

Effects of injection condition and combustion chamber shape on performance and exhaust emissions of supercharged natural-gas/diesel dual-fuel engine

学 ○佐藤 優人 (京大院) 田中 秀岳 (京大院) 正 堀部 直人 (京大)
 正 石山 拓二 (京大) 正 佐古 孝弘 (大阪ガス)
 Masahito SATO, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto
 Hidetake TANAKA, Naoto HORIBE, Takuji ISHIYAMA, Kyoto University
 Takahiro SAKO, Osaka gas Co. Ltd.

This study aims to obtain a strategy for optimizing the combination of diesel-fuel injection conditions and combustion chamber geometry to achieve high thermal efficiency with low exhaust emissions in a natural-gas/diesel dual fuel engine. Experiments were performed using a single-cylinder test engine with a common-rail injection system varying injection timings of two-stage pilot injection and piston bowl diameter. The pilot spray development was calculated using CFD simulation to understand the mechanism of experimental results. The experimental results showed that a smaller bowl diameter reduces THC and NOx emissions under a condition of high equivalence ratio, and the CFD results showed that the smaller bowl diameter provides a richer mixture of 1st pilot injection and a leaner mixture of 2nd pilot injection than a larger bowl diameter.

1 はじめに

天然ガスを主燃料とし、軽油を着火補助（パイロット）燃料とする天然ガスデュアルフュエル機関は、定置式発電機関や船用機関として実用化されており、今後さらなる熱効率の向上が求められている。熱効率向上の一つの手法として混合気の希薄化による比熱比の向上が挙げられるが、希薄化すると燃焼効率が低下し、熱効率が低下する問題がある。これに対して、希薄条件下においても二段パイロット噴射を用いて、早期の一段目パイロット噴霧により軽油蒸気を天然ガス予混合気内に分布させ、二段目噴霧により着火を制御することで、単段噴射を用いる場合に比べて NOx および未燃物質を同時に低減し、熱効率を改善できることが明らかにされている⁽¹⁾。また、燃焼室形状を大幅に変更した結果、口径の広い燃焼室において早い二段目噴射時期を用いることで NOx および未燃物質を低く抑えながら、熱効率を高められることが明らかにされた⁽²⁾。二段のパイロット噴霧による軽油蒸気の分布が天然ガス予混合気の燃焼改善に重要と考えられるが、その関係について十分な説明がされているとは言えない。

そこで本研究では、天然ガスデュアルフュエル機関における軽油蒸気の分布と性能・排気特性の関係を明らかにするため、単気筒試験機関においてくぼみ口径の異なる二種類の燃焼室を用い、天然ガス予混合気の当量比および二段パイロット噴射の噴射時期が性能・排気特性に与える影響を調査するとともに、CFD 計算を用いて軽油蒸気分布の観点から考察を加えた。

2 実験装置および方法

2.1 実験条件

実験装置の概略を図 1 に示す。試験機関には水冷単気筒 4 サイクル直接噴射式ディーゼル機関をベースとした天然ガスデュアルフュエル機関を用いた。機関諸元を表 1 に示

す。主燃料には 13A 天然ガスを使用し、吸気ポート上流約 300 mm の吸気管内に設けたノズルから連続的に投入した。着火補助燃料である軽油には JIS 2 号軽油（セタン指数 58）を使用し、コモンレール式噴射装置を用いて噴孔 0.12 mm、噴孔数 6、噴射角 140° のノズルから筒内に直接噴射した。噴射圧力は 80 MPa とした。二段パイロット噴射を採用し、一段目噴射量を 3 mm³/cycle、二段目噴射量を 2 mm³/cycle

