

令和 3 年 4 月 25 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03969

研究課題名(和文) 極短パルス繰り返し低温プラズマによる燃焼速度向上メカニズムの解明

研究課題名(英文) Clarification of combustion enhancement by pulse-repetitive 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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：繰り返し短パルス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( $dv/dt$ )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点を仮定し研究を行ってきた。この結果、を実験で証明できた。も実験で現象を把握した。に関し、 $dv/dt$ を大きく振ることが出来る装置を借用し実験を行った。この結果、従来の電源に対し、特に電圧の立ち上がり勾配がプラズマ生成に大きな影響を与えることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動力を取り出すためのエネルギー源として化石燃料が広く用いられているが、今後は太陽エネルギーから作り出す水素やバイオ燃料が増える。従来の燃焼機器や熱機関には、有害排気成分低減のために成分が厳密に管理された燃料だけが使われてきたが、成分の多様性に対して広く作動し、しかも高効率で低公害な熱エネルギー変換機構が望まれる。そこで本研究では、今日の急速な半導体技術とセンシング技術の進化を背景に、こうした成分の多様性に対しても確実な着火制御を行うことで、高効率で低公害なシステム開発の要素技術となる繰り返し極短パルス低温プラズマによる着火法について現象解析を行い、工学的な応用につながる技術として確立した。

研究成果の概要(英文)：As the effects of pulse-repetitive low temperature plasma, three items were assumed; i) supplied energy can be controlled by the pulse length, ii) the effect of radical can be controlled by changing pulse timing and interval, and iii) temporal variation of pulse voltage can control the form of plasma. Through this research, these three assumptions were successfully proved experimentally.

研究分野：熱流体工学

キーワード：点火 熱効率 多種燃料 パルス回路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

動力を取り出すためのエネルギー源として化石燃料が広く用いられているが、今後は太陽エネルギーから作り出す水素やバイオ燃料が増えてくる。従来の燃焼機器や熱機関には、有害排気成分低減のために成分が厳密に管理された燃料だけが使われてきたが、成分の多様性に対して広く作動し、しかも高効率で低公害な熱エネルギー変換機構が望まれる。そこで本研究では、今日の急速な半導体技術とセンシング技術の進化を背景に、こうした成分の多様性に対しても確実な着火制御を行うことで、高効率で低公害なシステム開発の要素技術となる繰り返し極短パルス低温プラズマによる着火法について現象解析を行い、工学的な応用につながる技術の確立を行おうとするものである。特に、申請者等による研究で明らかになった「パルス制御による燃焼速度及び熱効率の大幅な向上」に焦点を当てて、そのメカニズム解明を行う。

### 2. 研究の目的

これまでプラズマ物理は実験装置が高価であったり圧力の低い領域でないと応用が難しいといった理由から、工学的な応用につながる研究が熱工学分野の研究者によって行われることは少なかった。また、専門性が大きく異なることから熱工学の研究者が手を出しにくい分野でもあった。本研究は、プラズマ工学と熱工学さらに電気回路の専門家が知恵を出しあい、互いに協力して工学への応用を進めるための現象解明を行うことを目的とする。低温プラズマによる着火現象が解明されれば、工学的に熱変換エネルギー装置に応用が出来る、バイオや粗悪な燃料に対しても有害排出成分を抑えたままで熱効率を上げる燃焼制御に適用でき、その価値は極めて高い。

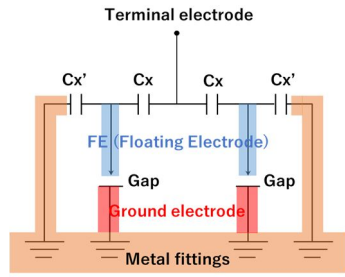
### 3. 研究の方法

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に明らかになっていない。申請者らは、繰り返し短パルス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( $dv/dt$ )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点を仮定し研究を行ってきた。この結果、は実験で証明できた。も実験で現象を把握した。その際、興味深い事実として、プラズマを発生させた直後ではなく、着火・燃焼が始まってしばらくして、低温プラズマの効果により燃焼速度が増大し、熱効率が向上するという現象が現れた。この現象は当初の予測にはない新たな発見であり、工学的に応用するためにはメカニズムの解明が必要である。は設備の都合から  $dv/dt$  を大きく振って実験を行えなかったため、新たな電源装置を使って詳細な実験と解析を行う必要のあることがわかった。これにより、の現象の解明にもつながると考えている。

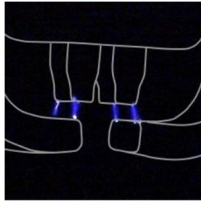
これらの装置を冷暖房に使うガスヒートポンプ用エンジンに適用したところ、希薄燃焼限界の拡大と熱効率の改善が見られた。従来よりも最大熱効率が増大し、同一  $NO_x$  濃度での熱効率も増大した。燃焼室内圧計測により熱発生率を解析したところ、熱効率が改善されるのは燃焼後半で燃焼速度が従来より大きくなり、短期間での燃焼による等容度の向上と熱損失の低減であることがわかった。ただし、印加するパルスの電圧、周期、タイミングで結果が異なり、従来よりも悪化してしまう条件もみられた。よって、工学的に適用するには、燃焼後半で燃焼速度が増加するメカニズムの解明が不可欠である。

