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^{*1} Research on Application of Ion Thruster's Exhausted Beam Ions to ENA Observation

田 中 幸 紀^{*2}・山 極 芳 樹^{*3}・國 中 均^{*4}
Yukinori TANAKA, Yoshiki YAMAGIWA and Hitoshi KUNINAKA

Key Words: Ion Thruster, Space Science, Environment, Charge Exchange Collision

Abstract: The observing method that uses ENA (Energetic Neutral Atom), produced by Charge Exchange Collision, is studied and researched by ISAS in order to estimate the density of neutral particles in the upper atmosphere. Its method is called ENA observation. At present, the ENA observation is done by Charge Exchange Collision between neutrals in the upper atmosphere and the ions in the magnetospheric ring current field that is activated by solar wind. But in this method, it is difficult to separate the informations between neutrals and ions from ENA data because the ions in the magnetospheric ring current field are the natural origin and their energies are not constant. In this study, we propose the new method of ENA observation that uses ions exhausted from ion thruster. Ions from ion thruster are the artificial ones and are more suitable for ENA observation because their energies and densities can be controlled. We evaluate the possibility of application of ion thruster's exhausted ions to ENA observation. Analytical results show the range of altitude and the operating conditions of ion thruster that this method effectively can apply.

1. は じ め に

現在、高層大気の中性粒子密度分布はまだ十分にはわかっておらず、その測定の一方法として太陽風により活発化した磁気圏環状電流領域のイオンによる電荷交換衝突 (Charge Exchange Collision) を利用しようというものがある。電荷交換衝突反応とは高速のイオンと低速の中性粒子が衝突し、その際の電荷の受け渡しによって高速の中性粒子と低速のイオンになるという現象である。この時エネルギーの受け渡しはほとんど行われない。上記の場合では磁気圏環状電流領域のイオンが高速イオンに、ジオコロナの中性粒子が低速中性粒子に相当し、これらが電荷交換衝突を起こす。

地球周辺には磁場があるため地球周辺のイオン粒子は磁場に捕らわれ、磁場に沿った運動をする。しかし、電荷交換衝突によって高速イオンが高速中性粒子になるともはや磁場に捕らわれることなく真っ直ぐに飛行する。この高速中性粒子は ENA (Energetic Neutral Atom) と呼ばれ、電荷交換衝突した場所の情報を持って飛行する。そのため ENA を観測、解析することで生成領域の情報を得ることができる。ここで得られる情報は ENA の粒子種、エネルギー、速度などである。また、電荷交換衝突の割合はその場での中性粒子密度に依存しており、中性化した粒子を測定することでその場の中性粒子密度を推定できる。

この ENA 観測の研究は現在、宇宙科学研究所により進められており、観測機器の試作機が造られ実験も行われている。

しかし、太陽風は自然現象であるため時々刻々変化しており、それに伴う磁気圏環状電流領域のイオン量も変化している。また、地球周辺の中性粒子密度も時々刻々変化している。そのため観測した ENA は高速イオンと中性大気の情報とが渾然一体になってしまい情報を分離することは難しい。

そこで今回、高層大気の中性粒子密度測定を目的として、イオンスラストが排出するビームイオンを使って ENA 観測するという手法を提案する。ここではビームイオンが高速イオンに相当するものとなる。イオンスラストは人工物であるので排出するビームイオンの密度、速度などの情報が既知である。そのため太陽風に伴う ENA 観測では、観測した ENA の粒子種、エネルギー、速度などが異なることもあるのに対し、ビームイオンによるものは特定の粒子が特定の速度、エネルギーで排出されるため、ビームイオンから ENA になったものは簡単に見分けがつく。このことから観測した ENA の情報から既知であるビームイオンの情報を考慮すれば高層大気の中性粒子の情報が正確に得られると考えられる。

