

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249015

研究課題名(和文)非平衡プラズマによるスマート燃焼サーマルマネジメント

研究課題名(英文)Thermal Management of Smart Combustion with Non-equilibrium Plasma

研究代表者

富田 栄二(Tomita, Eiji)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80155556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二酸化炭素や有害排出物の排出の低減のために、従来とは異なる新たなプラズマ支援燃焼方式を提案している。すなわち、大気圧・室温状態から高温・高圧状態までの着火・燃焼と非平衡プラズマの関係を物理的・化学的に調べるとともに、スマート燃焼という新たな研究分野を創出するための基礎現象を解明して、熱機関への応用を試みた。ラジカル密度、燃焼に及ぼすマイクロ波プラズマの影響、非平衡プラズマを重畳させたレーザー着火過程におけるラジカル挙動と燃焼特性、含水エタノールの燃焼・化学反応への影響を調べ、火炎の時空間制御の可能性を見出した。その結果、マイクロ波による燃焼の新たな可能性を見出すことができた。

研究成果の概要(英文)：We propose plasma-assisted combustion that is different from conventional combustion to reduce harmful exhaust emissions as well as carbon dioxide in this study. The purpose of this study is to investigate the relation between ignition and combustion and non-equilibrium plasma under the conditions from room temperature and atmospheric pressure to high temperature and pressure both physically and chemically. And then, fundamental phenomena were revealed to create a new research field of smart combustion and these findings were applied to heat power engines. The effect of microwave plasma on radical density and combustion, radical behavior and combustion characteristics in the process of laser ignition superimposed with non-equilibrium plasma, and the effect of microwave on wet ethanol combustion and chemical reaction were investigated. A propagating flame could be controlled spatially and temporally with microwave. As a result, the possibility of new combustion with microwave was found.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 熱機関 プラズマ支援燃焼 含水エタノール 非平衡プラズマ

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、エネルギーの有効活用と省エネルギー化の観点から、エネルギー変換方法としての燃焼の重要性が再認識されつつある。しかし、熱平衡化学反応工学と熱システム工学に基礎を置く従来の燃焼学では、有害排出物質や二酸化炭素排出量の削減には限界がある。そこで、従来の燃焼学に、プラズマ工学をも取り入れた全く新しい燃焼方式、すなわち、「スマート燃焼」を提案する。

米国やロシアなどでは、プラズマ支援燃焼は重要性の高い研究課題と考えられている。プラズマを用いた火炎制御、プラズマを用いた燃焼着火の制御、石炭や液体燃料のガス化などの研究が行われている。一方、国内では、非平衡反応性プラズマに関する研究は材料プロセスやその周辺分野に偏っており、非平衡反応性プラズマ研究で得られた知見や考え方を燃焼工学に応用しようとする研究はほとんどなかった。化学工学の分野では、火炎の制御を目的として火炎に高周波電力を印加する実験がなされているが、非平衡反応性プラズマ分野での成果の蓄積が活用されているとは言い難く、基礎研究の範疇にとどまっている例がほとんどである。

非平衡反応性プラズマを燃焼前、燃焼中、燃焼後のあらゆる局面に利用して、その改善に寄与させ、窒素酸化物などの有害排出物質と二酸化炭素排出量の削減効果を得ようとする研究はこれからの課題である。ところが、国内では、燃焼科学にプラズマ工学など他の学問分野を融合させるという視点に立った研究が皆無に近い。今後のエネルギー資源の運用上極めて重要なプラズマ支援燃焼に関する学術的知見・工業的権利が他国に奪われることは、日本にとって著しい損失であり、早急にこのような研究プロジェクトを立ち上げる必要がある。

我々のグループでは、平成 22 年からバイオエタノール燃料利用のため、燃焼工学にプラズマ工学の概念・手法を導入し、従来の燃焼工学では記述することができないような新たな研究分野、すなわち非平衡プラズマを取り入れた超燃焼システムの現象解明に取り組んできた。非平衡プラズマにより、バイオエタノール等、含水性燃料の着火性に対して負の効果を有する水分を正の効果を有する OH ラジカルに転換することができる。バーナーや熱機関への適用を考え、大気圧・室温状態から熱機関内における高温・高圧状態までの着火・燃焼と非平衡プラズマの関係を調べているところである。その結果、水分を含むことによって、空気に比べてより強い酸化能力を持つ OH ラジカル含有ガスとなり、希薄燃焼や難燃性燃料の燃焼活性化を実現できることを明らかにした。

