

渦流室式ディーゼル機関の燃焼改善による 排気浄化

堀田義博，中北清己，稲吉三七二

Combustion Improvement for Reducing Exhaust Emissions in IDI Diesel Engine

Yoshihiro Hotta, Kiyomi Nakakita, Minaji Inayoshi

要 旨

渦流室式ディーゼル機関におけるPM（粒子状物質）低減策を探索し，そのメカニズムを調査した。解析手法には排気・燃焼特性の測定，渦流室と主室の高速燃焼観察を用いた。本研究では以下のことを明らかにした。

(1) 渦流室式ディーゼル機関では直接噴射式ディーゼル機関と異なり，初期噴射率の抑制によりPMが減少する。これは着火位置が噴霧根元から先端に移動することでSOFが減少し，また主室への高濃度すすの流出が遅れることでスモークが減少するためである。

(2) 直接噴射式ディーゼル機関では，噴射の高圧化によってPMが低減されるが，渦流室式ディーゼ

ル機関の場合には逆に悪化する。これは，噴霧と壁面の激しい衝突によって燃料の壁面への付着と過濃混合気の滞留が生じるためである。

(3) 渦流室容積比の増大は渦流室内でのスモーク生成量を大幅に低減する。しかし，渦流室容積比を増大させるためには主燃焼室の容積を減少させざるを得ず，単純に主燃焼室全体を浅くして容積を減少させると，主燃焼室での流動が単純化して，主燃焼室における燃焼自体は悪化する。

(4) 主燃焼室において，容積を減少させつつ活発な流動を保つには，火炎噴き出し部の深さを確保して噴流火炎の幅を広げないようにして，双葉内を旋回する渦を生成させることが重要である。

Abstract

Means for reducing the particulate matter (PM) from swirl chamber type diesel engines were searched out, and the reducing mechanisms were investigated using an optically accessible engine. Both of the swirl chamber and the main chamber were simultaneously observed by the shadowgraph method. The following points were clarified in this study.

(1) At a light load, the suppression of the initial injection rate reduces PM, because SOF is reduced by the change in ignition point and smoke is reduced by the retarded flowout of the dense soot from the swirl chamber.

(2) Over a medium load, the main cause of the exhaust smoke is fierce spray-wall impingement which

leads to fuel adhesion on the wall and the stagnation of a rich fuel-air mixture.

(3) Enlarging swirl chamber volume ratio suppresses the formation of dense soot in the swirl chamber. In the main chamber, however, the soot oxidization becomes insufficient due to the mixing effect reduced by the essentially decreased chamber depth.

(4) The most effective method for obtaining the sufficient mixing of effect in the main chamber is to maintain the necessary depth of the trench area, which prevents the widening of the flame jet from the connecting passage and consequently ensures the twin-vortex formation.

キーワード

ディーゼルエンジン，燃焼，排気，可視化，渦流室，噴射率，噴射圧力，副室容積比，主燃焼室

1. まえがき

渦流室式ディーゼル機関は中・小型車用の原動機として乗用車から商用車まで幅広く用いられており、その排気浄化とりわけ微粒子状物質（PM）と窒素酸化物（NO_x）の低減が求められてきた。具体的には、車種別に1997～1999年に実施される長期排気規制においてPM、NO_xをそれぞれおおむね60%、33%低減するものである。この規制に対応するため燃焼の改善、排気触媒の開発および電子制御の導入等が進められたが、渦流室式機関の場合にはその搭載車種の性格から対策は比較的地味な項目の積み重ねが中心となる。とりわけ、燃料噴射特性や燃焼室形状の細かな改良による燃焼改善が最重要課題であった。

そこで本報では、これらの燃焼改善の主要因子とそれによる排気浄化メカニズムについて整理して紹介する。

2. 実験および解析の方法

本研究では排気ガス組成と燃焼特性の測定、および渦流室と主室の同時燃焼観察を行った。供試機関の主要諸元をTable 1に、燃焼室まわりの概略図をFig. 1に示す。シャドウグラフ法による燃焼観察を行うために渦流室は二次元的に扁平な形状とし、種々の形状を評価できるように着脱式のユニット構造とした。温度測定のためのグローブラグ型熱電対を渦流室に、圧力測定のための圧電式指圧計を渦流室と主室にそれぞれ取り付けた。定常連続運転により排気ガス組成と燃焼特性の測定を行う際には通常のピストンを使用し、可視化時にはこれに換えて延長ピストンを使用した。可視化時にはできるだけ温度条件が定常連続運転時と同じになるように、冷却水と潤滑油を定常運転時と同じに保ったうえ吸入空気を加熱してモータリング

Table 1 Engine specifications.

Bore × Stroke	92mm × 92mm
Displacement	612cc
Compression ratio	20.8
Swirl chamber volume ratio	52%

を行い、シリンダ内の温度が十分に高くなった後に燃料の噴射を行った。可視化光学系をFig. 2に示す。ここではシャドウグラフ法による燃焼観察を、渦流室と主室について同時に行うことができる。可視化視野はFig. 3に示すように、渦流室の全域と主室ボア径の75%の領域を確保した。

なおPMの評価に関しては、PMはISOF（すす等）とSOF（可溶有機成分）から構成されるが、本研究ではISOFの評価はスモークで代表して行い、SOFの評価はHCで代表して行った。

3. 結果および考察

3.1 初期噴射率の抑制

3.1.1 排気・燃焼特性の改善

従来の知見によると直接噴射式ディーゼル機関においては、初期噴射率の抑制により予混合燃焼量を減らすことでNO_xが低減されることが知られ

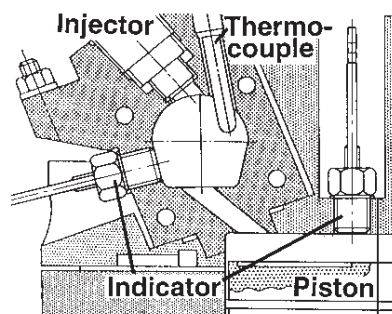


Fig. 1 Schematic diagram of combustion chamber.

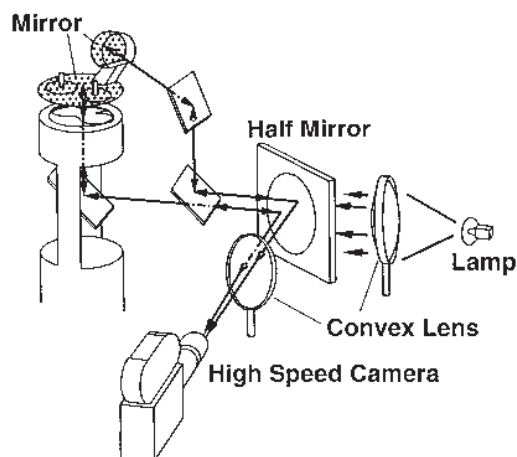


Fig. 2 Schematic diagram of shadow-graph photography.

