

デュアルインジェクタを備えたディーゼル機関の燃焼解析

堀部 直人¹⁾ 今西 良太²⁾ 江越 賢太³⁾ 川那辺 洋⁴⁾ 石山 拓二⁵⁾

Combustion Analysis of a Diesel Engine Equipped with Dual-Injector System

Naoto Horibe Ryota Imanishi Kenta Egoshi Hiroshi Kawanabe Takuji Ishiyama

To examine the potential of flexible fuel injection to improve diesel combustion, a series of experiments were performed using an optically accessible single-cylinder diesel engine with a dual-injector system (DIS) which includes two sets of common-rail injection systems and enables different injection rates in each injection pulse and a wide dwell range between injection pulses. Based on double pilot injection strategy, effects of injection timings and injection quantities of split-main injection were investigated. The high-speed photographs indicate that sprays that have longer paths to the wall show a larger amount of luminous flame by using DIS. When using a small second stage of the split-main injection, the mixture by the second stage is burnt in the center area where much luminous flame by first stage of the main injection is not observed.

KEY WORDS: Heat engine, Compression ignition engine, Combustion analysis, Dual injector, Optical engine (A1)

1. ま え が き

ディーゼル機関の排ガス浄化および燃費の低減が強く望まれている。燃焼改善手法の一つとして、噴射期間中に噴射率を変える可変噴射率を用いた研究が行われている⁽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、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。また、複数の噴射弁を用いて噴射率の大幅な変更を用いた研究も行われている^(5,6)。たとえば Merkel ら⁽⁵⁾はパイロット噴射用とメイン噴射用の二つの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 NOx と黒煙濃度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、搭載スペースの問題から乗用車クラスのエンジンをを用いた研究例は少ない。

著者らは、噴射率可変化による燃焼改善効果を明らかにするために、独立した二系統の燃料噴射システム (DIS) を搭載した小型ディーゼル機関を用いて、出力および NOx 排出濃度一定の条件のもとで、二段パイロット噴射を用いる噴射パターンをベースとして、パイロット噴射とメイン噴射の噴射圧力、メイン分割噴射の噴射時期、噴射量配分を独立に変化させた⁽⁷⁾。その結果、図 1 に示すように一つの噴射弁から噴射した場合 (FFF および RRR) に比べ、パイロット噴射とメイン噴射を別の噴射弁から噴射した場合 (FFR)，黒煙濃度が半分程度に低下した。また、メイン噴射に分割噴射を採用したところ、図 2 に示すようにメイン噴射を二等分割した場合には黒煙低減効果は得られなかったものの、噴射間隔をゼロ以上とし、分割噴射の後段の噴射量を減らす (after-inj.) と黒煙濃度を抑

えられることや、噴射期間を重複させる ($\Delta\theta_{34} = -1^\circ\text{CA}$) と黒煙濃度が急増することを明らかにした。

本研究では、これらの理由を明らかにするため、二系統の噴射システムを搭載した可視化機関を用いて噴霧および火炎の発達状況を調査した。可視化機関は既報⁽⁹⁾で用いたメタル機関と同じ機関諸元 (ボア・ストローク) を持つボトムビュー型の可視化機関を用い、噴射パターンの変更 (FFF と FFR) とメ

