

科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書

平成25年 4月20日現在

機関番号: 1380 研究種目:若手研究 研究期間:2010~201 課題番号:22686079	1 (A) 12
研究課題名(和文)	高温気流中の絶対原子数密度測定法の開発および内部非平衡状態の解明
研究課題名(英文)	Number density measurement in high temperature flows and clarification of their non-equilibrium internal states
研究代表者	
松井 信(MATSU	I MAKOTO)
静岡大学・工学部	•助教
研究者番号:90547	7100

## 研究成果の概要(和文):

本研究では誘導加熱プラズマ(ICP)を光源に用いた真空紫外吸収分光システムを開発 し、まず励起準位に対するレーザー吸収分光法による温度測定と組み合わせること、及び 二重管を用いて光源内吸収を制御することで原子数密度測定の精度を一桁以上、測定可能 領域を従来の二桁から五桁まで向上させることに成功した.また ICP により基底準位を励 起させ、準安定準位より数密度の高い反転分布の生成に成功し二段吸収分光の実現可能性 を示した.

## 研究成果の概要(英文):

In this study, vacuum ultraviolet absorption spectroscopy system was developed using inductively coupled plasma as a VUV light source. The accuracy of the number density measurement was enhanced more than one order of magnitude combined with the temperature measurement by laser absorption spectroscopy and the measurable range was expanded to five orders of magnitude using a dual tube ICP source. Finally, the population inversion was realized by pumping the ground state by the ICP light, which shows feasibility of the two stage absorption spectroscopy.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	10, 500, 000	3, 150, 000	13, 650, 000
2011 年度	6, 800, 000	2,040,000	8, 840, 000
2012 年度	2, 700, 000	810,000	3, 510, 000
年度			
年度			
総計	20,000,000	6,000,000	26,000,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:総合工学・航空宇宙工学 キーワード:航空宇宙流体力学,高温気体力学,プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

高エンタルピー風洞気流中における絶対 原子数密度測定は米国NASAAmes研究所が 90年代より二光子吸収レーザー誘起蛍光法 (TALIF)を用いて試みられており、近年欧 州やJAXAでも同手法による気流診断を開始 している.TALIFでは二光子吸収断面積の不 確かさを回避するため,エネルギー準位の近 い希ガス(Xe, Kr)を感度較正に用いている が較正の困難さ,数値計算による予測との大 きなずれが報告されている.

他分野における原子数密度測定へのアプ ローチとして,近年名古屋大の堀らがホロカ ソードを用いた基底準位からの真空紫外吸 収分光 (VUV AS)を TALIF に変わるものと して提案している.これは従来のブロードバ ンド光源と分光器を用いた吸光測定とは異 なり,ホロカソードにより測定ガスを用いた プラズマを生成し,共鳴ラインの発光をプロ ーブ光として利用するものである.しかしな がらレーザー分光のような波長掃引による 吸収プロファイルは得られず,波長平均吸収 率のみが得られるため,プローブ光と吸収ラ インのプロファイルの違いが大きな誤差を 生じさせる問題をはらんでいる.

- 2. 研究の目的
- (1) 従来の VUVAS にレーザー吸収分光法 (LAS)による温度測定を組み合わせる ことでプロファイル形状を正確に評価 し、測定精度の向上及び測定可能範囲に ついて検証する.
- (2) 基底状態に誘導加熱プラズマ(ICP)で 生成した共鳴ラインの光を吸収させ,励 起準位に対して LAS を行う二段吸収分 光の実現可能性を実験的に検証する.
- 3. 研究の方法
- 実験に前もって、プロファイル形状が数 密度測定に与える影響を理論的に評価 する.
- (2) 次に, ICP 温度の真空紫外光の光源として ICP により測定対象と同じ原子を用いたプラズマを生成し,共鳴ライン(147 nm)に相当するプローブ光を生成する. プローブ光のプロファイル形状は ICP の温度と内部吸収により決まるが,図1 に示す半導体レーザー吸収分光法を用いて ICP 内の温度分布を測定することでプロファイル形状を決定する.このプローブ光を用いて図2に示す VUVAS システムを開発し,数密度が既知である常温キセノンガスに対して適用することで測定精度を検証する.





