

ディーゼル燃焼におけるパイロット噴射の効果*

(第1報, 着火遅れの短縮)

石田 正 弘^{*1}, 陳 之 立^{*2}
植木 弘 信^{*1}, 山 田 武^{*3}

Effect of Pilot Injection on Diesel Combustion (1st Report, Reduction of Ignition Delay)

Masahiro ISHIDA, Zhi-Li CHEN,
Hironobu UEKI and Takeshi YAMADA

To reduce the level of exhaust emissions and to improve the ignition characteristics, the effect of pilot injection on combustion was examined experimentally in a turbocharged direct-injection diesel engine, and was analyzed theoretically using a two-zone combustion model. The pilot injection effect was compared with the combustion in the injection without pilot injection and also with the effect of fuel additive as an ignition improver in two kinds of fuel: high-quality fuel having a cetane index of 57 and low-quality fuel having that of 40. It is found that the pilot injection effectively reduces ignition delay at the retarded injection timing, under the low-load condition, and in the case of low-cetane fuel. The ignition delay of the main injection is reduced to about a half of that of the injection without pilot injection by the pilot injection with the short interval between pilot and main injection. The ignition delay of the low-cetane fuel is reduced to that of the high-quality fuel by a small amount of pilot injection, or by adding 1% of the ignition improver.

Key Words: Diesel Engine, Pilot Injection, Ignition Delay, Two-Zone Model Analysis, Combustion Gas Temperature, Low-Cetane Fuel

1. ま え が き

直接噴射式ディーゼル機関において窒素酸化物(NO_x)の生成を抑制するには、燃焼初期の予混合燃焼を支配する初期噴射率を低下させることが必要であるとの観点から、その一方法としてパイロット噴射が最近再び注目されている。膨張行程で噴射された噴霧の着火遅れがパイロット噴射により短縮され、受熱率の急激な増加を抑制できることがShimadaら⁽¹⁾によって示された。また、パイロット噴射による排煙の増加を回避しながら窒素酸化物を低減するには、小噴孔径ノズルならびにパイロット噴射量、およびパイロット噴射と主噴射の噴射間隔の厳密な調整が不可欠であり、しかも上死点噴射では NO_x は低減されず、それよりさらに噴射時期を遅延させた場合に徐々に NO_x 低減効果が現れることが、中北ら⁽²⁾によって示された。その他、山木ら⁽³⁾、Shakal-Martin⁽⁴⁾⁽⁵⁾、Durnholtzら⁽⁶⁾、Nehmer-Reitz⁽⁷⁾などによって、パイロット噴

射あるいはスプリット噴射などの効果が調べられたが、パイロット噴射による NO_x 低減効果は顕著でなく、かえって排煙が増加することが指摘された。そこで吉津ら⁽⁸⁾は、パイロット噴射によって積極的にすすの生成を低減することをねらって、主噴射に近接したパイロット噴射相互の噴霧到達距離の時間依存性の相違を利用しながら、着火遅れ期間中に適切な噴霧粒径分布を形成することを目指したパイロットインゼクタを提案した。

本研究では、吉津ら⁽⁸⁾によって提案されたドッジプランジャ式パイロットインゼクタを、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。Durnholtzら⁽⁶⁾によってもパイロット噴射の着火遅れ短縮効果が示されたが、本実験においても、少量のパイロット噴射によって着火遅れが顕著に短縮されることが注目され、本論では特にパイロット噴射量、およびパイロット噴射と主噴射の分離間隔が、着火遅れ短縮および最高熱発生率抑制に及ぼす効果について、通常噴射の場合と定量的に比較した。また、着火性の悪い低セタン価燃油に対するパイロット噴射の着火遅れ短縮効果についても、着火促進剤の効果と対比しながら明らかにした。なお、比較に当た

* 1994年3月17日 日本機械学会九州支部第47期総会講演会および1994年8月17日 日本機械学会第72期全国大会講演会において講演、原稿受付 1995年2月13日。

