

高強度 GFRP 積層板の層間はく離疲労き裂進展に  
およぼす混合モード比の影響\*松原 剛<sup>\*1</sup>, 西川 弘 泰<sup>\*2</sup>  
仁瓶 寛 太<sup>\*3</sup>, 田中 啓 介<sup>\*4</sup>Mode-Mixity Effect on Growth Behavior of Interlaminar Fatigue Cracks  
in High Strength GFRPGo MATSUBARA<sup>\*5</sup>, Hiroyasu NISHIKAWA,  
Kanta NIHEI and Keisuke TANAKA<sup>\*5</sup> KAWAJU TECHNO SERVICE CORP.,  
3-1 Kawasaki-cho, Akashi-shi, Hyogo, 673-0014 Japan

The effect of mode mixity on fatigue crack growth behavior from delamination was investigated with UD laminates (made of unidirectional laminates) and C laminates (made of unidirectional laminates and cloth laminates) of high strength glass fiber reinforced plastics (GFRP). Fatigue crack growth tests were carried out by mixed mode bending specimens at a stress ratio of  $R=0.1$ . In UD and C laminates, the crack propagation rate  $da/dN$  decreased as mixed mode ratio  $G_{I\max}/G_{T\max}$  decreased when compared at the same total maximum energy release rate  $G_{T\max}$  ( $=G_{I\max} + G_{II\max}$ ). At a constant crack propagation rate under mixed mode loading, the driving force is expressed in terms of a linear combination of the pure mode I  $G_{I\max}$  and the pure mode II  $G_{II\max}$ . The  $G_{T\max}$  in C laminates approached the  $G_{T\max}$  in UD laminates as  $G_{I\max}/G_{T\max}$  increased at the same crack propagation rate. In UD and C laminates, fiber bridging took place at  $G_{I\max}/G_{T\max}=0.70$  and the crack propagation rate was expressed by a power function of the maximum value,  $G_{T\max}$ , of the energy release rate at the crack tip. Fractographic observation UD and C laminates showed that the crack propagation path was on the surface of fibers at  $G_{I\max}/G_{T\max} \leq 0.41$  and some resin fracture was observed at  $G_{I\max}/G_{T\max}=0.70$ .

**Key Words:** Mixed Mode, Fatigue, Delamination, GFRP, Energy Release Rate, Crack Propagation, Mode Mixity, Composite Material

## 1. 緒 言

高強度ガラス繊維強化プラスチック (GFRP : Glass Fiber Reinforced Plastics) は、低剛性で許容ひずみに優れることから、ヘリコプターのブレードやブレードを支えるハブに適している。GFRP 製ハブはブレードの遠心力と面外方向荷重を支える部品で、バネ特性向上のために板厚を一定としていない。そのため、製造時の層間はく離や層間に発生するポイドなどの初期欠陥を想定した設計を行う場合、モード I とモード II、さらにその混合モードの層間き裂進展特性を把握することが重要となる。筆者らは、前報<sup>(1)(2)</sup>において純モード I と純モード II の層間き裂進展特性を明らかにした。

ところで炭素繊維強化プラスチック (CFRP :

Carbon Fiber Reinforced Plastics) では、近年、混合モード層間き裂進展特性に関する研究が数多く報告<sup>(1)~(13)</sup>されているが、モード比がき裂進展挙動に及ぼす影響を詳細に調べた研究は少ない。また、研究対象となる積層構成は、一方向シート同士についてである。これに対して高強度 GFRP 積層板は、通常、一方向シートと織物シートとを組み合わせで積層する。そのため高強度 GFRP 積層板の使用には、一方向シート同士の層間き裂進展特性だけでなく、一方向シートと織物シートとの異なるシート間の層間き裂進展特性の把握も重要である。

そこで本研究では、高強度 GFRP 一方向シートのみで積層した試験片と、一方向シートと朱子織シートとを組み合わせで積層した試験片について、混合モード層間はく離疲労き裂進展試験を行い、層間き裂進展挙動におけるモード比の影響を評価した。さらに、試験片の破面観察を行い、き裂進展の破壊形態を検討した。

\* 原稿受付 2004年5月6日。

<sup>\*1</sup> 正員, 川重テクノサービス(株) (☎ 673-0014 明石市川崎町3-1)。<sup>\*2</sup> 正員, 川崎重工業(株)技術研究所 (☎ 673-8666 明石市川崎町1-1)。<sup>\*3</sup> 川崎重工業(株)技術研究所。<sup>\*4</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科 (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: matubara@ati.khi.co.jp

## 2. 実験方法

**2.1 材料および試験片** 試験片の材料は、前報<sup>(14)</sup><sup>(15)</sup>と同じ一方向シートの繊維に T ガラス、朱子織りシートの繊維に E ガラス、樹脂に 180℃硬化の東レ製エポキシ樹脂 #3651 を用いた。試験片の積層構成は、一方向シートのみを積層した一方向積層（以後 UD 板と称する）と、一方向シート 4 枚と 8 本朱子織りシート 1 枚を交互に積層したクロス積層（以後 C 板と称する）の 2 種類とした。一方向シートの繊維配向角は、UD 板と C 板ともに試験片長手方向とした。朱子織りシートの繊維配向角は、試験片長手方向に対し ±45° とした。両試験片の物性値は、前報<sup>(14)</sup>に示した。

試験片形状は図 1 に示す MMB (Mixed Mode Bending) 試験片である。試験片幅は  $B=25\text{mm}$  と  $13\text{mm}$ 、UD 板の厚さは  $2h=9.8\text{mm}$ 、C 板の厚さは  $2h=10.3\text{mm}$  である。初期欠陥は、成形時に板厚中央に厚さ  $12.5\mu\text{m}$  のポリイミドフィルムを挿入することで導入した。なお、試験はき裂長さ  $a_0=25\text{mm}$  から開始した。

