

CFRP モードII層間疲労き裂進展と AE 信号の関係

卒業論文要旨

機能性材料工学研究室 1170112 中山 真輔

1. 緒言

プラスチックは軽量で加工性が良い特性を持っているが、弾性率や強度が低いいため、構造材料には向いていない。しかし、炭素繊維やガラス繊維など、高弾性率、高強度の材料を複合化することで、軽量かつ高強度な材料として使用することができる。中でも、炭素繊維を複合化した材料は炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）と呼ばれている。

CFRP は軽量化・高剛性・低振動性に優れ、自動車・航空宇宙機器など広い分野で用いられている。CFRP の積層構造における破壊、損傷では、層間はく離が重要なモードとなるため、そのモードでの疲労き裂進展挙動を把握しておくことは重要である。

一方、微小なき裂の発生、進展あるいは塑性変形などが生じた場合、材料内部に蓄積された弾性エネルギーが弾性波として外部に放出される。この現象をアコースティック・エミッション（以下、AE）と呼ぶ。この AE 信号を解析することで非破壊的に材料内部の情報を得ることができる。

本研究では母材のじん性値が異なる 2 種類の CFRP のモードII層間はく離疲労き裂進展試験（以下、き裂進展試験）を行い、その時の AE 信号との関係について調査を行った。

2. 試験片材料および実験方法

2-1. CFRP 試験片

本研究では破壊じん性値の異なる 2 種類の R 材と A 材を用意した。試験片は、140mm×25mm×6mm の寸法を有し、エポキシ樹脂を母材とした CFRP 直交積層板である。母材エポキシ樹脂の材料特性を表 1 に示す。積層条件は、9 層非対称積層 (0/90/0/90/0/90/0/90/0) で、初期き裂導入のため、図 1 に示すように厚さ 12 μ m のテフロンシートを 5 層目と 6 層目の間に配置して成形した。

Table1. Properties of epoxy resin

	R	A
Viscosity [Pa · S]	0.8	12
Fracture toughness [MPa · m ^{0.5}]	0.8	1.4
Tensile modulus [GPa]	3.1	2.0
Elongation at break [%]	3	6

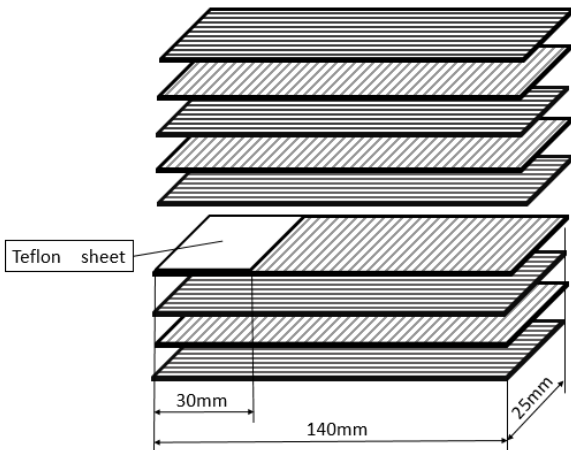


Fig.1 Laminated Structure

2-2. 実験方法

き裂進展試験は油圧サーボ式き裂進展試験機を使用し、試験片中央を荷重点とする 3 点曲げ負荷、支点間隔 100mm、繰返し速度 2Hz、変位比 0.1 の試験条件下で行った。き裂進展試験中の荷重-変位データは、10 秒毎に 1 回取得した⁽¹⁾。この荷重-変位データと読み取り顕微鏡で測定したき裂長さ a より、各測定時のコンプライアンス C を式 (1) で表した。

$$C = \alpha + \beta a^3 \quad (1)$$

モードIIエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} については式 (2) を用いて算出した。ここでは、 P は荷重、 β は式 (1) における a^3 の係数、 B は試験片幅を表す⁽²⁾。

$$\Delta G_{II} = \frac{3(P_{max}^2 - P_{min}^2)}{2B} \beta a^2 \quad (2)$$

き裂進展速度 da/dN は式 (3) で算出した。ここで a_i, N_i はそれぞれ i 番目に測定したき裂長さとその時の繰返し数である。

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \quad (3)$$

試験片中央から右 50mm の位置に AE センサを取り付けて、モードIIき裂進展時の AE 信号を計測した。AE 計測システムの概略を図 2 に示す。き裂先端が荷重負荷点中央の 70mm に達した時、き裂進展試験を終了した。

き裂進展試験で検出したモードIIき裂進展時の AE 信号は、ウェーブレット解析を行った。その後、試験片を強制破断させて、電子顕微鏡 (SEM) を使用し破面観察を行った。

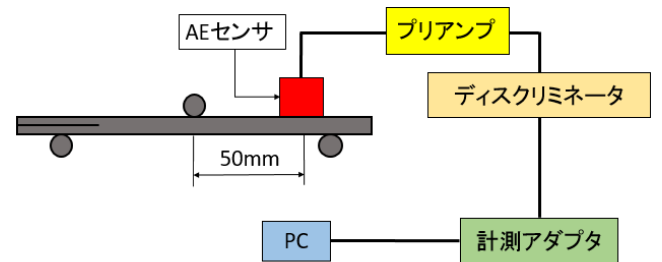


Fig2. AE measurement system

3. 実験結果

3-1. モードII層間き裂進展挙動

き裂進展速度とエネルギー解放率範囲の関係を図3に示す。A材の $da/dN - \Delta G_{II}$ 関係は両対数プロットにおいて、1本の近似直線で表すことが可能で、この領域では指数則が成立することが分かった。一方、R材の da/dN は A 材と比較して大きくなり、ばらつく結果となった。

