

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究

—非平衡プラズマの点火特性—

Study of Ignition Characteristics of Repetitive Nano-Pulse Discharges Plasma
— Ignition Characteristics of Non-thermal Plasma —田上 公俊^{1*}・牛丸 浩二¹・菅 雅裕¹・窪山 達也²・森吉 泰生²・渡邊 正人³・堀田 栄喜³TANOUE, Kimitoshi^{1*}, USHIMARU, Koji¹, SUGA, Masamichi¹, KUBOYAMA, Tatsuya², MORIYOSHI, Yasuo²,
WATANABE, Masato³, and HOTTA, Eiki³¹ 大分大学 大学院工学研究科 〒870-1192 大分市旦野原 700
Oita University, 700 Dannoharu, Oita, 870-1192, Japan² 千葉大学 大学院工学研究科 〒263-8552 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522, Japan³ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259
Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, 226-8502, Japan

2013年3月11日受付; 2013年8月3日受理/Received 11 March, 2013; Accepted 3 August, 2013

Abstract : A newly developed small-sized IES (inductive energy storage) circuit with a semiconductor switch at turn-off action was successfully applied to an ignition system in the previous papers [1,2]. In this ignition system, both thermal and non-thermal plasmas are utilized actively. In this paper, the focus is placed on the clarification of ignition characteristics of non-thermal plasma. For this purpose, the ignition and combustion characteristics of non-thermal plasma are examined and compared with those of a conventional spark ignition. As a result, it is found that streamer discharge characterized by non-thermal plasma cannot only ignite combustible mixtures as well as conventional thermal plasma, but there are also some advantages, such as volumetric ignition. In addition, OH LIF measurement is carried out to probe the OH time history induced by the non-thermal plasma. In conclusions, a number of OH radical can accumulate from pulse to pulse during a train of repetitive pulses, and the created radicals can initiate chemical chain reaction, which result in ignition finally.

Key Words : Non-thermal plasma, Streamer discharge, OH radical, Flame ignition

1. 緒言

現在の内燃機関には地球規模での環境問題やエネルギー資源枯渇問題の観点から、高効率・低公害な燃焼技術開発が求められている。火花点火エンジンの高効率で低公害な燃焼技術の1つとして希薄燃焼やEGR(排気再循環)希釈燃焼[3]が知られているが、一方で失火や燃焼速度の低下など未だ解決すべき問題を内包している。一般に炭化水素燃料予混合気は、燃料希薄領域及び不活性ガスによる希釈によって最小点火エネルギーは急激に増加し、燃焼速度は急激に低下[4]する。このような希薄燃焼及びEGR燃焼時における点火特性の悪化と初期燃焼速度の低下は、エンジン

稼働時に出力の低下、燃費の悪化、排気特性の悪化、騒音の発生など、さまざまな問題を引き起こす。これらの問題解決のためにプラズマジェット点火[5]、レーザ点火[6]、レールプラグ[7]などの新たなコンセプトの点火装置が提案されている[8]が、いまだ実用化には至っていない。

近年、半導体製品と電子回路の技術的向上により、非平衡プラズマの点火利用に関して多くの研究[1,2,9,10]がなされている。著者らは既報[1,2]で新たに開発した小型のIES(Inductive Energy Storage:誘導エネルギー蓄積)式パルス電源[11]を用いて、パルス幅300 ns程度のストリーマ放電(非平衡プラズマ)とアーク放電(熱プラズマ)を組み合わせた繰り返し極短パルスによる点火装置を提案した。本点火装置の特徴は、ストリーマ放電により生成した活性化学種雰囲気下の混合気に対して、短パルスアーク放電により、効

* Corresponding author. E-mail: tanoue@oita-u.ac.jp

率的にエネルギーを供給することで、希薄・希積燃焼時の点火特性の改善を図るものである。既報では、本点火装置を用いることで、希薄・希積燃焼時の点火特性が改善されることを報告している。即ち、反復パルス放電は希薄・希積可燃限界を拡大させる効果および、初期燃焼を促進する効果があることがわかった。

さらに既報では IES 点火装置の点火機構を調べるため、IES 点火回路と市販の自動車用点火回路を比較した結果、IES 点火回路の極短単パルス (アーク放電: パルス幅約 300 ns) は、既存の自動車用点火回路 (放電時間約 400 μ s) に比べて希薄領域での点火特性が優れていることがわかった。この改善メカニズムとしてアーク放電での点火の場合、同一エネルギーに対して、供給時間が短いほど点火性能が向上することを見出した。以上のことから熱プラズマのみで比較した場合、IES 点火回路を用いた繰り返し極短パルス放電は、既存の自動車用点火装置に比べて、優れた点火特性を有することを確認した。

しかしながら IES 点火装置のもう一つの特徴である非平衡プラズマ (ストリーマ放電) が点火特性に及ぼす影響に関してはいまだ不明確なことが多い。例えば、非平衡プラズマで生成される活性化学種が化学反応に寄与するか、非平衡プラズマ単体での点火が可能か、熱プラズマと非平衡プラズマで点火機構に違いがあるか、などを明らかにすることは新点火技術開発の観点から実用的に重要であるばかりでなく、「プラズマ支援燃焼」[12]の観点から学術的にも重要である。

