

# MATERIAL STAGE

## 巻頭

構造部材による軽量化設計の考え方と CAE 解析結果の検証方法

## 特集

マルチマテリアル車体に向けた接合技術, 接着材料の開発

AI, 自動実験を活用した材料開発の効率化

窒化ホウ素の分散, 配向制御と高熱伝導樹脂の開発

# 2

2026 ◆ Feb

# MATERIAL STAGE

2026.2

## 巻頭

構造部材による軽量化設計の考え方と CAE 解析結果の検証方法  
(公財) 浜松地域イノベーション推進機構 次世代自動車センター浜松 望月 英二 ——— 1

## 特集 1

### マルチマテリアル車体に向けた接合技術, 接着材料の開発

- ハイブリッド弾性瞬間接着剤による異種材料接着とその自動車分野への応用  
東亜合成 (株) 安藤 勝 ——— 8
- 金属樹脂直接成形接合における金属表面性状の影響  
東京大学 梶原 優介 ——— 13
- 車体軽量化に向けた 3D プリンターによるマルチマテリアル技術  
東北大学 山中 謙太, 崔 玉傑, 千葉 晶彦 ——— 20
- JIS で規定された引張接着強さの接着部の幾何形状寸法依存性  
九州工業大学 野田 尚昭  
日本文理大学 高木 怜 ——— 25

## 特集 2

### AI, 自動実験を活用した材料開発の効率化

- AI が切り拓く計算化学による材料開発  
Matlantis (株) 張 凡 ——— 33
- 電子実験ノートを活用した素材開発の効率化  
(株) カネカ 神田 彰久, 橋本 忠明, 宮田 きよみ ——— 38
- マテリアルズインフォマティクスによる材料探索の俯瞰  
東北大学 橋本 佑介, 筈居 高明 ——— 43
- 化学産業の無人化に向けた自動合成装置の開発  
北海道大学 芦刈 洋祐, 永木 愛一郎 ——— 47

# JIS で規定された引張接着強さの接着部の幾何形状寸法依存性

野田 尚昭 九州工業大学 名誉教授

高木 怜 日本文理大学 工学部 機械電気工学科 准教授

## 1 緒言

構造用接着剤による接着構造は，部品表面の平滑化，異種材料同士の接合，重量の軽減，密封性，設備費低減・工数削減といった生産経済性など多くの優れた点を有する。自動車の安全性と軽量化のキーとなるマルチマテリアル化において，接着接合技術は益々重要となっている<sup>1,2)</sup>。接着強さの評価方法は日本産業規格 JIS によって種々の試験法が規定されており，引張接着強さは  $\sigma_c^{JIS} = P/A$  と定義され， $P$  = 最大荷重， $A$  = 接着面積 ( $A = W^2 = (12.7\text{mm})^2$ ) である。このように定義される接着強度  $\sigma_c^{JIS}$  は接着層厚さ  $h$  に依存して大きく変わる。しかし，JIS 規格では接着層厚さ  $h$  に関しては，どのような記述も見あらず，その考慮がなされていない<sup>3)</sup>。このような，平均応力で表す強度は，試験片の引張強度や降伏応力を求めるのに有用であるが，その際，試験片に均一な応力が生じることを前提としている (図 1 参照)。すなわち，接着強度を求める突き合わせ継手では，接着部に不均一な応力集中が生じるけれども，それに対する配慮がない。そのことが，引張接着強さ  $\sigma_c^{JIS}$  が接着厚さ  $h$  に依存して変化する理由である。一方，最近，著者らが指摘しているように，接着部の応力集中を考慮した接着端部の特異応力場の強さ Intensity of Singular Stress Field (以下 ISSF と略記) を用いれば，接着強さは， $h$  に依存せず  $ISSF = \text{一定}$  で表される<sup>2)</sup>。その説明は 3 節で行う。

このように平均応力で表す接着強さ  $\sigma_c^{JIS}$  には，接着部の寸法に依存して変化する問題点がある。しかし，ISSF に比べて，この接着強さ  $\sigma_c^{JIS}$  は直観的には理解し易く，接着強度の指標として広く認識されている。そこで本研

究では，JIS の接着面積より接着面積が大きい ( $A = W^2 > (12.7\text{mm})^2$ ) 場合など，接着部の幾何形状寸法を変化させた場合の接着強さ  $\sigma_c^W(h)$  を，JIS で規定される  $\sigma_c^{JIS}$  から求める場合の妥当性を考察する。その際，一般的に使用される延性接着剤を用いた場合でも，接着層が弾性的挙動を示すことを説明する。また，最大荷重負荷時にも，接着層に生じる塑性域の大きさが小規模降伏条件満足することを，接着層形状を変えて明らかにする。

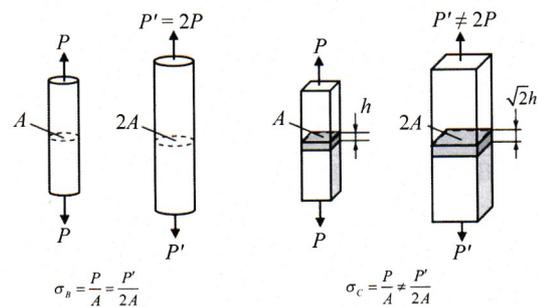


図 1 Illustration of tensile strength  $\sigma_B$  and tensile adhesive strength  $\sigma_c$  for the similarity ratio  $\sqrt{2}$

