

G0700204

噴射パターンの幅広い制御を伴うディーゼル PCCI 燃焼の性能と排気

堀部 直人^{*1}, 八木 政人^{*2}, 桑原 洋樹^{*2}, 川那辺 洋^{*1}, 石山 拓二^{*1}

Performance and Exhaust Emissions of Diesel-PCCI Combustion with Wide-Range Control of Injection Pattern

Naoto HORIBE^{*1}, Masato YAGI, Hiroki KUWABARA, Hiroshi KAWANABE, Takuji ISHIYAMA

^{*1} Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

In order to search an injection strategy for partially PCCI combustion implementing low NO_x, low smoke, and low maximum pressure rise rate, a series of experiment was carried out using a single-cylinder diesel engine equipped with a dual injector system (DIS), which includes two sets of common-rail injection system. The DIS enables variable injection rate for each injection pulse and a wide-range dwell between injection pulses, including even negative injection dwell. The baseline injection strategy was three-stage equally divided injection. The effects of injection timings, ratio of injection quantities, and second-injection pressure were investigated under a condition of constant speed, constant load, and constant NO_x emission concentration. The results show that significant reduction of smoke emission was obtained by using the three-stage equally divided injection, while maximum pressure rise rate increased. A combination of increasing second-injection quantity, reducing third-injection quantity, and lowered second-injection pressure reduced the maximum pressure rise rate, keeping thermal efficiency and low smoke emission.

Key Words : Diesel engine, PCCI, variable injection rate, DIS

1. はじめに

乗用車用ディーゼル機関の比較的低負荷・低回転域における熱効率の向上、窒素酸化物 (NO_x) および粒子状物質の排出低減を目指して、予混合圧縮自着火 (Premixed Charge Compression Ignition; PCCI) 燃焼の原理を取り入れた燃焼の実現が試みられてきた(例えば 1)。ディーゼル機関では比較的早い時期に燃料を噴射し、低い圧縮比と大量の排気再循環 (Exhaust Gas Recirculation; EGR) を組み合わせることで、従来よりも長い着火遅れの間に混合を進め、燃焼を上死点付近に制御する方法が主流である(例えば 2)。しかし、燃焼温度が低くなるために一酸化炭素や未燃炭化水素といった未燃物質の排出が多くなる傾向がある。また、高い EGR 率を保ったままで出力増大のために投入燃料量を増やすと、未燃排出物質濃度と黒煙濃度 (Smoke) が高くなり、さらに最大圧力上昇率が急激に高まって燃焼騒音が増大する⁽³⁾。そこで、燃料を分割して噴射し、混合律速燃焼を付け加えて部分的 PCCI 燃焼を行うことで低 NO_x かつ低 Smoke となる運転可能領域の拡大が図られているが⁽⁴⁻⁶⁾、従来燃焼に比べて熱効率が低下する傾向があり⁽¹⁴⁾、PCCI 燃焼の特徴を活かしきれていないとは言えない。

筆者らは、CFD に不均一自着火モデル⁽⁷⁾を組み込み、比較的低負荷の高い領域における部分的 PCCI 燃焼について、圧力上昇率を抑制するための噴射パターンを検討した⁽⁸⁾。等量三段分割噴射をベースとして検討した結果、着火前の一段目噴霧に二段目噴霧が追いつき、一つの混合気塊となって着火する条件では急激な燃焼となって最大圧力上昇率が增大するが、二段目噴射時期を少し遅らせるか二段目噴射率を下げると最大圧力上昇率を抑制でき、とくに二段目噴射率を下げた場合には壁面からの冷却損失が低減し、熱効率が向上する可能性が示唆された。

そこで本研究では、既報の燃焼制御方針を踏まえて、衝撃的な燃焼を抑制しながら、熱効率を向上する燃料噴射パターンを探るために、二系統のコモンレール式燃料噴射装置を搭載することにより噴射率および噴射パターンの設定自由度を高めた単気筒ディーゼル機関⁽⁹⁾を用いて、等量三段分割噴射をベースとして噴射圧力、噴射時

