

## 論文の内容の要旨

論文題目 SiFRP アブレーション現象の解明とモデル化

氏名 平井 研一

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く国内適用は少ないが、欧米では研究開発が進行中である。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の基礎となるアブレーション現象の整理とその定量化研究を行ったものである。こうした研究は液体エンジン設計上重要にも関わらず、国内外の定量的研究報告例は非常に少ない。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。本研究では、耐熱限界温度こそ劣るが、耐酸化性／断熱性に優れるSiFRPを研究対象とした。強化繊維は強度・剛性向上／炭化層形状保持の役割を担っており、SiFRPはSiO<sub>2</sub>繊維が軟化・熔融に至ると変形、欠損が生じ形状保持できずリセッション（表面後退）開始に至るのに対して、CFRPは炭化層を構成する炭素が酸化性気流アタックで消費されるとリセッションする。このように両者のリセッション機構は異なる。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（酸化性ガス成分のH<sub>2</sub>Oモル分率が倍以上）、長時間燃焼性から酸化環境としては厳しい反面、燃焼室壁面を指定温度以下に保持する壁面冷却法が適用可能（フィルム冷却等）のため、表面リセッションの人為的抑制が可能である。この理由により、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SiFRPが有利となる。燃焼中の燃焼室内面形状変化は性能低下に直結することから、リセッションはシステム上回避することが望ましい。

アブレータは高温環境下で熱分解反応を起こし、低強度の炭化変色層を形成する。このため、燃焼室熱設計では燃焼終了時または指定時刻でバージン層が残存し、かつ（アブレータ～外筒間接着層温度<指定温度）となるように板厚設定を行う。この際、アブレータ温度応答予測手法の高精度化／高信頼性化が必要となるが、下記のように加熱率予測と連動したアブレータ温度予測が必要となる点が液体エンジンの特徴である。

- 噴射器からの推進剤噴射特性（壁面冷却法）の影響を考慮した加熱率分布
  - 加熱率分布（＝燃焼室・壁面近傍燃焼ガス温度分布）を反映したアブレータ温度予測
- 前者はエンジン噴射器特性の影響が支配的であるのに対し、後者はアブレータ固有特性と考えられる。本研究ではこれら2項を分離し、明確な境界条件を設定可能なレーザ加熱試験を利用したアブレータ温度予測モデル構築／検証を実施後、アブレータ（+解析モデル）

をいわばセンサに見立て、エンジン地燃後アブレタ炭化量データから燃焼室加熱率分布（噴射器特性）を逆算後、他の地燃データ（温度データや変色層浸透深さ等）に対する解析再現性に基づき、解析予測妥当性を総合評価するというアプローチを採った。

加熱試験後アブレタ切断面を目視観察すると、加熱面から順に炭化層・変色層・バージン層の3領域に区分できる。一方、エンジン地燃後のアブレタ表面を目視観察すると、炭化変色層浸透深さ（の機軸/周方向分布）、加熱表面溶融/白色化（=白筋）（の空間分布）等の膨大な3次元的視覚情報が得られる。これに対し、地燃時温度データのもたらず情報は限定的かつ離散的である。従って、地燃データ最大活用には、3次元視覚情報に対する定量分析/評価が必須と考えた。本研究では、加熱試験後/エンジン地燃後に観測されるアブレタ炭化変色層浸透深さと各界面の物理的意味/解釈、加熱表面の溶融/リセッション/白色化といった視覚情報の整理/分析/定量化が、アブレタ温度応答モデル構築と信頼性向上、更には液体エンジン燃焼室熱設計予測手法確立における最重要技術課題であると位置づけ、特に注力した点である。

#### 炭化変色層界面特性の明確化

加熱後アブレタ内部に形成される炭化変色層の物理的意味把握のため、地燃後/切断後SiFRP燃焼室複数位置で、微小径（0.75mm）ダイヤモンドドリルを利用して、①炭化層～変色層界面、②変色層～バージン層界面、③バージン層の3箇所からTG（熱天秤）試験用サンプルを抽出し熱重量計測を行い、加熱試験時に界面位置が経験した熱分解反応進行度・最高到達温度を定量化した。この結果、炭化層/変色層界面位置に対応する温度は550°C程度と推定した。TGデータでは、SiFRPフェノール樹脂熱分解主反応ピークは500～600°Cと推定されるが、炭化層/変色層界面位置は丁度この反応ピーク温度近辺に対応することが分かった。一方、変色層/バージン層界面の重量減少特性はバージン層領域とほぼ同様で、同界面位置は反応進行度という尺度では特徴づけられない。このため、追加試験としてSiFRPハロゲンランプ集光加熱試験を実施した。供試体内部に複数熱電対埋設状態で加熱試験を行い、（試験後実測値の変色層/バージン層界面と熱電対までの距離）と熱電対が試験中に経験した最高到達温度の実験相関をとった結果、変色層/バージン層界面位置は最高到達温度：約250°C位置に対応することを確認した。