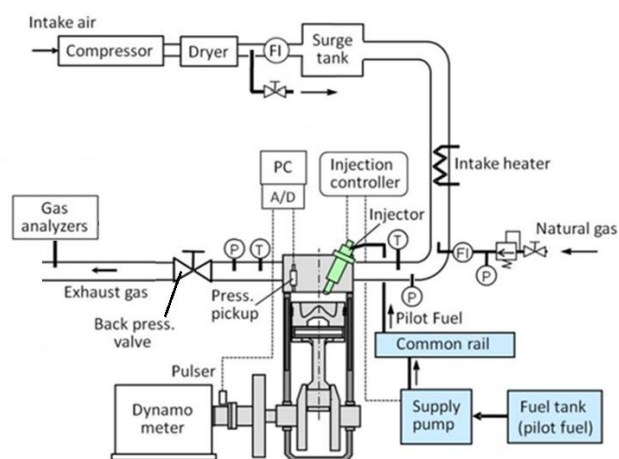


Fig.1 Experimental Setup

Table1 Engine specifications

Engine type	Natural gas/diesel dual-fuel engine, Single-cylinder, Water-cooled
Bore×Stroke	88 mm ×84 mm
Displacement	511 cm ³
Compression ratio	12.5
Combustion chamber	Toroidal type
Intake charging	External supercharging
Pilot-fuel injection system	Common-rail system 0.12 mm×6 holes 140° nozzle

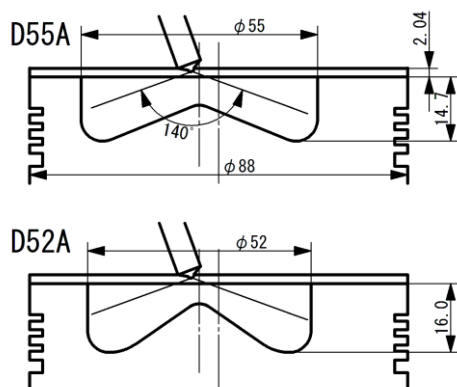


Fig. 2 Combustion chamber and spray direction

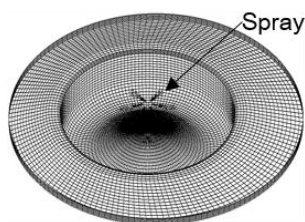


Fig. 3 Grid system of D52A for CFD simulation

に固定した。

燃焼室は図 2 に示すくぼみ口径 55 mm と 52 mm のトロイダル型燃焼室 (D55A と D52A) を採用した。くぼみ容積は等しく、圧縮比は 12.5 一定とした。

運転条件は、機関回転速度を 1200 rpm, オイルパン潤滑油温度を 70°C, 冷却水入口温度を 80°C, 吸気温度を 40°C とした。外部過給を施し、モータリング時の吸気流量が 24.6 Nm³/h となるよう吸気圧力を調整した。これは吸気圧力 0.18 MPa, 充填効率 1.44 に相当する。また、すべての条件において、排気圧力を吸気圧力と等しくした。総括当量比を変更する際は、軽油噴射量は一定とし、天然ガス流量を変化させた。

2.2 計算方法

計算には AVL® FIRE v2013.2 を用い、非燃焼のパイロット噴霧蒸気の分布を計算した。計算メッシュは図 3 に示す

通りで、実機と同じく燃焼室くぼみおよび噴射中心をシリンダ軸から偏心させた。乱流モデルは k-zeta-f モデルを用いた。液相は DDM で記述し、分裂モデルは KH-RT モデル ($C_1 = 0.61$, $C_2 = 12$), 蒸発モデルは Dukowicz モデルを用いた。噴霧拡がり角は 9° とした。これにより、高温高压の定容容器中のパイロット軽油相当の噴射量における自由噴霧の挙動を再現できることを確認した。

3 実験結果および考察

3.1 燃焼室くぼみ口径の影響

くぼみ口径が性能・排気・燃焼特性に及ぼす影響を調べるために、燃焼室 D55A と D52A を用い、まずは軽油噴射条件を固定して天然ガス流量を変化させた。軽油は二段噴射し、一段目噴射時期および量を -35° ATDC, 3 mm³/cycle とし、二段目を -15° ATDC, 2 mm³/cycle とした。

