

445-20145367 アフター噴射を用いたディーゼル機関における 混合気形成過程の数値解析*

堀部 直人¹⁾ 狸塚 雄司²⁾ 川那辺 洋³⁾ 石山 拓二⁴⁾

Numerical Analysis of Mixture Formation Process in a Diesel Engine with Post Injection

Naoto Horibe Yuji Mamizuka Hiroshi Kawanabe Takuji Ishiyama

Numerical study using a CFD simulation is carried out in order to better understand the mixture formation processes in a diesel engine with post injection. The effects of post injection timing, nozzle specifications, and combustion chamber shape on mixture formation process were investigated by CFD simulations for past experimental engine conditions. The results show that if post injection spray penetrates into high mixture fraction region in simulation, smoke reduction effect by post injection is not obtained in experiments.

KEY WORDS: heat engine, compression ignition engine, numerical calculation, Diesel Engine, Multiple Injections, After Injection, Post Injection, Smoke, Soot, CFD (A1)

1. まえがき

ディーゼル機関にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置が普及し、排ガス低減や騒音低減のために多段噴射が活用されている。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 (post injection) は黒煙の排出低減に有効とされており、多くの研究がなされている⁽¹⁻⁵⁾。著者らも既報⁽⁶⁾において、単気筒試験機関において総噴射量を一定としてパイロット/メイン/アフターの三段噴射を用い、アフター噴射の黒煙低減効果について調査を行っており、図 1 に示すように、噴孔数 7 の噴射ノズルとくぼみ口径の小さいリエントラント燃焼室 (Re55) の組み合わせではアフター噴射時期 θ_{post} を早くするほど、吸気酸素濃度 r_{O_2} が低下するにも関わらず黒煙濃度 Smoke が低下すること (7 holes nozzle)、噴射ノズル流量一定のもとで噴孔数を 10 に増やすと早いアフター噴射時期では黒煙濃度が増加すること (10 holes nozzle)、くぼみ口径の大きいリエントラント燃焼室 (Re60) ではアフター噴射時期を遅らせた方が黒煙濃度が低下することなどを明らかにした。このように、噴射ノズル仕様や燃焼室形状の組み合わせによってアフター噴射時期に対する黒煙濃度の傾向が異なる結果が得られた。また、池本らによる研究ではアフター噴射時期を早くすると黒煙濃度が下がる結果⁽²⁾が得られている一方で、Desantes らはアフター噴射時期を遅らせると黒煙濃度が下がる⁽³⁾ことを示しているなど、他所においてもアフター噴射時期に対する黒煙低減効果の傾向は様々である。アフター噴射による黒煙低減メカニズムについて、例えば、池本らによる

とメイン噴霧火炎は燃焼室くぼみ壁面に到達した後、燃焼室中央部へ向かって流動する。近接アフター噴射を用いる場合には、メイン噴霧の燃焼が主に燃焼室くぼみの側壁付近で行われているうちに、アフター噴霧が燃焼室中央部の酸素を利用できる。このとき、メイン噴射をアフター噴射に分割した分、メイン噴霧由来のすすが減り、さらにアフター噴霧由来のすすは少ないので、結果として黒煙低減の効果が得られる。一方、アフター噴射時期が遅い場合にはアフター噴霧は燃焼室中央部に流動したメイン噴霧火炎中に噴射され、低酸素状態で燃焼するため、アフター噴霧由来のすすが増加し、黒煙低減効果が得られない。このように、アフター噴霧とメイン噴霧火炎との干渉が黒煙低減効果を左右すると考えられ、前述のように多様な傾向が見られるのは、アフター噴霧がメイン噴霧火炎から受ける影響が様々に変化するためといえる。

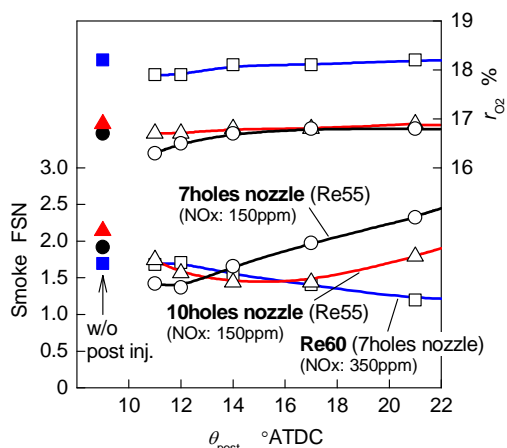


Fig. 1 Effects of post injection on smoke

*2014年05月23日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2)・3)・4) 京都大学(606-8501 京都市左京区吉田本町)

