



スワールインジェクタのノズル近傍における液膜分裂過程の可視化

Microscopic Visualization of Liquid Sheet Break-up Process Near Nozzle Exit of Swirl Injector

河原 伸幸, 富田 栄二, 住田 守
 (Nobuyuki KAWAHARA) (Eiji TOMITA) (Mamoru SUMIDA)
 岡山大学 岡山大学 三菱電機 (株)
 (Okayama Univ.) (Okayama Univ.) (Mitsubishi Electric Corp.)

Experimental investigations of liquid sheet break-up very close to nozzle of practical high-pressure swirl injector, which is used in direct injection spark ignition (DISI) engine, were carried out. Visualizations of primary spray formation process were demonstrated using a high-speed video camera (maximum speed: 1 Mfps) with a long-distance microscope. Initial state and development of the spray were discussed under the different injection pressure condition. During the injection period, the length and thickness of the liquid sheet, which is produced from the nozzle exit, were measured using Ar-ion laser sheet and high-speed camera. Primary spray structure and behavior of liquid sheet, especially surface wave of liquid sheet, at nozzle exit were discussed using obtained images. Three main conclusions were drawn from this study. (1) It has been shown that the liquid fuel column without swirl motion was injected as a compact jet at the beginning of the injection. During the injection period, the spray indicates the quasi-steady state mode. (2) Liquid film sheet has a ligament structure. Using Ar-ion laser sheet and high-speed camera, length and thickness of the liquid sheet can be measured. Higher injection pressure causes thinner thickness and shorter length of liquid sheet. (3) Surface waves of liquid sheet can be recognized. Higher injection pressure makes larger wavelength of surface waves of liquid sheet of swirl injector.

Keyword: Gasoline Engine, Fuel Injection, Flow Visualization, Liquid Fuel, Primary Break-up, High-Speed Visualization, Microscopic Observation

1. はじめに

筒内直接噴射式ガソリン機関 (DISI) ⁽¹⁻³⁾は、熱効率向上および汚染排出物低減の効果が高いために注目を集めている。DISI エンジンでは、高負荷条件では早期燃料噴射により均一な混合気形成を試み、部分負荷条件では燃料噴射時期を遅らせることで層状混合気を形成している^(3,4)。そのため、使用するインジェクタには、①短い噴霧貫通距離、②雰囲気圧により噴霧形状が制御できる、③より微細な噴霧（できればSMDで25 μ m程度）を形成する等が必要になってくる。現在、DISIエンジンでは、高圧噴射式スワールインジェクタが主に採用されている。

スワールインジェクタ（いわゆる、渦巻き噴射弁）は、従来より家庭用から工業用機器まで幅広く利用されてきた^(5,6)。スワールインジェクタでは、ホローコーン状（中空噴霧）の液膜微粒化が行われている。GDI エンジンにおいても、ノズル近傍では液膜微粒化が行われていると考えられている。図1に現在、考えられているスワールインジェクタノズル近傍における燃料微粒化過程を示す。燃料はインジェクタ内部でスワラにより旋回速度成分を与えられ、ノズル出口では、液膜が形成されている。この液膜は、非常に高速で噴射されるため、周囲気体との間で相対速度が大きくなり、界面の不安定性を生じる。この不安定性により、液膜は破断し、棒状の液柱になった後、微粒化が起きていると考えられている⁽⁵⁻⁷⁾。

このような燃料インジェクタの実験的評価のためには、高

速度ビデオとレーザシートを用いた可視化手法⁽⁸⁾、レーザ誘起（エキサイプレックス）蛍光法（LIF）⁽⁹⁾、レーザドップラ流速計（LDV）および位相ドップラ流速計（PDA）^(10,11)、粒子軌跡相関法（PIV）⁽¹²⁾などが用いられている。これらの手法により、噴霧の貫通距離や噴霧角、液滴/燃料蒸気分布、噴霧液滴粒径およびその速度を詳細に把握することができる。また、数値シミュレーションにおいてもTAB（Taylor Analogy Break-up）モデル⁽¹³⁾やDDM（Discrete Droplet model）法など

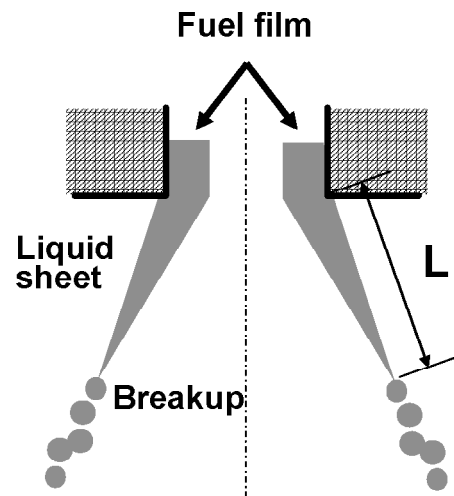


Fig. 1 Schematic image of liquid sheet near nozzle exit

が用いられている。これらは、二次分裂過程での燃料インジェクタの評価と考えられる。噴霧挙動に最も影響を与える微粒化過程として、ノズル出口液膜分裂過程が挙げられる。液膜挙動や微粒化過程は、実用インジェクタにおいては非常に高速度であり、かつ微小領域での現象であるため、実験的観察が困難であった。10倍等に拡大したモデルを用いた実験も行われているが、レイノルズ数、ウエーバ数やキャピテーション数や、特に時間スケールを実機運転条件に合わせることは困難である。そのため、実用条件下での実用ノズルにおいて、超高速でかつ微細現象を把握する手法が必要となる。

パルスレーザーを用いた拡大撮影法は、ディーゼル噴霧において行われてきた⁽¹⁴⁻¹⁶⁾。Laiら⁽¹⁴⁾は、ノズル出口における噴霧構造を把握するために、長距離顕微鏡とパルスレーザーを用いている。ChangとFarrell⁽¹⁵⁾は、銅蒸気レーザーとズームレンズを取り付けた高速度ビデオカメラをコモンレール式直噴ディーゼル機関用噴射弁に適用している。Fathら⁽¹⁶⁾は、パルスNd:YAGレーザーと長距離顕微鏡により、ミッドレンジによる二次元計測を行っている。これらの実用噴射弁による拡大撮影法によって、ノズル出口近傍における液滴分裂過程の観察が行われている。Schmitzら⁽¹⁷⁾はFathら⁽¹⁶⁾の計測システムを筒内直接燃料噴射式火花点火機関に用いられている高圧噴射式スワール噴射弁に適用している。しかし、彼らの撮影法では、ノズル出口の液膜分裂状態を観察するまでには至っていない。Gavaisesら⁽¹⁸⁾は、高分解能CCDカメラを用いて、スワール噴射弁によって形成される噴霧においてノズル出口近傍噴霧角を撮影している。

一方、数値シミュレーションにより、ノズル出口における液膜分裂過程のモデル化が行われている。Hanら⁽¹⁹⁾は、ノズル出口に形成される液膜の厚さと同じ大きさの液滴を分散Blobモデルとして定義し、DDM法により液膜分裂過程を計算している。Schmidtら⁽²⁰⁾は、LISA (Linearized Instability Sheet Atomization) モデルを構築し、ノズル出口に形成される液膜の不安定性を検討している。二相流解析に用いられるVOF (Volume of Fluid) 法を使用し、ノズル出口に形成される液膜を計算している例もある^(21, 22)。これらの研究により定性的にはノズル出口に形成される液膜の長さ、厚さを見積もることは可能であるが、実験データの不足により、定量評価までは至っていない。

