

# 人工イオンビームによる高層大気観測に関する研究

○杉本幸子 (東大・院), 國中均 (JAXA), 都木恭一郎 (東京農工大), 荒川義博(東大)

Study of the Upper Atmosphere Observation by Artificial Ion Beam

Sachiko Sugimoto (University of Tokyo),

Hitoshi Kuninaka (JAXA),

Kyoichiro Toki (Tokyo University of Agriculture and Technology),

And Yoshihiro Arakawa (University of Tokyo)

Key Words: Ion Thruster, Charge Exchange Collision, and Energetic Neutral Atom

## Abstract

The observing method that uses ENA (Energetic Neutral Atoms), produced by ion beam injected from an ion thruster, is studied and researched in order to estimate the density of neutral particles in the upper atmosphere. The ion beam experiences charge exchange collision (CEX) with neighboring neutral particles to transform into ENAs. The ENA preserves the information about the particles concerned with those collisions. We propose a new method of estimating the density and the composition of the neutral particles from measuring the ENAs and examine the usability by simple calculation and experiment.

## 記号

$\Gamma_{\text{ion}0}$ : 入射イオン粒子束 [ $\text{m}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]

$\Gamma_{\text{ion}}$ : 透過イオン粒子束 [ $\text{m}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]

$\Gamma_{\text{ENA}}$ : 生成ENA粒子束 [ $\text{m}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]

$\sigma_{\text{CEX}}$ : 電荷交換衝突断面積 [ $\text{m}^2$ ]

$n_n$ : 中性粒子密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]

L: イオンの運動に対して、垂直な中性粒子群の厚み [ $\text{m}$ ]

i: 混合ガスの種類

$n_i$ : iの中性粒子密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]

$\sigma_i$ : iと入射イオンの電荷交換衝突断面積 [ $\text{m}^2$ ]

$x_i = n_i / n_t$ : モル分率

$n_t$ : 全中性粒子密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]

$P_i$ : iの分圧 [Pa]

k: ボルツマン定数 [J/K]

T: 温度 [K]

$n_v$ : 真空計から計算される密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]

## 1. 目的および背景

人工衛星の利用が拡大するにつれて、地球高層大気について正確な測定と予測が重要になってきている。その測定方法の一つとして、イオンスラストが排出する人工イオンビームを用いる方法が提案されている[1]。

図1に簡単にそのシステムを示す。

地球近傍、特に低軌道でイオンスラストを動作させると、排出イオンビームは地球高層大気に含まれる中性粒子と電荷交換衝突 (Charge exchange collision: 以下 CEX と略す) を起こし、高速中性粒子 (Energetic neutral atom: 以下 ENA と略す) が生成されると考えられる。生成された ENA は次のような特徴を持つ。

1. ENA は高速イオンが電荷を失ったものである。(故にイオンスラストの推進剤として多用されつつも、天然にほとんど存在しない Xe のようなガスをイオン源とした場合、他と判別しやすい)
2. ENA は衝突した地球高層大気に関する情報 (密度や組成、位置など) を保持している。
3. ENA は中性であるので、イオンとは異なり地磁気の影響を受けず、慣性飛行を行う。

よって、この特性を利用して、別の軌道上で ENA を観測すれば、高層大気のリモートセンシングが行えるのではないかというのである。

この手法の特徴としては、イオンスラストという深宇宙探査機「はやぶさ」の主推進に用いられるほど実用化著しい装置を用いること、また太陽風のような自然現象を利用する場合と異なり人工イオンビームを用いるため、いつでもどこでも測定可能、という点が上げられるであろう。

さて、このような応用が期待される ENA 計測であるが、先行研究例が少なく、どの程度衝突中性粒子の情報を保存しているのか、よくわかっていない。そこで、本研究では、人工イオンビームから生成する ENA と生成に寄与した中性粒子の関係について、基礎的なデータの取得を目的とする。具体的には、

