

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20400

研究課題名（和文）CFRPの微視的損傷メカニズムを考慮した疲労損傷解析手法の構築と疲労寿命予測

研究課題名（英文）Development of Fatigue Simulation Method Considering the Microscopic Damage Mechanisms in CFRP and Prediction of Fatigue Life

研究代表者

青木 涼馬（Aoki, Ryoma）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60967868

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、炭素繊維複合材料（CFRP）の長期運用時の健全性評価を目的として、微視的損傷を考慮した疲労損傷モデルの開発に取り組んだ。疲労負荷による微視的損傷の累積メカニズムを数値解析上で明らかにし、巨視的なき裂形成までの微視的損傷を定量的に評価することが可能となった。また、繰り返し負荷の荷重レベルだけでなく、2種類の負荷レベルを組み合わせた複合疲労条件での解析が可能となるように拡張した。さらに、CFRPの疲労損傷発生後の耐久性評価として、疲労後残存強度を予測する方法を確立した。数種類のCFRP積層板での残留強度データと比較することで精度検証を行い、疲労後の残存強度予測に有用であることが実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRPの微視的損傷を考慮した疲労解析手法を開発し、巨視的なき裂形成に至るまでの損傷累積メカニズムを明らかにし、その損傷を定量的に評価することが可能となった。さらに、耐久性評価にとって重要な疲労後の残留強度を予測することも可能となった。これにより本手法は、航空機などの航空宇宙構造物だけでなく、近年注目を集める高圧水素タンクなどに対しても、耐久性評価を含めた設計支援技術として期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to evaluate the integrity of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) during long-term operation by developing a fatigue damage model that considers microscopic damage. The cumulative mechanism of microscopic damage due to fatigue loading was clarified through numerical analysis, enabling the quantitative evaluation of microscopic damage up to the formation of cracks. Additionally, the analysis was extended to handle combined fatigue conditions with two different load levels. Furthermore, a method to predict the residual strength after fatigue was established as the durability evaluation. By comparing the predicted residual strength data with experimental data from several types of CFRP laminates, the accuracy of the predictions was validated, demonstrating the utility of the method in predicting the residual strength after fatigue.

研究分野：複合材料工学

キーワード：炭素繊維強化複合材料 疲労負荷 微視的損傷進展 有限要素解析 残留強度評価

1 . 研究開始当初の背景

軽量で優れた機械特性を持つ炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、航空機や自動車を含む輸送システムへの適用が拡大している。CFRP の長期使用を見据えた場合、疲労による損傷の累積予測が不可欠である。しかし、CFRP は繊維と樹脂から構成されており、樹脂の微小き裂、界面剥離、層内き裂、繊維破断、層間剥離といった損傷モードが複雑に連携して破壊に至るため、疲労損傷の累積を予測するモデルの構築が困難であり、十分な精度での疲労寿命予測手法が未だ確立されていないという課題がある。そのため、CFRP の適用が進んでいる航空機構造においては、疲労損傷の進展を許さない安全側の設計となり、真の軽量化が達成されていない。さらに近年では、CFRP の比強度と比剛性の高さから、高圧水素タンクの構造部材としての期待も高まっている。プラスチックライナーと CFRP で構成されるタイプ IV タンクは、水素貯蔵容量の大幅な向上が期待されている。しかし、CFRP 製の高圧タンクでは、通常の使用圧力下でマトリックスのき裂や剥離などの損傷が観察され、繰り返し荷重の下でさらに進行する。タンク内で発生したき裂や層間剥離は構造剛性を低下させ、完全破壊は回避できても、初期状態と比較して強度が低下する可能性がある。これに対処するため、疲労による残留強度を考慮した数値解析技術の開発は、破壊強度に対する設計安全係数の潜在的な緩和に対応するだけでなく、さらなる軽量化の需要にも応えるために極めて重要である。

