

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)

石田正弘^{*1}, 松村 昇^{*2}, 植木弘信^{*1}
伊藤 玄^{*3}, 久保田俊輔^{*4}, 高長 権^{*5}

Measurement of Diesel Combustion by Optical Fiber Thermometer (1st Report, Combustion Process and Exhaust Emission Level)

Masahiro ISHIDA, Noboru MATSUMURA, Hironobu UEKI,
Gen ITO, Shunsuke KUBOTA and Jang-Gwon KO

A combination of an optical fiber thermometer (OFT) and a beveled-edge-type light pipe sensor was used to measure flame temperature and soot concentration accurately in a DI diesel engine combustion chamber through a simple and easy procedure applying an infrared two-color method. The influence of sensor contamination due to combustion on the OFT output was examined and the appropriate correction method was applied for compensation of the decreased OFT output. The changes in combustion temperature and soot concentration were measured and compared with the exhaust emission levels by varying parameters such as engine speed and torque, fuel injection timing and suction air temperature. As a result, it was shown that this measuring technique is useful and effective in evaluating the combustion process in a diesel engine.

Key Words: Diesel Combustion, Optical Fiber Thermometer, Two-Color Method, Flame Temperature, Soot Concentration, Exhaust Emission

1. ま え が き

ディーゼル機関における燃焼を解明するため、写真技術の応用⁽¹⁾や高速度カメラの開発⁽²⁾などのさまざまな研究がなされているが、火炎のふく射エネルギーに注目した研究が多く、例えば Matsui ら⁽³⁾はディーゼル火炎の可視光および赤外域における二色法を詳細に検討し、すすの生成・酸化過程を明らかにしようとした。また、Yan-Borman⁽⁴⁾はふく射エネルギーの受光部を改良することにより計測精度の高い二色法を追求しているし、Nagase-Funatsu⁽⁵⁾は3波長以上のふく射エネルギーから火炎温度を推定する多色法を提案した。最近では、Mohammad - Borman⁽⁶⁾および Dresen-Rausch ら⁽⁷⁾は燃焼室内の局所的な火炎温度およびすすの生成過程を明らかにするため、複数個のセンサを用いた多点同時計測を行っている。いずれの方法においても、センサ受光部を燃焼室内に挿入する

にはセンサが大きく、外乱を与えないためには燃焼室壁面より外側に装着しなければならないし、受光部の汚損低域のための特殊な技術を要するなど取扱いが簡便でなく、ふく射エネルギーの受光方法および計測精度の点でいまだ十分とは言いがたい。一方、高橋ら⁽⁸⁾が用いた黒体空洞センサ付き光ファイバ温度計はセンサがコンパクトでかつ取扱いが簡便であるが、高速ディーゼル機関における燃焼ガス温度の時間的変化にตอบสนองするようなセンサの特定数を確保することは困難である。

本研究においては、高橋らと同様に光ファイバケーブルおよび光ファイバ温度計を利用しているが、火炎温度およびすす濃度の時間的変化を実時間で計測するため、直径1.3mmの細いサファイヤ棒で作られたライトパイプセンサを用いて、二色法を適用した点が異なる。センサをディーゼル機関のグローブプラグ孔を利用して燃焼室内に挿入し、その受光部を燃焼室内の適切な位置に設置することにより、受光部の汚損程度を抑えつつ測定対象領域からの火炎ふく射エネルギーを計測する簡便な方法である。ここでは、波長800nmおよび950nmについての赤外二色法を適用しており、まず、赤外二色法において推定される計測誤差ならば、ふく射エネルギーの受光特性に及ぼすセンサ受光部

* 平成3年3月14日 機械学会九州支部総会講演会および平成3年7月18日 機械学会九州支部宮崎地方講演会において講演、原稿受付 平成4年3月16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。

^{*4} 日本鉱業(株) (〒105 東京都港区虎ノ門2-10-1)。

^{*5} 韓国済州大学校工科大学 (済州道済州市我羅洞1)。

汚損の影響について検討した。次いで、直接噴射式ディーゼル機関において燃焼を支配するパラメータを変化しながら燃焼室内の代表的測定対象領域の燃焼挙動を火炎温度およびすす濃度を代表する KL 値の変化として計測し、同時に排気中の窒素酸化物およびすす濃度、機関性能の変化と対比することによって、この計測法の有用性を示すとともに複雑な燃焼過程の解明を試みた。