- a. ENA 粒子束の計測から中性粒子の密度及び組成比を検出する方法を考案する。
- b. 1次元モデルに基づいて ENA 生成に関する計算を行い、その方法の有効性を確かめる。

- c. 2種類の気体を混合して実際に密度及び組成比を検出できるかどうか調べる。  
以上、3点について研究を行った。

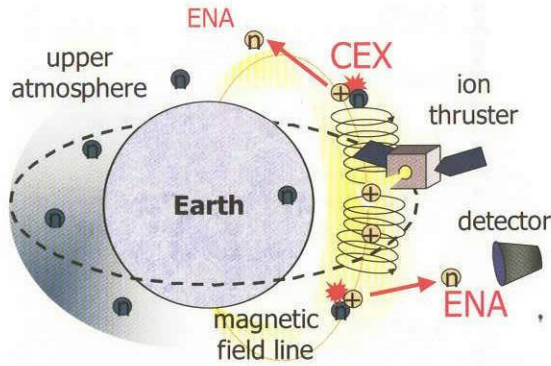


図1 地球高層大気のリモートセンシング概念図

## 2. 中性粒子の分析方法

### 2-1. ENAの生成機構

まずENNAの特徴を知るために、簡単に生成機構を説明する。イオンビームが中性粒子群に照射され、CEXを起こす時、イオンの減衰及びENNAの生成は(1)式のように表すことができる。

$$\begin{cases} d\Gamma_{ion} = -\sigma_{CEX} n_n \Gamma_{ion} dx \\ d\Gamma_{ENA} = \sigma_{CEX} n_n \Gamma_{ion} dx \end{cases} \quad (1)$$

(1)式を積分すると、(2)式ようになる。

$$\begin{cases} \Gamma_{ion} = \Gamma_{ion0} \exp(-\sigma_{CEX} n_n L) \\ \Gamma_{ENA} = \Gamma_{ion0} (1 - \exp(-\sigma_{CEX} n_n L)) \end{cases} \quad (2)$$

本システムの場合、人工イオンビーム源であるため $\Gamma_{ion0}$ を既知とみなすことができる。また $\sigma_{CEX}$ はイオンと中性粒子の組み合わせによるある一定の値である。さらに、 $L$ はイオンが噴射されてから観測機に届くまでにイオンが進んだ距離と仮定すると、既知の値であるとみなせる。よって、(2)式より $\Gamma_{ENA}$ が計測できれば、中性粒子密度 $n_n$ は容易に推定できると考えられる。

### 2-2. 粒子の種類と電荷交換衝突断面積 $\sigma_{CEX}$

$\sigma_{CEX}$ はイオンと中性粒子の組み合わせ及びイオン速度の関数である。例えば $Xe^+$ を様々な中性粒子と電荷交換衝突させた場合について、衝突断面積 $\sigma_{CEX}$ を文献[2]の理論に基づいて計算した。結果を図2に示す。縦軸は電荷交換衝突断面積 $\sigma_{CEX}$ 、横軸は衝突イオンの入射運動エネルギーである。

イオンが同種の粒子に衝突させた場合、 $\sigma_{CEX}$ は最大値を取る( $Xe^+-Xe$ の場合)。また、特定の中性

粒子に衝突させると、同種同士の場合と同じくらい大きな値を取ることがある( $Xe^+-O_2$ の場合)。そして、それ以外の場合は、イオン速度の増加に伴って $\sigma_{CEX}$ は増えるものの、前2例と比べてみると1/100にも満たない。よって、イオンと中性粒子の組み合わせに応じて、ENNA生成量に大きな差が生じるといえる。言い換えれば、イオン源に適当なガスを用いて、混合ガスにイオンを照射すると、ある特定のガスからのみ選択的にENNAが生成するとみなせる。この特徴を利用して、ENNA生成に関わった中性粒子を推測できるのではないかと考えた。

