

レーザー駆動プラズマ風洞の TPS 試験に向けた性能向上

○曾我遼太（東大・院），小紫公也（東大），松井信（静大），小泉宏之（東大）

Performance Improvement of Laser Driven Plasma Wind Tunnel toward TPS Test

○Ryota Soga (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo), Kimiya Komurasaki (The University of Tokyo), Makoto Matsui (Shizuoka University), Hiroyuki Koizumi (The University of Tokyo)

1. はじめに

宇宙機が大気圏に再突入する際、その速度は数 km/s に達し、空力加熱により激しく加熱される。反応性ガスである酸素や窒素は衝撃波により解離し、表面材料に影響を及ぼす。このような過酷な環境から機体を守るために、熱防御システム（TPS: Thermal Protection System）の開発が必要である。TPS 材料の地上試験には、プラズマ風洞が使用される。

代表的なプラズマ風洞の一つに、アーク風洞がある。構造が簡素で安定した長時間作動が行えることから、広く使用されている [1, 2]。しかし、アーク加熱を原理としているため、作動ガスに O₂ や CO₂ を用いている場合は電極損耗の発生が避けられない。損耗した電極は試験材料に付着し、正確な評価を妨げる深刻な問題となる [3, 4]。

電極を使用しないプラズマ風洞として、ICP 風洞が挙げられる。誘導加熱により作動ガスを加熱するため、ガス種に制限がない上、汚染のないクリーンな気流を生成することができる [5, 6]。しかし、周波数やプラズマ不安定性の観点から全圧の高圧化が難しいという欠点がある。

本研究室では、レーザーによりプラズマを定常的に維持し、間接的に作動ガスを加熱するレーザー駆動プラズマ風洞の開発を進めている [7, 8]。本風洞は、高圧下での安定作動が可能であり、全圧 0.95 MPa での作動を確認している [9]。また、O₂ や CO₂ のような反応性ガスでの安定作動も報告されている [9, 10]。しかしながら、気流径が小さく、材料加熱試験に適したものとは言えない。

本研究では、TPS 材料の加熱試験を視野に入れ実験系の改良を行い、その気流特性を評価したのでその結果を報告する。

2. レーザー駆動風洞

2.1. 作動原理

レーザー駆動風洞の概念図を Fig. 1 に示す。ステンレス製のロッドにレーザーを照射することで、LSP (Laser Sustained Plasma) が点火する。い

ったん点火すると、逆制動放射過程により電子がレーザーエネルギーを吸収し、レーザー上流方向に伝播していく作用と流れによる押し戻しが釣り合う位置で定常的に維持される。LSP の温度は 15000 から 20000 K に達し、それを通過する作動ガスを加熱する [11]。加熱されたガスは超音速ノズルを通り、高エンタルピー流として排出される。

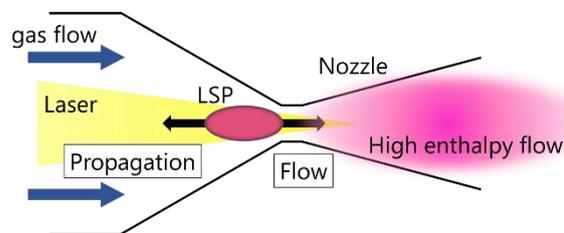


Fig. 1 LSP 風洞の概念図

2.2. LSP 生成器

Fig. 2 に LSP 生成器の概略図を示す。レーザー導入窓、プラズマ生成部とコニカルノズルから構成されている。レーザーは焦点距離 190.5 mm の集光レンズを通り、プラズマ生成部に集光される。レーザーには、最大発振出力 2 kW の連続発振 CO₂ レーザー（モード：TEM₀₀、発振波長：10.6 μm）を使用した。レーザーはビームエキスパンダーにより直径 40 mm まで拡大されたのち集光レンズを通る。

