リエントラント型燃焼室の形状が二段噴射ディーゼル機関の性能・排気に及ぼす影響 *

堀部 直人[1)] 磨井 泰裕[2)] 田中 宏和[3)] 濱田 貴之[4)] 石山 拓二[5)]

Effects of Reentrant Type Piston Bowl Geometry on Performance and Emissions in a Diesel Engine with Two-Stage Injection

Naoto Horibe Yasuhiro Usui Hirokazu Tanaka Takayuki Hamada Takuji Ishiyama

This study aims at finding the favorable combination of combustion-chamber shape and injection parameters when using two-stage injection. The experiments were carried out with various injection conditions, such as spray angle and injection timings and fuel-quantity ratio of two-stage injection, using three types of combustion chamber at low and middle loads. The results show that the strong flow in reentrant-type combustion chamber makes over-lean mixture from first-stage injection at a low load leading to an increase in unburned species emissions, while smoke emission is markedly reduced at a middle load. Increasing first-injection quantity reduces unburned species emissions at a low load but increases NOx emissions. The larger bowl diameter is effective to reduce unburned species emission for later first-stage injection at a low load; however, it causes an increase in smoke emission at a middle load.

Key Words: **(Standardized) Heat engine, Compression ignition engine, Performance**
(Free) Combustion chamber geometry, Injection Condition (A1)

1. まえがき

ディーゼル機関における窒素酸化物（NOx）と粒子状物質（PM）の排出を抑制する手法の一つとして，低圧縮比と高EGRを組み合わせる方法が検討されている[(1)-(3)]．この方法による排気低減効果は，着火遅れを長くして燃料と空気の混合が進んだ状態で着火させることにより，NOxやPMが生成する混合気濃度の頻度および滞留時間を減少させることで得られる．しかし，この方式では未燃物質の排出増加や燃焼騒音の増大などが問題となる．これらの対策として多段噴射の使用が検討されており[(4)(5)]，燃焼騒音を抑えながら排気を低減する噴射制御方法が提案されている．

著者らは，トロイダル型燃焼室をもつ試験機関を用いて二段噴射を行なった結果，黒煙の排出を抑えるために一段目噴射を進角し，二段目噴射時期はNOxと最大圧力上昇率を抑えるために膨張行程での噴射としながらも，熱効率の低下を防ぐために比較的TDCに近い時期を選ぶことが燃焼騒音の抑制，排気低減に有効であることを明らかにした．しかし，低負荷域では未燃物質排出量が増加し，中負荷域では黒煙濃度の低減と熱効率向上が背反関係にあることが明らかとなった[(4)]．また，既報[(6)]においてリエントラント型燃焼室を用いて低負荷で単段噴射を行なった結果，狭いコーン角度の噴射ノズルを用いることで，燃焼室の混合気をくぼみ内に閉じ込める性質と強い空気流動による混合促進効果により，低負荷において未燃物質とNOxの同時低減が可能であることがわかった．しかし，中負荷ではくぼみ内で混合気が過濃になりやすいので黒煙濃度が高くなり，口径の大きいトロイダル型燃焼室の方が排気低減に有利であった．

本研究ではこの結果を参考に，二段噴射により圧力上昇率を抑えたうえで，上記のようなリエントラント型燃焼室の低負荷における未燃物質の低減作用を活用し，さらに，中負荷において特に問題となる黒煙濃度の低減を図るために必要な燃焼室形状を実験的に見出すこととした．そのために無過給単気筒ディーゼル機関において，トロイダル型燃焼室および形状の異なる二種類のリエントラント型燃焼室を用いて実験を行った．実験では，既報において見出された，トロイダル型燃焼室に適したEGR率，噴射量配分などの条件を基準としながら，リエントラント燃焼室に特有の噴射条件設定が必要かどうかを調べた．

2. 実験装置および方法

試験機関にはコモンレール噴射システム（DENSO ECD-U2P）

*2010年9月29日受理．2010年9月29日自動車技術会秋季学術講演会において発表．
1)・2)・3)・4)・5) 京都大学(606-8501 京都市左京区吉田本町)
(E-mail:horibe@energy.kyoto-u.ac.jp)

Table 1 Standard specifications of test engine

Engine type	Direct-injection diesel engine, Single-cylinder, Water-cooled
Bore×Stroke	102×105 mm
Displacement	857 cc
Compression ratio	15.5
Swirl ratio	2.6
Injection system	Common-rail and solenoid injector (Max. pressure: 135 MPa)
Injection nozzle	ϕ0.18 mm×6 holes
EGR system	Water-cooled

