

CAMUI 方式ハイブリッドロケットの 燃焼特性に関する研究

学位論文内容の要旨

CAMUI 方式とは、ハイブリッドロケットの実用化を妨げる最大の要因である低推力の問題を改善するために考案された、ハイブリッドロケットの新しい燃焼方式である。ハイブリッドロケットの燃料グレインの最も一般的な形状は円筒である。酸化剤は燃焼室内に充填された円筒形燃料グレインの内壁(以下ポートと呼ぶ)に供給され、燃料表面に発達した乱流境界層内でガス化した燃料と混合して拡散燃焼する。ハイブリッドロケットの低推力は、火炎帯からの入熱量が乏しいため、燃料のガス化速度が遅く、十分な燃料流量を得られないことに起因する。CAMUI 方式では燃料グレインをいくつかのブロックにわけ、各段ブロックの間に狭い空隙を設ける。また、各段ブロックのポートが流れ方向に一直線に並ばないように、各段のポート位置を互いにずらして配置する。これにより燃焼ガスは各段燃料ブロックに垂直な衝突を繰り返しながら燃焼室を通過する。衝突噴流の優れた熱伝達特性により、よどみ領域で燃料が急速にガス化し、大燃料流量を得ることが可能となる。本燃焼方式では、燃料グレインの各段ブロックのポート、前端面(噴流が衝突する面)および後端面(燃料ブロックのもう一方の端面であり、次段燃料ブロック前端面に向かい合う面)が燃焼面として寄与する。

ロケットの推力は酸化剤流量と燃料流量の和である推進剤流量、および、両流量の比(O/F)によって決まる比推力の2つによって決定される。ハイブリッドロケットの燃料流量は、それ自体を制御して供給することが出来ず、酸化剤流量や燃料グレイン形状、圧力などの条件によって決まる燃料後退速度によって決定される。燃料グレイン形状は燃焼の進行により変化するため、燃料後退速度は時々刻々変化し、またそれにより O/F がシフトする。従って、ミッション要求を満たす燃料流量および O/F の履歴が得られる、燃料グレインの初期形状を選択する必要がある。そのためには、燃料グレインの燃料後退のメカニズムを解明し、燃焼室内の様々なパラメータが燃料後退特性に与える影響を取得する必要がある。CAMUI 方式のように衝突噴流領域において燃焼が進行し、かつ、燃料グレインが複数の段に分割されて燃焼する燃焼方式についての研究は、著者らが知る限りこれまでおこなわれていない。CAMUI 方式における燃料グレインの燃焼特性を取得することは、ロケットの実用化に向けた燃料グレイン設計に必要となる基盤データとして有益である。また、ハイブリッドロケットの燃焼は、固体燃料の熱分解、熱伝達、燃焼などが複雑に相互作用する現象であり、従来にはない燃焼場における燃焼メカニズムを解明することは、燃焼工学的にも非常に興味深いテーマといえる。以上の背景をふまえ、本研究は以下の点を目的としておこなわれた。

1. CAMUI 方式ハイブリッドロケットの燃料グレインの各燃焼面における燃料後退特性を取得し、実機ロケットモーターの燃料グレイン設計に必要な基盤データを構築する。また、CAMUI 方式ハイブリッドロケットのロケットシステムとしての特性について評価をおこなう。
2. 実用化に向けたロケットの大型化を視野に入れ、燃料グレインの寸法スケールの変化が燃焼特性に及ぼす影響を取得する。

本論文の構成と内容を以下に示す。

第一章は序論である。今後の宇宙開発においてハイブリッドロケットが必要とされる背景、従来型ハイブリッドロケットの持つ利点や欠点、本燃焼方式の特徴、本研究の目的などについて記述した。

