

# $E \times B$ プローブを用いたイオンエンジンにおける イオンビーム特性の測定

平野賢治\*1, 豊田裕司\*1, 木邊厚視\*1, 山本直嗣\*1, 中島秀紀\*1

**Measurement characteristics of the ion beam in the ion engine using the  $E \times B$  probe**  
Kenji HIRANO, Yuji TOYODA, Atsushi KIBE, Naoji YAMAMOTO, and Hideki  
NAKASHIMA

Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

†E-mail of corresponding author: k\_hirano@aees.kyushu-u.ac.jp

(Received February 5, 2013, accepted February 6, 2013)

The abundance ratio of the doubly charged ions in an ion thruster plume was measured in order to estimate the thrust and validate a numerical simulation code for lifetime validation of ion thruster. An  $E \times B$  probe was used for the estimation of the ratio of doubly charged ions to singly charged ions. The ratio of doubly charged ions to singly charged ions is 0.04 at an incident microwave power of 8 W and a mass flow rate of 20  $\mu\text{g/s}$ . The ratio is decreased with increase in mass flow rate. This is because the increase in mass flow rate leads to the decrease in mean free path, and electrons get less energy from the microwaves. The  $E \times B$  probe can estimate the ion velocity and the average velocity of the accelerated ions is estimated as  $3.7 \times 10^4$  m/s at a screen voltage of 1000 V, which is reasonable compared to the theoretical value.

**Key words:** Ion thruster, microwave discharge,  $E \times B$  probe, abundance ratio of doubly charged ions, ions velocity

## 1. 諸 言

近年、打ち上げコストや開発コストの低減や開発期間の短縮などの利点を持つ小型人工衛星の開発が活発化している<sup>(1)</sup>。しかし、小型化により搭載できる燃料も限られるため、高性能な特に燃費のよい推進器が求められている<sup>(2)</sup>。その候補の1つにイオンエンジン<sup>(3)</sup>が挙げられる。

イオンエンジンは、小惑星探査機「はやぶさ」などに搭載されており、実績が十分にある電気推進の一つである<sup>(4)</sup>。イオンエンジンの特徴としては、化学推進に比べ推力では劣るが燃費が非常に良く、燃料の大幅な削減が可能になる。そのため、宇宙機の重量の多くを占めている推進剤を大幅に削減できる。このため、衛星の小型化、低価格化に貢献できる。すなわち、このイオンエンジンを小型衛星に搭載可能なまでに小型化できれば、これまで大型衛星で行ってきたようなミッションが小型衛星でも可能になる。例えば、衛星の軌道保持や姿勢制御、大気抵抗補正やフォーメーションフライト、自己廃棄など、様々なミッションが低コストで可能になる。

\*1 先端エネルギー理工学専攻

本研究室ではマイクロ波放電型小型イオンエンジンの研究・開発を行ってきた<sup>(5)</sup>。マイクロ波放電型は直流放電型に比べ、放電電極を使用しないため長寿命であり、イオンエンジンの構造が簡素化できるといった利点がある。本研究室では、マイクロ波投入電力 8 W 及び推進剤流量 20  $\mu\text{g/s}$  以下で推力 0.5 mN を目標として研究・開発を行ってきた結果、推力 0.55 mN をマイクロ波投入電力 8 W、推進剤流量 20  $\mu\text{g/s}$  において達成できた。イオンエンジンの推力  $F$  の算出に当たり以下の式を用いた。

$$F = \gamma_T I_b \sqrt{\frac{2m_i V_b}{e}}$$
$$\gamma_T = \cos\theta_b \times \frac{1 + \alpha/\sqrt{2}}{1 + \alpha}$$
$$\alpha = \frac{I_2}{I_1}$$

ここで、 $\gamma_T$ は推力係数、 $\alpha$ は二価イオン存在比、 $I_b$ はイオンビーム電流[A]、 $m_i$ はイオン質量[kg]、 $V_b$ は引出し電圧[V]、 $e$ は電気素量、 $\theta_b$ はビーム発散角、 $I_1$ は一価イオンの電流値[A]、 $I_2$ は二価イオンの電流値[A]である。

現在、二価イオン存在比  $\alpha$  を 0.15 と仮定している。

しかしながら、人工衛星の軌道を精密に制御するためには、正確な推力の算出が必要不可欠であり、また二価イオン存在比は寿命にも大きく効いてくるため、これらのデータの取得が必要不可欠である。

