

今日から
モノ知り
シリーズ

トコトンやさしい

接着の本 **新版**

さまざまなモノをくっつける接着剤の役割は、産業界で日増しに高まるばかりです。原理だけでなく使用条件や作業性、コストなどに着目すると優れた接着が実現できます。

原賀康介



接着剤は液体である
異種材料でも容易に接合
剥がれず、やり直しが難しい
接着部のアキレス腱はどこ？
加圧は最小限の力で、一回で

知りたいことが
よくわかる

B&Tブックス
日刊工業新聞社

はじめに

この本を手にした方で、これまでに自分で接着をしたことがないという人は、おそらくおられないはずです。接着剤や粘着テープなどは、街のあちこちで容易に手に入ります。接着とはそれほど身近な接合技術です。それだけに、「接着したものが剥がれた」という経験を持つ方も多いのではないのでしょうか。

各種の産業分野においてもしかりです。現在、接着は、異種材料でも容易に接合ができるといふ利便性から、モノづくりに必要な技術となっています。その反面、化学的な要素が多く出来映えを可視化しにくい、完成後に強度検査ができない、設計基準が不明確など多くの課題も有しています。また、接着に関する教育は大学でもあまり行われていないため、接着の専門家を擁する企業は多くありません。そのため、接着に関係する不具合は結構発生しているのです。そこで本書では、実用的な観点から接着の基本を身につけると同時に、工業製品の製造における接着を対象に「見よう見まねの接着」から脱却して、「信頼性・品質に優れた接着」を行うことを推奨しています。そのために知っておかなければならないポイントや、やらねばならないこと、やってはいけないことなどについて、接着に詳しくない方々にもわかりやすくまとめました。

どんな技術にも、良い面と悪い面の両面があります。良い面ばかりが強調されて悪い面がないがしろにされると、大きな社会問題や重大な事故に必ずつながります。接着もしかりです。したがって、本書では接着の基本を正しく理解していただくとともに、接着の欠点と対策についても多

くの紙面を割きました。

今回、日刊工業新聞社から、接着を用いて組立を行うために必要な基礎知識について述べ、「新しい接着のあり方と作法」をトコトンやさしく書いて欲しいとの依頼を受けました。気軽に引き受けたものの、書き始めてみて、接着という技術をわかりやすくやさしく説明することの難しさを改めて実感しました。何とか必要なことを、できるだけわかりやすく書いたつもりです。本書をお読みいただいて、接着の利点と欠点・課題の両面と本質を十分にご認識いただき、信頼性・品質に優れた接着の一助としていただければ幸いです。各章末のコラムには、筆者がメインとなって開発した接着の適用事例を示しましたのでご参照ください。

最後に、終始ご支援いただいた日刊工業新聞社の矢島俊克氏に感謝の意を表します。

2023年10月

原賀 康介

トリアンヤルツ

接着の本

新版

目次

目次

CONTENTS

第1章
接着とは

1	天然系接着剤から合成系接着剤へ「接着の歴史と用途」……………	10
2	接着は「接着剤」という介在物による接合」「接着」の定義……………	12
3	接着剤は液体である「接着するときの接着剤の性状」……………	14
4	分子の電気的な引き合いによる結合「接着の原理①分子間力による結合」……………	16
5	分子が絡み合う結合と機械的結合「接着の原理②その他の結合」……………	18
6	異種材料でも容易に接合できる「接着の利点」……………	20
7	薄板軽量化、適材適所の材料選定「接着で得られる効果」……………	22
8	簡単に剥がれない、やり直しが難しい「接着の欠点」……………	24
9	接着と他の接合の組合せで欠点を補完「複合接着接合法の活用」……………	26

第2章
接着剤の
固まり方

10	二液の混合や一液加熱で硬化する接着剤「エポキシ系、ウレタン系、シリコン系接着剤」……………	30
11	二液の接触で硬化する接着剤「第二世代アクリル系接着剤(SGA)」……………	32
12	空気中の水分で硬化する接着剤「シリコーンRTV、変成シリコーン系、ウレタン系接着剤」……………	34
13	接着面の水分で硬化する接着剤「瞬間接着剤(シアノアクリレート系接着剤)」……………	36
14	酸素遮断と活性材料接触で硬化する接着剤「嫌気性接着剤」……………	38
15	光で硬化する接着剤「紫外線硬化型接着剤と可視光硬化型接着剤」……………	40

第3章 固まった 接着剤の物性 と接着特性

16	その他の固化方式の接着剤「溶媒乾燥型、ホットメルト(HM)型、固化しない粘着型」……………	42
17	接着剤は硬化時に収縮して応力が生じる「硬化収縮による内部応力(硬化収縮応力)」……………	46
18	接着剤と被着材の膨張係数差で生じる応力 「加熱硬化後の冷却過程で生じる内部応力(熱収縮応力)」……………	48
19	接着剤は弾性体と粘性体の性質を持つ物質「接着剤は「粘弾性体」……………	50
20	粘弾性体の性質「粘弾性体の速度依存性、クリープ特性、応力緩和特性」……………	52
21	接着部に加わる力の種類と代表的な評価方法 「接着強さの評価方法、引張せん断試験とはく離試験」……………	54
22	接着強さは接着剤の硬さや伸びで変化する「接着剤の硬さ・伸びと接着強さの関係」……………	56
23	接着強さは温度で変化する「接着剤のガラス転移温度(T_g)と接着強さの関係」……………	58
24	硬い接着剤では接着面全体に均一な力は加わらない「硬い接着剤での応力集中」……………	60
25	柔よく剛を制す「強靱で軟らかい接着剤では応力集中は少ない」……………	62

第4章

良好な接着を
行うための基本

26	目的は信頼性・品質に優れた接着の実施「高信頼性・高品質接着と特殊工程の技術」……………	66
27	接着面での破壊は禁物「凝集破壊と凝集破壊率」……………	68
28	接着界面での破壊(界面破壊)の危険性「小さな力でも起こる内部破壊」……………	70
29	バラツキをどの程度に抑えればよいか「バラツキの指標「変動係数」」……………	72
30	接着部のアキレス腱はどこか「接着面端部の界面は最もやられやすい」……………	74
31	界面破壊を避けて凝集破壊にするには「接着面の表面張力を高くして極性を上げる」……………	76
32	接着しにくい材料「被着材の素材の性質と接着性」……………	78
33	接着性を上げるための表面処理「面を粗らす、汚れを落とす、接着しやすい皮膜をつくる」……………	80
34	接着しやすい表面に変える表面改質「ドライ処理による表面改質」……………	82
35	接着剤と被着材表面をつなぐ中間層「カップリング剤プライマー」「コーティング材の活用」……………	84
36	接着剤と接着面の分子の距離を縮める「分子間の距離が離れると分子間力は弱くなる」……………	86

第5章
接着部の劣化
について知る

37	接着部の劣化因子と劣化箇所「接着剤自体か界面か被着材表面かを見極める」……………	90
38	熱劣化の3つのモード「酸素による接着剤の分解、界面結合の切断、被着材の変質」……………	92
39	水分劣化の4つのモード「界面結合の破壊、被着材表面の変質、加水分解、吸水膨潤」……………	94
40	耐水性向上のための接着部の寸法設計「水分劣化への接着部の形状・寸法の影響」……………	96
41	樹脂は水分を吸って変形する「吸水膨潤による劣化」……………	98
42	接着部に加わる継続荷重は劣化の大敵「クリープによる劣化」……………	100

第6章 設計・施工時に 留意すべきこと

58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	
加熱硬化はゆっくり昇温、ゆっくり冷却「急速硬化の課題と対策」	加圧は最小限の力で1回で押し切る「加圧力の大きさ、二度加圧の禁止」	気泡を入れない接着剤の塗布方法「空気の逃げ道を考慮した塗布方法」	接着剤の垂れや糸切れ性は粘度でわかるか「接着剤の粘度と揺変性」	塗装に適した素材は接着にも適しているか「素材(被着材)の選定」	接着剤のはみ出し部は除去すべきか「接着剤はみ出し部の効果と課題」	「室温初期の平均破断強さは加わる最大力の何倍必要か」	接着部の破断強さはどのくらいあればよいか	異種材の嵌合接着での接着層厚さ方向拘束②「線膨張係数が軸部品・穴部品の場合」	異種材の嵌合接着での接着層厚さ方向拘束①「線膨張係数が軸部品・穴部品の場合」	接着層厚さの調整方法「スプレーサーによる厚さコントロール」	接着層の厚さは出来映え次第ではいけない「接着層の厚さ基準での設計・施工」	接着層の厚さで強度や壊れやすさは変化する「接着層の厚さと強度、変形追従性」	高温・低温の繰返しによる劣化「ヒートサイクルとヒートショックの違い」	環境と応力の複合は劣化を促進する「環境と応力の複合劣化」	疲労耐久性の向上策「複合接着接合法の活用」	接着部に加わる繰返し力による劣化「繰返し疲労耐久性に注目しよう」
134	132	130	128	126	124	122	120	118	116	114	112	108	106	104	102	

第7章 信頼性を確保 するポイント

59	品質や生産性の良し悪しは設計で決まる 「開発段階でのつくり込みの技術『接着設計技術』」……………138
60	接着の品質確保は生産工程での管理で決まる 「適切な接着組立を行うための『接着生産技術』」……………140
61	破壊時の安全性確保は製造者の社会的責任「破壊に対する冗長性の確保」……………142
62	破壊試験における注意点「強度よりも凝集破壊率を重視する」……………144
63	接着剤は要求機能・特性の観点で選ぶ「接着剤の選び方」……………146
64	見よう見まねでの作業は不良品の山をつくる「マニュアルの整備と教育訓練」……………148
65	出荷後に不良が生じたときの原因究明「手順とポイント」……………150
66	接着の信頼性・品質をどう担保するか「信頼性・品質は不断の努力で築くもの」……………152

コラム

●エレベーターの意匠構造パネルの補強材接合……………28
●パラボラ電波望遠鏡の高精度反射面……………44
●金属筐体の組立(接着とリベットの併用接合)……………64
●車輛空調装置枠体(接着とスポット溶接の併用接合)……………88
●人工衛星の太陽電池パネル組立……………110
●モーターの永久磁石接着……………136
●熱交換器の冷媒配管の接合・シール……………154
参考文献……………155
索引……………158

