

京都大学	博士 (工 学)	氏名	高橋 岳志
論文題目	Numerical and Experimental Study of Performance Improvement of a Microwave-Excited Microplasma Thruster Designed for Small Spacecraft (小型宇宙機用マイクロ波励起マイクロプラズマスラスタの性能向上に関する数値的・実験的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、宇宙機の姿勢・軌道制御や惑星間航行に不可欠の宇宙推進技術であるプラズマスラスタ (推進機) のうち、ナノサテライトと呼ばれる質量 10 kg 程度の次世代小型宇宙機のための電熱加速型マイクロプラズマ推進機について、マイクロ波によるマイクロプラズマ生成とプラズマの流れに関する統一的な数値解析モデルを構築するとともに、推進剤ガスとマイクロ波周波数に着目し、推進性能向上の方策を、数値モデル解析と実験の両面から検討し実証した結果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、様々な宇宙機の中でのナノサテライトの位置付けと期待される役割、およびその実用に不可欠なマイクロ推進機に要求される性能について説明している。さらに、これまで提案されているプラズマを用いたマイクロ推進機、すなわちマイクロプラズマ推進機の研究開発動向をまとめ、本研究の対象である電熱加速型マイクロプラズマ推進機の研究開発の考え方と方向を論じている。このようなマイクロプラズマ推進機は、微小容器内での効率的なプラズマ生成・維持とプラズマ粒子の加速が難しく、マイクロプラズマ推進技術はまだ確立されていない。</p> <p>第2章では、マイクロ波を励起源とするミリメートルサイズのマイクロプラズマ源と、サブミリメートルサイズのマイクロノズルから成るマイクロプラズマ推進機について、マイクロ波電磁界に対する有限差分時間領域法 (FDTD 法) とプラズマに対して電子と重粒子 (イオンと中性粒子) の温度が異なるとした二温度流体モデルに基づく数値解析モデルを構築している。具体的には、アルゴンを推進剤として、プラズマ源におけるマイクロ波の伝播・吸収とプラズマの生成・維持、およびプラズマ源からノズルに至るプラズマの亜音速・超音速流れを統一的に数値解析し、このマイクロプラズマ推進機が発生できる推力を算出した。さらに、マイクロプラズマ推進機の実験モデルについて、発光分光法を用いてプラズマの電子密度とガス温度を、またターゲット式微小推力測定法を用いて推進機の推力を測定している。モデル解析と実験との比較の結果、このモデルがマイクロプラズマとマイクロノズル流れの特性評価、およびマイクロプラズマ推進機の性能評価に適用できることを示し、マイクロプラズマ源におけるマイクロ波エネルギーの吸収機構について、プラズマと誘電体壁との境界近傍に局在する表面波が生じてプラズマ電子が効率的に加熱されること、さらにプラズマ電子と中性粒子との弾性衝突によりガスが加熱されることを明らかにした。</p> <p>第3章では、上で開発したモデルを用いてヘリウムを推進剤としたときの数値モデル解析を行い、さらに、ヘリウムと水素を推進剤とした実験を行っている。これら軽いガスは熱伝導性が高く、微小容器壁でのプラズマのエネルギー損失が顕著になるため、マイクロプラズマ推進機の推進剤として適さない、とこれまで考えられてきた。しかし、モデル解析と実験の結果、マイクロプラズマ推進機においても大型のプラズマ推進機と同様、ヘリウムや水素といった軽い推進剤が、比推力と呼ばれる推進性能の向上に有効であることを明らかにした。具体的には、ヘリウムや水素ではアルゴンと比較して、プラズマの電子密度は 1 桁程度低く、さらにガスの熱伝導率が 1 桁程度高いことに起因して熱伝導によるプラズマの熱エネルギー損失が大きい、電子温度は 10%程度高く、さらに電子と中性粒子との弾性衝</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	高橋 岳志
<p>突断面積が 1 桁程度大きいことに起因して電子から中性粒子への大きな熱エネルギー移動が損失を補うことにより、ガス温度の低下は 20%程度にとどまり、マイクロプラズマ推進機においても、ヘリウムではアルゴンより 3 倍程度、水素ではアルゴンより 5 倍程度高い比推力が得られることを実証した。</p> <p>第 4 章では、さらに、アルゴンを推進剤として、プラズマ励起のためのマイクロ波周波数を上の第 3 章・第 4 章で用いた 4 GHz (S バンド) から 11 GHz (X バンド) と高くしたときの数値モデル解析を行い、解析結果に基づきマイクロプラズマ推進機の実験モデルを改良して実験を行っている。その結果、マイクロプラズマ源の長さがマイクロ波波長の 1/4 程度のとき、プラズマによるマイクロ波エネルギーの吸収密度が最も高く、プラズマの電子密度、ガス温度、および推進性能が最も高くなることを明らかにした。高い周波数 11 GHz では 4 GHz と比較して、1/2 程度の長さのプラズマ源を用いて、約 2 倍高いマイクロ波エネルギー吸収密度、20%程度高いプラズマ電子密度とガス温度、および 10%程度高い推進性能が得られることを実証した。X バンドマイクロ波によりマイクロプラズマ推進機の小型化と高性能化を両立することが期待できる。また、マイクロ波周波数が高いとき、プラズマの発光スペクトルにはアルゴンイオン線が含まれ、したがって熱平衡分布からずれた高いエネルギーを有するプラズマ電子の存在が示唆されることを見出し、マイクロ波励起マイクロプラズマにおけるマイクロ波周波数とプラズマ電子エネルギーについて新しい知見を示した。</p> <p>第 5 章は結論であり、本論文で得られた結果を要約するとともに、今後の研究課題について触れ、将来のマイクロプラズマ推進機の発展について提言を行っている。</p>			