## 2 JIS 規格に基づく接着強さ評価法とその問題点

図 2 に，接着剤／被着材の組み合わせとして，① Resin A / S35C，② Resin B / S35C，③ Araldite / Al，④ Solder / Brass の 4 種類の組み合わせにおける突き合わせ継手の接着強さの実験値<sup>4,5)</sup> を黒丸 (実験結果の平均値) で示す。表 1 にそれぞれの材料の機械的性質を示す。図 2 に示すように， $\sigma_c^{JIS}$  は  $h$  に依存して変化的ことは古くからよく知られており，例えば市販の接着剤の特性を代表する ResinB で S35C を接着した場合

$\sigma_c^{JIS} = 76.8 \sim 13.6 \text{MPa}$  である。よって  $\sigma_c^{JIS}$  は、少なくとも  $h$  の関数  $\sigma_c^{JIS} = \sigma_c^{JIS}(h)$  として表示する必要がある。しかし、JIS 規格では接着層厚さ  $h$  に関しては、どのような記述も見あらず、考慮がされていない<sup>3)</sup>。また、ASTM や ISO など他の規格や、接着技術教本においても、接着層厚さと接着強度との関係について言及した記述は見当たらない<sup>6-10)</sup>。

なお、重ね合わせ継手や他の JIS の試験法でも、接着強さは最大荷重/接着面積で定義されている<sup>3)</sup>。重ね合わせ継手の接着強さは  $\tau_c^{JIS} = N/A$  と定義され、 $N$  = 最大荷重、 $A$  = 接着面積 ( $A = 12.5 \times 25 \text{mm}^2$ ) である。図 3 に接着面積  $A = l_b \times 25 \text{mm}$  を変化させた場合の接着強さ  $\tau_c$  の例を示す<sup>11)</sup>。

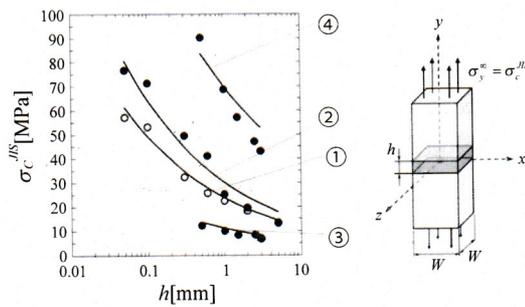


図 2 Butt joint adhesive strength expressed as  $\sigma_c^{JIS} = P/A$ ,  $P$  = ultimate tensile load  $A = W^2$  = fixed adhesive area with  $W = 12.7 \text{mm}$  (JIS)<sup>4,5)</sup>

図 3 では接着強さ  $\tau_c$  は接着長さ  $l_b$  に依存して変化している。このように、もし接着強さを最大荷重/接着面積、すなわち平均応力として表示する場合には、接着層の形状によって  $\sigma_c^{JIS} = P/A$  や、 $\tau_c^{JIS} = N/A$  が変化することに注意が必要となる。

JIS で規定される  $\sigma_c^{JIS}(h)$  のもう一つの問題点として、接着面積  $A = W^2$  の影響が考慮されていないことが挙げられる。すなわち、実用上は JIS の規定  $W^2 = (12.7 \text{mm})^2$  より、通常広い面積が接着される  $A = W^2 > (12.7)^2 \text{mm}^2$ 。しかし、その接着強さ  $\sigma_c^W(h)$  に、JIS で求めた平均応力  $\sigma_c^{JIS}(h)$  がそのまま適用可能で  $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$  であるのか、それとも低下して  $\sigma_c^W(h) < \sigma_c^{JIS}(h)$  であるのかは明らかではない。

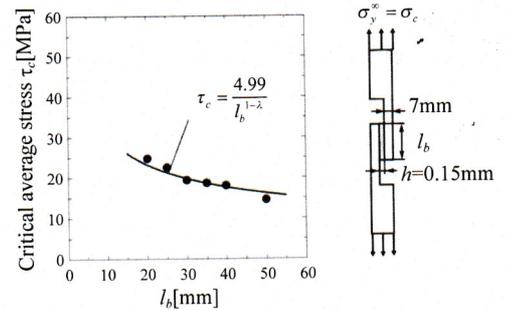


図 3 Lap joint adhesive strength expressed as  $\tau_c = P/A$ ,  $P$  = ultimate tensile load  $A$  = adhesive area under fixed  $A = l_b \times 25 \text{mm}$  when Aluminium is bonded by brittle epoxy resin<sup>11)</sup>. ( $\tau_c = 24.8 \sim 14.6 \text{MPa}$ )

