

二系統の燃料噴射システムを備えたディーゼル機関の性能と排気*

堀部 直人¹⁾ 八木 政人²⁾ 桑原 洋樹³⁾ 川那辺 洋⁴⁾ 石山 拓二⁵⁾

Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Equipped with Dual Injector System

Naoto Horibe Masato Yagi Hiroki Kuwabara Hiroshi Kawanabe Takuji Ishiyama

To examine the feasibility of performance improvement by highly flexible fuel injection, a series of experiments were performed using a single-cylinder diesel engine with a dual injector system which includes two sets of common-rail injection systems. This system enables variable injection rate for each injection pulse and a wide-range dwell between injection pulses, i.e. even negative injection dwell can be performed. Experiments with multi-stage injection were conducted with various injection pressures, injection timings, and injection quantities. The results show that switching injector for pilot and main injections reduces smoke emission, and a higher pilot injection pressure increases CO emission without a reduction of smoke emission, while a higher main injection pressure reduces smoke emission with no increase in CO emission. Split-main injection with zero injection dwell increases thermal efficiency under high injection pressure condition. However, negative injection dwell markedly increases smoke emission owing to the spray-to-spray interaction.

KEY WORDS: Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, Dual injection, Injection rate (AI)

1. はじめに

車両用ディーゼル機関ではコモンレール式燃料噴射装置が広く用いられており、燃焼制御手法の一つとして多段噴射が活用されている。また、噴射期間中に噴射率を変えられる可変噴射率による燃焼制御の試みもなされており、エミッション低減、熱効率向上、燃焼騒音低減に有効であると報告されている⁽¹⁻⁴⁾。たとえば、鈴木ら⁽⁴⁾は直動式ピエゾインジェクタを用いて多段噴射と可変噴射率を組み合わせて、黒煙濃度と燃焼騒音を同時に低減し、さらに燃焼騒音を抑えながら熱効率を向上させた。しかし、可変噴射率を用いた研究例は少なく、対象となる機関サイズや運転範囲は限定されており、十分な知見が得られているとは言えない。

一方、複数の噴射弁を用いることで噴射ごとの噴射率を変更する試みも行われており⁽⁵⁻⁸⁾、予混合圧縮自着火燃焼の原理を取り入れた PREDIC⁽⁵⁾や MULDIC⁽⁶⁾が知られている。また、Merkel ら⁽⁷⁾はパイロット噴射弁とメイン噴射弁を搭載した機関において、パイロット噴霧とメイン噴霧を空間的に分離することにより NO_x と PM の同時低減を得ており、複数噴射弁による燃焼改善の可能性が示されている。しかし、複数噴射弁の搭載性の難しさから大型車両を対象とした燃焼室の大きい機関を用いた研究例が多く、乗用車に搭載されるサイズの筒

内空間の小さい小型機関における複数噴射弁を用いた研究例はほとんどない。

そこで本研究では、小型ディーゼル機関において噴射率可変化による燃焼改善効果を明らかにするため、口径 85 mm の単気筒試験機関に独立した二系統のコモンレール燃料噴射システムを搭載し、二つの噴射弁を近接して配置することで可変噴射率を模擬した。これにより、噴射率および噴射パターンの設定自由度を高め、多段噴射の各段の噴射圧力、噴射時期、噴射量配分が性能・排気特性に及ぼす影響を調査した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。試験機関は水冷単気筒 4 サイクルディーゼル機関を用いた。表 1 に試験機関の主要諸元を示す。燃焼室形状は図 2 に示す口径 60 mm のトロイダル型とした。二系統のコモンレール式燃料噴射装置を搭載し、それぞれ独立して噴射圧力、噴射時期、噴射量を設定できる。噴射弁を出来るだけ近接して搭載することにしたが、結果的には設計上の制約より噴射中心の距離は 13.5 mm となった。便宜上、吸気バルブ側の噴射弁を F、排気側の噴射弁を R と呼ぶ。噴射弁はピエゾ駆動型の噴孔径φ0.115mm×8 噴孔とし、図 3 に示すようにそれぞれの噴射弁の噴霧軸が直径 55mm の円周上で交わる噴孔配置とした。なお、F と R の噴射弁はほぼ同じ噴射率特性を持つものを選んだ。二本の噴射弁を搭載するスペースを確保するため、吸気弁 2 本に対し、排気弁は 1 本とした。1D シミュレーションによる事前の検討によると、本論

