

無電極電気推進機のプラズマ電磁誘導加速過程に関する研究

学生証番号 47-166072 氏名 関根 北斗
(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words : 電気推進, 無電極, プラズマ加速, 磁場測定, 誘導電流測定

1. 研究背景

宇宙空間における軌道遷移に用いられてきた宇宙推進には, 化学推進と電気推進がある. このうち高比推力が特徴である電気推進は, 数km/sに及ぶ ΔV が必要とされる深宇宙探査ミッションにおいて用いられてきた. その一方で, 2020年代後半以降の実施が計画されている有人深宇宙探査ミッションを見据えたとき, 電気推進は低推力であるため, ミッションの長期化が問題となる. その解決策として, 投入電力が100 kW級の大電力で, かつ高推進効率($\cong 50\%$)で作動する電気推進の開発が進められている.

100 kW級電気推進機の実用化に向けて, 大電力で作動する”無電極推進機”を開発するという方針がある[1], [2]. 無電極推進機では, イオンスラスタ等の既存の電気推進機で問題となっている電極損耗が原理的に生じず, 長寿命化に有利である. しかし, 今日までに宇宙実証された無電極推進機は存在しない.

先行研究の成果によって, ヘリコン波放電などの効率の良いプラズマ生成法が定着している. しかし無電極推進機の実用化に向けた大きな課題の一つが, ”効率的なプラズマ加速方法の確立”である.

2. 無電極推進機”RIPAL”と研究目的

2016年柳沼らは, 高周波プラズマと高周波電流の電磁誘導による連続的なプラズマ加速をコンセプトとする無電極推進機”RIPAL”を提案した[3] (図 1). これまでも電磁誘導加速式電気推進機の提案・研究が行われてきたが, プラズマ加速過程における誘導電流の分布形成機構などはほとんど明らかにされてこなかった. 本研究では, 電磁誘導加速式の電気推進機のプラズマ加速においてキーとなる, プラズマ中の磁場, および誘導電流の分布を測定する. さらに, プラズマを加速するローレンツ力分布の導出, 誘導電流の移動速度の検証, 電場分布の導出などを通し, RIPALのプラズマ電磁誘導加速過程における誘導電流およびローレンツ力分布の形成機構やその時間発展を解明する.

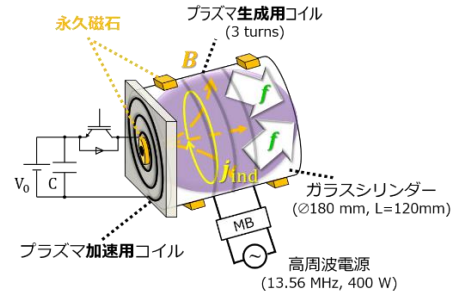


図 1. RIPALの推力発生原理.

3. 実験方法

本研究では, プラズマ加速過程におけるプラズマ中変動磁場を測定するために, 3軸方向の磁場が同時測定可能な磁気プローブを構築した. これを用いて, プラズマ加速中のプラズマ中磁場分布を測定した. 測定点数は400点(軸方向, 径方向にそれぞれ20点ずつ)で, 各点で2回ずつ測定を行った.

4. 実験結果

測定した磁場 B 分布および周方向誘導電流 j_{θ} 分布をそれぞれ図 2, 図 3に示す. ここで, j_{θ} の導出にはアンペール・マクスウェルの法則

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{B} \quad (1)$$

を用いた.

5. 考察

加速コイル電流 I_{acc} と j_{θ} の間には $\cong 2\pi/5$ の位相差があることがわかった(図 4). この結果は, プラズマ電磁誘導加速の等価回路モデル[4]において, プラズマの電気伝導率 σ_p を

$$\omega L_p \ll 1/\sigma_p \quad (2)$$

ω : 加速コイル電流周波数

L_p : プラズマの等価インダクタンス

としたとき, よく説明できる.

