

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03812

研究課題名(和文) 半導体レーザー維持プラズマの高効率化機構の解明と宇宙推進機への応用

研究課題名(英文) Study on Laser Sustained Plasma using Laser Diode for Space Thruster

研究代表者

松井 信 (Matsui, Makoto)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90547100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙推進機の熱源としてのレーザー維持プラズマ特性について実験、数値計算両面から検証した。4kW半導体レーザーを用いた実験ではXe, Kr及びAr単体でのLSP生成及びそれらをベースとした混合ガスでのLSP生成に成功した。Xeに比べ安価なArでのLSP生成例は半導体レーザーでは初めての報告例であり、また原子線吸収の影響により電離電圧がより低いKrよりAr-LSPの生成しきい値が低くなることが実験、CFDにより実証された。発光分光法による温度計測の結果、LSP温度は12000K程度(Ar)とアーク放電より高く、推進機に適用することで従来のアークジェットより高い比推力が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における学術的意義はレーザー光吸収過程が従来の逆制動放射だけではなく原子線吸収を併用することで生成しきい値を大幅に低減できることが実証されたことである。これにより、発振効率が高く、低コスト、コンパクトな半導体レーザーによりキセノンに比べ遥かにコストが低いアルゴンでのLSP生成が可能になった。工学的にはこの成果は非常に高く、LSPが従来の直流、交流放電プラズマに優る特性、すなわち高温、高圧、高輝度、純度(低コンタミ)が利用可能になり宇宙推進だけではなくEUV光源としての応用に関して半導体企業からの問い合わせもあり社会的意義も高い成果だと考えている。

研究成果の概要(英文)：Characteristics of laser sustained plasma (LSP) as a heat source for a space propulsion system were verified both experimentally and numerically. A 4 kW diode laser was used to successfully generate LSP with Xe, Kr, and Ar, and with a mixture of these based gases. This is the first reported case of Ar-LSP generation using a diode laser, which has higher ionization energy and is much lower cost than Xe. The minimum laser power to generate Ar-LSP was lower than that of Kr, which has a lower ionization voltage. This result was found to be caused by not only inverse bremsstrahlung radiation absorption but also the effect of Ar atomic line absorption as demonstrated by experiments and CFD. The results of temperature measurement by emission spectroscopy show that the LSP temperature is about 12,000 K (Ar), which is higher than that of arc discharges. Thereby, the LSP thruster would have the potential of higher specific impulse than that of conventional arc jets.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：レーザー維持プラズマ 大気圧プラズマ 半導体レーザー 宇宙推進

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) アークジェットは放電により推進剤を加熱し、ノズルによる空力加速で推力を得る推進機であり、電気推進の中では最も高い推力密度を持ち早くから実用化されてきた。しかしながら低比推力、低寿命、毒性を持つヒドラジンを推進剤とすることから現在ではイオンエンジンやホールスラスタに置き換えられつつある。この欠点を克服しようと高比推力が期待できる水素や無毒性である HAN 系、DME 推進剤の研究が行われているが、電極損耗による寿命 (1,000 時間程度) が課題となっている。

(2) レーザー維持プラズマ (LSP: Laser Sustained Plasma) はレーザー光を集光することで生成できる定常プラズマであり、エネルギー伝送が可能な点から打上用ロケットの熱源として米国、フランス、ドイツ、日本で研究されている。LSP の温度は 10,000K 以上に達し、アーク放電より高く熱源として有望であることはわかっていたが、kW クラス以上の高出力レーザー (主として CO₂ ガスレーザー) はエネルギー変換効率が低く、また装置のサイズ及びメンテナンスの観点から宇宙機に搭載することは現実的ではなかった。

