

マイクロ波放電式電子源内の電子加熱解析

STEP-2013-014

○渡邊裕樹, 窪田健一 (JAXA), 山本直嗣, 中島秀紀 (九州大学)
宮坂武志 (岐阜大学), 船木一幸 (JAXA)

1. はじめに

高比推力, 高推進効率を特徴とした静電加速型電気推進機であるイオンエンジンとホールスラスタは, 探査機の主推進や静止衛星の軌道遷移, 軌道維持に使用されている. イオンエンジンおよびホールスラスタの推力幅は, 数から数百 mN と化学推進機と比較し, 低推力であるため, 所定の総力積を達成するため, 数千から数万時間に及ぶ長時間の作動がこれらの推進機には要求される¹⁾. このため, 新規に推進機を開発する場合には長時間の作動を保証するために, 地上において1万時間を超える耐久試験を実施する必要がある²⁾. これまでの耐久試験から, イオンエンジンの寿命は加速グリッドおよび電子源の損耗により制限され, ホールスラスタの寿命は加速チャンネルおよび電子源の損耗によって制限されることが判明している³⁾. また, 電子源の作動に使用される電力および作動ガスは, 推力発生に直接寄与しないため, 静電加速型の電気推進機にとって, イオンの生成および中和に必要な電子を供給するための電子源は, 推進機の性能と寿命に強く影響を及ぼす重要な機器である.

マイクロ波放電式電子源は, 小惑星探査機「はやぶさ」に $\mu 10$ イオンエンジンの中和器として初めて搭載され⁴⁾, 最近では, DubaiSat-2 にホールスラスタの陰極として搭載されている⁵⁾. マイクロ波放電式電子源は, 放電室内で生成したマイクロ波放電プラズマから電子を供給することにより, 熱電子放出源を必要としないため, 従来の静電加速型電気推進機の電子源であるホローカソードと比較して, 簡素なシステム, 低運用コスト, 高いロバスト性, そして, 長寿命が期待できる. しかし, はやぶさの実運用において, マイクロ波放電式電子源には地上耐久試験では確認されなかった不具合が発生しており⁶⁾, 現在, 実験的手法により原因調査と対策が行われている⁷⁾.

以上の背景から, JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)では国内の大学と協力し, マイクロ波放電式電子源の内部現象の解明, 耐久性の評価を可能とするプラズマ解析ソルバの開発を進めている. マイクロ波放電式電子源では, マイクロ波放電により生成されたイオン-電子対の内, 電子が外部に放出される一方で, イオンは電子源壁面で電子と再結合し, 中性粒子となる. この中

性粒子が再電離することにより, 再度電子を供給するといったプロセスを繰り返し, 少ない作動ガスで所定の電子電流を出力することが可能となっている. 従って, 電荷の担い手であるイオンの運動はマイクロ波放電式電子源内の状況を模擬する上で, 重要な役割を果たすため, 開発を進めているプラズマ解析ソルバでは, イオンを粒子として, 電子を流体として扱う Hybrid-PIC(Particle-In-Cell)法を採用している. 究極的には, 電子も粒子として取り扱う方がより忠実に挙動を模擬することになるが, イオンと電子の質量差から, 高い計算コストが要求されるため, 開発ソルバでは, 電子を流体として取り扱っている. このため, 電子温度を得るためにエネルギー保存式を解く必要があり, マイクロ波電場による電子の加熱の効果を吸収電力としてエネルギー保存式に与える必要がある⁸⁾.

本研究では, 開発を進めている Hybrid-PIC 法によるプラズマ解析ソルバ (以降, 「Hybrid-PIC ソルバ」と表記する) のために, マイクロ波放電式電子源の電子のマイクロ波電力の吸収分布を, 九州大学で開発が進められてきた FDTD(Finite Difference Time Domain)法による電磁場解析と PIC 法による電子の運動解析を組み合わせた解析ソルバ⁹⁾を用いた3次元のプラズマ解析により求めたので報告する.

