



HAL
open science

Ignition and development of flame kernel formed by nanosecond repetitively pulsed discharges in the quiescent lean premixed mixture

Jun Hayashi, Sara Lovascio, S. Stepanyan, T. Ombrello, G.D. Stancu, C.O. Laux

► **To cite this version:**

Jun Hayashi, Sara Lovascio, S. Stepanyan, T. Ombrello, G.D. Stancu, et al.. Ignition and development of flame kernel formed by nanosecond repetitively pulsed discharges in the quiescent lean premixed mixture. *Journal of the Combustion Society of Japan*, 2022, 10.20619/jcombsj.64.208_177 . hal-04570046

HAL Id: hal-04570046

<https://hal.science/hal-04570046>

Submitted on 6 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

■連載講座/SERIAL LECTURE■

—燃焼におけるプラズマ利用の新展開 II/Recent Development of Plasma Techniques for Combustion II—

静止希薄予混合気に対するナノ秒繰返し放電 (NRPDs) を用いた点火および火炎核成長

Ignition and Development of Flame Kernel Formed by Nano-Second Repetitively Pulsed Discharges (NRPDs) in the Quiescent Lean Premixed Mixture

林 潤^{1*}・LOVASCIO, Sara²・STEPHANYAN, Sergey²・OMBRELLO, Timothy³・STANCU, Gabi²・LAUX, Christophe²HAYASHI, Jun^{1*}, LOVASCIO, Sara², STEPHANYAN, Sergey², OMBRELLO, Timothy³, STANCU, Gabi² and LAUX, Christophe²¹ 京都大学大学院エネルギー科学研究科 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
Kyoto University, Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8501, Japan² Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, FRANCE³ Aerospace Systems Directorate, Air Force Research Laboratory, 1950 Fifth Street, Building 18A, Wright-Patterson AFB, OH, 45433 USA, USA

Abstract: To provide a better understanding of the ignition process using nanosecond repetitively pulsed discharges (NRPDs), ignition trials of quiescent lean propane-air mixtures (equivalence ratio of 0.7) in a constant volume combustion chamber were conducted. Both the post-discharge and the following flame kernel development were visualized and analyzed by high frame rate imaging of the chemiluminescence. NRPD produces a gas motion resulting in a jetting phenomenon and that influence on the time of flame kernel development. For fixed inter-electrode gap and constant total energy, the ignition time was minimized at a certain pulsation frequency, with higher pulse repetition ratio being detrimental and resulting in longer ignition delay times. The effect of energy deposition, pulse repetition frequency (PRF), and inter-electrode gap was attributed to the competition between characteristic recirculation time from the discharge-induced flow field and the inter-pulse time.

Key Words: Ignition, Nano-second repetitively pulsed discharge, Propane/air mixture, Pulse repetition frequency

1. 緒言

燃焼機器には高い熱効率と燃焼排出物の低減が同時に求められている。これらの要求を達成するための方法として、燃料希薄条件や、強乱流の流れ場における燃焼器の運用や排気再循環率の上昇などが提案・検討されている。点火過程は燃焼の初期過程であり確実に達成することが求められるが、上述のような環境は点火過程にとって過酷である。このような環境では、安定した火炎核を形成し、自律的な火炎伝ばの達成に必要な十分なエネルギーを可燃性混合気に供給することが重要となる。

エネルギー供給方法のひとつとして、さまざまな方式のプラズマ支援点火が提案され、熱的・化学的效果または輸送に対する効果が研究されてきた[1, 2]。近年でも活発に研

究結果が報告されてきており、例えば、誘電体バリア放電[3-8]、マイクロ波[9, 10]、グライディングアーク[11]、コロナ放電[12, 13]、レーザー誘起プラズマ[14-18]、ナノ秒繰返し放電 (Nano-Second Repetitively Pulsed Discharges; NRPDs) [19-25]などが挙げられる。また、近年では複数の手法を組み合わせた検討もなされている[26, 27]。これらの点火手法に対する研究結果から、プラズマが時間的・空間的に励起する化学種や流動が火炎核の成長に大きな影響を与えることが指摘されている。

NRPD を用いた点火は、近年注目を集めている点火手法であり、ナノ秒オーダー放電時間を持つ短パルス放電を数 kHz から数 100 kHz の繰返し周波数で放電させることによって、活性化学種および短時間の温度上昇を達成する。放電時間が短いことによって、電極の過度な損耗を避けた確実な点火や、放電の繰返し周波数が高い状況における火炎核成長の促進などの相乗効果が期待されている。

* Corresponding author. E-mail: hayashi.jun.7a@kyoto-u.ac.jp

NRPD および通常の火花放電の電圧と時間の関係の模式図を図 1 に示す。NRPD を用いた点火では、放電の繰返し周波数、単一パルス放電の電圧、放電の回数が点火に対するパラメータとなり得る。また、放電の回数と周波数を調整することで総放電期間、および単一パルス放電の電圧(エネルギー)と、総放電エネルギーなど、自由度の高い点火が可能になる。

これまでにこれらのパラメータのうち、放電の繰返し周波数が点火あるいは火炎核形成に影響を与えることが、静止雰囲気場[20, 23-25, 28]や流れのある条件[29]において指摘されている。本稿では、放電の繰返し周波数が与える影響を理解するために行った NRPD を用いた点火に関する実験的な研究の結果[24, 25]を紹介する。

2. 実験装置および実験方法

本稿で示す点火試験は全て、定容容器 (Constant Volume Combustion Chamber; CVCC) を用いて行った。定容容器は、内径 50 mm, 奥行き 50 mm の円筒形である。容器側面には 2 方向に一对の石英可視化窓が設けられており、放電、火炎核形成から火炎伝播まで、一連の点火過程を可視化することが可能である。点火試験の装置配置の概略図および可視化窓から見た電極の直接写真を図 2 に示す[24, 25, 28]。

