

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13926

研究課題名（和文）低粘性液化燃料を生ずる境界層燃焼の加速度環境下における燃焼機構解明

研究課題名（英文）Investigation on Boundary Layer Combustion of Liquefying Fuel with Low Viscosity in Acceleration Environment

研究代表者

小澤 晃平 (Ozawa, Kohei)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90801879

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：パラフィンワックス燃料は、ハイブリッドロケット推進において推力密度の増加に寄与する。その後退速度特性の加速度依存性を調べるため、窓付き矩形燃焼器を用いて燃焼中の液化燃料流動の可視化や後退速度の計測を行った。研究の初期には、燃焼器の設置方向を変え、特性に違いが出るか調べた。結果、燃焼器流路方向に加速度をかけ、高い燃焼圧では燃料後退速度が増加することがわかった。また、大気圧燃焼の場合では、背景散乱光で輝炎を打ち消し、液化燃料の転波を可視化することができた。研究の後期には、室蘭工業大学のロケットスレッドが作る加速環境で同様の可視化計測を行うシステムを開発し、走行状態での計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提起した燃料後退速度の加速度依存性を今後さらに詳細に調べることで、ハイブリッドロケット燃焼中の固体燃料の消費計画を詳細に決定することができる。これはロケットの未燃推進剤の質量を削減し、増速性能を理想値に近づけることに繋がる。加えて、本研究で実証した計測手法や実験装置は、さらに高い加速度でのロケットスレッド走行実験に応用することができる。また、可視化燃料後退計測技術については、パラフィンワックス以外のハイブリッドロケット技術の実証に既に応用されている。

研究成果の概要（英文）：Paraffin wax fuel contributes to increasing thrust density in hybrid rocket propulsion. To investigate the dependency of its regression rate characteristics on acceleration environments, the dynamics of the melted fuels and fuel regression were visualized in combustion environments. In the initial phase of the study, these characteristics were compared when installing the combustor vertically and horizontally to the gravitational acceleration. The fuel regression rates increased when gravitational acceleration is aligned with the flow direction and the fuel is burned at pressures higher than the critical pressure of paraffin wax. At the atmospheric pressure, roll waves of the melted fuel were visualized. In the latter half of the research, a payload system for the visualization was developed in the acceleration environment created by the rocket sled of Muroran Institute of Technology. The demonstration of the system was successfully made in the running state.

研究分野：航空宇宙推進工学

キーワード：ハイブリッドロケット パラフィンワックス燃料 燃焼可視化 加速度環境

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ハイブリッドロケット(HR)推進は固体燃料を配置した燃焼室内に酸化剤流を噴射して境界層燃焼を形成し、燃焼ガスをノズルから噴射する非火薬式のロケット推進である。HR 推進は燃焼が固体燃料表面近傍に限定されるため高い安全性を持つ。理論性能の上限近くに達した既存の液体/固体ロケット推進に対し、HR はライフサイクルコストや事故被害の大幅な低減という側面でロケット推進に革新をもたらす。国際的には有人ミッションを含む多くの技術実証が行われてきた。

パラフィンを用いた HR は、従来比 3 倍の大推力を実現しようとして注目されてきた。従来の固体燃料では、熱分解された燃料ガスが燃焼熱の対流熱伝達を阻害する一方、パラフィンは次のようなメカニズムで高い燃料後退速度を実現している:

- 1) 固体燃料融解による低粘性燃料液膜の形成
- 2) 主流ガス-液膜間のケルビン・ヘルムホルツ不安定性による燃料液滴の飛散
- 3) 燃料液膜の薄膜化、気化燃料の伝熱阻害効果減少による固体燃料への熱伝達増加

これまで静置環境で多くの燃焼データが取得されてきた一方、ロケットで想定される加速度環境での詳細な燃焼データ取得例は見つからない。パラフィンの境界層燃焼で多量に生成される液化燃料はガスに比べ高密度で、加速度により同体積のガスの約 1000 倍の体積力を受ける。従って、液化燃料のダイナミクスが静置環境から変化する結果、燃焼機構が大きく変化することが予想される。固体ロケット推進薬のアルミ粒子でも類似の現象が見られ、加速度環境の燃焼・弾道特性は重要な研究課題である。

他の化学推進に比べ、HR は燃焼特性変化による性能低下が大きい。例えば、推進剤質量分率 75%のロケットにおいて燃料後退速度が 1%ずれる場合、比推力減少に加え未燃推進剤を生じ、約 4%もの増速性能が失われる。従って加速度環境でのパラフィンの燃焼特性把握は学術・技術上重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では次の目的を設定する:

- 1) 加速度が液化燃料のダイナミクスに及ぼす影響を、燃料後退の可視化や、燃焼後の燃料の特性を計測することで解明する。
- 2) パラフィン燃料の境界層燃焼が加速度から受ける影響をモデル化し、対流熱伝達及び燃料後退の解析的理論として纏める。

### 3. 研究の方法

#### 1) 燃料後退可視化実験装置および解析手法の開発と実験

パラフィンワックスの燃焼可視化を行う窓付き矩形燃焼器およびロケットの燃焼実験設備を構築した。まずは静置環境で実現可能な加速度環境(0[G]:燃焼器横置き、及び1[G]:燃焼器縦置き)で、背景散乱光影写真法を利用し、様々な加速度環境で液化燃料および固体燃料が後退していく様子を高速カメラで撮影した。

高速映像から液化燃料のダイナミクスを目視観察するとともに、各フレームで映像を二値化して液化燃料の界面を確定し、高さの時間履歴をプロットすることで、可視化映像から燃料後退量の時空間解像データを取得した。

#### 2) 高加速度環境での可視化計測システムの開発と実証実験

上で述べたのと同様な実験を高加速度環境でも実現するため、走行中に実験を行うことが可能な可視化燃焼実験システムを室蘭工業大学の高速走行架台(ロケットスレッド)のペイロード台車に集約し、機能実証実験を行った。実験システム本体はマイコンで制御され、ペイロード-スタート点倉庫間の通信によって計測室から装置の状態を監視できる。また、台車は水ブレーキにより停止するため、搭載された高速カメラや制御計測機器には防水処理を施した。

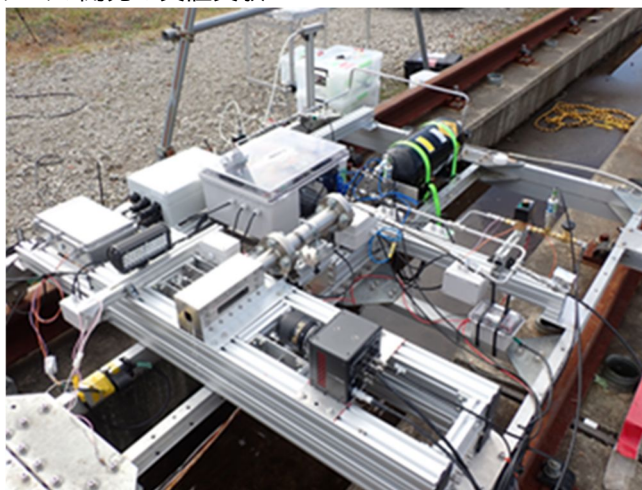


図1 ロケットスレッド上のミッション系概観[1].

### 4. 研究成果

#### 1) 静置環境での燃料後退可視化実験

大気圧燃焼においては、輝炎を背景散乱光で打ち消し、燃焼中に液化したパラフィンワックスの転波を可視化することに世界で初めて成功した(図2)。縦置きに対し、横置きでは転波がはっきりと形成されていることがわかる。一方、縦置きでは、燃焼開始時のごく初期を除き、転波はほとんど観察されなかった。

一方、液化したパラフィンワックスが超臨界状態となって粘性が低下し、転波や液滴の飛散が卓越すると期待される 0.6MPa 以上の燃焼圧力ではおそらく火炎温度が上昇して煤の放射強度が大きく上昇し、所持するバックライトでは輝炎の打ち消しができなかった。これは高速度カメラ側にバンドパスフィルタや減衰フィルタなどを設置しても解消できなかった。

図4に燃焼前後の固体燃料質量の差分から算出した時空間平均燃料後退速度-酸化剤質量流束の関係図を示す。ただし、これらの値は、固体燃料が初期形状の相似形として後退していくと仮定して算出したもので、実際の固体燃料の後退は複雑な形状となった。100[kg/m<sup>2</sup>s]未満の低酸化剤質量流束では後退速度の加速度依存性は実験データのばらつきに埋もれている。一方、100[kg/m<sup>2</sup>s]以上では、加速度の依存性がより顕著になった。これらは全てパラフィンの超臨界圧以上の燃焼圧での結果である。従って、観察された差異は、点火時に残留する液化燃料の厚さが重力方向の違いによって異なるためのものではなかったか、大気圧燃焼における液化燃料ダイナミクスの差異は無視できる程度なのではないかと考えられる。一方、高圧下では、液化燃料の転波の有無のレベルなど、定性的な目視観察ならば可能であるものの、本手法で用いた光源では定量的観察は困難であると考えられる。高圧燃焼での可視化には、煤放射強度を事前計測した上で、それを上回る強度のストロボやパルスレーザーなど、高性能な光源の導入の検討が必要であろうことがわかった。

