

ディーゼル機関燃料噴霧の  
分裂および制御に関する研究

2020年10月

長崎大学大学院工学研究科

齋藤 学

## 記号表

$a$	加速度
$\Delta A$	領域
$B_S$	噴霧幅
$C_{RT}$	モデル定数
$D_{Nozzle}$	噴孔径
$D_p$	液滴径
$dD_p$	液滴径減少
$F$	焦点径
$f$	ドップラーバースト信号周波数
$L$	焦点長さ
$L_b$	分裂長さ
$L_d$	上流焦点から下流焦点にかけての液滴間距離
$M$	全燃料質量
$M_E$	理論質量
$M_{inj}$	噴射質量
$MF_{all}$	上流焦点を通過したすべての液滴の質量流量
$MF_{valid}$	上流および下流焦点を通過したすべての液滴の質量流量
$N_{up}$	上流焦点を通過したすべての液滴数
$N_{up-down}$	上流および下流焦点を通過したすべての液滴数
$ND_{all}$	上流焦点を通過した液滴のすべての数密度
$ND_{valid}$	上流および下流焦点を通過したすべての液滴の数密度

$N_p$	液滴数
$P_e$	供試圧
$P_{inj}$	噴射圧
$Q_{mo}$	空気導入量
$r$	分裂前の親液滴の半径
$r_e$	等価円半径
$r_{new}$	分裂後の子液滴の半径
$S$	2 焦点間距離
$T$	噴射開始からの経過時間
$t_1$	飛行時間
$t_2$	上流焦点の散乱時間
$t_3$	下流焦点の散乱時間
$\Delta T$	解析区間
$\Delta t$	液滴時間間隔
$V$	粒子速度
$V_a$	平均速度
$V_{air}$	空気速度
$V_p$	液滴速度
$V_{rel}$	空気速度と液滴速度の相対速度
$We$	ウェーバー数
$Re$	レイノルズ数
$x$	座標
$\Delta x$	計測点間距離

$y$	座標
$z$	座標
$\sigma$	燃料の表面張力
$\sigma_l$	干渉縞間隔
$\lambda$	レーザー入射角度
$\tau_{bx}$	分裂特性時間
$\rho_l$	燃料密度
$\rho_g$	雰囲気密度

## 略称

APD	アバランシェフォトダイオード
CIV	相関画像速度計
CO <sub>2</sub>	二酸化炭素
DPF	ディーゼルパーティキュレートフェイルター
EV	電気自動車
FPGA	フィールドプログラマブルゲートアレイ
HV	ハイブリッド自動車
L2F	レーザー2焦点流速計
LCA	ライフサイクルアセスメント
LDV	レーザードップラー流速計
LIF	レーザー誘起蛍光法
NO <sub>x</sub>	窒素酸化物
PDPA	位相ドップラー粒子計測法
PDA	位相ドップラー流速計（PDPAと同義）
PHV	プラグインハイブリッド自動車
PIV	粒子イメージ流速計測法
PM	粒子状物質
SCR	選択的触媒還元
SNR	信号対雑音比
SIP	戦略的イノベーション創造プログラム

# 目 次

記号表	2
略称	5
第 1 章 序論	19
1.1 研究背景	9
1.2 研究目的	18
第 2 章 燃料噴霧液滴の計測装置	19
2.1 レーザー2焦点流速計システム	19
2.1.1 光学系および信号処理系	19
2.1.2 計測原理	21
2.2 位相ドップラー流速計	27
2.3 供試インジェクター	31
2.4 燃料噴射システム	31
2.5 画像計測システム	32
第 3 章 噴霧液滴の分裂モデル	33
3.1 1次分裂モデル	34
3.2 2次分裂モデル	34
第 4 章 L2F 法の特徴と特性	40
4.1 L2F 法、PDA 法、両計測法の比較検証	40
4.1.1 L2F における計測条件	40
4.1.2 PDA における計測条件	41
4.1.3 L2F と PDA の特徴の比較	43
4.1.4 速度とサイズの相関	44
4.1.5 速度およびサイズの確率密度	48
4.1.6 サイズに及ぼす速度の影響	51
4.1.7 まとめ	52
4.2 空気速度の評価	52
4.2.1 粒子画像計測計(PIV)における計測条件	52
4.2.2 L2F おける計測条件	54
4.2.3 噴射条件および計測条件	56
4.2.4 PIV 計測による空気導入量の評価	57

4.2.5	噴霧幅の比較	58
4.2.6	L2F による液滴速度の時間変化	59
4.2.7	L2F による液滴サイズの確率密度分布	61
4.2.8	L2F による液滴速度と空気速度の空間分布	63
4.2.9	空気導入量の算出方法	65
4.2.10	L2F 及び PIV による空気導入量の時間変化比較	66
4.2.11	まとめ	68
第 5 章 噴霧計測結果および考察		70
5.1	噴霧液滴の分裂・分散	70
5.1.1	噴射条件および計測条件	70
5.1.2	ウェーバー数の評価方法	72
5.1.3	液滴速度およびサイズの時間変化	73
5.1.4	液滴の速度およびサイズの空間分布	75
5.1.5	空気速度の空間分布	77
5.1.6	ウェーバー数の評価	78
5.1.7	液滴サイズの減少率	79
5.1.8	液滴サイズの減少率とウェーバー数の相関	80
5.1.9	まとめ	81
5.2	噴霧液滴への噴射量の影響	82
5.2.1	噴射条件および計測条件	82
5.2.2	液滴の速度およびサイズの時間変化	84
5.2.3	噴射中期における液滴の速度およびサイズの空間分布	89
5.2.4	液滴サイズ減少率の空間分布	94
5.2.5	液滴サイズ減少率の相関	95
5.2.6	まとめ	96
5.3	燃料液滴の 2 次分裂過程への噴孔仕様の影響	114
5.3.1	噴射条件および計測条件	114
5.3.2	液滴の速度およびサイズの時間変化	115
5.3.3	液滴サイズの減少率	116
5.3.4	液滴のウェーバー数	119
5.3.5	まとめ	121
5.4	インジェクター駆動信号変化による噴霧分裂の制御	114
5.4.1	噴射条件および計測条件	114
5.4.2	噴霧画像	115
5.4.3	速度・サイズの時間変化	116
5.4.4	電流波形と速度およびサイズ	119

5.4.5	液滴速度およびサイズの半径方向分布	121
5.4.6	まとめ	126
第6章	総括	127
参考文献		141
謝辞		141



# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、地球温暖化問題に関する京都議定書のCO<sub>2</sub>排出量削減目標を達成する手段の一つとして、また、化石燃料に対する依存を減らす手段の一つとして、電気モーターのみを動力源とする「電気自動車(EV)」をはじめ、内燃機関(ICE)と電気モーターの両方を動力源に持つ「HV」や「PHV」など、動力源の電氣化が進んでいる。電気モーターのみを動力源とする電気自動車(EV)は、CO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>等の有害排出物が無く、地球温暖化や大気汚染の緩和策に有効であり、内燃機関を有せず、回転領域によらず電力から動力への変換効率が大きく変化しないことから、変速機やスターターなどの起動補助動力も不要であり、音が静かという特徴もある。そういったメリットがあり、「EV」「HV」「PHV」は乗用車において普及し、また、「HV」「PHV」は、大型トラックやバスにおいても、僅かではあるが、採用されつつある。しかし、上述した、電気自動車「EV」が、CO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>等の有害排出物が無いのは走行中に限られた事であり、モーターのエネルギー源である電力は火力発電所において、自然界に存在する1次エネルギー(天然ガスや石油など)を変換加工することで生み出される2次エネルギーであり、その過程においてCO<sub>2</sub>が排出される。最新の天然ガスによる火力発電所の熱効率が61%を実現しているが、内燃機関においても、熱効率50%達成の研究成果が報告(科学技術イノベーション総合戦略(平成25年6月7日閣議決定)及び日本再興戦略(平成25年6月14日閣議決定)において、総合科学

技術会議が司令塔機能を発揮し、科学技術イノベーションを実現するために創設された、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において、熱効率 50% 及び CO2 30%削減（2011 年比）を実現するための革新的技術の研究開発を行うことを目的として設定されたテーマ「革新的燃焼技術」においては、2019 年 3 月に、熱効率 50%達成の研究成果が報告された。）されており、両者による熱効率に差はみられるものの、小さくなりつつある。また、工業製品の製造時から使用時、廃棄時まですべて含んだ環境負荷を考える LCA（ライフサイクルアセスメント）においては、製造時の環境負荷が大きいバッテリー（蓄電池：電気を蓄える装置で、鉛電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池等が実用化されており、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池は鉛電池よりエネルギー密度が高く、寿命が長い。）を必ず搭載する電気自動車は決して有利ではない。そのため、エネルギー密度の高さや取り扱いの良さから、1 次エネルギーである液体燃料をエネルギー源とした内燃機関への期待はより高まっている。

内燃機関の一つであるディーゼル機関は、内燃機関の中でも、熱効率が高く、低燃費という特徴を有しており、1892 年ドイツの技術者ルドルフ・ディーゼルによって生み出され、それ以降多くの動力源へ採用されてきた。近年では、単体としての動力源だけでなく、モーターとの組み合わせによる「HV」「PHV」向けの動力源としてもごく僅かではあるが採用されている。

高熱効率、低燃費という優れた特徴を有する一方、ディーゼル機関の排ガス中に含まれる窒素酸化物(NOx : Nitrogen Oxide)や粒子状物質(PM : Particulate Matter)は人体および環境に悪影響を及ぼすため、ディーゼル機関が誕生してお

よそ 100 年を経て、1990 年代に入ると環境保護の観点から、世界中でディーゼル機関の排出ガス規制が施工されている(図 1.1)。日本では 2009 年よりポスト新長期規制により NOx は 0.7g/kWh、PM は 0.01g/kWh の規制値が設けられており、同様にアメリカでは Tier3 による規制が、ヨーロッパでは EURO VI による規制が行われている。いずれにおいてもガソリン機関と同程度の規制値が設けられており、規制値の達成は容易ではない。これらの規制値を満たすために PM 低減対して、DPF(Diesel Particulate Filter)<sup>(1-3)</sup>、NOx 低減に対して、尿素 SCR(Selective Catalytic Reduction)システムや NOx 吸蔵還元触媒<sup>(4)</sup>などの後処理装置が実用化されているが、後処理装置の装着に伴い重量が増加すること、また、金属触媒担持型の DPF においては、触媒活性化のため、ポスト噴射や燃料の排気管噴射が必要となり、燃費は悪化する。また、尿素 SCR(Selective Catalytic Reduction)システムにおいては、エネルギー源としての液体燃料以外に尿素(AdBlue)を搭載しなければならない。

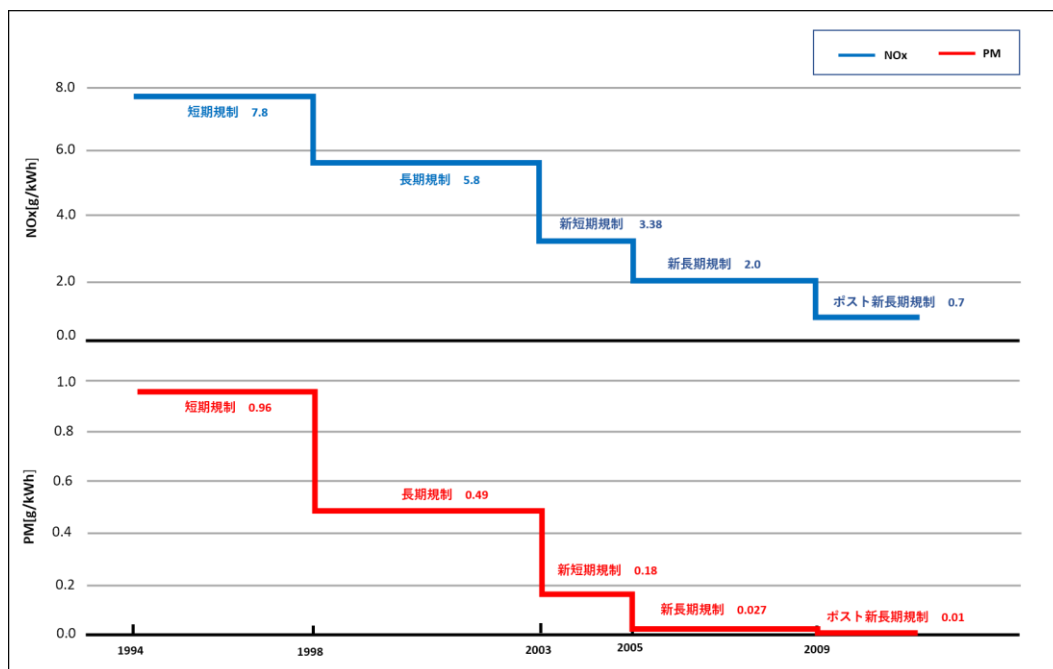


Fig. 1.1 Trends in Diesel emission regulation

本来であれば、上述の後処理装置を使用することなく、内燃機関単体からの排気ガス中の有害物質を削減することが望ましいが、燃焼温度が高くなった時に窒素と酸素が反応する事で発生する NOx と空気が少ない状態で燃焼した時に発生する PM はトレードオフの関係になっており、両有害物質の同時低減が困難であることから、様々な後処理装置が多く採用されている。

これに対して、燃料と空気の混合気形成の適正化は、燃焼時に発生する有害排出物そのものを低減する方法であり、NOx 排出量と PM 排出量のトレードオフ改善が見込める。NOx は混合気濃度が希薄な噴霧外縁付近で、PM は混合気濃度が過濃な噴霧内部で生成される。NOx と PM の同時低減のためには、噴霧内部は

PM が生成されない混合気濃度が一様に分布し、噴霧と雰囲気の間で希薄な混合気が生成されない噴霧を形成することが必要である。現在、ディーゼル機関において主流となっている、直接噴射式においては、燃料が筒内へ噴射され、微粒化、蒸発、液体内部乱れや雰囲気流の乱れにより拡散、その後、混合気を形成し、燃焼に至る。すなわち、混合気の形成過程が、燃焼形態を支配し、熱効率や排出ガスへ大きく影響を及ぼす。つまり、燃焼の改善、熱効率の向上、排出ガスの低減において、混合気の形成に影響する噴霧特性を空間的および時間的に制御する必要があり、噴霧全体の特性を大きく支配する噴孔出口近傍から噴射される燃料の液柱、液滴分布や噴射初期の分裂過程を詳細に理解することが重要である。また、そこから得られた知見を基に、噴霧特性の制御手法が確立すれば、より一層の熱効率向上、排出ガスの低減が見込める。

図 1.2 に排出ガス規制の遷移とインジェクターの進化について示している。1892 年、ディーゼル機関誕生からほどなく、非常に逸な機械式燃料噴射装置が発明・採用されたことにより、その後、ディーゼル排出ガス規制が強化される 1990 年代までのおよそ 100 年もの間、ディーゼルエンジンの基本設計は変わらなかった。当時の、機械式燃料噴射装置における燃料噴射弁は、「ノズル」と呼ばれ、燃料圧力に応じて、機械的に開閉する機能のみを担っており、1990 年代のディーゼル排出ガス規制の強化に伴い、ディーゼルエンジンに技術革新が求められ、機械式燃料噴射装置からコモンレールシステムに代表される電子式燃料噴射装置へ大きな進化を遂げてきた。その中でも、燃料噴射弁は機械式の「ノズル」から「インジェクター」と呼ばれる電子式燃料噴射弁へ爆発的に進化し、燃料圧力によら

ず、非常に微細に噴射量を調整し、精密に噴射タイミングを決定するという、極めて複雑な機能を担うこととなった。

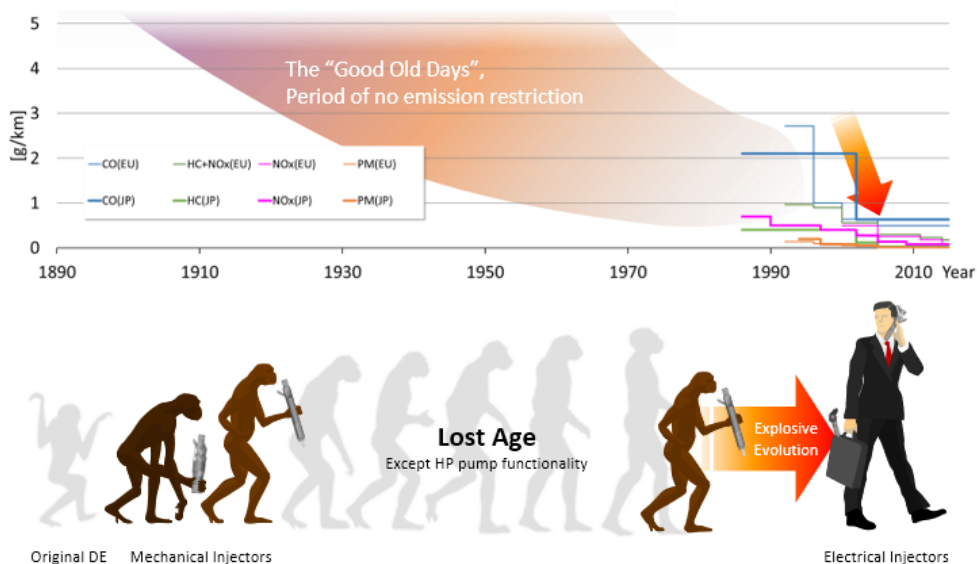


Fig. 1.2 The relationship between diesel emission regulations and the evolution of diesel injectors

その後、電子式燃料噴射装置は、迫りくるディーゼル排出ガス規制をクリアするため、燃料圧力の高圧化、小噴孔径化、多噴孔化、噴射応答性改善等、少しずつ進化し、2000年代に入ると、インジェクターノズルにおいて、噴孔入口から出口に向けてテーパ形状(K\_factor)、噴孔入口部の R 形状(Grinding\_rate)、近年は、噴孔出口部段付き形状(Stepped\_hole)が採用され、積極的に噴霧特性の制御も試みられてきた(図 1.3)。しかし、これらは、実験的に効果が検証され実用化されたものであり、噴霧特性や混合気形成過程の理解に基づいたものでない。噴霧特性や

混合気形成過程を理解し、噴霧を制御することが重要であり、そのためには、噴孔出口近傍における噴霧分裂過程を理解することの必要性が非常に高い。しかし、噴孔出口近傍は噴霧液滴が高速高数密度で存在しているために、直接計測が非常に困難であり、噴孔出口近傍の噴霧液滴の計測例はほとんどなく、噴孔出口近傍における分裂過程の噴霧特性は未だ解明されていない。

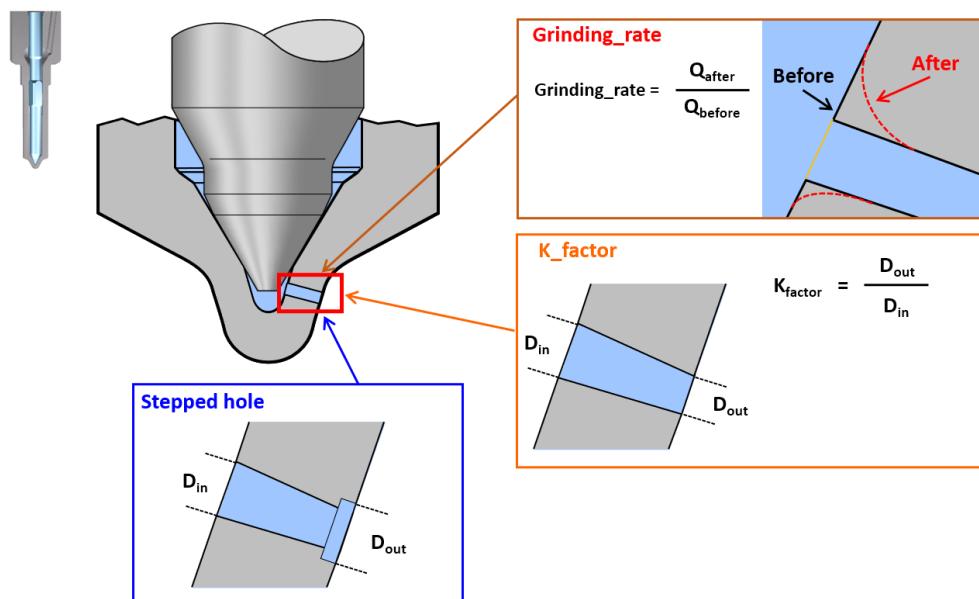


Fig. 1.3 Geometry of injector nozzle hole

これまでに多くの研究者により噴霧の計測方法が提案され、噴霧特性が評価されてきた。代表的な噴霧の計測方法として噴霧形状の時間過渡的な挙動をマクロ的にとらえる噴霧の画像計測があり、噴霧先端到達距離<sup>(5-7)</sup>や噴霧角<sup>(8,9)</sup>などの時間変化が報告されている。特に噴霧先端到達距離は噴霧の成長を評価する代表的

なパラメーターであり、廣安ら<sup>(10)</sup>に代表される多くの研究者によって予測式が提案されている<sup>(11-14)</sup>。また、LIF(Laser-induced fluorescence)法<sup>(15,16)</sup>、CIV(Correlation imaging velocimetry)<sup>(17)</sup>、PIV(Particle Image Velocimetry)<sup>(18-20)</sup>や X 線<sup>(21)</sup>等を用いた計測結果が報告されている。

噴霧液滴粒径の計測方法にはフラウンホーファー回析法<sup>(22)</sup>やレーザー光回折法<sup>(23,24)</sup>、蛍光・散乱光法<sup>(25)</sup>、干渉画像法<sup>(26)</sup>、ホログラフィ法<sup>(27)</sup>などがあるが、これらの計測法は計測された画像から液滴径を評価するため、噴霧の下流あるいは外縁の比較的低数密度な領域において用いられ、噴孔近傍や噴霧中心部の液滴の計測には不向きである。

粒径と流速を同時に計測できる位相ドップラー粒子計測法(Phase Doppler Particle Analyzer ; PDPA)は位相情報を基にして粒径を決定するために、計測点を取り巻く噴霧粒子によって散乱光強度が減衰しても計測結果への影響が少ないという特徴を持つ。これまでに多くの研究者によりディーゼル噴霧液滴の計測に PDPA を用いた結果が報告されており<sup>(28-35)</sup>、噴射期間中に噴射された液滴の計測結果も報告されているものの、噴霧内部では液滴の数密度が高いことから、個々の液滴の計測は容易ではなく、噴射期間中の液滴分裂領域における計測例はほとんどない。

燃料圧力の高圧化、噴孔径の小噴孔径化により、上述のように様々な噴霧計測法があるものの、噴孔出口近傍では高速高数密度で液滴が存在するため、いずれの計測方法においても、噴孔出口近傍の噴霧計測が困難であり、噴霧を構成する



液滴の挙動に関する知見は極めて限定的である。また時間的および設備的制約から現象の全てを実験により理解することは非現実的であり、数値解析による噴霧特性の理解が必要である。燃料噴霧について数値解析を行う際、液滴の分裂、衝突、合体、蒸発等の物理現象を適切にモデル化する必要がある。これまでに様々な研究者によって噴孔から離れた位置での計測結果や、噴霧先端到達距離等の噴霧形状から得られた情報を基にモデルが考案されているものの、その妥当性は確認できていない。

2つの焦点の間を液滴が飛行する時間を計測して速度を求めるレーザー2焦点流速計(Laser 2-focus velocimeter ; L2F)は光学的 SNR(Signal to Noise Ratio)が高く<sup>(36)</sup>、計測体積が微小であり、液滴数密度の高い噴霧計測において多重散乱の影響を受けにくいという特徴を有している。本論文において用いられたレーザー2焦点流速計は、液滴による散乱光の散乱時間計測機能を付加することによって速度とサイズの同時計測が可能である<sup>(37)</sup>。これまでにノズル噴孔から 0.5mm 下流の噴霧液滴速度とサイズを同時に計測した結果<sup>(38)</sup>や、ディーゼル噴霧内の局所的な液滴質量流量の評価法を提案し、その積分によって求められた噴射量と実噴射量がほぼ一致することが報告されている<sup>(39)</sup>。

## 1.2 研究目的

本研究では、計測体積が微小であり、高速高密度領域での液滴の速度とサイズの計測が可能なレーザー2焦点流速計（L2F）を用いて、他の計測手法では困難であった、高速・高数密度場（噴孔出口近傍）の噴霧分裂過程における噴霧特性を明らかにすることを目的とする。また、得られたデータを用いて、下記考察を行った。

- ・ 単一液滴における変形ならびに分裂が詳細に観察され、表面張力に対する慣性力の比であるウェーバー数と単一液滴の分裂の関係が整理されている<sup>(40)</sup>。また、ウェーバー数はディーゼル噴霧の数値シミュレーションで使用されており、分裂の進行を決定するパラメーターの一つとなっている<sup>(41)</sup>。ここでは、ウェーバー数と液滴分裂の関係を明らかにすることを目的に、L2Fによる計測データを基にウェーバー数を算出し、噴孔出口近傍における液滴のサイズ減少率との関係について考察を行った。
- ・ 多くの研究者が使用している電子式ディーゼルインジェクターにおいて、その作動原理は非常に複雑で、かつ、噴射を制御するためのインジェクター駆動波形は噴霧特性へ影響する因子として非常に重要であるが、そのインジェクター駆動波形を変更することによる、噴霧特性への影響について考察を行った。また、本考察は燃料噴霧を積極的に制御するための知見にも繋がることを期待される。

## 第 2 章 燃料噴霧液滴の計測装置

### 2.1 レーザー2焦点流速計システム

#### 2.1.1 光学系および信号処理系

本研究で用いた L2F の測定体積は 2 つの焦点より構成され、図 2.1 はその 3 次元構造を示している。焦点直径  $F$  が  $3\mu\text{m}$ 、焦点長さ  $L$  が  $20\mu\text{m}$ 、焦点間距離  $S$  が  $24\mu\text{m}$  の微小な測定体積を実現している。また、LDV(Laser Doppler Velocimeter) や PDPA と比べて光学的 SNR が非常に高いという特徴を持つ。

図 2.2 に L2F の光学系および信号処理系を示す。半導体レーザー(Intense 社製、波長  $830\text{nm}$ 、出力  $100\text{mW}$ )から射出されたレーザー光はコリメータレンズで平行

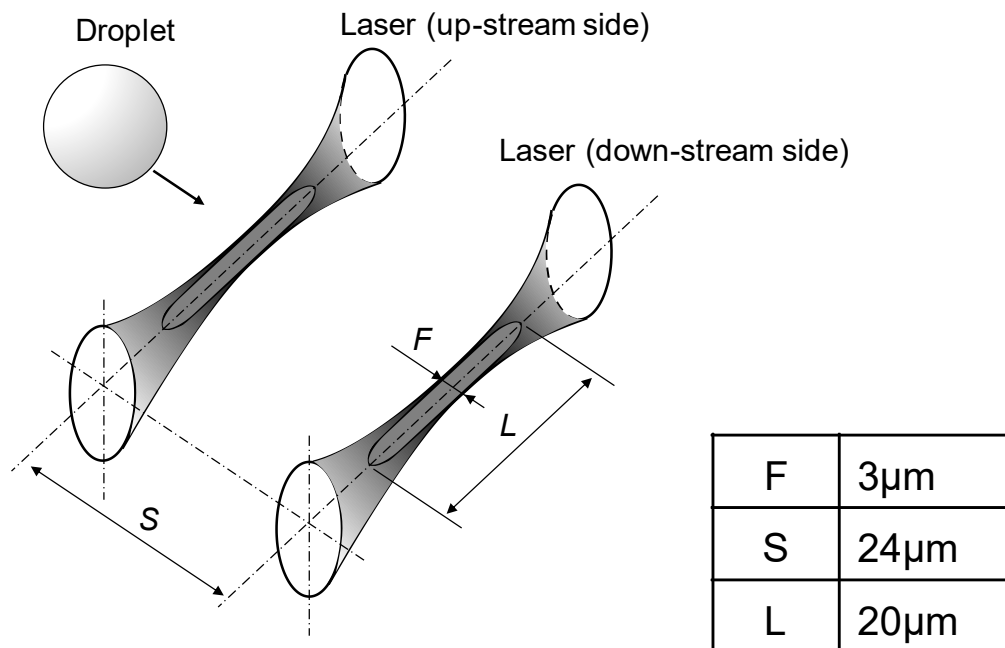


Fig. 2.1 Measurement probe of L2F

光となり、ビームスプリッターにより 2 本のレーザー光に分けられる。反射鏡およびキューブ型ビームスプリッターにより反射された 2 本のレーザー光は焦点距離 8mm の非球面レンズ(GELTECH 社製、BJ350240B)によりレンズ前方に 2 つの焦点を形成する。計測対象となる液滴が焦点を通過すると散乱光が生じ、L2F は後方散乱光を受光する。後方散乱光は再び非球面レンズおよびキューブ型ビームスプリッターを透過し、顕微鏡用対物レンズで拡大された後、光センサーであり受光面サイズが直径 0.2mm である APD(浜松ホトニクス社製、S2381)で検知される。2 つの焦点から生じた散乱光はそれぞれ別の APD に導かれる。APD から出力された微弱な電流はアンプで増幅され、FPGA (Field Programmable Gate Array : Prime Systems 社製、SX-USB2)により構成されるデジタルカウンターに送られる。FPGA により液滴が焦点間を飛行する時間、および各焦点における液滴の散乱時間は 480MHz の周波数で計数される。さらに、噴射信号印加からの経過時間である液滴データ取得時刻も同時に 6MHz の周波数で計数する。

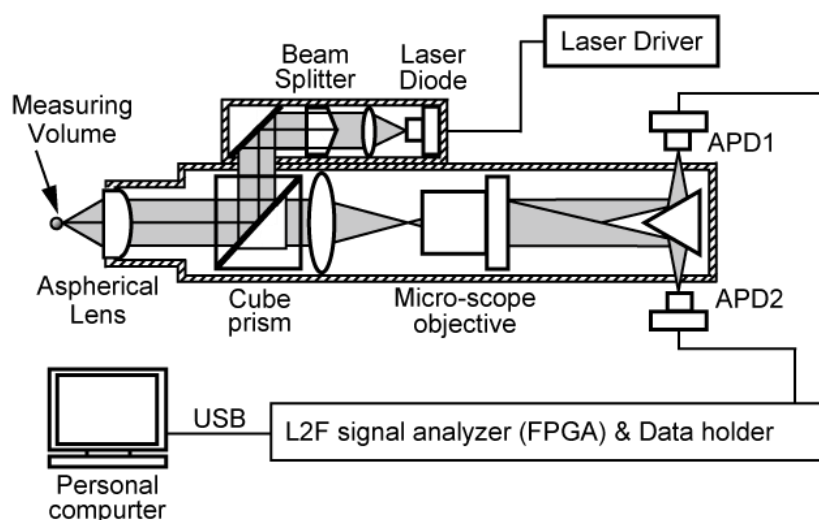


Fig. 2.2 Optical setup of L2F and signal processor

## 2.1.2 計測原理

図 2.3 に計測対象粒子が 2 焦点を通過するとき APD から出力される上流・下流信号とカウントされる飛行時間および散乱時間の関係を示す。計測対象粒子が上流焦点を通過してから下流焦点を通過するまでの飛行時間を  $t_1$ 、計測対象粒子が焦点を通過したときの、上流焦点の散乱時間を  $t_2$ 、下流焦点の散乱時間を  $t_3$  とする。液滴速度  $V_p$  は、既知である焦点間距離  $S$  と飛行時間  $t_1$  より次の式で求められる。

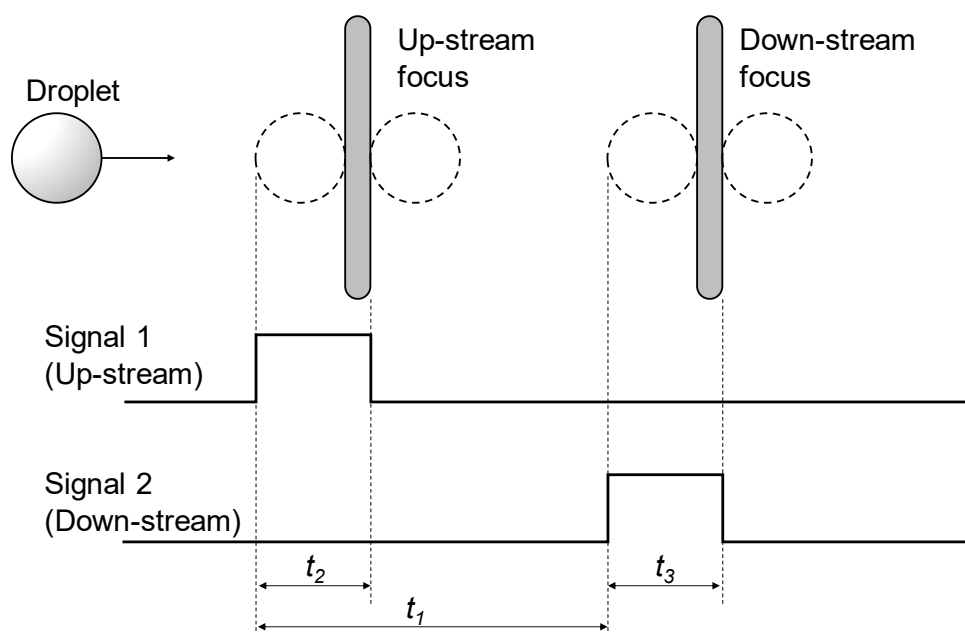


Fig. 2.3 Time-of-flight and time-of-scattering

$$V_p = \frac{S}{t_1} \quad (2.1)$$

また、液滴サイズは、2 焦点間距離  $S$  と液滴サイズ  $d_p$ +焦点サイズ  $F$  の比が飛行時間  $t_1$  と散乱時間の比に対応することから次の式が得られる。その際、散乱時間は上流散乱時間  $t_2$  と下流散乱時間  $t_3$  の平均値を用いる。

$$\frac{F + d_p}{S} = \frac{\frac{t_2 + t_3}{2}}{t_1} \quad (2.2)$$

上式をサイズ  $d_p$  について変形すると

$$d_p = V_p \cdot \frac{t_2 + t_3}{2} - F \quad (2.3)$$

と求められる。

噴霧液滴の空間的な分散の状況把握は、高数密度場における液滴の分裂過程を理解する上で重要である。本論文では分散の指標として、液滴間距離ならびに数密度を考える。液滴間の飛行方向の距離  $L_d$  は、液滴が計測点を通過した後、次の液滴が通過するまでの時間  $\Delta t$  と液滴の速度  $u$  の積、すなわち、

$$L_d = V_p \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

で推定できる。ここで液滴時間間隔  $\Delta t$  は両焦点を通過した液滴データすなわち有効データより算出される。また、焦点の計測可能な面積は  $(L+d_p) \cdot (F+d_p)$  であり、1個の液滴が体積  $L_d \cdot (L+d_p) \cdot (F+d_p)$  の空間に存在すると考えられる。これらより有効データより求めた単位時間当たりの平均液滴数密度  $ND_{valid}$  は

$$ND_{valid}(x,T) = \sum \frac{1}{L_d \cdot (L+d_p(x,T)) \cdot (F+d_p(x,T))} / \sum \quad (2.5)$$

で求められる。

液滴数密度の計測限界は測定体積、すなわち  $F \cdot L \cdot S \doteq 1.44 \times 10^{-6} (\text{mm}^3)$  に1つの液滴が存在する場合であり、そのときの数密度は  $1 / 1.44 \times 10^{-6} \doteq 694,444 (1/\text{mm}^3)$  となる。

噴霧内の局所質量流量は燃料当量比分布の基礎情報として重要である。直径  $F$ 、長さ  $L$  の焦点をサイズ  $d_p$ 、体積  $V_p$  の液滴が通過する場合、単位時間に上流焦点および下流焦点の両方を通過する各液滴の質量の総和である質量流量  $MF_{valid}$  は次式により算出できる。

$$MF_{valid}(x,T) = \frac{\sum \frac{\rho \cdot V_p(x,T)}{\Delta t(x,T) \cdot (L+d_p(x,T)) \cdot (F+d_p(x,T))}}{\sum} \quad (2.6)$$

式(2.5)および(2.6)では、上流焦点および下流焦点の両方を通過した液滴データを用いている。実際の噴霧中では上流焦点のみを通過する液滴が存在し、その判別が必要である。図 2.4 は上流焦点を通過した液滴、および上流・下流両焦点を通過した液滴を判別するフローチャートを示している。取得データ数、つまり上流焦点を通過した液滴数  $N_{up}$  は計測開始時にセットされる。飛行時間および散乱時間クロックの計数は、上流焦点を通過した微粒子の散乱光による上流焦点信号(Upstream signal)の検出によって開始される。下流焦点を通過した微粒子の散乱光による下流焦点信号(Downstream signal)が検知されるか、上流焦点信号が再び検知されるまで計数が行われる。上流焦点信号が検出された後、下流焦点信号が検知された場合、計数值とともに上流・下流フラグが保存される。また、上流焦点信号の後に再び上流焦点信号が検知される場合、計数值と共に上流・上流フラグが保存される。ここで有効データは上流・下流フラグを持つ液滴であり、計測終了後に抽出される。



