

# 代表的な接着継手の強度および破壊条件について

鈴木 靖昭

鈴木接着技術研究所

## 1 はじめに

最近、航空機だけでなく自動車の軽量化、スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラなどの軽量化、低価格化、エレクトロニクス実装のために、金属、CFRP、セラミックスおよび樹脂など多くの異種材料の接着・接合技術の必要性が高まっており、多様な接合技術が開発されている。

先に本誌にて、接着接合の原理、主な異種材料接着・接合法の接合原理および各種接合法についてご紹介した。

本稿では、代表的な接着継手の応力分布、強度、および破壊条件についてご紹介する。

## 2 接着継手の破壊条件<sup>1)</sup>

### 2.1 基本的な接着接合形式

接着接合形式を大別すれば、図1のような単純重ね合せ接合、スカーフ接合、および突き合せ接合となる。そのほかの接合形式は、それらの接合法の組み合わせにより構成されている。

ここでは、前記の基本的な接合形式の特徴、応力分布、破壊条件、および強度評価法について紹介する。

### 2.2 重ね合せ継手の特徴、応力分布および強度評価

#### 2.2.1 応力分布（弾性解析解および弾性有限要素解析結果）

重ね合せ継手は実用性ももっとも高く、基本的な接着接合法であるが、接着面端部には図2のような被着材の偏差的伸びに起因する大きな応力集中が発生することが特徴であり、古くから応力解析が行われてきた。

曲げの影響を考慮していない単純重ね合せ継手に関する大沼の解析によれば、ラップ長さ $l$ の継手について、

次のような解析結果が与えられている<sup>3)</sup>。

$$\tau = \frac{kp}{2t \sinh kl} \left\{ \cosh kl \left( 1 - \frac{x}{l} \right) + \cosh kx \right\} \dots\dots\dots (1)$$

せん断応力の最大値  $\tau_{\max}$  は、 $x = 0$  および  $x = l$  で生じ、

$$\tau_{\max} = \frac{kp}{2t} \coth \frac{kl}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$k^2 = 2G/Edt \dots\dots\dots (3)$$

$\tau_{\max}$  を、平均せん断応力  $\tau_{\text{ave}} = p/l$  で除すと、

$$\tau_{\max}/\tau_{\text{ave}} = \frac{kl}{2} \coth \frac{kl}{2} \dots\dots\dots (4)$$

となり、応力集中係数  $\eta = \tau_{\max}/\tau_{\text{ave}}$  は、 $kl$  の増加、すなわち、接着剤のせん断弾性係数  $G$  およびラップ長さ  $l$  の増加、ならびに被着材の縦弾性係数  $E$ 、接着層厚さ  $d$  および被着材厚さ  $t$  の減少とともに大きくなることが図3の  $kl$  をパラメータとする接着層の応力分布において示

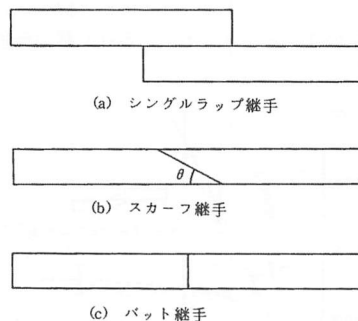


図1 基本的な接着継手形式<sup>1)</sup>

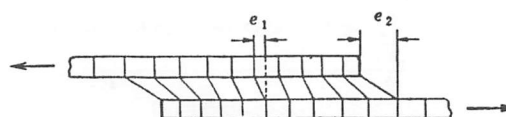


図2 被着材の接着面端部に生じる偏差的伸び<sup>2)</sup>

されており、したがって $kl$ の増加により接着強度は低下するものと推定される。

単純重ね合せ継手に引張り荷重がかかる場合、図4のように接着部には偏心荷重による曲げモーメントが生じ、その結果接着部端には面に垂直方向のはく離応力が発生し<sup>4)</sup>、強度低下の原因となる。

なお、以上はすべて弾性解析結果である。

## 2.2.2 重ね合せ接着継手のせん断破壊荷重実験値例

図5はde Bruyne<sup>5)</sup>による軟鋼の重ね合せ継手のラップ長さ $l$ と破断荷重との関係の実験値例である。同図において、被着材にテーパを付けた場合は、被着材先端に近づくほどその剛性が小さくなって図2の被着材の偏差的伸びが小さくなり、接着層のせん断変形が均一に近づ

