パルスジェット点火における OH ラジカル蛍光計測*

村瀬 英一^{*1}, 花田 邦彦^{*1}
尹 正 虎^{*2}, 川島 久和^{*3}

OH Fluorescence Measurements in Pulsed Flame Jet

Eiichi MURASE^{*4}, Kunihiko HANADA,
Jyong-Ho YUN and Hisakazu KAWASHIMA^{*4} Kyushu University, Dept. of Mechanical Engineering Science,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581 Japan

In internal combustion engines, lean-burn is particularly attractive for minimizing pollutant emissions, in particular NO_x, with a concomitant improvement in fuel economy. A *Pulsed Flame Jet* (PFJ) has a great potential to enhance ignition reliability and burning rate in lean fuel-air mixtures. In this study, two-dimensional images of OH radical in the jet of PFJ were obtained using a Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) technique. The effects of equivalence ratio of the mixture in the cavity, cavity volume, and orifice diameter on the variation of OH fluorescence area in the jet and their intensity were revealed quantitatively.

Key Words: Internal Combustion Engine, Ignition, Combustion, Lean Fuel-Air Mixture, OH Radical, Planar Laser-Induced Fluorescence, Pulsed Flame Jet

1. ま え が き

火花点火機関における熱効率の向上と排気ガス浄化を両立させるものとして、希薄燃焼がある。パルスジェット点火は、希薄混合気の安定した点火と燃焼の促進に有効と考えられる点火、燃焼方式である^{(1)~(5)}。著者らはパルスジェット点火の基本特性、並びにその点火機構を、燃焼圧力測定およびシュリーレン写真観測などにより調べてきたが^{(2)~(4)}、化学的な解明は充分になされていない。よって本研究では、炭化水素系燃料の燃焼で重要な役割を果たしているOHラジカルの挙動を、平面レーザ誘起蛍光法 (PLIF)^{(6)~(8)} により調べた。ここでは、イグナイタのキャビティ内の当量比、キャビティ容積、およびオリフィス直径を変化させてジェット内のOHラジカルの二次元分布を求め、蛍光面積と蛍光強度に及ぼすそれらの影響を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2-1 パルスジェットイグナイタ パルスジェットイグナイタとキャビティ部の詳細を図1に示

* 原稿受付 2000 年 7 月 26 日。

^{*1} 正員、九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。^{*2} 正員、東亜大学工学部 (〒751-8503 下関市一の宮学園町 2-1)。^{*3} 旭硝子(株) (〒100-8405 東京都千代田区有楽町 1-12-1)。
E-mail: murase@mech.kyushu-u.ac.jp

す。パルスジェット点火は、そのキャビティにのみ過濃混合気を導入し、自動車用の点火回路による放電をキャビティ内で行わせるものである^{(1)~(5)}。キャビティ内の過濃混合気を点火することにより、オリフィスから化学的に活性な不完全燃焼生成物を含むジェットが燃焼室内に噴出し、燃焼室内の希薄混合気を巻き込みながら点火を行う。パルスジェット点火では、キャビティ容積などの各種パラメータがジェットの特性および燃焼に大きな影響を与えるが^{(2)~(5)}、ここでは、キャビティ容積 V_p を 170, 340mm³、オリフィス直径 d を 2.5, 4.0mm と変化させた。キャビティ容積の変更は、キャビティ高さを 6mm と固定して、キャビティ内径を 6.0mm, 8.5mm とすることにより行った。キャビティへの混合気噴射圧 (ゲージ圧) 0.1MPa、噴射期間 50ms、点火時期 (燃料噴射弁作動用トリガパルスの立上りから放電までの時間で定義⁽²⁾) 50ms とした。

2-2 燃焼容器 使用した燃焼容器を図2に示す。燃焼室は直径 60mm の相貫体に近い形状で、向かい合う 4 面に直径 60mm の石英製の観測窓を設けた。また、燃焼容器上部にはイグナイタ、燃焼容器下部には混合気の導入口が備わっている。

2-3 レーザシステム OHラジカル蛍光計測では $X^2\Pi(v=1) - A^2\Sigma(v=0)$ 遷移における波長 283nm を吸収線とし、 $A^2\Sigma(v=0) - X^2\Pi(v=0)$ 遷移の蛍光を計測した⁽⁷⁾。図3に PLIF 計測装置の概略を示す。計測では、YAG レーザの第二高調波 (400mJ/pulse @532nm) を励起光源として色素

