52
Fig. 5-1-5 Spatial distribution of Sauter mean diameter at $\Delta p/p_t=4\%$ .....	52
Fig. 5-1-6 Spatial distribution of Sauter mean diameter at $\Delta p/p_t=5\%$ .....	53
Fig. 5-1-7 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=2\%$ .....	54
Fig. 5-1-8 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=4\%$ .....	54
Fig. 5-1-9 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=5\%$ .....	55
Fig. 5-1-10 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=2\%$ .....	56
Fig. 5-1-11 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=4\%$ .....	56
Fig. 5-1-12 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu\text{m}$ size class at $\Delta p/p_t=5\%$ .....	57

Fig. 5-1-13 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	58
Fig. 5-1-14 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	58
Fig. 5-1-15 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	59
Fig. 5-1-16 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	60
Fig. 5-1-17 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	60
Fig. 5-1-18 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	61
Fig. 5-1-19 Radial distribution of normalized droplet number count in each size class at $z=13.5$ , mm and $z=34.5$ mm.....	62
Fig. 5-1-20 Radial distribution of normalized droplet mean axial velocity in each size class at $z=13.5$ mm and $z=34.5$ mm.....	63
Fig. 5-1-21 Radial distribution of normalized droplet mean radial velocity in each size class at $z=13.5$ mm and $z=34.5$ mm.....	64
Fig. 5-1-22 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	65
Fig. 5-1-23 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	65
Fig. 5-1-24 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	66
Fig. 5-1-25 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 30 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	67
Fig. 5-1-26 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 30 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	67
Fig. 5-1-27 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 30 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	68
Fig. 5-1-28 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	69
Fig. 5-1-29 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	69
Fig. 5-1-30 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	70

Fig. 5-1-31 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	71
Fig. 5-1-32 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	71
Fig. 5-1-33 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 50 $\mu$ m size class at $\Delta p/p_i=5\%$ .....	72
Fig. 5-1-34 Radial distribution of normalized droplet mean circumferential velocity in each size class at $z=13.5\text{mm}$ and $z=34.5\text{mm}$ .....	73
Fig. 5-1-35 Size-velocity correlation of droplet at $\Delta p/p_i=2\%$ (left: $z=13.5\text{mm}$ , $r=6\text{mm}$ , right: $z=13.5\text{mm}$ , $r=24\text{mm}$ ).....	74
Fig. 5-1-36 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at $z=13.5\text{mm}$ and $r=6\text{mm}$ at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	75
Fig. 5-1-37 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at $z=13.5\text{mm}$ and $r=24\text{mm}$ at $\Delta p/p_i=2\%$ .....	75
Fig. 5-1-38 Size-velocity correlation of droplet at $\Delta p/p_i=4\%$ (left: $z=13.5\text{mm}$ , $r=6\text{mm}$ , right: $z=13.5\text{mm}$ , $r=24\text{mm}$ ).....	76
Fig. 5-1-39 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at $z=13.5\text{mm}$ and $r=6\text{mm}$ at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	77
Fig. 5-1-40 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at $z=13.5\text{mm}$ and $r=24\text{mm}$ at $\Delta p/p_i=4\%$ .....	77
Fig. 5-2-1 Comparison of fuel droplets distributions and flames for different <i>AFR</i> and pressure drop.....	78
Fig. 5-2-2 Spatial distribution of droplet number count.....	79
Fig. 5-2-3 Spatial distribution of Sauter mean diameter.....	80
Fig. 5-2-4 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20 $\mu$ m size class.....	81
Fig. 5-2-5 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu$ m size class.....	82
Fig. 5-2-6 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu$ m size class.....	83
Fig. 5-2-7 Radial distribution of normalized droplet number count in 20 and 30 $\mu$ m size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	84
Fig. 5-2-8 Radial distribution of normalized axial mean velocity in 20 and 30 $\mu$ m size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	85
Fig. 5-2-9 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30 $\mu$ m size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	86

Fig. 5-2-10 Radial distribution of normalized droplet number count in 20 and 30 $\mu\text{m}$ size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	87
Fig. 5-2-11 Radial distribution of normalized axial mean velocity in 20 and 30 $\mu\text{m}$ size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	88
Fig. 5-2-12 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30 $\mu\text{m}$ size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	89
Fig. 5-2-13 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30 $\mu\text{m}$ size class at $z=9, 21$ and $30\text{mm}$ .....	90
Fig. 5-2-14 Radial distribution of normalized droplet mean circumferential velocity in $20\mu\text{m}$ size class at $z=9$ and $21\text{mm}$ .....	91



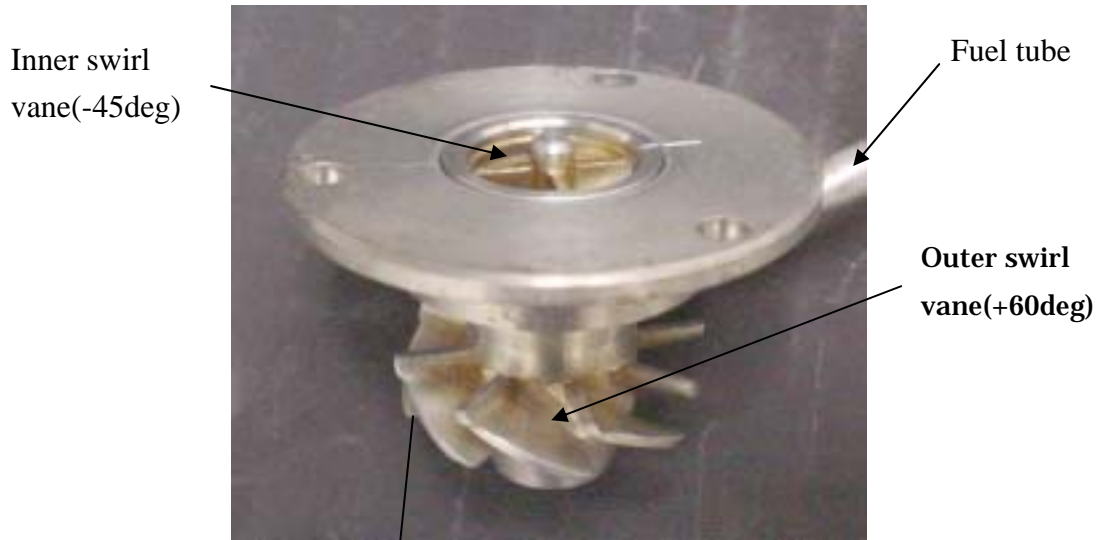


Fig. 2-1-1 Airblast fuel atomizer(for cold flow)

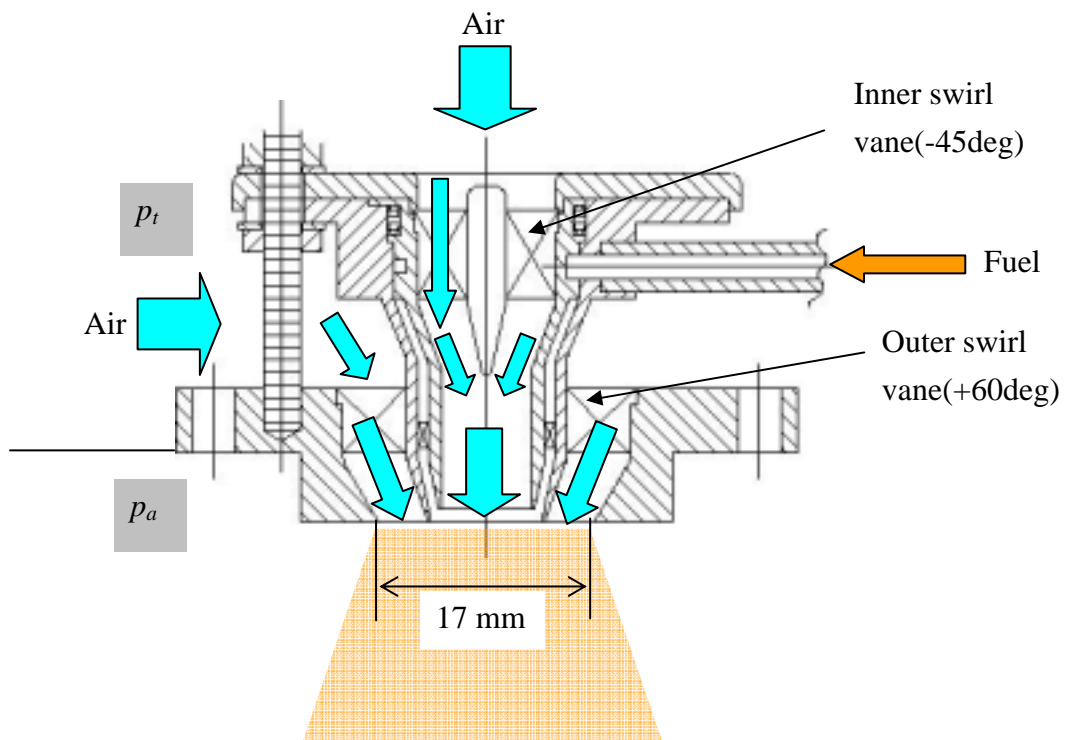


Fig. 2-1-2 Schematic drawing of airblast fuel atomizer .

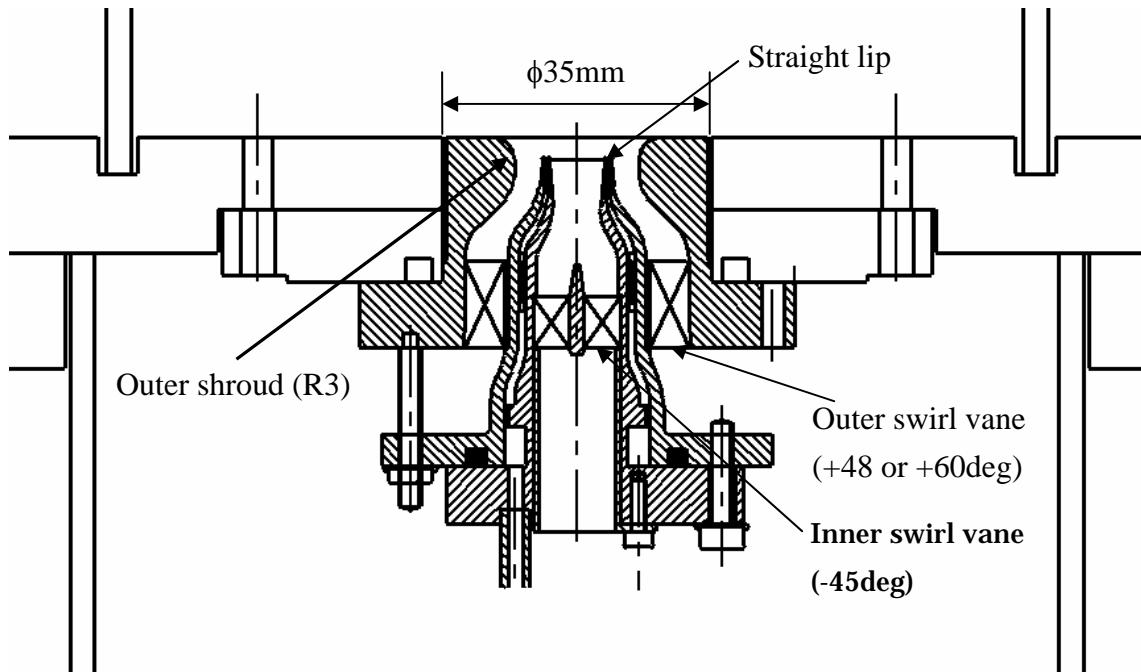
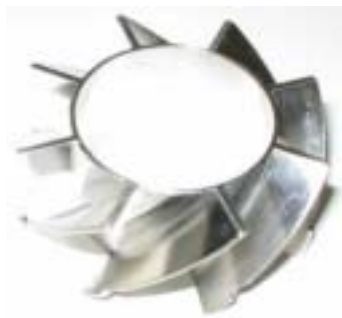


Fig. 2-2-1 Airblast fuel atomizer(for combustion flow)



旋回角 48deg



旋回角 60deg

Fig. 2-2-2 Outer swirl vane

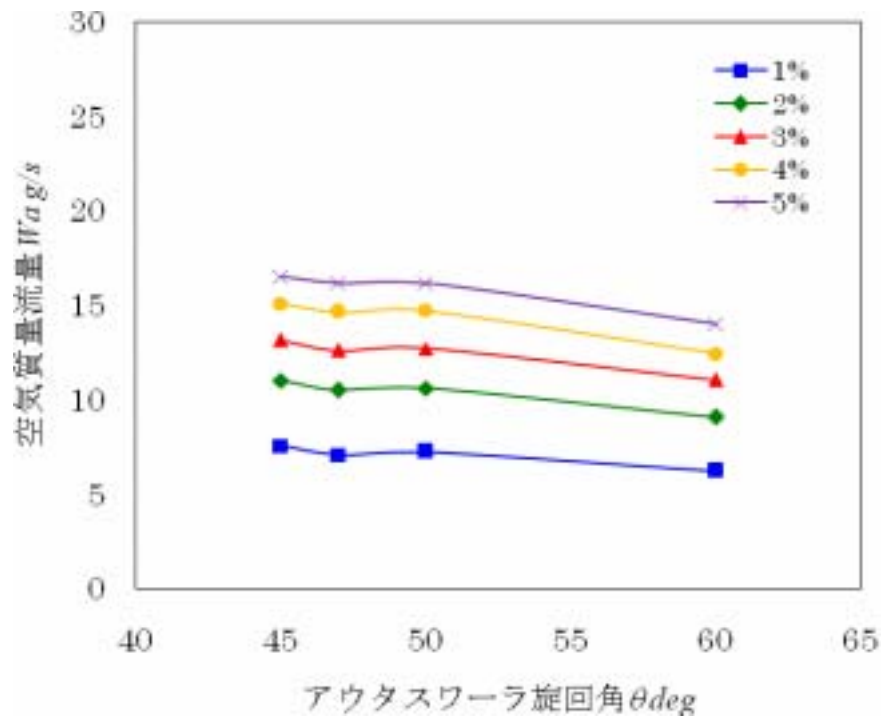


Fig. 2-2-3 Comparison of air mass flow rate for different pressure drop

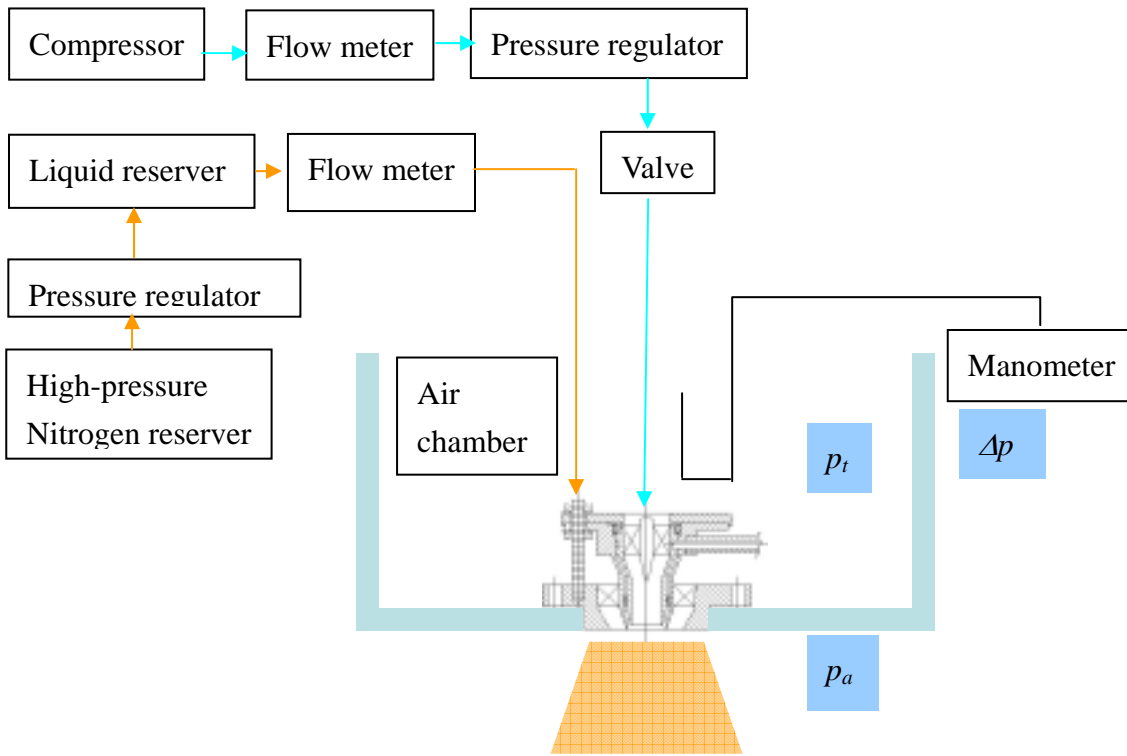


Fig. 3-1-1 Block diagram of experimental apparatus



Fig. 3-1-2 Photograph of air chamber with spray

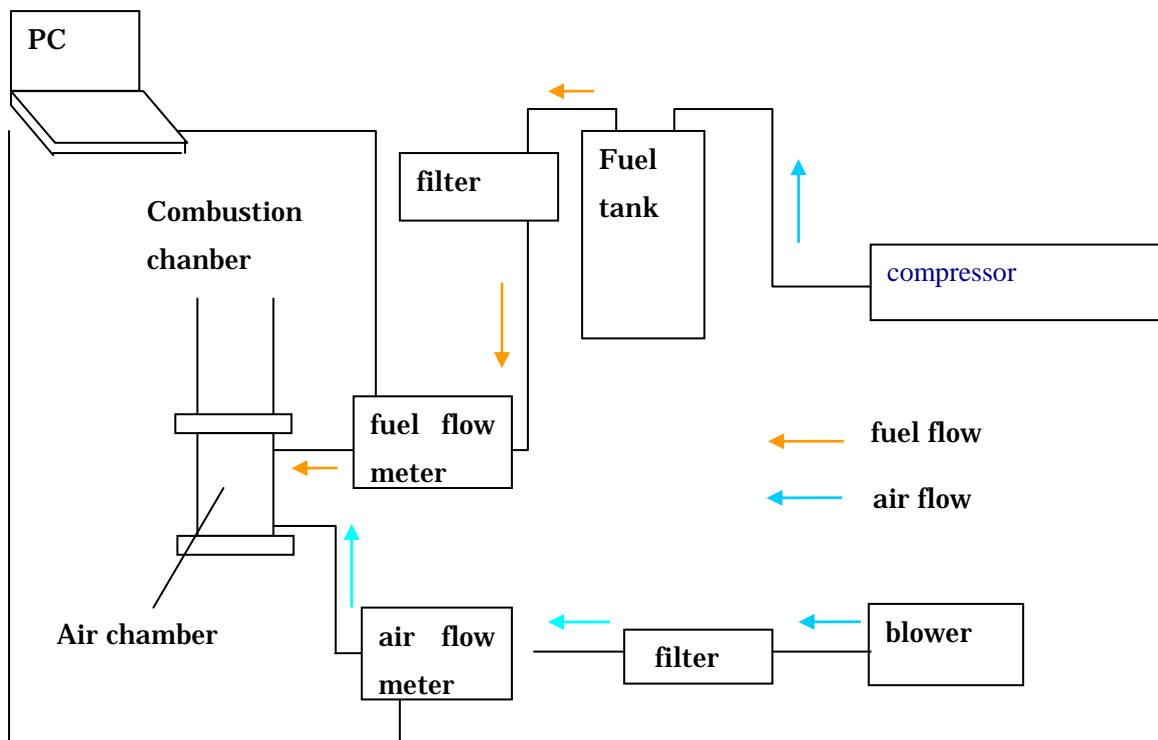


Fig. 3-2-1 Block diagram of combustion experimental apparatus



Fig. 3-2-2 square type combustion chamber for visualization

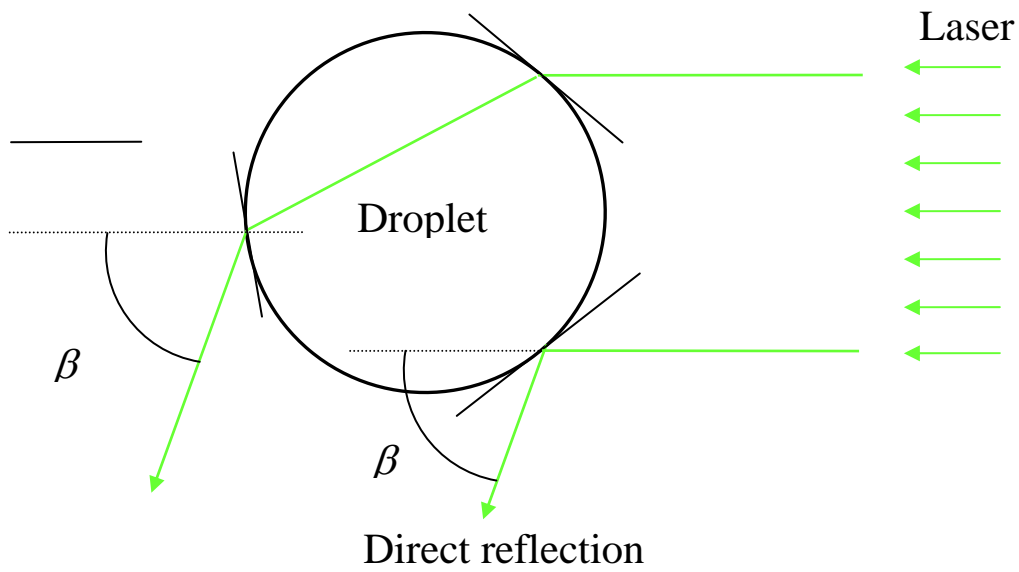


Fig. 4-1-1 Beam pass of external reflection and direct refraction

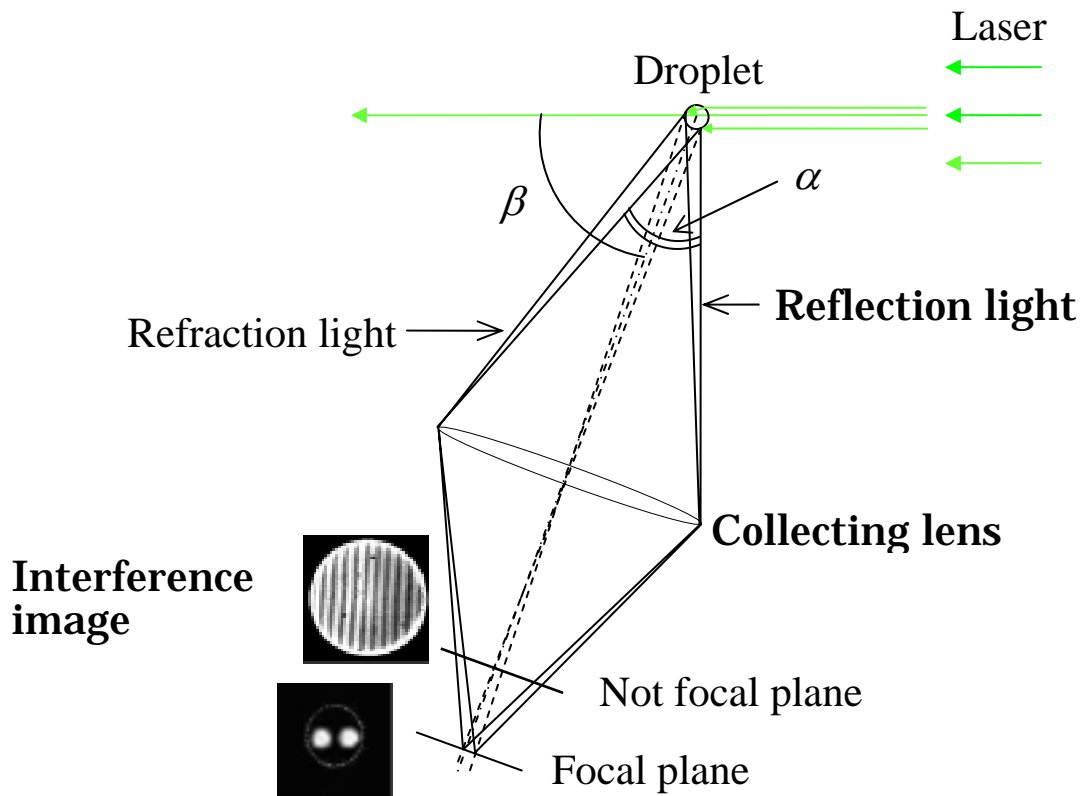


Fig. 4-1-2 Basic configuration of interferometric laser imaging technique

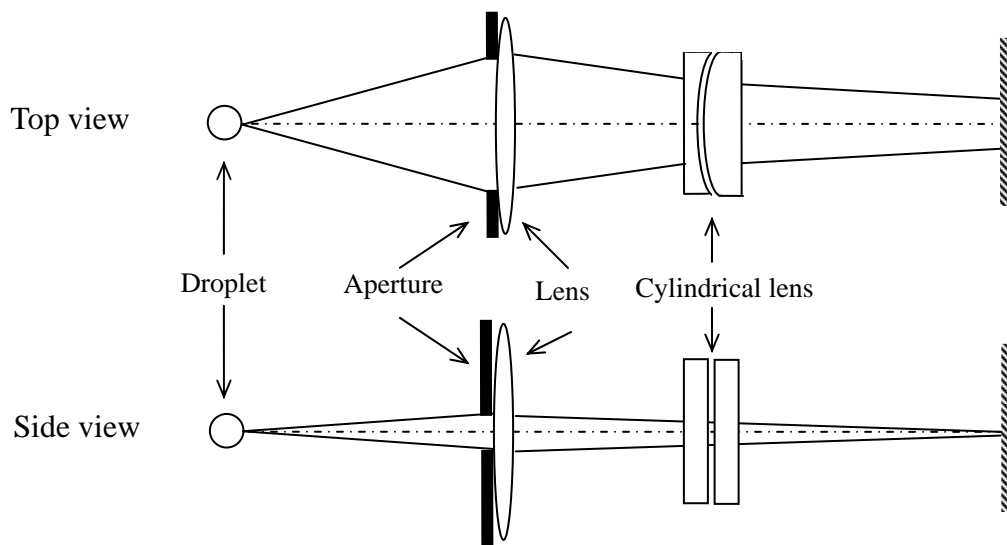


Fig. 4-2-1 Schematic drawing of optical compression technique

Optical compression  
by Maeda(2000)