点火試験においては、燃料にプロパン、酸化剤には空気の静止予混合気を用いた。過去の研究結果[28]との比較のために、予混合気の当量比は 0.7, 初期圧力は 0.2 MPa とした。点火試験には、先端を尖らせた一对の電極 (pin-to-pin) を用いた (図 2 中右側写真)。なお、点火位置となる電極間隙の中心は、CVCC の中心に配置した。放電および火炎核の観察には、高繰返しゲート付きのイメージインテンシファイア (Image Intensifier; I.I.) (浜松ホトニクス, C10880) および高速カメラ (Photron, FASTCAM SA-X2) を用いた。

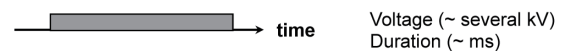
NRPD を用いた点火試験には、短パルスの放電を形成することが可能な電源を用いる必要がある。本研究では、短パルス高電圧電源 (FID GmbH, FPG20-100MC4K) を用いた。単一のパルス放電の放電持続時間幅は約 10 ns である。この短パルス高電圧電源は、最高電圧 30 kV, 最高繰返し周波数 100 kHz まで設定することが可能である。NRPD を用いた点火試験における電圧および電流の計測には、高電圧プローブ (Lecroy PPE20kV) および Pearson Coil (Model 6585) をそれぞれ用いた。これらの電圧および電流の値は、オシロスコープ (LeCroy, Wavepro7100) を用いて記録した。この際、計測機器からオシロスコープまでの信号遅延を考慮して計測を行った。

また本研究では、NRPD によって形成される火炎核と通常の火花放電によって形成される火炎核の形状を比較するために、通常の火花放電を用いた点火試験を行った。火花放電を用いた点火試験では、自動車用バッテリー、および AUDI-coil (VW/AUDI, model 06H905110E) を用いた。自動

車用バッテリーは 5 V のパルス信号で駆動し、3.5 ms の放電期間とした。NRPD と火花放電が形成する火炎核の比較を行う際には、放電の総エネルギーを一定とするを目的として、NRPD の放電回数を 82 pulses とし、電極間距離を 0.6 mm に設定した。なお、本研究と同様の実験装置を用いて行われた Xu らの結果[28]から、82 pulses の NRPD にて点火試験を行う場合には、放電の繰返し周波数が 30 kHz の条件において点火確率が 100 % に近い値となる。放電の繰返し周波数が 30 kHz の条件で、82 pulses の放電を行った場合は、総放電期間が 2.73 ms となる。通常の火花放電を用いた点火では、接地側の電極に 10 Ω の抵抗を挟むことで計測される電圧値 (Lecroy P2220 voltage probe) から、電流を算出した。全ての信号はオシロスコープ (LeCroy, Wavepro7100) を用いて記録した。

前述の通り NRPD のような繰返し放電を用いた点火には、放電の回数、放電の繰返し周波数、放電回数に繰返し周波数を乗じた総放電時間、放電回数に単一のパルス放電のエネルギーを乗じた総供給エネルギーなど多くのパラメータが存在する。また、電極間距離は、放電および放電によって形成される火炎核に影響を与えるパラメータの一つである。本稿後半の放電パラメータを操作した点火試験では、放電回数を 22 pulses に固定して、繰返し周波数を 2 kHz から 90 kHz, 電極間距離を 1.2 mm および 3.0 mm としている。

Conventional Spark



Nanosecond Repetitively Pulsed (NRP)



Fig. 1 Schematics of the time chart of (a) conventional spark and (b) NRP, and those adjustable parameters.

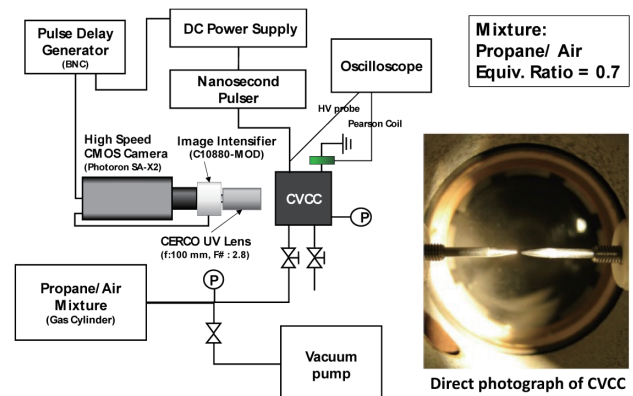


Fig. 2 Schematic illustration of the experimental set-up, and direct photograph of the electrodes in the CVCC. P is the pressure gauge.

3. 実験結果および考察

3.1. 繰返し放電による放電エネルギーの蓄積

本研究で対象とした NRPD を用いた点火試験では, 電極間距離を設定した上で, 電源の状態は一定としたため, 電流と電圧の積を時間積分することで単一パルス放電のエネルギーを次式で求めることができる. なお, V は電圧, i は電流, t は時間である[20, 30, 31].

$$E_p = \int_{\tau} V(t)i(t)dt \quad (1)$$

ナノ秒放電領域に入る本研究の条件では, 変位電流は, 放電エネルギーに対して十分に小さく[20, 31], 複数のパルス放電によって混合気に供給される総放電エネルギー E_t は, 各パルス放電のエネルギーを足し合わせることで得られる. ここで, N_p は放電パルス数である.

$$E_t = \sum_{i=1}^{N_p} E_p \quad (2)$$

本研究における第 1 番目のパルス放電のエネルギーは電源の性質上操作が不可能であった. その放電のエネルギーは, 常に 10 mJ 程度である. この第 1 番目のパルス放電のエネルギーの値は, 続く全てのパルス放電におけるエネルギーと比べて大きい. しかしながら, 本研究の混合気条件(プロパン/空気静止混合気, 当量比 0.7)では, 単一のパルス放電によって点火が達成されないことを NRPD の点火試験に先立って確認している. 第 1 番目のパルス放電に続くパルス放電の電圧は一定とした.

