

名古屋大学 正 宮田 隆司  
名古屋大学 正 田川 哲哉  
名古屋大学大学院 高橋 文雄 (現:日本発条(株))  
川崎重工(株) 平 博仁

### 1. 緒 言

航空機用構造材料においては、比強度、比剛性の高い連続繊維強化複合材料などの適用が検討されているが、種々問題が多く、1次部材への適用はそれほど進んでいないのが現状である。その中で、従来材のアルミニウム合金と連続繊維強化複合材料両者の長所を生かした材料として、繊維金属積層材(Fiber Metal Laminate; FML)が開発されている。この材料は一方繊維プリプレグとアルミニウム合金を積層したものであり、アルミニウム合金と連続繊維強化複合材料の中間的材料といえる。この材料の開発における狙いは、繊維強化による高強度、高剛性化よりもむしろ、疲労特性の向上にあるとされている。この材料の疲労特性向上については、いくつか報告されているものの<sup>1,2)</sup>、繊維層が疲労き裂進展特性に及ぼす影響を破壊力学的に検討した例は少ない<sup>3)</sup>。

本研究では種々のFMLに対して、疲労き裂進展試験を行い、繊維の種類や残留応力が進展速度に及ぼす影響を検討した。また、き裂進展に伴うプリプレグ層の挙動を基に、き裂進展特性の向上機構を破壊力学的に検討した。

### 2. 供試材・試験方法

供試材はいずれも繊維エポキシプリプレグの両面にアルミニウム合金を接着した3層材(Fig.1)で、繊維プリプレグにアラミド繊維を用いたものはARALL(Alcoa社)、ガラス繊維を用いたものはGLARE(Akzo社)の商標と呼ばれている。ARALL、GLAREともにアルミニウム合金の種類と引張予ひずみの有無の組み合わせの異なる各々2種類を用いた。Table 1, 2に各供試材の材料構成と機械的性質および密度を示す。き裂進展試験にはFig.2に示す片側切欠付小型試験片、中央円孔付大型試験片の2種類を用いた。試験はいずれも荷重制御で10Hzのsin波を負荷し、き裂進展速度を測定した。さらに、き裂進展に伴う繊維破断の有無を測定する

Table 1 Material compositions

Material code	Thickness t (mm)	Aluminum skin	Fiber/epoxy prepreg				Ref.
			Fiber*	Modulus (GPa)	tL (mm)	Vf	
ARALL1	1.34	2024-T3	AF	125	0.44	0.5	0.4%stretch
ARALL2	1.34	7075-T6	AF	125	0.44	0.5	-
GLARE1	1.40	2024-T3	GF	86	0.50	0.6	0.5%stretch
GLARE2	1.40	7075-T6	GF	86	0.50	0.6	-

\*; AF: aramid fiber (Twaron), GF: glass fiber (R-glass)

Table 2 Mechanical properties of materials tested

Material code	Young's modulus (GPa)*	Yield strength (MPa)*	Tensile strength (MPa)*	Density (g/cm <sup>3</sup> )
ARALL1	68 / 48	641 / 331	800 / 386	2.3
ARALL2	64 / 49	359 / 228	717 / 317	2.3
GLARE1	65 / 49	550 / 340	1300 / 360	2.5
GLARE2	66 / 50	400 / 230	1230 / 320	2.5
2024-T3	72	320	440	2.8
7075-T6	71	480	540	2.8

\*; upper: L-direction, lower: T-direction

ために、疲労き裂導入後、き裂上に機械切欠きを入れ、破面間に架橋(ブリッジング)している繊維層を切断し、コンプライアンスの変化を測定した。小型試験片では主にR比や初期切欠長さの影響を検討し、大型試験片ではコンプライアンス変化を検討した。また、一部の試験片は3NのNaOH溶液によりアルミニウム層を溶解し、き裂進展に伴う層間剥離を観察した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 各供試材の疲労き裂進展特性

Fig.3に大型試験片で得られた各供試材のき裂進展速度を $\Delta K$ に対して示す。比較のため各供試材のスキン層に用いているアルミニウム合金のデータも示している。いずれのFMLもアルミニウム合金に比較して極めて良好なき裂進展特性を示すことがわかる。また、引張予ひずみが付与してあるARALL1、GLARE1ではともにK漸増試験であるにもかかわらず、き裂進展速度は低下し、特にGLARE1ではき裂はある程度の進展の後、ほぼ停止した。ARALLとGLARE間でのき裂進展速度の大小関係は、引張予ひずみの有無により異なり、引張予ひずみのない場合にはARALLの方が、引張予ひずみのある場合にはGLAREの方が優れている。FMLのき裂進展特性の向上は基本的には破面間にブリッジングしている繊維のき裂開口阻止力によるものと考えられ、プリプレグ剛性の高いARALLの方がき裂開口阻止力は大きいものと考えられる。引張予ひずみの影響は高R比での試験結果では見られないため、基本的にアルミニウム合金層に生じている圧縮残留応力によるき裂開口であると思われる。アルミニウム合金層の圧縮残留応

