

# 粒子法を用いたプラズマ推進機の運動論的シミュレーション

Full-kinetic particle simulation for plasma thruster

研究代表者：西山 和孝（宇宙航空研究開発機構）  
nishiyama@ep.isas.jaxa.jp

研究分担者：月崎 竜童（宇宙航空研究開発機構）  
tsukizaki.ryudo@jaxa.jp  
担当：計算と比較用のレーザ計測実験  
：張 科寅（宇宙航空研究開発機構）  
choh.shinatora@jaxa.jp  
担当：計算コード開発  
：山下 裕介（東京大学大学院）  
yamashita@ep.isas.jaxa.jp  
：濃野 歩（東京大学大学院）  
nono-ayumu303@g.ecc.u-tokyo.ac.jp  
担当：計算コード開発

## 研究目的 (Research Objective):

イオンエンジンやホールスラストを始めとする電気推進機では、推進剤を電離しプラズマを生成し、イオンを高速排気することで推進力を得る。そのため、エンジン内で効率よくプラズマを作ることが重要であるが、強磁場化されたプラズマであるため、予測良く最適なエンジンを設計することは難しい。そこで、本研究ではエンジンのプラズマ物理を明らかにする共に、設計ツールを構築することを最終目的とする。対象のエンジンは、マイクロ波放電型イオンエンジンであり、小惑星探査機はやぶさ、はやぶさ2で宇宙実証された。本エンジンは、電子とマイクロ波の共鳴現象である ECR 共鳴を用いて電子を加熱し、推進剤を電離させるプラズマ生成法を取っている。また、電子を効率良く加熱させるため、ミラー磁場を形成している。このように本エンジンでは、ECR 加熱・ミラー閉じ込めなどの電子の運動論スケールから、イオンの運動までを解く必要があり、従来使われてきた陽解法では、数値安定性と計算コストの観点から現実的ではない。そこで、前年度は、計算コストの大幅な削減、安定性の向上を狙ったエネルギー保存型半陰的 EM-PIC 法の開発を行い、従来の陽解法よりも時間刻み、グリッド幅を大きく取れるものの、エネルギー保存は満たし数値的に安定であることを1次元の計算で示した。今年度は、多次元化の前に、本エンジンで最も重要なプラズマモード遷移を定性的に物理解明し、必要な数値モデルの洗い出しを行った。プラズマモード遷移は推進剤流量を増加させると、ミラー磁場中以外でプラズマが生成される現象であり、推進性能を律速する原因である。この物理現象を解明するために、レーザ計測などの実験結果に基づき以下の(A)と(B)を実行した。

### (A) 準安定中性粒子の粒子計算

レーザ吸収分光法による準安定中性粒子密度、2光子吸収レーザ誘起蛍光法による

基底中性粒子密度の計測結果から、ミラー磁場以外の領域では、準安定からの電離、つまり段階電離が重要であると示唆された。そこで、本研究では、準安定粒子の粒子計算を実行し、準安定中性粒子の生成・拡散を評価する。

### (B) マイクロ波電界

Electrical optic (EO) プローブ計測により、推進剤流量を増大させると、マイクロ波電界がミラー磁場に伝搬しなくなるカットオフ現象が発生した。そこで、マイクロ波電界とプラズマの拡散方程式をカップリングさせ、実験と比較することで、カットオフ現象を詳しく調査した。

### 計算手法 (Computational Aspects):

(A) 準安定中性粒子の粒子計算は、生成分布を多数仮定し、密度分布を実験と比較することで、その生成分布を同定する。他の粒子との衝突・壁面衝突をモンテカルロ法を用いて、行い粒子の運動は2次元軸対称で計算を実行する。

(B) マイクロ波電界とプラズマ密度の計算は、共に1次元を仮定する。マイクロ波電界は、ヘルムホルツ方程式を用いて解く。ただし、導波管内を伝搬する電界を再現するために、伝搬方向以外のラプラシアンを導波管内の伝搬モードを用いて表現した。また、プラズマ密度分布は拡散方程式を解くことで求めた。また、プラズマとマイクロ波をカップリングさせるため、プラズマの伝導率は Cold approximation を用いた。

