

## 直接噴射式高速ディーゼル機関における 拡散燃焼と排煙の関係について\*

前田利重\*<sup>1</sup>, 石田正弘\*<sup>2</sup>, 江尻康一\*<sup>3</sup>  
吉村良孫\*<sup>2</sup>, 植木弘信\*<sup>2</sup>, 久保田俊輔\*<sup>4</sup>

### A Relationship between Diffusion Combustion and Exhaust Smoke in a High-Speed DI Diesel Engine

Toshishige MAEDA, Masahiro ISHIDA, Koichi EJIRI,  
Yoshihiro YOSHIMURA, Hironobu UEKI, and Shunsuke KUBOTA

In order to clarify the combustion behavior in the combustion chamber of a high-speed DI diesel engine, the cylinder pressure and the radiant heat emission were measured simultaneously by using a small-sized piezo pressure transducer and an optical fiber thermometer (OFT) with the light pipe sensor respectively. The OFT output was compared with the soot formation and burn-up processes estimated by the simplified in-cylinder two-zone model. It was found that the diffusion burning stage usually started at a time close to the first maximum heat release, and a good correlation was shown between the measured exhaust smoke density and the integrated quantity of apparent diffusion combustion.

**Key Words:** Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Diffusion Combustion, Optical Fiber Thermometer, Smoke Density

#### 1. ま え が き

ディーゼル機関から排出されるすすについては、これまで実験的にも理論的にも数多くの研究がなされてきた。例えば、Khan<sup>(1)</sup>, Matsuiら<sup>(2)-(4)</sup>, 青柳ら<sup>(5)</sup>, 中西ら<sup>(6)</sup>, Miyamotoら<sup>(7)</sup>によってディーゼル機関燃焼室内でのすすの発生メカニズムについての実験的研究がなされている。また、広安ら<sup>(8)(9)</sup>, Morelら<sup>(10)(11)</sup>はすすの生成および酸化過程についてモデルを提案し、計算結果と実験結果の比較を行っている。Yanら<sup>(12)</sup>はMatsuiらの二色法をさらに検討し、燃焼温度およびすすの生成過程を高精度で計測しようとした。

本研究においては、直接噴射式小形高速過給ディーゼル機関の広範囲運転条件下で、光ファイバ温度計(Optical Fiber Thermometer)を用いて実測された燃焼室内の燃焼過程と、一方、簡単のため燃焼室内を燃焼域と未燃域の二つの領域に分けて、実測の窒素酸化物濃度から燃焼域ガス温度を推定する方法に、Morel

らのモデルを適用して得られるすすの生成・酸化過程の解析結果を対比することによって、高速ディーゼル機関の燃焼における拡散燃焼過程を明確にしようと試みるとともに、拡散燃焼量と排出すす量との関係を検討した。

#### 記 号

$dQ/d\theta$ : 受熱率 J/deg

$dNO_x/d\theta$ :  $NO_x$  生成率 mol/deg

$H_u$ : 燃料の低位発熱量 J/Kg

$\dot{m}_a$ : 拡散燃焼率 g/deg

$P$ : 筒内圧力 bar

$P_{me}$ : 正味平均有効圧力 bar

$PO_2$ : 燃焼ガス中の酸素分圧  $kg/cm^2$

$s$ : すすの生成・酸化量 g

$T_b$ : 燃焼域ガス温度 K

$T_{am}$ : 筒内平均ガス温度 K

$T_{rad}$ : 燃焼ガス輻射温度 K

$\theta$ : クランク角度 deg

#### 2. 実験装置および計測方法

2-1 供試機関および供試燃料油 供試機関は水冷4サイクル直接噴射式高速過給ディーゼル機関 [三

\* 平成2年3月13日、九州支部第43期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年9月11日。

\*<sup>1</sup> 正員、(株)小野測器(☎146 東京都大田区矢口1-27-4)。

\*<sup>2</sup> 正員、長崎大学工学部(☎852 長崎市文教町1-14)。

\*<sup>3</sup> 学生員、長崎大学大学院工学研究科。

\*<sup>4</sup> 正員、日本鉱業(株)(☎105 東京都港区虎ノ門2-10-1)。

菱重工業(株)製 3 AAC-1 型, 110 mm×125 mm, 3 気筒, 最高出力 115 PS/2 500 rpm]である。供試燃料油として軽油(以後 ADO 60)を用いるとともに, A 重油(2.8 cSt. at 50°C, 以後 A 40) およびその水添加乳化油を拡散燃焼を変化させるために用いた。乳化油全量に対する水の体積割合は 0, 10, 20%で, 水添加率 10, 20%に対しそれぞれ 0.75, 1.0%の乳化剤を添加して安定性を持たせた。機関の正味平均有効圧力  $P_{me}$  は 4.61 から 10.42 bar の範囲で, また回転速度は 1 250 から 2 368 rpm の範囲である。窒素酸化物濃度および排煙濃度は, それぞれ減圧型化学発光法による計測器(yanako ECL-77 A) および Bosch 式煙濃度計(ディーゼル機器社製スモークメータ DSM-10 B)を用いて計測した。

