

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560182

研究課題名(和文) 極短時間パルス放電による高活性流動場形成過程のマルチフィジックス解析と応用

研究課題名(英文) Multiphysics Simulation on Reactive Flow Generated by Nano-Second Pulsed Discharge and Its Applications to Plasma Assisted Ignition

研究代表者

高奈 秀匡 (TAKANA, Hidemasa)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：40375118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、極短時間パルス放電による内燃機関の燃焼促進効果を明らかにすることを目的とし、放電形成モデルとプラズマ化学反応モデルを統合した解析モデルを構築し、内燃機関における着火時の条件である10気圧、600 Kにおけるメタン・空気希薄混合気中の誘電体バリア放電もしくは針状電極間ナノパルス放電を対象として二次元数値シミュレーションを行った。本研究により、極短時間パルス放電構造および放電により生成されるラジカル種の数密度分布などの基礎特性やラジカル生成における電子エネルギー分配機構が明らかとなった。さらに、放電により生成されたラジカルにより、着火遅れが大幅に改善されることが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, detailed two dimensional computational simulations of nanosecond pulsed DBD (dielectric barrier discharge) or pin-to-pin discharge in a lean methane/air mixture were conducted at 10 atm and 600 K for plasma assisted ignition in an internal combustion engine. The fundamental characteristics of the nanosecond pulsed discharge and the radical production processes in the typical operating condition of internal combustion engines are clarified with understanding the partition of electron energy for radical production. Lastly, the effect of plasma produced radicals on enhancement of ignition delay has been clearly shown.

研究分野：電磁流体工学

キーワード：プラズマ流 反応流動 燃焼促進 数値シミュレーション モデリング 非平衡プラズマ

1. 研究開始当初の背景

今日の自動車産業においては、内燃機関の環境負荷低減が求められており、そのためには、希薄燃焼による燃料消費率の向上が不可欠である。しかしながら、既存技術による希薄燃焼は、ほぼ限界に達しており、技術革新が求められている。

このような背景の下で、非平衡プラズマによる燃焼促進が希薄燃焼限界にブレークスルーをもたらす新技術として期待されており、現在、国際的にその基礎研究が精力的に行われている。しかしながら、これまでの研究の多くは、大気圧・室温での実験が多く、実際の応用で想定される高温・高压化でのラジカルの生成過程やストリーマの進展過程などの基礎現象は明らかにすることが実用化の上で不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、放電形成モデルおよびプラズマ化学反応モデルを統合した二次元数値計算により、内燃機関における着火時の作動条件を想定し、10 気圧、600 K における空気・メタン混合気中における非平衡プラズマおよびラジカル種の生成過程を明らかにする。さらに、ストリーマの進展に伴う気体加熱過程および酸化反応過程を解析し、非平衡プラズマ燃焼促進による内燃機関の高性能化のための基礎資料を提供することを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に示す誘電体バリア放電 (DBD) および針状金属電極間放電を対象とし、ドリフト・拡散モデルに基づく荷電粒子の連続の式および電位に関するポアソン方程式を支配方程式とする。連続の式の離散化には Scharfetter-Gummel スキームを用いた。電子の輸送係数および電子衝突に関する反応速度係数は Boltzmann 方程式の解として得られる電子のエネルギー分布関数から求め、換算電界強度の関数として与えた。また、Helmholtz モデルにより酸素分子の光電離を考慮した。

作動気体は窒素および酸素、メタンの混合気から成り、それらの組成は、 $N_2:O_2:CH_4=15:4:1$  (当量比 0.5) とした。本研究では、励起窒素および励起酸素を含む 28 化学種を考慮した。また、放電による気体加熱効果を明らかにするため、以下の内部エネルギーおよび窒素分子の平均振動エネルギー保存式を合わせて解いた。

4. 研究成果

(1) 極短時間誘電体バリア放電特性を数値シミュレーションにより明らかにした。

図 2 に 10 気圧、600 K の下で DBD 放電を行った際の印加電圧および放電電圧、放電電流波形を示す。ここで、放電電圧とは、露出電極と誘電体表面間での電位差であり、放電空間に印加されている電圧である。最大印加電