*2016 年 9 月 6 日受理。2016 年 5 月 27 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)

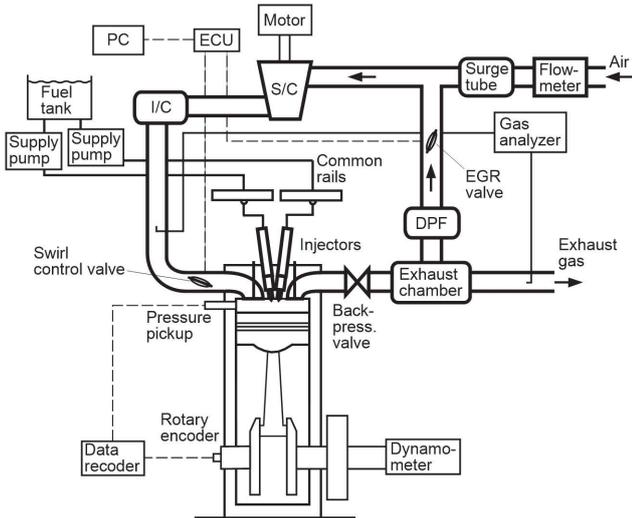


Fig.1 Experimental setup

この条件下では排気弁を2本から1本に減らしてもポンピングロスにほとんど差はない。

試験条件は乗用車の低負荷運転時を代表して機関回転速度を1500 rpm, 吸排気行程を除く図示平均有効圧力が 390 ± 2 kPaとなるようにメイン噴射量を調整した。その結果、噴射量は $12.1 \sim 13.1$ mm³/cycle となった。燃料はセタン指数55, 密度(30°C) 819.6 kg/m³のJIS 2号軽油を用いた。NO_x 排出濃度が 54 ± 2 ppmとなるようにEGR率を調整した。EGR率は43.1~49.3%であった。冷却水入口温度を80°C, 潤滑油温度を80°C, 吸気温度を50°C, 昇圧ポンプ入口燃料温度を30°Cとし, 吸気圧力および排気圧力は102 kPa(a)とした。スワール比は1.3である。

排気中のNO_x, THC, CO, CO₂, O₂濃度はエンジン排ガス分析装置(Horiba MEXA-1600DEGR), 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+5011B)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。

噴射パターンは拡散的燃焼が主体となるように二段パイロット噴射とメイン噴射を組み合わせる噴射パターンを基本とし, 一段目のパイロット噴射時期と量は -10.0° ATDC と1.9 mm³/cycle, 二段目は -2.75° ATDC と1.6 mm³/cycle, メイン噴射時期は 4.0° ATDC に固定した上で, 各噴射の噴射弁選択, 噴射圧力, およびメイン噴射を分割した際の噴射間隔と噴射量割合の影響を調査した。

3. 実験結果および考察

3.1. 噴射弁の使い分け

はじめに, 噴射弁の使い分けの効果を調査するため, 噴射弁Fのみを用いるFFF, 噴射弁Rのみを用いるRRR, パイロット噴射を噴射弁Fで行い, メイン噴射を噴射弁Rで行うFFRの噴射パターンについて噴射圧力 p_j を90, 110, 135 MPaと変

Table 1 Standard specifications of test engine

| | |
|---------------------------------|---|
| Engine type | Direct-injection diesel engine, Single-cylinder, Water-cooled |
| Bore × Stroke [mm] | 85.0 × 96.9 |
| Displacement [cm ³] | 550 |
| Compression ratio | 16.3 |
| Combustion chamber | Toroidal (Cavity diameter: 60.0 mm) |
| Injection system | Dual injection system, Common-rail systems with a piezo injector (Max. pressure: 220 MPa) $\phi 0.115$ mm × 8 holes nozzle (Spray-cone angle: 156°) |
| Supercharging | External supercharging |
| EGR system | Low-pressure loop EGR |

