

審査の結果の要旨

氏名 張科寅

修士(工学)張科寅提出の論文は、「Lifetime Investigation of Hall Thrusters by Using Multilayer Wall Probe and Plasma Particle Simulation」(プラズマ粒子シミュレーションと多層壁面プローブを用いたホールスラスタの長寿命化に関する研究)と題し、本文8章から成っている。

近年の宇宙開発において必須になりつつある電気推進の中でも、ホールスラスタは特に高性能で有望であり、各国で競って研究開発されている。ホールスラスタの実機搭載上もっとも重要な課題の一つは、プラズマが引き起こす壁面損耗によって制限される推進機寿命である。累計数千から数万時間の作動を要求されるホールスラスタにおいては、推進機の長寿命化や、耐久試験コストの低減がさらなる宇宙利用のために必要不可欠である。特に、近年大幅な長寿命化を実現できたホールスラスタも発表されており、損耗低減のメカニズムの解明が望まれている。

上記の観点から、著者は、ホールスラスタの長寿命化への指針を得ることを最終目標に研究を行った。まず、数千時間に及ぶ耐久試験に頼ることなく損耗を測定できるよう、独自の損耗測定法を提案した。次に、損耗メカニズムの解明のため、これまでに成功例のない Full-PIC 法を用いたホールスラスタの寿命解析モデルを構築した。最後に、これまでに様々な研究機関で提案されてきた損耗低減、長寿命化の手法について、開発したモデルを用いて検証し知見を得た。

本文は8章から成っており、第1章は序論で、ホールスラスタの有用性やその寿命を制限する主要な要因である壁面損耗を説明するとともに、過去の研究や課題について述べ、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章では、独自の損耗測定法である多層コーティング法について、その測定原理や測定方法、使用した設備について詳述している。本手法は、耐久試験に膨大な時間とコストが必要であるが、かといって分光法では定量的な測定や

空間分布の測定が難しい、という従来の寿命評価における問題を解決するため提案されたものである。具体的には、推進機の損耗部分に数百ナノメートル程度の多層薄膜を施したプローブを埋め込むことで、損耗の進行を薄膜層の発光により可視化し、ほぼリアルタイムな損耗測定を可能にする手法である。

第3章では、多層コーティング法によるホールスラストの損耗測定結果について説明している。まず、損耗率の定量測定のために必要な較正について述べ、損耗率の磁束密度依存性や軸方向の空間分布を測定した結果をまとめている。分光法による測定結果との定性的な比較も行い、推進機が高効率となる高磁場領域で損耗が激しくなるという一致した傾向が得られた。

第4章では、Full-PIC法を用いたホールスラストの数値寿命解析法のモデルや手法について詳述している。本手法は、壁面直近の領域を模擬できない、という従来の寿命シミュレーションにおける課題を解決するために提案されたものである。先例がない試みを成功させるため、半陰解法を用いた電位計算、質量比モデル、計算領域と境界条件の改良を提案し問題の解決を図った。特に電子の移動度を最重視したこれまでにない質量比モデルを用いることで、計算を大幅に高速化しつつも解析精度の低下を最小限に抑えることができることを提案した。

第5章では、計算モデルの妥当性確認を行った結果について説明している。パラメトリックな検証を行い、主要な物理モデルや計算条件の解析結果への感度を調べ、実験結果との比較によりそれらが妥当であることを確かめた。

第6章では、様々なホールスラストや作動条件において損耗、寿命解析を行った結果を示している。多層コーティング法による実験結果や耐久試験結果との比較を行なった結果、推進性能や壁面損耗を精度よく再現することができる計算コードを構築できたことを確認した。

第7章では、開発したモデルを用いて、ホールスラストの長寿命化のメカニズムを調べた結果についてまとめている。特に、プラズマを壁面から乖離させることが、長寿命化のために最も重要な指針であることを提案した。

第8章は結論であり、本研究で得られた結果を要約している。

以上要するに、本論文ではホールスラストの高速寿命試験法と、粒子法による数値寿命解析法の研究開発を行い、これらを用いてホールスラストの長寿命化への指針を模索し提案したものであり、その成果は宇宙推進工学上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。