(3) しかしながら 2010 年に Horne らが半導体レーザー (LD: Laser Diode) による Xe-LSP の生成に成功したことでこれらの課題が全て解決できる可能性が出てきた。LD は 60% を超える効率、コンパクトさ及び波長が近赤外域であるため石英系の光学部品が使用できる利点がある (赤外域の炭酸ガスレーザーは劇物である ZnSe 材に限定)。また、LSP は焦点付近で壁面とは非接触で生成されるため損耗が非常に少なく推進機としての寿命はレーザーで決定されるが LD の寿命はメンテナンスフリーで 10,000 時間以上に達する。すなわち、LD-LSP はアークジェット以上の比推力 1,500 秒 (水素換算) でかつ寿命を 10 倍以上延ばすことができる。一方で現在まで電離エネルギーの低い Xe 以外での LD-LSP の生成報告例はなく推進機へ適用するには安価かつ低分子質量での LSP 生成が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は 4kW 級半導体レーザーを用いた LSP 生成可能なガスの検証及び生成しきい値と LSP 特性評価及び CFD による LSP の物理過程の検証を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に実験装置の模式図を示す。使用している半導体レーザーは浜松ホトニクス社製 LE1178MOD であり、設計波長、最大出力はそれぞれ、940 nm、4.4 kW である。搭載されている標準レンズを使用した場合、スポット形状は矩形型であり、寸法は 0.96 mm × 1.44 mm である。レーザーの発振モードは可変であり、低出力でのアライメントモードと高出力の発振モードがあり、低出力のアライメントモードで焦点を合わせることが可能である。LSP の生成器は可動ステージに取り付けられており、レーザーの焦点をカソードの先端に調整をして実験を行っている。高圧チャンバーは 2.0 MPa 以上の耐圧を持ち、ナイロンチューブを通してアルゴンガスが供給される。初期プラズマ源はチャンバーに固定された二本の電極でアーク放電を起こし生成され、そこへレーザーを照射し、アーク放電停止後にプラズマがレーザーのみで維持されているかを確認する。本研究ではこの実験を、レーザー出力を下げて繰り返し行い、LSP の維持が確認できなくなるレーザー出力を生成しきい値と定義する。プラズマの生成の様子はデジタルカメラ (Sony Corp. RX100IX) で録画した。LSP からの発光スペクトルは分解能 0.75 nm の分光器により 200-1100 nm の範囲で取得した。

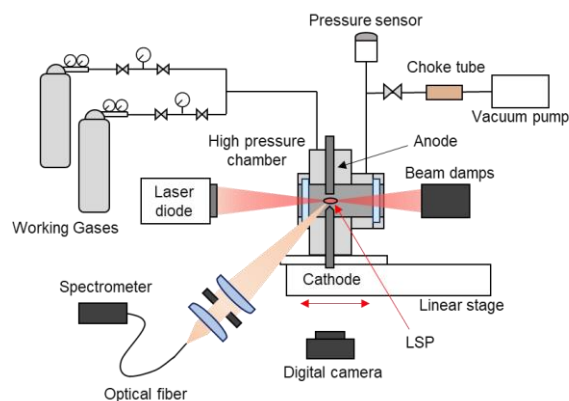


図 1. LSP 生成実験装置概略図

(2) 数値計算は軸対称の Navier-Stokes 方程式を用いて熱平衡と化学非平衡を仮定し、輻射熱伝導モデルにより輻射熱輸送を考慮した。入射レーザー光は半径方向に沿って 2400 本の光線の束に分割され各光線の経路はレイトラッキング法により計算し、各光線は Beer の法則によりレーザー吸収を考慮した。非粘性流束は AUSM-DV スキームを用い、時間積分は陰解法 Gauss Seidel を用いた。計算格子として総点数 584 × 126、壁面境界は 300K (室温) の非スリップ等温壁として扱った。

4. 研究成果

(1) 図2にKr, Ar及び混合ガスを用いてLSP生成に必要な最低レーザー出力を示す. 図よりKrおよびKr-Arにおいては圧力に伴ってしきい値が減少していく現象が確認できた. これは圧力上昇に伴って逆制動放射吸収係数が増加することに由来する. また, Kr-Arの傾きがKrよりも緩やかであるのは, Krよりも電離エネルギーの大きなArを添加することで圧力を上昇させているためである. したがって高圧力帯では全体に占めるArの割合が大きく, 結果として平均電離エネルギーが上昇する. また, Kr-Heでは圧力に対してのしきい値上昇が確認できた. これはHeを添加することによる電離エネルギー上昇の効果が, 圧力増加による吸収係数増大の効果を上回っていることを意味する. また, Kr-HeはKrを0.8 MPaに固定したところ, LSP生成可能な条件が限られたので, Krを1.0 MPaで固定したデータも取得した. ArもKrと同様に圧力に対してしきい値は低下するが, Krよりも傾きが急であり, 1.8 MPa付近でしきい値の大小が逆転すると思われる. これは半導体レーザーがAr原子の吸収ラインに発振スペクトルを持つため, 原子線吸収が起こった結果だと考えられる. 実際, 得られた発光スペクトルから原子線吸収を定量的に考慮したところ逆制動放射吸収と同程度の吸収係数があることがわかった.