表 1 Material properties for Adhesive/Adherend

Material	Young's modulus $E_y^{\text{Resin}}$ [GPa] $E_y^{\text{Steel}}$ [GPa]	Poisson's ratio $\nu$	Bulk strength $\sigma_B$ [MPa]	Dundurs parameter	
				$\alpha$	$\beta$
				Singularity index $\lambda$	
① Resin A/ S35C	3.14	0.37	65.5	0.969	0.199
	205.9	0.30	570	$\lambda = 0.685$	
② Resin B/ S35C	2.16	0.38	46.8	0.978	0.188
	205.9	0.30	570	$\lambda = 0.674$	
③ Araldite/ Al	2.1	0.36	14.8	0.941	0.205
	70	0.35	260	$\lambda = 0.714$	
④ Solder/ Brass	6.4	0.39	60	0.862	0.151
	90	0.34	205	$\lambda = 0.745$	

### 3 特異応力場の強さ ISSF で表される接着強さ

界面端部の特異応力場に注目し, 特異性指数や特異応力場について, 多くの有用な解析がなされており<sup>12-15)</sup>, 合理的な評価がなされるようになってきた<sup>16-18)</sup>。著者らは特異応力場の強さを端的に理解できるように ISSF (Intensity of Singular Stress Field) と定義し, JIS で定義される突合せ継手や重ね合わせ継手の強度が, ISSF = 一定で表されることを, 種々の接着剤と被着材の組み合わせについて実証した(後述の図5参照)<sup>19-23)</sup>。

図2に示すような角柱突合せ継手の接着剤と被着材の界面端部,  $x = \pm W/2, y = \pm h/2, z = \pm W/2$  には式(1)で示されるような特異応力場が生じる。ここで,  $K_{\sigma}$  は特異応力場の強さ ISSF を表す記号であり,  $r$  は接着界面端部からの距離,  $\lambda$  は特異性指数である。

$$\sigma_y^{Side}(x, z) \rightarrow \frac{K_{\sigma}}{r^{1-\lambda}} (r \rightarrow 0) \quad (1)$$

図2の角柱状突合せ継手を直接解析する3次元FEM解析と比較して, 2次元FEM解析, すなわち突合せ継手を板状平面ひずみ試験片として解析するのは, はるかに容易である。図4に表1の② Resin B/S35C について, 2次元解析結果  $K_{\sigma}^{2D} = 1.204 \pm 0.172 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$  と3次元解析結果  $K_{\sigma}^{Side} = 1.227 \pm 0.164 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$  を比較して示す<sup>24)</sup>。図2の図中に示す  $\sigma_c^{JIS}(h) = 3.18/h^{1-\lambda}$  は  $K_{\sigma}^{2D} = 1.204 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$  より求めた結果である。図4のResin B/S35Cでは, 2次元解析結果と, 3次元解析結果はほとんど一致する。図4には, 角柱状継手角部の特異応力場の強さの一定値も示している。接着継手の強度はこれら3つのうちの1つで表現できており, 簡便な2次元解析の有用性が確認される。なお, 角部には他の界面縁よりも特異性指数の観点から強い特異場が存在しているが, その範囲は限定されており, また, 通常角部には面取りも施されるので, 破壊起点は角部以外の界面縁から生じる。よって以下では, 簡便に利用できて, 理解が容易な2次元FEM解析を中心に平均応力で表される接着強さの寸法効果を議論する。

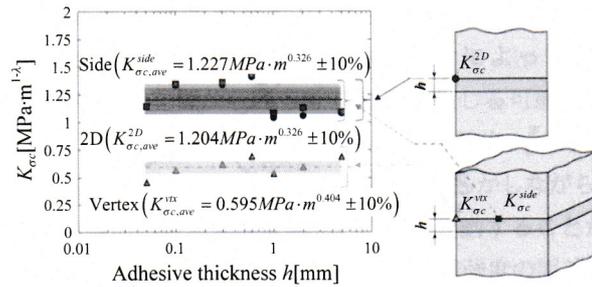


図4 Prismatic butt joint strength for ② in Table 1 can be expressed as a ISSF=const. obtained by the two-dimensional FEM analysis

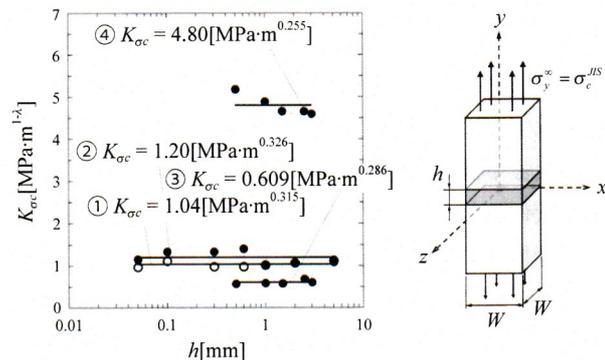


図5 Butt joint strength in Fig.2 can be expressed as constant ISSF for ①~④ in Fig.2

