

# レーザー吸収分光法における吸収飽和の 並進温度測定への影響

東京大学大学院 松井 信 小川悟史  
東京大学工学部 小紫公也 荒川義博

## Absorption Saturation in Laser Absorption Diagnostics

Makoto MATSUI, Satoshi OGAWA\*, Kimiya KOMURASAKI  
and Yoshihiro ARAKAWA\*

Department of Advanced Energy, The University of Tokyo

\*Department of Aerospace and Astronautics, The University of Tokyo

### Abstract

Absorption saturation appears in laser absorption spectroscopy when laser intensity becomes so high that the laser disrupts a population of absorbing particles in plasma. In this study, influences of saturation on translational temperature and integrated absorption coefficient measurement were investigated. An argon discharge tube was used and ArI absorption lines at 840.82nm and 842.46nm are examined. As a result, a variation of integrated absorption coefficient caused by the saturation phenomenon is well agreed to a theoretical curve. As for the translational temperature, if the laser intensity is smaller than a saturation laser intensity by an order of magnitude, true translational temperature would be obtainable.

**Keyword:** Laser absorption, Absorption saturation, 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(Thermal Protection System)の開発には再突入環境を模擬するためにアークヒーターが用いられる。しかしながらアークヒーター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、温度を同定することは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。このような高エンタルピー気流の診断には非接触な発光分光法、レーザー誘起蛍光法(LIF)、吸収分光法などがよく使われるが<sup>1,2)</sup> 本研究室では光学的に厚いプラズマにも適用可能な吸収分光法を用いて測定を行っている<sup>3,4)</sup>。

これまでの研究においてアルゴン・酸素高エンタルピー気流中の並進温度分布が測定された<sup>5)</sup>。Fig.1 に東京大学で制作されたアークヒーターの断面図、Fig.2 に作動時

の写真及び測定面を示す．このヒーターから得られた酸素原子の吸収ライン（777.19nm）におけるドップラー広がりから得られた並進温度分布をFig.3 に，アルゴン原子の吸収ライン（840.82nm）から得られた分布をFig.4 に示す．また7化学種，7化学反応を考慮した熱・化学非平衡数値計算から得られた並進温度分布をFig.5 に示す．これら3手法により得られた中心軸上ノズル出口での並進温度はTable 1 にまとめられており，それぞれ1000K~2500K程度の違いが得られた．

しかしながら，並進緩和時間が $0.1\mu\text{s}$ 程度であるのに対して気流の移動時間（気流が光学系の幾何的解像度限界を移動する時間）はせいぜい $1\mu\text{s}$ であるため並進温度は化学種によらずただ一つしか存在しないはずである．それゆえ上記3つの手法により得られた並進温度の違いは実験手法になんらかの問題があると考えるのが妥当である．一般にレーザー吸収分光法には飽和現象という効果が付随する．これはレーザー強度が高く，吸収により吸収準位の数密度が励起準位の数密度と同程度のオーダーにまで減少すると，吸収率が下がり，吸収プロファイルの半値全幅を広げる効果を持つ．つまり飽和効果が強く現れると並進温度は実際の値よりも高く見積もられるのである．そこで本研究では高エンタルピーアークヒーター気流に比べ吸収準位の数密度が低く，飽和が比較的起こりやすいアルゴン・グロー放電管を対象としてレーザー強度と飽和効果の関係を明らかにし，飽和効果が測定結果へ与える影響を検証することを目的とする．

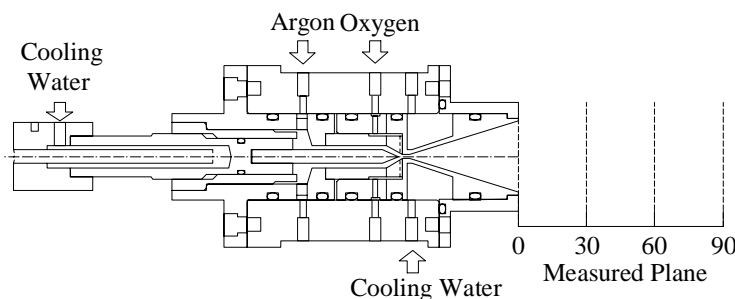


Fig.1 Arc-heater of the University of Tokyo.

