定容燃焼容器内に模擬した直噴 PCCI 燃焼における NO_x 生成に及ぼす混合の影響*

北村 泰隆^{*1}, モハンマディ アリ^{*1}
高橋 研^{*2}, 石山 拓二^{*1}

Effects of Fuel-Air Mixing on NO_x Formation in Simulated Direct-Injection PCCI Combustion Using a Constant Volume Vessel

Yasutaka KITAMURA^{*3}, Ali MOHAMMADI,
Ken TAKAHASHI and Takuji ISHIYAMA

^{*3} Graduate School of Energy Science, Kyoto University,
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

The effects of fuel injection parameters, such as injection pressure and nozzle hole diameter, on NO_x formation in direct-injection Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) combustion were investigated using a constant volume vessel and a total gas-sampling device. The results show that promotion of fuel-air mixing reduces final NO_x mass accompanying delayed hot flame. In this case, the NO_x reduction trend is enhanced by lowering oxygen concentration. Under a fixed nozzle hole size condition, final NO_x mass is reduced with increasing injection pressure, and smaller nozzle hole size promotes this effect. Enhanced mixing and reduced oxygen concentration provide longer mixing periods leading to lower NO_x mass per released heat NO_x/q_t, while promotion of mixing hardly affects NO_x/q_t when the quantity of injected fuel exceeds a certain level.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Pollutant, Fuel-Air Mixing, PCCI, Nitrogen Oxides, Ambient Oxygen Concentration, Gas Sampling

1. 緒 論

ディーゼル機関においては、粒子状物質と窒素酸化物(NO_x)の大幅な低減を目指して予混合圧縮自着火(PCCI)燃焼が注目されており、予混合吸気方式⁽¹⁾⁽²⁾および筒内直接噴射方式⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ともに盛んに研究が行われている。これらの混合気形成方法のうち、ディーゼル燃焼と組み合わせて機関の全負荷域をカバーする必要上⁽⁶⁾、直接噴射方式が実用上望ましい。しかし、早期に筒内直接噴射を行った場合には、失火と急激燃焼によって運転範囲が限定され、着火時期の制御が困難な問題に加え、燃料がシリンダライナに付着し、潤滑油の希釈や熱効率の低下が起きる。この問題を回避するためには、燃料噴射時期を上死点に近づける必要がある。その際に、低 NO_x の特性を保つためには、ごく小さい噴孔と高い噴射圧力を用いて混合気の均一・希薄化をすばやく進めることが重要とされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

こういった直接噴射による PCCI 燃焼は、着火時点で混合気の濃度が完全に均一にはならないが、通常のディーゼル燃焼と比べると平均濃度が低く、濃度の頻度分布は狭い。これまでの研究によると、このような条件では、噴射条件や酸素濃度を変化させると着火時期や熱発生率が大きく変化することがわかっている⁽⁹⁾。これは、量論比を超えて混合気が希薄化すると、着火反応の速度が急激に低下するためと考えられ⁽⁹⁾⁽¹²⁾、実機関においては、着火の安定な制御が難しくなる可能性がある。

これを防ぐためには、混合気濃度の不均一をある程度与えて、比較的反応の速い混合気を含ませるのが良いと考えられるが、これは、NO_x 生成速度の速い当量比範囲⁽¹⁰⁾に入る混合気を増やす方向なので、PCCI 燃焼本来の低 NO_x の特徴を損なう可能性がある。したがって、着火の制御性を保ちつつ低 NO_x 燃焼を実現するには、噴射条件や EGR 率を適切かつ精密に制御する必要がある。そのためには、ディーゼル燃焼に比べて弱い不均一性を持つ希薄混合気の燃焼において、混合の速度および酸素濃度が NO_x 生成に及ぼす影響を明らかにするとともに、着火時期や熱発生率の変化と NO_x

* 原稿受付 2005 年 9 月 12 日。

^{*1} 正員、京都大学大学院エネルギー科学研究科(〒606-8501 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: kitamura@elan.energy.kyoto-u.ac.jp

生成の関連を解明する必要がある。しかしながら、このような事柄を基礎的に扱った研究は数少ない。

そこで本研究では、定容燃焼装置および全量ガスサンプリング装置を用いて PCCI 相当の雰囲気気条件の下で酸素濃度、噴射圧力、噴孔径および噴射量の変化が熱発生率経過および NO_x 生成に及ぼす影響を調べた。さらに、実験結果を整理することにより、混合と NO_x 生成の関係について考察を加えた。