我々はイオンスラストの排出ビームイオンを用いた ENA 観測によって高層大気の中性粒子密度解明が可能であると考える、その可能性の評価を行った。

^{*1} © 2003 日本航空宇宙学会

平成 14 年 8 月 2 日原稿受理

^{*2} 静岡大学大学院理工学研究科機械工学専攻

^{*3} 静岡大学工学部機械工学科

^{*4} 宇宙科学研究所

2. ビームイオンによる ENA 観測

イオンスラスタは電気推進の一種であり、化学推進ロケットより高比推力が得られ効率も高いため将来の宇宙輸送手段の一つとして開発が進められている技術である。しかし、本研究では推進手段としてではなく高速イオンの供給源として用いることを想定しているため、イオンスラスタの応用的使用方法となる。

イオンスラスタから排出されるビームイオンは、宇宙機を電気的中性に保つために中和器から排出イオンと同量排出される電子によってプラズマ状態で排出される。排出直後のプラズマはその特徴である準中性を保っている。その後もビームイオンが準中性を維持するならプラズマ中のイオンは地球磁場の影響を受けることなく直進し、地球圏外に逃げてしまう。しかし、過去の研究¹⁾からビームイオンの拡がり角により排出プラズマはプラズマ密度が減少し、排出後短い距離（数十 km 程度）においてほとんどの粒子は準中性を失って地球磁場に捕らわれるだろうということがわかっていて、本研究もこのことを前提としている。

ここでイオンスラスタから排出されたビームイオンによる ENA 観測の概念図を第 1 図に示す。図のように観測装置、イオンスラスタ、地球中心が一直線に並ぶ時を考える（図においては X 軸上）。そして X 軸に垂直な方向にイオンスラスタからビームイオンを排出する。本研究では簡単のために排出後磁場に捕らわれるまでの短い距離は考慮せず、排出後すぐに磁場に捕らわれるものとする。捕らわれたイオンは磁場に沿ってラーマ運動（磁力線の周りを回転する運動、磁場に垂直方向）をしながら磁力線方向（磁力線に平行方向）に移動する。この二つの動きを組み合わせると磁力線の周りを螺旋状に動いていることになる。この時、磁力線方向の運動を左右するのがビームイオンの赤道面に対する排出角度である。排出角度が 0 度の時はほとんどのイオンがラーマ運動のみで、磁力線に平行方向の運動はほとんどない。一方、排出角度を大きくした場合は磁力線に平行方向の速度が大きくなり、磁力線に沿って運動する範囲が広がる。そうすると排出された赤道面からより極地点に近づくことになる。磁力線に沿って運動していると磁場が強くなってくるので、ある点でミラー反射をして反対

方向に移動する。荷電粒子はこのような運動を繰り返す。

排出角度を大きくすると磁力線に沿ってより極地に近づくので排出高度よりも低高度の範囲に進入することになる。

排出されたビームイオンが磁力線に沿って運動しているとそこでは種々の反応が起こり、その中には上記で述べた電荷交換衝突反応も含まれている。

本研究では参考文献を基に宇宙空間の電子密度、電子温度それに中性粒子密度を与え実際の宇宙空間での状態を模擬し、そこでビームイオンを排出した時どれほどの ENA が観測装置によって観測できるのかを解析する。もしある高度で排出されたビームイオンから生成した ENA を観測装置で十分な量、観測できるとしたならその排出高度を変えれば観測される ENA の量、頻度が変わる。それらを考慮すれば大気中の中性粒子密度分布を正確に測定できる。

3. 背景大気成分及び諸反応

3.1 背景大気の中性粒子密度 大気の中性粒子密度は経度や緯度それに時間帯や季節等によりめまぐるしく変化するので、それらの変化に対応したデータを入れることは難しい。そこで本研究では中性粒子密度として NASA の MSIS-E-90 Model²⁾ の緯度 0 度、経度 0 度での太陽活動が極大期にあたる時期のデータを使用している。また緯度、経度が変化しても同じデータを使用している。

このデータは 1000 km までしか示されていないためそれ以上の高度のデータは 1000 km までのデータを延長したものになると仮定して用いている。

3.2 背景大気の電子密度及び電子温度 背景大気の電子密度、電子温度ともに低高度部分は参考文献 3, 4) を参考に読み取ることによって得た。しかし、中性粒子と同じく 1000 km 以上のデータがないため、それ以上の範囲では近似により表している。