### 研究成果 (Accomplishments) :

(A) まず、Fig.1 に極端な生成分布を仮定した準安定中性粒子密度分布を示す。ここで、電子との衝突周波数については、内部電子パラメータから考え得る  $0 \sim 10^5 \text{ Hz}$  を用いてそれぞれ計算している。左側は、ミラー磁場中のみ、右側はミラー磁場外のみで準安定中性粒子が生成された場合の結果を示している。

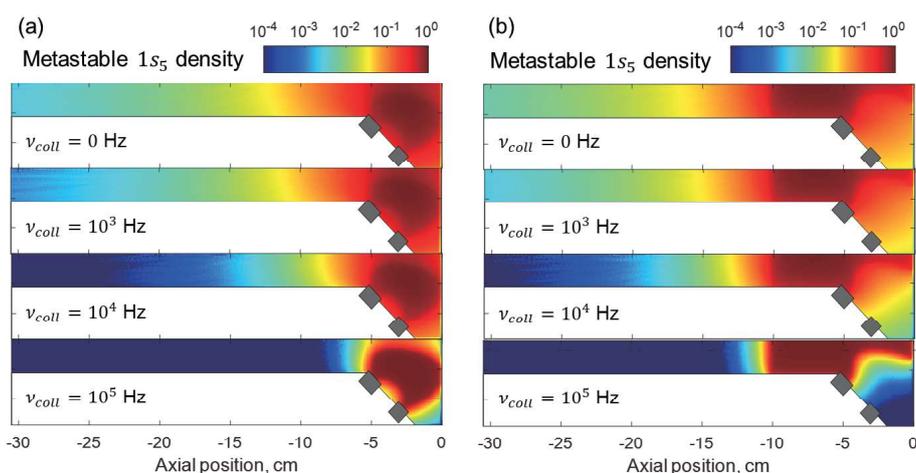


Fig.1 エンジン内部の準安定中性粒子密度分布。電子との衝突の脱励起周波数を  $0 \sim 10^5 \text{ Hz}$  まで考慮した。左はミラー磁場中でのみ準安定中性粒子が生成すると仮定した計算、右は、ミラー磁場以外でのみ準安定中性粒子が生成すると仮定計算。

実際には、ある一定の割合で、ミラー磁場内外で準安定中性粒子が生成されると考えられるため、その割合をパラメータとし、実験と比較した。その結果を Fig.2 に示す。左側の結果は、低流量時の結果であり、準安定中性粒子がミラー磁場領域のみで生成されたと仮定した場合の計算結果は非常に良い一致を示している。従って、推進剤流量が低いときには、ミラー磁場中に準安定中性粒子の生成が集中し、それらが中心軸付近まで拡散していることを示している。そして、推進剤流量が増加していくと、その分布はミラー磁場領域のみで生成されたと仮定した結果から大きく乖離することが分かった。これは、ミラー磁場領域以外でも準安定中性粒子が生成されたことを意味している。

