

イオン推進器における逆流イオン諸量測定による 太陽電池表面損耗評価

村中 崇信¹, 伊阪 光博¹, 吉田 拓人¹, 服部 凌大¹, 上野 一磨¹,
山下 裕介², 谷 義隆², 細田 聡史³, 西山 和孝³
¹中京大学, ²東京大学, ³宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

2014年12月に打上げられたJAXA小惑星探査機「はやぶさ2」¹⁾では、主推進器に10cm級イオンスラスタ $\mu 10$ ²⁾が使用されているが、2018年6月までのターゲット小惑星「リュウグウ」への往路運転において、スラスタ作動に伴うスラスタ近傍表面の損耗が搭載QCMセンサ³⁾により測定されている。この損耗は、14,000時間程度のミッション期間では最大0.7 μm 程度と見積もられており⁴⁾、宇宙機表面の多層熱制御剤や薄膜光学材料の劣化要因となることが憂慮されている。この損耗要因を明らかにし、かつ定量評価するために、本研究グループでは、地上試験によって「はやぶさ2」に搭載されたものと同型の10cm級イオンスラスタ²⁾作動時の逆流イオン諸量を測定し、この結果から逆流イオンによる表面材料損耗を算出する手法を考案した。この手法は、逆電位アナライザ(Retarding Potential Analyzer: RPA)を使用して逆流イオンのフラックスをエネルギー分解し⁵⁾、得られた実験結果にYamamura等の半実験式⁶⁾を適用することで、逆流イオンによる表面材料損耗率を算出する^{7,8)}。これまでの実験で得られた逆流イオンのエネルギー分布例を図1に示す。この図に示すように、スラスタ近傍の逆流イオンエネルギーは2重ガウス分布でよくあらわされ、40eV程度までのエネルギーの広がりを持つことがわかる⁷⁾。この手法で算出された損耗率は、「はやぶさ2」のフライトデータ³⁾とよい一致を示しており、本研究グループで考案した実験的手法によって、比較的高精度にイオンスラスタの逆流イ

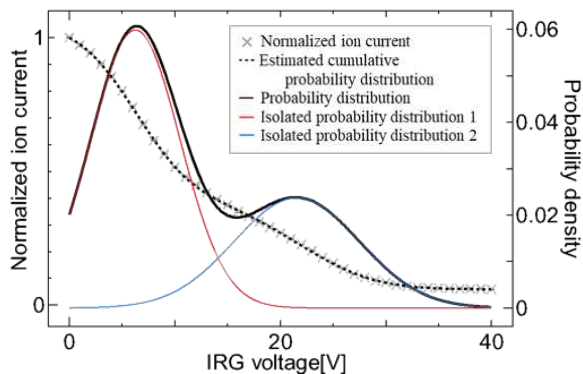


図1 スラスタ中心から40cmにおける、RPAによる逆流イオンエネルギー測定例

オンによる宇宙機表面損耗評価が可能であると考えている。

ところで、イオンスラスタの逆流イオンによる宇宙機表面の損耗により、性能劣化が懸念される主たる宇宙機部材のひとつは太陽電池表面であると考えられる。すなわち、太陽光入射面にコーティングされた反射防止膜が損耗することで太陽電池表面への光量が減少し、太陽光発電量低下が懸念される。そこで本研究では、スラスタ近傍に太陽電池パネルを模擬した部材(以後、SAPモデルと呼称する)を設置し、SAPモデルにより再現した発電中の太陽電池表面を対象として、本研究グループで考案した実験的手法により、イオンスラスタの逆流イオンによる表面材料損耗解析を試みた。

