

ディーゼル燃焼におけるパイロット噴射の効果*

(第3報, パイロット噴射量の少量化効果)

石田正弘^{*1}, 陳之立^{*2}
竹内優^{*3}, 吉津文嗣^{*4}

Effect of Pilot Injection on Diesel Combustion (3rd Report, Effect of Decrease in the Amount of Pilot Injection)

Masahiro ISHIDA, Zhili CHEN,
Masaru TAKEUCHI and Fumitsugu YOSHIZU

For reducing exhaust emissions, the effect of pilot injection with a short pilot-main interval on combustion was investigated in a turbocharged direct injection diesel engine. Although the amount of pilot injection could be decreased by increasing the Dodge plunger seat diameter, two types of technique for reducing the amount of pilot injection were examined to suppress an increase in smoke due to pilot injection; one is a reduction in the nozzle-hole diameter and the other is an increase in the spring chamber pressure. Each technique was compared from the view points of combustion, smoke density and the trade-off relationship between NO_x and fuel consumption. Smoke is reduced as the amount of pilot injection decreases while the trade-off between fuel consumption and NO_x is markedly improved by reducing both the nozzle-hole diameter and the amount of pilot injection.

Key Words: Diesel Engine, Pilot Injection, Injection Rate Control, Combustion, Two-Zone Model Analysis

1. まえがき

ディーゼル機関からの窒素酸化物 NO_x の低減を目的として、最近再び、多くの研究者によってパイロット噴射の効果が調べられた。ドッジプランジャ式パイロットインゼクタ⁽¹⁾を直接噴射式過給ディーゼル機関に適用し、主噴射に近接したパイロット噴射が機関の燃焼および排気物質に及ぼす影響を実験的に調べた著者ら⁽²⁾の研究結果によれば、パイロット噴射により着火遅れが顕著に短縮され、着火遅れの大きい低負荷運転時、着火性の悪い燃油を燃焼する場合、および上死点より遅い噴射時期において特に着火遅れ短縮効果が大きいことが示された。また、パイロット噴射の着火遅れ短縮効果に基づき、燃費・NO_x の背反関係も顕著に改善されることも示された⁽³⁾。ただし、パイロット噴射により排煙濃度がやや増加する傾向があり、その増加を抑制するには、パイロット噴射量を少量化

すること、また、機関の負荷に応じてパイロット噴射量を変化させる必要があることなどが示唆された。しかるに、ドッジプランジャ式パイロットインゼクタにおいては、ドッジプランジャシート径の増大によってパイロット噴射量を減少できるが、この方法では機関の運転中にドッジプランジャを交換できない。

本研究では、パイロット噴射量を少量化する第2の方法として、噴孔径を縮小することによって初期噴射率を抑えることを提案し、この方法に基づく少量化効果を、燃費・NO_x および排煙・NO_x の両背反関係の観点から調べ、機関の低負荷では、パイロット噴射と噴孔径縮小の組合せにより、燃費・NO_x 背反関係がさらに改善されることを、また、高負荷では、主噴射期間が過剰に増大するため、排煙・NO_x 背反関係が悪化することを明らかにしている。次いで、第3のパイロット噴射量少量化法として、インゼクタばね室の燃油圧力制御によって、適切なパイロット噴射量を任意に設定できるシステムの原形を提案し、その効果を明らかにしている。すなわち、パイロット噴射量を全噴射量の約5%まで減少しても、機関性能に及ぼすパイロット噴射の効果を維持したまま、パイロット燃焼と主燃焼は明確に分離され、パイロット火炎と主噴射の重なりに基づくすすの生成を回避しうることを示し

* 1995年7月17日 日本機械学会九州支部長崎地方講演会および1995年9月11日 日本機械学会第73期全国大会において講演、原稿受付 1996年9月17日。