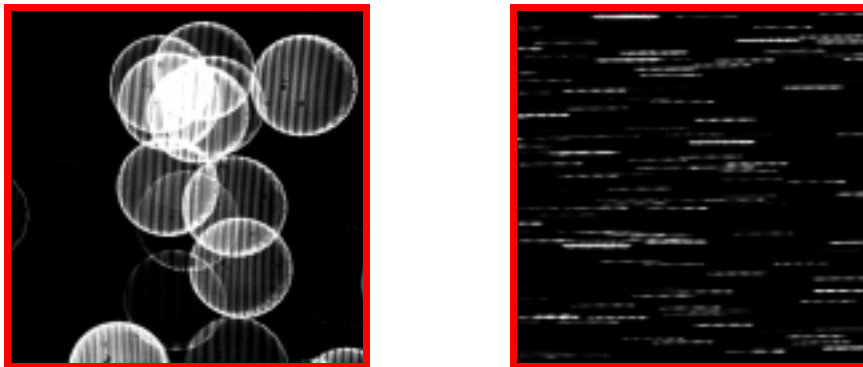


Fig. 4-2-2 Optical compression of fringe image

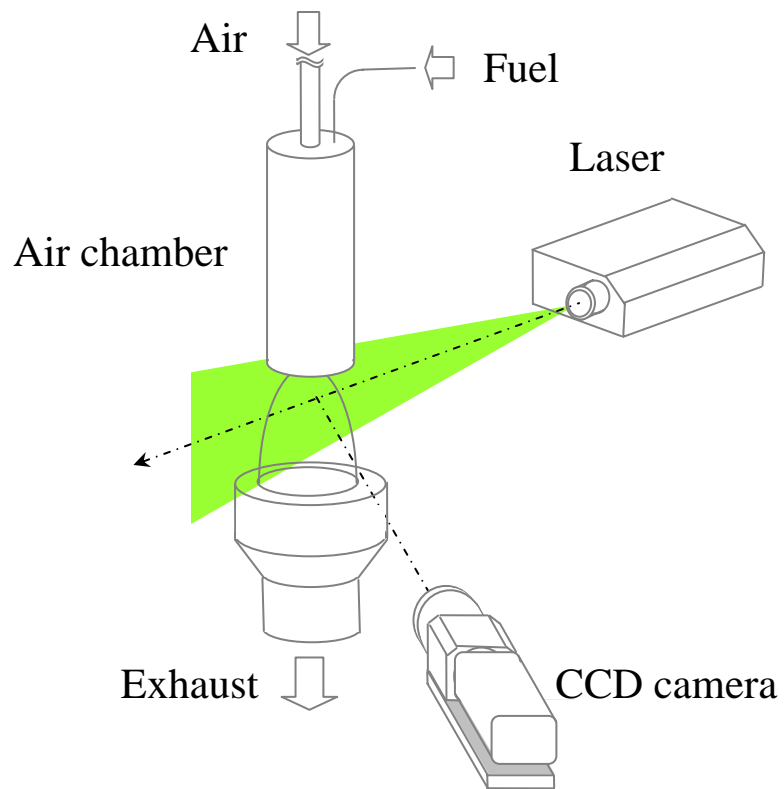


Fig. 4-3-1 Experimental set up of interferometric laser imaging technique

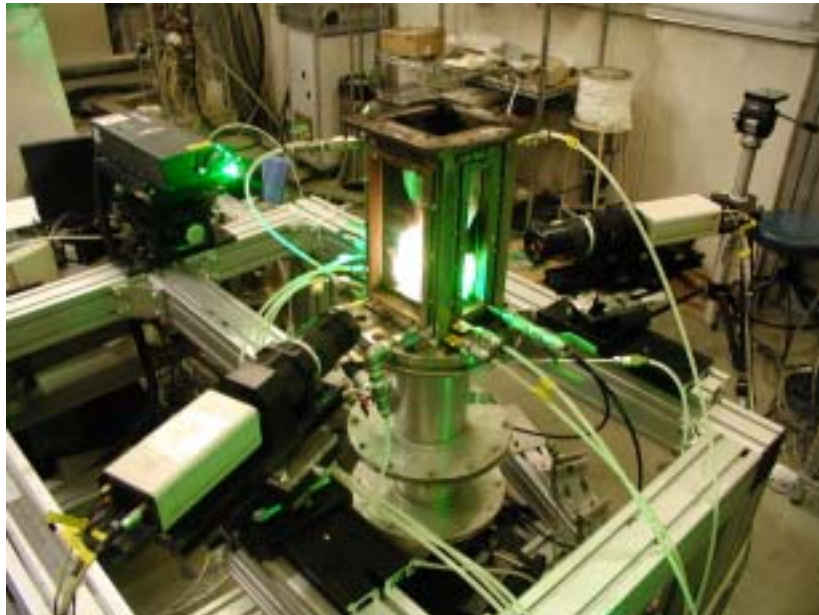


Fig. 4-4-1 Experimental set up of stereoscopic interferometric laser imaging for droplet sizing



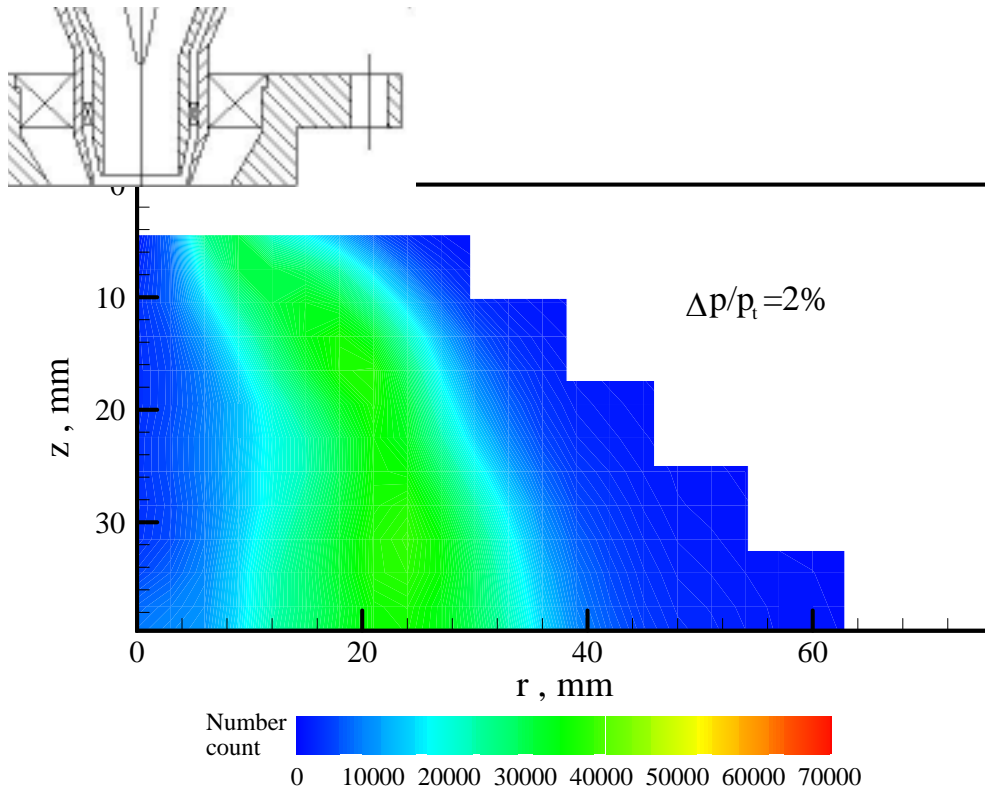


Fig. 5-1-1 Spatial distribution of droplet number count at  $\Delta p/p_t = 2\%$

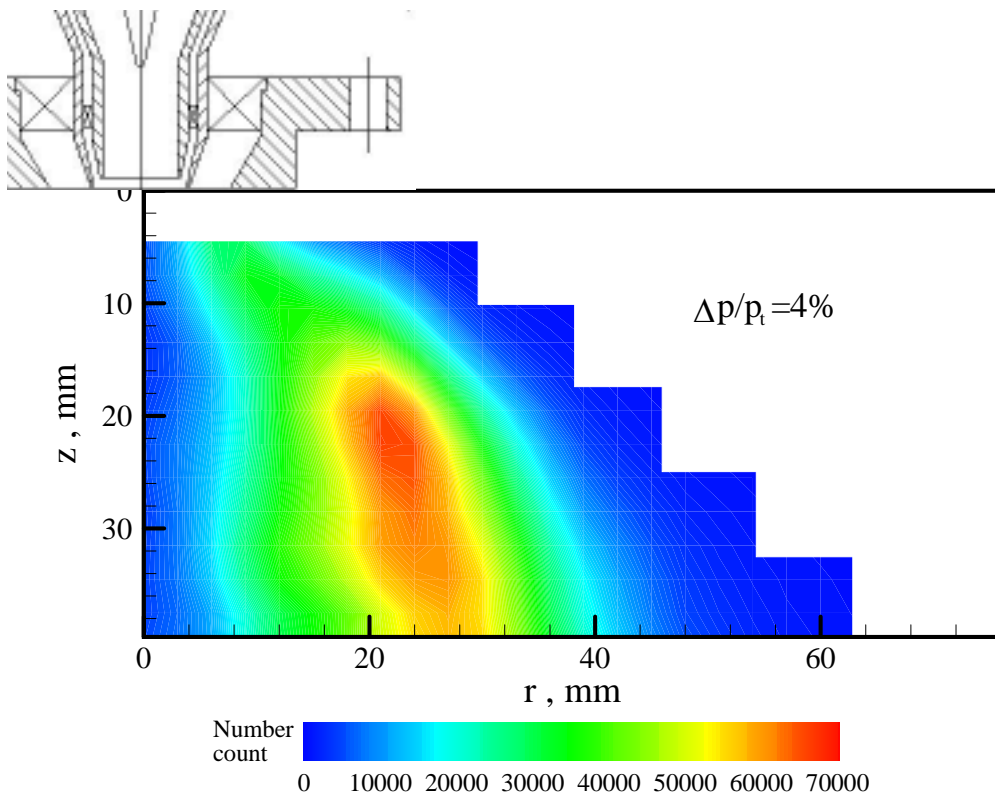


Fig. 5-1-2 Spatial distribution of droplet number count at  $\Delta p/p_t = 4\%$

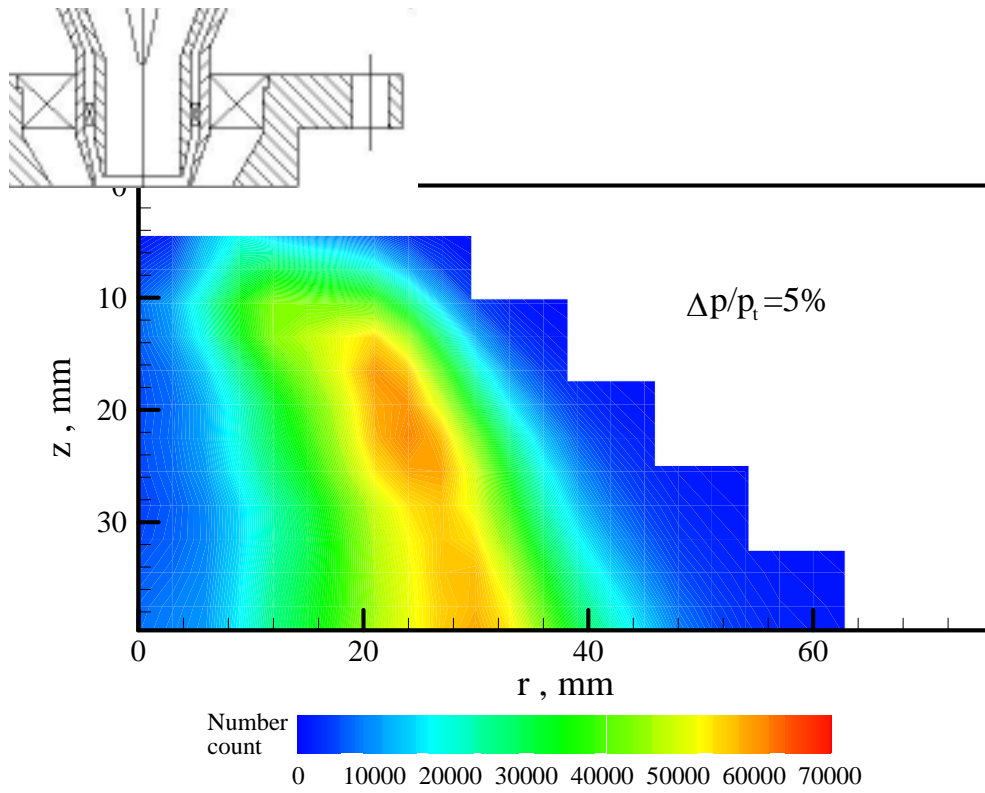


Fig. 5-1-3 Spatial distribution of droplet number count at  $\Delta p/p_t=5\%$

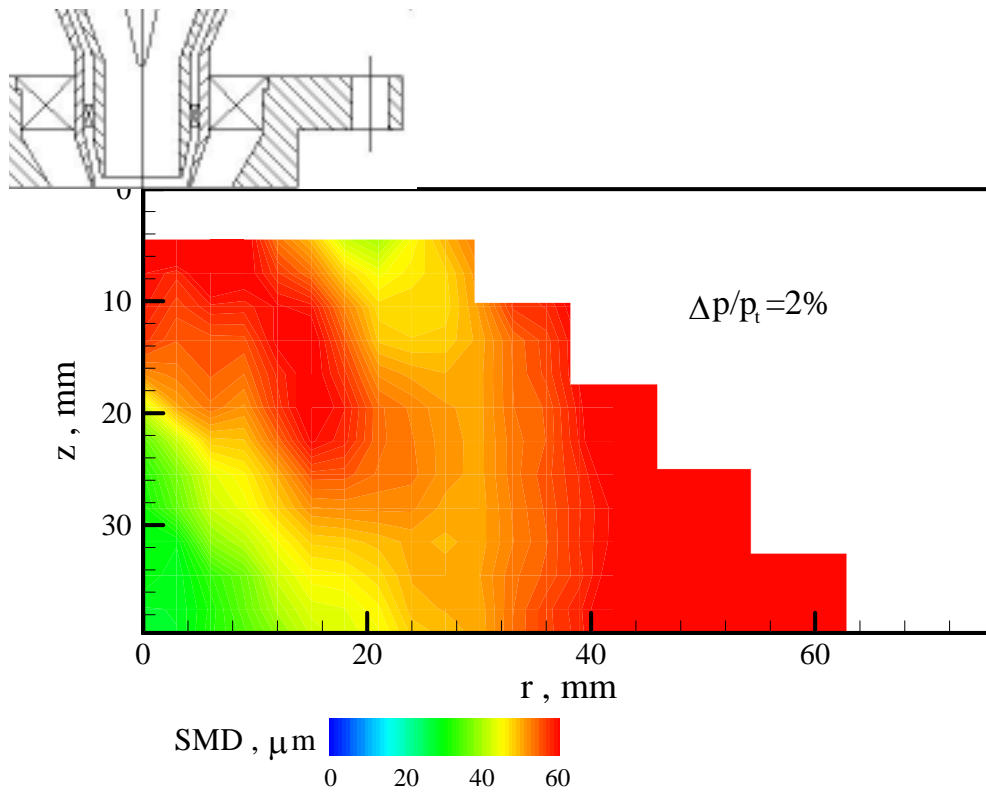


Fig. 5-1-4 Spatial distribution of Sauter mean diameter at  $\Delta p/p_t = 2\%$

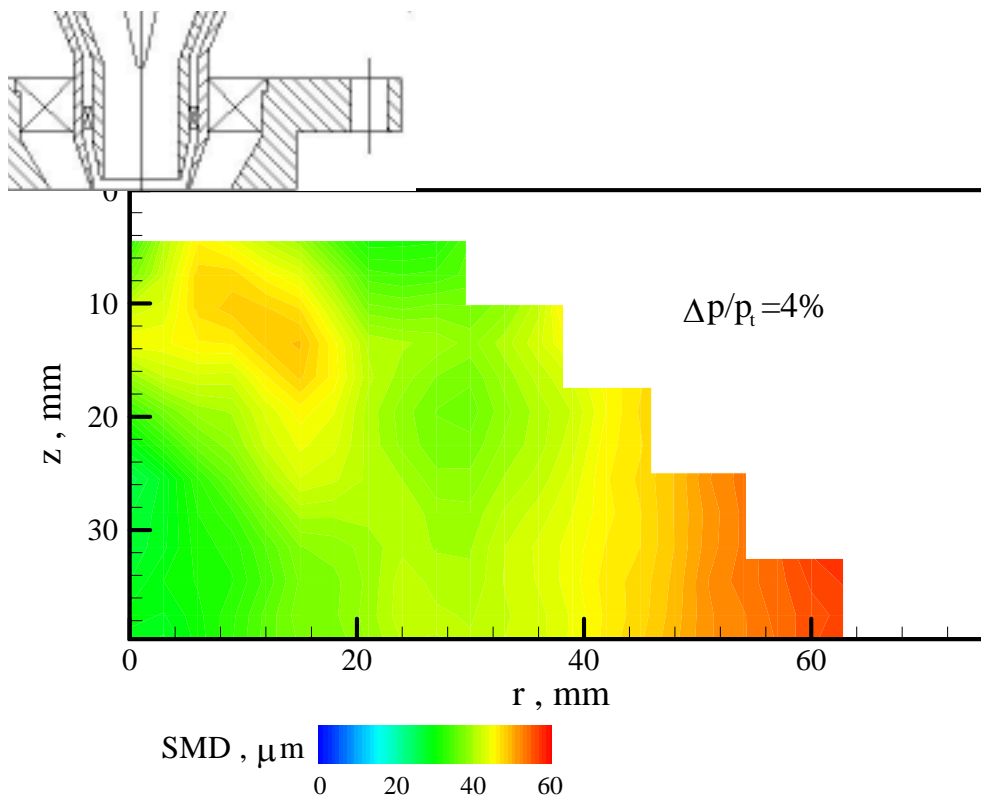


Fig. 5-1-5 Spatial distribution of Sauter mean diameter at  $\Delta p/p_t = 4\%$

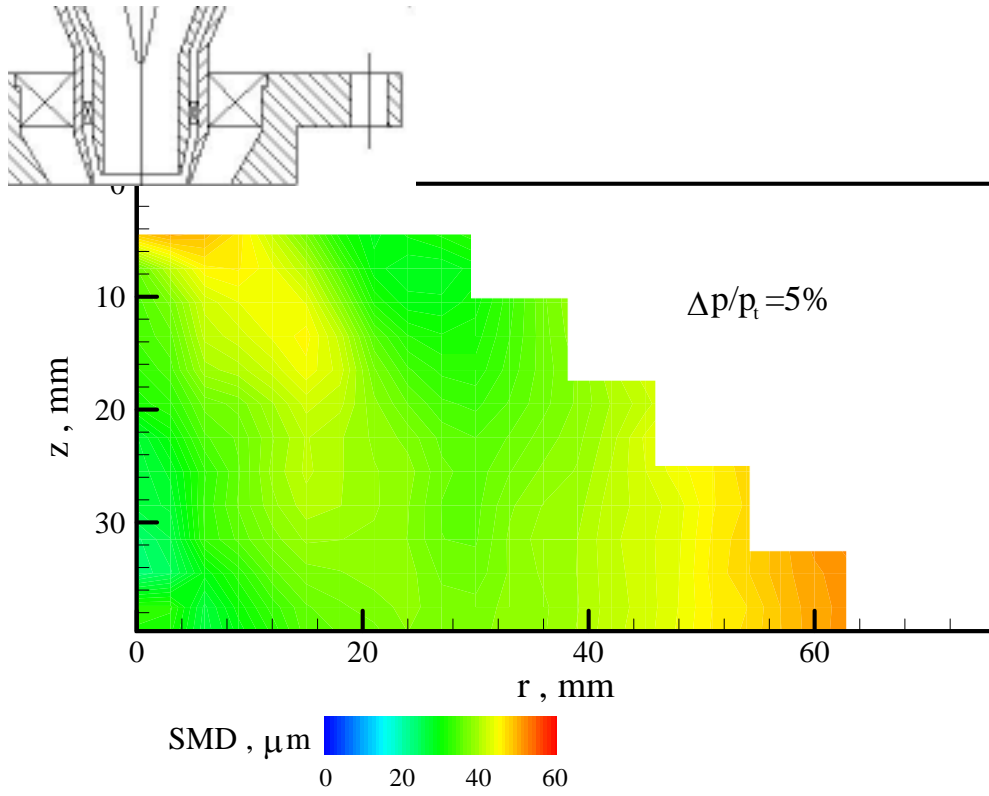


Fig. 5-1-6 Spatial distribution of Sauter mean diameter at  $\Delta p/p_t=5\%$

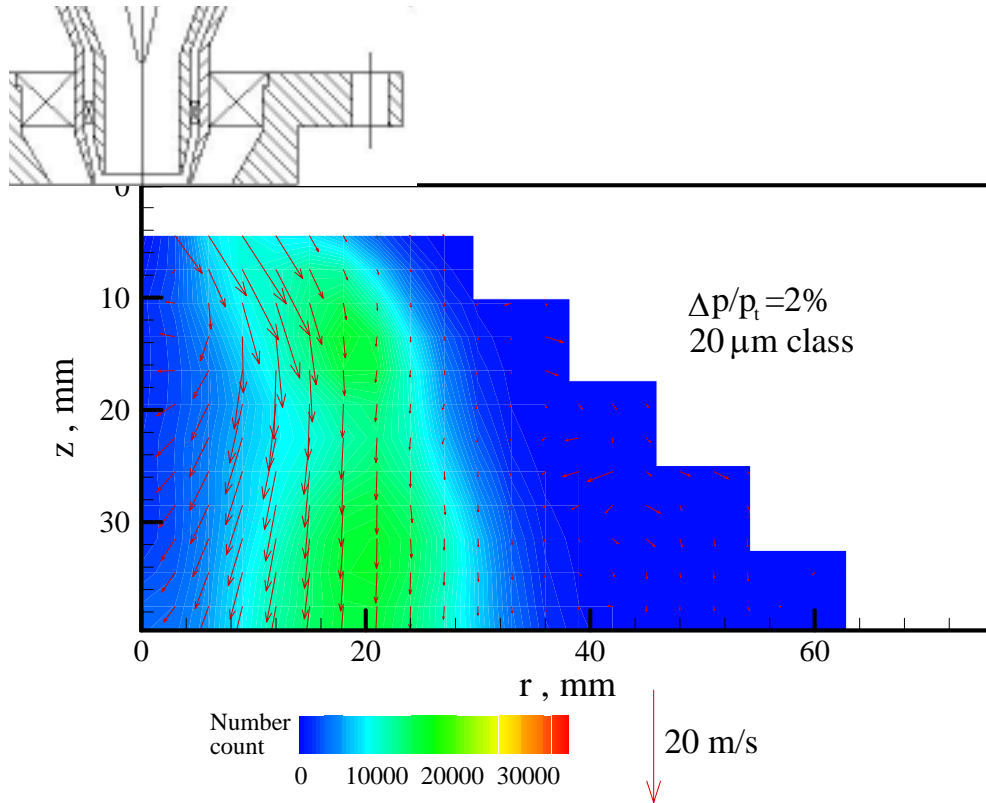


Fig. 5-1-7 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20μm size class at  $\Delta p/p_t=2\%$

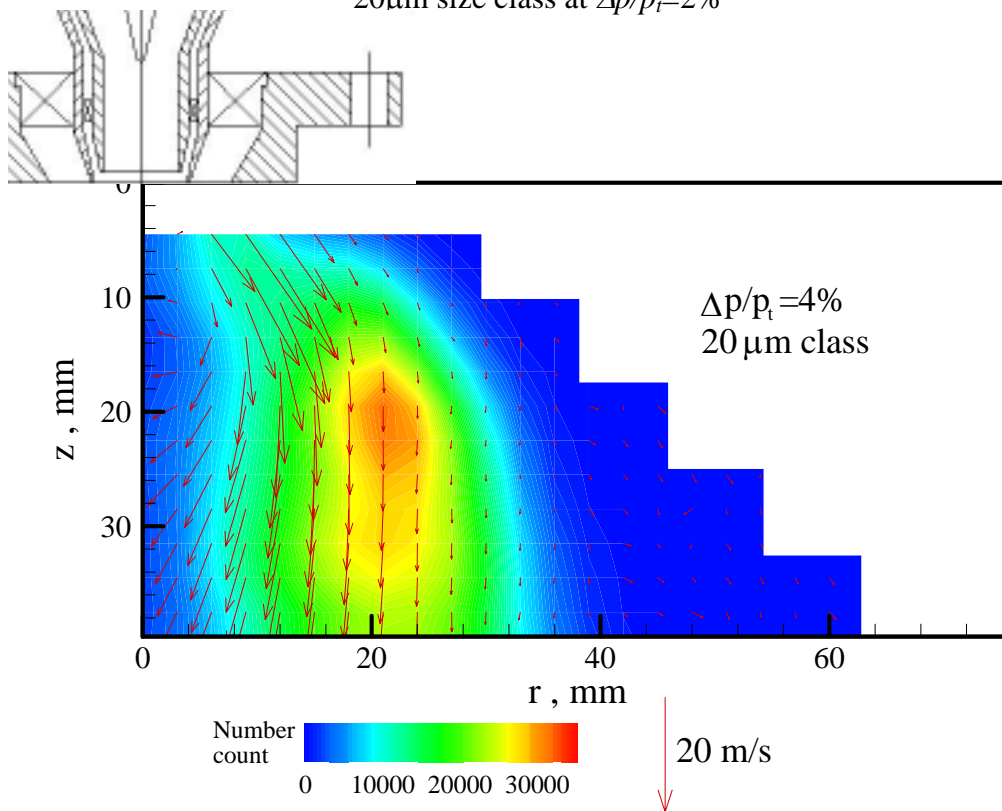


Fig. 5-1-8 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20μm size class at  $\Delta p/p_t=4\%$