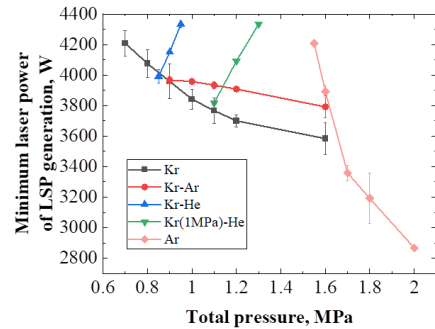


図2. ガス種とLSP生成しきい値

(2) 続いて, LSPの諸特性を求めめるためにレーザー出力を4350 Wに固定してLSP生成を行った. 図3に典型的なKr-LSPの発光スペクトルを示す. 図よりLSPからの発光は原子スペクトルが支配的であることがわかる. LSPは1.0 MPa前後と高圧であるため, 熱化学平衡を仮定し, ボルツマンプロット法を用いて温度を推定した. ボルツマンプロット例を図3に, 温度結果を図4に示す. Krは圧力に対して増加傾向であり, Kr-Ar, Arはほぼ一定という結果となった. これはArの熱伝導率がKrよりも大きいため熱が散逸してしまうためこのような結果になったのではないかと考えられる. Kr-Heでは温度の傾向がみられない. これはHeの添加量が少なく, パラメーターを大きく振れなかったことも原因の一つであるが, Heは電離電圧が高いためプラズマ化が起っていない可能性もある.

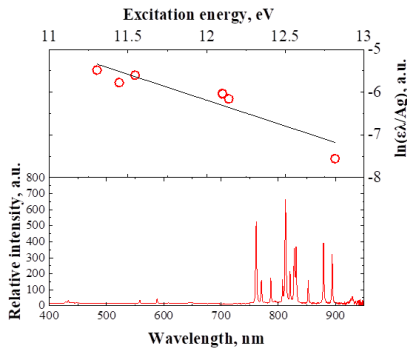


図3. Kr-LSPの発光スペクトルとボルツマンプロット

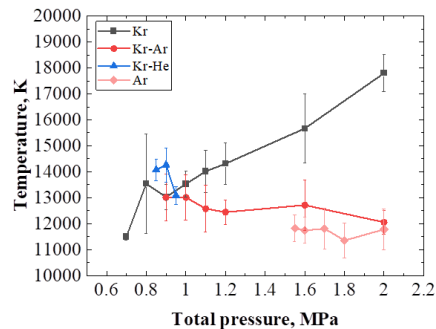


図4. ガス種と温度

さらに, 図5に示すようにデジタルカメラで撮影したLSPの輝度を二値化し, 焦点を原点としたピーク値をLSP位置, 輝度分布の半値全幅をLSP長さとして求めた. 図6, 7にそれぞれLSP位置と長さを示す. LSP長さはしきい値に余裕があるほどプラズマが長くなることが読み取れる. LSP生成位置はそれぞれのガスで大きくばらついている. これは生成位置の基準を電極先端に合わせたため, 実験系のアライメントによって空間的なゼロ点のずれが起きていると考えられる. したがって相対的な値の変化を読み取ると, それぞれのLSP生成位置は圧力によって変わらない事がわかった.

