燃料噴射率形状が非定常噴霧燃焼に及ぼす影響*

(第2報, 噴射率の上昇速度が噴霧燃焼に及ぼす影響)

脇坂佳史^{*1}, 畔津昭彦^{*2}, 及川 親^{*2}

Effect of Fuel Injection Rate Shaping on Spray Combustion (2nd Report, Effect of the Slope of Injection Rate Rise on Spray Combustion)

Yoshifumi WAKISAKA, Akihiko AZETSU^{*3} and Chikashi OIKAWA

^{*3} The University of Tokyo, Dept. of Mechanical Engineering,
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

This paper describes the effect of fuel injection rate shaping on spray combustion. Injection rate shaping with different slope of injection rate rise and drop were examined by using the electronically controllable fuel injection system. The effect on combustion characteristics, i.e., the ignition delay and combustion periods, were investigated through the light emission from spray flame. Two-dimensional temperature and soot distributions in flame were measured by the two color method. The steeper slope of injection rate rise develops the flame evolution in the direction of spray axis and width and cause the earlier start of main combustion. This tendency results in a larger area of high temperature region in flame from initial stage of combustion. The steeper slope of injection rate rise increases total and average soot productions in flame at initial stage of combustion in spite of the enhanced spray formation.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Injection Rate Shaping, Spray Combustion, Ignition Delay, Main Combustion, Flame Temperature, KL Factor

1. はじめに

ディーゼル機関の低公害化においては, 噴射率形状の最適化は, 噴射量や噴射タイミングの自在制御や高圧噴射とともに, 噴霧燃焼・燃焼生成物を支配するものと考えられており, 噴霧燃焼を制御する重要な因子として注目されている^{(1)~(3)}. 現在までに, 噴射率形状可変型の噴射装置が開発^{(4)~(5)}されるとともに, 噴射率形状が噴霧燃焼に及ぼす影響に関する多くの研究が行われており, NOx 生成を抑制するためには, 初期の噴射率を抑える方が良いという報告^{(6)~(7)}や, すすの低減には噴射後期の噴射率を高くし, 噴射期間を短くした方が良いという報告⁽⁸⁾がある.

しかし, これらの研究例では, 噴射率形状を変化させる際に, 噴射率のピーク値や噴射期間も合わせて変化させている場合が多く, 噴射率形状以外の条件は同じにして, 噴射率形状の影響のみを系統的に検討した

例は少ないように思われる. そこで本研究では前報⁽⁹⁾で, 噴射率形状の影響を系統的に研究するための噴射率形状可変型噴射システムを試作するとともに, 噴射率の上昇速度(噴射率形状の噴射開始点からピーク値までを直線で結んだ傾きとして定義)を変化させて上昇速度が噴霧特性に及ぼす影響を検討した. その結果, 噴射率の上昇速度が噴霧の時間的・空間的な展開に大きな影響を与え, 特に, 噴射率の上昇速度が速いほど, 噴射開始後噴霧が急速に噴射軸方向にも幅方向にも成長し, 空気導入の発達した噴霧を形成することが分かった.

本報では, 燃焼自発光計測と二色法による噴霧火炎中の温度分布・すす生成分布の計測により, 燃焼への影響を検討し, 前報⁽⁹⁾の噴霧観察の結果と合わせて, 噴射率の上昇速度が噴霧燃焼に及ぼす影響を系統的に検討した.

2. 実験装置および手法

本研究で用いた噴射率形状可変型噴射装置を図1に, 実験装置の概要を図2に示す. 噴射装置および圧力容器は前報⁽⁹⁾と同様である. 実際のディーゼル機関の燃

* 原稿受付 1999年5月20日.

^{*1} 正員, 東京大学大学院(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).

^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科.
E-mail: azetu@ingram.t.u-tokyo.ac.jp

Fig. 1 Schematic of injection nozzle and actuator

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

焼室と同等な高温・高圧雰囲気を実現する手段として、希薄水素予混合気を燃焼させる方法を採用した。予混合気は水素、酸素、窒素からなり、初期混合比は、水素燃焼後の残存酸素濃度が約 21% になるように設定した。燃焼実験時は、スパーク点火により水素を燃焼させた後、目標の雰囲気圧力に達する時刻に圧力容器上方に配置したノズルから燃料を鉛直下方に噴射し、自由噴霧燃焼させた。表 1 に実験で用いた予混合気の初期混合比および噴霧燃焼時の雰囲気条件を示す。なお、雰囲気温度は雰囲気圧力から換算し、本研究では 930K と 800K の 2 種類で実験を行なった。

