

# 大気吸入型イオンエンジン放電質内における ECR プラズマ生成の PIC 法を用いた数値解析

## Particle Simulations of ECR plasma generation in Air Breathing Ion Engine (ABIE)

○白川 遼, 臼井 英之, 三宅 洋平, 田川 雅人 (神戸大学), 西山 和孝 (JAXA)

Ryo SHIRAKAWA, Hideyuki USUI, Yohei MIYAKE, Mahahito TAGAWA (Kobe University)  
and Kazutaka NISHIYAMA (JAXA)

**Abstract:** Air breathing ion engine (ABIE) is one of the electric propulsion systems that uses neutral gas such as oxygen or nitrogen in the upper atmosphere as propellant. In the ABIE discharge chamber, magnets as well as a microwave antenna are attached inside so that electron cyclotron resonance (ECR) could be activated and electrons are accelerated by ECR. In this study, plasma generation processes in the ABIE chamber were examined by performing numerical simulations using the Electromagnetic Spacecraft Environment Simulator (EMSES). Electron acceleration and ionization processes by ECR in ABIE chamber were reproduced self-consistently in the ABIE discharge chamber.

**Key Words:** *Electric propulsion, Particle simulation, Microwave antenna, Electron Cyclotron Resonance,*

### 1. 背景

現在, 一部の人工衛星が運用される低地球軌道 (LEO: Low Earth Orbit) よりも高度が低く, 軌道投入コスト, 高解像度データの取得に有利である超低地球軌道 (sub-LEO: sub-Low Earth Orbit) において人工衛星を運用する試みが始まっている。しかし, この軌道においてはLEOよりも大気密度が上昇し, 大気抵抗が大きくなるのが課題の一つとして挙げられている。そこで, 大気抵抗を補償するための推進器としてsub-LEO領域に存在する原子状酸素(AO: Atomic Oxygen)や窒素(N<sub>2</sub>)を推進剤として利用する大気吸入型イオンエンジン(ABIE: Air Breathing Ion Engine)がJAXAの西山によって提案されている<sup>1)</sup>。しかし, ABIEの実現に向けて多くの技術課題が存在する。その一つとしてエンジン放電室内でのイオン生成効率の向上が挙げられる。これはABIEで用いられるAOやN<sub>2</sub>では, 表 1に示すように, 一般的なイオンエンジンで用いられる推進剤であるキセノン(Xe)よりも, 電子に対する電離衝突断面積が小さく, 更に電離を引き起こすために必要なエネルギーが大きいことに起因する。本研究では, 図 1に示すようにマイクロ波電気推進器  $\mu 10^2$  をプラズマ生成装置として用いるABIEを想定しており,  $\mu 10$ では電子サイクロトロン共鳴(ECR: Electron Cyclotron Resonance)によって電

子加速を行い, 中性粒子に衝突させることでプラズマを発生する<sup>3)</sup>。  $\mu 10$ におけるECR加速, およびプラズマ生成機構は, 放電室内の複雑な非一様磁場, 及びマイクロ波の壁面反射により発生する複雑なパターンのために, 地上試験による解析が困難である。そこで本研究では, 放電室内の基本要素に関するサブルーチンをParticle-in-Cell法<sup>3)</sup>に基づく電磁粒子衛星環境シミュレータ (EMSES: Electromagnetic Spacecraft Environment simulator<sup>4)</sup>) に導入し, ABIE放電室内におけるプラズマ生成に関する数値解析ツールの開発することにより, 放電室の最適設計に寄与することを目的とした。

表 1 中性粒子の電離特性

粒子種	Xe	AO	N <sub>2</sub>
最大電離衝突断面積( $\times 10^{-20} \text{ m}^2$ )	2.35	1.35	1.60
電離閾値エネルギー(eV)	12.1	13.6	27.2