^{*1} 正員、長崎大学工学部 (☎852 長崎市文教町1-14)。

^{*2} 正員、長崎大学大学院。

^{*3} 学生員、長崎大学大学院。

っては、筒内燃焼圧力および噴射率の実測結果について、2領域モデル^{(9)~(11)}を用いて燃焼域ガス温度の時間履歴を推定し、パイロット火炎の存在時期と主噴射時期との相互関係から、パイロット噴射に基づく着火促進効果の原因を追求した。また、パイロット噴射による着火遅れ短縮効果と同時に、NO_xの燃費の背反関係が著しく改善されることが明らかになったが、後者については次報に譲る。

2. 実験装置および供試燃油

2.1 供試パイロットインゼクタの特長 図1は、ドッジプランジャを内蔵する供試パイロットインゼクタ⁽⁸⁾を通常噴射弁との比較において示す。パイロット噴射量はドッジプランジャのシート径を変えることにより、また、パイロット噴射と主噴射の分離間隔は、ドッジプランジャのリフト量を変えることにより制御できる。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 Q_P の関係を、また、図3はドッジプランジャリフト量 $Lift_{DP}$ とパイロット・メイン噴射間隔 S の関係を機関回転速度 1500 rpm の場合について示

す。パイロット噴射量および噴射間隔クランク角は全噴射量には依存せず、噴射ポンプの回転速度に比例して増加する。ただし、本実験ではシートの面カットを固定しているため、パイロットインゼクタのパイロット・メイン噴射間隔の可変範囲は狭く、ドッジプランジャリフト量 0.2 mm および 0.6 mm に対し、噴射間隔はクランク角で 3° および 5° である。

一方、パイロット噴射量は図2の白丸印で示すように、ドッジプランジャシート径 d_{DP} として 3.7, 3.4, 3.1 mm の3種を選択しており、機関回転速度 1750 rpm のとき、それぞれ 3.0, 4.7, 6.0 mg/st であった。本実験の最少パイロット噴射量の全噴射量に対する割合は、高負荷運転条件の場合約 7%、低負荷の場合約 12% に相当した。燃焼試験に用いたノズルは、噴孔径 0.26 mm, 噴孔数 5 であり、パイロットおよび主噴射開弁圧はそれぞれ 18.5, 22.5 MPa に設定した。

2.2 供試機関および供試燃油 供試機関として、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)/3 500 rpm : 三菱自動車工業(株)製 4 D 31-T 形] を用い、別途インタクーラを装着して機関入口給気温度を制御した。本機関の

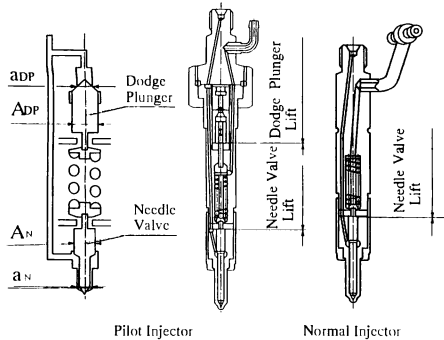


Fig.1 Section of test pilot injector

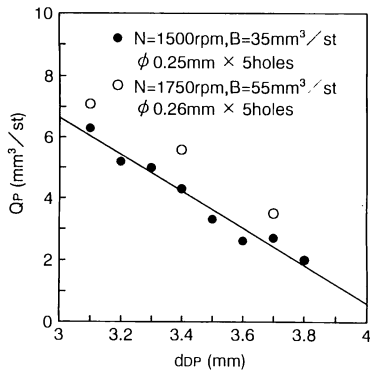


Fig.2 Relationship between pilot amount and Dodge plunger seat diameter

Table 1 Properties of test fuels

Name of fuel	ADO60	ADO40	LCGO
Sp/Gr@15/4 °C	0.8335	0.8914	
Viscosity cSt@50 °C	2.42	2.92	3.10
C.C.R. wt%	0.01	0.36	0.22
Sulfur wt%	0.14	0.73	0.76
Net Calorific Value MJ/kg	42.91	42.04	42.04
Distillation °C			
I.B.P.	183.0	193.5	213.5
10%	219.5	236.5	247.0
50%	272.5	292.0	297.5
90%	326.0	351.0	353.5
E.P.	356.5	377.5	374.5
Cetane Index	57.1	40.1	35.6
C/H Ratio	6.39	7.32	

