

# ECR 放電型原子状酸素源のビーム特性

久本泰慶 (総合研究大学院大学)

西山和孝 (ISAS/JAXA)

國中均 (ISAS/JAXA)

## 1. はじめに

### 1-1. 研究背景

電気推進機の利用方法の多様化により、人工衛星は超低軌道を飛行する機会が増えている。これまでの電気推進機の利用は静止衛星の南北制御や惑星間航行の推進機として用いられてきた。しかし、近年、電気推進機の新しい利用として、超低軌道衛星の大気抵抗補償や軌道高度のスパイラル上昇に用いられる。こうした新利用では、従来衛星が飛行を避けてきた超低軌道を積極的に飛行することになる。

超低軌道衛星として、ESA の GOCE や JAXA の SLATS が提案されてきた。超低軌道衛星は 150km ~ 250km の超低軌道を定常的に周回する衛星である。イオンエンジンによる大気抵抗補償によって超低軌道の定常飛行が可能になる。従来より低い高度の飛行は、光学センサによる地球観測分解能の向上、電波センサに必要な電力削減というメリットを持つ。さらに、超低軌道衛星は高層大気観測および地球重力場の観測にも大きな貢献を行う。例えば高層大気の詳細測定、全球マッピング、及び長期変動観測は、従来の離散的かつ散発的測定から連続的かつ継続的な測定へ発展する。また地球重力場およびジオイド測定の従来よりもはるかな高精度化が可能になる。

軌道高度のスパイラル上昇を行う衛星として DESTINY というミッションが検討されている。DESTINY は、将来の深宇宙探査のキーテクノロジーとなる先端技術を宇宙実証するという目的で、小型科学衛星シリーズでの打ち上げを目指した衛星である。イプシロンロケットにより高エネルギー軌道投入を行う軌道計画では、イオンエンジンを用いて遠地点高度を上げていく予定になっている。一方、近地点は高度 200 km 以下の高層大気が濃く存在する高度を複数回飛行することになる。この時、搭載されるマイクロ波放電式イオンエンジン  $\mu 20$  や薄膜軽量太陽電池パネル等は、超低軌道環境にさらされることになる。

超低軌道領域では原子状酸素を主とする高層大気により、材料劣化の問題が生じる。超低軌道での宇宙機ラム面に入射する原子状酸素フラックスは、従来の低軌道領域と比べ  $10^4 \sim 10^5$  倍に増加する。今後、超低軌道利用が拡大されていく流れの中で、材料レベルだけでなくコンポーネントやサブコンポーネントレベルでの耐原子状酸素環境試験といったことが必要になると予想される。本発表では超低軌道を模擬するために開発した原子状酸素源のビーム特性について報告する。

### 1-2. 高層大気環境

高層大気は、粒子密度と相対速度の 2 つの点で特徴づけられる。粒子密度は  $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^3$  @ 150 ~ 250 km である。これらの成分は、150 km 以上においては原子状酸素が大半を占める環境である(数密度比  $\text{O}:\text{N}_2:\text{other} = 59:38:3$  @ 200 km)。相対速度は、宇宙機と高層大気間で 8 km/s 程度を有している。この速度を原子状酸素のエネルギーで換算すると 5 eV 程度である。以上より、粒子密度と相対速度をフラックス密度で評価すると、宇宙機ラム面に流入する原子状酸素のフラックス密度は  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  オーダーに達する。

