

## 大気吸入型イオンエンジン放電室内におけるプラズマ生成シミュレーション

本山貴仁<sup>1</sup>、臼井英之<sup>2\*</sup>、三宅 洋平<sup>2</sup>、川口伸一郎<sup>1</sup>、横田久美子<sup>1</sup>、田川雅人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院工学研究科 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

<sup>2</sup>神戸大学大学院システム情報学研究科 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

Email: h-usui@port.kobe-u.ac.jp

\*Corresponding Author

In order to operate a satellite in sub-low earth orbit (sub-LEO), it is required to design an optimum ion engine to compensate the drag of the upper atmosphere. The air breathing ion engine (ABIE) is one of promising candidates for such an ion engine. However, the optimum design rule has not been established. Because ground experiments are difficult for ABIE, numerical simulation is a useful approach. In this study, in order to establish a useful guideline for designing ABIE, we perform particle simulations to examine plasma discharge in the ABE chamber by using the electromagnetic spacecraft environment simulator (EMSES). We particularly focus on electron acceleration process via electron cyclotron resonance.

### 1. 緒言

近年、低コストで軌道に投入できる、衛星の小型化が可能であるなどの理由から、低高度地球周回軌道(LEO)での衛星の運用に関心が高まっている。LEOにおいて長期間衛星を運用するには希薄大気の抵抗を無視できず、この抵抗を補完するための何らかの推進装置を定常的に作動させることが必要不可欠となる。現在は抵抗を補完する推進装置として一般的にその比推力の高さからイオンエンジンが適している。しかしながら、イオンエンジンは推進剤としてXeを携行する必要がある、このことからXeの携行量が衛星の寿命に直結してしまうという問題がある。この問題は特に小型衛星で顕著となる。

この問題を克服するために軌道上の希薄大気を推進剤として利用する大気吸入型イオンエンジン(ABIE)がJAXAの西山によって提案された[1]。Fig.1に大気吸入型イオンエンジンの模式図を示す。ABIEの実用化に際してはイオン生成効率の向上が必要不可欠であるが、地上実験ではその検証が困難である[2]。そこで本研究では宇宙プラズマ中における物理現象の解析を行う計算機実験コードEMSES(Electromagnetic Spacecraft Environment Simulator) [3]を用いてエンジンの放電室内の現象をモデル化する。特に放電室内での ECR 電子加速と電子・中性粒子衝突による放電現象をシミュレーションにより再現し、ABIE の設計指針を得ることを目標とする。

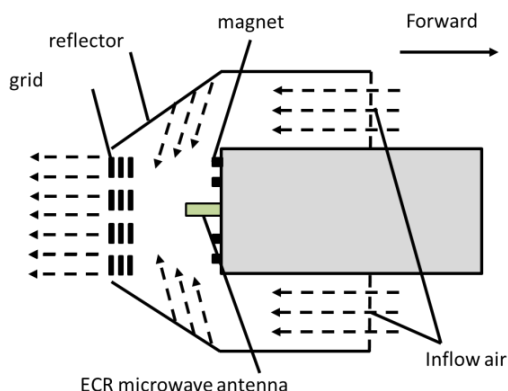


Fig.1 Schematic diagram of ABIE

### 2. モデル化

ABIE 放電室内の現象を中性粒子と電子の衝突、マイクロ波アンテナ、ダイポール磁場、金属境界によるマイクロ波反射の 4 つの要素に分けてモデル化を行った。

#### 2.1 中性粒子と電子の衝突

本シミュレーションでは中性粒子自体のダイナミクスを解き進めることはせず、中性粒子は入力パラメータで規定された密度で背景に存在すると仮定する。この仮定の下、電子の衝突断面積に基づいて衝突の判定を行った[4]。電子ビームがほとんど衝突することなく中性粒子の気体中を通過する場合を考える。電子ビーム強度を $I_1$ 、中性粒子の密度を $n_2$ 、ビームの進行方向を $x$ 方向とする。ビームが微小距離 $dx$ 進む間に起こる衝突回数は $I_1 \cdot dx$ 、また $n_2$ にも比例し、衝突した分だけ強度が減るので

$$dI_1 = -\sigma I_1 n_2 dx \quad (2-1)$$

と書ける。 $\sigma$ は比例係数で衝突の起こりやすさを示しておりこの $\sigma$ を衝突断面積と呼ぶ。衝突断面積より電子の微小時間 $\Delta t$ あたりの衝突確率 $P_i$ は、入射粒子の速度を $v_i$ 、座標 $x_i$ における中性粒子の密度を $n_t(x_i)$ として

$$P_i = 1 - \exp(-\Delta t v_i \sigma n_t(x_i)) \quad (2-2)$$

となる。このように衝突断面積のデータを用いて衝突確率を決定し粒子に対して数値的な処理を行う。本研究では衝突断面積に横軸に電子のエネルギー、縦軸に中性粒子との衝突確率をとった実測データを用いた。

