

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820063

研究課題名（和文）非定常噴霧におけるエントレイン波の空気導入促進効果を用いた排ガス低減手法の提案

研究課題名（英文）Suggestion of exhaust emission reduction technique based on the effect of air entrainment acceleration of unsteady spray

研究代表者

堀部 直人（Horibe, Naoto）

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90583881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円

研究成果の概要（和文）：単気筒ディーゼル機関において、非定常噴霧を含む多段噴射の活用により燃料と空気の混合を促進し、高効率・低エミッションとなる噴射条件を提案した。メイン噴射の直後に少量の燃料を噴射するアフター噴射を用いることで、窒素酸化物の排出濃度を保ったままに黒煙濃度を低減し、なおかつ、熱効率を上昇させることができた。また、数値シミュレーションをもちいてエンジン試験の結果を考察した。

研究成果の概要（英文）：A series of experiments was conducted using a single-cylinder diesel engine to investigate the smoke-reduction effect of multiple injection. The experiments were performed under a constant injection quantity condition and under a fixed NOx emission condition. The experimental results were explained using the results of CFD simulation.

研究分野：工学

キーワード：ディーゼルエンジン 非定常噴霧 アフター噴射 エミッション低減

1. 研究開始当初の背景

ディーゼル機関は熱効率が高いが、燃焼に起因して生成される窒素酸化物 (NO_x)、粒子状物質 (PM)、未燃炭化水素 (HC)、一酸化炭素 (CO) などの環境影響物質が大気中に放出されると、光化学スモッグや酸性雨の原因となるので、これらの排出をゼロに近づける必要がある。NO_x と PM の同時低減は、いかに燃料と空気の混合を促進して燃料過濃な混合気を減らしながら低温で燃焼させるかに帰結する。近年では、排気再循環 (EGR) ガスを大量に使うことで吸気中の酸素濃度を大幅に下げ、燃料噴射から着火までの時間を長くし、燃料と空気の混合が十分進んでから燃焼させる低温燃焼 (PCCI, LTC など) の研究が行われている⁽¹⁾。ところが、この燃焼法は NO_x と PM の同時低減は可能であるが、酸素濃度が低すぎるために HC や CO の排出が多いことが欠点である。この HC や CO の排出源は燃焼室壁付近の低温部や燃料噴射終了後に噴射弁近傍で急速に希薄化した混合気と言われており、後者については燃料噴射終了と同時に噴霧への空気の導入が急速に増大する原理 (Entrainment Wave) も明らかになりつつある⁽²⁾。そこで、この原理を従来のディーゼル噴霧燃焼に応用し、燃焼行程中に燃料噴射率を何度も変化させ、噴射率を低下させたときに生じる “Entrainment Wave” を活用すれば、燃料噴射圧力を比較的強く抑えながらも燃料と空気の混合を早めることができ、高効率・低炭素かつ低エミッションで低コストの燃焼技術が可能と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、ディーゼル機関においてメイン噴射の量を少量減少させ、元の出力を出せるようにメイン噴射のあとに定常的な噴射期間を含まない少量の噴射 (アフター噴射) を行うことで、噴射圧力を上昇させることなく熱効率向上とエミッション低減を両立す

ることを目的とした。

また、アフター噴射に用いられる噴射量の少ない非定常な噴霧の挙動の噴霧発達過程を明らかにし、アフター噴射によるエミッション低減効果について説明を加える。

3. 研究の方法

本研究は単気筒ディーゼル機関を用いたエンジン性能試験、数値流体力学 (CFD) を用いたエンジン筒内シミュレーションによる筒内現象の解析、および急速圧縮膨張装置を用いた非定常噴霧の発達計測を行った。

3. 1 エンジン試験

試験で用いた実験装置の概略を図1に示す。試験機関にはコモンレール噴射システムを搭載した水冷単気筒4サイクルディーゼル機関を使用した。表1に試験機関の諸元を、試験条件を表2に示す。機関回転速度を 1500 rpm とし、冷却水入口温度および潤滑油温度を 80°C とした。EGR を使用しないときの充填