図2. ICP 光源を用いた VUVAS システム

- (3) 上記実験により判明した ICP 内の内部 吸収を図中の二重管により制御するこ とで測定領域の拡大を試みる.
- (4) 以上による検証実験の後、マイクロ波を 用いた ECP プラズマ中の酸素原子に対 して適用し、解離原子にも本システムが 適用できることを実証する.
- (5) 最後に吸収飽和の影響を評価するため に図3に示す ICP にオリフィスを組み 込んだ装置を作成した.オリフィスより 上流(図中右側)は高真空に保たれてお り,光の強度はオリフィスからの距離の 二乗に比例する.従って軸方向に励起準 位からの数密度を LAS により取得する ことで飽和強度を逆算することが可能 となる.



- 4. 研究成果
- (1) 透過強度  $I_{\ell}I_0$ と数密度(吸収長を含め以下 Kl で表記) はプロファイル形状に依存することがわかっている. そこでプロファイル形状を決定する温度をパラメータ  $T_{targel}/T_{probe}$ として  $I_{\ell}I_0$ と Kl の関係(特性曲線) および $\Delta I_{\ell}I_0$ =0.01 に対する Kl の誤差を図4に示す. ここで  $T_{probe}$ として ICP 温度の代表的な値である 800 Kを用いたが,他の値でも同様の傾向が得られた. 図が示すように温度比によらずオーダー以下の精度を持った測定領域は  $10^8 < Kl < 10^{10}$  であるが,特性曲線は温度比に依存することがわかった. 実際にはある一定温度を持つ光源に対し,温度

分布を持つ対象を測定することが多い. そこでより詳細な $I_t/I_0$ の温度依存性およ び $\Delta T_{target}=5$ %の $I_t/I_0$ 誤差への影響を図5 に示す. $I_t/I_0$ は温度比とともに増加する ことがわかる.ただし,その勾配は緩や かであり,LAS等による温度測定誤差と 同程度の精度で数密度測定を行うこと ができる.



図4.温度比の数密度(Kl)と透過率の 関係への影響と測定誤差



(2) 図6に光源内吸収(Kl<sub>tube</sub>)を考慮しない 曲線(式(4))及び Kl<sub>tube</sub>を変数として フィッティングさせた曲線(式(6))を 示す.測定値は式(4)とは大きくかけ離れ ており、式(6)とよく一致している.また 得られた吸収長 27.9 mmは ICP 生成位置 と窓の関係から妥当な値である.また ICP と窓との間の温度分布の影響を調べ るために T<sub>tube</sub>を 500 K と 300 K の二層か らなるとしてフィッティングした結果, 300 K の吸収長は変わらず,500 K の吸 収長は 0.1 mm 程度となった.従って ICP 上流領域での温度は一様に近い常温と みなすことができる。

以上の結果から光源内吸収を考慮し

たプローブ光プロファイル形状を同定 することができたため、本装置を任意の 温度を持つキセノンプラズマの数密度 測定に適用することが可能となる.



図6.実験結果及び放電管内吸収を考慮しな い場合(式(4))と考慮した場合(式(6)) のフィッティング曲線

前項の結果より,放電管内吸収を制御す (3) ることで測定領域を可変にすることが できると考えられる.実際図2に示す二 重管を用いて内管と外管に流すガス流 量を制御することで内部吸収量を変化 させ測定を行なったところ図7の結果 が得られた.従来の吸収分光測定では二 桁程度の数密度領域しか測定ができな かったが、本方式により5桁以上の数密 度領域が可能となることがわかった.実 際に実証したのは5桁であるが、本手法 では原理的に高密度領域には限界がな く,内部吸収量を上げることで測定が可 能となる.一方で低密度領域にはプロー ブ光の反射を利用した高感度化が必要 となる.





