

G070033

アフター噴射を用いたディーゼル燃焼における混合気形成・燃焼過程の解析

山田 竜久^{*1}, 吉田 和希^{*1}, 堀部 直人^{*2}, 石山 拓二^{*2}

Analysis of Combustion Process in Diesel Combustion with After Injection

Tatsuhisa YAMADA^{*1} Kazuki YOSHIDA Naoto HORIBE and Takuji ISHIYAMA

^{*1} Kyoto University Graduate School of Energy Science
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

This study aims to investigate the combustion process and soot formation in diesel combustion with main/after injection. Heat release rates and high-speed photographs of luminous flame were analyzed changing injection interval and after-injection quantity using a constant volume vessel equipped with a multi-hole nozzle. The results show that luminous flame is still observed in the later stage of combustion for longer injection interval. Luminous flame decays earlier as the quantity of after injection decreases. With the lowest quantity of after injection, luminous flame disappears earlier than in the case of single injection.

Key Words : Diesel Engine, After Injection, Combustion, Fuel Spray, Constant Volume Vessel

1. はじめに

燃料の多段噴射はディーゼル機関の性能・排気の改善手法の一つとして活用されている。多段噴射のうち主噴射の後に少量の燃料の噴射を行うアフター噴射は排出黒煙濃度の低減に効果があるとされている⁽¹⁾。しかし、アフター噴射は噴射条件によってはかえって NOx や黒煙の排出増加を招いてしまう⁽²⁾。その効果を最大限に引き出すためには噴射量や噴射時期を適切に選択する必要がある。そのため、噴射条件が燃焼過程に及ぼす影響を詳細に理解しなければいけない。そこで本研究では、定容燃焼装置を用いてメイン噴射とアフター噴射の二段噴射を行い、噴射間隔、噴射量配分などの噴射条件が熱発生、火炎の発達に及ぼす影響を圧力履歴の測定と直接撮影により調べた。

2. 実験装置および方法

本研究では、希薄予混合気を火花点火・燃焼させて高温高压雰囲気を作成する方式の定容燃焼装置を用いた。実験装置図を図 1 に示す。メイン噴射開始時点での雰囲気圧力 p_i を 4MPa, 温度 T_i を 900K, 酸素モル分率 r_{O_2} を 21% とした。コモンレール式燃料噴射装置を用い、燃焼室（内径 80mm, 深さ 30mm）へ軽油（JIS #2, CI=54.2）を噴射した。燃料噴射弁はピエゾ駆動式で、噴孔径を 0.18mm, 噴孔数を 6 とし、噴射圧力 p_{inj} を 130MPa とした。総噴射量 m_{tot} を 40mg に固定し、アフター噴射量 m_{Af} , メイン噴射終了からアフター噴射開始までの間隔 t_{int} を変化させた。表 1 に本研究で用いた噴射条件を示す。

Zeuch 法に準じた測定法により噴射率経過を求めた。図 2 に $t_{int}=0.3ms$ で m_{Af} を変化させた際の噴射信号と噴射率 dm/dt を示す。横軸 t は噴射信号開始時刻を 0ms とした。噴射率は噴射信号から約 0.21ms 遅れて立ち上がり、約 0.6ms で最大となる。アフター噴射ではニードル・シート間の流路が全開にならないため、噴射量が少ないほど噴射率が低くなる。噴射期間と噴射間隔はこのような噴射率波形から求めた。

