

# CFRP 層間疲労き裂進展挙動と AE 特性

## Delamination Fatigue Crack Growth Behavior and AE laminates of CFRP

システム工学群

材料強度学研究室 1220080 芝本 曜輔

### 1. 緒言

炭素繊維とプラスチックの複合材料である炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)は、比強度、比剛性が高いという特徴があることから航空機、自動車、スポーツ用品など幅広い分野で用いられている。CFRP は繊維に樹脂を含浸させたプリプレグと呼ばれるシート状の材料を積層して加熱する方法が一般的である。この方法で成形した CFRP 板は積層構造体となり、その破壊、損傷は層間はく離が主たる形態をとる<sup>(1)</sup>。したがってその静的破壊挙動に加え、長期信頼性の確保のために繰り返し荷重下における層間はく離き裂進展挙動を明らかにしておく必要がある。

一方、CFRP の微視的破壊形態は母材の割れ、繊維と母材の界面はく離など複雑である。そこで本研究では材料の破壊や変形の進展挙動を微視的に評価するためにアコースティックエミッション(以下 AE)を用いる。AE は材料内部の変形または破壊が生じるときに弾性エネルギーが弾性波として放出される現象のことである。AE 信号を解析することで微視的な破壊形態などを捉えることができる。本研究では CFRP 積層材のモードIおよびモードII、またそれら2つの混合モード

(I+II) 荷重下の層間疲労き裂進展試験を行い、その際に発生する AE 信号との関係について明らかにするとともに微視的破壊メカニズムについて検討した。

### 2. 試験片および実験方法

#### 2.1 試験片

本研究では、150×150 mm に切り出した CFRP プリプレグをすなわち直交積層材として積層条件 $[0_{15}/90_{15}]_s$ 、 $[0_{20}/90_{10}]_s$ で、一方向材として $[0_{60}]$ で60枚積層し、加圧成形した CFRP 積層材である。予き裂導入源として片側の0°層と中央の90°層の端部の間に、一方向材では20層と21層の間に厚さ12.5 $\mu\text{m}$ のカプトンシートを挿入した。成形方法はホットプレスを用いた加圧成形である。その条件は、1時間で130°Cまで昇温し、2時間保持した後に自然冷却であった。その後、ファインカッターを用いて積層板を120×25×4.5 mm の試験寸法に切り出した。試験片の寸法を図1に示す。

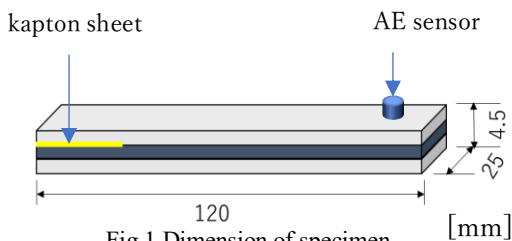


Fig.1 Dimension of specimen [mm]

#### 2.2 実験方法

疲労き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を使用した。予き裂を長さを25mm導入した。実験条件は、変位制御で繰

り返し速度を2.0Hzとした。実験はモードI、モードIIおよび混合モード(I+II)について行った。混合モードMMB試験の概略図を図2に示す。混合モードは、負荷荷重位置cを任意に変更することでモードI、IIのエネルギー解放率 $G_I$ 、 $G_{II}$ の比を変えることができる。き裂長さaは、読み取り顕微鏡を用いて測定した。き裂長さにおけるエネルギー解放率範囲は式(1)、(2)を用いた。ここで $P_{max}$ は荷重の最大値、 $P_{min}$ は荷重の最小値、aはき裂長さ、Bは試験片の幅である。 $(EI)_0$ 、 $(EI)_1$ はそれぞれ0°単層、0°+90°層の剛性であり、 $(EI)$ はき裂がない部分の試験片の剛性である。

試験終了後、計測したAE信号についてウェーブレット解析を行った。また、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面観察を行った。

$$\Delta G_I = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2)a^2}{2B} \left\{ \frac{1}{(EI)_0} + \frac{1}{(EI)_1} \right\} \quad (1)$$

$$\Delta G_{II} = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2)a^2}{8B} \left\{ -\frac{1}{(EI)} + \frac{1}{(EI)_0 + (EI)_1} \right\} \quad (2)$$

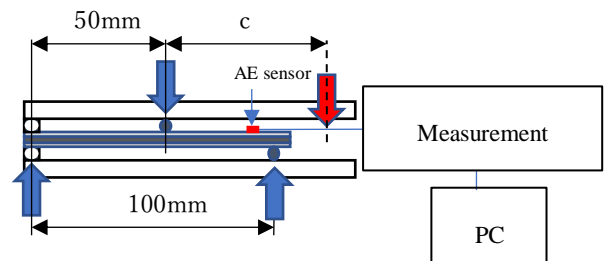


Fig.2 Schematic illustration of MMB test

### 3. 実験結果

#### 3.1 き裂進展挙動

本実験で得られたき裂進展速度 $da/dN$ とエネルギー解放率範囲 $\Delta G$ の関係をモードI、モードIIおよび混合モード(I+II)をそれぞれ図3、4および図5に示す。図3のモードIにおいてばらつきはあるものの $da/dN$ とエネルギー解放率範囲 $\Delta G_I$ には指数則が成り立つ。一方向材のばらつきが他の積層構成に比べて小さく $da/dN$ は高くなった。直交積層材は積層構成によらず同一 $\Delta G_I$ に対しほぼ $da/dN$ が等しくなった。