2. 実験装置および方法

2.1 定容燃焼装置

本研究で用いた定容燃焼装置は、希薄予混合気を火花点火・燃焼させて得た高温高压の模擬空気の中に燃料噴射を行う方式である⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本装置は図 1 に示すように、直径 80mm、奥行 30mm (容積約 150cm³) の燃焼室を持つ。その構造ならびに作動原理の詳細については、既報⁽¹²⁾を参照いただきたい。

燃料噴射開始時点での雰囲気気圧 p_i 、温度 T_i および酸素モル分率 r_{O_2} は、希薄予混合気 (C_2H_4 , H_2 , O_2 および N_2) の組成と充填圧力を調整することにより変更した。ただし、本研究での雰囲気気温度 T_i は、燃料噴射開始時の燃焼室内圧力から算出した熱力学的平均温度である。また、雰囲気気の酸素モル分率 r_{O_2} は O_2 を N_2 で置換することにより、15, 18, 21mol% と変化させた。

燃料は、セタン価が軽油とほぼ等しい n -ヘプタンを用いた。燃料噴射にはコモンレール式の電子制御燃料噴射装置 (DENSO ECD-U2P) を用い、単噴ノズルで燃焼室中心に向かって単発噴射を行った。噴射条件は、噴孔径 d_N を 0.17~0.22mm、噴射圧力 p_{inj} を 60~180MPa、噴射量 m_f を 12.3~39.0mg ($r_{O_2}=21\%$ のとき総括当量比 $\phi=0.16\sim0.52$) の範囲で変更した。

Fig. 1 Cross section of constant volume vessel

燃焼室内の圧力と燃料噴射弁のニードルリフトはそれぞれ圧電式圧力変換器 (KISTLER 6052A)、渦電流式リフトセンサで測定した。熱発生率の算出には、単層モデルを仮定し、燃焼室壁面への熱損失および燃料噴射によるエンタルピー変化を考慮して求めた。熱損失率は、燃料噴射を行わないときの圧力降下から熱通過率を求め、燃焼時もこれが変化しないとして推定した。

2.2 雰囲気気条件の選択

実機関での直噴 PCCI 燃焼の特徴として、二段着火と熱炎を伴う一山の予混合的燃焼が支配的となることが知られている⁽⁸⁾。本研究では、定容のもとでこのような熱発生過程の特徴を再現できる雰囲気気条件を選択する。図 2 は噴孔径 $d_N=0.18\text{mm}$ 、 $p_{inj}=120\text{MPa}$ 、噴射量 $m_f=19.5\text{mg}$ において、雰囲気気圧 $p_i=2\text{MPa}$ 、雰囲気気温度 $T_i=900\text{K}$ および酸素モル分率 $r_{O_2}=21\%$ の条件での正味圧力上昇 p_r-p_a 、熱発生率 dq/dt および噴射弁のニードルリフトセンサ出力電圧 h の履歴である。ここで、 p_r は燃焼時の燃焼室内圧力、 p_a は燃料噴射を行わなかったときの圧力経過であり、 p_r-p_a は噴霧の吸熱と熱発生による正味の圧力変化を示す。 dq/dt の履歴からまず、一山の予混合的燃焼が支配的であることが分かる。また、 dq/dt からは明確に読み取れないが、 p_r-p_a に微弱ながら熱炎に先立つ熱発生による圧力上昇 (図中 A) が見られる。このように、雰囲気気条件を $p_i=2\text{MPa}$ 、 $T_i=900\text{K}$ とすれば、PCCI 相当の燃焼が再現できるため、これ以降、本条件を標準雰囲気気条件として、噴射条件および酸素モル分率を変更した際の NO_x 生成について調べた。

なお、本研究では、 p_r-p_a および dq/dt が急激に上昇し始める時期を熱炎発生時期とし⁽¹²⁾、図のように圧力上昇の前後の p_r-p_a にフィットする二本の近似直線の交点としてこれを定めた。また、噴射終了からこうして求めた熱炎発生時期までの期間を混合期間 τ_{mix} と定義し、

