

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*

堀部 直人¹⁾ 田村 一生²⁾ 濱田 貴之³⁾ リュウ ロン⁴⁾ 石山 拓二⁵⁾

Smoke-Reduction Effect of After Injection in Combination with Pilot Injection

Naoto Horibe Issei Tamura Takayuki Hamada Long Liu Takuji Ishiyama

This study aims at obtaining the after-injection strategy to reduce smoke emissions in a diesel engine, where after injection is employed in combination with pilot injection. The experiments were performed using a single-cylinder diesel engine under various conditions of pilot and after injection at a fixed load. The results show that small after-injection quantity with short interval offers reduced smoke emission. Larger pilot-injection quantity provides larger smoke reduction from the level in the case without after injection. The smoke-reduction effect is scarcely affected by pilot-injection timing in the case of a larger pilot-injection quantity. These tendencies are explained with attention to the interaction between main-spray flame and after-injection spray.

Key Words (Standardized) Heat Engine, Compression Ignition Engine, Performance/Fuel Economy/Efficiency

(Free) Diesel Engine, After Injection, Post Injection, Soot, Smoke (A1)

1. はじめに

自動車用ディーゼル機関にコモンレール燃料噴射装置が普及し、燃焼騒音や黒煙低減のためにパイロット噴射やアフター噴射などを伴う多段噴射が活用されている。メイン噴射終了後に少量の燃料を噴射するアフター噴射は黒煙の排出抑制に有効であるとされている⁽¹⁻⁶⁾。アフター噴射をパイロット噴射と組み合わせて利用する場合、パイロット噴射の条件に依存してメイン噴霧の燃焼過程が変化するためアフター噴射による黒煙低減効果が影響を受けるが、その詳細についてはなお不明な点がある。黒煙低減効果が得られるアフター噴射の条件については多くの研究があるが、少量のアフター噴射をメイン噴射に近接させて行うことが有効とした研究例⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾がある一方で、アフター噴射時期を大きく遅らせると黒煙を低減できるとする研究結果も示されている⁽²⁾⁽⁶⁾。これらの一見矛盾した傾向は、負荷条件、アフター噴射量、および噴射時期の範囲などの違いによるものと考えられるが、系統的なデータにもとづく考察がなお必要であることも意味している。

そこで本研究では、単気筒ディーゼル機関を用いて、パイロット噴射量や時期を変えながらアフター噴射条件を変化させて実験を行い、その結果を、アフター噴射を行わない場合と比較し、メイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉を考慮した考察を加えることにより、アフター噴射による黒煙低減効果

が得られる条件について検討を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。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4サイクルディーゼル機関を使用した。表1に試験機関の諸元を示す。回転速度を1500 rpmとし、冷却水入口温度および潤滑油温度を80℃とした。EGRを使用しないときの充填効率が1となるように過給圧

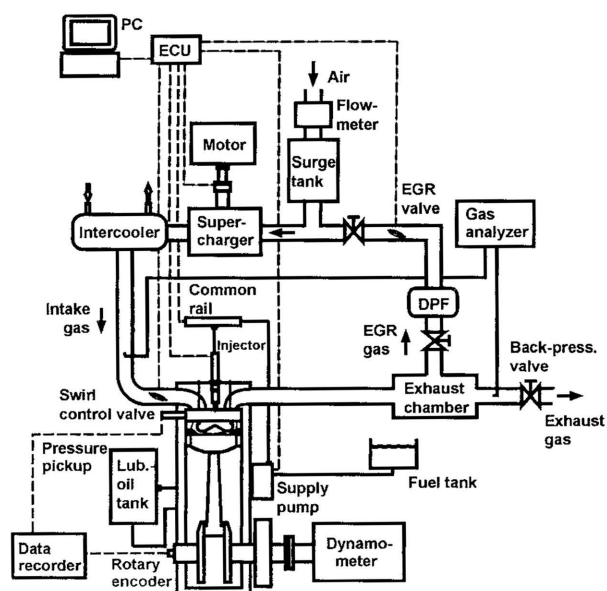


Fig.1 Experimental setup

*2012年5月25日受理。

2012年5月25日自動車技術会春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)

