

# アルミニウム合金接着継手の疲労き裂進展挙動に及ぼす表面処理の影響

卒業論文要旨

機能性材料工学研究室 1170172 横山裕之

## 1. 緒言

接着接合は、金属や繊維強化プラスチックやガラスなど異種材料間の接着や凹凸のある複雑な接着面に対応することが可能であり、ねじやリベットを用いないことから製品自体の軽量化や面で接着するため応力集中を避けることができる。そのため、航空機産業や自動車産業などの分野で広く利用されている。しかし、接着接合は被着材の接着面状態に依存する強度のばらつきが大きい。これは接着接合が接着接合部に界面を有するためである。そのため、接着面を洗浄、研磨などによって表面処理することが一般的である。以上のことから、高信頼性を有する接合のためには接着面に適切な処理を施す必要がある。また接着接合部の強度信頼性向上のためには、疲労き裂進展挙動に及ぼす接着条件の影響について明らかにしておくことが重要である。

本研究では、アルミニウム合金接着継手を用いて、表面状態の異なる継手のモードⅠおよびモードⅡの疲労き裂進展試験を行い、疲労き裂進展特性について破壊力学的観点により定量的に評価した。また疲労き裂進展挙動に及ぼす表面処理の影響を破面観察の観点から検討した。また先の研究<sup>(1)</sup>と比較して、接着層厚さの影響についても検討した。

## 2. 材料および実験方法

### 2.1 試験片

本研究では二重片持ちはり(DCB)試験片と端面切欠き曲げ(ENF)試験片を用いた。図1にそれぞれの試験片寸法を示す。

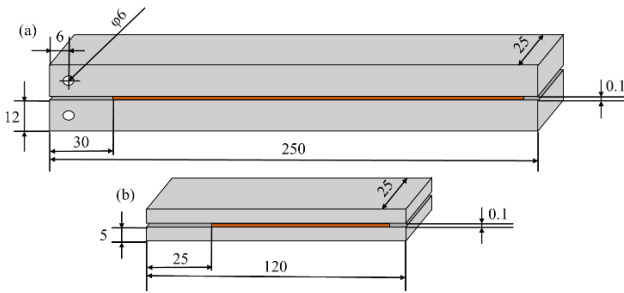


Fig.1 Schematic illustrations of (a)DCB and (b)ENF specimen.

被着材にはアルミニウム合金 A2017 を使用した。接着面は、研磨のみものと、酸化処理を施したものの2種類とした。研磨材はエメリー紙#500 を用いて被着材の長手方向に研磨し、洗浄した後に表面をアセトンで十分脱脂した。酸化処理材は表面を#1000 までのエメリー紙を用いて長手方向に研磨、洗浄、脱脂した後、10wt%リン酸水溶液中でステンレスを対極として25min 間 15V の電位を与えるリン酸陽極酸化処理を行った<sup>(2)</sup>。それぞれの仕上げ後の表面を電子顕微鏡で観察したものを図2に示す。

接着剤には構造用接着剤である一液加熱硬化型エポキシ樹脂(XA7416, 住友 3M 社製)を用いた。接着剤は塗布前に20min 間真空中で脱泡して気泡の混入を抑えた。接着層厚さ  $t$  を 0.1mm に制御するため、被着材の両端部に厚さ 0.1mm の

テフロンシートを挟み接着した。その後、試験片を治具に固定し、電気オーブン中で 120°C, 40min 間加熱し硬化させた。加熱硬化後、試験片からはみ出た接着剤は小刀などで丁寧に除去した。