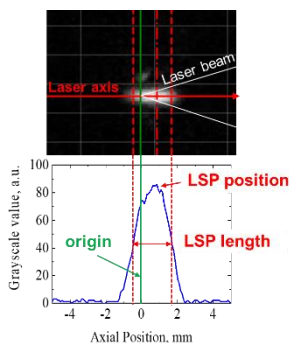


図5. LSP輝度分布

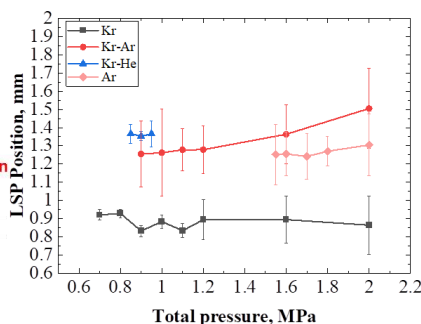


図6. ガス種とLSP生成位置

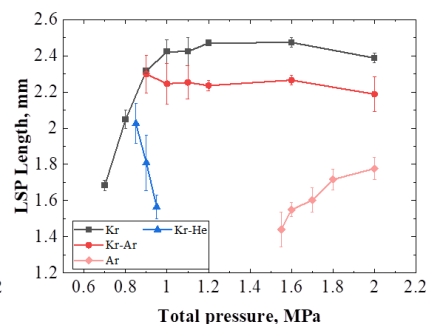


図7. ガス種とLSP長さ

(3) 次に実際の推進機の作動条件に近い流れのある状態に対して Ar-LSP 生成しきい値を求めた。レンズの F 値を変えて(2)と同様の実験を行った。流量調節はチャンバー後方に取り付けたチョークチューブを用いて行う。チョークチューブは流路より小さな径の穴が開いた管であり、穴径を 0.2-0.6 mm に変えることで流速を調整した。LSP しきい値の結果を図 8 に示す。Ar-LSP は 0.2 mm および 0.3 mm での生成には成功したものの他の条件では生成が確認できなかった。これは流速によって LSP が流されてしまったことが原因だと考えられる。また、流速による影響を大きく受けるものの、17.9 mm/s と 40.4 mm/s で生成しきい値に大きな変化は見られない。このことから、軸流ではなく流れの乱れに大きく影響を受けている可能性がある。今回実験で使ったチャンバーでは整流化などは特に考慮されておらず、流線が軸方向に向いていないと考えられる。LSP は LSC 波によって軸方向に伝搬するため、軸方向の流速には釣り合って平衡がとれるが、レーザー軸と垂直方向の流れには弱い。今回の実験では、LSP がレーザーパスの外に流されてしまい、そのまま消滅したのではないかと考えられる。実際のロケットへ適応する場合には、効率よく推進剤を加熱するために音速に近いスロート部付近で LSP を生成しなければならない、その場合の流速は現在よりも 5 桁程度大きい。従って、フロー状態で実験する際には、流れを平行流れにできる機構が必要となることが示唆された。

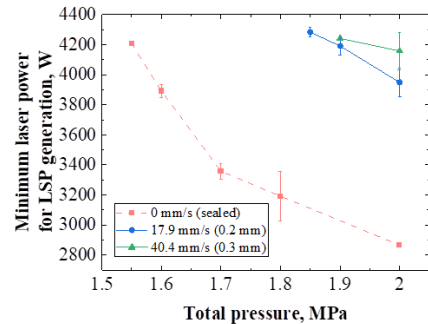


図 8. 流速の Ar-LSP 生成しきい値への影響

(4) 流れがあると LSP 生成しきい値が大きく上昇することがわかったため、F 値（焦点距離）を変えることでしきい値を下げることを試みた。図 9 にこれまでの F 2.0 に対し、F 1.5, F 2.24 で LSP 生成を試みた写真を示す。画像はそれぞれの F 値におけるしきい値レーザーパワーでの LSP の様子である。F 2.24 の場合のみ、最大レーザー出力(4400 W)においても LSP の生成を確認できなかったため、アーク放電プラズマにレーザーを照射したときの様子である。F 1.5 と F 2.0 のレンズを用いた実験では、アーク放電を停止した後も図に示すようにレーザーでプラズマを維持することができた。しかし、F 2.24 のレンズを用いた実験では、アーク放電プラズマにレーザーを照射することで、レーザーの光軸方向にプラズマが伸びる様子を確認することができたが、アーク放電を停止した後は、プラズマは維持されずに消失してしまった。図 10 に Ar LSP のそれぞれの F 値における生成しきい値取得の結果を示す。結果として、F 1.5 および F 2.0 のレンズを用いた場合には、2.00 MPa までの圧力の範囲で LSP の生成が確認できたが、F 2.24 のレンズを用いた際には、2.00 MPa までの圧力では生成が確認できなかった。全体の傾向として、圧力を上げることにより LSP の生成しきい値が緩和されることがわかる。これは圧力が増加することにより、数密度も上昇し逆制動放射吸収量が増加したことで、プラズマのレーザー吸収量が増加したことが原因であると考えられる。また、F 1.5 と F 2.0 のレンズを用いた場合のしきい値を比較すると F 1.5 の場合では LSP の生成しきい値が大幅に低下しているとわかる。これは F 値を小さくしたことにより、スポット面積が小さくなり、その影響でスポット面積当たりのレーザーパワーが増加したことが原因であると考えられる。そこでスポット径を考慮した焦点でのレーザー強度に換算したしきい値を図 11 に示す。図にはまた過去に行ったファイバレーザー、ディスクレーザーのしきい値も比較のためプロットした。これより、LD の LSP の生成しきい値はレーザー強度に依存しており、ファイバレーザーとほぼ同じである一方、ディスクレーザーのしきい値は一桁近く高いレーザー強度となることがわかった。これは LD (940 nm)、ファイバレーザー (1070 nm) の発振波長付近に Ar 原子線があるのに対し、ディスクレーザー (1030 nm) の発振波長付近には候補となる原子線吸収が存在しないためだと考えられ、本結果からも原子線吸収の有無が LSP 生成しきい値低減には有効的であることが実証された。

