

論文の内容の要旨

論文題目 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)

氏名 西井 啓太

本論文では、水を用いる超小型宇宙機用水新規において、その性能向上を目的として現象の観測が行われた。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、開発が広く行われ始めている。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メリットは、構造質量を減少させ、搭载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。本論文では水の推力電力比を高めることに関連し、以下の3つの点からアプローチを行っている。第一に、常温蒸発気化室を用いて周囲機器の排熱を回収、投入電力を減らすこと。次に、ノズル加速部における比推力を増加させること。そして水とマグネシウムの燃焼により発生する化学エネルギーを用いて潜熱の回収及び推進剤を加熱することである。これらの3つはいずれも既に用いられている、または提案されている手法であるが、さらなる向上または実現のために、それぞれの現象に関する知見が乏しいという問題がある。本論文は、6章からなり、構成は以下のようになっている。

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た。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で示した。推力電力比のうち、潜熱による影響を定量的に示した上で、性能向上のために必要な要件を挙げた。

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た。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を時系列で取得した。その結果、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が明らかになった。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た。

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、ノズル効率の測定を

行った。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た。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が明らかとなった。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が明らかとなった。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が示された。

第4章では、水とマグネシウムの燃焼を観測した。ワイヤ及びプレート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明らかにした。ワイヤ形状において、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た。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を、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た。

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て具体的な性能向上の指針が調査された。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。気化室では特に微小重力で蒸発伝熱が減少しうることに對し、流路設計による改善がそれを補える可能性がある。ノズルにおいては、本実験範囲 $100 < Re < 600$ では低いレイノルズ数が性能低下を起こさないことから、大口径ノズルを用いた低圧蒸発が適していることが示唆された。燃焼室においては、熱発火論的考え方が妥当であることが検証され、酸化物堆積を防ぐために10 m/s程度の流速が望ましいことが明らかにされた。

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。結論として、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。