

# 大気吸込式イオンエンジン用イオン源の磁石列数変更による性能変化の調査

## Performance investigation of an ion source for air-breathing ion engine by changing the number of magnet rows

○宮 優海(総研大・院)・西山 和孝(宇宙航空研究開発機構)

○Yukai Miya(the Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI)・Kazutaka Nishiyama (JAXA)

### Abstract (概要)

Air-breathing ion engine (ABIE) is suggested as a propulsion for atmospheric drag compensation in very low earth orbit (VLEO). In VLEO, ABIE uses ambient atmosphere around a satellite as propellant. Then, freeing the satellite from the limitation of propellant loading, the life time of the satellite is increased. However, ABIE has not yet been possible to generate enough thrust to compensate for the atmospheric drag under low pressure propellant. Therefore, we investigated the number of the magnet rows which improve the ion source performance under low pressure operation. In the result, among 8, biased 8, 12 and 16 rows, the ion source performance was found to be the best when 12 rows were employed.

### 記号の説明

- $f$ : マイクロ波周波数
- $I_{plate}$ : 金属板に流れる電流
- $P$ : マイクロ波正味投入電力
- $p$ : チャンバー内圧力
- $V_{plate}$ : 金属板に印加した電圧

### 1. 背景

超低軌道(very low earth orbit, VLEO)に当たる高度 450 km 以下の領域では未だに衛星の長期運用は実現出来ていない。この領域で衛星を運用することは衛星の製造・打上コスト低減や搭載観測機器の分解能が向上するなど多くの利点がある。しかし、現在用いられる通常の衛星軌道よりも低い高度のため、より密度の高い大気が存在しより大きな抗力を生じてしまう。そのため抵抗補償用に推進機が必要となるが、既存の推進機では推進剤の重量により衛星寿命は制限される。例えば JAXA の SLATS (super low altitude test satellite) <sup>1)</sup>は推進機としてイオンエンジンを採用していたが、衛星運用期間は 2017～2019 と短期間となっている。

そこで大気吸込式電気推進 (air-breathing electric propulsion, ABEP) の実現が期待されている。ABEP は VLEO の大気を取り込み推進剤として利用することで推進剤の積載を低減させ、衛星寿命を長くできる。VLEO の大気は図 1 に示すように地上とは異なる組成をしており、原子状酸素(AO),  $N_2$ ,  $O_2$  が大部分を占めている <sup>2)</sup>。従来の推進機に用いられる推進剤圧力よりも低い圧力であり、プラズマを点火させるためには圧縮して圧力を上げる必要がある。そ

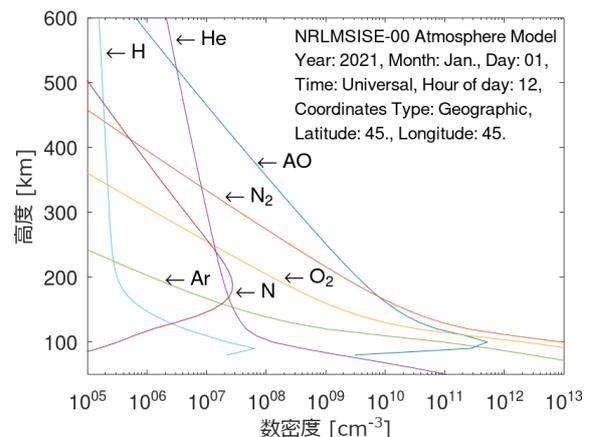


図 1 高度による大気組成の変化

こでまずインテークを用いて大気取込みと圧縮を行い、後段の電気推進へ送り込む方式が主流である。ABEP の先行研究には電気推進にイオンエンジン <sup>3)</sup>や、ホールスラスタ <sup>4)</sup>、ヘリコンスラスタ <sup>5)</sup>などを採用したものが存在しており、各研究機関の既存電気推進のヘリテージを活かしながら研究が行われている。その中で私たちは ECR (electron cyclotron resonance)イオンエンジンを採用した大気吸込式イオンエンジン (air-breathing ion engine, ABIE) <sup>3)</sup>の開発に焦点を当てている。

