

逆電位アナライザーを用いた イオンスラスタの逆流イオンによる宇宙機表面材料損耗評価

○服部 凌大, 永井 宏樹, 上野 一磨 (中京大学), 細田 聡史
西山 和孝 (宇宙航空研究開発機構), 村中 崇信 (中京大学)

Estimation of Erosion Rate on Spacecraft Surface Material Caused by Backflow Ions from Ion Thruster with Retarding Potential Analyzer

Ryota HATTORI, Hiroki NAGAI, Kazuma UENO (Chukyo University)

Satoshi HOSODA, Kazutaka NISHIYAMA (JAXA) and Takanobu MURANAKA (Chukyo University)

1. 背景

現在, 探査機や人工衛星の動力航行や姿勢制御のために, 従来の化学推進に替わりイオンスラスタやホールスラスタなどの電気推進が多く使用されている。電気推進は化学推進と比較して, 低推進力ながら約 10 倍程度の比推力を持つため, 宇宙空間での長期運用に適することがその理由である。国内では, イオンスラスタの長期宇宙実証の成功例として, 深宇宙探査機「はやぶさ」が広く知られている。「はやぶさ」は 2003 年 5 月に打ち上げられ, 累計 3 億 km にのぼる宇宙航行ののち, 小惑星イトカワから地質サンプルを採取し 2010 年 6 月に地球に帰還した¹⁾。現在は, その後継機にあたる「はやぶさ2」が運用されており, 搭載された4機のイオンスラスタは, 全動力航行の 7000 時間のうち 4000 時間を 2017 年 4 月までに完了している²⁾。

方で, 軌道上の「はやぶさ2」において, 宇宙機表面汚染量計測用に搭載された水晶振動子式微小天秤 (QCM) センサは, イオンスラスタの逆流イオン (バックフロー) によると思われるスパッタリング損耗を計測している。図1にイオンスラスタ取付プレート上の QCM センサ設置位置とセンサの外観を示す。QCM センサは, 表面処理の異なる2つのセンサ, QCM1 (ポリイミド) と QCM2 (金) が搭載されておりどちらも質量減を観測している³⁾。図2にそれぞれが観測した損耗レートとその時稼働していたスラスタとセンサ間距離の関係を示す。このグラフからも読み取れるようにスラスタ最近傍では最大 200[ng/cm²/h]の損耗が観測されている。これは厚さ換算で 1Å 程度であるが 7000 時間の宇宙作動⁴⁾が要求されるイオンスラスタにとっては, スラスタ累計運

用時間経過後大きな損耗量となる。はやぶさ2には, イオンスラスタの周囲にスラスタの熱制御を行うための薄膜積層構造からなる熱制御材が取り付けられている。そのため, はやぶさ2では, 周辺熱制御材の損耗が懸念されており, 探査機開発において, バックフローによる損耗のメカニズムの解明とともに定量評価手法の確立が急務となる。

このバックフローは, イオンスラスタの加速グリッド孔から漏洩する未電離の推進剤ガスと静電加速されたビームイオンが電荷交換を行うことで発生する電荷交換イオン (CEX イオン) であると考えられる。スラスタ下流のプラズマプルーム中で生成される CEX イオンは, 生成時に推進ガスの熱速度程度の低速度であるため, プラズマプルームと宇宙機の電位差で静電加速され, 宇宙機側に逆流するバックフローとなる。図3にプラズマプルームとこのバックフローの概念図を示す。

