

レーザー吸収分光法による高温プラズマ気流診断

東京大学大学院 松井 信

東京大学工学部 小紫公也 荒川義博

Laser Absorption Diagnostics of High Temperature Plasma Flow

Makoto MATSUI*, Kimiya KOMURASAKI*, Yoshihiro ARAKAWA**

*Department of Advanced Energy, University of Tokyo

**Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo

Abstract

Absorption spectroscopy has been applied to the diagnostics of high temperature plasma flow produced by arc-heater. Number density and translational temperature of atomic oxygen were obtained from the measured absorption line profile at 777.19 nm. In a nitrogen-oxygen plume at the total enthalpy of 19.3 MJ/kg, density distribution in the shock layer formed by the TPS material has been obtained. It was much smaller than theoretical estimation.

Keyword: Laser absorption, High enthalpy flow, Diode laser

1. 目的および背景

宇宙往還機などの熱防護システム(TPS)の開発には再突入環境を模擬するためにアーク風洞が用いられる。しかしながらアーク風洞によって生成された超音速高温プラズマ気流は熱化学的に非平衡であり気流の諸特性は正確に測定されていない。それゆえ気流の化学組成を同定することは TPS 開発上非常に有益であり、また非平衡流数値計算コードの妥当性を検証するのにも役立つ。

近年、このような高温、高マッハ数流れの特性を調べるために非侵入的な分光測定、特に発光分光測定が盛んに行われている[1][2]。その結果、気流中の原子、分子の励起、振動、回転温度が明らかにされつつある。しかしながらこの方法では流れの化学組成つまり数密度を測定することは難しい。

レーザー誘起蛍光法(LIF)は基底状態の数密度を直接測定できる最も有効な分光法の一つである。この測定法は感度がよく比較的低密度でも測定できるが[3]、基底状態の原子を励起するためエキシマなどの大型かつ高価なレーザーが必要となる。また気流が光学的に厚いと蛍光が発光に埋もれて測定できず比較的低乖離度の気流にしか適用できないなどの制約がある。

半導体レーザー吸収分光法はこれらの分光法にくらべ2つの大きな利点がある。光学的に厚い流れでも測定できること、また吸収率から数密度が求まるため絶対感度を必要とせず測定精度が高いということである。Table 1 はこれら3つの分光法の特徴を示している。

酸素原子数密度は耐熱材の加熱率、表面触媒性の研究において非常に重要なパラメータであることが認識され始めてきた。それゆえ本研究では酸素原子をターゲットとして吸収

分光測定を行った。吸収波長を中心としてレーザー波長を掃引することにより吸収プロファイルが得られる。このプロファイルの広がりから並進温度が求まり、積分吸収係数から数密度が求まる。本実験で対象とした吸収ラインの Grotrian 図を Fig.1 に示す。

Table 1 Comparison of three spectroscopes

	Absorption	Emission	LIF
Alignment	Easy	Difficult	Very difficult
Absolute calibration	No need	Absolute light source	Reference cell
Optically thick plasmas	Possible	Impossible	Impossible
Spatial resolution	Poor	Very good	Very good
Sensitivity	Low	High	High
Portability	Easy	Possible	Impossible

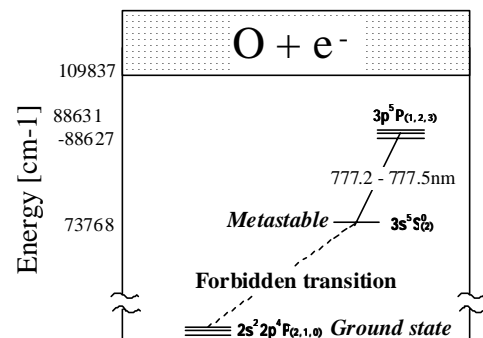


Fig.1 Grotrian diagram of Oxygen

2. 測定原理

本研究では一様流中における酸素原子の準安定準位からの吸収遷移である 777.19nm($3s^5S_2 \rightarrow 3p^5P_3$)をターゲットとして測定を行った。