3.3 地球磁場モデル 地球の磁場を双極子磁場として考える。磁気双極子を考えることにより磁気ポテンシャルは次のように表される⁵⁾。

$$\phi_m = \frac{m}{4\pi\mu_0} \frac{z}{R^3} \quad (1)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率、 m は磁気能率である。

磁場の r 方向と z 方向の成分は

$$B_r = -\mu_0 \frac{\partial \phi_m}{\partial r} = \frac{3rz}{R^5} B_m \quad (2)$$

$$B_z = -\mu_0 \frac{\partial \phi_m}{\partial z} = (3Z^2 - R^2) \frac{B_m}{R^5} \quad (3)$$

で表される。さらに x 方向と y 方向の成分は

$$B_x = B_r \sin \varphi = \frac{3xz}{R^5} B_m \quad (4)$$

$$B_y = B_r \cos \varphi = \frac{3yz}{R^5} B_m \quad (5)$$

と表される。ここで $B_m = 8.1 \times 10^{15}$ [Wb] である。

よって地球磁場 B は次の式で表される。

第 1 図 ビームイオンによる ENA 観測の概念図

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6)$$

磁力線は磁力の等しい点を結んだ線であり、磁場は等しいはずであるが、実際は重力の影響を受けるため磁力線に沿って一様でない磁場となる。

3.4 イオンと中性粒子の反応 磁力線に沿って移動する際に起こるイオンの素過程として、1) 周辺中性粒子との弾性、非弾性衝突、2) 周辺中性粒子との電荷交換衝突、3) 周辺大気中の電子との再結合、が考えられる。

1) は 3 つの中で最も頻繁に起こる反応で、その影響としてイオンのエネルギーの減少、それに伴う速度の減少がある。1) は考慮すべき反応ではあるがイオン量の変化には繋がらないため本研究では簡単のために省略し、2) と 3) の 2 つの反応について考慮する。

3.4.1 電荷交換衝突反応 1 章で述べたように電荷交換衝突とは高速のイオンと低速の中性粒子が衝突した結果、粒子間で電子が交換され衝突イオン起源の高速中性粒子と大気中の中性粒子起源の低速イオンが生じる現象である。

電荷交換衝突する確率は電荷交換衝突断面積と中性粒子密度により決まる。速度 v の N_i 個のイオン群が中性粒子中を通過した時、微小時間 dt 後の電荷交換衝突による衝突イオン数の変化 dN_i は電荷交換衝突断面積 σ_c 及び中性粒子密度 ρ_n を用いて次式で表される。

$$dN_i = -N_i \rho_n \sigma_c v dt \quad (7)$$

ここで中性粒子密度は前述の MSIS-E-90 Model を使用している。

電荷交換衝突断面積はイオンと中性粒子との組み合わせ及びイオンの速度によって決まる。参考文献 6) の理論から Ar^+ と O , O_2 , N , N_2 , He , Ar 及び H との電荷交換衝突断面積を計算した。その結果を第 2 図に示す。本研究では上記の 7 種類の中性粒子との電荷交換衝突を考慮した解析を行う。7 種類の中性粒子との電荷交換衝突を考えた時の変化量は次式で表される。

$$dN_i = -N_i v dt \sum_{j=1}^7 \rho_{nj} \sigma_{cj} \quad (8)$$

$j = \text{O}, \text{O}_2, \text{N}, \text{N}_2, \text{He}, \text{Ar}, \text{H}$ の 7 種類

第 2 図 Ar^+ に対する電荷交換衝突断面積

3.4.2 再結合反応 正の電荷を持った粒子と負の荷電粒子が衝突して、元の中性粒子に戻る過程を再結合という。再結合による荷電粒子の数密度変化は次式で表される。

$$\frac{dn_i}{dt} = -\alpha n_i n_e \quad (9)$$

ここで n_i はイオン密度、 n_e は電子密度である。

α は再結合係数 (m^3/s) であり

$$\alpha = \sigma_r v \quad (10)$$

という関係がある。 σ_r は再結合断面積、 v はイオン速度である。(9) 式での数密度変化をイオン数 N_i の変化量で表すと次式で表される。

$$dN_i = -\alpha N_i n_e dt \quad (11)$$

再結合には、1) 放射再結合、2) 二重電子再結合、3) 三体再結合、4) 解離再結合があるが本研究では解離再結合はほとんど起こらないと考えられるため 1), 2), 3) の 3 つの再結合が寄与するものとする⁷⁾。

