マイクロホールノズルを用いた直噴式ディーゼル機関
の着火, 燃焼および排気特性*小堀 繁治^{*1}, 神本 武征^{*1}, 小酒 英範^{*1}Ignition, Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine Equipped
with a Micro-hole Nozzle

Shigeharu KOBORI, Takeyuki KAMIMOTO and Hidenori KOSAKA

In an attempt to achieve lean combustion in Diesel engines which have a potential for simultaneous reduction of NO and soot levels, the authors developed a micro hole nozzle which has orifices with a diameter as small as 0.06 mm. Combustion tests were carried out using a rapid compression expansion machine which has a DI Diesel type combustion chamber equipped with the micro hole nozzle. A comparison with the results of a conventional nozzle experiment revealed that the ignition delay was reduced by 30%, in spite of which both peaks of initial premixed combustion and diffusion combustion increased significantly. The combustion in the case of the micro hole nozzle experiment was accompanied by a decrease in soot emission, and an increase in NO emission. The trends in the heat release pattern and exhaust emissions described above could possibly be attributed to the fact that locally stoichiometric mixtures which are responsible for NO formation still remain in the combustion region in the flame even if the mean equivalence ratio in the flame is lean.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Combustion, Emission Micro hole Nozzle, Rapid Compression-Expansion Machine

1. まえがき

ディーゼル機関においてすすとNOを同時に低減する一つの方法として希薄燃焼の概念があり, 希薄燃焼を実現するためには高圧燃料噴射と小口径多噴口ノズルの組み合わせが考えられる. 高圧噴射を用いた場合の噴霧火炎を観察すると⁽¹⁾, 燃料噴射圧力の増加に伴い, 輝炎領域は当量比の低い先端に移行する傾向があり, 従って高圧噴射は燃焼領域を希薄化できる可能性があると考えられる. しかし従来の研究結果⁽²⁾によると, 噴口径を $\phi 0.13\text{mm}$, 噴口数を10にし, 燃料噴射圧力を150MPaに高めても, すすは大幅に低減するが, NOはかえって増加している. この理由として, 噴口径を $\phi 0.13\text{mm}$ まで小さくしても希薄化が不十分なためと考えられるが, 噴口径を更に小さくすると希薄化燃焼が実現できるかもしれない.

本研究では, 従来のノズル噴口径の半以下の噴口径, 面積ではほぼ1桁小さい 0.06mm の噴口径を有するノズル(マイクロホールノズルと称する)を製作し,

Fig.1 Effect of nozzle orifice diameter and injection pressure on mean equivalence ratio, ϕ , at 0.8 ms after the start of injection

このノズルを用いて希薄燃焼の可能性を調べる. 先ず, 準定常理論を用いて噴霧特性を調べた. 図1は噴射開始後0.8ms(ほぼ着火遅れ時間)における噴霧内の平均当量比 ϕ が噴射圧力と噴口径によってどの様に変化するかを計算した結果である. 図から分かるように,

* 原稿受付 1995年7月17日.

^{*1} 正員, 東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1).

Fig.2 Variation of mean equivalence ratio, ϕ , in a spray versus time with injection pressure, P_i , as a parameter at a condition of fixed orifice diameter of 0.06 mm

噴口径を0.1mm以下にし、噴射圧力を100MPa以上にすれば $\phi < 0.8$ 、噴口径を0.05mm以下、噴射圧力を160 MPa以上にすれば $\phi < 0.6$ となることが分かる。図2は噴口径を0.06mmに保ち、噴射圧力を変化させた場合の着火時(噴射開始後0.8ms)における噴霧内平均当量比 ϕ を示している。噴射圧力を110MPa～130MPaとすれば着火後の燃焼は平均的に当量比1以下となる。

以上の検討に基づき燃焼と排気特性および着火特性に関する実験を急速圧縮膨張装置を用いて行った。

2. マイクロホールノズルの試作

本研究で目標とする数十 μ m程度の噴口径の加工は従来の方法では困難と考えられるので、レーザー加工装置を使用して穴開け加工を行った。

2.1 レーザー加工装置 レーザー加工装置は集光レーザー発振ヘッド、ノズル固定治具、X-Y方向移動ステージで構成される。レーザーには発振波長1.06 μ m、パルス幅0.2～20msのNd-YAGレーザーを使用している。レーザーヘッドにはレーザー光を集光するための光学系および拡大ビデオカメラが付いており、画面を見ながらノズル噴口の位置決め、レーザーの焦点合わせ、加工状態の観察を行うことができる。

2.2 レーザー加工 レーザー穴開け加工は以下の手順で行った。ノズル噴口の穴開けを行う前に、ノズル先端部と等しい肉厚の試験片を加工し、要求される噴口径を加工するのに適したレーザー射出時間および出力を調べた。レーザー発振条件が決定したら、ノズル固定治具に無垢のノズルを取り付けて加工を行