1

第

章

接着とは



2

接着は「接着剤」として
介在物による接合

「接着」の定義

「接着」は、JIS K 6800の「接着剤・接着用語」

において次ページ上図に示したように、「接着剤を媒介とし、化学的もしくは物理的な力、またはその両者によって2つの面が結合した状態」と定義されています。このうち「化学的もしくは物理的な力」は4・

5項で説明します。重要なのは、「接着剤」を用いるという点です。熱に溶けるもの同士の接合面を熱で溶かして接合する溶着や、凹凸をつけた面に熱で溶解した成形材料を型内で押し込んで冷却固化させて接合する方法など、接着剤を用いないで2つの面を直接接合する方法は種々あります。ただし定義上、それらは「接着」に含まれないこととなります。

強度や耐久性が必要な構造物の組立に用いられる接着は「構造接着」と呼ばれ、構造接着に用いられる接着剤を「構造用接着剤」と言います。「構造用接着剤」は、上記JIS規格では「長期間大きな荷重に耐える信頼できる接着剤」と定義されています。

最近のIoT化や知能化により、電子・光学系の

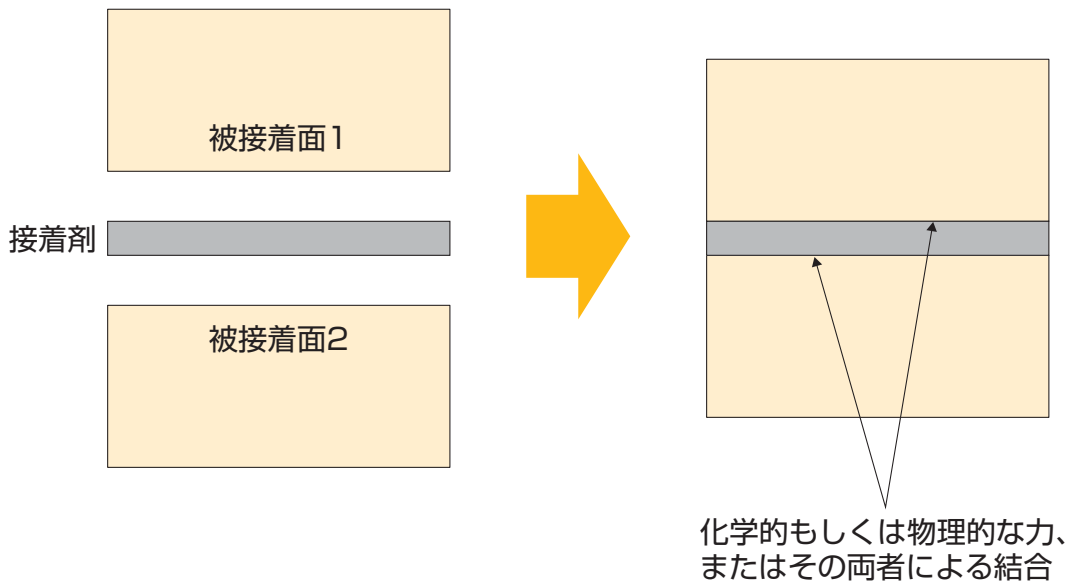
精密機器は大きさや重量、性能、機能などの面で著しく進歩しています。これらの精密機器や微小部品の組立に用いられる接着は「精密接着」と呼ばれています。JISなどの規格に「精密接着」の定義はなく、著者らは「精密部品や精密機器の接着を用いた製造において、部品の位置ずれ・変形・特性変化や接着部のはく離・破壊が極めて少ない高精度な接着部を実現できる接着技術」と定義しています³⁾。

その他に、接着剤や接着部が特別な機能を持つ接着は、「機能性接着」と呼ばれています。たとえば振動や音を低減する接着、はんだに代わって電気を通す接着、部品からの熱を伝えやすくして放熱性を上げる接着、解体性を付与した接着など、要求される機能は多様です。今後は、ナノメートル級の精密接着加工が要求される「微細接着」も増加していくことでしょう。

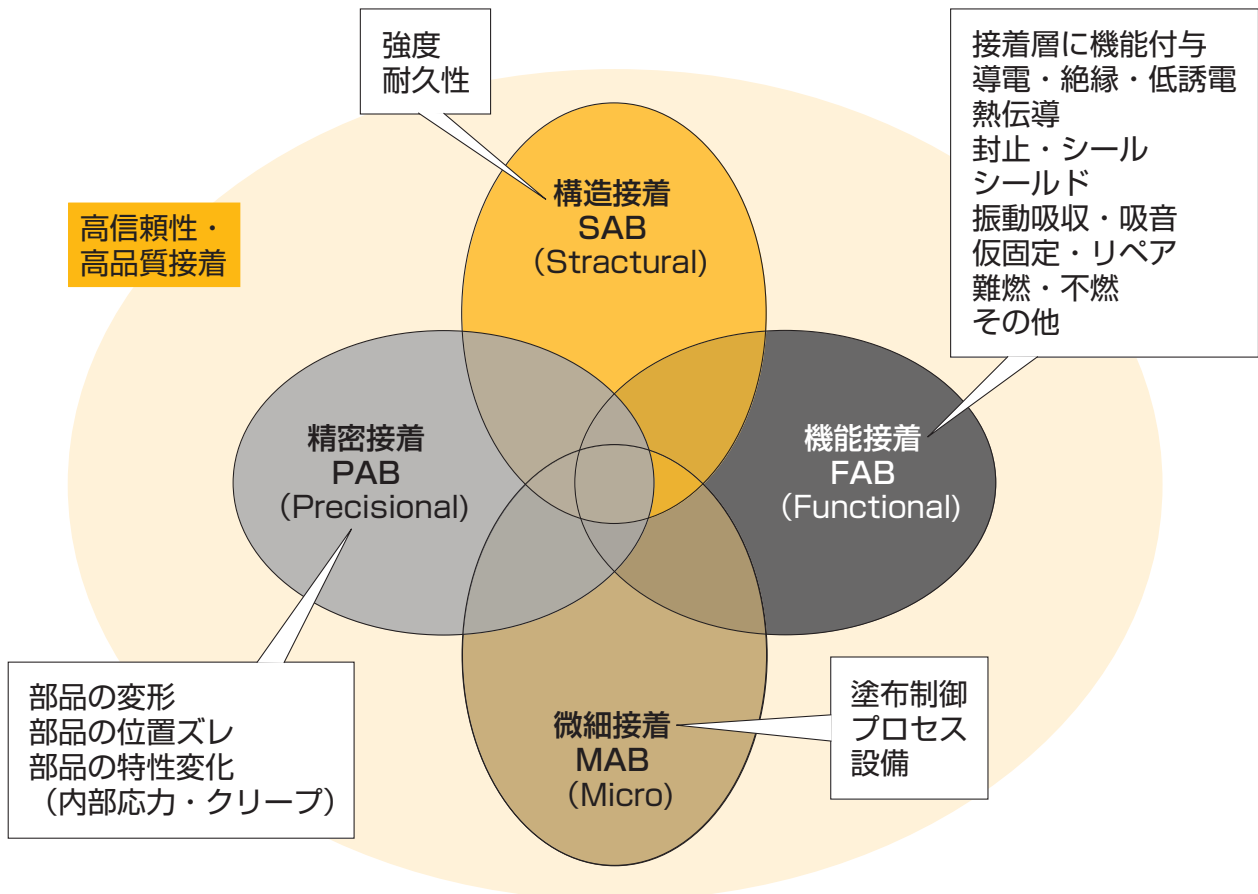
要点
BOX

- 「接着」は「接着剤」を媒介とした接合
- 用途や要求条件によって「構造接着」「精密接着」「機能接着」などがある

「接着」とは



部品・機器製造における接着の分類



用語解説

被着材：接着剤で接着される部品の材料のこと

4 分子の電気的な 引き合いによる結合

接着の原理①
分子間力による結合

液体の接着剤も固体の被着材料も分子の集まりでできていることは、次ページの上図に示す通りですが、それぞれの分子内では電気的に十と一に分かれています。これを分極していると言います。分極の程度は分子の構造によって異なります。

分子間力とは分子同士が電気的に引き合う力のこととて、接着では、接着剤の分子と被着材料表面の分子が電気的に引き合う力ということとです。接着剤の分子も被着材料表面の分子も、分極の程度が大きい(極性が高い)と強く結合します。

ただし、空気中にある極性の高い物質の表面には、次ページ下図(A)のように空気中の水分(水は極性が高い分子)が強力に吸着しており、実際には同図(B)のように表面の吸着水と接着剤が分子間力で結合しています。極性が低い物質の表面では、吸着する水分子の量は少なく、接着剤と水分子との結合箇所は少なくなります。

プラスチックの中で最も極性が低いものは、無極性のポリテトラフルオロエチレン(テフロンの商品名で知られています)です。テフロンはフライパンなどにコーティングしてあり、接着させないために使われています。ポリエチレンやポリプロピレンなども無極性で、基本的に接着ができない材料です。

接着剤と被着材料表面の分子の極性が高くても、分子同士の距離が少し離れるとほとんど引き合いの力は生じません。大きな結合力を得るためには、分子同士の距離が3〜5オングストローム程度以下まで近づかねばなりません。

