

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04071

研究課題名（和文）超音波疲労試験法を活用した炭素繊維強化エポキシ積層板の超高サイクル疲労特性の解明

研究課題名（英文）Investigation of Very High Cycle Fatigue Property of CFRP Laminate by using Ultrasonic Fatigue Testing Machine

研究代表者

島村 佳伸（Shimamura, Yoshinobu）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：80272673

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、金属の超高サイクル疲労試験に用いられている超音波疲労試験技術を応用して炭素繊維強化エポキシ積層板の加速疲労試験を実施し、炭素繊維強化エポキシ積層板の超高サイクル域での疲労挙動・疲労特性を解明することを目的としたものである。超音波疲労試験機により、擬似等方性積層板の超高サイクル域までの90°層におけるマトリックス割れの発生寿命と破損寿命を取得した。その結果、マトリックス割れの発生寿命、疲労破損寿命ともに、超高サイクル域においても疲労強度は右下がりになり続け、いわゆる疲労限度は見られないことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来の疲労試験技術では容易でない炭素繊維強化エポキシ積層板の超高サイクル疲労特性の取得を、超音波疲労試験技術を活用することで短期間に取得したものであり、その結果、炭素繊維強化エポキシ擬似等方性積層板のS-N線図に繰返し数10億回までは折れ曲がりが見られないことを実証したことにまず学術的な意義がある。さらに、炭素繊維強化エポキシ積層板の疲労試験を従来手法の1/10～1/100程度の所要時間で迅速に行えることを実証した点も、産業応用上極めてインパクトがある。

研究成果の概要（英文）：In this study, accelerated fatigue tests of carbon fiber reinforced epoxy laminates were conducted by applying an ultrasonic fatigue testing technique that is used for very high cycle fatigue testing of metals, and the fatigue behavior of carbon fiber reinforced epoxy laminates in the very high cycle region was investigated. The matrix crack initiation life in 90 degree lamina and fatigue failure life for a quasi-isotropic laminate and a cross-ply laminate were obtained up to the very high cycle region by using an ultrasonic fatigue testing machine. As a result, it was revealed that the fatigue strengths of matrix crack initiation life and fatigue failure life continued to drop in the very high cycle region, and thus so-called fatigue limit was not observed.

研究分野：複合材料工学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 積層板 超音波疲労試験 超高サイクル疲労

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、炭素繊維強化エポキシ（以下、CFRP と表記）の商用航空機への適用の拡大には目を見張るものがあり、航空機エンジンについても翼構造を中心に CFRP の適用が拡大している。風力発電分野でも、高出力化のための風車翼の大型化に伴い風車翼への CFRP の適用が進んでいる。これらの CFRP 翼においては繰返し荷重が作用することは避けられない。炭素繊維強化プラスチックの発明当初から低サイクル疲労・高サイクル疲労に関する幅広い研究が行なわれ、様々な知見が得られているが、一般的な見解としては、実用的に使われる CFRP 積層板は疲労する、すなわち繰返し回数の増加に伴ってその時間強度は緩やかに低下することが認められている。ただし従来報告されている疲労特性は、繰返し回数 10^7 回までのデータがほとんどである。

一方、風車翼では 10^8 回程度、航空機エンジン翼では 10^9 回を超える繰返し荷重の作用が設計段階で想定されているにもかかわらず、超高サイクル疲労に関する実験的知見の報告は極めて限られている。これは繰返し速度（＝試験周波数）を高くすると、母材の粘性に由来して試験片が発熱するので、繰返し速度を上げた疲労試験が困難なためであり、一般に 10Hz 以下でしか疲労試験が実施できない。そのため、超高サイクル域までの疲労試験を実施しようとする試験片 1 本の疲労試験に年単位の非実時間の時間を要してしまう。そのため、現時点ではわずかに本研究の研究分担者の細井らによって、 10^8 回までの疲労試験結果の報告がなされている程度である。以上のように超高サイクル域における CFRP 積層板の疲労挙動や疲労特性はほぼ未解明であり、炭素繊維強化エポキシ積層板に疲労限度は存在するのかという極めて基本的な学問的問いに対しても、現在は確たる答えはない。そのため、超高サイクル疲労が懸念される CFRP 翼構造においても、極めて限られた知見のもとに、十分な安全を見積もって設計、運用されているのが実情である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、金属の超高サイクル疲労試験に用いられている超音波疲労試験技術を活用して CFRP 擬似等方性積層板の加速疲労試験を実施し、炭素繊維強化エポキシ積層板の超高サイクル域での疲労挙動・疲労特性の解明、特に「炭素繊維強化エポキシ積層板に疲労限度は存在するのか？」という学問的問いに対して実験的知見を得ることを目的として研究を行なうものである。