図 3 に, 電極間距離を 1.2 mm に設定した点火試験において得られる放電エネルギーのパルス数に対する変化を示した. 図 3 の左上には, 電極間距離 3.0 mm の条件にお

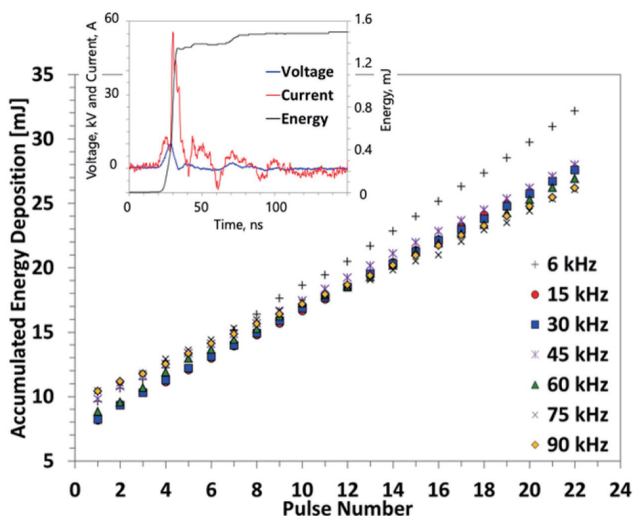


Fig. 3 E_t versus pulse number for a set of ignition trials of various pulsation frequency at 1.2 mm inter-electrode gap. (Upper left) Measured voltage, current, and energy for a single NRPD pulse using a 3.0 mm inter-electrode gap.

る単一パルス放電によって得られる, 電圧, 電流および算出される放電エネルギーの時間変化を示している. また, 図 3 中の凡例は, 放電の繰返し周波数が異なる試験において得られる 22 pulses のパルス放電のエネルギーである. 図 3 より, パルス放電によって供給されるエネルギーが, パルス回数とともに線形に増加していることがわかる. この結果から, パルス放電の繰返し周波数によってわずかに差が存在するものの, 放電電圧を一定とした場合には, 単一のパルス放電が供給するエネルギーが, パルスの順番によらず同一であることを示している. ここで, 6 kHz の条件は他の条件と比較して総放電エネルギーが大きい条件である. この結果についての考察は後述する.

3.2. NRPD における特徴的な火炎核形成

火炎核の形成過程の観察および評価には, プラズマあるいは火炎からの発光を用いた. 放電によって励起される活性化学種の発光を観察するために, レンズには紫外光を計測可能な UV レンズ (CRECO, 100 mm focal length, f/2.8) を使用した. 火炎核の成長過程は定容容器の壁面まで可視化することが可能である. このとき撮影速度は, 30 kHz とした. なお, 放電による輝度値の飽和を避けるために, I.I. には, 各パルス放電の後に $3 \mu\text{s}$ の遅延, および $7 \mu\text{s}$ のゲート解放時間を設定した. 放電によって生じる活性化学種 (OH, CH, O, および H) の可視化には, 各活性化学種に対応するバンドパスフィルタ (308 nm for OH*, 430 nm for CH*, 777 nm for O and 656 nm for H) をレンズに取り付けた. 全てのバンドパスフィルタの半値幅は 10 nm である.

図 4 の上段に 82 pulses の NRPD によって得られる典型的な火炎核形成の様子, および下段に通常の火花放電で得られる火炎核形成の様子を示している. この時の電極間距離は 0.6 mm である. なお, 図 4 中に示した発光領域は, I.I. の光電面に結像される画像の輝度値に FIRE カラーの Lookup table を適用している. 図 4 下段より, 火花放電を用いた点火試験では, 電極間に輝度値の高い領域が現れ, 放電期間中は位置が変化しないことが分かる. また, 放電終了後には強い発光領域が縮退し, 電極間に現れる弱い発光強度の火炎核が平滑な火炎面を保ちながら, 定容容器壁面へと成長する.

一方で, 図 4 上段に示した NRPD を用いた点火では, 全く異なる火炎核形成の様子が現れる. 放電期間中には, 輝度値の高い領域が電極間中心から放電電極間の外側に時間の経過と共に離れていっていることが分かる. 本研究ではこの現象を "Jetting" とした. また, Jetting による発光領域は, NRPD の放電ごとに供給される. 結果として得られる NRPD を用いた点火による火炎核は, シワ状の構造を持ち, その構造は火炎が定容容器の壁面へと伝播するまで維持される.

なお, NRPD を用いた点火, および火花放電の点火双方に対して, OH*, CH*, O, そして H の発光を撮影したところ, 全ての波長に対して発光輝度が観察された. このこ

とから, NRPD において電極間の領域から外部へと噴出される発光領域には, プラズマあるいはプラズマによって励起された活性化学種が多く含まれていると考えることができる. この活性化学種の発光は, 点火試験によって, 減衰する(火炎核へと成長しない噴流が現れる)場合もあれば, 複数の領域が発光輝度を維持し, やがて一つの火炎核として伝播することも観察された.

