

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289323

研究課題名(和文)液滴パージとレーザー点火によるパルスデトネーション技術の高度化

研究課題名(英文)Upgrading of the pulse-detonation technology by liquid-purge method and laser ignition

研究代表者

遠藤 琢磨 (Endo, Takuma)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00211780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：液滴パージとレーザー点火によるパルスデトネーション(PD)技術の高度化を目的に研究を行った。液滴パージによるPD技術の高度化については、技術の熟成段階に入った。具体的には、PD燃焼器の運転条件を変えた際に液滴パージに関する運転パラメータを如何に調整するかについて、その調整手順を確立し、種々の運転条件に対応できるようになった。レーザー点火によるPD技術の高度化については、技術がまだ未熟なので、単純な系を使った基礎研究を進め、静止した可燃性混合気および100 m/s程度までの高速で流れる可燃性混合気を使い、レーザー点火の特性を従来型のスパークプラグ点火の特性と比較して明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present study was the upgrading of the pulse-detonation (PD) technology by the liquid-purge method and the laser ignition. The liquid-purge method, which upgrades the PD technology, has become mature to a certain degree. Through the present study, we established the procedure to determine the operation parameters of the liquid-purge method for various operation conditions of the PD combustor, and we became able to operate the PD combustor by the liquid-purge method at various conditions. The laser ignition, which also upgrades the PD technology, is still immature. Therefore, we investigated the characteristics of laser ignition by comparing them with those of conventional spark-plug ignition in simple experimental devices, where the combustible gas mixtures were initially quiescent or flowed at high speed up to 100 m/s.

研究分野：反応性気体力学

キーワード：デトネーション 溶射 タービン レーザー 点火

### 1. 研究開始当初の背景

パルスデトネーション (PD) 技術とは、管内でデトネーションを繰り返し発生させ、高温のガス流を連続パルスの発生させる技術である。我々の開発した PD 技術は、運転周波数の高さと連続運転時間の長さにおいて突出しており、小型 PD 燃焼器の実用にも近いレベルにある。

我々がこれまで開発・成熟させてきた PD 技術を検討した結果、「パージガスの使用量が多く (燃焼用酸素の約 2 倍)、また原理的に爆発性ガスがパージガスで希釈されること」および「PD 燃焼器内部における高い熱負荷と力学的負荷によりスパークプラグの損耗が速いこと」の 2 点を改善すれば、さらなる小型・軽量・高温・高出力・高耐久性化を実現し得るとの結論に至った。

### 2. 研究の目的

前項で述べた 2 つの改善点に対し、前者に対しては、液滴パージ法と呼んでいる新しい技術を着想して原理実証実験に成功したので、この新しい独自の技術を発展・成熟させて改善し、後者に対しては、スパークプラグ点火に代わるレーザー点火 (レーザー生成プラズマを源とする点火法) を採用することで改善することを目的とした。

もう少し具体的に述べると、液滴パージに関しては、「パージに必要な最小水供給量の決定方法を工学的に体系化し」、「周波数 300 Hz 以上での熱的定常運転を達成し」、さらに「これまでの PD 燃焼器では溶射できなかった高融点材料の溶射が可能であることを実証する」ことを目的とし、レーザー点火に関しては、「リトロリフレクターを使って透過光をプラズマに再投入し、一度透過した光もプラズマに吸収させる技術を実証し」、「ランダム位相板と呼ばれるマスクでレーザービームを多数のビームレットに分割して局所的な輝点で絶縁破壊を起こすことで、平均的には温度の低い、大きなプラズマの生成を試み」、「レーザー点火による燃焼器の PD 動作を達成する」ことを目的とした。