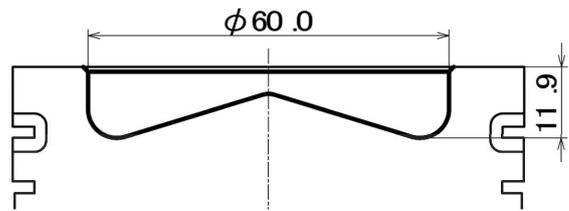


Fig.2 Combustion chamber shape

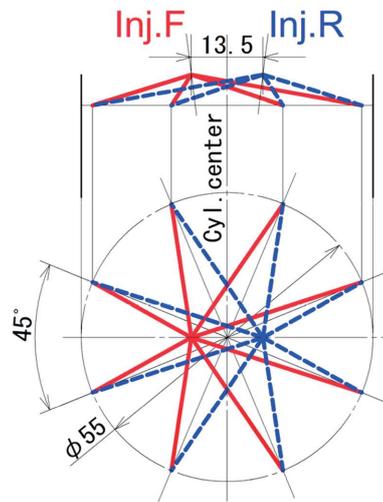


Fig.3 Nozzle-hole arrangement

化させた。図4に噴射圧力 p_j に対する黒煙濃度 Smoke, CO濃度, THC濃度, 図示熱効率 η_i , 最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ を示す。燃焼室壁までの距離に近い噴孔があるので全般に Smoke レベルが高いが, これは今後の課題である。いずれの噴射パターンを用いても, 噴射圧力を高めると Smoke は低下するが, COと最大圧力上昇率は増加し, 図示熱効率は低下した。噴射パターンの影響に着目すると, 片側の噴射弁のみを用いる FFR と RRR では性能・排気の違いは小さい。それらに比べ, FFR では Smoke が低下し, 図示熱効率が上昇した。

この原因を考察するために燃焼解析を行った。図5にクランク角度に対する筒内圧力 p , 熱発生率 $dQ/d\theta$ および噴射期間

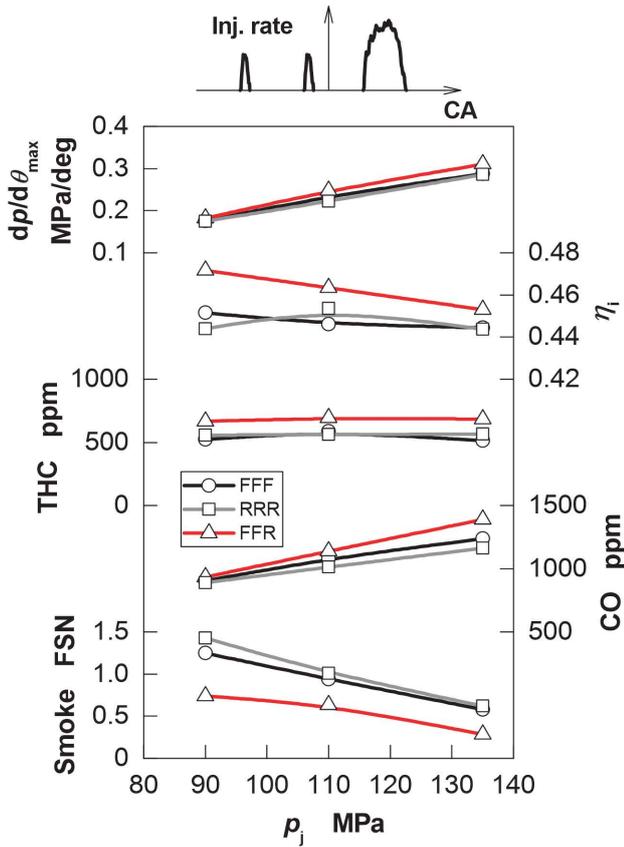


Fig.4 Effect of injection pattern on engine performance and emissions

を示す。いずれの噴射圧力でも FFR の着火時期がわずかに遅れ、熱発生率の最大値が高くなった。パイロット噴射とメイン噴射を別の位置から噴射したことにより、パイロット噴霧による燃焼ガスがメイン噴霧に取り込まれる量が低減し、メイン噴霧内の過濃領域が減ったことで Smoke が低減したと考えられる。

