

### 3次元PICシミュレーションを用いた大気吸入型イオンエンジン放電室内部におけるプラズマ生成解析

川口伸一郎<sup>1</sup>、白井英之<sup>2\*</sup>、三宅洋平<sup>2</sup>、安河内翼<sup>3</sup>、福田雅人<sup>4</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

<sup>3</sup>神戸大学工学部機械工学科 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

<sup>4</sup>神戸大学工学部情報知能工学科 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 for the development. 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), particularly focused on electron acceleration process via electron cyclotron resonance.

#### 1. 緒言

近年、軌道投入の容易性や観測データの高分解能化、衛星の小型化が可能である等の理由から、従来よりも低高度領域である超低地球周回軌道(Sub-LEO)での衛星運用に関心が高まっている。Sub-LEOにおいて長期間衛星を運用するには、希薄大気による衛星への大気抵抗を無視できない。大気抵抗を補完するためには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、電気推進器の中でもその比推力が高いイオンエンジンが用いられている。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、Xe携行量が衛星寿命を決定する。この制限はスケール効果により超小型衛星で顕著な問題となる(大気抵抗は衛星サイズに対して2乗に比例するが、推進剤タンク容量は3乗に比例する)。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)が西山によって提案されている[1]。

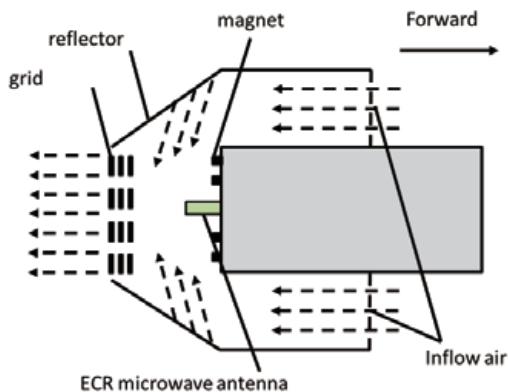


Fig. 1 Schematic drawing of the ABIE proposed by Nishiyama [1].

Fig. 1にABIEの模式図を示す。ABIEを実用化およびミッション成立可能高度領域の拡大にあたっては、ABIE内のイオン生成効率の向上が必要不可欠である。しかしながら、Sub-LEO領域での中性ガス環境を地上で再現することが困難であることから実験的アプローチは極めて困難である[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し、イオン生成効率の向上を目指した。本報告では放電室内でのECR(Electron Cyclotron Resonance)と電子・中性粒子衝突によるプラズマ生成現象をシミュレーションにより再現し、ABIEの最適設計指針を得ることを目標としている。

#### 2. モデル化

本研究ではABIE放電室内のプラズマ生成現象を、中性粒子-電子間衝突、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 $I_1$ 、中性粒子密度を $n_2$ 、ビーム進行方向をx軸とする。ビームが微小距離 $dx$ 進む間に起こる衝突回数 $I_1$ は、 $dx$ および $n_2$ に比例し、衝突した分だけ強度が減るので

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

と記述できる。ここで $\sigma$ は衝突断面積である。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 $n_i(x_i)$ として

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

となる。ここで $\sigma$ の電子衝突エネルギー依存性については実測データを用いた[4]。

## 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を仮定した。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した。シミュレーションにおいてアンテナは波長に比べて十分細いため太さを無視し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た。ダイポール磁場は、磁場中心からの位置ベクトル $r$ を用いて式(2-3)で定式化できる[4]。

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

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、 $r$ 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

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

さらに $r = (x_p, y_p, z_p)$ として、 $\mathbf{B}_{dipole} = (B_x, B_y, B_z)$ の各成分を展開すると

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

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

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

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、式(2-8)に示す粒子各々の運動方程式において $\mathbf{B}_{dipole}$ の寄与を考慮することにより、ダイポール磁場のモデル化を行った。

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

## 2.4 金属境界によるマイクロ波の反射

ABIE 放電室内部におけるプラズマ生成では放電

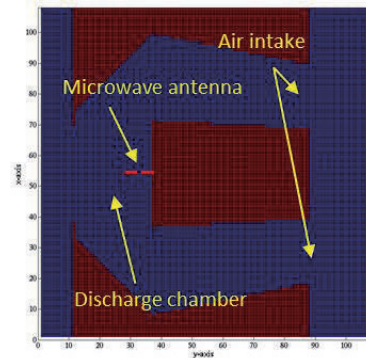


Fig.2 Visualization figure of the metal structure flag at z=54

室内部におけるマイクロ波の挙動を利用する事が重要である。実際の放電室内部においてはアンテナから出されたマイクロ波が伝播し、放電室壁で吸収・反射を引き起こす。この時の反射波と入力波の関係性について検証することが、プラズマ生成に大きな相関性を持つため、放電室壁におけるマイクロ波の反射機能を数値的に模擬した。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。