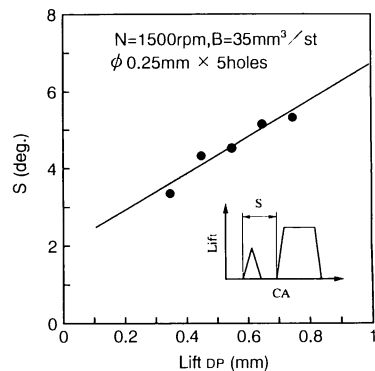


Fig.3 Relationship between separation period and Dodge plunger lift

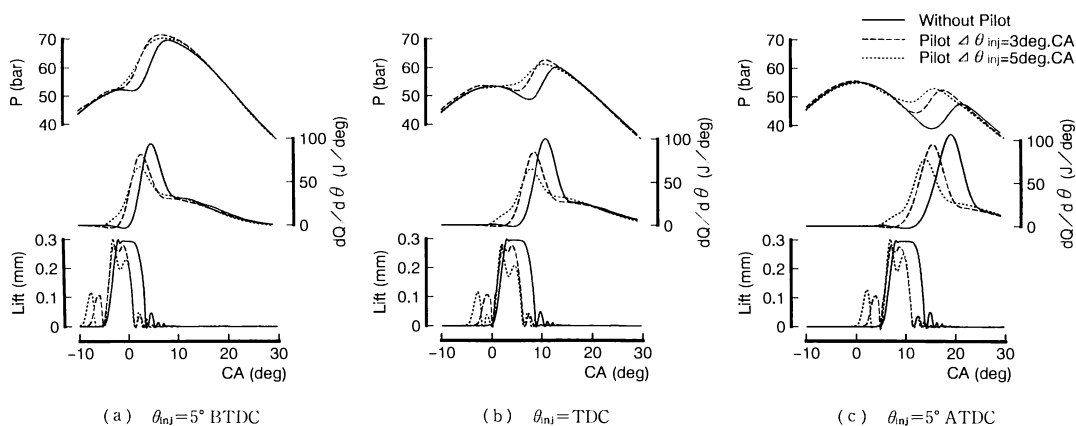


Fig. 4 Effect of interval between pilot and main injection on combustion

標準燃料噴射ポンプは列形であるが、ここでは噴射時期を任意にかつ容易に設定できる特別な分配形に置換した。

供試燃油として表1に示すセタン指数57の自動車用軽油(ADO 60)、およびセタン指数40の低質軽油(ADO 40)を用いた。ADO 40は、セタン指数約36のライトサイクルガスオイル(LCGO)とADO 60を、それぞれ77:23の比率で混合したものである。ADO 40はADO 60に比べ、比重、C/H比および蒸留温度、特に初留温度が高いため、着火性が悪い。なお、本実験では着火性改善の比較のため、燃料添加剤としてオクチルナイトレート $C_8H_{17}ONO_2$ (後出図8、12中記号XB)を使用した。

3. 実験結果および考察

3・1 パイロット・メイン噴射間隔の影響 燃焼に及ぼすパイロット・メイン噴射間隔の影響を、図4(a)~(c)に示した。機関回転速度1750rpm、正味平均有効圧 P_m 3.97barの運転条件で、主噴射開始時期 θ_{inj} を上死点前5°、上死点、上死点後5°とした。図4では噴射間隔 $\Delta\theta_{inj}$ が5°、3°および通常噴射の場合について、筒内圧力 P [bar]、熱発生率 $dQ/d\theta$ [J/deg]および針弁リフト $Lift$ [mm]を比較している。なお、通常噴射の開始時期は主噴射開始時期と一致させた。通常噴射の場合、初期噴射率が高いため燃油の蒸発に熱を奪われ、着火までの間、一時的に明確な負の熱発生率となる。パイロット噴射を3°先行させると主噴射の着火が顕著に早くなり、その負の熱発生率は小さくなるが、パイロット燃焼は顕著ではない。噴射間隔5°の場合には負の熱発生率がほとんど消滅し、パイロット燃焼の熱発生率が主燃焼の熱発生率に先だって顕著