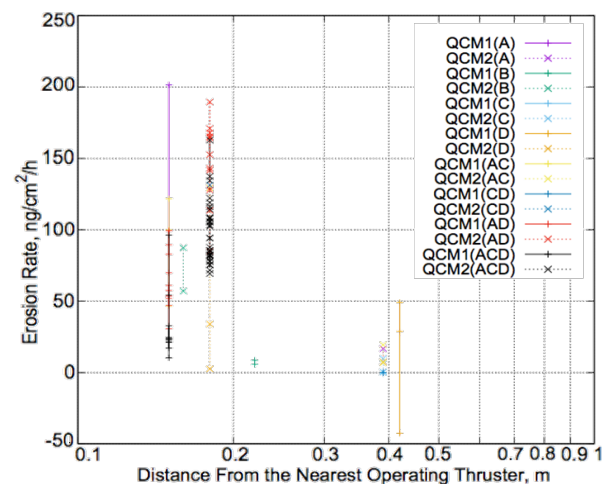


図2 作動中の最近傍スラスタ距離に対する損耗率

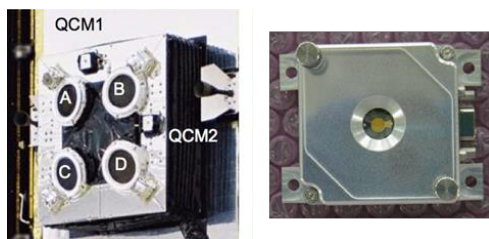


図1 イオンスラスタと QCM センサの配置(左)とポリイミドコーティングタイプの QCM1 (右)³⁾

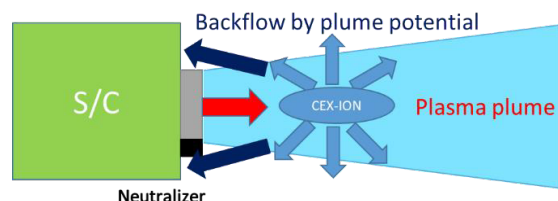


図3 バックフロー概念図

2. スパッタリング損耗率

本研究では宇宙機の表面材料損耗の定量評価として単位時間当たりのスパッタリング損耗率 $[\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ を評価するものとした。この損耗率は、Yamamura の半実験式^{6,7)}から得られる入射イオン当たりのスパッタリング収量 $[\text{atoms/ion}]$ と、入射イオンのフラックス $[\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ の積で算出可能である。Yamamura の半実験式では、イオン 1 個がエネルギー E で材料表面に垂直入射したときのスパッタリング収量 $Y(E)$ $[\text{atoms/ion}]$ は式(1)で示される。

$$Y(E) = 0.042 \frac{Q(z_2)\alpha * (M_1 / M_2)}{U_s} \frac{S_n(E)}{1 + \beta \Gamma k_e \varepsilon^{0.3}} \left[1 - \sqrt{E_{th}/E} \right]^s \quad (1)$$

また、スパッタリング収量は入射イオンの入射角依存性をもっており、これを考慮したスパッタリング収量は、Yamamura の式(2)によって以下のように計算できる。

$$\frac{Y(\theta)}{Y(0)} = t^f \exp[-\Sigma(t-1)], t = 1/\cos\theta \quad (2)$$

これらの式中の物質固有のパラメータは、^{6, 7)}で使用されるパラメータである。

3. 目的

前述の背景から、本研究では、地上実験によりイオンスラスタのバックフローイオンによるスラスタ近における損耗メカニズムの解明とともに定量評価手法の確立を最終目標としている。

この損耗はスパッタリング損耗と予想され、後述する Yamamura の半実験式^{6,7)}を使用することで、スパッタリング収量を計算し、計算したスパッタリング収量に入射イオン数を掛ければ定量評価を行った。この定量評価は、速度エネルギーとその角度分布、入射イオンフラックスが入力値としている。そのため、「はやぶさ2」実機に搭載されたイオンスラスタと同型のイオンスラスタ $\mu 10$ を用い、そのバックフローのこれらの諸量を計測した。本稿では、この実験の結果とそこから見積もられる損耗量について報告する。

