

令和 2 年 5 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03482

研究課題名(和文) 流路拡大部におけるデトネーションの動力学とそのパルスデトネーション技術への応用

研究課題名(英文) Detonation Dynamics in a Diverging Cone and its Application to the Pulse-Detonation Technology

研究代表者

遠藤 琢磨 (ENDO, Takuma)

広島大学・工学研究科・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)：短距離でのデトネーション発生と燃焼器出口の拡大との両立を図り、円筒管からコーン状流路拡大部にデトネーションが伝播する際に流路拡大部をデトネーションが通過できる条件を実験により明らかにした。また、その成果を使ってデトネーション溶射装置の出口直径を従来の10 mmから20, 30 mmに拡げ、装置を改良した。改良された装置は、従来通りの高周波数(100-150 Hz)で安定に動作した。そして実際に溶射実験を行い、それまでは溶射が困難であった高融点セラミックスの溶射ができるようになった。また、既に溶射可能であった物質に関しては、溶射ガン出口と基材との距離を出口径に概ね比例して離せるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デトネーションとは、通常の燃焼よりも高温・高密度・高圧の既燃ガスが生成される特殊な燃焼モードである。本研究では、デトネーションを産業応用するため、流路形状がデトネーション伝播に及ぼす影響についての基礎的な知見を得る研究を行うとともに、実際にその知見を使って溶射装置(コーティング装置の一種)を改良した。装置を改良した結果、高融点セラミックスの溶射能力が飛躍的に向上した。この溶射装置の改良により、デトネーションを利用する溶射装置の小型化が実現され、我が国の産業に役立つものと思われる。

研究成果の概要(英文)：For both the detonation initiation in a short distance and the enlargement of the combustor exit, we experimentally clarified the condition for that a detonation entering a diverging cone from a cylindrical tube can pass through the diverging cone. By using the results of the fundamental study, we improved our pulse-detonation thermal-spray gun so that its exit was enlarged from its original size of 10 mm in diameter to 20 or 30 mm. The improved pulse-detonation combustor was stably operated at the original frequency of 100-150 Hz. Furthermore, we demonstrated that the high-melting-point ceramics, that are difficult to be sprayed before the improvement, can be sprayed by using the improved pulse-detonation thermal-spray guns. In addition, on the spraying of materials that could be sprayed even before the improvement, the distance between the spraying-gun exit and the sprayed substrate was enlarged approximately in proportion to the exit diameter.

研究分野：反応性気体力学

キーワード：デトネーション 拡大流路 パルス運転 溶射 高融点セラミックス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

円筒状燃焼器を使うパルスデトネーション技術の応用を発展させるためには、デトネーション発生部は細くして短距離でデトネーションを発生させて燃焼器全体を短く保ち、同時に出口に近い部分は太くしてジェットの直径や燃焼器の容積を自由にコントロールすることが望まれる。それを実現するためには、デトネーション発生部の細い管と出口側の太い管とを接続するコーン状流路拡大部が必要であり、その流路拡大部を設計するためには、コーン状流路拡大部におけるデトネーション伝播に関する知見が不可欠である。ところが、本研究開始時には、装置設計に使えるだけの定量的な知見が存在していなかった。

2. 研究の目的

上記の背景の下、2つの研究目的を設定した。1つめは、円筒管からコーン状流路拡大部に伝播するデトネーションがその流路拡大部を通過できるための条件を、種々の爆発性混合気に対して無次元パラメータを使って表現するための基礎研究を実施し、デトネーションが流路拡大部を通過できるための条件を定量的な知見として確立するとともに、簡単なモデルによって現象を理解することである。2つめは、基礎研究によって得られる知見を使い、パルスデトネーション技術の重要な応用分野である溶射を行うための装置を改良し、改良の効果を実際の溶射実験によって確かめることである。

3. 研究の方法

1つめの目的を達成するための基礎研究では、図1の配置で実験を行った。デトネーションは、左から右に向かって伝播し、内径40mmの円筒管から半開き角 θ のコーン状流路拡大部に突入する。流路拡大部には中心軸に沿って煤板が設置されており、煤板表面にデトネーション特有のウロコ模様が残るか否かでデトネーション伝播の成否を判断する。実験で使用する爆発性ガスは4種で、 $C_2H_2+2.5O_2$ 、 $2H_2+O_2+4.5Ar$ 、 $C_2H_4+3O_2+0.44N_2$ 、 $1.1C_2H_4+3O_2+4Ar$ である。これらのガスは、実効的な活性化エネルギーや応用上の重要性を考慮して選んだ。