Fig. 2 Simulated PCCI combustion

Fig. 3 Total gas-sampling apparatus

NO_x 生成量との関連を検討した。

2.3 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、図 3 に示す全量ガスサンプリング装置を用いて 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されたダイヤフラムを撃針により破膜させ、燃焼室内のガスを急膨張させ冷却して反応を凍結させる方法である⁽¹³⁾。採取したガス中の NO_x(NO+NO₂)の濃度は CLD 式 NO_x 分析計 (Yanaco ECL-88A) により計測した。なお、希釈タンクには予め常温窒素ガスを充填しておき、採取時に質量比で約 5.5 倍に希釈することで、燃焼ガスの温度が約 600K 以下になるように冷却した。また、本研究では NO_x の質量を求める際には、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。

3. 実験結果および考察

3.1 NO_x 質量の履歴と最終 NO_x 質量

まず、燃焼中の NO_x 濃度の履歴を明らかにするために、酸素モル分率 r_{O_2} を 21%、燃料噴射量を $m_f=19.5\text{mg}$ (総括当量比 $\phi=0.26$) に固定し、平均噴射率がほぼ一定になるように噴孔径 d_N と噴射圧力 p_{inj} を変化させて実験を行った。図 4 は、そのときの熱発生率 dq/dt 、燃焼室内平均温度 T 、ニードルリフトセンサの出力 h 、ならびに NO_x 質量の噴射開始からの時間履歴を示す。

$d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ のような比較的混合の遅い条件では、予混合的燃焼の高い熱発生率の後に微弱な拡散的燃焼による熱発生が見られる。この場合には、拡散的燃焼が続く間、徐々に NO_x 質量が増加して、噴

Fig. 4 Effects of injection conditions on NO_x mass history under a fixed injection rate

射開始後約 13ms でほぼ一定値に達する。しかし、噴孔径をより小さく、噴射圧力を高めた他の条件では、拡散的燃焼による熱発生が見られない。このとき NO_x 質量は現状の装置の応答性では追従できないほど立ち上がりやすく、すみやかに一定値に達する。

ここで、実測された NO_x 濃度変化の意味を明らかにするために、均一混合気の燃焼における NO_x 生成量・速度との比較を行った。簡略化のため、均一 n-ヘプタン-空気混合気が定容下で瞬時に燃焼して平衡に達し、そのときの温度と組成をもとに拡張 Zeldovich 機構に従って NO が生成されるとして、その濃度推移を計算した⁽¹⁴⁾。ただし NO の初期濃度はゼロ、混合気の初期温度、圧力は実験と同じ 900K、2MPa とし、熱損失は無視した。また、熱発生量が実測の平均と等しくなるように燃料量を調整したので、当量比が 0.21 となった(熱量ベースの燃焼効率 80%に相当)。計算結果によると、平衡断熱火炎温度は 1497K で実測平均温度よりやや高く、充分時間が経過した後の平衡濃度(質量)は 1.38mg と、実測よりも高いが、混合気が希薄なため生成速度は非常に遅く、平衡濃度の半分に達するまでの時間は約 1700s であった。

すなわち、実測で得られた NO_x 濃度の増加は均一混合気比べて非常に速いといえる。これは、混合気濃度が不均一で、総括当量比よりも高い当量比の混合気が含まれることによる。一方、時間が経過した後の NO_x 濃度が平衡濃度よりも低いのは、図に示した平均温度 T の低下から推定されるように、燃焼室壁面からの熱損失により、燃焼ガス温度が低下するためと考えられる。このように、本実験における NO_x 生成は、冷却の影響を受けていると考えられるが、図から明らかなように、同じ総括当量比であっても、混合の条件によって NO_x 濃度

Fig. 5 Effects of injection conditions on heat release rate under a fixed injection rate ($m_i=19.5\text{mg}$)

が決定付けられる。そこでこれ以降、 $t=15\sim 25\text{ms}$ の期間のように NO_x 質量が一定となる値を最終 NO_x 質量と定義して噴射条件ならびに酸素濃度との関連を調べる。

3.2 噴射率一定のもとでの噴射条件の影響

前節で示した噴射率一定の実験を、酸素モル分率 $r_{\text{O}_2}=18, 15\%$ についても実施して熱発生率 dq/dt および最終 NO_x 質量を調べ、 $r_{\text{O}_2}=21\%$ の結果とともに図 5 および 6 に示す。