大気圧燃焼での可視化映像を二値化することで、燃料後退量の時間履歴を求めることは簡易的なレベルでは実施できている。しかし、ノイズ除去フィルタの実装が完了しておらず、目視の映像観察で認識されるような単調な燃料後退履歴のプロットには至っていないため、本報告では掲載を割愛する。

また、ここで開発した燃焼器や燃料後退量の定量計測技術は、他のハイブリッドロケット推進の関連研究にも適用され、多くの成果を得た。

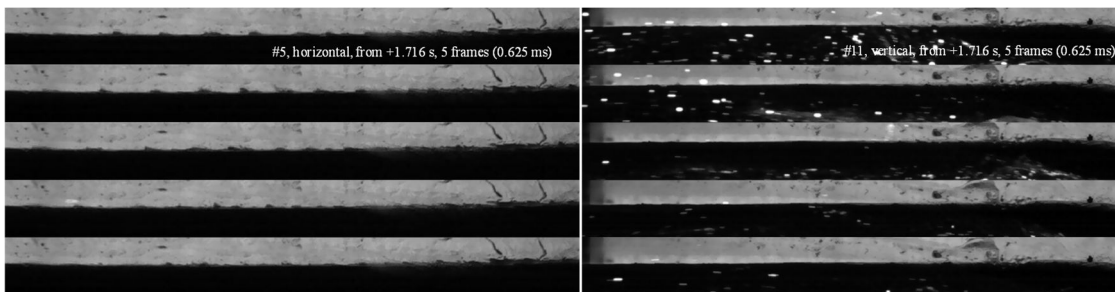


図2 大気圧燃焼下のワックス燃料界面[2].

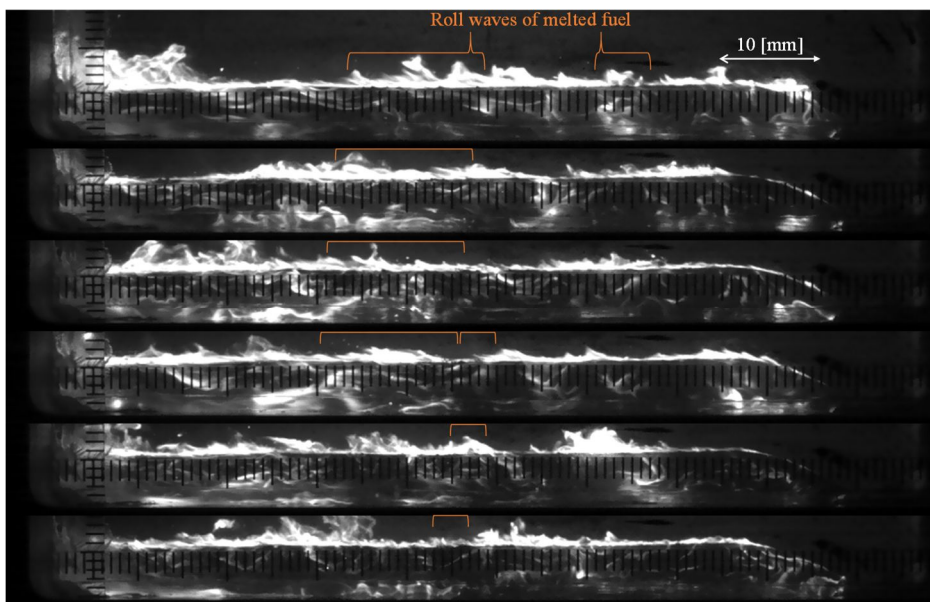


図3 高圧燃焼下のワックス燃料 [2].