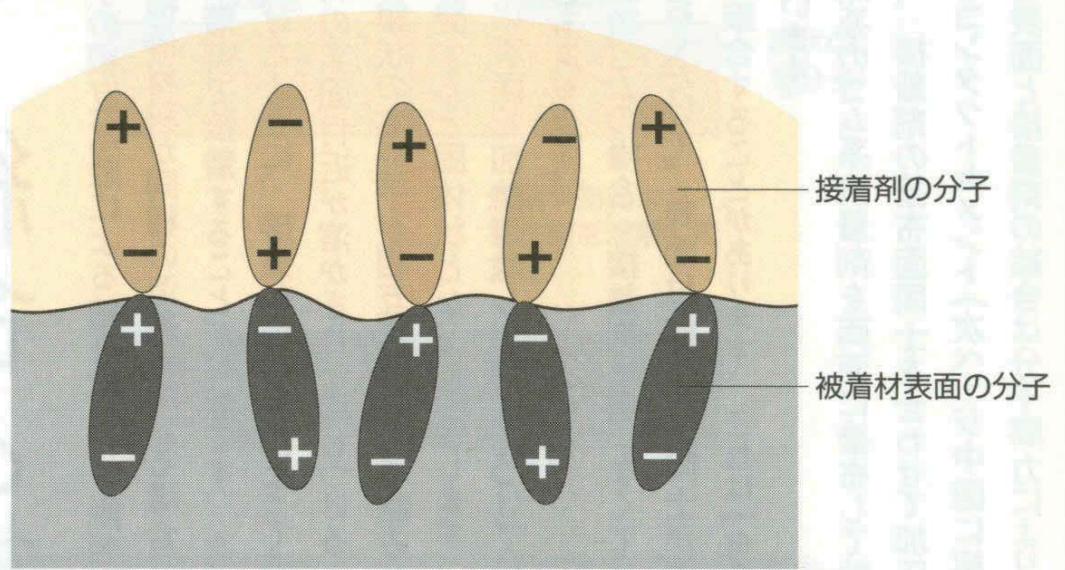
なお、1オングストロームは1千万分の1mmで、水(H—O—H)1分子の水素Hと酸素Oの距離が約1オングストロームです。

工業用接着で多用されている反応型接着剤による接着のほとんどは、分子間力による結合です。以下、本書では分子間力による接着について述べていきます。

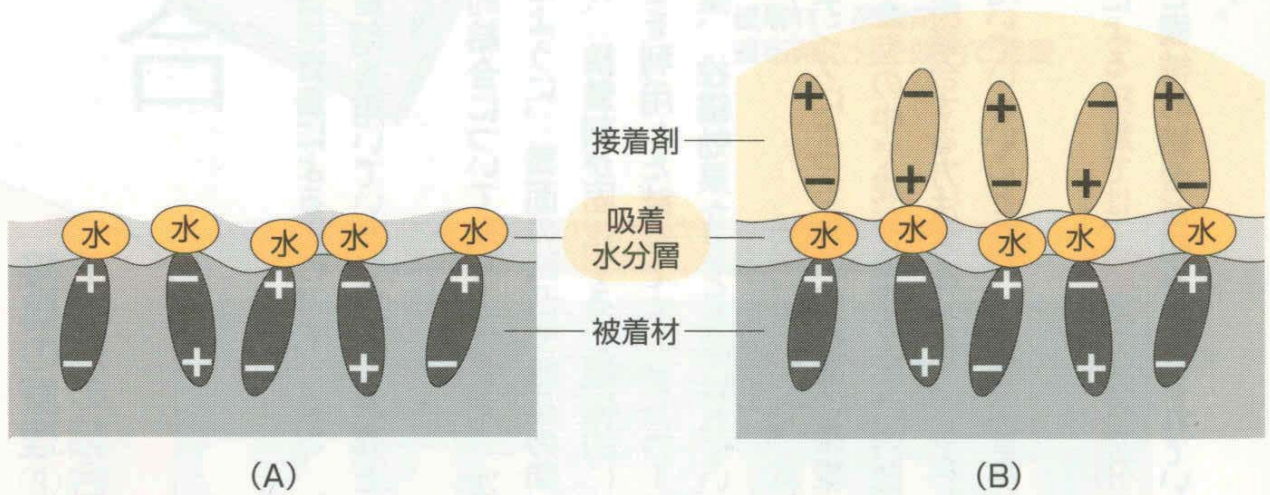
要点 BOX

- 分子の極性が高いほど強く結合する
- 分子間の距離が近づかなければ引き合わない
- 反応型接着剤での接着は分子間力が基本

分子間力による結合



水で覆われている被着材の表面



空気中にあるものの表面は水で覆われている

接着剤は表面の水と結合している

6

異種材料でも
容易に接合できる

接着の利点

接着は、溶接やボルト・ナット、ねじなどによる接合にはない多くの利点を持っています。一番のメリットは、何と言ってもさまざまな材料を、材料の組合せが異なっても容易に接合ができる点です。

接着は、ボルト・ナット、ねじ、スポット溶接、リベットのような点状や、アーク溶接、レーザー溶接、シーム溶接のような線状の接合ではなく、面で接合をしている点に特徴があります。すなわち接合面全体に力が分散するため、厚さが薄い材料や強度が弱い材料でも、材料自体が先に破壊するまでの強度を得ることができるのです。

たとえば、紙同士をステープラーと両面テープで接合して引つ張ると、ステープラーでは弱い力で接合部の穴から紙が破れます。一方、両面テープの場合は接合部は破壊せず、紙自体がちぎれます。アーク溶接、スポット溶接、リベットで2・3mm厚さの鋼板同士を接合したものと、接着剤で1・6mmの鋼板同士を接

着したものの繰返し疲労試験結果の比較を次ページ下図に紹介します。面接合の接着では、薄板化しても点状や線状の接合より優れた疲労特性を示すことがわかるはずです。

接着剤は液状で、隙間なく全面を接合できるため、液体や気体に対するシール効果も得られます。

接着は、接合時に溶接やろう付け、はんだ付けのような高温を必要としません。低い温度で接合が行えるため、熱に弱い材料でも接合でき、接合時に生じる熱ひずみが小さいことも大きな利点です。

ビルや工場などを稼働しながら工事を行う場合、溶接では養生が必要で、近くで塗装を行っている場合などは火花による引火の恐れもあります。多くの接着剤は現場施工ができ、室温で硬化できる火気レス工法が可能です。この点から、最近では船舶の艀装工事⁴⁾でも溶接に代わって接着が用いられるようになっていきます。

要点
BOX

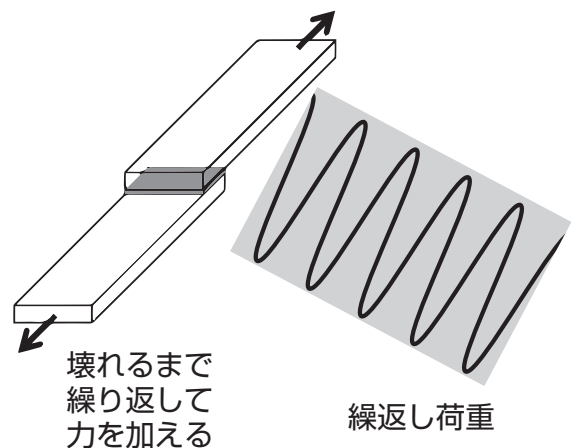
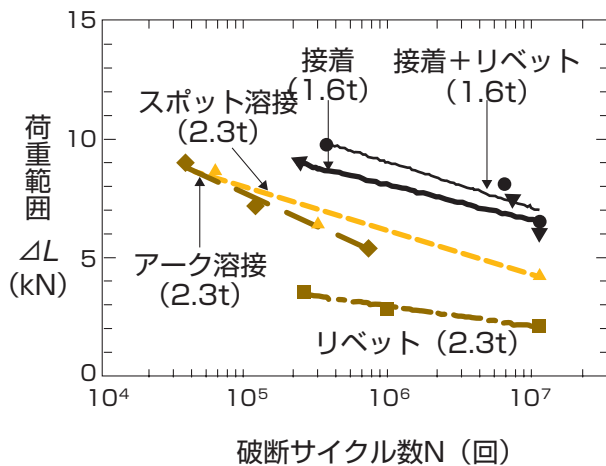
- 薄い材料や弱い材料でも高強度に接合可能
- 液体や気体に対するシール効果も得られる
- 接合ひずみが小さい

接着の利点

区分	利点
性能面	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 接合できる材料が広範囲 ◆ 異種材料の接合ができる ◆ 薄葉材料を高強度に接合できる(面接合による応力分散) ◆ 部材の機能を損なわず部材表面で接合ができる ◆ 微小部品から大物部品まで接合できる ◆ 大面積でも全面の接合が容易にできる ◆ 隙間充填性がある ◆ 接合ひずみが小さい
作業面	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 接合に高温を要しない ◆ 接合時に部材に局所荷重が加わらない ◆ 大がかりな設備が不要 ◆ 屋外での現場作業も可能 ◆ 熟練技能が不要
その他	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 接合に要するエネルギーが小さい ◆ 火気レス工法である



接着は面接合のため応力分散ができる



各種接合法の繰返し疲労特性の比較

接着は面接合のため、薄板化しても点や線での接合より疲労特性に優れている

7

薄板・軽量化、
適材適所の材料選定

接着で得られる効果

接着の利点を活用することで、多くの効果を得ることができま。異種材接合性や面接合による応力分散性、低ひずみ接合性などによる材料の適材適所化や薄板化による軽量化や材料費の低減などは、接着活用の最たる効果です。

部品にねじなどでの締結部分をつくり込む必要がなく、部品の表面をそのまま接合できることは、部品の小型化・軽量化につながり、高密度実装を可能にします。溶接やろう付けのような高温での接合では熱ひずみが大きく、ひずみ除去や精度確保にコストがかかります。ねじやスポット溶接などの点接合ではシール性がないため、接合後にシールが必要です。接着は熱ひずみが少なく、接合とシールを兼ねることができ、そのため、工程合理化によるコストダウンも実現します。

また接着剤は液体であるため、部品の隙間を埋めることが可能です。これを、接着剤の隙間充填性と呼んでいます。この利点を活用することで、次ページ

下図に例示したような部品の加工精度を低減して、加工コストを抑えることができます。

2つの部品をねじで締結し、上下面の平行度と締結後の厚さを公差内に収めるためには、各部品の上面の加工精度を高くしなければなりません。

接着を用いれば、部品の片面のみ高精度に加工し、接着面の加工精度や厚さの精度を落として、治具で上下面の平行度と厚さ精度を確保した状態で接着剤を硬化させると、高精度の接合を安価に行うことができます。大きな定盤を製造する場合にも、片面のみ高精度な平面加工をしたブロックを基準の定盤に並べて、各ブロックに接着剤を塗布して台板を接着すれば、基準定盤の平面度と同じ定盤をつくることは容易です。