Table 1 Major engine specifications

Engine type	Direct-injection, single-cylinder, water-cooled
Displacement [cc]	550
Bore [mm]	85.0
Stroke [mm]	96.9
Compression ratio [-]	16.3:1
Number of valves [-]	4 (Intake 2, Exhaust 2)
Injection system	Common-rail system with solenoid injector (Max. press.: 180 MPa)
Supercharging	External supercharging
EGR system	Low-pressure loop EGR

Table 2 Engine operating conditions

Engine speed [rpm]	1,500
Fuel	JIS No. 2 diesel fuel (cetane index: 57)
Injection nozzle hole dia. [mm] × num. [-]	φ0.125 × 7
Injection pressure [MPa]	90
Total-inj. quantity [mm ³ /cycle]	33
Pilot-inj. quantity [mm ³ /cycle]	6
Pilot-inj. timing [°ATDC]	-19
Main-inj. quantity [mm ³ /cycle]	23 (27 for the case without post injection)
Main-inj. timing [°ATDC]	1
Post-inj. quantity [mm ³ /cycle]	4
Post-inj. timing [°ATDC]	11-21
Swirl ratio [-]	1.8
Intake pressure [kPa (abs.)]	120
Intake temperature [°C]	35
NO _x emission [ppm]	150 ± 5

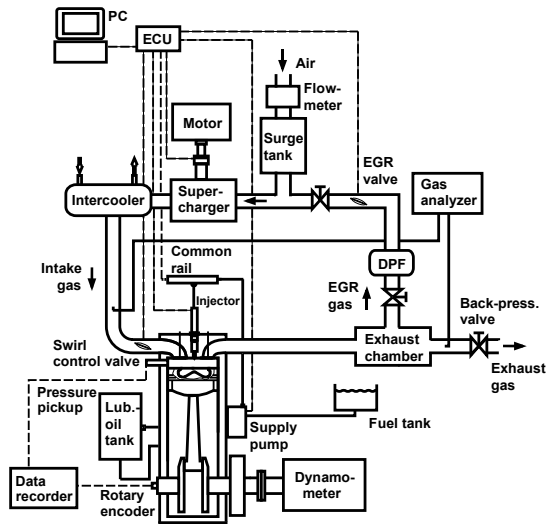


Fig.1 Experimental setup

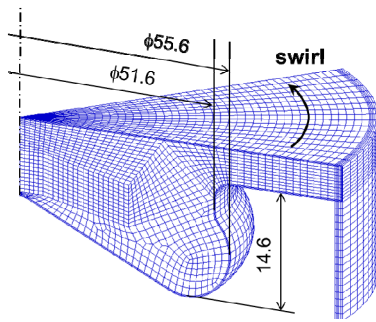


Figure 2 Grid systems for the seven-hole nozzle at 20° CA.

Table 3 Initial values in CFD.

In-cylinder pressure at 145° BTDC	123 kPa
In-cylinder temperature at 145° BTDC	338 K
Initial gas composition	
N ₂	78.7%
O ₂	16.7%
CO ₂	2.5%
H ₂ O	2.1%

効率が 1 となるように過給圧力を 1.19 bar, 吸気温度を 35°C とした。ただし, 排気背圧弁は全開とした。燃料は JIS2 号軽油を用いた。実験にあたっては, アフター噴射の影響を明確にするため, 噴射量の増減に対して黒煙濃度が敏感に変化する運転条件を選んだ。すなわち, 噴射圧力は 90 MPa, メイン噴射時期は 1°ATDC とし, 図示平均有効圧力 IMEP を 1.01 MPa とした。さらに, EGR 率を調整して NOx 排出濃度を一定とし, 150±5 ppm とした。スワール比は 1.8 とした。

