

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

パルスジェット点火における放電モードの影響
Effects of Spark Discharge Mode in Pulsed Flame Jet中島 史裕^{1*}・堀田 和郎²・橋本 英樹³・森上 修³・村瀬 英一³NAKASHIMA, Fumihiko^{1*}, HOTTA, Kazuro², HASHIMOTO, Hideki³, MORIUE, Osamu³, and MURASE, Eiichi³¹ 九州大学大学院工学府機械科学専攻 〒819-0395 福岡市西区元岡 744
Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan² 三菱重工工業株式会社 〒851-0392 長崎市深堀町 5-717
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, 5-717 Fukahori-machi, Nagasaki, Nagasaki 851-0392, Japan³ 九州大学大学院工学研究院機械工学部門 〒819-0395 福岡市西区元岡 744
Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan

2011年7月5日受付; 2012年1月4日受理/Received 5 July, 2011; Accepted 4 January, 2012

Abstract : Pulsed Flame Jet (PFJ) ignition system has a great potential to improve ignition reliability of lean fuel/air mixtures. The PFJ igniter used here has the same size as conventional spark plugs equipped with a small cavity of 170 mm³ in volume and an orifice of 2.5 mm in diameter. A rich methane/air mixture was introduced into the cavity and it was ignited by a spark discharge. In this paper, the orifice was opened into the air of an atmospheric pressure and a room temperature to obtain the pure characteristics of the jet with varying the spark discharge mode in the cavity of the PFJ igniter. Four different spark discharge modes in the cavity were used. Actions of OH radicals in the jet were captured based on the Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) technique, and temporal variations of OH fluorescence area, its mean intensity, and total intensity were evaluated from the images of OH fluorescence. Then the effects of spark discharge modes on the production of active radicals such as OH in the PFJ were revealed.

Key Words : Ignition, Internal Combustion Engine, Spectroscopic Measurement, OH Radical, Planar Laser-Induced Fluorescence, Pulsed Flame Jet, Spark Discharge

1. 緒論

火花点火機関において、混合気の希薄化は燃料消費および排出ガス中の有害物質の削減に有効である。しかし、混合気の希薄化に伴い点火確率および燃焼速度の著しい低下が問題となる。これに対して、パルスジェット点火[1-5]は、希薄混合気の点火確率向上および燃焼促進に有効な点火方式である。パルスジェット点火では、キャビティ内に充填した過濃混合気を通常の火花放電により点火し、ラジカルを多量に含むジェットがオリフィスより燃焼室内に噴出し、燃焼室内の希薄混合気を巻き込みながら点火する。この点火過程では、パルスジェットに含まれる多量のラジカルにより、点火確率の向上が期待される。また、容積的点火[2]が行われるため、燃焼促進効果が期待される。

著者らはこれまでの研究において[4]、スワールを有する

希薄混合気のパルスジェット点火を対象に、平面レーザ誘起蛍光法 (PLIF) [1-4, 6-9]による燃焼場の OH ラジカル蛍光計測を行った。その結果、OH ラジカルの蛍光像から算出された OH ラジカルの平均蛍光強度は放電開始後に増加した後、減少することが明らかになった。さらに、キャビティ内で異なる放電モードが用いられた結果、OH ラジカルの平均蛍光強度がピークとなる時間は各放電モードによって異なることが明らかになった。しかし、キャビティ内での放電モードが OH ラジカルの平均蛍光強度にこのような影響を及ぼす機構は明らかにされておらず、キャビティ内での放電モードの違いが、パルスジェットによる OH ラジカルの生成過程に及ぼす影響について詳細な検討が必要と考えられる。

パルスジェットが混合気中に噴射された場合、ジェットにより点火された混合気の新たな燃焼により OH ラジカルが継続的に生成されるため、キャビティ内の放電モードと OH ラジカルの生成過程の関係に対する検討が難しい。し

