ディーゼル機関の排出未燃炭化水素に及ぼす リエントラント燃焼室の影響*

岡 本 昌 章** 石 山 拓 二****
開 原 真 一*** 三 輪 恵****

Effects of Re-Entrant Combustion Chambers on Unburned Hydrocarbon Emission from a Diesel Engine

By Masaaki Okamoto, Takuji Ishiyama, Shinichi Kaihara, Kei Miwa

The effects of re-entrant combustion chambers on emissions of particulates and unburned hydrocarbons were investigated in a high speed small direct-injection diesel engine. From our study, it has been already suggested that the fuel or the fuel-air mixture can become an important origin of unburned hydrocarbon emissions when they intrude into the narrow space between the piston and the cylinder head. In this work, especially noticing this point, the trends of THC and SOF were examined changing the injection timing and the top clearance.

The results show that the re-entrant combustion chamber reduces THC emissions, but increases SOF emissions compared with the deep bowl chamber at the advanced injection timing. On the other hand, at the late injection timing, THC and SOF are simultaneously reduced. When the injection timing and the top clearance are optimized for the re-entrant combustion chamber, it is possible to reduce not only smoke and NOx but also THC and SOF.

1. は じ め に

ディーゼル排気中の有害物質に対する低減要求が強まっており、人体や地球環境に及ぼす悪影響から、排気煙や窒素酸化物だけでなく微粒子や未燃炭化水素に対する規制が年々強化されている。自動車用等の小型ディーゼル機関においては、排気煙と窒素酸化物の同時低減のために、排煙特性に優れるといわれるリエントラント燃焼室¹⁾が用いられている。リエントラント燃焼室が流動や燃焼に及ぼす影響については、スワールやスキッシュを強化する^{1)~4)}、

上死点以後も比較的強いスワールを維持する^{3, 4)}、未燃燃料の隙間部への流出を抑制する^{5, 6)}等が報告されており、これらがすすの低減要因と考えられている。しかし、リエントラント燃焼室が全炭化水素THCや微粒子中の可溶有機分SOFに及ぼす影響に関する報告は少ない。そこで本研究では、小型直接噴射式ディーゼル機関にリエントラント燃焼室を用いて、排出未燃炭化水素に及ぼす影響を調べた。筆者らのこれまでの研究結果から、比較的口径比の小さい深皿型燃焼室を持つ小型直接噴射式ディーゼル機関においては、燃焼室壁面への燃料噴霧の衝突とともにシリンダヘッドとピストンの隙間への未燃分流出がTHCやSOFの排出に影響すると考えられる^{7, 8)}。そのため、噴射時期や上死点隙間を変更することにより未燃分の隙間への流出状態を変化させて、THCやSOFの排出傾向を調べた。また、窒素

*原稿受付 平成6年6月8日

第53回学術講演(平成6年5月18日)

**正会員 徳島大学大学院(徳島市南常三島町2-1)

***マツダ株式会社(広島県安芸郡府中町新地3-1)

****徳島大学工学部(徳島市南常三島町2-1)

図1 供試ピストン

酸化物、排気煙、THC、SOFの排出傾向からリエントラント燃焼室における最適噴射時期を検討し、これらの有害排気物質の同時低減のためにリエントラント燃焼室が有効であることを確認した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験機関 実験に用いたのは無過給の単気筒直接噴射式4サイクルディーゼル機関（シリンダ径×行程92×96mm、圧縮比17.4）で、プランジャ径8mmのボッシュ型燃料噴射ポンプおよび噴口径0.26mmの4噴口ノズル（開弁圧19MPa、噴射角度150°）を用いて燃料（JIS1号軽油：密度836kg/m³）を噴射した。本研究で用いたピストンを図1に示す。標準燃焼室（STD）は口径50.6mm（口径比55%）のトロイダル型である。リエントラント燃焼室は口径43mm（口径比46.7%）でスキッシュリップを持ち、上死点隙間 δ がSTDと同じ $\delta=0.9$ mmになるようにしたR09をリエントラント燃焼室の標準と

した。さらに上死点隙間の影響を調べるために $\delta=0.6$ mmとしたR06、 $\delta=1.2$ mmとしたR12も使用した。いずれのピストンもスキッシュリップの形状は同一で、くぼみ深さとくぼみ中央突起高さの調整により圧縮比をSTDと一定に保った。