2. 光ファイバ温度計および二色法

2.1 センサ形状および計測システム 光ファイバ温度計 (Optical Fiber Thermometer: 略称 OFT: アクユファイバ社製モデル 100 C) および傾斜先端形ライトパイプセンサを用いた。図 1 にセンサ形状と計測システムを示す。ライトパイプセンサは直径 1.3 mm の平滑なサファイヤ棒であり、先端面がセンサ軸に対して約 50° の傾きを有し、測定対象領域からのふく射エネルギーを取り込む受光部は、傾斜面に正対するサファイヤ円柱表面である。受光部を通過したふく射エネルギーは約 15 m の光ファイバケーブルで OFT に送られ、OFT は赤外域の 2 波長 800 nm および 950 nm についてふく射エネルギー強度を検出する。この電圧出力は 4 チャンネル燃焼解析装置 [(株)小野測器製 CB-466] へ転送され、クランク角 0.25° ごとのデータとしてサンプリングされ、さらにパーソナ

ルコンピュータを介してフロッピーディスクに記録される。

2.2 赤外二色法および計測誤差の検討 温度に対する検出器出力の検定は黒体炉を用いて通常行われるが、本実験に用いた OFT システムは、ふく射エネルギーを電圧に変換し、電圧値からあらかじめ検定された演算係数により精度良く輝度温度を算定する機能を有する。しかしながら、モデル 100 C はディーゼル機関における燃焼温度の時間的変化に応答するほどの高速演算機能を持たない。燃焼解析装置に取り込まれた電圧値を輝度温度に換算するため、センサ受光部に入射される光の強さを定常的に変化させることによって、OFT 出力と輝度温度の検定を行った。輝度温度 T_a から式 (1) を用いて算定される単位波長幅当たりの単色ふく射エネルギーと OFT 出力の検定結果を図 2 に示す。

$$N(\lambda, T) = C_1 \cdot \epsilon(\lambda) \cdot \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} \\ = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2/\lambda T_a) - 1]^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $C_1 = 3.74041 \times 10^8 \text{ (W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$,

$$C_2 = 1.42868 \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)}$$

$$\epsilon(\lambda) = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\epsilon(\lambda)$ は単色射出率であり、これに対し Hottel-Broughton の式 (2) が成り立つと仮定する。 KL はすす濃度に関連した値であり、 α は限られた波長域では定数として扱えるし、赤外域では文献 (3) を参考にして 0.95 を採用した。

単色ふく射エネルギーと OFT 出力の関係は二つの波長で異なるが、それぞれ極めて良好な直線関係にある。図 2 の 2 本の直線は最小二乗直線近似で、検定値との相関係数は 0.9999 であった。本実験で採用した二色法は文献 (3) と同様であり、赤外 2 波長の OFT 出力の計測誤差が、火炎温度および KL 値の算定に及