およびCooled-EGRシステムを追加した水冷無過給単気筒4サイクルディーゼル機関（Yanmer NFD170）を使用した．表1に試験機関の主要諸元を示す．噴射ノズルは噴孔径 0.18mm，6孔のものを使用した．コーン角度はα=150°を標準とし，一部の実験で125°のものも使用した．

燃焼室は図1に示す三種類を用いた．基準としたトロイダル型燃焼室 D56 は既報[6]で用いたものと同じで，上死点隙間を広く取って（1.77mm）圧縮比を15.5とし，着火遅れを確保している．一方，リエントラント型燃焼室 Re54 および Re60 は，圧縮比を等しくしながら，空気流動を確保するため上死点隙間を0.8mmと小さくした．

各燃焼室におけるスワール流およびスキッシュ流の強さを概算した[7]．クランク角度に対するスワール比 r_s および平均ピストン速度に対するスキッシュ流速 v_{sq}/c_m を図2に示す．いずれもくぼみ外縁での値である．燃焼室Re60は燃焼室D56よりくぼみ口径が大きいが，上死点隙間を小さくしたためスワール流およびスキッシュ流ともに D56 より強く，さらに口径の小さいRe54において，もっともスワール流およびスキッシュ流が強くなる．

EGRガスは水冷式EGRクーラにより室温まで冷却し，吸入新気と混合した．EGR率は吸気中と排気中のCO_2モル分率の比で定義し，EGR弁を用いて調節した．

実験条件は，機関回転速度1800 rpm，冷却水入口温度80°C，オイルパン内潤滑油温度80°Cとし，噴射圧力は120 MPa一定とした．燃料はJIS2号軽油（セタン指数：60.0，密度：829 kg/m^3（15°C），総発熱量：45.9 MJ/kg）を使用した．噴射量は低負荷相当の20 mm^3/st（EGRなしのとき，総括当量比0.3）と，中負荷相当の30 mm^3/stを選んだ．EGR率は既報[4]の結果をもとに，トロイダル型燃焼室でNOx，未燃物質，および黒煙濃度が低く保てる条件として，低負荷では45%とし，中負荷条件では25%とした．

排気中の THC 濃度は加熱型 FID 分析計（HORIBA MEXA-1170HFID），CO およびCO_2は NDIR 分析計（Round Science ALTAS12），NOx は CLD 分析計（Yanaco KA-200），黒煙濃度は反射式スモークメータ（AVL 415S）を用いて計測した．また，圧力センサ（Kistler 6052A）から得た50サイクルの筒内圧力を平均して熱発生率および各種燃焼特性値を求めた．

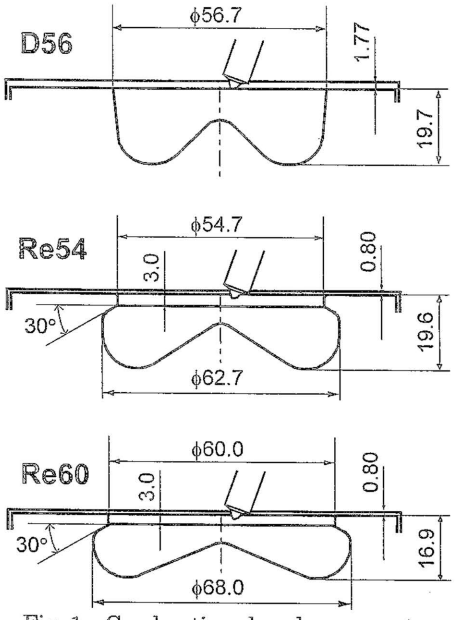

Fig. 1 Combustion chamber geometry

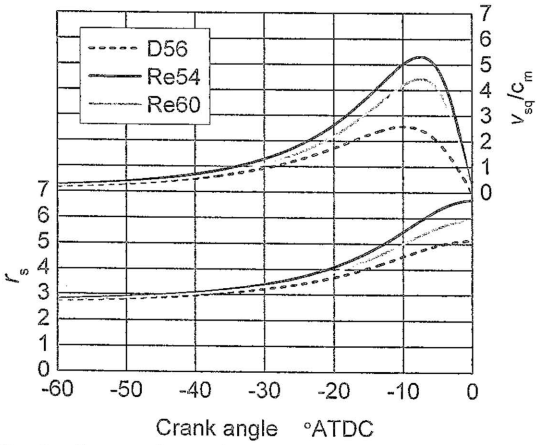

Fig. 2 Comparison of swirl and squish flow velocity

3. 実験結果および考察

3.1. リエントラント型燃焼室の性能および排気特性

まず，トロイダル型燃焼室 D56 およびリエントラント型燃焼室 Re54 を用いて低負荷において実験を行なった．D56 には標準のコーン角度α=150°の噴射ノズルを組み合わせ，Re54 にはコーン角度α=150°および125°の二種類を組み合わせた．