## 2・2 光ファイバ温度計(OFT)による燃焼計測

Dilis<sup>(13)</sup>によって提案された黒体空洞センサ付き光ファイバ温度計を用いて, 高橋ら<sup>(14)</sup>は火炎温度を計測したが, 高速ディーゼル機関における燃焼ガス温度の時間変化にตอบสนองするような時定数を確保することは困難である。本実験では, 単に直径 1.27 mm のサファイアロッドをステンレスパイプで被覆し, 先端のみを開放したライトパイプセンサと OFT(Accufiber 社製 Model 100)を用いて, 図 1 に示すようなセンサの装着状態で燃焼室内の燃焼挙動を計測した。センサ先端はシリンダヘッド触火面より約 5 mm 突き出している。ライトパイプセンサ装着箇所隣接した位置に小型のピエゾセンサを装着し, 4 チャンネル燃焼解析装置(小野測器製 CB-466)を用いて, 正確かつ再現性ある指圧線図を同時計測している。ライトパイプセンサ付き OFT は, 中西ら<sup>(6)</sup>が燃焼室内の拡散火炎の計測に用いた方法と類似しているし, Matsui ら<sup>(4)</sup>が行った二色法による火炎温度の計測方法とも一部類似している。燃焼にはサイクル変動がかなり観測されたが, OFT 出力を 360 サイクルにわたって平均することにより再現性の高い OFT 出力モードを得ている。なお, ここで用いた光ファイバ温度計の中心波長は 0.95 μm

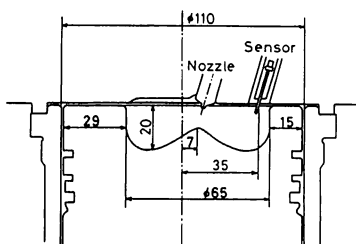


図 1 燃焼室形状およびセンサ装着位置

である。

## 3. すずの生成・酸化過程の計算方法

3・1 燃焼域ガス温度の推定方法 燃焼ガス温度の推定のため本研究で用いたモデルは, 例えば畠山<sup>(15)</sup>あるいは Morel ら<sup>(11)</sup>が提案したように, 燃焼室内を燃焼域と未燃域の二つの領域に分割するモデルを基本としており, 以下の仮定のもとに燃焼域ガス温度を計算した。

(1) 燃焼域, 未燃域の各領域は独立しており, それぞれ断熱変化を行う。(2) 燃焼域で燃焼した燃料重量は, 実測の筒内圧力から求まる受熱率の積分値と燃料の低位発熱量より算定される値とし, 燃焼域ガス総重量は, 燃焼した燃料重量および燃焼域に導入された空気量, 並びに水添加した場合にはそこに含まれる水混入量の総和とする。

計算方法としては, まず予混合燃焼における空気過剰率  $\lambda_{60}$  を仮定して燃焼域ガス温度  $T_b$  および燃焼ガスの平衡組成を推定し, 拡大 Zel'dovich 機構を適用して単位体積当たり窒素酸化物生成率を求める。この生成率に燃焼ガス体積を掛けて, 生成期間で積分して求まる窒素酸化物生成量(mol)と筒内総ガス重量から窒素酸化物濃度(ppm)が算定される。算定された窒素酸化物濃度が実測値と 0.5%の精度で一致するまで  $\lambda_{60}$  および  $T_b$  を確定する方法<sup>(16)</sup>を採用している。

3・2 すずの生成および酸化のモデル すずの生成・酸化モデルとして, Morel ら<sup>(11)</sup>が提案した以下の式を採用する。

$$\frac{ds}{dt} = A_1 \cdot \dot{m}_a \cdot \exp(-A_2/T_b) \\ ; A_1 = 0.30, A_2 = 3000 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = -B_1 \cdot s / (\rho_s d_s) \cdot \exp(-B_2/T_{rad}) \cdot \sqrt{PO_2} \\ ; B_1 = 0.136, B_2 = 10000 \dots \dots \dots (2)$$

