

大口径模擬太陽風プラズマの高速・高密度化と磁気セイル実験

○堀江優之(長岡技術科学大学・院), 上野一磨(ISAS/JAXA), 大塩裕哉(ISAS/JAXA),
江偉華(長岡技術科学大学), 船木一幸(ISAS/JAXA), 山川宏(京都大学)

Key word : Mag sail , Magneto Plasma Sail(MPS) , Magneto Plasma Dynamics(MPD) , Pulse Forming Network(PFN)

1. 研究背景及び目的

磁気プラズマセイルは、太陽起源の超音速プラズマ流である太陽風を宇宙機において作り出したダイポール磁場とプラズマアシストによる磁場拡大により受け止め大推力を獲得する次世代型宇宙推進システムである。地上実験設備を用いて本推進機の性能を測定するためにスケーリング側を用いて宇宙空間と地上実験設備を比較している。地上実験設備では、太陽風を模擬するための高速($\geq 20\text{km/s}$)かつ高密度($\geq 3 \times 10^{17}[\text{m}^{-3}]$)なプラズマ風洞が必要である。以前、JAXA 上野氏、大塩氏より報告された結果では、PFN(Pulse Forming Network)を用いて3台同時にMPD(Magneto Plasma Dynamics)アークジェットを動作させた。その結果、数密度が太陽風下流1250[mm]において数密度の要求性能が不十分であった。

そこで、本研究では風洞設備におけるPFN電源を再構築し、動作パラメータを変更することで模擬太陽風プラズマ流の更なる高速化・高密度化を実施したので、その動作確認試験について述べる。

2. 太陽風シミュレータ

2.1 PFNの再構築

2.1節で説明したMPDアークジェットを動作させるために瞬時的に大電力を作り出すためPFNを用いている。本実験では、以前JAXA 上野氏、大塩氏より報告されている放電電流 $I=16[\text{kA}]$ 、動作時間 $t=1[\text{ms}]$ の要求性能を持つPFN^{1),2)}を再構築した。変更したPFNの回路図を図3に示す。再構築の際、以下の式を使用してパラメータの選定を行う。インダクタンスを L 、コンデンサを C 、PFNの特性インピーダンスを Z_{PFN} 、放電時間を τ_{PFN} 、放電電流を I_{PFN} 、格子段数を n 、負荷側抵抗を R としている。

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

$$\tau_{PFN} = 2n\sqrt{LC} \quad (2)$$

$$I_{PFN} = \frac{V}{Z_{PFN} + R} \quad (3)$$

$$R = R_{match} + R_{Anode} + R_{Cathode} + R_{MPD} \quad (4)$$

その結果、決定したパラメータを表1に示す。表1のパラメータを用いてインダクタンスを製作し、PFNを再構築している。

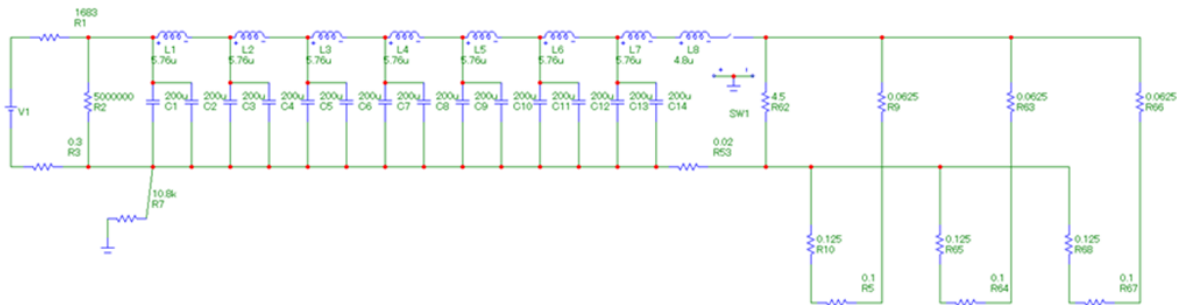


図1, PFNの概要図

表 1, PFN 再構築前後のパラメータ

パラメータ	再構築前	再構築後
コンデンサ	200[μ F]	200[μ F] \times 2=400[μ F]
インダクタンス	5[μ H]	5.72[μ H]
アノード分割抵抗	なし	0.062[Ω]
カソード分割抵抗	なし	0.125[Ω]
格子数	12[段]	6[段]
特性インピーダンス	0.166[Ω]	0.12[Ω]
動作時間	1[ms]	0.5[ms]

