可視化 DI ディーゼル機関を用いた燃焼室壁面付近での
混合気形成過程*Rahman Md. MONTAJIR^{*1}, 常 本 秀 幸^{*2}
石 谷 博 美^{*2}, 南 利 貴^{*3}Mixture Formation Process near Cavity Wall in a DI Diesel Engine
with Transparent Cylinder and PistonRahman Md. MONTAJIR, Hideyuki TSUNEMOTO^{*4},
Hiromi ISHITANI and Toshitaka MINAMI^{*4} Kitami Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

The mixing of a diesel spray with air is generally determined by the injection parameters and characteristic of the air movement in the combustion chamber. The combustion chamber design can also help to form better mixtures. In this study, improvements in mixture formation was attempted by changing the combustion chamber geometry, injection pressure, and intake gas pressure in an actual diesel engine with transparent cylinder and piston arrangement. With this engine the front view and the side view photographs of the spray impinging on the wall and flowing over the bottom surface of combustion chamber were taken. From these results the overall air and fuel mass distributions were estimated.

Key Words: Diesel Engine, Combustion Chamber, Fuel Spray, High Pressure Injection, Super Charging, Mixture Formation

1. まえがき

小型DIディーゼル機関の燃焼室壁面上での噴霧挙動に関する研究は、これまで多くの研究者によって進められてきている^{1)~3)}。しかし、最近の燃焼室の主流となっているリエントラント型のリップ付近あるいは燃焼室底面形状に関する詳細な研究例は少ない。

本研究では、通常のDI機関のピストン上部に角形ピストンとシリンダーを設置し、噴霧を側面および正面から撮影が可能のように改造して噴霧の発達過程を調べている。噴霧に関するこれまでの報告例では、その多くが微粒化現象や空気導入と言ったミクロの混合気形成に関するものであった^{4), 5)}。本研究では、噴霧と空気の質量分布の適正化を進める上で、側面・底面形状がどのような影響をもたらすかについてマクロ的な観点から検討を行っている。すなわち、噴霧は着火遅れおよび燃焼期間内に燃焼室壁面付近に多くが移動すると思われるが、その部分に存在する空気量には限界がある。このことが噴射量が増大した場合の黒煙発生

の原因の一つになっていると考えている。一方、利用できなかった中心部の空気は、膨張行程で燃焼室外に移動するから、その前に噴霧との混合の機会を作る事が重要である。

そこで今回は、リエントラント型燃焼室のリップ部あるいは底部形状を変更するとともに、過給圧あるいは噴射圧を高くした場合に燃焼室内の燃料と空気の質量分布がどのように変化するかなどについて、噴霧写真をもとに検討を行った。

Fig. 1 Schematic of the experimental system

* 原稿受付 1999年7月28日。

^{*1} 正員, 北見工業大学大学院 (☎ 090-8507 北見市公園町165)。^{*2} 正員, 北見工業大学工学部。^{*3} いすゞ自動車(株) (☎ 252-0806 藤沢市土棚8番地)。

E-mail: tsune@mech.kitami-it.ac.jp

2. 実験装置および方法

図1は、実験に用いた噴霧観察および計測システムの概略図である。使用した機関はボア95mm、ストローク115mmの単気筒直接噴射式ディーゼル機関で、ピストントップランド付近を改造し、噴霧観察用のアクリル製角形ピストンとシリンダーを設置している。角形ピストンを用いたのは、噴霧を側面から撮影した場合のレンズ効果による変形を少なくするためである。

実験に用いた燃焼室は、図2に示すようなリップ厚さおよび巾を基本とし、リップ下部のアール、リップとノズルとの距離あるいは底部のコーナーなどを変化させている。なお、角形ピストン部にはピストンリングを付けていないため、設計圧縮比は16.5であるが、実圧縮比は10程度まで下がっている。

実験に用いた噴射系はコモンレールタイプの高圧噴射システムであるが、標準の噴射圧は40MPaで、最高圧力はノズルからのリークが多かったために今回は100MPaにとどめた。なお、噴孔径は0.22mm一定である。また、図3は高圧発生装置とそのコントロール部を示している。燃料加圧装置としては、単発噴射の場合高圧油圧ジャッキが利用でき、ノズルからのリークが少なければ150MPa程度の圧力で噴射は可能である。