CFRP 積層板の超高サイクル疲労試験を従来の疲労試験手法で実施すると非実時間の時間を要するという問題を解決するため、研究代表者は金属の超高サイクル疲労試験に用いられている超音波疲労試験技術を活用して CFRP 積層板の迅速疲労試験手法を開発した。本研究はその独自技術を用いて炭素繊維強化エポキシ積層板の超高サイクル疲労特性の評価を世界に先駆けて実施するものであり、さらには炭素繊維強化エポキシ積層板の疲労限度の探求という学問的に基本となる課題の解明に取り組むことで当該学問分野における世界でのイニシアティブを握り、その上で、これらの知見を産業界へ展開することで CFRP 技術の発展に貢献することをも視野に入れた研究である。

3. 研究の方法

超音波疲労試験技術を用いて、CFRP 擬似等方性積層板の両振りの疲労試験を実施した。積層構成は [45/0/-45/90]_s とした。試験は断続荷重で行い試験片の発熱を抑えるとともに、試験片を空冷により冷却しながら試験を実施した。

高強度材料である CFRP を疲労破損させるために十分高い応力振幅を負荷できるようダンベル型形状を採用した。試験片は一次の引張圧縮モードで共振し、共振周波数付近で曲げやねじりのモードが発生しないように設計した。また、ホーンと試験片の接合と、試験片下部での変位計測を目的に試験片の両端にアルミニウム合金タブを接着した。ホーンとの取り付け側についてはねじ付きとした。

試験片設計は、まず一次元振動の運動方程式を解き得られた理論解から試験片の疲労損傷発生に十分な応力振幅が負荷できる基本寸法を決定したのち、有限要素解析により、試験機の共振周波数と等しい 20kHz で共振するように各寸法を微調整した。また、試験片の加工にはウォータージェットを用いた。打ち切り繰返し数は 10^9 回を予定していたが、一部、 10^{10} 回まで疲労試験を実施した。

繰返し負荷によるマトリックス割れの発生、局所的な繊維破断の発生などといったメゾスケールの疲労損傷と、マトリックス割れの発達、層間剥離の発生といったミリスケールの疲労損傷の観察のため、疲労試験を適時中断し、光学顕微鏡による表面観察を実施した。この定期観察の結果をもとにマトリックス割れ発生寿命の評価を実施した。

さらに疲労限度の存在についてより高度な考察を行なうことを目的に、顕微サーモグラフィを用いた試験片最大応力部のその場計測も実施した。超音波疲労試験では、最大応力部付近は変位振動の節であり顕微サーモグラフィの分解能以下の変位しか生じないことから、金属疲労のサーモグラフィ計測に良く使われているロックインサーモグラフィのような高価な機構なし

に試験片表面温度のその場計測が可能であることを補足しておく。

これらの実験で得られた知見をふまえ、超高サイクル疲労機構の検討と疲労限度の存在に関する考察を行なった。

4. 研究成果

(1) 主な成果

本研究により得られた CFRP 擬似等方性積層板の超高サイクル疲労特性を図 1 に示す。図中、 \diamond は疲労破損を意味し、横軸方向のエラーバーはマトリックス割れが観察できなかった繰返し数とマトリックス割れがはじめて観察できた繰返し数を意味しており、このエラーバーの区間の間にマトリックス割れが発生したことを意味する。図 1 は両対数プロットである。

結果から、CFRP 擬似等方性積層板はマトリックス割れ発生寿命、疲労破損寿命ともに超高サイクル域において折れ曲がりは見られなかった。また、マトリックス割れ発生寿命、疲労破損寿命ともに繰返しにより両対数プロット上で直線的に疲労強度が低下することがわかる。

また、金属疲労の分野では、疲労限度と試験片の発熱量の間により相関があることを示されており、繊維強化プラスチックの疲労に関しても、疲労限度と試験片の発熱量の間により相関があると主張する研究者も複数いる。そこで本研究では、作用応力振幅と試験片最大応力部の表面温度の関係を計測した。本実験では空冷は実施せず、断続発振比として、最大作用応力振幅（マトリックス割れ発生寿命 10^7 回）で測定温度が 40°C を超えないような断続発振比を選び、すべての温度測定で断続発振比は一定とした。実験結果を図 2 に示す。図 2 は両対数プロットである。図中の破線はマトリックス割れ発生時の 10^{10} 回疲労強度であり、図中の実線は傾き 2 を表す。

結果より、CFRP 擬似等方性積層板は、マトリックス割れ発生時の 10^{10} 回疲労強度よりかなり低い応力振幅の作用でも発熱し、作用応力振幅が増加するにつれて、おおよそ傾き 2 の割合（粘弾性由来の発熱の場合、原理的に両対数プロット上で傾き 2 となる）で表面温度が増加することがわかる。

