

審査の結果の要旨

氏名 平井研一

工学修士 平井研一 提出の論文は「SiFRP アブレーション現象の解明とモデル化」と題し、9章からなっている。

近年、ロケットエンジンには比推力向上といった性能面だけでなく、高信頼性と低コスト化が求められている。アブレータ方式液体エンジンは、再生冷却方式よりも高信頼性／低コスト化の潜在可能性はあるものの、設計難度が高いため適用実績が少なく、一層の研究開発が必要となっている。一般に、ロケットには CFRP（炭素繊維強化フェノール樹脂）と SiFRP（シリカ繊維強化フェノール樹脂）のアブレータ2種が広く用いられているが、液体エンジンは固体モータに比べると、燃焼ガスの酸化性の高さ及び長時間燃焼性から、酸化環境としては厳しい。このため、液体エンジン燃焼室用アブレータ材としての総合評価では酸化性リセッションが支配的な CFRP に比べ、SiFRP が有利と考えられる。しかしながら、設計を行う上での背景となる SiFRP のアブレーション現象は、燃焼ガスによる複雑な加熱条件、材料の熱分解反応、アブレータ内での熱伝導現象など、複雑現象であるため、アブレータ設計手法は実機条件での実験的検証・確認によるものに留まっており、定量的な予測モデルの構築が行われていない状況であった。また、アブレーション現象に関する理解及び実験データも不足しており、アブレーション現象自体の解明や事象定義を行う必要があった。

このような現状を受け、本論文は、液体エンジン用アブレータ方式燃焼室の熱設計を行う上で必要となる、アブレーション現象の整理とその定量化研究、さらには燃焼室設計解析モデルの構築を目指したものである。

第1章は導入であり、液体エンジン用アブレータに関するこれまでの研究開発動向を紹介し、本研究の意義や位置付けを示している。さらに、アブレータ現象に関する説明を行った上で、研究課題を抽出し、本研究で提案するモデル化手法の概要について説明している。

第2章は SiFRP アブレーション現象の整理及び分析を行ったものであり、各種加熱試験やエンジン地上燃焼試験後のアブレータの目視観察結果をまとめ、得られる視覚的情報及び試験データを照らし合わせることで、アブレーション現象の解明を試みている。加熱面から順に炭化層・変色層・バージン層の3領域が存在することを明らかにし、炭化層／変色層界面特性の明確化、SiFRP 加熱面の熔融・白色化・リセッション開始条件の定量的な

推定を行っている。

第3章では、SiFRP アブレーション現象の時系列データの取得と定量的評価結果をまとめている。加熱試験や地上燃焼試験後に取得されるアブレータの炭化・変色量は長時間経過後の姿であり、変色層は加熱試験後にも伝熱により継続進行することから、加熱中及び加熱後の炭化変色層リアルタイム進行状況の知見を得ることは SiFRP 温度応答モデルを構築する上で有力な手段となる。そのため、超音波計測を活用し、変色層深部の特定が可能であることを示し、レーザー加熱試験や液体エンジン地上燃焼時の変色層位置のリアルタイム計測を行った結果をまとめている。

第4章では、SiFRP アブレーション解析モデルの構築及びその検証を行っている。1次元モデル、及びそれを拡張した、SiFRP の異方性を考慮した3次元のアブレーション解析モデルに関する支配方程式及び境界条件を示すと共に、解析に必要な熱物性データや熱分解反応データの取得を行っている。さらに、加熱率分布等の熱的境界条件が明確なレーザー加熱試験による SiFRP の温度応答や炭化層位置などの実験結果との比較により、解析手法の妥当性を確認している。

第5章では、燃焼室環境が推定困難な地上燃焼試験におけるアブレーション現象についての解析モデルの構築と、設計への展開を述べている。4章で検証した解析モデル結果と試験後の炭化量データを用い、燃焼室における熱的境界条件を逆推定することにより解析を試みている。地上燃焼試験において計測可能な位置における温度応答や、3章で確立した超音波反射による変色層位置推定結果などとの比較により、解析モデルの総合的な妥当性の検証を行い、本手法を用いたアブレータ設計手法を提案している。

第6章では、本論文の成果をもとに、液体エンジン SiFRP 燃焼室の熱応答予測及び設計に関する今後の研究課題をまとめている。また、各課題に対する具体的な研究計画案を提示している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。また、第8章、第9章は謝辞及び文献リストとなっている。

以上要するに、本論文は、SiFRP アブレータのアブレーション現象について、SiFRP 表面及び内部の物理現象を膨大な実験に基づき解明した上で、現象の定量的なモデル化に成功し、実機への適用も可能なアブレーション解析モデルの提案と検証を行ったものであり、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。