

真空紫外共鳴散乱法による原子状酸素密度測定の精度向上に関する研究（2）

栗原 純一¹, 林 克郎², 金 秀榮³, 渡部 重十¹, 山本 真行⁴, 岩上 直幹⁵

1. 北海道大学 大学院理学研究院
2. 東京工業大学 応用セラミックス研究所
3. 東京工業大学 大学院総合理工学研究科
4. 高知工科大学 工学部
5. 東京大学 理学部

1. はじめに

原子状酸素（または酸素原子）は高度 200-700 km の地球超高層大気における主成分であり、この高度領域を飛翔する地球低軌道衛星（LEO）や宇宙ステーションに対する大気ドラッグの主役である。原子状酸素の密度は太陽活動に伴う時間的変動が大きいことが知られており、多様な時間スケールをもつ原子状酸素の密度変動を正確に捉えるためには、高精度・高時間分解能かつ長期間にわたって安定的に観測を行う必要がある。その目的において、真空紫外光を用いた共鳴散乱法は原子状酸素密度の観測に有効と考えられる。

一方、地上の実験室では原子状酸素を連続的に発生させる簡便な方法がないことが、共鳴散乱法で定量的な測定や較正を行う上で問題となっていた。これに対して、東工大の林克郎准教授のグループが新たに開発したセラミックスを用いた原子状酸素放出源 [Ojima *et al.*, 2012] は、連続的に原子状酸素のみを発生できるという点で大きなメリットがある。さらに、測定誤差の源となる真空紫外光や原子状酸素以外の気体種が発生しないことも重要である。本研究では、この放出源を用いて原子状酸素を発生させ、真空紫外共鳴散乱法を用いても従来と比較して高い精度で較正が行えることを検証し、宇宙空間における原子状酸素密度測定の精度を大幅に向上させることを目的とする。

昨年度は年度途中からの採択のため、ジルコニアセラミックスを用いた原子状酸素放出源によって原子状酸素の発生量が調整可能であることを確認し、発生させた原子状酸素からの真空紫外共鳴散乱光を検出するに留まった。今年度は測定精度向上のために検出器への迷光を防ぐ改良を行った。

2. 実験方法と装置

本研究では、高温に加熱したジルコニアセラミックスから原子状酸素が放出される現象を利用し、宇宙空間に相当する高真空の真空容器内で原子状酸素を発生させる。真空容器内の原子状酸素の密度を、真空紫外光源であるフローランプから発生させる酸素原子共鳴線を用いた共鳴散乱法によって測定する（図1）。