Fig.3 Enlarged photograph of a micro-hole nozzle ($\phi 0.06\text{mm} \times 14$)

う。穴開け加工の最終段階でレーザーが穴を貫通し、サック内および本体の針弁との接触面を傷つけないように、針弁の代わりにサック内に $\phi 1\text{mm}$ のステンレス棒を挿入し、レーザーを遮蔽する。穴開け終了後、加工の際、発生した酸化物やバリ等を取り除くため、超音波洗浄器で1時間程度洗浄する。

図3は試作した肉厚0.3mmで $\phi 0.06\text{mm} \times 14$ のノズルをノズル先端方向からみた拡大写真である。別途、穴の断面を写真により観察したところ、レーザー入射側が直径 $\phi 0.08\text{mm}$ 、射出側が $\phi 0.06\text{mm}$ であった。マイクロホールノズルの呼称噴口径はレーザー出口側、すなわちノズル内径の直径とした。

3. マイクロホールノズルを用いた場合の燃焼と排気特性

3.1 実験装置 マイクロホールノズルを用いた場合の燃焼排気特性を急速圧縮膨張装置⁽³⁾を用いて調べた。急速圧縮膨張装置の燃焼室を図4に示す。燃焼室の仕様はボア $\phi 100\text{mm}$ 、ストローク92.2mm、圧縮比15.8である。ピストン、ライナーおよびシリンダーヘッドには電気ヒーターを取り付け、壁面温度を473Kに保った。シリンダーヘッドには熱発生率を測定するための小型圧力変換器(KISTLER TYPE6061)を取り付けた。吸気管には吸入空気の予熱と予圧を行う蓄圧容器を連結した。燃料噴射装置には30～148MPaの圧力範囲で等圧噴射が可能な電子油圧制御式ユニット高圧噴射装置⁽⁴⁾を用いた。

実験には $\phi 0.06\text{mm} \times 4 + \phi 0.1\text{mm} \times 4$ の計8噴口のマイクロホールノズル(噴射角度 160°)を用いた。このノズルは $\phi 0.06\text{mm}$ と $\phi 0.1\text{mm}$ の噴口を 45° おきに配置し、 $\phi 0.06\text{mm}$ の噴口から噴射される噴霧が燃焼室中心付近の空気を、 $\phi 0.1\text{mm}$ の噴口から噴射される噴

Fig. 4 Cross section of the combustion chamber used for experiments of combustion and emissions

Fig. 5 A comparison of exhaust emissions and ignition delay between the micro-hole nozzle ($\phi 0.06 \text{ mm} \times 4 + \phi 0.1 \text{ mm} \times 4$) and the standard nozzle ($\phi 0.15 \text{ mm} \times 4$) at various equivalence ratios

霧が燃焼室外周部の空気を使うように意図した。このマイクロホールノズルと比較するために、基準ノズルとして $\phi 0.15 \text{ mm} \times 4$ (噴射角度 150°)のノズルを選択した。比較実験において、両ノズルの噴射率が等しくなるように各々の燃料噴射圧力を設定した。その結果、マイクロホールノズルの場合が 148 MPa 、基準ノズルの場合が 61 MPa となった。燃料には市販のJIS2号軽油

Fig. 6 A comparison of exhaust emissions and ignition delay between the micro-hole nozzle ($\phi 0.06 \text{ mm} \times 4 + \phi 0.1 \text{ mm} \times 4$) and the standard nozzle ($\phi 0.15 \text{ mm} \times 4$) at various injection timings

を使用し、また燃料系にはメッシュサイズ $5 \mu \text{ m}$ のラインフィルターを設置してマイクロホールの目詰まりを防止した。

3. 2 実験結果 ピストン往復時間 60 ms (1000 rpm 相当)、スワール比 1.8 、噴射時期を膨張行程開始時期として燃焼実験を行った。当量比を変化させた場合の排気特性を図5に示す。着火遅れは、雰囲気条件が等しいにも関わらず基準ノズルの場合が 1.1 ms であるのに対し、マイクロホールノズルの場合は 0.75 ms と 30% 程度短縮された。混合促進の結果と考えられる。NOの排出濃度については一般に着火遅れが短縮されるとNOの排出が減少する傾向があるが、図5の結果ではマイクロホールノズルの場合の方がNO排出濃度は基準ノズルの場合より増加した。排気煙濃度については、基準ノズルの場合は当量比 0.6 から急激に増加するのに対して、マイクロホールノズルの場合は当量比 0.7 まで排気煙が 0 であった。ノズル噴口径の小口径化と高噴射圧化によって、混合が促進されたためと考えられる。

