

小特集 プラズマ支援燃焼の現状と展望

5. 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

5. Radical Measurements and Ignition Characteristics of Repetitive Nano-Pulse Discharges Plasma

渡邊 正人, 堀田 栄喜, 田上 公俊¹⁾, 牛丸 浩二¹⁾, 窪山 達也²⁾, 森吉 泰生²⁾

WATANABE Masato, HOTTA Eiki, TANOUE Kimitoshi, USHIMARU Kohji,

KUBOYAMA Tatsuya and MORIYOSHI Yasuo

東京工業大学, ¹⁾大分大学, ²⁾千葉大学

(原稿受付: 2013年1月17日)

現在, 異分野融合型の新燃焼技術としてプラズマ支援燃焼が注目されている。これは, 非熱平衡プラズマにより内燃機関の点火・燃焼を促進させようとするもので, 自動車用ガソリンエンジン等への応用が期待されている。

本章では, 繰り返しナノパルス放電プラズマを用いた点火装置の開発を目的に, 放電プラズマ中のラジカル(活性化学種)の基礎特性を調べた。また, 小型の誘導エネルギー蓄積式パルス電源により生成される非平衡プラズマを用いた新たな点火装置を開発し, 希薄燃焼時の点火特性の改善を図った。特に, 定容燃焼器を用いて非平衡プラズマの点火機構の解明を試みると同時に, 実エンジンへ適用した結果を述べる。

Keywords:

non-thermal plasma, streamer discharge, nano-pulse, inductive energy storage, OH radical, flame ignition, ignition characteristic, gasoline engine

5.1 はじめに

現在の内燃機関技術には地球規模での環境問題やエネルギー資源枯渇問題の観点から, 高効率・低公害な燃焼技術の開発が求められている。火花点火エンジンの高効率で低公害な燃焼技術の1つとして希薄燃焼技術やEGR(排気再循環)希釈燃焼技術[1]が知られているが, 一方で失火や燃焼速度の低下など未だ解決すべき問題を内包している。これらの問題解決のために新たなコンセプトの点火装置が提案されている[2]が, いまだ実用化には至っていない。

近年, 非平衡プラズマを利用した支援燃焼技術が注目されている。これは, 非熱平衡プラズマ中のラジカル(活性化学種)等により内燃機関の点火・燃焼を促進させようとするもので, 火花点火エンジンの高効率化, 低公害化が期待できる。これまで, 著者らは小型の誘導エネルギー蓄積(Inductive Energy Storage: IES)式パルス電源[3]を用いて生成したプラズマを利用して, 様々な条件下での予混合気の点火特性を調べた。既報[4, 5]では, パルス幅300 ns程度の繰り返し極短パルスを用いることで, 希薄燃焼時の点火特性が改善されることを報告している。即ち, 反復パルス放電は希薄可燃限界を拡大させる効果および, 初期燃焼を促進する効果があることがわかった。

本章では, 繰り返しナノパルス放電プラズマを用いた点火装置の開発を目的に, まず針-平板電極を用いて放電プラズマ中のOHラジカルの基礎特性を調べた。次に, より実用的見地から詳細な点火特性について調べた。すなわ

ち, 1) 定容燃焼器を用いて, 実用的な燃料であるイソオクタンに対する希薄点火特性の改善効果の有無と点火改善効果に関するメカニズムの検討, および, 2) 実際のエンジンを用いて, 希薄・希釈点火特性の改善効果の確認実験を行った結果について述べる。

5.2 放電回路

本研究では, 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, パルス幅がきわ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(また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。回路図ならびに動作原理の詳細は文献[3]を参照していただきたい。

5.3 OHラジカルの計測

5.3.1 OHラジカルの寿命

非平衡プラズマ(ストリーマ放電)の高電界部では, プラズマ中に電子, イオンなどの荷電粒子, O, N, H, OH, NOなどのラジカル, 準安定原子や分子などが生成され燃焼の開始や維持・促進に関与する。これらの中でも, 特にOHラジカルの寄与は大きく, その特性を解明することは重要である。

