

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14114

研究課題名(和文) CFRPにおけるマイクロ疲労損傷の陽電子消滅法による非破壊検出手法の創製

研究課題名(英文) Non-destructive evaluation of micro fatigue damage in CFRP by positron annihilation line-shape and lifetime analyses

研究代表者

植松 美彦 (UEMATSU, Yoshihiko)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80273580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：熱可塑性樹脂をマトリックスとし、綾織り炭素繊維束を強化材としたCFRTPを作製し疲労試験を実施し、陽電子消滅パラメータと疲労損傷過程の相関について検討した。陽電子消滅パラメータとしては、陽電子が消滅するまでの陽電子寿命および、消滅時の線エネルギー分布から定義されるSパラメータを用いた。その結果、Sパラメータは疲労損傷初期に大きく上昇し、その後の繰返しによって徐々に減少する傾向が見られた。応力繰返しによりトランスバースクラックが発生し、繰返しとともにき裂数も増加することが確認された。このように、Sパラメータは疲労損傷を捉えることが可能であった。一方、陽電子寿命は疲労損傷に対して不敏感であった。

研究成果の概要(英文)：Axial loading fatigue tests were conducted using carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) using twilled fiber bundles. Accumulating fatigue damaged was nondestructively evaluated by a positron annihilation method, in which positron annihilation life time and S parameter were used for the evaluation. In the present case, S parameter is defined from the γ -ray energy distribution. In the early stage of fatigue life, S parameter sharply increased with increasing number of loading cycles. Subsequently, S parameter decreased in the middle and final stages of fatigue life. Microstructural observation revealed that transvers fatigue cracks were formed in the early stage of fatigue life, and the number of cracks increased with loading cycles. It could be concluded that S parameter could evaluate the fatigue damage accumulation in CFRTP. However, positron lifetime was insensitive to the fatigue damage.

研究分野：疲労破壊

キーワード：疲労 CFRP 損傷評価 非破壊検査 陽電子消滅

1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP) は軽量高強度であり、今後様々な機器の構造材料として適用が期待されている。すなわち CFRP は既に航空機のような工業製品に多用されているが、今後は自動車など、他の輸送機器へも積極的に利用されることが想定される。しかし、実機では繰返し荷重の付与による疲労損傷が生じるため、機器としての信頼性を確保するためには損傷を非破壊で検出することが望ましい。現在、CFRP では超音波を利用した非破壊検査が主流であるが、原理的には波長以下の分解能を持たせることが難しい。すなわち、CFRP における層間はく離は検出できても、その前段階である樹脂損傷や繊維 - マトリックス界面はく離等のミクロ損傷を検出することが困難である。

(2) 陽電子消滅法は、放射線源から発生する陽電子が材料内部で消滅する際に生じる各種パラメータを測定する手法であるが、金属材料の疲労損傷検出に応用された例がある。金属材料の疲労損傷は転位運動によるものであるが、そのようなミクロな疲労損傷を陽電子消滅法で検出可能であることが報告されているものの、CFRP に同手法を適用した例が無いという背景がある。

2. 研究の目的

本研究は、金属材料の格子欠陥を検出する手法として知られる陽電子消滅法を CFRP の疲労損傷検出として応用し、高精度かつ高分解能の非破壊検出手法を構築することを目的としている。陽電子消滅法を用いれば、超音波では検出できない CFRP のミクロ疲労損傷検出システムの構築が可能と考えられる。

3. 研究の方法

(1) 供試材は厚さ 2mm の熱可塑性樹脂基炭素繊維強化プラスチック CFRTP であり、マトリックスは熱可塑性樹脂のナイロン 66 (PA66) である。強化繊維として、綾織りの炭素繊維束を用いた。供試板よりウォータージェット加工機で長さ 140mm、幅 10mm の短冊形試験片を採取し、さらに曲率半径 68mm の切り欠きを施した。その後フライス盤を用いて直径 0.7mm の穴を中心に施した。中央部に穴を施すことにより陽電子消滅測定を行う際、試験片の破断が起こる領域を限定することで、疲労損傷を検出しやすくしている。