ている¹⁾。そこで最初に、渦流室式機関の場合にも初期噴射率の抑制がNO_xの低減に有効ではないかと考え、初期噴射率の抑制が排気特性におよぼす影響とそのメカニズムを調べた。試験条件をTable 2に示す。従来噴射率型（以下従来型）としては開弁圧15MPaの1段開弁圧型インジェクタを使用し、初期噴射率抑制型（以下初期抑制型）としては第1/第2開弁圧が20/30MPaの2段開弁圧型インジェクタを使用した。

従来型と初期抑制型の噴射特性をFig. 4に比較して示す。初期抑制型の特徴は以下の通りである。

噴射率が前半で低くほぼ一定に抑制され、後半の最大値も従来型の54%にすぎない。

噴射期間が従来型の14°CAから24°CAに延長される。

最高噴射圧力が従来型の22MPaから40MPaに増大する。

従来型、初期抑制型の排気特性の比較をFig. 5に示す。直接噴射式ディーゼル機関の場合と異なり、初期噴射率の抑制により、NO_xではなくPM関連成分であるHCとスモークが大幅に低減されることが分かった。NO_xが低減されないのは、噴射圧力が

高くなり、これが初期噴射率の抑制と噴射期間の増大によるNO_xの減少を打ち消したものと考えられる。HCとスモークの減少メカニズムについては、可視化結果を基に次章で詳細に述べる。

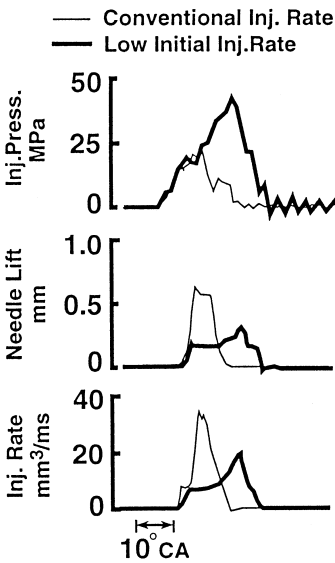


Fig. 4 Comparison of injection characteristics at light load.

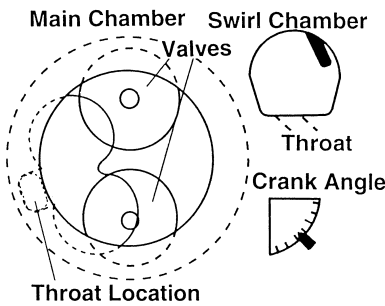


Fig. 3 Observation field.

Table 2 Experimental conditions at light load.

Engine speed	1600rpm	
Volumetric efficiency	100%	
Fuel amount	20mm ³ /st	
Equivalence ratio	0.34	
Injection timing	- 4°ATDC	
EGR rate	0 ~ 24%	
Nozzle-opening pressure	1 Spring 15MPa	2 pring 20/30MPa

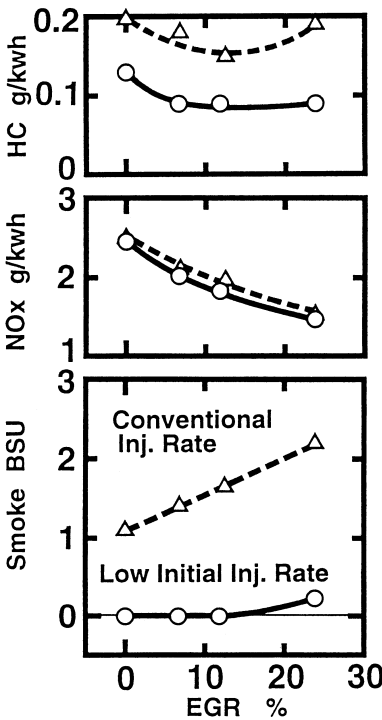


Fig. 5 Effects of initial injection rate suppression on exhaust emissions.

3.1.2 PM低減メカニズム

渦流室内と主室内の混合気・火炎発達状況をFig. 6とFig. 7にそれぞれ示す。初期噴射率を抑制することでPM関連成分であるHCとスモークが低減されるメカニズムはそれぞれ次のように考えられる。

(1) HC低減メカニズム

従来型では初期から多量の混合気が形成され、着火が噴射ノズル近傍で生じるため (Fig. 6 従来型 1.3°ATDC) , 噴霧に先行する未燃混合気領域が存在する。この未燃混合気が火炎に先駆けて主室に流出する (Fig. 6 従来型 2.5°ATDC)。一方主室ではこのような低負荷の場合、燃焼期間を通して火炎に覆われない領域が存在する (Fig. 7 従来型 16.9°ATDC)。このような火炎に覆われない領域に上記の未燃混合気が拡散し、完全に酸化されことなく排出されと考えられる。一方、初期抑制型では初期に形成される混合気の量は極めて少なく、着火は噴霧先端部で生じるため (Fig. 6 初期抑制型 1.8°ATDC) , 火炎に先行する未燃混合気が存在しない。このためHCが低減されと考えられる。

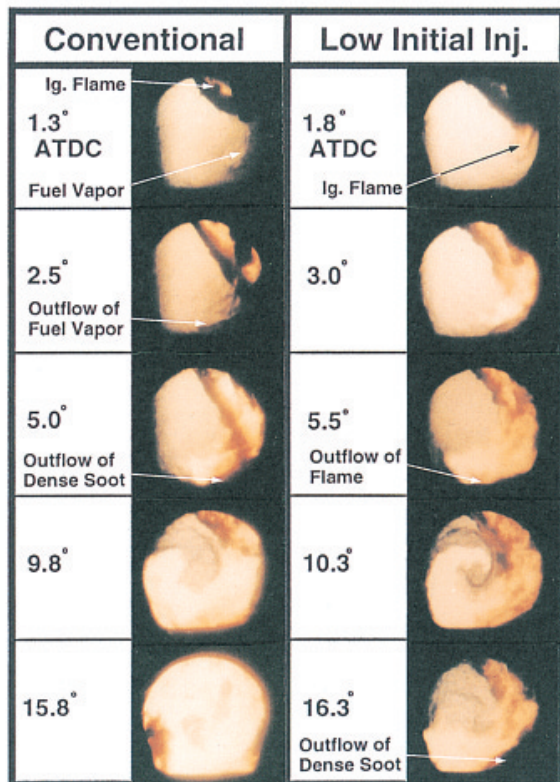


Fig. 6 Comparison of combustion process in swirl chamber (EGR 24%).