本研究では、燃料インジェクタにおける噴霧微粒化過程、特に液膜分裂過程を把握するために、実用スワールインジェクタでのノズル近傍に形成される液膜の分裂構造を調査する。可視化には、長距離顕微鏡と1Mfpsを有する超高速ビデオカメラを用いる⁽²³⁾。レーザーをシート状にしてノズル近傍に照射することにより、液膜断面を撮影することができる。これより、液膜の長さおよび厚さの変動を計測する。また、レーザーをビーム状にして液膜に照射することにより、液膜の不安定性に起因する振動状態を観察した。

2. 実験装置および方法

2.1 燃料噴射弁

実験には、実機エンジンに使用されている圧力噴霧式スワール噴射弁の試作品を用いた⁽²⁴⁾。この噴射弁により約60°のホローコーン噴霧が形成される。噴射用液体（以下、燃料とする）には、ドライソルベントを使用した。この噴射弁は、内部にニードルを有する形式である。図2に噴射弁先端部の内部構造を示す。燃料は噴射弁の上部から供給され、スワラによって旋回力を与えられる。ニードルがリフトしている間、燃料はノズル出口から噴出される。ノズル出口径はφ1.0mmである。噴射弁により形成される噴霧は軸対称となる。噴射弁先端部（スワラとバルブシート諸元）を変更す

ることにより、いわゆる先立ち噴霧が少なくなるような仕様になっている。

図3には、本研究で使用したスワール噴射弁により形成される噴霧の全体像を示す。噴射圧は、1.0, 3.0, 5.0MPaとした場合を示し、雰囲気圧は大気圧である。噴射期間は0.75msである。ここで、時刻 t_0 は噴射開始信号からの遅れ時間である。図より、噴射初期に噴霧角度0°で噴射される、いわゆる先立ち噴霧があまり生じていないことが分かる。主噴霧は約60°のホローコーン状に噴射されている。噴射開始信号から1.98ms後には、燃料噴射が終了し、噴霧コーン角上に大きなスケールの渦、いわゆるエントレイメント渦が形成されている。

2.2 実験装置

図4に実験装置の概略図を示す。燃料を燃料容器に入れ、窒素により加圧することにより燃料噴射圧を調整できるシステムを構築した。スワール噴射弁は定容容器上部に取り付けられている。定容容器は円筒形状をしており、容器内は直径180mm、高さ350mmである。容器は光学観測のために、三つの観測窓を有している。コンプレッサーにより容器内に空気を送り込み、任意の雰囲気圧力を得ることもできる。パルスジェネレータの信号を噴射弁ドライバに送り、噴射期間を設定した。

2.3 計測方法

計測には、高速度ビデオカメラ（最高撮影速度：1Mfps、島津社製Hyper Vision HEX-108）と高解像度の長距離顕微鏡を用いた（図5）。カメラの画像分解能は、316×260ピクセルである。一回の撮影可能画像枚数は102画像である。ノズル出口における燃料噴霧の噴射過程を時系列にて計測した。撮影領域はノズル出口近傍約4.0×4.0mmである。

高速度ビデオカメラにより1Mfpsのような高速において撮影を行う際には、露光時間が非常に短いため、光量の強い光源が必要になる。そのため、二種類の光源を準備し、撮影できる最高撮影速度や得られる画像に関して比較・検討を行った。二種類の光源とは、①出力6WのAr-ionレーザーからの射出ビーム、②Ar-ionレーザーを用いたシート光である。図6に二種類の光源により得られた画像をレーザー入射方法とともに示す。図6(a)にAr-ionレーザーのビームを直接照射したもの、(b)にAr-ionレーザーのシート光により撮影したものを示している。噴射弁ノズル近傍を撮影できるように光源照射位置を設定している。

光源にAr-ionレーザーのビームを用いた場合、ノズル出口における噴霧表面を撮影していることが分かる。しかし、画像下半分の部分は焦点がぼやけている。これは、この領域を撮影する場合には、長距離顕微鏡の焦点深度が短いことが原因である。噴霧は約60°の噴霧コーン角により噴射されているので、被写体深度の影響が出ている。撮影速度1Mfps、光源