2. 計算方法および条件

2.1 マイクロ波放電式電子源

本計算では九州大学で研究が行われているマイクロ波放電式電子源を解析対象とした. 図1にマイクロ波放

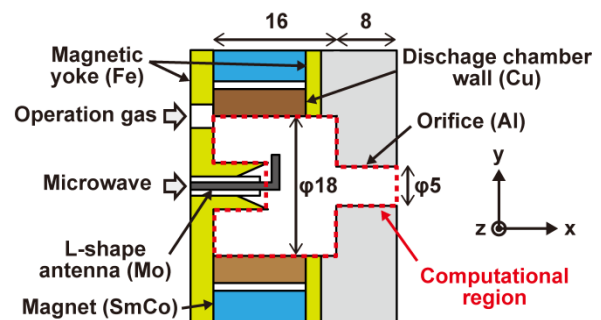


図1 マイクロ波放電式電子源の概略と計算領域. 赤枠で囲んだ領域が計算領域を示す.

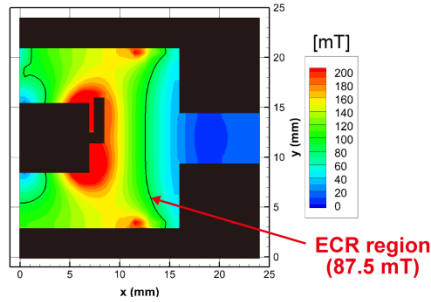


図 2 マイクロ波放電式電子源内の磁束密度分布 (XY 断面). 黒線は電子サイクロロン共鳴を起こす 87.5 mT の磁束密度を示す.

電式電子源の概略を示す. 内径 18 mm の円筒放電内に L 字に曲がったアンテナが挿入されており, 放電室下流には直径 5 mm のオリフィスが開いている. 放電室の上流と下流に設置された磁性体と放電室を囲むように設置された永久磁石により, プラズマの生成・維持に必要な磁場が形成されている. 本計算では, 赤枠で囲んだ領域を計算領域とした.

図 2 に電子源内部の磁束密度分布を示す. この磁束密度分布と図 1 で示した電子源の寸法は, 放出電子電流が最大になるように実験的に決定された. この際のマイクロ波の周波数は 2.45 GHz であり, 電子サイクロロン共鳴(ECR: Electron Cyclotron Resonance)を起こす磁束密度は 87.5 mT である. その領域は図 2 に示す通り, 放電室比較的下流に存在する.

2.2 計算手法

FDTD 法による電磁場解析と PIC 法による電子の運動解析を組み合わせた解析ソルバ (以降, 「電子 PIC ソルバ」と表記する) では, 解析する時間スケールを 100 ns 程度までとし, この時間スケールであればイオンおよび中性粒子は動かないと仮定, イオンの運動により生じる電流および静電場を考慮しない. これにより, 電子の時間スケールで, 電子の運動とマイクロ波電磁場の変化を解析し, 電子のマイクロ波電力の吸収分布を求める.

図 3 に電磁場解析と電子の運動解析を組み合わせた計算フローチャートを示す. 電子 PIC ソルバでは, 初期条件を読込んだ後, アンテナからの電磁場の励振を行い, 磁場と電場を求め, ある時間ステップに達したところでその電磁場の下, 電子の運動を計算し, 衝突を計算する. これにより電子の運動が更新されるため, 電流に変化が生じ, 更新された電流の下で再度電磁場を求めるという繰り返し計算を設定した累積時間まで計算する.

電子の運動を解析する際の基礎方程式は次の運動方程式を用いる.

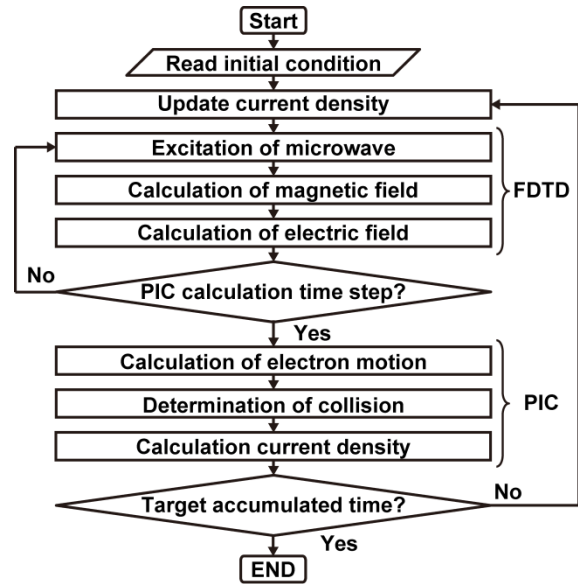


図 3 FDTD 法による電磁場解析と PIC 法による電子の運動解析を組み合わせた解析ソルバ(電子 PIC ソルバ)の計算フローチャート.

