

プラズマ風洞計測における半導体レーザー吸収分光法の高感度化

野村哲史, 小紫公也 (東京大学), 高柳大樹, 藤田和央 (JAXA), 荒川義博 (東京大学)

Sensitivity Enhancement of Diode Laser Absorption Spectroscopy for Plasma Wind Tunnel Diagnosis

by

Satoshi Nomura, Kimiya Komurasaki, Hiroki Takayanagi, Kazuhisa Fujita and Yoshihiro Arakawa

ABSTRACT

The laser absorption spectroscopy (LAS) has been applied to the high enthalpy flow at the plasma wind tunnel. However for the measurement of the arc heated air plasma it is necessary to enhance the sensitivity of LAS due to its low absorbance ($\sim 10^{-4}$). Cavity enhanced absorption spectroscopy (CEAS) has been developed as a highly sensitive LAS method. First the CEAS is applied at a microwave discharge tube to measure the argon in the mixture gas of argon and oxygen. As a result the minimum detectable absorbance is reduced to 2.8×10^{-4} . Then the CEAS is applied at a 750kW Arc heated wind tunnel at JAXA. As a result in the shock layer the absorption of atomic oxygen is observed and the absorbance is estimated at 5.3×10^{-4} .

1. はじめに

宇宙往還機の帰還や惑星探査機の惑星大気圏突入の際、機体前方には強い衝撃波が形成され、対流加熱、輻射加熱、表面触媒性再結合反応などの複雑なメカニズムによって、機体は厳しい加熱環境に晒される。機体の熱防護材の開発等のために、加熱環境を地上で模擬する設備がプラズマ風洞である。プラズマ風洞の気流は熱的、化学的に非平衡であることが知られており、現在のところ数値計算により気流状態を正しく把握することは容易ではない。そこで、気流中と衝撃波層内のさまざまなパラメータを計測する必要がある。熱化学的に非平衡な気流を記述するためには、並進温度、回転温度、振動温度、流速、解離度など多くの変数が必要となるが、そのなかでも並進温度は特に重要な物理量であり、その計測手法の確立が重要な課題となっている。

プラズマ風洞気流計測技術の中でも、高精度な並進温度計測が期待できる非接触な計測法としてレーザー吸収分光法(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)がある。これまで、ICP風洞の気流計測や¹⁾³⁾、アーク加熱風洞の電極内部の空気プラズマ計測に適用され⁴⁾、その有用性が示されている。しかし、アーク風洞における空気気流中では、いまだどの原子の吸収も測定されておらず、並進温度計測に成功していない。それは、窒素分子の解離に多くの入力エネルギーが消費され、その解離温度以上に温度が上がらず、吸収対象である励起準位の数密度が小さく吸収量が微小であるためである。そこで、そのような微小吸収量の測定を可能にする高感度吸収分光法の適用が必要になる。

レーザー吸収分光法の高感度化には、大きく分けて、波長掃引に二次変調を加えロックインアンプで信号ノイズ比を高める、周波数変調分光法(Frequency Modulation Spectroscopy, FMS)や波長変調分光法

(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)と、高反射ミラーを用いて光学的共振器を構築することにより光路長を増幅する、キャビティエンハンスド(Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy, CEAS)法やキャビティリングダウン(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)法の二つがある⁵⁾⁶⁾。CRDS、CEASの開発の歴史や他分野での応用、それらから派生した様々な計測技術等については、文献7)に詳しい。ここでは、それらの中でも、簡易なシステムでありながら、風洞計測において、より高感度な計測が可能になると期待できる、CEASの風洞計測への適用に関して述べる。まず、安定なプラズマを長時間維持することが可能であるマイクロ波放電管に対して、CEASを適用し、計測技術の向上を試み、またその測定感度を推定した。次に宇宙航空研究開発機構(JAXA)の750kW級アーク加熱風洞に対して適用した。

2. レーザー吸収分光法の高感度化の原理

従来のLASにおいて、計測対象である媒質透過前後のレーザー強度 I_0 , I , と吸収係数 α , 媒質中のレーザー光路長 L の関係は、Beer-Lambertの法則の示すように、 α の分布が均一であると仮定すると、以下の式によって表される。

