

圧縮着火機関における燃料噴霧の基礎特性*
(噴射初期におけるディーゼル噴霧の構造)

Fundamental Characteristics of Fuel Spray in as CI Engine
(Structure of Diesel Spray at Initial Stage of Injection)

成宮 喜久男
Kikuo NARUMIYA

An experimental study was conducted to analyze the mechanism of the fragmentation of the injected fuel . The diesel fuel was injected into an optically-accessible bomb at room temperature for various ambient pressures . A spray was photographically observed until about 100 μ s after the start of injection by using pulsed Nd:YAG laser. The results obtained are shown as follows ; (1)The intact liquid core which shaped as a pillar could be observed clearly until about 70 μ s after the start of injection. (2)The first fragmentation of the injected fuel began at the tip of the liquid core. (3)The fuel droplets fractured at the liquid core tip were spreaded almost in a spherical shape which diameter was about 2.5 times of the one of liquid core. (4)The group of fuel droplets scattered outside of liquid core stayed around the liquid core and formed the spray.

* 平成8年8月原稿受理
大阪産業大学 工学部

1. まえがき

圧縮着火機関において、燃焼室内に噴射された燃料の噴霧特性は、その後の着火、燃焼過程および汚染物質の排出量を支配する重要な因子である。実機での混合気形成に要する時間を考慮すると、噴射直後の初期段階の噴霧の発達過程や微粒化機構を詳細に解析することは重要な課題である⁽¹⁾。しかしながら、高压下での高速かつ非定常な現象のため計測が困難で、噴射開始直後の噴霧の発達過程について詳細に時系列的な解析をした報告は少なく、不明な点が多いと思われる^{(2)~(4)}。噴孔出口近傍での燃料の噴出過程およびその発達過程が明らかとなれば、巨視的な噴霧形成さらには燃料噴射装置の改善に寄与するものと考えられる。このため本研究では、同一噴霧の連続撮影と単発撮影の両面から噴射後の初期段階の噴霧特性を調べている。筆者らは現在までに、連続撮影による観察では超高速イメージカメラを用いて、噴射開始後 $150\mu\text{s}$ までの噴霧先端到達距離と微粒化の過程に関する基礎的情報を得ており^{(5)~(7)}、また単発撮影では、EXIPLEX法⁽⁸⁾などによりノズル近傍における噴霧の内部構造の解析を行い、ノズル噴孔近傍の噴霧の分裂過程に関する情報も得ている^{(9)~(11)}。

本報告では、燃料の分裂過程を明らかにするために、噴霧の形成の原点となるノズル噴孔から噴出する燃料を拡大撮影し、その発達過程を調べた。噴霧の鮮明な静止画像を撮影するため、撮影用光源にYAGパルスレーザーを用いた。そのシート光を噴霧中心軸に沿って照射し、噴射開始から約 $100\mu\text{s}$ までの噴霧断面を拡大、単発写真撮影した^{(12), (13)}。その結果、噴射直後の噴霧の初期発達過程の機構に関して新しい知見を得た。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の構成を示す。観察用高压容器の内部は、直径 90mm 、高さ 482mm の円筒形で、その上部に観察用のメインノズルが取り付けられている。メインノズルは単孔ホールノズル（噴孔径 $d=0.3\text{mm}$ 、噴孔長さ $l/d=2.5$ ）で、燃料の軽油は鉛直下方向に噴射さ