直接撮影により輝炎とアフター噴霧の発達過程を調べた。撮影には高速度デジタルイメージングカメラ (Vision

^{*1} 京都大学（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

^{*2} 正員, 京都大学エネルギー科学研究科

E-mail: yamada.tatsuhisa.36c@st.kyoto-u.ac.jp

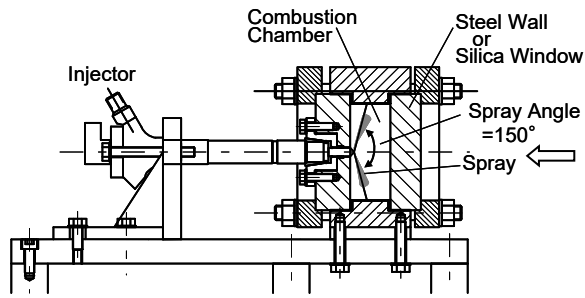


Fig.1 Schematic of the constant volume vessel

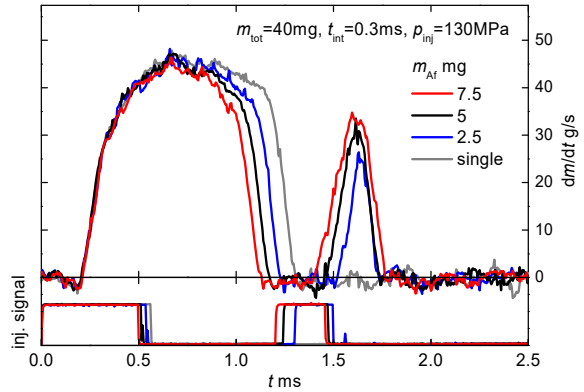


Fig.2 Injection rate

Table1 Injection conditions

m_{tot} (mg)	m_{Af} (mg)	t_{int} (ms)
40	2.5	0.3
	5.0	0.1, 0.3, 0.5, 0.7
	7.5	0.3
	0(single)	-
35	0(single)	-

Research Phantom v7) を使用した。撮影は図の矢印の方向から行い、撮影速度を 20000fps、露光時間を $2\mu\text{s}$ とした。また、すすの生成・消滅時期の指標とするため画像に二値化処理を施し輝炎面積を計測した。輝炎面積は撮影した画像を特定の閾値で二値化し、閾値以上の領域のピクセル数を数えることで求めた。測定領域は一本の噴霧中心軸から 2 つ隣の噴霧中心軸までの中心角 120 度の扇形領域とした。

3. 実験結果および考察

3・1 噴射間隔の影響

図 3 に p_{inj} を 130MPa, m_{Af} を 5mg とし t_{int} を 0.1~0.7ms の範囲で変化させた際の熱発生率 dQ/dt を示す。また比較のため総噴射量を一致させ 40mg とした場合、ならびにアフター噴射の分だけ減らして噴射量を 35mg とした場合の単段噴射の結果 (Single) も表示した。横軸の時間 t は二段噴射ではメイン噴射開始時刻を、単段噴射では噴射開始時刻を 0ms とした。

図より、 $m_{\text{tot}}=40\text{mg}$ の単段噴射では初期の予混合的燃焼の後、すぐに拡散的燃焼が続く。二段噴射の場合、メイン噴射による予混合的燃焼のピーク値が単段噴射 (40mg) の場合に比べて高くなっている。これは、一段目の噴射期間が短いため、単段噴射と比べて空気との混合が進んだためと考えられる。二段噴射における熱発生率履歴は、アフター噴射が開始されるまで $m_{\text{tot}}=35\text{mg}$ の単段噴射における熱発生率履歴と等しいが、アフター噴射開始後には熱発生率は高くなり、その後は緩やかに低下していく。燃焼後期において二段噴射では単段噴射 (40mg) のときに比べて高い熱発生率を示している。特に噴射間隔の広い $t_{\text{int}}=0.5, 0.7\text{ms}$ の条件でその傾向が顕著で燃焼期間が長くなる。

火炎の発達状況を調べるために直接撮影を行った。図 4 に単段噴射 (40mg) での撮影画像を、図 5, 図 6, 図 7 に $t_{\text{int}}=0.1\text{ms}, 0.3\text{ms}, 0.7\text{ms}$ での撮影画像を示す。

まず、単段噴射での画像 (図 4) について述べる。 $t=0.81\text{ms}$ において輝炎が見え始める。 $t=1.01\text{ms}$ 以降では輝炎は壁面に沿って広がり発達していく。噴射終了後の $t=1.21\text{ms}$ から $t=1.41\text{ms}$ にかけて輝炎が噴孔の方向へ遡る様子が確認できる。これは、噴射が終了した後に比較的当量比の高い混合気が燃焼室中心付近に滞留していたことを示唆している。噴射が終了した後も輝炎が壁際に残るが、これはその後徐々に消えていく。