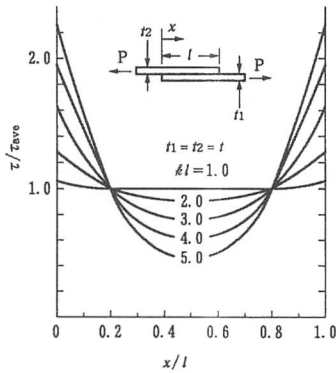


図3 重ね合せ継手接着層に生じるせん断応力分布<sup>3)</sup>

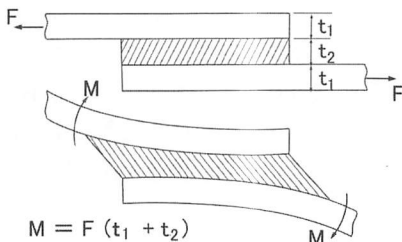


図4 偏心荷重の曲げモーメントによるはく離力発生の様式図<sup>4)</sup>

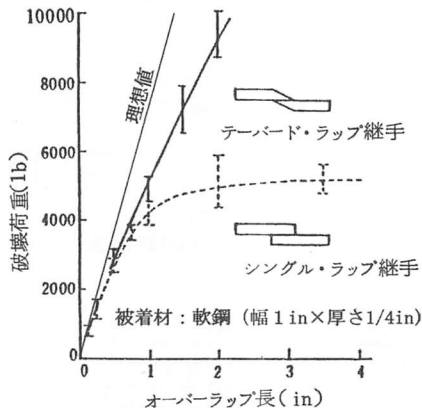


図5 重ね合せ接着継手の破断荷重とラップ長さとの関係<sup>5)</sup>

き ( $e_1 \approx e_2$ )、応力集中が小さくなるため、破断荷重がラップ長さにほぼ比例的な増加を示している。

一方、図5のシングルラップ継手においては、ラップ長さ $l$ の増加とともに、破断荷重の増加が飽和する傾向が見られる。

## 2.2.3 AI重ね合せ継手の引張せん断試験結果およびFEM解析による検討例

著者は、二液性エポキシ系接着剤ナビロック EA9430を用いて接着した図6のようなA5052P (厚さ1.6mm)の単純重ね合せ継手について、実験および弾塑性FEM解析により検討した<sup>6)</sup>。

荷重-ひずみ線図を図7に示す。図4に示した曲げモーメントにより、破断後の被着材は接着端において塑性変形していることが観察された。

図6の継手の左側半分を、平面ひずみ状態として二次元弾塑性FEM解析<sup>7)</sup>を行った。被着材および接着剤はvon Misesの条件により降伏するとした。表1に解析に用いた材料定数、図8中に接着剤の応力-ひずみ線図をそれぞれ示す。

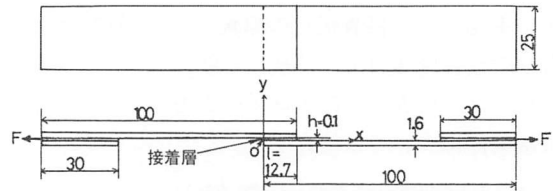


図6 AIの重ね合せ接着継手試験片寸法<sup>6)</sup>

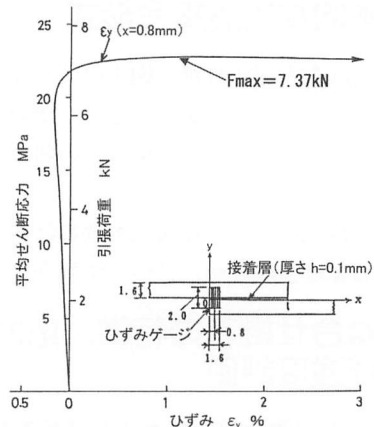


図7 AIの重ね合せ接着継手の荷重-ひずみ線図<sup>6)</sup>

表1 弾塑性FEM解析に用いた被着材および接着剤の材料定数<sup>6)</sup>

	縦弾性係数 GPa	ポアソン比	降伏応力 $\sigma_y$ MPa	$c^*$ GPa
被着材	68.9	0.34	202.9	2.71
接着剤	1.77	0.37	46.0	0

$$* \sigma^p = \sigma_y + c \varepsilon^p$$

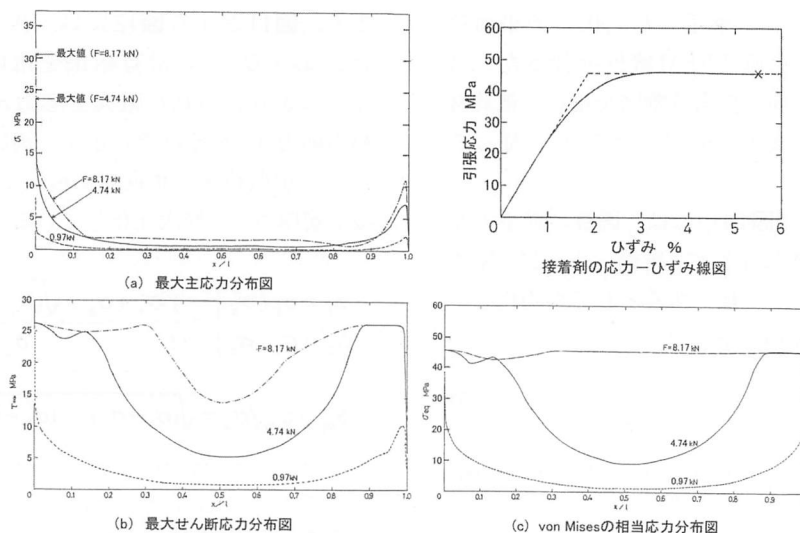


図8 Alの重ね合せ接着継手の接着層境界における最大主応力，最大せん断応力，および von Mises の相当応力分布図<sup>6)</sup>

図8(a)，(b)，および(c)は，それぞれ接着層境界（接着層内）における最大主応力 $\sigma_1$ ，最大せん断応力 $\tau_{\max}$ ，および von Mises の相当応力 $\sigma_{eq}$ の分布図である<sup>6)</sup>。