接着作業に訓練は必要ですが、特別な熟練技能や資格は要りません。熟練技能者や有資格者の減少や賃金上昇対策にも効果的です。

要点
BOX

- 薄板・軽量化、適材適所の材料選定ができる
- 小型化・軽量化、高密度化が可能
- 加工精度の低減、コストダウンにも効果的

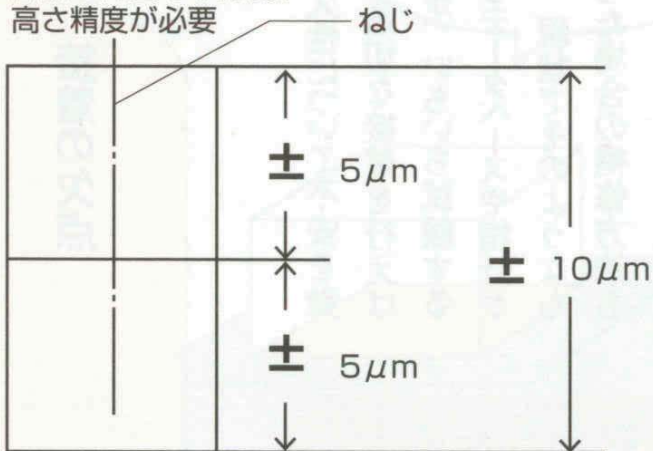
接着で得られる効果

軽量化	異種材接合
	薄板化
	締結部品廃止
低強度部材の高強度接合	
小型化・高密度化	
高精度化	部品の加工精度吸収、高精度位置決め
耐疲労特性の向上	
剛性向上	
振動吸収性の確保	
接合とシールの兼用	
平滑性の確保	意匠性向上、空気抵抗低減
意匠性向上	素材変更
コストダウン	材料費低減
	工程合理化
	熟練技能不要
	設備の初期投資低減
	加工エネルギー低減
稼働状態での工事が可能	火気レス工法



接着による部品の加工精度の低減

部品の両面の平行度、高さ精度が必要



ねじ固定

部品の高精度加工は片面のみでよい
治具で平行度と高さをセットした状態で
接着剤を硬化させる



接着接合

2

第

章

接着剤の固まり方



10

二液の混合や一液加熱
で硬化する接着剤エポキシ系、ウレタン系、
シリコン系接着剤

主剤と硬化剤を計量し、十分に混合することです。

剤と硬化剤の分子同士を隣接させて反応させるのが、次ページ上図に示した二液の混合による硬化です。

厳密な配合比の管理と十分な混合が必要です。硬

化温度は成分により異なり、室温で反応するものや

加熱が必要なものがあります。反応が進むと鎖状か

ら網目構造になります。このような反応は付加重合(共

重合)と呼ばれています。このような方式で硬化する

接着剤には二液型エポキシ系接着剤や二液型ウレタン

系接着剤、二液型シリコン系接着剤などがあります。

エポキシ系接着剤やシリコン系接着剤には、一

液型で決められた温度以上に加熱することで硬化す

る一液加熱硬化型もあります。これらの接着剤では、

加熱するまでは反応しない硬化剤がすでに主剤の中

に添加されています。計量や混合は不要ですが、保

存安定性が良くないため、冷蔵や冷凍保管が求めら

れます。

付加重合で硬化するシリコン系接着剤は、次ペ

ージ下表に示すような物質に接触していると、硬化

が阻害される場合があります。事前に硬化するかも

うかを確認しておくことが重要です。

二液型ウレタン系接着剤は発泡に注意すべきです。

主剤のポリオールは、水と非常に馴染みやすく、空

気中の水分を吸収します。硬化剤のイソシアネートは、

水と非常に反応しやすく、反応して二酸化炭素を発

生させます。

したがって、二液型ウレタン系接着剤の容器を開け

て計量・混合などの操作を通常の作業雰囲気で行っ

ていると、接着剤が発泡して使えなくなります。塗

布から貼り合せまでの放置時間が長いときも発泡が

生じます。二液型ウレタン系接着剤は手作業による

計量・混合は不適で、空気に触れずに計量・混合が

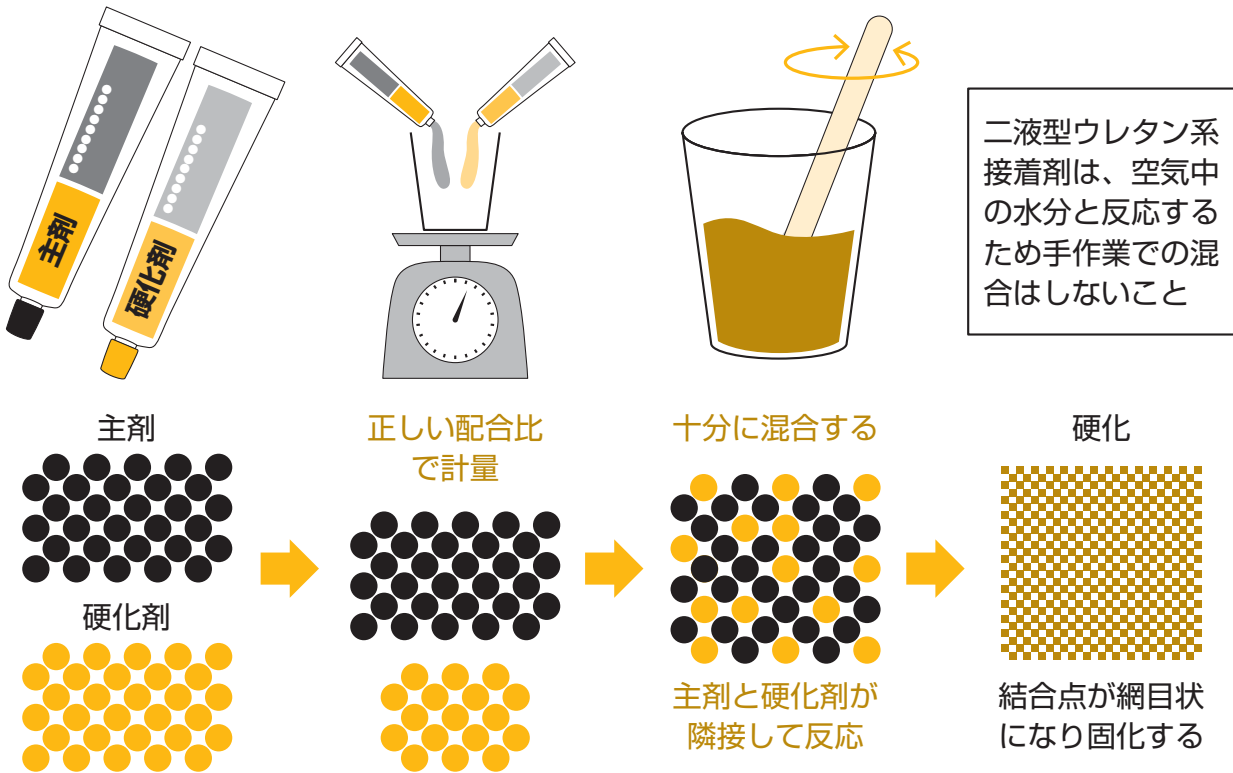
できる二連カートリッジ入りや専用の計量・混合・塗

布装置による作業が必要です。

要点
BOX

- 主剤と硬化剤が隣接して反応硬化する
- 正確な計量と十分な混合が必要
- 一液型は、主剤中に硬化剤が混合されている

二液の混合による硬化



二液型シリコン系接着剤の硬化阻害物質

硫黄化合物
 燐化合物
 窒素化合物
 有機ゴム(天然ゴム、クロロプレンゴム、ニトリルゴム、EPDMなど)
 軟質塩ビの可塑剤・熱安定剤
 アミン硬化系エポキシ樹脂
 縮合タイプのシリコン樹脂
 ウレタン樹脂のイソシアネート類
 一部のビニルテープ粘着剤・接着剤・塗料(ポリエステル系塗料など)
 ワックス類、はんだフラックス、松ヤニ
 ゴム粘土・油粘土
 など



11

二液の接触で
硬化する接着剤第二世代アクリル系接着剤
(SGA)

二液型の接着剤なのに、二液を混合しなくても使える接着剤もあります。それは、第二世代アクリル系接着剤やSGA (Second Generation Acrylic Adhesives)、変性アクリル系接着剤、構造用アクリル系接着剤、二液型アクリル系接着剤などと呼ばれるものです。

この接着剤は次ページ上図に示すように、二液とも主成分はほとんど同じであるため、二液主剤型と言われています。

片方の液には酸化触媒が、もう一方の液には還元触媒がわずかな量だけ添加され、それらの触媒が接触することでラジカルというものが発生し、接着剤の主成分が連鎖反応によって室温で短時間に次々と硬化していきます。このような反応方式はラジカル重合と呼ばれています。

したがって、二液を混合すればもちろん硬化しますが、次ページ下図のように二液を混合せず、両面にA

剤とB剤を別々に塗布したり、A剤の上にB剤を塗布するなど貼り合わせて二液を接触させたりすることも硬化できます。また、酸化触媒と還元触媒が接触すればラジカルが発生するため、二液の配合比が相当変化してもきちんと硬化でき、目分量で作業することも容易です。

