

噴射ノズル仕様および燃焼室形状が ディーゼル機関におけるアフター噴射の黒煙低減効果に与える影響*

堀部 直人¹⁾ 隅本 貴²⁾ 小溝 達也³⁾ 石山 拓二³⁾

Effects of Injection Nozzle Specifications and Combustion Chamber Shape on Smoke Reduction by Post Injection in a Diesel Engine

Naoto Horibe Takashi Sumimoto Tatsuya Komizo Takuji Ishiyama

This study aims at improving understanding of the relation between smoke-reduction effect of post injection and design and operating conditions in small diesel engines. A series of experiments was conducted using a single-cylinder diesel engine under a fixed NOx emission condition to investigate the smoke reduction effect of post injection varying the number of injection nozzle orifice and piston bowl diameter, which would influence the interaction between main spray flames and post sprays. The results indicate that the larger number of nozzle orifice with smaller diameter reduces smoke emissions under late post injection conditions. Advanced post injection reduces smoke emissions for the smaller piston bowl diameter; while retarded post injection reduces smoke emissions for the larger piston bowl diameter. Explanations for these trends were attempted paying attention to the influence of the main spray flames on post sprays.

KEY WORDS : Heat Engine, Compression Ignition Engine, Emission Gas/Harmful Emissions, Diesel Engine, Multiple Injections, After-Injection, Post Injection, Combustion chamber geometry, Smoke (A1)

1. はじめに

自動車用ディーゼル機関にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置が普及し、騒音低減や排ガス低減のために多段噴射が活用されている。メイン噴射の直後に少量の燃料を噴射するアフター噴射は黒煙の排出低減や大量 EGR を用いた低温燃焼法 (LTC) における未燃炭化水素の排出低減に有効とされており、多くの研究がなされている⁽¹⁻⁹⁾。アフター噴射の黒煙低減効果に関する研究では、負荷条件や噴射条件、噴射ノズル仕様、燃焼室形状などの条件が様々であり、アフター噴射時期をメイン噴射終了時期に近接させると黒煙濃度が下がるという結果や、遅らせると黒煙濃度が下がるという結果など、一見矛盾した報告もあり、アフター噴射の効果と上記の運転・設計条件との関係が明らかにされているとは言えない⁽¹⁰⁾。

著者らは既報⁽⁹⁾において、小型単気筒機関を用いて、アフター噴射時期をメイン噴射終了時期に近づけるほど黒煙濃度が低下すること、噴射圧力を高めると黒煙濃度は下がるがアフター噴射による黒煙低減効果は小さくなることなどを明らかにし、黒煙低減効果の大きさはメイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉の強さの違いによると推論した。本研究では、アフター噴射による黒煙低減効果についてより理解を深めるために、メイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉の強さに関連の

深い噴射ノズル仕様 (噴孔径×数)、噴射圧力、燃焼室形状を変更した実験を行い、その結果にもとづいて上記条件の変更に伴いアフター噴射の黒煙低減効果に変化する理由について考察を行った。

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を搭載した水冷単気筒四サイクルディーゼル機関⁽⁹⁾ (内径 85mm, 行程 96.9mm, 圧縮比 16.3) を使用した。

本実験では、燃料インジェクタはノズル流量 (680 mL/min @ 100 kPa) を等しくした上で噴孔数を変更した $\phi 0.135 \times 6$ 孔、 $\phi 0.125 \times 7$ 孔、 $\phi 0.117 \times 8$ 孔、 $\phi 0.105 \times 10$ 孔のインジェクタを用いた。いずれも噴射角は 156° である。燃焼室は図 1 に示すような二種類のリエントラント型を用いた。標準燃焼室とした Re55 に加え、くぼみ容積一定でくぼみ口径を上げた Re60 を用いた。

実験は、回転速度を 1500 rpm, 冷却水入口温度を 80°C , 潤滑油温度を 80°C として実施した。また、吸気温度を 35°C とし、EGR を使用しないときの充填効率 1.05 となるように吸気圧力を調整した。その結果、吸気圧力は約 120 kPa (abs) となった。なお、排気背圧弁は全開とした。燃料には JIS2 号軽油 (セタン指数: 56.6, 密度 (15°C): 832.2 kg/m^3) を用いた。

*214 年 8 月 26 日受理。

1)・2)・3)・4) 京都大学(606-8501 京都市左京区吉田本町)

