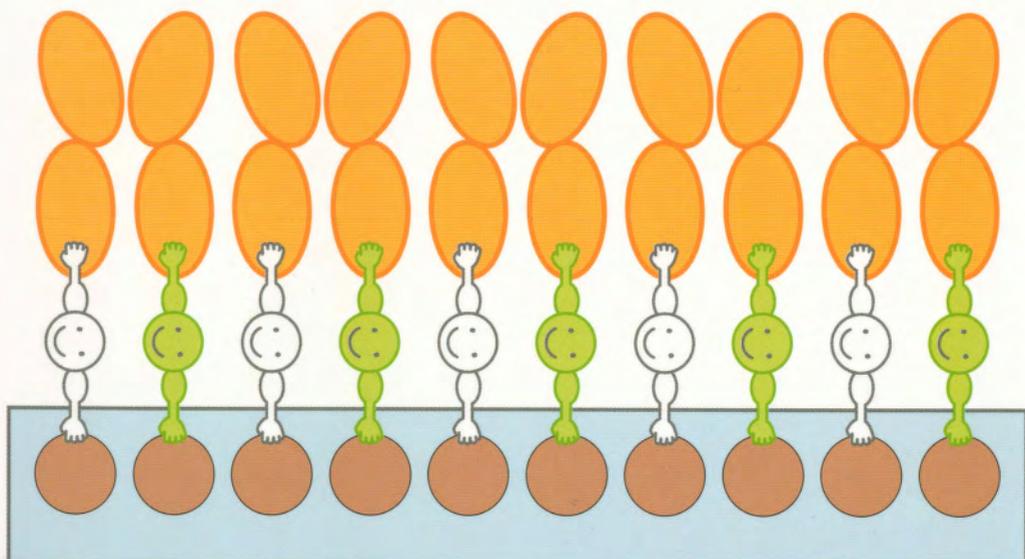


高信頼性を引き出す 接着設計技術

基礎から耐久性、寿命、安全率評価まで

原賀 康介 著

Haraga Kosuke



構造設計、材料設計、工程設計、信頼性確保まで

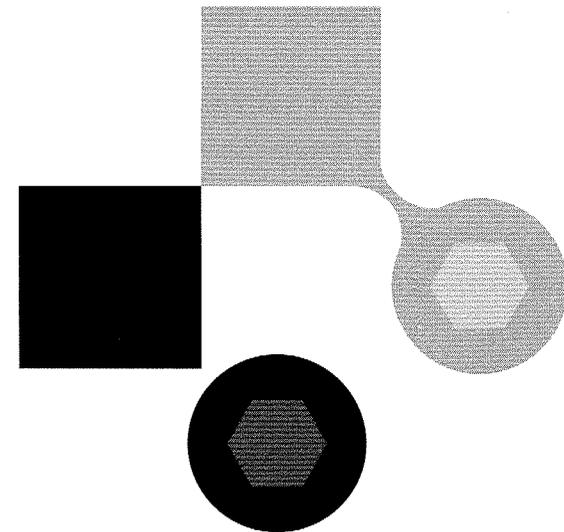
接着によるモノづくりで
失敗しない必須事項を網羅

日刊工業新聞社

2. 接着剤の分類	238
2.1 成分による分類	238
2.2 形態による分類	238
2.3 固化・接着方法による分類	241
2.4 機能による分類	241
3. 各種接着剤の特性	243
4. エンジニアリング接着剤の特性	243
4.1 エポキシ系接着剤	244
4.2 アクリル系接着剤	245
4.3 ウレタン系接着剤	246
4.4 シリコン系接着剤	246
4.5 嫌気性接着剤	247
4.6 光硬化性接着剤	248
4.7 瞬間接着剤 (シアノアクリレート系接着剤)	248
あとがき	250
索引	251

第 1 章

接着の基礎知識



機器の組立てには各種の接合法が使われています。設計の段階では、どの接合法を使うのが最も適しているかを考える必要があります。そのためには各種の接合法の特徴と欠点を十分に知っておくことが必要です。アーク溶接やスポット溶接、ろう付けやはんだ付け、ねじやボルト・ナット、リベット、かしめなどについては構造設計者の方々はよくご存じのところですが、接着剤を用いる接着接合についてはあまり知られていないのが実情です。そこで、本章では、まず、接着接合の特徴・機能と得られる効果と欠点について説明しています。

実際に接着剤を使いこなすためには、接着剤の選定や被着材の表面状態、接着部の構造、強度、信頼性などを最適化していかなければなりません。それらには多くの因子が影響しており、影響する多くの因子とその影響について知らなければなりません。これらについては、第2章～第5章で詳しく説明しますが、第2章～第5章に書かれていることがなぜ必要なのかを理解するためには、接着がどのような原理で成り立っているのかというメカニズムを理解しておかなければなりません。本章では、接着のメカニズムについても説明しています。

1.1 接着と他の接合法の比較

部品を接合して組み立てる方法としては、従来から、ねじ、ボルト・ナット、溶接、ろう付け、はんだ付け、リベット、かしめ、焼ばめ・圧入、接着・粘着など種々の方法が用いられています。表1.1に、各種接合法の特性の比較を示しました。接着剤を用いる接着接合は、他の接合法に比べて多くの特徴を有しており、接着接合を活用することによって種々の効果が得られることがわかります。

読者の皆さんが、接着に対して最も不安に思うことは接合強度の弱さではないでしょうか。図1.1^{1), 2)}に、接着剤による接合とアーク溶接、スポット溶接、リベット（ファスナー）、接着とリベットの併用の各接合法のせん断強度の

表 1.1 各種接合法の特性の比較

	アーク溶接	スポット溶接	ボルト・ナット	リベット	接着	接着・リベット併用
接合ひずみ・変形	×	×	△	△	◎	△
外観・平滑性	△	△	×	△	○	△
異種材接合	×	×	○	○	◎	◎
電食防止	×	×	×	×	◎	○
シール性	○	×	×	×	◎	◎
隙間充填性（部品精度吸収）	△	×	×	×	◎	○
薄板高強度接合	×	×	×	×	◎	◎
耐振性	○	○	×	×	◎	◎
筐体剛性	○	×	×	×	◎	○
振動吸収性	×	×	△	△	○	○
耐熱温度	◎	◎	◎	◎	△	△
設備費用	×	×	◎	◎	◎	◎
接合作業の容易さ	×	○	◎	◎	◎	◎
仕上げ作業の容易さ	×	△	◎	△	○	○
低温接合	×	×	◎	◎	◎	◎
接合時間	△	◎	○	◎	×	○
塗装耐熱性	◎	◎	◎	◎	○	○

問題の多さ × > △ > ○ > ◎

比較を示しました。試験片は、厚さ 2.3 mm の鋼板同士の重ね合わせ継手で、形状・寸法は図 1.2²⁾ に示しています。比較に使用した接着剤は、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤と呼ばれるものです。この結果から、接着剤による接合は、スポット溶接やリベットよりも強く、アーク溶接と同等の強度を有することがわかります。

図 1.3 は、銀河系宇宙の精密立体地図を作るという国立天文台の VERA プロジェクトで使用されている直径 20 m のパラボラ電波望遠鏡です。水沢、小笠原、入来、石垣島にある 4 台を連携させることで月面上の 1 円玉を判別でき

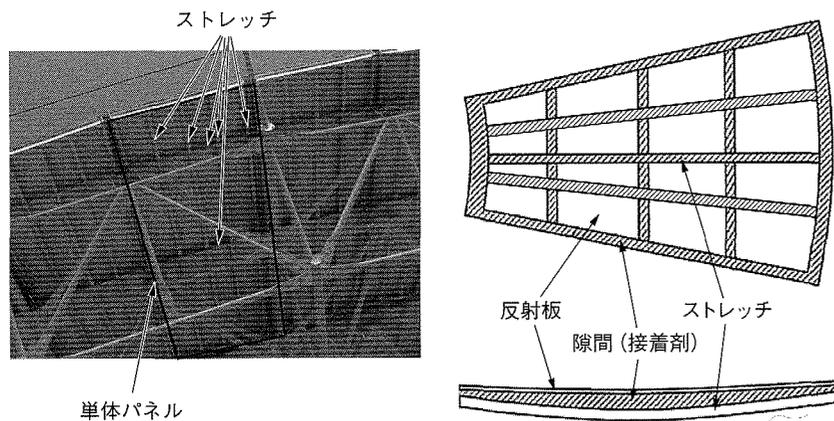


図 1.4 パラボラ反射鏡の裏面と単体パネルの構造

されており、精度があまり高くできないため、反射板とストレッチの間には数 mm の隙間ができてしまいます。このようなパネルの組立て方について考えてみましょう。

まず、アーク溶接での組立てです。アーク溶接で隙間を埋めて接合することはできますが、熱ひずみが大きく、とても高精度な鏡面を得ることはできません。スポット溶接や皿頭のねじでは反射板が補強材の曲面に沿わされてしまい、これも精度は出ません。また、スポット溶接やねじなどの点接合では強度的に弱いため、多点での固定が必要となります。反射面には電極の圧痕やねじ頭の段差も残り、パテ埋めで補修が必要です。補強枠を反射板と同じ精度に機械加工すれば鏡面精度は出せますが、加工は容易ではありません。そこで使用されているのが接着接合なのです。

接着剤は隙間埋めと接合を同時に行い、高精度の曲面を容易に得ることができます。この電波望遠鏡では、風速毎秒 90 m (時速 334 km) の台風の風圧でも剥離や変形を起こさず、30 年以上の耐用年数が必要なのですが、接着剤はこの要求を十分に満足できる強度と耐久性を有しています。ここでは、室温で硬化する二液型変性アクリル系接着剤が使われています。

造船所で大型船舶がアーク溶接で組み立てられているのは、よくご存じだと思います。大型船では、船体は厚さ 30 mm ほどの鋼板で作られています。アーク溶接であれば板同士の突合せ接合で鋼板と同等の接合強度を容易に得ることができます。リベットやボルトなどは穴をあけるため、船体の組立てには適していません。接着剤で、30 mm 厚さの鋼板自体の引張り強度と同等の接着強度を出そうとすると、重ね合わせ長さを 60 cm も取る必要があります、とてもアーク溶接に太刀打ちできるものではありません。

このように、用途によって最適な接合法を選択する必要があります。最適な接合を選定するためには、各種の接合法の特徴と欠点を知っておく必要があります。以下に、接着剤による接合の特徴・機能と欠点について説明します。

1.2 接着の特徴・機能と得られる効果

接着剤による接合には、次に示すような多くの特徴・機能があり、多くの効果を生み出すことができます。

(1) 異種材の接合—適材適所の材料選定—

金属、プラスチック、ガラス、セラミックス、複合材料、木材、紙などの広範囲の材料の接合が可能です。接着剤の選定は必要ですが、同種材料同士や異種材料同士でも比較的容易に接合ができます。

接着を用いれば、鋼とアルミニウム、ステンレスと亜鉛めっき鋼板、金属とプラスチックなど材料選定の範囲は大きく拡大し、適材適所の材料設計をすることが可能になります。適材適所の材料設計により、軽量化、材料費低減、高機能化、高強度化、意匠性向上などの効果を得ることができるのです。

(2) 部品の表面での接合—小型化、高密度化—

図 1.5³⁾ に示すように、ねじやリベットで部品を固定する場合には、ねじを締めるためのスペースが必要です。しかし、接着では部品の表面を直接接合面

表 1.4 接着・リベット併用筐体と溶接筐体の共振周波数の比較

	加振方向	接着・リベット併用筐体	溶接筐体
共振周波数 (Hz)	左右	8.8	5.0
	前後	9.5	9.3
	上下	>55.0	>55.0

板厚を溶接の 3.2 mm から 2.3 mm に減らしたにもかかわらず、溶接より高い共振周波数が得られることがわかります。

(8) 火気レス工法

アーク溶接では溶接アーク、スポット溶接では火花、溶接後のグラインダー仕上げでも火花が発生します。これらの火気の近くに燃えやすいものがある場合には、防火シートでの養生などの作業が必要となります。近くで塗装を行っている場合には、塗料から出た溶剤への引火にも注意が必要です。既存建造物や工場などでの補修・改修工事や船内での擬装工事などでは火気レスの接合方法が望まれています。接着接合では火気を用いないので、火気レス工法が可能になるのです。

(9) 熟練技能は不要—素人工化—

アーク溶接やひずみ修正作業には高度な熟練技能者が必要ですが、接着作業には特殊な熟練技能は必要ありません。熟練技能者の高齢化により空洞化が進んでいる昨今、素人工化による作業者の確保や人件費の低減などに効果が得られます。

(10) 低エネルギー接合—組立て工程の省エネルギー化—

接着接合の特徴である低温接合、低ひずみ接合（ひずみ修正作業の廃止）、隙間充填性（部品の加工精度低減）、面接合による応力分散（薄板化）などにより、製造工程において使用される電力や加熱燃料などのエネルギーを削減することができます。表 1.2 には、制御盤用筐体の製造における使用エネルギー

量の比較を示しました。

開発途上国では突然の停電も多いため、室温硬化型接着剤を用いた手作業接着工程は、停電時でも組立て作業を続行できるということから、接着が採用されているケースもあります。

