

# イオンスラスタによる高層大気のリモートセンシングについて

坂本 佑介<sup>\*1</sup> 國中 均<sup>\*2</sup>

## Remote sensing of the upper atmospheres using Ion thruster

by

Yusuke Sakamoto<sup>\*1</sup> and Hitoshi Kuninaka<sup>\*2</sup>

**Abstract:** This paper describes an application of microwave discharge ion thruster to remote sensing for upper neutral atmosphere. We assume the charge exchange collision between atomic oxygen (AO) and krypton ion beam. An apparatus has been constructed to simulate the atomic oxygen in an upper neutral atmosphere. From the experimental results, the gas density was subtle to detect ENA through CEX sell. Therefore, the apparatus variant was proposed.

**Key words:** Ion Thruster, ENA, Remote Sensing, Neutral Atmosphere

### 概 要

この論文では、マイクロ波放電式イオンスラスタの応用利用方法の一つとして高層中性大気のリモートセンシングについて述べる。高層中性大気の主成分の一つである大気原子状酸素 (AO) とクリプトンビーム間の電荷交換衝突 (CEX) を想定し、原子状酸素を模擬する実験装置を作製、計測した。計測の結果、本装置により発生する原子状酸素密度は ENA 検出には不十分ことが予想されるため、原子状酸素生成法の改良方法を提案している。

### 1. 背 景

昨今、高層大気の観測は宇宙利用の拡大に伴い重要度を増してきている。しかし、電波観測の可能な高層プラズマ大気とは異なり、物理的性質の違いから高層中性大気の観測については衛星の軌道変化や質量分析器といった直接的な観測手法がおこなわれるに過ぎなかった。

近年、高層中性大気の広範囲なりアルタイム観測手法の一つとしてイオンスラスタにより生成されたイオンビームにより生成される高速中性粒子 (Energetic Neutral Atom : 以下 ENA) を用いた観測手法が提案されている [1]。

ENA とは、高速イオンと低速中性粒子が衝突する際に電荷のみを受け渡す電荷交換衝突 (Charge Exchange Collision : 以下 CEX) で生じる高速の中性粒子のことであり、太陽風に含まれる高速  $H^+$  が地球高層大気と衝突する際やイオンエンジンのような電気推進機の排気する人工イオンビームが雰囲気中性粒子と衝突する際に発生することが確認されている。

このとき高速イオンの種類・速度・方向・イオンビーム量がわかっているならば ENA を観測することで CEX 時における低

\* 1 University of Tokyo

\* 2 JAXA/ISAS

速中性粒子の密度や粒子種の情報が得られるのである。

図1にイオンビームによる高層中性大気観測システムの概略図をしめす。

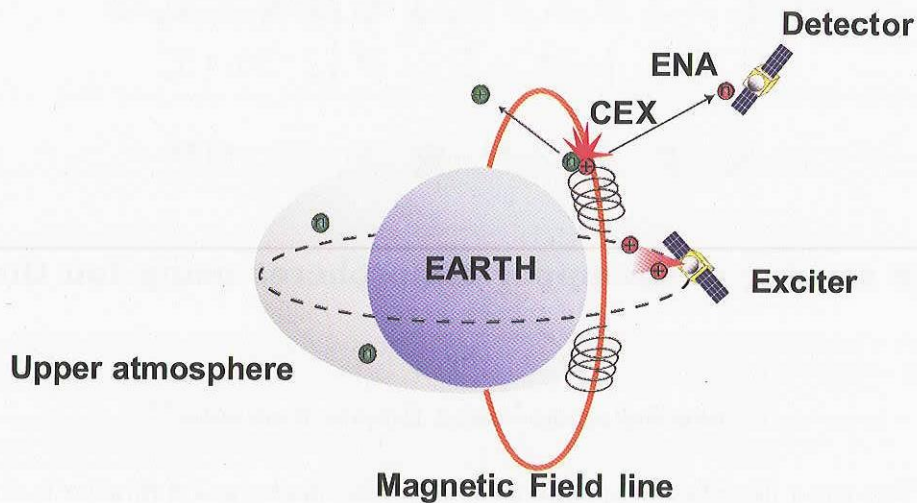


図1 システム概略図。

Exciter 衛星によるイオンビームは射出後、ビーム発散角を持つため広がるため地球磁場に捕らえられサイクロトロン運動をおこなう。その後、十分な距離を飛行すると高層大気と CEX をおこない ENA が生成される。ENA は地球磁場から解き放たれ直線的に飛翔する。その後 Detector 衛星により ENA が検出されるというものである。

## 2. 目 的

実験室系で ENA 生成の実証実験をおこなうために低速中性粒子ならびにイオンビームの種類を決定する。

高層大気モデルのひとつである MSIS-E-90 モデル (図2) によれば高度 200 km から 1000 km の高層中性大気の主成分は原子状酸素である。さらに高度 500 km において全粒子数の 80% 程度をしめていることがわかる。近年、原子状酸素の衛星への影響も懸念されるため低速中性粒子種は原子状酸素とする。