図において，せん断荷重 $F=0.97\text{kN}$ が弾性限界荷重であり， $F$ がそれより増すと接着層内は塑性変形する要素が生じる。図8(a)の最大主応力 $\sigma_1$ は，接着層自由端で大きな応力集中が見られ（応力特異性），はく離力として作用する。図8(a)における最大値は，接着層自由端における要素についての値である。

一方，図8(b)の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ および(c)の von Mises の相当応力 $\sigma_{eq}$ は接着層をせん断変形させる応力である。図において弾性限界せん断荷重 $F=0.97\text{kN}$ では，前記大沼の式による解析結果と同様に，接着端で大きな応力集中が見られる。しかし， $F=4.74\text{kN}$ においては，塑性域が接着端から内側へ接着層長さ $l$ の10～20%までの領域に拡大し， $F=8.17\text{kN}$ においては接着層の全域にわたり塑性変形が生じ， $\sigma_{eq}$ の値がほぼ一定（表1のバルク接着層剤の降伏応力 $\sigma_Y=46.0\text{MPa}$ ）となり，荷重がほぼ飽和に達している。 $F=8.17\text{kN}$ がこの弾塑性FEMソフト<sup>7)</sup>により計算可能な最大荷重であった。前述のSUS継手およびAl継手のせん断接着強度実験値が応力集中係数の大きさにそれほど影響を受けなかったのは，このように接着層が塑性変形するためと考えられる。

ところで，図7の最大せん断荷重 $F_{\max}$ は， $7.37\text{kN}$ で（他の4本の試験片もほぼ同様の値を示した），この値は図8(c)の接着層全面降伏荷重 $F=8.17\text{kN}$ の90%である。これは，接着層全面が降伏するより先に，図8(a)の接着層端において最大主応力 $\sigma_1$ （はく離応力）によりはく離が生じるためと考えられ，これが重ね合せ継手

の破断荷重がラップ長さに比例して増加しない原因と推定される。

## 2.3 スカーフ継手および突合せ（バット）継手

スカーフ接着継手は，被着材の加工が比較的難しいという短所があるが，重ね合せ接着継手の場合のような接合部全体にわたる大きな応力集中や引張荷重による接着部の曲げモーメントが生じないため，破断荷重が接着部長さに比較的比例して増加するという長所があり，航空機用複合材料や合板の接着接合には利用されている。

また，接着層内は垂直応力とせん断応力の組合せ応力状態となり，スカーフ角度を変えることで両応力の比率を任意に変えられるため，接着層すなわち厚さが薄い樹脂の組合せ応力状態と破壊条件との関係を調べるのが比較的容易にできる。

ここでは，炭素鋼を被着材として，スカーフ角度 $\theta$ （接着面と荷重方向との間の角度）が $15^\circ\sim 90^\circ$ の継手の2次元FEM解析を行って接着層内の応力分布を把握するとともに，ぜい性1種類，延性2種類のエポキシ系接着剤用いた継手の接着強度を測定して接着層破面のSEM観察を行い，その破壊条件を検討した結果を紹介する。

### 2.3.1 2次元弾性FEM解析<sup>8)</sup>

表2の材料定数を用いて，スカーフ継手（スカーフ角

表2 スカーフおよびバット継手の2次元FEM解析に用いた材料定数<sup>8)</sup>

	縦弾性係数	ポアソン比
被着材(軟鋼)	$E=210,00\text{ GPa}$	$\nu=0.30$
接着剤(エポキシ樹脂)	$E_a=3.20\text{ GPa}$	$\nu_a=0.37$
1 GPa=102 kgf/mm <sup>2</sup>		

$\theta = 15^\circ \sim 75^\circ$ ) およびバット継手 ( $\theta = 90^\circ$ ) の平面ひずみ状態における2次元弾性FEM解析を行った。スカーフ継手においては、同一要素分割図を用い、被着材の厚さ  $t$  を  $t = a \cdot \tan \theta$  ( $a$  は  $\theta = 45^\circ$  における  $t$ ) に従って変化させている。

式 (5)～式 (7) および図10中には、図9の継手の座標系に示すように接着層に平行に  $s$  座標、垂直に  $n$  座標を取り、接着層内の応力が一様であるとして平均化した時の応力  $\sigma_s$ 、 $\sigma_n$ 、および  $\tau_{sn}$  を示す。

