

永久磁石を用いた完全無電極電気推進法における 高密度ヘリコンプラズマ生成・加速

○大塚修平, 中川叔紀, 石井大樹, 勅使河原直人, 藤埴弘昌,
早稲田真平, 石井隆路, 桑原大介, 篠原俊二郎 (東京農工大学)

Key Words: Helicon Plasma, Electrodeless Electric Propulsion, Permanent Magnet, Magnetic Nozzle

1. 緒 言

電気推進法は、化学推進法に比べて比推力（単位重量の推進剤で単位推力を発生し続けられる秒数）が大きく、木星や土星探査のような長期宇宙ミッションに使用する有効な推進法として期待されている。従来の電気推進システムの多くにはプラズマ生成・加速のための電極が存在するが、この電極がプラズマと直接接触することにより摩耗し、推進機の寿命を著しく低下させる要因となっている。我々はこの問題を解決するため、放電管外のプラズマ生成・加速アンテナを利用した完全無電極な電気推進法：Helicon Electrodeless Advanced Thruster: HEAT^[1,2]を提案している。このシステムのうち、本研究室では、回転磁場^[3] (Rotating Magnetic Field: RMF) 加速と $m=0$ 半周期加速^[4]の2つの電磁加速法を扱う。これらの方法では高密度（ $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ）ヘリコンプラズマ^[5-7]内に周方向電流 j_θ が誘起され、外部より印加される発散磁場の径方向成分 B_r によってローレンツ力 F_z が発生する。この軸方向力によりプラズマが推進機後方へ加速され、その反力で推力を得る仕組みである。

我々の以前の研究では、外部磁場 B として、磁場配位を容易に変更することができる電磁石を用いていた。しかし、電磁石により形成した発散磁場では、上記システムによりプラズマを加速させるのに必要な径方向磁場 B_r が十分に得られていない（数 10 G 程度）という問題があった。そこで、我々はこの B_r 増強のために永久磁石^[8]を導入した。永久磁石には以下の3つの利点がある。

- (1) 電磁石よりサイズが小さく、強磁場を発生させることができる（今回実験に使用した永久磁石の表面磁束密度は $\sim 1.5 \text{ kG}$ ）。
- (2) 局所的な領域に強磁場を形成することができる（電磁石とは異なり、磁石から離れた位置で急激に磁場が弱くなる）。
- (3) 電力を一切消費せず、電力の限られた宇宙空間で磁場を生成する有効な手段である。

我々は今回、無電極加速法におけるプラズマ生成・加速に適した発散磁場を、永久磁石を用いて設計した。この論文では、設計した永久磁石磁場によるターゲットプラズマ (RMF, $m=0$ 加速を行わない状態) の電子密度 n_e とイオン速度 v_i の測定結果を報告する。さらに次の段階として、永久磁石と電磁石を併用した磁場によるプラズマ生成の初期実験についても併せて報告する。

2. プラズマの加速原理

前述の通り、我々の提案するプラズマ加速法では、プラズマ生成・加速のための電極とプラズマが直接接触しない。この加速原理は以下のようにになっている (Fig. 1)。まず、Fig. 1 左の高周波 (RF) アンテナにより放電管 (石英管) 内にプラズマを生成する。次に Fig. 1 中央の加速アンテナ (RMF, $m=0$ コイル) を用いてプラズマ中に j_θ を誘起する。これら生成・加速アンテナは放電管外に設置してあるため、プラズマによる損耗はない。ここに外部磁場源より B_r を印加すると、 $j_\theta \times B_r$ によるローレンツ力が発生し、プラズマが加速される。

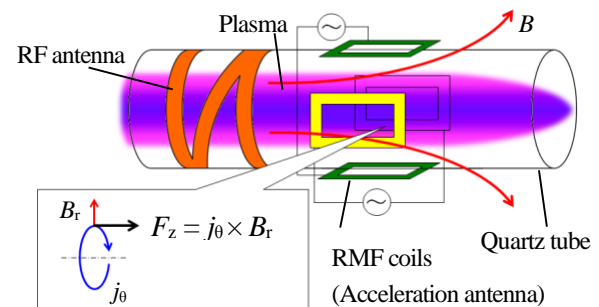


Fig. 1 Principle of electrodeless plasma acceleration method (RMF case).