噴霧燃焼時には圧力容器側面に設置した 2 つの直径 80mm の観測窓より、発光強度の時間変化の計測と画像撮影を行った。発光強度の計測は、燃焼発光を光ファイバで集光した後に 2 つに分岐し、一方は金属膜干渉フィルタ(中心波長:310.3nm, 半値幅:14.8nm)を通してフォトマルにより、OH ラジカルの 309nm 付近の自発光⁽¹⁰⁾を、他方は、金属膜干渉フィルタ(中心波長:651nm, 半値幅:16nm)を通してフォトダイオードで輝炎発光を検出した。なお、燃焼後期の燃焼室下部での燃焼光を観測するために、圧力容器上方にもフォトダイオード

Table 1 Initial condition of hydrogen combustion and ambient condition of spray combustion

Initial Mole Fraction	$\text{H}_2:\text{O}_2:\text{Air} = 0.123:0.103:0.845$	
Initial Total Pressure	1.071 MPa	
Ambient Pressure	930 K	800 K
Ambient Temperature	2.65 MPa	2.26 MPa

Table 2 Injection condition for experiments

Nozzle Type	Single Hole Nozzle
Hole Diameter	0.25mm
Injection Pressure	40.2MPa
Injection Period	2.7msec
Injection Volume	16 mm ³
Fuel	JIS #2 Diesel Fuel

Fig. 3 Variation of injection rate shaping

を設置し、輝炎発光を計測した。

噴霧火炎の画像撮影では、二色法⁽¹¹⁾を用いて火炎中のすす分布と温度分布を定量化した。本研究では図 2 に示すように、ダブリングプリズムを用いて 2 つの噴霧火炎の像を作成し、それらを 1 台のイメージインテンシファイア付 CCD カメラで同時に撮影した。2 つの像は異なる中心波長を持ったバンドパスフィルタを通してそれぞれ計測し、撮影後画像処理を行なって火炎温度分布とすす分布を求めた。なお、バンドパスフィルタの中心波長は、ラジカル発光のピーク波長と重ならないように留意し、中心波長 488nm, 半値幅 11.3nm のものと中心波長 634nm, 半値幅 8.5nm の 2 つのフィルタを使用した。

3. 噴射率形状および噴射条件

燃焼実験に使用した噴射率形状および噴射条件は前報⁽⁹⁾と同様である。噴射率形状は、図 3 に示すように噴射率の上昇速度の異なる 3 パターンで、噴射率の上昇速度の速い順にパターン A, B, C とした。また、噴射条件を表 2 に示す。

Fig. 4 Typical result of light emission from flame

Fig. 5 Effect of injection rate shaping on ignition

Fig. 6 Effect of injection rate shaping on luminous delay

4. 燃焼発光強度の解析

4.1 着火・初期燃焼に及ぼす影響 図4に、パターンA (雰囲気温度 930K) の典型的な燃焼初期の発光強度の時間変化を示す。噴射ノズル直下に照射した He-Ne レーザ光が遮られた瞬間を噴射開始時期として、ある時間遅れの後 309nm の発光が立ち上がり、その後少し遅れて 651nm の発光が立ち上がっている。309nm の発光が立ち上がる時期は OH ラジカル発光の開始であり、着火時期とみなせる。そこで、噴射開始後 309nm の発光が立ち上がるまでの期間を着火遅れ (τ_{id}) として定義した。次に、651nm の発光が立ち上がる時期は、輝炎発光の開始であり、拡散燃焼が開始した時期を示しているものと考えられる。また、309nm の発光が立

ち上がってから 651nm の発光が立ち上がるまでの期間は燃焼開始後、拡散燃焼が開始するまでの期間であり、予混合的な燃焼のみが存在している期間と考えられる。そこで着火後、651nm の発光が立ち上がるまでの期間を輝炎発光遅れ (τ_l) として定義した。

