

「はやぶさ 2」表面材料損耗解析に向けたイオンスラストにおける 逆流イオンの電流計測

Current Measurements of Backflow Ions from Ion Thruster for Estimation of Erosion Rate on “Hayabusa 2” Surface Material

○永井 宏樹・伊阪 光博・服部 凌大(中京大・院)・鈴木 良典・山下 晴己(中京大・学)
上野 一磨(中京大)・細田 聡史・西山 和孝(JAXA)・村中 崇信(中京大)

○Hiroki Nagai・Mitsuhiro Isaka・Ryota Hattori・Ryosuke Suzuki・Harumi Yamashita (Chukyo University)・
Satoshi Hosoda・Kazutaka Nishiyama (JAXA)・Takanobu Muranaka (Chukyo University)

Abstract

“Hayabusa 2”, a Japanese asteroid explorer powered by “ $\mu 10$ ” ion thrusters, is now traveling in deep space to the asteroid “Ryugu”. During the thruster operation, the surface erosion around the ion thrusters has been detected by the surface contamination sensors onboard Hayabusa2. The erosion is considered due to the sputtering by the backflow ions from the thrusters, mostly the charge-exchanged (CEX) ions that are generated in the thruster plume. To estimate the amount of the erosion analytically, measurements of both the energy and the flux of the backflow ions are required. In this paper, we introduce the ground test performed by our group to measure the flux of the backflow from the ion thruster $\mu 10$ that was the same type of the thruster mounted on Hayabusa2. The experiment results with Faraday cups are shown: the current as a function of the distance from the center of the thruster, angular dependency of the current defined from the location of the neutralizer. Also the comparison of the erosion rate estimated by the experiment data and the detected by the onboard sensors are compared.

1. 概 要

小惑星探査機「はやぶさ 2」は小惑星「Ryugu」のサンプルリターンを目的として深宇宙を航行中である。「はやぶさ 2」では往路・復路共にイオンエンジンによって航行を行い、2014 年の打ち上げ以降の合計運転時間は 7000 時間を超え、順調に稼働中である¹⁾。

「はやぶさ 2」では搭載された宇宙機表面汚染量計測用にイオンスラスト近傍に水晶振動子式微小天秤 QCM を 2 機搭載している。実機運用中に QCM センサでは汚染による質量増加ではなく質量減少を計測した²⁾。これは推進剤イオンの逆流によるスパッタリングが原因と考えられている。これによる悪影響としてイオンスラスト周辺の熱制御材の損耗が考えられる。

推進剤イオンの逆流の主要素として電荷交換イオンの逆流が挙げられる³⁾。イオンスラストからはプラズマ化した推進剤のうちイオンが選択的に加速され放出されるが、一部は熱的な中性粒子も放出される。熱的な中性粒子は低速であり、加速されたイオンと衝突して電荷交換を行う。これにより発生した低速の電荷交換イオンはプルームと宇宙機の電位差により逆流し、熱制御材を損耗し宇宙機に影響を与えると考えられている。

本研究では電荷交換イオンのバックフローを測定対象として実験測定を行い、損耗評価をすることを目的とする。損耗率はエネルギーと角度の関数となっており、損耗量は損耗率に入射するイオン数をかけることで計算することができる。これらを踏まえて損耗評価を行うためには

1. エネルギー分布の計測:
2. 粒子束（電流）の計測

を行う。1.エネルギー分布の計測では RPA を用いてエネルギー分解測定を行い、入射イオン 1 個に対する損耗量を算出する。2.粒子束の計測では、単位時間単位面積当たりの損耗率を算出する。これら 2 種の測定から推進剤イオンのバックフローが宇宙機構体の熱制御材に与える損耗量を評価する。本研究では粒子束の計測をファラデーカップによって計測を行った。

2. 実 験 手 法

2.1 ファラデーカップ 図 1 に作成したファラデーカップの概略図を示す。イオン電流を計測するためコレクタをプローブとして計測した場合、計測系外へ二次電子が漏れ、見