ここではまず, 針-平板電極を用いて, OHラジカルの寿

author's address: Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-8502 Japan, ¹⁾Oita University, Oita 870-1192 Japan, ²⁾Chiba University, Chiba, 263-8522 Japan

corresponding author's e-mail: hotta.e.aa@m.titech.ac.jp

命を調べた結果を述べる。針電極に IES 式パルス電源を用いて正極性パルス電圧 15 kV (パルス幅 400 ns) を印加し、空気中で 40 μ s 間隔、10 回のストリーマ放電を行い、このとき生成された OH ラジカル量の時間変化をレーザー誘起蛍光 (Laser Induced Fluorescence: LIF) 法 [6] を用いて調べた。色素レーザー (Quanta System, D-100) の励起波長は 282 nm で針電極先端付近にレンズで集光し、レンズと狭帯域フィルタ (朝日分光社製 MZ0310, 中心波長 308.5 nm, 帯域 9 nm: FWHM) を用いて、波長 309 nm および 314 nm の蛍光を光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R2256-02) により受光した。

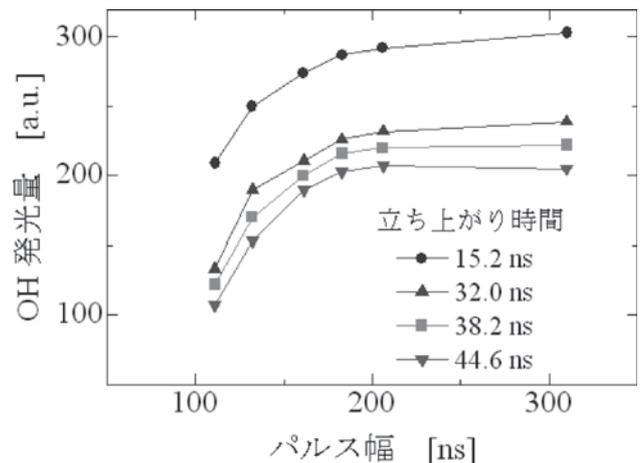
図 1 に、圧力 0.1 MPa の場合における LIF 出力の時間変化を示す。これより、OH ラジカル量は放電後、急激に減少するが、約 200 μ s 以降はほぼ一定値を示す傾向が見られた。この一定値部分はオゾン干渉によるものと推察できる。よって、観測開始から 200 μ s 経過までの観測値からオゾン干渉分を減じて平均寿命 (減衰時定数) を求めると 75 μ s となった。放電の繰り返しによるラジカルの累積効果を期待するには、少なくともパルス間隔をラジカル寿命よりも小さくする必要がある。著者らによる検討 [7] では、本実験のように放電パルス幅がラジカルの寿命に比べて十分に短い時、仮に放電間隔がラジカル寿命と同程度だとすれば、繰り返しパルス放電が継続する間、少なくとも単一放電によって生成される粒子数の約半分が維持されるという試算を得ている。このようなラジカル粒子の累積効果により、希薄燃焼実験における希薄可燃限界の拡大、点火遅れの減少が期待できる。

5.3.2 電圧パルス形状の影響

ここでは、燃焼特性に最適な印加電圧パルスの形状を調べる目的で、パルス幅と dV/dt が可変のパルス電源を用いて、放電生成プラズマからの励起 OH ラジカルからの発光量を計測した結果を紹介する。実験では、針-平板電極 (電極間隔: 2 mm) に、パルス幅が 111~310 ns, 立ち上がり時間が 15.2~44.6 ns のパルス電圧 (波高値: 10 kV) を印加した時の励起 OH ラジカルの発光量を、狭帯域フィルタを介して光電子増倍管により計測した。図 2 (a) および (b) は、パルス幅および立ち上がり時間の変化に対する OH

発光量の変化をまとめたものである。まず、パルス幅を変化させたときの発光量は、いずれの場合も $T=111$ ns から $T=206$ ns にかけて増大したが、 $T=206$ ns 以降は飽和傾向を示している。この理由については、以下のことが考えられる。