### 1-3. 先行研究・装置

既存の中性粒子ビーム生成装置をアプリケーション用途ごとに分類した場合、エネルギーごとに 3 つ

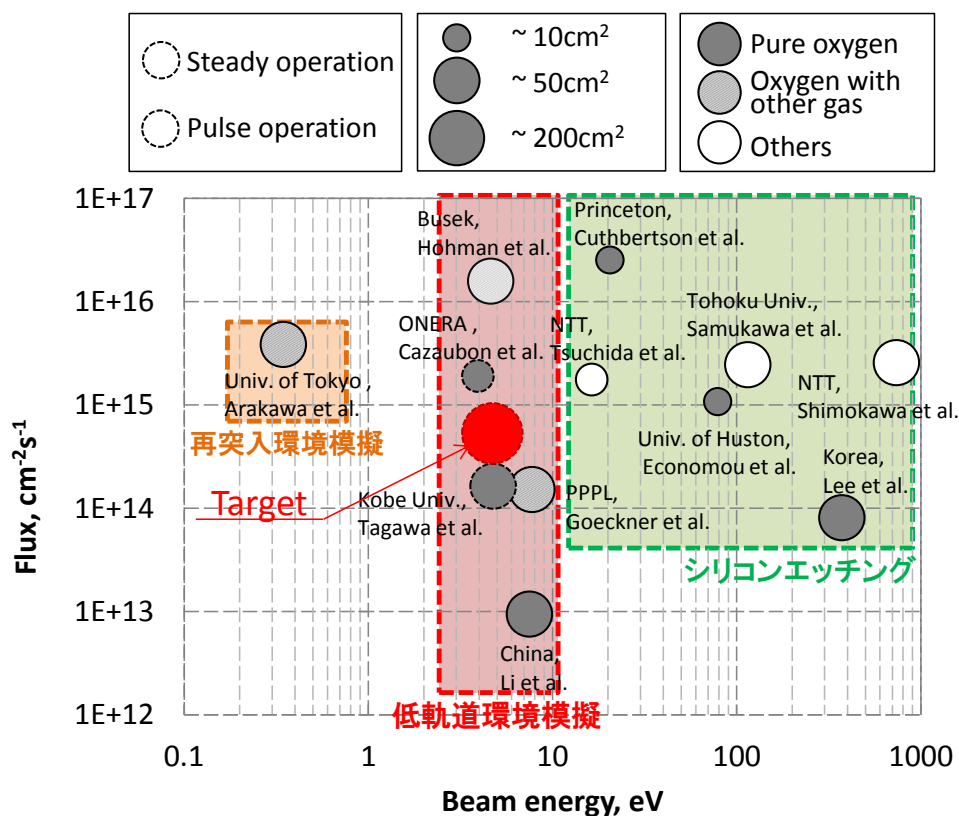


Fig.1 各中性粒子ビーム生成装置の特徴と用途

に分けられる。中性粒子ビーム生成装置として比較的低エネルギーの先行研究・装置を一つのグラフに纏めてみると Fig.1 のような位置付けになっている。

シリコンなどの材料加工を行う装置は、数 10eV～数 keV までと軌道速度より高いエネルギーで中性粒子を生成する。再突入環境を模擬する装置は、 $\sim 2\text{km/s}$  ( $\approx 0.4$  eV 程度) と軌道速度より低いエネルギーながらも高密度の気流で中性粒子を生成する。そして、本研究が目指す位置づけと同様の低軌道環境を模擬する装置は、 $\sim 5\text{eV}$  程度の軌道速度に匹敵するエネルギーで中性粒子を生成する。

低軌道環境模擬装置に限ってみると、軌道速度エネルギーで中性粒子を作り出すために直接解離方式(例:レーザーデトネーション型原子状酸素発生装置)やイオン壁面中性化方式(例:Busek 社製のホールスラスタを利用した原子状酸素発生装置)が取られており、これらがひとつのベンチマークとなる。

#### 1-4. 本発表の目的

## 2. ECR 型原子状酸素生成装置

原子状酸素発生装置は放電室の中にアンテナ、それを取り囲むように配置された磁気回路、中性化グリッドで構成される。原子状酸素の生成プロセスは大きく分けて二つからなる。一つは酸素ガスのプラズマ化、そしてもう一つは原子状酸素イオンの壁面中性化である。これら 2 つのプロセスは同じ放電室の中で行われている。

