

大気吸込み式イオンエンジン用 ECR イオン源の 磁場の変更による点火性能評価

Ignition performance evaluation of the ion source of the air breathing ion engine changing the magnetic field.

○宮 優海(総研大)・神田 大樹・西山 和孝 (宇宙航空研究開発機構)

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

Abstract (概要)

The Air Breathing Ion Engine (ABIE) is expected as a propulsion device for compensating atmospheric resistance of a very low orbit satellite. ABIE contributes to satellite weight reduction and prolongs satellite life by using ambient air as a propellant. For the realization of ABIE, an ion source that can ignite even under pressures lower than 1×10^{-3} Pa order is required. In this study, as a first step in the development of the ion source, we investigated the relation between the magnetic field and the ignition performance. As a result, we obtained the ion source's lower microwave power limits and knew that there is circumferential direction plasma ununiformation.

1. 緒言

超低高度衛星は高度 300 km よりも下の軌道を周回し、より地表に近づくことで搭載観測機器の性能を向上させる。その結果衛星の製造や打ち上げのコストを下げる。しかし、高度を下げたことにより周囲に大気が存在することになり、空気抵抗を受け次第に高度が下がり、最後は墜落してしまう。これを避けるため抵抗補償用の推進器が必要になる。例えば JAXA の超低高度衛星技術試験機(SLATS)¹⁾ではイオンエンジンを搭載している。

しかし既存の推進器では衛星に推進剤を載せる必要があり、その積載量によって衛星寿命が制限されてしまうという問題がある。そこで Nishiyama(2003)²⁾により大気吸込み式イオンエンジン(ABIE)が提案されている。ABIE は衛星周囲に存在する希薄な大気を圧縮しながら取り込み、推進剤として利用するので推進剤の積載が必要なくなりこの問題を解決する。

ABIE は主にインテーク、イオン源、イオン加速部、中和器の 4 つの部分で構成される。横田ら(2009)³⁾や、久本ら(2010)⁴⁾はインテーク部の開発の前段階として、超低高度大気を地上で再現するシミュレーターの開発を目指したが実現には課題が残っている。そこで、小澤ら(2019)⁵⁾は数値シミュレーションにより完全回帰軌道となる高度 268km を模擬し、高圧縮比を実現できるインテーク形状の調査を行った。その結果、その信頼性の高さから使用が想定されて

いた「はやぶさ 2」の $\mu 10$ イオンエンジンのイオン源形状ではインテーク性能に制限をかけることが判明した。したがって、ABIE 専用のイオン源形状を考案する必要がある。また、圧縮後の大気の圧力は 1×10^{-3} Pa 付近だということも分かった。

そこで本研究では 1×10^{-3} Pa を目標値とし、室内空気での点火性能を向上させることで実際の超低高度大気による点火性能も向上させる方針とし、ABIE 用 ECR イオン源試作機の磁場を変更することで点火性能への影響について調査し、点火性の改善の知見を得ることを目的とした。

2. 磁石配列がタイプ A の場合

2.1 磁石配列 図 1 に今回使用した八角柱型のイオン源とその側面の一面分の磁石配列を示す。この磁石配列をタイプ A とした。

2.2 実験装置・条件 タイプ A を採用時の実験装置と条件をそれぞれ図 2、表 1 に示す。真空チャンバー内にイオン源を設置し真空状態にした後、発振器と TWT (Traveling wave tube) アンプを用いマイクロ波を放電室内に、マスフローコントローラーにより室内空気をチャンバー内に投入しプラズマ点火を行い、投入電力あるいは空気の流量を変えて点火性を調査した。

2.3 タイプ A の結果 まずマイクロ波周波数 6.1 GHz、チャンバー内圧力 2.67×10^{-3} Pa の条件下でマイクロ波の投入電力を上げていき点火する電力を取得した。結果を表 2

に示す。この結果から点火開始下限電力は8 W 付近であることが分かった。また図3に8 Wでの点火の様子を示す。写真では点火していないように見えるが目視では発光を確認している。次に同条件下で点火している状態から投入電力を下げていきプラズマを維持できなくなる電力を取得した。結果を表3に示す。ここからプラズマを維持可能な下限電力は5~6 W 付近であることが分かった。また投入電力45 W 付近でチャンパー内圧力を高め、よりプラズマ密度を高くすると図4に示すように周方向のプラズマ分布に不均