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha L \quad (1)$$

計測感度は、透過光強度変化、 $\Delta I_{\min}=I_0-I$ の検知限界によって決まる。感度が悪化する原因としては、プラズマからの自発光やレーザー強度の揺らぎなどによるノイズが挙げられ、通常 $\Delta I_{\min}/I_0=0.01$ 程度である。

図1に示すように2枚のミラーによって共振器を作り、媒質を通過する光路長を長くすることにより吸収信号を大きくなる。ミラーの反射率が R であるとき、光路長はおよそ $1/(1-R)$ 倍に増幅され、それに伴って感度が向上する。

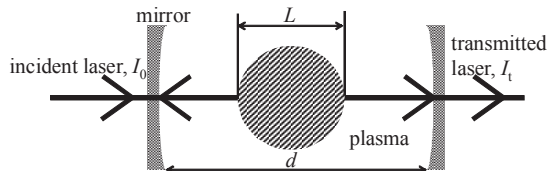


図1 光学的共振器の概略図

共振にはレーザーと共振器との空間的な位置関係によって、縦モードと横モードが存在する。自発光の強いプラズマ風洞に適用するために、比較的高い透過レーザー強度を得られるという利点を活かして、縦モードのみを利用することを考える。レーザー周波数を掃引した場合、ある周波数間隔で共振が起こり、透過レーザー強度は楕状の信号となる。レーザー透過率はエアリー関数として知られる次式で表される。

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{2\pi\nu d}{c}\right)} \quad (2)$$

ここで d は共振器長である。図2に式(2)により計算される透過強度プロファイルを示す。

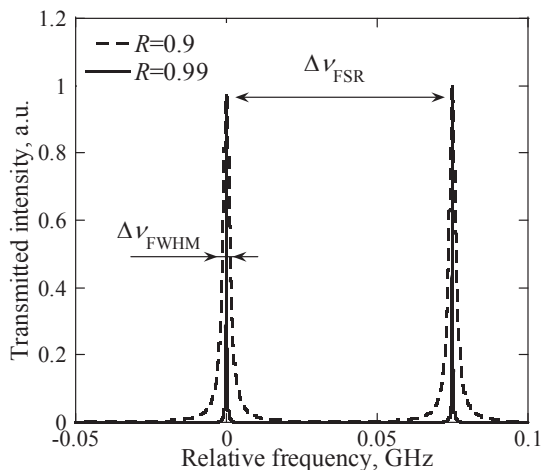


図2 透過強度プロファイル($d=2$ m, $R=0.9, 0.99$.)

共振は $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ (Free Spectral Range, FSR) 毎に起こり、その包絡線が吸収プロファイルを表す。次式に示すように d が長いほど $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ は狭くなるので、必要十分な波長分解能で吸収プロファイルを取得することができる。

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{2d} \quad (3)$$

また線幅 $\Delta\nu_{\text{FWHM}}$ は次式で表され、 R 、 d が大きいほど狭

線幅の信号が得られる。

$$\Delta\nu_{\text{FWHM}} = \frac{c(1-R)}{2d\pi\sqrt{R}} \quad (4)$$

高反射ミラーを大型風洞チャンバーの外に置く場合、 d は2 m程度となり、 $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ はおよそ75 MHz、 $\Delta\nu_{\text{FWHM}}$ は数十kHz程度となる。レーザーの周波数掃引速度が数十GHz/s程度であれば、立ち上がり時間が数百nsのパルス波形を計測することになるので、そのピーク値を捉えることができるよう、十分に応答性の高い計測系を用意する必要がある。

CEASではLASと同様にレーザー周波数を掃引し、共振器からの透過光強度変化から吸収プロファイルを取得する。媒質がない場合の透過強度とある場合の透過強度の比、 I_t^0/I_t と吸収係数の関係は以下の式によって表される。

$$\frac{I_t^0}{I_t} = \frac{1 - (R \exp(-\alpha(\nu)L))^2}{(1-R^2) \exp(-\alpha(\nu)L)} \quad (5)$$