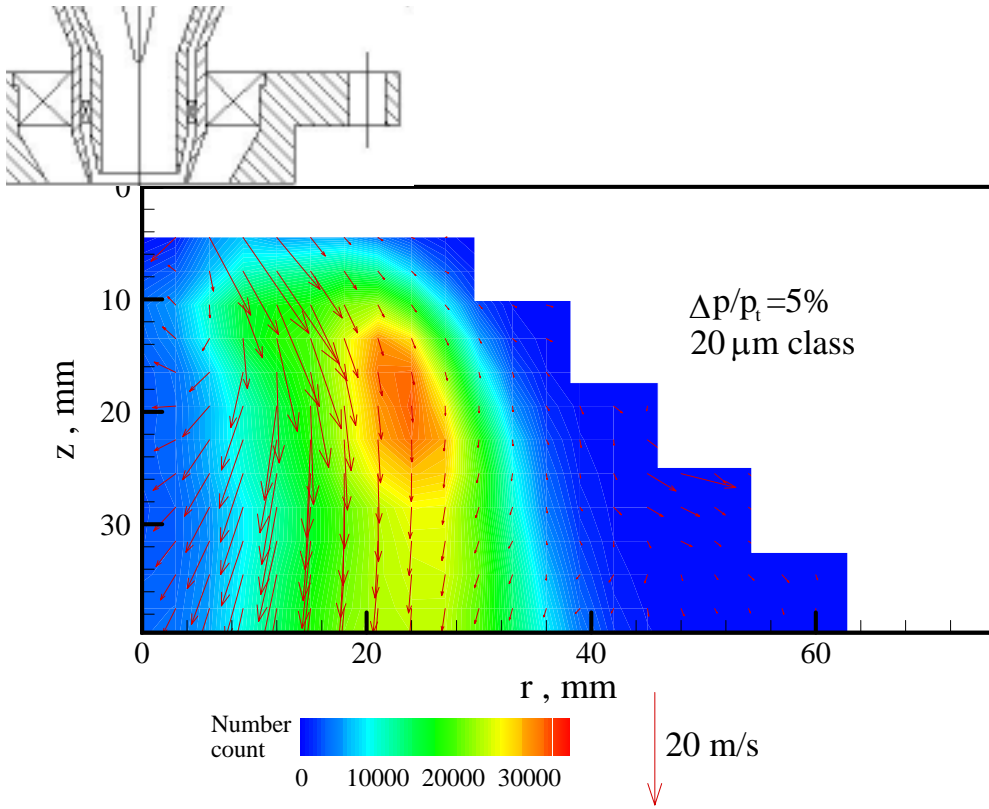


Fig. 5-1-9 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20μm size class at  $\Delta p/p_t=5\%$

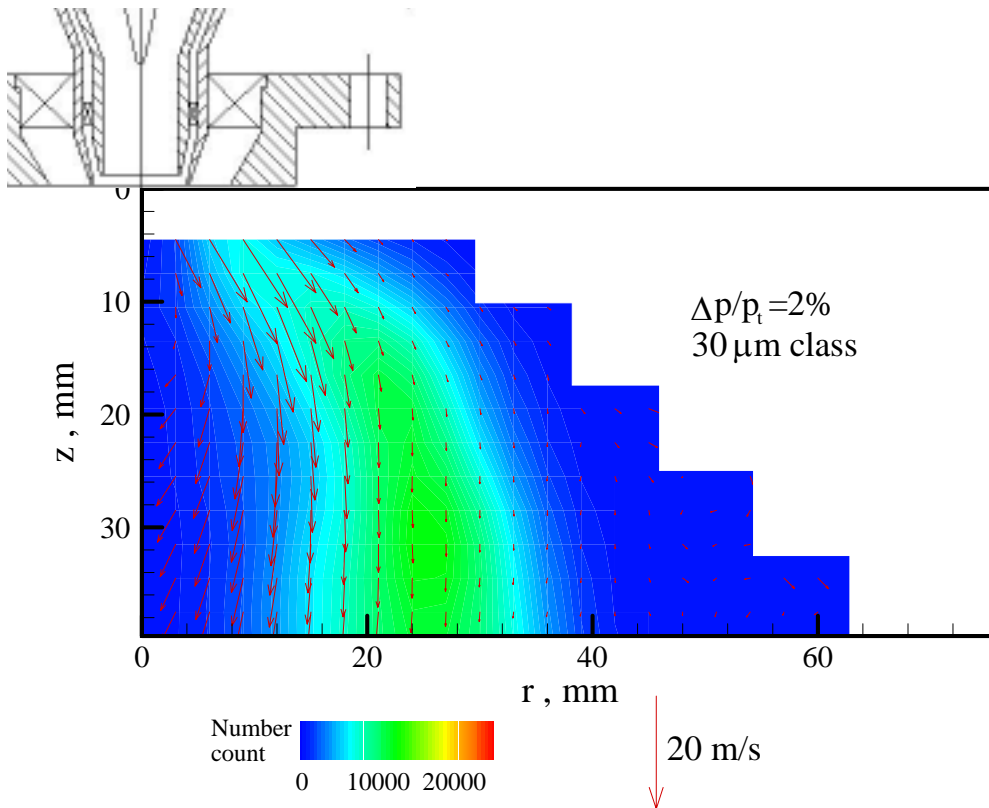


Fig. 5-1-10 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 μm size class at  $\Delta p/p_t = 2\%$

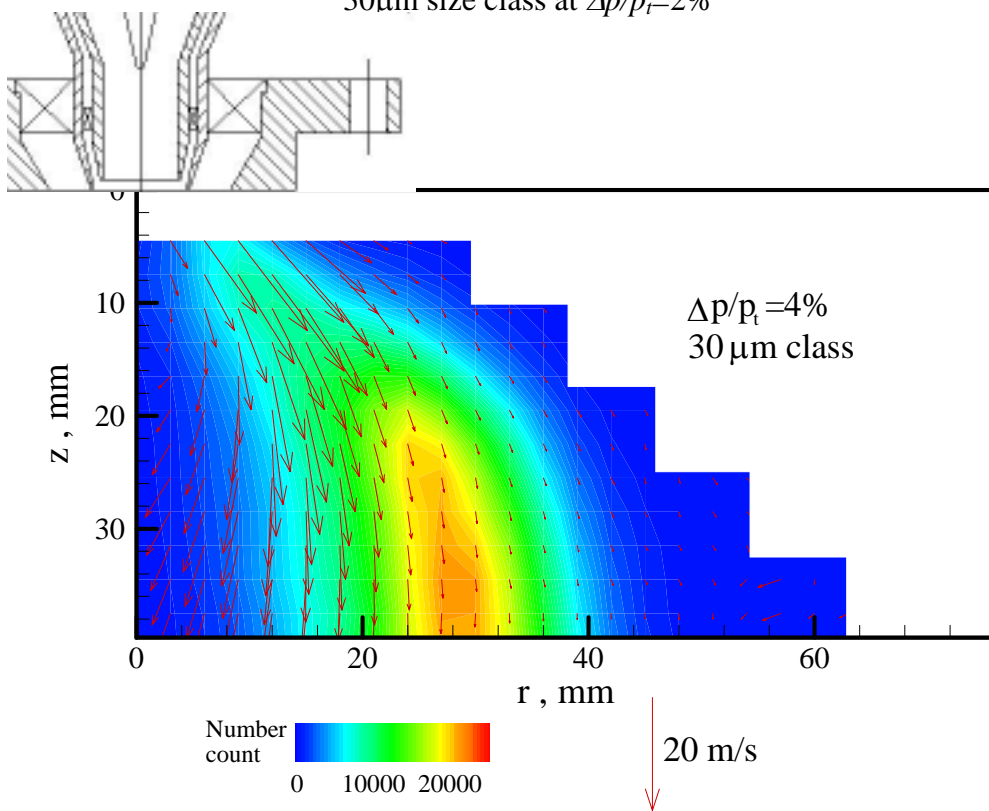


Fig. 5-1-11 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 μm size class at  $\Delta p/p_t = 4\%$

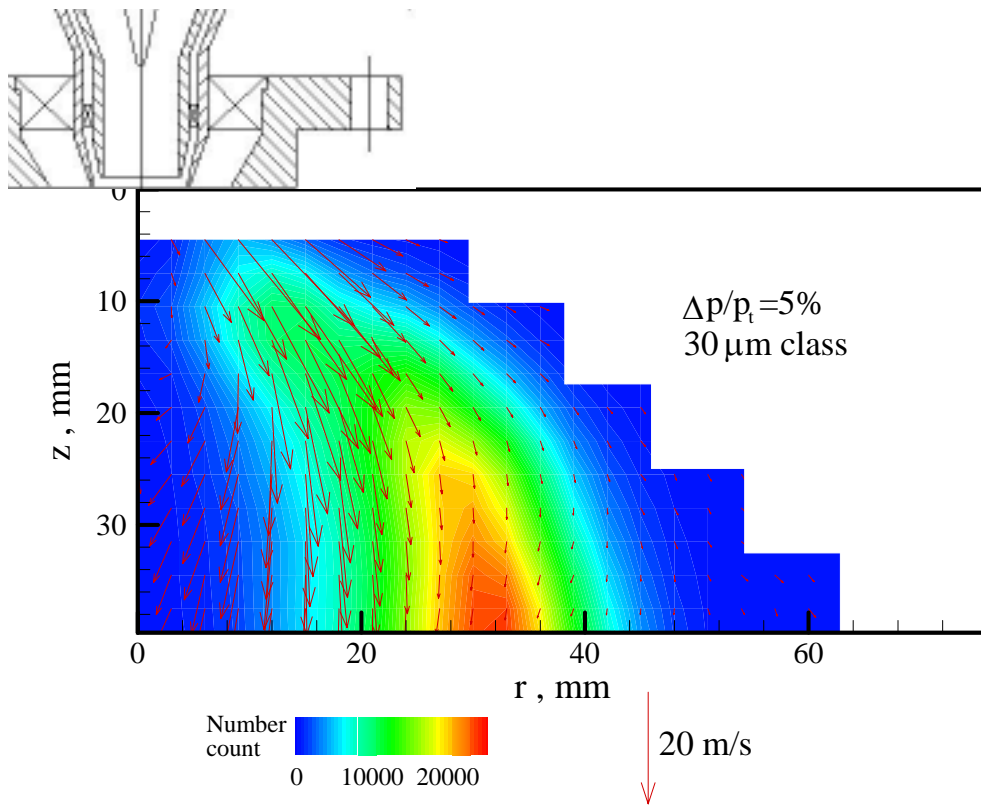


Fig. 5-1-12 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=5\%$



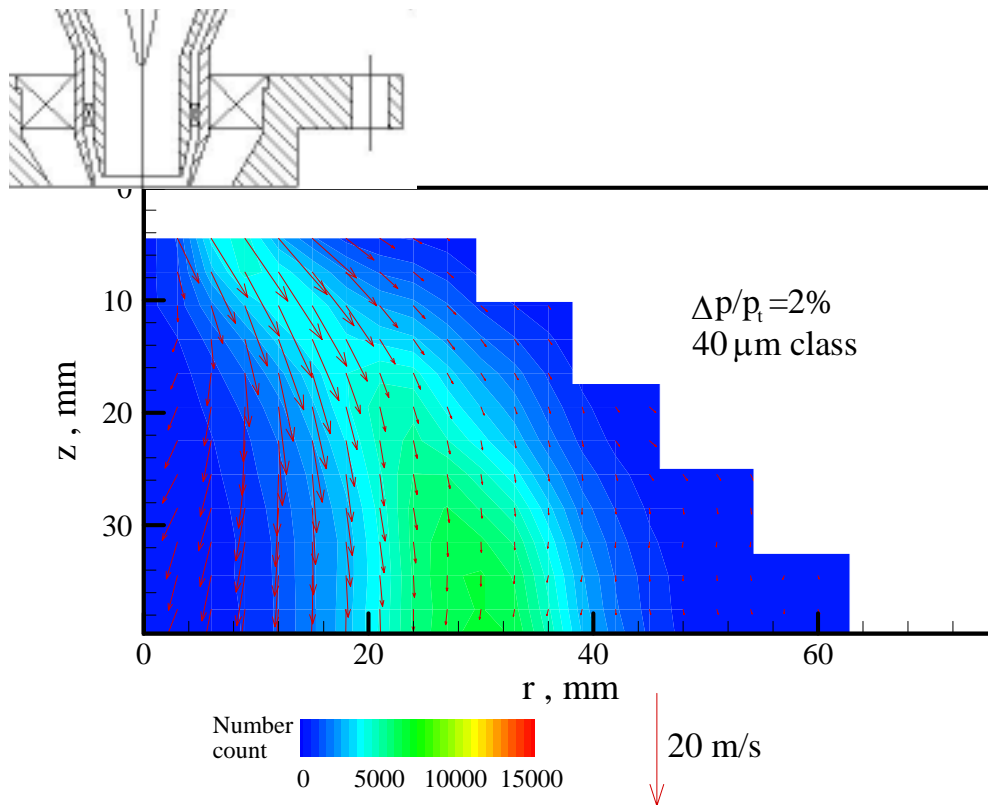


Fig. 5-1-13 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=2\%$

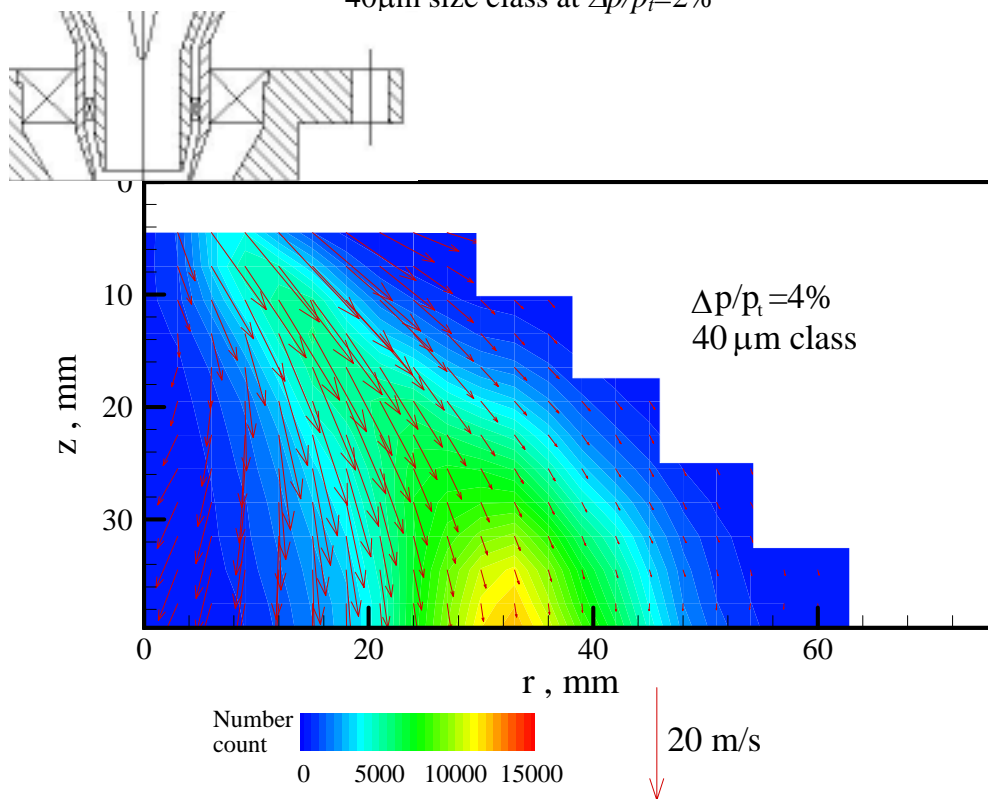


Fig. 5-1-14 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=4\%$

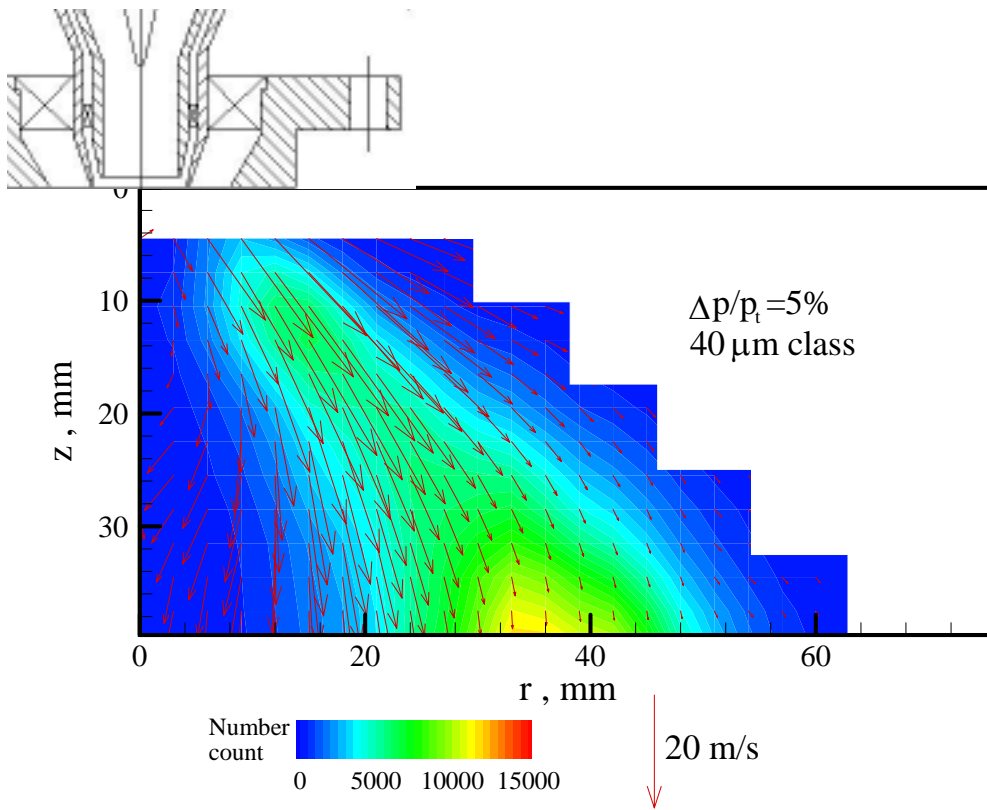


Fig. 5-1-15 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=5\%$

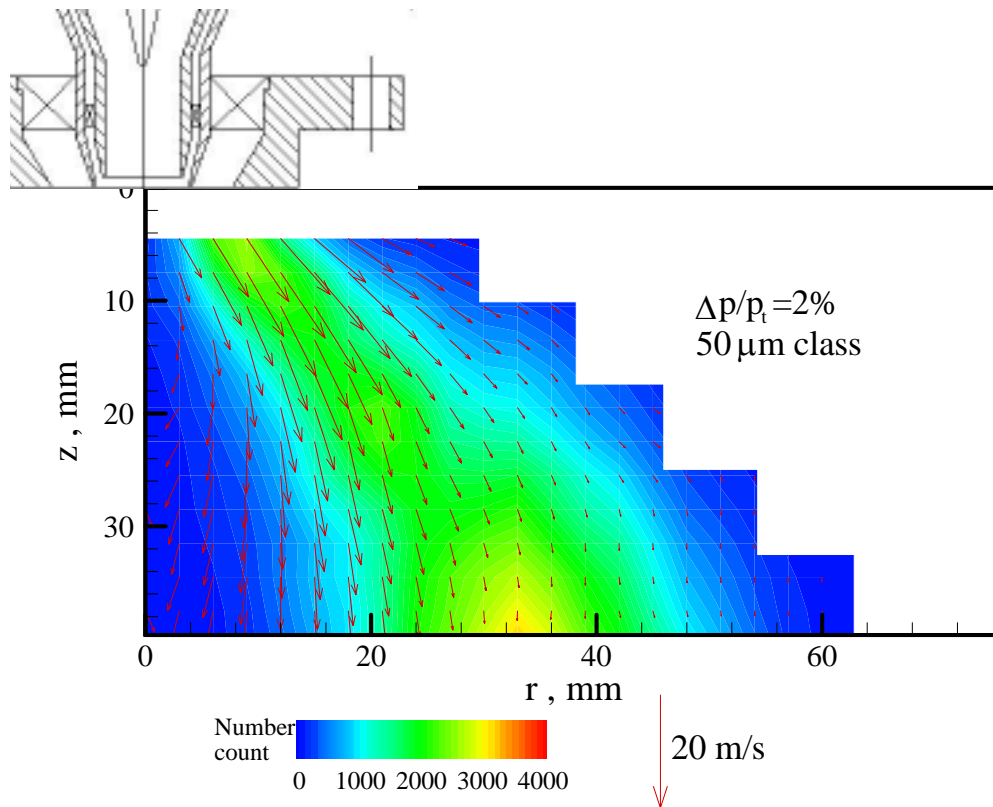


Fig. 5-1-16 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=2\%$

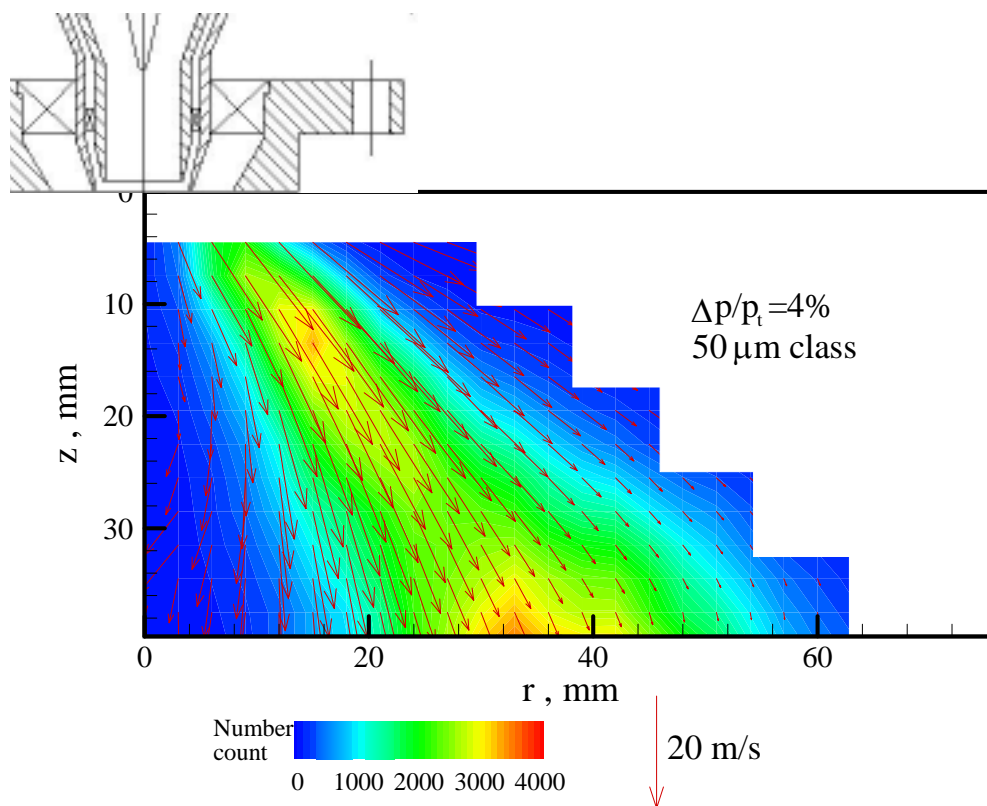


Fig. 5-1-17 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=4\%$

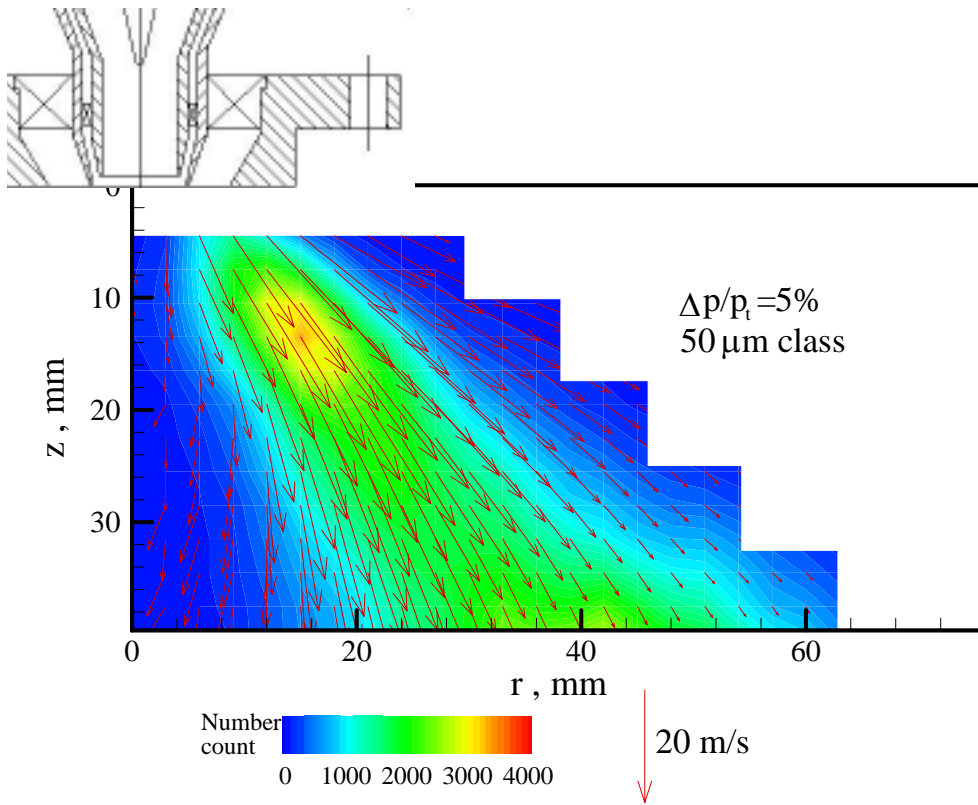


Fig. 5-1-18 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 50 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=5\%$

