

Analysis of Diesel Combustion using Multi-Stage Injection
in a Single-Cylinder Optical Engine

学 ○江越 賢太 (京大院) 学 田口 智喜 (京大院)

正 堀部 直人 (京大) 正 川那辺 洋 (京大) 正 石山 拓二 (京大)

Kenta EGOSHI, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Tomoki TAGUCHI, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Naoto HORIBE, Kyoto University

Hiroshi KAWANABE, Kyoto University

Takuji ISHIYAMA, Kyoto University

To improve the combustion method with combination of PCCI and conventional diesel combustion, mixture formation by early injection was investigated using an optically accessible single-cylinder diesel engine. Effects of injection pressure, injection timing, injection quantity, split injection, and the dwell between injections were investigated. Penetration of diesel spray was measured by high-speed photographs. Mixture distribution at TDC was observed by LIF imaging. When applying high injection pressure and split injection, relatively rich mixture spreads in wider areas of the combustion chamber.

1 はじめに

ディーゼル機関の排ガス浄化と熱効率向上が強く望まれている。近年、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⁾。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ので、中・高負荷では、従来ディーゼル燃焼を組み合わせたことが提案されている^(2,3)。例えば、橋詰ら⁽³⁾は一段目燃焼をPCCI燃焼、二段目燃焼を混合律速燃焼主体とし、各々の燃焼を独立に制御する燃焼法(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。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数多くあるが、熱効率の低下を伴う場合が多い。

そこで、本研究では、冷却損失低減をねらい、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(図1(b))を減らし、残りの燃料を早期燃料噴射(図1(a))によるPCCI燃焼に充てる燃焼法に注目した。PCCI燃焼と噴霧燃焼を同期させ、燃焼期間を短縮し等容度を向上させる。また、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、メイン噴射へ新気を供給できるようにする。

この燃焼法実現のためには、前述の様な希薄混合気の分布を得る早期噴射の条件を見出す必要がある。そこで、早期燃料噴射の噴射圧力、噴射時期、噴射量、噴射分割条件の選択方針を明らかにすることを目的とし、単気筒可視化期間において、直接撮影により噴霧到達距離を計測し、LIF法により混合気の分布を可視化した。

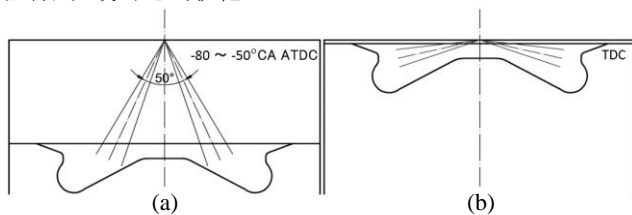


Fig. 1. Spray layout

(a): Early injection for PCCI combustion

(b): Main injection for diesel combustion

2 実験装置および方法

2.1 直接撮影による噴霧先端到達距離の計測

実験装置の概略を図2に示す。筒内の可視化のために、燃焼室底側からくぼみ内全域を撮影できるように、サファイアガラス製のくぼみ底面を持つDeep dish型ピストンを用いた。この試験機関はサブ、メインの二つの噴射弁を備えているが、今回は、早期燃料噴射に着目し、中央のメイン噴射弁のみ使用した。使用した噴射弁は、ピエゾ駆動式の噴孔径0.104 mmの5噴孔、噴射角50°である。吸気系統に備えた過給機および電気ヒーターを用いて吸気圧力・温度をそれぞれ、180 kPa(a)、50°Cに調整した。非燃焼で噴霧を撮影するため吸気は窒素のみとした。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-Z)で噴霧を撮影した。露光時間を約38 μsとし、コマ間を0.5°Cとした。