Table 1 Standard specifications of test engine

Engine type	Direct-injection diesel engine, Single-cylinder, Water-cooled
Bore × Stroke	85×96.9 mm
Displacement	550 cc
Compression ratio	16.3
Combustion chamber	Reentrant type (Cavity diameter: 51.6 mm)
Injection system	Common-rail system with a solenoid injector (Max. pressure: 180 MPa) φ0.125 mm × 7 holes nozzle (Spray angle: 156°)
Supercharging	External supercharging
EGR system	Low-pressure loop EGR

力を 1.19 bar, 吸気温度を 35°C とした。ただし, 排気背圧弁は全開とした。燃料は JIS2 号軽油 (セタン指数: 54.7, 密度 (15°C): 820.2 kg/m³) を用いた。実験にあたっては, アフター噴射の影響を明確にするため, 噴射量の増減に対して黒煙濃度が敏感に変化する運転条件を選んだ。すなわち, 噴射圧力 p_i は 90 MPa, メイン噴射時期 θ_{main} は 1°ATDC とし, 図示平均有効圧力 IMEP を 1.01 MPa とした。さらに, EGR 率を調整して NOx 排出濃度を一定とし, 150±5 ppm とした。スワール比は 1.7 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 は CLD 分析計 (Yanaco KA-200), THC 濃度は加熱型 FID 分析計 (HORIBA MEXA-1170HFID), CO および CO₂ 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 サイクル平均より熱発生率を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1. アフター噴射条件が性能・排気に及ぼす影響

まず, 固定したパイロット噴射条件 (噴射量 $q_{\text{pilot}} = 4 \text{ mm}^3$, 噴射時期 $\theta_{\text{pilot}} = -19^\circ\text{ATDC}$) のもとでアフター噴射時期と量を変化させて実験を行った。アフター噴射量 q_{after} は 2, 3, 4 mm³ とし, アフター噴射時期 θ_{after} は安定して噴射できる最近接時期から 21°ATDC までの範囲で変化させた。図 2 にアフター噴射時期 θ_{after} に対する排気中の黒煙濃度 Smoke, THC 濃度, CO 濃度, 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。図中にはアフター噴射を用いないとき (パイロット+メイン噴射, 同一の IMEP) の結果も併せて示す。なお, アフター噴射時期を 12°ATDC としたときのメイン噴射終了時期とアフター噴射開始時期の間隔は, アフター噴射量 2, 3, 4 mm³ に対して, 1.3, 1.5, 1.7°CA となる。また, 図 3 にはアフター噴射量を 2 mm³ としたときの熱発生率を示す。

このパイロット噴射条件では, 最大圧力上昇率は 0.3 MPa/deg 程度となり, 十分低く抑えられた。アフター噴射時期を早めると NOx を一定に保つために EGR 率を増加させる必要がある。図 3 に示すように, アフター噴射の熱発生時期

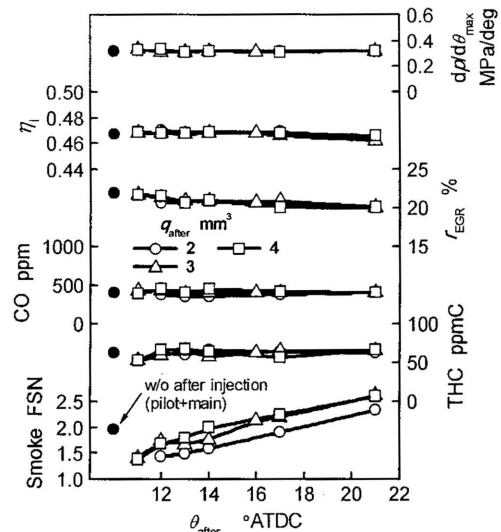


Fig. 2 Effects of after-injection conditions on emissions and performance ($q_{\text{pilot}} = 4 \text{ mm}^3$, $\theta_{\text{pilot}} = -19^\circ\text{ATDC}$)