着火位置に違いが生じるのは次のメカニズムによると考えられる。従来型ではFig. 4に示したように噴射率が噴射期間の最初から急速に増加するため、初期に噴射された燃料は後から噴射された燃料に追い越されて噴霧根元に運ばれる。着火は初期に噴射されて高温雰囲気中に長く存在した燃料から生じるため、この場合の着火はノズル近傍で生じる。一方初期抑制型では抑制期間中には噴射率が極めて低くほぼ一定に抑えられるために、大規模な追越しは生じず、噴射された燃料は強いスワール流によって噴射された順に運ばれるものと考えられる。このため初期に噴射された燃料は噴霧先端に存在し、ここで着火すると考えられる。

(2) スモーク低減メカニズム

従来型では噴射率が高いため初期から燃料噴霧がノズル対向壁に衝突して黒褐色の領域で示される高濃度のすす雲を生成する (Fig. 6 従来型

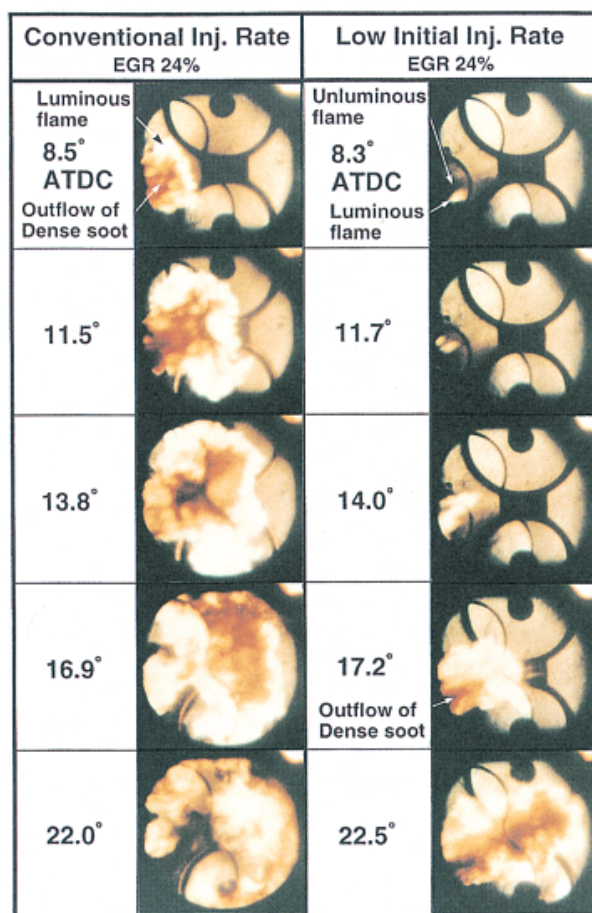


Fig. 7 Comparison of flame development in main chamber (EGR 24%).

5.0°ATDC)。この高濃度すすは噴霧が壁面に衝突して壁面へ付着し、酸素不足の状態で高温にさらされるために生成するものである。この高濃度すすの一部が火炎の流出とほぼ同時に主室に流出する (Fig. 6 従来型 5.0°ATDC)。このことは、主室において火炎の流出とほぼ同じに高濃度すすが観察されることから確認できる (Fig. 7 従来型 8.5°ATDC)。燃料噴霧の激しい衝突が続くことから高濃度すすの生成は噴射期間全域にわたって続き、これにより高濃度すすの主室への流出が続き、十分な酸化が困難になる。このように酸化が不十分になる様子は高濃度すすが消滅せずに主室全域に広がっていく様子 (Fig. 7 従来型 16.9°ATDC) として示される。

一方、初期抑制型の場合、噴射率抑制期間内には噴射率が極めて低いため噴霧はノズル対向壁に衝突せず、火炎は渦流室壁面に沿って発達する (Fig. 6 初期抑制型 3.0°ATDC)。このため従来型と異なり、高濃度すす雲を伴わずに、すす粒子密度の低い火炎のみが主室に流出する (Fig. 6 初期抑制型 5.5°ATDC)。この火炎は主室に流出すると同時に、十分な酸素によって高温の既燃ガスあるいは不輝炎となる。この既燃ガスあるいは不輝炎は、密度差によって生じる連絡孔周辺の影として示される (Fig. 7 初期抑制型 8.3°, 11.7°, 14.0°)。この場合にもノズル針弁の2段目に対応する主噴射時期には噴霧がノズル対向壁に激しく衝突し、高濃度すすが生成される (Fig. 6 初期抑制型 16.3°ATDC)。しかし、このような低負荷の場合には主噴射の期間が極めて短いため、高濃度すすの生成量は従来型より少なくなる。さらに、この高濃度すすが主室へ流出する時期 (Fig. 7 初期抑制型 17.2°ATDC) には主室の温度は高濃度すすよりも先に主室へ流出した既燃ガスや火炎によって既に高められている。つまり、主室の酸化能力は既に高められているため、高濃度すすは容易に酸化されることになる。以上のようにしてスモークが低減されと考えられる。

3.2 噴射圧力の増大

直接噴射式ディーゼル機関の場合には噴射圧力の増大がPMの低減に有効であることが知られている²⁾。そこで次に噴射圧力増大の効果を調べた。実

験条件をTable 3に示す。噴射圧力の増大はノズルの第1/第2開弁圧を15/20MPaから25/30MPaに高めることで行った。排気特性の比較をFig. 8に示す。直接噴射式機関の場合と異なり、高開弁圧化によってスモーク・HCとも大幅に増加する結果が得られた。しかし大幅なスモーク増加にもかかわらず、Fig. 9に示す熱発生パターンのようなマクロな燃焼特性に大きな変化はない。そこで次に、筒内の可視化によって燃焼経過を詳細に調べた。結果をFig. 10に示す。Fig. 10の左端が15/20MPaの場合であり、中央が25/30MPaの場合である。これらの結果から以下のことが分かる。

Table 3 Experimental conditions at medium load.

Engine speed	1800rpm	
Volumetric efficiency	100%	
Fuel amount	30mm ³ /st	
Equivalence ratio	0.52	
Injection timing	- 8°ATDC	
Nozzle-opening pressure	2 Spring 15/20MPa	2 Spring 25/30MPa

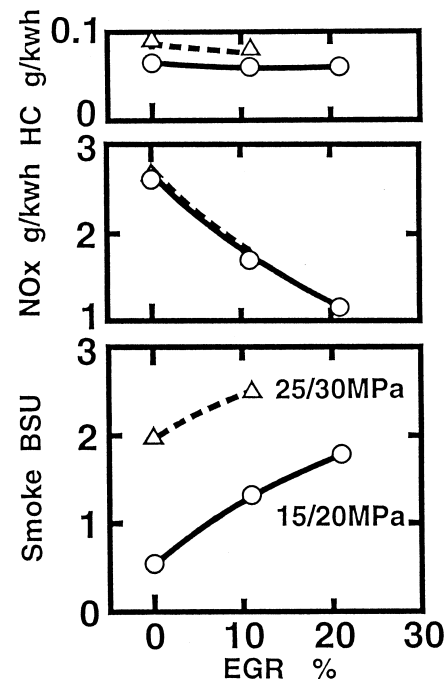


Fig. 8 Effect of nozzle opening pressure on exhaust emissions.

