

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15209

研究課題名（和文）デトネーション応用による簡素かつ高比推力な超小型衛星用ロケットエンジンの実現

研究課題名（英文）Application of Detonation to High-performance, Miniature Rocket Engine

研究代表者

川崎 央（Kawasaki, Akira）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号：20802242

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：回転デトネーションエンジン(RDE)においては、燃焼器内を周方向に極めて高速に伝播する回転デトネーション波の存在により、流れの温度、圧力、速度などが周方向に非一様となっていることが知られており、このことから壁面熱負荷は既存のロケットエンジン燃焼器におけるものと異なることが想定される。本研究では、このような極めて高速な熱現象を正しく理解するための端緒としての高速な温度計測手法の確立を目指し、近赤外高速2色式輻射温度計を新たに構築した。これをRDEの燃焼試験に適用して評価を行い、このような計測手法における基本的考慮事項を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デトネーションエンジンは、その理論効率が既存形式のエンジンの理論効率を上回ることから、将来型の高効率エンジンとして実用化が期待されている。実用化のための重要課題の1つは、デトネーションという極限的な現象に対応した熱設計の確立である。デトネーションエンジンでは、極めて高速に燃料の持つ化学エネルギーが解放されることから、従来形式のエンジンとは異なる熱設計が求められることが想定される。本研究では、デトネーション現象の時間スケールでの熱計測を可能とすることに端緒を開いた。また、本研究で取り扱った計測手法は、デトネーションエンジン以外の高速な熱現象を内包する対象についても有効であることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In rotating detonation engines (RDEs), it is known that the flow temperature, pressure, and velocity are circumferentially non-uniform due to presence of rotating detonation waves which propagate very fast in the circumferential direction in the combustor. This means that the heat load on the combustor wall is expected to be different from those in existing rocket engine combustors. In this study, a near-infrared high-speed two-color radiation thermometer was newly constructed to establish a high-speed temperature measurement method as an initial step to appropriately understand such extremely high-speed thermal phenomena. The measurement system was evaluated by applying it to the combustion test of an RDE, and fundamental considerations for such a measurement method were clarified.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：デトネーション デトネーションエンジン 化学推進 液体ロケット ロケットエンジン 燃焼

## 1. 研究開始当初の背景

キューブサットを初めとする超小型の衛星の活用により、宇宙利用・宇宙探査の在り方が変わりつつある。従前は限られたミッションのみが大規模な予算と長い準備期間の下で着実に進められてきたが、近年では大学およびベンチャー企業などによる多種多様なミッションが小規模な予算と短い準備期間でも実行可能となっている。現在までのところ、超小型の衛星ミッションは地球低軌道 (LEO) におけるものが多くを占めているが、LEO 以遠 (あるいは超低高度軌道) での活用を促進するには簡便な小型推進システムの実現が鍵となる。特に、地球重力圏内で高い機動性を得るには、大推力・高効率な化学推進システムの小型化が必須となる。これを達成する方策として、デトネーションの利用による化学ロケットエンジンの小型化を提案する。

デトネーション (爆轟) とは、衝撃波を伴い超音速で爆発的に進行する燃焼現象であり、既存の工学機器で利用されている燃焼形態 (デフラグレーション) とは明確に区別される[1, 2]。デトネーションを利用すると、衝撃波の圧縮・加熱作用により燃焼が極めて高速に完結することから、この特徴を最大限に際立たせることで、エンジンの小型化が期待される。また、衝撃波により自律的な燃焼圧の上昇、および、燃焼温度の上昇が可能となることから、ポンプを使用しない簡素な推進システムでも高い性能の実現が期待される[3, 4]。