(4) 常温の希ガスでの検証実験の後,実際に マイクロ波 ECR プラズマで生成した酸 素原子気流の数密度測定を行なった.その結果を図8に示す.酸素原子数密度は マイクロ波入力電力とともに増加する ことがわかった.これは入力電力ととも に解離度が増加するためであり,この傾向は発光分光法によるアクチノメトリ 一法の結果と一致した.



図8.マイクロ波 ECR プラズマ中の酸素原子 数密度測定例

(5) オリフィス上流における二準位の数密 度分布を図9に示す.準安定準位の信号 取得からプラズマが生成されているこ とが分かる.またオリフィス部での噴出 し,及び5mmの位置を中心として生成 されている.ここで共鳴準位の数密度が, エネルギー準位のより低い準安定準位 よりも大きいこと,及び距離の増加に伴 う共鳴準位の数密度減少の結果から,共 鳴線吸収による共鳴準位からの吸収信 号強度の増幅を示唆している.

> 上記測定の結果, 共鳴準位の増幅分か ら共鳴線のビーム強度を求めることが できる. ビーム強度と吸収係数の関係を 図10に示す. 測定した数密度からビー ム強度を推算すると、ビーム強度は1 mm の位置において 0.6 mW/mm<sup>2</sup> である ことが分かった.また共鳴線吸収による 減衰と共鳴準位数密度の傾向が同様で ある. しかしオリフィス上流 1 mm で 90%以上,共鳴線が減衰することから実 用化に向け、測定対象へファイバを用い てプローブ光を導入する場合, 共鳴線の 利用効率の向上が課題として考えられ る.また吸収飽和を満たす強度を得るた め、オリフィス部にレンズを設置し集光 することでエネルギー密度の向上,及び プローブ光プロファイルの中心波長の 強度を著しく低下させる原因となって いる自己吸収を低減させるため, キセノ

ン分圧の低下が課題となっている.



図9.オリフィス上流における共鳴準位,準 安定準位の数密度分布及び温度分布



図10. 共鳴線のビーム強度と吸収係数の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

 Kuwahara, A., <u>Matsui, M.</u>, and Yamagiwa, Y., "Development of vacuum ultraviolet absorption spectroscopy system for wide measurement range of number density using a dual-tube inductively coupled plasma light source," Review of Scientific Instruments, Vol.83, 2012, 123105(查読有).

http://dx.doi.org/10.1063/1.4770118

② <u>Matsui, M.</u>, Tanaka, K., Nomura, S., Komurasaki, K., Yamagiwa, Y., and Arakawa, Y., "Generation and Diagnostics of Atmospheric Pressure CO<sub>2</sub> Plasma by Laser Driven Plasma Wind Tunnel," Journal of Applied Physics, 112, 2012, 033301(査読 有).

http://dx.doi.org/10.1063/1.4739259 〔学会発表〕(計 46 件)

- <u>Matsui, M.</u>, Yoneda, S., Nomura, S., Yamagiwa, Y., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., "Generation and Characterization of High Enthalpy CO2 Flow by Laser Driven Plasma Wind Tunnel," 51<sup>st</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference, Dallas, Jan. 1<sup>st</sup> 2013.
- (2) <u>Matsui, M.</u>, Kuwahara, A., and Yamagiwa, Y., "Combined VUV Absorption and Laser Absorption Spectroscopy for Atomic Oxygen Detection," 28<sup>th</sup> AIAA Aerodynamic Measurement Technology, Ground Testing, and Flight Testing Conference, New Orleans, June 25<sup>th</sup> 2012.

[その他]

ホームページ等

http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tmmatui/i ndex.htm

6. 研究組織

- (1)研究代表者 静岡大学・工学部・助教
  - 松井 信(MATSUI MAKOTO) 研究者番号: 90547100
- (2)研究分担者 なし
- (3)連携研究者 なし