ABIE は図 2 のように大きく分けて 1. 大気を取り込み圧縮するインテーク, 2. 取り込んだ圧縮大気をプラズマ化させるイオン源, 3. 生成したイオンを電氣的に加速させ、高速排気するイオン加速グリッド, 4. 排気されたイオンに電子を供給し、電氣的中性を保つ中和器の 4 つの部分で構成

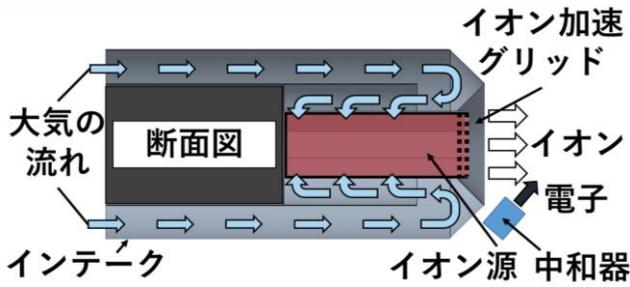


図2 ABIEの概要

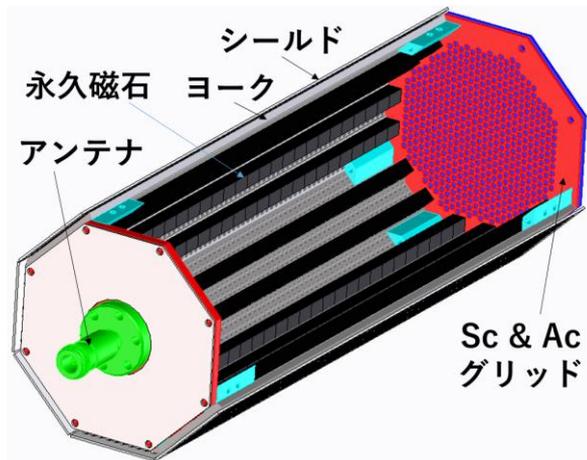


図3 イオン源の構成

される。本原稿において私たちはこの内のイオン源を扱う。先行研究としてインテーク研究の前段階としてVLEOでの大気を地上で模擬する試みが行われていたが、実現には至らなかった<sup>6-8)</sup>。そこで数値計算によってインテークの研究が行われ<sup>9-11)</sup>、圧縮比を大きくとれるイオン源形状として断面積が高アスペクト比なものが必要と分かっている。そこで私たちは8角柱状のイオン源の試作機を作成して研究してきた。

私たちの今までのABIEの研究開発結果<sup>12)</sup>から分かっているイオン源での解決すべき問題点は主に2つある。1つ目は数値計算で予想される圧縮後の低圧力大気( $\times 10^{-4} \sim 10^{-3}$  Pa オーダー)<sup>9-11)</sup>での作動ができていないこと、2つ目は目標推力に相当するイオンビーム電流(数十~100 mA程度)よりもイオン飽和電流の時点で小さい電流値であることである。そこで先行研究として直流放電式ではあるものの本研究のECRイオン源と同じく磁石配列がマルチラインカスプ磁場となる配列であるイオン源の研究<sup>13)</sup>を参考にした。磁石列数を変更して電子の動きを追う数値計算を行っており、結果として12列の時に電子の移動距離と存在時間が最も長く最適になるとしている。本研究ではECRイオン源に存在するマルチラインカスプ磁場形状磁石配列の磁石列数を変更しこれらの問題点の解決を試みた。