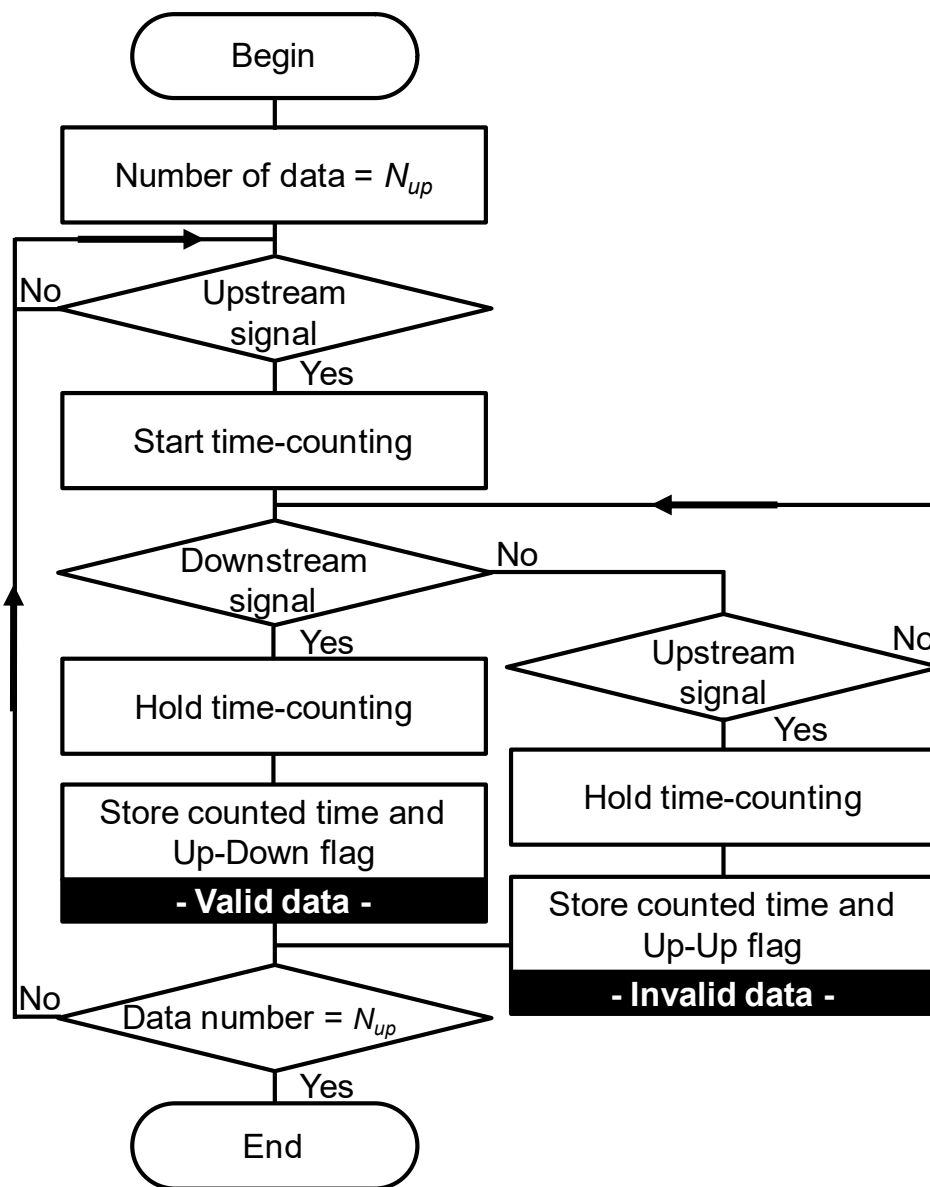


Fig. 2.4 Flowchart of data acquisition procedure

式(2.5)および(2.6)による液滴数密度および質量流量の評価では有効データ、すなわち両焦点通過液滴の速度、サイズおよび時間間隔を用いる。ここで、測定体積を通過した全ての液滴を対象に液滴数密度および質量流量を評価する場合、上流焦点のみを通過した液滴の存在を考慮する必要がある。両焦点通過液滴は全液滴のランダムサンプリングで得られたものであり、両焦点通過液滴の速度、サイズは上流焦点通過液滴の速度、サイズと統計的に同じと考えられる。このことから、両焦点通過液滴より算出した液滴時間間隔  $\Delta t$  に、上流焦点を通過した液滴数  $N_{up}$  と両焦点を通過した液滴数  $N_{up-down}$  の比をかけることにより、測定体積を通過した全ての液滴の液滴時間間隔を推定することとした。これより測定体積を通過した全ての液滴の液滴数密度  $ND_{all}$  および質量流量  $MF_{all}$  は次式より求められる。

$$ND_{all}(x, T) = ND_{valid}(x, T) \times \frac{N_{up}}{N_{up-down}} \quad (2.7)$$

$$MF_{all}(x, T) = MF_{valid}(x, T) \times \frac{N_{up}}{N_{up-down}} \quad (2.8)$$

噴射期間にわたる全燃料質量  $M$  は次式によって見積られる。

$$M(x, T) = \sum_x \sum_t MF_{all}(x, T) \Delta A(x) \Delta T \quad (2.9)$$

$$\Delta A(x) = 2\pi x \Delta x \quad (2.10)$$

ここで、 $\Delta T$  は解析する期間を、 $\Delta A$  は幅  $\Delta x$  のリング状断面を示す。

## 2.2 位相ドップラー流速計

L2F による計測に加えて、Artium 社製の位相ドップラー流速計(Phase Doppler Anemometer ; PDA) PDI-200MD を用いて、噴霧の計測を行った。測定原理を図 2.5、2.6 に示す。2 本のレーザー光をレンズで集光すると交点が形成され、その交点は測定体積と呼ばれる。この測定体積においては、規則正しい明・暗の干渉縞が形成され、この干渉縞の間隔はレーザー波長、レーザー交差角から幾何学的に次式(2.11)で表される。

$$\sigma_l = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2.11)$$

$\sigma_l$ : 干渉縞間隔

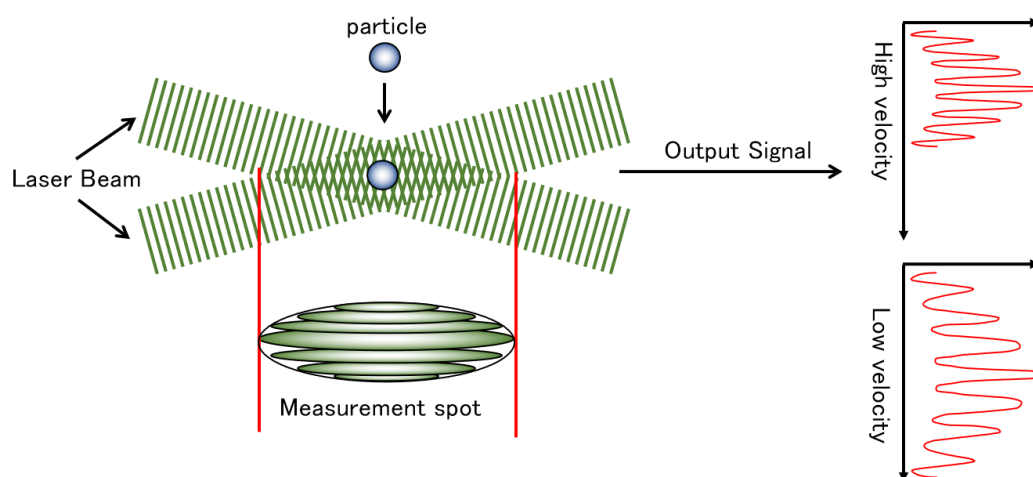


Fig.2.5 Measurement principle of LDV

測定体積を球体粒子が通過すると、レーザー光の一部は反射され、一部は粒子内部を透過し、測定体積に形成された干渉縞に応じて、空間にコントラストを形成する。このコントラストを受光器で検知し、電圧に変換すると、レーザーが持つ Gaussian 特性から山なりになり、ドップラーバースト信号が形成される。通過粒子の速度は、このドップラーバースト信号より算出され、干渉縞の間隔は一定であることから、粒子が通過すると、周波数特性を持った規則性があるドップラーバースト信号が発生し、この周波数から、粒子の通過速度は次式(2.12)で表される。

$$V = \sigma_l \times f \quad (2.12)$$

$V$ : 粒子速度       $\sigma_l$ : 干渉縞間隔       $f$ : ドップラーバースト信号周波数

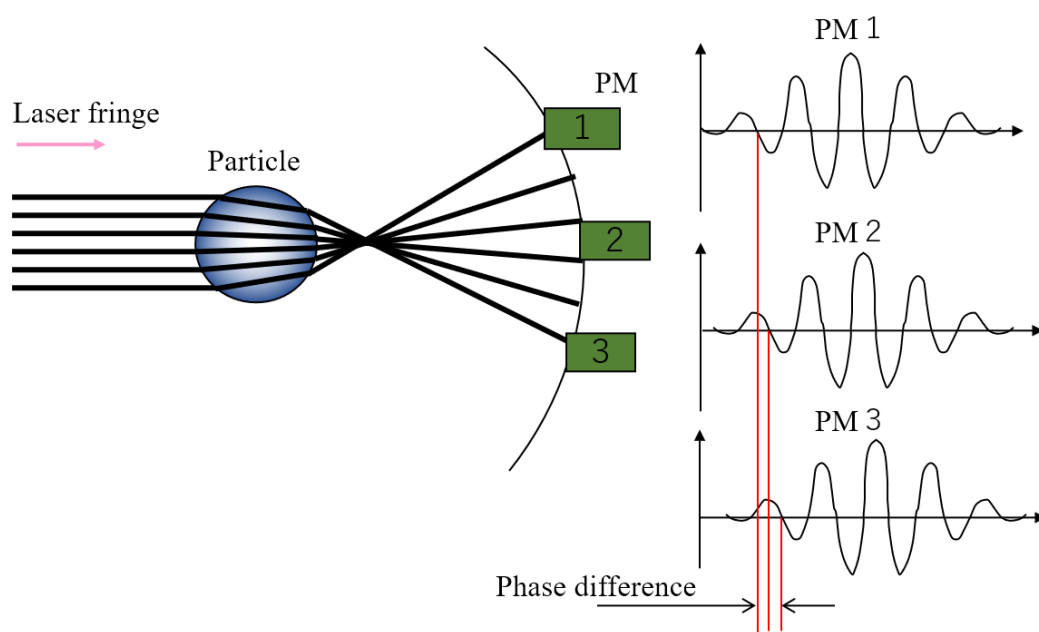


Fig. 2.6 Measurement theory of PDPA

本論文では、大気中に間欠噴射されるディーゼル噴霧の計測を行った。図 2.7 は PDA による噴霧計測システムを示す。光学系は鉛直方向の速度とサイズを計測する最大出力 150mW、波長 532nm の半導体レーザー(CH1)、および水平方向の速度を計測する最大出力 50mW、波長 491nm の半導体レーザー(CH2)を光源とし、トランスミッタとレシーバの集束レンズとして焦点距離が 500mm の非球面レンズを採用した。トランスミッタから射出される波長 532nm のレーザー光の間隔は 60.83mm、波長 473nm のレーザー光の間隔は 60.60mm であり、各レーザー光の直径は 1.0mm である。またトランスミッタの光軸とレシーバの光軸のなす角度は 40 度である。計測システムの最大サンプリングレートは 250kHz である。

鉛直方向には 3 つの検知器(PM)が設けられており、噴霧液滴が測定点を通過することで得られるドップラーバースト信号の周波数は検知器の場所によって位相ずれを起こす。この位相ずれ(位相差)が球形粒子の大きさとリニアな関係になることから、粒径を求めることが出来る(図 2.6)。

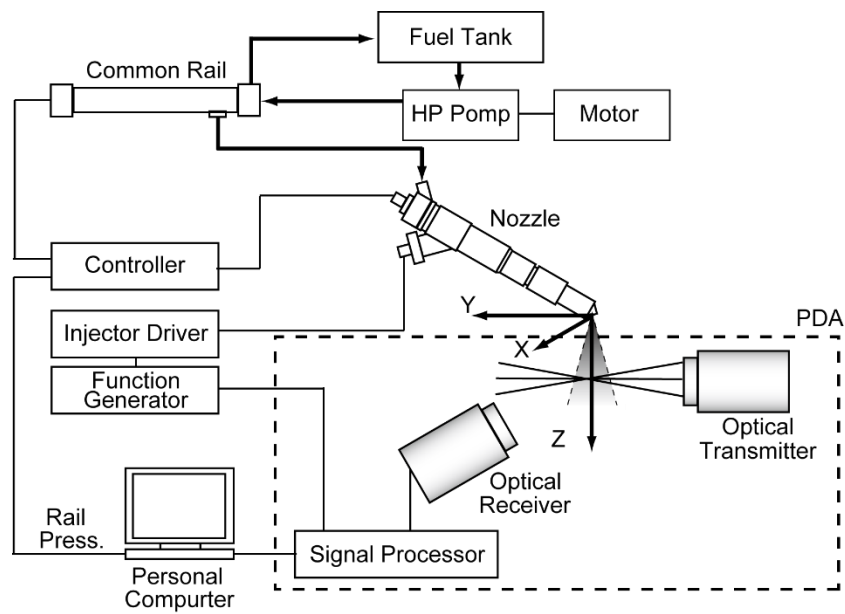


Fig. 2.7 Fuel spray measurement system of PDA

液滴の速度ベクトルを噴霧軸から $\pm 45$ 度の2つの方向の速度成分から算出し、  
 図 2.8 に示すように、噴霧軸である  $z$  軸と速度ベクトルのなす角度を  $\theta$  とした。  
 $y$  が正のとき、 $\theta$  が正の角度は液滴が内向きに飛行することを示し、 $\theta$  が負の角  
 度は液滴が外向きに飛行することを示す。

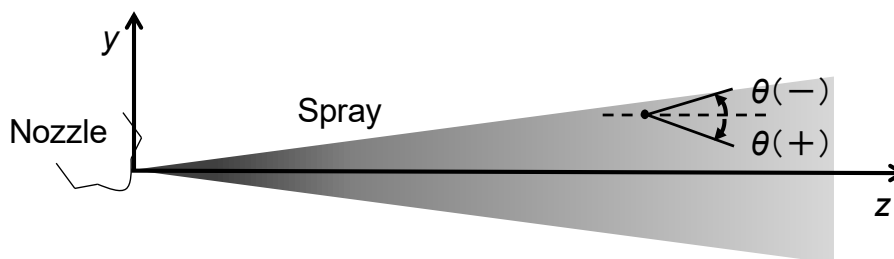


Fig. 2.8 Angle of droplet flight

## 2.3 供試インジェクター

本研究では、電子式ディーゼルインジェクターを使用した。インジェクターの噴射制御は、ファンクションジェネレーターからの矩形信号を、IRS 社製インジェクタードライバ (CRID-S BT FLEX) へトリガー信号として入力し、インジェクタードライバから出力される電流信号をインジェクターのソレノイドに与えることで針弁を駆動させて行った。噴射期間は矩形信号のパルス幅を、噴射間隔は周期を調整することにより変更した。電流信号、基本波形は、任意に設定が可能であるが、推奨標準波形を使用している。

## 2.4 燃料噴射システム

図 2.9 にコモンレールインジェクターシステムおよび L2F の信号処理系を示す。サプライポンプ(BOSCH 社製)は、プーリーを介してモーター(HITACHI 製、5.5kW TFO-KK4P)で駆動した。モーターの回転数を 800rpm とした。サプライポンプによって供試燃料がコモンレールに供給され、コモンレール内圧力をコモンレールに取り付けられた圧力センサで検出した。供試燃料には JIS2 号軽油を用い、燃料圧力は、出口調量 (供試燃料がコモンレールから燃料タンクに戻るリターン量を調整すること) により制御されている。リターン量の調整はコモンレールに組付けられている減圧弁を制御することによって行った。

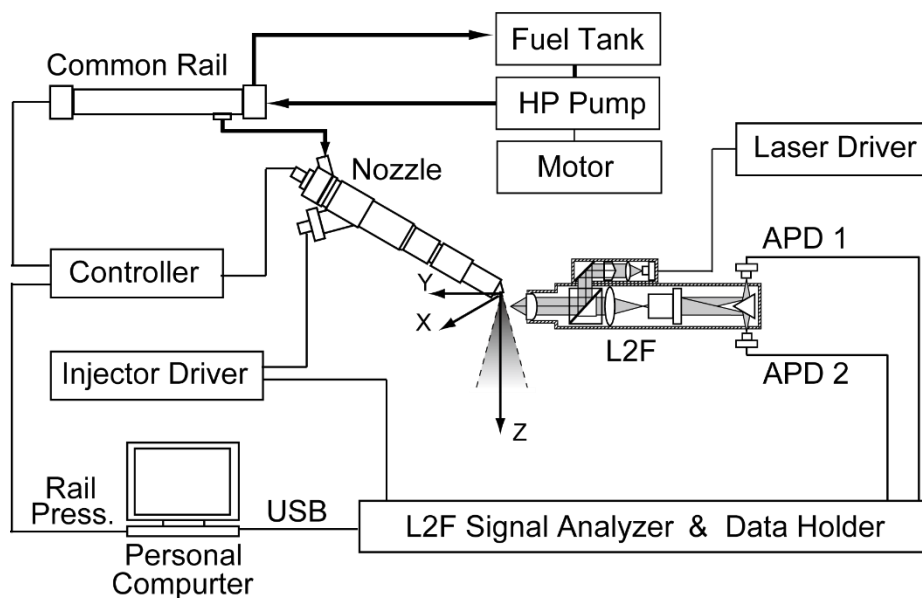


Fig. 2.9 System of fuel spray measurement by using L2F

## 2.5 画像計測システム

噴霧のマクロ的観察のため、噴射信号印加からの経過時間  $T$  に同期して噴霧画像を取得した。非常に短い時間で時間過渡的に噴霧の非定常性および不均一性が変化するため、光源として PHOTRON 社製ユークラフトメタルハライドランプ(HID-U70/U150W)、画像計測に、PHOTRON 社製光速度カメラ(FASTCAM SA-X2)並びに Nikon 社製レンズ(AF MICRO NIKKOR 200mm)を用いた。



### 第3章 噴霧液滴の分裂モデル

大きな液滴から小さな液滴に分裂することを微粒化といい、微粒化による効果は、液滴総表面積の増大、液滴数の増加、液滴質量の減少であることが広く知られている。内燃機関において燃料の微粒化が促進されると、総表面積が増大することで、熱物質の移動が容易になり、蒸発、燃焼が促進される。また、液滴数が増加し、各液滴質量が減少することで、雰囲気との混合気形成がスムーズになり、かつ、燃料を筒内に広く均一に分布させることが出来る。液滴は液体(液塊)から生成され、その過程を図 3.1 に示す。それぞれの分裂過程は、主として噴射圧力や微粒化器の形状により決まる。

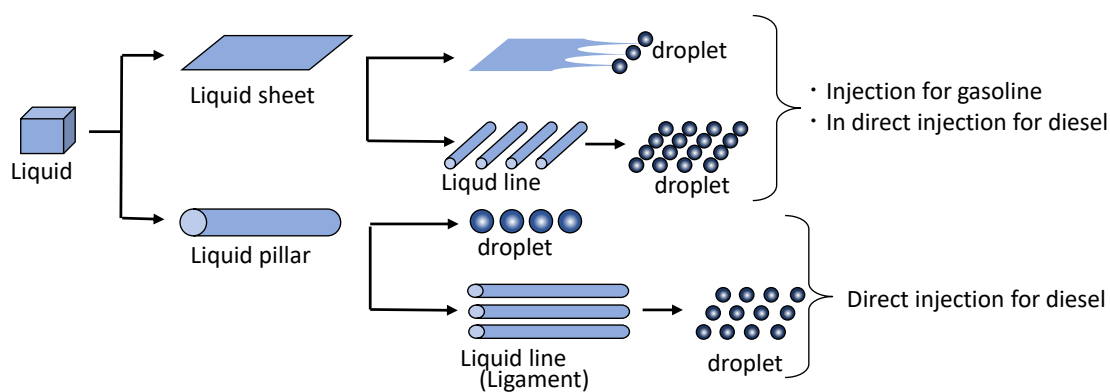


Fig. 3.1 The way of liquid atomization

ディーゼル機関において、燃料はホールタイプのノズルより高圧で噴射されるため、燃料は液柱状に噴射され、液柱から直接液滴に分裂し、雰囲気気流との相互作用によりさらに微細に分裂し、燃料噴霧を形成する。液柱から直接液滴に分裂する1次分裂においては、大きい液滴が分布し、雰囲気気流との相互作用による2次分裂において、

急激に微粒化することで、多くの微細な液滴が分布する燃料噴霧となる。

液柱あるいは液滴の分裂は噴霧形成において最も重要な過程であり、後述のように多くの分裂モデルが提案されている。分裂モデルは大きく分けて液滴振動タイプと表面波不安定タイプの2つに分類できる。液滴振動タイプでは、液滴変形とばね-質点系の振動が相似であるとした TAB(Taylor Analogy Breakup)モデル<sup>(42)</sup>などがある。表面波不安定タイプの分裂には Reitz の Wave Breakup モデル<sup>(41)</sup>、KH(Kelvin-Helmholtz)不安定と RT(Rayleigh-Taylor)不安定の両者をモデル化した KH-RT モデル<sup>(43)</sup>などがある。

### 3.1 1次分裂モデル

Blob 法<sup>(44)</sup>は1次分裂モデルの中で最も簡単な方法であり、図 3.2 のように、噴射した液滴の径はノズル径と等しいとする方法である。しかし、実際のノズルではキャビテーションなどの効果より、噴孔径より微細化された液滴が噴射される。よって、ノズルの径の値を直接使わず、縮流係数を使い実際の噴孔面積より小さい値が用いられることが多い。なお、噴射速度は入力データとして与える。

### 3.2 2次分裂モデル

KH-RT モデルは KH モデル<sup>(41)</sup>と RT モデル<sup>(43)</sup>を組み合わせた2次分裂モデルである。KH モデルとは流体力学における Kelvin-Helmholtz 不安定性を基に作られたモデルである。KH 不安定性とは、密度の異なる流体が層となっておりそれらが互いに異

なる速度で運動するとき発生する流体の不安定性であり、各々の流体が接触している界面では、密度と渦度が不均一になり、微小な擾乱が成長する。KH モデルはこの特性を液滴と気体との界面に適用する。この表面波は気体と液滴との相対速度により発生する空力的作用によって成長する。KHモデルの概略図を図 3.3 に示す。

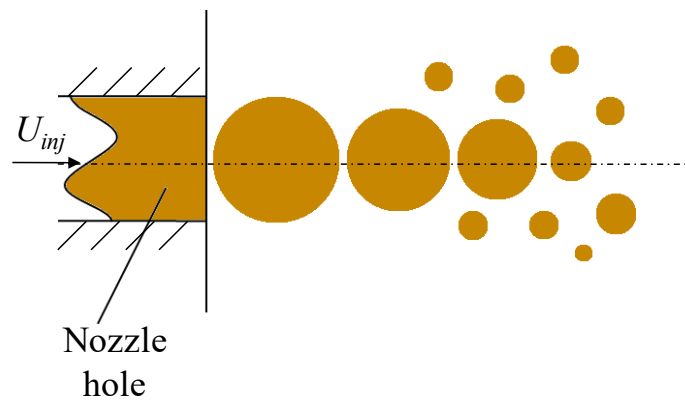


Fig. 3.2 Blob model

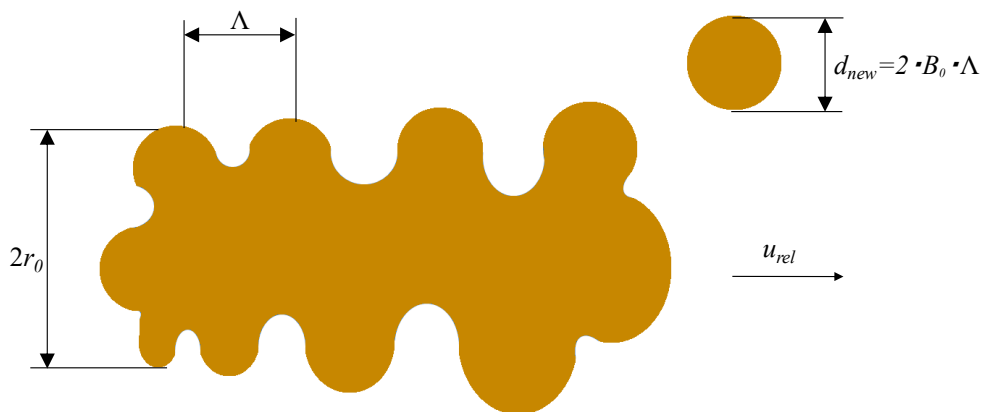


Fig. 3.3 Kelvin-Helmholtz breakup model

表面波の波長  $\Lambda$  および表面波の成長速度  $\Omega$  は次式で表される。

$$\frac{\Lambda}{r} = 9.02 \frac{(1 + 0.45 \cdot Z^{0.5}) \cdot (1 + 0.4 \cdot T^{0.7})}{(1 + 0.865 \cdot We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (3.1)$$

$$\Omega \cdot \left( \frac{\rho_l \cdot r^3}{\sigma} \right)^{0.5} = \frac{0.234 + 0.38 \cdot We_g^{1.5}}{(1 + Z) \cdot (1 + 1.4 \cdot T^{0.6})} \quad (3.2)$$

ここで、

$$Z = \frac{We_l^{0.5}}{Re_l} \text{ (Ohnesorge number)}$$

$$Ta = Z \cdot We_g^{0.5} \text{ (Taylor number)}$$

$$We_g = \frac{\rho_g \cdot r \cdot u_{rel}^2}{\sigma}$$

$$We_l = \frac{\rho_l \cdot r \cdot u_{rel}^2}{\sigma}$$

$$Re_l = \frac{\rho_l \cdot r \cdot u_{rel}}{\eta_l}$$

式(3.1)および(3.2)から表面波の波長  $\Lambda$  および表面波の成長速度  $\Omega$  を算出し、分裂後

の子液滴半径  $r_{new}$  と分裂特性時間  $\tau_{bu}$  を次式で計算する。

$$r_{new} = B_0 \cdot \Lambda \quad (3.3)$$

$$\tau_{bu} = 3.788 \cdot B_1 \cdot \frac{r}{\Lambda \cdot \Omega} \quad (3.4)$$

$B_0$ 、 $B_1$  はモデル定数であり  $B_0 = 0.61$ 、 $B_1 = 10 \sim 60$  が推奨されている<sup>(45)</sup>。さらに、

式(3.3)に示すように子液滴半径  $r_{new}$  と分裂特性時間  $\tau_{bu}$  から親液滴の液滴半径  $r$  の変化率を算出する。

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r - r_{new}}{\tau_{bu}} \quad (3.5)$$

式(3.5)から半径  $r$  の親液滴はタイムステップ  $\Delta t$  後に半径  $r'$  に変化し質量が減少する。

ここで、 $r'$  は次式で計算される。

$$r' = \frac{\tau_{bu} \cdot r + \Delta t \cdot r_{new}}{\tau_{bu} + \Delta t} \quad (3.6)$$

親液滴の半径が  $r$  から  $r'$  に変化することで減少した質量が分裂した子液滴の質量となる。この減少する質量  $M$  が総噴射量 / 初期パーセル数で表される噴射時の液滴質量の 3% になった時、新しいパーセルを作りだす。この時のパーセルの液滴数  $N_p$  は次式にて算出される。

$$N_p = \frac{M}{\rho_l \frac{4}{3} \pi r_{new}^3} \quad (3.7)$$

RT モデルは Rayleigh-Taylor 不安定性を基に作られたモデルである。RT 不安定性とは、密度の異なる 2 つの流体が接触しているときに密度の大きい流体から密度の小さい流体に力が働くと 2 つの流体の界面の微小な凹凸から擾乱が成長することによっ

て流体の界面が不安定化する現象である。RT モデルは次のように噴霧液滴に適応される。液滴が気体中を相対速度  $u_{rel}$  で移動するとき、周囲気体による空気抵抗によって液滴には減速力が働く。この減速力は液滴の進行方向とは逆方向に働き、加速度  $a$  とみなす。この加速度によって気液の界面が不安定になり、分裂が生じる。RT モデルの概略を図 3.3 に示す。ここで加速度  $a$  は次式で表される。

$$|\vec{a}| = \frac{3^2}{8} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_g \cdot u_{rel}^2}{\rho_l \cdot r} \quad (3.8)$$

表面波の波長  $\Lambda$  および表面波の成長速度  $\Omega$  は次式で表される。

$$\Lambda = C_{RT} \cdot 2\pi \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma}{a \cdot (\rho_l - \rho_g)}} \quad (3.9)$$

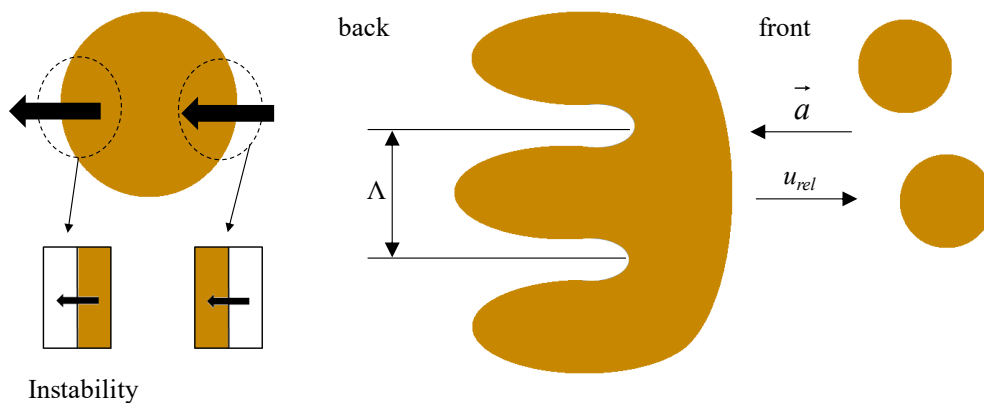


Fig. 3.4 Rayleigh–Taylor breakup model

$$\Omega = \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \sigma} \cdot \frac{[a \cdot (\rho_l - \rho_g)]^{\frac{3}{2}}}{\rho_l + \rho_g}} \quad (3.10)$$

$$r_{new} = \Lambda \quad (3.11)$$

$C_{RT}$  はモデル定数であり 1.0~5.33 が推奨されている<sup>(43)</sup>。RT モデルの場合は分裂後の子液滴半径  $r_{new}$  は表面波の波長  $r_{new}$  から算出される。また KH モデルとは異なり、減少する質量ではなく分裂時間で分裂を判断する。分裂時間  $\tau_{bu}$  は  $\tau_{bu} = \Omega^{-1}$  で表され、分裂開始(変形開始)から  $\tau_{bu}$  後に分裂する。分裂後は、新しいパーセルを作らず、液滴の半径が小さくなり、パーセル内の液滴数が増加する。

KH-RT モデルでは噴孔から式(3.13)で表される Levich 理論から算出される分裂長さ  $L_b$  までは KH モデルを適応し、 $L_b$  よりも下流側では KH モデルおよび RT モデルを適応する。KH-RT モデルの概略を図 3.4 に示す。

$$L_b = \frac{B_1}{2} D_{nozzle} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (3.12)$$

model ここで、 $D_{nozzle}$  は噴孔径、 $\rho_l$  は燃料密度、 $\rho_g$  は雰囲気密度を表す。

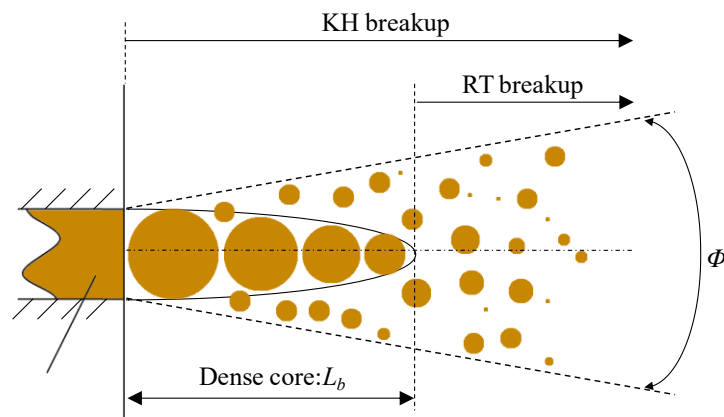


Fig. 3.5 KH-RT breakup

## 第4章 L2F 法の特徴と特性

本章では、測定体積が微小であり、高数密度場における噴霧液滴の速度とサイズを測定することを可能にしたレーザー2焦点流速計(L2F:Laser 2-Focus velocimeter)を用いて、超音波振動子で発生させた液滴をエジェクタに吸引、噴出させ、液滴の速度およびサイズを計測した。次に、同一条件で、粒子計測に広く一般的に使用されている位相ドップラ流速計(PDA:Phase Doppler Anemometer)<sup>(46-47)</sup>を用いて、液滴の速度およびサイズを計測し、両計測法による計測結果を比較、評価した。ここでは、エジェクタより噴出される粒子の数密度、サイズ、速度は、PDAの計測可能範囲とした。

次に、燃料と空気の混合気形成過程の把握のために、粒子画像流速計(PIV:Particle Image Velocimeter)<sup>(48)</sup>を用いて、噴霧の周囲流の計測を行った。加えて、L2Fを用いて、噴霧内部の液滴速度とサイズを計測し、その結果を用いて、和栗らの運動量理論<sup>(49)</sup>、Musculusらのモデル<sup>(50)</sup>から噴霧内部の空気量を算出し、PIVで得られた噴霧の周囲空気の導入量と比較した。

### 4.1 L2F 法、PDA 法、両計測法の比較検証

#### 4.1.1 L2F における計測条件

図 4.1 に L2F を用いた液滴測定システムを示す。L2F の光学系では最大出力 100mW、波長 830nm の半導体レーザーを光源とし、収束レンズとして焦点距離が 8mm の非球面レンズを採用した。光学系の全長は約 350mm である。2つの焦点にお



ける液滴からの後方散乱光を別個の Avalanche Photodiode(APD) に導き、Field Programmable Gate Array (FPGA)を用いて計数した飛行時間および散乱時間をパソコンに保存した。信号処理系のデータサンプリング周波数は 15MHz である。

エジェクタへの供給圧を  $P_e = 0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MPa}$  および  $0.4\text{MPa}$  に設定し、エジェクタから大気中に空気を噴出した。ピトー管を噴流に挿入し流れの全圧をデジタル差圧計で計測して、空気速度を評価した。超音波振動子で発生させた液滴をエジェクタに吸引、噴出させ、L2F で計測した。

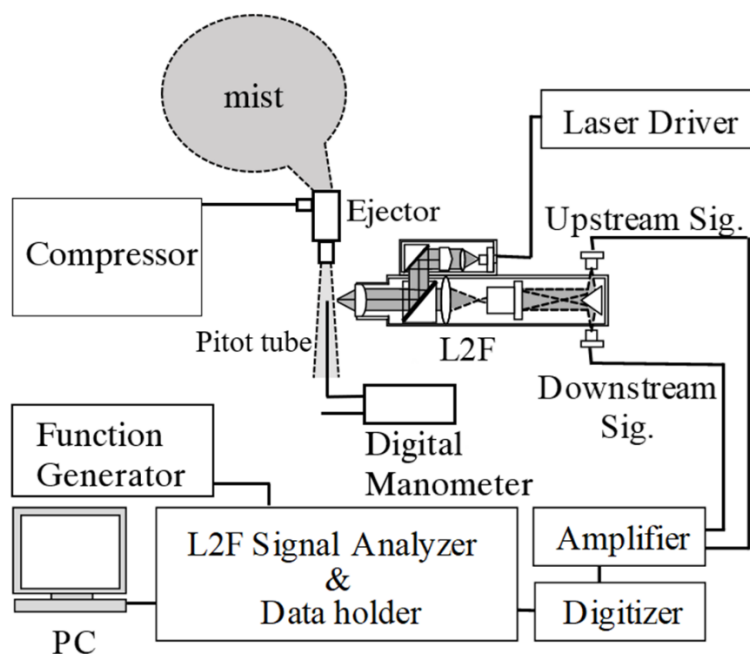


Fig. 4.1 Measurement system of velocity and size of droplets by L2F

#### 4.1.2 PDA における計測条件

図 4.2 は 2 次元位相ドップラ流速計 PDA;(Artium 社製、PDI-200MD)を用いた液滴

計測システムを示す。光学系では最大出力 150mW、波長 532nm の半導体レーザー、および最大出力 50mW、波長 491nm の半導体レーザーが光源であり、トランスミッタの集束レンズとして焦点距離が 500mm の非球面レンズが採用されている。トランスミッタから射出される波長 532nm のレーザー光の間隔は 60.83mm、波長 491nm のレーザー光の間隔は 60.60mm であり、各レーザー光の直径は 2.3mm である。また、トランスミッタの光軸とレーザーの光軸のなす角度は 40 度である。PDA で計測される結果は散乱光センサの印加電圧すなわち Gain によって異なる<sup>(51)</sup>。今回の実験では低・高、2 通りの Gain で計測を行い、それぞれ GainA および GainB として結果を比較することとした。以降 PDA(GainA)および PDA(GainB)と記載する。