$r_{\text{O}_2}=21\%$ において、噴孔径 d_N を小さくし噴射圧力 p_{inj} を上昇させると熱炎発生時期が遅れ、 dq/dt のピーク値は増加する。このとき、最終 NO_x 質量は減少する。熱炎発生の遅れは、混合の促進に伴い噴霧内部の希薄化が促進され、混合気の着火反応の速度が低下するためと考えられる⁽⁹⁾。一方、 dq/dt の増加は、 d_N の減少により熱発生後期の微弱な熱発生率が見られなくなることから、混合が遅い場合に拡散的に燃焼していた燃料が、空気と混合されてから燃焼するようになるためと考えられる。この場合、熱発生率が増加しても、混合気の不均一性が弱められているので、 NO_x 生成量は減少する。

酸素モル分率を低下させた $r_{\text{O}_2}=18, 15\%$ の場合には、 d_N を小さく p_{inj} を高くすると熱炎発生が遅れるとともに dq/dt が低下する。この傾向は、酸素モル分率の低下により、熱炎発生までの反応時間が長くなり、その間に混合がさらに進んで、混合気濃度の均一度が高まった場合に見られるものと考えられる。均一混合気の熱炎発生後の燃焼率(圧力上昇率)は当量比の減少とともに低下する⁽¹⁵⁾。上記のように混合気の均一度が高まったうえ、さらに、噴孔の縮小や噴射圧力の上昇により、希薄・均

Fig. 6 Effects of injection conditions on final NO_x mass under a fixed injection rate ($m_i=19.5\text{mg}$)

一化を進めると、均一混合気と同様に燃焼率、すなわち熱発生率が低下すると考えられる。

結局、 r_{O_2} を低下させたときの熱炎発生の遅れと dq/dt の低下は、 d_N が小さく p_{inj} が高いほど顕著になる。最終 NO_x 質量の変化はこの傾向に良く対応し、もともと噴孔が小さく噴射圧力の高い $d_N=0.17\text{mm}$, $p_{\text{inj}}=160\text{MPa}$ の条件で、 r_{O_2} を低下させたときの最終 NO_x 質量の低下割合が大きい。

3.3 噴射圧力の影響

次に、同一噴孔径で噴射圧力を変化させた際の燃焼特性および NO_x 生成について検討を行った。図 7 に、噴射量を前述の実験と等しくし、酸素モル分率 $r_{\text{O}_2}=21, 18\%$ において、噴孔径 $d_N=0.22\text{mm}$ および 0.18mm について噴射圧力 p_{inj} を変更した際の、 dq/dt および h の履歴を示す。また、この条件で得られた最終 NO_x 質量を p_{inj} で整理した結果を図 8 に示す。

図 7 によると、 p_{inj} を変更したときの dq/dt の変化は、噴孔径によって大きく異なる。噴孔の大きい $d_N=0.22\text{mm}$ では、 r_{O_2} により熱炎発生時期が変化するものの、 p_{inj} による熱炎発生時期および dq/dt の変化は小さい。これは、噴孔が大きいと噴霧内に導入される空気の流量が燃料流量に対して少なく、また微視混合の速度も低いので⁽¹⁶⁾、噴射圧力を増加させてもなお濃度不均一が残り、反応の速い比較的当量比の高い混合気が常に含まれるためと考えられる。一方、噴孔の小さい $d_N=0.18\text{mm}$ では、 p_{inj} の増加により混合が強められたときの dq/dt の変化は、図 5 に示した結果とよく似た傾向となる。

図 8 によると、 r_{O_2} の低下により、噴孔径に関わらず最終 NO_x 質量が大きく減少するが、噴孔径の小さい $d_N=0.18\text{mm}$ のほうが最終 NO_x 質量は低い。なお、

Fig. 7 Effects of injection pressure on heat release rate for different injection nozzle hole sizes ($m_f=19.5\text{mg}$)

$d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ の条件で NO_x がかなり低くなったが、これは図 7 に示したように、噴射期間が長く、噴射終了前に熱炎の発生が起こるため、拡散的燃焼による微弱な熱発生が長く続き、この間に容器壁面からの冷却により混合気温度が低下したのが原因と推察される。この条件を除くと、噴孔径による最終 NO_x 質量の差は、噴射圧力が高いほど大きくなる。