(2) 疲労試験には容量 10t の電気 - 油圧サーボ式疲労試験機を用い、片振り引張条件下で室温大気中にて繰返し速度 $f=18\text{Hz}$ 、応力比 $R=0.1$ で行った。陽電子消滅法では、陽電子が消滅するまでの時間を表す陽電子寿命、および陽電子消滅時に発生する線のエネルギー分布から定義される S パラメータを評価指標として用いた。線のエネルギー分布は

ドップラー効果によるため、S パラメータ測定手法はドップラー幅拡がり測定と呼ばれている。

4. 研究成果

(1) 疲労試験の結果 (S-N 曲線: 応力振幅と破断繰返し数) を図 1 に示す。矢印は規定の繰返し数までに破断が生じなかったことを示している。穴の無い平滑疲労試験片については、Lot A (印) および Lot B (印) の 2 種類の板から試験片を採取している。しかし同図に示すように、Lot A、Lot B の平滑材については疲労強度にばらつきが少ないことがわかる。図中、印で示しているのが、直径 0.7mm の円孔切欠きを有する試験片の結果である。円孔切欠きを付与することにより、円孔のない Lot A および Lot B よりも疲労強度が低下していることがわかる。この疲労試験結果を基に、以下の手順で疲労損傷の検出を行った。まず応力振幅 $\sigma_a=205\text{MPa}$ となる条件で疲労試験を実施する。図 1 によれば、同応力振幅は 10^7 回まで破断が生じない下限の応力に近いことがわかる。そこで $10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ および 10^7 回の応力を繰返した段階で疲労試験を中断することで 5 種類の疲労中断試験片を作製し、それぞれについて陽電子消滅法による測定を行った。この手法により、応力の繰返しとともに蓄積する疲労損傷と、陽電子消滅パラメータの相関を経時的に確認することができる。

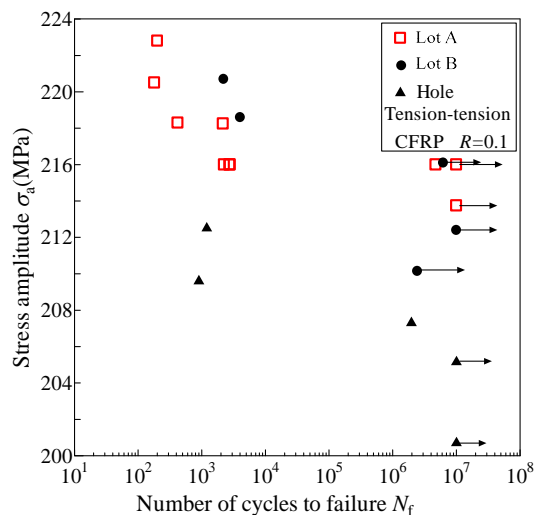


図 1 平滑材と穴あき材の S-N 曲線。

(2) 陽電子寿命による疲労損傷の評価結果を図 2 に示す。上側の図面 (印) が信号の相対強度であり、下側 (印) が陽電子寿命と繰返し数の関係となっている。同図より、陽電子寿命は応力繰返し数が 10^5 回程度まではほぼ一定であるが、 10^7 回で急激に上昇する傾向が見られた。しかし、後述するように CFRTP の微視的な疲労損傷は、繰返し数 10^3 回程度の初期段階から発生していることが確認されており、陽電子寿命は疲労損傷に対

