

B6-2 定容燃焼装置内に模擬した二段噴射ディーゼル燃焼に及ぼす 噴孔径および噴射圧力の影響*

堀部直人^{*1}, 吉田和希^{*2}, 石山拓二^{*3}

Effects of Nozzle Orifice Diameter and Injection Pressure on Two-Stage-Injection Diesel Combustion Simulated in a Constant Volume Vessel

Naoto HORIBE, Kazuki YOSHIDA and Takuji ISHIYAMA

This study aims to clarify the process of PCCI-based diesel combustion with two-stage injection. For this purpose, the effects of fuel injection conditions (injection pressure and nozzle-orifice diameter) on heat release rate and NO_x formation process for various fuel amounts of pilot injection and various injection intervals between pilot and main injections were investigated using a constant-volume vessel under an ambient condition, which provides PCCI-based combustion with longer ignition delay compared with diesel condition. The results show that, in the case of small pilot-injection quantity and short injection interval, high injection pressure makes over-lean mixture of pilot injection and long ignition delay of main-injection fuel. In the case of large pilot-injection quantity, longer injection interval shifts the combustion from the mixing-controlled mode to premixed mode with reduction of NO_x mass.

Key Words : Diesel Engine, Fuel Injection, PCCI, Two-Stage Injection, Constant Volume Vessel

1. はじめに

ディーゼル機関では、燃焼騒音やエミッションの低減を目的として多段噴射が活用されている。また、粒子状物質と窒素酸化物 (NO_x) の同時低減を目指して高 EGR と低圧縮比により長い着火遅れを確保し、その間に混合を進める予混合圧縮着火 (PCCI) 燃焼の原理を用いた燃焼方式が研究されている⁽¹⁾。この燃焼方式に多段噴射を適用する研究も行われており^(2,3)、PCCI 燃焼の欠点である燃焼騒音や未燃物質の排出を低減するのに有効なことが示されているが、拡散的燃焼を伴うので高 EGR 率下では黒煙が排出されやすい。これを防ぐには、燃焼騒音、未燃物質や NO_x を増加させないように噴射時期や噴射量配分などのパラメータを最適化する必要がある。そのためには、多段噴射特有の上記パラメータが燃焼過程に与える影響を基本的な理解することが求められる。本研究では、特に、噴射圧力ならびに噴孔径を変更した際の噴射時期および噴射量配分の選択について検討するために、定容燃焼装置を用いて模擬した部分的 PCCI 燃焼において、噴射圧力と噴孔径の組み合わせを三種類設けて、そ

れぞれについて噴射間隔および噴射量配分を変化させた実験を行い、熱発生率、混合気・火炎の発達および NO_x 生成量を調べ、燃焼過程の変化を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2・1 定容燃焼装置 実験には、希薄予混合気を火花点火・燃焼させて得た高温高圧の模擬空気の中に燃料噴射を行う方式の定容燃焼装置⁽⁴⁾を用いた。本装置は、直径 80mm、奥行 30mm (容積約 150cm³) の燃焼室を持つ。希薄予混合気 (C₂H₄, H₂, O₂ および N₂) の組成と充填圧力を調節し、燃料噴射開始時点での素囲気を圧力 2MPa、熱力学的平均温度 900K、酸素モル分率 21% とした。こうすることで、着火遅れが長く予混合的な燃焼が主体となる PCCI ベースの燃焼の特徴が得られる⁽⁵⁾。

燃料は、着火性が軽油に近い n-ヘプタンを用い、総噴射量を 19.5mg (総括当量比 0.26) とした。燃料噴射にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置 (Denso ECD-U2P) にピエゾインジェクタを組み合わせ、単噴孔ノズルにより燃焼室中心に向かって噴射を行った。噴射条件は、表 1 に示す三種類の設定とした。条件(B)を基準とし、(A)では平均噴射率が近くなるように噴射圧力を高めて噴孔を小さくした。条件(C)では(B)と等しい噴孔径のもとで噴射圧力を増加させた。噴射率計測の結果、条件(A)は(B)よりも平均噴射率が 13%増加、(C)は 32%増加した。二段

^{*1,3} 正員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 京都大学大学院エネルギー科学研究科。
E-mail: horibe@energy.kyoto-u.ac.jp

Case	Nozzle-orifice diameter d_N (mm)	Injection pressure p_{inj} (MPa)	Injection duration of single-stage injection (ms)
(A)	0.18	170	2.05
(B)	0.20	120	2.32
(C)	0.20	170	1.76

