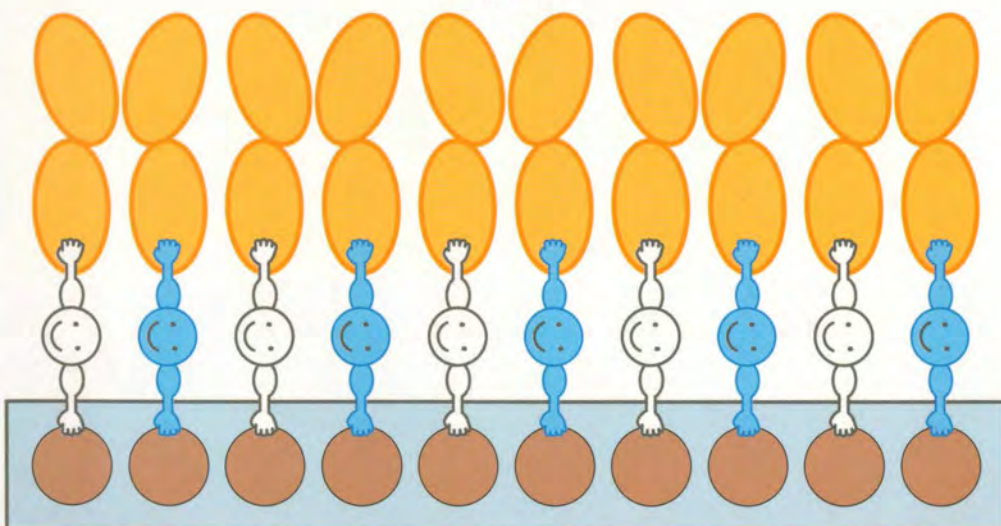


高信頼性接着の 実務

事例と信頼性の考え方

原賀 康介 著

Haraga Kosuke



高信頼性接着の実務

事例と信頼性の
考え方

原賀 康介 著
Haraga Kosuke

接着を使いこなす 現場必携の本

接着強度が高く、ばらつきが少なく、耐久性にも優れた
接着の作り込みのための基礎を事例とともに解説

日刊工業新聞社



第 1 章

接着接合の特徴・機能と、 事例に見る活用と効果

はじめに

接着剤による接合は、一般に弱くてすぐに剥がれるもの、あまり信頼できないものというイメージが強い。しかし、接着接合は、溶接以上の強度を発揮することもできるし、長期間の耐久性が要求される用途でも多くの実績を有しているものである。また、接着接合は、他の接合法にはないさまざまな特徴・機能を有しており、現在ではあらゆる産業分野で使用されている。第1章では、接着接合の特徴・機能と得られる効果と、実際の適用事例を通じて接着接合の特徴・機能がどのように活用されてどのような効果が得られているかについて述べる。

1. 接着接合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、焼き嵌め・圧入、接着・粘着など種々の方法が用いられている。表1に、各種接合法の特性の比較を示した。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る。

2. 接着接合の特徴・機能と効果

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る。

(1) 異種材接合一適材適所の材料選定が可能—

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ある。接着剤の選定は必要であるが、同種材料同

表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
接合歪み・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	○	○	×	×	◎	◎
箱体剛性	○	×	×	×	◎	○
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 ×>△>○>◎

士や異種材料同士でも比較的容易に接合できる。

溶接の場合は、基本的に同種金属同士の組み合わせでなければならないため、接合する両部品とも同じ金属で製造せざるを得ないが、接着を用いれば、鋼とアルミ、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る。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。

3 接着接合の欠点

接着にはさまざまな特徴・機能があることを述べたが、当然次に示すような欠点も有している。

(1) 接着剤の選定が難しい

接着剤と一口に言っても非常に多くの種類があり、その中から最適なものを選定するにはかなりの経験を要する。複数の接着剤メーカーに問合せをしながら選定する必要がある。

(2) 熱に弱い

有機物の接着剤は耐熱温度に限界がある。400℃を超えると炭化したり発火燃焼するものが多い。大きな強度が加わらない部分であればシリコン系接着剤が一般に広く使用されている。エポキシ系やフェノール系、ポリイミド系などの耐熱温度が高い接着剤は、強度的特性、作業性などに難があるものも多い。

(3) 耐久性に不安がある

接着接合物の耐久性は決して悪いわけではなく、屋外で30年間の耐久性が要求される機器などにも多く使用されており実績もある。しかし、新たに使用する場合、どの程度の環境でどのくらいの期間耐え、どのような状態にな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である。この点に関しても、接着剤メーカーの技術部門やコンサルタントなどに相談するのが早道である。

(4) 固まるまで時間がかかる

瞬間接着剤のように数秒で硬化するものもあるが、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ある。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ある。例えば、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、接着とりベット（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ある。

(5) 部品の材料によって接着できないものがある

接着剤は全ての材料に接着するわけではない。テフロンなどのフッ素樹脂、ポリエチレン（PE）やポリプロピレン（PP）には接着できないというのが一般である。ただし、最近では各種の難接着材料に適した接着剤も開発・販売されているので、まずは接着剤メーカーに相談されたい。

(6) 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ある。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るが、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ない。

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である。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である。

(7) 設計基準が明確でない

最適設計、限界設計を行うためには、機能設計や構造設計の段階で、接合部の材料、構造、寸法などを詰める必要があるが、溶接やねじ、ボルトのように強度面での設計基準は明確になっていない。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、標準というものがいないためである。

このように、接着剤を用いる接着接合には種々の欠点や問題点、課題はあるが、ねじ・ボルト、溶接、ろう付け、はんだ付けなど他の接合方法においても

種々の欠点や問題点、課題を抱えている点では同じである。欠点があるから使わないのではなくて、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である。欠点のないものなどないのは表1から明らかである。

次に示す種々の適用事例から接着の特徴・機能がどのように生かされ、欠点がどのようにカバーされているのかを学び取って上手に活用して頂きたい。

4. 接着接合の適用事例

—接着の特徴・機能の生かされ方—

接着接合の特徴や機能が実際にどのように生かされているのかを、実際の適用事例で見てみよう。ここでは、筆者が長年にわたって主として携わってきた産業用機器や各種の設備機器およびそれらの関連機器における適用例について示す。

4.1 二液室温硬化型変性アクリル系接着剤について

以下に述べる適用例では、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤が多く使用されているので、最初にこの接着剤がどのようなものであるかについて説明する。

二液室温硬化型変性アクリル系接着剤は、名前の通り A 剤と B 剤からなる二液型で、室温で短時間に硬化する接着剤である。別名を SGA (Second Generation Acrylic Adhesives: 第二世代のアクリル系接着剤) とも呼ばれている。主成分は名前の通りアクリル系樹脂であるが、柔軟なエラストマー (ゴム成分) も含まれている。硬化後の接着剤を電子顕微鏡で観察すると、図7⁶⁾に示すように、柔らかいエラストマー (写真で黒く見えている部分) の海の中に固いアクリル成分 (写真で白く見えている数 μm の粒状の部分) が島のように分散した構造になっている。このような微視的構造は海島構造やポリマーアロイと呼ばれており、1+1=3 にもなりうる強靱な性能を発揮することができる。

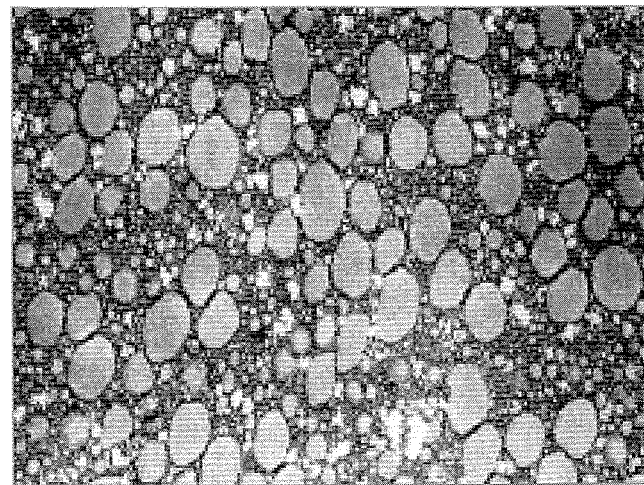


図7 二液室温硬化型変性アクリル系接着剤の海島構造
(電気化学工業(株)製ハードロック)

る。すなわち、固いアクリル成分による高いせん断接着強度や引張り接着強度と、柔らかいエラストマー成分による耐衝撃性や剥離接着強度の高さを併せ持つものである。

その他にもこの接着剤には多くの特徴がある。まずは、油が付着した面でも油を除去することなく使用できることである。この特徴は板金部品の接着においてはきわめて大きな利点である。図8⁶⁾は、油が多量に付着したままの鋼板を接着し、硬化後に剥離させた接着部の写真であるが、接着剤が両方の部品の接着部にきれいに残っている。このように、接着剤の内部で破壊する状態を凝集破壊と呼んでおり、凝集破壊は高信頼性接着の基本条件である。次に、二液型で配合比は1:1が基本であるが、エポキシ系接着剤やウレタン系接着剤などのように二液をきちんと計量する必要はない。配合比が2:1から1:2くらいに変化しても接着性能にはほとんど変化がない。これは、この接着剤の硬化反応がラジカル反応という連鎖反応によるものであるためである。二液が接触すれば十分に混合されていなくても連鎖反応が始まり、接着剤全体が硬化するためである。