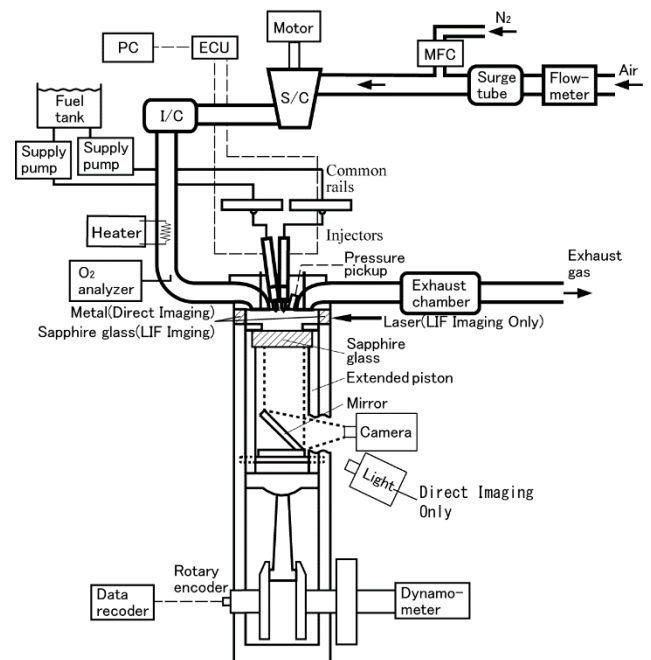


Fig. 2. Experimental setup

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(Direct), 14.6(LIF)
Piston	Bottom-view Deep dish type (Cavity diameter. 51.8 mm)
Injection System	Common-rail systems with a piezo Injector (Max.pressure:220 MPa) φ0.104 mm × 5 holes nozzle (Included angle: 50°)
Aspiration	External supercharging

Table 2. Injection conditions

case	Injection start timing	Injection quantity	Injection pressure
	[°CA ATDC]	[mm ³ /cycle]	[MPa]
A	-60.0	7.5	150
B	-60.0	7.5	90
C	-60.0	7.5	200
D	-50.0	7.5	150
E	-70.0	7.5	150
F	-60.0	5.0	150
G	-60.0	10.0	150
H	-60.0	15.0	150
I	-70.0/-60.0	5.0/5.0	150
J	-80.0/-60.0	5.0/5.0	150

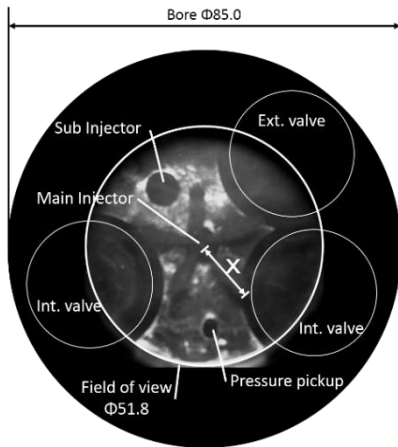


Fig. 3. Optical image and “x” length

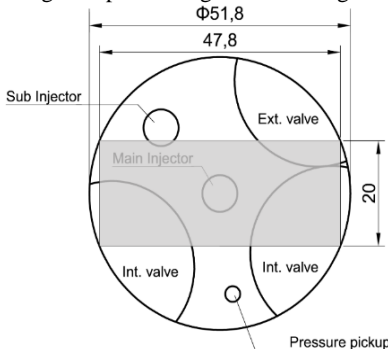


Fig. 4. Field of view through LIF (gray area)

視野の概略を図3に示す。

機関回転速度は2000 rpmとした。噴射条件は表2に示す。条件Aを基準とし、噴射圧力、噴射時期、噴射量を変更した。連続したサイクルで撮影を行うと、前のサイクルにピストンくぼみ底面に付着した燃料が残留していたため、残留燃料が見られなくなるように150サイクル毎に1サイクル燃料噴射することとした。燃料噴射は合計3サイクル行った。燃料にはJIS2号軽油を用いた。