**2.2 試験条件** 疲労試験には電気-油圧サーボ式疲労試験機（容量：100kN）を用い、荷重一定試験を実施した。試験に用いた治具を図 2 に示す。本治具は、Reeder の考案した MMB 試験治具<sup>(2)</sup>を改良したもので、レバー部に軸受けを挿入することで、レバーの幾何学的非線形を小さくした。MMB 試験の原理を図 3 に示す。混合モード比  $G_I/G_T$  ( $G_T = G_I + G_{II}$ ) は試験片中央から荷重負荷点までの距離  $c$  を変えることで自由に設定できる。

試験は、繰返し速度  $f=5\sim 10\text{Hz}$ 、応力比  $R=0.1$  の荷重振幅一定試験とした。試験環境は室温大気中である。混合モード比  $G_I/G_T$  は、UD 板で  $G_I/G_T = 0.03, 0.16, 0.30, 0.41, 0.70$  の 5 種類、C 板で  $G_I/G_T = 0.16, 0.41, 0.70$  の 3 種類とした。

荷重の検出には容量 5 kN の低容量ロードセルを用い、き裂長さの測定には 200 倍の光学顕微鏡による試験片両側面からの測定と、試験機変位と荷重のコンプライアンスを用いる自動測定とを併用した。

C 板の試験は、初期欠陥の上側を一方向シート、下側を朱子織りシートとなるように試験片をセットして実施した。

**2.3 エネルギー解放率** エネルギー解放率は FEM 解析に MCCI (Modified Crack Closure Integral) 法を適用して求めた。疲労き裂進展挙動を整理するパラメータには、最大エネルギー解放率  $G_{\max}$  を用いた。なお、モード比  $G_I/G_T = 0.70$  のき裂進展挙動は繊維架橋の影響を

受けたため、繊維架橋の影響を排除したき裂の真のエネルギー解放率  $G_{T\text{tip max}}$  による整理<sup>(15)</sup>も行った。

図 4 に繊維架橋の模式図を示す。繊維架橋を起こしたき裂の真のエネルギー解放率  $G_{\text{tip}}$  は、荷重応力  $\sigma_{\text{ap}}$  による  $G_{\text{ap}}$  と、繊維がき裂を閉口させる応力  $\sigma_{\text{bridge}}$  を負担するために生じる  $G_{\text{bridge}}$  との重ね合わせとなる。疲労の場合、次式で定義される。

$$\sqrt{G_{\text{tip max}}} = \sqrt{G_{\max}} - \sqrt{G_{\text{bridge max}}} \quad (1)$$

次に  $G_{\text{tip max}}$  の求め方を説明する。図 5 に繊維架橋を生じる FRP の疲労き裂進展挙動を示す。荷重一定試験を実施すると、架橋の生じる FRP では、実線で示す架橋

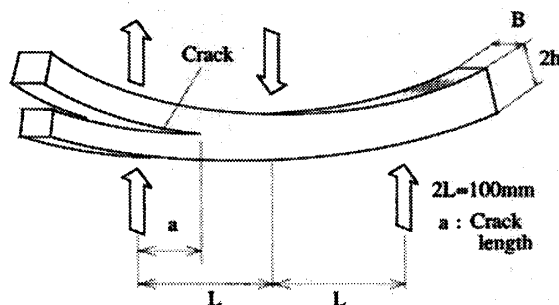


Fig.1 Mixed mode bending test specimen.

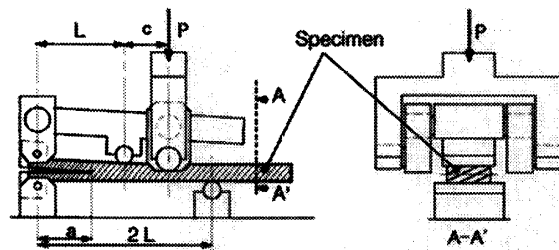


Fig.2 Modified mixed mode bending test jig.

$$\begin{array}{ccc} \frac{c}{L}P & \frac{c+L}{L}P & \frac{3c-L}{4L}P \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \text{Mixed mode} & \text{Mode I} & \text{Mode II} \end{array}$$

The diagram illustrates the decomposition of the mixed mode loading into Mode I and Mode II components. The total load is represented as the sum of two equivalent loads:  $\frac{3c-L}{4L}P$  (Mode I) and  $\frac{c+L}{4L}P$  (Mode II).

Fig.3 Schematic of mixed mode bending test.

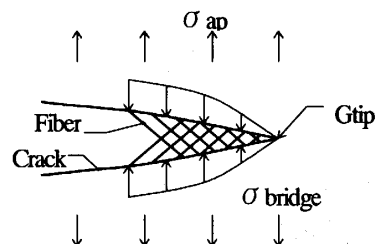


Fig.4 Schematic of crack growth by fiber bridging.

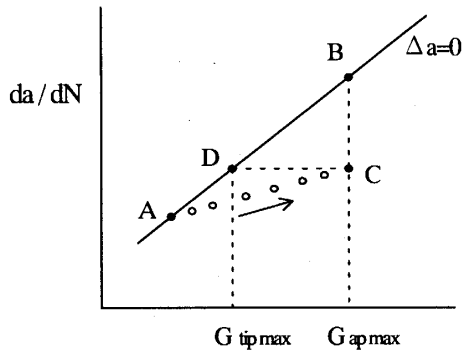


Fig.5 Schematic of crack growth behavior in load constant test.