ストリーマの進展機構として、印加電圧パルス幅がある程度ある場合、ストリーマヘッドが針電極から平板電極へ進展 (1 次ストリーマ) した後、さらに針電極から 2 次ストリーマが進展を開始していくことが知られている。2 次ストリーマは 1 次ストリーマが既に進展した後に発生することから、ストリーマヘッドの電界が 1 次ストリーマに比べて低くなり、電子温度も低くなるが、逆に電子密度は高くなる。このため、OH をはじめとするラジカルの生成には 2 次ストリーマが有効であると考えられている [8]。実際に OH ラジカルの生成量は 1 次ストリーマより 2 次ストリーマの方が多いと報告もなされている [9]。このため、本研究においてもパルス幅が長い方が OH ラジカルの生成量も増大したと考えられる。ただし、放電が継続することにより、励起 OH ラジカルが生成されさえすれば OH 発光量が増えることになるため、パルス幅が長くなれば見目の OH ラジカル量が増えることになる。本実験結果において、ある程度のパルス幅以上で OH 生成量に飽和がみられたのは、パルス幅が長くなると、パルス後半部では



(a) パルス幅を変えた場合

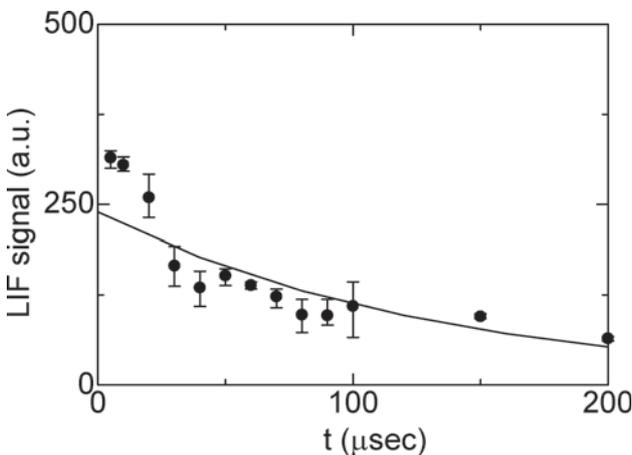
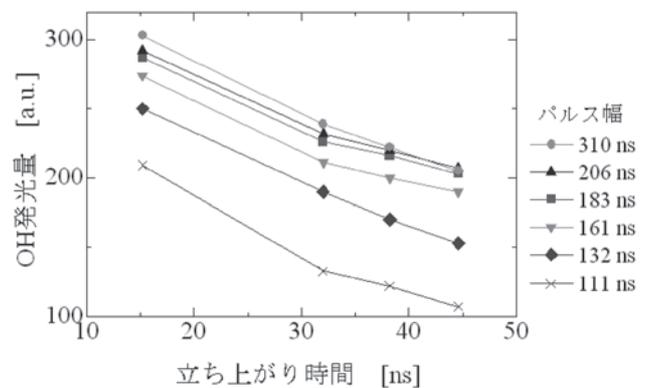


図 1 OH ラジカル量の時間変化.



(b) 立ち上がり時間を変えた場合

図 2 異なる放電パルス幅および立ち上がり時間に対する励起 OH 発光量の変化.

OH ラジカルが生成されなくなるためであると考えられる。さらには、長パルスではOH ラジカルの分解が起こることさえ考えられる。なお本実験では、励起 OH ラジカルの総生成量を計測しているため、長パルス電圧の印加により生成・蓄積、さらには分解され、最終的に残存するであろう OH ラジカル量を見積もることができない。

次に、立ち上がり時間に関しては、立ち上がり時間が短い方が OH ラジカルの発光量が多くなっている。これは、以下の理由による。一般に、放電は印加電界によって加速された比較的高いエネルギーを持った偶存電子が中性粒子に衝突し、これを電離することによって開始する。高気圧中での立ち上がり時間の長い、すなわち dV/dt の小さな放電（直流放電）では、比較的小数のストリーマによって電極間が橋絡するとアーク放電に移行し、非熱平衡プラズマが生成されないため、化学的活性の高いラジカル生成量が少ないだけでなく、高いエネルギー単位を持ったラジカルは生成され難い。これに対し、立ち上がり時間の短い、すなわち dV/dt の高い短パルス放電では、同時に多数のストリーマが発生し、アーク放電に移行する前に放電を停止すること、また放電開始電圧が直流放電電圧に比べてきわめて高くなるので、高いエネルギー単位を持つラジカルを生成しやすくなるため、OH ラジカルの発光量も多くなったものと思われる。