噴射率抑制期間 ($\sim 5^\circ\text{ATDC}$) においては両者に差はない。つまり、着火は噴霧先端で生じ、火炎は混合気領域全体を捕捉する。また、噴霧は対向壁には衝突しない。このため前節に述べたメカニズムにより、両場合とも高濃度すす雲は生成されない (2.5°ATDC)。

しかし、針弁の二段目リフトに対応する主噴射期間 ($5^\circ \sim 17^\circ\text{ATDC}$) になると、両者に顕著な違いが現れる。つまり、この時期になると噴射率が増加して噴霧が対向壁に衝突するようになるため、この噴霧衝突壁近傍に黒褐色の領域で示される高濃度のすすが2つの場合とも生成される (9.7°ATDC)。違いはこの高濃度すすの量である。開弁圧 25/30MPa の場合には高濃度すすの量が非常に多いため、高濃度すす雲は渦流室壁面に沿って運ばれ (14.5°ATDC)、渦流室全体に広がる (32.4°ATDC)。一方 15/20MPa の場合には 噴霧衝突壁近傍で生成される高濃度すすの量が 25/30MPa の場合ほど多くない。このため、壁面に沿って運ばれ、渦流室内に広がる高濃度すす雲の量は、はるかに少ない ($17^\circ \sim 32.6^\circ\text{ATDC}$)。このため、すす雲はたやすく酸化されて消滅する (58.0°ATDC)。

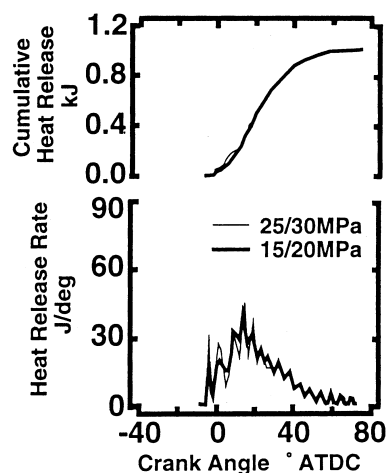


Fig. 9 Heat release pattern for each nozzle opening pressure.

開弁圧の違いによって高濃度すすの生成量に差が生じるのは、噴霧が壁面に衝突する時の勢いに差があるためと考えられる。そこで、ノズル針弁リフトと噴射管内圧力の実測値に基づき、2つの場合の燃料噴霧の運動量を特性曲線法³⁾により数値的に求めた。結果をFig. 11に示す。これによると 25/30MPa の主噴射時の燃料噴霧運動量は 15/20MPa の場合の約2倍になっていることが分かる。これは噴射圧力の増大もさることながら、針弁のリフト量が大きくなるため、ノズル開口面積が拡大して噴射される燃料質量が大きくなるためである。つまり、開弁圧の増大は、スロットルノズルの特性

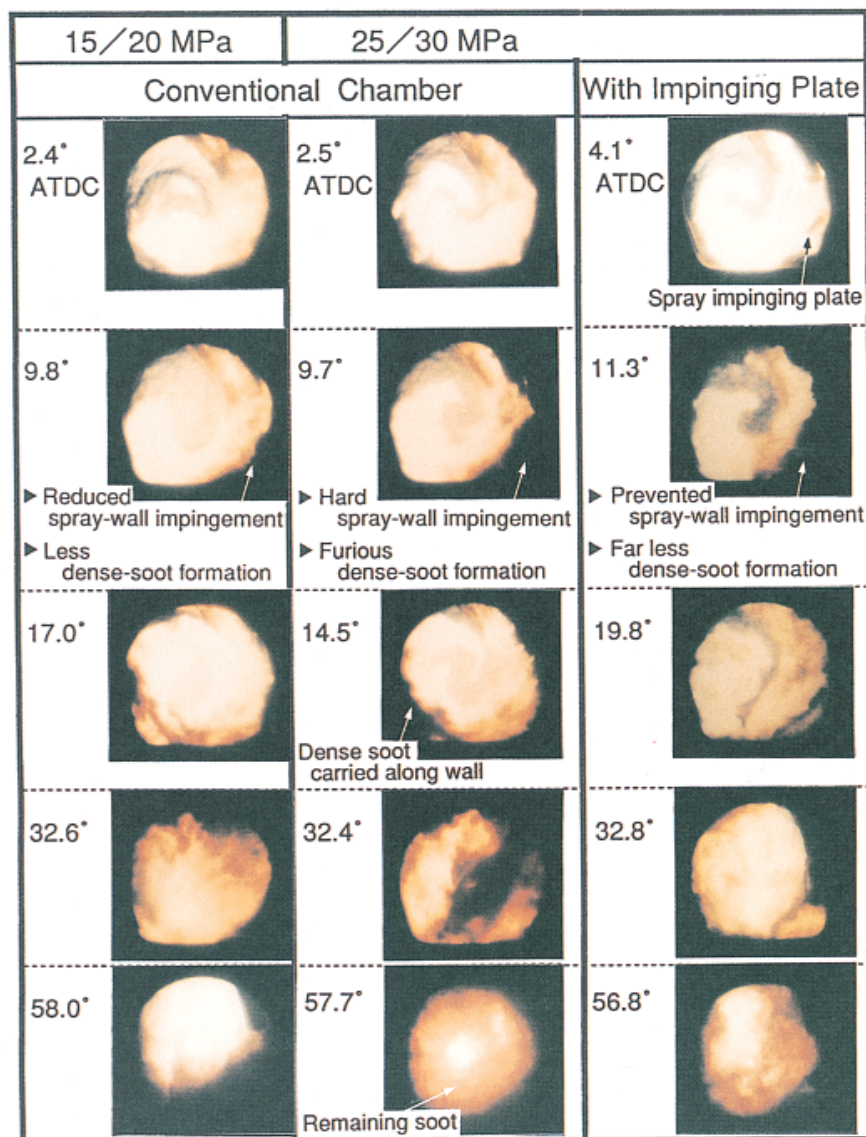


Fig. 10 Effects of nozzle opening pressure and spray impinging plate on combustion processes (EGR 11%).

