

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小澤 晃平

修士(工学)小澤晃平提出の論文は、「A Study on Highly-Functional Hybrid Rockets Using Axial and Tangential Oxidizer Injections (酸化剤の軸/周方向噴射を用いたハイブリッドロケットの高機能化に関する研究)」と題し、英文による本文6章よりなっている。

ハイブリッドロケットは固体燃料と液体酸化剤を搭載することから、高い安全性、制御性、環境適合性、低コスト性等の利点が指摘されており、近年では、有人サブオービタル宇宙機スペースシップ2の主エンジンとして開発が進められるなど、期待が寄せられている。しかし、ハイブリッドロケットでは燃料発生量が燃料表面近傍の火炎からの熱伝達に左右されるため、燃焼進行に伴うポート直径の変化や、推力制御に伴う酸化剤流量変化によって酸化剤と燃料の混合比(O/F)が変化する。このO/Fシフトと呼ばれる現象は推進性能の低下や、推進剤残滓の発生を招くため、特に衛星打ち上げ等の高エネルギーミッションにおいて顕著な問題となると考えられている。

本論文において論文提出者は、O/Fシフトが飛翔性能にもたらす影響を飛翔シミュレーションによって評価し、推力とO/Fを同時に制御する高機能化の効果を検証しその有効性を示している。次に推力とO/Fの同時制御を実現する手法として、酸化剤の軸及び周方向の噴射量を独立に操作する強度可変酸化剤流旋回型(Altering-intensity Swirling-Oxidizer-Flow-Type (A-SOFT))を取り上げ、これと既往の2手法を比較しA-SOFTの優位性を示している。さらに酸化剤の旋回噴射時の燃料後退速度を理論的に評価し、燃焼実験によってA-SOFTが推力とO/Fの同時制御にとって良好な特性を有することを確認している。

第1章は序論であり、研究の背景としてハイブリッドロケットの特徴と設計における課題を述べ、推力とO/Fの同時制御の既往例をまとめ、本研究の目的と概要について述べている。

第2章では、鉛直に打ち上げられる単段式ロケットの到達高度を推力制御によって最適化する問題について、燃焼ガスのエンタルピーの変化、ノズルスロートの拡大、特性排気速度効率の変化等、O/Fシフトに影響される要因が飛翔性能に与える影響を飛翔シミュレーションによって包括的に評価している。その際、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃料後退速度特性に関して系統

誤差及びランダム誤差を含むモデルを実験データより構築し、燃料後退速度の評価誤差が打ち上げ性能に及ぼす影響を評価している。その結果、O/F シフトによって打ち上げ性能が低下する事、その主要因が燃焼ガスのエンタルピー低下と推進剤残滓である事を確認し、O/F と推力の同時制御の高機能化により性能期待値が向上することを示している。

第3章では、ハイブリッドロケットの高機能化手法として A-SOFT と、既往の2手法である後部酸化剤付与方式(Aft-end Oxidizer Addition (AOA))と圧力感度方式(Pressure Sensitive Fuel (PSF))との比較を行い、O/F を維持する推力制御を行う場合に A-SOFT ではスロットル下限が、一方 AOA ではスロットル上限が存在することを示し、また PSF では極めて特殊な燃料後退速度特性が必要になることを述べている。さらに、A-SOFT では燃焼室噴射前の酸化剤気化等が必要である反面、燃焼効率が高く安定する事、ベースの燃料後退速度が大きいためモーターの構造効率を向上できる事を指摘し、A-SOFT 方式の総合的な優位性を述べている。

第4章では、Marxman の境界層燃焼理論を軸対称管内乱流境界層に拡張し、酸化剤旋回流型ハイブリッドロケットの燃料後退速度を理論的に評価し、結果を既往の実験結果と比較し、境界層厚が管半径に達しない上流領域において実験値と良い一致を示す事、その下流において実験結果は発達乱流境界層に基づく予測値より高い側にずれ、管内発達乱流による予測値との間に位置する事、その遷移点が形状スワール数に依存して移動する事等を明らかにしている。

第5章では、8組の酸化剤質量流量と実効回転数に対して、ポリプロピレンと気体酸素を用いて A-SOFT ハイブリッドロケットの燃焼実験を実施し、酸化剤流量と実効回転数に対して燃料後退速度が単調に増加することを確認している。実験後の燃料から、時間および軸方向平均燃料後退速度と、燃料後退速度の軸方向分布を測定し、第4章で得た燃料後退速度の評価が実験結果と $\pm 3.5\%$ 以内の誤差でフィットすること、O/F と推力がそれぞれ $\pm 4.2\%$ と $\pm 4.7\%$ 誤差以内で予測されること等を確認している。

第6章は結論であり、本研究の成果をまとめ、今後の課題を述べている。

以上、要するに、本論文は、酸化剤の軸及び周方向噴射を用いることによりハイブリッドロケットの推力と O/F の同時制御が可能となり、輸送性能が向上することを示すとともに、その鍵となる燃料後退速度の評価方法を理論と実験によって確認しており、宇宙航空工学に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。