ディーゼル噴射弁の水流模型による流れの観察*

許 敏^{*1}, 新井雅隆^{*2}, 廣安博之^{*2}Flow Observation in a Diesel Injection Nozzle
Using a Water Flow Model

Min XU, Masataka ARAI, and Hiroyuki HIROYASU

Internal flow in the diesel injection nozzle of a hole type was observed by using a tenfold water flow model and polystyrene tracer to investigate the relationship between the spray angle and the flow pattern in the suck volume of the nozzle. The three kinds of model nozzles, "90°-Needle", "Flat-Needle" and "Cylindric-Needle" were made of transparent acrylic plastic. The model nozzles were operated with water under conditions which gave a Reynolds number similar to that of a diesel nozzle at the exit of the nozzle hole. When the needle lift was very small, the high velocity of the inlet flow caused large turbulence in the suck volume and a wide spray angle. The nozzle of the "Flat-Needle" type had a tendency to produce an unsteady flow. This unsteady flow also caused turbulence in the suck volume and a wide spray angle.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Injection Nozzle, Diesel Spray, Spray Angle, Water flow Model, Flow Visualization

1. ま え が き

ディーゼル機関の燃焼に大きな影響を与える因子の一つに噴射ノズルから噴射された液体燃料の噴霧特性がある。この燃料噴霧の特性は噴射ノズルの形状や噴射特性によって左右されるため、従来から、噴射系および噴射特性に関する研究が数多くわれてきた⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、噴射圧力と微粒化特性の関係、数値計算による噴射系のシミュレーション、ノズル形状の噴霧特性への影響を調べた研究などがある。また噴射圧力の変動やノズル内の針弁の動きが噴射された燃料の噴霧特性に影響を与えることも調べられている⁽³⁾。

ノズル内の流れの状態⁽⁴⁾⁽⁵⁾と噴霧特性の関係を調べることは、噴射圧力の変動や針弁の動きが噴霧特性に影響を与えるメカニズムを明らかにすることができるため実際問題として大変重要なことと思われる。しかし内部の流れを直接観察することは、ディーゼルノズルが小さく、またそこでの流れが速いため、実際には極めて困難である。

そこで本研究では、実際のノズルの内部寸法を10倍に拡大したアクリル製の透明な水流模型を用いて、ノズルの噴射室内の流れをシミュレートし、針弁を変化させた場合の流れと噴霧角の関係を明らかにした。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。使用した模型ノズルは透明アクリル製である。粒径200~300 μm のポリスチレン粒子をトレーサとして用いた。ミキサ中でポリスチレン粒子を水と混合させてから、模型ノズルに流入させた。幅4mmのスリット光を、ノズルの側方から中心軸に沿って入射し、噴射室内中心断面の粒子の軌跡を撮影した。模型ノズルから噴射された噴流は分

図1 実験装置図

* 昭和61年4月1日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年10月20日。

^{*1} 学生員、広島大学大学院 (〒724 東広島市西条町下見)。

^{*2} 正員、広島大学工学部。

裂するが、その際の広がり角をここでは噴霧角とし、これを写真から計測した。

使用したノズルの模型は、市販のディーゼルノズル DL0S-301 と DL120S-306 に基づいて、その内部の寸法を 10 倍に拡大して噴孔径が 3mm になるように製作したもので、図 2 に原型と模型の構造を示す。模型ノズル内の燃料だまり部と噴射室に圧力計を取付けた。噴射室の形状および噴孔数と流れの関係を調べるため、図 3 のように通常の尖端角度 90° の針弁、先端をカットしたフラット針弁、先端を円筒状に突き出した円筒針弁を製作した。また、図 2 の (b), (c) で二孔ノズルや単孔ノズルとして示したように、噴孔数が二孔と単孔の噴射室を製作した。ここで燃料だまり部の圧力は P_i 、噴射室圧力は P_s 、背圧(本実験では大気圧)は P_a 、噴孔径は D_m で表した。また弁座と針弁のすきまの高さ、すなわち針弁リフトを H_m で表した。

実験は噴射圧力 ($P_i - P_a$) が 200 kPa と 100 kPa の場合を中心に行った。模型と実物の噴孔出口でのレイノルズ数が等しいとして計算すると、実験条件に対応するディーゼルノズルの噴射圧力は燃料の動粘度にもよるが、157 MPa と 69.7 MPa であって、高圧噴射のノズルをシミュレートしているとみなせる。模型ノズルの噴孔径や、実験条件におけるディーゼルノズルとの相似性を表 1 にまとめた。

