

光ファイバ温度計によるディーゼル燃焼変動解析 (火炎の乱れと燃焼域空気過剰率の関係)

石田 正弘*・黒川 清司*

Diesel Combustion Fluctuation Analysis by Optical Fiber Thermometer (Relationship between Flame Temperature Fluctuation and Excess Air Ratio of the Burned Zone)

by

Masahiro ISHIDA* and Kiyoshi KUROKAWA*

Fluctuation of flame temperature was measured in the combustion chamber of a DI diesel engine by means of the optical fiber thermometer, and combustion pressure history was measured as well. By using the two-zone model, the excess air ratio of the burned zone was analyzed based on the experimental pressure history, and it was compared between the two cases with and without pilot injection. It is shown that the excess air ratio in the case of pilot injection is smaller than the one in the standard injection depending the ignition delay. And it is also found that the excess air ratio of the burned zone is well correlated with the RMS values of pressure and flame temperature fluctuations.

1. はじめに

自動車用高速小型ディーゼル機関および船用中・大型ディーゼル機関とも厳しい排ガス規制に対処するための燃焼改善が行われている。特に小型直噴機関では窒素酸化物NO_xおよび微粒子の同時低減を目指して、燃焼室内での燃料の均質化、希薄化すなわち予混合化が指向され、一方噴霧燃焼改善のため、微細噴孔⁽¹⁾あるいは組合せノズル⁽²⁾、コモンレールによる多段噴射⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾あるいは噴射率制御⁽⁶⁾、パイロット噴射⁽⁷⁾⁽⁸⁾、水/燃料層状噴射⁽⁹⁾などの効果が調べられ、噴霧の微細化、適正化による微粒子特にすすの低減対策が追究されている。

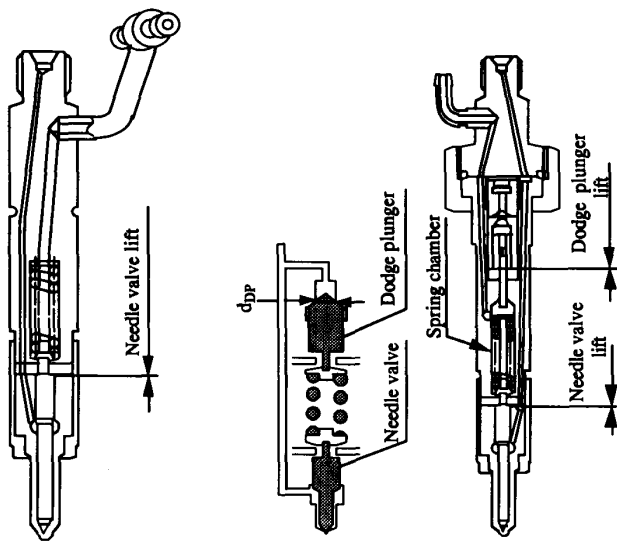
最近、NO_x低減のためにパイロット噴射が注目され、筆者ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は、ドッジプランジャ式パイロットインゼクタ⁽⁹⁾を直接噴射式過給ディーゼル機関に適用し、主噴射に近接したパイロット噴射が機関の燃焼および排気物質に及ぼす影響を調べた。その結果によれば、パイロット噴射によって顕著な着火遅れの短縮、および燃費・NO_x背反関係の改善が得られたが、一方、排煙濃度の増加が指摘された。着火遅れ短縮効果を損なうことなく、パイロット噴射に基づく排煙濃度の増加を抑制するため、パイロット噴射と小噴孔ノズルの

組合せによるパイロット噴射少量化法、および噴射弁ばね室圧力制御によるパイロット噴射少量化法が提案され、その効果が示された⁽⁹⁾。また、光ファイバ温度計を用いて2色法により火炎温度変動が計測され、パイロット噴射と通常噴射の比較において、燃焼圧力変動と火炎温度の乱れ強さの相関から、パイロット噴射に基づく機械効率向上および冷却損失減少の要因が明らかにされた⁽⁹⁾。