3.4 噴射量の影響

前節までの結果から、噴孔を小さくした上で噴射圧力を上昇させると NO_x 生成量が特に少なくなることがわかった。これは、充分空気が導入されて混合気の平均当量比が下がるのに加え、当量比の頻度分布の広がり小さくなって、 NO_x 生成速度の速い当量比の範囲に入る混合気量が減るためと考えられる。しかし噴射量が増加すると、平均当量比、当量比の広がりともに大きくなり、 NO_x 生成の抑制に限界を生じる可能性がある。そのためここでは、噴射期間の変更により噴射量を変化させた際の NO_x 生成への影響を調べた。酸素モル分率 $r_{O_2}=21$ および 18% において、平均噴射率がほぼ等しい $d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ および $d_N=0.17\text{mm}$, $p_{inj}=160\text{MPa}$ の二つの噴射条件について噴射量 m_f を $12.3\sim 39.0\text{mg}$ の範囲で変更した際の dq/dt および h の履歴を図 9 に示す。

$d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ の条件では、熱炎の発生時期は r_{O_2} によって決まり、 m_f の影響を受けない。また、もともと噴射量が少ない $m_f=12.3\text{mg}$ で他より dq/dt が低いのを除くと、 m_f の増加により dq/dt ピークはほとんど変化せず、熱発生後期の微弱な拡散的燃焼の熱発生率が上昇する。一方、噴孔が小さく噴射圧力が高い $d_N=0.17\text{mm}$, $p_{inj}=160\text{MPa}$ でも、非常に遅い時期に熱

Fig. 8 Effects of injection pressure on final NO_x mass for different injection nozzle hole sizes ($m_f=19.5\text{mg}$)

発生が生じる $m_f=12.3\text{mg}$, $r_{O_2}=18\%$ の条件を除くと、熱炎発生時期は酸素モル分率 r_{O_2} によってほぼ決まる。ただし、同じ r_{O_2} において、熱炎発生は $d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ に比べて遅く、熱発生後期の微弱な拡散燃焼も見られない。すなわち、希薄・均一化が進んでいるといえる。この場合には、 m_f の増加に伴って dq/dt のピークが上昇する。特に、 $m_f=12.3\sim 27.3\text{mg}$ の範囲で、 dq/dt の上昇が急激である。

図 10 に図 9 と同じ雰囲気条件で、前記条件と同等の平均噴射率となる $d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$ のデータを加えた最終 NO_x 質量の計測結果を示す。図中には、最終 NO_x 質量を熱発生率から計算した総発生熱量 q_t で除した NO_x/q_t も表示した。なお、プロットは、各条件で実施した 3 回以上の実験結果の平均値である。

噴射量 m_f の増加とともに最終 NO_x 質量は増加する傾向を示し、酸素モル分率 r_{O_2} が低くなると最終 NO_x 質量および NO_x/q_t が低下する。 NO_x/q_t は、

Fig. 9 Effects of injection quantity on heat release rate for different injection conditions

Fig. 10 Effects of injection quantity on final NO_x mass for different injection conditions

$d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=60\text{MPa}$ の条件では, m_f とともに最初は増加するが, m_f が 19.5mg ($r_{O_2}=21\%$ で $\phi=0.26$) 以上になるとほぼ一定値となる。噴孔が小さく噴射圧力が高い他の噴射条件でも同様の変化が見られるが, m_f が 27mg ($r_{O_2}=21\%$ で $\phi=0.36$) までは, dq/dt の増加とともに NO_x/q_i が増加し, それ以降はほぼ一定となる。

m_f が 27mg より小さい範囲では, 噴孔を小さく, 噴射圧力を高めるほど NO_x/q_i が低くなるが, m_f をそれ以上にすると, 噴射条件による差が小さくなる。すなわち, 噴射量が少ない範囲では, 混合気の均一・希薄化を促進すると, NO_x 生成量を減らせるが, 噴射量がある程度以上になると, 発生熱量を増やせば, それだけ NO_x 生成量が増えるようになり, 本実験の範囲内では, 噴射条件の選択によって NO_x 生成を抑えることが難しくなる。これは, 前にも触れたように, 総括当量比の増加によって, 混合気が NO_x 生成速度の速い当量比の範囲に滞留するのを防ぐにくくなるためと考えられる。