2.2 計測方法 排気煙Sはボッシュ形式モークメータ、窒素酸化物NOはCLD分析計（ヤナコ、ECL-77A）で計測した。THCは200℃に保温したサンプル管を通して排気管から直接導入したガスをH-FID分析計（ヤナコ、G2800）で計測し、CH₄換算値で表示した。微粒子PARTは小型希釈トンネルを用いてテフロンフィルタ上に採取し、微量天秤でひょう量した⁷⁾。その後ジクロロメタンによるソックスレー抽出を行って、可溶有機分SOFと固形炭素分SOLIDに分離した。シリンダ内圧力pは圧電式圧力検出器（KISTLER 601A）、噴射弁揚程は渦電流式変位計で計測し、データをA/D変換してパソコンに取り込み解析した。

機関回転数は1800rpm、冷却水温度は $T_c=80^\circ\text{C}$ 、スワール比は $r_s=2.5$ で一定とし、噴射時期は $\theta_i=12^\circ$ BTDCを標準として $\theta_i=2.5^\circ$ BTDCまで遅延させた。但し、噴射時期の設定値は $P_e=0.7$ MPaにおける値であり、実際の噴射時期は低負荷ほど遅れる傾向にある。機関運転要領は、約1時間の暖機運転を行い冷却水温度を安定させた後、負荷を高負荷から低負荷に下げながら順次設定して、それぞれの負荷で20分間保持し、保持時間の後半5分で排気の計測を行った。

3. 実験結果

3.1 機関性能の比較 標準運転条件においてトロイダル燃焼室のSTDとリエントラント燃焼室のR09で機関性能を比較した結果を図2に示す。リエントラント燃焼室の場合、シリンダヘッド壁面温度 T_w が約20K高いほかは、燃料消費率 b_e 、排気温度 T_e 、吸入空気量 G_a のいずれにも差はみられない。次に、STDとR09で燃焼経過を比較した。図3は平均有効圧 $P_e=0.7$ MPaの場合の圧力pおよび熱発生率 $\dot{Q}$ のクランク角経過を3通りの噴射時期について比較した結果である。これより熱発生率からみた着火遅れはSTDとR09で差がないが、初期燃焼時の $\dot{Q}$ のピークはR09の方が高くなっており、最高圧力もR09の方が高いのがわかる。また、

図2 機関性能の比較

図3 圧力および熱発生率経過の比較

STDでは噴射時期を遅らせると初期燃焼と主燃焼の境目が不明瞭になるのに対して、R09では噴射時期が遅い場合にも初期燃焼と主燃焼の境目がはっきりしている。図4は噴射時期 θ_i による燃焼特性値の変化を $Pe=0.7\text{MPa}$ の高負荷と $Pe=0.2\text{MPa}$ の低負荷で比較した結果である。最高圧力 $p_{\max}$ と最大熱発生率 $\dot{Q}_{\max}$ は図3にも示したようにR09の方が高い、着火遅れ τ はSTDとR09では差がみられない。発生熱量が排気弁開時までの総熱量の95%に達するまでの燃焼期間 $\Delta\theta_{\text{burn}}$ は、低負荷時はR09の方が僅かに短く、STD、R09のいずれも噴射時期による値の変化はない。一方高負荷時は、STDでは噴射時期を遅らせると $\Delta\theta_{\text{burn}}$ が急激に

図4 燃焼特性値の比較

図5 標準運転時の排気特性

増加するのに対して、R09では噴射時期を遅らせてもあまり増加しない。これらのことから、リエントラント燃焼室では、着火遅れ期間中のくぼみ内での混合気形成が促進されて、着火後の燃焼が速やかに進行していると考えられる。

3.2 排気特性の比較

3.2.1 標準運転時の排気特性 標準運転時における排気特性をSTDとR09で比較した結果を図5に示す。窒素酸化物NOはR09の方が高い値を示し、図4に示した $\dot{Q}_{\max}$ 、 $p_{\max}$ が高い燃焼特性と対応する。排気煙Sと固形炭素分SOLIDは高負荷でわずかながらR09の方が高い。全炭化水素THCはすべての負荷でR09が低い値を示す。これはリエントラント燃焼室では着火遅れ期間中の混合促進により、くぼみ内に予混合気が速やかに形成され、形成された予混合気着火後くぼみ内で活発に燃焼するためと思われる。また、その結果ピストンとシリ