そこで本報では非平衡プラズマ (ストリーマ放電) の点火特性を詳細に調べる。定容燃焼器を用いた可視化実験により、非平衡プラズマの点火特性を調べ、熱プラズマ (アーク放電) と比較する。また、初期圧力を変えて、非平衡プラズマの点火特性に及ぼす圧力の影響を調べる。さらに本研究では、針-平板電極を用いて放電プラズマ中の OH ラジカルの基礎特性を調べ、非平衡プラズマによる点火機構を考察する。

2. 実験装置および実験方法

2.1. 実験装置

本研究では、図 1 に示すような 2 重の定容燃焼器[13]を用いた。本燃焼器は、外部容器 (内容積約 18 L) の内部に図 2 に示すようなステンレス製で直径 120 mm、長さ 130 mm の円筒形の内部容器 (内容積約 1 L) が設置されている。内部容器には直径 80 mm の石英観測窓を有しており、外部容器の観測窓を通して、燃焼が観察できる。また、圧力逃がし口が 4 か所設られており、燃焼と同時にガスを外部容器へ放出することで、内部圧力を一定に保つことができる。実験は圧力逃がし口を閉じた状態で、内部容器には分圧に基づいた所定の組成の混合気を充てんする。同時に外部容器には内部容器との差圧が 0 となるように窒素を充てんする。充てん後、ファンにより十分攪拌し、予混合気が静止

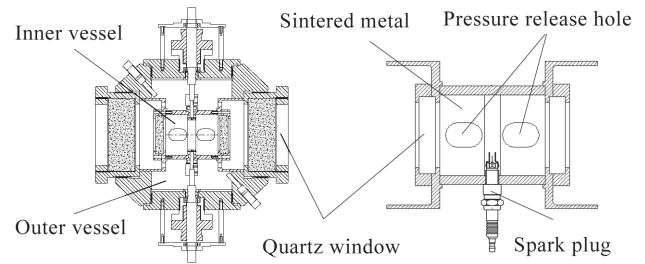


Fig. 1 Overall view of chamber. Fig. 2 Schematic of inner vessel.

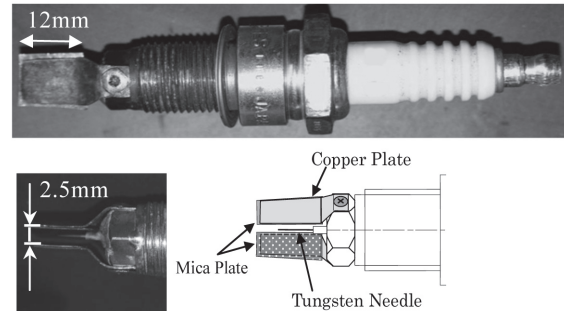


Fig. 3 Ignition plug (NTP).

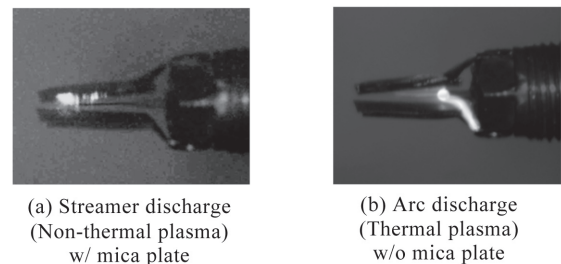


Fig. 4 Photographs of discharge emission for NTP.

するまで十分な時間をおいた後、圧力逃がし口を開けて、点火により燃焼実験を行った。本研究では高速度カメラを用いたシュリーレン法により火炎の可視化を行った。実験はプロパン・空気予混合気、当量比 $\phi = 1.0$ の条件で行った。

本研究では、図 3 に示すような市販の自動車用点火プラグを非平衡プラズマ点火用に加工したプラグ (以降 NTP と表示) を使用した。半径 0.6 mm のタングステン針を中心電極に取り付け、接地電極は 12 mm \times 10 mm の銅板電極を対称に取り付けた。2 つの接地板間の距離は 2.5 mm である。また、アーク放電への遷移を避けてストリーマ放電を保持するために絶縁体として薄い雲母板を接地電極に貼りつけた。図 4 に NTP の雲母がある場合 (ストリーマ放電) と雲母がない場合 (アーク放電) の放電の様子を示す。