4. 実験装置

4.1 実験施設 本稿の実験は、すべて宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(相模原キャンパス)のイオンエンジン耐久試験用の真空チャンバを使用して行った。この真空チャンバは、400W 級のマイクロ波放電式イオンエンジンの推進性能と耐久性能評価のために 1995 年に建設された直径 2m、長さ 5m の主真空タンクと直径 80 cm の2つの補助真空タンク(エアロック)を持っている⁵⁾。主タンクには、排気系としてロータリーポンプ、メカニカルブースターポンプ、ターボ分子ポンプで粗引きされた後、主タンクに直付けされた直径 80cm のクライオポンプ ULVAC CRYO-U30H 4 台にて排気される⁵⁾今回の実験は、真空チャンバの背圧が $4.6 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 程度として行った。

4.2 スラスタ 本稿の実験は、はやぶさ2実機に搭載されたものと同型でマイクロ波放電式イオンス

表 1 $\mu 10$ の作動条件

	Ion thruster	Neutralizer
Xe 流量 (sccm)	2.61	0.94
マイクロ波投入電力 (W)	26.9	8.42
スクリーン電圧 (V)	1500	
スクリーン電流 (mA)	180	
アクセル電圧 (V)	-350	
アクセル電流 (mA)	1	
バイアス電位 (V)		36
電子放出電流 (mA)		181

ラスタ $\mu 10$ (Lavatory Model)を使用した。 $\mu 10$ は、Xe を作動ガスとしており、JAXA 宇宙科学研究所の電気推進工学部門にて研究開発され、宇宙実証された ECR 放電型イオンスラスタである⁸⁾。このイオンスラスタを真空チャンバ内へ設置して実験を行った。設置方法の詳細は次章で述べる。実験時の $\mu 10$ の作動条件を表1に示す。

5. 計測器

5.1 エネルギーアナライザ エネルギーアナライザは、様々な種類のものが存在するが、本研究では積分型アナライザに分類される逆電位アナライザ⁹⁾(以下 RPA)を使用した。この装置の原理は、RPA 内部に入ってくるイオンビームに対してグリッド (IRG) に正電位を印加し、そのエネルギーに満たない低エネルギーイオンを遮断することによってグリッドに印加した電位以上のエネルギーをもつイオンのみを捕集することでエネルギー分解を行う。図 4 に本研究で用いた RPA の外観図と簡潔な回路図を示す。この図からも分かるように RPA は 3 種のグリッドと 1 つのコレクタから構成されている。各グリッドの役割についてについて以下に箇条書きで示す。

(A) FG (Floating Grid)

RPA 内の電界漏洩を防止してプラズマへの擾乱を防ぐ。浮動電位としている。

(B) ERG (Electron Retarding Grid)

電子の RPA 内部への侵入を阻止する。プラズマ電位より負電位を印加する。

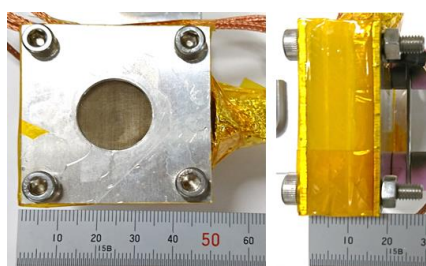
(C) IRG (Ion Retarding Grid)

エネルギーに応じた挿引電圧を印加し、RPA 内部に侵入したイオンにフィルタをかけ、エネルギー分解をする。

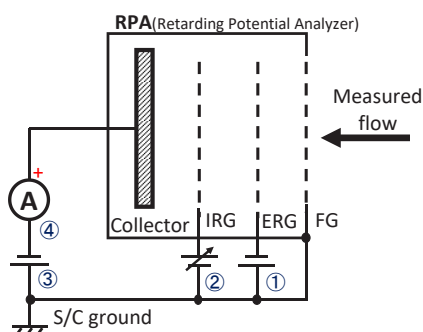
(D) Collector

コレクタは IRG の挿引電圧によるフィルタを透過したイオンを捕集する。コレクタでイオンを捕集するために、負電圧を印加する。

次に図 5 に、これらのグリッドの位置関係と、グリッドおよびコレクタに印加した実際の電圧を示す。ここでの ERG の電位 V_{ERG} は、中和機のバイアス電圧以下とし、十分に電子を反射できる電圧に決定した。イオンの捕集性能を高めるコレクタ電圧 V_C は電流計の都合上でバイアスできる最大電圧を使用した。また、これらのグリッドには、SUS 製のメッシュ 250 を用いてブルーム中のデバイ長以下の線間距離となるように、線間距離が 0.062 mm ものを使用してグリッド孔内でプラズマによる電位の静電遮蔽を回避するよ



a) 外觀図



b) 回路図

図4 RPA 外觀図(上)とその回路図(下)