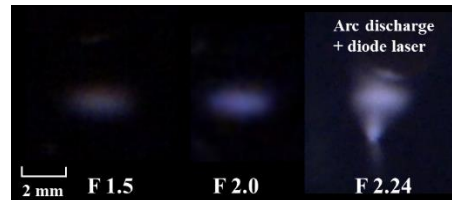


図 9. 各 F 値による LSP 生成写真

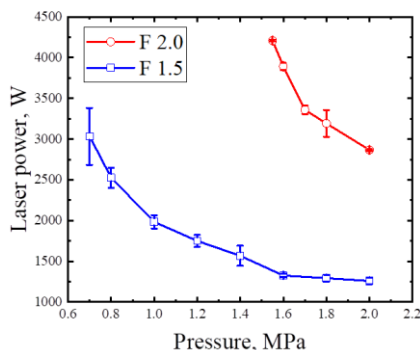


図 10. F 値による Ar-LSP 生成しきい値パワー

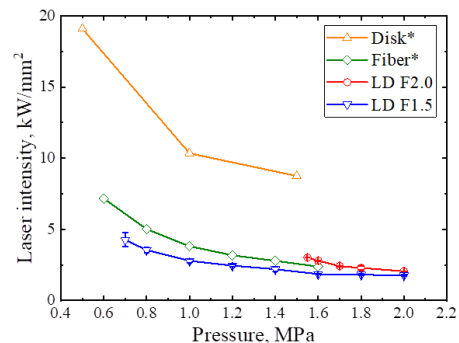


図 11. LD, ファイバ, ディスクレーザーの Ar-LSP 生成しきい値強度

(5) LSPの生成しきい値を解明するためCFD解析を用いてファイバおよびディスクレーザーを用いた高圧封じ込め容器内でのアルゴンLSPの解析を行った。図12にファイバレーザー(波長1070 nm, F 10, スポット径400 μm)を使用した場合の代表的なCFD結果の温度と電離度を示す(レーザーパワー750 W, チャンバー内圧2 MPa, 作動ガスはアルゴン)。レーザーは左から入射し、z=0 mmの位置に焦点がある。F値は10で集光されており、集光経路に沿って、細長いプラズマが生成されているのがわかる(位置は、レーザー入射側に偏る)。図13にファイバレーザーの場合のLSPを維持可能なレーザーパワーの下限値のチャンバー内圧依存性を示す。CFD結果は、実験値の圧力依存性を定性的に再現した。内圧が上昇するにつれて、必要なパワー下限が低下する理由は、主たる吸収過程である逆制動輻射吸収が、電子密度の二乗に比例して増加するためである。しかし、定量的にみると、CFD結果は、LSPを維持可能なレーザーパワーの下限値を常に過大評価した。この理由として、ファイバレーザーの波長(中心波長1070 nm, 線幅約5 nm)の近傍に、作動ガスであるArの電子励起遷移線(1067 nm)が存在するため、この原子線によりレーザーが吸収(線吸収)される可能性があり、CFDではこの効果を考慮していないためと考えられる。また、低圧側でCFDと実験値のレーザーパワー下限の差が小さくなる理由は、低圧ではプラズマ体積が大きくなるが、これに伴う輻射損失量の増加効果をCFDで組み込んでいないためと考えられる。

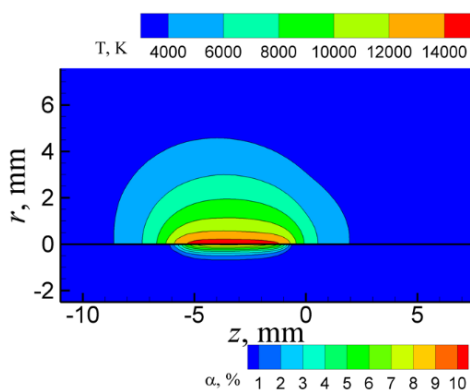


図12. ファイバレーザーLSPのCFD解析結果(温度と電離度)