噴霧先端到達距離は、図3の右下の噴霧に対して、動画のコマごとにノズル位置と噴霧先端の距離 x より求める。動画はピストン下より撮影されているため、噴霧を円錐の底面に半球がついた形状と仮定したとき、 x は円錐底面の半球の表面上の最もシリンダーライナに近い位置とノズルとの距離となる。そこで、式(1)を用いて噴霧先端到達距離 S を求めた。

$$S = \frac{\tan(\alpha/2) + 1}{\sin(25^\circ) + \tan(\alpha/2)} x \quad (1)$$

α は噴霧角であり本研究では、 20° として計算した。

噴霧先端到達距離の計測は、5本の噴霧がすべてくぼみ底面に衝突するコマの1コマ手前まで行った。

2.2 LIF法による混合気の観察

実験装置は前節と同じものを用いた。ただし、筒内にレーザを導入するため、シリンダーライナ上部をサファイアガラス、ピストンクラウンの一部を石英ガラスとしたものに変更した。視野は、レーザが通る図4のグレーの領域である。レーザは、ヘッド下面から約4 mm下に幅20 mm、厚さ1 mmで、図4の右側より導入した。噴射弁、吸気条件は前節と同様とした。Nd:YAGレーザの4倍波(波長:266 nm)を用い、燃料中に含まれる芳香族炭化水素を励起し、その蛍光をICCDカメラ(Andor i-Star DH334T)によって捉えた。励起に用いる波長266 nmの光をカットするため、波長270から420 nmの光のみを透過するバンドパスフィルタを用いた。露光時間を40 μ sとし、TDCにて撮影した。

機関回転速度、噴射条件、使用燃料、燃料を噴射するサイクルの間隔は前節と同様とした。燃料噴射は合計5サイクル撮影し、始めのサイクルは除外して2サイクル目以降の4サイクル分の画像を撮影した。

LIF法にて撮影した画像に対しては、(1)背景除去、(2)レーザパルス毎のエネルギーばらつき補正、(3)レーザシートパターンの補正、(4)混合気によるレーザ減衰の補正を施した。(3)、(4)の処理については、別途、均一な混合気におけるLIF画像が必要であるが、 -180° CA ATDCにて燃料を150 MPaで7.5 mm³噴射しTDCで撮影した画像を用いた。本研究では、相対的な濃度を知ることを目的としているため、前述の均一な混合気の濃度を1として、輝度から相対的な濃度 γ を求めた。LIF法にて撮影した4サイクルの平均画像をその実験条件の代表画像とした。

3 実験結果と考察

3.1 噴射圧力の影響(条件:A, B, C)

早期燃料噴射の噴射圧力を変えた際の、噴霧先端到達距離、および混合気の分布について調査した。図5(a)に噴霧先端到達距離 S 、図5(b)に各条件における代表画像を示す。図5(a)

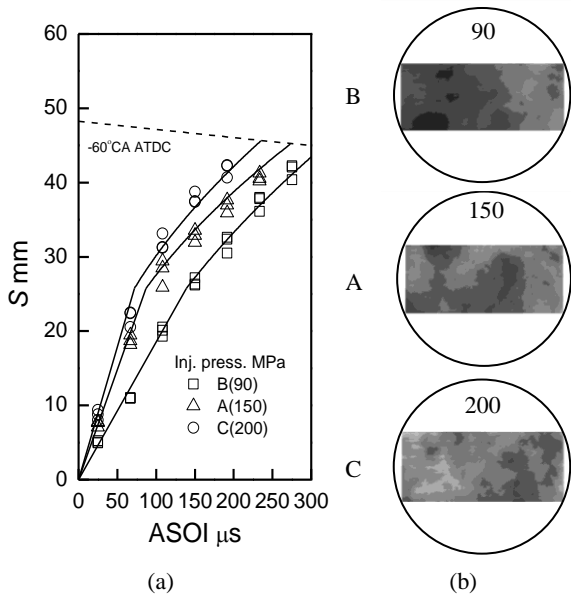


Fig. 5. Effects of injection pressure on liquid penetration (a) and fuel distribution at TDC (b).