チャンバーはロータリーポンプとメカニカルブースターポンプに接続されており、到達真空度は 0.6 Pa であった。

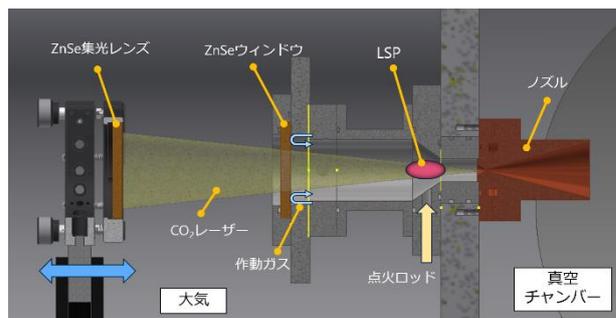


Fig. 2 LSP 生成器の概略図

3. レーザー吸収分光法 (LAS)

3.1. 原理

本研究では、気流診断として LAS を行った。非接触のため、気流を乱さずに計測を行うことができる [12, 13]。ArI772.38 nm の吸収線を用いて気流の並進温度と流速を測定した。

Beer-Lambert の法則によれば、吸収係数とレーザー強度は以下の関係式で表される。

$$\frac{dI(x)}{dx} = -k(v)I(x) \quad (1)$$

LAS から得られる吸収プロファイルは、弦に沿った積分値であるので、半径分布を求めるために軸対称分布の仮定の下アーベル変換を行った。よって、吸収係数の半径分布は以下の式で表せる。

$$k(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{d[-\ln(I/I_0)]}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (2)$$

(2) 式で表される吸収プロファイルは、いくつかの要因から線広がりを持っている。本条件では、ドップラー広がりの影響が十分大きく支配的であるので、広がりから気流の並進温度を求めることができ、次のように関連付けられる。

$$T = M \left(\frac{\Delta v_{FWHM}}{7.16 \times 10^{-7} v_0} \right)^2 \quad (3)$$

また、レーザーを気流に対して角度をつけて入射すると、ドップラー効果により吸収中心周波数がシフトする。以下の式により、流速をシフト量から求めることができる。

$$V = \frac{v_{\text{shift}} c}{v_0 \sin(\theta)} \quad (4)$$

3.2. LAS 計測装置

本実験で使用した LAS の計測系概略図を Fig. 3 に示す。診断レーザーには、外部共振器付半導体レーザーを使用した。771.00 nm から 789.00 nm の範囲で波長可変であり、線幅は 300 kHz である。吸収プロファイルを得るため、変調周期 0.5 Hz で周波数を線形に掃引した。レーザー前方には反射光が共振器内に入るのを防ぐためにアイソレータを設置した。分解能 0.75 GHz のエタロンは相対波長計として用い、時間と周波数の校正に使用した。また、参照用プラズマとして、Ar グロー放電管を用いた。流速が 0 であるため、吸収中心周波数を知ることができる。

診断レーザーはビームスプリッターにより数回分割されている。それぞれファイバケーブル、Ar グロー放電管、エタロンに導入されている。ファイバケーブルは高さ方向に移動できる自動

ステージに取り付けられており、自動ステージは回転ステージに固定されている。回転ステージは 10° の入射角度を付けた状態で固定した。ファイバを通った診断レーザーは、真空チャンバーの反対側でパラボラミラーに反射され、診断レーザーの高さに関わらずフォトディテクタに集光される。

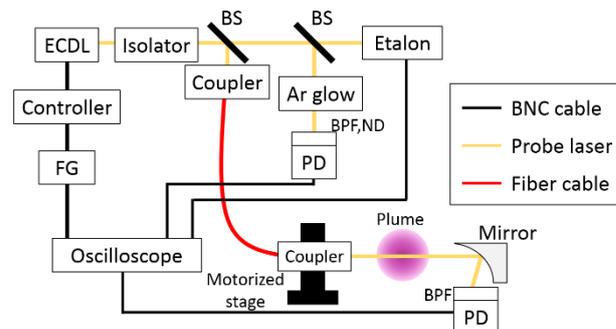


Fig. 3 LAS 計測系

4. 実験結果及び考察

4.1. 作動条件

Table 1 に実験条件を示す。プレナム圧は LPS 維持のために 0.1 MPa を維持する必要があり、それに合わせてガス流量を調節した。LSP が点火した後は集光レンズをステッピングモーターにより前進させ、スロート付近に維持した。

診断レーザーは入射角 10 度を保ったまま気流中心から 2 mm ずつ高さ方向に移動し、14 mm まで 8 点の吸収プロファイルを取得した。診断はノズル出口から 10, 20, 30 mm の 3 つの平面で行った。