排気中の黒煙濃度は反射式スモークメータ (AVL 415S), NOx は CLD 分析計 (Yanaco KA-200), THC 濃度は加熱型 FID 分析計 (HORIBA MEXA-1170HFID), CO および CO₂ は NDIR 分析計 (Round Science ALTAS12), を用いて計測した。また, 圧力センサ (Kistler 6052A) から得た筒内圧力の 50 サイクル平均より熱発生率を求めた。

3. 2 3-D シミュレーション

実験結果について考察するため, 実験条件に近いいくつかの条件について CFD シミュレーションを行った。計算には汎用 CFD コード AVL FIRE® v2010 を使用した。液滴分裂モデルは KH-RT モデルを用いた。分裂モデルのモデル定数は FIRE の推奨値⁽³⁾を用いた。噴霧の拡がり角は高温高压の定容容器内における噴霧の画像と比較して 12° とした。実験では軽油を燃料に用いたが, 計算では n ヘプタンを燃料とした。n ヘプタンの化学反応計算には Kawanabe らの PRF 簡略化モデル (42 化学種 69 反応式)⁽⁴⁾を用いた。また, 不均一混合気の自着火過程を考慮した Kawanabe らの NMA モデル⁽⁴⁾を適用した。

計算に使用したメッシュの例を図 2 に示す。

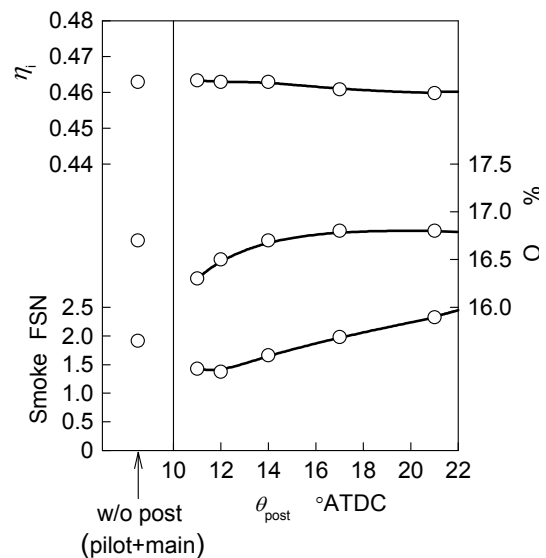


Figure 3 Effects of the post-injection timing on the indicated thermal efficiency η_i , intake oxygen concentration $O_{2,in}$, and smoke emission (experimental results).

計算格子は一噴孔分とした。TDC 時に 27000 セル程度である。噴射率の形状は実測ベースで与えた。ただし, n ヘプタンは軽油と比べて単位質量あたりの発熱量が低いので, 時間あたりの投入熱量が同じになるように噴射率を増加させた。計算では, アフター噴射時期による燃焼結果への影響を考察するために, 初期 (120°BTDC) のガス組成はアフター噴射時期や噴射圧力に依らず一定とした。初期値を表 3 に示す。

4. 研究成果

4. 1 エンジン試験

まず, アフター噴射を適用し, アフター噴射時期を変更した実験を行った。図 3 に図示熱効率, 吸気酸素濃度および黒煙濃度を示す。左には同じ噴射量でアフター噴射を使わないときの結果も示す。アフター噴射時期を早くすると, NOx を 150ppm 一定とするために EGR 率を上げて吸気酸素濃度が低下するにも関わらず黒煙濃度が低下した。この傾向は Hotta ら⁽⁵⁾の結果や池本ら⁽⁶⁾の傾向と一致した。熱効率はアフター噴射時期を早くするとアフター噴射がない条件とほぼ同等かわずかに上昇し, 狙い通りの結果が得られた。図には示さないが CO および THC 濃度は十分低く, アフター噴射時期による変化はほとんどない。

4. 2 CFD 解析

黒煙濃度の傾向について考察するため, アフター噴射時期が早い条件と遅い条件として 11° ATDC と 21° ATDC について CFD を用いて解析を行った。まず, 計算の妥当性を検討するため, 実験結果と計算結果の筒内圧力, 熱発生率経過を比較する。図 4 にこれらのクランク角経過を示す。計算結果ではメイン噴