図 2 ノズル

図 3 針弁の形状

3. 実験結果

3.1 単孔ノズル 単孔の噴射室と尖端角度が 90° の針弁を組合せた模型ノズル内の流れを針弁リフト H_m を変えて撮影した。図 4 は噴射圧力が 200 kPa の場合の結果である。また、 H_m が 2mm 以下のときと 6mm のときの噴射室内の流れのスケッチを図 5 に示した。 $H_m \leq 2\text{mm}$ のときは弁座間の抵抗が大きく流れが速くなるため、弁座間から流出した流れが噴射室壁面からはく離し、噴射室壁に沿って渦がたくさん発生し、それが噴孔に流れ込んでいく様子が観察される。 H_m を 6mm にすると、針弁先端に合流による弱い乱れができるが、壁に沿う渦は認められなくなる。この場合噴孔に向かう流れは噴射室内ではなめらかであり、全体として乱れの小さい流れが噴孔から流出していると見られる。

模型ノズルから噴出する噴流の写真を図 6 に示す。模型のノズルでは噴射速度そのものが低く、また背圧

表 1 ディーゼルノズルと水流模型ノズルの相似条件

parameter	unit	single hole		multi-holes	
		diesel nozzle	model I	diesel nozzle	model II
hole diameter	mm	0.3	3	0.3 × 6	3 × 2
density	kg/m ³	830	1000	830	1000
kinematic viscosity	m ² /s	3.0×10^{-6}	1.004×10^{-6}	3.0×10^{-6}	1.004×10^{-6}
injection pressure	MPa	157	0.2	69.7	0.1
injection velocity	m/s	51.0	20.4	40.6	13.7
flow rate	cm ³ /s	43.1	14.4	17.2	19.3
Reynolds number		6.10×10^4	6.10×10^4	4.08×10^4	4.08×10^4

(a) $H_m = 0.8\text{ mm}$ (b) $H_m = 2.0\text{ mm}$ (c) $H_m = 6.0\text{ mm}$

図 4 噴射室内の流れ (単孔- 90° 針弁)

(a) $H_m \leq 2.0\text{ mm}$

(b) $H_m = 6.0\text{ mm}$

図 5 噴射室内の流れのスケッチ

も大気圧であるため、ディーゼル噴霧のような微細な液滴には分裂せず、ある広がり角を持った液体噴流として噴出する。ディーゼル噴霧では高速の液体噴流が密度の高い高圧雰囲気中に噴出し微粒化されるが、このとき噴孔内の流れに乱れを与えると微粒化が促進され噴霧角が増大することが知られている。また噴孔内の乱れを大きくし大気圧下で噴霧角を増大させたノズルは高圧下でも大きな噴霧角を示すことが観察されている⁽⁶⁾。そこで、模型ノズルとディーゼルノズルの噴孔内の流れに相似性が成り立つとすれば、噴孔内の流れが不安定で噴流の広がり角が大きくなる傾向にある場合、その条件に相当するディーゼルノズルでも、角度そのものは異なるが、大きい噴霧角が期待できると思われる。そこで、この広がり角をここでは噴霧角 θ とし、これと噴射室内の流れとの関係を調べた。写真からは H_m が0.8mmの場合に噴霧角が大きく、 H_m が大きくなるにつれ噴霧角が減少していくことが明らかになった。

図7は単孔の噴射室と90°針弁を組合せて噴射圧力 P_i を一定とした場合の噴射量 Q 、噴霧角 θ と噴射室の圧力 P_s の実測値を示したものである。針弁リフトの増加に伴い、 H_m が0から0.8mmまでは、 Q と P_s は急に増加し、0.8~2mmの間でゆるやかに増加するが、それ以上になると一定になる。 θ は H_m が1mmになるまでは大きな変化を示し、1mmを越えると減少して3mmからほぼ一定の値に近づく。

噴霧角の増加する原因としては噴射室から噴孔に流入する流れの乱れが大きくなると噴出する噴流の不安定性が増し、その結果として噴流の広がり角が増加するものと思われる。 $H_m \leq 2$ mmのときは針弁と弁座の間からの流れのはく離によって噴射室壁に沿って渦が発生し、それが噴孔に流れ込み噴孔内の流れの不安定性が増すが、 H_m が1mm程度のときにこの現象がも

っとも顕著に起こっているものと考えられる。また H_m が2mm以上では噴孔に流れ込む流れの乱れが小さく安定性が増し、噴霧角が小さくなったものと考えられた。その実験結果をディーゼルノズル適用すると、針弁のリフトが $0.3D$ (D は噴孔径)程度のときに噴霧角が最大になると推定することができる。

図8では噴射量 $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合の P_i 、 P_s と θ に及ぼす H_m の影響を示す。針弁リフトが小さいときは、 P_i を非常に高くする必要がある。しかし針弁リフトを大きくすると、 P_i は減少し H_m が1.2mmになるとほぼ一定になる。 P_s は0.6mmですでに一定になっている。

噴霧角 θ は図7の場合と同じように変化する。これは噴射量が一定の場合でも弁座間のすきまが小さくなると、その部分の流速が増加し図6で説明したのと同じ現象が起きているためと思われる。