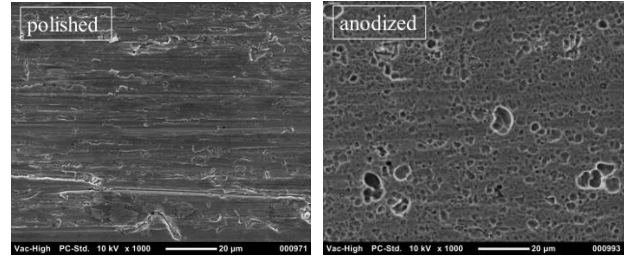


Fig.2 Surface condition of adherends

### 2.2. 実験方法

モードⅠおよびモードⅡの疲労き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を用いた。モードⅠでは引張り疲労き裂進展試験を行い、き裂進展速度  $da/dN$  が  $10^{-8}m/cycle$  を下回ったとき試験を終了した。モードⅡでは支点間隔 100mm の3点曲げの疲労き裂進展試験を行い、き裂が中央荷重点に達したとき試験を終了した。設定条件は繰り返し数 2Hz の変位制御(初期応力比  $R \cong 0.1$ )で正弦波の繰り返し負荷とした。モードⅠの最大荷重は 1.5kN、モードⅡの最大荷重は 4.7kN とした。試験中は読み取り顕微鏡を用いてき裂長さをモニタリングした。き裂長さがおよそ 1mm 進展するごとに繰り返し数を記録し、データロガーにより荷重出力値と変位出力値を取得した。コンプライアンス  $C$  は荷重値と変位値の関係から求めることができる。き裂長さ  $a$  とエネルギー解放率範囲  $\Delta G_I$  および  $\Delta G_{II}$  の算出にはコンプライアンス法を用いた。

モードⅠの場合では、コンプライアンス  $C$  と  $a$  の関係には予め実験的に求めた式(1)を、 $\Delta G_I$  の計算には式(2)を用いた。

$$C^{\frac{1}{3}} = 0.0132a + 0.184 \quad (1)$$

$$\Delta G_I = \frac{12a^2(P_{max}^2 - P_{min}^2)}{EB^2h^3} \quad (2)$$

ここで  $a$  はき裂長さ、 $P$  は荷重、 $E$  は被着材ヤング率、 $B$  は被着材幅、 $h$  は被着材厚さを表す。

一方、モードⅡの場合では、コンプライアンス  $C$  と  $a$  の関係には予め実験的に求めた式(3)を、 $\Delta G_{II}$  の計算には式(4)を用いた。

$$C^{\frac{1}{3}} = 4.42 \times 10^{-3}a + 0.503 \quad (3)$$

$$\Delta G_{II} = \frac{3(P_{max}^2 - P_{min}^2)\beta a^2}{2B} \quad (4)$$

ここで  $\beta$  は式(3)における  $a$  の係数、 $a$  はき裂長さ、 $P$  は荷重、 $B$  は被着材幅を表す。

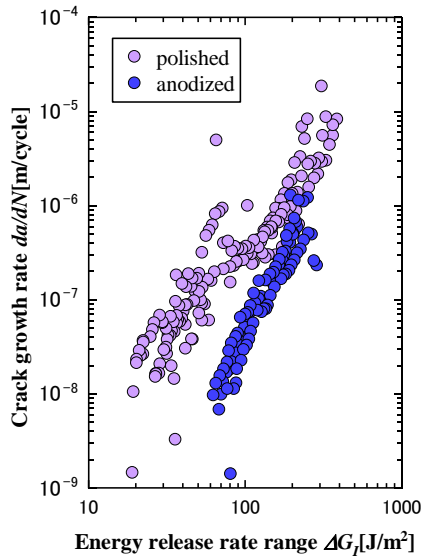


Fig.3 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_I$ .

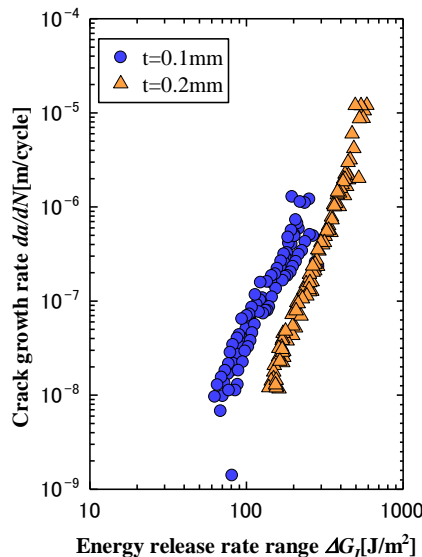


Fig.4 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_I$ .

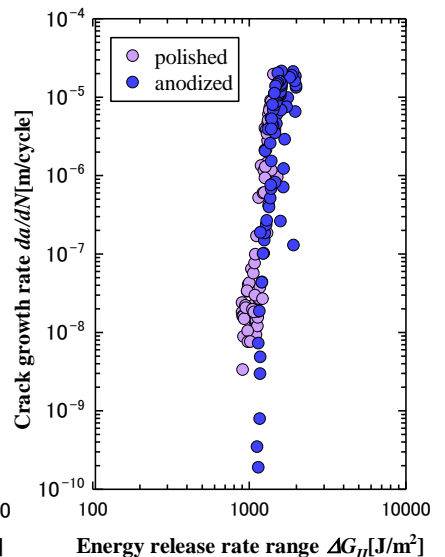


Fig.5 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G_{II}$ .

