

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560217

研究課題名(和文) 繰り返し極短パルス低温プラズマによる着火制御

研究課題名(英文) Ignition Control by Repetitive Pulse Low-Temperature Plasma

研究代表者

森吉 泰生 (MORIYOSHI, Yasuo)

千葉大学・工学(系)研究科(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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：低温プラズマ生成のための高電圧パルスの長さや間隔を変えることで、希釈されたエンジン内部での点火確率が変化し、最適な値が存在することが実験から明らかになった。また、燃料に対する着火性の違いもみられた。これは低温プラズマで生成されるラジカルが、燃料に対して作用する効果が異なるためであると示唆された。

今後、点火環境が高圧化、希釈/希薄化するにつれ、高エネルギーの供給が必要となる。その際、従来点火方式では電極の摩耗が重大な問題となるが、低温プラズマ方式ではその問題はほとんど起きないため、耐久性の面からも有利な点火方式であるといえる。実用化に際しては、コスト低減、電源の小型化が課題である。

研究成果の概要(英文)： In order to make an optimized low-temperature plasma, changing pulse width and its frequency was found to cause the ignition probability. Also, the effect of fuel on the ignition characteristics was examined due to the effect of radicals generated by the plasma.

As the future work, higher ignition energy is demanded due to boosted and diluted combustion, the wear of the plug should be the problem while low-temperature plasma would not cause such a problem. Thereby, the low-temperature pulse plasma system has an advantage to the conventional system, but the reductions in cost and size will be the future tasks.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱機関 点火 プラズマ

1. 研究開始当初の背景

現在、自動車用の火花点火装置としてトランジスタ式の点火コイルが広く使用されており、この放電は前駆放電(pre-breakdown)、ブレイクダウン(breakdown)、アーク(arc)、グロー(glow)の4つの過程から構成されている。この放電ではアーク及びグロー放電時に最もエネルギーが使われるが、これらの放電は長時間持続するため、電子温度と雰囲気温度が高い高温プラズマになり、投入したエネルギーの約50%が電極への熱損失で失われてしまう。

これに対して、本研究では電極間に極短パルス電圧を印加してアーク遷移する前に電界を遮断して低温プラズマを形成する。低温プラズマは電子温度のみが非常に高い熱的に非平衡な状態であり、雰囲気温度が上昇せず、また非常に短時間の放電なので電極への熱損失が極めて少ない。また、放電1回あたりのエネルギーが小さく、従来の点火方式(CIC)の4分の1程度である。さらに、ストリーマと呼ばれる複数の放電路を形成するため体積的な放電空間ができるメリットがある。ストリーマ放電では電極全体に多数の弱い放電路が形成されるが、アーク放電では単一の強い放電路が形成される。また、雰囲気圧力一定のもとではストリーマ放電とアーク放電は電極間圧力に依存する。すなわち、低温プラズマ点火方式(PPI)は低消費エネルギーにて、体積的な点火を行える可能性があり、難燃焼環境下で安定した着火をもたらす事が期待される。

2. 研究の目的

これまでの研究により、低温プラズマ繰り返し放電点火を用いることで炭化水素燃料の着火を促進する化学活性種の生成を図ると同時に、点火初期の火炎核の体積を増加させることで希薄燃焼特性を改善することが可能であることが、定容容器を用いた実験で明らかになっている。また実機における試験においては、希薄燃焼限界が市販の自動車用点火回路において A/F=21 から、低温プラズマ繰り返し放電点火において A/F=23 まで拡大することが明らかになっている。本研究では低温プラズマ放電点火システムを単気筒エンジンに用い、ガソリン、天然ガス、エタノール混合ガソリン燃料での希薄燃焼限界の検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

実験装置: 本研究ではペントルーフ型燃焼室、DOHC-4バルブを有する、4ストローク265ccの水冷単気筒エンジンを用いて試験を行なった。諸元を以下の表1に示す。

エンジンにはEGR管が取り付けられ、吸気チャンバー直前に取り付けられたEGRバルブと排気管後方に取り付けられた背圧調整バルブによりEGRガスの帰還量を調節できるようになっている。エンジン出力軸には渦流式

電気動力計、トルクフランジ(GIF製F1iS)、モータが接続され、モータによりエンジンの駆動ができるようになっている。図1にエンジン本体の概略を示す。

Table.1 Engine specifications

| | |
|---------------------|--|
| Type | 4-stroke single cylinder |
| Bore × Stroke | φ75 × 60 mm |
| Connecting rod | 113.4 mm |
| Displacement volume | 265 cc |
| Compression ratio | 11 |
| Fuel supply | Port injection (Gasoline, Ethanol) Mixer (Gas) |

