

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)石田正弘*¹, 松村昇*², 植木弘信*¹
伊藤玄*³, 山口征則*³, 高長権*⁴Measurement of Diesel Combustion by Optical Fiber Thermometer
(2nd Report, Local Combustion Behavior in Combustion Chamber)Masahiro ISHIDA, Noboru MATSUMURA, Hironobu UEKI,
Gen ITO, Masanori YAMAGUCHI and Jang-Gwon KO

The authors have proposed new techniques for measuring combustion behavior locally in a DI diesel engine combustion chamber by means of an optical fiber thermometer; one technique is to use two types of light pipe sensor with different measuring spaces and the other is to vary the measuring space only by rotating the axis of the beveled-edge-type light pipe sensor. Results obtained in this experiment are as follows: (1) Cyclic variation of combustion differs significantly from space to space in the combustion chamber. (2) Flame temperature varies a little locally, but the soot concentration varies considerably in the combustion chamber especially at the stage of initial combustion. (3) The soot formation process begins at a crank angle about two degrees after ignition.

Key Words: Diesel Engine, Two-Color Method, Optical Fiber Thermometer, Cyclic Variation, Flame Temperature, Soot Concentration, Soot Formation, Ignition

1. ま え が き

ディーゼル火炎からのふく射エネルギーについて可視光・赤外域の二色法を適用し, すずの生成・酸化過程に注目した研究は数多く, 例えば Matsui ら⁽¹⁾, Yan-Borman⁽²⁾の研究がある。また Nagase-Funatsu⁽³⁾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, 最近では, Mohammad-Borman⁽⁴⁾および Dresen-Rausch⁽⁵⁾らによって, 複数個のセンサを用いた多点同時計測がなされ, 燃焼室内の局所的な火炎温度およびすずの生成・酸化過程の追究が行われている。

著者ら⁽⁶⁾は, 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, 直接噴射式ディーゼル機関の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, 測定対象領域からの火炎ふく射エネルギーをとらえ, 波長800nmおよび950nm

の赤外二色法を適用して実時間で火炎温度およびすず濃度を計測する方法を提案し, 良好な精度で火炎温度が計測できることを示した。

本研究では, 燃焼室内の局所的燃焼挙動を解明することを目標に, 二つの計測方法を提案した。第1は, 受光対象領域の異なる2種のライトパイプセンサ, すなわち平たん先端形センサおよび傾斜先端形センサを利用する方法である。第2は, 約20°の受光角度範囲を有する傾斜先端形センサを, 単にセンサ軸の回りに回転するだけで測定対象領域を変化させる方法である。これらの方法により, 燃焼室各部の燃焼挙動の相違を明らかにするとともに, 測定対象領域と噴霧の相対的位置およびふく射エネルギー出力の立上り時期の関係からすずの生成開始時期を推定し, 計測された火炎温度およびすず粒子濃度の時間的変化および空間的変化から, 窒素酸化物の生成およびすずの生成・酸化過程を明確にしようとした。

2. 実験装置および計測方法

2-1 計測システムおよび供試機関 本実験で使用した計測システムおよび供試機関は, 前報⁽⁶⁾で用いたものと同じである。すなわち, 計測機器として光ファイバ温度計(アキュファイバ社製モデル100C:略

* 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 韓国済州大学校工科大学(済州道済州市我羅洞1)。

称(OFT)および燃焼解析装置 [(株)小野測器製 CB-466], 供試機関として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, 4 D 31-T 形, 100 mm×105 mm, 4 気筒, 最高出力 130 PS/3 500 rpm], 燃料油としてセタン価約 60 の軽油を用いた。図 1 に計測システムを示す。

