

補助事業番号 2022M-244  
補助事業名 2022年度 スクラムジェットエンジン用点火器の強制着火モデル構築と最適設計  
補助事業  
補助事業者名 大阪公立大学 小川泰一郎

## 1 研究の概要

スクラムジェット燃焼器内での安定した着火を実現するために、本事業では(1)モード解析を用いた強制着火及び燃焼メカニズムの解明、(2)波長可変半導体レーザー吸収分光法を用いた噴出ガス計測手法の構築、(3)強制着火モデルの構築についての研究を行った。モード解析では、固有直交分解と動的モード分解を用いて、キャビティ保炎器内のOH自発光計測画像の解析を行った。波長可変半導体レーザー吸収分光法を用いたマイクロロケットトーチ噴出ガスの計測では、噴出ガス内に含まれるH<sub>2</sub>O濃度及び温度を測定し、計測データをもとに噴出ガスの物理モデルを構築した。また、噴出ガスの物理モデルを予測モデルに組み込み、着火限界を予測できる高精度な強制着火モデルを構築した。

## 2 研究の目的と背景

スクラムジェットエンジン内の気流の滞留時間はミリ秒オーダーであり、エンジン内で燃料を確実に着火させるために、これまでプラズマジェットトーチ(PJトーチ)、レーザー、マイクロロケットトーチなど様々な点火器が提案されてきた。本研究では、スクラムジェットエンジン用の点火器の中でマイクロロケットトーチに着目した。ここで、マイクロロケットトーチは、トーチ内で生成した燃焼ガスを主流中に供給し着火促進させる点火器である。また、このトーチは、従来研究されてきたPJトーチと同等の着火促進効果を有していることが明らかとなっている。しかし、これまでの研究では、スクラムジェットエンジン内でのマイクロロケットトーチによる強制着火メカニズムについては明らかにされていない。そこで、本研究では複雑な燃焼モードに対して特徴量を抽出する解析方法であるモード解析を用いて、キャビティ保炎器内のマイクロロケットトーチによる強制着火メカニズムの解明を目的に研究を行った。さらに、スクラムジェットエンジン内で点火器を用いて安定して着火させるために、マイクロロケットトーチを対象とした高精度な強制着火モデルの開発を目指して以下の研究を実施した。

## 3 研究内容

### (1)モード解析を用いた強制着火及び燃焼メカニズムの解明

(URL: [https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition\\_and\\_flame\\_in\\_scramjet/index\\_1.html](https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition_and_flame_in_scramjet/index_1.html))

本研究では、計測画像データをなどを低次元基底に分解する方法である固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)と動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)を用いて、キャビティ保炎器内のOH自発光計測画像の解析を行い、マイクロロケットトーチによるキャビティ保炎器内での強制着火及び燃焼メカニズムを調べた。高速度カメラで撮影した

キャビティ保炎器内の5,000~10,000枚のOH自発光画像を基にPODとDMDを用いてモード解析した。本解析には、MATLABを用いて構築した解析プログラムを使用した。図1にキャビティ保炎器内のモード解析結果を示す。解析結果より、マイクロロケットトーチによるキャビティ保炎器内での強制着火及び燃焼時には、燃焼振動により特定の周波数帯が存在することが明らかとなった。この研究結果は、2023年3月と6月の国際学会(Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJCPP)とAIAA AVIATION)で発表し、国際学術誌に投稿した。

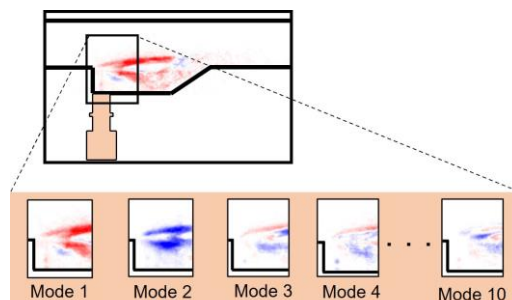
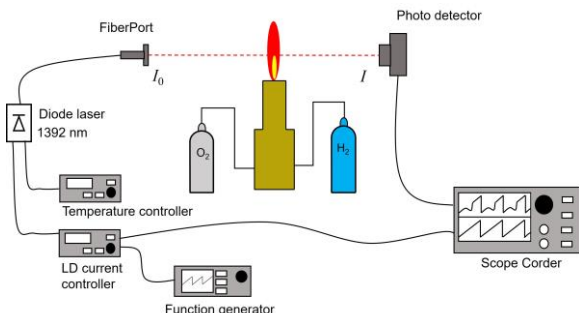


図1 キャビティ保炎器内のモード解析

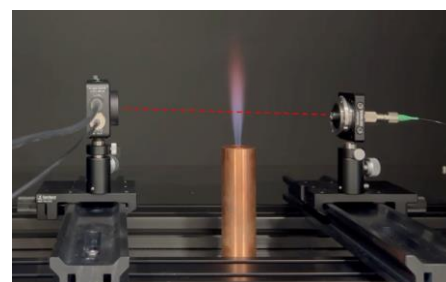
(2) 波長可変半導体レーザー吸収分光法を用いた噴出ガス計測手法の構築

(URL: [https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition\\_and\\_flame\\_in\\_scamjet/index\\_2.html](https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition_and_flame_in_scamjet/index_2.html))