Fig. 1 Pulsed Flame Jet ignition system

Fig. 2 Combustion chamber

レーザを発振させる。色素レーザから発せられた可視光から、U-Vパッケージを用いてU-V光 (8mJ/pulse @283nm) を得た。直径 7mm のU-V光を、焦点距離 70mm, 500mm, 1000mm の3枚のシリンドリカルレンズを用いて、幅 60mm、厚さ約 0.5mm の平行なシート状にして、燃焼室に入射させた。なおレーザシートはオリフィスの中心軸を含む面に一致させた。OHラジカルの蛍光像は、バンドパスフィルタ (中心波長 306.4nm, 半値幅 14.1nm) とイメージインテンシファイヤを介して、CCDカメラに単発の画像として取り込んだ。そしてパーソナルコンピュータで画像処理と解析を行った。イメージインテンシファイヤのゲート時間はOHラジカルの自発光の影響を除くため 100ns と

した。実験にはメタン-空気の混合気を用い、初期圧は大気圧、初期温度は室温とした。また燃焼室内の混合気の当量比は $\phi = 0.8$ とした。

3. 実験結果および考察

3・1 キャビティ内の当量比の影響 パルスジェット点火では、キャビティ内に噴射する混合気の濃度が点火後の燃焼状態に影響を与える。図4にキャビティ内の混合気の当量比 ϕ_c を 1.5 と 0.8 とした場合の放電からの圧力線図を示す。燃焼室内の混合気の当量比は $\phi = 0.8$ である。図4に示すように $\phi_c = 1.5$ の過濃混合気の使用により、 $\phi_c = 0.8$ に比べて大きい燃焼促進効果が得られることがわかる。

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for OH fluorescence measurements

Fig. 4 Pressure records demonstrating the effect of equivalence ratio in the cavity, ϕ_c
($V_p = 170 \text{ mm}^3$, $d = 2.5 \text{ mm}$, $\phi = 0.8$)

図5にPLIFで得られたOHラジカルの蛍光像の例を示す。視野径は観測窓の直径に等しく、60mmである。ここでは1回の燃焼実験で1画像しか得られないため、図5はそれらを時系列に並べたものである。図5より、蛍光面積は $\phi_c = 1.5$ の方が $\phi_c = 0.8$ より大きく、かつその蛍光強度も強いことがわかる。また、OHラジカルの蛍光はジェット周辺に存在するのみでなく、ジェットの内部にも存在する。特に放電後 3ms では非常に強い蛍光がジェットの内部に観測される。これはジェット内部

で激しい燃焼が起こっていることを意味しており、通常の火花放電による点火と異なり、ジェットによる初期の容積的な燃焼が確認されたと考えられる。また放電後 7ms 以降ではジェット内部の蛍光が弱まり、通常の伝ば火炎に近づいて行ったと思われる。

より詳細な検証を行うため、OHラジカルの蛍光面積と蛍光強度を定量化した。図6にOHラジカルの蛍光面積の放電からの時間変化を、図7にOHラジカルの平均蛍光強度の放電からの時間変化を示す。平均蛍光強度は蛍光強度を面積平均したものである。図6より、蛍光面積は時間と共に単調増加しており、 $\phi_c = 1.5$ の方が $\phi_c = 0.8$ より常に蛍光面積が大きく、その差は放電後 3ms まで広がるが、その後の差はほぼ同じであることがわかる。一方、平均蛍光強度も図7より $\phi_c = 1.5$ の方が $\phi_c = 0.8$ より常に大きいことがわかる。これは蛍光強度がOHラジカルの数密度に関係した値であることを考えると、 $\phi_c = 1.5$ の方が $\phi_c = 0.8$ より、高い数密度のOHラジカルがジェット内に存在していることを示している。よって、過濃混合気の使用により、ジェット内にOHラジカルを含む活性なラジカルが多く存在するために、図4に示すように大きな燃焼促進効果が得られたものと考えられる。また図7より、放電後 3ms で $\phi_c = 1.5$ と 0.8 において共に平均蛍光強度が最も強く、その後時間の経過に伴って弱くなっている。そして放電後 10ms では両者の差はほとんどなくなっ

