

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 13 日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860013

研究課題名（和文） 低温プラズマを利用した活性化学種生成による着火制御

研究課題名（英文） Improvement in ignitability via production of active species using low temperature plasma

研究代表者

窪山 達也 (KUBOYAMA TATSUYA)

千葉大学・大学院工学研究科・特任助教

研究者番号：80578831

研究成果の概要（和文）：放電パターンが火炎核生成に与える影響を調べるため、3方向からの可視化が可能な定容燃焼容器を試作し、放電の直接写真と初期火炎のシュリーレン写真の同時撮影を行える計測系を構築した。また、小型の IES 式パルス電源を利用した低温プラズマ放電点火システムを単気筒試験機関に適用し、排気再循環による希釈燃焼時の燃焼安定性について従来の点火システムとの比較を行った。これらの結果、低温プラズマ繰り返し放電点火は、従来の点火システムと比較して、排気再循環による希釈限界が 21%から 25%へと拡大できること、低温プラズマ繰り返し放電点火は従来の点火システムと比較して、燃焼速度などの部分燃焼限界に与える影響は少ないが、初期火炎核形成に関わる点火限界に強く影響を与えることがわかった。

研究成果の概要（英文）：To investigate the effect of the discharge pulse pattern on the initial flame kernel growth, an optically accessible constant volume chamber was designed. Using the constant volume chamber, direct photography and schlieren photography were carried out. Also, a newly developed small-sized IES (inductive energy storage) circuit with a semiconductor switch was employed to improve inflammability of a gasoline engine with EGR gas dilution, and a spark discharge pulse pattern was optimized for a practical usage. As a result the diluted limit with EGR gas was extended from 21% to 25% in EGR ratio at IMEP 630kPa by using the repetitive pulse discharge ignition system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：低温プラズマ，点火，着火，内燃機関，希薄燃焼

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全のため、二酸化炭素排出量の大幅な削減が求められている。二酸化炭素排出量の多くは、運輸、民生部門において広く利用される各種熱エネルギー変換機器から排出されており、熱エネルギー変換機器からの排出二酸化炭素量を大幅に低減する必要がある。近年、高効率、有害成分の排出量低減を両立する燃焼技術として希薄燃焼や希積燃焼が提案されている。予混合気を希薄化すれば燃焼温度が低下し、窒素酸化物生成が抑制され、熱損失低減と比熱比の増加によって熱効率が向上する。同様に既燃ガス等を利用して混合気を希積すれば、燃焼温度が下がり窒素酸化物生成が抑制され、熱損失が低減される。また、希積率を上げても当量比を一定に保つことができ、当量比を1（量論混合比）で燃焼すれば、三元触媒を利用した排ガス浄化が可能となり、排気を都市部の空気以上に清浄化したうえで、高い熱効率を実現できる利点がある。しかし、高度な希積化は空気量の減少を招き、過給する必要がある。過給すれば点火時の雰囲気圧力が高圧化し、予混合気の着火が困難になり、着火安定性が低下する。最近の結果によれば、今後の最重要課題は、高度に希積された混合気に対しても確実に着火が実現できる点火技術の開発である。一方、従来の熱エネルギー変換機には、排気後処理触媒保護の目的などのために成分が厳密に管理された燃料が使われてきたが、エネルギー資源の有効利用の観点から、石油系燃料の他にも水素や、セルロース等から合成されるバイオマス燃料などの代替燃料が着目され、燃料の多様化が急速に進んでいる。燃料種が変わればその着火性が変化するが、着火時期は熱効率や排出物濃度に強く影響を与えるため、粗悪な燃料を含めて、多様な燃料に対応可能で、適切に着火時期を制御する技術が求められている。

以上のように、有害排出物生成を抑制した上で熱効率を高め、二酸化炭素排出量を削減する最新の燃焼技術に対応するため、希薄化、希積化された着火性の低い混合気や、着火性の異なる多様な燃料に対して、適切な着火を実現する着火制御技術の重要性が高まっている。

2. 研究の目的

(1) 低温プラズマは電子温度のみが高い熱的に非平衡な状態であり、それゆえ電極への熱損失が低減される。また、複数の放電経路が形成され、体積的な着火が可能である。さらに消費エネルギーが小さいため、電極寿命の向上が期待される。高速パルスによるアーク放電、およびストリーマ放電を用いた定容容器内での火炎核形成過程の可視化において、高速パルスによる点火は市販の自動車用点

火回路に比べ初期火炎核が大きく成長することが示されている。また、この初期火炎核は市販の自動車用点火回路において電極に沿って成長しているのに対し、高速パルスによる点火は電極から離れた部分に成長する。これにより電極への熱損失が低減される。本研究では、低温プラズマ放電点火の放電パターンが初期火炎核の生成過程に与える影響を明らかにすることを目的とし、定容容器を用いて放電過程の直接撮影と初期火炎生成過程のシュリーレン撮影を行った。