図1 製作したファラデーカップの外観

かけ上の電流値が上昇し正確な電流を測定することはできず誤計測の原因となる。そこでファラデーカップでは二次電子抑制グリッド電極を設け、負電位をかけ二次電子が計測系外へ漏れることを防ぐ。これにより見かけ上の電流上昇を防ぎ、正確なイオン電流を測定することが可能となる。また、二次電子抑制グリッドでは低エネルギー電子の侵入を防止する役割も果たしている。作成したファラデーカップの外観を図1に示す。

表1 採用したメッシュの概要

メッシュ	40
線径	0.22mm
目開き	0.42mm
開口率	42.7%

コレクタは銅板を加工し、二次電子抑制グリッドはステンレスメッシュを加工して作成した。また、コレクタと二次電子抑制グリッド間の距離は5mmであり、その間にはポリアセタール板を挟んでいる。

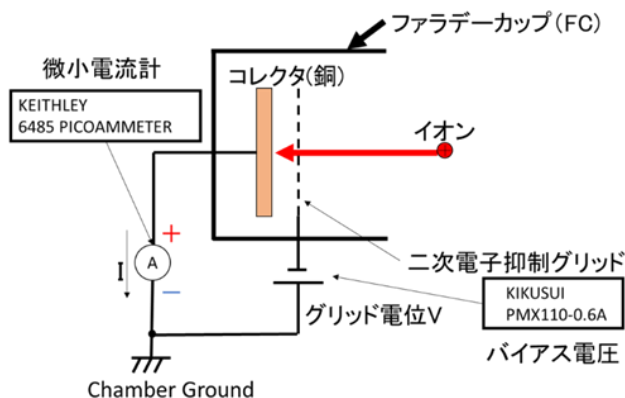


図2 ファラデーカップ周囲の計測系

2.2 ファラデーカップによるイオン電流計測系 ファラデーカップの計測系を図2に示す。ファラデーカップの筐体サイズは、50mm四方に厚さが15mm、イオンを捕集する前面の開口径は20mmとなっている。二次電子抑制グリッドには直流安定化電源で負電位を印可している。今回行なったバックフロー測定ではイオンのエネルギーが低いため二次電子抑制よりも電子の侵入を防ぐ役割を担っている。捕集する電荷交換イオンの量の計測には微小電流計であるピコアンメータを用いている。ファラデーカップの計測系を図2に示す。二次電子抑制グリッドには0～-50Vの負電位を1Vステップで掃引し、各電圧の電流値を得る。得られた電圧と電流のグラフから、二次電子の影響がなくなったと考えられる値から電流値を推定する。

2.3 実験環境と実験条件 今回の計測では直径2m、長さ5mのISAS耐久試験チャンバを用いた。イオンスラスタははやぶさ2に搭載されたμ10を用いて実験を行なった。実験におけるパラメータは背圧が 4.6×10^{-4} [Pa]、イオン源パラメータは進行波が8.9[V]、反射波が2.4[W]、流量が2.4[sccm]、中和器パラメータは進行波が5.8[V]、反射波が0.7[W]、流量は1.4[sccm]、中和器電圧が36[V]であった。グリッドパラメータはスクリーン電圧が1.5[kV]、スクリーン電流が180[mA]、アクセル電圧が-350[V]、アクセル電流が1[mA]であった。各種パラメータは実機上の運用パラメータと同等に設定した。

