

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420011

研究課題名(和文)炭素繊維強化プラスチックの超高サイクル疲労の迅速評価手法の開発

研究課題名(英文)Development of Accelerated Testing Method for Very High Cycle Fatigue of CFRP

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) 4,100,000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に10,000,000回を超える繰返し負荷を作用させた場合の疲労特性(超高サイクル疲労特性)を従来の1/100以下の時間で迅速に評価する手法の開発を目的とし、具体的には、従来適用が不可能と考えられていた超音波疲労試験法を炭素繊維強化プラスチック積層板への適用を検討した。その結果、円孔を有する矩形型試験片を用い、空冷と間欠発振を併用することで、炭素繊維強化プラスチック積層板の軸荷重疲労試験が実施可能であることを明らかとした。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the fatigue properties of CFRP laminates in the very high cycle region, i.e. more than 10,000,000 cycles, within a practical period, the feasibility study of an ultrasonic fatigue testing method for CFRP laminates was conducted. The experimental study revealed that it is possible to conduct axial fatigue testing of CFRP laminates by using an open-hole specimen with air cooling and intermittent loading.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：疲労 繊維強化プラスチック

### 1. 研究開始当初の背景

近年、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の商用航空機への適用の拡大には目を見張るものがある。例えばボーイング社の最新型機 B787 やエアバス社で開発中の A350-XWB では、CFRP の適用比率が 1 機あたりの重量比で 50% 以上にもなる。また自動車構造への CFRP の適用も高級車を中心に拡大しつつある。輸送機器の軽量化 (低燃費化) の要求がある限り、輸送機器への CFRP の適用が今後さらに進んでいくことは間違いがない。また発電分野では、風力発電風車の大型化に伴い、風車ブレードへの CFRP の適用が進んでいる。

これらの CFRP 構造においては繰返し荷重が作用することは避けられないため、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、様々な知見がすでに得られている。一般的な見解としては、実用的に使われる CFRP 積層板や CFRP 織物材は疲労する、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おり、かつ疲労限は存在しないと考えられている。

以上のように、CFRP 積層板や CFRP 織物材では疲労限が存在しないと考えられているにもかかわらず、 $10^7$  回を超える繰返し負荷による疲労である超高サイクル疲労については、従来ほとんど研究がなされていない。これは、母材がプラスチックであることから、ひずみ速度を速くしていくと試験片が発熱するため、繰返し周波数を上げていくことが困難 (~ 数 10 Hz 程度) であり、結果として、超高サイクル疲労の試験の実施に非現実的な時間を要してしまうという点が挙げられる。そのため、わずかに細井ら (文献[1]) によって、CFRP 積層板の  $10^8$  回までの疲労試験の報告がなされている程度である。

CFRP の超高サイクル域における疲労特性に関して知見がほとんど無いということは、将来、CFRP 構造の高経年化が進むにつれて、想定外の事故が生じる可能性があるということである。そのため、CFRP の適用が拡大しつつある現時点から研究を推進し、超高サイクル疲労に関する知見を蓄積しておくことは極めて重要であると考えられる。それにも関わらず、迅速試験法が無いということは、CFRP の超高サイクル疲労に関する研究推進にあたっての大きな障害である。

ところで、Backe ら (文献[2]) により、つい最近、超音波疲労試験法により CFRP の疲労試験が実施可能という報告がなされた。超音波疲労試験法とは、超音波振動子により試験片を共振させることで、20kHz という極めて早い繰返し周波数で疲労試験を行なう手法である。前述の通り、そのような高い繰返し周波数では、繊維強化プラスチック試験片は発熱してしまい疲労試験が実施できないというのが従来の常識的な見解であった。ところが、Backe らは、20kHz で試験片を 3 点曲

げ共振させることが可能なことを高速度カメラで確認し、さらに共振状態の CFRP 織物試験片においてほとんど発熱がみられないことをサーモグラフィーによって実験的に確認した。また、その CFRP 織物積層板に層間はく離が生じたことも確認した。

以上の結果は、CFRP に対して超音波疲労試験法が適用可能であることを示唆しているが、疲労試験としての負荷方式の妥当性や発熱に関する定量的な分析など、実用化にあたり解決が必要な様々な技術的課題にたいして十分な検討がなされていない。

### 2. 研究の目的

疲労試験としては、やはり単軸引張圧縮疲労が基本であると考えられる。そこで、本研究では、以下の二点に着目して研究を実施する。

(1) 超音波疲労試験法で単軸引張圧縮疲労試験が可能な負荷方法の検討 (治具や試験片の設計)

(2) 間欠負荷、空冷との併用による試験片の発熱抑止に関する定量的な検討

### 3. 研究の方法

#### (1) 超音波疲労試験機

超音波引張試験機の概略図を図 1 に示す。20kHz の交流電圧を超音波振動子に印可することで得られる微小な振動を振幅拡大ホーンで拡大し、試験片を共振させることにより試験片に繰返し応力を作用させるものである。本装置の構成の場合、応力比は -1 となる。