2. SAPモデル

本実験では、実物の太陽電池パネルを使用する替わりに、発電中の太陽電池パネルを模擬したSAPモ

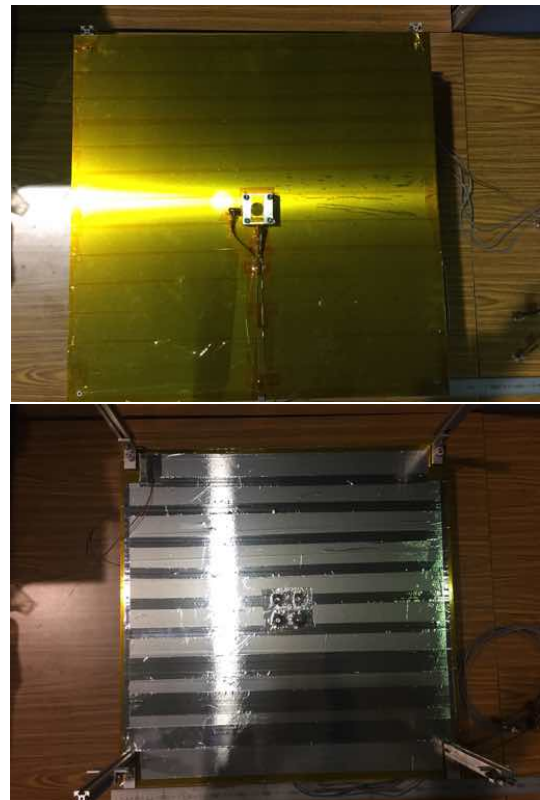


図2 製作したSAPモデルの外観。(上)絶縁体表面、(下)導体裏面。

デルを導入した。製作したSAPモデルを図2に示す。SAPモデルの基板は60cm四方のアルミ板であり、その全面に55 μm のカプトンテープを貼付け絶縁した。その後、片面には両面導電性アルミテープを貼付けて導体面を構成した。各部はそれぞれ、発電する太陽電池セル、セル表面の絶縁体（カバーガラス）、裏面の導体基板を模擬したものである。ただし、SAPモデル表面のカプトンテープ厚は一般的なSAPカバーガラスの厚みである200 μm の1/4程度である。実験時には、絶縁体面をスラスタビーム放出方向に向けて設置し、アルミ基板はSAP発電電圧相当に正バイアスした。このとき、裏面のアルミテープはスラスタグラウンドと共通接地とした。

3. 実験セットアップ

図3に実験セットアップを示す。真空装置はスラスタ下流にプラズマブルーム形成が十分なされる体積を有し、かつ高真空度を実現するJAXA宇宙科学研究所所有大型スペースサイエンスチャンバを使用した。イオンスラスタは「はやぶさ2」搭載と同型の10cm級イオンスラスタ μ10 を使用し、スラスタ中心軸とチャンバ中心軸が一致するよう設置した。また、同軸方向のスラスタ設置位置は図4に示す通りである。製作したSAPモデルは、スラスタに向かって右側に絶縁体面がスラスタ下流側となるよう設置した。また、その設置位置は、垂直方向はSAPモデル中心とスラスタ中心が一致するように、水平方向はスラスタ中心からSAP中心が80cmの距離とした。また、

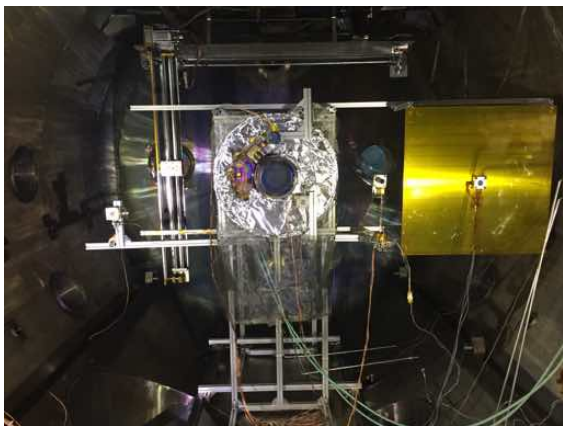


図3 実験セットアップ

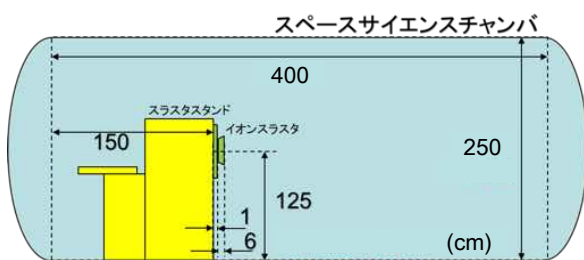


図4 スラスタのチャンバ内軸方向設置位置

チャンバ軸方向位置は、SAPモデル中心に取付けた5cm角、厚さ2cmのRPAの開口部面がスラスタ出口面と一致するよう設置した。SAPモデルへのバイアス電位は、導体基板に一樣に印加した。