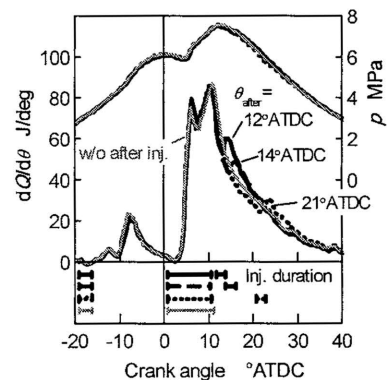


Fig. 3 Effects of after-injection timing on heat-release rate and in-cylinder pressure ($\theta_{\text{pilot}} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{\text{pilot}} = 4 \text{ mm}^3$, $q_{\text{after}} = 2 \text{ mm}^3$)

が上死点に近づき, EGR 率を固定すると NOx が増加する傾向にあるためである。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ときに比べて黒煙濃度が低減した。一方, アフター噴射を遅らせると黒煙濃度は増加した。この傾向は, いくつかの研究において既に報告されている⁽¹⁾⁽⁵⁾。同じアフター噴射時期で比較すると, アフター噴射量が少ない方が黒煙濃度は低い。アフター噴射条件による THC および CO 濃度の変化は少ない。アフター噴射時期が遅いと, アフター噴射の熱発生時期が遅くなり, 等容度が低下して熱効率がわずかに低下するが, 最近接条件ではアフター噴射なしの場合と同等の熱効率となる。

3.2. パイロット噴射条件が性能・排気に及ぼす影響

つぎに, パイロット噴射条件を変更したときのアフター噴射の効果を調べるために, アフター噴射量を固定し, パイロット噴射量および噴射時期を変更して実験を行った。

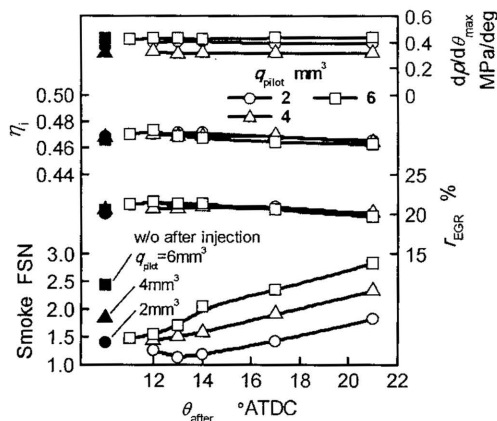


Fig. 4 Effects of pilot-injection quantity and after-injection timing on smoke and performance ($\theta_{\text{pilot}} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{\text{after}} = 2 \text{ mm}^3$)

(1) パイロット噴射量の影響

まず、パイロット噴射時期 θ_{pilot} を -19°ATDC に固定し、パイロット噴射量 q_{pilot} を2, 4, 6 mm^3 として、アフター噴射時期 θ_{after} を変化させた。アフター噴射量 q_{after} は2 mm^3 とした。図4に θ_{after} に対する性能・排気の変化を示す。ただし、COおよびTHC濃度は図2と同等であり、パイロット噴射条件およびアフター噴射条件による変化が小さかったので表示しない。

パイロット噴射量を増やすと黒煙濃度が増加した。上述と同様に、アフター噴射を早めると黒煙濃度はアフター噴射を行わない場合よりも減少した。最大圧力上昇率はパイロット噴射量が4 mm^3 のときに最も低くなる。これは、パイロット噴射量が少ないときにはメイン噴霧の着火が遅れ初期燃焼が急激になるが、噴射量を増やすとメイン噴霧の着火が早まり初期燃焼が抑えられる一方でパイロット噴霧の燃焼が急激になるためである。

アフター噴射を行わない場合と最近接アフター噴射の黒煙濃度を比較すると、パイロット噴射量の多い方が黒煙濃度の低減量大きい。メイン噴射に近接したアフター噴射では、黒煙濃度に対するパイロット噴射量の影響は小さいが、アフター噴射時期を遅くするとパイロット噴射量を増やすにつれて黒煙濃度は大きく増加した。

(2) パイロット噴射時期の影響

つぎに、パイロット噴射量 q_{pilot} を2, 4, 6 mm^3 としてパイロット噴射時期 θ_{pilot} を変化させた。アフター噴射量 q_{after} は2 mm^3 とした。アフター噴射時期は前項において各パイロット噴射量に対して最も黒煙濃度の低い時期とし、パイロット量が2 mm^3 についてはアフター噴射時期を 13°ATDC とし、パイロット噴射量が4および6 mm^3 については 12°ATDC とした。図5にパイロット噴射時期 θ_{pilot} に対する性能・排気の変化を示す。

