

無電極ヘリコンプラズマスラスタにおける推力測定

岩瀬頌太 (東京農工大学)

黒澤昌弘 (長岡技術科学大学)

松岡健之 (宇宙航空研究開発機構) (現大阪大学)

船木一幸 (宇宙航空研究開発機構)

篠原俊二郎 (東京農工大学)

谷川隆夫 (東海大学)

藤野貴康 (筑波大学)

Key Words: Electrodeless Electric Propulsion, Helicon Plasma Source, Thrust Measurement, REF Acceleration.

1 緒言

深宇宙探査や大規模軌道間輸送といった長距離・長時間の宇宙ミッションを行うためには、長寿命かつ高効率の推進機が必要である。現在、イオンエンジン等が広く用いられているが、それらはプラズマ状態となる推進剤に接する電極の損耗により長寿命化には限界がある。そのため、将来の長期宇宙ミッションを実現するには、さらに長寿命な推進機の開発が求められる。

ヘリコンプラズマは、高電離 (> 10%) で高密度 ($\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$) のプラズマであり、kW レベルの高周波を印加することで容易に得ることができる。生成にあたってプラズマに直接接触する電極を必要としないので、ヘリコンプラズマを利用することで宇宙推進機の長寿命が期待できる。

2 研究目的

現在、次世代の長寿命な宇宙推進機として、ヘリコン高密度プラズマを生成・加速することで推力を得る無電極ヘリコンプラズマスラスタの開発を目指す研究が行われている。しかし、プラズマパラメータの諸特性に関しては測定が行われてきたものの、推力の測定事例はまだ少ない。そこで本研究は、回転電場加速型無電極ヘリコンプラズマスラスタの推力の外部パラメータ依存性を明らかにすることを目的とする。

本研究では外部パラメータとして推進剤 (Ar) ガス流量、投入電力、石英管内径に着目した。また、プラズマの加速方法として、非接触の電極に位相のずれた高周波電圧を印加し、回転電場 (Rotating Electric Field: REF) を発生させることでプラズマを加速する方法 [1] (REF 加速) を用いた。

3 原理

図 1 に示すヘリコンプラズマスラスタは、生成アンテナ (印加電力 < 2kW)、加速アンテナ (印加電力 < 1kW)、石英管および磁気回路 (軸上での径方向磁場 $\sim 100 \text{ G}$, 図 2) から構成される。石英管中に導入された

Ar ガスは、生成アンテナを通じて高周波電力を伝送されヘリコンプラズマとなり、石英管後背面に熱推力を、磁気回路に電磁推力を与える。

熱推力は、生成アンテナによる高周波 (9.5 MHz) 電力投入によって発生したプラズマの圧力によって石英管が力を受ける気体力学的な力である。一方、電磁推力は、誘起された周方向の電流と永久磁石による径方向磁場の相互作用で永久磁石がローレンツ力を受けるものである。

プラズマ加速領域では、磁場の形状が発散形状となるように永久磁石を配置し、径方向磁場 B_r を作る。加速アンテナは、図 3 に示すように高さ 40 mm、幅 40 mm、厚さ 2 mm の銅板 2 組 4 枚で構成され、1 組のうち 1 枚