## 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

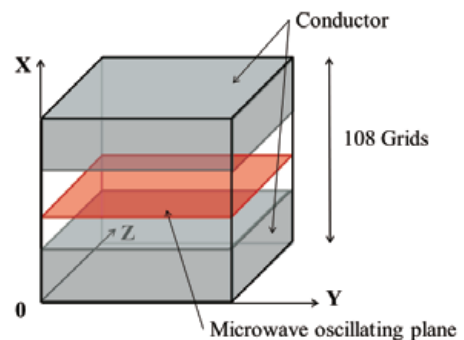


Fig.3 Computational model used in the plane wave simulation

Table 1 Simulation parameters used in this study

Parameter	value
Time step ( $\Delta t$ )	1.7E-12 s
Grid spacing (l)	5E-3 m
Initial electron density ( $n_e$ )	1.7E6 /m <sup>3</sup>
Initial electron velocity ( $v_e$ )	0 eV
Collision frequency ( $\nu'$ )	4×10 <sup>-2</sup> /s
Power frequency (f)	4.25 GHz
Wave length ( $\lambda$ )	70 mm
Power (P)	35 w
Magnetic force ( $m_d$ )	1.7 T
Radius of metal mesh (R)	10, 20 mm

シミュレーション空間には z 方向に 0.027 T 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。

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、放電室内部における電子の加速に与える影響を分析するため、金属構造の間隔 L と波長  $\lambda$  の比をパラメータとして電磁場エネルギーを比較するシミュレーションを行った。Fig. 4 に 4,000 step におけるシミュレーション空間内の電磁場エネルギーを計算した結果を示す。Fig. 4 から金属構造の間隔 L が半波長の整数倍である位置において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るため、空間内でのマイクロ波電界強度が上昇することがわかった。したがってこのような場合において電子がより効率よく加速されることが明確に示されているおり、イオン生成効率の向上の可能性が示唆されている。

4.実機モデルシミュレーション

坪井による先行研究を基に実機モデルシミュレーションを行った[5]。先行研究で用いられた試作機の写真を Fig. 5 に示す。平面波シミュレーションで得られた結果に基づき、放電室内部に金属メッシュをを導入することで、マイクロ波の強め合いを能動

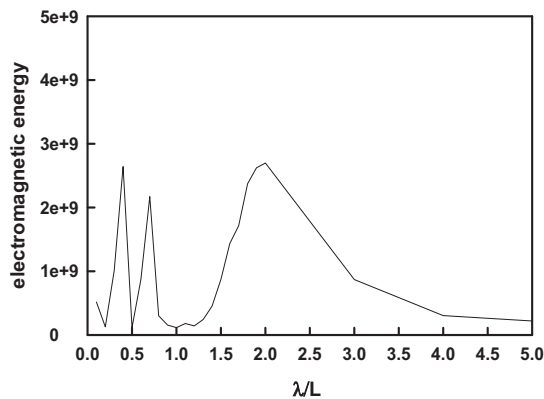


Fig4. Electromagnetic energy distribution as a function of  $\lambda/L$

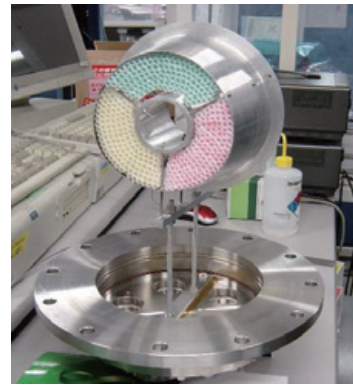


Fig. 5 Photograph of the prototype of ABIE used in the previous experiment [5]

的に起こすことを想定したシミュレーション解析を実施した。シミュレーション空間は 1 辺 108 グリッド(108 mm)の立方体として定義した。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、波長  $\lambda=70$  mm、周波数  $f=4.25$  GHz のマイクロ波を発振する。磁場配置は、1.7 T の磁束密度を持つ 24 個の磁石をシミュレーション空間の(x, y, z) = (54, 32, 54)を中心として xz 平