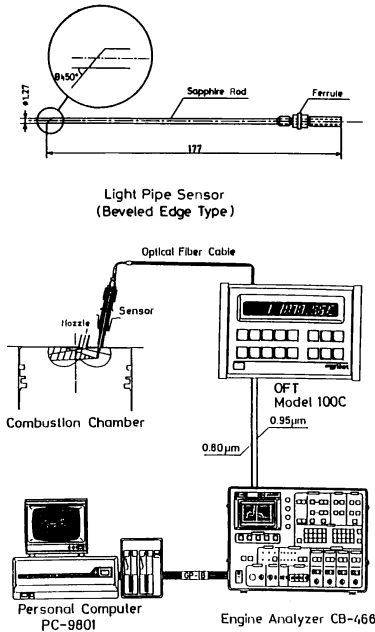


図 1 センサ形状および計測システム

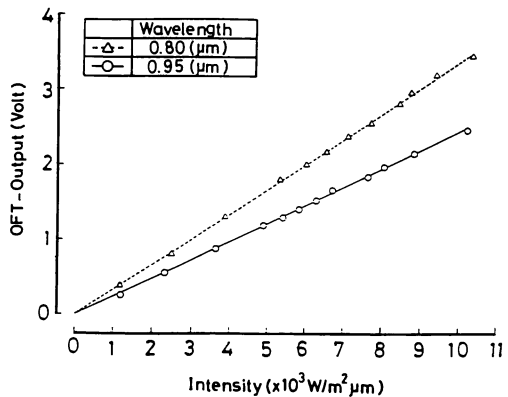


図 2 ふく射エネルギー強度と OFT 出力の関係

ばす影響を調べたものが図3である。計測結果によれば、センサ受光部が清浄な場合、赤外2波長のOFT出力最高時の電圧差は出力電圧の5%以下であり、例えば電圧差に5%の誤差があったとしても、図3の結果から推定される温度の算定誤差はたかだか約70°Cである。また、センサ受光部の汚損によってOFT出力が20%減衰した場合、それに基づく誤差は約30°Cであり、これらの誤差は計測温度レベル2300 Kに比べるとかなり小さい。一方、すす濃度を代表するKL値はOFT出力にほぼ比例して変化するため、センサ受光部の汚損の影響が直接その計測誤差になる。例えば汚損により出力が20%減衰すると誤差は約20%であり、また2波長の出力電圧差が5%の誤差を含む場合、KL値の算定誤差は約25%にも及ぶ。

2.3 受光部汚損に基づくOFT出力減衰の補正

実験に供した後で取り出されたセンサ受光部表面には薄い透明皮膜が形成されており、この透明皮膜はバーナ火炎で加熱処理しても完全には除去できないものであった。約1hの運転計測後停止し、センサを外して加熱処理をせずに、一定強さの基準光源を用いてセンサ受光感度を検定するという操作を10回繰返し、センサの使用回数の累積に基づくセンサ受光感度の低下を調べた。その結果を図4に示す。基準光源としては、波長780 nm、ビーム径約0.3 mmのレーザー光および白熱電球から放射される光の2種を用い、白熱光につ

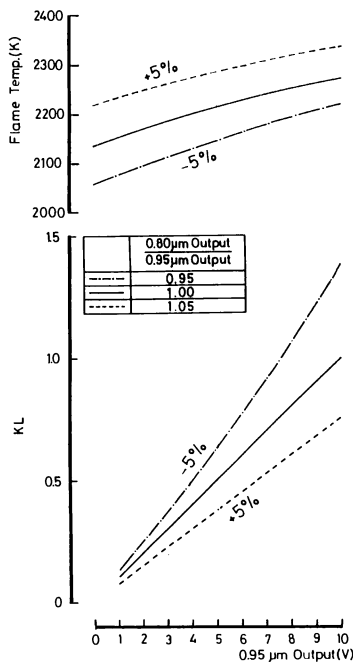


図3 OFT出力に基づく温度およびKL値算定誤差

いては中心波長800 nmおよび950 nmの2波長についてそれぞれOFT出力の減衰過程を調べた。減衰率は波長ごとに明らかに異なり、また単色レーザー光と連続スペクトルを有する白熱光においても減衰率に差があるが、波長によらずOFT出力は運転回数に対して指数関数的に減衰している。黒三角印および黒四角印は、機関燃焼室の火炎ふく射エネルギーを計測した場合において、クランク角に対して変化するOFT出力最大値の減衰を示す。検定光の場合の減衰率は、運転計測状態の減衰率よりかなり大きい、両者には整然とした相関が認められた。条件を変化させた多くの実験を行う場合には、同一の運転条件のデータ(図4の場合には、運転回数1回および10回)から運転回数に対応した汚損割合を求めることにより、異なる条件のOFT出力の補正を行うことができる。図5は汚損前後の計測結果の比較であり、汚損後のOFT出力について検定結果から補正係数を算定し、センサ汚損後のOFT出力を補正することによって算定された火炎温度およびKL値を破線で示したが、これは実線で示す汚損前の値とほぼ一致した。図5中の P_{me} 、 θ_{inj} および T_s は、それぞれ正味平均有効圧、燃焼噴射開始時期および吸気温度を示す。

なお文献(4)では、センサ受光部表面の汚損防止のため高度の工夫がなされたが、それにもかかわらず燃焼による受光部汚損のため受光率が20~30%減衰することが示された。減衰率はセンサの使用累積時間にも依存するが、本実験ではセンサ受光部を燃焼室内部に設置したため計測時間中の減衰は小さく、エンジン停止に伴う透明皮膜の累積形成に基づくものと推定さ