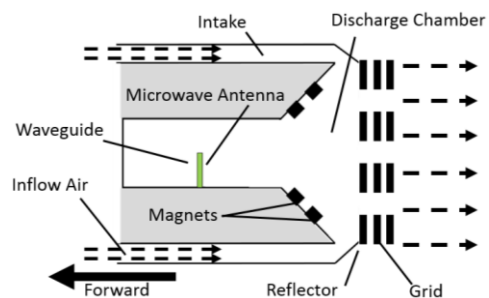


図 1 ABIE 模式図

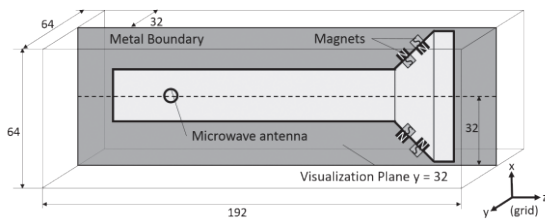


図 2 計算モデル

## 2. 計算モデル

本研究では、金属境界、マイクロ波アンテナ、磁石をEMSESに導入した。一方、プラズマ生成過程のみに注目するため、ABIEにおいて高層大気の取り込み圧縮機能を果たすインテークとリフレクター、および、イオンの加速放出を担うグリッドのモデル化は行っていない。シミュレーション空間は図 2 に示すように  $64 \times 64 \times 192$  grid の直方体形状で定義している。図 2 に示される形状は  $y = 32$  における計算モデルの断面であり、 $x = 32$ ,  $y = 32$  の軸対称な回転体を導入している。マイクロ波アンテナの給電部には振動電流を与え、磁石はダイポール磁場を円形に複数個配置することで連続的に配置されたトーラス上の磁石のモデル化を行っている。粒子衝突のモデルは Null-Collision 法<sup>5)</sup>に基づき AO の実際の 1 価の電離衝突断面積を導入することで処理を行っている。

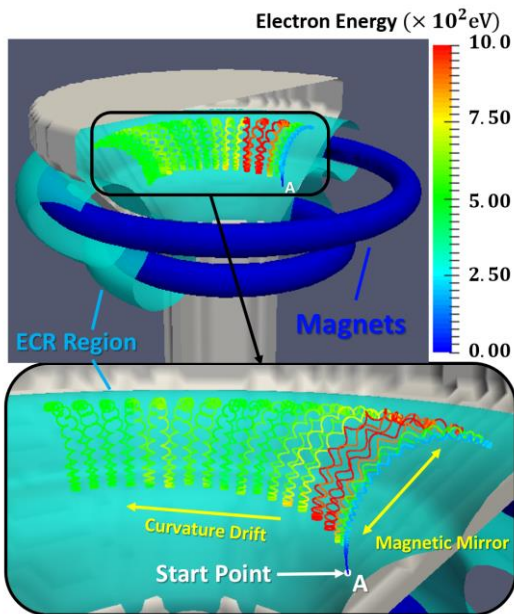
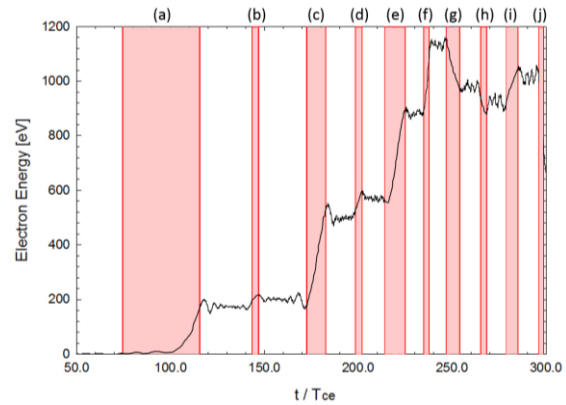
図 3  $t = 0 \sim 2.0 \times 10^{-7}$  s における電子 A の軌跡