氏名

高橋 岳志

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、宇宙機の姿勢・軌道制御や惑星間航行に不可欠の宇宙推進技術であるプラズマスラスタ(推進機)のうち、ナノサテライトと呼ばれる質量 10 kg 程度の次世代小型宇宙機のための電熱加速型マイクロプラズマ推進機について、推進剤ガスとプラズマ励起のためのマイクロ波周波数に着目し、推進性能向上の方策を、数値モデル解析と実験の両面から検討し実証した一連の研究成果をまとめたものであり、その主な内容は以下のとおりである。

(1) マイクロ波を励起源とするミリメートルサイズのマイクロプラズマ源と、サブミリメートルサイズのマイクロノズルから成るマイクロプラズマ推進機について、マイクロ波電磁界に対する有限差分時間領域法とプラズマに対する流体モデルに基づく数値解析モデルを構築した。具体的には、アルゴンを推進剤として、プラズマ源におけるマイクロ波の伝播・吸収とプラズマの生成・維持、およびプラズマ源からノズルに至るプラズマの亜音速・超音速流れを統一的に数値解析した。さらに、発光分光法を用いてプラズマの密度・温度を、またターゲット式微小推力測定法を用いて推進機の推力を測定し、モデル解析と実験との比較により、このモデルが、マイクロプラズマとマイクロノズル流れの特性評価・機構解明、およびマイクロプラズマ推進機の性能評価に適用できることを示した。

(2) 上で開発したモデルを用いてヘリウムを推進剤としたときの数値モデル解析を行い、ヘリウムと水素を推進剤とした実験を行った。その結果、マイクロプラズマ推進機においても大型のプラズマ推進機と同様、ヘリウムや水素といった軽い推進剤が、比推力と呼ばれる推進性能の向上に有効であること、ヘリウムや水素ではアルゴンと比較して、熱伝導によるマイクロプラズマ源での熱エネルギー損失が大きいが、弾性衝突による電子から中性粒子への大きなエネルギー移動が損失を補い、マイクロプラズマ推進機の比推力向上に至ることを明らかにした。ヘリウムではアルゴンより 3 倍程度、水素ではアルゴンより 5 倍程度高い比推力が得られることを実証した。

(3) さらに、アルゴンを推進剤として、マイクロ波周波数をこれまでの 4 GHz から 11 GHz と高くしたときの数値モデル解析と実験を行い、マイクロプラズマ源の長さがマイクロ波波長の 1/4 程度のとき、マイクロ波エネルギーのプラズマによる吸収効率、プラズマの密度・温度、および推進性能が最も高いことを明らかにし、11 GHz では 4 GHz より 10% 程度高い推進性能が得られることを実証した。また、マイクロ波周波数が高いときのプラズマの発光スペクトルにはアルゴンイオン線が含まれることを見出し、マイクロ波励起マイクロプラズマにおけるマイクロ波周波数とプラズマ電子エネルギーの関係について新しい知見を示した。

以上要するに本論文は、マイクロ波によるマイクロプラズマ生成と、プラズマ源からマイクロノズルに至るプラズマの流れに関する統一的な数値解析モデルを構築し、さらに、推進剤ガスとマイクロ波周波数について、マイクロプラズマ推進機としての性能向上の方策を、モデル解析と実験の両面から実証したものであり、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 23 年 8 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。