(11) 大がかりな設備が不要

接着作業には高価な設備はほとんど必要ありません。また、室温硬化型の接着剤での手作業接着の場合は作業場所を限定されないため、負荷変動に合わせた柔軟な生産計画や出張先、工事現場での作業にも容易に対応が可能です。

1.3 接着の欠点

接着には様々な特徴・機能があることを述べましたが、良いことばかりではなく、次に示すような欠点もあります。

(1) 界面を有する結合である

接着剤による接合は、接着剤と部品表面での接合であり、接合後も界面が残っています。溶接では界面は残りません。接着される部品の表面の状態を、常に同じ状態に管理することは困難です。そのため、接着接合では強度がばらつきやすいという問題があります。

(2) 化学的な反応や結合が接着強度のベースである

接着剤と部品表面とは化学的に結合しています。また、接着剤自体が化学製品であり、硬化反応は化学的に起こります。硬化前や硬化後の物性も化学的な組成に依存しています。このように、接着は化学的なものなので、可視化しにくく、機械系技術者には理解しにくいという面があります。

るのかという予測を正確に行うには、耐久性評価と寿命予測の知識が必要になります。耐久性、寿命予測については第4章、第5章に詳しく説明しています。

(8) 設計基準が明確でない

多くの検証試験なしで接着を使用したい場合には、設計基準が必要となります。しかし、接着に関しては、溶接やねじ、ボルトなどのように強度面での設計基準は明確になっていません。これは、接着剤の種類が非常に多く、部品の材料も多種多様であり、標準というものがないためと思われます。しかし、設計基準なしではいつまでたっても接着は一人前の接合方法とはなり得ません。そこで、本書では、接着の設計基準を提供することも大きな目的としており、第5章に詳しく述べています。

(9) 手離れが悪い(固まるまで時間が掛かる)

瞬間接着剤のように数秒で硬化する接着剤もありますが、一般の接着剤では数分から数時間というオーダーの硬化時間が必要です。じっと待っているのでは生産性は上がりません。接着剤の上手な使い方としては、接着剤が有する欠点は別の方法で補って、総合的に接着のメリットを生かすことが重要で、例えば、第2章で詳しく説明しているように、接着剤を塗布した後に接着剤の上からスポット溶接を行うウェルドボンディング、接着とリベット(ファスナー)を併用するリベットボンディング、接着とかしめの併用、接着剤と両面テープの併用などが自動車や電機機器などの組立てでは多用されています。

(10) やりなおしが困難

接着剤が硬化した後に不具合が見つかった場合に、容易に分解することは困難です。最近では、リサイクルのための分解のしやすい接着剤や、部品の加工のために仮接着して加工後に容易に取り外せる接着剤も種類が増加していますが、高強度、高耐久性の接合性能と易分解性を兼ね備えたものはまだないのが実情です。

(11) 接着した後の検査が困難

接着後に非破壊で接着部の健全性を検査することは事実上困難です。航空機用ハニカム部品などの特定の部品についての検査法はありますが、この方法を種々の部品に汎用的に利用する段階には至っていません。

接着は組立て後の検査ではなく、作業工程での作業管理で品質を確保するのが基本なのです¹²⁾。このような点から、抜けがないように管理項目、管理方法、管理基準を明確にして取り組むことが必要となります。

以上に述べたように、接着剤を用いる接着接合には種々の欠点や問題点、課題があります。しかし、ねじ、ボルト、溶接、ろう付け、はんだ付けなど他の接合方法でも種々の欠点や問題点、課題を抱えている点では同じです。

欠点があるから使わないではなくて、欠点をいかにカバーして利点をいかにうまく使いこなすかを考えることが大切なのです。欠点のないものなどないのですから。

1.4 接着のメカニズム

接着の特徴・機能を活用して種々の効果を得るためには、欠点を克服する必要があります。接着の欠点の中で、界面を有する接合、化学的反応や結合は、接着の本質に関わる点であり、接着の欠点を克服するためには、接着の原理(メカニズム)を理解することが必要です。接着の原理は決して難しいものではありません。以下に、接着の過程に沿ってメカニズムを説明します。

1.4.1 接着の過程

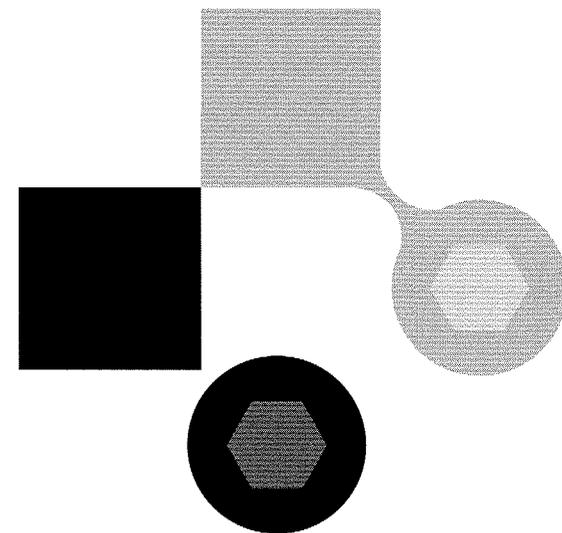
「接着」という現象は次の過程から成り立っています。

(STEP 1) 接着剤を塗布する。

(STEP 2) 接着剤の分子と被着材料の表面の分子の距離を近づける。

(STEP 3) 接着剤と被着材料表面が引き合って結合する。

接着強度や性能に影響する諸因子



接着の強度やいろいろな性能は様々な要因によって変化するものです。例えば、接着剤の物性や被着材料の物性、表面の状態、接着部に加わる力の方向、接着部の形状や寸法、温度など様々な要因があります。以下に、接着剤の選定や強度試験、接着継手の設計を行う際に必要な種々の要因とその影響について説明します。

2.1 接着部に加わる力の種類

接着部に加わる力の種類としては、図 2.1 に示すように、接着面に平行なせん断力 (a) と接着面に垂直な引張り力 (b) の 2 種類が基本です。圧縮力がありますが、圧縮力はマイナス方向の力と考えます。

せん断力としては、図 2.2 に示すように、板状の接着におけるせん断力 (a1)、(a2)、軸やパイプなどの勘合接着におけるせん断力 (b1)、(b2)、ねじり (c1)、(c2)、2 方向に加わるせん断力 (d)、曲げによるせん断力 (e) などがあり、引張り力としては、図 2.3 に示すように、均等引張り (a)、不均等な引張り (割裂) (b1) (b2)、剥離 (c)、曲げ (d1)、(d2)、片持ち曲げ (e1) (e2) などがあります。(c) の剥離で板が曲がりやすい場合は、接着端部の非常に小さな面積だけに引張り力が加わるので、弱い力で剥がれてしまいます。

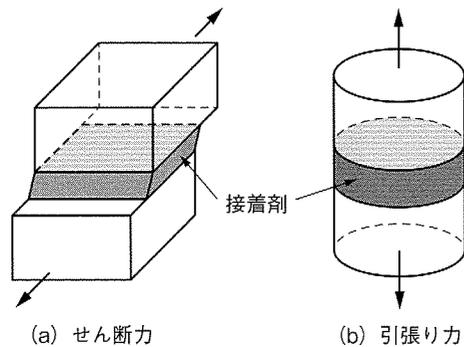


図 2.1 接着部に加わる基本的な力

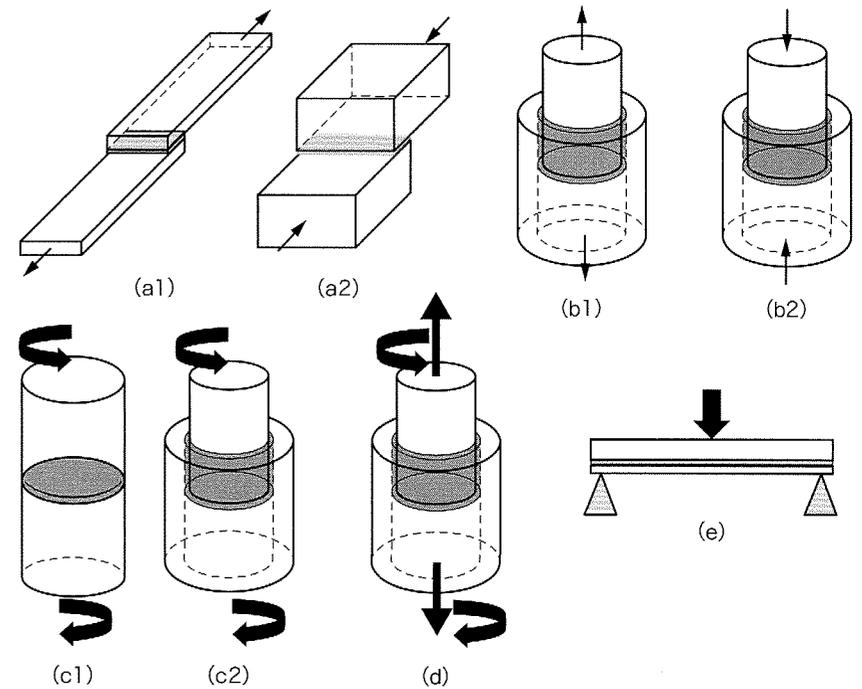


図 2.2 せん断力の種々の加わり方

実際の接着部では、せん断力と引張り力が同時に掛かる場合がほとんどで、図 2.4 に示すように、ねじりと引張りが同時に加わる場合 (a)、両端固定での曲げ (b1) (b2)、L 型金具などでの支持 (c1) (c2) などがあります。

2.2 接着部の形状

接着部の形状には様々なものがあります。いくつかの例を図 2.5 に示しました。(a) は板と板との部分重ね合わせ、(b) は板と板との全面接着、(c) は軸の勘合接着やパイプの差し込み接着、(d) はハニカムパネルや段ボールなどのサンドイッチパネル、(e) は隅肉接着で、ハニカムパネルにおけるハニカム

2.3 一般的な接着強度の測定方法

接着の強度試験でよく使われている方法を図 2.11 に示しました。

(a) は JIS K6850 の板/板の引張りせん断試験（単純重ね合わせ試験）で、標準板厚は金属板では 1.6 mm、プラスチックや複合材料では 3.0 mm となっています。高強度接着剤では一般に金属の降伏点を超えることがよくあります。

(b1) は JIS K6849 の引張り試験で、角材試験片も使用されます。(b2) は ASTM C297 のハニカムパネルの引張り試験で、フラットワイズ引張り試験と呼ばれているものです。

(c) は ASTM D393 のハニカムパネルの曲げ試験です。

(d1) は JIS K6854-3 の T 形剥離試験で、鋼板の場合は板厚 0.5 mm、アルミニウム板の場合は板厚 0.5 mm または 0.7 mm が標準となっています。(d2) は JIS K6854-1 の 90°剥離試験で、標準板厚は金属もプラスチックも 1.5 mm となっています。(d3) は JIS K6854-2 の 180°剥離試験で、標準板厚は金属 1.5 mm、プラスチック 1.5 mm となっています。(d4) は JIS K6854-4 の浮動ローラー剥離試験で、薄板の厚さは金属板では 0.5 mm となっています。(d1) の T 形剥離試験より安定したデータが得られます。(d5) は ASTM D1781 のハニカムパネルの剥離試験で、クライミングドラム剥離試験と呼ばれているものです。

(e) は JIS K6853 の割裂試験で、剛体の剥離試験のようなものです。

(f1) は JIS K6855 の衝撃試験で、せん断衝撃を測定するものです。(f2) は JIS K6856 のくさび衝撃試験です。接着部に高速でくさびを打ち込んだときの破壊エネルギーを測定するもので、最近はこの試験が重要視されています。

JIS や ASTM などの規格では、標準板厚などが規定されていますが、被着材料の材質や表面状態、板厚などが変わると接着強度は大きく変化するので、接着剤のユーザーが試験を行う場合には、実際の製品で使用するものと同じ材質、板厚の被着材を用いることが重要になります。試験法も実際に加わる力の