に表れる。また、パイロット噴射を先行するほど主燃焼の最高熱発生率が低くなる。

噴射間隔3°の場合は、パイロット燃焼が開始する前に主噴射が始まり、5°の場合はパイロット燃焼開始直後に主噴射が始まること、着火遅れ短縮度の違いの原因と考えられ、上死点以後の噴射時期において、噴射間隔による着火遅れの差が顕著となる。したがって、着火遅れを短縮するには、パイロット燃焼火炎が存在する間に主噴射を開始することが効果的であり、以後の実験は噴射間隔5°について行った。

3・2 良質軽油の燃焼に及ぼすパイロット噴射量の影響 三とおりのパイロット噴射量の噴射開始時期を上死点前5°に設定した場合について、針弁リフトおよび筒内圧力の実測結果、実測筒内圧力から算定される熱発生率、および著者ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾の2領域モデルによる燃焼域ガス温度 T_b [K]、筒内平均ガス温度 T_c [K]、未燃域ガス温度 T_u [K]の各計算結果を、図5に低負荷の場合、図6に高負荷の場合をそれぞれ示した。パラメータはドッジプランジャシート径 d_{DP} すなわちパイロット噴射量であり、比較のため同じ噴射開始時期の通常噴射の場合を実線で示した。

パイロット噴射と同じ時期に噴射された通常噴射の場合には、初期噴射率が高いため多量の噴霧の蒸発に熱を奪われ、パイロット噴射の場合よりかなり着火が遅れる。低負荷および高負荷いずれにおいても、主噴射に基づく燃焼に先だって、パイロット噴射に基づく燃焼が熱発生率曲線上に顕著に表れ、しかもパイロット燃焼期間中に極大値を示す。パイロット燃焼の熱発生率およびパイロット燃焼ガス温度はパイロット噴射量とともに徐々に増加するが、パイロット燃焼開始時期および主噴射に基づく燃焼開始時期は、特に高負荷

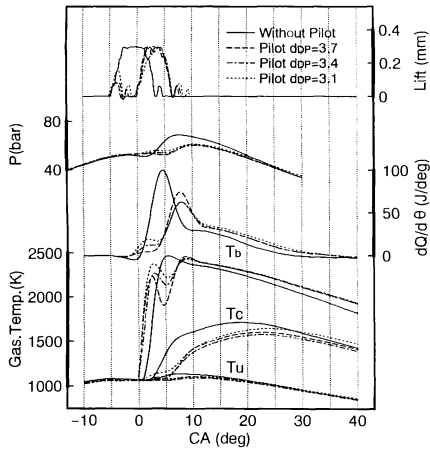


Fig. 5 Effect of pilot amount on combustion (Fuel ADO 60, $P_{me}=3.97$ bar, $\theta_{ni}=5^\circ$ BTDC)

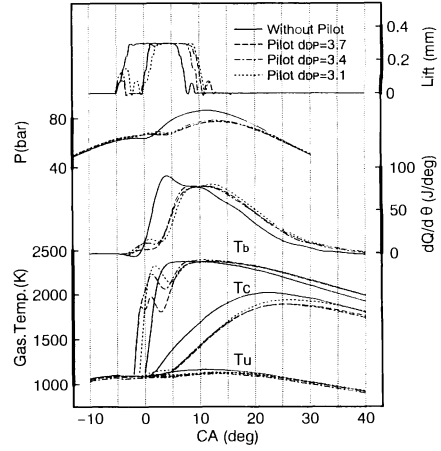


Fig. 6 Effect of pilot amount on combustion (Fuel ADO 60, $P_{me}=8.30$ bar, $\theta_{ni}=5^\circ$ BTDC)