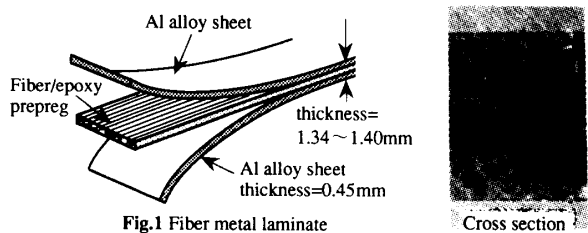


Fig.1 Fiber metal laminate

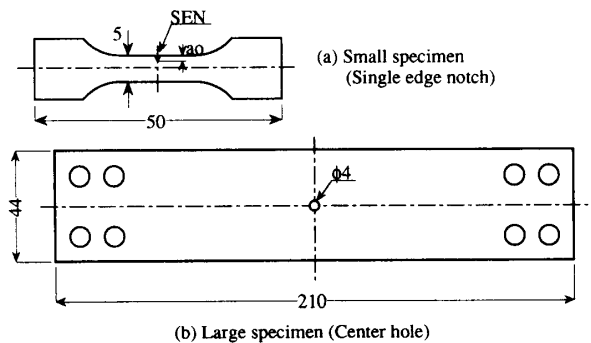


Fig.2 Specimen, dimensions are in mm. (thickness: as received)

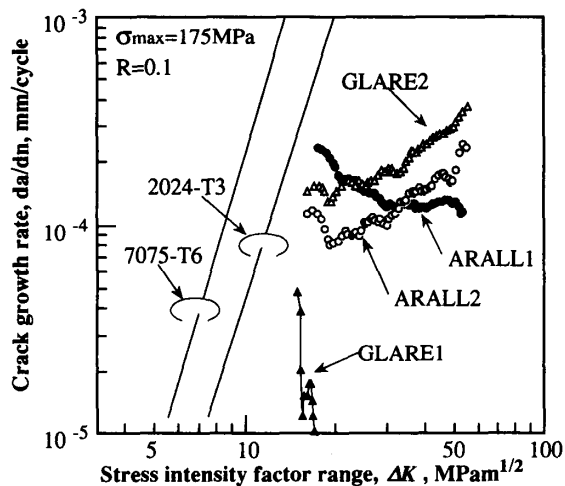


Fig.3 Crack growth rates of fiber metal laminates comparing with aluminum alloy. (Large specimen; φ4 center hole)

力は引張りひずみ量の大きいGLAREの方が大きく、そのためき裂進展が顕著となったものと考えられる。このように引張りひずみを施している材料の場合には残留応力の影響も重量されるが、基本的にはFMLの疲労き裂進展挙動には破面間にブリッジングしている繊維のき裂開口阻止力が大きく影響を及ぼしている。そのため、き裂進展速度は初期切欠長さに大きく依存する(Fig.4)。

### 3.2 破壊力学的解析

FMLの疲労き裂進展特性の向上は、破面間にブリッジングしている繊維層のき裂開口阻止力によるき裂先端の応力拡大係数 $K_{tip}$ の低下(低下量: $K_{sp}$ )に起因しているものと考えられる。ここでは、繊維層のブリッジング挙動に基づき、付与応力拡大係数 $K_{app}$ に対するき裂先端の応力拡大係数 $K_{tip}$ を解析的に算定し、アルミニウム合金の疲労き裂進展特性からFMLの疲労き裂進展特性の推定を試みる。

アルミニウム合金層が受ける裂開口阻止力(負のsplitting force)はき裂開口に伴い生じる繊維層の応力に等しいものと考えられる。き裂先端から $x$ の位置でブリッジングしている $dx$ の領域の繊維層の担う荷重 $P_f$ を次式で仮定する。