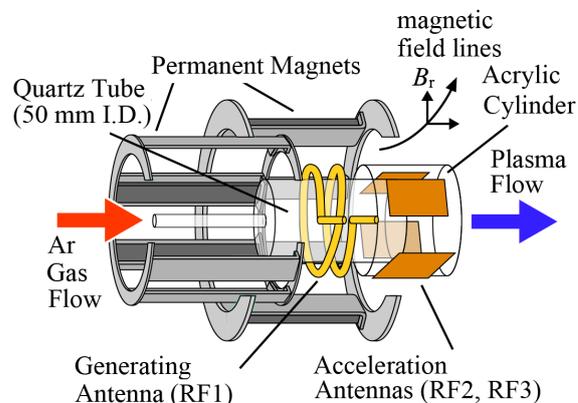


図 1 スラスタの概略図

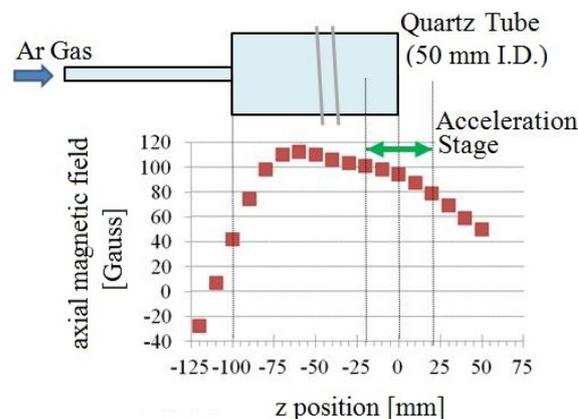


図 2 軸方向磁場の測定値

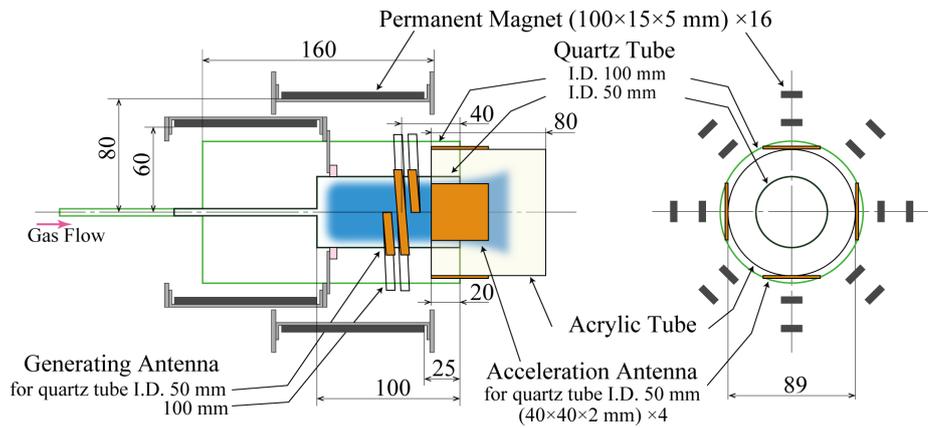


図 3 スラスターの寸法

は高周波電源出力端子に、もう 1 枚は GND に接続されている (図 4). それぞれの組に高周波電圧 (13.56 MHz) を位相をずらして印加すると REF が生じる. さらに, REF によってプラズマ中に j_{θ} が誘起されると, ローレンツ力 $j_{\theta} \times B_r$ が生じ, 軸方向にプラズマを加速することができる [2-5].

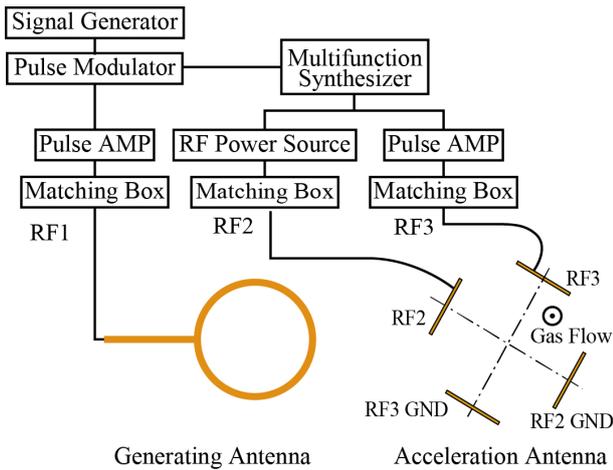


図 4 アンテナと電源系の構成

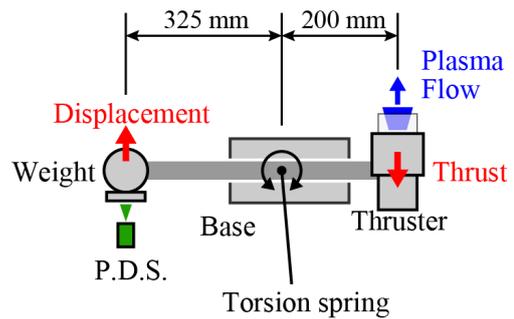


図 5 スラストスタンド上面図

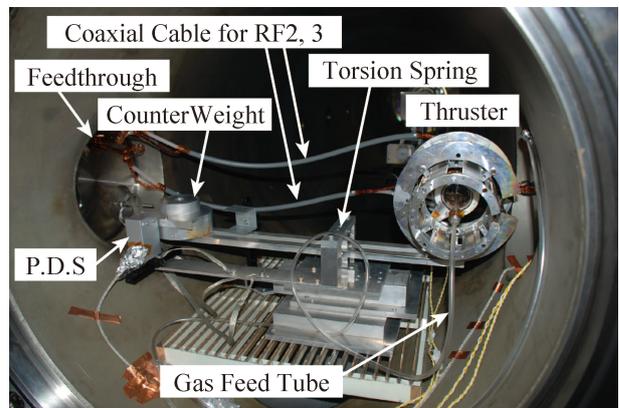


図 6 スラストスタンドを真空チャンバー内に配置した様子

4 測定方法

測定は、ねじり振り子を利用した微小推力計測装置であるスラストスタンド (図 5, 6) を用いて行った. スラストスタンドは、スラスターの一部と、カウンターウェイト、変位センサおよびトーシヨンスプリングから構成されている. 生成アンテナと加速アンテナはスラストスタンドから独立しており、石英管と磁気回路はスラストスタンド上にあるため、スラストスタンドで測定できる推力は熱推力と電磁推力の和となる.