パイロット噴射量が多いときは、パイロット噴射時期を早めるとパイロット噴霧の熱発生率が低下するので最大圧力上昇率は低くなった。一方、パイロット噴射量が少ないときは、

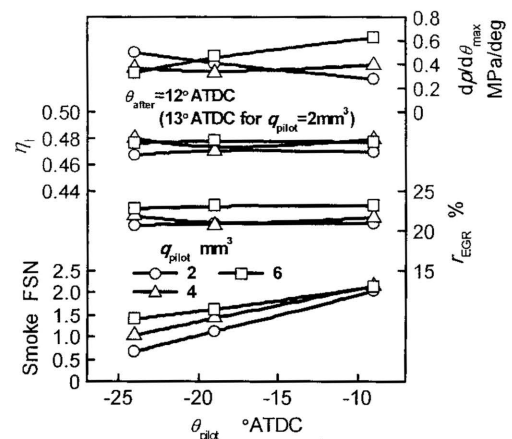


Fig. 5 Effects of pilot-injection quantity and timing on smoke and performance ($q_{\text{after}} = 2 \text{ mm}^3$)

パイロット噴射時期を早めるとメイン噴霧の初期燃焼における熱発生率の増加に伴って最大圧力上昇率は上昇した。

いずれのパイロット噴射量においてもパイロット噴射時期を早めると黒煙濃度は減少した。パイロット噴射時期が早いとパイロット噴霧から生じる混合気の希薄化によりメイン噴射開始までの熱発生量が減り、メイン噴霧の着火遅れが長くなることにより過濃混合気が減るためと考えられる。このようにパイロット噴射時期を早めると、パイロット噴射量を減らすことで黒煙濃度を低減できるが、このとき、最大圧力上昇率が増加するので、パイロット噴射の進角には限度がある。

3.3. アフター噴射による黒煙低減効果に関する考察

ここまでの結果から、①アフター噴射時期をメイン噴射終了時期に近づけると黒煙濃度が低下する（図2, 4）、②アフター噴射量は少ない方が黒煙濃度は低下する（図2）、③パイロット噴射量を増やすと黒煙濃度は増加するが、アフター噴射による黒煙低減効果は強くなる（図4）、④パイロット噴射時期を進角すると黒煙濃度が低下する（図5）、という傾向が得られた。これらの傾向を説明するため、Desantesらの手法⁽²⁾に倣い、パイロット・メインの二段噴射と、パイロット・メイン・アフターの三段噴射の黒煙濃度を比較した。これらの噴射パターン概念図を図6に示す。噴射パターンAおよびBはIMEPが1.01 MPaとなる二段噴射（図2, 4, 5のw/o after injection）および三段噴射である。Cはパイロット噴射およびメイン噴射をBと同じにした二段噴射である。AはBでアフター噴射を行う代わりにアフター噴射に相当する噴射量をメイン噴射に加えたもの、CはBからアフター噴射を取り除いたものと見ることができる。いずれの噴射パターンでもNOx濃度が150 ppmとなるようEGR率を調整した。

(1) アフター噴射時期とパイロット噴射量の影響

図7にパイロット噴射時期 θ_{pilot} を -19°ATDC とし、パイロット噴射量 q_{pilot} を2, 4, 6 mm^3 としたときの上記3つの噴射パターンについて、アフター噴射時期 θ_{after} に対する黒煙濃度

