

CAMUI 型ハイブリッドロケットの 燃料後退特性におよぼす流れ場の影響

学位論文内容の要旨

ハイブリッドロケットとは固体と液体の組合せを推進剤とするロケットのことであり、一般的には燃料に固体、酸化剤に液体を使用する。安全管理コストを大幅に削減できる等の利点を有するが、固体燃料の低燃焼速度に起因する低推力が大きな障害となり、これまで実用化が進展していない。CAMUI 型ハイブリッドロケットは、固体燃料の形状を工夫し、衝突伝熱による高い熱伝達率を利用して推力を向上させることを目指したものであり、実用化開発が進んでいる。

CAMUI 型ハイブリッドロケットの燃焼面は主に、ポート内面、前端面および後端面から構成される。これまでポート内面および前端面に関してはそれぞれ円管内流れ場および衝突流れ場における対流熱伝達機構をもとに後退速度式が構築されてきた。一方、後端面に関しては燃焼面近傍の流れ場に関して不明な点が多く、ポート内径および衝突距離への依存性から経験的な後退速度式が構築されるに留まっている。これらの後退速度式では燃焼面はそれぞれ一様に後退すると仮定しているが、実験においては同一燃焼面内において非一様な後退速度分布が得られている。非一様な後退特性分布は内部流れの分布に起因していると考えられるため、燃焼室内部流れを明らかにすることが重要である。局所後退特性によって決まる燃料の形状変化によって内部流れも変化する。この内部流れの変化により局所燃料後退特性も変化すると思われ、すなわち、内部流れと燃料形状は相互に関連しながら進展するが、その詳細な機構についてはほとんど明らかにされていない。

本研究は CAMUI 型ハイブリッドロケット燃料グレインの後退特性について、内部流れが局所的な燃料後退特性に与える影響について詳細に調査したものである。論文は 3 章で構成されており、内容は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、研究背景と研究目的について示す。これまでの研究の流れを概観し、どのような課題が残されているのかについて検討している。

第 2 章では、内部流れと燃料形状が相互に関連しながら進展する機構を解明する。その手段として、燃焼実験と数値解析をカップリングさせた手法を用いる。まず、流量などの実験条件をそろえて燃焼時間のみ異なる実験を行う。燃料の初期形状を用いて数値解析を行い、燃焼開始直後における内部流れ場を得る。得られた内部流れ場を、燃焼時間が短い燃焼実験より得られた燃料形状と比較することにより、内部流れと燃料後退特性の関連について調べる。次に、先に得られた燃焼後燃料形状を読み込んで計算格子を構築して数値解析を行い、燃料後退の進展により変化した内部流れ場を得る。これを先に得られた燃焼開始直後の内部流れ場と比較し、燃料の形状変化が内部流れにどのような変化を及ぼしたかを調べる。また、より長い燃焼時間の実験で得られた燃料形状と、燃料後退の進展により変化した内部流れとを比較して、燃料後退進展後の内部流れとその後の燃料後退特性との関

係を調べる。この手法により得られた知見は以下のとおりである。ポート入口側は円形状ではなく団扇状に後退する特徴があるが、これは、前端面に衝突してグレイン軸に対して垂直な面内方向に曲がった流れがポートに流入して再びグレイン軸方向に向きを変える際に生じる渦により、局所的に燃料後退が促進されることによるものである。後端面は複雑な凹凸のある後退形状を示すが、局所後退速度の分布は、後端面方向へ向かう速度ベクトルの大きさの分布に一致する。後端面中央部には高い後退速度を示す領域が存在するが、この領域は、上流ブロックの二つのポートからの噴流が干渉して生じる巻き上がり流れが後端面に衝突することによるものである。この巻き上がりは燃焼が進行して端面間のギャップが広がることにより急速に減衰し、このため、後端面中央部の後退速度は燃焼の進展に従って減少する。前端面においては燃焼開始直後においてはよどみ点が存在し、衝突流れ場における熱伝達機構が適用可能であると思われるが、このよどみ点は燃焼の進展と共に消滅する。前端面中央部付近には後退速度の高い領域が3か所存在するが、うち2か所は前述の巻き上がり流れによって生じた渦の再付着領域、もう1か所は巻き上がり流れの下部に生じる小スケールの渦によって熱伝達が促進される領域に対応する。