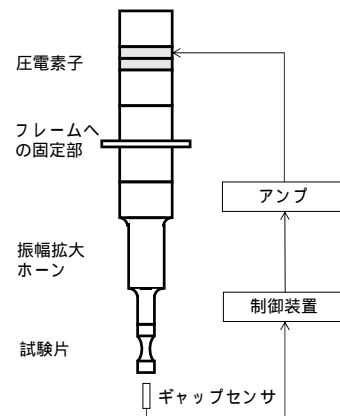


図 1 超音波疲労試験機の構成

#### (2) 材料

本研究で用いた材料はトレカプリプレグ T700/2592 である。なお、エポキシ 2592 のガラス転移温度は約 110 であることから、疲労試験はこの温度よりも十分低い温度で行う必要がある。積層構成は疑似等方積層とする。

#### (3) 試験片の設計

CFRP 試験片の両端に、超音波疲労試験機の振幅拡大ホーンとの締結と試験片底面での変

位測定のため、金属製タブを取り付ける必要がある。試験片形状の設計にあつての留意事項としては、試験片の共振周波数である20kHzにおいて引張圧縮の一次振動モードで共振し、かつ20kHz近傍に曲げ振動モードが存在しないように設計する必要がある。設計手順は次の通りである。まず次元の運動方程式を解くことで得られる理論解を用いて概算設計を行なった上で、有限要素法を用いて詳細寸法の設計を行う。

また、試験片形状であるが、短冊形試験片を用いる場合、試験片内での応力増幅が不十分で試験片の最大応力部が疲労破損する前に振幅拡大ホーンや金属タブなどで疲労破損が生じ、疲労試験が継続できない可能性がある。その場合、CFRP試験片に断面形状変化を設けることにより試験片に高い応力を作用させることが可能である。これは、本試験法は共振型試験であることを利用すると、試験片の断面積減少比率以上の応力増幅が可能なのである。

#### (4) 発熱抑止

CFRPに繰り返し荷重を作用させると、母材であるプラスチックの粘弾性によって試験片に発熱が生じる。超音波疲労試験法における試験片の発熱を抑制する方法としては、圧縮空気を用いた強制冷却と、断続発振による発熱防止があり、本研究でもこの両者を検討する。ここで断続発振とは、一定時間(数100 $\mu$ s)の繰り返し荷重を負荷したのち、一定時間(数100 $\mu$ s~数s)の休止時間を設けることで、試験片の発熱を抑制する方法である。断続発振の場合には、実質的な繰返し速度が低下することに注意が必要であるが、負荷・休止時間に対する負荷時間の比率(以下ではDuty比と呼ぶ)が1/100であったとしても、実効周波数はいまだ200Hzと十分に高速であり、既存の試験法と比べると疲労試験時間を1/10以下に短縮することが可能である。

#### 4. 研究成果

まずは共振条件を満たす長さ約100mm×幅12mm×板厚2mmの短冊形CFRP試験片を用いて、超音波疲労試験機を用いた軸荷重疲労試験の実施可能性を検討した。図2に連続発振した場合(試験片中央でのひずみ振幅550 $\mu$ )の試験片底面の変位波形、図3に試験片の温度分布のサーモグラフィ画像、図4に試験片長手方向のひずみ分布(有限要素法の結果より推定)と温度分布(実測値)を示す。試験片の温度分布の測定にはサーモグラフィカメラを用いた。変位波形の計測結果より、超音波疲労試験機により問題なく正弦波負荷が行えていることがわかる。またこのときの温度分布は試験片中央付近で最大値を示し、両端で最小となる正弦波状分布となっている。粘弾性理論によると発熱量はひずみの二乗にほぼ比例することを考慮すると、変形モードは設計通りの1次モード共振となっ