また、計測対象は L2F と同様にエジェクタに取り付けた円管から噴射される液滴で、ほぼ同じ条件で計測した。

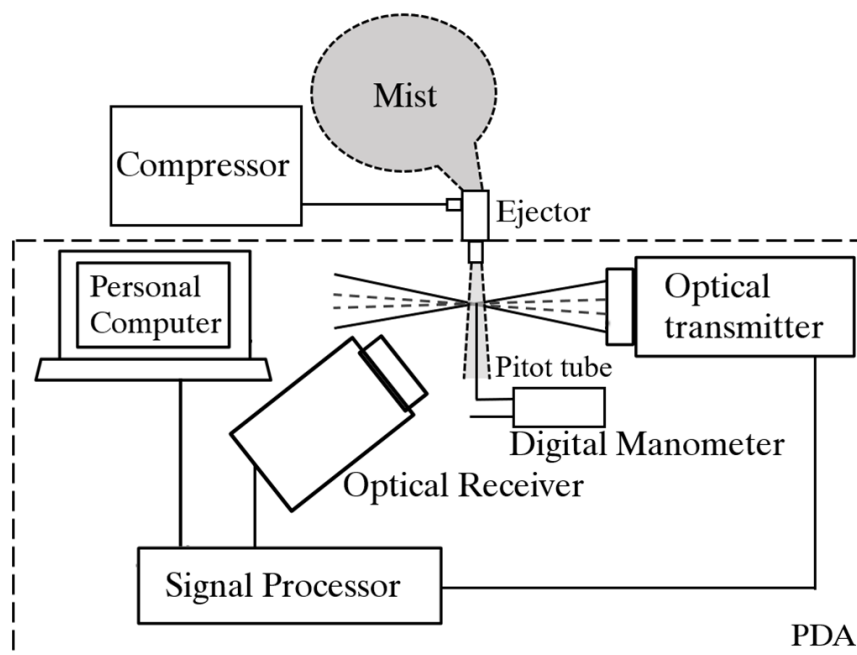


Fig.4.2 Measurement system of velocity and size of droplets by PDA

### 4.1.3 L2F と PDA の特徴の比較

L2F の焦点径が  $3\mu\text{m}$  であるのに対して PDA の焦点径は  $147.3\mu\text{m}$  であり、L2F の焦点における光強度は PDA に比べて約 2400 倍である。L2F の光学系は後方散乱型であるのに対して PDA の光学系は側方散乱型であり、焦点の光強度が同一の場合、L2F の散乱光強度は PDA に比べて 10 分の 1 である。これらのことから、L2F の散乱光強度は PDA の約 240 倍である。図 4.3 に L2F および PDA の散乱光強度の比較を示す。

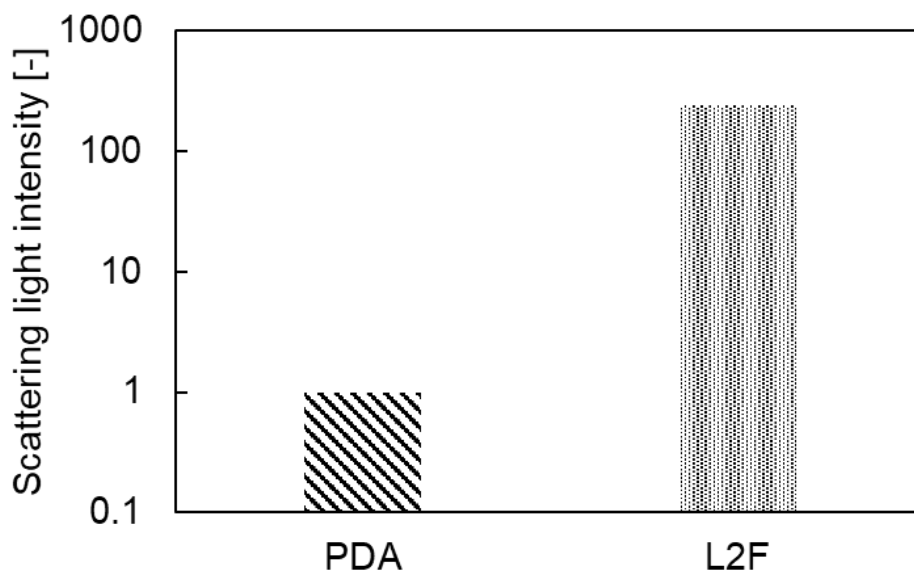


Fig. 4.3 Comparison of scattering light intensity of L2F and PDA

PDA において、トランスミッタの焦点距離が  $500\text{mm}$  の場合、ビームウエストは  $147.25\mu\text{m}$  と推算され、光センサに  $100\mu\text{m}$  のスリットを設けることにより、測定体積は  $1.709 \times 10^{-3} \text{mm}^3$  と評価される。PDA の計測可能な数密度は測定体積の逆数として約

585[1/mm<sup>3</sup>]となる。一方、L2F で焦点長さ L=20μm、焦点直径 F=3μm、焦点間距離 S=20 μ m より測定体積は約 1.2×10<sup>-6</sup>mm<sup>3</sup>であり、計測可能な数密度は約 8.3×10<sup>5</sup>[1/mm<sup>3</sup>]となる。つまり L2F で測定可能な液滴数密度の上限は PDA に比べて約 1400 倍高い。図 4.4 に L2F および PDA の計測可能な数密度の比較を示す。ディーゼル噴霧の代表的な数密度が 100000[1/mm<sup>3</sup>]である<sup>(52)</sup>ことから、PDA の計測可能な数密度は噴霧の数密度の約 0.6%であるのに対し、L2F は約 8.3 倍の数密度の計測が可能である。

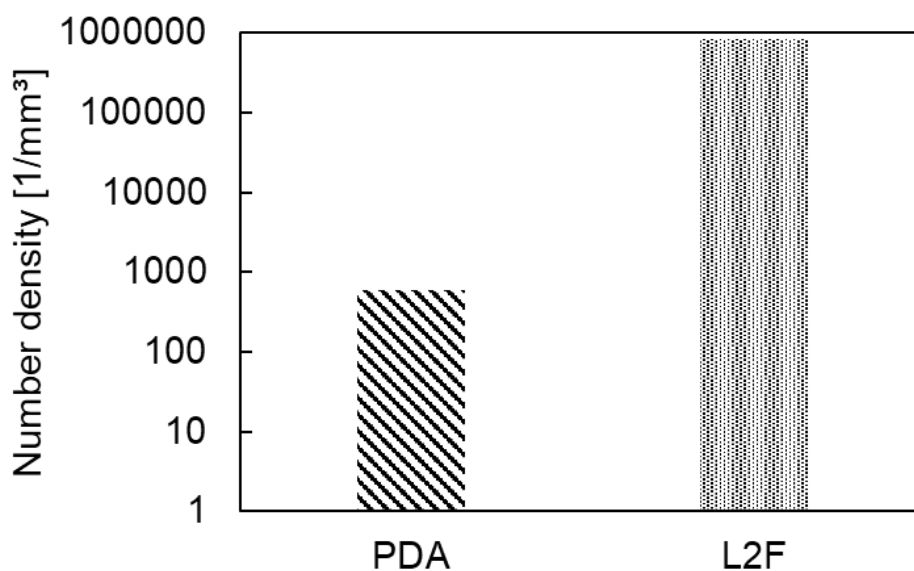
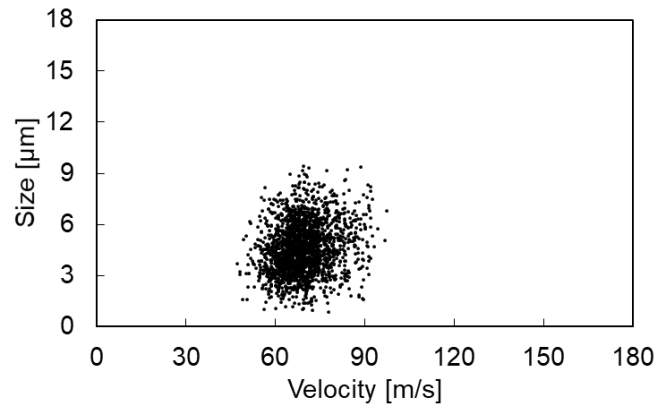


Fig. 4.4 Measurable upper limit of number density

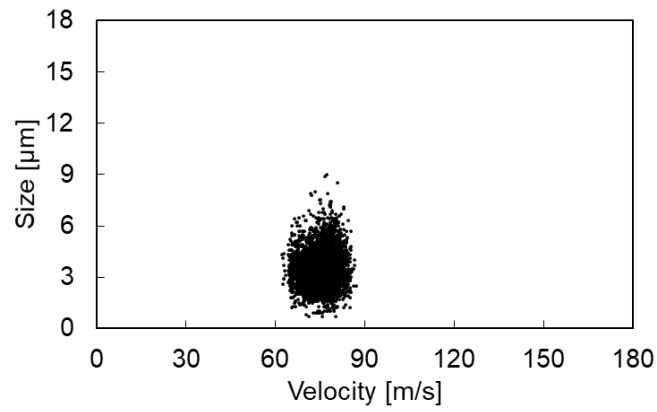
#### 4.1.4 速度とサイズの相関

図 4.5(a)、(b)および(c)にそれぞれ L2F、PDA(GainA)および PDA(GainB)で計測した液滴速度およびサイズの相関をプロットで示す。エジェクタへの供給は Pe=0.2MPa

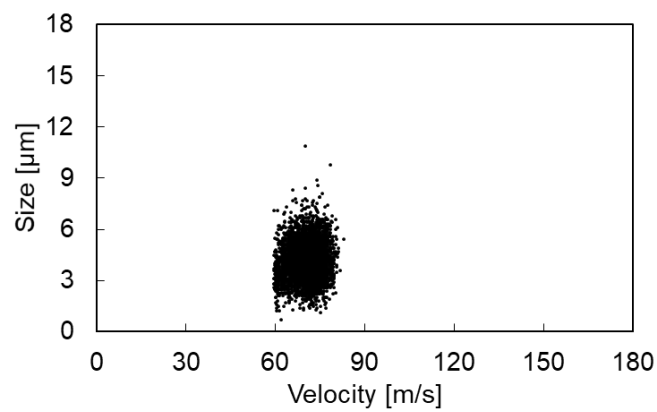
である。L2F のデータ数は約 2000 点であり、PDA(GainA)および PDA(GainB)のデータ数は約 5000 点であった。L2F、PDA(GainA)および PDA(GainB)の平均速度はそれぞれ 69.1m/s、75.7m/s および 70.4m/s であり、平均サイズは 4.6 $\mu$ m、3.5 $\mu$ m および 4.2 $\mu$ m であった。グラフはいずれもサイズの平均値に対して縦横方向に同様の広がりを示しており、相関係数は L2F では 0.19、PDA(GainB)では 0.07 と小さい値であることから、速度およびサイズの相関性は低く、液滴が空気の乱れにほぼ追随しているものと考えられる。PDA(GainA)のばらつきは PDA(GainB)のばらつきとほぼ同程度であり、L2F のばらつきに比べて、PDA(GainA)および PDA(GainB)の速度ばらつきは小さい。図 4.6(a)、(b)および(c)はエジェクタへの供給圧  $P_e = 0.4\text{MPa}$  の計測結果である。供給圧  $P_e = 0.2\text{MPa}$  の結果とほぼ同様の傾向が見られる。



(a) L2F;  $V_{air} \approx 74\text{m/s}$

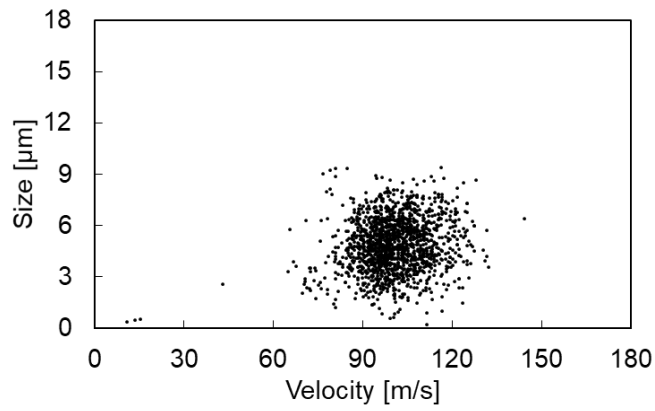


(b) PDA(GainA);  $V_{air} \approx 77.3\text{m/s}$

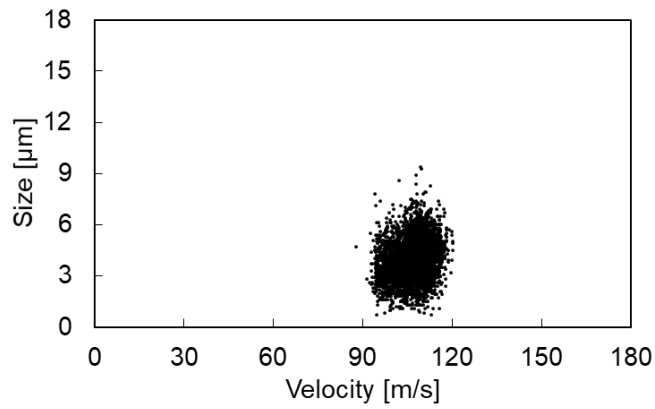


(c) PDA(GainB);  $V_{air} \approx 75.6\text{m/s}$

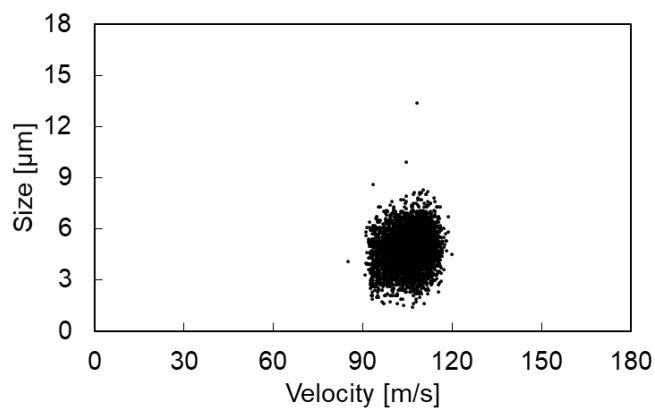
Fig. 4.5 Correlation of velocity and size;  $Pe=0.2\text{MPa}$



(a) L2F;  $V_{air} \approx 104.7\text{m/s}$



(b) PDA(GainA);  $V_{air} \approx 106.6\text{m/s}$

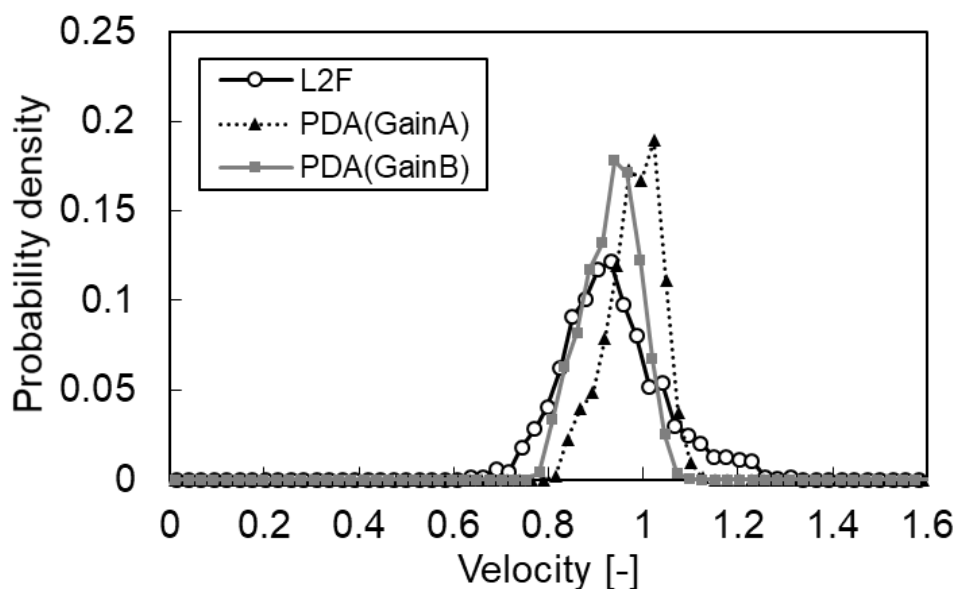


(c) PDA(GainB);  $V_{air} \approx 109\text{m/s}$

Fig. 4.6 Correlation of velocity and size;  $Pe=0.4\text{MPa}$

#### 4.1.5 速度およびサイズの確率密度

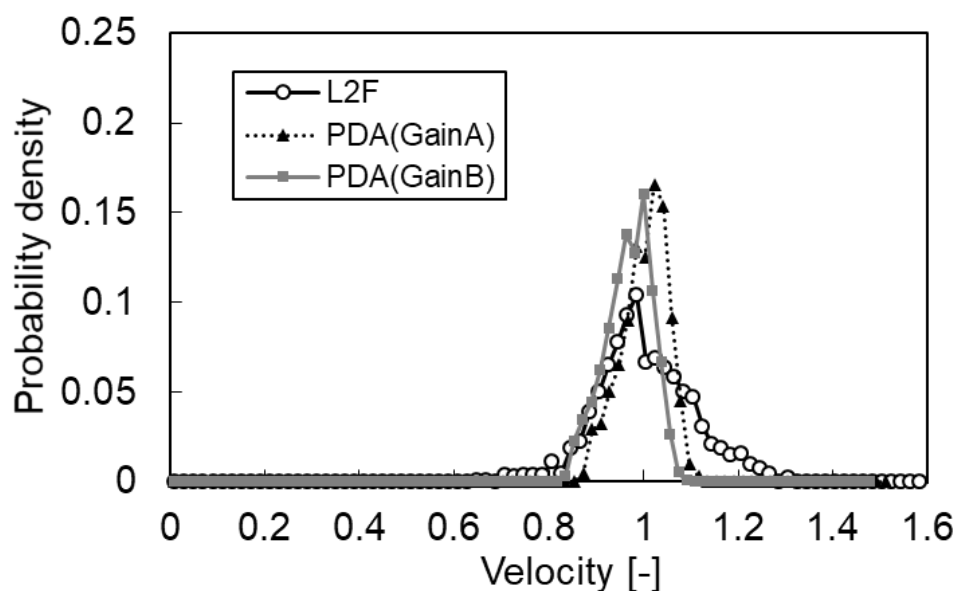
L2F、PDA(GainA)および PDA(GainB)で計測した噴霧液滴の速度をそれぞれ空気速度  $V_{air}$  で除して無次元化した。図 4.7 (a)および(b)にそれぞれエジェクタへの供給圧を  $Pe = 0.2\text{MPa}$  および  $0.4\text{MPa}$  とした場合の無次元速度の確率密度分布を示す。空気速度は L2F、PDA(GainA)および PDA(GainB)でそれぞれ  $Pe = 0.2\text{MPa}$  の場合  $V_{air} \doteq 74\text{m/s}$ 、 $77.3\text{m/s}$  および  $75.6\text{m/s}$ 、 $Pe = 0.4\text{MPa}$  では  $V_{air} \doteq 104.7\text{m/s}$ 、 $106.6\text{m/s}$  および  $109\text{m/s}$  であった。L2F および PDA(GainB)のピークの確率密度を示す速度はほぼ一致していることが分かる。L2F の分布の裾野は PDA の裾野に比べてやや広く、高速および低速の両側に現れている。また、PDA(GainA)のピークの確率密度を示す速度は PDA(GainB)より  $0.2\text{MPa}$  では約  $5.5\%$ 、 $0.4\text{MPa}$  では約  $2.2\%$  高い。



(a)  $Pe=0.2\text{MPa}$ ;  $V_{air} \doteq 74\sim 78\text{m/s}$

Fig. 4.7 Probability density of velocity (continued)

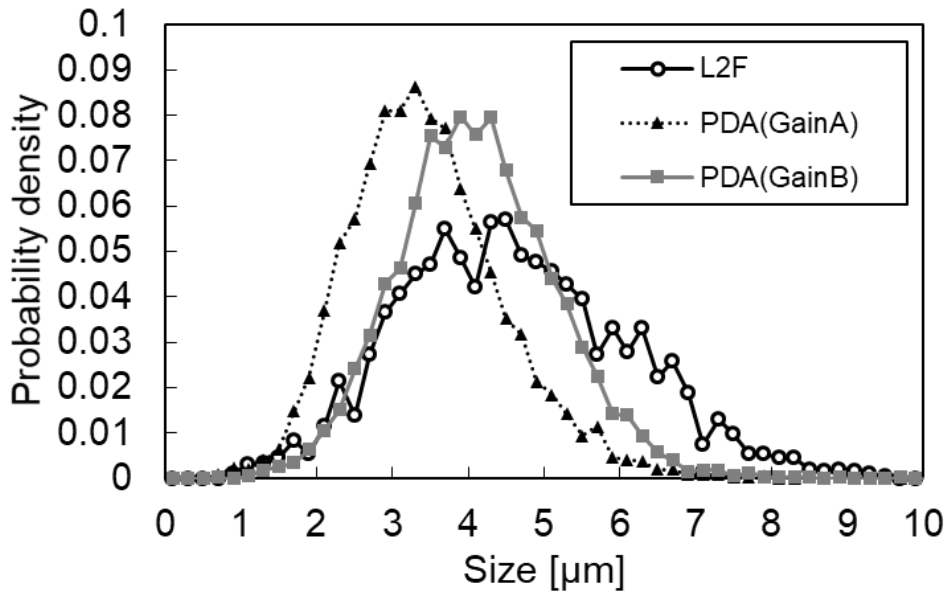




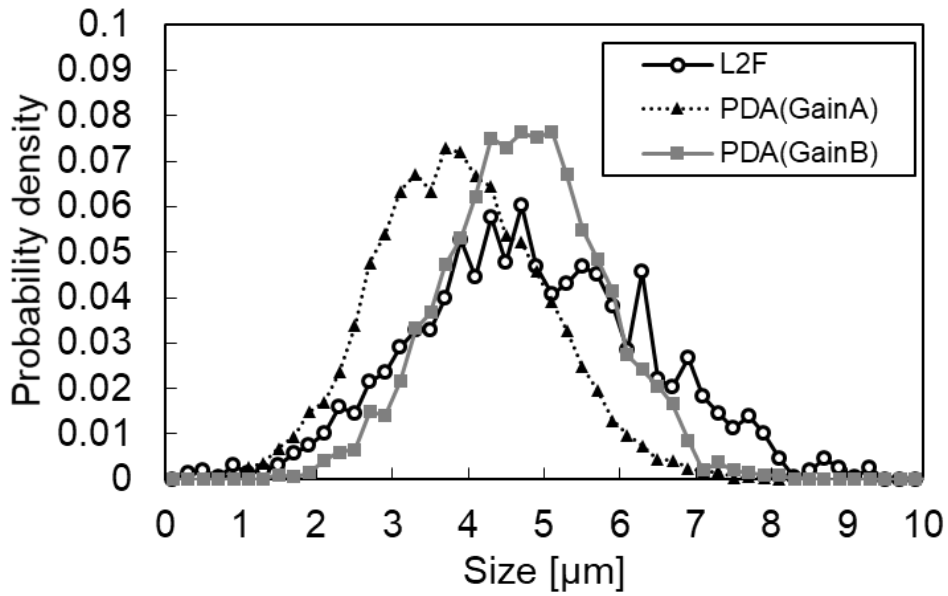
(b)  $Pe=0.4MPa$ ;  $V_{air} \doteq 105\sim 109m/s$

Fig. 4.7 Probability density of velocity

図 4.8 (a)および(b)はエジェクタへの供給圧を  $Pe = 0.2MPa$  および  $0.4MPa$  としたときの液滴サイズの確率密度分布を示す。L2F のサイズの確率密度は  $6\mu m$  以上で PDA(GainB)に比べて高い。PDA(GainA)と PDA(GainB)について確率密度がピークを示すサイズは  $Pe=0.2MPa$  でそれぞれ  $3.3\mu m$  および  $4.3\mu m$ 、 $Pe=0.4MPa$  でそれぞれ  $3.7\mu m$  および  $5.1\mu m$  であった。PDA(GainA)の方が小さいことから、Gain が小さくなるとサイズの計測結果も小さく評価されることが確認された。



(a)  $Pe=0.2MPa; V_{air} \doteq 74\sim 78m/s$



(b)  $Pe=0.4MPa; V_{air} \doteq 105\sim 109m/s$

Fig. 4.8 Probability density of size

#### 4.1.6 サイズに及ぼす速度の影響

図 4.9 にエジェクタへの供給圧を  $P_e=0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MPa}$  および  $0.4\text{MPa}$  としたときの L2F および PDA(GainB)の平均速度および平均サイズを示す。L2F で計測した速度の平均値に対する 95%信頼区間は、供給圧  $P_e = 0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MP}$  および  $0.4\text{MPa}$  においてそれぞれ約 0.34%、0.41%および 0.54%であり、PDA(GainB)では供給圧  $P_e = 0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MP}$  および  $0.4\text{MPa}$  においてそれぞれ約 0.17%、0.15%および 0.14%と非常に小さい値となった。サイズも同様に平均値から 95%信頼区間を算出し、平均値に対して L2F では供給圧  $P_e=0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MPa}$  および  $0.4\text{MPa}$  でそれぞれ約 1.41%、1.44%、1.56%であり、PDA(GainB)ではそれぞれ約 0.70%、0.70%、0.61%と非常に小さい値となった。空気速度  $V_{air}$  の  $70\sim 110\text{m/s}$  の変化に対して、L2F で計測されたサイズは  $4.5\sim 4.9\mu\text{m}$ 、PDA で計測されたサイズは  $4.2\sim 4.8\mu\text{m}$  であった。サイズに及ぼす速度の影響は小さい。

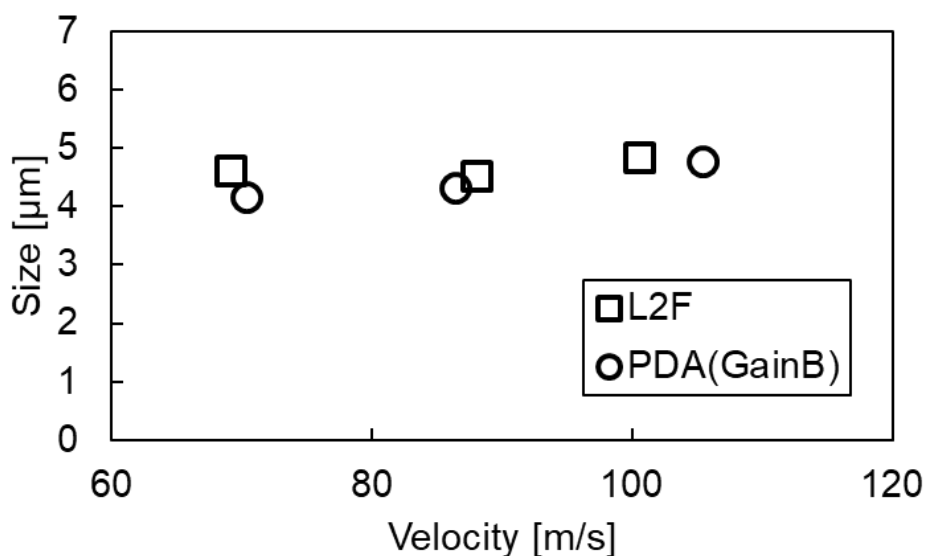


Fig. 4.9 Correlation of velocity and size

#### 4.1.7 まとめ

ディーゼル噴霧計測を主たる目的として開発された L2F と市販の PDA について、流速を約 70m/s～110m/s に変化させて超音波振動子で発生させた液滴の速度とサイズを計測し、両者を比較した。得られた知見を以下に示す。

- (1) L2F で検出される液滴からの散乱光の強度は PDA に比べて約 240 倍高い。
- (2) L2F で測定可能な液滴数密度の上限は PDA に比べて約 1400 倍高い。
- (3) L2F で計測された速度およびサイズは PDA の計測結果とほぼ一致する。
- (4) サイズに及ぼす速度の影響は小さい。

以上より、L2F による液滴の測定精度は、PDA と少なくとも同等であり、非常に高い測定精度を有していることがわかった。また、(1)(2)より、L2F を使用することで、PDA では測定不可な領域の測定が可能であることがわかった。

## 4.2 空気速度の評価

### 4.2.1 粒子画像計測計(PIV)における計測条件

図 4.10 に粒子画像流速計を用いた計測システムを示す。光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザー(Litron 社製:Nano S50-15)を用い、インジェクターの噴射と同期させる位相同期法を用いて計測を行った。位相同期法における、レーザー、カメラ、インジェクターによる噴射タイミングの一括制御のために、シンクロナイザ(LabSmith 社製:LC880)及び PIV 制御解析ソフトウェア(西華産業社製:Koncerto II)を用いた。画像

撮影には、解像度 1600×1200 pixel のダブルシャッター高感度 CCD カメラ(PCO 社製: PCO-1600) を用い、レンズは単焦点レンズ(Nikon 社製: Micro-Nikkor105mm f/2.8S) を使用した。シーディングオイル (DOS: セバシン酸ジオクチル) をコンプレッサで加圧することで、平均粒子径約 1mm のシーディングを発生させて使用した。

PIV 計測では、1 回の実験において、画像取得後、解析用パーソナルコンピュータ (CPU: Intel(R) Xeon(R)、Clock: 2.40 GHz、OS: Windows7) に取り込み移動ベクトルの算出を行った。

本研究では、噴射圧を 70MPa および 100MPa に設定し、それぞれにおいて噴射開始からの経過時間が、0.6~2.5ms および 0.5~2.5ms を PIV の計測時間とした。それぞれ 0.1ms 毎に 20 枚の画像を取得した。PIV における移動ベクトル算出には、PIV 制御解析ソフトウェア(西華産業社製: Koncerto II) を用いた。計算アルゴリズムには、再帰的相関法を用いた。初期検査領域は、64×64 pixel とし、最終的な検査領域は空間解像度を考慮し、解像度を 32×32 pixel とした。サブピクセル処理にはガウシアンフィッティングを用いた。本研究では、噴射時間ごとの画像を時間平均し、定常的な流れ場として評価を行った。半径方向平均速度等の各種統計量を、MATLAB により算出した。

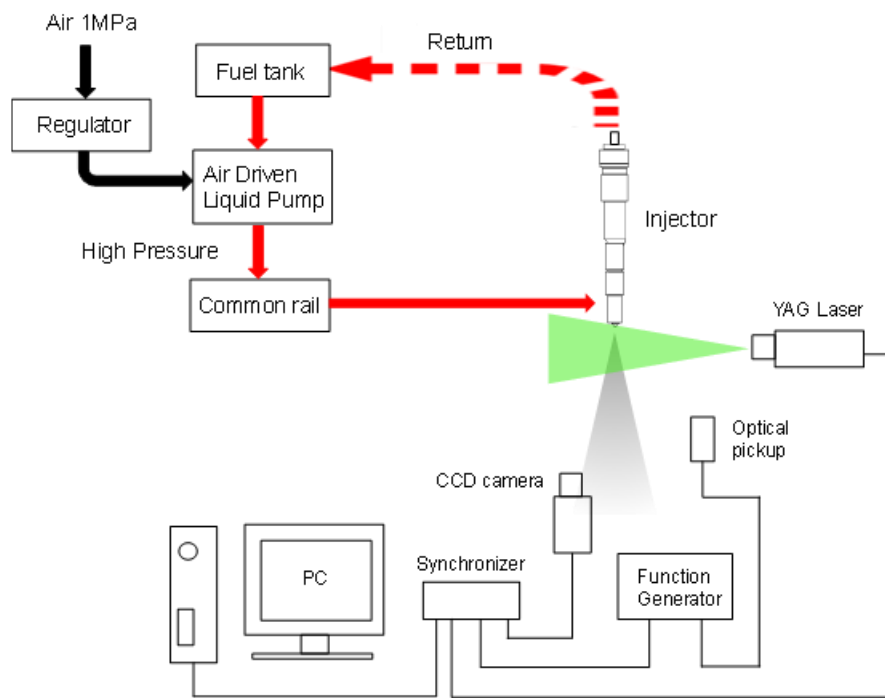


Fig. 4.10 PIV system for measurement of entrained flow of diesel spray

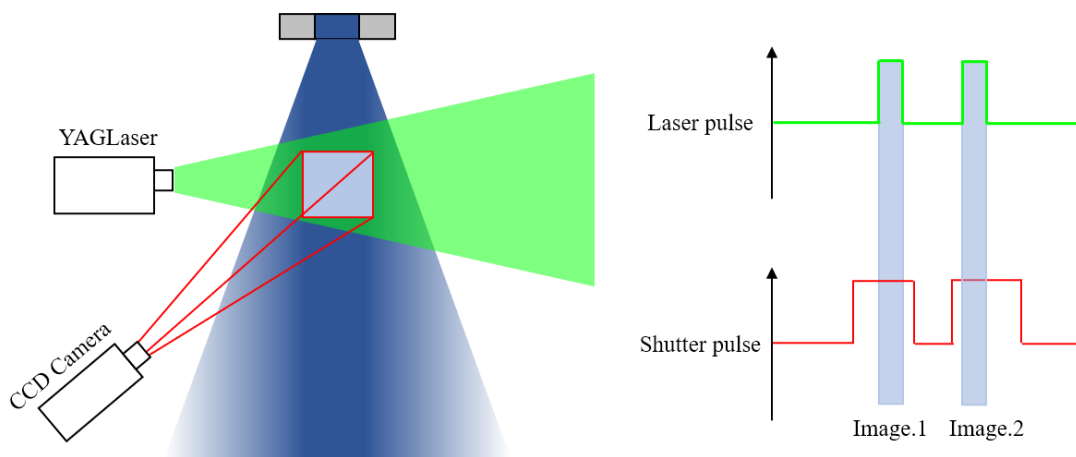


Fig. 4.11 Measurement method of PIV

#### 4.2.2 L2F おける計測条件

図 4.12 に L2F を用いた噴霧測定システムを示す。L2F の光学系では最大出力 100mW、波長 830nm の半導体レーザーを光源とし、収束レンズとして焦点距離が

8mmの非球面レンズを採用した。光学系の全長は約350mmである。2つの焦点における液滴からの後方散乱光を別個のAvalanche Photodiode(APD)に導き、Field Programmable Gate Array (FPGA)を用いて計数した飛行時間および散乱時間をパソコンに保存した。信号処理系のデータサンプリング周波数は15MHzである。L2Fのデータ取得に同期してインジェクターソレノイドに噴射開始信号を印加してからの経過時間を6MHzのクロックで計数した。噴霧軸方向をz軸、L2Fのレーザー光軸方向をy軸、y-z平面に垂直にx軸を取り、噴孔出口を座標軸の原点として計測点を表示することとした。また、噴霧画像計測にはPHOTRON社製高速度カメラ(FASTCAM SA-X2)並びにNikon社製レンズ(AF MICRO NIKKOR 200mm)、PHOTRON社製ユークラフトメタルハライドランプ(HID-U70/U150W)を用いた。

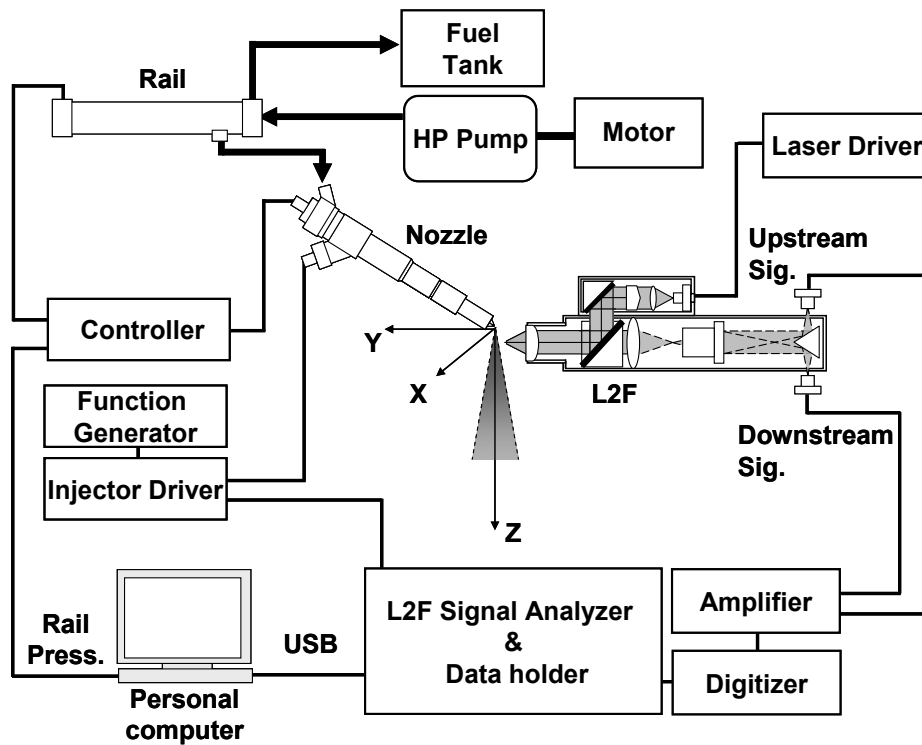


Fig. 4.12 Fuel spray measurement system

### 4.2.3 噴射条件および計測条件

噴射条件および計測点の座標を表1に示す。インジェクターは6噴孔で、噴孔径が0.165mmのソレノイドインジェクターを使用した。雰囲気圧力を0.1MPa、噴射周期を3Hz、噴射圧力を70MPaおよび100MPaに設定した。PIV計測では $z=7.5\text{mm}$ から $z=15\text{mm}$ の位置を計測し、L2F計測ではデータを20000点とし、各噴射圧で計測点の $x$ 座標を0、 $\pm 0.25$ 、 $\pm 0.5$ 、 $\pm 0.75$ 、 $\pm 1.0\text{mm}$ とし、 $z$ 座標を15mmとした。

Table.1 Injection condition

Injector specification	
Number of hole	6
Hole diameter [mm]	0.165
Injector type	Solenoid
Test condition	
Injection frequency [Hz]	3
Ambient pressure [MPa]	0.1
Rail pressure [MPa]	70,100
Injection period [ms]	1.5
Measurement positions [mm] (PIV)	$x=21$
	$y=0$
	$z=7.5\sim 15$
Measurement positions [mm] (L2F)	$x=0, \pm 0.25, \pm 0.5, \pm 0.75, \pm 1.0$
	$y=0$
	$z=15$



#### 4.2.4 PIV 計測による空気導入量の評価

PIV で計測した各条件において  $x=21\text{mm}$  の位置から導入される空気量を求めた。図 4.13 に噴射圧 70MPa および 100MPa における空気量の時間変化を示す。横軸は噴射信号印加からの経過時間である。

噴射圧 70MPa において、Time=0.6ms から Time=1.2ms まで空気量は増加し、Time=1.2ms から Time=1.9ms まではほとんど変化がない。Time=1.9ms から Time=2.5ms の噴射終期に増減がみられる。

