

磁気セイル地上実験用プラズマ源配置可変 MPD 風洞の性能評価

○村山裕輝（総研大・院），上野一磨（中京大学），大塩裕哉（龍谷大学），
船木一幸（ISAS/JAXA）

1. はじめに

磁気セイルは、太陽から恒常的に噴出する高速プラズマ流を宇宙機に搭載したコイルで生成した磁場の帆で受け止める推進手法であり、1991年に Zubrin によって提案された^[1]。この磁気セイルが用いる磁気圏と呼ばれる磁気帆をプラズマで押し広げて推力を増大する磁気プラズマセイルが2003年に Winglee によって提案された^[2]。磁気セイルの実験室実験による推力実証及びイオンラマー半径と代表長比による実機とのスケーリングを考慮したスケールモデル実験^[3-8]が行われた。また、小型プラズマ源をコイルに組み合わせた磁気プラズマセイル実験において、磁気圏の拡大と推力の増大が確認されている。一連の実験では、MPD アークジェットを用いた高エンタルピーのプラズマ風洞が用いられており、1基のMPD アークジェットによる直径1200mmのテストセクションを持つ初期のコンフィグレーションからプラズマ径の拡大を目的としてMPD アークジェットを3基用いたクラスタ化により直径1750mmのテストセクションを有するMPD 風洞へと拡張され運用されている。このクラスタMPD 風洞 (Fig. 1) では、3基のMPD アークジェットをチャンバフランジに設置していることから、各MPD アークジェット間の距離は固定となっており、テストセクションにおける実験条件の制約となっている。そこで、MPD アークジェット間の距離を変更可能にすることでより広い実験条件を実現する。



Fig. 1 チャンバフランジに取り付けられたMPD 風洞の作動中の様子(右手前は磁気プラズマセイル) ^[9]

2. 研究目的

既存のクラスタMPD プラズマ風洞をベースにMPD アークジェット間の距離を可変可能とすることで従来よりも幅広い実験条件の実現を研究目的とする。具体的には、これまでチャンバフランジに設置していたプラズマ風洞をチャンバ内へ移設し、各MPD アークジェット間の距離を変更可能なスタンドに設置する。本研究では、製作した可変クラスタMPD 風洞の初期性能評価を実施した。

3. 実験装置および実験方法

3.1. 実験装置

本実験はISASの所有の先端プラズマ推進チャンバ(φ2×3m)において実施した。この設備の真空系は、粗引き用のロータリーポンプ、メカニカルブースターポンプと高真空度用のターボ分子ポンプとクライオポンプを搭載し、実験時の排圧を 10^{-4} Pa以下に維持できる。3基のMPD アークジェットは、新たに設計製作したスタンドに設置しており、MPD アークジェットを搭載した状態でスタンドをチャンバ長手方向に移動可能とした。これにより、テストセクションに設置した供試体を再設置することなく実験条件を変更可能である。MPD アークジェットのチャンバ内への設置に伴い、従来は大気圧下に設置されていた貯気槽と電磁弁は全てチャンバ内に設置している。プラズマ計測装置は、ダブルプローブを稼働ステージに設置した。実験装置概略図とプローブの稼働する方向(Y方向)をFig.2に示す。

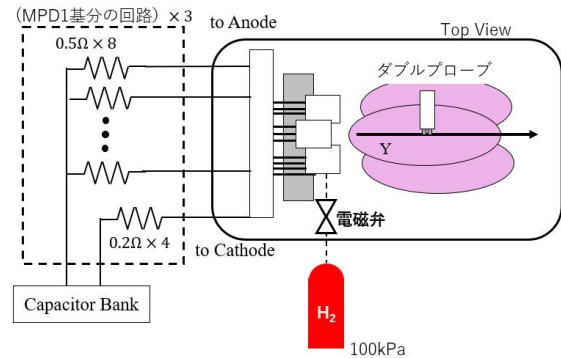


Fig. 2 実験装置概略図

3.2. MPD アークジェット

本実験施設で用いられる MPD アークジェットは、直径 16mm のトリア・タングステン製の陰極と、同心円状に陰極を取り囲むように配置された直径 8mm のモリブデン製の陽極により構成される。作動ガスは水素を用いており、貯気槽から小型高速電磁弁の短時間作動により放電室へ供給される。貯気槽圧および電磁弁はチャンバ外より監視と制御が可能であり、貯気槽の調整によってガス流量を制御する。MPD アークジェットの放電には数 kA もの大電流を必要とするため、電源にはキャパシタバンク (PFN 電源) を利用する。最大充電電圧 4.0kV において、16.7kA の放電電流を約 0.8ms 間維持できる。

3.3. MPD アークジェットの配置

従来は、3 基の MPD アークジェットを直径 350mm の同心円状に 120 度の間隔で配置していた。このときの、各 MPD 間の陰極中心同士の間隔 $d=305\text{mm}$ となる。移設後において同条件になるように設置した状態を Fig. 3 に示す。最も各 MPD アークジェットを近づけた場合、陰極中心同士の間隔 $d=150\text{mm}$ が実現可能である。こうした各 MPD アークジェット間の距離を変更することで、MPD アークジェットの作動条件を変更せずともテストセクションにおけるプラズマパラメータ (特に密度) を変更可能とした。