図5に雰囲気温度が 930K, 800K の場合の着火遅れの結果を示す。800K においては、噴射率の上昇速度が遅くなるほど着火遅れが長期化しており、蒸発・混合過程等による物理遅れが影響を及ぼしているものと考えられる。一方で、930K では逆の傾向を示している。前報⁽⁹⁾の非蒸発噴霧の観察によれば、着火時における噴霧先端到達距離はパターン B や C が約 10~15mm でありまだ噴霧も十分に発達していない状態にあったのに対し、A は約 40mm で十分に発達した噴霧になっている。別途行った噴霧燃焼の直接撮影によれば、着火位置はいずれのパターンでも大きな差は無く、ノズルから約 10~20mm 離れた位置であるため、B, C の OH 発光は不完全な噴霧の先端付近の着火により生じていることが推定される。一方、800K の着火遅れに対応する時期では、いずれの噴霧も十分に発達しており、噴霧の上流部で着火していることになる。こうした現象の違いがパターンによる差を生んでいると思われるが、今後、噴霧の蒸発過程を含めて検討を行なうことが必要であると考えている。

図6に輝炎発光遅れの結果を示す。輝炎発光遅れは、いずれのパターンでも着火後約 0.1ms 以内の非常に短い期間であり、OH 発光の立ち上がり後速やかに輝炎発光が観測され、拡散燃焼が開始していることが分かる。噴射率の上昇速度が速いほど、また雰囲気温度が低いほど遅れが長くなる傾向があるが、これは高い噴射率および長期化した着火遅れ期間中に混合気が多く形成され予混合的な燃焼のみの部分が増加したものと考えられる。

4.2 主燃焼に及ぼす影響

4.2.1 数値計算による噴射率形状の影響の予測

噴霧火炎内の燃料の分布や主燃焼時の燃焼傾向を検討するために数値解析を行なった。計算に使用したモデルは、噴射期間を 30 分割、空間的に半径方向に 5 分割し、時々刻々噴射される燃料 (パーセル) が実測の噴射率に対応した初期噴出速度で噴出し、噴出後は先端到達距離の実験式⁽¹¹⁾に従って飛行するものとした。計算では燃料パーセルの追い付き・追い越し時の相互作用は考慮に入らず、すり抜けるものとして取り扱っている。

図7にパターン A, C の計算結果を示す。計算結果の包絡線が先端到達距離に対応するが、図中にプロッ

Fig. 7 Flight traces of injected fuel parcels, $P_a = 1.07 \text{ MPa}$

トした前報⁽⁹⁾の実験結果と比較して噴射率形状が噴霧先端到達距離に与える影響を概略説明できるものと考えられる。計算結果によると、Aでは初期に噴射された遅い燃料は別として、燃料パーセルの追い付き・追い越しがほとんど起こらず、噴射された燃料が軸方向に比較的分散して分布している。一方Cでは、噴霧先端付近で後から噴射された噴出速度の速い燃料パーセルが追い付き、燃料が集中する様子が推測されている。なお、図には示していないがBの場合は両者の中間的な結果であった。燃焼時にも同様の傾向とすれば、Aは空間的に広い範囲で燃焼が行われ、一方Cは先端で燃焼する部分に後続燃料が突入し相互作用を及ぼすことが推定される。

4.2.2 主燃焼開始時期に及ぼす影響 輝炎発光強度の時間変化を燃焼の割合を示す指標になると考え、輝炎発光強度を整理して、主燃焼開始と主燃焼期間への影響を検討した。火炎全体からの発光強度の時間的変化を、フォトダイオードで燃焼室横方向及び上方より計測したパターンC（雰囲気温度：930K）の典型的な例を図8に示す。横方向と上方のフォトダイオードの感度は同一になるように整理してある。なお、上方に設置したフォトダイオードはノズル近傍のみを除

Fig. 8 Typical profile of luminous emission

Fig. 9 Effect of injection rate shaping on start of main combustion

いたほぼ火炎全体の視野を持っている。そこで、上方方向から観測した発光強度のピークを輝炎の発光最大値（以後：発光最大値）とみなした。

主燃焼開始時期を着火後、横方向より計測した輝炎発光強度が発光最大値の10%に到達するまでの期間として整理すると図9になる。噴射率の上昇速度が速いほど、また雰囲気温度が低いほど、着火後主燃焼への移行が急速である。これは、着火までに噴射された燃料の噴出量が多いためと考えられる。

4.1節の結果と合わせて噴射率形状が初期の燃焼に及ぼす影響をまとめると、以下ようになる。Aは、初期の噴霧内への空気導入に優れ、着火までに形成される予混合気の量が多いため、着火直後は予混合的燃焼のみの期間が比較的長く存在し、拡散燃焼の開始は少し遅れる傾向にある。しかし拡散燃焼開始後は初期に噴射された燃料噴出量が多いため、燃焼が活発に行われ、主燃焼へと急速に移行していると考えられる。一方で、Cは着火までの混合気形成が悪く、着火後すぐに輝炎をともなった拡散燃焼が開始される。さらに、初期の燃料噴射量が少ないため初期は緩慢な燃焼となり、主燃焼開始が遅れるものと考えられる。