(2) また、新しい高効率燃焼技術として知られる EGR ガス希積燃焼に、低温プラズマ放電点火を適用し、高度に希積した燃焼場においても安定した着火を得ることを目的とし、IES (Inductive Energy Storage : 誘導エネルギー蓄積) 式パルス電源を用いて生成した低温プラズマを利用して、低温プラズマ放電パターンが単気筒ガソリン機関の EGR ガス希積燃焼限界を調べた。

3. 研究の方法

(1) 本実験では容積約 8000cc の定容燃焼容器を用いた。容器は可視範囲 100×100mm の観察窓を3面に持つ。容器上部にはスパークプラグホルダが取り付けられ、容器中心付近にて点火が可能である。また、容器上部にはひずみ式圧力センサ (KYOWA PE-50KP) が取り付けられており燃焼圧力を計測する。圧力波形は計測ステーション (YOKOGAWA WE800) を用い計測モジュール (WE7272) を介して PC へ収録を行う。観察窓のない容器側面壁には、筒内流動を模擬するためのファン (最高回転数 8000rpm) が取り付けられており、このファンによりプラグ放電部で最大 7.4m/s の流動場を形成できる。

実験には3種類の点火コイルを用いた。すなわち、標準型、高電流型、長放電型であり、本稿ではそれぞれコイル A、コイル B、コイル C とする。点火コイルから発生した二次電圧・電流波形は、プラグケーブル中間から高電圧プローブ (Tektronix P6015A) にて、スパークプラグ直上から AC 電流プローブ (Pearson 110A) にて引き込み、これを高速オシロスコープ (Tektronix DPO4034) にて計測した。標準型のコイル A に比べ高電流型のコイル B は放電時間が短く、長放電型のコイル C は誘導放電部の最大電流が小さい。放電エネルギーは一定である。混合気作成には容積約 19600cc の混合気容器を用いた。容器上部には攪拌用ファンモータ、容器下部には混合気の誤爆による容器破壊を防ぐためラプチャーディスクが取り付けられている。また、混合気用ガスとして燃料ガス、酸素、窒素のシリンダーが接続されており、分圧法を用いて様々な組成の混合気を作成することが可

能である。本実験では燃料ガスとして純プロパン（純度 99.5%以上）を用いた。

(2) 単気筒試験機関を用いたガソリン機関の EGR 希釈率拡大試験においては、半導体スイッチを用いた小型の IES 式パルス電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。繰り返しパルスは全 10 回とし、前段 8 回をストリーマ放電、後段 2 回をアーク放電となるようにチャージ時間を調節する。これはストリーマ放電により活性化学種の生成を図り、アーク放電により確実な着火をすることを期待してのものである。各パルスの間隔は 40 μ s である。発生した放電は高電圧プローブ（Tektronix 製 P6015A）と電流プローブ（Pearson 製 2878 型）を通してオシロスコープ（Tektronix 製 TDS3024B）に取り込んだ。

本研究ではペントルーフ型燃焼室を有する 265cc 単気筒エンジンを用いて試験を行った。点火プラグは燃焼室中央に位置する。機関諸元の詳細は表 1 に示す。計測データは、高速データロガー（YOKOGAWA 製 WE500）によりクランクアングル毎の筒内圧（Kistler 製 6041A）、吸気圧（Kistler 製 4005AB）、トルク（GIF 製 F1iS）を収録し解析を行なう。EGR 率は吸気ポートの CO₂濃度を排気ポートの CO₂濃度で除することにより算出した。排気ガス成分分析には車検用簡易排気分析器（HORIBA 製 MEXA-554J）を使用した。燃料にはレギュラーガソリン（RON91）を使用した。

Table 1. Engine specification

Type	4-stroke single cylinder
Bore × Stroke	φ75 × 60 mm
Connecting rod	113.4 mm
Displacement volume	265 cc
Compression ratio	10.5
Fuel supply	Port injection

4. 研究成果

(1) 火炎核成長の様子を観察するため、放電輝度の直接撮影とシュリーレン撮影を行った。窒素希釈による EGR を模擬した混合気中でスパークプラグ放電部の流速を静止場、7.4m/s とした。スパークプラグは電極での熱損失低減とシュリーレン撮影を両立するため、接地電極を光路に対して 45° となるよう設置した。