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = e(E + v_e \times B) \quad (1)$$

電子 PIC ソルバでは, 運動方程式に leap-frog 法による時間中心差分を施して, 電子の速度と位置を算出した. この際, 電子が感じる電磁場は, 格子点上に割り振られた電磁場を PIC 法により内挿して計算した. また, 衝突計算には Null-Collision 法¹⁰⁾を採用し, 電子-中性粒子間の弾性・励起・電離および電子-イオン間のクーロン衝突を考慮した.

一方, 電磁場を解析する際の基礎式は以下のマクスウェル方程式を用いる.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

上記の 2 式について, FDTD 法を用いて, 時間および空間について差分を施すことにより, 電場と磁場を算出した. この際, 電子が運ぶ電流 \mathbf{J}_e に関しては, PIC 側から求めた格子点上での電子の速度および電荷密度の積から計算した.

投入されたマイクロ波電力は, ポインティングベクトルを用いて, 以下に示すように, 計算領域全体 $d\mathbf{S}$ に流入した電力束をマイクロ波 1 周期 ($2\pi/\omega$) で平均して求めた.

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \oint (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} dt \quad (4)$$

一方、セルあたりの電子が吸収したマイクロ波電力は、電子の運動エネルギーの変化量と等価であるので、以下に示すように、セル内に含まれている電子の運動量の変化を積算し、マイクロ波 1 周期で平均して求めた。

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{d}{dt} \sum_{j \in \text{cell}} \frac{1}{2} m_e v_{e,j}^2 dt \quad (5)$$

また、計算領域全体での電子のマイクロ波電力の総吸収量は、全セルの平均吸収電力を積算して求めた。

2.3 境界条件および計算条件

図 4 に本計算で使用した計算格子を示す。本計算では、計算領域内の電子源の形状を図 4 に示すような直方体格子で近似した。なお、静電場を考慮しないため、格子をデバيز長程度で構築する必要がなく、格子幅は 0.5 mm とした。図 4 において、青色のセルは電子が運動可能な領域であり、青色のセルに黄緑色のセルを加えた領域は電磁波が伝搬可能な領域である。アンテナからの電磁波の発振は同軸線路給電モデル¹¹⁾を使用した。このため、アンテナ下流端面 (x=0 mm) に 1 次の Mur の吸収境界条件を課し、それから 1 セルずれた面 (x=0.5 mm) で電場を励振した。なお、アンテナは線状導体で模擬している。一方、放電室壁面に関しては完全導体条件を課し、開放端であるオリフィス下流端面 (x=24 mm) では 1 次の Mur の吸収境界条件を課した。

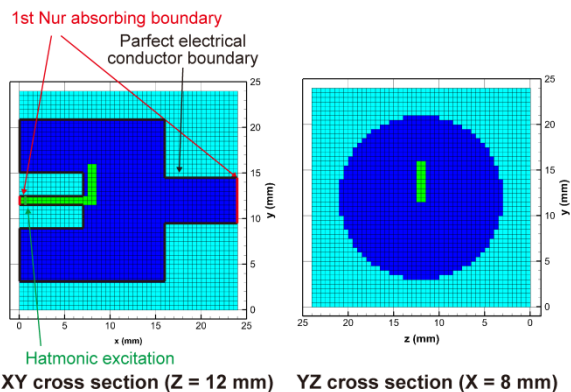


図 4 計算格子および電磁場解析に関する境界条件。青色のセルが電子の存在する流体要素，青色および黄緑色のセルは電磁場が伝搬する要素，水色のセルは放電室壁面に該当する導体要素を示す。

表 1 計算条件。

Parameter	Value/Type
Operation gas	Xenon
Microwave frequency	2.45 GHz
Input microwave power	8 W
Xenon mass flow rate	0.05 mg/s
Neutral xenon density	$4.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Initial electron density	$2.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$
Initial electron temperature	2.0 eV
Sheath potential	20 V