表2 タイプAの点火開始下限電力取得結果

Times	Fwd. [W]	Ref. [W]	Net power [W]	Ignited or not
1 st	5	0	5	×
	6	0	6	×
	7	0	7	×
	8	0	8	×
	9	1	8	○
2 nd	4	0	4	×
	5	0	5	×
	6	0	6	×
	7	0	7	×
	8	0	8	○
3 rd	5	0	5	×
	6	0	6	×
	7	0	7	×
	8	1	7	×
	9	1	8	○

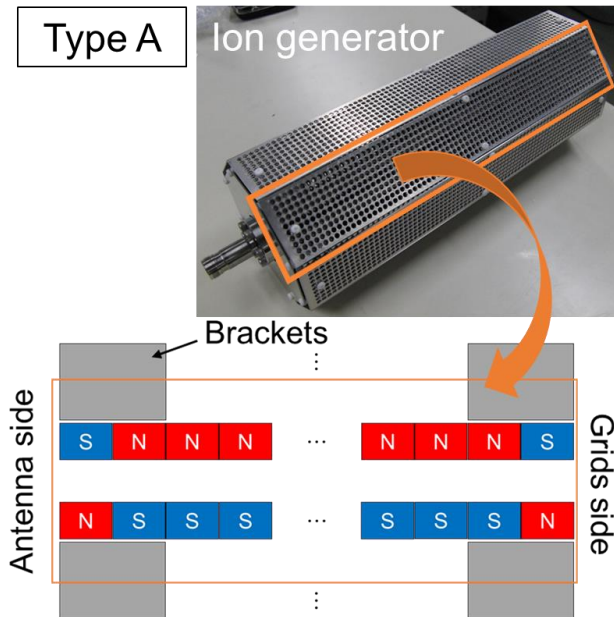


図1 タイプAの磁石配列概要

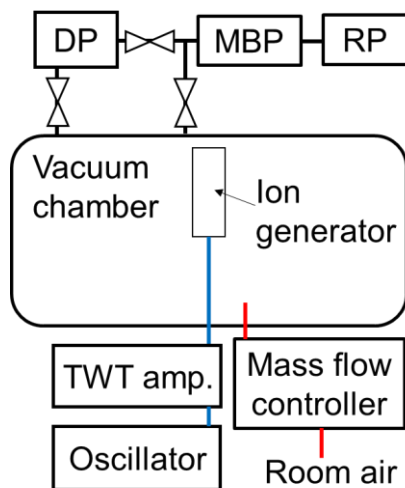
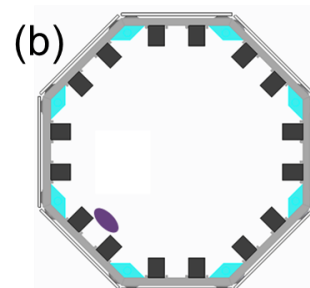
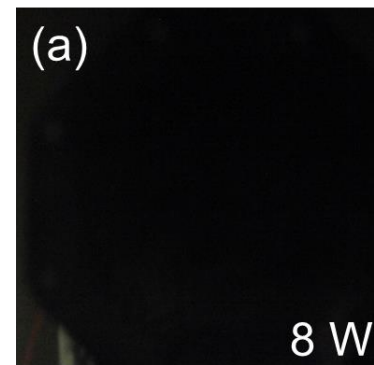


図2 実験装置概要

表1 タイプAの実験条件

Microwave frequency [GHz]	6.1
Forward power [W]	4 ~ 9, 45
Chamber pressure [$\times 10^{-3}$ Pa]	1.87, 2.67, over 130
Ultimate pressure [$\times 10^{-3}$ Pa]	1.60



Visual observation

図3 タイプAの点火の様子 (6.1 GHz, 2.67×10^{-3} Pa)
(a) カメラで撮影 (b) 目視した場合

表3 タイプAのプラズマ維持下限電力取得結果

Times	Fwd. [W]	Ref. [W]	Net power [W]	Ignited or not
1 st	9	1	8	○
	8	0	8	○
	7	0	7	○
	6	0	6	○
	5	0	5	×
2 nd	9	1	8	○
	8	0	8	○
	7	0	7	○
	6	0	6	○
	5	0	5	○
3 rd	8	0	8	○
	7	0	7	○
	6	0	6	○
	5	0	5	×