Table 1 Engine specifications and calculation conditions

| | |
|----------------------------|---|
| Engine type | Direct injection diesel engine, single cylinder |
| Bore × stroke | 85.0 mm × 96.9 mm |
| Displacement | 550 cc |
| Compression ratio | 16.3 |
| Swirl ratio | 1.8 |
| Injection pressure | 90 MPa |
| Engine speed | 1,500 rpm |
| Combustion chamber | Reentrant type (Re55*, Re60) |
| Injection nozzle | 0.125 mm × 7 holes - 150°, 0.105 mm × 10 holes - 150° |
| Fuel | Exp.: JIS No.2 diesel fuel Calc.: n-heptane |
| Pilot-inj. quantity/timing | 6 mm ³ /cycle / -19° ATDC |
| Main-inj. quantity/timing | 23 mm ³ /cycle / 1° ATDC |
| Post-inj. quantity/timing | 4 mm ³ /cycle / 11, 21° ATDC |
| Initial pressure at IVC | 123 kPa |
| Initial temperature at IVC | 337 K |

* Standard conditions

そこで、本研究では既報⁽⁵⁾の実験結果を対象として 3D-CFD を用いて燃焼過程の数値計算を行い、すすの生成に関連の深い燃料濃度分布を解析し、機関諸元や運転条件の違いによってアフター噴射の黒煙低減効果の傾向が異なる理由について説明を試みた。

2. 計算条件および計算方法

2.1. 計算条件

小型ディーゼル機関の比較的高負荷の条件を対象とし、パイロット/メイン/アフターの三段噴射を用いるディーゼル燃焼過程を計算した。対象とした機関の諸元と条件を表 1 に示す。標準とした噴孔数 7 の噴射ノズルおよび口径の小さい燃焼室 Re55 の組み合わせに加えて、噴射ノズルをノズル流量と噴射角度の等しい噴孔数 10 に変更した条件およびくぼみ容積一定で燃焼室口径を上げた燃焼室 Re60 に変更した条件それぞれについて、アフター噴射時期がメイン噴射終了時期に近い 11°ATDC と比較的遅い 21°ATDC の計算を行った。計算格子は図 2 に示すように一噴孔分のメッシュとし、Re55 では TDC 時に 27149 セルである。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。燃料噴射率は Bosch の長管法を用いて計測した実測値をもとにし、実験（軽油）と同じ投入熱量となるように噴射率を増加させた。初期のガス組成は実測の EGR 率にもとづいて設定した。実験では排ガス中の NO_x 濃度が一定となるようにアフター噴射時期を遅くするに従って EGR 率を下げたので、アフター噴射時期が遅いと吸気酸素濃度は高くなる。ただし、パイロット噴射およびメイン噴射による熱発生率にほとんど違いはなかったので、計算では初期のガス組成は燃焼室ごとに一定とした。

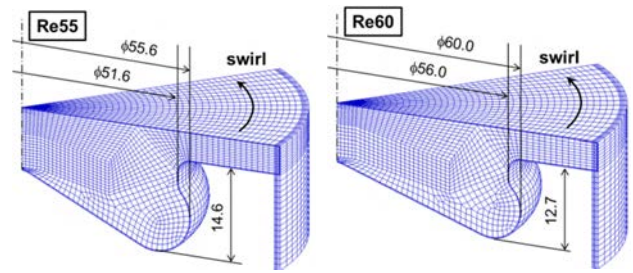


Fig. 2 Grid systems for 7 holes nozzle at 20°C

2.2. 計算方法

計算には汎用 CFD コード AVL FIRE® v2010 を用いた。乱流モデルは k-εモデルを用いた。液相は DDM で記述し、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⁽⁶⁾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。液滴蒸発過程は Dukowicz のモデル⁽⁶⁾を用いた。燃料には n-ヘプタンを用い、反応モデルは Kawanabe らの PRF 簡略化モデル (42 化学種 69 反応式)⁽⁷⁾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⁽⁷⁾を適用した。

3. 計算結果および考察

3.1. アフター噴射時期の影響

はじめに、図 1 の噴孔数 7 においてアフター噴射時期を早めると黒煙濃度が低下する原因について考察するため、標準ノズル・燃焼室においてアフター噴射時期 $\theta_{\text{post}} = 11^\circ\text{ATDC}$ と 21°ATDC について計算を行った。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 p 、平均温度 T_a 、熱発生率 $dQ/d\theta$ を比較する。図 3 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。