3.2. 噴射圧力の影響

前述の通り、噴射圧力を高めることで黒煙濃度が下げられる一方で CO などの未燃排出物質濃度が高くなる。パイロット

噴霧が長い着火遅れ期間中に希薄になることや貫徹力の上昇により壁面付近に広がる混合気が多くなり、壁で冷やされるためと考えられる。そこで、パイロット噴射の噴射圧力を抑えて未燃物質濃度を増加させることなく、メイン噴射圧力を高めて混合を促進し、黒煙濃度を低減することを狙い、パイロット噴射圧力 p_p とメイン噴射圧力 p_m を独立して変更した。噴射パターンは FFR とし、メイン噴射圧力のみを変更する場合には $p_p = 90$ MPa とし p_m を 90, 110, 135 MPa と変更し、パイロット噴射圧力のみを変更する場合には $p_m = 90$ MPa とし p_p を 90, 110, 135 MPa と変更した。

図 6 にパラメータとした噴射圧力に対する Smoke, CO, 図示熱効率 η_i , 最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ を示す。比較のため、パイロット噴射圧力とメイン噴射圧力を等しくした結果 (図 4 の FFR) を「a11」として示す。パイロット噴射圧力のみを高めた場合 ($p_p=var.$)、Smoke は変化せず、CO は「a11」と同様に増加した。一方、メイン噴射圧力のみを高めると ($p_m=var.$)、Smoke は「a11」と同様に低下し、CO は変化しなかった。これらのことから、図 4 において噴射圧力の増加に伴う CO の増加はパイロット噴霧の希薄化が主な原因であること、およびメイン噴射圧力上昇による混合促進が Smoke 低減の主な原因であることが実験的に示された。図示熱効率は噴射圧力を高めると低下する傾向が得られた。噴射による流動強化により冷却損失が増加したことが原因と考えられる。

3.3. メイン分割噴射の影響

メイン噴射を分割することで、メイン噴霧の貫徹力を低下させ、冷却熱損失が低減して熱効率が向上するとの報告^(9,10)がある。また、噴射が終了すると噴霧への空気導入が促進されることから⁽¹¹⁾、噴射を分割することで空気導入を促進し、黒煙濃度の低下および熱効率向上を試みた。

ここでは、メイン噴射を噴射間隔ゼロの等量二分割とし、二段パイロット噴射は噴射弁 F で行い、メイン分割噴射を噴射弁 F と R の順で行う噴射パターン FFRF とメイン分割噴射を噴射弁 R と F の順で行う FFRF を採用した。メイン分割噴射の噴射間隔は 0°CA とした。噴射圧力 90 MPa でメイン噴射を分