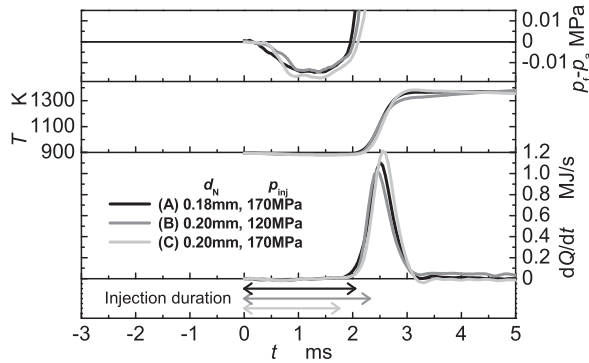


Fig.1 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions (Single-stage injection)

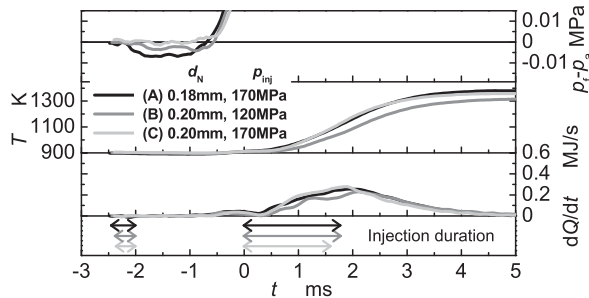


Fig.2 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{int}=2.0\text{ms}$)

噴射の条件として、一段目噴射量 $m_1=1.95$, 3.9mg (総噴射量に対し 10, 20%) について、一段目噴射終了から二段目噴射開始までの噴射間隔 t_{int} を $0.5\sim 2.0\text{ms}$ の範囲で変更した。燃焼室内圧力は圧電式圧力変換器 (Kistler 6052C) で測定した。

2・2 全量ガスサンプリング装置 本研究では、 NO_x の生成特性を実験的に調べるために、全量ガスサンプリング装置⁶⁾を用いて NO_x 濃度を測定した。本手法は燃焼中の任意の時刻において、燃焼室側面に設置したダイヤフラムを撃針により破膜し、燃焼室内のガスを希釈タンク内に急膨張させ冷却して反応を凍結させる方法である。採取したガス中の NO_x の濃度は CLD 式 NO_x 分析計 (Yanaco ECL-88A) により計測し、得られた NO_x がすべて NO であると仮定して質量を求めた。希釈タンクには予め常温窒素ガスを充填しておき、採取したガスを希釈して、温度が 700K 以下になるように冷却した。

2・3 高速度シャドウグラフ撮影 混合気形成と火炎の発達状況の可視化を行うために高速度シャドウグラフ撮影を行った。撮影には 2 枚の凹面鏡 (焦点距離

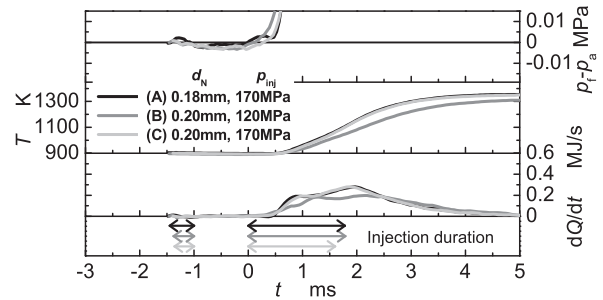


Fig.3 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{int}=1.0\text{ms}$)

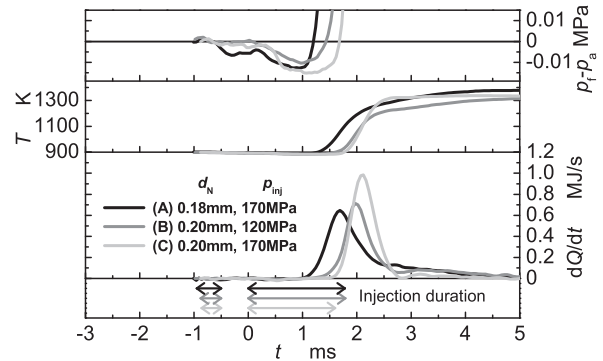


Fig.4 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{int}=0.5\text{ms}$)

