

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05818

研究課題名(和文) 極短パルス制御低温プラズマによる希薄燃焼限界拡大メカニズム解明

研究課題名(英文) Analysis on Extension of Lean-limit by Using Ultra-short Pulse-Controlled Low Temperature Plasma

研究代表者

森吉 泰生 (Moriyoshi, Yasuo)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40230172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：繰り返し短パルス低温プラズマに期待する効果として、パルスの長さで電子に与えるエネルギーの量を変えられる、パルスを打つタイミングおよびパルス間隔を変えることで、生成されるラジカルの作用を変えられる、電源回路から出力されるパルス電圧の時間変化を制御することでプラズマ形態を変え、分子に与えるエネルギー量と形態を変えられる、という3点を仮定している。この仮定について本研究で検討を行った結果、とについては、実験による検証が出来た。について、放電期間の短縮は、最適値が存在し、それ以上短縮しても燃焼期間の増加や熱効率の低下を招くこととなり、性能改善にはつながらなかった。

研究成果の概要(英文)：As the features of repetitive low temperature plasma, the following three assumptions were made in this study; i) the length of pulse can change the supply energy, ii) the effect of radical can be controlled by pulse timing and interval, and iii) the effect of plasma formation is controlled by the gradient of voltage per pulse duration. The evaluation was carried out. As a result, i) and ii) were experimentally proved. Regarding iii), the increase of gradient of voltage per pulse duration does not necessarily improve the performance.

研究分野：熱工学

キーワード：低温プラズマ 燃焼改善 着火

1. 研究開始当初の背景

地球環境を守るために短期間の内に二酸化炭素の大幅な低減を行うことが求められている。二酸化炭素排出源の内、動力を取り出すための手段としての熱エネルギー変換がその排出の多くを占めており、熱エネルギー変換分野からの二酸化炭素の大幅な排出低減が求められている。熱エネルギー変換は、タービンや内燃機関によって行われているが、最近の触媒など排出ガス適合装置保護のため、硫黄成分の除去や燃料の品質管理が厳しくなっている。この結果、例えば最新の自動車用ガソリン機関からの有害成分の排出濃度は都市部幹線道路周辺の濃度より低くなっており、自動車が空気清浄機の役割を果たすほどになっている。一方で、限られた化石燃料を有効に利用しつつ、太陽エネルギーから作り出す水素やバイオ燃料など燃料の多様化が進められている。燃料が変わればその着火性は変化し、着火が早まれば窒素酸化物の増加などが生じ、逆に遅くなれば熱効率の低減および未燃成分やすすの発生が生じる。二酸化炭素を低減するために有害成分の排出を増やすことは許されないため、多様化された燃料や酸化剤（空気だけとは限らない）に対して、確実に着火制御を行う技術の開発が求められている。

この課題に対し、従来の高温熱源で燃料を着火するのではなく、ナノ秒オーダーの高速パルス電圧を電極間に印加して発生する低温プラズマによる着火の研究が報告されるようになった。低温プラズマでは電子温度のみが非常に高い非平衡状態にあり、高エネルギーの電子は燃料および酸素分子と衝突して、高反応性のラジカルを生成し、このラジカルにより化学反応を開始させて着火させることができる。ガス温度が上がらないので熱損失が少なく、また複数の放電路を形成するため体積的な放電となる。

これまでに申請者らは、小型化可能な電源回路と繰り返し極短パルス低温プラズマによる着火法に関する基本的な特許を申請した。これまでに定容容器と単筒エンジンで燃料の安定希薄限界の試験と安定希積限界（窒素または二酸化炭素で希積）の試験を行い、従来点火方式に比べて限界が大幅に伸びることを確認した。

2. 研究の目的

低温プラズマによる着火は連鎖酸化反応の促進と考えられるが、そのメカニズムは十分に明らかになっていない。さらに繰り返し短パルスに期待している効果として、①パルスの長さで電子に与えるエネルギーの量を変えられる、②パルスを打つタイミングおよびパルス間隔を変えることで、生成されるラジカル作用を変えられる、③電源回路から出力されるパルス電圧の時間変化(dV/dt)を制御することでプラズマ形態を変え、分子に与えるエネルギー量と形態を変えられる、と

いう3点を仮定しているが、具体的な証明は不十分である。そこでこれらの仮定について実験による証明を行う。これにより希薄燃焼限界拡大メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

低温プラズマによる着火は連鎖酸化反応の促進と考えられるが、そのメカニズムは十分明らかになっていない。さらに繰り返し短パルスに期待している効果として、①パルスの長さで電子に与えるエネルギーの量を変えられる、②パルスを打つタイミングおよびパルス間隔を変えることで、生成されるラジカル作用を変えられる、③電源回路から出力されるパルス電圧の時間変化(dV/dt)を制御することでプラズマ形態を変え、分子に与えるエネルギー量と形態を変えられる、という3点を仮定している。本研究ではこの仮定の証明を、(1)パルスを打つタイミングおよびパルス間隔を変えた実験（指圧計測、可視分光計測）、(2)電源の改造を行い、パルス電圧の時間変化の影響を明らかにする、の2段階で行う。最終的に、バイオや粗悪な燃料に対しても希薄限界拡大した燃焼を可能にし、熱効率を改善する燃焼制御に適用できる手法の提案を行う。