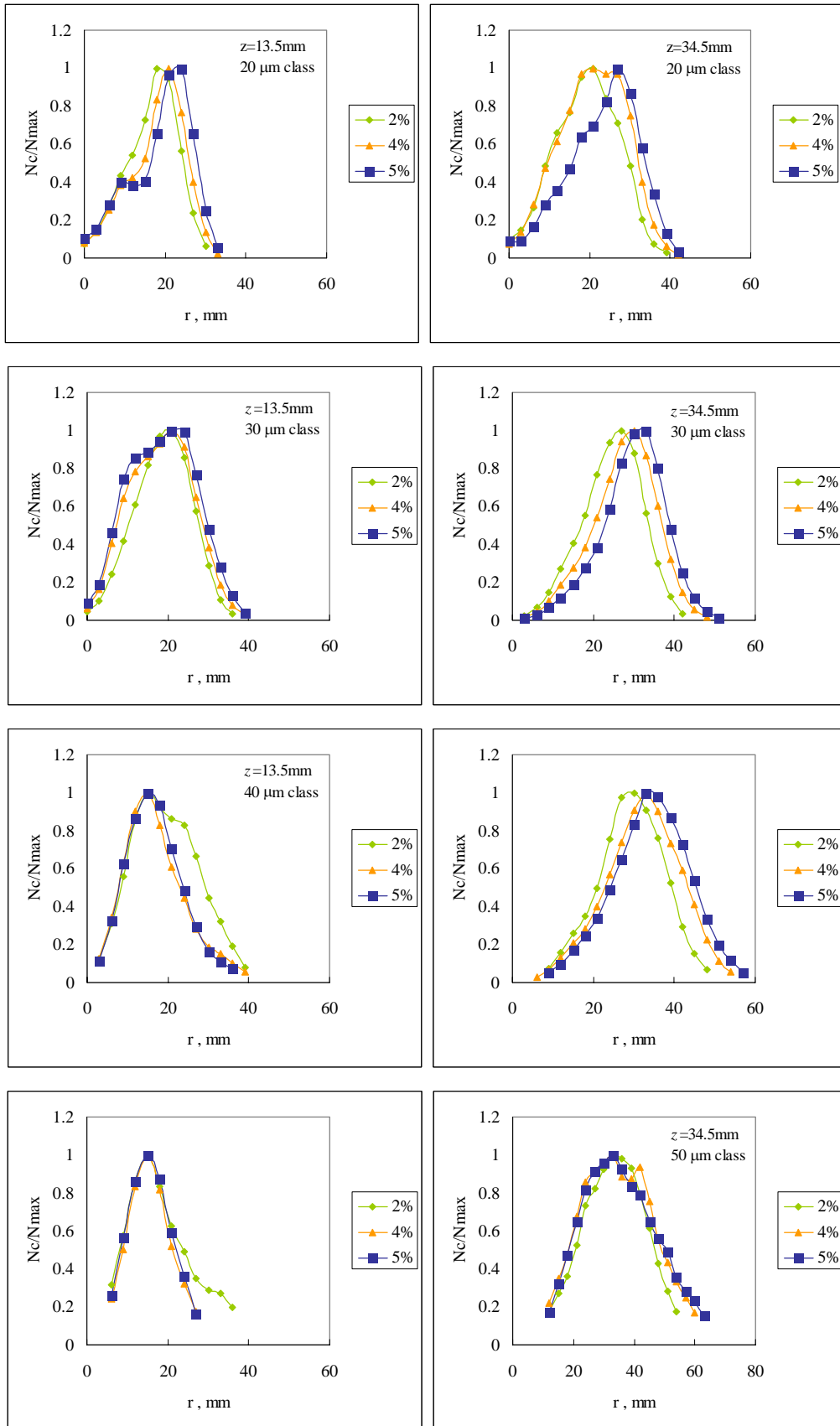


Fig. 5-1-19 Radial distribution of normalized droplet number count in each size class at  $z=13.5$ , mm and  $z=34.5$ mm

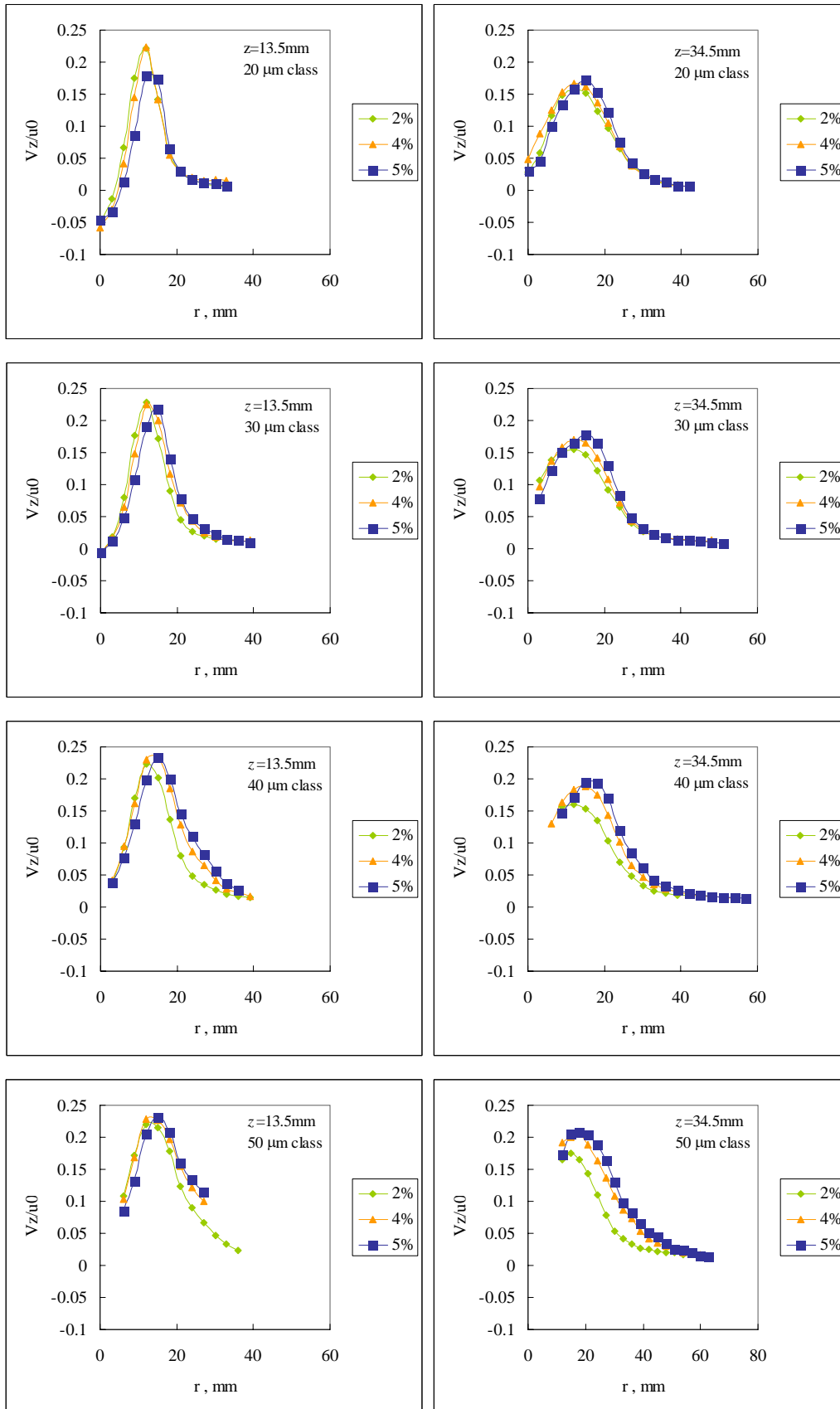


Fig. 5-1-20 Radial distribution of normalized droplet mean axial velocity in each size class at  $z=13.5\text{mm}$  and  $z=34.5\text{mm}$

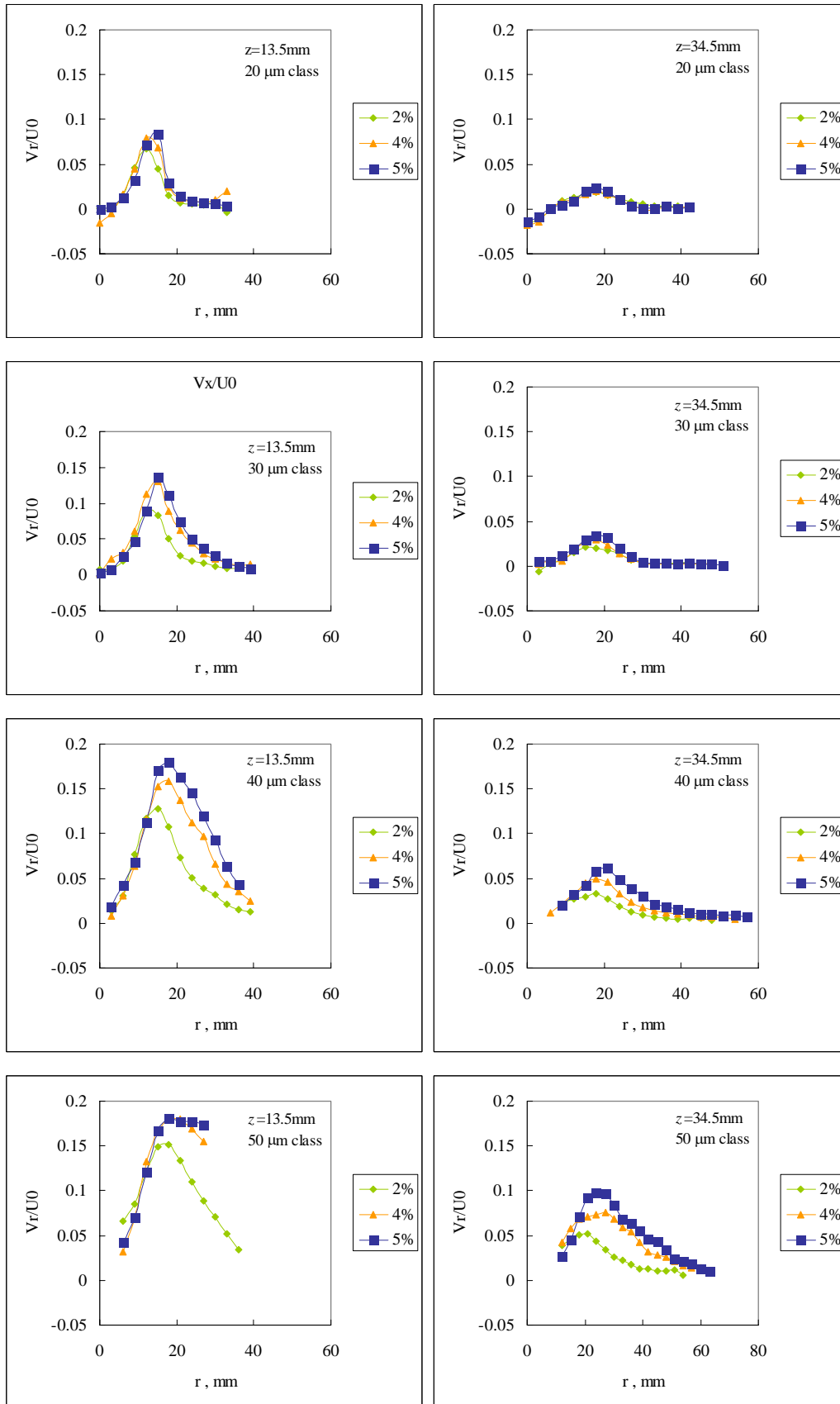


Fig. 5-1-21 Radial distribution of normalized droplet mean radial velocity in each size class at  $z=13.5\text{mm}$  and  $z=34.5\text{mm}$

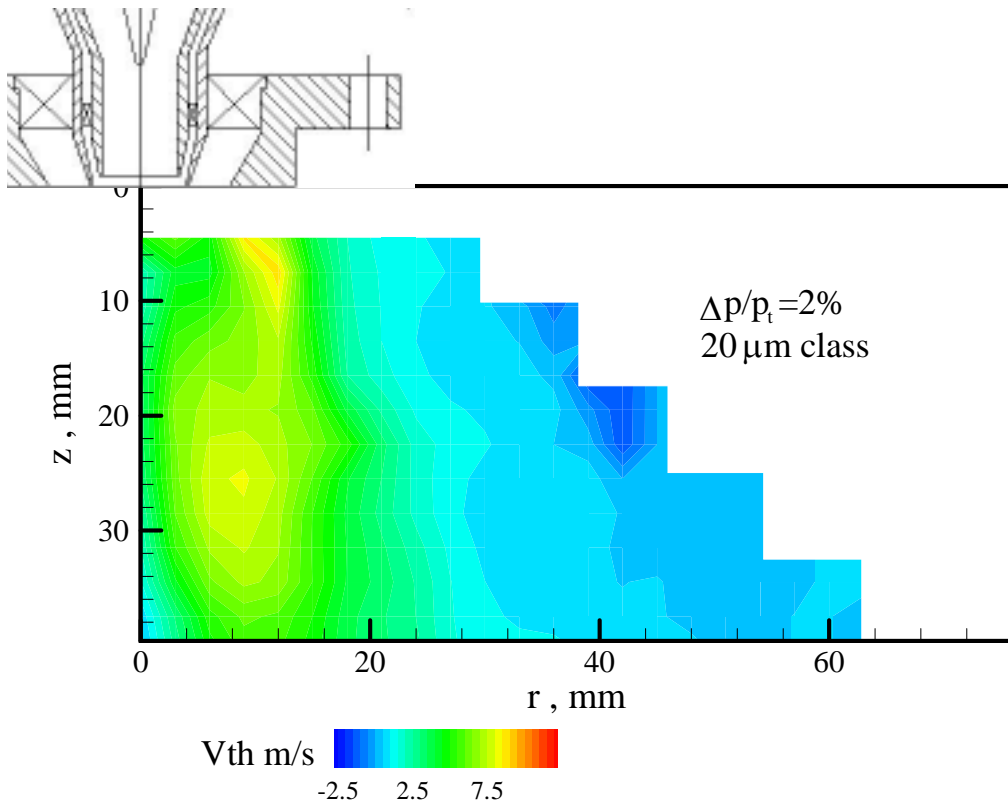


Fig. 5-1-22 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20µm size class at  $\Delta p/p_i=2\%$

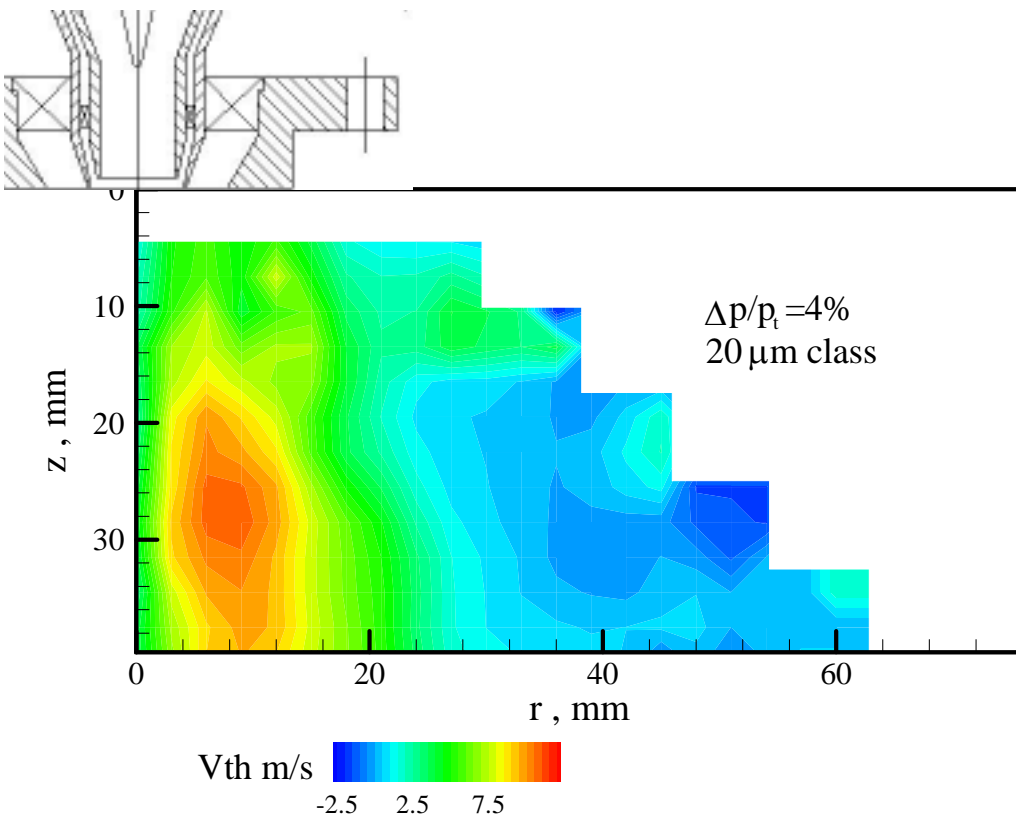


Fig. 5-1-23 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20µm size class at  $\Delta p/p_i=4\%$



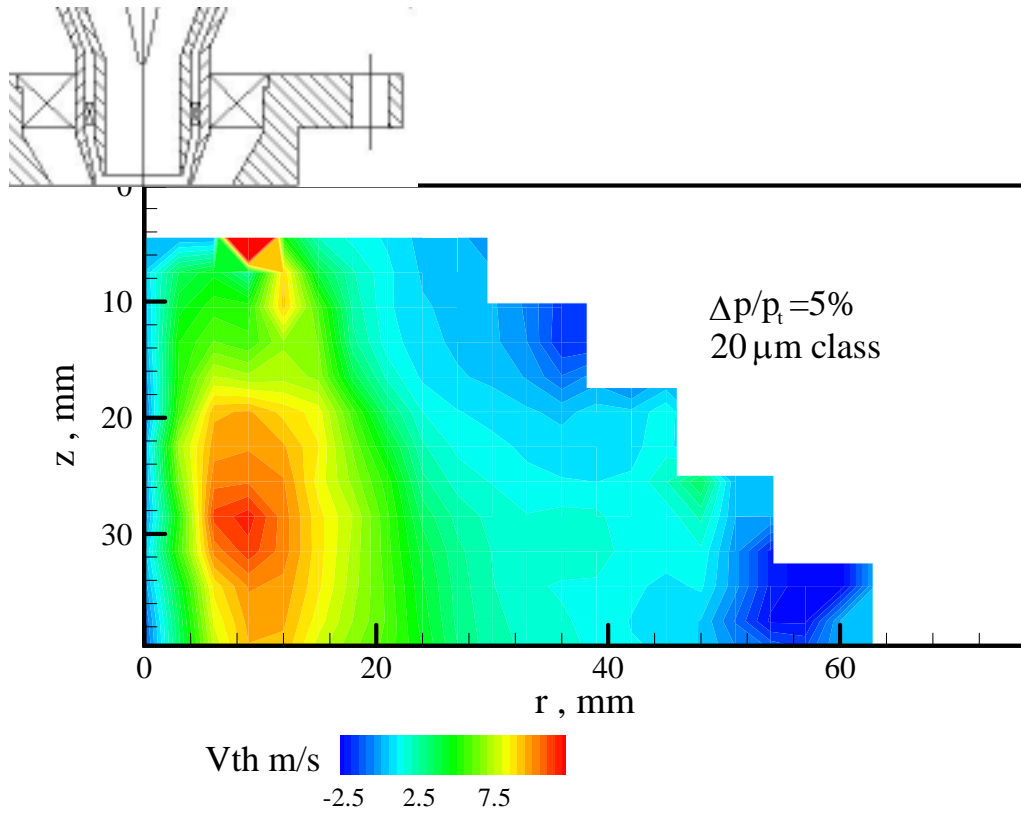


Fig. 5-1-24 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 20 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=5\%$

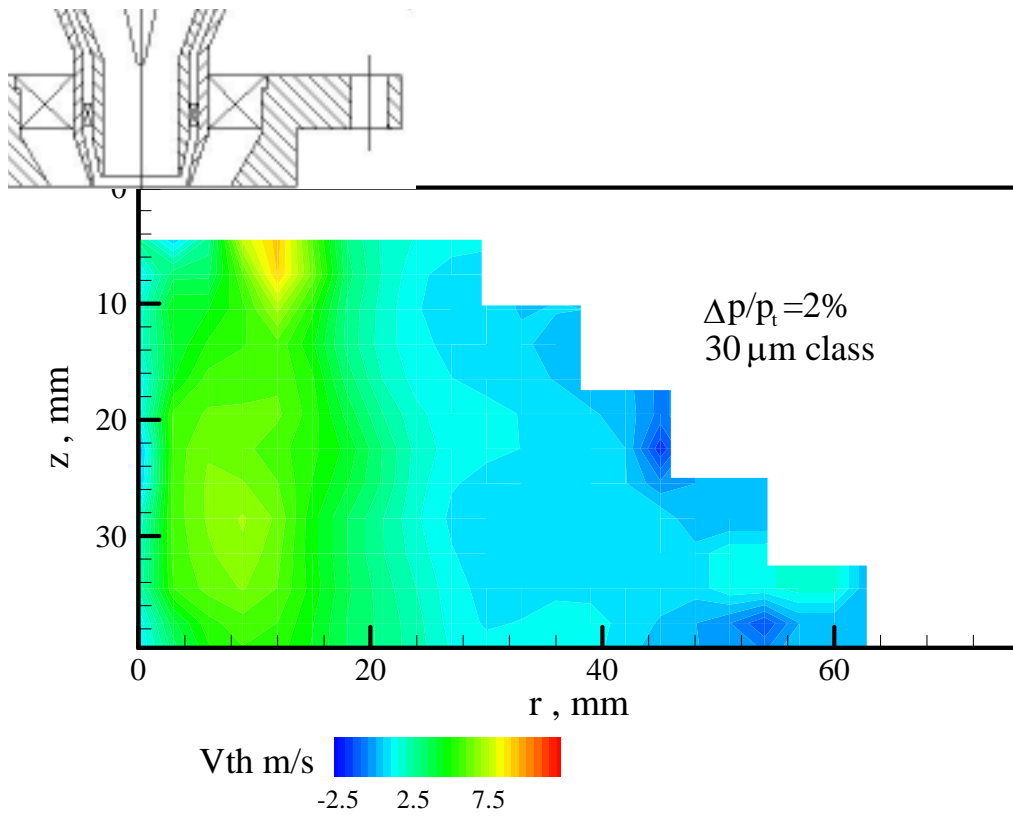


Fig. 5-1-25 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $30\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=2\%$

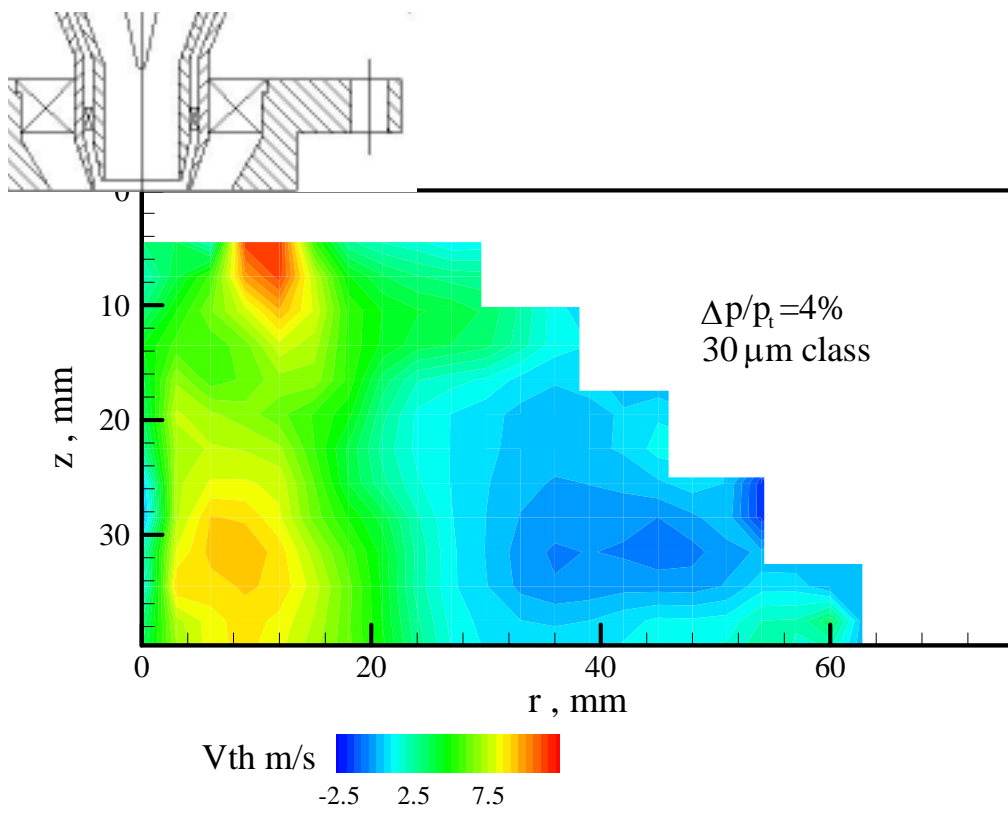


Fig. 5-1-26 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $30\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=4\%$