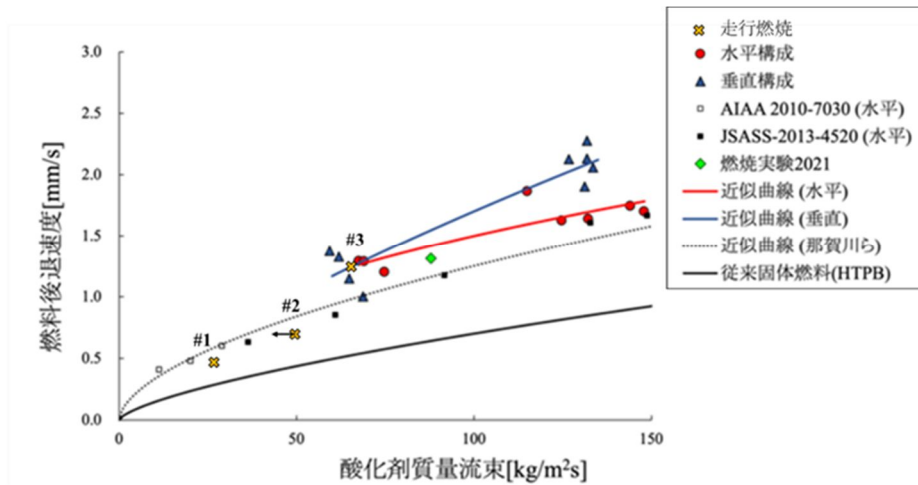


図4 時空間平均燃料後退速度特性 [1].

## 2) ロケットスレッドでの燃料後退可視化実験

令和2年度および令和3年度に室蘭工業大学白老エンジン実験場にて、ロケットスレッドを用いて燃料後退量の取得実験を行った。令和2年度の実験は、実質的にペイロードの噛み合わせの側面が強く、ロケットスレッドを地上に固定した状態の可視化実験と、ペイロードである可視化燃焼器側を点火しない状態での走行実験にとどまった。特に結露に関連した制御計測系のトラブルが多発した。

令和3年度では制御計測システムの構造系を一新して実験を行った。3度の走行中燃料後退可視化実験を実施した。いずれも大気圧燃焼であり、酸化剤質量流束は図4にプロットした通り、すべて100[kg/m²s]の範囲であった。走行実験のうち2回は、点火系の残留物による不均一な燃料後退や、走行中の固体燃料の脱落などが発生したものの、残りの1回では、均一な燃料後退を観察することができた。燃焼器にかかった流路方向の加速度は最大でおよそ0.5[G]と重力加速度以下であったものの、流路方向に関して0-1[G]の中間の取得できた他、高加速度での映像取得に向けてシステムの実証ができた。加速度が低い原因は、加速系を含めた実験系の総質量が加速用ロケットエンジンの推力に比べて大きいことに起因する。ペイロード機器の軽量化はある程度可能と考えられるが、持ち込んだペイロード機器を軽量化しても加速性能に対する感度は比較的小さく、むしろ加速系やペイロード台車の軽量化が今後の課題である。室蘭工大側も、加速用ロケットエンジンに固体推進を導入することを検討するなど、改善に動きつつある。

燃焼器および高速度カメラを搭載したペイロード系の構造には比較的大型のアルミフレームを採用し、剛性の確保を意図したものの、カメラと燃焼器の相対振動により、取得した可視化映像上で燃焼器窓の位置が変位している。可視化映像から燃料後退量の時間履歴を取得するにはこの変位を除去する必要がある、現在は画像補正のプログラムをコーディング中である。研究期間終了後も、これらの解析の活度を続行し、論文にまとめる予定である。



図4 走行可視化実験の様子 [1].

