

# 「はやぶさ2」表面材料損耗解析に向けた イオンスラスタの逆流イオンのエネルギー計測

## Energy Measurements of Backflow Ions from Ion Thruster for Estimation of Erosion Rate on HAYABUSA2 Surface Material

○服部 凌大・永井 宏樹（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）

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

### Abstract

“Hayabusa2”, 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 incident energy of the backflow from the ion thruster  $\mu 10$  that was the same type of the thruster mounted on Hayabusa2. The experiment results with Retarding Potential Analyzer (RPA) are shown, and also the possibility of the surface erosion around the ion thruster is discussed by comparing analytical estimation from the experiment data.

### 記号の説明

- $I_{io}$ : エネルギー制限をしないときのイオン電流
- $V_C$ : コレクタバイアス電位
- $V_{ERG}$ : 電子反射グリッド電位
- $V_{FG}$ : フローティンググリッド電位
- $V_{IRG}$ : イオン反射グリッド電位
- $\theta$ : バックフローイオンの  $\mu 10$  設置面への入射角

### 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。電気推進の一種であるイオンエンジンを搭載し長期運用に成功した例として、2003 年 5 月に打ち上げられ、30 億 km 離れた小惑星イトカワから地質サンプルを採取し 2010 年 6 月に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」は、広く知られている<sup>1)</sup>。現在は、後継機にあたる「はやぶさ2」が打ち上げ、運用されており、搭載された4機のイオンエンジンは、合計運転時間 10000 時間を越え、順調に稼働している<sup>2)</sup>。

一方で、軌道上の「はやぶさ2」において、宇宙機表面汚

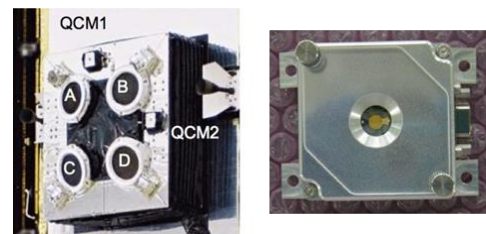


図1 イオンスラスタと QCM センサの配置(左)とポリイミドコーティングタイプの QCM1(右)<sup>3)</sup>

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にイオンエンジンプレート上の 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<sup>3)</sup>。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に近いところでは最大 200[ng/cm<sup>2</sup>/h]の損耗が観測されていることが分かる。これは厚さに換算すると 1Å程度であるが 14000 時間の宇宙作動<sup>4)</sup>が要求されるイオンエンジンにとっては大きな損耗量となる。はやぶさ2には、イオンエンジンの周囲に熱制御を行うための熱制御材が取り付けられている。そのため、はやぶさ

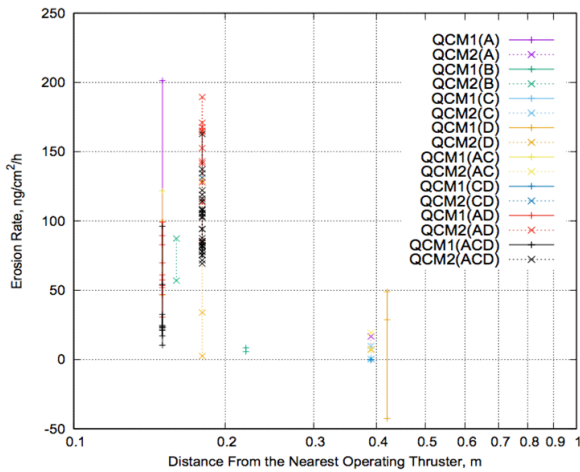


図2 作動スラスタ距離と QCM センサ損耗レート

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。

また、この損耗を引き起こすバックフローの主成分は、イオンエンジンの吹き出すガスに含まれる電荷的な偏りのない中性分子と加速された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。この CEX イオンは、非加速であり、加速されたイオンよりはるかに遅い動きをしているため、ブルームと宇宙機の電位差で加速されバックフローとなる。図3にこのバックフローの概念図を示す。