^{*1} 正員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

^{*2} 非会員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科
E-mail: horibe@energy.kyoto-u.ac.jp

Table1 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 injector system, Common-rail systems with a piezo injector (Max. pressure: 220 MPa) φ0.115 mm × 8 holes nozzle
Supercharging	External supercharging
EGR system	Low-pressure loop EGR

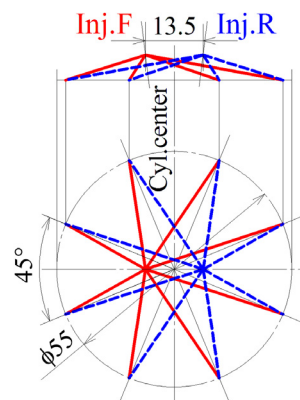


Fig.1 Nozzle-hole arrangement

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

試験機関には二系統のコモンレール式燃料噴射装置（Dual Injector System; DIS）を搭載した水冷単気筒 4 サイクルディーゼル機関を用いた。機関の主要諸元を表 1 に示す。本機関に搭載した二系統の噴射装置は，それぞれ独立して噴射圧力・時期・量を設定できる。噴射弁の噴射中心の距離は 13.5 mm である。噴孔径φ0.115 mm，噴孔数 8 のピエゾ駆動型噴射弁を用い，図 1 に示すようにそれぞれの噴射弁の噴霧軸が直径 55 mm の円周上で交わる噴孔配置とした。ここでは，吸気弁側の噴射弁を F，排気側の噴射弁を R と呼ぶ。燃焼室形状は口径 60 mm のトロイダル型を用いた。詳細については既報⁹⁾を参照されたい。

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 n_e を 1500 rpm，吸気圧力および排気圧力は 102 kPa (abs)とし，吸排気行程を除く図示平均有効圧力 IMEP_g が 390 ± 2 kPa となるように噴射量を調整した。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 排出濃度を 54 ± 2 ppm とするように EGR 率を調整した。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 とした。スワール比は 1.3 である。噴射パターンは一段あたりの噴射量が 4.3 mm³/cycle 程度の等量三段噴射を基本パターンとし，二段目の噴射率を変化させるために，一段目と三段目には噴射弁 F を用い，二段目には噴射弁 R を用いる噴射パターン FRF を採用した。噴射圧力は低負荷運転としては高圧の 135 MPa を基準とした。まず，三段全体の噴射時期の影響を調査した。さらに，各段の噴射パラメータが燃焼に及ぼす影響を詳しく調査するため，三段目噴射時期の影響と二段目噴射の時期・圧力・量の影響を調査した。

その際，エンジン排ガス分析装置（Horiba MEXA-1600DEGR）および反射式スモークメータ（AVL 415S）を用いて排気特性を調べた。筒内指圧は圧電式センサ（Kistler 6052A+5011B）を用いて計測し，50 サイクルの平均指圧より熱発生率を求めた。

3. 実験結果および考察

3・1 全体の噴射時期の影響

まず，等量三段噴射パターンを用いたときの性能・排気特性を明らかにするため，噴射間隔を一定として，全体の噴射時期の影響を調査した。噴射圧力 p_i を 135 MPa とし，一段目から三段目の噴射時期を $-10, -5, 0^\circ\text{ATDC}$ ， $-5, 0, 5^\circ\text{ATDC}$ ， $0, 5, 10^\circ\text{ATDC}$ と変化させた。ここでは，三段目の噴射量を調整して図示平均有効圧力を調整した。比較のため，拡散的燃焼が主体となるように二段パイロットとメイン噴射を組み合わせた基準試験（Benchmark）も行った。このとき，噴射圧力は 90 MPa とし，噴射弁 F のみを用いた。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，メイン噴射は 4.0°ATDC と 9.4 mm³/cycle とした。図 2 に一段目噴射時期 θ_{st} に対する黒煙濃度 Smoke，CO，THC，図示熱効率 η_i ，最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ を示す。基準試験の結果が示す通り，本機関は Smoke が高い特徴がある。噴射弁が燃焼室中心に配置されていないために，壁までの距離が近い噴孔があり，噴霧への空気導入が抑制されるためと考えられる。等量