2 . 研究の目的

本研究では、CFRP の長期運用時の健全性評価を目的として、微視的損傷を考慮した疲労損傷モデルとそれを用いた疲労解析手法の開発、および疲労後残留強度予測手法の確立に取り組んだ。構築した疲労解析手法は、単一の繰り返し負荷の荷重レベルだけでなく、二種類の負荷レベルを組み合わせた複合疲労条件での解析が可能となるように拡張した。さらに、CFRP の疲労損傷発生後の耐久性評価として、疲労後残存強度を予測する方法を確立した。数種類の CFRP 積層板での残留強度データと比較することで精度検証を行い、疲労後の残存強度予測に有用であることを実証した。さらに、実用レベルでの実証を目指して、フィラメントワインディングで製造されたタンク構造を想定した 2 次元タンクモデルに疲労解析を実施し、疲労後の残留強度特性の評価を行った。

3 . 研究の方法

本研究では、微視的損傷を考慮するために、CFRP 内に発生する損傷を連続体損傷力学に基づく損傷変数により表現し、疲労荷重下における複合材料積層板の損傷進展を解析するために、その損傷変数の発展モデルを定義した。これらの疲労損傷モデルを有限要素解析と組み合わせた手法を採用した。また、サイクルジャンプ法と呼ばれる計算コストを低減する疲労解析アルゴリズムを導入し、疲労解析手法を確立した。このアルゴリズムの導入により、計算コストを低減しつつ、損傷進展が十分な精度で予測できることを確認している。

また、疲労負荷後の残存強度予測手法の確立に向けては、構築した損傷力学モデルに基づく疲労解析手法を活用した。提案する疲労後残存強度予測手法では、まず構築した疲労解析手法により、ある負荷条件で特定のサイクル数まで疲労解析を行い、疲労による損傷、つまり損傷変数の分布を得る。その後有限要素モデルの各要素に対して、疲労後の損傷変数を紐づけてデータ出力させる。この損傷変数のマッピングデータを、残留強度を予測したい対象の解析条件の有限要素モデルの各要素の初期損傷状態として与える。疲労による損傷変数を持った状態を初期状態として静的損傷解析を行うことで残存強度を予測する。まずは本手法を用いて、疲労後の残存強度を CFRP 積層板 [45/-45]_{2S} を対象に、3 点曲げ疲労後の引張残留強度を数値解析上で評価する。

最後に、実用での解析手法の適用に向けて、フィラメントワインディングで製造されたタンク構造での疲労解析と残留強度評価を試みた。2 次元タンクモデルを作成し疲労解析を実施する。各疲労サイクルにおける剛性値と疲労損傷を評価し、疲労後の残留強度の予測を試みた。残留強度予測では、あらかじめ設定した目標疲労サイクルまで疲労解析を行い、評価した損傷変数を強度予測の初期値として用い、タンクが破裂するまでの内圧を評価する。

4 . 研究成果

まずは、残留強度予測の結果として、本提案手法によって疲労後に強度が低下する一例を示す。CFRP で作製した積層板 [45/-45]_{2S} を対象に、3 点曲げ疲労試験を行った後に静的引張試験により破断させて、残留強度を評価することを想定する。この条件で、本予測手法によって疲労後に強度が低下する (残存強度低下) が表現可能か数値解析により検証を行った。3 点曲げ疲労では、静的最大荷重の 60% の条件で、積層板の剛性がそれぞれ 90%、80%、70%、65% まで低下するサイクル数まで疲労させる。その後それぞれのケースで静的引張解析を行い、残留強度を評価した。疲労解析で得られた積層板の損傷分布を初期値として、試験片が荷重を持てなくなるまで引張荷重を与える静的引張解析を行った。図 1 に、疲労後残存剛性率 90%、80%、70%、65% とした際の残留強度計算結果を、疲労無しの引張解析結果と合わせて示す。図中の縦軸は疲労無しのケー

