

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820056

研究課題名(和文)低温プラズマを利用した高圧希薄・希釈予混合気の着火制御

研究課題名(英文) Ignition enhancement of the lean and diluted mixture using a low-temperature plasma discharge

研究代表者

窪山 達也 (Kuboyama, Tatsuya)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80578831

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)：低温プラズマ放電による着火促進効果を調べるため、常温・大気圧雰囲気下で低温プラズマ放電の分光分析を行い、プラズマの放電により生成される化学種を調べた。使用した放電プラグには4極の放電電極を有する。低温プラズマ放電とアーク放電を比較すると、低温プラズマに置いては、酸素イオンが検出されるが、従来の点火システムを用いたアーク放電においては検出されなかった。これより、酸素イオンの生成が、低温プラズマ放電による着火促進要因であると推察される。ただし、酸素イオンの検出信号のS/N比は低いことが課題として残っている。

研究成果の概要(英文)：To investigate the mechanism of the ignition enhancement with the repetitive low-temperature plasma discharge, a spectroscopic measurement of the low temperature plasma was carried out. Compared to the conventional ignition system with arc discharge, more oxygen ion could be generated with the low temperature plasma. This suggests that the generation of the oxygen ion is one of the possible reasons for the ignition enhancement with the low temperature plasma discharge.

研究分野：熱工学

キーワード：点火 低温プラズマ 希薄燃焼

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化や石油資源の枯渇など、様々な環境問題に関心が高まっている。IPCC の評価報告⁽¹⁾によれば、世界の温室効果ガス排出量は、2000 年から 2030 年までの間に CO₂ 換算で 25~90%増加し、2099 年には最悪の場合地球全体の平均気温が 6.4°C 上昇すると予測されている。これらの背景から、自動車用の内燃機関にも、CO₂ 排出削減のために高効率、低公害化が強く求められている。また、地球環境保全のほか、エネルギーセキュリティの観点から、ガソリンの代替燃料としてガス燃料やバイオエタノール燃料が注目されている。天然ガスの埋蔵量は原油よりはるかに多く、ガソリン車と同等の走行性能で CO₂ の排出量がガソリン車より 20~30%削減できる⁽²⁾。エタノールは、再生可能資源として継続的に利用でき、燃焼によって発生した CO₂ は原料となる植物によって吸収されるため、大気中の CO₂ 量を増やさない(カーボンニュートラル)燃料として注目されている。

内燃機関を高効率化技術として、圧縮比の増大、希薄燃焼、EGR ガスによる希釈燃焼などが有効である。しかし、高圧縮比化によるノッキングの発生や、希薄燃焼や希釈燃焼による燃焼変動の増大が大きな課題となっている。燃料を希薄化して燃焼させた場合、燃焼温度が低下することにより燃焼室壁面などへの熱伝達による冷却損失の低減や、作動ガスの比熱比が増大することにより熱効率が向上する。加えて、同じ平均有効圧で運転するための吸入空気量が多いため、スロットルを開き、吸気管、吸気行程の筒内圧を高まる。これにより、サイクルのポンプ損失が低減され、図示熱効率が向上する。また、窒素酸化物の排出量は、理論空燃比近傍よりやや希薄側で最も多く排出され、さらに希薄化すると排出量が減少していくことから、十分に希薄化が進んだところで実用的にエンジンを運転することができれば排出ガスの清浄化にもつながると考えられる。従来の火花点火燃焼では、理論空燃比近傍での運転では安定した火炎核の形成と伝播が行われ安定した燃焼が可能であるが、希薄燃焼領域では燃焼が不安定となり運転可能領域が限られてしまう。

希薄燃焼を達成する方法として、本研究で取り扱う低温プラズマ繰り返し放電の他に、レールプラグ⁽³⁾、プラズマジェット点火⁽⁴⁾、レーザー一点火⁽⁵⁾などの新たなコンセプトの点火システム⁽⁶⁾が提案されているが、未だ実用化には至っていない。レールプラグやプラズマジェット点火においては、高エネルギーを投入して高温プラズマを拡散させるため、体積的な着火が可能であるが、電極耐久性に課題が残り、また高温プラズマの利用により周辺ガスの温度が高まり、電極への熱損失が大きい。レーザー一点火においては、電極での熱損失がなく、燃焼室の任意の位置で非接触に着