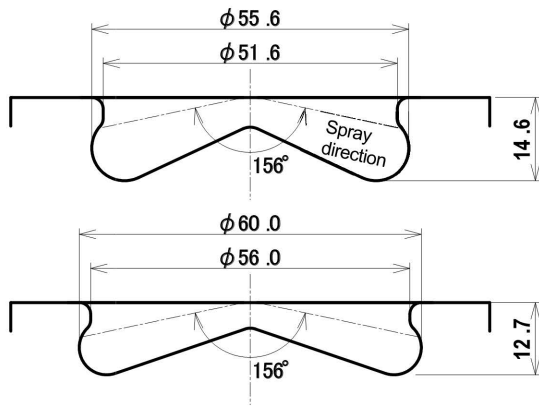


Fig. 1 Schematics of combustion chamber and spray direction at TDC (upper: Re55, lower: Re60)

アフター噴射による黒煙低減効果が明確になるように比較的黒煙濃度が高い条件（1~2 FSN 程度）で実験を行った。標準の噴射条件としては、噴射圧力 90 MPa、サイクルあたりの総噴射量を 33 mm³/cycle、パイロット噴射時期を -19° ATDC、パイロット噴射量を 6 mm³/cycle、メイン噴射時期を 1° ATDC、メイン噴射量を 23 mm³/cycle とし、アフター噴射量を 4 mm³/cycle としてアフター噴射時期をメイン噴射終了時期に最も近接させた時期（11° ATDC）から 21° ATDC まで変化させた。このとき、アフター噴射時期に応じてアフター噴射指令期間を調節し、アフター噴射量を一定に保った。アフター噴射時期を 11° ATDC としたとき、図示平均有効圧力（IMEP）は約 1.0 MPa となった。また、EGR 率を調整して NOx 排出濃度を 150±5 ppm に保った。その結果、EGR 率は 20% 程度、総括当量比は 0.75 程度となった。スワール比は 1.8 とした。

排気中の黒煙濃度は反射式スモークメータ（AVL 415S）、NOx 濃度は CLD 分析計（Thermo Fisher Scientific; Model 42i-HL）、THC 濃度は加熱型 FID 分析計（Horiba; MEXA-1170HFID）、CO および CO₂ 濃度は NDIR 分析計（Round Science; ALTAS12）を用いて計測した。また、圧力センサ（Kistler; 6052A）から得た筒内圧力の 50 サイクル平均より最大圧力上昇率および熱発生率を求めた。

また、試験で用いた燃料噴射指令値と同じ指令値を用いて、別途、Bosch 式燃料噴射率計を用いて噴射率を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1. 噴射ノズル諸元の影響

標準噴射条件を用いた場合、メイン噴霧は図 2 に示すように燃焼室くぼみ側壁に衝突した後、壁に沿って燃焼室中央へ向かって流動し、隣接した噴霧同士の干渉や逆スキッシュ流によって図中下段のように巻き上がるように流動すると考えられ、遅いアフター噴射時期を用いるとこの巻き上がったメイン噴霧火炎にアフター噴霧が進入すると考えられる。既報⁹⁾では、早いアフター噴射時期を用いるとアフターなしの条

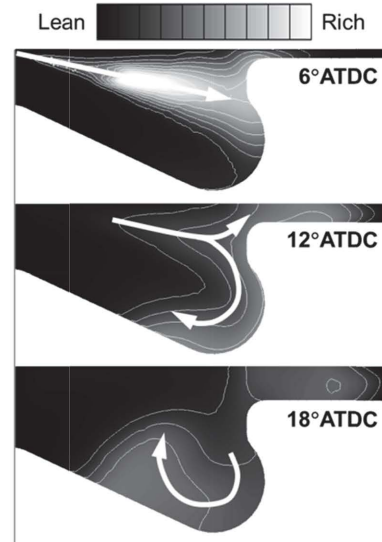


Fig. 2 Schematics of main-spray flow

件よりも黒煙濃度が低下し、アフター噴射時期を遅らせて行くと黒煙濃度が増加し、遅いアフター噴射時期を用いるとアフターなしの条件よりも黒煙濃度が増加した。早いアフター噴射時期で黒煙濃度が低下した理由として、メイン噴射量を減らしたことによるメイン噴霧由来のすす減少に加えて、メイン噴霧火炎が巻き上がる前にアフター噴射を行うことでアフター噴霧は燃焼室中央に残った酸素を導入して急速に希薄化し、アフター噴霧由来のすすが少なくなると考えられる。一方、遅いアフター噴射時期では、図 2 下段のように巻き上がったメイン噴霧火炎にアフター噴霧が進入し、アフター噴霧の燃焼によりメイン噴霧から生成したすすの酸化が促進される効果よりも、アフター噴霧が低酸素状態で燃焼することによるすす増加の効果が高くなり、黒煙濃度が増加したと考えられる。