^{*1} 正員、長崎大学工学部(●852 長崎市文教町1-14)。

^{*2} 正員、茨城大学工学部(●316 日立市中成沢町4-12-1)。

^{*3} 准員、ダイハツディーゼル(株)(●524 守山市阿村町45)。

^{*4} 正員、(株)ゼクセル(●355 東松山市箭弓町3-13-26)。

た。なお、この方法によれば、機関の回転速度および負荷に応じてパイロット噴射量を任意に変化しうる。

2. 実験装置および実験方法

2・1 供試パイロットインゼクタ 図1は供試ドッジプランジャ式パイロットインゼクタの断面および拡大概念図を示す。このパイロットインゼクタは、ドッジプランジャのシート径 d_{DP} を変えることによってパイロット噴射量を変化でき、また、ドッジプランジャのリフト量を変えることによってパイロット噴射と主噴射の間隔を変化できる構造を有する。図2はドッジプランジャシート径 d_{DP} とパイロット噴射量の検定結果を示す。すなわち、シート径の増加とともにパイロット噴射量は直線的に減少する。選定された3種のシート径 ($d_{DP} = 3.1, 3.4, 3.7 \text{ mm}$)に対するパイロット噴射量は、図2の白丸印で示すように、機関回転速度 1750 rpm の実験条件でそれぞれ 7.1, 5.7, 3.2 mg/st. であった。なお、パイロット噴射量および分離間隔は燃料の全噴射量には依存せず、噴射ポンプ回転速度にほぼ比例して変化する。

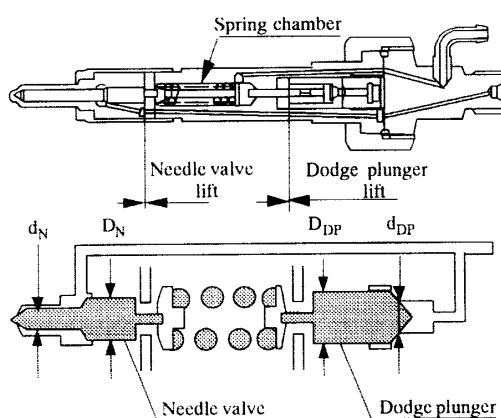


Fig. 1 Section of test pilot injector

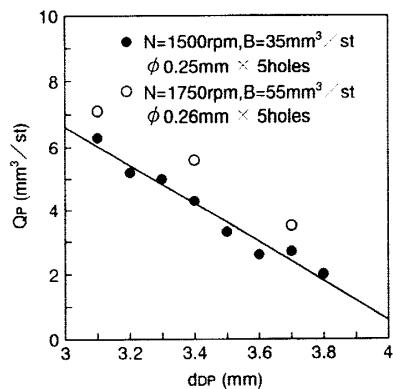


Fig. 2 Characteristics between pilot quantity and Dodge plunger seat diameter

以下の実験では、パイロット噴射と主噴射の分離間隔を、クランク角で約 5° になるようにドッジプランジャのリフト量を固定し、また、3種のドッジプランジャの中で最少のパイロット噴射量が得られる $d_{DP} = 3.7 \text{ mm}$ を採用した。実験に用いたノズルチップは、噴孔径が 0.26, 0.22, 0.18 mm の 3 種、噴孔数はいずれも 5 穴であり、パイロット開弁圧は 18.5 MPa、主噴射開弁圧は 22.5 MPa である。なお、ドッジプランジャを内蔵しない通常の噴射ノズルを比較の対象として用いている。

2・2 インゼクタばね室圧力制御システム 図3は、パイロットインゼクタばね室の燃油圧力を制御するためのシステム図である。ばね室はインゼクタからの燃油の戻り管路を介して燃油供給ラインに接続されており、供給燃油および戻り燃油ともにブーストポンプにより同時に加圧されるシステムを構成している。ばね室圧力が上昇すると、針弁およびドッジプランジャの開弁圧はいずれも上昇するが、ドッジプランジャの開弁圧上昇率が針弁のそれより小さく、この開弁圧上昇率の相対差によって、パイロット噴射期間が短縮され、結果としてパイロット噴射量が減少する。

全噴射量に対するパイロット噴射量の割合 $Q_p [\%]$ とばね室圧力 $P_{sc} [\text{MPa}]$ の検定結果を図4に示す。ばね室圧力は、図3に示した燃油供給ラインのブースト圧力で代表させている。丸印と四角印で示す低負荷