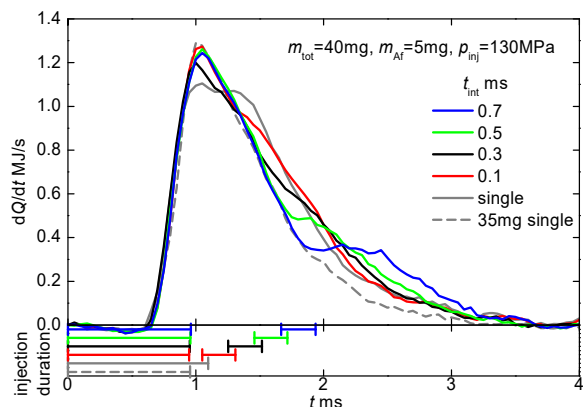


Fig.3 Effect of injection dwell on heat release rate

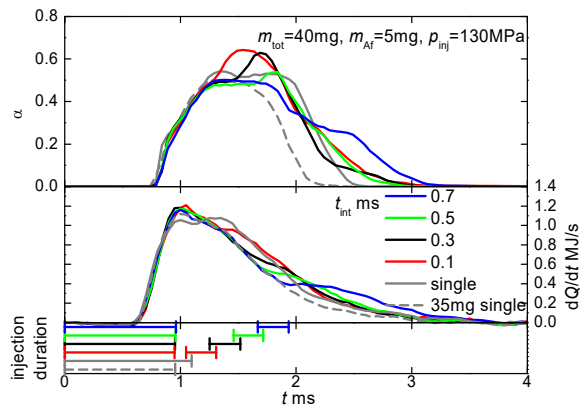


Fig.8 Effect of injection dwell on heat release rate and luminous flame area

次に二段噴射での撮影画像について述べる。噴射間隔の短い $t_{int}=0.1\text{ms}$ の条件では、 $t=1.05\text{ms}$ でアフター噴射が開始される。 $t=1.25\text{ms}$ においてメイン噴霧の輝炎が噴孔の方向に遡っており、アフター噴霧は蒸発して輝炎を発生させる前にメイン噴霧の輝炎に干渉する。その後、アフター噴霧はメイン噴霧とともに燃焼する。 $t_{int}=0.3\text{ms}$ の条件では、 $t=1.26\text{ms}$ でメイン噴霧の輝炎に照らされたアフター噴霧が確認できる。この時、メイン噴霧の輝炎は壁面付近に分布し、テール部の輝炎は消滅し始めている。その後、アフター噴霧は発達していくが蒸発により $t=1.41\text{ms}$ では噴霧は短く見える。 $t=1.46\text{ms}$ ではアフター噴霧から輝炎が発生し、 $t=1.61\text{ms}$ ではその輝度が増している。それ以降噴霧の形状を保ちながら輝炎がメイン噴霧由来の輝炎に進入する過程が見える。噴射間隔の長い $t_{int}=0.7\text{ms}$ の条件では、アフター噴霧が初めて確認できる $t=1.69\text{ms}$ においてメイン噴霧テール部の輝炎は消滅している。しかし、メイン噴霧の燃焼により高温となっているためアフター噴霧はすみやかに蒸発し、 $t=1.84\text{ms}$ において輝炎が確認できる。アフター噴霧とメイン噴霧の輝炎は分離しており、メイン噴霧の輝炎が消滅する $t=2.39\text{ms}$ 以降もアフター噴霧による輝炎は残り続ける。

アフター噴霧が初めて確認出来てからアフター噴霧の輝炎が確認出来るまでの時間は $t_{int}=0.1\text{ms}$, 0.3ms , 0.7ms でそれぞれ 0.20ms , 0.20ms , 0.15ms であり、コマ間が 0.05ms であることを考慮すると、差はほとんど見られない。しかし、アフター噴射開始時点でメイン噴霧の燃焼が進んでいる事により燃焼室の温度が高くなっているため、メイン噴霧の着火遅れ (0.6ms) に比べ短い。また、アフター噴射終了後いずれの t_{int} においてもアフター噴霧先端部の輝炎が燃焼後期まで残り続ける。これはメイン噴霧の燃焼により酸素が消費された空間にアフター噴霧が進入するためと考えられる。一方、噴孔付近の輝炎は早期に消滅している。これはエントレインによって周囲の酸素を取り込み酸化が進んだためと考えられる。