### 3. 研究の方法

液滴パージに関する研究については、次のように研究を進めた。

(1) 液滴パージに関する運転パラメータの決定手順を確立するために、実際に種々の条件で液滴パージ法を使い PD 燃焼器を運転することとした。具体的には、タービン駆動用 PD 燃焼器を化学量論比に近い水素・空気混合気を使って 20~60 Hz の周波数で運転し、溶射用 PD 燃焼器を化学量論比に近いエチレン・酸素混合気を種々の割合でアルゴン希釈して 150 Hz の周波数で運転することとした。また、液滴パージ法の派生技術として、PD 燃焼器とタービンの間で流路内に液滴 (水滴) を吹き込んでタービン入口温度を調整する方法も開発することとした。

(2) まず運転周波数 150 Hz で 30 分間の連続運転を達成し、可能であれば運転周波数を上げることとした。

(3) 高融点セラミックスとして知られているイットリア安定化ジルコニアを PD 燃焼器で溶射することとした。

レーザー点火に関しては、次のように研究を進めた。

(4) 実際にリトロリフレクターを使って透過光をプラズマに再投入する実験を行い、全吸収率とガス中に生じる流体運動を調べることとした。

(5) まずランダム位相板によってレーザー誘起ブレイクダウンの閾レーザー強度がどう変化するかを調べ、その後、点火実験を行うこととした。

(6) 溶射用 PD 燃焼器を模擬するレーザー点火用燃焼器を作製し、高速流中でレーザー点火とスパークプラグ点火の特性を比較し、安全が確保できそうなら PD 動作を試みることにした。

### 4. 研究成果

前項に対応させて記述する。

(1) 液滴パージに関する運転パラメータの決定手順は、次のようにするのが良かった。まず、ガスパージ法で PD 燃焼器を運転し、PD 燃焼器上流のガス供給位置に近いところで圧力履歴を測定し、点火信号とガス圧が急激に上昇する時刻との時間差を測定する。PD 燃焼器上流のガス供給位置に近いところで急激に圧力が上がる時刻にバルブレス法でのガス供給が止まるので、その時刻を液滴 (水滴) の噴霧終了時刻とする。このことによって、PD 燃焼器のガス供給位置の周辺に水蒸気が生じる。次に、ガス供給開始時の水蒸気層厚さが 80 mm 程度になるような条件からスタートして、安定に運転できる最小水供給量をトライ&エラーで決定する。最小水供給量を事前に精度よく予測することは非常に困難であることが明らかとなった。また、液滴パージ法の派生技術として、PD 燃焼器とタービンの間で流路内に液滴 (水滴) を吹き込んでタービン入口温度を調整する方法も開発した。図 1 はタービン入口温度を制御した実験 (化学量論比の水素・空気混合気を使い、周波数 60 Hz で運転) の結果とモデル計算の結果である (Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 11, Paper No.16-00322, 2016)。また、同様の方法で溶射用 PD 燃焼器を組成:  $1.1C_2H_4+3O_2+(\alpha+0.4)Ar$  ( $\alpha=0,1,2,3,4$ ) の混合気で周波数 150 Hz で運転した。図 2 は、燃焼器出口から 50 mm の位置で測定した溶射用 NiCr 粉体の温度と速度である。このように、組成を変えて混合気の爆発性を変化させても、液滴パージ法を使って PD 燃焼器を安定に運転できるようになった。