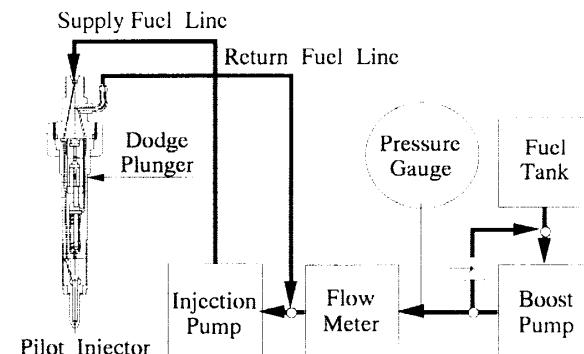


Fig. 3 Fuel line for pilot injection rate control

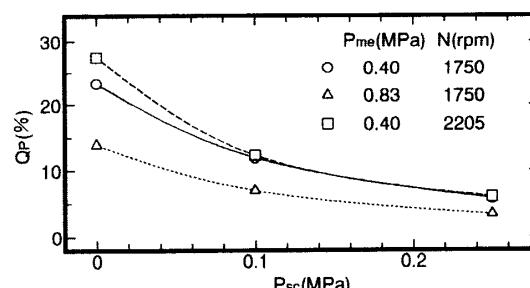


Fig. 4 Change in pilot injection fraction due to P_{sc}

($P_{me}=0.40 \text{ MPa}$)の場合、パイロット噴射割合は、いずれの回転速度においてもほぼ同じであり、 $P_{sc}=0$ では約25%である。また、三角印で示す高負荷($P_{me}=0.83 \text{ MPa}$)の場合のそれは約14%である。パイロット噴射割合は、いずれの回転速度および負荷においても、ばね室圧力の増加とともに減少し、わずかに0.25 MPaの加圧により約1/4に減少する。