図 4 に総括当量比 ϕ_t に対する THC 濃度, NO_x 濃度, CO 濃度, 燃焼効率 η_c , 図示熱効率 η_i , 図示平均有効圧力 p_{mi} を示す。ここで、総括当量比は天然ガスと軽油をあわせた当量比である。当量比が高い条件では D52A の方が THC と NO_x とともに低く、燃焼効率が高い。一方、当量比を下げていくと D55A に比べて

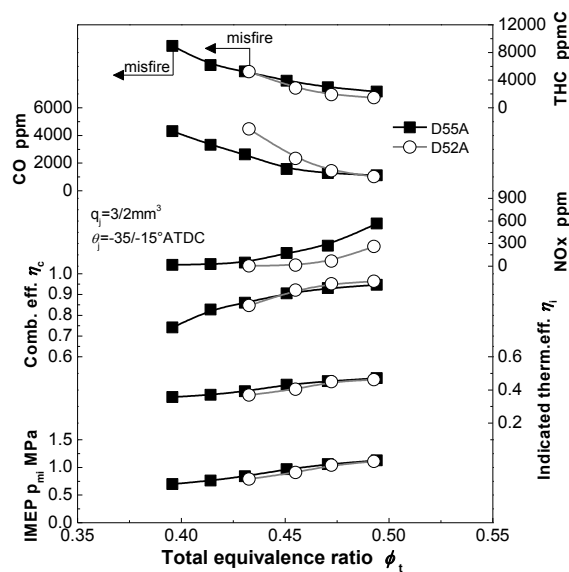


Fig. 4 Effect of combustion chamber shape on performance and exhaust emissions

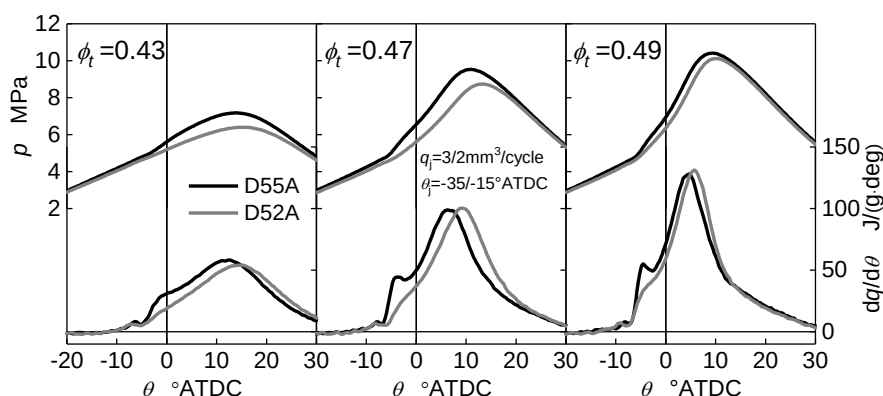


Fig. 5 Effect of combustion chamber shape on in-cylinder pressure and heat release rate

D52AはCOが高くなり、燃焼効率および熱効率が低下する。失火する当量比はD52Aの方が高い。

この要因を考察するため、燃焼解析を行った。熱発生率は50サイクル平均の筒内圧力を元に解析した。総括当量比0.43, 0.47, および0.49の筒内圧力と熱発生率を図5に示す。 $\phi = 0.49$ のD55Aの熱発生率に着目すると、二段目のパイロット噴射後、 -10° ATDCあたりに軽油の低温酸化反応によると思われる小さな熱発生率が見られた後、 -6° ATDCあたりに軽油の自着火を主体とする熱発生率（初期燃焼と呼ぶ）が表れ、それに続いて天然ガスの燃焼が主体と思われる熱発生率（主燃焼と呼ぶ）が見られる。いずれの条件でもこれに似た熱発生率履歴となるが、当量比を低くすると初期燃焼の熱発生率が小さくなり、ピークが見えなくなる。D52AではD55Aに比べて初期燃焼の熱発生率が小さく、当量比の高い条件でも初期燃焼の熱発生率のピークが見られない。それに伴って、主燃焼の位相がD55Aより遅れるが、当量比0.49および0.47では主燃焼の最大熱発生率はD55Aより高い。D52Aの初期燃焼の熱発生率が小さくなったことは二段目パイロット噴霧がD55Aに比べて希薄化したためと考えられる。また、D52Aの主燃焼の熱発生率が高いのは一段目パイロット噴霧が希薄になりすぎずに天然ガス予混合気の燃焼を活発化させたためと考えられる。