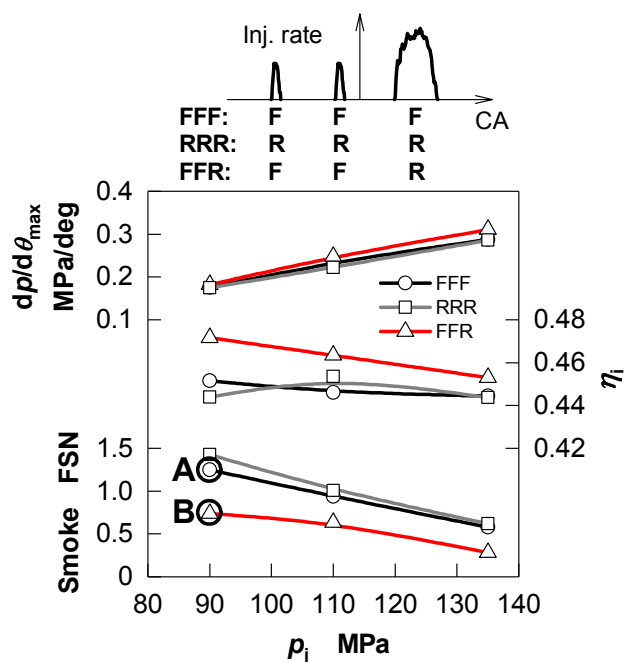


Fig.1 Effect of injection pattern on engine performance and emissions (1st pilot injection: -10.0° ATDC, $1.9 \text{ mm}^3/\text{cycle}$, 2nd pilot injection: -2.75° ATDC, $1.6 \text{ mm}^3/\text{cycle}$, main injection: 4.0° ATDC, IMEP_g: 390 kPa, injection pressure: 90 MPa, intake and exhaust pressure: 102 kPa(a), NOx emission: 54 ppm) (Redrawn based on reference [7])

1)・2)・3)・4)・5) 京都大学(606-8501 京都市左京区吉田本町)

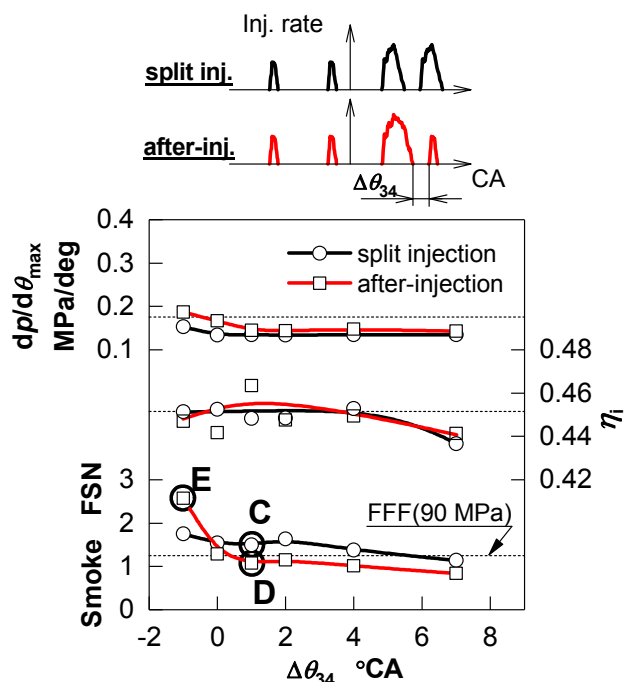


Fig.2 Effect of split-injection dwell and split ratio of injection quantity on engine performance and emissions (1st pilot injection: -10.0° ATDC, 1.9 mm³/cycle, 2nd pilot injection: -2.75° ATDC, 1.6 mm³/cycle, 1st main injection: 4.0° ATDC, 6.8 mm³/cycle, IMEP_g: 390 kPa, injection pressure: 90 MPa, intake and exhaust pressure: 102 kPa (a), NO_x emission: 54 ppm) (Redrawn based on reference [7])

イン噴射の分割条件の変更を行い、直接撮影により噴霧および輝炎を観察した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図3に示す。試験機関にはボア 85 mm の可視化機関を用いた。機関の主要諸元を表1に示す。噴射系および吸排気系（カムプロファイル、ポート形状、バルブ数）はメタル機関⁽⁹⁾と等しい仕様とした。筒内の可視化のために、燃焼室の底側からくぼみ内全域を撮影できるよう、サファイアガラス製のくぼみ底面を持つBowditch型ピストンを用いた。くぼみ容積はメタル機関と等しくした。伸長ピストンを用いるので、安全のために上死点隙間を 0.7 mm から 0.9 mm に広げた結果、圧縮比は 15.4 となり、メタル機関の圧縮比 16.3 より低い。燃料噴射装置は独立した二系統のコモンレール噴射装置を用いた。二噴射弁の噴射中心の距離は 13.5 mm である。噴射弁は二本とも同じ仕様とし、ピエゾ駆動式の噴孔径 0.115 mm の 8 噴孔を用いた。吸気系統に備えた過給機および電気ヒータを用いて吸気温度・圧力を調整した。また、窒素を供給することで吸気中の酸素濃度を低下させて EGR を模擬した。