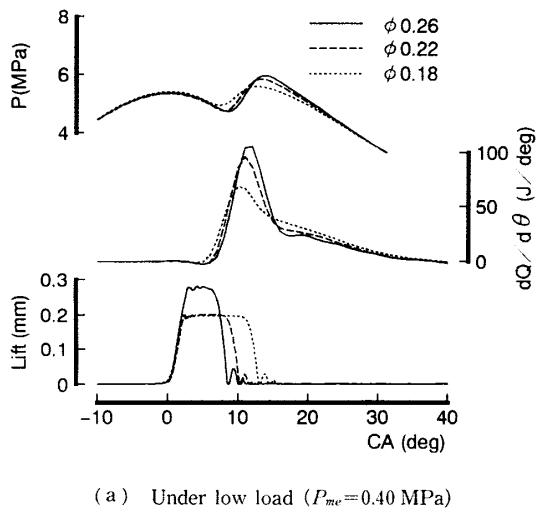
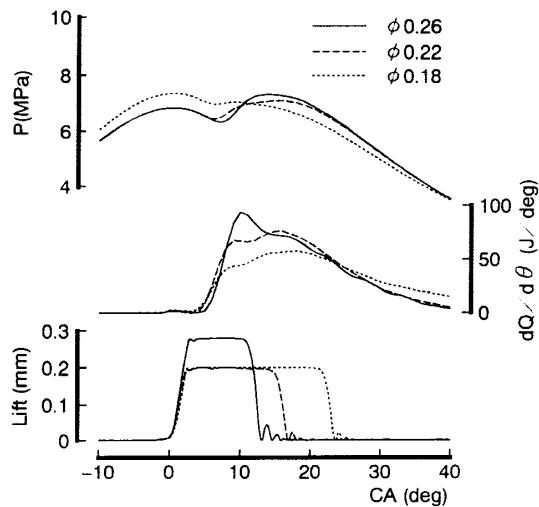
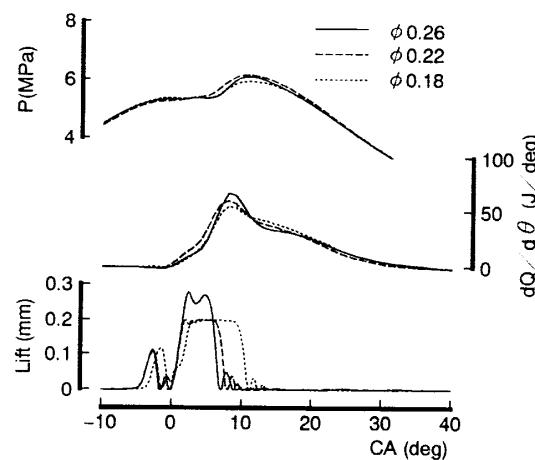
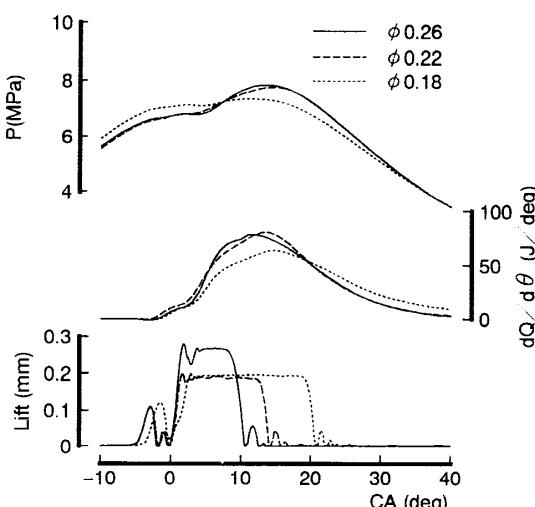
2・3 供試機関および実験方法 供試機関は、水冷四サイクル直接噴射式ターボ過給ディーゼル機関[ボア100 mm, ストローク105 mm, 4気筒, 圧縮比16, 最大出力95.6 kW{130 PS}/3500 rpm:三菱自動車工業(株)製4D31-T形]である。本実験では、特に機関性能の再現性を得るために、別途装着されたインタクーラを制御することにより機関入口給気温度を一定に保った。また、機関回転速度 $1750 \pm 5 \text{ rpm}$ の条件下で、正味平均有効圧0.40, 0.83 MPaの二とおり、主

噴射開始時期 θ_{inj} を上死点前5°、上死点、上死点後5°の三とおりについて行った。供試燃油としては、セタン指数57の自動車用軽油を用いた。

筒内燃焼圧力、燃油噴射圧、針弁リフトなどの時間履歴は、それぞれのセンサからの出力信号を、4チャネル燃焼解析装置(小野測器製、CB-467)を用いてクランク角0.25°ごとのデータとして集録し、連続した350サイクルの平均サイクルとして解析した。

3. 実験結果および考察

3・1 ノズル噴孔径縮小の効果 図5および図6は、ノズル噴孔径縮小に基づく燃焼時間履歴の変化および噴射期間の変化を、パイロット噴射を伴わない通常噴射の場合とパイロット噴射の場合について示す。(a)は低負荷の場合、(b)は高負荷の場合で、いずれも主噴射開始時期が上死点の場合を示した。図5, 6

(a) Under low load ($P_{me}=0.40 \text{ MPa}$)(b) Under high load ($P_{me}=0.83 \text{ MPa}$)Fig. 5 Change in combustion history due to nozzle hole diameter (Normal injection; $\theta_{inj}=\text{TDC}$)(a) Under low load ($P_{me}=0.40 \text{ MPa}$)(b) Under high load ($P_{me}=0.83 \text{ MPa}$)Fig. 6 Change in combustion history due to nozzle hole diameter (Pilot injection; $\theta_{inj}=\text{TDC}$)

において、 P [MPa] は筒内燃焼圧力、 $dQ/d\theta$ [J/deg.] は熱発生率、Lift [mm] は針弁リフト量を示す。なお、噴孔径が 0.22 mm および 0.18 mm の場合、0.26 mm に比べ、針弁最大リフトが小さく設定してある。