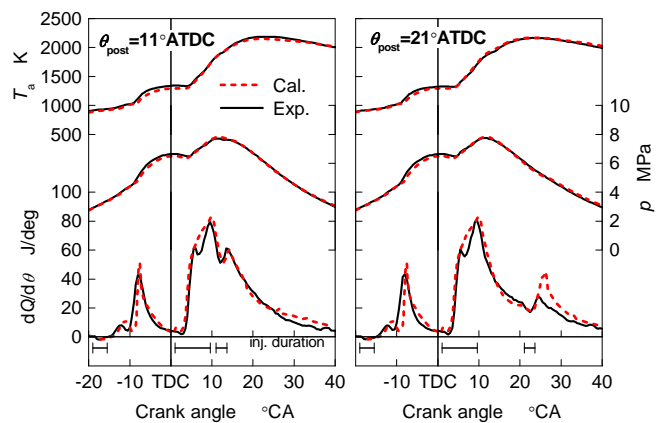


Fig. 3 Profiles of heat-release rate $dQ/d\theta$, in-cylinder pressure p , and average temperature T_a

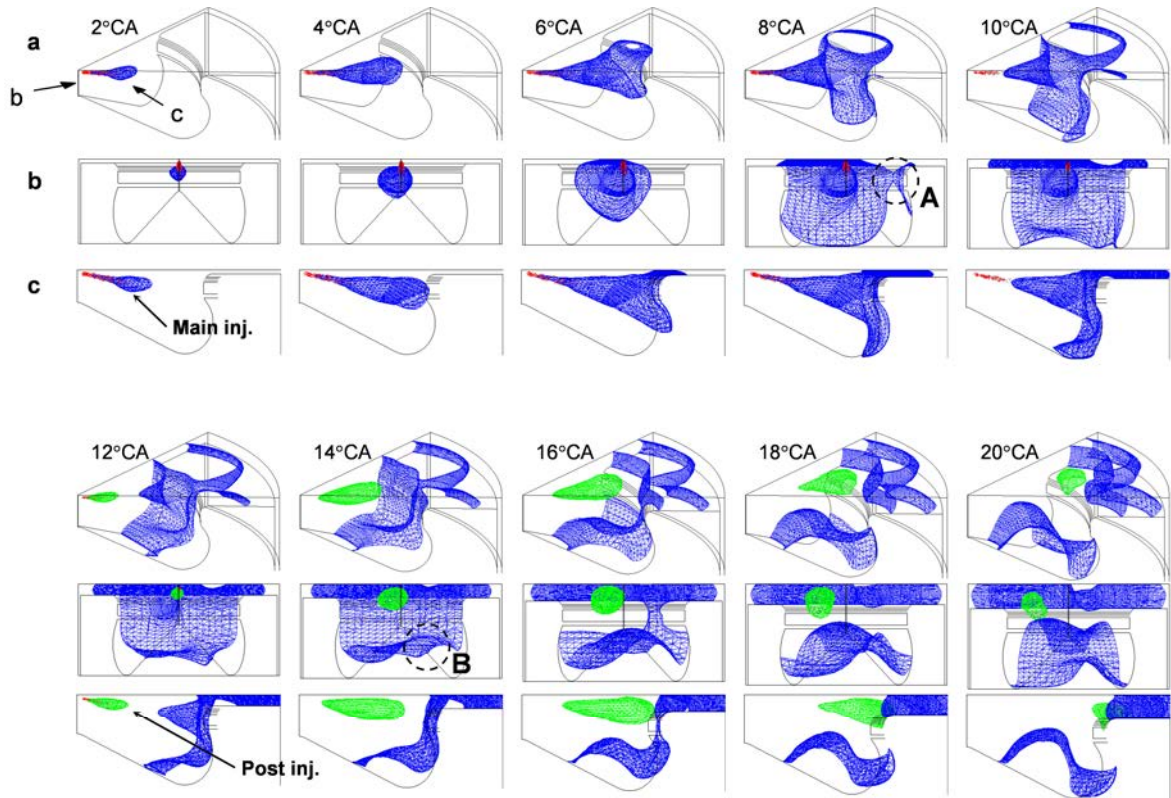


Fig. 4 Iso-surface of mixture fraction $f_u=0.05$ (Re55, 0.125 mm \times 7 holes nozzle, $\theta_{post}=11^\circ$ ATDC)