噴霧を撮影するためにメタルハライドランプを照明として用い、高速度カラーカメラ（フォトロン FASTCAM SA-X2）で筒内を撮影した。露光時間 40 μs とし、コマ間を 0.5° CA とし

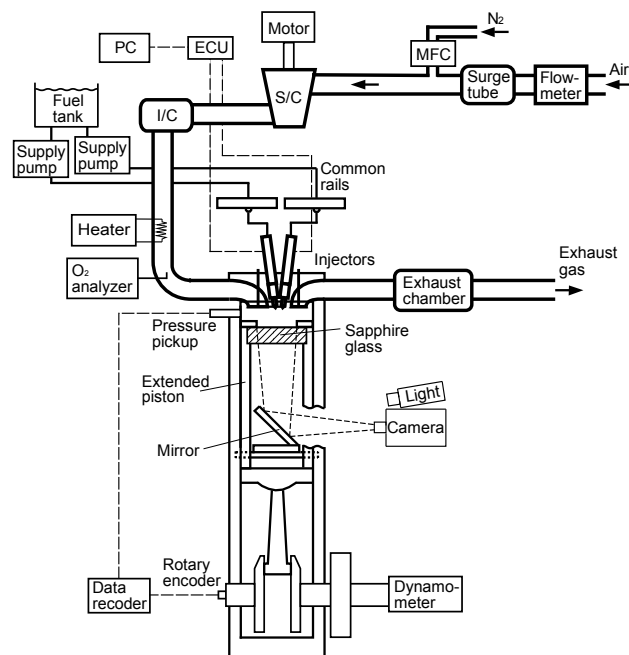


Fig.3 Experimental setup

Table 1 Standard specifications of optical engine

Engine type	Direct-injection diesel engine, Single-cylinder, Water-cooled
Bore × Stroke [mm]	85.0 × 96.9
Displacement [cm ³]	550
Compression ratio	15.4
Piston	Bottom-view Bowditch type (Cavity diameter: 51.8 mm)
Injection system	Dual injector system (DIS), Common-rail systems with a piezo injector (Max. pressure: 220 MPa) φ0.115 mm × 8 holes nozzle (Spray-cone angle: 156°)
Aspiration	External supercharging

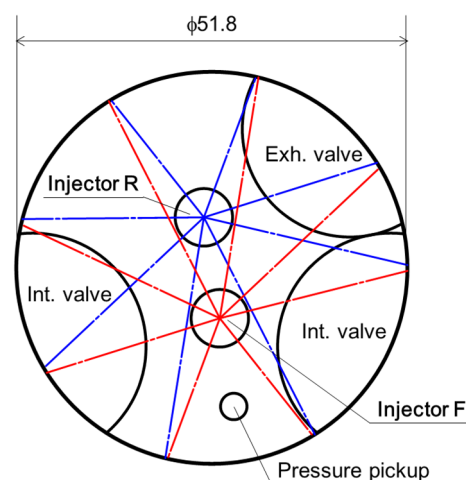


Fig.4 Field of view through optical window

Table 2 Injection and intake conditions

Case	Injection	1 st pilot injection		2 nd pilot injection		1 st main injection		2 nd main injection		Intake pressure [kPa (a)]	Intake temp. [°C]	Intake O ₂ [%]
		[°ATDC]	[mm ³ /cycle]	[°ATDC]	[mm ³ /cycle]	[°ATDC]	[mm ³ /cycle]	[°ATDC]	[mm ³ /cycle]			
A	FFF	-10.0	1.9	-2.75	1.6	4.0	9.4	—	—	121	52.7	16.3
B	FFR	-10.0	1.9	-2.75	1.6	4.0	8.6	—	—	121	52.2	16.2
C	FFRF	-10.0	1.9	-2.75	1.6	4.0	4.6	8.0	4.8	119	64.8	16.4
D	FFRF	-10.0	1.9	-2.75	1.6	4.0	6.8	8.5	2.6	119	63.1	16.4
E	FFRF	-10.0	1.9	-2.75	1.6	4.0	6.8	6.5	2.6	119	62.2	16.0

