高スキッシュ型燃焼室によるディーゼル微粒子と NO_x の
同時低減に関する研究*三輪 恵^{*1}, 武内 久^{*2}
江口 知孝^{*3}, 楊 長 林^{*4}Reduction of NO_x and Particulate of a High Speed Direct-Injection Diesel
Engine with High Squish Combustion ChamberKei MIWA^{*5}, Hisashi TAKEUCHI
Tomotaka EGUCHI and Changlin YANG^{*5} University of Tokushima, Graduate School of Engineering, Dept. of Ecosystem Engineering,
2-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506 Japan

In order to realize simultaneous reduction of NO_x and Particulate emissions, effects of combustion chamber geometry were investigated in a high speed direct-injection diesel engine. The reentrant combustion chambers with different throat diameter were compared in terms of engine performance, combustion characteristics and emissions such as NO_x , particulate and THC. The phenomena of combustion process were also observed with endoscopic high speed photography. The results showed that when the throat diameter of a reentrant combustion chamber was reduced to an extent, NO_x and particulate decreased simultaneously due to retarded injection timing and the intensified squish.

Key Words: Diesel Engine, Emission, Particulate, NO_x , Soot, Combustion Chamber

1. まえがき

現在、燃料経済性や CO_2 による温暖化抑制の立場から、小型ディーゼル機関においても直接噴射方式の導入⁽¹⁾が積極的に進められているなか、これら機関から排出される NO_x および微粒子の低減が緊急の課題となっている。 NO_x は、噴射時期の遅延やEGRなどによる燃焼温度や酸素濃度の低下と初期燃焼率の抑制が有効とされている。しかし、これら低減法は、主燃焼期間の増大によって機関性能ばかりでなく黒煙や青白煙の増加を招くことになる。そのため、高圧噴射による噴霧の微粒化と混合過程の促進⁽²⁾⁽³⁾、リエントラント燃焼室でスキッシュの強化や燃焼後期攪乱による空気流動と乱れを積極的に利用した燃焼改善法が提案されている⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾。しかしながら、いずれの方法においても NO_x と黒煙のトレードオフ関係は避けられないのが現状である。筆者らは、既報⁽¹¹⁾において渦室式機関の二段燃焼を前提とした NO_x 抑制機構について、燃焼前段の渦室内の過濃な燃焼場で NO 還元作用が存在することを示唆したが、実機関でこの燃焼方式を実現するには、燃焼後段で過濃混合気領域と希薄領域との混合促進をいかに図るかが重要な課題となる。

そこで本研究では、直接噴射式機関において急速ディーゼル燃焼を図るため、ピストン燃焼室口径比の変化によるスキッシュ流の強さが、着火遅れや熱発生率などの燃焼特性と微粒子や NO_x などの排気特性とに及ぼす影響を調べるとともに、実験下においてシリンダ内の火炎観察を行なって、ピストン副室燃焼方式の可能性を検討した。

2. 実験装置および実験方法

供試機関には、単気筒無過給直接噴射式4サイクル機関(シリンダ径×行程 102×105mm, 圧縮比17.0, スワール比2.2)を使用した。標準燃焼室(STD)は、図1に示すような深皿形トロイダルでピストン直径に対する燃焼室入口口径比 d/D は、55.6%である。スキッシュ強度の変更には、圧縮比および上死点隙間一定

Fig.1 Test engine

* 原稿受付 1998年10月21日。

^{*1} 正員, 徳島大学大学院工学研究科(〒770-8506 徳島市南常三島町2)。^{*2} 准員, 川崎重工業(株)(〒673-8666 明石市川崎町1-1)。^{*3} 准員, 日立造船(株)(〒559-0034 大阪市住之江南南港北1)。^{*4} 正員, 徳島大学大学院。

E-mail: miwa@eco.tokushima-u.ac.jp

のもとで、図2に示すように口径比 d/D が45%ピストン(R45)と35%ピストン(R35)を使用した。燃料には、JIS 1号軽油(密度 843kg/m^3 , 低位発熱量 44200kJ/kg)を使用し、ボッシュ型燃料ポンプ(PFR-I AW, プランジヤ径 9mm)と4噴口ノズル(YDLLA-P, 噴口径 0.29mm , 開弁圧 19MPa)を用い、いずれの燃焼室に対しても噴射角度 150° で噴射を行った。このとき、小口径ピストンの場合、燃焼室リップへ噴霧が衝突することを避けるため、ノズルを標準より 1.5mm 突き出した。