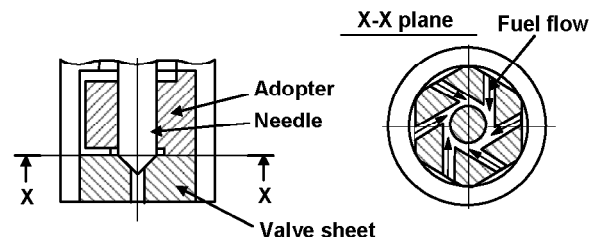


Fig. 2 Detail of nozzle of swirl injector

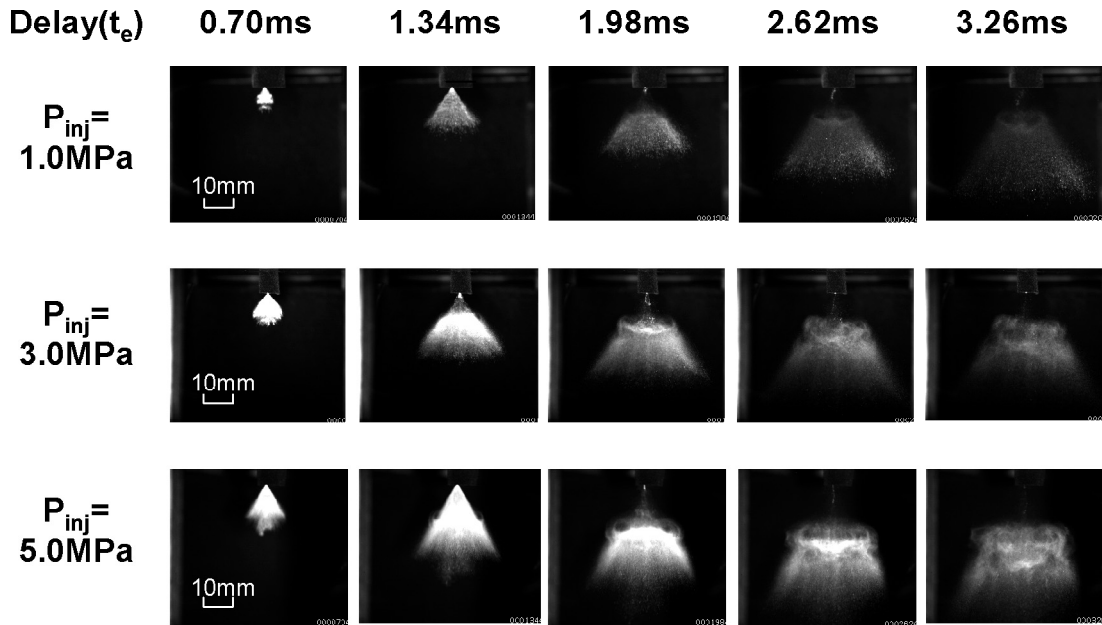


Fig. 3 Whole spray images of swirl injector

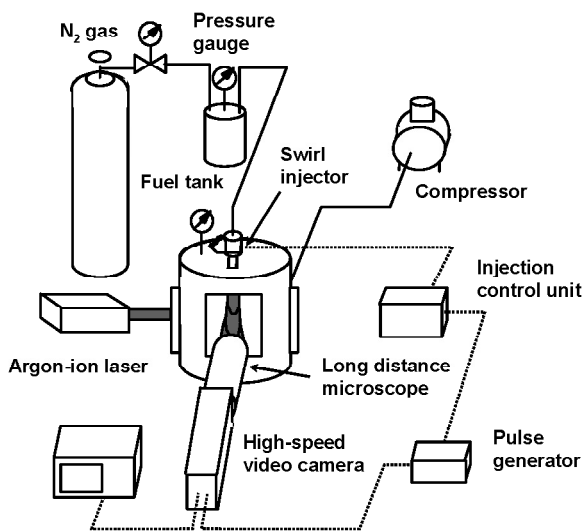


Fig. 4 Experimental set-up

に Ar-ion レーザのレーザーシート光 (シート厚さ: 約 50 μ m) を用いて撮影した画像より, ノズル出口の噴霧断面を捉えていることが分かる. レーザシート光は画像の左側から照射しているため, 噴霧右側断面の撮影に対してレーザー出力は十分ではなかった. レーザシート光を用いて撮影した画像を用いることにより, ノズル出口近傍における液膜の挙動(長さ, 厚さ)を計測することができる.

3. 結果と考察

3.1 初期噴霧発達過程

ノズル出口における燃料噴射過程を調べるために, 63kfps (露光時間: 2.0 μ s) の撮影速度により一回の噴射を時系列に

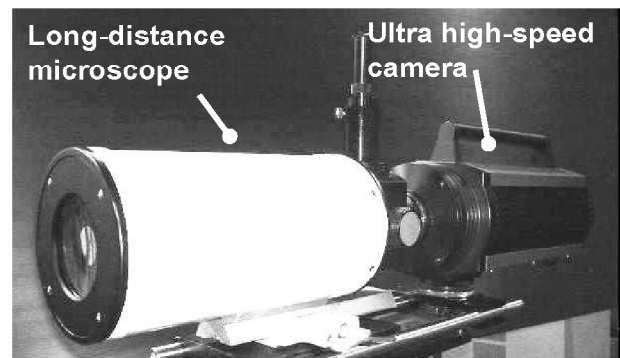
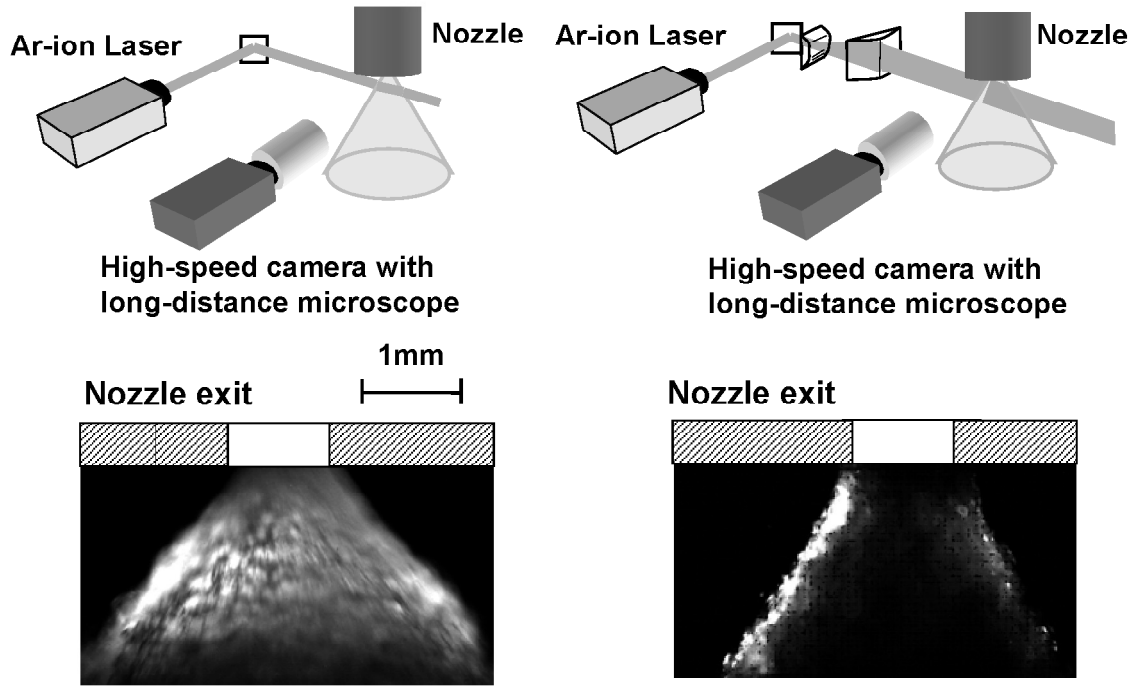


Fig. 5 High-speed video camera with long-distance microscope

て撮影した. 図7には, 光源にメタルハライドランプを用いて撮影した画像を示している (燃料噴射圧力: 5MPa). 図の上部にはノズル出口 (内径 ϕ 1.0mm) を示している. 噴霧の発達には, 三段階, すなわち, ①噴霧初期 (噴射開始信号からの遅れ時間 $t_e=0\sim 0.50$ ms), ②準定常期間 ($t_e=0.50\sim 0.75$ ms), ③噴射終了期間がある. ①噴霧初期において, 燃料はノズルから円柱状に噴射されている. この円柱形状はほぼ軸対称である. $t_e=0.32$ ms 頃から噴霧のコーン角は広がり始めている. このころから噴霧は旋回方向の運動が見られる. $t_e=0.40$ ms から 0.98ms 頃までは噴射期間中であるため, 噴霧は準定常状態を示し, 噴霧角に大きな変動は見られない. 噴霧表面は均質な状態ではなく, 凹凸を含んだ表面を示している. 噴射期間終了後, 噴霧コーン角は徐々に小さくなっていく.

次に, 噴霧初期におけるホローコーン噴霧形成過程を詳細に把握するため, 光源をレーザーシートにして撮影した画像を示す. これらの画像は, レーザシート光を光源としているため, 噴霧の左側断面を表している. また, 燃料噴射圧力の違いによるノズル出口近傍燃料挙動を調べた. 撮影速度: 1Mfps, 露光時間: 0.25 μ s である. 図8に噴射初期から液膜が十分発達するまでの液膜断面の画像を時系列で示す.