そこで本研究の目的は磁場印加にコイルを用いたE×Bプローブを製作し、これを用いて、本研究室で開発した小型イオンエンジンの二価イオン存在比を測定することである。これと並行して、今回開発したE×Bプローブを用いると、理論的にイオンの速度が算出可能であるため、この実験と並行してイオン速度の計測も行い、その妥当性を評価した。

## 2.実験装置

### 2.1 イオンエンジン

本研究室で開発したイオンエンジンの断面図をFig.1に示す。放電室内径は21mmで、外形は50mm×50mm×30mmである。磁気回路は、サマリウムコバルト(Sm-Co)磁石と放電室を前後から挟み込む軟鉄製のヨークからなる。磁場形状はSm-Co磁石の個数によって変更することができ、放電室内部にECR層とそれを横切る磁気ミラーを形成させ、効率よくプラズマを生成できるようにする。今回の実験では、マイクロ波周波数を2.45GHzで実験を行い、同軸ケーブルを通してマイクロ波をアンテナに伝送している。使用したアンテナは、過去の研究により星形が最も性能が良いことが分かっており、星形アンテナを用いた。材質はモリブデンで、直径9mmの円に内接し、厚さは1mmである。グリッドはカーボン製で、グリッド間はアルミナの円柱を用いて絶縁している。Table 1に実験で用いたグリッドのパラメータを示す。アースに対してスクリーングリッドとイオン源に1000V印加する場合、アクセラグリッドには-150Vを印加している。推進剤流量は、サーマルマスフローコントローラにて制御した。推進剤がキセノンの場合では、このマスフローコントローラの誤差は、5μg/sにおいて±0.5μg/sであった。今回の実験は、直径1m、長さ1.2mのステンレス製真空容器で行った。ロータリポンプ(排気速度27L/s)とターボ分子ポンプ(排気速度2230L/s)により排気した。

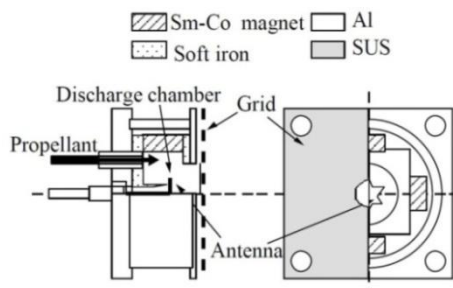


Fig.1 Cross-section of miniature ion thruster

Table 1 Grid parameters

	Screen	Acceleration
Open area ratio [%]	51	16
Hole diameter [mm]	1.20	0.70
Potential [V]	1000	-150
Thickness [mm]		0.30
Hole pitch [mm]		1.20
Material		Carbon
Grid gap [mm]		0.20
Number of holes		91

到達圧力は $2.5 \times 10^{-3}$  Paで、イオンエンジン作動時の圧力は $3.3 \times 10^{-3}$  Paであった。推進剤にはキセノンとアルゴンを用いている。

### 2.2 E×Bプローブ

E×Bプローブの概念図をFig.2、製作したE×Bプローブの写真をFig.3に示す。外観は277mm×97mm×82mmである。コリメータ部は50mm、偏向部90mm、自由飛行部90mmである。前後のコリメータ部の孔は直径0.4mm、オリフィスプレートの孔は直径1mmである。

E×Bプローブは、速度の異なるイオンに電場と磁場をかけることにより分離して計測できる装置である。コリメータ部は直径が0.4mmと小さな孔が50mm離れて設置されており、この2つの孔を通過する単一のベクトルを持ったイオンビームのみが偏向部に入射される。次に、イオンビームは電場と磁場がかかっている偏向部を通過する。磁場は一定に保ち、電場は電極

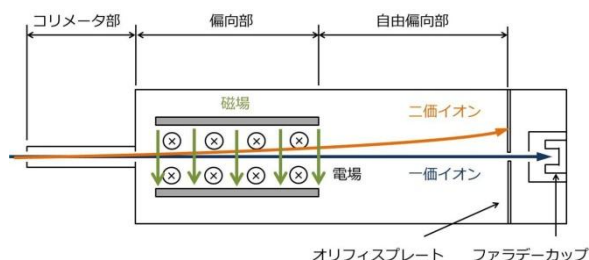


Fig.2 Conceptual diagram of E×B probe

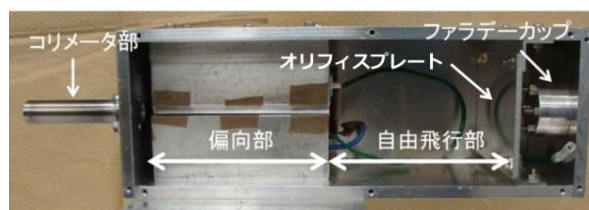


Fig.3 Photo of E×B probe

間に掛ける電圧を変えることで偏向部を通るイオンが受ける力を変化させる。磁場により受ける力と電場により受ける力が釣り合えばイオンは力を受けずに直進する。つまり、この2つの力が釣り合う条件は