図4のモードIIにおいて一方向材はモードIと同様に指数則が成り立つ。直交積層材の $da/dN$ は他の積層構成に比べてばらつきが大きく、一方向材より $da/dN$ が大きくなった。これは成形時の熱応力が原因と考えられる。

図5の混合モード(I+II)においては $da/dNa$ が $[0_{60}]$ 、 $[0_{20}/90_{10}]_s$ 、 $[0_{15}/90_{15}]_s$ の順に大きくなった。

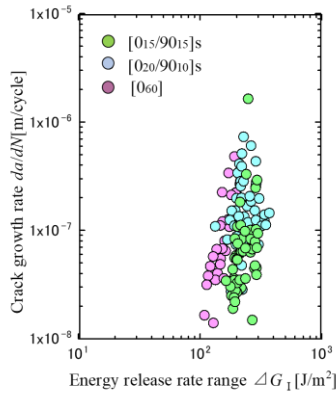


Fig.3 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_I$

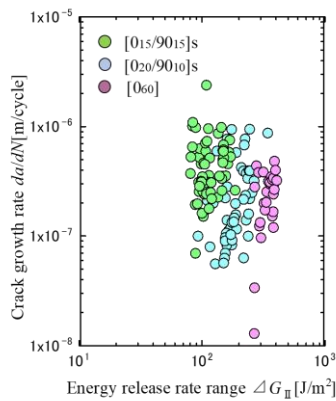


Fig.4 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_{II}$

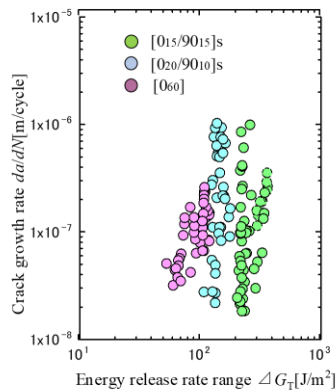


Fig.5 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_T$

### 3.2 AE 信号解析

図6はモードIおよびモードIIのき裂伝ば試験で得られたAE信号をウェーブレット解析した結果を示している。縦軸に周波数成分、横軸に時間を取り、信号の強さを青から赤の色相で色分けしている。

モードIの解析結果では、50~100 kHz 付近に強い信号が現れた。AE信号の周波数成分と破壊メカニズムの関係についての報告<sup>2)</sup>を参照すると樹脂割れでき裂が進展の主たるメカニズムであることが考えられる。一方でモードIIでは、き裂が短いとき50~100 kHz 付近に強い信号を示したことからモードIと同様に樹脂割れでき裂が進展していると考えられた。しかし、き裂が長い領域においては150~200 kHz 付近の成分も強く検出されたことから繊維間界面はく離が主たるき裂進展メカニ

ズムであることが考えられる。混合モードではモードIIと同様な結果が得られた。

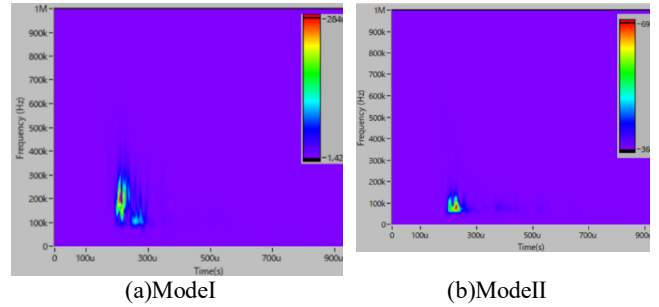


Fig.6 Wavelet analysis results for mode I and mode II cracks

### 3.3 破面観察

試験後の試験片の90°側破面をSEMにより観察した結果を図に示す。矢印はき裂の進展方向を示す。

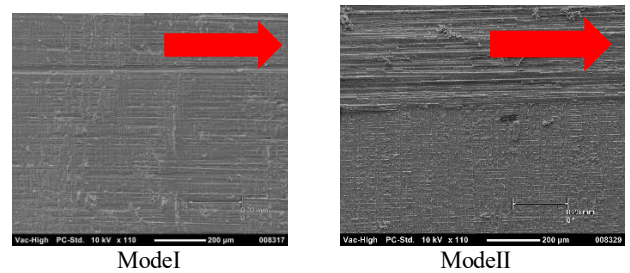


Fig.7 SEM observation of fracture surface for mode I and mode II

モードIの破面を観察すると繊維が見られず、樹脂割れであることが確認できた。モードIIの破面を観察すると、き裂初期ではモードIと同様に樹脂割れであることが確認できた。き裂終期では繊維が見られたことから樹脂と界面はく離が混在していることが確認できた。混合モードではモードIIと同様の破面を確認することができた。また、AE信号のウェーブレット解析した結果と対応していることが分かった。

### 4. 結言

- (1) 各モードにおけるき裂進展速度  $da/dN$  とエネルギー開放率範囲  $\Delta G$  の関係には指数則が成り立つことが確認できた。
- (2) AE信号のウェーブレット解析および破面観察の結果より、き裂初期はどのモードにおいても樹脂割れによってき裂が進んでいることが分かった、モードII、混合モードのき裂終期では繊維間界面はく離であることが分かった。

### 文献

- (1) 文仙北谷英貴, 北條正樹, 長澤長八郎, 劔持潔, 牧廣, “一方方向CF/エポキシ積層板の引張疲労およびモードI層間はく離疲労き裂伝ばにおける破壊機構の比較”, 材料, Vol.42, No.472(1993), p. 52-58.
- (2) 宅間正則, 新家昇, 鈴木健, 藤井俊行 精密工学会誌 Vol.68 (2002) No.10.