

## 原子状酸素照射装置開発を目的とした原子状酸素速度および流束の計測

○ 植賀将、Danish Noor、Arifur Khan、増井博一、岩田稔、豊田和弘、趙孟佑 (九州工業大学)

## Measure the velocity and flux of Atomic Oxygen for the development of AO facility

## Abstract

Atomic oxygen (AO) environment same as low earth orbit (LEO) is generated in chamber by dissociating molecular oxygen ( $O_2$ ) using pulsed  $CO_2$  of 5.5Joule energy. The energy of the generated AO is controlled by primary molecular oxygen injection pressure, pulse duration of AO injection through pulse valve and delay time between laser and pulse valve opening signal. The velocity and energy of generated AO is measured by analyzing time of flight (TOF) signal detected by quadrupole mass analysis system (QMS). The velocity of AO at 2.0MPa primary injection pressure, 550us opening pulse duration for pulse valve and having a delay of 450-650[ $\mu$ s] is about 10.0~15.0 [km/s]. We are still manifesting above mentioned parameters to get a similar environment of LEO having 8km/sec or 5eV AO. The generated AO flux is  $2.1 \times 10^{18}$ [atoms/ $m^2 \cdot s$ ] and it is enough to experiment erosion test at LEO environment 1 year.

Key Word : Atomic Oxygen , flux, LEO

## 1.序論

宇宙機は宇宙空間において過酷な環境に曝される。紫外線・真空・熱サイクル・原子状酸素などである。原子状酸素は地球大気に含まれる酸素分子が宇宙空間からの強烈な紫外線に曝されることにより、原子に解離したものである。原子状酸素は非常に活性であるうえに、宇宙機との相対速度 8km/s で宇宙機に衝突する。これは 5eV のエネルギーに相当する。宇宙環境における原子状酸素による宇宙機の劣化は深刻な問題である。特に、低軌道環境において原子状酸素は宇宙機表面材料の劣化の主要因であり、低軌道衛星の今後さらなる長寿命・高性能のためには原子状酸素対策が重要である。また材料劣化により二次電子放出係数や光電子放出係数などの衛星帯電に関する諸量も変わってくる可能性があり、複合劣化環境曝露後の諸係数のデータベースを作成する必要がある。本研究では、原子状酸素照射装置の開発および帯電に関する材料パラメタの複合劣化環境曝露後のデータベース構築を目的としている。

## 2.原子状酸素照射装置

## 2.1 原子状酸素の生成方法

本研究で開発する原子状酸素発生装置はレーザーデトネーション方式と呼ばれる。図1はその模式図であり、図2はレーザーデトネーション方式に基づいて構築した原子状酸素発生装置の写真である。原子状酸素を発生させるための真空チャンバーを AO チャンバーとしている。AO チャンバーの圧力はロータリーポンプとターボ分子ポンプにより  $5.0 \times 10^{-5}$ Pa 程度に保たれる。AO チャンバーへはパルスバルブにより酸素分子ガスが導入される。パルスバルブへの導入圧力は酸素ボンベにとりつけられたレギュレータにより調節し、最大 1MPa である。酸素ガスの導入はパルスバルブにより制御され、導入時間、導入するタイミングを変

えることができる。酸素ガスはパルスバルブによりパルス状にチャンバー内部へと導入される。ガスが導入された後に少しの遅れをともなって炭酸ガスレーザーがチャンバー内部へと導入される。1パルスの出力は 5.5J で最高 10Hz の照射が可能である。レーザーの焦点はガスの導入を制御するパルスバルブに合わせられる。チャンバーへと照射されたレーザーはチャンバー内部にとりつけられたノズルによって直径数 mm にまで集光され、先に導入されていた酸素分子ガスに衝突する。レーザーからエネルギーを付与された酸素ガスは解離し、紫外線の発生を伴って原子状酸素が発生する。また原子状酸素はレーザーからエネルギーを付与されたことで加速される。このときの原子状酸素の速度は、ガス噴射とレーザー照射との時間間隔を調節することにより変えることができる。