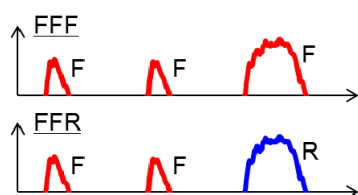


Fig.5 Injection patterns of FFF and FFR

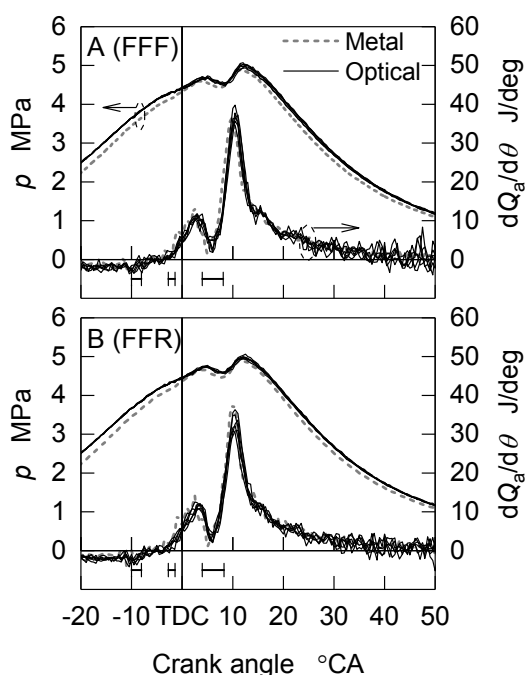


Fig.6 Comparisons of in-cylinder pressures and apparent heat release rates of optical engine and metal engine

た．視野の概略を図 4 に示す．便宜上，図中下側の噴射弁を F，上側の噴射弁を R と呼ぶ．

機関回転速度は 1,500 rpm とし，噴射条件および吸気酸素濃度はメタル機関の実験条件と等しくした．すなわち，二段パイロット噴射とメイン噴射を組み合わせた噴射パターンを元として，噴射圧力はすべて 90 MPa に固定した上で，パイロット噴射とメイン噴射の噴射弁の使い分けとメイン噴射を分割した際の噴射間隔を変更した．可視化の対象とした条件について，図 1 と図 2 の黒煙濃度のプロットを丸印で示し，表 2 に

噴射条件および吸気条件の一覧を示す．メタル機関と比較して圧縮比が低いことや，ピストンのくぼみ形状や材質が異なるため，吸気圧力・温度を高めて既報の熱発生率を再現した．連続する 7 サイクルに噴射を行い，2 サイクル目以降の 6 サイクルの筒内圧力および筒内撮影画像を解析した．

3. 実験結果および考察

3.1. 噴射弁の使い分け

はじめに，二段パイロット噴射とメイン噴射を用いた三段噴射において，パイロット噴射とメイン噴射の噴射弁を使い分けた際の燃焼過程を調査した．試験条件は表 2 の条件 A，B である．すなわち，図 5 に示す通り，噴射弁 F のみを用いる条件 A と，パイロット噴射には噴射弁 F を用い，メイン噴射には噴射弁 R を用いる条件 B で試験を行った．図 6 にメタル機関と可視化機関の筒内圧力 p および見かけの熱発生率 $dQ_a/d\theta$ を示す．ここでは比熱比 1.4 一定として熱発生率を算出した．メタル機関は 50 サイクル平均の結果，可視化機関はデータを取得した 6 サイクルすべての結果を示す．可視化機関はメタル機関に比べて圧縮比が低いが，吸気圧力および温度を高めることでメタル機関の熱発生率を概ね再現することができた．また，サイクル間の大きな変動はなかった．

