

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02348

研究課題名（和文）レーザー爆轟式衝撃波管の提案と先行輻射を伴う大気圏突入カプセルの加熱予測精度向上

研究課題名（英文）Proposal of Laser-Detonated Shock Tube and Improvement of Heating Prediction Accuracy of Atmospheric Entry Capsule with Precursor Radiation

研究代表者

葛山 浩（Katsurayama, Hiroshi）

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：80435809

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：前例のない超高速でカプセルを大気圏へ突入させる計画があり、その過酷な加熱環境の解明が急務となっている。本研究は、この加熱環境をレーザー駆動爆轟波で模擬し、さらに加熱のカギを握る電子の振る舞いを解明することに挑んだ。結果として、シャドウグラフと発光分光により、爆轟波が数万度のプラズマを伴うことを明らかにし、レーザー爆轟波が超高速突入用風洞として有望であると示した。次に、レーザートムソン散乱法を用いて、電子物理量の高精度計測に挑んだが、有意な信号捕捉のためには、強い自発光の除去が必要であることがわかった。また、数値解析により爆轟波の波長依存性を調べ、1 μm波長帯のレーザーの有望性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高速大気圏突入カプセルの加熱予測精度の向上は、挑戦的探査計画での確実なカプセル回収のための必須事項である。本研究では、レーザー爆轟波の伝播速度のレーザーパワー依存性とプラズマ温度を明らかにし、レーザー爆轟風洞が、超高速突入時の加熱環境シミュレータとして有望であることを示した。また、成功には至っていないが、レーザートムソン散乱法が爆轟波プラズマ計測の有効な手段となりうることも示唆した。さらに、爆轟波の駆動には、CO2レーザーよりも、最近の発展の目覚ましい固体レーザーが有利となる可能性を示し、固体レーザーの新たな応用先となりうることを示した。

研究成果の概要（英文）：There are near-future missions in that capsules enter the atmosphere at an unprecedented high speed, and there is an urgent need to elucidate the severe heating environment. This study attempted to simulate this heating environment using laser-driven detonation waves and to elucidate the behavior of electrons, which play an important role in the heating process. As a result, shadowgraphs and emission spectroscopy revealed that the detonation wave is accompanied by a high-temperature plasma of tens of thousands of degrees Kelvin. They showed its promise as a device for simulating an ultra-high-speed reentry environment. We attempted to measure the electronic quantities with high accuracy using laser Thomson scattering and found that the removal of strong spontaneous emission is necessary to capture significant signals. We also performed numerical analysis to investigate the wavelength dependence of the detonation wave, and revealed the promise of a laser with 1 μm wavelength.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：大気圏突入 レーザーデトネーション レーザートムソン散乱 数値流体力学 レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

近年の挑戦的な遠方外惑星探査計画において、地球再突入カプセルによるサンプル・リターンが担う役割は大きい。その突入速度は前例のない15~22 km/sに達する。このような超高速大気圏突入では、先行輻射が、衝撃波の前方に予加熱された先行電子を生成し、カプセルの加熱を20%以上も増加させる可能性がある(図1)。しかし、超高速突入環境を模擬できる実験装置が存在せず、先行電子の計測技術も確立されていないため、この予測を検証できないことが問題となっていた。

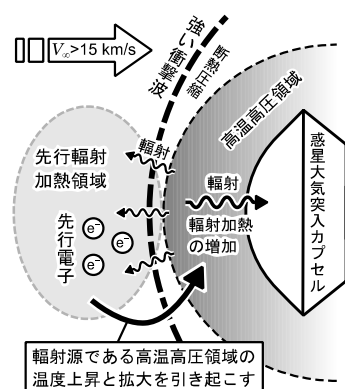


図1 超高速の惑星大気突

2. 研究の目的

本研究では、「超高速突入環境を模擬できるレーザー爆轟式の革新的衝撃波管」、「レーザートムソン散乱法による先行電子の高精度計測」を実施し、では、超高速突入環境シミュレータとしてのレーザー爆轟波の実用性・性能を評価し、では、レーザー爆轟波に伴う先行電子の振る舞いを明らかにし、超高速突入時の加熱環境を解明することを目指した。また平行して、レーザー爆轟波のレーザー波長依存性を数値解析により調査し、レーザー爆轟風洞の性能向上について調査した。