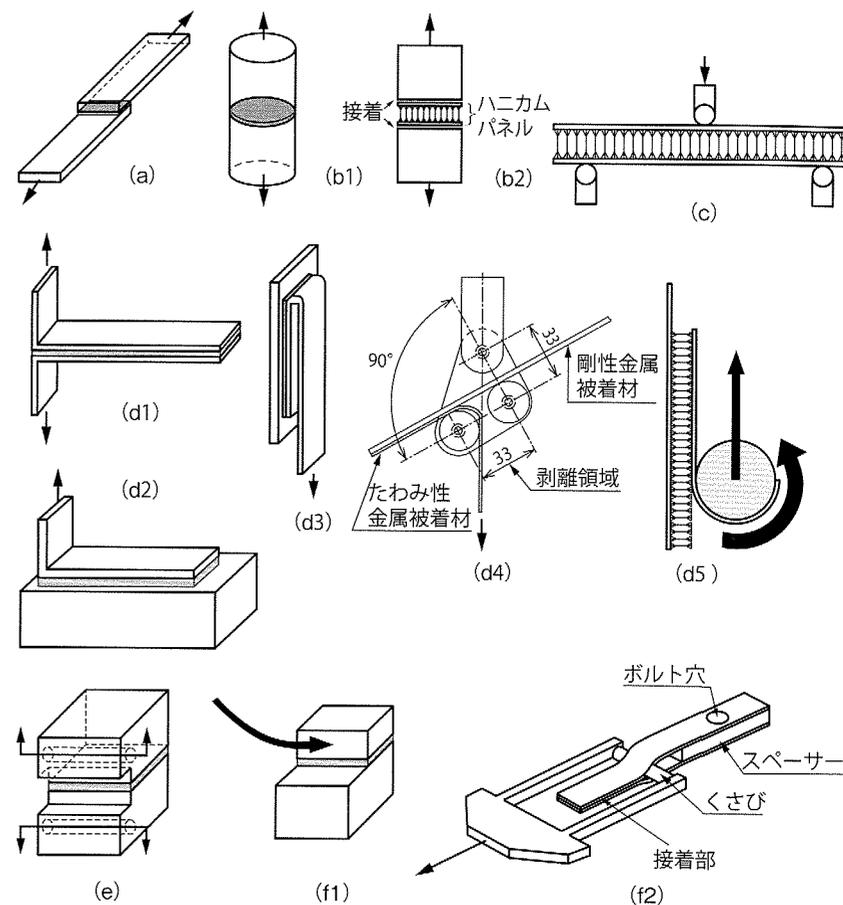


図 2.11 一般的な接着強度の測定方法

状態を考慮して適切な選択をする必要があります。

2.4 接着剤に関する因子

2.4.1 接着剤の硬さ（弾性率）と伸び

一般の接着剤では、硬いものは伸びが小さく、柔らかいものは伸びが大きい性質を持っています。図 2.12 は、接着剤の硬さ（弾性率）、伸びと各種の接着強度の関係を示したものです。一般に、せん断強度や引張り強度と剥離強度や衝撃強度は接着剤の硬さや伸びに対して逆の関係になります。すなわち、接着剤が硬くて伸びが小さければせん断強度、引張り強度は高くなりますが、剥離強度、衝撃強度は低くなります。接着剤が軟らかくて伸びが大きい場合は逆になります。

これは、剥離強度を高くするためには、接着剤に伸びが必要で、衝撃強度を高くするためには衝撃エネルギーを吸収できる柔軟性が必要なためです。各種の力に対して強い接着剤は、硬すぎず軟らかすぎず、すなわち、爪を立てれば少し傷が付く程度の強靱なものが良いということになります。構造用接着剤と

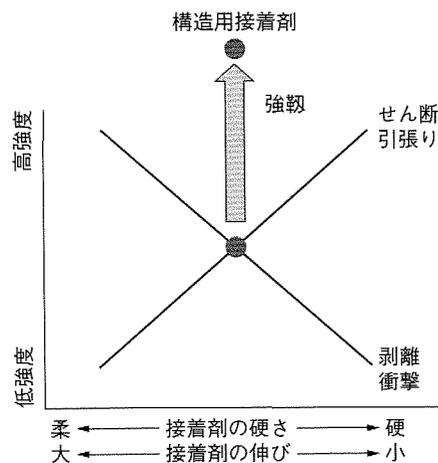


図 2.12 接着剤の硬さ、伸びと各種の接着強度の関係

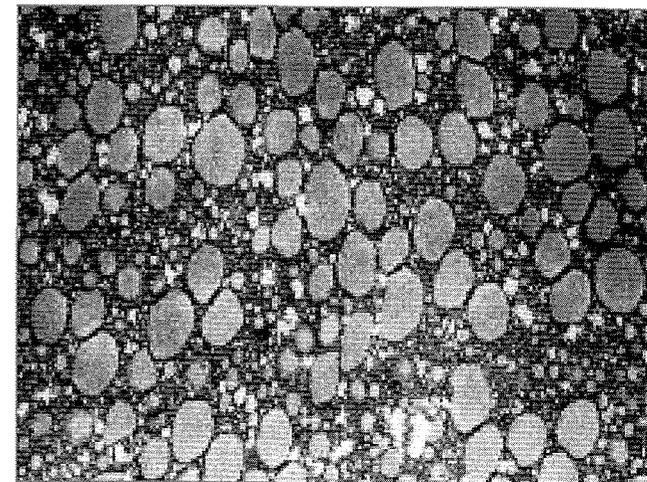


図 2.13 二液室温硬化型変性アクリル系接着剤の微視的構造

呼ばれる高強度接着剤では、硬さと伸びが両立されていて、いわゆる「強靱」な性質になっています。強靱さを出すためには、硬いエポキシ樹脂やアクリル樹脂に柔らかいゴム成分などを添加するなどの変性がなされています。図 2.13 は、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤の硬化物を透過型電子顕微鏡 (TEM) で見た写真です。白く丸いものが硬いアクリル樹脂、黒い部分が柔らかいニトリルゴムです。このような微視的構造は、海鳥構造やポリマーアロイなどと呼ばれていて、非常に強靱になり $1+1=3$ の性質が得られるのです。

2.4.2 接着剤の温度特性

大半の接着剤は樹脂系のもので、プラスチックや接着剤などの樹脂は、大きく分けると熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分類できます。熱可塑性樹脂は、図 2.14 (a) のように、高分子状のものがからみ合っただけのもので、熱硬化性樹脂は、(b) のように橋架け（架橋と言います）が起こって 3 次元の網目構造になっています。

分子は、低温では動きにくく、高温では動きやすくなります。分子が動きや

です。線膨張係数を小さくするために、無機物のフィラーを多量に添加することがありますが、硬いフィラーを多量に添加すると弾性率が高くなって内部応力が増加する方向に行くので注意が必要です。

6) 加熱硬化においては、短時間で冷却せずに徐冷を行う

これは、ある程度温度が高い状態に長い時間放置することで、「(3) 内部応力の緩和」で述べた応力緩和が大きくなるためです。図 2.23¹⁰⁾ で、80℃で硬化した後 40℃で保持することにより内部応力が幾分緩和してひずみが低減していることがわかります。短時間で冷却した場合は、再度温度を上げてアニールしても応力緩和を起こさせることができます。

7) 硬化速度を遅くする

これも応力緩和を起こす時間を稼ぐためです。紫外線硬化接着剤は精密部品の接着にもよく使われ秒単位で硬化する便利なものですが、光のパワーを下げた緩やかに硬化させると内部応力は大きく低減し、部品の精度低下を防止することができます¹⁰⁾。

(6) 第3の内部応力—吸水膨潤応力—

接着剤が硬化した後、使用中に高湿度に曝される場合には接着剤が吸湿して体積膨張を起こします。吸水膨張により発生する内部応力を「吸水膨潤応力」と呼んでいます。

吸水による体積膨張は非常に大きいので、容易に観察することができます。

図 2.24 に示すように、薄い金属板の上に接着剤を厚めに塗布して硬化させると硬化収縮により金属板に反りが生じます。これを水中に浸漬しておくとうる々に金属板の反りが減り、ある時点で反りがなくなります。この状態は接着剤が硬化により体積収縮した分だけ接着剤が吸水して体積が増加した時点です。さらに、水中に浸漬し続けると接着剤の吸水による体積膨張は更に大きくなり、金属板の反りは更に増加していきます。吸水量が接着剤の飽和吸水率に達した時点で反りは停止します。この状態から乾燥させると再び平らな状態を経て最初の反った状態に戻ります。

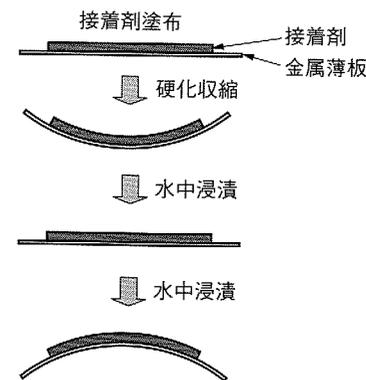


図 2.24 吸水・膨潤による内部応力の発生

接着剤の吸水による膨張率は接着剤の種類によってかなり異なりますが、%オーダーの膨張をするものも多くあります。接着剤の線膨張係数は一般に 10^{-4} 程度であるので、吸水による膨張率は 10^{-2} レベルで 100 倍も大きいのです。このため、ヒートサイクルやヒートショックなどの温度変化がない場合でも、接着剤が吸水しただけで 100℃の温度変化による熱応力と同レベルの応力が発生してしまうことになるのです。

2.5 被着材に関する因子

2.5.1 接着しやすい材料、接着しにくい材料

接着接合の特徴として「異種材料の接合が容易にできる」ことが挙げられます。では、どんな材料でも接着できるのかというと、そう簡単にはいきません。接着される材料には、接着しやすい材料、接着しにくい材料があります。同じ素材であっても表面の状態によって接着のしやすさは大きく変わります。

一般に、表面エネルギーや表面張力が大きな材料は接着しやすく、表面エネルギーや表面張力が小さな材料は接着しにくく、また、結晶性の材料は接着し

ーは、有機リン酸塩系化合物（プライマーF-100：電気化学工業(株)製）、接着剤は二液室温硬化型変性アクリル系です。図2.35に示したように、プライマー塗布により凝集破壊率が大きく向上し、疲労強度も大きく向上しています。

プライマーやカップリング剤は、図2.36に示すように、できるだけ薄く塗布することがポイントです。厚く塗布した場合、プライマーやカップリング剤の成分が層となり、層間の凝集力は低いため、層内での破壊となってしまいます。プライマーやカップリング剤をできるだけ希釈して使用すれば、多量に塗布しても成分の付着量は少なくなるため、塗布作業は容易に行えます。

2.5.6 被着材料の線膨張係数

「2.4.4 内部応力」でも述べたように、接着剤と被着材料の線膨張係数の差が大きくなると、加熱硬化後の冷却過程や、使用中の温度変化によって2つの部品の収縮量が異なるため、部品が変形してしまうことがあります。部品の剛性が高い場合には、変形ができないために熱応力が接着層に蓄積して接着部が破壊することもあります。このような問題を避けるためには、室温硬化型接着剤を使用するのが望ましいのですが、加熱硬化型接着剤を用いる場合には、硬化後の硬さが軟らかいものや、できるだけガラス転移温度の低いものを選ぶ必要があります。

2.5.7 被着材料の吸水膨潤

アクリルやナイロンのような吸水による膨張が大きい被着材料を金属など水分の影響を受けない材料と接着する場合は注意を要します。寸法が大きなものや長いもの場合は、吸水によるプラスチックの伸びに接着剤の伸びが追従できない場合、接着部で破壊することがあるためです。伸びに追従できる軟らかい接着剤を厚い接着層にして接着する必要があります。

2.5.8 被着材料の強度

接着部の面積を大きくすれば接着強度は上昇しますが、継手の強度を部品の

材料自体の強度より高くすることはできません。すなわち、接着強度は部品が塑性変形を始める強度までしか得られないということです。高い接着強度を得るためには、被着材料の厚さを厚くすればよいということになります。薄い紙では接着部が壊れる前に紙自体が低い強度で破れてしまいますが、紙を厚くしていけば破壊の強度は上がっていくというようなことです。

硬い接着剤を用いた場合には、被着材料自体の強度よりかなり低い強度で被着材料が破壊することがあります。例えば、硬い加熱硬化型エポキシ系接着剤でガラスと金属を接着すると、冷却後に接着部の下のガラスがえぐり取られるように貝殻状に破壊することがあります。これは、接着層の内部応力が非常に高いために、割れやすいガラスの一部分に応力が集中したためです。このような場合には、接着剤を軟らかくするなど、内部応力を低減することによって応力集中を避ければ、更に高い強度を得ることができるようになります。

2.5.9 材料、部品の剛性

被着材料の曲げ剛性は、被着材料の種類や同じ厚さの同じ材料であっても断面の形状によって変化します。はく離強度は被着材の曲げ剛性に大きく影響されます。

2.6 接着継手に関する因子

2.6.1 形状、物性、剛性の不連続性

板状のものを接着する場合には、重ね合わせによる接着が一般的です。このような継手に加わる力としては、図2.37に示すように、せん断方向の引張りや圧縮、回転方向のせん断モーメント、垂直方向の引張りや圧縮、剥離や割裂、ねじり、曲げなど種々の力があります。

接着部での破壊を防ぐためには、破壊が始まる場所である接着部の端部に局部的な力が加わりにくくする工夫が必要です。局部的な力は、(1) 形状の不連

2.7 せん断強度に影響する因子

2.7.1 せん断強度の値の真偽は？

せん断強度に影響する因子の説明の前に、カタログなどに記載されているせん断強度の値について考えてみましょう。

モータの永久磁石の接着に使用されている二液室温硬化型アクリル系接着剤で永久磁石と鋼のブロックを接着してせん断試験を行うと、47 MPa (480 kgf/cm²) という極めて高いせん断強度が得られます。ところが、接着剤メーカーのカタログを見ると、せん断強度は 28 MPa と書かれています²¹⁾。どちらが正しいのでしょうか。