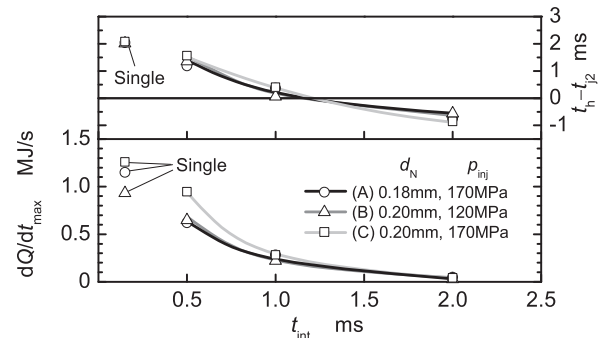


Fig.5 Effects of injection conditions on maximum heat release rate and hot flame delay from main injection start ($m_1=1.95\text{mg}$)

1910 mm) による透過型のシャドウグラフ光学系と高速度デジタルビデオカメラ (Photron FASTCAM SA1.1) を用いた。露光時間は $5.4\mu\text{s}$ 、撮影速度は 20000fps とした。

3. 実験結果および考察

3・1 圧力ならびに熱発生率経過 上記のピロロット噴射量および噴射間隔において噴射圧力および噴孔径を変化させ、熱発生率経過の変化を調べた。また、総噴射量が等しい単段噴射の実験も行なった。図 1 に単段噴射時の燃焼室内正味圧力 $p_f - p_a$ 、平均温度 T 、熱発生率 dQ/dt の経過を示す。正味圧力の経過に対する噴射条件の影響は小さい。熱発生率のピークは噴射率が高い条件ほど高くなり、もっとも噴射率の低い

(B)ではピーク後に低い熱発生率が続く。希薄化が十分でない混合気が拡散的に燃焼するものと思われる。

図2から4に一段目噴射量 $m_1=1.95\text{mg}$ について噴射間隔 t_{int} を2.0, 1.0, 0.5msとした二段噴射の結果を示す。横軸はメイン噴射開始時期を時刻ゼロとした。噴射間隔が2.0msまたは1.0msと長い場合にはパイロット噴霧が発熱した後にメイン噴射が行われるので拡散的燃焼が主体となる。このような燃焼形態では、噴射圧力の高い(A)および(C)で熱発生率が高くなる。噴射間隔の短い $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ ではパイロット噴霧とメイン噴霧の熱発生が一体となる。正味圧力の経過から、パイロット噴霧が吸熱から発熱に転じようとする時にメイン噴霧の吸熱が始まり、結果として着火が遅くなる様子が推定できる。そのため、予混合的燃焼を主体とする燃焼形態となる。噴射圧力が高く、噴孔径の小さい(A)で着火が最も早く、初期の熱発生率ピークが低い。

図5に噴射間隔 t_{int} と初期燃焼の最大熱発生率 dQ/dt_{max} および二段目噴射開始時期を基準とした着火時期 t_h-t_2 との関係を示す。 t_h は熱炎発生時期⁶⁾とした。 $t_{\text{int}}=2.0\text{ms}$ では t_h-t_2 が負となり、パイロット噴霧がメイン噴射開始前に着火したことがわかる。噴射間隔を短くして1.0msとすると t_h-t_2 がわずかにゼロを超える。さらに噴射間隔を短くすると、急激に t_h-t_2 が長くなり、最大熱発生率が増加する。着火遅れに対する噴射条件の影響はあまり見られないが、 $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ では噴射率の高い(C)で最大熱発生率が高くなる。

次に、パイロット噴射量 m_1 を3.9mgに増やして実験を行った。図6から8に結果を示す。 $t_{\text{int}}=2.0\text{ms}$ ではパイロット燃焼がメイン噴射の前に起こる。噴射圧力の低い(B)でパイロット燃焼の熱発生率が高い。(A)と(C)ではパイロット噴霧が過剰に希薄になるためにパイロット燃焼の熱発生が小さくなったと考えられる。 $t_{\text{int}}=1.0\text{ms}$ では熱発生率過程に噴射条件による差は見られない。 $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ ではどの噴射条件でもメイン噴射開始後に着火する。(A)と(C)では、 p_f-p_a はパイロット噴射後の低温酸化反応による緩やかな圧力上昇の後にメイン噴射の影響を受けてふたたび圧力が降下する。しかし、(B)ではメイン噴射による圧力降下が見られない。メイン噴射の影響を受ける前にパイロット噴霧が着火に至ったことが原因と思われる。(A)と(C)ではメイン噴霧の吸熱の影響を受けて着火が遅くなる。特に噴射率の大きい(C)ではその影響が顕著となり、予混合的な燃焼が主体となる。