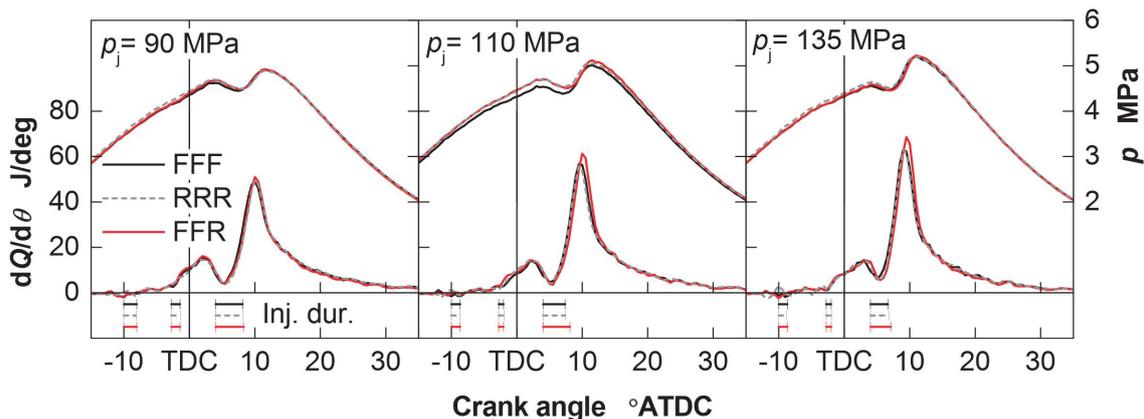


Fig.5 Comparison of in-cylinder pressure and heat-release rate between injection patterns

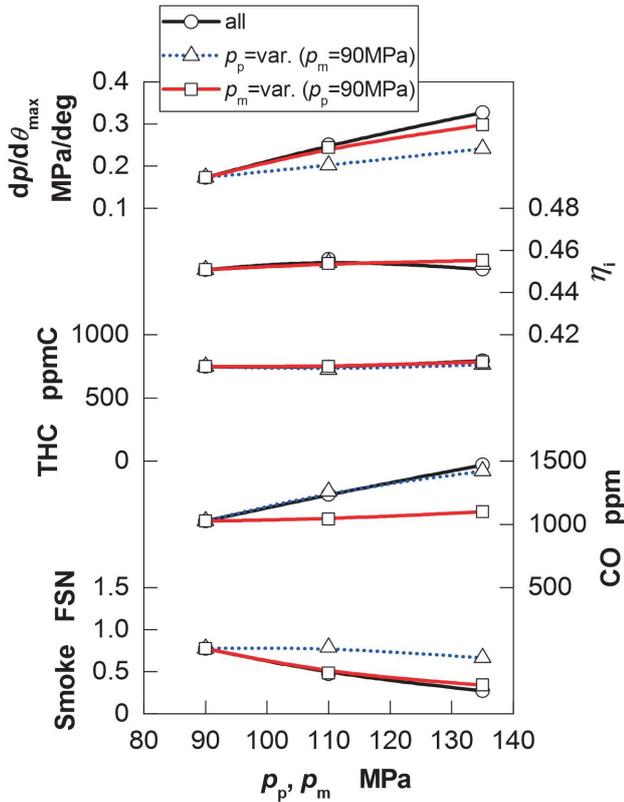


Fig.6 Effect of pilot-injection pressure and main-injection pressure on engine performance and emissions