Fig. 10 Effect of injection rate shaping on main combustion period within a window

Fig. 11 Effect of injection rate shaping on main combustion period

4.2.3 主燃焼期間に及ぼす影響 図8に示したように、横方向及び上方向から観測した輝炎発光強度プロファイルでは、上方向から観測した発光終了時期の方が遅れている。これはCの場合に最も顕著であり、燃焼末期に火炎が横方向からでは観測できない燃焼室下部で燃焼していることを示している。そこで、主燃焼期間と火炎の空間的分布を検討するために、燃焼容器下部も含めた全体の主燃焼期間 (t_{all}) とともに、ノズルから約80mm以内の領域の主燃焼期間 (視野内主燃焼期間: t_c) も検討した。それぞれの定義は図8中に模式的に示しているように、 t_{all} は横方向から観測しているフォトダイオードの発光強度が発光最大値の10%に到達した時刻から、上方向から観測しているフォトダイオードの発光強度が発光最大値の10%にまで落ちる期間、 t_c は横方向から観測しているフォトダイオードの発光強度が発光最大値の10%以上の期間とした。

視野内主燃焼期間の結果を図10に、また主燃焼期間の結果を図11に示す。両者を比較すると、噴射率の上昇速度が遅くなるほど、また雰囲気温度が低くなるほど両者の差が大きく、視野を外れた先端部で燃焼が続いていることが分かる。これは、図7の計算結果で推定したように、Cは燃焼末期には、他のパターンに比べてノズルから離れた先端部に火炎が集中して燃焼が行われること、また雰囲気温度が低下すると、いずれのパターンでも主燃焼の開始時期が遅れるために、火炎がノズルから遠い場所に存在することが原因と考えられる。

主燃焼期間は噴射率の上昇速度・降下速度ともに中間のBが最も短く、また雰囲気温度が低くなると燃焼が緩慢になるために長期化する傾向にあることが分かる。A、Cの主燃焼期間が長期化した理由は以下のように推定される。Aの噴射後期に噴射率が徐々に低下していく過程で噴射された燃料は、噴出速度が遅いため燃料と空気の拡散混合が遅れ、その結果燃焼が緩慢

になり、主燃焼期間が長期化したものと考えられる。一方、Cでは4.2.1項で述べたように、噴射後期には火炎先端部に後続燃料が突入し、相互作用を及ぼすことが期待された。しかし、多量の燃料が火炎に包まれた噴霧先端部に集中し、火炎によって周囲からの空気導入が阻害されたために、燃焼期間が長期化したものと考えられる。また、Bでは噴射率の上昇速度・降下速度ともに両者の中間にあり、燃料の噴射、混合気形成が燃焼期間全体において適度に行われ、主燃焼期間が短縮化されたものと考えられる。

5. 火炎温度に及ぼす影響

図12に雰囲気温度930Kにおける、画像二色法で解析した観測視野内に存在する火炎中の温度分布を示す。着火後、噴射率の上昇速度が速いほど、火炎が噴射軸方向及び噴射軸と直交する方向(幅方向)に急速に成長することが分かる。この傾向は、非蒸発噴霧の成長⁹⁾に定性的に一致している。また燃焼初期には、どのパターンでも火炎先端では温度が低いが、火炎の側面では高温になっており、火炎の側面では良好な混合気形成が行われ、燃焼も盛んに行われていると考えられる。なお、燃焼の進行とともに高温領域が増加していく様子がとらえられているが、この傾向を定量的に示すために温度のヒストグラムを検討した。

図13a, bに雰囲気温度が930KにおけるパターンA、Cの火炎温度ヒストグラムの時間的変化を示す。このヒストグラムは画像二色法から求めた火炎温度分布を10K毎に階層化し、その温度がどの程度の面積存在するかを整理したものである。火炎が視野全体に広がって行く燃焼初期から中期(噴射開始後約2~3msまで)においては、火炎の成長とともにヒストグラムは高温側にシフトし、ヒストグラムのピーク値も上昇している。図12で示したように、火炎の成長はAのように噴射率の上昇速度が速いほど急峻であることがこのヒ