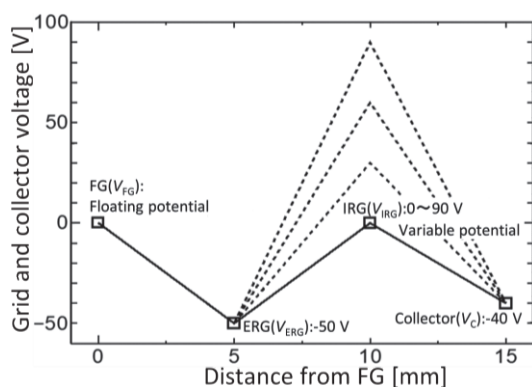


図5 各グリッドの電圧と位置関係

う設計した。

RPA は IRG の電圧を変えさせながら、このときコレクタに流入するイオン電流を計測し、電流電圧特性を取得する。これは、IRG に印可された特定の電圧を超えることが出来るエネルギーを持つイオン全てを捕集していることとなり、計測されるイオン電流はエネルギーが無限大から IRG 印可電圧までのエネルギーを持つ全イオンの積分値をとっていることになる。よって計測された電流をエネルギーで微分することで、式(3)のとおりイオンのエネルギー分布が計算できる。ここで、 I_i はコレクタ電流、 V_{IRG} は IRG の電圧、 E はイオンエネルギー[eV]、 I_{i0} は、エネルギー制限をしないときのイオン電流である。

$$f(E) = -\frac{1}{I_{i0}} + \frac{dI_i}{dV_{IRG}} \quad (3)$$

また、このときの電流 I_{i0} に各グリッドの開孔率 (0.368) による補正をかけて計測面積で割れば、入射イオンフラックスが計算可能である。計測面積は、開口径の直径 2[cm] の円形である。

5.2 計測器セットアップ

本研究では、前述した

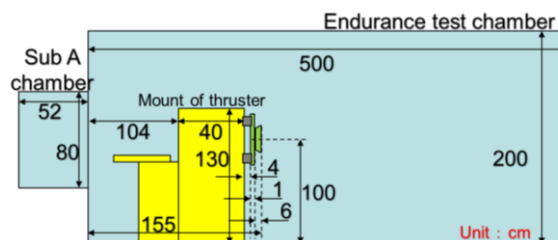


図6 イオンエンジン設置位置

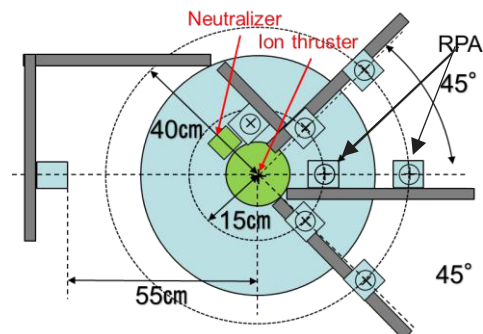


図7 イオンエンジンプレートへのRPA設置位



図 8 RPA 設置の写真

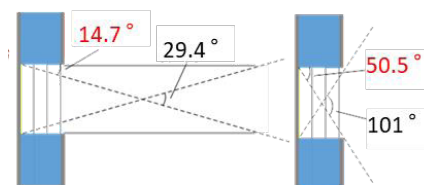


図9 視野角制限フードによる視野角変化(上)と外観(下)