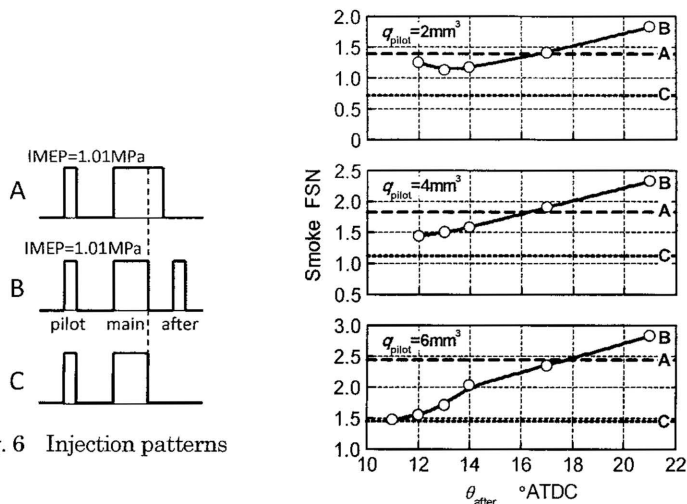
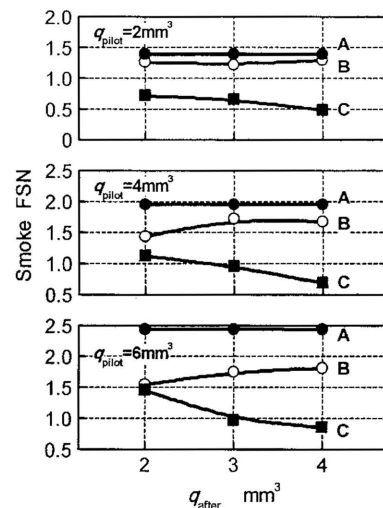


Fig. 6 Injection patterns

Fig. 7 Smoke emission against after-injection timing for $q_{pilot} = 2, 4, 6 \text{ mm}^3$ ($\theta_{pilot} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{after} = 2 \text{ mm}^3$)Fig. 8 Smoke emission against after-injection quantity for $q_{pilot} = 2, 4, 6 \text{ mm}^3$ ($\theta_{pilot} = -19^\circ\text{ATDC}$, $\theta_{after} = 12^\circ\text{ATDC}$)

Smoke を示す。アフター噴射量 q_{after} は 2 mm^3 とした。

いずれのパイロット噴射量でも、アフター噴射を使わずに噴射パターン C からメイン噴射量を増加させて噴射パターン A とすると黒煙濃度が大きく増加する。C から A への噴射量増加は 2 mm^3 程度であり、本研究ではこのような少量の噴射量増加で黒煙濃度の変化が大きい条件設定となっている。

前述のように、アフター噴射時期を早めると黒煙濃度が低下し、 17°ATDC よりも早めると A よりも黒煙濃度が低くなる。パイロット噴射量を増やすと A, C ともに黒煙濃度が増加する。いずれのパイロット噴射量の場合でも、B における黒煙濃度の最小値は A と C の間にあり、パイロット噴射量を増加するにつれて C に近づき、もっともパイロット噴射量の多い 6 mm^3 では、B と C の黒煙濃度はほぼ一致する。つまり、パイロット噴射量を増加させると、メイン噴射量を増加させることによる黒煙濃度の増加に対し、アフター噴射を追加したことによる黒煙濃度の増加が小さくなる。これは、パイロット噴射量の増加に伴いメイン噴射量が減ることでメイン噴霧火炎の領域が小さくなり、アフター噴霧との干渉が少なくなるためと考えれば説明できる。つまり、アフター噴霧がメイン噴霧燃焼で使用されなかった酸素を利用できるので、アフター噴射によるすすの残留が少なくなると思われる。

この推定は、池本ら⁽¹⁾が提案しているメカニズムとほぼ同じである。この推定に従うと、本実験で得られたアフター噴射時期を早めると黒煙濃度が低下する現象についても説明ができる。池本らによるとメイン噴霧火炎が、燃焼室くぼみ壁面に到達した後、次第に燃焼室中央部へ向かって流動する。そのため、アフター噴射時期が遅い場合にはアフター噴霧はメイン噴霧の火炎中に噴射されることになり、アフター噴霧は低酸素状態で燃焼することになる。それに対し、アフター噴射時期を早めるとメイン噴霧火炎が燃焼室中央部へ広がる

前にアフター噴霧の燃焼が行われ、燃焼室内の酸素を有効に利用することができるので、アフター噴霧火炎からのすすの残留が少なくなったと考えられる。

(2) アフター噴射量の影響

アフター噴射量を変化させた場合について、図 8 にアフター噴射量 q_{after} に対する黒煙濃度 Smoke を示す。パイロット噴射量 q_{pilot} はそれぞれ $2, 4, 6 \text{ mm}^3$ であり、パイロット噴射時期 θ_{pilot} は -19°ATDC 、アフター噴射時期 θ_{after} は 12°ATDC である。図中 A, B, C は図 6 に示す噴射パターンに対応しており、C は B からそれぞれ噴射量 $2, 4, 6 \text{ mm}^3$ のアフター噴射を取り除いたものである。