2.1 吸収係数

レーザー強度 I_ν と物質を通る吸収係数 k_ν は Beer-Lambert の式により次のように関係づけられる。

$$\frac{dI_\nu}{dx} = -k_\nu I_\nu \quad (1)$$

本研究では測定対象としたプラズマが軸対象であるため、吸収係数を補正する必要がある。

(1)式を積分したのちアーベル変換すると [4]

$$k_\nu(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{d \left(\ln \frac{I_\nu(y)}{I_{\nu 0}} \right)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (2)$$

となり、吸収率から半径方向の吸収係数が得られる。

局所的な吸収係数は吸収係数および誘導放出係数の和であるから、積分吸収係数と数密度は次の式で関係づけられる [5][6]。

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} k_\nu d\nu = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{g_j}{g_i} A_{ji} n_i \quad (3)$$

ここで、 g は統計重率、 λ は吸収波長、 A_{ji} はアインシュタイン係数、 n_i は吸収準位の数密度を表す。今回対象とした 777.19nm ラインの遷移データを Table 2 に示す。

Table 2 Transition data of atomic oxygen

i	j	$\lambda(\text{nm})$	$E_i(\text{cm}^{-1})$	$E_j(\text{cm}^{-1})$	g_i	g_j	$A_{ji}(10^8\text{s}^{-1})$
3s ⁵ S ₂	3p ⁵ P ₃	777.19	73768.20	86631.45	5	7	0.369

2.2 吸収プロファイル

一般に吸収プロファイルはさまざまな物理機構により広がりをもつ。この広がりにはガウス型、ローレンツ型の2つのタイプがあり、実際のプロファイルはこれら2つのコンボリューションであるフォークト型の広がりを示す。

2.2.1 ドップラー広がり

ドップラー広がりには粒子の熱運動に起因する統計的な広がりでありガウス型を示す。

$$\Delta\nu_D = \frac{\sqrt{8R \ln 2}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4)$$

ここで、 R は気体定数、 M は原子量を示す。これにより気流の並進温度 T が求まる。

2.2.2 その他の広がり

自然広がりには電子の遷移が有限の時間を持つことに起因し、次の式で表される。

$$\Delta\nu = \frac{A}{2\pi} \quad (5)$$

圧力広がりには中性粒子の衝突により起こる広がりであり次の式で表される。

$$\Delta\nu_L = 1.95 \times 10^{13} p \sigma_L^2 \sqrt{\frac{2R}{\pi T} \left(\frac{1}{M_1} - \frac{1}{M_2} \right)} \quad (6)$$

ここで、 p は雰囲気ガス圧力、 σ は有効衝突断面積、 M_1 、 M_2 はプローブ原子量、雰囲気ガス原子量を表す。

シュタルク広がりには周辺電子により生成される電場により縮退が解けることに起因する広がりであり次の式で表される。

$$\Delta\lambda_s = 2 \left[1 + 1.75 \times 10^{-4} n_e^{1/4} \alpha \left(1 - 0.068 n_e^{1/6} T_e^{-1/2} \right) \right] n_e w \cdot 10^{-16} \quad (7)$$

ここで、 w は電子衝突パラメータ、 α はイオン広がりパラメータ、 n_e は電子密度、 T_e は電子温度を表す。

これら3つの広がりはいずれもローレンツ型の広がりであり、ドップラー広がりには比べ3桁程度小さい。従って本実験では広がりにはドップラー広がりだけに起因すると仮定する。

3. 実験装置

3.1 光学系

Fig.2 に光学系の概略図を示す。半導体レーザーには外部共振器がついており 20Hz で波長を変調する。変調されたレーザーはビームスプリッターによりアーク透過光、参照光、エタロン光に分けられる。アーク透過光は光ファイバにより真空チャンバ窓まで導かれ、コリメートレンズにより平行光にして真空チャンバ内に導入する。この光はアーク気流を透過したのち非軸ミラーにより集光し光ファイバを通じて検出器に導入される。参照光は直接検出器に、エタロン光は波長計であるエタロン (FSR=1GHz) を通じたのちオシロスコープで検出される。なおビームスプリッターの反射光が共振器に戻ってくるのを防ぐためアイソレーターを用いている。