噴射圧 100MPa において、Time=0.5ms から Time=0.9ms までに空気量は増加し、Time=0.9ms から Time=2.0ms までは増減を繰り返し、Time=2.0ms から Time=2.5ms の噴射終期に増減がみられる。

噴射圧 70MPa および噴射圧 100MPa において空気量の変化が小さい時間ではどちらの条件でも空気量は近い値となった。

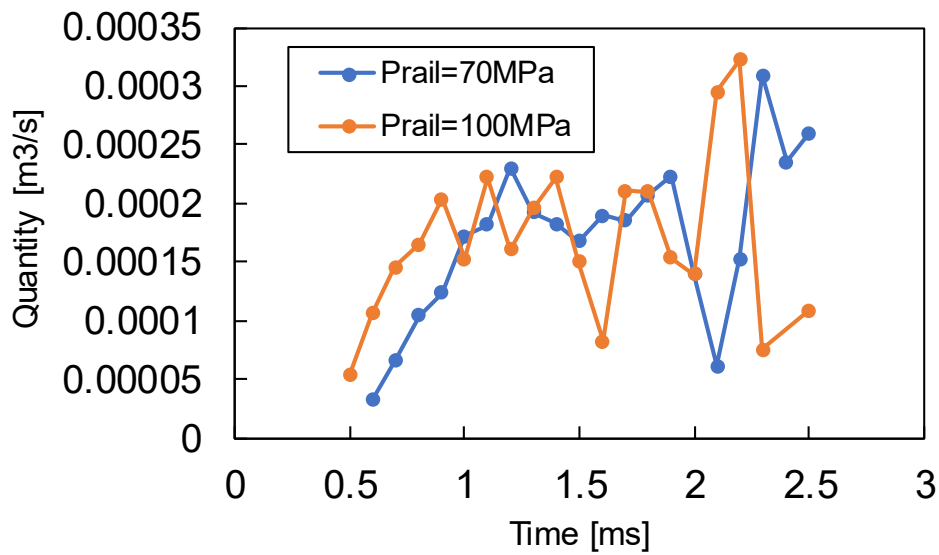


Fig. 4.13 Time variation of air flow quantity

#### 4.2.5 噴霧幅の比較

本研究における噴霧画像はモノクロで撮影され、その輝度は白と黒の階調を 0～255 の数字で表したものである。0.1ms 毎に噴霧画像 25 枚を平均化し、輝度のピーク値に対して 20%となる輝度の位置を噴霧外縁として噴霧幅を求めた。図 4.14 に噴射圧 70MPa および噴射圧 100MPa における  $z=15\text{mm}$  での噴霧幅の時間変化を示す。横軸は噴射信号印加からの経過時間である。

噴霧が  $z=15\text{mm}$  に到達する時間が噴射圧 70MPa では  $\text{Time}=0.6\text{ms}$  であるのに対して、噴射圧 100MPa では  $\text{Time}=0.5\text{ms}$  であり、高圧噴射の場合の噴霧到達時間が早い。また、 $\text{Time}=0.7\text{ms}$  以降は噴射圧 70MPa と噴射圧 100MPa において変化に大きな差がないことがわかる。

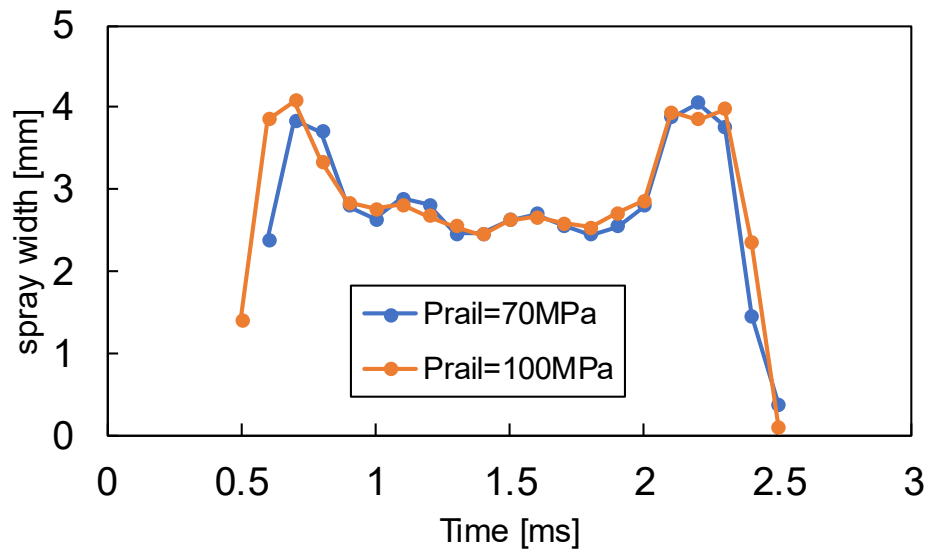


Fig. 4.14 Time variation of spray width

#### 4.2.6 L2F による液滴速度の時間変化

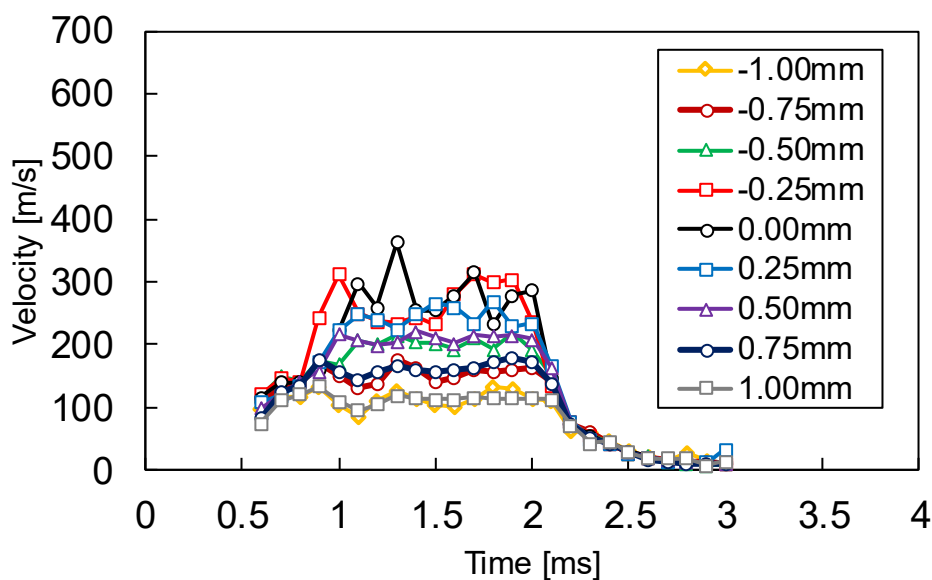
噴射圧 70MPa および噴射圧 100MPa における時間窓 0.1ms 毎の平均液滴速度の時間変化をそれぞれ図 4.15(a)および(b)に示す。横軸は噴射信号印加からの経過時間である。

噴射圧 70MPa において、 $x=\pm 0.75, \pm 1.0\text{mm}$  では  $\text{Time}=0.6\text{ms}$  から  $\text{Time}=2.1\text{ms}$  まで速度にほとんど変化がなく、その後減少している。また、 $x=0, \pm 0.25, \pm 0.5\text{mm}$  では  $\text{Time}=0.6\text{ms}$  から  $\text{Time}=1.0\text{ms}$  まで速度が増加し、 $\text{Time}=1.0\text{ms}$  から  $\text{Time}=2.1\text{ms}$  までほとんど変化がなく、その後減少している。

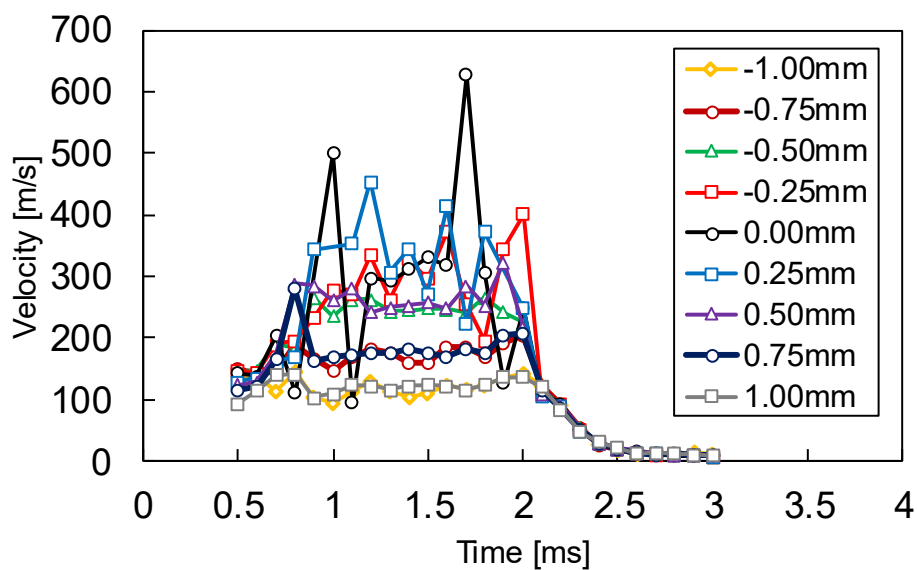
噴射圧 100MPa において、 $x=\pm 0.75, \pm 1.0\text{mm}$  では  $\text{Time}=0.5\text{ms}$  から  $\text{Time}=2.0\text{ms}$  まで速度にほとんど変化がなく、その後減少している。また、 $x=0, \pm 0.25, \pm 0.5\text{mm}$  では  $\text{Time}=0.5\text{ms}$  から  $\text{Time}=0.9\text{ms}$  まで速度が増加し、 $\text{Time}=0.9\text{ms}$  から  $\text{Time}=2.0\text{ms}$  ま

でほとんど変化がなく、その後減少している。

噴射圧 70MPa に比べて噴射圧 100MPa の方が  $x=\pm 1.0\text{mm}$  を除く各半径位置での速度が大きいことがわかる。



(a)  $P_{rail}=70\text{MPa}$



(b)  $P_{rail}=100\text{MPa}$

Fig. 4.15 Time variation of velocity

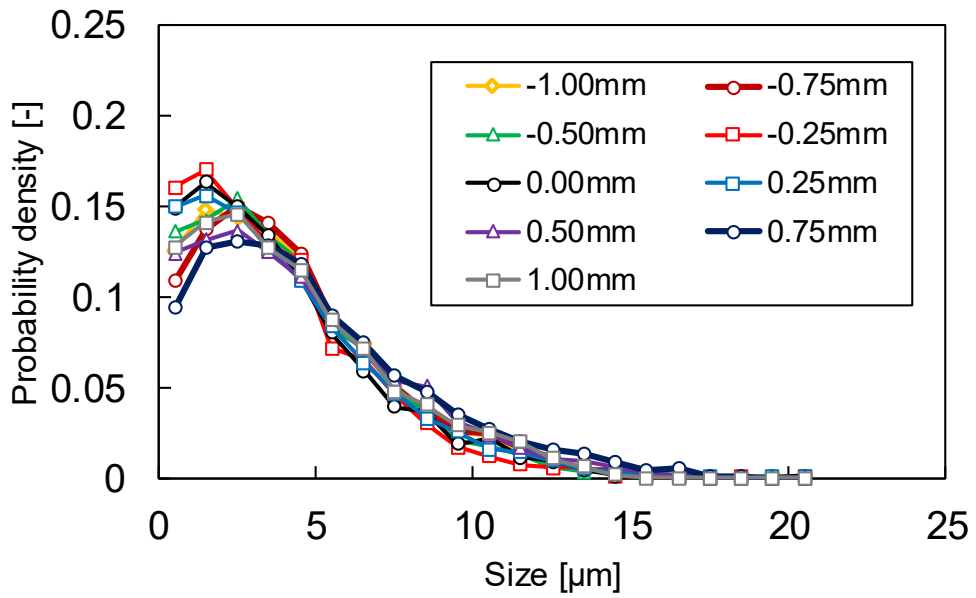
#### 4.2.7 L2F による液滴サイズの確率密度分布

噴射圧 70MPa および噴射圧 100MPa において測定された液滴サイズの確率密度分布をそれぞれ図 4.16 (a)および(b)に示す。横軸が液滴サイズである。

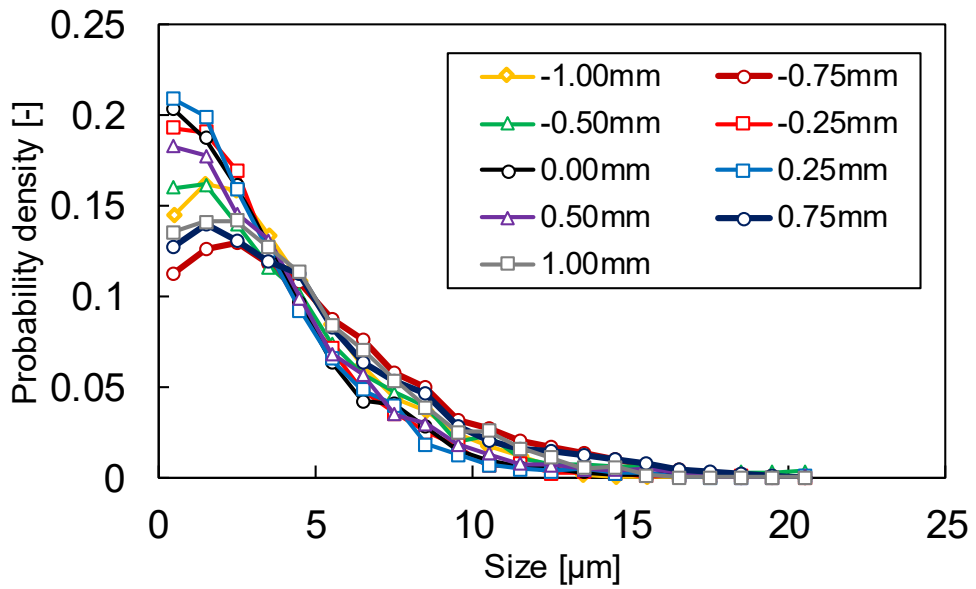
噴射圧 70MPa において、 $x=0, \pm 0.25\text{mm}$  では液滴サイズ  $1.5\mu\text{m}$  の確率密度が最も大きい。また、 $x=\pm 0.5, \pm 0.75, \pm 1.0\text{mm}$  では液滴サイズ  $2.5\mu\text{m}$  の確率密度が最も大きい。また、液滴サイズが  $12.5\mu\text{m}$  より大きい液滴はほとんど存在しない。

噴射圧 100MPa において、 $x=0, \pm 0.25, \pm 0.5\text{mm}$  では液滴サイズ  $0.5\mu\text{m}$  の確率密度が最も大きい。また、 $x=\pm 0.75, \pm 1.0\text{mm}$  では液滴サイズ  $1.5\mu\text{m}$  の確率密度が最も大きい。また、液滴サイズが  $10.5\mu\text{m}$  より大きい液滴はほとんど存在しない。

噴射圧 70MPa に比べて噴射圧 100MPa の方がサイズの小さい液滴が多く存在することから、噴射圧 70MPa に比べて噴射圧 100MPa の方が  $z=15\text{mm}$  までに微粒化が促進されていると考えられる。



(a)  $P_{rail}=70\text{MPa}$



(b)  $P_{rail}=100\text{MPa}$

Fig.4.16 Probability density of size

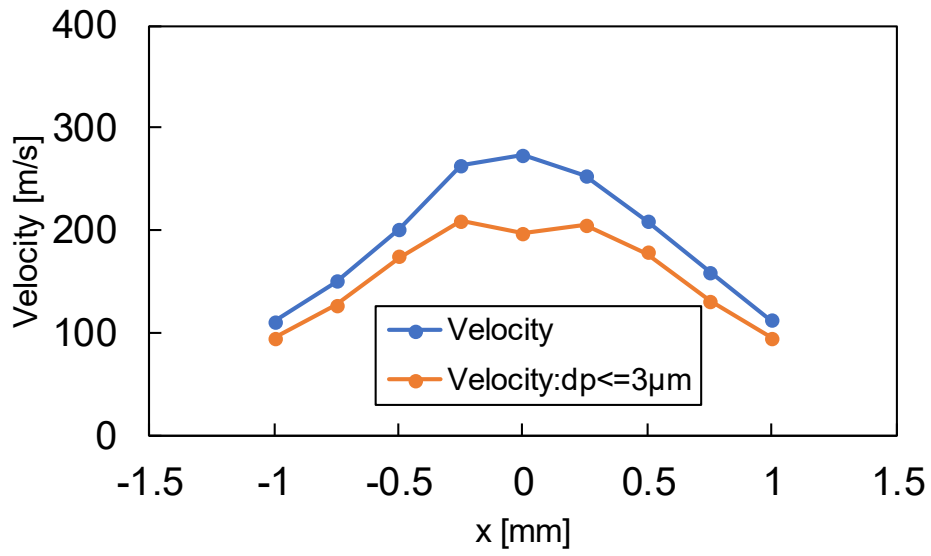
#### 4.2.8 L2F による液滴速度と空気速度の空間分布

Melling らは、シリコンオイルの  $2.6\mu\text{m}$  の粒子が  $1\text{kHz}$  の周波数変動をもつ流速変動に、誤差 1%以内で追従することを報告している<sup>(53)</sup>。このことを参考に、本研究では  $3\mu\text{m}$  以下の液滴の速度を空気速度として取り扱うこととした。

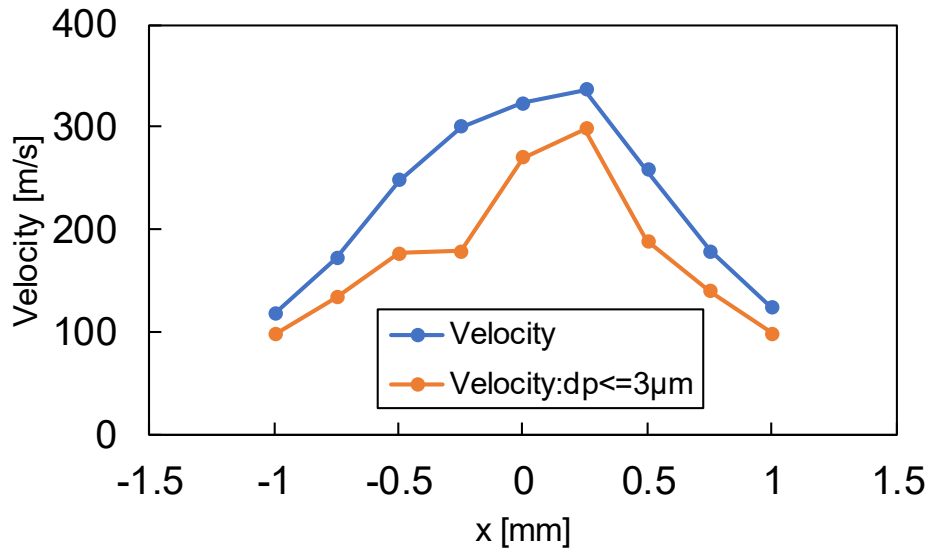
噴射圧  $70\text{MPa}$  および噴射圧  $100\text{MPa}$  における液滴速度と空気速度の空間分布を図 4.17 (a)および(b)に示す。横軸は半径方向における位置である。解析区間はそれぞれ  $T=1.0\text{ms}$  から  $T=2.0\text{ms}$  および  $T=0.8\text{ms}$  から  $T=2.0\text{ms}$  である。

噴射圧  $70\text{MPa}$  において、噴霧中心付近から噴霧外縁に向けて速度が小さくなっている。また、空気速度も同様に噴霧中心付近から噴霧外縁に向けて速度が小さくなっている。また、すべての半径位置において、液滴速度に比べて空気速度の方が小さい。噴射圧  $100\text{MPa}$  においても、噴霧中心付近から噴霧外縁に向けて速度が小さくなっている。また、空気速度も同様に噴霧中心付近から噴霧外縁に向けて速度が小さくなっている。また、すべての半径位置において、液滴速度に比べて空気速度の方が小さい。

噴霧中心において、噴射圧  $100\text{MPa}$  の空気速度は噴射圧  $70\text{MPa}$  に比べて高く、噴霧周辺部においては両者にほとんど差が見られない。



(a)  $P_{rail} = 70 \text{ MPa}$



(b)  $P_{rail} = 100 \text{ MPa}$

Fig.4.17 Spatial distribution of velocity



#### 4.2.9 空気導入量の算出方法

川那辺ら<sup>(54)</sup>は、噴霧の発達を準定常と考える和栗らの運動量理論および噴霧の発達を非定常と考える Musculus らのモデルの二通りの解析方法に基づいて、噴霧の周囲流体導入過程に関する考察を行っている。この方法を参考に、L2F の計測結果から空気導入量を評価した。

和栗らの運動量理論に基づく方法では、0.1ms 毎に、L2F データから断面平均速度  $V_a$ 、噴霧幅  $2B_s$ 、および運動量理論から等価円半径  $r_e$  を求める。半径内向きに導入された空気が、等価円半径から噴霧幅までのリング面を噴霧軸方向に流れるとして空気導入量  $Q_{mo}$  を次式で算出する。

$$Q_{mo} = V_a \cdot (\pi B_s^2 - \pi r_e^2) \quad (4.1)$$

Musculus らのモデルに基づく方法では、リング面の噴霧軸方向速度の変化を考慮して、空気導入量  $Q_{mu}$  を次式で算出する。

$$Q_{mu} = \sum_i V_i \cdot (\pi r_{i+1}^2 - \pi r_i^2) \quad (4.2)$$

ここで、 $i$  はリング面の半径方向の分割であり、 $i$  の変化によって等価円半径から噴霧幅までの変化を示す。噴霧最外縁の空気速度を 0m/s とし、L2F で計測した 9 点と合わせて 2 次曲線で速度の空間分布を近似することで  $V_i$  を求めた。

#### 4.2.10 L2F 及び PIV による空気導入量の時間変化比較

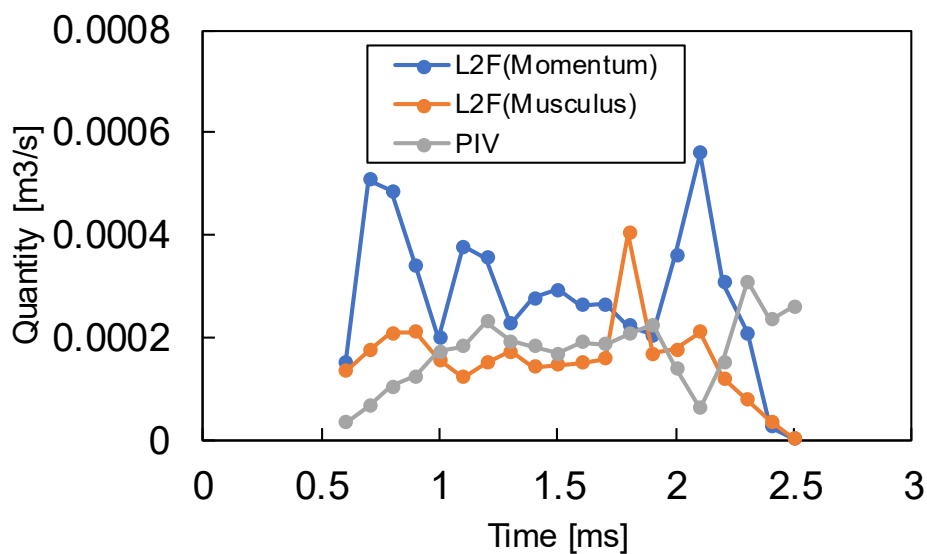
図 4.18 (a)および(b)に L2F の計測結果から求めた空気導入量と PIV の計測結果から求めた空気導入量の時間変化を示す。横軸は噴射信号印加からの経過時間である。

噴射圧 70MPa において、Time=1.0ms から Time=2.0ms では PIV の計測結果と Musculus らのモデルから求めた空気導入量がおおよそ一致している。Time=0.6ms から Time=1.0ms および Time=2.0ms から Time=2.5ms では、和栗らの運動量理論は PIV の計測結果および Musculus らのモデルから求めた空気導入量に比べてやや過大評価となった。噴射圧 100MPa において、Time=0.8ms から Time=2.0ms では PIV の計測結果と Musculus らのモデルから求めた空気導入量がおおよそ一致している。Time=0.5ms から Time=0.8ms では、噴射圧 70MPa の場合と同様に、和栗らの運動量理論は PIV の計測結果および Musculus らのモデルから求めた空気導入量に比べてやや過大評価となった。

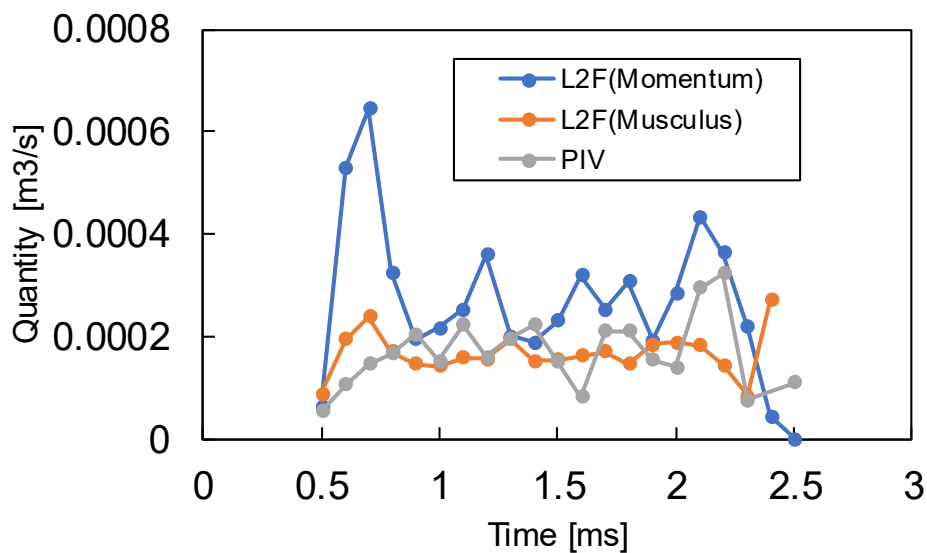
噴射初期および噴射終期において、L2F の計測結果に基づいて運動量理論から求めた空気導入量は、PIV の計測結果に比べてやや過大評価となっている。噴霧幅が広いため、空気導入として評価した領域が広がったことが要因の1つと考えられる。噴射初期および噴射終期における噴霧幅の広がり、空気導入によるものではなく、シート絞りに起因するノズル内部の乱れによるものと考えられる。

図 4.19 に、横軸にニードルリフト量、縦軸にノズル単体流量を示すノズルの L-Q 特性を示す。ニードルがリフトし噴射する過程において、流体の通過面積が最小になる絞り領域は、噴射初期にサック絞りからシート絞りへ短期間で推移し、そして緩やかに、噴孔絞りへと移行する。噴射初期および噴射終期における絞り領域の急激な変化に

伴う、流体内部の乱れにより微粒化が促進され噴霧幅の広がりにつながった。



(a)  $P_{rail}=70\text{MPa}$



(b)  $P_{rail}=100\text{MPa}$

Fig. 4.18 Time variation of air flow quantity

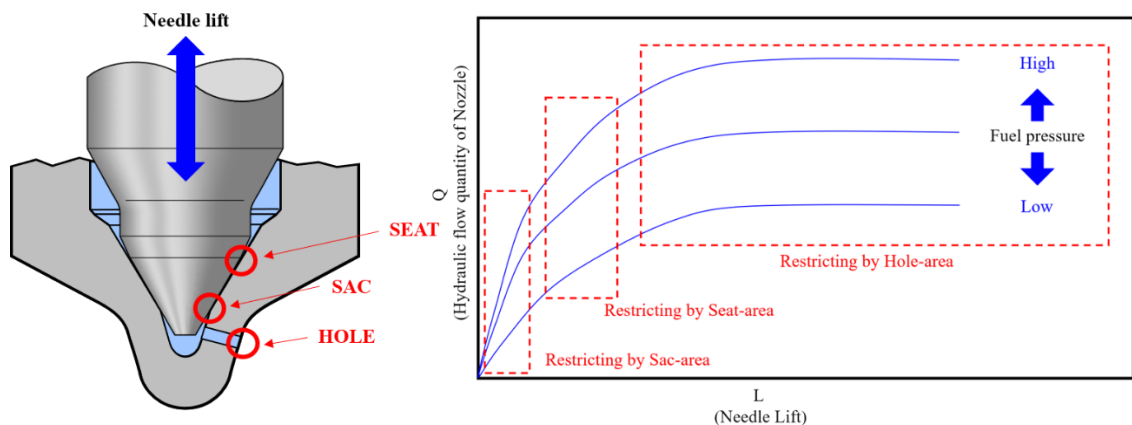


Fig. 4.19 L-Q characteristic of nozzle

#### 4.2.11 まとめ

噴射圧を 70MPa および 100MPa、噴射期間を 1.5ms に設定した 6 噴孔のソレノイドインジェクターから大気中に間欠噴射された噴霧の周囲空気の流れを噴孔から 7.5mm～15mm の範囲で PIV を用いて計測した。また、噴孔より 15mm 下流の位置において L2F を用いて液滴の速度およびサイズの計測を行い、計測結果から噴霧に導入される空気量を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) PIVで計測された噴射中期の導入空気量の噴射圧による変化は小さい。このことは、L2Fにより評価された噴霧周辺部の軸方向空気速度が噴射圧により変化しないことに対応するものと考えられる。
- (2) 噴射中期のL2F計測結果を用いて和栗らの運動量理論とMusculusらのモデルに基づいて評価された空気導入量は、PIVによる計測結果とほぼ一致する。
- (3) 噴射中期において、噴射圧100MPaの場合の噴霧軸近傍における空気速度は噴射圧70MPaの場合に比べて高い。

以上の結果より、第5章にて用いるウェーバー数 $We$ を算出する際に用いる空気速度として、L2Fで計測された $3\ \mu\text{m}$ 以下の液滴の速度を使用することが適切であることがわかった。

## 第5章 噴霧計測結果および考察

本章では、噴霧液滴の速度とサイズを測定することを可能にしたレーザー2焦点流速計（L2F : Laser 2-Focus velocimeter）を用いて、ディーゼル噴霧を計測し、その結果について考察する。また、ディーゼル噴霧においては、他計測手法では計測が困難な、液滴速度が高速であり、かつ、高数密度場となる噴孔出口近傍を計測し、考察する。

### 5.1 噴霧液滴の分裂・分散

#### 5.1.1 噴射条件および計測条件

噴射条件を表 5.1 に示す。供試インジェクターは噴孔数 10、噴孔径 0.10mm である。噴射周期を 3Hz、雰囲気圧力を 0.1MPa、噴射圧力を 60 および 100MPa、噴射期間を 1.0ms に設定し、L2F のサンプルデータ数を 20000 点とした。計測点の座標を表 5.2 に示す。座標を 4、6、8、10 および 12mm とし、 $z=4\text{mm}$  の断面における計測点を  $x=0$ 、 $\pm 0.25$  および  $\pm 0.5\text{mm}$  の 5 点とした。

Table 5.1 Experimental conditions

Injector specifications	
Number of hole [-]	10
Hole diameter [mm]	0.10

Test conditions	
Injection frequency [Hz]	3
Ambient pressure [MPa]	0.1
Rail pressure [MPa]	60 and 100
Injection duration [ms]	1.0

Table 5.2 Measurement positions

		x [mm]				
		-0.5	-0.25	0	0.25	0.5
z [mm]	4	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5
	6	-0.75	-0.375	0	0.375	0.75
	8	-1	-0.5	0	0.5	1
	10	-1.25	-0.625	0	0.625	1.25
	12	-1.5	-0.75	0	0.75	1.5
x/z [-]		<b>-0.125</b>	<b>-0.0625</b>	<b>0</b>	<b>0.0625</b>	<b>0.125</b>

計測点の配置を図 5.1 に示す。噴孔近傍では噴霧が噴孔を頂点としてほぼ円錐状に広がることから、計測点を噴孔から放射状に配置している。 $z > 4\text{mm}$  の各断面における計測点について、 $x/z$  を  $z = 4\text{mm}$  の断面における 5 点の  $x/z$  と同じ値、すなわち、 $x/z = -0.125$ 、 $-0.0625$ 、 $0$ 、 $0.0625$  および  $0.125$  とし、それぞれ白抜き青丸、白抜き赤丸、黒丸、赤丸、および青丸で示した。

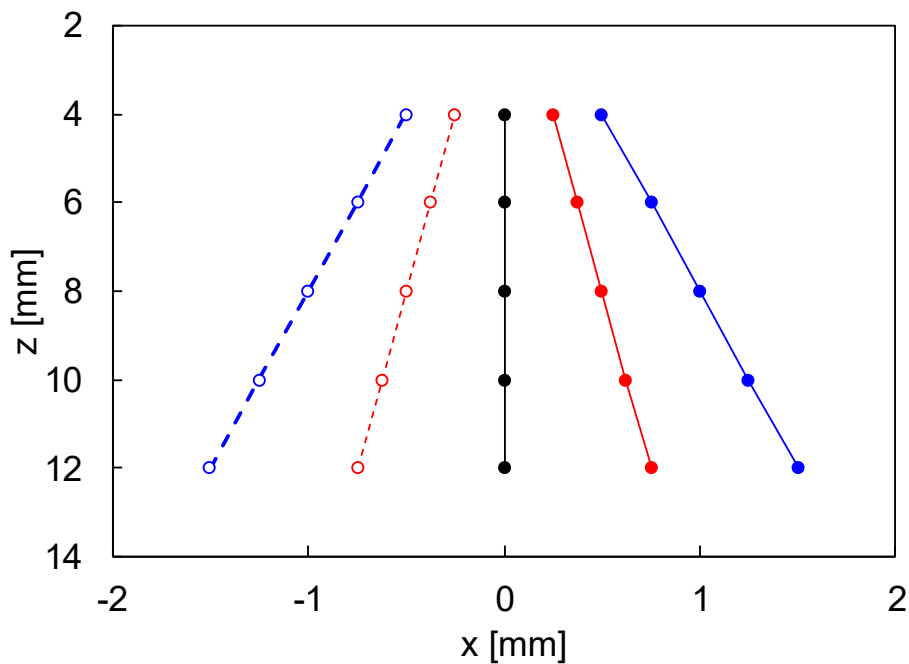


Fig. 5.1 Geometric arrangement of measurement positions

### 5.1.2 ウェーバー数の評価方法

液滴の分裂を評価する指標であるウェーバー数  $We$  を以下の式(5.1)で求める。

$$We = \frac{\rho_g V_{rel}^2 D_p}{\sigma} \quad (5.1)$$

ここで  $\rho_g$  は雰囲気の密度、 $D_p$  は液滴サイズ、 $\sigma$  は燃料の表面張力である。 $V_{rel}$  は空気速度と液滴速度の相対速度であり、以下の式 5.2 で求める。

$$V_{rel} = V_p - V_{air} \quad (5.2)$$

ここで  $V_p$  は液滴の速度、 $V_{air}$  は空気速度である。

液滴の分裂を定量的に評価するため、L2F の計測データに基づいて、液滴のサイズ減少  $dD_p$  をその移動距離  $dz$  で除して  $dD_p/dz$  を算出した。次に、チェーンルールに基づいて、液滴の速度  $V_p$  を掛けて、次式により単位時間当たりの液滴サイズ減少率  $dD_p/dt$  を求めた。これは分裂モデルにおける式(3.5)で定義された液滴半径変化率  $dr/dt$  の 2 倍に相当する

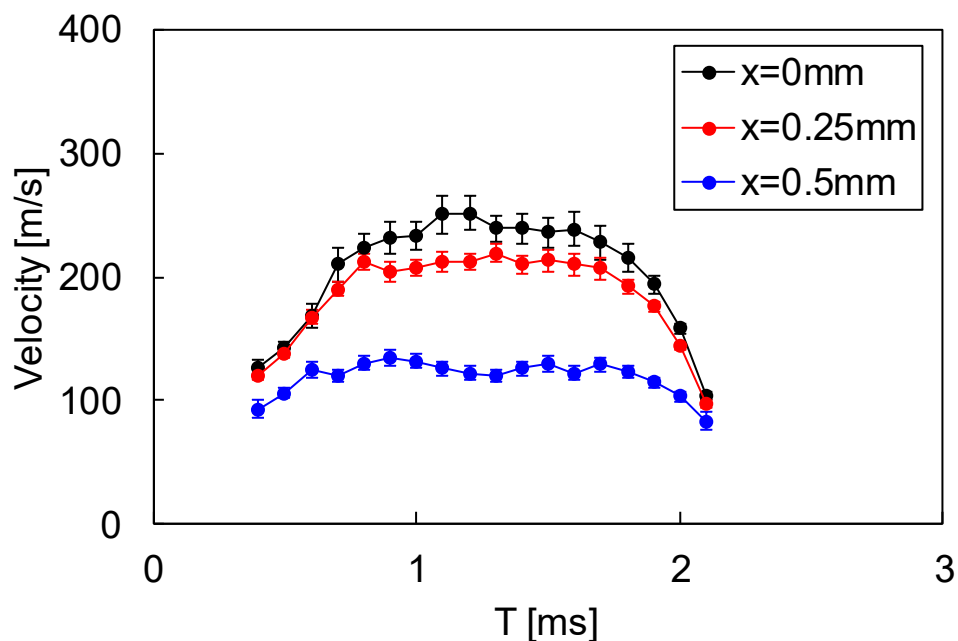
$$\frac{dD_p}{dt} = \frac{dD_p}{dz} \frac{dz}{dt} = V_p \frac{dD_p}{dz} \quad (5.3)$$