3. 研究の方法

3-1. レーザー爆轟波の駆動と爆轟状態の評価法

爆轟波の駆動には、プラズマに吸収されやすい長波長( $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$ )を持つTEA-CO<sub>2</sub>パルスレーザー(エネルギーは7 J/pulse)を用いた。1パルスのパワー履歴とビームパターン(バーンパターン)を図2に示す。パルスは、発振直後の100~200 nsの間に9 MW程度のピークパワーを示し、その後6  $\mu\text{s}$ 程度まで持続する。ビームサイズは矩形であり、縦方向30 mm(トップハットに近い強度分布)×横方向40 mm(ガウシアンに近い強度分布)のサイズである。

レーザーで駆動した衝撃波(プラズマを伴う)が爆轟状態になっているか確認するため、図3に示す光学系でシャドウグラフ撮影を行った。光源には、半導体レーザー光源(波長645 nm、パルス幅20 ns)を用いて、その影絵を高速CMOSカメラ(露光時間300 ns)で捉えた。なお、爆轟プラズマからの強い自発光がシャドウグラフ撮影の邪魔になるため、可変アイリス、バンドパスフィルター(中心波長650 nm)およびNDフィルター(1/4減光)を用いて、自発光の影響を減じた。

次に、同様の系において、光源、バンドパスフィルター、およびNDフィルターを廃し、CMOSカメラをICCDカメラ(露光時間は、シャドウグラフ法の光源のパルス幅と同じ20 nsに設定)に置き換えて、自発光領域の進展を計測した。

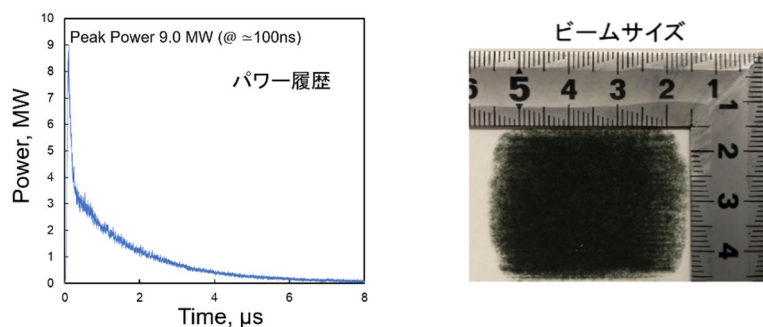


図2 CO2レーザーのパワー履歴とビームパターン

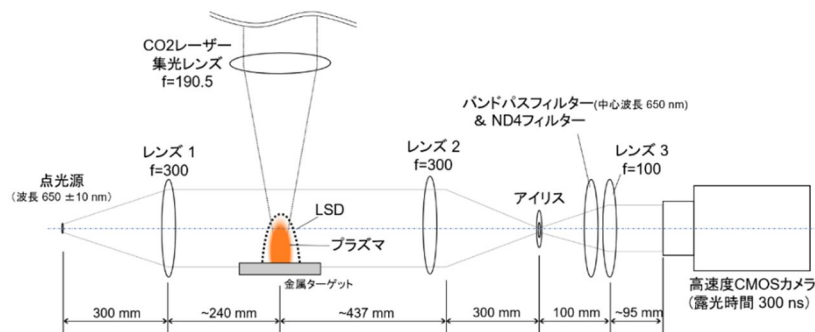


図3 レーザー爆轟波駆動系とシャドウグラフ光学系

シャドウグラフと自発光計測から得られた衝撃波面とプラズマ前縁の履歴から両者の波面速度を算出し、さらに両波面が離れた時間により、爆轟状態の終端を判定した。

### 3-2. レーザートムソン散乱計測と発光分光の方法

図4に示す光学系で発光分光およびレーザートムソン散乱(LTS)計測を実施した。LTS計測系では、プローブ光となるNd:YAGパルスレーザー(波長532nm、パルス幅5ns)を波面先頭に対して斜め45度から入射し、真横へ発生するトムソン散乱光を自作のトリプル分光器(図中のLTS分光器)を介してICCDカメラ(YAGと同期)で取得した。詳細は省くが、自作トリプル分光器は、三つの回折格子からなり、第一回折格子と第二回折格子の間にレーリーブロックが設置されており、レーザー波長由来の迷光および強いレーリー散乱光を除去することで、トムソン散乱光の取得を可能にする。