表 1 に本計算の計算条件を示す。作動ガスにはキセノンを使用し、その質量流量は 0.05 mg/s とした。この質量流量下での放電室内の中性粒子は、DSMC 解析から放電室内に一様に $4.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ で存在するとして電子との衝突を計算した。一方、計算初期の電子源内部の電子密度および電子温度は、九州大学の電子源について実験値が存在しないため、宇宙科学研究所のマイクロ波放電式電子源で過去に計測された実験値¹²⁾を参考に、 $2.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ と 2.0 eV とした。また、マイクロ波周波数は 2.45 GHz、投入マイクロ波電力は 8 W に設定した。ここで、投入マイクロ波電力の制御因子は、先に示したアンテナ根本に励振する電場強度である。時間発展するにつれ、電子の状態は変化するため、アンテナから見た負荷インピーダンスは変化し、一定の電場を根本に与えた場合、投入されるマイクロ波電力も時間とともに変化する。本計算では、8 W の一定マイクロ波電力を放電室内に投入するために、以下の式にしたがって、根本に与える電場強度をマイクロ波 1 周期毎に更新した。

$$E_{\text{new}} = E_{\text{old}} + \theta \left(\frac{P_{\text{target}}}{P_{\text{old}}} - 1 \right) \frac{E_{\text{old}}}{2} \quad (6)$$

ここで、 E_{old} 、 E_{new} は更新前後の励振電場強度、 P_{old} は更新前のマイクロ波 1 周期で平均した投入マイクロ波電力、 P_{target} は設定投入マイクロ波電力（本計算では先に示した通り 8 W）、 θ は比例係数である。なお、本計算では θ は 0.5 とした。

また、FDTD 計算の時間刻みはクーラン条件から $2.5 \times 10^{-13} \text{ s}$ に設定した。一方、PIC 計算の時間刻みは計算コストの観点から、 $2.5 \times 10^{-12} \text{ s}$ に設定し、FDTD 計算を 10 回行った後、PIC 計算および衝突計算を 1 回行った。加えて、電子の運動に課す境界条件として、オリフィス下流に到達した電子はそのまま流出するとした。一方、壁面に到達した電子はイオンシースによる電子の排斥を模擬するために、20 eV 以上の運動エネルギーを持った電子はシースの逆電位を乗り越え、壁面に到達するものとし、20 eV 以下の運動エネルギーの電子に関しては、シースによって反射され、エネルギーを失うことなく、計算領域に戻るものとした。なお、反射の閾値である 20 V のシース電位は、小野寺らがプローブにより計測したプラズマの空間電位¹²⁾を参考に設定した。

3. 解析結果および考察

3.1 エネルギーの保存性の確認

図 5 に 50 ns までの投入マイクロ波電力と電子の吸収電力のマイクロ波 1 周期での平均値の時間履歴を示す。式(6)で示した励振電場強度の更新は、電場が安定してくる 4 ns 付近（計算開始からマイクロ波 10 周期が経過

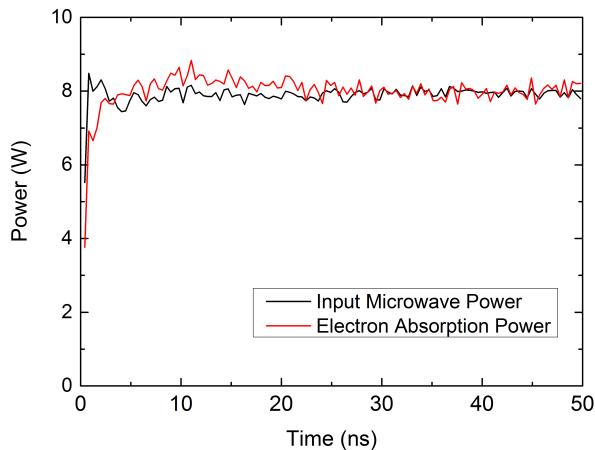


図5 投入マイクロ波電力(黒線)と電子の吸収電力(赤線)のマイクロ波1周期での平均値の時間履歴。

した時間)から開始した。図5より、4 ns以降は励振電場強度の更新により、投入電力が8 Wに維持されていることが分かる。

また、計算開始直後は、電磁場として空間に残るエネルギーが存在するため、投入電力に比べ電子の吸収電力が小さくなるが、計算が進むにつれて、投入されたマイクロ波電力と電子に吸収されたマイクロ波電力が良く一致することが分かる。電子PICソルバでは、陽にエネルギーの保存性を保証していないが、図5の結果より、電子PICソルバから求めた電子のマイクロ波電力の吸収分布を、開発しているHybrid-PICソルバのエネルギー保存式を解く際に提供しても問題ないことが確認された。