2・2 センサ受光角度特性 センサ受光部形状の異なる 2 種のライトパイプセンサ, すなわち, 先端面がセンサ軸に直角な平たん先端形および先端面がセンサ軸に 50°の傾きを有する傾斜先端形を用いた。受光部にビーム径約 0.3 mm のレーザー光を当て, その入射角を変化させたときの OFT 出力変化を図 2 に示す。図 2 (a) は平たん先端形センサの受光角度特性, 図 2 (b) および図 2 (c) は傾斜先端形センサの仰角方向およびピッチ角方向の受光角度特性を示す。OFT 出力が

最大値から 90% 減衰するときの角度範囲を受光角度幅と定義すれば, 平たん先端形, 傾斜先端形のピッチ角方向では受光角度幅は約 $\pm 20^\circ$ であり, 傾斜先端形仰角方向の受光角度幅はかなり狭く約 $\pm 10^\circ$ である。なお傾斜先端形センサのピッチ角方向受光中心軸は, センサ軸に垂直な方向と一致している。

2・3 燃焼室形状および測定対象領域 図 3 に燃焼室形状および測定対象領域を示す。図 3 (a) は平たん先端形, 図 3 (b) は傾斜先端形の場合である。噴射ノズルとして噴孔径 0.3 mm の 5 穴ホールノズルを用いており, その噴孔方向を矢印付き実線で示した。平たん先端形センサの先端はシリングヘッド触火面より 1.7 mm 深さに挿入し, 1 本の噴孔軸がセンサ直下を通る 5 穴等ピッチ形 (Type B) を採用した。また傾斜先端形では 7.0 mm 深さまで挿入し, 噴孔軸がセンサ軸と交差しない 5 穴不等ピッチ形 (Type A) を採用した。

傾斜先端形センサの場合, センサ軸を中心として基準方向 1 から 9 まで角度 40° ごとに回転することによって燃焼室全域を網羅する測定対象領域を選定した。図 3 のハッチング領域はいずれも測定対象領域を $\pm 10^\circ$ の受光角度幅で示している。領域 1 では, 5 本の噴孔軸の 1 本がセンサの受光角度範囲内にほぼ含まれており, 同様に領域 8 および 9 においても噴孔軸との位置関係から測定対象領域に占める噴霧の存在割合が比較的高いと推定される。一方, 領域 3, 5~7 では領域内に噴孔軸を含まないため, 測定対象領域に占める噴霧の存在割合は低いと推定され, また領域 2 および 4 では, 噴孔軸を一部含むのみである。