2つめの目的を達成するための応用研究では、これまで溶射用に開発してきた内径10mmの円筒状燃焼器をベースとし、出口に近い後半部分の内径を20mmに広げるものと30mmに広げるものとの2種の燃焼器を新たに設計・製作し、実際に溶射実験を行った。

4. 研究成果

1つめの目的を達成するための基礎研究に関し、典型的な実験結果を図2に示す。爆発性ガスは $1.1C_2H_4+3O_2+4Ar$ である。GOはデトネーションが流路拡大部を伝播できたことを意味し、NO GOは伝播できなかったことを意味する。横軸はコーン状流路拡大部の半開き角 θ であり、縦軸は流路拡大部に突入する前の円筒管の直径 d とデトネーションの波面構造の特性長 λ との比である。条件として θ が与えられたときは、流路拡大部をデトネーションが伝播できる条件は $d/\lambda \geq (d/\lambda)_{cr}$ というように与えられ、逆に条件として d/λ が与えられたときは、流路拡大部をデトネーションが伝播できる条件は $\theta \leq \theta_{cr}$ というように与えられる。 θ の関数としての $(d/\lambda)_{cr}$ はガス種によって変化するが、任意の θ における $(d/\lambda)_{cr}$ を $\theta = 90^\circ$ における $(d/\lambda)_{cr}$ で規格化すると、ガス種依存性がほとんどなくなることが経験的に明らかとなった。

2つめの目的を達成するための応用研究では、図2に示した結果を基に、コーン状流路拡大部の半開き角を 20° として、新しい燃焼器を設計した。これは、溶射実験で使用する爆発性ガスが通常 $1.1C_2H_4+3O_2+\alpha Ar$ ($\alpha = 0 \sim 4$)であること、燃焼器上流部分の内径が10mmであること、 $1.1C_2H_4+3O_2+4Ar$ に対する(常温・常圧での)セル幅が $\lambda = 0.66$ mmであること、および $\alpha = 0 \sim 4$ において $\alpha = 4$ のときに λ が最大であることを考慮した結果である。本研究では、図3に示す3