図5に例として① Resin A / S35C, ② Resin B / S35C, ③ Araldite / Al, ④ Solder / Brass の4種類の組み合わせにおける突合せ継手の破断時のISSFを示す。図5の一定値を利用すると, 図2に示す, 曲線①  $\sigma_c = 2.70/h^{1-\lambda}$  (Resin A / S35C), ②  $\sigma_c = 3.18/h^{1-\lambda}$  (Resin B / S35C), ③  $\sigma_c = 1.57/h^{1-\lambda}$  (Araldite / Al), ④  $\sigma_c = 1.20/h^{1-\lambda}$  (Solder / Brass) の曲線が得られる。図3に示す重ね合わせ継手の  $\tau_c = 4.99/l_b^{1-\lambda}$  の曲線もISSF = 一定から得られる。

接着強度がJISで規定される平均応力ではなく, 特異応力場の強さISSF = 一定で表されることは, 突き合わせ継手が一見すると応力集中の無い平滑試験片のように見えるので, 理解が難しいかもしれない。しかし, 同様のことは, 過去の破壊力学分野の研究でも経験してきている。すなわち, き裂材の脆性破壊強度が応力拡大係数K(き裂のISSFに相当)で表現できることは, 今日ではよく知られている。図6に片側き裂を有する平板

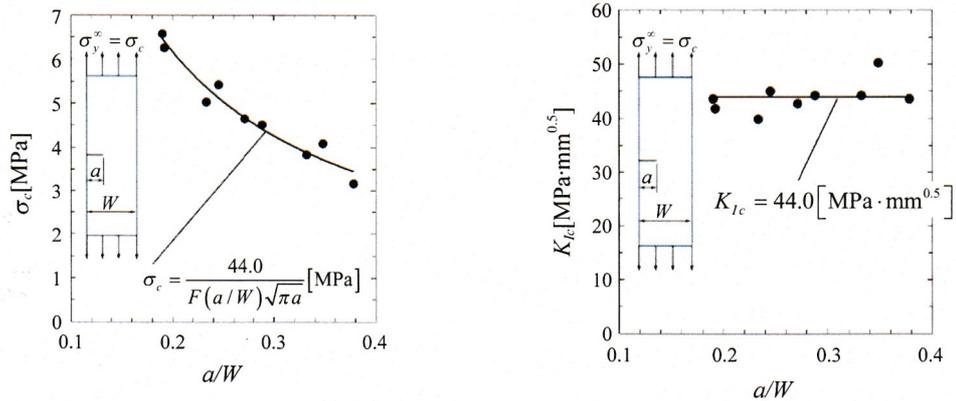


図6 Fracture strength of an edge cracked acrylic resin plate can be expressed as a constant stress intensity factor<sup>25)</sup>

の破断応力 $\sigma_c$ および破断時の応力拡大係数 $K_{Ic}$ と相対き裂長さ $a/W$ の関係を示す<sup>25)</sup>。板幅 $W$ に対してき裂長さ $a$ が大きくなると破断応力 $\sigma_c$ は低下するのに対して、応力拡大係数 $K_{Ic}$ は $a/W$ に依存せず一定である。図5の突合せ継手における接着層厚さ $h$ とISSFの関係は、図6のき裂材におけるき裂長さ $a$ と応力拡大係数 $K$ の関係とよく似ている。特異応力が生じる問題では、破壊条件を表現するために、平均応力ではなく、応力拡大係数を用いるのが有用である。しかし、応力拡大係数 $K$ が知られていない時代では平均応力 $\sigma_c$ を使用せざるを得なかった。接着強度の問題も同じように考えることができる。

突合せ継手の場合、接着層厚さ $h$ がき裂長さ $a$ に相当するが両者には若干の違いがある。すなわち、図6のき裂材の特異場はき裂先端の1箇所であるのに対して、突合せ継手では特異場が上下の接着端の2箇所ある。よって、 $h$ が小さいとその干渉によってISSFが減少するので、図6のき裂材におけるき裂長さ $a$ と、図5の突合せ継手における $h$ がき裂長さ $a$ と類似の挙動を示す。このように、接着層厚さ $h$ は、き裂長さ $a$ とは異なり、接着端部上下2箇所の特異場の干渉効果に関係する量であるため、 $h/W \geq 1$ では干渉が無くなるのでISSFは一定になる。つまり、ISSFに対する接着層厚さ $h$ の影響(干渉効果)は、図6のき裂材に同じ長さで距離が $h$ の平行な2つのき裂が存在する場合に、その応力拡大係数 $K$ が距離 $h$ によって変化する影響と似ている。

突き合わせ継手の接着強度を平均応力 $\sigma_c^{ISS} = P/A$ で評価する場合、もし、接着層厚さ $h$ が十分大きい( $h/W \geq 1$ )ならば、特異場の干渉が無くなるのでISSFは $h$ に依存せず一定となり $\sigma_c^{ISS}$ で評価可能である。しかし、現実には $h=0.05\sim 1.0\text{mm}$ が実用上の接着層厚さの範囲であるのでISSFによる評価が必要である。また、 $h/W \geq 1$ を満足しても接着面積( $A=W^2$ )が変化するとISSFは変化するので $\sigma_c^{ISS} = P/A$ は変化する。