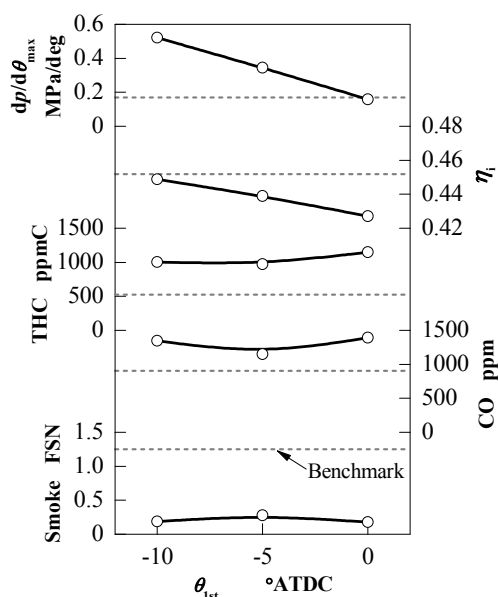


Fig.2 Effects of whole injection timings on performance and emissions
($n_e = 1500$ rpm, $IMEP_g = 390$ kPa, $NO_x = 54$ ppm)

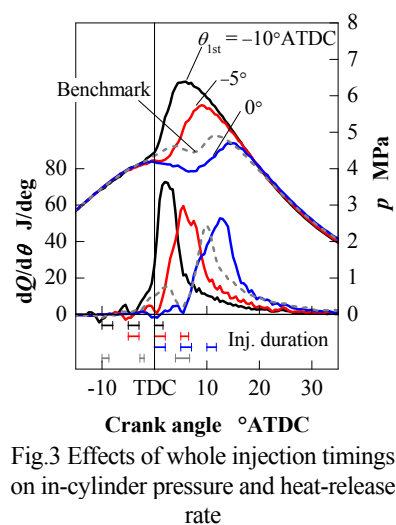


Fig.3 Effects of whole injection timings on in-cylinder pressure and heat-release rate

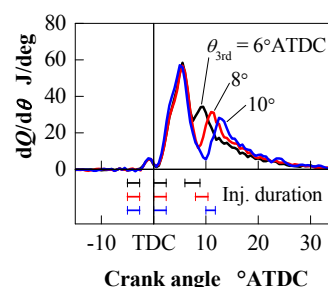


Fig.4 Effects of third injection timing on heat-release rate ($n_e = 1500$ rpm, $IMEP_g = 390$ kPa, $NO_x = 54$ ppm)

三段噴射を用いると、基準試験結果と比較して Smoke が大幅に低減し、CO と THC が増加した。一段目噴射時期を -10°ATDC とすると、基準試験と同等の熱効率となるが、最大圧力上昇率は上昇した。一方、最大圧力上昇率が基準試験と同程度となるまで噴射時期を遅らせると、熱効率は大きく低下した。

全体の噴射時期が燃焼に及ぼす影響を調べるために燃焼解析を行った。図 3 にクランク角度に対する筒内圧力 p 、熱発生率 $dQ/d\theta$ 、噴射期間を示す。基準試験ではパイロット噴射による燃焼ののちにメイン噴霧が燃焼する二山の熱発生率となった。等量三段噴射を用いると二段目噴射終了のあたりで熱発生率が立ち上がった。また、三段目噴霧は一段目と二段目噴霧の燃焼期間中に噴射することになり、一山の熱発生率となった。とくに、噴射時期を早くすると燃焼期間が短くなり、最大熱発生率は高くなった。噴射時期を早めると、燃焼期間が短く、上死点に近い時期に熱発生が生じたにも関わらず、基準試験結果と比べて熱効率の向上は得られなかった。冷却損失が増大したためと考えられる。また、噴射時期を遅らせると熱発生が遅くなり、等容度が低下して図示熱効率が低下したと考えられる。