火できる利点があるが、レーザー照射窓の汚れの問題、レーザー自体の効率、耐久性、コスト等に課題が残る。本研究で用いる低温プラズマ点火の着火機構は、低温プラズマによる活性化化学種生成、および生成化学種による着火促進であると考えられ、燃焼限界付近の希薄な予混合気に対して、低い点火エネルギーで確実に着火が実現し得ることが期待される。実際に、定容容器を用いた実験で、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、希薄燃焼特性を改善することが可能であることを明らかにしてきた⁽⁷⁾。また、実機における試験において、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 まで拡大することを明らかにしている⁽⁸⁾。

2. 研究の目的

本研究では低温プラズマ繰り返し放電点火の放電中の分光解析を行い、発生している活性化化学種を調査するとともに点火に及ぼす影響について調べることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高圧燃焼試験用容器

本実験装置の概略を図 3.1 に示す。混合気容器の容量は約 19,600cc であり、容器上部には混合気攪拌用のファンモーター、容器下部には混合気の引火・爆発による容器破壊を防ぐため、碗形のラプチャーディスク(破裂板)が取り付けられている。容器材質は上下蓋が A5056、胴筒が SUS304 である。混合気用ガスとして、燃料ガス(99.5% pure-Propane: C₃H₈)、酸素(0.2)、窒素(N₂)のガスボンベが接続されている。混合気作成には分圧法を用い、その為の圧力センサとして絶対圧センサ Kistler 4045A、及び Kistler 4007AA が配管中に接続されている。混合気精度誤差は±0.5%以内で作成可能である。混合気は最大 500kPa で作成し、必要量を燃焼容器へ送る。配管は内径 7mm、肉厚 1.2mm の銅管を用いている。ゲート用バルブにはボールバルブ、流量調整用バルブにはニードルバルブを用いている。混合気に用いるガスボンベは 99.5%純プロパン(5kg)、酸素(7.0m³, 14.7MPa)、窒素(7.0m³, 14.7MPa)が接続されている。配管中には精度と測定レンジの異なる 2 個の絶対圧センサ(Kistler 4007AA, Kistler 4045A)が同点に組み込まれており、混合気作成から燃焼容器への混合気輸送までを同じセンサで管理できるようになっている。燃焼容器、混合気容器へはコンプレッサーからの圧縮空気を導入可能となっており、燃焼容器へはバルブの右側より、混合気容器にはボールバルブを介して直接、ハイカプラが取り付けられている。

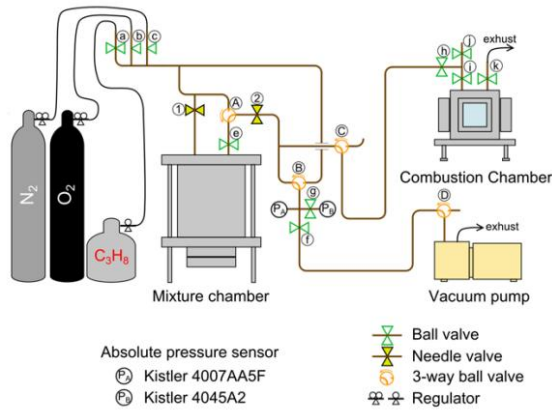


Fig. 3.1 Experimental apparatus

燃焼容器は内寸 180×180×180mm の立方体であり、容積は約 5600cc である。容器には可視範囲 100×100mm、厚さ 35mm の合成石英製の観察窓が 3 面に取り付けられている。容器上部にはスパークプラグホルダーが取り付けられている。このホルダーを交換することによりネジ径、ネジ長さの異なる様々なスパークプラグを取り付けることができる。容器材質は SUS304、スパークプラグホルダー材質は C2600、又は C3604 である。容器上部にはピエゾ式圧力センサ Kistler 7061B が取り付けられており、燃焼圧力を計測する。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（直径 60mm、6 枚羽、最高回転数約 9000rpm）が取り付けられている。スパークプラグは鉛直方向に設置される。スパークプラグ底面を観察するための取り外し可能な 45° 傾斜ミラーを容器内部に設置可能となっている。

