

# マイクロ波放電式中和器のカップリング運転に関する研究

## Study on Coupling Operation of Microwave Discharge Neutralizer

○濃野歩(東大・院)・森下貴都(東大・院)・細田聡史・月崎竜童・西山和孝 (JAXA)

○Ayumu Nono (The University of Tokyo)・Takato Morishita(The University of Tokyo)・Satoshi Hosoda・Ryudo Tukizaki・Kazutaka Nishiyama (JAXA)

### Abstract (概要)

The ion engine onboard Hayabusa2, which was launched on December 3, 2014, consists of an ion source that emits ions and a neutralizer that emits electrons. The ion source and the neutralizer have been individually tested for a long time for durability and performance, and their stand-alone behavior has been studied. On the other hand, the coupling operation, in which they are operated simultaneously, has not been sufficiently investigated. In this paper, we will report on the findings of the coupling tests. In particular, we will share our findings regarding the rise in neutralizer voltage observed in orbit.

### 1. 背景

2014年12月に打ち上げられたはやぶさ2に搭載されているマイクロ波放電式イオンエンジンは、大きく分けてイオン源と中和器の2つの機構から構成されている。イオン源は、電子サイクロトロン共鳴ECRによって励起された電子が中性ガスに衝突することによって生成されたイオンを高速噴射する機構であり、中和器は電子を放出することでイオン放出に伴う宇宙機の帯電を防ぐための機構である。はやぶさ初号機・はやぶさ2では適切に電子が放出されるように、中和器は宇宙機に対して電気的に負にバイアスされており、そのバイアスに必要な電圧値は中和器の性能を定量評価するための重要な指標として用いられることが多い[1][2]。

これまで、中和器に関する種々の実験および測定が多数行われ、また、はやぶさ初号機とはやぶさ2において宇宙空間での実運用による知見も併せて得られており、中和器に関するプラズマ現象の解明が進んでいる[3][4]。一方で、はやぶさ2の実機運用にて得られた未解明な現象として、中和器バイアス電源（以下、中和器電源）の急激な電圧上昇が報告されている[5]。地上での耐久試験では中和器は6万時間を超えて正常に動作している一方で、この電圧上昇現象は6600時間程度で確認されていることから、中和器の経年劣化によるものとは考えにくい。本研究では、軌道上で見られた急激な中和器電源電圧上昇を地上試験にて再現し、現象の説明を試みることを目的とする。特に、中和器単体の問題ではなく、中和器電流制御方式を含めた系全体が関与している可能性を視野にいれ、今まで十分に行われてこなかった、イオン源と中和器を同時に作動させるカップリング試験を行った。

### 2. 手法

#### 2.1 軌道上での電流制御

はやぶさ2の中和器電流はイオン電流よりも3mA大きく放出するように中和器にバイアスされる電圧が制御されている。この余剰3mAは衛星機体に回収されることで電流収支状況は適切に維持されている。そのため、機体には導電性を担保するためにITOと呼ばれる導電性被膜がスラスト近傍に貼付されている。

イオンエンジンの作動時には電荷交換反応によって生じたCEXイオンによるスパッタリング現象が起こる[6]。本研究では導電性被膜ITOがスパッタリングによって劣化することで機体の導電性を担保できなくなることが、中和器電圧上昇に影響している可能性を想定した。