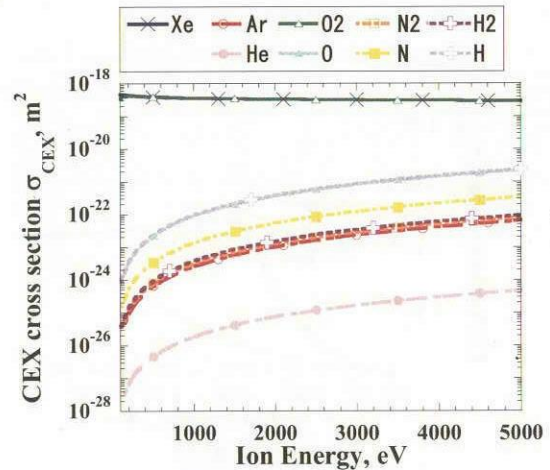


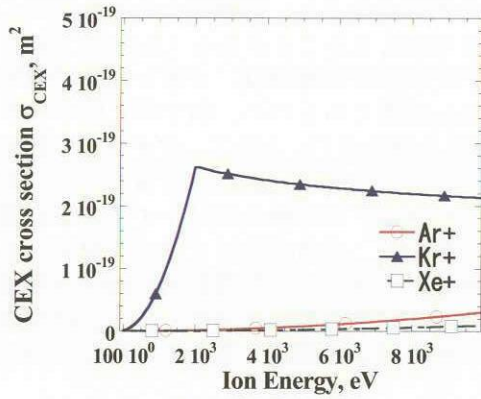
図2 中性粒子の違いによるイオン入射運動エネルギーと $\sigma_{CEX}$ の関係( $Xe^+$ の場合)

### 2-3. 高層大気と電荷交換衝突断面積 $\sigma_{CEX}$

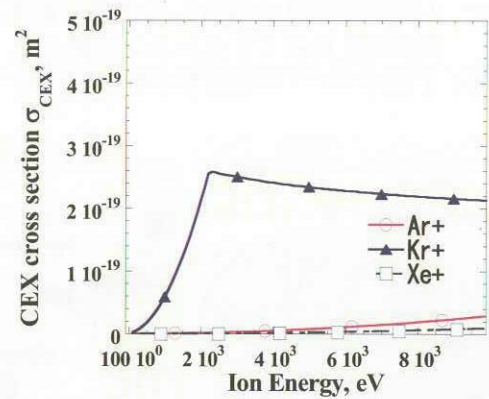
高度約500[km]での高層大気的主要成分はO、N、He、 $N_2$ 、H、 $O_3$ 、 $O_2$ 、Ar等である。これに、イオンスラスタの推進剤としてよく利用されている $Xe^+$ 、 $Ar^+$ 、 $Kr^+$ を電荷交換衝突させた場合、それぞれの $\sigma_{CEX}$ を文献[2]の理論に基づいて計算した。計算結果を図3に示す。縦軸は電荷交換衝突断面積 $\sigma_{CEX}$ 、横軸は衝突イオンの入射運動エネルギーである。

図3全体を眺めてみると、He以外の中性粒子は全て、 $\sigma_{CEX} > 10^{-19} [m^2]$ のイオンが存在することがわかる。(例えばO原子に対して $Kr^+$ など)よって、この方式で地球高層大気を一通り網羅できると考えられる。

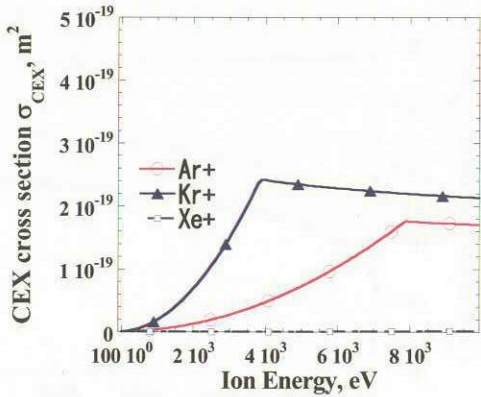
また、同時に、 $\sigma_{CEX}$ とイオン運動エネルギーの関係は、同じイオンを衝突させた場合でも中性粒子の種類によって異なる。(例えばOとNは同じ $Kr^+$ で大きな $\sigma_{CEX}$ をとるが、最大値の時のイオン運動エネルギーはそれぞれ2[keV]、4[keV]と異なる)よって、同じイオンをENNA生成に用いる場合でも、イオン運動エネルギーを変化させることで、中性粒子の種類、密度を判別できると考えられる。