$$\sigma_n = \sigma_a \sin^2 \theta \quad \dots (5)$$

$$\sigma_s = \frac{\nu_a}{1 - \nu_a} \sigma_n \quad \dots (6)$$

$$\tau_{sn} = \sigma_a \sin \theta \cos \theta \quad \dots (7)$$

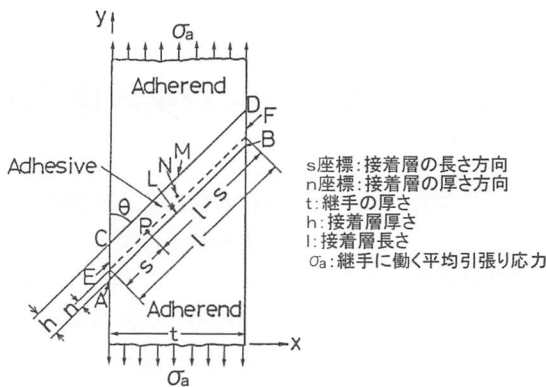


図9 スカーフ接着継手の座標系<sup>8)</sup>

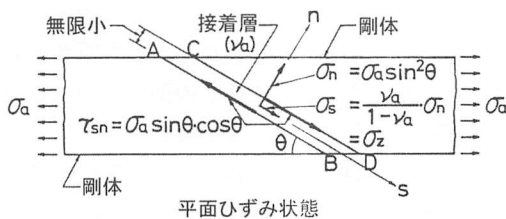


図10 スカーフ接着継手の接着層内の平均化応力<sup>8)</sup>

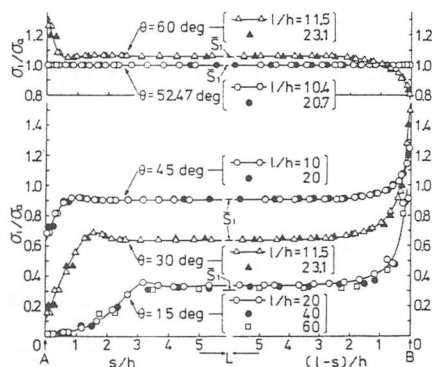


図11 2次元FEMによるスカーフ継手の接着層境界における最大主応力  $\sigma_1$  の分布<sup>8)</sup>

また、図11および図12には、接着層境界における  $\sigma_s$ 、 $\sigma_n$ 、および  $\tau_{sn}$  の計算結果を用いて式 (8) および式 (9) により得られた最大主応力  $\sigma_1$  および von Mises の相当応力  $\sigma_{eq}$  をそれぞれ示す。両応力は、平均引張応力  $\sigma_a$  (=引張荷重/垂直断面積) で無次元化し、 $s$  座標は接着層厚さ  $h$  で無次元化している。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sigma_1 / \sigma_a \\ S_2 &= \sigma_2 / \sigma_a \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s + \sigma_n \pm \sqrt{(\sigma_s - \sigma_n)^2 + 4\tau_{sn}^2}}{\sigma_a} \quad \dots (8)$$

$$S_{eq} = \sigma_{eq} / \sigma_a = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_1)^2} / \sqrt{2} \sigma_a \quad \dots (9)$$

ここで、 $\sigma_2$  および  $\sigma_z [= \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$  は最小主応力および  $z$  方向 (紙面に垂直) の中間主応力である。

図11および図12の  $\theta = 52.47^\circ$  においては、被着材を含めて継手全体にわたりすべての応力が一定値を示す。この角度は、同一寸法の材料1 (被着材) および材料2 (バルク接着剤) の長方形板のそれぞれに同一引張応力を負荷した時、負荷前において軸方向に對しいずれも角  $\theta$  をなす両材料の斜面の長さが、負荷後においても常に

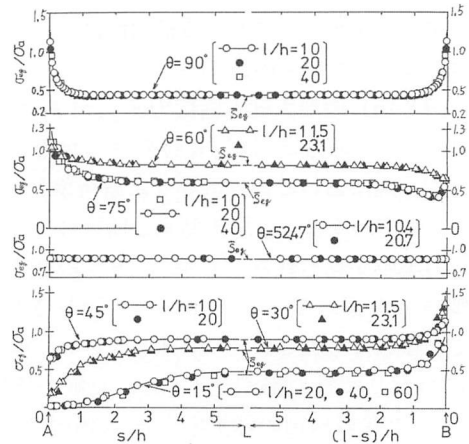
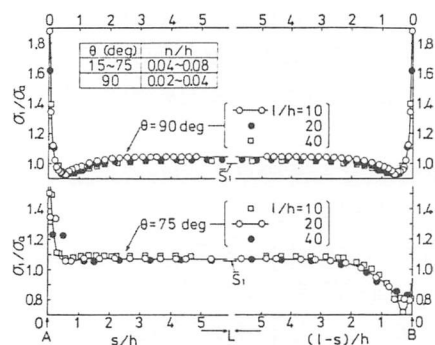


図12 2次元FEMによるスカーフ継手の接着層境界における von Mises の相当応力  $\sigma_{eq}$  の分布<sup>8)</sup>



等しくなる角度として導かれる<sup>8)</sup>。

解析結果において、接着層自由端から接着層厚さの2～3倍内側へ入った個所までの応力集中部では、接着層の厚さが異なっても応力分布がほぼ相似となっている。したがって、接着層厚さ $h$ が厚くなるほど、接着端の応力集中部が内部にまで及ぶ。また、それ以外の接着層の大部分ではほぼ一定応力となり、その値は、式(5)～(7)の平均化応力 $\sigma_s$ 、 $\sigma_n$ 、および $\tau_{sn}$ を式(8)および式(9)に代入し $\sigma_a$ により無次元化して得た $S_1$ および $S_{eq}$ の値にほぼ一致している。