3. 実験装置

3.1 Large Mirror Device^[9]

我々が使用しているプラズマ生成装置 Large Mirror Device: LMD を Fig. 2 に示す。全長 1,700 mm, 内径 445 mm の真空容器に、テーパ形状を有した石英管 (全長 1,000 mm, 内径 100 ~ 170 mm) が取り付けられており、管内で生成したプラズマを加速し、真空容器に排気する形になっている。テーパ形状は発散するプラズマの壁面損失を低減するためのものである。LMD の背景圧力は $\sim 10^{-4} \text{ Pa}$ 程度であり、推進剤は Ar である。7 MHz の高周波 (Radio Frequency: RF) 電力を $\sim 3 \text{ kW}$ 投入し、放電させる。外部磁場としては永久磁石と電磁石を使用する。

3.2 永久磁石

今回設計・製作したマグネットホルダーは、石英管周りに永久磁石を保持するための構造物である。このホル

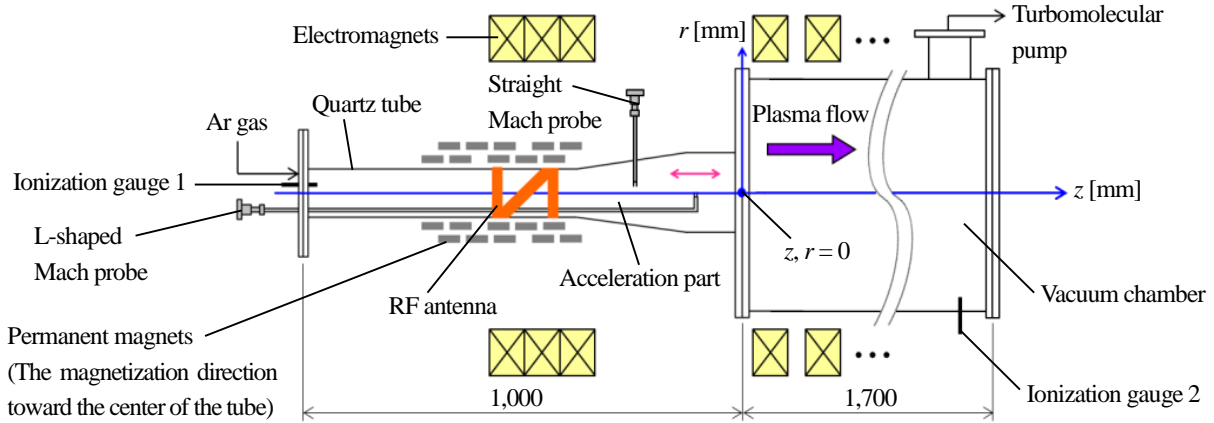


Fig. 2 Schematic diagram of LMD.

ダーの利点は、永久磁石の挿入枚数により磁場強度が変更できる点にある。ホルダーには100箇所の磁石固定部があり、 $50 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズの永久磁石を1箇所に最大3枚、合計300枚挿入することができる。最大枚数を挿入した場合の永久磁石の磁場配位をFig. 3に示す。これより、永久磁石が局所的に強い発散磁場を形成していることがわかる。尚、使用した永久磁石はNeoMag社製グレードN35、表面磁束密度 $\sim 1,590 \text{ G}$ 、最大エネルギー積 $33 \sim 36 \text{ MGOe}$ のネオジウム磁石である。

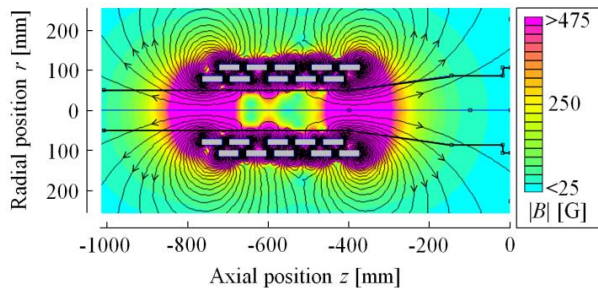


Fig. 3 Magnetic field of strength and its field lines of permanent magnets (in case of 3 sheets each).

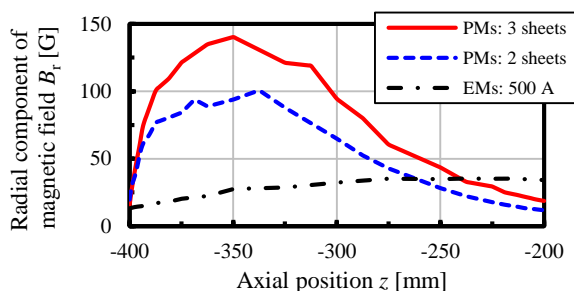


Fig. 4 Axial profiles of magnetic field B_r of permanent magnets and electromagnets on a line of $r = 50 \text{ mm}$ in the area of plasma acceleration.