により予想以上の運動量増加を招き、これによって噴霧の激しい壁面衝突を引き起こし、多量の高濃度すすの生成につながったと考えられる。

噴霧と壁面の激しい衝突が高濃度すす生成の主因であることを確認するため、次にFig. 12に示す噴霧の衝突拡散板の効果調べた。この衝突拡散板は、噴霧コア部を破壊して微粒化を促進することで、燃料液滴の濺み領域への付着防止を狙っている。Fig. 13にNO_x-スモーク・トレードオフ特性に衝突拡散板が及ぼす影響を示す。ノズル開弁圧25/30MPaの場合には、スモークは70%も低減されることが分かる。

この衝突板による燃焼状況の変化を観察した結果をFig. 10の右列に示す。衝突板付の場合、主噴

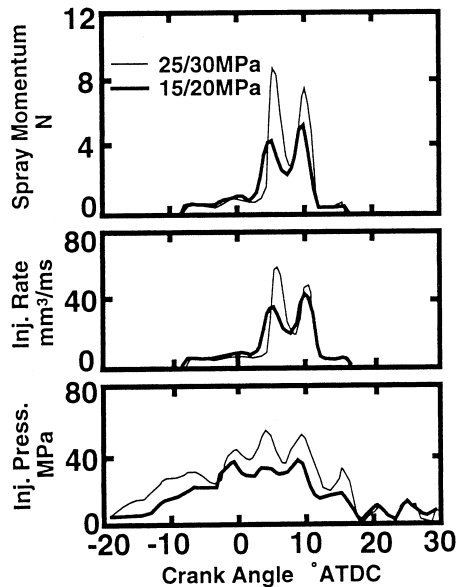


Fig. 11 Comparison of spray momentum between high and low nozzle opening pressure.

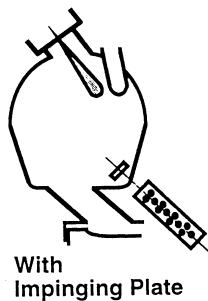


Fig. 12 Schematic diagram of spray impinging plate.

射時期には噴霧は衝突板に衝突し、燃料液滴は広い範囲に拡散される。これにより噴霧の壁面衝突が防止され、高濃度すすの生成が抑制される(11.3°ATDC)。このため衝突板がない場合(Fig. 10中央列)と比べると、壁面に沿って移動し渦流室内全域に広がる高濃度すすの量が大幅に減少している(19.8°~32.8°ATDC)。以上より、噴霧と壁面の激しい衝突が高濃度すす生成の主因であることが確認できた。

3.3 渦流室容積比の増大

3.3.1 渦流室における燃焼改善

一般に渦流室の容積割合(以下 β と記す)を大きくするとスモークが減少することが知られている⁴⁾。この理由は渦流室内の空気過剰率が大きくなって噴霧と空気の混合が促進されるためと言われているが、明確になっているとは言いがたい。そこで本節ではこのメカニズムに関し、噴霧衝突部での高濃度すす生成量に着目して詳細な解析を行った。実験条件は前章と同様(Table 3参照)とし、 β を前章までの51.8%から59.6%に増大させた。この際、渦流室は厚みを変えずに投影方向の形状を相似形のまま拡大し、主室はFig. 14のB型として全体を2.5mmから1.25mmへ浅くすることで圧縮比を同等に保った。またノズル開弁圧は前節の結果から第1/第2開弁圧を15/20MPaとした。

各 β におけるスモーク排出量の比較をFig. 15に示

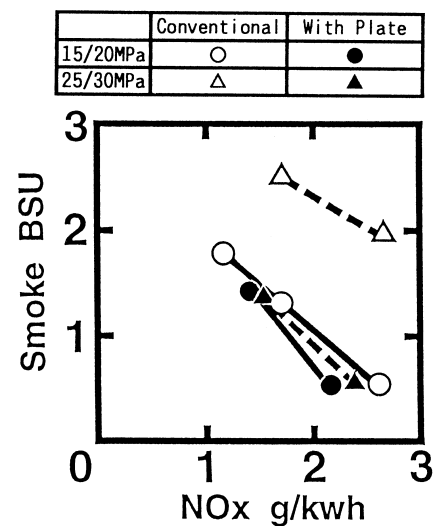


Fig. 13 Improvement of NO_x-smoke trade-off by spray impinging plate.

す。本実験条件では、渦流室容積比増大によるスモーク低減は、ほとんど得られなかった。しかしこの時渦流室での燃焼経過にはFig. 16に示すように大きな変化が現われる。すなわち $\beta = 51.8\%$ では噴霧衝突壁近傍に多量の高濃度すすが生成され(10.2°ATDC)、クランク角が進むとこれが渦流室全域に広がって(40.0°ATDC)、燃焼期間の後期には渦流室全域が高濃度すすに覆われたままとなる(60.8°ATDC)のに対し、渦流室容積比を59.6%に増大させた場合には、(1)噴霧衝突壁近傍に生成する高濃度すすの量が大幅に減少して(10.0°ATDC)、渦流室内で観測される高濃度すすの量が減少し(26.9°, 40.1°ATDC)、(2)燃焼期間後期には渦流室内から高濃度すすが完全に消滅する。

上記(2)の現象は、一般に言われているように渦流室内の当量比低下による効果であると考えられる。一方、(1)の現象は、以下の2つのメカニズムによって生じると推察される。先ず第一には、渦流室内の当量比低下により噴霧に導入される酸素量が増加するため、噴霧衝突壁近傍に形成される過濃混合気の当量比が低下する。また第二には、渦流室の拡大により壁面衝突時の噴霧運動量が減少する。以上の2つにより当量比の低下と燃料の壁面付着の減少が同時に達成され、高濃度すすの生成が抑制されたものと考えられる。

このように渦流室容積比増大によって渦流室での燃焼が大幅に改善されるにもかかわらず、スモーク排出量が低減されないのは、主室の燃焼が悪化しているためであると推察される。そこで次に

主室における燃焼経過の比較を行った。

3.3.2 主室における燃焼状況の変化

ここでは可視化結果の説明のために、Fig. 14に示すように3つの部位を噴き出し部(Trench Area)、振り分け部(Divider Area)、双葉部(Double-Leaves Area)と定義し、以下これらの表記を用いることとする。Fig. 17の左端に $\beta = 51.8\%$ の場合の燃焼経過を、左から2列目に $\beta = 59.6\%$ に増大させた場合の主室での燃焼経過を示す。なお視野はFig. 3に示したとおりである。

$\beta = 51.8\%$ の場合、初期に主室に噴出した火炎の多くは振り分け部で左右に振り分けられ(12.5°ATDC)、まず双葉内を旋回する1組の渦となる(16.2°ATDC)。一方振り分け部を越えて直進した火炎はシリンダ壁に衝突して左右に分かれ、主室全体を旋回するもう1組の大きな渦となる(16.2°ATDC)。この大きな渦は双葉内を旋回する渦を取り込んでいきながら、主室全域の酸素を利用していく。これによって副室から流出してきた高濃度すすは、双葉内の渦と主室全体の大きな渦によって3箇所に分散され(18.6°ATDCの矢印部)、主室全体で酸化されていく。