機関性能および燃焼計測は、機関回転数 $n=1800\text{rpm}$, 正味平均有効圧 $p_e=0, 0.2, 0.35, 0.5, 0.7\text{MPa}$ (当量比 $0.12, 0.24, 0.34, 0.46, 0.63$), 冷却水温度 80°C の定常運転のもとで行った。排出微粒子の測定には、小型希釈トンネル(内径 70mm , 混合部長さ 680mm)を用いた。微粒子PARTは、排気弁後方 1.6m の位置で排気ガスの一部を採取してトンネル内に導入して、これを清浄空気 10 倍に希釈して捕集した⁽¹²⁾。微粒子中の固形炭素分SOLIDと可溶有機分SOFの分離には、ジクロロメタンによるソックスレ抽出法を用いた。全炭化水素THCは、 210°C に保温したサンプル管によりHFID付ガスクロマトグラフィ(Yanaco G2800)に導いて分析し、 CH_4 換算濃度として求めた。NO濃度は、化学発光分析計(Yanaco ECL-77A)を用いて測定し、スモーク濃度 S は、ボッシュ式スモークメータで計測した。また、シリンダ内圧力の測定には、圧電式圧力検出器(KISTLER 601A)を使用して、クランク角度 0.5° 毎に計測し、着火遅れ τ , 熱発生率 $\dot{Q}$ および全燃焼期間 $\Delta\theta_{\text{burn}}$ を求めた。ここで、 $\Delta\theta_{\text{burn}}$ は、全熱発生量の90%期間とした。

また、実働下におけるシリンダ内の火炎の発達状況を観察するために、エンドスコープ(AVL Type510, 画角 80°)を用いて火炎の高速度撮影を行なった⁽¹³⁾。エンドスコープは、保護スリーブ(外形 15mm)を通してシリンダヘッド上部に 30° 傾けて挿入し、ピストン燃焼室内とピストン頂面の一部を視野対象にした。撮影には、高速度カメラ(Nac EE10, 6000fps)とASA500フィルム(HS-500)を使用し、機関運転条件は、回転数 $n=1500\text{rpm}$, 冷却水温度 80°C に設定した。

3. 実験結果と考察

3.1 燃焼室口径比の影響 まずはじめに、燃料消費率に及ぼす口径比の影響を調べた。図3は、口径比 d/D の異なる3種類の燃焼室、 $d/D=55.6\%$ (STD), 45% (R45)および 35% (R35)ピストンを用いて、噴射時期 θ_i を変更したときの燃料消費率 b_e の変化を、正味平均有効圧 $p_e=0.7\text{MPa}$ および 0.2MPa について示す。いずれの燃焼室においても θ_i を遅らせると b_e は増加す

Fig. 2 Detail of combustion chamber

Fig. 3 Effect of injection timing on fuel consumption

る。特に低負荷域ではこの傾向が強く現れる。しかし、トロイダル燃焼室STDを用いて、 θ_i を上死点より遅らせると b_e は極端に悪化するが、R35燃焼室では、 θ_i を上死点后 5° 近くまで遅らせても、 b_e の極端な増加は見られず、口径比が小さいほど、噴射時期遅延による燃料消費率の悪化は少ないといえる。ただ、R35燃焼室で θ_i を進めると、後述のようにディーゼルノックが強くなるため、本実験では、標準噴射時期を $\theta_i=-5^\circ$ ATDCと定めた。図4は、3種類のピストンにおいて、 $\theta_i=-5^\circ$ ATDCで負荷を変更したときの、NO濃度、スモーク濃度 S , 全炭化水素THCおよび微粒子PARTならびに固形炭素分SOLIDとSOFを平均有効圧 p_e に対して示す。NOは、口径比を小さくするにつれて増加するが、スモークは、R45燃焼室が高負荷域で最も低くなる。口径比が小さいR35燃焼室では、トロイダル燃焼室の濃度と同程度となる。この傾向は、微粒子中のSOLID濃度と同じ排出傾向を示し、SOF濃度には、燃焼室の影響があまり見られない。THCは、小さい口径比の方がトロイダル燃焼室に比べてわ