実験装置の詳細については昨年度の本研究課題の報告を参照されたい。

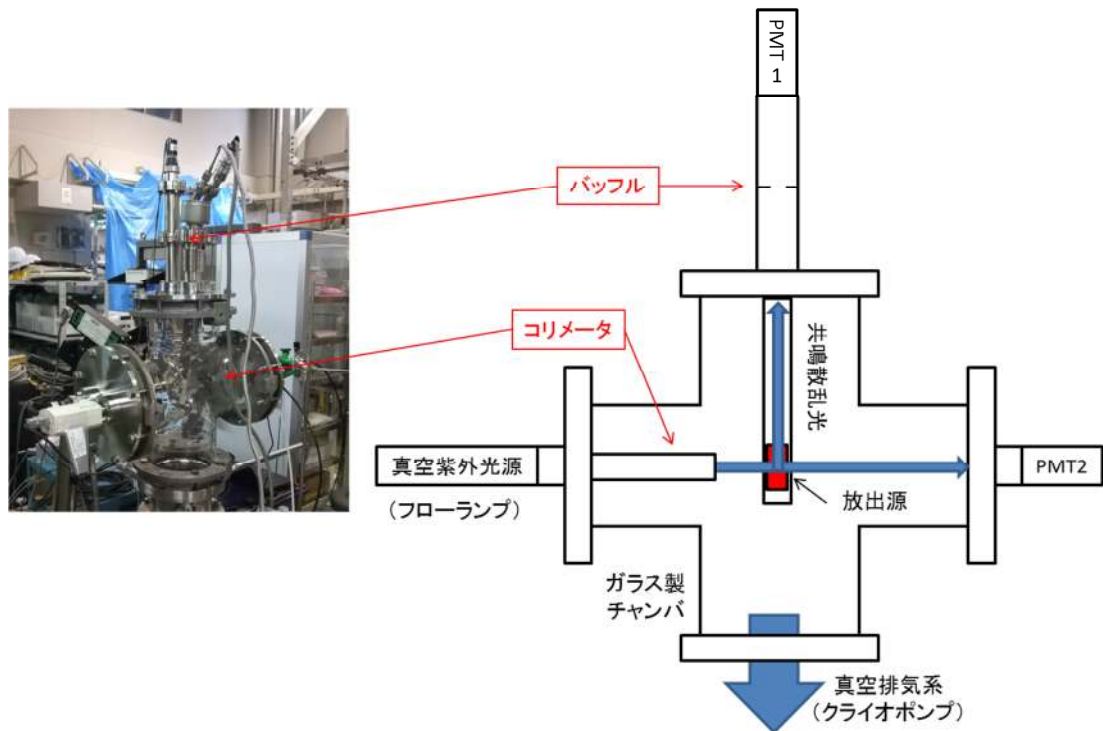


図 1. 実験に用いたガラス製チャンバ（左）および実験装置の模式図（右）

今年度は、昨年度の実験で課題となった真空紫外光の散乱による迷光を防ぐために、光源側にコリメータを、検出器側にはバッフルを取り付けた。コリメータは直径 18 mm 長さ 200 mm のアルミ製パイプで、先端は原子状酸素放出源から約 100 mm の距離にある。バッフルは ICF70 のニップル（長さ 126 mm）を 2 段に重ね、ニップルの間には光電子増倍管のフォトカソードの直径と同じ直径 10 mm の穴が開いた金属板を挟んでいる。最初にコリメータのみで実験を行った後、バッフルを追加してそれぞれの効果を確認した。

3. 実験結果

図 2 にコリメータのみを追加した場合の、放出源へ供給する酸素ガスの圧力に対する、光電子増倍管 (PMT1) によって検出された共鳴散乱光の強度変化を示す。放出源への供給圧力を 0-10 kPa に変化させた場合に、検出される共鳴散乱光強度がそれに対してほぼ線形に増加していることがわかる。また、各圧力における共鳴散乱光強度測定値の標準偏差をエラーバーとして付している。コリメータの効果により、昨年度の実験と比較して共鳴散乱光強度自体は約 1/4 に減少している。ここで迷光の影響の相対的な割合を、放出源圧力が 10 kPa の時の共鳴散乱光強度に対する、0 kPa の時の共鳴散乱光強度の割合と定義する（迷光が無い場合は 0 %）。図 2 から計算される迷光の影響度は 78 %で、昨年度のコリメータが無い場合の 76 %に対してほぼ変化が無い。このことから、コリメータの効果は共鳴散乱が起こる領域を絞るだけで、迷光対策には直接的な効果が無いと言える。

