

# CFRP 積層板のモード II 層間はく離疲労き裂進展挙動と AE 信号特性との関係

## Acoustic emission generated by mode II fatigue crack propagation in CFRP laminates.

システム工学群

機能性材料工学研究室 1190102 程 和毅

### 1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量で高強度・高剛性であることから航空機や自動車、スポーツ用品などに幅広く使われている。CFRP の成形方法として代表的なものに、プリプレグと呼ばれる繊維に樹脂を含浸させたシートを積層して成形する方法がある。この成形方法で成形した CFRP は積層構造体となり、その破壊は層間はく離に起因することが多い。このため、繰り返し荷重による層間はく離き裂進展においてどのような微視的破壊形態が支配的であるかを把握しておくことは実用上必要である。

AE (Acoustic Emission) 法は材料内部の微視的な破壊現象を反映した信号を検出するものであり、破壊の発生場所を特定したり、微視的な破壊の形態を識別できるなど、破壊過程を明らかにする上で優れた非破壊検査法である。

本研究では、CFRP に繰り返し 3 点曲げ荷重を負荷し、層間はく離疲労き裂進展試験を行い、そのき裂進展特性を明らかにするとともに、き裂進展に伴い発生する AE 信号をウェーブレット解析によって解析し、き裂進展挙動と AE 信号の関係を明らかにすることを目的とする。

### 2. 材料および実験方法

#### 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 (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を積層層数 [0<sub>20</sub>/90<sub>20</sub>/0<sub>20</sub>] で 60 枚積層した材料を用いた。予き裂として厚さ 50 $\mu$ m のテフロンシートを 90°層と 0°層の間に挿入した。ホットプレス機を用いて圧力 40 MPa 下で 1 時間かけて 130 °C まで加熱し、2 時間 130 °C を保持した後に自然冷却する成形条件で加圧成形を行った。成形後、ファインカッターを用いて CFRP 積層板を試験片寸法に切り出した。このとき、導入したテフロンシートが試験片端部から 25 mm の位置までくるようにした。試験片寸法は 120×25×4.5 mm であり、図 1 に試験片の概略図を示す。

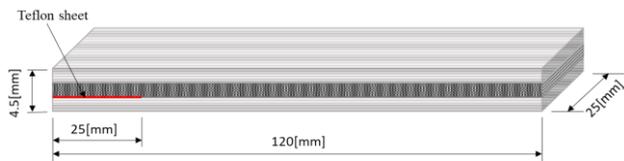


Fig.1 Schematic illustration of specimen.

#### 2.2 試験方法

図 2 に試験装置の概略図を示す。き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を使用し、支点間距離 100 mm、繰り返し速度 2.0 Hz として変位制御で 3 点曲げ荷重を行った。き裂長さの測定は、試験片側面を白く塗装し、読み取り顕微鏡を用いて光学的に行った。試験片中心からき裂とは逆側 40 mm の

位置に AE センサーを取り付け、き裂進展による AE 信号を計測した。また、き裂進展試験中の荷重-変位データを 10 秒間隔で記録し、そのデータから試験片のコンプライアンス  $C$  およびエネルギー解放率範囲  $\Delta G_{II}$  を算出した。

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 (以下 SEM) による破面観察を行った。

また、比較のためモード I 疲労き裂進展試験も行った。

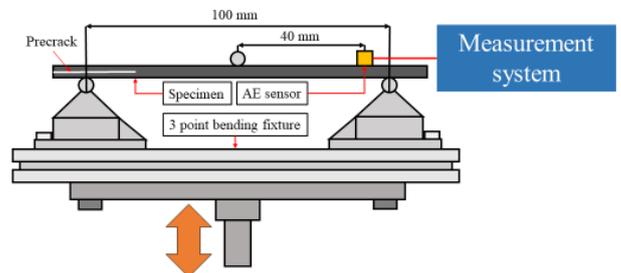


Fig.2 Experiment equipment

### 3. 実験結果

#### 3.1 き裂進展挙動

本実験において得られるコンプライアンス  $C$  とき裂長さ  $a$  の関係の一例を図 3 に示す。一般に、3 点曲げ荷重において、コンプライアンスとき裂長さの関係は式(1)のように表される。