#### 4 突合せ継手の接着強さの幾何形状寸法依存性

本節では、式(1)で定義される平均接着強度 $\sigma_c^W(h)$ の数値解析に基づく変化を、接着強度がISSF=一定で表せることを用いて考察する。平均接着強度 $\sigma_c^W(h)$ は、式(2)のように求めることができる。

$$\sigma_c^W(h) = \frac{K_{\sigma c}}{F_{\sigma}^*} \frac{1}{h^{1-\lambda}} = \frac{C}{h^{1-\lambda}}, \quad (2)$$

$$C = \frac{K_{\sigma c}}{F_{\sigma}^*} (C: \text{Constant depending on } \alpha, \beta),$$

For Resin/Metal,

$$F_{\sigma}^* = F_{\sigma}^*(\alpha, \beta, h/W) \approx F_{\sigma}^*(\alpha, \beta) \approx 0.3 \sim 0.6$$

when  $0 \leq h/W \leq 0.1$ .

$$K_{\sigma c} \approx 0.609 \sim 2.24 \text{MPa} \cdot \text{m}^{-1-\lambda}, \lambda = 0.5946 \sim 0.9348$$

突合せ継手の幾何形状寸法の変化は以下のケースが考えられる。ケース①：全体形状が一定で接着層のサイズが相対的に変化するケース、ケース②：接着層の厚さ $h$

のみが変化する場合、ケース③：試験片幅  $W$  のみが変化する場合。これら3つのケースのうち、実験が行われているのはケース②のみであり、ケース①および③については実験的研究が行われていない。従って本節では、ISSF = 一定の条件に基づく数値実験を用いて、これらのケースの接着強度を検討する。

図7(a)は、接着層の形状比  $h/W$  を固定し、接着層の全体寸法を相似的に変化させた場合の Resin B/Steel および Araldite/Aluminum の組み合わせにおける角柱状突合せ継手の引張接着強度を示す。図7(a)におけるプロット点は JIS に基づく実験結果  $\sigma_c^{JIS}$  を示す。図7(a)の Resin B/Steel の組み合わせの  $h/W=0.1/12.7$  および図7(a)の Araldite/Aluminum の組み合わせの  $h/W=0.5/10$  の結果が示すように、接着剤形状が10倍になると接着強度は JIS 強度  $\sigma_c^{JIS}$  の50%に低下し、100倍になると接着強度は JIS 強度  $\sigma_c^{JIS}$  の20%に低下する。図7(a)では、接着層形状が相似であるため、 $F_\sigma^*(h/W)$  は一定である。試験片の幅  $W$  と接着層の厚さ  $h$  が比例して変化する場合、試験片の接着強度  $\sigma_c$  は式(3)で表すことができ、その結果、図7(a)が得られる。

For Resin B/S35C

$$\sigma_c^W(h) = \frac{K_{\sigma c}}{\left[ F_\sigma^* \left( \frac{h}{W} \right) h^{1-\lambda} \right]} = \frac{3.18}{h^{1-\lambda}} [\text{MPa}] \quad (3a)$$

For  $h/W = 0.1/12.7 \sim 1.0/12.7$ ,

$$F_\sigma^*(h/W) = 0.377, K_{\sigma c} = 1.20 \text{MPa} \cdot m^{0.326}$$

For Araldite/Aluminum

$$\sigma_c^W(h) = \frac{K_{\sigma c}}{\left[ F_\sigma^* \left( \frac{h}{W} \right) h^{1-\lambda} \right]} = \frac{1.51}{h^{1-\lambda}} [\text{MPa}] \quad (3b)$$

For  $h/W = 0.1/10 \sim 1.0/10$ ,

$$F_\sigma^*(h/W) = 0.403, K_{\sigma c} = 0.609 \text{MPa} \cdot m^{0.286}$$

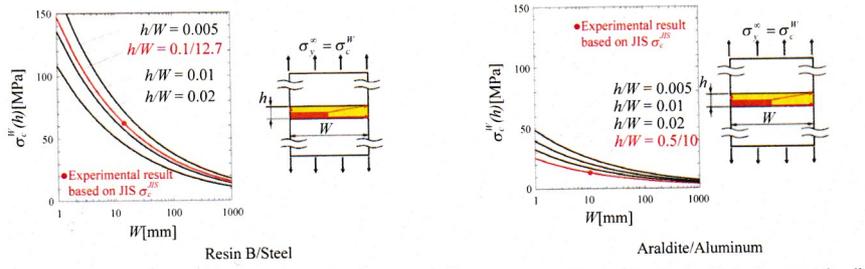
実用的な接着層厚さ  $h$  の範囲  $h=0.05\sim 0.6\text{mm}$  および実用的な接着面積  $W \geq 12.7\text{mm}$  から、相対接着厚さ  $h/W$  は  $h/W \leq 0.0472$  の範囲となる。従って、Resin B/S35C においては  $F_\sigma^*(0.1/12.7) \approx \text{constant} \approx 0.377$  となり、Araldite/Aluminum においては、 $F_\sigma^*(0.5/10) \approx \text{constant} \approx 0.403$  となる。

接着層の厚さが比較的大きい場合、すなわち  $h/W \approx 0.1$  の場合、材料の組み合わせによっては、 $F_\sigma^*(h/W)$  一定値から約5%の誤差が生じる可能性がある。このような場合、予測される引張強度  $\sigma_c^W(h)$  にも約5%の誤差が生じる可能性がある。しかしながら、実際の製品の接着強度は約10~20%変動することがあり、式(3)の誤差は実際の製品の接着強度の誤差範囲内に収まる。