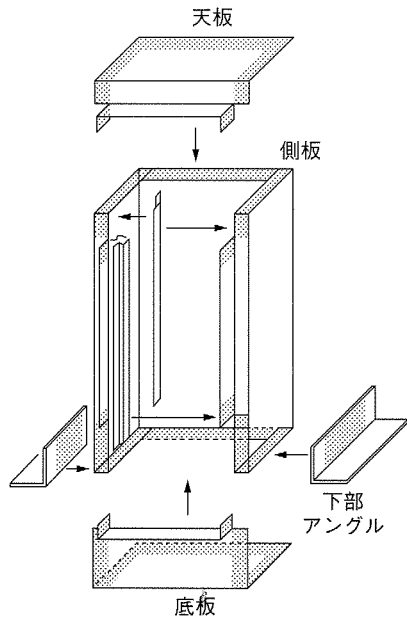


図 25 小型筐体における接着構造の例

されている。

また、リベット（ファスナー）は、次のような役割も果たしている。電着塗装時の電気的導通の確保、アースや電磁シールド性の確保、焼付け塗装時の高温での接着剤の軟化に伴う変形の防止、接着剤の長期クリープの防止、ビル火災などにより制御盤が延焼した場合の最低限の形状維持などである³⁾。

接着接合で組立てる場合は、面接合とするために糊しろを作る必要がある。図 25¹⁸⁾には、高さ 1 m 程度の小型筐体（図 24 (A) の列車無線中継器用筐体）の構造を、図 26^{3,7,16,17)}には、高さ 2.3 m 程度の標準的な筐体（図 24 (B) の工業プラント用制御盤筐体）の構造を示した。

図 27³⁾には、接着・リベット併用組立法と従来の溶接組立における製造工程の比較を示した。プレコート鋼板とは、鋼板メーカーですでに塗装までされた鋼板である。表 3⁷⁾には、重量、作業時間、コスト、使用エネルギーなどの比

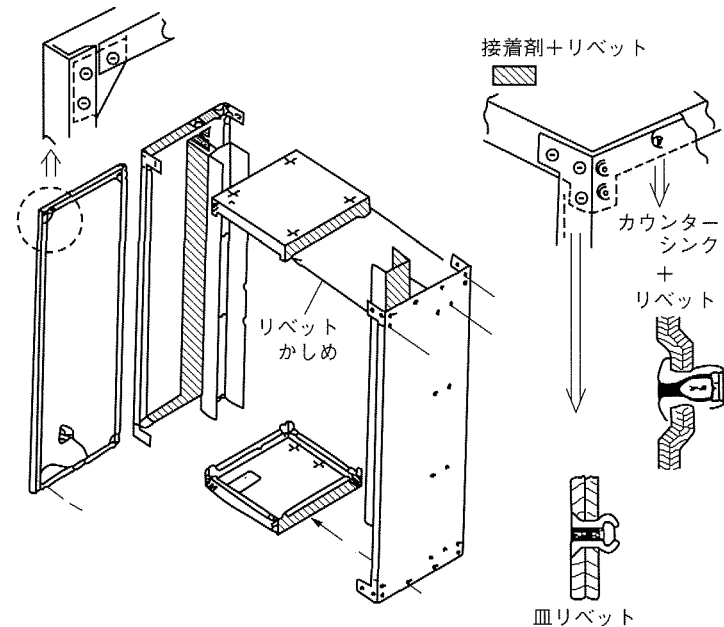


図 26 接着・リベット併用による制御盤用金属筐体の組立構造の一例 (800 w × 800 D × 2300 H)

較を示した。

接着剤は、油が付着したまま使用できる二液室温硬化型変性アクリル系接着剤が使用されている。図 24 の列車無線中継器用筐体や船舶用軽量高剛性筐体は 1980 年代ははじめから、工業プラント用制御盤筐体などの標準的な筐体は 1994 年頃から接着組立がなされており、屋外でも多くの実績が得られている。

(2) フレーム構造筐体

先に述べた金属筐体は、基本的にパネル構造部品で構成されているが、大型重量筐体では、フレーム構造のものが多く。フレームは、形鋼をアーク溶接で組立てるのが一般的な作り方である。しかし、形鋼の切断・切削・溶接、強度・剛性、軽量化の点では多くの課題を有している。図 28³⁾に示すものは、高さ 2.7 m、幅 2.0 m、奥行き 2.0 m × 3 連、筐体重量 1000 kg × 3 連、製品重量 5 t

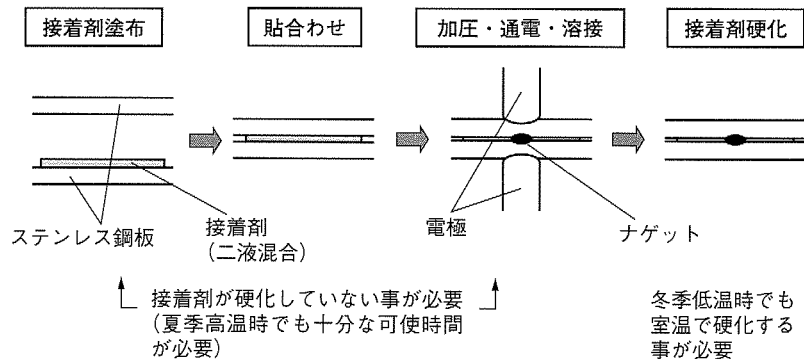


図 35 二液室温硬化型変性アクリル系接着剤によるウェルドボンディングの接着プロセス

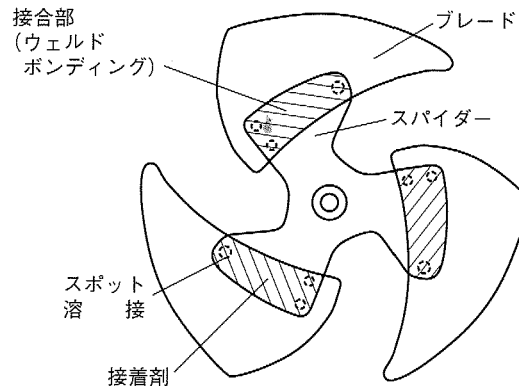


図 36 ウェルドボンディングによる送風機の羽根組立構造

るため、ある程度の板厚が必要となり薄肉化、軽量化に限界があった。また、リベット締結後に塗装を行っても塗料が接合部の内部まで十分に入らず、使用中に錆が発生するという問題もあった。

そこで、薄板化・軽量化と接着剤の隙間充填性による赤錆の防止を目的に、接着剤とスポット溶接を併用するウェルドボンディングが適用され、ブレードを高張力鋼板で薄板化することにより、30~40%の薄板化、軽量化が実現している^{7,9)}。スポット溶接の役割は、薄板のブレードを厚板のスパイダーの曲

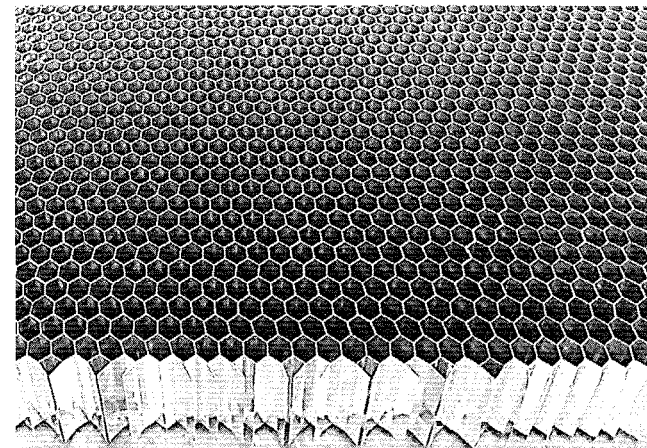


図 37 ハニカム (アルミ製)

面に沿わせることと、接着剤硬化までの固定、接合信頼性の向上である。また、リベットの突起もないので外観意匠性にも優れるなどの効果も得られている。

接着剤は油面接着性を有する一液加熱硬化型の構造用エポキシ系が使用され、油面に塗布して貼り合わせ、スポット溶接の後、焼き付け塗装ラインで160℃~180℃で塗料と接着剤が同時に硬化される。

1989年に産業用有圧換気扇の羽根組立てにウェルドボンディング法が採用⁷⁾されて23年程度が経過したが、現在でも接着不良や錆発生の問題は生じていない。

4.5 軽量ハニカム構造物の接着組立て

4.5.1 ハニカムとは

図 38 は、ハニカムコアと呼ばれるものである。材質は、アルミや紙、樹脂製などがある。以下、アルミハニカムを例として説明する。

このハニカムの製造方法は、図 38²²⁾に示すように、2/100 mm~8/100 mm 程度の薄いアルミ箔に筋状に接着剤を印刷塗布して、アルミ箔を切断し、一枚ごとに接着剤が塗布されている部分と塗布されていない部分を交互にずらして

