

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Liquid Film Formation and Heat Transfer Characteristics  
of a Liquid Jet Obliquely Impinging onto a Wall  
(壁面に斜め衝突する液体噴流の液膜形成および伝熱特性)

申請者

佐古 憲孝

最終学歴

令和 5 年 3 月  
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻博士後期課程  
(研究指導認定見込)

学識確認

令和 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員  
(主査)

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 川那辺 洋

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 林 潤

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 藤本 仁

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	佐古 憲孝
論文題目	Liquid Film Formation and Heat Transfer Characteristics of a Liquid Jet Obliquely Impinging onto a Wall (壁面に斜め衝突する液体噴流の液膜形成および伝熱特性)		
(論文内容の要旨)			
<p>現在、次世代の小型宇宙探査機の開発が進められており、これらの姿勢制御には、二液式スラスタと呼ばれる小型のロケットエンジンが用いられている。このロケットでは燃料と酸化剤の燃焼反応により推力を発生させているが、同時に液体燃料の一部を燃焼室壁面へ噴射し液膜を形成させることで高温燃焼ガスから壁面を保護している。これをフィルム冷却と呼ぶ。燃料フィルムは壁面を守る一方、一部燃焼に寄与せず燃焼器から排出されて推力性能を下げてしまうために冷却流量を最適化することが求められる。本論文ではこの冷却過程を対象として、壁面に液体が斜め噴射された際の液膜形成過程という基礎的な物理現象に注目し、(1) 液体燃料の飽和温度以下の低温壁面、(2) 液体燃料の飽和温度より高い温度勾配を有する高温壁面の 2 つの壁面温度状態に対して生じる熱移動現象について研究が進められた。</p> <p>まず、第 1 章では、現在実機に用いられている各種スラスタのタイプおよび開発状況について広く述べるとともに、日本の HTV 等にも用いられている 2 液式のスラスタの利点および開発課題について論じている。これらのスラスタ内部の現象について調査するとともに特に冷却過程に不明な点が多く、十分なモデル化がなされていないために開発には実験的な手法が主であることを指摘しており、より安全で高度な制御・運用のためには本過程を明らかにすることが極めて重要であると結んでいる。</p> <p>そこで、まず第 2 章では、低温壁面に液体噴流が斜め衝突した際の液膜形成過程について実験および理論的検討を行った内容を述べており、液体噴流の運動量、衝突角度、液体噴流表面に生じる不安定性の成長が液膜の広がりおよび影響を網羅的に評価している。</p> <p>つづく第 3 章では、実際のスラスタの特に燃焼室上流部の状況を模擬するために、温度勾配を有する高温壁面に液体噴流が斜め衝突した際の液膜形成過程ならびに液膜/壁面間の伝熱特性に関する実験的検討を実施した。液膜挙動の可視化および壁面温度計測を同時に行い、加えて本章で構築した 3 次元非定常熱伝導逆問題解析を適用することで、液膜挙動と伝熱特性を対応付けて評価することを可能にした。</p> <p>さらに、第 4 章では、スラスタの出力を調整する際に実際に用いられる間欠燃焼にお</p>			

る冷却過程を明らかにするために、温度勾配を有する高温壁面に液体噴流をパルス噴射した際の液膜形成過程および伝熱特性について実験的調査を行っており、パルス周期における液体の総噴射量一定の下で噴射流量およびデューティー比を変更し、冷却特性の検討を行っている。

第5章では、液膜冷却流量の減少の要因となりうる、高温壁面上液膜の沸騰現象に起因する微粒化現象に着目し、実験および理論的検討を行っており、沸騰分裂によって壁面冷却に寄与せず飛びあがる液体が存在することを明らかにした。

最後に第6章では、本研究の結果をまとめるとともに、今後、得られた知見からどのようなモデル化が必要かを述べるとともに、さらに詳細に検討すべき点を明らかにしている。

以上、本研究ではスラスタにおける燃焼室壁面の冷却過程を明らかにするために、高温でかつ温度勾配を有する壁面に液体が斜め噴射された際の液膜形成・蒸発過程という基礎的な物理現象を対象として実験的・理論的解析を実施した。とくに、熱移動に注目して液体燃料の飽和温度以下の低温壁面および液体燃料の飽和温度より高い温度勾配を有する高温壁面の2つの壁面温度状態に対して、そのフィルム発達およびその冷却効果を明らかにした。これらの結果は小型推進装置の主流である2液式スラスタのより高度な開発および運用を支える重要な知見が得られたものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

現在、次世代の小型宇宙探査機の開発が進められており、これらの姿勢制御には、二液式スラスタと呼ばれる小型のロケットエンジンが用いられている。このロケットでは燃料と酸化剤の燃焼反応により推力を発生させているが、同時に液体燃料の一部を燃焼室壁面へ噴射し液膜を形成させることで高温燃焼ガスから壁面を保護している。これをフィルム冷却と呼び、燃料フィルムは壁面を守る一方、一部燃焼に寄与せず燃焼器から排出されて推力性能を下げてしまうために冷却流量を最適化することが求められる。本論文ではこの冷却過程を対象として、壁面に液体が斜めに噴射された際の液膜形成過程という基礎的な物理現象に注目し、壁面温度が液体燃料の飽和温度以下、および飽和温度より高くかつ勾配を有する高温壁面の2つの条件に対して研究が進められた。

まず、第2章では、低温壁面に液体噴流が斜め衝突した際の液膜形成過程について実験および理論的検討を行った内容を述べており、液体噴流の運動量、衝突角度、液体噴流表面に生じる不安定性の成長が液膜の広がり及び影響を網羅的に評価している。続く第3章では、温度勾配を有する高温壁面に液体噴流が斜め衝突した際の液膜形成過程ならびに液膜と壁面の伝熱特性に関する実験的検討を実施した。液膜挙動の可視化および壁面温度計測を同時に行い、加えて新たに構築した3次元非定常熱伝導逆問題解析を適用することで、液膜挙動と伝熱特性を対応付けて評価することを可能にした。さらに、第4章では、温度勾配を有する高温壁面に液体噴流をパルス噴射した際の液膜形成過程および伝熱特性について実験を実施し、パルス周期における液体の総噴射量一定の下で噴射流量およびデューティー比を変更し、冷却特性の検討を行っている。第5章では、液膜冷却流量の減少の要因となりうる、高温壁面上の液膜の沸騰に起因する微粒化に着目し、実験および理論的検討を行っている。

以上、本研究では、2液式スラスタにおける燃焼室のフィルム冷却過程を実験的な手法および理論解析を組み合わせることによって明らかにした。これら得られた結果は、今後のスラスタにおける開発および高度な運用において重要かつ一般性の高い知見を含んでおり、博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月17日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：                      年                      月                      日以降