接着剤メーカーが用いている接着試験片は、JIS K6850 に規定されている図 2.2 (a1) に示したような引張りせん断試験片で、板厚 1.6 mm、幅 25 mm、長さ 100 mm の軟鋼板同士を 12.5 mm 重ねて接着したものです。この試験片では最大何 kg まで測定ができるのでしょうか。それは、鋼板自体がちぎれる強度までということです。軟鋼板の破断強度は大体 30 kg/mm² くらいです。板の断面積は 1.6 mm × 25 mm = 40 mm² なので、40 × 30 = 1,200 kg くらいで板がちぎれることになります。しかし鋼板は破断する前に大きく伸びます。伸び始める点を降伏点と言い、軟鋼板の場合は 20~24 kg/mm² くらいです。この時の引張り荷重は 800~960 kg なので、接着面積で割って接着強度を計算すると 256~307 kg/cm² (25~30 MPa) となり、メーカーのカタログ値とほぼ一致します。

すなわち、実際の接着強度は非常に高いのに、用いた板が薄くて弱かったためにそれ以上の測定ができなかったということなのです。カタログには、「28 MPa 以上 (実測不可)」と表示すべきだったということです。別の見方をすれば、JIS などの規格は、最近の高性能接着剤の性能評価を行うには不適とも言えるでしょう。

2.7.2 板厚、板の強度

では、板の厚さを厚くすればするほど高い接着強度が得られるのでしょうか。

図 2.59 は、板金構造物の組立てに使用されている二液室温硬化型アクリル系接着剤 (ハードロック C-355-20: 電気化学工業(株)製) での試験結果です。鋼板は熱間圧延鋼板 (SPHC) で、板幅は 100 mm、板の長さは 200 mm で、JIS 規格の引張りせん断試験片よりかなり大きいものを使っています。接着部の重ね合わせの長さは 12.5 mm、25.0 mm、37.5 mm、50.0 mm の 4 種類で試験を行っています。この結果から、板が厚くなるほど接着強度は高くなっていることがわかります。やはり板の厚さが厚いほど接着強度は高くなるようです。

しかし、図の線の傾きを見ると、板の厚さが厚くなるにつれて接着強度が頭打ちになって線が寝てきているのがわかります。そうです、この線が寝たところの強度が正確なせん断接着強度ということなのです。重ね合わせ長さ

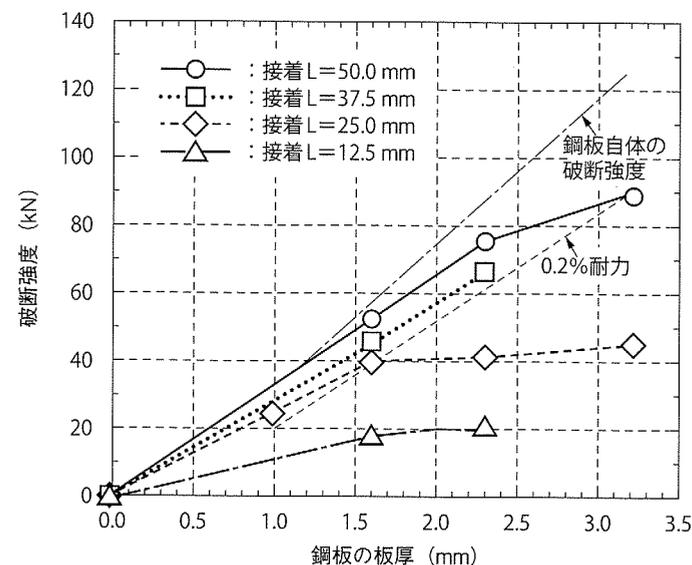


図 2.59 せん断試験片の板厚と接着破断強度

2.7.10 高強度接着におけるデータの判断誤り

これまでに説明したように、接着強度が被着材の強度よりも高い場合には、被着材の強度以上の接着強度を知ることはできません。例えば、接着強度の温度依存性を測定する場合、図 2.65 に示すように、高温で接着強度が被着材の強度より低くなると薄板での測定でも接着強度は正確に求められますが、低温で接着剤が硬くなって被着材の強度を超えると得られる強度データは頭打ちになります。

また、図 2.66 に示すように、耐久劣化試験において、初期状態で接着強度が被着材の強度を超えていると、実際には暴露初期に大きな劣化をしても、劣化を見つけることはできず、ある期間は劣化しないという誤った判断をしてしまうことになります。長期間暴露後の劣化率を求める場合にも、初期強度を

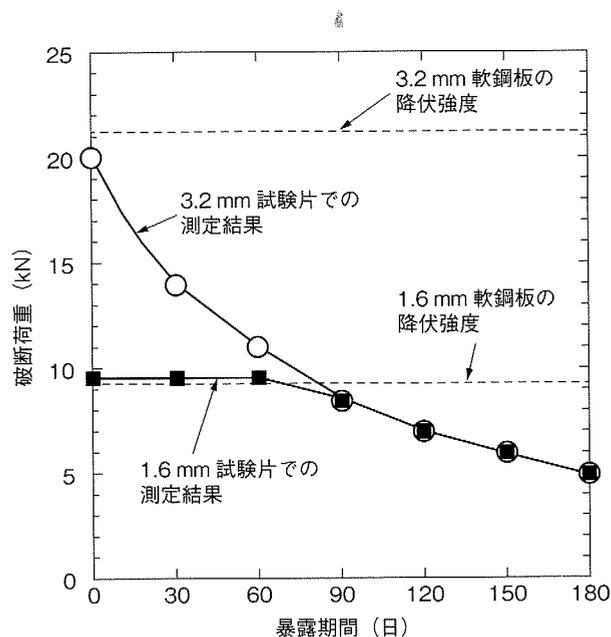


図 2.66 被着材の厚さによる接着強度データの誤り (耐久性試験)

低く見積もっているため誤ったデータを出すことになります。

せん断試験を行うときには、接着強度と被着材料自体の強度の関係をよく考えて、被着材料の厚さや重ね合わせ長さを決めて試験を行わなければ、誤った結果に振り回されて泣く目に遭うことになりかねません。規格はあくまでも1つのガイドと思わなければなりません。

2.8 剥離強度に影響する因子

2.8.1 剥離試験の目的と得られる情報

剥離強度に影響する因子の説明の前に、剥離試験について説明しておきましょう。

接着強度の代表的な試験方法は、引張りせん断試験と剥離試験です。引張りせん断と剥離は、既に説明したように種々の相反する特性を有しているために、2種類の評価試験を行うのです。

剥離試験には、図 2.11 (d1)~(d5) に示したように、種々の試験法があります。接着剤を構造用途に使用する場合には、一般的に (d1) の T 形剥離試験や (d2) の 90° 剥離試験、(d4) の浮動ローラー式剥離試験が行われています。

剥離試験で得られる情報は何なのでしょう。

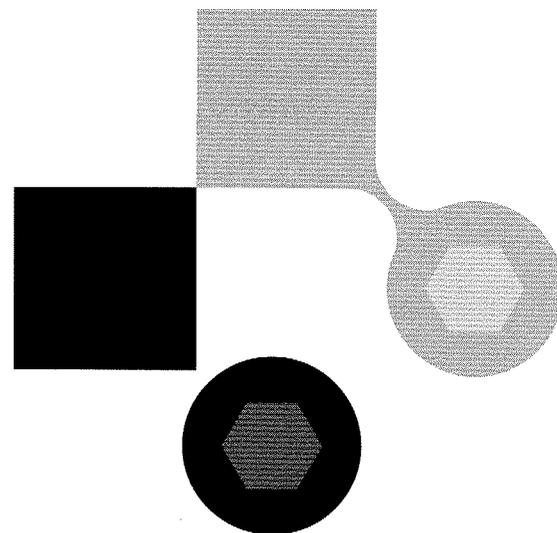
(1) 破壊開始強度

得られる1つの情報は、接着部が破壊を始めるときの強さの情報です。実際の接着構造体を考えると、せん断応力で支える構造を設計したとしても、接着部に加わる垂直方向の力を完全になくすことなどできません。せん断強度が極めて強い接着剤でも、剥離では手で引張っただけでもパリンと壊れてしまうものも多くあります。ですから、破壊の開始強さの大小の評価は非常に重要です。しかし、理由はよくわかりませんが、JISなどの規格試験では、破壊開始点の強度はほとんど無視されています。

- 18) 原賀康介：「信頼性の高い耐久性評価と寿命予測法」, 工業料, Vol. 58, No. 2, p. 45 (2010)
- 19) 原賀康介：「信頼性の高い接着設計のための基本条件と耐久性評価法」, 科学と工業, Vol. 82, No. 6, p. 21 (2008)
- 20) 原賀康介：「信頼性の高い接着設計のための基本条件と耐久性評価法」, 日本接着学会誌, Vol. 43, No. 8, p. 319 (2007)
- 21) 電気化学工業(株)：“ハードロック G-672-15P 技術資料”

第 3 章

接着強度のばらつきと 製品の信頼性



3.1 接着強度のばらつき

3.1.1 ばらつきの例

図 3.1¹⁾ は、2種類の接着剤のせん断接着強度の度数分布（ヒストグラム）の比較の例を示したものです。被着材は銅とニッケルめっきされたネオジム系焼結磁石、接着剤は二液室温硬化型変性アクリル系と一液加熱硬化型エポキシ系です。いずれの接着剤も平均強度は非常に高いのですが、ばらつきの程度は大きく異なっています。二液室温硬化型変性アクリル系接着剤は強度のばらつきが少なく、一液加熱硬化型エポキシ系接着剤では、強度のばらつきが非常に大きくなっていることがわかります。

3.1.2 ばらつきの原因

「第1章 1.4.7 (2) 接着部の脆弱箇所」で、接着部で最も弱い部分は接着端部の界面であることを説明しました。この接着端部の界面での結合の状態や生じる応力の状態がばらついていれば接着強度はばらつくことになります。

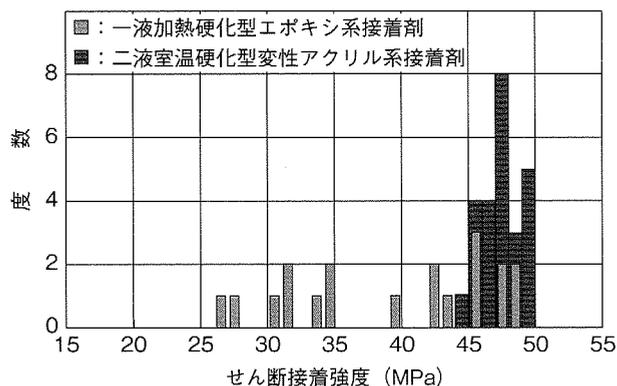


図 3.1 2種類の接着剤のせん断接着強度の度数分布の比較例

界面での結合状態のばらつきの原因には次のようなものがあります。第1の原因は、被着材表面のばらつきです。図 3.2²⁾ は、金属材料の表面付近の接着に影響を及ぼす因子を示したのですが、被着材の表面付近には、接着性に影響を及ぼす非常に多くの因子が集まっています。これらの因子を常に同じ状態に管理することは困難です。ですから、常に同じ結合状態にすることは困難なのです。

第2の原因としては、接着剤の品種や接着条件によって内部応力が異なることが挙げられます。内部応力が大きければ小さい力で破壊することになります。接着剤が同じであっても、内部応力は硬化の温度や時間、昇温速度や冷却速度、接着層の厚さなどによって変化します。

第3の原因は、接着剤の硬化後の凝集力（硬さ）があります。非常に硬い接着剤では、内部応力も大きくなりますが、外力が加わった場合に接着剤の変形ができないため、接着端部の界面に非常に大きな応力集中が生じてしまいます。接着剤が軟らかければ、内部応力も小さく、外力が加わっても接着剤の変形力を吸収するため、接着端部の界面に加わる応力が低減されます。

第4の原因は、接着剤と被着材表面との相性が挙げられます。相性の悪い接着剤では表面のばらつきの影響を敏感に受けてしまいます。

第5の原因としては、接着剤の粘度が挙げられます。例えば、ペースト状の接着剤の場合は、よほど力を掛けて塗布・貼り合わせをしなければ、表面の細かい凹凸を埋めることはできません。

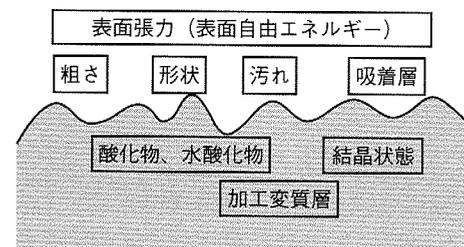


図 3.2 金属材料の表面付近の接着に影響する諸因子

頼性に優れた凝集破壊であることを前提としているので、変動係数 CV の増大はせいぜい初期（劣化前）の CV 値の 1.5 倍程度見ておけば十分でしょう。この 1.5 倍という数字は、筆者が 40 年間にわたり実施してきた多くの耐久性試験結果からの実績に基づいたものです。屋外で 30 年間ほど使用した場合と考えていただければよいでしょう。

3.2 製品の信頼性とは

3.2.1 信頼性の意味

信頼性は、JIS Z8115:2000 では「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすることができる性質」と定義されています。同様に信頼度については「アイテムが与えられた期間与えられた条件下で機能を発揮する確率」と定義されています。不良率は信頼度が足りないものの割合なので、 $1 - \text{信頼度}$ となります。製品の不良率をどこまで許容するかは、製品の重要さによって異なりますが、設計段階で想定されている不良率の上限を許容不良率と呼んでいます。