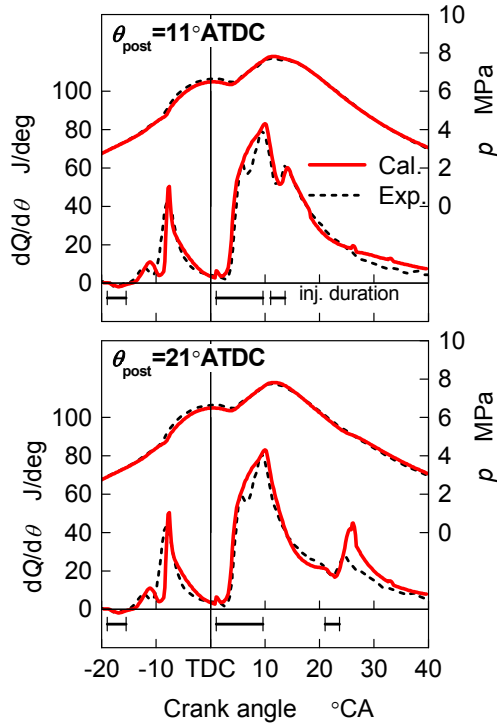


Figure 4 Comparison of the heat-release rate $dQ/d\theta$ and in-cylinder pressure p between the experimental and computational results ($\theta_{\text{post}} = 11^\circ \text{ATDC}$ and 21°ATDC).

射による初期燃焼と主燃焼のピークが分離していないことや遅いアフター噴射を用いたときのアフター噴射による熱発生率が過大になることなど、実験結果との違いは見ら

れるもののそれぞれの噴射に対応する熱発生率の立ち上がり時期や高さなど、実験結果の特徴をよく再現している。

つぎに、すすの生成・酸化に関係する筒内の混合気分布を解析するため、未燃混合分率 f_u の分布を調べた。 f_u は次式に示すように、化学反応が起きなかったとしたときの燃料の質量分率を表す。

$$f_u = \frac{m_f}{m_f + m_a}$$

ここで、 m_f は化学反応が起きなかった場合の燃料質量、 m_a は化学反応が起きなかった場合の周囲ガスの質量である。 今回の計算条件では $f_u = 0.05$ で当量比が約 1.0 となる。 アフター噴射時期 $\theta_{\text{post}} = 11^\circ \text{ATDC}$ における混合分率 $f_u = 0.05$ の等値面を図 5 (a: 俯瞰図, b: 燃焼室中心軸から噴霧方向を見た図, c: 噴霧側方から見た図) に示す。 メイン噴霧の等値面は青、アフター噴霧の等値面は緑で示す。

なお、表示の期間ではパイロット噴霧はすでに $f_u = 0.05$ 以下になっている。 メイン噴射による混合気 (メイン噴霧と呼ぶ) は燃焼室くぼみ側壁に衝突した後、くぼみ壁面に沿って拡がり、一部はスキッシュエリアに入る。 壁面に沿って流動する部分の等値面は隣接する噴霧による等値面と 8°CA あたりで合流し (図中 A), その後、くぼみ底面で盛り上がりを作る (図中 B)。 この盛り上がりは大きくなりながらスワールに流され、アフター噴射による混合気 (アフター噴霧と呼ぶ) が分布する領域に近づいて行く。 アフター噴霧は噴射開始後 5°CA 程度 (16°CA) でくぼみ側壁付