まず, 燃料噴射圧力が 5.0MPa の場合, ノズルから旋回方



(a) Ar-ion laser beam (b) Ar-ion laser sheet
 Fig. 6 Experimental setup of light source and captured images

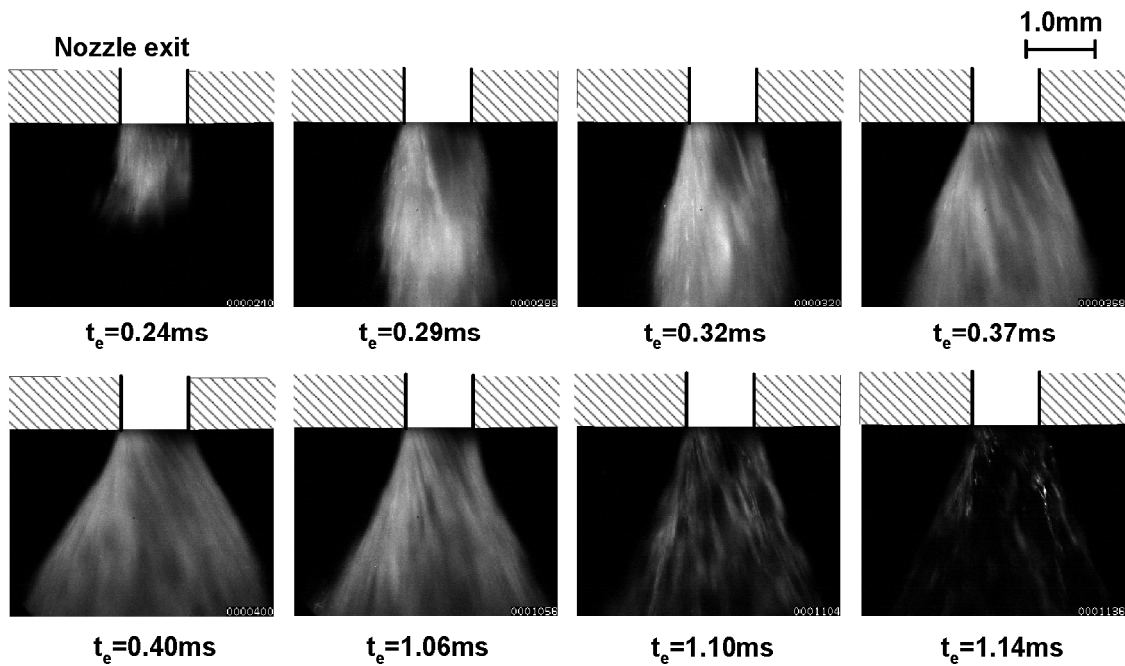


Fig. 7 Temporally resolved primary structure near nozzle exit

向速度成分を持たない中空円柱状の燃料が噴射される。本研究で用いたスワール噴射弁は、いわゆる先立ち噴霧ができるだけ少なくなるように設計されているため、先立ち噴霧はあまり観察されない。 $t_e=0.388\text{ms}$ 頃から噴霧は中空円錐状のホローコーン状噴霧となっている。 $t_e=0.452\text{ms}$ においては、噴霧は噴霧角のほとんど変動しない準定常状態にある。この際に、液膜厚さおよび長さの変動を計測することができる(次節にて詳述する)。燃料噴射圧力を高くすると、実際の燃料噴射開始時期は早くなる。燃料噴射開始時期(噴射開始信号

からの遅れ時間: 図中で矢印で示す。)は噴射圧が 5.0MPa で約 0.23ms, 3.0MPa で約 0.26ms, 1.0MPa で約 0.31ms となり、噴射圧によって液膜の広がり角が発達する時期が異なることが確認できる。どの噴射圧でも十分液膜が発達するとほぼ一定の広がり角で、安定して液膜を形成する状態(準定常状態)になる。

次に液膜断面の画像から液膜の角度を測定することにより、液膜形成に及ぼす燃料噴射圧力の影響を調べた。この結果を図 9 に示す。5.0MPa と 3.0MPa はほぼ同じ傾向で変化し、

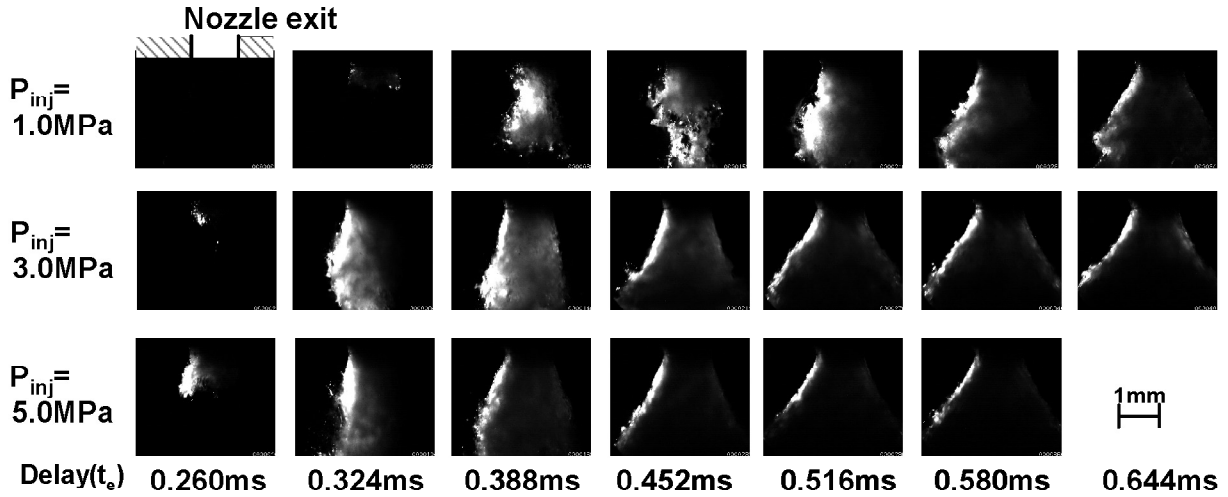


Fig. 8 Effect of injection pressure on initial state of the spray

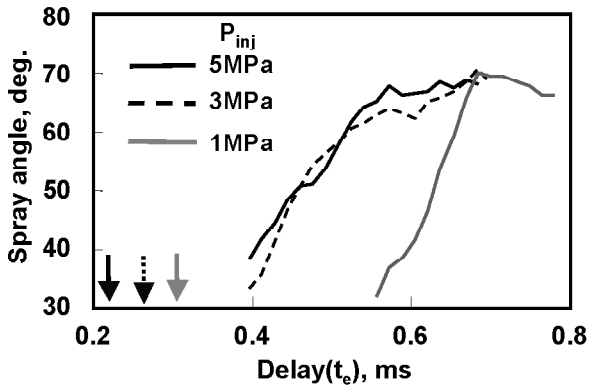


Fig. 9 Spray angle development

1.0MPaは5.0MPa, 3.0MPaより遅い時期に液膜が発達することが分かった。また準定常状態ではどの噴射圧でもおよそ60°~70°の噴霧角で液膜を形成することが分かった。この理由は、噴射圧が高いほうが燃料の噴出速度が高いために準定常状態への遷移期間が短くなると考えられる。

以上のように、高速度ビデオカメラと長距離顕微鏡を用いることにより、ノズル出口から噴射される燃料の発達過程、つまり液膜形成過程を把握することができる。

3. 2 準定常期間中の液膜厚さ・長さ

噴射弁内のニードルが開いている噴射期間中では、噴霧コーン角は準定常状態を表し、噴霧コーン角は一定値を示す。そこで、準定常期間における画像を用いることにより、スワール噴射弁のノズル出口近傍で形成される液膜長さおよび厚さを計測する。ここでは、まずカメラの撮影速度の違いが、液膜長さや厚さの測定値に与える影響を検討する。カメラ撮影速度125kfps(露光時間:1.0μs)および1Mfps(露光時間:0.25μs)により撮影した画像を図10に示す。これらの画像で液膜部分を拡大した図を合わせて示している。露光時間:1.0μsの場合、噴霧が静止画像にならずに流れてしまい、噴霧軌跡の像として撮影されていることが分かる。噴霧速度を仮に100m/sとすると、この露光時間(1.0μs)の間に噴霧は10ピクセル分進むことになる。この10ピクセルは、移動長さでは約100μmとなる。それゆえ、カメラ撮影速度が比較的