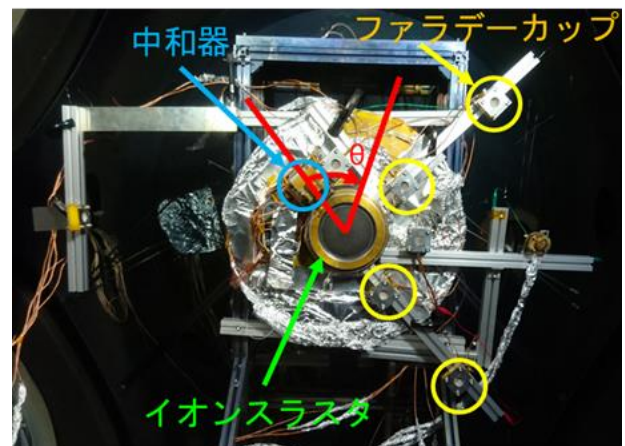


図3 スラスタヘッドと周囲のファラデーカップ設置状況



図4 チャンバ内のスラスタヘッド設置状況

2. 4 実験概要 中和器を基準として角度を変化させ、イオンスラスタ使用時のバックフローイオンの電流分布を計測した。スラスタ中心からの半径方向の距離ははやぶさ2実機の QCM センサの位置を参考に設置した。

表 2 角度毎のファラデーカップ設置位置

	$\theta[^\circ]$	イオンスラスタ中心からの距離[cm]
FC1	90	15
FC2	90	40
FC3	180	15
FC4	180	40
FC5	15	15
FC6	90	30
FC7	0	20

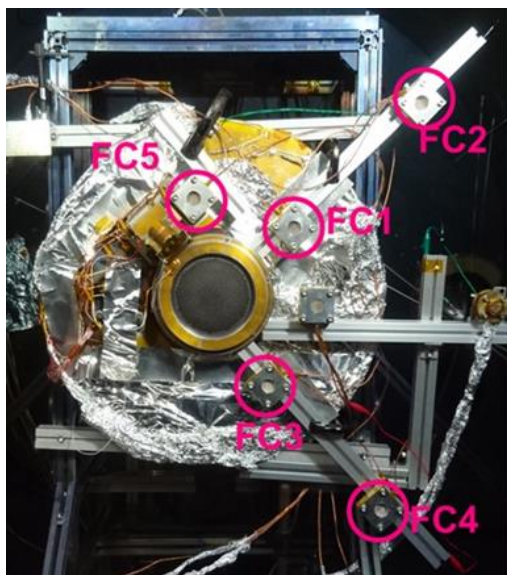


図 5 イオンスラスタ周囲のファラデーカップ設置位置

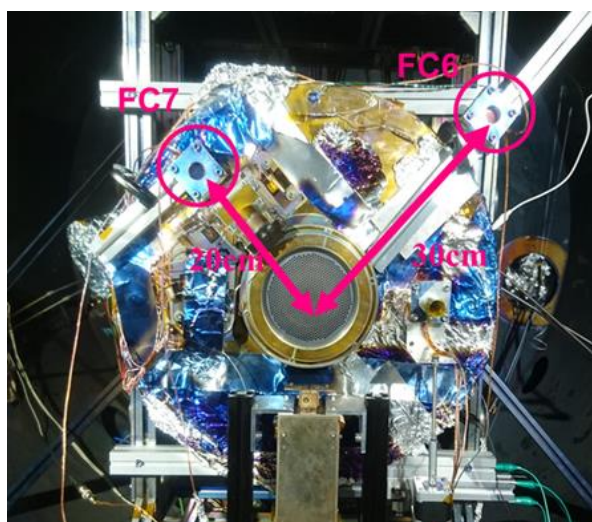


図 6 イオンスラスタ周囲のファラデーカップ設置位置 2

はやぶさ2で使用されているイオンスラスタ「 $\mu 10$ 」と同型のイオンスラスタをチャンバ内に設置して実験を行った。実験時の設置状況を図3に、チャンバ内のスラスタヘッド設置状況を図4に示す。電流分布計測時のファラデーカップ位置の詳細を、番号付けしたファラデーカップの角度およびイオンスラスタ中心からの距離とともに表2に示す。また、それぞれのファラデーカップの位置関係を表2のファラデーカップ番号と対応させ図5、図6に示す。

$\mu 10$ 使用時のプラズマプルームの電流分布を計測した。中和機を基準として時計回りに 135° ，スラスタ中心から半径方向に 48 cm，ファラデーカップを軸方向に向けスラスタから長手方向に 10 cm，40 cm，70 cm，100 cm (30 cm 間隔) にそれぞれ設置した。設置状況を図7，図8に示す。さらに