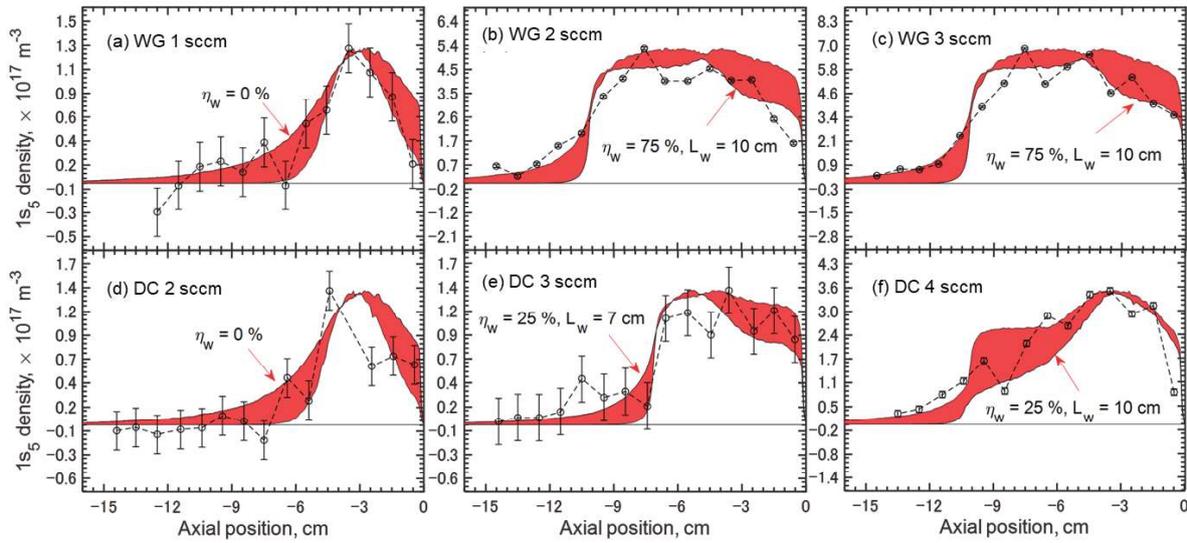


Fig.2 中心軸の準安定中性粒子密度の計算と実験の比較。赤い領域は、電子の脱励起  $0 \sim 10^5 \text{ Hz}$  による密度分布の変化。

(B) まず、プラズマがない状態でのマイクロ波電界の計算を Fig.3 に示す。比較対象は、3D-FDTDとEO probeによる実験結果であるが、マイクロ波電界分布をよく再現できていることが分かる。従って、本計算手法の近似は有効であることが示された。

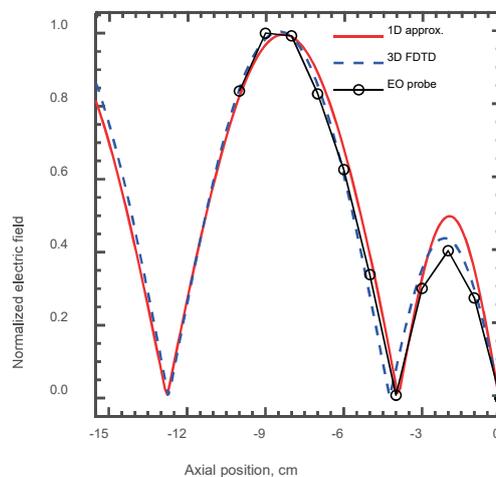


Fig.3 プラズマが存在しない場合のマイクロ波電界分布の比較。

次に、Fig.4 にプラズマ密度とマイクロ波電界の分布を載せている。これらは、準安定/基底の密度比を変化させている。この場合、準安定/基底の密度比が 5% のとき、マイクロ波電界をよく再現できている。実験では、推進剤流量を増加させると、準安定/基底の密度比が増加してくることが分かっており、このような状況下では準安定の段階電離が重要な役割を果たすことが分かった。