ずかに減少するが、R35燃焼室では、低負荷域で急激に増加する。このときTHCが増加するにもかかわらず、SOF濃度には変化が見られないことから、THCの増加は、燃料の壁面付着よりも、小口径比燃焼室によるスキッシュ流の増大により、失火あるいは不完全燃焼のため、未燃燃料が排出したものと思われる。

次に、燃焼室口径比の変化が、燃焼特性に及ぼす影響を調べるため、シリンダ内圧力経過を解析した。図5は、トロイダル(STD)、R45およびR35燃焼室において、 $p_e=0.7\text{MPa}$ のもとで噴射時期が $\theta_i=-5^\circ$ と 0° ATDCの場合について、シリンダ内圧力 p 、熱発生率 $\dot{Q}$ の時間経過を弁揚程NLとともに示す。 $\theta_i=-5^\circ$ ATDCでは、トロイダル燃焼室とR45燃焼室との差は少ないが、口径比を35%まで小さくすると、燃焼初期の圧力上昇率が大きく、初期の熱発生量が極端に増加して、燃焼最高圧力も高い。噴射時期を 0° ATDCまで遅らせると、初期の熱発生率は、他の燃焼室とほぼ同程度になるが、初期燃焼のピークは早くなり、燃焼期間も短縮する。図6は、口径比の異なる燃焼室における燃焼特性値を平均有効圧 p_e に対して示す。いずれの燃焼室においても着火遅れ τ には差がないにもかかわらず、口径比の小さいR35燃焼室では、最大熱発生率 $\dot{Q}_{\max}$ は、全負荷域でトロイダル燃焼室やR45燃焼室に比べて、約2倍程度高くなる。いま、圧縮比はいずれの燃焼室においても同一であるので、燃料噴射時の空気温度はほぼ同等と考えられることから、 $\dot{Q}_{\max}$ の大きな変化は、小口径比の場合スキッシュの強化と乱れの増加によって、着火遅れ期間内の可燃混合気量が増加したことが主原因と考えられる。また、全燃焼期間 $\Delta\theta_{\text{burn}}$ は、トロイダル、R45、R35燃焼室の順に短くなり、全燃焼量に対する初期燃焼量 $Q_{\text{pre}}/Q_{\text{total}}$ は、口径比の減少とともに大きくなる。しかし、R35とR45燃焼

室の $\Delta\theta_{\text{burn}}$ や $Q_{\text{pre}}/Q_{\text{total}}$ には、 $\dot{Q}_{\max}$ で見られたような口径比の違いによる大きな差は見られない。このことから、口径比を小さくしてスキッシュを強めると、着火遅れ期間での混合促進ばかりでなく、主燃焼期間の燃焼を活性化し、全燃焼期間の短縮に効果があるといえる。

Fig.5 Cylinder pressure and heat release rate under different combustion chambers

Fig.4 Effect of combustion throat diameter on emissions

Fig. 6 Effect of combustion chamber on combustion characteristic

3.2 噴射時期の影響 次に、前述のような燃焼促進効果をもつ小口径比の燃焼室を用いて、 NO を低減するために噴射時期をどこまで遅らせることができるかを調べた。図7は口径比の異なる3種類の燃焼室で、噴射時期 θ_i を変更したとき NO 、スモーク、 THC および微粒子の変化を $p_e=0.7\text{MPa}$ と 0.2MPa についてそれぞれ示す。高負荷時では、いずれの燃焼室でも NO 濃度は噴射時期遅延によって減少する。特に口径比の大きいSTD燃焼室では、上死点前 4° 付近からこの傾向が現れるが、上死点付近まで遅らせると口径比による差は少なくなり一定値に近づく。このときスモーク濃度 S は、口径比45%では、トロイダル燃焼室に比べて中負荷域以上の排気煙は改善されるが、噴射時期遅延とともに悪化する傾向は変わらない。これに対して、口径比の小さいR35燃焼室では、スモークが噴射時期の遅延とともに減少し、従来の直接噴射式機関の排出傾向と異なることが大きな特徴である。一方、低負荷域では、噴射時期の影響が THC と SOF に現れる。R45とR35燃焼室では、 θ_i が上死点より早い場合には、 THC 、 SOF ともにSTD燃焼室に比べて改善されるが、上死点より遅らせると急激に悪化する。