2.2. 放電回路

本研究では、半導体スイッチを用いた小型の IES (Inductive Energy Storage: 誘導エネルギー蓄積) 式パルス電

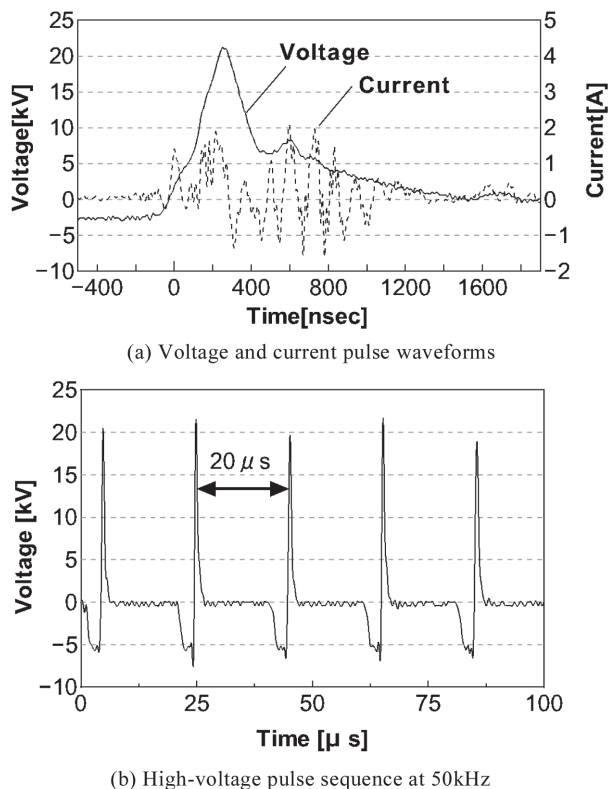


Fig.5 Repetitive pulse discharges.

源を用いて放電を行った。これは数十 V 程度の直流電源から、パルス幅が極めて短い高電圧を発生させることが可能なパルス電源で、インダクター (又はトランスのインダクター成分) に蓄積した磁気エネルギーを半導体スイッチの高速電流遮断動作で負荷側に放出することにより、パルス電圧を発生させる。回路図ならびに動作原理の詳細は文献 [11] を参照のこと。図 5(a) に本実験で使用した繰り返しパルス放電の典型的な電圧・電流波形を示す。本研究におけるパルス幅 (電圧波形の FWHM) は約 300~330 ns, 電圧は約 14 kV~20 kV, 繰り返し周波数は 10~100 kHz である。また、例として図 5(b) に 50 kHz の繰り返しパルスでの電圧波形を示す。

3. 実験結果および考察

3.1. ストリーマ放電の点火特性

本研究ではまず、繰り返し周波数を固定し、1 パルス当たりのエネルギー (以降パルスエネルギー) とパルス数を変化させて、点火特性を調べた。

図 6 に初期圧力 0.5 MPa, 及び 1.0 MPa において、繰り返し周波数を 50 kHz に固定し、パルスエネルギーとパルス数を変化させた場合の点火特性を示す。ここで●印は点火に至った条件, ×は点火できなかった条件を示す。また図の Total Energy とはパルスエネルギーとパルス数の積である。図 6 より、非平衡プラズマのみで従来の火花点火 (熱

プラズマ) と同様に可燃混合気を点火でき、その点火特性はパルスエネルギーに依存することがわかる。すなわち、基本的に熱プラズマ同様にトータルのエネルギーが増加すると点火性能は向上するが、非平衡プラズマ特有の点火特性として、「点火の能否」が「トータルのエネルギー」のみでなく、「パルスエネルギー」と「パルス数」に依存することがわかる。すなわち、パルスエネルギーが小さい領域で、単純にパルス数を増やしてトータルのエネルギーを大きくしても、点火しない条件がある一方、パルスエネルギーが大きい領域で、パルス数が少なくても (トータルのエネルギーが小さくても) 点火に至る条件がある。例えば 0.5 MPa の場合、図 6(a) より、7.0 mJ/pulse では 100 回 (Total Energy: 700mJ) でも点火しないが、8.0 mJ/pulse の場合 10 回 (Total Energy: 80 mJ) で点火可能である。この非平衡プラズマの点火特性は、基本的にトータルのエネルギーが増加すると、点火特性が向上する熱プラズマとは異なっている。

次に、パルス数を固定し、繰り返し周波数とパルスエネルギーを変化させて、点火特性に及ぼす繰り返し周波数の影響を調べた。

図 7 にパルス数を 10 に固定し、繰り返し周波数とパルスエネルギー (Total Energy = パルスエネルギー×10) を変化させた場合の点火特性を示す。図 7 より、初期圧力が高い場合、繰り返し周波数の影響が大きくなることがわかる。すなわち、初期圧力 0.5 MPa の場合は、繰り返し周波数に関係なく Total Energy が約 80 mJ (パルスエネルギー約 8 mJ) で点火している。この場合、点火特性に及ぼす繰り返し周波数の影響は小さい。一方、初期圧力 1.0 MPa の場合は、繰り返し周波数 10 kHz ではパルスエネルギーを大きくしても点火しないが、繰り返し周波数を大きくしていくことで点火に至っている。このことから、初期圧力 1.0 MPa の場合、繰り返し周波数が点火特性に影響していることがわかる。

3.2. ストリーマ放電の初期火炎形成

次に本研究では、シュリーレン撮影法による可視化により、初期火炎形成を調べた。実験は自動車用点火回路 (TI) とパルス数 10 のストリーマ放電 (NTI10), パルス数 100 のストリーマ放電 (NTI100) で行った。

