

数値解析によるマイクロ波放電式中和器の内部物理解析

○楠田将士, 笹川裕太郎, 山本直嗣, 中島秀紀(九大)

1. はじめに

1.1. 研究背景

イオンエンジンは、宇宙用推進機の中でも、特に比推力の高い静電加速型電気推進機であり、小惑星探査機「はやぶさ」のミッションのような深宇宙探査や、人工衛星の姿勢制御、軌道遷移に使用されている。「はやぶさ」ミッションにおいて、イオンエンジンの中でも無電極のために長寿命を期待されていたマイクロ波放電式が採用され、ミッションの成功によって、マイクロ波放電式イオンエンジンの世界初の宇宙実証がなされた。今後、その利用は益々拡大していくだろう。開発にあたって、イオンエンジンは、低推力のために所定の ΔV を得るために、数千から数万時間の長時間の作動が必要となる。そのために、地上での耐久試験において、数万時間をかける必要があり、その際の人的・時間的コストは開発の際に大きな負担となっている。

そのような状況の下、数値解析によってイオンエンジンの寿命評価の指針を得る研究が進められている。先のはやぶさのミッションでは、宇宙機の帯電を防ぐために設置されているマイクロ波放電式中和器の不具合及び性能低下がイオンエンジンシステムの寿命の制限要因となることが分かった。マイクロ波放電式中和器に関しては、その寿命どころか内部の物理現象も不明である。よって、本研究では、マイクロ波放電式中和器の内部物理現象の解明、性能向上への指針を得ることおよび寿命評価ツールの作成を目的としている。

これまで、本研究室では、内部物理解析するものとして①電子とマイクロ波の相互作用の効果を解析する解析ソルバ(3D-FDTD-PIC)と②電子とイオンの運動及びシース解析を目的とした静電場解析を行うコード(2D-Full-PIC)。寿命評価を行うものとして、③中和器内部のスパッタ粒子の動きの解析するコード(2D-DSMC)という3つの解析物理対象に対するコード群の作成を行ってきた。②の電子とイオンのプラズマ解析に際し、電子とイオンを各々粒子として扱う Full-PIC(Particle In Cell)モデルを採用した。これは、一連のツールは、より忠実に挙動を模擬する設計思想の下、開発されているのである。本稿では、さらに忠実な解析を進めるために、

従来の 2D-Full-PIC コードでは、電子のマイクロ波電力の吸収効果は、ECR(電子サイクロトロン共鳴)を模擬していたが、これを改善し、ECR 効果のみではなく、空間毎のエネルギー吸収効果を取り入れることにした。密度分布、エネルギー分布、電位分布などを用いて、定性的なプラズマ挙動を議論する。

2. 数値解析手法

2.1. 全体のフロー

まず、ツール全体のフローについて詳しく説明する。本研究では初期電子密度を一様として、①電子とマイクロ波の相互作用を解析し、その効果をエネルギー獲得確率として、②電子とイオンの運動を解析し、密度分布を得る。電子密度分布を①のマイクロ波解析にフィードバックし、定常状態まで繰り返す。その後、③各壁面電流値からスパッタ計算を行い、マイクロ波性能の低下を解析する。その効果をさらにマイクロ波解析へとフィードバックする。これらの連成解析を進めることによって、より忠実な解析が可能となる。本稿では、連成解析を行うステップとして、上述の通り、①と②の連成部を検証するために、①と②のみを扱う。

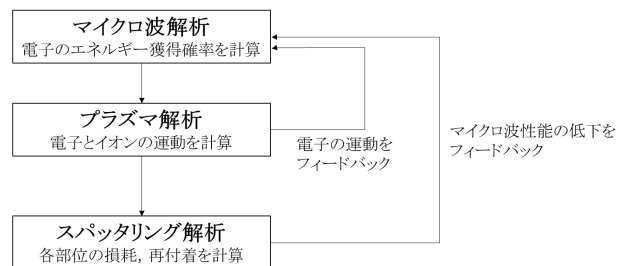


図1 フローチャート

2.2. 粒子計算の意義

ECR プラズマ源の数値解析は、内外で実施されており、電子とイオンを粒子として扱う Full-PIC モデルと電子を流体、イオンを粒子として扱う Hybrid-PIC モデルがある。電子を流体と扱うことで、計算コストを大幅に減少させることが出来るが、壁面シースをモデル化する必要があり、厳密解と言えない。そこで、電子も粒子として扱うことで、壁面シースを直接解くことが出来る、さらに磁気ミラーによる電子