Fig. 5 PLIF images of OH: viewed diameter 60 mm, $V_p = 170 \text{ mm}^3$, $d = 2.5 \text{ mm}$
Times: 1, 3, 5, 7, 10 ms after spark discharge

Fig. 6 Effect of equivalence ratio in the cavity, ϕ_c , on OH fluorescence area ($V_p = 170 \text{ mm}^3$, $d = 2.5 \text{ mm}$, $\phi = 0.8$)

Fig. 7 Effect of equivalence ratio in the cavity, ϕ_c , on mean OH fluorescence intensity ($V_p = 170 \text{ mm}^3$, $d = 2.5 \text{ mm}$, $\phi = 0.8$)

ており、両者が燃焼室内の混合気の当量比である $\phi = 0.8$ の蛍光強度に漸近して行ったと考えられる。このことは、図5の蛍光像観察での考察を裏付けるものである。すなわち、放電後 3ms 付近まで、活性なラジカルの噴出が継続した後、通常の火炎伝播に推移したと考えられる。この活性なラジカルの噴出時間は、通常の自動車用の点火装置における放電持続時間（数ミリ秒⁽⁹⁾）に相当しており、放電持続時間に関係していると考えられる。

3・2 キャビティ容積、オリフィス直径の影響

図8にキャビティ容積とオリフィス直径をそれぞれ変化させた場合の放電からの圧力線図を示す。キャビティ内の混合気の当量比 ϕ_c は 1.5、燃焼室内の当量比 ϕ は 0.8 である。図8中の Spark ignition は通常のスパークプラグによるものである。図8より、通常のスパークプラグによる燃焼に比べて、パルスジェットの燃焼促進効果が確認できる。その効果は、オリフィス直径が小さい方が、またキャビティ容積が大きい方が大きいことがわかる。特にオリフィス直径が小さい $d = 2.5 \text{ mm}$ における燃焼促進効果が大きいことがわかる。

図9に PLIF で得られたオリフィス近傍での OH ラジカルの蛍光像の例を示す。図9の視野は、 $36 \times 44 \text{ mm}$ である。また図10に OH ラジカルの蛍光面積の放電からの時間変化を、図11に OH ラジカルの平均蛍光強度の放電からの時間変化を示す。図9はジェットの一つの断面のみの情報ではあるが、ジェットによる大きな尺度の渦構造が観測される。また放電後 3ms までは、強い OH ラジカルの蛍光がその渦の中に見られ、ジェットによる容積的な点火が起きていることがわかる。これらの渦によるジェットの歪みは、小さなオリフィスの場合の方が大

Fig. 8 Pressure records demonstrating the effect of cavity volume, V_p , and orifice diameter, d ($\phi_c = 1.5$, $\phi = 0.8$)

きく、より強い乱れが存在していたことがわかる。図10、11より、キャビティ容積とオリフィス直径の違いに関わらず、OH ラジカルの蛍光面積は、時間と共に単調増加し、また平均蛍光強度は放電後 3ms 付近に最大値を持つことがわかる。一方、OH ラジカルの蛍光面積とその平均蛍光強度はオリフィス直径が小さい程、またキャビティ容積が大きい程大きな値を示しており、図8の圧力線図からみた燃焼促進効果の傾向に一致する。キャビティ容積とオリフィス直径の関係を、次式で定義されるジェットの燃焼室への進入深さに関係した特性長さ L^+ で整理してみる⁽¹⁰⁾。

$$L^+ = V_p / A$$

ここで A はオリフィスの断面積である。それぞれのキャビティ容積、オリフィス直径から計算した L^+ の値を表1に示す。表1より、蛍光面積とその

Fig. 9 PLIF images of OH: viewed region $36 \times 44 \text{ mm}$, $\phi_c = 1.5$, $\phi = 0.8$
 Times: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 3.0, 4.5 ms after spark discharge

平均蛍光強度は、ジェットの特性長さ L^+ が大きい程大きいことがわかる。すなわち、ジェットの特性長さ L^+ が大きい程、多数の OH ラジカルが広くジェット内に存在しており、その結果として燃焼促進効果が現れたと考えられる。