周知のように、ディーゼル機関におけるすすの生成率は主として拡散燃焼率に、またすすの酸化率はすす粒子径および燃焼域の酸素分圧に依存している。したがって、すすの生成を減少させるには、拡散燃焼量を減らすこと、すなわち予混合化の促進によって達成される。一方、すすの酸化は燃焼域の酸素分圧の増加、換言すれば燃焼域への空気導入率の増加によって促進される。本研究では、上述の観点に立って、パイロット噴射に基づく排煙濃度の増加要因を明確にするために、燃焼域空気過剰率のパイロット噴射に基づく変化を2領域モデル⁽¹⁰⁾により解析し、燃焼域空気過剰率と計測された燃焼圧力変動および火炎温度変動との相関関係から追究した。

平成11年10月26日受理

**長崎大学工学部機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)



(a) Standard injector (b) Pilot injector

Fig.1 Tested standard injector and pilot injector

2. 実験装置および計測結果

2.1 供試機関およびパイロットインゼクタ

供試機関は、自動車用水冷4サイクル直接噴射式ターボ過給ディーゼル機関（ボア100mm、ストローク105mm、4気筒、圧縮比16、最大出力95.6kW(130PS)/3,500rpm：三菱自動車工業(株)製4D31-T型)を用い、水冷式インタークーラを別途装着することにより吸気温度を一定に保った。噴射ポンプは、燃料噴射時期を自由に設定できるハンドタイマーを装着した分配型ポンプを、また燃料噴射弁として図1に示すような広く使用されている標準型インゼクタ、およびドッジプランジャを装着したパイロットインゼクタを用いた。本実験では、パイロットと主噴射の分離間隔をクランク角度で約5°に設定し、ドッジプランジャシート径 d_{dp} に3.7mmを選定した。機関回転速度1,750rpmの時、パイロット噴射量は約3.0mg/st.であり、この噴射量は、 P_{me} が0.40MPaおよび0.83MPaの場合の全噴射量に対し、それぞれ約12%および7%であった。実験に用いたノズルは噴孔数5の等ピッチノズルで、噴孔径は0.26、0.24および0.22mmの3通り、供試燃油はセタン価約57のJIS2号軽油である。

2.2 火炎温度計測システム

図2は、光ファイバ温度計を用いた火炎温度計測システムを示す^{9,10,11)}。直径約1.3mmのサファイヤ棒で製作された傾斜先端型ライトパイプセンサの受光部を通過した放射エネルギーは、光ファイバケーブルを通して4チャンネル光ファイバ温度計（アキュファイバ