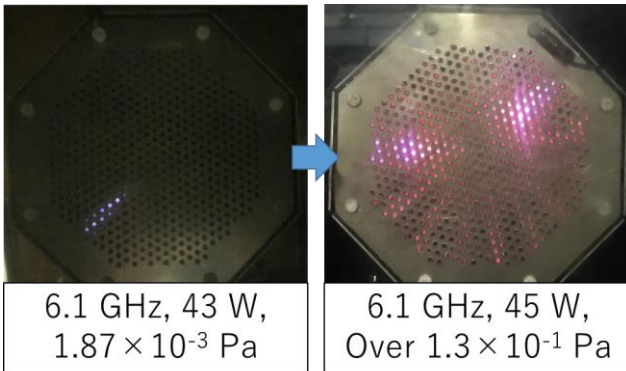


図4 タイプAの周方向プラズマ分布不均一

一が生じていることが分かった。

3. 磁石配列がタイプBの場合

3.1 磁石配列の変更点 タイプAの周方向不均一を解消し、また更にタイプAと同条件下で比較してよりプラズマ密度を高めることを狙い図5に示す磁石配列を考案した。これは巨視的に見ると電子が長くドリフト可能な磁場になっていると考えられる。しかし、タイプAからこの磁石配列に変更するにはブラケットが邪魔になってしまい、実際には図6の磁石配列で実験を行った。この磁石配列をタイプBとした。黄緑の枠で囲った磁石はタイプAの配列のままで残した。

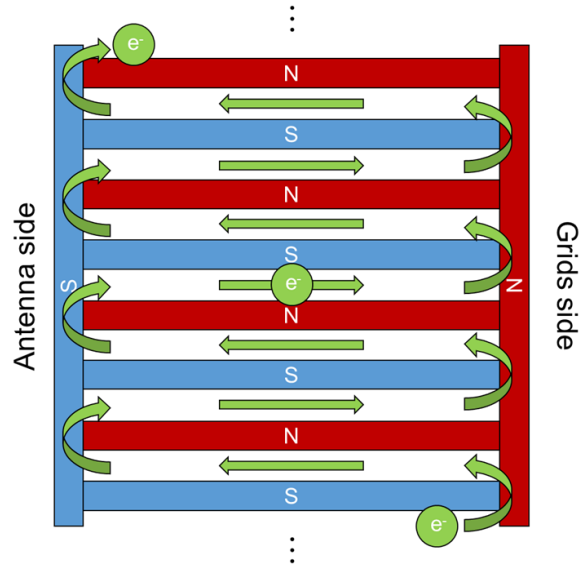


図5 電子がより長くドリフト可能な磁石配列

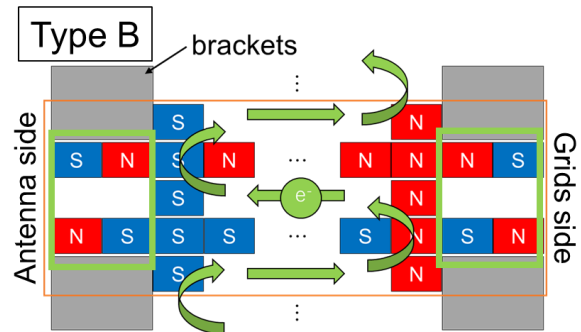


図6 タイプBの磁石配列概要

表4 タイプBの実験条件

Microwave frequency [GHz]	6.1
Forward power [W]	4 ~ 10, 20 ~ 50, 53
Chamber pressure [$\times 10^{-3}$ Pa]	2.67 ~ 5.33, over 130
Ultimate pressure [$\times 10^{-3}$ Pa]	1.60