標準とした運転条件は、機関回転数700rpm、噴射量は10mg/strokeで上死点噴射で実験を行っている。なお、燃料はJIS2号軽油である。

Fig. 2 Combustion chamber geometry for testing

Fig. 3 High pressure injection system

今回の実験では、着火を避けるために作動ガスに窒素を用い給気圧を高くした実験を行っているが、この場合の過給圧コントロールは、図4に示す吸気自動弁方式で実現している。この方式の場合、バルブのセット圧を弱くしておけば、過給圧とシリンダー内との差圧で開弁し、圧縮圧力が過給圧以上になると自動的に閉じることになり、排気を行わないことから、少量の窒素を補充するだけで高過給が得られる。しかし、吸気バルブが小さいことから、図5に示すように、シリンダー内の最高圧力が定常値に達するまでに15回転程度の期間が必要となり、写真撮影までの待ち時間が生ずる。なお、1回転に1回、図6に示すような圧縮・膨張行程が実現でき、高圧・高温のもとでの噴霧の観察が可能

Fig. 4 Super charging system by nitrogen gas

Fig. 5 Cylinder pressure history with gas intake pressure

Fig. 6 Compression and expansion pressure curve

能となる。写真撮影は、噴射ポンプの回転部分に取り付けたセンサーからの信号をトリガーとして、リターダでストロボの発光タイミングを変更しながら CCD カメラで行っている。

本研究では、撮影された壁面上の噴霧の広がり面積を画像処理ソフトを利用して求めているが、この場合、256階調のうちの黒に近い10ステップ程度をしきい値としている。本実験のように背面との濃度差が大きい場合、しきい値を1～2ステップ程度にしても面積変化は2%程度であり、10ステップ程度のしきい値で信頼性の高い結果が得られる。なお、各条件において写真を3枚撮影し再現性の確認を行っているが、コモンレールタイプの噴射系の場合、再現性が優れており実験間の誤差は最大でも2%程度である。

3. 実験結果および考察

3.1 シリンダー内ガスの質量分布

図7は、圧縮比を16.5として計算した場合のクランク角に対する燃焼室内外のガス質量分布比を示している。図から、燃焼室内ガスと燃焼室外ガスの質量分布割合は、30° ATDC 付近で逆転し燃焼室外で大きくなっている。一方図8は、燃焼室内外の半径方向の空気質量分布を1mm巾当たりで計算したものである。当然の事ながら、上死点付近における半径方向のマス分布は

Fig. 7 In-cylinder air mass distribution with crank angle

Fig. 8 Distribution of air mass per unit width in the radial direction (Calculated)

燃焼室内の外周部で大きい。しかし、拡散燃焼期間に当たる20° ATDC 付近になると、燃焼室外のマス分布が増大し、40° ATDC では外周部だけでも逆転している。このような空気のマス分布を考えると、燃料の多くを壁面付近に移動し、上死点付近の短期間内に混合気を形成することが重要となる。

図9は、高負荷に相当した噴射量を噴射した場合の、写真(a)のような噴霧発達中の空燃比(A/F)分布を推定したものである。この場合のA/Fの推定は、側面図と壁面上に広がった噴霧写真より噴霧体積を推定し、この体積相当の空気を取り込まれたとしてA/Fを計算しており、蒸発量は考慮していない。なお、この場合の燃料質量の空間分布は、噴射率一定で、噴霧内での追いつきがないものと仮定して求めており、その傾向は図(b)に示すように壁面に到達するまでは一定で、壁面上では到達後の噴霧が蓄積するが、噴霧内に均一に分散しているものとしている。この結果、図(b)の燃焼室内半径方向のA/Fは、壁面に達するまでの噴霧の場合、空気を取り込みが少ないため噴霧内の平均的A/Fは6以下になっている。しかし、壁面に達した噴霧は、空気を取り込みながら発達するから平均空燃比は14程度になる。また、図(c)は、燃焼室壁面付近におけるA/Fを時間経過で推定した結果である。なお、この場合の噴霧体積は衝突後の時間と共に厚さおよび大きさが変化するが、壁面から5～8mm程度の厚さになっている。また、この噴霧内に衝突後の燃料が図9(c)に示すように噴射率に対応して時間と共に蓄積され、それが均一に分布しているものとして平均空燃比を算出している。この結果、図に見られるように、壁面衝突直後はA/F=6程度の濃い混合気であるが、1msec 付近になると14程度

(a) Front and side view photographs of spray

Time after start of injection 1.0 msec

Side view

Front view

(b) A/F along the spray axis

(c) A/F along the wall

Fig. 9 Image of overall A/F in the cavity

になり、噴射期間を過ぎるとその後は変化が少ない。なお、5噴孔ノズルを想定した場合、壁面上での噴霧間干渉が1.5msec以降で発生するから、希薄化は停滞すると考えられる。従って、希薄混合気を作るためには、利用されていない中心部の空気を取り込んで混合気を形成する必要がある。