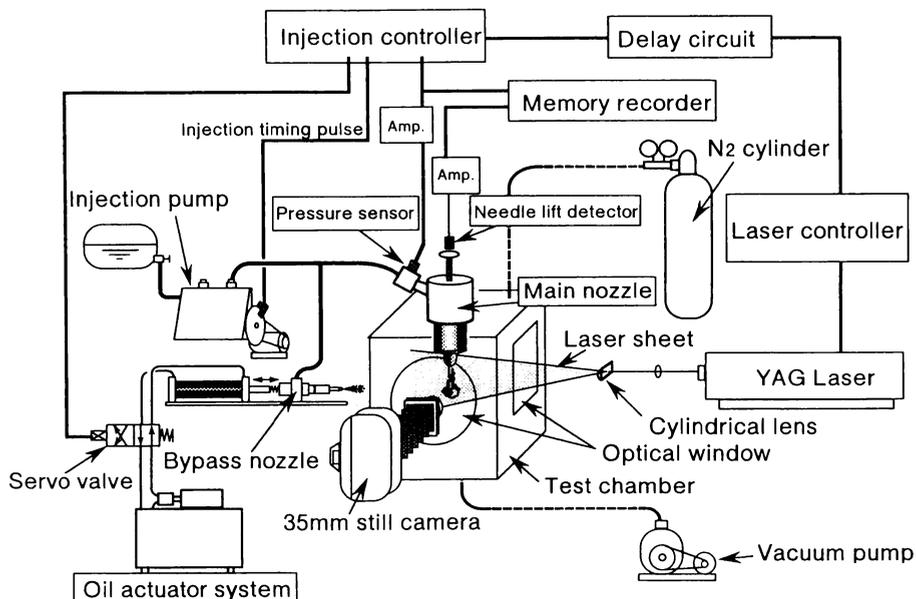


図1 実験装置の構成

れる。メインノズルの開弁圧 P_o は 32 MPa で、一回だけ噴射した。一回噴射の方法は以下の通りである。一台の噴射ポンプにメインノズルとバイパスノズルを接続し、メインノズルの開弁圧をバイパスノズルの開弁圧より高く設定する。撮影時、すなわち一回噴射時には、バイパスノズルの開弁圧を油圧アクチュエータで一時的に高くし、開弁圧の大小関係を逆転させる。これにより燃料はメインノズルから噴射される。撮影後は再び開弁圧を逆転させることにより、メインノズルからの噴射は行われない。

雰囲気ガスは常温の窒素を充填した。噴霧観察用の光源には、YAG レーザ（波長； $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、パルス幅 = 6 ~ 7 ns）のシート光を用いた。シート光の厚さは、噴口径が 0.3 mm であることを考慮して、円筒面レンズと高压容器内部に設けたスリットにより観察部で 0.2 mm に設定した。噴霧からの散乱像はシート光と直角方向の観察窓から 35 mm スチルカメラで撮影した。撮影倍率は、フィルム膜面上で約 6.8 倍である。実験条件は、雰囲気圧力 P_a を変化させ、3.0 と 1.0 MPa の二種類を設定した。表 1 に実験条件と装置の主要諸元をまとめて示す。

表 1 実験条件および装置の諸元

Injection System			
Injection Pump Speed		645min ⁻¹ (Type PES)	
Injection Nozzle		Single Hole Nozzle (DLL-S type)	
Nozzle Hole Diameter	d	0.3mm	
Nozzle Hole length	l	0.75mm	l/d = 2.5
Nozzle Opening Pressure	Po	32 MPa	
Fuel		Diesel Oil JIS # 2	
Ambient Pressure	Pa	1.0, 3.0MPa	
Ambient Gas		Nitrogen	
Ambient Gas Temp.		Room Temperature	
Imaging System			
Lighting Source		Nd:YAG Laser (532nm)	
Pulse Width		6~7nsec	
Laser Sheet Width		0.2mm	
Imaging Magnification		X6.9 (On the 35mm film sheet)	

3. 実験結果

3.1 噴射装置の特性

単発噴射を行う場合、噴射ごとの再現性が問題となる。本バイパス方式で単発噴射した場合の、ノズルホルダ直前の噴射管内圧力をノズルニードル弁のリフト波形とともに図 2 に示す。図に示すように、噴射開始前には噴射系内に残留圧力が保たれており、噴射前の系内の状態が一定に保たれている。このため、噴射系内への空洞の混入が回避され、再現性に優れる噴射特性が得られた。

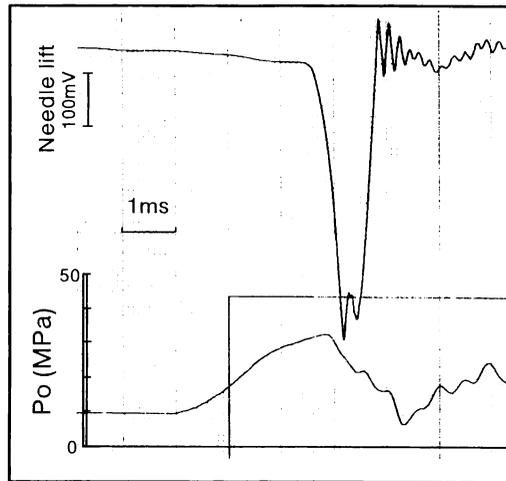


図2 噴射高圧管内の圧力およびノズルニードル弁リフトの記録波形

3・2 噴射開始時期および時間軸の定義

噴射開始直後の現象を微視的に解析する場合、噴射開始時期の決定が重要となる。ノズルニードル弁の立ち上がり時期は、緩やかで噴射開始時期の決定に誤差が生じる（図2）。そこで、高速度イメージカメラにより噴射直前から約 $150 \mu s$ までの噴霧像を撮影し、その先端到達距離を計測した。撮影速度は5万コマ/秒で、時間分解能は $20 \mu s$ である。図3にノズル開弁圧 $P_o = 3.2 \text{ MPa}$ における噴霧先端到達距離 l_t を示す。この期間では、 l_t の噴射毎の再現性は良好で、雰囲気圧 P_a による差は無いとみなせる。したがって噴射開始時期は、図3に示す噴霧先端到達距離と噴射開始後の時間を基準とし、単発写真撮影された噴霧像の長さから逆算して決定した。