次に当量比を 0.6 一定とし、噴射時期を変化させた場合の結果を図6に示す。NO排出濃度は両条件において膨張開始後、 $0 \text{ ms} \sim 0.5 \text{ ms}$ 付近で極小値をとる傾向がある。それ以後噴射時期を遅くすると着火遅れが長くなり、NO排出濃度はかえって増加する。着火性の

Fig. 7 A comparison of the rate of heat release between the micro-hole nozzle ($\phi 0.06 \text{ mm} \times 4 + \phi 0.1 \text{ mm} \times 4$) and the standard nozzle ($\phi 0.15 \text{ mm} \times 4$)

優れたマイクロホールノズルを用いて噴射時期を遅らせても、基準ノズルの場合に比べてNO濃度が低くなることはなかった。

熱発生率の結果を図7に示す。図は当量比0.6、噴射時期を膨張開始時に固定した場合の経過時間に対するピストン変位 X 、シリンダー内圧力 P_c および熱発生率 $\dot{Q}$ を示す。時間軸の0は膨張行程開始時期を表す。マイクロホールノズルの熱発生率の特性は、基準ノズルと比較して着火遅れが短縮されるが、初期熱発生率が大きく、同時に拡散燃焼の最大値も大きくなること、また燃焼期間は短縮されることである。小噴口径化と高圧噴射が相まって、混合が促進されたことが分かる。

マイクロホールノズルを使用した場合の燃焼特性は着火遅れの短縮と高い熱発生率である。以上の結果から本研究の狙いである希薄化および混合促進は平均的には達成されたといえる。しかし、NO排出濃度は大幅に増加する傾向がある。これは高噴射圧化および噴口径の小噴口径化により噴霧が平均的に希薄化されても、拡散燃焼の形態である限り噴霧内は不均一な構造を持ち、局所的に当量比 $\phi = 1$ の混合気が不可避免的に形成され、NO生成量が増加したものと推定される。従って、NOの生成を抑える希薄燃焼を実現するためには噴射圧力をさらに上昇させるか、燃焼の形態を変更することが必要と思われる。

4. マイクロホールノズル噴霧の着火特性

前章の結果よりマイクロホールノズルの場合の着火遅れが短くなるという興味ある結果が得られたが、こ

Fig. 8 Cross section of the combustion chamber used for ignition delay experiment

Table 1 Specification of test nozzles used for ignition delay experiment

Orifice dia.	$\phi 0.15 \text{ mm}$	$\phi 0.1 \text{ mm}$	$\phi 0.06 \text{ mm}$
No. of orifice	1	2	6
Total orifice area	0.0177 mm^2	0.0157 mm^2	0.017 mm^2
$\Delta \theta$	—	90°	22°

の実験では噴口径だけではなく、噴射圧力も変化していた。そこで噴射圧力を一定にして、噴口径を $\phi 0.15 \text{ mm}$ から $\phi 0.1 \text{ mm}$ 、 $\phi 0.06 \text{ mm}$ と変化させた場合、着火遅れがどのように変化するかを調べた。また高速写真によりマイクロホールノズルの噴霧火炎を観察した。

4. 1 実験方法 実験に用いた燃焼器を図8に示す。燃焼室はボア $\phi 60 \text{ mm}$ 、ストローク 92.2 mm 、圧縮比16、トップクリアランス 0.8 mm である。燃焼室はボア $\phi 120 \text{ mm}$ 程度の直噴式ディーゼル機関のピストン形状を模擬して、噴口出口からキャビティー内壁までの距離を 28 mm 、深さ 11.5 mm とした。本実験では急速圧縮膨張装置のピストンが上死点で静止している期間中に燃料噴射を行った。圧縮時間は 25 ms である。

表1に実験に用いた3種類のノズルの仕様を示す。噴口総面積がほぼ等しくなるように噴口径、噴口数を定めた。噴射圧力は 100 MPa で一定とした。初期圧力を変化させて雰囲気圧力をパラメーターとして、 $2.8 \sim 8.5 \text{ MPa}$ の範囲で変化させた。

4. 2 実験結果

4. 2. 1 噴口径が着火遅れに及ぼす影響 着火始めは図9に示すように燃焼室内圧力が極小値を示す時刻と定義した。噴射開始時刻は燃料噴射圧力の降下開始時とした。両時刻の差を着火遅れと定義する。

図9に各噴口径の場合における着火遅れの雰囲気圧力に対する変化を両対数表示で示した。図中、各シンボルは4～5個のデータの平均値であり、縦棒の長さは標準偏差の2倍の大きさを示す。いずれのノズルにおいても雰囲気圧力の増加に伴い着火遅れが減少する。