## 2. 実験方法

**2.1 イオン源概要** 本研究で用いたECRイオン源の概要を図3に示す。8角柱形状をしており、イオン源内部に永久磁石を多数保持している。また、マイクロ波を投入す

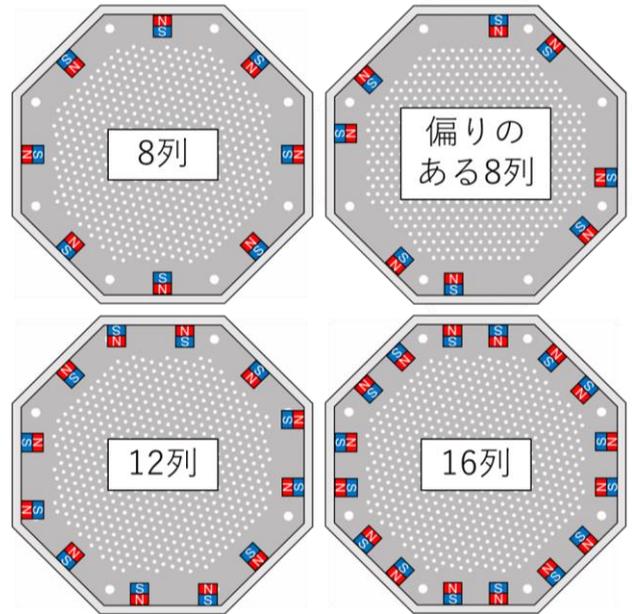


図4 用いた4種類の磁石配列の概要

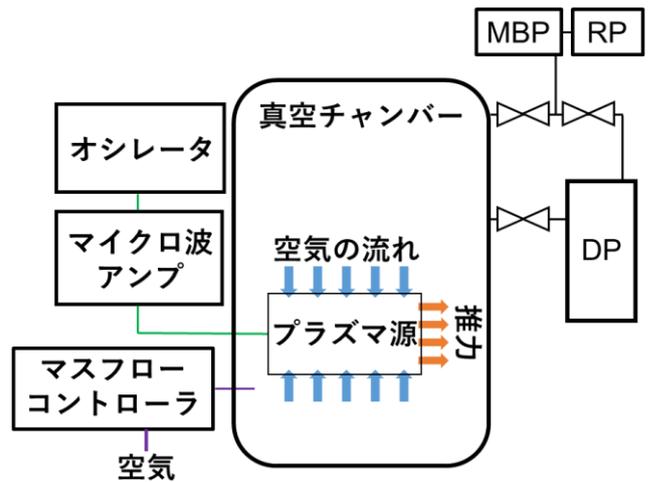


図5 実験装置概要

るためのアンテナを設置している。側面には多量の吸気孔を設けており、ここからイオン源周囲の推進剤を取り込む。

**2.2 磁石配列概要** 本研究で用いた磁石配列は図4に示すように8列、偏りを持たせた8列、12列、16列の4種類である。

**2.3 実験装置** 実験装置の概要図を図5に示す。真空系は油回転ポンプ(RP)、メカニカルブースターポンプ(MBP)、油拡散ポンプ(DP)を用いて真空引きを行った。推進剤供給系はマスフローコントローラーにより実験室内空気を流量の制御をしながら真空チャンバーに投入し、イオン源側面から吸気した。これはインテークで推進剤が低速になることの模擬を狙った。マイクロ波供給系は発振器により生じたマイクロ波をアンプにより増幅させ、イオン源のアンテナへ投入した。