Table 1 実験条件

Laser power, W	1800
Ar mass flow rate, slm	7.0
Plenum pressure, MPa	0.11
Ambient pressure, Pa	48

4.2. データ解析

Fig. 4 に、LAS から得られる典型的な取得データを示す。それぞれブルーム透過レーザー、Ar グロー放電管透過レーザー、エタロンを示している。入射レーザー強度は、透過レーザーの吸収がない値を内挿して定義した。また、診断レーザーが端に近づくにつれ、気流振動の影響から SN 比が悪くなる。そこで、各振動の極大値を抽出し、それらについてガウシアンフィッティングを行った。Fig. 5 にその代表的なフィッティング結果を示す。

周波数ごとにアーベル変換を行い、数値積分により式 (2) を解いて吸収プロファイルを求めた。

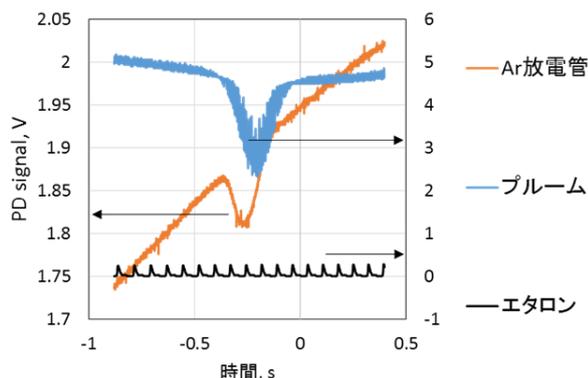


Fig. 4 LAS による典型的な取得データ

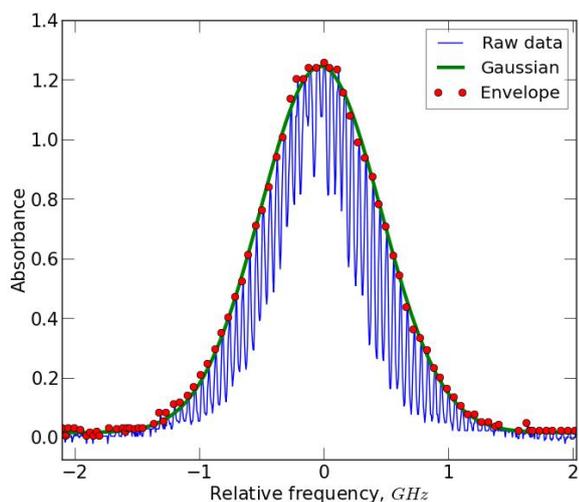


Fig. 5 振動極大値のガウシアンフィッティング

4.3. 気流診断結果

アーベル変換を行った結果、中心がくぼんだ温度分布が得られた。本研究で使用した CO_2 レーザーは、 TEM_{00} を主成分としているが、中心がくぼんだ TEM_{10} に近い形状をしていることがわかっている [11]。これにより、LSP がレーザープロファイルを反映した温度分布をもち、Ar 流の温度分布にも影響したのではないかと考えられる。流速については非常に誤差が小さい結果が得られ、ノズル出口からの距離によらずおよそ同じ値を示していた。マッハ数は最大で 5.5 程度であり、ノズルの開口比から計算される設計マッハ数と比べると小さくなっている。これは、背圧が理想の圧力より高くなっており、ノズルの有効出口径が小さくなっているためであると考えられる。

得られた並進温度、流速分布から比エンタルピーを推算した。比エンタルピーは次式で表すことができる。

$$h = \frac{1}{2}u^2 + \int_0^T C_p dT \quad (5)$$

ここで、 h は比エンタルピー、 u は流速、 T は静温、 C_p は定圧比熱である。本実験では作動ガスに Ar を用いているため、化学ポテンシャルは考慮していない。これにより得られた比エンタルピー分布を Fig. 6 に示す。Ar 流の場合、エネルギーはほとんど運動エネルギーになるため、流速分布を強く反映した分布になっていることがわかる。先述したように並進温度は中心がくぼんだ形状で得られたが、比エンタルピーは静温分布に依存していない。最終的に直径 10 mm のサンプルを用いて耐熱試験を行うことを考慮すると、サンプルがピーク値の 60% 以上の気流に曝されることになる。また、気流径を比エンタルピーの半値全幅 (FWHM) で比較すると、今回の実験で得られた径は 12 mm となり、先行研究の 7 mm と比べて気流径が拡大されたと言える。TPS 加熱試験をするのに十分な気流径を得ることができた。