(2) 燃焼温度が最も高い混合気の一つである化学量論比のエチレン・酸素混合気を使い、周波数 150 Hz で 30 分間の連続運転を行った。

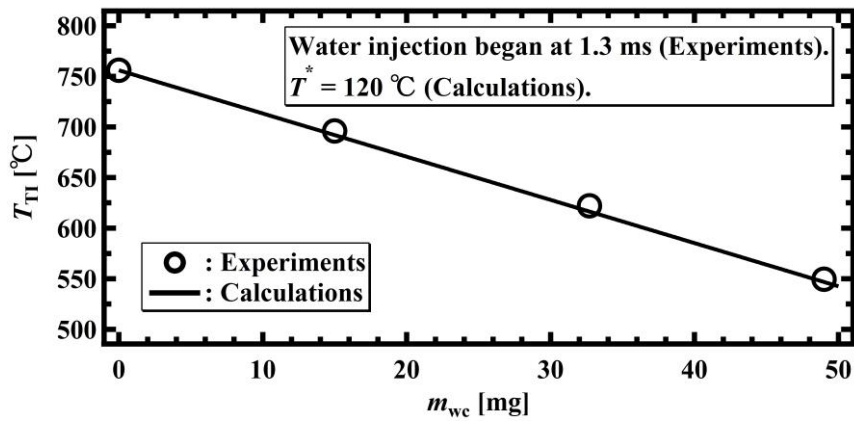


Fig. 1 Influence of water-injection quantity on turbine-inlet temperature.

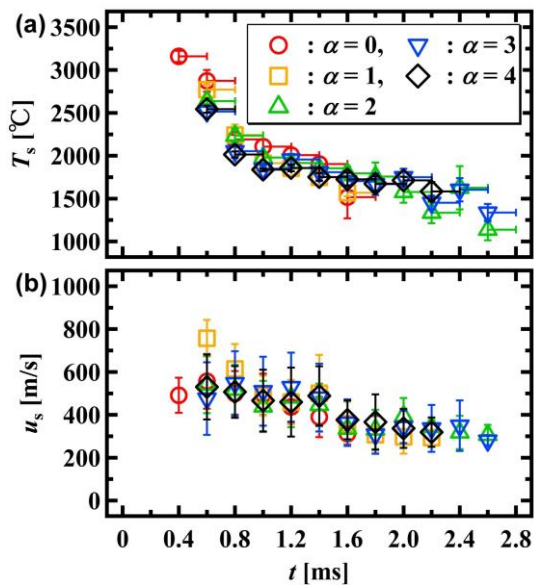


Fig. 2 Surface temperature (a) and speed (b) of 50Ni-50Cr particles in flight.

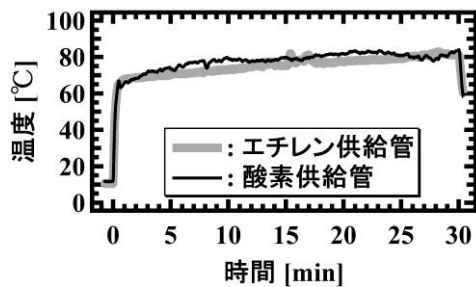


Fig. 3 Temperature of gas-supply pipes.

図3は、その際に測定されたガス供給管外壁の温度である。ほぼ熱的定常状態が達成されていることがわかる。運転周波数を上げるところまでは研究が進まなかった。

(3) 高融点セラミックスとして知られているイットリア安定化ジルコニア ( $ZrO_2$ -8 wt%  $Y_2O_3$ : YSZ) をPD燃焼器で溶射した。図4は、実際に溶射されたイットリア安定化ジルコニア皮膜の様子である。

(4) 実際にリトロリフレクター (コーナー

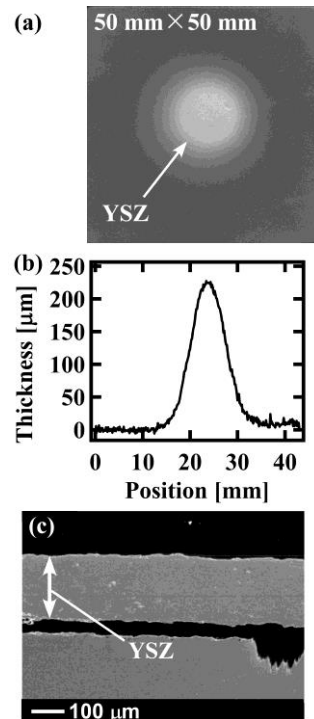


Fig. 4 YSZ-coated substrate (a), coating thickness (b), and cross-sectional photograph of the YSZ coating by a scanning electron microscope (c)

