

# ECR プラズマを用いた電磁加速型マイクロスラスタ STEP-2012-059

○森 大輔 (京大・工・院), 鷹尾 祥典, 江利口 浩二, 斧 高一 (京大・工)

## 1. 緒言

宇宙開発において、人工衛星の省スペース化・省電力化は従来からの課題である。今後、50 kg 以下の質量を持った超小型衛星(ナノサテライト)が重要な役割を果たすことが期待される。ナノサテライトは、その小型軽量性により、製作・打上げコストの削減、および開発期間の短縮を可能とするが、その実現には姿勢・軌道制御システムの中核となる超小型推進機(マイクロスラスタ)の開発が不可欠である。以上の背景のもと、筆者らは、電子サイクロトロン共鳴(ECR)を用いてプラズマ生成を行う電磁加速型のマイクロECRスラスタの研究を行ってきた<sup>(1)</sup>。図1にその概念図を示す。本スラスタにおける加速原理は、発散磁場で加速した高エネルギー電子がもたらす両極性電場によるイオンの加速である<sup>(2)(3)</sup>。

低圧(~0.1 Pa)では電子の平均自由行程が数百 mm であり、代表長が数 mm に満たないマイクロプラズマ領域において放電開始および放電維持は困難になる。そのため、何らかの方法を用いて壁面損失を軽減する必要がある。ここで磁束密度を0.1 T、電子温度を5 eV と仮定すると、その磁場中での電子サイクロトン半径は約40 μm となり、電子は磁力線に拘束される。低圧マイクロプラズマの放電開始及び放電維持には電子を磁場によって閉じ込め、中性粒子に効率的に衝突させることが重要となる。

本研究では、Ar を推進剤とした ECR 放電型の電磁加速型マイクロスラスタについて、磁場解析・放電開始実験・プローブ測定を行い、これらの結果から推進性能を見積もった。さらに、通常の ECR 磁場の半分の磁場によって共鳴を行うセカンドハーモニック ECR 放電を用いたスラスタも試作し、ECR 放電との放電特性の比較を行った。

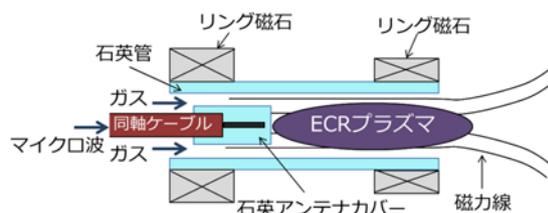


図1 マイクロ ECR プラズマスラスタの概念図

## 2. 実験装置

図2に実験装置全体の概略図を示す。実験装置はマイクロ波供給機構、推進剤供給機構、スラスタヘッド、測定系から構成され、後述するECR型とセカンドハーモニックECR型の差異はスラスタヘッドのみである。プラズマ源は真空チャンバ内に設置され、推進剤のArガスは質量流量計で制御されて供給される。ロータリーポンプおよびターボ分子ポンプにより排気し、背圧は $3.0 \times 10^{-4}$  Pa である。信号発生器(Agilent, E8257C) から発振された4 GHzのマイクロ波は、アンプにより増幅されて(<10W)スラスタへ導入される。ここで、マイクロ波の反射をほぼゼロとするためスリースタブチューナーを用いる。

プローブ測定に関する測定系は、タングステン製プローブと半導体パラメータアナライザ(HEWLETT PACKARD, 4145B)から構成される。プローブ先端は直径0.3 mm、長さ10 mmの円筒形状であり、プローブはスラスタ中心軸上に沿って軸方向に動かすことができる。