2.2 3台同時駆動 MPD アークジェット

3台同時駆動 MPD アークジェットは多電極型を3台で構成している(図2). 図3に示す多電極型 MPD アークジェットは, 1本の陰極の周りに8本の陽極を配置した構造となっている. 陰極には Th-W(トリウム入りタングステン)を, 陽極には Mo(モリブデン)を電極に使用している. 陰極は $\phi 16$ [mm], 陽極は $\phi 8$ [mm]であり, 陽極は陰極を中心に半径 20 [mm]の円周上に等間隔で配置されている. 3台の MPD アークジェットは, 120° の角度毎に $\phi 350$ [mm]の円周上に配置している. 実験装置は, MPD アークジェット, 電力供給系(PFN 電源)及び作動ガス(水素, タンク圧 0kPa)を供給するための電磁弁ならびに測定系から構成されている. 多電極型 MPD アークジェットには, 8本のアノードジェットを1台の PFN で動作するため MPD アークジェットに投入する電流を均等に分割する必要がある. そのため分割電極型では, $0.5[\Omega] \times 8$ の分割抵抗を用いている. 分割抵抗の合成抵抗は $0.063[\Omega]$ である. また, 3台の MPD アークジェットにアノード分割抵抗とカソード分割抵抗を用いて同時駆動させた. 放電後の発振を抑えるために $4.8[\mu\text{F}]$ のインダクタンスと $0.024[\Omega]$ の整合抵抗を用いている. 図4に示す真空チャンバーは, 直径 2[m], 長さ 3[m]であり, MPD アークジェットを動作前の状態において真空度 3×10^{-3} [Pa]以下で実験を行った. 本研究では, MPD アークジェットの放電電流, 放電電圧の計測ならびに放電の様子を撮像を行った.

3. 実験結果

3.1 PFN 放電特性

3台の PFN 放電試験結果を図5に示す. 充電電圧を



図 2, 3台同時駆動 MPD アークジェット



図 3, 多電極型 MPD アークジェット

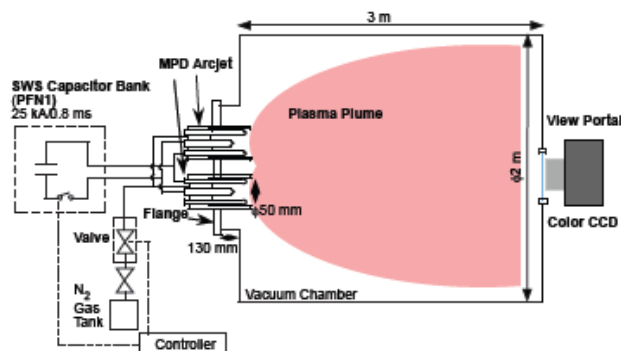


図 4, 地上実験システム全体図

2[kV]から 4.5[kV]まで $0.5[\text{kV}]$ 刻みで各点 3回測定を実施した. その結果, 充電電圧を上昇することで線形に放電電流が上昇していることが確認できた. また, 単体 MPD アークジェットの放電電流が再構築後 $5.8[\text{kA}]$ を確認した. 3台同時駆動 MPD アークジェットの放電電流は $16.7[\text{kA}]$ であることを確認した.

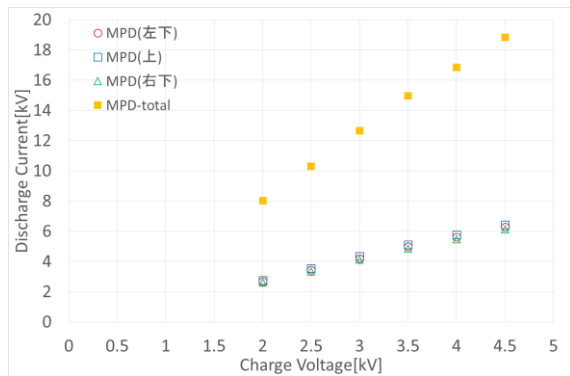


図 5, 3 台同時駆動 MPD アークジェットを負荷した時の放電電圧 VS 放電電流の関係式

3.2 3 台同時駆動プラズマ計測

本プラズマ測定では、太陽風下流 1250mm でのプラズマ数密度及び温度、流速を測定した。測定した結果を図 8 及び図 9 に示す。太陽風流れに対して垂直方向(径方向)での数密度分布では、 $3 \times 10^{17} [\text{m}^{-3}]$ となった。また、プラズマの流速はプラズマ流中心において 28[km/s] を得た。よって太陽風プラズマ密度の要求を満たす風洞に改善できた。

4. まとめ

3 台同時駆動 MPD アークジェットを用いた太陽風シミュレータの高密度化を実施した。その結果 PFN を再構築することによって充電電圧が 4[kV] の時、放電電流が 16.2[kA] を確認した。本電源を用いて風洞のプラズマ流測定を行った結果、太陽風下流 1250mm において、 $\phi 1200\text{mm}$ 以上で流速 28[km]、数密度 $3.34 \times 10^{17} [\text{m}^{-3}]$ の一様なプラズマ流を確認した。よって、大口径模擬太陽風プラズマの要求性能を満たすプラズマ流に改善した。今後は、更なる高速化・高密度化を図り、本風洞設備を用いた磁気プラズマセルの推力実験を行う。