5.4 定容燃焼器を用いた実験

5.4.1 実験装置

本実験に用いた燃焼装置は、上下2面に直径92 mmの多孔板を、他の4面には直径92 mmの観測窓を配置した内径が約100 mmの球形に近い定容燃焼器である。図3に燃焼室の概観を示す。2枚の多孔板の後方にそれぞれ独立に駆動される遠心ファンがあり、混合気を攪拌することができる。本研究では分圧により所定の組成で混合気を充填し、ファンにより攪拌した後、時間をおいて壁面に取りつけた市販の点火プラグにより点火して実験を行った。

5.4.2 IES 点火回路の希薄点火特性

本研究ではまず、IES 点火回路の希薄点火特性を調べるため、IES の10パルス放電（以下 PRD10）、単パルス放電（以下 SD1）および、市販の自動車用点火回路（以下 CIC）により、点火確率、点火遅れを調べた。ここで SD1 は極短幅のアーク放電のみ、PRD10 は5回のストリーマ放電と5回のアーク放電となるようにパルス幅を調整した。この際、反復パルスは最大約 10 kV、パルス幅 300 ns、繰り返しパルス周波数 25 kHz 程度であった。本研究において点火確率は、放電後点火して燃焼に至った割合とし、点火遅れは放電から最大圧力の10%の圧力に達するまでの時間として定義した。実験は点火エネルギーを固定し、各条件に対して10~100回の実験を行い算出した。ここで、燃料はイソオクタンを、プラグはプラグ間隔 1.5 mm に拡大した市販のスパークプラグを図3に示すように装置壁面に取りつけて実験を行った。PRD10、SD1、CICの点火エネルギーの平均はそれぞれ約 20 mJ、15 mJ、20 mJ であった。

図4に初期圧力 0.1 MPa のイソオクタンに関して、当量

比と点火確率の関係を PRD10、SD1 および CIC に対してそれぞれ示す。CIC、SD1 を比較すると、100%の点火確率を示す当量比は 1.05 で変化がないが、それ以下の当量比では、SD1 の点火確率が向上（希薄可燃限界が拡大）していることがわかる。一方、PRD10 では100%の点火確率を示す当量比は 0.95 と、希薄可燃限界が大きく拡大しており、繰り返しパルス放電は希薄燃焼時の点火特性を向上させることがわかる。

図5にこの場合の当量比と点火遅れの結果を示す。図から、SD1 の点火遅れは CIC に比べて短縮していることがわかる。さらに PRD10 は SD1 に比べて点火遅れが減少している