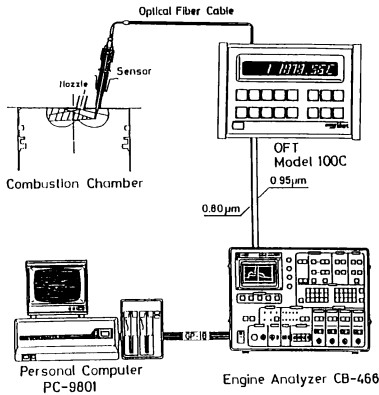


図 1 温度計測システム

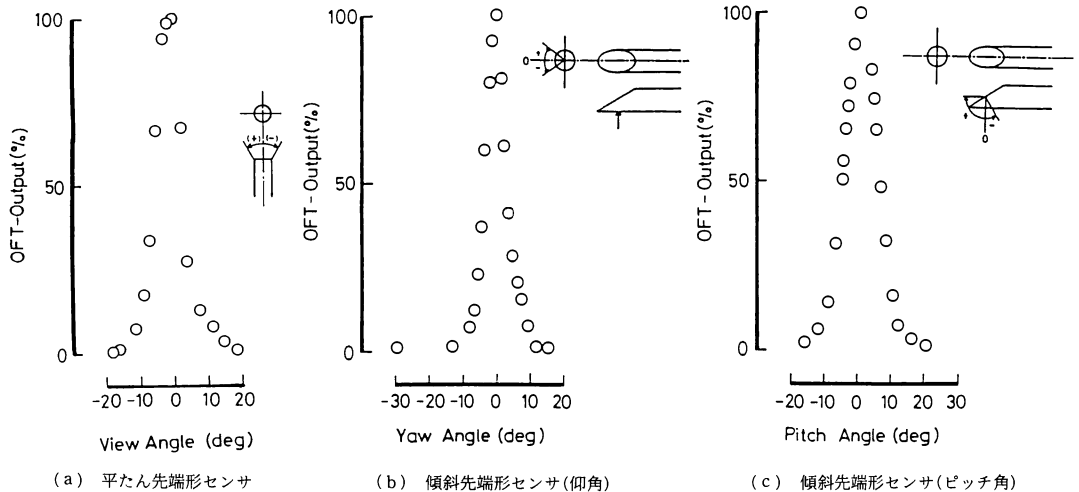


図 2 センサ受光部形状および受光角度範囲

3. 実験結果および考察

3・1 燃焼のサイクル変動 OFT 出力から二色法により算定された火炎温度について、連続した四つの単独サイクルと 360 サイクル平均との比較を図 4 に示す。図 4 (a) は平たん先端形センサの場合であり、図 4 (b) は傾斜先端形センサの領域 1 の場合である。センサの違いは、図 3 に示したように測定対象領域の違いであり、平たん先端形の場合噴霧火炎の一部分が測定対象領域であるのに対し、傾斜先端形の場合は 1 本の噴霧火炎全体が受光対象に含まれる。いずれの場合も、測定対象領域では燃焼自体のサイクルごとの変動が大きく、測定対象領域がより局所的な図 4 (a) のほうが変動が顕著に現れている。図 4 (b) の OFT 出力の立上り時期は図 4 (a) よりクランク角で数度早く、かつ極めて安定しており、燃料の噴射時期および着火時期のサイクル変動はかなり小さいことを示している。筒内燃焼圧力のサイクルごとの変動は局所的な OFT 出力の変動よりかなり小さいこと、および連続した 360 サイクルをアンサンブル平均することによって再現性のある OFT 出力が得られることを考え合わせると、機関の運転条件は十分に整定されていると判断された。それにもかかわらず燃焼のサイクル変動が大

きいことは、スワールやスキッシュを伴う筒内空気流動における乱れの大きさがサイクルごとに、また局所的に異なることが原因と考えられる。なお、燃焼開始時期に見られる火炎温度の著しいサイクル変動は、この時期の 2 波長に対する OFT 出力レベルが極めて低いことと、計測システムの分解能が原因の一つと推定されるが、予混合火炎中に生成されたわずかなすす粒子からの局所的で不安定なふく射エネルギーに起因しているとも考えられる。

3・2 測定対象領域による燃焼挙動の相違 図 5 は一定の機関運転条件下で、図 3 (b) に示した九つの測定対象領域において計測された OFT 出力(波長 950 nm)、火炎温度および KL 値の時間的変化をそれぞれ三次元的に表示したもので、値はすべて 360 サイクルの平均値である。図 5 の両端には領域 1 で異なる時間に計測された値を示したが、両者はほぼ一致しており、燃焼現象の再現性および計測法の妥当性が確認された。OFT 出力は領域 1 において最高値を示すが、これは前述のように測定対象領域が 1 本の噴霧火炎をほぼ包含していること、また、燃焼中期ではスワールの影響で隣の噴霧火炎が領域 1 に到達する可能性が充分推定されることなどが原因と考えられる。領域 2 の近辺で、OFT 出力、火炎温度および KL 値のレベルが