ノズル流量一定で噴孔数を増やし、噴孔径を小さくすると、同じ噴射圧力では噴霧先端の速度が低くなり、噴霧が燃焼室くぼみ側壁に衝突した後、燃焼室中央部への移動速度が低くなることから、メイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉が弱まり、比較的遅いアフター噴射時期でもアフター噴射による黒煙低減効果が大きくなると予想される。そこで、標準燃焼室において、6 孔から 10 孔のインジェクタを用いてアフター噴射の黒煙低減効果に与える影響を調査した。

図 3 にアフター噴射時期 θ_{post} に対する黒煙濃度 Smoke, EGR 率 r_{EGR} , 図示熱効率 η_i , 最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{\text{max}}$ を示す。また、図中の左端には同じ総噴射量でアフター噴射を用いない場合（メイン噴射量 27 mm³）とアフター噴射を用いたときと同じメイン噴射量のままアフター噴射を取り除いた場合（メイン噴射量 23 mm³）の結果を比較のために示す。前者の場合 IMEP は約 1 MPa であるのに対し、後者では約 0.9 MPa に減少した。

アフター噴射を用いない場合にメイン噴射からアフター噴射量の分の噴射量を減少させると黒煙濃度は半分程度に低下

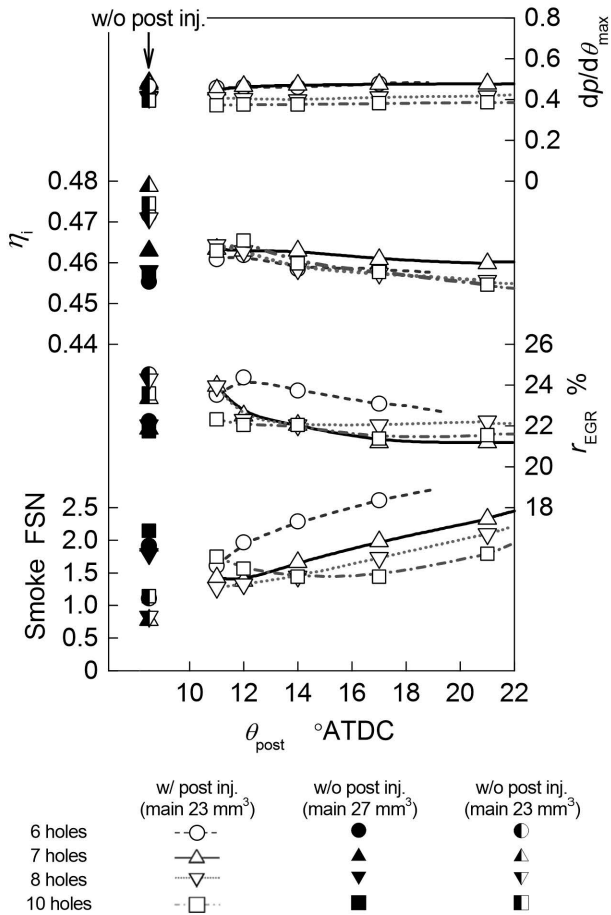


Fig. 3 Effects of the number of injection-nozzle orifice on exhaust emissions and performance

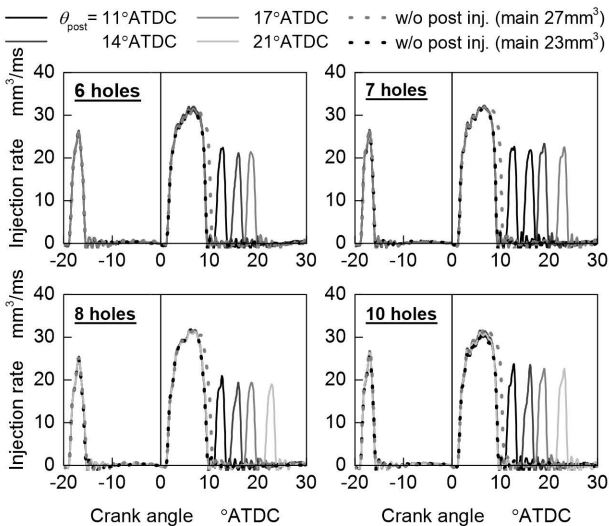


Fig.4 Injection rates for various injection nozzles and various post injection timings