本研究では、1 パルスの高周波放電 (~ 200 ms) に伴って生じる推力でねじり振り子を変位させ、その変位量を変位センサ (P.D.S.) で測定する. パルス高周波放電とし

たのは、次の 2 つの理由による.

- 1) 回路の耐熱性から連続放電を避けた.
- 2) 高周波電流が流れている状態では高周波ノイズがセンサの信号に重畳するので信号を判別しにくい.

推力の値は、力積 I と最大変位 d との関係式 $d = C_a I$ から算出する. この式中の定数 C_a は較正作業によって求めるが、ガス供給チューブの配置によって変わってしまうため、実験セットアップごとに較正作業を行う. 較正作業は、既知の大きさの力積 I を振り子の重りを衝突させることにより与え、その時の最大変位を測定すると

いう手法で行う。

図 7 は、石英管径 50 mm, ガス流量 30 sccm, REF 加速なしのとき, プラズマ生成によるスラストスタンドの変位を測定したものである。時刻 0 s におけるインパルス状のノイズは, プラズマ生成の放電が行われたことに伴うものであり, これ以降の最大変位と, 予め求めておいた最大変位と力積の関係式から推力は $2.7 \pm 0.037 \text{ mN}$, 比推力は $2.7 \times 10^2 \pm 3.7 \text{ s}$ と求まる。

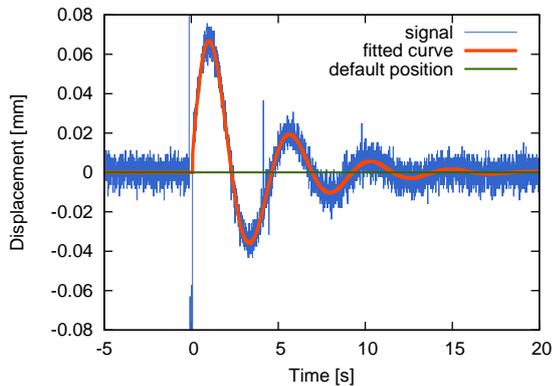


図 7 プラズマ生成後のスラストスタンドの振動

5 実験結果

5.1 石英管内径 50 mm の場合

内径 50 mm の石英管を用いて加速を行わないときのガス流量と推力の関係は図 8 のようになった。供給ガス流量は 10 – 70 sccm, 投入電力は 0.1 – 2.1 kW の範囲で行った。このとき, 推力の最大値は $4.7 \pm 0.12 \text{ mN}$ と計測された。ただし, パラメータによってはプラズマが点かないことがあり, 特に低電力のときデータをとれていない領域がある。

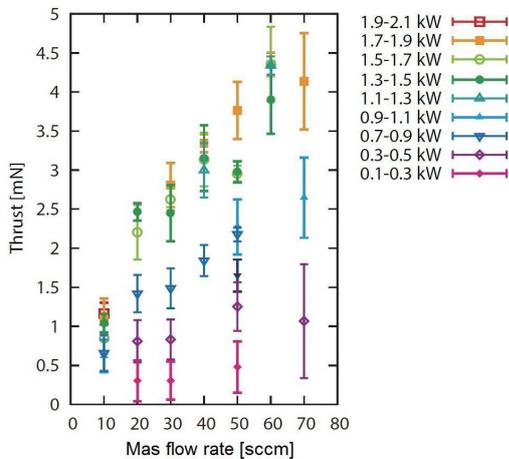


図 8 石英管内径 50 mm, 加速なし

図 8 から投入電力 1.3 – 1.9 kW のデータを抽出し, ショットごとにプロットしたものが図 9 である。図 9 よ

り, ガス流量が増加すると推力も増加することがわかる。これは, 石英管内のプラズマ密度が増大するためである。一方, 比推力はガス流量の増加に伴い減少することを確認した。これは, 推力の増加よりもガス流量の増加の方が比推力の値の変化に大きく働くためである。

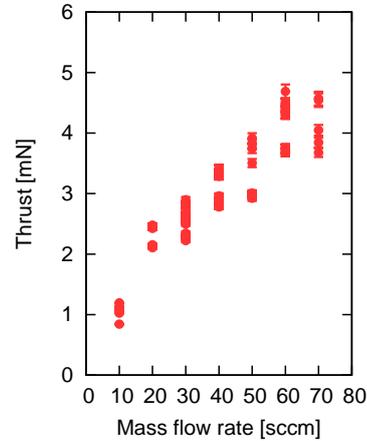


図 9 ガス流量依存性 (石英管内径 50 mm, 投入電力 1.3–1.9 kW)