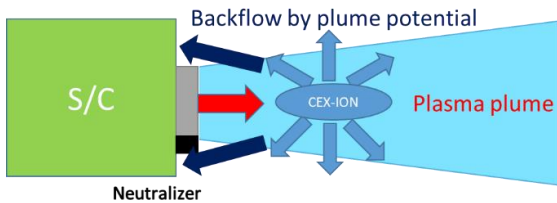


図3 バックフロー概念図

## 2. 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推進剤のバックフローによるスラスタ近傍材料の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、Yamamura の半実験式<sup>6),7)</sup>を使用することで見積もりが可能である。この式はスパッタリング率(入射イオンに対するスパッタリングされる原子個数)を計算でき、これに入射イオン数を掛ければ定量評価が可能である。Yamamura の半実験式において、スパッタリング率は、速度エネルギーが入力値となり求められるため、入射イオンの速度エネルギーの計測が必要となる。そこで、スパッタリング率算出を目的に「はやぶさ2」に搭載されたイオンエンジンと同型のイオンエンジン  $\mu 10$  を用い、そのバックフローイオンの速度エネルギーの角度分布を計測した。本稿では、この実験の結果を報告する。

## 3. 実 験 方 法

本研究では、はやぶさ2に搭載されたイオンエンジンと同型の  $\mu 10$  を使用して、地上試験によるイオンスラスタのバックフローのエネルギー計測を行った。

**3.1 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。図4にこの真空チャンバの外観を示す。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80cmの2つの補助真空タンク(エアロック)を持っている<sup>5)</sup>。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<sup>5)</sup>。クライオポンプ内部には液体ヘリウムを循環させており、クライオパネルは20K以下の低温に保たれ、このパネル上にガス吸着させることで無負荷時であれば  $1.3 \times 10^{-4}$ Pa 以下、Xe 流量8sccmにて  $4 \times 10^{-4}$ Pa 以下の真空度を維持できる。今回の実験は、背圧が  $4.6 \times 10^{-4}$ Pa 程度として行った。



図4 耐久試験チャンバ外観

**3.1 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エンジン  $\mu 10$ (Lavatory Model)を使用した。 $\mu 10$ は、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、そして世界で唯一の実用化された ECR 放電型イオンエンジンである<sup>8)</sup>。このイオンエンジン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。

表1  $\mu 10$  の作動条件

	イオンスラスタ	中和機
流量[sccm]	2.61	0.94
ケーブル端電力[W]	26.9	8.42
進行波[W]	47.6	10.5
反射波[W]	2.4	0.7
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	
バイアス電圧[V]		36
電流[ mA ]		181

**3.1 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電界反射型アナライザ<sup>9)</sup>(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5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以下に簡条書きで示す。

**(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6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を上回り、十分に電子を反射시키는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を用いてプレーム中のデバイ長以下

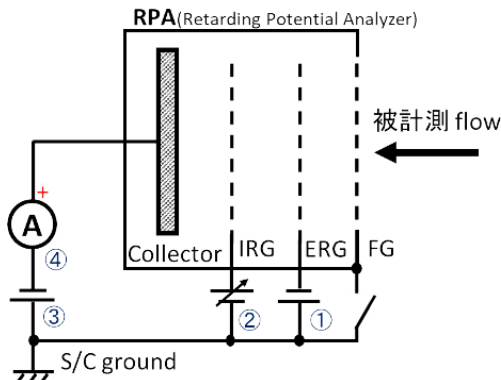


図4 RPA 外観図(上)の回路図(下)

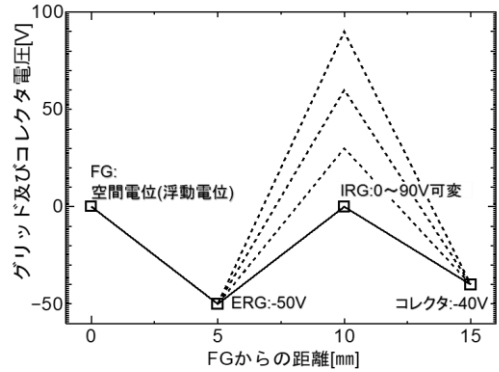


図6 各グリッドの電圧と位置関係

の線間距離となるように、線間距離が0.062mmものを使用してグリッド孔の中の電位が等しくなるよう設計した。

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制限だから 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、イオンのエネルギー分布が計算できる。具体的には式(1)を使用して計測することができ、 $I_i$  はコレクタ電流、 $V_{IRG}$  は IRG の電圧、 $I_{i0}$  は、エネルギー制限をしないときのイオン電流である。