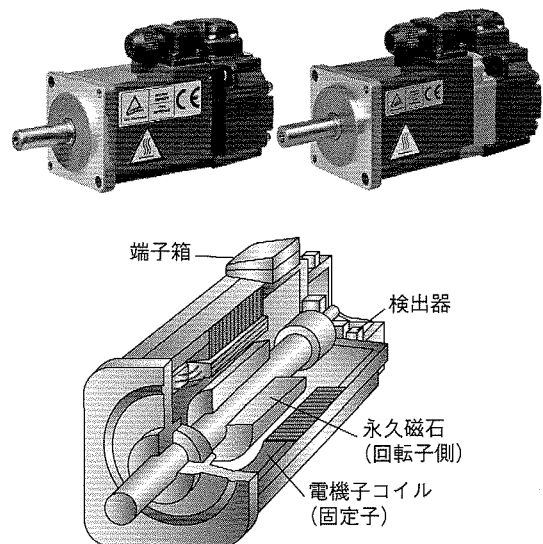


図 54 FA 用サーボモーターの外観と構造図

トパイプ埋込み型パネルが使用されている。ヒートパイプ間及びヒートパイプとパネル表皮の接合はフィルム状接着剤が使用されている。また、機器搭載面と反対側のパネル表面には、太陽光による吸熱量を抑え搭載機器からの発熱を宇宙空間に逃げやすくするために、ガラスに銀を蒸着したオプティカルソーラリフレクタ（40 mm×43 mm）と呼ばれる熱制御材が1枚のパネルに約 2500 枚接着されている。接着の方法は太陽電池とほとんど同じである。

4.6 モーターの永久磁石接着

4.6.1 FA 用サーボモーター

図 54³³⁾は、工作機械やロボットなどの高精度位置決めが必要なところに使用される FA 用サーボモーターの外観と構造図で、モーターの小型・軽量化、省エネ・高効率化のために永久磁石化が急速に進んでいる。図 55³⁴⁾はローターの構造の一例を示したもので、ローターコア（鉄心）の周囲に永久磁石が接着されている。小型のモーターでは図 56(A)³⁵⁾に示すようなリング状磁石が、

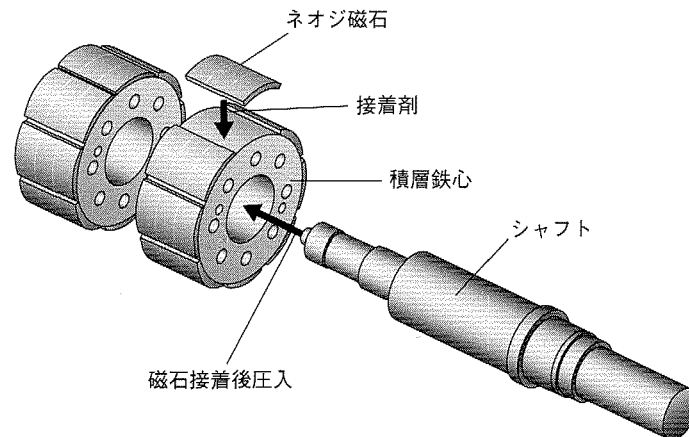
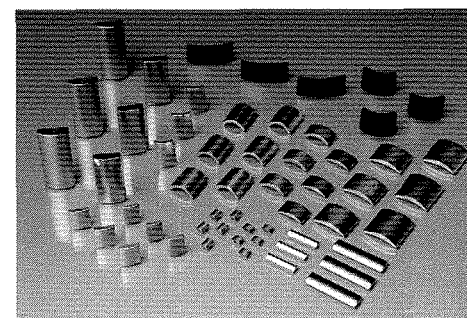


図 55 AC サーボモーターのローターの構造の一例

(A) リング状磁石
(提供：(株)ダイドー電子)

(B) セグメント状磁石(提供：信越化学工業(株))

図 56 各種のリング状磁石とセグメント状磁石

小型以上では図 56(B)³⁶⁾に示すようなセグメント状磁石が使用されている。磁石は希土類系、フェライト系などが使用されるが、最近は強力な Nd-Fe-B 系磁石が多い。Nd-Fe-B 系磁石は腐食しやすいので、磁石の表面はめっきや塗装がされるものが多い。接着剤としては、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤、エポキシ系接着剤、嫌気性接着剤などが使用されている。接着接合の使用目的は、異種材料の接合ができること、部品の表面を直接接合するので小型化

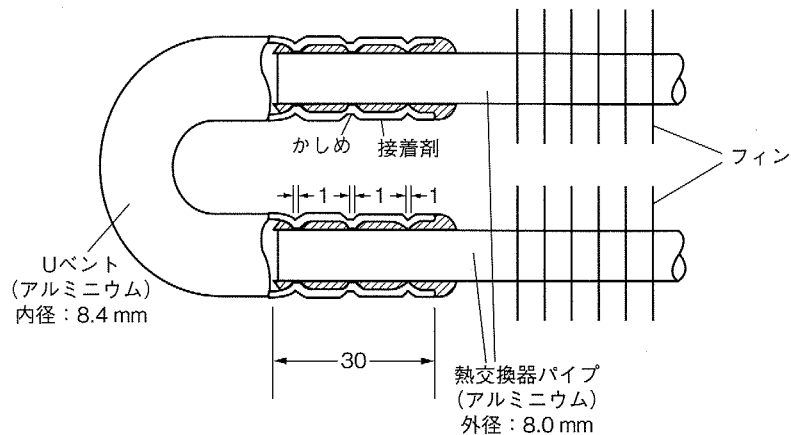


図 77 熱交換器における接着・シール構造の一例

圧シール性が要求される。

このような条件に耐える接着剤として一液加熱硬化型のペースト状エポキシ系接着剤が使用されている。Uベントに接着剤を塗布して相手側に挿入すると必ず部分的に接着剤が欠き取られ、そのまま接着剤を硬化させるとほとんど漏れ不良となる。そこで、図 77 に示すように、挿入後に外管をバンド状にかしめてつぶして接着剤を接続部全体に均等に流動させることにより漏れ不良は 1/20 万以下となる⁶⁰⁾。耐圧強度は 14 MPa (140 Kgf/cm²) 以上あり、接着部ではなくアルミパイプ自体が破裂する。オールアルミ熱交換器の組立てに接着法を採用してからすでに 30 年以上が経過したが、現在でも性能検用実機での冷媒漏れもなく順調に稼働している。

4.8.2 ゴルフクラブ

図 78⁶¹⁾ はゴルフのクラブである。ヘッドとシャフトは接着剤で接合されている。耐衝撃性が要求されることから、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤が多用されている。

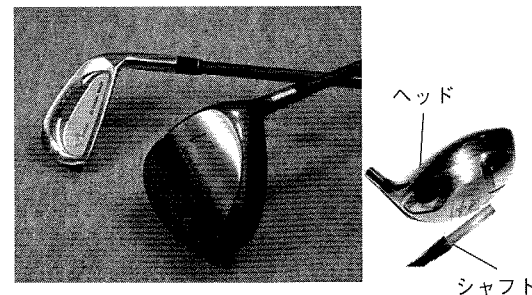


図 78 ゴルフクラブのヘッドとシャフトの接着組立

おわりに

以上に、接着接合の特徴・機能と実際の適用における活用事例と効果を紹介した。接着の特徴・機能を有効に活用することによって、多くの効果を得ることができる。接着には欠点もあるが、欠点があるから使えない、使わないではなく、いかに欠点をカバーしながら利点を生かしていけるかが、適用の成否につながる。

先に述べた種々の適用例の成功の裏には、信頼性の高い製品を作るために多くの技術検討や開発が実施されていることを忘れてはならない。見よう見まねでの適用は怪我の元である。信頼性の高い製品を作り込むためには、多くの要素技術を知って、評価・検討することが重要である。信頼性の高い接着接合を行うための要素技術の連携を「接着設計技術」「接着管理技術」と呼んでいる。次章では、この「接着設計と接着管理」について説明する。

参考文献

- 1) 有機エレクトロニクス材料研究会編：「エレクトロニクスと接着」“電機・電子機器における接合設計（原賀康介）” P.7-42、ぶんしん出版（1998）
- 2) 新日鐵住金ステンレス(株) ホームページ：<http://www.ns-sc.co.jp/product/special/vibeless/>
- 3) 原賀康介：“電気機器における構造接着技術”、溶接学会誌 Vol.70, No.2, 253、溶

第2章

接着設計技術と 接着管理技術

はじめに

接着接合は、接着後の検査が難しい、失敗した時のやり直しが困難、液体を使用する接合であること、化学的な接合であること、接着剤の種類が非常に多いなど他の接合法とは異なる点が多い。また、接着される部品の状態、接着剤、作業環境などは時々刻々と変化している。接着作業のたびにその変化を敏感に捉えて、変化に対応できるプロセス作りや作業管理の構築が必要である。接着設計の段階では、種々の変化に対する許容範囲をできるだけ広げる工夫が必要である。実際の接着組立工程においては、種々の変化の状態をいかに判定し、適切な作業をするかの管理の仕方が重要となる。

第2章では、接着の特徴・機能を最大限に活用し、高性能・高機能で信頼性に優れ、しかも生産性にも優れた接着組立を行うために重要な接着設計技術と接着管理技術について説明する。

1. 接着設計技術と接着管理技術

1.1 接着設計技術とは

「接着設計技術」とは、接着の特徴・機能を最大限に活用し、欠点をカバーして、高性能・高機能で信頼性に優れた製品を高い生産性で製造するための開発段階での作り込みの技術である。簡単に言えば、接着の特徴・機能を使いこなす技術である。接着設計がうまくできていれば、実際の接着組立工程での管理は非常に楽になり、安定した品質の製品を効率よく生産することが可能になる。逆に言えば、接着設計がうまくできていなければ、組立て現場では無駄な作業が増え、安定した品質や効率的生産に支障が生じることとなる。すなわち、接着組立の品質、生産性は接着設計で決まるということである。