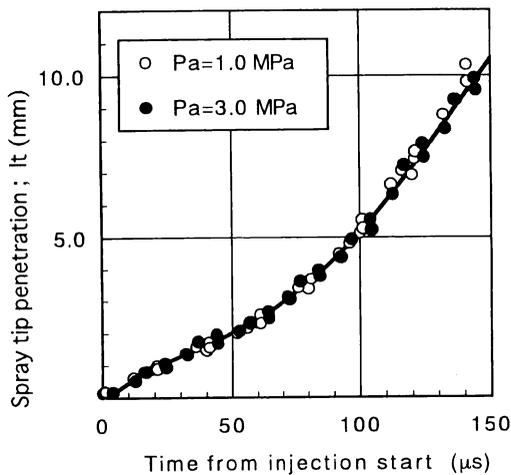


図3 噴霧先端到達距離 l_t ($P_o = 3.2 \text{ MPa}$)

3・3 噴射直後の噴霧の拡大撮影

図4に噴射開始から $55\mu\text{s}$ における拡大撮影した噴霧像を示す。雰囲気圧力 P_a は 3.0MPa である。レーザー光は画面の右から左方向に照射されている。噴霧像はレーザー光の光軸に対し 90° 方向の散乱光の強度分布を示す。この噴霧像は、ノズル噴孔出口部分からの直線的な輝度の低い部分と先端部の輝度が高い部分に分けられる。ここではノズル近傍の柱状部分では燃料が液柱を形成しており、先端のかさ状部分を既に分裂した噴霧群と見なした。この段階での噴霧は、その先端が噴孔出口から 2.1mm の位置に到達し、全体としてきのこ状となる。まず液柱部分に関して次のようなことがわかる。ノズル噴孔から噴出した燃料は噴孔径とほぼ同一直径($d=0.3\text{mm}$)の液柱を形成し、下流に行くにしたがわずかにその径は増加する。噴孔出口から 1.5mm の位置でその径は 0.41mm となる。液柱表面での乱れは小さく、図の液柱部両側に見られる直線的な光は液柱表面での反射光と考えられる。いっぽう、噴霧先端部では既に燃料が分裂しており、周辺への広がりが観察される。噴霧形状の特徴は、分裂した燃料液滴群が噴霧先端部を形成し、尖ったかさ状となる。噴霧軸中心部の輝度が高く、中心軸から離れるにしたがい低くなる。液柱から液滴へ分裂する部分の詳細は観察できないが、液柱先端部と噴霧群との相対位置から判断して、液柱からの分裂は急激に起こるようである。このことは噴霧の散乱範囲が円形と見なして最大 1.0mm で、前述の液柱の太さに対して約 2.5 倍に増加していることから類推できる。この分裂現象のメカニズムについては、現在のところ不明確であり今後解明すべき課題である。噴霧の中央部すなわちノズル噴孔から約 1mm の位置で液柱部周辺に散在する液滴群中の輝点の大きさは $10\sim 30\mu\text{m}$ である。

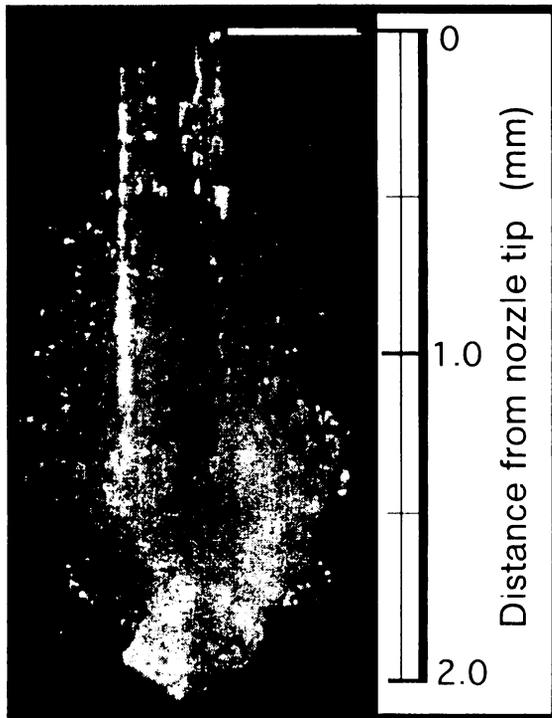


図4 噴射後の初期段階の噴霧の拡大写真 ($P_a = 3\text{MPa}$, $t = 55\mu\text{s}$)

