

回転磁場による電気推進器の効率の改善

Improved propulsion performance of Rotating Magnetic Field thruster

○山崎翠¹, 藤田侑希¹, 高津幹夫², 板垣宏知³, 井通暁³, 平野洋一², 浅井朋彦²

*Midori Yamazaki¹, Yuki Fujita¹, Mikio Takatsu²

Hiroto Itagaki³, Michiaki Inomoto³, Hirano Yoichi⁴, Tomohiko Asai⁴

Plasma formation and acceleration methods by using a rotating magnetic field (RMF) technique have been demonstrated experimentally. A magnetized plasma torus generated by RMF technique has been proposed as highly efficient orbit maneuvering thruster of a space satellite. Generally, electrical propulsion has higher impulse compared with chemical propulsion. However, most of electrical propulsion systems have a problem that a decrease in propulsion efficiency due to electrode consumption. In a proposed RMF thruster accelerate plasma flow by Lorentz force on driven RMF current and bias field without electrode. Initial experimentation has demonstrated successful generation of thrust force of 62 micronewton for 0.8 kilowatts of input power. Optimization of the system has been conducted for improved propulsion performance of RMF thruster.

1. 序論

人工衛星や宇宙機には、宇宙空間における姿勢変更や軌道変更を行うための推進器（スラスタ）が搭載されている。これまでにさまざまな方式のスラスタが開発され、実際に宇宙機の推進等に用いられてきた。その中でも電気推進機は電氣的な加速機構を介して推進剤にエネルギーを与え反力を得ようとする外燃機関の一種であり、化学推進など他の方式のスラスタにくらべて推進材の排気速度が早く比推力が大きいという特徴を持つ。

電磁加速型スラスタであるホールスラスタや MPD (Magneto Plasma Dynamic) スラスタは比較的高い比推力を持つ一方で、電極放電による電極損傷によって推進効率の低下が生じるなどの問題点がある。そこで回転磁場 (Rotating Magnetized Field : RMF) を用いた電磁加速型電気推進器が提案された。回転磁場による電流駆動は従来、核融合分野において磁場反転配位 (Field-Reversed configuration : FRC) プラズマのトロイダル電流駆動法として研究が進められてきた。^[2]

本研究グループにおいてこれまでに開発した RMF システムにおいて得られた電流値から推進力を見積もったところ、0.8kW の消費電力で推力は $62 \mu\text{N}$ となった。このため、推進に特化した装置改造を行い、電源系を強化することで、電力の推進力への変換効率の向上を測った。

本研究では、放電用アンテナを用いた無電極放電によってプラズマを生成し、RMF によってプラズマ中に誘導される電流と磁場によるローレンツ力を推進力とするスラスタの推進効率を評価することを目標とする。

2. 回転磁場による推進力の評価

回転磁場はコンパクトトーラス (CT) を研究する上で、プラズマ内に電流を駆動する手法として広く使われている。円柱形のプラズマを考え対称軸を z 軸とし、このプラズマに z 軸に垂直な方向の磁場で θ 方向に周波数 ω で回転する磁場

$$B_{RMF} = B_{\omega} \cos \omega t \mathbf{e}_x + B_{\omega} \sin \omega t \mathbf{e}_y \quad (1)$$

を印加する。このときの回転磁場の周波数をイオンのサイクロトロン周波数 ω_{ci} と電子のサイクロトロン周波数 ω_{ce} に対して

$$\omega_{ci} < \omega_{RMF} \ll \omega_{ce} \quad (2)$$

の条件をみたすようにすると、イオンは回転磁場の影響を受けず、電子のみが回転磁場に随伴するため電流を駆動することができる (Fig. 1)。

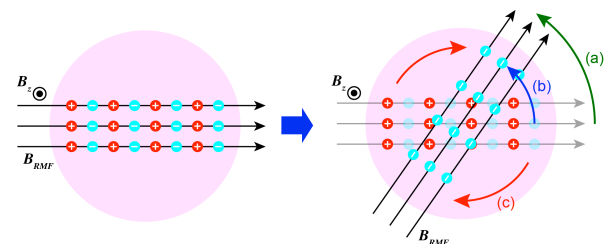


Figure 1. Mechanism of current drive by RMF
Arrows indicate directions of (a) the rotating field, (b) the electron motion and (c) the driven current