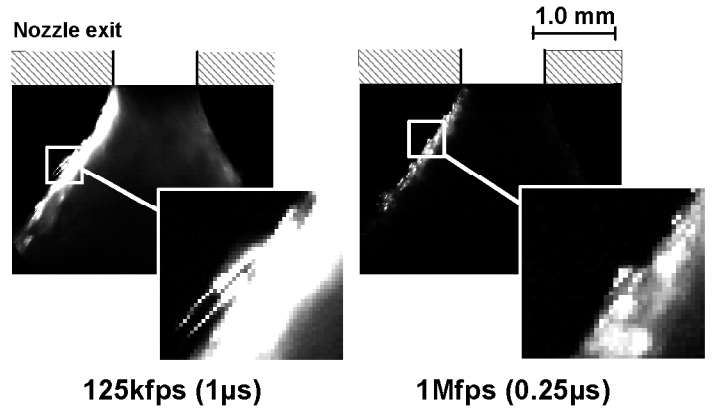


Fig. 10 Effect of camera speed on captured images

遅くなると、撮影した画像から求めた液膜長さには誤差を多く含むことが分かる。ここで、露光時間:0.25μsの場合、撮影速度が速いため、最大2.5ピクセル(約25μm)の誤差を有し、より瞬時の画像を撮影することができる。このため、ノズル出口に形成される液膜長さおよび厚さの測定には、カメラ撮影速度を1Mfps(露光時間:0.25μs)によって得られた画像を用いている。

次に準定常期間中におけるノズル出口近傍液膜長さおよび厚さの測定方法を説明する。光源には、Arionレーザのシート光を用い、カメラの撮影速度は1Mfps(露光時間:0.25μs)としている。撮影される画像は、輝度分布を持つグレイスケールの画像となる。液膜表面を明確にするために、二値化処理を行った。しきい値に関しては、しきい値を変化させることにより得られる液膜長さに与える影響を調べて決定した。しきい値を変化させた場合に液膜長さに与える影響を図11に示す。同図には、しきい値を変化させた場合の二値化画像も合わせて示している。ここで、しきい値を高くすると液膜長さは短くなっていることが分かる。これより、しきい値を128として、液膜長さ、厚さの解析を行った。液膜長さは、ノズル出口から連続している部分の長さとして決定した。液膜はその不安定性により時間的に長さおよび厚さに変化している。

ここで液膜が準定常状態での長さおよび厚さの平均を、各噴射圧ごとに測定した。それぞれ300枚の画像から液膜の長さ

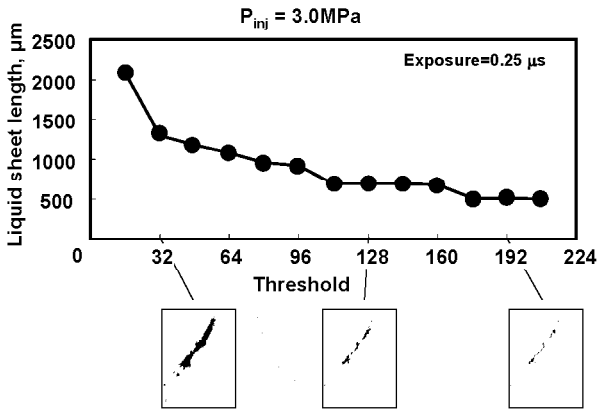


Fig. 11 Effect of threshold level on revised image

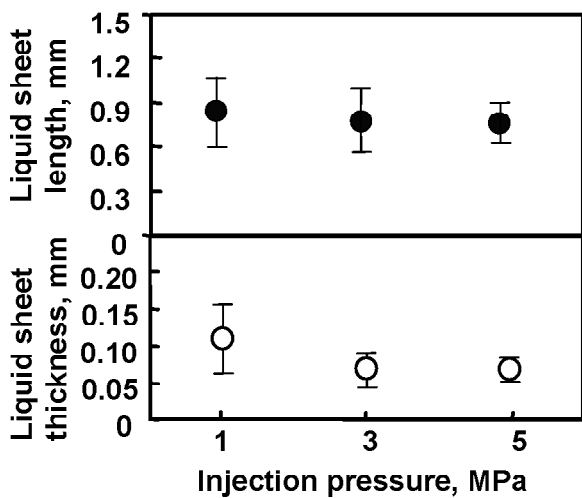


Fig. 12 Length and thickness of liquid sheet

厚さを測定した。図 12 にその結果を示す。この結果から液膜の平均長さは噴射圧が高いほど準定常状態で若干短くなることが分かった。理由としては界面（液膜とそのまわりの空気の境界）で生じるせん断力が影響していると思われる。噴射圧が高いほど液膜の噴出速度が速くなり、せん断力は大きくなる。したがって液膜は噴射圧が高いほど分裂しやすくなり、液膜の長さも短くなると考えられる。また液膜の平均厚さは噴射圧が 1MPa の場合が最も厚く、3.0MPa と 5.0MPa ではほぼ同じ厚さになることが分かった。これはノズル内を燃料が通過するとき生じる遠心力によるものと考えられる。燃料はノズル内ですでに旋回成分を持っているため、噴射孔の壁に沿って旋回しながら噴射される。このとき噴射圧が高いほど、旋回成分は大きくなり遠心力も増加する。そのため噴射孔内部の壁に沿って噴出される液膜の厚さは薄くなると考えられる。以上のことから噴射圧が高いほど液膜の微粒化が促進されることがいえる。

本研究では撮影速度 1Mfps で画像撮影を行っているため、液膜長さの周期的な変動を計測することができる。図 13 に、時系列での液膜長さを示す。これより、ノズル近傍に形成される液膜は、時間経過に伴い液膜長さが長くなると分裂して急激に短くなり、再度時間経過とともに長くなる傾向を示す。