このうち，代表的なサイクルの筒内撮影画像を図 7 に示す．スワールはいずれも反時計回りである．メイン噴射開始時期の画像 (4.2° CA) によると，FFF と FFR のどちらにおいても，パイロット噴霧からの輝炎は画面下方には少ない (図中 a, b)．その後，パイロット噴霧から生じた輝炎の領域にメイン噴霧が進入し，6.7° CA 付近で輝炎を発生し始める (図中 c, d)．11.7° CA において，FFF では噴射弁 F から壁面が遠い画面上側において明るい輝炎が見える．一方，FFR は FFF と比べると，画面下側の輝炎が多い．すなわち，DIS では壁面までの距離が遠い噴霧が過濃混合気を生成しやすいと考えられる．これは，噴霧が壁に衝突することによる混合促進作用が弱いためと思われる．図 8 に示すように，メタル機関においてシリンドラ中心軸上に噴射弁 ($\phi 0.123 \times 7$ 孔) を搭載する通常の燃焼系と比較して DIS の黒煙濃度が高いのは，この理由によるものと考えられる．また，DIS では中心噴射に比べて小さい噴孔径を採用したため，噴霧が壁に衝突する際の噴霧運動量が小さいこともその要因であろう．

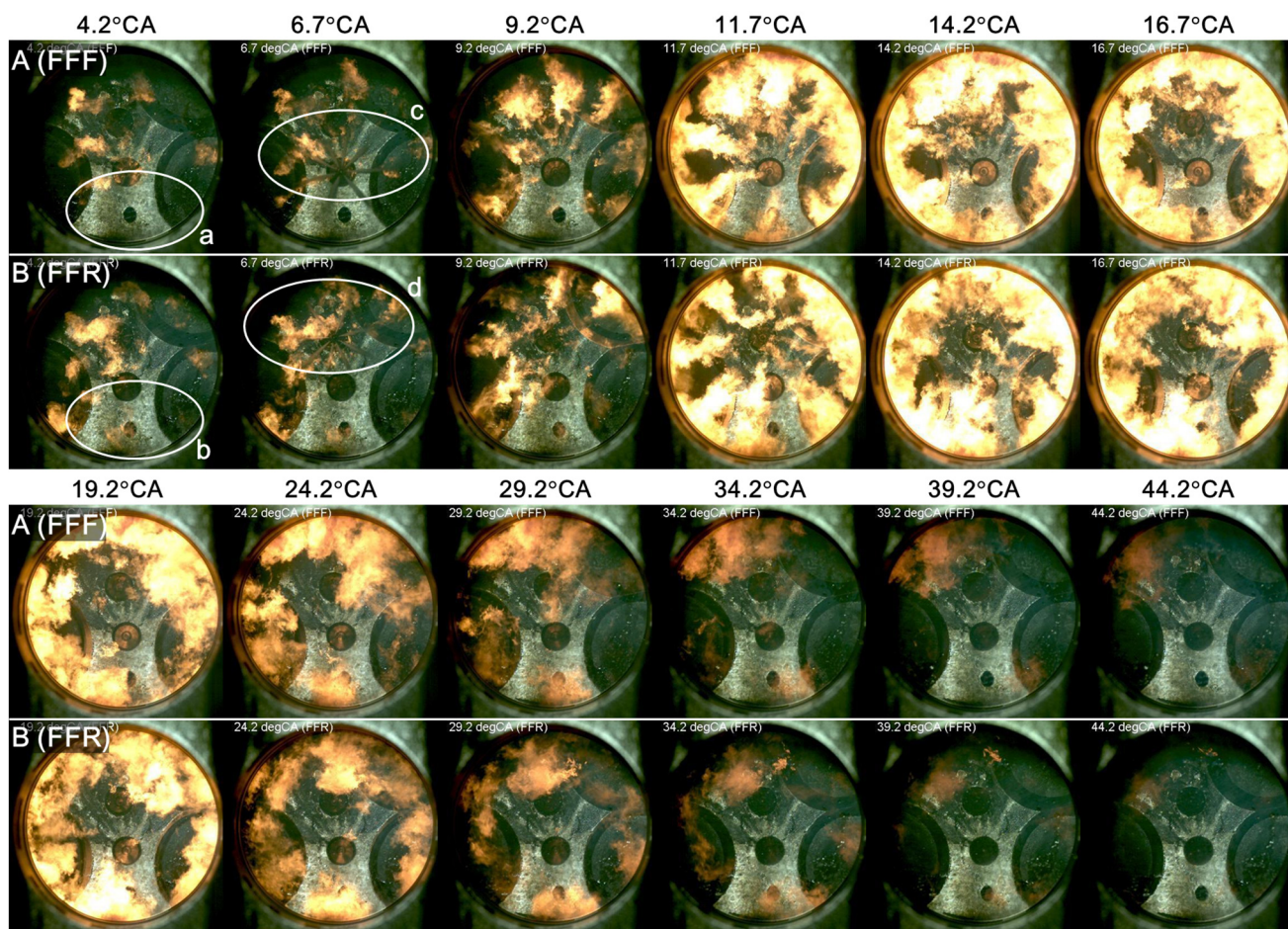


Fig.7 Comparison of combustion processes of cases A and B

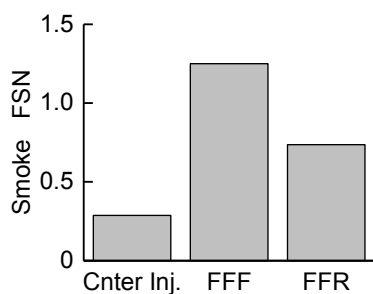


Fig.8 Comparison of smoke emission of center injection, FFF, and FFR of a metal engine (1st pilot injection: -10.0° ATDC, 1.9 mm³/cycle, 2nd pilot injection: -2.75° ATDC, 1.6 mm³/cycle, main