4. イオンスラストと観測装置

ここではイオンスラストと観測装置について述べる。

4.1 イオンスラスト イオンスラストから排出されるビームイオンに関する主な性能式は以下のように表される。ビームイオンの流量 $\dot{m}_i$ は

$$\dot{m}_i = \frac{M}{q} J_b \quad (12)$$

M : イオン質量、 q : イオン電荷、 J_b : ビーム電流、と表される。ビームイオンの速度 v_i は

$$v_i = \sqrt{2 \frac{q}{M} V_b} \quad (13)$$

V_b : ビーム電圧、と表される。空間電荷制限の式 (チャイルド・ラングミュアの式) は

$$j_b = \frac{4\varepsilon_0}{9} \left(\frac{2q}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_b^{\frac{3}{2}}}{x^2} \quad (14)$$

j_b : 電流密度、 ε_0 : 真空の誘電率、 x : 電極間隔、と表される。また

$$J_b = j_b A_b \quad (15)$$

A_b : イオンスラスト断面積、と表される。以上の式よりビームイオン密度 n_b は

$$n_b = \frac{\dot{m}_i}{A_b v_i} = \frac{4\varepsilon_0 V_b}{9 x^2 q} = \frac{2\varepsilon_0 M v_i^2}{9 x^2 q^2} \quad (16)$$

と表される。

第3図 計測器の断面図 (参考文献 8) より引用)

4.2 観測装置 高速中性粒子撮像のための観測装置は現在、宇宙科学研究所が開発を進めている。本研究ではこの観測装置を使うことを想定して解析を行う。計測器の断面図を第3図⁸⁾に示す。測定器は荷電粒子除去部、粒子電離部、粒子分析/検出部の3部分からなり、ノイズ成分である荷電粒子と紫外線を除去したうえで ENA をイオン化させて電気信号に変換する。

この観測装置は 1~30 keV の ENA を計測することを目的としている。計測器の有効入射面積は $3 \times 0.4 \text{ cm}^2$ 、分解能は約 4 度である⁸⁾。これは入射角 4 度の範囲から入ってくる ENA を認識できるということであり、観測した ENA が 4 度の範囲のどの方向から来たかを細かく認識することはできない。

4.3 観測装置の高度 イオンスラストから排出されるビームイオンは排出された付近の磁場に捕らわれ、磁場に沿った動きをする。イオンの場合、磁力線の周りを螺旋運動しながら地球の周りを左周りにドリフトすると考えられるが、ほぼ最初に捕らえられた磁場に沿って運動していると考えて良い。

こうした時、観測装置の高度が低いと地球の自転速度よりかなり速く地球周辺を周っているためビームイオンから生成した ENA を観測できるポイントを直ぐに通抜けしてしまう。それに対し観測装置を静止軌道に乗せるとある経度に注視できるので特定の磁場を観測できる状況にある。確かに高度が低い方が観測量は多くなるが、わずかな時間でのすれ違いよりは長く観測できる方が有利と考え、本研究では観測装置は赤道面上の静止軌道にあるものとする。

測定器が向いている方向は地球中心方向つまり赤道面上に平行な時を 0 度として XZ 面上で方向を変えられるものとする。

5. 解析手法

イオンスラストからの排出速度 v [m/s]、排出時間 t [sec] の時、排出されるイオンの総数を N_1 [個] とすると

$$N_1 = n_b \times A_b \times v \times t \quad (17)$$

n_b : ビームイオン密度, A_b : イオンスラスト断面積, と表される。この N_1 個の排出イオンが磁場に沿って動いてい

第4図 ENA 飛行方向の想像図

る途中に電荷交換衝突や再結合が起こる。この2つの反応は(8)式と(11)式に記した通りである。ある微小時間で2つの反応が終わった時に反応せずに残っているイオンの数を N_2 [個] とすると

$$\begin{aligned} N_2 &= N_1 - (\text{電荷交換衝突変化量} + \text{再結合量変化量}) \\ &= N_1 \left(1 - vdt \sum_{j=1}^7 \rho_{nj} \sigma_{cj} - \alpha n_e dt \right) \end{aligned} \quad (18)$$