Fig. 7 Effect of injection timing on emissions

Fig. 8 Effect of injection timing on combustion characteristics

図8は、図7と同条件での燃焼特性を噴射時期 θ_i に対して示す。いずれの口径比においても着火遅れ τ には差がないにも関わらず、小口径比R35の最大熱発生率 $Q_{\max}$ および $\dot{p}_{\max}$ は、噴射時期を進めると極端に高くなるが、上死点を過ぎると燃焼室の差はほとんど見られない。しかしながら、噴射時期遅延による口径比の効果は、全燃焼期間 $\Delta\theta_{\text{burn}}$ に現れ、R35燃焼室では、 θ_i が遅くなるとSTD燃焼室に比べて、クランク角度で約 10° CA短くなって、また、他の燃焼室よりも θ_i を遅くすることができる。このとき、前述のように、スモーク濃度が θ_i の遅延とともに低下することが大きな特徴である。

図9は、高負荷時 $p_e=0.7\text{MPa}$ と低負荷時 $p_e=0.2\text{MPa}$ のもとで、噴射時期 $\theta_i=-5^\circ, 0^\circ$ ATDCにおける NO と微粒子PARTの排気特性を、燃焼室口径比 d/D に対して整理したものである。高負荷時の $\theta_i=-5^\circ$ ATDCの場合、 NO は、 d/D を小さくするにつれて単調に増大するが、 $\theta_i=0^\circ$ ATDCでは、 d/D を小さくしても NO の増加傾向は見られない。微粒子は、 $\theta_i=-5^\circ$ ATDCのとき $d/D=45\%$ で極小値が存在し、さらに口径比を小さくすると固形炭素分SOLIDが増加してかえって微粒子が増える。これに対して、 $\theta_i=0^\circ$ ATDCに遅らせると、微粒子は口径比の大きい側で、 $\theta_i=-5^\circ$ ATDCに比べて高い濃度を示すが、口径比が小さくなるにつれて単調に減少し、 $d/D<40\%$ では、噴射時期を遅らせた場合、かえってSOLIDが減少して微粒子濃度は下がる。 THC は、 θ_i が早いと口径比の影響が大きく現れて、 SOF も小口径比側でわずかに増加する。これに対して、低負荷時においても小口径比側で、微粒子と THC の減少傾向がみられるが、噴射時期を遅くすると、

口径比の全範囲でPARTとTHCは悪化する。このとき、微粒子の増加は、SOFの増加によるもので、低負荷域では、SOFとTHCの排出傾向は一致する。これは、噴射時期を遅らせると、シリンダ内温度が低くなって、混合気が失火することと不完全燃焼になることが原因と思われる。

3.3 エンドスコープによる火炎の観察 前節で見たように、燃焼室口径比を小さくして、噴射時期を遅らせると、NOと微粒子とも低減できることが明らかになった。この効果を明らかにするため、実働下での運転条件のもとで、エンドスコープを用いてシリンダ内の火炎撮影を行なった。撮影は、火炎強度が弱いいため、機関回転数1500rpmで行なったが、NOと微粒子の排出傾向は、前述の結果と変わらないことを事前に確認した。図10は、NOと微粒子に大きな効果が見られた $\theta_i=0^\circ$ ATDCにおいて、 $p_e=0.5\text{MPa}$ のもとでトロイダル燃焼室(STD)とR35燃焼室の火炎の発達状況を示す。いずれの燃焼室でも、着火は上死点後 7° CA付近で、輝炎はこの視野では、上死点後約 11.25° CAで観察される。その後、R35では、強い輝度の火炎が、放射状に勢よく隙間部へ噴出する。ただ、輝炎が、隙間部で観察される時期は、主燃焼期の前半のみの短時間で、その期間は約 6° CAに限られ、主燃焼中期以降では、燃焼はピストン燃焼室内でのみで進行する。これに対して、トロイダル燃焼室では、輝炎は早い時期から、シリンダ内全体に広がり主燃焼期にはスワールに流されて隙間部全体で燃焼する。これらのことから、小口径の燃焼室で、噴射時期を遅れた場合には、強いスキッシュによる混合の促進と、隙間部への未燃混合気の流出の抑制により、活発な燃焼が燃焼室内で進行し、一部は隙間部へ噴出してすばやく燃焼が完了