本研究では、推力密度および比推力 (推進剤の消費効率に相当) の観点から、特に、2元推進剤 (燃料と酸化剤が別々の物質) により駆動される回転デトネーションエンジン (RDE、rotating detonation engine) に着目する。通常 RDE では、燃焼室は二重円筒構造を有し、インジェクターから燃料および酸化剤をそれぞれ連続的に流入させても、デトネーション波は円筒間のスリット状流路を周方向に回転伝播して連続的に維持される。これまでの研究にて、上記二重円筒構造から内筒を取り除いて径方向に縮小した、直径 20mm の小さい単円筒構造燃焼室でもデトネーション波の安定保持が可能であることを明らかとしたことから、より小型化に適するこの形状に着目する。

小型のデトネーションエンジンに対しては、基礎的な性能評価 (推力および比推力の評価) に特化した短時間の瞬時的な作動による研究が実施されてきた、実用化に向けて技術成熟度を引き上げるためには、長時間作動時のシステムとしての特性評価を行うための適切な熱設計が必須となる。

## 2. 研究の目的

RDE においては、燃焼器内を周方向に回転伝播するデトネーション波自身とデトネーション波による誘起流れの存在により、既存のロケットエンジン燃焼器におけるものとは異なる流れ場・燃焼場構造を有する。すなわち、先行する強い衝撃波、極めて局所的な発熱領域、温度・圧力・流速の周方向非一様といった RDE に固有の流れ場・燃焼場の特徴があり、これらが燃焼器壁への熱負荷メカニズムに影響を与えることが予想される。このため RDE においては、既存のロケットエンジンに対する熱的な設計則は必ずしも妥当ではない可能性がある。特に、デトネーション波が燃焼器内を回転する時間スケールでの高速かつ非定常な熱流束変動が、熱設計に無視できない影響を与える可能性がある。そこで本研究では、このような高速な熱現象を正しく理解するための端緒として、高速な熱現象の計測手法の確立に資する基本的考慮事項の明確化を目的とした。

## 3. 研究の方法

RDE 燃焼器の壁面熱負荷に対する回転デトネーション波の影響を十分に解像可能な程度に高速な温度計測の手法を確立するため、新たに近赤外高速 2 色式輻射温度計を構築する。また、これを実際の RDE に適用するために、RDE 燃焼器内壁面からの熱輻射を観測可能な光学計測用小型単円筒 RDE を構築する。RDE の燃焼器内壁面から放射される熱輻射は、集光光学系を介して光ファイバーへと導入し、最終的に輻射温度計へと伝送し計測される。

RDE は、気相酸素および気相水素を推進剤として真空環境で運転され、燃焼室圧力、推力、燃焼器の振動加速度、燃焼器内壁からの輻射光、および、関連する諸量が、高速データレコーダで記録される。サンプリングレートは、基本的に、典型的な RDE 内のデトネーション波の挙動を十分に解像できるように 1MHz 以上とした。

## 4. 研究成果

本研究で構築した光学計測用小型単円筒 RDE の概要を図 1 に示す。RDE は、これまでの研究で小型化を進めてきた単円筒型とし、燃焼器半径は 20mm とした。噴射器は、異種 2 対衝突型エレメントを単一ピッチ円上に 24 等配とした。また、デトネーション波の存在すると考えられる燃焼器上流部 (噴射面から 15mm) に光学可視化ポートを設け、燃焼器内壁から放射される熱輻射を集光光学系へ導入できるようにした。

本研究で構築したファイバー導光近赤外高速 2 色式輻射温度計の概要を図 2 に示す。ファイバーにより伝送された RDE 燃焼器内壁からの熱輻射は、ファイバーコリメーターで平行光に光

学調整され、プリズム型光束分岐器により2つの経路に分岐される。その後、各経路において、光束は、狭帯域透過濾光器を通過後、最終的に集光レンズにより InGaAs 光検出器に照射される。InGaAs 光検出器は、おおよそ 900~2600nm に感度を有し、内蔵増幅器の小信号帯域幅は 25MHz である。本温度計を構成する光学素子は、光ファイバーを含め、近赤外領域に十分な透過率を有する材料を使用したものを選定した。RDE 側の集光光学系から光検出器までの光学系の全体は、輻射スペクトル分布が既知の近赤外光源により相対強度校正が行われる。