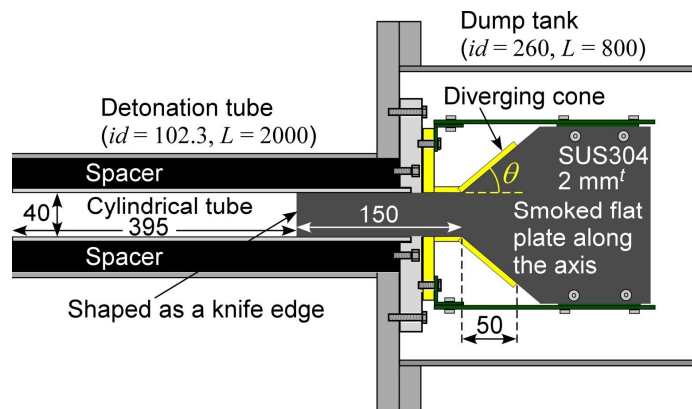


図1 基礎研究の実験配置

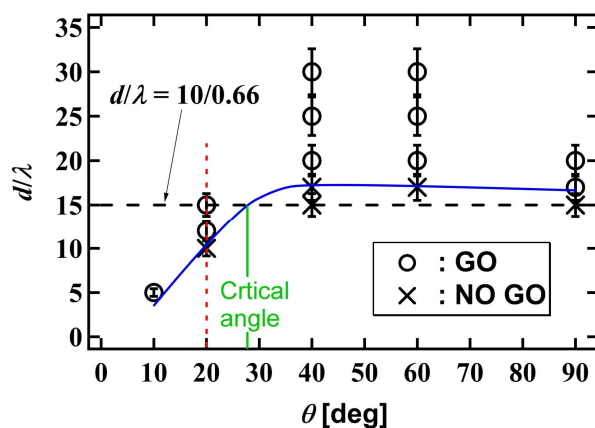


図2 $1.1C_2H_4+3O_2+4Ar$ に対する基礎実験の結果

種の溶射用パルスデトネーション燃焼器を設計・製作し、溶射実験を行った。溶射実験は、運転周波数を 100 Hz に固定して実施した。

図 4 に、イットリア安定化ジルコニア (YSZ) に関する実験結果を示す。縦軸は溶射の物質効率であり、皮膜になった溶射材の質量 (測定値) を基材に衝突した溶射材の質量 (計算値) で除したものである。図 4(a) の横軸は溶射ガンの出口直径 (d_{exit}) であり、図 4(b) の横軸は溶射ガン出口と基材との距離 (Stand-off distance: $L_{stand-off}$) を溶射ガンの出口直径 (d_{exit}) で除した無次元化溶射距離である。図 4(a) からわかるように、溶射ガンが内径 10 mm の単なる円筒のときは、イットリア安定化ジルコニアの溶射は、不可能ではないものの、許容しがたいほどに低効率 (約 1% の物質効率) であった。しかし、出口径を 20 mm に広げたことによって物質効率が格段に上がり、実用化の見通しが得られた。図 4(a) の結果を、図 4(b) のように、出口径で無次元化された溶射距離に対してプロットすると、全体の傾向がもう少し明確になる。なお、出口径を 30 mm に広げた場合に、期待したほどには物質効率が上がっていない。この理由はあまり明確になっていないが、物質効率が溶射ガン自身の無次元量である「長さ / 内径」にも強く依存している可能性が考えられる。すなわち、図 3 に示されているように、出口径が 20 mm の場合は、内径が 20 mm の部分の長さが内径の 5 倍 (100 mm) であるのに対し、出口径が 30 mm の場合は、内径が 30 mm の部分の長さが内径の 3.3 倍 (100 mm) でしかなく、溶射材が溶射ガンを出てからの振る舞いだけでなく、溶射材が溶射ガンを出るまでの振る舞いも無視できない影響を与えている可能性がある。特に、イットリア安定化ジルコニアは融点が 2700 程度と非常に高いため、加熱過程が重要であり、溶射ガン自身の無次元量である「長さ / 内径」を一致させた実験を今後行う必要が生じたものと考えている。

図 5 にアルミナに関する実験結果を示す。アルミナの融点は約 2050 で、イットリア安定化ジルコニアに比べれば溶射は容易であり、図 5(a) からわかるように、溶射ガンが内径 10 mm の単なる円筒の場合でも、かなり実用的な溶射距離 150-200 mm において 10% 以上の物質効率で溶射可能である。図 5(a) の結果を、図 5(b) のように、出口径で無次元化された溶射距離に対してプロットすると、全体の傾向が明確になる。ただし、図 5(b) には、出口径 20 mm で溶射距離が 50 mm および 100 mm の場合の結果も合わせてプロットしてある。アルミナ程度の融点であれば、図 3 に示した溶射ガン形状であれば溶射ガン自身の無次元量である「長さ / 内径」は溶射の物質効率にはあまり影響しないようであり、図 5(b) に示されているように、溶射の物質効率は出口径で無次元化された溶射距離にほぼ支配されるようである。図 6 に、アルミナの溶射皮膜に関して、気孔率と密着力についての実験結果を示す。図 6(a) の縦軸は体積 % 単位の気孔率であり、電子顕微鏡による組織断

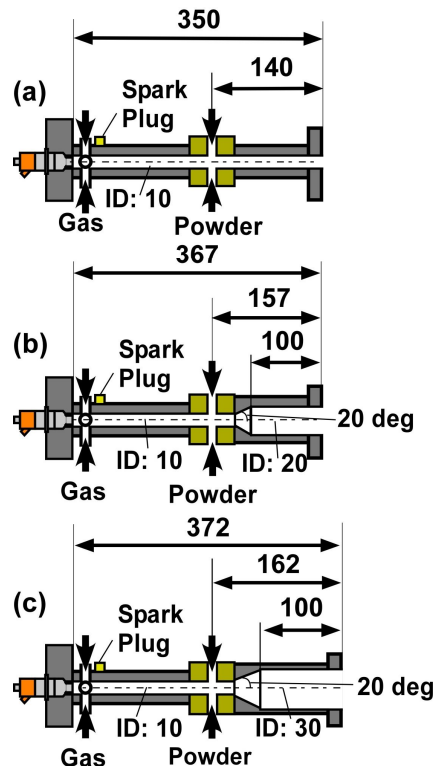


図 3 設計・製作した溶射用燃焼器

図 5 にアルミナに関する実験結果を示す。アルミナの融点は約 2050 で、イットリア安定化ジルコニアに比べれば溶射は容易であり、図 5(a) からわかるように、溶射ガンが内径 10 mm の単なる円筒の場合でも、かなり実用的な溶射距離 150-200 mm において 10% 以上の物質効率で溶射可能である。図 5(a) の結果を、図 5(b) のように、出口径で無次元化された溶射距離に対してプロットすると、全体の傾向が明確になる。ただし、図 5(b) には、出口径 20 mm で溶射距離が 50 mm および 100 mm の場合の結果も合わせてプロットしてある。アルミナ程度の融点であれば、図 3 に示した溶射ガン形状であれば溶射ガン自身の無次元量である「長さ / 内径」は溶射の物質効率にはあまり影響しないようであり、図 5(b) に示されているように、溶射の物質効率は出口径で無次元化された溶射距離にほぼ支配されるようである。図 6 に、アルミナの溶射皮膜に関して、気孔率と密着力についての実験結果を示す。図 6(a) の縦軸は体積 % 単位の気孔率であり、電子顕微鏡による組織断