ここで、透過強度比から吸収係数を求めるためには、 R を正しく求める必要がある。リングダウン信号から R を求める方法と、吸収係数がわかっているプラズマを計測することで較正を行う方法があるが、本研究では、リングダウン信号から求める方法を用いた。

3. 高感度吸収分光法の測定系

図3に測定系の概略図を示す。外部共振器付半導体レーザー(New Focus Inc. Velocity 6300)を光源に用いた。マイクロ波放電管測定ではアルゴンの772.42 nmにおける遷移、風洞測定では酸素の777.19 nmにおける遷移を対象としている。レーザー線幅は300 kHz程度である。ビームスプリッターによって三経路に分けられた光は、ひとつは波長計としてのFSRが0.75 GHzのエタロンに導かれ、ひとつは参照セルを計測するために用いられる。参照セルでは、測定対象と同じ原子を生成し、計測前に予めレーザー周波数を測定対象の吸収周波数に合わせておくことで計測を円滑に行うことができる。これは、長時間の作動が難しい大型プラズマ風洞での計測に際して重要である。リングダウン信号計測では、レーザーが共振器へ入射されないようリングダウン時間よりも短い時間で遮断する必要がある。ここでは、遮蔽機構としAOM (Acousto-optic modulator, ISOMET, 1205C-2)を用いた。ミラー間にあるチャンバー窓でのレーザー強度損失を最小限に抑えるため、チャンバー窓はブリュスター角で取り付けられている。そのため、ファイバーの曲げを調節することで偏光制御を行っている。光学的共振器は曲率半径1.5 mの高反射ミラー(Layertec)を用いて構築している。表1にマイクロ波放電管、アーク加熱風洞それぞれにおける測定条件を示す。反射率はリングダウン信号計測により求めたが、アーク加熱風洞測定において反射率が低いのは、図4に示されるように、計測環境下

の機械的振動が影響を与え、縦モードのみで調節した共振器からも高次の横モードが励起されているからであると考えられる。この影響を回避するため、データ解析において、縦モードのみを抽出し、100回の掃引プロファイルを平均した。

表2にマイクロ波放電管およびアーク加熱風洞の作動条件を示す。マイクロ波放電管においては、アルゴンと酸素の混合気体を作動ガスとし、酸素の流量を調節することで、任意の微小吸収量のプラズマを生成し、アーク加熱風洞における計測環境にむけた計測法の向上を試みた。

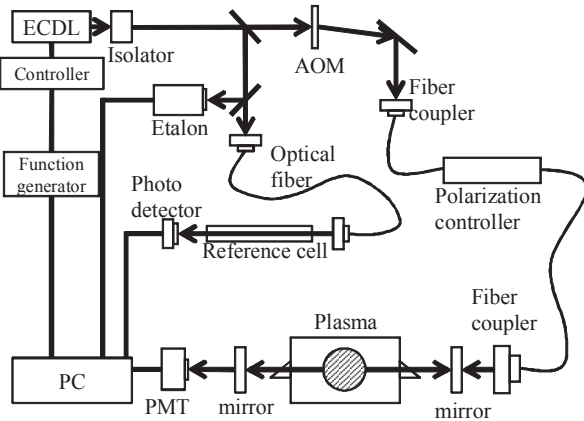


図3 高感度吸収分光法の光学系概念図

表1 マイクロ波放電管、アーク加熱風洞における計測条件

	マイクロ波放電管 測定	アーク加熱風洞 測定
共振器幅	1.1 m	1.98 m
反射率	0.9972	0.9935
掃引幅	15 GHz	36 GHz
測定対象	Ar (772.42 nm)	O I (777.19 nm)