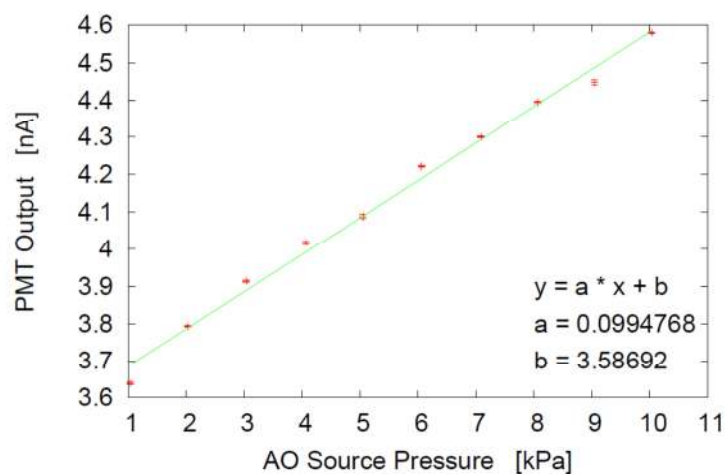


図2. 放出源供給圧力と共鳴散乱光強度の関係（コリメータのみ）

図3にさらにバップルを追加した場合の、放出源へ供給する酸素ガスの圧力に対する、光電子増倍管によって検出された共鳴散乱光の強度変化を示す。バップルを追加したことによって迷光の影響度は12%まで下がった。一方で、供給酸素ガス圧力に対する、測定された共鳴散乱光強度の線形性からのずれが見出された。昨年度の実験で供給酸素ガス圧力と容器内圧力には高い線形性があることが示されており、原子状酸素放出量は再現性が高い。したがって、真空紫外光源（フローランプ）の放射光強度が不安定であることが要因としてあげられる。フローランプに流す酸素・ヘリウム混合ガスは、別の保存容器で混合した後に流している。昨年度までは、保存容器内の圧力減少に伴って混合ガスの流量が変化するために、放射光強度が大きく変動する可能性を疑っていた。しかし、今年度の実験で同時にモニターしているPMT2の測定強度がPMT1よりも常に安定していることが判明した。酸素とヘリウムガス混合気体の高周波放電では原子状酸素の共鳴散乱光の輝線を含む広い波長域にわたって真空紫外光が放射されるため、確かにPMT2の測定強度は混合ガスの流量を表しているが、その流量は安定していると考えられる。また、昨年度は迷光の変動が影響していると考えたが、今回の線形性からのずれは迷光の影響と同程度で、迷光が数倍も変動するとは考えにくい。残る可能性として、混合ガスの混合比が時間的に変動することにより、フローランプからの共鳴散乱光の強度が変動すると考えられる。

今後、測定精度を向上させるにあたって、2つの改良案が考えられる。一つはPMT2の位置に分光器を置き、放射光に含まれる共鳴散乱光輝線のみ強度を測定するという方法。もう一つは、混合比を制御できるタイプのマスフローコントローラによって、フローランプの酸素・ヘリウムガス混合比を一定に保つことである。

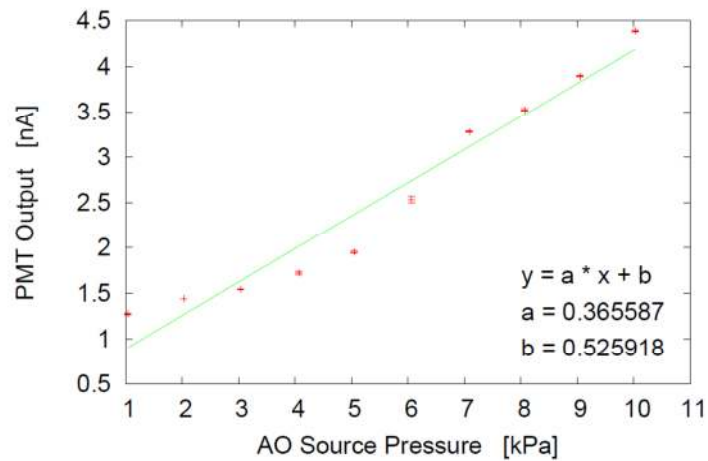


図3. 放出源供給圧力と共鳴散乱光強度の関係（コリメータにバッフルを追加）

4. まとめ

本年度は、昨年度の課題であった迷光対策を施し、その効果を評価した。また、真空紫外光源の放射光強度が不安定になる原因を特定し、さらなる精度向上のための改良案を考察した。

参考文献

Daiki Ojima, Tetsuya Chiba, Kazunari Shima, Hidenori Hiramatsu, Hideo Hosono, and Katsuro Hayashi, Solid-state source of atomic oxygen for low-temperature oxidation processes: Application to pulsed laser deposition of TiO₂:N films, *Rev. Sci. Instrum.* 83, 023903 (2012); doi: 10.1063/1.3683571.