



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Fuel Regression Characteristics in Stabilized Combustion with Liquid Oxygen [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	津地, 歩
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14612号
Issue Date	2021-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82295
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ayumu_Tsuji_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 津地 歩

審査担当者 主 査 教 授 永田 晴紀
 副 査 教 授 藤田 修
 副 査 教 授 大島 伸行
 副 査 准教授 橋本 望

学位論文題名

Fuel Regression Characteristics in Stabilized Combustion with Liquid Oxygen

(液体酸素での安定燃焼における燃料後退特性)

ハイブリッドロケットは安全で運用コストの大幅な削減が可能ことから注目されているが、実用化例は初の民間宇宙機となったスペースシップワン等の限られた事例に留まっており、地球周回軌道への投入に成功した事例は無い。これは燃焼中や推力制御時の酸燃比変動 (O/F シフト) による比推力低下や低推力等の課題が解決されていないことが主な理由である。本研究は、液体酸化剤の直接供給により作動する端面燃焼式ハイブリッドロケットの開発を目的としている。端面燃焼式ハイブリッドロケットは軸方向に無数の微小ポートを設けた円柱状固体燃料を用いる。各微小ポートに酸化剤ガスを流し、ポート出口に微小拡散火炎が定在する。これら微小拡散火炎群が一体化して軸方向に高速で燃え進む。固体推進剤を上回る燃料後退速度が得られ、燃焼中や推力制御時に O/F シフトが発生しないことから、ブースタロケットへの適用が期待される。しかしながら、従来の研究は気体酸化剤供給で実験が行われており、これを実機に適用するには搭載した液体酸化剤をガス化させる必要があるのが課題であった。

本研究は、微小ポートに気体ではなく液体の酸化剤を供給した時の燃料後退特性を実験的に調べた最初の事例である。著者は併せて燃料後退モデルを構築し、その妥当性をモデルによる予測と得られた実験結果とを比較することにより検証している。本論文は以下に説明する 7 章から構成されている。

第一章は序論であり、研究背景と本研究の目的を説明している。安定燃焼という燃焼形態が説明された後、端面燃焼式ハイブリッドロケット燃料の軸方向燃焼速度は安定燃焼火炎の伝播速度と同値であることが述べられている。安定燃焼とは、ポート内酸化剤流速が臨界値を超えると火炎がポート内を燃え広げることが出来ず、火炎がポート出口に定在しながらポート出口近傍のガス化に伴って上流側に燃え進む燃焼形態のことである。端面燃焼式ハイブリッドロケットで形成される火炎はこれらポート出口に定在する微小拡散火炎群が一体化したものである。

第二章では実験装置の構成、実験手順、および得られた実験データの解析方法が説明されている。酸化剤は液体酸素、燃料は PMMA 角柱の中心に一つの微小ポートを軸方向に設けたものである。このポートに液体酸素を供給する。酸素を液相に保つために、液体酸素供給系は液体窒素により冷却されている。

第三章では実験により観察された燃焼形態の概略が述べられている。定常燃焼が得られる場合、消炎する場合、および不安定な燃焼をする場合が観察された。微小ポートの出口はベルに似た末広

形状に後退し、このベル形状の移動速度が火炎移動速度を与える。大気圧環境下で得られた火炎移動速度は 1 mm/s 未満であった。これらの燃焼形態から、液体酸化剤供給により安定燃焼が得られていると判断された。

第四章では軸方向燃料後退速度に及ぼすポート内径、ポート内酸化剤流速、および雰囲気圧力の影響が述べられている。実験により、酸化剤流速の増大およびポート径の減少により燃料後退速度が減少した。雰囲気圧力に対しては燃料後退速度が比例的に増大することも示された。これら実験結果を踏まえて、燃料後退速度を与える実験式が構築された。

第五章ではポート出口近傍での熱収支から燃料後退モデルが構築された。得られたモデルにより、ポート内径、ポート内酸化剤流速、および雰囲気圧力が燃料後退速度に影響する物理的な機構が明らかにされた。酸化剤流速が大きく、ポート内径が小さい条件では不安定な燃焼や消炎が観察されるが、これは液体酸素による冷却の影響が大きいことが上記熱収支モデルから明らかにされた。モデルにより予測される燃料後退速度は実験結果と定性的に一致した。燃料後退速度は、気体酸化剤が供給されるときはポート内径の影響をほぼ受けないのに対して、液体酸化剤が供給されるときはポート内径に依存するが、この違いは気体酸素と液体酸素との動粘性係数の違いが主な要因であることが示された。

第六章では、ポート内径、ポート内酸化剤流速、および雰囲気圧力がポート出口の後退形状に与える影響について述べられ、ポート出口形状を与える実験式が構築された。得られた実験式を用いて、燃焼に寄与しないまま下流に流出する液体酸素の流量が見積られた。

第七章は結論であり、本研究で得られた結果と新たな知見が纏められている。

これを要するに、著者は微小燃料ポート出口で固体燃料と液体酸化剤との界面に形成される拡散火炎の燃焼特性、および軸方向への燃料後退特性を実験的に明らかにし、ポート出口近傍の熱収支モデルを構築することで燃料後退速度が決定される基礎的物理機構を明らかにした。この成果は端面燃焼式ハイブリッドロケットの実用化に寄与するのみならず、液体酸化剤と固体燃料の拡散燃焼という、これまでほとんど研究例が無い燃焼場について実験データおよび新たな知見を提供しており、基礎燃焼学的にも価値が有ることから、宇宙推進工学および燃焼工学の分野に寄与するところが大なるものである。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位が授与される資格が有るものと認める。