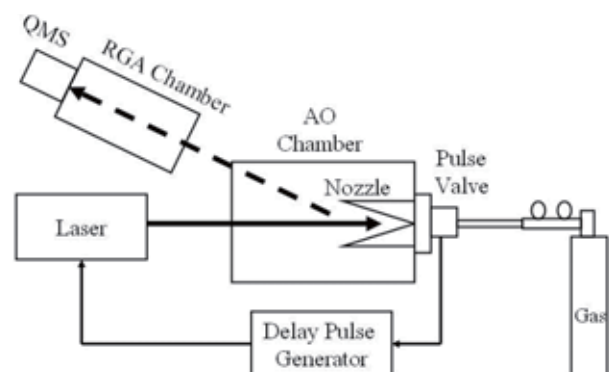


Fig.1 AO generation system by laser detonation

## 2.2 原子状酸素の検出・計測

レーザーデトネーション方式では原子状酸素を計測するために、QMS(Quadrupolar Mass Spectrometer: 四重極質量分析計)を用いた。QMS

は試料をイオン化するイオン源・四重極電極・検出部(二次電子増倍管)からなる。イオン源では、試料はイオン化される。四重極電極は四本の円柱の電極から構成されている。これら四本の電極に直流電圧と高周波電圧を重ねて印加すると、特定の質量電荷比を持つイオンのみが四重極電極内を通過できる。四重極電極を通過したイオンは検出部で検出され、オシロスコープで計測される。QMAはRGA(Residual Gas Analysis: 残留ガス分析)チャンパーに設置した。RGA チャンパー自体もターボ分子ポンプにより排気されており、圧力は $2.0 \times 10^{-7}$ Pa程度とAOチャンパーよりも低く保たれる。AOチャンパーとRGAチャンパーを接続した際に、2つのチャンパーの間に穴の直径が1mmのオリフィスを取りつけ圧力差を維持した。

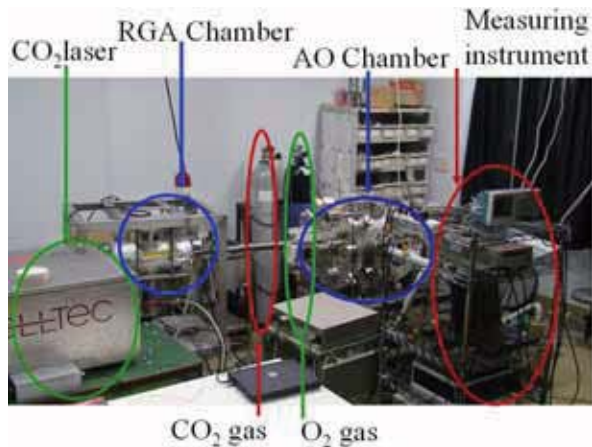


Fig.2 Whole figure of AO ge neration system by laser detonation

### 2.3 原子状酸素の生成方法

レーザーデトネーション方式の原子状酸素発生装置では、各機器の作動遅延時間・ガスの速度・レーザーの速度を考慮しなければならない。原子

状酸素の発生方法の手順としてまず最初にAOチャンパー内部へ酸素ガスを導入する。導入圧力はガスボンベに取り付けられたレギュレータにより調節する。酸素ガスの導入はパルスバルブにより制御されるが、 $200\mu\text{s}$ 程度の遅延が発生する。次に、導入されたガスへレーザーを照射する。レーザーは光速でガスへと照射されるが、レーザーへのトリガ信号とレーザー発射装置で約 $50\mu\text{s}$ の遅延が発生する。パルスバルブで $200\mu\text{s}$ 程度の遅延が発生する事と、レーザーの速度が非常に大きいことを考慮すると、レーザーはガスの導入よりも遅れて照射させる必要がある。レーザーを照射されたガスは付与されたエネルギーにより原子状酸素へと解離しチャンパー内部で拡散していく。RGAチャンパーへ移動した原子状酸素はQMSで検出され、オシロスコープで計測される。図3はその一連の流れを示したタイミングチャートである。[Pulse valve signal]はパルスバルブコントローラがパルスバルブに酸素ガスをAOチャンパーへ導入するように指示する信号を送った時間を示す。[O<sub>2</sub> Gas emission]は実際にパルスバルブから酸素ガスがAOチャンパーへと導入された時間を示す。[Laser emission signal]はレーザーの発射を指示するトリガ信号が送られた時間を示す。[Laser emission]は実際にレーザーが発射された時間を示す。[AO generation]は原子状酸素が発生した時間を示す。レーザーの速度は光速であるので、[Laser emission]と[AO generation]はほぼ同時とみなせる。

