

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04558

研究課題名(和文) ピントル型噴射器を有する液体ロケットエンジン燃焼器の振動燃焼ダイナミクス

研究課題名(英文) Combustion oscillation dynamics of liquid rocket engine combustor with a pintle injector

研究代表者

中谷 辰爾 (Nakaya, Shinji)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：00382234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではピントル型噴射器を用いた液体ロケットエンジンモデル燃焼器の燃焼実験を通して、ロケットエンジン開発において重要となる燃焼挙動や燃焼不安定性のメカニズムの理解を目指した。実験では不安定燃焼から安定燃焼への遷移が確認され、高速度画像ベースの動的モード分解、フラクタル性に着目した非線形解析や教師なし学習などの解析手法を用いて、振動状態の分類を行った。その結果、安定燃焼は不安定燃焼に比べて、様々なスケールの振動を含んでいる複雑な振動であることが示された。また、形状の異なる噴射器の微粒化特性の比較から、We数の増加による燃焼効率改善が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケットエンジンの低コスト化、安全性向上に向けて、炭化水素燃料を用いた場合の燃焼特性を理解することは重要である。また、ロケットの再使用化や衛星の軌道要求の高まりから、高効率でのスロットリング性能を持つピントル型噴射器に注目が集まっている。本研究の結果からデータドリブン手法を用いた、振動状態の把握の可能性が示され、将来的に振動の抑制や制御に応用できると考えられる。さらに、本研究で得られた微粒化特性と燃焼挙動関連性は、噴射器設計において有用な指標となりうる。

研究成果の概要(英文)：In rocket engine development, it is important to understand the combustion behavior and the mechanism of combustion instability. In the present study, the combustion behaviors were observed in a model combustor with a pintle injector. A transition from unstable combustion to stable combustion, and vice versa were observed in the experiments. The oscillation states were analyzed by data-driven approaches using analytical methods such as high-speed image-based dynamic mode decomposition, a nonlinear analysis focusing on fractality, and unsupervised learning. The results showed that stable combustion was more complex than unstable combustion, containing various scales of vibration. The comparison of atomization characteristics of different injectors clarified a mechanism for an increase in the We number resulted in the combustion efficiency.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：液体ロケットエンジン ピントル型噴射器 燃焼不安定性 動的モード分解 データ駆動型アプローチ
マルチフラクタル解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ロケットエンジンの信頼性向上、低コスト化の上で液体の炭化水素燃料の利用は必須である。また、多様化する衛星要求や惑星探査における軟着陸を含め、エンジンの幅広いスロットリングが要求される。図1に示すようなピントル型噴射器を備えたロケットエンジン燃焼器はディープスロットリングが可能である。大きく作動環境が変化する中で、振動燃焼を避けながら、安定した燃焼の実現が必要である。しかしながら、ロケットエンジン燃焼器内においては、高温、高圧力における

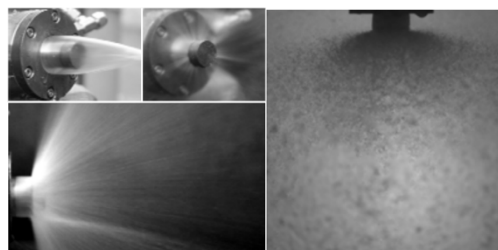


図1 ピントル型噴射器の噴霧 (東大)

流体力学、噴霧形成、相変化、化学反応が密接に干渉した系であり、燃焼振動抑制のメカニズム解明と抑制への明確な指針は得られていない。近年、ピントル型噴射器を用いたロケットエンジンの燃焼研究が行われており、インジェクタ形状、燃焼器特性長さ(L*)や推進剤モーメント比が燃効率に及ぼす影響、噴霧形成に及ぼすインジェクタ形状の影響を調べている。[1,2]

しかしながら、ピントル型噴射器を用いた燃焼研究が限定的なのに加え、スロットリング下の燃焼効率の最大化や燃焼不安定性の抑制に関する知見は希である。また、ピントル型噴射器を用いた燃焼器では燃焼不安定性に起因する振動燃焼が起き難いと言われてきたが、我々の実験によりピントル型噴射器を持つ燃焼器においても振動燃焼の発生が観察されている。[3] 振動燃焼はエンジンの破滅的な破壊につながるため、そのメカニズムの解明と抑制はロケットエンジンの開発において非常に重要である。非線形現象である振動の発生要因の解明は理化学的に重要であるのに加え、エンジンの高効率化や信頼性の向上に大きく寄与する。