#### 2.2 マイクロ波アンテナ

マイクロ波アンテナは2本の長さ5グリッドの直線状のワイヤを組み合わせたダイポールアンテナとした。ワイヤ間の2グリッド分の空隙に正弦波の電界を与えることで給電点とする。シミュレーションにおいてアンテナは波長に比べて太さが無視できるくらい細いため太さ $0$ とし、また完全導体で構成されているものとし中心軸に沿って電界を $0$ としてモデル化した。

### 2.3 ダイポール磁場

磁場のモデル化にあたり、磁場モデルとして地球磁場に代表されるダイポール磁場を用いる。ダイポール磁場は、磁場中心からの位置ベクトル  $\mathbf{r}$  を用いて式(2-3)で定式化できる[5]。

$$\mathbf{B}_{dipole} = (3 \times \frac{m_d \mathbf{r}}{r^5} \cdot \mathbf{r} - \frac{m_d}{r^3}) \quad (2-3)$$

ただし  $m_d$  はダイポールの南北方向および強度を定義するダイポールモーメントベクトル、 $\mathbf{r}$  は中心からの距離である。例として、 $y$  軸に南北方向を持つダイポールモーメントベクトル  $m_d = (0, m_d, 0)$  の磁場を考える。磁場中心からの位置ベクトルにおける磁場は、式(2-3)に  $m_d = (0, m_d, 0)$  を代入すると

$$\mathbf{B}_{dipole} = m_d (3 \times \frac{e_y \mathbf{r}}{r^5} \cdot \mathbf{r} - \frac{e_y}{r^3}) \quad (2-4)$$

さらに  $\mathbf{r} = (x_p, y_p, z_p)$  として、

$\mathbf{B}_{dipole} = (B_x, B_y, B_z)$  の各成分を展開すると

$$B_x = m_d \left( 3 \times \frac{z_p x_p}{r^5} \right) \quad (2-5)$$

$$B_y = m_d \left( 3 \times \frac{z_p y_p}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right) \quad (2-6)$$

$$B_z = m_d \left( 3 \times \frac{z_p^2}{r^5} \right) \quad (2-7)$$

となる。この磁場を EMSES のプラズマダイナミクスへ反映させるためシミュレーション空間内の全プラズマ粒子位置における磁場を計算し、各粒子について運動方程式の磁場の値へ加える。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_{dipole})) \quad (2-8)$$

以上のようにしてダイポール磁場のモデル化を行った。

### 2.4 金属境界によるマイクロ波の反射

シミュレーション空間において金属構造は格子点に定義された金属フラグによって定義される。Fig.2 に ABIE の金属構造フラグの可視化図を示す。ある格子点における金属フラグの値が 1 であれば、その格子点に定義されている電界が毎ステップごとに更新される際 0 に書き換えられ、格子点に到達した電磁波は固定端反射で反射される。以上のようにして金属境界によるマイクロ波の反射を実装した。

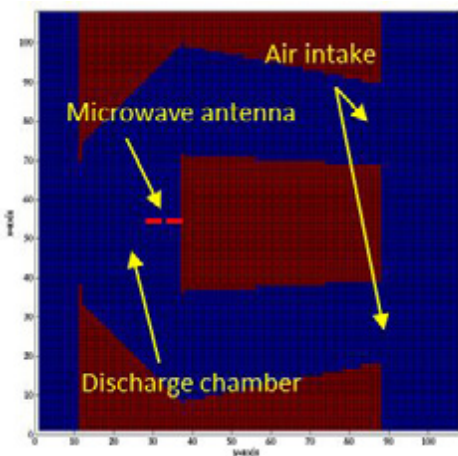


Fig.2 Visualization figure of metal structure flag at  $z=54$   
(青: flag=0, 赤: flag=1)

### 3.平面波シミュレーション

ABIE の構造をモデル化した実機シミュレーションを行う前に、金属境界でのマイクロ波の反射による干渉がイオン生成効率に与える影響を分析するため、現象を単純化した平面モデルでのシミュレーションを行った。