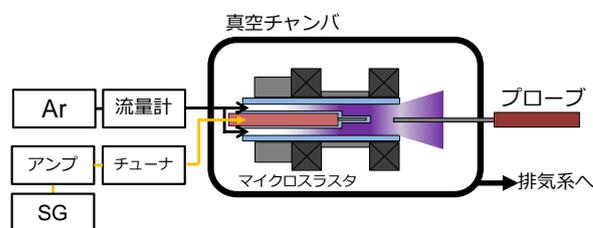


図2 実験装置全体図

## 3. ECR型スラスタ

### 3.1. 概要

図3に ECR 型のセットアップの断面図及び寸法を示す。マイクロ波を供給する同軸ケーブル(RG-405/U)は、外部導体と内部絶縁体を先端から10 mm 取り除いて内部導体をロッドアンテナ状とし、プラズマによる侵食を防ぐために石英カバーで覆っている。このケーブルを内径4.15 mmの石英管に挿入する。使用した磁石はNdFeBリング磁石2個であり、内径7.0 mm、外径20.0 mm、高さ10.0 mm、残留磁束密度は約1.25 Tである。また、次節の磁場解析の結果を踏まえ、磁石間距離は20.0 mmとした。

### 3.2. 磁場解析

図4にリング磁石中心軸上( $r=0$ )における磁束密度の軸方向成分 $B_z$ (文献4のEq.(6)より解析的に算出), 図5に辺要素2次元軸対称静磁場解析(有限要素法解析ソフトウェアANSYSを利用)で得られた, $r_z$ 平面における磁束密度の大きさ $|B|$ の分布を示す. 以上の解析からマイクロ波周波数4GHzにおけるECR磁場 $B_{ECR}(=0.143\text{ T})$ の近傍でほぼ均一な磁場形状が得られることを確認した.

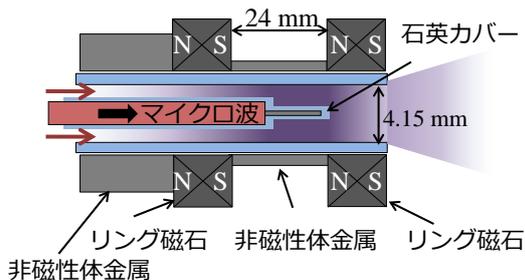


図3 スラスタ構造図(ECR型)

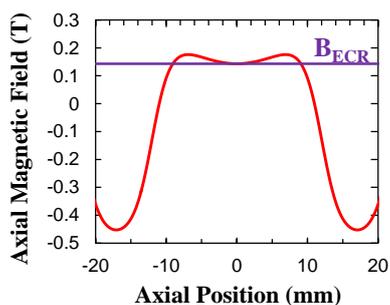


図4 中心軸上の軸方向磁場(ECR型)  
(磁石間の中点を座標0とした)

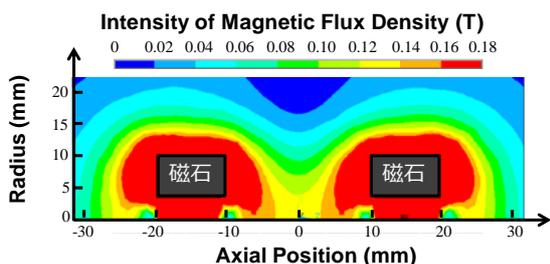


図5 磁束密度分布(ECR型)

### 3.3. 放電開始実験

図6にECR型スラスタにおけるプラズマ放電開始電力の流量依存性を示す. 放電開始にあたりイグナイタは使用していない. また放電が開始されると以後は安定して放電が維持されることが確認された. Ar流量は0.01–0.5 sccmの範囲で変化させ, 各点につき5回ずつ測定した. 図6に示すように, 流量が0.07

sccmよりも大きい場合は, 流量にほぼ依存せず, 約0.4 Wで安定してプラズマ放電が開始された. 低流量では放電開始電力にばらつきが生じ, さらに流量を下げると電力を最大の10 Wにしても放電開始させることが出来なかった. このことは流量低下により, チャンバ内の圧力が低下して電子・中性粒子間の衝突頻度が減少したためであると考えられる.