図8に直接撮影を行った際の熱発生率 dQ/dt 、輝炎面積と計測領域総面積との比 α を示す。輝炎面積は熱発生率からやや遅れて立ち上がる。輝炎面積は噴射間隔が短くなるほど早期に低下するが、噴射間隔を $t_{int}=0.1\text{ms}$ まで短くすると輝炎面積の低下は遅くなる。これは噴射間隔の短い条件ではメイン噴霧の燃焼によりアフター噴霧周辺の酸素が消費されているためだと考えられる。 $t_{int}=0.7\text{ms}$ の条件では輝炎が遅い時期まで残る。したがって、実機関の場合、噴射間隔が長い条件では燃焼後期にまで残りますが残り、酸化されず排出されてしまう可能性がある。

3・2 噴射量配分の影響

図9に t_{int} を 0.3ms とし、総噴射量を一定 (40mg) に保ち m_{Af} を変更した際の熱発生率 dQ/dt を示す。図によると、 m_{Af} が多い条件ほど二段目の熱発生が大きくなる。また、燃焼後期において、 m_{Af} が 7.5mg の条件は他の条件より高い熱発生率を示しており、熱発生終了がわずかに遅れる。

図10, 図11に $m_{Af}=2.5\text{mg}$, 7.5mg での撮影画像を示す。どの条件でもアフター噴霧はすみやかに蒸発し輝炎を発生する。その後、燃焼室壁面付近のメイン噴霧の輝炎に近づく。 $t=1.86\text{ms}$ の燃焼画像を比較すると、 m_{Af} が少ないほど、燃焼室壁面付近に存在するメイン噴霧由来の輝炎の光強度が強く見え、アフター噴霧による輝炎の領域は狭い。これは、アフター噴射の量を減らすと、メイン噴射の量が増えるためである。 m_{Af} の条件にかかわら

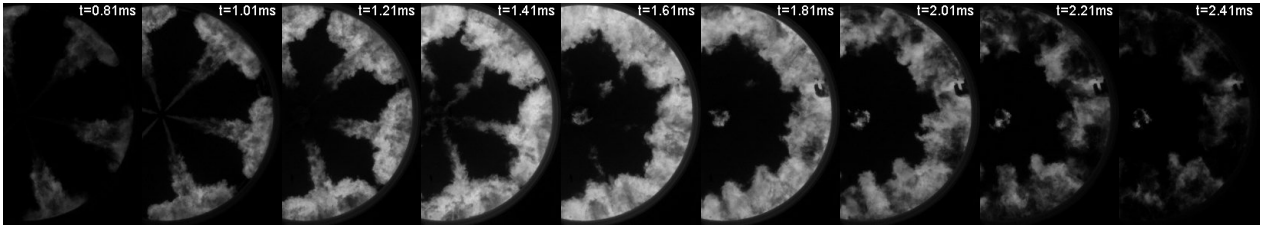


Fig.4 Images of luminous flame (single inj., $m_{\text{tot}}=40\text{mg}$)

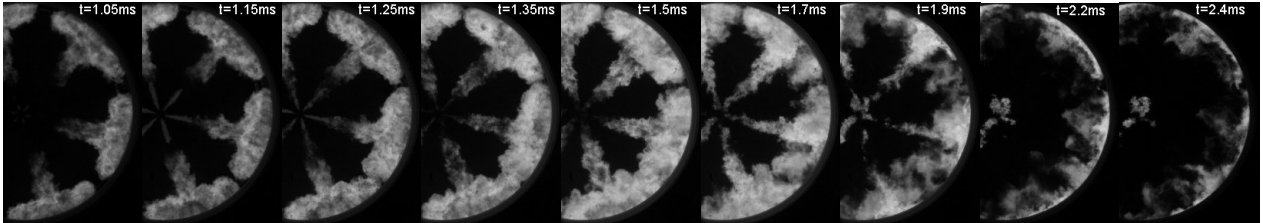


Fig.5 Images of luminous flame (Two-stage inj., $t_{\text{inj}}=0.1\text{ms}$, $m_{\text{Af}}=5\text{mg}$)