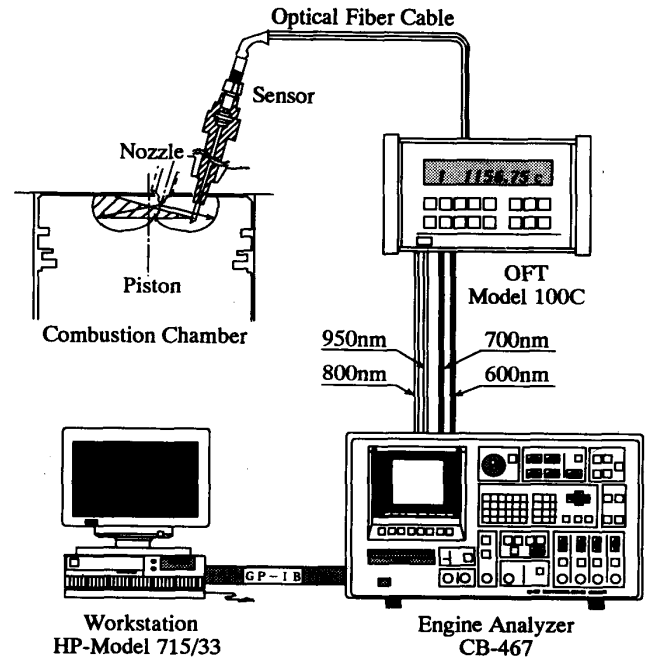


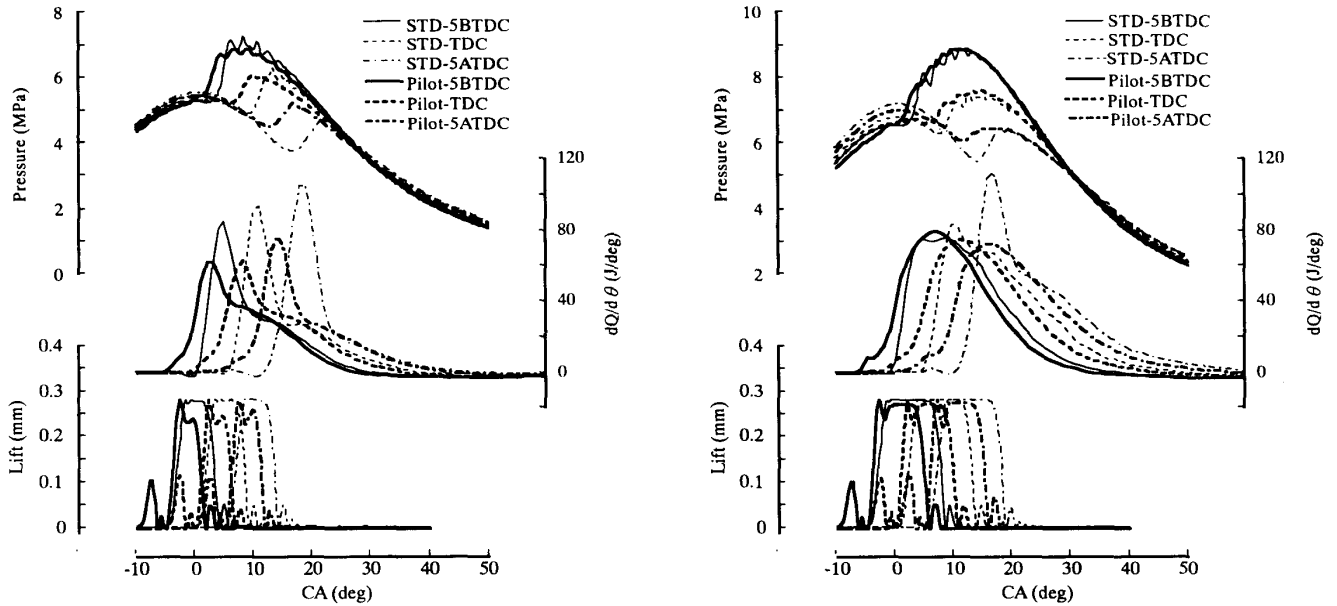
Fig.2 Flame temperature measuring system

社製モデル100C、略称OFT)へ送られる。OFTでは、適切に選択された中心波長950nm、800nmの赤外線2波長について放射エネルギー強さが検出される。この電圧出力は4チャンネル過渡燃焼解析装置（小野測器(株)製CB-467)へ転送され、クランク角度0.25°毎のデータとしてサンプリング後、ワークステーション（HP製モデル715/33)に記録、解析される。また、筒内圧力、燃料噴射圧力、針弁リフトなどの時間履歴についても、それぞれのセンサを用いて、上記の計測システムにより火炎温度と同時に計測された。

2.3 実験条件および計測結果

実験では、機関回転速度を $1,750 \pm 5$ rpm、機関入口での過給機入口吸気圧力を電動のプロワを用いて標準大気圧に、また機関入口吸気温度をインタークーラを動作することによって 45 ± 1 °Cに保ち、正味平均有効圧 P_{me} が0.40および0.83MPaの2通りの負荷条件で、燃料噴射時期 θ_{inj} を上死点前5°(5BTDC)、上死点(TDC)、上死点后5°(5ATDC)の3通り変化した。

図3(a)および(b)は、連続した350サイクルに亘って取得された筒内燃焼圧力、熱発生率および針弁リフトのアンサンブル平均時間履歴を示す。図では噴孔径が0.26mmの場合について、パイロット噴射および通常噴射の場合をそれぞれ比較している。いずれの負荷および噴射時期においても、パイロット噴射により、着火遅れが短縮され、予混合燃焼での熱発生率のピーク値が低くなり、拡散燃焼割合が増加している。



(a) Low load (Pme=0.40 MPa)

(b) High load (Pme=0.83 MPa)

Fig.3 Ensemble mean time histories of combustion pressure, heat release rate and needle valve lift