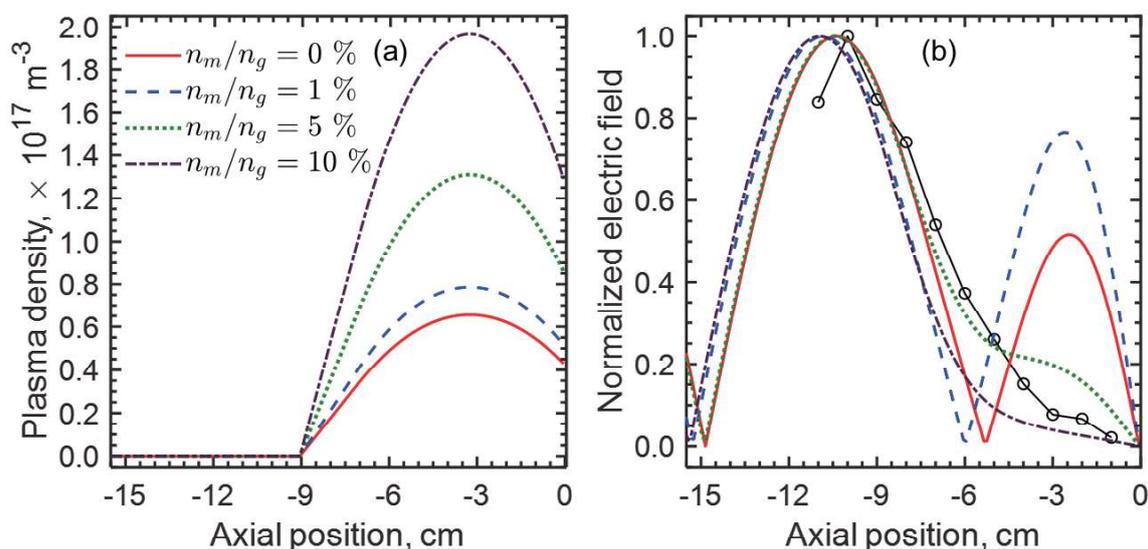


Fig.4 準安定中性粒子と基底中性粒子の密度比を変更させたマイクロ波電界(右)とプラズマ密度分布(左)。図中-5 cm より下流がミラー磁場領域であり、マイクロ波電界が伝搬しなくなる様子が再現されている。

Fig. 2 と Fig.4 の結果から、ミラー磁場領域外でのプラズマ生成プロセスは以下の Fig.5 のようになることが分かった。推進剤流量を増加させると、ミラー磁場中で発生した準安定中性粒子が中心方向に拡散し、その準安定粒子が段階電離を発生させ、プラズマ・準安定粒子を生成する。更に、その領域で生成された準安定中性粒子は、より内部へと浸透する。その結果、マイクロ波電界が十分に伝搬しなくなるカットオフ現象が発生したと考えられる。段階電離は、必要な電離エネルギーが直接電離に比べて 1/4 程度に済むため、十分に ECR 加熱されていない電子でも発生させることが可能である。

以上のように、準安定中性粒子の粒子計算・マイクロ波電界強度の計算を行うことで、プラズマモード遷移の定性的な挙動を説明するに至った。ただし、本計算では、プラズマ伝導率を Cold approximation で仮定しているが、本エンジンは希薄な weakly collisional なプラズマであり、そのような環境下では運動論的效果や熱的效果を考慮することが必要であると推察される。従って、これらの効果を自己矛盾なく計算できる EM-PIC 法は、推進性能の定量予測を可能にすると考えられる。

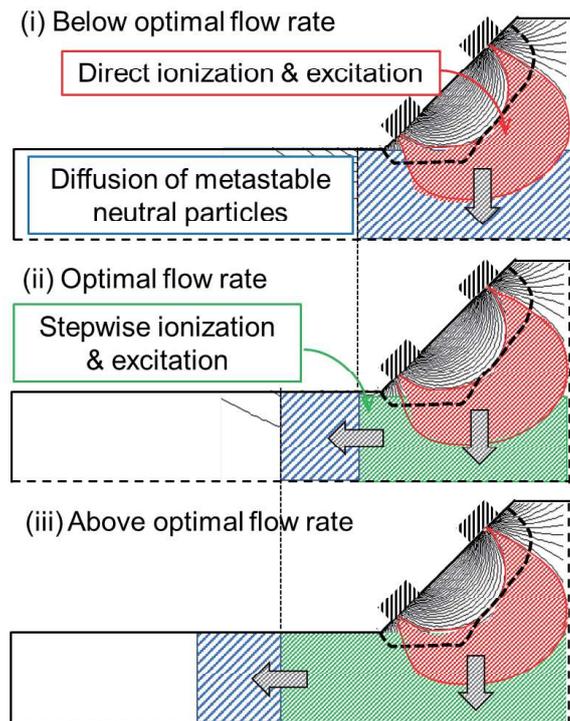


Fig.5 推進剤流量を増加に伴うプラズマモード遷移現象の説明。準安定中性粒子の拡散と準安定中性粒子からの段階電離によって、ミラー磁場領域外に電離生成場所が広がっていく。

**公表状況 (Publications) :**

**(論文)**

1. Yusuke Yamashita, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, Importance of stepwise ionization from the metastable state in electron cyclotron resonance ion thrusters, *The journal of electric propulsion*, under review
2. Yusuke Yamashita, Investigation of plasma mode-transition by two-photon absorption laser-induced spectroscopy and particle simulation in microwave discharge ion thruster, Phd thesis, 2022

**(口頭)**

1. Yusuke Yamashita, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, Thruster development and plasma diagnostics of microwave discharge ion thruster, *International symposium on space technology and science*, S-3-02, 2022