次に、プラズマ加速領域、 $r = 50 \text{ mm}$ における永久磁石と電磁石の B_r 軸方向分布の比較をFig. 4に示す。電磁石はFigure 2に示した左3つを使用して発散磁場を生成

した場合の値である(印加電流 500 A)。最大値を比較すると、永久磁石の B_r は電磁石の約4倍である。ここで、Fig. 3及びFig. 4は有限要素法による解析値であるが、Lake Shore 410 Gaussメータ(最小分解能: 0.1 G)で測定した実際の値とは $\sim 1\%$ の誤差である。

4. 実験結果

永久磁石磁場の有用性を調べるため、以下の2種類の実験を行った。

- (1) (i) 外部磁場を与えない場合、(ii) 電磁石磁場 (Fig. 2の左より3つの電磁石を使用し、印加電流は 500 A)のみを与えた場合、(iii) 永久磁石磁場(各ホルダーに2枚)のみを与えた場合における電子密度 n_e 、イオン速度 v_i の軸方向分布。
- (2) 永久磁石の挿入枚数を変化(各ホルダーに2, 3枚)させた場合の n_e 、 v_i の軸方向分布。

実験条件の詳細はTable 1を示す。ガス圧力の測定位置はFig. 2に示した2箇所である。軸方向分布の測定には先端が直角に曲がっているL字型マッハプローブを用いた。尚、このプローブによる測定では非磁化モデル(モデル定数 $\kappa = 1.26$)^[10, 11]を仮定している。

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Experiment (1)	Experiment (2)
Gas flow rate	25 sccm	50 sccm
Gas pressure	Gauge 1	0.094 Pa
	Gauge 2	0.62 Pa
External B	• w/o B	PMs
	• EMs [※] (500 A)	• 2 sheets each
	• PMs [※] (2 sheets)	• 3 sheets each
RF power	2 kW	
Measurement position	r	0 mm
	z	-700 ~ -100 mm

※EMs: Electromagnets, PMs: Permanent Magnets

4.1 実験 (1)

実験 (1) の結果を Fig. 5 に示す. まず Fig. 5 (a) より, 永久磁石のみを用いた場合の n_e は, 電磁石のみを用いた場合と磁場を与えない場合に比べ, 全体として大きな値を示しており, その最大値は約 1.8 倍である. また Fig. 5 (b) より, 永久磁石を用いた場合の v_i もまた, 電磁石のみを用いた場合と磁場を与えない場合より大きな値を取っている. その最大値を比較すると, 電磁石のみを用いた場合の約 2.2 倍, 磁場を与えない場合の約 3.4 倍となっている. このことから, 永久磁石磁場が n_e , v_i を増加させ, 結果プラズマ推力の上昇に貢献していると考えられる.

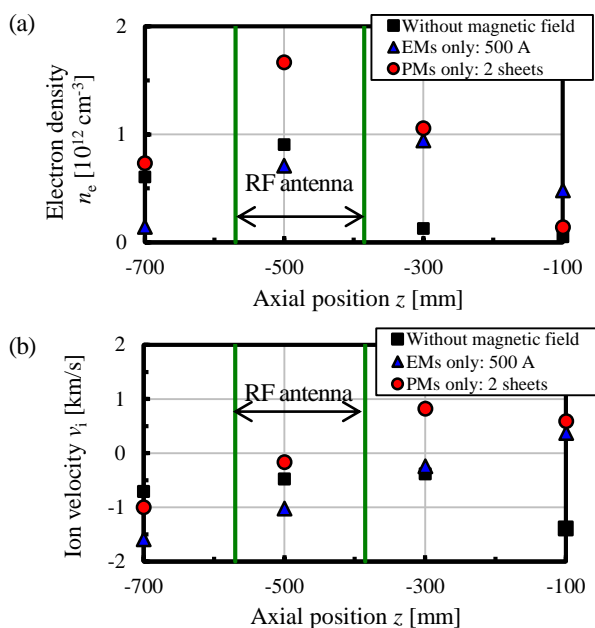


Fig. 5 Axial distribution of (a) n_e and (b) v_i , changing the magnetic field configuration: no magnetic field, electromagnets and permanent magnets.