injection: 4.0° ATDC, 6.8 mm³/cycle, IMEP_g: 390 kPa, injection pressure: 90 MPa, intake and exhaust pressure: 102 kPa (a), NOx emission: 54 ppm)

FFRの黒煙濃度がFFFより低いのは、パイロット噴霧による過濃混合気が少ない画面下方へのメイン噴霧の配置が多いためと考えられるが、原因を明確にするためにはさらなる研究が必要である。

3.2. メイン分割噴射

次に、メイン噴射の分割の影響を調査した。条件は表2の条件C, D, Fとした。図9に示す通り、いずれも噴射弁Fか

らパイロット噴射を行い、メインとなる分割噴射はR・Fの順に噴射した。条件Cは分割噴射の噴射間隔を1°CAとし、噴射量を等分割した。条件Dは噴射間隔1°CAで分割噴射後段の噴射量割合が小さい。条件Eでは条件Dに対して噴射間隔を-1°CAとして噴射期間をオーバーラップさせた。

まず、噴射量割合による性能・排気への影響について考察するため、条件CおよびDの可視化結果を比較する。可視化機関で得られた熱発生率および撮影画像を図10に示す。条件C・Dともに一段目メイン噴霧はパイロット噴霧火炎中に噴射され、すぐに輝炎が発生する(f, g)。さらに、一段目のメイン噴霧の燃焼ガス中に二段目メイン噴霧が噴射される(9.2°CA)。ただし、二段目メイン噴射量の割合を減らした条件Dは二段目噴霧の貫徹力が小さく、二段目噴霧は燃焼室の中心付近の一段目噴霧輝炎の少ない領域で燃焼する。そのため、二段目メイン噴霧由来のすすが少なくなり、黒煙濃度が下がったと考えられる。

次に、噴射期間を重複させたときの黒煙濃度の増加の原因を考察するために、条件Eの画像を図11に示す。一段目メイン噴射終了前に二段目メイン噴射が始まり、燃焼室中心付近で噴霧同士が干渉する様子が確認できる(h, 7.2°CA)。これによ