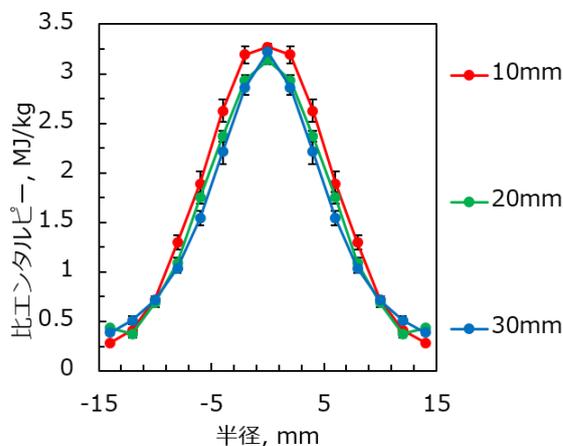


Fig. 6 比エンタルピー分布

5. まとめ

- レーザー駆動風洞の実験系を、TPS 試験に向け改良し、Ar を用いて作動試験を行った。
- 吸収分光により気流診断を行い、並進温度と流速の空間分布を得た。
- 比エンタルピーの半値全幅で比較して、気流径を 12 mm にまで広げることができた。

References

- 1) Choi, C. H., Oh, P. Y., Moon, S. Y., Hong, B. G., "Characterization of arc-heated plasma for the study of plasma material interactions under fusion reactor conditions," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 98-99, (2015), pp. 1784-1787
- 2) Smith, R. K., Wagner, D. A., Cunningham, J., "A Survey of Current and Future Plasma Arc-Heated Test Facilities for Aerospace and Commercial Applications," *36th Aerospace sciences meeting and exhibit, AIAA Paper*, (1998), 1998-0146.
- 3) Harris, W. J., "A STUDY OF CATHODE EROSION IN HIGH POWER ARCJETS," *Ph.D. Thesis, Texas Tech University*, (2002).
- 4) Matsui, M., Ikemoto, T., Takayanagi H., Komurasaki, K., Arakawa, Y., "Evaluation of plume characteristics of arc-heaters with various oxygen injection systems," *Vacuum*, Vol. 80, (2006), pp. 1161-1166.
- 5) Herdrich, G., Auweter-Kurtz, M., "DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF INDUCTIVELY HEATED PLASMA GENERATORS FOR ATMOSPHERIC ENTRY SIMULATIONS," *24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, (2004).
- 6) Ito, T., kurotaki, T., Sumi, T., Fujita, K., Ishida, K., Mizuno, M., "Evaluation of Surface Catalytic Effect on TPS in 110kW ICP-heated wind tunnel," *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2005).
- 7) 井上孝祐, "CW レーザーによる高エンタルピー流の生成," *博士学位論文, 東京大学*, (2007).
- 8) Matsui, M., Shinmi, K., Ueno, T., Komurasaki, K., Arakawa, Y., "Operation Characteristics of Laser Driven Plasma Wind Tunnel," *JSASS Space Tech.*, Vol. 7, No. ists26, (2009), pp. 31-36.
- 9) 新見耕二, 松井信, 小紫公也, 荒川義博, "レーザー駆動プラズマ風洞による高密度酸素原子流の生成," *プラズマ応用科学*, Vol. 16 No. 1, (2008), pp. 9-14
- 10) Matsui, M., Tanaka, K., Nomura, S., Komurasaki, K., Yamagiwa, Y., Arakawa, Y., "Generation and diagnostics of atmospheric pressure CO2 plasma by laser driven plasma wind tunnel," *Journal of Applied Physics* 112, 033301, (2012).
- 11) 細田聡史, "CW レーザー推進におけるレーザープラズマの役割," *博士学位論文, 東京大学*, (2002).
- 12) 山本学, 村山精一, "プラズマの分光計測," *学会出版センター*, (1995).
- 13) Hutcinson, I. H., "Principles of Plasma Diagnostics," *CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS*, (2002)