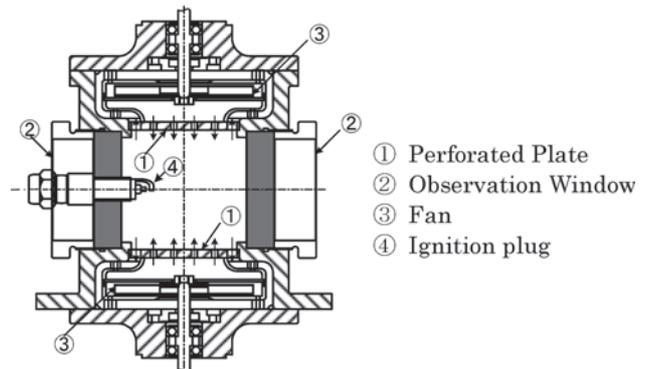


図3 実験装置。

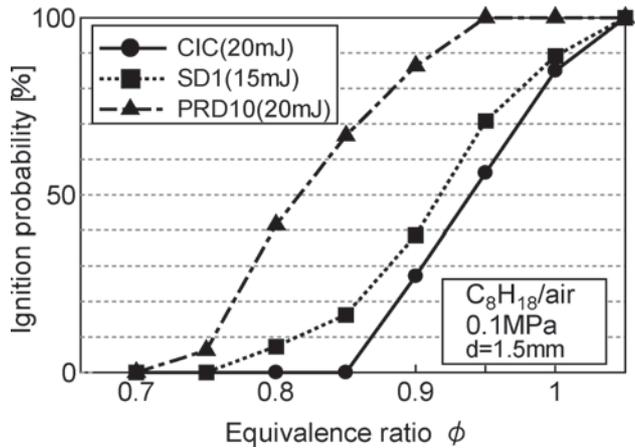


図4 IES 回路と自動車用点火回路の点火確率。

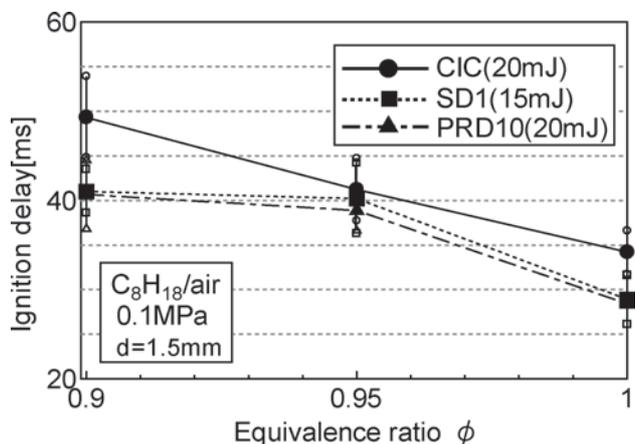


図5 IES 回路と自動車用点火回路の点火遅れ。

るが、その効果は点火確率の改善ほど大きくない。

以上のことから、IES 回路は市販スパークプラグでも、希薄点火特性改善効果があり、また、初期燃焼を促進する効果がある。さらにこの効果は、繰り返しパルスで顕著になることがわかった。

5.4.3 点火特性改善機構に関する考察

次に既存の自動車用点火回路に比べて、IES 回路の希薄および希積点火特性が改善するメカニズムを調べた。本研究では高速度カメラによるシュリーレン法により火炎核形成の様子を可視化した。

図6に当量比1.0のプロパン・空気混合気に対して得られたCICおよびIESのSD1, PRD10のシュリーレン写真を、点火からの時間0.5 ms, 2.0 ms, 4.0 msに対してそれぞれ示す。図6(a), (b)において、CICとSD1を比較すると、CICに比べSD1の火炎核は円環状で点火プラグから離れていることがわかる。これによりSD1はプラグへの熱損失が小さいことが推察される。また同時間で比較すると、SD1の供給エネルギーはCICより少ないに関わらず、SD1の火炎核はCICに比べて大きいことがわかる。初期火炎核が大きいと、初期燃焼が促進されると考えられる。これはSD1の点火特性がCICに比べ優れており、初期燃焼が促進されるといった以前の結果[3,4]と整合性を有する。これ