噴射パターン C では、図の右に向かってメイン噴射量が減るので黒煙濃度は減少する。パイロット噴射量が多いため 2 mm^3 では C から B へとアフター噴射を加えることによる黒煙濃度の増加量が大きい。このことはアフター噴射量が増加するほど顕著になり、その結果、メイン噴射量の削減による黒煙濃度低下の効果が打ち消され、B と同一の IMEP である A と比べると黒煙濃度の低減はほとんどない。パイロット噴射量が多い 6 mm^3 でも、アフター噴射量が多いほど噴射パターン C から B への黒煙濃度の増加量は多くなる。しかし、パイロット噴射量が多い場合には、C から B への黒煙濃度の増加量が C から A への増加量より少ないため、アフター噴射による黒煙低減効果が得られる。

前述の推論に従えば、アフター噴射量を増やしたときに黒煙低減効果が弱くなるのは、アフター噴射量を増やした分だけメイン噴射量を削減しても、アフター噴霧の貫徹力が増すことでメイン噴霧火炎との干渉が強まり、アフター噴霧の燃焼に起因するすすの残留が多くなるためと考えられる。

アフター噴射量を増やすと、メイン噴射量の削減に加えてアフター噴霧による乱れによってすすの酸化を促進する効果

が強まると思われるが、本実験ではアフター噴霧からのすすの残留が増える作用が支配的になったと思われる。

(3) パイロット噴射時期の影響

パイロット噴射時期を変化させた場合について、図 9 にパイロット噴射量 q_{pilot} を 6 mm^3 としたときのパイロット噴射時期 θ_{pilot} に対する黒煙濃度 Smoke を示す。パイロット噴射時期を変更しても、噴射パターン C から B へへのアフター噴射を追加することによる黒煙濃度の増加量、および A から B へへのアフター噴射による黒煙濃度の低減量に大きな変化は見られなかった。この条件ではパイロット噴射時期はメイン噴霧とアフター噴霧の干渉の強さに大きくは影響しないようである。

図 10 にパイロット噴射量を 4 mm^3 に減らし、アフター噴射量を 3 mm^3 に増やしたときの結果を示す。この条件でもパイロット噴射時期の変化に対し、A, B, C の関係に大きな変化はない。ただし、噴射パターン C から B へアフター噴射の追加による黒煙濃度の増加が大きく、黒煙低減効果は弱い。

これらのことから、パイロット噴射量を増やしてメイン噴射量を減らし、さらに、アフター噴射量を少量とすることでメイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉を弱めることによりアフター噴射による黒煙低減効果を強くできると考えられる。ただし、本実験条件ではパイロット噴射量が多いとアフター噴射を使用しない条件における黒煙濃度が高くなるため、結果として、アフター噴射を行っても黒煙濃度を下げることができなかった。そこで、アフター噴射を行わないときに黒煙濃度が低い条件として噴射圧力を上昇させて実験を行った。

3.4. 噴射圧力上昇とアフター噴射の黒煙濃度低減効果

噴射圧力 p_j を 90 MPa から 125 MPa に高めたときに、アフター噴射が性能・排気に与える影響を調査した。パイロット噴射時期 θ_{pilot} を -19°ATDC 、アフター噴射量 q_{after} を 2 mm^3 とし、パイロット噴射量 q_{pilot} が 2 および 6 mm^3 についてアフター噴射時期を変化させた。図 11 と 12 にそれぞれの q_{pilot} について

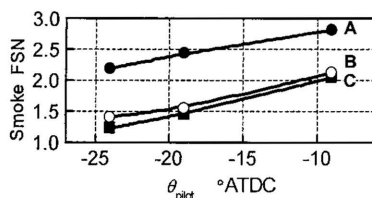


Fig. 9 Smoke emission against pilot injection timing ($q_{pilot} = 6 \text{ mm}^3$, $q_{after} = 2 \text{ mm}^3$, $\theta_{after} = 12^\circ\text{ATDC}$)