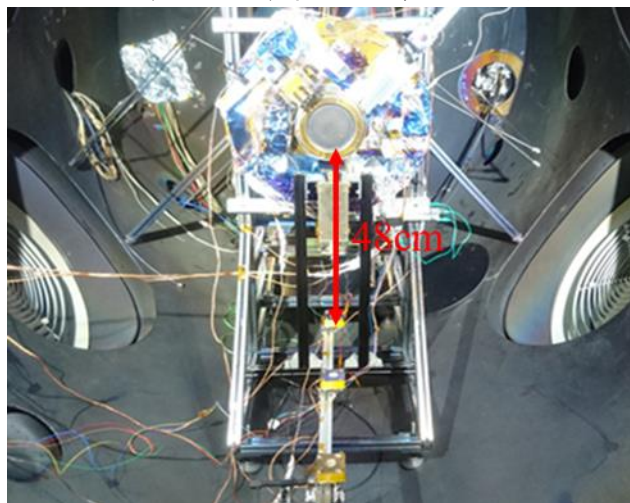


図 7 $\mu 10$ 使用時のプラズマプルームの電流分布計測ファラデーカップの半径方向の位置

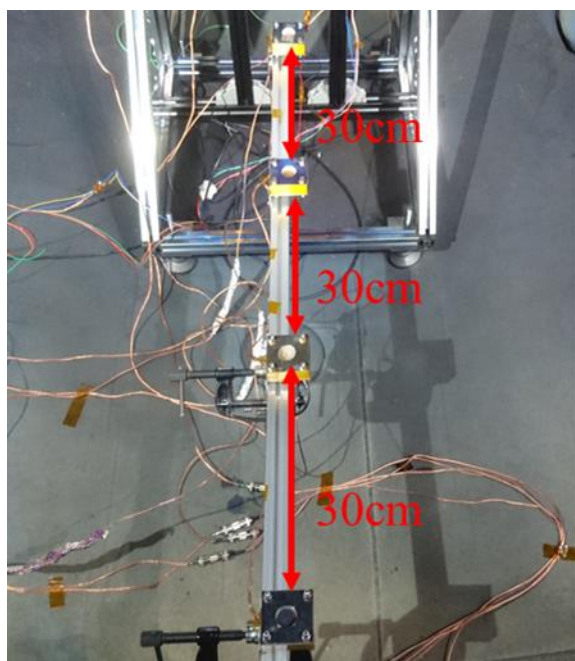


図 8 $\mu 10$ 使用時のプラズマプルーム電流分布測定ファラデーカップの長手方向の設置位置

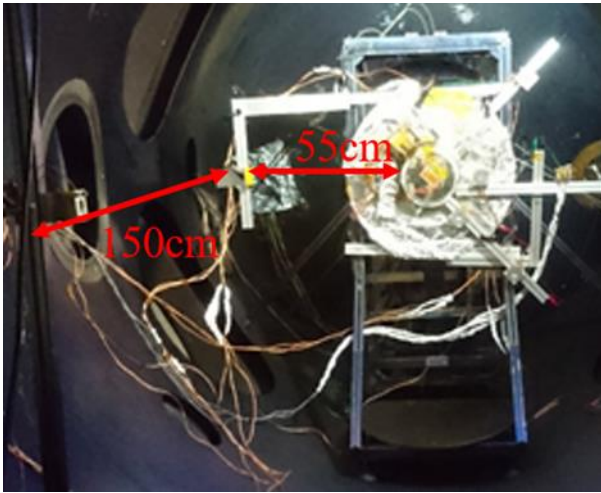


図9 μ10 使用時のプラズマプルーム電流分布測定
スラスタ中心から半径方向 55cm のファラデーカップ設置
位置

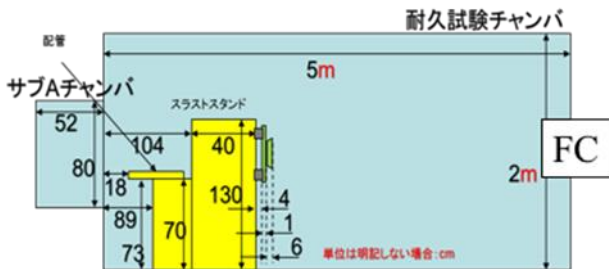


図10 チャンバ内のファラデーカップ設置状況

中和機から 315° , スラスタ中心から半径方向に 55 cm, ファラデーカップを軸方向に向けスラスタから長手方向に 0cm, 150cm の位置に設置した場合についても測定を行なった. 設置状況を図 9 に示す.

