

マイクロ波放電式中和器解析に向けた3次元 Hybrid-PIC コード開発

○窪田健一，渡邊裕樹，船木一幸 (JAXA)，山本直嗣，中島秀紀 (九大)，宮坂武志 (岐阜大)

1. 研究背景

イオンエンジンは推進剤を放電によりプラズマ化し、イオンを静電加速することにより推力を得る宇宙用推進機である。比推力が 3,000 秒程度と化学燃焼を使用する推進機と比較して1桁高いことから、イオンエンジンは探査機の主推進や地球周回衛星の軌道・姿勢制御に用いられるが、低推力ゆえに所定の総力積を達成するためには数千から数万時間に及ぶ長時間の作動が要求される。長寿命が利点であるイオンエンジンであるが、そのような長時間作動を保証するためには、実時間（数万時間）をかけた寿命評価試験を実施する他ないのが現状であり、これが新規開発・改良を遅延化させる一因となっている。現に、2010年6月に地球への帰還を果たした小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ イオンエンジンにおいては、長寿命を保証するために 20,000 時間程度の寿命評価試験が 2 回実施された¹⁾。

そのような状況に鑑み、近年は数値解析によってイオンエンジンの寿命評価試験を支援する研究が進められている。加速電極の損耗解析に関しては多くの研究機関で研究が行われており^{2,3)}、JAXA で開発された JIEDI ツールにおいては既に実用段階にある⁴⁾。一方、主陰極や中和器に用いられる電子源に関しても原理解明や性能向上を目的とした数値解析的研究が行われてきたが、内部現象については不明な点が多い。はやぶさミッションでは地上試験で保証されていた寿命よりも短い 14,000 時間でマイクロ波放電式中和器が劣化の兆候を示したという経緯もあり⁵⁾、その劣化機構、及び中和器内部のプラズマ挙動の詳細について理解が求められている。

そこで本研究ではマイクロ波放電式中和器の内部現象の解明、さらには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。本稿ではイオンの時間スケールで解析するために、イオン・電子をそれぞれ粒子・流体で扱う Hybrid-PIC(Particle In Cell)モデルを採用し解析を実施した。電位の壁面境界条件として、一定のシース電圧を仮定する条件と、シースモデルを用いる条件それぞれを適用し、それらが放電場に与える影響について調べた。

2. 解析条件とモデリング

2.1. 中和器形状

本稿では九州大学所有の試験モデルを解析対象とした。図 1 に解析対象の中和器の断面図を示す。円筒状の筐体内に L 字型アンテナが挿入された構造を為す。作動ガスは図左上部から流入し、右端のオリフィスから流出する。本計算では赤い枠で囲んだ領域を解析領域とした。

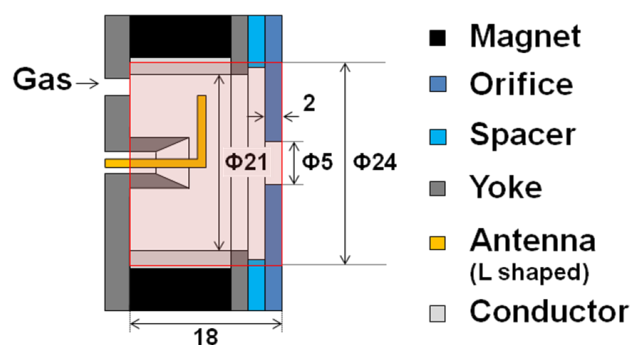


図 1 解析対象中和器

磁場はアンテナ先端周辺で電子の共鳴磁束密度(マイクロ波周波数 4.2GHz の場合 0.15 T)となるように印加されている。図 2 は infolytica 社の磁場解析ソフト Magnet7 を用いて解析した磁束密度分