謝辞

磁気プラズマセル研究は、JAXA 宇宙科学研究所戦略的基礎開発経費の支援を受けて、同所内のスペースプラズマ共同設備にて実施した。本研究にご協力いただいた、JAXA 宇宙科学研究所の山本育男氏に深く感謝する。

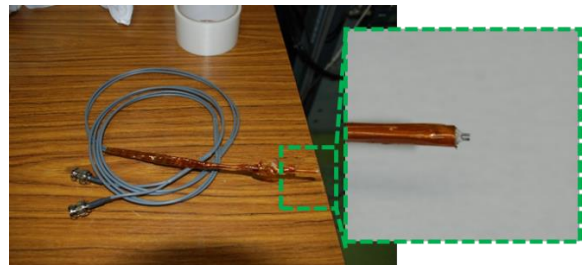


図 6, プラズマ測定器具(ラングミュアプローブ)

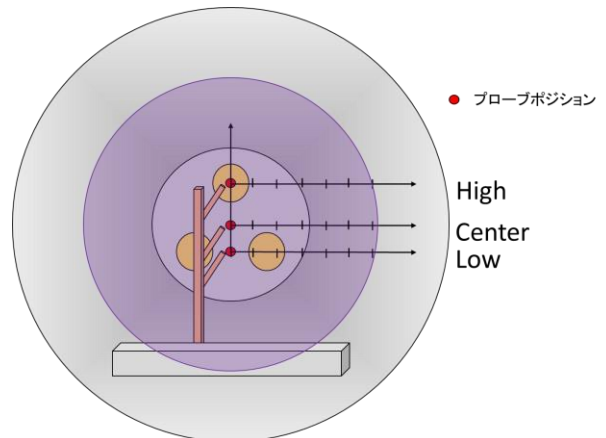


図 7, 太陽風下流 1250mm の測定外略図

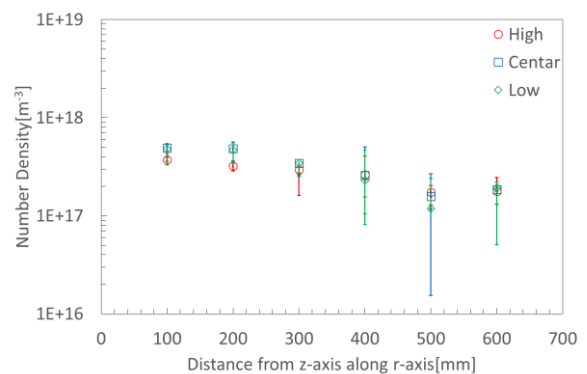


図 8, 太陽風下流 1250mm における径方向数密度の測定結果

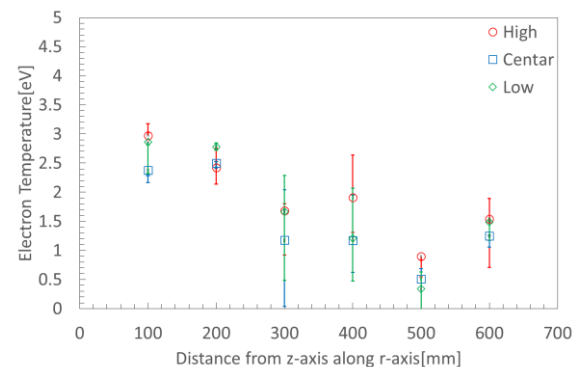


図 9, 太陽風下流 1250mm における径方向数密度の測定結果

参考文献

- 1) 大塩裕哉,上野一磨,船木一幸,”大口径プラズマ流生成のための3台同時駆動準定常MPDアークジェットの開発”,第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム, 1D01(2012)
- 2) Kazuma Ueno, Yuya Oshio, Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa, Development of Magnetoplasmadynamic Solar Wind Simulator for Magnetoplasma Sail Experiment, 29th ISTS, 2013-b-46, Nagoya, June 2-9, 2013.
- 3) R. M. ZUBRIN and D. G. ANDREWS, “Magnetic Sails and Interplanetary Travel,” J. Spacecraft and Rockets, 28, 197 (1991).
- 4) R. M. WINGLEE, J. SLOUGH, T. ZIEMBA, and A. GOODSON, “Mini-magnetospheric plasma propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion,” J. Geophys. Res., 105, 20,833 (2000).
- 5) 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スケールモデルの推力評価実験,平成24年度宇宙輸送シンポジウム,STEP-2012-014,2013年1月