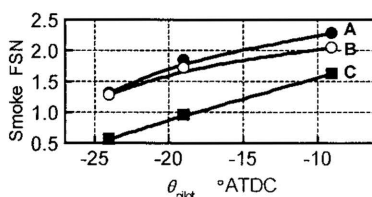


Fig. 10 Smoke emission against pilot injection timing ($q_{pilot} = 4 \text{ mm}^3$, $q_{after} = 3 \text{ mm}^3$, $\theta_{after} = 12^\circ\text{ATDC}$)

アフター噴射時期 θ_{after} に対する性能・排気の変化を示す。

噴射圧力を高めると EGR 率 x_{BGR} が上昇し、図示熱効率 η_i が増加した。図 13 に示す熱発生率から分かるように、噴射圧力を高めるとメイン噴霧の熱発生率ピークが高くなり、等容度

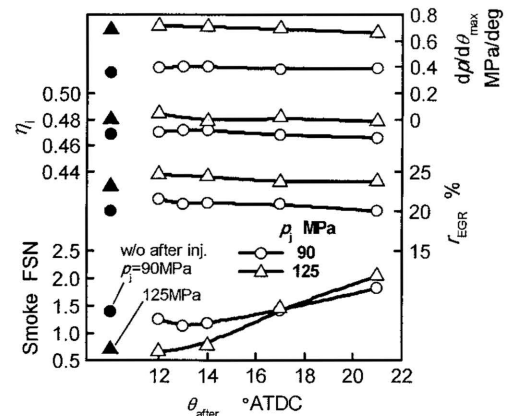


Fig. 11 Effects of injection pressure on smoke and performance ($q_{pilot} = 2 \text{ mm}^3$, $\theta_{pilot} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{after} = 2 \text{ mm}^3$)

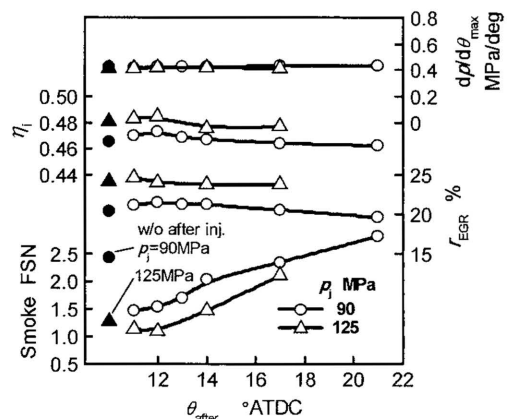


Fig. 12 Effects of injection pressure on smoke and performance ($q_{pilot} = 6 \text{ mm}^3$, $\theta_{pilot} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{after} = 2 \text{ mm}^3$)

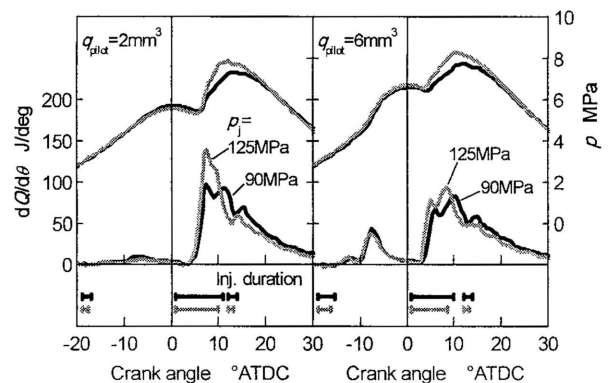


Fig. 13 Effects of injection pressure on heat release rate and in-cylinder pressure ($\theta_{pilot} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{after} = 2 \text{ mm}^3$, $\theta_{after} = 12^\circ\text{ATDC}$)

