

# 博士論文の概要

( 2014年 12月 1日 提出)

## 論文題目

各種宇宙機用の低電力型及び大電力型ホールスラストの研究と  
超小型人工衛星用の姿勢制御システム・電源システムの構築

指導教員 田原 弘一 ⑩

大学院 工学研究科 機械工学 専攻  
博士後期課程

申請者氏名 池田 知行 ⑩

大阪工業大学大学院

本論文は、筆者が大阪工業大学大学院工学研究科に在籍中に行った「各種宇宙機用の低電力型及び大電力型ホールスラストの研究」と「超小型人工衛星用の姿勢制御システム・電源システムの構築」の2つの研究テーマにおいて得られた成果を総括したものである。

本論文は総論と2部の各論、本研究の結論から構成されており、第1部では「各種宇宙機用の低電力型及び大電力型ホールスラストの研究」について、全6章で述べ、第2部では「超小型人工衛星用の姿勢制御システム・電源システムの構築」について全3章で述べる。

本論文の研究テーマと人工衛星の推進系と姿勢制御・電源系はそれぞれに分野が異なるが、いずれも今後の人工衛星の開発においては必須となる技術群である。ここで得られる知見は将来の宇宙工学・プラズマ工学において寄与するものと考えられる。以下に総各部の内容についての概要を示す。

## 総論

総論では本論文の構成と各研究テーマについて示している。

## 第1部 ホールスラストの低電力化と大電力作動試験

近年の電気・電子工学の急速な発展と低価格な相乗り衛星打ち上げビジネスの展開により、比較的 low コストで製作でき、かつ開発期間が短期間である質量 50kg 以下の超小型人工衛星の開発が世界各国の教育機関および民間企業において活発に行われつつある。日本においても 2002 年 12 月 14 日に打ち上げられた千葉工業大学の超小型人工衛星「観太くん」が軌道投入されたことを皮切りに、2014 年現在までに 10 機以上の大学発の人工衛星が打ち上げられてきた。2010 年 5 月 21 日には地球の重力圏を脱出した初めての超小型深宇宙衛星である「しんえん」が大学宇宙工学コンソーシアム (University Space Engineering Consortium : UNISEC) によって開発・打ち上げられ、超小型人工衛星による地球外探査への応用も進みつつある。

しかしながらこれまで開発されてきた超小型人工衛星は、その小ささ故に大量の推進剤を必要とする化学推進システムを搭載することは困難であるため、投入軌道から他の軌道への遷移や、空気抵抗による軌道速度・軌道高度の低下からの回復が不可能であることから長期間にわたる運用が難しい。また同時に

打ち上げる主衛星と同じ軌道を取らざるを得ないため、任意の軌道を選択することができない。

この問題に対し、大阪工業大学によって開発され 2012 年 9 月 9 日に打ち上げられた超小型人工衛星「PROITERES (プロイテレス)」や、2014 年 12 月 3 日に打ち上げ予定の東京大学の超小型深宇宙探査技術実証機「PROCYON (プロキオン)」に小型化が比較的容易で比推力に優れる電気推進機を搭載する試みがなされているが、これらの衛星に搭載されている推進機の推力はいずれも  $\mu\text{N}$  オーダーと非常に小さなものであり、必要な速度を得るための加速時間が長大になるため、地球周回軌道上での迅速な機動 (マヌーバ) を行うことは困難である。

この点において、電気推進機的一种であるホールスラスタは、その高い推力密度による  $\text{mN}$  オーダーの推力と 30-60% という高い推進効率に注目される。超小型人工衛星への搭載により、衛星コンステレーション (編隊) の構築など幅広いミッション要求にこたえることができるようになれば、超小型人工衛星による更なる宇宙利用が現実のものとなると考えられる。

また、ホールスラスタは数  $\text{kW}$  クラスの大電力作動時において特に高い推進性能を示すため、静止衛星の南北制御、東西制御に既に用いられている他、軌道間での物資輸送を行う輸送機や深宇宙探査機用の将来的な推進機としても大きな注目を集めており、世界各国の研究機関で様々な大電力型ホールスラスタが次々と開発されている。

日本においても例外ではなく大電力型ホールスラスタの技術獲得を目指し、東京大学、首都大学東京、岐阜大学、大阪工業大学、宮崎大学、九州大学の 6 大学と宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace eXploration Agency : JAXA) による All-Japan での共同研究体制が構築され、5-10 $\text{kW}$  クラスにおいて比推力 3000s の推進性能をもつ大電力ホールスラスタ「Robust Anode-layer Intelligent thruster for Japan IN-space propulsion : RAIJIN」の研究が進められている。

以上のような高い推進性能を期待でき、大小の人工衛星の推進系として発展性があるホールスラスタではあるが、小型化に伴い著しく推進性能が低下することで知られているほか、大電力作動時における問題点の洗い出しが充分に行われていないのが現状である。