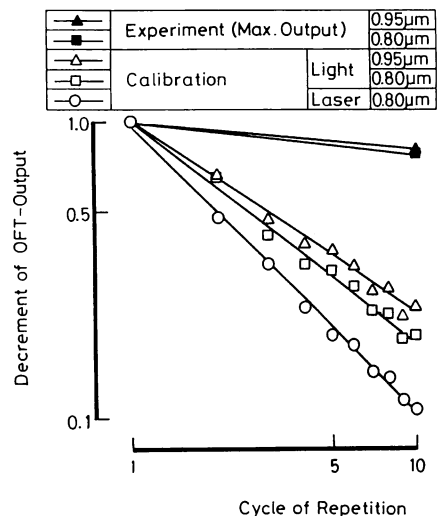


図4 受光部の累積汚損に基づく受光特性の変化

れた。

3. 実験結果および考察

3・1 供試機関、燃焼室形状および測定対象領域

供試機関は水冷四サイクル直接噴射式自動車用過給ディーゼル機関 [三菱自動車工業(株)製, 4D31-T形, 100 mm × 105 mm, 4気筒, 最高出力 130 PS/3500 rpm] であり, 供試燃油としてセタン価約 60 の軽油を用いた。シリンダヘッドにはピエゾ圧力センサとライトパイプセンサを同時に装着しており, ライトパイプセンサの装着位置, 受光角度範囲および燃料噴射ノズルの噴孔軸を図6に示す。ここで適用した傾斜先端形ライトパイプセンサは指向性を有し, その仰角およびピッチ角方向受光角度範囲 $\pm 10^\circ$ を図6のハッチング領域で示した。ノズルからの5本の噴孔軸の1本が受光角度範囲内に大部分含まれており, 測定対象領域に占める噴霧火炎の存在割合が高い。センサ先端をシリンダヘッド触火面より7.0 mm突き出し, かつ噴孔軸がセンサ軸と交差しない5穴不等ピッチホールノズルを採用し, すずの付着が少ないようにした。なお, 測定対象領域には, 噴霧, 空気, 火炎および既燃ガスなどが混在するため, 計測される温度は不均一な温度場の影響を受けるが, 主として既燃ガス中のすす粒子群からの強いふく射エネルギーの影響が支配的であると推定される。

3・2 パラメータ変化燃焼試験

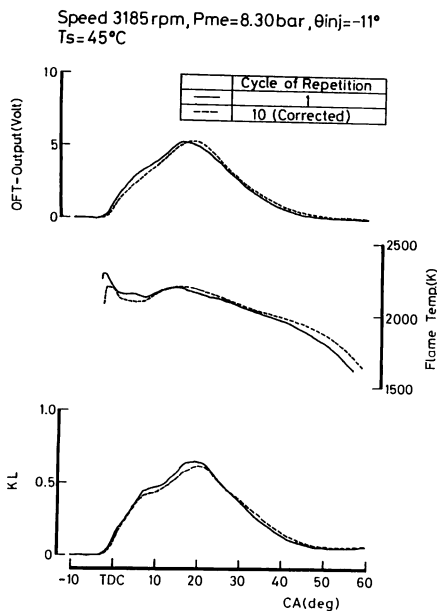


図5 受光部汚損補正が火炎温度算定に及ぼす影響

(1) 噴射時期変化試験 図7(a)および図7(b)は, 機関運転条件を一定に保ちつつ燃料噴射時期のみを上死点前 11° から 5° まで 2° ごとに遅延させた場合の火炎温度計測結果および機関性能をそれぞれ示す。図7中の記号 T_e は排気温度, P_{Nmax} , P_{max} , P_s は最高噴射圧, 最高燃焼圧力, 吸気圧力, q_a は空気消費率, N_B は過給機回転速度, NO_x は窒素酸化物濃度, D_s は排煙濃度, b_e は燃料消費率をそれぞれ表している。

OFT出力および火炎温度の立上り開始時期は, 噴射時期を遅延させた分だけ順次遅れるとともに火炎温度レベルが低下している。すす濃度を代表する KL 値は, その最高値が噴射時期遅延によって増加し, 燃焼終了時点での KL 値は噴射時期が遅いほど高く, 排煙濃度が増加することを示している。これらの結果は, 図7(b)に示した排煙濃度の増加と一致しており, また, 火炎温度の低下が排気 NO_x 濃度の低下となって表れたものと判断される。