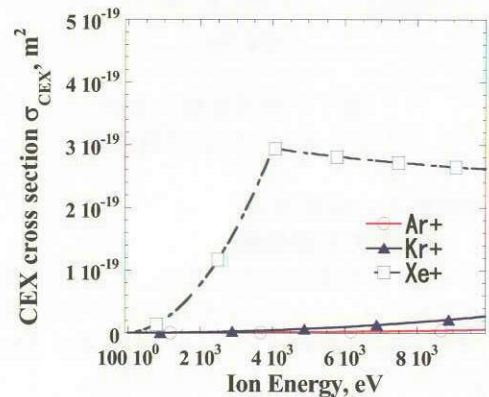
(a) O の場合



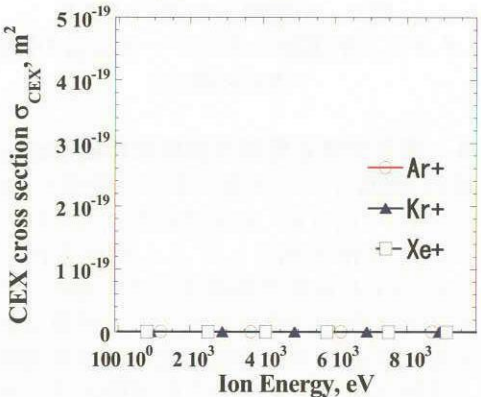
(e) H の場合



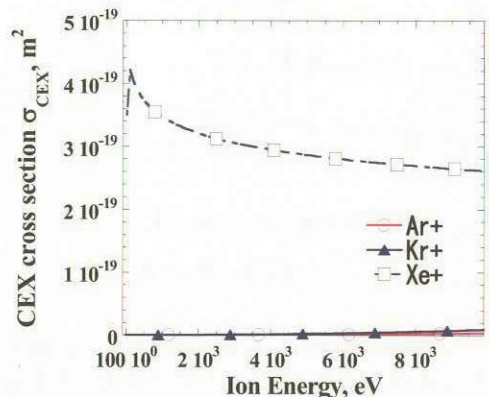
(b) N の場合



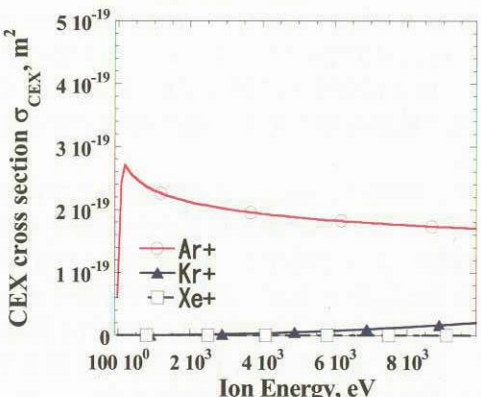
(f) O<sub>3</sub> の場合



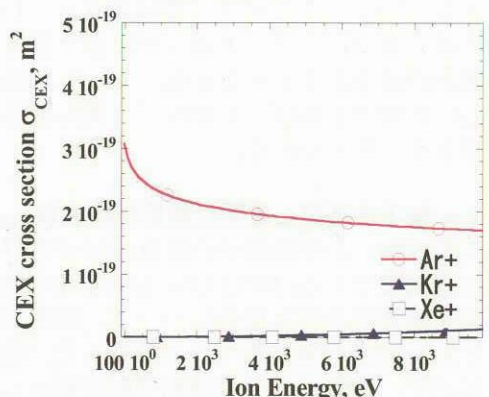
(c) He の場合



(g) O<sub>2</sub> の場合



(d) N<sub>2</sub> の場合



(h) Ar の場合

図3 地球高層大気を構成する中性粒子の $\sigma_{CEX}$

2-4. 混合ガスにおける ENA 生成について

実際に、混合ガスにおける ENA 生成量を調べてみた。(1)式と同様に、入射イオンの減衰と ENA の生成について微分方程式を表すと(3)式のようになる。

$$\begin{cases} d\Gamma_{ion} = -\sum_i \sigma_i n_i \Gamma_{ion} dx \\ d\Gamma_{ENA} = \sum_i \sigma_i n_i \Gamma_{ion} dx \end{cases} \quad (3)$$

それぞれ積分すると、(4)式のようになる。

$$\begin{cases} \Gamma_{ion} = \Gamma_{ion0} \exp\left(-\sum_i \sigma_i x_i n_i L\right) \\ \Gamma_{ENA} = \Gamma_{ion0} \left\{1 - \exp\left(-\sum_i \sigma_i x_i n_i L\right)\right\} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、密度と圧力の関係  $n_i = P_i / kT$  を用いると、圧力をパラメータとしても表現できる。