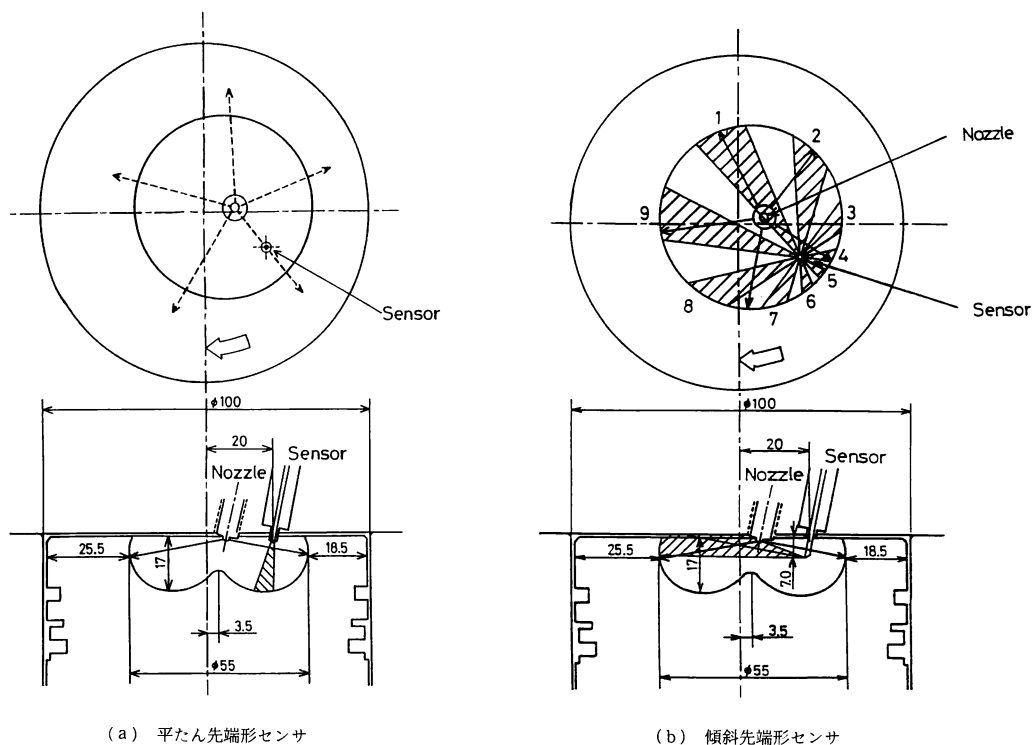
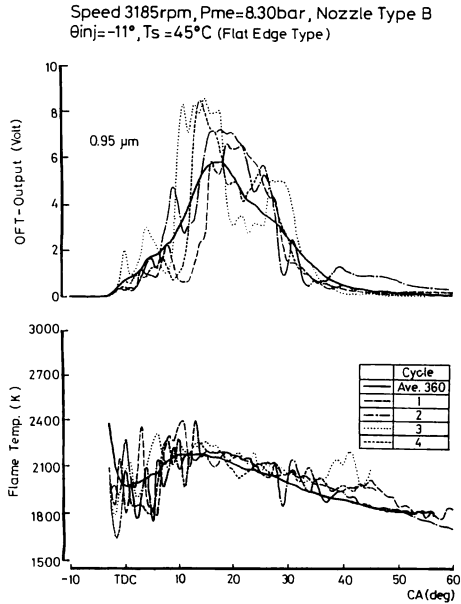
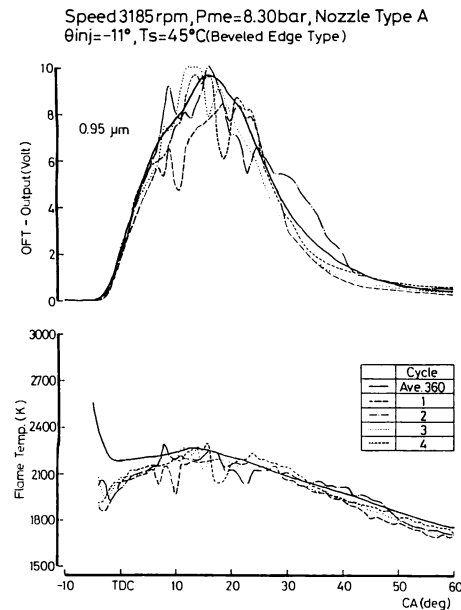