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

**4. イオンの速度エネルギー分布計測**

**4.1 実験セットアップ** 本研究では、前述したとおり直径2m、長さ5mの円筒状の真空チャンバ内にイオンエンジン $\mu 10$ を設置して実験を行った。図7にイオンエンジン設置位置について示す。今回の実験ではスラストスタンドの台に固定しているがスラストを測るためではなくあくまで固定に使用している。

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 センサの位置を参考に、スラスト中心から15cmの位置に設置して実験を行った。図8にイオンエンジンプレートへの設置位置、図9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、RPA の開口部とビーム出口面が同一面となるように設置している。

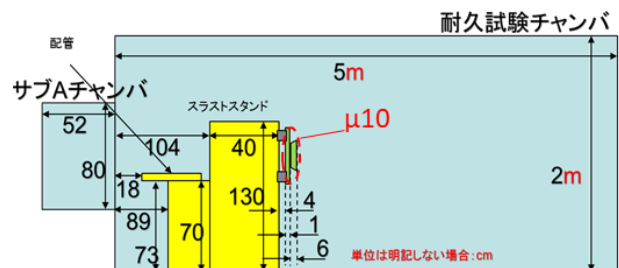


図7 イオンエンジン設置位置



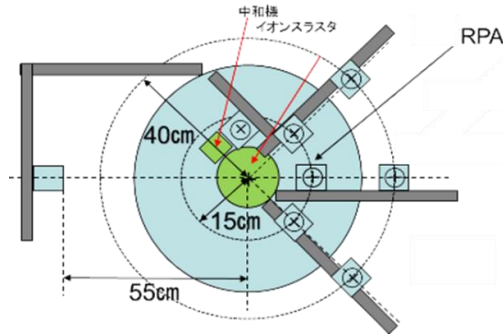


図8 イオンエンジンプレートへのRPA設置位置

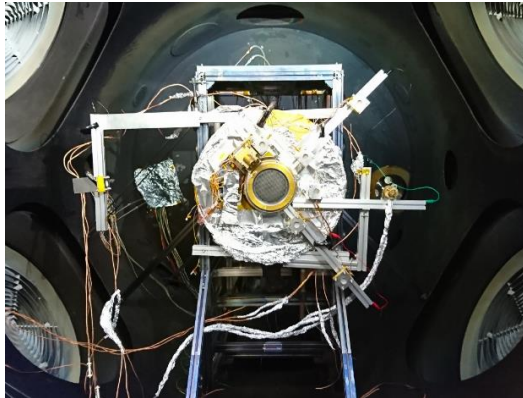


図9 RPA設置の写真

**4.2 実験結果** RPA でエネルギー分布計測を行う際に、IRGの各電圧で電流計測を5回行い、これを3セット繰り返した。図10にRPAの計測した電流とそこから導いたイオン速度エネルギーの分布のグラフを示す。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、この計測結果をGeneralized Reduced Gradient (GRG) 非線形で探索の行うことで行最小二乗法により2重のガウス型累積確率分布に近似した。これは、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。表2に電流の規格化に使用した電流量と最小二乗法による近似結果を示す。

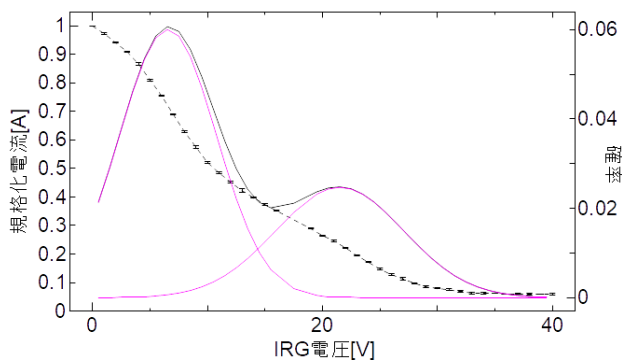


図10 イオンの速度エネルギー分布計測結果

表2 近似結果と規格化電流

	確率 ピーク	平均エネル ギー[eV]	標準偏差 [eV]	規格化 電流[A]
低エネルギー側	0.0601	6.56	4.21	7.76E-09
高エネルギー側	0.0247	21.5	5.57	