μ10 使用時のイオンビーム中のイオン電流についても計測を行なった. ファラデーカップ (FC) はチャンバ壁壁面中心に設置し, プルーム中の電流測定を行なった. これにより測定したイオンビームとバックフロー電流を比較検討することができる. 図 10 にチャンバ内のファラデーカップ設置位置を示す.

3. 実験結果

図 11 にスラスタからの半径方向距離とファラデーカップの収集電流密度のグラフを示す. 計測された電流はそのまま逆流してきた電荷交換イオンの量だと考えることができる. イオンスラスタ中心から 15cm の位置 (グラフ内赤丸) では電流密度が $200\text{nA}/\text{cm}^2$, ただし中和器近傍では $1400\text{nA}/\text{cm}^2$ であった. イオンスラスタ中心から 40cm の位置 (グラフ内緑丸) における電流密度は $50\text{nA}/\text{cm}^2$ であった. なお, 電流密度はメッシュの開孔率を考慮したものである. 測定された電流を開孔率で割り 100 倍した後, 開口部面積で割り電流密度としている.

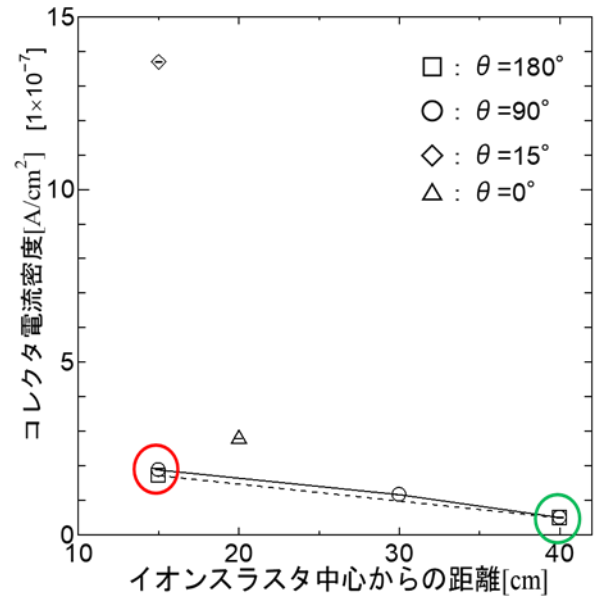


図11 イオンスラスタ周辺の電流分布計測結果

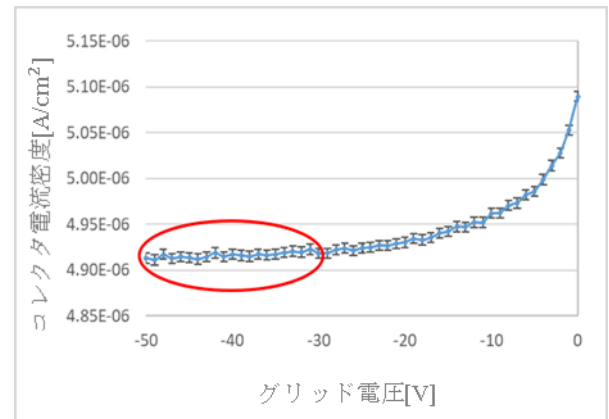


図12 イオンビーム中のイオン電流測定結果

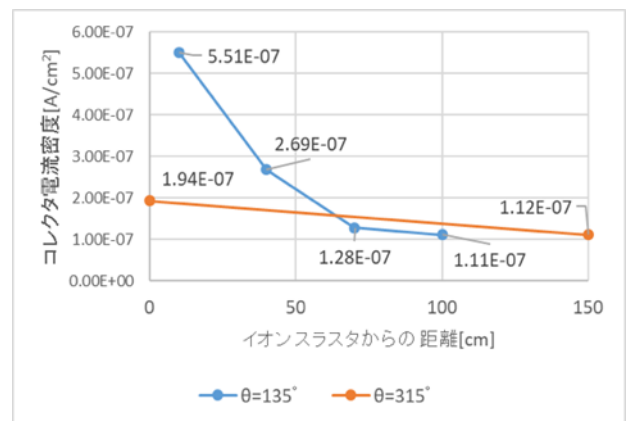


図13 μ10 使用時のプラズマプルーム電流分布計測結果

ファラデーカップで測定したイオンビーム中のイオン電流測定結果のグラフを図 12 に示す. 赤丸で示した部分がイオン飽和電流密度であり, その値は $4.91 \times 10^{-6} [\text{A}/\text{cm}^2]$ であった. グラフを見ると電流密度が減衰していることがわか