Fig.3 に平面波シミュレーションモデルを示す。1 辺 108 グリッドの立方体のシミュレーション空間の  $x=54$  の  $yz$  平面をマイクロ波発振平面として周波数 3GHz、波長 20 グリッドのマイクロ波を発振する。この平面を中心として間隔  $L$  を開けた 2 つの立方体の金属構造を上下に定義する。シミュレーション空間には  $z$  方向に 0.027T の一様磁場が定義されている。詳細なシミュレーションパラメータを Table 1 に示す。

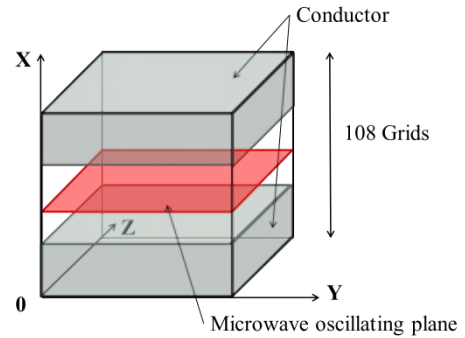


Fig.3 Computational model of plane wave

このシミュレーションモデルを用いて金属境界でのマイクロ波反射による干渉がイオン生成効率に与える影響を分析するため、金属構造の間隔  $L$  を波長の整数倍である 60 グリッド ( $3\lambda$ ) を基準に 58 グリッド、56 グリッドと徐々に変化させた計 3 通りのシミュレーションを行った。

Fig.4 に 1000, 3000, 5000step における  $(y, z)=(54, 54)$  での  $x$  方向のマイクロ波強度分布図を示す。Fig.4 から金属構造の間隔  $L$  が波長の整数倍である 60 グリッドの場合は、入射波と金属境界で反射されたマイクロ波が干渉して定常波となり時間の経過とともに強度が上昇していることが分かった。金属構造の間隔が波長の整数倍から離れるとともに入射波

Table 1 Simulation parameters

Parameter	value
Time step ( $\Delta t$ )	1.7E-12 s
Grid spacing ( $l$ )	5E-3 m
Initial electron density ( $n_e$ )	1.7E6 1/m <sup>3</sup>
Initial electron velocity ( $v_e$ )	0 eV
Collision frequency ( $\nu'$ )	1.0E-4 1/s
Power frequency ( $f$ )	3 GHz
Wave length ( $\lambda$ )	20 grid
Power ( $P$ )	35 W
Magnetic force ( $m_d$ )	0.027 T
Interval of conductor ( $L$ )	60,58,56 grid

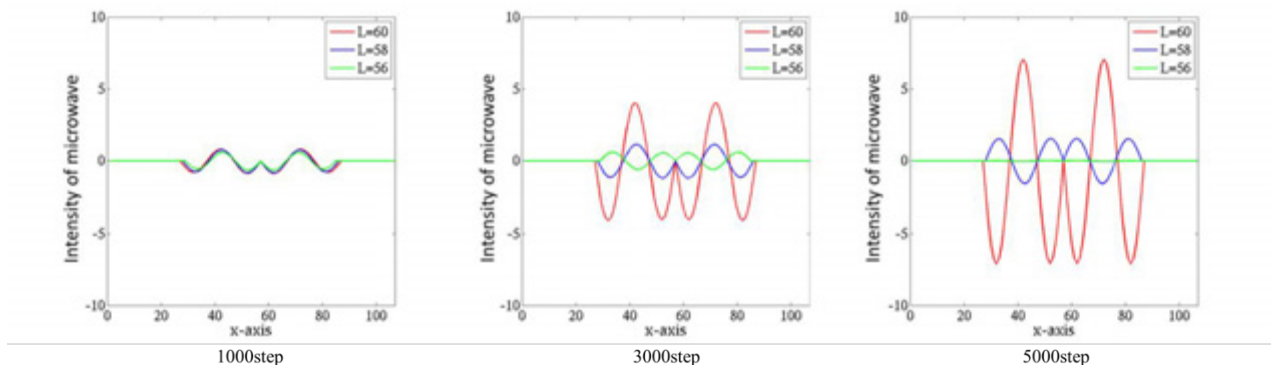


Fig.4 Intensity of microwave (L=60,58,56)

と反射波の強めあいは起こりにくくなり、マイクロ波強度は低下していることが分かった。Fig.5 にイオン生成数をプロットした図を示す。イオンの生成数は L=60 の場合の最も多く、L=60 から離れるに従い減少しており、イオンの生成数はマイクロ波の強度に比例していることが分かった。Fig.6 に L=60 のシミュレーションにおいて、生成されたイオン密度とマイクロ波強度の y=54 における xz 平面上の分布図を示す。Fig.6 から生成されたイオンは定常波となったマイクロ波の腹に集中しており、定常波の節の部分ではほとんどイオンが生成されていないことが示されている。以上の結果から、放電室内で反射し定常波となったマイクロ波の腹の領域にサイクロトロン共鳴条件を満たす磁場を配置することで、イオン生成効率を向上できることが示唆された。