そこで、それぞれの燃焼室における軽油蒸気の筒内分布について、CFD計算を用いて検討した。計算では周囲ガスは空気とし、実機の噴射前の筒内圧力と温度の履歴を再現するように初期温度・圧力を与えた。噴射条件は実験と同じ二段噴射条件とした。ここでは質量分率0.01（当量比0.15）以上の混合気を噴霧として扱った。噴霧は初め希薄化に伴って大きくなり、さらに希薄化すると小さく見えることになる。

図6に質量分率0.01の等値面を示す。 -35° ATDCに噴射された一段目パイロット噴霧の大きさは -25° ATDC付近にピストンに到達するまで燃焼室による違いはほとんどない。ピストンに衝突したあと、噴霧が小さくなっていく。 -15° ATDCに噴射した二段目パイロット噴霧が -10° ATDC以降、燃焼室の中央付近に見られる。

-10° ATDCおよび -5° ATDCの図を見ると、D52Aの一段目噴霧がD52Aより大きい。壁衝突後は空気導入が抑制されると考えられるが、D52Aは早く壁に衝突するためD55Aより希薄化が遅くなったと考えられる。二段目噴霧に着目すると、D52Aの方の噴霧が大きい。TDC付近ではくぼみ口径の小さいD52Aのスワール流速が大きくなるので、その影響で空気導入が多くなったと考えられる。これらは、前述の燃焼解析の結果から得られた推論と一致する。すなわち、くぼみ口径を小さくすると、一段目噴霧は希薄化が抑えられて主燃焼を活発にし、二段目噴霧は希薄になるため、初期燃焼の熱発生率が抑えられるとともにNOxの生成が抑制されたと考えられる。

3.2 二段目噴射時期の影響

先の噴射条件では、くぼみ口径を小さくすると、一段目パイロット噴霧が希薄になりすぎず、一方、二段目パイロット噴霧は希薄になることが示唆された。そこで、着火時期の影響について考察するため、一段目噴射時期を -35° ATDCに固