2. 研究の目的

大気圧・室温状態から高温・高圧状態まで

の着火・燃焼と非平衡プラズマの関係を調べるとともに、新たに提案する「スマート燃焼」によるサーマルマネジメントを行う。

具体的には、ラジカル密度、燃焼効率に及ぼすマイクロ波プラズマの影響、レーザー着火過程における非平衡プラズマを重畳させた場合のラジカル挙動と、初期火炎核生成等の燃焼特性との関係性、火炎伝播中の火炎の時空間的制御、含水エタノールの燃焼化学反応への影響、を調べ、その物理的・化学的過程をプラズマ状態の把握と合わせて現象解明することで、スマート燃焼という新研究分野を構築する。

以上より、これらの物理的・化学的過程をプラズマ状態の把握と合わせて解明する。スマート燃焼という新たな研究分野を創出するための基礎現象を解明し、実機への適用の可能性の道筋をつける。

3. 研究の方法

ラジカル密度、燃焼効率に及ぼすマイクロ波プラズマの影響

マイクロ波プラズマの電子温度および電子密度を測定した。安定したプラズマ生成を得るために、直径 3 mm の二つの円筒電極(ギャップ長 12 mm)の間にマイクロ波を印加する放電方式を用いた。二つの円筒電極は真空容器の中に納められており、真空容器の内部を油回転ポンプで一旦真空に排気した後、ヘリウムガス(大気圧から 10 気圧(1 MPa))を封入した。上側円筒電極を半導体マイクロ波電源に接続した。マイクロ波電力は繰り返し周波数 10 Hz で ON/OFF 変調しており、ON 時間は 2 ms で ON 時の瞬時電力は 200 W とした。下部側円筒電極は乗用車用点火コイルを経て接地した。火花放電の 0.5 ms 後にマイクロ波電力を供給し、プラズマを生成した。プラズマの電子温度と電子密度を測定するためにレーザートムソン散乱法を用いた。波長 532 nm、エネルギー 7 mJ、パルス幅約 10 ns の Nd:YAG レーザー光を二つの円筒電極の中央に集光照射し、生じるトムソン散乱光を 3 重回折格子分光器の入口スリットに導いた。トムソン散乱光の強度をガス圧が既知の窒素によるラマン散乱光強度と比較することにより電子密度を求め、トムソン散乱スペクトルの解析から電子温度を求めた。

マイクロ波プラズマの電子温度のヘリウムガス圧に対する依存性を図 1 に示す。マイクロ波電力印加後 0.2 ms、1.0 ms、および 1.9 ms が経過した時点における電子温度をプロットした。図からわかるように、電子温度はガス圧に対して増加し、9 気圧の場合でも約 2.5 eV の電子温度が得られることがわかった。これに対し、不純物としての水蒸気を起源とすると思われる OH ラジカルの発光スペクトルから評価したガス温度は 3000 K より低く、非平衡プラズマが得られていることがわかった。

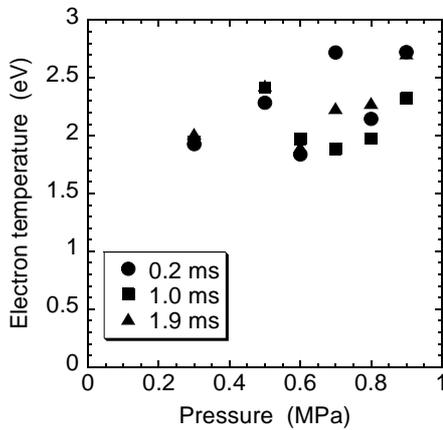


図 1 マイクロ波プラズマの電子温度のガス圧に対する依存性

一般に、プラズマの電子温度はガス圧に対して減少すると考えられているが、図 1 に示したとおり、本実験の結果では、1 気圧を超えるガス圧において、電子温度はガス圧に対して増加した。このメカニズムとして、1)再結合による低エネルギー電子の消失、2)ヘリウムエキシマどうしの衝突による低エネルギー電子の生成、および、3)準安定状態ヘリウム原子どうしの衝突による低エネルギー電子の生成が考えられる。高ガス圧条件で生成されたプラズマは拡散で無くヘリウムを第 3 体とする 3 体再結合で消失することが、マイクロ波電力遮断後のアフターグロー時間における電子密度の時間変化により確かめられている。1)および 3)の過程は他のガスを用いたプラズマにも共通すると考えられ、これらが本研究で用いた方式のマイクロ波プラズマにより高ガス圧条件においても非平衡プラズマが得られるメカニズムであると考えられる。