閉じ込め効果も表現できる。また、流体計算の妥当性の評価も可能である。故に、高い計算コストがあるものの、粒子計算を行う意義はあると言える。

2.3. 解析対象

本稿では、解析対象として、本研究室の実験体系を導入した。解析対象となる中和器の断面図及び解析領域を図2に示す。計算領域は赤枠で示すように軸対称 zr 円筒座標系 $z=18\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ としている。円筒状の放電室に、L字型のアンテナを内挿したものと、直方体のサマリウムコバルト磁石を14個、放電室の周りに囲んだ物である。放電室の上流(図左)と下流(図右)に設置された磁性体(Fe)と永久磁石により、プラズマの生成・維持に必要な磁場が形成されている。図3に、その磁場分布を示す。これは、Advanced Science Laboratory, Inc社の3次元磁場解析ソフト Amaze を用いて解析した磁束密度分布である。本稿で用いられるマイクロ波周波数は4.2GHzの為、ECRを起す磁束密度は0.15Tである。図中の黒線部が ECR 層を示している。

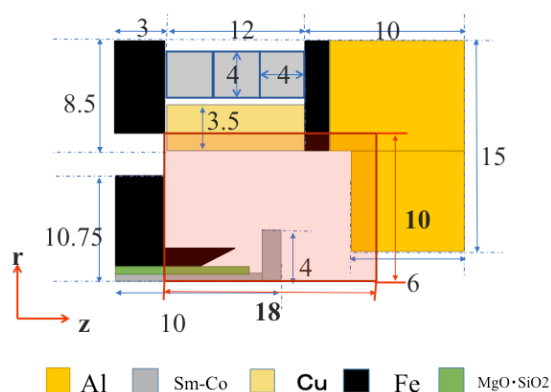


図2 計算体系図 赤枠が計算領域

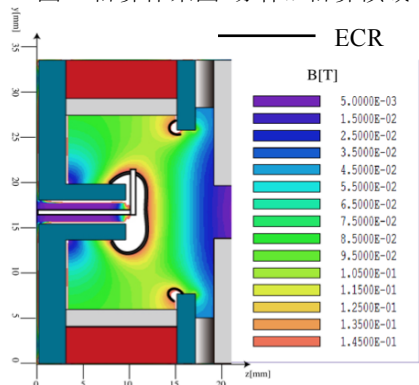


図3. 磁束密度分布(zr 断面) 黒線は ECR 層(0.15T)

2.4. マイクロ波解析

マイクロ波解析は3D-FDTD-PICを用いて解析される。これは、増井ら¹⁾によって開発されてきた電子とマイクロ波の相互作用を解析するコードである。電子スケールで解析するものとし、中性粒子とイオンは背景として動

かず、静電場を考慮しないものとする。マイクロ波伝播解析にはFDTD法を用いる。3次元体系として電場と磁場を差分化し、基礎式として以下のマクスウェル方程式によって解く。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (4)$$

電場計算に用いられる電流密度 \mathbf{J} の項として、PIC法で計算される電子電流密度のみを考慮して計算する。

一方FDTD-PICでは、イオンと中性粒子を背景として置き、電子のみを粒子として扱う。電子の運動はPIC法により解析する。電子の位置と速度は以下の運動方程式を leap-frog 法により時間中心差分により解く。

2.5. プラズマ解析

プラズマ挙動解析のための2D-Full-PICについて説明する。粒子計算は、PIC法(particle in the cell method)を用いた。PIC法では、離散的な空間格子に電磁場量を割り振り、格子内の粒子に電磁場量を線形補間して与える。(1)の運動方程式を基礎式として電子、イオンについてイオンの時間スケールで解く。電子とイオンを粒子として扱うことから Full-PIC と呼ばれる。このように粒子法を用いることで、壁面シースを解く際、モデル化が不要であり、(2)のポワソン方程式を解くことができる。シースを解析する際、格子間隔をデバイ長程度にする必要があるため、計算コスト削減のために2次元解析を行っている。