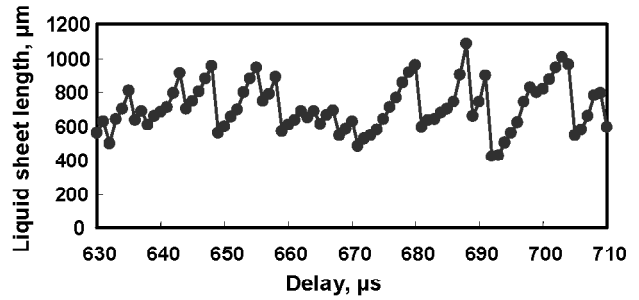


Fig. 13 Fluctuation of liquid sheet length

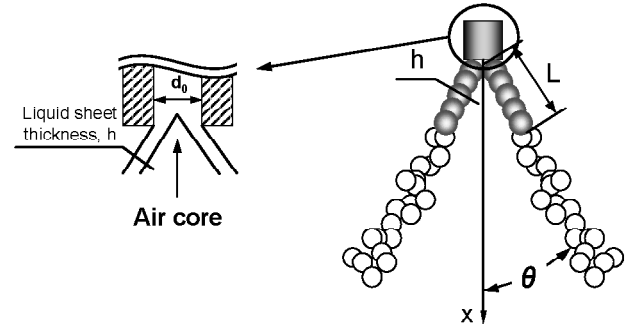


Fig. 14 Blob model⁽¹⁹⁾

これより、周期的に変動する液膜長さを把握することができる。

本研究により得られた燃料噴射圧 5.0MPa 時における平均的なノズル出口液膜長さは 760μm、厚さは 69μm となった。ここで、Han らのモデル⁽¹⁹⁾により得られる液膜長さと比較する。Han らの円錐液膜の微粒化と分裂モデルを図 14 に示す。円錐液膜は、ノズル出口で長さ L と厚さ h の形態をとると仮定する。平均噴霧角 2θ をノズルの内部形状より決定する。ここで、完全な液膜と仮定する代わりに、液膜厚さ h と同じ大きさの直径である分離した液滴が噴射されるとする。これらの液滴群が液膜を示し、抗力の影響はないと仮定する。液膜厚さ h と液膜長さ L は以下の式で定義される。

$$h = \left[A \frac{12}{\pi} \frac{\mu_l \dot{m}}{d_0 \rho_l (p_1 - p_2)} \frac{1+X}{(1-X)^2} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$L = B \left[\frac{\rho_l \sigma_l \ln(\eta/\eta_0) h \cos \theta}{\rho_g^2 U^2} \right]^{0.5} \quad (2)$$

ただし、A：幾何学係数で文献(19)より 40、 d_0 ：ノズル出口径、 μ_l ：燃料の粘性係数、 \dot{m} ：燃料の質量流量、 σ ：燃料の表面張力、 η ：液膜が分裂するときの振幅であり、 η_0 は初期値を示し、パラメータ $\ln(\eta/\eta_0)$ は Han らの結果⁽¹⁹⁾より 12 とした。また、B は定数で文献(19)より 3、 ρ_g は気相密度、U は気液相対速度である。

まず、実験結果より液膜厚さの平均値は、 $h = 69 \times 10^{-6} [m]$ であることよりパラメータ X は、

$$X = \left(1 - \frac{2 \times 69 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3}} \right)^2 \approx 0.743 \quad (3)$$

続いて、式(1)より液膜厚さ h は、

$$h \approx 96 \times 10^{-6} [m] \quad (4)$$

ここで、周囲気体である空気の色度を $V_g = 0$ とすると、気液相対速度 U 、燃料液膜速度 V_0 と等しくなるので、式(2)より、

$$L \approx 2.8 \times 10^{-3} [m] \quad (5)$$

実際に計測した液膜厚さ $h = 69 \mu m$ の値を用いて算出した液膜厚さは、 $h = 96 \mu m$ と厚くなる結果が得られた。また、液膜長さは、実際に計測した $L = 760 \mu m$ に比べて、算出された液膜長さ $L = 2800 \mu m$ と非常に長くなる結果が得られた。このように、実際の計測結果と算出された結果では、算出された値の方が大きくなる。この原因は、計算過程において無視した燃料の旋回方向の流れであると考えられる。

以上の理由より、Han らのモデルを用いて液膜厚さ、液膜長さを算出した場合、液膜厚さはやや大きい値を示しているが、液膜長さは実際の計測結果より明らかに大きく見積もる傾向がある。

3.3 液膜の不安定性

スワール噴射弁において非常に速い速度で燃料が噴射される場合、液膜と周囲気流体との間のすべり速度が大きくなり、液膜は Kelvin-Helmholtz の不安定性を示すと言われている⁽⁶⁾。この不安定性により液膜表面には振動現象が見られる。この液膜表面の振動状態を把握することができれば、液膜の不安定性の理解につながる。そこで、光源をレーザービームとすることで、液膜表面の可視化を行った。撮影条件は、撮影速度：1Mfps、露光時間：0.5 μs である。図 15 に撮影した画像を示す（燃料噴射圧力 5MPa）。画像中、明るい部分は液膜厚さが薄く、暗い部分は厚くなっている。画像下の部分は長距離顕微鏡の被写体深度不足のため、ぼやけている。画像より、液膜表面に波動が観察できており、液膜が振動している様子が分かる。一枚の図では表しにくいので、連続撮影していることで、波動が動いている様子を観察することができる。燃料噴射圧力が液膜表面波動に与える影響を把握するため、図 16 に各燃料噴射圧力条件下における液膜画像を示す。これらの画像からどの噴射圧でも液膜表面の凹凸を確認することができる。この凹凸は液膜の不安定性により生じるものであり、液膜の初期分裂過程における重要な現象を可視化することができた。液膜表面波動の波長計測方法を図 15 に示す。図 17 は図 15 における破線部の画像強度分布を示している。この画像強度分布より波動の波長 λ を把握することができる。破線位置は

得られる画像から強度も強く、鮮明に移っている位置とし、各条件でも統一している。またベルヌーイの式を用いて燃料の噴出速度を計算し、表面波動の波長と燃料の噴出速度から

