

論文題目     **Discharge Pattern and Energy Balance in an MPD Thruster**  
(MPD スラスタの放電形状とエネルギー収支)

氏 名     中田 大将

MPD (MagnetoPlasmaDynamic) スラスタは円筒状陽極と棒状陰極間に大電流アーク放電を起こし、アンペール則に従って誘起される周方向磁場と放電電流自身との相互作用によりプラズマを高速排気すると云うコンセプトに基づいた電磁加速型外燃機関である。

コンパクトな形状から大きな推力密度を達成出来ること、またほとんどあらゆる種類の物質を推進剤として利用可能であることから、将来の大規模軌道間、惑星間輸送における高比推力主推進機関としての利用が期待されている。一方で、外部電源より投入した電力を推進剤の排気流運動エネルギーに変換する効率が未だ低く、その改善が求められている。

過去においては空気力学的側面を強調することによりこの変換効率の改善を図る試み等が為されたが、単一のスラスタ形状及び推進剤種において最大効率を達成するのは臨界作動点付近の電磁加速が支配的な領域であるから、純粋な電磁加速に着目したエネルギー収支の改善を行うことが重要である。

とりわけ、電磁加速流れ場における電極形状のあり方についてはターゲットとなる作動条件の違いを考慮しても諸説入り乱れており、高い一般性を有した設計指針の確立が望まれる。第1章では以上のような背景について述べられる。

第2章では純粋な電磁加速のみに焦点を絞り、効率改善のための理論的背景について、國井・都木らの準次元解析を取り上げて紹介する。その趣旨は磁気レイノルズ数が十分に高く電磁加速が支配的な領域では、一定断面積の流れ場において放電電流はチャンネル入り口及び出口に集中し、効率の低下を招くと云うものである。これを緩和するには狭まり広がり形状によってチャンネル中央付近に放電電流を誘導し、全体に均一な電流分布を達成することが有効と推察される。過去の多くの解析例では直線型、広がり型、狭まり広がり型と云った代表的な形状の単一のケースについてのみ取り上げ、入り口径、スロート径、出口径と云った詳細なパラメタについて取り上げられることは無かったが、本論文ではこれらのスケールパラメタの影響によって代表的な形状の優劣は上下することも示す。

第3章では電極形状と放電電流分布、推進性能の関連性について実験的に確認すべく7種の電極形状を作成してスラストスタンドにより推力測定を行った。推進剤としては理論に従いやすい希ガスであるアルゴンを採用した。推力より排気流の平均的な運動エネルギーが求まり、これと投入電力との比から電磁加速流れ場におけるエネルギー変換効率が算出され

る。結果として、広がり形状における出口径や、狭まり広がり形状におけるスロート径はエネルギー変換効率にあまり影響を及ぼさないと分かった。単純広がり形状においては磁気感応シートを用いた電流分布の実験的推定を行い、電極壁の出口径によらず放電電流分布はほぼ同じ状態になっていることが確認された。これは陽極固体壁の形状の変更によって実際の放電形状を制御することが必ずしも可能ではないことを意味している。

また、陰極材料について従来の  $\text{ThO}_2\text{-W}$  に加え、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-W}$  と  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-W}$  をこの分野において初めて適用した。その結果、全く同じ推力を発生する一方で放電電圧は下がり、エネルギー変換効率は大きく改善されることが確認された。

さらに本論文第4章では、電極表面のごく薄い静電境界層（シース）における降下電圧の重要性に着目し、確度の高い手法を用いてこれを求めた。具体的には、溶接アーク分野で広く用いられている電極間隔接近法と呼ばれる手法である。これをMPD流れ場に適用するに当たり、間隔を接近した際の磁場強度が変わらないことを重視して新たに 5ch 平行平板型のチャンネルを製作し、実験を行った。陽極・陰極間隔を次第に近づけ放電電圧についてゼロの極限を取った値は約 18V となり、これが両電極のごく近傍における降下電圧の和であると推定することが出来る。なお、ラングミュア単針法を用いたプラズマ空間電位の測定により、電極降下の多くは陰極側に存在することを確認した。また、電極の損耗量が推進剤投入量に対し十分無視し得る量であることも併せて確認した。

最終章では上記の推力測定と電極降下電圧の結果を踏まえ、準一次元解析と実験結果の差異について考察を行った。同軸形状においては陰極近傍と陽極近傍における磁気レイノルズ数の差が大きく、陰極付近では準一次元解析で示されたようなチャンネル端への電流集中が起きやすい一方で、陽極付近における電流分布は電極間距離或いは準一次元解析では省かれたホール効果に従っていると考えられる。また、4章で求めた電極降下電圧を考慮に入れた結果、狭まり広がり形状では電極降下電圧の占める割合が大きく、結果として推進効率の大幅な上昇にはつながっていない。しかしながらこれを省いて考えるとチャンネル内の熱ロスが改善されており、一定の形状効果が認められる。今後、電極降下電圧に対して十分な電磁加速逆起電力を取ること、陰極面の形状変更などが効率の改善に有効であるとの指針を提案する。