

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	微小サイズ一方向 CFRP の強度信頼性評価と引張-ねじり負荷下における破壊特性 (Strength Reliability Evaluation of Micro-sized Unidirectional CFRPs and Their Fracture Properties under Tensile-Torsional Loading)
氏 名(Name)	橋本 樹慶

炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)は、炭素繊維(強化材)と熱硬化性樹脂(母材)からなる複合材料であり、強度・剛性などの機械的特性がガラス繊維強化プラスチックなど他の複合材料に比べて格段に優れている。CFRPは、従来の代表的な工業材料と比較しても優れており、例えば、鉄と比べると、比重が鉄の約1/4の1.6程度であるにもかかわらず、比強度が鉄の約10倍、比弾性率が鉄の約7倍と極めて高い値を示す。このような優れた特性から、CFRPは鉄、アルミニウムに続く、第3の構造用材料に挙げられるまでに成長してきた。省エネルギー、二酸化炭素排出量の削減が求められる昨今、軽量で高強度な材料であるCFRPは、地球環境問題の解決に向けても大きな役割を担っており、航空宇宙分野や自動車分野、建築土木分野をはじめ、さまざまな分野での適用が進んでいる。今後、技術発展による低コスト化により、CFRPの応用範囲は益々拡大すると予想されている。

CFRPをはじめとする強化用無機繊維を用いた長繊維複合材料は、繊維の軸方向に沿って優れた強度を示すが、無機繊維は高強度材料特有の脆性を有する。そのため、複合後の強度のばらつきは強度信頼性を議論する上でしばしば問題となる。これまで強度信頼性については、構成する繊維の強度がワイブル分布に従うとき、その微視損傷進展問題に信頼性解析を用いることで定量的に評価されてきた。これらは、複合材料の累積損傷の進行状況を確率論や確率過程に基づいた状態変化としてモデル化し、複合材料強度の期待値と変動係数を予測する、すなわち、損傷過程(原因)を通じて強度(結果)を順問題として予測する扱いである。一方で、実材料の破壊要因の究明や引き続く材料再設計的観点から、逆に強度データ(結果)から損傷・破壊過程(原因)を逆問題的に推定する方法があっても然るべきであるが、これを逆問題として扱った報告は極めて少ない。

加えて、実用構造部材として使用されるとき、CFRPは引張-圧縮やねじり負荷が複雑に生じる多軸応力下に置かれるが、同時にその強化繊維である炭素繊維も多軸負荷を受ける。周知のように、多軸応力下での材料の強度や破壊挙動は単軸応力下とは大きく異なり、単軸の材料特性のみで予測・説明することは困難である。しかしながら、従来の炭素繊維やCFRPの強度評価に関する報告は、繊維軸方向引張や繊維軸と垂直な圧縮など単純な負荷応力に対する理解が先行しており、多軸特性に関する研究は十分とはいえないのが現状である。

以上の観点から、本研究はCFRPの強度信頼性と多軸応力特性を明らかにするため、そのモデル試験片として少数繊維からなる一方向CFRP(微小サイズCFRP)を作製し、その単軸引張・純ねじり・引張-ねじり試験と強度信頼性解析を行うとともに得られた結果に対して評価・考察を行ったものである。

本論文は緒論から結論までの全5章からなる。以下に各章の概略を示す。

第1章は緒論であり、研究背景としてCFRPが有する代表的な特徴と本材料の産業分野への応用動向を俯瞰した。また、CFRPのさらなる適用範囲の拡大に向けてしばしば議論が起こる、強度信頼性と多軸特性における諸課題を挙げるとともに関連する従来の研究をレビューした。最後に、以上を踏まえた本研究の目的と意義について述べた。

第2章では、CFRPの強度信頼性に関わる累積繊維破断点数の定量的推定手法の確立を目指した。まず、モデル試

験片である少数繊維からなる一方向 CFRP（微小サイズ CFRP と記す）の引張強度データを用いて損傷破壊過程を逆問題的に推定する，マルコフ過程逆解析モデルを構築した．続いて，逆解析モデルから導かれる破壊確率曲線と実験値にフィッティングさせて，本モデルの妥当性を検証するとともに本材料の繊維破断の累積性を評価した．

第3章では，CFRP の多軸特性の解明に向けた第一段階として，現在の CFRP の強化繊維の大多数を占める PAN 系炭素繊維の単繊維多軸特性を評価した．具体的には，炭素繊維1本の引張-ねじり強度特性を比例負荷試験により取得し，多軸強度評価・破面観察などを行い，多軸負荷の影響を調査した．さらに，実験結果に基づいて，これまで明らかにされていなかった本材料の多軸応力破壊基準を新たに提案し，その適用可能性を検討した．

第4章では，前章の結果を踏まえ，多軸特性評価を微小サイズ一方向 CFRP に拡張して実施した．まず，微小サイズ CFRP の純ねじり試験を行い，強度データを収集するとともにねじり破壊モードを観察した．続いて，引張-ねじり二軸応力下における破壊強度データを実験的に調査し，複合材料強度に与える多軸負荷の影響を解明した．最後に，本材料の引張-ねじり破壊基準を新たに提案し，考察を加えた．

最後に第5章では，総括として本研究で得られた結果を要約するとともに，今後の展望について述べた．

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目

(Dissertation Title)

微小サイズ一方向 CFRP の強度信頼性評価と引張-ねじり負荷下における破壊特性

(Strength Reliability Evaluation of Micro-sized Unidirectional CFRPs and Their Fracture Properties under Tensile-Torsional Loading)

氏 名 (Name)

HASHIMOTO Mikiyasu

Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) are composite materials made of carbon fibers (reinforcing material) and thermohardening resin. They benefit from superior mechanical properties (low weight, high strength, high stiffness, etc.) compared to other composite materials, such as Glass Fiber Reinforced Plastics. They greatly surpass industrial materials: when comparing to steel, their specific weight is 1/4, their specific strength is 10 times higher, and their specific elastic modulus is 7 times higher. Thus, CFRP have grown into the third structural materials, after steel and aluminum. Currently, low energy systems and decreases in CO2 emissions are necessary, and CFRP allow the low weight – high strength combination that could play a role in solving environmental problems. They are broadly used for aerospace, automobile, and infrastructure. With further development decreasing CFRP costs, their application range is expected to increase.

Composite materials using long fibers as reinforcement, such as CFRP, show excellent strength in the direction of the fibers, but the fibers also suffer from the brittleness typical of high-strength materials. In turn, this causes variations in strength levels, which makes it difficult to discuss the reliability of CFRP. Until now, reliability analyses have been conducted quantitatively in terms of evolution of micro-damage to the fibers, in which the fiber strength follows a Weibull distribution. The evolution of cumulative damage of the composite materials is modelled with probability theory and stochastic processes, and the expected strength and the coefficient of variation of the composite material is predicted. In other words, the damage process (cause) is used to calculate the strength (result) in an “direct problem”. However, there are few reports on “inverse problems”, where the experimental strength data of actual materials (result) are used to evaluate the damage and fracture process (cause).

Additionally, when CFRP are used as structural materials, they are subjected to multiaxial loads (tension, compression, torsion), and thus the reinforcing carbon fibers are undergoing the same loads. The strength or the failure mode change significantly under multiaxial loads, compared to uniaxial load, and the behavior under multiaxial loads cannot be readily predicted from uniaxial data. Still, there is a scarcity of data for multiaxial loading of CFRP.

Based on the above points, this research aims at elucidating the strength and reliability of CFRP and their fracture properties under multiaxial loads, by using unidirectional CFRP samples with few carbon fibers (micro-sized CFRP) and subjecting them to pure tension, pure torsion, or tension-torsion loads, in order to evaluate, analyze and discuss their strength reliability.

The five chapters of this Ph.D. dissertation are summarized below.

Chapter 1, being the introduction, explains the research background, the characteristics of CFRP and their industrial applications, as well as the issues related to strength reliability and multiaxial properties. Related reports are reviewed and the goals of this research are stated.

The goal of chapter 2 is the establishment of a method to evaluate the accumulation of fiber-break points in the CFRP in relation to strength reliability. First, micro-sized unidirectional CFRP samples with a small number of carbon fibers were manufactured and their tensile strength data used to estimate the damage and fracture process (inverse problem); a Markov process inverse analysis model was established. The fracture probability curve was derived from this inverse analysis model and it was fitted to the experimental data to assess the model adequateness while evaluating the accumulateness of fiber damage.

In chapter 3, the multi-axial properties of single PAN-based carbon fibers were evaluated as a first step to clarify the multi-axial properties of CFRP. Specifically, single carbon fiber was subjected to proportional tensile-torsional loading, and its strength and fracture were evaluated to assess the effect of multi-axial loading. Additionally, a multi-axial stress fracture criterion, so far unclear for this material, was proposed based on the experimental results, and the possibility of its adoption was considered.

Chapter 4 is based on the previous chapter to expand the evaluation of multi-axial properties to micro-sized unidirectional CFRP specimens. First, pure torsion tests were conducted, and the strength data as well as the fracture modes were observed and recorded. Tension-torsion properties and fracture behavior were then evaluated experimentally, and the effect of multi-axial load on the strength of composite material was clarified. Lastly, a fracture criterion for this material under tension-torsion loading was proposed and discussed.

The last chapter is a summary of the results described in this dissertation, followed by future prospects.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	橋本 樹慶
審査委員	主 査 : MACADRE Arnaud
	副 査 : 大木 順司
	副 査 : 南 和幸
	副 査 : 古賀 毅
	副 査 : 中原 佐
論文題目	微小サイズ一方向 CFRP の強度信頼性評価と引張-ねじり負荷下における破壊特性 (Strength Reliability Evaluation of Micro-sized Unidirectional CFRPs and Their Fracture Properties under Tensile-Torsional Loading)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は、炭素繊維 (強化材) と熱硬化性樹脂 (母材) からなる複合材料である。CFRP は軽量・高強度・高剛性の優れた機械的特性を有するものの、それらの特性は極端な異方性を示すことが知られている。CFRP の信頼性および多軸負荷下における機械的特性に関しては、未だ十分に理解されておらず、より広範な実用化を実現する上では本特性の解明が不可欠である。特に、微小機械への適用時に必要とされる微小サイズ CFRP (少数の炭素繊維からなる一方向 CFRP) の強度と破壊機構の関係はほとんど明らかにされておらず、個々の繊維の破断過程と CFRP 全体の破断の関係、いわゆる破断累積限界は解明されていない。また、CFRP は引張荷重に対して極めて優れた耐荷性を有するものの、ねじり荷重に対しては優れた耐荷性を示さない。実用的には引張荷重とねじり荷重が同時に作用する二軸負荷下での微小サイズ CFRP の変形挙動および破壊機構の解明が必要とされるが、十分に調査されているとは言えない。</p> <p>以上の背景を踏まえて、本学位論文は、異なる構成繊維数を有する微小サイズ CFRP の引張強度データを収集するとともに、引張過程における繊維破断点数と CFRP 試験片の強度分布の関係を評価するためのマルコフ過程モデルを新たに提案した。加えて、微小サイズ CFRP の引張試験、ねじり試験、引張・ねじり試験も実施し、二軸負荷下における破壊特性を明らかにした。</p> <p>本学位論文は、5 章からなる。各章の概要は下記の通りである。</p> <p>(第 1 章) 緒言であり、本研究の背景を詳しく述べるとともに、本研究の必要性を明らかにし、新規性について触れている。</p> <p>(第 2 章) CFRP の強度信頼性に関わる累積繊維破断点数の定量的推定手法の確立について</p>	

(様式 9 号)

て述べている。微小サイズ CFRP 試料の引張試験結果からマルコフ過程逆解析モデルを構築し、本モデルの妥当性を検証している。

(第 3 章) 炭素繊維単体の引張・ねじり試験を実施し、多軸強度を評価するとともに、破面観察による多軸下での破壊挙動について調査している。この結果に基づき、炭素繊維の新しい多軸応力破壊基準を提案し、その適用可能性を実証している。

(第 4 章) 第 3 章の結果に基づき、微小サイズ CFRP の引張、ねじり、引張・ねじり試験を実施し、多軸強度を評価している。この結果に基づき、CFRP の引張・ねじり破壊基準を新たに提案し、多軸負荷下における強度推移を明らかにしている。

(第 5 章) 第 1 章から第 4 章までの総括とともに、今後の展望について述べている。

予備審査会で試験および試問として 4 名の副査から次の課題が課された。

1. PAN 系炭素繊維の異方性におよぼす製作方法とそれらに関する考察
2. Tsai-Hill 則の修正に関する物理的な説明および妥当性
3. 引張・ねじり試験において、繊維の本数によりせん断応力の変化
4. 炭素繊維と樹脂の界面剥離に関する考察
5. CFRP 試料において、寸法効果の有無、挙動の変化の有無

以上の試問に対して、本審査会ではパワーポイント資料に基づいて回答がなされ、また公聴会での口頭試問に対しても適切に回答がなされた。加えて、英文論文の発表もあり、十分な英語能力を有すると判断された。以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 3 編, 参考論文 計 1 編)

1. 関連論文の印刷公表の方法及び時期

(a) 査読のある雑誌等

- 1) 橋本樹慶, 合田公一, マカドリアルノー, 澤田吉裕, 微小サイズ CFRP のマルコフ過程逆解析モデルによる損傷・破壊過程の推定, 材料, 72 巻 3 号 (2023) pp.180-187
- 2) 橋本樹慶, シティファルハナ, マカドリアルノー, 合田公一, 引張-ねじり負荷下における炭素繊維の破壊特性と強度評価, 材料, 73 巻 5 号 (2024) pp.379-385

(b) 査読のある国際会議の会議録等

- 1) M. Hashimoto, S. Farhanah, K. Goda, A. Macadre, Y. Sawada, Strength Strength Characterization of Micro-sized Unidirectional CFRPs under Tension-Torsion Loading, Proceedings of 6th International Conference on Materials and Reliability (ICMR2022)

2. 参考論文

(a) 査読のある雑誌等

- 1) K. Sanai, S. Nakasaki, M. Hashimoto, A. Macadre, K. Goda, Fracture Behavior of a Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Plastic under Biaxial Tensile Loads, Materials, MDPI, 17 巻 6 号 (2024) p.1387 (17 pages)