3・2 三段目の噴射時期の影響

各段の噴霧の燃焼形態を明らかにするため、三段目の噴射時期が熱発生率に及ぼす影響を調べた。一段目と二段目の噴射時期を -5° と 0°ATDC とし、三段目噴射時期 θ_{3rd} を 6° , 8° , 10°ATDC と変化させた。ここでは、 $IMEP_g$ を一定とするため、三段目の噴射量を調整した。図 4 に熱発生率を示す。 $\theta_{3rd} = 10^\circ\text{ATDC}$ の結果を見ると、一段目と二段目噴霧によると考えられる 10°ATDC 付近までの熱発生率は立ち下がりが鋭く、燃え切りの良い PCCI 的な燃焼になっている。一方、三段目の噴霧は着火遅れが短く、後燃えが続く拡散的燃焼が主体であることが明らかとなった。前節の結果も同様に一段目と二段目の噴霧は PCCI 的に燃焼し、三段目の噴霧は拡散的に燃焼したと考えられる。

3・3 二段目の噴射時期・圧力の影響

運転条件は異なるものの既報で得られた噴射方針に従い、最大圧力上昇率と冷却損失を抑制するため、二段目噴射時期の遅延および二段目噴射率低下の影響を調査した。二段目噴射時期を広く変化させるために、噴射期間が重ならないように一段目噴射時期は -5°ATDC 、三段目噴射時期は 8°ATDC とした。二段目噴射時期を 0° から 6°ATDC まで変化させた。さらに、一段目と三段目の噴射圧力は 135 MPa に保ったまま、二段目噴射圧力 p_{j2} を 135 MPa と 90 MPa に変化させた。ここでは二段目噴射量を調整して $IMEP_g$ を保った。二段目噴射時期 θ_{2nd} に対する性能・排気特性および燃焼解析結果を図 5 と図 6 に示す。二段目噴射時期を遅らせると最大圧力上昇率と Smoke が緩やかに低下した。図 6 に示すように、二段目噴射圧力を 90 MPa に低下させると二段目の熱発生率ピークが

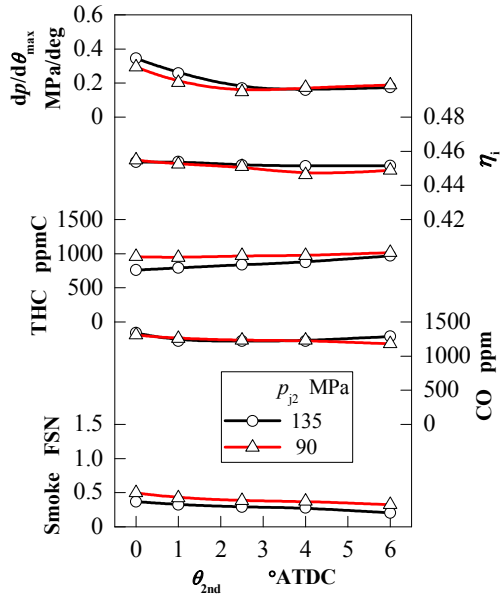


Fig.5 Effects of second-injection timing and second-injection pressure on performance and emissions ($n_e = 1500$ rpm, $IMEP_g = 390$ kPa, $NO_x = 54$ ppm)

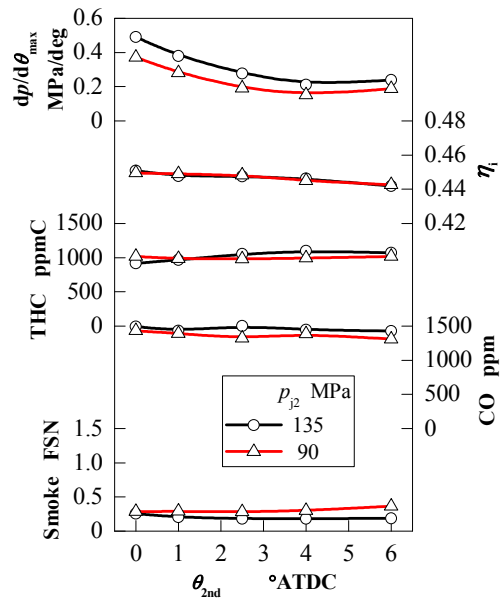


Fig.7 Effects of second-injection timing and second-injection pressure on performance and emissions ($q_{3rd} = 2.2$ mm³/cycle)