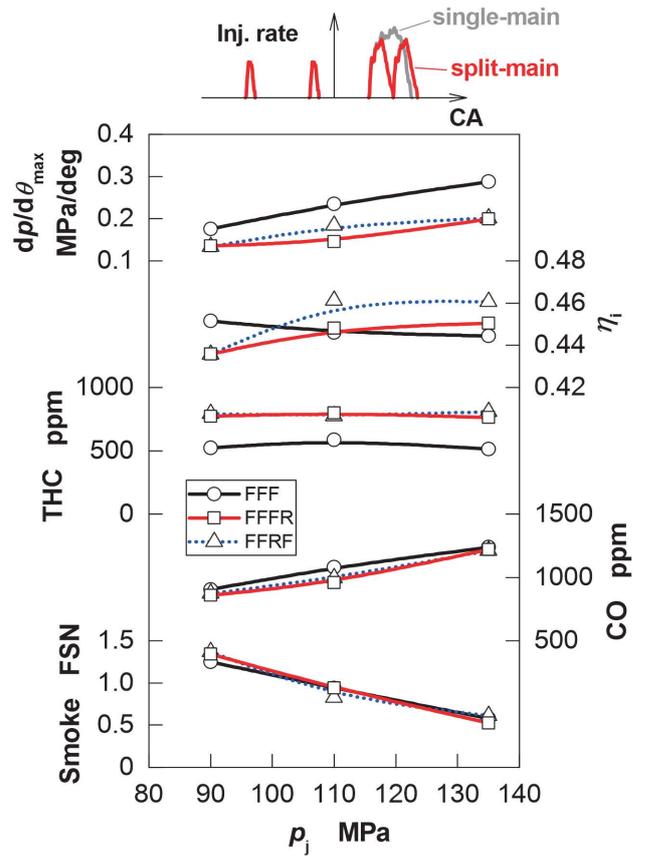


Fig.7 Effect of split-main injection on engine performance and emissions

割しない場合（単段メイン噴射）に比べ、同じ噴射圧力でメイン噴射を分割すると噴射期間が増大する。そこで、全体の噴射圧力を 90, 110, 135 MPa と変化させた。噴射圧力 110 MPa のメイン分割噴射の最大噴射率は噴射圧力 90 MPa の単段メイン噴射の最大噴射率と同程度となり、噴射圧力 135 MPa とすると、メイン分割噴射の噴射期間が噴射圧力 90 MPa の単段メイン噴射の場合と同じになる。メイン分割噴射の場合、メイン噴射一段目の噴射量を 4.6 mm³/cycle とし、メイン噴射二段目の噴射量を微調整して図示平均有効圧力を調整した。結果的にメイン噴射二段目噴射量は 4.4~4.8 mm³/cycle となった。

図 7 に単段メイン噴射とメイン分割噴射を用いた場合の噴射圧力 p_j に対する性能・排気特性を示す。予想に反し、メイン噴射を分割しても黒煙濃度は変わらなかった。メイン噴射を分割すると噴射期間が伸びて、平均噴射率は低下する。その結果、分割噴射の空気導入促進による黒煙低減効果と噴射率低下による黒煙増加効果が打ち消し合い、黒煙濃度が変化しなかったと考えられる。熱効率は単段メイン噴射では噴射圧力の上昇とともに低下したが、分割噴射では噴射圧力を高めると熱効率が上がり、 $p_j = 110, 135$ MPa では単段メイン噴射よりも分割噴射の熱効率が高くなった。最大圧力上昇率は分割噴射を用いることで低くなった。

図 8 に示す熱発生率経過から、 $p_j = 90$ MPa の場合には分割噴射によって熱発生率のピークが大きく低下し、等容度低下

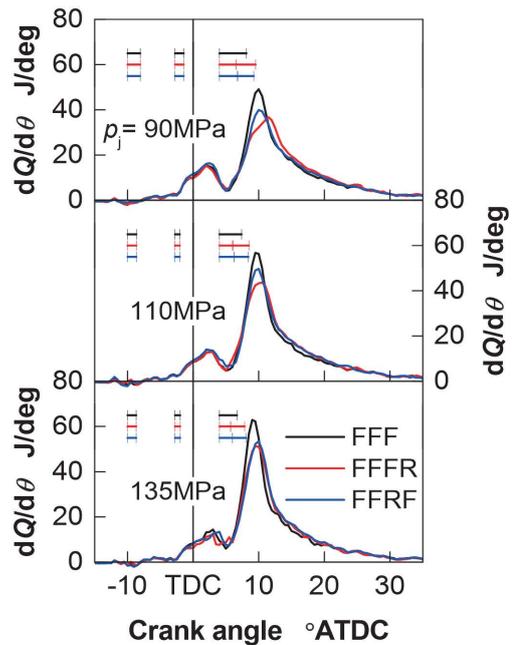


Fig.8 Comparison of heat-release rate between single main injection and split main injection