なお、通常の発光分光は、1200g/mmと150g/mmの二種類の回折格子を用いて、市販分光器を介して、CO2レーザーとタイミングを同期したICCDカメラで撮影した。

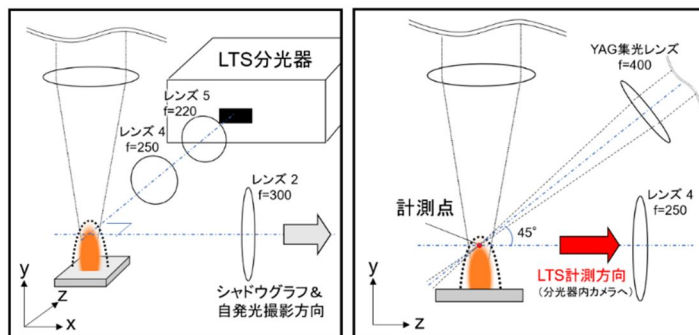


図4 発光分光およびレーザートムソン散乱計測系

### 3-3. レーザー爆轟波の波長依存性の数値流体解析法

熱化学非平衡を考量した空気二温度コードを用いて、大気圧下で駆動される1次元爆轟波伝播の数値解析を行った。レーザー波長は、本研究の実験で用いたCO2レーザーの波長である10.6μmと、最近、安価でかつ大出力が可能となっている固体レーザー(ファイバーレーザー、半導体レーザーなど)の代表的波長である1μmの二種類を用いて、両者のレーザーで駆動される爆轟波構造の違いを調べた。

## 4. 研究成果

### 4-1. レーザー爆轟波の駆動と爆轟状態の評価結果

図5にレーザー爆轟波のシャドウグラフと自発光の画像の代表的なスナップショットを示す。

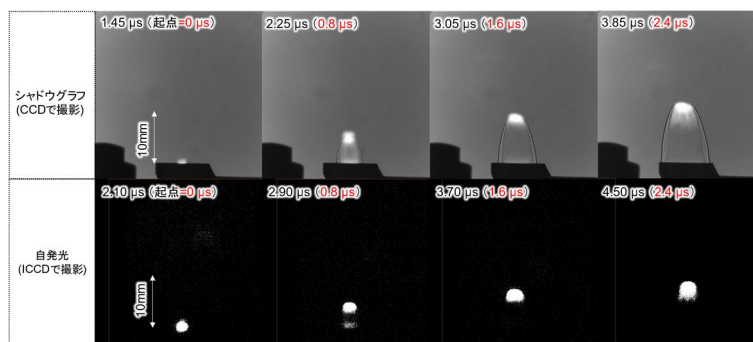


図5 シャドウグラフ(上側)と自発光画像(下側)のスナップショット

図6にシャドウグラフから得られた衝撃波面位置と自発光画像から得られた電離波面位置(自発光領域の前縁)の履歴を示す。レーザーブレイクダウン後、2.5μsまで両波面は一致して進展し(つまり爆轟状態)、その後、両者は離れ、爆轟状態ではなくなる。また、爆轟波終端時のレーザー強度(図2のパワー履歴と波面位置に対応する集光状態から計算される)は、 $S=168 \text{ GW/m}^2$ であった。図7に図6から算出された爆轟波速度のレーザーパワー依存性を示す。RaizerのC-J detonation-1次元伝播モデルの速度 $V_{C-J}$ と比較すると、本研究の理論速度 $V_{\text{present}}$ は小さいことがわかった。この理由は、本研究の集光系では、進行方向とは異なる方向への衝撃波の膨張によるエネルギーロスを無視できないためと考えられる。また、類似の実験で算出された松井らのレーザー爆轟波速度 $V_{\text{Matsui}}$ と比較すると、本研究の速度は、若干レーザーパワー $S$ に強く依存し(累乗係数が大きい)、速度が大きい結果となった。この違