**4.3 考察** 図10のグラフや表2からも分かるようにあきらかに5eVと20eV付近にピークを持つエネルギー分布が計測されていることが分かる。また、RPAの開口角(イオンの最大入射角)は、50°程度ある。このことから、このダブルピークをなすそれぞれのイオンは、プラズマブルーム中の異なる電位(方向)から来たことが推測される。また、予想されているブルーム電位はさらに高いため、50°以上の入射角で侵入するイオンはかなり開口部で遮断されているとわかる。高エネルギーは高角度の侵入が予想され、実際の熱制御材での損耗を想定したとき、エネルギーの角度依存性が深くかかわっているといえる。この角度依存性の詳細は、次章で改めて述べる。

## 5. イオン速度エネルギー分布の角度依存計測

**5.1 実験セットアップ** 角度依存計測ではRPAの角度分解能が重要であるが4章で扱ったRPAは、視野角が片側50°と大変広いため、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11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。

このように角度分解能を向上させたRPAにステップモーターを取り付け、計測器に対するバックフローイオンの入射角を変化させた。図12にイオンエンジンプレートへのRPA設置位置を、図13にRPA設置の様子と回転機構の写真をそれぞれ示す。4.1章の実験セットアップと異なり、図12のように設置したRPAは、回転機構設置の都合上RPA取り付けフード先端面が6cmビーム出口面よりビーム放出方向に突出している。

これらのセットアップで、RPAへのイオン入射角度 $\theta$ をスラスタ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

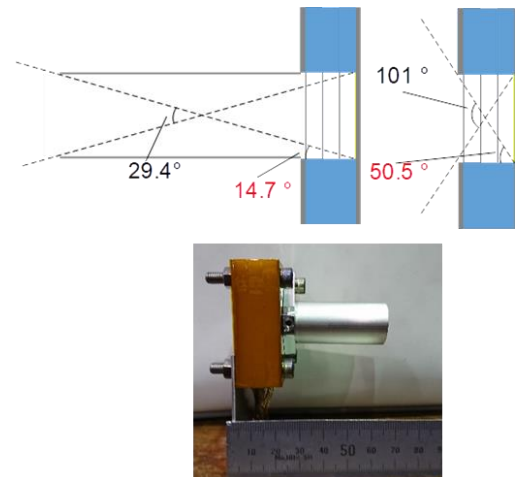


図11 視野角制限フードによる視野角変化(上)と外観(下)

きのイオンの速度エネルギー分布を計測した。図 13 にこの時の RPA から計測される領域のイメージ図とビーム軸上の位置を示す。

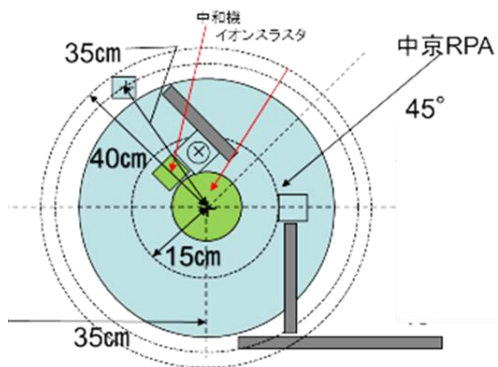


図 12 イオンエンジンプレートへの RPA 設置位置

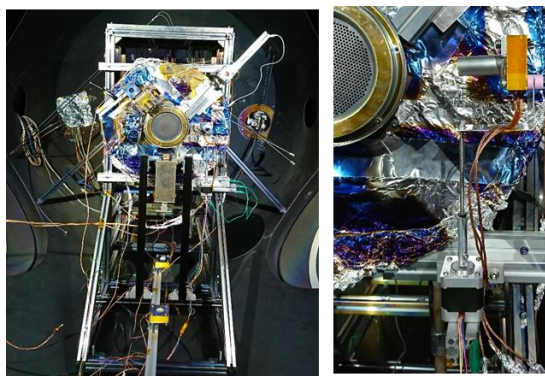


図 13 RPA 設置の様子(左)と回転機構(右)