した。メイン噴射量が 27 mm³および 23 mm³のいずれの場合も、噴孔数が 6 および 10 の黒煙濃度が高い。噴孔数 6 の場合は噴孔径が大きく、噴孔あたりの噴射量が多いために混合が不足

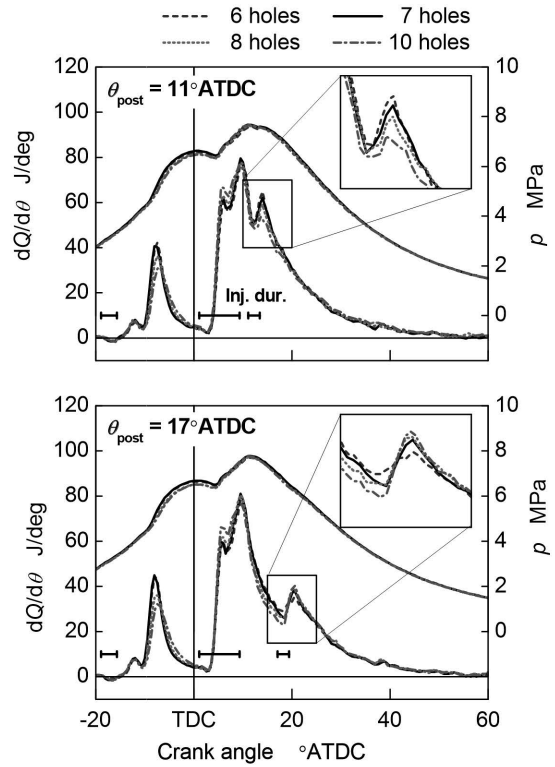


Fig. 5 Effects of the number of injection-nozzle orifice on in-cylinder pressure and heat-release rate

したと考えられる。噴孔数を 10 まで増やすと噴霧の先端速度が遅く、メイン噴霧の燃焼室くぼみ側壁衝突後の拡がりが遅くなり、周囲空気の導入が進まないためと考えられる。

アフター噴射を用いる場合には、NO_x 排出濃度を一定にするためにアフター噴射時期を早めると EGR 率を高める必要がある。噴孔数 10 の場合を除き、アフター噴射時期を早めるほど EGR 率が高くなるにも関わらず黒煙濃度は低下し、アフター噴射時期をもっとも早めた条件ではアフター噴射を用いない場合 (メイン 27 mm³) より低下する。この傾向は Hotta ら⁽²⁾、Ogawa ら⁽⁴⁾、池本ら⁽⁶⁾などの結果と一致する。また、アフター噴射を用いた際の黒煙濃度は、いずれの噴孔数でもアフター噴射を除いた場合 (メイン 23 mm³) よりも高い。アフター噴射時期が遅い場合には、噴孔数を増やすほど黒煙濃度が低下する。噴孔数 10 の場合、アフター噴射時期を 17° ATDC よりも早めると黒煙濃度は上昇し、アフター噴射時期をもっとも早めた条件では他の噴孔数の場合よりも黒煙濃度は高くなる。図示熱効率はいずれの噴孔数でもアフター噴射をメイン噴射に近づけると、アフター噴射を用いない場合と同等になる。なお、図には示さないが CO および THC 濃度は低く、アフター噴射時期による変化はほとんどない。

コモンレール内圧力の脈動によりアフター噴射の噴射率が噴射時期によって異なり、これが黒煙濃度に影響を及ぼした可能性があるため、別途、噴射率を計測した。図 3 の試験と同じ噴射指令値を入力したときの噴射率を図 4 に示す。実線

はアフター噴射を用いたときの、点線はアフター噴射を用いないときの噴射率である。いずれの噴孔数でもアフター噴射を用いた際のパイロット噴射およびメイン噴射の噴射率は、アフター噴射を用いないメイン噴射量 23 mm^3 の場合と等しい。アフター噴射の噴射率の大きさはアフター噴射時期を変えてもほとんど変化しない。また、噴孔数 8 としたとき、アフター噴射の噴射率が他の噴孔数に比べてわずかに低い。

図 5 にアフター噴射時期 θ_{post} をもっとも早めた 11° ATDC と比較的遅い時期の 17° ATDC としたときの筒内圧力 p および熱発生率 $dQ/d\theta$ を示す。アフター噴射時期に依らず、噴孔数を増やすとパイロット噴射による熱発生率は低くなり、 6° ATDC 付近のメイン噴霧の初期燃焼は活発になる。一方で、 θ_{post} が 17° ATDC の図から分かるように、噴孔数を増やすと 10° ATDC 付近の熱発生率ピークからアフター噴射開始時期までの主燃焼の後燃え期間の燃焼は穏やかになる。アフター噴射時期 11° ATDC では噴孔数を 10 とすると他の噴孔数に比べてアフター噴射による熱発生率が低下する。一方、アフター噴射時期 17° ATDC では噴孔数を増やすと逆にアフター噴射による熱発生率が上昇する。