つぎに、筒内の混合気分布を明らかにするため、アフター噴射時期 $\theta_{post}=11^\circ$ ATDC における混合分率 $f_u=0.05$ (当量比 1) の等値面を図 4 (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) でくぼみ側壁付近まで拡がり、大部分はスキッシュエリアに入る。このとき、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。

筒内の混合分率および温度分布の詳細を明らかにするため、アフター噴射時期 θ_{post} が 11° ATDC および 21° ATDC における混合分率 f_u および温度 T の筒内分布のクランク角経過を図 5 と図 6 にそれぞれ示す。ここではアフター噴霧の混合分率が高いと考えられる、噴射方向からスワール方向に 6° 下流の縦断面を示す。メイン噴霧はパイロット噴射の燃焼による高温の領域に噴射され、 6° CA にはくぼみ側壁付近で f_u が $0.1 \sim 0.2$ のあたりで温度が 2000K 近くに上昇することが確認できる。メイン噴射終了後、テール部の混合分率は 10° CA から 14° CA にかけて

急速に低くなる。アフター噴射時期が早い $\theta_{post}=11^\circ$ ATDC では、その領域にアフター噴霧が噴射される。アフター噴射時期の遅い $\theta_{post}=21^\circ$ ATDC ではアフター噴射時期にメイン噴霧が巻き上がっており、混合分率の高い領域にアフター噴霧が噴射される。

これらのことから、早いアフター噴射時期を用いるとメイン噴霧火炎とアフター噴霧の干渉が小さくなるのでメイン噴霧に取り込まれなかった酸素をアフター噴霧の燃焼に利用できると思われる。そのため、アフター噴射時期を早めると吸気酸素濃度が低いにも関わらず、アフター噴霧から生成するすすが少なくなり、黒煙濃度が低下したと考えられる。一方、アフター噴射時期が遅いとメイン噴霧の燃焼によって酸素濃度が低下した領域にアフター噴霧が噴射されることになり、アフター噴霧由来のすすが多くなるために、黒煙濃度が増加したと考えられる。

3.2. 噴孔数の影響

つぎに、噴射ノズル仕様 (噴孔径, 噴孔数) を変更した際に、アフター噴射時期に対する黒煙濃度の傾向が変化する原因について考察するため、噴孔径と噴孔数を 0.105 mm および 10 とし、アフター噴射時期 $\theta_{post}=11^\circ$ ATDC と 21° ATDC の条件で計算を行った。図 7 に実験結果と計算結果の筒内圧力 p , 平均温度 T_a , 熱発生率 $dQ/d\theta$ を示す。実験結果では、噴孔数を 7 から 10 とするとアフター噴射による熱発生率は $\theta_{post}=11^\circ$ ATDC では小さくなり、 $\theta_{post}=21^\circ$ ATDC では大きくなる。計算結果でも

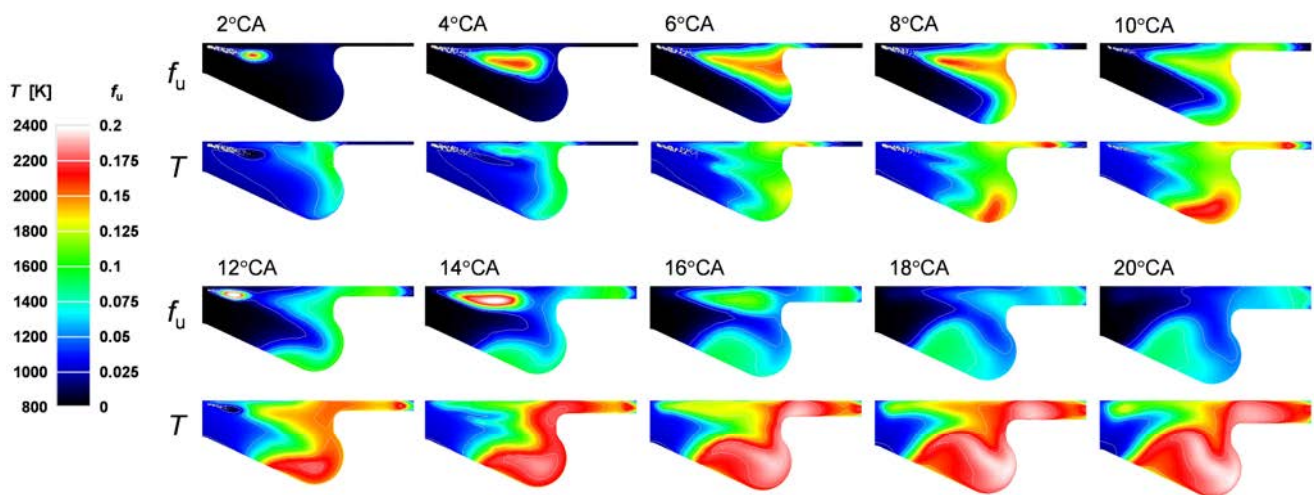


Fig. 5 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re55, 0.125 mm \times 7 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$)