キューブ : cc) を使って透過光をプラズマに再投入する実験を行った。実験では、透過光がコーナーキューブで反射されて戻って来るまでの時間遅れ  $\tau$  を変化させて、入射光の吸収率  $E_{1abs}$  とコーナーキューブで反射されて戻って来た光の吸収率  $E_{2abs}$  を独立に測定した。図5は、吸収率の増倍率 :  $(E_{1abs} + E_{2abs}) / E_{1abs}$  が入射エネルギー  $E_{1in}$  に対して変化する様子を示したものである。また、図6は、初期圧 100 kPa の水素・空気混合気 (水素 : 6 mol%) 中に生じた流体運動の様子である。吸収率のみならず流体運動も影響されることがわかる。

(5) ランダム位相板によってレーザー誘起

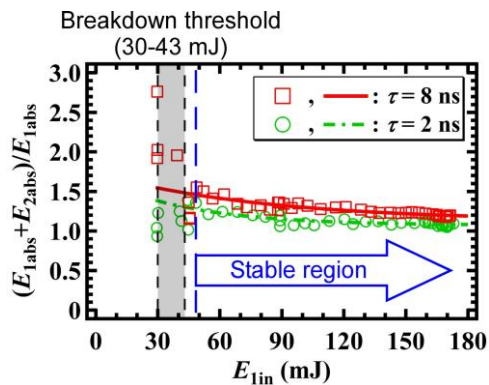


Fig. 5 Effect of the re-injection of the transmitted light on the total absorption efficiency.

ブレイクダウンの閾レーザー強度がどう変化するかを調べた結果、上がる事が判明したため、点火実験は行わなかった。

(6) 溶射用 PD 燃焼器を模擬するレーザー点火用燃焼器を作製し、高速流中でレーザー点火とスパークプラグ点火の特性を比較した。その結果、高速流中では、レーザー点火の場合の火炎の拡がり通常スパークプラグの場合のそれに比べて早く起こることがわかった。図7は、エチレン・酸素混合気において実験的に得られた火炎伝播速度である ( $U_{av}$  は未燃ガスの流速、燃焼器は1辺が8.86 mmの矩形断面の管)。可視化実験装置の安全が確保できなかったため、当量比を1に近づけてデトネーションの発生を試みることはしなかった。

#### 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 6 件)

- ① T. Endo, Y. Takenaka, Y. Sako, T. Johzaki, S. Namba, and D. Shimokuri, An experimental study on the ignition ability of a laser-induced gaseous breakdown, *Combustion and Flame*, 査読有, 178 巻, 2017, 1-6.  
DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.01.016
- ② T. Endo, K. Masuda, W. Watanabe, T. Mukai, H. Nagai, T. Johzaki, and K. Matsuoka, Reduction of air flow rate for pulse-detonation-turbine-engine operation by water-droplet injection, *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, 11 巻, 2016, Paper No.16-00322.  
DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0022
- ③ 遠藤琢磨, 高周波数パルスデトネーション技術による高融点材料の溶射, *FINE CERAMICS REPORT*, 査読なし, 34 巻, 2016, 96-100.
- ④ T. Endo, Y. Takenaka, Y. Sako, T. Honda, T. Johzaki, and S. Namba, Reinjection of