4. 研究成果

(1) 実験装置

本実験で使用した単気筒エンジンは、ボア、ストローク共に86mm、排気量は500cc、圧縮比12.3の4ストローク水冷単気筒エンジンである。燃料は都市ガス(13A)を用いた。エンジンはECUを介して燃料噴射期間、スロットル開度、点火時期を操作することができる。クランク角エンコーダからエンジンのクランク角、TDC信号を得、ECUにて点火時期を設定する。ECUにて設定した点火時期に点火トリガーを発生し、パルスジェネレーターに入力する。パルスジェネレーターでは任意の波形(周波数、パルス幅、パルス回数)を生成することができる。パルスジェネレーターで生成された高速繰り返しパルスはノイズの影響を避けるために光信号に変換され、IES(Inductive Energy Storage: 誘導エネルギー蓄電式)パルス電源へ入力される。IESパルス電源では、入力されたパルス長に応じてチャージ量が決定され、プラグで放電を生じさせることができるようになっている。発生した放電の一次側電圧、二次側電圧、二次側電流を高電圧プローブ、電流プローブを通してオシロスコープに取り込み、波形の観察を行った。ストリーマ放電は二次側の電圧、電流が負の領域にも振れ、また電圧が最大値を取るとき電流が0になるという特性がある。

(2) 実験条件

試験条件を表1に示す。実験では、各条件においてA/Fが一定の状態、点火時期をMBT中心に進角側、遅角側に2~5deg. CAずつ変化させ測定を行った。各測定点で図示平均有効

圧の変動率(COV of IMEP)を計算し希薄燃焼限界を求めた. 本実験では空気過剰率を $\lambda=1.0$ からリーン側へ変化させた.

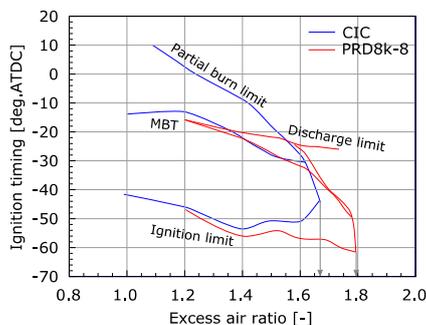
希薄燃焼限界の判定は, 点火限界と部分燃焼限界の2つの限界から求めた. 点火限界は放電による初期火炎核が形成されなかったことに起因する限界であり, 一般に点火時期を過度に早めた場合に生じる. 部分燃焼限界は, 初期火炎核が形成されたが火炎伝播速度が遅いために燃焼が完了しなかったことに起因することによる限界である. この2つの限界線に挟まれた領域を運転可能領域とし, 2つの限界線が交わる部分を希薄燃焼限界とする. 各限界線は図示平均有効圧の変動率が5%となる点を結ぶ. 図示平均有効圧の変動率は図示平均有効圧の標準偏差を平均で除した値である. 結果において着火遅れは放電がなされてから質量燃焼割合の10%に到達したクランク角度, 燃焼期間は質量燃焼割合の10%から90%に達したクランク角度と定義する.

表1 実験条件

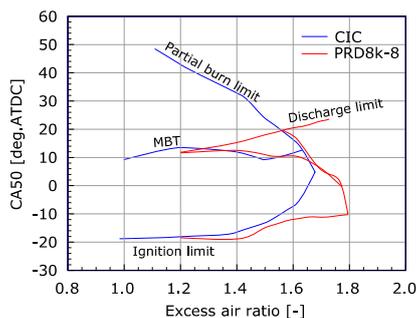
Engine speed	500 rpm
IMEP	390 kPa
Excess air ratio	1.0 ~ lean limit
Ignition timing	Advance ~ MBT ~ Retarded
Ignition pattern (PPI)	8 kHz × 8 times

(3) 実験結果

図1(a)に従来プラグ(CIC)と低温プラズマ



(a) 空気過剰率に対する可燃限界の点火時期



(b) 空気過剰率に対する可燃限界のCA50

図1 点火系の特性

マプラグ (PRD) の空気過剰率に対する可燃領域の点火時期を示す. 低温プラズマの方が, リーン限界が空気過剰率で0.1程度伸びている. 同図(b)には空気過剰率に対する可燃領域の燃焼重心位置 CA50 を示す. 低温プラズマの方が重心位置が早期に来ている.

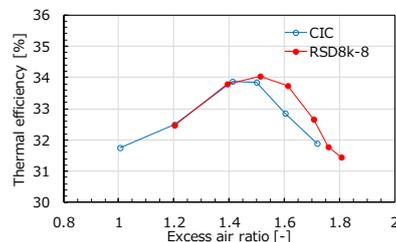


図2 空気過剰率に対する図示熱効率

図2には空気過剰率に対するプラグ違いの図示熱効率を示す. 低温プラズマが空気過剰率の高いところで高い値を示す.