3.2 電子のマイクロ波電力吸収分布

図6に計算開始から10 ns後、50 ns後の電子のマイクロ波電力の吸収分布を示す。図6の結果より、経過時間に関係なく、マイクロ波による電子の加熱はアンテナ近傍で発生していることが分かる。今回の計算では、初期の電子密度を $2.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ と設定しており、この密度は2.45 GHzのマイクロ波のカットオフ密度 $7.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ を超えている。このため、マイクロ波電磁場は図2で示した下流に形成されているECR層まで到達せずに、アンテナ近傍の高密度のプラズマにより急激に減衰したと考えられる。マイクロ波放電式電子源の内部の中性粒子密度は、マイクロ波放電式イオンソースのイオン源内中性粒子密度に比べ桁高いため、比較的高密度のプラズマが電子源内部には生成され、場合によってはカットオフ密度以上のoverdenseなプラズマが生成、維持されることもある¹³⁾。本解析結果から、カットオフ密度を超える電子源の作動条件下では、ECRによる電子の加熱ではなく、変動電場との容量的な結合により電子が加熱

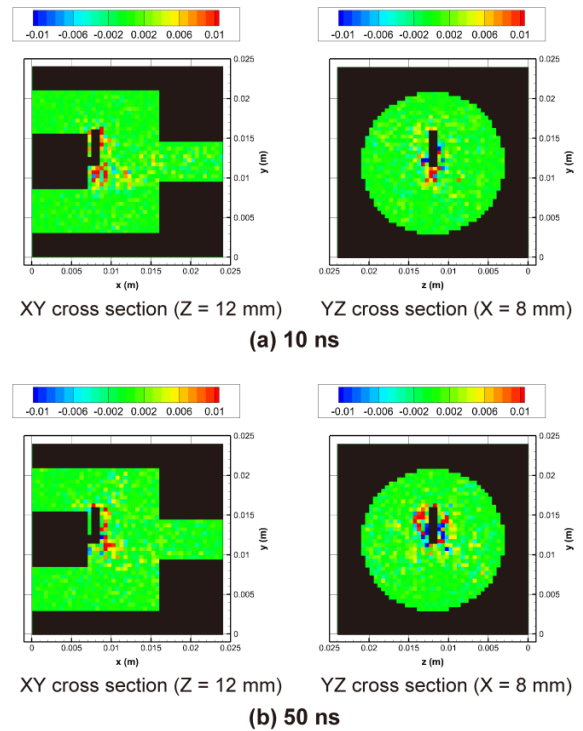


図6 (a)10 ns後、(b)50 ns後の電子のマイクロ波吸収電力分布。単位はW。

されていることが確認された。

3.3 電子温度分布

図7に計算開始から10 ns後、50 ns後の電子温度分布を示す。図7(a)、(b)の比較から、時間の経過とともに電子の温度が全体的に上昇していくことが分かる。これは、単位時間に電子が得たエネルギーが衝突によってすべて消費されず、蓄積されており、50 nsでは定常まで計算できていないことを示している。電子PICソルバで50 nsまで計算するのに4コアの一般的なCPUを用いた並列計算で3時間程度であり、電子の時間スケールで電子源内部のプラズマが完全に定常に達するまで計算するのは現状では現実的でないことが分かる。このため、これまでの開発指針の通り、電子を流体として扱い、イオンの時間スケールでプラズマを解析するHybrid-PICソルバに、電子PICソルバから得られたマイクロ波電力吸収分布を受け渡す連成解析を今後進めていくことにより、電子源内部のプラズマ状態の解析を進めていく必要がある。

また、電子の加熱は図6で示したようにアンテナ近傍で生じるが、加熱された高エネルギーの電子は図7に示すように磁力線に沿うように拡散することが分かる。しかし、実際の電子源の作動においては、今回解析に使用した電子PICソルバで考慮していない静電場により、電子が電子源内部からオリフィスを通して抽出されるた