「接着設計」は、製品の開発コンセプトが決定して基本構想が決まった後に展開される技術開発である。「接着設計」の開発キーマンには、製品スペック

と基本構造図面が提示された時点で、材料、プロセス、接着構造、治工具・設備、管理・検査方法などの全体を瞬時にイメージできる能力と経験が求められる。残念なことであるが、このような全体が見通せる技術者は、大手企業といえども非常に少なく、年々減少しているのが現実である。日本がもの作り立国として生きていくためには、このような技術者の育成が重要な課題である。

1.2 接着管理技術とは

接着剤での組立てが終了した後に、その接着部の健全性を非破壊で検査することは容易ではない。また、部品の位置ずれが見付かった場合に、部品を傷つけずに分解・再生することも容易ではない。完成後の検査や修復をなくして、常に安定した品質の接着組立を行うためには、接着組立の各工程での適切な作業管理が重要である。

「接着管理技術」とは、「接着設計」段階で規定された最適条件と許容条件の範囲に従って適切な接着組立を行うために、組立現場において実施される検査や管理の技術である。接着される部品の状態、接着剤、作業環境などは時々刻々と変化しているので、接着工程ごとにその変化をいかに的確に捉えるかが、高い品質で効率的な組立てを行う基本となる。

「接着管理」は実際の製造工程での管理であるが、「接着設計」が全て終了した段階から始まるのではなく、「接着管理技術」と「接着設計技術」はコンカレントに相互にリンクして、技術の作り込みをしていくことが必要である。

2. 接着設計技術と接着管理技術における要素技術

2.1 接着設計技術における要素技術

「接着設計技術」は、図1に示すように、接着技術に関する機能設計、材料設計、構造設計、工程設計、設備設計、信頼性設計などの要素技術から成り立っている。各要素技術の概要は次の通りである。

で規定された最適条件と許容範囲内の条件で作業を行えば問題はないが、作業条件が許容範囲内に入っているかどうかの管理は工程管理の担当項目である。また、前工程までで各工程において行う作業に適した状態にきちんとできているか、その工程で行った作業は後工程に問題はないかの確認・管理も工程管理の担当項目である。

接着剤やプライマーなどは化学品であるため、工程でトラブルが発生した場合、作業場の温度や湿度などによって対処法や対処に許容される時間は変化する。材料の成分、物性、反応機構などを理解した上で、適切な対処を行うのも工程管理の重要項目である。

作業手順、方法、条件を勝手に変更することは厳禁である。工程改善のために、作業要領書で規定された内容から何らかの変更を行う場合は、作業者は工程管理者に事前に変更内容を提案し、工程管理者は工程設計者とともに変更内容の適否を吟味し、変更点通知書に記録、承認後、はじめて変更を実施する。このステップを義務付けることが重要である。

(4) 設備管理

設備管理は、設備や冶工具、器具などが常に最適な作業条件を維持できるように調整・管理する技術である。設備が順調に稼働していたとしても、二液の配合比のずれ、混合の程度、塗布ノズル内の接着剤ゲル化物の付着状態、接着剤内への気泡の混入状態などは変化していることもある。使用する材料の成分、性状・物性、反応機構を理解した上で、それらの変化を見分けられる診断能力も必要である。

組立て治具への接着剤の付着硬化は、後から組み立てる製品の精度に直接影響するため、常に清浄にしておくなどの管理も必要である。

(5) 検査・品質管理

接着組立が終了した製品での接着部の健全性の検査は困難であるため、各工程において検査をすることが重要である。基準値から外れていた場合には、次

工程に流さずに、前工程にさかのぼって原因を究明して対策を講じる必要がある。

完成した接着部品の性能評価は、一般に抜き取り検査やダミーサンプルによる接着強度試験がなされる。しかし、接着作業場の近くに強度試験機が設置されていることはまれであり、高価な試験機を使用しないで簡便に試験ができるようにすることが必要である。

接着作業には、表面処理・表面改質から接着作業までの時間、接着剤の計量・混合から貼り合せまでの時間、硬化時間など経過時間が接着品質に及ぼす影響は大きい。作業場の温度も同様である。そこで、組み立てた部品ごとに各工程での経過時間と温度を自動記録しておく、不具合が生じた時の原因究明に有効である。

接着工程において高品質の接着を行うためには、作業者の教育・指導が重要である。重要な部分の接着の場合は、認定作業員による指名作業工程とすることも必要である。

3. 接着設計技術の勘どころ

接着設計技術の各要素技術におけるポイントを以下に述べる。

3.1 機能設計

接着接合は、次のような特徴・機能を有しており種々の効果が得られる。詳細は第1章に述べたが、列挙すると、①異種材接合一適材適所の材料選定一、②部品表面での接合一小型化、高密度化一、③低歪み接合一製造工程合理化、精度の向上一、④接合に力を要しない一部品の高精度位置合わせ、平坦度確保一、⑤隙間充填性一部品の高加工精度の低減や熱的、光学的機能の向上、電食防止、シール性、振動吸収性一、⑥低温接合一熱に弱い材料の使用一、⑦面接合一薄板の高強度接合、剛性向上一、⑧熟練技能は不要一素人工化一、⑨低エネルギー接合一組立工程の省エネルギー化一、⑩高価な設備は不要、室温硬化型

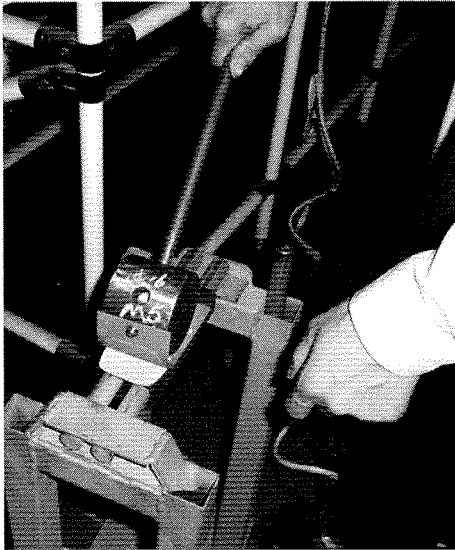


図19 手動てこ式簡易ローラーはく離試験装置

3.6 信頼性設計

(1) 部品、材料の品質管理

部品や材料の、品質管理体制のチェック、工程能力指数の確認、QC工程表に基づいた工程監査の実施、メーカー出荷検査の項目・評価方法・条件の決定などを行う。

(2) 接着製品のばらつきの評価

接着された製品の信頼性を確保する（低強度品を減らす）ためには、ばらつきを減らす、平均強度を高くするという二つの手段がある。しかし、平均強度を高くするためには構造・材料にまでさかのぼる必要があり現実的ではない。そこで、ばらつきを小さくするほうが低強度品を排除するには適当である。接着組立てされた製品の抜き取り試験でばらつきを評価することは重要である。また、抜き取り検査の方法、判定基準の明確化も必要である。

4. 接着管理技術の勘どころ

4.1 部品管理

(1) 部品の検査

部品の受け入れ時には、部品が図面通りの寸法・公差でできているか、材質に間違いはないか、バリは除去されているか、めっきや塗装は規定通りにできているか、表面粗さは規定通りか、表面状態に異常はないかなどを検査する。接着に関係する寸法やスペックが図面に規定されていない場合には、図面に規定してもらうように工作部門や品管部門から設計部門に要求することが必要である。

(2) 部品の変形

図20(a)に示すように平面であるべき接着面が、(b)や(c)のように変形していたり、図17(a)のようなハット形断面の薄板金補強材では、曲げ角度が悪くて断面が(b)や(c)のような形状となっていたり、長手方向には(d)や(e)のように反りが生じていることがある。このように接着面が変形していると、接着層の厚さや接着剤の拡がり方が変化して接着性能がばらついたり、部品の傾きなどによる製品不良にもつながる。特に、海外で製造している部品については、公差外のものが高率で含まれているので要注意である。

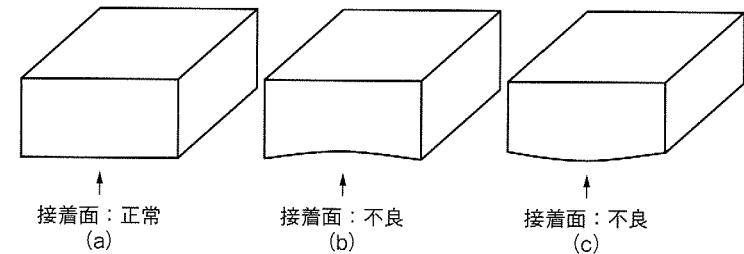


図20 部品の加工精度による接着面の変形例

である。重要な部分の接着の場合は、認定作業による指名作業工程とするこ
とも必要である。

(5) 硬化接着剤の保管

計量・混合後の接着剤を小さな容器に採取しておくことにより、硬化状態を
調べることができる。

(6) 変更点通知の徹底

作業手順、方法、条件を勝手に変更することは厳禁である。工程改善のため
に、作業要領書で規定された内容から何らかの変更を行う場合は、作業者は工
程管理者に事前に変更内容を提案し、工程管理者は工程設計者とともに変更内
容の適否を吟味し、変更点通知書に記録、承認後に、はじめて変更を実施する。
このステップを義務付けることが重要である。