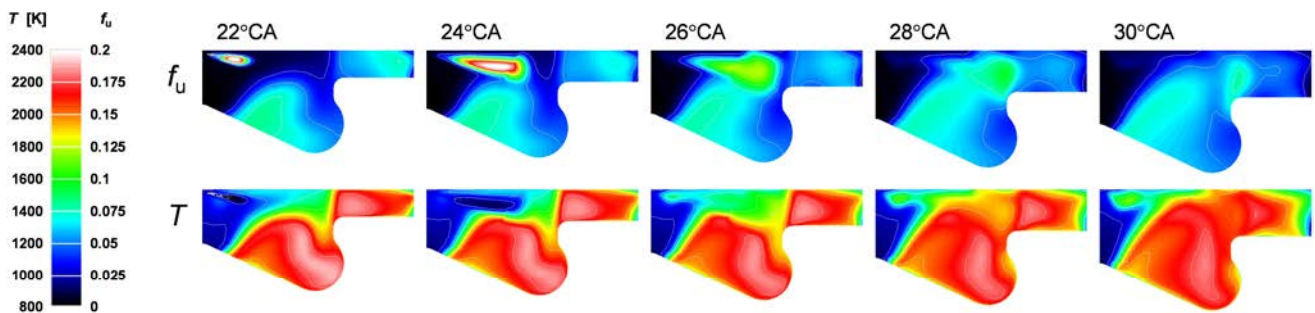


Fig. 6 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re55, 0.125 mm \times 7 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=21^\circ\text{ATDC}$)

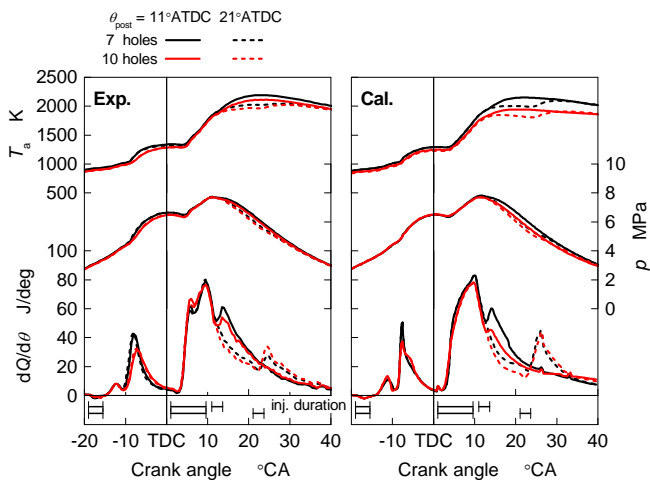


Fig. 7 Effects of nozzle specifications on heat-release rate $dQ/d\theta$, in-cylinder pressure p , and average temperature T_a

この特徴を再現できている。

噴孔数を10としたときの混合気の分布を明らかにするため、アフター噴射時期 $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$ における混合分率 $f_u=0.05$ (当量比1) の等値面を図8に示す。噴孔径が小さいために混合気の流動が遅くなっており、くぼみ側壁付近にメイン噴射による濃い混合気が噴孔数7の場合(図4)と比べて長い期間存在

する。そのため、14°CAの図を見るとメイン噴射とアフター噴射による等値面が噴孔数7の場合と比べて近くなっている(図中A)。また、噴孔数7の場合よりもメイン噴霧のくぼみ底面からの盛り上がり小さい(図中B)。

アフター噴射時期 $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$ および 21°ATDC の混合分率 f_u および温度 T の筒内分布を図9および10に示す。これらは噴射方向からスワール方向に6°下流の縦断面のものである。メイン噴霧の分布に着目すると、噴孔数7の場合と比較して、スキッシュエリアおよびくぼみ底面に沿った混合分率の高い領域の流動が遅く、希薄化が遅い。アフター噴射時期 $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$ では、リップ付近に存在する混合分率の高い領域にアフター噴霧が噴き込まれる。また、くぼみ底面からのメイン噴霧の巻き上がりが小さいので、アフター噴射時期が遅い場合にはアフター噴霧は f_u および T が低い領域に噴射される。