ポワソン方程式を解く際、(2)式を差分化し、連立方程式として解いた。このポワソン方程式の連立方程式の解法として、反復法の一つであるマルチグリッド法を用いた。マルチグリッド法は比較的高速な解法であり、多大な計算コストを必要とするシースの解析には有効であると考え採用した。シース解析の際に、不等間隔格子を採用した。格子全体をデバイ長で解くことは、多大な計算コストとなるので、シース解析に必要な壁面付近のみをデバイ長程度の細かい格子に設定することで、計算コストをかけることなくシースを解くことが可能となった。

電子・中性粒子・イオンの衝突は弾性、励起、電離衝突を考慮し、衝突判定として、計算時間短縮のため Null-collision 法を用いている。これは、

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

2.6. FDTD-PIC から Full-PIC への連成方法

2D-Full-PICへ電子のマイクロ波吸収効果を渡すために、3D-FDTD-PICにおいて、各電子がある領域、ある時間に受け取るエネルギー増分を観測し、それを図5に示すような確率分布として算出する。ここで、ある領域

とは、FDTD-PIC で計算する際の 1 セル(0.5mm×0.5mm ×0.5mm)を表し、ある時間とは、電子の平均エネルギーを約 8eV と仮定した時の 1 セルを通り過ぎる時間、約 0.9 ns とする。この 8eV はマイクロ波放電式イオンエンジンの内部をレーザートムソン散乱法で計測した際の値である。従来は、図 3 に示すような ECR 層を電子が通る時のみ、エネルギーを与えていたが、上記のように 1 セル毎のエネルギー増分の効果を反映させることにより、より厳密な解が、得られる。これを可能にしたのは、並列化や計算機性能の向上により、計算可能になった為である。

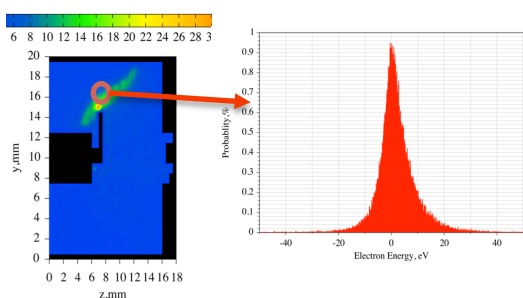


図 5 FDTD-PIC における空間エネルギー分布(yz 断面)とあるセルにおける電子エネルギー獲得確率分布

2.7. 境界条件

壁面での粒子の扱いとして、壁面に達したものとオリフィス下流では、無条件で電子・イオンは消失するものとした。尚、今回は、非対称性のある L 字アンテナの壁面条件は 2 次元で表現できないために、アンテナでの消失は考えないものとした。

2.8. 解析条件

Full-PIC における種々のパラメータを表 1 に示す。推進剤、マイクロ波周波数及び投入電力は本研究室所有の中和器に用いられたものと同等である。中性粒子密度に関しては、別途同中和器体系にて DSMC 計算を行ったところ、0.05mg/s では、 $2.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ で一定となったため、それを導入した。出口(オリフィス下流)の計算領域の端に 30V をかけ、イオンビーム電位を模擬した。

表 1 物理パラメータ

推進剤	Xe
ガス流量	0.05 mg/s
中性粒子密度(一定)	$2.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
マイクロ波周波数	4.2 GHz
投入電力	8 W
初期密度	$1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$
初期電子温度	2.0 eV
初期イオン温度	300 K
出口電圧	30 V

表 2 計算パラメータ

各粒子数 (電子・イオン)	各 1000 万個
1 セルあたりの粒子数	約 40 個
タイムステップ	$1.0 \times 10^9 \text{ ns}$

2.9. 並列化

本稿では、粒子数を増やし、計算精度の向上を図った。しかし、計算コストが大幅に上がる。そのため、計算時間の短縮が必要であった。そこで、分散メモリ型の並列計算機に最適化するため、MPI (Message Passing Interface) を用いた。⁵⁾ 今回、粒子分割つまりノードの数だけ粒子数を分割し、メモリを分散化し、計算コストの削減を図った。Full-PIC において、PIC 計算部の並列化は比較的容易であるので、PIC 部のみの並列化を図った。並列数を 384 とすると、従来の約 10 倍の速度が得られた。ポワソン方程式の反復計算がその多くを占めているため、今後は反復計算を並列化することで、更なる計算コストの削減が図れるはずである。