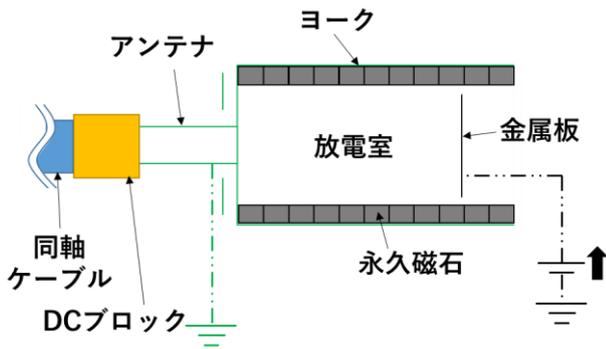


図6 実験でのイオン源まわりの詳細

表1 下限圧力取得の実験条件

$f$ [GHz]	4.14, 4.20, 5.40, 5.45
$P$ [W]	33

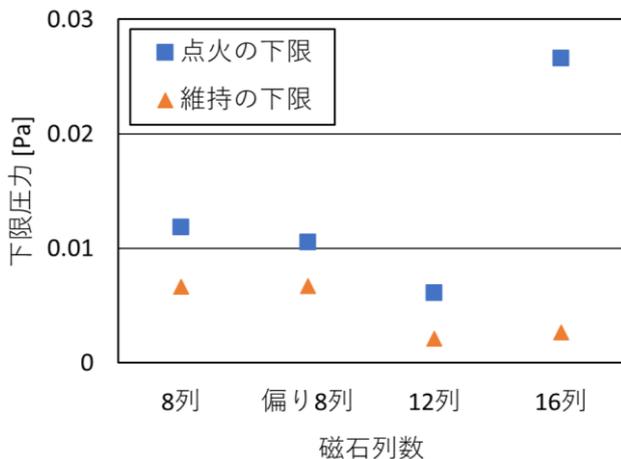


図7 各磁石配列でのプラズマの点火・維持可能な下限圧力

### 3. 磁石列数変化時の点火・維持下限圧力取得

磁石列数を変化させたときのイオン源性能の評価の一つとして点火する圧力の下限とプラズマを維持できる下限圧力を調査した。

**3.1 実験装置・条件** 実験装置の概要図を図6に示す。実験条件を表1に示す。磁石列数によってプラズマを点火できたマイクロ波周波数は変化したので4つの周波数で実験を行った。

**3.2 結果** 各磁石配列でのプラズマの点火・維持できる下限圧力を調査した結果、図7のグラフのようになった。目標圧力オーダーである $\times 10^{-3}$  Paの範囲に入った磁石配列は点火・維持下限圧力ともに12列の時であった。よって下限圧力の観点では本実験で用いた磁石配列の中では12列が最も有利であると判断した。