第二章では CAMUI 方式ハイブリッドロケットの基礎的な燃焼特性について記述した。CAMUI 方式燃料グレインの主燃焼面となる前端面、後端面、およびポート内の燃料後退形状をラボスケールの燃焼器を用いた実験により取得し、数値計算により得られた燃料グレイン内の流れの様子と対比させながら考察した。従来型ハイブリッドロケットの燃料後退速度の理論式を基盤として、CAMUI 方式に固有となるパラメータを新たに付加した各燃焼面の燃料後退速度の実験式を構築した。パラメータとなる燃料グレイン形状や燃焼ガス流量、圧力などを変えて燃焼実験を実施し、それらの条件が各燃焼面や各段の後退速度に与える影響を取得した。上記内容における具体的な成果の一例として、(1) 各燃焼面における燃料後退速度は燃料グレイン内を通過する燃焼ガスの局所 O/F の影響を受けて段ごとに変化する、(2) 各燃焼面の燃料後退速度はポートを通過する燃焼ガスの流量流束に依存する、(3) ポート内および前端面では、流量流束の変化が燃料後退速度に与える影響は段によらずほぼ等しい、(4) 後端面では、燃焼面の局所により燃料後退速度の O/F 依存性が異なり、段ごとに異なる燃料後退特性を示す、ことなどを明らかにした。以上より得られた各燃焼面の燃料後退特性を従来型ハイブリッドロケットの燃料後退特性と比較することで、本燃焼方式のロケットシステムとしての特性および有効性の評価をおこなった。結果、CAMUI 方式ではポート、前端面、後端面の主燃焼面全てで従来型ハイブリッドロケットよりも高い燃料後退速度を得ることが可能であることなどを明らかにした。

第三章では CAMUI 方式燃料グレインの寸法スケールの変化が燃料後退速度特性に及ぼす影響について記述した。寸法スケールの異なる相似形燃料グレインを相似形燃焼器を用いて燃焼させたときに、各スケール間の燃料後退速度にみられる相似関係について、対流熱伝達の観点から考察をおこなった。また、第二章において構築した各燃焼面の燃料後退速度の実験式を拡張して燃料グレインスケールの項を含む新たな実験式として構築し、燃料グレインスケールの変化が実験式中の各パラメータの指数に与える影響について考察した。具体的な成果として、(1) 燃料後退速度が十分に大きい条件では、初段前端面、初段ポート入口領域、および最終段後端面を除く全ての燃焼面において、燃料グレインスケールの変化が燃料後退速度に与える影響は、燃料グレインスケールの変化が対流による熱伝達率に与える影響に一致する、(2) 燃料後退速度が小さい条件では、ふく射熱流束の影響が顕著に現れ、燃料後退速度の対流熱伝達のスケール則が成立しない、(3) 初段前端面では、対流熱伝達の相似関係に加え、燃焼反応速度論上の相似関係が成立するときに、他の燃焼領域と同様の燃料後退速度の相似関係が成立する、(4) 燃料グレインスケールの変化が本章において構築した実験式中の各パラメータの指数に与える影響は十分に小さい、ことなどを明らかにした。

第四章は結論であり、本研究により得られた結論を簡潔にまとめて記述した。

学位論文審査の要旨

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 戸 谷 剛

学 位 論 文 題 名

CAMUI 方式ハイブリッドロケットの 燃焼特性に関する研究

CAMUI 方式とは、ハイブリッドロケットの低推力の問題を改善するために考案された新しい燃焼方式である。ハイブリッドロケットの燃料グレインの最も一般的な形状は円筒であるが、CAMUI 方式ではいくつかのブロックにわけられる。燃焼ガスは各段燃料ブロックに垂直な衝突を繰り返しながら燃焼室を通過する。衝突噴流の優れた熱伝達特性により、よどみ領域で燃料が急速にガス化し、大燃料流量を得ることが可能となる。本燃焼方式では、燃料グレインの各段ブロックのポート、前端面（噴流が衝突する面）、および後端面（次段燃料ブロック前端面に向かい合う面）が燃焼面として寄与する。ハイブリッドロケットの燃料流量は、燃料後退速度によって決定される。燃料グレイン形状は燃焼の進行により変化するため、燃料後退速度は時々刻々変化する。ミッション要求を満たす燃料流量履歴を与える燃料グレインの初期形状を選択するためには、燃料グレインの燃料後退のメカニズムを解明し、燃料後退速度を予測する必要がある。また、ハイブリッドロケットの燃焼は、固体燃料の熱分解、熱伝達、燃焼などが複雑に相互作用する現象であり、従来にない燃焼場における燃焼メカニズムを解明することは、燃焼工学的にも非常に興味深いテーマといえる。本論文の構成と内容を以下に示す。