4.2 実験 (2)

実験 (2) の結果を Fig. 6 に示す. 永久磁石を 2 枚から 3 枚に変更すると, その磁場強度は Fig. 4 に示したように約 1.5 倍になる. Figure 6 (a) から, n_e は $z = -500$ mm 位置を除いてほとんど変化しない. このことから, 磁場強度は n_e に大きく影響しないことがわかる.

さらに Fig. 6 (b) より, $z = -400 \sim -100$ mm において永久磁石枚数を 2 枚から 3 枚へ増やす (磁場強度を大きくする) と, v_i も増加し, その最大値は, $z = -200$ mm 位置で 2.2 km/s となった. 可視分光法とレーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence: LIF method^{[12])} による測定では, 前者で 2.9 km/s, 後者で 2.8 km/s という結果が得られた. このことからマッハプローブによる測定はイオン速度を若干小さく評価しているものの, 良い一致を示したと言える. ここで, 使用した分光器はリッソ-応用光学社製ツェルニーター型 MC-150 (波長域: 190 ~ 600 nm, 回折格子: 2,400 lines/mm, 分解能: 0.006 nm) であり, LIF 法に用いた波長可変ダイオードレーザーは Topica 社製 TA100 (発

振周波数: 663.5 ~ 669.3 nm, 波長幅: 1 MHz, 最大レーザ一出力 500 mW) である.

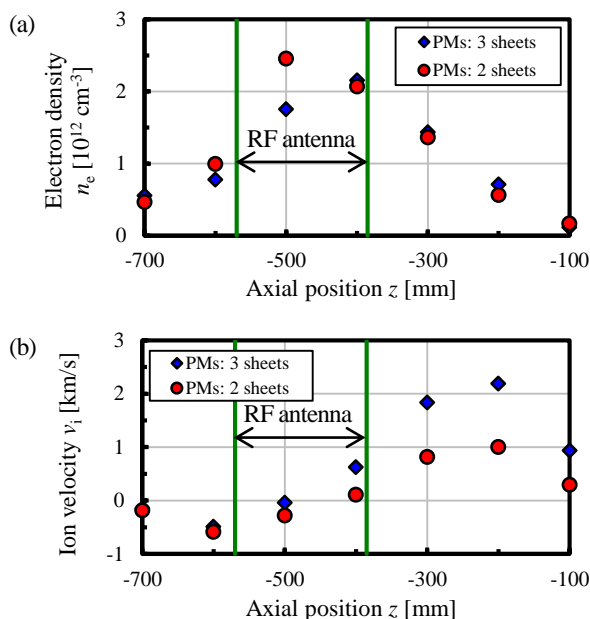


Fig. 6 Axial distribution of (a) n_e and (b) v_i , changing the number of permanent magnet sheets (2 or 3 sheets in each position of magnet holder).

イオン速度 v_i を変化させる要因として, プラズマの圧力勾配に加えて磁場勾配が考えられる. 圧力勾配が無視できる場合, 以下に示す磁場勾配による軸方向力 \mathbf{F} がプラズマに作用する.

$$\mathbf{F} = -\mu \nabla B. \quad (1)$$

ここで μ は磁気モーメントである. Figure 4 より, 永久磁石には $z > -400$ mm の位置に負の磁場勾配が存在し, このため, $z = -400 \sim -200$ mm で v_i が単調に増加したと考えられる. しかし, $z = -200 \sim -100$ mm では v_i の減少が見られる. この原因として, 負の磁場勾配が小さくなったこと, さらに発散磁場によって磁力線が石英管内壁に触れることでプラズマ損失があり, プラズマ-中性粒子間での衝突が増えたことが考えられる.

5. 永久磁石と電磁石の併用

前節で述べたプラズマの壁面損失を低減するため, 設計・製作した永久磁石と電磁石を組み合わせた磁場によるプラズマ生成を現在研究中である. 電磁石は加速に必要な径方向磁場 B_r を作るのには適していないが, 電磁石の軸方向位置と印加電流を変更することで, 磁場形状と強度を変更することができる. 初期段階として今回設計した永久磁石と電磁石の併用磁場配位を Fig. 7 に示す. 電磁石により一様磁場を作ることで, 永久磁石の強力な B_r はそのままに, 発散した磁力線が石英管壁面に触れないようになっており, プラズマの壁面損失を低減できる可能性がある.