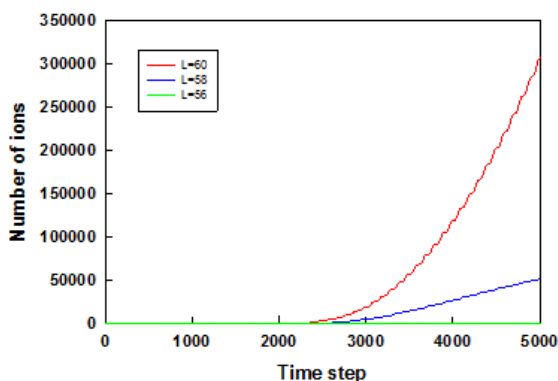


Fig.5 Number of generated ions (L=60,58,56)

#### 4. 実機モデルシミュレーション

平面波シミュレーションで得られた設計指針が実機に適用できるかを検証するため、シミュレーション空間内により現実的な金属構造、アンテナを定義した実機シミュレーションを行った。実機の金属構造は神戸大学大学院工学研究科の坪井による先行研究を基にモデル化を行った[6]。ABIE 試作機的设计図を Fig.7 に示す。また金属構造モデルを可視化した物を Fig.2 に示す。アンテナはシミュレーション空間の(x,y,z)=(54, 32, 54)において y 方向に定義した。

このシミュレーションモデルを用いて、金属境界で反射されたマイクロ波と入射波が強めあう領域や、イオンが生成する領域について分析するため、Fig.8 に示すように中心に 1.7T のダイポール磁場を 12 個組み合わせ、実機の磁石配置を模したシミュレーションを行った。詳しいシミュレーションパラメータを Table2 に示す。

Fig.9 に 3000step での x=54 の yz 平面における生成イオン密度分布図、Fig.10 に 3000step での x=54 の yz 平面におけるマイクロ波強度分布図を示す。イオンの生成はサイクロトロン共鳴条件を満たした磁場強度の存在する領域(Fig.8 において磁場強度が 1.6 となっている領域)で電子がマイクロ波からエネルギーを受け取って加速し、中性粒子に衝突することで起こる。しかしながら Fig.9 から生成されたイオンはマイクロ波アンテナのごく近傍に集中している。これは Fig.10 の矢印で示すようにアンテナ

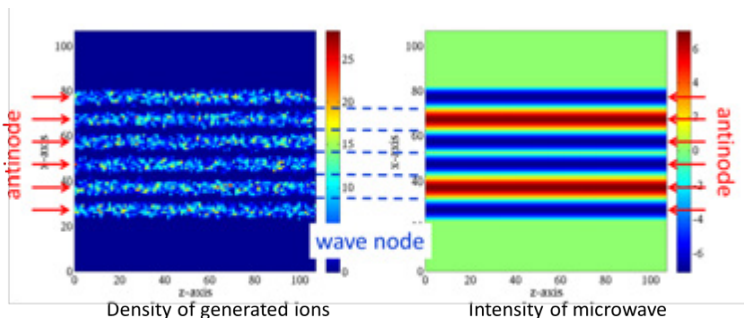


Fig.6 Density of generated ions and intensity of microwave (L=60, xz plane, y=54, 5000step)

Table 2 Simulation parameters

Parameter	value
Time step ( $\Delta t$ )	1.7E-12 s
Grid spacing ( $l$ )	1E-3 m
Initial electron density ( $n_e$ )	1.7E6 1/m <sup>3</sup>
Initial electron velocity ( $v_e$ )	0 eV
Collision frequency ( $\nu$ )	4E-2 1/s
Power frequency ( $f$ )	4.25 GHz
Wave length ( $\lambda$ )	70 grid
Power ( $P$ )	35 W
Magnetic force ( $m_d$ )	1.7 T

