

ディーゼルノズルより噴出する間欠噴霧の
初期微粒化過程の観察*高橋秀夫*¹, 柳沢洋樹*², 志賀聖一*³
柄沢隆夫*³, 中村壽雄*⁴Observation of the Atomization Process of an Intermittent Spray
From a Diesel Nozzle in Its Very Early StageHideo TAKAHASHI, Hiroki YANAGISAWA, Seiichi SHIGA,
Takao KARASAWA and Hisao NAKAMURA

The atomization behavior of an intermittent fuel spray from a diesel nozzle was clearly observed by means of shadowgraphy using an image-converting camera with the framing rate of 10^5 f. p. s. and an image-intensified CCD camera with high-speed gating. A rather wide range of valve-opening pressure (5 to 70 MPa) was covered, and simultaneous measurement of the injection pressure inside the nozzle sac was also attempted to clarify the atomization mechanisms at its very early stage of injection. At the beginning of injection, the emergence of a liquid column was observed. Initially, it has almost the same diameter as the nozzle hole and then spreads radially, forming the spray angle in the vicinity of the nozzle exit. The timing of this spray-angle formation becomes earlier with the increase in valve opening pressure, even if the pressure inside the nozzle sac at this moment does not vary. This pressure approximately corresponds to that of the transition region in an atomization regime of a steady jet.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Fuel Injection, Diesel Spray, Atomization, High-Pressure Injection

1. 緒 言

ディーゼル噴霧の生成過程の解明はディーゼル燃焼の改善に対してきわめて重要な課題であり、今までにも到達距離や噴霧角などの噴霧形状に関する研究や、噴霧断面を可視化して噴霧の内部構造を観察した研究など多くの研究が行われている^{(1)~(5)}。

しかし、間欠噴霧固有の現象である噴射始めにおける噴霧生成過程が観察された例は少なく、間欠噴霧の微粒化機構については不明な点が多く残されている。

また、噴霧の発達過程を計算する噴霧生成の数学モデルにおいては、噴射された液体の初期粒径を予測して与えている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、粒径の算出方法はノズル噴出口部で実際に生じている現象を基礎にしているものではなく、今後、より正確なモデルを構築するためには間欠噴霧の微粒化過程を把握し、実際の現象に基づいた方法を用いる必要があると思われる。

Reitzら⁽⁸⁾は、1 000 000 こま/sを超える高速度写真

撮影により、また、梅津ら⁽⁹⁾は、光ファイバによる遅延法を用いた二重露光による撮影法により間欠噴霧の初期噴出過程を観察している。これらの研究により、間欠噴霧の微粒化機構は連続噴霧のそれとは相当異なる可能性が示唆されている。しかし、噴射圧は比較的低く、また、噴射圧が噴霧生成にどのように影響するかなどの系統的な研究はなされていない。

著者らは、ディーゼル燃焼の点火遅れ期間中に相当する噴射初期の噴霧生成過程に着目した研究⁽¹⁰⁾を行い、この中で、開弁圧力が低い場合には、噴射初期に未分裂の液柱状の噴霧を観察した。開弁圧力が高い場合には微粒化が不完全な噴霧形態は観察されなかったが、これは、装置の制約から、噴射開始後0.05 ms以前の噴霧の挙動が詳細に観察できなかったためとも考えられる。

本研究では、噴射開始後0.1 ms程度までの噴霧の挙動を詳細に観察することを目的として、高速度カメラを用いた100 000 こま/sの連続写真観察、および、CCDカメラによる瞬間写真観察を行った。また、噴霧生成に直接影響を及ぼすノズルサック室圧力の測定を行って、噴霧の挙動とサック室圧力の関係を調べ、噴射初期のディーゼル噴霧の生成機構について考察した。

* 原稿受付 平成6年5月23日。

*¹ 正員, 群馬工業高等専門学校 (〒371 前橋市鳥羽町580)。*² 三菱自動車工業。*³ 正員, 群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町1-5-1)。*⁴ 群馬大学工学部。