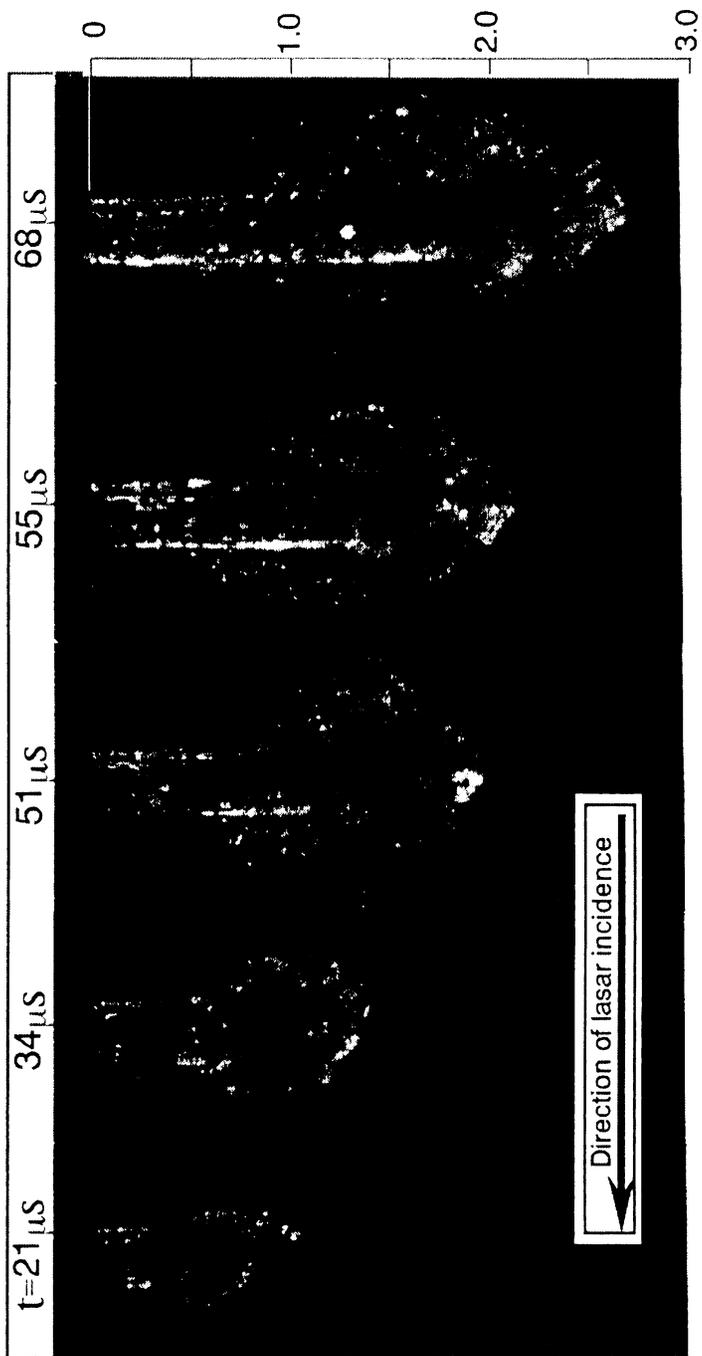
3・4 噴射初期の噴霧の発達過程

図5-1および図5-2に、噴射開始から約100 μ sまでの単発撮影された個々の噴霧像について、経過時間の順に整理して示す。Paは3.0MPaである。

噴射開始直後の21 μ s時において、既に噴射された燃料は液柱部と先端噴霧部とに分かれる。この時期では先端噴霧部は中央部が突出しておらず、噴出方向に対して押しつぶされたように扁平な形状を示す。わずかではあるが横方向への広がりが見られる。燃料の分裂は先端部から始まるといえる。液柱部は中央部で反射する光は見られず、その表面での乱れは小さい。また液柱部周辺には噴霧とみなせる液滴からの散乱光は観察されない。噴射開始後34 μ sでは液柱部が時間の経過とともに長くなり、その径が増加する。先端噴霧部の形状は外縁に凹凸が見られるもののほぼ円形状、すなわち軸対称と見なせば球状となっているものと考えられる。噴射開始後51 μ s経過すると、先端噴霧はやや先端が尖った菱形状となり、その側面には多数の凹凸やすじ状の燃料分布が見られる。先端噴霧の上流部には多数の燃料粒子が存在する。いっぽう、噴孔出口から先端部までの噴霧は、前画面と同様の燃料柱の状態であり、この段階でも液柱部からの微粒化は全く見られない。55 μ sの噴霧像は図4に掲載したものと同一であるが、この時期の噴霧像には共通した特徴が見られる。この特徴は、液柱部は先端噴霧群に突入した時点で急激にその径を小さくし、先端部に突出した球状の輝度値の高い輪郭が見られることである。これを明確に観察するためには、先端噴霧群の影響を受けないように、さらにレーザーシート光の厚さを薄くし、断面を観察する必要がある。