本研究ではホールスラスタの課題点である小型化・低電力化と大電力型ホールスラスタの作動時における潜在的問題点を明らかにするため、磁場解析と実

機の開発，作動実験を通して推進性能の評価と問題点の洗い出し，解決法の模索を行った。

本論文の第1部は全6章より構成されている。各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章は研究テーマである低電力型・大電力型の各種ホールスラスタ開発の概要であり，超小型人工衛星の開発経緯，推進システムの必要性と搭載における問題点，電気推進機の種類，ホールスラスタの有用性と課題点について述べ，本研究の意義と目的，論文構成を整理した。

第2章ではホールスラスタの放電室内で発生させたプラズマ中の電子・イオンの挙動やその加速法などの物理現象について説明し，推進性能の定義をまとめた。

第3章では，実験に使用した機器の性能や実験方法について述べた。

第4章においては，50kg級の超小型人工衛星への搭載を想定した，消費電力100W，比推力1300-1900s，推進効率30%を目標とする低電力シリンドリカル型ホールスラスタ「TCHT-4」の開発について述べた。目標性能の設定や Khaymsらによって提唱された設計相似則を用いた予測性能の算出，内部構造や磁場解析結果を行い，得られた結果を元に TCHT-4 を製作した。作動試験を通して推進剤流量の増減，印加磁場の強弱についての影響，ミラー効果による電子捕捉の有効性を明らかにし，TCHT-4の推進性能の更なる向上と作動時にみられる問題の解決案を示した。

第5章では，4章で明らかとなった印加磁場の熱減磁に対する永久磁石の外周部配置の有効性と放電室内の磁場解析，サマリウムコバルト磁石とネオジム磁石の性能比較，TCHT-4では確認することができなかった磁極間距離の最適位置について作動試験を通して検証し，それぞれの条件における最適条件を特定した。

また使用する永久磁石の種類別に作動試験を行い，最適な磁石を選定した。このほか，放電室長がどの程度推進性能に影響が現れるかどうかを確認し，これまで開発されてきた小型・低電力型のホールスラスタよりも高い推進性能を示すことを明らかにした。

第6章では現在6大学とJAXAとの共同開発を行っている5-10kW級大電力ホールスラスタ「RAIJIN」の開発において，作動実績が少ない大電力作動時に

起こりうる問題点を抽出するため、既存の SPT 型ホールスラスタ「THT-VI」と TAL 型ホールスラスタ「TALT-2」の両スラスタに対し大電力作動試験を行い、作動時の推進性能と問題点を明らかにし、問題解決のための方策を検討した。

## 第 2 部 超小型人工衛星「プロイテレス」の姿勢制御・電源システムの構築

2007 年 4 月、電気推進機的一种であるパルスプラズマスラスタを搭載した超小型人工衛星を軌道投入し、軌道上での推進を行うことを目的とした開発プロジェクト「大阪工業大学・電気推進ロケットエンジン搭載小型スペースシッププロジェクト (Project of Osaka Institute of Technology Electric-Rocket-Engine onboard Small Space Ship (PROITERES : プロイテレス))」が発足した。関西の大学初の超小型人工衛星である「プロイテレス」は、超小型人工衛星としては世界初となる電気推進機を搭載・運用する先進的なプロジェクトである。本衛星で行う予定であるリモートセンシングと推進機の運用ミッションを達成するためには、衛星の姿勢を安定させる姿勢制御と電力を安定供給できる電源システムが不可欠である。

本研究テーマにおいては、超小型人工衛星「プロイテレス」に搭載する姿勢制御機の一つである「伸展ブーム」の開発と、搭載機器に対し電力の供給を行う電源システムの構築を目的とする。

本論文の第 2 部は全 3 章より構成されている。各章の概要は以下に示すとおりである。

第 1 章では、プロイテレス衛星の開発経緯や行うミッションについて述べ、本研究の目的となる伸展ブームと電源システムの開発目的について説明した。

第 2 章では、人工衛星の姿勢制御系についての概要を説明し、プロイテレス衛星の姿勢制御アクチュエータである伸展ブームに求められる姿勢精度、姿勢安定度について述べた。要求性能から伸展ブームのサイジングを行い、数値計算によりメインの姿勢制御器である磁気トルカと併用したとき、軌道上で姿勢安定させることができるかを検証し、サイジングの妥当性を示した。

以上の結果から伸展ブームを製作し、加振試験と展開試験を通して打ち上げ時の衝撃に耐えうることを証明した。また、軌道上の衛星から得られた太陽電池パネルの発電状況から、伸展ブームの展開と姿勢安定が正常に行われていることを推定することができた。

第3章では, 宇宙開発合同会社 AstreX との共同開発により開発した電源システムについて述べた. 軌道上で衛星が最悪姿勢を取った際に受ける最小受光量の算出し, 太陽電池から得ることができる電力量の見積りを行った.

またプロイテレス衛星の各作動モードごとの機器の消費電力量を算出し, 発電電力量が消費電力量を上回っていることを確認した. これらの結果を元に電源供給システムと太陽電池パネルの開発し, 軌道上の衛星より取得した発電量から, 開発した電源システムが正常に作動していることを確認した.

## 本研究の結論

結論においては 2 つの研究テーマの内容と, 研究によって得られた結果と成果をまとめている.