次に、燃焼圧力と OH ラジカルの蛍光像との関係を調べるために、OH ラジカル蛍光と燃焼室内圧力の同時計測を、放電後 1.0, 3.0, 4.5 ms に行った。図 12 に得られた結果を示す。図 12 の横軸は、得られた OH ラジカルの蛍光面積を $3/2$ 乗して蛍光容積とした。図 12 より、キャビティ容積やオリフィス直径の違いに関わらず、燃焼圧力と (OH ラジ

Table 1 Characteristic length of the jet, L^+

$Vp = 340 \text{ mm}^3$	$d = 2.5 \text{ mm}$	: $L^+ = 69.3 \text{ mm}$
$Vp = 170 \text{ mm}^3$	$d = 2.5 \text{ mm}$	: $L^+ = 34.6 \text{ mm}$
$Vp = 340 \text{ mm}^3$	$d = 4.0 \text{ mm}$	: $L^+ = 27.1 \text{ mm}$
$Vp = 170 \text{ mm}^3$	$d = 4.0 \text{ mm}$	: $L^+ = 13.5 \text{ mm}$

カルの蛍光面積) $^{3/2}$ の間には良い相関があることがわかる。この結果より、燃焼圧力は OH ラジカルの蛍光容積と強く関係していることがわかる。

Fig. 10 Variation of OH fluorescence area with delay time after spark discharge

Fig. 11 Variation of mean OH fluorescence intensity with delay time after spark discharge

4. 結 論

PLIFにより、パルスジェットのジェット内のOHラジカルの挙動を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) OHラジカルの蛍光像より、ジェット内に大きな尺度の渦構造が観測された。また、渦内部に強いOHラジカルの蛍光が見られ、ジェットによる容積的な点火が起きていることが確認された。
- (2) キャビティ内の当量比が大きい程、OHラジカルの蛍光面積と平均蛍光強度が大きいことがわかった。
- (3) キャビティ容積やオリフィス直径の違いに関わらず、OHラジカルの蛍光面積は、時間と共に単調増加し、また平均蛍光強度は放電後 3ms 付近に最大値を持つことがわかった。この時間は、放電持続時間に関係していると考えられる。
- (4) オリフィス直径が小さい程、またキャビティ容積が大きい程、多数のOHラジカルが広くジェット内に存在していることがわかった。またこの結果は、ジェットの特性長さ L^+ により整理できることがわかった。
- (5) キャビティ容積やオリフィス直径の違いに関わらず、燃焼圧力と(OHラジカルの蛍光面積) $^{3/2}$ の間には良い相関が見られた。

文 献

- (1) Oppenheim, A. K., Beltramo, J., Faris, D. W., Maxson, J. A., Hom, K. and Stewart, H. E., *SAE Trans.*, **98**, Sec.3 (1990), 175-182.
- (2) 村瀬英一・小野信輔・花田邦彦・仲原彰治・遠藤浩之・Oppenheim, A. K., *機論*, **58-546**, B(1992), 561-567.

Fig. 12 Relation between combustion pressure, P , and $(\text{OH fluorescence area})^{3/2}$ ($\phi_c = 1.5$, $\phi = 0.8$)

- (3) Murase, E., Ono, S., Hanada, K. and Oppenheim, A. K., *SAE Paper* 942048, (1994).
- (4) 村瀬英一・小野信輔・花田邦彦・尹正虎・Oppenheim, A. K., *機論*, **62-594**, B(1996), 801-807.
- (5) 村瀬英一・花田邦彦・尹正虎, *機論*, **65-630**, B(1999), 451-456.
- (6) Kychakoff, G., Hanson, R. K. and Howe, R. D., *20th Int. Symp. Combust.*, (1984), 1265-1272, The Combustion Institute, Pittsburg.
- (7) Hanson, R. K., *21st Int. Symp. Combust.*, (1987), 1677-1691, The Combustion Institute, Pittsburg.
- (8) Tanaka, T. and Tabata, M., *SAE Paper* 940477, (1994).
- (9) Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Publishing Company, (1988), 440.
- (10) Cetegen, B., Teichman, K. Y., Weinberg, F. J. and Oppenheim, A. K., *SAE Paper* 800042, (1980).