### 2-1. プラズマ化

4.25 GHz のマイクロ波と 0.15 T の等磁場面において電子は電子サイクロトロン共鳴を起こしエネルギー

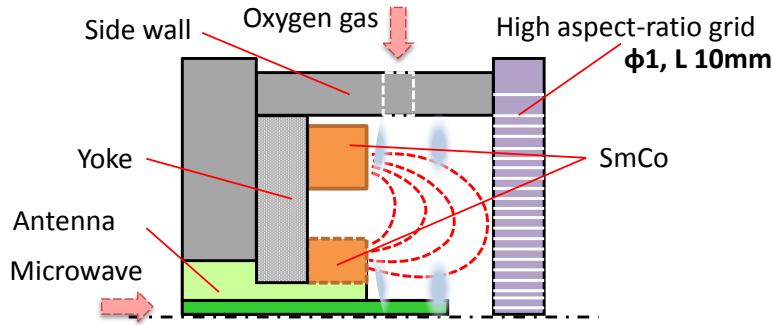


Fig.2 原子状酸素源の概略

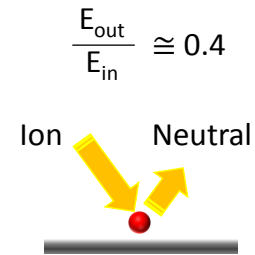


Fig.3 壁面中性化の過程

ギーを得る. この電子が放電室に投入された中性ガスと衝突すると, 電子衝突電離反応を起こし中性粒子は電離する. ECR プラズマは電子の加速を介して電源のパワーを効率的にプラズマ生成に寄与させることができるプラズマ生成法である. これまでに, 直径 20 cm のプラズマ源において原子状酸素プラズマの生成を達成している. しかし, 本発表においては, 取り扱いの観点から直径 6 cm のプラズマ源でビーム性能を評価した.

## 2-2. 壁面中性化

イオンエンジンの中和方法がイオンビームに中和器から電子を振り掛け空間的に電位を中性に保つのに対し, 高層大気シミュレータの場合は粒子自体の電荷を中性にする必要がある. そのため, 生成された原子状酸素イオンを金属壁面と衝突させることにより電荷を奪い中性化されることになる. 壁面衝突によってニュートラルとなった原子状酸素のエネルギーは, 衝突前の粒子が持つエネルギーの 0.4 倍になることが知られている.

## 3. 実験方法

### 3-1. 空間分布測定

原子状酸素ビームのフラックス空間分布は, フラックス計測装置を空間掃引することで取得した. フラックス計測は原子状酸素で損耗が起きるポリイミドの特性を利用した. 損耗量の変化はポリイミドコーティングを施した水晶振動微小天秤(明星電気製 QCM)を用いた. 原子状酸素発生装置からのコンタミネーションや温度変化の影響を除去するため, 参照用として原子状酸素で損耗しない金の QCM を並列して設置し, 両者の比からフラックスを算出した.

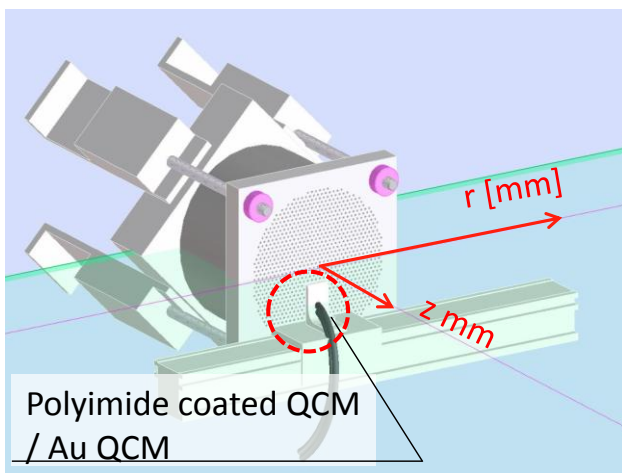


Fig.4 空間分布計測

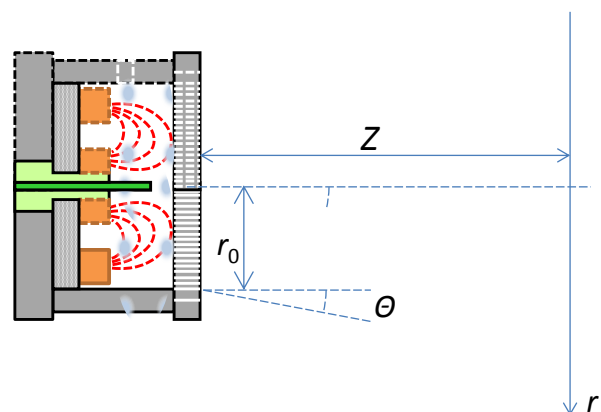


Fig.5 ビーム発散角計測

### 3-2. ビーム発散角の算出

ビーム発散角は、全ビーム量の 95% を網羅する角度と定義する。この角度は、中性化グリッドの円周部端における法線となす角とする。記号の関係を Fig.5 に示す。