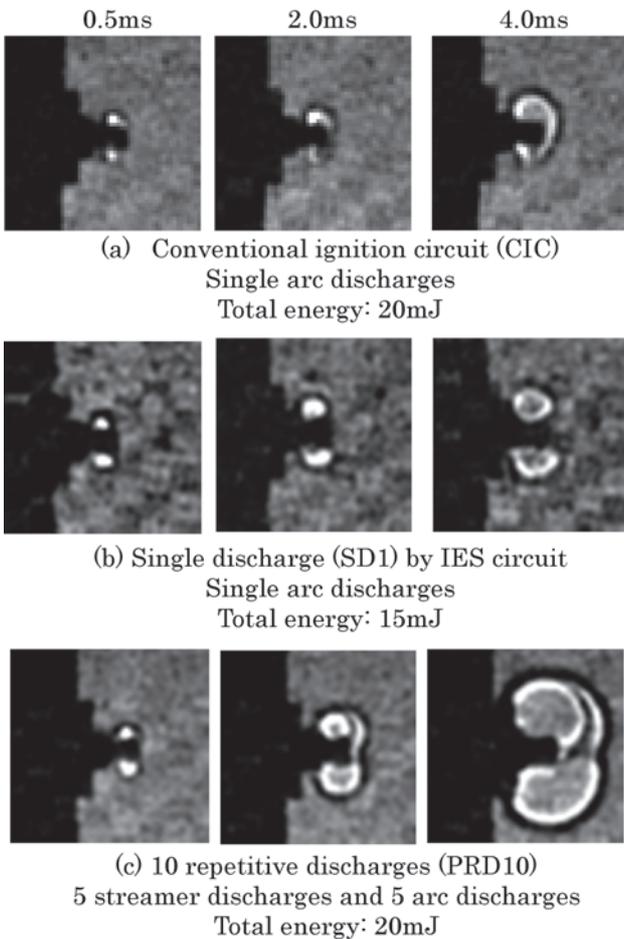


図6 当量比1.0のプロパン・空気予混合気のシュリーレン写真, time: 0.5, 2.0 および 4.0 ms.

らの現象に関して、同一エネルギーであるなら、できるだけ短い時間で与えた方が、点火性能が向上することは以前の研究[10,11]でも報告されている。一方、図6(c)において、反復パルス放電PRD10の火炎核は単パルス放電のSD1と基本的に似ているが、楕円体に近い形となっている。また、火炎核内にしわが確認できることから、火炎核が乱され表面積が増加していることがわかる。また、同一時間で比較すると、PRD10により形成された火炎核はより大きく成長していることがわかる。

5.5 実機での試験

最後に本研究ではIES点火回路 (PRD) と、既存の自動車点火回路 (CIC) により、単気筒エンジン (Bore×Stroke: 75×60 mm, 265 cc, 圧縮 10.5) での検証を行った。実験はエンジン回転数を1000 rpmに固定して行った。ここで繰り返しパルスは8回のストリーマ放電と、2回のアーク放電となるようにそれぞれのパルス幅を調整した。また、プラグ間隔はCICで0.5 mmであるが、PRDの場合、ストリーマ放電の効果を強めるため、1.5 mmとした。供給エネルギーはどちらも約140 mJ/cycleであった。

本研究では、まずエンジンの希薄限界に及ぼす繰り返しパルス放電の効果を調べた。ここで、IMEP (Indicated Mean Effective Pressure, 図示平均有効圧力) は440 kPaに固定し、A/F (エンジンに吸入される空気と燃料の質量比率) を14.7から希薄側へ変化させて実験を行った。この際、点火タイミングはMBT (Minimum spark advance for Best Torque, エンジンが最大トルクを発生する点火時期) とした。

図7にA/Fに対するIMEPのCOV (Coefficient Of Variation, 変動率)を示す。図7から、既存の自動車点火回路 (CIC) におけるエンジンの希薄安定稼働条件 (COV < 5%) は、A/Fが20であるのに対して、IES点火回路 (PRD) では23までの希薄運転が可能であることがわかる。これにより、本繰り返しパルス放電は、実機でも有効であり、希薄運転範囲を広げる効果があることがわかる。

次に本研究では、EGRによるエンジンの希積限界に及ぼす繰り返しパルス放電の効果を調べた。ここで、IMEPは630 kPaに固定し、A/Fを14.6一定の条件下で、EGR比を

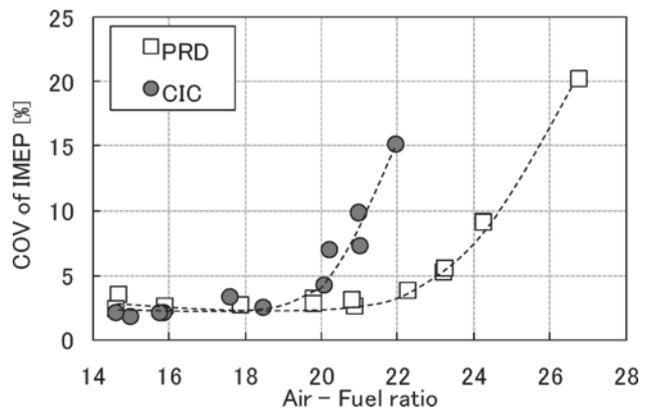


図7 A/Fに対するIMEPのCOV.