### 2.3.3 接着強度および破壊条件<sup>9), 10)</sup>

#### (1) スカーフおよびパット継手の接着強度実験結果

図13の形状・寸法のS35C製被着材に対し、実接着表面積の増加および接着面の十分な洗浄により接着強度の向上を図るため、#60の研削砥石WAH60（白色酸化アルミニウム）により研削方向を試験片の長手方向に一致させて研削し、トリクロロエチレンにより10分間ずつ4回の超音波洗浄を行った。

3種類のエポキシ系接着剤の組成および力学的性質を表3に、応力-ひずみ線図を図14に示す。応力-ひずみ線図の測定は、厚さ3mmの各バルク接着剤注型板を

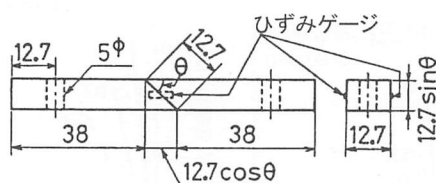


図13 スカーフ継手およびパット継手試験片形状<sup>9), 10)</sup>

表3 3種類のエポキシ系接着剤の組成および力学的性質<sup>10)</sup>

接着剤	組 成			力学的性質			
	エポコート 828	エポコート 871	硬化剤 DETA	縦弾性係数 GPa	ポアソン比	降伏応力 MPa	引張り強度 MPa
A(ぜい性)	100	0	11.0	3.14	0.37	—	65.5 *
B(弾塑性)	75	25	9.5	2.16	0.38	46.8 *	46.8
C(弾塑性)	50	50	8.0	0.784	0.45	16.7 *	18.5

\*  $\sigma_{By}$  1 GPa=102 kgf/mm<sup>2</sup> 1 MPa=0.102 kgf/mm<sup>2</sup>

用いて、ASTM D638 Type I（平行部幅13mm）試験片により得た。

接着剤Aはぜい性、接着剤Bおよび接着剤Cは延性（弾塑性）を示す。

図13のように、試験片の接着層を含む位置の両面に大ひずみ用ひずみゲージ（ゲージ長さ5mm）を貼りつけて、荷重と被着材の伸びを含む接着層のひずみ計測値 $\varepsilon$ との関係を測定し、図15のような結果を得た。

図16に示す方法で、各接着継手の接着強度または降伏応力 $\sigma_y$ （いずれも荷重方向に垂直な断面積当たりの平均応力 $\sigma_a$ ）を決定し、図17(a)～(c)に示した<sup>10)</sup>。○印が実験値である。

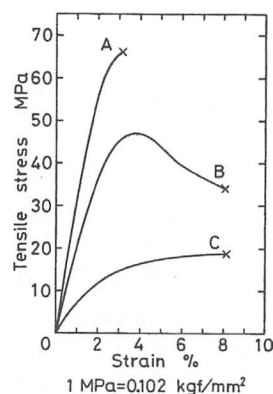


図14 3種類のエポキシ系接着剤の応力-ひずみ線図<sup>10)</sup>

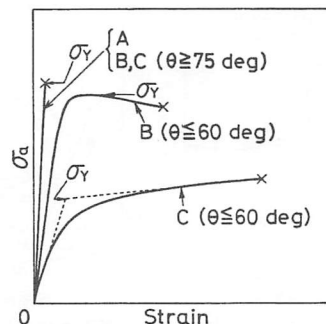


図16 接着継手の接着強度または降伏応力 $\sigma_y$ の決定法<sup>10)</sup>

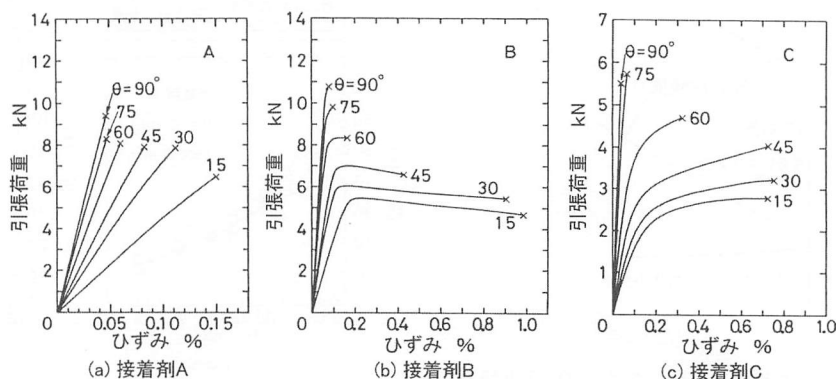


図15 3種類の接着剤によるスカーフおよびパット継手の荷重-ひずみ線図<sup>10)</sup>

## (2) スカーフおよびバット継手の接着層の破壊条件

切欠きなどにより応力勾配のある材料の降伏あるいは破壊が最大応力によるのではなく、最大応力を含む有効容積についての応力の平均値によって決まることから Neuber<sup>11)</sup>によって示され、中西<sup>12)</sup>は同様の事実が材料の表面に境界層を考慮することにより説明できることを示した。ここでは、そのように図18の境界層厚さ $\delta$ だけ内部に入った点の応力が一定値に達したときに破壊(ぜい性材料)および降伏(弾塑性材料)が起こるとし