3. 解析結果

3.1. 空間エネルギー分布

まず、FDTD-PIC から Full-PIC への連成がきちんと行われているかを確認するために、電子のエネルギーを見る。図 6 に空間電子エネルギー分布を示す。これは、2D-Full-PIC を 9000ns まで解析した結果である。図 5 のようなアンテナの先端付近にエネルギーが集中するような分布になっている。以前は、ECR 層付近しか高エネルギーが存在しなかったが、電子エネルギー獲得確率を各セル毎で評価するように改善すると、FDTD-PIC で解析した結果通りに、エネルギーが与えられるようになった。よって、連成がきちんと行われていることが確認できる。また、出口電位があるオリフィス下流にも高エネルギー電子が存在しているので、ビーム電位により電子が加速されている事がわかる。FDTD-PIC の分布と比べて、広がっているように見えるのは、静電場の影響の可能性もあるかもしれない。また、定量的に見ると、全体的に 3eV、BACKYORK と FRONTYORK 間の磁気チューブ付近を中心に 8eV 以上の電子が分布している事がわかる。マイクロ波放電式イオンエンジンのレーザートムソン散乱計測では、8eV 程度と出ているので、定量的にも合っていると見えるが、定常状態ではないので、評価はできない。今後、連成解析を進め、定常状態まで解析した後、実験値等との比較が必要である。

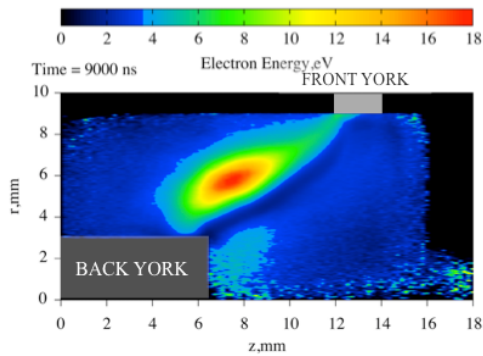


図6 空間エネルギー分布 9000 ns 後

3.2. 空間電位分布

次に、シースや中空電位が模擬できているか確認するために、電位を見る。図7に空間電位分布を示す。まず、オリフィス下流に出口電位として、30V設定していたが、きちんと現れている事がわかる。壁面シースの確認だが、壁面に対して、負の電位もしくは、中空に比べて低電位が見られる。壁面シースを表現できていると言える。次に、放電室の中空電位であるが、中心付近に若干ではあるが、高電位が見られる。先ほど述べたエネルギー分布でも、中空に高エネルギー電子が存在しており、この地点で多くの電離が起こっているため、後述する密度分布でもこの地点が高い密度を示しており、高電位が存在しているものと考えられる。しかし、BACKYORKのすぐ上に低電位が存在しており、定性的な振るまいといえるのか難しいものもある。また、定量的に見ると、後述する高密度の割には、非常に低く(10V程度)見積もられている。実験値からは、20~30V程の電位の存在が示唆されていることも有り、電位に関しては、過小評価されていることがわかる。

