

氏 名 戸端 佑太

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2227 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 短繊維強化セラミックス複合材料の損傷累積機構

論文審査委員 主 査 後藤 健

JAXA 宇宙科学研究所 准教授

稲富 裕光

宇宙科学専攻 教授

徳留 真一郎

宇宙科学専攻 准教授

竹内 伸介

宇宙科学専攻 准教授

横関 智弘

東京大学 大学院工学系研究科 准教授

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 戸端 佑太

論文題目 短繊維強化セラミックス複合材料の損傷累積機構

Accumulative damage mechanics of short fiber reinforced ceramic matrix composite

Ceramic Matrix Composite (CMC) has been expected as a lightweight material for a hot structure, e.g. engines of rockets and airplanes, thermal protection systems of reusable spacecraft, brake disks and telescopes of astronomical satellites. However, CMC has been mostly reinforced with woven fabrics, requiring long processing time to fold fibers precisely and to make dense ceramic matrix.

One possible solution to reduce manufacturing cost is to reinforce with short fibers. A short fiber reinforced CMC doesn't need precise fiber alignment but randomly disperses in the hot press process, which helps to shorten the process time. Besides, this type of CMC has a lower flexural strength and Young's modulus, but equaled superior wear properties and low thermal expansion coefficient to those of the continuous fiber reinforced CMCs. These thermo mechanical properties and the lower process cost encourage introducing short carbon fiber reinforced silicon carbide composites for the brake disk of automobiles. Besides, the short fiber reinforced CMC has a possibility of application for thermal protection systems of the reusable spacecraft by comparisons of the mechanical and thermal properties, and oxidation resistance to those of the past ceramic tiles of the space shuttle.

However, a short fiber reinforced CMC has been only applied to brake disks. The reason of this seems to be due to its low reliability for lower safety factor application such as an aerospace industry. The complex material structure, where fibers randomly dispersed and residual metal phase, carbon phase and ceramic phase mix together, causes randomly distributed thermal process cracks to initiate during cooling process, which makes crack propagation observations complicated. This is why, previous researches only conducted observations after fracture, or limited observing around a notch to measure fracture toughness under the mixed mode.

In order to use short fiber reinforced CMC safely and to expand its usage, a predicting life method is expected. In the case of continuous fiber reinforced CMC, which has been already successfully applied to jet engines, stress-strain relationships were investigated during a loading/unloading tensile test, while damage process observations were conducted at each maximum stress. After revealing the mechanical properties and damage process, Evans et al constructed a damage mechanics model, which estimates stress-strain relationships from the measured damage characteristics such as crack length and its numbers. Furthermore, Evans et al found a close relationship between the life span and the stress-strain behavior by conducting a fatigue test. Consequently, it seems to be also inevitable to reveal the damage process and to construct the damage mechanics model in the case of short carbon fiber reinforced CMC for

proposing a life prediction method and increasing its reliability. In addition, these investigations are necessary at not only tensile but compressive and shear stress condition, considering an application to the real stress condition of structures.

This study aims to reveal an accumulative damage mechanism of short fiber reinforced CMC. The loading/unloading tests were conducted before fracture under the compression, tension and shear, to obtain the stress-strain relationship. In addition, the crack propagation process was observed to reveal the damage process and damage characteristics. Furthermore, a new damage mechanical model was proposed to estimate stress-strain relationships, by substituting the obtained damage characteristics.

In chapter 1, the motivation of this study was explained after summarizing previous works regarding the short fiber and continuous fiber reinforced CMC.

In chapter 2, the stress-strain relationships under loading/unloading tests were investigated. The results showed nonlinear stress-strain relationships. The apparent modulus decreased, while the permanent strain increased, with an increase of the maximum stress. On the other hand, unloading modulus, which was calculated from the inclination of stress-strain relationships near the maximum stress under unloading, did not change. To verify this reason, the composites' Young's modulus was estimated by changing the fiber bundle modulus of the longitudinal and transverse direction by an application of the modulus estimation method of Fu et al. The estimation suggests that there is no fiber fracture before the total fracture.

In chapter 3, damage process observation and visualization were conducted in the wide area of specimen where no obstacles for observation. Damage characteristics, such as the crack angle, number and length, were measured. The results of damage process observations showed that cracks propagated from the existing process cracks in the transverse fiber bundle of the through-thickness plane without fiber fracture by connecting the process cracks or other cracks. This suggests that the damage mechanics model of continuous fiber reinforced CMC is inapplicable to this material. In addition, cracks did not close after the unloading. This reason seems to be due to the stack of the inside crack surfaces. Damage characteristics measurements suggest that mode I crack propagation is a dominant under all kinds of stress conditions.

In chapter 4, a new damage mechanics model was proposed to explain the stress-strain relationships quantitatively from the obtained damaged characteristics, by expanding that of a brittle rock, granite, proposed by Batista et al. The model succeeded to explain the tendency of the experimental results. The estimations also suggest that the stress-strain nonlinear relationships are caused by the crack propagation and opening in the transverse fiber bundle of the through-thickness plane.

In chapter 5, the summary and conclusion of this study were described.

This study succeeded to reveal the damage process, which previous researches had never succeeded, and provided a basic insight of the theoretical damage mechanics of the short fiber reinforced CMC under compression, tension and shear, which is quite different from that of the continuous fiber reinforced CMC.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 戸端 佑太

Title  
論文題目 短繊維強化セラミックス複合材料の損傷累積機構

戸端佑太さんは、短繊維強化セラミックス複合材料の損傷累積に関する一連の研究を行い、所定の研究成果をまとめている。繊維強化セラミックス複合材料はセラミックスにはない損傷許容性を持ち、軽量の耐熱材料としての活用が期待されている。その中で、短繊維強化セラミックス複合材料は連続繊維強化セラミックス複合材料に比較して製造コストを下げることができ、市販自動車のブレーキディスクへ適用されている。しかし、短繊維強化セラミックス複合材料の損傷過程や損傷累積に伴う力学特性の変化は十分に解明されておらず、構造材料に求められる、破壊や寿命の推定はできていない。本研究は、短繊維強化 SiC 複合材料の圧縮、引張、せん断の各荷重における力学特性の変化と損傷過程の関係を明らかにしている。さらに、観察された損傷過程から短繊維強化セラミックス複合材料の損傷力学モデルを提案し力学特性の変動を説明することに成功しており、学術的、技術的観点で新規性および独創性が高い研究である。

本論文は、軽量耐熱材料として期待されている短繊維強化セラミックス複合材料の破壊過程と力学特性の変動についてまとめている。短繊維強化セラミックス複合材料の破壊過程はこれまで解明されておらず、非線形変形や損傷許容性の発現機構は不明であった。そのため、損傷の累積による力学特性の変化や破壊さらには疲労時の寿命を予測することができていない。そこで本研究では、圧縮、引張およびせん断のそれぞれの荷重条件での短繊維強化セラミックス複合材料の荷重負荷による力学特性の変化を調査している。全ての荷重条件で損傷の発生に伴う非線形な変形が発生することを明らかにし、特に破壊応力の小さい引張荷重の場合ではより低応力から発生していることを明らかにした。また、非線形変形に伴う力学特性の変化と損傷の関係を詳細に調査するために、繰り返し負荷—除荷試験を実施し、負荷荷重の増加に伴い永久ひずみが増加するがヤング率は変動しないことを明らかにした。次に、繰り返し負荷—除荷試験のサイクル毎に表面の損傷を観察し、クラックの発生は繊維束内に存在するプロセスクラックのうち、荷重方向に対してモード I 方向に配向しているものが独立に多数進展していることを見出した。荷重サイクル毎のクラックの密度、配向角度を測定し、力学特性の変化と損傷量の関係について整理した。最後に、測定した力学特性の変化を定量的に説明するために、これまで存在していない短繊維強化セラミックス複合材料のクラック発生に伴う永久ひずみを推定する損傷力学モデルを提案した。損傷力学モデルは破壊力学に基づくクラックの開口変位を考慮に入れ、実験的に求めた最大負荷応力からの除荷サイクルでの線形変形する領域（圧縮では 30 MPa、引張では 15MPa）ではクラック開口に伴う変形が生じないと仮定することで求めている。せん断試験では、引張および圧縮の主軸方向について独立に推定した結果をせん断ひずみとして変換することで求めている。考案した損傷力学モデルを用いて推定した永久ひずみ

や各荷重サイクルにおける最大ひずみを実験結果と比較している。推定結果は実験結果に比べて小さい結果となったが、荷重負荷履歴に伴う力学特性変化の傾向を記述できている。提案された損傷力学モデルは、短繊維強化セラミックス複合材料の荷重負荷に伴う損傷の累積による力学特性の変化を定量的に表すことに成功している。

また、予備審査時に提起された4つの課題「試験片個数の正当性について説明を加えること。」、「表面での観察結果が内部でも同様であることを説明すること。」、「材料の異方性が等方性を仮定して求めた結果に与える影響について説明を加えること。」、「今回の非線形変形を定量的に表す手法を生かした今後の発展について説明を加えること。」についての確かな考察を本審査までに加えている。

このように、本論文では、これまで不明確であった短繊維強化セラミックス複合材料の損傷累積過程を明らかにし、本材料固有の損傷力学モデルを構築し損傷の特徴量となるクラック密度や配向角度から実験結果を定量的に示す手法を提案したところに、独創性と高い学術的価値が認められる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。