し、また、燃焼室内では強い乱れが減衰されずに燃焼後期まで持続して、燃焼室主体で燃焼が進行していることがNOと微粒子の低減をもたらしたものとする。

Fig.9 Effect of throat diameter ratio of combustion chamber on emissions

Fig.10 Comparison of flame behavior between different combustion chambers

図11に3種類の燃焼室において噴射時期を変化させたときの微粒子PARTとNO排出量の関係を、 $p_c=0.7\text{MPa}$ および 0.5MPa について比較した結果を示す。図から明らかなように、トロイダル燃焼室STDで噴射時期を変更すると、いずれの負荷においてもNO-PART曲線には、トレードオフの関係が見られる。R45燃焼室では、中負荷での微粒子とNOは低減されるが、高負荷域で噴射時期を遅延すると微粒子が悪化する傾向はまぬがれない。これに対して、口径比をさらに小さくしたR35燃焼室では、噴射時期を遅らせると、中負荷以上の領域でNOばかりでなく微粒子も同時に低減できることがわかる。

Fig.11 Correlation of NO_x and particulate

4. むすび

以上、直接噴射式ディーゼル機関のNO_xおよび微粒子の同時低減を目的として、リエントラント燃焼室の燃焼室入口口径を変更して、スキッシュを変化させたときの、NOおよび微粒子の排出特性と燃焼特性を調べるとともに、実験下におけるシリンダ内火炎の状況を観察した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 同一圧縮比のもとで、燃焼室口径比を小さくしスキッシュを強くすると、一定の着火遅れのもとで混合気形成が促進されるばかりでなく、主燃焼が活発化して、全燃焼期間の短縮に効果がある。
- (2) 燃焼室の小口径化により、燃料消費率の悪化を抑えて噴射時期を遅らせることができる。特に、口径比40%以下では、噴射時期の遅延に有利である。
- (3) NOは、燃焼室の小口径化とともに増加するが、

噴射時期を遅らせた場合には、口径比に関係なく一定値に落ち着く。

(4) 微粒子に対する口径比の変化は、噴射時期によって異なり、口径比40%以下にすると噴射時期の遅延により、微粒子中の固形炭素分が減少して微粒子は低下する。ただ、低負荷時には、THCおよびSOFが増加する。

(5) 小口径比燃焼室では、ピストン隙間部への火炎流出が抑制され、ピストン凹み内での燃焼が主体になる。

(6) 口径比40%以下では、NOと微粒子の同時低減が可能である。

終わりに、実験機関についてご協力を頂いたヤママディーゼル(株)、および高速度撮影にご便宜を賜ったトヨタ自動車(株)に厚くお礼申し上げます。また、実験装置を製作頂いた本学志摩俊郎、桑内忠昭技官に感謝いたします。なお、本研究費の一部は、日本機械学会研究協力部会(RC133研究分科会)の助成による。

参考文献

- (1) Peters, A. and Putz, W., MTZ, 56-78, (1995), 402-410.
- (2) Pierpont, D. A. and Reitz, R. D., SAE Paper 950604 (1995).
- (3) Nakakita, K., et. al., JSME Int. J., 37-4, (1994), 966-973.
- (4) Middlemiss, I. D., SAE Paper 780113 (1978).
- (5) 大聖泰弘, ほか2名, 機論, 52-479, (1986), 2768-2773.
- (6) 金野 満, ほか3名, 機論B, 57-534, (1991), 773-777.
- (7) 福田昌准, ほか3名, 自技論, No. 39, (1988), 3-10.
- (8) 張 瓏, ほか3名, 機論B, 62-600, (1996), 3213-3219.
- (9) Sakata, K., et. al., SAE Paper 900654 (1990).
- (10) 植田隆広, ほか3名, 自技論, 28-1, (1997), 35-40.
- (11) Miwa, K. and Ishiyama, T., JSAE Review, 19-2, (1998), 151-153.
- (12) 三輪 恵, ほか2名, 機論B, 57-538, (1991), 2159-2165.
- (13) Werberge, F. and Cartellieri, W. F., SAE Paper 870097 (1987).