$$E = v \times B \quad (1)$$

となる。一価イオンと二価イオンは、同じ電位差で加速されると、二価イオンは一価イオンに比べ2倍のエネルギーを有している。そのため、一価イオンと二価イオンでは速度が大きく異なり、偏向部で受ける力が異なる。Fig.2のように一価イオンが直進しているときは電場と磁場から受ける力が釣り合っている。しかし、二価イオンは一価に比べ速度が速いためローレンツ力すなわち右辺が大きくなり、力の釣合いが取れないため曲がってしまう。その結果、直進した一価イオンはオリフィスプレートの孔を通過し、曲がった二価イオンはオリフィスプレートに衝突する。そして、一価イオンのみがファラデーカップに入り、電流値を計測される。このように、速度差を用いることで一価イオンと二価イオンを分離して測定している<sup>(6),(7)</sup>。今回製作した装置で得られる分解能を数値計算により求めたところ電界強度では±77.8 V/mで、速度に換算すると±2000 m/sであった。

本実験では、出力値がpAオーダーと非常に小さい。そのため、出力値を増幅させる目的に加え、ノイズ対策として、I-V変換回路、増幅回路、ローパスフィルター、絶縁アンプを組み込んだ。ローパスフィルターの遮断周波数は16 Hzとし、電圧は偏向部の間にある電極に精密電源増幅器から電圧を印加し0.1 Hzの三角波を掃引した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 実験結果

Fig.4には実験結果の一例としてマイクロ波周波数2.45 GHz、マイクロ波投入電力を16 W、推進剤はキセノン、推進剤流量は20 µg/s、偏向部の磁場強度が40 mTにおける実験結果を示す。この結果より、非常にノイズが少ない信号が取得できた事が分かる。主要要因と

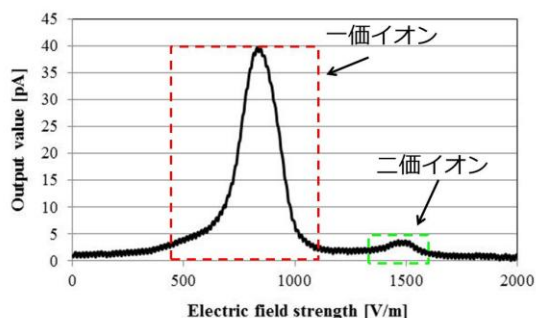


Fig.4 An example of output value

しては、ローパスフィルターによりノイズが抑えられた事と思われる。得られた結果より、二価イオン存在比を算出した。この実験条件では0.15±0.05であった。誤差は、ばらつきによる標準偏差とノイズで評価した。

#### 3.2 投入電力依存性

今回の実験条件は全てマイクロ波周波数2.45 GHzにて行った。実験条件は、マイクロ波投入電力を6 W～16 Wまで2 W間隔で変え、推進剤はキセノン、推進剤流量は20 µg/s、偏向部の磁場強度は40 mTで行った。

Fig.5に二価イオン存在比のマイクロ波投入電力依存性を示す。Fig.5に見られるように、投入電力が増加するとともに二価イオン存在比も増加することが分かった。これは、投入電力の増加により、二価イオンに電離することができるエネルギーを持った電子が増加していることを意味する。しかし、6 Wから10 Wまでと12 W以上では二価イオン存在比の増加率が違うことが分かる。すなわち、12 W以上で、2価電離が可能なエネルギーを持った電子が急激に増加していることを意味する。10 Wから放電室内部のプラズマ密度に比例する引き出しイオンビーム電流が一定になっていることを鑑みると、一価電離に要するエネルギーの総量は閾値以上ではマイクロ波投入電力を増加させても変わらず、投入されたエネルギーは電子の加速のみに使われたため、結果として12 W以上で2価電離の増加率が上昇したと考えられる。