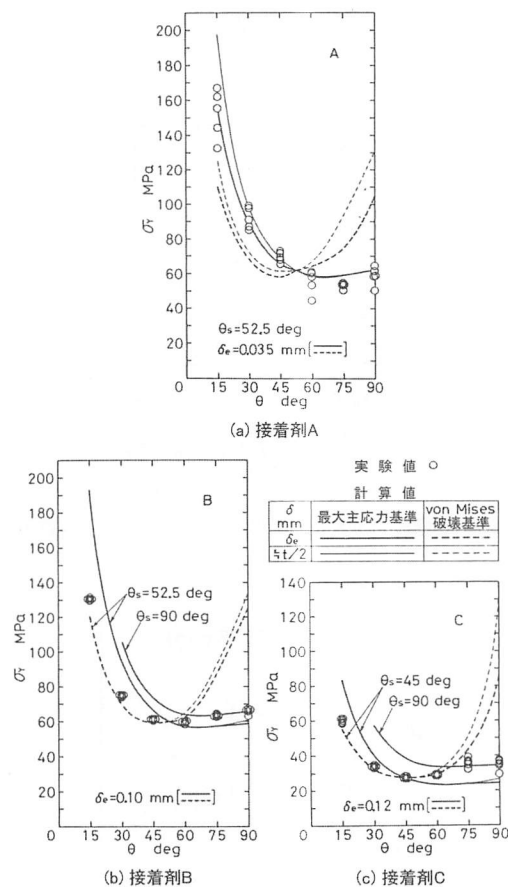


図17 3種類の接着剤によるスカーフ継手の接着強度とスカーフ角度との関係<sup>9),10)</sup>

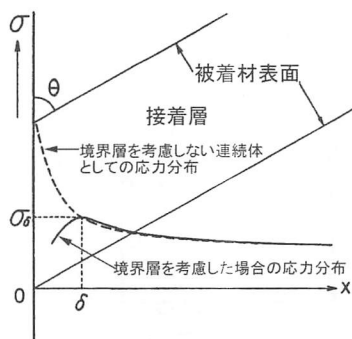


図18 境界層厚さ $\delta$ を考慮した接着層境界における自由端近傍の応力分布<sup>9)</sup>

て、接着強度の計算値を求めて図17に示した。

境界層厚さ $\delta$ は、実験値に適合する最小値を採用するが、その値 $\delta_e$ は、接着剤A:0.035mm(前出)、接着剤B:0.10mm、および接着剤C:0.12mmとなった。図17(a)~(c)において、各継手の接着強度計算値は、境界層厚さ $\delta_e$ における応力値を用いた場合(太い実線および破線)と、それより内部の一定応力域( $x \approx t/2$ )の応力を用いた場合(細い実線および破線)とがほぼ同一となった( $x = \delta_e$ と $x \approx t/2$ における応力値がほぼ同一のため)。

図17(b)および(c)において、弾塑性接着剤BおよびCの継手の接着層は、 $\theta \leq 60^\circ$ では von Mises の条件で降伏が起こり、 $\theta > 60^\circ$ では、応力の3軸性が高くなって<sup>10)</sup>、塑性変形が拘束されるため、最大主応力条件でぜい性破壊(切欠ぜい性)が生じていると考えられる<sup>13),14)</sup>。