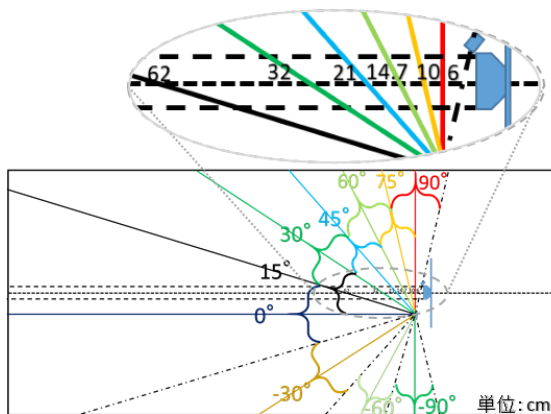
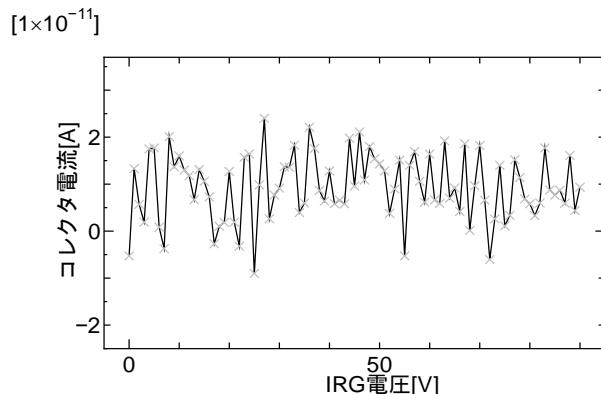


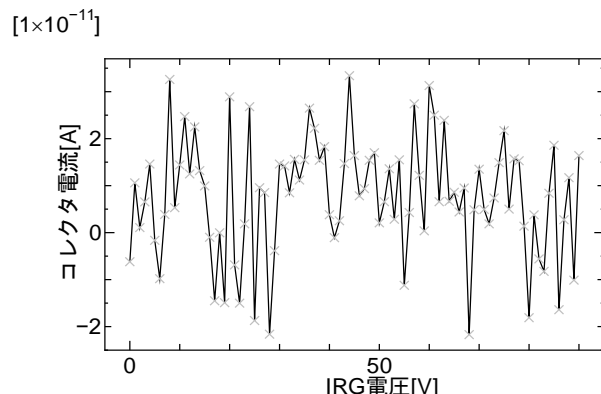
図 14 各角度におけるビーム軸上の位置(上)と RPA の視野領域(下)

**5.2 実験結果** イオン速度エネルギー分布の角度依存計測では、RPA を回転させ、計測するイオンの入射角を変化させて行った。基本的な計測方法やグラフの表現の仕方や近似に関して 5.1 章と同様に行った。今回は、入射角(RPA 角度)を  $-90^\circ$ 、 $-60^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  と変化させたときのエネルギー分布の計測を行ったが、 $-90^\circ$ 、 $-60^\circ$  はノイズにより計測できなかった。図 15 の(a)と(b)に

$90^\circ$ 、 $-60^\circ$  のときのそれぞれの実電流計測結果を示す。また、図 16 の(a)~(f)に正常に計測できた  $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  の結果を示す。今回は、2重のガウス型累積確率分布に近似したが 2重の分布がどちらも同じ分布に近似されたときは、通常のガウス型累積確率分布に近似した。さらにこれらの近似結果を表 4 にまとめて示す。



(a) 入射角  $-90^\circ$  における RPA の計測電流



(b) 入射角  $-60^\circ$  における RPA の計測電流

図 15 イオンの入射角が  $-90^\circ$ 、 $-60^\circ$  のときの計測電流

入射角度	確率ピーク	平均エネルギー[eV]	標準偏差[eV]	規格化電流[A]
-30	0.0906	1.67	0.54	4.56E-10
	0.184	7.05	1.59	
0	0.123	9.42	2.28	6.43E-10
15	0.0774	12.3	4.52	8.67E-10
30	0.0121	11.4	7.16	1.77E-09
	0.0833	20.4	2.71	
45	0.0104	2.29	9.76	7.37E-09
	0.0772	29.4	4.11	
60	0.005	2.01	4.47	3.55E-08
	0.0818	38.5	4.59	
75	0.0973	41.9	4.05	1.03E-07
90	0.117	43.2	3.23	1.49E-07

