

(様式 5)

2021 年 12 月 16 日  
Year Month Day

## 学位（博士）論文要旨

(Doctoral thesis abstract)

論文提出者 (Ph. D. candidate)	工学府博士後期課程 機械システム工学専攻 (major) 2019 年度入学 (Admission year) 学籍番号 19833001 氏名 五十嵐 喜寅 (student ID No.) (Name)
主指導教員氏名 (Name of supervisor)	小笠原 俊夫
論文題目 (Title)	直交三次元織物 SiC 繊維/SiC 基複合材料の高温におけるクリープ・疲労メカニズム解明と変形・寿命予測の力学モデル構築 Creep-fatigue mechanisms and lifetime prediction modeling for orthogonal 3D-woven SiC fiber/SiC-based matrix composites at elevated temperature
論文要旨（2000 字程度） (Abstract(400 words)) ※欧文・和文どちらでもよい。但し、和文の場合は英訳を付すこと。 (in English or in Japanese) 燃料消費率の優れた航空機ターボファンエンジンの開発のため、SiC 繊維強化 SiC 基 (SiC-f/SiC) 複合材料のエンジン高温部への適用が進められている。今後適用が検討されているタービン動翼等の回転部品では、材料は高温・高圧の燃焼ガスによる酸化の影響を受ける。また、エンジンの起動/停止時の繰返し荷重と熱サイクル、更には遠心力による一定荷重などが材料に作用する。したがって、高温酸化雰囲気中における、定荷重、繰返し荷重、更にはこれらが複合した荷重下での材料の損傷・破壊メカニズムを解明したうえで、変形・寿命予測のための力学モデルを構築する必要がある。そこで本研究では、直交三次元織物 SiC-f/SiC 複合材料を対象とし、高温での定荷重、繰返し荷重、複合荷重下での SiC-f/SiC 複合材料の力学挙動（変形挙動・材料寿命）を実験的に評価したうえで、これらの予測を可能とする力学モデルを構築することを目的としている。 第 1 章では、本研究における背景と目的を述べている。力学モデル構築に必須となる強化材 (SiC 繊維) の信頼性の高いワイブルパラメータの推定手法が確立されていないこと、実験結果に基づいて SiC-f/SiC 複合材料の時間に依存した損傷・変形挙動をモデル化・定式化した研究例が少ないこと、材料寿命に及ぼす定荷重と繰返し荷重の相互影響については調査されていないこと、き裂進展プロセスを実験的に評価した上で力学モデルを構築した研究例はほとんどないことを示した。 第 2 章では、単繊維と繊維束引張り試験の妥当性を検証したうえで信頼性の高い SiC 繊維のワイブルパラメータを得ることを目的に、種々の SiC 繊維に対して単繊維と繊維束引張り試験から推定されるワイブルパラメータの直接比較を行った。その結果、尺度母数はいずれの方法でも同等の値が得られたものの、形状母数は、単繊維引張り試験結果と比較して、繊維束引張り試験結果から推定された値の方が高くなる傾向を示した。繊維直径の	

ばらつきの影響を考慮した繊維束引張り試験のモンテカルロシミュレーションを実施したところ、実験結果とは異なり、形状母数は単繊維引張り試験結果とほとんど一致することがわかった。長さ1 mにわたるSiC繊維の直径を測定したところ、繊維に沿った顕著な変動が認められた。ゲージ長が相対的に長い繊維束引張り試験では、評価部間における繊維直径分布の影響を考慮する必要がある可能性が示唆された。

第3章では、直交三次元織物SiC-f/SiC複合材料を対象に、高温真空中・定引張り荷重下における時間依存の損傷・変形挙動を記述する力学モデルを構築した。室温引張り試験中のその場観察、1200℃・Ar雰囲気中における負荷-除荷引張り試験、1200℃・真空中における定荷重引張り試験を実施することで、材料の変形挙動に及ぼす微視的損傷の影響を実験的に評価した。実験結果に基づいて、線形粘弾性モデルとシアラグモデルを組み合わせた直交三次元織物SiC-f/SiCの時間依存型非線形応力-ひずみ応答モデルを構築した。提案したモデルによる計算結果は、タービン部品へ本材料を適用した際に想定される応力域において実験結果とよい一致を示した。これは本論文において重要な成果であり、SiC-f/SiC複合材料の更なる実用化へ貢献するものである。しかし、高応力域では、時間経過に伴う0°層におけるマトリクスき裂進展や繊維破断の影響を考慮する必要性が示唆された。