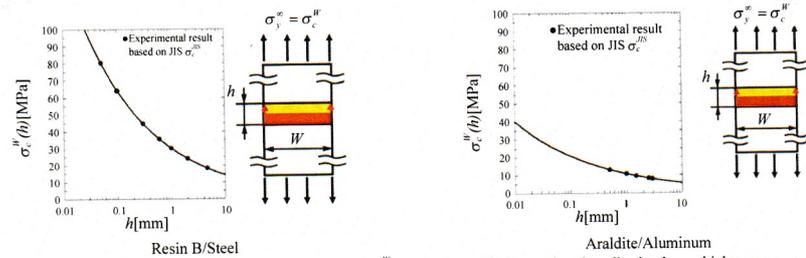
次に、図7(b)は接着層厚さ  $h$  を変化させた場合の接着強度を示す。ここで、 $W$  は一定である。接着面積が JIS 規格とは異なる場合、例えば、 $A = W^2 = (10\text{mm})^2 \sim \infty$  であっても、 $F_\sigma^*(h/W)$  の結果から、接着強度は JIS 試験片を用いて  $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$  と予測できる。Resin B/Steel の場合、図7(b)に示すように、接着強度  $\sigma_c^W(h)$  は接着層厚さ  $h$  の増加に伴い減少する。図7(b)  $\sigma_c^W(h) - h$  の関係は、 $h/W = 0.1/12.7 = 0.007874$  において図7(a)の  $\sigma_c^W(h) - W$  関係に対応する。

Araldite/Aluminum の場合、図7(b)に示すように、Resin B/Steel と同様に接着層厚さ  $h$  の増加に伴い接着強度  $\sigma_c^{JIS}(h)$  は減少する。図7(b)の  $\sigma_c^W(h) - h$  関係は、 $h/W = 0.5/10 = 0.05$  において図7(a)の  $\sigma_c^W(h) - W$  に対応する。このように、式(3)を用いて実際に試験されていない接着形状の接着強度  $\sigma_c^W(h)$  を予測できる。例えば、Araldite/Aluminum の場合、 $h \geq 0.5\text{mm}$  でのみ実験結果が得られているが、式(3)を用いて  $h < 0.5\text{mm}$  における接着強度  $\sigma_c^W(h)$  を予測できる。例えば、 $h = 0.1\text{mm}$  における接着強度  $\sigma_c^W(h = 0.1\text{mm})$  は、 $\sigma_c^W(h = 0.1\text{mm}) = 20.8\text{MPa}$  と予測できる。

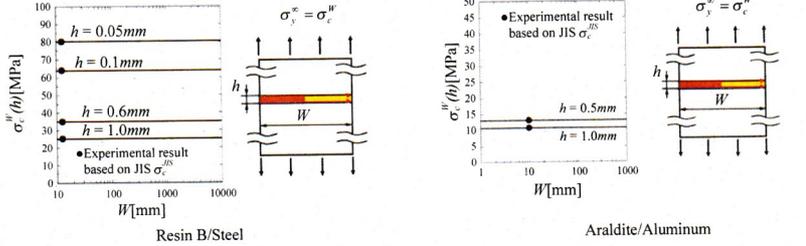
図7(c)は、 $h$  一定で固定し、試験片幅  $W$  を変化させた際の接着強度を示す。接着強度は破断時の ISSF  $K_{\sigma c}$  によって支配される。すなわち  $K_{\sigma c} = F_\sigma^*(h/W) \cdot \sigma_c \cdot h^{1-\lambda}$  であるため、試験片幅がどれほど大きくなっても、図7(c)に示す通り  $\sigma_c^W(h)$  は一定となる。したがって、JIS 試験片と実際の接着において接着層厚さ  $h$  が同一であれば、試験片幅  $W$  に関わらず同一の接着強度  $\sigma_c$  が得られる。実際の接着剤  $h$  の厚さを試験片厚さと一致させることは困難に思えるかもしれないが、接着面積当たりの接着剤塗布量を制御するこ



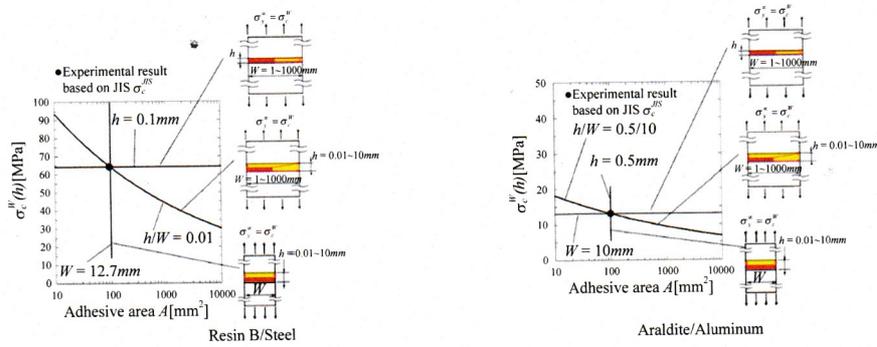
(a)  $\sigma_c^W$  vs.  $W$  under fixed  $h/W$  (Average adhesive strength  $\sigma_c^W$  decreases with increasing the adhesive dimension proportionally.)