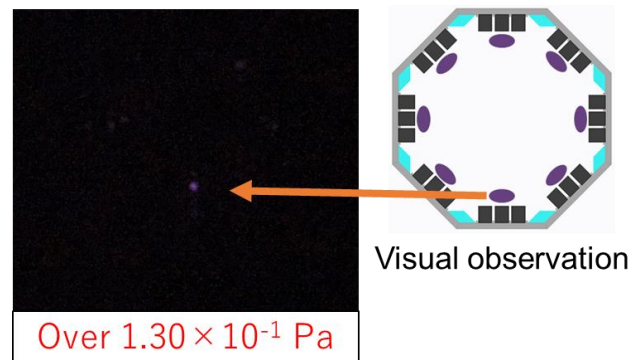


図7 タイプBの点火の様子

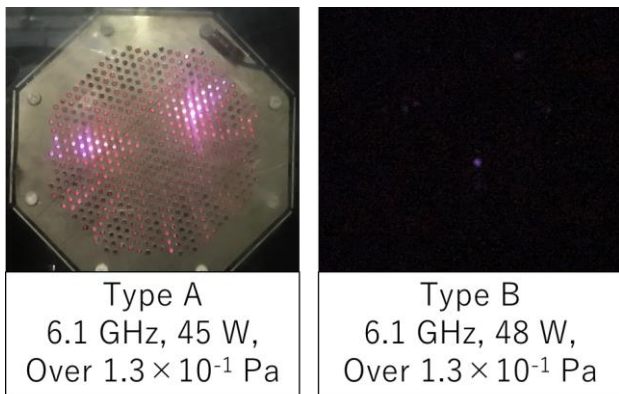


図8 タイプAとタイプBの点火の様子と比較

3.2 実験装置・条件 実験装置はタイプAの時と同じ図2に示すものを用い、同様に実験を行った。また、実験条件は表4に示す。

3.3 タイプBの結果 タイプAと同様に投入電力を上げていき点火を開始する電力を取得しようとしたが、正味の投入電力で4~48Wでは点火することはなかった。そこで48Wの状態から空気の流量を増やしていき、チャンバー内圧力を高めることで点火するか取得した。その結果 $2.67 \times 10^{-3} \sim 5.33 \times 10^{-3}$ Pa では点火せず、マスフローコントローラーを open にして流量を制御しない(少なくとも圧力は 1.30×10^{-1} Pa を超えていた)状態にすることで初めて点火した。その様子を図7に示す。

3.4 タイプAとタイプBとの比較 それぞれのタイプでの点火の様子を比較のため図8に再掲する。タイプBはタイプAと比べて高電力でよりプラズマが点火し易いと考えられる条件でも、タイプAよりも弱い発光となっていることがわかるので、タイプAとタイプBとではタイプAのほうが点火性能は良いと考えられる。この理由としては本来の電子を長くドリフトさせる磁石配列の両端にタイプAの配列を一部残したことで、その残した磁石によって生じた磁場に電子がトラップされている可能性が考えられる。今後、この理由を明らかにするには磁場の解析や、両端に残した磁石を取り除いた磁石配列にしたイオン源での実験を行う必要がある。

4. 結言

本研究では ABIE 専用のイオン源開発のためイオン源の磁石配列を変更してプラズマ点火性への影響を調査し、改善を目指した。結果として現磁石配列のタイプAでは点火開始下限電力は8W付近で、点火維持可能な下限電力は5~6W付近であることが分かった。また周方向のプラズマ分布不均一が生じることが分かった。不均一改善のためより長く電子をドリフトさせる磁場配列を追加したタイプBでも実験を行ったが、タイプAよりも点火性が悪いことが確認された。

参考文献

1) Sasaki, M. : Mission for Super-Low Earth Orbit, Space Research Today, **198** (2017), pp.10-18.

2) Nishiyama, K. : Air Breathing Ion Engine Concept, International Astronautical Congress: 54th Int. Astronaut. Congr. (2003).
 3) 横田久美子, 西山和孝, 田川雅人, 義澤康男, 山本大作, 國中均 : 大気吸込式イオンエンジン (ABIE) に関する実験的研究, In title Proceedings of Space Transportation Symposium 宇宙輸送シンポジウム: 講演集録. (2009).
 4) 久本泰慶, 西山和孝 : 大気吸込式イオンエンジン (ABIE) のための高層大気シミュレータに関する研究, In title Proceedings of Space Transportation Symposium 宇宙輸送シンポジウム: 講演録. (2010).
 5) 小澤宇志, 今村俊介, 西山和孝, 田川雅人, 藤田和央 : 空気吸込式イオンエンジンの実証に向けたエアインテーク数値解析, In title 宇宙航空研究開発機構特別資料: 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集 JAXA Special Publication: Proceedings of the 50th Fluid Dynamics Conference/the 36th Aerospace Numerical Simulation Symposium, (2019), p. 97.