(2) 正味平均有効圧変化試験 (3185 rpm) 図8(a), (b)は, 機関回転速度を一定3185 rpmに保ち, 正味平均有効圧 P_{me} を8.30 barから3.97 barまで低下させたときの火炎温度計測結果および機関性能をそれぞれ示す。 P_{me} の低下に伴い, 燃費率, 空気消費率が顕著に増加し, 窒素酸化物濃度および排煙濃度は

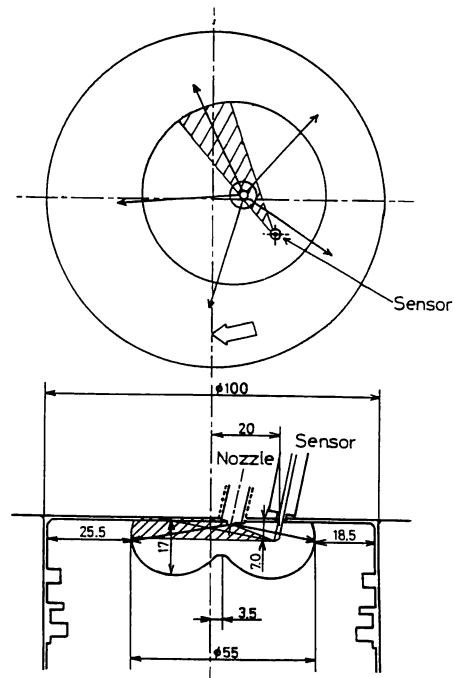
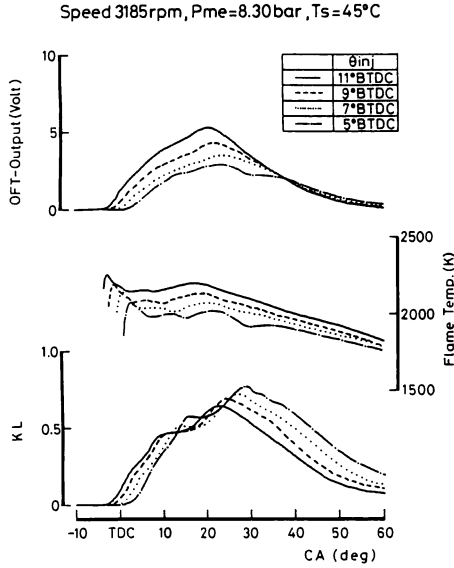


図6 燃焼室形状および計測位置

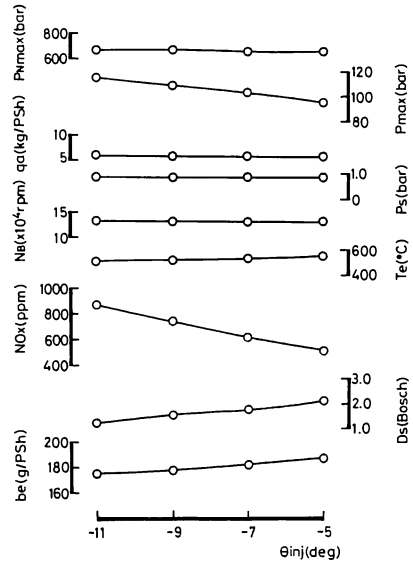
減少する。このことは火炎温度レベルおよび燃焼末期の KL 値の低下と一致している。 P_{me} を減少したとき、空気消費率の増加により火炎温度レベルが低下することは当然であるが、 KL 値が燃焼過程の途中一時的に増加するのは空気導入が遅れかつ火炎温度が低いためすすの酸化が遅れるからであり、空気過剰率が大きい

ほど燃焼過程後半での酸化が急速に進行し、燃焼末期では KL 値が低下するものと考えられる。

(3) 正味平均有効圧変化試験 (1750 rpm) 図 9 (a), (b) は、機関回転速度を一定 1750 rpm に保ち、 P_{me} を 8.30 bar から 3.97 bar まで低下させたときの火炎温度計測結果および機関性能をそれぞれ示