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

この関係を用いて、き裂進展中のき裂長さを推定することができる。また、試験した 4 本の試験片についてのき裂進展速度  $da/dN$  とエネルギー解放率範囲  $\Delta G_{II}$  の関係を図 4 に示す。試験片ごとに若干のばらつきが見られるものの、 $da/dN$  と  $\Delta G_{II}$  の関係を曲線で表すことができる。また、直線的に表せる領域があり、ここでは両者の間に指数則が成り立っていることがわかる。比較のために行ったモード I 疲労き裂進展試験の結果と比較すると、同じき裂進展速度でモード I の方が  $\Delta G$  が大きい値をとることがわかった。

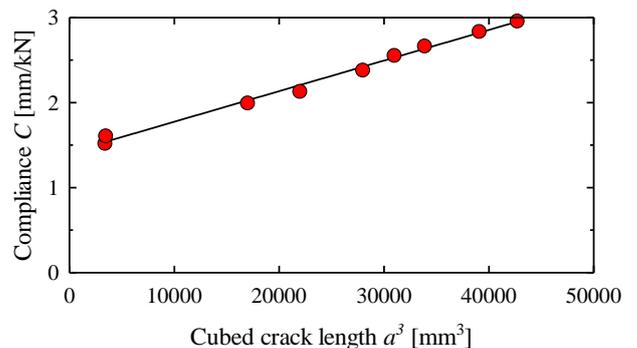


Fig.3 Relationship between  $C$  and  $a^3$

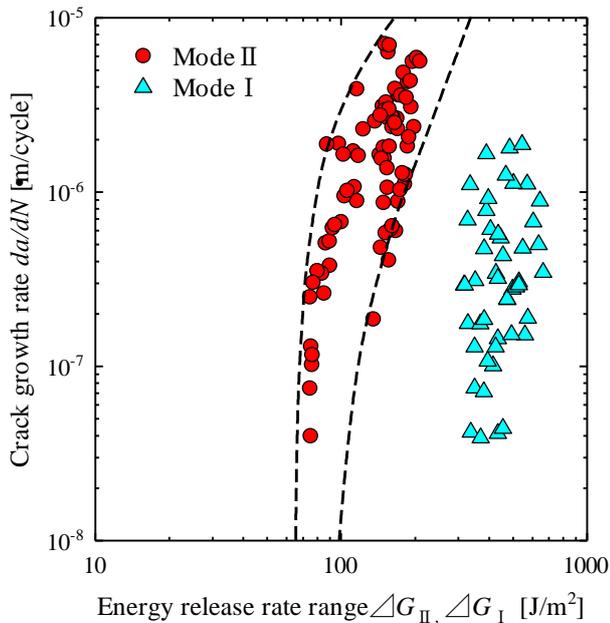


Fig.4 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_{II}$ ,  $\Delta G_I$

### 3.2 AE 信号

き裂長さ、15~30 mm におけるき裂進展試験中の AE 信号をウェーブレット解析した結果を図 5 に示す。同図の(a)はき裂長さ  $a$  が約 18 mm、(b)は  $a$  が約 25 mm のときの結果である。この図の縦軸は周波数成分、横軸は時間であり、信号の振幅(強度)を青色~赤色で色分けして示した。き裂長さによらず、50~250 kHz 近傍の信号が強く検出された。FRP 積層板における破壊過程で発生する AE 信号の周波数成分と破壊形態の関係については既に報告されており<sup>(4)</sup>、50~100 kHz は樹脂割れによる AE 信号、150~250 kHz が繊維樹脂界面破壊による AE 信号であるとされている。今回のモード II 疲労き裂進展試験による損傷は樹脂割れや繊維樹脂界面における破壊が支配的であると考えられる。また、 $a \approx 25$  mm の場合、ごく初期のき裂における AE 信号と比較して持続時間が長くなる傾向も見られた。