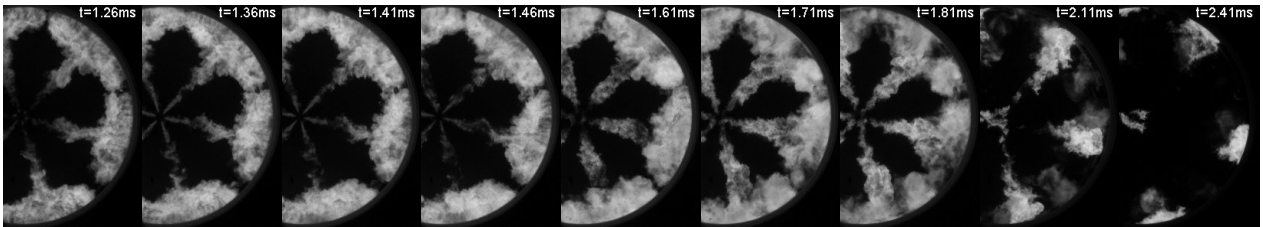


Fig.6 Images of luminous flame (Two-stage inj., $t_{\text{inj}}=0.3\text{ms}$, $m_{\text{Af}}=5\text{mg}$)

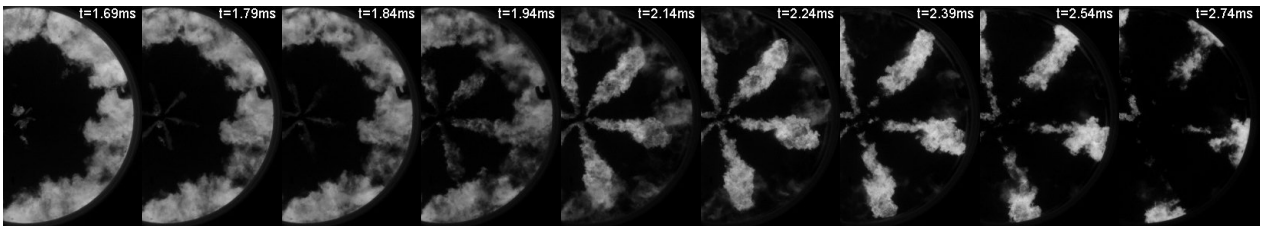


Fig.7 Images of luminous flame (Two-stage inj., $t_{\text{inj}}=0.7\text{ms}$, $m_{\text{Af}}=5\text{mg}$)

ず、アフター噴霧先端部に輝炎が多く見られる。特に m_{Af} が 7.5mg の条件でその傾向が顕著で、 $t=2.4\text{ms}$ 以降も壁面に沿って輝炎が残る。アフター噴射量を減らした $m_{\text{Af}}=2.5\text{mg}$ ではアフター噴霧による燃焼は壁面まで到達済みやかに消滅していることが分かる。

図 12 に直接撮影を行った際の熱発生率 dQ/dt 、輝炎面積と計測領域総面積との比 α を示す。アフター噴射量を増やした $m_{\text{Af}}=7.5\text{mg}$ では $t=1.8\text{ms}$ 付近での輝炎面積が低くなっている。これはアフター噴射量を増やしたことによりメイン噴射由来の輝炎が減少したためである。その後 $m_{\text{Af}}=7.5\text{mg}$ の条件ではアフター噴射由来の輝炎が長く残り、 $t=2.0\text{ms}$ 以降で輝炎面積は再び立ち上がる。これはアフター噴射量が多いためアフター噴霧が壁面へと衝突し、広がったためである。一方、アフター噴射量を減らした $m_{\text{Af}}=2.5\text{mg}$ では単段噴射よりも早く輝炎面積が減少する。

4. おわりに

定容燃焼装置を用いてアフター噴射を伴う二段噴射による燃焼を行い、燃焼過程を解析した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) アフター噴霧の発達過程において噴霧先端部では輝炎が長い期間残り続け、噴霧の上流側では空気のエントレインが進み比較的早期に輝炎が消滅する。
- (2) 噴射間隔を長くすると緩慢な拡散的燃焼による熱発生が多くなり、燃焼後期にまで輝炎が残り続ける。輝炎の消失は噴射間隔を短くすると早くなるが、最も短い条件ではかえって遅くなる。