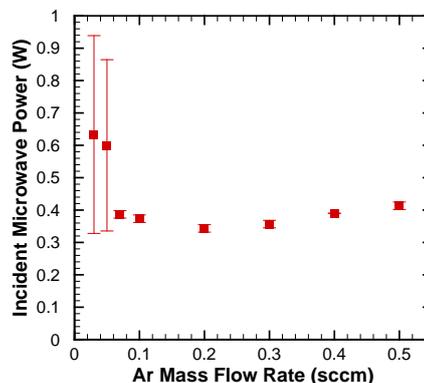


図6 放電開始に必要な電力の  
流量依存性(ECR型)

### 3.4. プローブ測定

図2に示すように, プローブはスラスタ軸方向に挿入されているため, 大部分のプローブ表面に対して磁力線が平行となる. 電子は外部磁場の影響により磁力線を横切って移動しにくいので, 電子電流の測定による解析が困難である. イオン温度は室温程度であると仮定するとラーマ半径は100 mm以上とプラズマ源に対して十分大きい. イオンは磁化されていないとみなせる. したがって磁化されていないイオンの飽和電流からプラズマ密度 $n$ を以下の式より求める<sup>(5)</sup>.

$$n = \frac{I_0}{0.605q_e S} \sqrt{\frac{m_i}{kT_e}} \quad (1)$$

ここで,  $I_0$ はイオン飽和電流,  $q_e$ は電気素量,  $S$ はプローブ表面積,  $k$ はボルツマン定数,  $T_e$ は電子温度(5–10 eVと仮定)である. マイクロ波電力を1, 5, 10 Wで動作させている時のスラスタ出口から上流側に10 mmの位置と下流側に10 mmの位置の2箇所についてプローブ測定を行った. 図7はプローブ測定によって得られた電子密度を質量流量の関数としてプロットした図である. 図7より, 同電力, 同流量で上流から下流に向かって電子密度はおおよそ1桁下がっていることが分かる. よって上流と下流で電子温度が一定であると仮定すると両極性電位差 $\Delta\phi$ は以下の式で表せる.

$$\Delta\Phi = T_e \ln \frac{n_u}{n_d} \quad (2)$$

ここで、 $n_u$ と $n_d$ はそれぞれ上流側と下流側の電子密度を表す。電子温度が5–10 eVの仮定のもと両極性電位差は12–23 Vである。

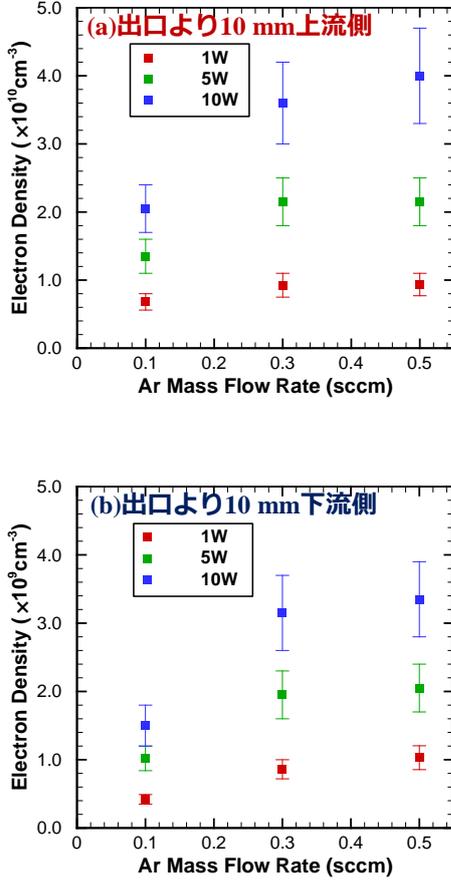


図7 電子密度の流量依存性(ECR)  
(a)上流側 (b)下流側

### 3.5. 推力見積もり

推力の見積もりに用いた式は、以下の2式であり、それぞれ電子圧力の寄与 $T_s$ と発散磁場によるローレンツ力の寄与 $T_B$ について準一次元近似を用いて記述したものである<sup>(6)</sup>。

$$\begin{aligned} T_s &= \langle p(r, z_0) \rangle_r A_0 \\ &= q \langle n_0(r, z_0) T_e(r, z_0) \rangle_r A_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_B = \int_{z_e}^{z_d} \langle p(r, z) \rangle_r B_z(z_e) A(z_e) \frac{-1}{B_z^2} \left( \frac{dB_z}{dz} \right) dz \quad (4)$$