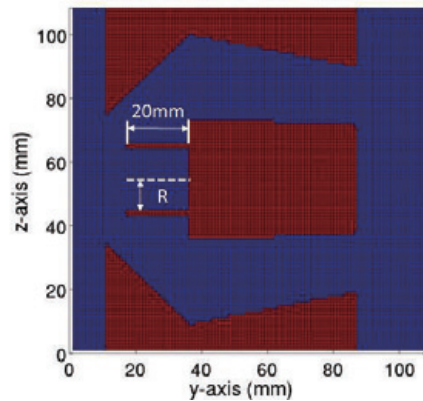


Fig. 6 Simulation model of ABIE with metal mesh reflector in yz plane

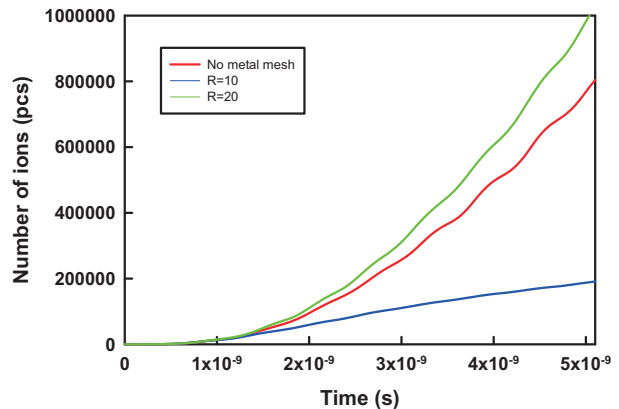


Fig. 7 Number of generated ions with time. Red: without metal mesh, Blue: with metal mesh reflector at R=10 mm and Green: with metal mesh reflector at 20 mm



面に半径  $r=7, 15$  mm を持つ円の円周上に等間隔に配置した。金属メッシュの円筒は、電子・イオンは反射せずにマイクロ波のみを反射する境界として、Fig. 6 に示すように高さ 20 mm ( $y=17\sim 27$ )、( $x, z$ )=(54,54)を中心とする半径  $R$  の境界として定義した。金属メッシュの効果を検証するため、金属メッシュの有無と位置 (半径  $R=10, 20$  mm) の3通りのシミュレーションを行った。シミュレーション空間内の金属境界モデル図を Fig. 6 に、シミュレーションパラメータは Table 1 に示されている。Fig. 7 に3つの条件での累積イオン生成数の時間変化を示す。 $R=20$  mm の金属メッシュを導入した場合にはイオン生成効率の改善を確認することができたが、 $R=10$  mm の場合においてはイオン生成効率が逆に低下する傾向が示された。放電室内部に

おける電子分布を比較するため、それぞれの条件で  $t=1.2\times 10^{-9}$  s、 $x=54$  mm の  $yz$  平面における電子密度分布を可視化した結果を Fig. 8 に示す。 $R=10$  mm の金属メッシュを導入した場合には、シミュレーション開始時には一様分布であった電子が、 $t=1.2\times 10^{-9}$  s では金属メッシュの内側の領域では磁場に捕捉されている僅かな電子を除きほとんど存在していない。これはアンテナから放出されるマイクロ波がアンテナ近傍の電子をメッシュ外へと移動させてしまうため、メッシュ内部にイオンを生成するための十分な電子密度が存在しなくなることが原因であると考えられる。

一方、 $R=20$  mm の場合には放電室に設置したメッシュ内のアンテナから離れた ECR 層において電子が集積している様子が示されている。 $R=20$  mm の場合では金属メッシュ内にマイクロ波が金属境界で反射し放電室内においてマイクロ波の干渉しているため放電室内部の電磁場エネルギーが高くなり、メッシュのない場合に比べてイオン生成数が増大したものと考えられる。

## 5. 考察

実際のイオンエンジンとして採用実績のあるマイクロ波の周波数帯は、2.45~4.5 GHz であり波長は約 12~6.7 cm である。本研究室で試作機として考えている大気吸入型イオンエンジンは 6 cm 級のサイズであり、放電室内においてマイクロ波を十分に利用するためには、放電室内にメッシュ等を作成し、マイクロ波を利用する最適な条件を設定することが、実機製作に向けては非常に重要である。またこの他に中性ガスリフレクター形状を最適化することにより放電室内における中性ガス分子分布を最適化することも重要である。中性ガス分子の固体表面での反射・散乱現象は複雑であり、表面へのエネルギー移動効果、拡散効果、多重衝突効果等を考慮する必要がある[6]。さらに金属製中性ガスリフレクターはマイクロ波の反射効果も併せ持つため、最適なリフレクター形状を決定することは設計上、非常に重要である[7]。