図9に噴射間隔 t_{int} と初期燃焼の熱発生率ピーク値 dQ/dt_{max} および二段目噴射開始時期を基準とした着火時期 t_h-t_2 を示す。図5と同様に $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ で dQ/dt_{max} の変

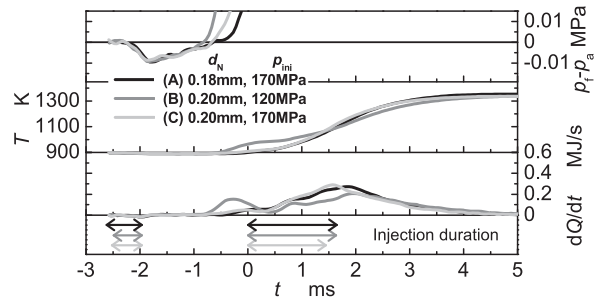


Fig.6 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=2.0\text{ms}$)

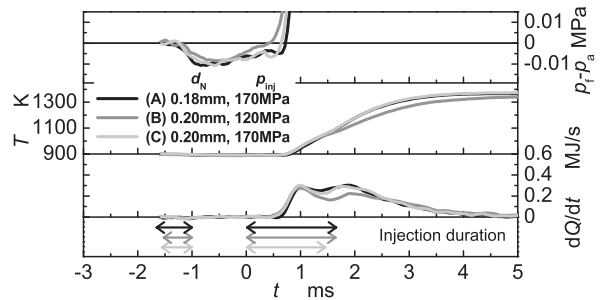


Fig.7 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=1.0\text{ms}$)

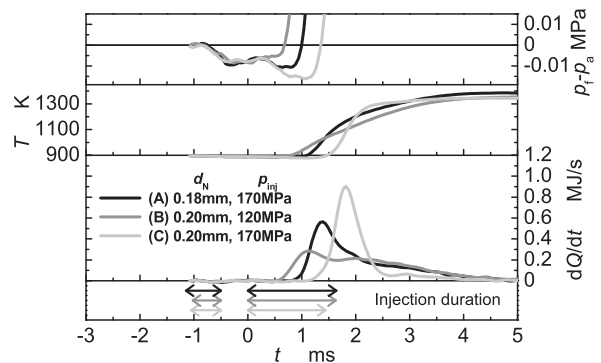


Fig.8 Pressure, temperature, and heat release rate for various injection conditions ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$)

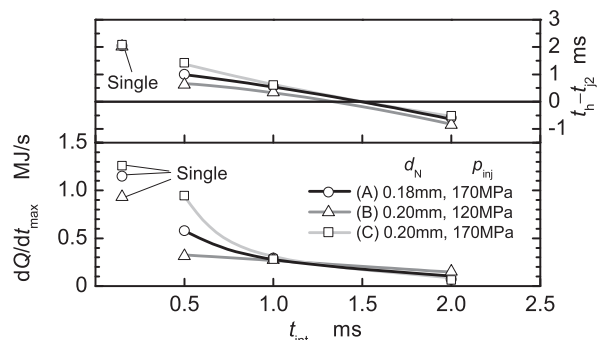


Fig.9 Effects of injection conditions on maximum heat release rate and hot flame delay from main injection start ($m_1=3.9\text{mg}$)

化が大きく、(C)で最も大きい。一方、 $m_1=3.9\text{mg}$ では(B)の dQ/dt_{max} が低い。これは、(B)ではパイロット噴霧がメイン噴霧の影響を受ける前に着火するので、拡散的燃焼主体となったためである。

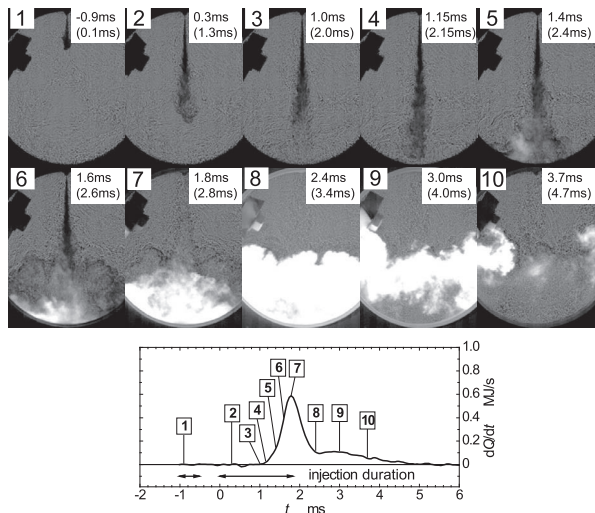


Fig.10 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (A))

