

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246025

研究課題名（和文）

非平衡プラズマによる含水物超燃焼熱システムの着火・燃焼過程の解明

研究課題名（英文） Investigation of ignition and combustion processes of ultra-combustion heat system with containing water due to nonequilibrium plasma

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

研究成果の概要（和文）：

マイクロ波プラズマの性質を診断して、予混合バーナーおよび火花点火機関の着火に適用した。マグネトロンを電源に用いた場合から研究を始め、このプラズマ発信源を半導体に置き換えることによって安定したプラズマを生成することができた。エタノールのように含水性のある燃料に、マイクロ波プラズマを利用した着火システムは、含水の効果により有用であることが分かった。さらに、含水エタノール燃料の場合、レーザーブレークダウンによるプラズマ生成によっても着火を促進するなど有益な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

The properties of plasma produced by microwave were investigated and this plasma was applied to the ignition in a premixed burner and in spark-ignition engines. At first, the plasma made by magnetron was used at first and the power supply was changed to semiconductor type, so that stable plasma was produced. It is found that the ignition system utilizing microwave plasma is very useful for the fuel such as ethanol containing water. Furthermore, when ethanol with water is used, ignition is promoted due to the plasma produced by laser induced breakdown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	23,600,000	7,080,000	30,680,000
2011年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2012年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	38,000,000	11,400,000	49,400,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学、燃焼

キーワード：燃焼、着火、予混合燃焼、プラズマ、非平衡プラズマ、熱機関

1. 研究開始当初の背景

(1) 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おり、プラズマを用いた火炎制御、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ッシングおよびその周辺分野に偏って研究されており、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。化学工学などの分野では、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い。また、この種の研究は、燃焼現象そのものに興味を中心を置いた基礎研究にとどまっていた。

(2) 非平衡反応性プラズマをバイオエタノール等の水分を含む難燃性燃料の燃焼改善に利用し、窒素酸化物などの有害排出物質低減や二酸化炭素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、プラズマ科学と燃焼科学の融合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。

(3) 新たな非平衡プラズマ超燃焼熱システムを構築するべく、その現象解明を目指す。アプローチの方法としては、プラズマ工学、燃焼科学、熱機関・熱システム工学の3つの視点から、お互いの情報を交換しながら、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超燃焼システムの現象解明に取り組む。

2. 研究の目的

(1) 非平衡プラズマを生成させるための装置を製作する。そのためには、まず、既存のマイクロ波プラズマに関する知見を整理し、その性能を超えるプラズマ超燃焼基礎実験装置の基礎的な性能試験が必要である。連続燃焼の可能なバーナーを利用して、本装置におけるラジカル密度計測や燃焼効率に及ぼすマイクロ波電力印加の影響を調べる。これらの知見を基にして、新たなプラズマ発生装置を製作する。また、非平衡プラズマと高温、高圧状態における着火過程との関連についても、既存マイクロ波プラズマ装置により基礎的な知見を得てから、新たなプラズマ装置による効果を確認する。

(2) 高温、高圧場における非平衡プラズマの基礎特性を把握するとともに、熱機関への適用の可能性について探る。燃料としては、まずはメタンなど従来型の燃料を用いて試験をするが、バイオエタノール、さらには含水バイオエタノール等を用いて、含水の効果を確認する。

(3) 以上より、超燃焼熱システムのための非平衡プラズマを利用する研究分野を新たに創出するための基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) 既存マイクロ波プラズマの診断

周波数 2.45 GHz のマグネトロンを電源に用いた既存のマイクロ波プラズマ発生装置で生成される窒素プラズマのガス温度を測

定するために、波長 532 nm の YAG レーザーを光源とし、2重回折格子分光器と ICCD カメラを検出装置とするレーザーラマン散乱装置を構築して、窒素分子の回転ラマン散乱スペクトルを測定した。