なお、上記のぜい性破壊が起こるような応力特異性が大きな条件の破壊は、厳密には後記の特異応力場の強さKにより検討するべきである。

## (3) バット継手の接着層厚さと接着強度との関係<sup>15)</sup>

図19ならびに図20は、それぞれぜい性接着剤Aおよび

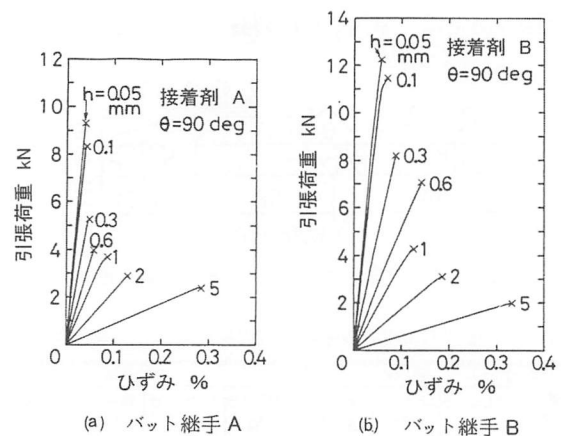


図19 バット継手の荷重-ひずみ線図<sup>15)</sup>

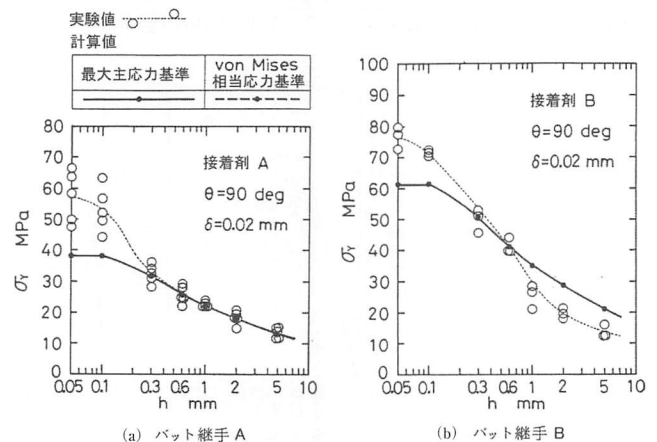


図20 バット継手の接着層厚さと接着強度との関係<sup>15)</sup>



び延性接着剤Bを用いたバット継手の荷重－ひずみ線図ならびに接着強度 $\sigma_y$ と接着層厚さ $h$ との関係である<sup>15)</sup>。

図19から、いずれも接着層がぜい性破壊しているものとみなされる。

## 2.4 接着接合部における特異応力場の強さを用いた接着強度の評価

### 2.4.1 特異応力場の強さによるバット継手の強度評価<sup>16)</sup>

野田ら<sup>16), 17)</sup>は、前出2.3.3 (3) 項の鈴木によるぜい性接着剤Aおよび延性接着剤Bを用いたバット継手の引張強度実験値に対し、図21の完全接着モデルを適用して精細なFEM解析を行い、引張強度予測値が実験値にほぼ一致するというを示したので以下に紹介する。

図21の完全接着モデルにおいて、接合端部の特異応力場の強さ $K_\sigma$ は、

$$K_\sigma = \lim_{r \rightarrow 0} \left[ r^{1-\lambda} \times \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}(r) \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表される<sup>18)</sup>。ここで、 $r$ ：接着層境界端からの距離、 $\lambda$ ：特異性指数である。

これを用いて無次元化特異応力場の強さ $F_\sigma$ が次式のように定義される<sup>18)</sup>。

$$F_\sigma = \frac{K_\sigma}{\sigma_0 W^{1-\lambda}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

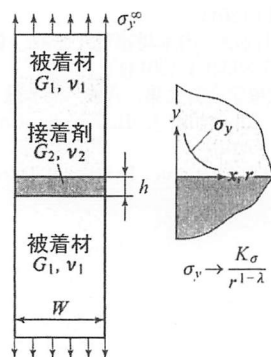


図21 完全接着モデル<sup>16), 17)</sup>

ここで $\sigma_0$ は遠方における $y$ 方向応力である。

式(11)の $\sigma_0$ の値として、接着強度 $\sigma_c$ を代入することにより、継手破壊時の特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ が次式のように得られる<sup>16)</sup>。

$$K_{\sigma c} = F_\sigma \sigma_c W^{1-\lambda} \quad \dots\dots\dots (12)$$

上式の $\sigma_c$ の値として、図20のバット継手の接着強度実験値 $\sigma_y$ を代入することにより図22のように継手破断時の特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ と接着層厚さ $h$ との関係が得られた<sup>16)</sup>。この図から、ぜい性接着剤Aおよび延性接着剤Bの場合ともに、各接着層厚さの継手の接着強度が特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ ＝一定で評価できることが示された。

### 2.4.3 特異応力場の強さによる単純重ね合せ継手の強度評価<sup>17), 19)</sup>

服部<sup>20)</sup>は、被着材が鉄－ニッケル合金 ( $E=148\text{GPa}$ 、板厚5mm)の単純重ね合せ継手(接着層厚さ0.1mm)のせん断接着強度とラップ長さ(5, 15および30mm)との関係が、せん断応力 $\tau(r)$ に関する応力特異場パラメータ $K$ により説明できることを示した。

宮崎・野田ら<sup>17), 19)</sup>は、Parkら<sup>21)</sup>が行った図23のような被着材A6061-T6を、120℃硬化変性エポキシ系フィルム形構造用接着剤(Cytec社FM73M)<sup>21)</sup>により接着した単純重ね合せ継手の接着強度実験結果(図24)が、前2.4.1項のバット継手の場合と同様に、特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ ＝一定で評価できることを示したので以下に紹介する。接着剤FM73Mのせん断応力－ひずみ線図は、 $-55^\circ\text{C}$ 以上において折れ線で近似される弾塑性性を示す。

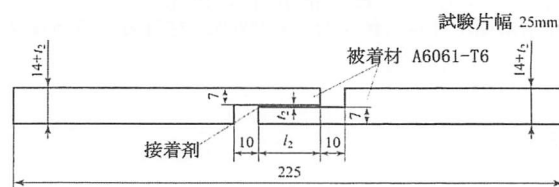
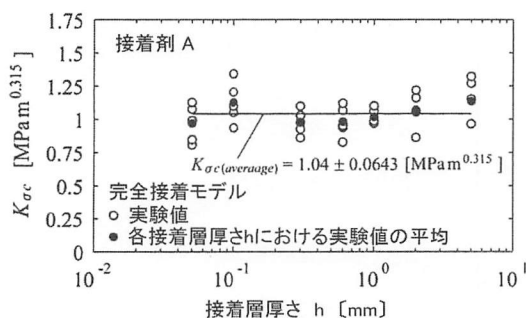
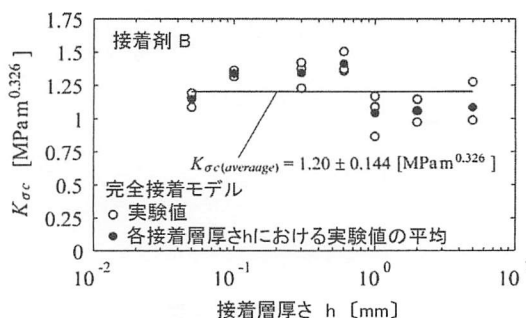