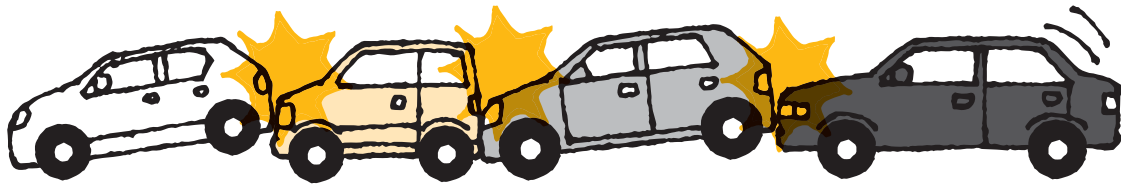
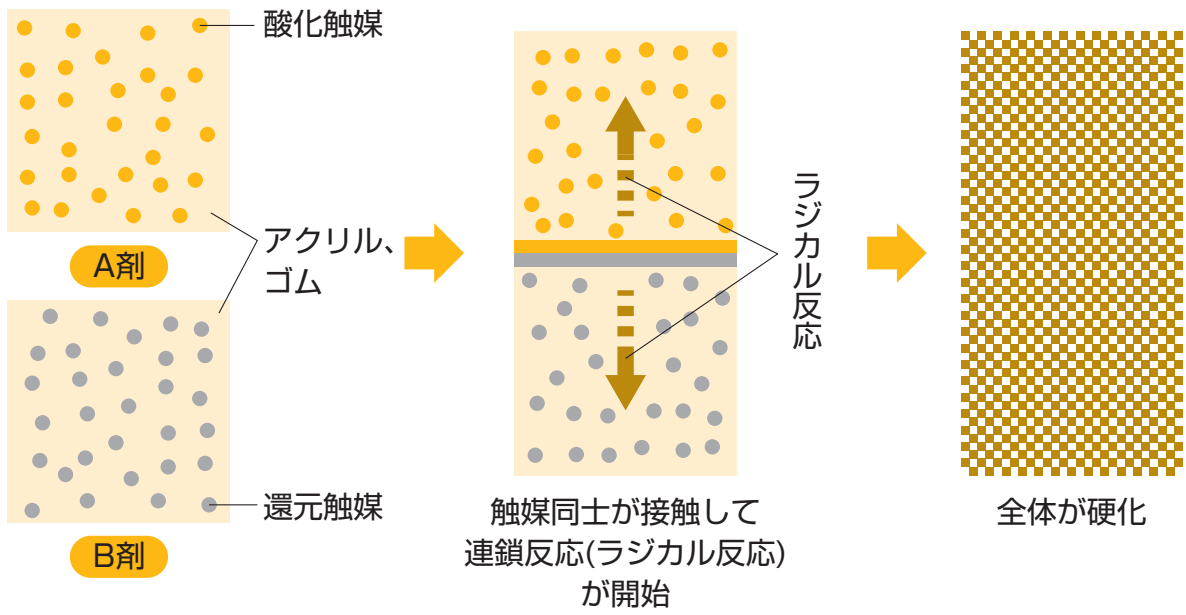
二液の一方の触媒を溶液としてプライマーにした、プライマー・主剤型の変性アクリル系接着剤もあります。これは接着面にプライマーを薄く塗布しておき、主剤を塗布して貼り合わせるとラジカルが発生して硬化するものです。

ただし、ラジカル連鎖反応は、酸化剤と還元剤が接触してラジカルが発生した部分からせいぜい数mm程度しか硬化しないため、プライマータイプや二液を別々に塗布したり重ねて塗布したりして使用する場合には注意が必要です。すなわち、接着層の厚さが厚くなると未硬化になることがあるのです。

要点
BOX

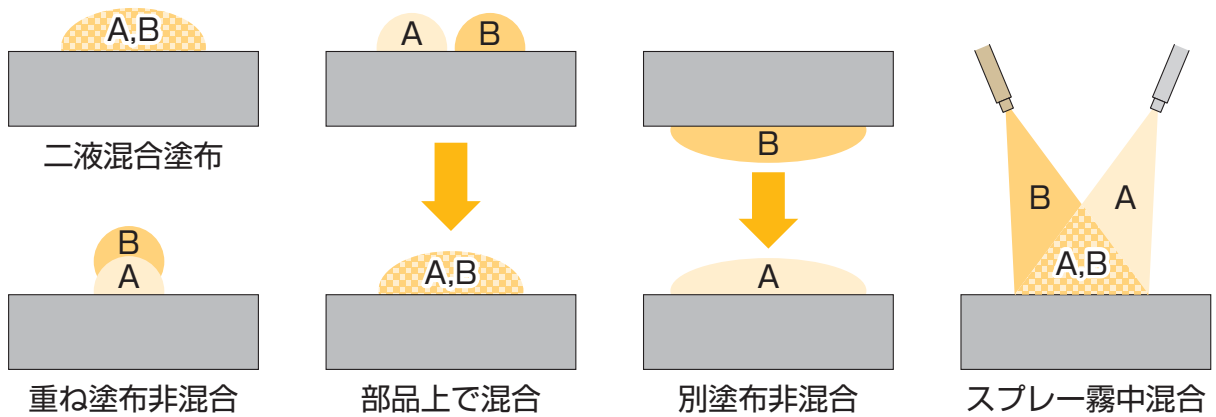
- 二液の接触で連鎖反応により室温で硬化する
- 配合比がずれても安定な特性が得られる
- 一方がプライマーになったものもある

二液の接触による硬化



ラジカル連鎖反応は玉突きのように、順番に伝搬していく

二液型アクリル系接着剤(SGA)の使い方



3

第

章

固まった接着剤の 物性と接着特性



17

接着剤は硬化時に
収縮して応力が生じる硬化収縮による内部応力
〈硬化収縮応力〉

ほとんどの接着剤は、液体から固体に変化して硬化や固化するとき、体積が収縮します。

室温硬化型接着剤は室温で、加熱硬化型接着剤は硬化中の加熱温度下で体積収縮が起こります。ところが、接着剤と被着材表面は、接着剤が液体のときに分子間力で結合しています。

このため、接着剤の硬化や固化が始まると体積収縮が始まりますが、次ページ上図(A)のように界面の結合部分は接着剤の体積収縮に従って動くことができないため、硬化が終わったときには同図(B)のような形となり、結合界面付近の接着剤は接着剤の中心に向かつて引っ張られた状態となります。このように、接着剤の硬化収縮によって生じる力を「硬化収縮応力」と呼んでいます。

接着剤の硬化過程における体積収縮率と弾性率、硬化収縮応力の経時変化を示したものが、次ページの下図です。接着剤の硬化が始まると、体積収縮は

すぐに起こり始めます。硬化の進行に伴って、接着剤は液状→ゲル状→固体と変化します。ゲル状態を過ぎると徐々に硬くなっていき、弾性率が増加します。

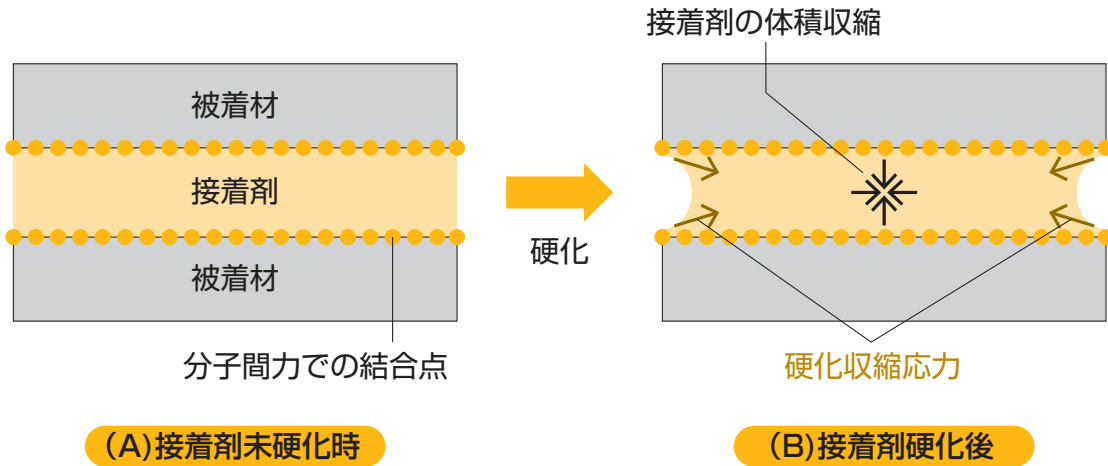
弾性率がある程度(100MPa程度)以上になると硬化収縮応力が生じ始め、硬化が終了するまで増加します。硬化が終了した時点で、硬化収縮応力は最大になります。そして、放置時間とともに若干低下していくのです。この応力が低下する現象は「応力緩和」と呼ばれます。応力緩和については、20項で詳述します。

そして硬化収縮応力により、接着強さや耐久性の低下、部品の変形などが生じることとなります。硬化収縮応力は、接着剤の硬化後の硬さが硬いほど、硬化収縮率が大きいほど高くなります。したがって、硬化収縮応力を減らすためには、硬化後の硬さができるだけ柔らかい接着剤や硬化収縮率が小さい接着剤を選ぶ必要があります。

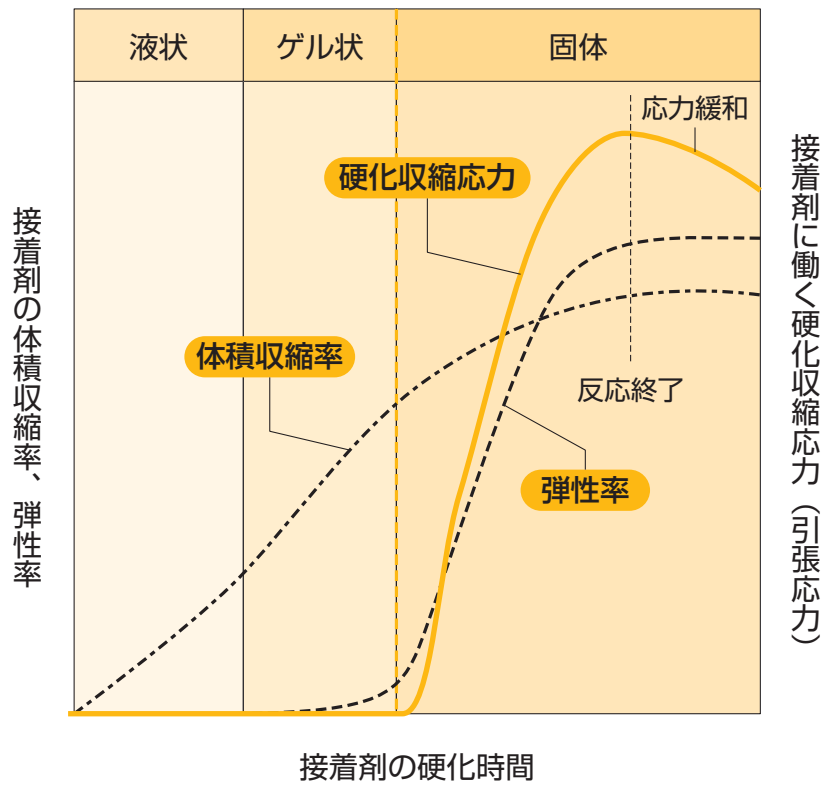
要点
BOX

- 接着剤は硬化や固化時に体積が収縮する
- 界面は接着剤が液体時に結合して動けないため、界面接合部は接着剤内部に引っ張られる

接着剤の硬化収縮による内部応力の発生



接着剤の硬化時間と体積収縮率、弾性率、硬化収縮応力の変化



接着剤の硬化が始まると、体積収縮はすぐに発生する。しかし液状やゲル状では、収縮しても力は発生しない。ゲル状態を過ぎて硬くなるにつれ、硬化収縮応力が発生し、硬化が終了するまで増加して硬化終了時点で最大となる。硬化後は、放置時間とともに応力緩和で硬化収縮応力は若干低下する