のない場合 (A 点から B 点へ移動する) に較べて進展抵抗が増して A 点から C 点へ移動する。この場合、見かけ上のエネルギー解放率は  $G_{ap \max}$  で、B 点で示される繊維架橋のない場合の進展速度より低い C 点が繊維架橋のある場合の進展速度となる。C 点の進展速度に対応する繊維架橋の影響を除いた真のエネルギー解放率は D 点に対応する値  $G_{tip \max}$  とみなせる。したがって、 $G_{tip \max}$  値は、き裂進展量  $\Delta a = 0$  のときの進展挙動 (AB の線) を基にして、実際の進展速度 (C 点) から逆算して求められる。

**2.4 破面観察** UD板とC板におけるき裂進展形態の違いを検討するために、疲労試験片の破面に金蒸着を施し、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy) による破面観察を行った。

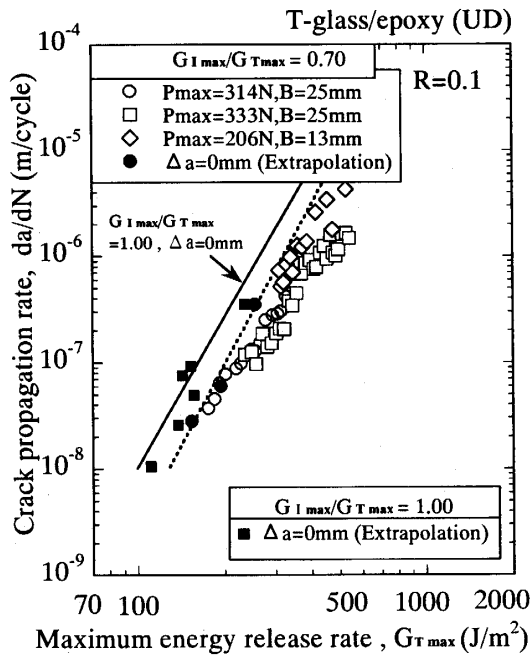


Fig.6 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate for  $G_I/G_T = 0.7$  in UD specimens.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 モード I 成分の多い場合の疲労き裂進展挙動

図 6 に UD 板、図 7 に C 板の混合モード比  $G_I/G_T = 0.70$  のき裂進展速度  $da/dN$  と最大エネルギー解放率  $G_{T \max} (= G_{I \max} + G_{II \max})$  との関係を示す。両図には、DCB 試験片による純モード I ( $G_I/G_T = 1.00$ ) の試験結果<sup>(15)</sup>も示す。図中の純モード I の実線は、 $\Delta a = 0\text{mm}$  すなわち  $G_{tip \max}$  データについての近似線である。黒四角印■が実測値から  $\Delta a = 0\text{mm}$  に外挿した点である。なお、前報<sup>(15)</sup>で述べたようにモード I の UD 板の  $\Delta a = 0\text{mm}$  の結果は C 板の場合とほぼ一致している。

図 6 の UD 板の  $G_I/G_T = 0.70$  の試験結果も  $\Delta a$  に依存してき裂進展抵抗が増大しており、 $G_{T \max}$  の整理では UD 板の純モード I の結果<sup>(15)</sup>と同様に  $da/dN$  が一義的に決定されない。なお、後述する破面観察においても本モード比では繊維架橋が観察された。ところで、田中らは CFRP の一方向積層板において、MMB の  $G_I/G_T = 0.58$  の破壊靱性試験で繊維架橋を確認したが、同一モード比の疲労試験では認められなかったことを報告している<sup>(6)</sup>。この原因として、静荷重と繰返し荷重との違いを挙げているが、本試験片の場合、混合モードの疲労試験でもモード I 成分が多くなれば繊維架橋を起こすことがわかる。

図 7 の C 板の純モード I の試験結果も荷重一定試験の結果であるが、繊維架橋が激しく  $G_{T \max}$  の増加に

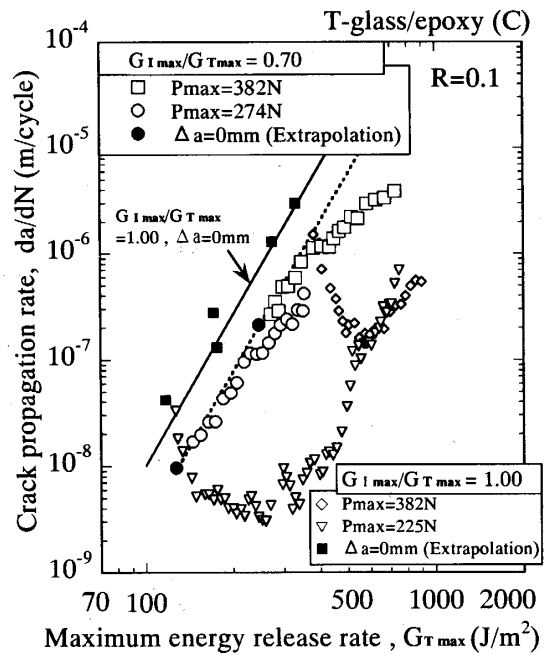


Fig.7 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate for  $G_I/G_T = 0.7$  in C specimens.

つれて  $da/dN$  が一旦低下, その後加速した. 一方, C板の  $G_I/G_T = 0.70$  の試験結果は, モード I の結果と異なり  $da/dN$  の一時的な低下は見られず, UD板のモード I に近い挙動を示した. この原因については後述する. しかし, UD板と同様に  $G_{Tmax}$  の整理では  $da/dN$  が一義的に決定されないことから, 繊維架橋が生じていることが示唆される.