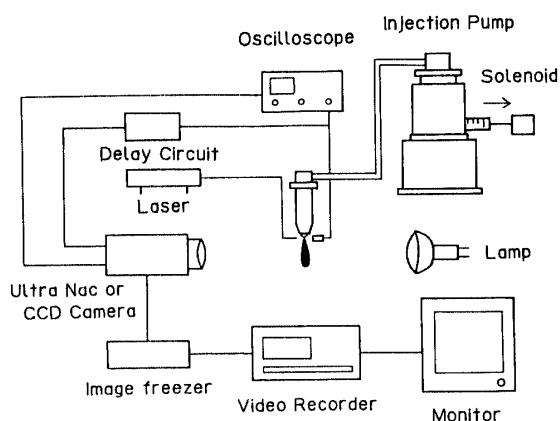


図 1 実験装置

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。噴射ポンプはボッシュ形であり、高噴射圧を得るためプランジャ径20 mmの大形のものをを用いている。ノズルは単口ホール形で、噴口径0.31 mm、噴口の長さ、直径比(L/D)は3.2である。本研究に用いた噴射系では、ノズルホルダ入口で測定した噴射期間前半の噴射管内圧力は、時間に対してほぼ直線的に増加するので、噴射管内圧力上昇率 $dP/dt^{(10)}$ としてこの値を示した。本研究ではすべての噴射条件で $dP/dt=10$ MPa/msとした。開弁圧力 P_0 は5~70 MPaの範囲で変化させ、通常では用いられない低い噴射圧から高噴射圧の範囲で実験を行った。噴射は常温の大気中に行われ、噴射液体にはJIS2号軽油を用いた。

写真撮影にはイメージコンバータ方式の高速度カメラ(ウルトラナック:ナック社製)による連続高速度撮影(100 000 こま/s)と、高速ゲートイメージインテンシファイア付 CCD カメラ(C4347:浜松ホトニクス社製)に遅延回路を組合せた瞬間写真法を用いた。

噴射始めを精度よく検出するため、レーザ光を光ファイバを用いてノズル噴口部に導き、噴霧がレーザ光を遮る信号をPINフォトダイオード(S1190:浜松ホトニクス社製)で検出した。高速度カメラによる連続高速度撮影の場合にはこの信号をスタート信号とし、CCDカメラによる瞬間写真撮影の場合にはこの信号を遅延回路に入力した。

PINフォトダイオードによる噴射始め信号、針弁リフト、噴射管内圧力の時間経過を図2に示す。PINフォトダイオードによる噴射始め信号は鋭い立上りを示し、針弁リフト信号を用いる場合よりもより正確な噴射始めが検出できる。0.02 mm程度の針弁リフト時から燃料の噴射が検出されており、針弁が最大揚程に達

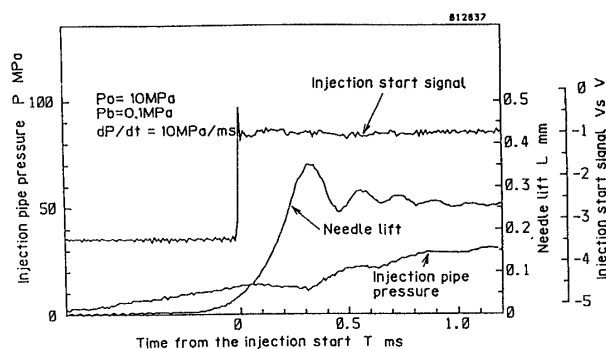


図 2 噴射初期における噴射始め信号、針弁リフト、噴射圧の時間経過

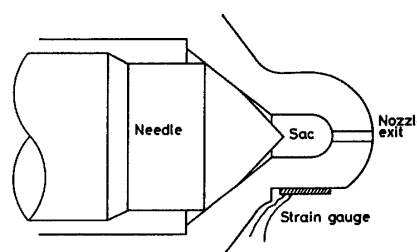


図 3 サック室圧力測定におけるひずみゲージちょう付位置

するまでの過渡運動期間は約0.3 msである。この期間は開弁圧力によってはほとんど変化しない。

ノズルサック室圧力は、図3に示すようにノズルサック側面を削り、小形のひずみゲージ(グリッドの大きさ0.2×0.9 mm, 共和電業社製)を接着することにより測定した。

3. 結果および考察

3.1 ノズルサック室圧力変化 図2に示されるように、本研究における噴霧観察範囲はノズル針弁の過渡運動期間にあたる。よって、ノズルシート部流路面積は小さく、しかも、時間とともに増加しており、この絞りの影響で噴射初期のサック室圧力と噴射管内圧力とは大きく異なると考えられる。