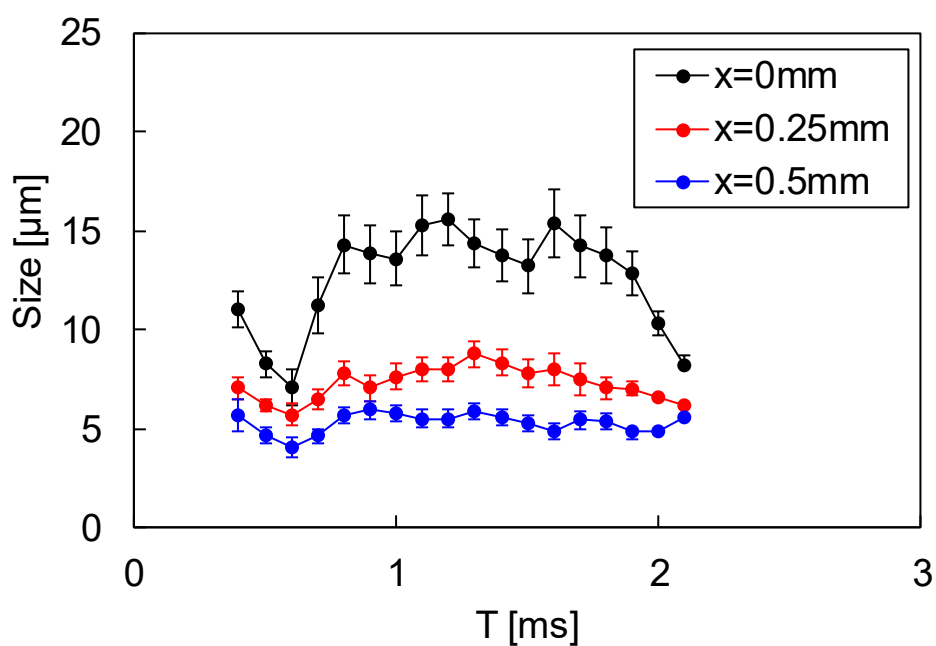
### 5.1.3 液滴速度およびサイズの時間変化

図 5.2(a)は、噴射圧力が 60MPa、計測位置が  $z=4\text{mm}$  において 0.1ms の時間窓に対する算術平均液滴速度の時間変化を示す。横軸はインジェクターへの噴射信号印加からの経過時間  $T$  である。 $x=0$ 、0.25 および 0.5mm をそれぞれ黒丸、赤丸および青丸で示す。 $x=0$  および 0.25mm の場合、液滴速度は  $T=0.4$  から 0.9ms の間で増加し、 $T=0.9$  から 1.5ms の間で変化が小さく、 $T=1.5\text{ms}$  以降において減少する傾向を示した。液滴速度の増加および減少の変化量は、 $x$  の増加とともに減少しており、噴射期間に渡って  $x=0.25$  から 0.5mm への変化が大きい。噴孔半径の 5 倍の位置である  $x=0.25\text{mm}$  において針弁開閉の影響が顕著に現れている。図 5.2(b)は液滴サイズの時間変化を示す。 $x=0\text{mm}$  の場合、液滴サイズは  $T=0.4$  から 0.6ms の間で減少した。金らはノズルの 10 倍模型を用いた定常流の観察により、低針弁開度時に生じたノズル内部の乱れと噴霧角の増加を報告しており<sup>(55)</sup>、Moon らは X 線を用いた実ノズル内部流動の計測によって低針弁開度時に生じたノズル内部の乱れにより噴霧角が増加することを報告している<sup>(56)</sup>。この低針弁開度時に発生する乱れにより液滴サイズが減少したものと考えられる。その後、液滴サイズは  $T=0.6$  から 0.8ms の間で増加し、 $T=0.9$  から 1.5ms の間では他の期間に比べて相対的にサイズが大きく、 $T=1.5\text{ms}$  以降において減少する傾向を示した。液滴サイズの増加および減少の変化量は、 $x$  の増加とともに減少しており、噴射期間に渡って  $x=0$  から 0.25mm への変化が大きい。噴孔半径の 5 倍の位置である  $x=0.25\text{mm}$  では、 $z<4\text{mm}$  における液滴分裂による小サイズ液滴が現れたものと考えられる。この位置の液滴速度が噴霧中心に

比べてやや低いものの、ほぼ同様の時間変化であったことから、分裂で生じた小さいサイズ液滴がまだ減速していないものと考えられる。



(a) Velocity

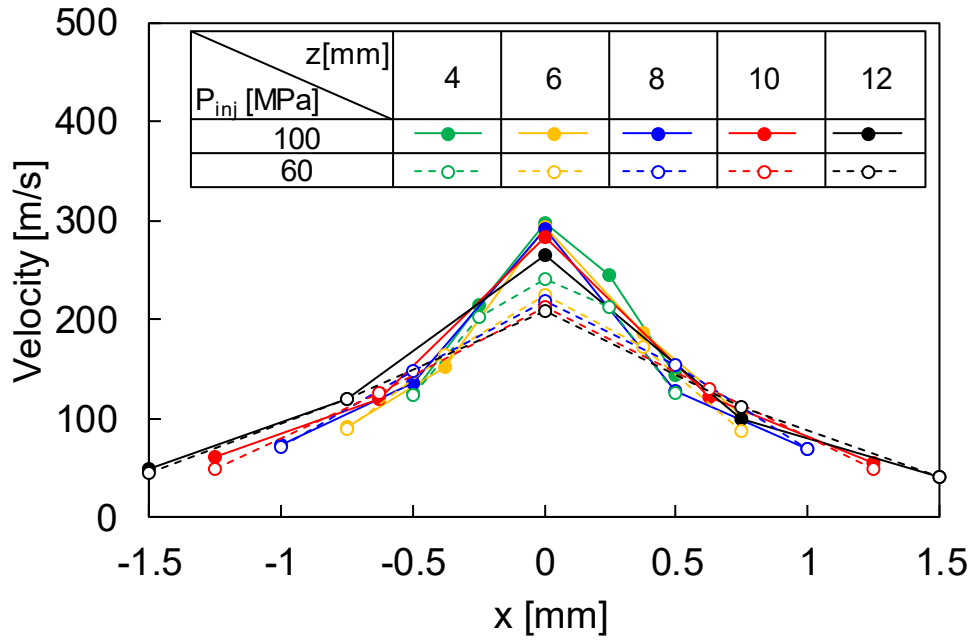


(b) Size

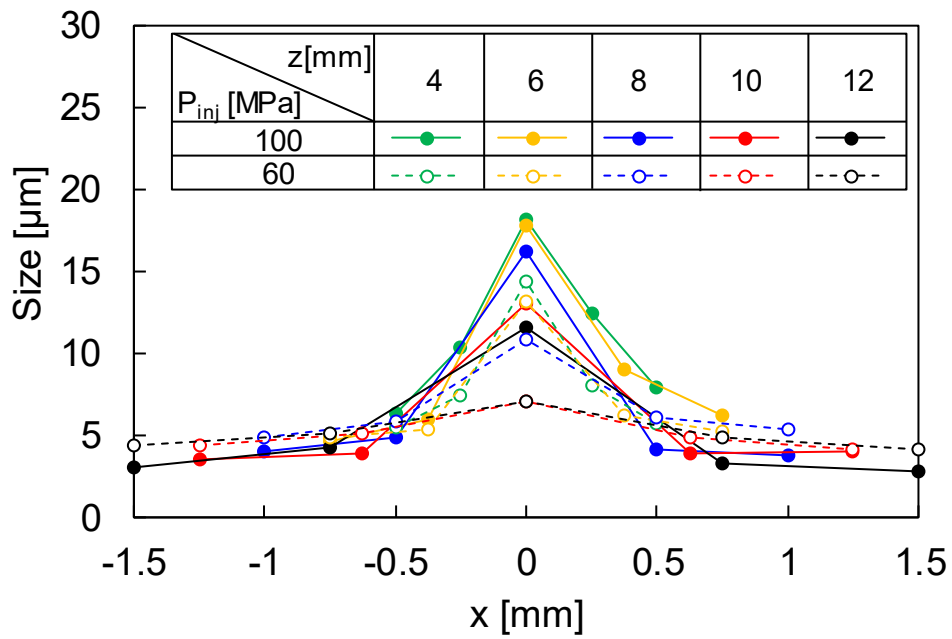
Fig. 5.2 Time variations of velocity and size of droplets,  
 $z = 4\text{mm}$ ,  $P_{inj} = 60\text{MPa}$

#### 5.1.4 液滴の速度およびサイズの空間分布

ここでは、噴霧中心において液滴速度が高くかつ時間的な変化が小さい  $T=0.9$  から  $1.5\text{ms}$  を噴射中期とし、この期間の平均液滴速度および平均液滴サイズを算出した。それぞれの  $x$  軸方向の空間分布が図 5.3 (a) および(b)であり、噴射圧  $P_{inj}$  が  $60\text{MPa}$  および  $100\text{MPa}$  の場合をそれぞれ白抜き丸および中実丸で示す。また、計測断面  $z$  が  $4, 6, 8, 10$  および  $12\text{mm}$  の場合をそれぞれ緑、黄、青、赤、および黒で示す。いずれの  $z$  断面においても噴霧中心近傍に比べて噴霧周辺部の液滴速度が低い。噴霧中心において、噴射圧  $60\text{MPa}$  に比べて噴射圧  $100\text{MPa}$  の液滴速度が高く、上流側に比べて下流側の液滴速度が低い。 $z=4\text{mm}$  において、 $x=-0.25\text{mm}$  に比べて  $x=0.25\text{mm}$  の液滴速度が高く、噴霧にわずかな非軸対称性が観察された。 $z=8\sim 12\text{mm}$  において、噴霧外縁の速度は他の位置に比べて低く、 $z$  によらずほぼ同程度である。液滴サイズの空間分布は、液滴速度とほぼ類似の形状であり、いずれの  $z$  断面においても噴霧中心近傍に比べて噴霧周辺部の液滴サイズが小さい。噴霧中心において、噴射圧  $60\text{MPa}$  に比べて噴射圧  $100\text{MPa}$  の液滴サイズが大きく、上流側に比べて下流側の液滴サイズが小さい。下流側では低速かつ小サイズの液滴が存在する噴霧周辺部の領域が上流に比べて拡大しており、噴霧の広がりとともに分裂によって生じた小サイズの液滴が分散したものと判断される。



(a) Velocity



(b) Size

Fig. 5.3 Spatial distributions of velocity and size at middle period of injection

### 5.1.5 空気速度の空間分布

Melling らは、シリコンオイルの  $2.6\mu\text{m}$  の粒子が  $1\text{kHz}$  の周波数をもつ流速変動に、誤差 1%以内で追従することを報告している<sup>(53)</sup>。この液滴サイズを参考に、L2F で取得された  $3\mu\text{m}$  以下の液滴の速度を空気速度として用いることとした。この方法に基づいて Musculus ら<sup>(50)</sup>のモデルで評価された空気導入量が、PIV による計測結果と良好に一致することを報告している<sup>(57)</sup>。図 5.4 に噴射中期の  $T=0.9$  から  $1.5\text{ms}$  の期間の空気速度の空間分布を示す。いずれの  $z$  座標においても噴霧中心近傍に比べて噴霧周辺部の速度が低い。噴霧中心において噴射圧  $60\text{MPa}$  に比べて噴射圧  $100\text{MPa}$  の空気速度がやや低いものの両者の差はわずかである。

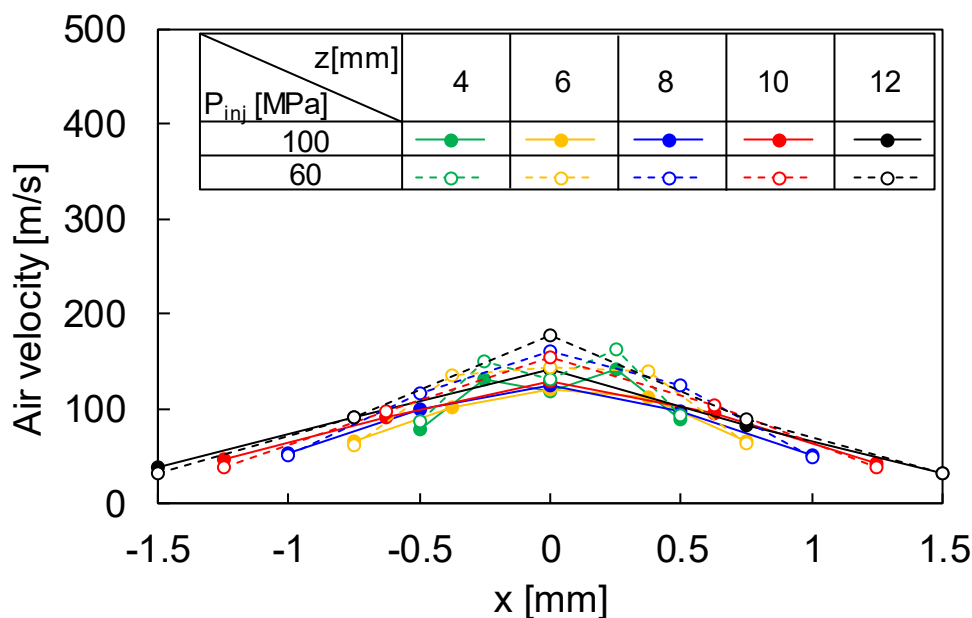


Fig. 5.4 Spatial distributions of air velocity at middle period of injection

### 5.1.6 ウェーバー数の評価

式(5.1)より算出した噴射中期の  $We$  の空間分布を図 5.5 に示す。いずれの  $z$  座標においても噴霧周辺部に比べ噴霧中心近傍の  $We$  が高く、噴霧下流に向かって低くなった。上流側の噴霧中心近傍に存在する大サイズかつ高相対速度の液滴が分裂し分散することが  $We$  の変化として現れたものと考えられる。噴霧の中心およびその近傍において噴射圧 60MPa に比べて噴射圧 100MPa の  $We$  が高いことが明確である。

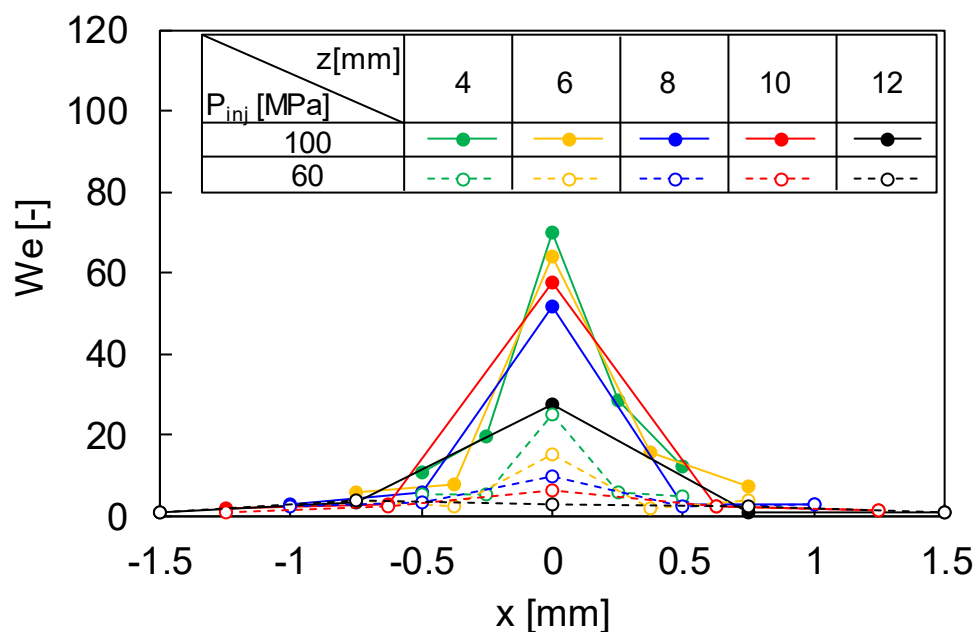


Fig.5.5 Spatial distributions of Weber number at middle period of injection

### 5.1.7 液滴サイズの減少率

噴霧がほぼ円錐状に広がることから、液滴が主として  $x/z$  一定で下流に飛行することを念頭に、式(5.3)より噴射中期の  $dDp/dt$  を算出した。その空間分布を図 5.6 に示しており、 $z=4\sim 6\text{mm}$ 、 $z=6\sim 8\text{mm}$ 、 $z=8\sim 10\text{mm}$  および、 $z=10\sim 12\text{mm}$  の  $dDp/dt$  をそれぞれ緑、青、赤および黄で示す。 $dDp/dt$  は、 $z=4\sim 6\text{mm}$  を除くいずれの断面間において噴霧周辺部に比べて、中心あるいはその近傍で大きい。図 5.5 で示された噴霧の中心あるいはその近傍に存在する高  $We$  の液滴の分裂が活発であったものと考えられる。 $dDp/dt$  が  $300\ \mu\text{m}/\text{ms}$  を超えるプロットはその全てが噴射圧  $100\text{MPa}$  の場合であり、高圧噴射の場合に液滴分裂が活発であることがわかる。 $z=4\sim 6\text{mm}$  では噴霧中心の  $dDp/dt$  がその近傍の値より小さくなっており、分裂後の小サイズ液滴が分散しやすく噴霧軸上に残りにくいことが過小評価の要因と考えられる。 $z=6\sim 8\text{mm}$  においては、 $x=0.375\text{mm}$  に比べて  $x=-0.375\text{mm}$  の  $dDp/dt$  は小さく、この相違は噴霧の非軸対称性によるものと考えられる。噴霧周辺部において、 $dDp/dt$  は小さく、噴霧下流ではゼロに近い。噴霧周辺では分裂がほとんど生じていないと考えられる。

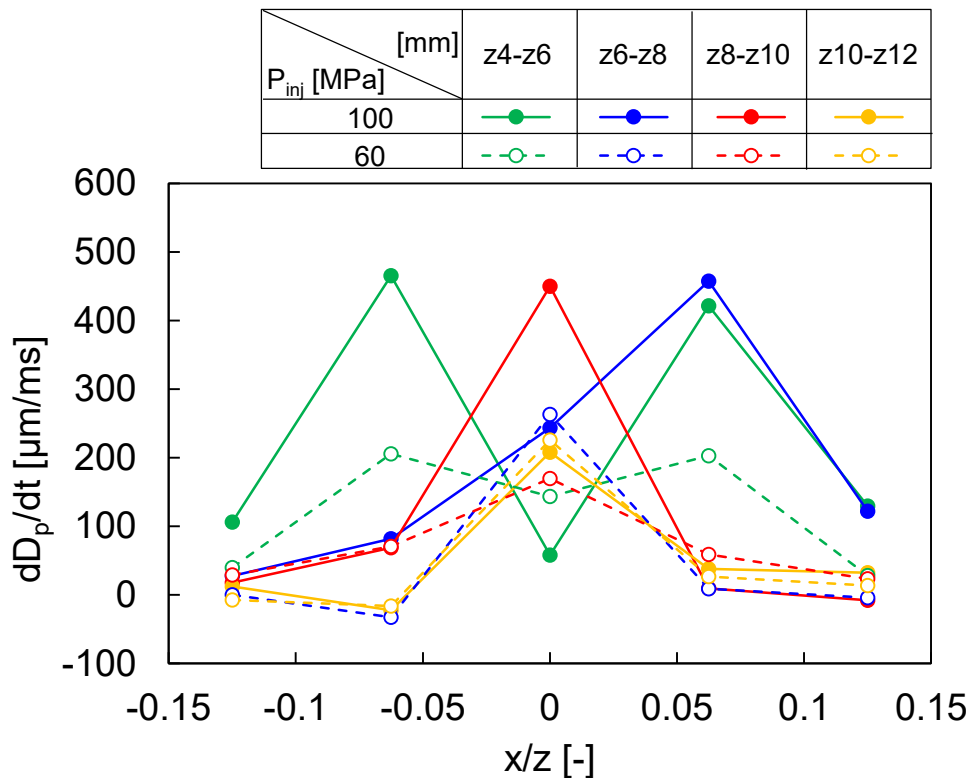


Fig. 5.6 Spatial distributions of droplet size decrease rate

### 5.1.8 液滴サイズの減少率とウェーバー数の相関

$dD_p/dt$  と  $We$  の相関を図 5.7 に示す。 $We$  が高い場合に液滴サイズ減少率は大きく、両者には正の相関がある。プロットにばらつきはあるもののこの相関は噴射圧に依存しないことが明らかである。 $We$  が高い場合に液滴の分裂が活発であると判断される。噴射圧 100MPa の  $z = 4 \sim 6\text{mm}$  において  $We$  が最大のプロットは  $dD_p/dt$  は最大ではなく、この相関からのずれは、前述の通り、分裂後の小サイズ液滴の分散によるものと考えられる。



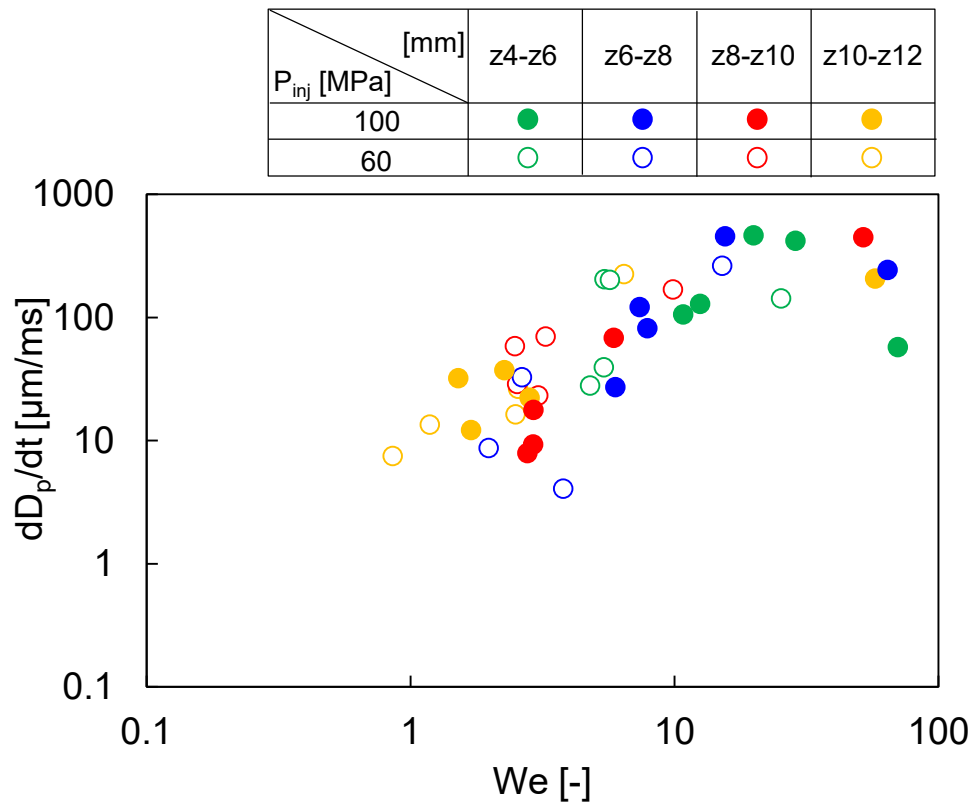


Fig. 5.7 Correlation between droplet size decrease rate and Weber number

### 5.1.9 まとめ

噴射圧を 60 および 100MPa に設定したインジェクターから大気中に間欠噴射された噴霧液滴について、噴孔から 4、6、8、10 および 12mm 下流の位置において L2F を用いて液滴の速度およびサイズの計測を行った。また得られたデータからウェーバー数を算出し、液滴の分裂および分散について評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 噴霧は下流に向かうとともに広がり、その周辺部に小サイズの液滴が分散する。
- (2) 噴霧周辺部に比べて噴霧中心近傍の液滴サイズ減少率が大きい。

- (3) ウェーバー数と液滴サイズ減少率に正の相関があり、この相関は噴射圧に依存しない。

## 5.2 噴霧液滴への噴射量の影響

ここでは燃料の噴射量を変化させ、噴孔近傍の複数断面において L2F を用いて噴霧内部の液滴を計測し、燃料噴射方向の液滴サイズ減少率を評価することによって液滴分裂の噴射量依存性を述べる。

### 5.2.1 噴射条件および計測条件

噴射条件および計測条件を表 5.3 に示す。インジェクターの噴孔径は 0.15mm であり、噴孔数は 6 穴である。噴射圧力を 60MPa、噴射当たりの燃料質量を 1.1 および 7.0mg/inj. に設定し、大気圧場に周期 3Hz で噴射した。6 噴孔の内の 1 つの噴孔から噴射された噴霧を L2F で計測し、他の噴孔からの噴霧を細い流路に導いて回収した。

Table 5.3 Experimental condition.

Injector specifications	
Number of hole [-]	6
Hole diameter [mm]	0.15
Test conditions	
Injection frequency [Hz]	3
Rail pressure [MPa]	60
Injection quantity per injection [mg / inj.]	1.1 and 7.0
Ambient pressure [MPa]	0.1
Measurement positions	
z [mm]	x [mm]
4	0, $\pm 0.1$ , $\pm 0.2$ , $\pm 0.3$ , $\pm 0.4$
6	0, $\pm 0.15$ , $\pm 0.3$ , $\pm 0.45$ , $\pm 0.6$
8	0, $\pm 0.2$ , $\pm 0.4$ , $\pm 0.6$ , $\pm 0.8$
10	0, $\pm 0.25$ , $\pm 0.5$ , $\pm 0.75$ , $\pm 1.0$

噴孔出口から 4、6、8 および 10mm 下流の断面において L2F による計測を行った。計測点の配置を図 5.8 に示す。噴霧中心が  $x=0\text{mm}$  であり、 $z=4\text{mm}$  の断面における計測点を  $x=0$ 、 $\pm 0.1$ 、 $\pm 0.2$ 、 $\pm 0.3$  および  $\pm 0.4\text{mm}$  の 9 点とした。 $z>4\text{mm}$  の各断面における計測点について、 $x/z$  を、 $z=4\text{mm}$  の断面における 9 点の  $x/z$  と同じ値、すなわち  $x/z=0$ 、 $\pm 0.025$ 、 $\pm 0.05$ 、 $\pm 0.075$  および  $\pm 0.1$  とした。噴孔近傍では噴霧が噴孔を頂点としてほぼ円錐状に広がることから、計測点を噴孔から放射状に配置している。各計測点における取得データ数は 20000 点である。

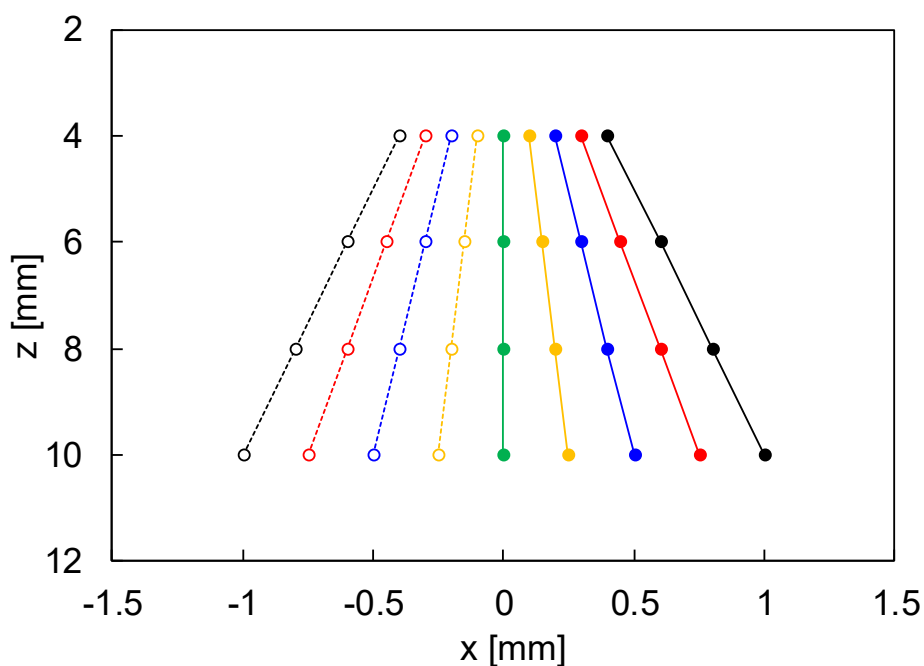


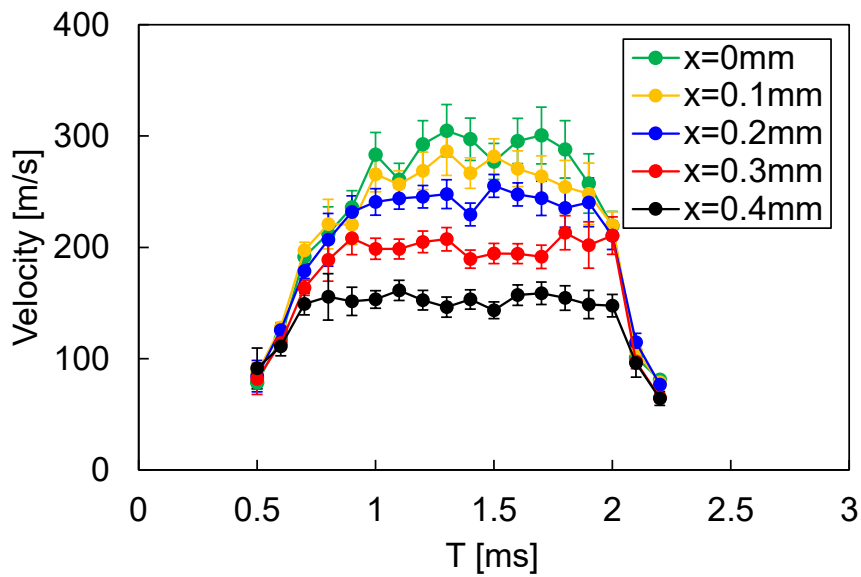
Fig. 5.8 Geometric arrangement of measurement positions.

## 5.2.2 液滴の速度およびサイズの時間変化

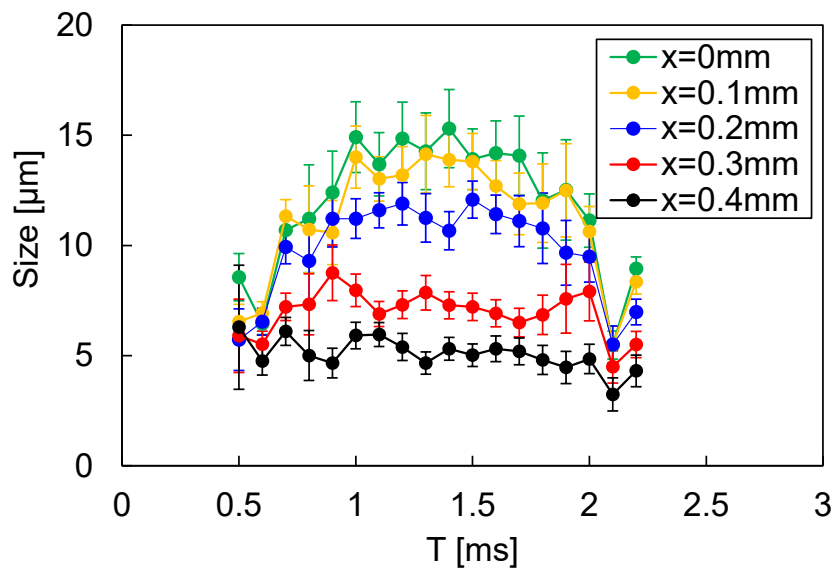
図 5.9 (a)は  $z = 4\text{mm}$  の断面における時間窓  $0.1\text{ms}$  毎の算術平均液滴速度の時間変化を示す。噴射量  $Q$  は  $7.0\text{mg/inj.}$  である。横軸は噴射開始信号印加からの経過時間を示す。緑丸、黄丸、青丸、赤丸および黒丸はそれぞれ  $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$  および  $0.4\text{mm}$  の場合を示す。また図中のエラーバーは  $95\%$ 信頼区間を示す。噴射初期の  $T = 0.5 \sim 0.6\text{ms}$ 、および噴射終期の  $T = 2.1 \sim 2.2\text{ms}$  において、 $x$  による液滴速度の変化は小さく、それぞれの時期において速度の空間分布はほぼ一様である。 $x = 0\text{mm}$  の場合、液滴速度は  $T = 0.5 \sim 0.9\text{ms}$  において増加し、 $T = 0.9 \sim 1.8\text{ms}$  の間で変化が小さく、その後、減少した。サック内圧が噴射期間の前半で増加し、後半で減少することが報告されている<sup>(58)</sup>。本研究においても開弁時のサック内圧力の増加、ならびに閉弁時のサック内圧力の減少がそれぞれの時

期の液滴速度の増加ならびに減少となって現れたと推察される。 $x=0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$  および  $0.4\text{mm}$  においては、 $x$  の増加とともに、液滴速度が増加あるいは減少する期間が短縮され、速度変化が小さい期間が相対的に延びている。噴霧周辺部は静止した周囲空気の影響を受けるため噴霧中心に比べて噴霧周辺部の液滴の速度は低い値にとどまり、サック内圧力の増加および減少の影響が小さいと考えられる。図 5.9 (b)は算術平均液滴サイズの時間変化を示す。噴射初期の  $T=0.5\sim 0.6\text{ms}$ 、および噴射終期の  $T=2.1\sim 2.2\text{ms}$  において、 $x$  の増加とともに液滴サイズは減少しており、分裂によって生じた小サイズ液滴が噴霧周辺部に現れたものと考えられる。また、この小サイズ液滴は噴霧中心の速度と同程度の速度で飛行しているものと理解される。 $x=0\text{mm}$  の場合、液滴サイズは  $T=0.5\sim 0.6\text{ms}$  において減少している。ノズル内部において、針弁開度が小さいとき、狭いシート部からサックへの流路の急拡大によって流れが乱され、噴霧角が広がることが報告されている<sup>(59)</sup>。この乱れのために液滴の分裂が促進され、噴霧全域に及んだものと考えられる。その後、液滴サイズは  $T=0.6\sim 1.0\text{ms}$  において増加し、 $T=1.0\sim 1.7\text{ms}$  の間で変化が小さい。開弁とともにシート部流れに起因するサック内の乱れが減少し、一方、噴孔内の速度増加による乱れ増加の影響は相対的に小さいものと考えられる。 $T=1.7\sim 2.1\text{ms}$  の間で液滴サイズは減少し、 $T=2.1\sim 2.2\text{ms}$  の間で増加した。弁開度減少に伴う乱れの増加によって液滴の分裂が促進され、続く閉弁直前には低速で乱れが小さいため分裂が進まず大きな液滴となって現れたものと考えられる。 $x=0.1$ 、 $0.2$  および  $0.3\text{mm}$  においても、速度が増加する期間におけるサイズの増加、および速度が減少する期間におけるサイズ

の減少が観察された。 $x=0.4\text{mm}$  の噴霧周辺部においては、他の  $x$  に比べて液滴サイズが小さくかつその時間的変化も小さい。分裂によって生じた小サイズ液滴が噴射の全期間にわたって噴霧周辺部に現れるものと考えられる。



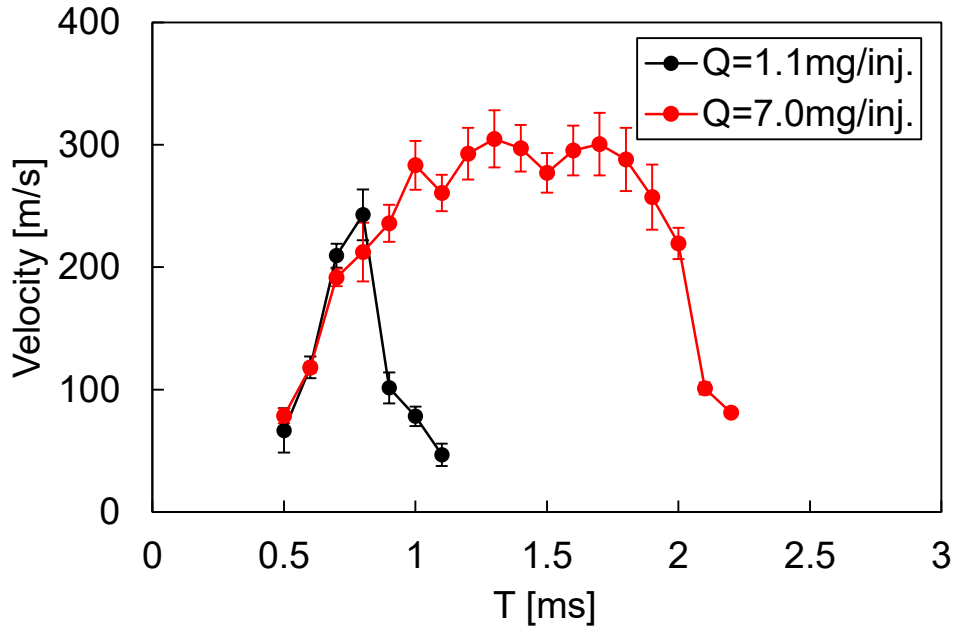
(a) Velocity



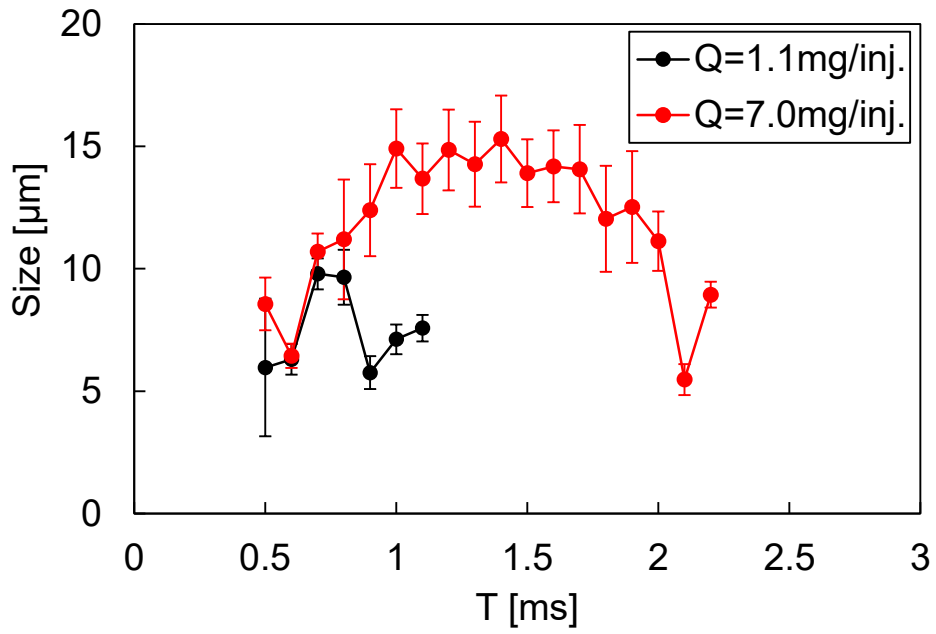
(b) Size

Fig. 5.9 Time variations of velocity and size of droplets,  $z = 4\text{mm}$ ,  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$

図 5.10 (a)は噴孔下流 4mm の噴霧中心において噴射量の変化に伴う液滴速度の変化を示す。黒丸および赤丸はそれぞれ  $Q = 1.1$  および  $7.0\text{mg/inj.}$  の場合を示す。 $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合の液滴速度は図 5.9 (a)の  $x = 0\text{mm}$  のプロットの再掲である。 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合、液滴速度は  $T = 0.5 \sim 0.8\text{ms}$  の間において増加し、その値は  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  における同時刻の液滴速度とほぼ同じ値であった。 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合に、その最高速度が  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合に比べて低いことから、シート絞りの状態、すなわち噴孔総面積に比べてシート部流路面積が狭い状態と考えられる。図 5.10 (b)は液滴サイズの時間変化を示す。 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合、 $T = 0.5 \sim 0.8\text{ms}$  の間において液滴サイズは  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  における同時刻の液滴サイズとほぼ同じ値を示した。噴射期間の短縮によって噴射量を減少させた本研究においては、 $T = 0.8\text{ms}$  まで、 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の針弁挙動が  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合とほぼ同じと考えられる。 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合に、その最大液滴サイズが  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合に比べて小さい。小弁開度時にサック内の燃料流動の乱れが増加すること<sup>(60)</sup>、ならびにサック内の渦強度が増加すること<sup>(59)</sup>が報告されている。 $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合、噴射期間が短いため弁開度が小さく、小弁開度に起因したノズル内部の燃料流動の乱れの増加が噴射期間にわたって生じ、液滴分裂が活発であったと推察される。また、 $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  においても液滴の速度およびサイズが最大かつ定常になる時期まで続いているものと推定される。



(a) Velocity



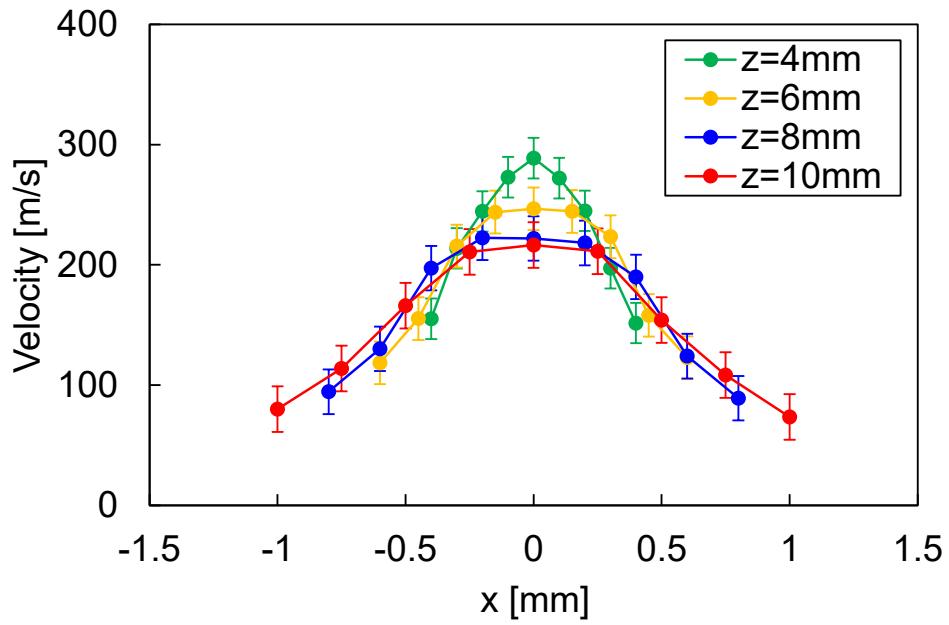
(b) Size

Fig. 5.10 Time variations of velocity and size of droplets at spray center,  $z = 4\text{mm}$ .