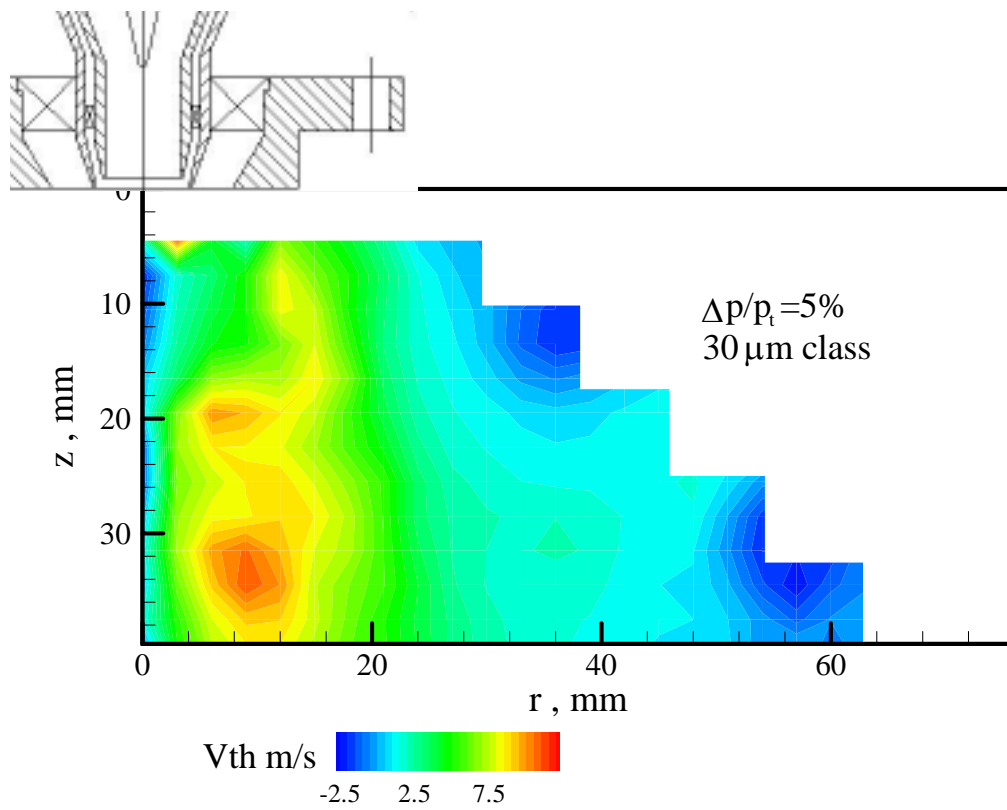


Fig. 5-1-27 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 30 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=5\%$

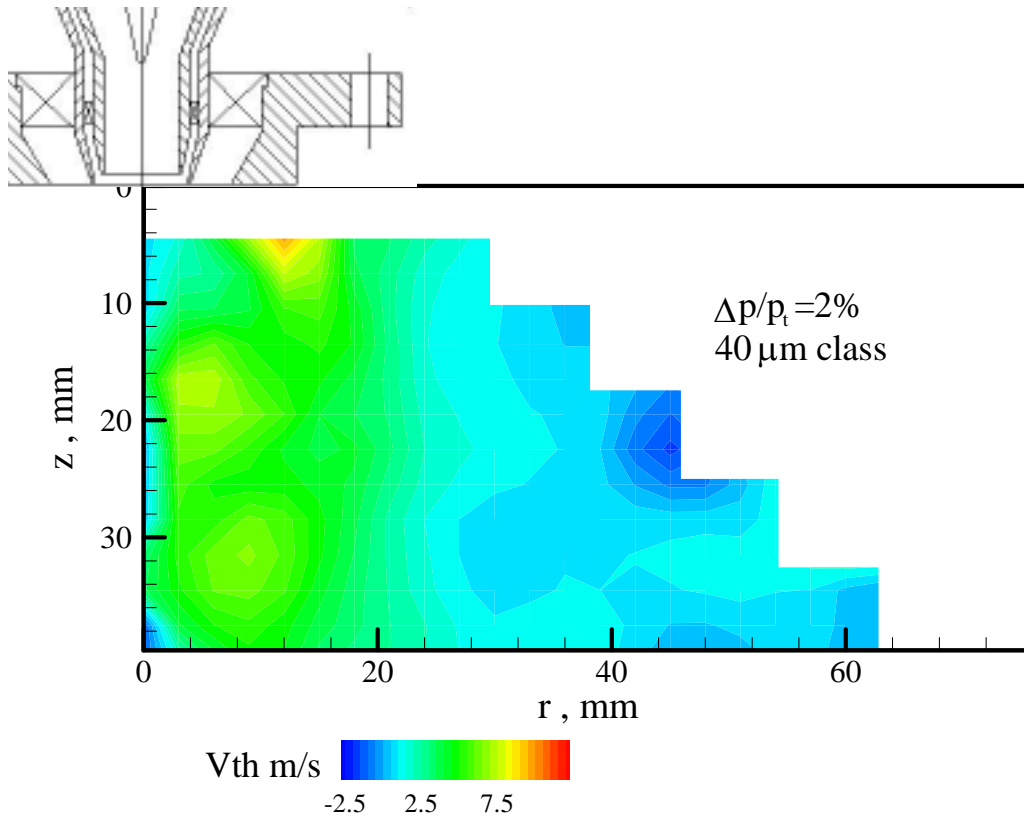


Fig. 5-1-28 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $40\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=2\%$

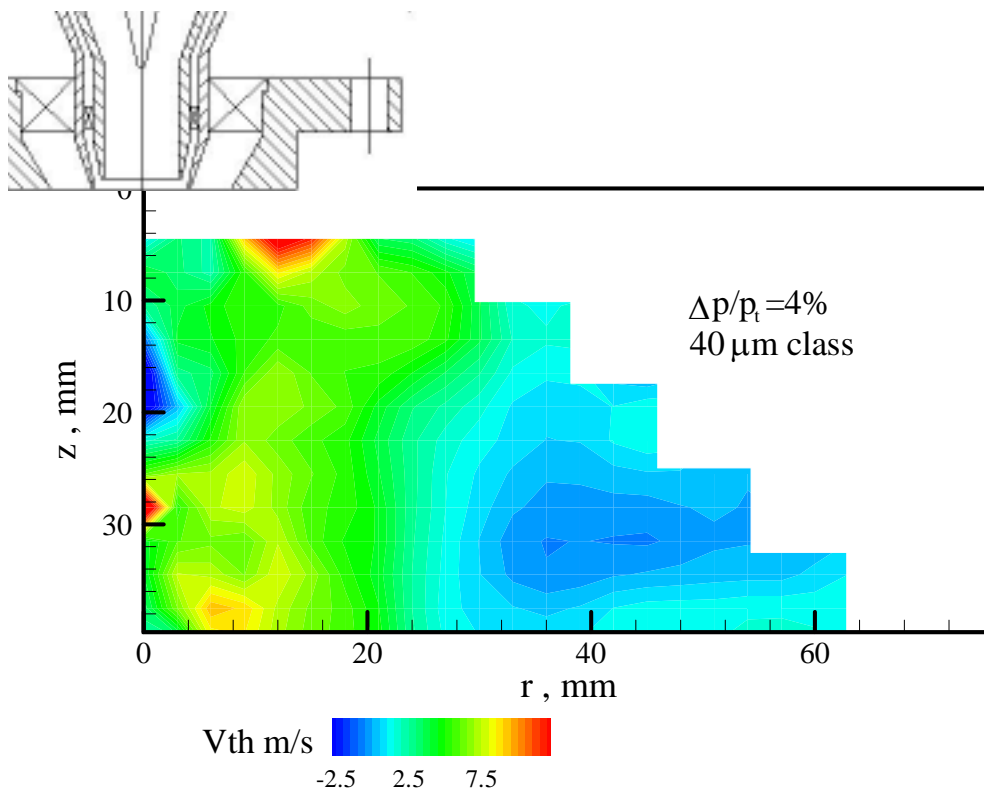


Fig. 5-1-29 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $40\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_t=4\%$

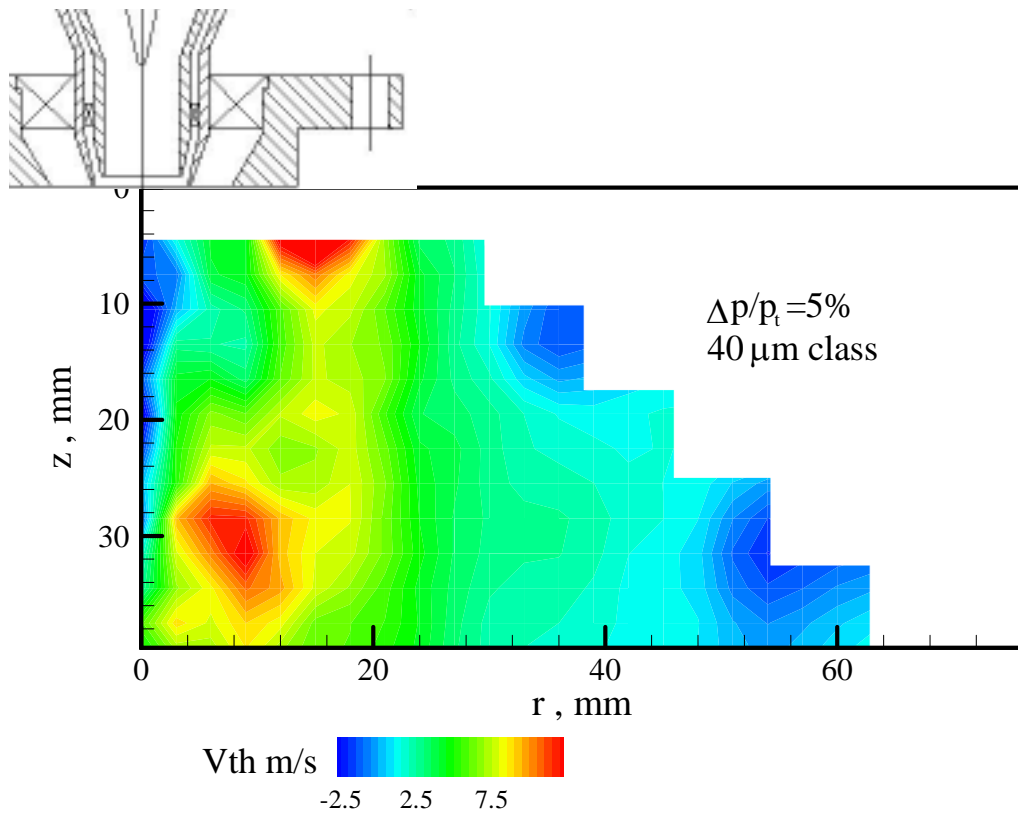


Fig. 5-1-30 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 40 $\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=5\%$

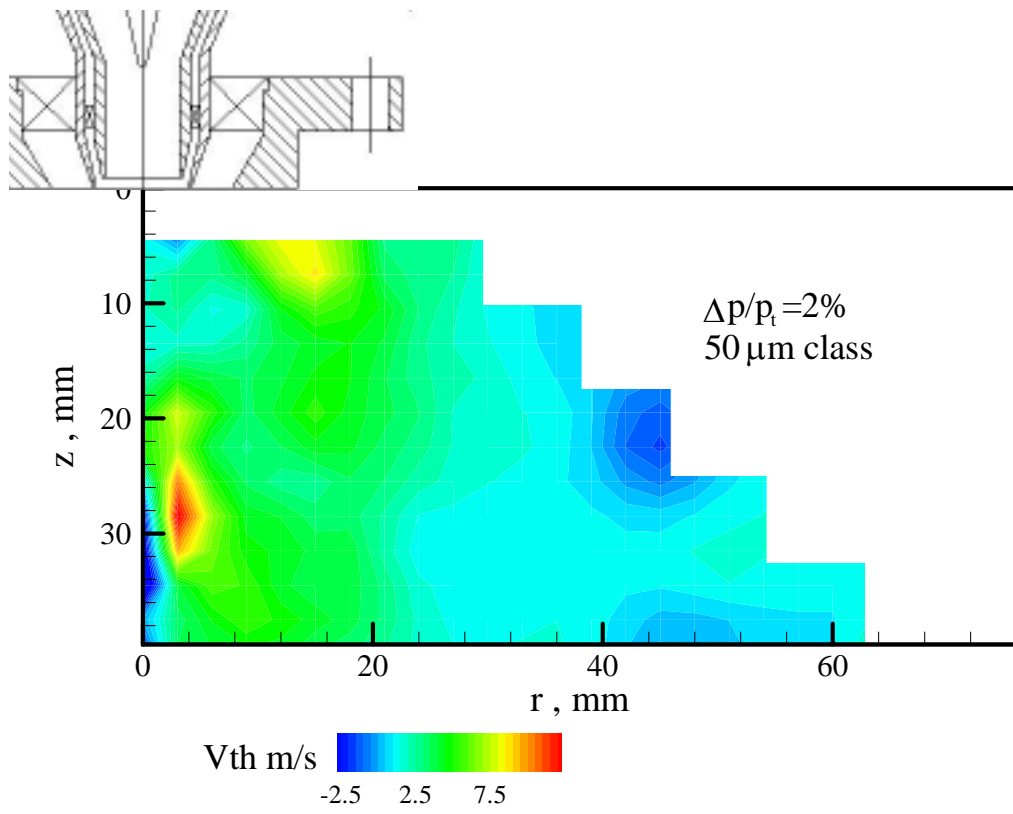


Fig. 5-1-31 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $50\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=2\%$

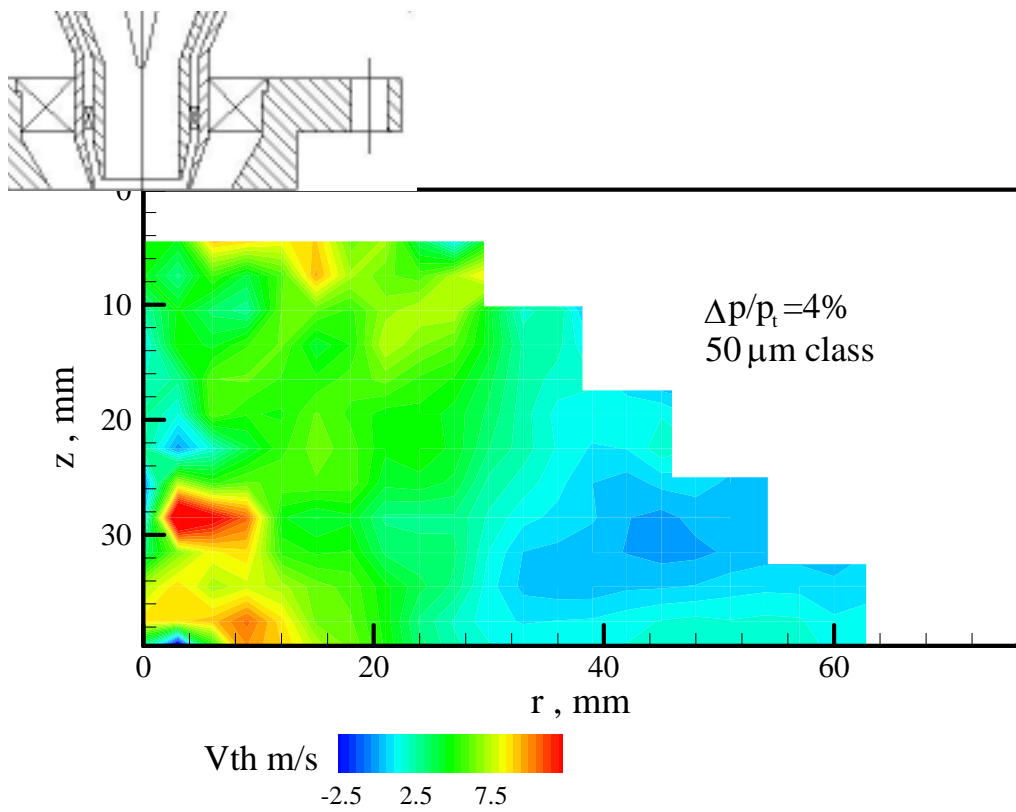


Fig. 5-1-32 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in  $50\mu\text{m}$  size class at  $\Delta p/p_i=4\%$

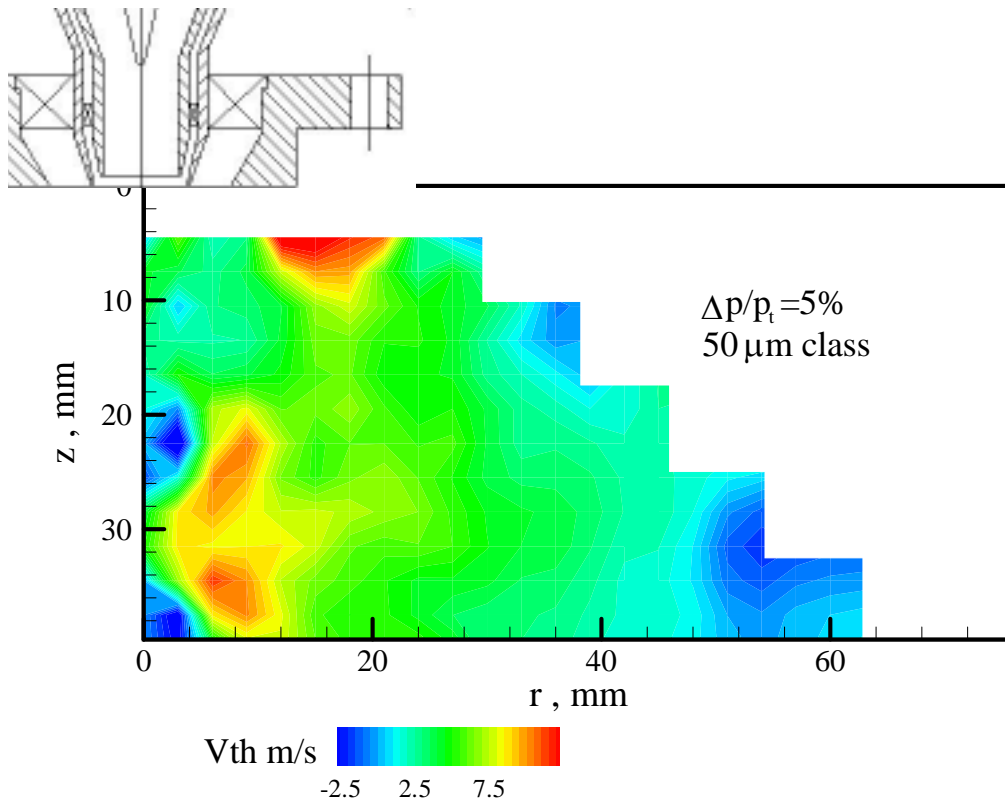


Fig . 5-1-33 Spatial distribution of circumferential velocity of droplet in 50 $\mu\text{m}$  size class  
at  $\Delta p/p_t=5\%$

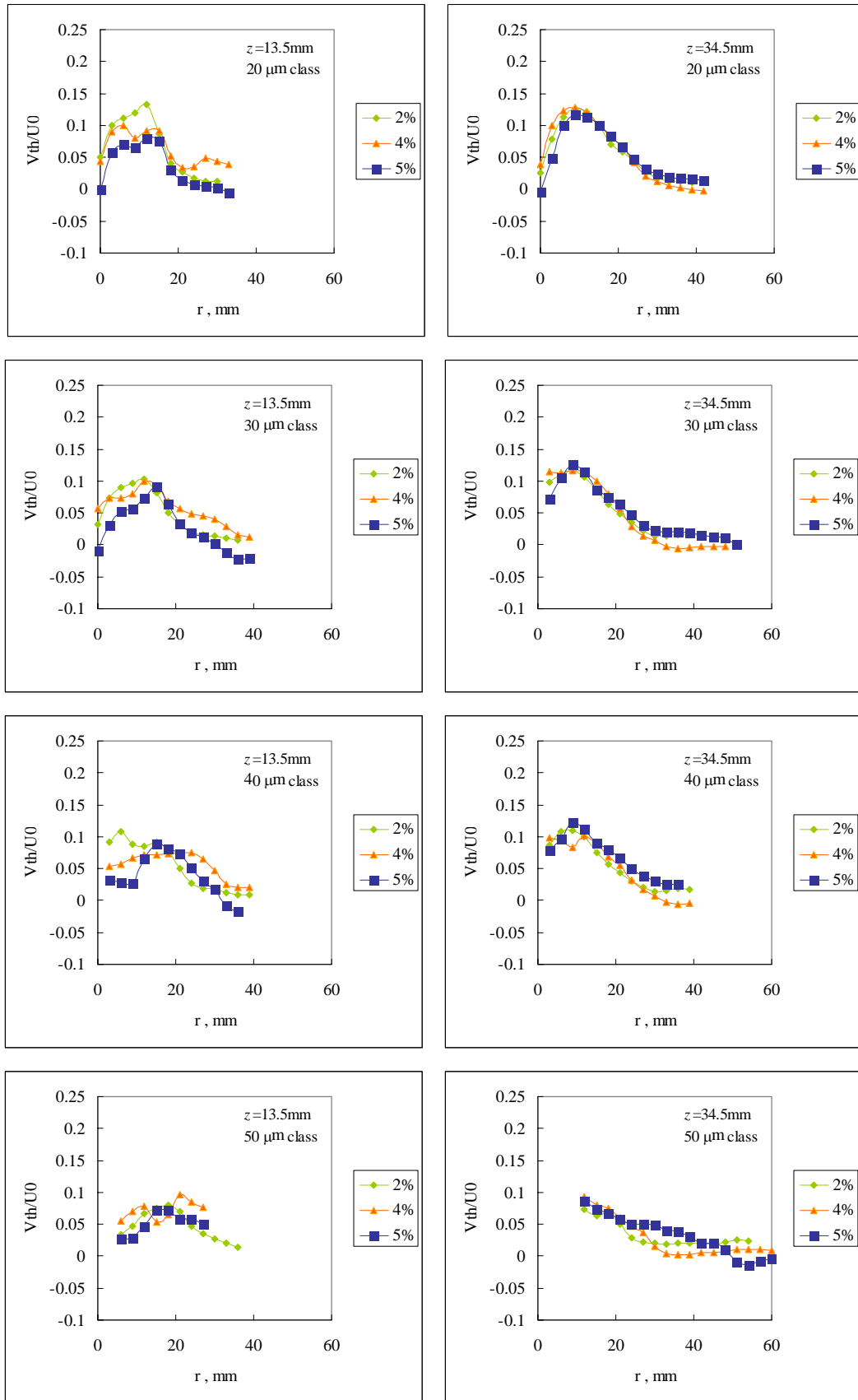


Fig. 5-1-34 Radial distribution of normalized droplet mean circumferential velocity in each size class at  $z=13.5\text{mm}$  and  $z=34.5\text{mm}$



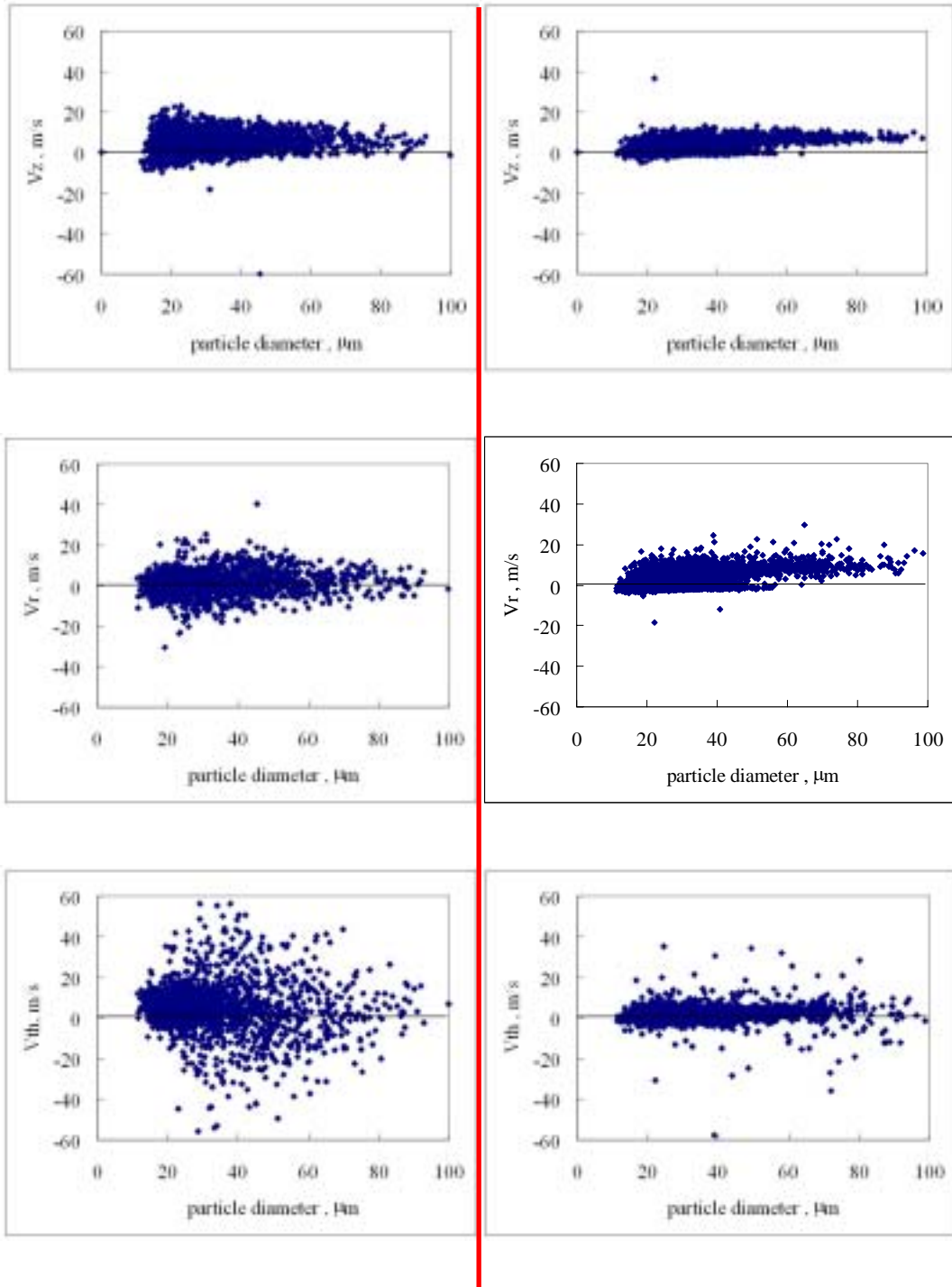


Fig. 5-1-35 Size-velocity correlation of droplet at  $\Delta p/p_i=2\%$   
 (left:  $z=13.5\text{mm}$ ,  $r=6\text{mm}$ , right:  $z=13.5\text{mm}$ ,  $r=24\text{mm}$ )