図 3 燃焼室形状および測定領域

ずれも相対的に低いことを除けば、燃焼室全体にわたる燃焼挙動に著しい差はない。ただし、OFT出力が最高値を示すまでの燃焼初期段階では各領域の燃焼挙動の不均一性が見られ、燃焼自体の空間的非一様性ととも、測定対象領域と噴霧の相対的位置にも依存していることが推定される。



(a) 平たん先端形センサ



(b) 傾斜先端形センサ

図4 燃焼のサイクル変動

図6は、燃焼室内の九つの測定対象領域を特徴的な三つのグループに分けてOFT出力、火炎温度およびKL値の比較を示した。グループ(a)には領域1, 8, 9を、グループ(b)には領域2~4を、グループ(c)には領域5~7を割り振ったが、(b)を除けばそれぞれのグループ内では、火炎温度およびKL値の時間的変化過程が著しく類似しており、特に火炎温度の極小値およびKL値の最高値を示すクランク角時期がほぼ一致している。一方、燃焼初期におけるスパイク状の火炎温度の高さおよびKL値の増加率の点においてグループごとの差が顕著であり、これらの現象の相違は、前述の測定対象領域における噴霧の相対的位置に加えて、測定対象領域と燃焼室壁との相対的位置および測定対象空間の大きさなどに依存していることが推定される。

3.3 すずの生成開始時期 計測されたOFT出力は、すず粒子からの強いふく射エネルギーに基づく

Speed 3185rpm, Pme=8.30bar, Nozzle Type A
 $\theta_{inj} = 11^\circ, T_s = 45^\circ\text{C}$