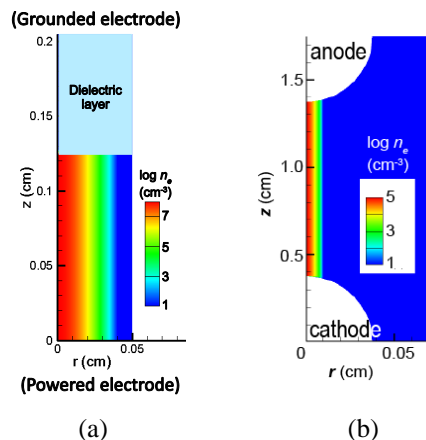


図 1 (a)誘電体バリア放電および(b)針状金属電極間放電の電極形状

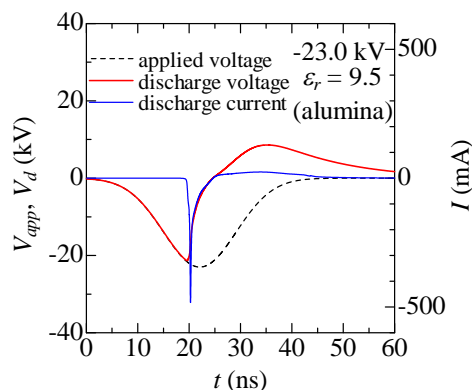


図 2 極短時間誘電体バリア放電における印加電圧および放電電圧、放電電流波形

圧である -23 kV が 22 ns 間に印加されており、その後、22 ns かけて 0 kV まで減少する。放電電圧は誘電体表面上に電子が蓄積するため、21.3 ns 後に急激に 0 V まで減少し、印加電圧とは逆向きの電圧が放電空間に印加され、誘電体に蓄積した電子は、放電空間に放出されることが明らかとなった。t = 19.7 ns において発生したストリーマは、誘電体側 (陽極) から露出電極側 (陰極) に向かって進展し、ストリーマ先端が露出電極に達すると、露出電極・誘電体間に放電チャネルが形成れ、瞬間的に 500 mA 程度の電流が流れる (20.7 ns)。

(2) 極短時間放電により生成されるラジカル種の濃度分布および寿命を定量的に明らかにした。

図 3 に時刻 t = 60 ns における誘電体バリア放電により生成される電子および酸素原子数密度の数密度分布を示す。生成されたラジカルの数密度分布は、電子密度分布とよく対応しているが、これはこれらラジカルがストリーマ先端における高電界域での高エネルギー電子の衝突反応により生成されるためである。最大で  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  程度の酸素ラジカルが生成され、中心軸上の放電空間中心部およ

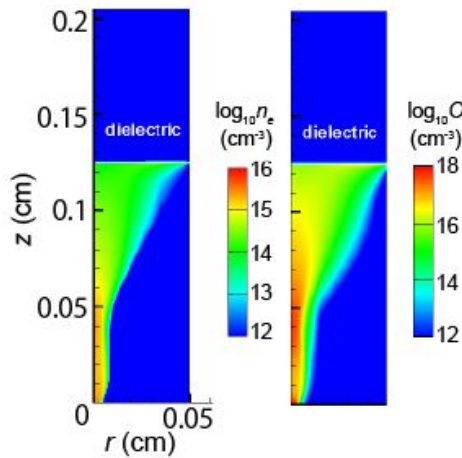


図3 極短時間誘電体バリア放電における電子および酸素原子数密度の数密度分布 ( $t = 60 \text{ ns}$ )

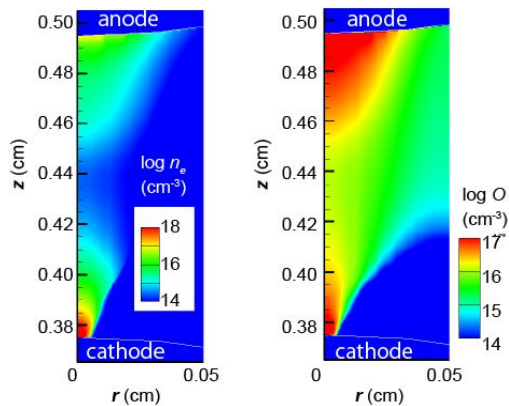


図4 針状金属電極間での極短時間パルス放電における電子および酸素原子の数密度分布 ( $t = 24.6 \text{ ns}$ )

