

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709065

研究課題名（和文）半導体レーザーを用いた革新的な高エンタルピー風洞の実現可能性の検証

研究課題名（英文）Feasibility Study on Novel High Enthalpy Wind Tunnel using High Power Diode Laser

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） 18,800,000円

研究成果の概要（和文）：1kW級半導体レーザーを用いてレーザー維持プラズマ生成（LSP）に関する研究を行った。まず1MPaのキセノンを用いてLSP生成を試みたところレーザー出力526W以上でLSPの生成に成功した。LSPはレーザー出力とともに吸収率が増加し、発光分光法による温度測定の結果、最大で6200Kであることがわかった。一方、アルゴンを用いた場合、5MPa下でもLSPは生成できず、より高圧もしくは高出力のレーザー光が必要である。

研究成果の概要（英文）：Generating conditions of laser sustained plasma (LSP) using 1kW class diode laser were investigated. For 1 MPa xenon gas, the LSP could be generated at the laser power higher than 526 W. The fractional absorption of the laser power increased with the increase in the laser power. As a result of emission spectroscopy, the LSP temperature was 6200 K at maximum. For argon gas, the LSP could not be generated even at the pressure of 5 MPa. Then, higher pressure or higher laser power are necessary to generate the argon LSP.

研究分野：航空宇宙

キーワード：レーザー維持プラズマ 半導体レーザー プラズマ診断 高エンタルピー気流

1. 研究開始当初の背景

(1)従来のアーク風洞や誘導加熱風洞では電極損耗や作動圧の上限から金星大気圏突入環境のような大気主成分が CO_2 でかつ高い総圧 (0.7 MPa) を持つ高エンタルピー気流を生成することは困難であった。

(2)我々はこれまで2 kWの CO_2 レーザーを用いたレーザー維持プラズマ (LSP: Laser Sustained Plasma) を熱源としたレーザープラズマ風洞の開発を行ってきており、気流直径5 mm以下と小規模ながら上記条件を満たす気流の生成に成功した。しかしながら耐熱試験を行う気流サイズを生成するには100 kW以上のレーザー源が必要であるが CO_2 レーザーの高パワー化はサイズ、コスト的に非常に困難である。

(3)半導体レーザーは近年高パワー化、低コスト化が著しく、既に100 kWを超えるものが商用化されている。またレーザーの発振効率は商用で50%、研究段階では80%弱と非常に高く (CO_2 レーザーは10%)、気体レーザーとは異なりメンテナンスや維持コストもほとんど不要であるため大型風洞のレーザー源として有望である。

2. 研究の目的

1 kW級半導体レーザーを用いてLSP生成条件の検証を行う。まず、イオン化エネルギーが低いキセノンを用いてLSP生成しきい値を求め、LSP生成後、LSP特性を評価する。次にアルゴンを用いて同様の実験を行う。

3. 研究の方法

(1)キセノンLSPの生成実験

実験装置の概略図を図1に示す。半導体レーザー (浜松ホトニクス, LE0351) はバーアレイタイプであり、最大パワーは1.1 kWである。各バーにはコリメータレンズがついており、焦点距離100 mmの集光レンズによりスポット径においてファースト軸0.39 mm、スロー軸1.25 mmまで集光できる。ターゲットはキセノンランプ (USHIO Inc., UXL-500D) で放電管内には1 MPaのキセノンが充填されている。キセノンランプは定格500 Wであるがレーザー吸収による圧力上昇を考慮し、最小の240 Wで着火し、アーク放電プラズマに半導体レーザーを入射することでLSP生成を試みた。レーザーと反対側にはパワーメータ (オフィールジャパン, 1000W-BB-34) が設置されており、レーザー透過光強度を測定した。

LSPからの発光は焦点距離150 mm, 35 mmの二枚のレンズ及びアイリスにより直径600 μm のファイバに導入し、分光器 (オーシャンオプティクス, HR4000) を用いて測定した。集光系は3軸の移動ステージに設置されており、最も発光強度が強い位置を原点とし、レーザー入射方向分布を1 mm間隔で測定し

た。分光器の波長測定領域は200 nm~1100 nmであり、波長分解能は0.75 nmである。分光器の感度校正はタングステンハロゲンランプ (Newport, 63358), 波長軸校正は水銀アルゴンランプ (オーシャンオプティクス, HG-1) を用いて行った。LSPは20 Hz程度で振動していることがわかっているため、露光時間は130 ms~1500 msで測定を行った。