*Corresponding author. E-mail: nakashima@ignition.mech.kyushu-u.ac.jp

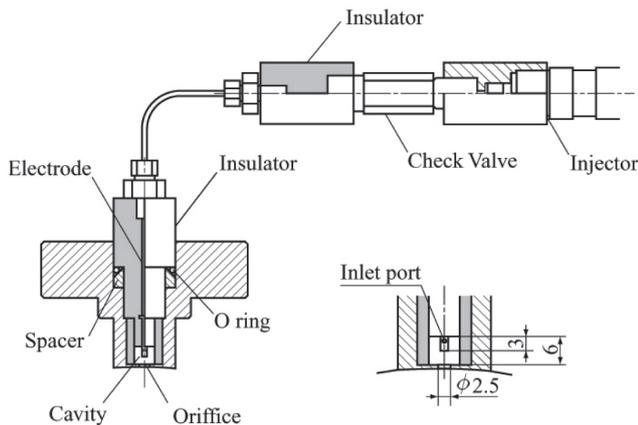


Fig.1 Pulsed Flame Jet igniter

たがって、本研究では純粋にパルスジェットイグナイタ内での放電モードの違いが OH ラジカルの生成過程に及ぼす影響を調べるために、パルスジェットを空气中に噴射した。また、キャビティ内での放電モードには標準放電、2重放電、3重放電、そして長時間放電の4種類の異なるモードを適用し、PLIFによるOHラジカルの蛍光計測によりその影響を検討した。

2. 実験装置および方法

2.1. パルスジェットイグナイタ

図1にパルスジェットイグナイタとキャビティ部の詳細を示す。パルスジェットイグナイタは、自動車用点火プラグとほぼ同じ大きさであり、キャビティおよびオリフィスを備えている。自動車用燃料噴射弁により過濃混合気がキャビティ内に充填され、中心電極とオリフィスプレートとの間隙で火花放電を行い、過濃混合気を点火する。これにより、化学的に活性な不完全燃焼生成物を多量に含むジェットがオリフィスより噴出する。本研究では、キャビティ容積を 170 mm³、オリフィス直径を 2.5 mm とし、燃料にはメタンを用いた。また、キャビティ内に噴射する過濃混合気の当量比は 1.5 とした[2,3]。

2.2. 放電特性

キャビティ内における放電の電圧特性の概念図を図2に示す。標準放電 (Normal, 図2-a1) では、通常の自動車用点火コイルを用いて、1回の放電を行った。なお、このときの放電時間は約 1 ms であった。2重放電 (Double, 図2-a2) および3重放電 (Triple, 図2-a3) では、標準放電と同じ点火コイルを用いて、1 ms のインターバルをはさんで複数回の放電を行った。また、長時間放電 (Long, 図2-b) では、標準放電用比べてインダクタンスの大きい点火コイルを