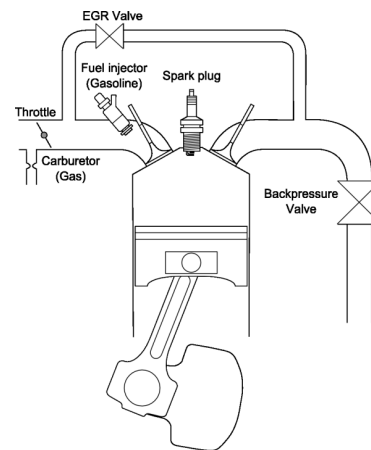


Fig.1 Schematics of test engine

本実験で用いた点火装置の概略図を図2に示す。クランク角エンコーダによりエンジンのクランク角、TDCパルスを検出し点火タイミングコントローラに入力する。これにより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に入力する。このパルスジェネレータは任意の周波数の波形を生成できる。パルスジェネレータから高速繰り返しパルスを生成し、ノイズの影響を避けるため光信号に変換してIES(Inductive Energy Storage: 誘導エネルギー蓄積式)パルス電源へ入力する。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、プラグで放電が生じるようになっている。発生した放電は二次側電圧、二次側電流を高電圧プローブ(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)にて観察および波形の取り込みを行なった。また、一次側電圧、一次側電流をオシロスコープ(Tektronix製BPO4034)にて観察を行った。放電波形の一例を図3(a)に示す。この例では125μsの間隔でパルスを8発入力している。図3(b)にストリーマ放電を拡大したものを示す。二次側の電圧、電流が負の領域に振れ、

また電圧が最大値をとる所で電流が0となり、エネルギー投入量が非常に小さい。

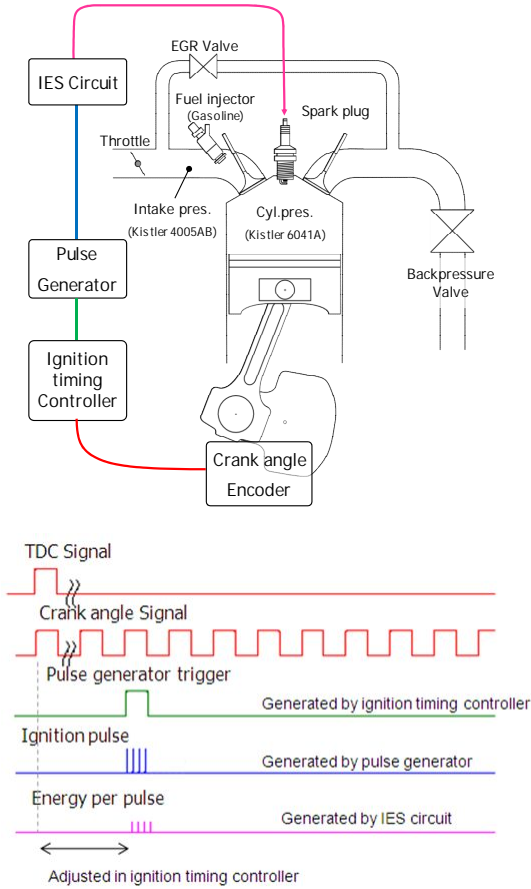
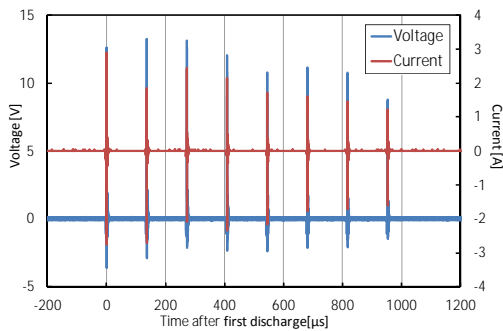
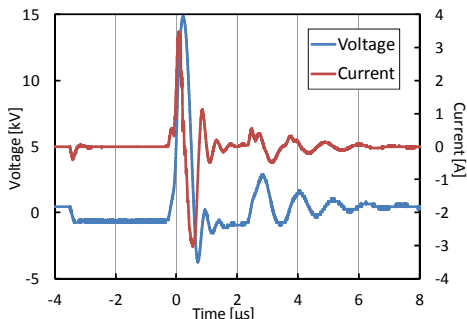


