

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04309

研究課題名（和文）繰り返し放電が形成するプラズマから混合気へのエネルギー移動による火炎核形成

研究課題名（英文）Flame kernel formation by energy deposition from the plasmas of repetitively pulsed discharges

研究代表者

林 潤（Hayashi, Jun）

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：70550151

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：繰り返し放電による燃料希薄混合気に対する点火に対する実験および解析を行った。その結果、繰り返し放電によって火炎核形状が空間的に不均一となり、点火に至るまでの時間が短縮する傾向が現れることが明らかになった。また、放電ごとに十分なエネルギーを有する繰り返し放電の場合は、周波数が低い条件において、繰り返し放電が継続している間、火炎核の変形が持続し、結果として火炎核の成長速度が上昇することが示された。プラズマ反応・燃焼反応モデルの二段階反応を用いた火炎核形成の数値解析を行い、着火遅れ時間が最短となる放電周波数が存在することが示され、これまでに得られている実験結果と整合性のある解析結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

繰り返し放電によって形成される火炎核に対する流動および活性化学種の影響に対する実験、および解析を行っており、繰り返し放電による流動が火炎核を変形させ、火炎核の成長速度が増大することを示している。また、プラズマによって活性化した化学種が酸化反応を促進することによって、熱着火へと至るまでの時間が短縮される繰り返し放電の周波数が存在することを示した。これらの結果は、プラズマを用いた火炎核形成に対して、効果的なエネルギー供給時間が存在することを示している。また、少ないエネルギーで効率よく反応始動を行うための方法に関する知見を提供しており、新しい点火手法の技術開発に対する意義を有する。

研究成果の概要（英文）：Experiments and numerical simulation of the flame kernel formation in a fuel-lean premixed mixture using repetitively pulsed discharges have been conducted. Results have confirmed that the flow induced by repetitively pulsed discharges deform flame kernel. The time for flame kernel development becomes short at the specific repetitive frequency of pulses. Additionally, the deformation of the flame kernel is continued during the repetition period, even under low-frequency conditions when each discharge has sufficient high energy, resulting in the time for flame kernel growth becoming shortened. A numerical analysis of ignition using a two-step model of plasma reaction and combustion reaction was developed. Numerical results show that there exists an appropriate discharge frequency with the shortest ignition delay time. These results are consistent with the experimental results obtained.

研究分野：燃焼工学

キーワード：火炎核形成 プラズマ支援 繰り返し放電

1. 研究開始当初の背景

燃焼反応を用いたエネルギー変換は、現在でも国内のエネルギー供給の多くの部分を担っている。そのため、二酸化炭素排出に対する量的な影響が大きく、高い熱効率をもちつつ燃料の使用効率を向上させて二酸化炭素の排出量を低減することが求められている。近年では、新エネルギー（例えばアンモニアなどの難燃性燃料）の利用を目指した戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）-エネルギーキャリア・直接燃焼^[1]や、内燃機関の熱効率向上を目指した SIP-革新的燃焼技術^[2]が行われてきた。これらの研究開発では、難燃性燃料の利用、燃料希薄条件、二酸化炭素等による希釈条件、強い乱流条件などの“燃えにくい環境”において、確実に燃焼反応を維持することで、目標が達成できる可能性が示されている。ここで、初期火炎核の形成（点火）は、安定した燃焼現象の成否に大きく影響する。燃えにくい環境において、確実に初期火炎形成を行うためには、1) 燃焼反応を維持するための持続的エネルギー供給、および2) 火炎形成のために必要な最小体積に対するエネルギー供給が必要であり、初期火炎核形成に必要な時間的・空間的エネルギーの供給を制御した強点火手法が求められている。

このような背景から、レーザーやナノ秒放電を用いるプラズマ支援点火は、時間・空間的なエネルギー供給条件の制御性の高さから、新たな点火手法として注目を集めてきた。近年では、エネルギーの供給を複数回に分けて行う繰返し放電による流動に起因した初期火炎変形（Wrinkling^[3,4]）や、燃焼反応を示す領域が放電領域から層流燃焼速度以上の速度で噴出する現象（Jetting motion：図 1^[5]）が発見されているが、静止混合気中での現象観察にとどまっており、火炎核変形や噴出現象の原因および時間的・空間的な影響範囲について詳細は明らかになっていないのが現状である。

