

Study for Improvement of Diesel Engine Performance using a Combination of Early-injection PCCI and Conventional Diesel Combustion

学 〇平山 一輝 (京大院) 学 横山 卓司 (京大院) 正 Bao Zhichao
正 堀部 直人 (京大) 正 川那辺 洋 (京大) 正 石山 拓二 (京大)

Kazuki HIRAYAMA, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Takuji YOKOYAMA, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Zhichao Bao, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Naoto HORIBE, Kyoto University

Hiroshi KAWANABE, Kyoto University

Takuji ISHIYAMA, Kyoto University

The objective of this study is to find the strategies for increasing thermal efficiency of light-duty diesel engine by means of managing both cooling loss reduction and increase in degree of constant volume. For this purpose, a combustion strategy combining premixed charge compression ignition (PCCI) based combustion and conventional diesel combustion is examined. Experiments were performed using a single-cylinder light-duty diesel engine with two common-rail injection systems which enables independent control of fuel injections for PCCI and diesel combustion. This report focuses on investigating basic characteristics of the performance and exhaust emissions.

1 はじめに

ディーゼル機関は熱効率が低い一方、排気エミッションの低減が問題となっている。そのため、予混合圧縮着火(PCCI)燃焼の原理を活用し、窒素酸化物(NOx)および粒子状物質(PM)の同時低減が試みられてきた^(1,2)。しかし負荷を高めた場合、燃焼騒音や NOx の増大が問題となるため、中・高負荷では従来ディーゼル燃焼を組み合わせることが提案されている^(3,4)。例えば、橋詰ら⁽⁴⁾は初期燃焼を PCCI 燃焼、後期燃焼を従来の拡散的燃焼とし、各々の燃焼を独立に制御する二段燃焼(MULDIC)を提案し、高負荷条件においても NOx と PM を同時に低減した。Kim ら⁽⁵⁾は噴射角 100° のインジェクタを用いた早期燃料噴射を提案し、中負荷で排気エミッションを悪化させずに PCCI 燃焼を行うための燃料噴射条件を示した。また、Klos ら⁽⁶⁾はガソリンのポート噴射と軽油の筒内直噴を組み合わせた際の混合気を調査し、PCCI 燃焼の燃焼安定性と NOx 排出がトレードオフ関係にあることを示した。しかし、排気エミッションを低減

することに着目した研究例は多くあるが、熱効率の低下を伴う場合が多い。

そこで本研究では、等容度の向上と冷却損失低減の両立による熱効率向上を狙い、噴霧火炎のピストン壁面衝突を抑えるためにメイン噴射量を減らし、残りの燃料を早期燃料噴射による PCCI 燃焼に充てる燃焼法に着目した。PCCI 燃焼と噴霧燃焼を同期させることで燃焼期間を短縮し等容度を向上させる。また噴霧燃焼による PM 増加を防ぐため、早期噴射による希薄混合気が噴射弁周りに分布しないようにし、メイン噴射燃料へ新気を供給できるようにする。ここでは、この燃焼方法の基本的な特性と問題点を明らかにするため、単気筒試験機関を用いて実験を行い、燃料噴射圧力、噴射量および噴射時期を変化させた際の性能・排気特性を調査した。

2 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。独立した二系統の噴射弁を備えた、水冷単気筒 4 サイクルディーゼル機関(口径 85mm, 行程 96.9mm, 排気量 550cc, 圧縮比 15.5)を使用し、スーパーチャージャーにより外部から過給した。

燃料噴射にはコモンレール式ピエゾ駆動インジェクタを用いた。噴射弁の配置、燃焼室の形状および噴霧と燃焼室の位置関係を図 2 に示す。図 2(a)に示すとおり、狭いコーン角を持つサブ噴射弁(噴孔径 0.104mm, 5 噴孔, 噴射角 50°)