5. 接着設計技術と接着管理技術の連携

5.1 接着の設計と管理は車の両輪

接着設計技術と接着管理技術は、図1に示したように、優れた品質の製品を
高い生産性で組み立てるための両輪であり、データベースやノウハウ、経験、
理論、情報などに裏付けされて有機的につながりシステム化されることにより
機能するものである。

接着設計の技術者と接着管理の技術者は相互に強力に連携することが重要で
ある。そのためには、接着設計に携わる技術者は接着管理技術をよく知ること
が重要であり、接着作業と作業管理に携わる技術者は接着設計技術をよく知
ることが重要である。現場からは接着設計の技術者に現場の状況をタイムリーに
伝え、改善提案までできることが重要である。相互に情報をタイムリーに共有
化ができるようになれば、不具合発生時の対応も迅速化され、やがては不具合
は減少して、高品質の製品を効率よく生産できるようになる。

なお、接着設計、接着管理には多くの技術分野が複雑に関連しているので、
社内関係者に限らず、各種関連メーカーとの連携を強化することももちろん重
要なことである。

5.2 2次元から3次元の技術へ

図22⁹⁾に、接着に関わる3部門（デバイス開発・設計部門、材料部門、構
造設計・生産技術部門）の相関関係を概念的にまとめた。ここで、X軸は、デ
バイスが必要とする機能および材料に要求される機能（電気的、熱的、機械的、
光学的、化学的など）に関する軸であり、Y軸は、材料の種類や物性（エポキ
シ樹脂、ウレタン樹脂、光硬化性樹脂などやガラス転移温度、弾性率、収縮率、
熱膨張係数など）に関する軸であり、Z軸はデバイスの構造や材質、組立プロ
セスなど（部品の材料、表面処理、接合部の形状・寸法、硬化方法・条件、接
合の前後工程など）に関する軸である。

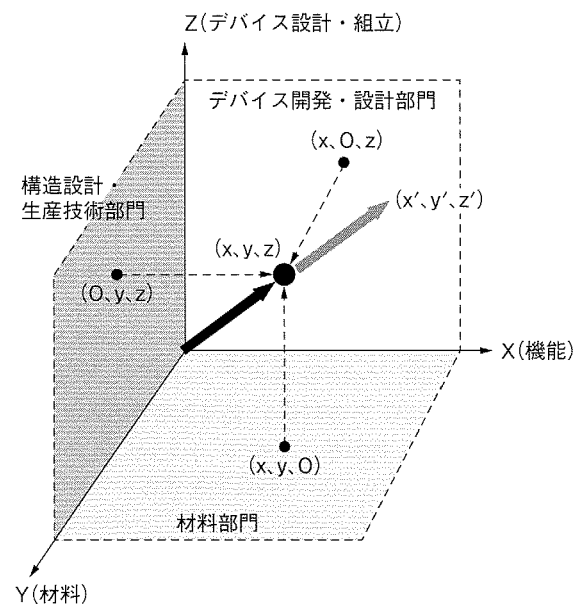


図22 接着に関わる3部門の相関関係

一般に、X-Z 面はデバイス開発・設計部門、X-Y 面は材料部門、Y-Z 面は構造設計・生産技術部門が担当しており、それぞれ専門性が高いため相互に立ち入ることができないことが多く、相互の情報交換も十分とは言えない。

以下に、光部品においてレンズやミラーを歪みなく接着する場合を例に考えてみる。デバイス開発・設計部門は機器の目的を達成するためにレンズやミラーの形状・寸法や材質、取付部の形状・寸法や材質、歪みの許容値などを提示してくる $(x, 0, z)$ 。

材料部門では、要求機能である低歪みを実現するために硬化収縮率や熱膨張係数が小さい材料の開発を行う $(x, y, 0)$ 。

最後に構造設計・生産技術部門では、デバイス開発・設計部門から出された機能上の制約条件の中で材料部門の開発した材料を用いて、いかにコンパクトで組み立てやすくするための構造やプロセス、設備を設計する $(0, y, z)$ 。この段階で、構造やプロセス、設備の面から材料部門へ材料改良の要求が出される場合が多い。

このように、2次元側面の組み合わせでは、デバイス開発・設計部門と構造設計・生産技術部門の両方から材料開発部門に過大な要求を強いられることとなり、それらの要求を満足できず、場合によっては機器の開発自体が困難になる場合もある。

最終的に求められる接着は、2次元的な X-Z 面 $(x, 0, z)$ 、X-Y 面 $(x, y, 0)$ 、Y-Z 面 $(0, y, z)$ 上に存在するのではなく、X-Y-Z の3次元空間 (x, y, z) 上にある。

今後の接着設計は目標座標 (x, y, z) を目指し、各部門がベクトルを合わせることが必要で、それによってさらに高いレベルの座標 (x', y', z') に到達することが期待できる。

おわりに

接着される部品の状態、接着剤、作業環境などは時々刻々と変化している。

接着作業のたびにその変化を敏感に捉えて、変化に対応できるプロセス作りや作業管理の構築が必要である。設計段階では、変化に対する許容範囲をできるだけ広げる工夫が必要である。ここで述べたのは接着品質作り込みのほんの一例に過ぎない。実際の作業プロセスを上記の観点から見直していただきたい。「接着設計技術」の開発キーマンには、製品の構想案が提示された時点で、材料、プロセス、接着構造、冶工具・設備、管理・検査方法などの全体を瞬時にイメージして見通し、難易度の見積もりができる能力と経験が求められる。残念なことであるが、このような全体が見通せる技術者は、大手企業といえども非常に少なく、年々減少しているのが現実である。日本が「もの作り立国」として生きていくためには、このような技術者の育成が重要な課題である。

参考文献

- 1) 原賀康介：“エレベーターの意匠パネル製造”、接着の技術誌 Vol. 11, No.4, 28、日本接着学会 (1992)
- 2) 電気化学工業(株) ハードロックカタログ
- 3) “個性を磨く新型接着剤”、日経ものづくり No. 1, P. 59-67、日経 BP 社 (2010)
- 4) 須藤 洋：“低臭気・非危険物 SGA の開発と適用”、第 19 回構造接着シンポジウム講演要旨集 (2010 年 11 月 16 日)
- 5) 中島義信、田口広一、眼龍裕司、八木直樹、原賀康介：“接着剤とりベット併用による板金筐体の設計・施工技術”、工業材料 Vol. 41, (4), P. 87-104、日刊工業新聞社 (1997)
- 6) 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、日本接着学会 (2003)
- 7) 寺本和良、岡島敏浩、松本好家、栗原 茂：“紫外線による表面改質”、日本接着学会誌 Vol. 29, No. 4, P. 180、日本接着学会 (1993)
- 8) 原賀康介、上山幸嗣、青木福次郎、眼龍裕司：“海外生産での高信頼性接着技術”、三菱電機技報 Vol. 83, No. 8, P. 19-23、三菱電機 (株) (2009)
- 9) 有機エレクトロニクス材料研究会編：“エレクトロニクスと接着”「序論 なぜ今接着なのか (大場洋一)」、P. 1-6、ぶんしん出版 (1998)

第3章

実際の高信頼性接着の 作り込み

はじめに

第2章では、接着設計、接着管理について述べたが、第2章の段階まででは、まだ「見よう見まね」の接着の段階である。接着設計、接着管理においては、常に高い信頼性を確保することを根底において取り組む必要がある。ところが、「高い信頼性を確保する」には何を考え、何を行えばよいのか、ということになると曖昧なことが多い。

そこで、本章では、「見よう見まねの接着」を脱して「正しい原理に基づいた根拠ある接着」の段階にレベルアップするために、高信頼性接着のセオリーと基本条件、その基本条件に影響する諸因子、接着の原理（過程）と、高い接着信頼性を満足させるための手段について解説する。

1. 接着信頼性のセオリー

本書においては、「高い信頼性を確保する」というセオリーを次のように考えている。

図1は、接着強度の分布と接着部に加わる最大の力 P の関係である。設計段階では、製品における接着部の重要さ、加わる力、使用される環境、耐用年数などから、あらかじめ許容できる最大の不良率（これを許容不良率という）が設定されている。例えば許容不良率が1/100万であれば、分布全体の面積を1とすると、図1で黒く塗りつぶした部分の面積が全体の1/100万ということである。図1において、接着強度のばらつきが小さな分布Aの場合は、許容不良率の上限強度 p_1 は接着部に加わる最大の力 P より大きいので、設定された不良率以下の不良にとどまる。一方、接着強度のばらつきが大きな分布Bの場合は、許容不良率の上限強度 p_2 は接着部に加わる最大の力 P より小さいので、設定された不良率以上の不良が発生することとなる。そこでいわゆる接着強度の「安全率」は、一般に μ/P と考えられているが、本章では p/P と考