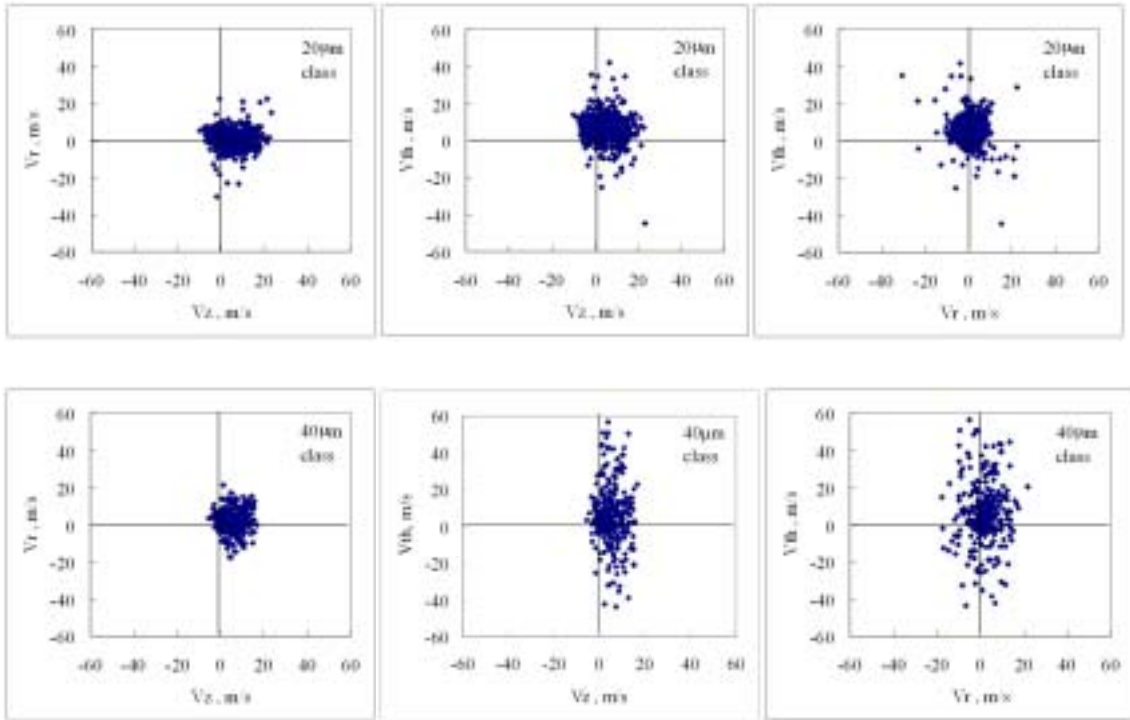


Fig. 5-1-36 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at  $z=13.5\text{mm}$  and  $r=6\text{mm}$  at  $\Delta p/p_i=2\%$

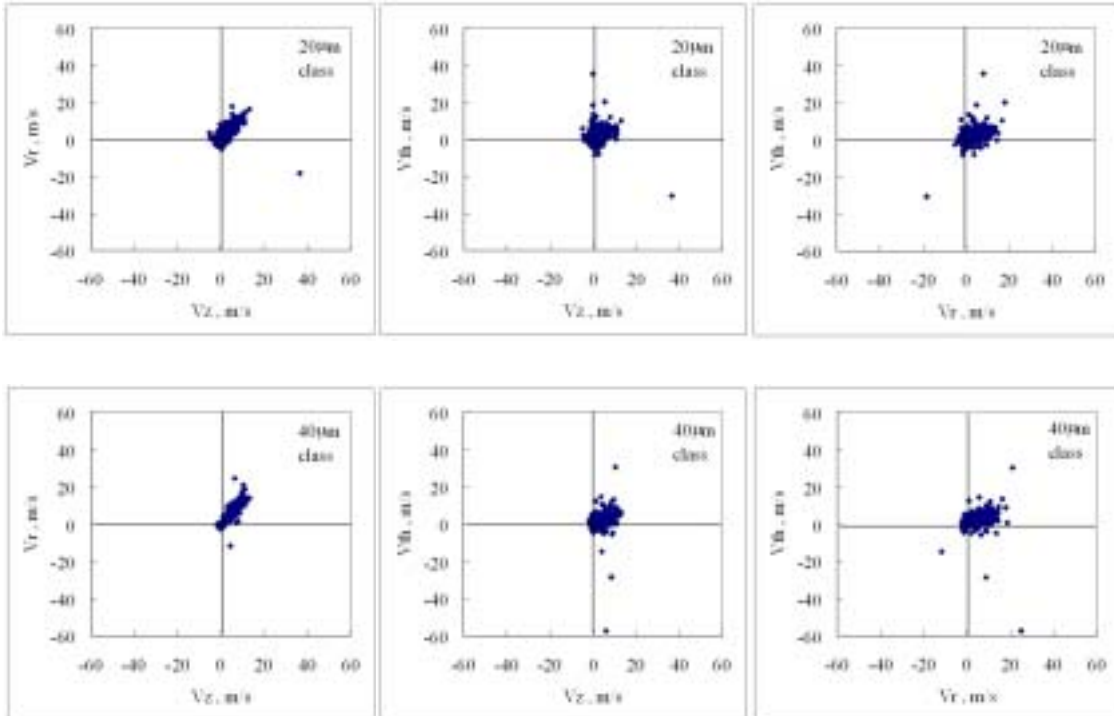


Fig. 5-1-37 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at  $z=13.5\text{mm}$  and  $r=24\text{mm}$  at  $\Delta p/p_i=2\%$

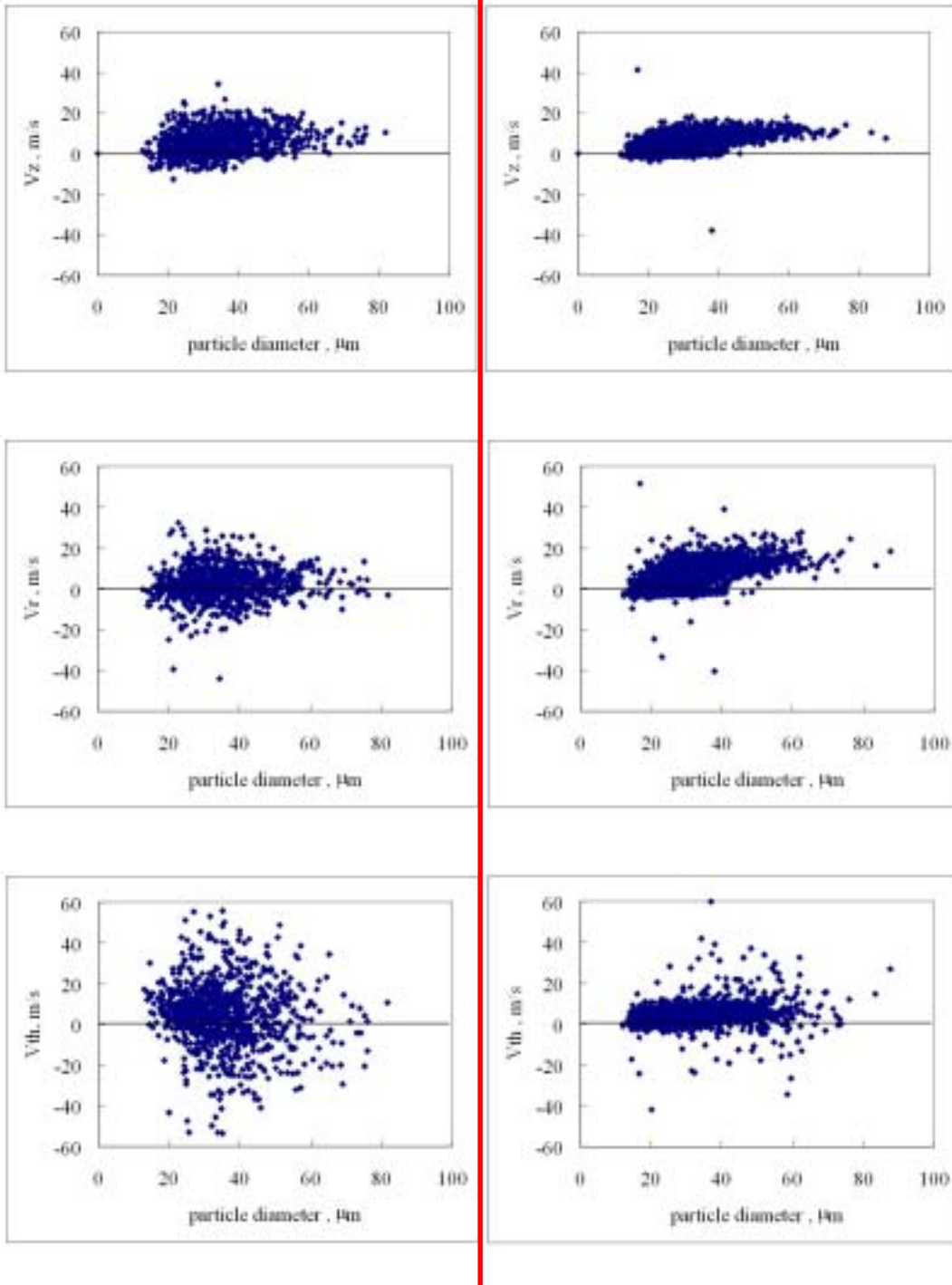


Fig. 5-1-38 Size-velocity correlation of droplet at  $\Delta p/p_i=4\%$   
 (left:  $z=13.5\text{mm}$ ,  $r=6\text{mm}$  , right:  $z=13.5\text{mm}$ ,  $r=24\text{mm}$ )

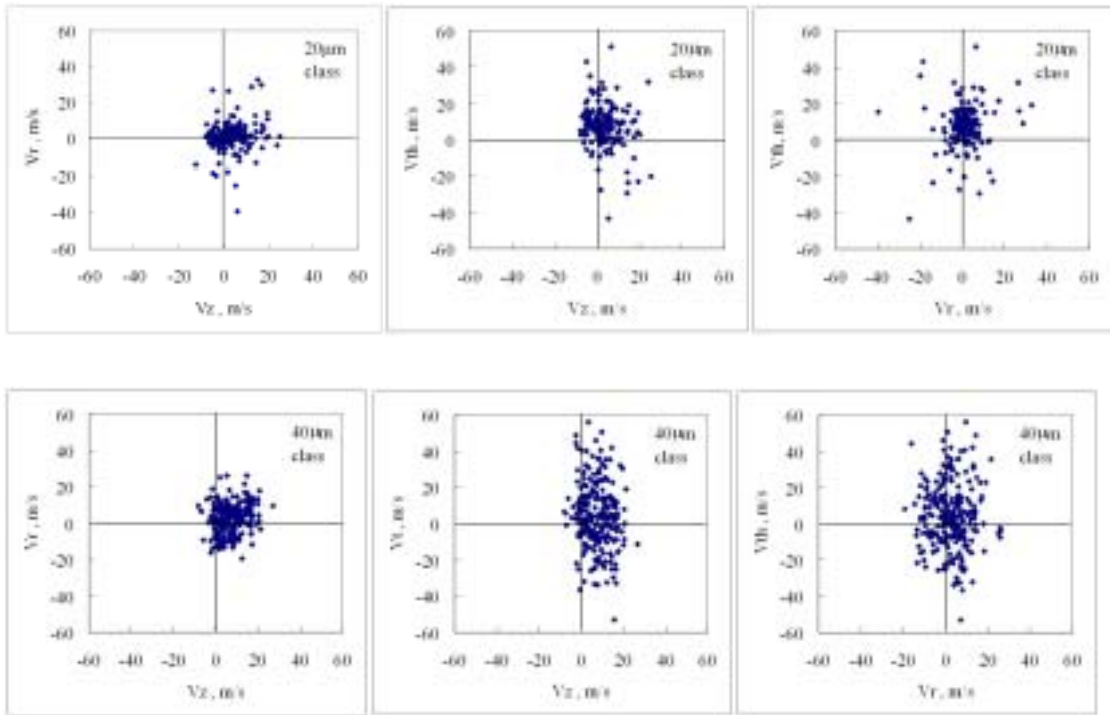


Fig. 5-1-39 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at  $z=13.5\text{mm}$  and  $r=6\text{mm}$  at  $\Delta p/p_i=4\%$

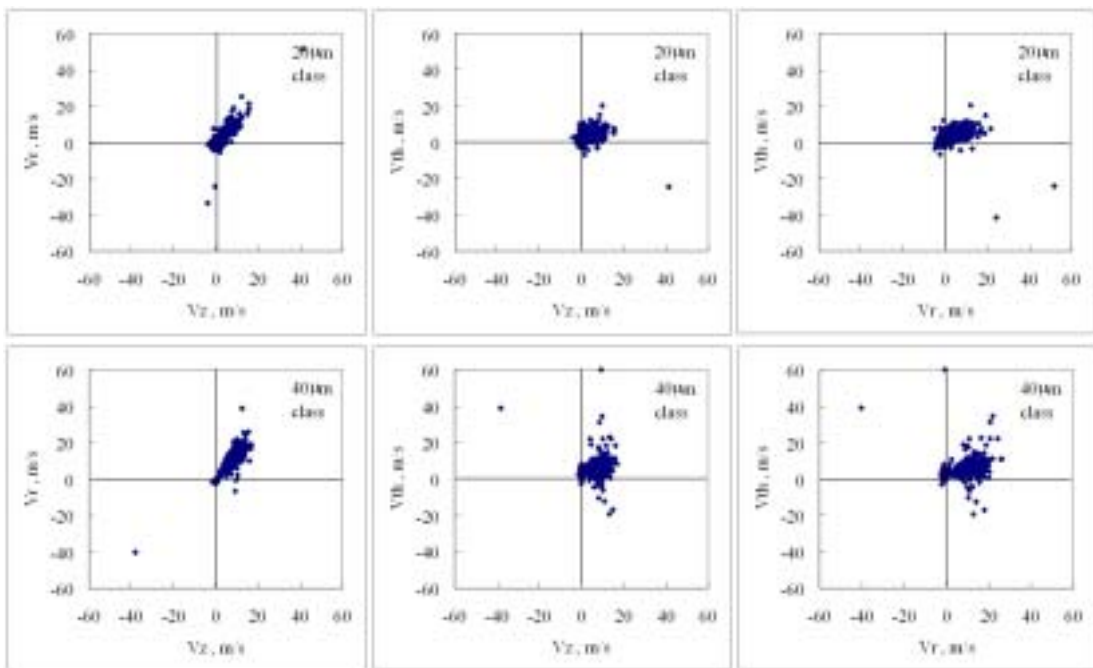
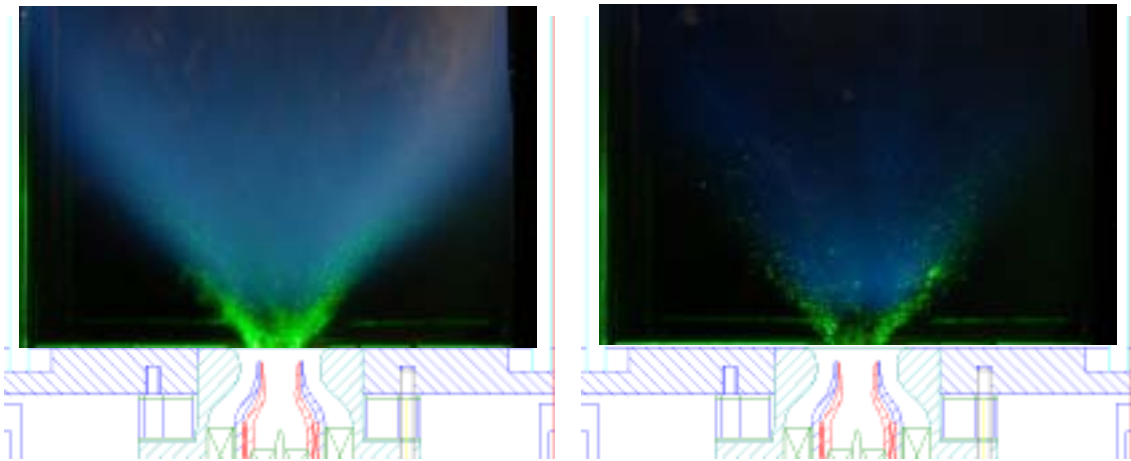
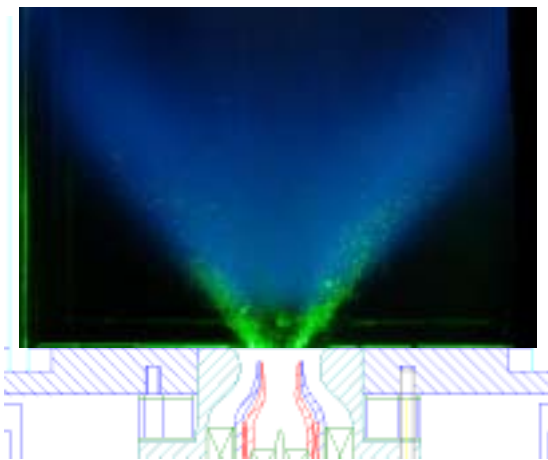


Fig. 5-1-40 Size-classified correlation of different velocity component of droplet at  $z=13.5\text{mm}$  and  $r=24\text{mm}$  at  $\Delta p/p_i=4\%$



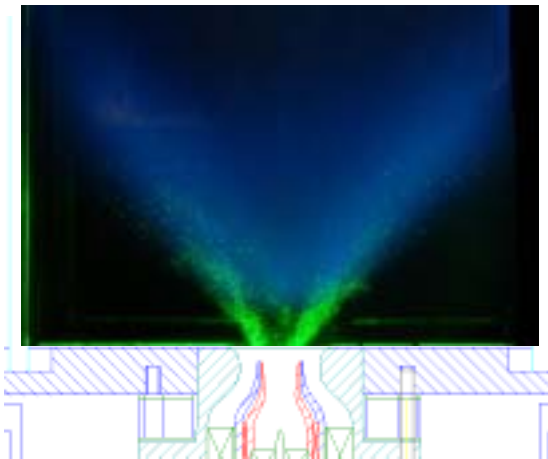
$\Delta p/p_t = 4\%$  ,  $AFR = 15$

$\Delta p/p_t = 2\%$  ,  $AFR = 20$



$\Delta p/p_t = 4\%$  ,  $AFR = 18$

$\Delta p/p_t = 3\%$  ,  $AFR = 20$



$\Delta p/p_t = 4\%$  ,  $AFR = 20$

Fig. 5-2-1 Comparison of fuel droplets distributions and flames for different  $AFR$  and pressure drop