により熱効率が下がったと考えられる。また、 $p_j = 110, 135$ MPa の場合にも熱発生率のピークが低下し、等容度は低下した。

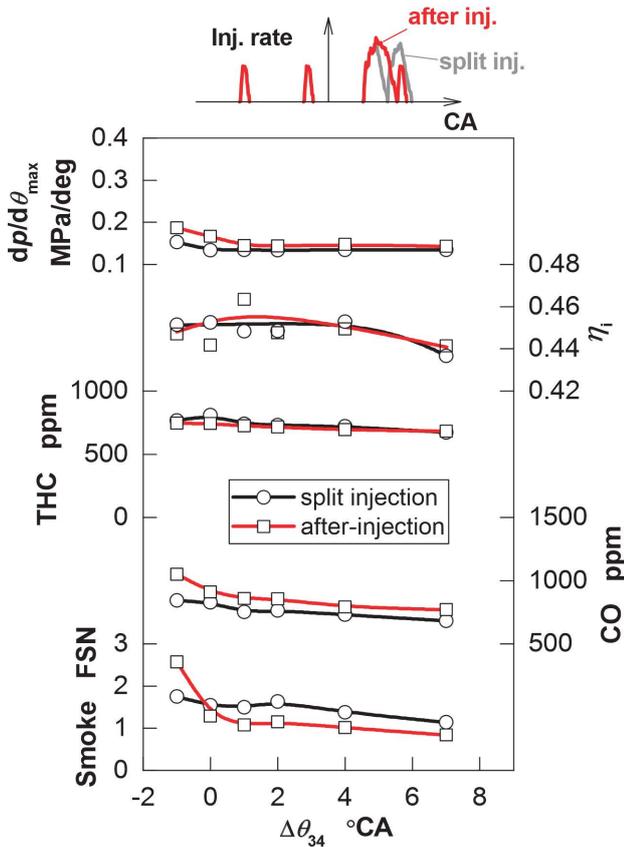


Fig.9 Effect of split-injection dwell and split ratio of injection quantity on engine performance and emissions

分割噴射による熱効率向上の理由としては分割噴射による冷却損失低減効果が寄与したものと思われる。噴射パターン FFRF と FFRF では FFRF のメイン噴霧の初期燃焼による熱発生率が FFRF より低くなる傾向があり、最大熱発生率および熱効率が低くなったが、噴射圧力に対する性能・排気の傾向に大きな違いは見られなかった。

3.4. メイン分割噴射条件の影響

前項でメイン分割噴射による性能改善の可能性が示唆された。ここでは、メイン分割噴射の噴射条件の変化が性能・排気に及ぼす影響を明らかにするため、噴射パターンを FFRF とし、噴射圧力 90 MPa においてメイン分割噴射の噴射間隔（メイン噴射一段目の噴射終わりと二段目の噴射開始の間隔）を $-1 \sim 8^\circ\text{CA}$ で変化させた。 -1°CA では噴射期間を重複させることとなる。さらに、メイン噴射の二段目がアフター噴射に近い役割を持つことを期待して、メイン噴射一段目の噴射量を $6.8 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ に増やし、メイン噴射二段目は $2.6 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ 程度とした。いずれの場合も、メイン噴射二段目を微調整して図示平均有効圧力を調整した。

図 9 に等量分割噴射を行った場合（split injection）とメイン噴射の二段目を小さくした場合（after-injection）のメイン分割噴射の噴射間隔 $\Delta\theta_{34}$ に対する性能・排気特性を示す。いずれの噴射パターンでも噴射間隔を 0°CA から広げると

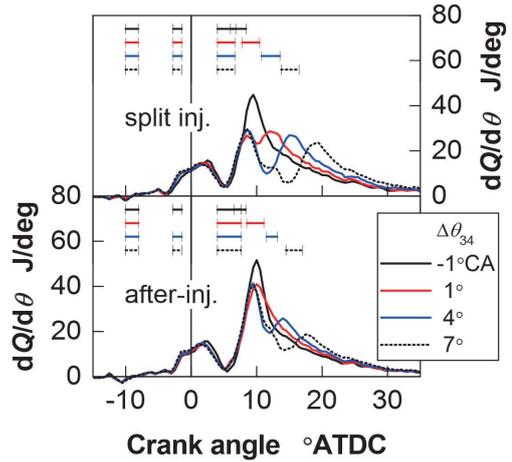


Fig.10 Effect of split-injection dwell and split ratio of injection quantity on heat-release rate