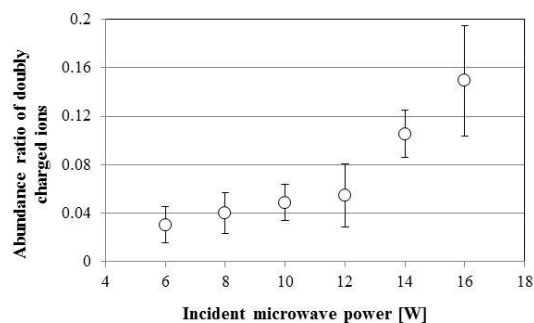


Fig.5 Dependence of incident microwave power on the abundance ratio of the doubly charged ions

#### 3.2.2 推進剤流量依存性

次に、マイクロ波投入電力を8 Wに固定し、推進剤流量を9.8 µg/s, 19.5 µg/s, 29.3 µg/s, 39.1 µg/sに変化させ、推進剤流量が二価イオン存在比に及ぼす影響を調査した。この時の実験結果をFig.6に示す。Fig.6に示されるように、推進剤流量が増加すると二価イオン存在比は減少することが分かった。これは推進剤流量の増加に伴い、放電室内部の圧力は上昇し、平均自由

行程が短くなる。今回用いたイオンエンジンでは、電子は磁力線に沿って動き、磁気ミラー間を何度も往復しているが、ECR 層を横切るときに効率よくエネルギーをマイクロ波から吸収しているため、衝突間に ECR 層を横切る回数の減少は電子の得られるエネルギーの減少を意味する。そのため、高エネルギーの電子が減少し、結果として二価イオン存在比が減少したと考えられる。

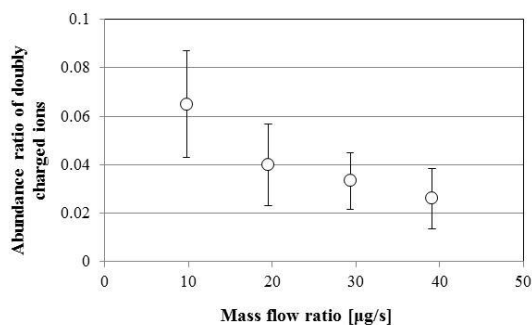


Fig.6 Dependence of mass flow rate on abundance ratio of the doubly charged ions

### 3.3 イオンの速度計測

今回は磁場形成にコイルを用いているため、磁場強度を自由に変更できる。そのため、様々な磁場強度でイオンのピークの位置を計測し、近似直線を引くことで速度を求めることができる。コイルに流す電流値は、実験前にガウスメータで磁場強度を計測し、校正を行っている。まず、推進剤にキセノンを用いた場合でのイオンの速度計測を行った。磁場強度は 80 mT~80 mT まで 20 mT 間隔で磁場強度を変更した。マイクロ波投入電力は 8 W、推進剤流量は 20 µg/s で実験を行った。80 mT から -80 mT までの実験結果を Fig.7 に示す。まず、ある一点のみで速度を測定した場合の速度を測定した。80 mT のみで速度を求めると 42000 m/s であった。イオンエンジンから排出されるイオン速度は理論的に求め、測定値との精度を確認するため以下に示す式から算出した速度と比較した。

$$v = \sqrt{\frac{2zq\Delta V_p}{m_i}}$$

z : イオンの価数      m<sub>i</sub> : イオンの質量  
 q : 電荷素量          ΔV<sub>p</sub> : スクリーニングリッド電圧

この式から求めた結果、一価のキセノンイオンの速度は 38000 m/s であった。これらから、測定値と計算値との誤差を求めたところ、誤差は約 9.3% であった。次に、Fig.7 に示す実験結果を一次関数として近似して速度を求めた。一価イオンの速度は、約 37000 m/s であり、計算値との誤差は 2.6% であった。これ

らを比較すると、近似直線から求めた速度に比べて 1 点のみで求めた速度は、7 割ほど誤差が小さくなっており、一次関数に近似して速度を求める手法の優位性が得られたと言える。しかし、近似直線から求めた速度は理論値と一致していない。この原因としては、偏向部の磁場が均一でないことやヒステリシスの影響で測定した磁場強度が異なるなどの要因が考えられる。