次にイオンスラスタで主に用いられる Xe, Kr に加え Ar が原子状酸素に対してどの程度 ENA を生成するかを示す。図3は縦軸に電荷交換衝突断面積、横軸にイオンビームエネルギーをとったものである。図3によるとイオンビームは  $Kr^+$  が適当と考えられる。そこで、マイクロ波型イオンスラスタから  $Kr^+$  ビームを射出し、高層大気を模擬した原子状酸素の ENA による密度測定目的とする。しかし、あらかじめ実験室系で原子状酸素を生成し密度を求めておく必要があるため、本研究ではマイクロ波型中和器をもちいた原子状酸素源を作製した。また、原子状酸素密度の測定についても述べる。

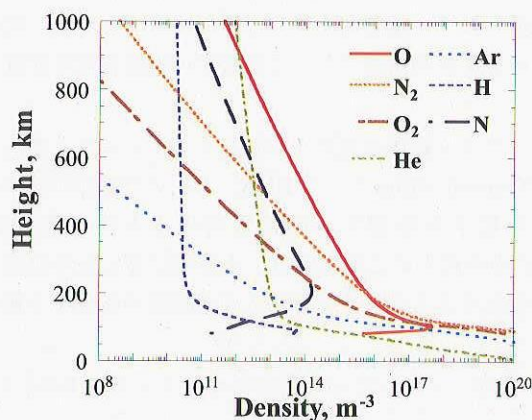


図2 高層中性大気密度。

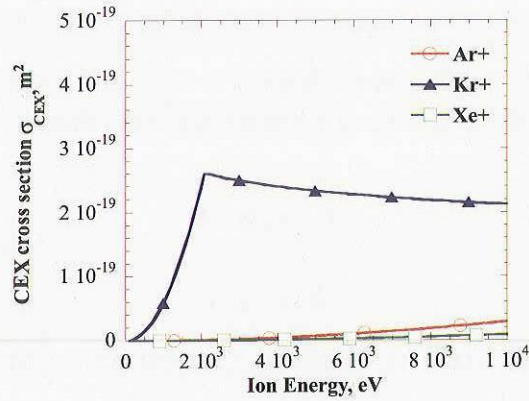


図3 電荷交換衝突断面積 (原子状酸素).

### 3. 実験装置

実験装置は、CEXセルと呼ばれる長さ40 cm ガラス製十字型の電荷交換衝突領域内にマイクロ波放電式原子状酸素源、測定装置 (銀蒸着 QCM) を配置し、ターボ分子ポンプを用いて高真空を保持する。CEXセルの概略図を図4に示す。

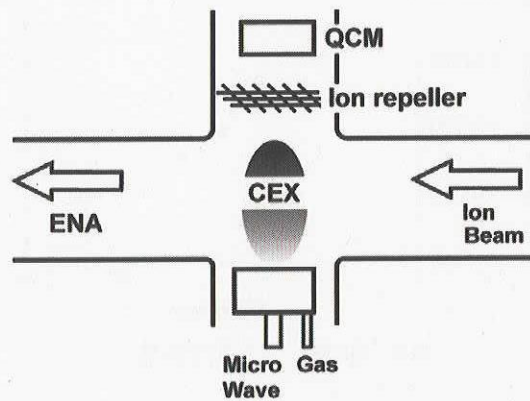


図4 CEXセルの概略図.

#### 3.1 原子状酸素源

高層中性大気を模擬する原子状酸素源には、「はやぶさ」に用いられた ISAS/JAXA 製プラズマ中和器の改良型を作製し用いた。試運転時の動作環境を表1に示す。

表1 プラズマ源の仕様.

マイクロ波電力	12 W
O <sub>2</sub> 流量	0.35 sccm
真空度	1.8 × 10 <sup>-3</sup> Pa

#### 3.2 測定装置 (銀蒸着 QCM)

原子状酸素を測定するために水晶振動子法 (Quartz Crystal Microbalance : 以下 QCM) を用いた。これは、水晶振動子の共振周波数が質量に応じて変化するという特性を利用して微小質量変化を計測できる装置である。