(2) 分光器

本研究で使用した分光器は相馬光学 小型 USB マルチチャンネル分光器 S-2431 であり、主な仕様を表 3.1 に示す。

Table 3.1 Specifications of sepctroscope

Measurement wavelength range	200~800nm
Slit	50 μ s
Detector	Backside-illumination type CCD image sensor
Linear dispersion/Pixel	0.41nm
Discrimination	1.9nm
Wavelength accuracy	\pm 0.5nm
Exposure time	2.5ms~6s
Electric supply source	DC24V,0.5A
Shape	90(w)*110(H)*170(D)mm
Weight	1.0kg
Specifications temperature range	10~40°C
Specifications humidity range	40~80%RH

(3) 実験方法

リレーレンズ光学系を用いて、放電の分光解析実験を行った際の分光器のタイムチャートを図 3.2 に示す。「1sec の露光を 1 回ごとに 85 μ s のインターバルを持って 5 回行う」ということを 1 回の計測とした。1

回当たりの発光強度は約 5sec の積算値である。1 回の露光ごとのインターバルは分光器の仕様値となっている。

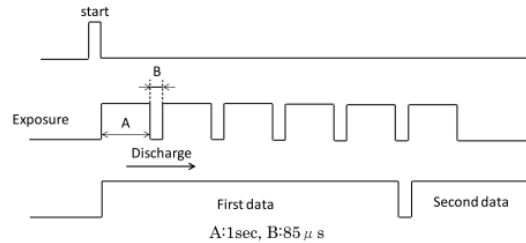


Fig. 3.2 Time chart for the plasma emission spectrum measurement

4. 研究成果

(1) 燃焼実験

定容燃焼容器にて PPI (繰り返しプラズマ放電点火システム, Pulse Plasma Ignition system) による点火実験を行った。実験条件を表 4.1 に示す。燃料は純プロパンガスを用い量論混合比。大気圧でパルスのチャージ時間を 3ms でパルス周波数 8,000pps として、パルス回数を変化させて点火実験を行った。

Table 4.1 Experimental conditions

Ignition system	Pulse Prasma Ignition
Initial pressure	100kPa
Equivalence ratio	1
Initial temprerature	Room temp.[°C]
Fuel	Propane(99.5%)
Charge duration	3ms
Pulse frequency (Pulse period)	8,000pps (125 μ s)

はじめに側方電極が 4 極のスパークプラグを用いて燃焼実験を行った結果、パルスを 1 発与えても点火に至らずまた与えるパルスの回数を増やしても点火に至ることはなかった。次に側方電極が 2 極のスパークプラグを用いて実験を行ったところ、1 発のパルスで点火に至ることはなく、10 発のパルスで点火に至ったが同条件でも点火に至らないケースが約半数となった。同条件にてほぼ必ず点火に至るパルスの回数として 30 回を要することとなった。単気筒エンジンにて PPI での点火の実験を行った研究では 1 発のパルスでも点火に至るという報告があり、本実験容器が実際のエンジン燃焼室を模擬出来ていない可能性がある。点火環境の差異としては初期温度、初期圧の違いが考えられる。またスパークプラグの側方電極による点火への影響について、4 極のプラグの方が 2 極のプラグよりも電極からの熱損失が大きくなるため、点火に至らないという可能性が考えられる。単気筒エンジンでの試験結果と

の相違については、試作した点火栓の詳細仕様の個体差に起因するものと考えている。

(2) 放電の分光計測

PPI と CIC (従来型点火回路, Conventional Ignition Circuit) でそれぞれの放電による活性化学種の発生の様子を比較するために同一の光学系を用いて分光解析を行った。容器内圧力は 100 kPa (abs.), 容器内のガス温度は 25°C とした。PPI の放電状況は、繰り返し周波数 8 kHz, 放電繰り返し数 1000 回である。