それでは、実際にXe<sup>+</sup>を、XeとN<sub>2</sub>の混合ガスに入射した場合について、ENA生成量を計算してみる。この2つのガスは電荷交換衝突断面積の理論値がXe<sup>+</sup>の運動エネルギー1.5[keV]の時、それぞれ  $\sigma_{Xe} = 3.3 \times 10^{-19} [m^2]$ 、 $\sigma_{N_2} = 7.1 \times 10^{-24} [m^2]$ と非常に大きく異なるのである。また計算の中で、室温T=300[K]とした。

結果を図4に示す。縦軸は入射イオン粒子束で正規化した生成ENA粒子束、横軸は混合ガスの全圧Pと行路長Lの積となっている。またグラフの実線は純粋Xeガスの場合のENA生成量、点線はP<sub>Xe</sub>を一定に保ちながらP<sub>N2</sub>を変化させた場合のENA生成量となっている。

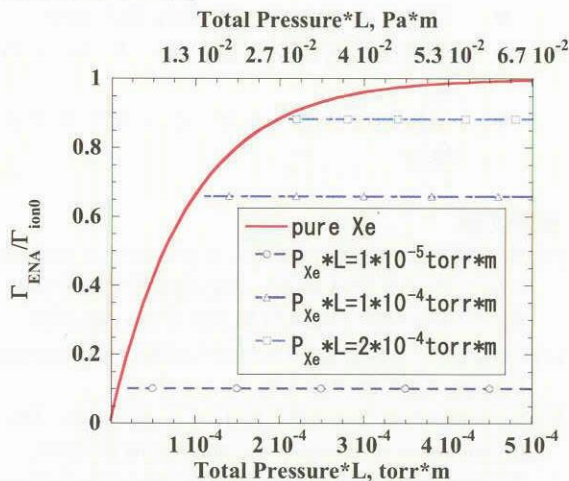


図4 XeとN<sub>2</sub>の混合ガスにXe<sup>+</sup>を入射した場合の ENA 生成量の違い

図4より、P<sub>Xe</sub>が一定ならば、全圧に関わらず ENA生成量が常に一定ということがわかる。よって、Γ<sub>ENA</sub>がわかれば、混合ガスにおけるXeの分圧(密度)が推定できると考えられる。

3. 実験

3-1. 実験装置

実験装置は、人工イオンビーム源(2cm級マイクロ波型イオンエンジン)、中性ガスの種類及び圧力(密度)を変えることが出来る CEXセル、及び検出器から構成されている。実験装置の構成図を図5に、イオンビーム源の主要諸元を表1に示す。

