

# 単純重ね合わせ接着継手の疲労挙動と AE 特性

システム工学群  
機能性材料工学研究室 1180023 大久保 優也

## 1. 緒言

接着接合は、金属と繊維強化プラスチックの接合など異種材料間の接着が可能であり、また複雑な接着面に対応することができる。近年、自動車や航空機などの分野で軽量化への要求が高まり、接着接合は多く使用されるようになってきた。接着接合を用いることで、ボルトやネジを使用した接合に比べて軽量化を図ることもできる。しかし一方で、接着継手の強度は被着材の表面性状によって大きく変わるため、接着面に適切な表面処理を施すのが一般的である。被着材としてアルミニウム合金を使用する場合、陽極酸化処理を行うことで接着強度が向上することも知られている。この表面処理の違いにより、静的破壊や疲労破壊時のメカニズムが変化すると考えられる。

材料に外力が負荷されると、材料内部でひずみエネルギーが蓄積されるが、材料が塑性変形したり、内部で微小な破壊、き裂進展が生じたりすると、その際蓄えられていたひずみエネルギーが解放され、弾性波が放出される。この現象はアコースティックエミッション(AE)と呼ばれる。材料の力学的挙動、疲労損傷などの評価に有効となる。

本研究では、一液加熱硬化性エポキシ接着剤を用いたアルミニウム合金の単純重ね合わせ接着継手の疲労強度に及ぼす表面性状の影響を微視的な破壊挙動の観点から明らかにする。このため、接着表面を機械研磨したものと酸化処理を施した2種類の試験片を用いて、疲労試験中に発生するAE信号を検出しそのパラメータを検討し、さらにはウェーブレット解析により微視的な破壊挙動の比較を行う。

## 2. 材料及び実験方法

### 2.1 試験片

アルミニウム合金 A2017 を被着材とし、一液加熱硬化性エポキシ接着剤を用いて接着した単純重ね合わせ試験片を作製した。図1に試験片の形状および寸法を示す。

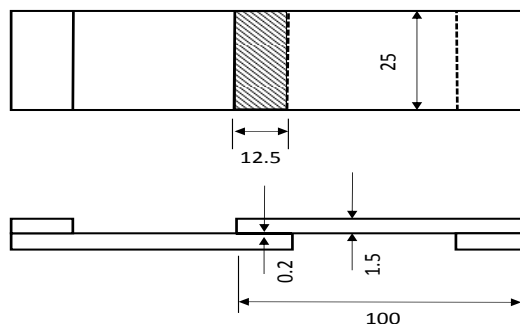


Fig.1 Shape of specimen

試験片の接着面を#500のエメリー紙で研磨したものを機械研磨材(MP材)、MP材を#1000で再度研磨しリン酸水溶液(10wt%)を用いて、15V、25分間陽極酸化処理を施したものを酸化処理材(An材)とした。接着層厚さは治具とテフロンシートを用いて0.2mmに制御した。図2にそれぞれの表面処理後の表面を電子顕微鏡で観察したものを示す。酸化処理を施すことで10 $\mu$ m以下の微小な空洞が形成された。

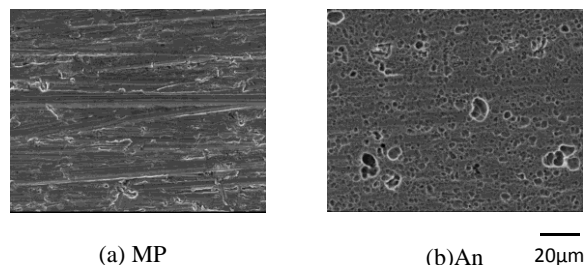


Fig.2 Surface condition of adherends

### 2.2 実験方法

疲労試験には油圧サーボ疲労試験機を用いた。負荷条件は応力比0、繰り返し速度5Hzの正弦波で荷重制御とした。本研究では、最大せん断応力をMP材では5MPa、An材では9MPaと固定し、繰り返し最大荷重を決定した。センサ出力はプリアンプで40dB、メインアンプで20dB増幅し、 $V_H = 0.55V$ 、 $V_L = 0.12V$ の2点を閾値にしてAEイベントと定義し、これらを計測システムで収録した。