ここでは, すずの生成が拡散燃焼率  $\dot{m}_a$  に, またすずの酸化は主として残存すず量に依存するとしているが, 定数  $B_1$  は本実験結果に合うように調整した。ディーゼル火炎は輝炎であり, 火炎内のすず粒子群からの連続スペクトルは気体からの輻射に比べて圧倒的に強いと言われ, 輝炎からの光の波長範囲は可視光線領域から赤外線領域にも及び, 一般に波長  $\lambda$  の輻射エネルギーは次式で与えられる<sup>(3)</sup>。

$$E(\lambda) = \epsilon(\lambda) \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} / \{\exp(-C_2/\lambda T) - 1\} \dots (3)$$

$$\epsilon(\lambda) = 1 - \exp(-KL/\lambda^2) \dots \dots \dots (4)$$

$K$ : 吸収係数

$L$ : 光軸に沿った火炎の厚さ

二色法では, 火炎温度を計測すると同時に  $K \cdot L$  の

値を求めることによって、すすの生成過程を推定している。ここで用いたライトパイプセンサ付き OFT では、火炎から放射される中心波長 0.95  $\mu\text{m}$  の赤外光の輻射エネルギーのみを検知しているため、 $K \cdot L$  値は求められないが、文献(12)の結果によれば輻射エネルギーの信号と  $K \cdot L$  値のクランク角度に対する変化のパターンはかなり類似している。

#### 4. 実験結果と解析結果の比較

**4.1 OFT 出力とすすの酸化過程の比較** 図2は広範囲運転領域の燃焼試験で得られた受熱率曲線が最初にピーク値を示すクランク角度と、OFT 出力の顕著な立上り開始時期を比較したもので、OFT 出力ピーク値の1%を示すクランク角度とした。両者の相関性は極めて良くかつほぼ直線関係にある。回転速度が異なる結果が含まれているにもかかわらず、OFT 出力の1%立上り時期はほぼ受熱率曲線が最初のピーク値を示すクランク角度付近である。すなわち、OFT モードがすすの酸化過程に対応する輻射エネルギーに基づくとすれば、ディーゼル燃焼における拡散燃焼は受熱率曲線が最初のピーク値を示すクランク角度近傍で開始していると考えるのが妥当であろう。このことは文献(5)、(12)のデータによっても支持されている。なお、OFT 出力は受熱率曲線の立上り後、すなわち着火後クランク角度にして約5度ほど遅れて顕著に立上っているが、着火後約2度から5度の間でも微小な出力を示しており、この出力が予混合燃焼ガスからのガス輻射によるものか、あるいは拡散燃焼の兆候を示すのか明らかではない。モデル計算では図3に示すように、近似的に拡散燃焼の開始を受熱率曲線の予混合燃焼率最大の時期とし、実測の拡散燃焼部分を Wiebe の燃焼関数<sup>(7)</sup>で最小自乗近似した拡散燃焼率を採用した。

図4は実験で得られた燃焼モードの解析例として回

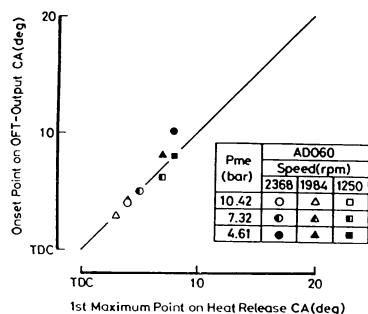


図2 予混合燃焼率ピーク位置と OFT 出力立上り時期の比較

転速度が一定 (2 368 rpm) で、正味平均有効圧力  $P_{me}$  がそれぞれ 10.42, 7.32, 4.61 bar の場合の筒内圧力  $P$ , 受熱率  $dQ/d\theta$ , 燃焼域ガス温度  $T_b$ , 筒内平均ガス温度  $T_{am}$ ,  $\text{NO}_x$  生成率  $d\text{NO}_x/d\theta$  のクランク角度に対する変化を示す。

図5(a)~(i)は、機関回転速度3種 ( $n=1250, 1984, 2368$  rpm), 正味平均有効圧3種 ( $P_{me}=10.42, 7.32, 4.61$  bar) のそれぞれ九つの運転条件において得られた実測の受熱率, すすの生成および酸化過程のモデル計算結果および光ファイバ温度計(OFT)出力の実測結果を比較している。OFT の出力モードとモデル計算におけるすすの酸化モードとは、ピーク値を示すクランク角度が異なることを除けば、両者の立上り開始時期、ピーク値の負荷に基づく変化、現象完了時期