$P_f(x) = E_f \epsilon_f V_f t_p dx = COD(x) E_f V_f t_p dx / del(x)$  (1)  
ここで、 $E_f$ 、 $E_f$ はそれぞれ繊維のひずみ、弾性率、 $V_f$ は繊維層中の繊維の体積率、 $t_p$ は繊維ブリッジング層の厚さ、 $del(x)$ は繊維層/アルミニウム層間の剥離長さ、 $COD(x)$ は開口変位である。ただし、(1)式中の $COD(x)$ は繊維層がブリッジングした結果の開口変位であつて、負荷応力 $\sigma_{app}$ で一義的に決まるものではなく、 $\sigma_{app}$ による開口変位と $P_f(x)$ による開口変位を次のように重ね合わせる値である。

$$COD(x) = COD(x, \sigma_{app}) + COD(x, P_f(x)) \quad (2)$$

以上の計算を行えばき裂先端から $x$ の位置の $dx$ の領域でブリッジングした場合のsplitting force  $P_f(x)$ が求められるが、(2)式の $COD(x)$ を求めるには $P_f(x)$ が必要となり解析的に解くことは不可能である。ここでは収束計算を行い、数値計算により求めた。このようにして算定したsplitting force  $P_f(x)$ に基づき、splitting forceによる応力拡大係数 $K_{sp}$ を算定した。引張りひずみを施した材料では推定さ

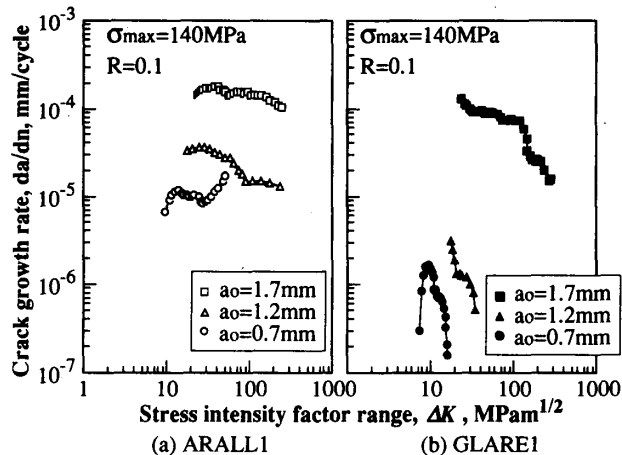


Fig.4 Influence of initial notch length on crack growth rate. (Small specimen; single edge notch)

れる残留応力を $P_f(x)$ に加えた。計算対象は中央円孔付大型試験片とし、splitting force  $P_f(x)$ による応力拡大係数およびき裂開口変位 $COD(x)$ の算定にはWestergaard応力関数に基づくIrwinの式<sup>5)</sup>を用いた。計算で必要となる剥離長さ $del(x)$ はき裂を導入した試験片のアルミニウム層をNaOH溶液により溶解し観察した結果を用いた。また、き裂進展に伴う繊維層の破断はコンプライアンス変化の結果よりほとんど起こっていないことが示唆されたため、円孔を除き裂全域でブリッジングしているものとして計算した。Fig.5にGLAREに対して行った計算結果を示す。進展速度の予想値はき裂進展に伴い変化する $K_{tip}$ を基にアルミニウム合金のデータより推定したものである。若干誤差はあるものの、概ね実験結果を説明できることがわかる。

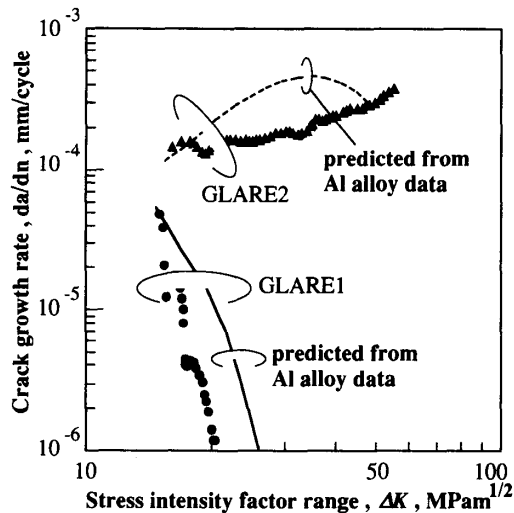


Fig.5 Predicted crack growth rate based on the fracture mechanics model.

- 参考文献1) H.F.Wu, J. Mater. Sci, 25,p.1120(1990).  
2) J.R.Yen, Eng. Frac. Mech., 30,p.827(1988).  
3) R.O.Ritchie, Mater. Sci. Eng., A103,p.15(1988).  
4) 金属材料疲労き裂進展抵抗データ集,日本材料学会(1983).  
5) The stress analysis of cracks handbook,H.Tada et al.(1973).