## 3. 実験結果

### 3.1 S-N 曲線

図3に縦軸を繰り返し最大せん断応力 $\tau_{max}$ 、横軸を破断繰り返し数 $N$ としたS-N曲線を示す。各処理材とも先行研究で得られたデータを青色のプロットで示し、本研究で得られたデータを赤色のプロットで示した。これらの結果より、被着材表面に陽極酸化処理を施すことで、疲労強度が50~80%向上していることがわかる。今回、MP材は $N_f = 1 \times 10^5 \sim 4 \times 10^6$ 、An材は $4 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ の範囲のデータである。

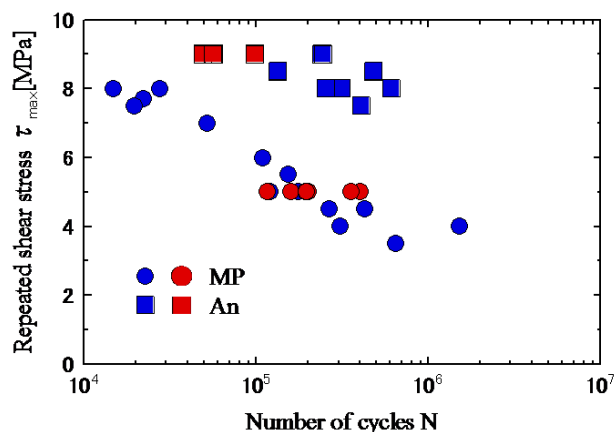


Fig.3 S-N curves

### 3.2 コンプライアンスの変化

各負荷サイクルにおける変位 - 荷重関係式

$$\delta = CP \quad (1)$$

における係数Cはコンプライアンスと呼ばれ、き裂が発生し、これが伝ばしていくとその値が変化していく。

試験片が破断するまでのコンプライアンスの変化を標準化して図4に示す。

この結果よりコンプライアンスの変化挙動は以下のことが分かる。MP材では負荷の繰返し初期(全寿命の約20%)でき裂が発生し、負荷せん断応力が比較的小さいため、このき裂がゆっくりと伝ばし最終破壊近くに急激に成長した。一方、An材では、き裂発生までかなりの繰返し数を必要とし、全寿命の約60%でき裂が発生した後、高い負荷せん断応力のため、き裂が比較的速く伝ばし破断に至った。

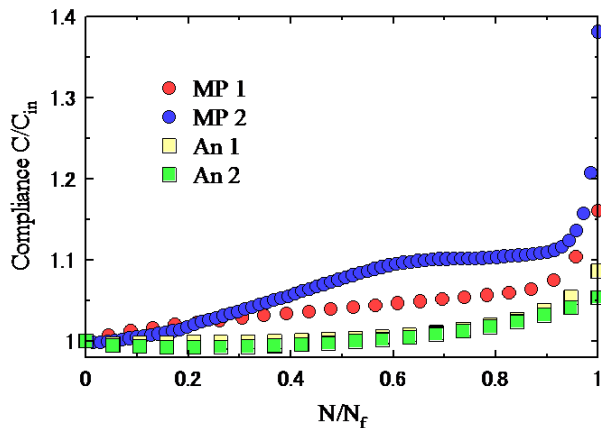


Fig.4 Compliance during fatigue tests

### 3.3 AE信号のウェーブレット解析

ウェーブレット解析はフーリエ解析に時間の情報を加えたものである。フーリエ変換による周波数解析は材料の微視的破壊因子の判別に有効であるが、破壊の発生時刻との関連は分からない。ウェーブレット解析では破壊の発生時刻を知ることが可能である。

図4のコンプライアンスが増加し始めたところをき裂進展開始初期、破断直前を寿命終期として図5にMP材、図6にはAn材の初期と終期のAE波形とウェーブレット解析の一例を示す。ウェーブレット解析では強い周波数成分が赤で示されている。MP材の初期と終期を比較すると初期は300kHz付近の高い周波数成分が強くなっているが終期になると周波数帯域が小さくなった。