まず、酸素分子ガスをAOチャンパー内部に導入するために、[Pulse valve signal]が送られる。 $200\mu\text{s}$ の遅延を伴い酸素分子ガスがAOチャンパーへと導入される。[Pulse valve signal]よりも $600\mu\text{s}$ 遅れて[Laser emission signal]が送られ、 $50\mu\text{s}$ 遅れてレーザーが発射される。レーザーの発射と同時に原子状酸素が発生する。これらの遅延時間はDelay

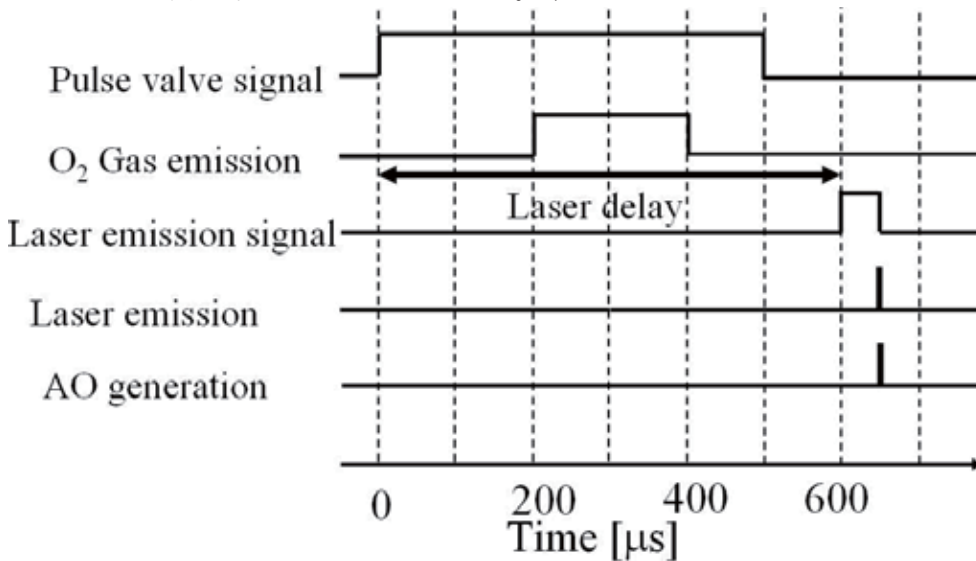


Fig.3 Time chart of AO generation

Pulse Generator により制御される。タイミングチャート図中の laser delay は、パルスバルブシグナルとレーザートリガの時間差を示す。

### 3 発生させた原子状酸素の計測と速度

図 4 はレーザーデトネーションにより発生した原子状酸素の QMS による計測結果である。150 $\mu$ s 付近から立ち上がり 200 $\mu$ s 付近で最大となっている信号は計測物質を原子状酸素に設定し QMS で検出された信号である。50 $\mu$ s 付近で立ち上がっている信号はレーザーシグナルである。このときのガス導入圧力は 2.0MPa、パルスバルブ開放時間は 550 $\mu$ s、レーザーディレイは 550 $\mu$ s である。QMS の値が最も大きい時の時間を T2、レーザーシグナルを T1 とすると、QMS の出力が最も大きい時の原子状酸素の速度は

$$V = \frac{1.90 \times 10^{-3}}{T_2 - T_1} [km/s] \quad (1)$$

と求めることができる。図 5 から求めた原子状酸素の速度は約 12.2km/s であった。本研究では宇宙空間の原子状酸素(8.0km/s)を模擬するため、発生させる原子状酸素の速度をさらに落とす必要がある。

図 6 は図 5 の原子状酸素の速度分布図である。最も粒子数が多い速度は 12km/s 付近であると分かる。また、速度は 10km/s~15km/s と幅広く分布している。宇宙機表面材料の評価のための原子状酸素装置としては、速度分布ができる限り狭いことが理想である。よって、速度分布の幅を狭くする必要はある。