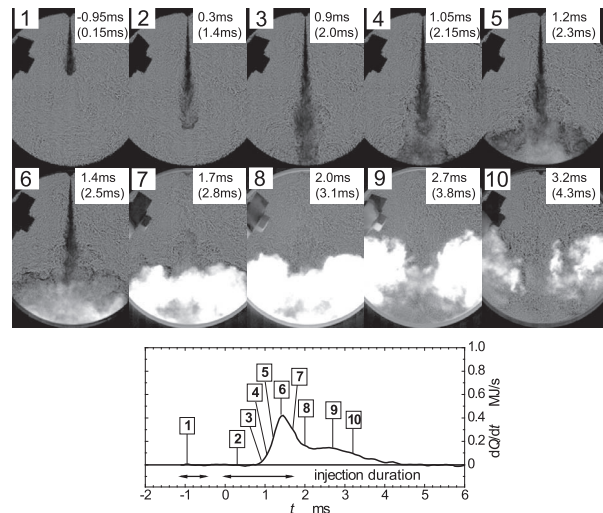


Fig.13 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (A))

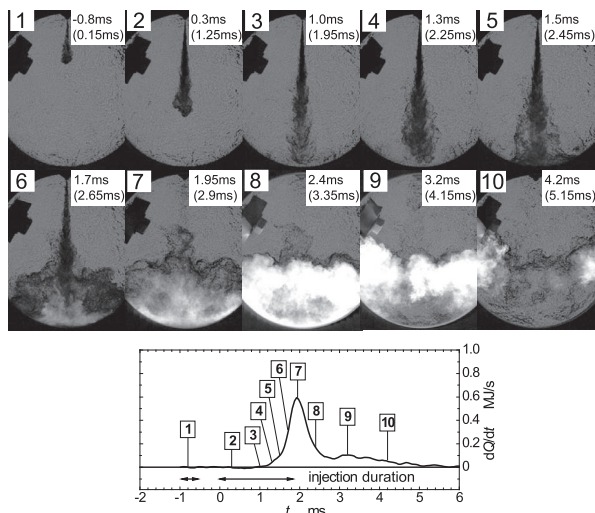


Fig.11 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (B))

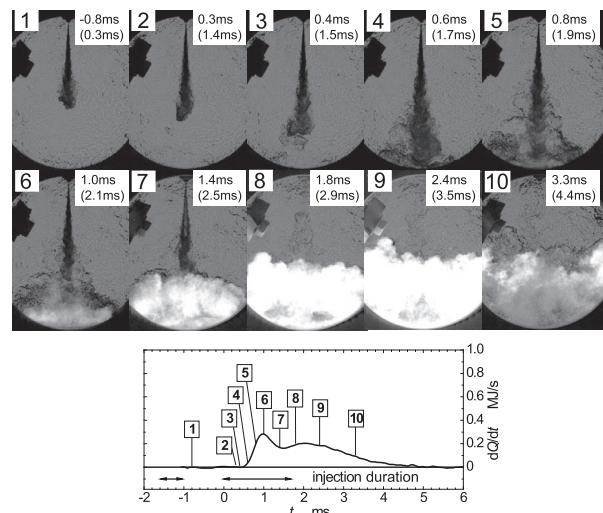


Fig.14 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (B))

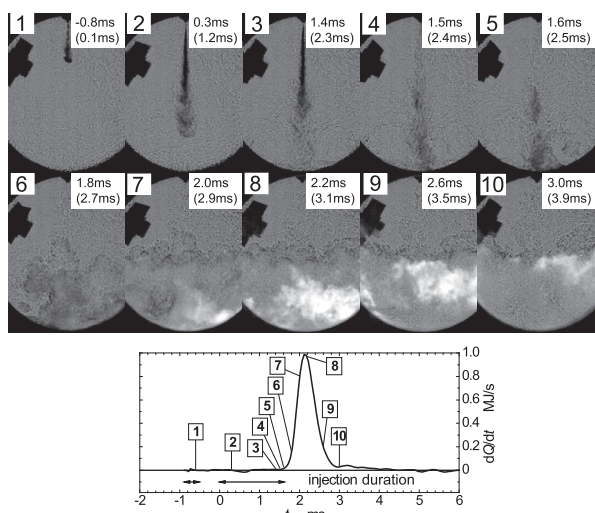


Fig.12 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (C))