図 8 に初期圧力は 1.0 MPa で、NTP を用いたアーク放電 (TI) 及びストリーマ放電 (NTI) の初期火炎形成のシュリーレン写真を示す。ここで時間軸は放電開始を 0 としている。図 8 より、NTI と TI を比較すると初期火炎形成に違いが見られる。TI はブレークダウンした高温の放電部位において強い光が形成された後 (図 4(b)), その箇所を中心に連続的な火炎核形成・成長が見られる。図 8(a) の画像では示されていないが、動画では 0 ms と 1.5 ms の間で連続的な火炎の成長が確認できる。すなわち、TI における点火は熱プラズマで生成された高温領域の「火炎核」を中心に火炎が形成・成長する (点での点火)。これに対して NTI では、肉眼では観察できない弱い光のストリーマ放電が広範囲に生じ

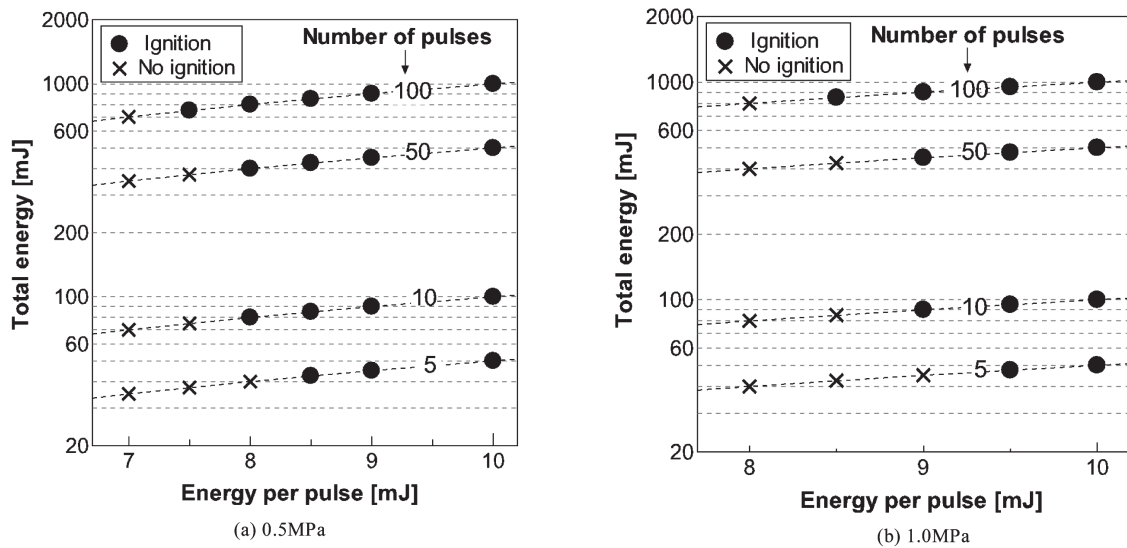


Fig.6 Effect of pulse energy on inflammability for non-thermal plasma ignition.

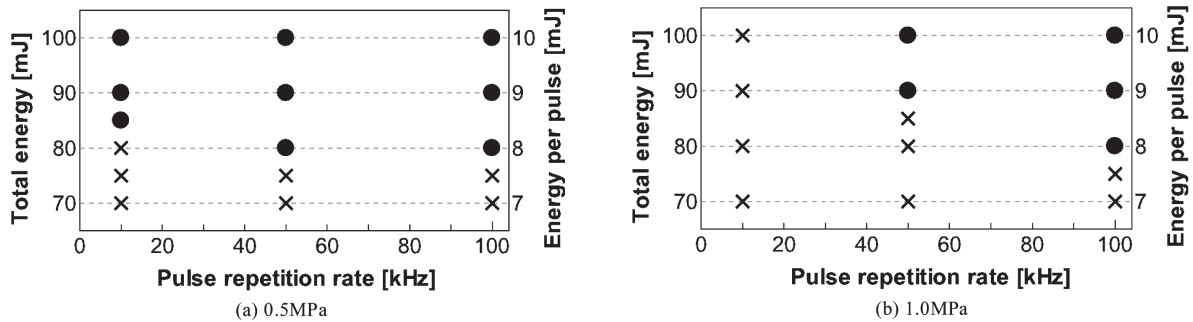


Fig.7 Effect of pulse repetition on inflammability for non-thermal plasma ignition.

(図 4(a)), ある時間が経過後, 突然一定の体積を有する反応領域が出現する (例えば NTI 10 では図 8(b) 1.5 ms の画像). 以上のような非平衡プラズマによる初期火炎形成のメカニズムに関して以下のように考察した.

熱プラズマでは, 点火エネルギーが直接ガス温度上昇に使われ化学反応が始まるが, 非平衡プラズマでは供給したエネルギーは電子エネルギーとして蓄積されるため, ガス温度はあまり上がらない. 高エネルギーとなった電子の衝突により広範囲に生成された活性化学種により連鎖反応が進行し, ある時間経過後, 化学反応による温度上昇を伴う広範囲な反応領域が出現したものと考えられる (体積的な点火). なお, 本装置の繰り返しパルス放電による非平衡プラズマで活性化学種が蓄積されることの確認は次節で行う. また, NTI10 と NTI100 を比較すると, NTI100 の反応領域が広いことがわかる. これは活性化学種の生成範囲が広がったためと推察される.