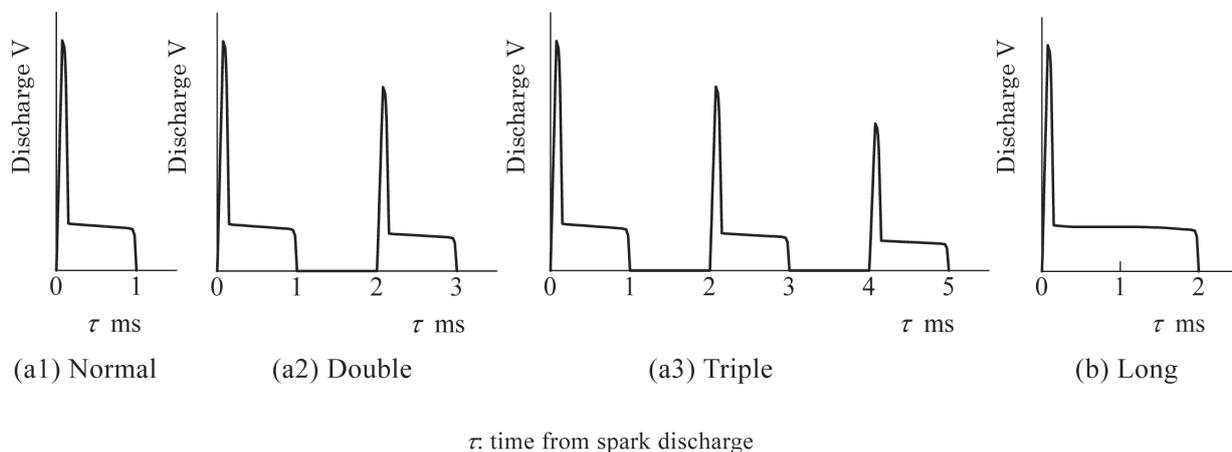


Fig.2 Schematic diagrams of spark discharge voltage in the cavity and spark discharge timing diagram

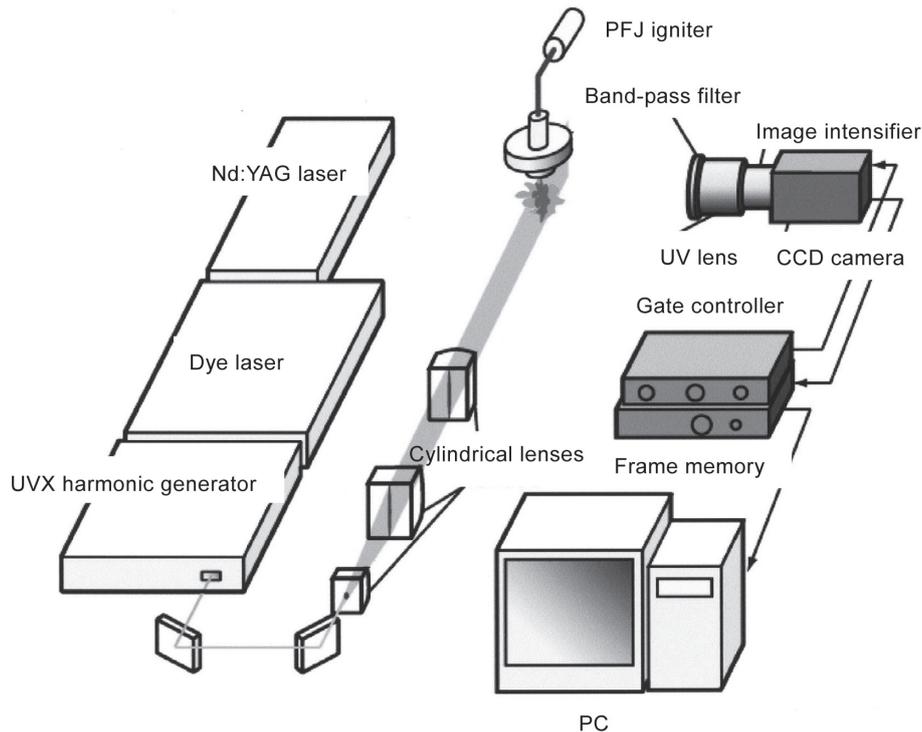


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup for OH fluorescence measurements

用い、1回の放電を行った。このときの放電時間は標準放電に比べて長く、約2msであった。それぞれの放電モードにおいて、放電エネルギーは当然異なるが、本研究では時間的に異なる放電モードの影響に着目し、放電エネルギーの測定は行わなかった。図2に各放電モードにおける放電のタイミングと、キャビティへの過濃混合気の噴射タイミングの関係を示す。ここでは、全ての放電モードにおいて、1回目の放電開始時期をキャビティへの過濃混合気の噴射開始後50msとした。これにより、各放電モードにおいて1回目の放電開始時におけるキャビティ内の混合気の状態を等しくした。また、3重放電における3回目の放電が終了する55msを過濃混合気の噴射終了時期とした。