とおり直径 2m, 長さ 5m の円筒状の真空チャンパ内にイオンエンジン $\mu 10$ を設置して実験を行った. 図 6 にイオンエンジン設置位置について示す. また, RPA の設置位置については, 「はやぶさ2」に搭載された QCM センサの位置(14 cm, 39 cm)を参考に, スラスタ中心から 15cm と 40cm の位置に設置して実験を行った. 図 7 にイオンエンジンプレートへの設置位置, 図 8 にセットアップの写真を示す. また, ビー

ム軸方向の取付け位置は、回転機構設置の都合で RPA の開口部がビーム出口面比べて 6cm 下流側となるように設置している。

角度依存計測では RPA の角度分解能が重要であるため、視野角制限フードを設けて 14.7° まで分解能を向上させて角度依存を計測することとした。図 9 に、RPA の視野角制限フードの外観の写真および視野角制限フードによる視野角変化の図を示す。

これらのセットアップで、RPA へのイオン入射角度 θ をスラスト中心軸へ向くほど正として表現して -90°, -60°, -30°, 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° と角度を変化させたときの計測を行った。

5.3 計測と解析の方法

RPA でエネルギー分布計測を行う際には、IRG の電圧を 0~90[V]まで可変し、各電圧で電流計測を 5 回行い、これを 3 セット繰り返し、計測を行った。RPA は、式(3)のように正規化した計測電流を IRG 電圧で微分するため、わずかなノイズでも大きく影響を及ぼす。そのため、速度エネルギーの分布である式(4)のガウス関数を式(3)に代入し、微分方程式として解いた累積分布関数の式(5)に計測電流を Generalized Reduced Gradient (GRG) 非線形で探索の行うことで最小二乗法により近似を行った。この近似では、式(5)の分布を 2 重にした関数への近似も行い、よりよく適切に近似できている(2乗の誤差和の小さい)方を選択した。さらに、この近似により求めた係数を式(4)に当てはめることで速度エネルギー分布を得た。式(4)、式(5)の a, b, c, C は定数であり、 erf はガウスの誤差関数である。

$$f(E) = a \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) \quad (4)$$

$$I(E) = I_{i0} \left(-\frac{\sqrt{\pi}}{2} a \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}E - \sqrt{2}b}{2c}\right) \right) + C \quad (5)$$

実際の解析の一例を図 10 にしめす。このグラフでは、計測電流値の平均を IRG 電圧が 0V の時の電流ですべて規格化(除算)し灰色の×印で示し、エラーバーには標準偏差を表示した。さらに、前述した近似曲線はグラフ中では灰色の点線で表されており、これを微分したものが黒の実線となる。この黒の実線はイオン速度エネルギーの確率密度になっており、そのほかの2色の実線は確率密度分布をそれぞれに分けた結果である。

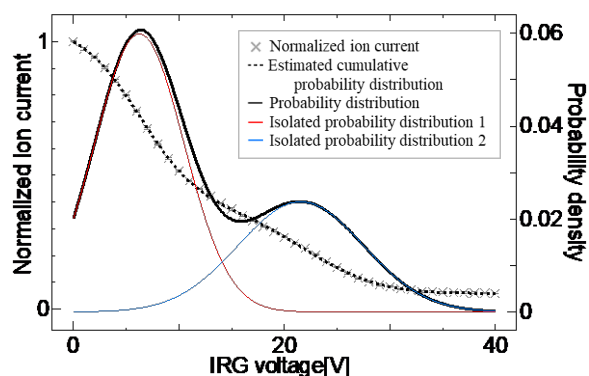


図 10 RPA 計測結果解析の一例

6. 実験結果

フィッティングをかけた式(5)の係数のうちのイオンエネルギー分布のピークエネルギーを表す係数 b に着目して図 11 にイオン入射角に対するイオン速度エネルギー b の関係を示す。ただし、2 重分布の場合は平均エネルギーが大であるものをプロットした。また、図 12 にイオン入射角に対する入射イオン束の関係を示す。ただし、入射角 -90°, -60° は、SN 比が高かったため、イオンエンジンプレート上の 15 cm と 40 cm とともに計測することができなかった。