波長可変半導体レーザー吸収分光法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)を用いて、マイクロロケットトーチから噴出されるガスの物性値を調べた。本研究では、噴出ガス内のH<sub>2</sub>O濃度を計測するために、1392 nmの吸収帯の半導体レーザーを用いた。計測装置の概要を図2に示す。トーチからの噴出ガスには、燃焼振動などの振動要因により波形にノイズが含まれている。そのため、ノイズ除去するためのプログラムを開発した。計測手法の検証実験には、大気中の温度及びH<sub>2</sub>O濃度と比較し、本研究で開発したデータ解析手法は、従来のデータ解析手法と比較して同等の精度を有していることが明らかとなった。また、トーチからの噴出ガスの計測でも、従来のデータ解析手法よりも精度よく物性値を算出することができる。この研究結果は、2023年3月の国内学会(日本航空宇宙学会北部支部2023年講演会)で発表した。より詳細な物性値の解明には、複数本のレーザー光を用いて計測精度の更なる高精度化が必要であることが明らかとなったため、今後の解決すべき課題である。



(a) 計測装置の概要



(b) 噴出ガスの測定

図2 半導体レーザーを用いたマイクロロケットトーチ噴出ガスの測定

### (3) 強制着火モデルの構築

(URL: [https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition\\_and\\_flame\\_in\\_scramjet/index\\_2.html](https://www.omu.ac.jp/eng/mori/research/ignition_and_flame_in_scramjet/index_2.html))

キャビティ保炎器内にマイクロロケットトーチを取り付けた場合の強制着火モデルを構築した。(2)で測定したマイクロロケットトーチ噴出ガスの物性値を基に、噴出ガスモデルを構築し、キャビティ保炎器内での強制着火限界を予測できる物理モデルを開発した。本モデルを用いた予測結果は、以前実施したスクラムジェット燃焼器を用いた燃焼実験データと概ね一致する結果が得られた。しかし、(2)で述べたように噴出ガス測定の更なる高精度化が必要であるため、今後、強制着火モデルをさらに高精度化し、安定して着火及び燃焼できる点火器の最適設計することが今後の課題として残った。この研究結果は、2023年6月の国際学会 (International Symposium on Space Technology and Science, ISTS) で発表する。

### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本事業によって、スクラムジェット燃焼器内でのマイクロロケットトーチによる着火・燃焼のメカニズムを解明でき、さらに現在構築している強制着火モデルを用いて安定して着火・燃焼できる点火器の最適設計ができることで、これまで長年研究されてきたスクラムジェットエンジン内での着火問題を解決することができる。これにより、大陸間の移動時間を大幅に短縮できる極超音速機の実現に欠かすことのできないスクラムジェットエンジンの実現に向けて大きく前進できる。さらに、本研究で構築している波長可変半導体レーザー吸収分光法は、レーザー光を用いて排ガスなどの物性値を測定する手法であり、流れ場を乱さずに計測することが可能である。また、半導体レーザーは小型、軽量であり、スペースの限られる場所でも計測可能であるため、航空宇宙推進分野に限らず、今後幅広い分野に応用可能である。

### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は、これまで東北大学大学院の博士課程在学時からスクラムジェット燃焼器内での点火器による強制着火メカニズムについて、燃焼実験および数値解析を用いて調べてきた。2021年からは、大阪公立大学(前大阪府立大学)大学院工学研究科航空宇宙工学分野の航空宇宙推進工学グループで、スクラムジェットエンジン用の点火器を対象とした強制着火及び燃焼のメカニズムの解明に関する研究を行うとともに、学部生に推進工学に関する実験・演習の教育を行ってきた。本研究は、これまで研究してきた研究課題のスクラムジェットエンジン内での安定した着火を実現するために、波長可変半導体レーザー吸収分光法を用いたマイクロロケットトーチ噴出ガスの物性値の解明及び計測データを基にした強制着火モデルの構築のための研究である。

### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

#### 国際学会発表

- [1] **Ogawa, S.**, “Dynamic Mode Decomposition of the Combustion Flow Field in a Scramjet Combustor with a Cavity Flameholder,” AIAA Aviation 2023, June 2023.

- [2] Ogawa, S., Hirayama, Y., and Kido, M., “Study on Accuracy Improvement of a Forced Ignition Model Focused on Micro-Rocket Torch,” The 34th International Symposium on Space Technology and Science, C000334, June 2023.
- [3] Ogawa, S., “Modal Analysis of Forced Ignition Characteristics by Micro-Rocket Torch in Supersonic Flow,” The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 2023.

#### 国内学会発表

- [4] 平山裕也, 小川泰一郎, 森浩一, 木戸真之, “TDLAS法による点火器火炎の計測精度向上に関する研究,” 日本航空宇宙学会北部支部2023年講演会, JSASS-2023-H037, 2023年3月.
- [5] 小川泰一郎, “モード解析を用いた超音速流れ場におけるキャビティ内の強制着火過程の検討,” 第60回燃焼シンポジウム, C134, 2022年11月.
- [6] 木戸真之, 小川泰一郎, 森浩一, “OH\*自発光計測によるスクラムジェット燃焼器内の強制着火過程に関する研究,” 第60回燃焼シンポジウム, P307, 2022年11月.

#### 7 補助事業に係る成果物

##### (1)補助事業により作成したもの

該当なし

##### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 大阪公立大学 大学院工学研究科

(オオサカコウリツダイガク ダイガクインコウガクケンキュウカ)

住 所: 〒599-8531

大阪府堺市中区学園町1-1

担 当 者: 助教・小川泰一郎 (オガワ シンイチロウ)

担 当 部 署: 工学研究科 航空宇宙工学分野

(コウガクケンキュウカ コウクウウチュウコウガクブンヤ)

E - m a i l: shinichiro.ogawa@omu.ac.jp

U R L: <https://www.omu.ac.jp/eng/mori/>