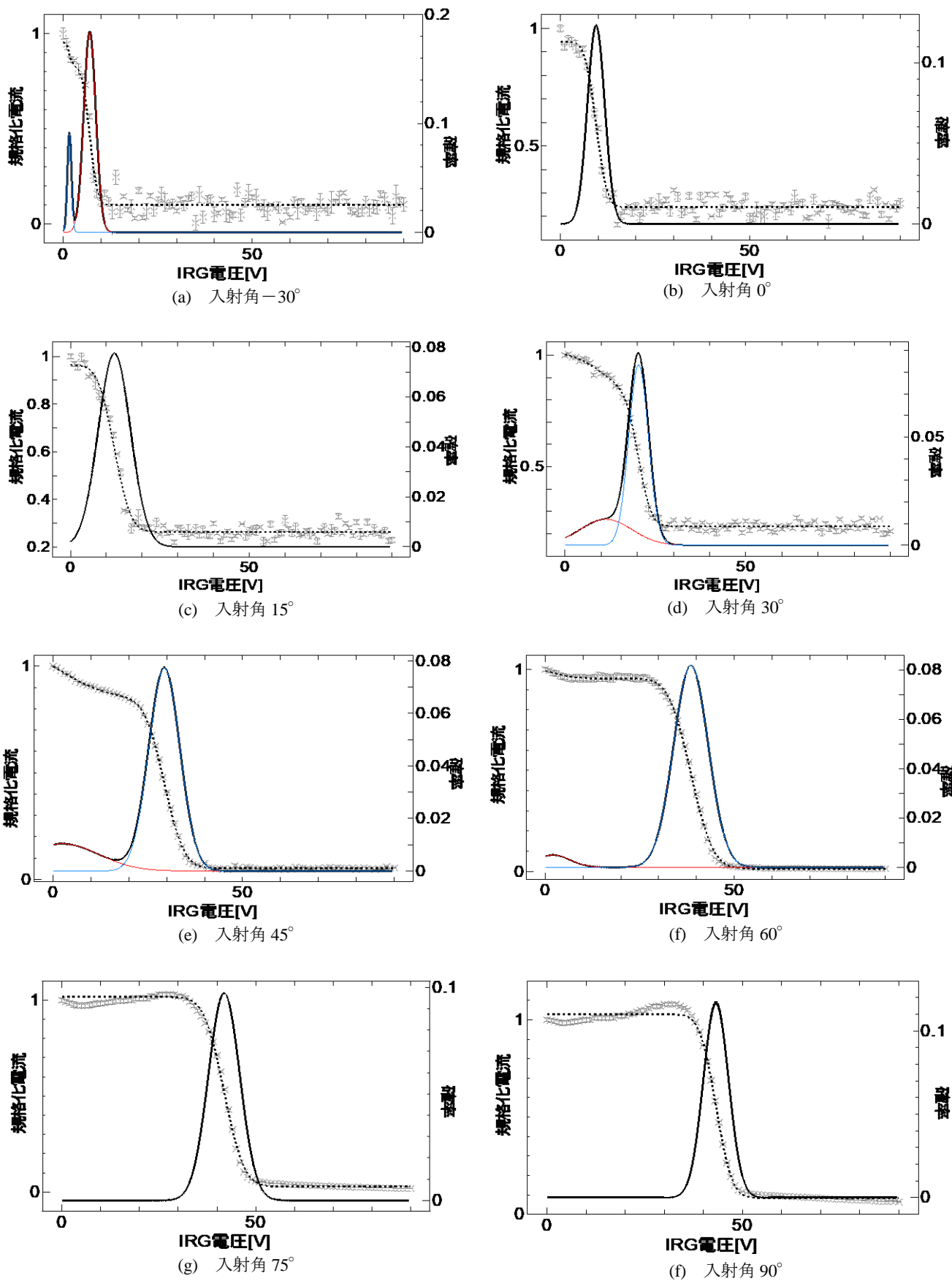


図 16 イオン入射角  $-30^\circ$  から  $90^\circ$  における RPA の規格化電流とイオンの速度エネルギー分布

**5.3 考察** 図 16 と表 3 を見ると入射角度増加に伴いイオン速度エネルギーが大きくなっていることと角度増加に伴いイオンの量も増加していることが分かる。図 17 と図 18 に入射角に対するイオン速度エネルギーの関係とイオン電流量の関係についてそれぞれまとめたグラフを示す。図 17 のイオン速度エネルギーに関しては、 $-30^\circ$  では  $7.05\text{eV}$  であったが  $90^\circ$  では  $43.2\text{eV}$  まで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しており、 $90^\circ$  の時に観測した  $43.2\text{eV}$  に関しては、プルームの最大電位であることが予想される。また、図 18 のイオン電流量に関しては、 $10^{-10}[\text{A}]$  台から  $10^{-7}[\text{A}]$  台まで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 3 桁も増えたと考えられる。

本稿では、詳しく扱っていないが、Yamamura の半実験式を用いてキセノンイオンによる金のスパッタリング損耗を評価するとイオンの入射エネルギー  $20\text{eV}$  がスパッタリング損耗の閾値であり、 $30\text{eV}$  を超える入射エネルギーに対してスパッタリングイールドは  $0.01$  程度である。また、 $30\text{eV}$  のときスパッタリングイールドが最大となるイオンの入射角は  $40^\circ$  であり、 $70^\circ$  以上の入射角ではスパッタリングイールドは  $0$  とみなせる。