して鈍感となる結果が得られた．一般に，陽電子寿命は金属材料の疲労損傷に対しては敏感とされており，金属とは相反する結果となった．

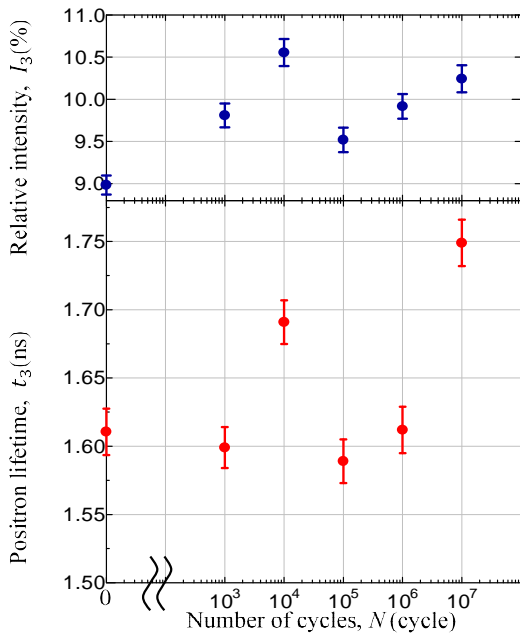


図 2 陽電子寿命の荷重繰返しに伴う変化．

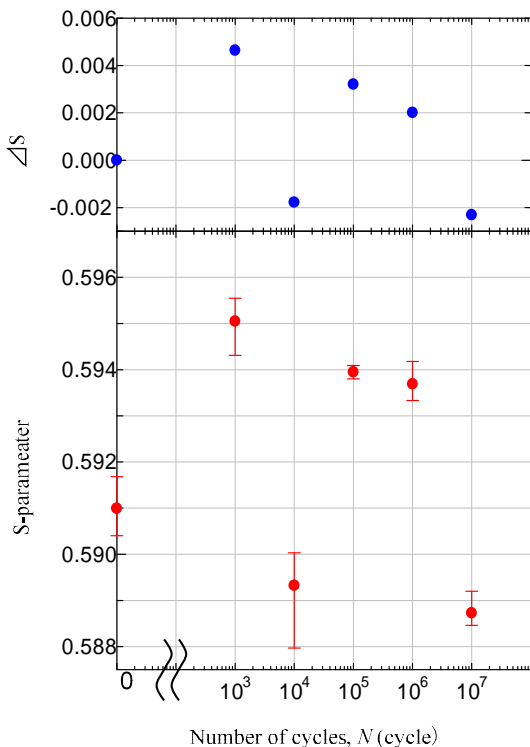


図 3 S パラメータの荷重繰返しに伴う変化．

(3) S パラメータによる疲労損傷の評価結果を図 3 に示す．上側 (印) が S パラメー

タの変化量 S であり，下側 (印) が S パラメータと繰返し数の関係である．同図より， S パラメータは繰返し数 10^3 回で大きく上昇し，その後ほぼ連続的に減少する傾向が見られた．このように， S パラメータについては，応力繰返しとともに経時的に値が変化した．金属材料の疲労損傷検出法としては， S パラメータは陽電子寿命より分解能に劣るとされるが，これについても CFRTP では逆の結果となった．

(4) CFRTP に実際に生じている疲労損傷の観察を行った．図 4 は繰返し数 10^3 回における円孔切欠き周囲の表面様相であり，荷重軸は水平方向である．図中に矢印で示すように，円孔切欠き底部に荷重軸とはほぼ平行な巨視的なき裂が確認された．また，図 5 は同じ繰返し数で切欠き底の側面を観察した例である．矢印で示すようにトランスバースクラックも確認できた．応力振幅 $\sigma_a = 205\text{MPa}$ の条件では 10^7 回まで破断は生じない．すなわち，応力繰返しのかかなり初期の状態でも疲労損傷が生じており，図 3 で示した S パラメータの急激な初期上昇は，これらのき裂に対応していると考えられる．一方図 6 は，繰返し数 10^7 回における円孔切欠き周囲の様相である．同図より，図 4 と比較して切欠き底の巨視的なき裂が著しく増えていることがわかる．また図 7 は，同繰返し数における切欠き底の側面様相である．切欠き底側面においてもき裂が増加していることが確認された． S パラメータは 10^3 回以降徐々に減少しているが，このようなき裂数の増加に対応して経時的に変化したと考えられる．一方陽電子寿命については，図 4，図 5 で示したような明らかな疲労損傷の蓄積があるにもかかわらず， 10^6 回程度まで大きな変化が見られなかった．すなわち，疲労損傷に対して鈍感であることを示している．