び露出電極近傍において最大となり、半径方向に減少することが明らかとなった。

図4に時刻  $t = 24.6 \text{ ns}$  における針状金属電極間に形成される極短時間パルス放電中の電子および酸素原子の数密度分布を示す。誘電体バリア放電の場合と同様に、酸素原子の多くはストリーマ先端における電子の衝突反応により生成されるが、DBD放電の場合と異なり、針上電極の場合では、陽極および陰極の両電極近傍において高濃度の酸素原子が生成され、陽極側においてより広範囲でラジカルが生成されるが明らかとなった。

(3) 放電により生成された高活性化学種による燃焼促進効果を明らかにした。

針上電極間極短時間放電の1パルス後 ( $t = 24.6 \text{ ns}$ ) における生成化学種濃度を初期条件として局所燃焼反応解析を行った。1パルス後において生成された化学種の数密度が最大となる露出電極近傍における化学種組成を初期条件とし、スパークプラグ等の外部熱源温度を  $1200 \text{ K}$  と仮定して初期の気体温度

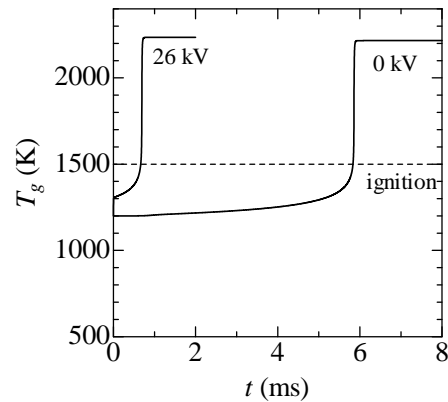


図5 放電により生成された高活性化学種による燃焼促進効果

とした。燃焼反応モデルには GRI-Mech. Ver.3.0 を基とし、オゾンの生成・消滅反応および励起化学種の脱励起過程を加えたものを用いた。なお、初期温度から  $1500 \text{ K}$  に達するのに要する時間を着火時間と定義した。

図5に温度の経時変化を各印加電圧に対してそれぞれ示す。極短時間放電を行わない場合には、 $5.8 \text{ ms}$  後に着火する。一方、印加電圧が  $26 \text{ kV}$  の下では、放電により生成された  $\text{O}$  および  $\text{OH}$  ラジカルによる低温酸化反応により気体温度が  $1200 \text{ K}$  から  $1300 \text{ K}$  まで  $10 \mu\text{s}$  間で急激に上昇し、着火に要する時間は、 $0.5 \text{ ms}$  後となる。極短時間放電による明確な着火遅れの改善効果を示され、放電により、着火遅れが  $88\%$  改善されることが明らかとなった。

(4) 本研究により得られた一連の成果は国内外の論文誌に掲載されるとともに、第31回電離気体現象に関する国際会議における招待講演およびその他4件の国内外での招待講演を行い、国際的にも高い評価を得ている。

#### 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)

Hidemasa Takana, Igor V. Adamovich and Hideya Nishiyama, Computational Simulation of Nanosecond Pulsed Discharge for Plasma Assisted Ignition, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 550, 2014, 012051 (9pp)  
DOI: 10.1088/1742-6596/550/1/012051

Hidemasa Tanaka and Hideya Nishiyama, Numerical Simulation of Nanosecond Pulsed DBD in Lean Methane-air Mixture for Typical Conditions in Internal Engines, Plasma Sources Science and Technology, 査読有, Vol. 23, No.3, 2014, 034001 (9pp)  
DOI: 10.1088/0963-0252/23/3/034001

高奈秀匡, 西山秀哉, 内燃機関燃焼促進のための極短時間パルス DBD 放電構造解析とエネルギー効率評価, 査読有, 日本機械学会論文集 B 編, 第 79 巻 801 号, 2013, pp.1005-1015,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/801/79\\_1005/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/801/79_1005/_article/-char/ja/)

[学会発表](計 16 件)

Hidemasa Takana, Igor V. Adamovich and Hideya Nishiyama, Computational Simulation of Plasma Assisted Ignition by Nanosecond Pulsed Discharge in Internal Combustion Engines, Plasma Conference 2014, Niigata, 2014 年 11 月 20 日