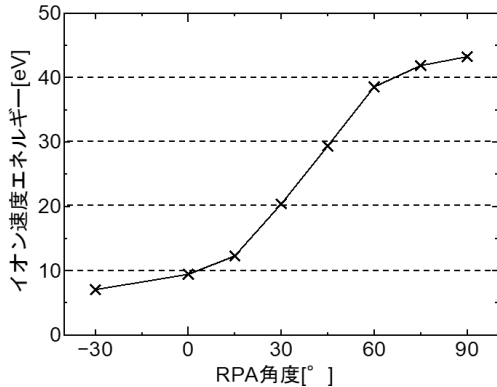


図 17 入射角に対するイオン速度エネルギー

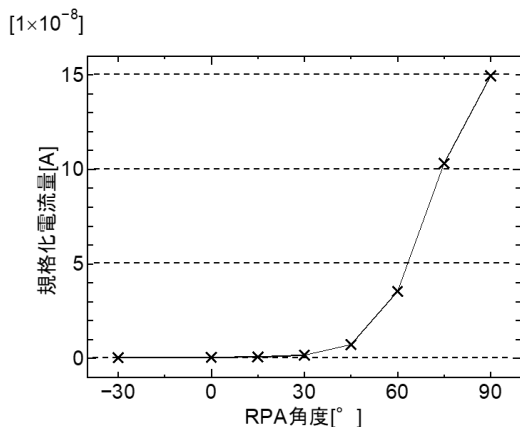


図 18 入射角に対するイオン電流量

表 3 の入射角  $45^\circ$  と  $60^\circ$  のイオン速度エネルギーをまとめるとおよそ  $30\text{eV}$  であり、Yamamura の半実験式が示す理論と比較すると、実験で測定された入射イオンによる表面材料のスパッタリング損耗は十分起こりうるといえる。

## 6. ま と め

イオンエンジン  $\mu 10$  を用いて RPA でバックフローのイオン速度エネルギー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。具体的には、最上流から入射するバックフローのエネルギーと電流は大で入射角が  $90^\circ$  のとき  $45\text{eV}$  および  $150\text{nA}$  であり、最下流から入射するバックフローのエネルギーと電流は最も小で入射角が  $0^\circ$  のとき  $9.4\text{eV}$  および  $0.64\text{nA}$  であった。さらに、Yamamura の実験式からスパッタリング率が大きくなるのは入射角が  $45\sim 60^\circ$  のとき  $30\sim 40\text{eV}$  であり、スパッタリングイールドはおおよそ  $0.01$  となり、この時の入射イオンによる表面材料のスパッタリング損耗が起こりうるということが分かった。

## 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,