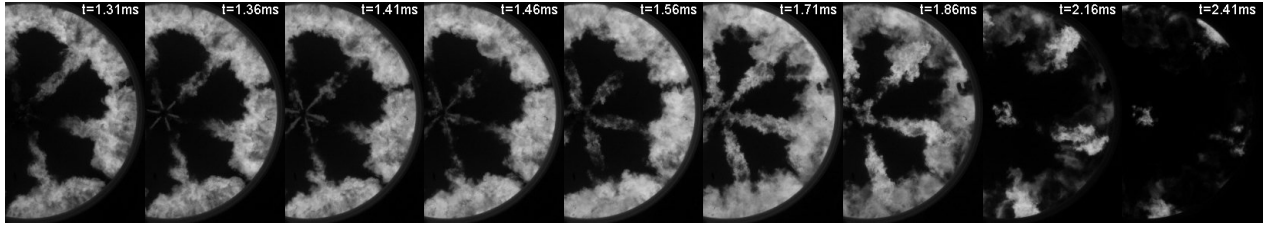


Fig.10 Images of luminous flame (Two-stage inj., $m_{Af}=2.5\text{mg}$, $t_{int}=0.3\text{ms}$)

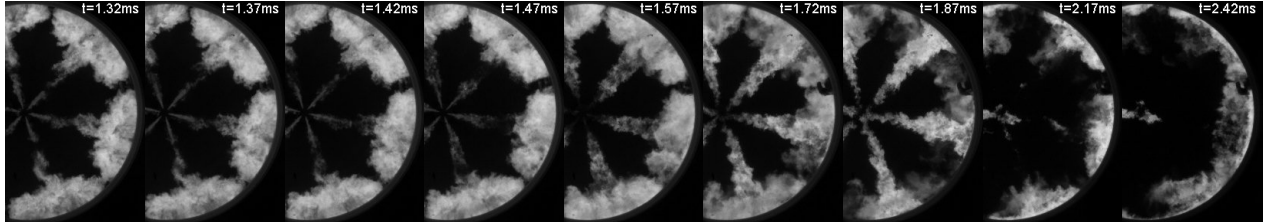


Fig.11 Images of luminous flame (Two-stage inj., $m_{Af}=7.5\text{mg}$, $t_{int}=0.3\text{ms}$)

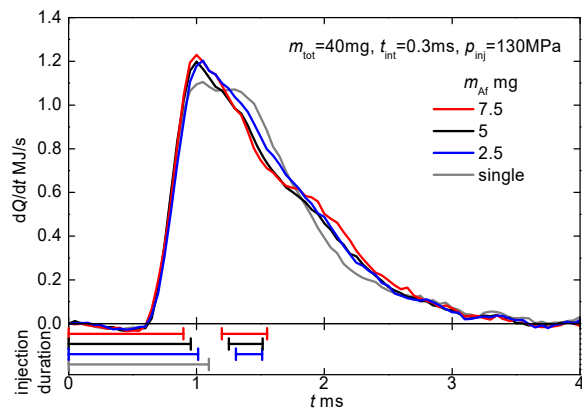


Fig.9 Effect of after injection quantity on heat release rate

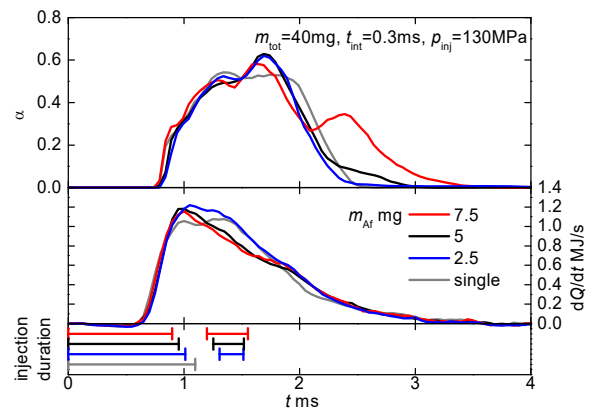


Fig.12 Effect of after injection quantity on heat release rate and luminous flame area

- (3) アフター噴射の量を減らしメイン噴射の量を増やすと、輝炎の消滅が早くなる。アフター噴射量を最も減らした条件では単段噴射よりも早期に輝炎が消滅する。

文 献

- (1) 堀田義博, 稲吉三七二, 中北清己, 藤原清, 阪田一郎, “マルチ噴射による HSDI ディーゼルの排気・性能改善”, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.1, pp.79-85, (2005)
- (2) 堀部直人, 田村一生, 濱田貴之, Liu Long, 石山拓二, “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”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.76-12, pp.7-12, (2012)