(2) 予混合バーナー火炎を用いた基礎実験

予混合バーナー火炎に周波数 2.45 GHz のマイクロ波を照射するための実験装置、および、予混合バーナー火炎に誘電体バリア放電を重畳するための実験装置を構築し、燃焼状態にある火炎に対する高エネルギー電子の効果を基礎的に調べた。

(3) マイクロ波が照射された火炎の電子エネルギー分布関数の推定

既知の電子輸送係数に基づき、マイクロ波が照射された火炎の電子エネルギー分布をモンテカルロシミュレーションにより推定した。

(4) 既存マイクロ波プラズマを用いた含水燃料の燃焼実験

マグネトロンによるプラズマ発生方式と試験用単気筒可視化エンジンをを用いて、プラズマ超燃焼による燃焼試験を実施する。燃焼状態を観測し、初期火炎核の形成、初期火炎伝播に対して、マイクロ波プラズマの有無がどのような効果を与えるかを検討する。

含水燃料を燃焼することのできる単気筒エンジンにて含水エタノール燃料を用いたマイクロ波プラズマ燃焼有無による効果差異の評価を行う。

(5) 熱機関燃焼室内における新しいプラズマ生成方式の開発および非平衡プラズマの含水バイオマス燃料熱機関内燃焼試験への適用

点火プラグの放電による局所プラズマへの、別体マイクロ波アンテナによるマイクロ波伝送・エネルギー注入方式、および点火プラグをアンテナとしても併用したマイクロ波伝送・エネルギー注入方式を検討し、燃焼室内におけるプラズマ生成方式として効果的な方式を開発する。そのために必要なアンテナ、マイクロ波伝送系、マイクロ波発振方式を検討する。

含水燃料を用いる熱機関において、効果的なプラズマ生成を行うため OH ラジカルによる反応効果を検討する。含水燃料熱機関におけるプラズマ燃焼システムのコンポーネントの耐久性を向上するため、マイクロ波アンテナ、伝送系、マイクロ波発振電源の寸法、材質、形状等の諸元を検討し、それらを用いて含水バイオマス燃料熱機関への適用が可能なプラズマ生成システムの開発を行う。

(6) レーザー誘起ブレイクダウンによって形成されるプラズマによるメタン-空気予混合気の着火特性の解明

実用燃焼器内の着火現象を理解するために必要な知見が得られる高圧 (~2.0MPa) 下

におけるレーザー誘起ブレイクダウン試験およびレーザー着火試験を実施し、メタン-空気予混合気の初期状態（初期圧力、温度）および空気比がブレイクダウン閾値および着火に必要な最小の入射光エネルギーに与える影響に対して、圧力履歴および高速度シュリーレン撮影を用いて考察を加えた。

(7) メタノール燃料に対してレーザー着火させたときの着火メカニズムと燃焼促進効果

エタノールと空気の予混合気、エタノール噴霧、エタノール単一液滴の場合に対して、それぞれレーザー着火をさせ、含水率の影響に関して調査した。

4. 研究成果

(1) 既存マイクロ波プラズマの診断

窒素分子の回転ラマン散乱スペクトルから求められたガス温度の時間変化を図1に示す。プラズマ中の位置によらず、放電開始後の時間の経過に伴ってガス温度が増加することが観測されたが、ガス温度増加の時間定数は数ms以上であり、放電開始後1msまでの期間では、ガス温度は500K未満に保たれることがわかった。また、本マイクロ波プラズマのガス温度は強い空間分布を持つことがわかった。本プラズマが熱平衡状態にあると仮定すると、サハの電離平衡式から実験で観測された1600K未満の温度ではプラズマを維持できないので、本プラズマの電子温度はガス温度より十分高く、非平衡状態にあるものと推測された。

(2) 予混合バーナー火炎を用いた基礎実験

メタン/乾燥空気の予混合バーナー火炎にマイクロ波を照射すると、通常火炎では見られない窒素分子の2nd positive systemの発光スペクトルが明瞭に観測され、火炎中の電子が加熱されていることが確かめられた。マイクロ波電力をパルス化し、2nd positive systemの発光強度の時間変化を調べた実験か