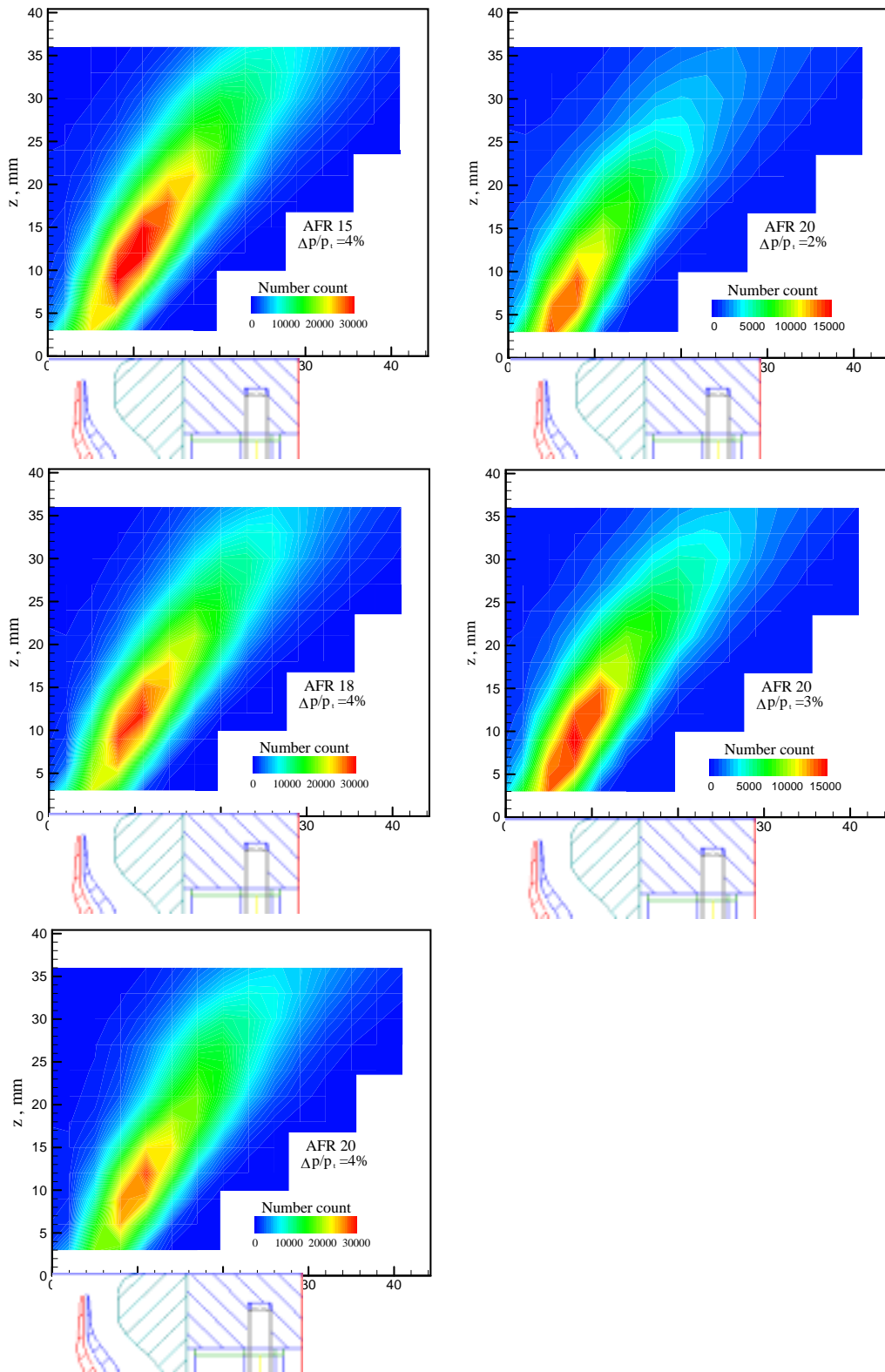


Fig. 5-2-2 Spatial distribution of droplet number count

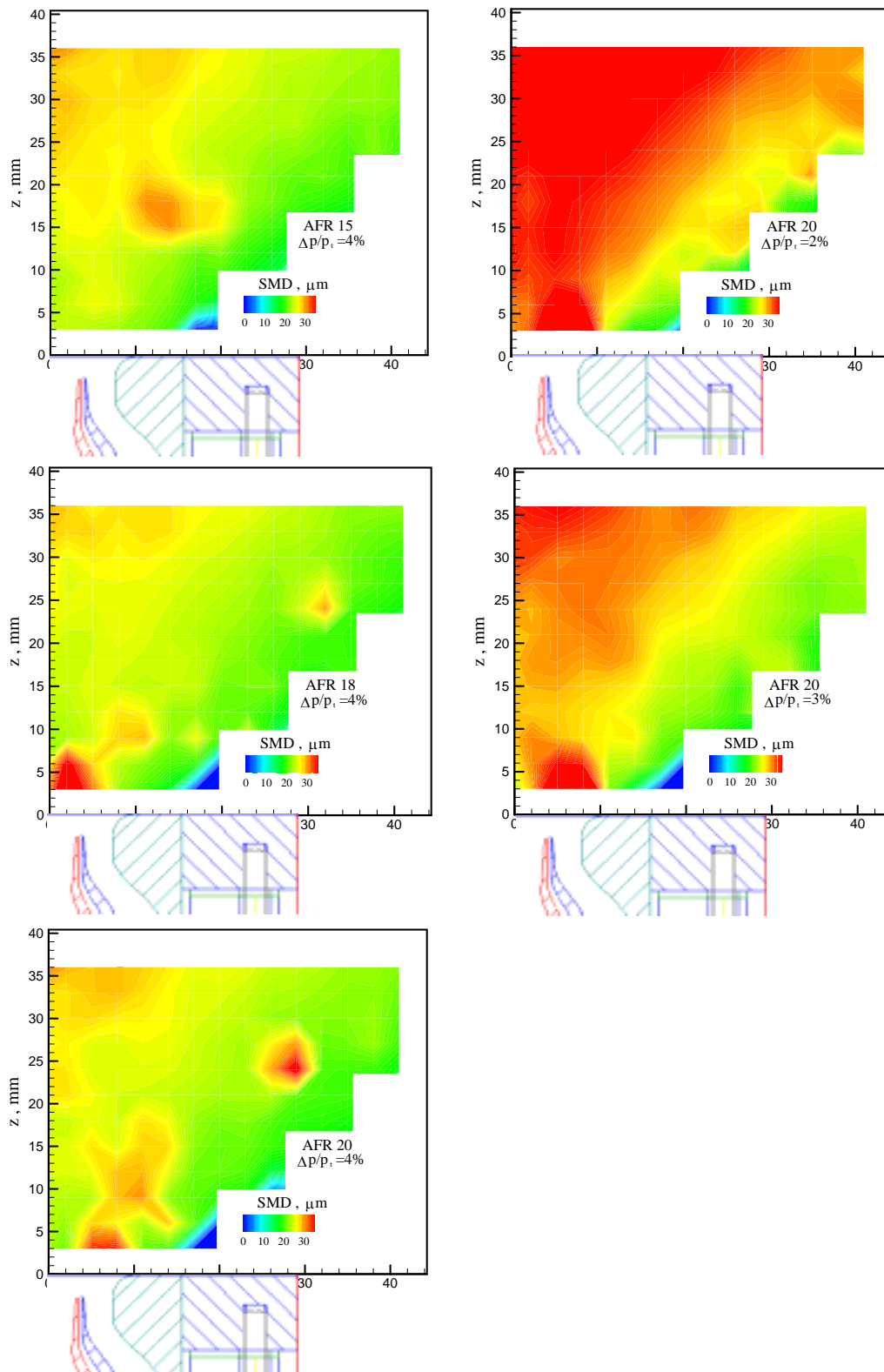


Fig. 5-2-3 Spatial distribution of Sauter mean diameter

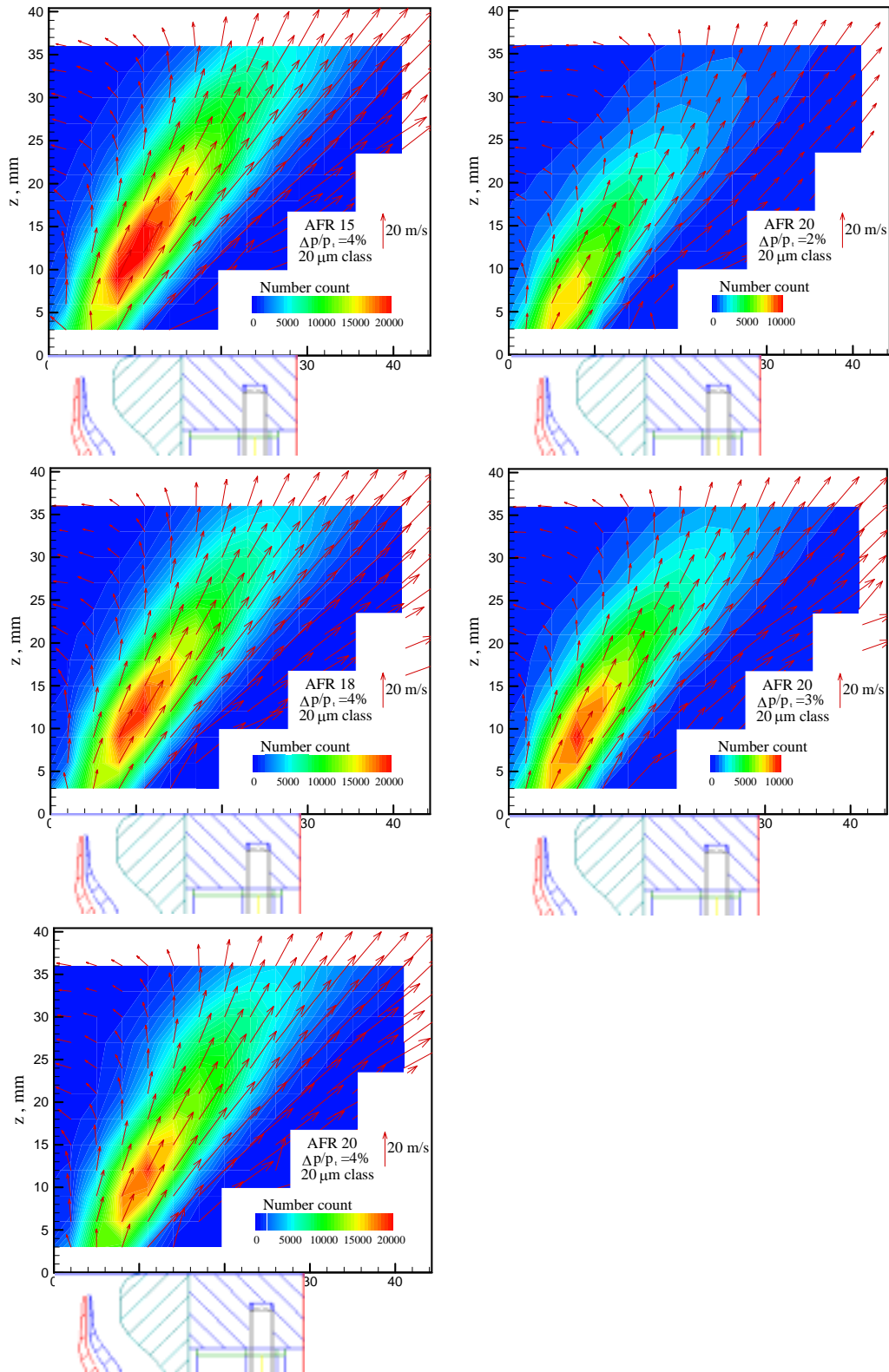


Fig. 5-2-4 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 20 μm size class



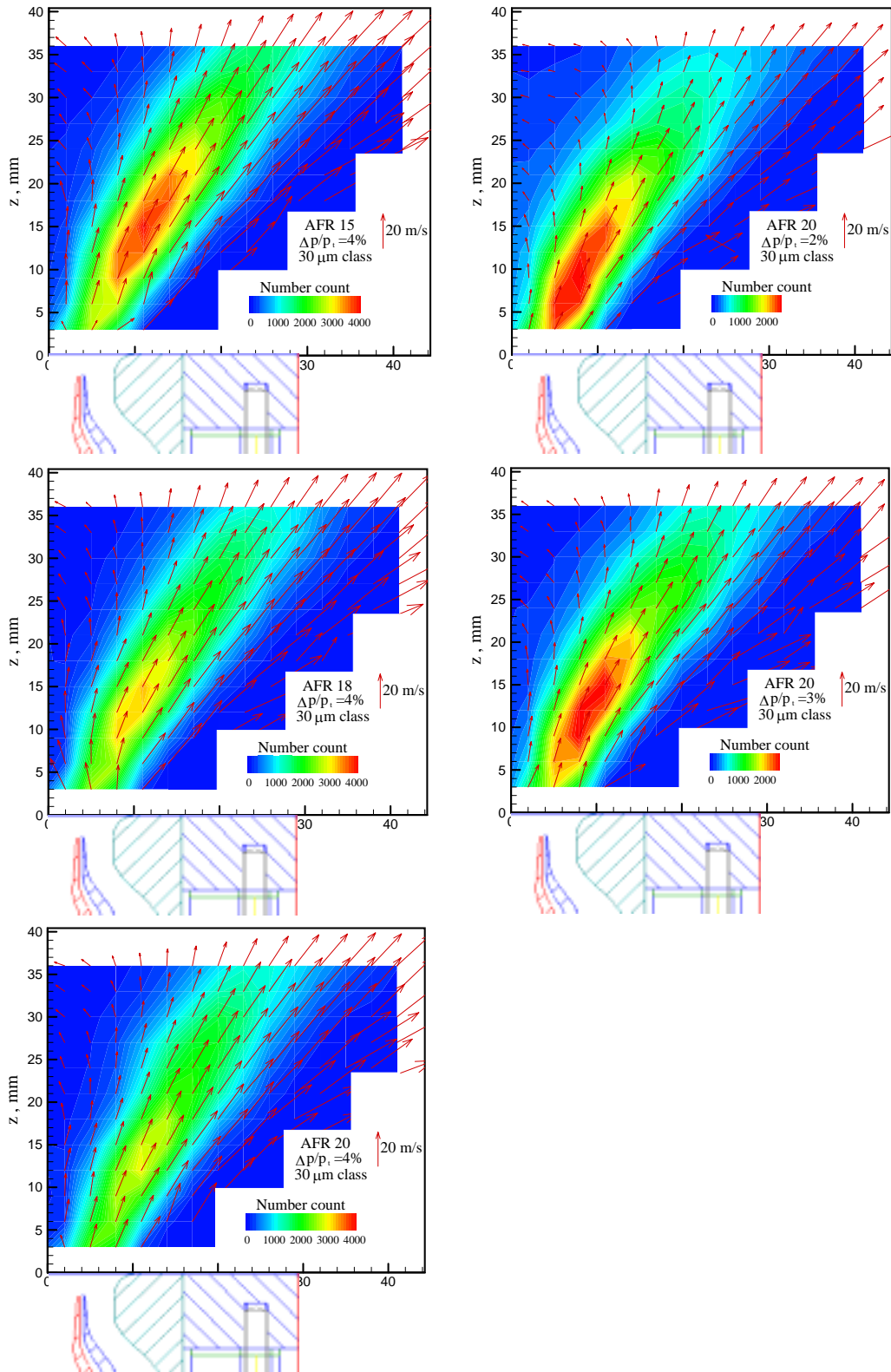


Fig. 5-2-5 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 30 $\mu$ m size class

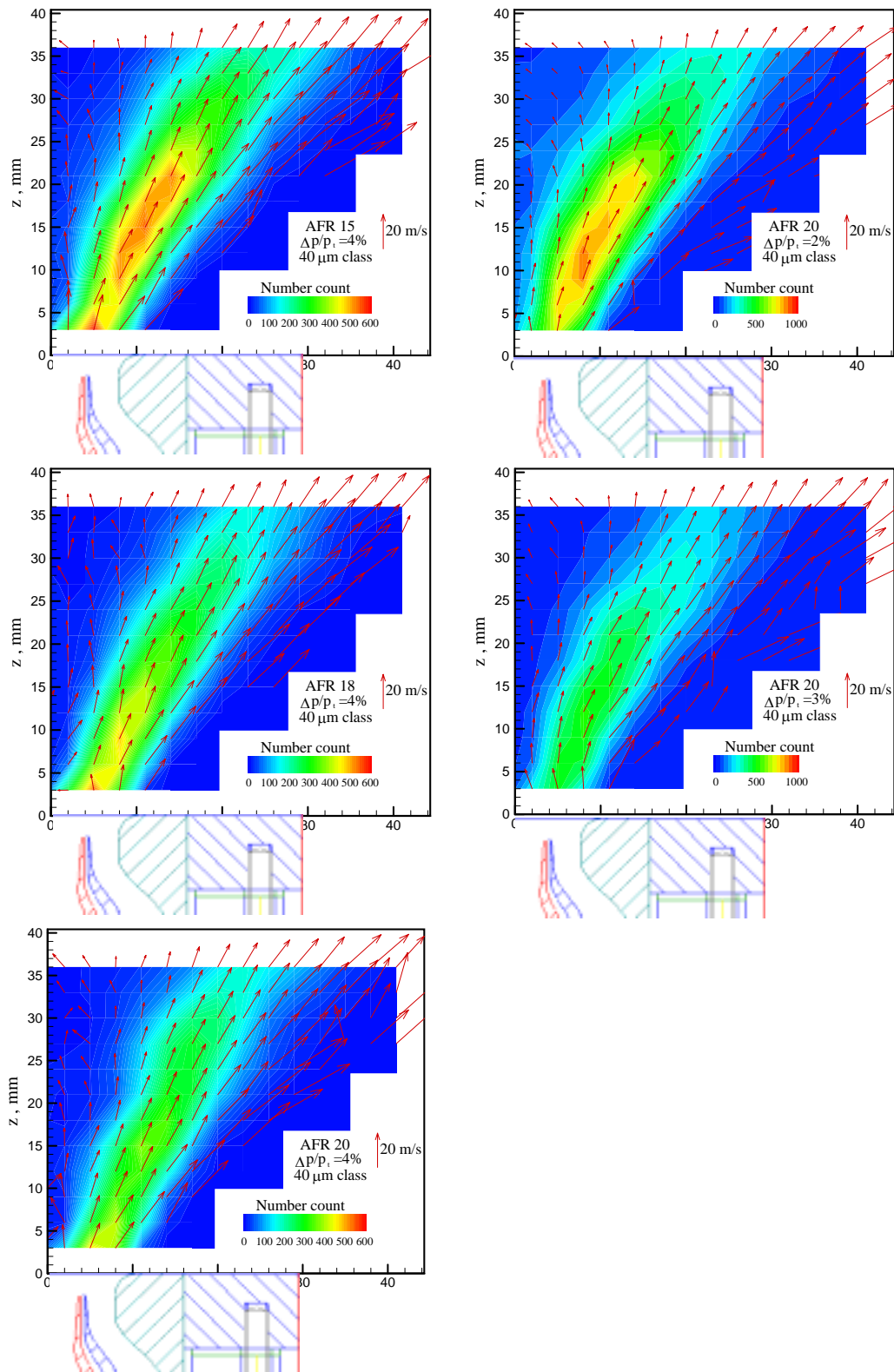


Fig. 5-2-6 Spatial distribution of droplet number count and mean velocity of droplet in 40 μm size class

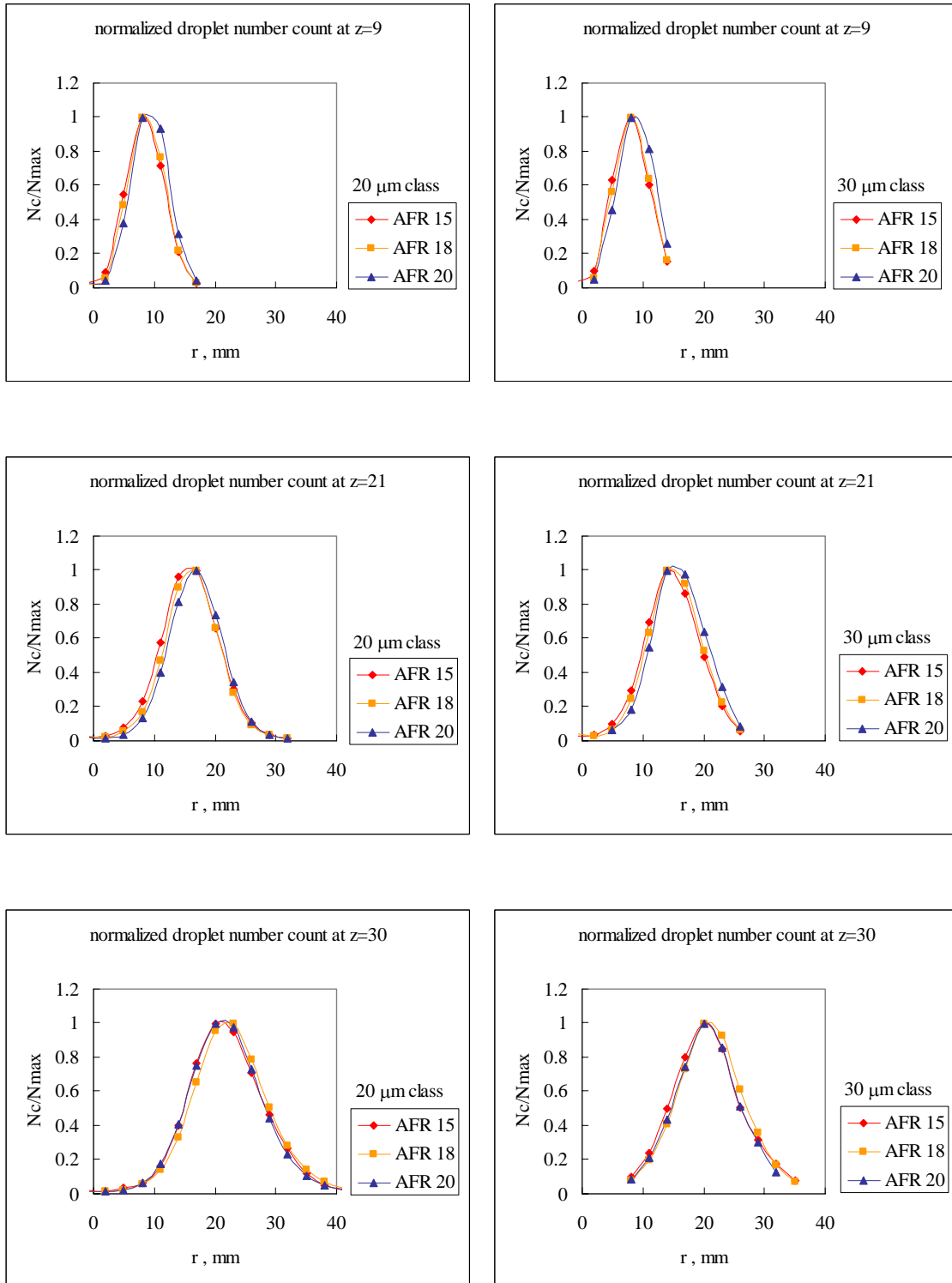


Fig. 5-2-7 Radial distribution of normalized droplet number count in 20 and 30 μm size class at z=9, 21 and 30mm

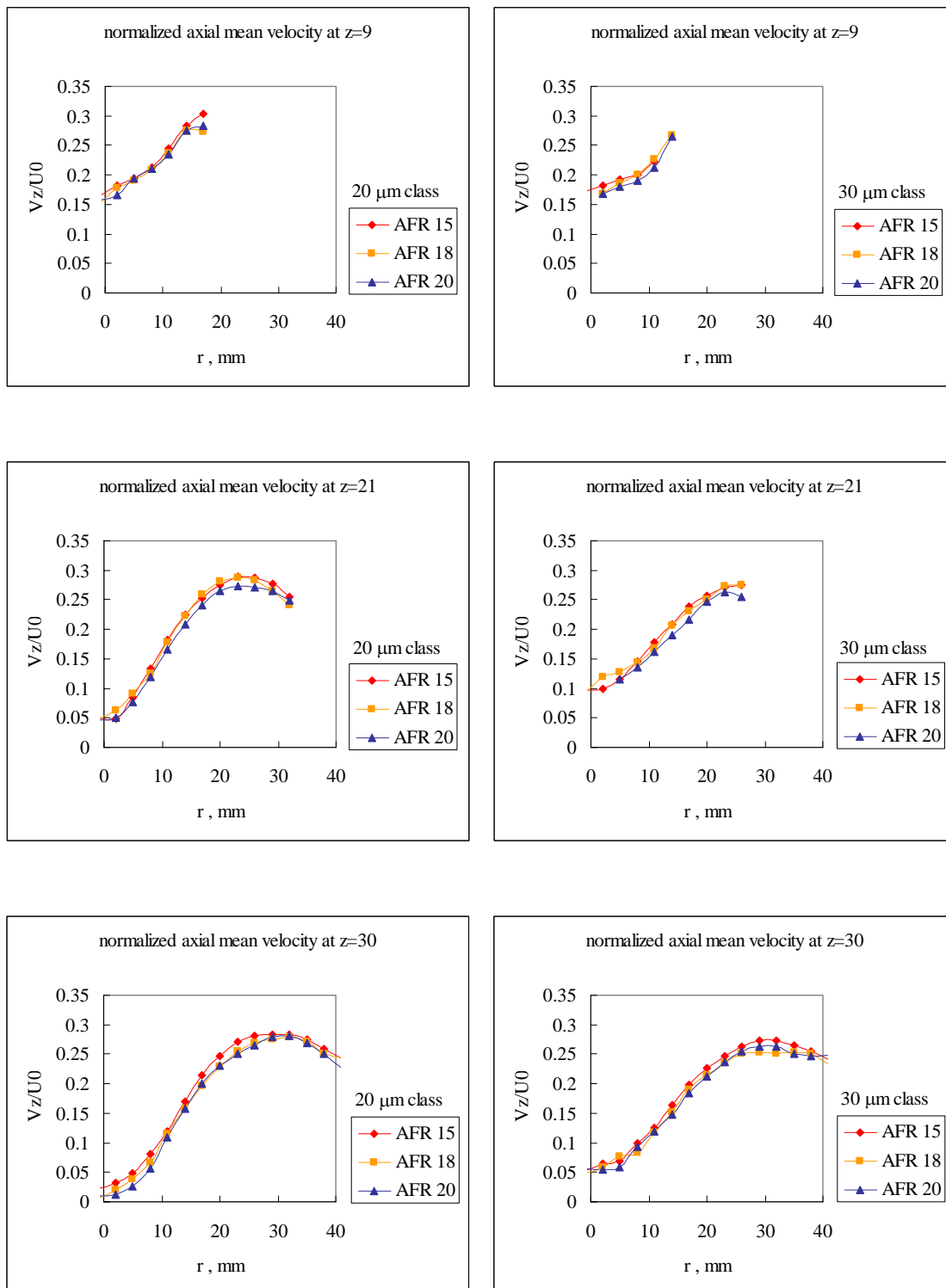


Fig. 5-2-8 Radial distribution of normalized axial mean velocity in 20 and 30 μm size class at z=9, 21 and 30mm

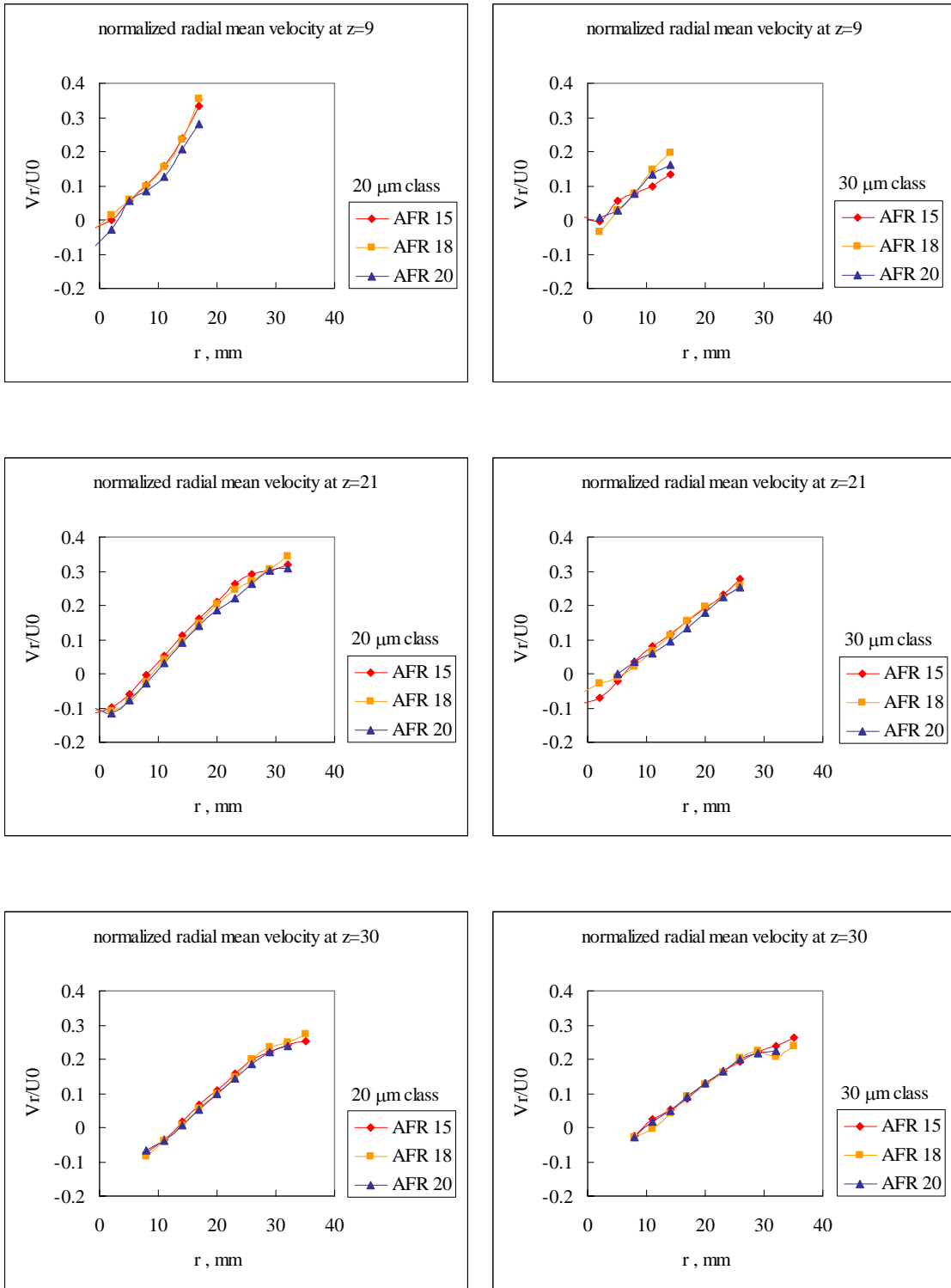


Fig. 5-2-9 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30  $\mu\text{m}$  size class at  $z=9, 21$  and  $30\text{mm}$

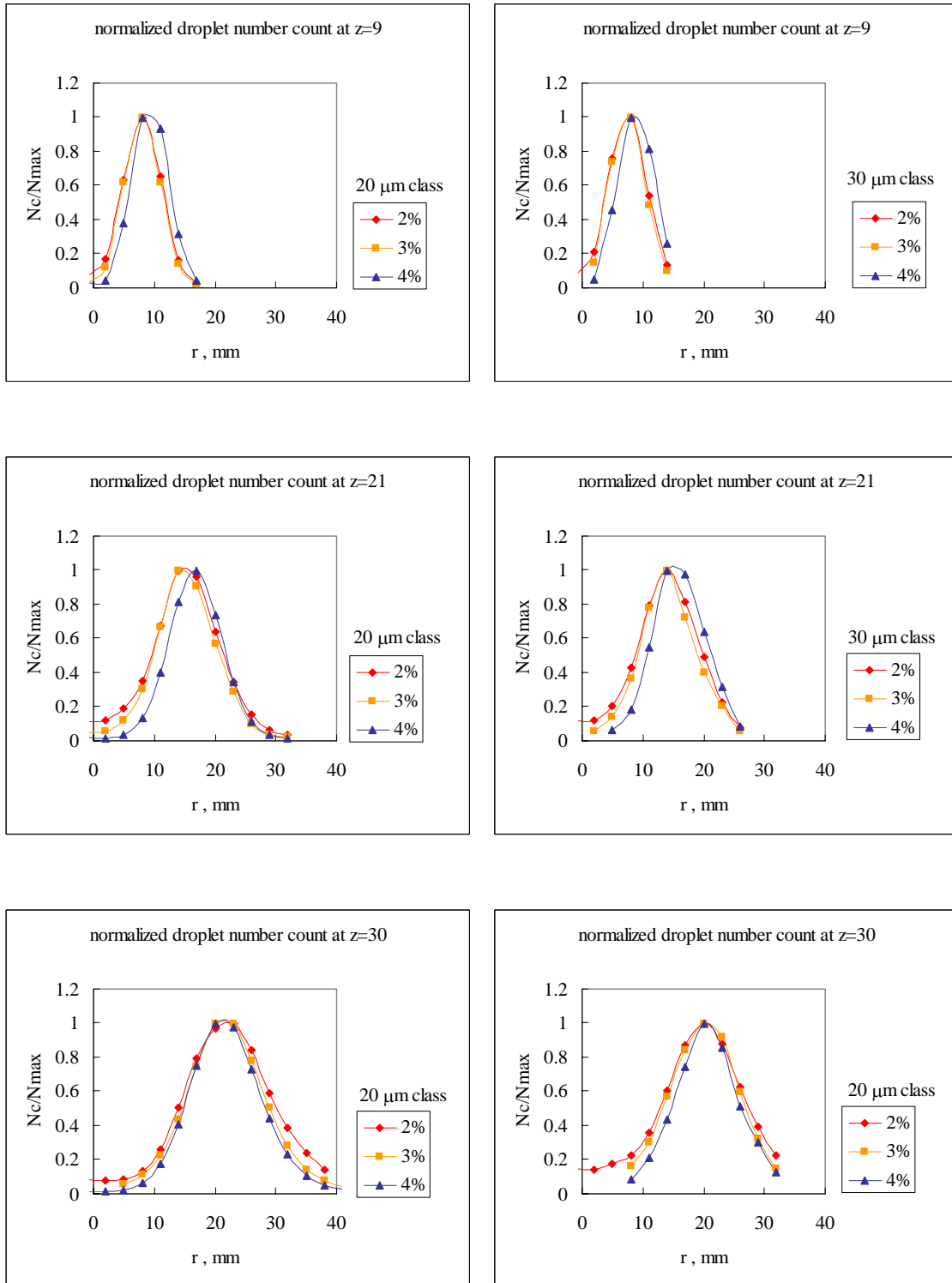


Fig. 5-2-10 Radial distribution of normalized droplet number count in 20 and 30  $\mu$ m size class at z=9, 21 and 30mm