図 8 からガス流量 30 sccm のデータを抽出し, 投入電力と推力の関係をショットごとにプロットしたものが図 10 である。この図 10 より, 投入電力が増加すると, 推力の値も増加することがわかる。

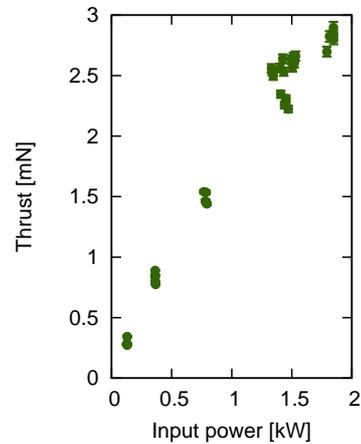


図 10 投入電力依存性 (石英管内径 50 mm, ガス流量 30 sccm)

また, REF を印加して加速実験を行ったが, 電圧位相差による推力の変化を測定できなかった。電圧周波数やアンテナ形状を最適化できていないためであると考えられる。

5.2 石英管内径 100 mm の場合

次に, 内径 100 mm の石英管を使用し, 加速を行わないときの実験を実施した。石英管内径が 50 mm の

時に比して、推力の向上が見られた。推力の最大値は 11 ± 0.66 mN となり、石英管内径 50 mm の場合に対し ~ 2.4 倍となった。性能が改善された理由として次の事柄が考えられる。

- 1) 磁気回路内で石英管内部空間が拡大したためにプラズマ中の磁場勾配と体積あたりの壁表面積が増加し、壁損失が軽減された。
- 2) プラズマと永久磁石が接近したためにプラズマ中の径方向磁場が増加し、電磁推力が増強された。

6 結論と今後の展開

本研究では、スラストスタンドを用いた推力計測を確立した。まず、石英管内径 50 mm、加速なしのときの推力を計測し、推力の最大値は 4.7 ± 0.12 mN を得た。投入電力を固定したときガス流量の増加は推力を増加させ、ガス流量を固定したとき投入電力の増加は推力を増加させた。

石英管内径 50 mm の場合に REF 加速の予備実験を行ったが、効果を確認することはできなかった。しかし、石英管径を 100 mm にすることによって、推力の値は 11 ± 0.66 mN に増加した。

今後は、石英管内径 100 mm のときのリサージ加速の実験を行い、効果が表れるのかどうかを確かめることが第一の課題である。ただし、石英管内径 50 mm のときに REF 加速の効果が見られなかったことを踏まえ、アンテナや印加電圧のパラメータの再検討が必要である。また、アンテナ近傍に高電圧プローブを接続し、アンテナに実際に加わっている電圧・電流の値や電源位相差を直接測定することも求められる。

今回の実験で、石英管の内径を増加させたことで推力・比推力の増加が認められたため、今後、さらに石英管内径を増加させた場合の推力測定を行う。そのためには、スラストスタンドをさらなる重量増加、推力増加に対応できるか確認し、改良する必要がある。

また、壁損失の低減には、石英管の内径を大きくすることが考えられるが、スラスタの推力密度の低下につながるため、実用化に際してはできるだけ小さいほうが望ましい。そのため、磁場を強くすることでプラズマの閉じ込めを強化し、電磁推力を増強することも試みる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 [(S) 21226019] の補助により、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備にて実施された。実験装置の製作、ならびにサポートをいただいた同研究所工作室スタッフ

ならびに実験装置の運転にてサポートをいただいた山本育夫氏に深く謝意を表す。

参考文献

- [1] Toki K., Shinohara S., Tanikawa T., Shamrai K. P. and Funaki I., *28th International Conf. on Electric Propulsion*, IEPC-2003-0618, 2003.
- [2] S. Shinohara, T. Hada, T. Motomura, K. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka and K. P. Shamrai, *Phys. Plasmas*, **16**, 057104 (2009).
- [3] Toki K., Shinohara S., Tanikawa T., Hada T., Funaki I., Shamrai K. P., Tanaka Y. and Yamaguchi A., *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, **8**, 25—30, 2009.
- [4] Nishida, H., Nakamura T., Shinohara S., Matsuoka T., Funaki I., Tanikawa T., Hada T. and Shamrai K. P., *Special Issue of Frontier of Applied Plasma Technology*, **5** (2), 2012.
- [5] T. Matsuoka, I. Funaki, S. Satoh, T. Fujino, T. Nakamura, H. Nishida, S. Shinohara, T. Tanikawa, T. Hada and K. Shamrai, *AIAA-2012-3956, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.