3.2 単孔ノズルに及ぼす針弁形状の影響 単孔の噴射室とフラット針弁や円筒針弁を組合せた模型ノズル内の流れと噴霧角との関係も調べた。図9はフラット針弁の場合で噴射室内の流れは図4の場合より不安定で激しく乱れている。この傾向は H_m が小さい場合に特に顕著で、噴射室全体に強い乱れが見られた。これは噴射室壁面ではなく離とフラット針弁の先端ではなく離の両者によって渦が造られるため、流れが不

図6 噴霧の状態(単孔—90°針弁)

図7 単孔—90°針弁模型ノズルの特性(噴射圧一定)

図8 単孔—90°針弁模型ノズルの特性(噴射量一定)

安定で乱れが多いものと思われる。一方、円筒針弁の場合は噴射室の壁面に沿った流れができるため壁面からはく離せず円筒針弁の先端にのみはく離した渦ができていることが図 10 より認められる。

単孔の噴射室と前述した三種類の針弁を組合せたときの噴霧角の比較を図 11 に示す。噴霧角はフラット針弁の場合に大きくなり円筒針弁の場合に小さくなるが、これは噴射室内の乱れが噴孔から流出する程度に比例していると写真から判断することができた。例えば円筒針弁の場合は針弁の先端に大きな渦ができるが、噴射室から噴孔に流出する流れはなめらかであり、その結果噴霧角は小さくなったものと思われた。

3.3 二孔ノズル 二孔の噴射室と 90° 針弁を組合せた場合の噴射室内の流動の写真を図 12 に示す。噴射室壁面で一度はく離した流れが噴孔に流れ込み、流れが単孔の噴射室の場合より複雑になっていることが

わかる。図 13 と 14 は二孔の噴射室とフラット針弁や円筒針弁を組合せた場合の結果である。どちらの場合も単孔の噴射室の場合よりも流れは複雑になり乱れの大きい流れが噴孔から流出しているようにみられる。特に円筒針弁の場合では単孔の場合に見られた針弁の先端の大きな渦が見られず、噴射室全体に細かい乱れが見られる。図 15 は二孔の噴射室から噴射される場合の噴霧角の測定結果である。 H_m が小さい場合に円筒

(a) $H_m=0.8$ mm (b) $H_m=2.0$ mm (c) $H_m=6.0$ mm

図 9 噴射室内の流れ (単孔—フラット針弁)

(a) $H_m=0.8$ mm (b) $H_m=2.0$ mm (c) $H_m=6.0$ mm

図 10 噴射室内の流れ (単孔—円筒針弁)

図 11 噴霧角の比較 (単孔ノズル)

(a) $H_m=0.8$ mm (b) $H_m=2.0$ mm (c) $H_m=6.0$ mm

図 12 噴射室内の流れ (二孔—90° 針弁)

(a) $H_m=0.8$ mm (b) $H_m=2.0$ mm (c) $H_m=6.0$ mm

図 13 噴射室内の流れ (二孔—フラット針弁)

(a) $H_m=0.8$ mm (b) $H_m=2.0$ mm (c) $H_m=6.0$ mm

図 14 噴射室内の流れ (二孔—円筒針弁)

図 15 噴霧角の比較 (二孔ノズル)

針弁と組合せたときの噴霧角が他の場合より大きい。これは図 14 に示した写真のように噴射室内の乱れが大きく、その乱れが左右の二つの噴孔から流出しているためと考えられる。

二孔ノズルの噴霧角を図 11 の単孔ノズルの場合と比較すると、どの形状の針弁についても二孔ノズルのほうが噴霧角が大きくなっている。これは単孔の場合よりも二孔の場合のほうが噴孔入り口が弁座間からの流れの影響を受けやすい位置にあり、また流れが二孔に分かれるため不安定になりやすいためと思われる。

4. 結 論

水流模型ノズルを使ってディーゼルノズルの噴射室内の流れと噴霧角の関係を調べた結果、次の事項が明らかになった。

(1) 針弁リフトの小さいときは噴射室壁の近くに渦ができ、そこでできた乱れが噴孔に流出するため噴

霧角が大きくなる。リフトが大きくなると、乱れが弱くなるため、噴霧角が減少して、ついに一定になる。

(2) フラット弁により噴射室内の乱れが強まると噴霧角が大きくなる。

(3) 円筒針弁の場合では噴孔の状態によって噴射室内の流れは異なり、噴射室内の乱れが噴孔から流出すると噴霧角が大きくなる。

本実験を行うに当たり志賀健治君の協力があったことを記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 廣安・松成, 機論, 34-260, (昭 43), 13.
- (2) 廣安・宝諸, 内燃機関, (昭 61), 117, . コロナ社.
- (3) Hiroyasu, H., ほか 2 名, *ICLASS-78*, (1978), 125.
- (4) Guido, A. R., *ATA*, 19 (4), (1966), 229.
- (5) Reitz, R. D. and Bracco, F. B., *SAE Paper*, No. 790494, (1979), 1.
- (6) Arai, M., ほか 2 名, *ICLASS-85*, (1985), 1B/4.