

プラズマシミュレーションを用いた

ABIE 放電室内における中性粒子吸入を考慮したプラズマ生成解析

川口伸一郎¹、臼井英之^{2*}、三宅洋平²、安河内翼¹、福田雅人³、横田久美子¹、田川雅人¹

¹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

²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 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. 研究背景

近年 Sub-LEO と呼ばれる高度 400km 以下における人工衛星利用のニーズが増加してきている。一番のメリットとして挙げられるのは、掲載するカメラ等の観測機器が発揮する分解能の向上である。光学分解能は、高度に比例して低下すること知られており、高度 200km 付近で運用される人工衛星の場合、高度 400km で周回している ISS に比べ、約 2 倍の分解能を発揮し画像を得ることが可能となる。その他にも、SAR 衛星や、LIDER 搭載の人工衛星の場合では、それぞれ分解能が高度の 2 乗もしくは 3 乗に反比例して低下する点や、光学観測系機器の小型化によって、コスト削減や、衛星の多様化等が可能となる。これらの点からも、Sub-LEO 領域における人工衛星利用は人類の生活水準の引き上げや、有事における情報収集等広い用途を想定することが可能であると考えられる。

しかし、Sub-LEO 領域における人工衛星利用のデメリットとして考えられるのが、大気抵抗による人工衛星の減速及び、衛星表面材料の原子状酸素による材料劣化等である。現在 Sub-LEO 領域の大気組成についての科学的解明が十分進んでおらず、

Sub-LEO 領域を周回する衛星を用いて詳細な知見を得ることが期待されている。

このような目的を持って 2016 年には JAXA より超低高度試験衛星 SLATS の打ち上げが予定されており、Sub-LEO 領域の科学的知見に期待されている。

本研究では、今後の Sub-LEO 領域における人工衛星の運用に最適と考えられている、電気推進器である大気吸入型イオンエンジン (ABIE; Air Breathing Ion Engine) の開発に取り組んでいる。[1]

ABIE は、高層大気に存在する原子状酸素を推進剤として利用するイオンエンジンであり、従来の推進器が持つ、推進剤携行量による衛星寿命の制限がなく、より長期間のミッションや高度 200km 付近における人工衛星の利用を活発化させることが可能と考えられる。

ABIE の開発にあたって、先行研究として低軌道宇宙環境を模擬した実機実験を行った[2][3]。しかし、超熱原子装置を用いた高速酸素ビームの生成では、パルス状の酸素ビームに限定されることや、ABIE リフレクターにおける高速粒子の反射・拡散等が正確に再現できない点等、Sub-LEO の環境を十分に模擬できているとは言い難い。

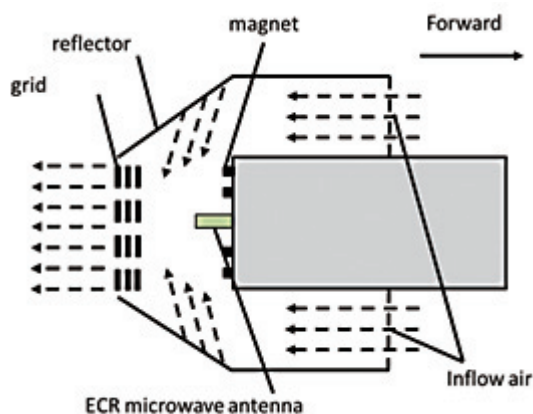


図1. ABIE 概念図[1]

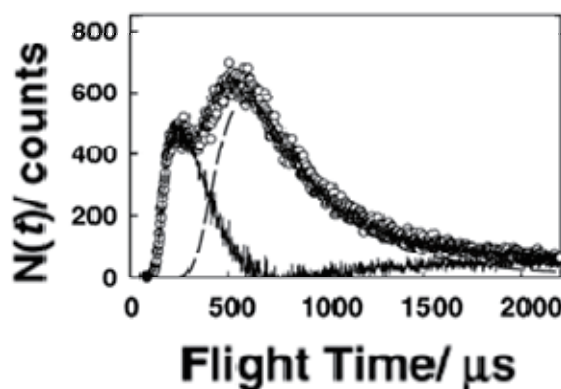
このような理由から、本研究では実際の環境データを模擬した数値シミュレーションを用いた、ABIE 放電室内部におけるプラズマ生成解析を行った。本研究では宇宙プラズマ中における物理現象の解析を行う計算機実験コード EMSES (Electromagnetic Spacecraft Environment Simulator) [4]を用いてエンジンの放電室内の現象をモデル化し、イオン生成効率の向上を目指した。本報告では、放電室内に吸入する推進剤ガスとなる原子状酸素流の挙動について解析し、ABIE 砲煙室内における中性粒子分布の最適化という観点から ABIE の最適設計指針を得ることを目標としている。