Jetting を定量的に評価するために, 高速度撮影によって得られた画像に対して Image J を用いた画像処理を施した[32]. 具体的には, 発光領域の領域検出および二値化を行い, その領域の発光輝度で重み付けした発光領域の重心位置の時間履歴を評価した[33]. 図 5 右側には, NRPD の点火の際に観察される特徴的な (a) 発光領域の取得画像および (b) 画像処理後の画像を示している. また, 図 5 には, 点火開始から 10 ms 間における発光輝度の重心位置の時間変化を示した. 二次元平面における粒子位置は発光領域の重心位置を示しており, 高さ方向には時間の経過を示している. なお, 図中における電極間中心は, $x = 15.7\text{mm}$, $y = 15.3\text{mm}$ に位置している. 図 5 中のカラーのプロットは NRPD によって形成される発光領域の重心位置, 灰色は通常の火花点火によって形成される発光領域の重心位置を示してい

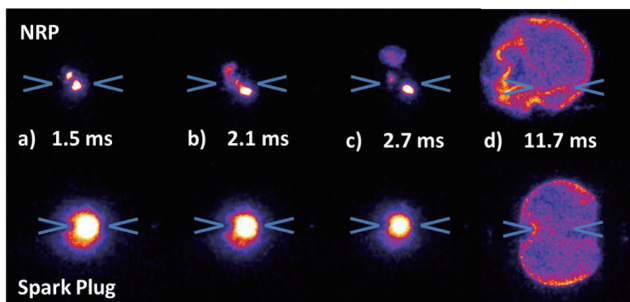


Fig. 4 Chemiluminescence images of a typical ignition initiated by NRP discharges (82 pulses, 30 kHz PRF, 2.73 ms total discharge duration, 65 mJ total energy) and by spark plug (3.5 ms discharge duration, 50 mJ total energy) [25].

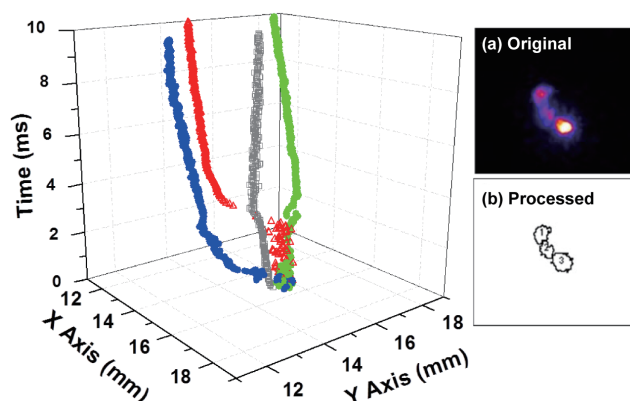


Fig. 5 (a) Chemiluminescence image, (b) processed image, and (c) displacement of ignition kernel and growing flame in the frame plane for some NRP discharges ignitions (colored dots) and spark plug ignition (grey dots).

る. なお, NRPD の点火試験によって形成される火炎核は, 試験ごとに振る舞いが異なるためプロットの色を変えて示している. 図 5 より, 火花放電による点火の場合は, 点火試験によらず粒子の位置が電極間から移動しないことがわかる. これは火炎が伝播しても, 火炎が容器中心から均質に伝播しており, 重心位置が変わらないことを示している.

一方で, NRPD を用いた点火では, 電極間から離れた位置に発光領域の重心位置が移動することがわかる. また, 点火試験毎にその様相が異なる. NRPD によって形成される発光領域の重心位置は, 電極に対して片側に偏るということではなく, さまざまな方向に噴出し, 本研究における点火試験に浮力の影響は認められない. ほぼ全ての解析結果から, 点火開始から 15 ms 後の火炎核は, 電極間から 4~6 mm の位置に分布しており, 過去に行われたシュリーレン像による高温領域の結果と整合する[28].

この発光領域の移動量から速度を求めることができる. この速度は, 高速度カメラの前後の撮影間隔と, 電極間中心からの移動距離より算出した. 電極間に形成される移動量の少ない発光領域の重心位置, および放電終了後の発光領域の重心位置の移動速度は, 平均 $4.3 \pm 2\text{ m/s}$ であり, この場における特徴的な速度として考えることができる. 放電期間中に Jetting として計測される発光領域の重心位置の移動速度は, $27 \pm 5\text{ m/s}$ であり, 特徴的な速度の 7 倍も高い値となった.

3.3. 火炎核成長に必要な時間に対する放電の繰返し周波数の影響

火炎核が成長する時間は, 高速度撮影における火炎核の面積の変化を評価することで得ることができる. ここで, 点火の方式によらず, 火炎核が電極から遠く離れた場合には, 放電の影響は大きくないことから, NRPD においても, 放電によって形成された火炎核が自律的に伝播するまでの期間にのみ火炎核の構造に影響を及ぼすと考えられる. そのため, 本研究においても火炎核近傍の火炎伝播のみを解析の対象とした. 火炎核の成長の解析に用いた画像の一例と解析の対象とした領域, および異なる放電の繰返し周波数の点火試験において得られる火炎核の成長を図 6 に示す. なお, 発光領域に対しては, 前節と同様に Image J における FIRE カラーの Lookup table を適用している. 解析対象領域の中心は電極間中心とし, 解析領域を $23.6\text{ mm} \times 23.6\text{ mm}$ (557 mm^2) とした. 火炎核の成長における火炎外縁は, ImageJ のアルゴリズムを用いて自動で算出し[32], 解析対象領域に対して発光領域が占める割合を算出した.