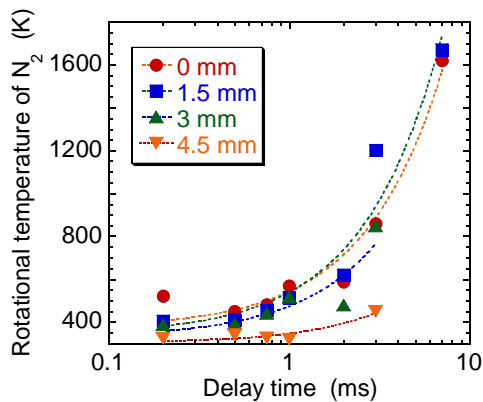


図1 窒素分子の回転ラマン散乱により求めたマイクロ波プラズマのガス温度

ら、電子の加熱（冷却）時間定数は0.05 ms未満であること、および、加熱された電子の寿命は0.35 msであることがわかった。観測領域におけるガスの滞在時間の評価から、加熱された電子は輸送損失以外に周波数 $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ で反応損失していることが示唆された。

誘電体バリア放電を予混合バーナーに重畳する実験ではメタン/酸素/アルゴンの混合ガスを用いた。火炎像をICCDカメラで撮影することにより火炎帯の半径を評価し、それをアルゴンの発光強度の関数としてプロットすると図2の結果が得られた。火炎帯の半径の収縮は燃焼速度の増加を意味する。様々な条件のプラズマを重畳したが、燃焼速度の変化はアルゴンの発光強度の関数としてほぼ単一の曲線を示した。このことから、プラズマ中の高エネルギー電子によって燃焼化学反応が制御された非平衡燃焼化学反応状態が実現しているものと考えられた。

(3) マイクロ波が照射された火炎の電子エネルギー分布関数の推定

マイクロ波電場が1.8 kV/cm以上のように強い場合、大気圧火炎の衝突頻度が大きな条件でも、火炎中の電子エネルギー分布関数に無視できないレベルの高エネルギーテール部が発現することが示された。

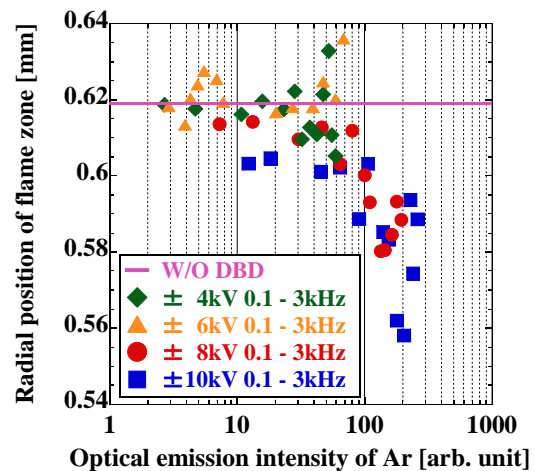


図2 火炎帯の半径とアルゴンの発光強度の関係

(4) マグネトロン式発生方式と試験用単気筒可視化エンジンを用いて、プラズマ超燃焼による燃焼試験を実施した結果、プラズマにより初期の火炎伝播が促進され初期燃焼期間が短縮されること、希薄混合気（プロパン-空気混合気、当量比0.6）において燃焼改善効果が大きくなくことを確認した。また、火花放電にマイクロ波を照射することで、通常放電では放電がなくなる時期においても

ラズマが拡大・持続できることを確認した。

(5) CFR 単気筒エンジンにおいてメタン、含水エタノール燃料を用いてマイクロ波プラズマ燃焼の有無の効果差異を評価した。含水エタノール燃料では、エンジンの圧縮比 (9~12)、吸気温度 (22~80°C)、燃料の含水率 (0~30%) においてガソリンエンジンと同様、着火安定性の向上、希薄燃焼領域の拡大などを確認した。