2. 研究の目的

本研究では、ピントル型噴射器を有するロケットエンジン燃焼器のスロットリング時の燃焼挙動や振動燃焼といった燃焼不安定性メカニズムの解明を目的とする。実際にサブスケールのロケットエンジン燃焼器を使用し、エタノール/LOx を推進剤とした燃焼試験を行う。また、燃焼挙動や燃焼不安定性に影響を及ぼすと考えられるピントル型噴射器の噴霧構造を調べるため、水噴射試験を行った。

燃焼実験では実験室スケールの金属燃焼器および可視化燃焼器を使用することで、振動燃焼をはじめとする燃焼現象を測定する。非定常現象である燃焼不安定性を詳細に解析するため、複数の圧力センサーデータ、光センサーおよび高速度カメラ画像に対して解析を実施する。圧力、噴霧の状態、CH*などの化学発光挙動を実験的に測定し、燃焼現象の解明を行う。本研究では、保存則や移流方程式などの支配方程式に基づく従来型の演繹手法に加え、数学的手法に基づく非定常現象のデータ駆動型手法を応用する。非線形現象を取り扱う手法として、センサー情報に対してはウェーブレット変換また短時間フーリエ解析、画像情報に対して Gabor フィルタを用いた DMD(Dynamic Mode Decomposition)や DMD にカーネル法とスパース推定を組み合わせた KSP-DMD (Kernel-based Sparsity-promoting DMD) といった動的モード分解手法を用いて解析を行う。これらの動的分離手法の適用により、音響波、渦度波やエントロピー波といった不安定性が振動燃焼につながるメカニズムに着目する。上記の手法を用いた解析は、非線形支配方程式に基づく状態量からなる観測関数を、モードの重ね合わせに分離し、線形的解析を実施することで非線形現象を取り扱う手法として近年注目されている。そのため、本研究では複数の高速度カメラを使用した画像ベース診断を実施する。また、圧力振動、化学発光振動の両者について振動モードを分類するためマルチフラクタル解析[4]を行う。図2にマルチフラクタルスペクトルを示す。従来の周期的現象や定常現象を対象とした解析手法から、動的な解析手法を適用することにより、非定常振動燃焼のダイナミクスの解明に挑戦する。さらに、教師なし学習の一種である t-SNE[5]を用いて低次元空間での振動のクラスタリングを行う。時間ごとのクラスタ間の遷移などから振動の遷移現象を捉えやすくする。

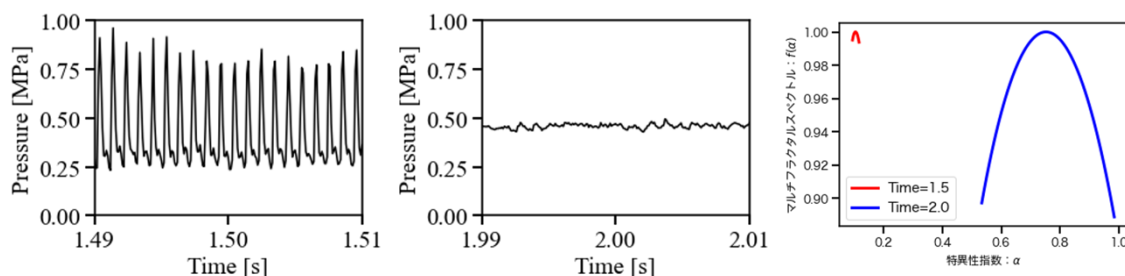


図2 マルチフラクタル解析を用いた振動解析

非燃焼場においては水を用いた実験で、微粒化特性を取得する。周方向に連続的な噴射口を持つスリットタイプと離散的な噴射口をもつスポークタイプの2種類について、We 数をパラメータに取り、噴霧の微粒化特性の違いを調査する。この結果と燃焼実験との対応により微粒化特性が燃焼挙動に影響を及ぼすメカニズムの理解を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、エタノール/LO_xを推進剤とするピントル型噴射器を持つロケットエンジン燃焼器内の非正常燃焼現象に着目し、サブスケールの燃焼器を使用したロケット燃焼実験を実施した。ロケット可視化燃焼器およびメタル燃焼器双方を利用することにより、高速度カメラを使用した光学測定、圧力センサーによる圧力測定を実施した。振動燃焼の発生メカニズムに関する基礎的知見の獲得、動的解析による解析手法の確立、現象の低次元化を検討した。また、非燃焼場での水を用いた噴霧可視化実験では、スリットタイプスポークタイプの2種類について、We 数をパラメータに取り、噴霧の微粒化特性の違いを調査した。燃焼試験を同様のインジェクタを用いることで、燃焼実験での結果と対応させた。