布である。なお、図中には磁石とヨークのみ表示されている。

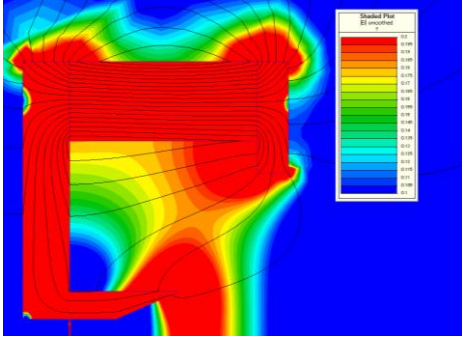


図2 磁束密度分布

2.2 Hybrid-PIC モデル

マイクロ波放電式中和器では、ECR (Electron Cyclotron Resonance) により生成されたイオンが壁面に衝突し、電子と再結合して中性粒子となり、その後再び放電室内で電離して同様の過程を繰り返すというプロセスで電子が中和器本体から抽出される。したがって、イオンが電荷の運び手として重要な役割を果たしており、中和器の作動を模擬するためにはイオンの時間スケールで解析できるモデルを選択する必要がある。作動ガスに関するクヌーセン数は1-10程度であるため、イオンは粒子として扱うのが適切である。一方、電子についても ECR によるプラズマ生成を模擬するためには、その粒子性まで考慮できるモデル化が理想的である。しかし、電子のサイクロトロン振動数は $10^{10-11} \text{ s}^{-1}$ 程度であるため、電子の粒子性を考慮しつつイオンの時間スケール(ms 程度)で解析するには非常に高い計算コストがかかる。

そこで本研究ではイオンは粒子、電子は流体として扱う Hybrid-PIC 法を適用した。なお、ECR 放電は九州大学で開発が進められてきた FDTD (Finite Difference Time Domain) と電子 PIC のカップリングソルバを用いて解析した⁶⁾。同ソルバにより各セルでのイオン生成率を計算し、それを Hybrid-PIC に反映させるという手法を用いた。なお、生成されるイオンの速度としては、後述する背景中性粒子の流れ場に対して Maxwell 分布を仮定してランダムに選んだ速度を与えた。

Hybrid-PIC の支配方程式を以下に示す。イオン粒子の位置及び速度は以下の式を leap-frog 法により解くことで算出した。

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{e}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \mathbf{v}_i \quad (2)$$

(1)式中に現れる電場は、電流保存式(3)に電子運動方程式(4), (5)を代入して得られる電位 ϕ に関するポアソン方程式を有限要素法で解くことで算出した⁷⁾。

電流保存式

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot n_e (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e) = 0 \quad (3)$$

電子運動方程式

$$\mathbf{u}_{e\parallel} = -\mu_e \mathbf{E}_{\parallel} - D_e \frac{\nabla_{\parallel} n_e}{n_e} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{e\perp} = \mathbf{r}_{e\perp} - \beta_e \mathbf{r}_{e\perp} \times \mathbf{b} \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad \mathbf{r}_{e\perp} = -\mu_{e\perp} \mathbf{E}_{\perp} - D_{e\perp} \frac{\nabla_{\perp} n_e}{n_e}$$

ここで、 μ_e , D_e , β_e , \mathbf{b} はそれぞれ移動度、拡散係数、ホール係数、磁場方向単位ベクトルを表す。なお、計算領域内で準中性条件が成り立つと仮定し、さらに簡単のために電子温度は一定とした。イオンと中性粒子の衝突としては、電荷交換衝突および弾性衝突を考慮した⁸⁾。中性粒子の流れ場については事前に DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 解析により計算しておき、その結果を Hybrid-PIC 解析に反映させた。

2.3 マイクロ波解析

マイクロ波により加熱された電子によるイオン生成率分布を解析するために、増井らが開発したコードを本研究では使用した⁶⁾。このソルバでは電子の挙動のみを PIC で解き、イオン・中性粒子は背景に静止しているとして取り扱う。また、静電場は考慮されていないので、電子はマイクロ波による電磁場の影響のみ受けると仮定されている。

2.4 解析条件

本解析で使用した格子を図3に示す。本稿では

中和器の中心軸を x 軸とし、L 字アンテナの先端が指す方向を +y 軸方向とする。円筒である中和器形状を図に示すような直方体格子で近似した(赤：壁面セル，青：流体セル)。格子幅は 0.5 mm である。粗い近似ではあるが、マイクロ波の波長は中和器長さよりも十分大きいので(7 cm 程度)、現象の本質に影響はないと判断し本格子を採用した。ただし、バックヨークのアンテナ周りの形状は直方体格子での模擬は困難であるため、図 3 に示すように円筒形状に置き換えた。なお、PIC で使用する磁場については実形状で解析した磁場データを用いている。