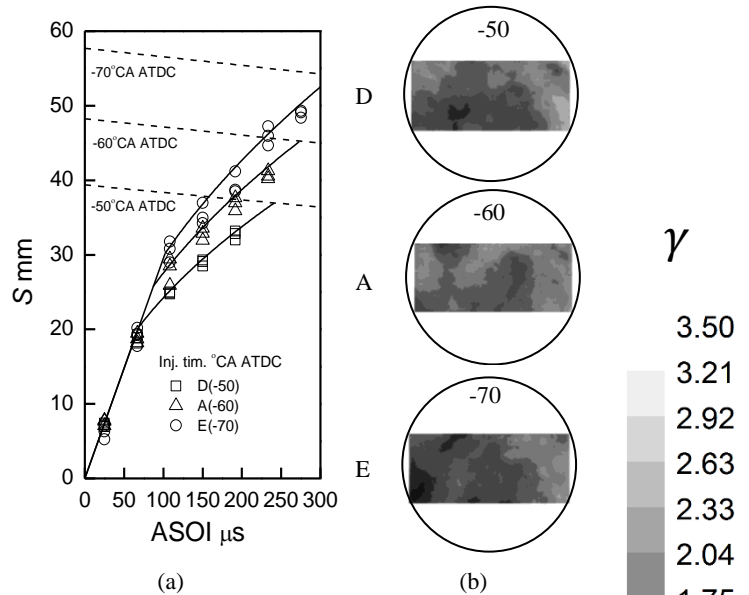


Fig. 6. Effects of injection timing on liquid penetration (a) and fuel distribution at TDC (b).

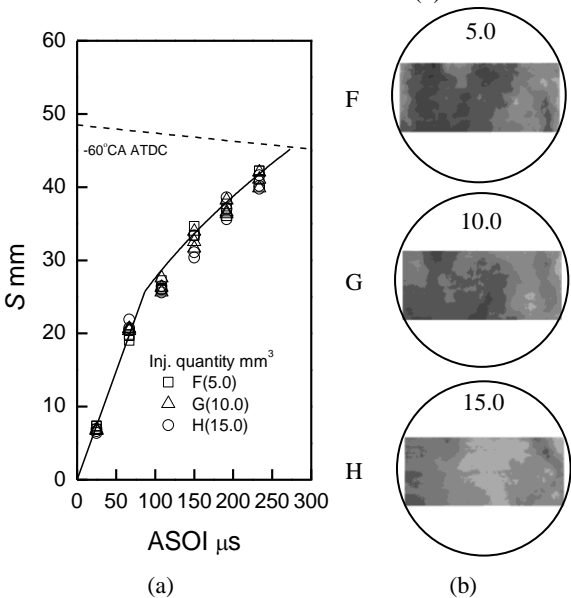


Fig. 7. Effects of injection quantity on liquid penetration (a) and fuel distribution at TDC (b).