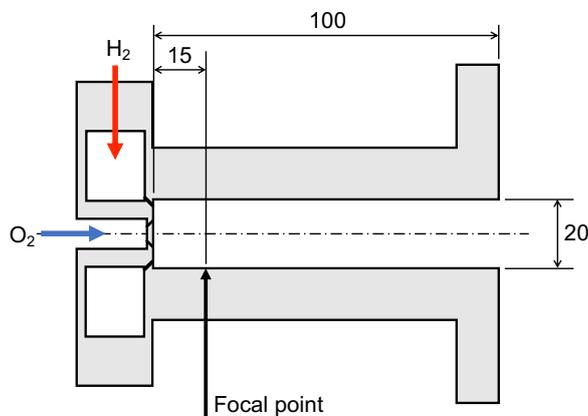


図1 光学計測用小型単円筒 RDE

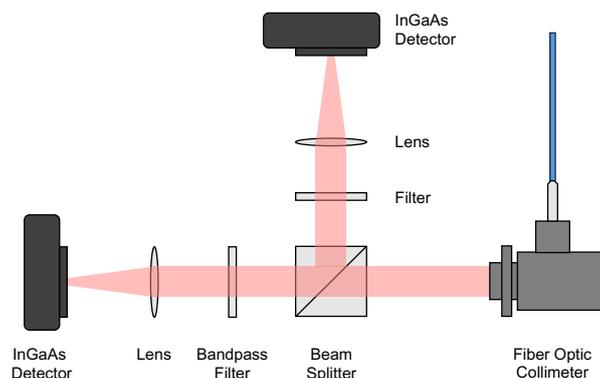


図2 ファイバー導光近赤外高速2色式輻射温度計

輻射温度計で使用する2波長は、燃焼器内壁からの熱輻射が燃焼生成ガスを通過後から光ファイバーへの集光光学系へと導入されることに注意して選定する必要がある。即ち、選定する2波長において、燃焼生成ガスが光学的に十分薄くなるように注意を要する。これは、壁面からの熱輻射のうち選定した2波長について、燃焼生成ガスにより吸収されたり、あるいは、燃焼生成ガスからの発光が重畳したりすると、相対強度比が変化してしまうことによる。そこで、本研究では、主として、分子による吸収スペクトルの大規模データベースである HITRAN [5] を参照して検討を行った。図3に水素・酸素火炎中の化学種による近赤外領域における吸収スペクトル強度分布を示す。本研究では、主として、吸収スペクトルが存在しない、あるいは、十分に弱い 1500~1700nm の領域から2波長を選んで計測に使用した。なお、図3に示したスペクトル強度分布は常温でのものであり、燃焼生成ガスの温度領域では、より多くの自由度が励起されることとなることに注意を要する。

RDEの燃焼実験で得られた典型的な計測波形を図4に、典型的なプルーム画像を図5に示す。本条件では、点火から1.5秒程度の間、安定した燃焼室圧力および推力が得られている。また、振動加速度の計測結果から、デトネーションの発生に起因すると解釈される特徴的な波形が得られている。また、約1.5秒のRDE作動中において、燃焼器内壁から放射された熱放射光を濾光した強度データも得られている。これらの実験を通して、計測システムの信号応答特性が良好であることが確認できた。

またこれらに付随して、デトネーションエンジンの小型化設計に不可欠なデトネーションの構造特性長についても検討を行ったが、特にデトネーション回折に伴う構造特性長がもつ、各種の熱力学的・化学動力的パラメーターに対する依存性も明らかとなった。