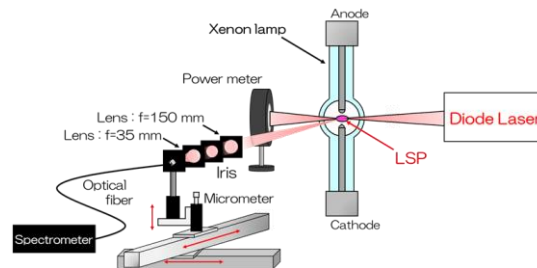


図1. キセノンLSP生成実験装置

(2)アルゴンLSPの生成実験

図2にアルゴンLSP生成装置を示す。アルゴンはイオン化エネルギーがキセノンより大きく、より高い圧力がLSP生成には必要であると考えられるため最大5 MPaの圧力耐えられるLSP生成チャンバを新たに製作した。LSPの着火にはタングステン電極によるアーク放電を用いており、高圧下での異常放電を防ぐため電極は先端以外セラミック管で覆われている。着火部はレーザー光入射窓とは別に観察用の窓がついており、カメラ計測及び分光計測が可能となっている。また本LSP生成器は半導体レーザーだけではなく、比較のため4 kW級ディスクレーザー (Trumpf GmbH, TruDisk 4002) を用いたLSP生成実験も行った。

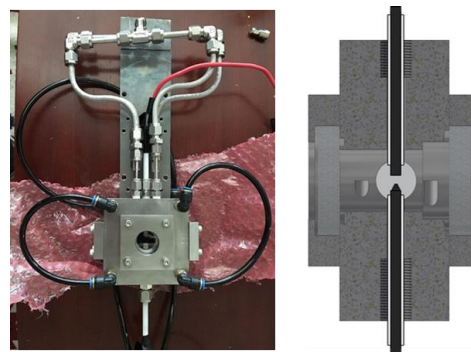


図2. アルゴンLSP生成実験装置

4. 研究成果

(1)キセノンLSP生成条件と吸収率

図3にアーク放電、アーク放電にレーザー光を入射した場合、レーザー光のみを入射した場合の写真を示す。図が示すようにアーク放電を火種としてレーザー光だけでLSPの生成・維持に成功した。LSP維持に必要な最小レーザーパワーは538 Wであった。

図4にレーザーパワー650 W, 800 Wおよび1,000 W時のLSPの写真を示す。図が示す

とおり、レーザーパワーが高いと LSP の発光領域はレーザー入射軸方向に伸び、最大で 9.7 mm 程度になる。一方、ファースト軸である垂直方向はレーザーパワーによらず左端では 0.5 mm 程度で焦点と同程度であるため、左端が焦点位置付近であることがわかる。

図 5 にパワーメータによる透過光強度から求めたレーザー光吸収率と正味の LSP 入力パワーを示す。LSP を生成できた最小のレーザーパワーである 538 W 時に吸収率は 0.20 であり、その値はレーザーパワーとともに増加しレーザーパワー 952 W で 0.66 に達する。次節で示す通り、LSP 温度はレーザーパワーの大きく依存しないため、この吸収率の増加は吸収係数の増加ではなく、レーザー入射軸方向の LSP 長さがレーザーパワーとともに長くなり、吸収長が長くなったためだと考えられる。正味の LSP パワーは最小で 109 W であり、LSP 生成に必要な最小レーザーパワー 538 W を大きく下回る。従ってスポット径をより小さくし、レーザー強度を上げることができれば吸収量が増加し LSP 生成しきい値を大きく下げられることが期待できる。