と表される。この N_2 [個] のイオンが磁場に沿って動いていると再び2つの反応が起こりイオン総数は減っていく。イオンの総数が 0 になるまで磁場に沿ってこれを繰り返す。

磁場に沿って動くので高度が変わり中性粒子密度、電子密度や電子温度も変化し電荷交換衝突と再結合による反応量も変化する。それに伴いイオン数の減少の割合も変化する。

電荷交換衝突により生成された ENA は生成された地点から放射状に広がる。本研究ではこの ENA を観測したいのでこれが観測装置の有効入射断面積に入るであろう確率を求める必要がある。ここで、その確率について考える。今、電荷交換衝突が起こった地点と観測装置との距離が D [m] であるとする。電荷交換衝突が起こった地点を中心、半径を D とする球をイメージする。ENA は中心から放射状に飛んでいくと考えるので、この球のどの位置にも均等に飛んでいくものとする。これを第4図に示す。そこで、この球の表面積に対する観測装置の有効入射断面積の割合を考えたものが電荷交換衝突した ENA が観測装置に入ってくる確率になる。これを式として表すと

$$P = \frac{1.2 \times 10^{-4}}{4\pi D^2} \quad (19)$$

となる。ただし、ビームの排出角度が 0 度を始めとするごく小さい排出角度の場合は ENA が飛行するであろう方向は限られると考えられるので分母にあたる表面積を小さくすることができる。南北方向にはビームの拡がり角の範囲でしか広がらないと考えると、分母の表面積は南北に 12300 km

第5図 排出角度0度の時の ENA 飛行方向の想像図

第1表 解析条件

排出角度 [度]	0	10, 45, 90
排出速度 [km/s]	49.1, 98.1	
排出高度 [km]	500~4000	500, 1000, 5000
作動時間 [s]	1, 600	60
観測時間 [s]	1, 600, 3600	3600
時間刻み [s]	10^{-3}	
ピームイオン密度 [m ⁻³]	1.24×10^{16} , 4.94×10^{16} *	
推進剤	アルゴンイオン (Ar ⁺)	
スラスタの直径 [cm]	15	
スラスタの電極間隔 [mm]	1	
推進剤利用効率 [%]	100	
ピーム拡がり角 [度]	10	

* 排出速度に対応。

第6図 電荷交換衝突確率

第7図 排出角度0度, 作動時間1秒, 観測時間1秒の時の ENA 観測個数

程度伸びた帯状の表面積として考えることができる。これを第5図に示す。この表面積は球として考えた場合の表面積の約1/6になる。

このようにして求められた確率 P を電荷交換衝突により生成された ENA 量に掛け、得られた値が観測装置に入ってくる個数となる。

本研究ではイオンスラスタの排出速度, 排出角度, 排出高度の3つをパラメータとして考える。本解析で使った排出イオンやイオンスラスタに関する値を第1表に示す。排出速度 49.1 [km/s] は比推力 5000 秒, 98.1 [km/s] は比推力 10000 秒に相当する。

ここで本研究で用いている作動時間, 観測時間の意味を定義しておく。作動時間はその名の通りイオンスラスタを何秒作動させたかを意味し, その時間に対応したイオン個数が排出されるものとする。観測時間もその名の通り観測装置で観測を行っている時間のことである。排出されたイオンが電荷交換衝突により ENA になって観測装置に到達するまでには電荷交換衝突した地点と観測装置との間の距離を排出速度で除しただけの時間がかかる。ただし, 本解析での観測時間には, 到達するまでの時間は含まずに理論上一番最初の ENA が観測装置に到達すると考えられる時をスタートとする時間であるとする。