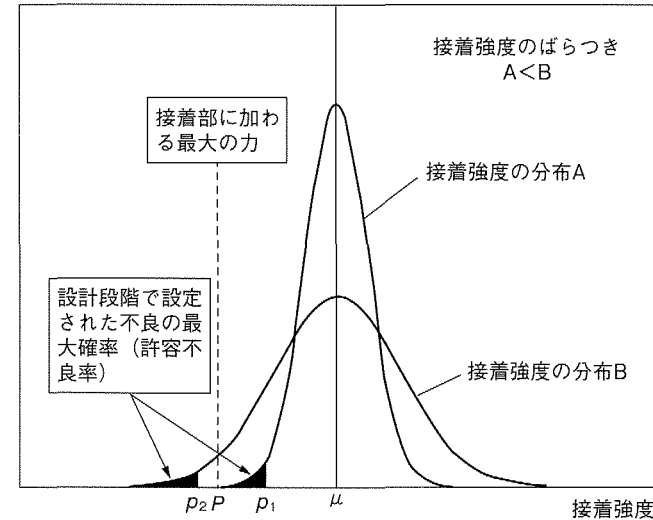


図1 接着強度の分布と接着部に加わる最大の力と許容不良率の関係

える。 p/P を求めるためには、許容不良率における上限強度 p を知ることが必要であり、その求め方を本章に説明している。

なお、本章で言うところの「安全率 p/P 」は、初期強度ではなく製品の耐用年数が経過した後の安全率であるべきである。本書では、製品の耐用年数経過後の劣化係数を求めて、耐用年数経過後の許容不良率における上限強度 p を求める方法¹⁾までは述べていない。機会があれば別書で述べたい。

接着信頼性を高くするためには、平均接着強度 μ を高くする方法と、図1のように、平均値 μ は変えずにばらつきを小さくする方法がある。本章では主として後者のばらつきの低減についてを解説する。

2. 高信頼性接着の基本条件

2.1 良い破壊状態と良くない破壊状態

2.1.1 凝集破壊と界面破壊

良好な接着状態ができていのかどうかは、接着したものを破壊して判定することが一般的である。図2は、接着接合物の断面の模式図で、外力を加えたときに接着剤の内部または接着剤と被着材料（部品の材料のことを被着材料という）の接合界面、または被着材料自体のいずれかで破壊が生じる。図3に示すように破壊の場所に応じて、接着剤の内部での破壊は凝集破壊、接着剤と被着材料の接合界面での破壊は界面破壊と呼ばれている。接着剤の内部で凝集破壊した部分は、破壊後接着面の両面の相対する位置の双方に接着剤が残っている。界面破壊の場合は、接着剤はいずれか一方の被着材に付着しており、相対する

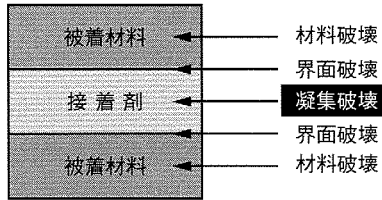
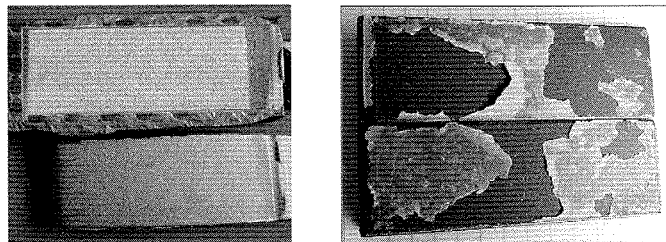


図2 接着接合物における破壊の箇所



(A) 凝集破壊

(B) 界面破壊

図3 凝集破壊と界面破壊

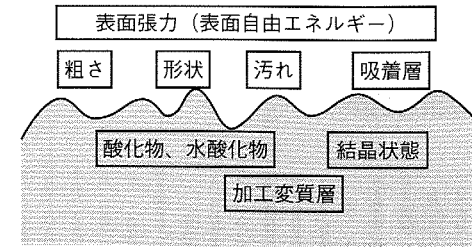


図4 被着材料の表面付近の接着に影響する因子

相手面は被着材料の表面が露出した状態になっている。

通常の接着で最も多く見られるのは界面破壊である。しかし、被着材料の接着表面付近は、図4に示すように、接着性に影響を及ぼす非常に多くの因子が集まったところであり、界面破壊の場合は接着強度のばらつきが大きくなることから、適正な破壊状態とはいえない。一方、接着剤の内部で破壊する凝集破壊は接着剤の物性で決まるため、接着強度のばらつきは小さく、理想的な破壊状態である。

2.1.2 凝集破壊率

図5^{2,3)}は、サンプル数1213個のデータをプロットした凝集破壊率と接着強度の関係の一例である。図中の○が各サンプルのデータである。被着材は銅とニッケルめっきされたネオジウム系焼結磁石、接着剤は二液室温硬化型変性アクリル系、測定はせん断試験である。ここで、凝集破壊率とは、接着面積全体に占める凝集破壊部分の面積の比率であり、凝集破壊以外の部分は界面破壊である。この結果から、凝集破壊率が40%以下に低下し、界面破壊が増加すると低強度のものが多く出現してくることがわかる。この低強度のものが接着不良へとつながることになる。筆者が測定した複数の事例でも、凝集破壊率が40%以上になると低強度のものは出現しにくい結果となっている。

2.6 高信頼性接着の基本条件

以上に述べたことから、高信頼性接着を実現するためには、次の二点を満足させることが重要である。

(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）を高くすること。凝集破壊率は40%以上を確保すること。

なお、凝集破壊率は、破壊面を拡大して観察するほど高くなり、信頼性との相関が悪くなる。通常、肉眼か低倍率のルーペ程度の観察で得られた凝集破壊率が最も信頼性との相関が高いようである。

(2) 接着強度の変動係数 CV をできるだけ小さくすること。初期状態における変動係数は、0.10 以下にすることが望ましい。

変動係数 CV を求める場合のサンプル数には特に規定はないが、筆者は正確に求めるために25個以上のサンプルで行っている。

なお、ここまでの説明では、二液室温硬化型変性アクリル系接着剤のせん断試験の例を多く示したが、これまでに述べてきたことは、接着剤の種類や強度試験の方法には関係なく成り立つことである。

3. 「接着は難しい」と感じるわけは？

「接着は難しい」ということをよく聞きます。それはなぜでしょうか。確かに接着には多くの因子があり、どれが欠けても不良の原因となります。しかし、このようなことは「接着」に限ったことではなく、はんだ付けや、塗装、めっきなど多くの技術分野に共通して言えることです。

接着不良が発生して対策を立てなければならない時などに「接着は難しい」と感じるのは、これまでに「正しい接着の原理原則」を勉強したことがないために、対策のためにそもそも何を考えればよいのかわからないというのが主原因と思われます。

「全ての接着現象は原理原則に則っている」ので、接着の原理（メカニズム）

を知り、正しい基礎知識を持てば、問題点の抽出、対策のポイントなど自ずと見えるようになってきます。接着のメカニズムはそれほど難しいものではありません。接着の原理を理解するのに必要な知識のほとんどは、小学校から高校までに得ている知識で十分です。

もう一つ、接着は難しいと感じる原因は、接着剤のユーザーは問題が起きた時にはまず接着剤メーカーに相談します。しかし、接着剤メーカーの技術者にしても営業マンにしても、接着剤自体のことや基本的な使い方はわかるが、接着剤で組み立てられる製品の機能を満たしながら製品を組み立てるという接着のソリューションとなると十分な知識を有していません。そのため接着剤メーカーの人に言われたことをやってみてもなかなか解決に繋がらないという経験を頻繁にしていることもあります。この点は、欧米に比べて日本は遅れていると言えるでしょう。

では、以下に、接着のメカニズムをわかりやすく説明します。

4. やさしい接着のメカニズム（接着の過程）

「接着」という現象は次の過程で成立している。

(STEP1) 接着剤を塗布する。

(STEP2) 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。

(STEP3) 接着剤が表面に濡れ拡がって結合力が発生する。

(STEP4) 接着剤が固化する。

(STEP5) 接着層に内部応力が発生する。

(STEP6) 接着機能を維持しながら各種の環境や応力によって劣化が進行する。

以降、各STEPについて説明する。

5. (STEP1) 接着剤の塗布

「接着剤」と呼ばれる「液体」が接着される部品（「被着材料」という）の表面に塗布される過程のことである。

接着剤には固形やフィルム状のものなど液体でないものもあるが、塗布される時には熱や溶媒で溶融、溶解されて必ず液体になっている。粘着テープなどの粘着剤は、固体の性質と液体の性質を併せ持つ物質で、塗布時には液体として作用している。

6. (STEP2) 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

接着剤を被着材料の表面に塗布しただけでは十分な接着はできない。

被着材料の表面は平面に見えても微視的に見ると種々の複雑な形状をしている。一方、接着剤は粘度の高いものが多く、接着剤を被着材料の表面に乗せただけでは、図15に示すように、複雑な形状の内部まで接着剤を浸透させることはできない。

高粘度の接着剤を被着材料表面の凹凸の内部まできれいにに入れるためには次

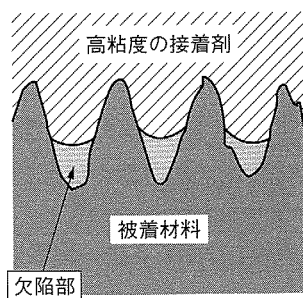


図15 接着剤を被着剤の表面に塗布しただけでは細かい凹凸の内部まで入らない

のような方法をとる必要がある。

(1) 力を加える

接着剤を塗布するときに、こすりつけるなど力をかけて塗布する。面同士の接着の場合は、貼り合せ時に力を加えて圧縮することも効果がある。しかし、これでも表面の凹凸の内部の空気を完全に追い出して接着剤で埋めることは困難である。