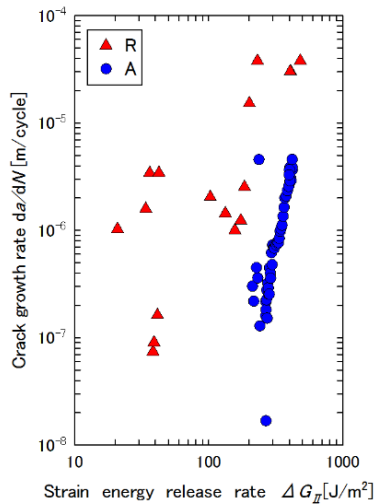


Fig.3 Relationship between da/dN and ΔG_{II}

3-2. AE 信号のウェーブレット解析

周波数成分の情報のみを得るフーリエ解析とは異なり、ウェーブレット解析では、対象とする周波数成分の発生時刻も情報として得ることができる。各材料のき裂進展試験中に測定された AE 信号のウェーブレット解析結果を図 4、図 5 にそれぞれ示す。縦軸が周波数成分、横軸に時間を表し、周波数成分の強い領域が青～赤で表示されている。

R 材では、250kHz 付近と 50~100kHz の周波数成分が特に強いことが確認できる。一方、A 材では 50~100kHz の領域のみが強くなっている。CFRP の破壊において、損傷モードとその時に生じる AE 信号の周波数成分との関係は表 2 に示す関係があることが知られている⁽³⁾。

Table2. Relationship between AE frequency and damage mode in CFRP

Frequency [kHz]	Damage mode
<50	Test piece - tool friction
50~100	Matrix cracking
150~250	Interface cracking
270~390	Fiber breaks
630<	Fiber friction

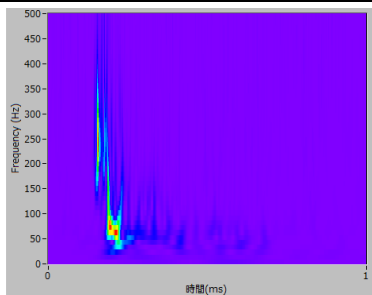


Fig.4 Result of wavelet analysis in R

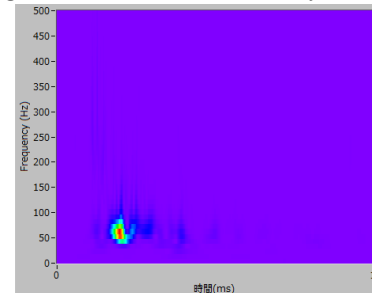


Fig.5 Result of wavelet analysis in A

この結果と照合すると、いずれの材料も樹脂割れが支配的なモードでき裂が進展しているが、R 材では繊維破断や繊維-樹脂間にはく離が生じたことが分かる。無作為に複数の AE 信号を解析したが、A 材ではすべての信号が図 5 に示すような結果であった。

3-3. 破面観察

各材料の SEM で観察した破面を図 6、図 7 にそれぞれ示す。R 材では、樹脂部の破面が 1 つ 1 つ大きいのが特徴であり、繊維が破断している箇所も見られた。A 材では、樹脂部の破面が 1 つ 1 つ小さく縞模様のようにになっているのが特徴であり、き裂進展方向に直交する割れも観察された。

以上の結果から、母材じん性値の低い R 材では一部に不安定破壊が生じ、大きなき裂進展を伴うため da/dN が大幅に大きく、また頻繁に繊維の破断も生じたと考えられる。

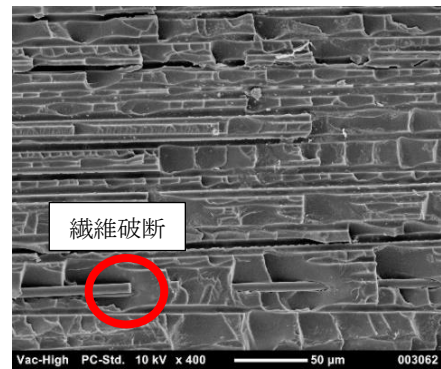


Fig.6 SEM image of fracture surface in R

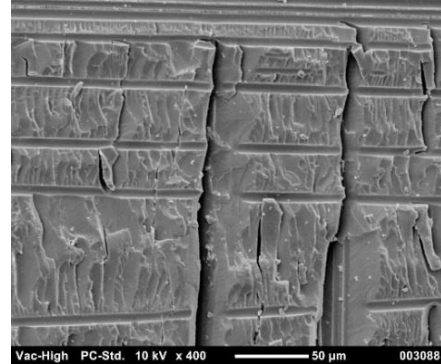


Fig.7 SEM image of fracture surface in A

4. 結言

- (1) CFRP 試験片の破壊じん性値の違いによって、疲労き裂進展に対する抵抗が異なり、R 材の da/dN は A 材に比べて大幅に大きいことが明らかとなった。
- (2) R 材、A 材の疲労き裂進展の挙動は、AE 信号のウェーブレット解析、破面観察より異なることが明らかとなった。

参考文献

- (1) アルミニウム合金接着継手のモード I およびモード II 疲労き裂進展に及ぼす陽極酸化処理の影響、高知工科大学、波多野勇気、(2016)
- (2) アルミニウム合金 単純重ね合わせ接着継手疲労挙動と AE 信号 高知工科大学、濱田亜希 (2016)
- (3) AE 信号のウェーブレット変換による FRP 積層板の曲げ疲労損傷評価—フラクタル次元とニューラルネットワークの適用—宅間正則、新家昇、鈴木健、藤井俊行 精密工学会誌 Vol. 68, No. 10. 2002 日本複合材料学会誌 第34巻 第6号 (2008)