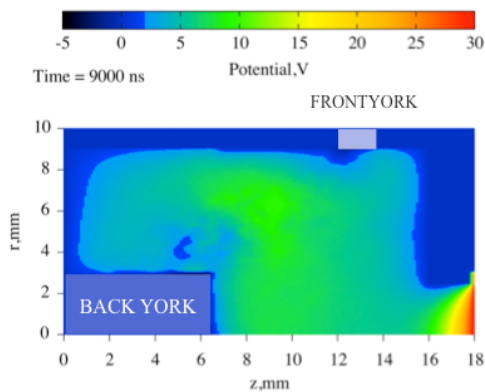


図7 空間電子エネルギー分布 9000 ns 後

3.3. 密度分布

プラズマ挙動を見るために、電子とイオンの密度分布を見る。図8(a)に空間電子密度分布、図8(b)に空間イオン密度分布を示す。電子密度は、BACKYORK 寄り、イオン密度は FRONTYORK 寄りに高密度が存在しているのがわかる。図6の高エネルギー電子が存在しているところとイオン密度の高密度がある地点が合致するので、この地点で多くの電離が起こっていることがわかる。電子は磁気チューブ内に閉じ込められているのはわかるが、イオンも閉じ込められているように見える。本来ならば、イオンは壁面シースに引き寄せられる筈である。電場の効果が上手く働いていないことがわかる。また、定量的に見ると、電子・イオン共に非常に高い密度を示している。特に、イオンは、 $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 以上を示している。中性粒子密度一定で $2.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ であるため、電離度が100%を超えるものとなり、過剰に電離している事がわかる。これは、明らかに過大評価であり、損失機構の見直しや衝突計算の際に過剰に電離する地点を一定とせず、中性粒子密度を減らす必要があるかも知れない。

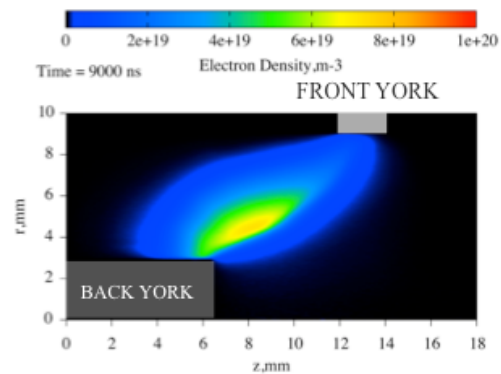


図8(a) 空間電子密度分布 9000 ns 後

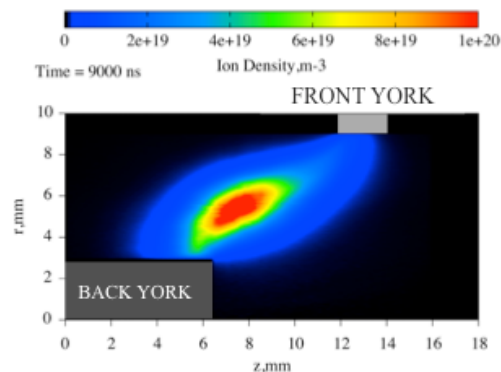


図8(b) 空間イオン密度分布 9000 ns 後

4. まとめ

3D-FDTD-PIC コードを用い、マイクロ波解析を行い、その効果を 2D-Full-PIC コードに反映させて、電子とイオンのプラズマ挙動を解析した。FDTD-PIC から Full-PIC への連成において、従来の ECR のみを考慮したマイクロ波からの電子のエネルギー増分の効果から、各セル毎のエネルギー増分の効果を取り入れることが出来た。

壁面シースと中空電位を模擬することに成功したが、実験値より低い値を示した。過剰電離し、イオンの密度が高過ぎる値をとってしまった。

今後は、電位分布の過小評価と電離の際の過大評価を改善するために、ポワソンソルバの見直しと密度の過大評価の改善のために損失機構の見直しと衝突計算の見直しが必要と考えられる。連成解析の自動化を行い、実際に計算をしてみて、定常状態への目処が立つかを確認していく。

参考文献

- 1) Ohmichi, W., and Kuninaka, H.: Degradation Mechanism of ECR Neutralizer and Countermeasure, IEPC-2011-314, 2011
- 2) 増井博一：マイクロ波放電型宇宙推進用プラズマ源に関する数値解析，九州大学博士論文，2005
- 3) 廣池匠哉：マルチグリッド法を用いたマイクロ波放電式中和器のプラズマ損失機構解明，九州大学修士論文，2012
- 4) 窪田健一，渡邊裕樹，船木一幸，山本直嗣，中島秀紀，宮坂武志，“マイクロ波放電式中和器の3次元 Hybrid-PIC シミュレーション，”第 45 回流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2013 論文集 2C15、2013 年 7 月、東京
- 5) 青山幸也：並列プログラミング入門 MPI 版，理化学研究所 情報基盤センター
http://accr.riken.jp/secure/4467/parallel-programming_main.pdf
- 6) Y. Takao, "Three-Dimensional Particle-in-Cell Simulation of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster mu1", IEPC-2013-186