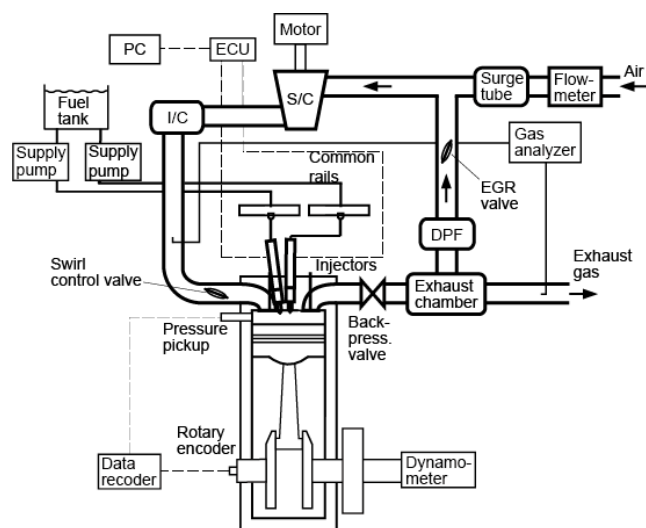


Fig. 1 Experimental setup

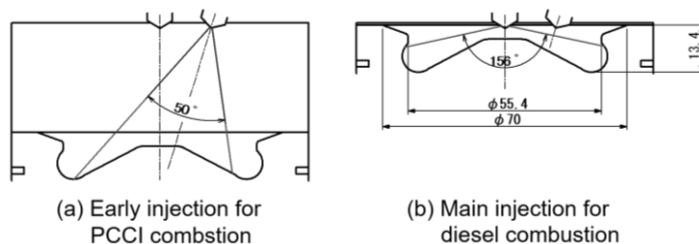


Fig. 2 Spray layout

により早期燃料噴射を行う(以下「サブ噴射」と呼ぶ)。なお、図は-60°ATDC でサブ噴射を開始した場合の噴霧と燃焼室の位置関係を表している。続いて(b)のように、通常のコーン角を持つメイン噴射弁(噴孔径 0.091mm, 10 噴孔, 噴射角 156°)により TDC 付近で燃料噴射を行う(以下「メイン噴射」と呼ぶ)。それぞれの噴射弁で異なる燃料を使用しており、メイン噴射にはセタン価 55 の通常軽油を用いる。サブ噴射には、3.1 節ではセタン価 55 の通常軽油を用い、3.2 節および 3.3 節ではセタン価 40 とした軽油を用いた。理由は後述する。

吸排気圧力を 180kPa, 吸気温度を 50°C, 油水温度を 80°C とした。機関回転速度は 2250rpm, スワール比は 1.3 で一定とし、吸気酸素濃度が 18%となるように EGR 率を設定した。

この燃焼方法では、サブ噴射による混合気の着火時期を TDC に近づけること、混合気を十分希薄にして冷却損失を抑えることが重要である。そのため本研究では、メイン噴射時期はすべての条件において-1.8°ATDC に固定し、サブ噴射の燃料噴射圧力、噴射量および噴射時期を変化させた。

3 実験結果および考察

3.1 サブ噴射のみによる燃焼

前述のような混合気を形成するサブ噴射条件を見出すため、セタン価 55 の通常軽油でサブ噴射のみを行い、噴射圧力および噴射段数の影響を調査した。燃料噴射圧力は 90, 120, 150MPa とし、サブ噴射量は 15mm³/cycle とし、単段

Table 1 Sub-injection quantity and timing

	Inj. quantity [mm ³ /cycle]	Start of inj. [°ATDC]		
		θ_{1st}	θ_{2nd}	θ_{3rd}
Single-Stage	15×1	-45	--	--
Two-Stage	7.5×2	-45	-35	--
Three-Stage	5×3	-45	-35	-25