ここで、 $p$ は電子圧力、添え字0は電子圧力 $p = nkT_e$ が最大値をとる座標 $z_0$ での物理量、 $\langle \cdot \rangle_r$ は径方向についての平均値をとる記号、 $B_z$ は磁束密度の軸方向成分、 $A = \pi r_p^2$  ( $r_p$ はプラズマ発散半径)、 $z_d$ はイオンが磁気

ノズルから離れる位置座標(今回は真空室径を考慮し、スラスタ出口から20 cmとした)、 $z_e$ はプラズマチャンバ出口の位置を表している。

スラスタ出口から上流側に10 mmの位置にて電子圧力が最大となるとし、 $\langle p(r, z_0) \rangle_r \sim 0.5p(0, z_0)$ と近似した。また、磁力線に沿ってプラズマ断面積が変化する無衝突プラズマを仮定した場合、プラズマ密度に関する近似式を用いて計算を簡略化した<sup>(7)</sup>。

$$B/B_0 \approx n/n_0 \quad (5)$$

以上の式から、電力を10 W、流量を0.5 sccmとして、電子温度 $T_e$ が全プラズマ領域で一様に5 eVであると仮定した場合、推力について電子圧力の寄与が2.1  $\mu\text{N}$ 、発散磁場によるローレンツ力による寄与が11.1  $\mu\text{N}$ と計算され、合計13.2  $\mu\text{N}$ と見積もられた。このとき、比推力は89 sとなる。

## 4. セカンドハーモニック ECR型スラスタ

### 4.1. 概要

図8にセカンドハーモニック ECR型スラスタの断面図および寸法を示す。石英管チャンバ・マイクロ波導入アンテナ・2つのリング磁石から成る基本的な構造は ECR型と同様である。チャンバおよびアンテナの形状は、ECR型に準じるが、プラズマ点火の容易さの観点から、アンテナカバーは装着されていない。使用した磁石はNdFeBリング磁石2個であり、内径7.0 mm、外径10.0 mm、高さ6.0 mm、残留磁束密度は約1.25 Tである。また、次節の磁場解析の結果を踏まえ、磁石間距離は12.4 mmとした。

### 4.2. 磁場解析

図9にリング磁石中心軸上における磁束密度の軸方向成分 $B_z$ を、図10にANSYSにより得られた、 $r_z$ 平面における磁束密度の大きさ $|B|$ の分布を示す。以上の解析からマイクロ波周波数4 GHzにおけるECRに要する磁場 $B_{ECR}$ の半分の磁場強度(= 0.071 T)近傍でほぼ均一な磁場形状が得られることを確認した。

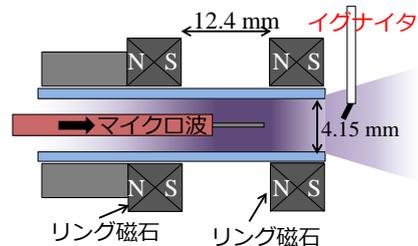


図8 スラスタ構造図  
(セカンドハーモニック ECR型)

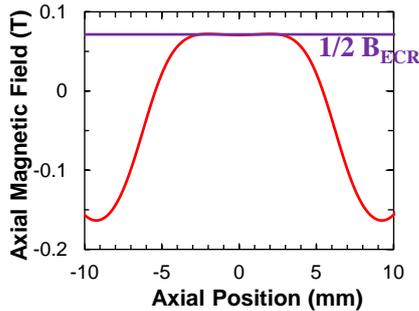


図9 中心軸上の軸方向磁場  
(セカンドハーモニック ECR 型)  
(磁石間の中点を座標 0 とした)