$$\tan\theta = \frac{r - r_0}{Z} \quad (1)$$

原子状酸素ビームの発散角は空間分布測定結果を用いた。酸素生ガスのビーム発散角は、電離真空計を空間掃引し並進エネルギーを熱速度と仮定することで計測した。

## 4. 実験結果

### 4-1. 空間分布結果

Fig.6・7 にフラックスの空間分布結果を示す。軸方向分布は下流 10・190 mm の間を 20 mm 間隔で測定し、半径方向は下流 20 mm と 120 mm の地点を半径方向に 5 mm 間隔で計測した。

軸方向分布は原子状酸素源からの距離が離れるに従ってフラックスが減少している。また距離と減少の関係は距離の 0.74 乗に反比例している。ビームが完全に平行になっていないためであると考えられる。

半径方向分布は下流 20 mm と 120 mm で異なる形状を示した。下流 120 mm は M 字の分布形状となった。原子状酸素源の内部構造と比較すると、ピークが表れている箇所は磁石上になる。原子状酸素源直下であるため、原子状酸素の生成箇所を表しているとする、磁石表面が壁面中性化の主体的箇所であることが考えられる。M 字の分布となるもののその差は微小で、環境模擬(アプリケーション)の観点からみると  $12 \text{ cm}^2$  ( $r = \pm 20 \text{ mm}$ ) でほぼ均一な原子状酸素ビームを生成出来ることが確認された。一方下流 120 mm は中心にピークを持つなだらかな形状となった。この時ピーク値も 3 分の 1 に減少している。ビームが発散しているためであると考えられる。