2.3. レーザシステム

図3にPLIF計測装置の概略を示す。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、 $A^2\Sigma(v=0) - X^2\Pi(v=1)$ 遷移の蛍光を計測した[1-3,7,8]。ここでは、YAGレーザの第二高調波(400mJ/pulse: 532nm)を励起光源として色素レーザを共振させ、色素レーザから発せられた可視光から、UVパッケージを用いてUV光(8mJ/pulse: 283nm)を得た。直径約7mmのUV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、幅約30mm, 厚さ約0.5mmの平行なシート状にして、オリフィス中心直下に照射した。OHラジカルの蛍光像は、バンドパスフィルタ(中心波長307.8nm, 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および解析を行った。このとき、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。

3. 実験結果および考察

3.1. 空気中に噴射されたパルスジェットに対するOHラジカル蛍光計測

空気中(室温, 大気圧)に噴射されたパルスジェットにおけるOHラジカルの蛍光像を、1回目の放電開始後の時間と共に図4に示す(視野は30mm×30mmである)。1回目の放電終了直後の1msでは、全ての放電モードにおいて、OHラジカルの蛍光領域全域でほぼ均一な蛍光強度が確認される。その後、時間の経過と共にパルスジェットは周囲の空気を巻き込み、OHラジカルの蛍光領域は拡大する。その一方で、OHラジカルの蛍光強度は蛍光領域の外周部から低下する。パルスジェットが周囲の空気を巻き込むことにより、ジェット外周部の温度が低下したために、OHラジカル濃度そのものが減少したと考えられる。また、温度が低い場に励起されたOHラジカルが存在すると、周囲の冷たい分子と衝突し、失活確率が高くなるため蛍光強度が低下すると考えられる[9]。したがって、図4に示すOHラジカルの蛍光像を、オリフィスから噴射したOHラジカル濃度の時間変化として定量的に捉えることはできない。しかし、このような雰囲気では蛍光強度が増加した場合は、

