

## 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：13801

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686079

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（MATSUI MAKOTO）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：90547100

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 NASA Ames 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



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  $\Delta T_{\text{target}}=5\%$  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。

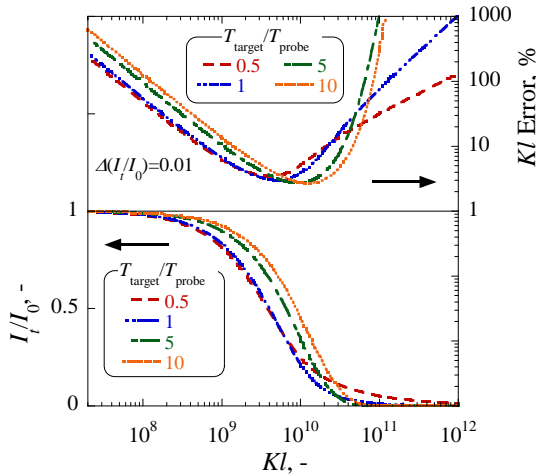


図4. 温度比の数密度 ( $KI$ ) と透過率の関係への影響と測定誤差

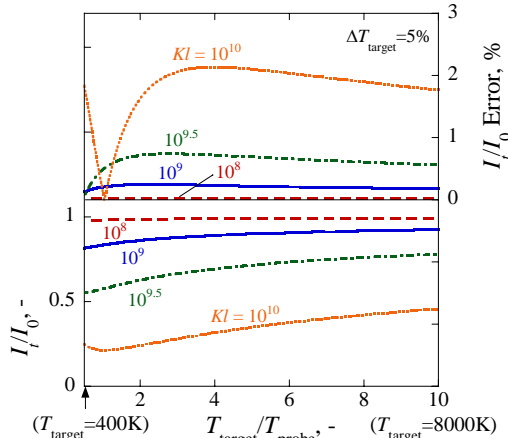


図5. 温度比の透過率と誤差への影響

- (2) 図6に光源内吸収 ( $KI_{\text{tube}}$ ) を考慮しない曲線 (式 (4)) 及び  $KI_{\text{tube}}$  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  $T_{\text{tube}}$  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樣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。

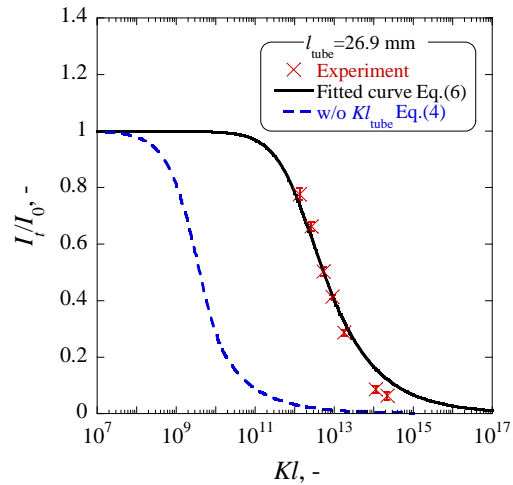


図6. 実験結果及び放電管内吸収を考慮しない場合 (式 (4)) と考慮した場合 (式 (6)) のフィッティング曲線

- (3) 前項の結果より、放電管内吸収を制御す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。

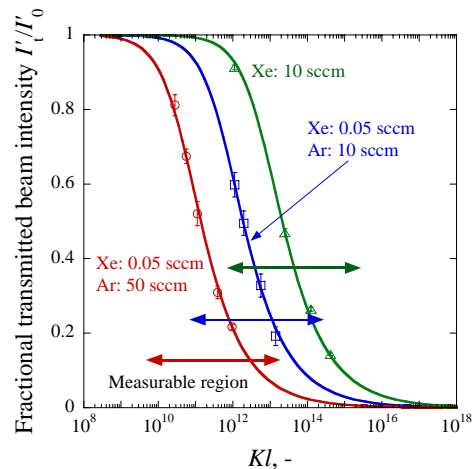


図7. 二重管を用いた放電管内吸収の制御による測定領域の拡大

- (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。

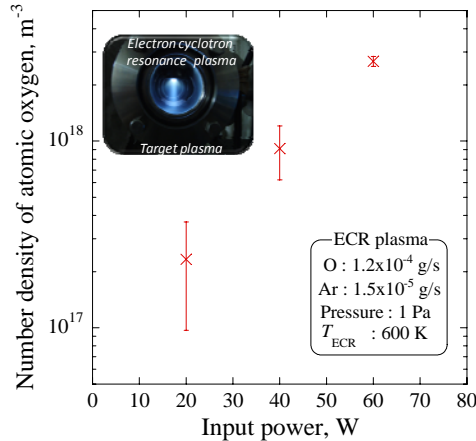


図 8. マイクロ波 ECR プラズマ中の酸素原子数密度測定例

- (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 5 mm 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  $0.6 \text{ mW/mm}^2$  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。

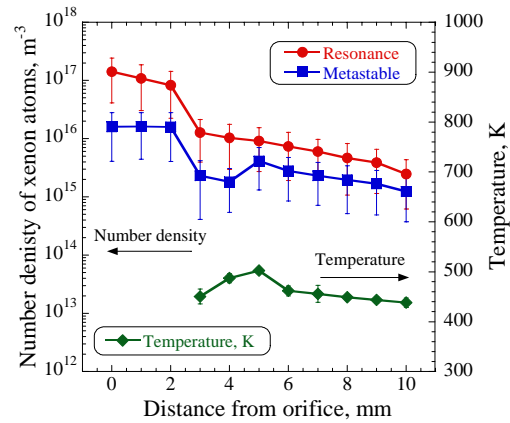


図 9. オリフィス上流における共鳴準位、準安定準位の数密度分布及び温度分布

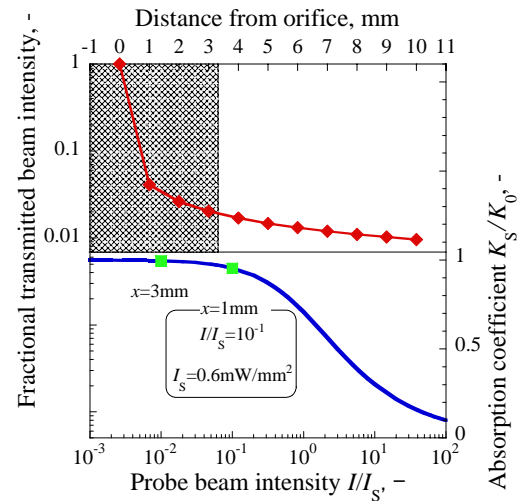


図 10. 共鳴線のビーム強度と吸収係数の関係

##### 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)

- ① Kuwahara, A., Matsui, M., 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(査読有).  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4770118>
- ② Matsui, M., 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)

- ① Matsui, M., Yoneda, S., Nomura, S., Yamagiwa, Y., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., “Generation and Characterization of High Enthalpy CO<sub>2</sub> Flow by Laser Driven Plasma Wind Tunnel,” 51<sup>st</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference, Dallas, Jan. 1<sup>st</sup> 2013.
- ② Matsui, M., 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/index.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