スでの最大応力で正規化した正規化応力を，横軸は引張方向ひずみをプロットしている．数値解析結果を見ると，疲労無しの引張解析と比較して，3 点曲げ疲労により残存剛性率が低下するとともに，初期弾性率と強度がともに低下する傾向にあることが分かる．数値解析上で 3 点曲げ疲労により受けた疲労損傷が強度低下を引き起こしており，提案手法により疲労後に残存強度が低下する現象を捉えられていることを確認した．

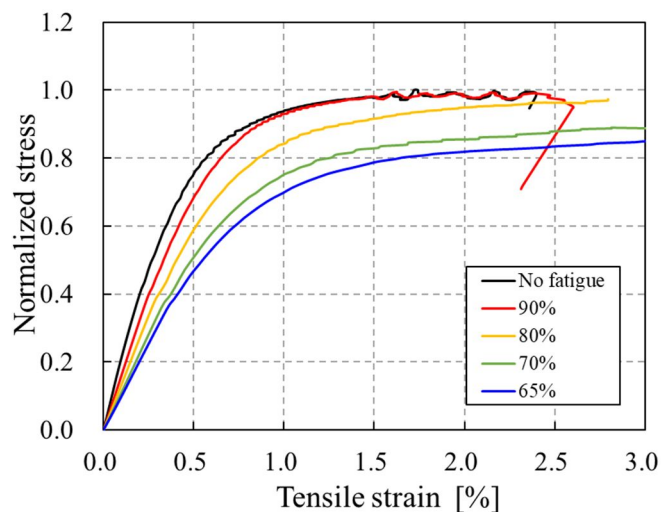


図 1 3 点曲げ疲労後の引張解析結果：数値解析による比較．

続いて，複合疲労での疲労解析手法の拡張と剛性低下予測についての一例を示す．単一の荷重レベルでの疲労だけでなく，二条件の荷重レベルとサイクル数の疲労負荷を組み合わせた複合疲労についても，本解析手法で疲労解析を行った．疲労負荷の組み合わせは 70%，3,000 サイクルと 60%，10,000 サイクルの組み合わせ，および 80%，400 サイクルと 55%，50,000 サイクルの組み合わせの二種類とし，それぞれの組み合わせで順序を入れ替えて解析を実施した．図 2 に複合荷重レベル条件での疲労解析から得られた正規化剛性を示す．結果に示すように，本研究で目標としていた複数の荷重レベルでの疲労負荷を組み合わせた条件においても疲労解析が可能であることを確認した．また図に示す解析結果の 70%と 60%の組み合わせの場合，70%が先のケースでは最終的に残存剛性が 78.8%となっており，一方で 60%が先のケースでは 80.1%となっており，70%が先のケースの方がより疲労による損傷進展が大きかったことが分かる．また 80%と 55%の組み合わせの場合では，80%が先のケースだと残存剛性は 69.2%で，55%が先のケースでは 65.8%と 55%が先のケースの方がより疲労による剛性低下が大きいことが確認された．ただし，数値に差はあるものの，70%と 60%，80%と 55%の組み合わせの両者の場合で，順序を入れ替えてもほとんど同程度の剛性値まで低下することが明らかになった．この現象については今後実験によるデータとの比較を行うことで検証する必要がある．