第4章では、直交三次元織物SiC-f/SiC複合材料を対象に、繰返し引張り荷重下における材料寿命に及ぼす定荷重および繰返し荷重の相互影響を実験的に評価した。1100℃・大気中において、定負荷速度引張り試験、定荷重引張り試験、引張り-引張り疲労試験を実施した。各試験後には、破断面の微視的観察、単繊維Push-out試験による界面力学特性評価をそれぞれ実施し、損傷・破壊メカニズムについて評価を行った。得られた試験結果に基づき、定荷重と繰返し荷重による損傷をそれぞれ考慮した簡易的な寿命予測モデルを構築した。モデルによる寿命予測結果は、繰返し荷重下における材料寿命の全体的な傾向は表現できるものの、酸化に伴うき裂進展挙動を実験的に評価する必要がある、材料寿命に及ぼす繊維/マトリクス界面での酸化や摩耗の影響度合いを明確にする必要性が考えられた。

第5章では、直交三次元織物SiC-f/Y<sub>2</sub>Si-Si基複合材料を対象に、高温大気中での繰返し荷重下におけるき裂進展挙動を実験的に評価した。平滑材試験片と片ノッチ材試験片に対して、温度1100℃・大気中における引張り試験ならびに引張り-引張り疲労試験を行った。さらに、任意のサイクル数にて疲労試験を中断し、ノッチ導入部からのき裂進展挙動をデジタル顕微鏡およびX線CT装置を用いて観察した。得られた実験結果に基づき、セラミックスにおけるき裂進展モデルを適用・修正することで、繰返し荷重下におけるSiC-f/Y<sub>2</sub>Si-Si基複合材料の疲労寿命を予測する力学モデルを構築した。これによって、既に取得されている疲労寿命については予測可能であることを示した。本章で提案した力学モデルはこれまでに例はなく、本論文における重要な成果である。

第5章は本研究の結論であり、前章までに得られた結果をまとめた。

(英訳) ※和文要旨の場合(400 words)

To improve the fuel efficiency of commercial turbo-fan engines, major engine manufacturers have applied SiC fiber reinforced SiC matrix (SiC-f/SiC) composites to hot sections. The SiC-f/SiC composites applied to turbine rotor blades of turbo-fan engines are exposed to an oxidizing atmosphere at high temperatures. Moreover, the composites are subjected to constant tensile load because of centrifugal force and cyclic tensile loads when the engine starts and stops. Therefore, it is necessary to clarify and predict the damage and rupture behavior of SiC-f/SiC composites under a combination of constant and cyclic tensile loads at elevated temperature in an oxidizing atmosphere. The objective of this study is examination and mechanical modeling of the mechanical behavior for an orthogonal 3D-woven SiC-f/SiC composite at elevated temperature.

The first chapter presents research background and objectives. The chapter overviews various studies for tensile strength distribution of the reinforcement (SiC fiber). Also, the chapter overviews experimental and numerical studies of the damage and rupture behavior of SiC-f/SiC composites.

In the second chapter, tensile strength distributions of various SiC fibers were evaluated by monofilament and multifilament tow tensile testing. The estimated Weibull parameters by each method were directly compared. The effect of diameter variation in individual fiber on the multifilament tow test results was investigated by Monte-Carlo simulations.

In the third chapter, a mechanical model to predict the time-dependent damage and deformation behavior of an orthogonal 3D-woven SiC-f/SiC composite under constant tensile loading at elevated temperature in vacuum was proposed. It was established using the linear viscoelastic model, micro-damage propagation model, and a shear-lag model.

In the fourth chapter, the effect of the constant and cyclic tensile loads on an orthogonal 3D-woven SiC-f/SiC composite under cyclic tensile loads was examined. Monotonic tensile test, constant tensile test, and tension-tension fatigue tests were conducted at 1100 °C in air. A lifetime prediction model under cyclic tensile load was also proposed.

In the fifth chapter, the crack growth behavior of an orthogonal SiC-f/  $Y_2Si$ -Si based matrix composite under cyclic tensile loads at elevated temperature in air was examined. Tension-tension fatigue testing for a single-edge notched specimen was conducted at 1100 °C. The fatigue test was interrupted several times for measuring the crack length from the notch tip. A lifetime prediction model was also proposed by modifying a fracture mechanics model for monolithic ceramics.

The concluding remarks of the present study are provided in the sixth chapter.