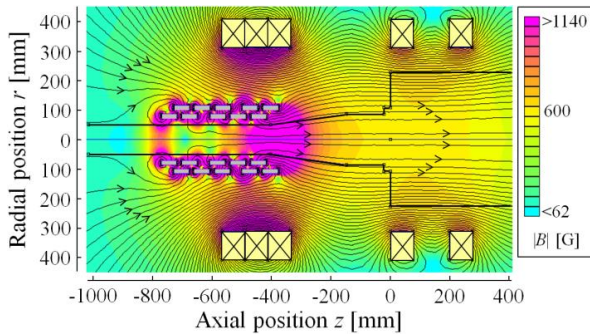


Fig. 7 The magnetic field in combination with permanent magnets and electromagnets to reduce the wall losses of the plasma.

この併用磁場と、永久磁石磁場の場合の n_e と v_i の径方向分布の比較結果を Fig. 8 に示す。尚、ガス流量 50 sccm, RF 投入パワー 3 kW, 測定位置 $z = -275$ mm (壁面に磁力線が触れている一部分), $r = 0 \sim 60$ mm である。

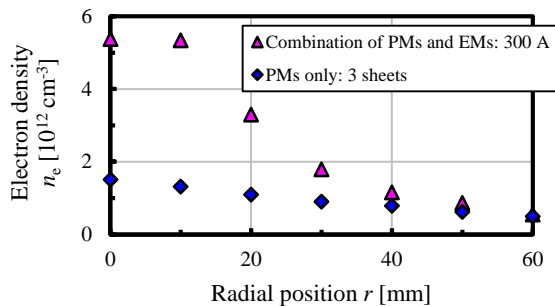


Fig. 8 Radial distributions of n_e using both permanent magnets and electromagnets, or using permanent magnets only.

永久磁石磁場に電磁石による一様磁場を加えることで、石英管中心の n_e が大幅に増加している。その最大値は $5.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ と、永久磁石のみを使用した場合の約 3.6 倍である。このことから併用磁場によって壁損失を低減できた可能性があるが、この効果の検証のためには、今後様々なパラメータの下での径方向 n_e 、 v_i 分布が必要である。

6. 結 論

我々の提案する完全無電極電気推進法を実現するために、永久磁石を用いてプラズマ生成・加速に適した磁場を設計した。この永久磁石磁場の下、推力を扱う上で重要なパラメータである電子密度 n_e とイオン速度 v_i の軸方向分布を測定し、結果電磁石のみを使用した場合の数倍の値を得ることができ、その最大値は $n_e = 2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $v_i = 2.2 \text{ km/s}$ であった。今後定量的な議論を行うために、可視分光法や LIF 法といった他計測法を用いて様々なプラズマパラメータを測定し、比較研究を行う必要がある。

さらに、永久磁石のみを使用した場合に見られる壁面損失低減のため、永久磁石と電磁石を組み合わせた磁場によるプラズマ生成の初期実験を行った。測定した n_e の最大値は $5.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ であり、永久磁石のみを使用した場合

の約 3.6 倍であった。

プラズマの壁面損失を低減し、電磁加速に適したターゲットプラズマを得るためには、永久磁石と電磁石の併用磁場の最適化は不可欠であり、様々な実験条件下における測定結果をもとに磁場設計を行う必要がある。これらより最適化されたターゲットプラズマを使用し、RMF, $m = 0$ コイルによる電磁加速に適用する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた HEAT プロジェクト関係者の皆様に深く感謝致します。尚、本研究は科学費補助金基盤研究 (S) 21226019 の援助によりなされました。

参考文献

- [1] S. Shinohara *et al.*, Proc.32nd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC-2011-056 (2011).
- [2] S. Shinohara *et al.*, *Trans. Fusion Sci. Technol.* **63**, 164 (2013).
- [3] I. R. Jones, *Phys. Plasmas* **6**, 1950 (1999).
- [4] T. Ishii, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.* (2014) in press.
- [5] R.W. Boswell, *Phys. Lett.* **33A**, 457 (1970).
- [6] S. Shinohara, *Jpn J. Appl. Phys.* **36**, 4695 (1997).
- [7] R. W. Boswell and F. F. Chen, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25**, 1229 (1997).
- [8] K. Takahashi *et al.*, *Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 01524 (2011).
- [9] S. Shinohara, S. Takechi and Y. Kawai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 4503 (1996).
- [10] M. Hudis and L. M. Lidsky, *J. Appl. Phys.* **41**, 5011 (1970).
- [11] K. S. Chung and I. H. Hutchinson *et al.*, *Phys. Fluids B1*, 2229 (1989).
- [12] R. F. Boivin and E. E. Scime, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 4352 (2003).