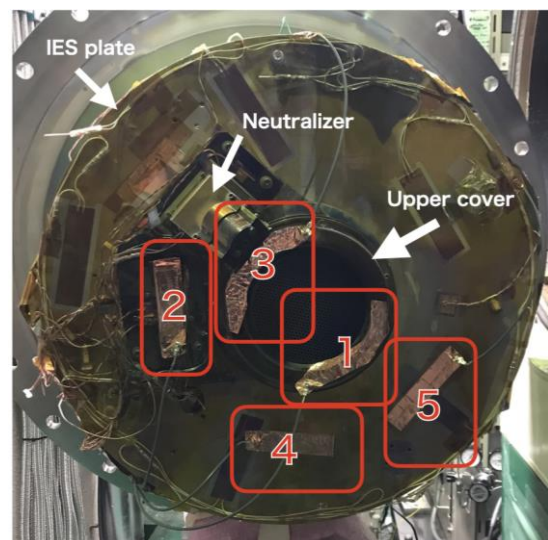


図1 実験に用いた IES プレート

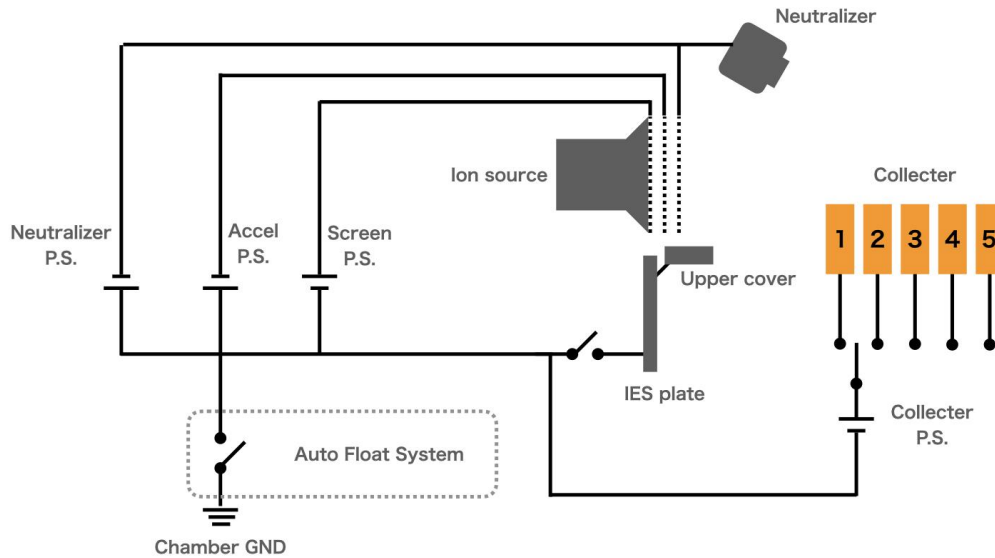


図 2 実験に用いた回路

## 2.2 地上試験

機体の導電性の有無、つまり、余剰電流の回収の可否が中和器電圧上昇に影響していることを調査するために地上試験を行った。系全体はチャンバに対して浮遊している状態と接地している状態の両方が可能で、また、スラスタが取り付けられている IES プレートは系と常時絶縁状態である(図 1)。さらに、IES プレートおよび上部シールドにはコレクタと呼ばれる導電性テープを貼り付けそれらを系から付け外しすることで、実機における導電性被膜 ITO が機能している状態と劣化して導電性を担保できなくなった状態をそれぞれ再現した。コレクタは全部で 5 枚貼り付け、IES プレートに 3 枚、上部シールドに 2 枚をそれぞれ中和器からの距離が異なる場所に貼り付けた(図 2)。

スラスタに関するパラメータを表 1 に示した。若干の値の差異があるが、中和器の電圧上昇を定性的に論じるには十分である。

表 1 スラスタパラメータ

	はやぶさ 2	地上試験
イオンビーム電流[mA]	170	158
イオン源ガス流量[sccm]	3.3	2.25
中和器ガス流量[sccm]	0.7	1.3

## 3. 結果・考察

中和器電流をイオン電流よりも 3mA 大きくなるように制御した場合の中和器電源の電圧値を表 2 に記す。系が接地状態、すなわち系がチャンバと導通している状態のとき、中和器電源の電圧値は 36.5V を示した。一方で、系が浮遊状態、すなわち、系がチャンバから絶縁されている状態のとき、中和器電源の電圧値は 43.8V と比較的大きくなった。

また、チャンバを基準とした系の電位は -5V であった。このとき IES プレートは系と導通しており、コレクタはすべて系から絶縁されている。そのため、余剰電流を回収し得る箇所は、IES プレートおよび上部シールドのみである。この実験結果から中和器電流がイオン電流よりも 3mA 大きくする制御方式のもとでは、系全体を浮遊させた状態では接地させた状態よりも中和器電源に必要な電圧が大きくなることを確認された。