これらのことから実験結果を考察すると、噴孔数10では早いアフター噴射を用いるとくぼみ側壁付近に存在するメイン噴霧火炎に向かってアフター噴霧が噴射され、アフター噴霧は高温で酸素濃度の低い燃焼ガスをエントレインすると考えられる。そのため、アフター噴霧からの生成するすすが増加し、黒煙濃度が高くなったと考えられる。アフター噴射時期

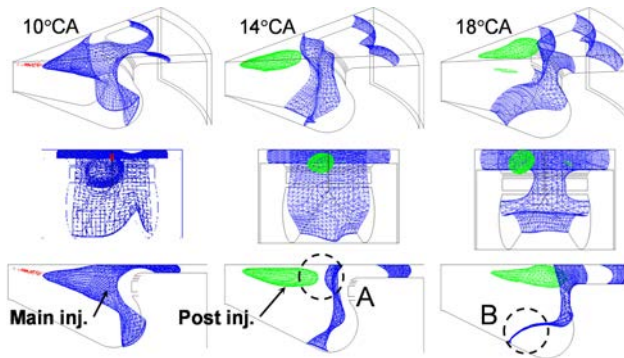


Fig. 8 Iso-surface of mixture fraction $f_u=0.05$ (Re55, 0.105 mm \times 10 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$)

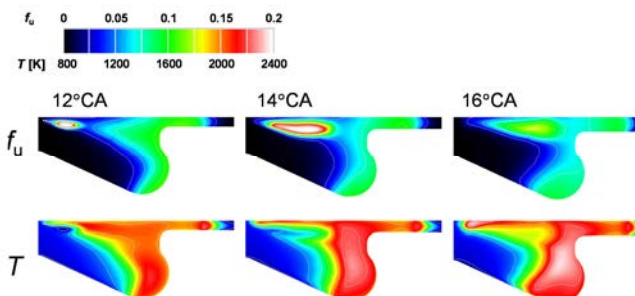


Fig. 9 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re55, 0.105 mm \times 10 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$)

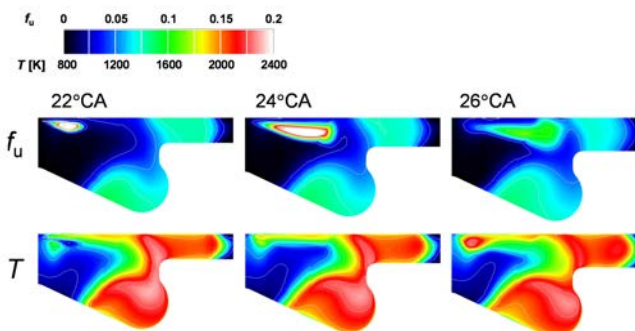


Fig. 10 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re55, 0.105 mm \times 10 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=21^\circ\text{ATDC}$)

を遅くするとアフター噴霧はメイン噴霧火炎の干渉が小さくなると考えられ、メイン噴霧の燃焼に使われなかった酸素をアフター噴霧で利用できるので噴孔数 7 よりも黒煙濃度が低下したと考えられる。すなわち、噴孔数 10 の場合には、アフター噴射時期をメイン噴射終了との最近接時期から遅らせて行くと、くぼみ側壁付近のメイン噴霧が希薄化するので黒煙濃度が低下し、さらにアフター噴射時期を遅らせるとくぼみ底面からメイン噴霧が巻き上がってくるので、アフター噴霧にエントレインされるメイン噴霧が多くなり、黒煙濃度が再び上昇したと考えられる。

3.3. 燃焼室口径の影響

最後に、くぼみ口径を変更した際にアフター噴射時期に対する黒煙濃度の傾向が変化する原因について考察するため、

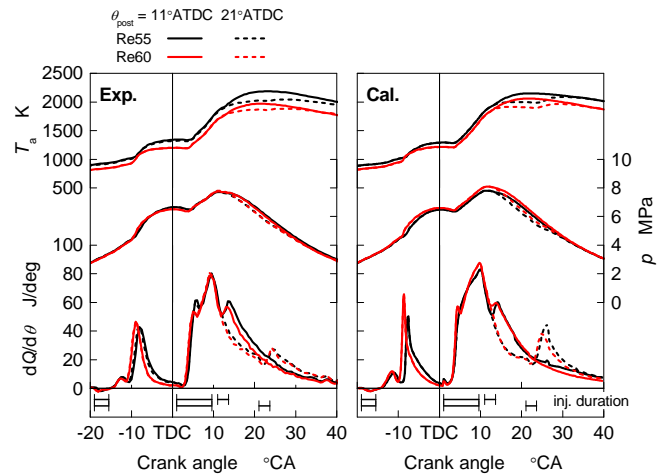


Fig. 11 Effects of combustion chamber shape on heat-release rate $dQ/d\theta$, in-cylinder pressure p , and average temperature T_a

