



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Applicability of scaled testing for CAMUI-type hybrid rocket regression modelling [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Viscor, TOR
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14875号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85312
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Viscor_TOR_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 Viscor TOR

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

学位論文題名

Applicability of scaled testing for CAMUI-type hybrid rocket regression modelling (CAMUI 型ハイブリッドロケットの燃料後退モデルにおけるスケール則の適用性)

近年、軌道投入用小型ロケットや弾道宇宙観光用ロケット等の需要によりハイブリッドロケットが注目されている。これは、ハイブリッドロケットの本質的に非爆発性であるという特性によるものである。ハイブリッドロケットは相が異なる推進剤の組合せを使用するが、ゴムやプラスチック等の固体燃料樹脂と液体酸化剤の組合せを使用するのが一般的である。いずれも漏洩により爆発に至る危険が無い場合、製造、貯蔵、輸送、および打ち上げ運用の全工程で安全管理コストを削減出来る。これは小型システムや有人ミッションでは特に有利である。

従来のハイブリッドロケットは固体燃料のガス化速度の制約による低推力という課題を有していたが、これを解決する技術として CAMUI(Cascaded Multi-Stage Impinging Jet、縦列多段衝突噴流)方式が開発された。CAMUI 方式はその有効性が過去 20 年以上に渡って実験的に確認されて来たものの、推力規模は打上げ実証実験において最大 5 kN、地上燃焼実験において最大 10 kN に限られている。机上検討により、40 kN 規模の推力を点火から燃え切りまで安定して発生するロケットが実現出来れば、それをクラスタ化および多段化することにより、100 kg 以下の超小型衛星を低高度地球周回軌道に投入することが可能である事が見出された。大型モータ開発のためには CAMUI 型ハイブリッドロケットのスケール効果を考慮に入れた設計ツールの構築が重要となる。

本研究は、過去に蓄積された燃焼実験データおよび新たに本研究において実施された燃焼実験により、推力 2.5 kN(燃焼室内径 100 mm) から 40 kN(燃焼室内径 400 mm) までをカバーするスケール効果を考慮した設計ツールを開発し、その精度および誤差要因を定量的に明らかにしたものである。尚、本研究で行われた推力 40 kN の地上燃焼実験はこれまで国内で実施されたものとしては最大規模である。論文は以下に説明する 7 章で構成されている。

第一章は序論であり、本研究の背景を説明すると共に、CAMUI 型ハイブリッドロケットのこれまでの開発の流れを紹介している。続けて第二章で、過去に構築された固体燃料後退速度式を整理し、それらを用いて固体燃料の形状と各燃焼面の後退速度の各履歴を簡易的に予測するモデル、および要求される推力および燃焼時間を実現するモータを設計するためのモデルを組合わせた設計ツールを構築している。

第三章では、本研究で対象とする各スケールの燃焼実験装置を説明している。全てのスケールにおいて、燃料に高密度ポリエチレン、酸化剤に液体酸素が用いられた。いずれの実験においてもヘリウムガスによる加圧により液体酸素が燃焼室に供給されているが、本研究で実施された燃焼実験(推力 4 kN 級および 40 kN 級)においては、酸化剤供給配管を予冷する、および酸化剤供給系にバ

ルブを追加することにより、酸化剤供給開始時の非定常時間を短縮している。

第四章では構築された簡易モデルによる燃焼履歴予測の精度を検証している。誤差要因解析の結果、酸化剤供給開始時の非定常履歴が最大の誤差要因であることを明らかにした。その他の誤差要因として、流線に沿ってガス化した燃料が連続的に付加される過程のモデル化に起因する誤差、レイノルズ数により支配的な熱伝達機構が変化する事を考慮する際の誤差、および拡散律速モデルを適用する事による誤差を指摘し、検証している。また、過去の研究における燃料後退量計測法に起因する誤差の存在を指摘し、定量的に評価した。

第五章では、第四章で検証した要因により生じる各誤差を補正および改善する手法を提案し、その効果を定量的に検証している。具体的には、各燃焼面の後退速度を計算する際に採用する、それよりも上流でガス化した燃料ガスの流量を算出する方法の再検討、燃焼開始時の非定常履歴を補正するための「等価燃焼時間」の導入、燃焼開始時の非定常期間を短縮するための燃焼実験装置の改善、および過去の計測方法により取得された燃料後退量の補正が提案および実施され、それらによる精度改善の効果が定量的に検証された。

第六章では、第五章までで説明された設計ツールを用いて、商業利用に繋がる大推力モータを設計し、地上燃焼試験用モータを製作した。製作された推力 40 kN 級モータは、到達高度 100 km 規模の弾道飛行用ロケットとして利用可能であるのに加えて、クラスタ化・多段化により 100 kg 以下の超小型衛星を地球周回軌道に投入することも可能とする。製作された 40 kN 級モータによる地上燃焼実験は良好な結果を示し、提案された設計手法の高い有効性を示すものとなっている。

第七章では、第六章までに得られた知見が、CAMUI 型のみならず、その他の燃料形状のハイブリッドロケットの大型化開発においてどのように貢献し得るかを議論している。結論として、本研究の成果を生かすことで、より迅速かつ少ないリソースでハイブリッドロケットの大型化開発が可能であると述べている。

第八章は結論であり、本研究により得られた成果および知見を簡潔に纏めている。

これを要するに、本研究は、CAMUI 型ハイブリッドロケットの大型化開発をより迅速かつ低リソースで行うことを可能とする設計ツールを構築し、それを用いて国内最大規模となる推力 40 kN 級モータを製作し、良好な結果を得ることにより本設計ツールの有効性を示したものである。本研究により得られた知見の多くは、CAMUI 型のみならず、その他の燃料形状のハイブリッドロケットに適用可能なものであり、宇宙推進工学の分野に貢献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)の学位を授与される資格が有るものと認める。

尚、本成果により CAMUI 型ハイブリッドロケットを用いた事業化の高い実行可能性が示されたことで、航空宇宙分野の企業から投資が得られ、Mjornir Spaceworks 社の起業および著者の代表取締役社長就任に繋がっていることを付記したい。この事は、本研究が工学プロジェクトの成果としても高く評価されることを客観的に示すものである。