図 4 電子 A のエネルギーの時間的变化

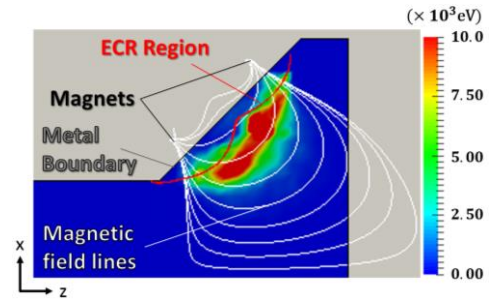
## 3. 計算結果

はじめに、シミュレーション内で扱われている電子の ECR による詳細な加速過程を得るために、個々の粒子の運動に注目した。図 3 に初期位置として点 A の場所に存在した電子の移動の軌跡を三次元的に描画した結果を示す。電子の軌跡には各々の電子の運動エネルギーの値も示されている。ECR は理論的には電子のサイクロトロン周波数とマイクロ波の周波数の一致する領域で発生する。マイクロ波は  $4.25 \text{ GHz}$  で設定しているため、磁束密度が  $0.15 \text{ T}$  の場所において ECR が発現することが予想される。よって、磁束密度が  $0.15 \text{ T}$  を満たす領域をここでは ECR 領域と定義する。図 3 では ECR 領域は水色で示している。A の電子はサイクロトロン運動を行いながら、図の下側の磁石から上の磁石へと伸びる磁力線にトラップされている。その間に磁石間をミラー反射、ドリフト運動しながら、ECR 領域を何度も通過し、加速されていく様子が観察された。また、図 4 で  $t / T_{ce} = 50 \sim 300$  ( $t = 1.18 \times 10^{-8} \sim 7.06 \times 10^{-8} \text{ s}$ ) における電子 A のエネルギーの変化を示している。 $T_{ce}$  は磁束密度が  $0.15 \text{ T}$  における電子のサイクロトロン周期である。赤色の線が ECR 領域を通過するタイミングを示したものである。ECR 領域を通過するたびに、エネルギーが上下に変化しており、最終的には加速される様子が確認された。また、図 5 の (a) は  $t = 2.0 \times 10^{-7} \text{ [s]}$  における電子エネルギー分布である。ECR 領域は赤色の線で示している。この図より、高エネルギー粒子が ECR 領域付近に集中していることが確認された。これは、磁力線にトラップ

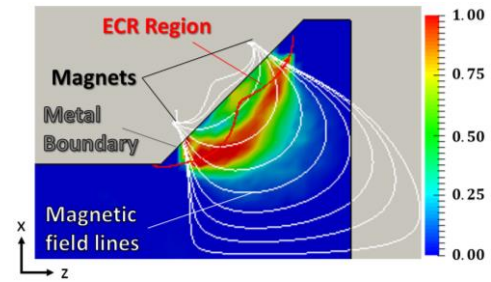
されたECR領域付近の粒子はECR領域を頻繁に通過することができるためである。この結果は図3の電子Aの運動から理解できる。よって、個々の電子の運動、放電室内の分布の両方において、ECRによる電子加速過程が正確に再現されていることが示された。

次に、電離衝突とイオン生成に注目する。図5の(b)に13.6 eV以上のエネルギーの電子存在比を示す。13.6eVは表1に示すように、電子がAOの電離を引き起こす閾値のエネルギーである。また、図5の(c)に電離衝突周波数の分布を示す。電離衝突周波数は、1つの電子が単位時間に中性粒子と衝突し、電離を引き起こす回数を示しており、その値が高い場所はプラズマ生成が活発な領域であることを意味する。図5の(b)と(c)を比較すると、13.6eV以上のエネルギーを保持する電子の存在比が高い場所で、プラズマ生成が活発であることが示された。また、図5の(d)、(e)にそれぞれイオンと電子の数密度の分布を示す。両方の分布ではECR領域付近で高密度となっており、電離衝突によってイオンと電子がそれぞれ新たに生成され、磁力線にトラップされている様子が確認された。これにより、ECRによる電子加速からの電離衝突を通じたプラズマ生成といった一連のプロセスを正確に再現できたことを確認できた。加えて、電子密度分布ではイオン密度と比べ金属境界付近の密度が低くなっている。これは、電子とイオンの質量の違いにより、電子のほうが頻繁に金属境界に衝突し、壁面を負に帯電させるためである。このような固体表面の帯電現象を再現できるといった点は、EMSESを用いる利点であるといえる。