図6と図7の図中の黒丸印●は,  $G_I/G_T = 0.70$  の各試験片の  $da/dN$  と  $\Delta a$  との関係を最小 2 乗近似したときの  $\Delta a=0\text{mm}$  への外挿点である. 図6の点線は  $\Delta a=0\text{mm}$  データの最小 2 乗近似線である. 図7の点線は  $\Delta a=0\text{mm}$  のデータ 2 点を結んだ線である. この線は最小 2 乗近似線ではないが, モード I のばらつきの小さいことを考慮すると, 繊維架橋の影響のない場合のき裂進展挙動を表すと考えられる. この  $G_{Tip\max}$  による整

理は, UD板でもC板においても, モード I の場合と同様に繊維架橋のある場合のき裂進展挙動を安全側に評価することとなり, モード I の場合だけでなく混合モードにおいても有効である.

UD板とC板の繊維架橋の進展挙動への影響を調べるために,  $G_I/G_T = 0.70$  での  $G_{Tbridge\max}/G_{Tmax}$  と  $\Delta a$  との関係を図8に示す. 図中には, モード I の場合の近似線も示す. モード I の進展挙動では, 本整理によりUD板とC板とで, それぞれロットの違いや試験方法に依存しない一価の関係が得られることがわかっている<sup>(15)</sup>. UD板の混合モードの挙動は, モード I の近似線によく一致している. 混合モードではモード II 成分が含まれることにより繊維架橋への影響も予想されたが, 明確な影響はなかった.

次にC板の混合モードの挙動とモード I の近似線との比較をする. C板の混合モードの挙動は, C板のモード I の挙動とは異なり, UD板のモード I の挙動と一致する. この原因として, 架橋している繊維の違いが考えられる. モード I 疲労破面の観察<sup>(15)</sup>から, C板の架橋は朱子織シートの繊維で生じ, UD板は一方方向シートの繊維で生じることがわかっている. 今回のC板の試験では, き裂の上側を一方方向シート, 下側を朱子織シートとして, き裂先端の主応力の向きを斜め下側となるように荷重を負荷した. そのため, き裂は上側の一方方向シートの方向へ向くと推定される. このことから, C板でも一方方向シートの繊維で架橋が生じ

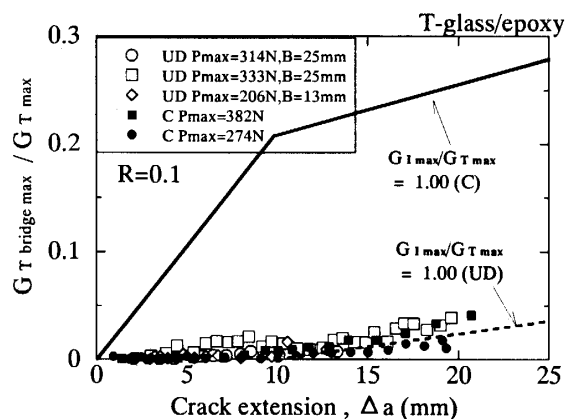


Fig.8 Relation between  $G_{Tbridge\max}/G_{Tmax}$  and crack extension.

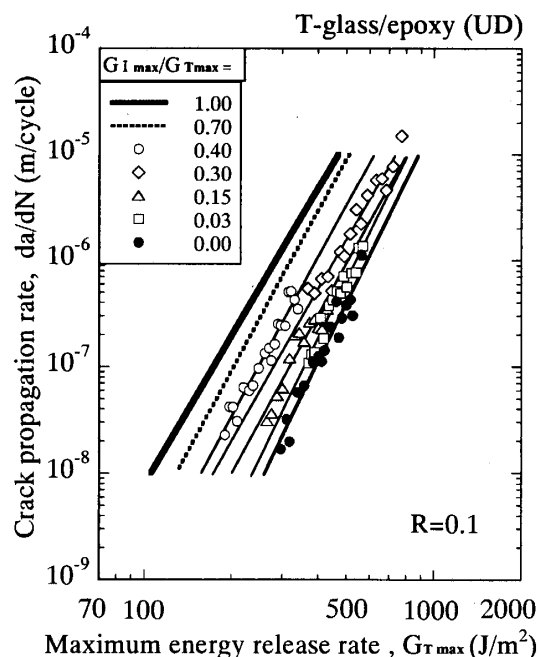


Fig.9 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate in UD specimens.

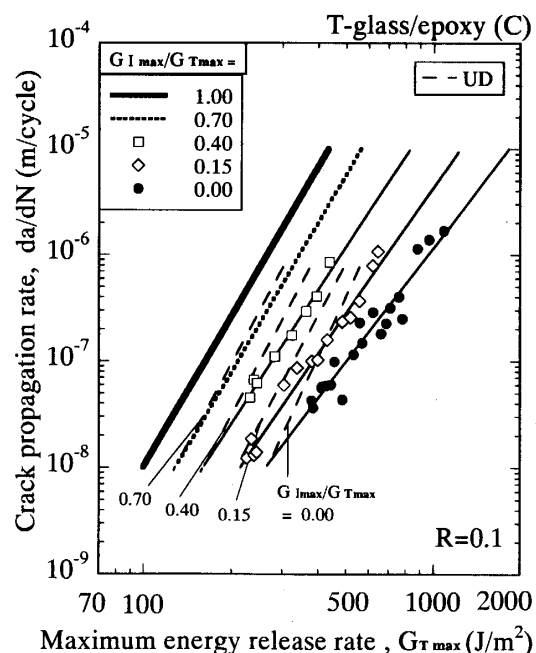


Fig.10 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate in C specimens.