3.2.2 不良品を減らすための考え方

図 3.14 には、平均強度が同じでばらつきが異なる 2 つの正規分布 (A) (B) を示しました。使用中に接着部に力加わって、その力が接着強度よりも大きければ接着部は破壊することになります。接着部に加わる力も常に変動しているので一定ではありませんが、ここでは図 3.14 に示すように、接着部に加わる最大の力で考えます。ばらつきが小さな分布 (A) では、加わる最大の力より接着強度が低いものはほとんどないので、接着の不良は非常に少ないのですが、ばらつきが大きな分布 (B) では、加わる力より接着強度が低いものかなりあることがわかり、不良率は (A) より高くなることがわかります。

では (B) の不良率を減らすにはどうしたらよいでしょうか。1 つは、(C)

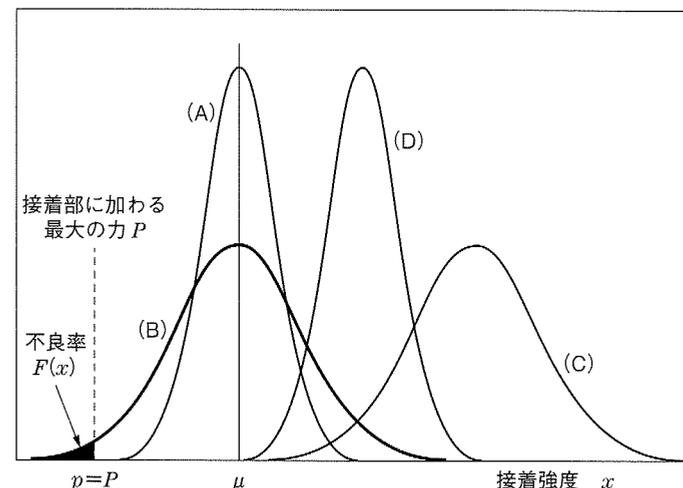


図 3.14 ばらつき的大小と不良率の大小および不良率低減の考え方

のように、平均接着強度を高くすることが考えられます。もう 1 つは、(A) のように、平均強度はそのままにしてばらつきを減らす方法があります。(B) を (C) や (A) にするためには、それなりの改善対策活動が必要です。ばらつきを減らして (A) にするのは、地道な努力の積み重ねで実現可能ですが、平均強度をかなり高くして (C) にするためには、相当な研究開発やイノベーションが必要なため難易度はかなり高くなります。(A) までできれば、その平均強度を少し上げて (D) くらいに持って行くことは一般の研究開発のレベルで可能でしょう。これらの観点から、不良品を減らすためには、ばらつきを減らすことが第 1 ということになります。

3.2.3 接着部に加わる力の大きさより接着強度が低いものの割合を求める

正規分布の全体の面積を 1 としたときに、図 3.11 に示した低強度側の領域の面積の割合 $F(x)$ は、式 (3.1) で計算することができます⁶⁾。

$$F(x) = \int_{-\infty}^p \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx \quad (3.1)$$

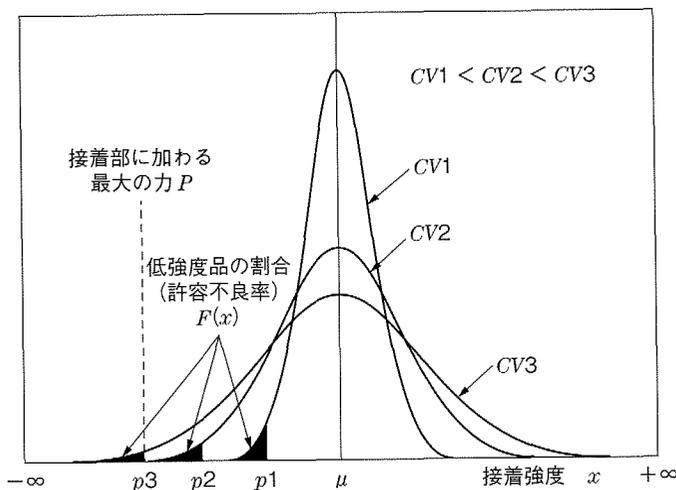


図 3.16 ばらつきの増加につれて不良品発生の可能性は増加する

ことは、 $p3/\mu \geq 0.3$ 以上となるようにすればよいということです。図 3.15 から、設定されている許容不良率において、ばらつき係数 D が 0.3 以上となればよいわけですから、 CV 値は横軸から容易に求めることができます。例えば、許容不良率が 1/10 万である場合は、 CV 値は 0.16 以下であればよいということがわかります。

ただし、ここで安心してはいけません。「3.1.8 劣化によるばらつきの増加」で説明したように、劣化すると変動係数は初期の 1.5 倍に増えるとすると、先に得られた変動係数は「劣化後の変動係数」ということになります。初期の変動係数は劣化後の変動係数の 1.5 分の 1 になります。表 3.2 に、図 3.15 から読み取った許容不良率と劣化後の変動係数と初期の変動係数とばらつき係数 $D (=P/\mu)$ の値を示しました。許容不良率が 1/10 万と 1/100 万で、ばらつき係数 D がおよそ 0.3 以上となる部分を太字で示しました。例えば、許容不良率が 1/10 万の場合は 0.11 以下、1/100 万の場合はおよそ 0.10 以下となります。おしなべて初期の変動係数を 0.10 以下に抑えるように接着の作り込みを行えば、信頼性に優れた接着ができていると言えるでしょう。

表 3.2 劣化後の変動係数 CV_y と許容不良率 $F(x)$ から求めた劣化後のばらつき係数 D_y

許容不良率 $F(x)$	劣化後の変動係数 CV_y (下段は初期の変動係数 CV_0)											
	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.30
	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.20
1/1 万	0.73	0.67	0.63	0.59	0.55	0.52	0.48	0.44	0.41	0.33	0.26	-0.11
1/10 万	0.66	0.62	0.57	0.53	0.49	0.45	0.40	0.36	0.32	0.23	0.15	-0.28
1/100 万	0.62	0.57	0.52	0.48	0.43	0.38	0.33	0.29	0.24	0.14	0.05	-0.43
1/1,000 万	0.58	0.53	0.48	0.43	0.37	0.32	0.27	0.22	0.17	0.06	0.04	-0.56

初期の変動係数が 0.15 以上になると劣化後の変動係数は 1.5 倍の 0.225 となり、図 3.15 から、とても信頼性のある接着ができていると言えないことは明らかです。界面破壊が多い場合は、変動係数が 0.15 を超えてしまう場合は頻繁に見られます。図 3.1 で界面破壊をしていた一液エポキシ系接着剤の変動係数は 0.19 です。凝集破壊をしていた二液室温硬化型変性アクリル系接着剤の変動係数は 0.03 です。ちなみに、変動係数 0.03 の場合、1 億個接着しても最低強度の 1 個以外のものは平均強度の 83.1 % 以上の強度を確保しているということで、非常に信頼性が高いことがわかります。

3.3 まとめ—高信頼性接着の基本条件—

本章では、接着強度のばらつきと製品の信頼性について説明しました。信頼性に優れた接着を行うための基本条件としては、次の 2 点ということになります。

- (1) 接着の破壊形態は、接着剤の内部で破壊する凝集破壊が、接着面積全体の 40 % 以上になっていること。
- (2) 初期の接着強度の変動係数 $CV(\sigma/\mu)$ は 0.10 以下であること。

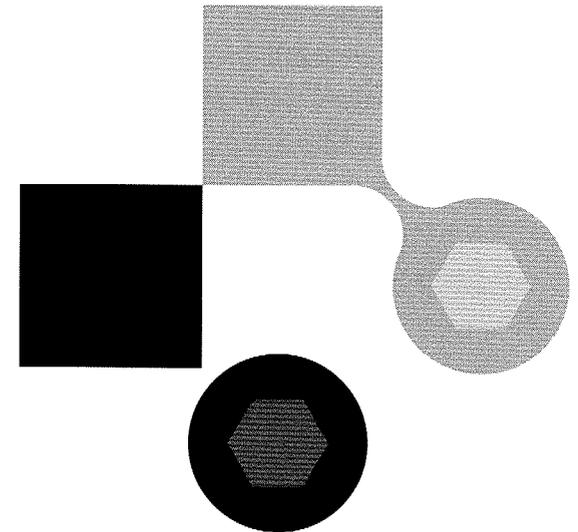
接着剤の選定、表面処理などの接着プロセスの検討においては、上記 2 点を満足するように、作り込みの作業を行うことが大切です。

参考文献

- 1) 原賀康介:「最適設計のための接着信頼性評価法」, 日本接着学会誌, Vol. 40, No. 11, p. 564 (2004)
- 2) 原賀康介:「信頼性確保のための接着強度の実力値の見積り方」, 接着の技術誌, Vol. 32, No. 3, p. 62 (2012)
- 3) 原賀康介:「電気・電子機器における接着品質設計と安全率の定量化」, 日本接着学会誌, Vol. 39, No. 12, p. 448 (2003)
- 4) 原賀康介:「信頼性の高い接着設計のための基本条件と耐久性評価法」, 日本接着学会誌, Vol. 43, No. 8, p. 319 (2007)
- 5) 原賀康介:「信頼性の高い耐久性評価と寿命予測法」, 工業材料, Vol. 58, No. 2, p. 45 (2010)
- 6) Kosuke HARAGA: "Processing Quality Control" , Lucas F. M. da Silva, Andreas Ochsner, Robert D. Adams, Handbook of Adhesion Technology, Springer (2011) pp. 1031-1048
- 7) 原賀康介:「接着耐久性の評価方法—耐用年数経過後の接着強度の安全率の定量化法—」, 接着の技術誌, Vol. 24, No. 2, p. 58 (2004)

第4章

接着耐久性に影響する諸因子と 寿命評価法



工業製品は、少なくとも製品の耐用年数の期間に、劣化や性能低下により致命的な機能不全を起こしてはいけません。マンションの外壁タイルの剥離なども非常に危険なことです。2012年12月に、接着剤によって支えられていたトンネルの天井板が崩落するという大事故が起きてしまいましたが、このような事故は二度と起こってはいけません。50年以上のように非常に耐用年数が長い製品もあり、定期的な点検補修は保全性の点で欠かすことはできません。しかし、接着接合物による劣化がどのようなものであるかを知り、どのくらい劣化するのかを予測し、安全な設計をすることが基本となります。残念ながら、接着の耐久性に関する研究に従事している研究者、技術者は非常に少ないのが現状です。筆者もその少ない一人として40年近くにわたって耐久性を考えてきました。以下に、筆者がこれまでに蓄積した情報を説明します。

4.1 接着接合における劣化の要因

接着接合物が劣化を起こすのは、接着剤自体が劣化するためと思われることが多いようです。しかし、実際には、図4.1に示すように、接着剤自体の劣化だけではなく、接着剤と被着材料の結合界面や被着材料自体が劣化して強度が低下する場合も多いのです。このため、接着接合物の劣化は、接着剤と被着材料の組み合わせで評価することが大切なのです。

接着接合物に劣化を起こさせる要因としては次のようなものがあります。

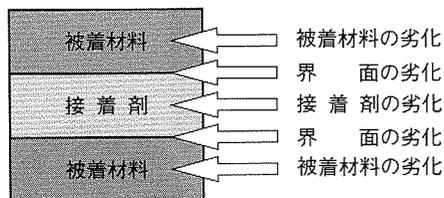


図4.1 接着接合物の劣化箇所

4.1.1 熱

接着接合物が高い温度に曝されると強度が低下することがあります。これを熱劣化と呼んでいます。熱劣化の原因としては次のようなものがあります。

- (1) 酸素によって接着剤自体が酸化分解を起こして接着剤自体の強度が低下する。
- (2) 熱によって接着剤自体が熱分解を起こして接着剤自体の強度が低下する。
- (3) 酸素によって接着界面の結合が切断される。
- (4) 酸素によって被着材料の接着表面が酸化して、弱い酸化層が生成して被着材料自体の強度が低下する。
- (5) 熱によって被着材料の接着表面が変質する。

熱劣化は被着材料の材質に大きく影響されます。

熱劣化には、焼付け塗装やはんだディップのような「短時間だが非常に高い温度に曝される場合」と、製品の使用環境のように「それほど高い温度ではないが長期間にわたって高温に曝される場合」とがあります。これらは劣化機構が異なるので区別して考える必要があります。

表4.1¹⁾は、被着材料の違いによる耐熱性の違いを示したもので、接着剤が同じ（ここでは二液室温硬化型変性アクリル系接着剤）であるにもかかわらず、耐熱限界温度が大きく異なっていることがわかります。リン酸亜鉛皮膜処理がなされた亜鉛めっき鋼板が特に悪いのは、図4.2¹⁾に示すように、リン酸亜鉛の結晶は結晶水を持っており、加熱によって結晶水が脱離して、金属同士の接着の場合は水分の逃げ道がないため界面付近に集まって界面での結合を破壊するためと考えられています。リン酸亜鉛皮膜処理は塗装の下地処理として実績があり、焼付け塗装で問題はないのですが、接着では上のように問題が起こります。塗装の場合は、水分が塗膜を通して逃げるための違いと思われます。このケースは、上記の原因(5)に相当しています。