#### 4.1 レーザーの遅延時間の変更による原子状酸素の速度調節

レーザーデトネーション方式では原子状酸素の速度を、レーザーのパルスバルブシグナルに対する遅延時間・酸素ガスの導入圧力と導入時間を調節することにより、任意に変えることができる事が知られている。宇宙機に使用される材料の評価を正しく行なうには、発生させる原子状酸素の速度は非常に大切な要素である。速度が異なれば、材料劣化の速度が異なるからである。よって、宇宙機に使用される材料の評価を正しく行なうには、速度を制御し宇宙での原子状酸素の速度 8km/s と同じにしなければならない。そこで、パルスバルブ開放時間・ガス導入圧力を固定し、レーザーの遅延時間だけを変えることで、原子状酸素の速度がどのように変わっていくかを調べた。図 6 はガス導入圧力は 2.0MPa、パルスバルブ開放時間は 550 $\mu$ s、レーザーの遅延時間は 450・500・550・600・650 $\mu$ s で原子状酸素を発生させたときの、レーザー遅延時間と原子状酸素の速

度の関係である。横軸 laser delay はレーザーの遅延時間である。縦軸は式(1)より求めた原子状酸素の速度を表す。レーザーの各遅延時間 450・500・550・600・650 $\mu$ s において 8~10 回計測し、その平均値を○で表している。図 7 では、レーザーの遅延時間が大きくなるにつれて原子状酸素の速度が遅くなる事が分かる。しかし、最も遅いときでさえ、10km/s の速度がある。よってこの結果より、8km/s の原子状酸素を得るにはレーザー遅延時間の調整だけでは無理であると分かった。また、酸素ガスの導入圧力やパルスバルブの開放時間を変えることで酸素ガスの発生量を制御できるので、速度 8km/s を得るにはこれらの要素全てを調節する必要があると思われる。

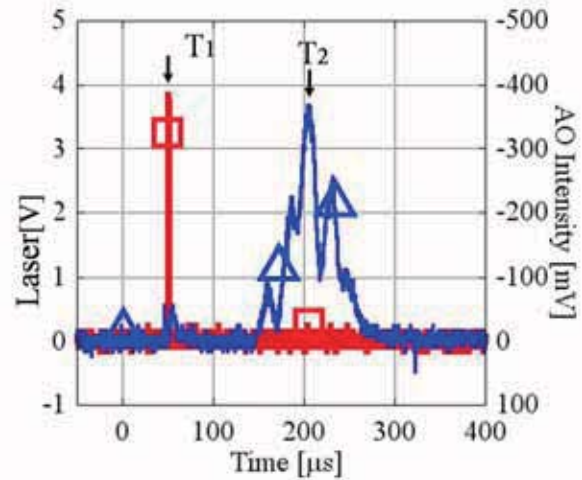


Fig.5 A O ge neration at 2.0 MPa Gas pr essure and 550  $\mu$ s Pulse Valve opening time , 550 $\mu$ s Laser delay

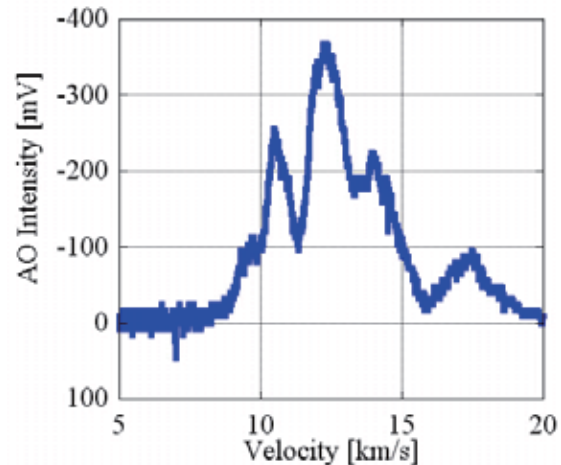


Fig.6 A O Velocity di stribution at 2.0MPa G as pressure an d 10 00 $\mu$ s Pu lse V alve opening ti me , 500 $\mu$ s Laser delay