図23 A6061-T6の単純重ね合せ継手の形状および寸法<sup>19), 21)</sup>



(a) 接着剤 A



(b) 接着剤 B

図22 完全接着モデルにおける破断時の特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ と接着層厚さ $h$ との関係<sup>16), 17)</sup>

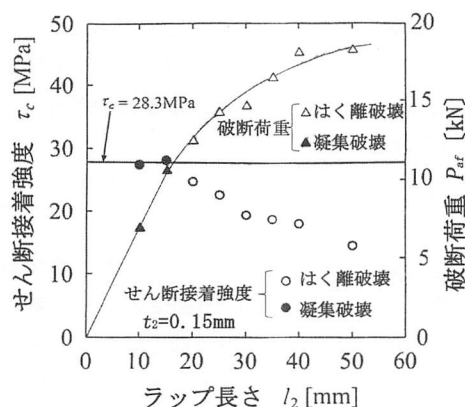


図24 単純重ね合せ継手の接着強度実験値<sup>19),21)</sup>

図24において、単純重ね合せ継手の破断荷重 $P_{af}$ は、ラップ長さ約15mmまではラップ長さ $l_2$ に比例し（せん断接着強度 $\tau_c$ ＝一定）、それ以上では次第に鈍化しているが、これは図5と同様である。

一方、図25は、この継手のラップ長さ $l_2$ と特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ との関係であり、 $15\text{mm} < l_2$ では特異応力場の強さ $K_{\sigma c}$ ＝一定で破壊が起こっていることが示された。したがって、応力特異性が大きい接着継手の破壊を予測するためには、 $K_{\sigma c}$ が有用であることがわかる。

### 参考文献

- 1) 鈴木靖昭，接着工学－異種材料接着・接合，強度・信頼性・耐久性向上と寿命予測法，丸善出版，pp.123-195(2018)
- 2) 小島陽之助，接着－理論と応用－，高分子学会編，丸善，(1959)，p.257
- 3) 大沼康二，日本航空学会誌，7 (60)，41 (1958)
- 4) 前川善一郎，複合材料ハンドブック，日本複合材料学会編，日刊工業新聞社，(1989)，p.201
- 5) N. A. de Bruyne, Aircr. Eng. 16, 115 (1944)
- 6) 鈴木靖昭，日本機械学会 (No.900-86) 材料力学講演論文集，

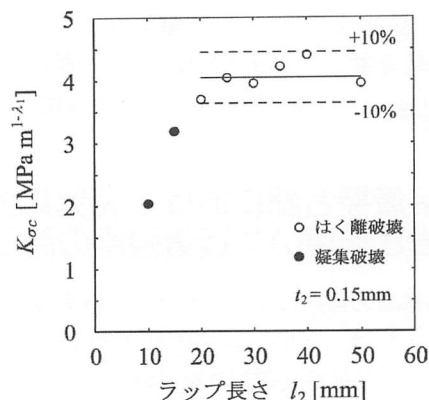


図25 破断時の $K_{\sigma c}$ とラップ長さ $l_2$ との関係

- 395-397 (1990)
- 7) 山田嘉昭，横内康人，有限要素法による弾塑性プログラミング，培風館，(1981)
- 8) 鈴木靖昭，松本 淳，小幡 鍊，日本接着協会誌，18, 7 (1982)
- 9) 鈴木靖昭，日本機械学会論文集，50-451, A編，526-533 (1984)
- 10) 鈴木靖昭，日本機械学会論文集，51-463, A編，926-934 (1985)
- 11) Neuber, H., Kerbspannungslehre, Julius Springer, Berlin, (1937), p.142
- 12) 中西不二夫，ほか，日本機械学会論文集，19-87, 14, (1953)
- 13) Parker, E. R., Brittle Behavior of Engineering Structures, John Wiley & Sons, (1957)
- 14) 横堀武夫，材料強度学，岩波書店，(1971)，p.160-164, p.183-185,
- 15) 鈴木靖昭，日本機械学会論文集，53-487, A編，514-522 (1987)
- 16) 野田尚昭，宮崎達二郎，内木場卓巳，李戎，佐野義一，高瀬康，エレクトロニクス実装学会誌，17, 132-142 (2014)
- 17) 野田尚昭，堀田源治，佐野義一，高瀬 康，異種接合材の材料力学と応力集中，pp.107-151 (コロナ社，2017)
- 18) 張玉，野田尚昭，高石謙太郎，蘭欣，日本機械学会論文集，A編，77-774, 128-140 (2011)
- 19) 宮崎達二郎，野田尚昭，内木場卓巳，李戎，佐野義一，自動車技術会論文集，45, 895-901 (2014)
- 20) 服部敏雄，日本機械学会論文集，A編，56-523, 618-623 (1990)
- 21) J. -H. Park, J. -H. Choi, and J. -H. Kweon, Composite Structures, 92, 2226-2235 (2010)
- 22) FM73®Epoxy Film Adhesive Technical Data Sheet, Cytec Industry Inc.