熱機関燃焼室内における新しいプラズマ生成方式の開発、および非平衡プラズマの含水バイオマス燃料熱機関内燃焼試験への適用として含水燃料の自己着火特性を改善する、および耐久性を確保するために、高電圧直流パルスとマイクロ波を重畳して電極間に印加できるミキサー回路を開発し、通常点火プラグ (抵抗なし) の使用を可能とすることで、含水エタノール (含水率 20%) を燃料として安定着火 (燃焼変動低減: COV < 7.5%) と、リーン限界拡大 (空気過剰率で 0.2 程度向上) の効果を実証した。

含水燃料を用いる熱機関において、効果的なプラズマ生成を行うための耐久性を向上したマイクロ波アンテナ、伝送系、マイクロ波発振電源の寸法、材質、形状等の諸元を検討し、それらを用いてプラズマ生成システムの開発を行った。従来から行っているプラズマ源として点火プラグの放電を用いることとし、点火プラグをマイクロ波アンテナとしても併用できるよう、ミキサー回路を開発した。また、アンテナ併用とした点火プラグの耐久性向上のため、プラグの火花放電にマイクロ波エネルギーを重畳するのではなく、プラグの放電時間に対しわずかに遅れを設けることでプラグの金属摩耗を大幅に低減できる見通しが立った。

時間遅れの制御、マイクロ波発振パルスの発振タイミング、持続時間、発振時のピーク電圧等をより精度よく制御するために、半導体素子を用いた半導体パルス発振電源を開発した。

(6) レーザー着火は、レーザー誘起ブレイクダウンを用いた新しい着火方式であり、希薄予混合気の着火において、従来の点火プラグ方式に比べて利点があることが知られている。この着火方式は、レーザー装置の小型化に伴って国内外で注目が集まっており、物理状態に対する基礎的な着火特性を明らかにすることが望まれている。本研究では、初期圧力を最大で 2.0 MPa (20 気圧) まで昇圧させた条件におけるレーザー着火試験装置を構築し、希薄高圧下におけるレーザー着火特性に対して実験的な研究を行った。

① 希薄高圧下におけるレーザー着火特性を明らかにするために、異なる初期圧力、異なる

空気比においてレーザー着火実験を行った。図 3 に圧力に対するブレイクダウン閾値 (破線) および各空気比における着火に必要な最小の入射光エネルギー (Minimum Pulse Energy for ignition, MPE) の関係を示す。図 3 より、圧力の上昇に伴って量論空気比の MPE は、ブレイクダウン閾値の減少に起因して同様に減少することが明らかとなった。

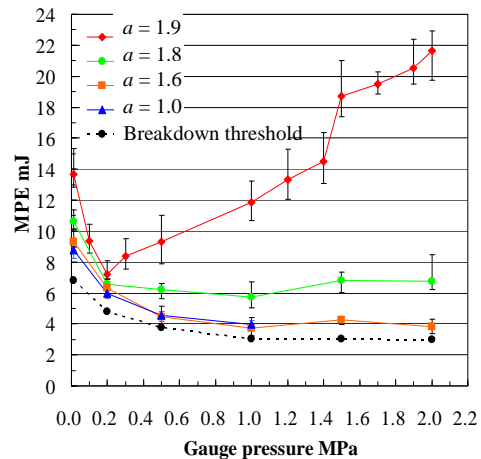


図 3 点火のための最小パルスエネルギーに及ぼす雰囲気圧力の影響 (α は空気比)

一方で、メタンの希薄可燃限界に近い空気比 1.8, 1.9 の予混合気では、初期圧力が 0.2 MPa 以上の高圧下において MPE が上昇する傾向を示すことが明らかとなった。この結果は、高圧かつ希薄な条件では、レーザー誘起ブレイクダウンによって生じるプラズマにブレイクダウン閾値に対して余剰なエネルギーを供給する必要があることを示している。