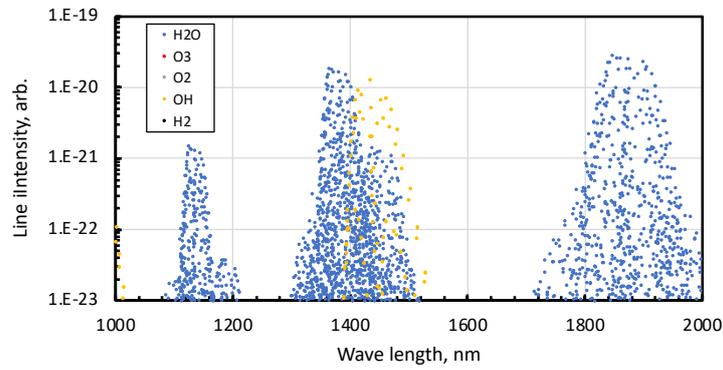


図3 水素・酸素火炎中の化学種による近赤外領域における吸収スペクトル

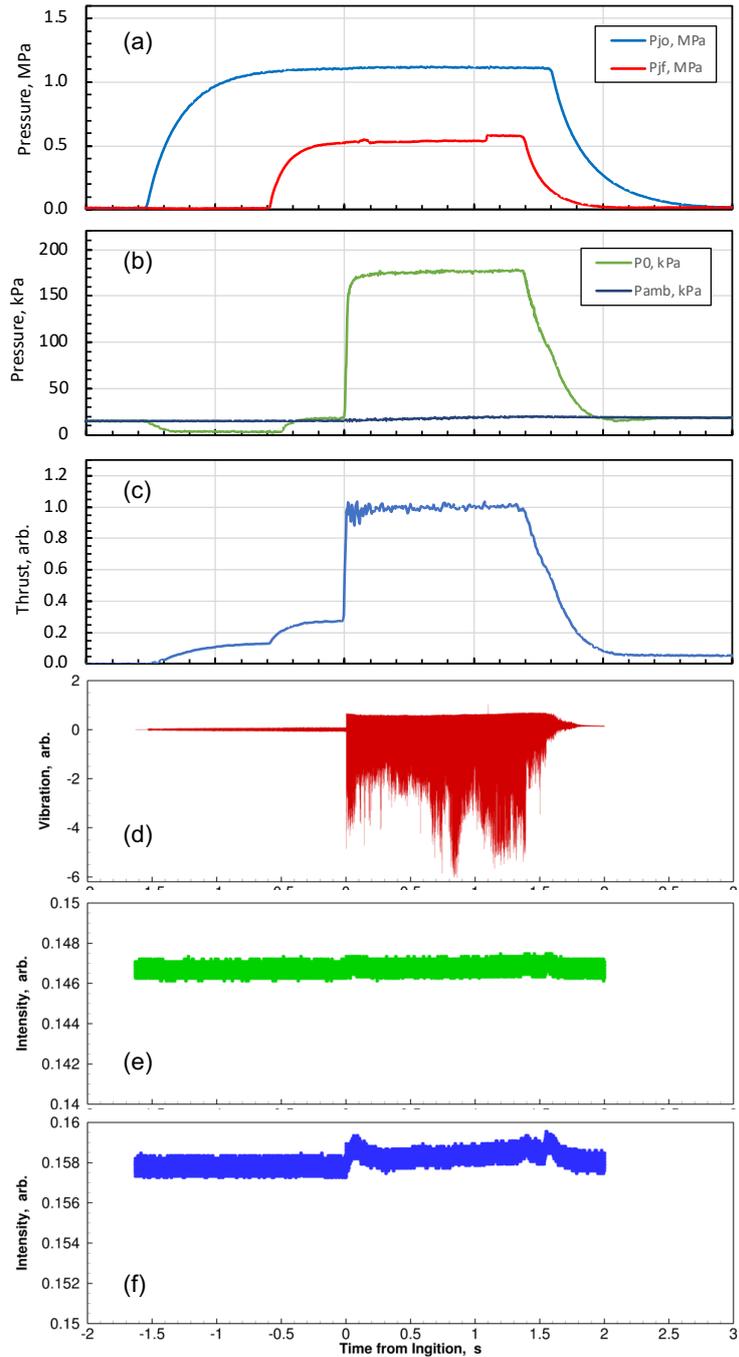


図4 典型的な計測波形 ( $H_2/O_2$ , 当量比 1.0, 総流量 30 g/s) (a) 酸化剤マニホールド圧力  $P_{jo}$ 、燃料マニホールド圧力  $P_{jf}$  (b) 燃焼室圧力  $P_0$ 、雰囲気圧力  $P_{amb}$  (c) 推力 (d) 振動加速度 (e) 近赤外光強度(1540 nm) (f) 近赤外光強度(1650 nm)



図5 作動中 RDE の典型的な排気ブルーム ( $\text{H}_2/\text{O}_2$ , 当量比 1.0, 総流量 30 g/s)

参考文献

1. Fickett & Davis, *Detonation Theory and Experiment*, University of California Press, (1979).
2. Lee, *The Detonation Phenomena*, Cambridge University Press, (2008).
3. Abul-Huda & Gamba, *Proceedings of Combustion Institute*, (2016).
4. Endo *et al.*, *Science Technology Energy Materials*, (2004).
5. I.E. Gordon, L.S. Rothman, R.J. Hargreaves *et al.*, "The HITRAN2020 molecular spectroscopic database", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277, 107949, (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakata Kotaro, Ota Kosei, Ito Shiro, Ishihara Kazuki, Goto Keisuke, Itouyama Noboru, Watanabe Hiroaki, Kawasaki Akira, Matsuoka Ken, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko, Funaki Ikkoh, Higashino Kazuyuki, Braun James, Meyer Terrence, Paniagua Guillermo	4. 巻 na
2. 論文標題 Supersonic Exhaust from a Rotating Detonation Engine with Throatless Diverging Channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061300	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 該当する

1. 著者名 Sun Han, Kawasaki Akira, Matsuoka Ken, Kasahara Jiro	4. 巻 38
2. 論文標題 A study on detonation-diffraction reflection point distances in H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , and C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3605 ~ 3613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.06.371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yokoo Ryuya, Goto Keisuke, Kasahara Jiro, Athmanathan Venkat, Braun James, Paniagua Guillermo, Meyer Terrence R., Kawasaki Akira, Matsuoka Ken, Matsuo Akiko, Funaki Ikkoh	4. 巻 38