 Fig. 12 Temperature distributions of flame ($T_a=930\text{K}$)

ストグラムからも明らかであり、燃焼初期から全体的に火炎温度が高温になっていることが分かる。一方、燃料噴射が終了し、完全に成長した火炎では（図では3～4msに対応）、視野内の火炎温度ヒストグラムはほぼ同様の形状をしている。

図 13c に、雰囲気温度 800K におけるパターン A の温度ヒストグラムを示す。930K の場合と同様に火炎の成長とともにヒストグラムは高温側にシフトし、またそのピーク値も増加するなど、定性的には 930K の場合と同様の傾向を示していることが分かる。しかし、燃料噴射時の雰囲気温度が低いために、火炎温度は全体的に 930K の時よりも低温側に存在している。

火炎中の高温領域の傾向を定量的に示すために、2400K 以上の領域の面積の時間的変化を整理したものを図 14 に示す。火炎全体が観測視野内に存在するデータは中実の記号（●, ▲, ■）で、火炎先端が視野を外れたデータは白抜き記号（○, △, □）で示した。雰囲気温度 930K では、初期の噴射率が高い A は、他のパターンに比べて高温領域の面積が初期から大きい。これは着火遅れ期間中に噴射された燃料が多いことに起因しているものと考えられ、この傾向は NO_x 生成量の増加を招いているものと推定される。一方、雰囲気温度 800K では、定性的な傾向は 930K の場合と同様であるが、どのパターンも 2400K 以上の火炎面積が圧倒

(a) Pattern A at 930K

(b) Pattern C at 930K

(c) Pattern A at 800K

Fig. 13 Temporal change in temperature histogram

Fig. 14 Effect of high temperature region in flame (over 2400K)

Fig. 15 KL factor distributions in flame ($T_a=930\text{K}$) (a) $T_a=930\text{K}$ (b) $T_a=800\text{K}$

Fig. 16 Temporal change in KL factor histogram

Fig. 17 Effect on spatial integration of KL factor

Fig. 18 Effect on spatial average of KL factor

的に抑制されている。

パターンAでは1.6msで、Bは2.2msで、またCは2.5msで火炎先端が視野を超えるため、ノズルから80mm以内の火炎に限定した議論となるが、燃焼中期以降は高温領域の面積の逆転が見られ、Cが最も高温領域が多いことが分かる。B、Cでは、噴射中期から後期にかけて噴射された運動量の高い、多量の燃料が観測視野内を通過する内にこの期間の燃焼を活性化させたために火炎温度が上昇し、高温領域の増加につながったものと考えられる。一方Aでは、4.2.3項の燃焼期間長期化の考察で述べたように、この期間に観測視野内に存在する燃料は、後期に噴射された運動量が低く、混合気形成能力の低い燃料であると推定され、それらが緩

慢に燃焼しているために高温領域が増加しなかったものと考えられる。なお、雰囲気温度が800Kの場合、高温領域の面積は小さくなるものの同様の傾向を示している。

6. すず生成に及ぼす影響

図15に雰囲気温度930Kにおける、画像二色法によって求めた観測視野内に存在する火炎中のKL値の分布を示す。図12と比較すると分かるように、高KL値の領域は、火炎温度が低い火炎中央部に存在し、その領域は火炎の成長とともに増加していることが分かる。

図16a, bは、パターンBのKL値ヒストグラムの時間変化を2つの雰囲気温度に対して示したものである。

なお、KL 値は 0.01 毎に階層化している。火炎の成長の違いを除いては、パターンによる傾向の違いはあまり見られなかったために、B を代表として雰囲気温度の影響を比較している。

時間的変化を見ると、着火後すす濃度の高い高 KL 値の領域が急増し、最大値を持つようになる。その後、すすの燃焼に伴って、KL 値の小さい領域へとシフトして行く様子が分かる。なお雰囲気温度が低下すると、低 KL 値の領域が減少し、高 KL 値の領域が増加する傾向にあるが、これは図 13 でも示したように火炎温度が低下し、燃焼が緩慢になったためと考えられる。