なお, 図中の占有割合の時間履歴における解析開始時(図 6 中左下)に, NRPD による発光領域による影響が現れているが, 火炎核の成長時に得られる輝度値の時間変化には大きな影響を与えず, 火炎核の成長は条件によって一定の傾きを持つことが示された. このことから, 図 6 に示した占有割合の時間変化を用いて, 火炎核が自律的な伝播に至るまでに要する時間を評価することが可能であると判断し

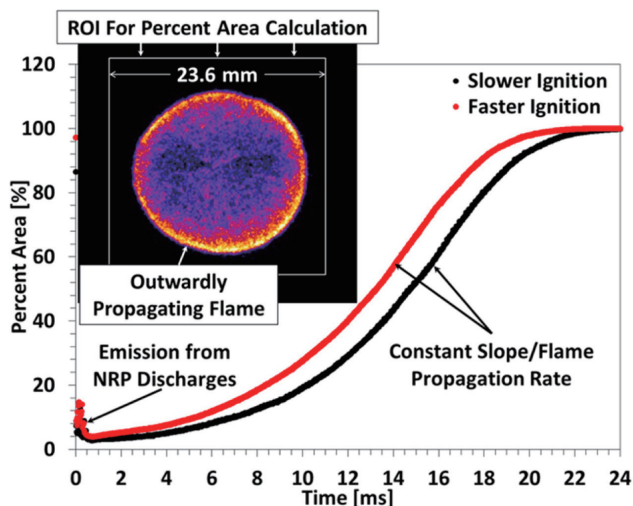


Fig. 6 Chemiluminescence image of outwardly propagating flame in the specified region of interest (ROI), and a plot of the percent area in the ROI versus time [24].

た. 火炎核の成長の速さを表現するための基準として, 本研究では解析領域の 50% (半径約 9.4 mm) の領域に火炎核到達するまでの時間 ($t_{50\%}$) を採用した. この解析領域および判定時間の設定は, Jetting による非球形の火炎伝播の影響および定容容器壁面の影響を極力排除することを目的としている.

電極間距離が 1.2 mm, 22 pulses の NRPD の点火試験において, 放電の繰返し周波数を 6 kHz から 90 kHz まで操作した際に得られる火炎核の成長に必要な時間の変化を図 7 に示す. 図 7 中には, 総放電エネルギー E_t を変えた 2 つの条件によって得られる結果が示されている. 青色のプロット, 破線で示した結果は, E_t が 19.9 ± 1.2 mJ の条件であり, 赤色のプロットおよび実線は, E_t が 27.3 ± 1.3 mJ の条件において得られる結果である. 図 7 より, 火炎核の成長に要する時間が, 放電の繰返し周波数に対して単調な傾向を持たないことが分かる. 総放電エネルギーによって異なるが, E_t が低い条件では, 60 kHz までの間に, E_t が高い場合には, 10 kHz から 30 kHz の間で, 火炎核の成長に必要な時間は急激に短縮される. 一方で, それ以上に放電の繰返し周波数が高くなると, 火炎核の成長に要する時間は増加の傾向に転じることがわかる. このことは, NRPD を用いた点火において, 点火に最適な放電の繰返し周波数が存在することを示している. NRPD を用いた点火に対して, 最適な繰返し周波数が存在することは, 静止混合気だけでなく, 乱流条件においても示されている[23].

E_t が 27.3 mJ の条件における放電の繰返し周波数が 30 kHz までの条件では, パルス間の相乗効果が働いていると考えられる. これは, 注目するパルス放電のひとつ前のパルス放電によって励起された活性化学種および温度上昇によって燃焼反応が促進される効果であると考えられており, 他の条件における実験結果としても表れている[21, 28]. また, パルス放電の繰返しは, O 原子の量を増加さ

せることが示されており, 反応の促進につながったと考えることができる[29, 30].

ここで, 放電の繰返し周波数が低い 6 kHz において, 単一のパルスエネルギーを大きくして, 総放電エネルギーを上昇させた条件 (図中赤色白抜き, $E_t = 32.2$ mJ) と赤色中実の実験結果を比較すると, 単一のパルス放電のエネルギーが低い条件であっても放電の繰返し周波数が高くなることで, パルス間の相乗効果により, 火炎核の成長に要する時間が短縮されることがわかる (例えば, $E_t = 27.3$ mJ の 15 kHz). さらに, 結果には示していないが, 放電の繰返し周波数を 2 kHz とした場合には, 総放電エネルギーを 40 mJ 近くまで上昇させたとしても点火には至らなかった. この結果から, NRPD において確実に点火を行うためには, 単一のパルス放電のエネルギーを上昇させるだけでは不足しており, パルス間の相乗効果を得る必要があることが示された.

ここまでの結果において, E_t が 27.3 mJ, 放電の繰返し周波数が 30 kHz を超える条件においては, さらなる相乗効果が得られることが期待された. しかしながら, 結果は単調なものとはならず, 図 7 に示した通り放電の繰返し周波数の上昇に伴って, 火炎核の成長に要する時間が増加した. この単調ではない変化は, 化学的效果と NRPD で誘起される流れ場の影響で説明することができる. ナノ秒放電では 20 ns の間に電極間の温度上昇があることが知られている[30]. この急激な温度上昇は衝撃波を誘起する[34]ことが知られており, 衝撃波と温度上昇によって再循環流が誘起され, 電極間に新しい混合気が入り込む[35, 36]. Castera et al. による 1 mm の電極間距離の条件における NRPD の三次元直接数値解析[37]によると, 未燃の混合気再循環流によって放電領域に入り込むための特性時間は 10 ~ 20 μ s である. この時間は, 周波数に変換すると 50 ~ 100 kHz となる.