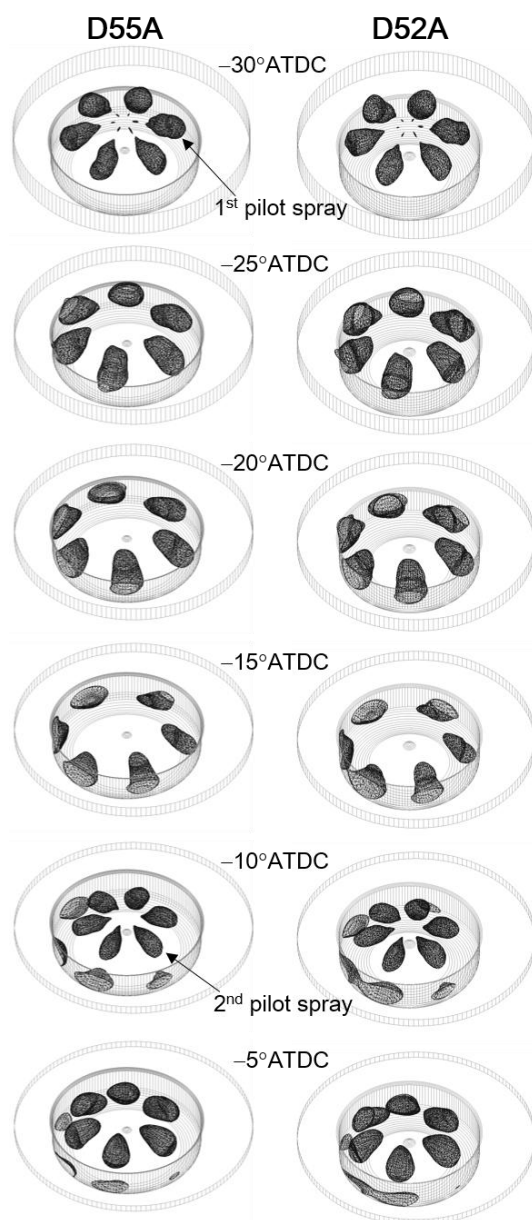


Fig.6 Isosurfaces for a pilot-spray mixture fraction of 0.01

定したまま、着火時期を制御する二段目噴射時期を $-20^\circ \sim -5^\circ$ ATDCとし、天然ガス流量を変化させた。図7と図8に性能・排気および熱発生率を示す。図7によると、 -15° ATDC（図4）とは異なり、失火限界はD52Aの方が低当量比となったが、二段目噴射時期が遅い -5° ATDCと -10° ATDCでは、 -15° ATDCと同様にD52Aの方がTHCとNOxともに低く、燃焼効率が高い。一方、二段目噴射時期を -20° ATDCとするとD52Aの方がTHCとCOが高くなった。図8に示す通り、何れの二段目噴射時期でもD52Aの初期燃焼による熱発生率は小さくなったことから、やはりD52Aの二段目パイロット噴霧はD55Aに比べて希薄化していると考えられる。また、二段目噴射時期 -20° ATDCを除き、D52Aの主燃焼の熱発生率は高く、一段目パイロット噴霧の希薄化が抑えられたと考えられる。一方、二段目噴射時期を -20° ATDCまで早めると、初期燃焼が弱くなり、主燃焼の位相がD55Aに比べて大きく後退したことにより、未燃物質の排出が多くなったと考えられる。

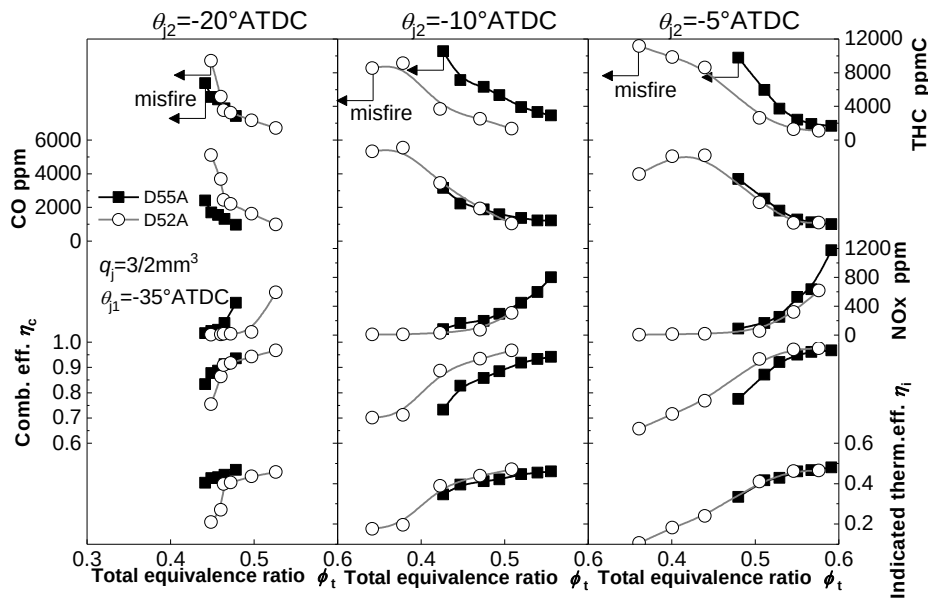


Fig.7 Effect of second injection timing and combustion chamber shape on performance and exhaust emissions