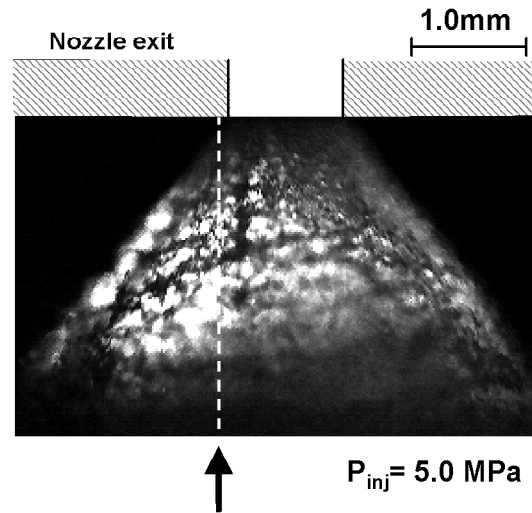


Fig. 15 Surface wave of liquid sheet

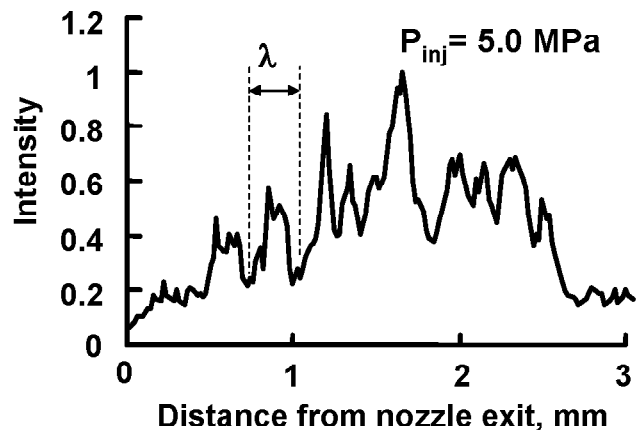


Fig. 17 Intensity profile of the image

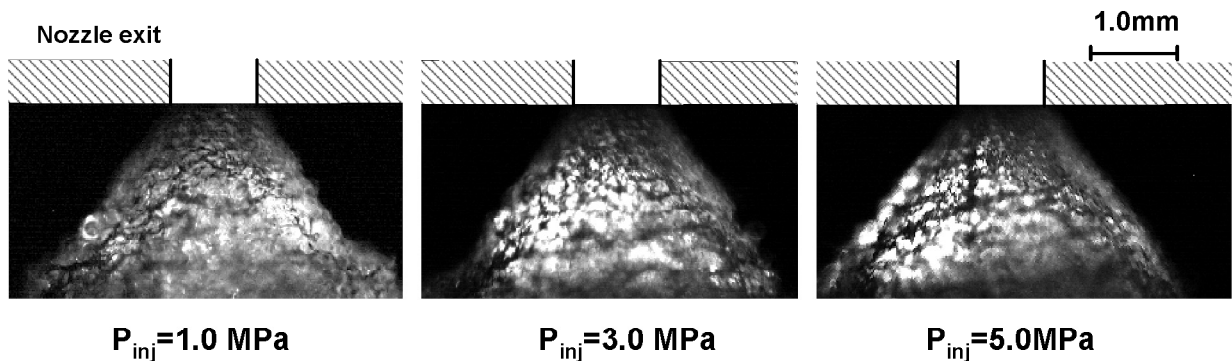


Fig. 16 Effect of injection pressure on surface wave of liquid sheet

表面波動の周波数を求めた。その結果を図 18 に示す。液膜の表面波動の波長は 5.0MPa で 0.20mm, 3.0MPa で 0.15mm, 1.0MPa で 0.13mm であった。この結果から噴射圧が高いほど表面波動の波長が若干長いことが分かった。この液膜表面に生じる波動と下流での液膜分裂の関係を把握するために、インジェクタを 45 度傾けて設置し、下流での液膜分裂状態を可視化した (図 19)。図 15 で示すように、用いた長距離顕微鏡の被写体深度はそれほど大きくない (約 100 μ m) ため、インジェクタを傾けて設置することで、液膜分裂の様子を撮影した。この場合、光源にはレーザーシート光

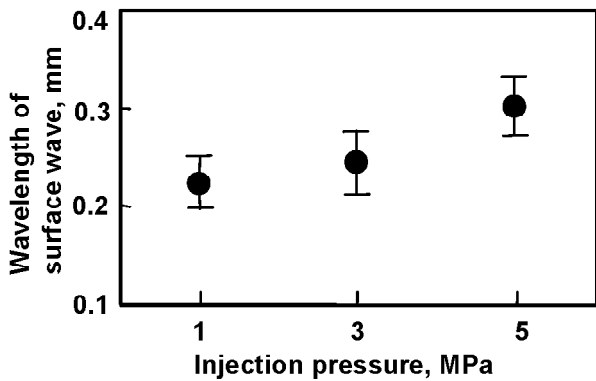


Fig. 18 Wavelength of surface wave of liquid sheet

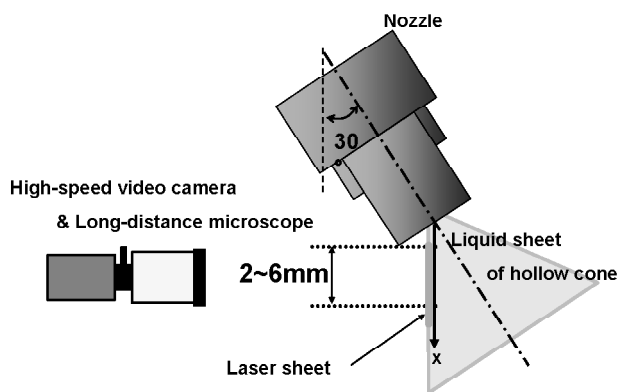


Fig. 19 Experimental set-up of visualization liquid sheet surface

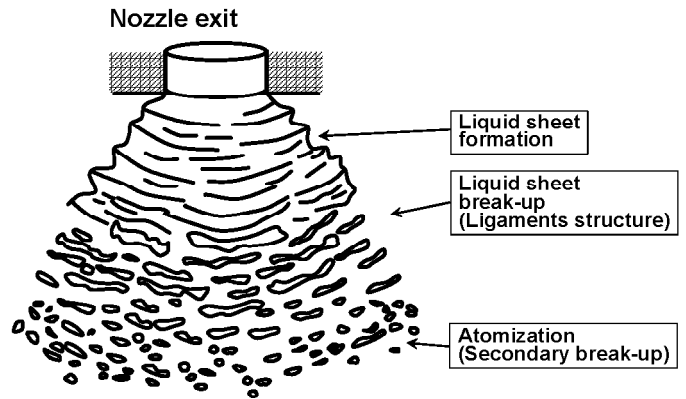


Fig. 21 Model of liquid sheet break-up

(シート厚さ: 約 50 μ m) を用い、液体に照射しているため、白く見える部分が液体の部分である。ここで、レーザー照射位置を変化させ、白く見える部分が液体であり、黒く見える部分には何も存在しないことを確認している。図 20 に各燃料噴射圧力でのノズルから 2~6mm の地点での液膜分裂の様子を示す。液膜表面に生じた波動の影響で液膜は分裂していき、液糸形状になっていることが分かる。

以上のように、超高速カメラと長距離顕微鏡を用い、光源を工夫することにより、実用インジェクタの実用条件における液膜表面に生じる不安定性に起因する表面波動を観察することが可能になった。最後に、スワールインジェクタが形成する液膜分裂構造に関して、モデル図 (図 21) を示す。ノズル内部で旋回方向速度を与えられた燃料はノズル出口において液膜を形成する。この液膜は時間的にも変動しており、周期的な分裂を示している。この液膜表面には表面波動が生じ、液糸 (棒状の液塊) へと分裂していく。この液糸がその後、液滴に分裂していく。

4. まとめ

実機エンジンに用いられるスワール噴射弁が形成する噴霧構造を詳細に把握するために、最大撮影速度 1Mfps を有する高速ビデオカメラと長距離顕微鏡を用いて実験を行った。得られた知見を以下に示す。