次に, ストリーマ放電による初期火炎形成に及ぼす初期圧力の影響を調べた.

図 9 に初期圧力 0.5 MPa, 0.7 MPa, 1.0 MPa に対して, NTI100 の初期火炎形成のシュリーレン写真を示す. 図 9

より, 初期圧力の増加により, 初期火炎形成場所に違いが見られる. 初期圧力 0.5 MPa の場合は, 針全体から初期火炎形成が見られ, 広範囲の点火が同時に起こっている. 初期圧力 0.7 MPa では, 点火場所が針先端付近に移動し, そこを中心に広範囲の点火が起こっている. 初期圧力 1.0 MPa も 0.7 MPa と同様に, 針先端付近から点火している. 以上のことから, ストリーマ放電は, 初期圧力が増加するにつれて, 放電しやすい針先端側で初期火炎形成が行われると考えられる.

3.3. レーザ誘起蛍光法による OH の計測

上述のようにストリーマ放電 (非平衡プラズマ) は, アーク放電 (熱プラズマ) と同様に, 単体で可燃混合気を点火できるだけでなく, 体積的な点火が実現できるといった優位性を有することがわかった. 非平衡プラズマによる点火メカニズムに関しては未だ明らかにされていないが, 以下のように定性的な説明が考えられる.

高換算電界場におけるストリーマ放電では, 熱エネルギーへの変換が少ないため, 高いエネルギーを有する電子が生成される. この場合, 高エネルギー電子の衝突により,

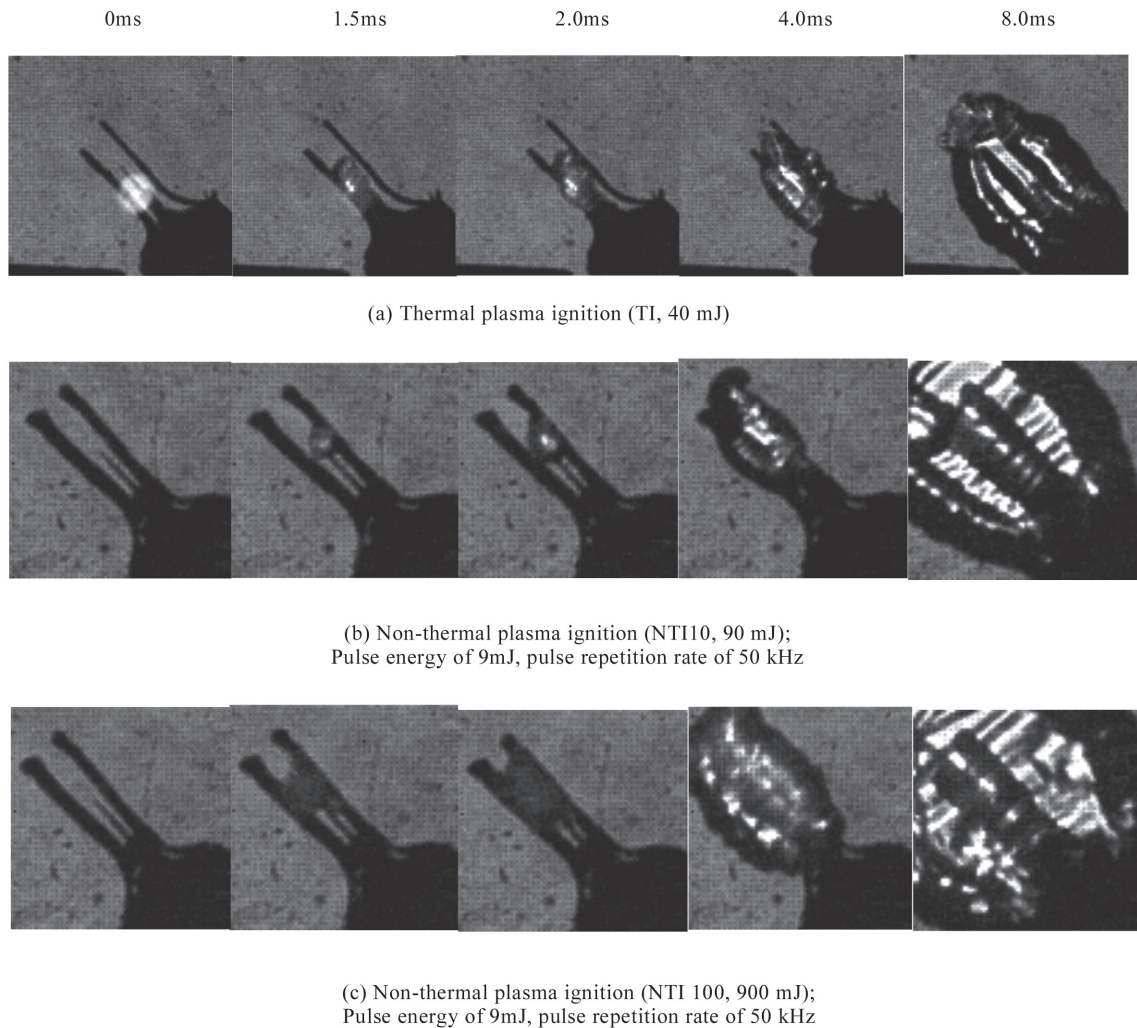


Fig.8 Schlieren photographs of the flame kernel formation at 1.0MPa by thermal plasma and non-thermal plasma.