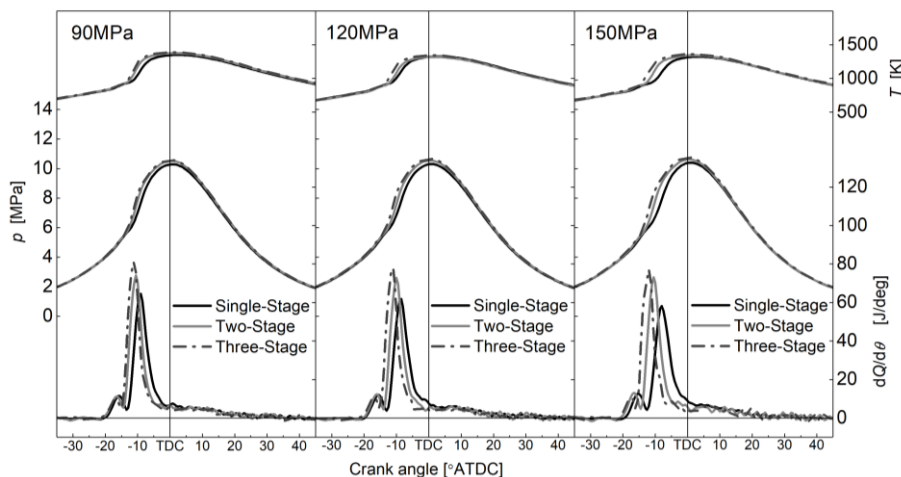


Fig. 3 In-cylinder pressure, heat release rate and in-cylinder gas temperature (effects of sub-injection pressure and number of stages)

噴射および二段・三段の等量分割噴射を用いた。表 1 に噴射量および噴射時期を示す。

図 3 に熱発生率、筒内圧力、筒内平均ガス温度を、図 4 に性能・排気特性を示す。なお、図 4 の「 $\eta_{i-gross}$ 」は吸排気行程を除いた図示熱効率である。図 3 より、いずれの噴射条件においても約-20°ATDC で熱炎が発生することが分かる。すなわち、燃料の過早着火が見られる。また噴射圧力による熱発生率形状の差異は小さく、噴射段数を多くすると着火時期がより早くなった。図 4 より、噴射段数が少ない場合は未燃物質が多くなったが、これは燃料が壁面に付着したことが原因と考えられる。また噴射圧力が低いときは、燃料の微粒化が進まないため燃料過濃領域が生じ、スモークの増加につながったと考えられる。

サブ噴射時期を進角することにより着火時期を遅らせることができると予想されるが⁽²⁾、一段目噴射時期を-50°ATDC より進角した場合、CO がさらに増加した。しかしメイン噴射を行うことで未燃燃料を燃焼させることができると考え、次節からはメイン噴射を行いながらサブ噴射時期を進角させた。また燃料の着火性を下げることで過早着火を緩和することを狙い、セタン価 40 の軽油をサブ噴射に用いた。

3.2 サブ噴射時期の影響

次に、サブ噴射とメイン噴射を組み合わせた際のサブ噴射時期の影響を調査した。燃料噴射圧力は、サブ噴射を 150MPa, メイン噴射を 200MPa とした。総噴射量は 35mm³/cycle で一定とし、サブ/メインの噴射量の割合を変化させ、10/25 mm³/cycle, 15/20 mm³/cycle の二条件で実験した。またサブ噴射は燃料の壁面付着を軽減するため等量二段に分割し、一段目の噴射開始から 10°CA 遅れて二段目の噴射を開始した。

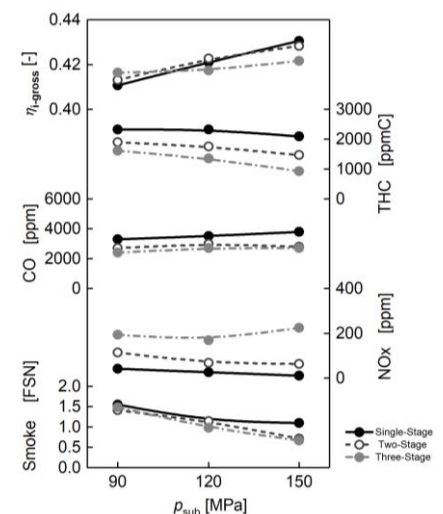


Fig. 4 Performance and exhaust emissions (effects of sub-injection pressure and number of stages)

