準定常 MPD 推進機における排出プラズマ速度の 放電室形状への依存性^{*1}

Dependence of Plasma Velocity Exhausted from Quasi-Steady MPD Thrusters on Discharge Chamber Configurations

満 尾 和 徳^{*2}・田 原 弘 一^{*3}・木 村 太 郎^{*3}・加 賀 谷 洋 一^{*3}・吉 川 孝 雄^{*3}
Kazunori MITSUO, Hirokazu TAHARA, Taro KIMURA, Yoichi KAGAYA and Takao YOSHIKAWA

Key Words: Electric Propulsion, MPD Thruster, Velocity Measurement, Fabry-Perot Interferometer

Abstract: Plasma velocity measurement of quasi-steady MPD thrusters was carried out to investigate the dependence of the exhaust plasma velocity characteristics on the discharge chamber configurations. The velocities at the exit of MPD channels and PF-series MPD arcjets, which were designed to generate a high axial current, were measured by a Fabry-Perot interferometer. Plasma velocities exhausted from the MPD channel exit were above a sonic velocity in this operational conditions. However, for a large cathode radius, it is inferred that the effect of the friction between the plasma and the cathode surface could not be ignored. On the other hand, the velocity profiles for PF arcjets were dependent on the anode radius and the mass flow rates, and the experimental velocities were larger than the theoretical ones derived from the electromagnetic thrust.

1. は じ め に

MPD 推進機の構造は環状陽極内に棒状陰極を備えた同軸形状をしており、電極間に流れる放電電流と電流自身により誘起される自己誘起磁場との相互作用で発生する電磁気力（ローレンツ力）を利用してプラズマを加速し、その反作用として推力を発生させる¹⁾。従って、そのプラズマ加速過程と発生推力は放電電流分布（放電室形状）に強く依存し^{2,3)}、同時にそれらの特性は排出速度に反映される。MPD 推進機における排出速度の放電室形状への依存性は未だ詳しく調べられておらず、その特性を明らかにすることは推力発生機構・プラズマ加速過程の解明につながると考えられる。

本研究では試験機として軸方向ローレンツ力のみが作用するように設計された MPD チャンネルと、径方向ローレンツ力に起因するポンピング加速が強調された放電室形状を有する MPD-PF アークジェット推進機を使用し、その放電室形状の差異による排出プラズマ速度特性を調べた。

速度測定法は宇宙科学研究所の中山・栗木らが行った方法を参考にした⁴⁾。彼らはスペクトルの微細構造を調べるために用いられるファブリペロー干渉計を用いてドップラーシフトを計測し、MPD 推進機放電室内のプラズマ速度を測定した。この測定法の場合、流れ中に探針を設置しないため流れを乱さず速度を測定することができる。また、

ファブリペロー干渉計により描かれる干渉縞を MOS リニアセンサーで計測するため放電時間の短い 0.6 ms 程度の準定常作動にも対応できる利点がある。

2. 実験装置と測定装置

2.1 実験装置 研究で用いた実験装置全体の概略図を第 1 図に示す。真空タンクは第 1 図に示すように、直径 0.6 m、全長 5.75 m、一端から 0.35 m、0.4 m のアルミフランジ、1 m のパイレックスガラス壁部、続いて 4 m のアルミ壁部からなる。アルミフランジには 2 個の観測窓が設けられ、この観測窓とガラス壁部からタンク内を観測することができる。また、これらのアルミフランジ内壁はプラズマ流との電気的な干渉を避けるためにマイラーシートによって絶縁されている。タンク的一端にはロータリーポンプと油拡散ポンプがそれぞれ 2 基ずつ設けられ、実験時にタンク内は約 1.5×10^{-3} Pa まで排気される。

放電電力の供給は最大 62 kJ 蓄えることができるコンデンサーバンクで行われる。このコンデンサーバンクはインダクタンス $L_0 = 17 \mu\text{H}$ のコイル、容量 $C_0 = 48 \mu\text{F}$ のコンデンサーをそれぞれ 10 個を 1 組として 4 並列とした L-C 梯子回路である。この電源は最大供給電流 27 kA、放電持続時間 0.6 ms の定電流電源として働く。放電はイグナイトロンからの信号により、コンデンサー充電電圧が電極間に加わることによる高電圧絶縁破壊により始められる。