Fig.9 Effect of nozzle diameter on ignition delay

また噴射圧力が同じであっても噴口径を小さくすると着火遅れが短くなることが分かる。 $\phi 0.15\text{mm} \times 1$ とマイクロホールノズルの $\phi 0.06\text{mm} \times 6$ の場合を比較すると、噴口の小口径化に伴い、雰囲気圧力が3.0MPaで35%、8.5 MPaで22%各々の着火遅れが減少している。噴口の小口径化により、燃料の微粒化と蒸発が促進され、燃焼可能な混合気の生成が促進されたためと考えられる。このように、噴口の小口径化は、広い雰囲気圧力範囲において、着火遅れを短縮することが明らかとなった。

4. 2. 2 マイクロホールノズルを用いた噴霧燃焼の高速度撮影 デジタル・ハイスピード・ビデオ（フォトン、FASTCAM）を用いて、マイクロホールノズルの噴霧火炎の高速度直接写真を撮影した。石英窓を通して燃焼室のほぼ全域を観察するが、観察窓からの熱損失が大きく、このままでは燃料噴射時の雰囲気温度、圧力が着火遅れの実験の場合に比べ著しく低下してしまう。そこで高速度撮影実験では、空気の代わりにAr:53%、He:26%、 O_2 :21%の混合気を用いることで、鉄製ヘッド使用時と同程度の雰囲気温度および圧力を得た。撮影速度は13500fpsとした。

図10にマイクロホールノズルと基準ノズルの場合の高速度直接写真を示す。マイクロホールノズルの場合には、基準ノズルの場合に比べて、輝炎の発生時期が早く、かつ輝炎の観察される領域が噴口に近い。また拡散燃焼時の輝炎領域は広くかつ輝度も高い。輝炎の消失時刻も早い。以上の観察結果は図7の熱発生率の傾向とよく対応している。前書きで述べたように、噴口径を小さくして高圧燃料噴射すれば燃焼領域が噴

$P_{inj} = 100 \text{ MPa}$, $T_s = 800 \text{ K}$, $P_s = 2.8 \text{ MPa}$

Ar : 53 %, He : 26 %, O_2 : 21 %

Fig.10 High speed photographs of flames : micro-hole nozzle (top), standard nozzle (bottom)

口から遠ざかる、つまり希薄領域へ移動すると期待したが、この写真を見る限り、マイクロホールノズル火炎では、かえって輝炎が噴口の近くに存在することになってしまった。今後、理由を調べる必要がある。

5. 結論

レーザー加工により噴口径 $\phi 0.06\text{mm}$ のマイクロホールノズルを試作し、ボア $\phi 100\text{mm}$ 、ストローク 92.2mm 、圧縮比 15.8 の燃焼室を有する急速圧縮膨張装置を用いて、マイクロホールノズルが燃焼と排気に及ぼす影響を調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) マイクロホールノズルは基準ノズルと比較して、着火遅れが約 30% 短縮する。しかし、初期熱発生率は増加し、拡散燃焼の最大熱発生率も増加する。また燃焼期間が短縮された。
- (2) マイクロホールノズルを用いた場合の排気煙濃度は基準ノズルの場合より減少したが、 NO 排出濃度は基準ノズルの場合より増加した。

マイクロホールノズルを用いた場合の着火特性を調べるため、ボア $\phi 60\text{mm}$ 、ストローク 92.2mm 、圧縮比 16 の燃焼室を用い、燃料噴射圧力を 100MPa 一定に保ち、噴口径が着火遅れに及ぼす影響を調べた。また高

速度ビデオにより燃焼観察を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (3) 噴口の小口径化は、広い雰囲気圧力範囲において、着火遅れを短縮する。噴口径を $\phi 0.15\text{mm}$ から $\phi 0.06\text{mm}$ に小さくすると、雰囲気圧力が $2.8 \sim 8.5\text{MPa}$ の範囲で着火遅れが約 30% 短くなる。
- (4) マイクロホールノズルを使用すると、従来のノズルの場合に比べ、噴口により近い位置から輝炎が観察される。

本研究を行うに当たり当時学部学生であった井原宏二氏、寺崎公浩氏、二宮弘行氏および大澤健一郎氏達の協力を得た。またマイクロホールノズルの試作に当たっては(株)ゼクセル社の協力を得た。記して謝意を示す。なお、本研究は文部省科学研究費補助金、試作研究B(1)04555047「マイクロホールノズルを用いた予混合燃焼式ディーゼル機関の試作」の補助を受けて行われた。

参考文献

- (1) H. Yokota, et al., SAE Paper No.910255.
- (2) S. Shundoh, et al., SAE Paper No.920461.
- (3) 神本・他4名:機論, 55-512,B(平1),1253.
- (4) 神本・他2名:機論, 53-487,B(昭62),1117.