回転磁場によって誘起された方位角方向の電流内の電子は径方向磁場を横切って運動するためローレンツ力により z 軸方向に加速され、回転磁場によって駆動されなかったイオンはローレンツ力を受けないためプラズマ内で分極される。この分極によって z 軸方向に電場が生成され電子・イオン分極を打ち消す向きに加速力を受ける。イオンはこの電場によって加速され電子と結合し、分子となってスラストから射出される。スラストはこの反作用を受け推進力を得る。

3. 実験装置

回転磁場による電流駆動にはアンテナを Fig.2 のように配置する方法が一般的である。各々のアンテナに 90 度位相のずれた電流を流すことによって回転磁場を誘起させる。誘導結合プラズマの生成および回転磁場による電流駆動にはプラズマ生成領域において数 mT 以上の磁場強度が必要であり、アンテナの直径を数十 mm 程度とした場合 100A 以上の高周波電流をアンテナに流す必要があると考えられる。^[3]大電流を流す際に IGBT の加熱が問題となる。そこで定格電流及び電圧が 200A, 1200V と従来に比べて定格電力の大きい IGBT を用い、さらに並列に IGBT を設置することで熱負荷を軽減させた。

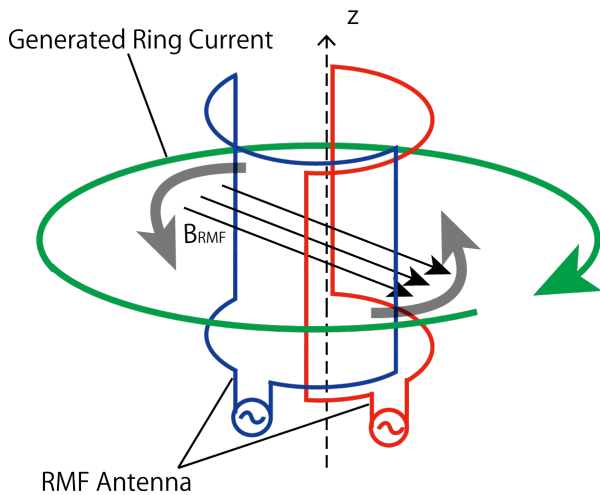


Figure 2. Schematic diagram of RMF Antenna

放電および回転磁場形成回路を Fig.3 に示す。この回路は IGBT を用いたインバータ回路と LC 共振回路で構成されており、IGBT により形成された矩形波を LC 共振回路の 1 次側入力としアンテナのインダクタンス L と共振用キャパシタンス C による発信を利用することで大電流の正弦波を駆動している。

また、RMF アンテナは円筒状の石英管上に固定し、真空容器内に設置した。本実験で用いる真空容器は容量 880 l, 内径 1,000mm で真空度は 10^{-7} Torr である。

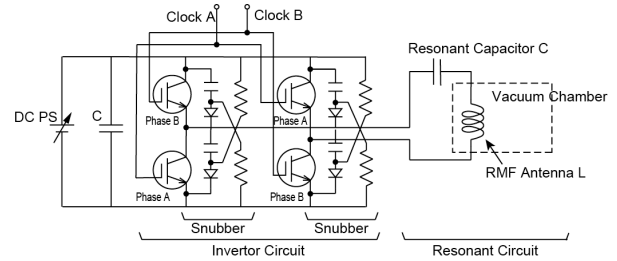


Figure 3. RMF power circuit schematic

4. 今後の実験計画

ゲート駆動回路・放電および回転磁場形成回路を設計・製作し、低電力での動作実験の結果、正常に機能することがわかった。今後は磁場強度を保ちつつ、回転磁場による電流駆動効果が十分に確認できると考えられるアンテナの形状や巻数等の設計を行い、真空容器内のプラズマの生成および電流駆動実験をする。またさらに放電条件の最適化をはかり、アンテナに強磁性体であるフェライトを組み合わせることで回転磁場生成効率の評価を試みる。

5. 参考文献

- [1] Asai Tomohiko : "Generation of a Magnetized Plasma Shield by Means of a Rotating Magnetic Field for Innovative Space Transportation", ISTS, pp.1-5, 2011
- [2] 小林由佳 : 「回転磁場によるトロイダル電流駆動効率も改善」, 修士論文, pp.1-31, 2010
- [3] 上田智史 : 「高周波回転磁場を用いた電磁加速型推進機に関する研究」, 大阪大学修士論文, pp.1-49, 2006
- [4] J.T. Slough, K.E. Miller : "Enhanced Confinement and Stability of a Field-Reversed Configuration with Rotating Magnetic Field Current Drive", Phys. Rev. Lett, 85, pp.1444-1447, 2000