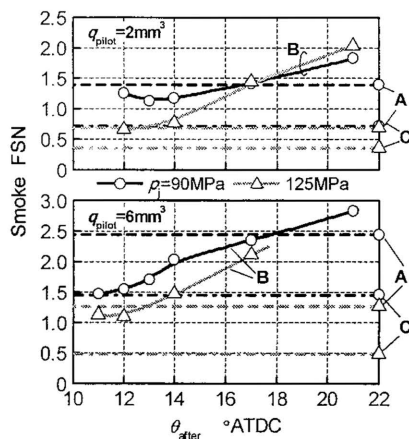


Fig. 14 Effect of injection pressure on smoke emission for $q_{\text{pilot}} = 2, 6 \text{ mm}^3$ ($\theta_{\text{pilot}} = -19^\circ\text{ATDC}$, $q_{\text{after}} = 2 \text{ mm}^3$)

が高まるためである。噴射圧力を高めると、アフター噴射を用いない場合の黒煙濃度は大幅に下がった。パイロット噴射量が少ない 2 mm^3 の場合、噴射圧力が 90 MPa のときはアフター噴射による黒煙濃度の低減は小さかった。噴射圧力を高めるとこの傾向は強くなり、アフター噴射をメイン噴射に近接させてもアフター噴射を用いないときに比べて黒煙濃度の低減は見られない。パイロット噴射量の多い 6 mm^3 では黒煙濃度は低下するが、噴射圧力が低いときに比べて低減量は少ない。

最大圧力上昇率を低く抑える観点からは、メイン噴霧の着火遅れを短くできるパイロット噴射量の多い条件が望ましい。このとき、メイン噴霧の急激な初期燃焼が緩和されるので、アフター噴射なしの条件と比べてときの EGR 率の上昇も抑えられるので黒煙濃度の低減効果が得られる。

噴射圧力が低いときに比べてアフター噴射による黒煙低減効果が弱くなる理由を明らかにするため、図 14 にパイロット噴射量が 2 および 6 mm^3 の場合について、噴射パターン A, B, C の黒煙濃度を比較した。噴射圧力を上昇させると、いずれのパイロット噴射量でも噴射パターン A および C の黒煙濃度は大幅に下がるが、C から B へとアフター噴射を加えることによる黒煙濃度の増加量が大きく、B は A に比べて黒煙濃度の低減効果がほとんど得られない。

このように、噴射圧力を高めた場合にアフター噴射の黒煙低減効果が弱まったのは、燃料噴射率が高く、噴霧の運動量が大きいために、メイン噴霧火炎が燃焼室くぼみ壁面付近から燃焼室中心へ流動するのが早く、さらに、アフター噴射の貫徹力も高まっていることから、メイン噴霧とアフター噴霧の干渉が強まるためと考えられる。

4. ま と め

パイロットおよびアフター噴射を用いる三段噴射において、アフター噴射による黒煙低減効果とその理由を明らかにするために、単気筒ディーゼル機関を用いた実験を行い、考察を

加えた。その結果、本実験条件の範囲内で以下の知見を得た。

- (1) アフター噴射時期がメイン噴射終了時期に近いときは、二段噴射（パイロット+メイン）においてメイン噴射からアフター噴射分の噴射量を減らすと黒煙濃度が大きく低下し、そこにアフター噴射を加えても黒煙濃度の増加が小さいので、結果として黒煙濃度は低下する。ただし、アフター噴射量が多いとアフター噴射追加による黒煙増加が大きくなり、黒煙低減効果は弱くなる。
- (2) パイロット噴射量を増やすと黒煙濃度は増加するが、同一出力でアフター噴射を使用しない場合と比べてときのアフター噴射による黒煙低減効果は強くなる。
- (3) パイロット噴射時期を進角すると黒煙濃度が低下する。このとき、同一出力でアフター噴射を使用しない場合と比べてときのアフター噴射による黒煙低減量に大きな変化はない。
- (4) 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弱くなる。
- (5) 以上の結果は、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って合理的に説明できる。

謝 辞

本実験で使用した試験機関は株式会社本田技術研究所よりご提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 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)
- (2) José M. Desantes : A Comprehensive Study of Diesel Combustion and Emissions with Post-injection, SAE Paper 2007-01-0915 (2007)
- (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) Hideyuki Ogawa : Improvements in Diesel Combustion with After-Injection, SAE Paper 2008-01-2476 (2008)
- (5) Yoshihiro Hotta : Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection, SAE Paper 2005-01-0928 (2005)
- (6) 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)