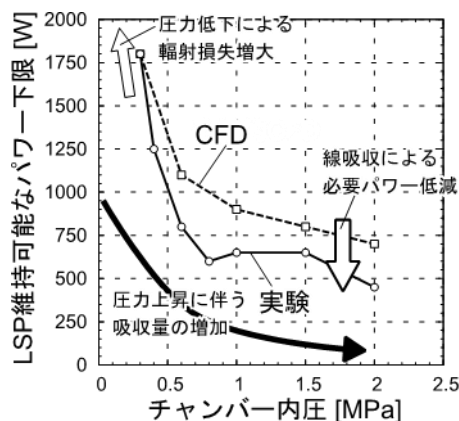


図13. ファイバレーザーLSP生成しきい値

(6) 実験、CFDの結果からLSP生成では逆制動輻射吸収だけではなく原子線吸収が重要な役割を果たす可能性が高い。図14に原子線吸収の概念図を示す。図15に圧力2 MPaのアルゴンプラズマにおいて、サハの熱電離平衡を仮定した場合の1067 nmの原子線吸収係数と逆制動輻射吸収(レーザー波長1070 nm)の比較を示す。LSP中心の温度は15,000 K程度であり、この時、線吸収係数は、逆制動吸収係数の二桁程度大きい値を持つ。一方で、いくら線吸収係数が大きくとも、レーザー線幅に対して、線吸収線幅が小さければ、吸収量としてはインパクトがない。ドップラー拡がりのみを考慮した場合線幅は15pmであり、レーザーの線幅に対して0.3%と非常に小さい。しかしながらLSPは1 MPa程度の高圧で維持されているため、吸収線幅は圧力広がり支配しており、ドップラー拡がりのみ考慮した本見積りよりもっと大きい可能性が高い。そこで、今後はこれらの効果を考慮した線幅モデルを構築しCFDに組み込み、線吸収効果の解明を行う予定である。