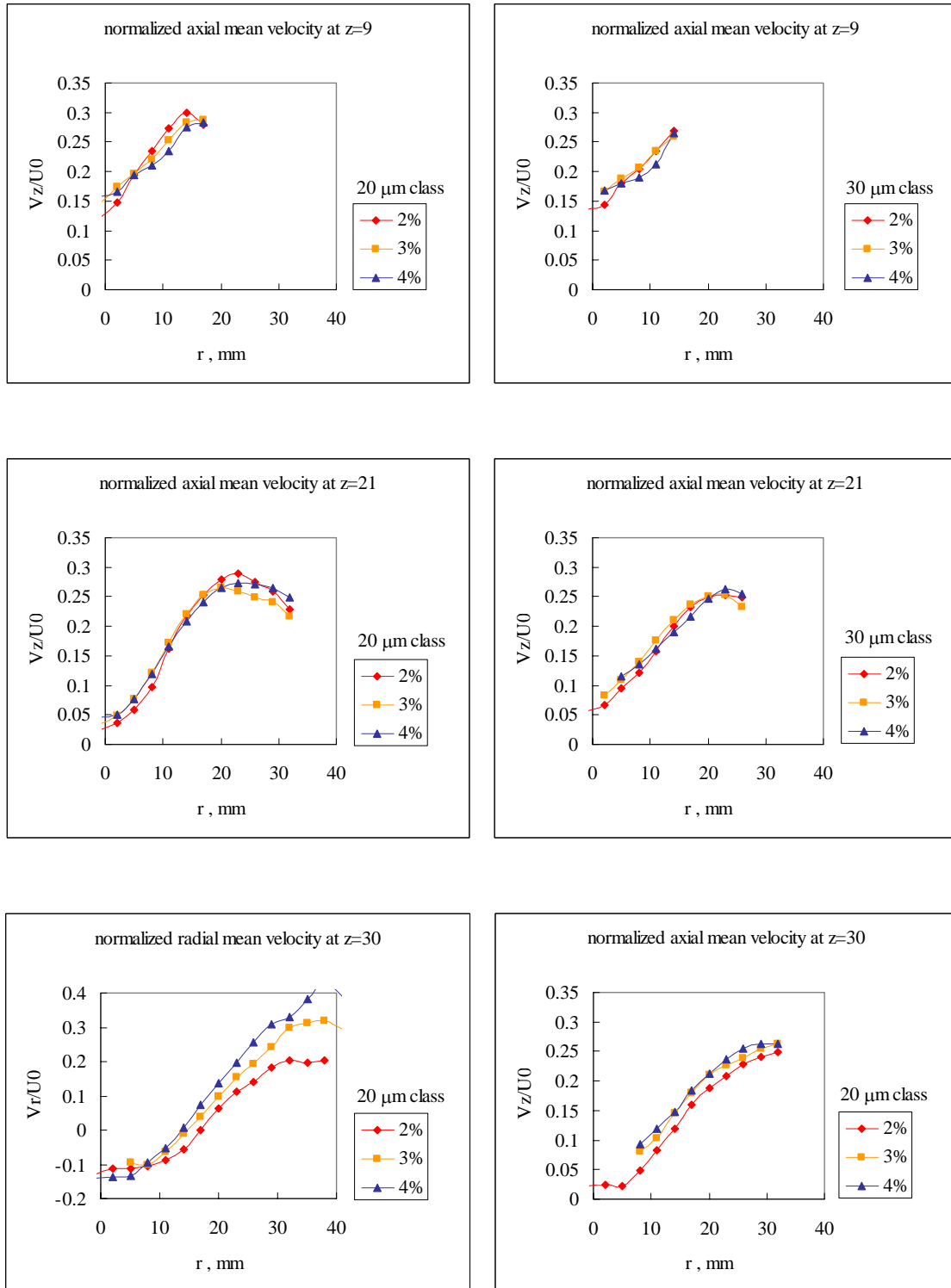


Fig. 5-2-11 Radial distribution of normalized axial mean velocity in 20 and 30  $\mu\text{m}$  size class at  $z=9, 21$  and  $30\text{mm}$

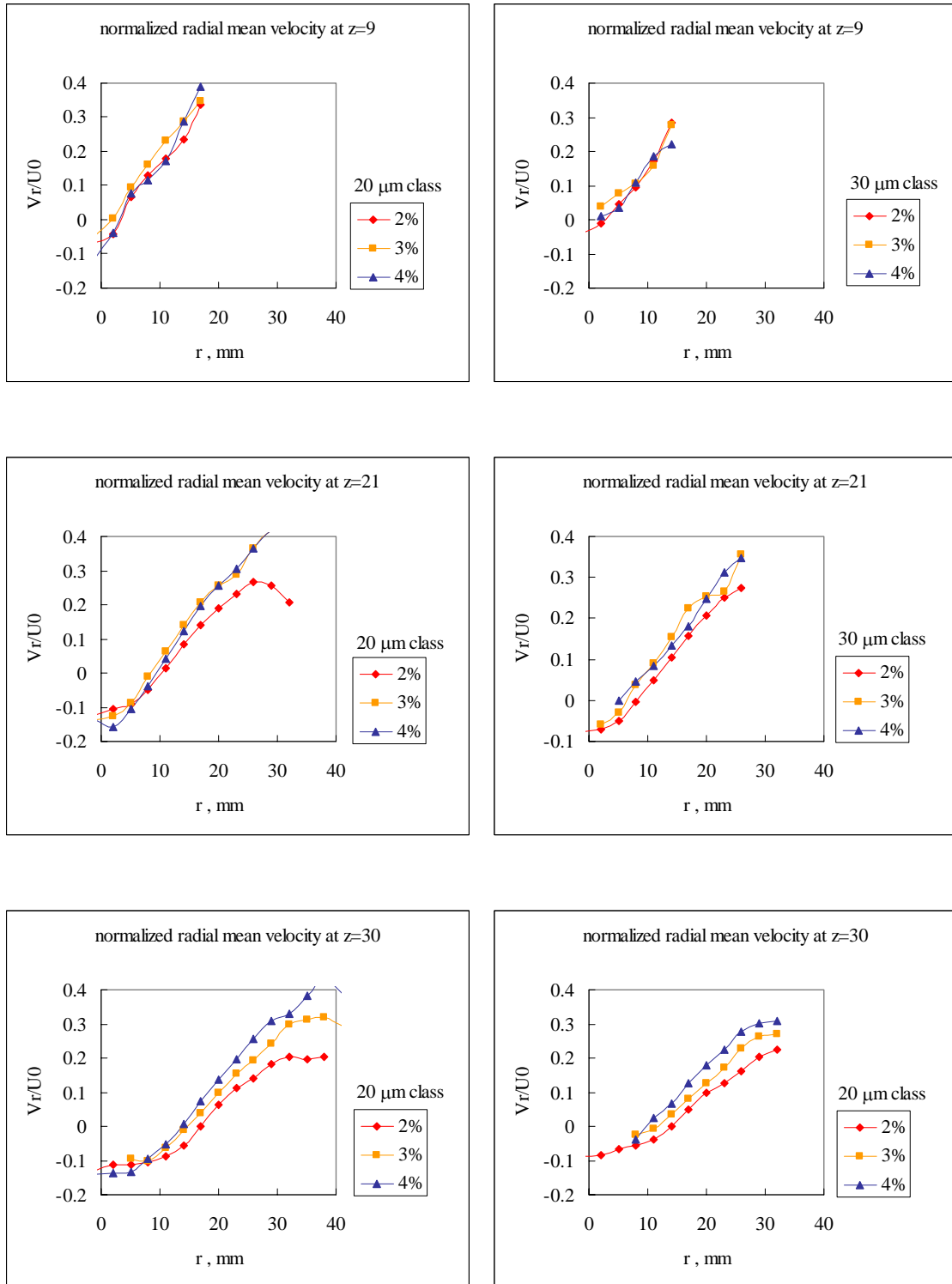


Fig. 5-2-12 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30 μm size class at z=9, 21 and 30mm



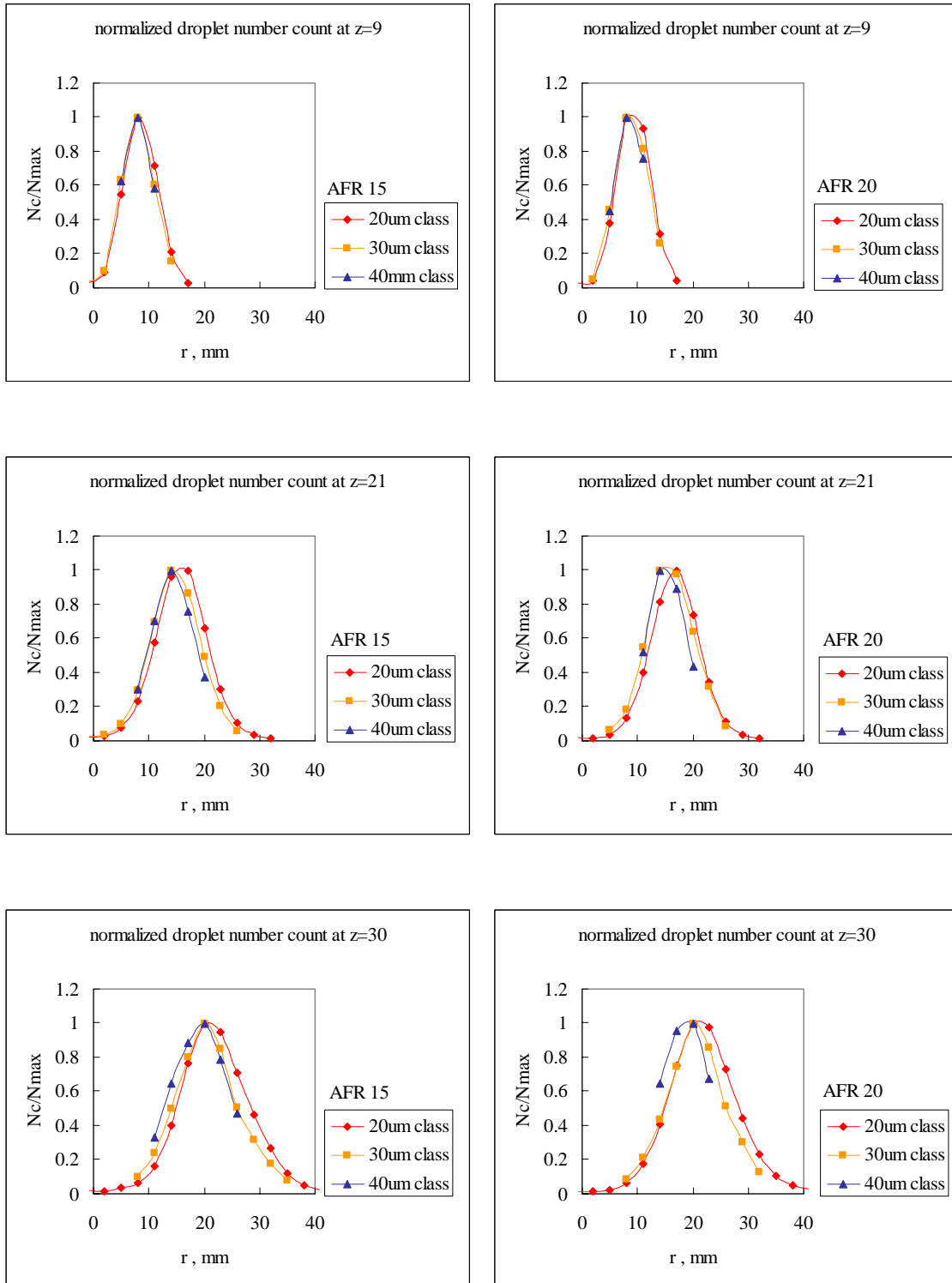


Fig. 5-2-13 Radial distribution of normalized radial mean velocity in 20 and 30  $\mu\text{m}$  size class at  $z=9, 21$  and  $30\text{mm}$

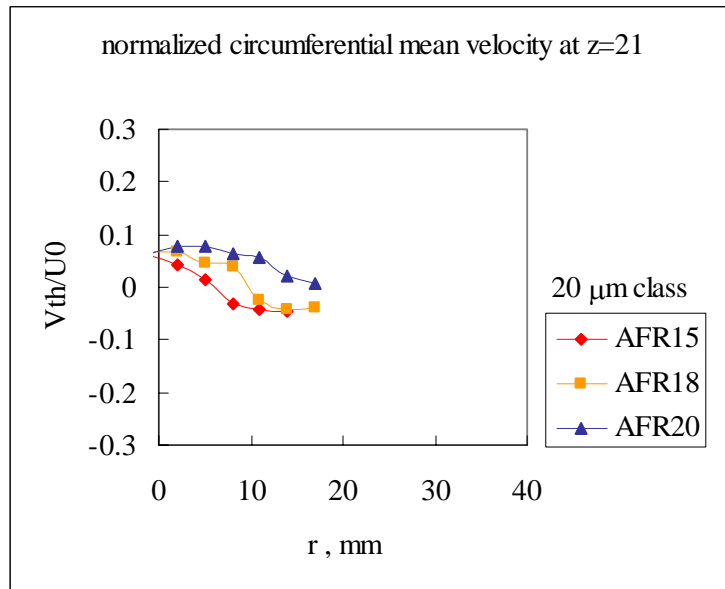
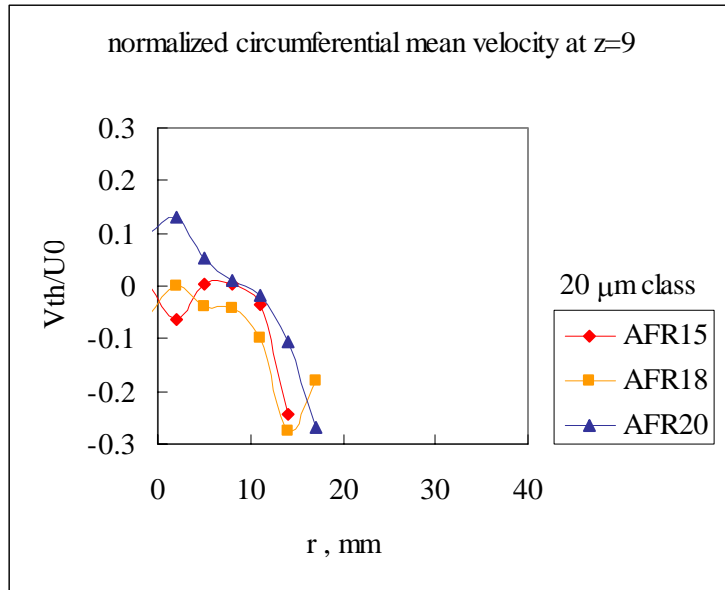


Fig. 5-2-14 Radial distribution of normalized droplet mean circumferential velocity in 20 $\mu$ m size class at z=9 and 21mm

## 付録 A レーザ干渉画像法の光学系設定

ステレオレーザ干渉画像法の光学系設定の一例として、非燃焼場での噴霧計測の霧化空気差圧 2, 4% のときの設定を示す。なお、全試験条件を通じて使用した光学機器は共通で、設定値は以下の値と大きく異なるない。

### 送光系

レーザー	New Wave solo PIV(MAX 15mJ) QSW ~ 110 $\mu$ s Second Harmonic 532nm
レーザーシート構成装置	f12.7 シリンドリカルレンズ f2000 平凸球状レンズ
作動距離	500mm(f2000 平凸球状レンズ先端から)
波長板	非燃焼試験: 1/4 波長板 燃焼試験: なし

### 受光系

開口スリット	縦 4mm 横 25mm
対物レンズ	Nikkor f105#2.5S
シリンドリカルレンズ	前 f-100 後 f100
CCD カメラ	Kodak ES1.0 8bit 1000 $\times$ 1016 pixel

### カメラ設定

作動距離 (測定原点 ~ スリット先端)	204.5mm
睨み角	カメラ 1 70.5° カメラ 2 70.0°
集光角	カメラ 1 6.99° カメラ 2 6.94°

解像度

カメラ 1 4.86 $\mu$ m/fringe

カメラ 2 4.89 $\mu$ m/fringe

計測可能粒径範囲

15 $\mu$ m ~ 200 $\mu$ m

## 付録 B ストークス数の導出

本論文では液滴の気流への追隨性を定性的なストークス数の概念を用いて考察した．そこで，ここでは気流への追隨時間を流れの特性時間により除した値であるストークス数の導出について述べる．

気流中の球状液滴の運動方程式は以下のように表される．

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d^2}{4} \rho_a (u - v) |u - v| \quad \dots (A-1)$$

ここで， $m$ ， $v$ ， $u$ ， $d$ ， $\rho_a$ ， $C_D$  はそれぞれ，液滴質量，液滴速度，気相速度，液滴径，気相密度，抗力係数である．

また，液滴の相対レイノルズ数は

$$\text{Re}_r = \frac{\rho_c D |u - v|}{\mu_c} \quad \dots (A-2)$$

(1) 式を(2)式を用い整理すると

$$\frac{dv}{dt} = \frac{18\mu_c}{\rho_a d^2} \frac{C_D \text{Re}_r}{24} (u - v) \quad \dots (A-3)$$

ただし， $\mu_c$  は気相の粘性係数， $C_D$  は抗力係数である． $\text{Re} < 1$  の場合ストークス流とみなせるから，抗力係数  $C_D$  は

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad \dots (A-4)$$

であるから，式(A-3)は

$$\frac{dv}{dt} = \frac{18\mu_c}{\rho_d D^2} \cdot (u - v) \quad \dots (A-5)$$

$$\tau_v = \frac{\rho_d D^2}{18\mu_c} \quad \dots (A-6)$$

$\tau_v$ を追従時間(緩和時間)と呼ぶ。

気流の特性時間  $\tau_f$ は

$$\tau_f = \frac{L}{U} \quad \dots (A-7)$$

$L$ は代表長さ， $U$ は代表速度である．よってストークス数  $S_t$ は

$$S_t = \frac{\tau_v}{\tau_f} = \frac{\rho_d D^2 U}{18\mu_c L} \quad \dots (A-8)$$

これよりストークス数は粒径の2乗と速度に比例することが分かる．

## 付録 C 屈折率変化の粒径解像度への影響

本研究では、液滴からの屈折光を利用するステレオレーザ干渉画像法を燃焼場に適用したため、燃焼による温度変化によって液滴の屈折率が変化することが問題になると考えられた。

そこで、液滴の屈折率の温度依存性とその粒径解像度への影響を調査した。温度  $T$ [K]と屈折率  $m$  の関係は次式で表される<sup>[C1]</sup>。

$$m(T) = 1.516204 - 7.4900943 \times 10^{-5} \times T - 4.906530 \times 10^{-7} \times T^2 \dots (C-1)$$

この式の適用範囲は 20~280 であるが、それ以上の温度では燃料は気化していると考えられるので問題はないと考えられる。この式により得られた屈折率を用いて粒径解像度を計算し、屈折率変化の粒径解像度への影響を評価する。

図 C-1 に屈折率と温度の関係、図 C-2 に屈折率と粒径解像度を示す。図から屈折率は温度上昇により 1.45 から 1.32 程度まで変化するが、干渉縞数(N)と粒径(d)の比例係数はほとんど変化しないことが分かる。比例係数の変化は  $10^{-2} \mu\text{m}$  のオーダーである。これは式(2.1)から分かるように粒径算出への屈折率の寄与が小さいためである。このように粒径解像度の屈折率への依存性が小さいことは、燃焼場へレーザ干渉画像法を適用することの大きな利点である。

## 参考文献

[C1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Mitteilung 98-01

Die Stoffeigenschaften von Kerosin JetA-1, Michael Rachner

Institut für Antriebstechnik Köln

## 図題

Fig.C-1 Refractive index of droplet for different temperature

Fig.C-2 Resolution of droplet for different refractive index of droplet



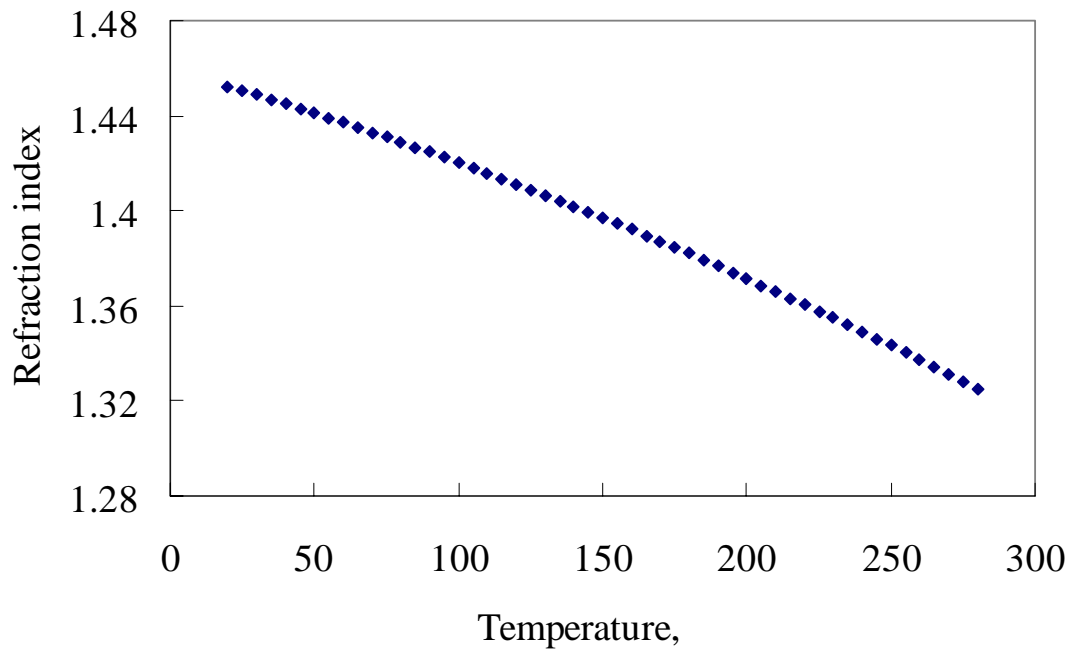


Fig.C-1 Refractive index of droplet for different temperature

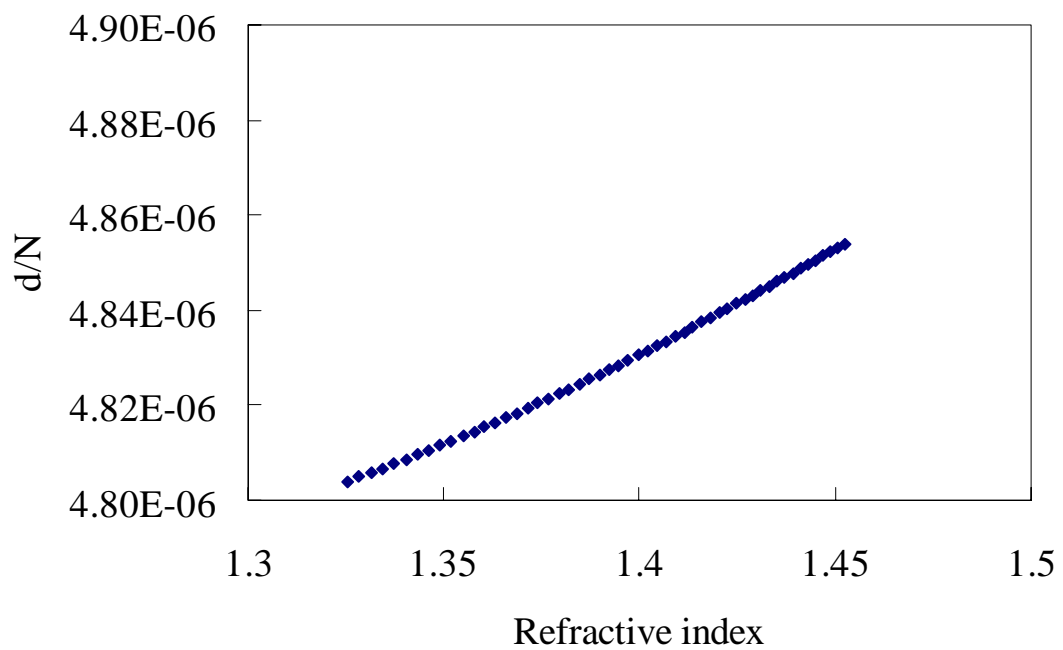


Fig.C-2 Resolution of droplet for different refractive index of droplet