図3 空気過剰率1.6の時の熱収支

図3には2つの点火系に対し, 空気過剰率1.6の時の熱収支を示す. 低温プラズマの方が熱効率が高いのは, 排気損失が減ったため, 燃焼期間の短縮によるものと考えられる.

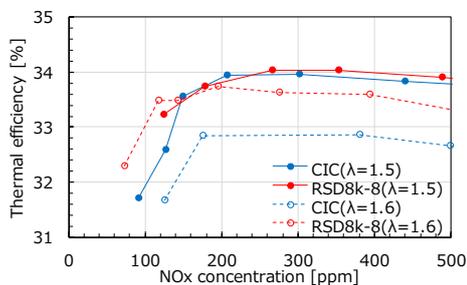


図4 熱効率とNOx排出量の関係

図4には空気過剰率が1.5と1.6の時のNOxと熱効率の関係を示す. 低温プラズマの場合がNOxが最小で, 同じNOxに対して熱効率も高い.

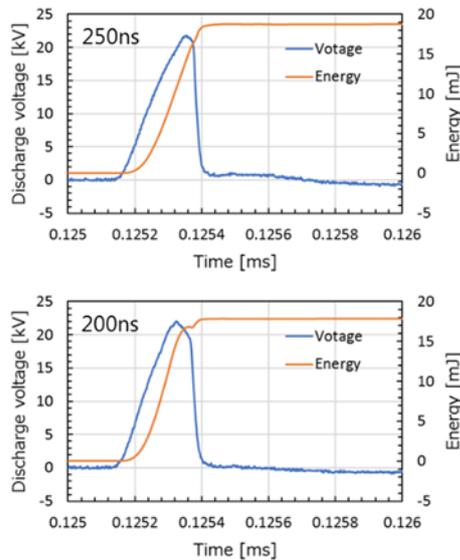


図5 放電期間の影響

図5に放電期間を250nsから200nsに短縮したときの電圧と電流波形を示す。放電期間を短縮すると電圧降下が生じて、点火が出来なかった。そこで一次側の電圧を上げて試験を行った。

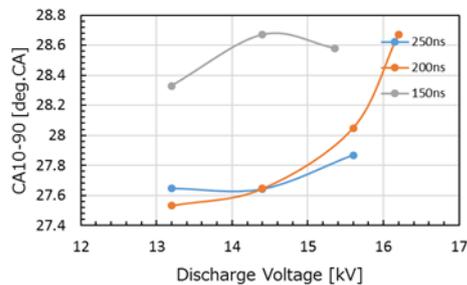


図6 二次電圧に対する燃焼期間 (CA10-90) の結果

図6より放電期間が200nsと250nsの場合は、放電電圧に対する燃焼期間の関係は定量的に近い。しかし放電期間を150nsの時は燃焼期間がCA1度程度長くなっている。

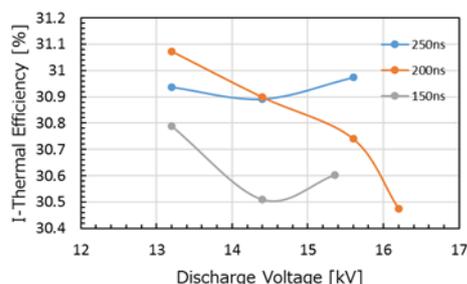


図7 二次電圧に対する図示熱効率の結果

図7は二次電圧に対する図示熱効率の関

係を示す。最も効率が高いのは放電期間が200nsであるが、放電電圧が上がるほど燃焼期間は増加し、熱効率は悪化している。放電期間を250nsにしたとき、熱効率の変化は小さかった。放電期間をさらに短くして200nsにすると熱効率は悪化した。

以上の結果から、放電期間の短縮は、最適値が存在し、それ以上短縮しても二次電圧を上昇させないと点火しない、燃焼期間の増加や熱効率の低下を招くこととなり、性能改善にはつながらないことが分かった。

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1件)

Y. Moriyoshi, Qian Xiong, Yasushi Takahashi, Tatsuya Kuboyama, Koji Morikawa, Toshio Yamada, Masatoshi Suzuki, Kimitoshi Tanoue, Jun Hashimoto, 査読有, CIMAC (2016) No. 262 PP 1-12.

[学会発表] (計3件)

① Matsumoto, T. Kuboyama, Y. Moriyoshi, Y. Kinuzawa, T. Nakamura, K. Tanoue, A Novel Low-Temperature Plasma Ignition System Applied to a GHP Engine, 0. SIA Powertrain Conference (2017) pp.1-6

② Y. Moriyoshi, Application of Low Temperature Plasma Ignition to a Gas Engine, T. Kuboyama, IEA-TLM (2017)

③ Y. Moriyoshi, Combustion Analysis in a Natural Gas Engine With Pre-Chamber to Improve Thermal Efficiency, IEA-TLM (2016)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森吉 泰生 (MORIYOSHI, Yasuo)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40230172

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

田上 公俊 (TANOUE, Kimitoshi)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：60284783

(4) 研究協力者 なし