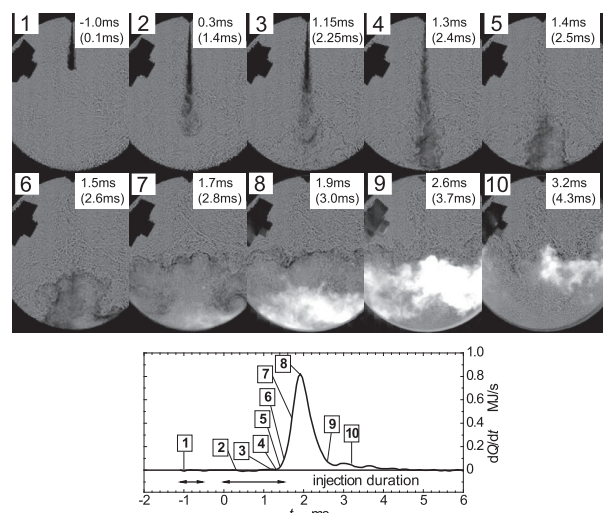


Fig.15 Shadowgraph images and heat release rate ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$, Case (C))

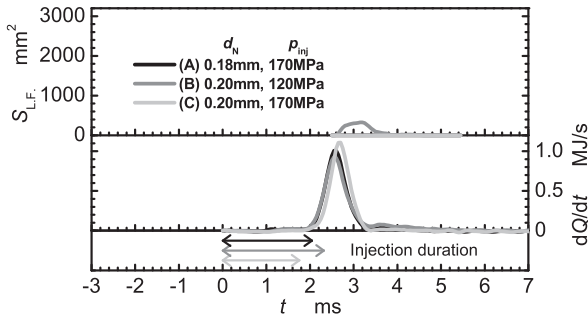


Fig.16 Effect of injection conditions on luminous flame area (Single-stage injection)

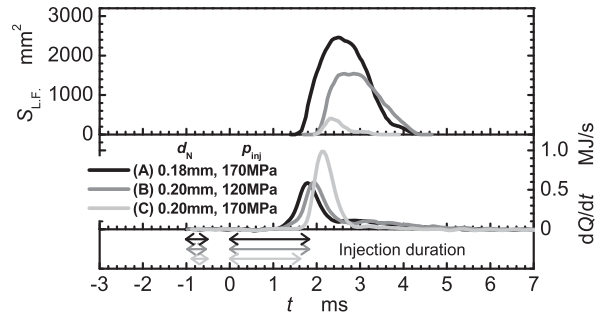


Fig.18 Effect of injection conditions on luminous flame area ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$)

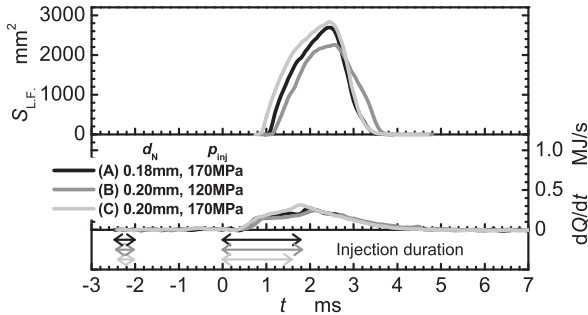


Fig.17 Effect of injection conditions on luminous flame area ($m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=2.0\text{ms}$)

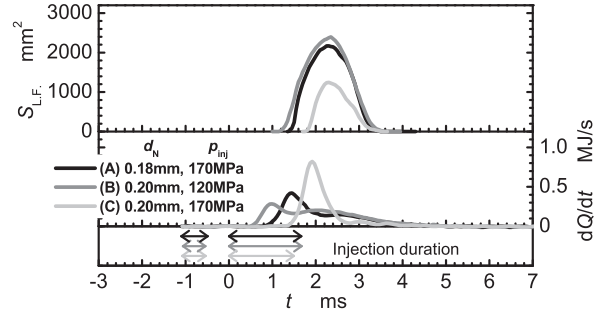


Fig.19 Effect of injection conditions on luminous flame area ($m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$)