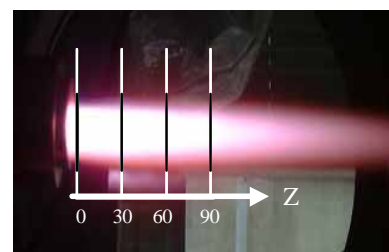


Fig.2 Argon-oxygen arc plume and measured planes.

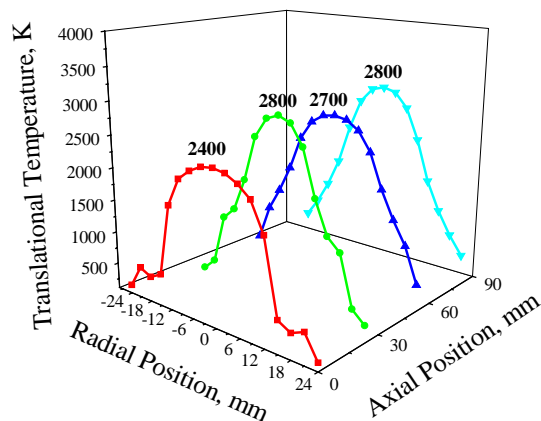


Fig.3 Translational temperature profile deduced from ArI absorption line.

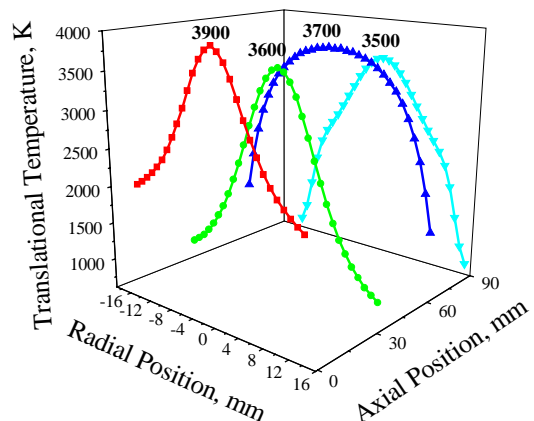


Fig.4 Translational temperature profile deduced from OI absorption line.

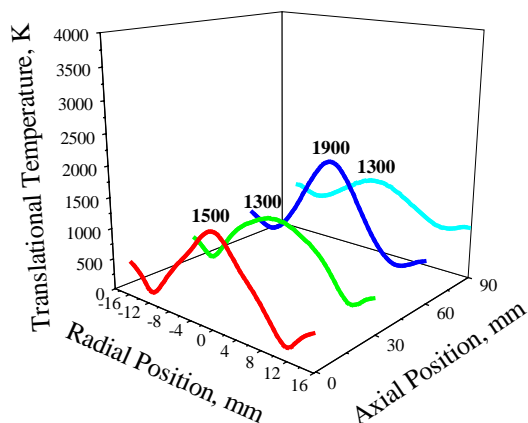


Fig.5 Computed translational temperature.

Table 1 Translational Temperature.

Method	Translational Temperature
OI (777.19nm)	3.900K
ArI (840.82nm)	2.400K
Computation	1,500K

## 2. 測定原理

### 2.1 レーザー吸収分光法

一般に吸収プロファイルの広がりには自然広がり，圧力（Van der Waals）広がり，シユタルク広がり，ドップラー広がりなど様々な広がりがあるが，本研究の実験条件下ではドップラー広がり以外の広がりより2桁以上大きいためドップラー広がりのみを考慮する<sup>4)</sup>。ドップラー広がりとは周辺粒子の熱運動に起因する不均一な統計的な広がりでありガウス分布を示す。

$$\Delta \nu_D = \frac{\sqrt{8R \ln 2}}{c} \sqrt{\frac{T}{M}} \nu_0 \quad (1)$$

ここで $\Delta \nu_D$ は吸収プロファイルの半値全幅， $R$ は気体定数， $c$ は光速， $M$ は原子量， $\nu_0$ は吸収中心振動数を示す。これにより並進温度 $T$ が求まる。また，吸収準位の数密度を示す積分吸収定数 $K$ は以下の式で関連付けられる。