いの原因は不明だが、ビームクオリティ(ビーム品質がよりトップハット形状に近く、一次的な伝搬をしている)の差異が一因と考えられる。

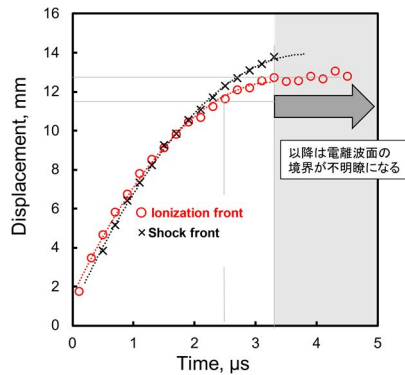


図 6 衝撃波面と電離波面位置の時間履歴

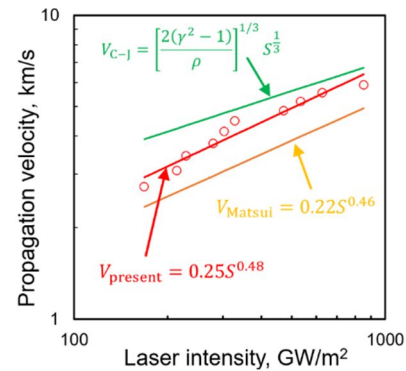


図 7 レーザー爆轟波速度

#### 4-2 . 発光分光およびレーザートムソン散乱光計測の結果

図 8 にレーザートムソン散乱 (LTS) 計測で得られた分光画像の時間履歴を示す (赤字の時間が爆轟波駆動開始後からの経過時間、爆轟波は下方向へ進展、画像中心の暗い部分がレーリーブロックに相当する部分)。爆轟状態が継続していると考えられる  $t=1.85 \mu\text{s}$  までは、爆轟波頭に非常に強い自発光が観測されている。爆轟波がすでに終了している  $t=3.35 \mu\text{s}$  以降は、波頭背後にも発光領域が観測され、特に  $t=4.45 \mu\text{s}$  以降には、発光領域の進展はほぼ止まっており、窒素のバンドスペクトル由来と考えられる強い発光が波頭背後に存在していることがわかる。

図 9 と 10 に、 $t=1.85 \mu\text{s}$  と  $t=4.45 \mu\text{s}$  での YAG レーザーの入射の有無の発光領域の比較を示す (「YAG レーザー + CO2 レーザーの画像」(2 枚目) から「CO2 レーザーのみの場合の画像」(1 枚目) を引くと、YAG レーザー由来の散乱光 (3 枚目) が取得できる。4 枚目は赤く囲んだ領域の空間方向の積分値)。結果として、トムソン散乱光は、プラズマの自発光に埋もれてしまっており、有意な散乱信号を検出するに至らなかった。このため、トムソン散乱光を捉えるためには、アパチャーの利用や、プラズマから分光器までの距離を取るなどの工夫を計測系に施し、自発光を減じる必要があることがわかった。また、発光分光計測 (470-720 nm) からは、計測領域全体に、電子の自由-自由遷移および自由-束縛遷移由来の右肩下がりの強い連続スペクトルが現れており、この結果から、プラズマの電子温度が数万度に達していることが示唆された。

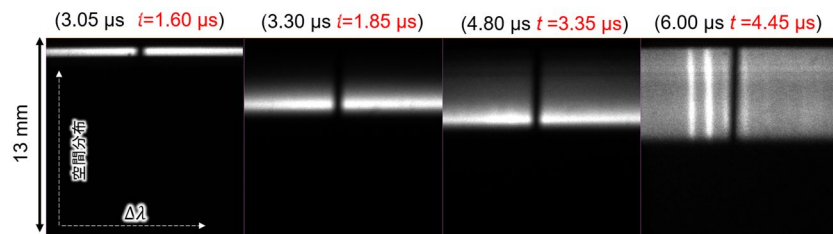


図 8 LTS 計測で得られた分光画像の時間履歴 (爆轟波は下方向へ進展)