実験条件は，噴射量 q_{total}=20mm^3/st とし，噴射量配分は一段目噴射量 q_1 と二段目噴射量 q_2 を q_1/q_2=5/15，二段目噴射時期 θ_2 は-5°ATDC および 0°ATDC とした．一段目噴射時期θ_1は-40°ATDC より遅角側で変化させた．ただし，一段目噴射時期と二段目噴射時期を近付け過ぎると噴射量が安定しなくなるため，一段目と二段目の噴射時期は 15°CA 以上間隔をあけて実験を行った．EGR率は45%とした．図3および図4に一段目噴射時期θ_1に対する排気中の黒煙濃度 Smoke，NOx 濃度，CO 濃度，THC 濃度，図示熱効率，最大圧力上昇率を示す．

二段目噴射時期が早い場合（θ_2=-5°ATDC，図3），標準のコーン角度α=150°を用いると，CO 濃度および THC 濃度が増加し，

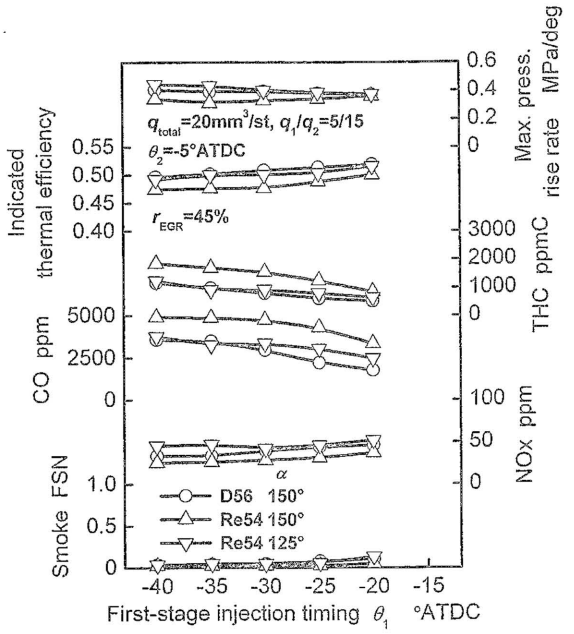

Fig. 3 Effects of combustion chamber geometry on engine performance and emissions at a low load (θ_2=-5°ATDC)

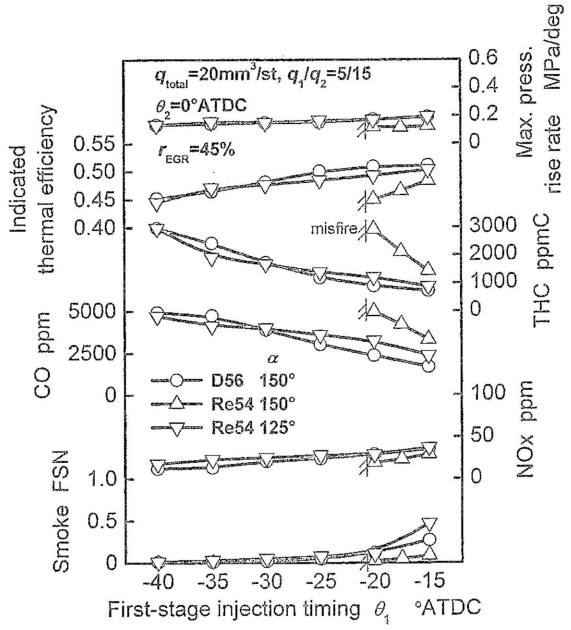

Fig. 4 Effects of combustion chamber geometry on engine performance and emissions at a low load (θ_2=0°ATDC)