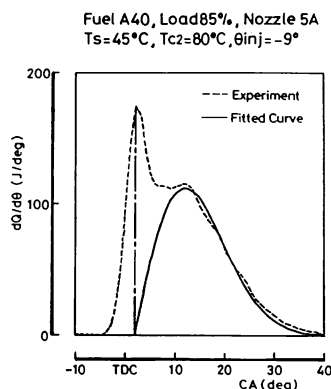


図3 拡散燃焼過程の Wiebe 関数による近似

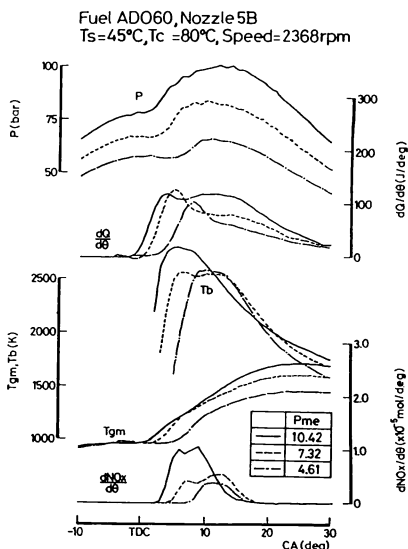
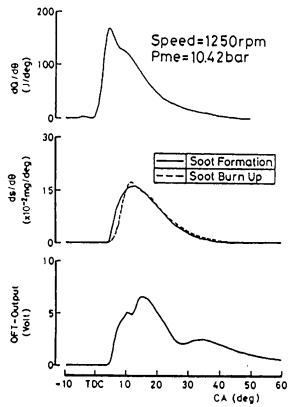
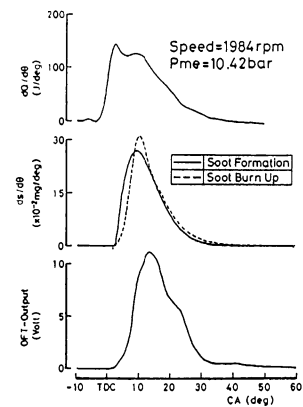