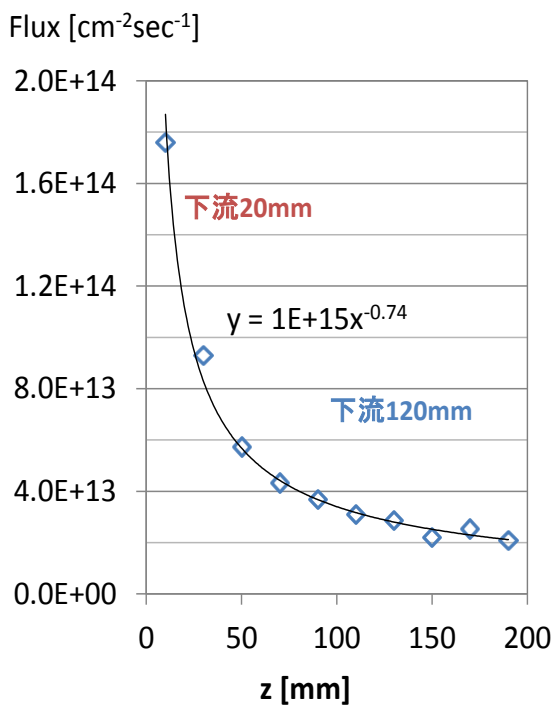


Fig.6 軸方向分布

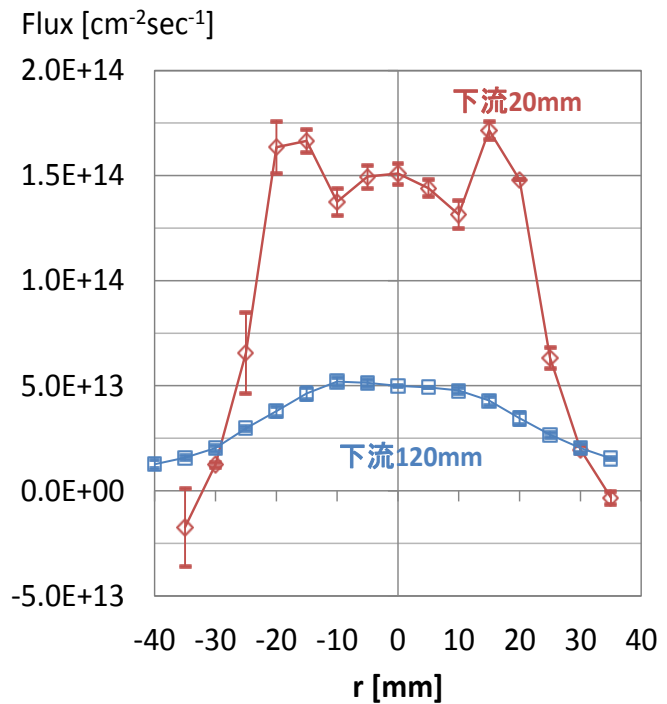


Fig.7 半径方向分布

## 4-2. ビーム発散角結果

全ビーム量は下流 120mm を掃引した結果を用いた。Fig.8 - 9 に原子状酸素と酸素分子の発散角をそれぞれ示す。原子状酸素の発散角は 4 度程度となった。また、酸素分子(生ガス)の発散角は 6 度程度となった。中性化グリッドに設けられた多数のオリフィス(φ1, L10 mm)の幾何形状が 6 度である。酸素分子の発散角は中性化グリッドの幾何形状によるものだと考えられる。

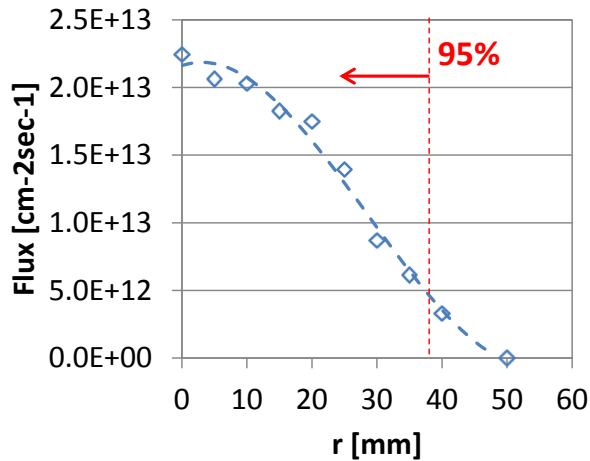


Fig.8 原子状酸素の発散角

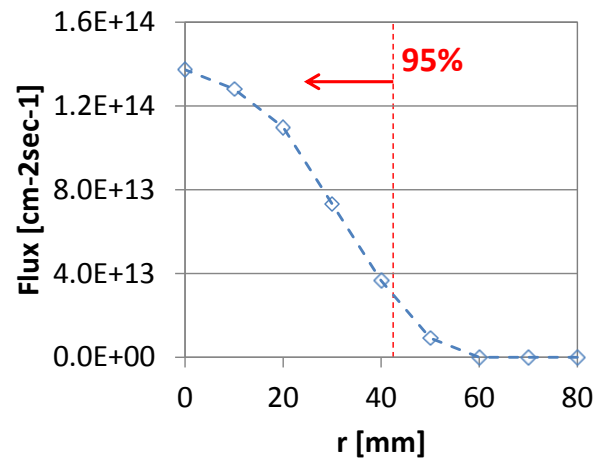


Fig.9 酸素分子(生ガス)の発散角

## 5. 終わりに

### 5-1. まとめ

高層大気を模擬するための ECR 放電型原子状酸素源を用い、本発表では原子状酸素のフラックス空間分布を計測した。また、原子状酸素と酸素分子(生ガス)の発散角を取得した。本発表の結果を、これまでに得られた性能表に追記すると次のようになる。

Table 1 ビーム特性のまとめ

	目標値	原子状酸素	酸素分子(生ガス)	酸素イオン
Flux [cm <sup>-2</sup> sec <sup>-1</sup> ] @ 2 cm	~ 10 <sup>15</sup>	~ 10 <sup>15</sup> (@60W)	10 <sup>15</sup> ~ 10 <sup>16</sup> (@1 ~ 3 sccm)	~ 10 <sup>12</sup>
速度 [eV]	5		(Thermal velocity)	12 ~ 13
発散角 [°]	Parallel	4	6	-

### 5-2. 今後の課題

ビーム特性の表における原子状酸素の速度の項が未達成であるので、原子状酸素の速度計測に取り組んでいく予定である。

## 6. Reference

<sup>1</sup>J.W. Cuthbertson, W.D.anger, R.W.Motley, "Reflection of low energy plasma ions from metal surfaces", Journal of Nuclear Materials, 196-198, pp113-128, 1992