図4に開弁圧力30 MPaの場合におけるサック室圧力の時間経過を針弁リフトとともに示す。サック室圧力は、油だまり室圧力が開弁圧力に達して針弁の上昇が開始するとともに急速に増加するが、その後、しだいに油だまり室との圧力差が少なくなるため、その圧力上昇率は減少する。サック室圧力が開弁圧力に等しくなるまでの時間は噴射開始後約0.2 msである。以後は、噴射管内圧力上昇率とほぼ等しい増加速度でサック室圧力が増加している。図5は開弁圧力を変えた場合のサック室圧力変化を示したものである。図5中

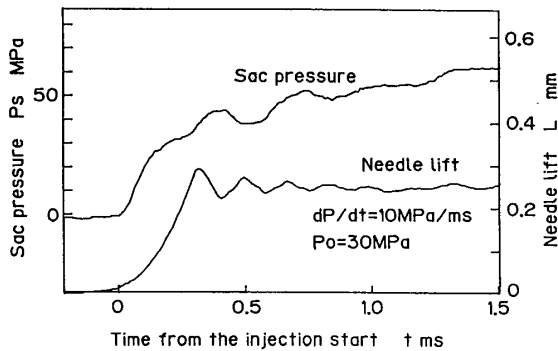
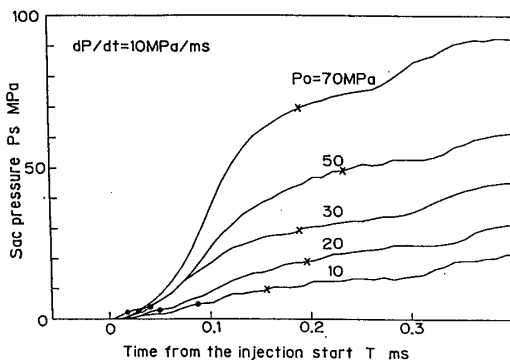


図4 サック室圧力と針弁リフトの関係

図5 開弁圧力 P_0 をパラメータとしたサック室圧力変化

で、 \times はそれぞれの開弁圧力において、サック室圧力が開弁圧力に達する時刻を示している。いずれの開弁圧力においても、噴射始めのサック室圧力は雰囲気圧力に等しく、約0.2 msの後に開弁圧力まで達している。その後の圧力変化は噴射管内の圧力上昇率に等しい。本研究に用いた噴射系では、開弁の過渡期間は開弁圧力によらず約0.3 msであるから、この過渡期間の2/3程度の時間でサック室圧力が開弁圧力と等しくなることがわかる。

前報⁽¹⁰⁾において、Dateらによる模型ノズルのサック室圧力測定結果⁽¹¹⁾をもとに実際のディーゼルノズルのサック室圧力変化の予測が行われ、噴射圧が低い場合の噴霧生成機構が考察された。Dateらの模型ノズルにおいては、針弁リフトの過渡期間の2/3程度の時間でサック室圧力が管内圧力に等しくなっている。この結果は、本研究における実際のノズルの結果と定量的にもよく一致しており、Dateらの模型ノズルのサック室圧力変化をもとにした前報における考察の妥当性が裏付けられた。

これらの結果より、開弁圧力は噴射のごく初期のサック室圧力履歴を決定し、よって、噴射初期の噴霧生成には、開弁圧力によって決定されるサック室圧力の非定常性と、噴射系全体によって定まる噴射管内圧力

の非定常性の二つを考慮する必要があることがわかる。高开弁圧力におけるサック室圧力の非定常性はかなり大きく、本研究においては $P_0=70$ MPa において約770 MPa/msに達した。このことは、ディーゼル噴霧の初期微粒化機構を考えるうえでの一つの重要な要因になると考えられ、後から噴射された燃料の追越しが、0.2 ms程度までの噴射初期においてかなり激しく生じているものと思われる。また、高开弁圧力の噴霧においても噴射開始時には圧力の低い噴射が行われており、微粒化が不十分な噴霧が噴出することが予想されるが、このような噴霧は3・2節に示す噴霧写真において明りょうに撮影された。

3・2 噴霧の写真観察 噴霧の連続高速度写真を図6に示す。開弁圧力は $P_0=10$, および20 MPa, 撮影速度は100 000コマ/sである。いずれの開弁圧力においても噴射初期には噴口径とほぼ等しい液柱が観察され、先端には噴口径よりも細い突出物が突き出している。ここでは、この突出物を除いた部分を噴霧主要部と呼ぶことにする。