また、この結果のそれぞれの規格化電流から入射イオン束を計算した。この入射イオン束とそれぞれのエネルギー分布から 2 章で説明した Yamamura の半実験式を用いて 0.1eV ごとにキセノン対金のスパッタリング収量を計算して、台形則による積分近似を行って損耗率を計算した。この損耗率の計算結果を表 2 に示す

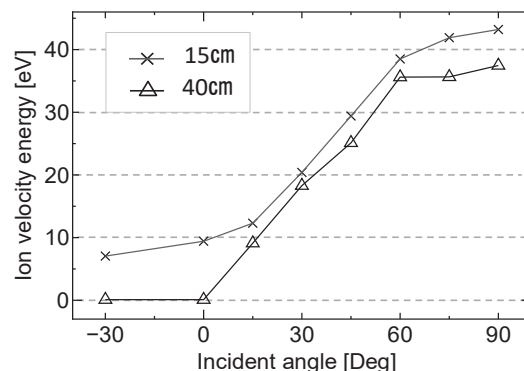


図 11 入射角に対するイオン速度エネルギー b

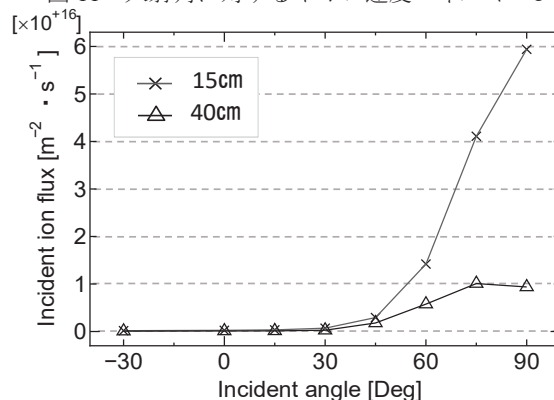


図 12 入射角に対する入射イオン束

表 2 入射イオン (キセノン) 束と金の損耗

入射角 [Deg]	15 cm		40 cm	
	入射イオン束 [m ² · s ⁻¹]	損耗率 [m ² · s ⁻¹]	入射イオン束 [m ² · s ⁻¹]	損耗率 [m ² · s ⁻¹]
-30	1.82E+14	9.21E-21	7.71E+13	7.80E-138
0	2.56E+14	2.29E-01	1.09E+14	4.91E+10
15	3.46E+14	1.00E+09	1.40E+14	5.25E+10
30	7.06E+14	2.87E+11	2.72E+14	9.70E+10
45	2.94E+15	3.61E+13	1.80E+15	6.55E+12
60	1.42E+16	2.21E+14	5.77E+15	2.83E+13
75	4.11E+16	4.92E+11	1.01E+16	5.12E+09
90(89)	5.94E+16	2.20E-111	9.38E+15	1.40E-93
合計	1.19E+17	2.58E+14	2.76E+16	3.51E+13

7. 考察

図 11 と図 12 それぞれの結果からイオン入射角度の増加とともにイオン速度エネルギーが増加し、また、イオン電流量も増加していることが分かる。図 11 のイオン速度エネルギーに関しては、15 cm, 40 cm どちらの点の計測結果も角度上昇に伴い単調増加していることがわかる。これは、プルーム電位がスラスト直下においてもっと電位が高くなることに起因するものと考えられる。しかし、15 cm と 40 cm の位置の 90° の時は、どちらも計測器の視野領域中央が同じ位置であるが計測したエネルギーが異なっている。これは計測器の視野領域がプルーム軸から距離が増加により変化したことが考えられる。図 12 の入射イオン束に関しては、どちらの結果も指数関数的に増加していることが分かる。スラストはイオンを噴射しイオンは拡散していくため、プルーム中においてイオン密度がもっと濃いスラスト直下であり、電荷交換イオンが発生しやすい。高入射角にすると電荷イオンの発生量が多い方向を見ていくため、イオンの量が 2~3 桁も増えたと考えられる。