## 6. 結言

大気吸入型イオンエンジン開発にむけて、放電室内においてマイクロ波の干渉によるプラズマ生成効率の受ける影響について検証するために3次元粒子シミュレーションを行った。平面波シミュレーションで得られた結果より放電室径とマイクロ波波長を最適化することにより、マイクロ波による電子へのエネルギー伝達効率が改善される可能性が指摘された。実機シミュレーションにおいても、平面波シミュレーションと同等の傾向が見られたが、マイクロ波閉じ込め用メッシュの半径とマイクロ波の波長には最適化が必要である可能性が指摘された。

## 参考文献

[1] 西山和孝：大気吸入型イオンエンジンの検討、

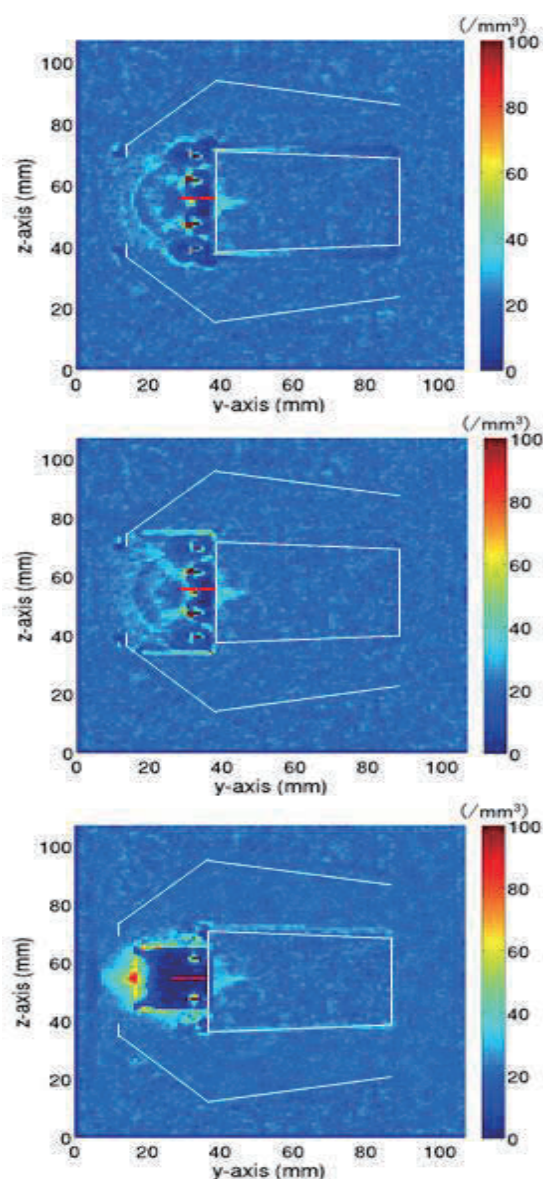


Fig. 8 Density distributions of electrons in  $yz$  plane at  $x=54$  mm,  $t=1.2\times 10^{-9}$  s, (a): without metal mesh reflector, (b): with metal mesh reflector at  $R=20$  mm and (c): with metal mesh reflector at  $R=10$  mm

宇宙技術 Vol.4, (2005), pp.21-27.

- [2] Tagawa M., Nishiyama K., Yokota K., Yoshizawa Y., Yamamoto D., Tsuboi T., Kuninaka H.: Experimental Study on Air Breathing Ion Engine using Laser Detonation Beam Source, J. Propulsion and Power, Vol.29 (2013) pp.501-506.
- [3] Miyake Y., Usui H.: New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions, Phys. Plasmas Vol. 16 (2009) 062904.
- [4] Vahedi, V., Surendra M.: 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] 坪井堯甫 : 神戸大学卒業論文 (2011) .
- [6] Minton T. K., Tagawa M., Nathanson G. M.: Energy accommodation in hyperthermal gas-surface collisions: relevance to aerobraking in planetary atmospheres, J. Spacecraft Rockets, Vol. 41, No. 3 (2004) pp.389-396.
- [7] 本山貴仁 : 神戸大学大学院修士論文 (2014).