$$K = \frac{\sqrt{\pi}}{2} k(\nu_0) \cdot \Delta \nu_D \quad (2)$$

ここで $k(\nu_0)$ は吸収中心での吸収係数である。 $\Delta \nu_D$ ， $K$ と吸収プロファイルの関係をFig.6に図示する。

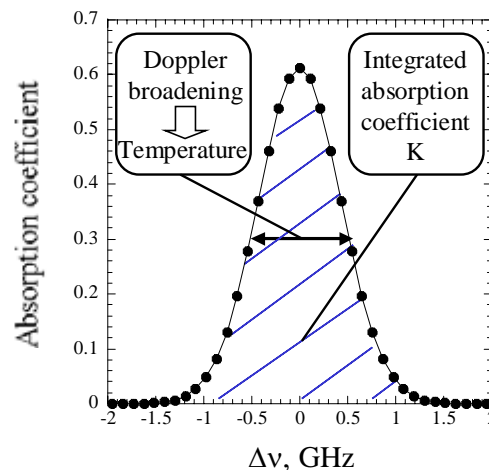


Fig.6  $\Delta \nu_D$  and  $K$  in an absorption profile.

### 2.1 飽和現象

一般にレーザー強度が高くなると吸収による吸収準位の数密度の減少が無視できなくなり，飽和現象と呼ばれる吸収率の低下が発生する。レーザー強度 $I$ と飽和により減少した積分吸収係数 $K$ の関係を次式に示す<sup>6)</sup>。

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_{sat}}}} K_0 \quad (3)$$

ここで $K_0$ は飽和が起こっていない状況下での積分吸収係数， $I_{sat}$ は飽和レーザー強度と呼ばれ次式で示すように圧力広がり $\Delta\nu_c$ と関連づけられる<sup>7)</sup>。

$$I_{sat} = \frac{g_2}{g_1 + g_2} \frac{\pi c \Delta\nu_c}{2} \frac{A_{21} + Q}{B_{12}} \quad (4)$$

ここで $g_1$ ， $g_2$ はそれぞれ吸収準位，励起準位の統計重率， $A_{21}$ ， $B_{12}$ はアインシュタインA，B係数，Qは衝突による失活(Quenching)を示す。

### 3. 実験装置

本研究ではアルゴン・グロー放電管を用いてアルゴン原子 840.82nm( $4s^2[1/2] 4p^2[3/2]$ )，842.46nm( $4s^2[3/2] 4p^2[5/2]$ )の吸収ラインを対象として測定を行った。放電管直径は 3cm，長さ 9cm，投入電力は 0.4W，圧力は 67Paである。Fig.7,8 に実験装置の概略図および写真を，Table 2 に遷移データを示す。

半導体レーザーにはリットマン型外部共振器(DMD845, EOSI 社製)がついており，線幅 300KHz のレーザーを周期 10Hz，幅 20GHz(=24pm)で変調する。変調されたレーザーはビームスプリッターによりプローブ光，参照光，エタロン光に分けられる。プローブ光は ND フィルター，放電管を通りフォトディテクタで検出される。この ND フィルタにより放電管に入射するレーザー強度を 3.5mW~0.008mW まで変化できる。参照光は直接，エタロン光は波長計であるエタロン (FSR=1GHz) を通じたのちフォトディテクタで検出される。なおビームスプリッターの反射光が共振器に戻り干渉するのを防ぐためアイソレーターを用いている。

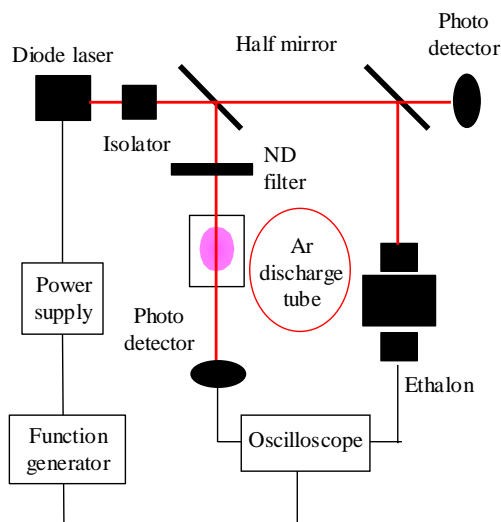


Fig.7 Schematic of measurement system.