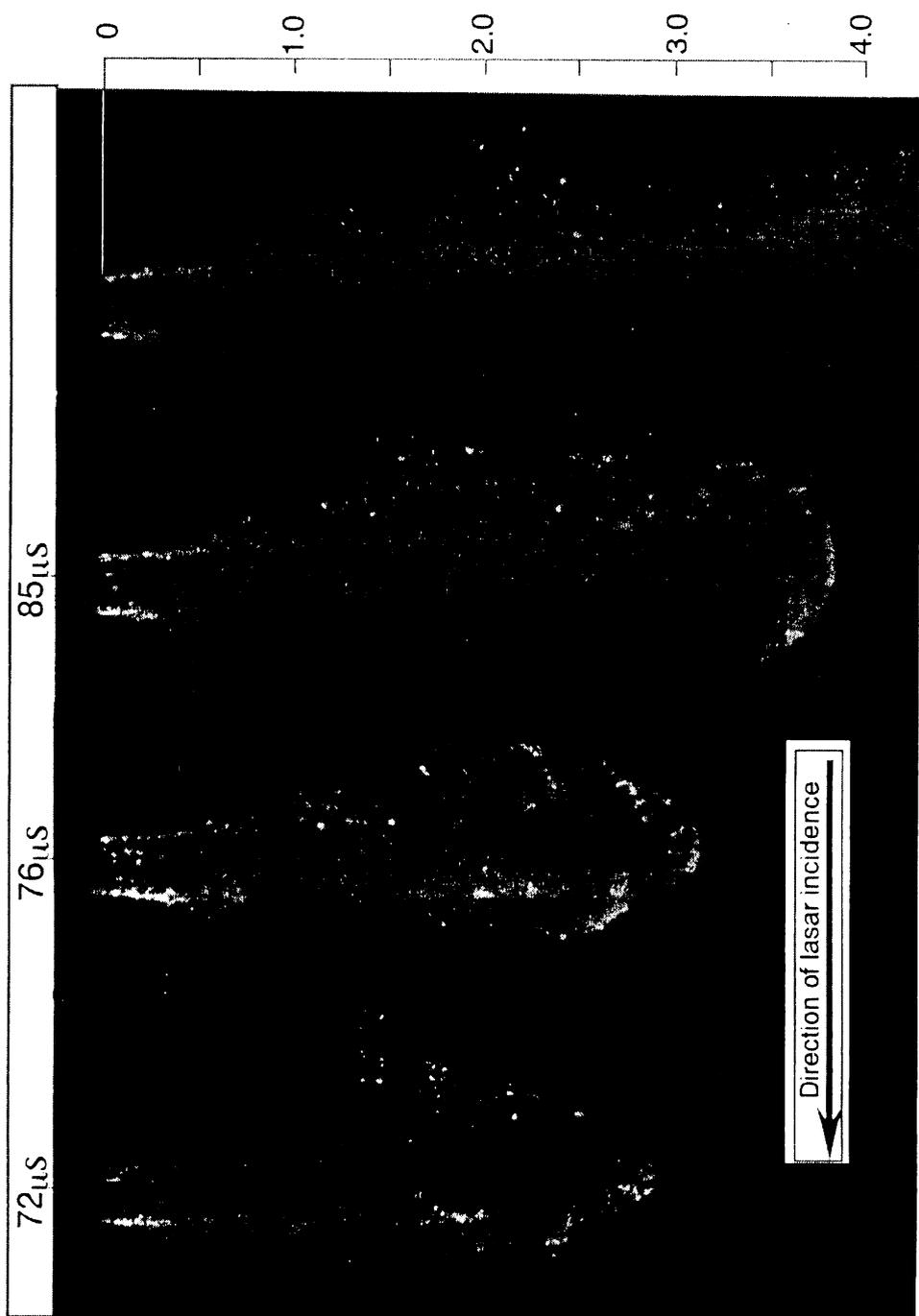
68 μ sでは、液柱部に輝度の高い部分が現れ、その側面にも凹凸と見られる輝度の不連続性が発生する。しかしながら、この時点でも液柱部での分裂はほとんど見られず、先端噴霧部の横方向への広がり小さい。液柱周辺部には液滴からの散乱が見られ、その範囲は時間の経過とともに広がる。72 μ sでは、噴孔出口部近傍を除く液柱部にも噴霧粒と思われる散乱光が見られ、時間の経過とともにその散乱光におおわれ液柱部の区別が不可能となる。この時点ではあまり活発ではないが液柱部の外縁の乱れの発生から判断して液柱部での分裂も生じているようである。76 μ s以降では、液柱部の輪郭が噴霧先端部方向ほど広い円錐状となり、燃料液滴が取り囲むように存在している。噴孔出口近くでは液柱と見られるわずかな輝度の低い部分が見られる。

図6にPa=1.0MPaの雰囲気圧力を低下させた場合の噴霧像を示す。散乱強度の小さい液柱状の燃料柱の噴出が見られ、14 μ sでは先端に高輝度の部分が見られるが、燃料粒子はほとんど存在せず微粒化のごく初期状態であると見なせる。Pa=3.0MPaに比べ先端部での分裂が遅れている。これは雰囲気密度が低下したため、空気を剪断するために受ける抵抗が小さくなったためと考えられる。先端部での高輝度部分の形状は、Paが高いときにくらべてやや滑らかな表面の球状を示す。しかし、噴霧の形状およびその発達過程に大きな差は見られない。