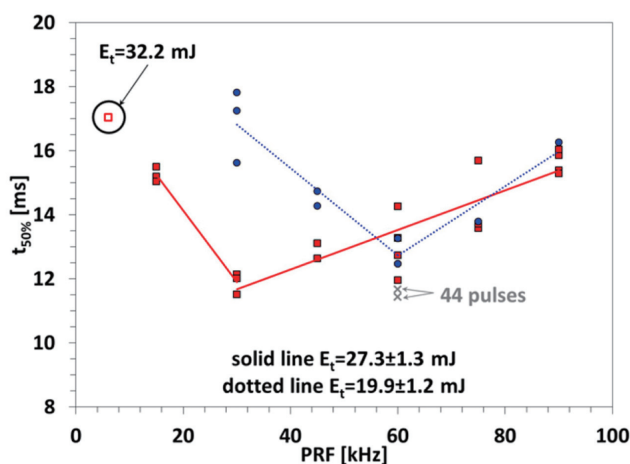


Fig. 7 $t_{50\%}$ versus PRF for 1.2 mm inter-electrode gap using 22 pulses between 6 and 90 kHz. The two gray symbols indicate cases with 44 pulses at 60 kHz [24].

放電の繰返し周波数が低い条件では、前のパルス放電によって励起された再循環流によって、後続のパルス放電が起こる前に、電極間に存在する混合気が完全に入れ替わることが考えられる。すなわち、単一の放電による点火と大きな相違が無くなる。ここで、本研究で対象とした NRPD では、電極間に存在するほぼ全ての酸素分子を分解することが可能である[38, 39]。放電によって生成された O ラジカルは、Jetting によって電極間の領域の外へと噴出され火炎核形成に寄与すると考えられる。再循環流によって新しい混合気が供給される周波数範囲では、周波数の上昇によってより多くの O ラジカルや他の活性化学種を噴出させることが可能となる。しかしながら、PRF が再循環流の特性時間を上回ると、電極間に存在する混合気はもはや新しい混合気ではなくなる。単一のパルスで酸素分子を十分に分解させることができるため、後続の放電は他の反応に対してエネルギーを加えることになり、燃焼反応に対して有効ではなくなる。結果として、放電の繰返し周波数が上昇すればするほど燃焼反応を活性化する効果が弱くなると考えられる。

興味深いことに、総放電エネルギーが異なる場合、傾向を維持したまま最小となる放電の繰返し周波数が、高い周波数へと移動する。単一のパルス放電のエネルギーが低い場合には、その場に存在するガスの温度上昇や活性化学種の噴出の影響が小さく、放電の繰返し周波数の効果が高い周波数において現れると考えられる。

また、いずれの総放電エネルギー条件においても、点火に至るまでの火炎核成長に要する時間が最小になる条件に達していることがわかる。このことから、放電回数が同じ場合には、同程度の着火遅れ時間の短縮が単一のパルスエネルギーが低く周波数が高い条件において達成できると考えることができる。

NRPD を用いた点火において、エネルギーがどのような時間に分配されるかが鍵となる項目であることが示されたことから、パルス数を増やした実験も行った。放電の繰返し周波数を 30 kHz として、総放電エネルギーは 27.3 mJ、電極間距離を 1.2 mm に統一して、放電周波数を 60 kHz, 44 pulses に変更した。この時単一のパルスエネルギーは半分として、総放電期間と総放電エネルギーを一定とした。結果は、図 7 に×印として表されている。同じ放電の繰返し周波数 (60 kHz) で 22 pulses と 44 pulses の $t_{50\%}$ で評価される火炎核の成長に必要な時間を比較すると、44 pulses において明らかに速い火炎核の成長が観察できる。しかしながら、この速度は、22 pulses の 30 kHz の条件において得られる最短の値と同程度である。したがって、時間に対するエネルギー供給率が同じであれば、同様の火炎核成長に要する時間を達成できることを示している。この結果は、点火においてエネルギーがいかに分配されるかが重要であることを強調する結果である。加えて、単一のパルスのエネルギーを低くした場合には、火炎核の成長に要する時間を最短とする周波数が高い方へシフトし、放電回数を増やす

ことが必要になると考えられる。

3.4. 電極間距離の影響

電極間距離は放電によるエネルギー供給が限界火炎核に対してどのように与えられるかを検討する上で重要である。本稿では、1.2 mm および 3.0 mm の電極間距離に対して、 E_t をおよそ 20 mJ に統一した試験を行った。それぞれの電極間距離におけるエネルギーは、3.0 mm の条件で $E_t = 20.6 \pm 2.1$ mJ, 1.2 mm の条件で、 $E_t = 19.9 \pm 1.2$ mJ である。得られた結果を図 8 に示す。前述した電極間距離 1.2 mm の条件と同様に、電極間距離が 3.0 mm の条件においても同様に火炎核が成長するのに要する時間は周波数の増加に伴って減少する。しかしながら、最小値を取る放電の繰返し周波数は 1.2 mm の条件と比較して低く、15 kHz となった。また、放電の繰返し周波数の上昇に対する火炎核成長に必要な時間の増加はわずかであり、60 kHz までに 6% の上昇に留まった。また、放電の繰返し周波数が最小値となる周波数はシフトしているものの、火炎核の成長に要する最小の時間はおよそ 13 ms であった。

前述の放電周波数に対する影響と同様に、電極間距離が増加した場合の単調ではない傾向について検討する。電極間に誘起される再循環流は電極間距離が増加することで、電極間中心に流入するまでに有する時間が増加する。その結果、特徴的な周波数が低い方向にシフトしたと考えることができる。過去の研究では、電極間距離を倍にするとおよそ 30% 再循環流の特性周波数が下がることが示されている[35]。一方で、電極間距離が大きい条件では、換算電解の値が低下するため、燃焼反応を促進するための活性化学種の生成が弱まることも想定される。結果として、単一のパルスエネルギーが同程度であれば、電極間距離の増大によって、温度上昇による膨張や Jetting の程度が低くなると考えられる。したがって、電極間距離が広がると低い周波数において最小値を示すことになる。