本実験では、原子状酸素を計測するため、QCM 表面が銀蒸着されたものを用い、表面の酸化により質量が上昇するという特性を利用して測定をおこなった。

以下に測定原理を示す。QCM の質量増加分  $dM$  を共振周波数の低下分  $df$  から式 (1) で示される関係を利用して QCM に付着した原子状酸素の個数を見積もる。

$$df = -f^2 / N\rho \cdot dM / A \quad (1)$$

原子状酸素の個数を式(2)で示すように曝露面積Aと曝露時間Tで除することで原子状酸素のフラックスを求め、さらに、フラックスは速度と密度の積で定義されるので、原子状酸素の速度を熱平均速度であると定義し原子状酸素密度を決定した。

$$\Gamma_{AO} = dM / At \quad (2)$$

$$N_n = \Gamma_{AO} / v_n \quad (3)$$

また、原子状酸素源から発生する余分な $O^+$ や $O_2^+$ を排除するためQCM前方に+50Vのイオン排除部を設置した。

#### 4. 結果・考察

同型のマイクロ波放電式酸素イオン源において原子状酸素の密度が推定されている[2]。その実験結果を図5に示す。

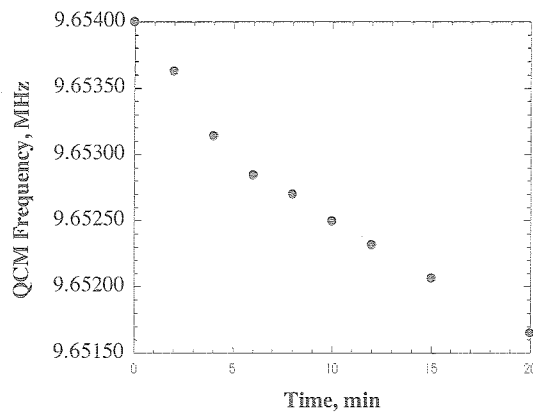


図5 QCMによる測定結果。

QCM曝露後の曝露面酸化が支配的な領域(この場合6分間)におけるQCM周波数変化から求めた原子状酸素のフラックスは、 $2.6 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、原子状酸素密度は $1.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ と見積もられている。

この時、図2で見られたような実際の高度100 kmから1000 kmの高層中性大気中の原子状酸素密度を模擬できる性能を示していることがわかる。Kr<sup>+</sup>ビームを1.5 keVで加速した場合、AOとの電荷交換衝突断面積 $\sigma_{\text{CEX}}$ は $1.33 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ となるため、式(4)よりKr<sup>+</sup>ビームの平均自由行程は50 mとなる。この時、実験室系においてENAを十分に観測できない可能性が生じる。

$$\lambda = 1 / \sigma_{\text{CEX}} N_n \quad (4)$$

観測するための解決策としては

- CEXセルの延長
- 原子状酸素密度の増加
- Kr<sup>+</sup>イオンビーム量の増加
- 検出精度の向上

などが挙げられるが、ここでは解決策の1例としてCEXセル内に一様な原子状酸素を満たす方法を提案する。

図6にCEXセルの改良案を示す。CEXセル外部に永久磁石による磁場を形成しセル全体でプラズマを点火するものである。その結果、CEX領域の延長とともに高密度原子状酸素の生成を期待するものである。

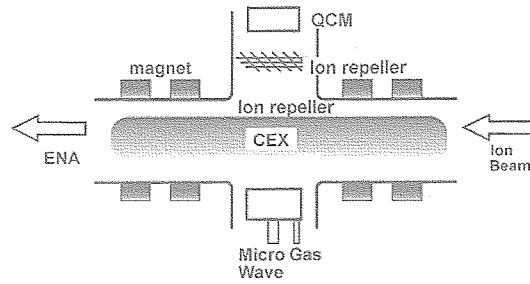


図6 CEXセル改良案.

## 5. まとめと今後の予定

本研究では地球高層大気の ENA を観測するために高層中性大気成分として原子状酸素を、イオンビーム種として  $\text{Kr}^+$  を提案し、実験室系における ENA を観測すべく新たに原子状酸素源の作製をおこなった。また以前の酸素プラズマ源により原子状酸素密度を銀蒸着 QCM により測定した。その結果、 $1.5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$  の原子状酸素密度と測定された。この値は高層大気中の原子状酸素を模擬するには十分な値であるが、実験室系における ENA 観測には不十分である可能性が指摘された。そこで改良方法の 1 例として CEX セルを永久磁石で囲みプラズマを生成する方法を提案した。

今後の予定として、本実験では  $\text{O}_2^+$  に代表されるような負イオンが考慮されていないのでその影響を除外し再度原子状酸素密度を推定する。十分な密度の原子状酸素を生成できた後に ENA 観測装置により推定される密度との比較検討をおこなう予定である。また、衛星システム上で観測されうる ENA の推算を検討し現実に観測する場合の問題点や装置に求められる性能を考察していきたいと考える。

## 6. 参考文献

- [1] S. Sugimoto, H. Kuninaka, K. Toki, Y. Arakawa, "The measurement of Energetic Neutral Atoms from Ion Thruster Beam", 24<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, ISTS 2004-s-23, 2004.
- [2] 林寛, 趙孟佑, 西山和孝, 國中均, "電離層プラズマ環境模擬のためのマイクロ波放電式酸素イオン源", 日本航空宇宙学会論文集, Vol.52, No.610, 2004.