噴孔数を増やしたときに上述のように主燃焼の後燃え初期に熱発生率が低下するのは、噴霧の先端速度が遅く、メイン噴霧が燃焼室くぼみ側壁に衝突した後に、スキッシュエリアおよびくぼみ底へ向かう流動が遅く周囲空気の導入が進まないためと考えられる。この考えに基づくと、アフター噴射時期が早いと、噴孔数が少ない時に比べ側壁付近にメイン火炎が多くあるので、ここへアフター噴霧が進入して低酸素状態で燃焼し、熱発生率が低下するとともに黒煙増加の原因になると推定される。アフター噴射を遅らせていくと、側壁付近の火炎がスキッシュエリアおよびくぼみ底へ流動していくの

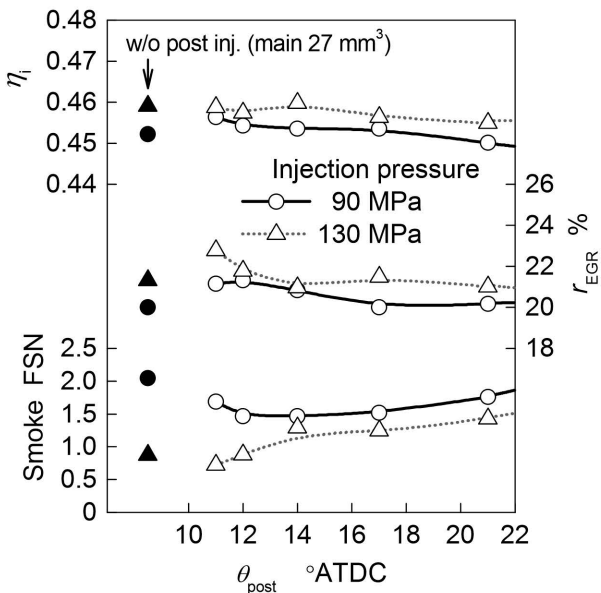


Fig. 6 Effects of injection pressure on exhaust emissions and performance (10 holes injector)

で最初はアフター噴霧への影響が弱まるが、さらに遅らせると、噴孔数が少ない場合ほどではないにせよ、くぼみ底からの火炎の巻き上がりがあつて、アフター噴霧の通り道をふさぐであろう。これらのことから、黒煙濃度が極小になるアフター噴射時期が現れたと推定される。

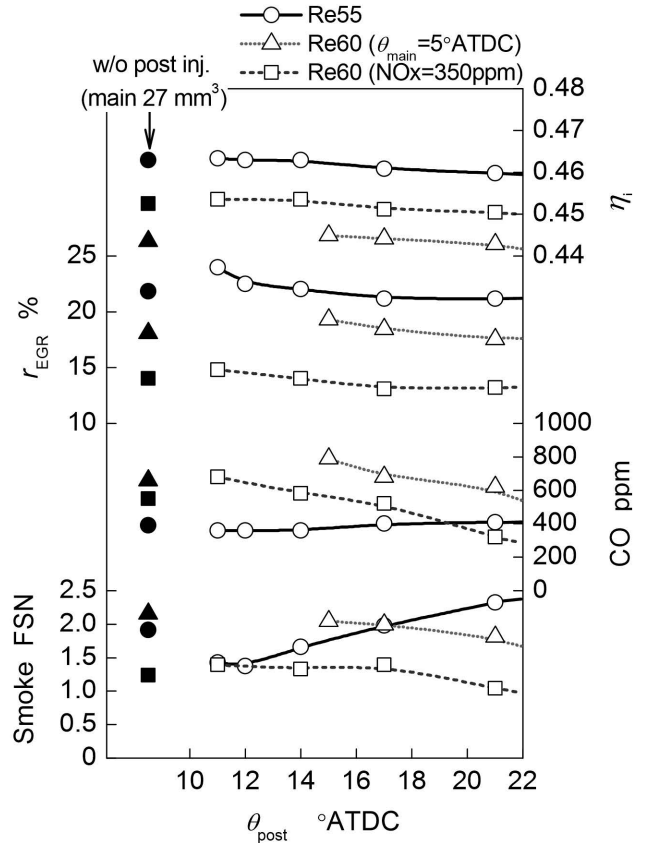


Fig. 7 Effects of piston cavity diameter on exhaust emissions and performance (7 holes injector)