Fig. 3 従来と同様の間隔 ($d=305\text{mm}$) に調整した MPD 風洞の外観

3.4. プラズマ計測

プラズマの電子温度・密度の計測にはダブルプローブ法を用いた。プローブは外径 2mm で長さ 40mm のセラミックチューブに直径 1mm のタングステン棒が先端に 3mm が露出する形状であり、プローブ間の間隔は 3mm である。計測に使用したダブルプローブの模式図を Fig. 4 に示す。各プローブ電極は同軸線に

より、チャンバ壁のポートを通じて、外部へと導出される。計測抵抗は 5Ω とし、プローブ電圧のスイープには、ファンクションジェネレータとバイポーラ電源を用いた。

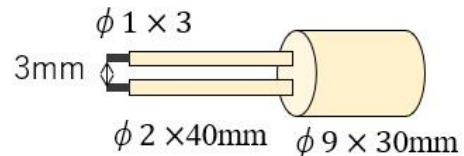


Fig. 4 使用したダブルプローブの模式図

4. 実験結果および考察

計測は、3 基合計の電流値を 18.6kA (1 基あたり 6.2kA)、ガス流量を 3 基合計で 0.81g/s (1 基あたり 0.27g/s) に設定し実施した。MPD アークジェット間の距離は最小である $d=150\text{mm}$ で実施した。実験結果は、電子温度が MPD アークジェット近傍において 1.4-1.6eV 程度、 $Y=600-1000\text{mm}$ の範囲では 0.8eV-1.6eV となった。また、電子密度は、 $Y=300-600\text{mm}$ までは $1 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ とほぼ一定、 $Y=700\text{mm}$ から減少する傾向となった。本結果から、今回の配置可変への更新により、 $Y=600\text{mm}$ 付近で高密度かつ電子温度が一定のテストセクションを実現した。

5. まとめと今後の予定

既存のクラスター MPD プラズマ風洞をベースに、より幅広い実験条件の実現を目的として MPD アークジェットの設置方法の更新を行った。設置方法をチャンバフランジへの固定からチャンバ内の新設スタンドに設置することで供試体の設置位置を変更すること無く実験条件の変更を可能とした。また、MPD アークジェット間の距離を変更可能な機構により従来よりも幅広い実験条件を提供可能とした。一例として実施した MPD アークジェット間の距離を最小の $d=150\text{mm}$ とした場合、 $Y=600\text{mm}$ において高密度かつ電子温度が一定のテストセクションが得られたことを確認した。次年度以降は、今回の MPD 風洞の更新で得られた特性を活かした磁気セイル/磁気プラズマセイル実験を実施する予定である。

参考文献

- 1) Zubrin, R. M. and Andrews, D. G.: "Magnetic Sails and Interplanetary Travel", Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 28, No. 2, 1991, pp. 197-203.
- 2) Winglee, R. M. et al: "Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion", Journal of Geophysical

Research, vol. 105, No. 21, 2000, pp. 67-77.

- 3) 船木一幸, 小嶋秀典, 山川宏, 清水幸夫, 都木恭一郎, 中山宣典, 藤田和央, 小川博之, 篠原季次, 磁気セイルシミュレータの開発, 日本航空宇宙学会論文集, vol. 54, No. 634, pp. 501-509, 2006.
- 4) Ueno, K., Kimura, T., Ayabe, T., Funaki, I., Yamakawa, H. and Horisawa, H.: “Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail”, *Trans. JSASS Space Tech, Japan*, vol. 7, No. ists26, pp. Pb_65-Pb_69, 2009.
- 5) Ueno, K., Kimura, T., Ayabe, T., Funaki, I., Yamakawa, H. and Horisawa, H.: “Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail”, *Trans. JSASS Space Tech, Japan*, vol. 7, No. ists26, pp. Pb_65-Pb_69, 2009.
- 6) 上野一磨, 大塩裕哉, 船木一幸, 山川宏, 堀澤秀之, 磁気セイルの推力特性に関する実験研究, 日本航空宇宙学会論文集, vol. 59, No. 692, pp. 229-235, 2011.
- 7) Ueno, K., Oshio, Y., Funaki, I., Horisawa, H. and Yamakawa, H.: “Thrust Measurement of Magnetic Sail for Various Tilt Angles”, *Trans. JSASS Space Tech, Japan*, vol.10, No. ists28, pp. Tb 13 - Tb 16, 2012.
- 8) 大塩裕哉, 太陽風を利用した磁気プラズマセイル推進の推進特性に関する研究, 総合研究大学院大学, 博士論文, 2013.
- 9) 上野一磨, 大塩裕哉, 堀江優之, 船木一幸, 山川宏, 磁気プラズマセイルおよび磁気セイルの実験室実験, 平成24年度スペース・プラズマ研究会, 2012.