Distance from nozzle tip (mm)

図5-1 初期噴霧の成長過程 ($P_a = 3\ \text{MPa}$, $t = 21 \sim 68\ \mu\text{s}$)



Distance from nozzle tip (mm)

図 5-2 " " ($t = 72 \sim 85 \mu s$)

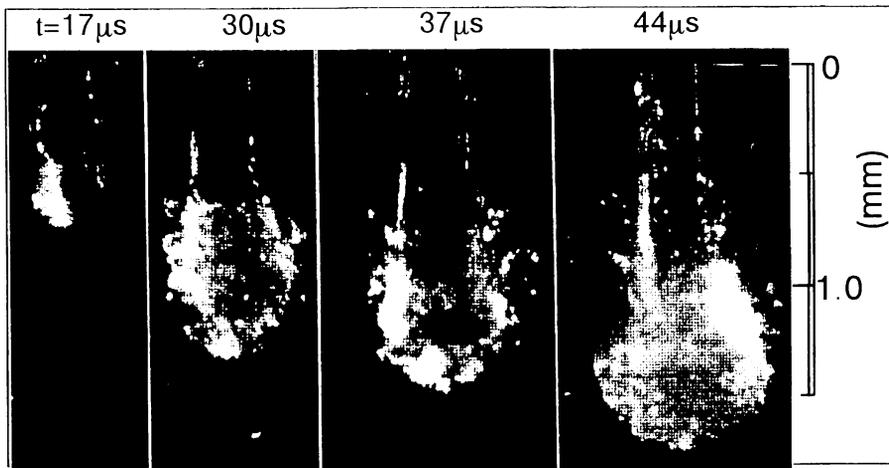


図6 初期噴霧の成長過程 ($P_a = 1 \text{ MPa}$, $t = 71 \sim 44 \mu\text{s}$)

3・5 噴霧先端部および液柱部の発達

レーザーシート光によって撮影された噴霧像から、初期噴霧を図7に示すように模式化した。このモデルでは噴霧を液柱部、先端噴霧部および液柱周辺の噴霧群部に分けた。液柱部はノズル出口の直径 D_n 、液柱先端部直径 D_c 、長さ l_c のテーパ状の円柱と仮定した。噴霧先端の膨らみ部は直径 D_t の球と仮定した。このモデルを基に各部分の成長過程を定量的に計測した。