る。この減衰率は3.6%であり、-20V以降では二次電子が抑制されている。バックフロー測定ではファラデーカップの二次電子抑制グリッドは、主に電子を流入することを防ぐ役割を持っていたのに対して、ビーム中の計測では流入するイオンのエネルギーが高く二次電子が多く出ているためこのような結果となったと考えられる。

図13に $\mu 10$ 使用時のプラズマブルーム電流分布計測結果のグラフを示す。角度 135° 、 315° ともにイオンスラストからの軸方向距離が遠くなるとコレクタ電流は減少する結果となった。グラフを見るとスラストからの距離70cm以降では電流密度の減少が小さくなっていることがわかる。

4. 考 察

得られた電流密度を、その位置ごとに考察を行う。角度 90° 、 180° の時の電流量は、イオンスラストからの距離が同じであったこともあり、コレクタ電流量はほぼ同じ値であった。このことから同心円状における電流はほとんど同じになるということがわかる。ただし、中和器近傍での電流量はほかの位置と比べると1桁大きい値となっている。これは中和器が電子源であり、磁場が発生している特殊な環境であることから、その磁場によって電荷交換イオンが集められたということが考えられる。中和器周辺の磁場の値は垂直で52mT、平行で0.9mT、その他のファラデーカップ周辺の磁場は垂直で0~0.5mT、平行で0~0.9mTであった。垂直の場合では中和器近傍の磁場の値は、他のFC付近の磁場の値よりも2桁大きい値となっており、磁場の差は顕著であるといえる。

はやぶさ2実機で観測されたQCM損耗量から見積もったイオン電流と今回の結果を比較する。QCMの表面はAu電極（原子量197）であり、100時間当たりの損耗量はスラスト中心から14cmの位置でMax 200ng/cm²/h(1.0Åの侵食)、40cmの位置で20ng/cm²/h(0.1Åの侵食)であった（図14）。