ていることがわかる。以上のことより、超音波疲労試験法により軸荷重疲労試験が原理的には実施可能であることを明らかとした。

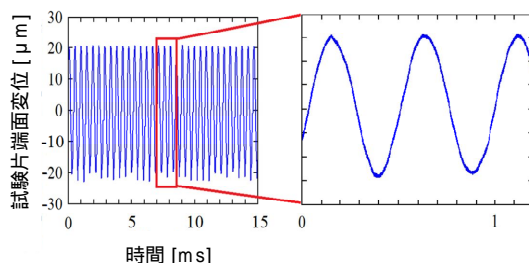


図2 試験片端部の変位波形

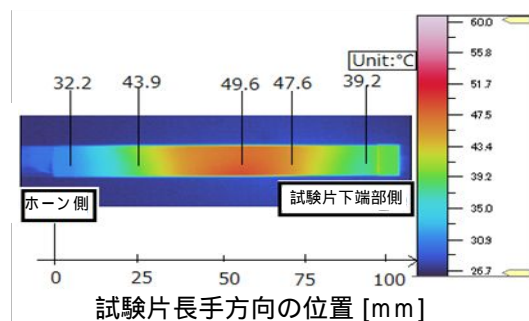


図3 試験片の温度分布

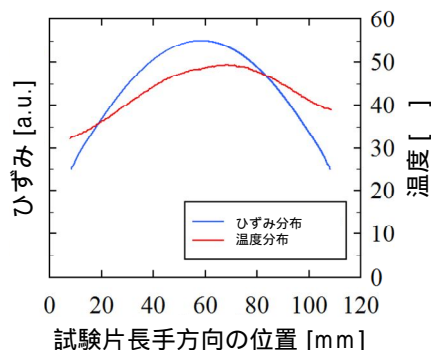


図4 試験片長手方向のひずみと温度の分布

しかし、試験片の昇温は無視できる量ではなく、発熱の抑止が必要である。そこで、間欠発振による冷却効果について検討を実施するため、試験片中央部の試験片温度の時間履歴とDuty比の関係を計測した(図5)。図中のDはDuty比を表す。なお、ひずみ振幅は先の実験と同じく550 $\mu$ とした。連続発振の場合には温度が上昇し続けたが、断続発振の場合には昇温は数分程度でとまり定常状態に達することがわかった。以上の結果は、断続発振は試験片温度を抑制するのに極めて有効であることを示している。さらに圧縮空気による強制冷却を併用すれば、疲労損傷が入る応力レベルである積層板の引張強度の20%の応力レベルのときでも+40程度の昇温ですむことも確認した。以上のことより、超音波疲労試験機を用いた軸荷重疲労試験が十分に実施可能であることを明らかにした。



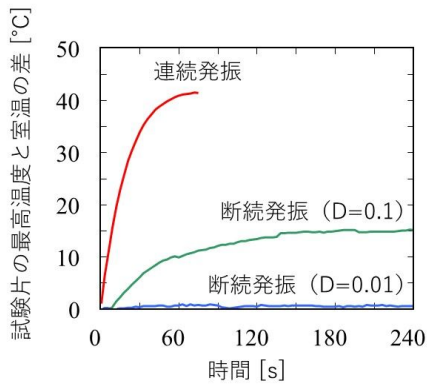


図5 試験片温度の時間変化(Duty比の影響)

以上の結果をふまえて疲労試験(D=0.01, 空冷を併用)を実施し、疲労損傷の発生を確認を試みた。ところが、金属タブとCFRP試験片との接着部の疲労はく離が発生してしまい、CFRPの疲労損傷に至る前に疲労試験が進行不可能となった。そこで、試験片に円孔を設けて試験片内で応力拡大をはかることでその問題を解決することとした。その結果、リガメント部に疲労損傷を発生させることが可能となった。応力振幅が引張強度の35%のときに、90°層に生じた樹脂割れの様子を図6に示す。このときの試験停止繰返し数は $10^4$ 回である。なお本試験では、疲労損傷の観察を容易にするために、最外層の繊維配向を90°としている。さらに応力振幅を増加させたところ、応力振幅が引張強度の40%のときにリガメント部の0°層で繊維破断が生じた(図7)。

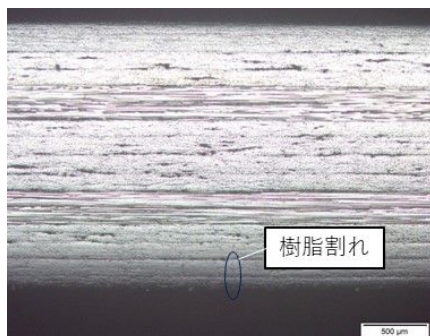


図6 リガメント部での疲労損傷の発生

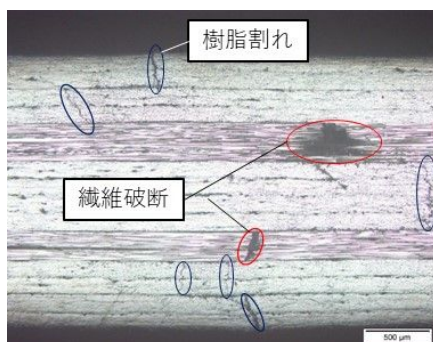


図7 リガメント部の疲労損傷

以上の結果を総括すると、超音波疲労試験法により、CFRP積層板の軸荷重疲労試験が可能であり、本手法により疲労損傷ならびに疲労破壊を生じさせることが可能であることを明らかとした。

#### <引用文献>

- A. Hosoi et al., "High-cycle fatigue characteristics of quasi-isotropic CFRP laminates over  $10^8$  cycles", Intl. J. Fatigue, 32, 2010, 29-36  
 D. Backe, F. Balle and D. Eifler, "Fatigue testing of CFRP in the Very High Cycle Fatigue (VHCF) regime at ultrasonic frequencies", Compos. Sci. Technol., 106, 2015, 93-99

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

#### 6. 研究組織

##### (1)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: 8 0 2 7 2 6 7 3

##### (2)研究分担者

加藤木 秀章 (KATOGL, Hideaki)  
 神奈川大学・工学部・助教  
 研究者番号: 0 0 6 2 5 2 9 6

東郷 敬一郎 (TOHGO, Keiichiro)  
 静岡大学・法人本部・理事  
 研究者番号: 1 0 1 5 5 4 9 2

藤井 朋之 (FUJII, Tomoyuki)  
 静岡大学・工学部・助教  
 研究者番号: 3 0 3 7 7 8 4 0