次に、推進剤にアルゴンを用いた場合にイオンの速度を計測した。磁場強度は 80 mT~10 mT では 10 mT 間隔で、-20 mT~80 mT では 20 mT 間隔で計測を行った。マイクロ波投入電力は 13.5 W、推進剤流量は 18 µg/s として実験を行った。その結果を Fig.8 に示す。キセノンの場合と同様に、80 mT のみで速度を求めると、56000 m/s であった。先ほどと同様に比較するため、計算式からアルゴンイオンの速度を算出した。すると、速度は約 70000 m/s であった。これより、誤差を求めると約 20% であった。次に、Fig.8 に示す実験結果を一次関数として近似して速度を求めると約 65000 m/s であった。同様にして、測定値と計算値の誤差を求めると 7% の誤差であった。したがって、近似直線から求めた速度に比べ、1 点のみで求めた速度は 7 割ほど誤差が小さくなっている。この結果より、一次関数に近似して速度を求める手法の優位性が得られ、さらに様々な速度で測定可能であることが確認できた。

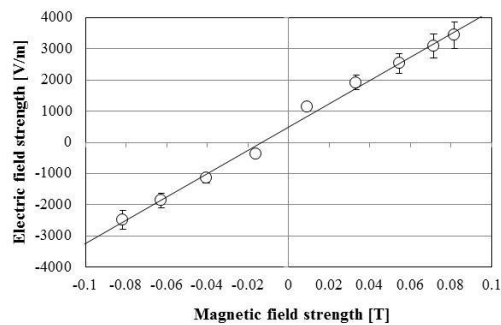


Fig.7 Dependence of magnetic field strength on electric field strength

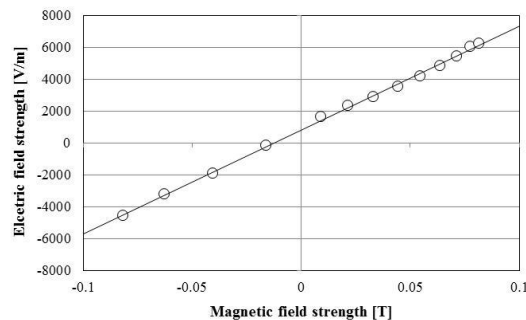


Fig.8 Dependence of magnetic field strength on electric field strength

#### 4.結 論

今回、磁場形成にコイルを用いた  $E \times B$  プローブを製作し、研究室で開発した小型イオンエンジンの二価イオン存在比を測定した。マイクロ波周波数は 2.45 GHz、マイクロ波投入電力は 8 W、推進剤がキセノン、推進剤流量は 20  $\mu\text{g/s}$  のとき、二価イオン存在比は 0.04 であり、想定のお四分の一であった。この値を用いて正確な推力を算出し直すと 0.57 mN であった。さらに、今回はイオンの速度計測も行った。一次関数に近似して求めた速度は、ある磁場強度 1 点のみで求めた速度よりも精度高く求めることができることが分かった。

偏向部の磁場を出来る限り均一にすることや磁気センサーを  $E \times B$  プローブ内に設置し、実際に磁場を計測しながら速度を測定できるように改良することなどによりさらなる精度向上が期待できる。これらにより計測精度が向上したならば、イオンエンジンのみならず、他の推進器でも精度良く速度の測定が可能となり、様々な推進器の性能向上に貢献できる。

#### 参 考 文 献

- 1) 茂原正道, 鳥山芳夫: “衛星設計入門”, 培風館, 2002
- 2) Mueller, J., “Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State-of-the Art and Emerging Technologies,” Micropropulsion for Small Spacecraft, edited by Micci, M. M., and Ketsdever, A. D., Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.187, AIAA, Reston, VA, 2000, pp. 45–137.
- 3) 栗木恭一, 荒川義博: “電気推進ロケット入門”, 東京大学出版会, 東京, 2003
- 4) 細田聡史, 國中均: “イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用”, プラズマ・核融合学会誌, Vol.86, 2010, pp282–292
- 5) 近岡貴行, “小型衛星用イオンスラスターの開発”, 九州大学修士論文, 2006
- 6) Casey C.Farnell, Daniel L.Brwn, Garret M.Willis, Richard D.Branam and John D.Williams “Remote Diagnostic Measurements of Hall Thruster Plumes” IEPC Paper 2009-031
- 7) 早川幸男, 北村正治: “キセノンイオンエンジンの地上設備における運転と評価法”, 航空宇宙技術研究所資料 TM-752, 平成 12 年 10 月号, 2000, pp. 1-21.