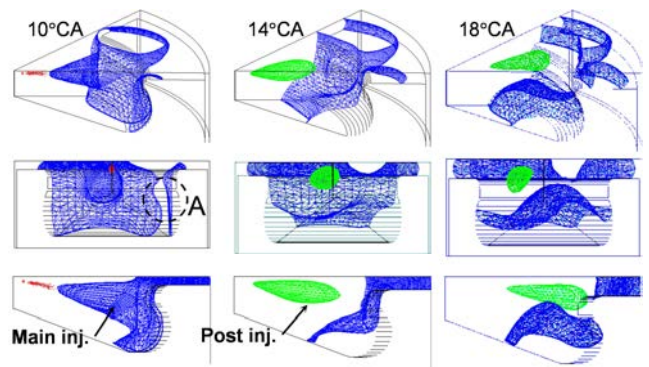


Fig. 12 Iso-surface of mixture fraction $f_u=0.05$ (Re60, 0.125 mm \times 7 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$)

燃焼室形状を Re60 に変更してアフター噴射時期 $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$ と 21°ATDC について計算を行った。図 11 に実験結果と計算結果の筒内圧力 p 、平均温度 T_a 、熱発生率 $dQ/d\theta$ を示す。パイロット噴射の着火遅れが短くなり、その熱発生率が高くなること、メイン噴射による熱発生率に大きな変化がないことなど、実験結果を概ね再現できている。

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 12 に示す。実験では Re60 を用いた際に Re55 と同じように排ガス NO_x 濃度を 150ppm に調整すると黒煙濃度が非常に高くなったため、EGR 率を下げて NO_x 濃度を 350ppm とした。その際の吸気ガス組成を初期条件として与えたので、吸気酸素濃度が Re55 の場合よりも高くなり、 $f_u=0.05$ は当量比 0.9 に相当する。10 deg CA の図では、Re55 の場合 (図 4) と異なり、等値面はまだ隣の噴霧による等値面と合流していない。燃焼室くぼみ口径が大きくなったことでノズルから壁までの距離が遠くなったことに加え、メイン噴霧が壁面に到達したときの速度が低くなり、衝突噴霧の拡がりが遅くなったためと考えられる。その後、くぼみ底面の隣接噴霧と合流したあたりから等値面が盛り上がる。Re60 はくぼみが浅いので等値

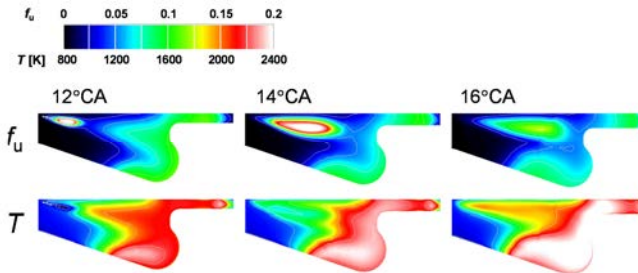


Fig. 13 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re60, 0.125 mm×7 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$)

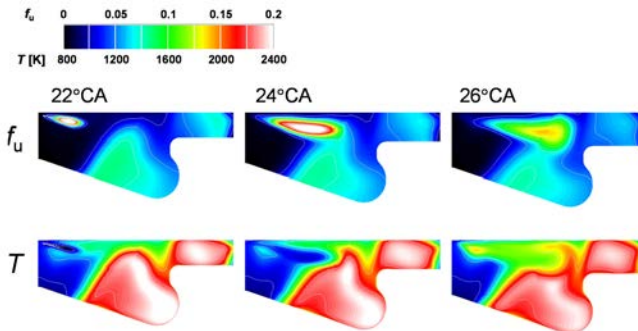


Fig. 14 Distributions of mixture fraction f_u and temperature T (Re60, 0.125 mm×7 holes nozzle, $\theta_{\text{post}}=21^\circ\text{ATDC}$)