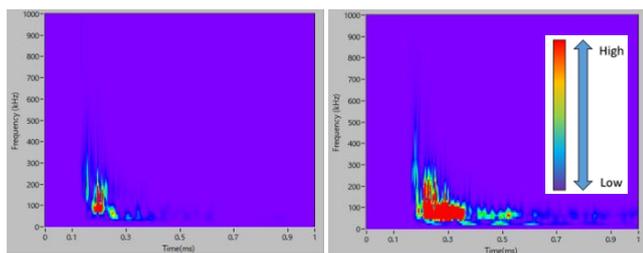


Fig.5 Results of wavelet analysis

### 3.3 破面観察

図 6 に試験終了後の試験片 0°層側破面を観察した結果を示す。(a)はき裂進展部分の破面全体を示した写真であり、(b)および(c)は SEM で観察した結果である。破面には繊維が見える箇所(b)と、繊維が見えない箇所(c)が混在していた。(a)から、き裂進展初期は繊維と樹脂の界面をき裂が進展していたが、き裂進展が進むにつれて繊維が見られなくなり、樹脂割れによる破壊の領域が多くみられることがわかる。このことが AE 信号のウェーブレット解析結果において、き裂長さ  $a \approx 25$  mm のときに 50~100 kHz の周波

数で持続時間が長くなっていることの原因であると考えられる。

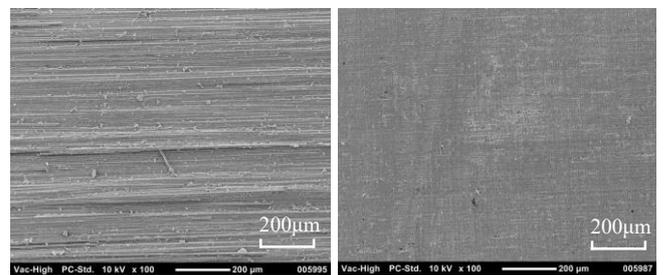
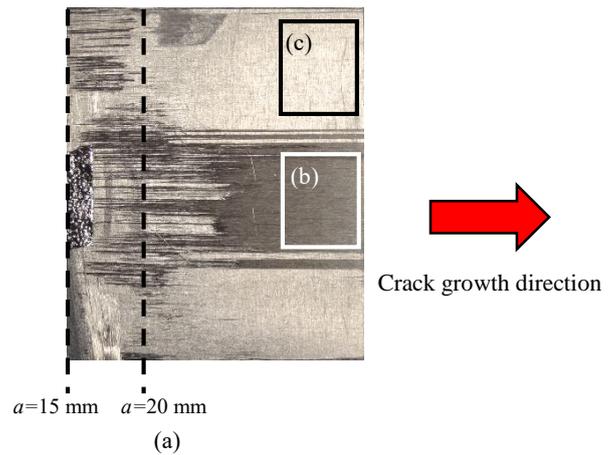


Fig.6 Observations of fracture surface

## 4. 結言

CFRP 積層板のモード II 疲労き裂進展試験を行い、き裂進展挙動と AE 信号との関係について調査し、以下の結言を得た。

- (1) き裂進展速度  $da/dN$  とエネルギー解放率範囲  $\Delta G_{II}$  の間には指数則が成り立つ領域がある。
- (2) き裂進展に伴う AE 信号をウェーブレット解析した結果、信号の周波数帯は 50~250 kHz の間にあった。破面観察の結果、樹脂割れおよび繊維樹脂界面破壊が支配的であったため、この周波数特性の AE 信号はこれらの破壊機構と対応していることがわかった。
- (3) 樹脂割れによる破壊と、繊維樹脂界面破壊が混在していたが、き裂が進むにつれて樹脂割れで進展する領域が広がった。これに応じて AE 信号の持続時間が長くなった。

## 文献

- (1) 奥田謙介(1988)『炭素繊維と複合材料』共立出版
- (2) 影山和郎 『複合材料の破壊力学(I)』日本複合材料学会誌 (1992), 83-89
- (3) 戸田浩, 章忠, 川畑洋昭(2005)『最新ウェーブレット実践講座 入門と応用 信号処理の基礎から最新理論まで』SBクリエイティブ。
- (4) 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.
- (5) 阿佐健吾 高知工科大学大学院 平成 29 年度修士論文
- (6) 青木弓人 高知工科大学 平成 29 年度卒業論文