図6 噴射時期の影響

ンダヘッドの隙間へ流出する未燃分が減少すること
もTHC低減の一因と思われる。これに対して、
SOFはR09の排出量が多く特に中負荷での増加が
大きい、SOFは燃料噴霧や混合気が接触する壁面
近傍の局所的な温度状態の違いによって排出量
が変化する^{7)・8)}ことから、燃焼室形状の違いによって
壁面への燃料の付着状態が変化していることが増加
の一因として考えられる。

3.2.2 噴射時期の影響 噴射時期を変更する
と燃料の壁面付着や未燃分の隙間部への流出の状態
が変化するため、排気に及ぼすリエントラント燃焼
室の影響が異なると思われる。図6は噴射時期を
 $\theta_i = 12 \sim 2.5^\circ$ BTDCの範囲で変化させた場合の
NO, S, THC, SOFをSTDとR09で比較したもの
である。図には $Pe = 0.7\text{MPa}$ の高負荷と $Pe = 0.2$
MPaの低負荷における結果を示す。NOは噴射時期
を遅らせるほど減少する傾向を示すがSTDとR09
の差はあまり変化しない。高負荷時のSはSTDで
は噴射時期を遅らせることにより増加するのに対し
て、R09では噴射時期を遅らせても増加しない。こ
の結果は噴射時期を遅らせても燃焼期間が増加しな
いことと対応し、リエントラント燃焼室では燃焼後
期まで比較的強い流動が維持されているものと思わ
れる。THCは低負荷時に燃焼室形状による大きな
差がみられる。STDでは $\theta_i = 6^\circ$ BTDC付近に
THCの極小値があり、それ以上遅らせると大きく
増加するのに対し、R09では全体に排出量が少なく
噴射時期遅延による増加も小さい。SOFも低負荷
時に差がみられ、STDでは噴射時期を遅らせると
排出量が増加し $\theta_i = 3^\circ$ BTDC付近で極大とな
るのに対して、R09では $\theta_i = 10^\circ$ BTDCにおい

図7 上死点隙間の影響

てはSTDより排出量が多いものの噴射時期を遅ら
せるほど減少し、 $\theta_i = 7^\circ$ BTDCより遅らせた
場合はSTDより低い値となる。噴射時期を遅らせ
た時は混合不十分なガスが隙間部へ流出し易い⁵⁾
ためSTDではTHCやSOFが増加するが、R09では未
燃分が隙間へ流出する際にスキッシュリップにより
混合が促進されるため⁵⁾ THCやSOFの増加が抑制
されたものと思われる。

3.2.3 上死点隙間の影響 上死点隙間は圧縮
行程におけるスキッシュ流の強さと、膨張行程にお
ける未燃分の隙間部への流出状態を変化させ、その
結果排気に及ぼす影響が大きいと思われる。図7は
圧縮比一定のもとで上死点隙間 δ を変化させたR06
($\delta = 0.6\text{mm}$)、R12($\delta = 1.2\text{mm}$)ピストンの排気
特性をR09($\delta = 0.9\text{mm}$)と比較したものである。
NOは δ が小さいほど高くなる。Sは逆に小さいほ
ど低くなっており、この結果は深皿型燃焼室を用い
た池上らの結果⁶⁾と一致する。THC, SOFは δ が
大きいR12ではR09と比較して大幅に増加している。
また、 δ の小さいR06もTHC, SOFのいずれもR
09より増加している。池上らのシミュレーション結
果⁶⁾から、 δ が大きい場合は未燃分の隙間への流出
速度が遅い上に上死点後に急速に乱れが低下するこ
と、逆に δ が小さい場合は強い逆スキッシュに乗っ
て当量比の高い混合気が隙間に流出することが
THCやSOFの増加原因と考えられ、THCやSOFの
低減のためには隙間部の流動と隙間への未燃分の流
出量を適正に保つことが必要と思われる。