② レーザー着火に対する初期温度の影響を明らかにするために、異なる焦点位置付近の分子数密度を一定に保った条件においてブレイクダウン閾値および MPE の計測を行った。その結果、予混合気の初期温度の上昇に関わらず、同じ入射光エネルギーに対するプラズマによる入射光エネルギーの吸収率は変化しないことが明らかになった。また、電子の内部励起状態が変化しない温度範囲においては、ブレイクダウン閾値も初期温度によって変化せず、焦点位置付近の分子数密度によって決定されると考えられることが示された。

図 4 に示したように、空気比が大きく初期温度が低い条件において着火させるためには、ブレイクダウン閾値に対して余剰なエネルギーを供給することで、プラズマが形成する高温場の面積を増大させる必要があること、および予混合気の空気比および初期温度の上昇に伴い、火炎核の成長が容易になるために、MPE が減少し、ブレイクダウン閾値に

近づくことが明らかとなった。

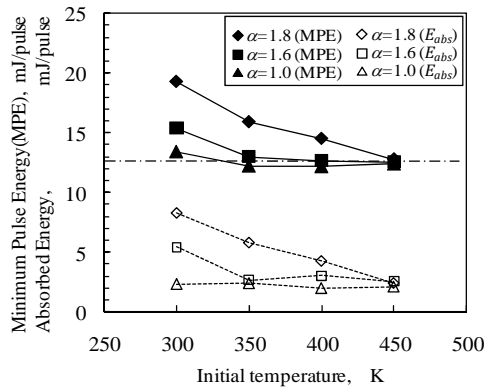


図4 一定モル濃度中で、最小入射エネルギーおよび吸収エネルギーに及ぼす初期温度の影響

(7) メタノール燃料に対してレーザー着火させたときの着火メカニズムと燃焼促進効果

エタノール噴霧を容器内に形成し、レーザー着火させた場合、含水率が30%程度までは、電子温度はほぼ同程度であった。

定容容器内でエタノールと空気の混合気を充填し、レーザー着火させた場合、含水率10%のとき、圧力の立ち上がりが最も早く、最大圧力値も最も高い値を得た。しかし、それ以降は含水率が増加するとともに、圧力の立ち上がりは遅くなり、最大圧力値も低くなっていった。少量のエタノール中の水分は燃焼を促進する可能性があることがわかった。

なお、単一液滴の場合にはブレイクダウンは可能であったが着火には至らなかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

○ 古井憲治, 林潤, 岡田朝貴, 中塚記章, 平等拓範, 堀輝成, 赤松史光, メタン-空気予混合気に対するピコ秒レーザーのレーザー着火特性, 日本機械学会論文集B編, 78-795(2012), 2004-2014. (査読有)

○ M. ElSabbagh, S. Kado, Y. Ikeda, and K. Sasaki, Measurements of rotational temperature and density of molecular nitrogen in spark-plug assisted atmospheric-pressure microwave discharges by rotational Raman scattering, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 076101 (2011) (査読有)

○ J. Hayashi, K. Furui, T. Okada, N. Nakatsuka, T. Taira, T. Hori and F. Akamatsu, Study of Laser Induced Ignition for Combustible Mixtures with Pico-Second Pulse Duration Laser, Proceedings of IGTC, (2011.11), IGTC2011-ABS-0145. (査読有)

○ N. Kawahara, E. Tomita, S. Nakamura, Laser-Induced Plasma Generation and Evolution in a Transient Spray, 16th Int. Symp. on

Application of Laser Techniques on Fluid Mechanics, 2-10(2012.7, Lisbon)(査読有)

○ N. Kawahara, E. Tomita, S. Nakamura, Ignition Characteristics in Transient Spray by Laser-Induced Plasma, Int. Gas Turbine Congress 2011 Osaka, (IGTC11 Osaka), #223, (2011.11) (査読有)

○ 河原伸幸, 富田栄二, 中村紳哉非定常噴霧におけるレーザー誘起プラズマによる着火特性, 微粒化, Vol.20, No.70, pp.61-67(2011) (査読有)

○ 林潤, 澤中裕介, 中塚記章, 岡田朝貴, 赤松史光, 瀬尾健彦, 堀輝成, レーザー誘起ブレイクダウンを用いた着火における予混合気初期温度の影響, 日本機械学会論文集B編, 76-772(2010), pp.2242-2248. (査読有)