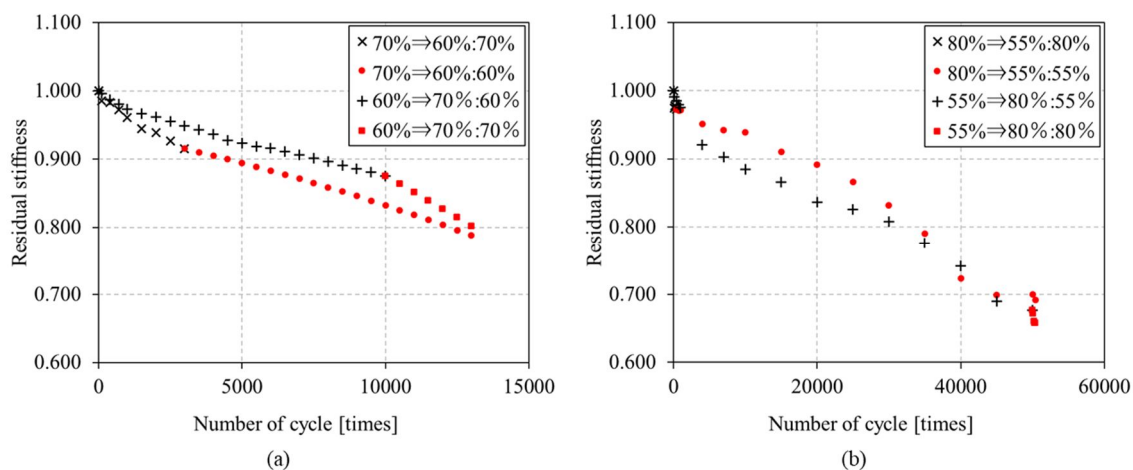


図 2 複合荷重レベル条件の疲労解析結果：正規化剛性 サイクル数 (a) 荷重レベル 70%&60%の組み合わせの場合，(b) 荷重レベル 80%&55%の組み合わせの場合．

最後に、実用レベルでの適用として、フィラメントワインディングで製造されたタンク構造を想定した2次元タンクモデルに疲労解析を実施し、疲労後の残留強度特性の評価を行った。2次元のタンクの有限要素モデルを作成し、本研究課題で構築した疲労解析および残留強度予測手法の適用を試みた。まず作成した2次元タンクモデルについては、事前に静的損傷解析を行い内圧70.2MPaでバーストすることを確認している。これを基に、疲労解析の条件は、内圧レベル50%（35MPa内圧負荷）の条件で10,000サイクルの疲労負荷で内圧疲労試験を行ったのちに、バースト試験を実施することを想定する。数値解析では、内圧レベル50%で10,000サイクルの疲労解析を行った後、得られた損傷分布を初期状態として静的損傷解析を行った。内圧レベル50%での残留強度予測結果を図3に示す。内圧レベル50%での疲労後のバースト破壊では、疲労を伴わないバーストの場合と同様に、シリンダー中央部のフープ層で繊維破壊が発生し、最終破断に至った。シリンダー部での繊維破断後、タンクの著しい変形が生じ、シリンダー部内での繊維破断の伝播が確認された。内圧レベル50%での疲労後の破裂圧力は61.2MPaであり、疲労がない場合に比べて約13%低下した。疲労による樹脂の損傷により変形が生じやすく、その結果、繊維方向に沿った応力が増加し、無疲労の場合に比べて破断が早まったと考えられる。以上のように実用のタンクレベルにおいても疲労解析および残留強度予測を実施し、残留強度が低下する現象を数値解析上で捉えることができた。