Smoke はわずかに低下する。また、メイン噴射二段目を小さくした場合、等量分割のときよりも Smoke が低下した。噴射間隔を 5°CA 以上に広げると熱効率は低下した。一方、噴射間隔を -1°CA とし、分割噴射の噴射期間を重複させると Smoke が急増し、最大圧力上昇率が増加した。図 10 に示す熱発生率より、噴射間隔を大きくすると、熱発生率の重心が後ろに下がり、等容度が低下することが熱効率低下の原因と考えられる。また、噴射間隔を重複させた場合の Smoke 急増の理由として、図 2 に示したように噴射弁 F と R から出た噴霧が交差する噴孔配置となっているため、噴霧が衝突し合い、噴霧への空気導入が阻害されて過濃な混合気が形成されたと考えられる。

4. まとめ

小型ディーゼル機関において噴射率可変化による燃焼改善効果を明らかにするため、口径 85 mm の単気筒試験機関に独立した二系統の燃料噴射システムを搭載し、多段噴射の各段の噴射圧力、噴射時期、噴射量配分が性能・排気特性に及ぼす影響を調査し、以下の結果を得た。

1. パイロット噴射とメイン噴射の噴射弁を切り替えることで黒煙濃度が低下する。
2. パイロット噴射圧力のみを上昇させると CO 濃度が増加するが、メイン噴射圧力のみを上昇させると CO の増加なく黒煙濃度が低下する。
3. 低い噴射圧力でメイン噴射を分割すると噴射率が低下して熱効率が下がるが、噴射圧力を高めると単段メイン噴射の場合よりも熱効率は高くなる。
4. メイン噴射を分割する場合、等分割するよりもメイン噴射二段目の量を減らすと黒煙濃度が下がる。
5. 分割噴射の噴射期間を重複させると、別の噴射弁からの噴霧同士が衝突するため噴霧への空気導入が阻害され、黒煙濃度が急増する。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理法人：JST）によって実施された。また、実験に際し、本学学生 平山一輝氏の協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) K. Tanabe : Effect of Fuel Injection Rate Control on Reduction of Emissions and Fuel Consumption in a Heavy Duty DI Diesel Engine, SAE Paper No.2005-01-0907 (2005)
- (2) M. Rottmann : Injection Rate Shaping Investigations on a Small- Bore DI Diesel Engine, SAE Paper No. 2009-01-0850 (2009)
- (3) O. Kastner : Advantages of sophisticated injection strategies in diesel engines, Proc. THIESEL 2010, p. 571-585 (2010)
- (4) 鈴木浩高：ディーゼル機関における噴射率制御による燃費、排出ガスおよび燃焼音の同時低減、自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 4, p. 863-868 (2012)
- (5) 武田好央：早期燃料噴射による希薄予混合ディーゼル燃焼の排出物特性、日本機械学会論文集B編, Vol. 62, No. 599, p. 2887-2894 (1996)
- (6) 橋詰剛：二段燃焼によるディーゼル機関の排気改善、日本機械学会論文集B編, Vol. 65, No. 631, p. 1166-1172 (1999)
- (7) S. Merkel : Investigation of a New Injection Strategy for Simultaneous Soot and NOx Reduction in a Diesel Engine with Direct Injection, SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 1, No. 1, p. 1433-1442 (2009)
- (8) 岡本毅：大型ディーゼルエンジンにおける熱効率、各損失およびエミッション同時改善コンセプト、第26回内燃機関シンポジウム講演要旨集, No. 87-20158028, p. 1-6 (2015)
- (9) 長田英朗：単気筒エンジンにおける高過給・広域多量EGRのディーゼル燃焼(第3報) -燃料マルチ噴射による排出ガスと燃費率の改善効果-, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 4, p. 855-861 (2012)
- (10) 佐田翼：小型ディーゼルエンジンにおける多段噴射による熱損失低減と熱効率向上に関する研究、自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 4, p. 755-761 (2015)
- (11) M.P.B. Musculus : Entrainment Waves in Diesel Jets, SAE Int. J. Engines, Vol. 2, No. 1, p. 1170-1193 (2009)