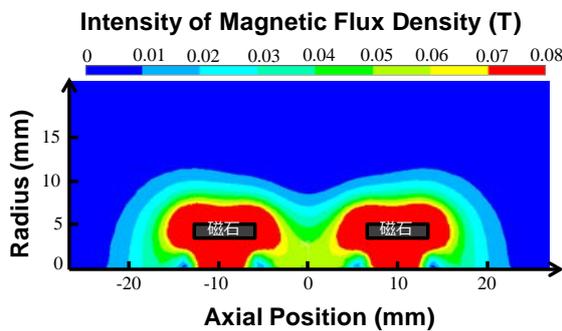


図10 磁束密度分布  
(セカンドハーモニック ECR 型)

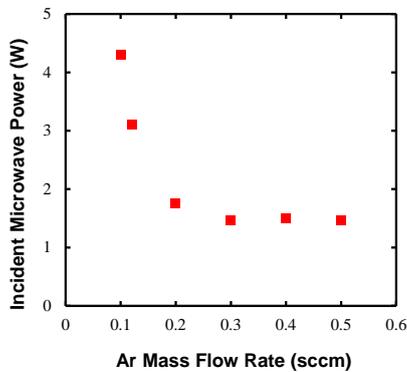


図11 放電開始に必要な電力の流量依存性  
(セカンドハーモニック ECR 型)

#### 4.3. 放電開始実験

図11にセカンドハーモニック ECR 型スラスタにおけるプラズマ放電開始電力の流量依存性を示す。この型においては、イグナイタによる放電開始の補助が必要であった。ただし、放電が開始されると以後は安定して放電が維持されることが確認された。これは、セカンドハーモニック ECR 条件においては、電子に加えらるエネルギーが ECR 条件に比べて小さいために、放電維持に必要なエネルギーを持った

電子は得られるものの、放電開始に必要なエネルギーを持った電子が得られないことを表している。イグナイタを援用し、Ar 流量を 0.01–0.5 sccm の範囲で変化させて放電を開始した最小の電力を各点ごとにプロットした。図11に示すように、流量が 0.2 sccm よりも大きい場合は、流量にほぼ依存せず、約 1.5 W で安定してプラズマ放電が開始された。低流量では放電開始に必要な電力が上昇し、0.1 sccm 未満では最大電力の 10 W を入力しても放電を開始させることができなかった。

#### 5. 結言

本研究では、まず、ECR プラズマ源を用いた電磁加速型のマイクロスラスタについて、静磁場解析、放電開始実験、およびプローブ測定を行った。そして、準一次元モデルから推進性能を試算した結果、電力 10 W、流量 0.5 sccm の条件において、推力は 13.2  $\mu\text{N}$ 、比推力は 89 s と見積もられた。

次に、セカンドハーモニック ECR プラズマ源を用いたスラスタを提案し、静磁場解析の結果から磁石配置を決定し試作した。放電開始実験を行ったところ、セカンドハーモニック ECR 型においては、放電開始にイグナイタが必要となり、放電維持に必要な電力も ECR 型より大きくなることがわかった。

今後、セカンドハーモニック ECR 型について、イグナイタを用いずに放電開始が可能な条件を調査し、電子密度測定を行って、ECR 型との定量的なプラズマ特性の違いを調査する。

#### 参考文献

- (1) 川那辺哲雄 ほか, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム講演集, (2012), STEP-2011-024.
- (2) T. Kaneko et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, (2000), 1747.
- (3) K. Takahashi et al., *Phys. Plasmas* **15**, (2008), 084501.
- (4) Q.L. Peng et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, **268**, (2004), 165.
- (5) M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley, New York, 1994).
- (6) C. Charles et al. *Appl. Phys. Lett.* **100**, (2012), 11350.
- (7) 伊藤裕紀 ほか, 「高密度ヘリコンプラズマ中発散磁場領域における静電イオン加速現象」, 平成 22 年度スペースプラズマ研究会論文集, (2011)