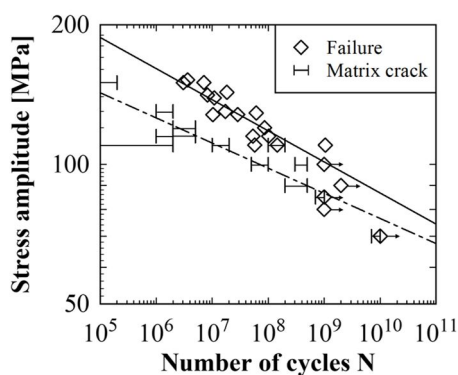


図 1 CFRP 擬似等方性積層板の S-N 特性

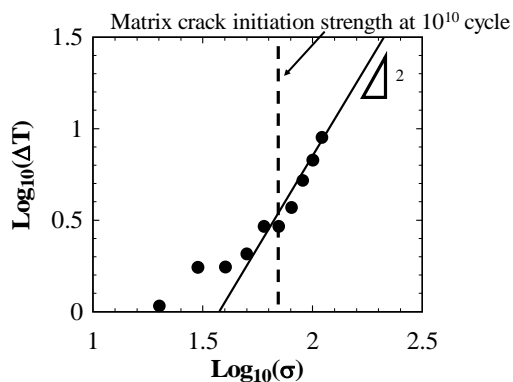


図 2 作用応力振幅と試験片表面温度の関係

以上の結果より、少なくとも 10^9 回までは狭義の意味での疲労限度は存在しないことがわかる。また、超高サイクル域でのマトリックス割れ発生寿命、疲労破損寿命ともに高サイクル疲労特性と同じく Basquin 則に従った疲労特性を示すこともわかる。

サーモグラフィ計測の結果からは、超高サイクル疲労強度と試験片の発熱量の間の相関は見られなかった。このことは、本研究における温度計測の精度が十分であるという条件付きではあるが、試験片の発熱に寄与する機構（粘弾性、塑性）と超高サイクル疲労き裂の発生機構との関係が必ずしも高くない可能性があることを示唆している。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

科研費実施期間の間に、主に国外において、超音波疲労試験による繊維強化プラスチックの疲労特性の取得の試みが複数報告されたが、炭素繊維強化プラスチック積層板の軸荷重疲労試験の報告はいまだなく、研究代表者が知る限り、本研究が世界初の報告である。

また、炭素繊維強化プラスチック積層板の軸荷重疲労試験において、少なくとも 10^9 回までは狭義の意味での疲労限度は存在しないことを実験的に示したことは、最初に述べた「炭素繊維強化エポキシ積層板に疲労限度は存在するのか？」という学術的問いに対する答えを与えており、学術的なインパクトは大きい。さらに、超高サイクル疲労特性が Basquin 則に従うという実験結果が CFRP 積層板に普遍的なものであれば、超高サイクル疲労が懸念される構造の疲労設計指針の策定に学術的な裏付けを与えることができるため、CFRP 技術の発展と安全の確立に貢献できるという意味でもそのインパクトは大きい。さらに、炭素繊維強化エポキシ積層板の疲労試験を従来手法の $1/10 \sim 1/100$ 程度の所要時間で迅速に行えることを実証した点も、産業応用上極めてインパクトがある。

(3) 今後の展望

本研究で用いた供試材は 1 種類のみであるため、ほかの材料であっても同様の傾向を示すかどうかはいまだ不明であり、さまざまな炭素繊維強化プラスチックに対して超高サイクル疲労試験を実施し、実験的知見を積み上げていく必要がある。また、本研究で得られた作用応力振幅と試験片最大応力部の表面温度の関係は、従来のいくつかの報告とは異なるものであり、疲労によるマトリックス割れ発生機構を考える上で興味深い示唆を与えていることから、やはり実験事実の積み重ねが必要であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川島大輝, 島村佳伸, 藤井朋之, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 CFRP擬似等方性積層板の超高サイクル域における疲労損傷発生と疲労破損に関する研究
3. 学会等名 第46回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinobu Shimamura, Takuya Hayashi, Hitoshi Miyazaki, Keiichiro Tohgo and Tomoyuki Fujii
2. 発表標題 Very High Cycle Fatigue of CFRP Laminate
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Nanomaterials & Advanced Composites (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島村佳伸, 林卓矢, 東郷敬一郎, 藤井朋之
2. 発表標題 超音波疲労試験技術による CFRP の超高サイクル疲労試験
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会 信頼性フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島村佳伸
2. 発表標題 超音波疲労試験技術の繊維強化プラスチック積層板への適用
3. 学会等名 日本複合材料学会 東北・北海道支部 特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島村佳伸, 林卓矢, 東郷敬一郎, 藤井朋之
2. 発表標題 超音波疲労試験技術による炭素繊維強化プラスチック擬似等方性積層板の超高サイクル疲労特性の評価
3. 学会等名 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島村佳伸, 林卓矢, 宮崎陸, 東郷敬一郎, 藤井朋之
2. 発表標題 炭素繊維強化プラスチック積層板への超音波疲労試験技術の適用
3. 学会等名 64th CON-EX2019講演会
4. 発表年 2019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	藤井 朋之 (Fujii Tomoyuki) (30377840)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	
研究分担者	細井 厚志 (Hosoi Atsushi) (60424800)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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