2. 論文標題 Experimental study of internal flow structures in cylindrical rotating detonation engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3759 ~ 3768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.08.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 1件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kawasaki, A., Matsuyama, K., Matsuoka, Watanabe, H., Itouyama, N., Goto, K., Ishihara, K., Buyakofu., V., Noda, T., Kasahara, J., Matsuo, A., Funaki, I., Nakata, D., Uchiyumi, M., Habu, H., Takeuchi, S., Arakawa, S., Masuda, J., Maehara, K., Nakao, T., Yamada, K.
2. 発表標題 Flight Demonstration of Detonation Engine System Using Sounding Rocket S-520-31: System Design
3. 学会等名 AIAA SciTech 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakata, K. Ota, S. Ito, K. Ishihara, K. Goto, N. Itouyama, H. Watanabe, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki
2. 発表標題 Experimental Study on Truncated Conical Rotating Detonation Engine with Diverging Flows
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Kawasaki, K. Matsuyama, K. Matsuoka, H. Watanabe, N. Itouyama, K. Goto, K. Ishihara, V. Buyakofu, T. Noda, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, M. Uchiumi, H. Habu, S. Takeuchi, S. Arakawa, J. Masuda, K. Maehara, K. Yamada, T. Nakao
2. 発表標題 In-Space Flight Demonstration Results of a Detonation Engine System on Sounding Rocket S-520-31: System Design
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎 央, 長谷川 大樹, 孫 涵, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 松岡 健, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸
2. 発表標題 回折デトネーション波観測に基づくデトネーション特性長予測に関するデータ駆動的検討
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39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 2021年