ていると予想される。このことが、図 7 における C 板のモード I と混合モードの進展挙動の違いになった理由と考えられる。

なお、UD 板と C 板の混合モードの  $G_{\text{Thridge max}}/G_{\text{Tmax}}$  と  $\Delta a$  との関係も、モード I と同様に一価の関係が得られることから、混合モードの繊維架橋を生じた場合のき裂進展挙動の評価も、モード I の場合と同様に  $G_{\text{Thridge max}}/G_{\text{Tmax}}$  の整理で評価可能であることがわかる。

### 3・2 モード II 成分の多い場合の疲労き裂進展挙動

図 9 に UD 板、図 10 に C 板の混合モードの  $da/dN$  と  $G_{\text{Tmax}}$  との関係を示す。両図ともに純モード I と  $G_I/G_T = 0.70$  については、近似線を示す。他のモードについては、図中に実験データと実験データの最小 2 乗近似線を示す。図 10 では比較のため UD 板の同一モード比の近似線も破線で示す。なお、モード I 成分の多い場合 ( $G_I/G_T \geq 0.70$ ) と異なり、両材ともに負荷レベルを変えてもき裂進展特性に差がないことを確認した。したがって、モード II 成分の多い場合には繊維架橋はなく、得られた進展特性は本質的な特性を示す。

図 9 の UD 板の試験結果を同一  $G_{\text{Tmax}}$  で比較すると、田中らの CFRP の結果<sup>(6)</sup>と同様に純モード II の  $da/dN$  が最も遅く、モード I の割合が多くなるほど速くなった。また、近似線の傾きは田中らの結果<sup>(6)</sup>とは逆に、モード I の割合が多くなるほど小さくなっており、GFRP と CFRP との違いが見られる。

一方、図 10 の C 板の試験結果は、UD 板と同様に同一  $G_{\text{Tmax}}$  で比較すると、モード I の割合が多くなるほど速くなったが、近似線の傾きは、UD 板とは逆に純モード II が最も小さく、モード I の割合が多くなるほど大きくなる。

次に、C 板と UD 板との進展挙動を比較すると、 $da/dN = 1 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$  のとき、各モード比で  $G_{\text{Tmax}}$  値は一致するが、 $da/dN$  が速くなるほど、さらにモード II 成分の多い混合モードほど C 板の進展抵抗が大きくなる。

### 3・3 一方向積層板とクロス積層板の疲労き裂進展挙動の比較

UD 板と C 板の  $da/dN$  と  $G_{\text{Tmax}}$  の間にべき乗則が成立しており、図 11 にべき乗則の指数  $m$  とモード比  $G_I/G_T$  との関係を示す。図中の実線は、実験データの近似線である。UD 板ではモード I 成分が増えるにつれて  $m$  が減少する。逆に C 板では  $m$  が大きくなる。ともに緩やかな変化であり、純モードから混合モードへの移行やモード比の変化は、進展抵抗を緩やかに変化させることがわかる。

次に、図 9 と図 10 のき裂進展試験結果の近似線から、任意の  $da/dN$  に対する  $G_{\text{Imax}}$  と  $G_{\text{IImax}}$  を算出し、縦軸  $G_{\text{Imax}}$ 、横軸  $G_{\text{IImax}}$  として整理した結果を図 12 に示す。

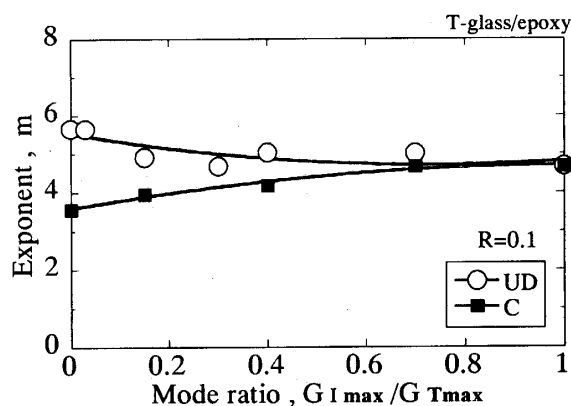


Fig.11 Variation of exponent with mode ratio.

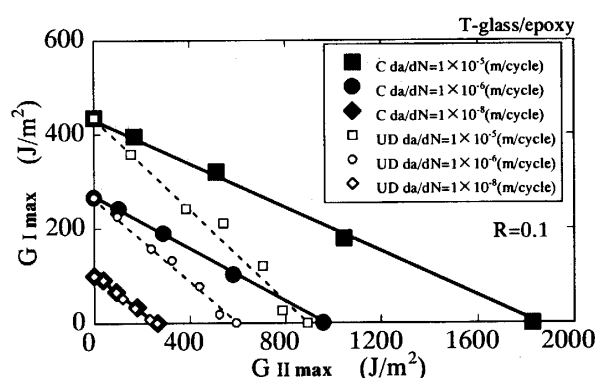


Fig.12 Mixed mode fatigue crack growth behavior.

図中の実線は C 板、破線は UD 板の純モード I と純モード II の同一  $da/dN$  のデータを結ぶ直線である。

UD 板と C 板のき裂進展挙動を同一  $da/dN$  で比較すると、モード比  $G_I/G_T$  が増すにつれて C 板の  $G_{\text{Tmax}}$  は UD 板の  $G_{\text{Tmax}}$  に近づいた。さらに  $da/dN = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$  では UD 板と C 板の各モード比での進展抵抗が一致した。これらの結果は、筆者らの前報の結果<sup>(14)</sup> <sup>(15)</sup>である UD 板と C 板のモード I の進展挙動が一致すること、モード II では UD 板と C 板の抵抗が  $da/dN = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$  で一致し、 $da/dN$  が高くなるほど C 板の抵抗が高くなるとの結果と対応する。

