

永久磁石を用いた電磁誘導加速型無電極推進機における推力の 静磁場依存性

学生証番号 47186076 氏名 龍野 瑛
(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words : 電気推進, RFプラズマ, 推力測定, ダブルプローブ

1. 研究背景

国際宇宙探査協働グループ(ISECG)は, Global Exploration Roadmap第3版(GER3)において, 有人火星探査を将来(2035 - 2040年頃)の目標に掲げ, 実現に必要な宇宙システムなどを検討している. その中で, 月・火星探査に向けて, 10 - 100kW級の電気推進機が必要とされている. ただし, 既存の電気推進機はいずれも1 kW - 5 kWであり, 低推力(~ 0.1 N)によるミッション長期化が懸念される. そこで, 高効率($> 50\%$)の100 kW級大電力電気推進機を実用化することにより, ミッション長期化の問題が解決されると期待されている.

RIPALは無電極の電磁加速型電気推進機である. 円筒形状の絶縁管内で, プラズマ生成用コイルを用いてRFプラズマを生成し, そのプラズマに対してプラズマ加速用コイルで変動磁場を印加することで, 誘起された周方向電流と径方向磁場のローレンツ力を発生させ, 加速を行う. 大電力化に関しては, 電極損耗や大電流の中和器開発の問題がなく, また変動磁場を用いた電磁誘導加速であることから, 静磁場を用いた推進機で課題となっているプラズマの静磁場からのデタッチメントの課題を解決できる.

現状, 定常加速において最適な作動条件は見つかっておらず, 特にプラズマ加速にとって重要な磁場分布が推力に与える影響は未だ調査されていない. RIPALにおける磁場とは, 加速用コイルが作る変動磁場と, 永久磁石が作る静磁場のことであり, 変動磁場のうち軸方向磁場は周方向電流の誘起を引き起こし, 径方向磁場は軸方向ローレンツ力の発生に使われる. 静磁場はプラズマを閉じ込めることによって電子密度の向上につながるだけでなく, その径方向成分は変動磁場と同様, 軸方向ローレンツ力の発生に使われる. 変動磁場によって引き起こされる周方向電流の分布等は3D B-dot probeの測定によって明らかになっているため, 本研究では静磁場に注目する. 異なる永久磁石の組み合わせによって作られる静磁場条件において, 電子密度分布測定と推力測定を行い, 推

力の静磁場依存性を実験的に明らかにする. またプラズマが受けるローレンツ力及び圧力勾配の項を定式化し, 理論的なローレンツ力と圧力勾配の算出及び実験値との比較を行う.

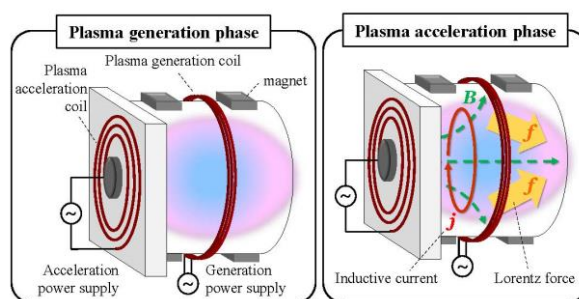


図1. RIPALの概要図.

2. 実験条件

本研究では, 静磁場と推力の定量的な関係を知るため, 6つの静磁場条件を設定した. また, それぞれの静磁場条件に対して5, 10, 15, 20 sccmの流量条件を与えたため, 全部で24通りの実験条件に対して各測定を行った.

表1に静磁場条件と各条件で用いた磁石の種類, 磁石配置を示す. 図2に各静磁場条件の磁力線を示した. この磁力線はFEMMという有限要素法を用いたソフトによって解析したものである[81]. 軸対象を仮定して正三角形のメッシュを細かく切り, 全体の挙動を近似して計算している.

表1. 静磁場条件

	Bottom Magnet	Side Magnet
B_{00}	None	None
B_{10}	Ferrite	None
B_{01}	None	Ferrite
B_{11}	Ferrite	Ferrite
B_{02}	None	Neodymium
B_{12}	Ferrite	Neodymium

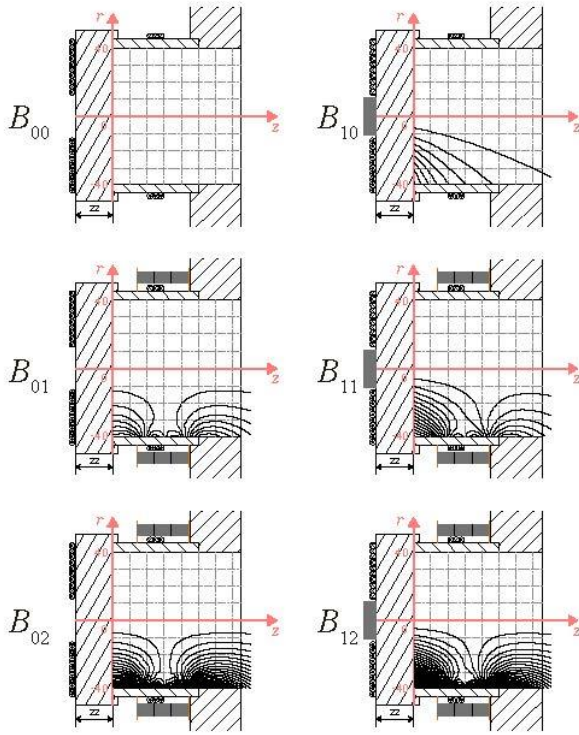


図2. 静磁場条件と磁力線図.