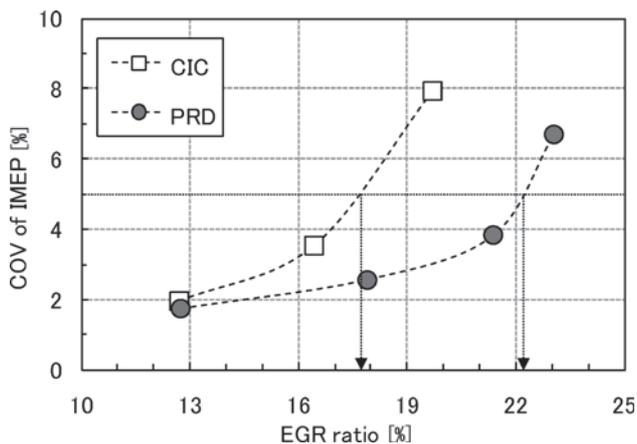


図8 EGR比に対するIMEPのCOV.

13%から23%まで変化させて実験を行った。ここでEGR比は給気と排気の二酸化炭素濃度から算出した。

図8にEGR比に対する、IMEPのCOVを示す。図6から、既存の自動車点火回路(CIC)におけるエンジンの希薄安定稼働条件(COV<5%)は、EGR比が17.5%であるのに対して、IES点火回路(PRD)では22%までの希釈運転が可能であることがわかる。これにより、本繰り返しパルス放電は、実機でも有効であり、EGRによる希釈運転領域を広げる効果があることがわかる。

5.6 まとめ

小型のIES式パルス電源を用いた非平衡プラズマ中におけるOHラジカルの発光量を計測した。また、様々な条件下での予混合気の点火特性を調べた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 針-平板電極におけるOHラジカルの平均寿命をLIF法により計測したところ75 μ sとなった。

- (2) 印加電圧のパルス幅と立ち上がり時間を変化させた場合、パルス幅が長いほど、また立ち上がり時間が短いほど励起OHラジカルからの発光量は多くなった。
- (3) IES点火回路の希薄および希釈点火特性は、既存の自動車用点火回路に比べて良好であり、また、IESの点火回路は点火遅れを減少させる効果、即ち、初期燃焼を促進する効果があるといえる。これは形成される初期火炎核の影響が大きいと考えられる。
- (4) IESの反復パルス放電を実機に適用し、市販の自動車用点火回路と比較した。この結果IESの反復パルス放電では希薄可燃限界がA/Fで20から23へ拡大した。
- (5) EGR使用時の実機に対して、IESの反復パルス放電では市販の自動車用点火回路と比べて、希釈限界がEGR比で17.5%から22%へと拡大し、熱効率が5%向上した。これは燃焼速度の増加と、等容度の増加によるものと考えられる。

参考文献

- [1] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals* (McGraw-Hill, 1988).
- [2] J.D. Dale *et al.*, *Prog. Energy Combust.* **23**, 379 (1997).
- [3] N. Shimizu, *et al.*, *Proc. 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*, 281 (2004).
- [4] K. Tanoue, *et al.*, *Int. J. Engine Research* **10**, 399 (2009).
- [5] K. Tanoue, *et al.*, *SAE Int. J. Engines* **2**, 298 (2009).
- [6] 渡邊正人, 堀田栄喜: *防菌防黴* **39**, 161 (2011).
- [7] 堀田栄喜 他: 平成23年電気学会全国大会講演論文集 1, 1-S2(3) (2011).
- [8] N. Nakagawa *et al.*, *J. Appl. Phys.* **110**, 073304 (2011).
- [9] 小野 亮: *プラズマ・核融合学会誌* **87**, 302 (2011).
- [10] R. Maly, *Spark Ignition: Its Physics and Effect on the Internal Combustion Engine* (Plenum Press, 1984) pp.91-148.
- [11] M. Tsue, M. Kono, *J. Combust. Soc. Japan* **48**, 257 (2006).