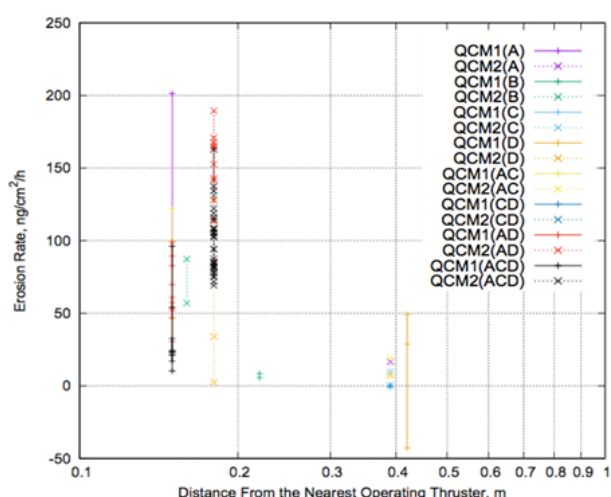


図14 作動スラスト距離とQCMセンサ損耗レート

単位面積当たりの金コーティングの損耗原子数は、スラスト中心から14cmの位置で $1.7 \times 10^{15} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、40cmの位置で $1.7 \times 10^{14} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ あった。キセノンイオンのAuへの低エネルギー領域でのスパッタイルドを山村モデルより35eVで0.05（角度依存なし）とすると入射イオンのフラックスは、14cmの位置で $3.4 \times 10^{16} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ （電流密度換算544nA/cm²）、40cmの位置で $3.4 \times 10^{15} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ （電流密度換算54.4nA/cm²）であった⁴⁾。これらの値を実験によって得られた値と比較したものが表3であり、実験で得られた値と損耗量から見積もったイオン電流密度は一致していると考えられる。

表3 実験によって得られた電流密度とQCM損耗量から見積もった電流量の比較

実験によって得られた値	損耗量から見積もった値
200nA/cm ² @15cm	544nA/cm ² @14cm
50nA/cm ² @40cm	54.4nA/cm ² @40cm

$\mu 10$ 使用時のプラズマブルーム計測結果では、イオンスラストからの距離が遠くなるほど測定電流量は減少し、プラズマブルーム中の電荷交換イオンが少なくなっているのだと考えられる。70cm以降では電流の減少量が小さいが、これはある地点から電荷交換イオンの量が著しく低下するのではないかと考えられる。

5. ま と め

ファラデーカップによるイオンスラスト周辺の電流分布計測を実施した。電流はスラスト中心からの距離rに対して反比例して減少する様子が見られた。別角度の同じ距離での測定電流量が等しいことから、同心円状における電流はほぼ等しいことが分かった。また、ファラデーカップ計測により得られたイオン電流密度とQCMセンサの損耗量から見積もったイオン電流密度のオーダーが一致した。ただし、今回の測定ではバックフローイオンのエネルギーが二次電子抑制グリッドのバイアス相当である。そのため、ファラデーカップに自然に流入するイオンを測っているというよりも、二次電子抑制グリッドにより周囲から余分にイオンを収集していたと考えられる。故にイオン電流の流入を過大評価している可能性がある。

6. 今 後 の 計 画

今回の計測ではファラデーカップをスラストに対して平行にしか向けていない。損耗率は角度の関数となっているためファラデーカップを回転させて電荷交換イオンを測定することが必要である。また、現状ではファラデーカップの視野角が 45° で制限されている。この状態では 45° 以上の角度から流入するイオンを直接測定することができない。そのため、開口部を拡張することでより確かな計測にすることが必要と考えられる。さらに、現状のファラデーカップではFG（Floating Grid）が無いため、二次電子抑制グリッドの漏れ電界によりイオンを過剰に収集し、イオン電流を過大評価していると考えられる。そのため、二次電子抑制グリッド前方にFGを設けた実験も行う予定であ

る.

謝 辞

本研究にあたり、協力してくださった國中・西山研究室の皆様へ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 JAXA 宇宙科学研究所に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 西山和孝, 細田聡史, 月崎 竜童, 國中 均「小惑星探査機はやぶさ 2 イオンエンジンの運用状況」p.1,平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム,講演集録, 2017-01, STEP-2016-058.
- 2) 西山和孝, 細田聡史, 月崎 竜童, 國中 均「小惑星探査機はやぶさ 2 イオンエンジンの運用状況」p.5,平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム,講演集録, 2017-01, STEP-2016-058.
- 3) 村中 崇信,星 賢人, 小嶋 浩嗣, 山川 宏, 細田 聡史, 西山 和孝「イオンエンジン中和不良時の宇宙機表面への逆流電流評価」平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 講演集録, 2015,STEP-2014-062.
- 4) YASUNORI YAMAMURA, and HIRO TAWARA :
ENERGY DEPENDENCE OF ION-INDUCED
SPUTTERING YIELDS FROM MONATOMIC SOLIDS
AT NORMAL INCIDENCE,ATOMIC DATA AND
NUCLEAR DATA TABLES 62, ARTICLE NO.0005,
1996,pp.149-253.