2. 研究手法

本研究では、EMSES の本来の機能である電磁場解析の機能を使用しない、つまりイオン電荷機能を使用しないことによって、中性粒子を扱った。これにより、ABIE 機体内部での中性粒子流の反射・拡散を実現した。しかし DSMC 法とことなり、中性粒子同士の衝突現象が考慮されていない。この点については ABIE サイズと ABIE 内の原子状酸素平均自由行程を比較することによって、中性粒子同士の衝突は ABIE 内では十分に無視できると考えられる。

2.1 中性粒子反射

中性粒子流が ABIE 機体内に吸入された際に起きる反射について以下の機能を実装した。分子流が高速衝突する際には、弾性衝突だけではなく、熱エネルギーを失い、

図2. TOF 解析図
N₂ 高速表面衝突[2]

吸着脱離を起こす反応が起こることによって知られている[2]。

本研究では、2種類の反射を考慮した。
i. 直接的非弾性散乱過程 (IS) The direct inelastic scattering 及び、ii. 吸着・脱離過程 (TD) trapping desorption.

図2に示すのは、先行研究で実施された高速酸素流を ABIE 実機に照射した際に、リフレクターで反射した粒子を計測した Time of flight (TOF) データである[4]。

TOF スペクトルには、二つのピークが存在することがわかる。時間が早いピークは IS 過程を意味し、遅れて存在するピークは TD 過程を意味する。

IS, TD それぞれの割合や、強度が中性粒子の反射後の振る舞いを決定するため、それらを確率的に考慮したシミュレーションを行うことにより、実機環境を模擬した。

3. 研究結果

3.1 中性粒子シミュレーション結果

中性粒子シミュレーションにおいて、図1に示した ABIE 概念図におけるリフレクター部分の角度をパラメータとして ABIE 機体内の中性粒子分布について検証した。

今回リフレクター角度として、20°、30°、45° の三種類について検証を行った。それぞれについて、ABIE 機体内における中性粒子分布及び、密度について比較を行い、角度依存性について考察を行った。

図3 a, b, c に示すのはリフレクター角度がそれぞれ 20°、30°、45° の時の中性粒子分布図である。全ての場合において、ABIE

機体中央付近において密度が大きくなることを確認される。これらを数値的に解析するために中性粒子流入数を時間変化と共に解析した。その結果が図4である。この結果から、粒子吸入が時間経過と共に増加率が減衰し、定常状態に収束することが確認された。中性粒子密度の増減は角度依存しており、リフレクター角度が 45° において最も効率良く粒子を取り込み、プラズマ生成の推進剤として利用できる可能性が示唆された。また、リフレクター角度が 20° の場合では、リフレクターに衝突後粒子が放電室内部に留まりにくい結果が得られた。これは 20° の場合において弾性・非弾性を含む物理的衝突効果が強く放電室外部へと粒子が流れたためと考えられる。今後、より長期間の定常的なシミュレーションを行うことで、ABIE機体内の中性粒子分布が定常となった分布を計算した後、イオン生成シミュレーションを行うことで、中性粒子分布とイオン生成効率との関係性を明らかにする予定である。

ABIE放電室内における中性粒子分布について解析を行った。結果を図5に示す。図5では横軸にX軸を取っており、0~54グリッドにおける中性粒子の相対数変化を示している。x=54、y=54、z=54の位置における中性流数を1として他の位置における相対数を示している。この結果から、リフレクター角度に依存して、放電室内における中性粒子分布が変化していることが確認される。いずれの角度においても、放電室中央部分における密度は大きく、他の部分に比べて、5~8倍の密度であることがわかる。これらの結果からも、マイクロ波アンテナ上部におけるプラズマ生成がABIEのプラズマ生成効率向上に重要であると確認された。

3.2 シミュレーション結果考察

ABIE放電室内における中性粒子密度は、ある一定以上に保つ必要がある。ABIEの推進剤吸い込み後、推進剤として利用する際にはラム圧縮を利用する。高度180km~220km域における利用を想定し、プラズマ生成はECRを用いて行う事を考慮すると、

放電室内における数密度は常に 10^{18}cm^{-3} 以上であることが指定されている。[8]

これらと現在得られている数値解析結果を比較した際、10%程の差が見られ、放電室全体における密度ではなく、主プラズマ生成領域においてこれらの密度を実現することが可能であると考えられる。