第一章は序論であり、今後の宇宙開発においてハイブリッドロケットが必要とされる背景、従来型ハイブリッドロケットの持つ利点や欠点、本燃焼方式の特徴、本研究の目的などについて述べている。

第二章では CAMUI 方式における基礎的な燃焼特性について記述している。主燃焼面となる前端面、後端面、およびポート内の燃料後退形状をラボスケールの燃焼器を用いた実験により取得し、従来型ハイブリッドロケットの燃料後退速度の理論式を基盤として、CAMUI 方式に固有となるパラメータを新たに付加した各燃焼面の燃料後退速度の実験式を構築した。具体的な成果の一例として、(1) 各燃焼面における燃料後退速度は燃料グレイン内を通過する燃焼ガスの局所 O/F の影響を受けて段ごとに变化する、(2) 各燃焼面の燃料後退速度はポートを通過する燃焼ガスの流量流束に依存する、(3) ポート内および前端面では、流量流束の変化が燃料後退速度に与える影響は段によらずほぼ等しい、(4) 後端面では、燃焼面の局所により燃料後退速度の O/F 依存性が異なり、段ご

とに異なる燃料後退特性を示す、ことなどを明らかにした。以上より得られた各燃焼面の燃料後退特性を従来型ハイブリッドロケットの燃料後退特性と比較することで、本燃焼方式のロケットシステムとしての特性および有効性の評価をおこなった。結果、CAMUI 方式ではポート、前端面、後端面の主燃焼面全てで従来型ハイブリッドロケットよりも高い燃料後退速度を得ることが可能であることなどを明らかにした。

第三章では燃料グレインの寸法スケールの変化が燃料後退速度特性に及ぼす影響について記述している。寸法スケールの異なる相似形燃料グレインを、相似形燃焼器を用いて燃焼させたときに、各スケール間の燃料後退速度にみられる相似関係について、対流熱伝達の観点から考察をおこなった。また、第二章において構築した各燃焼面の燃料後退速度の実験式を拡張して燃料グレインスケールの項を含む新たな実験式として構築し、燃料グレインスケールの変化が実験式中の各パラメータの指数に与える影響について考察した。具体的な成果として、(1) 燃料後退速度が十分に大きい条件では、初段前端面、初段ポート入口領域、および最終段後端面を除く全ての燃焼面において、燃料グレインスケールの変化が燃料後退速度に与える影響は、燃料グレインスケールの変化が対流による熱伝達率に与える影響に一致する、(2) 燃料後退速度が小さい条件では、ふく射熱流束の影響が顕著に現れ、燃料後退速度の対流熱伝達のスケール則が成立しない、(3) 初段前端面では、対流熱伝達の相似関係に加え、燃焼反応速度論上の相似関係が成立するときに、他の燃焼領域と同様の燃料後退速度の相似関係が成立する、(4) 燃料グレインスケールの変化が本章において構築した実験式中の各パラメータの指数に与える影響は十分に小さい、ことなどを明らかにした。

第四章は結論であり、本研究により得られた結論を簡潔にまとめている。

これを要するに、著者は各燃焼面の燃料後退速度が局所 O/F の関数として予測可能であること、および、燃料スケールの影響については対流熱伝達の理論によりほぼ説明可能であることを明らかにし、得られた知見を元に燃料後退速度の予測式を構築すると共に、化学反応速度および輻射の影響に起因する予測式の適用限界を示した。これらの知見は基礎燃焼学的に重要な知見であるのみならず、工学的にも安価で機動的な無火薬式小型ロケットの開発に寄与するところ大なるものがある。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あるものと認める。