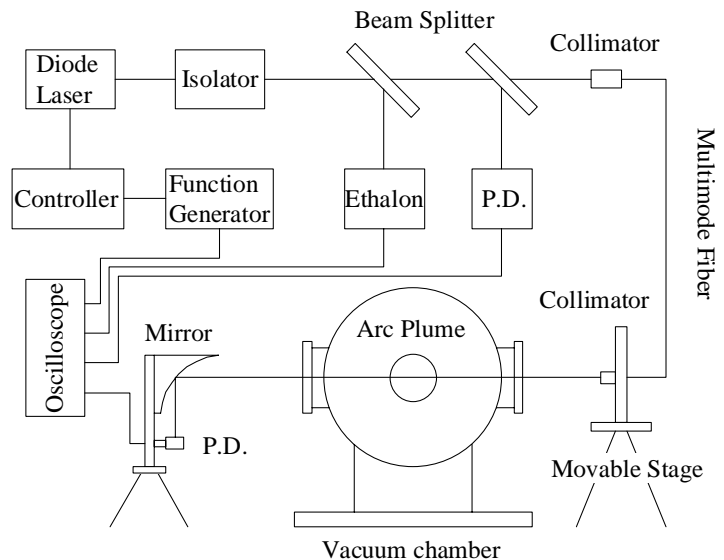


Fig.2 Schematic of measurement system

3.2 アーク風洞

本実験では超高温材料研究センター(JUTEM)のアーク加熱風洞を用いて測定を行った。この装置の断面図を Fig.3 に示す。この風洞はコンストリクタ型であり、酸素はカソードが酸化するのを防ぐためにコンストリクタ部で混入される。ノズル出口の設計マッハ数は3である。作動時の写真を Fig.4 に示す。

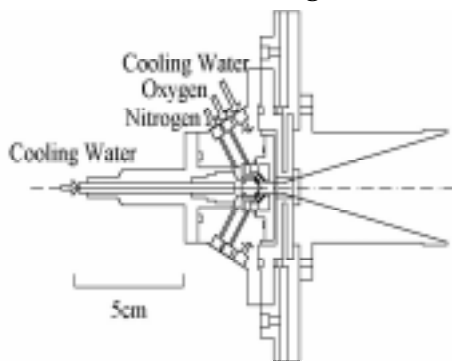


Fig.3 JUTEM Arc-Heater



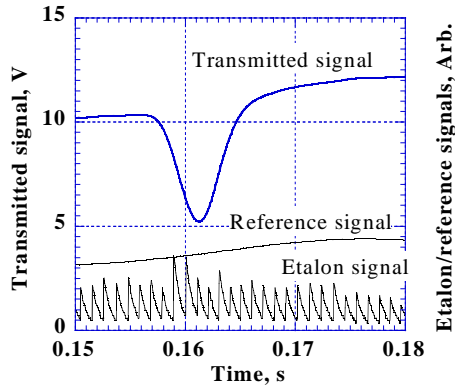
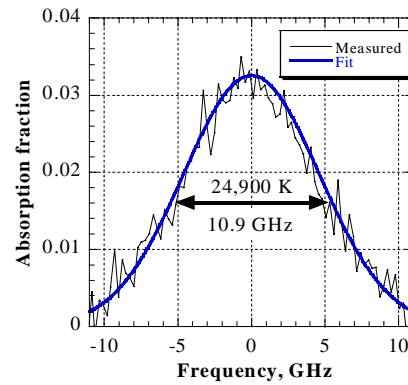
Fig.4 Nitrogen-oxygen plume

3.3 試験条件

本実験での測定条件を Table 3 に示す。当初、一様流での測定を試みたが吸収プロファイルがでなかったため、気流中に SiC 耐熱材を置き高温の衝撃波層内で測定を行った。作動ガスは窒素:20[slm]、酸素:5[slm]であり、投入電力は 21.6[kW]、熱流速、圧力から推定される中心軸上の比エンタルピーは 19.3[MJ/kg]である。