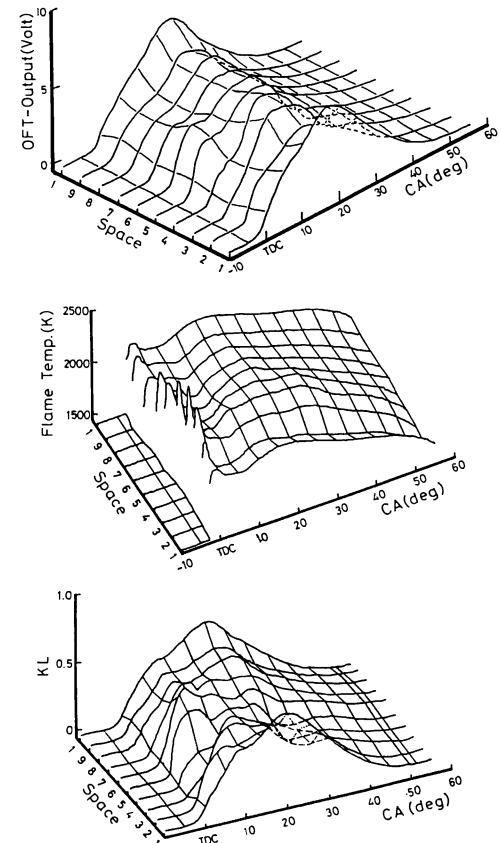


図5 燃焼挙動の時間-空間変化の三次元的表示

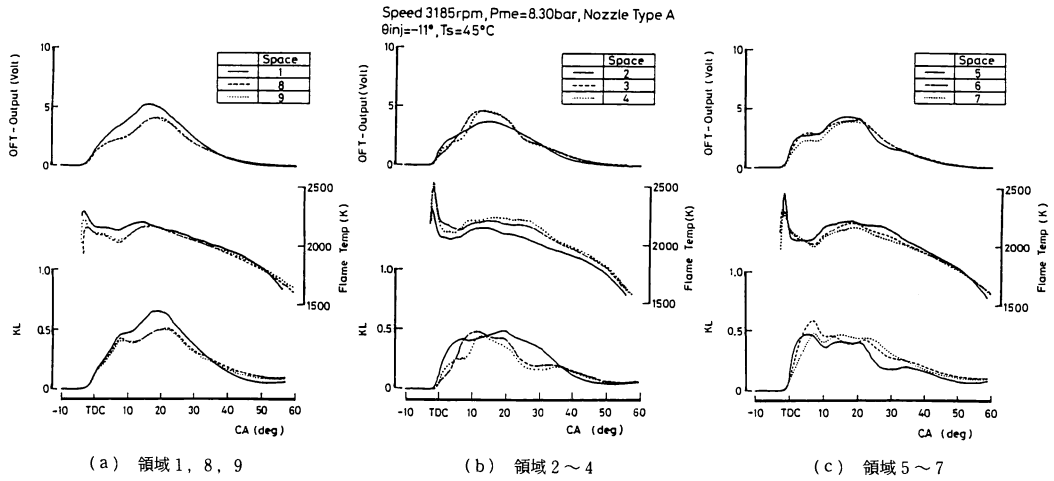


図 6 OFT 出力, 火炎温度および KL 値の測定対象領域による変化

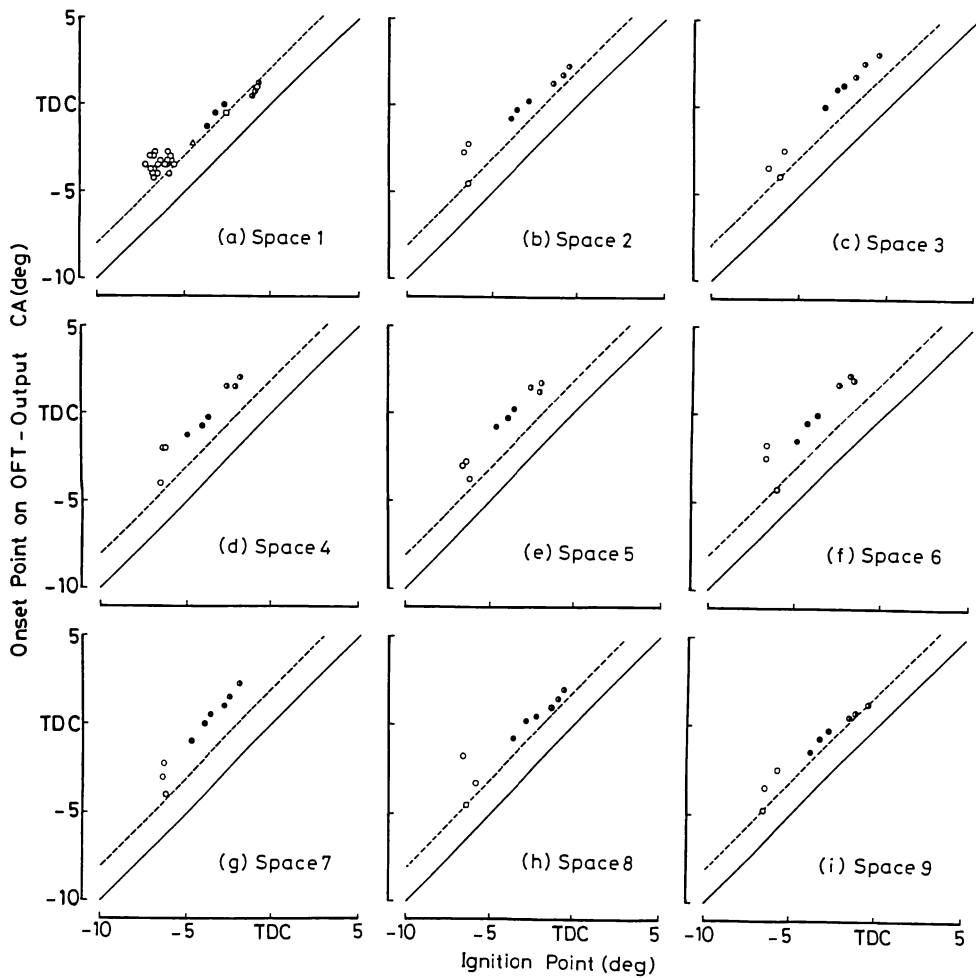


図 7 OFT 出力の立上り時期と着火時期の相関

ものであり、その立上り時期はすすの生成開始時期である。熱発生率パターンを着火遅れ直後の予混合燃焼期とそれに続く拡散燃焼期に分けると、すすの生成は概して拡散燃焼過程において支配的と言われている。図6に示した火炎温度分布から判断すると、いずれの火炎温度分布においても、燃焼初期のスパイク状の高温状態は明らかに予混合燃焼火炎からのふく射エネルギーと考えられ、予混合燃焼過程においても一部に濃混合気が存在するためにわずかにすす粒子が生成されたものと推定される。また、スパイク状の火炎温度分布が一時的であることから、そのすす粒子は直に酸化され消滅することを示している。しかし、 KL 値はOFT出力の立上り時期において急増し、スパイク状の温度分布が消滅する時点で増加率がやや低下するものの、引き続き連続的に増加していることは、予混合火炎中のすす粒子ほどの高温ではない状態のすす粒子が同時に生成されていると考えられる。

図7はOFT出力(波長950 nm)の立上り時期と着火時期との相関を各領域ごとに示した。なお、着火時期は受熱率曲線の立上りにおいて、受熱率が正になるクランク角時期と定義した。図7には機関回転速度を1750~3185 rpm, 正味平均有効圧を3.97~8.30 barの広範囲に変化させた実験から得られた結果を示した。OFT出力立上り時期は、領域1, 8, 9のグループ(a)の場合、クランク角で着火後約 2° 、領域5~7のグループ(c)のそれは着火後約 4° 、グループ(b)のそれは両者の中間を示しており、測定対象領域における噴霧の相対的位置に依存していることが明らかである。したがって、すすの生成開始時期は、測定対象領域に噴霧軸をかなり含むグループ(a)のデータから判断すべきであり、それは着火後約 2° と推定される。

4. む す び