はんだディップにおいては、接着剤が水分を含んでいると急激な加熱によって水分が蒸気となり、その圧力により破壊を起こすことがあります。

4.2 接着耐久性を考える上で知っておくべき事項

4.2.1 破壊状態と耐久性

第1章1.4.7で説明したように、接着部におけるアキレス腱は接着部端部の界面なのです。ですから、最初から界面破壊をするような場合には、耐久性は悪くなってしまいます。また、第3章で述べたように、界面破壊の場合は接着強度のばらつきも大きくなるので、元々信頼性の高い接着とは言いがたいのです。

優れた耐久性を確保するためには、まずは、第3章3.3節に示した、高信頼性接着のための2つの基本条件を満足させることが基本となるのです。2つの基本条件を再度示します。

- (1) 接着に破壊形態は、接着剤の内部で破壊する凝集破壊が接着面積全体の40%以上になっていること。
- (2) 初期の接着強度の変動係数 CV (標準偏差 σ /平均値 μ) は0.10以下であること。

4.2.2 水分での劣化に関する事項

(1) 接着部の形状・寸法の影響

第2章2.6.5で概要を述べましたが、水分は、接着部の周囲から内部に向かって浸入して行くので、接着部の形状・寸法が変化すると耐湿性や耐水性は大きく変化してしまいます。ですから、製品の開発段階で接着部の形状・寸法について検討し、耐湿性や耐水性に優れた形状・寸法となるように構造設計を行うことが重要です。

図4.10^{2)~4)}は、接着部の面積が一定 S で形状が異なる3種類の接着試験片を示したものです。引張り試験では接着面に応力がほぼ均一に加わるので、接着強度は3種類とも同じです。これらの接着部を同一の水中に同じ時間浸漬す

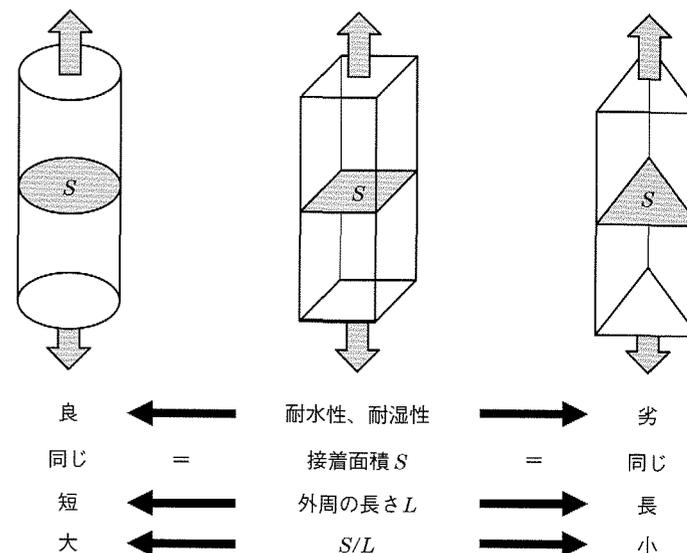


図 4.10 接着部の形状と耐水性、耐湿性

ると同じように強度低下するのでしょうか。結果は、三角形が最も劣化が大きく、円形が最も劣化が少ないのです。これは、被着材料が金属のように水分を通さない場合には、接着部への水分の浸入は接着部の周囲からのみであるため、接着面積が同じ場合には、水分の入り口の長さ（接着部の周囲の長さ） L が長いほど、同一時間で接着部に浸入する水の量が多くなるためなのです。

図4.11⁵⁾は、幅が一定(25mm)でラップ長さ(重ね合わせ長さ)が異なる引張りせん断試験片(軟鋼板/二液室温硬化型変性アクリル系接着剤/ステンレス鋼板)を60℃90%RH霧囲気に暴露したときの接着強度保持率(初期の強度に対する劣化後の残存強度の比)の経時変化を比較したものです。図4.12⁶⁾は、接着部の幅 W が異なる剥離試験片(ステンレス鋼板同士、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤)を70℃90%RH霧囲気に暴露したときの接着強度保持率の経時変化を比較したものです。これらの結果から、ラップ長さや接着部の幅が変化するだけで、耐湿性が大きく変化していることがわかります。

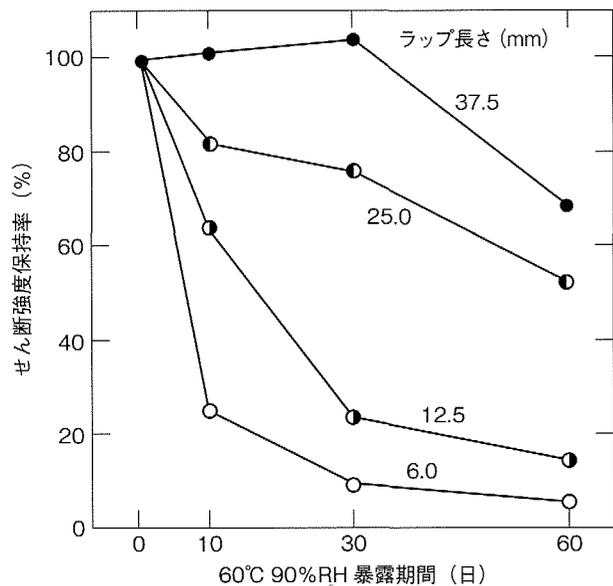


図 4.11 引張りせん断試験片 (幅 25 mm) のラップ長さを
変化させた場合の耐湿性の違い

図 4.13^{7)~9)} は、図 4.14^{8),9)} に示した接着部が円形、正方形、正三角形で寸法が異なる突合せ引張り試験片 (接着剤は二液室温硬化型変性アクリル系、被着材料はステンレス鋼) を、80°C 90% RH 雰囲気中に 5 日間暴露した後の接着面積 S と引張り強度の保持率の関係を示したものです。同じ形であれば接着面積 S が大きいほど耐湿性に優れていることがわかります。また、接着面積 S が同じでも、形状により耐湿性に差があることもわかります。これは、先に述べたように、接着面積が同じでも形状により接着部の外周の長さ L が異なるためです。被着材が水分を通さない場合は、水分は接着部の外周のみから浸入してくるため、外周の長さ L が短い形状ほど耐湿性に優れているのです。このように、耐湿性は接着部の面積 S と外周の長さ L に影響されるので、接着面積 S を外周の長さ L で割った値 $e = S/L$ で図 4.13 の横軸を整理しなおすと、図 4.15^{2)~4),7),9)} に示すようにほぼ 1 本の線に一致するのです。 e が大きいほど

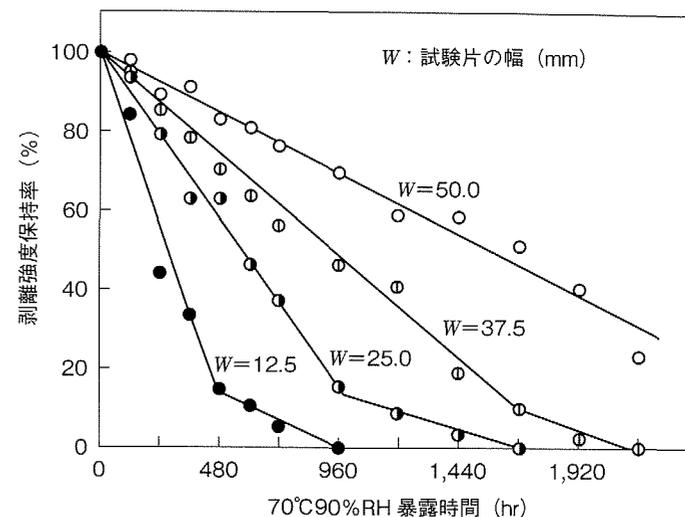


図 4.12 剥離試験片の幅 W を変化させた場合の耐湿性の違い

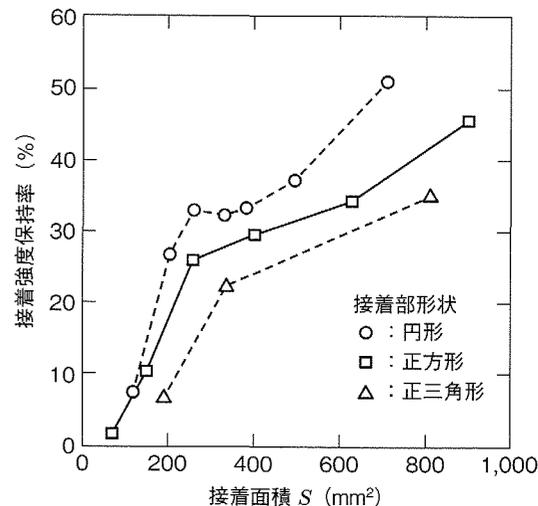


図 4.13 突合せ引張り試験片の形状・接着面積と耐湿性の関係 (ステンレス、アクリル系接着剤、80°C 90% RH 5 日間暴露後)

ということは、接着剤のガラス転移温度を測定して劣化開始温度を決めればよいのですが、ガラス転移温度は測定方法やデータの取り方で20℃程度は変化します。ですから、筆者は、寿命予測の2つの鉄則、(1)単純化する、(2)安全サイドの推定を行うの(2)の観点から、 $T_g - 20^\circ\text{C}$ を1つの基準にしています。この例の接着剤の T_g を測定すると110℃であったため、90℃を熱劣化の開始温度として、90℃以上に曝される期間を考えると、図4.41のように、せいぜい年間4カ月間となります。10年間では40カ月間(28,800時間)となります。ただし、1日の気温差が20℃あることを考えれば、90℃以上になっている時間はもっと短いということになります。

4.3 耐久性の寿命評価法

4.3.1 寿命予測の鉄則

既に随所で書きましたが、寿命予測を行うときには、次の鉄則を守ることが必要です。

- (1) 単純化する。これは、測定結果を直線近似などでできるだけ単純な形に置き換えるということです。
- (2) 安全サイドの推定を行う。決して危険側の推定結果になってはいけません。

4.3.2 熱劣化による長期劣化の予測法

(1) アレニウスの反応速度式

化学的に変化する現象は、アレニウスの反応速度式で表されます。ここではアレニウスの反応速度式自体には触れませんが、接着のように化学的に変化するほとんどの現象の基本となっています。簡単にいうと、ある一定の反応に要する時間は温度が高いほど短くなるということです。「10℃2倍則」という言葉を聞かれたことがあるかと思いますが、これは、温度が10℃上がるとある

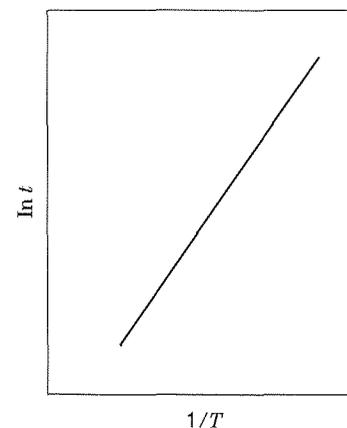


図 4.42 アレニウス法における温度（絶対温度）と劣化時間の関係

一定の反応に要する時間は半分になる、というのですが、常に10℃で速度が2倍になるとは限りません。アレニウスの反応速度式では、10℃で速度が何倍になるかがわかるのです。

アレニウスの反応速度式から、最終的には次のような関係が得られます。

$$\ln t = a + (E/R) \times (1/T)$$

この式は、図4.42に示すように、縦軸を対数時間 $\ln t$ ($\log t$) で示し、横軸を温度の逆数 $1/T$ で表示して、例えば、接着強度がある一定の割合まで劣化するのに要した時間 t と、劣化試験を行った温度 T の関係を数点プロットすると、傾きが E/R の直線関係が得られるということを表しています。ここで、 R はガス定数と呼ばれるもので一定の値 ($R = 8.314 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$)、 E は活性化エネルギーと呼ばれるもので、接着剤の種類などにより変化します。ここで、温度 T の単位は、℃ではなく°Kです。°Kは絶対温度と呼ばれる温度で -273°C が 0°K になります。化学で使用する温度はほとんどの場合°Kを使います。

図4.42で直線を引くためには、少なくとも3条件以上の温度と時間のデータが必要になります。

(2) アレニウス法による長期熱劣化の予測例

アレニウスプロットから直線関係を得るためには、図 4.43^{2)~4)} に示すように、まず、温度を3条件以上変化させた加速劣化試験を行う必要があります。ここでは、150℃、180℃、200℃、220℃の4つの温度条件における熱劣化試験を行っています。次に、アレニウスプロットを行うために、図 4.43 に示すように、劣化曲線を単純化するため直線近似をします。この近似直線から、それぞれの温度で接着強度がある保持率（ここでは、95%、90%、85%、80%、70%、60%、50%）まで低下する時間を求めます。150℃では強度低下していないので180℃以上の温度についてのみ求めています。

次に、図 4.44^{2)~4)} に示すように、横軸に絶対温度の逆数 ($1/T$)、縦軸に時間の対数 $\log t$ を取って、図 4.43 から求めた温度と時間の関係をプロットし、プロットした点に対して直線を引きます。この直線を試験温度以下の温度領域まで外挿することにより、実使用温度における劣化時間を予測することができるのです。