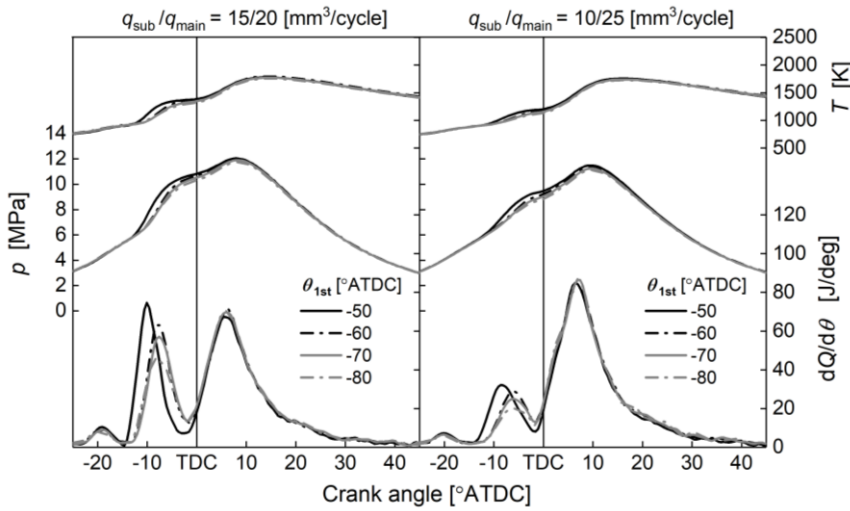


Fig. 5 In-cylinder pressure, heat release rate and in-cylinder gas temperature (effects of sub-injection timing)

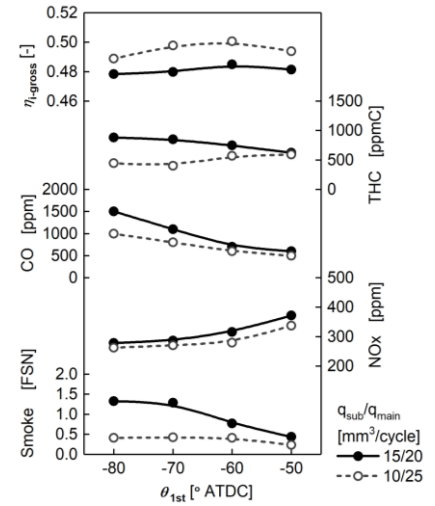


Fig. 6 Performance and exhaust emissions (effects of sub-injection timing)

図5に熱発生率、筒内圧力、筒内平均ガス温度を、図6に一段目噴射開始時期に対する性能・排気特性を示す。図5の熱発生率を見ると、サブ噴射により作られた混合気が低温酸化による弱い発熱を示したのち、約-15°ATDCで熱炎を発生した。すなわち、サブ噴射燃料の着火性を低下させた場合でも燃料の過早着火が見られる。その後、TDCより少し前からメイン噴射燃料の発熱による大きな熱発生が見られる。サブ噴射時期を遅角すると、着火時期が早くなり、一段目の熱発生の割合が大きくなった。またサブ噴射量が少なくなるとTDC以降の熱発生が大きく、熱効率が向上した。

図6より、サブ噴射時期の進角に伴って未燃物質の排出が増加し、熱効率は低下した。サブ/メインの噴射量の割合を比較すると、サブ噴射量割合の多いほうが未燃物質およびスモークの排出が多い。これは、サブ噴射量割合が多い場合にはサブ噴射燃料の壁面付着量が増加し、過濃領域が多くなったことが原因であると思われる。

3.3 サブ噴射量の影響

前節でサブ噴射量が多いとき未燃物質およびスモーク排出が増加することが分かったため、さらにサブ噴射量が少ない範囲においてサブ噴射量が着火時期および冷却損失に与える影響を調査した。