#### SiFRP加熱面の溶融/白色化/リセッション開始条件の推定

SiFRP炭化層はC+SiO<sub>2</sub>の混合体で、SiO<sub>2</sub>融点は約1720°Cであることから、リセッション特性試験の仕立には、酸化性/非酸化性ガスでの強制対流・高加熱率環境が可能、かつ放射温度計でのSiFRP加熱面温度計測が可能であることが必要と考えた。このため、酸化性ガス（Air）/非酸化性ガス（N<sub>2</sub>）と作動ガス種が選択可能なJAXA/ISASアーク加熱試験を主試験設備とした。試験中の加熱面温度計測、試験前後SiFRP供試体寸法変化に基づくリ

セッション量算出、試験後供試体加熱面 SEM 分析による表面溶融状態観測、目視／可視光領域反射率／XRFに基づく加熱面表面白色化の定量化を実施した。この結果、SiFRP は気流ガスの酸化性・非酸化性に拠らず、加熱面ではSiO<sub>2</sub> 繊維融点（1720°C）以上で溶融開始するものの、シリカ繊維融点を数100°C上回る温度からリセッション開始することが分かった。また、加熱面 XRF 分析／反射率計測の結果、加熱面の白色化は、表層 C 含有率に依存した現象で、気流が非酸化性の場合には起こらず、気流が酸化性で炭化層 C が消費される環境で発生することが分かった。確認のため、地燃後／燃焼室切断後 SiFRP サンプルから可視光反射率と加熱面 C 含有率の実験相関をとると、加熱条件に拠らず、加熱面 C 含有率が少ないほど可視光反射率が高いという明確な傾向があることを確認した。よって、SiFRP 加熱面白色化は加熱雰囲気酸化性有無に依存しており、SiFRP 加熱面白色化度が高い場合には、加熱環境は酸化性であることが示唆される。

アーク加熱試験条件は気流圧力が低く、酸化性ガス種は Air のみ選択可能であるのに対し、液体エンジンは高動圧環境かつ酸化性ガス主成分は H<sub>2</sub>O であることから、アーク試験の SiFRP 溶融／リセッション開始条件推定結果の汎用性には疑問が残る。これについては今後の研究課題に挙げた。

#### 超音波計測による SiFRP 損耗量時刻歴の推定

地燃後に取得される炭化変色量は長時間経過後の姿である。変色層は加熱試験直後高温炭化層からの伝熱で加熱終了後も継続進行することから、加熱中／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 温度応答モデル妥当性検証の有力手段となる。本研究では超音波計測を活用した。定量評価に用いるため、超音波反射点をハロゲンランプ集光加熱試験等により推定した結果、入射超音波は変色層深部（約 300°C 位置）で反射しているとの結果を得た。本知見は後述のレーザ加熱試験／液体エンジン地燃時の超音波計測データ評価に反映され、SiFRP 解析予測モデル検証（過渡温度応答）の有力手段となった。

#### レーザ加熱試験を利用したアブレータ温度応答モデル検証

アブレータ内部温度応答モデル検証には、不活性雰囲気下加熱試験が可能、ユーザ持込み計測系（超音波計測等）に対する自由度が高く、試験ターンアラウンド時間が短いレーザ加熱試験（JAXA 研究開発本部（調布）1KW 半導体レーザ加熱試験）を利用した。試験は真空槽内に供試体セット後、Ar ガス雰囲気で波長：約 1 $\mu$ m レーザ光を照射する。□30mm 程度の供試体表面に疑似均一加熱するため、レーザ矩形スポット形状（半値幅：10mm×3mm 程度）ビームを 2 軸ガルバノスキャナミラーで走査、加熱領域を 2 次元的に拡大させた。加熱率分布は黒色アクリル樹脂へのレーザ光照射時焼損量空間分布と投入電力の関係から設定した。試験中は表面温度、内部温度、超音波反射の各計測、試験後は炭化変色量を計測した。加熱率 3 次元分布、供試体伝熱異方性、供試体保持用試験治具の熱影響を考慮した 3 次元アブレーション解析モデルに基づき、試験データに対する再現性（SiFRP 温度応答

モデル妥当性検証)を確認した。

#### 地上燃焼試験を利用したアブレータ燃焼室温度応答モデル検証

アブレータ燃焼室温度応答モデル確立には、加熱率予測と連動したアブレータ温度予測が必要となる。レーザ加熱試験に基づき構築/検証した温度予測モデルを利用し、地燃時炭化量データを再現できるように、噴射器特性が支配的因子である燃焼室加熱率分布(壁面近傍ガス温度分布)を逆算した。この時のアブレータ燃焼室温度応答モデル妥当性は、他の地燃データ(変色層浸透深さ、スロート周り加熱面近傍温度応答、超音波反射位置時刻歴)の解析再現性に基づき総合評価/検証した。尚、燃焼室内面形状は2次元軸対称形状だがSiFRP伝熱異方性から燃焼室温度応答予測には3次元解析モデルを用いた。

本研究は、SiFRPの①表面物理現象(白色化/溶融/リセッション特性)と②内部物理現象(炭化変色層の浸透)を実験研究に基づき解明した上で、定量モデル化を実施したものである。本研究成果は既に液体エンジン地上燃焼試験予測に適用されており、実用面で有用なレベルに達している。