逆流イオンフラックスのエネルギー分解測定を行うRPAは、SAPモデル中央部に固定式1式を設置した。RPAはこの他にも、スラスタ中心から15cm位置、中和器近傍にそれぞれ固定式を、スラスタ中心から40cm位置にアパーチャ付回転式をそれぞれ一式設置した。また、イオンスラスタに向かって左側にスラスタ中心から70cm位置に固定式を1式設置した。全てのRPAのグラウンドはチャンバと共通設置とし、これに接続されたRPA開口面の金属筐体とグリッド電極はグラウンド電位となる。固定式RPAの開口部はすべてスラスタビーム放出面と同一方向に設置した。

4. 実験結果および考察

本実験におけるイオンスラスタ作動条件は「はやぶさ2」実機搭載スラスタ運用時のノミナル条件であり、これらを表1に示す。実験におけるスラスタ作動時の背圧は作動ガスであるXe換算で 5.08×10^{-4} Paであった。図5に、この実験でSAPモデル中央部取付けRPAによって測定された、逆流イオンエネルギーの累積分布を示す。グラフは上から、SAPモデルのバイアス電位0V, 75V, 100Vにおける測定結果を示しており、このときグラフの縦軸は規格化電流を、横軸はRPAのイオン反射グリッド(Ion Retarding Grid, IRG)に印加した電圧をそれぞれ示している。SAPバイアス電圧0V, 75V, 100Vにおける規格化電流はそれぞれ、 3.20×10^{-9} A, 3.20×10^{-9} A, 3.10×10^{-9} Aであった。グラフにおける各測定点は、同一条件で5回測定した平均値をプロットしている。また、測定データをガウス関数の累積関数でフィッティングした結果を実線で示す。これら3つの測定結果は単一ガウス分布でよく表され、IRG印加電圧およそ25V以上、すなわちイオンエネルギー25eV以上のものはごくわずかであることがわかる。また、3つの異なるSAPバイアス電位にも関わらず、RPAによる逆流イオンエネルギー累積分布にはほとんど差が見られなかった。これは、スラスタ近傍に拡散する電子による静電

表1 イオンスラスタの作動条件

| | イオン源 | 中和器 |
|------------------|------|-----|
| Xe 流量 (sccm) | 2.45 | 0.7 |
| スクリーングリッド電圧 (V) | 1500 | — |
| スクリーングリッド電流 (mA) | 179 | — |
| アクセルグリッド電圧 (V) | -350 | — |
| アクセルグリッド電流 (mA) | 1 | — |
| バイアス電位 (V) | — | -36 |
| 放出電子電流 (mA) | — | 177 |

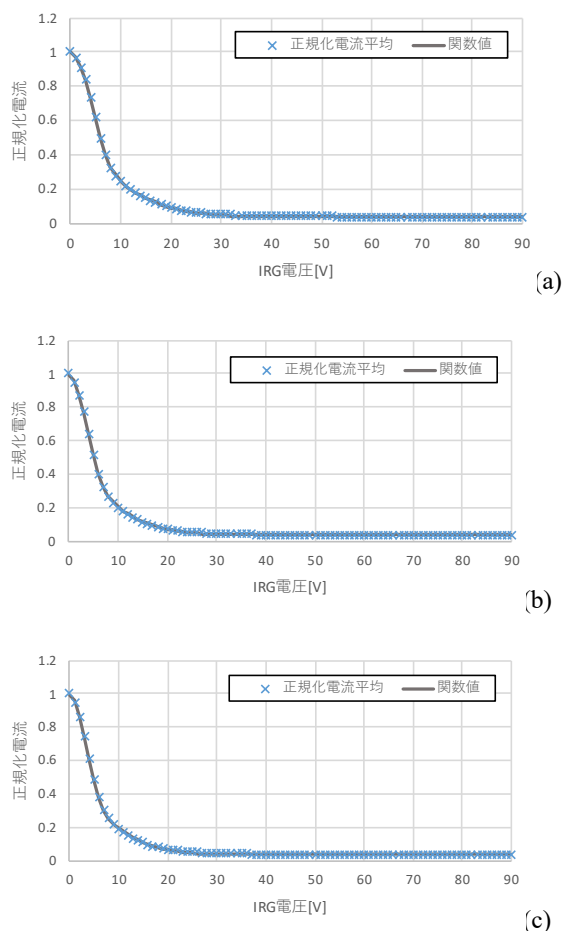


図 5 SAP モデル中央取り付け RPA が測定した、逆流イオンのエネルギー累積分布。(a)SAP モデルバイアス電位 0V, (b)同 75V, (c)同 100V.

