超高压喷射時のディーゼル噴霧の特性*

西田 恵哉^{*1}, 落合 裕晶^{*2}
新井 雅隆^{*3}, 廣安 博之^{*1}

Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultrahigh-Pressure Injection

Keiya NISHIDA, Hiroaki OCHIAI,
Masataka ARAI and Hiroyuki HIROYASU

Electronically controlled and hydraulically actuated fuel injection equipment was developed to investigate the characteristics of a diesel fuel spray at injection pressures of up to 300 MPa. The injection equipment made it possible to keep the injection pressure almost constant during the injection period. The spray angle and the Sauter mean diameter decreased with an increase in the injection pressure in the range up to 250 MPa, whereas above this injection pressure the spray did not show such variation. Mach waves were observed around the spray when the initial penetrating velocity of the spray tip exceeded the sound velocity of the ambient gas. The distribution of the penetrating velocity of the fuel along the spray axis was measured from the Mach angles at the edge of the spray.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Atomization, Diesel Spray, High-Pressure Injection, Sauter Mean Diameter, Spray Angle, Mach Wave

1. ま え が き

直接噴射式ディーゼル機関から排出される NO_x の低減のため噴射時期を遅延させ、これに伴うパティキュレートを増加を燃料噴射の高圧化によって改善する方法が検討され、噴霧特性や燃焼過程の変化が調べられている^{(1)~(4)}。これらの研究では噴射圧が200 MPa程度までの範囲に限られていた^{(3)~(4)}。本研究では、これまでに例のない噴射圧300 MPaまでの範囲で、噴射期間中はほぼ一定の圧力で噴射を行うことのできる電磁油圧制御方式の噴射装置を試作し、この装置から噴射したディーゼル噴霧について、到達距離、噴霧角、ザウタ平均粒径などの噴霧特性の測定を行った。また、噴霧のシュリーレン写真で観察された噴霧周囲のマッハ波を解析し、噴霧内部の燃料の到達速度を求めた。

2. 実験装置および方法

2-1 高圧噴射装置 図1に高圧噴射装置の概要

を示す。本装置は噴射装置本体(中央)、燃料供給・増圧系(右側)、針弁制御系(左側)からなる。本体①には増圧プランジャ③(断面積比12.25:1)が内蔵され、ア

1. Injector	13. Motor 1
2. Needle Control Plunger	14. Accumulator 1
3. Boost Plunger	15. Servo Valve
4. Poppet Valve 1	16. Motor 2
5. Poppet Valve 2	17. Hydraulic Oil Filter
6. Relief Valve 1	18. Hydraulic Oil Tank
7. In-Line Filter 1	19. Hydraulic Oil Pump
8. Pressure Gauge 1	20. Check Valve 2
9. Check Valve 1	21. Relief Valve 2
10. Fuel Pump	22. In-Line Filter 2
11. Fuel Tank	23. Accumulator 2
12. Fuel Filter	24. Pressure Gauge 2

Fig. 1 Schematic diagram of an injection system

* 原稿受付 1996年1月26日。

^{*1} 正員、広島大学工学部(〒739 広島市鏡山1-4-1)。^{*2} 正員、三菱自動車工業(株)エンジン設計部(〒616 京都市右京区太秦異町1)。^{*3} 正員、群馬大学工学部(〒376 桐生市天神町1-5-1)。

キュムレータ⑭に蓄圧した燃料を増圧プランジャの上部に供給することにより、アキュムレータ内の燃料圧力の12.25倍の圧力が増圧プランジャ下部に発生する。

図2に油圧バルブの制御信号を示す。噴射の制御は、電磁弁付ポペット弁1, 2(図1中の④, ⑤)、燃料の供給および増圧プランジャの作動用)と電磁-油圧サーボ弁(⑩、ノズル針弁の開閉用)により、次のように行う。

- (1) 電磁-油圧サーボ弁(図1中の⑩)を作動(Pull)させて、ノズル針弁制御プランジャ(②)の上部に油圧をかけ針弁を押し下げる。
- (2) 増圧プランジャ(③)下部に燃料を供給する。
- (3) 電磁弁付ポペット弁1(④)を開き、2(⑤)を閉じて、増圧プランジャ上部に燃料を送る(増圧開始)。