Yamamura の半実験式を用いて行った損耗率評価では、15 cm, 40 cm とともに損耗率が最大となるイオンの入射角は 60° であり、90° 付近や 0° 以下の方向から入射するイオンは損耗にほとんど影響をあたえないことがわかった。はやぶさ 2 で観測された金の損耗率はスラストから 14 cm の位置と 39 cm の位置でそれぞれ最大 $7.42 \times 10^{14} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ と $1.41 \times 10^{14} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ であった。それに対して、今回の実験で損耗量見積りの合計は、それぞれ $2.58 \times 10^{14} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ と $3.51 \times 10^{13} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ であり、損耗の桁としては、およそ一致しているが、実機に対して実験値は 2.9 倍と 4.0 倍の差異が見られる。この差異の原因のひとつとして、プルーム電位と宇宙機電位の差が考えられる。プルーム電位に関しては、数値解析により、地上実験でのプルーム電位は宇宙空間での実機に対して低くなっていることが指摘されており、その電位差分だけ軌道上ではイオンの速度が増加していることが考えられる。また、宇宙機電位に対しては、RPA は、地上電位 (grand) を基準にエネルギー分解を行っているため、宇宙機が負に帯電していた場合のイオンの速度は同じくその電位差分加速されていることが考えられる。

8. まとめと今後の予定

イオンスラスト $\mu 10$ を用いて RPA で、実機 QCM センサの位置におけるバックフローのイオン速度エネルギー分布とその角度分布について計測を行った。これによりイオン速度エネルギーやイオンの量は、プルーム電位や電荷交換イオンの発生量に起因するビームに沿う方向に明らかな角度分布をもつことがわかった。

さらに、Yamamura の実験式を用いた金の損耗率評価では、実機の 1/3~1/4 倍の結果となり、桁数としてはおよそ一致した。両者の差は、実機と地上実験のプルーム電位と宇宙機電位の差が考えられ、宇宙機電位に関しては、損耗率のデータから逆算を行う計画である。

謝辞

本研究にあたり、協力してくださった國中・西山研究室の皆様に感謝を申し上げます。また、耐久試験チャンバなどの実験環境を使用させていただいた宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) K. Nishiyama, S. Hosoda, K. Ueno, R. Tsukizaki, H. Kuninaka: Development Status of Hayabusa2 Ion Engine System, Proceedings of Space Transportation Symposium FY2013, 2014-01, STEP-2013-023
- 2) S. Hosoda, K. Nishiyama, K. Ueno, H. Kuninaka: Development Status of Hayabusa2 Ion Engine System, Proceedings of Space Transportation Symposium FY2012, 2013-01, STEP-2012-067
- 3) K. Nishiyama, S. Hosoda, R. Tsukizaki, H. Kuninaka : Operation Status of Ion Engines of Asteroid Explorer Hayabusa2, Proceedings of Space Transportation Symposium FY2016., 2017-01, STEP-2016-058.
- 4) Y Arakawa, H Kuninaka, Y nakayama, K Nishiyama : イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 2006 年 12 月
- 5) I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki, Y. Shimizu, S. satori: Development of an Endurance Test Facility for Microwave Discharge Ion Engine System., Journal of the japan society for aeronautical and space sciences, 47 (1999), pp.411-418.
- 6) Y. Yamamura and Y. Mizuno, IIPJ-AM-40, Inst. Plasma Physics, Nagoya Univ., 1985.
- 7) Y. Yamamura and H. Tawara, Atomic data and Nuclear data Tables 62, 149 (1996).
- 8) S. Hosoda, H. Kuninaka : The Homeward Journey of Asteroid Explorer "Hayabusa" Powered by the Ion Engines , J. Plasma Fusion Res. Vol.86, No.5 (2010) , pp282-292.
- 9) S Minami : 逆電位アナライザ(RPA)の寸法,電極バイアス電位の設定基準について,電気学会論文誌 A 基礎・材料・共通部門誌 102(6), 1982-06, p327-334,