遮蔽により、バイアスされた SAP モデル表面絶縁体電位が緩和され、逆流イオンに対して SAP モデルのバイアス電位がおよぼす影響は小さかったものと推測される。Yamamura 等の半実験式によると、1 価の Xe イオンが Au 表面に垂直入射する場合の損耗エネルギーの閾値は約 20 eV である。よって、例えば衛星表面材料が Au であった場合、逆流イオンによる損耗は 20 eV 以上のエネルギーを持つイオンで有意となる。従って、実験結果から判断すれば、今回の実験セットアップでは太陽電池絶縁体表面の損耗は極めて小さいと予想される。

5. 今後の予定

今回の RPA による逆流イオンエネルギーの測定では、SAP モデルに 0V, 75V, 100V それぞれバイアス電圧を印加した場合でも逆流イオンのエネルギー累積分布にほとんど差がみられなかった。この要因として、現時点ではモデル表面の絶縁体電位が周辺電子で静電遮蔽されたためと推測している。これを検証するために、バイアス電圧印加時の SAP モデル絶縁体表面近傍電位をエミッシブプローブで直接測定

することを考えている。また、今回、比較実験のためにスラスタを中心として SAP モデルの反対側 70 cm の位置に RPA 単体を設置して逆流イオンエネルギー測定を実施したが、SAP モデルセットアップを保持したまま同時に測定を実施していた。SAP モデル設置の影響が不定であるため、SAP モデルを撤去し、スラスタ単体作動のみで同様の測定を実施し、比較実験をより厳密に実施する予定である。SAP モデル表面近傍電位の直接測定と、この比較実験から、逆流イオンエネルギーに対する SAP バイアス電位の影響をより詳細に調査していく。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースチェンバー共同利用設備を使用して実施した。

参考文献

- 1) M. Yoshikawa, S. Watanabe, Y. Tsuda, H. Kuninaka, and Hayabusa2 Project Team, "Hayabusa2 - The Next Asteroid Sample Return Mission of Japan," Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol. 12, no. ists29, pp. Tk_29-Tk_33, 2014.
- 2) K. Nishiyama, S. Hosoda, K. Ueno, R. Tsukizaki, and H. Kuninaka, "Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System," Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol. 14, no. ists30, pp. Pb_131-Pb_140, 2016.
- 3) K. Nishiyama and H. Kuninaka, "Development and Flight Experiment of a Space QCM in Small Demonstration Satellite-4," Proc. 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, 2013-r-29, 2013.
- 4) K. Nishiyama, S. Hosoda, R. Tsukizaki, H. Kuninaka, "In-flight Operation of the Hayabusa2 Ion Engine System on Its Way to Rendezvous with Asteroid 162173 Ryugu," Proc. 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 1-5 October 2018.
- 5) 服部凌大, 永井宏樹, 鈴木良典, 山下晴己, 上野一磨, 細田聡史, 西山和孝, 村中崇信, 「「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」, 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム予稿集, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 2018 年 1 月. (STEP-2017-025)
- 6) Y. Yamamura, and H. Tawara, "Energy Dependence of ion-Induced Sputtering Yields from Monoatomic Solids at Normal Incidence," Atomic Data and Nuclear Data Tables, vol. 62, pp.149-253, 1996.
- 7) 服部凌大, 永井宏樹, 上野一磨, 細田聡史, 西山和孝, 村中崇信, 「逆電位アナライザ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」, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 久留米シティブラザ, 久留米市, 2018 年 10 月. (P23)
- 8) 村中崇信, 服部凌大, 永井宏樹, 伊阪光博, 上野一磨, 細田聡史, 西山和孝, 「逆電位アナライザを使用し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」, 平成 30 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 2019 年 1 月. (STEP-2018-004)