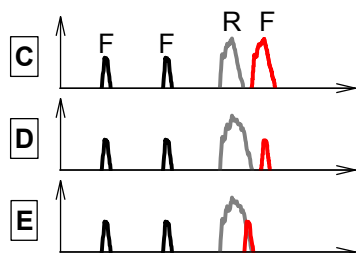


Fig.9 Injection patterns of cases C, D, and E

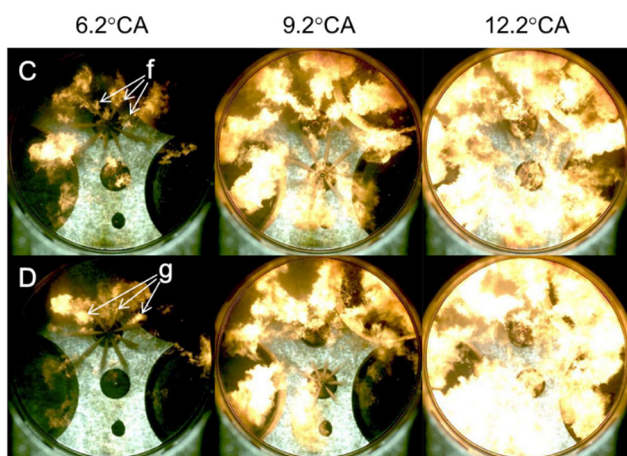
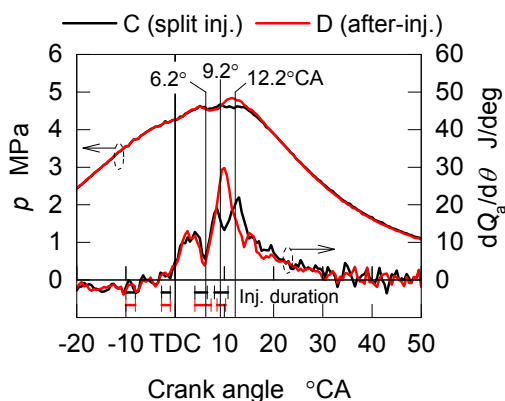


Fig.10 Comparison of combustion process between case C and D (upper: apparent heat release rate, lower: combustion image)

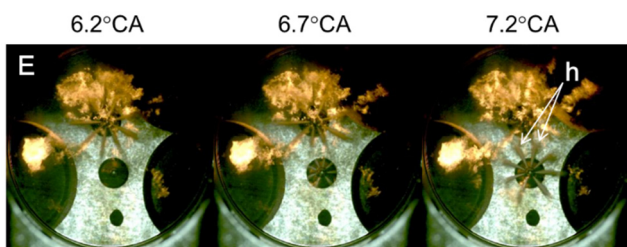


Fig.11 Serial images of spray-spray impingement of case E

り、空気導入が阻害された結果、過濃な混合気量が増加してメタル機関では黒煙濃度が急増したと考えられる。

4. まとめ

二系統の噴射システムを搭載したディーゼル機関における噴霧および火炎の発達状況を明らかにするため、可視化機関を用いて筒内を観察し、以下の知見を得た。

1. 噴孔と壁の距離が遠い噴霧の輝炎が多い。これは、噴霧が壁に衝突することによる混合促進作用が弱いためと思われる。
2. メイン噴射に噴射間隔 1° CA の分割噴射を用いた場合、二段目メイン噴射の割合を減らすと、二段目メイン噴霧は燃焼室中心付近の比較的輝炎の少ない領域で燃焼する。二段目メイン噴霧由来のすすが少なくなり黒煙濃度が下がったと考えられる。
3. メイン分割噴射の噴射間隔を -1° CA とすると、一段目と二段目のメイン噴霧が衝突し、輝炎が長く残る。黒煙濃度が急増した理由は噴霧同士の衝突により空気導入が阻害されたためと考えられる。

最後に、高速度カメラを提供して頂いた株式会社フォトロンに深謝する。また、実験に協力頂いた本学研究員古川正善氏に感謝する。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。ここに感謝の意を表す。

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) 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)
- (6) 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)
- (7) 堀部直人: 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, 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 2, p. 219-223 (2017)