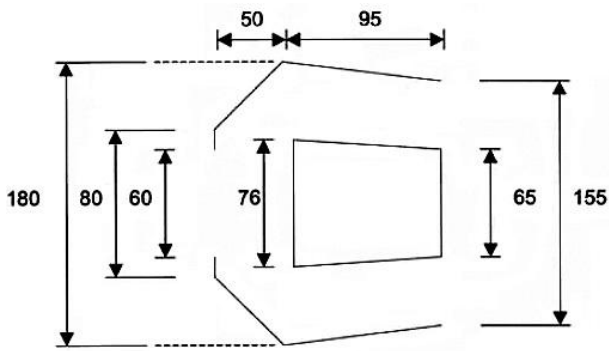


Fig.7 Blueprint of prototype ABIE

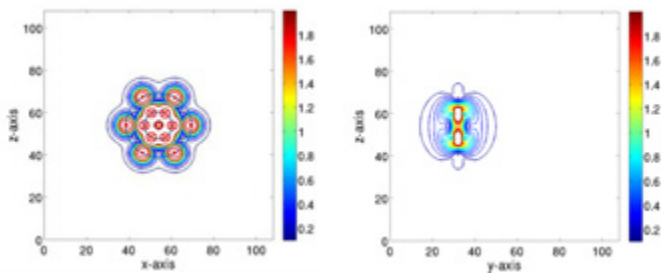
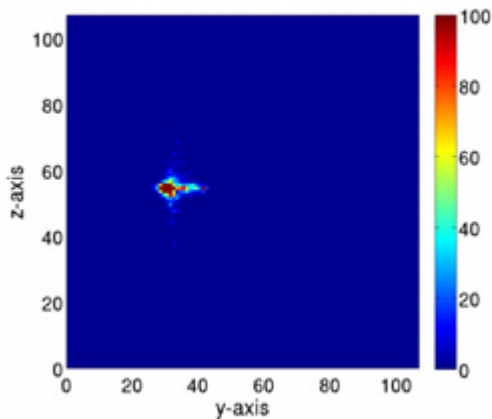
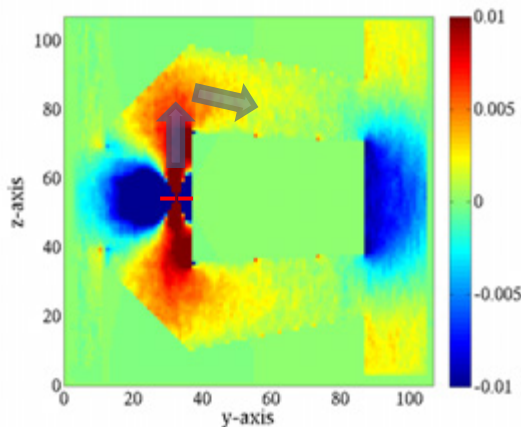


Fig.8 Distribution of magnetic field strength

Fig.9 Density of generated ions  
(yz plane, x=54, 3000step)Fig.10 Intensity of micro wave  
(yz plane, x=54, 3000step)

ナから発振されたマイクロ波が  $z$  軸方向に伝播しリフレクターで反射された後、ABIE の放電室内にとどまらず大気吸入口を通り外部に放出されてしまうことでマイクロ波の強め合いが起こらないと考えられる。

平面波シミュレーションによって得られた設計指針を実機に適用するにはリフレクターの形状を変更する必要がある。しかしながらリフレクターの主な機能は大気吸入口から流入する中性粒子を可能な限り高い圧力で放電室に送り込むことであるため、形状変更には中性粒子の反射への影響についても留意する必要がある。

## 5. 結言

イオン生成効率を向上させる ABIE の設計を得るため、エンジン内部でのマイクロ波の反射による干渉がイオン生成効率に与える影響について着目しシミュレーションを行った。その結果、入射マイクロ波と反射波が強めあう条件下で、定常波の腹に ECR 条件を満たす磁場を配置することでイオンを効率的に生成できる可能性が示唆された。この設計指針を実機に適用するため中性粒子の金属境界での反射モデルを作成し、リフレクターの最適形状を電磁波の反射・中性粒子の反射の双方を考慮して求めることが必要である。

## 参考文献

- [1] Nishiyama K : A Study of Air Breathing Ion Engine, JSASS, Vol.4, (2005), pp.21-27
- [2] Tagawa M, Kishida K, Yokota K : Calibration of Atomic Oxygen Sensors aboard Satellites, ISAS/JAXA, Space Utilize 26, (2010), pp.110-111
- [3] Miyake Y, Usui H : New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions, PHYSICS OF PLASMAS 16, (2009), pp.062904:1-11
- [4] V.Vahedi,M.Surendra : A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method, applications to argon and oxygen discharges, Computer Physics Communications, Vol.87, (1995), pp.179-198
- [5] Nishida H : Promotion characterization of magnetic sail, Master's thesis at University of Tokyo Graduate School, (2005)
- [6] Tsuboi T : The basic research on air breathing ion engine using 2.45GHz microwave, B.Sc thesis of Kobe University,(2010)