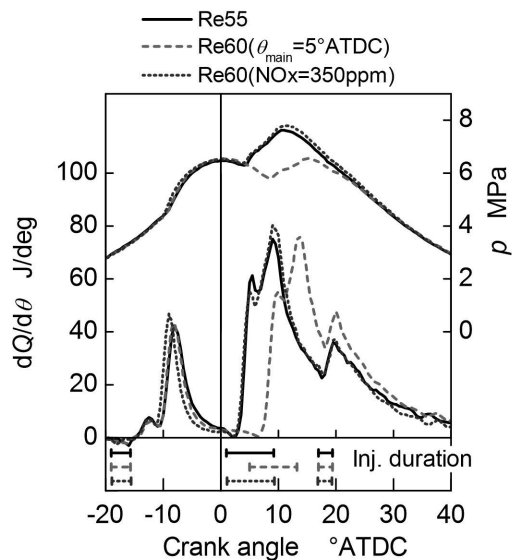


Fig. 8 Effects of piston cavity diameter on in-cylinder pressure and heat release rate ($\theta_{\text{post}} = 17^\circ \text{ ATDC}$)

3.2. 10 孔インジェクタにおける噴射圧力の影響

前項の結果において、噴孔数を 10 まで増やした場合、アフター噴射時期を早めると黒煙濃度が増加した。その理由として、上記のように噴霧の貫徹力が低下したことが一因とすれば、噴射圧力を高めれば噴孔数 10 の場合にも黒煙濃度の傾向が他の噴孔数の傾向に近づくと考えた。ここでは、和栗らの運動量理論⁽¹¹⁾にもとづき、噴霧先端到達距離の時間履歴が 7 孔で噴射圧力を 90 MPa としたときとほぼ同等となるように噴射圧力を 130 MPa に高めた。図 6 に結果を示す。噴射圧力を高めると全体的に黒煙濃度が低下し、噴射圧力が低いときは異なり、アフター噴射時期を早めるほど黒煙濃度が低下する他の噴孔数と同様の傾向となった。全面的ではないにせよ、10 噴孔の黒煙濃度の傾向についての前述の推定が正しいことを支持する結果と思える。

3.3. 燃焼室口径の影響

燃焼室くぼみ口径を大きくすると、メイン噴霧が燃焼室くぼみ側壁に到達する時の速度が低くなり、燃焼室中央への流動も遅くなるので、標準燃焼室で噴孔数を増やしたときと類似の燃焼過程になると予想し、燃焼室口径を大きくした Re60 を用いて実験を行った。ここでは噴孔数を 7 とした。予備実験の結果、Re60 燃焼室を用いた場合には標準噴射条件のもとで NOx を 150 ppm とすると黒煙濃度が大幅に増加した。メイ

ン噴霧が壁に衝突した後の流動が遅くなったことに加え、口径の拡大により燃料が燃焼室くぼみ内に入る割合が高くなり、過濃混合気が多く生成されたためと考えられる。そこで、くぼみ内に入る燃料を減らすことをねらい、メイン噴射時期を 5° ATDC に遅らせて NOx を 150 ppm とした条件、および標準噴射条件のまま過濃混合気を減らすねらいで EGR 率を低くして NOx を 350 ppm に増やした条件で実験を行った。メイン噴射時期 5° ATDC の場合、アフター噴射時期の最近接時期は 15° ATDC であった。

図 7 に性能および排気を示す。Re55 燃焼室ではアフター噴射時期を早めるほど黒煙濃度が低下するのに対し、Re60 燃焼室ではメイン噴射時期を遅らせた条件、NOx 濃度を高めた条件ともにアフター噴射時期を遅らせるほど黒煙濃度が低下する。これは、Re55 燃焼室で噴孔数を 10 としたとき (図 3) の傾向とは違い、予想と異なる結果となった。図示熱効率は Re60 燃焼室を用いると低下する。メイン噴射時期を遅らせた条件では、図 8 に示すようにメイン噴霧による熱発生時期が遅れ、等容度が低下するためであり、NOx 濃度を高めた条件では EGR 率が低く、吸気酸素濃度が高いため燃焼温度が上昇し、冷却熱損失が増加するためと考えられる。CO はメイン噴射時期を遅らせた条件では Re55 燃焼室と比べて EGR 率が低いにも関わらず増加する。NOx 濃度を高くした条件でもアフター噴射時期が早い条件で同様の傾向がみられる。Re60 燃焼室ではいずれの条件も CO と黒煙濃度はアフター噴射時期に対して類似の