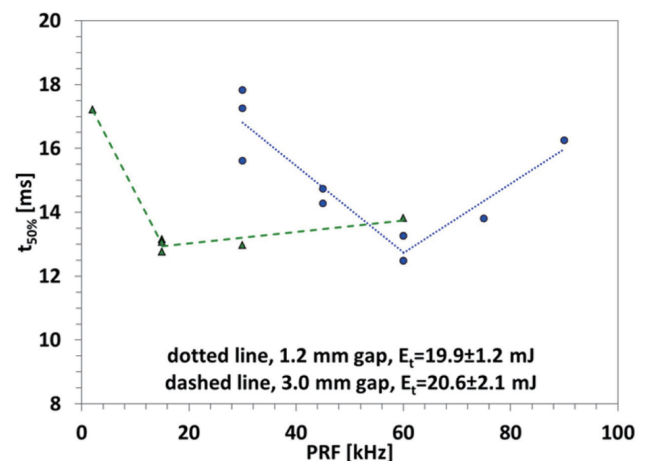
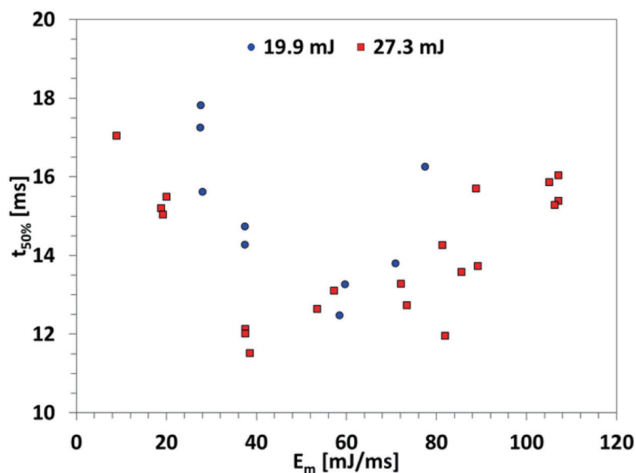


Fig. 8 $t_{50\%}$ versus PRF for 1.2 mm and 3.0 mm inter-electrode gap using 22 pulses between 2 and 90 kHz [24].

Fig. 9 $t_{50\%}$ versus E_m for inter-electrode gap of 1.2 mm [24].

3.5. 平均エネルギー供給量

放電の繰返し周波数による火炎核形成に必要な時間の最小値に与える平均エネルギー E_m について考察する。時間平均のエネルギー供給は以下の式で定義する。

$$E_m = (E_t \times PRF) / N_p \quad (3)$$

放電の回数を固定して繰返し周波数を増加させると、総放電期間は短縮する。そのため、単位時間あたりに供給されるエネルギー量は増加する。図7に示した結果を E_m に対して示すと図9となり、総放電エネルギー E_t が異なる条件であっても、火炎核の成長に要する時間は E_m が 40 ~ 60 mJ/ms の条件において最小値を取る。図9に現れるばらつきは、前述した Jetting による試験ごとに異なる火炎核の形状によると考えられる。

電極間距離が 3.0 mm の条件に対しても同様の解析を行った結果、火炎核の成長が最短となる E_m の値は低く、およそ 13 mJ/ms となった。この値は、電極間距離が 1.2 mm の条件と比較すると 5 倍も小さい。また、興味深いことに電極間距離が広い場合には、火炎核の形成に要する時間は、ある一定以上のエネルギーを供給した場合に、ほぼ横ばいとなり、1.2 mm に表れたような適した時間平均エネルギーは表れない。

4. 結言

本報では、NRPD を用いた点火に対して著者らが行った結果を紹介した。繰返し放電は、自由度が高いため新しい点火手法として注目を集めている。本研究で対象とした NRPD を用いた点火の場合は、電極間から噴出する活性化学種が確認され、噴出によって初期の火炎核が不均質になることが示された。また、繰返し放電には放電の繰返し周波数と、短パルス放電による Jetting によって励起される再循環流の特性時間との相乗効果によって火炎の伝播時間が

短縮することが明らかになった。また、Jetting は数 10 m/s 程度であり、点火電極付近に形成される流れ場に対しても影響を及ぼすことが考えられる。

また、放電の繰返し周波数に対する点火試験の結果からは、火炎核の成長に要する時間を最小とする放電周波数が現れることが示された。この周波数は点火に適した周波数であると考えられる。また、この放電の繰返し周波数は、電極間距離や単一のパルスの放電エネルギーに依存して変化するが、火炎核の成長に必要な時間の最小値は大きく変化しないことが示された。

本研究における試験環境は静止雰囲気であるが、放電によって励起される化学種と流れ場の状況で決定される最適な放電の繰返し周波数が存在することが示されており、流れ場、化学反応速度と放電の繰返し周波数が与える影響について検証していく必要があると考えられる。