マイクロ波プラズマ重畳場でのレーザー点火過程の調査

マイクロ波プラズマ重畳場でのレーザー点火過程の調査を行うために、様々な圧力と温度の雰囲気条件における燃焼特性、プラズマ特性の影響について高速度カメラ、分光器を用いて調査した。

誘電体バリア放電のアフターグローガス中でのレーザー着火実験では、内径 7 mm の石英管の中央に接地したタングステンワイヤを設置し、石英管の外周に円筒電極を設置して、円筒電極を高電圧電源に接続することにより、石英管の内部に同軸型の誘電体バリア放電を生成した。ガスにはメタン / 酸素 / アルゴンの予混合ガスを用い、水蒸気を添加する場合には、予混合ガスを水中にバブリングした。プラズマは石英管の内部でのみ生成されるが、そのアフターグローガスがガス流と共に石英管上部の空間に放出される。石英管の上端から約 4 mm 離れた軸上に波長 532 nm

の Nd:YAG レーザーパルスを集光照射し、レーザー着火を行った。着火点の周囲に伝播する火炎核の様子をシャドウグラフ法により高速度撮影した。また、石英管上部の空間における OH ラジカル密度をレーザー誘起蛍光法により測定した。

バブリングを経たメタン / 酸素 / アルゴンの予混合ガス中にレーザー照射を行ったとき着火に至る確率が 0%のレーザー照射条件(レーザーエネルギー 2.7 mJ)において、誘電体バリア放電を生成すると着火の確率は 100%となり、水蒸気を含む予混合ガスの着火に対するプラズマの効果は極めて顕著であることが確かめられた。レーザー照射後 1.5 ms 後における火炎核のシャドウグラフ像をプラズマ生成が無い場合とある場合(放電電圧 14 kV)で比較して図 2 に示す。図の下部には石英管の位置が描かれており、図の中央部付近の丸点はレーザー照射点を表している(ただし、ガス流に沿ってのレーザー照射点の上方への移動を考慮している)。上方に伝播する火炎核は石英管からの距離が 12-13 mm の位置にあり、その伝播速度はプラズマ生成の有無によってあまり違いが無い。一方、下方に伝播する火炎核はプラズマ生成によって伝播速度が大きくなり、レーザー照射後 1.5 ms において石英管付近にまで到達している。また、プラズマを生成した場合に下方に向かう火炎核には複雑な凹凸形状が認められる。

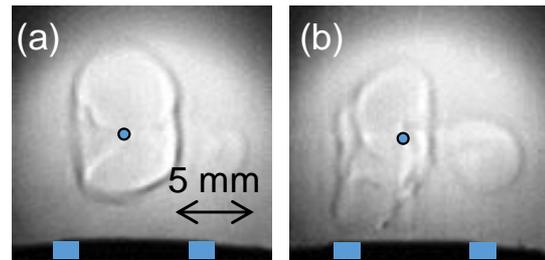


図 2 レーザー照射後 1.5 ms において観測されたレーザー照射点付近のシャドウグラフ像。(a)誘電体バリア放電を生成しない場合、(b)誘電体バリア放電を生成した場合

レーザー誘起蛍光法を用いて OH ラジカル密度の空間分布を測定すると、石英管直上の OH ラジカル密度は石英管から 15 mm 離れた位置の OH ラジカル密度に比べて一桁程度高密度であることがわかった。したがって、下方に向かう火炎核が大きな伝播速度をもつ原因として、燃焼化学反応に対する OH ラジカルの寄与が示唆された。この結果から、燃焼化学反応に負の効果を持つ水蒸気をプラズマによって OH ラジカルに転換し、燃焼化学反応を活性化するという本研究計画のコンセプトはある程度確かめられたと考えられる。

