

## 審査の結果の要旨

氏名 升岡 正

静止衛星や宇宙ステーション補給機などの軌道変換および姿勢制御に使用される二液式スラスタの燃焼器に対し、スラスタに対する高性能、長寿命化および高信頼性への要求から、従来品より耐熱温度が高く長寿命な材料の適用が進んでいる。燃焼器には従来から表面にシリサイドコーティングを施したニオブ合金材 (C103) が広く使用されているが、欧米では超耐熱合金としてイリジウム/レニウムや白金ロジウムを使用したスラスタがすでに市場に投入されている。国内においても、窒化珪素系セラミックスを使用したスラスタが実用化されているほか、JAXA では従来のニオブ合金材の表面に耐熱性および耐酸化性を向上させた新しいコーティングを施したスラスタの開発が進められている。このような超高温環境で長時間使用されるスラスタ燃焼器について、設計段階から寿命を精度よく予測できる手法の開発が期待されている。本研究では、スラスタ燃焼器の損傷として想定される延性、クリープ、疲労の各損傷を連続体力学の枠組で統合的に考慮できる理論体系である損傷力学に基づいて、寿命予測手法の構築を試みている。

本論文は6章で構成されており、以下に各章の内容を示す。1章では、上述したような本研究の背景と既往研究について論じ、目的および概要について述べている。

2章では、宇宙機の軌道変換および姿勢制御に使用される二液式スラスタの構成部品の中で、最も高温となる燃焼器の使用材料であるニオブ合金材に対して、損傷力学に基づく構成方程式を導出した。

3章では、室温環境における静的引張試験を実施し、構成方程式に使用される材料定数を同定した。損傷強度材料パラメータについて、3点による折れ線近似で表現することにより、実験結果が良好に再現された。低サイクル疲労試験については、材料損傷を延性損傷と疲労損傷の和であると仮定し、損傷変数  $D$  について設定値 (本材料については  $D = 0.1$ ) を境に疲労損傷強度材料パラメータを変化させることにより、応力・ひずみ曲線、損傷進展曲線および疲労寿命を良好に再現した。また、ひずみ振幅  $\Delta \varepsilon = 0.08$  の条件で同定した材料定数をそのまま用いて  $\Delta \varepsilon = 0.02$  の条件での挙動を再現したことにより、損傷力学モデルの妥当性が確認された。さらに、試験後の試験片破断面観察結果と損傷進展曲線 (延性損傷+疲労損傷) に関する計算結果を比較し、損傷進展メカニズムに

について考察することにより、計算結果が物理現象と良好に対応することを確認した。

4章では、1500°Cの超高温環境でクリープ試験、静的引張試験を実施し、得られた実験結果に基づいて損傷力学モデルを同定した。また、クリープ疲労試験を実施し、構成方程式および同定した材料定数をそのまま用いてクリープ疲労解析を実施した。その結果、ひずみ履歴とクリープ疲労寿命を良好に再現できており、本手法の有効性が確認された。さらに、クリープ疲労試験後の試験片破断面観察から、本試験の損傷はクリープが支配的であり、計算結果と実際の損傷形態は定性的に一致することを確認した。

5章では、人工衛星用二液式スラスタの燃焼器（実機）を対象としてクリープ疲労解析を実施した。広範囲な温度変化に対応するために、クリープ疲労解析で使用する材料定数の温度依存性について算定した。すなわち、700°Cにおける静的引張試験データや977°Cにおけるクリープ試験データ（文献値）を活用して、室温～1500°C間の温度における材料定数の補間式を求めた。解析対象として推力 22N の小推力二液式スラスタを選択し、連続噴射中の最高温度について1250°Cと1500°Cの2種類のケースで、部分連成解析によるクリープ疲労解析を実施した。連続噴射1250°Cのクリープ疲労寿命について妥当な結果を得た。また、連続噴射1500°Cの条件では延性損傷により寿命が大きく低下すること、パルス噴射の場合は連続噴射と比べクリープ疲労寿命が長くなること、すべての噴射モードでクリープ損傷が支配的であること、パルス噴射で懸念されていた疲労損傷は非常に小さいこと、連続噴射1500°Cの条件下では延性損傷の割合が増加することなどが明らかとなった。

6章は、本論文の結論である。本研究により、延性損傷、疲労損傷、クリープ損傷を考慮した損傷力学に基づく構成方程式の利用、人工衛星用二液式スラスタ燃焼器のクリープ疲労寿命解析のための局所的破壊解析手法（部分連成解析）の活用について、その有用性を示唆する結果を得たことを述べている。すなわち今後、一層需要が高まるであろう衛星用スラスタ燃焼器の信頼性評価に関し、提案した手法は高い工学的価値を有している。

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。