具体的には下記の項目に着目した。

1. 振動燃焼発生メカニズム
2. CH*化学発光をベースとした高速度測定と動的解析手法の確立
3. 非線形的な解析手法を用いた燃焼モードの分類
4. 噴射器形状と微粒化特性、燃焼挙動の関連

ロケットエンジンモデル燃焼器を使用し、耐振動燃焼性の高いピントル噴射器使用時の燃焼メカニズムを明らかにすることを目指し、振動燃焼発生時の燃焼機構を従来の化学発光法を用いることで画像ベース診断を行った。また、高周波数で取得した画像群に対して、Gabor フィルタを用いたDMDあるいはKSP-DMDを実施した。また、多点で測定された圧力や発光データに対して、フーリエ変換およびウェーブレット変換により解析を行った。これにより周期的挙動および非正常非線形挙動による現象の解析を行い、振動燃焼のモードの解析、現象の低次元化を行い振動燃焼現象メカニズムの解明を目指した。また、画像データとセンサーデータの相関解析を行い、それらの低次元での検出の可能性を検討した。

推進剤であるエタノール/LO_xを共に水で模擬した噴霧の微粒化特性の取得によって、噴射器形状が微粒化特性に及ぼす影響を調査した。バックライトを使用し、噴霧の影響に対して高速度カメラを使用して測定を行った。スリットタイプとスポークタイプの2種類の噴射器について、We 数をパラメータに取り、微粒化特性にどのような違いが現れるのかを調査した。

実験の実施には本学の連携研究者の津江光洋教授、大学院生、インターステラテクノロジズの稲川大貴氏、金井竜一郎氏の協力をえる。また、JAXA の平岩徹夫氏、榊和樹氏の協力を得た。

4. 研究成果

(1) FFT スペクトルを用いた t-SNE による振動の分類

FFT の結果から、いずれの燃焼においても約 1000Hz ごとに振動のピークが確認された。今回使用したサブスケール燃焼器の軸方向固有振動数が約 1000Hz であることから、これは燃焼器の音響振動であると考えられる。また、噴射器の噴射口オリフィス高さをパラメータとして変化させ、燃焼時の圧力振動を計測したところ、低周波領域のピークや音響振動の大きさに違いが見られた。これらをデータドリブンに分類するために

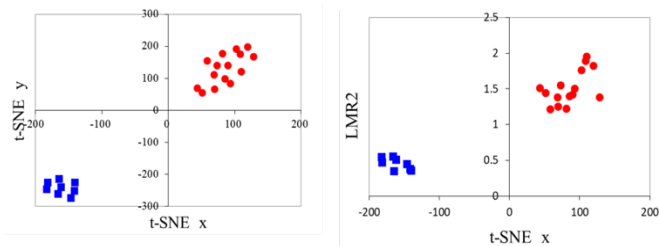


図 3 FFT スペクトルを用いたクラスタリング (左) / LMR2 との対応 (右)

t-SNE を用いて 2 次元空間上でクラスタリングを行った結果、図 3 左に示すような 2 つのクラスタに分類された。また、ピントル型噴射器の、2 段に別れている推進剤噴射口の内、2 段目での局所運動量比を表す LMR2 と t-SNE により得られた 2 次元空間の x 軸との対応 (図 3 右) より、クラスタごとに局所運動量比 (LMR2) の大きさに明らかな違いが見られた。これより LMR2 が振動に深く関与していることが示唆された。

(2) 燃焼振動の遷移に関する周波数解析

不安定燃焼から安定燃焼への遷移が確認された区間において、その圧力履歴とウェーブレット変換によるスペクトログラムを図 4 に示す。また、図 4 において赤色の線で示した、燃焼開始後 1.65 秒と 1.80 秒の点におけるスペクトルを図 5 に示す。