表 2 接地状態と浮遊状態での実験結果

	中和器電源電圧 [V]	チャンバに対する系の電位[V]
接地状態	36.5	-
浮遊状態	43.8	-5

表 3 コレクタを導電させた場合の結果

コレクタ	中和器電圧 [V]	系の電位 [V]	コレクタ電流 [mA]
なし	60(CV)	-21	-
1	50	-13	4
2	60(CV)	-22	3
3	16	20	4
4	60(CV)	-22	2
5	60(CV)	-23	2

続いて、コレクタにて余剰電流 3mA を回収できるようにした場合の結果を表 3 に記す。この実験では IES プレートは系から絶縁されており、余剰電流が流れ込める箇所はコレクタのみとなっている。また、電子が流れ込み易い状況を作るために、導電されたコレクタには電源を用いて正に 20V 電圧を印加した。コレクタ 3 が導電されている場合は

中和器電源の電圧値は 16V と最も低く、続いてコレクタ 1 が導電されている場合は 50V であり、それ以外の場合では最大値に設定しておいた 60V を示した。また、この時、コレクタに流れる電流値は、コレクタ 1, 3 では 4mA、それ以外では 3mA 以下となった、余剰電流を回収できていれば中和器電圧は上昇せず、余剰電流回収のしやすさには位置依存性があるということが明らかとなった、また、同時に、チャンバに対する系全体の電位はコレクタ 3 に依存し、コレクタ 3 が導電性を失ったケースでは軌道上と同じように中和器電圧が上昇することが確認された。中和器およびイオン源には永久磁石が内蔵されており、それらの磁石から出る磁力線は中和器からイオン源グリッドに向かって弧を描く。そのため、その磁力線に沿った方向に流れる電子が多く、その磁力線に最も近いコレクタ 3 が最も余剰電流回収に効果的な位置であったと推察できる。

#### 4. 結論

本研究では、軌道上で見られた急激な中和器電源の電圧上昇現象を地上試験にて再現した。中和器だけでなくイオン源も同時に作動させるカップリング試験にてスラスタ系全体を再現し、中和器の余剰電流が系に与える影響を調査した。余剰電流が適切に系に回収されていないと中和器電圧が上昇するという結果が得られたことから、中和器電源電圧上昇は中和器単体の劣化ではなく、スラスタ周辺表面の導電性や中和器電流制御方式を含む系全体の問題の可能性があることが地上試験環境でも確認された。

#### 参考文献

- [1] T. Morishita, R. Tsukizaki, S. Morita, D. Koda, K. Nishiyama, and H. Kuninaka “Effect of nozzle magnetic field on microwave discharge cathode performance,” *Acta Astronautica*, 2019.
- [2] Wataru Ohmichi and Kuninaka Hitoshi, “Performance Degradation of a Spacecraft Electron Cyclotron Resonance Neutralizer and Its Mitigation,” *Journal of Propulsion and Power*, 2014.
- [3] Morishita, T., Koda, D., Hosoda, S., Mogami, T., Minemura, K., Nomura, N., Kuninaka, H., “Study on charge neutralization effect by electron cyclotron resonance plasma source in high vacuum,” *Journal of Physics*, 2019.
- [4] Kuninaka, H., and Molina-Morales, P., “Spacecraft Charging due to Lack of Neutralization on Ion Thrusters,” *Acta Astronautica*, 2004.
- [5] 西山和孝, 細田聡史, 月崎竜童, 今井駿, “イオンエンジンによる「はやぶさ2」の地球帰還,” *宇宙輸送シンポジウム*, 2020.
- [6] Hattori, R., Nagai, H., Ueno, K., Hosoda, S., Nishiyama, K., Muranaka, T., “Energy Measurements of Backflow Ions from Ion Thruster for Estimation of Erosion Rate on HAYABUSA2 by Measurement of Backflow Ions from 10-cm-class Ion Thruster”, 36th International Electric Propulsion Conference, 2019