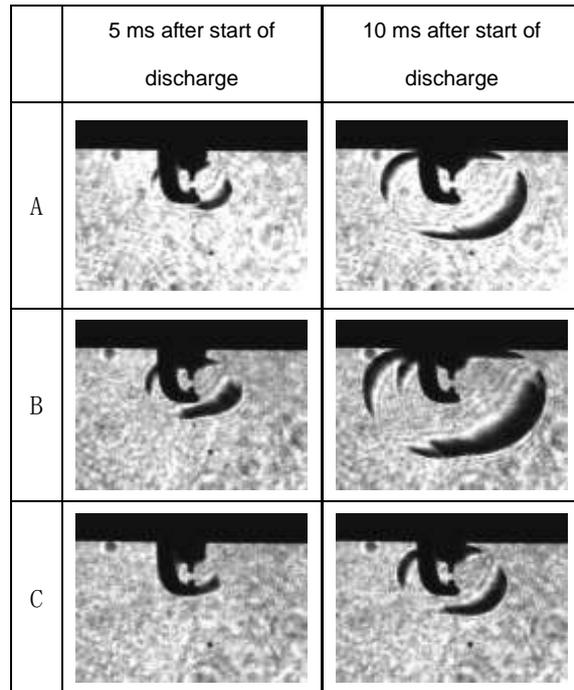


Figure 1. Schlieren photograph of initial flame kernel growth

図 1 に静止場、放電エネルギー 50mJ での火炎のシュリーレン画像を示す。上段からコイル A（標準型）、コイル B（高電流型）、コイル C（長放電型）の順で、左列が放電後 5ms、右列が放電後 10ms の画像である。放電エネルギーが同一である場合、火炎核の成長速度はコイル B→コイル A→コイル C、すなわち高電流型→標準型→長放電型の順で大きくなっていることがわかる。また、放電輝度と着火遅れの関係を調べた結果、放電積算輝度が増加するに従って着火遅れが短縮される傾向が見られ、窒素による希釈率が高いほど、放電輝度の増加により着火遅れが大きく短縮された。

次に、繰り返し短パルス低温プラズマ放電点火を単気筒ガソリン機関に適用し、EGR ガスによる希釈燃焼限界について調べた。希薄燃焼、希釈燃焼において点火限界と部分燃焼限界の二つの限界があることが知られている。点火限界は放電による初期火炎核が形成されなかったことに起因する限界であり、一般に点火時期を早めた場合に生じる。部分燃焼限界は、初期火炎核は形成されたが火炎伝播速度が遅く、燃焼が完了しなかったことに起因する限界である。これは点火時期を遅らせた場合に生じる。この二つの限界線に挟まれた領域を運転可能領域とし、二つの限界線が交わる部分を希釈燃焼限界とする。

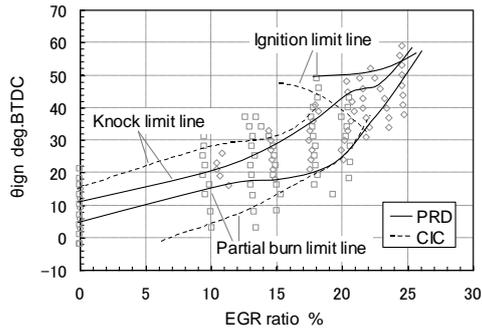


Figure 2. Effect of repetitive low temperature plasma discharge ignition on ignition and combustion stability of spark ignition engine

図2に試験結果を示す。実験は1000rpmストイキでMBTでのIMEPを630kPaとし、EGRバルブ開度一定で点火時期を振っている。各限界線はIMEPの変動率が5%となる点を結んだ。図より、希釈燃焼限界は市販の自動車用点火回路(CIC)においてEGR率21%に対し、低温プラズマ繰り返し放電点火(PRD)においてEGR率25%に拡大した。また、高EGR率の領域において部分燃焼限界線において両点火回路で差異は見られないのに対し、点火限界線はPRDにおいてCICに比べ大幅に運転領域が拡大している。これはストリーマ放電が活性なラジカルを生成し、初期火炎核の形成を助長したためと考えられる。また、両点火回路において燃焼期間に大きな差が見られなかったことから、部分燃焼限界に差がないものと推察している。低EGR率においてCICに比べPRDにおいて運転領域が狭くなっている。PRDにおいては入力するパルス幅によりアーク放電とストリーマ放電を制御しているが、点火時期が遅角することによって筒内圧が上昇するため、アーク放電が妨げられ着火しなかったためである。図3に、各EGR率でのMBTにおける図示熱効率を示す。両点火回路間において点火時期、燃焼期間、図示熱効率に差異は見られない。ストリーマ放電の効果は主に初期火炎核形成に関わるものであり、その後の燃焼に大きく関与しないと推察される。EGR率増大と共に図示熱効率は上昇傾向にある。これは熱損失およびポンプ損失の低減によるものである。

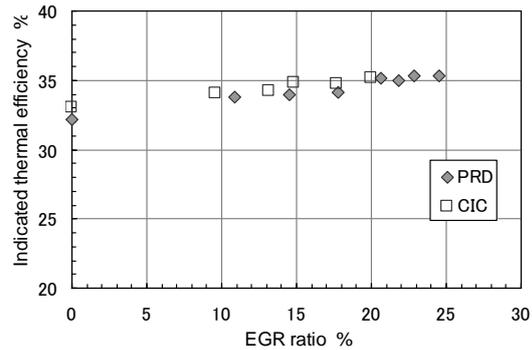


Figure 3 Effect of repetitive low temperature discharge ignition on indicated thermal efficiency

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

- ① 松本脩, 窪山達也 ほか, 「放電特性が高希釈・ガス流動場における初期火炎核成長に及ぼす影響」, 第22回内燃機関シンポジウム, 2011年11月30日, 東京工業大学大岡山キャンパス

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

窪山 達也 (KUBOYAMA TATSUYA)

千葉大学・大学院工学研究科・特任助教

研究者番号: 80578831