作動ガス供給装置は高速電磁弁（Fast Acting Valve: FAV）とその駆動電源からなる。FAV は MPD アークジェット本体と共に真空タンク内に設置され、推進機に作動ガスを約 6 ms の間、定常的に供給する。この FAV は 8

^{*1} 平成 11 年 7 月 28 日原稿受理

^{*2} 日本学術振興会特別研究員

^{*3} 大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻機械科学分野

第1図 実験装置の概略図

個のオリフィスを持つリング型で、8本のピストンが1枚の円環状ディスクにより同時に駆動するものである。作動ガス流量はオリフィスのチョーキング条件により与えられる。

推力が自己誘起磁場による理論電磁気加速のみに従うとすれば、排出速度がAlfvénの臨界速度に達するときの流量は次式で与えられる⁵⁾。

$$\dot{m} = \frac{aJ_c^2}{U_c} \quad (1)$$

ここで、 a は電極形状係数、 U_c はAlfvénの臨界速度、 J_c は理論臨界電流値を表す。Alfvénにより提唱された臨界速度は中性粒子のプラズマ雲に対する相対的な運動エネルギーが、解離エネルギーと電離エネルギーの和に相当するとき、完全電離状態になるという仮説⁶⁾に基づいている。従って、Alfvénの説によれば理論臨界電流以上の作動でプラズマは完全電離状態にある。各試験機、作動ガス流量に対する理論臨界電流値を第1表に示す。なお、作動ガスにはArを使用した。

2.2 試験機

2.2.1 MPDチャンネル 実験に使用したMPDチャンネルMC-IIIを第2図に示す。MPDチャンネルは環状の陽極と棒状陰極から構成されており、軸方向ローレンツ力のみ作用するように出口側の電極端面は電流が流入しないように絶縁されている。MPDチャンネルMC-IIIの放電室の長さは100mmあり、陽極は銅製で内径が50mm、陰極は直径25mmのモリブデン製である。陽極は5個のセグメントに分割されており、各セグメント間は電氣的に絶縁されている。作動ガスはチャンネル後部の4個のガスポートから供給され、放電室に流入するようになっている。また、放電室入口に浮動電極は設けられておらず、作動ガスが一樣に流入するように設計されている。陰極径の差異によるプラズマ速度特性を調べるために、実験では陽極内径50mm、陰極径10mm(酸化トリウム入りタングステン(ThO₂-W)製のMPDチャンネルMC-IVも用いられた。

第1表 各試験機、作動ガス流量に対する理論臨界電流値

試験機	作動ガス流量 (g/s)	理論臨界電流値 (kA)
MC-III	0.96	11
MC-IV	1.37	8.6
PF-II	1.37	8.5
PF-III	1.37	7.1
PF-III	2.74	10

第2図 MPDチャンネル (MC-III) の断面図

第3図 MPD-PFアークジェット (PF-II) の断面図

2.2.2 MPD-PFアークジェット 実験に使用したMPD-PFアークジェットPF-IIの断面図を第3図に示す。MPD-PFアークジェットは軸対称形状であり、環状陽極は銅製で内径25mm、長さ20mmである。酸化トリウム入りタングステン(ThO₂-W)製の棒状陰極は直径10mmであり、推進剤ガス流入口がある放電室壁から10mm露出している。陰極端面の形状は頂角90°の円錐形である。高エネルギーのカソードジェットを形成できるように陰極側面を電氣的に絶縁し、陽極も通常用いられる推進機とは異なり、陰極先端から30mm下流に配置し、電流が陰極端面に軸方向から多く流れるように設計されている。放電室内径は陽極と同じく25mmである。電極間の放電室壁には石英ガラスを使用しており、放電室内部のプラズマが観測できるようになっている。作動ガスは実験機の側部(4個)、および後部(4個)にある8個のガスポートから供給され、陰極周囲および石英ガラスとの境界から流入するようになっている。また、陰極径の差異によるプラズマ速度特性を調べるために、陽極内径が50mmのPF-IIIアークジェットを製作した。放電室内径は50mmで、その他の構造はPF-IIと同じである。

2.3 ファブリペロー干渉計を用いた速度測定 測定システム⁷⁾を第4図に、ファブリペロー干渉計の仕様を第2表に示す。ジェットの中心軸に対して60度と90度2方向

第4図 プラズマ速度測定システム

第2表 ファブリペロー干渉計におけるエタロン板の仕様

直径: 60 mm, 有効径: 30 mm, 材質: 合成石英
平面精度: $\lambda/380$
反射率: $95 \pm 1.5\%$ (460~520 nm の範囲では 94.5%以上)
エタロン間隔を保持するスペーサー: $d=1.5$ mm
理論フィネス: 58.3