図 5.2 に分光計測結果を示す。PPI, CIC ともに発光強度の最大値で正規化している。

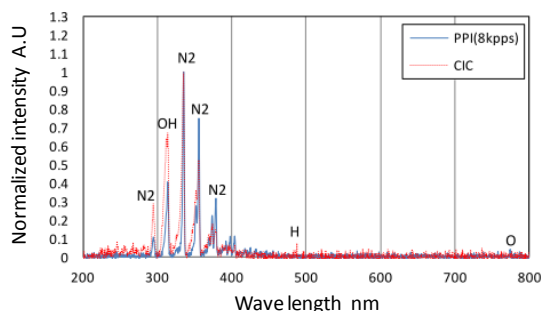


Fig. 5.2 Comparison of emission spectrums of PPI and CIC

PPI, CIC ともに 335nm で窒素分子の発光ピークを示していることがわかる。同様に 294nm, 355nm, 378nm でも窒素分子の発光ピークを示している。314nm で水酸化物イオンの発光ピークが検出され CIC の方が PPI より強度が高いことが見てとれる。また 486nm で水素イオンの発光ピークが検出された。777nm で酸素イオン (O) の発光ピークが検出され、これは特に PPI の放電にのみ見られた。これより、低温プラズマ繰り返し放電点火 (PPI) においては、酸素イオンを生成していることが示唆された。

(3) まとめ

定容燃焼容器に低温プラズマ繰り返し放電点火システムを適用して放電の分光解析実験を行い発生している活性化学種の調査を行った結果、以下の知見を得た。

- ① 側方電極が 2 極と 4 極のものを使用して定容燃焼容器を用いた燃焼実験に低温プラズマ放電点火を適用した結果、4 極プラグでのみ点火を行うことができた。
- ② 低温プラズマ放電点火 (PPI) と従来の火花点火 (CIC) の放電の分光解析の比較を行った結果、酸素イオンが PPI にて CIC と比較して特異的に検出された。

<引用文献>

- (1) IPCC Fourth Assessment Report
- (2) 独立行政法人, 環境再生保全機構, http://www.erca.go.jp/taiki/now_car/content_4_01.html
- (3) M. J. Hall, R. D. Matthews, O. O. Ezekoye, : “Railplug Ignition

Operating Characteristics and Performance: A Review”, SAE Paper No. 2007011832, (2007)

(4) J. D. Dale, A. K. Oppenheim, : “Enhanced ignition for I. C. engines with premixed gases”, Tras. SAE, Paper810146, vol.90, pp.606-621, (1981)

(5) J. D. Dale, P. R. Smy, R. M. Clements, : “Laser Ignited Internal Combustion Engine - An Experimental Study”, SAE Paper No. 780329, (1978)

(6) J. D. Dale, M. D. Checkel, P. R. Smy, : “Application of High Energy Ignition Systems to Engines”, Prog. Energy Combust. Sci. Vol.23, pp.379-398, (1997)

(7) 田上, 堀田, 森吉: “繰り返しパルスプラズマ放電を用いた点火システムの開発”, 自動車技術会論文集 Vol.39 No. 6, 20086035, (2008)

(8) 田上, 窪山, 森吉, 堀田, 清水, 今西, 飯田: “繰り返しパルスプラズマ放電を用いた点火システムの開発 第二報 点火機構の解明と実機での試験”, 自動車技術会論文集 Vol.40 No. 5, 20094583, (2009)

(9) 白石, 角方, 漆原, Cathey, Tang, Gundersen: “高速パルスプラズマによる内燃機関の新点火手法の検討”, 自動車技術会論文集 Vol.39 No.4, 20084644, (2008)

(10) 日本分光学会, 火炎の分光学的計測とその応用, (1990)

(11) 行村建, 放電プラズマ光学, (2008)

(12) 神原信志, 大気圧プラズマ反応光学ハンドブック, (2013)

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)

大高慶太, 森吉泰生, 窪山達也, 低温プラズマ繰り返し放電点火システムの分光解析, 自動車技術会関東支部 2013 年度 学術研究講演会 (工学院大学, 東京都, 新宿区), 2014 年 3 月 7 日

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

窪山 達也 (Tatsuya Kuboyama)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80578831