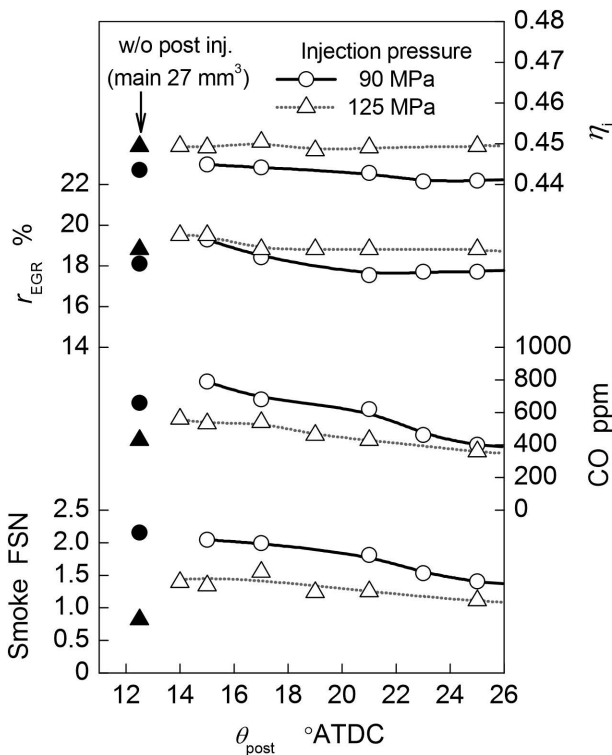


Fig. 9 Effects of injection pressure on exhaust emissions and performance (Re60, main inj. timing: 5° ATDC, NOx: 150ppm)

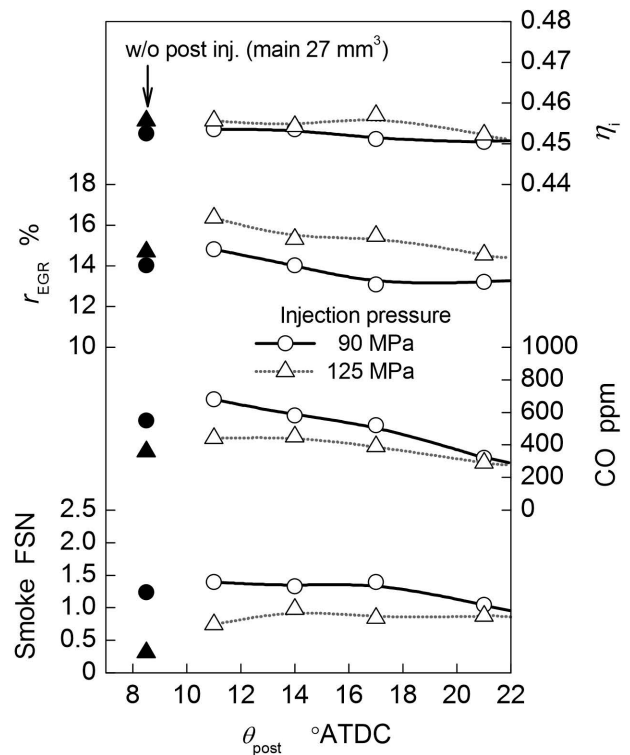


Fig. 10 Effects of injection pressure on exhaust emissions and performance (Re60, main inj. timing: 1° ATDC, NOx: 350ppm)

傾向となった。これらのことから、Re60 ではメイン噴射時期を遅らせても、EGR 率を低下させても、なお過濃混合気が形成されやすい状況にあると考えられる。

そこで、混合気の希薄化を促進するために噴射圧力を高めて実験を行った。噴霧が燃焼室くぼみ側壁に衝突するときの噴霧先端速度を Re55 燃焼室で噴射圧力 90 MPa としたときとほぼ同等になるように噴射圧力を 125 MPa とした。まず、メイン噴射時期を 5° ATDC として NOx を 150 ppm としたときの結果を図 9 に示す。噴射圧力を高めてもアフター噴射時期を遅らせるほど CO と黒煙濃度が低下する傾向は変わらない。噴射圧力を高めたことで全体的に CO と黒煙濃度は低下するがアフター噴射を行わない場合と比べて CO と黒煙濃度も増加し、アフター噴霧が低酸素状態で燃焼していることを示している。