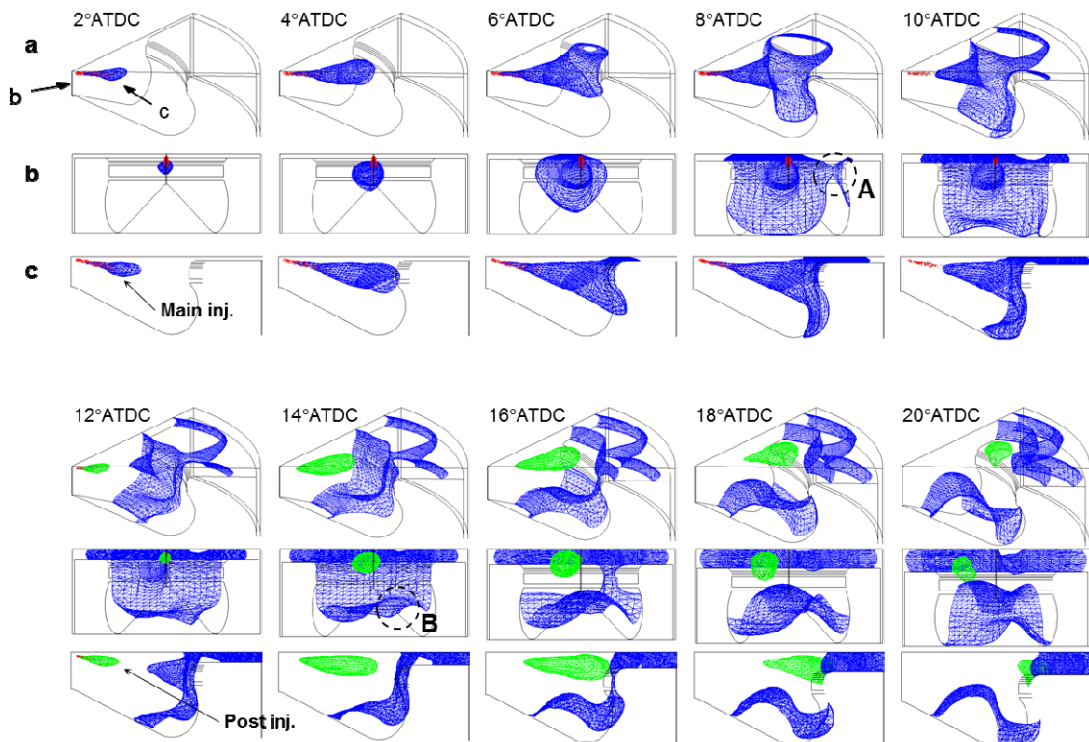


Figure 5 Isosurfaces for a mixture fraction $f_u = 0.05$ (seven-hole nozzle, $\theta_{\text{post}} = 11^\circ \text{ATDC}$).

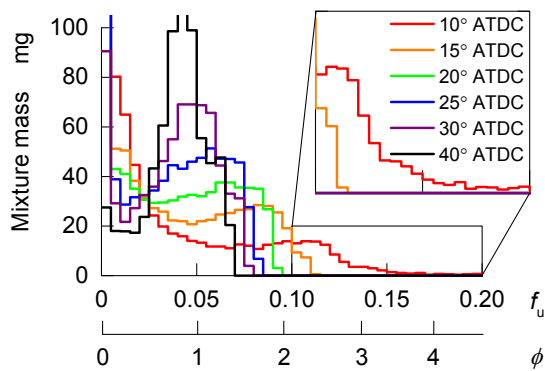


Figure 6 Histograms for the mixture fraction f_u (seven-hole nozzle, without post injection, main-injection quantity: 27 mm^3).

近まで拡がり、さらに時間が進むと大部分はスキッシュエリアに入る。16°CA では、アフター噴霧はスワールにより噴射方向から 6° 程度下流方向に流されている。

筒内全体の混合気分布を大局的に捉えるために、筒内全体の混合気を f_u を 0.005 ごとに区分けし、その質量プロファイルの時間に対する移り変わり、および、アフター噴射の有無による変化について解析した。なお、あとで噴孔数変更の影響を考察するために筒内全体の質量に換算するため、1/7 セクターの結果を 7 倍した結果を示す。

