

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	Saurabh Agrawal (サウラブ アグラワル)
論文題目	Flame kernel formation and its early development by repetitively pulsed plasma discharges (繰り返しパルス放電による火炎核形成とその初期成長)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、希薄あるいは高乱流条件の燃料-空気予混合気における燃焼反応を安定的にスタートさせる技術として注目を集めている誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharges; DBD）およびナノ秒繰り返し放電(Nano-second Repetitively Pulsed Discharges; NRPD)を用いたプラズマ支援点火に関する実験的研究によって得られた結果をまとめたものである。繰り返しパルス放電の放電条件が火炎核の形成、および成長過程に与える影響を検討するとともに、安定した火炎核の形成メカニズムを明らかにしている。 まず第1章では、各種エネルギーシステムにおける温暖化ガス低減にむけて、希薄条件や反応性の低い燃料を用いた際の安定点火が重要な課題であることを示し、現在まで検討されている各種点火方法についての調査を行うとともに、DBD や NRPD 方式が点火プラグの耐久性等を考慮した際に有利であることを明らかにしている。一方、これらの安定点火条件については体系的な知見が十分には得られていないことを指摘している。 第2章では、DBD を対象として定容容器に封入された静止混合気に対する点火試験、および急速圧縮膨張機(RCEM)を用いた高温・高圧条件下における点火試験を実施して安定点火条件を調べるとともに、高速度可視化技術を用いることで吸気圧力や当量比による点火過程の変化を検討し、圧力の上昇に伴い放電形態がストリーマ状からフィラメント状へと遷移することを明らかにした。 第3章では、前章につづいて RCEM を用いた DBD 放電の可視化計測により、放電周波数が、放電形態、火炎核形成、成長過程に与える影響について考察を加えている。得られた代表的な知見として、高圧条件においては、前述のフィラメント状の放電によって局所的な高温を得ることで火炎核が安定して形成され、希薄混合気に対する点火が成立することを示した。また、定容容器における放電周波数が異なる DBD を用いた点火試験から、放電周波数の上昇によって生じる放電経路のメモリー効果により、安定した火炎核形成につながることを示した。 さらに第4章では DBD 放電の挙動および生成されたプラズマ構造が点火に与える影響を明らかにしている。正面および側面からの同時撮影により、DBD イグナイタは広範囲の圧力および温度条件下において、一貫して複数の放電経路を生成することが示された。放電パターンは圧力が上昇するにつれて複数の放電経路がまとまるが、単一の放電経路へと収束することはない。このことは、DBD 構成がサブミリ秒のタイムスケールで空間的に異なる複数の部位にエネルギーを投入するという、多点点火または準体積点火の要件を本質的に備えていることを裏付けていることを示した。			

第5章では、NRPD による初期火炎核の形成過程について、シュリーレン法と自発光の同時イメージングを用い、水素、メタンおよびプロパンの希薄混合気において点火試験を実施し、パルス繰返し周波数(PRF)の増加に伴う化学反応性の向上、噴流（ジェッティング）運動により誘起される流体構造的効果に起因すると考えられる火炎伝播の加速が点火過程における反応推進効果であることを示した。一方、NRPD によって誘起される流動によって、初期火炎核の一部が消炎してしまう局所消炎現象が起こることを示した。この現象は、特にルイス数が1 より大きい混合気において顕著であり、このような局所消炎現象を防ぐためには、PRF を十分に高く設定し、火炎核を自立伝播させる必要があることを示した。

第6章は得られた結果をまとめるとともに、希薄条件あるいは反応性の低い燃料の予混合気において安定的に点火する手法を示した。

以上、本研究では燃料希薄、反応性の低い燃料あるいは高乱流条件において安定した火炎核形成を達成するために重要な知見が得られ、今後の各種燃焼装置の効率向上と安定的な運転を同時に実現する手法を開発する上で重要な知見を提供している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、希薄あるいは高乱流条件の燃料-空気予混合気における燃焼反応を安定的にスタートさせる誘電体バリア放電(DBD)およびナノ秒繰り返し放電(NRPD)を用いた点火に関する実験的研究を実施し、放電条件が火炎核の形成および成長過程に与える影響を調べるとともに、安定した火炎核の形成メカニズムを明らかにしたものである。まず、DBDを対象として定容容器および急速圧縮膨張機を用いた点火試験を実施して安定点火条件を調べた。高速度可視化により圧力の上昇に伴い放電形態がストリーマ状からフィラメント状へと遷移することを明らかにするとともに、高圧条件においては、フィラメント状の放電によって局所的な高温を得ることで火炎核が安定して形成されることを示した。また、放電周波数の上昇によって生じる放電経路のメモリー効果が安定した火炎核形成につながることを示した。この際、複数の放電経路が生成されて圧力上昇に伴ってそこへ集中する傾向を示すが、単一の経路に収束することはない。このことは、サブミリ秒のタイムスケールで空間的に異なる複数の領域にエネルギーを投入できるという、多点点火または準体積点火の要件を本質的に備えていることを示した。

さらに、NRPD 点火による初期火炎核の形成過程について、水素、メタンおよびプロパンの希薄混合気を対象としてシュリーレン法と自発光の同時可視化を実施した。パルス繰り返し周波数(PRF)の上昇に伴い、放電に誘起される流動により燃焼が促進されることを示した。一方、特にレイス数が 1 より大きい混合気においては誘起される流動によって、初期火炎核の一部が局所的に消滅することを示した。このような局所消滅を防ぐためには、PRFを十分に高く設定し、断片化した火炎核が統合された自立火炎核へと発達できるようにする必要があることを示した。

以上、本研究では燃料希薄、反応性の低い燃料あるいは高乱流条件において安定した火炎核形成を達成するために重要な知見が得られ、今後の各種燃焼装置の効率向上と安定的な運転を同時に実現する手法を開発する上で重要な知見を提供した。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年2月17日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降