以上のような条件で解析を行った。なお磁力線周りのラーマ半径は解析には考慮していない。

6. 解析結果及び考察

6.1 電荷交換衝突確率について ピームイオンから ENA が生成される割合つまり電荷交換衝突の確率について結果を示す。各高度において排出されたアルゴンイオンが排出後1秒間で全体のどれだけが電荷交換衝突したかを第6図に示す。イオンスラスタの排出高度は500 km 以上であるので500 km 以下のデータは参考としてである。なお図は排出イオンがその高度にずっと留まっていると考えた時のものである。この図から高度が低いほど多くの量が電荷交換衝突することがわかる。

6.2 排出角度が0度の時 まずピームイオンの排出角度が0度の時を考える。この時磁力線に平行な方向への速度成分がほぼ0のため, 磁場に捕らわれたイオンは排出された赤道面上でラーマ運動を繰返し, ほぼ排出高度に留まることになる。この条件においてイオンスラスタ1台で作動時間1秒間, 観測時間1秒間で観測できる ENA の量を第7図に示す。この図から排出速度が大きい方が多くの量を観測できるため観測に適していることがわかる。ENA 観測で高度による中性粒子密度変化を捉えることができるよ

うにするために必要な量を「1 秒間に 1 個の ENA を観測すること」と考える．図において最も観測個数が多い排出速度 98.1 [km/s]，排出高度 500 [km] の結果を見ると観測個数は 0.04 個であり 1 個/s の測定値を得るにはこの解析条件ではイオンスラスタを約 25 台作動させる必要がある．

しかし 1 秒間排出したもの全てが 1 秒間で電荷交換衝突反応し観測されているわけではないのでイオンスラスタ 1 台で排出速度 98.1 [km/s]，作動時間 1 秒間とした時の ENA 観測個数総数の時間変化を第 8 図に示す．Y 軸は総数であるので時間が経てばどの高度においても観測個数が増える．排出高度が高高度ほど観測個数は少なく，低高度では排出した量が全て反応するため，ある時刻で観測される量は頭打ちになる．つまり作動時間 1 秒間の排出量は高高度排出では多すぎて低高度排出では少なすぎるのであり，低高度では作動時間を長くすれば観測個数が増える．そこでスラスタ 1 台，排出速度 98.1 [km/s] で作動時間 600 秒間，観測時間 600 秒間の時の観測個数を第 9 図に示す．図より観測個数が 1 個/s という条件を排出高度 700 [km] 以下の範囲では満たしていることがわかる．このようにイオンスラスタの作動時間が長ければ観測しやすい状況になる．ただし観測装置が静止軌道にあるのに対しイオンスラスタは排

第 8 図 排出角度 0 度，作動時間 1 秒の時の ENA 観測総個数の時間変化

第 9 図 排出角度 0 度，作動時間 600 秒，観測時間 600 秒の時の ENA 観測個数

出高度での軌道を地球自転速度よりかなり速くまわっているため観測装置の分解能を考慮しても作動時間を伸ばして観測量が増える範囲には限界がある．また，イオンスラスタの台数を増やすことによって条件を満たす高度は高くなると考えられる．

6.3 排出角度がある時 次にビームイオンに排出角度がある場合について考える．しかし排出角度をつけると次の理由で難点が多い．

ほぼ排出高度で反応が起こる排出角度 0 度の時と違い排出角度をつけるとイオンが磁場に沿って動き，排出高度よりも低高度の部分でより多くの ENA を生成する．この時 ENA はどの高度で生成されたかを示す要素を持っていないため，観測装置で観測した際には ENA が飛んでくる方向はわかってもどの高度で生成された ENA かを断定することはできない．そのため詳細な磁場モデルから高度と観測装置から見た時の角度の関係がどのようなものかをある程度予測しておいて ENA の飛んできた方向から生成された高度を予測することになる．しかし本解析では 35786 km という高高度に観測装置があるため 500 km，1000 km，そして 5000 km の排出高度での磁場に沿った動きはたとえ 90 度の排出角度をつけても観測装置から見て数度の角度に収まってしまう．本解析で使用を想定している観測装置は約 4 度の分解能であるので ENA を観測してもどの方向から飛んできたのかを瞬時に特定することは難しいと考えられる．ただし観測装置の向いている方向を上下に動かすことで ENA 量が多い方向と少ない方向の判定はできると考えられる．