粒子の反射条件について、中性粒子 DSMC 解析では格子表面で拡散反射を仮定し、Hybrid-PIC 解析ではイオンは壁面に衝突した時点で電子と再結合して消滅するとした。また、マイクロ波解析のための電子 PIC ではイオンシースによる電子の挙動を模擬するために、20 eV 以下の運動エネルギーを持って放電室壁面に到達した電子はシースにより反射され、20 eV 以上の電子は壁面に到達し、消失するものとした。これはシース電位を 20 V に固定することを意味し、増井らの用いた境界条件に倣ったものである⁶⁾。以後、同条件を ϕ_{sh} 固定条件と呼ぶ。

一方、Hybrid-PIC で用いる壁面電位条件としては、電子 PIC と同様に 20 V で固定する場合に加え、シースモデルを適用した場合の 2 ケースについて調べた。シース電位が ϕ_{sh} のとき、壁面に流入する電子のフラックスは以下のように与えることができる。

$$n_e \mathbf{u}_e \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{4} n_e C_e \exp\left(-\frac{e\phi_{sh}}{kT_e}\right) \quad (6)$$

ここで \mathbf{n} 、 C_e はそれぞれ壁面方向の法線ベクトル、電子熱速度を表す。式(4)、(5)を式(6)に代入することでシースの存在下で電位が満たすべき条件式が得られる。電位に関するポアソン方程式を解く際に、式(6)を壁面で課すことでシースをモデル化した。

計算条件を表 1 に示す。

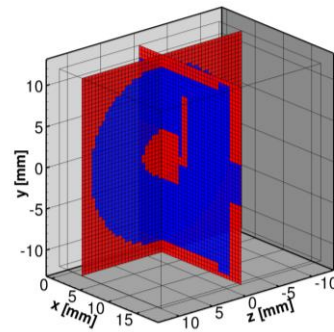


図 3 計算格子

表 1 計算条件

作動気体	Xe
流量	0.5 sccm
マイクロ波周波数	4.2 GHz
投入電力	8 W
壁面電位(シース電位) * ϕ_{sh} 固定条件の場合に限る	20 V
出口電位	22 V
電子温度	3 eV

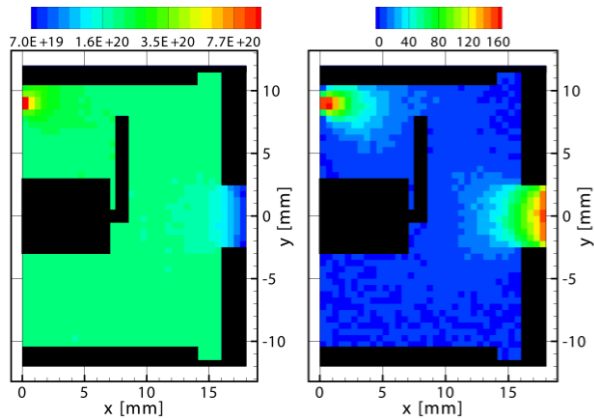
3. 解析結果

3.1 中性粒子の流れ場

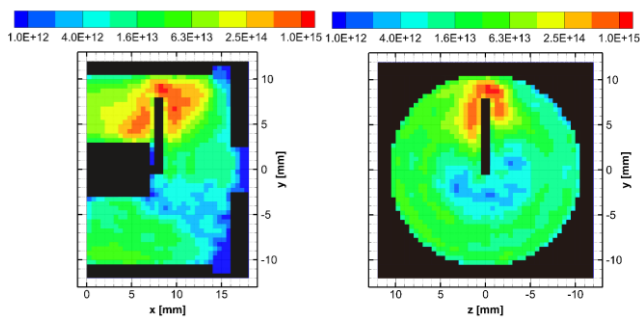
図 4 に中性粒子 DSMC 解析による中性粒子数密度、軸方向速度分布を示す。ガス導入ポート付近やオリフィス付近以外ではほぼ一様の密度、速度であることが分かる。アンテナ周りの密度は約 $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、オリフィス出口では約 $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となった。