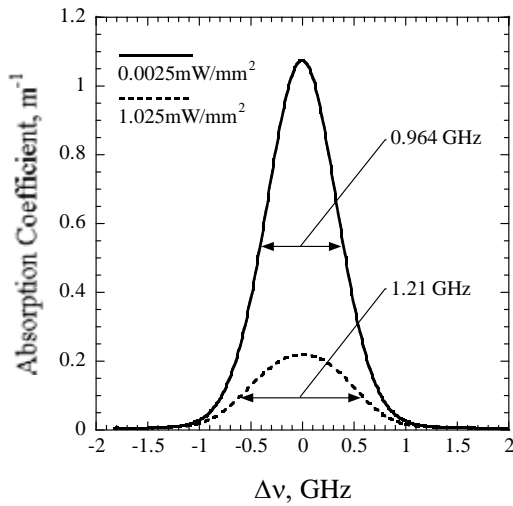
Fig.8 A picture of an optical system.

**Table 2.** Transition data of atomic oxygen.

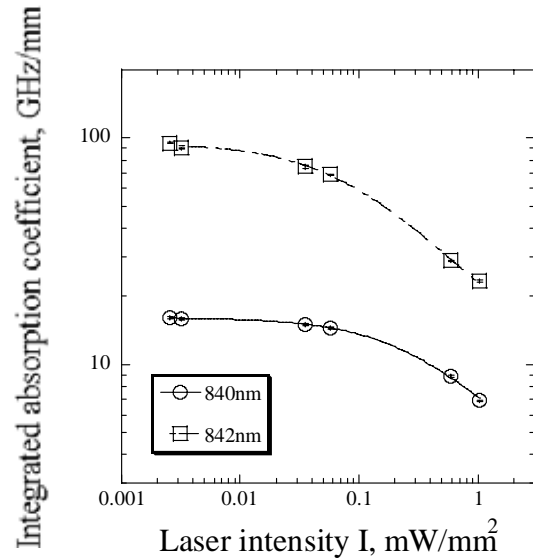
$\lambda$ (nm)	1	2	$E_1$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_2$ (cm <sup>-1</sup> )	$g_1$	$g_2$	$A_{21}(10^7\text{s}^{-1})$
840.82	4s <sup>2</sup> [1/2]	4p <sup>2</sup> [3/2]	95399.83	107289.70	3	5	2.23
842.46	4s <sup>2</sup> [3/2]	4p <sup>2</sup> [5/2]	93750.60	105617.27	3	5	2.15

#### 4. 実験結果および考察

Figure 9 に異なる 2 つのレーザー強度での吸収プロファイル(842.46nmライン)を示す．この図は典型的な飽和現象を示しており，高いレーザー強度でのプロファイルは低いものに比べて吸収率つまり吸収係数が小さく，半値全幅つまり並進温度が大きくなっている．Figure 10 に実験で得られた積分吸収係数のレーザー強度依存性及び，式 (3)を用いて $K_0$ ， $I_{\text{sat}}$ をパラメータとしたフィッティング曲線を示す．得られた $K_0$ ， $I_{\text{sat}}$ をTable 3 に示す．この $K_0$ ， $I_{\text{sat}}$ により規格化した積分吸収係数( $K/K_0$ )とレーザー強度の関係( $I/I_{\text{sat}}$ )をFig.11 に示す．これよりレーザー強度が飽和レーザー強度より一桁小さい，つまり $I/I_{\text{sat}}$ が 0.1 以下の場合， $K$ の減少率は 5%以下に押さえられる．同様に並進温度と規格化したレーザー強度 $I/I_{\text{sat}}$ の関係をFig.12 に示す．これより $I/I_{\text{sat}}$ が 1 より大きくなると並進温度は急激に上昇し，0.1 より小さいと上昇率は 1%以下に押さえられることができる．