からプラズマの放射光を観測し、それらの観測プロファイルからドップラーシフトを計測して速度を求めた。

プラズマからの放射光 (Ar II スペクトル $\lambda_0=480.607$ nm) を集光レンズを用いて分光器に取り入れ、観測波長域を限定して観測スペクトルを選択する。次に、選択されたスペクトルをファブリペロー干渉計 (溝尻光学工業所製) に取り込み、その透過光をレンズを用いて観測カメラに結像する。焦点面では干渉縞が描かれ、この縞をマルチチャンネルアナライザー (MCA: Multi-Channel Analyzer) で観測する。この MCA の受光面には一列に 1024 個の光感電素子 MOS リニアセンサーが配置されており、光の強度分布を測定することができる。研究対象である MPD アークジェットは準定常作動であり、さらにプラズマからの放射光は弱いため、測定では露光時間を設定できるイメージンテンシファイアー (I.I) 付きの MCA (Hamamatsu C 2925-01) を用いて干渉縞の測定を行った。

第5図と第6図に MCA で測定したパソコン画面の観測プロファイルとドップラーシフトを示す。この観測プロファイルから干渉縞半径を読みとり、(2)式を用いて速度を求めた^{4,7)}。

$$U = \frac{c}{2f^2 \sin 30^\circ} (r_2^2 - r_1^2) \quad (2)$$

ここで、 U , c , n_1 , n_2 , f はそれぞれ、軸方向プラズマ速度、光速、ドップラーシフトを受けた干渉縞半径、ドップラーシフトを受けていない干渉縞半径、レンズの焦点距離を表す。測定では放電時間を 0.6 ms に設定し、放電開始時の過渡的な現象を避けるため放電開始後 0.2 ms から 0.4 ms 間のプラズマからの放射光を観測した。

第5図 放電中のプラズマにおいて観測された干渉縞のパソコン画面の画像(1)

第6図 ドップラーシフト

観測位置は MPD チャンネルの場合、チャンネル出口面の電極中間位置 (MC-III: 中心軸から半径方向に 18.75 mm, MC-IV: 中心軸から半径方向に 15 mm) とした。また、PF-II の場合、ジェット中心軸上の放電室出口から 10 mm 下流、PF-III の場合、放電室出口から 20 mm 下流を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 放電電圧特性 第7図に放電電圧-放電電流特性を示す。MPD チャンネルの場合、MC-IVの放電電圧は MC-IIIのそれと比べて大きく、10 kA において 100 V であった。一方、MPD-PF アークジェットの場合、PF-II と PF-IIIの放電電圧はあまり変わらず、また PF-IIIのそれは高放電電流域において流量に強く依存しなかった。

3.2 MPD チャンネルの排出プラズマ速度特性 第8図に MPD チャンネル MC-IIIの測定結果を示す。実験では測定を 5 回行い、その平均値をグラフにした。エラーバーは測定値の最大値と最小値を表す。図中の実線は電磁気理論から導かれる理論推力を推進剤流量で割ったものであり、平均理論排出速度 V_{mean} である。理論推力は径方向電流成分と放電電流自身により誘起される周方向自己誘起磁場との相互作用により発生する軸方向ローレンツ力を体積積分することにより得られる¹⁾。

$$V_{\text{mean}} = \left(\frac{\mu_0 J^2}{4\pi} \ln \frac{r_a}{r_c} \right) / \dot{m} \quad (3)$$

(a) MPD チャンネルの放電電圧特性

(b) PF アークジェットの放電電圧特性

第7図 放電電圧特性

第8図 MC-IIIの速度測定結果

ここで、 $\dot{m}$ は推進剤流量、 μ_0 は真空の透磁率、 r_a と r_c はそれぞれ陽極半径と陰極半径を表す。

作動ガス流量に関わらずプラズマの排気速度は放電電流値が大きくなるに従って増加し、12 kA の作動において約 8 km/s に達した。過去の実験からチャンネル出口付近の

第9図 MC-IVの速度測定結果

電子温度は 20,000 K 程度であると考えられる。プラズマが完全電離状態にあり、イオンと電子の温度が等しいと仮定した場合、その音速は約 2.6 km/s なので測定されたプラズマはすべて超音速に加速されていることになる。