噴射開始直後には液柱の幅はほとんど増加することなく噴口径とほぼ等しいまま成長するが、しばらくすると噴口出口部で噴霧角が形成されるようになる。噴霧角が形成されてくる時期は $P_0=10$ MPa で噴射開始後70 μ s, $P_0=20$ MPa で50 μ s程度であり、開弁圧力の増加とともに早くなっている。噴霧角の形成が見られるようになると噴霧は半径方向へも広がるようになるが、この広がりには噴霧長さの半分近く、噴口からの距離で2 mm程度の位置において最も顕著に現れている。ここでは、後から噴射された速度の大きい液により、先に噴射された液が追越しを受けて横に広がっているように見える。噴霧主要部の先端もまた、周囲空気の抵抗を受けて半径方向へ広がり、皿状から紡すい状へと変形するようになるが、微粒化するには至っておらず、上述の噴霧中央部とは違って、しばらくの間、後から噴射された噴霧に追い越されることなくそのまま進んでいるように見える。噴霧角の形成が見られてから約40 μ sの後には先端の広がりには噴霧内に取り込まれ、全体として円すい形の噴霧形状へと発達している。このときの噴霧主要部の長さは約6 mm程度であった。

多くの噴射条件において、噴霧主要部の先端に直径0.1 mm以下の突出物が観察された。この突出物は噴射の初期から存在し、その先端速度は減衰せずにほぼ等速で進んでいる。また、初期には噴霧主要部の先端速度より速いため、結果として時間の経過につれて長くなっている。図6の写真から求めた先端速度は、 P_0