3.2 リップの効果

3.2.1 リップ形状 図10は、リップの有無およびリップコーナーのアールの影響について調べた結果である。図に見られるように、側面図の特徴は、リップにアールが付いた場合、衝突直後の噴霧厚さが薄くなり、それに対応して下方への広がりが大きくなる点である。このように側面図の場合、噴霧全体としての発達過程に差は少ないが、壁面上での噴霧の広がりを撮影した写真には大きな違いがある。すなわち、リップがない場合には噴霧は衝突点を中心として同心円状に広がっているが、リップがある場合、リップ面上での噴霧の広がりは少なく、多くの噴霧が燃焼室内に移動するのが明かである。なお、リップ下部のコーナーにアールがない場合、噴霧外周部下部の噴霧と壁面に衝突して下方に向かう噴霧が干渉し、側壁に衝突後の噴

Fig. 10 Effect of side wall shape on spray development

Fig. 11 Effect of lip shape on spray spreading area

霧の移動速度が低下し、広がり面積が小さくなる。図11は、これらの写真をもとに壁面上での広がり面積を求めた結果である。図に見られるように、リップなしとコーナーにアールのないシャープリップの場合の差は少ないが、アールのあるラウンドリップでは約50%面積が大きくなっている。従って、混合気の形成場所が底面付近になるとしても、リップにアールを付けた方が希薄混合気を作る上で有利な方法と言える。

3.2.2 噴霧衝突位置の影響 図12は、リップに衝突する噴霧の衝突位置と噴霧発達過程の関係を、リップにアールがある場合について調べた結果である。図に見られるように、噴霧の衝突位置によってヘッド面と燃焼室側面に移動する噴霧量に大きな違いが認められる。また壁面上での広がりは、噴霧の衝突中心がリップの下方にある場合、噴霧は衝突位置から扇状に広がっており、正面での広がりが大きくなることから、隣接する噴霧との干渉が起きやすくなる。一方、衝突位置がリップのコーナーより1mm上方の場合、ヘッド側に移動する噴霧が増大している。なお、下方に向かう噴霧はリップ部で広がりその巾のまま下方に移動する。

なお図13は、この場合の壁面上での広がり面積をヘッド面、側面および底面に分けて測定した結果である。なお、底面での広がり面積は側面図の先端部を頂点とし、正面図の横巾を弦とする弧で近似できることから6)、この関係を利用して計算している。図に見られるように、トータル面積に大きな違いはないが、混合気形成の位置が異なっており、1mm下方に噴射した

Fig. 12 Effect of impinging position on spray development

場合、混合気形成は底面で大きくなることがわかる。従って、燃焼後期に逆スキッシュに乗って燃焼を促進するためには、リップ付近にある程度の混合気が存在する方がよいことを考えると、リップコーナーの(b)付近に衝突させるのが良いのではないかと考えている。なお、本研究ではスワールがない条件で実験を行なっているが、噴霧初期の運動量が大きい期間では衝突後の噴霧でも基本形状は変化しないことから7)～9)、本研究結果をもとに、実機のスワールがある場合の混合気形成過程を推定することは可能であると考えている。

3.2.3 ノズルと壁面との距離 図14は、圧縮比一定で、ノズルと壁面との距離を変更した場合の壁面上での噴霧の特徴を示したものである。当然のことながら、距離が遠くなると底面が浅くなるので、底面への広がりが増大する。

図15は、壁面上での広がり面積の分布を示した結果である。図において、ノズルと壁面との距離が変わっても、リップ部における噴霧の挙動は類似しており、この部分における面積の違いは少ない。しかし、燃焼

室が浅くなると、燃焼室底部での広がりが大きく、全面積の約30%が底部に移動する。なお、燃焼室底部に移動した噴霧は空気流動の弱い部分になることから、ここでの面積が大きくなりすぎるのは後期燃焼の障害になると考えられ、ボア(D)と燃焼室径(d)の比 d/D は0.5位が良いのではないかと考えている。

3.3 燃焼室底面の形状

図16は、燃焼室底面形状と噴霧発達過程の関係を調べた結果である。また図17は、この場合の広がり面積を示している。図に見られるように、直角のコーナーを持った壁面とコーナーにアールを付けた壁面とでは、後者の方が噴霧移動量および広がり面積ともに大きくなるが、その差は少ない。これは、底面に達するまでに噴霧の速度が低下したためと考えている。ただ、コーナーが鋭角の場合、ここがよどみ点となって噴霧は停滞し、過濃混合気が形成される。なお、Rが大きい場合、この部分の空気が中心部に移動することになるから、外周部の空気利用率は減少する。従って、底面コーナーのRは必要であるが、大きすぎても燃料と空気のバランスは悪くなる。