Fig.2 Ignition system



(a) Full view



(b) Streamer discharge

Fig.3 Current and voltage of repetitive pulse discharges

実験条件：主な実験条件を表 2 に示す。個別の実験に対する詳細な実験条件は実験結果・考察の項にそれぞれ示す。

Table.2 Experimental conditions

| | Gas lean limit test | Gasoline lean limit test | Ethanol blended gasoline lean limit test |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| Engine speed | 1600 | 1000 | 1000 |
| IMEP | 500 kPa at MBT | 500 kPa at MBT | 500 kPa at MBT |
| A/F (Excess air ratio) | 17 ~ 29 (1.0 ~ 1.7) | 17~22 (1.1~1.5) | 18~24 (1.15~1.55) |
| Ignition timing | 95 deg.BTDC ~ 30 deg.BTDC | 70 deg.BTDC ~ 10 deg.BTDC | 70 deg.BTDC ~ 10 deg.BTDC |
| Fuel | Gas | Gasoline(RO N91) | E10, E85, E100 |

希薄燃焼限界を求める実験において、その限界は点火限界と部分燃焼限界の二つの限界により求めた。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薄燃焼限界とする。各限界線は図示平均有効圧の変動率(COV of IMEP)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ストリーマ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 80%に達したクランク角度と定義する。

使用燃料は市販のレギュラーガソリン (RON 91)および都市ガス(東京ガス 13A, 低位発熱量=40.63MJ/m³)を使用した。ガソリンは吸気ポートに噴射圧力 0.3MPa (gauge)で噴射した。燃料にガスを用いる場合、燃料はスロットル直前に設置されたミキサーにより供給した。また、H/C 比はガソリンで 1.85, ガスで 3.88 である。低温プラズマ繰り返し放電点火(PPI)の比較対象としては、ガソリン機関においてフルトランジスタ型の市販の自動車用点火回路(CIC), ガス機関において CDI 型の点火回路を用いた。点火プラグは、CIC では市販の自動車用点火プラグ (NGK 製 BCP5ES), PPI ではストリーマ放電用に特別に製作した専用プラグを用いた。都市ガスにおける実験では右の側方電極が 4 本のものを、ガソリン、エタノール燃料における実験では左の側方電極が 2 本のものを使用した。

4. 研究成果

天然ガス機関の点火に低温プラズマ放電点火を適用した。希薄燃焼時の燃焼安定限界空燃比について、従来の点火システムと低温プラズマ点火システムの比較を行った。実験では、IES 電源への入力をすべてストリーマ放電となるよう調節し、そのパルスパターンにより燃焼特性がどう変化するかについて調べた。実験条件は回転数 1600 rpm, 図示平均有効圧力(IMEP)500kPa, 吸気過剰率() 1.4~1.7, 点火時期は MBT とした。燃料には都市ガス(13A)を使用した。

パルス回数が燃焼に与える影響：パルス周期を 125 μs に固定し、パルス回数を 1, 2, 4, 8 回に変化させて実験を行った。空気過剰率を変化させ、CIC と比較した。図 4, 5 に図示平均有効圧力の変動率(COV of IMEP)と着火遅れを示す。