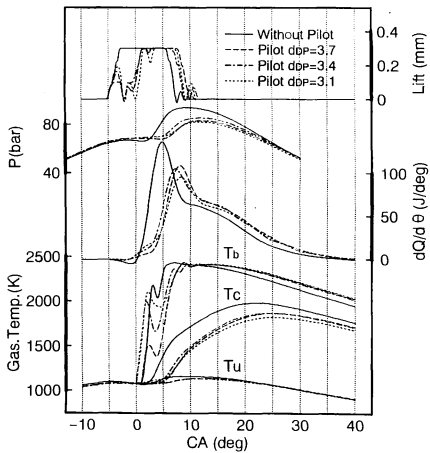


Fig. 7 Effect of pilot amount on combustion (Fuel ADO 40, $P_{me}=8.30$ bar, $\theta_{ni}=5^\circ$ BTDC)

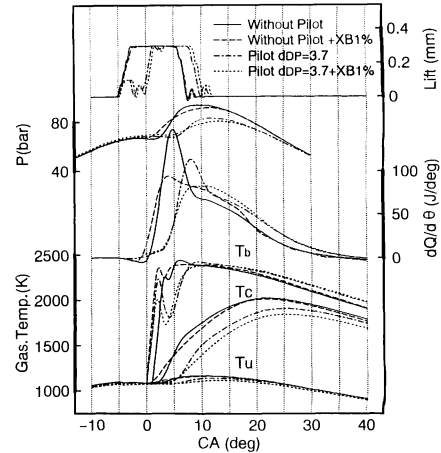


Fig. 8 Effect of pilot amount on combustion (Fuel ADO 40, $P_{me}=8.30$ bar, $\theta_{ni}=5^\circ$ BTDC)

の場合パイロット噴射量にはあまり影響されていない。高負荷では2000 Kを超える高温のパイロット燃焼火炎が存在する間に主噴射が開始されるため、パイロット噴射量の影響が小さいのであろう。一方、予混合燃焼割合が50%を超える低負荷の場合は、パイロット燃焼火炎温度が十分に高くないパイロット燃焼開始直後に主噴射が開始されるので、パイロット噴射量の影響が主燃焼の最高熱発生率の低下として表れている。

高負荷では通常噴射のときでも予混合燃焼割合が少ないため、パイロット噴射による最高熱発生率抑制効果は小さく、パイロット噴射によって予混合燃焼熱発生率の第1ピークは消滅するものの、拡散燃焼期の熱

発生率曲線はパイロット噴射量によってほとんど影響を受けない。この拡散燃焼期熱発生率曲線は、パイロット噴射による初期噴射率制御では変えられず、これを変えるには主噴射率を制御する別の方法によらねばならない。

なお、パイロット噴射量が大きい場合でかつ高負荷ほど、パイロット噴射に二次噴射的な噴射が現れているが、それに基づく噴射量はわずかであるため、熱発生率曲線に及ぼす影響は小さい。

3.3 低質軽油の燃焼に及ぼすパイロット噴射および着火促進剤の影響 低質軽油 ADO 40 の高負荷時の燃焼に及ぼすパイロット噴射量の影響を、図7に示す。パイロット噴射量の増加とともにパイロット燃

燃焼の熱発生率が徐々に増加することは、図6の場合と同じ傾向であるが、良質軽油の場合パイロット燃焼期間に熱発生率が極大値をもつものに対し、低質軽油の場合はパイロット燃焼は緩やかで、パイロット噴射の二次噴射があるためかその熱発生率は単調増加し、ついで主噴射に基づく急激な燃焼に引き継がれる。着火性の悪い低質軽油の場合は、高負荷であっても図5に示した良質軽油の低負荷の場合と同様で、パイロット燃焼初期に主噴射が開始され、主噴射に基づく燃焼には予混合燃焼期熱発生率に顕著なピークが存在し、そのピーク値はパイロット噴射によって通常噴射の場合より顕著に低減される。また、それはパイロット噴射量の増加によってさらに低下する。