Fig.2 Sequence diagram of signals for controlling hydraulic valves
Poppet valve 1(④ in Fig. 1)
Poppet valve 2 (⑤)
Servo valve (⑩)

Fig.3 Time histories of boost pressure (fuel pressure below a boost plunger [③ in Fig. 1], servo valve signal and needle lift

- (4) 電磁-油圧サーボ弁(⑩)を作動(Push)させて、ノズル針弁制御プランジャ(②)上部の油圧を抜くと、ノズル針弁が上昇し始める(噴射開始)。

- (5) 電磁-油圧サーボ弁(⑩)を作動(Pull)させて、ノズル針弁制御プランジャ(②)上部に油圧をかけ、針弁を押し下げる(噴射終了)。

- (6) 電磁弁付ポペット弁1(④)を閉じ、2(⑤)を開く(増圧終了)。

なお燃料および油圧回路の作動油としてディーゼル軽油を使用した。

2・2 増圧過程と噴射過程 以上のような作動で得られた、噴射装置本体の増圧プランジャ下部の燃料圧力の測定結果の一例を図3に示す。アキュムレータ(図1中の⑭)から増圧プランジャ下部に供給された燃料の圧力が $P_{acc1}=24$ MPa の場合の結果である。電磁弁付ポペットバルブ2(⑤)を作動させると、増圧直後に圧力が振動した後、およそ 255 MPa でほぼ一定となる。さらに電磁-油圧サーボ弁(⑩)を作動(Pull, Push)させると、これに対応して針弁が開き、燃料が噴射される。噴射期間中には開弁時の圧力降下によるわずかな圧力振動があるが、ほぼ一定の圧力で噴射していると見ることができる。本研究では噴射前の増圧プランジャ下部の圧力の測定結果を噴射圧 P_{inj} とした。

図3の例ではアキュムレータ1の圧力 P_{acc1} から噴射圧 P_{inj} への上昇比はおおよそ 10.6 : 1 で、増圧プランジャの断面積比である 12.25 : 1 より小さい。図4にアキュムレータ1の圧力と噴射圧の関係を示す。アキ

Fig.4 Relation between fuel pressure in an accumulator (⑭ in Fig. 1) and injection pressure

Fig. 5 Optical arrangement of focused shadow and schlieren photographs for a spray

ムレータ1の圧力が16 MPa程度までは、ほぼ12.25 倍の噴射圧が得られているが、これを超えると圧力の上昇比が小さくなる。これはプランジャのすきまからの漏れの影響などが大きくなるためと考えられる。

2.3 噴霧観察用光学系 高压噴射装置から、内部が直径 100 mm、長さ 120 mm の高压容器中に噴射された燃料噴霧を、図 5 に示すような焦点影写真法の光学系で撮影した。光学系は高輝度ストロボと焦点距離 1 m の凸レンズおよび焦点距離 2 m の凹面鏡からなる。ドラムカメラで撮影した噴霧の焦点影写真から噴霧の到達距離や噴霧角などを測定した。また画像濃度の透過光減衰理論による解析⁽⁵⁾を行い、噴霧のザウタ平均粒径を求めた。一方、シュリーレン写真法による噴霧周囲のマッハ波の観察の場合には、ドラムカメラ側の凹面鏡の焦点位置にナイフエッジを置き、感度を適当に調節して撮影した。

なお高压容器中の雰囲気は、実際の機関の燃料噴射時期における燃焼室内雰囲気条件を想定した温度 773 K、圧力 3.0 MPa の空気と密度が等しい、室温で圧力 1.2 MPa の窒素とし、この中に燃料を噴射した。

3. 実験結果および考察

3.1 噴霧特性の噴射圧による変化 図 6 に噴孔径 $d=0.2$ mm のノズルから噴射圧 $P_{inj}=45$ MPa から 280 MPa までの範囲で噴射した噴霧の先端到達距離を示す。いずれの噴射圧の場合も、到達距離は噴射開始後約 0.1 ms までは急激に増加し、その後はやや緩やかに増加するようになる。また同一時刻での到達距離は噴射圧の増加とともに大きくなる。噴射圧を変化させた場合の噴霧特性すなわち噴霧角やザウタ平均粒径の比較は、噴霧先端の到達距離がほぼ同一の噴霧について行った。