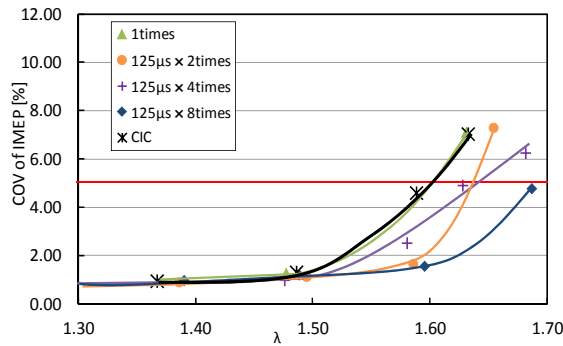


Fig.4 Effect of pulse times and excess air ratio on COV of IMEP

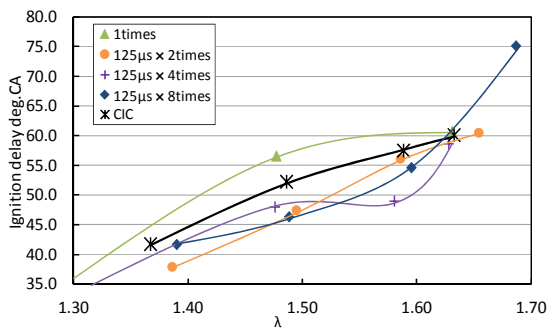
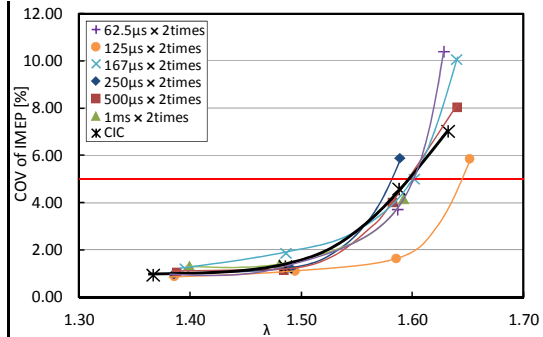
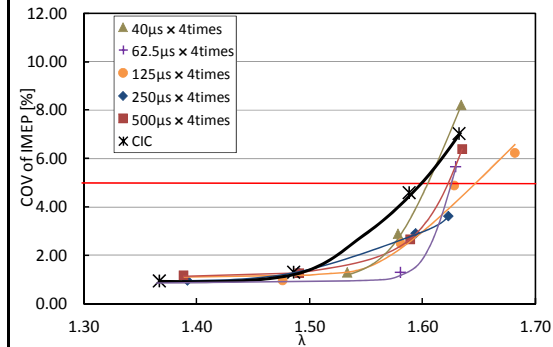


Fig.5 Effect of pulse times and excess air ratio on ignition delay

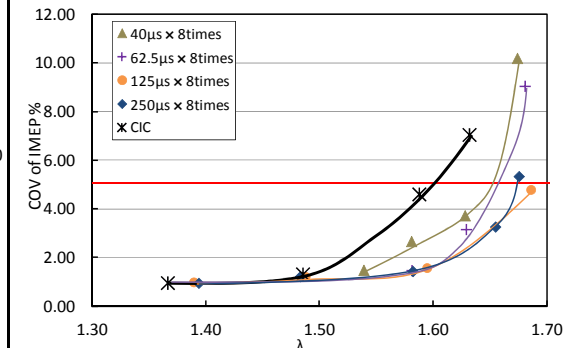
パルス周期が燃焼に与える影響：パルス回数を 2 回, 4 回, 8 回に固定し、パルス周期を 62.5-1000 μs に変化させて実験を行った。空気過剰率を変化させ、CIC と比較した。図 6 に図示平均有効圧力の変動率を、図 7 にパルス周波数を変化させたときの希薄限界をそれぞれ示す。図 6(a)より、パルス周期により希薄限界が変わり、パルス周期 125 μs で最も希薄限界が拡大し、他の周期についても、CIC とほぼ同等の性能となった。



(a) 2times



(b) 4times



(c) 8times

Fig.6 Effect of pulse period and excess air ratio on COV of IMEP

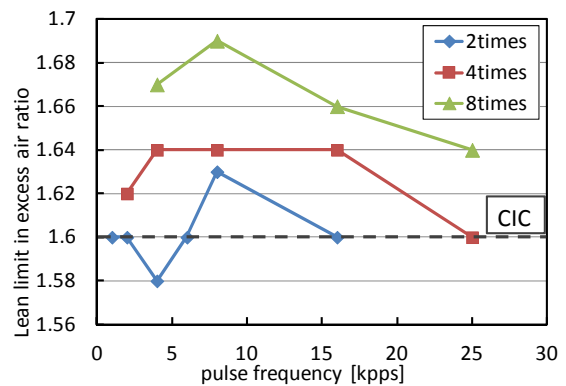


Fig.7 Effect of input pulse frequency on COV of IMEP

低温プラズマ放電点火は、パルス 1 回あたりのエネルギーが約 5.5mJ であり CIC(20mJ)の 4 分の 1 であるが、パルス数 2 回、つまり CIC の半分の投入エネルギーで CIC と同等の性能を得ることができる。また図 6(b)でも、すべてのパルス周期の場合でも CIC より希薄限界を拡大することができた。これより、CIC と同じ投入エネルギーで、CIC よりもより点火性能を向上させることができる。

図 7 よりいずれのパルス回数においても、パルス周波数 8kpps(パルス周期 125 μs)のとき最も希薄限界が向上した。これより、パルス周期には最適値が存在する可能性がある。これらの結果よりパルス回数、パルス周期を変化させた場合、パルス回数は多いほど、またパルス周期は比較的長いほど、図示平均有効圧の変動率が小さくなることわかる。これは、全放電期間を長くすることで、可燃混合気との接触確率が高くなり、初期火炎核が形成されやすくなるためであると考えられる。また、パルス周期に最適値を持つ可能性があることについては、投入エネルギーが有効に使われるようにインピーダンスマッチングを行うが、エンジンの場合は、圧力や温度が急激に変化するため、最適状態を常に設定することはできない。そのため、パルスの長さや間隔が変わるとエネルギーの有効利用効率が変化し、点火確率が変化することが示唆された。