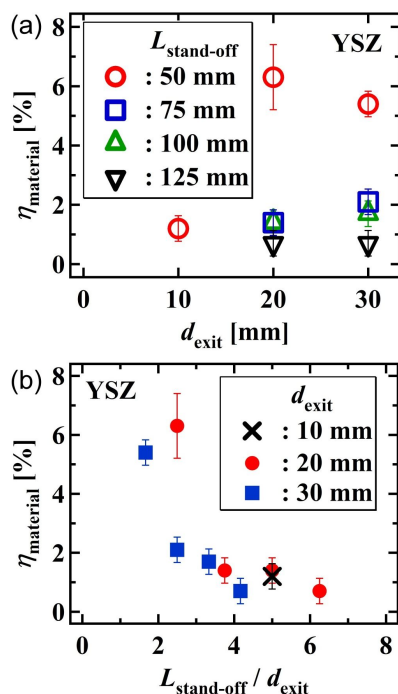


図 4 イットリア安定化ジルコニア (YSZ) に関する溶射実験の結果

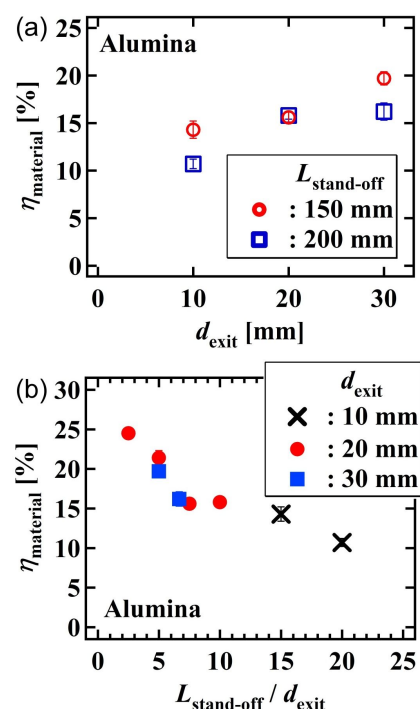


図 5 アルミナに関する実験結果 (物質効率)

面写真を2値化して空孔部分の面積割合として求めたものである。図6(b)の縦軸はMPa単位の密着力であり、プルオフ試験による引っ張り強さとして求めたものである。気孔率については、明確な傾向は見られないが、1%以下という値は他の溶射法によって作製されたアルミナ皮膜に比べて非常に低い値であり、非常に緻密な皮膜が作製されたと判断できる。また、密着力については、出口径で無次元化された溶射距離に対して右下がりの傾向が読み取れる。また、プラズマ溶射で作製されたアルミナ皮膜の密着力に対するJIS規格は20MPaであり、これを満たすには $L_{\text{stand-off}}/d_{\text{exit}}$ を2.5程度にまで小さくせねばならないことが明らかになった。