火炎中のすす生成量の指標となる KL 値の面積積分値の時間変化を図 17 に示す。図 14 と同様に火炎全体が観測視野内に存在するか否かによって記号を変えた。A から C へと噴射率の上昇速度が遅くなるにつれて、初期の積分 KL 値は低く抑えられていることが分かる。時間的変化の形状としては後ろにシフトした形になっているが、このシフト量は噴射率がピークになる時期の差におよそ対応している。雰囲気温度が低い場合には、図 8 に示したように火炎の成長、主燃焼の時期が遅れることに伴って積分 KL 値の時間的変化も後方へと移行している。なお、視野内の積分 KL 値のピークは、雰囲気温度、噴射率形状によらずほぼ同じであることが特徴的である。

積分 KL 値の時間的変化には噴射した燃料の量と火炎の大きさが影響を及ぼす。そこで、火炎の大きさの影響を除去するために、積分 KL 値を火炎断面積で除した面積平均 KL 値で整理した結果を図 18 に示す。なお、図 14, 17 と同様に火炎全体が観測視野内に存在するか否かによって記号を変えている。基本的には積分 KL 値と同様の傾向を示している。燃焼の初期に注目すると、A では他のパターンに比べ積分 KL 値、平均 KL 値ともに高い値になっていることが分かる。噴霧観察の結果では、A は噴射率とともに初期の空気導入量も大きく、また、噴霧の発達も良好であったが、ミクロな観点から見た空気と燃料の混合は促進されていないものと考えられる。なお、雰囲気温度が下がると、平均 KL 値は上昇している。これは、燃焼温度が下がり燃焼が緩慢になったことが原因と考えられる。

7. 結論

噴射率形状が非定常噴霧燃焼に及ぼす影響を系統的に検討するために、燃焼発光計測と二色法による火炎温度分布とすす分布を計測して、噴射率の上昇速度が噴霧燃焼に及ぼす影響を検討した。その結果、本研究

の実験条件において以下のことが明らかになった。

1. 噴射率の上昇速度が着火遅れに及ぼす影響は雰囲気温度により異なる可能性がある。
2. 着火後は、噴射率の立ち上がり速度が遅いほど予混合的燃焼は短く、速やかに拡散燃焼が開始する。
3. 噴射率の上昇速度が速いパターン程、着火後、火炎が噴霧の軸方向、幅方向に急速に成長し、早くから主燃焼が開始する。その結果、火炎中の高温領域は燃焼初期から大きくなり、NO_x の生成が増加するものと考えられる。
4. 噴射率の上昇速度、降下速度とも中間のパターン B が最も主燃焼期間が短かった。A の主燃焼期間が長期化した原因は、燃焼後期の混合気形成が十分でないことによるものと考えられる。一方、C は、火炎の上流側では噴射率の高い燃料の追い越しにより燃焼が活性化されるものの、燃料の多くは火炎先端部に集中し、その部分では火炎に包まれて空気導入が不十分になるために燃焼期間が長期化したものと考えられる。
5. 噴射率の上昇速度が速い場合は、燃焼初期において積分 KL 値、平均 KL 値がともに高い値となり、ミクロな観点からの空気と燃料の混合は促進されていないものと考えられる。

本研究の実験システムの開発にあたっては、当時本学学生、今野信二君、森大地君の協力を得た。また、本研究の一部は、科学研究費補助金及び日本機械学会研究協力部会 RC151 によって行われたものであり、記して謝意を表します。

文 献

- (1) N.J. Beck and O.A. Uyehara, *SAE Paper* 880299, (1988).
- (2) A.P. Gill, *SAE Paper* 880350, (1988).
- (3) J.R. Needham, M.P. May, D.M. Doyle, S.A. Faulkner and H. Ishiwata, *SAE Paper* 900854, (1990).
- (4) H. Ishiwata and H. Okubo, *SAE Paper* 880491, (1988).
- (5) M. Miyaki, H. Fujisawa, A. Masuda and Y. Yamamoto, *SAE Paper* 910252, (1991).
- (6) 池上・中谷・山根・田中, 機論 **B**, 63-613, (1997), 3158-3164.
- (7) 高橋・佐藤・伊藤・西村・横田, 第 14 回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1997), 451-456.
- (8) 川島・長谷川・松井, 機論 **B**, 63-609, (1997), 1869-1874.
- (9) 畔津・脇坂・福地・及川, 機論 **B**, 64-624, (1998), 2737-2743.
- (10) 水谷・松本・松井, 機論 **B**, 52-476, (1986), 1931-1937.
- (11) Y. Matsui, T. Kamimoto and S. Matsuoka, *SAE Paper* 790491, (1979).
- (12) M. Arai, M. Tabata, H. Hiroyasu and M. Shimizu, *SAE Paper* 840275, (1984).