マイクロ波のレーザー誘起ブレイクダウンに対する重畳の効果を明らかにするために、最小点火エネルギーを計測した。図3にマイクロ波の重畳有無の各条件における火炎伝播の高速度撮影画像および圧力履歴を示す。マイクロ波を重畳させた条件では、プラズマのサイズが大きく、プラズマからの発光が強くなり、容器内圧力の立ち上がりも早期化していることが分かる。このことから、マイクロ波の重畳によってレーザー点火の燃焼速度の向上を達成することができることが明らかとなった。

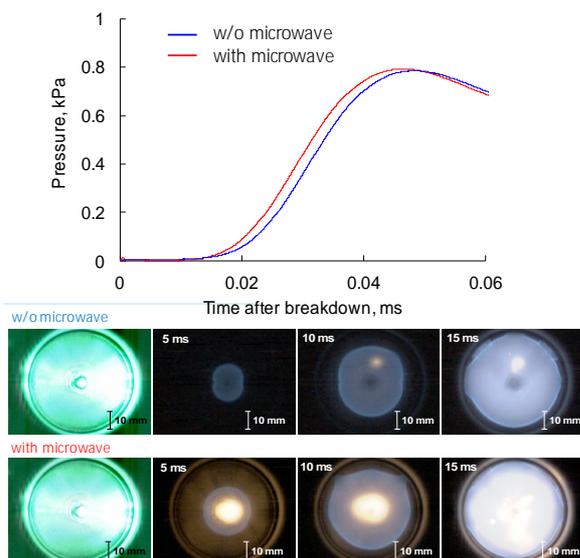


図3 マイクロ波重畳の有無による圧力履歴および直接高速度写真の例（メタン-空気混合気，当量比 1.0，レーザーのエネルギーは 7mJ，MW のエネルギーは 0.5ms，360mJ，上がマイクロ波あり，下がマイクロ波なし）

次に、異なるマイクロ波重畳条件におけるレーザー点火試験を行った。図4に最小点火エネルギーのマイクロ波重畳時間に対する変化を示す。図4の横軸はマイクロ波の印加時間である。また、縦軸はレーザー点火に必要な最小のレーザー入射光エネルギーを表している。図4より、マイクロ波の重畳時間の増加に伴い、点火に必要なレーザーの入射光エネルギーが大きく減少していることが分かる。また、重畳時間によるレーザーの入射光エネルギー低減の効果は、200 μ s までが大きく、それ以上の重畳時間は大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。この数 100 μ s の時間スケールは火炎核形成の時間スケールと同程度であり、レーザー点火では、点火源となるプラズマから火炎核が形成されるまでの時間プラズマを持続させることが有効であることを明らかにした。また、連続照射だけでなく、デューティ比 D.R. を設定してもマイクロ波の重畳による効果を得ることが可能であり、レーザー点火に必要な、最小のレーザー入射光エネルギーの低減が可能であることを示した。

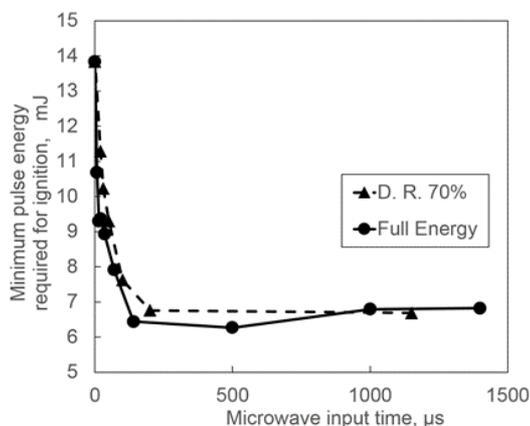


図4 デューティ比 D.R. 有無における最小レーザー着火エネルギー

半導体マイクロ波発振電源の開発を行い、500W@2.45GHz のパルス発振電源を開発した。さらに、半導体デバイスの高出力化により 1kW@2.45GHz、より小型で高出力、制御性の良い 1.6kW@2.45GHz のパルス発振電源を試作した。半導体化により、マイクロ波のパルス発振制御が容易となり、レーザー点火への重畳時期、重畳時間、エネルギーを数百ナノ秒から数マイクロ秒オーダーで任意に制御できるようになった。マイクロ波アンテナおよびチューナーを用いるシステム構成により、レーザー誘起ブレイクダウンの位置に対する相対位置の影響についても評価できるようになった。