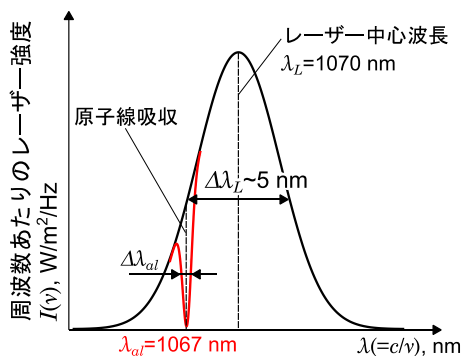


図14. 原子線吸収モデル

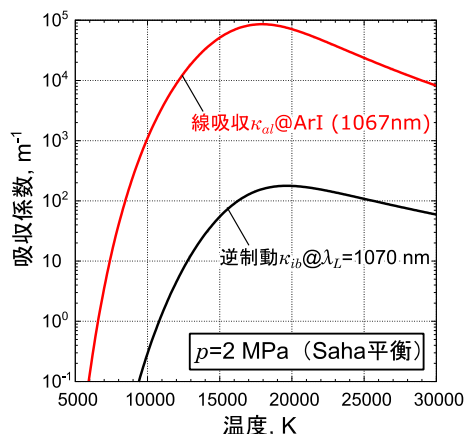


図15. 原子線吸収係数と逆制動輻射係数の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Uesugi, K., Oishi, R., and Matsui, M.	4. 巻 61
2. 論文標題 Evaluation of Ablation Plume Temperature for Laser Intensity and Alumina Powder Particle Density in Alumina Reduction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac1485	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 Uesugi, K., Oishi, R., and Matsui, M.	4. 巻 14
2. 論文標題 Temperature Measurement of Laser Ablation using 1 kW Class Continuous-wave Laser Diode and Analysis of Ablated Alumina	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Kuwahara, A., Aiba, Y., and Matsui, M.	4. 巻 6
2. 論文標題 Plasma Atomization of Strontium Chloride Powder by a Supersonic Plasma Jet and Measurement of Its Efficiency Using Diode Laser Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 11750-11755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsomega.1c01094	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 小林隆, 松井信, 山田和彦	4. 巻 29
2. 論文標題 マルチパスレーザー吸収分光法における膨張波管窓の感度向上への影響評価と時間分解気流診断	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ応用科学	6. 最初と最後の頁 15-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Matsui, M., Ono, T., Kamei, T. and Mori, K.	4. 巻 167
2. 論文標題 Generating Conditions of Argon Laser-Sustained Plasma by Disk, Fiber and Diode Lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 490-494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2018.05.012	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 Hara, R. and Matsui, M.	4. 巻 12
2. 論文標題 Dependence of Phosphoric Acid Concentration on Emission Intensity and Temperature of Single Bubble Sonoluminescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Okamoto, T., Kobayashi, R. and Matsui, M.	4. 巻 13
2. 論文標題 Evaluation of Sensitivity and Spatial Resolution of Laser Absorption Spectroscopy Using Multipass Configuration for Expansion Tube Flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 39-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一	4. 巻 3
2. 論文標題 100 kWファイバーレーザーを用いたレーザー打上システムの実現可能性の検証と将来の大量輸送システム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 宇宙太陽発電	6. 最初と最後の頁 38-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24662/ssps.3.0_38	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 Matsui, M., Katsurayama, H., Komurasaki, K., and Arakawa, Y.	4. 巻 11
2. 論文標題 Characterization of Hypersonic High Enthalpy CO2 Flows by Laser Driven Plasma Wind Tunnel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 41-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yamada, T., and Matsui, M.	4. 巻 11
2. 論文標題 Evaluation of Time Resolution of Laser Heterodyne Interferometer for Electron Density Measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 22-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Matsui, M., Ono, Y., and Mori, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Generating Conditions of Argon Laser-Sustained Plasma by Disk, Fiber and Diode Lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Okamoto, K., Ishikawa, K., Takano, S., and Matsui, M.
2. 発表標題 Ignition of Xe Diode Laser Sustained Plasma by Capacitor Discharge
3. 学会等名 15th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takano, S., Ishikawa, K., Okamoto, K., Matsui, M.
2. 発表標題 Effect of F-number on Generation Conditions of Argon LSP using Diode Laser
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 Katsurayama, H., Matsui, M.
2. 発表標題 Numerical Investigation of Sustainable Characteristics of Solid-State-Laser Sustained Plasma
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 岡本晃太, 石川知義, 高野成一郎, 松井信
2. 発表標題 半導体レーザーによるアルゴンレーザー維持プラズマの生成およびその諸特性の調査
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 葛山浩, 松井信
2. 発表標題 連続発振固体レーザーにより維持されたアルゴンプラズマの線吸収効果の数値解析的検討
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本晃太, 石川知義, 高野成一郎, 松井信
2. 発表標題 レーザーアブレーションによる半導体レーザー維持プラズマの生成
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川知義, 岡本晃太, 高野成一郎, 松井信
2. 発表標題 Kr-Ne混合ガスを用いた半導体レーザー維持プラズマにおける生成条件の調査
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 葛山浩, 松井信
2. 発表標題 固体レーザー維持プラズマの維持特性の数値解析
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本晃太, 石川知義, 高野成一郎, 松井信
2. 発表標題 レーザーアブレーションによるレーザー維持プラズマの着火条件の調査
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川知義, 岡本晃太, 松井信
2. 発表標題 レーザー推進実現に向けたArガスを用いた半導体レーザー維持プラズマにおける流速が生成条件に及ぼす影響
3. 学会等名 第53回流体力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kamei, T., Niwa, W., Ishikawa, K., Matsui, M., and Mori, K.
2. 発表標題 Feasibility study of laser propulsion system for launch demonstration and generation of laser sustained plasma as heat source
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kamei, T., Niwa, R., Ishikawa, K., and Matsui, M.
2. 発表標題 Influence of Flow Velocity on Generating Conditions of Diode Laser Sustained Plasma
3. 学会等名 12th International Symposium on Applied Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsui, M., Kamei, T., Niwa, R.
2. 発表標題 Laser sustained plasma using argon, xenon, krypton, hydrogen and methane for onboard laser-based thruster
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kamei, T., Niwa, R., and Matsui, M.
2 . 発表標題 Generation experiment of laser sustained plasma using penning effect for application to laser propulsion
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Matsui, M., Ono, T., and Kamei, T.
2 . 発表標題 Methane Laser Sustained Plasma using High Power Diode Laser for Space Propulsion
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kamei, T., Ono, T., Niwa, R., Matsui, M., and Mori, K.
2 . 発表標題 Evaluation of Launch Performance for Launch Demonstration of CW Laser Propulsion and Verificaton of Feasibility of Launch System
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nozu, T., Katsurayama, H., and Matsui, M.
2 . 発表標題 Numerical Analysis of Diode Laser Sustained Plasma
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 亀井知己, 丹羽亮貴, 石川知義, 松井信
2. 発表標題 レーザー推進への応用に向けたアルゴン混合ガスを用いた半導体レーザー維持プラズマの生成実験
3. 学会等名 第56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 2019年