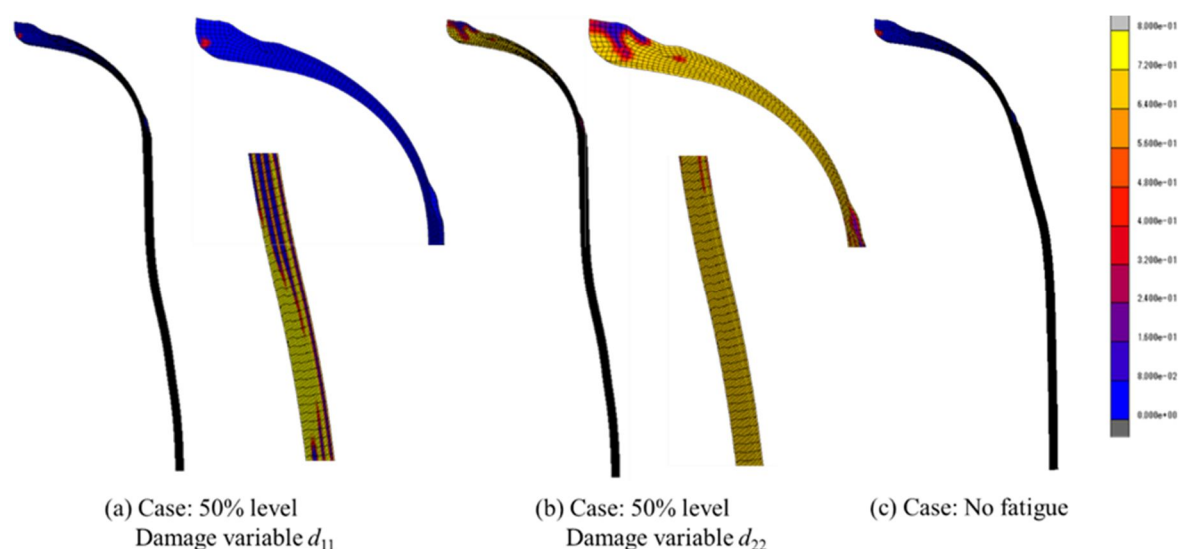


図3 内圧レベル50%での疲労後の残留バースト予測結果：(a)繊維方向損傷分布，(b)繊維直交方向損傷分布，(c)疲労無しの場合のバースト時の変形モード。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1 . 著者名 Aoki Ryoma、Higuchi Ryo、Yokozeki Tomohiro	4 . 巻 314
2 . 論文標題 Progressive damage and residual strength of open-hole thin-ply CFRP laminates under tensile fatigue loading	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 Composite Structures	6 . 最初と最後の頁 116973 ~ 116973
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2023.116973	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 6件）

1 . 発表者名 Ryoma Aoki, Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Takahira Aoki
2 . 発表標題 Evaluation of fatigue degradation of laminate stiffness using intra-laminar damage model considering the effects of ply thickness
3 . 学会等名 9th International Conference on Fatigue of Composites（国際学会）
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Takeshi Watanabe, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki, Yuta Urushiyama
2 . 発表標題 Simulation of Residual Property after Fatigue in CFRP Laminates Manufactured by Filament Winding Using Intra-laminar Damage Models
3 . 学会等名 9th International Conference on Fatigue of Composites（国際学会）
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki, Tetsuya Matsuda, Masahito Ueda, Wataru Iwase
2 . 発表標題 Numerical prediction of fatigue damage progress and residual strength after fatigue in composite pressure vessel
3 . 学会等名 21th European Conference on Composite Materials（国際学会）
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Takeshi Watanabe, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki, Yuta Urushiyama
2 . 発表標題 Material characterization on temperature dependency of fatigue stiffness degradation of CFRP laminate manufactured by filament winding using three-point bending test
3 . 学会等名 21th European Conference on Composite Materials (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki, Tetsuya Matsuda, Masahito Ueda, Wataru Iwase
2 . 発表標題 Evaluation on fatigue degradation and residual strength of composite pressure vessel
3 . 学会等名 American Society for Composites 39th Annual Technical Conference (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Ryoma Aoki, Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Kazuyuki Aoki, Shigekazu Uchiyama, Toshio Ogasawara
2 . 発表標題 Prediction of filled-hole tensile strength of CFRP laminates with various ply thicknesses
3 . 学会等名 44th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 青木涼馬, 樋口諒, 横関智弘, 青木一行, 内山重和, 小笠原俊夫
2 . 発表標題 CFRP積層板の板厚・積層比率が有孔引張強度・破壊特性に与える影響
3 . 学会等名 第14回日本複合材料会議
4 . 発表年 2023年

1．発表者名 渡邊健，青木涼馬，横関智弘，漆山雄太
2．発表標題 FW製CFRP積層試験片の三点曲げ疲労損傷後の引張物性評価
3．学会等名 第14回日本複合材料会議
4．発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------