3. 2領域モデルによる燃焼域空気過剰率の解析

2領域モデル解析においては、簡単のため、燃焼室内を燃焼域と未燃域の2領域に分割し、図3に示した燃焼圧力および熱発生率の時間履歴を初期条件として解析した。未燃域から燃焼域への空気導入率、換言すれば燃焼域空気過剰率 λ_b は、予混合燃焼期および拡散燃焼期の燃焼期間全体を通して一定と仮定し、図4に示す2領域モデル解析フローチャートに従って計算を行った。なお、計算手順の詳細は文献(14)で示された方法と同様である。

筒内平均ガス温度 T_c は状態方程式、未燃域ガス温度 T_u は断熱変化の式、および燃焼域ガス温度 T_b は混合気体の内部エネルギーの総和の式をそれぞれ適用した次式により算定される。

$$T_c = PV/G_c R \tag{1}$$

$$T_u = T_0 (P/P_0)^{(k-1)/k} \tag{2}$$

$$T_b = \{G_c c_{vc} T_c - G_u c_{vc} T_u\} / (G_b c_{vb}) \tag{3}$$

ここで、 G_c 、 G_b 、 G_u はそれぞれ筒内全体、燃焼域、未燃域のガス重量、 P は筒内圧力、 V は燃焼室容積、 R はガス定数、 k は比熱比、 T_0 、 P_0 は着火前の筒内平均ガス温度および筒内圧力、 c_{vc} 、 c_{vb} はそれぞれ筒内平均、未燃域の定容比熱であり、ガス定数および分子量とともに、4種のガス組成 [CO_2]、 $[O_2]$ 、 $[H_2O]$ 、 $[N_2]$ および未燃燃料蒸気を考慮して算定した。特に燃焼域の定容比熱 c_{vb} 、ガス定数および分子量は、10種の化学種 [CO]、 $[CO_2]$ 、 $[O_2]$ 、 $[H_2]$ 、 $[H_2O]$ 、 $[OH]$ 、 $[H]$ 、 $[O]$ 、 $[NO]$ 、 $[N_2]$ の化学平衡組成解析結果から算定した。

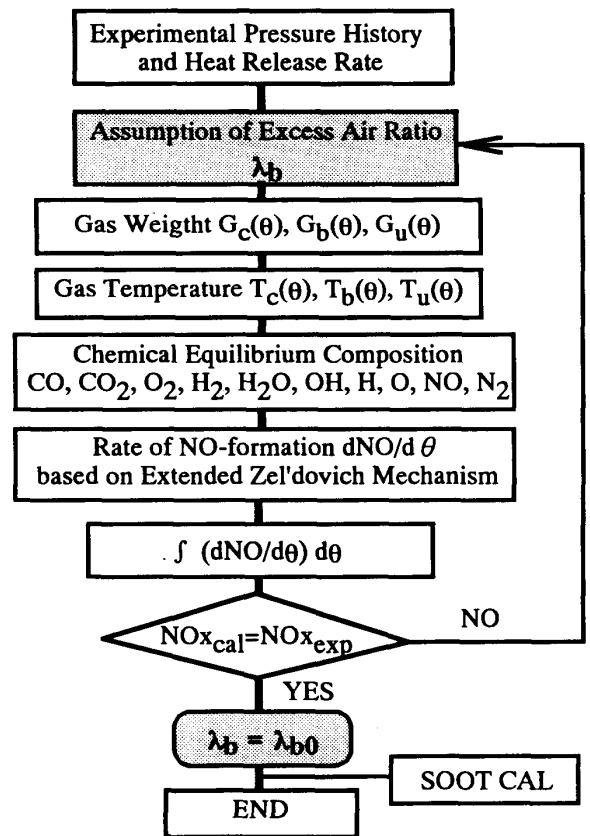


Fig.4 Flow chart of two-zone model analysis

燃焼域ガス温度 T_b は、仮定された λ_b に対して式(3)より求まるが、解析においては、 NO_x 濃度の計算値が実測値と一致するまで λ_b を変化して繰り返し計算