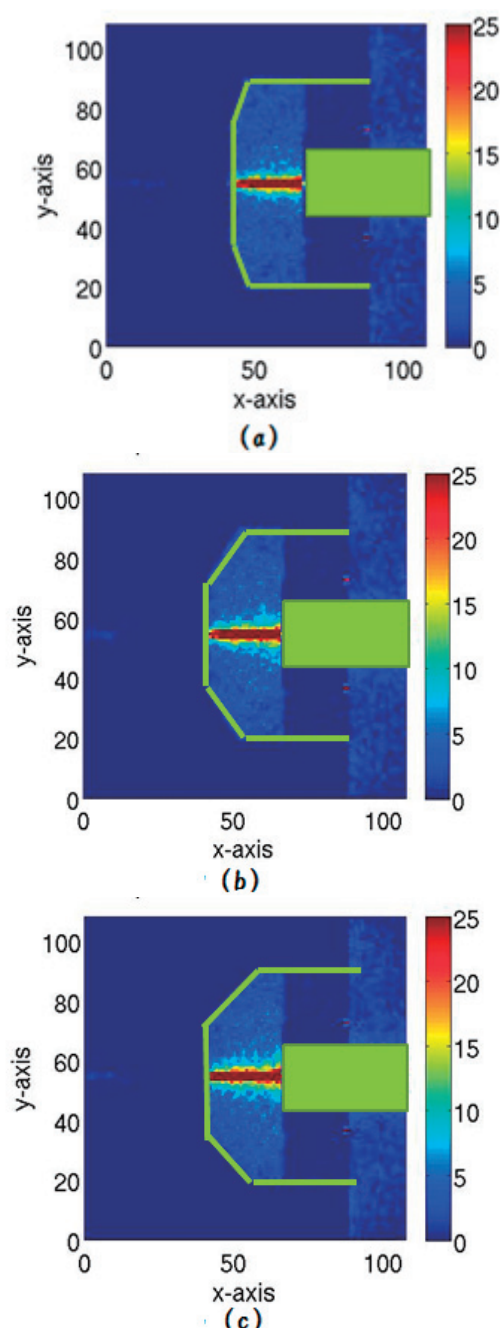


図4. 中性粒子密度分布図；リフレクター角度 (a) 20° (b) 30° (c) 45°

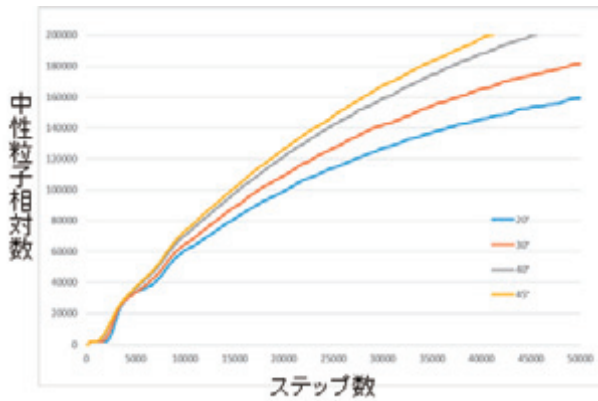


図5. 中性粒子密度時間変化図

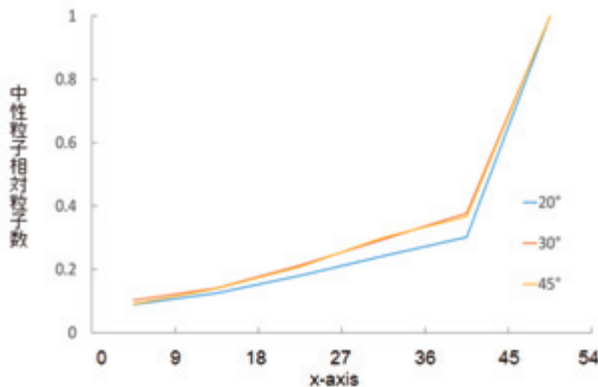


図6. 中性粒子密度分布(y=54,z=54)

4. 結言

Sub-LEO 領域において運用される人工衛星用電気推進器として大気吸入型イオンエンジン (ABIE) の開発にむけて、大気吸入についての中性粒子シミュレーションを行い、放電室内における中性粒子分布の最適化に向けた知見を得ることができた。中性粒子として、酸素原子を仮定し、運用想定高度である高度 220km における衛星周回速度 8km/s の分子流が金属壁面に衝突する現象を再現するために、数値シミュレーション内において、非弾性散乱過程、吸着・脱離過程を考慮した。シミュレーションの結果 ABIE では従来のイオンエンジン放電室とは異なり、放電室中央付近に原子状酸素が集中するため、この領域でのプラズマ生成をおこなうことで、ABIE のプラズマ生成効率の向上させる可能性が示唆された。

参考文献

[1] 西山和孝:大気吸入型イオンエンジンの検討, 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] 坪井堯甫:神戸大学卒業論文 (2011).

[4] Miyake Y., Usui H.: New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions, Phys. Plasmas Vol. 16 (2009) 062904.

[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).

[8] Kazuhisa Fujita :Air-intake Performance Estimation of Air-breathing Ion Engines, 日本機械学会論文集 (B 編)、70 巻 700 号、2004