3.2 イオン生成率分布

図 5 に電子 PIC 法と FDTD 法を組み合わせたカップリングコードによる、中和器内部の電離衝突の空間分布を示す。一様に電子を分布させた状態から放電を開始し、150 ns から 250 ns の間の平均生成率を表す。



(a) 数密度, m^{-3} (b) 軸方向速度, m/s
 図4 中性粒子 DSMC 解析結果($z=0$ mm)



(a) $z=0$ mm (b) $x=8$ mm
 図5 イオン生成率分布, s^{-1}

3.3 イオン密度分布

図6にイオン密度分布を示す. $x=8$ mmの断面図は中和器下流から見た図を表す. ϕ_{sh} 固定条件の場合, アンテナ先端におけるイオン密度は約 $3 \times 10^{19} m^{-3}$ となる一方で, オリフィス出口では約 $3 \times 10^{16} m^{-3}$ まで密度が低下した. $x=8$ mmでは, アンテナの左側($z>0$)の方が右側よりも高密度となった.

一方, シースモデルを課した場合, アンテナ先端におけるイオン密度は約 $7 \times 10^{18} m^{-3}$ となり, ϕ_{sh} 固定条件の場合の23%程度となった. 逆にオリフィス出口付近では $10^{17-18} m^{-3}$ となった. また, $x=8$ mmの図から分かるように, 先に見られたようなアンテナ左右における非対称性は顕著には現れなかった.

3.4 電位分布

図7に電位分布を示す. ϕ_{sh} 固定条件の場合, $z=0$ mmの断面においてはほぼ一様な電位とな

るが, $x=8$ mmの断面図からアンテナの両側において高電位領域が形成されることが分かる. 一方, シースモデルを課した場合, アンテナ先端付近に高電位領域が形成され, 最大で34 V程度となった.

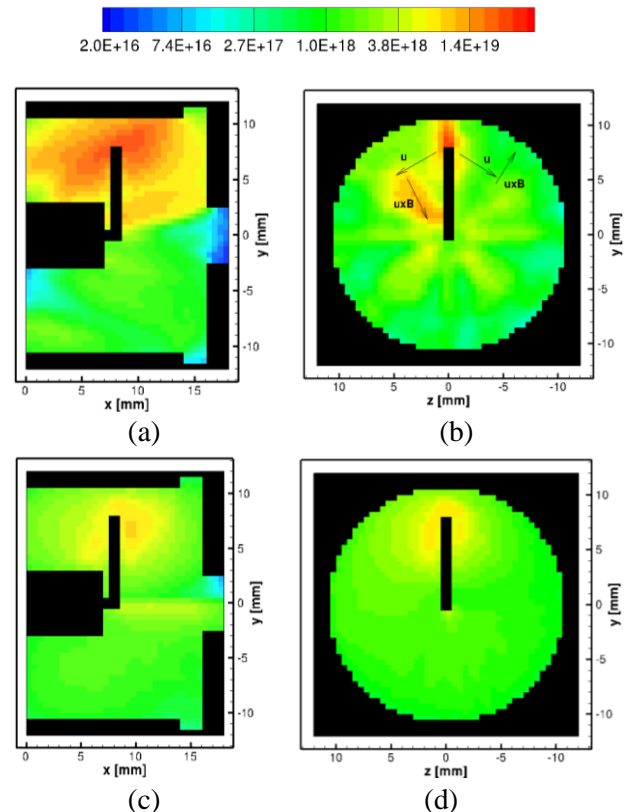


図6 イオン密度分布, m^{-3} , (a) ϕ_{sh} 固定条件($z=0$ mm), (b) ϕ_{sh} 固定条件($x=8$ mm), (c) シースモデル($z=0$ mm), (d) シースモデル($x=8$ mm)

3.5 電子流線

図8に電子の流線を示す. ϕ_{sh} 固定条件の場合, 電子は基本的に磁力線に沿うように移動し, 磁力線が集まるヨークに流入している様子が見て取れる. また, オリフィス出口において電子が中和器外に抽出される様子が捉えられているものの, 流線の出発点はバックヨーク・アンテナ表面となっている. 一方, シースモデルを課した場合, バルクプラズマ中で生成された電子が複雑な軌跡を辿った末, オリフィス出口から流出するという流線が得られた. ただし, オリフィス出口において, 現条件では外部から電子が流入してくる箇所も存在する.