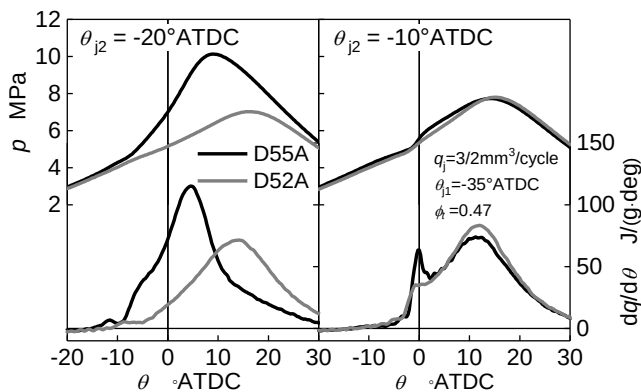


Fig.8 Effect of second injection timing and combustion chamber shape on heat release rate and in-cylinder pressure

3.3 一段目噴射時期の影響

最後に、一段目噴射時期が性能・排気にどのような影響を与えるか調査した。二段目噴射時期を -15° ATDCに固定し、一段目噴射時期を $-40^{\circ} \sim -30^{\circ}$ ATDCとした。当量比を変化させた時の性能・排気を図9に示す。一段目噴射時期を早めると性能・排気とも全体的に高当量比側へシフトしたが、燃焼室の影響について性能・排気の傾向に大きな違いは見られない。すなわち、当量比が高い条件ではD52Aの方がTHCとNOxともに低く、燃焼効率が高い。当量比を下げるとD55Aに比べてD52AはCOおよびTHCが高くなり、燃焼効率および熱効率が低下する。一段目噴射時期を変えても、くぼみ口径による軽油蒸気分布への影響は小さいと考えられる。

4 まとめ

単気筒試験機関において二段パイロット噴射を用いた天然ガスデュアル燃料運転を行い、くぼみ口径と軽油噴射時期を変化させることで以下の知見を得た。

- 燃焼室のくぼみ口径を小さくすると、総括当量比の比較的高いところではTHCとNOxを同時に低減することができる。

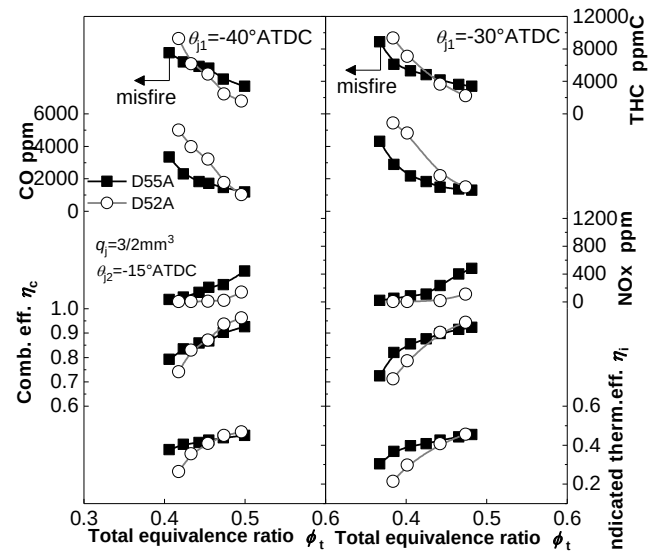


Fig.9 Effect of first injection timing and combustion chamber shape on performance and exhaust emissions

- 上記の傾向は、くぼみ口径を小さくすると初期燃焼が抑えられる一方、主燃焼が活発になるためである。
- CFD 計算によると、くぼみ口径を小さくすると一段目噴霧は壁衝突の影響で希薄化が遅れる。一方、二段目噴霧はくぼみ口径が小さいとスワール流の影響で希薄化する。
- 二段目パイロット噴射時期を早めると初期燃焼が小さくなり、小さいくぼみ口径と組み合わせると主燃焼の時期が遅くなり未燃物質の排出が増加する。
- 一段目パイロット噴射時期を変えても、くぼみ口径および総括当量比に対する性能・排気特性は変わらない。

参考文献

- (1) Ishiyama, T., et al, SAE Int. J. Fuels Lubr. 5(1), p.243, (2012)
- (2) 姜正鎬ほか, JSAE Trans. 43(2), p.473, (2012)