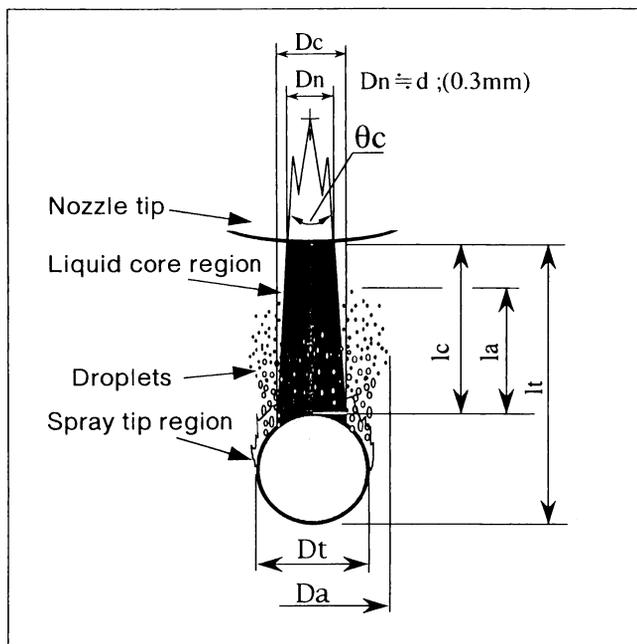


図7 初期噴霧の模式図

図8に先端噴霧部の直径 D_t の変化を示す。 D_t は噴射後の時間経過とともにほぼ比例して増加する。雰囲気気圧力による有意な差は見られない。

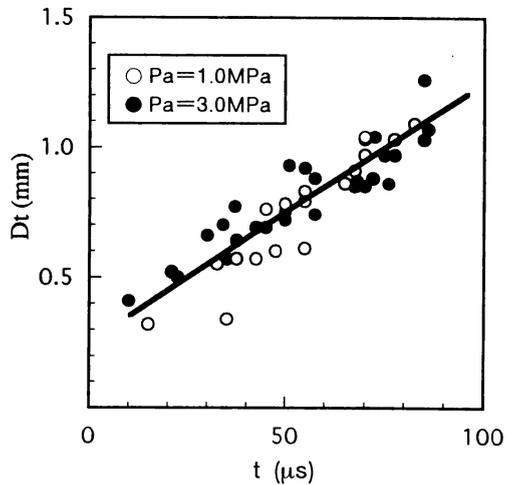


図8 噴霧先端部の直径 D_t の時間的变化

図9に液柱長さ l_c の時間的な変化を示す。図中には噴霧先端到達距離 l_t も同時に示した。液柱長さの増加傾向は、噴霧先端到達距離のそれとほとんど同様の傾向を示す。すなわち、 $60 \mu s$ まではほぼ時間に比例して増加し、それ以後勾配が急となる。これは、噴霧先端到達距離が増速過程になるのと同様、液柱長さもこの時期を境に急激に増速されることを意味する。雰囲気気圧力による影響はほとんど見られない。図10は液柱先端部の直径 D_c および液柱部の広がり角度 θ_c の時間的な変化である。図の上段に示す液柱先端部の直径は、図4において液柱部表面に強い乱れが見られなかった $70 \mu s$ まで 0.3 mm から 0.4 mm とわずかに増加する。 $70 \mu s$ を越えると液柱表面に乱れが生じるため見かけの直径は急激に大きくなる。下段に示す液柱部の広がり角度 θ_c は噴射後急激に増加し、約 $50 \mu s$ で最大となった後再び急激に減少する。これは、約 $60 \mu s$ 以降において図10に示す液柱長さおよび図9上段の液柱先端部の直径の両者とも急激に増加するが、液柱長さの増加割合が大きいことを示している。

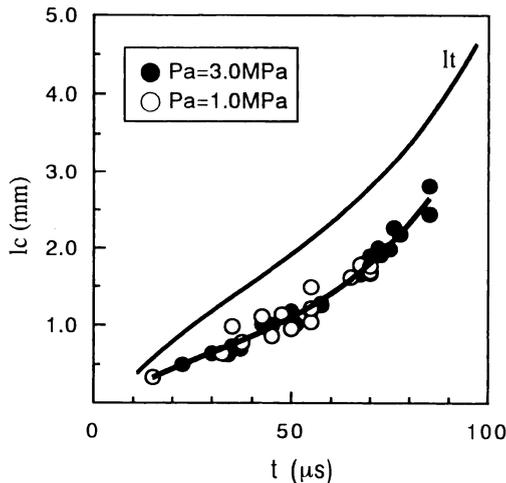


図9 液柱部の長さ l_c の時間的变化

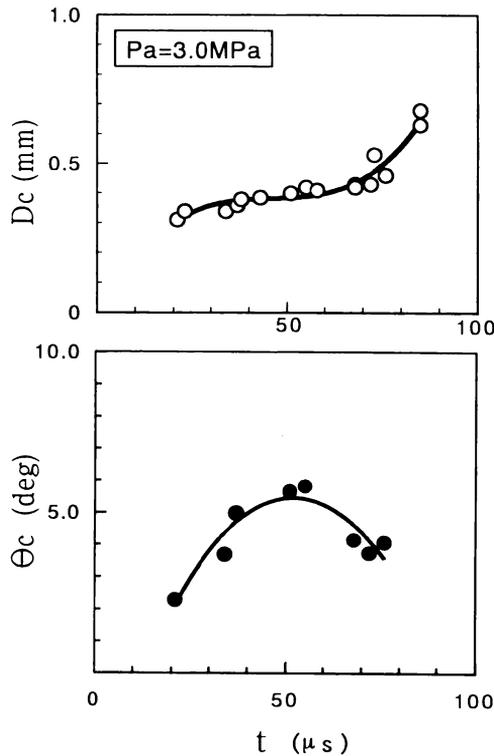


図10 液柱先端直径 D_c および液柱の広がり角度 θ_c の時間的变化

噴霧先端から液柱周辺に分布する液滴群の範囲に注目した。 $P_a = 3.0 \text{ MPa}$ において、図11に液柱先端から噴霧上流側（ノズル側）への噴霧の分布する長さ l_a 、図12に噴霧中心軸に対して噴霧の分布する最大外径 D_a を示す。 $50 \mu\text{s}$ 以前には液柱まわりに噴霧群が観察されなかった。両図から l_a および D_a の両者とも噴霧が観察されてから増加しており、その分布範囲が広がっていることを表している。図11を見ると、噴霧先端側は液柱長さに相当し、前述のように噴霧の成長とともに増加する。しかし、ノズル側は時間の経過に関係なく一定で、約 0.5 mm である。図4からも明らかなように、噴射開始後約 $70 \mu\text{s}$ まで液柱部での分裂は見られないことからノズル近くに存在する噴霧群は先だって微粒化した燃料が滞留しているものと考えられる。