高負荷時の低質軽油 ADO 40 の燃焼に及ぼす着火促進剤添加の影響を図8に示す。ここでは通常噴射および最少パイロット噴射量の場合において、着火促進剤(XB)を1%添加した場合と、添加しない場合についてそれぞれ比較した。通常噴射の場合、ADO 40にXBを1%添加すると着火遅れが短縮され、予混合燃焼最高熱発生率が大幅に低下される。その熱発生率曲線は、図6に実線で示したADO 60のそれとほとんど一致している。同様に、ADO 40にパイロット噴射および着火促進剤を重複適用した図8の点線で示す熱発生率曲線は、図6に示すADO 60にパイロット噴射を適用した場合の拡散燃焼期熱発生率曲線とほとんど一致している。着火促進剤はパイロット噴射と同様に着火遅れを短縮し、燃焼初期の圧力上昇を緩やかにするが、急激燃焼の緩和により拡散燃焼期の乱れが抑制されるためか、あるいは着火促進剤固有の性質のためか、図8からは明確ではないが、拡散燃焼過程における燃焼速度が抑制され、燃焼期間がやや増加する傾向が見られた。

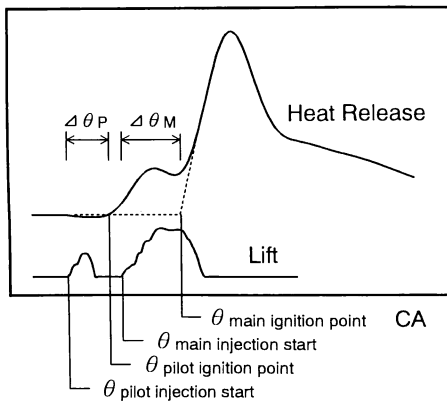


Fig. 9 Definition of ignition delay

3.4 パイロット噴射および着火促進剤による着火遅れ短縮効果 図9に示すように、針弁リフト曲線および熱発生率曲線において着火遅れを定義した。パイロット噴射着火遅れ $\Delta\theta_P$ はパイロット噴射開始時期とパイロット燃焼開始時期のクランク角差として、また、主噴射着火遅れ $\Delta\theta_M$ は、主噴射開始時期と主噴射に基づく燃焼開始時期のクランク角差として定義している。なお、パイロット燃焼開始時期は熱発生率曲線の立上りが $dQ/d\theta=0$ の横軸と交差するクランク角とした。また、主燃焼開始時期は熱発生率曲線が急激に立ち上がる部分を図9に示すように直線で近似して延長し、 $dQ/d\theta=0$ の横軸と交差するクランク角として定義した。いくつかの噴射開始時期 θ_{inj} について、パイロット噴射量を変化した実験結果から得られた $\Delta\theta_P$ および $\Delta\theta_M$ を図10~12にプロットした。なお、図10~12中の白丸印を結んだ実線は通常噴射の着火遅れを示す。図10は低負荷での燃油ADO 60の着火遅れを、図11は高負荷でのADO 60の着火遅れを、図12は高負荷でのADO 40の着火遅れをそれぞれ示した。

図10~12からわかることをまとめると以下のとおりである。(1)パイロット噴射着火遅れおよび主噴射着火遅れのいずれも、通常噴射着火遅れのおおよそ半分であり、低負荷ほど着火遅れ短縮効果大きい。(2)噴射時期が上死点前 10° と上死点后 5° の範囲では、噴射時期遅延によってパイロット噴射着火遅れは減少し、主噴射着火遅れは増加するが、特に上死点后噴射の場合にパイロット噴射は通常噴射に比べ、著しい着火遅れ短縮効果がある。(3)良質軽油の場合、パイロット噴射着火遅れおよび主噴射着火遅れのいずれも、パイロット噴射量の影響をほとんど受けないのに

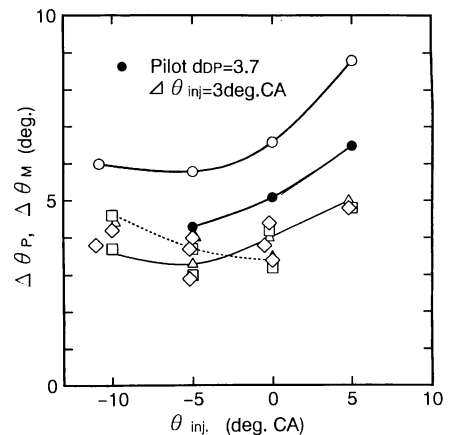


Fig. 10 Reduction of ignition delay (Fuel ADO 60, $P_{me}=3.97$ bar)