3・2 燃料噴霧および火炎の状況 上記のような熱発生率経過が得られる理由について考察するため、高速度シャドウグラフ撮影による画像から、混合気形成と着火ならびに火炎の発達を観察した。ここでは、噴射条件の変更による燃焼過程の変化が大きい $m_1=1.95\text{mg}$ と 3.9mg の $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ の結果を示す。また、燃焼室内でのすすの発生状況を推定するため、画像から得た輝炎面積の時間変化について検討した。図10から15に高速度シャドウグラフにより撮影した画像と画像取得時の熱発生率経過を示す。各画像の右上の数字は二段目噴射開始からの経過時間であり、括弧内の数字は一段目噴射開始からの経過時間を示す。

$m_1=1.95\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ の(A) (図10) では、メイン噴霧先端部に熱炎が現れ (画像[4])、急激に熱炎領域が広がっていくとともに、熱炎が下方壁面より広がる。噴射条件(B) (図11) においても、同じような経過が見られるが、画像[1]や[2]から分かるように、パイロット、メイン噴霧ともに希薄化が遅い。噴射条件(C) (図12) においては噴霧の希薄化が早いうえ、噴射率が高く噴射期間が短いため、噴射終了後に希薄になった混合気から熱炎が発生する。その後は、壁に沿って広がった混合気が着火し、わずかな輝炎を伴って燃焼が進行する。このように、条件(C)のように噴射が早く終わり、メイン噴霧の希薄化が早く進む場合には着火が遅れ、輝炎の少ない燃焼となる。

$m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ の場合、条件(B) (図14) ではメイン噴霧の先端下流でパイロット噴霧によるものと思われる熱炎が早い時期に発生する (画像[3])。一方、条件(A) (図13) および(C) (図15) では希薄になったメイン噴霧の先端部から熱炎が発生する (それぞれ、画像[4]および[5])。すなわち、相対的に混合が遅い条件(B)では、パイロット噴霧が着火源になっていると考えられる。他の条件ではパイロット噴霧が希薄化することにより、発熱が遅れ、メイン噴霧の作った混合気とともに着火が起きる。

図16から19に、図1, 2, 4, 8の条件で得られたシャドウグラフ画像中の輝炎を二値化処理により求めた面積 S_{LF} と、そのときの熱発生率を示す。単段噴射の場合 (図16)、噴射圧力の高い条件(A)および(C)では高輝度の輝炎は見られない。(B)では、熱発生率ピーク時期から輝炎が現れるが、短期間で消滅する。パイロット噴射量が少ない $m_1=1.95\text{mg}$ では、噴射間隔が広い場合 (図17) は全体的に輝炎面積が大きく、燃料噴射終了時期付近で最大となり、熱発生率が減衰する燃焼後期にかけて減少する。(A)、(C)では面積は早めに立ち上がり、立ち下がりも早い。噴射間隔を狭くすると (図18)、着火が早い条件(A)で面積の上昇が早く、持続時間も長い。もともと噴射率が高く、メイン噴射終了と共に熱発生率が上昇する(C)では輝炎面積が小さく、持続時間も短い。 $m_1=3.9\text{mg}$, $t_{\text{int}}=0.5\text{ms}$ の場合 (図

19) もパイロット噴射量が少ない場合と似た傾向を示し、(C)ではほかの噴射条件に比べて輝炎面積が小さく持続時間が短い、パイロット噴射量の増加に伴って、面積、持続時間ともに増加する。

3・3 NOx生成の特性 全量ガスサンプリングの結果にもとづいて、噴射条件の変更による燃焼室内NOx質量の変化について検討した。図20に結果を示す。パイロット噴射量の多い $m_i=3.9\text{mg}$ では噴射間隔 t_{in} を0.5msから2.0msに長くするとNOx質量が減少する。噴射間隔の長い $t_{in}=2.0\text{ms}$ では拡散的燃焼が主体となり、量論混合比に近い濃度を持つ混合気が存在するので、NOxの生成が多くなると予想したが、噴射間隔が短い $t_{in}=0.5\text{ms}$ において、初期の予混合的燃焼が熱発生に占める割合が増加するにも関わらずNOx生成量が増加した。これは、着火時点で混合気が十分に希薄化されておらず、温度上昇の大きい量論比に近い濃度を持つ混合気が残存しているためと考えられる。また、単段噴射とパイロット噴射量の少ない $m_i=1.95\text{mg}$ を比較すると、条件(A)ではNOx質量の傾向に変化が見られないのに対して、(B)では二段噴射にすることで単段噴射よりも減少し、(C)では逆に増加する。このように、NOx生成量には一定の傾向が見られない。