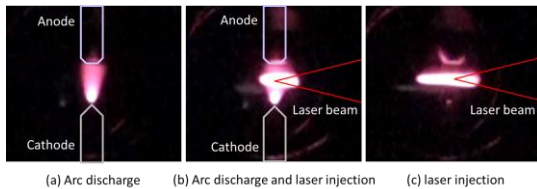


図 3. アーク放電 (左), アーク放電+レーザー光 (中央), 及び LSP (右) 写真

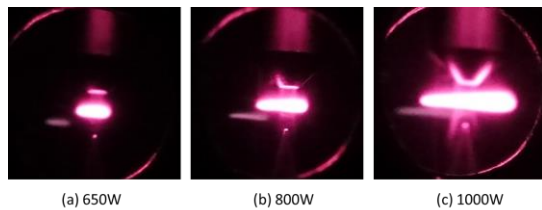


図 4. 650W, 800W 及び 1,000W 時の LSP 写真

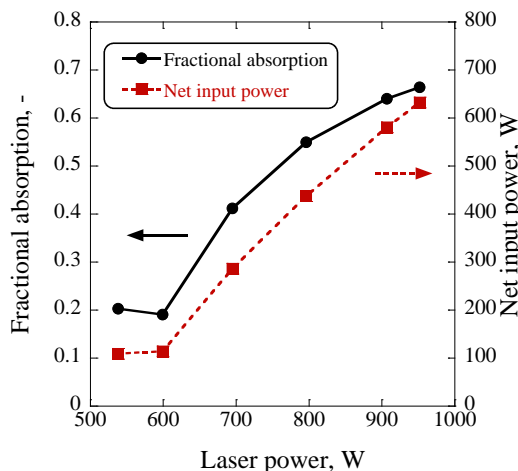


図 5. レーザー光吸収率と正味の LSP 入力パワー

(2) キセノン LSP 温度分布

典型的な発光スペクトルを図 6 に示す。発光スペクトルは近赤外域の Xe I、紫外域の Xe I と電極材である W I、および制動放射が全域で観測された。本実験条件は 1 MPa 以上と非常に圧力が高く LSP は局所熱化学平衡状態にあると仮定し、ボルツマンプロットにより温度を求めた。使用した原子線は近赤域の Xe I であり、紫外域のスペクトルは強度が弱い上、本実験で用いた分光器の波長分解能では Xe I と W I をフィッティングにより分離することができなかったため除外した。

図 7 に温度分布および全波長域を積分した発光強度分布を示す。ここでエラーバーは 3 回測定した際の標準偏差を表す。図が示すように温度分布は発光強度分布に比べなだらかな分布を持っている。これはシュテファンボルツマンの法則から発光強度が温度の 4 乗に比例するため、発光強度が温度変化に敏感であるためだと考えられる。温度はレーザーパワーとともに僅かに増加傾向を持っており、最大温度は 8,800 K から 9,200 K まで増加した。

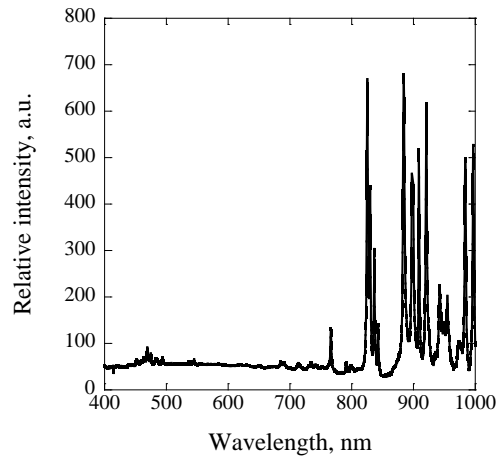


図 6. キセノン LSP 発光スペクトル

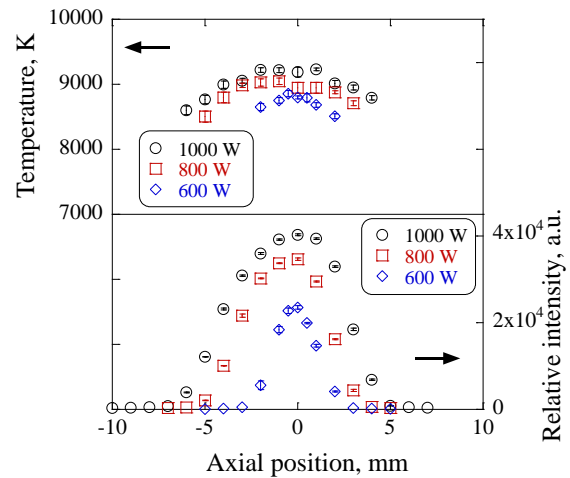


図 7. キセノン LSP 発光強度及び温度分布

(3) アルゴン LSP 生成条件について

半導体レーザーを用いたアルゴン LSP 生成実験はレーザーパワー 1 kW、圧力 5 MPa

において、アーク放電にレーザーを入射時に強い発光は確認できたものの、LSPの維持には成功しなかった。そこでLSP生成条件に関して検証するために別途ディスクレーザーを用いたアルゴンLSP生成実験を行った。

図8にディスクレーザーを用いたアルゴンLSP生成閾値を示す。比較のためCO₂レーザー^①及びファイバーレーザー^②を用いた結果も示す。図が示すようにLSP生成閾値は圧力とともに減少することがわかる。ディスクレーザーでは1.5MPa時に1100WでLSPを生成することに成功した。CO₂レーザーの閾値が他のレーザーに比べ小さいのは波長が桁大きく逆制動放射吸収係数が大きいことが理由である。一方でファイバーレーザーとディスクレーザーの波長はほとんど同じ近赤外領域にあり、逆制動放射吸収係数に違いはない。従って今回ファイバーレーザーとディスクレーザーの閾値の差はビーム品質の差によるスポット径の差、すなわちレーザー強度であると考えられる。