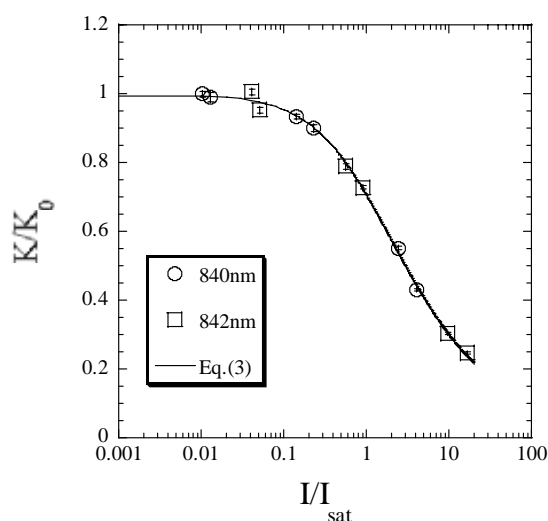
**Fig.9** Typical saturation phenomenon at 842.46 nm absorption line.



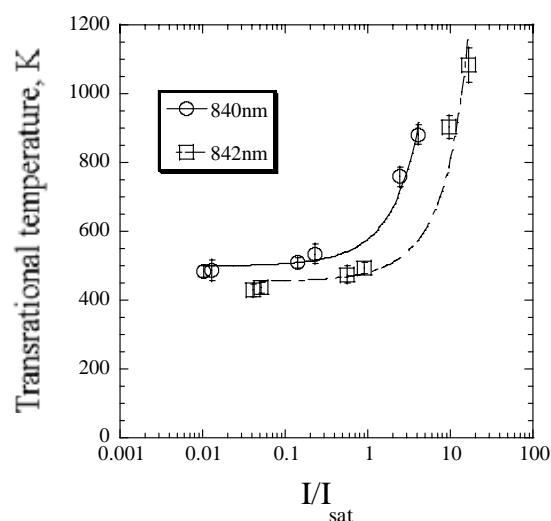
**Fig.10** Integrated absorption coefficient.

**Table 3**  $I_{\text{sat}}$  and  $K_0$  in Experiment.

	840.82 nm line	842.46 nm line
$K_0$ (GHz/m)	$16.1 \pm 0.08$	$94.7 \pm 1.37$
$I_{\text{sat}}$ (mW/m <sup>2</sup> )	$29.9 \pm 0.26$	$7.58 \pm 0.042$



**Fig.11** Normalized integrated absorption coefficient and theoretical curve fitting.



**Fig.12** Relationship between the translational and the laser intensity.

## 5. まとめ

- 1) グロー放電管を対象としたレーザー吸収分光法計測において  $0.1\text{mW}/\text{mm}^2$  程度以上のレーザー強度では飽和現象が発生することを確認した。
- 2) 測定された積分吸収係数  $K$  のレーザー強度依存性は理論曲線によく一致した。
- 3) レーザー強度  $I$  が飽和レーザー強度  $I_{\text{sat}}$  より一桁以上低い場合、真の並進温度、積分吸収係数が得られることがわかった。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) Storm, P. V. and Cappelli, M. A.: Laser-induced fluorescence measurements within an arcjet thruster nozzle, AIAA paper 95-2381, July 1995.
- 3) 松井信・小紫公也・荒川義博:「レーザー吸収分光法による高温プラズマ気流診断」, プラズマ応用科学, Vol.9, pp17-22 (2001)
- 4) Matsui, M., Komurasaki, K., and Arakawa, Y.: Laser Diagnostics of Atomic Oxygen in Arc-Heater Plumes, 40<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2001-0793 (2001)
- 5) Matsui, M., Komurasaki, M., and Arakawa, Y.: Characterization of Arcjet Type Arc-Heater Plumes, 33<sup>th</sup> AIAA Plasma dynamics and Laser Conference, AIAA Paper 2002-2242 (2002)
- 6) Bear, D. S., and Hanson, R. K.: Semiconductor laser-based measurements of quench rates in an atmospheric pressure plasma by using saturated-fluorescence spectroscopy, Appl. Opt. Vol.32, No.6 p948-p955, (1993)
- 7) Yariv, A.: *Quantum Electronics*, Wiley, New York, 1975
- 8) Davis, C.: *Lasers and Electro-Optics*, Cambridge, University press, 1996