

# 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ショーンヘル トニー

工学修士 Tony SCHÖNHERR 提出の論文は「Investigation of Performance and Plasma Dynamics of the Pulsed Plasma Thruster ADD SIMP-LEX」（和訳：パルス型プラズマスラスタ「ADD SIMP-LEX」の性能とプラズマ力学に関する研究）と題し、本文 6 章と Appendix から成っている。

今日小型衛星の開発が増加し、低コストで高効率の推進システムの需要が高まっている。シュツットガルト大学宇宙航行システム研究所の小型衛星プログラムでは、技術実証小型衛星の主推進装置の一つとしてパルス型プラズマスラスタ(Pulsed Plasma Thruster, PPT)を搭載予定であり、その実用推進機モデル ADD SIMP-LEX 推進機の開発を行っている。本論文は、ADD SIMP-LEX の性能とプラズマ加速過程を可視化・計測し、それを記述できる解析的なプラズマ加速モデルを構築することによって、普遍的な PPT 設計指針を得ることを目的としている。特に、従来の研究では推進効率や比推力といった推進性能が、電源のコンデンサ静電容量と充電電圧の積である放電エネルギーを唯一のパラメータとして整理されてきたのに対し、それでは普遍的な傾向を得ることが難しいため、コンデンサ静電容量と充電電圧のそれぞれに対する依存性を明らかにし、その背景となる物理現象を理解してモデル化することで、設計に対し有用な情報を与えようとするものである。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、推進性能のコンデンサ静電容量と充電電圧へのそれぞれの依存性を、ADD SIMP-LEX 推進機を用いて検証している。1 放電あたりの推力インパルスと推進剤消費量を測定することにより得られる推進効率、比推力は、ともにコンデンサ静電容量に対しては強い依存性（性能向上）が見られる一方、充電電圧に対しては緩やかな性能向上を示している。その他、放電電流波形や回路インダクタンスなどに対する影響も整理されている。

第 3 章では、推力発生において極めて重要であると考えられる推進機内でのプラズマの加速の様子（プラズマ前縁の移動速度）を様々な計測手法を用いて測定している。超高速カメラを用いたプラズマ発光領域の撮影、磁気プローブによる誘起磁場の計測、エッセル分光器を用いた  $C^+$ 、 $C^{++}$ 、 $F^+$  の発光ピーク位置の同定、およびマッハツェンダー干渉法によるプラズマ密度分布計測を行い、得られるプラズマ前縁の移動速度は互いに良く一致することが示されている。また、充電電圧に対する依存性は、単調に増加するのではなく、高電圧条件下で速度が減少する傾向が見られ、プラズマ層に蓄積される推進剤質量の変化が影響している可能性が示唆されている。一方、コンデンサ静電容量への依存性は比較的弱いことが示されている。

第 4 章では、固体推進剤（テフロン）のアブレーション過程とそれに続く電離過程について調べている。まず、固体推進剤表面のアブレーションパターンは、静電容量には依ら

ず、充電電圧に強く依存して変化することが示されている。高速度カメラを使った計測によると、放電後期では中性粒子ガスの生成が支配的で、圧力勾配によって大きな広がり角を持って拡散してしまい、いわゆるレイトタイムアブレーションがほとんど推進力に寄与しないことが示されている。さらに、分光計測及びマッハツェンダー干渉法計測によると、推進機内のプラズマの電子温度は約 22,000 K、電子密度は  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーであり、デバイ長が 20 nm から 70 nm、クヌーセン数が 0.01 から 0.001 と見積もられ、電氣的に準中性の電磁流体として扱うことが適当であると述べている。

第 5 章では、実験で観測された物理現象をより正しく再現できるように従来のプラズマ加速モデルであるスラグモデルに修正を加えたモデルを提案している。これまでのモデルでは、アブレーション推進剤質量がすべて加速を受けると仮定されていたが、修正モデルではその一部分だけがプラズマ層に含まれ加速されるとし、プラズマ層に含まれる質量とアブレーション推進剤質量との比を推進剤利用効率と定義して、プラズマ前縁の移動速度が実験結果と一致するように推進剤利用効率を求めている。またその効率が充電電圧に対して正の相関を持たないことを見出している。

第 6 章は結論であり、本研究の成果を要約している。得られた知見を総合し、高い推進性能を実現する指針として、できるだけ大容量のコンデンサを用いて充電電圧を抑えることを提案している。

以上要するに、本論文は、実用推進機モデル ADD SIMP-LEX の推進性能とプラズマ生成・加速過程を様々な方法で計測し、その物理現象をモデル化することにより、パルス型プラズマスラスタに関する普遍的な設計指針を提案するものであり、その結果は独創的で、先端エネルギー工学、特に宇宙推進工学上貢献するところが大きい。

なお、本論文第 2 章は、小紫公也、荒川義博、川嶋嶺、Herdrich Georg, Nees Frank との共同研究との共同研究であるが、いずれも論文提出者が主体となって実験ならびに解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。