サブ噴射時期を-64°ATDCに固定し、メイン噴射の噴射量を一定としてサブ噴射量のみを変化させた場合と、総噴射量を一定としてサブ噴射とメイン噴射の噴射量割合を変化させた場合について調査した。燃料噴射圧力はサブ150MPa、メイン270MPaとし、総噴射量一定の条件では吸排気行程を除く図示平均有効圧力を1440kPaとした。また、3.1節より単段サブ噴射のとき最も着火が遅かったため、サブ噴射を単段とした。図7に熱発生率、筒内圧力、筒内平均ガス温度を、図8に性能・排気特性を示す。

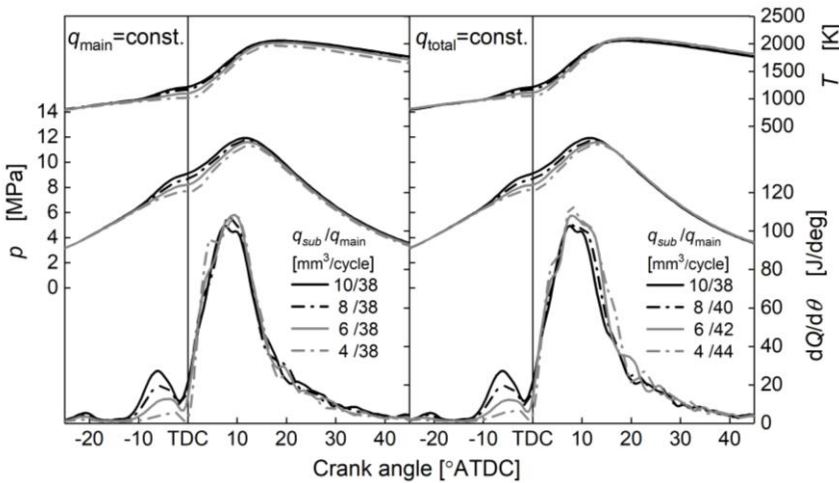


Fig. 7 In-cylinder pressure, heat release rate and in-cylinder gas temperature (effects of sub-injection quantity)

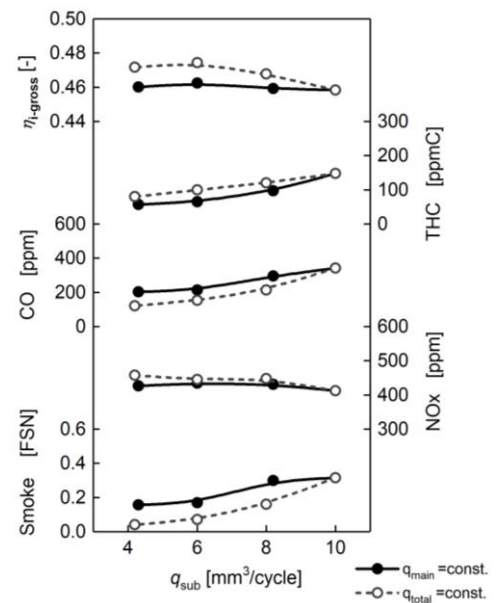


Fig. 8 Performance and exhaust emissions (effects of sub-injection quantity)

図 7 によると、サブ噴射量を変化させてもサブ噴射燃料の着火時期は一定であり、過早着火の改善には至らなかった。またメイン噴射量一定、総噴射量一定いずれの条件においても、サブ噴射量を少なくするとメイン噴射燃料の着火遅れが長くなり、熱発生立ち上がりが急峻になった。サブ噴射量の減少分だけメイン噴射量を増加した場合は、TDC 以降の熱発生が大きくなり燃焼期間が長くなっていることが分かる。

図 8 より、サブ噴射量が少ないほうが未燃物質およびスモークが減少したが、これはサブ噴射量が少ない場合は燃焼室壁面への付着が少なく、過濃領域の少ない混合気が形成されたためだと考えられる。このことが前述したメイン噴射燃料の着火遅れ短縮にもつながったと推測される。サブ噴射量の減少に伴って熱効率は向上したが、サブ噴射量最小の条件では少し低下している。これはメイン噴射燃料の発熱による熱発生立ち上がりが急峻になったことにより冷却損失が増加したためであると思われる。