Fig. 13 Effect of impinging position on spray spreading area

Fig. 15 Effect of wall distance on spray spreading area

Fig. 14 Effect of wall distance on spray development

Fig. 16 Effect of bottom corner radius on spray development

3.4 噴射圧力の影響

図18は、噴射圧力を変更した場合の噴霧の発達過程を調べた結果である。これらの写真を見ると、高圧化にともない貫通力が強くなり、壁面上での広がり面積も増大している。図19はこの時の広がり面積を示しているが、40MPaに対して100MPaでは1.5msec付近では約1.7倍の面積になっている。この結果、高圧噴射はマクロ的な視点からも希薄化に効果的であることが確認できる。

3.5 過給圧の影響

図20は、過給圧を変更した場合の噴霧挙動を示している。図から明らかなように、過給圧が高くなるほど噴霧角が広がるが、ペネトレーションが低下するため噴霧の広がり面積は減少し、噴霧体積は減少している。この場合の面積変化は図21に示すように1.5msec付近では0.1MPaと0.3MPaの吸気圧で後者の方が30%程度

減少する。しかし、噴霧体積が減少しても空気密度が高くなっていることから、噴霧内の空気質量は、過給圧0.1MPaに対して、0.3MPaの場合、2倍程度大きくなっており、混合気全体の空燃比は約40%希薄化されている。

Fig. 17 Effect of bottom corner radius on spray spreading area

Gas intake pressure 0.2 MPa

Inj. mass	10 mg		
Inj. pressure	40 MPa	70 MPa	100 MPa
Inj. duration	1.75 ms	1.30 ms	0.95 ms

Time after start of injection 1.0 msec

Fig. 18 Effect of injection pressure on spray development

Fig. 19 Effect of injection pressure on spray spreading area

Fig. 20 Effect of intake gas pressure on spray development

Fig. 21 Effect of intake gas pressure on spray spreading area

4. まとめ

文 献

以上、燃焼室側壁および底面形状あるいは高圧噴射・高過給のもとでの混合気形成過程を調べた結果、次のようなことが明らかとなった。

- 1) リエントラント型燃焼室を用いた場合、空気流動が大きい燃焼室内での混合気量が増大し、空気利用率が改善できる。なお、この効果はリップ入り口部にアールがあり、しかもアールの中心付近に噴霧の中心を衝突させた場合に大きい。
- 2) 燃焼室壁面とノズルとの距離を変更しても、噴霧の広がり面積の違いは少ないが、距離が遠くなると燃焼室が浅くなり、底面での広がりが増大する。
- 3) 燃焼室底部にアールを付けても噴霧の広がり面積に大きな違いはない。
- 4) 噴射圧力を高くした場合、貫通力が強くなり壁面上での広がりも大きくなることから、混合気の希薄化が可能になる。
- 5) 過給圧を高くした場合、噴霧体積は減少するが空気密度が大きくなることから、過給圧0.1MPaに対して0.3MPaで平均空燃比は約40%後者の方が大きくなる。

なお、本研究の遂行に際し、燃焼室製作などに対し協力を頂いた北見工業大学技術部 阿部清 山田忠永 両技官に、ここに記して謝意と致します。

- 1) J. Senda and et al., Modeling Spray Impingement Considering Fuel Film Formation on the Wall, SAE paper 970047
- 2) H. Fujimoto and et al., Characteristics of Free and Impinging Gas Jets by Means of Image Processing, SAE paper 970045
- 3) L. Zhengbai and et al., Experimental Investigation of Film-Space Atomization Combustion in D.I. Diesel Engines, SAE paper 901578
- 4) M. Arai and et al., Movement and Structure of Diesel Spray Impinging on an Inclined Wall, SAE paper 970046
- 5) R. D. Reitz and et al., Modeling Drop Drag Effects on Fuel Spray Impingement in Direct Injection Diesel Engines, SAE paper 970879
- 6) 常本ほか2名, ディーゼル機関の燃焼室壁面での噴霧の挙動, 自技論, No. 26, 1983
- 7) S. Shundoh and et al., The Effect of Injection Pressure and Swirl on Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection, SAE paper 910489
- 8) 堀田ほか4名, 小型高速DIディーゼルの燃焼改善, 自技会秋季大会前刷集, 1998, No.9838859
- 9) T. Minami and et al., Analysis of Fuel Spray Characteristics and Combustion Phenomena Under High Pressure Fuel Injection, SAE paper 900438