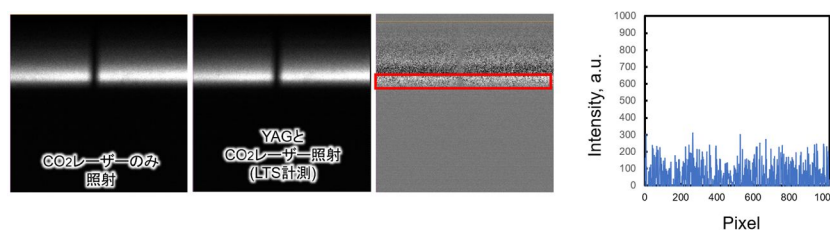


図 9  $t=1.85 \mu\text{s}$  での YAG レーザーの有無での分光画像の比較

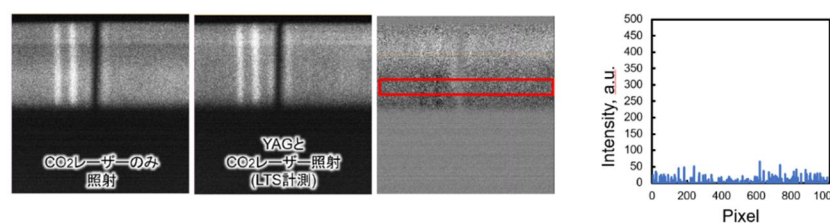


図 10  $t=4.45 \mu\text{s}$  での YAG レーザーの有無での分光画像の比較



### 4-3 . レーザー爆轟波の波長依存性の数値流体解析結果

同一パワー強度  $S=200 \text{ MW/m}^2$  での固体レーザー (波長  $\lambda=1 \mu\text{m}$ ) と  $\text{CO}_2$  レーザー (波長  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ) の一次元爆轟波伝播解析を実施した。図 11 に爆轟波速度 ( $x-t$  線図) と圧力履歴の比較を示す。両者の圧力履歴はほぼ同一であるが、固体レーザーの方が波頭背後の圧力が大きくなるため (理由は後述) 伝播速度は若干早くなる。