さらに, j_{θ} と周方向電場 E_{θ} の分布が類似していることもわかった. このことは, j_{θ} が主に, Maxwell方程式

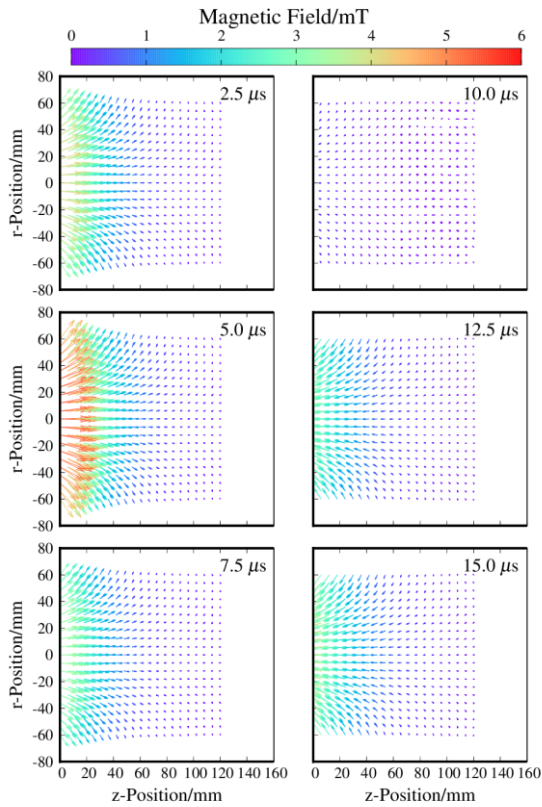


図 2. 磁場 B 分布の時間発展.

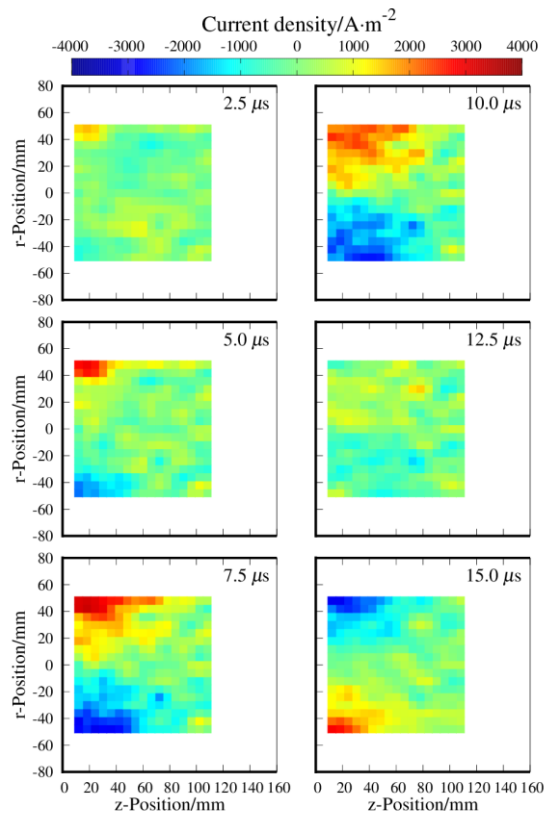


図 3. 周方向誘導電流 j_θ の分布の時間発展.

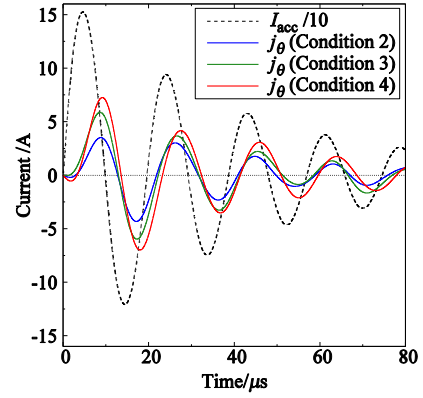


図 4. 加速コイル電流 I_{acc} と j_θ の時間履歴.

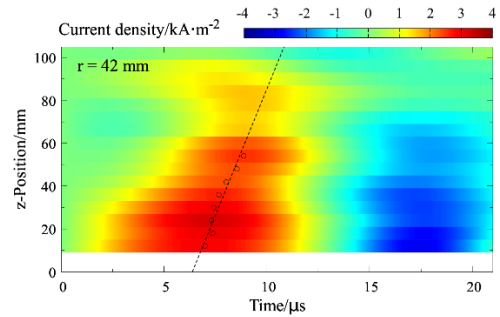


図 5. 周方向誘導電流 j_θ の $t-z$ 図. 黒点は j_θ のピーク位置を示す.

$$\frac{dB}{dt} = -\text{rot}E \quad (3)$$

により生じる電場 E_θ によって、形成されていることを示唆している.

またプラズマの電磁誘導加速では、誘導電流の z 軸方向への移動が重要である. 実験結果から、特に $z < 60, |r| > 40$ の領域で、顕著に j_θ のピーク位置の移動が確認され (図 5), その移動速度 v_{j_θ} は $\cong 25$ km/s だった. ピークの移動の要因としては、

- 軸方向ローレンツ力によるプラズマの移動
- $z < 60, |r| > 40$ では、オームの法則

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

における $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の項が無視できなくなることなどが考えられる.

参考文献

- [1] S. Shinohara et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 5, pp. 1245–1254, 2014.
- [2] K. Takahashi et al., *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 35, pp. 1–6, 2013.
- [3] K. Yaginuma et al., *J. IAPS*, vol. 23, no. 2, pp. 1–6, 2015.
- [4] R. H. Lovberg and C. L. Dailey, *AIAA J.*, vol. 20, no. 7, 1982.