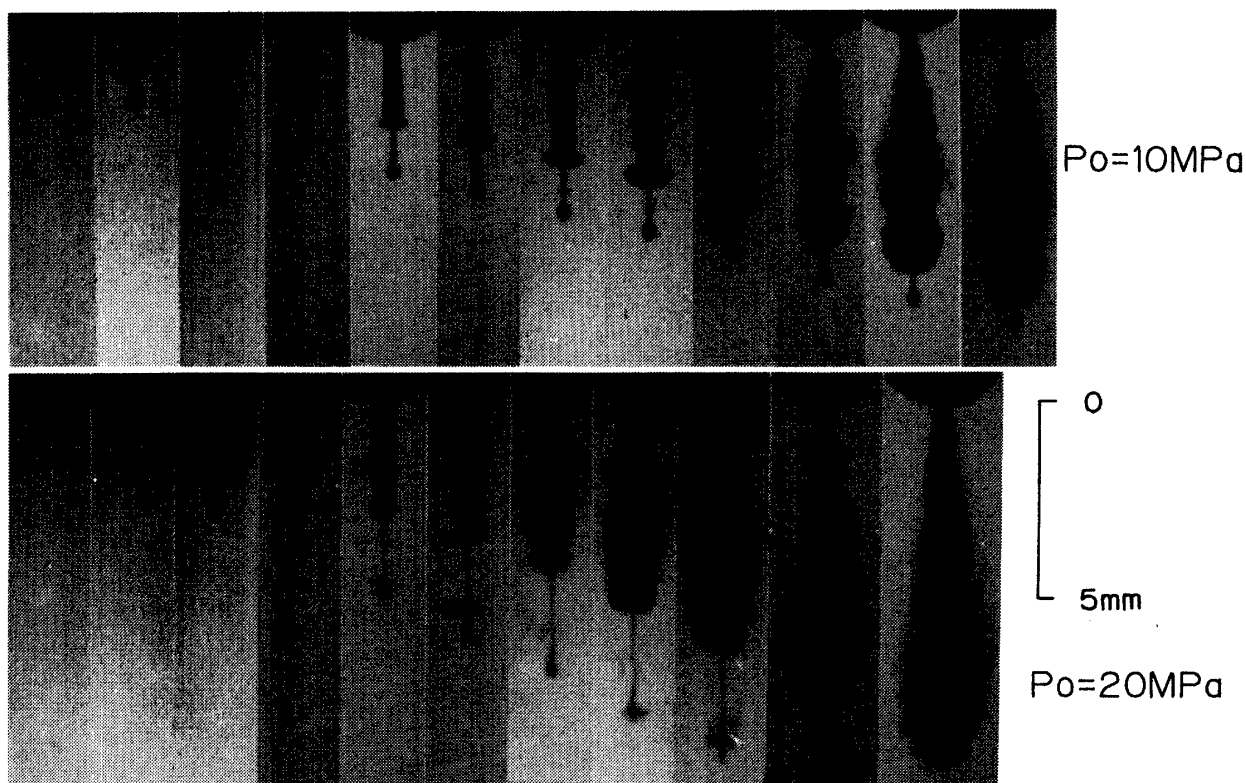


図 6 噴射初期の噴霧の連続写真(撮影速度：100 000 こま/s, P_0 は開弁圧力を表す)

=10 MPa で 60 m/s, $P_0=20$ MPa で 110 m/s 程度であるが、試行ごとのばらつきはかなり大きい。先端部分は周囲空気の抵抗によってわずかに形が崩れる様子が見られるが、ほとんど微粒化されることなくそのまま進んでおり、後方からの追越しも受けていないようである。これらのことから、この突出部は噴射開始時に噴霧主要部より速い初速度が与えられたことにより生じたと考えられる。さらに、ほとんどの場合噴霧中心から突出しており、軸対称の現象によることが予想される。噴射開始時に、噴霧主要部の先端速度より速い速度を与える要因は明らかでないが、ノズル噴口の先端部にあった燃料が何らかの原因によって飛び出し、後方へ糸を引いたような現象とも考えられる。噴射初期にこのような突出物が現れることは梅津ら⁽⁹⁾により報告され、著者らも前報⁽¹⁰⁾において報告しているが、連続高速度撮影を行った本研究によって、その挙動がより詳しく明らかになった。

連続高速度撮影の結果をふまえ、より高い開弁圧力の場合について、CCD カメラによる瞬間写真法で詳細に観察した。結果を図 7 に示す。 $P_0=30$ MPa の場合には、図 6 と同様に、時間の経過とともに噴口出口部で噴霧角が形成されてゆく様子が見られるが、この時刻は図 6 の $P_0=10, 20$ MPa という、より低い開弁圧

力の場合よりもさらに早くなっている。

しかし、開弁圧力 50 MPa 以上では、噴射始めに円柱状をした液柱が認められることは同様であるが、その後、この液柱が噴口出口部で噴霧角を形成し、しだいに噴霧幅が広がるという発達過程をたどらない。噴口出口部で噴霧角が形成される以前に、噴口より少し下流で不規則に半径方向への噴霧の広がりが生じており、開弁圧力が低い場合と異なった、はじけるような発達過程を示している。このような微粒化過程は周囲空気との摩擦によるものとは考えにくい。しかし、噴口近傍において明確に噴霧角が観察される時刻は開弁圧力の増加につれて系統的に早くなっており、 $P_0=50, 60, 70$ MPa において、それぞれ 30, 20, 10 μ s 程度である。

したがって、本研究における非定常噴流の初期発達においては、すべての開弁圧力下で見られる噴口部付近に噴霧角が形成される現象と、50 MPa 以上の高開弁圧力下で見られるはじけるような発達の二つの異なった微粒化機構が存在しているといえる。

それぞれの開弁圧力において、噴霧角を生じる時刻のサック室圧力を、図 5 に●で示した。いずれの場合も 5 MPa 程度のサック室圧力で噴霧角が形成されている。写真から求めた、この時刻における噴霧主要部