不安定燃焼時はおよそ 1, 2, 3... kHz の軸方向固有振動と 96Hz の低周波振動が確認され、安定燃焼へ遷移後の軸方向固有振動は減衰し 938Hz の固有振動モードと考えられる振動のみが確認された。また、低周波振動に関しては 98Hz の振動は維持され、新たに 312Hz の振動が確認

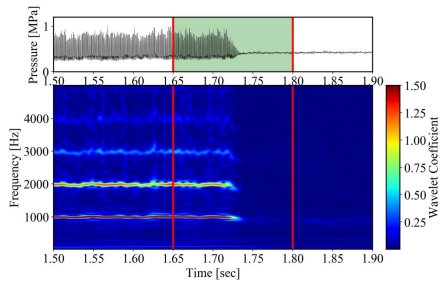


図 5 遷移区間における圧力履歴 (上) とウェーブレット変換のスペクトログラム (下)

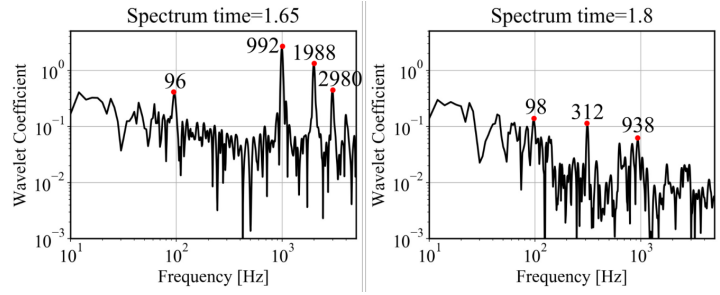


図 4 燃焼開始 1.65 秒後 (左) と 1.80 秒後 (右) のウェーブレット係数のスペクトル

された。これより 312Hz の振動が燃焼振動の遷移に関与していることが示唆された。

(3) 高速度画像の動的モード分解による遷移現象の解析

図 6 に KSP-DMD により得られた空間モードを示す。(a)は圧力のウェーブレット変換で得られたおよそ 100Hz の振動に近い周波数モードで、KSP-DMD では 116Hz のモードが得られた。(b)はウェーブレット変換や KSP-DMD で遷移現象に関与していることが示唆された 311Hz の周波数モードである。(c)は軸方向固有音響振動モード、1L モードであると考えられるおよそ 1kHz の周波数モードである。図 6(a)は推進剤供給系に起因すると考えられており、空間モードも全体が一様に变化するようなモードとなっている。このことから推進剤の流量変動による振動モードであると考えられる。図 6(c)は周波数から 1L モードであると考えられ、軸方向に発光輝度が変化していることが確認できる。

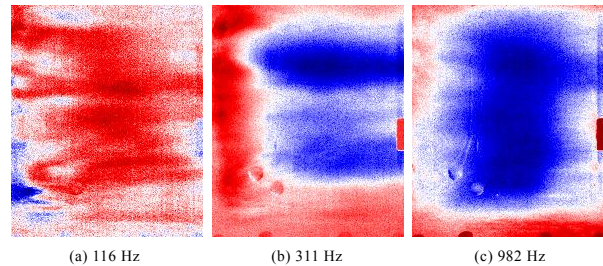


図 6 遷移区間の動的モード分解による空間モード

以上のことから 311Hz の振動が遷移後に支配的となり、遷移現象に寄与している可能性が示唆された。そこで以下では 311Hz の振動の発生要因を考察する。図 7 に Gabor-filtered KSP-DMD によるスペクトログラムを示す。すなわち、各時刻の前後 100 枚、合計 201 枚の画像を用いた KSP-DMD のスペクトログラムである。この図より、遷移の直前におよそ 100Hz 以下の低周波振動が強く現れていることが確認できる。このことから CH* 発光の観測領域において局所的な燃焼や突発的に推進剤流量が変動した可能性が考えられる。よって、突発的な推進剤流量の変動が 311Hz の振動発生のトリガーとなったことが可能性としてあげられる。また、振動燃焼へ遷移する時の解析を行っているが、観察される弱い縦モードを除いた正の成長率を持ついくつかのモードを用いて、再構成を行ったところ縦モードの第二高調波および第三高調波に似た構造が観察された。いくつかの不安定モードが成長し、干渉することで高次振動モードに近い状態を再現し、縦モードを励起したと考えられる。