混合モードの進展抵抗が他モードの影響を受けるのであれば、試験結果は直線と一致しないはずである。しかし、試験結果は直線によく近似される。したがって、UD 板と C 板の混合モードの進展挙動は、他モードの影響を受けずに純モード I と II の  $G_{\text{Tmax}}$  の線形和で表せることがわかる。田中らの CFRP の応力比  $R=0.2$  および  $R=0.5$  の下限界の結果<sup>(6)</sup>も、同様に試験結果は線形則と一致する。このことより、混合モードの疲労進展挙動は CFRP と GFRP とで同じ挙動を示すと考えられる。ただし、田中らは、 $R=0.5$  の進展速度の速い

領域と破壊じん性試験では、モードⅠ成分の多い混合モードの進展抵抗が、線形則よりも高くなるとの報告<sup>10)</sup>をしており、疲労と静的破壊の進展機構の違いを挙げている。GFRP の破壊じん性試験は未実施であり、今後の課題である。

**3・4 一方向積層板の破面形態** 図13はUD板の破面のSEM写真である。破壊形態を比較し易い様に、

繊維間隔が  $15\mu\text{m}$  程度で進展速度が  $da/dN=3\times 10^{-7}\text{m/cycle}$  のところを選んだ。図中右下の矢印はき裂の進展方向を示す。比較のため、モードⅡとモードⅠの写真も示す<sup>(14)(15)</sup>。モードⅡではき裂が繊維と樹脂の界面を進行し、その割れが樹脂へ広がる。繊維表面が観察されることと、繊維間の樹脂割れの合流が特徴である。モードⅠでは、き裂が樹脂の中を進展するために

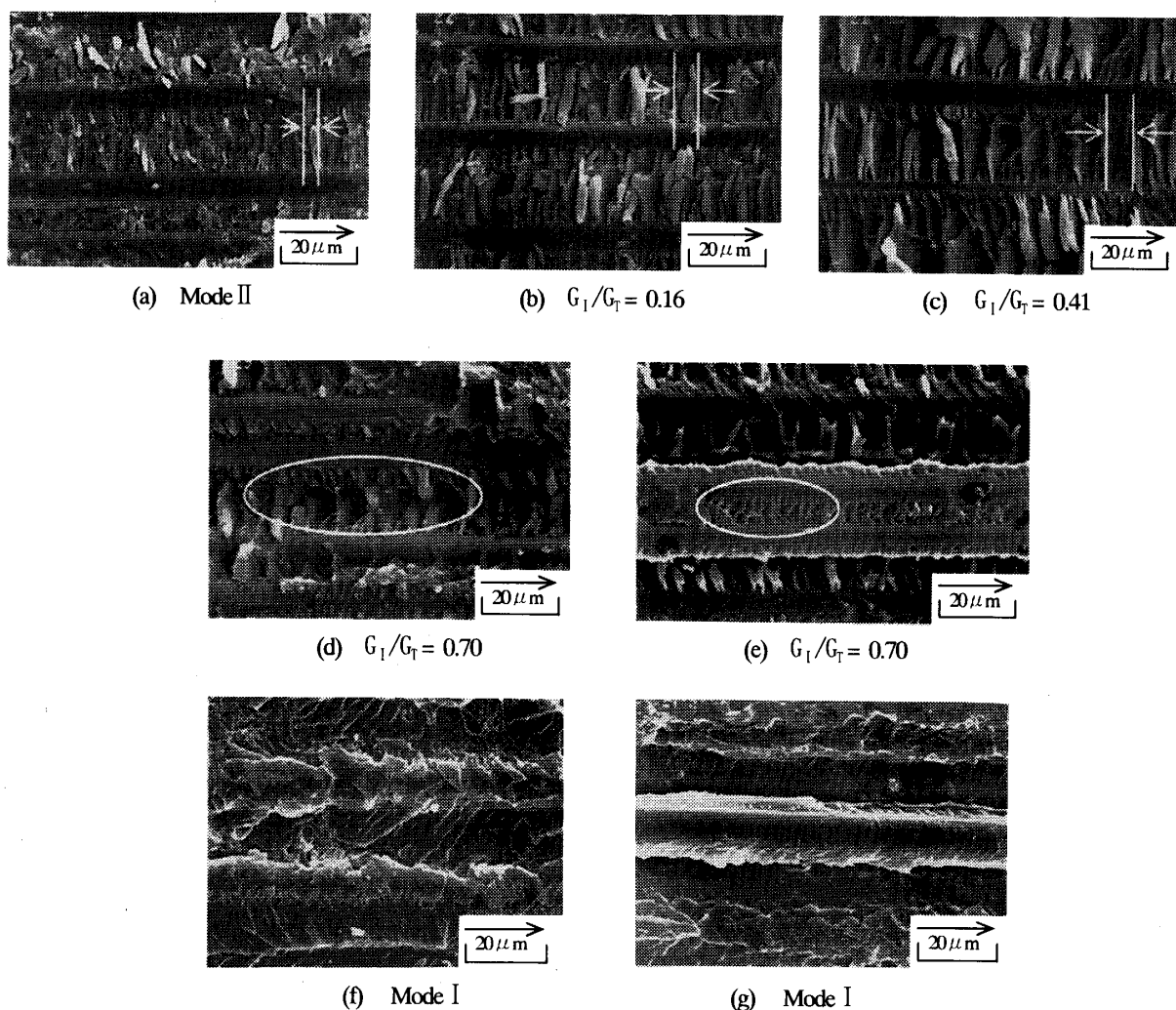


Fig.13 SEM fractographs of fatigue fracture surface for UD laminates.