2. 研究の目的

初期火炎形成が困難な条件において確実に初期火炎核を形成するためには、安定したエネルギー供給を行う必要がある。また、熱効率の高い燃焼機器の運用のためには、物理現象にもとづく新たな燃焼制御を行う必要がある。新しい点火制御のためには、プラズマから混合気へのエネルギー移動現象を明らかにする必要がある。これまでの実験的な研究結果から、繰返し放電によるプラズマを用いた点火では、反応による発熱と熱の拡散によって決定される最小火炎核とは原因を違える点火が起こることが示されている^{[3],[4]}。これは、プラズマから燃焼を継続するために必要なエネルギーが、流動あるいは活性化学種、温度として混合気へ供給されたことに起因する。本研究では、プラズマから混合気へのエネルギー移動現象を理解するために、エネルギー移動現象を、反応に要する時間に対する影響と空間的な流動に対する影響に分離し、1)『プラズマから混合気へのエネルギー移動が燃焼反応に影響を及ぼす時間』2)『プラズマにより誘起される流動が火炎核形成に与える影響範囲』を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、大きく2項目を実施した。第1に、繰返し放電を用いた火炎核形成の様子を観察する実験、第2にプラズマから混合気へのエネルギー移動を表現するモデルを用いた数値解析である。それぞれの手法の概要を以下に示す。

(1)定容容器に封入された混合気に対する繰返し放電を用いた点火試験

可視化用の窓を備えた定容容器（右図）における混合気の点火過程を対象として、繰返し放電が火炎核成長速度に与える影響に対する評価を行った。放電は定容容器の中心に設置した一对の電極間において行われ、繰返し放電には、放電周波数が高く、放電エネルギーが小さな放電様式として誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharge; DBD）、繰返し周波数は低い放電ごとのエネルギーが大きなサブマイクロ秒放電（sub-microsec Repetitively Pulsed Discharges; Sub-MRPD）を選択した。本研究では、放電パラメータのうち特に、繰返し放電の周波数をパラメータとして、火炎核が形成される確率、および火炎核形状に対する影響、ならびに火炎核の成長時間を高速度撮影によって評価した。

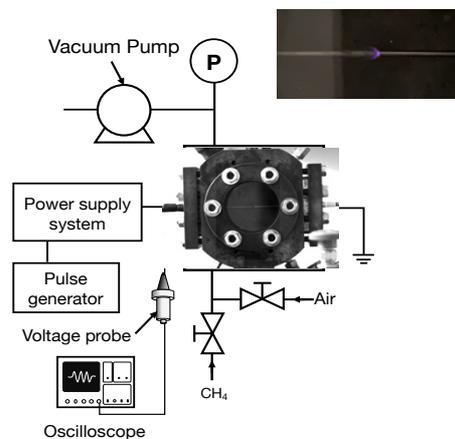


図1：実験装置の概要、放電および放電電極の直接写真(右上)

(2) プラズマ反応および燃焼反応モデルの二段階反応を用いた繰り返し放電による火炎核形成の数値解析

本研究では、プラズマ反応と燃焼反応を逐次的に扱う 0 次元反応モデルを用いた数値解析を行った。このモデルでは、一次反応として、電子と分子の反応をモデル化し、二次反応では、一次反応によって生成された活性化学種を含む化学種を初期条件として混合気の燃焼反応取り扱う (図 2)。また、燃焼反応時間の変化を評価することが可能となる。一次反応と二次反応をプラズマ反応と燃焼反応の時間スケールの相違を利用して、燃焼反応を複数段に分割することで、繰り返し供給されるプラズマを表現した (図 3)。

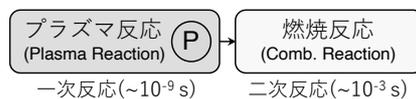


図 2: プラズマ反応モデル

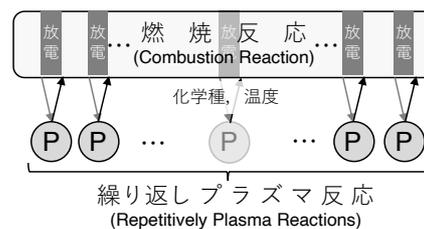


図 3: 繰り返しプラズマ反応モデル

4. 研究成果

(1) 定容容器に封入された混合気に対する繰り返し放電を用いた点火試験

本研究では非平衡プラズマの一つである DBD の繰り返し放電の希薄混合気に対する点火特性が放電周波数により受ける影響を実験的な研究を行った。その結果、放電周波数が 30 kHz, および 40 kHz の条件と比較して周波数が低い 20 kHz の条件では、点火を成功させるために多くのエネルギーを必要とすることが示された。また、DBD を用いた点火について、放電によって放出されるエネルギーの評価方法を策定し、異なる放電周波数での放電の違いについて評価した結果、DBD の放電周波数が増大すると、誘電損失や電子衝突により電極近傍の気体温度が上昇することで、誘電率が変化し、放電 1 周期あたりの放出エネルギーが減少する傾向が示された。また、化学量論の予混合気を点火するために必要な最小エネルギーは、放電周波数の上昇に反比例して小さくなる傾向が示された。この際、放電周波数に関わらず繰り返し放電によって形成される初期火炎核の形状は空間的に不均一となることが示された。また、単一の火炎核ではなく、複数の火炎核が同時に成長し、互いに干渉する点火形態も観察された。