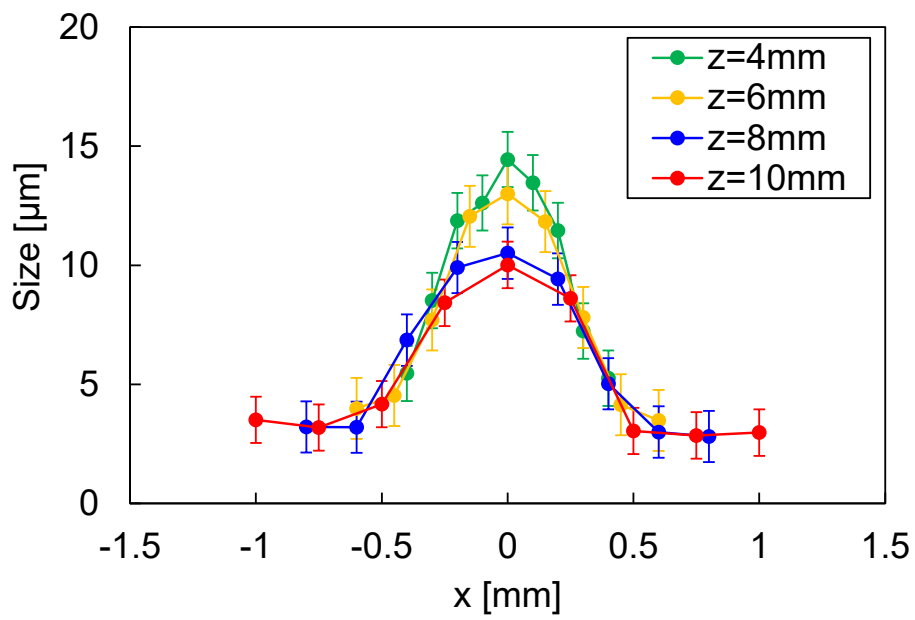


### 5.2.3 噴射中期における液滴の速度およびサイズの空間分布

噴霧液滴の速度およびサイズは、時間的・空間的に変化する。噴射量変更に伴う噴霧特性の変化を、 $z = 4\text{mm}$  の噴霧中心の液滴の速度およびサイズが時間的にほぼ最大となる噴射中期のデータに基づいて評価することとした。すなわち、 $Q = 1.1$  および  $7.0\text{mg/inj.}$  において、それぞれの噴射中期は  $T = 0.7 \sim 0.8\text{ms}$  および  $T = 1.1 \sim 1.7\text{ms}$  となる。図 5.11 (a) は  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合の噴射中期における液滴速度の空間分布である。緑丸、黄丸、青丸および赤丸はそれぞれ  $z = 4, 6, 8$  および  $10\text{mm}$  を示す。いずれの断面においても噴霧周辺部の計測点に比べて噴霧中心の液滴速度は高い。噴霧下流に向かって噴霧中心近傍における液滴速度は明確に減少し、また噴霧幅の広がりとともに噴霧周辺部の液滴速度も減少している。図 5.11 (b) は液滴サイズの空間分布を示す。いずれの断面においても噴霧外側の計測点に比べ噴霧中心の液滴サイズは大きい。噴霧上流に比べて噴霧下流では、噴霧中心近傍の液滴サイズは小さく、また、噴霧周辺部において液滴サイズが小さい領域が増している。



(a) Velocity



(b) Size

Fig. 5.11 Spatial distributions of velocity and size at middle period of injection on  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$

図 5.12 は  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合の  $x/z = 0.1$  における噴射中期の液滴サイズの確率密度分布を示す。ほとんどの液滴は、 $z = 4\text{mm}$  では  $20\mu\text{m}$  以下、 $z = 6\text{mm}$  では  $15\mu\text{m}$  以下、 $z = 8$  および  $10\text{mm}$  では  $10\mu\text{m}$  以下であった。

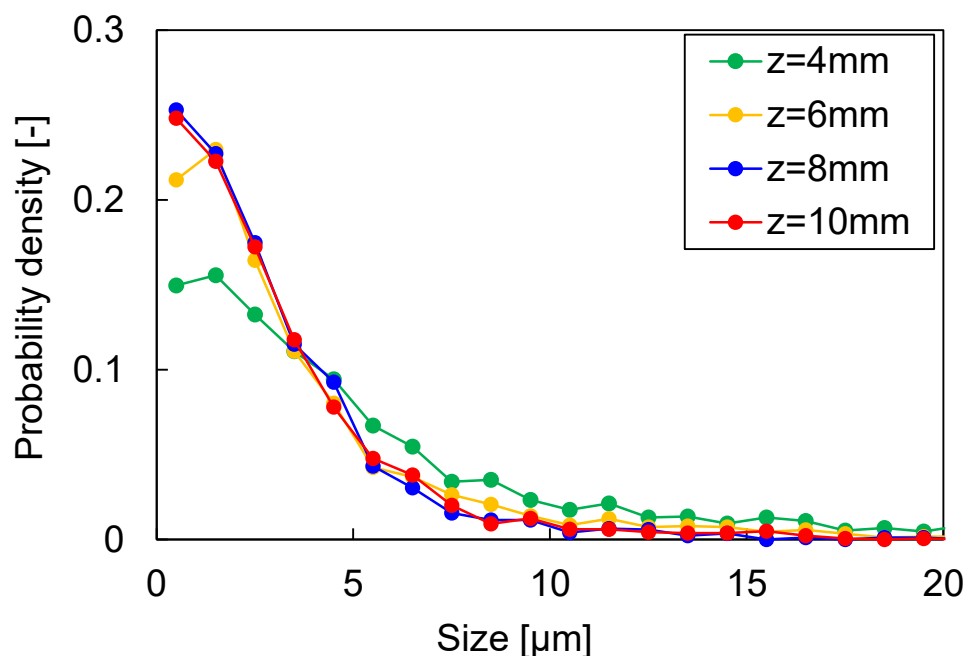


Fig. 5.12 Probability densities of size of droplets at middle period of injection on  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$ ;  $x/z = 0.1$ .

Melling らは、 $2.6\mu\text{m}$  のシリコンオイルの粒子が  $1\text{kHz}$  の周波数をもつ流速変動に、誤差 1%以内で追従することを報告している<sup>(53)</sup>。分裂がほぼ完了したと考えられる  $3\mu\text{m}$  以下の液滴の確率の空間分布を図 5.13 に示す。噴霧上流に比べて噴霧下流では、噴霧周辺部において  $3\mu\text{m}$  以下の液滴の確率が高い領域が増している。これらより、小サイズ液滴は噴霧の下流向きの飛行に加えて噴霧の外周側へ飛行すると判断される。

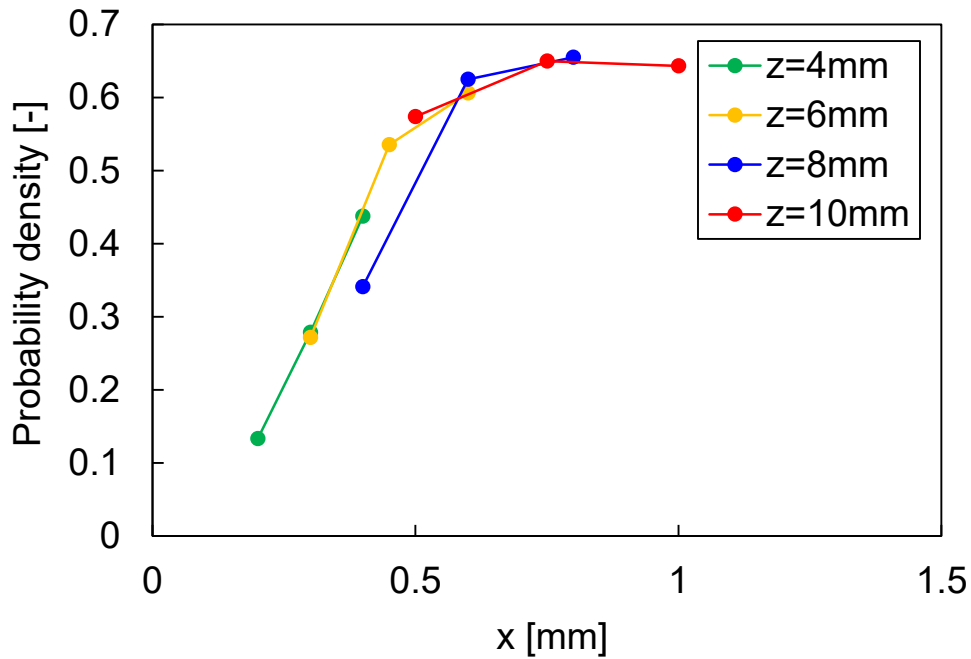
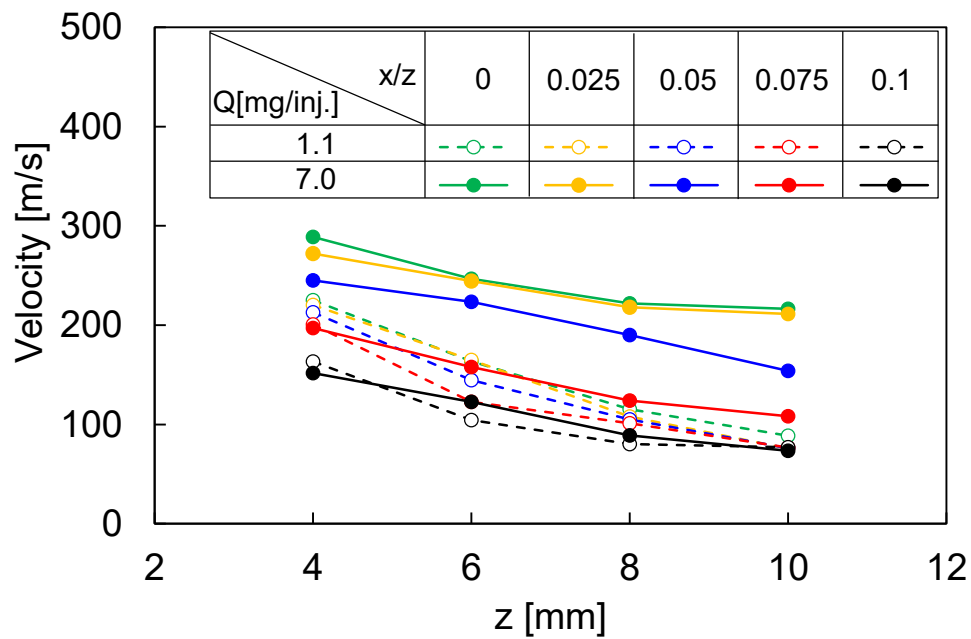


Fig. 5.13 Spatial distributions of probability of droplets smaller than  $3\mu\text{m}$  on  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$

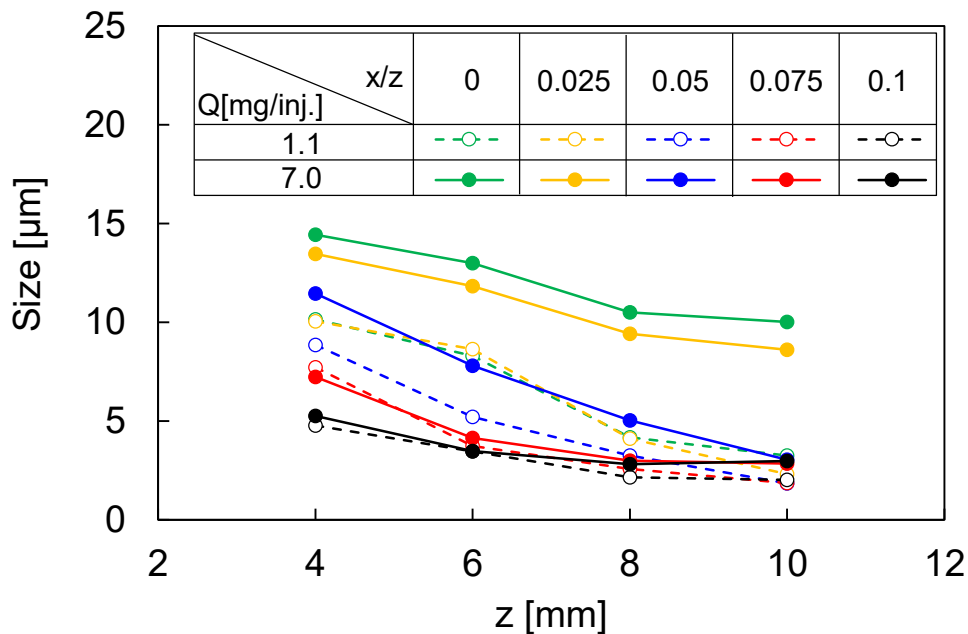
図 5.14 (a)は噴射中期における液滴の平均速度の軸方向変化である。緑丸、黄丸、青丸、赤丸および黒丸はそれぞれ  $x/z = 0, 0.025, 0.05, 0.075$  および  $0.1$  を示し、また、実線は  $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の場合を、破線は  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の場合を示す。両噴射量のいずれの  $x/z$  においても液滴の速度は噴霧下流に向かい減少した。 $z = 4\text{mm}$  における噴霧の中心およびその近傍を含む  $x/z < 0.075$  で、各  $x/z$  の  $Q = 7.0\text{mg/inj.}$  の液滴速度に比べて同じ  $x/z$  の  $Q = 1.1\text{mg/inj.}$  の値は格段に低い。また、このことは  $z > 4\text{mm}$  の断面においても同様である。図 5.14 (b)は平均液滴サイズの軸方向変化を示す。噴霧の周辺部かつ下流側計測点の  $x/z = 0.1, z = 8 \sim 10\text{mm}$  を除く、いずれの噴射量、および半径位置においても液滴サイズは噴射の向きに減少した。噴孔近傍において液滴サイズが減少する傾向は位相ドップラー流速

計<sup>(61)</sup>や X 線<sup>(62)</sup>を用いた場合においても報告されている。本研究において計測対象とした噴霧においても下流に向かって液滴の分裂が進行したものと判断される。各  $z$  断面の  $x/z < 0.075$  において、各  $x/z$  の  $Q = 7.0 \text{ mg/inj.}$  の液滴サイズに比べて同じ  $x/z$  の  $Q = 1.1 \text{ mg/inj.}$  における値は顕著に小さい。



(a) Velocity

Fig. 5.14 Axial distributions of velocity and size at middle period of injection.  
(continued)



(b) Size

Fig. 5.14 Axial distributions of velocity and size at middle period of injection.

### 5.2.4 液滴サイズ減少率の空間分布

図 5.15 は噴射中期における液滴サイズ減少率の無次元半径位置  $x/z$  に対する空間分布として示す。緑丸、青丸および赤丸はそれぞれ  $z=4\sim 6\text{mm}$ 、 $z=6\sim 8\text{mm}$ 、および  $z=8\sim 10\text{mm}$  の場合であり、破線および実線はそれぞれ  $Q=1.1$  および  $7.0\text{mg/inj.}$  の場合である。 $x/z$  が  $\pm 0.025$  より外側において、 $z=8\sim 10\text{mm}$  に比べて  $z=4\sim 6\text{mm}$  における液滴サイズ減少率が大きいことから噴霧上流で液滴の分裂が活発と考えられる。 $x/z$  が  $\pm 0.05$  より外側において、 $z=8\sim 10\text{mm}$  における液滴サイズ減少率がほぼゼロとなっていることから、この領域では液滴の分裂が終了したと判断される。 $x/z=0$  および  $0.025$  の場合、いずれの噴射量においても  $z=6\sim 8\text{mm}$  に比べて  $z=4\sim 6\text{mm}$  サイズ減少率が小さい。前述したように、分裂

後の小さな液滴は噴霧の外周部へ向かって飛行するため、噴霧の中央部の  $z = 6\text{mm}$  において平均液滴サイズがやや過大に評価され、 $z = 4\sim 6\text{mm}$  で液滴サイズ減少率が小さくなったものと推定される。 $Q = 1.1$  および  $7.0\text{mg/inj.}$  の液滴サイズ減少率の空間分布はいずれの  $z$  位置においても非一様であるにもかかわらず、それらの形状はほぼ同様であった。

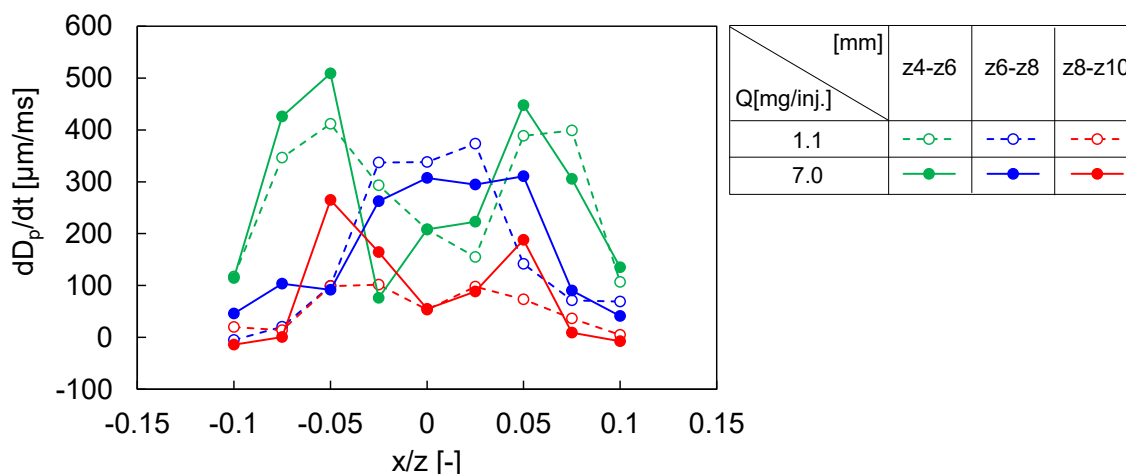


Fig. 5.15 Spatial distributions of droplet size decrease rate per unit time at middle period.

### 5.2.5 液滴サイズ減少率の相関

図 5.16 は同じ  $z$  位置および  $x/z$  において、 $Q = 1.1$  および  $7.0\text{mg/inj.}$  の液滴サイズ減少率の相関を示す。緑丸、青丸および赤丸はそれぞれ  $z = 4\sim 6\text{mm}$ 、 $z = 6\sim 8\text{mm}$ 、および  $z = 8\sim 10\text{mm}$  における液滴サイズ減少率である。黒の実線は両噴射量における液滴サイズ減少率が一致するときの相関線を示し、黒の破線は

ロットの標準偏差を示す。ばらつきがあるものの、 $Q=7.0\text{mg/inj.}$ の液滴サイズ減少率と  $Q = 1.1\text{mg/inj.}$ の液滴サイズ減少率には正の相関があり、相関係数は 0.84 であった。両者はほぼ同レベルであることから液滴サイズ減少率におよぼす噴射量の影響は大きくないものと考えられる。

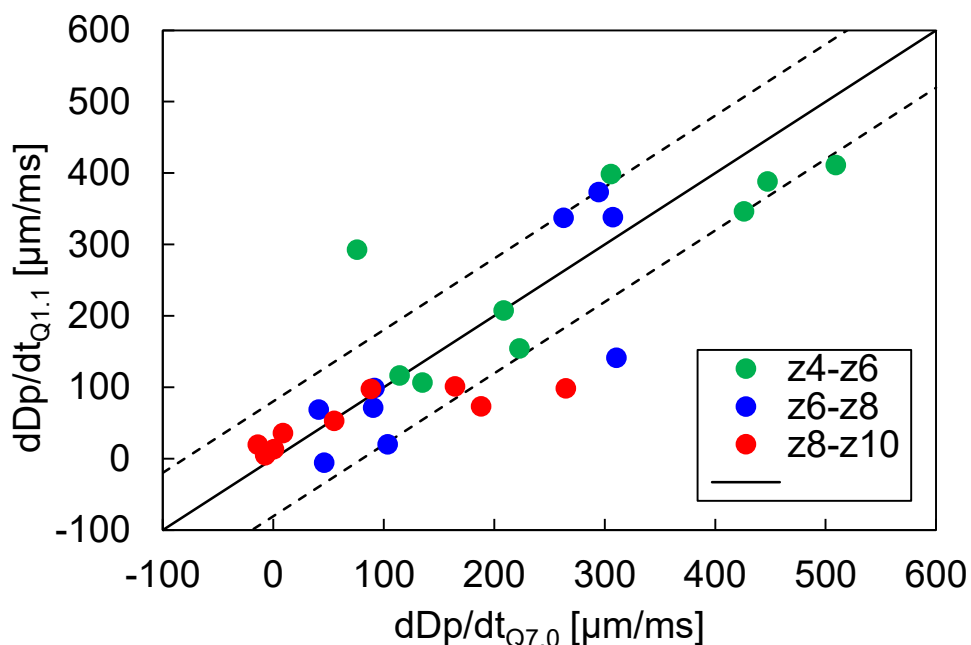


Fig. 5.16 Correlation of droplet size decrease rate between  $Q = 1.1$  and  $7.0\text{mg/inj.}$

## 5.2.6 まとめ

噴射圧が 60MPa、噴射量が 1.1 および 7.0mg/inj.の条件でコモンレールインジェクターを用いてディーゼル燃料を大気中に噴射した。燃料噴霧の液滴の速度およびサイズを噴孔下流 4、6、8 および 10mm の断面において L2F を用いて評価し、以下の知見を得た。

- (1) 噴霧中心近傍において、噴射量が多い場合に比べて噴射量が少ない場合の



液滴サイズは小さい。

- (2) いずれの噴射量においても噴霧上流に比べて噴霧下流の液滴サイズは小さく、液滴は下流に向かって分裂が進行したものと判断される。
- (3) 噴孔下流の噴霧外縁において、いずれの噴射量においても液滴サイズ減少率がゼロに近いことから液滴の分裂が終了したものと判断される。
- (4) 噴射量の多い場合の液滴サイズ減少率と少量噴射の場合の液滴サイズ減少率との間に正の相関があり、液滴サイズ減少率におよぼす噴射量の影響は小さい。

### 5.3 燃料液滴の 2 次分裂過程への噴孔仕様の影響

ここでは、燃料噴射方向の液滴サイズの変化を噴孔仕様の異なる 2 つのインジェクターに対して L2F を用いて調べ、時間経過に伴う液滴サイズ減少率を評価した。また、前章と同様にウェーバー数  $We$  を算出し、ウェーバー数とノズル噴孔出口近傍の液滴サイズ減少率との関係を明らかにした。

#### 5.3.1 噴射条件および計測条件

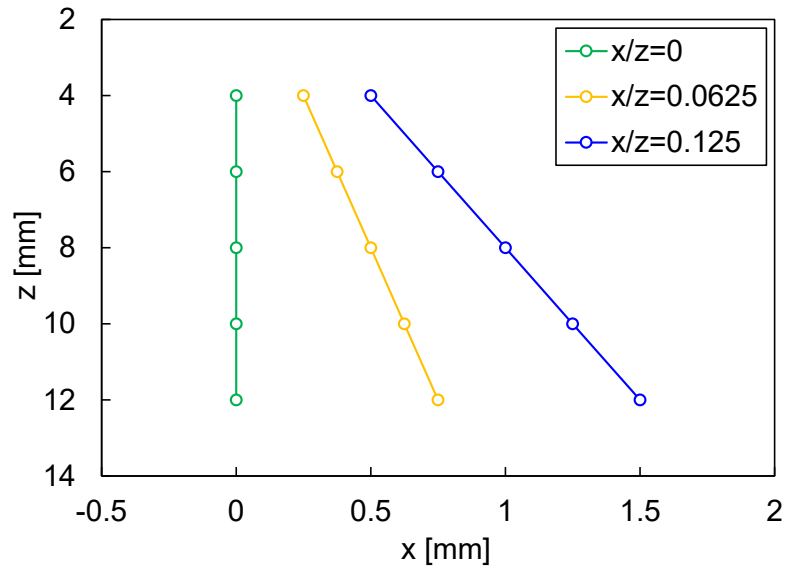
実験条件を表 5.3 示す。異なる 2 つの Injector.A および Injector.B における測定条件は同じとした。Injector.A は、噴孔径が 0.1mm、噴孔数が 10 孔、噴射量は、1 噴孔当たり 2.7mg であり、Injector.B は、噴孔径が 0.15mm、噴孔数が 6 孔、噴射量は、1 噴孔当たり 7mg である。噴射圧力は 60MPa、噴射頻度は 3Hz、噴射場の雰囲気圧力は 0.1MPa とした。Injector.A における  $z$  方向の測定点は、 $z = 4, 6, 8, 10, 12$ mm、Injector.B は  $z = 4, 6, 8, 10$ mm であり、 $z = 4$ mm における測定

点は、Injector.A においては 3 点( $x = 0, 0.25, 0.5\text{mm}$ )、Injector.B においては 5 点( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{mm}$ )である。噴霧は、噴孔出口を頂点とした円錐状に成長するため、測定点は、液滴の推定進行方向の頂点より、直線上に設定されている。それらの、 $x/z$  は下流側においても一定である。 $z > 4\text{mm}$  における各測定点の  $x/z$  は、 $z = 4\text{mm}$  における  $x/z$  と同じ、すなわち、Injector.A では、 $x/z = 0, \pm 0.0625, \pm 0.125$ 、Injector.B では、 $x/z = 0, \pm 0.025, \pm 0.05, \pm 0.075, \pm 0.1$  となる。各測定点の L2F による計測データ数は、20000 点とした。

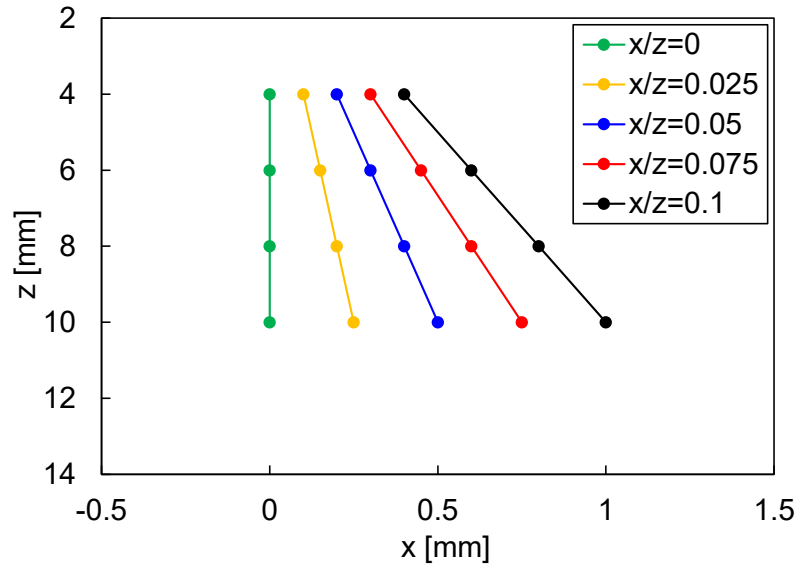
Table.5.3 Experimental conditions

Injector specifications		
	Injector A	Injector B
Number of hole [-]	10	6
Hole diameter [mm]	0.10	0.15
Test conditions		
Injection frequency [Hz]	3	
Rail pressure [MPa]	60	
Injection quantity per injection [mg / inj.]	2.7	7.0
Ambient pressure [MPa]	0.1	
Measurement positions		
z [mm]	x [mm]	
4	0, 0.25, 0.5	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
6	0, 0.375, 0.75	0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6
8	0, 0.5, 1.0	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
10	0, 0.625, 1.25	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0
12	0, 0.75, 1.5	-

図 5.17(a)は、Injector.A の測定点の配置であり、緑、黄、青はそれぞれ、 $x/z = 0, \pm 0.0625, \pm 0.125$  の位置を示す。図 5.17(b)は、同様に Injector.B の測定点の配置であり、5 本の線の  $x/z$  は一定である。



(a) Injector A



(b) Injector B

Fig. 5.17 Measuring points.

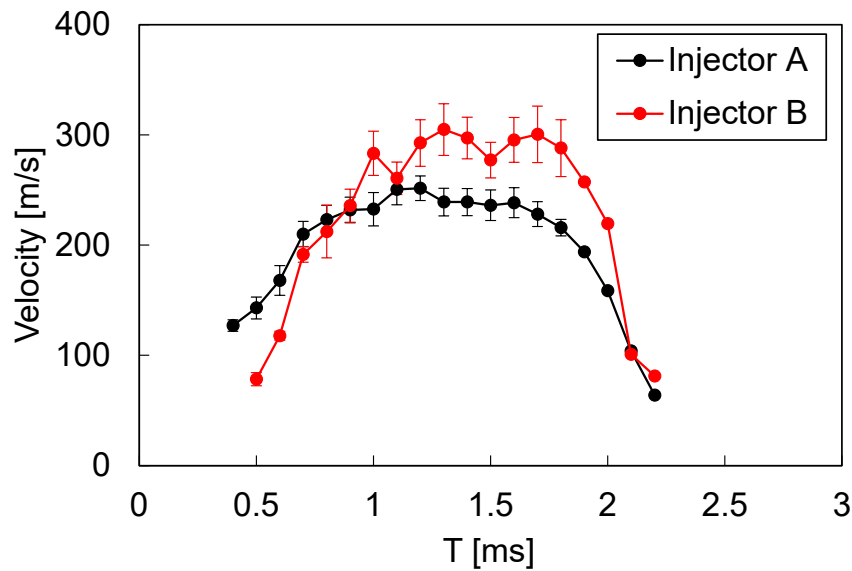
### 5.3.2 液滴の速度およびサイズの時間変化

ディーゼル燃料の流れは、ノズル内部のニードルの開閉によって制御されるため、その噴霧は非定常な挙動を示す。図 5.18(a)は、ノズル噴孔出口から下流 4mm の噴霧中心における 2 種類のインジェクターの液滴速度の時間変化を示す。

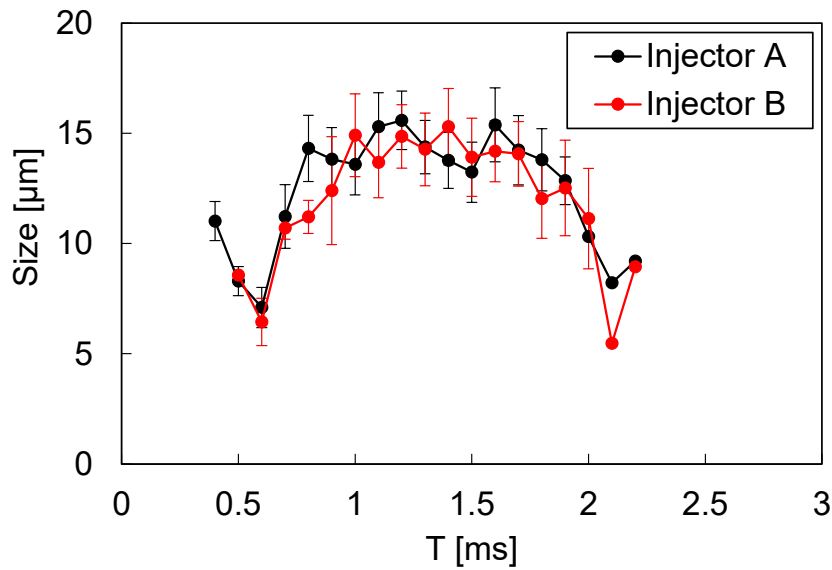
横軸  $T$  は、噴射信号印加からの経過時間であり、黒は Injector.A、赤は Injector.B を示している。図中のエラーバーは、95%信頼区間を示す。インジェクターAにおいて、液滴速度は、 $T=0.4\sim 0.9\text{ms}$  の期間で上昇し、 $T=0.9\sim 1.5\text{ms}$  の期間で僅かに変化し、その後減少している。開弁時のノズルサック内圧力の上昇と閉弁時のノズルサック内圧力の低下が液滴速度の上昇および減少として現れている。この傾向は、Injector.B においても同様であり、液滴速度は、 $T=0.5\sim 1.1\text{ms}$  の期間で上昇し、 $T=1.1\sim 1.6\text{ms}$  の期間で僅かに変化し、その後減少している。また、Injector.A の最大液滴速度は、Injector.B の最大液滴速度よりも低く、その比率は 0.84 であった。噴孔出口における液滴の平均速度は、噴射量、噴孔面積、噴射期間により求められる。実際の噴射期間は、Injector.A は  $T=0.4\sim 2.2\text{ms}$ 、Injector.B は  $T=0.5\sim 2.2\text{ms}$  であり、それぞれのインジェクターの平均液滴速度の比は 0.82 であった。実際の噴射量から推定した噴孔出口での液滴速度と L2F 測定で推定した液滴速度がほぼ同じであることから、それぞれのインジェクターの液滴速度の差は噴射率の差によるものと考えられる。噴射率は通常ノズルの内部流路の仕様に依存する。噴射率の変化は、噴孔出口から下流 4mm の噴霧中心部における液滴速度に反映されている。図 5.18(b)は、液滴サイズの時間変化を示す。Injector.A において、 $T=0.4\sim 0.6\text{ms}$  の期間で液滴サイズが減少しており、この現象は、低リフト時におけるニードルシート部からサック部にかけて、急激に通過面積が増加することによる乱れの増加が要因であることが報告されている<sup>(56)</sup>。この乱れによって、液滴の分裂が促進されていると考えられる。 $T=0.6\sim 0.9\text{ms}$  において液滴サイズが増加し、 $T=0.9\sim 1.5\text{ms}$  の期間では変化が小さい。ニ

ードルが上昇し、流路面積が増加するとシート絞りによる乱れは減少するが、噴孔内部の流速増加による乱流増加の影響は比較的小さいと考えられる。液滴サイズは、 $T=1.5\sim 2.1\text{ms}$  の期間で減少し、 $T=2.1\sim 2.2\text{ms}$  の期間で増加した。これは、閉弁時の乱れの増加により液滴が分裂し、その後、閉弁直前に低速度・低乱流により分裂していない大きなサイズの液滴が出現したためと考えられる。

**Injector.B** における液滴サイズの時間変化は、**Injector.A** と同様の傾向であった。それぞれのインジェクターの液滴サイズについて、インジェクター仕様を考慮して比較する。**Injector.B** に比べて、**Injector.A** は、噴孔径が小さく、噴孔数が多く、最大噴霧速度が低かった。また、**Injector.A** は、流量係数が低く、キャビテーションが発生しやすい可能性がある。そのため、**Injector.A** の液滴サイズは小さいと予想されるが、測定結果には表れていない。噴霧中心部では、液滴分裂により発生した小サイズの液滴が分散し、大きいサイズの液滴が残っているため、インジェクター仕様の違いによる影響が不明瞭になっている可能性がある。



(a) Velocity



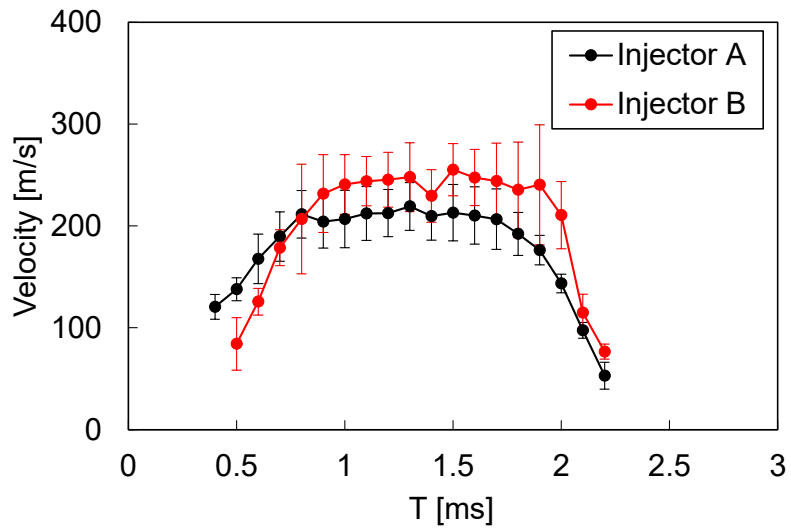
(b) Size

Fig. 5.18 Time variation of droplet velocity and size,  $z = 4\text{mm}$ ,  $x = 0\text{mm}$ .