図8 排気煙の等濃度線図

図9 NOの等濃度線図

3.3 リエントラント燃焼室による排気の改善

これまでに得られたデータをもとに、排気煙S、NO、THC、SOFの同時低減の観点からリエントラント燃焼室による排気の改善効果を検討した。

3.3.1 排気煙とNOの排出傾向 まず、主に高負荷で問題となる排気煙SとNOの排出傾向を検討した。図8は噴射時期 θ_i と負荷 P_e に対する排気煙Sの排出傾向を等濃度線表示したものである。下段にトロイダル燃焼室のSTD、上段にリエントラント燃焼室のR09の結果を示す。これより、STDでは $P_e=0.3\text{MPa}$ 以上でSが排出され、負荷が高くなるほど等濃度線が密になっているのがわかる。また、等濃度線が弓なりになっており、同じ負荷に対して噴射時期を遅らせていくとSの排出量が増加し、 $\theta_i = 2 \sim 4^\circ$ BTDC付近で最高値となる。R09の場合は、Sが排出されるのは $P_e=0.4\text{MPa}$ 以上であり、等濃度線が横軸にほぼ平行で噴射時期を遅らせても排出量が変化しないことがわかる。図9はNOの排出傾向を図8と同様に等濃度線

図10 排気煙とNOの相関

表示したものである。STDでは等濃度線が右上がりであり、噴射時期が早いほどまた負荷が高いほど値が大きくなるのがわかる。R09も傾向はSTDと同じだが等濃度線の間隔が全体的に狭く、噴射時期や負荷による値の変化が大きい。図10は $P_e=0.7, 0.5$

図11 THCの等濃度線図

図12 SOFの等濃度線図

MPaにおいて噴射時期 θ_i を変化させた場合の排気煙SとNOの排出量の関係をSTDとR09で比較した結果である。図よりSTDでは一定の負荷についてみるとS-NO線が右下がりになっており、NOを低減させるために噴射時期を遅らせると排気煙Sが増加する、一般に言われるトレードオフ関係になっていることがわかる。一方、R09ではS-NO線が垂直に近く、噴射時期を遅らせることで排気煙Sを増加させることなくNOを低減できることを示しており、高負荷における排気煙SとNOの同時低減のためにリエントラント燃焼室は有効であるといえる。

3.3.2 THCとSOFの排出傾向 次に主に中、低負荷で問題となるTHC、SOFの排出傾向を検討した。図11は噴射時期と負荷に対するTHCの排出傾向を等濃度線表示したものである。STDのTHCは、 $Pe=0.2$ MPaの $\theta_i=10^\circ$ BTDCとTDC付近の2箇所にピークがあり、等濃度線の間隔が狭く、負荷や噴射時期の変化に対して急激に値が変化している。R09のTHCも大きくみると傾向はSTDに似

ており、 $Pe=0\sim0.2$ MPaの低負荷での値が大きく、噴射時期を早めても遅らせても増加する傾向を示す。しかしSTDに比べて等濃度線の間隔が全体的に広く、噴射時期、負荷のいずれに対しても値の変化は小さい。特に $\theta_i=8\sim4^\circ$ BTDCの範囲では低負荷においてもTHCが比較的低い値を保つことがわかる。トロイダル燃焼室では、負荷が低いと燃焼室内に火炎が広がりやすく、噴射時期が遅いと燃焼中に流動が弱まり過濃混合気が隙間へ流出しやすいため、急激に燃焼が悪化して未燃分の排出量が増加するものと思われる。それに対してリエントラント燃焼室では、強い流動が燃焼後期まで維持されることと、スキッシュリップにより未燃分が隙間へ流出する際にも混合が促進されることにより、活発な燃焼が持続されるため、負荷の低下や噴射時期の遅延に対して急激なTHCの増加が見られないものと思われる。図12はSOFの排出傾向を等濃度線表示したものである。これより、STDでは $Pe=0.2$ MPaで噴射時期を遅らせた $\theta_i=5\sim2^\circ$ BTDCの範囲に値の大きい領域があるのに対して、

図13 最適噴射時期での排気特性

R09ではピークは $Pe=0.3\sim0.4$ MPaの $\theta_i=11^\circ$ BTDC付近にあり、噴射時期を遅らせるほど減少する傾向を示すことがわかる。リエントラント燃焼室で噴射時期が早い場合にSOFが高い値を示す一因として、スキッシュリップ内側に噴霧が接触していることが考えられる。噴射時期を遅らせると、噴霧の到達距離が短くなることと、相対的にくぼみ内の深い位置に燃料が噴射されることにより、噴霧の壁面接触が弱まりSOFが減少する傾向を示したもののと思われる。