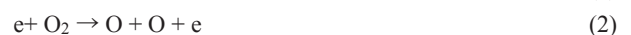
O, N, H, OH, NO といったラジカルが大量に生成され, これらラジカルにより連鎖反応が始まり, ついには点火に至る.

以上の考察をより具体化して, Lou ら[14]は「(1) 非平衡プラズマにより燃料が酸化されてラジカルが生成される. (2) この酸化過程での発熱反応で温度が上昇し, (3) 温度上昇と生成されたラジカルにより化学反応が開始・促進され, 点火に至る」と説明した. すなわち, 非平衡プラズマによる燃料の酸化と, それに伴う温度上昇により点火が起こると推察した.

このようなストリーマ放電による点火機構の妥当性を検証するためには非平衡プラズマによる OH などのラジカルの生成特性を調べる必要がある. そこで本研究では, 針-平板電極を用い, 針電極に正極性パルス電圧 15 kV (パルス幅 400 ns) を印加して空気中で 40 μ s 間隔, 10 回のストリーマ放電を行い, このとき生成された OH の時間変化をレーザー誘起蛍光 (Laser Induced Fluorescence: LIF) 法を用いて調べた. 色素レーザー (Quanta System, D-100) を用いて, 励起波長 282 nm で基底準位の OH ラジカルを $A^2\Sigma (v' = 1) \leftarrow$

$X^2\Pi (v'' = 0)$ の遷移で励起した[15]. 色素レーザー光は, 針電極先端付近にレンズで集光し, レンズと狭帯域フィルタ (朝日分光社製 MZ0310, 中心波長 308.5 nm, 帯域 9 nm: FWHM) を用いて, 波長 309 nm および 314 nm の蛍光を光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R2256-02) により受光した.

図 10 に圧力 0.1 MPa における, パーストパルス最後のストリーマ放電終了後の LIF 出力の時間変化を示す. 図 10 から OH 密度の減衰時定数として約 150 μ s が得られた. OH の生成に関しては以下のように空気中の水分から生成されたものと推察される[16]. すなわち (1) 電子の衝突により, 水蒸気が分解され直接 OH が生成されるか, (2) 酸素より生成された O 原子と水蒸気が反応して OH が生成される. この場合,