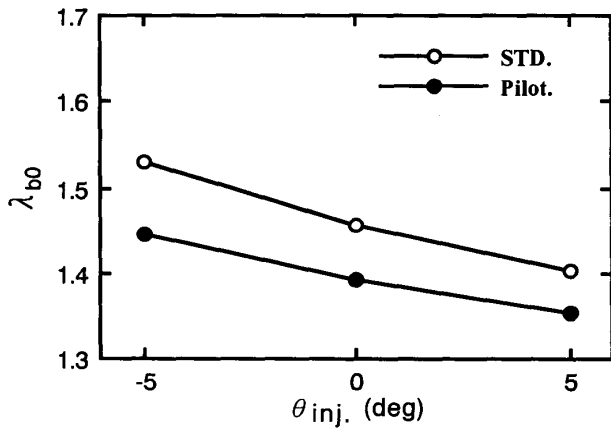
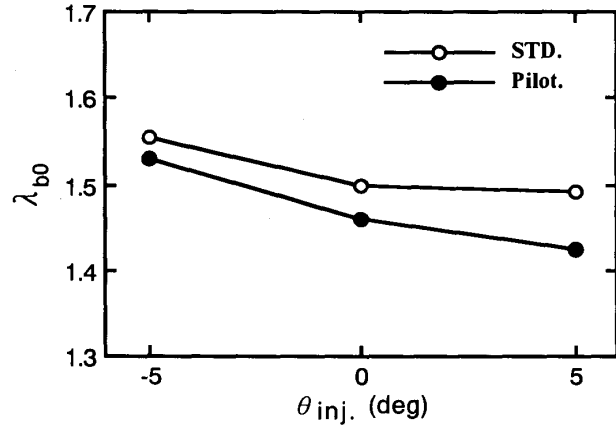
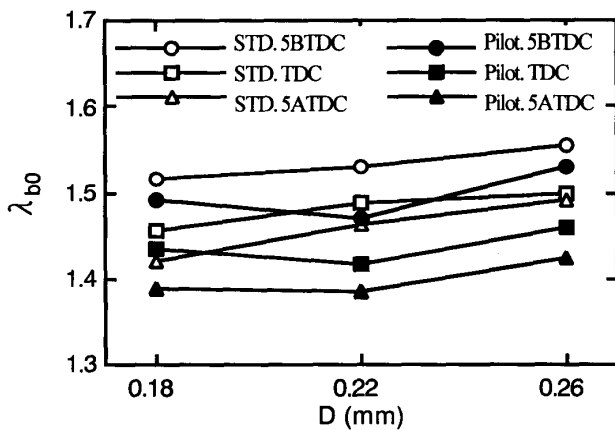
(a) Low load ($P_{me}=0.40$ MPa)(b) High load ($P_{me}=0.83$ MPa)Fig.5 Change in excess air ratio due to pilot injection and timing retard ($D=0.26$ mm)

Fig.6 Change in excess air ratio due to pilot injection and nozzle hole diameter reduction

を行い、試行錯誤法により最終的な λ_{∞} を決定した。なお、NO生成率の算定には、拡大チェルドヴィッチ機構を適用している。

図5(a)および(b)は、それぞれ低負荷 ($P_{me}=0.40$ MPa) および高負荷 ($P_{me}=0.83$ MPa) の場合について、2領域モデル解析により算定された燃焼域空気過剰率 λ_{∞} の噴射時期による変化を示す。図では噴孔径が0.26mmの場合について、パイロット噴射と通常噴射の場合を比較している。燃焼域空気過剰率は、通常噴射に比べ、パイロット噴射の方が明らかに小さい値を示しており、また、いずれの場合も噴射時期を遅延するほど燃焼域空気過剰率が低下している。図6は燃焼域空気過剰率に及ぼす噴孔径の影響を、噴射時期をパラメータとして示している。通常噴射の場合、噴孔径が小さい方が着火遅れが僅かではあるが短くなり、また燃焼域空気過剰率が低くなる傾向を示す。一方、理由は明確ではないが、パイロット噴射の場合は、噴