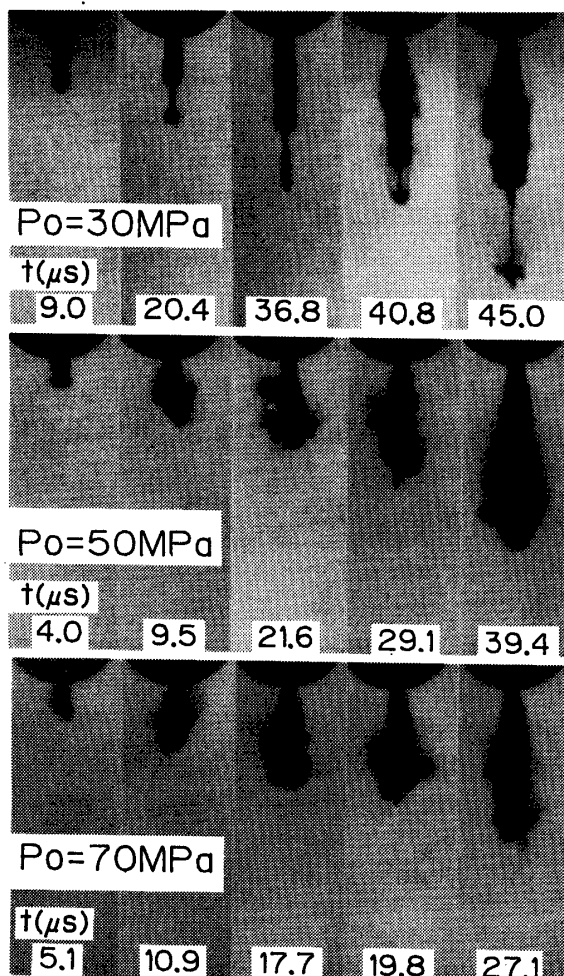


図7 噴射初期の噴霧写真
($t[\mu\text{s}]$ は噴射開始からの時間, P_0 は開弁圧力を表す。撮影倍率は図6と同様)

の先端速度は約 65 m/s 程度であり、これは、定常流における波状流から噴霧流への遷移速度とほぼ一致している。よって、噴口部付近に噴霧角が形成される微粒化現象は、定常流の微粒化機構から説明できることが示唆される。

また、針弁リフトの過渡期間は本研究の範囲では開弁圧力によってはほとんど変化しないので、高開弁圧力の噴霧ほど噴霧角形成時のノズル針弁のリフト量は少なく、針弁前後の高い差圧のために、狭いシート部を通過した高速の液体がサック室内に流入し、乱れを生成しやすくなることが予想される。よって、高開弁圧力の噴霧においては、ごく初期の噴射圧は低いものの、このようにして生成された乱れが噴霧生成過程に影響を与えていることが考えられ、開弁圧力 50 MPa 以上の噴霧において見られるはじけるような噴霧の挙動は、このような噴射前の液体内に存在するエネルギーによることが予想される。

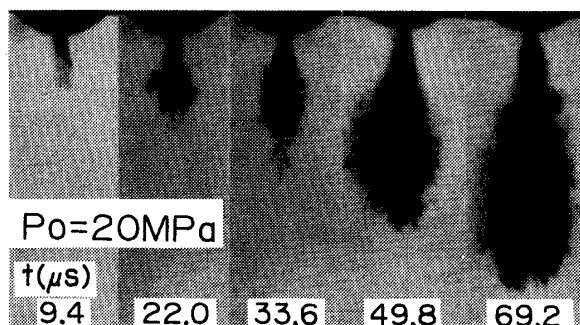


図8 サック室の軽油を吸い取った場合の噴霧写真
($t[\mu\text{s}]$ は噴射開始からの時間, P_0 は開弁圧力を表す。撮影倍率は図6と同様)

噴射前のノズル内において液体内に生成した乱れやキャビテーションの泡等が、噴霧の微粒化過程に影響することが連続噴霧において指摘されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。ディーゼル噴霧において、このような噴射前の液体内の状態が、初期微粒化過程に及ぼす影響についての手がかりを得るため、サック室の軽油をあらかじめ真空ポンプで吸い取った場合の噴霧を観察した。

通常、噴口から最初に噴射される液体は噴射前にサック室にたまっていた液体であるが、吸取りを行った場合には、噴射の最初からシート部を通過してきた液体が噴出する。

開弁圧力 20 MPa の写真を図8に示す。噴霧形状は同じ開弁圧力の場合におけるサック室に液体が存在するとき(図6の高速度写真)と大きく異なる。噴射始めには、サック室内で混合したと思われる気液混相流のようなものが先端に見られ、その後、急速に噴霧幅が広がっており、吸取りを行わなかったいずれの開弁圧力の噴霧とも発達の様子が異なっている。

通常の噴霧の場合、ノズル噴口内にあった乱れの少ない、分裂しにくい液体が、噴射開始後しばらくの間噴霧先端に存在し、発達の先導的な役割を果たすため、噴霧幅が広がりにくいものと思われる。これに対し、吸取りを行った場合は先端部分も噴射の最初から微粒化しており、その結果、噴霧幅も容易に広がったものと思われ、噴霧先端に存在する液体の状態が非定常噴霧のごく初期の生成過程に大きく影響することが明らかになった。到達距離等にも違いが認められるが、時間の経過とともに少なくなり、噴射開始後 300 μ s 程度経過すれば、これらの違いは噴霧内に取り込まれ、噴霧形状、到達距離ともほとんど差は認められない。