Fig. 6 Spray tip penetration

(a) θ_{30}

(b) θ_{50}

Fig. 7 Effect of injection pressure on spray angle

噴霧角の測定結果を図 7 に示す。これは視野内で十分発達した噴霧として噴霧先端の到達距離 S が 76 ± 3 mm の噴霧を選び、噴霧角の噴射圧力による変化をまとめたものである。噴霧角はその定義によって値が異なる。ここではノズル先端からの距離が噴霧の到達距離に対して比較的ノズルに近い 30 mm と、比較的噴霧先端に近い 50 mm を選び、これらの位置での噴霧軸を中心とした噴霧外縁 2 点とノズル先端を結ぶ直線のなす角 θ_{30} と θ_{50} とした。それぞれの結果を図 7(a), (b) に示す。いずれの定義の噴霧角でも、噴射圧がおおよそ 250 MPa 以下の範囲で噴霧角は噴射圧の上昇とともに増加するが、噴射圧が 250 MPa を超え

ると、このような変化が頭打ちになる傾向が見られる。

図8に到達距離 S が87~93 mmの噴霧の先端の形状が噴射圧の上昇とともに変化するように示す。先端形状の右端の位置の横軸の値がその噴霧の噴射圧である。噴射圧がおよそ250 MPaまでの範囲で、噴射圧の上昇とともに先端形状が扁平になり幅が大きくなる。しかし噴射圧が250 MPaを超えると再び先端形状はとがり、幅も小さくなる。

図9に焦点影写真の画像濃度の解析から求めたザウタ平均粒径を示す。噴霧先端の到達距離 S が 80 ± 10 mmの噴霧についての結果である。噴射圧がおよそ250 MPa以下の範囲では噴射圧の上昇とともにザウタ平均粒径が減少するが、これ以上の噴射圧ではザウタ平均粒径の減少が頭打ちになる傾向が見られる。

以上のような噴霧角、噴霧先端形状、ザウタ平均粒径の変化は、噴孔内部の流れの状態の変化が噴霧特性に何らかの影響を及ぼしたものと推定されるが、はっきりしたことは不明である。

3・2 噴霧周囲のマッハ波 噴射直後の噴霧先端到達距離が雰囲気音速を超えると、噴霧周囲にマッハ波が生じるのが観察された⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図10に噴射圧が $P_{inj}=275$ MPaの場合の噴霧のシュリーレン写真を示

す。噴射開始後 $t=0.10$ msの噴霧周囲には、先のとがった円すい状の圧縮波すなわちマッハ波が見られる。図6に示した到達距離の曲線のこう配から計算し

Fig. 10 Schlieren photographs of a spray and Mach wave around the spray
 $P_{inj}=275$ MPa, $d=0.25$ mm,
 $P_a=1.2$ MPa, $T_a=298$ K

Fig. 8 Effect of injection pressure on a shape of spray tip

Fig. 9 Effect of injection pressure on Sauter mean diameter of a spray

た噴霧先端到達速度は、図 11 に示すように噴射開始後約 0.10 ms 以内の間に、雰囲気音速である $U_a = 335$ m/s を超えていると考えられる。したがって、このときの先頭の圧縮波は噴霧先端に付着した状態となっている。

噴射開始後 0.22 ms になると、噴霧先端到達速度が減衰して雰囲気音速より小さくなるため先頭の圧縮波は噴霧先端から離れるが、ノズル側の噴霧周囲にはマッハ波が存在している。0.34~0.46 ms では先頭の圧縮波がノズルと反対側の高圧容器壁面で反射し、後続の圧縮波と干渉を起こしている。

3・3 燃料の到達速度 噴射開始後 0.46 ms までの噴霧周囲のマッハ波の半頂角(マッハ角)から、噴霧軸方向の燃料到達速度を求めた⁽⁸⁾。ここで言う燃料到達速度とはマッハ波を引き起こしている燃料塊あるいは液滴群のノズル噴孔軸方向への移動速度である。その結果を図 12(a)~(d)に示す。図 12 中の記号で△は噴霧到達方向左側のマッハ波より、○は噴霧到達方向右側のマッハ波より求めたものである。また□は噴霧先端の到達距離から求めた噴霧先端の到達速度である。なお噴射圧 $P_{inj} = 275$ MPa から噴孔部での速度係数を 1、ディーゼル軽油の密度を 825 kg/m³ として燃料の噴射速度を計算すると、 815 m/s となり、雰囲気音速の $U_a = 335$ m/s を大きく超えている。