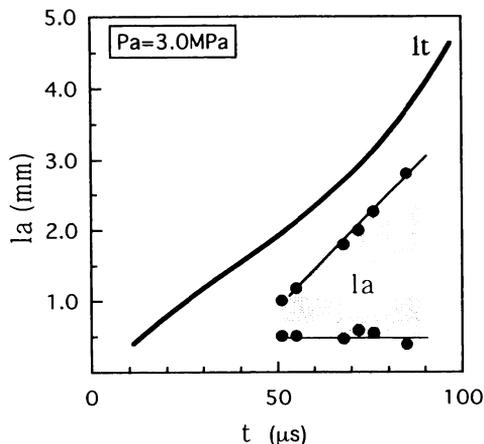


図11 噴霧粒子群の分布範囲 l_a （噴霧軸方向）

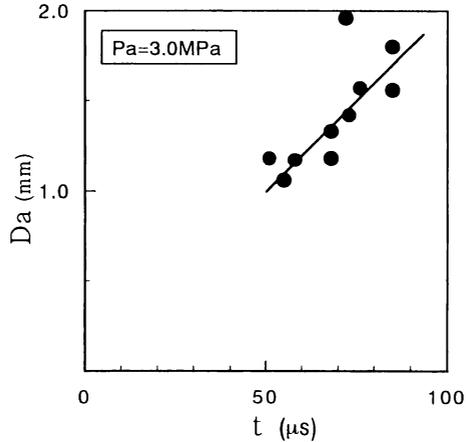


図1.2 噴霧粒子群の分布範囲Da (半径方向)

3.6 噴霧形成機構に対する一考察

以上のように噴射直後の噴霧を可視化した現象をまとめると以下ようになる。

噴射開始から約100 μsまでの観察期間においては、ノズル噴孔出口から噴出する燃料は、出口端で直接液滴に分裂するのではなく、液柱を形成し、その先端部から分裂、微粒化が起こる。この形態は、時間経過とともに噴出方向に成長するものの、噴射後約70 μsまで保持される。特に液柱部の成長が著しい。先端部で分裂した燃料液滴群は、最初球状の広がりを見せ、次第に先端の尖った形状を示す。その直径は液柱直径の約2.5倍となる。一連の噴霧像には液柱の分裂が発生していない時点でも液柱部周辺に燃料液滴群とみなせる噴霧が存在する。また、噴霧先端到達距離は時間経過とともに増加し、下に凸の曲線、すなわち増速傾向を示す。

以上の結果から噴霧形成機構を類推すると以下のように考えられる。最初に噴射された燃料は液柱状となって噴出し始める。噴出した燃料は空気抵抗の影響を最も強く受けるその先端部から分裂する。分裂した燃料液滴が液柱の外にも飛び出す。これらの液滴は噴射方向への運動量が順次減少するため、液柱周辺に滞留する。後からさらに高い圧力で噴射された燃料は、先行燃料により形成された流れに沿って高速度で噴出する。この速度差のために先行噴霧を順次追い越す。しかし先行噴霧が無くなると、先端の燃料から分裂し、その速度を低下させる。これらの現象が連続的に発生し、噴霧先端部には空気抵抗により分裂した燃料液滴群、液柱周辺部には取り残された滞留液滴群が形成され、巨視的に見た噴霧を形成する。

4. まとめ

高圧雰囲気中に噴射されるディーゼル噴霧に対して、噴射直後の初期噴霧の形成過程を可視化した。その結果、

- (1) 噴射直後の燃料を液柱部と噴霧部に分けて観察することができた。
- (2) 噴射直後の燃料は液柱を形成し、その先端部から分裂し始める。
- (3) 液柱部は噴射開始後約 $70 \mu\text{s}$ まで液柱状態を維持し、その表面からの分裂は見られない。また、その形状はノズル出口ではほぼ噴孔径に等しく、徐々に径が増加する円柱状である。
- (4) 液柱先端部で分裂した燃料はほぼ球形に拡がり、その直径は液柱直径の約 2.5 倍となる。
- (5) 液柱先端部で分裂した燃料のうち液柱直径より外部に飛散した液滴は、液柱周辺に滞留し、噴霧を形成する。

文献

- (1) 小酒・小林・神本, 機論, 55-519, (1989), 3587.
- (2) 梅津・村上, 機論, 57-544, (1991), 4300.
- (3) 石山・三輪ほか3名, 機論, 60-570, (1994), 715.
- (4) 高橋・柳沢・志賀ほか2名, 機論, 60-571, (1994), 1093.
- (5) 服部・成宮ほか3名, 機学関西第70期講演論文集, 954-2, (1995), 157.
- (6) 成宮・服部ほか2名, 機学第73期大会講演論文集, 95-10, (1995), 176.
- (7) 成宮・服部ほか2名, 機学関西第254回講演論文集, 954-4, (1995), 75.
- (8) Melton, L. A. and Verdiek, J. F., 20th Symposium (International) on Combustion, (1984), 1283.
- (9) 津江・服部・斉藤・角田, 機論, 55-564, (1993), 244.
- (10) Tsue, M., Hattori, H., Saito, A. and Kadota, T.: SAE92205
- (11) Kusakabe, T., Tsue, M. and Kadota, T.: SAE941920
- (12) 成宮・服部ほか2名, 機学関西第71期講演論文集, 964-1, (1996), 136.
- (13) 成宮・服部ほか2名, 第13回内燃機関シンポ講演論文集, 96-251, (1996), 1.