Ono と Oda [17]は大気圧下において酸素濃度を 0%, 3%,

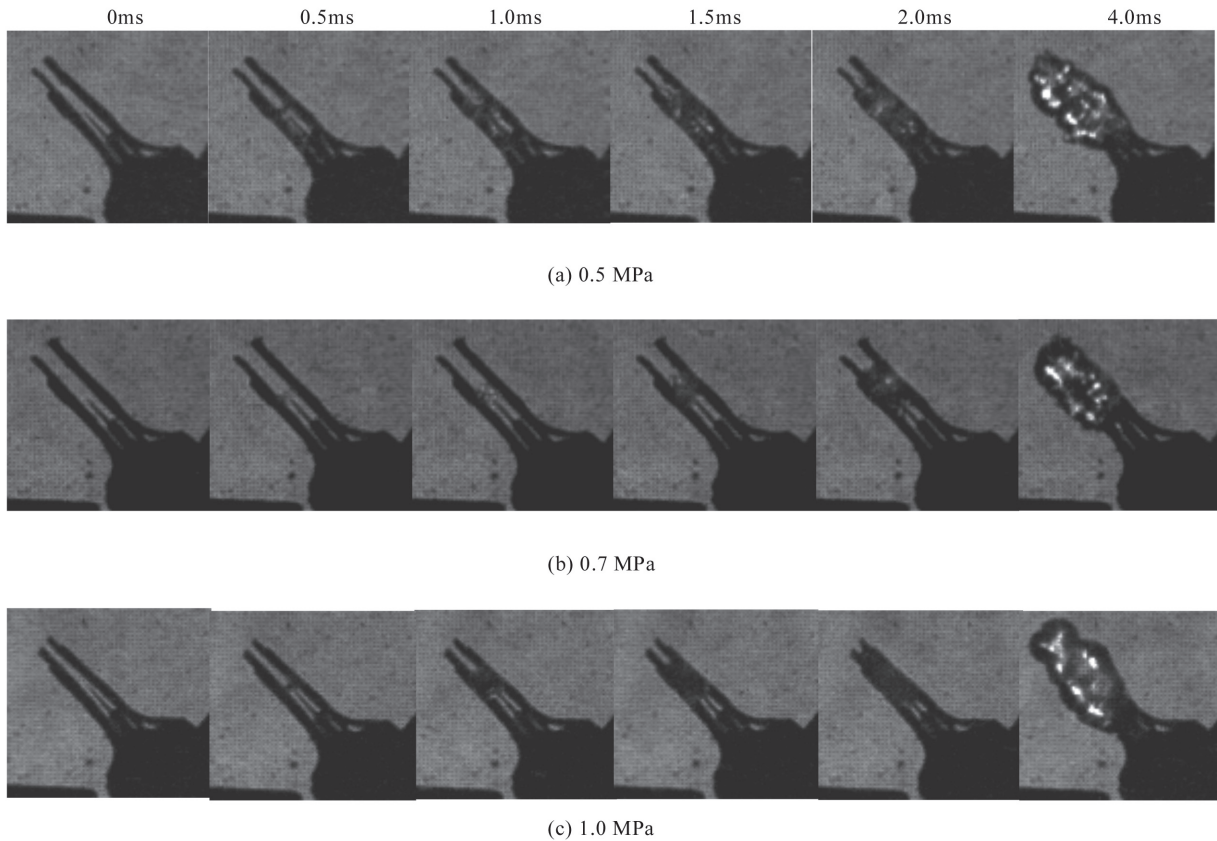


Fig.9 Schlieren photographs of the flame kernel formation by non-thermal plasma ignition (NTI100, 900mJ); Pulse energy of 9mJ, pulse repetition rate of 50 kHz.

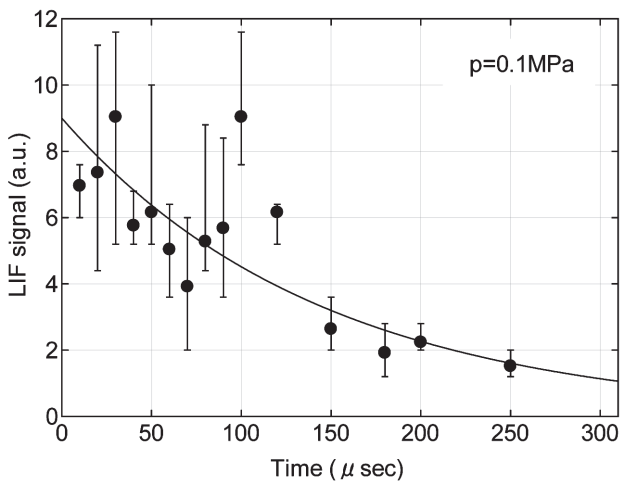


Fig.10 Time evolution of LIF signal for OH in air at 0.1 MPa.

10%, 20% と変化した H₂O(2.4%)/O₂/N₂ 混合気に対して、100 ns のコロナパルス放電を加えて生成される OH の時間推移を調べた。その結果、生成された OH は、放電後 10 μs 後、20~300 μs の時定数で減衰していること、また酸素濃度の増加に伴い、減衰速度が増加(時定数が減少)することを見出した。

本研究で得られた減衰時定数 150 μs は、Ono らの 20 %

酸素雰囲気中での実験結果である減衰時定数約 20 μs (一定期間を考慮すると 30 μs) と比べて長い、これはオゾン干渉の影響を補正していないためであると推測される。OH-LIF 計測においてレーザによるオゾンの光解離により OH が生成され、測定される LIF シグナルに影響を及ぼす。Ono らの測定ではオゾン干渉の影響が減じられている。

一方、Cathey ら[18]は円筒状の燃焼器を用いて OH-LIF 測定を行い、実験室空気中では OH は放電終了後 500 μs まで存在するが、可燃混合気中では 100 μs 以下となることを報告している。Cathey らの測定はオゾン干渉の影響を考慮していないため、本研究の測定値と近い値となっている。

以下で本研究では、実験結果より得られた OH の減衰時間を基に、繰り返しによるラジカルの蓄積について考察する。上述のように本研究では LIF による OH の減衰時定数(寿命)の計測を行い、約 150 μs を得ているが、オゾン干渉を考慮すると数 10 μs 程度の寿命と考えられる。1 回の放電によるラジカル生成量を N_0 とし、この量は放電ごとに変わらないものとする。拡散がないことを仮定し、ラジカルの寿命を τ 、放電時間を T とする。このとき 2 回目の放電直前 ($t = T_-$) の残留ラジカル量 $N(T_-)$ は、

$$\frac{N(T_-)}{N_0} = \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \tag{4}$$

放電直後 ($t = T_+$) には,

$$\frac{N(T_+)}{N_0} = \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \quad (5)$$

と表される. 同様に 3 回目の放電直前 ($t = 2T_-$) には

$$\frac{N(2T_-)}{N_0} = \left\{ \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \right\} \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \quad (6)$$

放電直後 ($t = 2T_+$) には

$$\frac{N(2T_+)}{N_0} = \left\{ \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \right\} \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \quad (7)$$

と表される. これが放電毎に繰り返されるので, 無限に放電が繰り返されたときの残留ラジカル量 $N_f = \lim_{n \rightarrow \infty} N(nT_-)$ は

$$\begin{aligned} \frac{N_f}{N_0} &= \left[\left\{ \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \right\} \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + 1 \right] \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \cdots \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \exp\left(-i\frac{T}{\tau}\right) \\ &= \frac{\exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} \quad (8) \end{aligned}$$

と表される.