熱効率が低下する．コーン角度をα=125°に狭めると，CO 濃度および THC 濃度は減るものの D56 よりわずかに高い．二段目噴射時期を遅らせてθ_2=0°ATDC（図 4）とすると，標準のコーン角度では失火により一段目噴射時期を早めることが出来ない．コーン角度を狭めると，一段目噴射時期を-30°ATDC より進角したとき，トロイダル型燃焼室に比べて CO および THC 濃度がわずかに減少するが，それよりも遅い一段目噴射時期では逆に増加する．このとき黒煙濃度の増加も見られる．リエントラント型燃焼室はくぼみ内部に混合気を保持する傾向が強いため，過濃な混合気が増加したことが原因と考えられる．

性能および排気が変化する原因を明らかにするため燃焼解析を行なった．二段目噴射時期θ_2=-5°ATDC と 0°ATDC のそれぞれについて一段目噴射時期θ_1=-20°ATDC とした場合の筒内圧力，熱発生率およびニードルリフトセンサの出力を図 5 に示す．Re54 では二段目噴射時期θ_2=0°ATDC の場合，標準のコーン角度では TDC 付近に見られる一段目燃料の熱発生量が少なく，雰囲気温度・圧力の上昇が不十分となり二段目燃料の燃焼が遅れる．図示していないが，この傾向は一段目噴射時期が早いと顕著になり，失火に至る．二段目噴射時期θ_2=-5°ATDC でも一段目燃料の熱発生が少なくなるが，TDC に近い時期での燃焼となるため D56 と熱発生率経過に大きな違いは見られない．しかし，図 3 に示したように，CO，THC 排出は D56 と比べて多い．これらのことから，失火や未燃物質の排出増加は，一段目噴霧の混合気形成に関連していると考えられる．コーン角度を狭めた場合は D56 と同様の熱発生率経過となる．コーン角度が小さい場合に未燃物質の大きな増加が見られないこと，コーン角度が広い場合に，一段目噴霧がリップ下部に到達すると思われる-30°ATDC より遅い一段目噴射時期でも未燃物質が多いことなどから，リップ付近の空気流動が貫徹力の弱い一段目噴霧の希薄化に寄与し，高 EGR を用いるとこれが失火や未燃物質増加の原因になったと推定される．

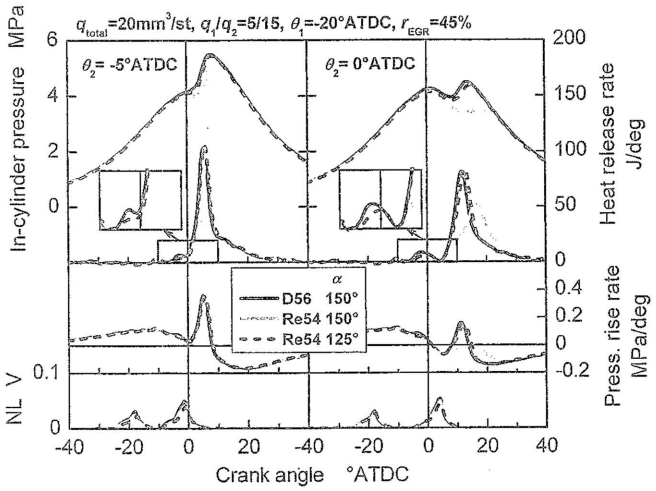

Fig. 5 Effects of combustion chamber geometry on in-cylinder pressure, heat release rate and pressure rise rate

3.2. 噴射量配分の影響

つぎに，低負荷での未燃物質排出抑制を狙って，一段目噴射量の割合を増やして性能と排気の変化を調べた．実験条件は，前項において比較的熱効率の高かった二段目噴射時期θ_2=-5°ATDC において，噴射量配分 q_1/q_2 を 7.5/12.5 に変更して実験を行なった．図 6 に一段目噴射時期θ_1に対する性能および排気を示す．

一段目噴射量を増加させると一段目噴射時期が早いときは燃焼室くぼみから外れる一段目燃料の量が増加するため CO や THC が増加し，熱効率が低下する．一方，一段目噴射時期が遅いときは一段目燃焼の熱発生率の増加により二段目燃焼の着