$\beta = 59.6\%$ の場合、火炎が主室へ噴出し始める時期は $\beta = 51.8\%$ と同じであるが、火炎の噴出方向への発達が速く(8.8°, 12.3°, 16.1°ATDC)、かつ噴き出し部で横方向へ広がって幅の広い噴流として噴出する(12.3°ATDC)。このような差が生じるのは、噴き出し部が2.5mmから1.25mmに浅くなり、火炎は扁平に広がって発達せざるを得ないためである。

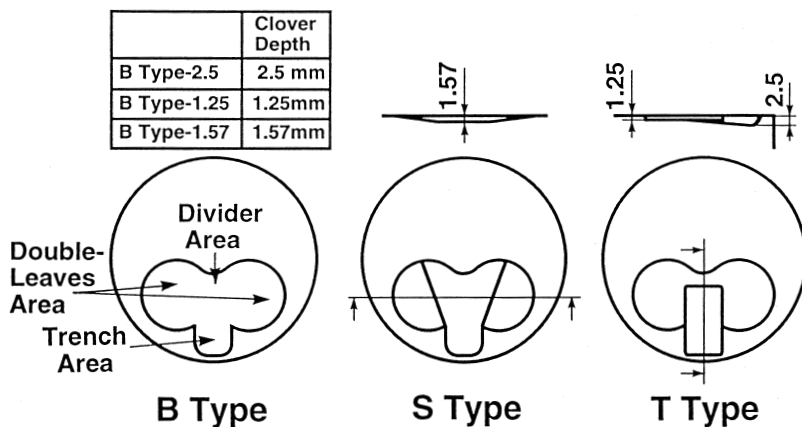


Fig. 14 Variation of main chamber.

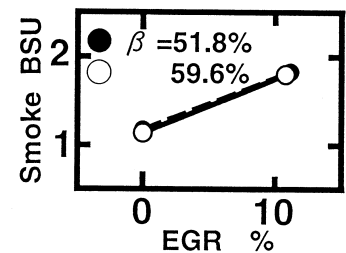


Fig. 15 Comparison of exhaust smoke between conventional and enlarged swirl chamber.

この火炎は振り分け部で左右に分けられることはなく、これを乗り越えて直進するため (12.3°ATDC)、主室全体を旋回する大きな1組の渦しか生成されない (16.1°ATDC)。このためすべての高濃度すすが連絡孔と対向するシリンダ壁面近傍に運ばれ (16.1 ~ 18.4°ATDC)、その後シリンダ壁面に沿って移動するのみであり (22.0°ATDC)、 $\beta = 51.8\%$ の場合のように主室全体において比較的小さなスケールで強く混合されることはない。

このように主燃焼室全体を単純に浅くすると、流動が単純化して酸化能力が低下することが分かった。従って、主室での流動が単純化しないようにできれば渦流室容積比の増大によりスモークを低減できると考えられる。そこで次に主燃焼室形状を種々に変更して排気・燃焼特性と主室内の燃焼経過を調べ、主室形状が排気特性に与える影響を検討した。

3.4 主室形状の影響

3.4.1 主室形状因子の影響

試験を行った主燃焼室形状を、Fig. 14に示す。

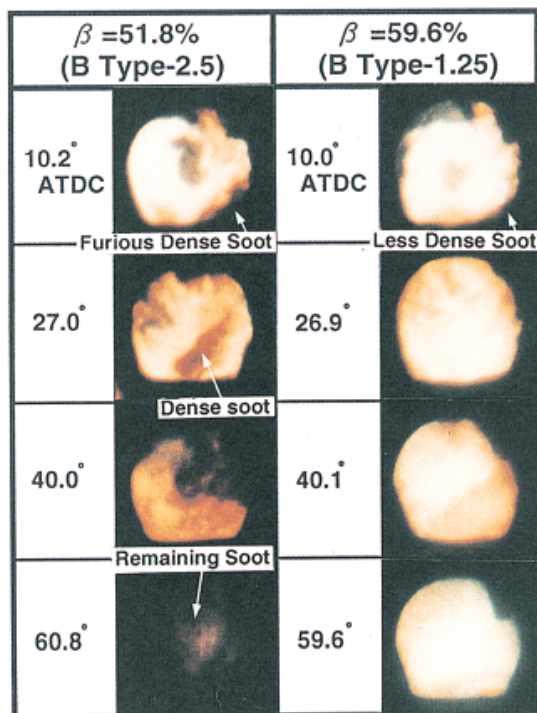


Fig. 16 Comparison of combustion processes in swirl chamber between conventional and enlarged swirl chamber (EGR 11%).

前節で述べた $\beta = 51.8\%$ の場合の燃焼室をB型-2.5、59.6%の場合の燃焼室をB型-1.25と称する。

S型は双葉部を傾斜させ、ここでの容積を減少させることで主燃焼室全体の容積をB型-1.25と同一に保ちながら双葉中央部の深さをより深い1.57mm確保している。これによって噴き出し部と振り分け部の深さの影響を調べることができる。

B型-1.57は双葉内全域をS型の双葉中央部と同じ深さとしており、これとS型を比較することで双葉部傾斜の役割を知ることができる。なお、B型-1.57はS型よりも燃焼室容積が大きくなるが、圧縮比はS型の20.44に対してB型-1.57は20.15とその差は僅かであり、燃焼室容積の違いが排気燃焼特性に与える影響は小さいと考える。

T型は双葉部と振り分け部の深さをB型-1.25と同一としながら噴き出し部の深さを最大2.5mm確保している。これによって噴き出し部深さによる影響を分離することを狙っている。

本節での実験条件は前節と同一とした。Fig. 18右側に各燃焼室のNO_x - スモークトレードオフ特性を示す。この図から以下のことが分かる。

噴き出し部が深いほどスモークが減少する。特にT型はB型-1.25の噴き出し部を変更しただけであるのにスモークが大幅に減少している。

S型はB型-1.25よりもスモークが減少するが、B型-1.57はS型よりもさらにスモークが減少する。このことから、S型のスモーク低減要因は、双葉中央部の深さを確保できたことであり、双葉部を傾斜させたことが有効なのではないことが分かる。