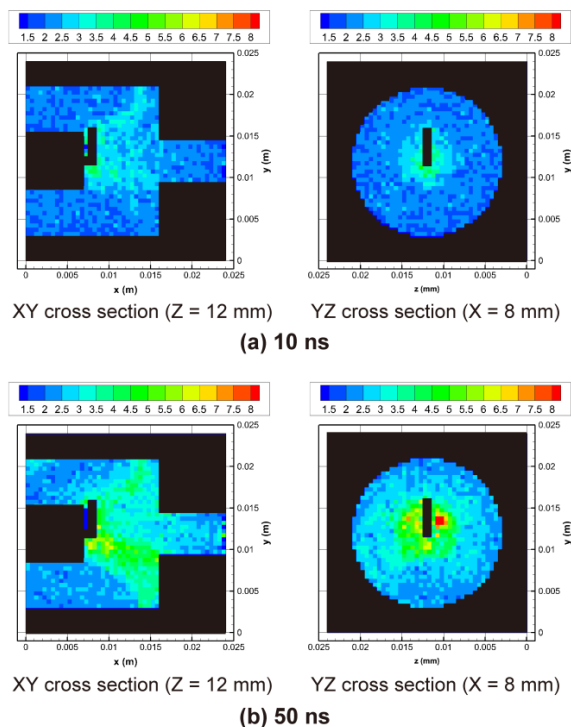


図7 (a)10 ns 後, (b)50 ns 後の電子温度分布. 単位は eV.

め, 実際の電子温度分布は図7の結果から変化すると予想される. この点に関しても, 先に述べたように今後 Hybrid-PIC ソルバとの連成解析を進めていくことにより, 調査する必要がある.

4. まとめ

本研究では, 現在 JAXA において開発を進めている Hybrid-PIC ソルバによる電子源プラズマ解析のために, マイクロ波放電式電子源内における電子のマイクロ波電力の吸収分布を, 九州大学で開発が進められてきた FDTD 法による電磁場解析と PIC 法による電子の運動解析を組み合わせた解析ソルバを用いて, 3次元のプラズマ解析を行った.

プラズマ解析において, 電子源内に投入されたマイクロ波電力と電子に吸収されたマイクロ波電力を評価し, これが一致することを確認した. また, カットオフ密度を超える電子源内部プラズマ状態では, マイクロ波はアンテナ近傍で強く減衰し, アンテナ近傍で電子が強く加

熱されることを確認した. 加えて, 加熱された電子が磁力線に沿って拡散していることを確認した.

しかし, 本計算ではプラズマの状態は定常に達しておらず, また, 電子を引き出すための静電場を考慮していないため, 今後は Hybrid-PIC ソルバに電子のマイクロ波の吸収分布を受け渡し, 連成解析を進めることにより, 静電場による電子放出を模擬した定常の電子源内部プラズマ状態について調査を進めて行く必要がある.

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
- 2) 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝: イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 2006.
- 3) Dan M. Goebel, Ira Katz: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, John Wiley & Sons, 2008.
- 4) 國中均, 堀内泰男, 西山和孝, 船木一幸, 清水幸夫, 山田哲哉: 「はやぶさ」搭載マイクロ波放電型イオンエンジン, 日本航空宇宙学会誌, 第 53 巻, 第 618 号, pp. 203-210, 2005.
- 5) 小泉宏之, 國中均: DubaiSat-2 における 500mA 級マイクロ波放電式中和器の運用報告, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-010, 2013.
- 6) 細田聡史, 國中均: イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, プラズマ・核融合学会誌, 第 86 巻, 第 5 号, pp. 282-292, 2010.
- 7) Wataru Ohmichi, Hitoshi Kuninaka: Degradation Mechanism of ECR Neutralizer and its Countermeasure, 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-314, 2011.
- 8) 窪田健一, 渡邊裕樹, 山本直嗣, 中島秀紀, 宮坂武志, 船木一幸: マイクロ波放電式電子源のイオンスケール解析, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-009, 2013.
- 9) Hirokazu Masui, Yousuke Tashiro, Naoji Yamamoto, Hideki Nakashima, Ikkoh Funaki: Analysis of Electron and Microwave Behavior in Microwave Discharge Neutralizer, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 49, No. 164, pp. 87-93, 2006.
- 10) V. Vahedi, M. Surendra: A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges, Computer Physics Communications, 87, pp. 179-198, 1995.
- 11) 宇野亨: FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- 12) 小野寺範義, 竹ヶ原春貴, 西山和孝, 船木一幸, 國中均: マイクロ波放電型中和器の電子放出機構, 日本航空宇宙学会論文集, 第 49 巻, 第 564 号, pp.27-31, 2001.
- 13) Ikkoh Funaki, Hitoshi Kuninaka: Overdense Plasma Production in a Low-power Microwave Discharge Electron Source, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, pp. 2495-2500, 2001.