粘着テープは非常に粘度が高く流動性のない液体なので、自力では被着材料の表面になじまないため、力を加えることが必要になる。粘着テープの正式名が「感圧テープ」となっているのはこのためである。

高精度な位置合わせを必要とする部品の接着において、部品を位置合わせした後に部品の側面に接着剤を隅肉状に盛りつけて接着する場合があるが、この場合は接着剤の塗布時に力を加えておらず、盛りつけ用の接着剤は粘度も高い場合が多いので、面同士の接着に比べて接着剤と被着材料表面との接触面積が小さくなりやすい。

(2) 接着剤の粘度を下げる

接着剤または被着材料の温度を上げたり、接着剤を溶剤や水などの溶媒に溶かして低粘度にする。

(3) オートクレーブなどの使用

航空・宇宙分野などで非常に高い信頼性が求められる接着の場合は、接着物を袋に入れて、一旦空気を抜いた後に、釜に入れて圧力と熱を加えるオートクレーブという装置が用いられている。

(4) 接着剤をプライマーとして使う

図16に示すように、使用する接着剤を溶剤に薄く溶かしてプライマー（下塗り剤）として被着材料表面に薄く塗布する。塗布後溶剤を飛ばすと谷の部分

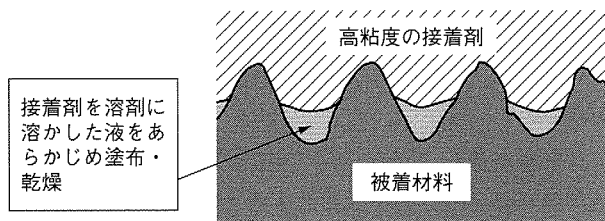


図16 溶剤で希釈した接着剤をプライマーとして使用する

に接着剤が残って谷が浅くなる。その後、通常通り接着剤で接着する。この方法は大きな効果が得られる。

一液型接着剤の場合は、接着剤を単に溶剤で希釈すればよい。二液型エポキシ系接着剤の場合も混合した接着剤を溶剤で希釈すればよいが、一方の液だけを希釈する場合は、エポキシ主剤を溶剤に薄く溶かしてプライマーにして被着材料表面に薄く塗布する。塗布後溶剤を飛ばして、二液混合したエポキシ系接着剤で接着する。被着材料表面と結合するのはエポキシ樹脂、つまり主剤であるので、プライマーとして使用するのはエポキシ主剤である。硬化剤は主剤のエポキシ樹脂を硬化させるのが役目で、被着材料表面との結合にはほとんど寄与しない。なお、厚く塗布すると主剤単独の厚い層が被着材料表面にできて硬化しないので塗りすぎは禁物である。

7. (STEP3) 被着材料表面への接着剤の濡れ広がり と 結合力の発生

7.1 接着の結合力の基本 (分子間力)

接着剤と被着材料表面の分子は、図17に示すように、電気的に+と- (磁石でいえばS極N極)に分極しており、接着剤の分子と被着材料表面の分子の距離が近づくと互いに引き合うようになる。この力が接着の結合力の基本であり、この分子同士が引き合う力は「分子間力」と呼ばれている。

分子同士が引き合うためには、分子同士の距離を3~5Å (オングストロー

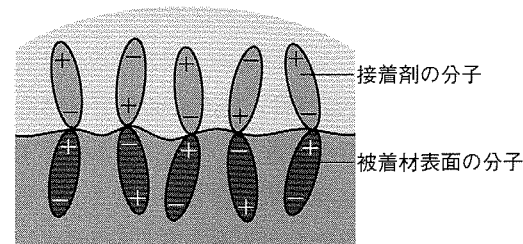


図17 接着剤と被着材料表面での分子同士の結合 (分子間力)

μ : 1Å = 1億分の1cm) に近づけることが必要である。これ以上の距離に離れていればほとんど引き合う力は生じない。鋼板と永久磁石は距離が近づくと強力に引き合うが、距離が少し離れると引き合う力は急激に低下していく。分子間力も同様で、強い分子間力を得るためには、6. (STEP2) で述べたように、接着剤の分子と被着材料表面の分子の距離を近づけることが必須条件である。

分子内での+-の分極の程度は分子の構造によって異なる。+-が強く分かれている分子を「極性が高い分子」、あまり強く分かれていない分子を「極性が低い分子」、全く分かれていない分子を「無極性の分子」と呼んでいる。図17で、強力な分子間力を得るためには、接着剤も被着材料表面も極性が高い状態が好ましいのは自明である。

接着剤と被着材料表面の分子同士の距離が近づいて分子同士が引き合うようになり、引き合う力が強ければ接着剤は被着材料表面に引っ張られて自然になじんでいく。このような状態を接着剤が被着材料表面に“良く濡れる”と表現し、良好な接着の条件となる。接着剤は一般に極性の高い分子構造の材料が用いられるが、被着材料表面の分子の極性が低い場合には分子同士が強く引き合わないため、接着剤は被着材料表面になじまず、“濡れが悪い”状態で、強い結合力は生じず良好な接着はできない。被着材料表面の濡れ性は、一般に表面張力で表される。表面張力が大きい被着材料ほど接着剤は濡れ広がりやすい。

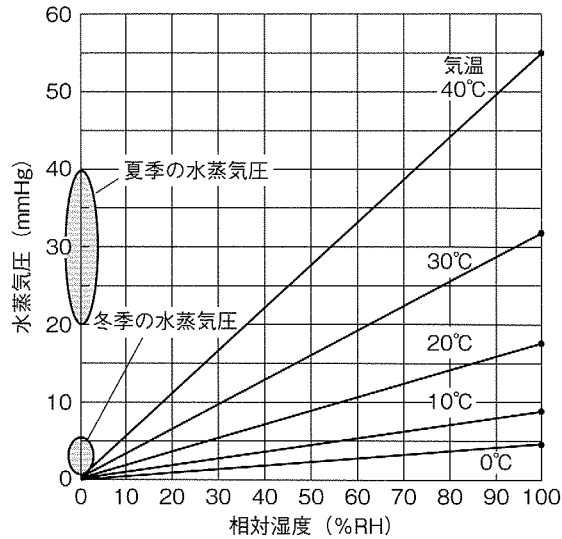


図30 温度・湿度と空気中の水蒸気圧の関係

剤と結合しやすい基を成分中に有する低粘度の液体であり、被着材料、接着剤の種類に合わせた選択が必要である。

表2には、ステンレスの接着におけるプライマー塗布の効果の例を示した。ここで使用したプライマーは、有機リン酸塩系化合物（プライマー-F100：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ある。図8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る。

プライマーやカップリング剤は、図31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ある。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、層内での破壊となる。プライマーはできるだけ希釈して使用すれば、多量に塗布してもプライマー成分の量は少ないため、作業は容易である。

表2 メーカーやロットが異なるステンレス鋼板のプライマー処理による接着強度、破壊状態の変化

SUS304	未処理	プライマー処理
A 製作所購入品	1.5 (界面)	9.4 (凝集)
B 製作所購入品	4.1 (界面)	8.7 (凝集)
C 製作所購入品	3.3 (界面)	9.3 (凝集)
D 製作所購入品	6.0 (凝集+界面)	8.9 (凝集)
E 製作所購入品	8.9 (凝集)	9.0 (凝集)

はく離強度 (kN/m)

接着剤：ハードロック M372、プライマー：F100（有機リン酸塩系化合物）

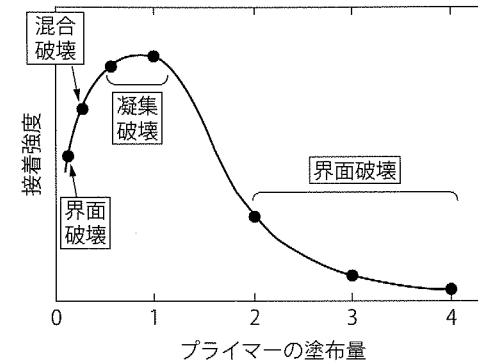


図31 プライマーの塗布量と接着強度、破壊状態の関係

8. (STEP4) 接着剤の固化

接着剤と被着材料表面の分子同士が分子間力により結合しても、接着剤が液体のままでは外力が加わった場合に小さな力で破壊してしまう。大きな力に耐えるためには、接着剤は固体に変化することが必要である。

- 接着剤が液体から固体に変化する形態としては、次のようなものがある。
- (1) 溶剤系接着剤や水溶性接着剤、エマルジョン系接着剤のように、溶媒（溶

剤、水など)に溶解または分散している接着剤の場合には、溶媒を飛ばすことによって固化する。

(2) ホットメルト系接着剤のように熱熔融させている場合には、冷却によって固化する(水も凍ると接着力を発揮する)。

(3) 化学反応によって固化(硬化)する。反応型接着剤にはエポキシ系、二液室温硬化型変性アクリル系、嫌気性、ウレタン系、シリコン系、シアノアクリレート系、紫外線硬化性、可視光硬化性、電子線硬化性など多くのものがあり、反応形態も様々である。

固化した後の固体(接着剤)の硬さにより耐えられる外力の大きさは異なる。強い力が加わる場合には十分な硬さに硬化している必要があるが、加わる力が小さい場合や柔軟性が必要な場合には、ゴム状や粘着状態が良い場合も多い。粘着テープは固化はしないが、粘着剤は固体の性質も持っているので力に耐えることができる。