次に、第9図に MC-IV の測定結果を示す。MC-IV の陰極半径は MC-III の 1/2.5 であり、電磁氣的推力が強くなるためプラズマ速度は MC-III のそれよりも大きく、12 kA において約 16 km/s に達した。

実線で示す理論平均速度と比較すると、MC-III を用いて測定されたプラズマ速度は理論臨界電流値以上の作動で理論平均速度よりも小さくなったが、MC-IV の場合、臨界作動条件を越えた作動でも速度は理論値とほぼ等しくなった。MC-III の陰極表面積は MC-IV のそれよりも大きく、陰極表面とプラズマ間の摩擦の影響が顕著に現れたためプラズマの加速が妨げられたものと推定される。あるいは、MPD チャンネル流は断面積変化のない流れなので、強い加熱により超音速流が減速されていることも考えられる。過去に行った放電室内のプラズマ診断の結果⁹⁾ から電流は放電室出口に強く集中することが確認されており、さらに電流はインシュレータ部分に張り出していると推定される。MC-III の電極間距離 (チャンネル断面積) は MC-IV のそれよりも小さいためチャンネル出口付近においてプラズマは過度にジュール加熱を受けていると予想される。しかし、この議論には定量的な評価が不可欠であり、チャンネル出口付近の詳しいプラズマ診断が必要である。

3.3 MPD-PF アークジェットの排出プラズマ特性
次に、PF-II アークジェットと PF-III アークジェットにおけるジェット中心軸上のプラズマ速度を第10図に示す。図中の実線、点線は陰極先端に等電流密度で流入すると仮定した場合のブローイング力のみを考慮した電磁氣的推力を作動ガス流量で割った平均速度である¹⁾。なお、MPD チャンネルとは異なり陰極先端に流入する電流により生じるローレンツ力が加わるため、PF アークジェットの理論推力は MPD チャンネルのそれよりも大きくなる。

$$V_{\text{mean}} = \left\{ \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left(\ln \frac{r_a}{r_c} + \frac{1}{4} \right) \right\} / \dot{m} \quad (4)$$

第10図 PF-II, PF-IIIを用いて測定したプラズマ速度 (流量 1.37 g/s, 測定位置: ジェット中心軸上)

第12図 プラズマ速度の径方向分布

第11図 PF-IIIを用いて測定したプラズマ速度 (流量 1.37 g/s, 2.74 g/s, 測定位置: ジェット中心軸上)

排出速度は放電電流値が大きくなるにしたがい増加し、陽極径と陰極径の比が大きい PF-III の速度は PF-II のそれよりも大きくなった。排出速度は理論推力から得られる平均速度よりも大きく、8 kA において、PF-II では約 6 km/s, PF-III では約 12 km/s に達した。PF アークジェットの場合、陰極先端に形成される高エネルギー領域が膨張加速することによっても推力に貢献するため、理論値よりも大きくなったものと推定される。

次に PF-III を使用し、流量を変化させた場合の結果を第 11 図に示す。流量が多い作動における排出速度は流量が少ない場合のそれよりも小さくなった。また、流量が多い作動では理論値との差が大きく、低電流域で特に顕著になっている。これは電磁加速に電熱加速 (気体力学的加速) が加わるためと推定される。圧力は粒子数に強く依存するので、流量の多い作動では放電室内の圧力が高く、測定位置 (放電室出口面から 20 mm 下流) では結果として速度増分に貢献することになる。

MPD チャンネル MC-III の測定結果とは異なり、PF ア

ークジェットでは放電電流値の 2 乗にほぼ比例して速度は増加している。これは、チャンネルのように放電室出口付近にスムーズな加速を妨げるような強い加熱が流れ中に存在せず、放電電流により形成される磁気ノズルによりプラズマが効果的に加速されるためと考えられる。

また、陽極径と陰極径が等しい MPD チャンネル MC-IV と PF-III アークジェットの排出速度を比較すると、理論推力から予想されたように PF-III アークジェットの方が速度は大きくなった。

3.4 測定値の妥当性 次に、測定された速度と推力から見積もった排出速度を比較する。過去の実験⁹⁾から、放電室出口面のプラズマ密度はほぼ一様であると予想され、また第 12 図に示す径方向分布からプラズマ速度は半径方向に依らず一様に排出されていることが確認された。従って、PF アークジェットの放電室出口面におけるプラズマ状態は径方向に強く依存しないため推力との比較が可能であると推定される。