20

粘弾性体の性質

粘弾性体の速度依存性、クリープ特性、応力緩和特性

粘弾性体は、速度によって特性が変化したりクリープや応力緩和が生じたりします。

【速度依存性】

両面テープの引張せん断強さの引張速度依存性の一例を、次ページ上図に示しました。粘弾性体を高速で引張ると強度は高く現れ、低速で引張ると強度は低く現れます。粘性的性質が大きい粘着剤では、特に速度依存性が大きくなります。部品組立で使われる粘着テープや両面テープの目的を考えると、部品保持など速度が加わらない状況下での利用が圧倒的に多く、極低速での破断強さが重視されます。

【クリープ】

接着部に継続して力が加わると、接着剤が「クリープ」を起こして強度低下を起こすことがあります。「クリープ」とは、たとえば輪ゴムを強く締めると徐々に伸びて緩むような「分子の滑り現象」です。次ページ中央の図のように、時間とともに粘性部分が徐々に

伸びてくる現象を「クリープ変形」と言います。クリープ変形の速度は温度が高いほど、荷重が大きいほど速くなります。粘性的性質が大きい軟らかい接着剤では、硬い接着剤に比べてクリープ変形が大きくなります。ある伸び量に達すると破断し、これを「クリープ破壊」と呼びます。クリープは接着接合物の耐久性に影響を及ぼすため、劣化には十分な注意が必要です。

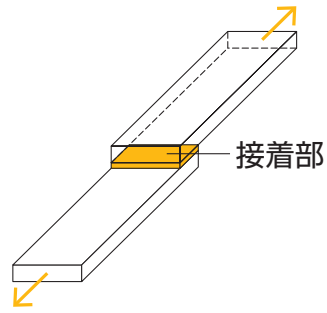
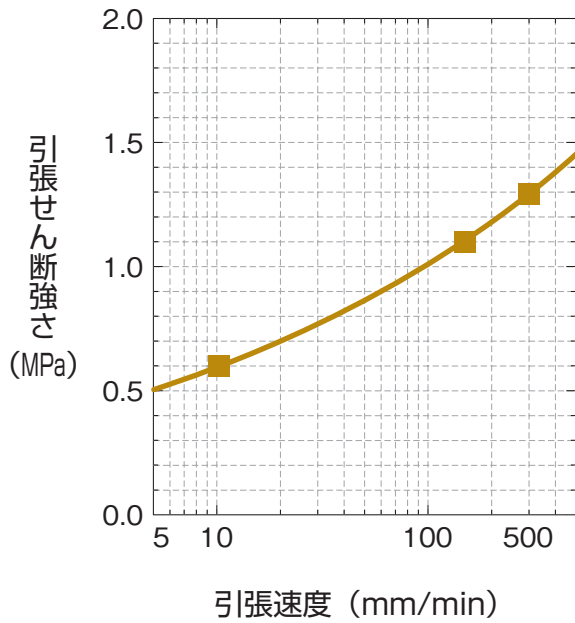
【応力緩和】

次ページ下図のように、接着剤がある変位量まで引張られて変位が固定している場合には、接着剤は引張られた状態になります。このとき接着剤に加わる引張力を P_0 とします。接着剤は粘弾性体のためクリープを起こします。時間とともに粘性部分はズルズルと引張られて緩むため、接着剤に加わる引張力は $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ と小さくなり、これを応力緩和と言います。応力緩和は温度が高いほど、接着剤に加わっている応力が大きいほど速くなります。

要点
BOX

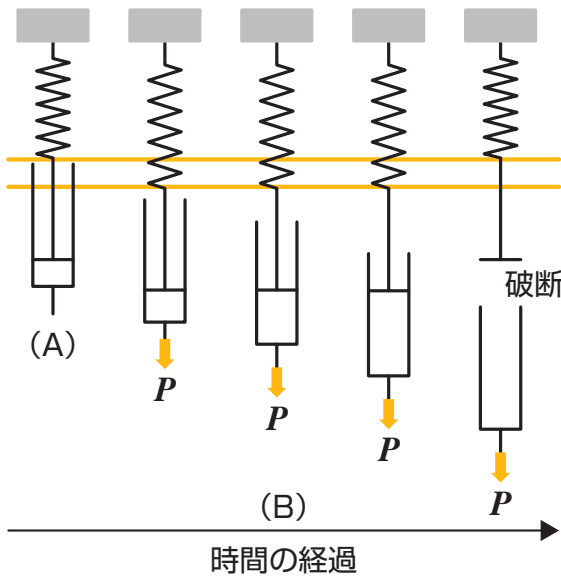
- 高速の負荷では弾性体的、低速では粘性体的
- 継続負荷では徐々に伸びてクリープを起こす
- 一定変位での負荷状態では応力が緩和する

引張せん断試験における引張速度依存性の例



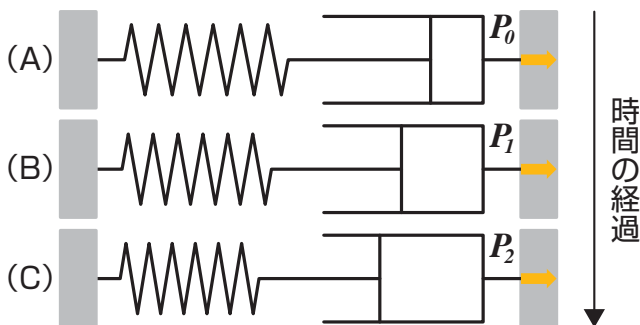
接着部を急速に引っ張ると接着強さは高く、ゆっくり引っ張ると低く現れる。これは、接着剤や粘着剤は粘弾性体であるため、高速では粘性部分の動きが悪く、弾性的性質が強くなるためである。低速では、粘性部分が大きく動く

粘弾性体におけるクリープ変形とクリープ破断



ばね(弾性部)は荷重 P に比例して伸び、時間が経過しても変わらない。ダッシュポット(粘性部)は、時間の経過とともに変形が大きくなっていく。破断伸び率に達した時点で破断する

粘弾性体の応力緩和



接着剤に引張力 P_0 が加わった状態で変位が変わらない場合、粘性部分は時間の経過とともにズルズルと引っ張られて緩んでくるため、接着剤に加わる引張力は $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ と小さくなっていく

21

接着部に加わる力の種類と代表的な評価方法

接着強さの評価方法、引張せん断試験とはく離試験

接着の結合力の基本は分子間力であるため、単位面積当たりの結合強さは、共有結合や金属結合などより非常に低強度です。このため接着は面接合にして、面全体で荷重を受ける構造での使用が基本です。はく離や衝撃のように局部的に加わる力は苦手です。せん断では20mm角の接着面積で車1台程度は軽く吊り上げられますが、25mm幅のはく離では手でも剥がすこともできる程度の強度になります。

接着部に加わる力の種類としては、次ページ上図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力(b)の2種類が基本です。圧縮力はマインナス方向の力と考えます。

せん断力としては、次ページ中央の図に示すように、板状の接着におけるせん断力(a1)(a2)、軸やパイプなどの嵌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)などがあります。引張力としては、次ページ下図に示

すように、均等引張り(a)、不均等な引張り(割裂)(b1)(b2)、はく離(c)などが挙げられます。(c)のはく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力が加わるので、弱い力で剥がれてしまいます。

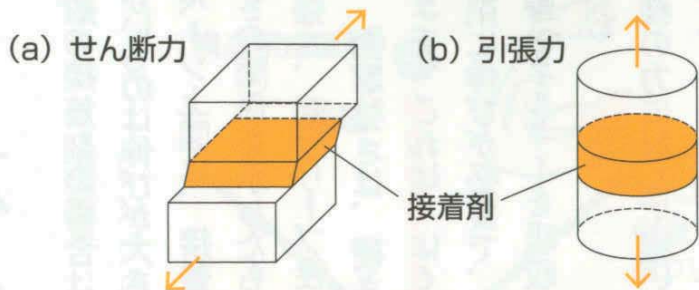
接着の強度試験で最も用いられるのは、引張せん断試験とはく離試験です。引張せん断試験は、次ページ下図(a)に示すJIS K 6850規定の単純重ね合せ引張せん断試験が一般的です。板幅は25・0mm、重ね合せ長さは12・5mmと規定されています。接着強さが被着材の引張降伏強さ以上では、板が伸びて正確に測定できないため、板の引張降伏強さが接着強さ以上となる板の厚さが必要です。

はく離試験は、JIS K 6854のT形はく離試験(b1)、180°はく離試験(b2)、90°はく離試験(b3)が一般的です。被着材の曲がりやすさや加わる力の方向によって使い分けられています。