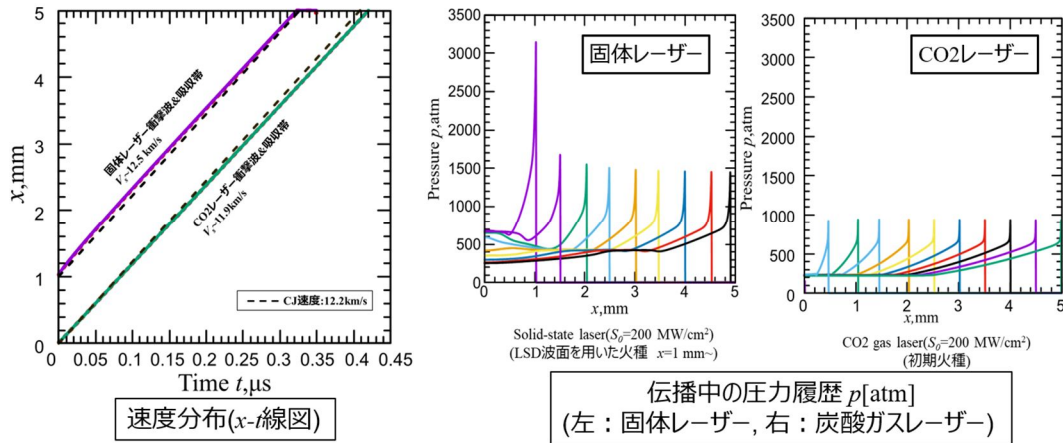


図 11 固体レーザーと  $\text{CO}_2$  レーザーでの爆轟波速度と圧力履歴の比較

図 12 に安定駆動中の爆轟波前縁近傍の温度と圧力、および化学組成の固体レーザーと  $\text{CO}_2$  レーザーの比較を示す。固体レーザーの場合は、波長が短いため (つまり吸収長が長い)  $0.1 \text{ mm}$  程度の比較的長い距離でレーザー吸収が行われる。結果として、ほぼ熱平衡状態に保たれながら吸収が完了するため、エネルギーロスが少なく、高い圧力を維持できる。一方で、 $\text{CO}_2$  レーザーの場合は、波長が長いため、吸収長が短く、ほぼレーザー波長と同じオーダーで吸収が完了する。結果として、電子温度のみが高くなる非平衡状態で吸収が行われるため、無駄な電離反応が促進され、エネルギーロスが大きい。このため、波頭の圧力が低くなり、爆轟波速度が若干小さくなる。また、固体レーザーは波長が短いため、カットオフ電子密度が大きく、カットオフを起こさずに大きなレーザーパワーを投入可能であることもわかった。

以上より、爆轟波の駆動には、必ずしも波長の長い  $\text{CO}_2$  レーザーが有利とは限らず、エネルギーロスが少なく、カットオフ密度の高い固体レーザーの方が、速い爆轟波を小さいエネルギーで駆動できる可能性があることがわかった。