Table 3 Experimental conditions

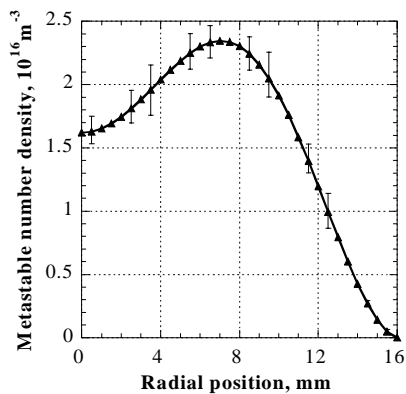
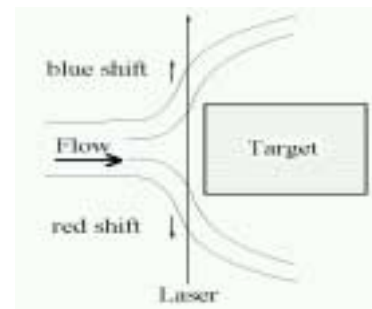
Gas flow	Specific enthalpy	Position
N ₂ : 20[slm]	19.3 [MJ/kg]	In the shock layer
O ₂ : 5 [slm]	(On the centerline)	

**Fig.5** Typical signal**Fig.6** Normalized absorption profile

典型的な吸収信号、および規格化した吸収プロファイルを Fig.5、6 に示す。

4. 実験結果および考察

得られた数密度分布を Fig.7 に示す。この分布は 2 つの点で予想と異なっていた。つまり 1) 酸素原子数密度($\sim 10^{16} \text{m}^{-3}$)が完全乖離を仮定した場合($\sim 10^{18} \text{m}^{-3}$)に比べ小さいこと、2) 分布のピークが中心軸からずれていることである。このことから酸素原子は中心軸上では少なく外側の低温部に多く存在し、従って乖離度が低いと考えられる。またプロファイルの広がりから並進温度は約 25000K となりマッハ数が 3 であることを考慮すると一様流中での並進温度は 10000K を超え非現実的である。これは次のような原因によるものだと考えられる。つまり、耐熱材表面での気流は Fig.8 で示されるように流れレーザーと同方向に速度成分を持つ。これがドップラーシフトを引き起こし広がりが見かけ上大きくなり温度が正確に見積もれないのである。

**Fig.7** Radial distribution of number density in nitrogen-oxygen shock flow**Fig.8** Doppler shift in front of the model

5. まとめ

1. 半導体レーザー吸収分光法により **777.19nm** ラインの吸収プロファイルから準安定準位の酸素原子数密度を求めた。
2. 窒素・酸素流中(比エンタルピー**19.3MJ/kg**)に設置された **TPS** 耐熱材表面に形成される衝撃波層内における酸素原子数密度分布を求めた。この値は理論的に求められた値よりも小さく、分布はピークが中心軸からずれていることがわかった。
3. またこの衝撃波層内ではドップラーシフトにより温度を正確に求めることができないことがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、宇宙開発事業団、**JUTEM** の方々に多大なご協力をいただいたことをここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Tahara, H. Taniguchi, T, Onoe, K, Yoshikawa, T .: DC Arcjet Plasma characteristics using ammonia and mixture of nitrogen and hydrogen, AIAA paper 99-3736, July, 1999.
- [2] Winter, M. W. and Auweter-Kurtz, M.: Boundary layer investigation in front of a blunt body in a subsonic air plasma flow by emission spectroscopic means, AIAA paper 98-2460, June, 1998.
- [3] Feigl, M., Dennis, J. E., Fasoulas, S. and Auweter-Kurtz, M.: Comparison of LIF and solid electrolyte sensor measurements of atomic and molecular oxygen in a plasma jet, AIAA paper 2000-0198, January 2000.
- [4] Deutch, M., Abel inversion with a simple analytic representation for experimental data, *Appl. Phys. Lett.*, Vol 42, pp 237-239, 1983
- [5] Zel'dovich, Y. B., Raizer, Y. P., Hayes, W. D. And Probstain, R. F.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*, Academic Press New York (1966), pp. 107-172.
- [6] Lochte-Holtgreven W.: *Plasma Diagnostics*, Norty-Holland Publishing Company, Amsterdam (1968), pp. 9-65.