第3章では、最上流ブロックの前端面に見られる、酸化剤衝突領域における燃料後退に関して、酸化剤流速が燃料後退速度に及ぼす影響について調べる。過去の研究で、CAMUI型ハイブリッドロケットの燃料後退特性におけるスケール効果が調べられ、初段前端面および最終段後端面を除く各燃焼面で、対流熱伝達のスケール則が適用可能であることが明らかにされた。また、初段前端面については対流熱伝達の相似関係に加えて反応速度論上の相似関係を満たすことで、後退形状を予測できることが示された。これに付随して、同一レイノルズ数において酸化剤流速の増加により燃料後退速度が増大することが示されたが、その詳細なメカニズムは明らかにされていない。本章では、酸化剤噴流衝突場で固体燃料が燃焼する実験系を構築し、雰囲気圧力、酸化剤流量、および噴流径を変化させて燃焼実験を行い、以下の成果を得た。まず、燃料後退特性を適切に評価するため、超音波パルス反射法により燃料厚さをリアルタイムで計測し、本実験条件において燃料後退履歴は後退量にほとんど依存せず、時間に対して線形に後退すると考えても問題ないことを確認した。続いて火炎位置と燃焼面内の後退量分布との対応を調べ、青炎が存在する淀み点近傍の領域と、高い後退速度が得られる領域とがほぼ一致することを示した。レイノルズ数を揃え、流速を変化させた条件において、 C_2 バンドにより火炎形状を観察し、両流速条件において火炎形状に有意な差が見られないことを確認した。また、同一レイノルズ数条件において、流速の増加により後退速度が増加する現象が再現できていることを示した。この機構として、レイノルズ応力増大による火炎面発熱密度の増大と Thermo-chemical heat release (TCHR) による熱伝達促進の2つの機構を考え、検証を行ったいずれの機構においても、熱伝達が増大するためには、流速の増大により乱流強度が増大し、混合により律速されている発熱反応場の形状が変化していることが必要である。熱線流速計により乱流強度を計測し、いずれのレイノルズ数条件においても乱流強度は流速に対してほぼ一定であることから、流速の増加による燃料後退速度が増加する条件においても、発熱反応場の形状は保たれているという推察を得た。

第4章は結論であり、本研究で得られた成果を要約して述べている。

本論分で著者は、CAMUI型ハイブリッドロケットの局所後退特性と内部流れの関係を基礎的に明らかにし、燃焼実験と数値計算を組み合わせる独創的な手法により、内部流れと燃料形状が相互に関連しながら進展する機構を解明した。また、同一レイノルズ数条件において流速の増加による燃料後退速度が増加する条件においても、発熱反応場の形状は保たれているという推察を得た。これらの知見は基礎燃焼学的に重要な知見であり、観測された現象は興味深いものである。同時に、CAMUI型ハイブリッドロケットの燃料形状を適切に設計するための指針として寄与する結果が得られた。

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 型ハイブリッドロケットの 燃料後退特性におよぼす流れ場の影響

ハイブリッドロケットとは固体と液体の組合せを推進剤とするロケットのことであり、一般的には燃料に固体、酸化剤に液体を使用する。安全管理コストを大幅に削減できる等の利点を有するが、固体燃料の低燃焼速度に起因する低推力が大きな障害となり、これまで実用化が進展していない。CAMUI 型ハイブリッドロケットは、固体燃料の形状を工夫し、衝突伝熱による高い熱伝達率を利用して推力を向上させることを目指したものであり、実用化開発が進んでいる。

CAMUI 型ハイブリッドロケットの燃焼面は主に、ポート内面、前端面および後端面から構成される。これまでポート内面および前端面に関してはそれぞれ円管内流れ場および衝突流れ場における対流熱伝達機構をもとに後退速度式が構築されてきた。一方、後端面に関しては燃焼面近傍の流れ場に関して不明な点が多く、ポート内径および衝突距離への依存性から経験的な後退速度式が構築されるに留まっている。これらの後退速度式では燃焼面はそれぞれ一様に後退すると仮定しているが、実験においては同一燃焼面内において非一様な後退速度分布が得られている。非一様な後退特性分布は内部流れの分布に起因していると考えられるため、燃焼室内部流れを明らかにすることが重要である。局所後退特性によって決まる燃料の形状変化によって内部流れも変化する。この内部流れの変化により局所燃料後退特性も変化する予想される。すなわち、内部流れと燃料形状は相互に関連しながら進展するが、その詳細な機構についてはほとんど明らかにされていない。

本研究は CAMUI 型ハイブリッドロケット燃料グレインの後退特性について、内部流れが局所的な燃料後退特性に与える影響について詳細に調査したものである。論文は 3 章で構成されており、内容は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、研究背景と研究目的について示す。これまでの研究の流れを概観し、どのような課題が残されているのかについて検討している。

第 2 章では、内部流れと燃料形状が相互に関連しながら進展する機構を解明する。その手段として、燃焼実験と数値解析をカップリングさせた手法を用いる。まず、流量などの実験条件をそろえて燃焼時間のみ異なる実験を行う。燃料の初期形状を用いて数値解析を行い、燃焼開始直後における内部流れ場を得る。得られた内部流れ場を、燃焼時間が短い燃焼実験より得られた燃料形状と比較することにより、内部流れと燃料後退特性の関連について調べる。次に、先に得られた燃焼後燃料形状を読み込んで計算格子を構築して数値解析を行い、燃料後退の進展により変化した内部流れ場を得る。これを先に得られた燃焼開始直後の内部流れ場と比較し、燃料の形状変化が内部流れにどのような