<引用文献> [1] 根木智也, 小澤晃平, 坪井伸幸, 立山亮介, 大宮一志, 中田大将, 内海

政春, 加速度環境におけるパラフィンワックス燃料後退速度の可視化システム開発, 第4回 ハイブリッドロケットシンポジウム, HR-2021-15, 2022. [2] Kohei Ozawa, Takuro Yoshino, Han-wei Wang and Nobuyuki Tsuboi, "Boundary-Layer Combustion of Wax-based Fuels at Various Chamber Pressures under Two Static Acceleration Environments," AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, AIAA 2019-4100, 2019.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kohei Ozawa, Han-wei Wang, Takefumi Inenaga, Nobuyuki Tsuboi	4. 巻 82
2. 論文標題 Regression behavior of polylactic acid manufactured by fused filament fabrication for hybrid rocket propulsion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 170-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34571/stem.82.6_170	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 Kohei Ozawa, Han-wei Wang, Takuro Yoshino, Nobuyuki Tsuboi	4. 巻 187
2. 論文標題 Time-resolved fuel regression measurement function of a hybrid rocket solid fuel integrated by multi-material additive manufacturing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 89-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2021.06.031	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 Kohei Ozawa, Toru Shimada	4. 巻 37
2. 論文標題 Performance of Mixture-Ratio-Controlled Hybrid Rockets Under Uncertainties in Fuel Regression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 86-99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37970	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 Kohei Ozawa, Toru Shimada	4. 巻 36
2. 論文標題 Performance of Mixture-Ratio-Controlled Hybrid Rockets for Nominal Fuel Regression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 400-414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37665	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 Kohei Ozawa, Koki Kitagawa, Shigeru Aso, Toru Shimada	4. 巻 35
2. 論文標題 Hybrid Rocket Firing Experiments at Various Axial-Tangential Oxidizer-Flow-Rate Ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 94-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B36889	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 Kohei OZAWA, Toru SHIMADA	4. 巻 13
2. 論文標題 A theoretical study on throttle ranges of O/F controllable hybrid rocket propulsion systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 p. JFST0031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2018jfst0031	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16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 根木智也, 小澤晃平, 坪井伸幸, 立山亮介, 大宮一志, 中田大将, 内海政春
2. 発表標題 加速度環境におけるパラフィンワックス燃料後退速度の可視化システム開発
3. 学会等名 第4回 ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Ozawa, Han-wei Wang, Takuro Yoshino, Nobuyuki Tsuboi
2. 発表標題 Integration of Fuel Regression Measurement Function into Hybrid Rocket Solid Fuels with Multi-Material Additive Manufacturing
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Ozawa, Han-wei Wang, Takafumi Inenaga, Nobuyuki Tsuboi
2. 発表標題 Accuracy of real-time fuel regression measurement function of a 3d printed solid fuel
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤晃平, 王瀚緯, 坪井伸幸
2. 発表標題 多素材3Dプリンタ製燃料後退計測機能付き固体燃料の研究
3. 学会等名 第3回 ハイブリッドロケット シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤晃平, 王瀚緯, 坪井伸幸
2. 発表標題 素材3Dプリンタ製燃料後退計測機能付き固体燃料の研究
3. 学会等名 第29回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長坂春花, 小澤晃平, 坪井伸幸, 中田大将
2. 発表標題 ワックス燃料後退速度の加速度環境下における可視化システム研究開発
3. 学会等名 第74期 日本機械学会九州支部 講演会
4. 発表年 2021年



1 . 発表者名 Kohei Ozawa, Takuro Yoshino, Hanwei Wang, Nobuyuki Tsuboi
2 . 発表標題 Boundary-Layer Combustion of Wax-based Fuels at Various Chamber Pressures under Two Static Acceleration Environments
3 . 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kohei Ozawa, Hanwei Wang, Takuro Yoshino, Nobuyuki Tsuboi
2 . 発表標題 Real-time Regression Rate Measurement of an Additive-manufactured Functional Hybrid Rocket Fuel
3 . 学会等名 70th International Astronautical Congress
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kohei Ozawa, Takuro Yoshino, Nobuyuki Tsuboi
2 . 発表標題 Visualization of Boundary Layer Combustion of Wax-Based Fuels in Horizontal and Vertical Chamber Configurations
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Sciences ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hanwei Wang, Kohei Ozawa, Nobuyuki Tsuboi
2 . 発表標題 Feasibility Study of a Real-time Fuel Regression Rate Measurement using an Electrostatic Capacitive Probe for Hybrid Rocket Engines
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Sciences ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野 拓郎, 小澤 晃平, 坪井 伸幸, 王 瀚緯
2. 発表標題 異なる加速度環境における高燃焼室圧力下でのワックス燃料を用いた液膜不安定性の可視化
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Ozawa, Takuro Yoshino, Nobuyuki Tsuboi
2. 発表標題 Visualization of Boundary Layer Combustion of Wax Fuels in Vertical and Horizontal Configurations
3. 学会等名 2018 Joint Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉野 拓郎, 小澤 晃平, 坪井 伸幸
2. 発表標題 加速度環境におけるハイブリッドロケット用ワックス燃料の境界層燃焼可視化に関する研究
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤 祥太, 小澤 晃平, 坪井 伸幸
2. 発表標題 軸・接線噴射を用いたハイブリッドロケットエンジンのインジェクタ特性解析
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 王 瀚緯, 小澤 晃平, 坪井 伸幸
2. 発表標題 ハイブリッドロケットの推力・酸燃比制御に向けた新しい瞬時後退速度計測手法
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪井 伸幸, 後藤 祥太, 小澤 晃平
2. 発表標題 A-SOFTハイブリッドロケットエンジンの内部流れの数値解析にむけて
3. 学会等名 平成30年度ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 燃焼装置及びその製造方法、並びに、ハイブリッドロケットエンジン	発明者 小澤晃平, オウ カン イ, 吉野拓郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-063501	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------