つぎに標準噴射条件（メイン噴射時期 1° ATDC）で NOx を 350 ppm としたときの結果を図 10 に示す。噴射圧力を高めると CO と黒煙濃度のアフター噴射時期に対する感度は小さくなるが Re55 のような傾向にはならない。ここでも、噴射圧力を高めるとアフター噴射を行うことで CO と黒煙濃度が増加した。

このように、口径の大きい Re60 燃焼室で噴射圧力を高めてもなお、アフター噴射時期を早めると黒煙濃度が増加する傾向となり、かえってアフター噴射の黒煙低減効果を失わせる。この理由について、くぼみ口径の拡大に伴いくぼみ深さを浅くしたことが一因として挙げられる。すなわち、メイン噴霧火炎が側壁に衝突した後、くぼみ底に沿って流動し巻き上がる際、くぼみが浅い分、巻き上がった火炎が早期にアフター噴霧の通り道に侵入するのではないかと。噴射圧力を高めると、この傾向が強まり、アフター噴射の黒煙低減効果が得られない。ただし、この仮説を確認するにはなお検討が必要である。

4. ま と め

ディーゼル機関のアフター噴射による黒煙低減効果を調査するため、単気筒ディーゼル機関を用いて、NOx 排出濃度一定のもと、噴孔数（6～10：流量一定）および燃焼室くぼみ口径（55 mm（標準）、60 mm）を変化させて実験を行った。その結果、本実験条件の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 標準燃焼室において、アフター噴射時期が遅い場合には、噴孔数を増やすと黒煙濃度は低くなる。
- (2) 標準燃焼室では噴孔数が最も多い 10 の場合を除きアフター噴射時期を早めると黒煙濃度は低下する。噴孔数を 10 とした場合には、アフター噴射時期をメイン噴射終了時期に近接させると黒煙濃度は増加し、噴孔数の少ないときと比べて黒煙濃度は高くなる。
- (3) 噴孔数 10 の場合でも、噴射圧力を高め噴霧貫徹力を増しメイン噴霧が燃焼室くぼみ側壁に衝突した後の流動を活性化すると、噴孔数が少ない時と同様にアフター噴射時期を早めた方が黒煙濃度は低くなる。

- (4) 口径の大きい燃焼室を用いると、標準燃焼室とは逆にアフター噴射時期を遅らせた方が黒煙濃度は低くなる。この傾向は、噴射圧力を高め噴霧が燃焼室くぼみ側壁に衝突した後の流動を促進しても大きくは変わらない。

参 考 文 献

- (1) S. Kevin Chen : Simultaneous Reduction of NOx and Particulate Emissions by Using Multiple Injections in a Small Diesel Engine, SAE Paper 2000-01-3084 (2000)
- (2) Yoshihiro Hotta : Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection, SAE Paper 2005-01-0928 (2005)
- (3) Jean Arrègle : Insights on Post Injection-Associated Soot Emissions in Direct Injection Diesel Engines, Combustion and Flame, Vol. 154, p. 448-461 (2008)
- (4) Hideyui Ogawa : Improvements in Diesel Combustion with After-Injection, SAE Paper 2008-01-2476 (2008)
- (5) José M. Desantes : A Comprehensive Study of Diesel Combustion and Emissions with Post-injection, SAE Paper 2007-01-0915 (2007)
- (6) 池本雅里 : リフトセンサ付きピエゾインジェクタを用いた近接アフタ噴射によるスモーク低減機構の解析, 自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 6, p. 1347-1352 (2010)
- (7) Mohan Bobba : Effect of Post Injections on In-Cylinder and Exhaust Soot for Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine, SAE Int. J. Engines, Vol. 3, No. 1, p. 496-516 (2010)
- (8) Clément Chartier : Effects of Post-Injection Strategies on Near-Injector Over-Lean Mixtures and Unburned Hydrocarbon Emission in a Heavy-Duty Optical Diesel Engine, SAE Int. J. Engines, Vol. 4, No. 1, p. 1978-1992 (2011)
- (9) 堀部直人 : パイロット噴射と組み合わせたアフター噴射のスモーク低減効果, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 5, p. 1039-1044 (2012)
- (10) Jacqueline O'Connor : Post Injections for Soot Reduction in Diesel Engines: A Review of Current Understanding, SAE Int. J. Engines, Vol. 6, No. 1, p. 400-421 (2013)
- (11) 和栗雄太郎 : ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 日本機械学会論文集 (第 2 部), 25 巻, 156 号, p. 820-826 (1959)