噴射開始後 0.10 ms [図 12(a)] では、噴霧先端付近での燃料の到達速度は雰囲気音速である $U_a = 335$ m/s とほぼ一致している。またノズル側に近づくとともに燃料の到達速度は大きくなり、データはばらついているが、上記の燃料の噴射速度の 815 m/s に近づいているように見える。噴射開始後 0.22 ms 以降 [図 12(b)~(d)] になると、噴霧先端の到達速度は雰囲気音速より小さくなるが、ノズルに近い側では燃料の到達速度は雰囲気音速を超えている。しかし、ノズルに近い側の燃料の到達速度は時間の経過と

Fig. 11 Penetrating velocity of spray tip

(a) $t = 0.10$ ms

(b) $t = 0.22$ ms

(c) $t = 0.34$ ms

(d) $t = 0.46$ ms

Fig. 12 Distribution of penetrating velocity of fuel along a spray axis

ともに減少しており、図3に示した噴射開始直後の噴射圧の低下や、噴霧内部での燃料の微粒化の進行の影響が現れているものと思われる。

なお、図12を概観すると△のデータのほうが○より大きい傾向が見られる。これは以下のような計測法上の理由によるものと考えられる。すなわち、図10のようなナイフエッジを噴霧軸と平行に設置して撮影したシュリーレン写真では、フィルム感度の影響もあり、噴霧到達方向左側と右側のマッハ波のシュリーレン画像(マッハ波の密度こう配に対応)の明暗の境界線の現れ方には違いが生じる。このため、シュリーレン画像の明暗の境界線と噴霧軸の角度として測定したマッハ角にも、噴霧到達方向左側と右側で違いが現れ、△と○のデータに差が現れると考えられる。

4. ま と め

これまでに例のない噴射圧 300 MPa までの範囲で、噴射期間中ほぼ一定の圧力で噴射を行うことのできる電磁油圧制御方式の噴射装置を製作し、この装置から室温で圧力 1.2 MPa の窒素雰囲気中に噴射したディーゼル噴霧について、噴霧特性の測定を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 噴射圧が 250 MPa までの範囲では、噴射圧の上昇とともに噴霧角は増加しザウタ平均粒径は減少する。しかし、これ以上の噴射圧の範囲では、このような変化が頭打ちになる傾向が見られる。

(2) ノズル噴孔からの燃料の噴射速度が雰囲気の

音速を超える噴射圧では、噴霧周囲にマッハ波を生じる。噴霧先端の到達速度が雰囲気音速を超えている場合には、先頭のマッハ波は噴霧先端に付着した状態となる。

(3) マッハ波が見られる位置での噴霧軸方向の燃料の到達速度は雰囲気音速を超えており、またノズルからの距離の増加とともにこの燃料到達速度は減少して、噴霧先端到達速度となる。

謝 辞

噴射装置の試作にあたりヤンマーディーゼル(株)より多大の援助を受けた。また噴射装置の設計に関しては日本大学工学部の斎藤篤教授〔当時ヤンマーディーゼル(株)〕から貴重な助言を賜った。なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金(重点領域研究「燃烧機構」)によることを記して謝意を表す。

文 献

- (1) Needham, J. R., SAE Paper, No. 891949(1989).
- (2) Kato, T., ほか 4 名, SAE Paper, No. 890265(1989).
- (3) Kamimoto, T., ほか 2 名, SAE Paper, No. 871610(1987).
- (4) 坂根篤・ほか 3 名, 日本船舶機関学会誌, 23 1(1988), 47-52.
- (5) 神本武征, 内燃機関, 25 314(1986), 27-31.
- (6) 廣安博之・ほか 3 名, 流れの可視化(写真集), No. 7 (1990), 56-57.
- (7) Nakahira, T., ほか 3 名, SAE Paper, No. 920460(1992).
- (8) 藤本武助, 流体力学, (1976), 105, 養賢堂.