References

- Ju, Y., Sun, W., *Prog. Energy Combust. Sci.* 48: 21-83 (2015).
- Starikovskiy, A., Aleksandrov, N., *Prog. Energy Combust. Sci.* 39: 61-110 (2013).
- Anikin, N.B., Mintoussov, I.E., Pancheshnyi, S.V., Roupasov, D.V., Sych, V.E., Starikovskii, A., *41st AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV AIAA-2003-1053:* (2003).
- Criner, K., Cessou, A., Louiche, J., Vervisch, P., *Combust. Flame* 144: 422-425 (2006).
- Belhi, M., Domingo, P., Vervisch, P., *Combust. Flame* 157: 2286-2297 (2010).
- Vanhove, G., Boumehdi, M.-A., Shcherbanev, S., Fenard, Y., Desgroux, P., Starikovskaia, S. M., *Proc. Combust. Inst.* 36: 4137-4143 (2017).
- Shcherbanev, S. A., Ding, Ch, Starikovskaya, S. M., Popov, N. A., *Plasma Sources Sci. Technol.* 28: 065013 (2019).
- Nakaya, S., Yamaki, Y., Ren, F., Tsue, M., *Combust. Flame* 234: 11650 (2021).
- Ikeda, Y., Moon, A., Kaneko, M., *Appl. Opt.* 49: C95-C100 (2010).
- Wolk, B., De Filippo, A., Chen, J.Y., Dibble, R., Nishiyama, A., Ikeda, Y., *Combust. Flame* 160: 1225-1234 (2013).
- Fridman, A., Gutsol, A., Gangoli, S., Ju, Y., Ombrello, T., *J. Propul. Power*, 24: 1216 (2008).
- Wang, F., Liu, J.B., Sinibaldi, J., Brophy, C., Kuthi, A., Jiang, C., Ronney, P., Gundersen, M.A., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33: 844-849 (2005).
- Bellenoue, M., Labuda, S., Ruttun, B., Sotton, J., *Combust. Sci. Technol.* 179: 477-496 (2007).
- Hayashi, J., Nakatsuka, N., Morimoto, I., Akamatsu, F., *Proc. SPIE 10328, 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, 1032813 (2017).

15. Hayashi, J., Chen, L., Akamatsu, F., Nishiyama, A., Moon, A., Ikeda, Y., in: *Ignition Systems for Gasoline Engines*, M. Günther and M. Sens (Eds.), Springer International Publishing, 246-253 (2016).
16. Dumitrache, C., Baumgardner, M., Boissiere, A., Maria, A. Roucis, J., Marchese, A. J., Yalin, A., *Proc. Combust. Inst.* 36: 3431-3439 (2017).
17. Nakaya, S., Iseki, S., Gu, X., Kobayashi, Y., Tsue, M., *Proc. Combust. Inst.* 36: 3441-3449 (2017).
18. Sung, Y., Charalampous, G., Hardalupas, Y., Choi, G., *Proc. Combust. Inst.* 36: 1653-1660, (2017).
19. Kim, W., Do, H., Mungal, M.G., Cappelli, M.A., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34: 2545-2551 (2006).
20. Pancheshnyi, S., Lacoste, D.A., Bourdon, A., Laux, C.O., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34: 2478-2487 (2006).
21. Pilla, G., Galley, D., Lacoste, D.A., Lacas, F., Veynante, D., Laux, C.O., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34: 2471-2477 (2006).
22. Rouso, A., Yang, S., Lefkowitz, J., Sun, W., Ju, Y., *Proc. Combust. Inst.* 36: 4105-4112 (2017).
23. Shy, S.S., Chen, Y.R., Lin, B-L., Maznoy, A., *Combust. Flame* 231: 11506 (2021).
24. Lovascio, S., Ombrello, T., Hayashi, J., Stepanyan, S., Stancu, G.D., Laux, C.O., *Proc. Combust. Inst.* 36: 4079-4086 (2017).
25. Lovascio, S., Hayashi, J., Stepanyan, S., Xu, D.A., Stancu, G.D., Laux, C.O., *Proc. Combust. Inst.*, 37: 5553-5560 (2019).
26. Nishiyama, A., Moon, A., Ikeda, Y., Hayashi, J., Akamatsu, F., *Opt. Exp.* 21-S6: A1094-1101 (2013).
27. Takahashi, E., Sakamoto, S., Imamura, O., Ohkuma, Y., Yamasaki, Y., Furutani, H., Akihama, K., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 52: 485501 (2019).
28. Xu, D.A., Lacoste D.A., Laux, C.O., *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 36: 309-327 (2015).
29. Lefkowitz, J.K., Guo, P., Ombrello, T., Won, S.H., Stevens, C.A., Hoke, J.L., Schauer, F., Ju Y., *Combust. Flame* 162: 2496-2507 (2015).
30. Rusterholtz, D.L., Lacoste, D.A., Stancu, G.D., Pai, D.Z., Laux, C.O., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46: 464010 (2013).
31. Pai, D.Z., Lacoste, D.A., Laux, C.O., *Plasma Sources Sci. Tech.* 19 : 065015 (2010).
32. Rasband, W. S., ImageJ, Software Package ver. 1.48j, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, MD, Dec. 2013, <http://imagej.nih.gov/ij/> [retrieved 2015]
33. Utrecht University, "Object representation and analysis", www.cs.uu.nl/docs/vakken/ibv/reader/chapter8.pdf
34. Xu, D.A., Lacoste, D.A., Rusterholtz, D.L., Elias, P.Q., Stancu, G.D., Laux, C.O., *Appl. Phys. Lett.* 99: 121502 (2011).
35. Thiele, M., Warnatz, J., Maas, U., *Combust. Theo. Modelling* 4: 413-434 (2000).
36. Thiele, M., Selle, S., Riedel, U., Warnatz, J., Maas, U., *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 1177-1185.
37. Castela, M., Stepanyan, S., Fiorina, B., Coussement, A., Gicquel, O., Darabiha, N., Laux, C.O., *Proc. Combust. Inst.* 36: 4095-4103 (2017).
38. Stancu, G.D., Kaddouri, F., Lacoste, D.A., Laux, C.O., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43: 124002 (2010).
39. Popov, N., *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, AIAA-2015-1391.