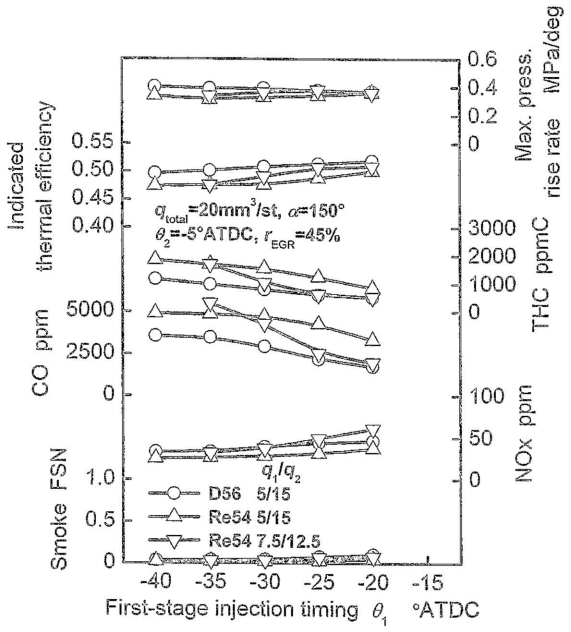

Fig. 6 Effects of injection-quantity ratio on engine performance and emissions (Re54)

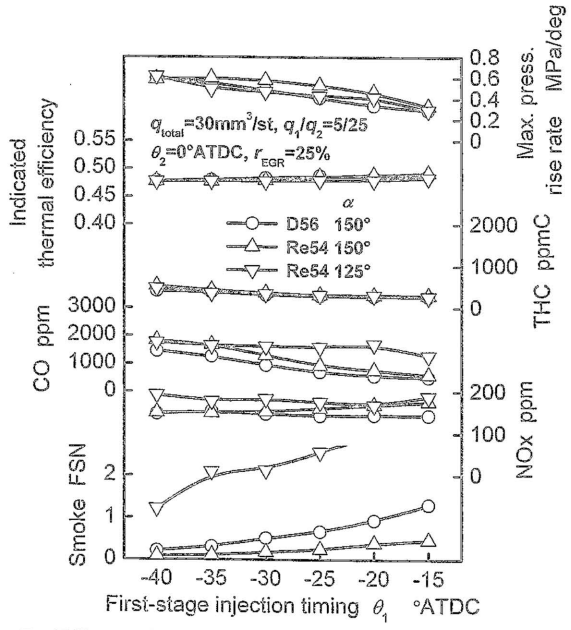

Fig. 7 Effects of combustion chamber geometry on engine performance and emissions at a middle load

火が早まり，CO と THC 濃度は減少するが，NOx は増加する．これは，一段目燃料の熱発生量が増加し，筒内圧力および温度が上昇したためと考えられる．

3.3. 中負荷における燃焼室形状の影響

次に中負荷におけるリエントラント型燃焼室の性能・排気特性を調べるために噴射量 q_{total}=30mm³/st，噴射量配分 q_1/q_2=5/25，二段目噴射時期θ_2=0°ATDC，EGR 率 25%とし，燃焼室 D56 および燃焼室 Re54 を用いて実験を行なった．D56 には標準のコーン角度α=150°の噴射ノズルを組み合わせ，Re54 にはコーン角度α=150°および 125°の二種類を組み合わせた．実

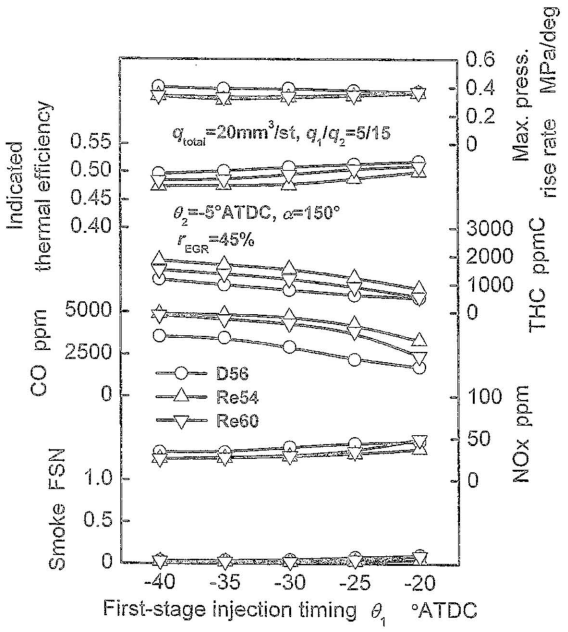

Fig. 8 Effects of diameter of combustion chamber on engine performance and emissions at a low load

験結果を図 7 に示す．

コーン角度α=150°を用いると，一段目噴射時期が早い場合に CO 濃度がやや増加するものの黒煙濃度を大きく下げることが出来る．最大圧力上昇率は一段目噴射時期θ_1 が-20°ATDC から-30°ATDC にかけて増加する．一方，コーン角度を狭くすると，黒煙濃度と CO 濃度が大きく増加する．総噴射量を増やしたことでくぼみ内に過濃な混合気が多くなったものと考えられる．なお，EGR 率が低いために，燃焼室を変更しても低負荷で見られたような一段目燃焼の熱発生量の変化は見られなかった．