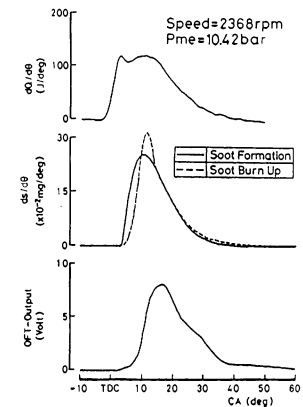
図4 燃焼モード解析結果



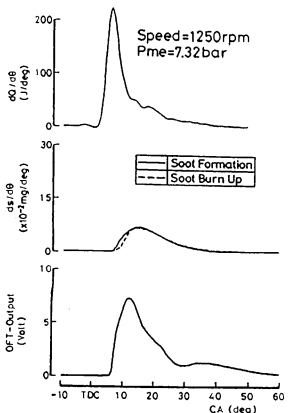
(a) 回転数 1250 rpm,  $P_{me}10.42$  bar



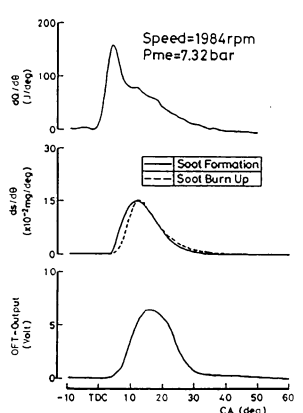
(b) 回転数 1984 rpm,  $P_{me}10.42$  bar



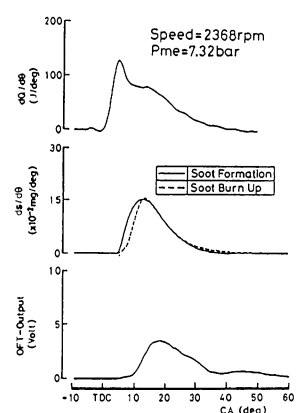
(c) 回転数 2368 rpm,  $P_{me}10.42$  bar



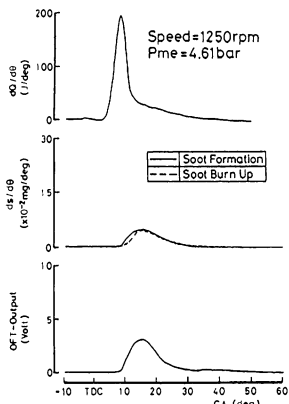
(d) 回転数 1250 rpm,  $P_{me}7.32$  bar



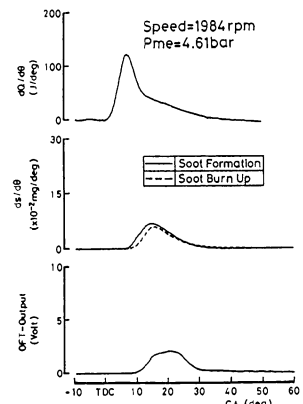
(e) 回転数 1984 rpm,  $P_{me}7.32$  bar



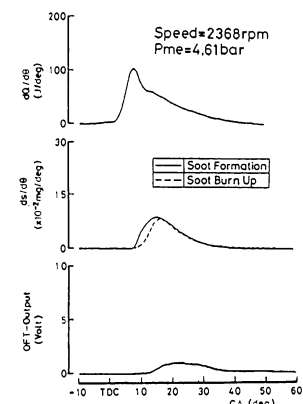
(f) 回転数 2368 rpm,  $P_{me}7.32$  bar



(g) 回転数 1250 rpm,  $P_{me}4.61$  bar

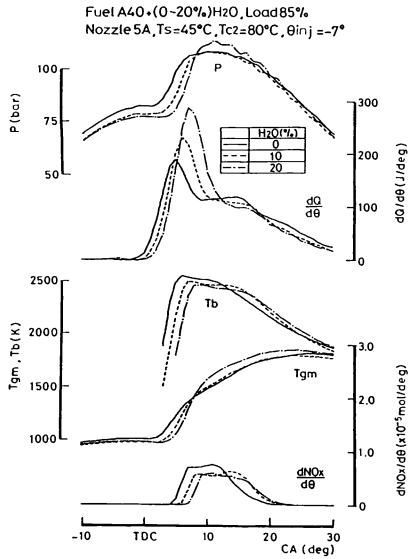


(h) 回転数 1984 rpm,  $P_{me}4.61$  bar

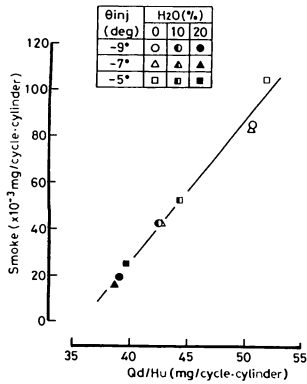


(i) 回転数 2368 rpm,  $P_{me}4.61$  bar

図5 受熱率, すすの生成・酸化過程およびOFT出力の比較 (燃料: ADO 60)



(a) 燃焼モードの比較



(b) 拡散燃焼量とすす排出量の相関

図 6 水添加乳化油に基づくすすの低減効果

などの点において定性的に一致している。すなわち、OFT 出力が顕著に増加し始める時期は、すすの酸化過程開始時期と対応しており、拡散燃焼の開始時期を近似的に受熱率曲線の予混合燃焼率最大の時期とすることは妥当と考えられる。火炎から放射される輻射エネルギーは、式(3)、(4)で与えられるから、OFT 出力は燃焼域の吸収係数  $K$ 、および光軸に沿った燃焼域の厚さ  $L$  などの影響を受けるため、すすの酸化過程と直接対応するとは考えていないが、OFT 出力は燃焼現象の理解のために有用な情報を与えている。ここで用いた OFT は中心波長  $0.95 \mu\text{m}$  の赤外光の輻射エネルギーを検知していること、またライトパイブセン

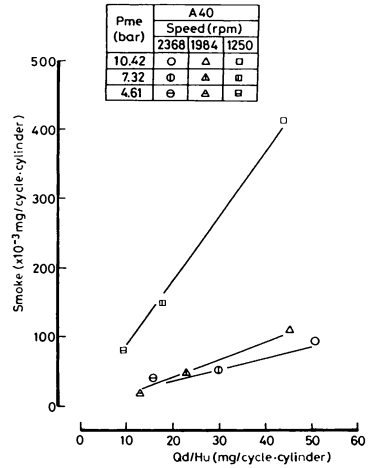


図 7 広範囲運転領域での拡散燃焼量とすす排出量の相関

サが検知する火炎は、図 1 で示したように、噴霧火炎の一部分であることを考慮すると、図 5 に示したすすの酸化モードと OFT の出力は充分な相関関係を示していると判断される。