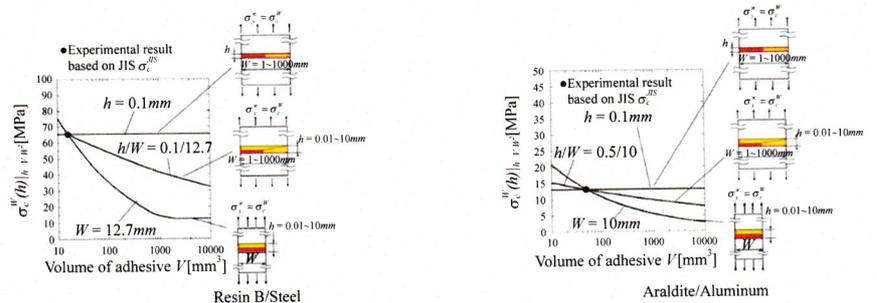
(b)  $\sigma_c^W$  vs.  $h$  under fixed  $W$  (Average adhesive strength  $\sigma_c^W$  increasing with decreasing the adhesive layer thickness  $h$  independent of  $W$ .)



(c)  $\sigma_c^W$  vs.  $W$  under fixed  $h$  (Average adhesive strength  $\sigma_c^W$  does not change under fixed  $h$ .)



(d)  $\sigma_c^W$  vs. adhesive area  $A=W^2$  (Average adhesive strength  $\sigma_c^W$  decreases with increasing adhesive area  $A$  except under fixed  $h$ .)



(e)  $\sigma_c^W$  vs. volume of adhesive  $V$  (Average adhesive strength  $\sigma_c^W$  decreases with increasing volume of adhesive  $V$  except under fixed  $h$ .)

7 Adhesive strength  $\sigma_c$  defined as an average stress  $\sigma_c = P/A$  estimated from  $ISSF=const.$  in three models for Resin B/S35C and Araldite / Aluminum. The solid circle denotes experimental results based on JIS  $\sigma_c^{JIS}$

とで容易に達成可能である。

図7 (d) は，図7 (a) ～ (c) に示すケース①～③において，接着面積  $A$  を変化させた場合の接着強度  $\sigma_c^W(h)$  を示す。また，図7 (e) は，図7 (a) ～ (c) に示すケース①～③において，接着層全体の体積  $V$  を変化させた場合の接着強度  $\sigma_c^W(h)$  を示している。図7 (d), (e) に示すように，同じ接着面積  $A$ ，あるいは同じ接着剤体積  $V$  のもとでも，接着強度  $\sigma_c^W(h)$  は  $h$  によって変化する。図7 (e) に示すように， $h/W = 0.1/12.7$  および  $h/W = 0.5/10$  の場合，接着形状が10倍になると接着強度は JIS 強度  $\sigma_c^{JIS}$  の50%に低下し，100倍になると接着強度は JIS 強度  $\sigma_c^{JIS}$  の20%に低下する。これは，前述のように接着層厚さ  $h$  の増加に伴い接着強度  $\sigma_c^W(h)$  が減少するが，試験片幅  $W$  には依存しないためである。接着強度  $\sigma_c^W(h)$  に直接影響しない接着面積  $A$  や接着層体積  $V$  ではなく，接着層厚さ  $h$  を接着強度  $\sigma_c^W(h)$  の支配因子と考えるべきである。

図7の結果は，接着層内の欠陥数などの統計的要因を考慮せず，ISSF = 一定と仮定した均質接着剤に基づく弾性理論に基づいている。固定された接着層厚さ  $h$  のもとで，接着面積または接着層体積の増加に伴い実験的に接着強度  $\sigma_c$  が低下する場合，すなわち ISSF 一定の条件下であっても，その原因は接着層内に含まれる欠陥の増加にある可能性がある。

## 5 結 言

接着継手の強度が，接着層の形状・寸法によってどのように変わるか，特異応力場の強さ ISSF の観点から考察した。また，その妥当性を，接着層の弾性的性質や接着層に生じる塑性域の大きさから確認した。以下に結論をまとめる。

- (1) 接着面積が JIS 試験片より，はるかに大きい場合でも，JIS 試験片の接着層厚さ  $h$  と実製品で用いる接着層厚さ  $h$  を揃えることで，JIS 試験片によって得られた引張接着強さ  $\sigma_c^{JIS}(h) = P/A$  を実製品の強度に  $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$  として適用可能である。
- (2) 接着強さ  $\sigma_c^W(h) = P/A$  が実製品の評価に  $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$  として適用可能となる理由は，

$h/W \leq 0.1$  の範囲で，接着面積が異なっても，無次元化された ISSF  $F_\sigma^* = K_\sigma / (\sigma h^{1-\lambda}) = \text{一定}$  が成り立つためである。すなわち，ISSF は試験片幅  $W$  に依存せず，接着層厚さ  $h$  のみに依存するためである。