放電形態が異なる Sub-M RPD を用いた点火においても、同様の火炎核の変形が現れる。一方で、Sub-M RPD を点火源とした放電ごとに十分なエネルギーを有する場合は、周波数が低い条件においても繰り返し放電が持続している時間は、火炎核を変形させる効果が持続する傾向が示された。一方で、エネルギーの供給量と火炎核の変形量、及びその持続時間については、更なる研究が必要である^[6]。

(2) プラズマ反応および燃焼反応モデルの二段階反応を用いた繰り返し放電による火炎核形成の数値解析

放電周波数の異なるナノ秒繰り返しパルス放電を模擬した 0 次元の反応解析を行い、放電周波数が着火遅れ時間に与える影響を検討した。その結果、圧力が高い初期条件において、O 原子がプラズマによって生成されたとして混合気に投入された場合、O 原子の消費と H₂O₂ ループの二段階の過程を経由して熱着火に至ることが示された。O 原子の合計投入量を一定として、放電回数を変化させた際に得られる熱着火に至るまでの時間(着火遅れ時間)を評価したところ、周波数によって着火遅れ時間が最短となる放電周波数が存在することが示され、これまでに得られている実験結果と整合性のある結果が得られた。

放電回数が多く、放電周波数の大きな条件では、放電の全期間が長くなったことにより、混合気において高温酸化反応が支配的となる時刻に O 原子が混合気に供給されることで、結果として着火遅れ時間の増大された。対して、放電回数が少なく放電周波数の高い条件においては、H₂O₂ を介した反応の進行に必要な CH₂O との反応に代わって、CH₃O との反応による O 原子の消費が起こることで、着火遅れ時間が増大する。また、放電開始前の CH₂O の濃度は、放電の時間間隔と CH₃O の反応ループが終了する時間との競合によって決定されることが示された。

ただし、本研究においては反応の進行において重要となるナノ秒繰り返し放電による温度上昇について、温度上昇を一定として扱っており、ナノ秒繰り返し放電による温度上昇と反応の変化については、実験値を用いた検証を含めて更なる検討が必要である^[7]。

5. 参考文献

- [1] SIP プログラム エネルギーキャリア <http://www.jst.go.jp/sip/k04.html>
- [2] SIP プログラム 革新的燃焼技術 <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>
- [3] S. Lovascio, T. Ombrello, J. Hayashi, et al., *Proc. Combust. Inst.*, 36-3, (2017), 4079-4086. (DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.065).
- [4] S. Stepanyan, J. Hayashi, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26(2017), 04LT01.
- [5] S. Lovascio, J. Hayashi, et al., *Proc. Combust. Inst.*, 37(2018), 10.1016/j.proci.2018.06.029.
- [6] Y. Akiyama, S. Agrawal, J. Hayashi, N. Horibe, and H. Kawanabe, TILA-LIC2023, LIC7-2, (2023.4.20).
- [7] 汐除 明, 林 潤, 川那辺 洋, 日本燃焼学会誌, (2022), 22-00068.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 汐除 明、林 潤、川那辺 洋	4. 巻 64
2. 論文標題 活性化学種の繰り返し供給における着火遅れ時間の周波数依存性に関する反応解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 288-294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20619/jcombsj.2201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田村紘太郎, 汐除 明, 井上貴裕, 林 潤, 川那辺 洋
2. 発表標題 繰り返しパルス放電によるメタン・空気予混合気中の初期火炎核形成過程
3. 学会等名 第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上弘貴, 田村紘太郎, 川那辺 洋, 林 潤
2. 発表標題 ナノ秒繰り返し放電によるメタン・空気予混合気における火炎核形成
3. 学会等名 (公社)自動車技術会関西支部 学生自動車研究会 第38回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村紘太郎, 汐除 明, 井上貴裕, 林 潤, 川那辺 洋
2. 発表標題 周波数を変化させた際の誘電体バリア放電のメタン・空気希薄予混合気における点火特性
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 汐除 明, 林 潤, 川那辺 洋
2. 発表標題 活性化学種の繰り返し供給による着火遅れ時間の周波数依存性に対する反応解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村紘太郎, 汐除 明, 井上貴裕, 林 潤, 川那辺 洋
2. 発表標題 繰り返し放電によるメタン・空気希薄予混合気の点火特性
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Akiyama, Saurabh Agrawal, Jun Hayashi, Naoto Horibe, Hiroshi Kawanabe
2. 発表標題 Flame kernel development induced by pulse train of sub-microsecond discharges in methane/air premixed mixture
3. 学会等名 Tiny-Integrated Laser and Laser Ignition Conference 2023 (TILA-LIC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	川那辺 洋 (Kawanabe Hiroshi) (60273471)	京都大学・エネルギー科学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------