### 3. 実験結果

#### 3.1. き裂進展速度

モード I での異なる接着面仕上げごとに 3 本ずつの試験片について得られた  $da/dN$  と  $\Delta G_I$  の関係を図 3 に示す。  $da/dN$  を同一  $\Delta G_I$  で比較したとき、明らかに研磨材に比べ酸化処理材の  $da/dN$  が低下しており、モード I の疲労き裂進展において酸化処理によりき裂進展抵抗が大きくなることがわかった。

モード I における酸化処理材の  $da/dN$  と  $\Delta G_I$  の関係と先の研究<sup>(1)</sup>で得られた接着層厚さ  $t$  が 0.2mm での同種の結果との比較を図 4 に示す。接着層厚さ  $t$  が 0.1mm の場合  $t=0.2mm$  の場合と比べて  $da/dN$  は高くなることがわかった。特に  $\Delta G_I$  が小さいほどその差が顕著となった。このことは研磨材でも同様であった。

モード II での異なる接着面仕上げごとに 3 本ずつの試験片について得られた  $da/dN$  と  $\Delta G_{II}$  の関係を図 5 に示す。  $\Delta G_{II}$  の小さい領域で酸化処理材の  $da/dN$  が僅かに低くなっている。しかし、モード I で見られたほどの差異はなかった。

モード II における研磨材と酸化処理材の  $da/dN$  と  $\Delta G_{II}$  の関係を先の研究<sup>(1)</sup>で得られた接着層厚さ  $t$  が 0.2mm での同種の結果と比較すると、研磨材では  $\Delta G_{II}$  の小さい領域で  $t=0.1mm$  の  $da/dN$  が僅かに低くなっており、酸化処理材では接着層厚さ  $t$  によらず  $da/dN$ - $\Delta G_{II}$  関係に差異はみられなかった。

#### 3.2. 破面観察

図 6 にモード I き裂進展試験後の酸化処理材における巨視的破面を示す。試験片幅方向中央部分(枠内)にき裂が接着層内部を進展した凝集破壊の破面が観察された。この様相を示す破面領域の幅は接着層厚さ  $t$  が厚い場合に比べてかなり小さいものであった。それ以外の破面は接着層の被着材近傍をき裂が進展する界面近傍凝集破壊<sup>(1)</sup>の破面で、この破面様相を示す場合、完全な凝集破壊に比べて  $da/dN$  が増加するため、図 4 に示したように接着層厚さの違いにより  $da/dN$  に差異が現れたものと考えられる。一方、研磨材では接着層と被着材の界面をき裂が進展する様相が多く見られ、このことが  $da/dN$  を加速させた原因である。

図 7 にモード II き裂進展試験後の研磨材における巨視的破面を示す。一部き裂長さが短い部分に界面破壊による破面(枠内)が見られるものの、接着面の状態および接着層厚さに関係なく基本的に界面近傍凝集破壊であった。このため  $da/dN$ - $\Delta G_{II}$  関係に差が見られなかった。

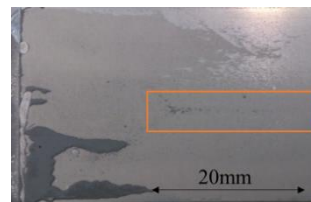


Fig.6 Fracture surface in anodized specimen

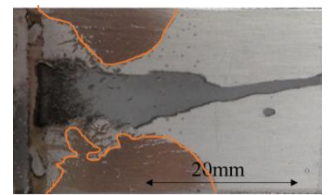


Fig.7 Fracture surface in polished specimen

### 4. 結言

- (1) モード I の疲労き裂進展においては酸化処理によりき裂進展抵抗が大きくなることがわかった。
- (2) モード II の疲労き裂進展においては酸化処理による  $da/dN$ - $\Delta G_{II}$  に及ぼす影響は僅かであった。
- (3) モード I の疲労き裂進展挙動について接着層厚さ  $t$  が 0.1mm の場合、 $t=0.2mm$  の場合と比べて  $da/dN$  は高くなることがわかった。
- (4) モード II の酸化処理材での接着層厚さ  $t$  による  $da/dN$ - $\Delta G_{II}$  関係に差異はみられなかった。

### 参考文献

- (1) 波多野勇気, “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表面陽極酸化処理の影響 Effect of anodizing on Mode I and II fatigue crack growth behavior in adhesive joint of aluminum alloy” (2016)
- (2) 日本接着学会, “接着ハンドブック” (2007)
- (3) Li, Jian, T. Kevin O'Brien, and Shaw Ming Lee. "Comparison of Mode II and III Monotonic and Fatigue Delamination Onset Behavior for Carbon/Toughened Epoxy Composites." (1997).