3. 実験結果と考察

推力測定結果を図3に示す. いずれも投入電力を大きくするにつれ, また流量が大きくなるにつれて推力が大きくなっていることがわかる. しかし, その推力の絶対値や増加の仕方は各静磁場条件によって大きく異なっている. その中でも, B01やB02はどの投入電力でも大きな推力が測定された.

この結果を以下の計算式より算出されたローレンツ力と圧力勾配と比較する. 流体としてみたときのプラズマの運動方程式は以下のようにかける.

$$M \frac{DV}{Dt} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p$$

プラズマ全体が作る, 圧力勾配による推力は

$$F_{\nabla p, z} = - \iint kT_e \frac{\partial n_e}{\partial z} 2\pi r dr dz$$

となり, 一般化オームの法則を用いるとプラズマ全体が作るローレンツ力は

$$\bar{F}_{L, z} = - \iint \frac{en_e}{1 + \bar{\Omega}_H^{-2}} \frac{1}{\bar{\Omega}_H} \frac{\bar{B}_r}{\bar{B}} \bar{E}_\theta 2\pi r dr dz$$

となる.

圧力勾配を計算したところ, 生成用電力400 W, 加速用電力0 Wの推力測定結果と傾向はおよそ一致し, 計算が測定の60%程度を占めていた. ローレンツ力を計算したところ, 生成用電力400 W, 加速用電力

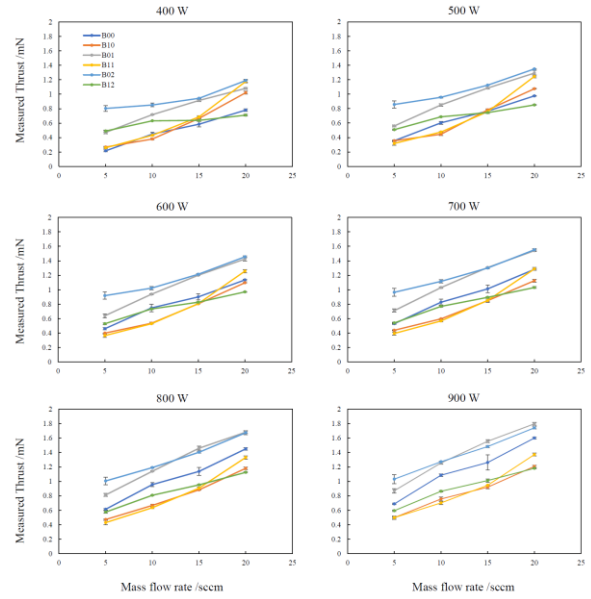


図3. 推力測定結果.

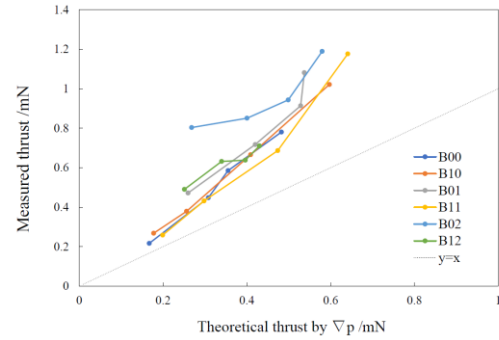


図4. 圧力勾配と400 Wの測定結果の比較.

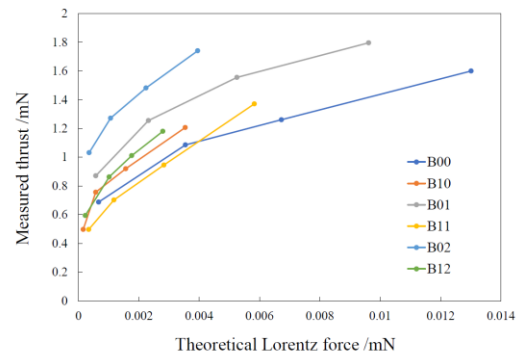


図5. ローレンツ力と900 Wの測定結果の比較.

500 Wの推力測定結果と比較すると1%程度であり, 測定された推力の大部分は圧力勾配によるものであることが示唆された.

静磁場条件の違いによって推力測定結果に有意な違いが確認された. B01とB02は電子密度と電子温度の積が一番大きくなる静磁場の強さであったため, 最も大きな推力が測定されたと考えられる.