

論文の内容の要旨

論文題目 MPD スラスタの準定常作動における定常性評価と
 作動特性の実験的探索

Evaluation of Quasi-steady State and Parametric Investigation of
Magneto-Plasma-Dynamic Thruster in Extended Pulsed Operation

氏 名 井出 舜一郎

Magneto-Plasma-Dynamic (MPD) スラスタは、MW 級の電力を用いた kA 級のアーク放電による電磁力を主な加速力とするため、大電力化の潮流に適した次世代の電気推進機として注目されている。宇宙での定常運用に向けた地上試験では装置規模の制約から、汎用的なパルス電源である Pulse Forming Network (PFN) による 1 ms 程度のパルス作動方式が考案された。これは PFN の時定数程度の放電波形のうち、放電電流が安定する区間を電磁流体力学的な定常状態であるとして、これを準定常作動と称して定常作動性能と同等に評価してきた。しかし実際は、空力加速や金属蒸気など様々な非電磁流体力学的な物理現象が併発する環境において、準定常状態の定義は不十分なものであると言える。また近年の研究動向として、外部磁場を印加した 100 kW 級の比較的低電力な作動の性能・物理現象解明に注目が集まっており、MW 級の数十 N から数百 mN へと推力レンジが推移している背景がある。その際にもあまりにも短い準定常状態の評価区間が性能評価に大きく影響すると考えられる。またいくつかの物理現象的な予測や定常作動性能に比べて、異常に高い比推力が報告されている。これは推進剤供給のガスパルス幅に対しても、放電時間は 1/10 程度に短く、先行投入されたガスが放電に寄与した可能性もある。本研究では、準定常作動の定常性について実験的な調査を行い、その定量的評価を行うことを目的としている。本論文は 5 章から成り、構成は以下となっている。

第 1 章では、序論として電気推進機の一つである MPD スラスタの基本原理や位置づけ、およびその準定常作動の意義と問題点、そして近年の研究動向をまとめている。続いて本研究の研究目的として、以下の 2 点を設定している。

- 1) MPD スラスタの準定常作動における定常性の定量的評価
- 2) 準定常作動時における広範囲なパラメータ探索によるデータ取得

第 2 章では、本研究で用いる MPD スラスタの実験系として、スラスタ本体、電力供給系、推進剤供給系、推力測定系、真空排気系、作動制御系の設計や特性および校正方法について詳述している。

第 3 章では、準定常作動の定常性評価に特化した電源装置を提案し、回路シミュレーションを用いた開発について述べている。結果として、寄生インダクタンスを考慮した放電回路の模擬により、大電流の高速遮断時に発生するサージ電圧を見積もり、素子破壊に至らない安全な領域で作動することを確認した。これにより放電時間に占める定常区間の割合が、従来の PFN 波形の 42 % から 89 % まで向上し、より理想に近い矩形波の出力を達成した。さらに電流遮断のタイミングを任意に設定することで、パルス幅を可変にすることができるため、MPD スラスタのパルス作動方式において、放電時間を変えた作動で放電波形と推力の取得に初めて成功している。これにより、放電波形の定常性を確認するとともに、実験系由来の誤差を評価することで、準定常作動領域を定量的に設定する方法を提案した。本実験系では、スラストスタンドの校正誤差を含む予測区間が 10 % 以内となるのは放電時間 1.5 ms 以上であった。また上限に関して、ガスパルス幅以下である 5 ms 以下では放電波形の定常性が保たれているとした。結果として、本実験系においては 1.5 ms から 5.0 ms を準定常作動領域と結論付けている。また、推力の時間履歴の直接的な観測方法として、加速度計を用いることを提案した。結果として、機械構造的な振動ノイズの制約から外部磁場なしの自己誘起磁場作動に条件が限定されるものの、従来の変位計測との整合性を確認した上で、放電時間と推進剤種をパラメータとした推力波形の取得に成功している。これを受けて、準定常作動における直感的な推力測定・評価方法として有用である可能性を示した。

第 4 章では、前章の実験系における準定常作動領域内である 2.0 ms の作動で、短時間作動の簡便性と広域性を生かしたパラメータ探索を行っている。近年の研究で注目されている以下の 3 点に相補的なデータ取得を目標とする。

- 1) 外部磁場強度による性能向上の上限
- 2) 外部磁場型における種々の推進剤の作動特性
- 3) 同軸型放電室における外部磁場印加による加速機構の詳細

結果として、本研究で開発した電源装置の安全性と広域性を確認するとともに、以下 3 つ

のパラメータにおける実験データと知見を得た。

- 1) 外部磁場を最大 800 mT まで印加して作動を行い、推力が上限なく向上することを明らかにした。推力を $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ を用いて整理することで、電磁加速が支配的な領域で作動していることを確認している。推進効率を要素分解することで、放電電圧に占める逆起電力の割合が向上したことが推力向上に寄与したと考察している。
- 2) 推進剤に、高性能であるが定常作動では放電継続性が悪い水素および、宇宙利用実績を有するが地上試験での長時間供給では高コストとなるキセノンの2種を用いて作動を行い、特に水素において流量増大に伴って放電電圧が増大する分子性ガス特有の放電特性を外部磁場型においても確認した。また水素では推進性能が大きく向上し、投入電力 260 kW において、推力 3.65 N、比推力 4600 秒、推進効率 31.9 % を記録した。
- 3) 同軸型放電室の一部を模擬した矩形型放電室は、ローレンツ力が排気方向を向くため、外部磁場が直接加速に寄与する簡便な加速機構を有する。本研究では、放電室形状の変更が簡便なスラスタを設計・開発し、手始めに放電室長さを変更した場合の作動特性を取得した。得られた推進性能を理論電磁推力と逆起電力の観点から考察した結果、放電室長さごとに外部磁場が推進性能に及ぼす効果が異なっていることを明らかにした。また、得られた広域なデータセットから電気伝導度や放電電圧の内訳を調査したことで、今後の詳細な解析によりさらなる知見が得られる可能性を示した。

第5章では、本論文の結論を述べている。はじめに、MPD スラスタの準定常作動の定常性について実験的に評価する方法として、独自開発した電源装置により従来の PFN に比べて 10 倍程度長い放電時間かつ、非定常区間が少なく理想的な矩形波に近い放電波形の出力を達成したことを述べた。さらにそのパルス幅を可変に制御することで、準定常作動の放電時間特性を初めて定量的に調査した上で、実験系由来の誤差を明記することで準定常作動領域を設定する方法の提案について述べた。次に、そのような準定常作動の実験系におけるデモンストレーションとして、近年の研究で注目されているパラメータに相補的かつ広域なデータ取得が可能であることを述べた。