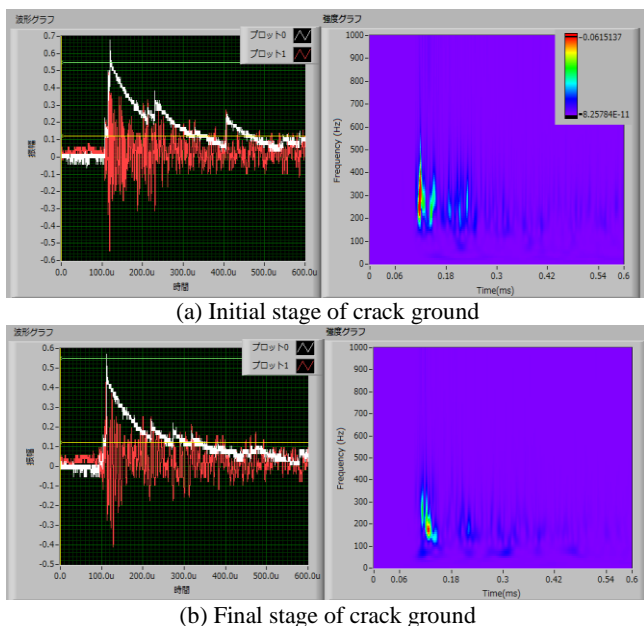
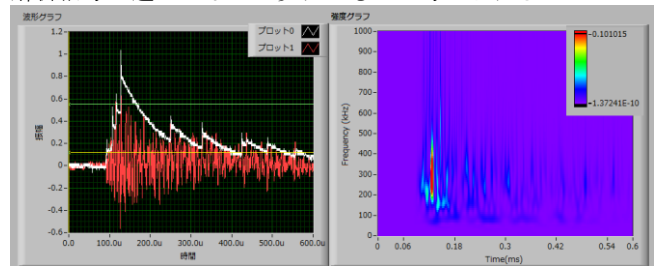


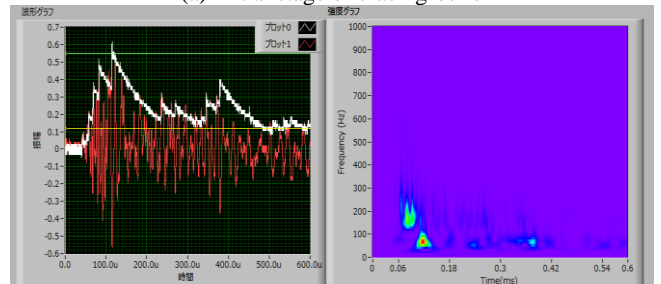
Fig.5 AE signal (left) and wavelet analysis (right) of mechanical-

polished

An材でもMP材と同様に初期では周波数の高い成分が強く現れており、終期では周波数帯域が小さくなり、MP材とAn材のウェーブレット解析の結果を比較すると、An材の方が広い周波数帯域でAE信号が出力されている。また長い時間にわたって200~300kHzの信号が出力されている。これには破壊メカニズムの違いが関係していると考えられる。破断後の破面を図7に示す。MP材では接着剤と被着材の界面をき裂が進展するのに対し、An材では被着材近くで接着剤の凝集破壊でき裂が進展していた。An材では、アルミニウム合金と接着剤との界面で結合力が強くなったためであるが、この破壊挙動の差がAE信号のウェーブレット解析信号の違いとなって現れたものと考えられる。



(a) Initial stage of crack ground



(b) Final stage of crack ground

Fig.6 AE signal (left) and wavelet analysis (right) of Anodized



(a) MP

(b) An

Fig.7 Fractured surface

## 4. 結言

- (1) コンプライアンスの挙動からMP材では初期の段階からき裂が発生し、An材では、寿命の約60%程度からき裂が発生したことが分かった。
- (2) ウェーブレット解析の結果、MP材、An材共にき裂の初期は高い周波数成分でも強く現れており、終期では周波数帯域が小さくなった。
- (3) MP材では接着剤と被着材の界面をき裂が進展するのに対し、An材では被着材近くの凝集破壊となっていた。

(参考文献省略)