CEXセルは、両端をターボ分子ポンプで低圧に引いており、CEXセル内部と外部の圧力差が4倍以上に保たれている。セル長は15.1cmとした。

検出器は、QCMとグリッドを組み合わせたもので、前方のグリッドで静電的にイオンを排除し、後方のQCMでENAによる表面スパッタ量を計測する。スパッタ量は衝突ENA粒子束に比例することから、生成されたENA粒子束が推定できると考えられる[3]。検出器の構成を図6に示す。

表1 2cm級マイクロ波型イオンエンジン

マイクロ波電力	10[W]
推進剤/流量	Xe/0.37[sccm]
スクリーン電圧	1500[V]
アクセル電圧	-350[V]
スクリーン電流	6[mA]
真空度	7.6*10 <sup>-3</sup> [Pa]
フィラメント電流/電圧	4[A]/5[V]

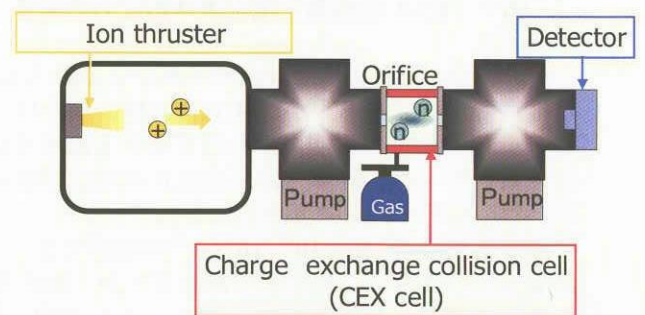


図5 実験装置の構成

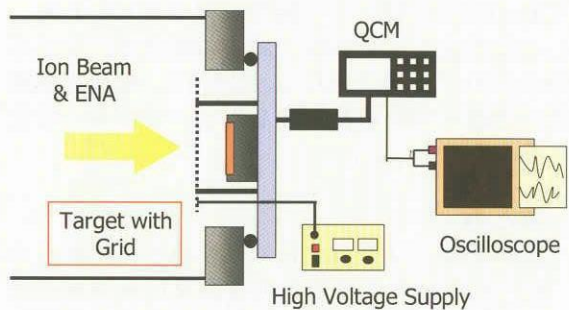


図6 検出器の構成

### 3-2. 実験結果

計算結果と比較するため、 $Xe^+$ をXeと $N_2$ の混合ガスに照射してENA生成粒子束の計測を行った。実験結果を図7に示す。縦軸はENA粒子束を入射イオン粒子束で正規化したもの、横軸は混合ガスの全圧Pと行路長(CEXセル長)Lの積である。図6と同様に、グラフの実線は純粋Xeガスの場合のENA生成量、点線はXeの分圧 $P_{Xe}$ を一定に保ちながら $N_2$ の分圧 $P_{N_2}$ を変化させた場合のENA生成量である。

図7より、ENA生成量は $P_{Xe}$ が増えると増加するけれども、 $P_{Xe}$ を一定に保つと、生成量は $P_{N_2}$ の増加に伴って多少増加傾向にあるものの、それほど変わらない。つまり、 $\sigma_{CEX}$ から推測される通り、ENAは $Xe^+$ をXeに衝突させた場合のみ生成されるといえよう。