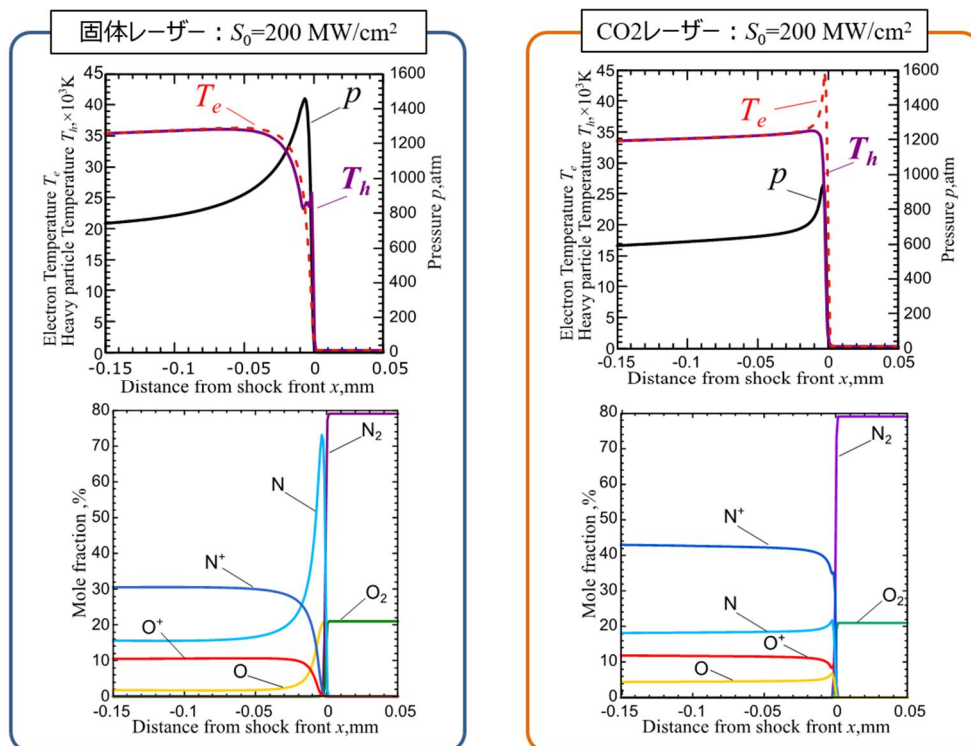


図 12 爆轟波前縁近傍の温度と圧力、化学組成の固体レーザーと  $\text{CO}_2$  レーザーの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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<br>葛山 浩、石田樹                              | 4. 巻<br>28          |
| 2. 論文標題<br>レーザー支持爆轟波の一次元数値解析における格子解像度の影響        | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>プラズマ応用科学                              | 6. 最初と最後の頁<br>47～54 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.34377/aps.28.1_47 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>H. Katsurayama and A. Sasaki  | 4. 巻<br>12          |
| 2. 論文標題<br>Numerical Investigation of Chemical Species Dependency of Laser Supported Detonation Propagation | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Frontier of Applied Plasma Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>43-44 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kento Suzuki, Hiroshi Katsurayama   |
| 2. 発表標題<br>One Dimensional Numerical Analysis of Laser Supported Detonation Driven by NearInfrared Laser |
| 3. 学会等名<br>Asian Joint Conference Propulsion and Power 2023（国際学会）  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鈴木賢斗、葛山浩                     |
| 2. 発表標題<br>固体レーザーで駆動されるレーザー爆轟波特性の数値解析調査 |
| 3. 学会等名<br>第66回 宇宙科学技術連合講演会             |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>森山皓太、浅野直人、村上悠、柏木大輝、和田隆太郎、葛山浩、富田健太郎 |
| 2. 発表標題<br>アーク風洞中に置かれた磁化模型周りのレーザートムソン散乱計測     |
| 3. 学会等名<br>第66回 宇宙科学技術連合講演会                   |
| 4. 発表年<br>2022年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kota Moriyama, Hiroki Sakaguchi, Hiroshi Katsurayama, Kentaro Tomita                           |
| 2. 発表標題<br>Laser Thomson Scattering Measurement around Magnetized Body in Rarefied Arc-Heated Argon Plume |
| 3. 学会等名<br>33rd International Symposium on Space Technology and Sciences (国際学会)                           |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>坂口弘樹、楠汐里、小川原圭人、葛山浩、富田健太郎 |
| 2. 発表標題<br>電磁力ブレーキング試験模型周りの電子物理量計測  |
| 3. 学会等名<br>第65回 宇宙科学技術連合講演会         |
| 4. 発表年<br>2021年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>森山皓太、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎                 |
| 2. 発表標題<br>アルゴン希薄気流中における電磁力印加模型周りのレーザートムソン散乱計測 |
| 3. 学会等名<br>第58回 日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会         |
| 4. 発表年<br>2021年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上部航洋、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎                      |
| 2. 発表標題<br>アルゴン気流中に置かれた電磁力模型周りの電子密度・温度のレーザートムソン散乱計測 |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会 年会2020                           |
| 4. 発表年<br>2020年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上部航洋、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎                  |
| 2. 発表標題<br>レーザートムソン散乱計測法を用いた電磁力模型周りのアーク気流診断     |
| 3. 学会等名<br>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 |
| 4. 発表年<br>2020年                                 |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石田樹、葛山浩                    |
| 2. 発表標題<br>レーザー支持デトネーションのCFD解析に関する諸検討 |
| 3. 学会等名<br>第64回宇宙科学技術連合講演会            |
| 4. 発表年<br>2020年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>上部航洋、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎                 |
| 2. 発表標題<br>アルゴンアーク気流中に置かれた電磁力模型周りのレーザートムソン散乱計測 |
| 3. 学会等名<br>第64回宇宙科学技術連合講演会                     |
| 4. 発表年<br>2020年                                |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>坂口弘樹、上部航洋、葛山浩、富田健太郎                      |
| 2. 発表標題<br>アーク気流中に置かれた磁化模型の半径方向電子物理量分布のレーザートムソン散乱計測 |
| 3. 学会等名<br>2020年度衝撃波シンポジウム                          |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Koshi, K. Uwabe, H. Katsurayama, and K. Tomita  |
| 2. 発表標題<br>Electron Temperature and Density Measurement around Magnetized Blunt Body in Rarefied Argon Arc Flow using Laser Thomson Scattering Method |
| 3. 学会等名<br>32nd International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2019-e-21 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>葛山浩、石田樹                      |
| 2. 発表標題<br>希ガス中を伝播するレーザー支持デトネーション波の数値解析 |
| 3. 学会等名<br>第63回宇宙科学連合講演会                |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>上部航洋、合志義亜、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎                    |
| 2. 発表標題<br>アルゴンアーク気流中に置かれた電磁力模型周りの電子密度・温度のレーザートムソン散乱計測 |
| 3. 学会等名<br>2019年度衝撃波シンポジウム                             |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|               | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                  | 備考 |
|---------------|--|--|----|
| 研究<br>分担<br>者 | 富田 健太郎<br><br>(Tomita Kentaro)<br><br>(70452729) | 北海道大学・工学研究院・准教授<br><br><br><br>(10101) |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|