本装置と定容容器を用いて高圧下でのプラズマ分光計測を行った。マイクロ波パルス発振パターン（ピーク出力、発振時期、持続時間等）により発光スペクトル（金属発光有無含む）に差異が観測され、現象解明の一助となった。また、出力ピークエネルギー、パルス幅、休止時間、デューティ比の違いによるマイクロ波発振パターンによって、活性ラジカル種である OH の発光強度、持続時間が変化することが観察された。

火炎の時空間的制御

火種（放電等による局所プラズマ）の不要なマイクロ波共振回路を利用した非平衡プラズマ発生用のプラグを開発した。発振用、受信用に役割分担することで生成したプラズマの拡大化が可能となり、非平衡プラズマによる初期火炎、燃焼中の火炎の時空間的制御の可能性を示した。

火炎の観測が可能な装置を試作し、予混合伝播火炎に及ぼす影響を調べた。その結果、マイクロ波プラズマの作用位置、作用時刻により、任意の条件で（伝播火炎通過直後に）、プラズマストリークが発生し、瞬間的に火炎伝播速度の向上が観察された（図5）。この効果は、マイクロ波入力エネルギーが高いほど顕著である。

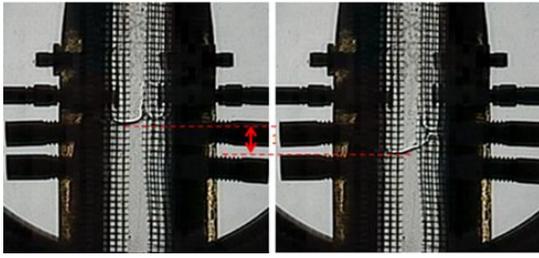


図 5 火炎伝播へのマイクロ波の照射（上から下へ火炎が伝播。側面任意の位置にある非平衡プラズマ生成プラグで火炎面が到達，前/中/後でプラズマ生成による伝播速度の差異を高速カメラで計測）

含水エタノール燃焼に及ぼすプラズマの効果

定容容器内でエタノールに水を混合させた後、蒸発させて空気との当量比 0.7 の希薄予混合気を作成した。含水エタノールと空気の予混合気にレーザー着火をさせた場合、容器内の圧力履歴および高速直接写真撮影結果から、含水率 10～20%程度においては、含水率 0%の場合よりも初期燃焼が促進されることがわかった。

次に、ほぼ同様の定容容器内で、火花放電にマイクロ波を重畳させて、容器内圧力の計測および高速直接写真の撮影を行った。この場合も、レーザー着火の場合と同様、エタノールに水を混合すると、通常の火花点火のみでも、水の 20%混合までは燃焼がやや早くなる。火花点火のみの場合よりも、マイクロ波を重畳させると初期燃焼が速くなる。マイクロ波投入の Duty 比を 80%まで増加させると、水を 30%および 40%混合させても燃焼が改善された。

4. 研究成果

上記が主な結果であるが、そのほか、nヘプタン、BDF 燃料を用いた高圧燃焼容器内での噴霧燃焼において、噴霧にマイクロ波プラズマを作用させることで自着火遅れの改善が、観察された。また、本研究の応用として、SIBS (Spark induced Breakdown Spectroscopy) 法による局所混合気濃度の計測法にも進歩が見られた。

以上、これらの知見を整理し、今後の低質燃料への適用法、スマート燃焼によるサーマルマネジメントの学理探求の一助とする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件、いずれも査読有)

K. M. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Combustion characteristics of wet ethanol ignited using a focused Q-switched Nd:YAG nanosecond laser, *Fuel*, **156**(2016) 331-340, doi:10.1016/j.fuel.2015.10.067

K. Sasaki, S. Soma, H. Akashi, M. ElSabbagh, and Y.

Ikeda, Electron temperatures and electron densities in microwave helium discharges with pressures higher than 0.1 MPa, *Contrib. Plasma Phys.* **55** (2015), 563-569, DOI 10.1002/ctpp. 201500033.