噴射条件の変更によるNOx生成量の変化をより正確に把握するためには、NOx生成の時間履歴を調べるなど、より詳細な調査が必要である。

4. おわりに

定容燃焼装置内に模擬した二段噴射ディーゼル燃焼について、噴射圧力およびノズル噴孔径を変更した際の燃焼過程の変化について、熱発生率の解析、シャドウグラフ撮影による混合気と火炎挙動の観察、ならびに燃焼室内NOx質量の計測を行った。その結果、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 単段噴射ならびに噴射間隔の大きい二段噴射では、噴射条件によるメイン噴霧の着火遅れへの影響は小さく、噴射圧力を高めた場合、これに加えて噴孔径を縮小した場合に熱発生率の上昇が見られる。
- (2) パイロット噴射量が少ない条件で噴射間隔を小さくすると、噴射条件が熱発生過程に与える影響が強くなる。噴射圧力が高く噴射期間が短い条件では、パイロット噴霧の希薄化が進み、メイン噴霧の着火遅れが長くなるため、予混合的な燃焼が主体となる。
- (3) パイロット噴射量を増加させても上記の傾向は変わらないが、噴射間隔が小さい場合、噴射条件による最大熱発生率の差が大きくなる。

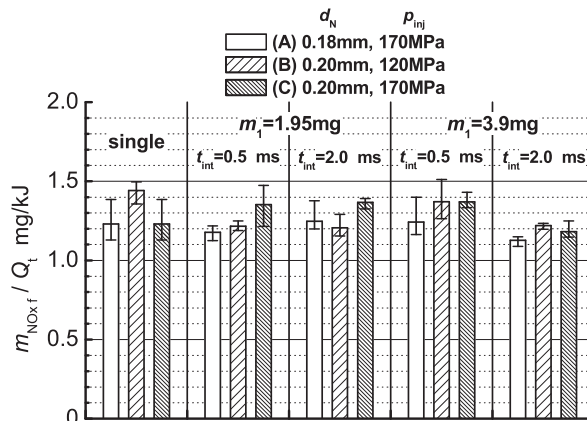


Fig.20 Effects of injection conditions on NOx mass per heat release

- (4) パイロット噴射量の多い条件では、噴射間隔を長くすると予混合的燃焼主体から拡散的燃焼主体へと変化するが、NOx質量は減少する。
- (5) 噴射間隔が小さい場合、噴射圧力の上昇や噴孔径の縮小により着火が遅くなり、輝炎面積が小さく、持続時間は短くなる。パイロット噴射量を増やしても、同様の傾向が見られるが、いずれの噴射条件でも輝炎面積は大きくなり、持続時間は長くなる。

最後に、本実験で使用した噴射系部品はトヨタ自動車株式会社にご提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Kanda, T., PCCI Operation With Early Injection of Conventional Diesel Fuel, *SAE paper No.2005-01-0378*, *SAE 2005 Transactions Journal of Engines* (2006), pp. 584-592.
- (2) Koci, C. P., Multiple Event Fuel Injection Investigations in a Highly-Dilute Diesel Low Temperature Combustion Regime, *SAE paper No.2009-01-0925, SP2242* (2009), pp. 353-373.
- (3) Horibe, N., Improvement of premixed charge compression ignition-based combustion by two-stage injection, *International Journal of Engine Research*, Vol. 10 (2009), No. 2, pp. 71-80.
- (4) Ihara, T., Analysis of the Effects of Mixing on the Temperature Dependence of Ignition Delay in n-Heptane Sprays, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 2130-2137.
- (5) Kitamura, Y., Effects of Fuel-Air Mixing on NOx Formation in Simulated Direct-Injection PCCI Combustion Using a Constant Volume Vessel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 72, No. 716 (2006), pp. 1029-1036.
- (6) Ishiyama, T., Effects of Heat Release Rate on NOx Time History in Diesel Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No. 624 (1996), pp. 2715-2721.