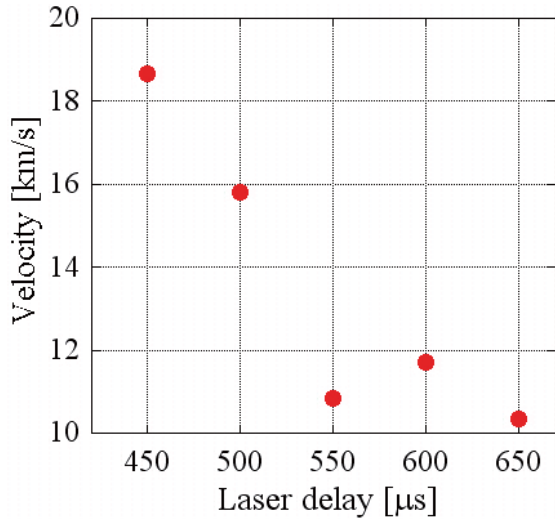


Fig.7 AO Velocity at 2 .0 MPa Gas pressure and 550μs Pulse valve opening time, 450~ 650μs Laser delay

#### 4.2 ガス導入圧力変更による原子状酸素速度の調整

4.1 において、レーザーの遅延時間による速度調整には限界があるとわかった。よって、ガス導入圧力変更することで原子状酸素の速度調節をこころみた。パルスバルブ開放時間・レーザー遅延時間を固定し、ガス導入圧力だけを変化させることで原子状酸素の速度がどのように変化するかを調べた。図8はパルスバルブ開放時間 550[μs]、レーザー遅延時間 550,600[μs]としてガス導入圧力を変化させたときの原子状酸素の速度とガス導入圧力の関係図である。縦軸は原子状酸素の速度を表し、横軸はガス導入圧力を表している。図8より、ガス導入圧力を変化させても、大きな速度変化は見られない。この事より、ガス導入圧力を変化させても原子状酸素の速度変化はほとんどないと言う事ができる。

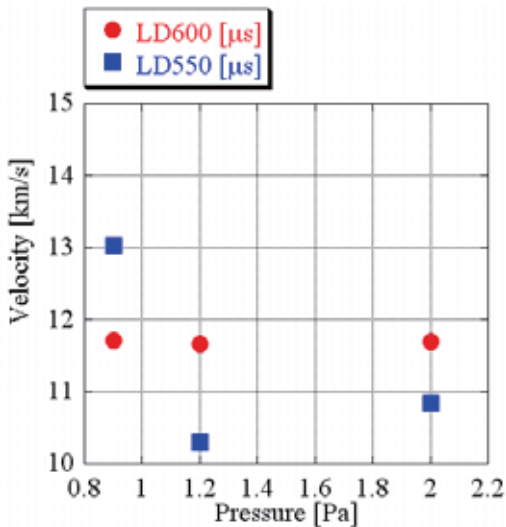
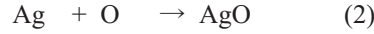


Fig8 AO velocity at 0.9,1.2,2.0 MPa Gas pressure and 550μs Pulse valve opening time, 550,600μs Laser delay

### 5 流束の計測

#### 5.1 実験方法

原子状酸素による劣化においては、流束量 (fluence)が非常に重要な要素となってくる。よって、本研究で開発した原子状酸素照射装置で生成される原子状酸素の流束(flux)を計測する必要がある。測定には銀コーティングクリスタルを装着した QCM(水晶振動子)を使用した。銀に原子状酸素を照射すると以下の反応がおこる。



よって、照射された原子状酸素に比例して QCM の質量が変化する。質量変化から原子状酸素の流束を求めることができる。

原子状酸素は生成直後からチャンバー内部で拡散するため、測定場所によって流束が異なる。よって、図で示した①、②、③の3箇所測定した。

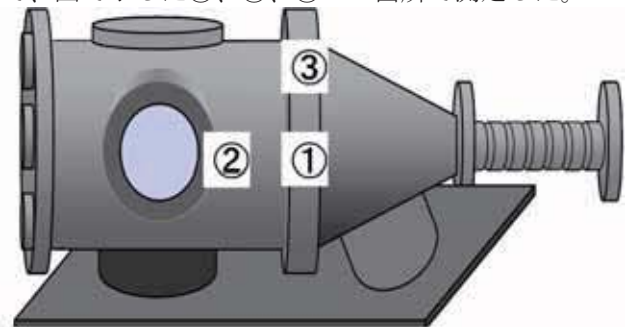


Fig9 QCM set position

#### 5.2 実験結果および考察

実験結果は図で示したとおりとなった。横軸は照射時間を示し、縦軸は QCM の質量変化を示す。図より、①②③全ての場合において照射時間に比例して質量変化が大きくなっている事がわかる。なお、①において照射開始から約 50 秒間、質量変化が見られないのは、クリスタル表面に付着した水分等の汚染物が原子状酸素の照射により除去されているためである。