いずれの図からもわかるように、噴孔径を 0.26 mm から 0.18 mm まで小さくするに従って、主噴射期間が顕著に増加し、また、燃焼初期の最高熱発生率が低下している。最高熱発生率の低下は、噴孔径縮小に基づくわずかな着火遅れ短縮が一因であるが、初期噴射率の減少が主たる原因と判断される。また、この最高熱発生率の低下は、 NO_x 低減の一つの因子となりうる。噴孔径縮小とともに噴射時間が増大するのは当然であるが、特に低負荷において、燃焼期間がほとんど

増加しないことが注目される。このことが、後述の燃費と NO_x の背反関係の改善につながっているものと推定される。しかしながら、噴孔径 0.18 mm で高負荷の場合は、過剰な低噴射率のために噴射期間が著しく増大し、最高熱発生率は低下するものの、そのピーク位置が後ろにずれ、燃焼期間が顕著に増加している。

図 7(a), (b) は、噴孔径縮小に基づく機関性能の変化を、噴射時期が上死点の場合を代表として、低負荷および高負荷それぞれについて示す。 T_e [°C] は過給機タービン入口での排気温度、 η_m は正味平均有効圧と図示平均有効圧の比で定義される機械効率、 NO_x [g/(kW·h)] は窒素酸化物排出率、 D_s は排煙のボッシュ濃度、 b_e [g/(kW·h)] は燃料消費率を表す。丸印付き実線で示す通常噴射の場合と、三角印付き破線で示すパイロット噴射の場合を比較してわかるように、いずれの場合も燃費はパイロット噴射によって低下している。この理由は、主としてパイロット噴射による着火遅れ短縮効果により、主燃焼の早期着火、早期終了ひいては排気温度の低下が、排気損失の減少をもたらすためである。なお、低負荷では、噴孔径縮小によって噴射時間が増大しても、燃焼終了時期がほとんど影響を受けないため、燃費が増加しないが、高負荷では、特に噴射孔径 0.18 mm のときに、主燃焼の終了時期が遅れるため、燃費が増加している。パイロット噴射によって燃費が低減される今一つの理由は、機械効率が改善されることである。図 8(a), (b) に、機械効率の増分 $\Delta\eta_m$ を示しているが、噴孔径 0.22 mm で噴

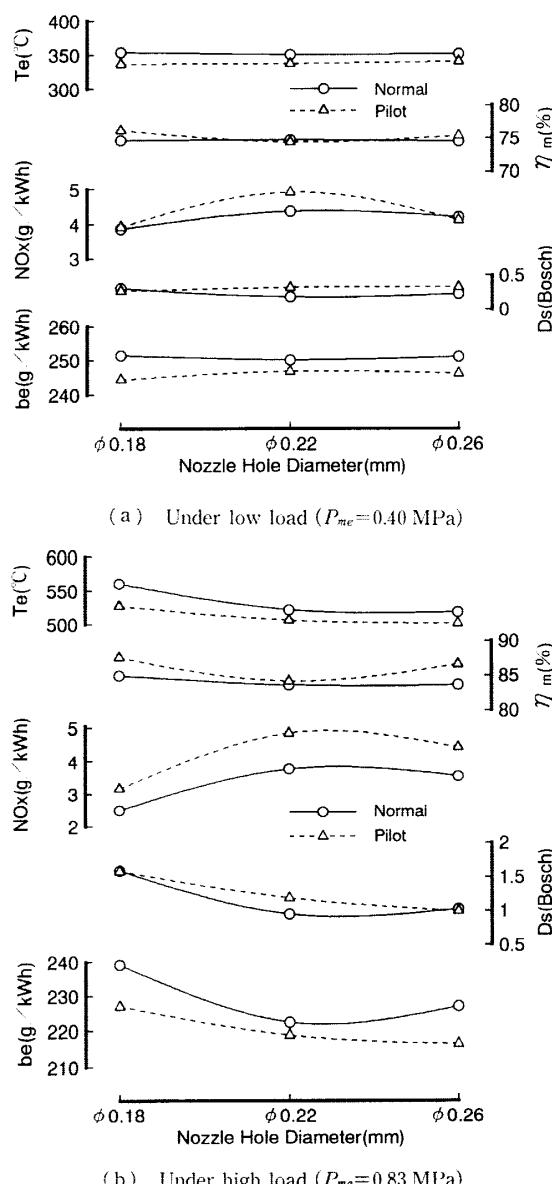


Fig. 7 Change in engine performance due to nozzle hole diameter ($\theta_{inj} = \text{TDC}$)