3.4. 燃焼室くぼみ口径の影響

低負荷においてリエントラント型燃焼室 Re54 を用いた場合，一段目燃料の熱発生量が不足し，二段目燃料の燃焼が遅れて熱効率が低下した．一段目噴射量割合を増加させたところ，一段目噴射時期が遅い場合に，燃焼室 D56 と同等の未燃物質および黒煙濃度とすることが出来たが NOx が増加した．中負荷ではリエントラント型燃焼室を用いることで黒煙濃度を下げることが出来た．これらの傾向は，いずれもくぼみ内の流動の強さに依存していると考えられるので，そのことを確認するために口径を拡大したリエントラント型燃焼室 Re60 を用いて実験を行なった．

図 8 に低負荷（q_{total}=20mm³/st）における実験結果を示す．口径の拡大によりくぼみ内の流動は弱くなるが，黒煙濃度の目立った増加は見られない．CO および THC 濃度，ならびに熱効率は燃焼室 D56 と燃焼室 Re54 の中間となる．図 9 に示す燃焼解析の結果から，Re54 ほどではないが一段目燃料の熱発生量が D56 の場合より少なくなっていることが分かる．Re54 と同様に，これが CO と THC 濃度の増加につながったといえる．

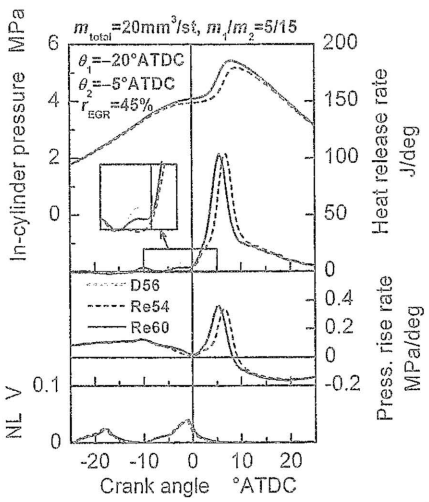

Fig. 9 Effects of diameter of combustion chamber on in-cylinder pressure, heat release rate and pressure rise rate

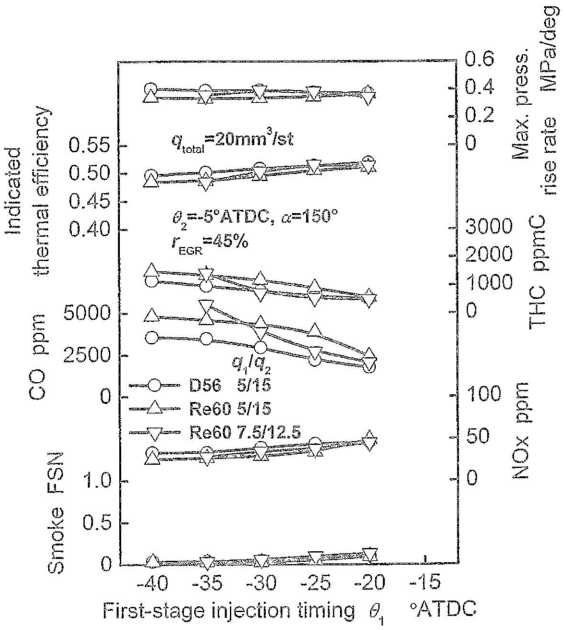

Fig. 10 Effects of injection-quantity ratio on engine performance and emissions (Re60)

図 10 に示すように，一段目噴射量を増やすと Re54 と同様に一段目噴射時期が遅い時に CO と THC 濃度を下げることができる．

図 11 に中負荷における実験結果を示す．燃料噴射量が増えると流動が弱くなることの影響が強く表れ，Re54 に比べて CO および THC 濃度，最大圧力上昇率はわずかに低下するが，黒煙濃度が大きく増加して D56 と同等になる．

3.5. 燃焼室形状変更による排気改善効果

燃焼室形状の変更による排気改善効果を明らかにするために，低負荷ならびに中負荷の結果を図 12，図 13 にまとめた．各種排気成分は図示仕事に対する排出量に換算した．なお，PM 排出量は黒煙濃度より換算した[8]．

