

論文の内容の要旨

論文題目 損傷力学に基づくニオブ合金材の機械特性モデリングと
クリープ疲労解析

氏 名 升岡 正

静止衛星や宇宙ステーション補給機等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、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、窒化珪素系セラミクスを使用したスラスタが実用化されている他、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使用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する手法への期待は大きい。

スラスタ燃焼器の損傷として想定される、クリープ、疲労を含む材料の弾粘塑性現象を材料内部に発生する損傷や破壊と関連付ける力学体系として、連続体損傷力学は高いポテンシャルを有している。しかし、構成方程式が複雑であり材料定数値の同定方法が困難かつ明瞭でないため、実際の工業機器の設計および構造解析の現場において実用的に使用されているとは言い難い状況である。

損傷力学に関する既往研究について、金属材料への損傷力学モデルの適用に関しては、鉄やアルミ等の合金材について延性損傷の発展形態を豊富な実験データとともに詳細に報告した例や、高サイクル疲労の損傷について弾性損傷におけるマイクロ損傷を表現するために、Two-Scale Modelに基づく定式化により精度よく解析する手法について報告されている。また、高温環境におけるクリープおよびクリープ疲労損傷について損傷力学を適用した研究については、温度範囲20-500℃における鋳銅への適用例や、多軸クリープ疲労損傷への拡張とクロムモリブデン鋼への適用例がある。しかし、著者らの知る限り、スラスタ燃焼器のような超高温環境である1000℃以上の温度で使用される耐熱材

料に損傷力学を適用した研究は行われていない。また、スラスタ燃焼器の寿命評価手法として、従来は損傷を考慮しない構造解析を実施し、その応力-ひずみ履歴から疲労であれば疲労寿命曲線、クリープであればクリープ寿命曲線等により個別に寿命を評価して要求を満たすか確認する手法が一般的である。しかし、このような評価手法では、各損傷モードの相互作用とその寄与度、損傷による応力再配分を評価できない。また、最終的には衛星システム側の要求を満足するか評価するために、地上での長秒時燃焼試験等が行われているが、多大な費用をかけて実施しているのが現状である。

本研究では、二液式スラスタの寿命評価で重要となる燃焼器について、設計段階から解析によって精度よく寿命を予測する手法を確立することを目的とする。二液式スラスタの寿命評価に損傷力学を用いることで、想定される各損傷モードの相互作用やその寄与度、損傷による応力再配分を評価可能な手法を確立する。対象材料は、現在の二液式スラスタに広く使用されているニオブ合金とする。現状、ニオブ合金を使用した二液式スラスタの寿命は、ニオブ合金製燃焼器の表面に施された耐酸化用のシリサイドコーティングの寿命で決定されるが、より高い耐熱性をもつコーティングがJAXAにおいて開発中であり、新コーティングが適用された場合スラスタ燃焼器の使用温度が引き上げられることが想定される。このような場合、表面の耐酸化コーティングの寿命が要求を満たしたとしても、基材であるニオブ合金製燃焼器が寿命の律速となる可能性がある。よって、使用温度環境の上昇によるニオブ合金材の寿命への影響を評価する手法が求められる。

本論文は上述の序論(1章)から結論(6章)に至る全6章により構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

2章では、本研究の対象である二液式スラスタの特徴と作動原理について説明し、対象材料となるニオブ合金材に関して概要を説明する。さらに、本研究で用いる損傷力学について概略を述べ、ニオブ合金に対し損傷力学を適用する際に使用および導出した構成方程式について示す。

3章では、室温環境における機械特性試験およびこれに対応する損傷力学を用いた解析について具体的に示す。機械特性試験として実施した静的引張試験および低サイクル疲労試験について、まず使用した試験片および試験方法について述べる。また、構成方程式の定式化および使用される材料定数の同定結果について、材料定数同定の過程を含め論じる。本章最後には、得られた損傷力学モデルを低サイクル疲労解析に適用し、実験および解析で得られた損傷および寿命について比較・評価を行う。また、試験片破断面と解析結果との関係を考察し、物理現象との対応について評価を行う。

4章では、1500℃の超高温環境に対応する機械特性試験およびクリープ疲労解析について示す。機械特性試験として実施した、1500℃の環境におけるクリープ試験、静的引張試験およびクリープ疲労試験について、使用した試験片および試験方法について述べる。また、構成方程式の定式化および使用される材料定数の同定結果について、材料定数同定の過程

を含め論じる。本章最後には、得られた損傷力学モデルをクリープ疲労解析に適用し、試験片破断面との対応関係を含め実験および解析で得られた損傷および寿命について比較・評価を行う。

5章では、室温および1500℃の環境で得た損傷力学モデルをベースとした、衛星用二液式スラスタ燃焼器のクリープ疲労解析手法について示す。まず、本解析で用いる部分連成解析の適用範囲について評価するために、評価としてシンプルな応力範囲:0-90MPaの試験結果を元にクリープ疲労解析を実施する。次に、700℃の静的引張試験および977℃のクリープ試験について材料定数を同定し、構成方程式で使用される材料定数の温度依存性について評価する。本章後半では、スラスタの連続噴射時およびパルス噴射時におけるスラスタ燃焼器の三次元熱伝導-弾粘塑性解析の有限要素解析およびポスト処理による三次元弾粘塑性損傷解析を実施するとともに、スラスタの噴射モードおよび燃焼器温度の寿命への影響を評価する。

6章では、本研究で得られた結論を示す。本研究の主な結論は以下の通りである。

1. 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および液式スラスタの構成部品の中で最も高温となる燃焼器に用いられている材料であるニオブ合金材について、損傷力学を適用し構成方程式を導出した。
2. 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、解析は実験結果を良好に再現した。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 についてある値を境に変化させることで応力・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。さらに、試験後の試験片破断面観察結果と損傷進展曲線および損傷変数（延性損傷、疲労損傷）に関する解析結果を比較し、損傷進展メカニズムについて考察し、解析結果が物理現象と良好に対応することを確認した。
3. 1500℃の超高温度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、ひずみ履歴およびクリープ疲労寿命を良好に再現できており、本手法の有効性を確認した。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、解析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。
4. 人工衛星用二液式スラスタの燃焼器に対するクリープ疲労解析を実施した。スラスタ燃焼器の解析を行う前に、シンプルなケースである1500℃環境における応力制御のクリープ疲労試験（応力範囲0 - 90 MPa）に対して部分連成解析によるクリープ疲労解析を実施し、その適用範囲について評価した。また、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評価した。

5. 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、連続噴射中の最大温度について、1250℃と1500℃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℃のクリープ疲労寿命について妥当な結果を得た。連続噴射1500℃の条件では、延性損傷により寿命が低下することが明らかとなった。パルス噴射については、連続噴射に対し、クリープ疲労寿命が長くなることが明らかとなった。また、すべての噴射モードでクリープ損傷が主体的であること、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が明らかとなった。さらに、連続噴射が1500℃の条件については延性損傷の割合が増加することが明らかとなった。

以上から、本研究により損傷力学に基づく構成方程式を用いた人工衛星用二液式スラスタの燃焼器のクリープ疲労解析を行う手法について目途を得た。本技術を用いることで、スラスタ燃焼器について設計段階から、使用温度や噴射パターン等の異なるケースに対しクリープ疲労寿命を評価することが可能となる。