9. (STEP5) 接着層での内部応力の発生

9.1 接着層での内部応力

9.1.1 硬化収縮応力

接着剤が液体から固体に変化する8. (STEP4) 接着剤の固化の過程において、ほとんどの接着剤は体積収縮を起こす。水は液体から固体(氷)になるときに体積が増加するように、全ての液体が固体になるときに体積収縮を起こすとは限らないが、工業用に用いられている接着剤のほとんどは体積収縮が生じる。

接着剤と被着材料表面の分子は7. (STEP3) 表面への濡れ広がり と 結合力の発生の過程で結合しているため、接着剤が収縮しても接着剤と被着材料表面との結合部は動けない。そのため、接着剤が硬化した後は図32に示すような形状になり、接着剤と被着材料表面との結合部は内部の接着剤によって内部に引っ張られた状態となる。この力を硬化収縮応力と呼んでいる。

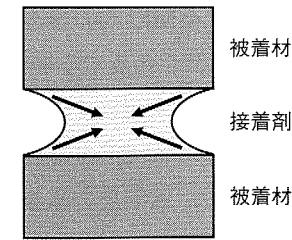


図32 接着剤の硬化収縮による応力
(硬化収縮応力)

9.1.2 加熱硬化における熱応力

接着剤を加温状態で硬化させる場合には、加温状態で上記の硬化収縮が起こり、硬化収縮応力が発生する。接着剤のほとんどは有機物であるため、線膨張係数は一般に被着材料の線膨張係数より大きい場合が多い。そのため、加温状態で硬化した後に室温まで冷却すると、接着剤が被着材料より大きく収縮するため、図32の接着剤の収縮状態はさらに大きくなる。この線膨張係数の違いによって冷却過程で生じる応力を熱応力と呼んでいる。

被着材料が金属やガラス・セラミックスなどのように線膨張係数が小さな材料の場合には、被着材料がプラスチックのように接着剤の線膨張係数に近い場合に比べて熱応力は大きくなる。

9.1.3 接着層での内部応力

接着剤の硬化収縮によって生じる硬化収縮応力と、接着剤硬化時の加温温度から室温までの冷却過程で生じる熱応力を合わせて「接着層での内部応力」と呼んでいる。

9.2 内部応力によって生じる諸問題

接着層に内部応力が発生すると、製品に次のような問題を引き起こすことになる。

層は薄くなる。この状態で硬化収縮応力が発生する。次に、室温まで冷却される段階では、シャフトと接着剤は冷却により収縮するが、磁石はほとんど収縮しないので、接着層には大きな引張りの熱応力が作用する。軸方向にも大きな剪断方向の熱応力が作用する。シャフトと接着剤または磁石と接着剤の界面の接着強度が低ければ、この熱応力により剥離が生じることになる。界面での結合力が高い場合は、接着剤中にクラックが生じたり、磁石には内周面に大きな応力が作用しているため磁石内部でクラックが生じることがある。

モーターの使用中には、室温以下の低温や高温に曝される。加熱硬化型接着剤を用いている場合には、低温になると、上記で述べた接着剥離や接着剤中のクラック、磁石割れなどがさらに起こりやすくなる。室温硬化型接着剤の場合は、室温状態では熱応力は作用していないので上記の問題は起こりにくい。モーターの使用中に高温になる場合は、加熱硬化型接着剤の場合は、加熱硬化時の温度で熱応力はゼロとなる。室温硬化型接着剤の場合は、加熱されると鋼製シャフトと接着剤は膨張するが、磁石はほとんど膨張しない。このため、接着剤層は圧縮された状態となり、パイプ状の磁石には内圧が加わった状態となる。焼結磁石は圧縮には強いが、引張りには弱い。パイプ状の磁石に内圧が加わると磁石の表面には周方向に引張り応力が加わる。磁石の表面に傷や小さなクラックがあると引張り応力により磁石が表面から軸方向に割れることがある。

リング状磁石の接着においては、接着剤の弾性率、ガラス転移温度 T_g 、硬化収縮率、線膨張係数、低温時の伸び、硬化温度、接着剤層の厚さなどが接着性能に影響する。加熱硬化型接着剤を用いる場合には、硬化温度をできるだけ低くする、必要以上に固い接着剤を用いない、接着層の厚さを厚くする、冷却時に除冷するなどがポイントである。室温硬化型接着剤を使用する場合には、中程度の温度で加温硬化させれば、低温側でも高温側でも問題のない接着を行うことができる。

(2) 外周部品の線膨張係数が大きい場合

アルミ製のブラケットに鋼製やステンレス製のベアリングを接着することもよく行われている。このような接着部においては、接着剤の外周部品の線膨張

係数が内面部品の線膨張係数より大きい。このため、高温の状態では外周部品が内面部品より大きく膨張するため、接着層は広がっている。逆に低温においては、接着層は薄くなっている。

加熱硬化を行う場合は、接着層が広がった状態で接着剤が硬化し、室温に冷却された状態では接着層に圧縮応力が作用している。製品の使用中に室温以下になっても同様である。このような圧縮状態では接着部の剥離は生じない。製品の使用中に接着剤の加熱温度以上の温度になると、外面部品は接着剤硬化時の寸法よりさらに膨張するので、接着層には引張り応力が加わって剥離が生じやすくなる。室温で接着剤を硬化させた場合は、高温での使用時に問題を生じやすい。

10. (STEP6) 接着機能の維持と劣化 (環境・応力劣化)

10.1 接着部の劣化に影響を及ぼす諸因子

10.1.1 環境的因子

ヒートショックやヒートサイクルなどの高温低温の繰り返しは大きな劣化要因である。接着剤は低温では固くなり、線膨張係数も被着材料より大きいため、接着部の熱応力は低温になるほど大きくなり破壊へとつながる。接着部の熱応力は、接着剤、被着材料の物性（弾性率、線膨張係数）以外にも、接着層の厚さ、部品の構造（厚さ、剛性、部品の拘束状態）などによる影響も非常に大きいので、板/板の小さな試験片での評価は不適切であり、できるだけ実物に近い形状、材料での試験が必要である。

接着部にかかる水や薬品も大きな劣化要因である。高温で連続使用される場合は熱劣化も生じる。接着剤が熱劣化するだけでなく、被着材の接着部表面（結合界面）が熱により変質して強度低下する場合も多い。

被着材が光を通す場合は、紫外線による劣化も生じる。宇宙環境では、各種の放射線や電子線による劣化も生じる。

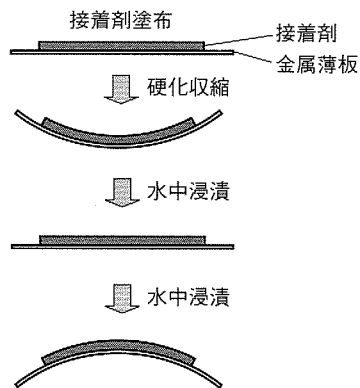


図 47 吸水・膨潤による内部応力の発生

47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る。これを水中に浸漬しておくで徐々に金属板の反りが減り、ある時点で反りがなくなる。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ある。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さらに大きくなり、金属板の反りはさらに増加していく。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する。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る。

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るが、%オーダーの膨張をするものも多い。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。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°C の温度変化による熱応力と同レベルの応力が発生することになる。

また、被着材料が吸水で膨張しやすい材料の場合も注意を要する。大きなアクリル板を金属に接着するような場合は、アクリル板が吸水膨張を起こすので、伸びに追従できる柔らかい接着剤を厚い接着層にして接着する必要がある。

おわりに

本章では、高信頼性接着のセオリーと基本条件、その基本条件に影響する諸因子、接着の原理（過程）と高い接着信頼性を満足させるための手段について述べた。高信頼性接着の基本条件は、高い凝集破壊率を確保して、接着強度の変動係数をできるだけ小さくすることである。これを達成するために、表面処理や表面改質を行う。硬化収縮応力や熱応力などの内部応力は、製品の機能にも影響を及ぼし、接着強度や耐久性にも悪影響を及ぼすので、極力低減することが必要である。

参考文献

- 1) 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、日本接着学会（2004）
- 2) 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、日本接着学会（2007）
- 3) 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、日刊工業新聞社（2010）
- 4) 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、日本接着学会（2004）
- 5) 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、日本接着学会（2003）
- 6) Kosuke HARAGA, “Processing Quality Control”, Lucas F. M. da Silva, Andreas Ochsner, Robert D. Adams, Handbook of Adhesion Technology, Springer (2011) P. 1031-1048.
- 7) ウシオ電機(株) エキシマ光照射ユニットカタログ
- 8) 寺本和良、岡島敏浩、松本好家、栗原 茂：“紫外線による表面改質”、日本接着学会誌 Vol. 29, No. 4, P. 180、日本接着学会（1993）
- 9) 寺本和良、西川哲也、原賀康介：“接着による光学歪に及ぼす接着条件の影響”、日本接着協会誌 Vol. 25, No. 11, P. 7、日本接着協会（1989）
- 10) 有機エレクトロニクス材料研究会編：“「エレクトロニクスと接着」”第1章 エレクトロニクス分野における接着技術(原賀康介)”，P. 7-42、ぶんしん出版（1998）