例えば, 放電パルス幅 400 ns, $T = 40 \mu\text{s}$ を用いれば, 式 (8) の導出条件を満たしている. このとき, OH の寿命として $\tau = 40 \mu\text{s}$ を用いれば, 累積効果により, 繰り返し放電によって維持される最小粒子数として $N_f = 0.58N_0$ が得られる. すなわち, 繰り返しパルス放電が継続する間, 少なくとも単一放電によって生成される粒子数の約半分が維持されることになる.

気中放電で換算電界が高く, 電界中の電子エネルギーが大きい場合に, 酸素原子ラジカルは電子衝突による直接解離 (O_2 の解離エネルギーは原子当たり 2.56 eV) や大量に生成される以下の高励起準安定窒素分子 N_2^* による酸素分子の解離により生成される.



OH と O の反応による HO_2 の生成では, 反応当たり 2.87 eV の発熱がある. このため, 微小体積中でストリーマ放電を高繰り返しで行うと気体の温度上昇も起こり, ラジカルの蓄積と相まって, ストリーマ放電での点火が起こったものと推察される.

4. 結言

本研究では, 非平衡プラズマ (ストリーマ放電) の点火特性を詳細に調べた.

1. 非平衡プラズマ点火は, 従来の火花点火 (熱プラズマ)

と同様に可燃混合気を点火でき, 基本的に熱プラズマ同様にトータルのエネルギーが増加すると点火性能は向上するが, 非平衡プラズマ特有の点火特性として, 「点火の能否」が「トータルのエネルギー」のみでなく, 「パルスエネルギー」と「パルス数」および「繰り返し周波数」に依存する.

2. 非平衡プラズマは熱プラズマとは異なり体積的な点火を実現できる. 点火場所に関しては, 初期圧力が増加するにつれて, 放電しやすい針先端側で初期火炎形成が行われる.
3. 針-平板電極における OH ラジカルの平均寿命を LIF 法により計測したところ $150 \mu\text{s}$ となった. また OH の減衰時間を基に, 繰り返しによるラジカルの蓄積について考察したところ, 繰り返しパルス放電が継続する間, 少なくとも単一放電によって生成される粒子数の約半分が維持されることがわかった. 蓄積されたラジカルにより, 非平衡プラズマの点火が起こったものと推察される.

謝辞

本研究の一部は平成 24 年度科学研究費補助金 基盤研究 (C) (No. 23560239), 谷川熱技術振興基金, JKA 機械工業振興補助事業により行われた. また, 本研究に使用した電源は日本ガイシ株式会社よりご提供いただいた. ここに謝意を表します.

References

1. Tanoue, K., Moriyoshi, Y., Hotta, E., *International Journal of Engine Research*, 10(6): 399-407 (2009).
2. Tanoue, K., Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Hotta, E., Imanishi, Y., Shimizu, N., Iida, K., *SAE International Journal of Engines*, 2(1): 298-306 (2009).
3. Heywood, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, (1988).
4. Glassman, I., "Combustion", Academic Press, (1996).
5. Dale, J.D., Oppenheim, A.K., *Trans. SAE*, Paper810146, 90: 606-621 (1981).
6. Dale, J.D., Smy, P.R., Clements, R.M., *SAE Paper* No.780329, (1978).
7. Hall, M.J., Matthews, R.D., Ezekoye, O.O., *SAE Paper* No.2007011832, (2007).
8. Dale, J.D., Checkel, M.D., Smy, P.R., *Prog. Energy Combust.* 23: 379-398 (1997).
9. Liu, J.-B., Ronney, P.D., Gundersen, M.A., *Proc. 3rd Joint Meeting U.S. Sect. Combust. Inst.*: 16-19 (2003).
10. Pancheshnyi, S.V., Lacoste, D.A., Bourdon, A., Laux, C.O., *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34: 2478-2487 (2006).
11. Shimizu, N., Sekiya, T., Iida, K., Imanishi, Y., Kimura, M., Nishizawa, J., *Prog. 2004 International Symposium on Power*

- Semiconductor Devices & ICs*: 281-284 (2004).
12. Strikovskiy, A., Aleksandrov, N., *Prog. Energy Combust.* 39: 61-110 (2013).
 13. Tanoue, K., Kato, Y., Iwashimizu, K., Miyawaki, K., Shimada, F., Hashimoto, J., *Transactions of Society of Automotive Engineering of Japan*, 43: 1021-1026 (2012)
 14. Lou, G., Bao, A., Nishihara, M., Keshav, S., Utkin, Y.G., Rich, J.W., Lempert, W.R., Adamovich, I.V., *Proc. Combust. Inst.*, 31: 3327-3334 (2007).
 15. Esshov, A, Borysow, J., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28: 68-74 (1995).
 16. Lowke J.J. and Morrow, R., *IEEE Trans. Plasma Science*, 23: 661-671 (1995).
 17. Ono T., Oda T., *J. Appl. Phys*, 93(10): 5876-5882 (2003).
 18. Cathey, C., Cain, J., Wang, H., Gunderson, M.A., Carter, C., Ryan, M., *Combust. Flame*, 154: 715-727 (2008).