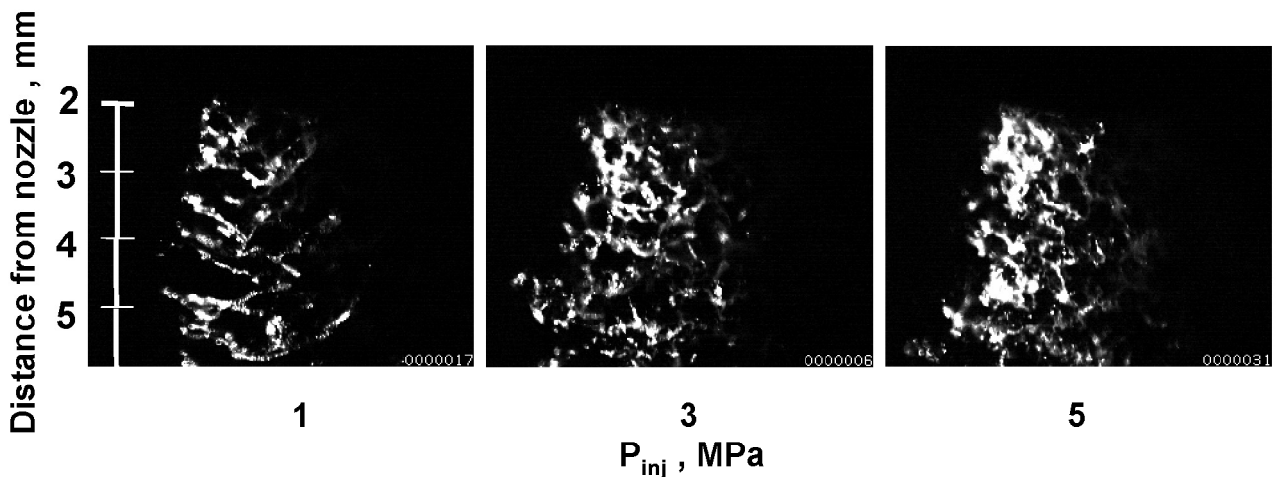


Fig. 20 Effect of injection pressure on liquid sheet break-up

- (1) 高速度ビデオカメラと長距離顕微鏡を組み合わせることにより、燃料の噴射過程を詳細に把握することができた。まず旋回成分を有しない燃料塊が噴射され、徐々にホローコーン噴霧を形成している。その後、燃料噴射は準定常状態を示し、ホローコーン角に変化は見られない。
- (2) 実機運転条件における噴射期間中のノズル出口液膜長さおよび厚さを計測することが可能になった。画像により計測された液膜長さは Han らのモデルより短くなっている。
- (3) 液膜の不安定性に起因する液膜表面波動を観察することができた。この液膜に生じる表面波動に起因し、液糸へと分裂していく。

謝 辞

本研究の一部は、岡山大学工学部超高速現象画像情報計測システムを利用して行われた。また本研究は、当時本学に在籍していた笠原大輔君の協力によるものである。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Zhao, F., Harrington, D. L., Lai, M.-C., Automotive Gasoline Direct-Injection Engines, Society of Automotive Engineers, Inc., (2002).
- (2) Kume, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, M., Akishino, K., and Ando, H., Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper No. 960600, (1996).
- (3) Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T., and Ando, H., Development of Gasoline Direct Injection Engine, SAE Paper No. 970541, (1997).
- (4) Stan, C., Direct Injection Systems – for Spark-Ignition and Compression-Ignition Engines -, Society of Automotive Engineers, Inc., (1999).
- (5) 日本液体微粒化学会編, アトマイゼーションテクノロジー, 森北出版, (2001).
- (6) H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- (7) Chigier, N., Atomization of Liquid Sheets, Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena, Volume 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., (1996), pp.241-259.
- (8) Hentschel, W., Optical Diagnostics for Combustion Process Development of Direct-Injection Gasoline Engines, Proc. of the Combustion Institute, 28, pp.1119-1135, (2000).
- (9) Ipp, W., Wagner, V., Krämer, H., Wensing, M., Leipertz, A., Arndt, S., Jain, A.K., Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques, SAE Paper No. 1999-01-0498, (1999).
- (10) Ikeda, Y., Hosokawa, S., Sekihara, F., and Nakajima, T., Cycle-resolved PDA Measurement of Size-Classified Spray Structure of Air-Assist Injector, SAE Paper No. 970631, (1997).
- (11) VanDerWege, B.A., and Hochgreb, S., Effects of Fuel Volatility and Operating Conditions on Fuel Sprays in DISI Engines: (2) PDPA Investigation, SAE Paper No. 2000-01-0536, (2000).
- (12) Kubo, M., Sakakida, A., and Iiyama, A., Technique for Analyzing Swirl Injectors of Direct-Injection Gasoline Engines, SAE Paper No. 2001-01-0964, (2001).
- (13) O'Rourke, P.J., and Amsden, A.A., SAE Paper No. 872089, (1987).
- (14) Lai, M.-C., Wang, T.-C.T., Xie, X., Han, J.-S., Henein, N., Schwarz, E., and Bryzik, W., Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit, SAE Paper No. 982542, (1998).
- (15) Chang, C.T., and Farrell, P.V., Spray Characteristics and Near Injector Tip Effects of Injection Pressure and Ambient Density, Proc. Fourth Int. Symp. COMODIA 98, pp.465-470, (1998).
- (16) Fath, A., Fettes, C., and Leipertz, A., Investigation of the Diesel Spray Break-up Close to the Nozzle at Different Injection Conditions, Proc. Fourth Int. Symp. COMODIA 98, pp.429-434, (1998).
- (17) Schmitz, I., Ipp, W., and Leipertz, A., Microscopic Investigations of Primary Gasoline Spray Breakup of a High-Pressure Swirl Injector, Proc. of 8th ICLASS, in CD-rom, (2000).
- (18) Gavaises, M., Abo-serie, E., and Arcoumanis, C., Nozzle Hole Film Formation and its Link to Spray Characteristics in Swirl-Pressure Atomizers for Direct Injection Gasoline Engines, SAE Paper No. 2002-01-1136, (2002).
- (19) Han, Z., Parrish, S., Farrell, P.V., and Reitz, R.D., Modeling Atomization Processes of Pressure-Swirl Hollow-Cone Fuel Sprays, Atomization and Sprays, 7, pp.663-684, (1997).
- (20) Schmidt, D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, C.J., Martin, J.K., Reitz, R.D., and Hoffman, J.A., Pressure-Swirl Atomization in the Near Field, SAE Paper No. 1999-01-0496, (1999).
- (21) Gravaies, M., and Arcoumanis, C., Modeling of Sprays from High-Pressure Swirl Atomizers, Int. J. Engine Research, vol. 2, No. 2, pp.95-117, (2001).
- (22) Moriyoshi, Y., Hu, X., and Takagi, M., Experimentally Evaluated Spray Model for a Swirl-Type Injector, SAE Paper No. 2002-01-2696, (2002).
- (23) Kawahara, N., Tomita, E., Nakayama, T., and Sumida, M., Microscopic Observation of Primary Spray Structure of High-Pressure Swirl Injector for Gasoline Direct Injection Engine, The 9th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS 2003), in CD-rom, (2003).
- (24) Kawajiri, K., Yonezawa, T., Ohuchi, H., Sumida, M., and Katashiba, H., Study of Interaction Between Spray and Air Motion, and Spray Wall Impingement, SAE Paper No. 2002-01-0836, (2002).



河原 伸幸
 岡山大学大学院自然科学研究科産業
 創成工学専攻 准教授
 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8235
 FAX: 086-251-8266
 Mail: kawahara@mech.okayama-u.ac.jp
 略歴: 1997年 神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学), 主として熱流体现象のレーザー計測, 熱機関, 液体燃料の微粒化に関する研究に従事。



富田 栄二
岡山大学大学院自然科学研究科産業
創成工学専攻 教授
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
電話: 086-251-8049
FAX: 086-251-8266
Mail: tomita@mech.okayama-u.ac.jp
略歴: 1981年 京都大学大学院機械
工学専攻修士課程修了, 工学博士,
主として熱機関, 燃焼のレーザ計測, モデリングに関する
研究に従事.



住田 守
三菱電機株式会社姫路製作所アクチ
ュエータ製造部 インジェクタ統括
〒670-8677 姫路市千代田町 840
電話: 079-298-9404
FAX: 079-298-9799
Mail: Sumida.Mamoru@eb.MitsubishiElectric.co.jp
略歴: 1981年 京都大学大学院機械
工学専攻修士課程修了, 主としてガソ
リンエンジン用インジェクタの研究開発に従事.