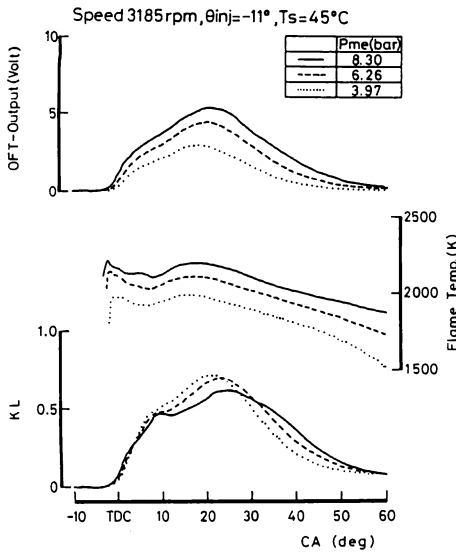


(a) 火炎温度および KL 値

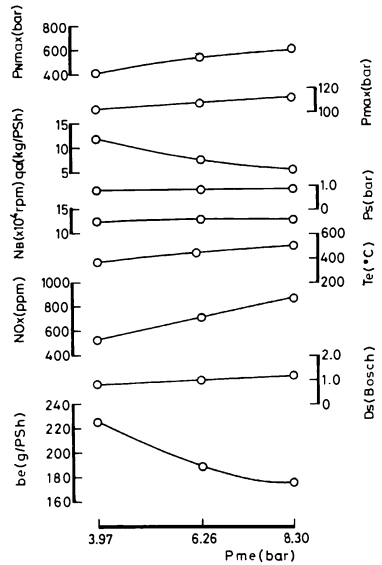


(b) 機関性能

図 7 噴射時期変化試験



(a) 火炎温度および KL 値



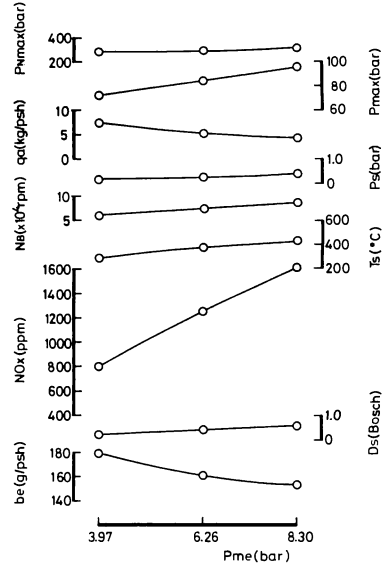
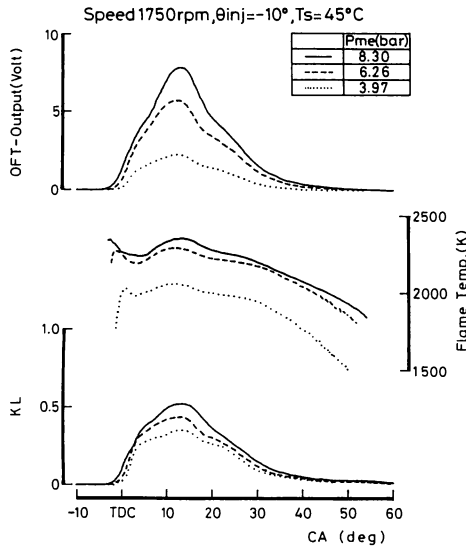
(b) 機関性能

図 8 正味平均有効圧変化試験 (3185 rpm)

す。図8の場合と同様に、 P_{me} の低下に伴う窒素酸化物濃度および排煙濃度の減少と、火炎温度レベルおよび燃焼末期の KL 値の低下は一致している。図8の場合と比較して、燃焼初期の火炎温度がより高いために窒素酸化物排出濃度が高いことが明確に表れている。回転速度が約1/2であることは、燃焼時間が相対的に

長く、空気を導入しすを酸化するのに十分な時間があるため、 P_{me} が低く空気過剰率の高いほうが燃焼過程全体にわたって KL 値が低くなったものと推定される。