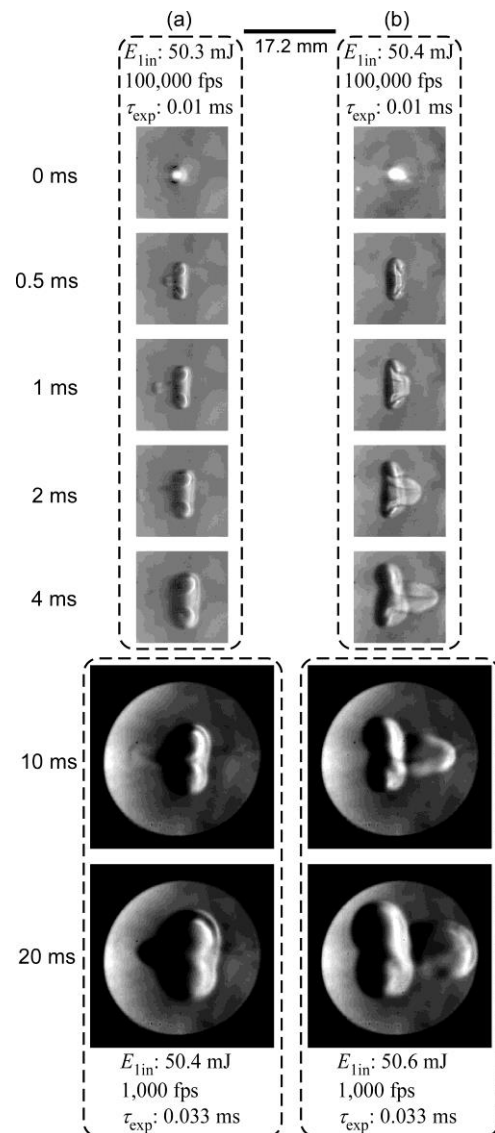


Fig. 6 Effect of the re-injection of the transmitted laser light on the gas-dynamics phenomena in a hydrogen-air mixture. The time origin was determined by the plasma self-emission. The field of view of the images at 10 and 20 ms is twice that of the images at earlier times. (a) w/o CC. (b) w/ CC at 120 cm ( $\tau = 8$  ns).

transmitted laser light into laser-produced plasma for efficient laser ignition, *Applied Optics*, 査読有, 55 巻, 2016, 1132-1137.  
DOI: 10.1364/AO.55.001132

- ⑤ T. Endo, R. Obayashi, T. Tajiri, K. Kimura, Y. Morohashi, T. Johzaki, K. Matsuoka, T. Hanafusa, and S. Mizunari, Thermal Spray Using a High-Frequency Pulse Detonation Combustor Operated in the Liquid-Purge Mode, *Journal of Thermal Spray Technology*, 査読有, 25 巻, 2016, 494-508.



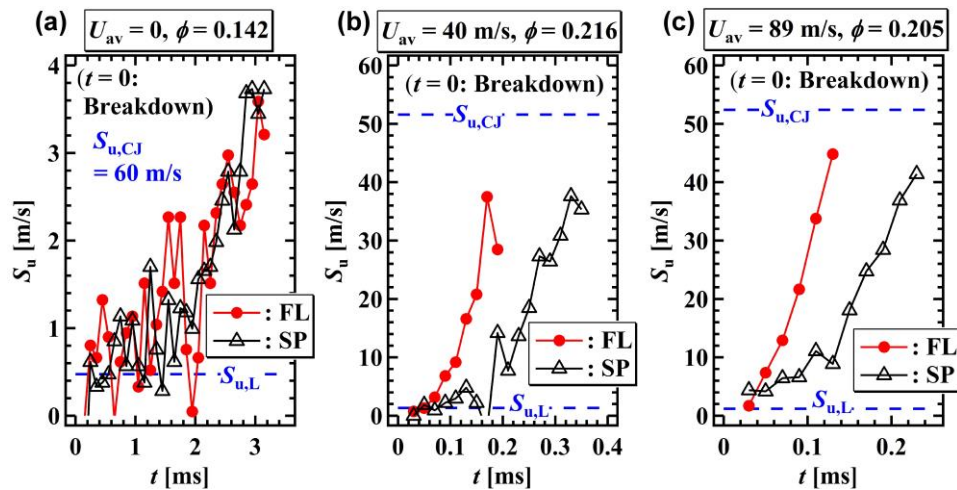


Fig. 7 Flame-propagation velocities in almost quiescent cases (a), medium-speed cases (b), and high-speed cases (c). FL and SP denote laser ignition and spark-plug ignition, respectively.