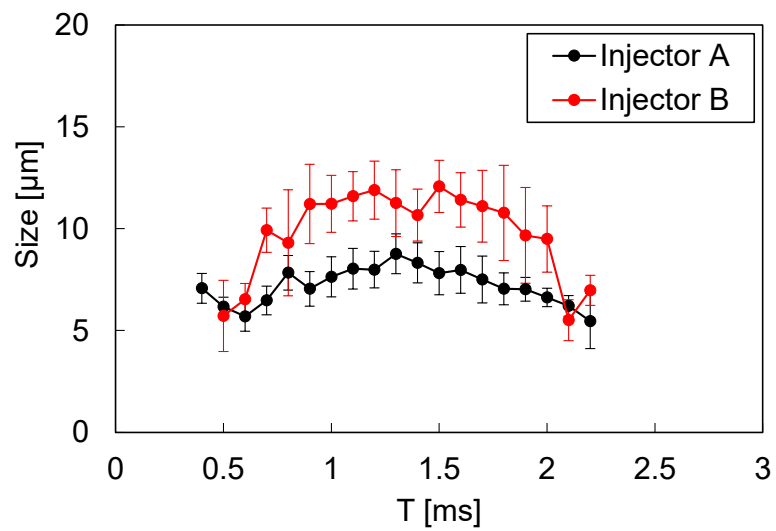
図 5.19(a)は、ノズル出口から 4mm 下流側で噴霧中心から半径方向に少し離れた位置、Injector.A では  $x=0.25\text{mm}$ 、Injector.B では  $x=0.2\text{mm}$  の測定点における液滴速度の時間変化を示したものである。いずれのインジェクターにおいても、 $x=0\text{mm}$  の場合と同様に、液滴速度は増加し、ほぼ一定となり、その後減少した。また、噴射期間の途中では、Injector.B の液滴速度が Injecotor.A の液滴速度より

も高くなっていた。開閉弁時のノズルサック内圧力の影響は、噴霧中心から離れた場所でも現れていたと思われる。図 5.19(b)は、液滴サイズの時間変化を示している。x=0mmの時とは異なり、Injector.A の液滴サイズはほとんどの噴射期間で Injector.B の液滴サイズよりも小さくなっている。噴孔径が小さく、噴孔数が多い Injector.A から噴射された噴霧は、Injector.B より微粒化が促進されるため、小さい液滴サイズが分布していると考えられる。

図 5.20(a)は、噴孔出口から 4mm 下流における噴霧周辺部、Injector.A では x=0.5mm、Injector.B では x=0.4mm における液滴速度の時間変化を示す。図 5.18(a)、図 5.19(a)と同様に、ほとんどの噴射期間において、Injector.B の液滴速度は Injector.A の液滴速度よりも高くなっていた。インジェクター仕様の違いによる影響は、噴霧の外縁部にも残っている。図 5.20(b)は、液滴サイズの時間変化を示している。それぞれのインジェクターの液滴サイズは同様であり、時間変化は小さかった。いずれの場合も、分裂後の小さいサイズの液滴は、周囲の空気の流れによって誘起されて現れたものと考えられる。



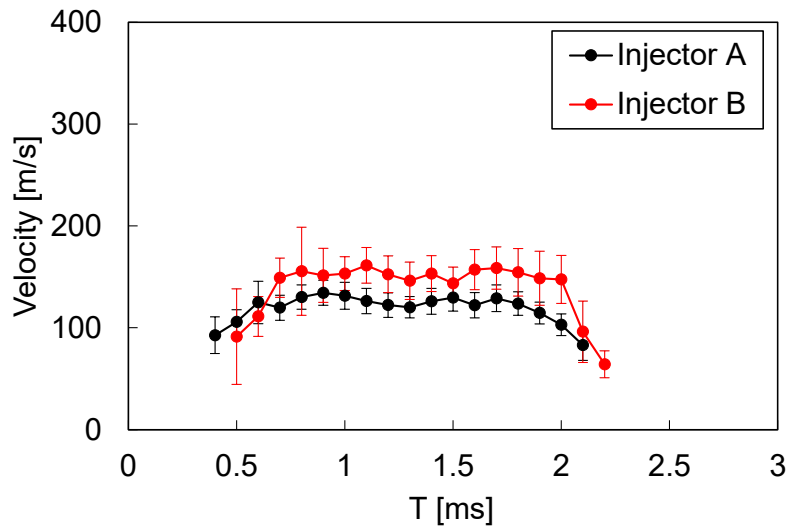
(a) Velocity



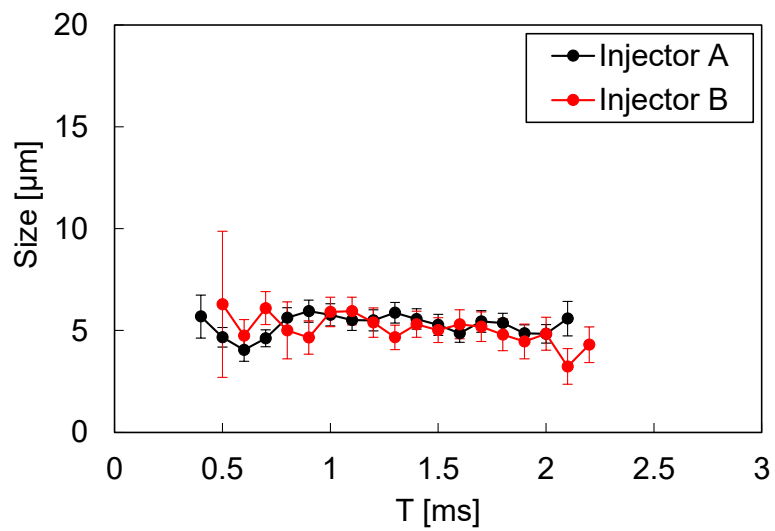
(b) Size

Fig. 5.19 Time variation of droplet velocity and size at  $z = 4\text{mm}$ , Injector A;  $x = 0.25\text{mm}$ , Injector B;  $x = 0.2\text{mm}$ .





(a) Velocity

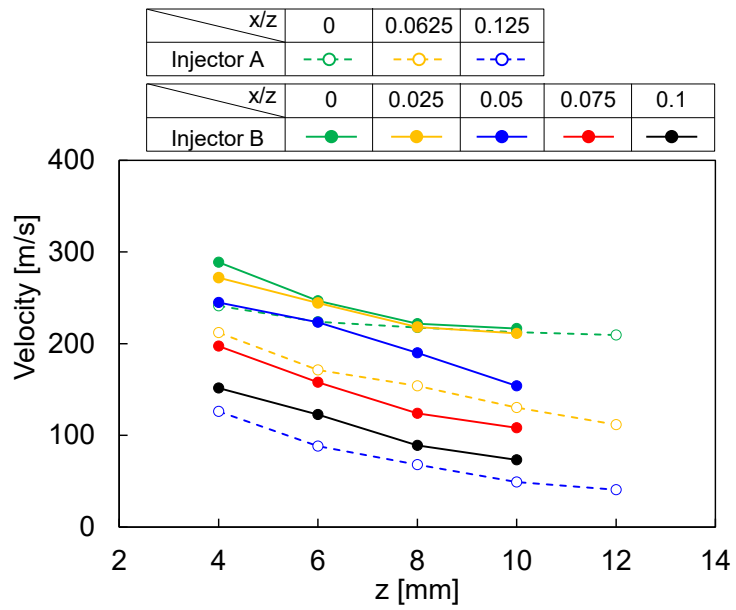


(b) Size

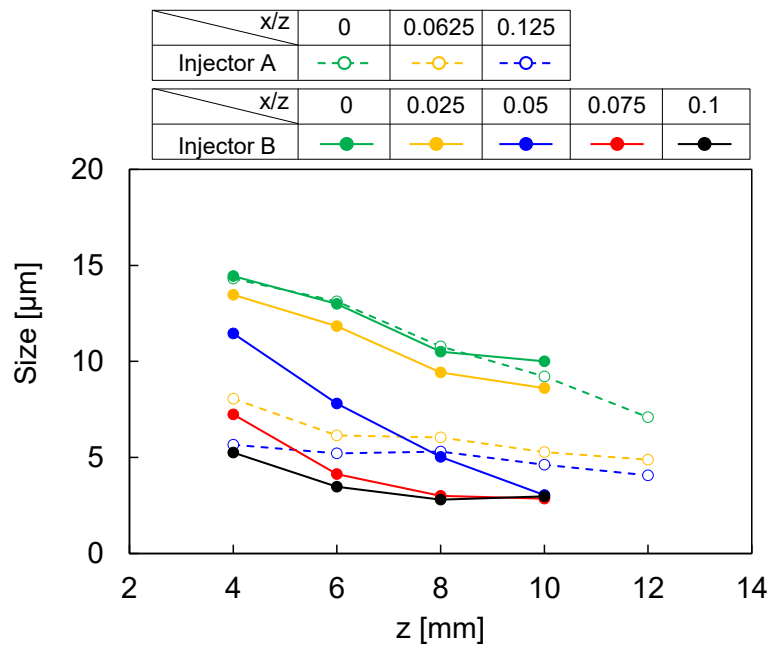
Fig. 5.20 Time variation of droplet velocity and size at  $z = 4\text{mm}$ , Injector A;  $x = 0.5\text{mm}$ , Injector B;  $x = 0.4\text{mm}$ .

### 5.3.3 液滴サイズの減少率

噴霧中心部における液滴速度は高く、噴射期間中期まで、ほとんど変化しない。この期間は、Injector.A では  $T = 0.9 \sim 1.5$  ms、Injector.B では  $T = 1.1 \sim 1.6$  ms の範囲である。この期間における液滴速度と液滴サイズの平均値を計算し、図 5.21(a)、(b)にそれぞれ  $z$  軸方向の液滴速度と液滴サイズの空間分布を示す。線は、 $x/z =$  一定の条件で描かれており、いずれのインジェクターにおいても、全ての  $z$  における噴射中心付近の液滴速度は、外縁部の液滴速度よりも高くなっていた。噴霧下流側ではすべての  $x/z$  の液滴速度が低下しており、その低下率は同様であった。これは噴霧と雰囲気との間における運動量交換によるものと考えられる。噴霧下流側の液滴サイズは、それぞれのインジェクターの全ての  $x/z$  において、上流側の液滴サイズよりも小さくなっている。L2F は連続した液塊ではなく、分裂した液滴を測定しているため、この液滴サイズ減少は二次分裂によるものと考えられる。噴霧中心部において、Injector.A のサイズ減少率は Injector.B のサイズ減少率とほぼ同じである。しかし、噴霧外縁部では、Injector.A のサイズ減少率は Injecotr.B のサイズ減少率よりも若干低い傾向にある。それぞれのインジェクターにおけるサイズ減少率の空間分布は、部分的に類似しないことがわかった。



(a) Velocity



(b) Size

Fig. 5.21 Spatial distribution of velocity and size of droplets during the middle stage of injection.

図 5.22 は、式(5.3)により算出された噴射中期の  $dDp/dt$  の空間分布を示す。各プロットの  $z$  は、液滴サイズ変化を評価した際の上流側と下流側の 2 点の間中点である。Injector.A においては、すべてのプロットにおいて、噴霧中心の  $dDp/dt$  が外縁部よりも大きくなっていった。Injector.B においては、 $x/z \leq 0.05$  の噴霧中心側の  $dDp/dt$  が外縁部よりも大きく、下流側で減少していた。どちらのインジェクターにおいても、液滴速度が高く、液滴サイズが大きい噴霧中心側で  $dDp/dt$  が大きくなっているように認められる。また、どちらのインジェクターにおいても  $z=4 \sim 6\text{mm}$  では、噴霧中心部の  $dDp/dt$  は他の半径方向位置よりも小さくなっていた。これは、分裂後の小さいサイズの液滴が分散して噴霧中心に残らないことによる過小評価であると考えられる。両インジェクターとも噴霧下流側の外縁部では  $dDp/dt$  がゼロに近かったため、この領域では液滴分裂が活発でないためと考えられる。

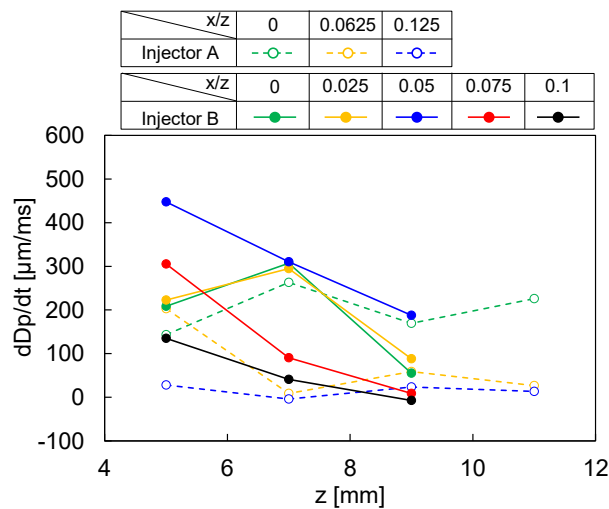


Fig. 5.22 Spatial distributions of droplet size decrease rate per unit time during the middle stage of injection.

2.6  $\mu\text{m}$  のシリコンオイル粒子は、1kHz の周波数で 1%以下の誤差で流速変化に追従することが報告されている<sup>(53)</sup>。この報告を基に、3  $\mu\text{m}$  以下まで分裂した液滴を分裂が完了した液滴の指標とし、この大きさの液滴の流速を空気流速と定義した。

図 5.23 は、噴射中期に測定された全液滴に対する分裂完了液滴の確率密度分布を示す図である。分裂完了液滴の存在確率は、外縁部に比べて噴射中心部で低く、下流部では高くなっていることがわかる。分裂完了液滴は、下流側への移動に伴って、噴霧中心部から外縁部へと拡散することがわかる。

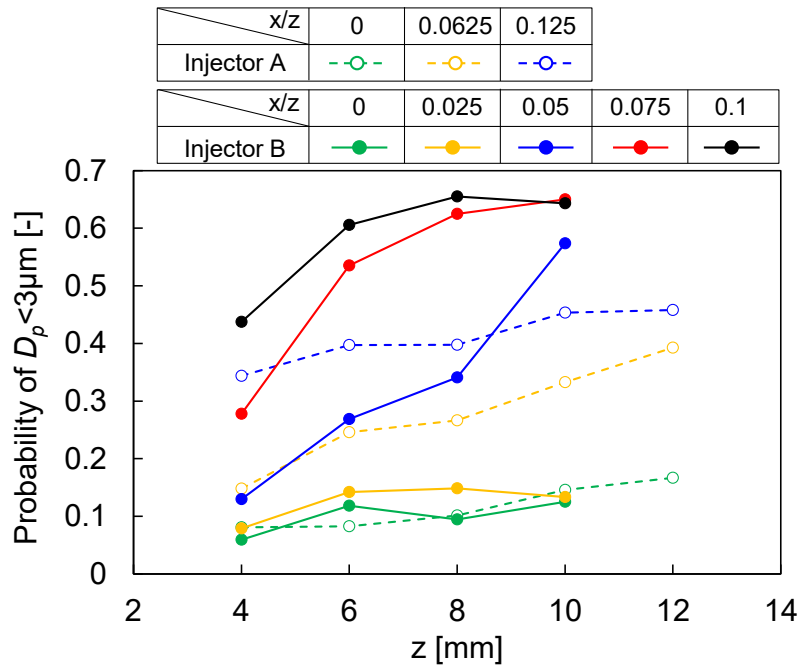


Fig. 5.23 Spatial distributions of probability of droplets smaller than 3  $\mu\text{m}$ .

### 5.3.4 液滴のウェーバー数

図 5.24 は、噴射中期の  $3 \mu\text{m}$  以下の液滴の速度で表される空気速度  $V_{air}$  の空間分布を示す図である。いずれのインジェクターにおいても、噴霧中心部の空気速度は外縁部よりも高くなっていた。これは、高速度の液滴によって空気が誘起されたものと考えられる。空気流速は、噴霧中心付近ではやや下流側で上昇し、外縁部では低下していた。噴霧中心部では液滴から空気への運動量の交換過程、外縁部では静止している雰囲気とのせん断力の影響によるものと考えられる。

各測定位置で計測された全ての液滴データを用いて、式(5.1)より噴射中期のウェーバー数の平均値を算出した。図 5.25 にウェーバー数の空間分布を示す。いずれのインジェクターにおいても、噴霧中心付近で最もウェーバー数が高く、下流側では減少していることがわかる。噴霧中心付近のサイズが大きい高速液滴は上流で分裂して下流に分散し、液滴分裂は下流で減少していると考えられる。

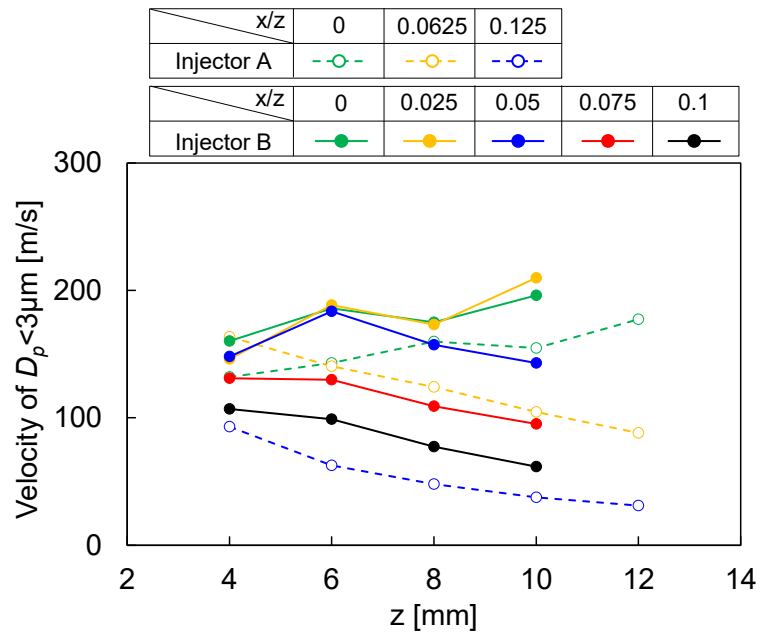


Fig. 5.24 Spatial distributions of velocity of droplets smaller than  $3\mu\text{m}$  as air velocity.

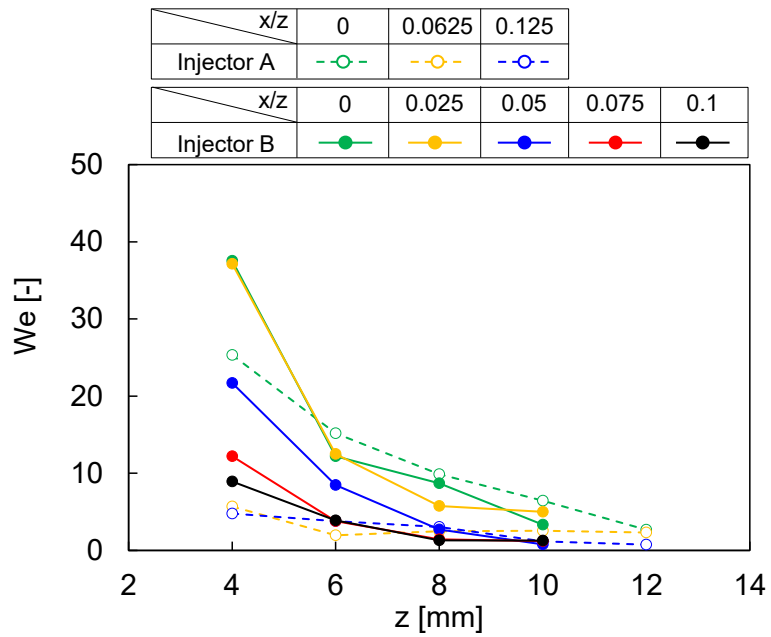


Fig. 5.25 Spatial distributions of Weber numbers during the middle stage of injection.

図 5.26 に  $dDp/dt$  とウェーバー数との相関を示す。ウェーバー数が高いときは  $dDp/dt$  が大きく、両者の間には正の相関があることがわかる。液滴分裂においては、因果因子であるウェーバー数と計測結果より算出したサイズ減少率との関係が明らかになった。この相関関係は、異なるインジェクターにおいて同様の傾向を示すことから、噴孔径や噴孔数などのインジェクター仕様に依存しないことが示された。

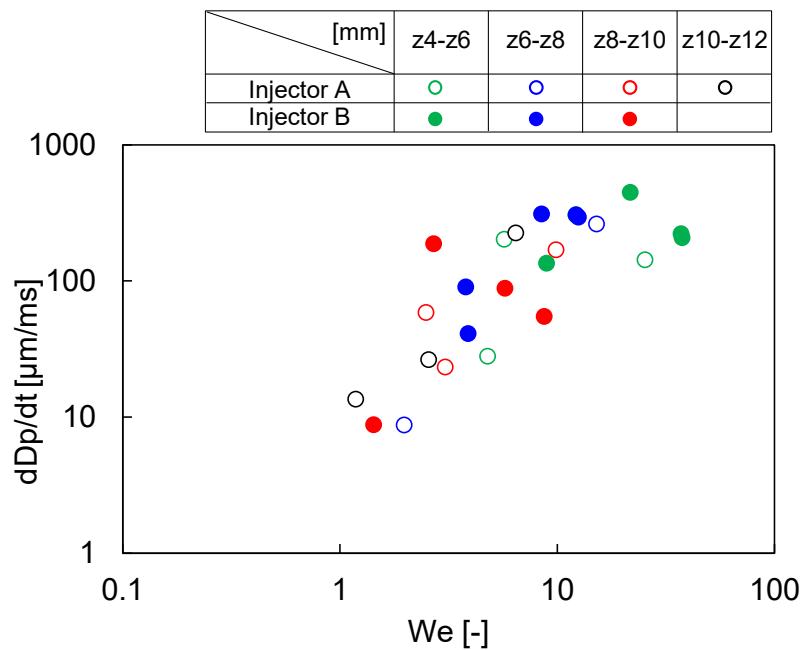


Fig. 5.26 Correlation between Weber number and droplet size decrease rate per unit time.



### 5.3.5 まとめ

噴孔径 0.10 と 0.15mm のインジェクターから噴射されたディーゼル噴霧について、噴孔出口から下流側 4, 6, 8, 10, 12mm の位置で L2F を用いて液滴速度と液滴サイズの測定を行った。二次分裂による液滴サイズの減少率を、連続した塊ではなく、個々の液滴の L2F 測定により選別されて調査された。得られたデータからウェーバー数を算出し、液滴の二次分裂との関係性を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 噴射速度の変化は、噴孔出口から 4 mm の噴霧中心における液滴速度に明確に反映されている。
- (2) 分裂した液滴の確率密度分布は、噴霧中心部では外縁部に比べて低く、下流部では高くなっていることから、分裂完了液滴は下流部への移動に伴って噴霧中心部から外縁部へ拡散していくことがわかった。
- (3) 噴霧中心付近の液滴サイズ減少率は、噴霧外縁部の液滴サイズ減少率よりも大きい。

## 5.4 インジェクター駆動信号変化による噴霧分裂の制御

### 5.4.1 噴射条件および計測条件

噴射条件及び計測点の座標を表 5.4 示す。インジェクターの噴孔数は 6、噴孔径は 0.15mm である。1 つの噴孔から噴射される噴霧の計測を行うため、他の 5 噴孔から噴射される噴霧を狭い流路に導いて回収した。雰囲気圧力を 0.1MPa、噴射周期を 3Hz、噴射圧力を 60MPa に設定し、L2F の計測データ数を 20000 点とした。計測点の x 座標を 0、0.25、0.5、0.75 および 1.0mm とし、y 座標を 0mm、z 座標を 5mm とした。

インジェクターの駆動電流波形を図 5.27 に示す。横軸は電流印加からの経過時間である。電流波形は 2 種類、最大電流値 23A(凡例に“High”と記載)を点線で示しており、最大電流値 13A(凡例に“Low”と記載)を実践で示している。二つの駆動電流波形は Time=0.15ms 時まで同様の波形であり、その後電流波形“Low”の電流値は、緩やかに上昇し、Time=0.25ms 時に 13A に達し、保持される。電流値が高い場合、電磁バルブの引付力が増加し、ニードルの上昇速度が増加する。

Table 5.4 Injection conditions

Injector specification	
Number of hole	6
Hole diameter (mm)	0.15
Test condition	
Injection frequency (Hz)	3
Ambient pressure (MPa)	0.1
Rail pressure (MPa)	60
Sample data number	20000
Measurement point (mm)	x=0、0.25、0.5、0.75、1.0
	y=0
	z=5
Injection solenoid current (A)	23 (High)

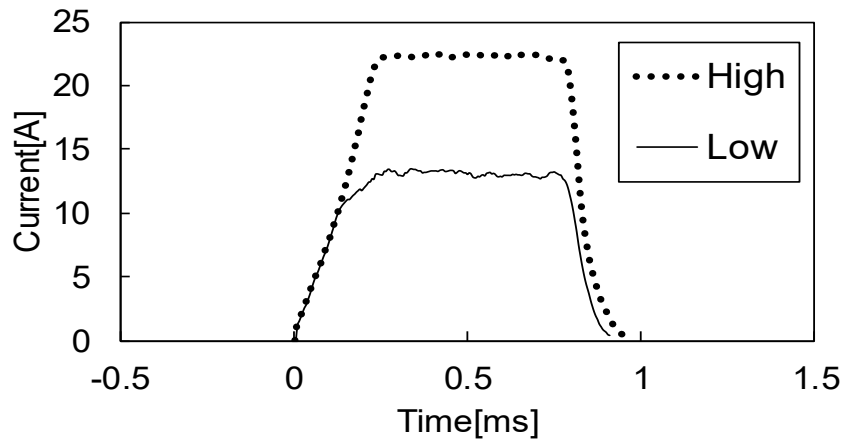
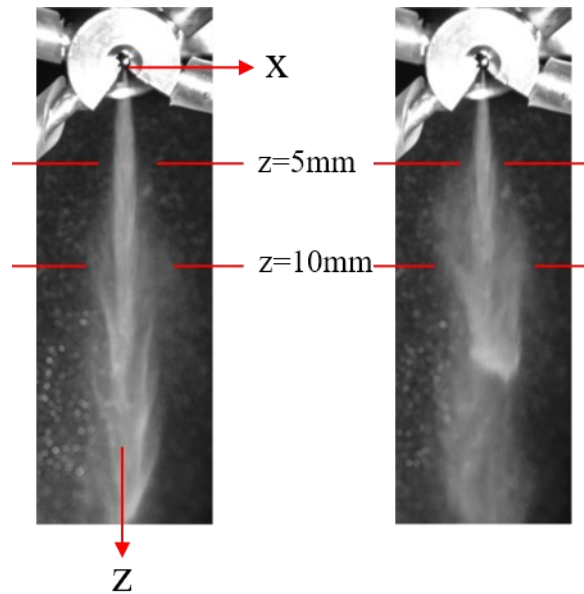


Fig.5.27 Injector drive current profile

#### 5.4.2 噴霧画像

電流波形“High”および“Low”両条件の噴射中期における噴霧画像を、図 5.28 (a) および(b)に示す。Z=10mm 付近における噴霧幅を両電流波形で比較すると、電流波形“Low”の方が大きい。

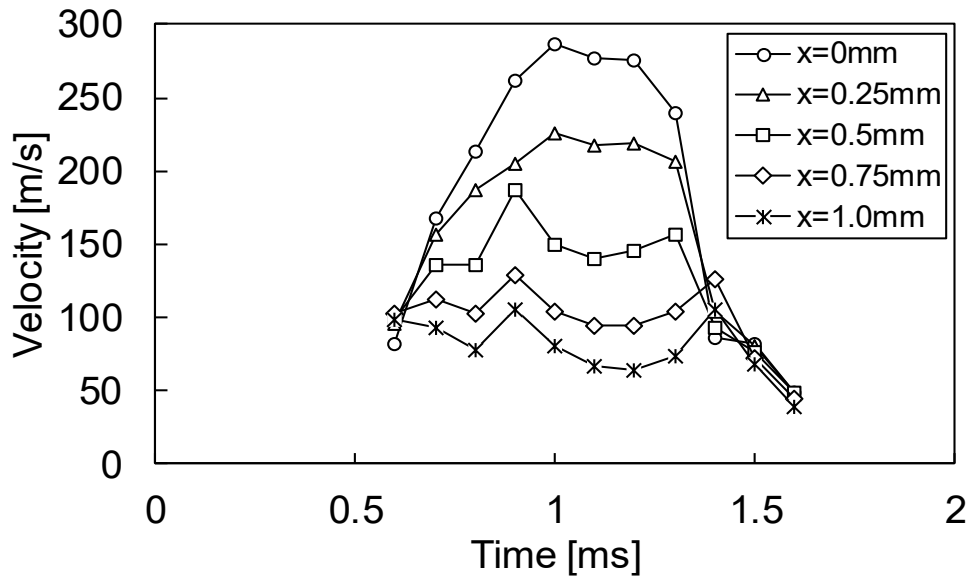


(a) High current condition (b) Low current condition

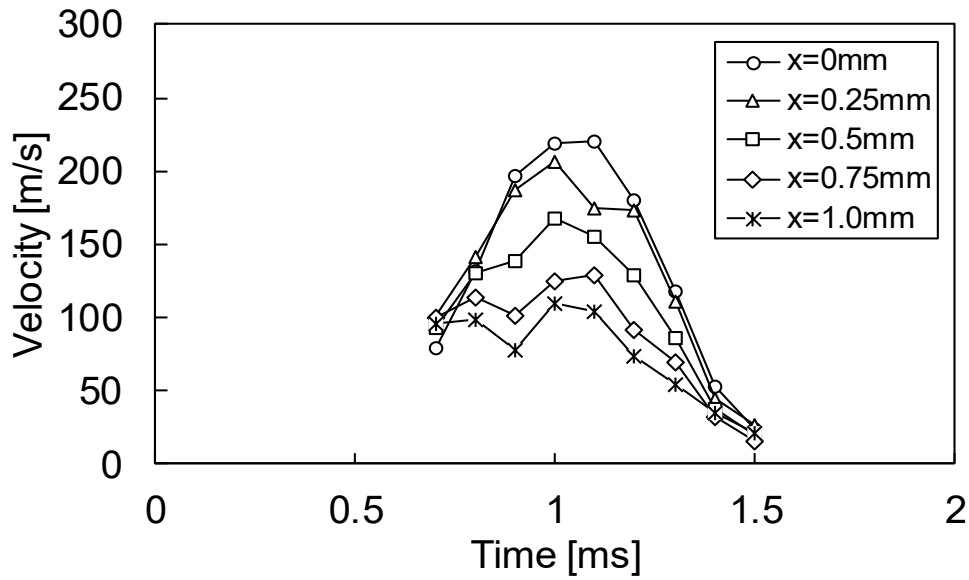
Fig. 5.28 Spray images

### 5.4.3 速度・サイズの時間変化

電流波形 “High” および “Low” 両条件における、時間窓 0.1ms 毎の各計測点における液滴速度の時間変化をそれぞれ図 5.29 (a) および (b) に示す。横軸は噴射信号印加からの経過時間である。電流波形 “High”、噴霧中心  $x=0\text{mm}$  の液滴速度は、Time=0.6ms から Time=1.0ms の期間で増加し、Time=1.0ms から Time=1.3ms の噴射中期期間で最高速度が維持されている。その後、Time=1.4ms 付近の噴射終期で減少している。電流波形 “Low” における、噴霧中心  $x=0\text{mm}$  の液滴速度は、Time=0.7ms から Time=1.0ms の期間で増加している。電流波形 “High” および “Low” 両条件における、噴霧外縁  $x=1.0\text{mm}$  の液滴速度は、噴射初期から噴射終期まで、顕著な変化はみられなかった。電流波形 “High” における、液滴最高速度は、約 300m/s であり、電流波形 “Low” においては、220m/s であった。また、電流波形 “High” における、液滴最高速度は、電流波形 “Low” の全噴射期間の液滴速度より大きいことがわかる。



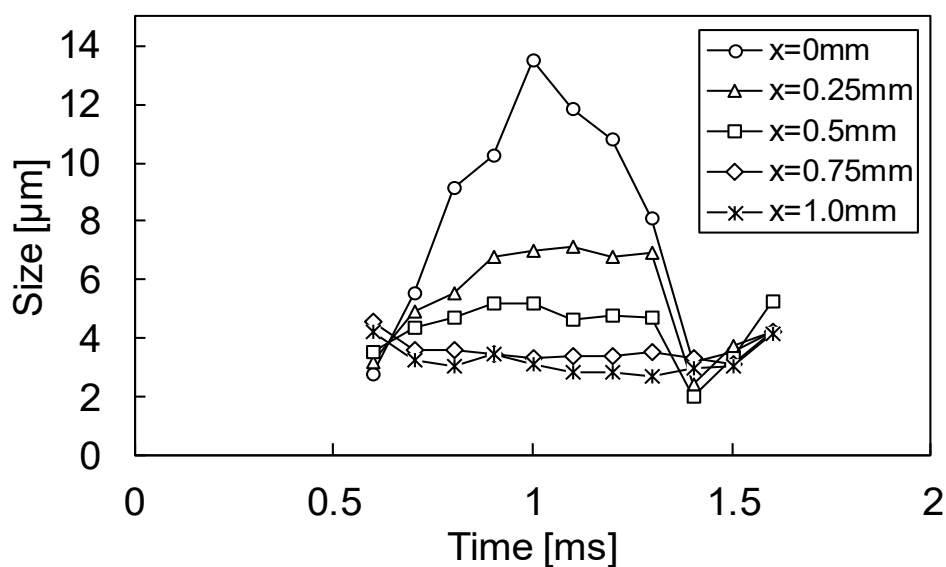
(a) High current condition



(b) Low current condition

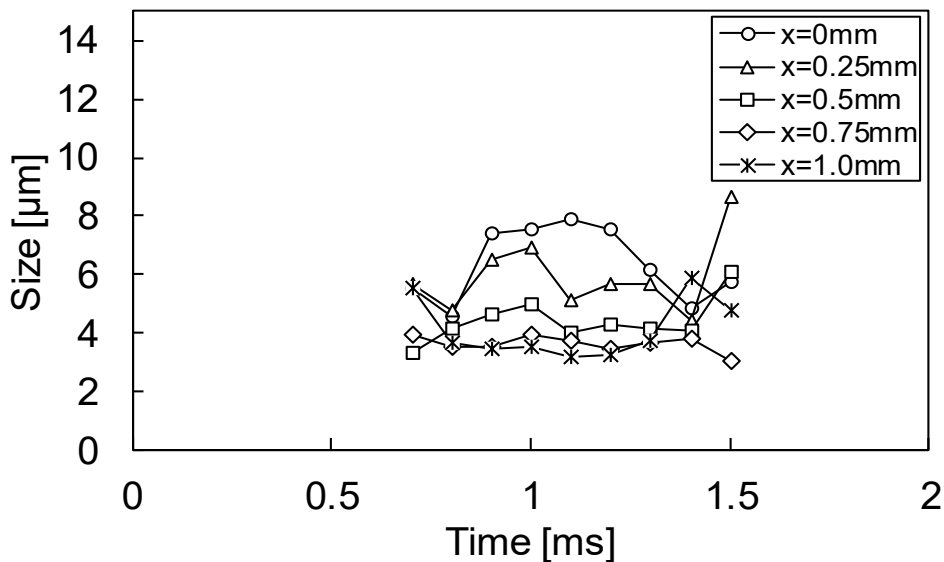
Fig.5.29 Time variations of velocity

電流波形 “High” および “Low” 両条件における、時間窓 0.1ms 毎の各計測点における液滴サイズの時間変化をそれぞれ図 5.30 (a) および (b) に示す。電流波形 “High”、噴霧中心  $x=0\text{mm}$  の液滴サイズは、噴射初期  $\text{Time}=0.6\text{ms}$  から噴射中期  $\text{Time}=1.0\text{ms}$  の期間で急激に増加している。これは図 5.20 (a) において  $\text{Time}=0.9\text{ms}$  から  $\text{Time}=1.0\text{ms}$  の期間で急激に液滴速度が増加していることと一致している。電流波形 “High” および “Low” 両条件における、噴霧外縁  $x=1.0\text{mm}$  の液滴速度は、噴射初期から噴射終期まで、顕著な変化はみられなかった。電流波形 “Low” における、噴霧中心  $x=0\text{mm}$  の液滴速度は、 $\text{Time}=0.7\text{ms}$  から  $\text{Time}=0.8\text{ms}$  の期間で減少し、 $\text{Time}=0.8\text{ms}$  から  $\text{Time}=0.9\text{ms}$  の期間で増加している。また、電流波形 “High” における、液滴最高サイズは、電流波形 “Low” の全噴射期間の液滴サイズより大きいことがわかる。