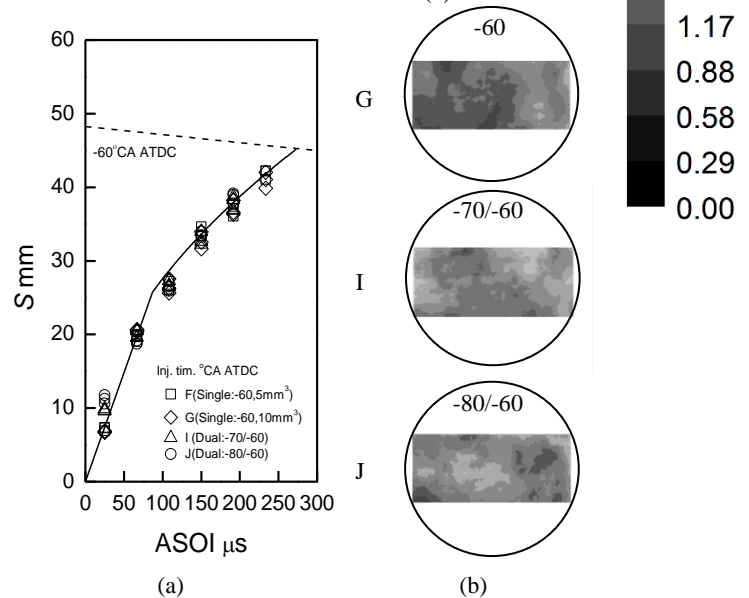


Fig. 8. Effects of multi-stage injection on liquid penetration (a) and fuel distribution at TDC (b).

鎖線は、噴射軸上でのノズル位置とピストンのくぼみ底面との距離を示す。破線の下のカラック角は、対応する噴射時期を示す。代表画像の周囲の丸は視野の外枠を表す。

噴霧先端到達距離は、噴射初期には時間に比例し、その後、時間の1/2乗に比例することが知られている⁽⁴⁾。図5(a)に示すとおり、この傾向が見られる。噴射圧力を高くしていくと、分裂時間(時間の1乗依存の期間)が短くなっていくことが分かる。これは、微粒化が促進されたためと考えられる。図5(b)を見ると、噴射圧力を高くしていくと、混合気がより広範囲に広がっていることが分かる。これらのことから、噴射圧力を高くすると、燃料蒸発をより進めることができ、壁面に付着する燃料割合を減らすことができると推定される。また、貫徹力が高くなることで、より広範囲に混合気が拡散するようになると思われる。

3・2 噴射時期の影響(条件: A, D, E)

噴射時期を変えた際の、噴霧先端到達距離、および混合気

の分布について調査した。図6(a)に噴霧先端到達距離 S 、図6(b)に各条件における代表画像を示す。

図6(a)に示すとおり、前節と同様、噴霧は最初、時間に比例して進み、その後、時間の1/2乗に比例して進む。分裂時間内では噴霧先端到達距離に差は見られなかった。これは、噴霧速度は、噴射圧力に依存すると考えられるためである。分裂後、噴射時期を早くするにつれ、噴霧先端到達距離は長くなる。これは、早期に噴射した場合、雰囲気密度が低いことによるためと考えられる。

次に、図6(b)の条件DとAを比べると、Dに比べAの方が、より広範囲に混合気が広がっている。これは、Aの方が早期に噴射しているため、混合時間が長いことによる。また、Dでは、くぼみ外周部に混合気が存在し、混合時間が長いAでは、くぼみ外周部から、より内側方向に混合気が広がっていることが分かる。これは、条件D、Aともに噴霧がくぼみ底面に衝突し、くぼみの外周方向、くぼみ側面の順に進む

ことで、くぼみ外周部から混合気が拡がっているためと考えられる。

しかし、最も早期に噴射した条件 E を見ると、混合時間が条件 A よりもさらに長いにもかかわらず、混合気の濃度は全体的に低くなっている。この条件では、噴霧がくぼみ底面隅に衝突している。そのため、噴霧がその場で滞留してしまい、混合気が拡がらなかったと考えられる。

3・3 噴射量の影響(条件：F, G, H)

噴射時期を変えた際の、噴霧先端到達距離、および混合気の分布について調査した。図 7(a)に噴霧先端到達距離 S 、図 7(b)に各条件における代表画像を示す。

図 7(a)に示される通り、噴霧先端到達距離に違いは見られなかった。これは、すべての条件において、噴射が継続している最中に計測を行ったためと考えられる。

次に、図 7(b)を見ると、噴射量を多くしていくと、混合気がより広範囲に拡がっていることが分かる。これは、燃料の総噴射量が多いためと考えられる。また、総噴射量が多いことで、噴射期間が長期化し、噴霧の貫徹力が維持され続けることも混合気がより広範囲に拡がる要因の 1 つと考えられる。