### 4. 研究成果

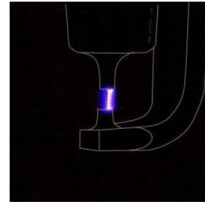
低温プラズマを発生させるには、高電圧短パルス電源が必要になる。このため、SI サイリスタの高速電流遮断操作で数十 V の一次電圧からパルス状の高電圧(数百 ns オーダー)を発生することができる。低温プラズマ用のイグナイタはアーク放電への移行を避けるためにフローティングカソード電極を持つ(以下、FE イグナイタ)。点火回路に繋がる端子部分と中心電極の間の絶縁を行い、コンデンサを形成する。このコンデンサにより電荷がプラグギャップに直接流れ込むのを防ぐ。点火システムの違いを比較するために従来のフルトランジスタ点火コイルと一般的なスパークプラグ(ギャップ: 0.5mm)も準備した。図 1 に低温プラズマイグナイタと従来のプラグの放電を可視化した図を示す。従来のプラグは 1 つの熱プラズマの放電路を形成するのに対し、低温プラズマイグナイタでは同時に複数の放電路を形成する。



Internal structure of FE ignitor.



(a) FE ignitor.



(b) Conventional.

Fig. 1 Difference of discharge channel characteristics between FE

plug and conventional

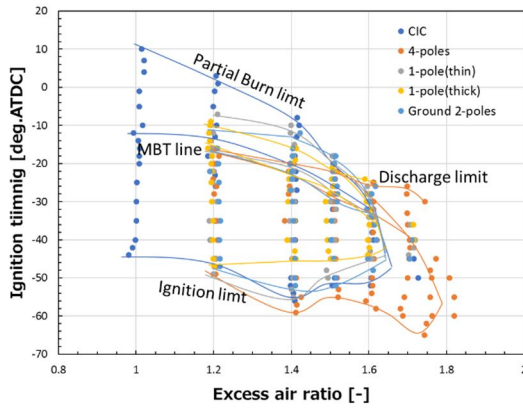
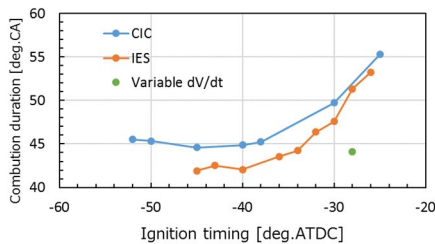
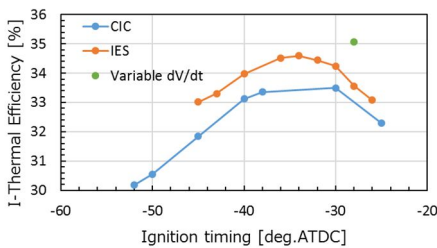


Fig. 2 Operational area [23].



(a) Combustion duration.



(b) I-Thermal Efficiency.

Fig.3 Comparison of combustion characteristics to CIC and IES

( $\lambda=1.6$ )

エンジンに適用した結果を図 2 に示す．従来の火花点火方式(Conventional Ignition Circuit : CIC)と低温プラズマ点火における各プラグとの運転可能領域の比較を示す．

CIC に対し低温プラズマ点火では遅角側で MBT での運転はできているものの放電限界となり運転可能領域が狭くなってしまった．これは点火時期を遅角した際に点火時期の筒内圧が高くなってしまいプラグへの要求電圧が高くなってしまったためである．希薄燃焼限界はそれぞれ CIC で  $\lambda=1.6$  , 4 極プラグで  $\lambda=1.75$  , 1 極プラグ全ての形状で  $\lambda=1.6$  となり ,CIC に対し希薄燃焼限界の拡大が見られたのは 4 極プラグのみとなった .4 極プラグは複数の電極から同時に放電したため ,より体積的な着火が可能となり希薄燃焼限界が拡大したと考えられる .

図 3 に点火時期に対する燃焼期間 , 図示熱効率を示す . CIC よりも低温プラズマの IES の方が燃焼期間が短く , 熱効率も高い . さらに低温プラズマ生成の電源を  $dV/dt$  可変にすることで , 5deg.CA 以上の燃焼期間の短縮が見られ , 図示熱効率も 1 ポイント向上した . 熱収支を比較すると冷却損失 , 排気 , 未燃損失が低下した . 熱発生率を比較すると  $dV/dt$  可変電源は燃焼が早く , 熱発生率ピークが高くなっていることがわかった . これらの差の要因としては IES と  $dV/dt$  可変電源ではラジカルの生成効率が違うと推測される . 詳細な原因解明のためにはシミュレーション等を用いて放電メカニズムの解明や生成するラジカルの量や種類を調べる必要がある . 低温プラズマ方式の実用化への課題は , 短パルスの電源をいかに安く作るか , 低温プラズマイグナイタの絶縁電圧を向上させることである .

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 0件）

1. 著者名 Y.Moriyosih et.al.	4. 巻 None
2. 論文標題 Combustion Enhancement in a Gas Engine Using Low temperature Plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SAE Technical Paper	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4271/2020-01-0823	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森吉泰生ほか
2. 発表標題 低温プラズマによるガスエンジンの点火手法の研究
3. 学会等名 自動車技術会春季学術講演会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------