図11, 12からSTDではNOと排気煙Sの間だけでなくNOとTHC, SOFの間にもトレードオフ関係がある、すなわち噴射時期を遅らせて高負荷におけるNOを減少させると、低負荷時にTHC, SOFが増加することがわかった。これに対して、R09では噴射時期を遅らせた時のTHC, SOFの増加が抑えられることから、NOとTHC, SOFの間のトレードオフ解消にもリエントラント燃焼室は有効であると思われる。

3.3.3 噴射時期の最適化 前項の結果より、リエントラント燃焼室においてはTHCが増加しない範囲でなるべく噴射時期を遅らせた $\theta_i=5^\circ$ BTDCが最適噴射時期と考えられる。その場合の排気特性をSTDと比較して排気の改善効果を検討した。図13は、 $\theta_i=5^\circ$ BTDCにおけるR09の排気特性と、SあるいはNOが同等となるSTDの排気特性を比較したものである。すなわち、STDでSが同等となる噴射時期は $\theta_i=12^\circ$ BTDCでありこれを Δ で、NOが同等となる噴射時期は $\theta_i=$

7° BTDCでありこれを $\times$ で示してある。Sが同等の場合の排気特性を比較すると、SOFはSTDとR09で差がないが、NO, THCはいずれもすべての負荷でR09の方が低い値となる。NOが同等の場合は、SだけでなくTHC, SOFもR09の方が低い値となる。

このように、リエントラント燃焼室を用いて噴射時期を最適化することで、排気煙SやNOを悪化させることなくTHCやSOFを低減できることがわかった。

4. おわりに

小型直接噴射式ディーゼル機関にリエントラント燃焼室を用い、噴射時期や上死点隙間を変更して排気特性を調べた結果、次のことがわかった。

- (1) リエントラント燃焼室はトロイダル燃焼室と比較して、着火遅れには差がないが初期燃焼時の最大熱発生率が高く、噴射時期遅延による燃焼期間の増加が抑えられる。これより、リエントラント燃焼室では着火遅れ期間中のくぼみ内での混合気形成が促進されていると思われる。
- (2) 標準噴射時期においては、THCはすべての負荷でリエントラント燃焼室の方が低い値となるが、SOFは逆に高い値を示す。THCの減少は、着火遅れ期間中の混合促進によりくぼみ内での燃焼が活発になり、隙間への未燃分の流出が抑制されたためと思われる。
- (3) 噴射時期を遅らせると、トロイダル燃焼室ではTHC, SOFのどちらも増加するが、リエントラント燃焼室ではTHCの増加が抑えられ、SOFは逆に減少する。これは、リエントラント燃焼室では未燃分が隙間へ流出する際にスキッシュリップにより混合が促進されるためと思われる。
- (4) リエントラント燃焼室で上死点隙間 δ を広げると、THC, SOFの両方が大きく増加する。 δ を狭めた場合にもTHC, SOFが増加し、THCやSOFの低減のためには隙間部の流動と隙間への未燃分の流出量を適正に保つことが必要と思われる。
- (5) リエントラント燃焼室を用いて噴射時期を最適化することで、排気煙SやNOを悪化させることなくTHCやSOFを低減できる。

文 献

なお、本研究の一部は日本機械学会研究協力部会 RC107研究分科会の助成を受けて行われたものである。

終りに、本研究で用いた実験機関についてご便宜を賜ったヤンマーディーゼル㈱に厚くお礼申上げる。また実験に際し、本学学生栢井克明氏、石川崇氏および石崎昌幸氏（研究当時）のご協力を頂きここに謝意を表す。

- 1) I. D. Middlemiss, SAE Paper No.780113 (1978) .
- 2) 大聖ほか 2 名, RC86 成果報告書・Ⅱ (1990) , 157.
- 3) T. J. Williams and M. J. Tindal, SAE Paper No.800027 (1980) .
- 4) 侯・木沢, 第10回内燃シンポ講演論文集 (1992) , 13.
- 5) 福田ほか 3 名, 自技論 No.39 (1988) , 3.
- 6) 池上ほか 3 名, 自技論 No.46 (1990) , 8.
- 7) 三輪ほか 2 名, 機論 57-538, B (1991) , 233.
- 8) 石山ほか 3 名, 機論 58-554, B (1992) , 268.