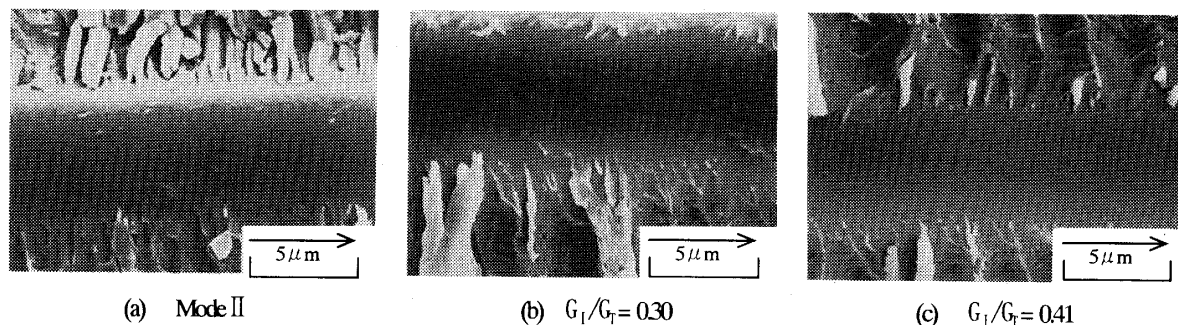


Fig.14 SEM fractographs of fatigue fracture surface for UD laminates ( $da/dN=3\times 10^{-7}\text{m/cycle}$ ).

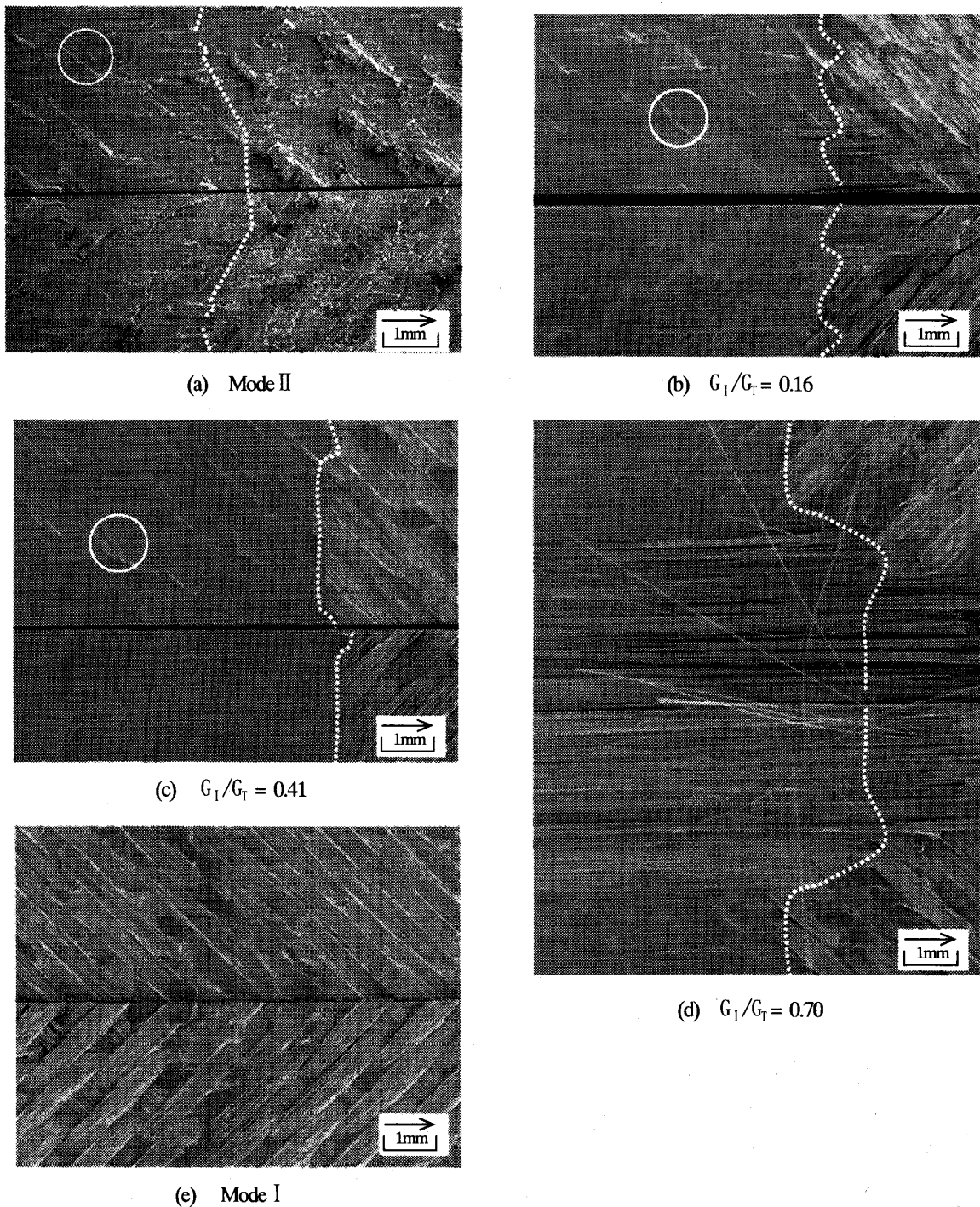


Fig.15 SEM fractographs of fatigue fracture surface for C laminates.