平たん先端形および傾斜先端形の2種のライトパイ

プセンサを用いて、異なる測定対象領域における燃焼のサイクル変動を調べ、また、傾斜先端形センサを、単にセンサ軸の回りに回転するだけで燃焼室各部の燃焼挙動を計測し、測定対象領域と噴孔軸の相対的位置関係から燃焼を評価するとともにすす生成開始時期を推定した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 燃焼のサイクル変動は測定対象領域によってかなり異なる。また、数百サイクルにわたって平均されたサイクルの火炎温度およびすす濃度の変化過程から燃焼挙動を評価できる。

(2) 燃焼室内全域を9分割した測定対象領域において計測された燃焼挙動から、火炎温度の挙動変化は各領域ごとに大きな差異はないが、 KL 値の挙動変化は燃焼初期において各領域ごとに大きな違いが見られ、燃焼室内の燃焼状態は一様ではない。

(3) 測定対象領域に噴孔軸全体が含まれる場合の計測結果から、すすの生成開始時期として定義される拡散燃焼の開始時期は、機関の回転速度および負荷にかかわらずほぼ一定で、クランク角で着火後約 2° と推定される。

本研究を推進するに当たり、ご協力いただいた日本鉱業(株)の久保田俊輔氏、(株)小野測器、三菱自動車工業(株)の関係各位に深く謝意を表す。

文 献

- (1) Matsui, Y., ほか2名, *SAE Paper*, No. 800970(1980).
- (2) Yan, J. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 891901(1989).
- (3) Nagase, K. and Funatsu, K., *SAE Paper*, No. 901615(1990).
- (4) Mohammad, I. S. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 910728(1991).
- (5) Dresen-Rausch, J., and Krebs, R., *Proc. 19th CIMAC*, Paper No. D 19(1991).
- (6) 石田・ほか5名, *機論*, 58-555, B(1992), 3482.