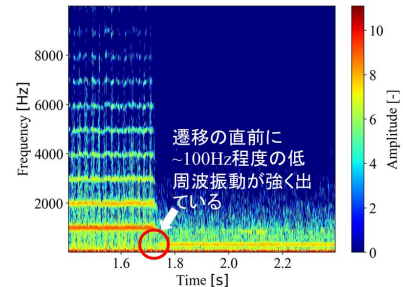


図 7 Gabor-filtered DMD によるスペクトログラム

(4) マルチフラクタル解析を用いた遷移現象の解析

図 8 に示したマルチフラクタルスペクトルより、スペクトル幅およびスペクトル高さは遷移を境に非常に大きく変化している。圧力および CH* 発光輝度のスペクトル幅は遷移後に増加しておりこれは波形のマルチフラクタル性が増加したことを表す。すなわち様々な周波数での変動や大小様々なスケールの波が含まれていることを表す

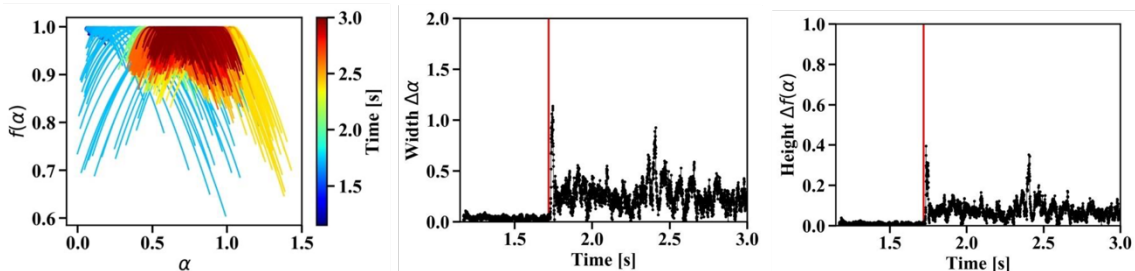


図 8 遷移区間の圧力履歴に対するマルチフラクタル解析

(5) t-SNE を用いた遷移を伴う振動の分類

図 9 左図の圧力データを用いて分類を行った結果、音響振動の支配的な燃焼区間においてはデータ点が円を描くように回転していることが確認できる。これは音響振動の周期性が強いためであると考えられる。一方で安定燃焼へ遷移したのちの時刻において、データ点は円を描かず時間発展とともに右下へずれていくようなクラスタを形成していることが確認できる。これより安定燃焼へ遷移したのちも時間発展とともに波形の特徴が変化していることを示唆している。同様の傾向は図 9 右図の CH*発光輝度の分類結果でも確認できる。

図 9 では圧力や CH*発光輝度の波形をそのまま t-SNE への入力としたが、安定燃焼と不安定燃焼区間では振幅が大きく異なるために単純に振幅の違いで分類されている可能性も考えられる。そこで図 10 に正規化した圧力および CH*発光輝度を t-SNE への入力とした分類結果を示す。t-SNE のパラメータはすべて図 9 と同じである。図 9 と図 10 を比較すると、振幅を正規化しても不安定燃焼時のデータは円を描くように分布しており、安定燃焼と不安定燃焼を分類できていることが確認できる。一方で安定燃焼時のデータは図 9 では時間的に近い位置のデータは t-SNE による低次元化後も近い位置に存在していたが、波形を正規化した時の分類結果では位置がばらばらであることがわかる。このことから安定燃焼時の振動波形が非常に不規則であることがわかる。

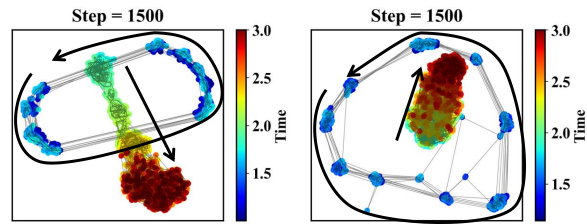


図 9 遷移区間の圧力履歴を用いた t-SNE (左) /CH*発光履歴を用いた t-SNE (右)