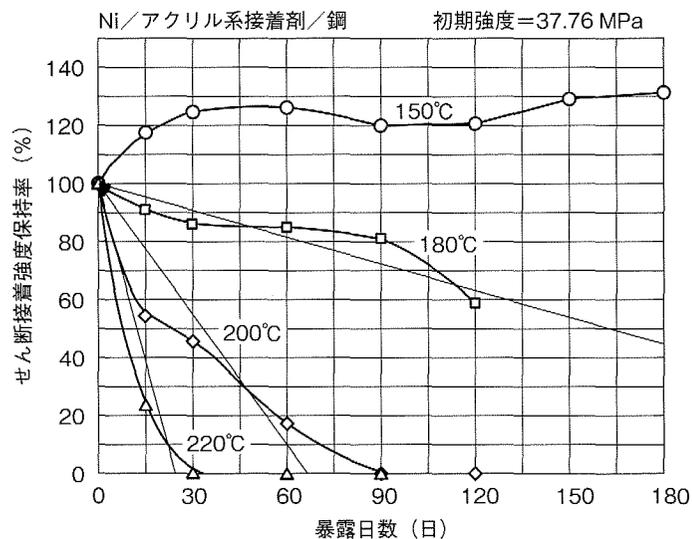


図 4.43 熱劣化の加速試験の一例

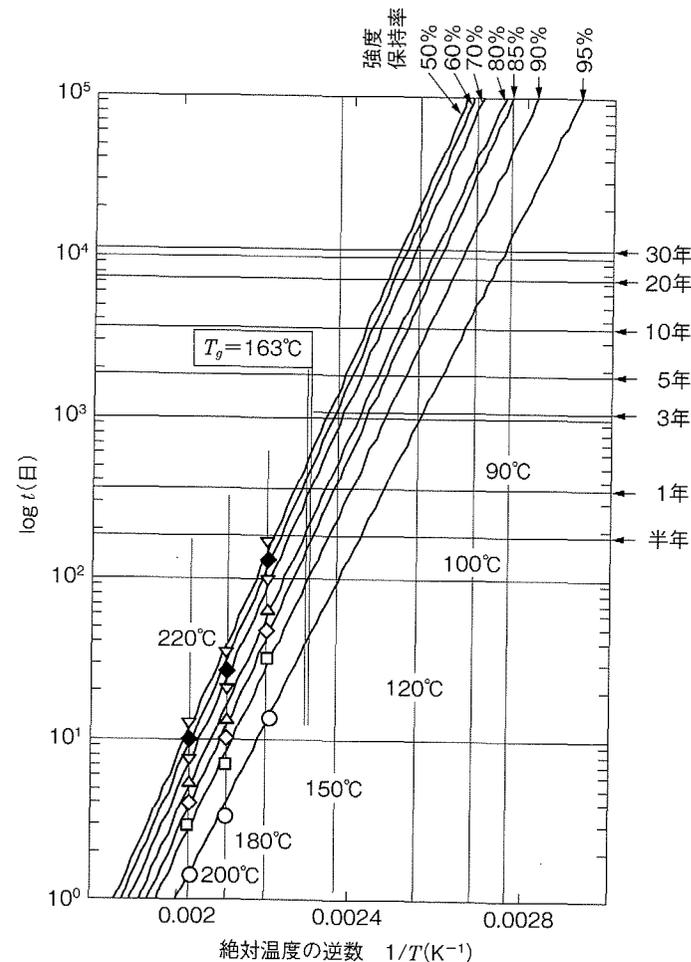


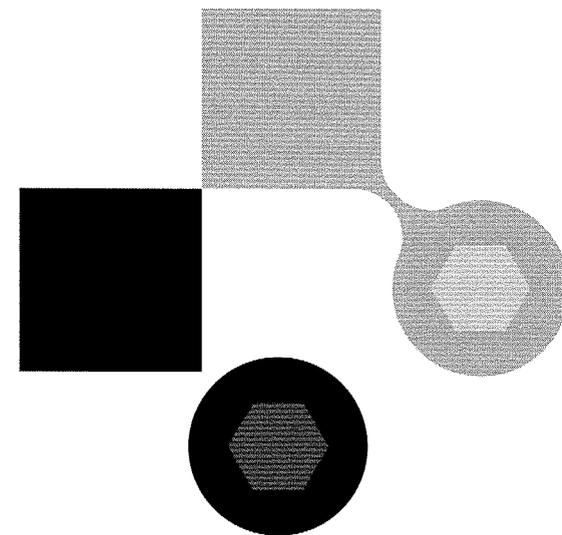
図 4.44 図 4.43 から求めた各強度保持率におけるアレニウスプロット

この図 4.44 から得られた予測結果は正しいのでしょうか。図 4.44 の結果から、150℃半年後の保持率を予測すると 91~92% 程度となります。しかし、図 4.43 の 150℃の実験結果では半年後も強度低下は起こしていません。これは、図 4.44 の図中に示したように、ここで使用した接着剤のガラス転移温度 (T_g) は 163℃であり、アレニウスプロットに使用した試験温度は全て T_g 以上でし

- 15) 原賀康介：“エレベーターパネルの接着”，接着の技術，Vol. 13, No. 1, p. 32 (1993)
- 16) 栢木浩之，山本 拓，押野幸一，下鍋達也，浜原京子，大橋義暢：新時代を担う構造接着技術 Part2 シンポジウムテキスト ((社)自動車技術会)，p. 23, 1994年3月10日
- 17) 原賀康介：「接着接合における長期信頼性の定量化法」，Mate 2003 (9th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”)，pp. 139-144 (2003-2-6, 7 (社)溶接学会主催)
- 18) 原賀康介：「耐用年数経過後の安全率の定量化による接着接合の設計品質の創り込み」，第33回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集，pp. 117-122 (2003-7-7 (財)日本科学技術連盟主催)
- 19) 平沼 勉，竹内豊和，栢木浩之，志村邦久：自動車構造接着技術特設委員会報告書 ((社)自動車技術会)，p. 56 (1992)

第5章

設計基準と安全率



5.1 簡易に設計するための設計基準と設計手順

5.1.1 設計基準と設計手順の必要性

接着剤による接合は、その特徴・機能から各種の産業分野で高度な適用がなされています。そこで、製品の組立てに接着を使いたいと思って設計基準なるものを探してみても見つからない、接着剤メーカーに問い合わせをしても使用できるかどうかの明確な回答は得られない、結局は接着の採用をあきらめざるを得ないというのが接着の現状なのです。すなわち、「接着」は、ボルト・ナットや溶接のように「工業的に汎用的な接合方法」とはなり得ていないのが現状なのです。では、航空機や自動車や電機機器において接着の高度な利用がされているのはどうやって達成されているのかというと、適用までには多大な研究開発や検証試験がなされてようやく採用されているのです。これには、十分な開発期間と開発リソースが必要なため、接着の採用によって大きな効果が得られる場合にしか採用は困難とも言えます。

筆者は信頼性に優れた接着を汎用的に使用できることを目的として長年種々の研究開発を行ってきました。その中で、これまでに、(1) 接着部の破壊状態は、凝集破壊率が40%以上であること、(2) 初期の接着強度の変動係数は、0.10以下であること、の2点を満たすことで信頼性に優れた接着を行うことができることを示してきました。しかし、これだけでは「簡易に設計を行う」には不十分です。第3の条件として、「設計基準に従って強度設計を行うこと」という項目を追加する必要があります。最近ようやくこの段階に到達することができました。

本章では、簡易に設計するための設計基準と設計手順を示しました。設計基準や設計手順は一種のマニュアルであるため、結論だけ示せばそれでよいのですが、少なくともその基準に至った経緯は理解した上で利用していただく必要があります。そこで、以下では、簡易に接着強度設計を行うための設計基準と

設計手順の考え方と求め方についても説明しています。

5.1.2 設計基準強度、設計許容強度の考え方

接着強度は、破断試験で求められることが一般的なのですが、破断強度を接着強度の実力値と考えるのは危険なことです。そこで、通常用いられている破断強度や平均値、劣化前の初期値などではなく、次に示すような接着強度の低下に及ぼす各種因子の影響を考慮して、接着強度の実力値を求めて、その強度を設計基準強度とします。

接着強度の低下に影響する因子として、(1) 接着強度の温度依存性、(2) 接着強度のばらつき、(3) 内部破壊の発生、(4) 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大、を考えます。

設計許容強度は、接着強度の実力値である設計基準強度を安全率で除した強度となります。

ここでは、5.1.1項にも示した信頼性に優れた接着を行うための基本条件の(1)、(2)を満たすところまで作り込みがなされた接着系であることを前提とするので、破壊状態は凝集破壊の場合について考えます。

5.1.3 接着強度の低下に影響する因子

(1) 接着強度の温度依存性

ここでは、室温での接着強度ではなく、製品の使用温度範囲において接着強度が最も低下する温度下での接着強度で考えます。図5.1に示すように、樹脂系の接着剤の場合は、温度によって接着強度が変化します。一般に、高温やかなりの低温領域では室温付近の強度に比べて接着強度が低下します。接着部の使用温度範囲において、接着強度が最も低下する温度下における接着強度を μ_T とし、室温での接着強度 μ_0 に対する μ_T の比率(μ_T/μ_0)を温度依存係数 η_T とします。 μ_0 、 μ_T は容易に実測できるので、温度依存係数 η_T は容易に求めることができます。

5.2 製品の耐用年数経過後の安全率の尤度の定量評価法

5.2.1 定量評価法の必要性

5.1節では、多大な評価試験や検証試験を行わないで接着が適用できるかどうかを簡易に判定するための設計基準と設計許容強度を説明しました。しかし、製品の構造設計、機能設計において最適設計や限界設計を追求する場合には、製品の耐用年数が経過した時点で安全率の尤度がどのくらい残っているかを定量的に評価して、尤度がある場合には更なる信頼度の向上やコストダウンに再配分していくことが必要となります。

そこで、ここでは、製品の耐用年数経過後における接着強度の安全率の尤度を定量的に求める方法^{6),7)}を説明します。

なお、本方法は、あくまでも第3章で述べた「高信頼性接着の基本条件」の(1)接着剤と被着材の界面で破壊する界面破壊を少なくして、接着剤の内部で破壊する凝集破壊の割合(凝集破壊率)を40%以上にすることと、(2)接着強度の変動係数 CV (=標準偏差/平均値)をできるだけ小さくし、初期状態における変動係数を0.10以下にすること、の2つの条件を満たすところまで作り込まれた系についての評価であり、接着剤や被着材料の表面処理などの選定のための相対評価試験ではないので、適用に当たっては注意していただきたい。

5.2.2 接着強度の経年変化の概念

図5.7に、接着強度の経年変化の概念図を示しました。接着強度は使用中の環境・応力によって経年変化を生じて強度が下がっていきます。実際には図5.7のように直線的に低下するとは限りません。初期の状態でも接着強度にはばらつきがあり、劣化に伴ってばらつきは増加していきます。第3章で説明したように、製品・部品ごとに設計時点で許容不良率が設定されています。高い

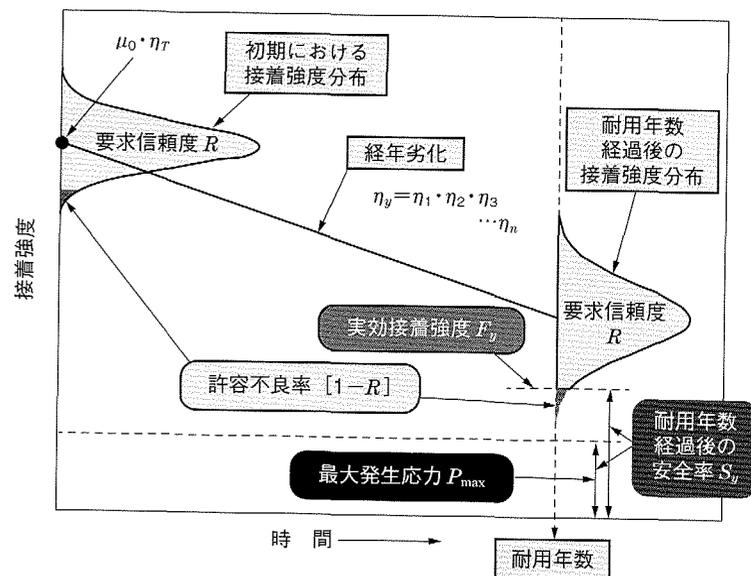


図5.7 接着強度の経年変化の概念図

信頼性が要求される製品・部品ほど許容不良率は低く設定されています。接着部に加わる応力の最大値を最大発生応力 P_{max} とすると、耐用年数が経過した時点での接着強度の分布において、許容不良率での接着強度(この強度を実効接着強度 F_y と呼びます)が最大発生応力 P_{max} 以上であれば不良率は許容不良率以内に収まります。この評価法で求めたいのは、この実効接着強度 F_y なのです。この実効接着強度 F_y が求まれば、最大発生応力 P_{max} との比較で、耐用年数経過後の安全率の尤度 S_y を求めることができます。

5.2.3 耐用年数経過後の安全率の尤度の算出法

(1) 評価のプロセス

図5.8に、評価のプロセスを示しました。

まず、耐用年数、許容不良率、使用環境・応力、最大発生応力 P_{max} などのスペックを明確にすることが必要です。

表 5.7 許容不良率、接着剤塗布面積比と安全率の尤度

許容不良率		1/10 万	1/1,000 万	1/1 億
接着剤	1.0	$S_y=2.51$	$S_y=2.11$	$S_y=1.94$
塗布	0.7	$S_y=1.75$	$S_y=1.47$	$S_y=1.35$
面積比	0.5	$S_y=1.25$	$S_y=1.05$	$S_y<1.00$