Md T. A. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Effect of ambient pressure on local concentration measurement of transient hydrogen jet in a constant-volume vessel using spark-induced breakdown spectroscopy, *Int. J. of Hydrogen Energy*, **40-13** (2015) pp.4717-4725.

N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Laser-induced plasma generation and evolution in a transient spray, *Optics Express*, **22-S1**(2014), A44-52.

Md T. A. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Visualization and Concentration Measurement of a Direct-Injection Hydrogen Jet in a Constant-Volume Vessel Using Spark-Induced Breakdown Spectroscopy, *Int. J. of Hydrogen Energy*, **39-31** (2014), 17896-17905.

A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, J. Hayashi, F. Akamatsu, Ignition characteristics of methane/air premixed mixture by microwave-enhanced laser-induced breakdown plasma, *Optics Express*, **21-S6**(2013), A1094-1101.

〔学会発表〕(計 27 件、うち招待講演 5 件)

(1) 劉, 林, 沢田, 赤松, 西山, 池田, マイクロ波プラズマ重畳によるレーザー点火特性の向上, 第 91 期日本機械学会関西支部定時総会講演会(大阪), (2016.3.12), 50-53.

(2) N. Kawahara, E. Tomita, Y. Takagi, Y. Mihara, Local air-fuel ratio measurement using spark-induced breakdown spectroscopy (SIBS) in a hydrogen DISI engine, 2nd Int. Forum on Advanced Technologies (IFAT2016, Tokushima), (2016.3.8) (Invited)

(3) 出口, 佐々木, 誘電体バリア放電の空間アフターグロー中でのレーザー着火実験, プラズマ・核融合学会北海道地区研究連絡会第 19 回研究会 (2016.2.16, 札幌)

(4) 劉, 林, 赤松, 西山, 池田, マイクロ波重畳レーザー点火の点火特性, 第 53 回燃焼シンポジウム(つくば), (2015.11.16)

(5) 出口, 佐々木, 誘電体バリア放電の空間アフターグロー中でのレーザー着火実験で観測された火炎核の伝播速度, 第 76 回応用物理学学会秋季学術講演会 (2015.9.15, 名古屋)

(6) Y. Ikeda, A. Nishiyama, A. Moon, Application of microwave enhanced plasma spectroscopy to evaluate limit of contamination in aqueous liquid jet, 8th Euro-Mediterranean Symp. on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (EMSLIBS2015, Linz, Austria), (14 September 2015) O-15.

(7) J. Hayashi, N. Nakatsuka, F. Akamatsu, Studies of Laser Ignition for the Constant Volume Combustion Vessel in Osaka Univ., 3rd Laser Ignition Conf. (LIC15, Argonne, USA) (2015.4.30), Th4A.1 (Invited)

(8) C. Liu, J. Hayashi, F. Akamatsu, A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, Effects of duty ratio on Microwave-enhanced laser ignition, The 3rd Laser Ignition Conf. (LIC'15, Argonne, USA), (2015.4.30), Th4A.2.

(9) K. M. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Experimental Study on Combustion Characteristics of Wet Ethanol Ignited by Laser-Induced Breakdown,