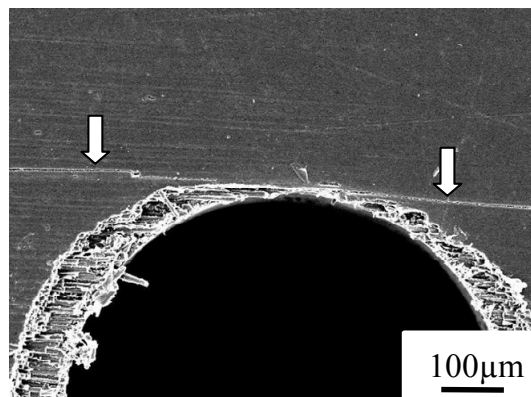


図 4 繰返し数 10^3 回における切欠き底周囲の表面様相．

研究者番号：20452039

(2)研究分担者

大谷 章夫 (OHTANI, Akio)

京都工芸繊維大学・教育研究基盤機構系・
准教授

研究者番号：80569533

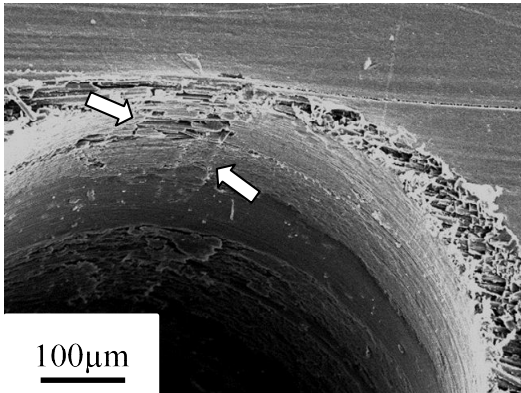


図5 繰返し数 10^3 回における切欠き底の側面様相。

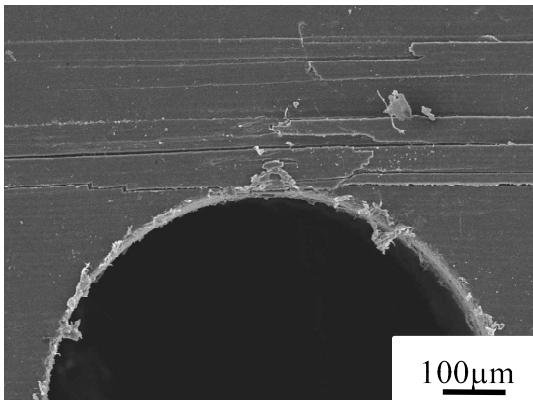


図6 繰返し数 10^7 回における切欠き底周囲の表面様相。

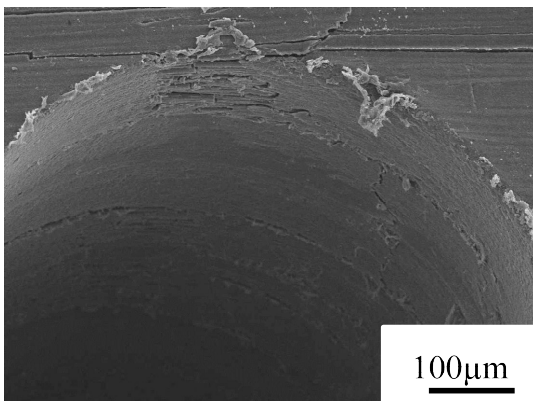


図7 繰返し数 10^3 回における切欠き底の側面様相。

5. 主な発表論文等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

植松 美彦 (UEMATSU, Yoshihiko)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80273580

(2)研究分担者

柿内 利文 (KAKIUCHI, Toshifumi)

岐阜大学・工学部・准教授