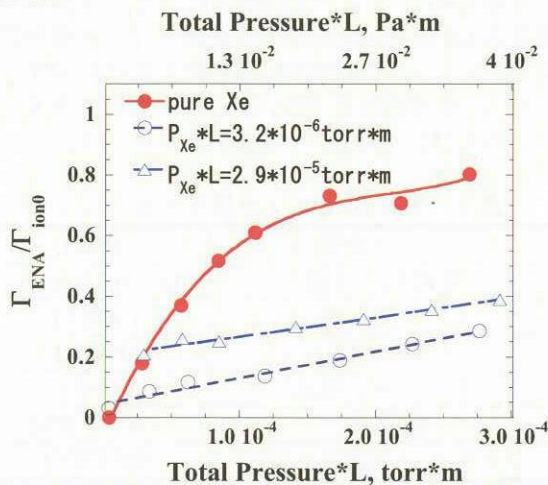


図7 ENA生成量と混合ガスの圧力の関係

それでは、計測されたENA粒子束からXe密度 $n_{Xe}$ は推定できるであろうか。(4)式に実験結果を代入して $n_{Xe}$ を推定し、真空計から計算されるXe密度 $n_v$ と比較してみた。計算では、室温 $T=300[K]$ の値を用いた。結果を図8に示す。

図8を見ると、 $n_v=10^{19}\sim 10^{20}[m^{-3}]$ の範囲では、ほぼ $n_v \doteq n_{Xe}$ であり、この方法で混合ガスからXe密度を推定できるといえよう。しかし、 $n_v \sim 10^{18}[m^{-3}]$ の範囲では、実験条件によっては10倍ほどの誤差が生じている。この原因としては、混合ガスにおいてXeの割合が低いので検出誤差が生じたため、もしくは想定している粒子同士の衝突モデルが不十分なため、と考えられる。実際は、電荷交換衝突だけでなく弾性散乱衝突も起こっていると考えられるからである[3]。

### 4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に列挙する。

- イオンスラストの推進剤及び加速電圧を変化させることで、ENA粒子束の計測から中性粒子の密度及び組成比を検出する

方法を考案した。

- 1次元モデルに基づいてENA生成に関する計算を行い、その方法が有効であることがわかった。
- 実験的に $Xe^+$ によってXeと $N_2$ の混合ガスの中から、Xeのみの密度を推定することに成功した。

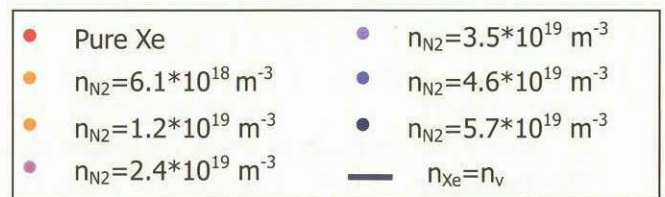
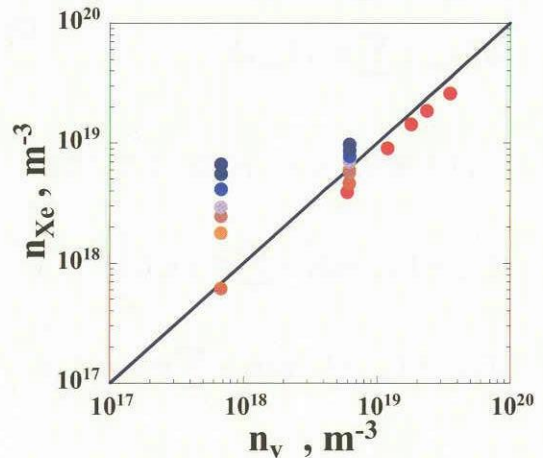


図8 測定結果の評価

### 5. 今後の課題

今後の課題としては、以下のようなものが考えられる。

- Ar, Kr の高速イオン (数 keV 程度) 生成装置の開発
- AO, AN を含む高層大気のシュミュレーターの開発
- 高精度の ENA 粒子束検出器の開発
- 電荷交換衝突断面積のデータベースの構築
- 全体的なりモートセンシングシステムの検討

### 参考文献

- [1] 田中幸紀,山極芳樹,國中均: イオンスラスト排出ビームイオンの ENA 観測への応用に関する研究,日本航空宇宙学会誌,51(2003),第 593 号, pp.285-2928
- [2] Hasted, J. B.: Physics of Atomic Collisions, Butterworth, London, 1964, pp. 413-448.
- [3] 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.