1. 発表者名 長谷川 大樹, 川崎 央, 孫 涵, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 松岡 健, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸
2. 発表標題 デトネーション回折における反射点距離の人工ニューラルネットワークを用いた予測モデルの構築と評価
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎 央, 松本 正晴
2. 発表標題 デトネーション燃焼器により駆動されるMHD発電システムの概念検討
3. 学会等名 新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sun, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara
2. 発表標題 A study on detonation-diffraction reflection point distances in H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , and C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> systems
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Yokoo, K. Goto, J. Kasahara, V. Athmanathan, J. Braun, G. Paniagua, T. Meyer, A. Kawasaki, K. Matsuoka, A. Matsuo, I. Funaki
2. 発表標題 Experimental study of internal flow structures in cylindrical rotating detonation engines
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 孫 涵, 川崎 央, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 松岡 健, 笠原 次郎
2. 発表標題 水素・酸素及び炭化水素・酸素混合気におけるデトネーション回折時の特性長に対する当量比の影響調査
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 耕太郎, 太田 光星, 石原 一輝, 後藤 啓介, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 川崎 央, 松岡 健, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸
2. 発表標題 拡大流路を有する単円筒回転デトネーションエンジンに関する研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎 央, 野田 朋之, プヤコフ バレンティン, 石原 一輝, 後藤 啓介, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 松岡 健, 松山 行一, 笠原 次郎, 他 11名
2. 発表標題 S-520-31号機によるデトネーションエンジン実験の進捗状況: デトネーションエンジンシステム
3. 学会等名 令和2年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎 央, 孫 涵, 伊東山 登, 渡部 広吾輝, 松岡 健, 笠原 次郎
2. 発表標題 気相デトネーションの反射点距離に与える希釈種の影響に関する実験的検討
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 孫 涵, 川崎 央, 渡部 広吾輝, 伊東山 登, 松岡 健, 笠原 次郎
2. 発表標題 水素・酸素及び炭化水素・酸素混合気におけるデトネーション回折に伴う特性長の初期圧力及び当量比依存性調査
3. 学会等名 流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2020オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田内 思担、大塩 裕哉、川崎 央、船木 一幸
2. 発表標題 2MW 級自己誘起磁場型 MPD スラスタの推進性能と熱特性に関する実験的研究
3. 学会等名 令和2年度 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Yokoo, K. Goto, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki
2. 発表標題 Combustion Pressure Distributions and Thrust Performances in Small Cylindrical Rotating Detonation Engines
3. 学会等名 AIAA SciTech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Kawasaki, R. Yokoo, K. Goto, J.H. Kim, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki
2. 発表標題 An Experimental Study of In-Space Rotating Detonation Rocket Engine with Cylindrical Configuration
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎 央、横尾 颯也、金 周会、松岡 健、笠原次郎、松尾 亜紀子、船木 一幸
2. 発表標題 膜冷却壁を有する小型単円筒回転デトネーションエンジンの実験研究
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37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 2019年

1. 発表者名 A. Kawasaki, K. Goto, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki
2. 発表標題 Development Progress of a Detonation Engine Testing Module for Flight Demonstration on Sounding Rocket S-520 #31
3. 学会等名 2nd International Constant Volume and Detonation Combustion Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kawasaki, J. Kasahara
2. 発表標題 An Experimental Investigation of a Detonation Characteristics Length Scale Relevant to Critical Diffraction
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 川崎央、松岡健、笠原次郎、松尾垂紀子、船木一幸
2. 発表標題 デトネーション燃焼技術応用による宇宙推進システムの高度化研究
3. 学会等名 令和元年度電気学会新エネルギー・環境研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------