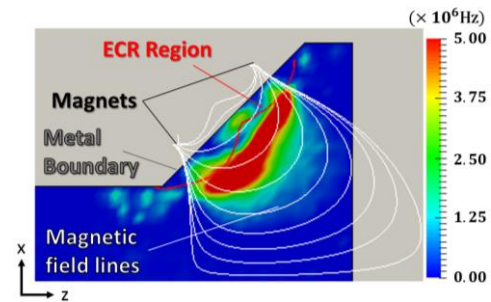
また、計算結果からECR領域付近に高エネルギーかつ高密度な電子が存在し、その場所において活発なプラズマ生成が行われることが示された。これより、中性粒子をこの領域に集中させ、非一様分布を形成することにより、イオン生成効率の向上できるという可能性が考えられる。つまり、このツールを使用することで、インテーク、リフレクターの最適設計に寄与できるといえる。また、その他、ABIEでは放電室内で中性粒子数密度が低いために引き起こされる過剰な電子加速などの問題が考えられるが、解決のために適切



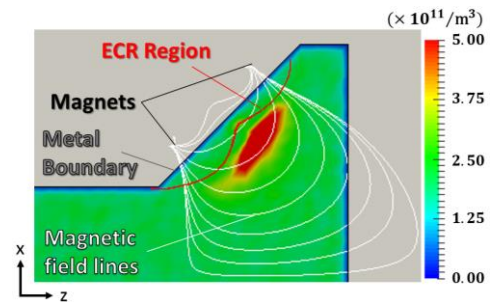
(a) 電子運動エネルギー



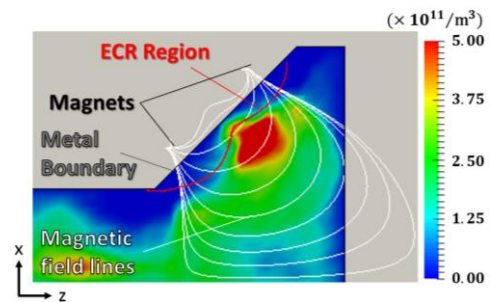
(b) 13.6 eV 以上のエネルギーの電子存在比



(c) 電子電離衝突周波数



(d) イオン数密度



(e) 電子数密度

図5  $t = 2.0 \times 10^{-7}$  s における分布

な磁場配置やマイクロ波強度を探るといったアプローチを実験よりも比較的容易に行えるという手法の有効性についても示唆された。

#### 4. 結論

ABIEの放電室の最適設計に寄与することを目的とし、プラズマ生成機構を再現する数値計算ツールの開発を行った。計算の結果、ECRによる電子加速、電離衝突によるプラズマの生成といった素過程の部分から物理現象が正しく再現されていることが確認された。さらに、ABIEの設計におけるインテークやリフレクターの設計、過剰な電子加速といった問題の解決に実験よりも比較容易に寄与できるという手法の有用性も示唆された。

#### 5. 参考文献

- 1). 西山和孝：大気吸込式イオンエンジンの検討，宇宙技術， vol. 4， pp. 21- 27， 2005.
- 2). H. Kuninaka: Development and Demonstration of a Cathode-less Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster, Journal of Propulsion and Power, vol. 14, no. 6, pp. 1022-1026, 1998.
- 3). C. K. Birdsall: Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 19, no. 2, pp. 65-85, 1991.
- 4). Y. Miyake and H. Usui: New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions , Physics of Plasmas, vol. 16, no. 6, p. 062904, 2009.
- 5). V. Vahedi and M. Surendra: A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges, Computer Physics Communications, vol. 87, no. 1-2, pp. 179-198, 1995.

#### 6. 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費助成金#26289322， #18H01624， 及び名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）計算共同研究プログラ

ムの援助により行われたものである。このコンピュータシミュレーションは名古屋大学情報基盤センターのFX100スーパーコンピュータシステム、及び京都大学生存圏研究所KDKコンピュータシステムにより行われた。また、NIFS DATABASEによる衝突断面積のデータが用いられた。