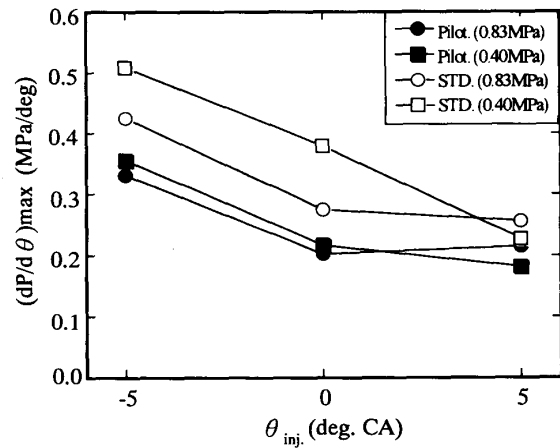


Fig.7 Change in maximum pressure rise rate due to injection timing

孔径0.22mmの時に極小値を示す。

4. 空気導入率と火炎温度変動の相関関係

図7は、図3に示したアンサンブル平均燃焼圧力時間履歴から求めた最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ の噴射時期に基づく変化を示す。図から明らかなように、通常噴射よりパイロット噴射の方が、また、噴射時期を遅延した方が、最大圧力上昇率が小さい。この傾向は図5(a)および(b)に示した燃焼域空気過剰率の噴射時期に基づく変化と傾向が類似している。なお、 $(dp/d\theta)_{max}$ の値は、予混合燃焼期の熱発生率のピーク値、換言すれば着火遅れの大小に主として依存している。

図8は、計測された燃焼圧力変動のRMS値の最大値と、図7に示した最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ との相関で、両者は極めて良い相関関係を示している。すなわち、燃焼期間中の圧力変動は着火直後の最大圧力上