3・4 噴射多段化の影響(条件：F, G, I, J)

総噴射量を確保しつつ、噴射が壁面に継続して当たり、燃料が付着することを抑えるために、噴射を多段化し、1 回の噴射あたりの燃料量を減らし、噴射期間を短くすることによる、形成される混合気への影響を調査した。

噴射を分割し、噴射間隔を変えた際の、噴霧先端到達距離、および混合気の分布について調査した。図 8(a)に噴霧先端到達距離 S 、図 8(b)に各条件における代表画像を示す。

図 8(a)では、多段噴射の条件 I, J における 2 段目噴霧の到達距離と、単段噴射で等しい燃料量、噴射開始時期、噴射圧力で噴射した条件 F、噴射圧力と総燃料量が等しい単段噴射の条件 G の噴霧到達距離を比較した。図 8(b)では、噴射圧力と総噴射量が等しい単段噴射の条件 G と多段噴射の条件 I, J とで比較した。

図 8(a)を見ると、噴射開始後、約 250 μs のときに噴霧先端到達距離の計測を行うことができたのは単段噴射である条件 F と G のみであった。多段噴射の場合においては、この時点でくぼみ底面への噴霧の衝突を確認していた。これはつまり、多段噴射においては、噴射開始後、約 250 μs あたりで噴霧先端速度が単段噴射の場合を上回ったことを示唆している。これは、主に 1 段目の噴射によって、筒内の噴霧の流れる方向に流動が生じるためと考えられる。

図 8(b)を見ると、総噴射量は同じであるが、単段噴射の条件 G より多段噴射の条件の方が、混合気がより広範囲に拡がっている。これは、くぼみ底面に付着する燃料量が多段化により少なくなったためと考えられる。

条件 I と J を比較して、噴射間隔を広くした場合の方が、比較的濃い混合気が筒内中央に存在している。これは、条件 J の 1 段目噴霧がくぼみ側面に衝突し、くぼみ底面方向に拡がり、くぼみ中央で噴霧同士が衝突し巻き上がる一方で、条件 I の 1 段目噴霧がくぼみ底面円周部に当たり、3・2 節で述べた理由により、混合気が拡がらなかったためと考えられる。

4 ま と め

はじめに述べた希薄混合気を燃焼室内で形成するため、噴射圧力、噴射時期、噴射量、噴射段数・間隔を変更して、早期噴射の噴霧先端到達距離と形成される混合気について、可視化機関を用いて調査を行い、以下の知見を得た。

1. 噴射圧力を高くすると、比較的濃い混合気がより広範囲に拡がる。
2. 噴射時期を変えたとき、噴霧がくぼみ底面に当たる場合は、混合時間が長くなるにつれ混合気は拡がる。
3. 噴射時期を変え、くぼみ底面隅に噴霧が当たると、くぼみ底面に当たる場合と比べて混合時間は長くなるが、それに対して混合気は拡がらない。
4. 噴射を多段化すると、単段噴射の場合と比べて、多段噴射の 2 段目の噴霧先端到達距離は長くなる。
5. 燃料噴射量を等しくした時、単段噴射の場合と多段噴射の場合とで比較すると、多段噴射の場合の方が、混合気がより広範囲に拡散する。

本研究では、2 次元的にのみ混合気を観察したが、今後は、より詳細に混合気の分布を調査するため、レーザ導入位置を変更しながら画像撮影を行い、3 次元的に混合気の分布を把握する必要がある。

最後に、実験に協力いただいた本学研究員古川正善氏、学部生岸上稜氏両名に感謝する。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) 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
- (2) Hasegawa, R., et al., SAE paper No. 2003-01-0745, (2003)
- (3) 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
- (4) 広安博之ほか 1 名, 自動車技術会論文集, 21 巻, (1980), pp. 5-11