DOI: 10.1007/s11666-015-0354-8

- ⑥ 遠藤琢磨, レーザー点火の物理過程, レーザー研究, 査読なし, 42 巻, 2014, 383-387.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 小久保光成, 諸橋佑紀, 望月弘睦, 篠原佑太, 金佑勁, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 竹保義博, パルスデトネーション溶射による低気孔率アルミナ皮膜の作製, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 2017 年 3 月 10 日, ヴェルクよこすか (神奈川県・横須賀市)
- ② 竹中祐平, 三紙航平, 城崎知至, 難波愼二, 下栗大右, 遠藤琢磨, プロパン・空気予混合気におけるレーザー点火と火花点火の比較, 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016 年 7 月 8 日, 金沢歌劇座 (石川県・金沢市)
- ③ 小久保光成, 諸橋佑紀, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 竹保義博, パルスデトネーション燃焼器を用いた NiCr 溶射皮膜の作製, 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016 年 7 月 8 日, 金沢歌劇座 (石川県・金沢市)
- ④ T. Endo, K. Kokubo, Y. Morohashi, K. Kimura, W. Kim, T. Johzaki, K. Matsuoka, T. Hanafusa, and Y. Takeyasu, Temperature Control in Pulse-Detonation Thermal-Spray Technology, 2016 International Workshop on Detonation for Propulsion, 2016 年 7 月 13 日, Singapore (Singapore)
- ⑤ Y. Takenaka, Y. Sako, K. Mikami, T. Johzaki, S. Namba, D. Shimokuri, and T. Endo, A comparative study of spark ignitions induced by high-power laser and by high-voltage electrodes, The 4th Laser Ignition

Conference 2016, 2016 年 5 月 19 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)

- ⑥ 遠藤琢磨, 迫義之, 竹中祐平, 三紙航平, 城崎知至, 難波愼二, レーザー点火におけるレーザー吸収率のコーナーキューブを用いた改善, 平成 27 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2016 年 1 月 23 日, 指宿いわさきホテル (鹿児島県・指宿市)
- ⑦ 竹中祐平, 迫義之, 三紙航平, 城崎知至, 難波愼二, 遠藤琢磨, プロパン・空気予混合気におけるレーザー点火および火花点火の初期過程, 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2015), 2015 年 12 月 4 日, 広島大学学生会館 (広島県・東広島市)
- ⑧ 諸橋佑紀, 木村圭佑, 小久保光成, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 竹保義博, ガス組成を変化させたパルスデトネーション溶射による Ni-Cr 皮膜の作製, 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2015), 2015 年 12 月 4 日, 広島大学学生会館 (広島県・東広島市)
- ⑨ 遠藤琢磨, 迫義之, 竹中祐平, 三紙航平, 城崎知至, レーザー点火の初期過程に関する実験的研究, レーザー学会第 487 回研究会「新レーザー技術」, 2015 年 12 月 14 日, くにびきメッセ (島根県・松江市)
- ⑩ 遠藤琢磨, 迫義之, 竹中祐平, 三紙航平, 城崎知至, 難波愼二, レーザー点火における透過光再投入の効果, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015 年 11 月 16 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ⑪ Takuma Endo, Thermal Spray of Alumina by High-Frequency Pulsed Detonations, 2015 International Workshop on Detonation for Propulsion, 2015 年 8 月 28 日, 北京市 (中華人民共和国)
- ⑫ T. Endo, R. Obayashi, T. Tajiri, K. Kimura, Y. Morohashi, T. Johzaki, and K. Matsuoka, Heating and Acceleration of Particles by