- The 3rd Laser Ignition Conf. (LIC'15, Argonne, USA), (2015.4.29), W3A.2.
- (10) K. M. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Evaluating Effect of Elevated Water Content on Laser-Ignition Characteristics of Premixed Charge of Ethanol-Air., 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2014.12.3, 岡山), 講演番号 B133, pp.54-55.
- (11) 松永, 河原, 富田, 高木, 三原, SIBS 法による高圧筒内直接噴射水素エンジンでの点火プラグ近傍局所空気過剰率計測, 自動車技術会 2014 秋季学術講演会講演論文集, (2014.10.23, 仙台), 講演番号 20145690.
- (12) K. Sasaki, S. Soma, M. ElSabbagh, Y. Ikeda, Electron temperatures and electron densities in multi-atmospheric-pressure microwave helium discharges, 14th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Hakone, 2014.9.22)
- (13) A. Nishiyama, Y. Ikeda, LOD of Contamination in Aqueous Liquid Jet, The 8th Int. Conf. on Laser Induced-breakdown Spectroscopy (LIBS2014, Beijing, China), (10 September 2014).
- (14) 河原, 富田, 池田, スプレーガイド直噴機関におけるマイクロ波プラズマのプラズマ形成過程, 自動車技術会 2014 春季大会講演前刷集, (2014.5.22, 横浜), 講演番号 20145451.
- (15) J. Hayashi, K. Yoneda, K. Sugeta, C. Liu, F. Akamatsu, A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, Characteristics of Microwave-Enhanced Laser Ignition in Methane/air Premixed Mixture, The 2nd Laser Ignition Conf. (LIC14, Yokohama), (2014.4.24), LIC6-2.
- (16) J. Hayashi, K. Sugeta, C. Liu, K. Yoneda, Y. Tokunaga, I. Morimoto, F. Akamatsu, Effects of Laser Irradiation Delay on the Laser Ignition Characteristics of Hydrogen Jet Injected into a Constant-volume Combustion Vessel, The 2nd Laser Ignition Conf. (LIC14, Yokohama), (2014.4.24) **(Invited)**
- (17) J. Hayashi, K. Yoneda, K. Sugeta, C. Liu, F. Akamatsu, A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, Characteristics of Microwave-Enhanced Laser Ignition in Methane/air Premixed Mixture, The 2nd Laser Ignition Conf. (LIC14, Yokohama), (24 April 2014), LIC6-2.
- (18) 相馬, 池田, 佐々木, 大気圧以上のガス圧を有するマイクロ波プラズマにおけるレーザートムソン散乱計測(II), 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (2014.3.17, 青山学院大学)
- (19) E. Tomita, Application of Plasma-Assisted Combustion to Internal Combustion Engine, 1st Laser Ignition Conf. (LIC13, Yokohama), (April 25, 2013), LIC8-1 **(Invited)**
- (20) N. Kawahara, E. Tomita, Interaction between laser-induced plasma and fuel spray, 1st Laser Ignition Conf. (LIC13, Yokohama), (April 25, 2013), LIC8-3
- (21) A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, J. Hayashi, F. Akamatsu, Ignition characteristics of methane/air premixed mixture by microwave enhanced laser-induced breakdown plasma, 1st Laser Ignition Conf. (LIC13, Yokohama) (April 25, 2013), LIC8-4.
- (22) A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, J. Hayashi, F. Akamatsu, Characteristics of Laser Ignition in Methane/air Premixed Gas with Pico-second Pulse Duration Laser, The 1st. Laser Ignition Conf. (LIC13, Yokohama), (April 25, 2013), LIC8-5.
- (23) 林, 古井, 菅田, 中塚, 森本, 徳永, 赤松, 空气中に噴射される水素噴流に対するレーザー誘起ブレイクダウンを用いた点火, 2013 年日本機械学会年次大会(岡山) (2013.9.10), (**招待講演**)
- (24) S. Soma, R. Tsuruoka, Y. Ikeda, K. Sasaki, Gas temperatures in high-pressure microwave plasmas for plasma-assisted combustion in automobile engines, XXXI Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (グラナダ国際会議場, スペイン), (2013.7.14-19)
- (25) K. Sasaki, S. Soma, Y. Ikeda, Thomson scattering in high-pressure microwave plasmas for plasma-assisted combustion in automobile engines, 66th Annual Gaseous Electronics Conf. (Princeton, USA), (2013.10.1)
- (26) Md T. A. Rahman, N. Kawahara, E. Tomita, Mixing Process of Direct Injection Hydrogen Jet in a Constant Volume Vessel by Using Spark-Induced Breakdown Spectroscopy, SAE/KSAE 2013 International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting(Seoul, Korea), (2013.10.21)
- (27) 相馬, 池田, 佐々木, 大気圧以上のガス圧を有するマイクロ波プラズマにおけるレーザートムソン散乱計測, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 (2013.9.19, 同志社大学)

{ その他 }

以下のホームページで公開している。

<https://powerlab.mech.okayama-u.ac.jp/~plasma/index.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

富田 栄二 (TOMITA Eiji)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：80155556

(2) 研究分担者

佐々木 浩一 (SASAKI Koichi)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50235248

赤松 史光 (AKAMATSU, Fumiteru)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10231812

池田 裕二 (IKEDA, Yuji)

イマジニアリング株式会社 代表取締役

研究者番号：10212789

(3) 連携研究者

河原伸幸 (KAWAHARA Nobuyuki)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30314652