1. 発表者名 亀井知己, 丹羽亮貴, 石川知義, 岡本晃太, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザー推進への搭載に向けたCH4混合ガスを用いた半導体レーザー維持プラズマの生成実験
3. 学会等名 第63回 宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川知義, 亀井知己, 丹羽亮貴, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザー推進におけるビーム伝送過程が熱源のプラズマ生成に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 第63回 宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 丹羽亮貴, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザー推進への応用に向けたヘリウムのペニング効果を利用したレーザープラズマの生成実験
3. 学会等名 第51回流体力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹羽亮貴, 亀井知己, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 炭素繊維熱交換器を用いたレーザー推進機内における伝熱解析
3. 学会等名 第51回流体力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kamei, T., Ono, T., Niwa, R., Matsui, M., and Mori, K.
2. 発表標題 Feasibility study of space transportation system using laser susutained plasma as heat source
3. 学会等名 12th International workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials Joined (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kamei, T., Ono, T., Niwa, R., Matsui, M., and Mori, K.
2. 発表標題 Investigation of influence of laser power and heat source temperature on launch capability of laser propulsion
3. 学会等名 Inter Academia Asia 5th Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kamei, T., Ono, T., Niwa, R., Matsui, M., and Mori, K.
2. 発表標題 Evaluation of Launch Performance of Laser Propulsion Considering Energy Loss due to Beam Expansion
3. 学会等名 15th Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 松井信
2. 発表標題 高出力半導体レーザーを用いたアルミナ還元システムに向けて
3. 学会等名 2018年度アルミサイクル研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井信
2. 発表標題 4kW級半導体レーザーの導入と安全管理体制について
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 丹羽亮貴, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 CWレーザー推進の打上デモに向けた打上性能評価と熱源のプラズマ生成実験の現状報告
3. 学会等名 平成30年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 丹羽亮貴, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザービームをエネルギー源とした宇宙輸送システムのレーザー出力と打上性能のスケール則の調査
3. 学会等名 第6回応用物理学会名古屋大学スチューデントチャプター東海地区学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹羽亮貴, 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザープラズマを用いた4kW級レーザー推進デモ機的设计
3. 学会等名 第6回応用物理学会名古屋大学スチューデントチャプター東海地区学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 丹羽亮貴, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 CWレーザー推進の打上性能評価と推進剂加熱温度が打上性能に与える影響の調査
3. 学会等名 第55回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹羽亮貴, 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザープラズマを用いた4kW級レーザー推進デモ機的设计
3. 学会等名 第55回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 レーザー推進機の打上デモに向けた打上性能評価とコストを考慮した実現可能性の検証
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 丹羽亮貴, 宮木敦司, 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 100kW級レーザー打ち上げ機に向けた8kW級デモ機的设计案
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 小野貴裕, 亀井知己, 丹羽亮貴, 宮木敦司, 松井信
2. 発表標題 レーザー推進への応用に向けたメタンガスを用いたレーザー維持プラズマの生成実験
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 葛山浩, 森浩一, 松井信, 小紫公也
2. 発表標題 レーザー軌道打ち上げ機による大量宇宙輸送
3. 学会等名 第79回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野貴裕, 亀井知己, 松井信
2. 発表標題 メタンガスを用いた半導体レーザー維持プラズマの生成
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 2種類の加熱方式を用いた複合型レーザー推進機の打ち上げ性能評価
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野貴裕, 亀井知己, 松井信
2. 発表標題 高出力CWレーザーを用いたアルゴンレーザー維持プラズマの生成実験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第49期年会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江口敬祐, トラン・ドック・トゥアン, 伊藤弘貴, 小野貴裕, 亀井知己, 山森浩人, 松井信, 森浩一
2. 発表標題 炭素繊維群熱交換器を用いたCWレーザー推進に関する実験的研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第49期年会講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP http://ars.eng.shizuoka.ac.jp/~matsui/index.html
--

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
研究 分 担 者	葛山 浩 (Katsurayama Hiroshi) (80435809)	鳥取大学・工学研究科・教授 (15101)	

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