これらの結果より、間欠噴霧の初期微粒化過程にも、定常噴霧の微粒化過程と同様、噴射の速度や噴射前の液体の状態が大きく影響することが示されたが、どの

ような要因が噴射開始後どの時点において微粒化に対して支配的になるかなどの詳しい点を明らかにするためには、より基礎的な研究が必要であると考えられる。

4. 結 論

広範囲に設定された開弁圧力によるディーゼル噴霧の初期微粒化過程について、噴射開始後 0.1 ms 程度までの挙動を超高速度連続撮影、および、高分解能の写真撮影法により観察した結果、次のことが明らかになった。

(1) 噴射初期のノズルサック室圧力の時間経過は、噴射管内圧力の変化とは大きく異なる。噴射開始時はいずれの開弁圧力においてもサック室圧力は雰囲気圧力に等しいが、開弁圧力が大きくなるほどサック室の圧力上昇率は大きく、短時間のあいだに噴射圧が上昇する。

(2) 噴射初期の噴霧生成には、開弁圧力によって決定されるサック室圧力の非定常性と、その次につづく噴射系全体によって定まる噴射管内圧力の非定常性の二つの噴射圧の時間に対する変化を考慮する必要がある。高開弁圧力の噴霧では、噴射初期のサック室圧力の時間変化が大きいことが特徴である。

(3) 高開弁圧力においても、噴射の初期には低い噴射圧による微粒化が不完全な噴霧が形成される。

(4) 噴射の初期には噴口径と等しい液柱状の噴霧が噴出し、時間の経過とともに噴口出口において噴霧角が形成される。噴霧角が形成される時期は、開弁圧力の増加とともに早くなる。このときのサック室圧力は約 5 MPa であり、開弁圧力によらずほぼ一定である。

(5) 噴霧角が形成されるようになると噴霧は半径方向へも急速に広がるようになり、開弁圧力 20 MPa

において、噴射開始後約 0.1 ms 後には円すい形の噴霧形状を示す。

(6) 50 MPa 以上の高開弁圧力の噴霧では、噴霧角が形成される以前に、半径方向にはじけるような不規則な噴霧幅の広がりが見られる。

(7) 噴射初期に噴霧先端に見られる突出物は噴射始めから存在し、その先端速度は、噴霧主要部の先端速度よりも速い。

(8) ノズルサック室の液体を吸い取った後に噴射された噴霧は、通常の噴射の場合と初期噴霧形状が大きく異なる。このことは、間欠噴霧の初期微粒化過程に、噴射前の液体内の状態が大きく影響することを示していると考えられる。

本研究は、文部省科学研究費 [試験研究(A)代表廣安博之, No. 04505001], および日本機械学会研究分科会 RC107(松岡信主査)研究費によった。また、ウルトラナックによる噴霧の撮影にはナック社の協力を、実験には群馬大学 4 年 畠中実君 [現: いすゞ自動車] の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 広安・ほか 2 名, 機論, 44-385(1978), 3208.
- (2) Dent, J. C., *SAE Paper*, No. 710571(1971).
- (3) 佐藤・ほか 2 名, 日本舶用機関学会誌, 13-5(1978), 39.
- (4) Azetsu, A., ほか 3 名, *Proc. COMODIA-90*, (1990), 199.
- (5) 高橋・ほか 4 名, 機論, 56-526, B(1990), 1837.
- (6) Bracco, F. V., *SAE Paper*, No. 850394(1985).
- (7) 金・ほか 4 名, 第 17 回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1990), 49.
- (8) Reitz, R. D., *Phys. Fluids*, 25-10(1982), 1730.
- (9) 梅津・ほか 1 名, 機論, 57-544, B(1991), 4300.
- (10) 高橋・ほか 4 名, 機論, 60-571, B(1994), 1093.
- (11) Date, K., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 920622(1992).
- (12) DeJuhasz, K. J., *Trans. ASME*, 53(1931), 65.
- (13) Arai, M., ほか 2 名, *Proc. ICLASS-88*, (1988), 177.