そこでここでは観測装置から見て ENA がどの方向（角度）から飛んで来るのかを考える．500，1000，5000 km の各高度で排出された場合について解析を行ったが最もわかりやすい特徴を示している排出高度 1000 km の時の結果を第 10 図に示す．この図から次のことがわかる．排出角度 10 度の時，イオンは磁力線に沿う動きは小さく，低高度まで入り込まないため電荷交換衝突が起こりにくく，赤道面を中心にして同じ範囲を何度も行き来する．逆に排出角度 45 度，90 度の時は磁力線に沿って動き低高度まで入り込み，

第 10 図 排出高度 1000 km で排出角度をつけた時の ENA 観測個数

そこで電荷交換衝突を活発に行うのでその方向(観測角度の大きい部分)からの量が多くなっている。この領域でイオン全てが反応を起こし、なくなるため正の角度領域にしかデータがない。この時、同じ排出速度であれば排出角度による違いはほとんどないことがわかり観測個数の大きな差は排出速度の違いが生み出していることがわかる。排出高度が 500, 5000 km の時は電荷交換衝突の起こりやすさの違いによりグラフの形は異なるが観測角度の大きい部分(低高度部分)で観測個数が多いという特徴は変わらない。このように低高度に入り込んだ時に ENA 観測量が多くなるという特徴を利用すれば観測装置の角度を変化させることで ENA の飛来方向を特定でき、先の方法により ENA が生成された高度を特定することができる可能性がある。

7. 結 論

イオンスラスト排出ビームから生成した ENA を利用した高層大気中性粒子密度観測の可能性を評価するためイオンスラストの排出速度、排出角度、排出高度を変化させて十分な量の観測が可能と考えられる高度やその条件について解析を行った。その結果は以下の通りである。

- (1) ビームイオンの排出速度が大きいほど観測がしやすくなる。
- (2) ビームイオンの排出角度 0 度の時はイオンスラストの台数を増やすことなどにより排出高度 1000 km 程度までなら ENA による高層大気密度観測を行える可能性がある。
- (3) 観測装置が静止軌道上にあるとした場合、排出角度が大きいビームイオンを用いた高層大気密度観測を行うことは難しいが観測装置の角度を変化させることで ENA の飛来方向を特定でき観測可能となる。

今回の解析は簡単のため観測機器は静止軌道にあるとしたが、観測機器を低い軌道にする(スラストに近づく)ことで、イオンスラスト排出ビームイオンによる ENA 観測を可能にする範囲(高度)は広がると考えられる。このことについては、スラスト軌道と観測機器の位置関係の変化、排出方向の制御といった詳細な解析が今後必要である。

参 考 文 献

- 1) 山極芳樹, 山本良一, 山 祐次: 地球周回軌道上でのイオンスラスト排出プラズマの挙動及びその周辺環境に及ぼす影響, 日本航空宇宙学会論文集, 49 (2001), pp. 115-122.
- 2) MSIS-E-90 Atmosphere Model, NSSDC MODEL Web, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>
- 3) 高村秀一: プラズマ理工学入門, 森北出版, 東京, 1997, pp. 45-48.
- 4) 堀内剛二: 超高層物理, 共立出版, 東京, 1969.
- 5) 前田 坦: 太陽惑星環境の物理学, 共立出版, 東京, 1982, pp. 41-44.
- 6) Hasted, J. B.: Physics of Atomic Collisions, Butterworth, London, 1964, pp. 413-448.
- 7) 電気学会: 放電ハンドブック, オーム社, 東京, 1974, pp. 42-45.
- 8) 向井利典, 早川 基, 齋藤義文, 風間洋一, 浅村和史, 町田 忍, 長谷部信行: 高速中性粒子撮像観測装置の開発, 平成 9 年度地球惑星観測用搭載機器基礎開発報告書, 宇宙科学研究所, 1998, pp. 44-50.