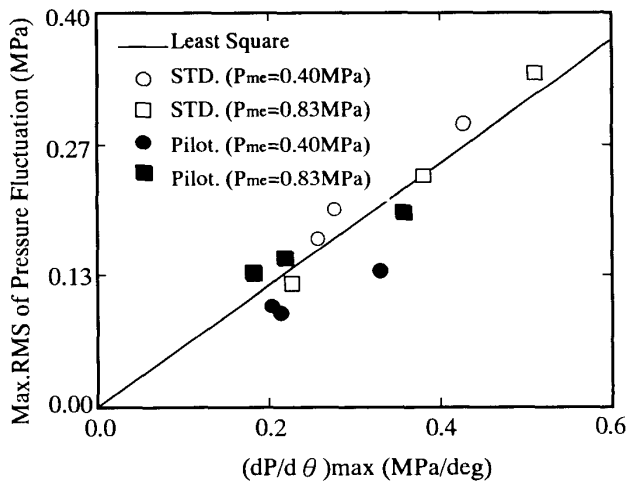


Fig.8 Correlation between pressure rise rate and flame temperature fluctuation

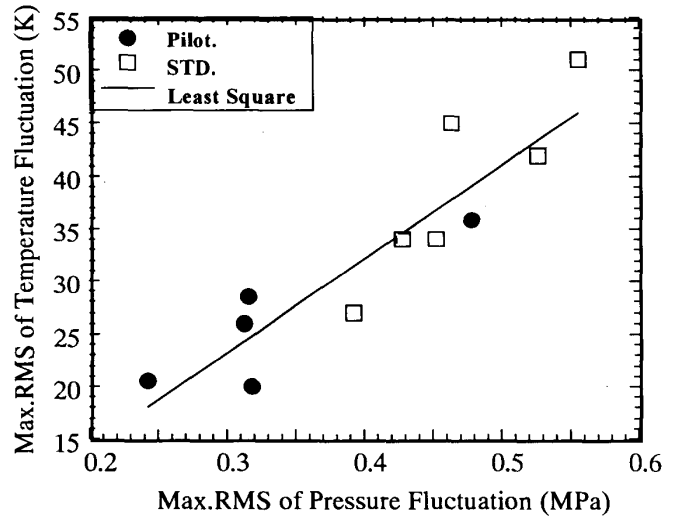


Fig.10 Correlation of fluctuations between pressure and flame temperature

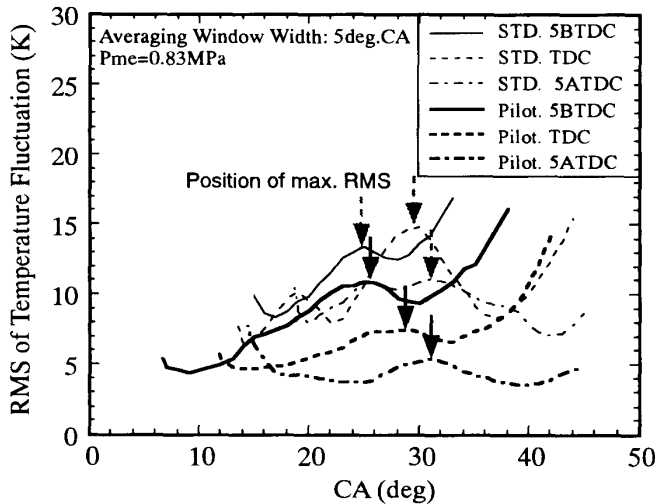


Fig.9 Time history of flame temperature fluctuation

昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ に依存することが明らかである。なお、RMS値は、連続した100サイクルに亘って計測された燃焼圧力の時間履歴について、クランク角度 20° の移動平均幅 (カットオフ周波数約500Hz) として処理したRMS値の最大値であり、以下に示す火炎温度変動についても同様の処理 (移動平均幅は 5°) を行った。具体的な処理方法については、文献(13)に記載されている。

図9は光ファイバ温度計により計測された火炎温度変動のRMS値の時間履歴を示す。なお、図ではそれぞれの実験条件での拡散燃焼期間に限定して表示した。拡散燃焼期間の火炎温度変動の最大RMS値と、圧力変動の最大RMS値との相関を図10に示すが、両者の相関はかなり高い。すなわち、燃焼圧力変動と火

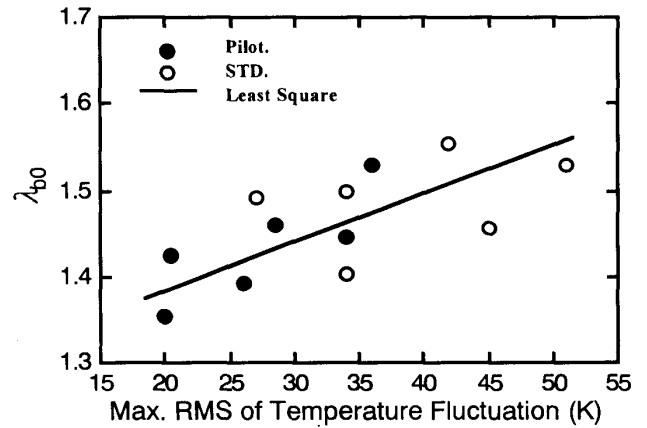


Fig.11 Correlation between excess air ratio and temperature fluctuation

炎温度変動は連動していることが伺える。

図11は、燃焼域空気過剰率と火炎温度変動のRMS値との相関を示す。プロットされたデータにはばらつきが見られるが、殆どのデータは実線で示す最小自乗直線の近傍にあり、温度の変動の最大RMS値と燃焼域空気過剰率との間に顕著な相関があると言える。すなわち、燃焼における火炎温度変動のRMS値は、圧力変動のRMS値すなわち乱れと相関関係にあり、この乱れは、燃焼初期の最大圧力上昇率に顕著に依存している。

5. むすび

直接噴射式小型高速ディーゼル機関におけるパイロット噴射に基づく排煙濃度の増加要因を、2領域モデルによって算定される燃焼域空気過剰率の変化から評価し、また、計測された燃焼圧力変動および火炎温度変動の

RMS値と燃焼域空気過剰率との相関関係を調べることに
よって以下のことを明らかにした。

(1) パイロット噴射, 噴射時期遅延, および噴孔径
が燃焼域空気過剰率に及ぼす影響は, 同時に計測され
た燃焼圧力変動および火炎温度変動のRMS値と顕著
な相関があり, 変動が増加するほど燃焼域空気過剰率
が増加する。

(2) パイロット噴射の場合の燃焼域空気過剰率は, 通
常噴射の場合に比べて低い値を示す。すなわち, 燃焼
域への空気導入率がパイロット噴射によって低下する
ことが排煙増加原因の一つと推定される。