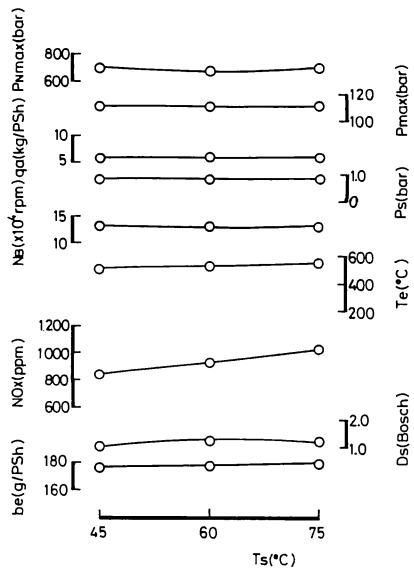
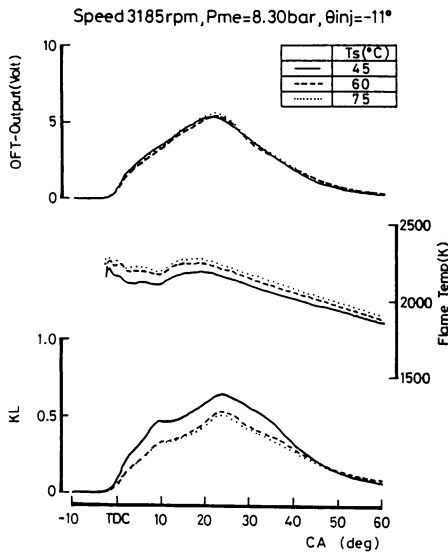
(4) 給気温度変化試験 図10(a)および図10(b)は、機関運転条件を一定に保ちつつ、過給機後に



(a) 火炎温度および KL 値

(b) 機関性能

図9 正味平均有効圧変化試験 (1750 rpm)



(a) 火炎温度および KL 値

(b) 機関性能

図10 給気温度変化試験

装着された中間冷却器を制御することによって、給気温度のみを変化させた場合の火炎温度計測結果および機関性能を示す。給気温度を45°Cから75°Cまで上昇させると、図10(b)からわかるように、体積効率が悪化するため空気流量が減少し、燃費率、NO_x濃度、排煙濃度、排気温度のわずかな増加をもたらす。このことは、火炎温度および燃焼末期のKL値の微増現象と一致している。

4. む す び

本研究では、直径1.3mの細いサファイヤ棒で作られた傾斜先端形ライトパイプセンサと光ファイバ温度計を組合せた簡便な計測システムにおいて、波長800nmおよび950nmの赤外二色法を適用し、ディーゼル燃焼における火炎温度およびすす濃度の時間的変化を実時間で精度良く計測することを試み、また、燃焼を支配するパラメータを変化させることによって、計測された燃焼過程と排気中の窒素酸化物濃度および煙濃度との対比から、以下の結果を得た。

(1) コンパクトなセンサを機関シリンダヘッドのグロープラグ孔を利用して燃焼室内に挿入し、その受光部を燃焼室内の適切な位置に設置することにより、燃焼に基づく受光部の汚損を抑えながら測定対象領域からの火炎ふく射エネルギーを計測できた。

(2) 光ファイバ温度計出力の計測誤差は、火炎温度の算定には大きな影響を与えないが、KL値には大

きな誤差となること、およびセンサ受光部の汚損に基づく受光性能の低下を検定結果を用いて補正することにより正確な計測ができた。

(3) 燃焼を支配するパラメータである機関回転速度、正味平均有効圧、燃料噴射時期および給気温度を変化した計測結果から、火炎温度レベルの変化と排気中のNO_x濃度、および燃焼末期のKL値と排煙濃度との整合性が確認され、ここで用いた計測方法の有用性が示された。

本研究の推進に貢献された平方 靖君 [当時長崎大学大学院生、現在川崎重工業(株)]に、また本研究にご理解とご協力をいただいた日本鉱業(株)、三菱自動車工業(株)、マツダ財団の関係各位にこの場を借りて感謝の意を表す。

文 献

- (1) Ahn, S. K., ほか3名, *SAE Paper*, No. 810183 (1981).
- (2) Kawamura, K., ほか3名, *SAE Paper*, No. 890320 (1989).
- (3) Matsui, Y., ほか2名, *SAE Paper*, No. 800970 (1990).
- (4) Yan, J. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 891901 (1989).
- (5) Nagase, K. and Funatsu, K., *SAE Paper*, No. 901615 (1990).
- (6) Mohammad, I. S. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 910728 (1991).
- (7) Dresen-Rausch, J., and Krebs, R., *Proc. 19th CIMAC Paper*, No. D19 (1991).
- (8) 高橋・ほか2名, 機論, 53-495, B (1987), 3417.