図 9 に、メイン噴射量一定および総噴射量一定の場合の、サブ噴射量に対する冷却損失量を示す。冷却損失は、吸排気の温度および流量から求めた排気損失と図示仕事、摩擦損失、未燃損失を足し合わせたものを投入熱量から引いて求めた。

メイン噴射量を固定してサブ噴射量を減らした場合、総噴射量の低下に伴って冷却損失は減少し、等容度、熱効率が向上した。総噴射量を固定して、メイン噴射量の減少分だけサブ噴射量を増加させた場合、すなわちディーゼル燃焼の噴射量を減らして PCCI 燃焼に割り当てた場合でも、冷却損失はほぼ一定の値を示した。これは、早期噴射燃料が燃焼室壁面に付着することにより部分的に過濃な領域が生じ、壁面近くに高温の燃焼ガスが滞留したためと推測される。この問題の解決方法として、インジェクタの傘角を変更して噴射時期を遅らせ燃料付着を起りにくくすることが考えられる。

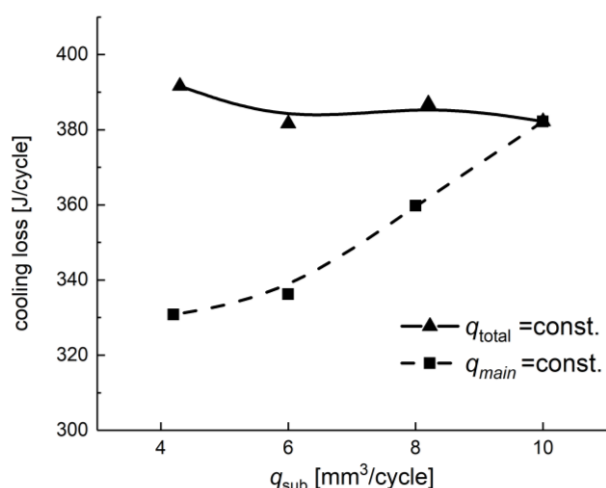


Fig. 9 Cooling loss at each sub-injection quantity

4 まとめ

早期燃料噴射による PCCI 燃焼とディーゼル燃焼を組み合わせた燃焼の性能・排気特性を、単気筒試験機関を用いて調査した結果、以下の知見を得た。

1. サブ噴射のみを行った場合、噴射を分割することで未燃物質が減少するが着火時期が早くなる。また噴射時期を進角すると未燃物質の排出が多くなり、運転可能な噴射条件に限られる。
2. 低セタン価軽油を用いたサブ噴射とメイン噴射を組み合わせてサブ噴射時期を遅角すると、未燃物質の排出量が減少するとともに着火時期が早くなり、サブ噴射燃料の熱発生が大きくなる。
3. サブ噴射時期を固定してサブ/メイン噴射量割合を変化させた場合、サブ噴射量割合の小さいほうが未燃物質およびスモークが減少する。
4. メイン噴射量とサブ噴射量の割合を変化させた場合でも、総噴射量が一定ならば冷却損失の値はほぼ一定である。

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。ここに謝意を表す。最後に、実験に協力いただいた本学学生、大野健太郎氏に感謝する。

参考文献

- (1) 武田好央ほか 2 名, 日本機械学会論文集 B 編, 62 巻, 599 号, (1996), pp.347-354
- (2) 石山拓二ほか 1 名, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 巻, 第 6 号, (2012), pp.82-87
- (3) Hasegawa, R., et al., SAE paper No.2003-01-0745, (2003)
- (4) 橋詰剛ほか 2 名, 日本機械学会論文集 B 編, 65 巻, 631 号, (1999), pp.354-360
- (5) Kim, Y., et al., ICLASS-2006, ID: ICLASS06-224
- (6) D.Klos, et al., SAE international No.2015-01-0841