低負荷（図 12）では NOx に対して CO，THC，図示燃料消費

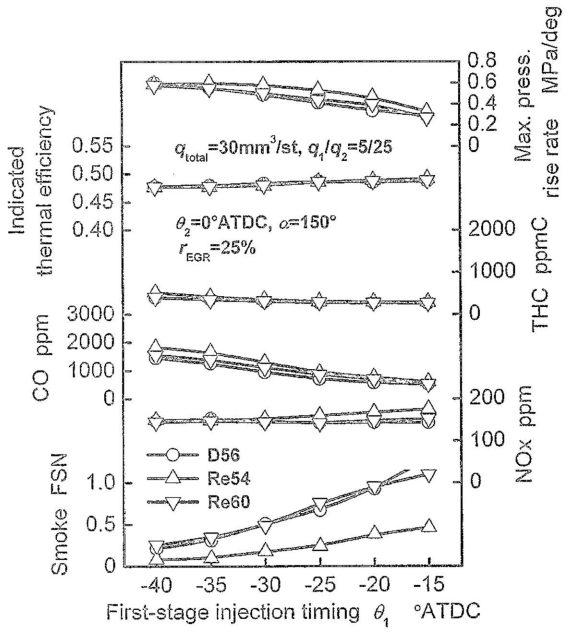

Fig. 11 Effects of diameter of combustion chamber on engine performance and emissions at a middle load

率 ISFC がトレードオフの関係となる．また，PM および最大圧力上昇率に対する燃焼室形状や噴射量配分の大きな影響は見られない．CO，THC，図示燃料消費率は，口径の大きいリエントラント型燃焼室 Re60 の場合，標準の燃焼室 D56 より等 NOx に対して減少し，口径の小さいリエントラント型燃焼室 Re54 では増加する．Re54，Re60 ともに図 8 では D56 の同じ一段目噴射時期に対して CO，THC は増加し，NOx は低下したが，Re60 は熱効率の低下が小さいために上記の結果になる．また，リエントラント型燃焼室を用いた際に減少した一段目燃焼の熱発生量を増やすために一段目噴射量を増加させると CO，THC は減少するが，NOx が増加するため NOx と CO，THC の関係の改善は得られない．とくに Re54 では NOx の増加が大きくなり（図 6），トレードオフの関係は悪化する．口径の小さいリエントラント型燃焼室では，一段目燃焼の熱発生量を増やすために一段目噴射割合を増やすと，二段目燃焼が早くなり，さらに強い空気流動によって燃焼が活発化するため NOx が大きく増加したと考えられる．

中負荷（図 13）では燃焼室形状によって排出物質間の関係は大きく異なる．D56 では NOx と PM がトレードオフの関係になっているのに対して，Re54 では一段目噴射時期を変更しても PM はほとんど変化せず，低負荷のときと同様に NOx と CO はトレードオフの関係となる．Re60 ではこれらの中間的な関係となる．最も空気流動の強い Re54 では噴霧が希薄化するため低負荷と同様の傾向になったと考えられる．

これらの結果から，リエントラント型燃焼室を用いる場合，中負荷では黒煙濃度を抑えるためにくぼみ内の流動を確保する必要があることがわかる．一方，低負荷では一段目噴霧が希薄化すると未燃物質の排出が増加するので，流動を抑える必要があると推定される．

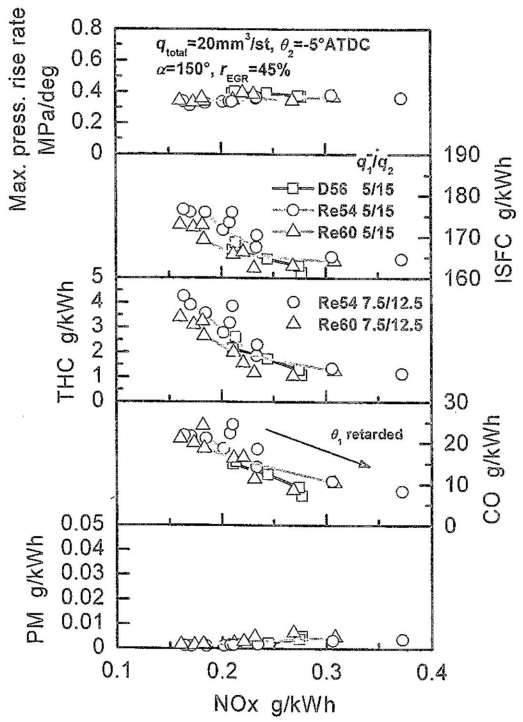

Fig. 12 Relationships between NOx, PM, CO, THC, ISFC and pressure rise rate at a low load