MPD 推進機では陰極先端に形成される高エネルギー領域が陰極を押すことによっても推力に貢献する。過去の研究⁹⁾において陰極先端圧力からこの推力成分を見積もっており、速度を算出するときは全推力からこの推力成分を差し引いた。なお、全推力に占める陰極先端を押す力の割合は、PF-II アークジェットの場合、7 kA の作動において約 25% であった。

第 13 図に PF-II における推力から見積もった排出速度とファブリペロー干渉計により計測された速度を示す。それぞれの速度はほぼ一致しており、ファブリペロー干渉計により測定されたプラズマ速度は妥当であることが確認できた。

PF アークジェットの測定では理論臨界作動付近になると第 14 図に示すように干渉縞のピークが崩れはじめ、それ以上の作動領域では速度を求めることができなかった。この現象は MPD チャンネルでは見られなかったため、放電室形状に強く依存するものと考えられる。多くの研究者によって MPD 推進機では理論臨界作動付近になると Onset 現象と呼ばれる電磁流体力学的不安定性が発生するこ

第13図 Fabry-Perotにより測定された速度と推力から見積もった速度の比較

第14図 放電中のプラズマにおいて観測された干渉縞のパソコン画面上の画像(2)

とが報告されている¹⁰⁾。

4. ま と め

本研究ではMPD推進機における放電室形状の差異による排出プラズマ速度特性を調べるため、ファブリペロー干渉計を利用してMPDチャンネルとMPD-PFアークジェットの排出プラズマ速度特性を調べた。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 本実験作動条件において、MPDチャンネルから排出されるプラズマは超音速に加速されていることが確認

された。MPDチャンネルMC-IVの場合、流量：1.37 g/s、放電電流値：12 kAにおいて速度は約16 km/sに達した。

(2) PFアークジェットの排出速度は理論推力から得られる平均速度よりも大きくなった。PFアークジェットの場合、陰極先端に形成される高エネルギー領域が膨張加速することによっても推力に貢献するため、理論値よりも大きくなったものと推定される。

(3) 陽極径と陰極径がそれぞれ等しいMPDチャンネルMC-IVとPF-IIIアークジェットの排出速度特性から、PF-IIIでは陰極先端に流入する電流により発生するローレンツ力が加わるため、理論推力から予想されるようにチャンネルよりもプラズマは強く加速されることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) Jahn, R. G.: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 240-255.
- 2) Sovey, J. S. and Mantenieks, M. A.: Performance and Lifetime Assessment of Magnetoplasmadynamic Arc Thruster Technology, J. Propulsion Power, 7 (1991), pp. 71-83.
- 3) Wegmann, Th., Auweter-Kurtz, M., Habiger, H., Kurtz, H. L. and Schrade, H. O.: Experiment Comparison of Steady State Nozzle Type and Cylindrical MPD Thrusters at High Current Levels, 23rd International Electric Propulsion Conference, IEPC 93-122, 1993.
- 4) Nakayama, T., Toki, K. and Kuriki, K.: Optical Measurement of Velocity Distribution in MPD Arcjet, 22nd International Electric Propulsion Conference, IEPC 91-048, 1991.
- 5) Devillers, P. and Burton, R. L.: The Importance of Alfvén's Critical Velocity for MPD Arcs, AIAA Paper 70-1096, 1970.
- 6) Alfvén, H.: Collision between a Non-Ionized Gas and a Magnetized Plasma, Rev. Modern Phys., 32 (1960), pp. 710-713.
- 7) 辻内順平：光学概論II (理工学基礎講座11), 朝倉書店, 東京, 1979, pp. 43-48.
- 8) 満尾和徳, 田原弘一, 奥谷浩一, 加賀谷洋一, 吉川孝雄：準定常MPDチャンネル内のプラズマの加速過程, 日本航空宇宙学会誌, 46 (1998), pp. 215-223.
- 9) Mitsuo, K., Hamano, H., Tahara, H., Kagaya, Y. and Yoshikawa, T.: Plasma Features near Cathode Tip of MPD Thrusters, Proceedings of 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-98-a-2-23p, 1998.
- 10) Schrade, H. O., Wegmann, Th. and Rösger, Th.: The Onset Phenomena Explained by Run-Away Joule Heating, 22nd International Electric Propulsion Conference, IEPC 91-022, 1991.