(3) すなわち, パイロット噴射の場合, 着火遅れ短縮
に基づく緩やかな圧力上昇により, 乱れが抑制され,
燃焼域への空気導入率が減少することが推定された。

本研究の推進に当り, 当時本学海洋生産科学研究科
学生であった陳之立氏(現在, 茨城大学工学部) およ
び当時本学工学部助手であった駱貴峰氏(現在, いすゞ
自動車(株))の多大な協力があつたことを記して謝意
を表す。

参考文献

- (1) 秋山英之・ほか3名, 急速圧縮装置を用いた微細口高
圧ディーゼル噴霧の予混合的燃焼に関する研究, 機論,
64-618, B(1998), 613-620
- (2) 正司武志, 神本武征, 組合せ噴孔ノズルによる直接
噴射式ディーゼルエンジンの燃焼改善, 機論, 64-620,
B(1998), 1268-1273
- (3) Endo, S., ほか4名, development of J-Series
Engine and Adoption of Common-Rail Fuel
Injection System, SAE Paper, 970818 (1997)
- (4) Verhoeven, D.D., ほか2名, Macroscopic and
Ignition Characteristics of High-Pressure Spra
ys of Single-Component Fuels, SAE Paper, 98
1069 (1998)
- (5) Katoh, T., ほか4名, Common Rail Fuel Injection
System for Improvement of Engine Performance
on Heavy Duty Diesel Engine, SAE Paper,
980806 (1998)
- (6) 畔津昭彦・ほか3名, 燃料噴射率形状が非定常噴
霧燃焼に及ぼす影響, 機論, 64-624, B(1998), 2737-
2743
- (7) 石田正弘・ほか3名, ディーゼル燃焼におけるパ
イロット噴射の効果(第1報, 着火遅れ改善効果),
機論, 61-590, B(1995), 3518-3523
- (8) 石田正弘・ほか3名, ディーゼル燃焼におけるパ
イロット噴射の効果(第2報, 燃費・NO_x背反関係
の改善), 機論, 61-590, B(1995), 3524-3531
- (9) 土佐陽三・ほか2名, 燃料・水層状噴射によるディー
ゼルエンジンのNO_x低減, 機論, 64-624, B(1998),
2744-2749
- (10) Takasaki, K., ほか3名, Improvement of
Diesel Combustion with Stratified Fuel/Water
Injection System, Proc. 4th COMODIA (1998),
57-62
- (11) 吉津文嗣・中山満茂ディーゼル噴霧の過渡的制
御を目的としたインゼクタに関する研究, 機論59-
559, B(1993), 880-885
- (12) 石田正弘・ほか3名, ディーゼル燃焼におけるパ
イロット噴射の効果(第3報, パイロット噴射量少
量化効果), 機論, 63-610, B(1997), 2222-2227
- (13) 石田正弘・ほか3名, 光ファイバ温度計によるディー
ゼル燃焼過程の変動特性解析(通常噴射とパイロ
ット噴射の燃焼変動比較), 機論, 64-619, B(1998),
961-968
- (14) Ishida, M., ほか3名, Diesel Combustion Ana
lysis Based on Two-Zone Model (Comparison
between Model Analysis and Experiment), JS
ME Intl. J., 39-1(B) (1996), 185-192
- (15) Ishida, M., ほか3名, Diesel Combustion Anal
ysis Based on Two-Zone Model (Examination of
Excess Air Ratio in Burned Zone), JSME Intl.
J., 39-3(B) (1996), 632-639
- (16) 石田正弘・ほか5名, 光ファイバ温度計によるディー
ゼル燃焼の計測(第1報, 燃焼過程と排気物質濃度),
機論, 58-555, B(1992), 3482-3488
- (17) 石田正弘・ほか5名, 光ファイバ温度計によるディー
ゼル燃焼の計測(第2報, 燃焼室内の局所的燃焼挙
動), 機論, 58-555, B(1992), 3489-3494
- (18) 石田正弘・ほか3名, 光ファイバ温度計の計測精
度に関する研究(第1報, 火炎温度計測センサーの
特性), 長崎大学工学部研究報告, 24-43 (1994),
129-134
- (19) 石田正弘・ほか3名, 光ファイバ温度計の計測精
度に関する研究(第2報, 火炎温度計測の誤差因子
および補正方法), 長崎大学工学部研究報告, 25-45
(1995), 1-8