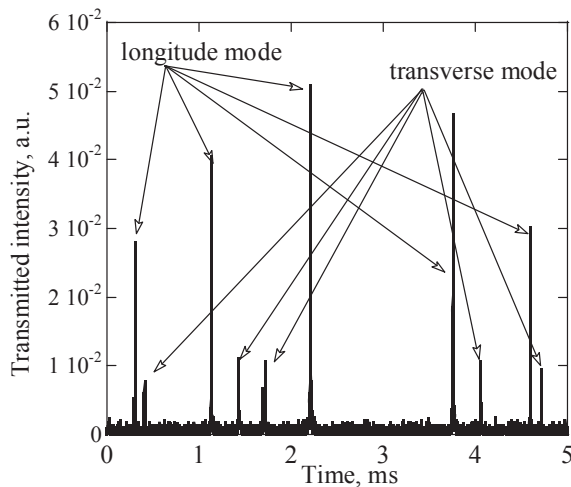


図4 機械的振動環境化での透過強度プロファイル

表2 マイクロ波放電管およびアーク加熱風洞の作動条件

	マイクロ波放電管	アーク加熱風洞
投入電力	0.5 kW	530 kW(700A)
作動ガス	Ar:0.077g/s, O ₂ :0.023g/s	Air:10 g/s
比エンタルピー	5 MJ/kg	21.8 MJ/kg

4. 結果

図5にマイクロ波放電管測定において一回の周波数掃引で取得されたアルゴン原子吸収プロファイルを示す。参照信号としてアルゴングロー放電管におけるLAS測定結果を添えている。透過レーザー強度（ピーク値）にばらつきがみられるが、数回の掃引を行ってピーク値を平均することで、図6に示すような吸収プロファイルを得ることができる。吸収がない領域の透過強度のばらつきから測定限界を求めると、 $\alpha L = 2.8 \times 10^{-4}$ と見積もられる。

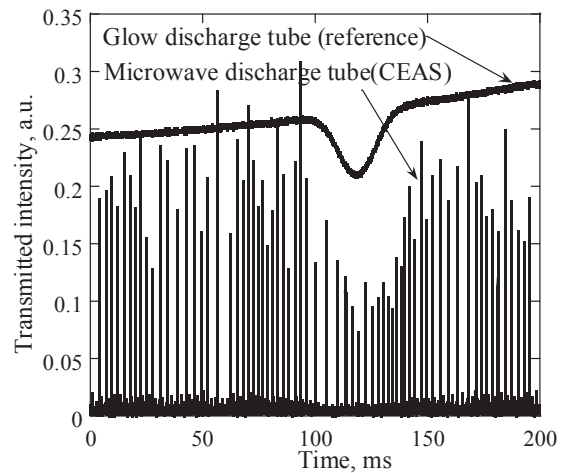


図5 CEASにより取得された吸収プロファイル

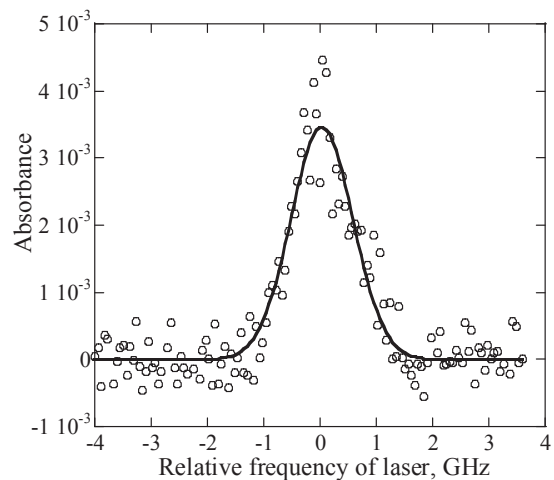


図6 平均化された吸収プロファイル(10回の周波数掃引の平均)

以上のようにして開発したCEASをアーク加熱風洞に適用した結果を図7に示す。自由流中では吸収を確認できなかったが、供試体プローブにより生成された衝撃層内において酸素の吸収を確認した。得られたデータをガウ

ス関数で近似した結果、吸収中心において $\alpha L=5.3 \times 10^{-4}$ と求められた。自由流中での吸収を確認できなかったのは、反射率が十分に高くなかったためと考えられる。反射率の低下の原因としては、ミラー間にあるチャンバー窓の影響とアーク加熱風洞においては計測環境下の機械的振動の影響が挙げられる。ミラーをチャンバー内にマウントすることにより、チャンバー窓での反射率低下を防ぐことはできるが、プラズマ気流によるミラーへのコンタミネーションを防ぐことが新たな課題となる。