図 6 にアフター噴射を用いない場合（メイン 27 mm^3 ）のメイン噴射終了直後からの混合気の質量分布を示す。メイン噴射終了直後の 10°ATDC ではすすを生成しやすい、 f_u が 0.1 を超えるリッチな領域が存在するブロードな形を持つが、時間がたつにつれて濃い混合気と空気に近い薄い混合気が少なくなり、筒内全体の平均 f_u である 0.04 あたりの混合気が増加し、希薄化・均一化が進む様子が確認できる。

図 7 にアフター噴射時期を 11°ATDC としたときの混合気の質量分布を示す。アフター噴射直前の 10°ATDC では、アフター噴射を用いるに伴いメイン噴射量を減少させたので濃い混合気が減少する。アフター噴射終了直後の 15°ATDC ではアフターなしの場合では見られなかった f_u が 0.12 を超える濃い混合気の確認ができる。20°ATDC を超えると f_u が 0.1 を超える混合気は確認できなくなり、30°ATDC ではアフター噴射なしの場合（図 6）と比べて、混合気の濃度幅は小さくなり、 $f_u = 0.05$ あたりのピークの値が高くなる。このことから、アフター噴射を用いることで混合が促進され、均一化が進むことわかる。

以上の結果から、メイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉について以下を推察した。早いアフター噴射時期を用いると、メイン噴霧が巻き上がる前に噴射されるので筒内に残った酸素をエントレインすることができる。その結果、混合気の希薄化・均一化が進み、黒煙濃度がアフターなしと比べて減少したと

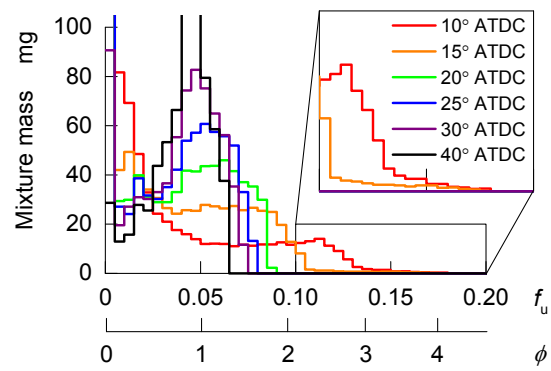


Figure 7 Histograms for the mixture fraction f_u (seven-hole nozzle, $\theta_{\text{post}} = 11^\circ \text{ ATDC}$).

考えられる。

参考文献

- (1) Shimazaki, N., Tsurushima, T. and Nishimura, T., Dual Mode Combustion Concept With Premixed Diesel Combustion by Direct Injection Near Top Dead Center, SAE paper No.2003-01-0742, 2003.
- (2) Musculus, M.P.B., "Entrainment waves in decelerating transient turbulent jets," J. Fluid Mech., vol.638, pp.117-140, 2009.
- (3) AVL FIRE Manual, v2010 ICE Physics & Chemistry, 2010.
- (4) Kawanabe, H., Kojima, H., and Ishiyama, T., "Modeling of the Auto-ignition Process of a Non-homogeneous Mixture in a Diesel Spray for CFD," SAE Technical Paper 2010-01-0357, 2010.
- (5) Hotta, Y., Inayoshi, M., Nakakita, K., Fujiwara, K. and Sakata, I., "Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection," SAE Technical Paper 2005-01-0928, 2005.
- (6) 池本雅里ほか、リフトセンサ付きピエゾインジェクタを用いた近接アフタ噴射によるスモーク低減機構の解析、自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 6, pp. 1347-1352, 2010.

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 2 件）

1. Naoto Horibe, Tatsuya Komizo, Yuji Mamizuka, Takashi Sumimoto, Hiroshi Kawanabe, Takuji Ishiyama, Analysis of Mixture Formation Process in a Diesel Engine with Post Injection, SAE Technical Paper 2015-01-1836, 2015, p. ー.

2. 住野友則, 包智超, 堀部直人, 石山拓二, 少量噴射時におけるディーゼル噴霧特性に関する研究, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集 CD, 2015, p. ー.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀部 直人 (HORIBE NAOTO)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90583881