- High-Frequency Pulsed Detonations, 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2015年8月4日, Leeds (UK)
- ⑬ 竹中祐平, 迫義之, 本田智久, 城崎知至, 難波慎一, 遠藤琢磨, レーザー一点火における透過光再入射の効果, 第47回流体力学講演会/第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2015年7月3日, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)
- ⑭ Takuma Endo, Physical Processes in Laser-Induced Gaseous Breakdown, 3rd Laser Ignition Conference, 2015年4月30日, Argonne (USA)
- ⑮ T. Endo, Y. Takenaka, Y. Sako, T. Honda, T. Johzaki, and S. Namba, Re-Injection of Transmitted Light into Laser-Induced Gaseous Breakdown, 3rd Laser Ignition Conference, 2015年4月30日, Argonne (USA)
- ⑯ 木村圭佑, 尾林良太, 田尻敏浩, 諸橋佑紀, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 水成重順, 液滴パーズ法を用いたパルスデトネーション溶射によるアルミナ皮膜の形成, 平成26年度衝撃波シンポジウム, 2015年3月10日, ホテル天坊(群馬県・渋川市)
- ⑰ 遠藤琢磨, 尾林良太, 田尻敏浩, 木村圭佑, 諸橋佑紀, 城崎知至, 松岡健, 花房龍男, 水成重順, パルスデトネーションによる高融点材料の溶射, 平成26年度航空宇宙空力シンポジウム, 2015年1月23日, 皆生グランドホテル天水(鳥取県・米子市)
- ⑱ 迫義之, 本田智久, 竹中祐平, 城崎知至, 難波慎一, 遠藤琢磨, 藤岡慎介, 余語覚文, 西村博明, 水素・空気予混合気におけるレーザー一点火の初期過程, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2014), 2014年11月28日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)
- ⑲ W. Watanabe, T. Mukai, K. Masuda, T. Johzaki, T. Endo, and K. Matsuoka, Reduction of the Air Flow Rate for Pulse-Detonation-Turbine-Engine Operation by Water-Droplet Injection, 5th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 2014年11月12日, ザ・ルイガンズ スパ & リゾート(福岡県・福岡市)
- ⑳ R. Obayashi, T. Tajiri, K. Kimura, Y. Morohashi, T. Johzaki, T. Endo, K. Matsuoka, T. Hanafusa, and S. Mizunari, Thermal Spray by Pulsed Detonations with Liquid-Purge Method, 5th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 2014年11月12日, ザ・ルイガンズ スパ & リゾート(福岡県・福岡市)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

- ①  
 名称: 窒化アルミニウムの皮膜製造方法及びその方法により製造される窒化アルミニウム皮膜  
 発明者: 花房龍男, 遠藤琢磨, 松浦英次, 鈴木忠彦, 榎原均  
 権利者: 広島県, 国立大学法人広島大学, マイメタリコン株式会社, 鈴木精工株式会社, 榎原光江  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2015-200253  
 出願年月日: 2015年10月8日  
 国内外の別: 国内

○取得状況(計 2 件)

- ①  
 名称: パルス燃焼装置, および溶射装置  
 発明者: 遠藤琢磨, 松岡健  
 権利者: 国立大学法人広島大学  
 種類: 特許  
 番号: 特許第 5988878 号  
 取得年月日: 2016年8月19日  
 国内外の別: 国内
- ②  
 名称: パルスデトネーション溶射装置及び溶射方法  
 発明者: 遠藤琢磨, 須佐秋生, 花房龍男, 竹保義博, 松浦英次, 鈴木忠彦, 榎原均  
 権利者: 国立大学法人広島大学, 広島県, マイメタリコン株式会社, 鈴木精工株式会社, 榎原光江  
 種類: 特許  
 番号: 特許第 5659343 号  
 取得年月日: 2014年12月12日  
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 琢磨 (ENDO, Takuma)  
 広島大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号: 00211780

(2) 研究分担者

難波 慎一 (NAMBA, Shin-ichi)  
 広島大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号: 00343294

松岡 健 (MATSUOKA, Ken)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・講師  
 研究者番号: 40710067