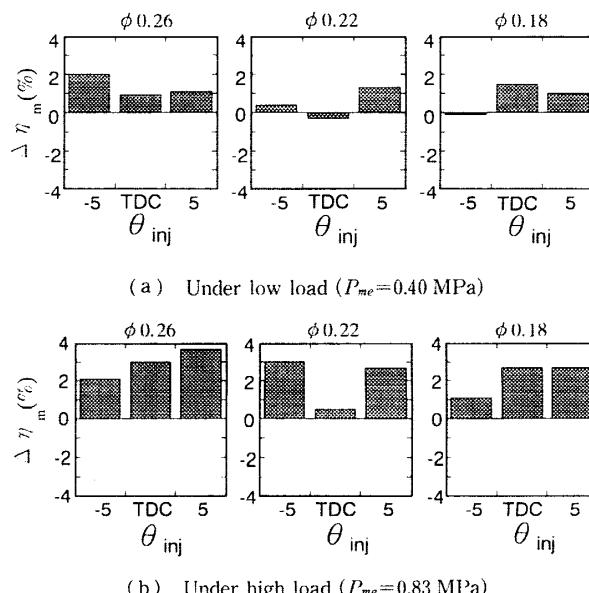


Fig. 8 Increment of mechanical efficiency due to pilot injection

射時期が上死点の場合を除けば、いずれの噴孔径、噴射時期、負荷においても、パイロット噴射によって機械効率が増加し、最高では4%も向上している。

図9(a), (b)は、排煙とNO_xおよび燃費とNO_xの背反関係を示す。なお、排煙排出率Smoke [g/(kW·h)]はあらかじめ検定された実測値ボッシュ煙濃度 D_s [Bosch]と排煙濃度[g/(N·m³)]の近似的関係および排ガス流量から算定した。実線は、噴孔径0.26 mmの基準ノズルを用いた通常噴射の場合、破線は基準ノズルを用いてパイロット噴射を行った場合、点線は、噴孔径を0.18 mmに縮小してパイロット噴射を行った場合である。パイロット噴射により、低負荷および高負荷とも、燃費とNO_xの背反関係が改善され、低負荷で著しい改善が得られることは、著者らの前報告⁽³⁾と同様である。低負荷では、噴孔径縮小によって、排煙とNO_xの背反関係を悪化することなく、燃費とNO_xの背反関係がさらに改善されることが注

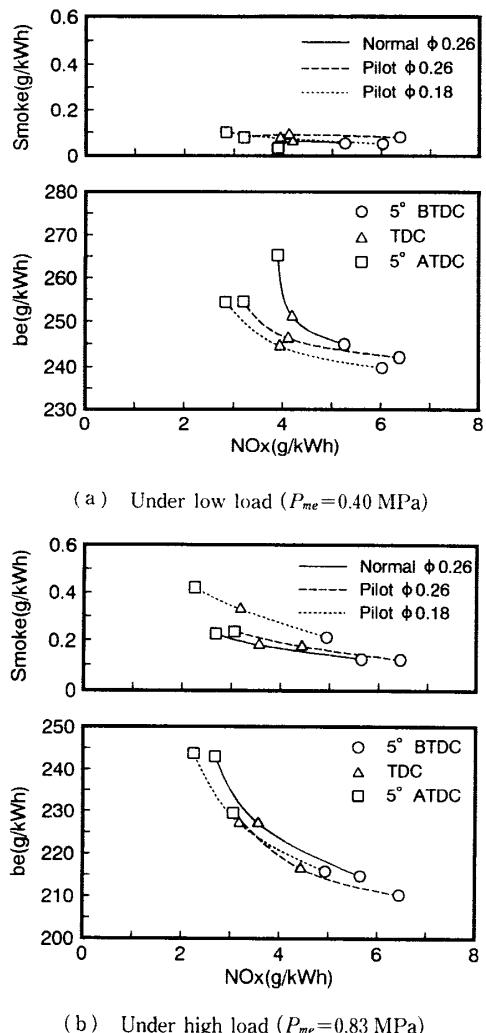


Fig. 9 Improvement of trade-off between smoke and NO_x, and between fuel consumption and NO_x