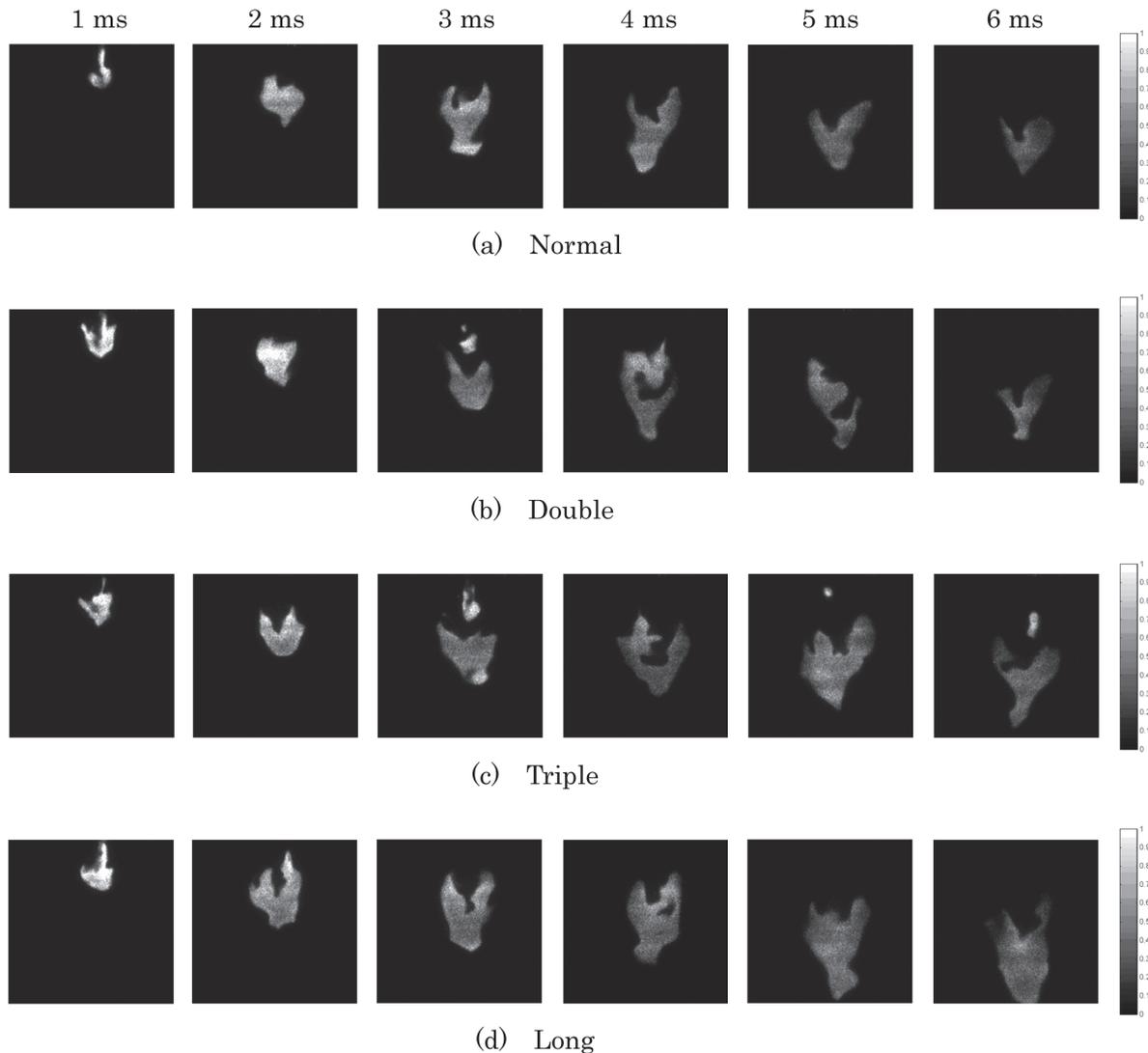


Fig.4 PLIF images of OH after start of first spark discharge

明らかに OH ラジカルの濃度が増加したことを意味していると考えられる。そこで本論文では、以上のことに注意して、図4に示す OH ラジカルの蛍光像を用いて、キャビティ内での放電特性の影響に関する定性的な検討を行った。

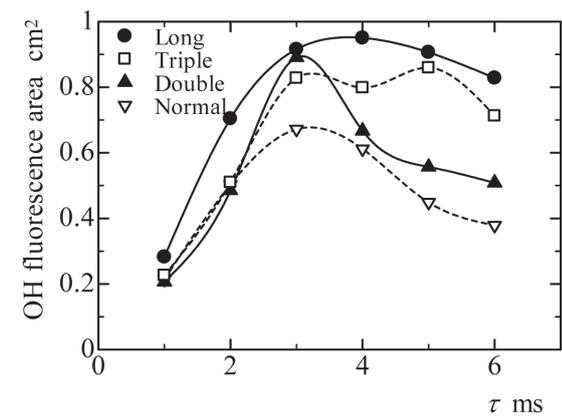
図4-bに示すように、2重放電では3 msの画像において、2回目の放電により生成された OH ラジカルの蛍光領域が確認される。さらに、これは4 msの画像において先行する蛍光領域と結合している。同様のことが3重放電(図4-c)でも確認されるが、3回目の放電によって生成された OH ラジカルの蛍光領域は非常に小さく、放電エネルギーが著しく低下していることがわかる。著者らのこれまでの研究では、パルスジェットが希薄混合気中に噴射され点火が行われた場合、過濃混合気が噴射される全期間に置いて、オリフィス近傍に OH ラジカルの強い蛍光が確認された[1-3]。一方、本研究のようにパルスジェットが空気中に噴射された場合、オリフィス近傍における OH ラジカルの蛍光は放電終了後、全ての放電モードにおいて急激に低下し

ている。すなわち、放電終了後の過濃混合気の噴射はパルスジェットにおける OH ラジカルの生成に影響を与えないことがわかる。パルスジェットが希薄混合気中に噴射された場合、放電終了後の過濃混合気の噴射により、パルスジェット上方近傍の混合気が燃料過濃となったため燃焼化学反応が促進され、オリフィス近傍で多量の OH ラジカルが生成されたと考えられる。