3.5 混合時間と NO_x 生成量

ここでは, 以上のデータをもとに, NO_x 生成と混合の関係について整理を試みる。試験機関を用いた直噴 PCCI 燃焼の研究⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾から, 燃料噴射が終了してから熱炎が発生するまでの期間(混合期間)が, 混合の度合いと関連することが指摘されている。そこで本研究ではこれに準じて, 2.2 節で定義した混合期間 τ_{mix} で発生熱量あたりの最終 NO_x 質量 NO_x/q_i を整理した。図 11 に, その結果を示す。図には, 図 10 に示した三通りの噴射条件について, 噴射量 m_f を 19.5mg および 33.5mg としたデータを選び, さらにこれらの噴射条件と噴射量について酸素モル分率 r_{O_2} を 15% とした実測結果を加えて表示した。図中のプロットは m_f ならびに r_{O_2} ごとに記

Fig. 11 Effects of mixing period τ_{mix} on final NO_x mass per released heat

号を区別したが, 噴射条件の違いは区別していない。

噴射量が少ない $m_f=19.5\text{mg}$ では, 噴孔の縮小と噴射圧力の増加による混合の促進や酸素モル分率の低下により, τ_{mix} が約 0.5ms から 3ms に増加する間に NO_x/q_i が急激に減少する。ただし, $\tau_{mix}>3\text{ms}$ のごく低い NO_x/q_i となる条件は $r_{O_2}=15\%$ のときのみ実現できる。一方噴射量が多い $m_f=33.5\text{mg}$ では, 前述のように噴射条件によって NO_x/q_i が影響を受けにくい。この傾向は r_{O_2} を 15% として τ_{mix} が長くなっても変わらず, 酸素モル分率の低下のみが NO_x 生成を抑える要因となる。

このように, 噴射量が少ない条件では, 混合の促進と酸素モル分率の低下の組み合わせによって混合時間を確保すると, NO_x 生成を抑えることができるが, 噴射量が多い場合には, 混合の促進による混合時間の確保が必ずしも NO_x 抑制にはつながらない。

次に, 噴射条件と混合期間 τ_{mix} との関連について検討した。図 12 に, 混合の影響が強く現れた噴射量 $m_f=19.5\text{mg}$ において, τ_{mix} と最終 NO_x 質量を噴射圧力 p_{inj} で整理した結果を示す。なお, 図中のプロットは 3 回以上の実測値の平均である。酸素モル分率 r_{O_2} に関わらず噴射圧力 p_{inj} を上げると τ_{mix} は長くなり, それに伴い最終 NO_x 質量も減少する。特に, $d_N=0.18\text{mm}$ を用いた方がより τ_{mix} が増加する。これは, 図 7 に示したように, p_{inj} の上昇に伴う熱炎発生が遅れによるものである。また, τ_{mix} がほぼ等しい $d_N=0.22\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$ と $d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$ では, 後者の方が最終 NO_x 質量は低い。これは, 後者では噴孔径が小さいので, 同じ τ_{mix} であっても混合気の均一化が速く進むためである。このように, 噴孔を小さくすることで, 混合時間を確保できる上, 均一化速度も高まるので, NO_x 生成抑制に有利となる。しかし, 噴射期間を長くし噴射量を増加させると, 図 10 ならびに 11 に示したよう

Fig. 12 Effects of injection pressure on mixing period τ_{mix} and final NO_x mass under different nozzle hole sizes ($m_i=19.5\text{mg}$)

に、混合期間が短くなり NO_x の抑制が困難になるため、更なる EGR 率の増加、もしくは混合をさらに促進して混合気の希薄化および均一化を図ることが必要となる。