目される。しかしながら、高負荷では、噴孔径の過剰な縮小は、燃費とNO_xの背反関係を悪化することはないが、排煙とNO_xの背反関係を顕著に悪化させる。なお、この現象は通常噴射の場合においても同様であった。

3・2 ばね室圧力制御の効果 図10(a), (b)は、低負荷および高負荷のそれぞれの場合について、最上部には、2領域燃焼解析モデル⁽⁴⁾を用いて解析した燃焼域ガス温度 T_b 、筒内平均ガス温度 T_c および未燃域

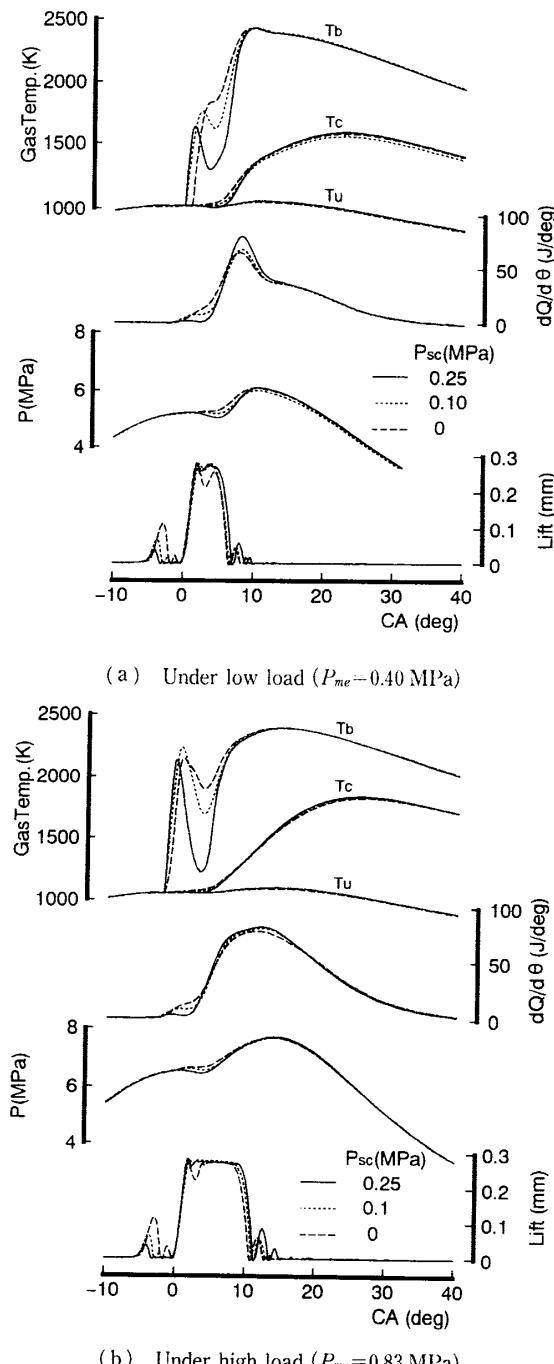


Fig. 10 Change in combustion history due to spring chamber pressure ($\theta_{ini}=TDC$)

