

審査の結果の要旨

氏名 西井 啓太

修士(科学)西井啓太提出の論文「**Experimental study of the multiphase flow inside water thrusters for microspacecraft** (水を推進剤とする小型宇宙推進機内部における多相流れの実験的研究)」では、水を用いる超小型宇宙機用推進機において、その性能向上を目的として現象の観測と議論が行われ、性能向上への提案が示されている。現在、超小型衛星の利用の増加から、水を推進剤とする推進機の安全性が注目され、開発が広く行われている。加えて、従来の高圧ガス推進剤とは異なり、大気圧程度で液体充填可能であるという水推進剤のメリットは、構造質量を減少させ、体積あたりの宇宙機増速量を高めることに貢献する。しかし、水は大きな潜熱を持つために、液体充填された水が気体として使用されるためには多くの電力が必要となる。これによる低い推力電力比が水推進機にとって大きな問題の一つであり、宇宙機のミッションの幅を狭める要因となっている。この推力電力比を高めるためには、次の3つの方法がある。第一に、常温で水を蒸発させる気化室を用いて周囲機器の排熱を回収し投入電力を減らすこと。次に、希薄かつ凝縮性である水蒸気流のノズルにおける加速を効率化(比推力を増加)させること。そして水と金属等の燃焼により発生する化学エネルギーを利用することである。しかし、これら各現象に関する深い理解は未だ得られておらず、性能向上の妨げとなっている。本論文では、水を推進剤とした超小型宇宙機の推力電力比を高めるため、上述の方法に関する各現象の観察と議論を行い、各現象の理解を深める知見を得た上で性能を向上させる方法を提案している。本論文は、6章構成であり、各章において以下の事項が述べられている。

第1章では、超小型推進機の課題及びその解としての水推進機の利点を述べている。その上で現在研究開発が行われている水推進機を網羅的に述べ、その性能を推力電力比と比推力により示している。この中で、潜熱による影響を定量的に示した上で、推力電力比向上のために必要な指針を3つ挙げ、これらに関わる現象への深い理解が性能向上のために必要であることを示し、本論文の目的として定めている。

第2章では、推力電力比向上指針の1つ目、「気化室」を用いた常温蒸発システムに関して、液体の微小重力下における蒸発現象を観測し議論を行っている。さらに、可視化蒸発装置と落下塔を用いて、落下中の液体の挙動及び蒸発圧力の

時系列を取得することで、気化室内の液滴は非反射で壁面にピン留めされ、核沸騰によって蒸発することを明らかにしている。また、その沸騰挙動によって変化する接触面積を画像から算出し、微小重力によって液滴がより大きく飛散することを示している。

第 3 章では、水蒸気を推進剤とするマイクロノズルに関して、ノズル効率の測定と議論を行っている。真空槽内部に設置された、ノズル試験用スラストおよび推力測定スタンドを用いて、レイノルズ数及び過飽和度を変化させた際のノズル性能を得ている。結果、レイノルズ数 100-600 の範囲において、流出係数とレイノルズ数に明確な依存性がないことを明らかにしている。加えて、レイノルズ数が小さい範囲では粘性によって断熱的膨張が抑制されることから、温度と比推力効率の相関が小さくなることを示している。また、レイノルズ数が小さい範囲では、圧力推力の卓越から、壁面実装ノズルにおいて、低レイノルズ数領域における比推力効率の低下が抑制されることを示している。

第 4 章では、水とマグネシウムの燃焼を観測し、化学エネルギーを利用した水推進機実現のための議論を行っている。ワイヤ形状あるいはプレート形状マグネシウムの燃焼から、着火条件と燃焼場における燃焼生成酸化物の挙動を観察している。ワイヤ形状においては、断線時間から計算により求められた着火温度は、圧力上昇と共に減少し、熱発火理論上の限界温度を示している。プレート燃焼においては、2色撮影によって低い火炎温度が酸化物堆積に大きく寄与していることおよび、透過光撮影によって圧力によって酸化物が生成・飛散する状態が変化することを明らかにしている。

第 5 章では、これら 2-4 章の内容を実際に製作・提案されたモデルケース推進機に当てはめ、具体的な性能向上の指針を調査している。電力低下の手法や推力増加の方法について、気化室・ノズル・燃焼室それぞれに分けて紹介されている。

第 6 章では、本研究によって明らかになった事項及びその知見を具体的に推進機に応用する方法について、まとめられている。

以上を要約すると、本論文では、今後の小型宇宙推進機として重要となる水を推進剤とした小型宇宙推進機に対して、実験に基づいて水特有の相変化に関連する現象を明らかにし、特に推力電力比を上昇させるために有効と考えられる方法を提案している。本研究成果は、未だ宇宙実証例の少ない水推進機に対して、実現性及び利用範囲の拡大に貢献し、宇宙開発を加速させることが期待される。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。