各箇所における質量変化は次の通りである。

① +1.431[μg]

② +0.632[μg]

③ +0.46[μg]

原子状酸素生成箇所により近い①における質量変化は②、③よりも大きい事がわかる。また、これらの結果より流束を求めると次のようになる。

①  $2.14 \times 10^{18}$  [atoms/m<sup>2</sup>\*2]

②  $9.52 \times 10^{17}$  [atoms/m<sup>2</sup>\*2]

③  $6.92 \times 10^{17}$  [atoms/m<sup>2</sup>\*2]

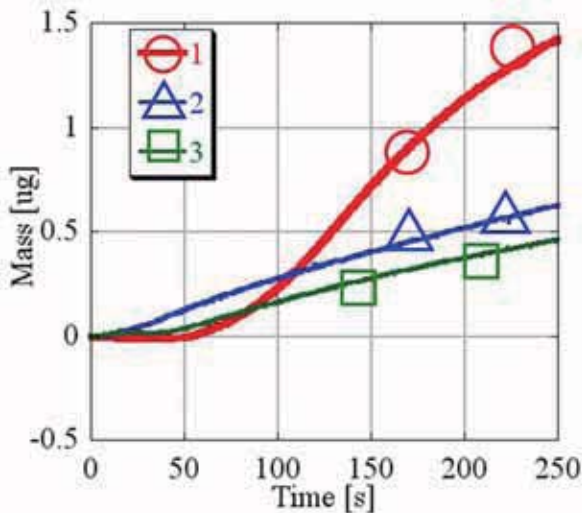


Fig. 10 Mass change of QCM by 11km/s AO

ISS 軌道付近では一年間の原子状酸素被照射量は  $1.0 \times 10^{24}$  [atoms/m<sup>2</sup>\*year] とされている

①の流束において、 $1.0 \times 10^{24}$  という流束量を再現するのに必要な時間は

$$\begin{aligned} & (1.0 \times 10^{24} / 2.1 \times 10^{18}) / (60 \times 60) \\ & = 132 [\text{hour}] \end{aligned}$$

より、およそ 130 時間とわかる。

なお、今実験においては QCM の形状により設置が適切に行えず、発生箇所に対して QCM が数十度傾いた状態であった。よって、QCM によって計測された流束は実際の流束よりもかなり少なかったと思われる。今後は計測方法を改善してより詳しい流束量を計測する必要がある。さらに、今実験では測定箇所が 3 箇所と非常に少なかった。前述のように原子状酸素の流束は測定箇所によって異なる。よって、今後は計測箇所を増やしてより詳細で正確な流束の分布を調べる必要がある。

また、今実験では 2Hz で原子状酸素を照射したが、本実験設備では最終的に 4Hz での運用を予定している。よって、劣化試験に要する時間は更に短縮できると思われる。

## 6 結論

レーザーデトネーション方式により原子状酸素を発生させるができた。しかしながら発生した原子状酸素の速度は 10km/s 以上であり宇宙空間の原子状酸素の速度 8.0km/s よりも大きかった。宇宙空間における原子状酸素を模擬するには更に実験が必要である。また発生させた原子状酸素は LEO (ISS 軌道) 環境での一年分の劣化試験を 130 時間で行える流束であった。今後は更に詳細な流束の測定を行う必要がある。

## 参考文献

[1] Bertrand G. Gazeubon,\* Alain Paillou s, l" and Jean

Siffre\* Centre d' Etudes et de Recherches de Toulouse-ONERA, Toulouse 31 055, France And Roger Thomas "Five-Electron-Volt Atomic Oxygen Pulsed-Beam Characterization by Quadrupolar Mass Spectrometry" JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS Vol. 33, No. 6, November-December 1996