- (3) 接着面積の増加とともに，接着層厚さ  $h$  も増加させた場合，すなわち JIS 試験片の接着層と相似な形状では， $\sigma_c^W(h')$  は低下する，すなわち， $\sigma_c^W(h') < \sigma_c^{JIS}(h), h' > h$  である。このように接着面積当たりの最大荷重  $\sigma_c$  を接着層厚さ  $h$  が異なる場合に適用するときは，十分な注意が必要である。

## 参考文献

- 1) 自動車技術，Vol. 77, No. 7, 「特集 異材接合と適材適所によるモビリティのマルチマテリアル化」, (2023)
- 2) 野田尚昭：金属と樹脂の界面力学と特異応力場の強さに基づく新しい接着強度評価法，自動車技術，Vol. 77, No. 7, pp. 2-11, (2023)
- 3) 日本産業規格，JISK6848 接着剤—接着強さ試験方法 (1999)
- 4) 鈴木靖昭：鋼のスカーフおよびバット継手の引張り接着強度（第3報，接着層の厚さと接着強度との関係），日本機械学会論文集，Vol. 54, No. 487, pp. 514-522, (1987)
- 5) A. R. Akisanya, C. S. Meng : Initiation of fracture at the interface corner of bi-material joints. Journal of Mechanical Physics and Solids, Vol. 51, No. 1, pp. 27 - 46. (2003)
- 6) ASTM D5656 Standard test method for thick-adherend metal lap-shear joints for determination of the stress-strain behavior of adhesives in shear by tension loading. (2005)
- 7) ISO 11003-1 : 1993, 接着剤—構造接着のせん断虚構の測定—第一部：突合せ接合中空円筒ねじり試験方法, (1993)
- 8) 日本接着学会，接着ハンドブック第4版，日刊工業新聞社, (2007)
- 9) 日本接着学会，プロを目指す人のための接着技術教本，日刊工業新聞社, (2009)
- 10) 小野昌孝，JIS 使い方シリーズ 新版接着と接着剤—その選び方・使い方—，日本規格協会, (1989)
- 11) J. H. Park, J. H. Choi, J. H. Kweon : Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses. Composite Structures, Vol. 92, pp. 2226-2235, (2010)
- 12) D. B. Bogy : Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges

- under normal and shear loading, Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, No. 3, pp. 460-466, (1968)
- 13) D. B. Bogy : Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions, Transactions of the ASME Journal of Applied of Mechanics, Vol. 38, No. 2, pp. 377-386, (1971)
- 14) V. L. Hein, F. Erdogan : Stress singularities in a two-material wedge, International Journal of Fracture, Vol. 7, pp. 317-330. (1971)
- 15) D. H. Chen, H. Nisitani : Singular stress field near the corner of jointed dissimilar materials, Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 60, No. 3, pp. 607-613, (1993)
- 16) 渋谷忠弘 : 異種材料接合端部のはく離発生強度の破壊力学的評価と電子デバイスへの適用”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 7, No. 7, pp. 639 - 644, (2004)
- 17) 白鳥正樹 : 電子デバイス実装における接合の諸問題, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 60, No. 577, pp. 1905 - 1912, (1994)
- 18) 服部敏雄, 坂田荘司, 初田俊雄, 村上元 : 応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価, 日本機械学会論文集 A 編 Vol. 54, No. 499, pp. 597 - 603, (1988)
- 19) 野田尚昭, 宮崎達二郎, 内木場卓巳, 李戎, 佐野義一, 高瀬康 : 接着接合板における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法について, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 132 - 142, (2014)
- 20) 野田尚昭, 高木怜, 王彪, 王思瑞, 石田大貴, 佐野義一, 宮崎達二郎 : スカーフ継手における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法, 自動車技術会論文集, Vol. 52, No. 4, pp. 905-910, (2021)
- 21) 野田尚昭, 李戎, 佐野義一, 高瀬康, 高木怜, 宮崎達二郎 : 単純重ね合わせ継手を用いて二重重合わせ継手と同一強度を得る方法について, 設計工学, Vol. 52 (10), pp. 621-628, (2017)
- 22) 高木怜, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 鈴木靖昭, 趙振綱, 張季婷 : 角柱突き合わせ継手の破壊起点の位置と特異応力場の強さとの関係について, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 23, No. 6, pp. 507-515, (2020)
- 23) 宮崎達二郎, 井上卓真, 野田尚昭, 佐野義一, 3次元異材接合体の界面端角部に生じる特異応力場の簡便で効率的な評価法について, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 864, p. 18-00013
- 24) 古口日出男, ヴィセシントアッタポーン : 有限要素法による接合体の界面自由端近傍における弾塑性特異応力場の解析, 日本材料学会 学術講演会講演論文集, Vol. 55, pp. 259-260, (2006)
- 25) 原田昭治, 野田尚昭, 深迫泉, 遠藤達雄, ぜい性材料の破壊じん性に及ぼす初期スリットの鋭さの影響, 材料, Vol. 35, No. 397, pp. 1157-1162, (1986)