Zak Eckert, Hidemasa Takana, Hideya Nishiyama and Igor Adamovich, Master Equation Modeling of a Nanosecond Pulse Discharge in Nitrogen in a Pin-to-Pin Geometry, 14th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014), Sendai, 2014 年 10 月 9 日

Hidemasa Tanaka, Igor V. Adamovich and Hideya Nishiyama, Computational Simulation of Nanosecond Pulsed Discharge for Plasma Assisted Ignition, Proceedings of 13th European Plasma Conference, High-Tech Plasma Processes Conference (HTPP13), Toulouse, France, 2014 年 6 月 27 日

Ivan Shkurenkov, David Burnette, Walter R. Lempert, Igor V. Adamovich, Hidemasa Takana and Hideya Nishiyama, Kinetics of Excited States and Radicals in a Nanosecond Pulse Discharge and Afterglow in Nitrogen and Air, 13th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2013), Sendai, 2013 年 11 月 25 日

Hidemasa Takana and Hideya Nishiyama, Characterization of DBD Reactive Air Jet under High Temperature and High Pressure for Combustion Assist, 10th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013), Sendai, 2013 年 11 月 25 日

Hidemasa Takana and Hideya Nishiyama, Computational Simulation of Highly Reactive DBD Plasma for Combustion Enhancement, 12th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization (FLUCOME 2013), Nara, 2013 年 11 月 21 日

高奈秀匡, 西山秀哉, ナノパルス放電による内燃機関燃焼促進に関する数値シ

ミュレーション, 自動車技術会 2013 年秋季大会学術講演会, 名古屋, 2013 年 10 月 23 日

Hidemasa Tanaka and Hideya Nishiyama, Computational Simulation on Radical Production by Methane-Air DBD for Plasma Assisted Combustion, International Workshop on Flow Dynamics Related to Energy, Aerospace and Material Science, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2013 年 9 月 11 日, (招待講演)

Hideya Nishiyama, Hikaru Asano, Sho Murakawa and Hidemasa Tanaka, Characteristics of DBD Air Jet under High Temperature and High Pressure for Combustion Assist in an Internal Engine, 21st International Symposium on Plasma Chemistry, Cairns, Australia, 2013 年 8 月 8 日

Hidemasa Tanaka and Hideya Nishiyama, Numerical Study on Nano-Second Pulse Dielectric Barrier Discharge for Plasma Assisted Combustion, 21st International Symposium on Plasma Chemistry, Cairns, Australia, 2013 年 8 月 5 日

Hidemasa Tanaka and Hideya Nishiyama, Numerical Simulation of High-Energy Nano-Second Pulse DBD for Combustion Enhancement in Internal Engine, 31th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG-2013), Granada, Spain, 2013 年 7 月 16 日, (招待講演)

高奈秀匡, 内燃機関燃焼促進のための反応性プラズマシミュレーション, 日本フルードパワーシステム学会第 5 回機能性流体との融合化によるフルードパワーシステムの新展開に関する研究委員会, 東京, 2013 年 6 月 11 日, (招待講演)

Hidemasa Takana, Radical Production Characteristics by DBD Plasma at High Pressure and High Temperature Conditions, International Plasma Engineering for Nano Forum 2012, Cheorwon, Korea, 2012 年 11 月 28 日, (招待講演)

高奈秀匡, 燃焼促進用反応性プラズマ流動シミュレーション, 日本実験力学会第 7 回機能性流体に関する公開研究会, 仙台, 2012 年 11 月 13 日, (招待講演)

Hidemasa Takana and Hideya Nishiyama, Streamer Dynamics for Radical Generation in Air/Methane Mixture under High Temperature and High Pressure, 9th

International Conference on Flow Dynamics  
(ICFD2012), Sendai, 2012 年 9 月 20 日

高奈秀匡, 田中康規, 西山秀哉, 高温・  
高圧下における空気・メタン DBD 放電  
によるラジカル生成特性, 日本機械学会  
2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月  
10 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

東北大学流体科学研究所 電磁機能流動研究  
分野:

[http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/crfrd\\_effdl.html](http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/crfrd_effdl.html)

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nishiyama-lab/japanese.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高奈 秀匡 (TAKANA, Hidemasa)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号: 4 0 3 7 5 1 1 8

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

西山 秀哉 (NISHIYAMA, Hideya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号: 2 0 1 5 6 1 2 8