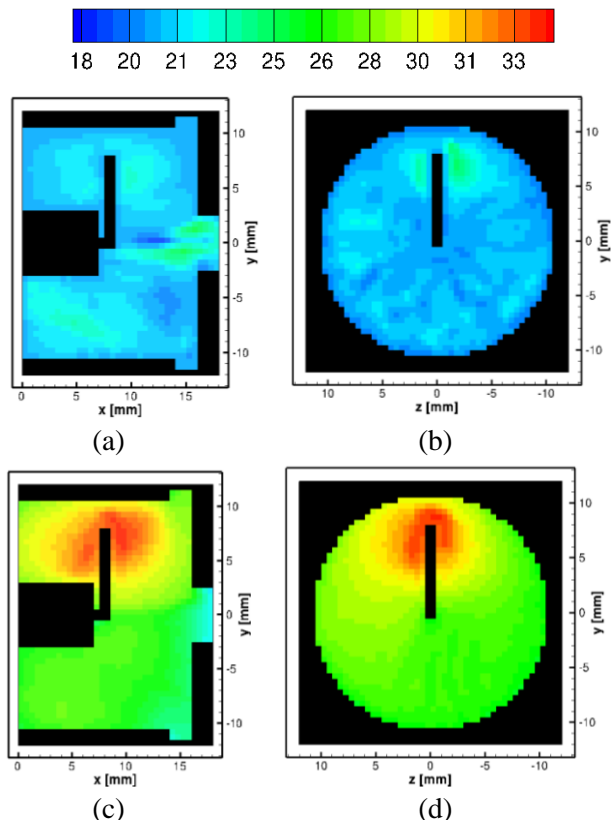


図 7 電位分布, V, (a) ϕ_{sh} 固定条件($z=0$ mm), (b) ϕ_{sh} 固定条件($x=8$ mm), (c)シースモデル($z=0$ mm), (d)シースモデル($x=8$ mm)

4. 考察

4.1 イオン密度と電位分布

ϕ_{sh} 固定条件の場合、アンテナ表面シース電位が固定されているためアンテナ両側で高電位領域が形成されるような電位分布になる (図 7-b)。その結果、高電位領域に挟まれたイオンは電場による加速はほとんど得られず、アンテナ先端付近に停滞することで $z=0$ mm 断面におけるイオン密度が $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ にも達したものと考えられる。アンテナ先端ではイオン生成が活発であるにもかかわらず、高電位領域に挟まれたイオンは周囲に散逸できず、近くの壁面に吸収されて消滅してしまうため、中和器下部やオリフィス近傍では供給されるイオンが少なく低密度となる傾向がある。高電位領域で生成され、周囲に散逸するイオンも存在するが、イオンが受けるローレンツ力が図 6-b に示すように非対称なため、結果的に密度の非対称性が現れたものと考えられる。

一方、シースモデルを用いた場合、アンテナ先

端周辺の電位は相対的に高い値(30 V 程度)となるが、これはアンテナ周辺ではイオン生成率が高く電子密度が高いことに起因する。この高電位領域で生成されたイオンは電場で加速され周囲に散逸するため、 ϕ_{sh} 固定条件の場合にアンテナ周辺で見られたイオンの局在化は緩和される。また、 ϕ_{sh} 固定条件の場合と比べ電位の最大値が高いため、電場で周囲に加速されるイオンの速度が高く、非対称なローレンツ力を受けるもののアンテナ下部までイオンが回り込むことができる。その結果、イオン密度の左右非対称性は軽減されたものと推察される。

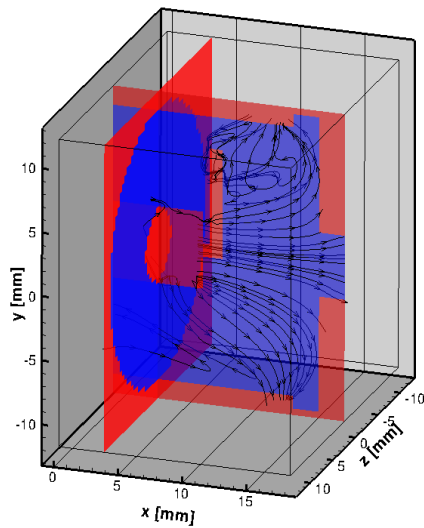
4.2 電子の流れ

ϕ_{sh} 固定条件の場合、オリフィスから電子が外部に抽出されている。しかし、その電子の源は総じて中和器内部の壁面であり、マイクロ波放電式中和器の動作を模擬しているとは言い難い。2 次電子放出を無視する場合、同中和器では壁面から電子が抽出されるのは壁面におけるイオンの再結合時であり、電子はバルクプラズマ中で生成されるからである。