4. 結 論

定容燃焼装置および全量ガスサンプリング装置により、定容の下で PCCI 燃焼を模擬して NO_x 生成に及ぼす噴射条件の影響を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) 同一酸素モル分率で、噴射率を固定して小噴孔径と高い噴射圧力を用いると熱炎の発生が遅れ、最終 NO_x 質量は低減する。特に酸素モル分率が低い場合に小噴孔径と高い噴射圧力とすると、熱炎発生の遅れに加えて熱発生率が低下し、最終 NO_x 質量はさらに大きく減少する。
- (2) 同一噴孔径で噴射圧力を上げると、最終 NO_x 質量は減少する。このとき、より小さい噴孔径を用いて希薄化・均一化を促進すると、特に噴射圧力が高いときに最終 NO_x 質量の減少が大きくなる。
- (3) 酸素モル分率に関わらず、噴射量が多くない場合は、結論(1)、(2)に示したように、混合を速めることにより発生熱量当りの最終 NO_x 質量 NO_x/q_i は減少するが、噴射量がある程度以上に増加させると、噴射条件が NO_x/q_i に及ぼす影響が小さくなる。
- (4) 噴射量が少ない条件では、混合の促進と酸素モル分率の低下の組み合わせによって混合期間を確保すると、NO_x 生成を抑えることができる。このとき、等しい混合期間でも混合が速く進む条件の方が、

NO_x は少ない。一方、噴射量が多い場合には、本研究の噴射条件の範囲内では混合の促進による混合時間の確保が必ずしも NO_x 抑制にはつながらない。ただし、この場合でも、酸素モル分率の低下により NO_x 生成量は減少する。

なお、本研究の一部は京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」による補助を受けた。また、トヨタ自動車株式会社に本実験で使用した燃料噴射系の部品をご提供頂いた、ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) Furutani, M., et al., A New Concept of Ultralean Premixed Compression-Ignition Engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.595 (1996), pp.1240-1246.
- (2) Christensen, M., Johansson, B., Amnéus, P. and Mauss, F., Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition, SAE Paper No.980787, (1998).
- (3) Yanagihara, H., Simultaneous Reduction of NO_x and Soot in Diesel Engines Using a New Mixture Preparation Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.63, No.606 (1997), pp.724-729.
- (4) Takeda, Y., et al., Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.599 (1996), pp.2887-2894.
- (5) Harada, A., et al., A Study of Ignition Timing Control on Premixed Lean DI Compression Ignition Engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.670 (2002), pp.1827-1832.
- (6) Shimazaki, N., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.57, No.9, (2003), pp.59-64.
- (7) Ishiyama, T., et al., Analysis of Ignition Processes in a Fuel Spray using an Ignition Model Including Turbulent Mixing and Reduced Chemical Kinetics, *International Journal of Engine Research*, Vol.4, No.3, (2003), pp.155-162.
- (8) Shimazaki, N. and Nishimura, T., Improvement of Exhaust Emissions of Premixed-type Diesel

- Combustion with Fuel-Injection Near Top Dead Center, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.34, No.1, (2003), pp.53-58.
- (9) Ishiyama, T., et al., Modeling and Experiments on Ignition of Fuel Sprays Considering the Interaction Between Fuel-Air Mixing and Chemical Reactions, SAE Paper No.2003-01-1071, (2003).
- (10) Kitamura, Y., et al., Fundamental Investigation of NO_x Formation in Diesel Combustion under Supercharged and EGR Conditions, SAE Paper No.2005-01-0364, (2005).
- (11) Siebers, D. L., *SAE Transactions*, Vol.94, Paper No.852102, (1985), pp.673-686.
- (12) Ihara, T., et al., 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.
- (13) Ishiyama, T., et al., Effects of Heat Release on NO_x Time History in Diesel Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.598 (1996), pp.2521-2527.
- (14) Shioji, M., et al., Effect of Mixture Heterogeneity on the Formation of Nitrogen Oxides in Lean-Burn Gas Engines, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.588 (1995), pp.3092-3098.
- (15) Tanaka, S., et al., Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels and Additives, *Combustion and Flame*, Vol.132, (2003), pp.219-239.
- (16) Ishiyama, T., et al., Effect of Exhaust Gas Recirculation and Injection Pressure on Exhaust Emissions from a Diesel Engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.66, No.646, (2000), pp.1578-1585.
- (17) Shimazaki, N., et al., Dual-Mode Combustion Concept With Premixed Diesel Combustion By Direct Injection Near Top Dead Center, SAE Paper No.2003-01-0742, (2003).
- (18) Okude, K., et al., Premixed Compression Ignition (PCI) Combustion for Simultaneous Reduction of NO_x and Soot in Diesel Engine, SAE Paper No.2004-01-1907, (2004).