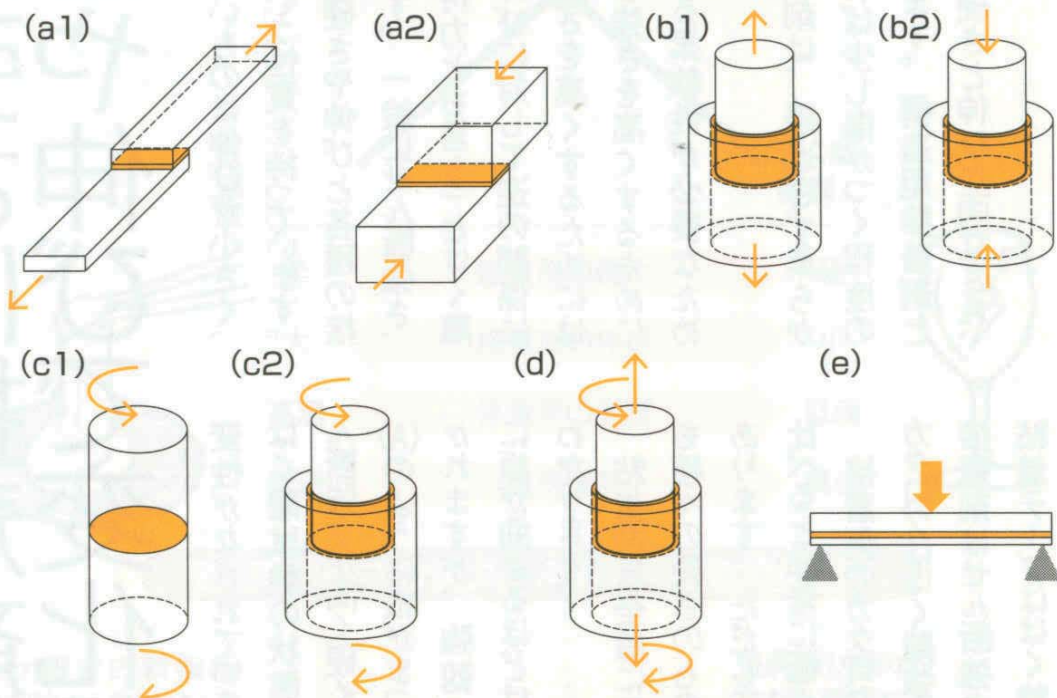
要点BOX

- 応力の基本は、せん断応力と引張応力
- 接着は面全体で荷重を受ける構造が基本
- 一般にせん断には強いが、はく離には弱い

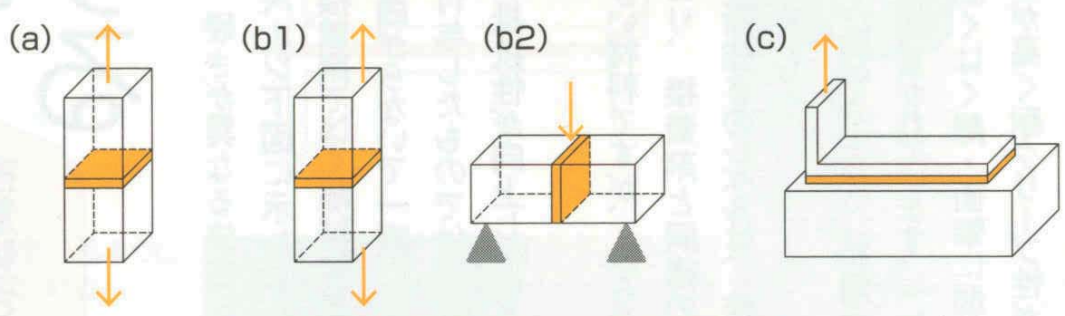
接着部に加わる基本的な力



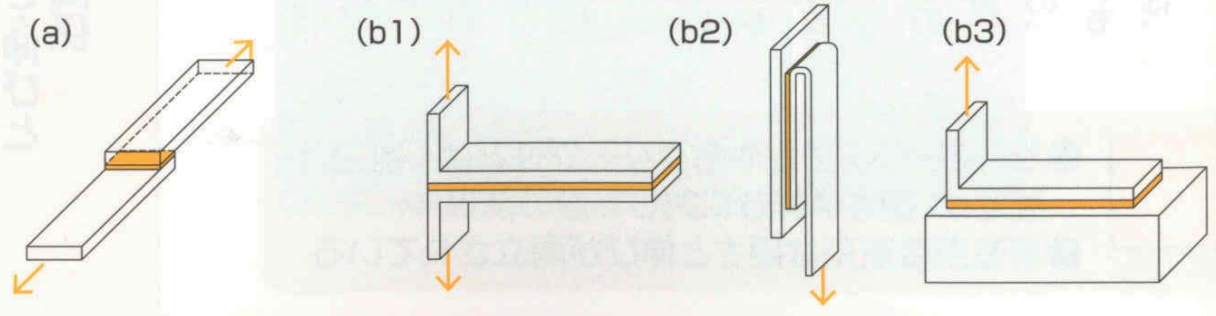
せん断力の種々の加わり方



引張力の種々の加わり方



代表的な接着強度の試験方法



4

第

章

良好な接着を 行うための基本



26

目的は信頼性・品質に優れた接着の実施

高信頼性・高品質接着と
特殊工程の技術

接着したものが、接着強さなどの特性や耐久性に優れていることはもちろん必要ですが、それだけで信頼性や品質に優れた接着が実現できているとは言えません。接着特性（強度など）のバラツキが小さい、不良率が低い（信頼性が高い）、さらには生産性にも優れていて「コスト面でも有利、ということが問われているのです。

これらを兼ね備えた接着のことを「高信頼性・高品質接着」と呼んでいます。特に接着は、出来映えに影響する因子が多い接合方法であるため、バラツキが出やすいという特性があり、「バラツキを小さく抑える」ことは非常に重要です。

「結果が後工程で実施される検査および試験により、要求された品質基準を満たしているかどうかを十分に検証することができない工程」のことを「特殊工程」と言っています。接着は、組立後に非破壊で接着部の強度を調査して、低強度品を排除することができ

ないという観点から、まさに「特殊工程」の接合技術という位置づけです。

特殊工程の技術で信頼性や品質を確保するためには、開発段階での品質のつくり込みと、工程ごとの作業の最適条件と許容範囲の明確化と管理がカギを握っています。

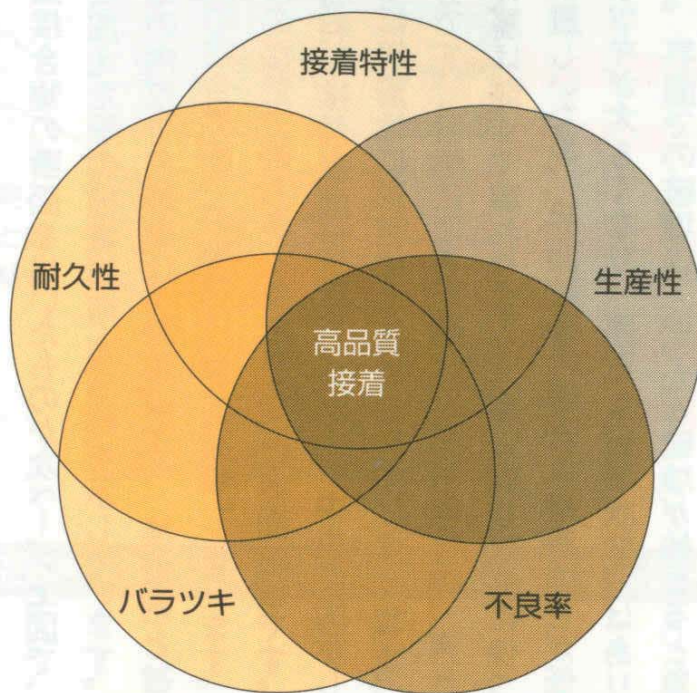
製品や部品の小型化・軽量化、高機能・高性能の要求はますます高度化し、構造物や電気・電子・光学機器などの精密機器組立に接着が必要不可欠な要素技術となっています。その適用は、今後も拡大し続けるのは間違いありません。

そうした中で、接着部の損傷や破壊が重大事故につながる可能性が懸念されています。国際的には、ISO 9001の接着版とも言える規格（ISO 21368）が2022年4月に改訂され、これからは「接着の品質」への取り組みが極めて重要になる時代を迎えました。

要点BOX

- 接着特性と耐久性を追求する
- バラツキや不良率を極限まで小さく
- 生産性やコスト面で競争優位に立てる

高信頼性・高品質接着の条件



接着強さなどの特性や耐久性に優れているだけでなく、バラツキが小さい、不良率が低い(信頼性が高い)、さらに生産性にも優れ、コスト的にも有利な面を兼ね備えた接着を「高信頼性・高品質接着」と言う

67

接着は特殊工程の技術

「特殊工程」の定義

「結果が後工程で実施される検査および試験によって、要求された品質基準を満たしているかどうかを十分に検証することができない工程」

接着は、組立後に非破壊で接着部の強度を検査して、低強度品を排除することができない

高信頼性・高品質を確保するためには、開発段階での品質のつくり込みと、工程ごとの作業の最適条件と許容範囲の明確化と管理が重要

27

接着面での破壊は禁物

凝集破壊と凝集破壊率

接着接合物の断面を描いたものが次ページ上図で、外力を加えた際の破壊箇所と名称を示しています。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」と言います。

通常の接着で最も多く見られるのは界面破壊です。被着材料の接着表面付近は、次ページ中央に図示したように接着性に影響する因子が非常に多く集まった部分です。自然にできた酸化膜や水酸化膜、汚れなどの層は弱くて壊れやすく、常に同じ状態に保つことが難しいため、界面破壊の場合は接着強さが低くバラツキが大きくなり、適正な破壊状態ではありませぬ。界面での破壊は、いったん破壊が始まると急速に伝搬します。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り、接着強さのバラツキは小さく、理想的な破壊状態と言えます。