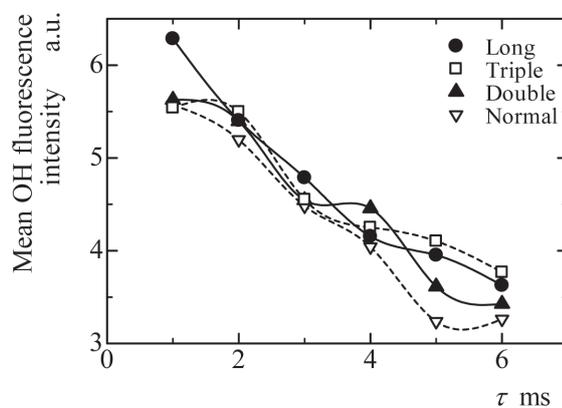
3.2. 画像解析によるキャビティ内での放電特性の影響の検討

OH ラジカルの蛍光像より OH ラジカルの蛍光面積、平均蛍光強度および全蛍光強度を計算した。ここで、平均蛍光強度は蛍光強度を蛍光面積で平均したものである。また、蛍光強度を全蛍光面積にわたって積分したものを全蛍光強度とした。なお、ここでは10回の実験を行い、各計測時間に対して得られた OH ラジカルの蛍光像より計算した値を平均した。

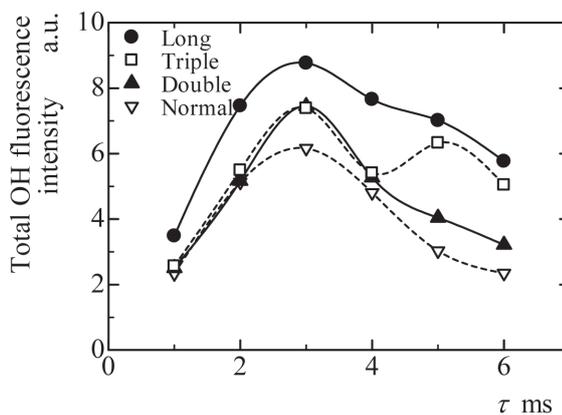
各放電モードにおける1回目の放電開始からの OH ラジ



(a) OH fluorescence area



(b) Mean OH fluorescence intensity



(c) Total OH fluorescence intensity

Fig.5 Variations of OH fluorescence area, its mean intensity, and total intensity with delay time after the start of the first spark discharge

カルの蛍光面積, 平均蛍光強度および全蛍光強度の時間変化を図5に示す。1回目の放電開始後1msにおいて, OHラジカルの蛍光面積は長時間放電で最も大きい。その後, 長時間放電では4ms, 標準放電, 2重放電および3重放電では3msまで増大し, その後減少する。ここでは, 1回目

の放電により生成されたOHラジカルの蛍光面積が放電開始後3msまで増大したと考えられる。2重放電および3重放電では2msから3msにかけて行われる2回目の放電によるOHラジカルの生成により, 3msにおけるOHラジカルの蛍光面積は標準放電のそれに比べて大きい。ただし, 2回目の放電では1回目比べて放電エネルギーが小さいと考えられ, 放電終了後にOHラジカルの蛍光面積は減少する。同様に, 3重放電では4msから5msにかけて行われる3回目の放電によるOHラジカルの生成により, OHラジカルの蛍光面積は再び増大し, その後減少する。これらと同様の変化が, パルスジェットが希薄混合気中に噴射され点火が行われた場合に得られたOHラジカルの平均蛍光強度においても確認された[1-3]。すなわち, パルスジェットによる混合気の点火過程では, 各放電モードの違いがOHラジカルの平均蛍光強度において確認されたと考えられる。