(a) High current condition

Fig.5.30 Time variations of size (continued)



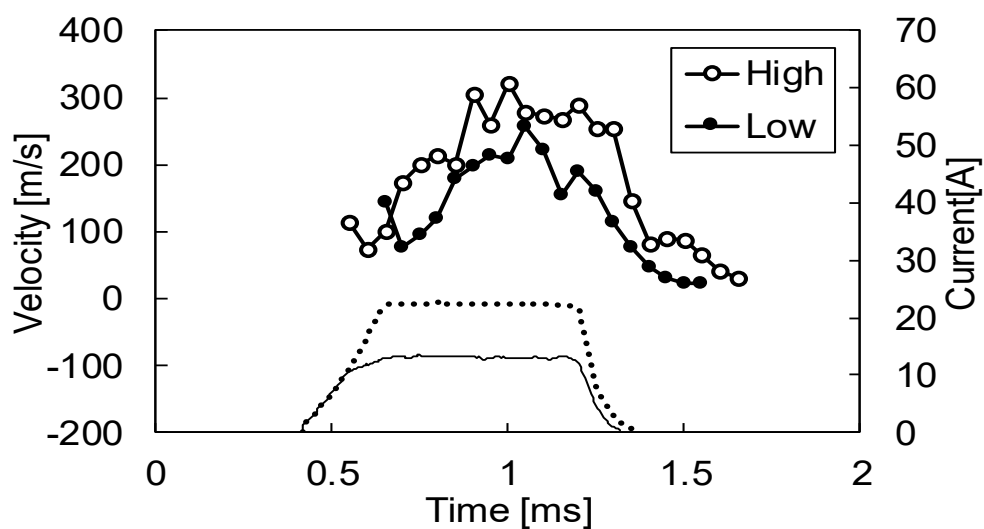
(b) Low current condition

Fig.5.30 Time variations of size

#### 5.4.4 電流波形と速度およびサイズ

電流波形 “High” および “Low” 両条件において、時間窓 0.05ms 毎の噴霧中心部における液滴速度およびサイズの時間変化をそれぞれ図 5.31 (a) および (b) に示す。第 1 縦軸は液滴速度およびサイズ、第 2 縦軸は電流値を示している。電流波形 “Low” における、液滴速度のデータ取得開始点は、電流波形 “High” と比較すると、0.1ms 遅れている。電流波形 “High” および “Low” において、電流値 13A に到達に要する時間の差異はおおよそ、0.1ms であった。電流波形 “High” および “Low” における、液滴が検出されるまでの期間が同等であることから、ノズルの開弁開始電流値は 13A と推定される。液滴検出開始とノズルの開弁タイミングが同じになるように、図 5.20 の電流波形を 0.4ms 遅らせて、本図に示した。

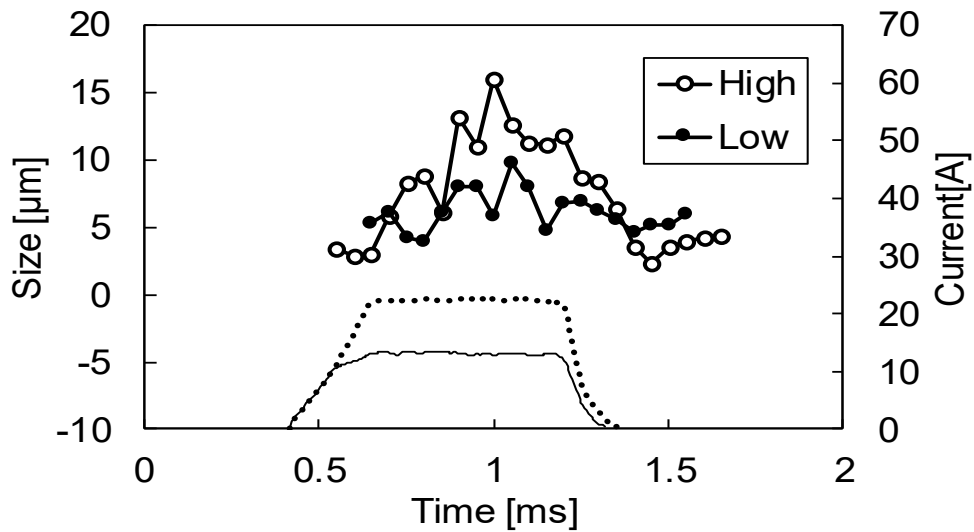
駆動電流が印加されて、一定の期間で、液滴速度とサイズが増加したことがわかる。噴射中期において、電流波形 “Low” における、液滴速度およびサイズは、電流波形 “High” の場合よりも小さい。電流波形 “Low” においては、ニードルの上昇量が僅かで、シート絞りにより燃料流量が減少したものと考えられる。また、シート絞り領域で発生した乱れが、液滴分裂を促進し、液滴サイズ減少に繋がった。



(a) Velocity

Fig.5.31 Time variations of velocity, size and current waveform(continued)



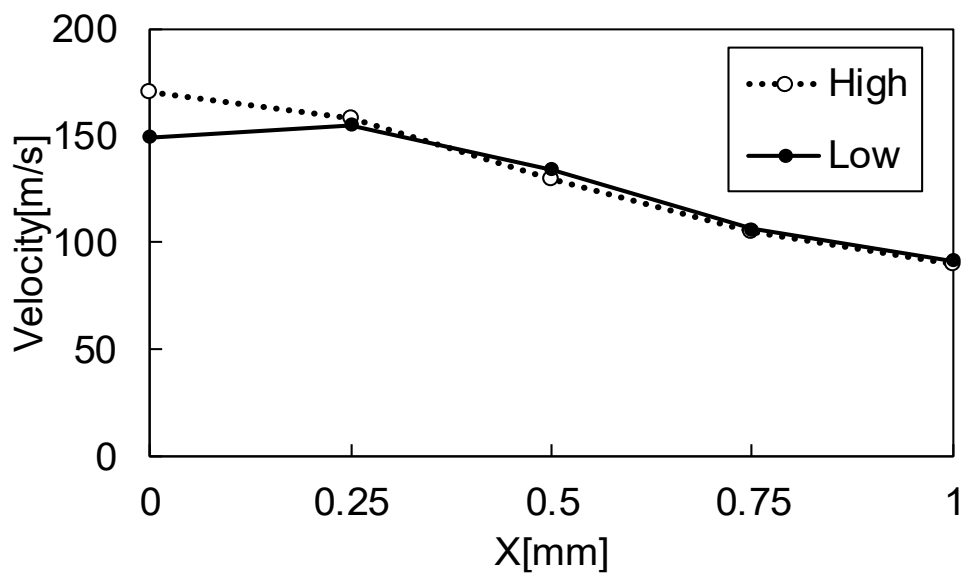


(b) Size

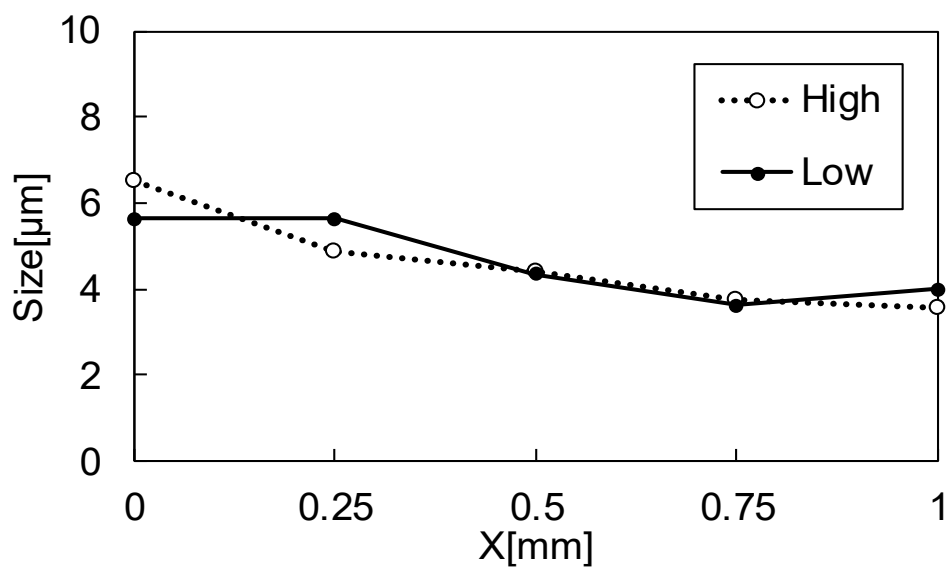
Fig.5.31 Time variations of velocity, size and current waveform

#### 5.4.5 液滴速度およびサイズの半径方向分布

電流波形 “High” および “Low” 両条件において、噴射初期の液滴速度およびサイズの空間分布を、図 5.32 (a) および (b) に示す。期間は、電流波形 “High” では Time=0.6ms から Time=0.9ms まで、電流波形 “Low” では Time=0.6ms から Time=0.8ms までであった。電流波形 “High” および “Low” における、液滴速度とサイズ共に大きな差は認められなかった。



(a) Velocity

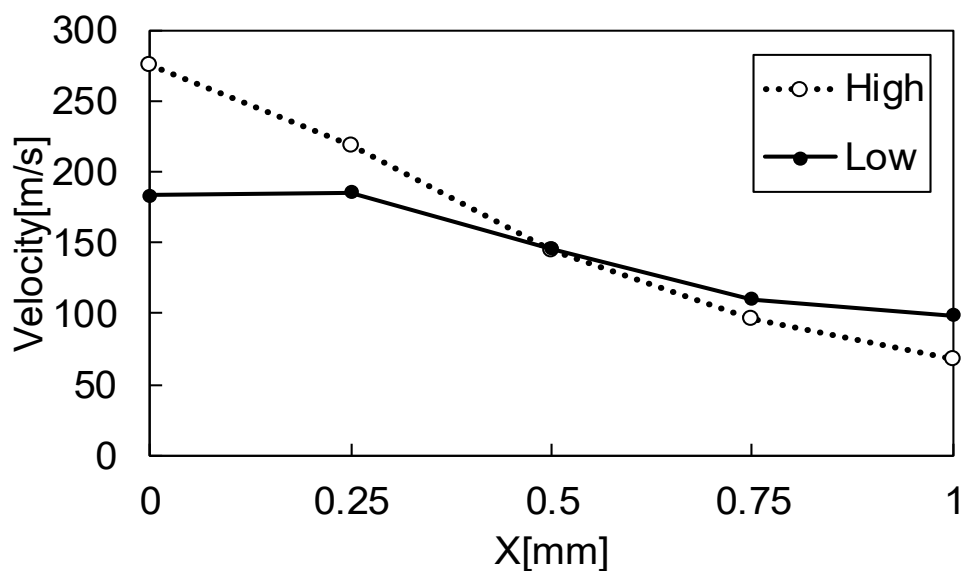


(b) Size

Fig.5.32 Spatial distributions of velocity and size in the early stage of injection

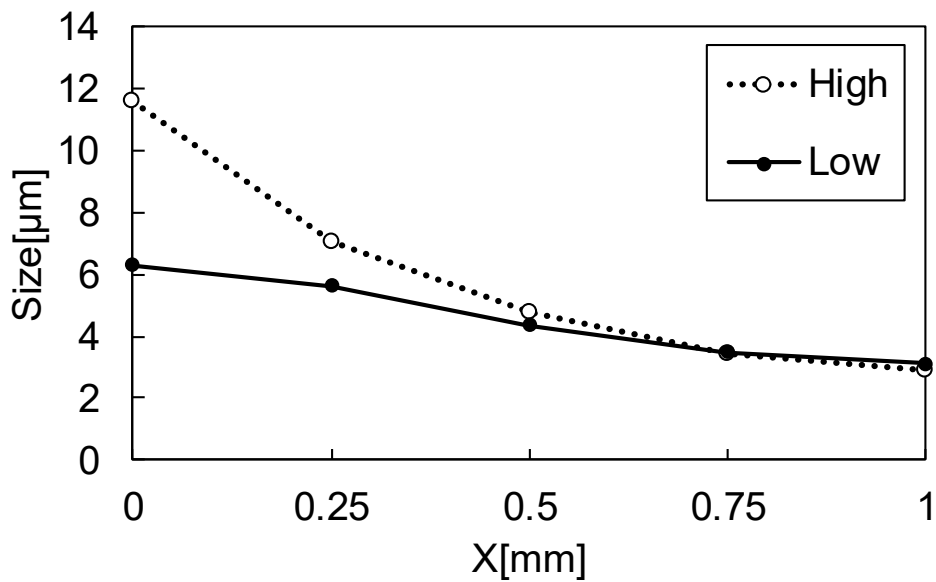
噴射中期の液滴速度およびサイズの空間分布を、図 5.33 (a)および(b)に示す。  
 期間は、電流波形“High”では Time=1.0ms から Time=1.3ms まで、電流波形“Low”

では Time=1.0ms から Time=1.2ms までであった。電流波形 “High” および “Low” における液滴速度およびサイズは、噴霧中心部から噴霧端に向かって、徐々に減少している。また、電流波形 “Low” における噴霧中心部液滴サイズは、電流波形 “High” における液滴サイズよりも小さい。駆動電流波形の変化が液滴サイズに与える影響は、噴霧中心部で大きく、噴霧外縁部で小さくなっていることがわかる。



(a) Velocity

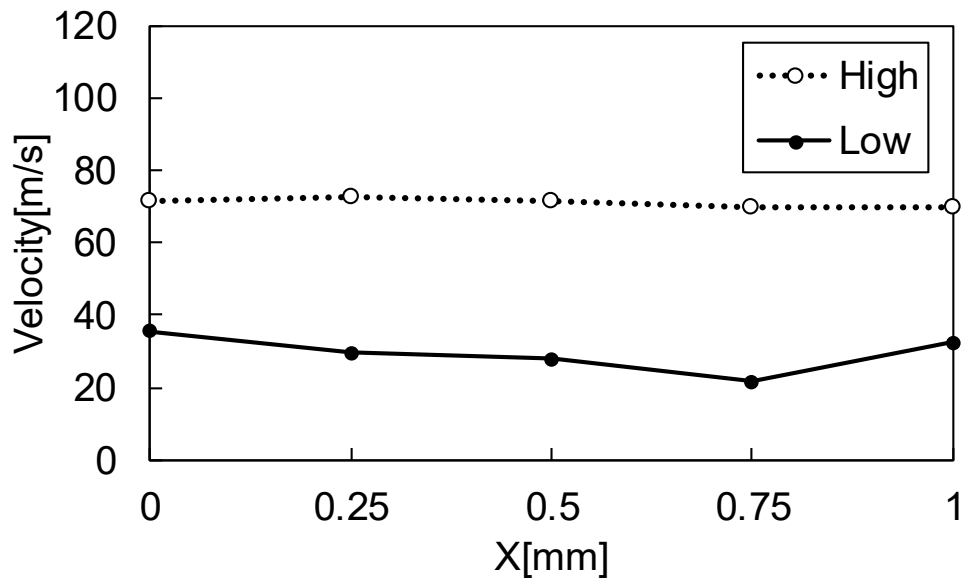
Fig.5.33 Spatial distributions of velocity and size in the middle stage of injection (continued)



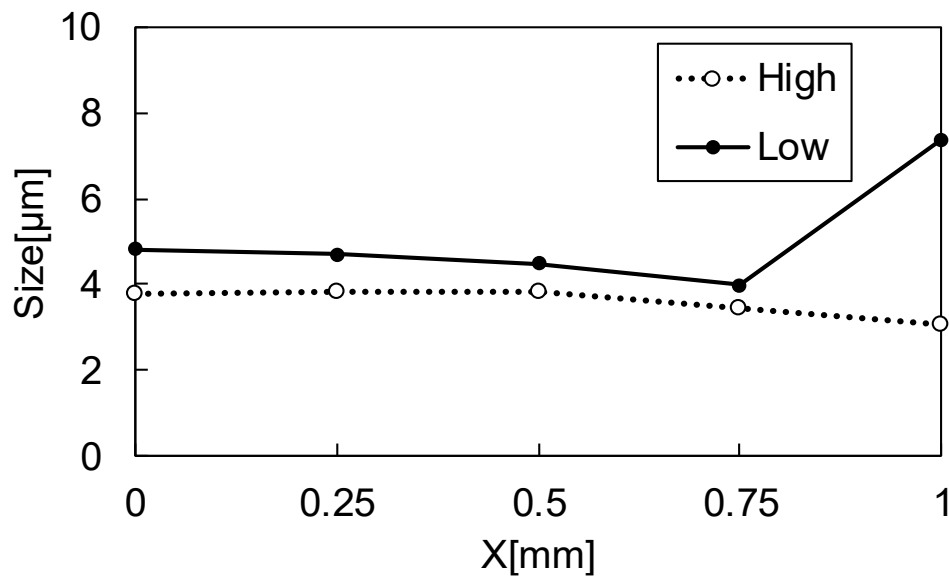
(b) Size

Fig.5.33 Spatial distributions of velocity and size in the middle stage of injection

噴射終期の液滴速度およびサイズの空間分布を、図 5.34 (a)および(b)に示す。期間は、電流波形“High”では Time=1.4ms から Time=1.6ms まで、電流波形“Low”では Time=1.4ms から Time=1.5ms までであった。電流波形“High”における液滴速度は、電流波形“Low”よりも大きかったが、電流波形“High”における液滴サイズは、電流波形“Low”よりも僅かに小さい。



(a) Velocity



(b) Size

Fig.5.34 Spatial distributions of velocity and size in the final stage of injection

#### 5.4.6 まとめ

燃料圧力を 60MPa に設定した噴孔数 6 穴のソレノイドインジェクターから大気中に間欠噴射された噴霧液滴について、噴孔より 5mm 下流の位置において L2F を用いて計測を行った。噴霧液滴の速度およびサイズに及ぼすインジェクター駆動電流の影響について調査し、得られた知見を以下に示す。

1. 噴射中期において、駆動電流を変化させることで液滴サイズを小さくすることが可能である。
2. 噴射中期において、駆動電流変化が液滴サイズに及ぼす影響は、噴霧中心部で大きく、噴霧外縁部で小さくなることがわかった。

従来は、噴霧の形状は、ノズル内部の幾何学的構造に頼っており、それ以外の手法により、噴霧の形状を変更することは出来なかった。本章では、駆動電流波形を変更することで、噴霧形状の変更が可能であることがわかった。駆動電流を更に大きく変更し、噴霧形状への影響を明らかにすることで、ノズルの幾何学的な形状を変更することなく、積極的に噴霧を制御することが可能であり、その、手法を用いることで、噴霧の設計が可能となる。

## 第6章 総括

本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景として、近年急速に進んでいる動力機関電気化の動向やその問題点を示し、その状況下におけるディーゼル機関の重要性について解説した。また、今後、ディーゼル機関にとって、より一層の熱効率の向上、排出ガスの低減が期待されており、本研究の目的は、その技術的進化のために必要な、噴霧特性の把握と制御であることを述べた。

第2章では、測定体積を微小化することで高速高数密度で液滴が存在する噴孔出口近傍での計測を可能とし、非球面レンズを使用することで噴霧計測に特化させたレーザー2焦点流速計(L2F)の液滴速度およびサイズの測定原理、またそれらを用いた分散の指標として、液滴間距離ならびに数密度の算出方法について述べた。次に一般に噴霧下流域での計測に用いられ、2次元での液滴速度およびサイズの計測が可能な位相ドップラー流速計について述べた。また、これらを含む噴霧画像計測システムについて述べた。

第3章では、本研究で用いた非定常3次元数値解析における噴霧液滴の分裂に関するモデルについて述べた。

第4章では、位相ドップラー流速計(PDA)とレーザー2焦点流速計(L2F)を用いて、エジェクタより噴出される粒子の数密度、サイズ、速度を測定し、計測結果を比較することで、L2Fの測定精度及び、PDAに対する優位性について述べた。

また、粒子画像流速計(PIV)による導入空気量の評価に基づいて、L2Fによる噴霧内空気量の評価(L2Fで計測された $3\mu\text{m}$ 以下の液滴の速度)が妥当であることを明らかにし、ウェーバー数 $We$ を算出する際の代表速度である相対速度(液滴速度と空気速度の差)が評価出来ることがわかった。

- (1) L2Fで検出される液滴からの散乱光の強度はPDAに比べて約240倍高い。
- (2) L2Fで測定可能な液滴数密度の上限はPDAに比べて約1400倍高い。
- (3) L2Fで計測された速度およびサイズはPDAの計測結果とほぼ一致する。
- (4) PIVで計測された噴射中期の導入空気量の噴射圧による変化は小さいことは、L2Fにより評価された噴霧周辺部の軸方向空気速度が噴射圧により変化しないことに対応するものと考えられる。
- (5) 噴射中期のL2F計測結果を用いて和栗らの運動量理論とMusculusらのモデルに基づいて評価された空気導入量は、PIVによる計測結果とほぼ一致する。

第5章では、噴孔出口近傍の噴霧を計測し、噴霧液滴の分裂・分散について考察した。前章で求められた相対速度を用いて、ウェーバー数 $We$ を算出し、液滴サイズ減少率との相関について明らかにした。また、燃料の噴射量を変化させ、



噴孔出口近傍の複数断面において L2F を用いて噴霧内部の液滴を計測し、燃料噴射方向の液滴サイズ減少率を評価することによって、液滴分裂の噴射量依存性について述べた。仕様が異なるインジェクターを使用し、同様に噴霧を評価することで、インジェクター仕様が噴霧分裂過程に与える影響を明らかにした。最後に、噴霧の制御を目的として、インジェクター駆動電流波形を変化させることで、噴霧液滴の速度およびサイズに及ぼす影響について述べた。

- (1) 噴霧は下流に向かうとともに広がり、その周辺部に小サイズの液滴が分散する。
- (2) 噴霧周辺部に比べて噴霧中心近傍の液滴サイズ減少率が大きい。
- (3) ウェーバー数と液滴サイズ減少率に正の相関があり、この相関は噴射圧に依存しない。
- (4) 噴霧中心近傍において、噴射量が多い場合に比べて噴射量が少ない場合の液滴サイズは小さい。
- (5) いずれの噴射量においても噴霧上流に比べて噴霧下流の液滴サイズは小さく、液滴は下流に向かって分裂が進行したものと判断される。
- (6) 噴孔下流の噴霧外縁において、いずれの噴射量においても液滴サイズ減少率がゼロに近いことから液滴の分裂が終了したものと判断される。
- (7) 噴射量の多い場合の液滴サイズ減少率と少量噴射の場合の液滴サイズ減少率との間に正の相関があり、液滴サイズ減少率におよぼす噴射量の影響は小さい。
- (8) 分裂が完了した液滴の確率密度分布は、噴霧中心部は外縁部に比べて低く、

下流部では高くなっていることから、分裂完了液滴は噴霧下流部への移動に伴って噴霧中心部から外縁部へ拡散していくことがわかった。

- (9) 噴霧中心付近の液滴サイズ減少率は、噴霧外縁部の液滴サイズ減少率よりも大きい。
- (10) 噴射中期において、駆動電流を変化させることで液滴サイズを小さくすることが可能である。
- (11) 噴射中期において、駆動電流変化が液滴サイズに及ぼす影響は、噴霧中心部で大きく、噴霧外縁部で小さくなることがわかった。

## 参考文献

1. 坂本 隆行, 大串 彰秀, 坂口 敏章, 鈴木 省伍, 河村 英男, 炭化珪素繊維を用いた DPF の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, 700-00, JSAE Paper No. 200050641, 2000.
2. T. Lanni, S. Chatterjee, D. Rosenblatt, C. Bush, J. Evans, R. McLean, Performance and Durability Evaluation of Continuously Regenerating Particulate Filters on Diesel Powered Urban Buses at NY City Transit, SAE Paper No. 2001-01-0511, 2001.
3. B. Cooper, J. Thoss, Role of NO in Diesel Particulate Control, SAE Paper 1999-01-0111, 1999.
4. 高木 信之, 田中 俊明, 小倉 善次, NOX吸蔵還元触媒のディーゼルエンジンへの適用, 自動車技術, Vol.55, No. 9, pp. 59-62, 2001.
5. D. A. Kennaird, C. Crua, J. Lacoste, M. R. Heikal, M. R. Gold, N. S. Jackson, In-cylinder penetration and break-up of diesel sprays using a common-rail injection system, SAE Paper, 2002-01,1626, 2002.
6. S. M. Martinez, F. A. S. Cruz, J. M. R. Avila, A. G. Munoz, Liquid penetration length in direct diesel fuel injection, Applied Thermal Engineering, Vol.28, pp.1756-1762, 2008.
7. J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, Time resolved measurements of the initial stages of fuel spray penetration, Fuel, Vol.88, pp.2225-2237, 2009.

8. J. Kang, C. Bae, K. O. Lee, Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems, *International Journal of Engine Research*, pp.238-298, 2003.
9. E. Delacourta, B. Desmeta, B. Besson, Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques, *Fuel*, Vol.84, pp.589-867, 2005.
10. 広安 博之, 新井 雅隆, ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角, 自動車技術会論文集, No.21, pp.5-11, 1980.
11. S. S. Sazhin, G. Fengt, M. R. Heikal, A model for fuel spray penetration, *Fuel*, Vol.80, pp.2171-2180, 2001.
12. F. Payri, V. Bermudez, R. Payri, F. J. Salvador, The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzle, *Fuel*, Vol.83, pp.419-431, 2004.
13. J. M. Desantes, R. Payri , F. J. Salvador, A. Gil, Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration, *Fuel*, Vol.85, pp.910-917, 2006.
14. I.V.Roisman, L. Araneo, C. Tropea, Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33 pp.904-920, 2007.
15. M.Uhl, R. Schießl, U. Maas, A. Dreizler, Time resolved spray characterization

in a common rail direct-injection production type diesel engine using combined Mie/LIF laser diagnostics, SAE paper, 2003-01-1040, 2003.

16. F. Payri, J. V. Pastor, J. M. Pastor, J. E. Julia, Diesel spray analysis by means of planar laser-induced exciplex fluorescence, *International Journal of Engine Research*, pp.77-89, 2006.
17. J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, A correlation image velocimetry-based study of high-pressure fuel spray tip evolution, *Experiments in Fluids*, Vol.51, pp.667-678, 2011.
18. W. Choi, B. C. Choi, Estimation of the air entrainment characteristics of a transient high-pressure diesel spray, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, pp.1025-1036, 2005.
19. J. Yeom, Diagnosis of the behavior characteristics of the evaporative diesel spray by using images analysis, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.22, pp.1785-1792, 2008.
20. S. Moon, Y. Matsumoto, K. Nishida, J. Gao, Gas entrainment characteristics of diesel spray injected by a group-hole nozzle, *Fuel*, Vol.89, pp.3287-3299, 2010.
21. A.L. Kastengren, C. F. Powell, Y. Wang, K. S. Im, J. Wang, X-Ray radiography

measurements of diesel spray structure at engine-like ambient density,

Proceedings of 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2008.

22. M. Arai, M. Tabata, H. Hiroyasu and M. Shimizu, Disintegrating process and spray characterization of fuel jet injected by a diesel nozzle, SAE Paper 840275, 1984.
23. J. Swithenbank, J. Beer, D. Taylor, D. Abbot, G. McCreath, A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution, Experimental diagnostics in gas phase combustion systems, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.53, 1976.
24. B. P. Sangeorzan, O. A. Uehara, P. S. Myers, Time resolved drop size measurements in an intermittent high-pressure fuel spray, SAE, 841361, 1984.
25. 葉 啓南, 小酒 英範, 神本 武征, 蛍光・散乱光法による非蒸発噴霧のザウタ平均粒径測定に関する研究, 日本機械学会論文集. B 編 59(568), 4008-4013, 1993.
26. 柳 昌成, 森吉 泰生, 青柳 友三, 改良型干渉画像法を用いたディーゼル噴霧の二次元粒度分布・速度分布の同時計測, 日本機械学会論文集. B 編 73(725), pp.380-386, 2007.
27. B. J. Thompson, J. H. Ward, W. R. Zinky, Application of hologram techniques

for particle size analysis, *Applied optics*, Vol.6, No.3, 1967.

28. J. Y.Koo, J. K. Martin, Droplet sizes and velocities in a transient diesel fuel spray, SAE Paper, 900397, 1990.
29. F. Payri, J. M. Desantes, J. Arregle, Characterization of D.I. diesel sprays in high density conditions, SAE Paper, 960774, 1996.
30. J. Lacoste, C. Crua, M. Heikal, D. Kennaird, M. Gold, PDA characterization of dense diesel sprays using a common-rail injection system, SAE Paper, 2003-01-3085, 2003.
31. J. Y.Koo, The effects of injector nozzle geometry and operating pressure conditions on the transient fuel spray behavior, *KSME International Journal*, Vol.17 No.3, pp.617-625, 2003.
32. J. Benajes, R. payri, S. Molina, V. Soare, Investigation of the influence of injection rate shaping on the spray characteristics in a diesel common rail system equipped with a piston amplifier, *Transactions of the ASME*, Vol.127, pp.1102-1110, 2005.
33. A. Doudou, Turbulent flow study of an isothermal diesel spray injected by a common rail system, *Fuel*, Vol.84, pp.287-298, 2005.
34. J. Kong, C. Bae, Effect of tapered nozzle hole on spray characteristics of high pressure diesel injection, *Proceedings of the 11th International Annual*

Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2009.

35. I.Pribicevic, T. Sattelmayer, Investigation of the diesel spray atomization process with use of phase doppler anemometry at high injection pressures and at engine-like gas density, Proceedings of the 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2012.
36. M. Beversdorff, W. Förster, R. Schodl, H. W. Jentink, In-flight Laser Anemometry for Aerodynamic Investigations on Aircraft. Optics and Lasers in Engineering, Vol.27, pp. 571-586, 1997.
37. H. Ueki, M. Ishida, D. Sakaguchi, Simultaneous Measurement of Particle Size and Velocity by Laser 2-Focus Particle Analyzer, Proceedings of ICLASS94, pp.483-490, 1994.
38. H. Ueki, M. Ishida, D. Sakaguchi, M. Naganuma, Simultaneous Measurements of Velocity and Size of Diesel Fuel Droplet near Nozzle Orifice by Laser 2-Focus Velocimeter with Micro-Scale Probe Volume, Proceedings of Thiesel 2004, pp.369-380, 2004.
39. K. Komada, N. Kawaharada, D. Sakaguchi, H. Ueki, M. Ishida, Evaluation of Mass Flow Rate Distribution in Diesel Fuel Spray by L2F, Proceedings of the ASME 2011 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, CD-ROM, pp.1-10, 2011.



40. M. Pilch, and C. A. Erdmann, Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments, *Journal of multiphase flow*, Vol. 13, pp. 741-757(1987)
41. R. D. Reitz, Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays, *Atomization and Spray Technology*, vol. 3, No. 4, pp. 309-337(1987).
42. P.J. O'Rourke, A. A. Amsden, The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper 872089, 1987..
43. M. A. Patterson, R. D. Reitz, Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission, SAE Paper 980131, pp.27-43, 1998.
44. R. D. Reitz, R. Diwakar, Structure of High-Pressure Fuel Sprays, SAE, 870598, 1987.
45. S. C. Kong, Z. Han, R. D. Reitz, The development and application of a diesel ignition and combustion model for multidimensional engine simulation, SAE, 950278, 1995.
46. 河原伸幸, 富田栄二:位相ドップラ法(PDA/PDPA)を用いた噴霧粒子径および速度の同時計測, *ながれ*, Vol.27, No.4 p.303-310 (2008)
47. 西田恵哉:微細噴孔から超高压で噴射されるディーゼル噴霧と燃焼, *ながれ*, Vol.31, No.4, p.345-350 (2012)

48. 金子誠:高分解能PIVによる筒内乱流の空間的評価, 可視化情報, Vol. 17, Supplement..No. 1, p.153-156 (1997)
49. 和栗 雄太郎, 藤井 勝, 網谷 竜夫, 恒屋 礼二郎:ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.25, No.156, p.820-826 (1959)
50. M. P. B. Musculus, K. Kattke, :Entrainment waves in diesel jets, SAE International Journal of Engines, Vol.2, No.1, pp.1170-1193 (2009).
51. R. Payri, L. Araneo, J. Shakal, V. Soare : Phase doppler measurements: system set-up optimization for characterization of a diesel nozzle, Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) p.1620-1632
52. 調 尚孝:高数密度燃料噴霧の影画像処理による粒径計測,微粒化, 20(71), p.121-128(2011)
53. A. Melling, J. H. Whitelaw, The accuracy of flow measurement of laser doppler methods, LDA-Symposium Copenhagen 1975, p.385
54. 川那辺 洋, 石山 拓二, 塩路 昌宏, 運動量理論に基づくディーゼル噴霧の周囲流体導入過程に関する一考察, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.856, p.17-00294
55. 金壯憲, 西田恵哉, 清水正則, 廣安博之, 定常流におけるディーゼル噴射ノズル内の流れ特性, 微粒化, Vol.7, No.18,pp.2-10(1998).

56. S. Moon, W. Huang, J. Wang, First observation and characterization of vortex flow in steel micronozzles for high-pressure diesel injection, *Journal of experimental thermal and fluid science*, Vol. 105, pp. 342-348(2019)
57. 栗原健太, 斎藤学, 駒田佳介, 坂口大作, 植木弘信, レーザ一流速計によるディーゼル噴霧の周囲および内部の空気流動の評価, *自動車技術会2019年春季大会予稿集*, No. 20195304, pp. 1-6(2019)
58. T. C. Wang, J. S. Han, X. B. Xie, M. C. Lai, N. A. Henein, E. Schwarz W. Bryzik, Parametric characterization of high-pressure diesel fuel injection systems, *Journal of engineering for gas turbines and power*. Vol. 125(2003), pp. 412-426
59. S. Moon, W. Huang, J. Wang, First observation and characterization of vortex flow in steel micronozzles for high-pressure diesel injection, *Journal of experimental thermal and fluid science*, Vol. 105(2019), pp. 342-348.
60. F. J. Salvador, J. Martínez-López, M. Caballer, C. D. Alfonso, Study of the influence of the needle lift on the internal flow and cavitation phenomenon in diesel injector nozzles by CFD using RANS methods, *Journal of Energy Conversion and Management*(2013), pp.246-256.
61. C. S. Lee, S. W. Park, An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays, *Fuel*, Vol.

81, Issue 18(2002), pp. 2417-2423.

62. A. Kastengren, J. Ilavsky, J. P. Viera, R. Payri, C. F. Powell, Measurements of droplet size in shear-driven atomization using ultra-small angle x-ray scattering, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 92(2017), pp.131-139.

## 謝辞

本研究に関してご指導とご協力を頂きました多くの方々に厚く御礼申し上げます。特に指導教官である長崎大学大学院工学研究科システム科学部門機械科学分野 植木弘信 教授には終始懇切なるご教示とご指導を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表するとともに厚く御礼申し上げます。また本論文をまとめるに際し、ご助言およびご指導を賜りました、福岡工業大学工学部知能機械工学科 駒田圭介 助教に深く感謝の意を表します。

本研究は、長崎大学において行われたものであります。本研究と本論文を作成する機会を与えていただいた長崎大学大学院工学研究科 坂口大作 教授ならびに石田正弘 名誉教授に感謝の意を表するとともに厚くお礼申し上げます。また、さらに、昼夜を問わない実験や光学調整、数値解析、データの整理に惜しみない努力を傾注し、多大な支援を頂いた長崎大学のエネルギーシステム学研究室の皆さんに心より感謝申し上げます。

実験装置の製作や修理、数値解析に関する情報提供など、ご支援およびご協力を頂いた方はあまりにも多く、ここにお名前を記すことはできませんが、これらの方々にも深く感謝の意を表します。

本研究の遂行、執筆にあたり、私が代表取締役を務める、株式会社アイ・アール・エスの従業員及び関係者の方々には多大なるご協力を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。