面の盛り上がりは Re55 の場合よりも高く、18°CA でピストン頂面付近に達する。また、燃焼室くぼみ口径が大きいためにスワールの流速が遅く、等値面が盛り上がったところのスワール方向の移動は Re55 と比べて遅い。ただし、アフター噴霧のスワール方向の移動距離は表示の範囲では Re55 と大きく変わらない。

アフター噴射時期 $\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$ および 21°ATDC の混合分率 f_u および温度 T の筒内分布を図 13 および 14 に示す。ここでも、断面の位置は噴射方向からスワール方向に 6° 下流とした。Re55 の場合に比べて燃焼ガスの温度が高いのは、酸素濃度が高いためである。図 13 ($\theta_{\text{post}}=11^\circ\text{ATDC}$) を見ると、メイン噴射による混合分率の高い領域のくぼみ底面からの厚さは Re55 (図 5) と比べて大きく変わらない。ただし、くぼみが浅いためにアフター噴霧は混合分率および温度の比較的高い領域に噴射される。図 14 ($\theta_{\text{post}}=21^\circ\text{ATDC}$) ではアフター噴射開始直後の 22°CA においてメイン噴霧の燃焼ガスはヘッド近くまで巻き上がっており、そこにアフター噴霧が噴射される。このように、くぼみ口径の広い燃焼室を用いた場合には早いアフター噴射時期を用いても、比較的混合分率の高いところに向かってアフター噴霧が噴射される。「計算条件」で述べたように実験ではアフター噴射時期を遅らせるほど吸気酸素濃度が高くなることから、Re60 ではメイン噴霧火炎とアフター噴霧との干渉は常に強いので、干渉に起因して黒煙が変化するというよりも、EGR 率の変化に伴う吸気酸素濃度の違いが黒煙濃度の傾向を決めていると考えられる。

4. まとめ

噴射ノズル仕様・燃焼室形状を変更した実験を対象として、3D-CFD を用いてアフター噴射時期 11°ATDC および 21°ATDC について燃焼過程の解析を行い、黒煙濃度の傾向と混合気および火炎の分布の関係について以下のように推定した。

- 1) 7 噴孔ノズルと Re55 燃焼室の組み合わせでは、早いアフター噴射時期を用いるとくぼみ底面からメイン噴霧火炎が巻き上がる前にアフター噴射が行われるので、メイン噴霧燃焼に利用されなかった酸素をアフター噴霧の燃焼に利用でき、黒煙濃度が低下する。
- 2) 10 噴孔ノズルを用いると、早いアフター噴射時期ではくぼみ側壁付近に存在するメイン噴霧火炎中にアフター噴霧が噴射されるので黒煙濃度が高くなる。遅いアフター噴射時期ではくぼみ側壁付近のメイン噴霧が希薄化する。さらに、くぼみ底面からの巻き上がりが小さいのでアフター噴霧とメイン噴霧火炎の干渉が小さくなり、黒煙濃度が低下する。さらに遅いアフター噴射時期ではメイン噴霧火炎の巻き上がりにより再び黒煙濃度が上昇する。
- 3) Re60 燃焼室はくぼみが浅いので、アフター噴射時期に依らず、メイン噴霧火炎とアフター噴霧との干渉は常に強い。そのため、干渉に起因して黒煙が変化するというよりも、EGR 率の変化に伴う吸気酸素濃度の違いが黒煙濃度の傾向を決めていると考えられる。

参考文献

- (1) Jean Arrègle : Insights on Post Injection-Associated Soot Emissions in Direct Injection Diesel Engines, Combustion and Flame, Vol. 154, p. 448-461 (2008)
- (2) 池本雅里 : 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, 41(6), p. 1347-1352 (2010)
- (3) José M. Desantes : A Comprehensive Study of Diesel Combustion and Emissions with Post-injection, SAE Paper 2007-01-0915 (2007)
- (4) 堀部直人 : パイロット噴射と組み合わせたアフター噴射のスモーク低減効果, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 5, p. 1039-1044 (2012)
- (5) 堀部直人 : 噴射ノズル仕様および燃焼室形状がディーゼル機関におけるアフター噴射の黒煙低減効果に与える影響, 第 24 回内燃機関シンポジウム講演論文集 CD, (2013)
- (6) AVL FIRE Manual, v2010 ICE Physics & Chemistry (2010)
- (7) Hiroshi Kawanabe : Modeling of the Auto-ignition Process of a Non-homogeneous Mixture in a Diesel Spray for CFD, SAE 2010-01-0357 (2010)