4・2 拡散燃焼量と排煙濃度の関係 ディーゼル機関から排出されるすすの量は、すすの生成量とすすの酸化量の差であるから、必ずしも排出すす量が拡散燃焼量に依存するとは言えないが、両者が密接に関係していることが推定される。

図 6 (a), (b) は水添加乳化油の水添加率を変化した場合の燃焼モードならびに拡散燃焼量と排煙濃度の相関を示す。水添加率が 0 から 20% の範囲では、燃費率はほとんど変わらず、排煙濃度が著しく低下する。図には燃料噴射時期を変化させた結果についても示した。両者の相関が顕著であることから判断すると、水添加に伴う着火遅れの増大および空気導入率の増大が予混合燃焼量の増加となり、逆に拡散燃焼量の減少となって排煙濃度を低下させたものと推定される。なお、水添加に基づく排煙濃度低減効果には、噴霧の空気過剰率の増加による燃焼改善の要素も含まれる。

図 7 は排煙濃度と拡散燃焼量の相関を広範囲運転領域において調べたものである。回転速度一定の状態ではトルクを変化した場合のデータは、いずれの回転速度においてもほぼ比例関係がある。ただし、回転速度が異なると、拡散燃焼量に対する排煙濃度の増加率が異なることは、排煙濃度が単に拡散燃焼量だけに支配されていないことを示している。

## 5. ま と め

直接噴射式高速ディーゼル機関における燃焼過程を光ファイバ温度計を用いて計測し、すすの生成および酸化過程のモデル計算と対比するとともに、拡散燃焼量と排煙濃度との相関を実験的に調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1) 機関のトルクおよび回転速度を広範囲に変化した燃焼試験において計測されたライトパイプセンサ付き光ファイバ温度計の出力は、拡散燃焼に基づくすすの酸化過程において生じるすす粒子からの放射エネルギーと密接に関係しており、拡散燃焼過程は予混合燃焼率がピーク値を示す時期付近から開始しているものと判断される。

(2) 拡散燃焼開始時期が上述の結果に従うものとして、かつ実測の受熱率曲線の拡散燃焼部分をWiebeの燃焼関数で近似し、予混合燃焼を分離して得られる拡散燃焼量は、排出すす量と良好な相関を示す。ただし、排出すす量は拡散燃焼のみに依存するものではない。

(3) 水添加乳化油の燃焼において、水添加率の増加とともに予混合燃焼量が増加し拡散燃焼量が減少することが、排煙濃度減少の一つの原因として考えられる。

終わりに、光ファイバ温度計について多大のご協力

をいただいた日本鉱業(株)に深く感謝いたします。また、モービル石油(株)、三菱重工業(株)、タイホー工業(株)の関係各位、並びに長崎大学大学院学生であった占部英昭氏〔現在トヨタ自動車工業(株)〕のご協力に謝意を表します。

## 文 献

- (1) Khan, I. M., ほか 1 名, *Proceedings of 9th CIMAC at Stockholm*, A-18, (1971).
- (2) Matsui, M., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 790491 (1979).
- (3) Matsui, M., ほか 2 名, *SAE Trans.*, 89, Paper No. 800970 (1980), 3043.
- (4) Matsui, M., ほか 2 名, *SAE Trans.*, 91, Paper No. 820464 (1982), 1923.
- (5) 青柳・ほか 3 名, *機論*, 46-403, B (1980), 540.
- (6) 中西・ほか 2 名, *機論*, 48-430, B (1982), 1190.
- (7) Miyamoto, N., ほか 3 名, *SAE Paper*, No. 850107 (1985).
- (8) 広安・ほか 2 名, *機論*, 48-432, B (1982), 1606.
- (9) 文献(8)の1614ページ.
- (10) Morel, T. and Keribar, R., *Trans. SAE*, Paper No. 860445 (1986), 2, 1141.
- (11) Wahiduzzaman, S., Morel, T., ほか 2 名, *Trans. SAE*, Paper No. 870571 (1987), 4, 583.
- (12) Yan, J. and Borman, G. L., *SAE Paper*, No. 881315 (1988).
- (13) Dils, R. R. and Tichenor, D. A., *Sandia Report*, SAND 83-887 (1983).
- (14) 高橋・ほか 2 名, *機論*, 53-495, B(1987), 3417.
- (15) 畠山, *三菱重工技報*, 12-3(1975), 341.
- (16) 石田・ほか 4 名, *機論* 54-498, B(1988), 506.