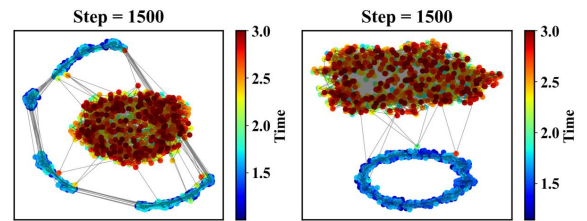


図 10 遷移区間の正規化した圧力履歴を用いた t-SNE (左) /正規化した CH*発光履歴を用いた t-SNE (右)

(6) 噴射器形状、微粒化特性と燃焼挙動の関連について

推進剤を水で模擬した非燃焼場におけるバックライトを用いた噴霧影の高速撮影から、スリットタイプとスポークタイプの噴霧形状について比較を行った。燃焼試験においては、基本的に LOx のウェーバー数の増大と共に C*効率が改善された。非燃焼試験で噴霧挙動を観察すると、We 数の増加が噴霧を不安定化し、微粒化を促進していることがわかった。また、LOx の噴射孔をスリット型とした場合の C*効率を比較すると、スポーク型による効率の増大は限定的であった。スリット型の非燃焼微粒化測定の結果、スポーク型の方が噴霧の三次元構造が複雑ではあるが、スリット型の方の液滴径が小さいことが観察された。また、スポークタイプにおいて、噴射口高さを変化させることで We 数を変化させた。We 数が高まるほど液柱か液滴への分裂速度が大きくなり、よりきめ細かい液滴が生成することが見てとれた。We 数と燃焼効率が正の相関を示したという燃焼実験結果との対応により、スポークタイプの燃焼効率改善には We 数が重要な指標となりうる。

参考文献

[1] Xin-xin Fang, Chi-bing Shen, Study on atomization and combustion characteristics of LOX/methane pintle injectors, Acta Astronautica, Vol.136, pp.369-379, 2017.
[2] M. Son, et al, Design Procedure of a Movable Pintle Injector for Liquid Rocket Engines, Journal of Propulsion and Power, Vol.33, pp.858-869, 2017.
[3] 榎和樹, 船橋友和, 中谷辰爾, 津江光洋, 他 4 名, ピントル型噴射器における燃焼振動挙動の光学計測, 日本航空宇宙学会論文集, Vol 65, pp.193-199, 2017.
[4] Olsen, L, Multifractal Formalism.Pdf, Adv. Math. (N. Y.), vol. 116, no. 1, pp. 82-196, 1995,
[5] Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton, Visualizing Data using s-SNE, Journal of Machine Learning Research 9, pp.2579-2605, 2008

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 井戸雅也, 中谷辰爾, 津江光洋, 金井竜一郎, 稲川貴大
2. 発表標題 スポークタイプピントル型噴射器の” 燃焼特性と微粒化現象
3. 学会等名 第64回 宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ido, M., Sugihara, K., Nakaya, S., Tsue, M., Kanai, R., Inagawa, T.
2. 発表標題 Combustion Instability in an Ethanol/Liquid Oxygen Model Rocket Engine Combustor with a Spoke-type Pintle Injector
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝村友博, 中谷辰爾, 津江光洋, 金井竜一郎, 鈴木恭平, 稲川大貴, 平岩徹夫
2. 発表標題 ピントル型噴射器を有するLOX/エタノールロケットエンジンモデル燃焼器におけるカーネルDMDを用いた燃焼振動解析
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 Shinji Nakaya, Kyo Sugihara, Tomokazu Funahashi, Mitsuhiro Tsue, Kyohei Suzuki, Ryuichiro Kanai, Takahiro Inagawa, Kazuki Sakaki, Tetsuo Hiraiwa
2. 発表標題 Modal Decomposition of Combustion Dynamics based on Time-resolved CH* Chemiluminescence in an Ethanol/LOx Rocket Engine Model Combustor with a Pintle Injector
3. 学会等名 Space Propulsion 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 勝村友博, 杉原恭, 中谷辰爾, 津江光洋, 金井竜一郎, 鈴木恭平, 稲川大貴, 榊和樹, 平岩徹夫
2. 発表標題 ピントル型噴射器を有するLOX/エタノールロケットエンジン燃焼器における燃焼振動の遷移解析
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～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
---------	---------