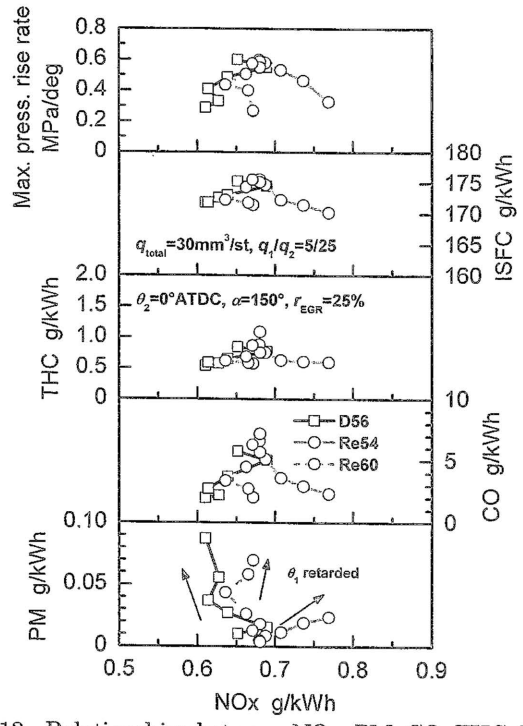

Fig. 13 Relationships between NOx, PM, CO, THC, ISFC and pressure rise rate at a middle load

4. まとめ

リエントラント型燃焼室をもつ単気筒ディーゼル機関において，高 EGR と二段噴射を用いて運転を行い，噴射時期，噴射量配分，燃焼室形状および噴射ノズルのコーン角度が性能・排気に与える影響を調査した結果，以下の知見を得た．

(1) リエントラント型燃焼室では強い空気流動によって一段目噴霧が希薄化し，低負荷で高 EGR を用いる場合，未燃物質が増加する．

(2) 低負荷で一段目噴射割合を増やすと一段目噴射時期が早い場合は未燃物質が増加する．一段目噴射時期が遅い時は，未燃物質は減少するが，NOx は増加する．

(3) 中負荷ではリエントラント型燃焼室を用いると強い気流によって混合が促進され，黒煙濃度が大きく低下する．

(4) リエントラント型燃焼室のくぼみ口径を拡大すると，低負荷では一段目燃料の熱発生量は増加して未燃物質は低減する．さらに，一段目噴射割合を増やすと未燃物質は低減する．中負荷では流動が弱くなる効果が大きく，未燃物質と最大圧力上昇率が低下し，黒煙濃度が大きく上昇する．

(5) リエントラント型燃焼室を用いる場合，中負荷では黒煙濃度を抑えるためにくぼみ内の流動を確保する必要がある．一方，低負荷では高 EGR を使うと，一段目噴霧が希薄化すると未燃物質の排出が増加するので流動を抑える必要がある．

謝　辞

本実験で使用した燃料噴射系部品はトヨタ自動車株式会社よりご提供頂いた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

(1) T. Kanda : PCCI Operation with Fuel Injection Timing Set Close to TDC : SAE Paper, No. 2006-01-0920, (2006)

(2) 北畠亮：過給運転及び低圧縮比化による予混合ディーゼル燃焼領域の拡大，自動車技術会論文集，Vol. 37, No. 5, p. 119-124, (2006)

(3) R. M. Opat : Investigation of Mixing and Temperature Effects on HC/CO Emissions for Highly Dilute Low Temperature Combustion in a Light Duty Diesel Engine : SAE Paper, No. 2007-01-0193, (2007)

(4) N. Horibe : Improvement of premixed charge compression ignition-based combustion by two-stage injection : International Journal of Engine Research, Vol. 10, No. 2, p. 71-80 (2009)

(5) 北村高明：低圧パイロット噴射と高圧メイン噴射を組み合わせた混合律速型低温ディーゼル燃焼法（第 1 報）高負荷運転を可能にする低 NOx 燃焼コンセプト：自動車技術会論文集，Vol. 41, No. 2, p. 339-345 (2010)

(6) 堀部直人：ディーゼル機関における PCCI 運転に適した燃焼室形状の選択に関する研究：日本機械学会論文集（B 編），Vol. 74, No. 739, p. 737-745 (2008)

(7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, (1988)

(8) Emissions Test Instruments, AVL 415S Smoke Meter, The new correlation curve : downloaded from www. avl. com on 1st June 2005