図5-bに示すOHラジカルの平均蛍光強度は, 1回目の放電開始後1msにおいて, 長時間放電で他の放電モードに比べ著しく大きい。すなわち, 長時間放電では, キャビティ内部での温度, 圧力およびOHラジカル濃度がその他の放電モードに比べて高いと考えられる。このことから, パルスジェットにおけるインダクタンスの大きい点火コイルの使用は, 点火確率の向上に有効であると考えられる。これは, 大きなインダクタンスをもつ点火コイルを用いているため, 長時間放電と他の放電では, 容量放電とその後の1msまでの誘導放電電圧の下がり方に差異があり, これが原因と考えられるが, 放電パターンの詳細な実験が必要と考えられる。また, 長時間放電ではオリフィスから噴出するパルスジェットの運動量はその他の放電モードに比べて大きく, パルスジェット内部に巻き込まれる空気量も多くなったと考えられる。周囲の空気を巻き込むことにより, パルスジェット内部のOHラジカル濃度および温度は急激に減少すると考えられ, 長時間放電におけるOHラジカルの平均蛍光強度は放電開始後2msには急激に減少し, 他の放電モードとほぼ同じ値になっている。放電開始後2ms以降, OHラジカルの平均蛍光強度は, 放電モードによる差異が見られないまま減少する。

図5-cに示すOHラジカルの全蛍光強度の時間変化は, 図5-aに示すOHラジカルの蛍光面積の時間変化と類似しており, OHラジカルの全蛍光強度が蛍光面積に強い影響を受ける[2,3]ことが確認される。

4. 結論

パルスジェット点火におけるキャビティ内での放電モードの影響を検討した。空気中に噴射されたパルスジェットに対してPLIFによるOHラジカルの蛍光計測を行った結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 過濃混合気の噴射は放電開始後5msまで続くものの, キャビティ内での放電により生成されたOHラジカル

の蛍光領域は、放電開始後 2 ms にはオリフィスを離れた。すなわち、放電終了後の過濃混合気の噴射はパルスジェットへの OH ラジカルの生成に影響を与えないことがわかった。

- (2) OH ラジカルの蛍光面積の時間変化より、キャビティ内における 1 回目の放電により生成された OH ラジカルの蛍光領域は放電終了後 2 ms まで拡大することがわかった。一方、2 重放電および 3 重放電における 2 回目、3 回目の放電により生成された OH ラジカルの蛍光領域は放電中にのみ拡大することがわかった。この原因として、2 回目以降の放電における放電エネルギーの低下が考えられる。
- (3) インダクタンスの大きな点火コイルを用いた長時間放電では、放電開始後 1 ms において OH ラジカルの平均蛍光強度はその他の放電モードに比べて著しく大きい。また、全蛍光強度は他の場合よりも大きくなっている。これらのことから、パルスジェットにおける長時間放電の適用は、点火確率の向上に有効であると考えられる。

References

1. Murase E., Hanada K. and Yun J.-H., Ignition Mechanism of Pulsed Flame Jet: Radical Emission and Fluorescence Measurements, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 65 No. 630 (1999), pp.451-456.
2. Murase E. and Hanada K., Enhancement of Combustion by Injection of Radicals, SAE Transactions, Journal of Engines, Vol. 109 Section 3 (2001), pp.34-41.
3. Murase E., Hanada K., Yun J.-H. and Kawashima H., OH Fluorescence Measurements in Pulsed Flame Jet, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 67 No. 654 (2001), pp.508-513.
4. Murase E., Hanada K., Hamakawa T. and Hotta K., Effects of Spark Discharge Mode in Pulsed Flame Jet Igniter on OH Fluorescence Images in a Swirl Flow, Combustion Science and Technology, Vol. 176 (2004), pp.1639-1652.
5. Oppenheim A. K., Combustion in Piston Engines, (2004), Springer.
6. Oppenheim A. K., Dynamics of Combustion Systems, (2006), Springer.
7. Eckbreth A. C., Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species, (1988), Abacus press.
8. Hanson R. K., Combustion Diagnostics: Planar Imaging Techniques, Twenty-first Symposium (International) on Combustion, (1987), pp.1667-1691.
9. Paul P. H., A Model for Temperature-Dependent Collisional Quenching of OH $A^2\Sigma^+$, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 51 (1994), pp.511-524