この時の各燃焼室の熱発生率パターンの比較をFig. 18左側に示す。渦流室での発熱パターンは主室形状の影響を受けず、すべての場合でほとんど同一である。一方主室では、B型-1.25、S型、B型-1.57の熱発生率はともに12°ATDCで最大となり、18 ~ 28°ATDCで一定になる共通の特徴を持つ。つまり、双葉中央の深さや双葉部の形状をこの程度変更するだけでは、熱発生率の変化はほとんどないことが分かる。これらに対してT型では20°ATDC付近での熱発生率が他の燃焼室より高くなっている。これは噴き出し部の深いT型は火炎噴出時の絞り効果が小さく、渦流室から主室へ火炎が急激に噴出して激しく燃焼するため、主室の流

動が燃焼後期まで活発に保たれることを示唆している。

以上のような燃焼経過の違いを考慮に入れ、次に主室での火炎の流動パターン (Fig. 17) を調べた。

まず、S型 (Fig. 17中央) では噴き出し部の深さがB型-2.5 (Fig. 17左端) とB型-1.25 (Fig. 17左から2列目) の中間であるため、火炎の横方向への広がりや噴出方向への発達程度は両者の中間となる (8.9°ATDC , 12.6°ATDC)。その後、この場合には双葉中央部の深さが確保できているため、渦流室容積比を増大させる前 (Fig. 17左端、B型-2.5) と同様に火炎は左右に振り分けられ (16.2°ATDC)、双葉内を旋回する渦と主室を旋回する大きな渦がそれぞれ生成される。これにより高濃度すすはB

型-2.5と同様に3つの塊に分かれて双葉内の渦と主室全体の渦に取り込まれ、主室全体に分散されて酸化されていく (18.6°ATDC)。このように双葉中央部 (噴き出し部および振り分け部) の深さを確保することで、主室の流動を活発化させて主室の酸化能力を回復できることが分かった。

次にT型の燃焼経過の特徴を以下に示す。この形状では噴き出し部の最大深さが渦流室容積比増大前 (B型-2.5, Fig. 17左端) と同じ2.5mm確保できているために、火炎噴出時の横方向への広がりや噴き出し方向への発達状況はB型-2.5とほぼ同じである (9.8° , 13.2°ATDC)。そしてこの場合には、振り分け部の深さがB型-1.25と同じで浅いにもかかわらず、火炎は振り分け部で左右に分けられ双葉内を旋回する渦が生成する (17.0°ATDC)。これに

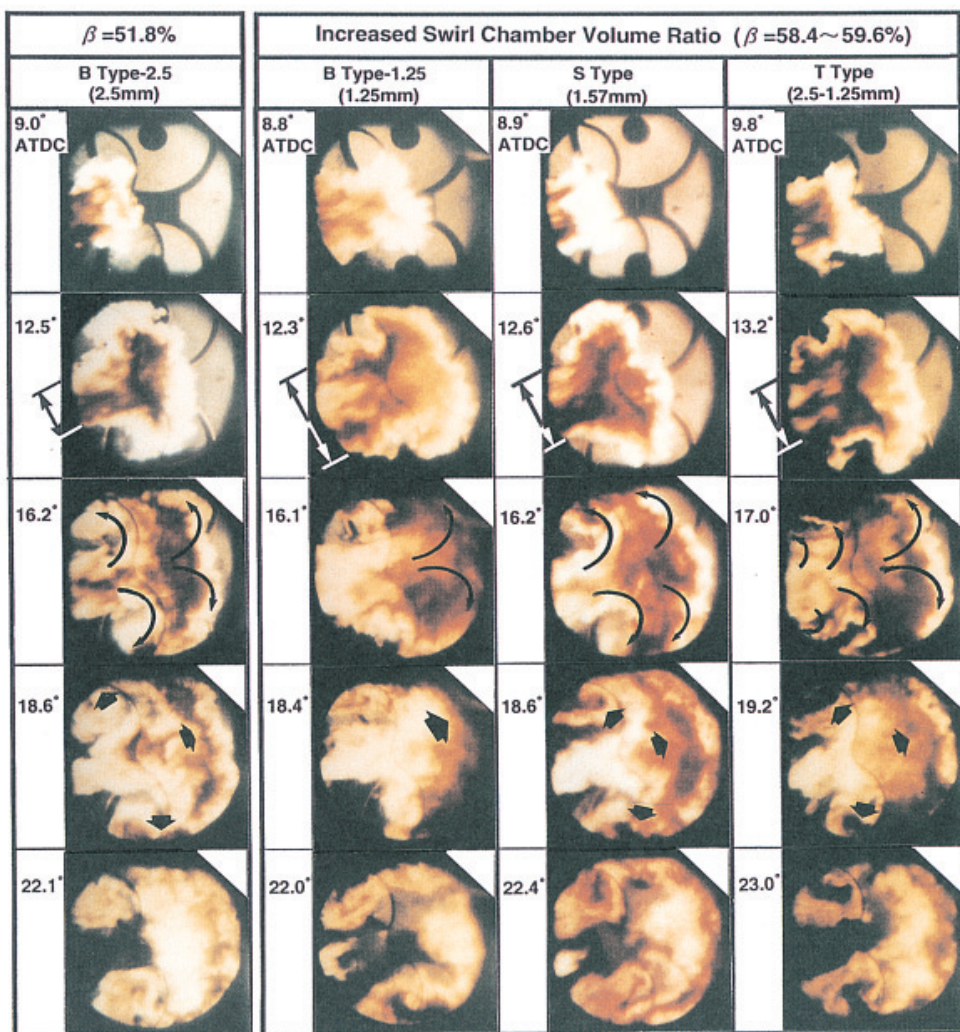


Fig. 17 Comparison of combustion processes in each main chamber (EGR 11%).

よって高濃度すすはS型と同様に3箇所分散されて酸化されていく(19.2°ATDC)。さらに、この場合に生成される渦はS型よりも強くなっており、これにより流動が燃焼後期まで保たれて、Fig. 18の熱発生パターンの比較に示したように燃焼後期の熱発生がB型-1.57やS型に比べて活発となる。つまり、すす雲を3箇所に分散させて酸化するという点では同じであるが、流動の強さの違いによりS型よりもスモークが減少するものと考えられる。

3.4.2 主室形状改良のポイント

前節で示したように火炎の振り分け効果が振り分け部の深さではなく、噴き出し部の深さで決まるメカニズムは、次のように考えられる。すなわちFig. 19左に示すように噴き出し部が浅く、火炎が連絡孔から横に広がって噴出する場合、振り分け部で左右に分かれた火炎はその外側の火炎に押し流されてしまうため、双葉内を旋回する渦になることができない。しかし、Fig. 19右のように噴き出し部が深く、横幅の狭い火炎として噴出する場合には、振り分け部で分かれた火炎を押し流すその外側の流れが存在しないため、振り分け部で分かれた火炎は双葉内を旋回する渦となる。このようにしてT型では振り分け部の高さがB型-1.25と同一で浅いにもかかわらず、双葉内を旋回する渦