生応力は増加することとなるため、安全率の計算時に考慮することが必要です。接着面積の低減によって、部品寸法の小型化や接着剤使用量の低減、接着剤はみ出し量の減少による仕上げ作業の廃止などでコストダウンを図ることができます。

5.3 設計基準による安全率の尤度の検証

5.2.4 項で用いた事例について、5.1 節で説明した設計基準との整合性について検証してみましょう。

5.2.4 項の事例では、室温における平均せん断強度は 26.46 MPa、最高使用温度 100℃における温度係数は 0.23、劣化後のばらつき係数 D_y は 0.57（初期の変動係数 CV_0 は 0.067、許容不良率は 1/10 万）、最大負荷応力 P_{max} は 0.10 MPa でした。

5.1 節の設計許容強度を用いて適否を判定してみましょう。この事例では、高サイクル疲労が加わるので、表 5.3 の内部破壊係数 h_2 の場合で考えます。劣化後保持率は不明であるので低く見積もって 0.50 と仮定しましょう。劣化後のばらつき係数は 0.57 とわかっているので、表 5.3 から、設計基準強度係数は 0.07 程度となることがわかります。安全率 S を 1.5 倍とすると、設計許容強度係数は $0.07/1.5=0.047$ となります。すなわち、最大発生応力が 100℃強度 ($26.46 \text{ MPa} \times 0.23=6.09 \text{ MPa}$) の 0.047 倍以下であれば適用可能との判断ができるわけです。 $6.09 \text{ MPa} \times 0.047=0.29 \text{ MPa}$ なので、最大負荷応力 P_{max} の 0.10 MPa より大きいという結果となり、接着は使用可能という判定となりま

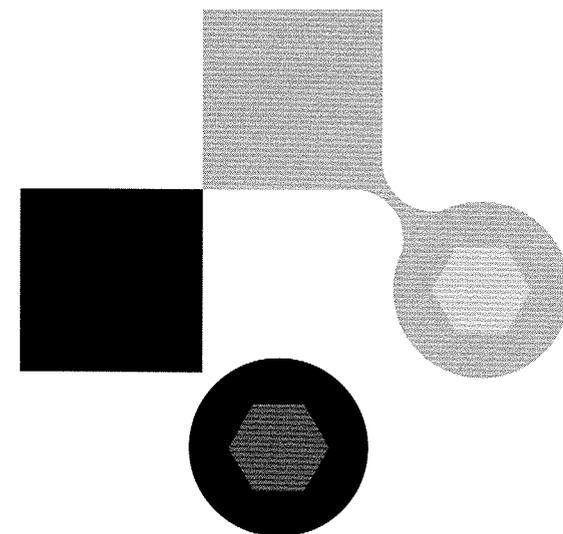
す。

5.1 節の設計許容強度によれば、安全率の尤度は $0.29/0.10=2.9$ 倍あることになります。5.2 節の評価結果での安全率の尤度は 2.51 倍であり、両者の整合はほぼ取れていると考えられます。

参考文献

- 1) 原賀康介：接着の技術誌, Vol. 32, No. 3, p. 62 (2012)
- 2) 原賀康介：接着の技術誌, Vol. 24, No. 2, p. 58 (2004)
- 3) 原賀康介：日本接着学会誌, Vol. 39, No. 12, p. 448 (2003)
- 4) 原賀康介：日本接着学会誌, Vol. 43, No. 8, p. 319 (2007)
- 5) 原賀康介：日本接着学会誌, Vol. 40, No. 11, p. 564 (2004)
- 6) 原賀康介：「接着接合における長期信頼性の定量化法」, Mate2003 (9th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics"), pp. 139-144 (2003-2-6, 7(社)溶接学会主催)
- 7) 原賀康介：「耐用年数経過後の安全率の定量化による接着接合の設計品質の創り込み」, 第33回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, pp. 117-122 (2003-7-7) (財)日本科学技術連盟主催)

接着剤の種類と特徴



1 接着剤の種類

接着剤の種類は、非常に広範囲にわたっています。接着剤メーカーは、大手化学メーカーから中小のブレンドメーカーまで極めて多く、カタログに載っている品種だけでも無数にあります。さらに、各接着剤メーカーは顧客のニーズに合わせて作業性や特性を調整・改良するため、接着剤の種類は昆虫の種類に匹敵するほどです。日本接着剤工業会が接着剤の生産量の推移の表で分類している接着剤の種類を付表1¹⁾に示します。

実際に接着剤を選定していく場合は、成分、形態、固化・接着方法、機能、特性などを考えることが必要です。以下に、これらの面からの分類を示しました。

2 接着剤の分類

2.1 成分による分類

付表2²⁾に、接着剤の成分による分類を示しました。接着剤には有機材料系、無機材料系があり、有機材料系においては広範囲の樹脂材料が接着剤として使用されていることがわかります。実際の接着剤では、1種類の成分だけでなく、接着特性を向上させるために2種類以上の成分が組み合わせている場合も多くあります。

2.2 形態による分類

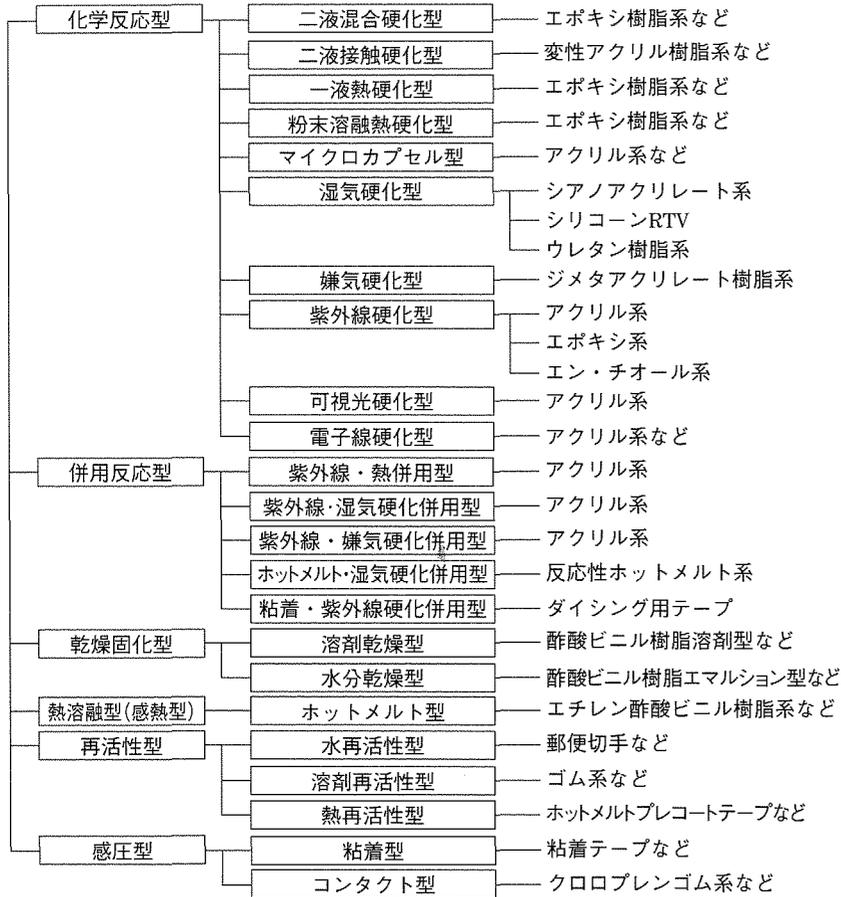
付表3²⁾に、接着剤の形態による分類を示しました。固形のもの、粘着テープ類や熱で溶融して接着するホットメルト系が大半ですが、エポキシ系接着剤には粉末状や、ハニカムサンドイッチパネルの製造や航空機部品の組立てに使用されるようなフィルム状のものもあります。

付表1 接着剤の種類別生産量推移（日本接着剤工業会）

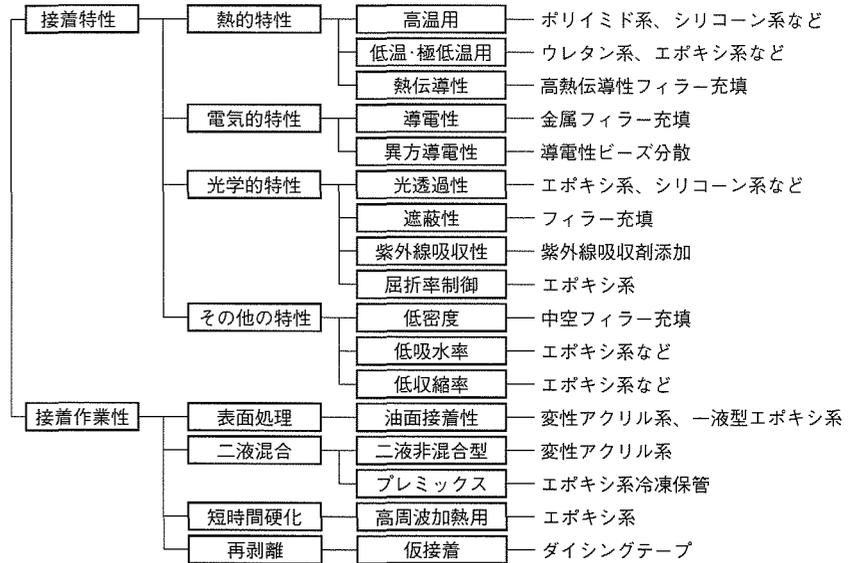
(単位：トン)

接着剤	2007	2008	2009	2010	2011	2012
ユリア樹脂系接着剤	101,226	72,592	65,223	57,469	61,263	61,808
メラミン樹脂系接着剤	112,091	66,778	64,856	54,015	38,364	33,544
フェノール樹脂系接着剤	96,908	82,761	97,348	109,706	116,079	103,826
[溶剤形接着剤]						
酢酸ビニル樹脂系溶剤形接着剤	4,025	3,479	2,829	2,131	1,856	1,705
その他の樹脂系溶剤形接着剤	12,859	20,366	16,519	17,740	15,045	14,860
CR系溶剤形接着剤	16,485	13,506	10,239	10,533	10,023	10,629
その他の合成ゴム系溶剤形接着剤	10,466	11,887	9,739	10,922	9,849	9,386
天然ゴム系溶剤形接着剤	1,150	1,003	847	889	1,370	1,198
[水性形接着剤]						
酢酸ビニル樹脂系エマルジョン形接着剤	91,927	84,926	73,035	73,850	82,441	76,208
酢酸ビニル共重合樹脂系エマルジョン形接着剤	10,269	6,710	7,937	8,041	8,654	9,620
EVA樹脂系エマルジョン形接着剤	44,663	36,376	27,492	27,863	33,028	32,000
アクリル樹脂系エマルジョン形接着剤	73,883	49,946	46,531	48,202	49,907	52,879
その他の樹脂系エマルジョン形接着剤	26,288	6,070	4,853	6,041	10,359	10,528
水性高分子—イソシアネート系接着剤	22,232	16,112	15,763	18,527	18,857	18,070
合成ゴム系ラテックス型接着剤	18,034	13,088	10,811	10,991	10,461	11,887
その他の水性形接着剤	11,566	5,665	4,507	4,156	6,729	25,950
[ホットメルト形接着剤]						
EVA樹脂系ホットメルト形接着剤	53,285	41,096	38,895	39,519	38,638	38,151
合成ゴム系ホットメルト形接着剤	51,748	52,799	48,964	54,366	51,194	50,381
その他のホットメルト形接着剤	12,517	13,810	11,480	13,900	14,673	13,298
[反応形接着剤]						
エポキシ樹脂系接着剤	18,443	19,037	15,954	17,981	18,185	20,955
シアノアクリレート系接着剤	946	870	780	1,060	805	1,038
ポリウレタン系接着剤	61,205	64,193	57,137	51,870	39,833	42,437
アクリル樹脂系接着剤	1,607	1,402	1,248	1,741	1,612	1,354
その他の反応形接着剤	12,421	15,262	13,851	15,227	25,132	36,131
[感圧形接着剤]						
アクリル樹脂系感圧形接着剤	151,254	54,852	100,314	107,462	127,281	128,554
ゴム系感圧形接着剤	30,944	18,780	16,494	18,480	17,606	17,059
その他の感圧形接着剤	1,890	403	197	902	3,742	2,878
[その他接着剤]						
[工業用シーリング材]	14,531	13,584	15,851	16,632	3,318	6,251
[工業用シーリング材]	43,041	27,743	21,208	23,412	24,369	18,166
合計	1,107,905	815,116	800,903	823,628	840,672	850,750

付表4 接着剤の固化・接着方法による分類



付表5 接着剤の機能による分類



3 各種接着剤の特性

付表6²⁾に、各種の接着剤の特性の比較を示しました。表中のランクはあくまでも一般的なものであり、それぞれの種類の接着剤にも種々の改良品があります。

4 エンジニアリング接着剤の特性

機器組立てに多用される接着剤はエンジニアリング接着剤と呼ばれています。以下に、エンジニアリング接着剤の特性について説明します。