### 4. 磁石列数を変更してのイオン飽和電流調査

次に推力の大元としてイオン飽和電流を調査し、イオン

表2 イオン飽和電流取得の実験条件

$f$ [GHz]	4.14, 4.20, 5.40, 5.45
$p$ [Pa]	$3.2 \times 10^{-2}$

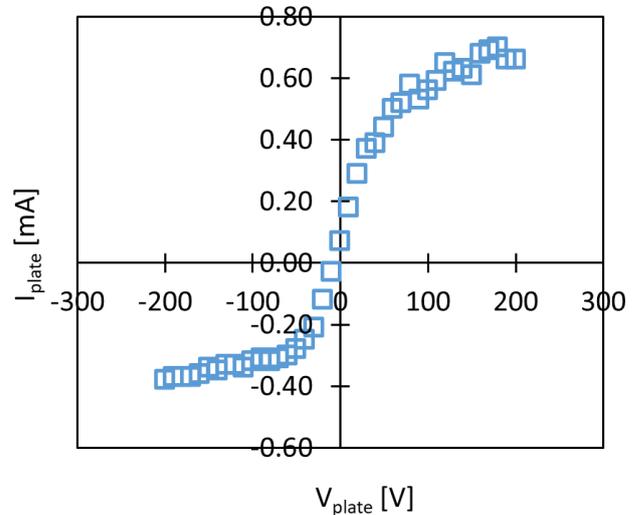


図8 偏りを持たせた8列を採用したときのプローブ測定結果

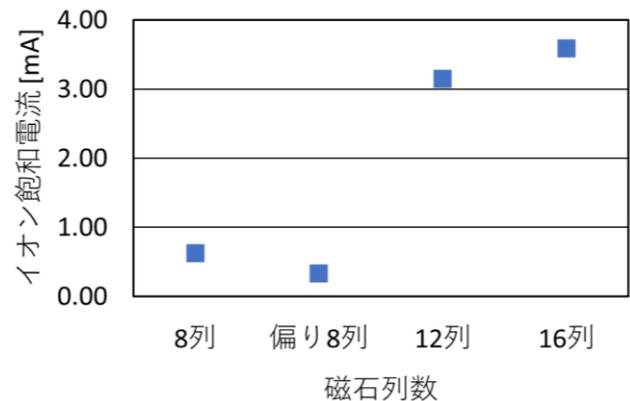


図9 各磁石配列でのイオン飽和電流

ン生成能力の評価をした。

**4.1 実験装置・条件** 3章で用いた図6と同様の装置を用い、金属板に電圧を印加して簡易的なプローブとした。実験条件を表2に示す。

**4.2 結果** イオン飽和電流測定のためのプローブ測定の結果の代表として図8に偏りを持たせた8列の時の測定結果のグラフを示す。-100 Vで飽和しているとみなしプラト一部分で平均をとると、イオン飽和電流は0.33 mAとなった。各磁石配列でのイオン飽和電流をまとめた結果を図9に示す。磁石列数が増加するとイオン飽和電流が増加する傾向が見られ、16列の時に最大のイオン飽和電流となっている。だが、12列の時も同程度の電流値であり、前章の下限圧力の観点と合わせると12列が最も有望であると判断した。

表3 イオン飽和電流の圧力依存特性取得の実験条件

$f$ [GHz]	4.14
$P$ [W]	33
$V_{plate}$ [V]	-100

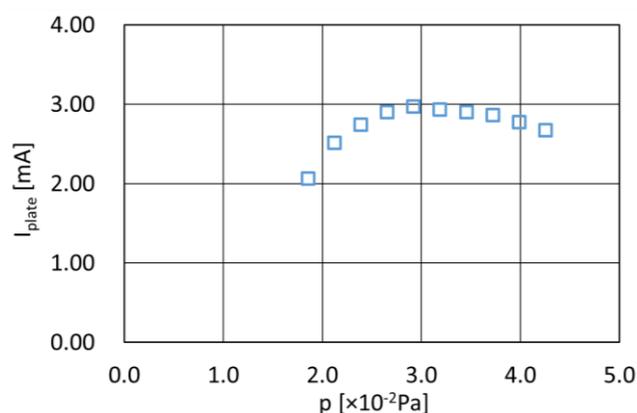


図10 12列を採用したときのイオン飽和電流の圧力依存特性

## 5. 12列の時のイオン飽和電流の圧力依存特性の取得

前章までで12列の時を最も有利である磁石列数と判断したので、この時の圧力によるイオン飽和電流の変化を調査した。

**5.1 実験装置・条件** 4章で用いたものと同様の装置を用いた。実験条件を表3に示す。

**5.2 結果** イオン飽和電流の圧力依存特性調査の結果図10のグラフのようになった。最大の電流となった圧力は $2.9 \times 10^{-2}$  Paであり、このときのイオン飽和電流でもたかだか約3 mAにとどまっている。この値は目標イオンビーム電流である数十～100 mAの1, 2桁下である。イオン飽和電流の時点でこのような低電流であることを考えるとABIEの成立のためにはイオン生成に大幅な改善が必要となり、今後の研究課題である。改善案としてはマイクロ波の周波数を固定してアンテナの最適化を行うこと、イオン源の下流側(グリッド近傍)に磁石を集中させ、マイクロ波からのエネルギー吸収を集中させることなどを考えている。

## 6. まとめ

本研究ではABIE用マルチラインカスプ磁場形状ECRイオン源の磁石列数を変更することで低圧力でのイオン源性能の向上を目的とし、結果として以下の成果を得た。

- 8列, 偏りを持たせた8列, 12列, 16列の4種類の中では12列の時がプラズマの点火・維持の下限圧力の観点で最も有利であることが分かった。
- イオン飽和電流は磁石列数が増加すると増大する傾向を示したが、12列の時と16列の時の電流は同程度であり、下限圧力の観点を加味すると12列が最も有利であると判断した。
- 12列の時のイオン飽和電流最大になる圧力は