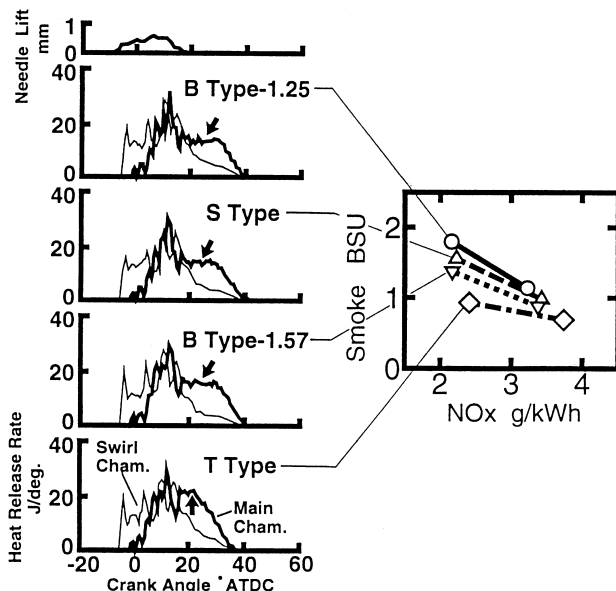


Fig. 18 NO_x-smoke trade-off and heat release pattern for each main chamber.

が発生するものと考えられる。このようなメカニズムにより、主室容積を減少させつつも複雑な流動を維持して高い酸化能力を得るポイントは、噴き出し部の深さを確保して噴流の幅を狭くすることであると考えられる。

4. まとめ

渦流室式ディーゼル機関における燃焼改善による排気浄化、特にPM低減の方策を探索し、それによるPM低減メカニズムを詳しく解析した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 初期噴射率の抑制により、中・軽負荷時にスモークとPMが低減される。これは、初期噴射率抑制によりNO_xが低減される反面、PMの増加を招きやすい直接噴射式ディーゼル機関の場合と対照的であり、渦流室式機関に特有の現象である。この場合、スモークとPMは以下のメカニズムにより低減される。

着火遅れ期間中の混合気形成量が抑制されると同時に、着火位置が燃料噴射ノズル近傍から噴霧先端部に移動する。このため、火炎が混合気領域全体を補足し、従来型噴射率の場合のように火炎に先行して未燃燃料が主室に流出して火炎領域外の低温域に拡散することが防止される。このためHCやSOFが低減される。

噴射期間前半で噴霧がノズル対向壁に衝突することがないため、この間は従来型噴射率の場合に生じるノズル対向壁近傍での高濃度すすの生成が防止される。このため、主室側への高濃度すすの流出は、先行する火炎の流出により主室内温度が上昇した後になるため、すすの酸化が促進される。

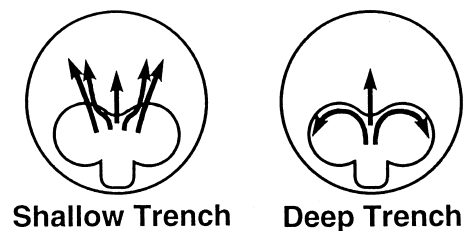


Fig. 19 Schematic diagram of flame development in main chamber.

噴霧の激しい壁面衝突を引き起こす主噴射期間が短くなるため、高濃度すすの生成量自体も減少する。

(2) ノズル開弁圧を高くして高噴射圧化を図るとスモークが増加する。これは、噴射圧の増加とスロットルノズル特性との相乗効果により噴霧運動量が大幅に増加して噴霧の激しい壁面衝突を引き起こすため、多量の高濃度すすが生成されることによる。このため通常のスロットルノズルを用いる限り、低噴射圧化（低開弁圧化）の方が有利となる。この傾向も、一般に直接噴射式機関の場合とは逆である。

(3) 渦流室容積比の増大は、渦流室内の当量比低下によるすすの酸化促進の他に、ノズル対向壁部での高濃度すすの生成を抑制する作用を併せ持つ。

(4) 中負荷以上においては、スモーク生成の主因は噴霧衝突壁面への燃料付着と過濃混合気の滞留である。この対策として、上記のノズル低開弁圧化や渦流室容積比の増大が有効である。

(5) 渦流室容積比の増大に際して単純に主室側の双葉型燃焼室全体を浅くすると、連絡孔から噴出する火炎を双葉中央部で左右に振り分けることができないため、主室内に複雑な渦流動が形成されなくなるうえ高濃度すすが主室内の一箇所に集中する。これによりすすの酸化能力が低下する。

(6) 渦流室容積比増大に際し、双葉型主室の容積を減少させつつ高い酸化能力を得るポイントは以下のとおりである。

双葉内を旋回する渦を生成させて、主室内に複雑で強い渦流動を確保するとともに高濃度すす群を分散させるためには、先ず連絡孔からの噴き出し部の深さを確保して噴流の幅を狭く保つことが重要である。

次いで双葉中央の振り分け部深さ、更には双葉両翼の深さを確保することが有効である。

本研究にあたり多大なご協力を頂いたトヨタ自動車(株)および(株)デンソーの関係者各位に深く感謝の意を表します。また、供試機関の開発には当所、森信之、竹下登門、水田準一の各氏にご助言ご協力を頂いたことを併せて記します。

参考文献

- 1) 例えば河村清美, ほか2名: "高压ディーゼル噴霧の特性解析", 自動車技術会学術講演前刷集, No.911076, (1991), 307
- 2) 中北清己, ほか4名: "高压噴射時のディーゼル燃焼解析", 自動車技術会論文集, 23-1(1992), 9 ~ 14
- 3) 小池誠, ほか4名: "分配型ポンプを用いた噴射系の異常噴射解析 第1報シミュレーションによる解析", 第7回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1988), 251 ~ 256
- 4) 佐藤薫, ほか3名: "乗用車用IDIエンジンの燃焼改善", 自動車技術会学術講演前刷集, No.9534487, (1995), 225 ~ 228

著者紹介



堀田義博 Yoshihiro Hotta

生年: 1968年。

所属: 燃料制御研究室。

分野: ディーゼルエンジンの排気浄化, 燃焼改善に関する研究。

学会等: 日本機械学会, 自動車技術会会員。



中北清己 Kiyomi Nakakita

生年: 1952年。

所属: 燃料制御研究室。

分野: ディーゼル機関の燃焼改善, 排気浄化に関する研究, 技術開発。

学会等: 日本機械学会, 自動車技術会, 日本燃焼学会, 日本液体微粒化学会会員。

第42回自動車技術会賞論文賞。

日本機械学会エンジンシステム部門技術業績賞。

工学博士。



稲吉三七二 Minaji Inayoshi

生年: 1952年。

所属: 動力システム研究室。

分野: ディーゼル機関の燃焼解析。