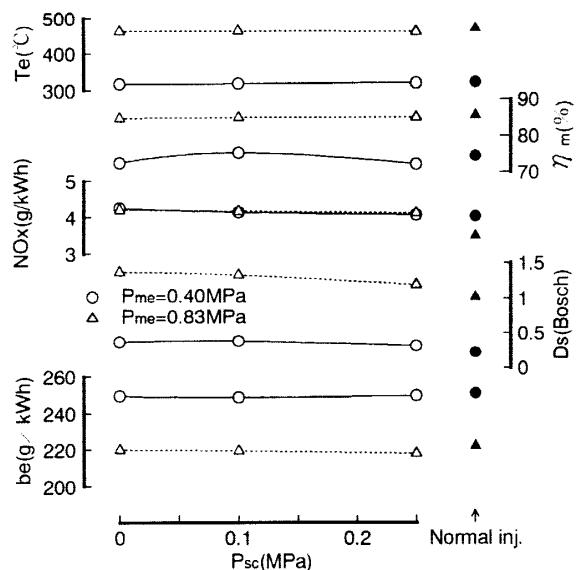


Fig. 11 Change in engine performance due to spring chamber pressure ($\text{Nozzle } \phi 0.26, \theta_{inj} = \text{TDC}$)

ガス温度 T_u の各時間履歴を、また、熱発生率 $dQ/d\theta$ [J/°], 箱内圧力 P [MPa] および針弁リフト Lift [mm] の各時間履歴を示す。ばね室圧力の増加とともに、パイロット噴射のリフトが低下し、かつ、パイロット噴射期間が短縮される。また、燃焼域ガス温度 T_b の時間履歴で示されるように、パイロット噴射量の減少とともに、パイロット燃焼と主燃焼が次第に分離される。ばね室圧力を 0.25 MPa まで上昇させると、図 4 で示したように、パイロット噴射量が全噴射量の約 5% となり、このとき、パイロット燃焼と主燃焼は明確に分離される。すなわち、パイロット燃焼期間が短縮されることによって、パイロット火炎と主噴射の重なりが回避され、そのことに基づくすずの生成を回避できるものと推定される。

図 11 はパイロット噴射量少量化に基づく機関性能の変化を示す。図 11 の右端には、比較のため、通常噴射の場合の機関性能をプロットしている。ばね室圧力の増加につれ、排煙濃度がわずかではあるが減少し、通常噴射の場合の値に近くなっている。一部の実験デ

ータのばらつきを除けば、燃費その他の機関性能は、パイロット噴射量によってほとんど変化せず、パイロット噴射量をかなり減少しても、パイロット噴射の効果は維持されている。

4. まとめ

本研究では、ドッジプランジャー式パイロットインゼクタにおいて、パイロット噴射と噴射孔径縮小の組合せによるパイロット噴射量少量化方法、およびばね室圧力制御によるパイロット噴射量少量化方法を提案した。主噴射に近接したパイロット噴射の長所を維持しながら、排煙濃度の増加を抑制するには、パイロット噴射量の少量化が適切であることを示し、以下の結論を得た。

- (1) パイロット噴射量を減少することによって、着火遅れ短縮効果を損なうことなく、パイロット噴射に基づく排煙濃度の増加を抑制できる。
- (2) パイロット噴射量を少量化しても、パイロット噴射の効果を維持できるのは、パイロット噴射が主噴射に近接していることに基づくものと推定される。
- (3) パイロット噴射量を 5%程度まで減少すると、パイロット燃焼と主燃焼がほとんど分離され、パイロット火炎と主噴射の重なりに基づくすずの生成を回避できることが推定される。
- (4) 少量のパイロット噴射によって燃費・NO_x 背反関係が顕著に改善され、噴孔径縮小との組合せによって、さらなる改善が達成できる。
- (5) パイロット噴射によって、機械効率が顕著に改善される。

終わりに、本研究において、当時長崎大学大学院学生であった山田武君〔現：三菱自動車工業(株)〕の協力があったことを記して謝意を表する。

文 献

- (1) 吉津文嗣・中山満茂、機論, 59-559, B(1993), 880-885.
- (2) 石田正弘・ほか 3 名、機論, 61-590, B(1995), 3518-3523.
- (3) 石田正弘・ほか 3 名、機論, 61-590, B(1995), 3524-3531.
- (4) 石田正弘・ほか 4 名、機論, 60-573, B(1994), 1845-1851.