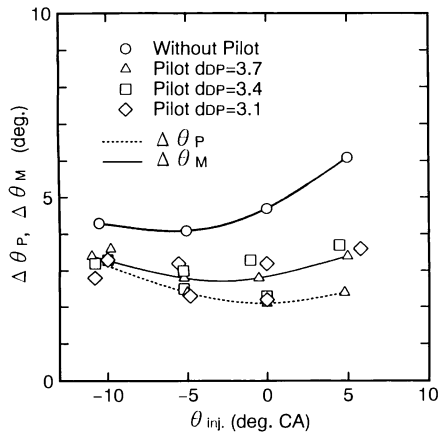


Fig. 11 Reduction of ignition delay (Fuel ADO 60, $P_{me}=8.30$ bar)

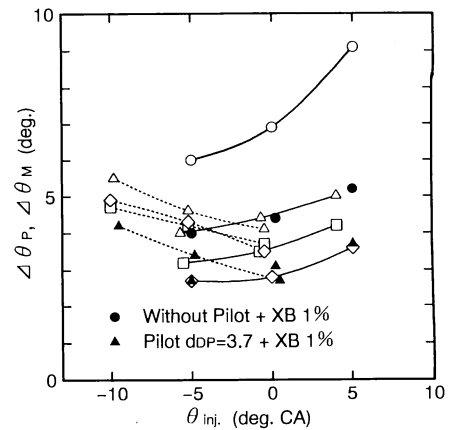


Fig. 12 Reduction of ignition delay due to pilot injection and ignition improver (Fuel ADO 40, $P_{me}=8.30$ bar)

対し、着火性の悪い低質軽油の場合、パイロット噴射量の増加によって着火遅れの短縮度が大きくなる。

なお図10の黒丸印はパイロット・メイン噴射間隔 3° の場合であり、噴射間隔 5° の場合より着火遅れ短縮度は小さい。また、図12の黒丸印は通常噴射に着火促進剤を添加した場合、また、黒三角印はパイロット噴射に着火促進剤を添加した場合であり、着火促進剤の1%添加は本パイロット噴射とほぼ同程度の着火遅れ短縮効果を示す。

4. む す び

直接噴射式過給ディーゼル機関にドッジブランジャ式パイロットインゼクタを適用し、主噴射に適度に近接した少量のパイロット噴射が、着火遅れ短縮のため極めて有効であることを、パイロット燃焼および主燃焼の熱発生率、および燃焼域ガス温度の時間履歴から明らかにした。パイロット噴射によって、着火遅れが通常噴射に比べて約半分ほどに短縮されること、また、噴射時期を上死点以後に遅延した場合に極めて効果的であることを示すとともに、特に、低負荷ほど、また着火性の悪い低質油ほどパイロット噴射による着火遅れ短縮効果が大きいことなどを示した。

終わりに、本研究の基本となるパイロットインゼクタを提供していただいた(株)ゼクセルの吉津文嗣氏に、実験に協力いただいた澤田耕一君〔当時：長崎大学大学院、現：ヤンマーディーゼル(株)〕に、また供試燃油についてはモービル石油(株)、着火促進剤については協和発酵(株)の関係各位にご協力いただいたことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) Shimada, T., ほか2名, *SAE Paper*, No. 891919(1989).
- (2) 中北・ほか4名, *機論*, 59-559, B(1993), 892.
- (3) 山本・ほか3名, 第11回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1993), 1.
- (4) Shokal, J. S. and Martin, J. K., *SAE Paper*, No. 940667(1994).
- (5) Shokal, J. S. and Martin, J. K., *SAE Paper*, No. 940903(1994).
- (6) Durnholtz, M., ほか2名, *SAE Paper*, No. 940674(1994).
- (7) Nehmer, D. A. and Reitz, R. D., *SAE Paper*, No. 940668(1994).
- (8) 吉津・中山, *機論*, 59-559, B(1993), 880.
- (9) Kamimoto, T., ほか3名, *SAE Paper*, No. 800253(1980).
- (10) 石田・ほか4名, *機論*, 60-573, B(1994), 1845.
- (11) 石田・ほか3名, *機論*, 60-575, B(1994), 2592.