変化を及ぼしたかを調べる。また、より長い燃焼時間の実験で得られた燃料形状と、燃料後退の進展により変化した内部流れとを比較して、燃料後退進展後の内部流れとその後の燃料後退特性との関係を調べる。この手法により得られた知見は以下のとおりである。ポート入口側は円形状ではなく団扇状に後退する特徴があるが、これは、前端面に衝突してグレイン軸に対して垂直な面内方向に曲がった流れがポートに流入して再びグレイン軸方向に向きを変える際に生じる渦により、局所的に燃料後退が促進されることによるものである。後端面は複雑な凹凸のある後退形状を示すが、局所後退速度の分布は、後端面方向へ向かう速度ベクトルの大きさの分布に一致する。後端面中央部には高い後退速度を示す領域が存在するが、この領域は、上流ブロックの二つのポートからの噴流が干渉して生じる巻き上がり流れが後端面に衝突することによるものである。この巻き上がりは燃焼が進行して端面間のギャップが広がることにより急速に減衰し、このため、後端面中央部の後退速度は燃焼の進展に従って減少する。前端面においては燃焼開始直後においてはよどみ点が存在し、衝突流れ場における熱伝達機構が適用可能であると思われるが、このよどみ点は燃焼の進展と共に消滅する。前端面中央部付近には後退速度の高い領域が3か所存在するが、うち2か所は前述の巻き上がり流れによって生じた渦の再付着領域、もう1か所は巻き上がり流れの下部に生じる小スケールの渦によって熱伝達が促進される領域に対応する。

第3章では、最上流ブロックの前端面に見られる、酸化剤衝突領域における燃料後退に関して、酸化剤流速が燃料後退速度に及ぼす影響について調べる。過去の研究で、CAMUI型ハイブリッドロケットの燃料後退特性におけるスケール効果が調べられ、初段前端面および最終段後端面を除く各燃焼面で、対流熱伝達のスケール則が適用可能であることが明らかにされた。また、初段前端面については対流熱伝達の相似関係に加えて反応速度論上の相似関係を満たすことで、後退形状を予測できることが示された。これに付随して、同一レイノルズ数において酸化剤流速の増加により燃料後退速度が増大することが示されたが、その詳細なメカニズムは明らかにされていない。本章では、酸化剤噴流衝突場で固体燃料が燃焼する実験系を構築し、雰囲気圧力、酸化剤流量、および噴流径を変化させて燃焼実験を行い、以下の成果を得た。まず、燃料後退特性を適切に評価するため、超音波パルス反射法により燃料厚さをリアルタイムで計測し、本実験条件において燃料後退履歴は後退量にほとんど依存せず、時間に対して線形に後退すると考えても問題ないことを確認した。続いて火炎位置と燃焼面内の後退量分布との対応を調べ、青炎が存在する淀み点近傍の領域と、高い後退速度が得られる領域とがほぼ一致することを示した。レイノルズ数を揃え、流速を変化させた条件において、C2バンドにより火炎形状を観察し、両流速条件において火炎形状に有意な差が見られないことを確認した。また、同一レイノルズ数条件において、流速の増加により後退速度が増加する現象が再現できていることを示した。この機構として、Thermo-chemical heat release (TCHR) による熱伝達促進と、レイノルズ応力増大による火炎面発熱密度の増大の2つの機構を考え、検証を行った。いずれの機構においても、熱伝達が増大するためには、流速の増大により乱流強度が増大し、混合により律速されている発熱反応場の形状が変化していることが必要である。熱線流速計により乱流強度を計測し、いずれのレイノルズ数条件においても乱流強度は流速に対してほぼ一定であることから、流速の増加による燃料後退速度が増加する条件においても、発熱反応場の形状は保たれているという推察を得た。

これを要するに、著者は、CAMUI型ハイブリッドロケットの局所後退特性と内部流れの関係を基礎的に明らかにし、燃焼実験と数値計算を組み合わせる独創的な手法により、内部流れと燃料形状が相互に関連しながら進展する機構を解明した。また、同一レイノルズ数条件において流速の増加による燃料後退速度が増加する条件においても、発熱反応場の形状は保たれているという推察を得た。これらの知見は基礎燃焼学的に重要な知見であり、観測された現象は興味深いものであることから、燃焼工学分野への貢献が認められる。同時に、CAMUI型ハイブリッドロケットの燃料形状を適切に設計するための指針として寄与するところ大なるものであり、宇宙推進工学分野への貢献が認められる。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。