$2.9 \times 10^{-2}$  Paであり、電流値は約3 mAであった。

## 参考文献

- 1) Sasaki, M.: Mission for super-low earth orbit SLATS. Space Res. Today, **198** (2017), pp. 10–18.
- 2) Picone, J.M., Hedin, A.E., Drob, D.P., Aikin, A.C.: NRLMSISE - 00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. J Geophys Res Space Physics **107**(A12), SIA-155 (2002).
- 3) Nishiyama, K.: Air Breathing Ion Engine Concept. In: International Astronautical Congress: 54th Int. Astronaut. Congr., (2003).
- 4) Andreussi, T., Ferrato, E., Piragino, A. and Cifali, G., Rossodivita, A. and Andrenucci, M.: Development and experimental validation of a hall effect thruster RAM-EP concept. In: Space Propulsion Conference 2018, (2018).
- 5) Romano, F., Chan, Y. A., Herdrich, G., Traub, C., Fasoulas, S., Roberts, P. C.E., Crisp, N., Holmes, B. E.A., Edmondson, S., Haigh, S., Livadiotti, S., Macario-Rojas, A., Oiko, V.T. A., Sinpetru, L.A., Smith, K., Becedas, J., Sullioti-Linner, V., Bisgaard, M., Christensen, S., Hanessian, V., Kaufman Jensen, T., Nielsen, J., Garcia-Alminana, D., Garcia-Berenguer, M., Rodriguez-Donaire, S., Sureda, M., Kataria, D., Belkouchi, B., Conte, A., Seminari, S.: Design, Set-Up, and First Ignition of the RF Helicon-Based Plasma Thruster. In: Space Propulsion Conference 2020+1., (2021).
- 6) Yokota, K., Nishiyama, K., Tagawa, M., Yoshizawa, Y., Yamamoto, D., Kuninaka, H.: Experimental study about air breathing ion engine (ABIE), Proceedings of Space Transportation Symposium, (2009).
- 7) Hisamoto, Y., Nishiyama, K.: Research on the simulator of upper atmosphere for Air Breathing Ion Engine (ABIE), Proceedings of Space Transportation Symposium, (2010).
- 8) Hisamoto, Y.: CW Beam Characterization of a Hyperthermal Atomic Oxygen Source using ECR Discharge and Ion Surface Neutralization, SOKENDAI Repository, Online (Available: [https://ir.soken.ac.jp/?action=repository\\_uri&item\\_id=4937&file\\_id=19&file\\_no=2](https://ir.soken.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=4937&file_id=19&file_no=2)), (2014), Accessed 20 June 2021.
- 9) Fujita, K.: Air intake performance of air breathing ion engines. Jpn Soc. Aeronaut Space Sci. **52**, (2005), pp. 514–521.
- 10) Ozawa, T., Imamura, S., Nishiyama, K., Tagawa, M., Fujita, K.: Numerical Analyses of Air Intake for Air Breathing Ion Engine, JAXA Special Publication: Proceedings of the 50th Fluid Dynamics Conference / the 36th Aerospace Numerical Simulation Symposium, (2019).
- 11) Ozawa, T., Tagawa, M., Yokota, K., Imamura, S.: Investigation of Ground Tests for Air Intake Performances, Proceedings of the 64th Space Sciences and Technology Conference, (2020).
- 12) Miya, Y., and Nishiyama, K.: Performance evaluation of a plasma generator and ion optics for air-breathing ion engine, CEAS Space Journal (2022), pp. 1-7.
- 13) Hosseinzadeh, M., and Afarideh, H.: Numerical Simulation for Optimization of Multipole Permanent Magnets of Multicusp Ion Source, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **735**, (2014), pp. 416–21.