繊維が見えない状態(f)や、繊維架橋の跡を示す繊維の浮いた状態(g)が特徴である。モードⅡの(a)とモードⅡ成分の多い(b)(c)とを比較すると、モードⅠ成分が増すほど樹脂の割れる間隔(白矢印の間隔)が広がり、樹脂の破壊面が水平に近づく。すなわち、モードⅠ成分が増すほど、き裂先端の主応力の向きが積層面に対して垂直方向に近づくことを示す。また、 $G_I/G_T=0.70$ では(d)のように樹脂割れの間隔がさらに広がると

もに繊維の抜けた跡(白丸部)も見られる。(e)では繊維架橋の跡である繊維の浮いた状態と、繊維間の樹脂にモードⅡで見られる樹脂割れの合流(白丸部)も観察される。

図14は繊維表面を高倍率で撮影したSEM写真である。モードⅡの繊維表面(a)では、樹脂痕がき裂進展方向へ一定間隔で凸状に残っており、縞の間隔はき裂進展速度の1サイクル分に対応している<sup>(45)</sup>。(b)のG



$G_I/G_T=0.30$  までは樹脂痕の痕跡が残っている。モード I 成分が増える程、樹脂痕の痕跡が薄くなっており、(c) の  $G_I/G_T=0.41$  では樹脂痕が完全に消失する。なお、(b) の縞間隔も (a) のモード II と同様にき裂進展速度の 1 サイクル分に対応している。

**3・5 クロス積層板の破面形態** 図 15 は C 板の SEM 写真で、図中右下の矢印はき裂の進展方向を示す。写真の上側の破面と下側の破面は試験片の上下に対応する。(a) の白破線の左側はモード II の疲労破面、右側はモード II の静的破面である。(b) (c) (d) は白破線の左側が混合モードの疲労破面で、右側がモード I の静的破面である。(e) はモード I の疲労破面である。

(a) (b) (c) では一方向シートの繊維表面に朱子繊維が付着しており(白丸部)、き裂が一方向シート界面を進展したことがわかる。さらに、モード I の割合が多くなるほど朱子繊維の付着量が増える。ところで高倍の観察によると、各モード比における一方向シートの繊維表面や樹脂の破壊形態は、UD 板の同一モード比と同じ様相となっている。このことが、UD 板と C 板の混合モードの進展挙動で大きな差が生じなかった理由と考えられる。

$G_I/G_T=0.70$  の破面 (d) では、3・3 節で推定したように一方向シートの繊維による架橋が観察されており、C 板のモード I の破面<sup>(9)</sup>のように朱子繊維の架橋は観察されない。このことから、C 板の混合モードとモード I の繊維架橋のき裂進展挙動への影響の違いが裏付けられた。

#### 4. 結 言

高強度 GFRP 一方向シートのみで積層した積層板 (UD 板) と、高強度 GFRP 一方向シートと GFRP 朱子繊維シートとを組み合わせた層板 (C 板) とを用いて、混合モード層間はく離疲労き裂進展試験を行うとともに疲労破面の観察を行い、以下の結論を得た。

- (1) UD 板と C 板の混合モードのき裂進展挙動は、両材ともに同一最大エネルギー解放率  $G_{max}$  で比較すると、モード I 成分が増すにつれき裂進展速度  $da/dN$  が速くなった。
- (2) UD 板と C 板の混合モードの場合、同一の  $da/dN$  を与えるときのエネルギー解放率は純モード I と II の  $G_{max}$  の線形和で表せる。
- (3) UD 板と C 板のき裂進展挙動を同一  $da/dN$  で比較すると、モード比が増すにつれて C 板の  $G_{max}$  は UD 板

の  $G_{max}$  に近づいた。これは、モード I のき裂進展抵抗が UD 板と C 板で一致していること、モード II のき裂進展抵抗が UD 板に比べ、C 板が高くなることに対応する。

(4) UD 板と C 板は、モード比  $G_I/G_T=0.70$  のときに繊維架橋を生じるが、ともに両材の純モード I と同様に進展挙動の支配パラメータとして  $G_{IIP, max}$  が有効であることがわかった。

(5) UD 板と C 板ともに、モード II 成分が多い場合、き裂はモード II と同様に繊維界面を進展するが、繊維間の樹脂割れの破壊面は水平に近づく。モード I 成分が多くなると、き裂は樹脂そのものの中を進展し始めるが、純モード I では見られない繊維間の樹脂割れも観察される。

#### 参 考 文 献

- (1) Reeder, J. R., NASA Tech. Memo., 102777, (1991)
- (2) Reeder, J. R., NASA Tech. Memo., 104210, (1992)
- (3) 松原剛・武浩司・西川弘泰, 機構論, No. 96-10, A(1996-10)19-20
- (4) 松原剛・西川弘泰, 機構論, No. 98-5, B(1998-11)207-208
- (5) 田中拓・田中啓介・辻辰也・加藤秀崇, 機論, 65-635, A(1999), 1504-1512
- (6) 田中拓・田中啓介・辻辰也・加藤秀崇, 機論, 65-636, A(1999), 1676-1683
- (7) 田中拓・田中啓介・加藤秀崇・辻辰也・山岸謙二郎, 材料, 48-12, (1999), 1408-1415
- (8) 張惟敦・金原勲・影山和郎・大沢勇, 機構論, No. 930-73, (1993-11)167-168
- (9) 菊池正紀・黒田基文, 機論, 57-542, A(1991), 2378-2383
- (10) K. Kussmaul and M. v. Albertri, Proc. ICCM-10, (1995)125-132
- (11) M. L. Benzeggagh, X. J. Gong, Z. Aboura and H. Y. Sastra, Proc. ICCM-9, (1993)752-759
- (12) P. Sriram, Y. Khourchid, S. J. Hooper and R. H. Martin, ASTM STP, 1230, (1995), 73-18
- (13) Y. A. Khourchid, AIAA-93-0015, (1993-11), 1-9
- (14) 松原剛・尾野英夫・田中啓介, 機論, 70-692, A(2004), 580-587
- (15) 松原剛・尾野英夫・田中啓介, 機論, 70-695, A(2004), 928-935