そこで半導体レーザーによるLSP閾値を逆制動放射吸収係数及びスポット位置でのレーザー強度を考慮して評価した。図9に半導体レーザー及びディスクレーザーの逆制動放射吸収係数とスポット位置でのレーザー強度の積と温度の関係を示す。ここで半導体レーザーのパワーは1kW、圧力4-6MPa、ディスクレーザーは実験で得られた1100W、1.5MPaの値を用いた。図が示すように15,000K以下の温度領域では半導体レーザーの積は4MPa時には下回っているが5MPa時にディスクレーザーを若干上回る。従ってLSP生成閾値は5MPa付近であると推定できる。今回、LSPの生成には成功しなかったものの、5MPa時には4MPa時にない強い発光を観測しており、この圧力付近がLSP生成閾値だという推定とは矛盾しない。従ってアルゴンでLSPを生成するためにはさらなる圧力向上で可能であると考えられる。

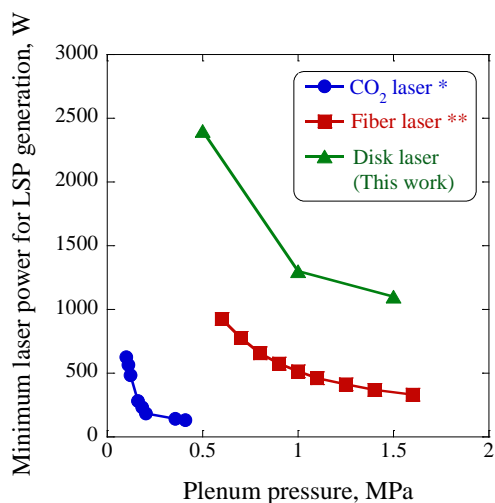


図8. ディスクレーザー、ファイバーレーザー及びCO₂レーザーのアルゴンLSP閾値と圧力の関係

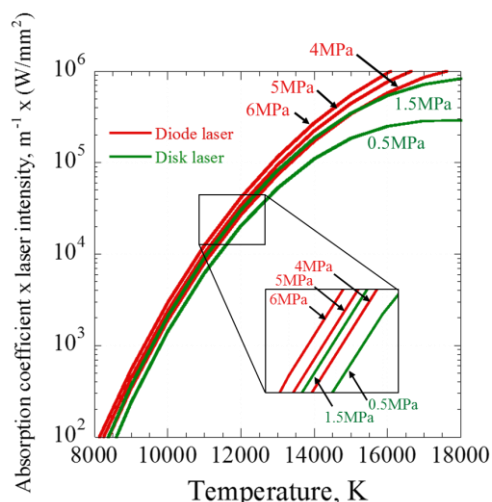


図9. 半導体レーザー及びディスクレーザーの逆制動放射吸収係数とスポット位置でのレーザー強度の積と温度の関係

<引用文献>

- ① V. A. Kuznetsov, et al. *Sov. Phys. Tech.*, 49-11, 1979, 1283.
- ② V. P. Zimakov, et al. *Plasma Phys. Rep.*, 42-1, 2016, 68.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Matsui, M. and Yamada, T., “High sensitive translational temperature measurement using characteristic curve of second harmonic signal in wavelength modulation spectroscopy,” *Review of Scientific Instruments*, 査読有, Vol.88, 2017, 013105. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4973906>
- ② Nishimoto, K., and Matsui, M., “Generation of Xenon Laser Sustained Plasma Using 1 kW Class Laser Diode,” *Frontier of Applied Plasma Technology*, 査読有, Vol.9, No.2, 2016, pp.71-73.
- ③ Sato, Y., Myoen, R., Matsui, M., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., “Reduction efficiency of alumina powder by various feeding methods in laser plasma wind tunnel,” *Frontier of Applied Plasma Technology*, 査読有, Vol.9, No.1, 2016, pp.45-46.
- ④ 山田透, 松井信, “波長変調分光法による並進温度測定可能性の検証,” *プラズマ応用科学*, 査読有, Vol.23, No.2, 2015, pp.102-106.

[学会発表] (計21件)

- ① Matsui, M., “Characteristics of Laser Sustained Plasma by High Power Diode Laser,” 9th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials and 10th International Conference on

Plasma-Nano Technology & Science,
Chubu University (愛知県・春日井市), Mar.
1-5, 2017.

- ② Nishimoto, T., Matsui, M., and Ono, T.,
“Generation conditions of CW Diode Laser
Sustained Plasma,” 69th Annual Gaseous
Electronics Conference, Ruhr Univ.
Bochum (ドイツ・ボーフム), Oct.10-14,
2016.
- ③ Nishimoto, K., Matsui, M., and Ono, T.,
“Temperature Distribution of Diode Laser
Sustained Plasma by Emission
Spectroscopy,” 77th JSAP Autumn Meeting,
Toki Messe (新潟県・新潟市), Sept. 13-16,
2016.

他 18 件

〔図書〕 (計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tmmatui/
index.html](http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tmmatui/index.html)

6. 研究組織

(1) 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