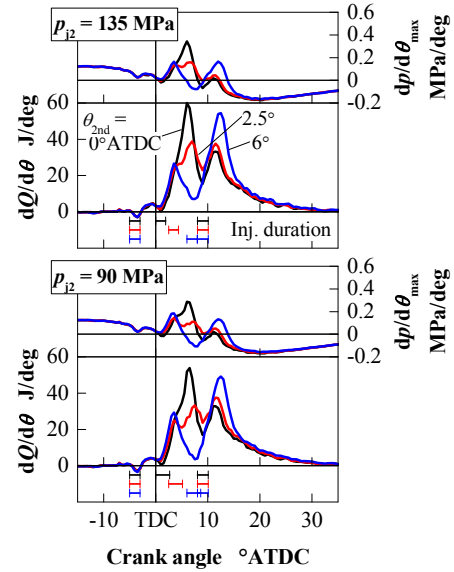


Fig.6 Effects of second-injection timing on heat-release rate

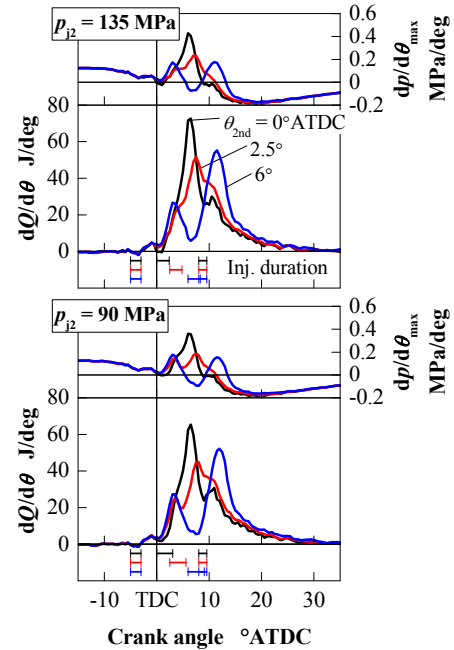


Fig.8 Effects of second-injection timing on heat-release rate ($q_{3rd} = 2.2$ mm³/cycle)

わずかに低下したが、二段目噴射時期を 0° ATDC としたときを除いて最大圧力上昇率は一段目噴霧燃焼で決まるため、最大圧力上昇率は二段目の噴射時期および噴射圧の影響を受けなかった。二段目噴射圧力による熱効率への影響は小さい。

3・4 噴射量割合の影響

最後に、等容度を高めて熱効率を向上させることと拡散的に燃焼する燃料の割合を低下させて黒煙濃度の抑制を狙い、前節の噴射パターンに対して二段目噴射量を増やし、三段目噴射量を半減させた。三段目噴射量 q_{3rd} は 2.2 mm³/cycle とし、前節と同様に二段目噴射時期と二段目噴射圧の影響を調査した。図7と図8に性能・排気と燃焼解析結果を示す。二段目の噴射量を増やしたことで二段目の熱発生率ピークが高くなった。それに対し、二段目噴射圧を下げると熱発生率ピークが低下した。最大圧力上昇率は二段目噴霧の燃焼で決まることになり、二段目噴射圧の低下により最大圧力上昇率は低下した。熱効率は二段目噴射時期を 0° ATDC とすると二段目噴