○ N. Kawahara, E. Tomita, T. Oka, Y. Ikeda, Fuel Concentration Measurement of Premixed Mixture in a Spark-Ignition Engine Using Spark-Induced Breakdown Spectroscopy, 15th Int. Symp. on Application of Laser Techniques on Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, Paper No. 2.11.3, (2010/7) (査読有)

[学会発表] (計28件)

○ A. Nishiyama, A. Moon, Y. Ikeda, J. Hayashi, F. Akamatsu, Ignition Characteristics of Methane/air Premixed Mixture by Microwave Enhanced Laser-Induced Breakdown Plasma, The 1st. Laser Ignition Conference 2013, (2013/4/25, 横浜)

○ E. Tomita, Application of Plasma-Assisted Combustion to Internal Combustion Engine, The 1st Laser Ignition Conference 2013, (2013/4/25, 横浜) (Invited)

○ 富田栄二, プラズマ支援燃焼エンジン, 日本機械学会 2012 年次大会, 基調講演, K07100, (2012/9/10, 金沢)

○ K. Sasaki, Control of combustion chemistry with the help of nonequilibrium plasmas (Invited), 11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology, (Kyoto, 2012)

○ 河原伸幸, 富田栄二, 片山孝志, 池田裕二, 水素直噴機関におけるプラズマ支援燃焼の着火特性, 第50回燃焼シンポジウム講演論文集, 講演番号 E222, pp.330-331, (2012/12/6, 名古屋)

○ K. Sasaki, Effect of energetic electrons on combustion of premixed burner flame (Invited), 64th Gaseous Electronics Conference, (Salt Lake City, USA, 2011)

○ K. Sasaki, H. Akashi, and Y. Ikeda, Possibility of combustion control with the help of nonequilibrium plasma: plasma-assisted combustion (招待講演), 第24回プラズマ材料科学シンポジウム (大阪大学, 2011/7)

○ 佐々木 浩一, プラズマ科学から燃焼工学

へのアプローチ：プラズマ支援燃焼（招待講演），応用物理学会九州支部シンポジウム（かんぼの宿柳川，2011/11）

○ 文雅司，西山淳，池田裕二，A. DeFilippo, R. Dibble, J.Y. Chen, マイクロ波燃焼技術の含水エタノール燃料への適用，第 22 回内燃機関シンポジウム，(2011/11/30, 東京)

○ 河原伸幸，片野博樹，富田栄二，越智雄大，池田裕二，マイクロ波プラズマ燃焼エンジンにおける初期火炎核形成過程と火炎伝播特性，第 21 回内燃機関シンポジウム講演論文集，講演番号C2-3, pp.195-200. (2010/11/10, 岡山)

○ 佐々木 浩一，プラズマ支援燃焼：プラズマ応用工学から燃焼工学へのメッセージ（招待講演），日本機械学会関西支部燃焼懇話会（立命館大学，2010/10）

○ 片野博樹，河原伸幸，富田栄二，越智雄太，池田裕二，マイクロ波プラズマ燃焼エンジンにおける着火過程の観察，自動車技術会 2010 年秋季大会，(2010/9/29, 福岡)

〔その他〕

(1) ホームページ

<http://powerlab.mech.okayama-u.ac.jp/~plasma>

(2) 高校生向け情報発信：高校生と教員、大学が直接出会う合同進学ガイダンス。
夢ナビ（講義、授業、ライブ）

(3) The 1st laser Ignition Conference の Laser ignited engines for power -2 (Plasma-Assisted Combustion) のセッションにて招待講演 1 件と通常講演 5 件の発表。

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・工学研究科・教授

研究者番号：50235248

赤松史光 (AKAMATSU FUMITERU)

大阪大学・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

明石治朗 (AKASHI HARUAKI)

防衛大学校・応用科学群・准教授

研究者番号：20531768