付録: 推進剤利用効率が 100%以外の時

本研究では推進剤利用効率を 100%として考えた。そのためイオンスラストから排出されるのはイオン及び中和のために出される電子のみでスラスト起源の中性粒子は考慮していない。今回の応用は推進機としてではないのでイオン生成コストは高くても良いと考えられるが、推進剤利用効率 100% (近く) での作動は 2 価イオンの生成といった問題も生じてくるので、実際にはもっと低い利用効率で作動させる必要がある。

推進剤利用効率 η は

$$\eta = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_0} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_i + \dot{m}_n} \quad (A1)$$

$\dot{m}_i$: イオン流量, $\dot{m}_0$: 推進剤流量, $\dot{m}_n$: 中性粒子流量, と表されるため推進剤利用効率が 100%以外の時はスラスト起源の中性粒子がビームイオンと電荷交換衝突するため大気中性粒子との間で電荷交換衝突する時にはスラスト出口での情報が失われていると考えられる。それがどの程度かを見積もる。

(A1) 式の右辺の分母, 分子を Ar 粒子質量 M で割り, 整理すると

$$N_n = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) N_i \quad (A2)$$

N_n : 中性粒子個数, N_i : イオン個数, という個数の関係が得られる。この式より推進剤利用効率が 90%の時は排出されるイオン個数の約 11%, 80%の時はイオン個数の約 25%に相当する中性粒子が単位時間に排出されることがわかる。

次にその中性粒子のうち、どの程がビームイオンと電荷交換衝突するかを考える。(A1) 式を変形していくとイオン密度と中性粒子密度の関係は

$$\rho_n = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{v_i}{v_n} n_i \quad (A3)$$

ρ_n : 中性粒子密度, n_i : イオン密度, v_i : イオン速度, v_n : 中性粒子速度, と表せる。イオン速度は本解析では 98.1 [km/s] もしくは 49.1 [km/s] を使用している。中性粒子速度は放電室壁面に相当する熱速度であると考え。放電室壁面の温度を 300 °C とすると熱速度は約 600 [m/s] になる。すると中性粒子個数はイオン個数より少ないが密度では中性粒子密度がイオン密度の数十倍濃いことが (A3) 式よりわかる。このことは排出後、熱速度で移動する濃い中性粒子群の中を高速のイオン群が通り抜けていくことを意味している。これに関して (7) 式を変形して

$$-\frac{dN_i}{N_i} = \rho_n \sigma_c v_i dt \quad (A4)$$

ρ_n : スラスト起源の中性粒子密度, とすると左辺は電荷交換衝突による排出したイオンの減少割合を表している。今、イオン速度を 98.1 [km/s], スラスト起源の中性粒子密度を排出直後の濃い状態で一定であると仮定した時、左辺の電

第 A1 図 電荷交換割合の時間変化

荷交換によるイオンの減少割合とそれに要する時間の関係は第 A1 図のようになる。図中で電荷交換によるイオンの減少割合がある値で頭打ちになるのは、任意の時間で電荷交換反応をするイオンがその時間で排出される中性粒子数を上まわることではないからである。

この図よりスラスタから排出されたビームイオンはスラスタ起源の中性粒子のほとんどと排出直後に電荷交換衝突すると考えられる。そして、それに相当する量のビームイオンはスラスタ起源の中性粒子により高速中性粒子 (ENA) になる。この反応は第 2 章で述べた粒子の準中性が失われる前に起こっているため、大気中性粒子との電荷交換衝突を考える際には、もうすでにビームイオンはスラスタ起源の中性粒子個数分だけ減少していると考えられる。

以上のことから推進剤利用効率が低い場合における大気中性粒子の観測ではそのスラスタ作動状態における推進剤利用効率に応じたスラスタ起源の中性粒子による ENA を区別して評価する必要がある。スラスタ起源の中性粒子による ENA はスラスタ方向から来ること、そしてスラスタ作動直後に発生するが、一方、周辺中性粒子との反応による ENA はその発生に時間遅れがあり、方向はランダムであることから、短時間で間欠的なスラスタ作動による ENA 観測では区別可能と考えられるが、このことについては今後より詳細な検討が必要である。