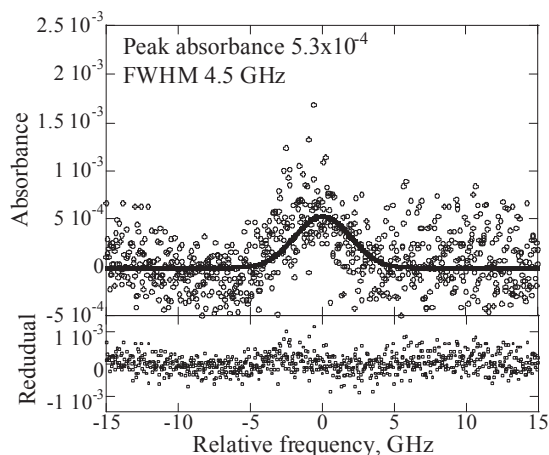


図7 アーク加熱風洞における衝撃層内の酸素吸収プロファイル

5. まとめ

高感度レーザー吸収分光法として、CEASをマイクロ波放電管および750kW級アーク加熱風洞の計測に適用した。その結果、マイクロ波放電管においては、アルゴンの吸収を計測し、 $\alpha L_{\min}=2.8 \times 10^{-4}$ と見積もられた。また、アーク加熱風洞計測においては、衝撃層内にて酸素の吸収を $\alpha L=5.3 \times 10^{-4}$ と確認した。

また、共振器を用いた吸収分光法においても、レーザー強度が高いと吸収飽和⁸⁾が起こることが報告されている^{9),10)}。プラズマ風洞気流のように10~100Paのプラズマでは、吸収飽和強度が低く一般的な半導体レーザー強度で容易に吸収飽和が起こるので、正確な温度計測のために、吸収飽和強度を把握することが重要である。CEASにおける吸収飽和強度決定法に関しては、研究はいまだ十分でないので、さらなる研究が必要な課題である。

参考文献

- 1) Matsui, M., Komurasaki, K., Herdrich, G. and Auweter-Kurtz, M.: Enthalpy Measurement in Inductively Heated Plasma Generator Flow by Laser Absorption Spectroscopy, *AIAA J.*, **43** (2005), pp.2060-2064.
- 2) Matsui, M., Komurasaki, K., Arakawa, Y., Knapp, A., Herdrich, G. and Auweter-Kurtz, M.: Enthalpy Measurement of Inductively Heated Air Flow, *Journal of*

Spacecraft and Rocket, **45** (2008), pp. 155-157.

3) 松井 信, 小紫公也, Georg Herdrich, Monika Auweter-Kurtz: レーザー吸収分光法を用いた誘導過熱風洞気流診断, *日本航空宇宙学会論文集*, **53** (2005), pp. 379-384.

4) Kim, S.: Development of Tunable Diode Laser Absorption Sensors for a Large-Scale Arc-Heated Plasma Wind Tunnel, Doctoral Thesis (2004), Stanford University.

5) Friedrichs, G.: Sensitive absorption methods for quantitative gas phase kinetic measurements. Part 2: Cavity ringdown spectroscopy, *Zeitschrift fuer Physikalische Chemie*, **222** (2008), pp.31-61.

6) Friedrichs, G.: Sensitive absorption methods for quantitative gas phase kinetic measurements. Part 1: Frequency modulation spectroscopy, *Zeitschrift fuer Physikalische Chemie*, **222** (2008), pp.1-30.

7) Mazurenka, M., Orr-Ewing, A., Peverall, R., and Ritchie, G.: 4 Cavity ring-down and cavity enhanced spectroscopy using diode lasers, *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, **101** (2005), pp.100-142.

8) Matsui, M., Ogawa, S., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Influence of Laser Intensity on Absorption Line Broadening in Laser Absorption Spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, **100** (2006), pp.063102.

9) Romanini, D., Dupre, P. and Jost, R.: Non-linear effects by continuous wave cavity ringdown spectroscopy in jet-cooled NO₂, **19** (1999), *Vibrational Spectroscopy*, pp.93-106.

10) Bucher, C.R., Lehmann K.K. and Fraser G.T.: Doppler-free nonlinear absorption in ethylene by use of continuous-wave cavity ringdown spectroscopy, *Applied Optics*, **39** (2000), pp.3154-3165.