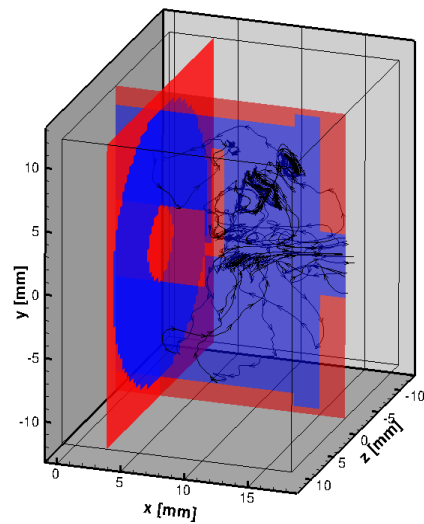
一方、シースモデルを用いた場合、バルクプラズマ中で生成された電子がオリフィスから流出する様子が捉えられており、予想される電子流線に近い。ただし、オリフィス出口において電子が逆流する箇所もあり、現条件では完全に中和器の模擬ができていないと言えない。今後、プルーム領域に解析領域を広げ、オリフィス近傍の物理をより忠実に捉える試みが必要である。

5. まとめ

マイクロ波放電式中和器の放電場をイオンの時間・空間スケールで調べるために、3 次元 Hybrid-PIC 解析を実施した。マイクロ波の吸収によるイオン生成は、電子 PIC と FDTD のカップリング解析から得られた結果を用いた。電位の境界条件としてシース電位を 20 V に固定する場合と、シースモデルを適用した場合について解析を実施し、境界条件が放電場に与える影響を調べた。



(a) ϕ_{sh} 固定条件



(b) シースモデル

図8 電子流線

作動ガスは Xe, 流量は 0.5 sccm, マイクロ波周波数は 4.2 GHz, 投入電力は 8 W という条件で解析を行った。

シース電位を固定した場合, 電位分布はほぼ一様でイオンが散逸せず, アンテナ周辺で高密度 ($3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) となった。一方, シースモデルを用いた場合はアンテナ先端周辺で 34 V 程度と高電位となり, 電場により加速されたイオンが散逸することでアンテナ先端周辺のイオン密度は $7 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 程度となった。

電子の流線について調べた結果, シース電位を固定した場合はオリフィス出口に到達する電子の源が中和器壁面となった。一方, シースモデルを用いた場合はバルクプラズマ中で生成された電子がオリフィスに到達する流線を得た。これはマイクロ波放電式中和器内部の電子の挙動としては妥当なものである。ただし, 現条件ではオリフィスにて電子の逆流も見られるため, 解析条件及びモデルの改善が必要である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) J. R. Brophy, J. E. Polk, and V. K. Rawlin: Ion Engine Service Life Validation by Analysis and Testing, AIAA96-2715, 1996.
- 3) 趙孟佑: イオンスラスタグリッドシミュレーションに関するレビュー, JAXA-SP-06-019, pp.35-46, 2007.

- 4) 船木一幸, 篠原育, 中野正勝, 梶村好宏, 宮坂武志, 中山宜典, 百武徹, 和田元, 剣持貴弘, 村本哲也, 國中均: イオンエンジングリッド損耗解析ツール JIEDI, JAXA-RM-11-023, 2012.
- 5) 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, J. Plasma Fusion Res., Vol.86, No.5, pp.282-292, 2010.
- 6) H. Masui, Y. Tashiro, N. Yamamoto, H. Nakashima, and I. 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.
- 7) J. Jin: The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.
- 8) 宮坂武志, 安里勝雄, 小林勉, 柴田悠基: 粒子法によるイオンエンジングリッド損耗解析, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告書, JAXA-RR-09-004, pp.10-20, 2009.