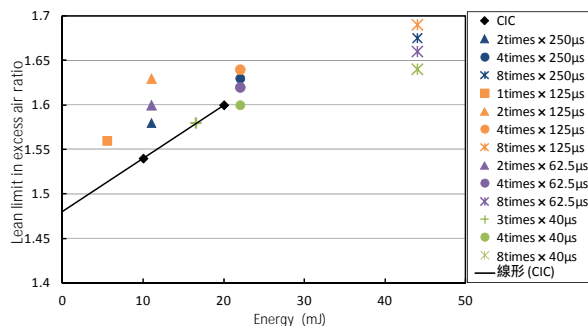


Fig.8 Effect of energy and pulse period on Lean limit in air excess ratio

放電エネルギーが燃焼に与える影響：パルス回数を変えることで放電エネルギーの総量を変化させ、より少ない放電エネルギーでより希薄限界が拡大できる条件を調査した。図 8 にパルス回数を変えて放電エネルギーを変化させたときの希薄限界との関係を示す。図では、グラフの左上に向かうほど低い放電エネルギーと希薄限界の拡大の両立ができているという評価ができる。パルス回数 2 回(放電エネルギー 11mJ) ,もしくは 4 回(同 22mJ)のとき、希薄限界の向上と少ない放電エネルギーの両立ができると考えられる。

燃料種別の希薄限界の比較：これまでの各燃料種の希薄限界の実験結果について、それぞれ比較した。図 9 に各燃料種でパルス周期を 125 μs に固定し、パルス回数を変えて放電エネルギーを変化させたときの希薄限界を示す。

図より、PPI では希薄限界は都市ガスの場合が最もよく、次いで E85 ,E10 ,ガソリン ,E100 という結果となった。また、CIC と比べて PPI では燃料種により希薄限界が大きく異なっていた。これは、高温プラズマを形成して熱的な着火を行う CIC とは異なり、低温プラズマを形成して化学反応の促進により着火を行う PPI の特長が着火性に影響しているためであると考えられる。

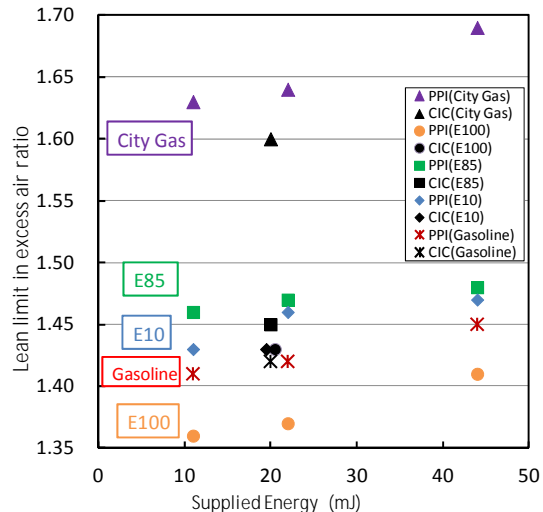


Fig.9 Effect of different fuel on Lean limit in air excess ratio

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 3 件)

田上, 牛丸, 菅, 窪山, 森吉, 渡邊, 堀田, 繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究, 日本燃焼学会誌, 査読有, 56-175 (2014) pp.59-66.

渡辺, 堀田, 田上, 牛丸, 窪山, 森吉, 繰り返しナノパルス放電プラズマ中のラジカル計測と点火特性: プラズマ核融合学会誌, 査読有, 第 89 巻 4 号, pp. 228- 232 (2013)

中野, 服部, 森吉: 「非平衡プラズマによるラジカル生成と自着火促進作用」自動車技術会論文集, 査読有 Vol.43, No.4 , pp.823-828 (2012)

〔学会発表〕(計 6 件)

大高, 森吉, 窪山: 「低温プラズマ繰り返し放電点火の分光解析」自動車技術会関東支部(2013.3.7)

田上, 牛丸, 菅, 窪山, 森吉, 渡邊, 堀田, 繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究(2012.12.11), 第 50 回燃焼シンポジウム

中野, 服部, 森吉: 「非平衡プラズマによるラジカル生成と自着火促進作用」第 2 回内燃機関シンポ(2011.11.30)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 1 件）

名称：内燃機関の点火方法

発明者：森吉，堀田，今西，清水

権利者：千葉大学，東京工業大学，日本ガイシ

種類：特許

番号：5458276 号

取得年月日：2014/01/24

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://engine50.tm.chiba-u.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

森吉 泰生 (MORIYOSHI, Yasuo)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40230172

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし