

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2021～2023

課題番号：21KK0063

研究課題名（和文）疲労負荷下CFRPにおけるエントロピー損傷に基づく余寿命・残存強度予測法の構築

研究課題名（英文）Predictions of remaining lifetime and residual strength of CFRP under cyclic loading based on entropy damage criterion

研究代表者

小柳 潤（Koyanagi, Jun）

東京理科大学・先進工学部マテリアル創成工学科・教授

研究者番号：60386604

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の疲労特性と強度低下挙動をエントロピーに基づいてシミュレートする世界初のモデルを開発した。エントロピー生成に基づく強度低下スキームを導入し、ひずみが増加しなくても強度低下と遅延破壊をシミュレートできる。このモデルを用いて、CFRPの疲労破壊をシミュレートし、異なる応力比や周波数の影響を考慮した数値解析を行った。得られた結果は実験結果と一致しており、CFRPの長期耐久性を数値的に予測する新しいアプローチを提供する。この研究は、CFRP構造物の設計効率を向上させ、持続可能な開発目標（SDGs）に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の長期耐久性をエントロピーに基づいて数値的に予測する新しいアプローチを提供する。従来の実験的手法に代わり、信頼性の高い数値モデルを用いることで、CFRP構造物の設計と評価の効率が大幅に向上する。このモデルは、疲労特性や強度低下挙動の詳細なシミュレーションを可能にし、異なる応力条件や環境下でのCFRPの挙動を予測するツールとして有用である。また、この研究は持続可能な開発目標（SDGs）に貢献し、材料の使用寿命を延ばし、資源の効率的な利用を促進することで、環境負荷の低減にも寄与する。

研究成果の概要（英文）：This study developed the world's first model for simulating the fatigue characteristics and strength degradation behavior of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) based on entropy. The model incorporates an entropy-based strength degradation scheme, allowing for the simulation of strength reduction and delayed failure without an increase in strain. Using this model, the fatigue failure of CFRP was simulated, and numerical analyses were conducted considering the effects of different stress ratios and frequencies. The results obtained are consistent with experimental findings, providing a new approach for numerically predicting the long-term durability of CFRP. This research enhances the design efficiency of CFRP structures and contributes to the Sustainable Development Goals (SDGs).

研究分野：複合材料工学

キーワード：CFRP 疲労 エントロピー 数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、その優れた機械的特性から、航空宇宙、自動車、風力発電、スポーツ用品などの様々な産業分野で広く利用されている。しかし、CFRP の長期的な耐久性と疲労特性についての理解はまだ十分ではない。特に、複雑な応力条件下での CFRP の挙動を正確に予測することは、従来の実験的方法では多大な時間とコストがかかるため、非常に困難であった。これにより、CFRP の信頼性評価や設計最適化が大きな課題となっていた。

従来の研究では、CFRP の疲労特性を評価するために多数の疲労試験が行われてきたが、これらの実験は時間がかかり、また、実際の使用条件を完全に再現することは難しい。このため、数値シミュレーションを用いた疲労特性の予測が求められている。しかし、既存の数値モデルでは、CFRP の複雑な破壊挙動を正確に再現することが難しく、新しいアプローチが必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、CFRP の疲労特性と強度低下挙動をエントロピーに基づいて数値的にシミュレートする新しいモデルを開発することである。このモデルにより、CFRP の長期耐久性を正確に予測し、実験に依存せずに構造設計や評価を効率的に行うことを目指している。具体的には、以下の目標を設定している。

- (1) エントロピー生成に基づく強度低下スキームを導入し、従来の Hashin 基準を改良する。
- (2) ひずみが増加しなくても強度低下と遅延破壊をシミュレートできるモデルを構築する。
- (3) 開発したモデルを用いて、異なる応力条件や周波数の影響を考慮した数値解析を行う。
- (4) 得られた数値解析結果を実験結果と比較し、その一致を確認する。
- (5) 新モデルを用いて CFRP の長期耐久性を予測し、持続可能な開発目標 (SDGs) に貢献する。

3. 研究の方法

- (1) 新モデルの開発:
エントロピー生成に基づく強度低下スキームを導入する。エントロピーは、材料が内部エネルギーを散逸する過程で生成される物理量であり、疲労破壊の進行を正確に表現するための指標となる。
従来の Hashin 基準を改良し、エントロピー生成を考慮した新しい破壊基準を導入する。これにより、従来のモデルでは再現が難しかった疲労特性と強度低下挙動を精度高くシミュレートすることが可能となる。
- (2) 数値解析の実施:
開発したモデルを用いて、CFRP の疲労破壊をシミュレートする。異なる応力比や周波数の影響を考慮し、数値解析を行う。
シミュレーションには有限要素法 (FEM) を使用し、CFRP の微視的および巨視的な挙動を詳細に解析する。
得られた数値解析結果を実験結果と比較し、モデルの妥当性を検証する。特に、疲労破壊の進行過程や最終破壊に至るまでの挙動を詳細に解析し、実験データとの一致を確認する。
- (3) モデルの応用と最適化:
新モデルを用いて、CFRP の長期耐久性を予測する。これにより、実験に依存せずに CFRP 構造物の設計と評価を効率的に行うことが可能となる。
モデルのパラメータを最適化し、実用的な応力条件下での CFRP の挙動を精度高く予測する。
開発したモデルを基に、CFRP の使用寿命を延ばすための設計指針や評価基準を策定する。

4. 研究成果

本研究により、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の疲労特性と強度低下挙動をエントロピーに基づいてシミュレートする世界初のモデルを開発した。このモデルは、エントロピー生成に基づく強度低下スキームを導入し、ひずみが増加しなくても強度低下と遅延破壊をシミュレートできる特徴を持つ。具体的な成果として、以下の点が挙げられる。

(1) エントロピー生成モデルの確立:

図1に示すようなエントロピー生成を考慮した新しい破壊基準を導入し、CFRPの疲労特性を正確に再現する数値モデルを開発した。
このモデルは、従来のモデルでは再現が難しかった複雑な疲労破壊挙動を精度高くシミュレートすることが可能である。

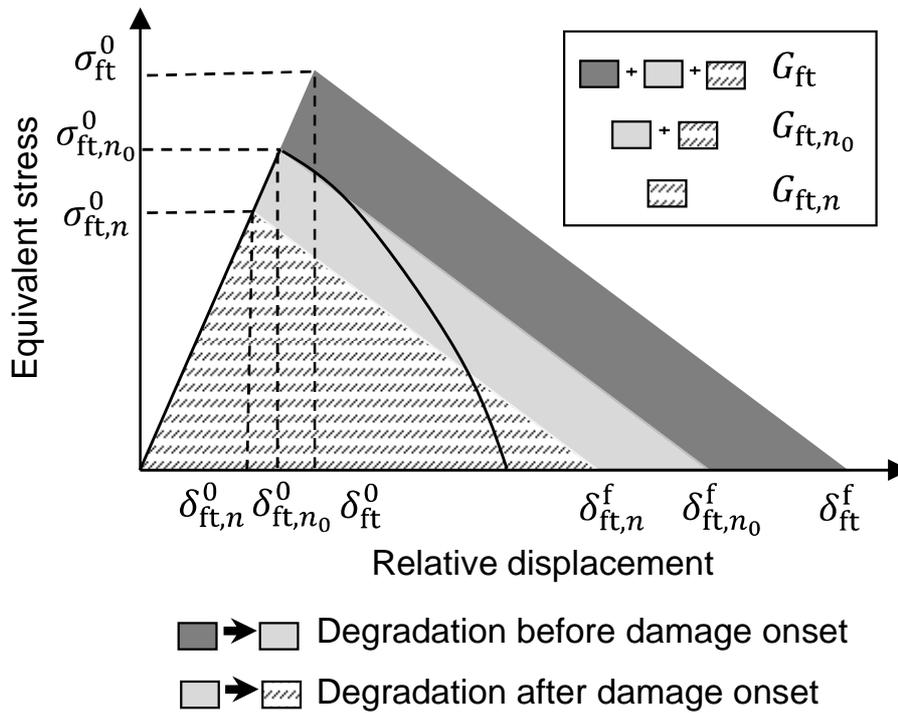


図1 本研究にて開発されたエントロピーに応じて強度が低下するCFRPの破壊モデル

(2) 数値解析結果と実験結果の一致:

図2に数値シミュレーション結果の例を示すが、開発したモデルを用いた数値解析結果は、実験データと高い一致を示した。特に、異なる応力比や周波数条件下での疲労破壊挙動を正確に予測することができた。
これにより、CFRPの長期耐久性を数値的に予測する新しいアプローチの有効性が実証された。

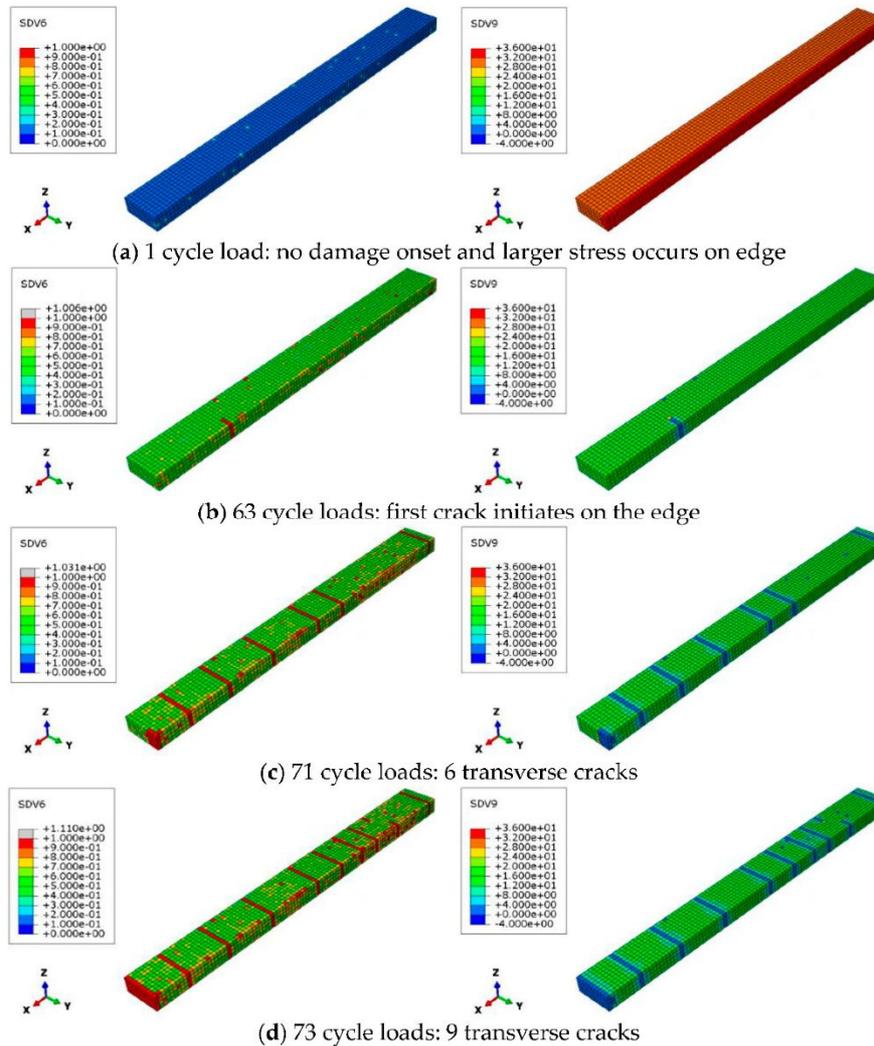


図2 開発されたモデルを用いてCFRPの内部損傷をシミュレートした計算結果の例

(3)設計と評価の効率化:

開発したモデルを用いることで、実験に依存せずにCFRP構造物の設計と評価を効率的に行うことが可能となった。

新モデルを基に、CFRPの使用寿命を延ばすための設計指針や評価基準を策定し、持続可能な開発目標(SDGs)に貢献する。

本研究の成果は、CFRPの長期耐久性評価における新しい指針を提供し、実用的な応用が期待される。これにより、CFRPを用いた製品の信頼性と安全性が向上し、さらなる技術革新と持続可能な社会の実現に貢献する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamada Naoki, Oya Yutaka, Kato Nobuhiko, Mori Kazuki, Koyanagi Jun	4. 巻 28
2. 論文標題 A Molecular Dynamics Simulation for Thermal Activation Process in Covalent Bond Dissociation of a Crosslinked Thermosetting Polymer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 2736 ~ 2736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules28062736	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kagawa Hikaru, Umezu Yuta, Sakaue Kenichi, Koyanagi Jun	4. 巻 10
2. 論文標題 Numerical simulation for the tensile failure of randomly oriented short fiber reinforced plastics based on a viscoelastic entropy damage criterion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part C: Open Access	6. 最初と最後の頁 100342 ~ 100342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcomc.2022.100342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Deng Huachao, Mochizuki Asa, Fikry Mohammad, Abe Shun, Ogihara Shinji, Koyanagi Jun	4. 巻 16
2. 論文標題 Numerical and Experimental Studies for Fatigue Damage Accumulation of CFRP Cross-Ply Laminates Based on Entropy Failure Criterion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 388 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16010388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Koyanagi Jun, Mochizuki Asa, Higuchi Ryo, Tan V.B.C., Tay T.E.	4. 巻 165
2. 論文標題 Finite element model for simulating entropy-based strength-degradation of carbon-fiber-reinforced plastics subjected to cyclic loadings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 107204 ~ 107204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2022.107204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwamoto Shun, Oya Yutaka, Koyanagi Jun	4. 巻 14
2. 論文標題 Evaluation of Microscopic Damage of PEEK Polymers under Cyclic Loadings Using Molecular Dynamics Simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 4955 ~ 4955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym14224955	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 望月 諒 (東理大院), 星名 滉 (東理大), 樋口 諒 (東大), 小柳 潤 (東理大)
2. 発表標題 散逸エネルギーに基づく損傷を考慮したCFRPの疲労破壊モデルの構築
3. 学会等名 第13回日本複合材料会議 (JCCM-13)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	樋口 諒 (Higuchi Ryo) (00815946)	東京大学・大学院工学系研究科 (工学部)・特任准教授 (12601)	
研究分担者	佐藤 光桜 (Sato Mio) (90914664)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
シンガポール	National University of Singapore			