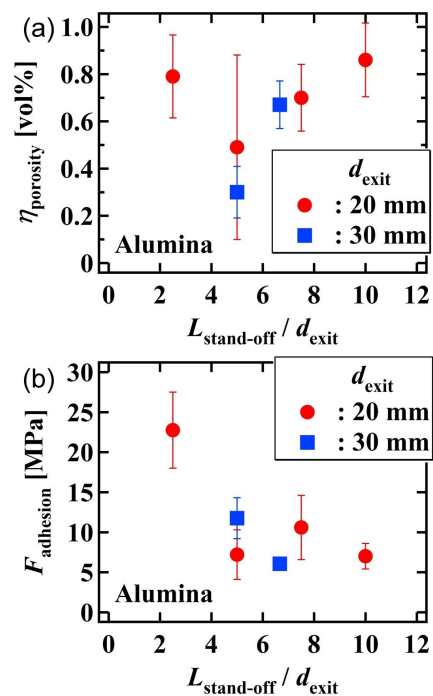


図6 アルミナに関する実験結果(気孔率および密着力)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Endo Takuma, Kuwamoto Keisuke, Kim Wookyung, Johzaki Tomoyuki, Shimokuri Daisuke, Namba Shin-ichi	4. 巻 191
2. 論文標題 Comparative study of laser ignition and spark-plug ignition in high-speed flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 408 ~ 416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2018.01.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Endo Takuma, Okada Kazuki, Ito Yuto, Kim Wookyung, Johzaki Tomoyuki, Namba Shin-ichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Experiments on laser cleaning of sooted optical windows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10522 ~ 10522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.57.010522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤琢磨	4. 巻 200
2. 論文標題 パルスデトネーション溶射	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 K. Okada, Y. Ito, W. Kim, T. Johzaki, S. Namba, and T. Endo
2. 発表標題 Experiments on Laser Cleaning of Sooted Optical Windows
3. 学会等名 The 6th Laser Ignition Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林隆慈, 井本弘平, 桑嶋志門, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨
2. 発表標題 円筒管から発散コーンへのデトネーション伝播
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 望月弘睦, 高島汰直, 小久保光成, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 竹保義博
2. 発表標題 大出口径高周波数パルスデトネーションガンによるイットリアの溶射
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Endo
2. 発表標題 Influence of Laser Ignition on Deflagration-to-Detonation Transition (DDT)
3. 学会等名 2018 International Workshop on Detonation for Propulsion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑嶋志門, 岡田和城, 洪銘遙, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨, 難波慎一, 下栗大右
2. 発表標題 デフラグレーション・デトネーション遷移に対するレーザー点火の影響
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤琢磨, 桑嶋志門, 岡田和城
2. 発表標題 レーザー点火がデフラグレーション・デトネーション遷移に及ぼす影響
3. 学会等名 平成30年度航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川又亮介, 望月弘睦, M. IHSAN BIN RADZUAN, 金佑勤, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 大田耕平
2. 発表標題 パルスデトネーション溶射における運転周波数と粉体供給速度が溶射能力に与える影響
3. 学会等名 平成 30 年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Imoto, S. Kuwajima, R. Kobayashi, K. Okada, T. Johzaki, W. Kim, and T. Endo
2. 発表標題 Transit of a detonation wave through a diverging nozzle
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Mochizuki, K. Kokubo, T. Takabatake, T. Johzaki, W. Kim, T. Endo, K. Matsuoka, Y. Takeyasu, and T. Hanafusa
2. 発表標題 Development of pulse-detonation spraying gun with expanded exit
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Endo
2. 発表標題 Transit of a detonation wave through a diverging nozzle and its application to a thermal-spray detonation gun
3. 学会等名 2017 International Workshop on Detonation for Propulsion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 遠藤琢磨, 小久保光成, 望月弘睦, 高畠汰直, 井本弘平, 小林隆慈, 桑嶋志門, 金佑勤, 城崎知至, 松岡健
2. 発表標題 大口径バルスデトネーション燃焼器の開発
3. 学会等名 平成29年度航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Endo, S. Kuwajima, K. Okada, W. Kim, T. Johzaki, D. Shimokuri, A. Miyoshi, and S. Namba
2. 発表標題 Deflagration-to-Detonation Transition in Explosive Gas Ignited by Laser in a Smooth-Wall Cylindrical Tube
3. 学会等名 The 7th Laser Ignition and Giant-microphotonics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Endo, K. Okada, S. Kuwajima, W. Kim, T. Johzaki, D. Shimokuri, A. Miyoshi, and S. Namba
2. 発表標題 Deflagration-to-Detonation Transition in Laser-Ignited Explosive Gas Contained in a Smooth-Wall Tube
3. 学会等名 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤琢磨, 岡田和城, 桑嶋志門, 金佑勁, 城崎知至, 下栗大右, 三好明, 難波慎一
2. 発表標題 レーザー点火の位置とエネルギーが管内におけるデフラグレーション・デトネーション遷移に与える影響
3. 学会等名 第51回流体力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関陽子, 井本弘平, 小林隆慈, 金佑勁, 城崎知至, 遠藤琢磨
2. 発表標題 障害棒を用いたデフラグレーション・デトネーション遷移の促進
3. 学会等名 第51回流体力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Endo, K. Okada, S. Kuwajima, W. Kim, T. Johzaki, D. Shimokuri, A. Miyoshi, and S. Namba
2. 発表標題 Deflagration-to-Detonation Transition in Laser-Ignited Explosive Gas
3. 学会等名 10th International Workshop on Detonation for Propulsion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤琢磨, 桑嶋志門, 岡田和城
2. 発表標題 レーザー点火時のデフラグレーション・デトネーション遷移に関する実験
3. 学会等名 令和元年度航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川又亮介, 笹津輝, 金佑勁, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 大田耕平
2. 発表標題 パルスデトネーション装置の溶射能力に対する出口径の影響
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----