射圧力に関わらず図2の基準試験と同等となり、二段目噴射時期を遅らせると低下した。 $\theta_{nd}=0^\circ\text{ATDC}$ では二段目の噴射圧力を変えてもSmokeは変わらない。このとき、二段目の噴射中に一段目噴霧が着火するが、一段目と二段目の噴霧が空間的に分離されており、二段目噴霧は一段目噴霧の燃焼ガスの導入が少なく、比較的長い着火遅れの後に燃焼すると考えられ、噴射圧力によるSmokeへの影響が小さかったと考えられる。結果として二段目噴射量を増やしたことによる熱効率の向上は得られなかったが、二段目噴射時期を 0°ATDC とし二段目噴射圧力を下げることで、図2の基準試験結果と比べて熱効率を低下させることなく、最大圧力上昇率を比較的強く保ちながらSmokeを大幅に抑えることができた。

4. ま と め

二系統のコモンレール式燃料噴射装置を搭載した単気筒ディーゼル機関において、等量三段分割噴射をベースとして噴射時期、噴射量配分、噴射圧力が性能・排気特性に及ぼす影響を調査した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 等量三段噴射を用いて、一段目と二段目の噴霧をPCCI的に燃焼させ、三段目を拡散的に燃焼させることで、従来の噴射方式を用いた拡散的燃焼主体の燃焼に比べて黒煙濃度を低減することができる。このとき、全体の噴射時期を早めることで従来と同等の熱効率を得ることができるが、最大圧力上昇率は増加する。
- (2) 等量三段噴射では一段目噴霧の燃焼で最大圧力上昇率が決まるため、二段目の噴射時期の遅延および二段目の噴射圧力の低下は最大圧力上昇率の抑制にはならない。
- (3) 二段目の噴射量を増やし、三段目の噴射量を減らした場合、二段目の噴射圧力を低下させると、熱効率およびエミッションへの影響なしに最大圧力上昇率を抑制できる。

なお、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）により実施された。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 島崎直基, 宮本武司, 赤川久, 辻村欽司, “上死点近傍燃料噴射による予混合圧縮着火機関の性能および排気特性”, 日本機械学会論文集B編, Vol. 68, No.665 (2002), pp.262-269.
- (2) Kanda, T., Hakozaki, T., Uchimoto, T., Hatano, J., Kitayama, N., Sono, H., “PCCI Operation with Fuel Injection Timing Set Close to TDC,” *SAE Technical Paper*, No.2006-01-0920 (2006).
- (3) 堀部直人, 高橋研, 原田慎治, 奇成燮, 石山拓二, 塩路昌宏, “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 (2008), pp.737-745.
- (4) Okude, K., Mori, K., Shiino, S., Moriya, T. “Premixed Compression Ignition (PCI) Combustion for Simultaneous Reduction of NOx and Soot in Diesel Engine,” *SAE Technical Paper*, No.2004-01-1907 (2004).
- (5) Weiskirch, C., Müller, E., “Advances in Diesel Engine Combustion: Split Combustion,” *SAE Technical Paper*, No.2007-01-0178 (2007).
- (6) Horibe, N., Harada, S., Ishiyama, T., Shioji, M., “Improvement of premixed charge compression ignition-based combustion by two-stage injection,” *International Journal of Engine Research*, Vol. 10, No. 2 (2009), pp.71-80.
- (7) Kawanabe, H., Ishiyama, T., “Computational fluid dynamics analysis of the combustion process and emission characteristics for a direct-injection-premixed charge compression ignition engine,” *International Journal of Engine Research*, Vol. 15, No. 5 (2014), pp. 539-548.
- (8) 川那辺洋, 石山拓二, “多段噴射および噴射率制御を活用したディーゼルPCCI燃焼のCFD解析”, 第26回内燃機関シンポジウム講演要旨集, No. 11-20158012 (2015), pp. 1-5.
- (9) 堀部直人, 八木政人, 桑原洋樹, 川那辺洋, 石山拓二, “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”, 自動車技術会2016年春季大会学術講演会講演予稿集, No.69-16S (2016), pp.1716-1721.