実際の接着部では、凝集破壊と界面破壊が混在して現れるのが一般的です。接着面積全体に占める凝

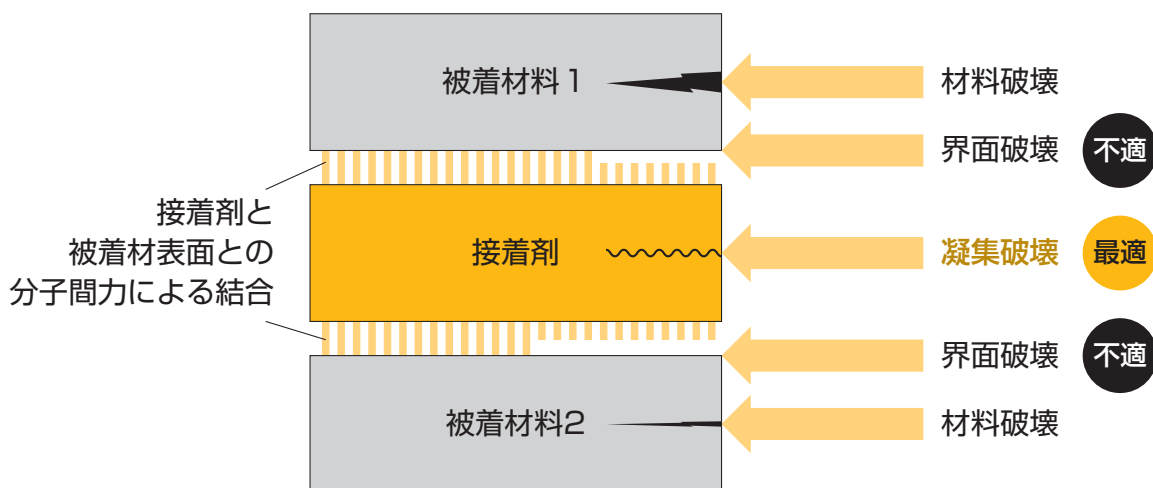
集破壊部分の面積の比率を「凝集破壊率」と呼んでいきます。筆者が測定した多数のデータと長年の経験から、強度バラツキが少ない高品質の接着を行うためには、凝集破壊率40%以上を最低限で確保することが必要と判断できます。凝集破壊率が40%以下になると低強度品が頻出するようになり、強度のバラツキが大きくなってきます。接着部にシール性が要求される場合は、より高い凝集破壊率が求められます。

せん断の繰返し疲労試験の結果を次ページ下図に示しました。表面処理を変えて界面破壊、凝集破壊率70%、同100%としたものの比較です。凝集破壊率が高いほど繰返し疲労特性が向上しています。繰返し疲労試験は外力での繰返しですが、使用中に高温低温を繰り返す冷熱サイクル試験やヒートショック試験では熱応力の繰返しとなり、外力の疲労と同様に凝集破壊率を高くすることで、冷熱繰返し特性を向上させることができます。

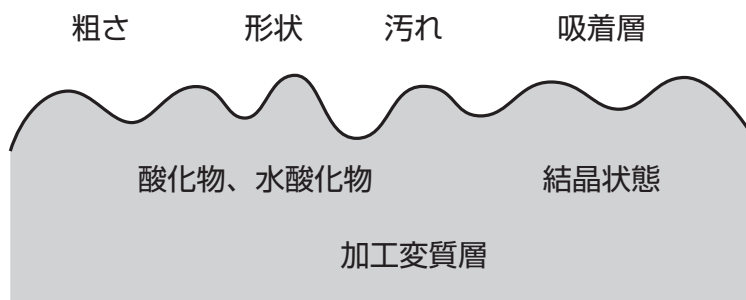
要点BOX

- 接着界面での破壊は低強度でバラツキの元
- 界面を強化して接着剤の内部で破壊させると、凝集破壊率を高くすることがカギ

接着部の破壊箇所



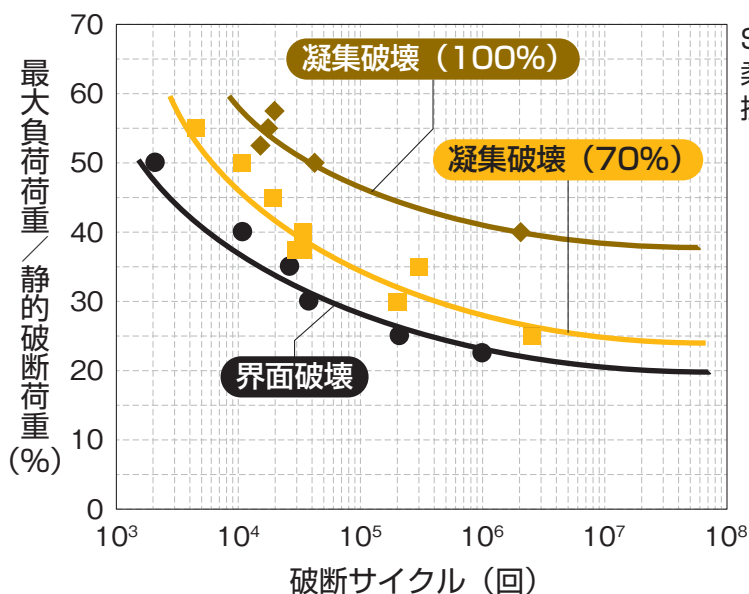
空気中にある金属表面の接着性に影響する因子



自然にできた酸化膜や水酸化膜、汚れなどの層は弱くて壊れやすく、常に同じ状態にコントロールすることはできないため、界面破壊の場合は接着強さが低くなるほかバラツキが大きくなり、適正な破壊状態とは言えない

凝集破壊率が高いほど耐久性が向上

凝集破壊率の違いによる繰返し疲労特性の差



SUS/SUS
柔軟二液アクリル系
接着剤 (SGA)

界面での接着性を向上させて凝集破壊率を高くするほど、接着強さや水分、繰返し応力、高温低温の繰返しなどへの耐久性は向上する

31

界面破壊を避けて
凝集破壊にするには

接着面の表面張力を
高くして極性を上げる

4項で述べたように、接着剤も被着材表面も分子の極性が高ければ、強い分子間力が得られます。接着剤の極性を高くするのは接着剤メーカーに任せて、接着剤を使う側では被着材表面の極性を高くする(活性化すること)が必要です。被着材表面の極性を高くすることは、すなわち被着材の表面張力(固体の表面張力は、正確には表面自由エネルギーと言つ)を大きくすることになります。

被着材の表面張力を大きくするには、表面の清浄化や表面処理による化成皮膜の形成、表面改質などを行います。表面の清浄化は接着の基本ですが、それだけではもともと表面張力が低い材料の表面張力を上げることは困難です。また、表面に酸化膜や水酸化膜などの弱い層が残っていると、高い強度は確保できないことから除去が必要です。空気中にある多くの部品の表面は接着に適した表面張力を持たず、表面処理や表面改質は必須のプロセスと言えます。

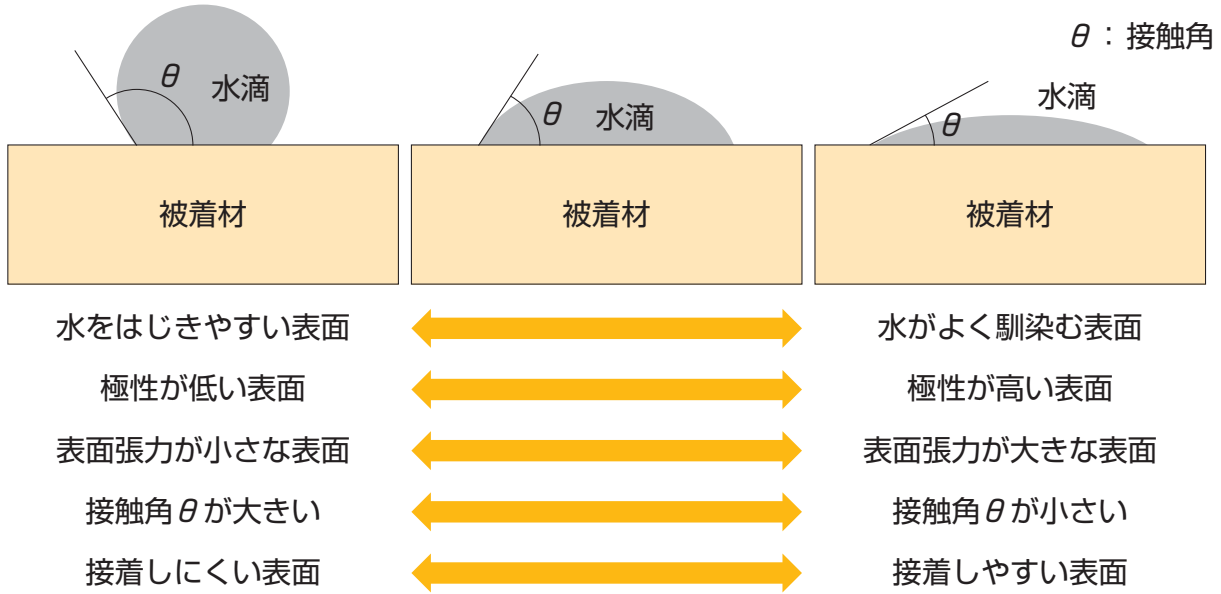
液体の表面張力は、表面積を小さくするために玉になろうとする力ですが、固体の表面張力は液体を引つ張ろうとする力になります。表面に液滴を落とすと、ある状態で釣り合います。液滴と表面のなす角度 θ を接触角と呼び、固体の表面張力が大きいほど接触角は小さくなります。すなわち、接触角が小さいほど接着しやすい表面になります。

被着材表面の表面張力を測る方法としては、次ページ下図に掲げるように、濡れ張力試験用混合液を表面に微量滴下して液が広がるかどうかを見る方法(滴下法)があります。筆者の経験から、この方法では一般に被着材の表面張力が $36 \sim 38 \text{ mN/m}$ 以上あれば、凝集破壊率が高く高品質な接着が可能と言えます。ダイペンと呼ばれるフェルトペンで線を書いて、はじきを見る方法もあり、 $40 \sim 43 \text{ mN/m}$ 以上であれば良好な接着ができます(テフロンの表面張力は 18 mN/m 程度と非常に低いので接着できない)。

要点
BOX

- 凝集破壊率を高くするには、接着面の表面張力を高くして分子間力を大きくする
- 接着面の表面張力は $36 \sim 38 \text{ mN/m}$ 以上必要

固体の表面への水の馴染みやすさと接着のしやすさ



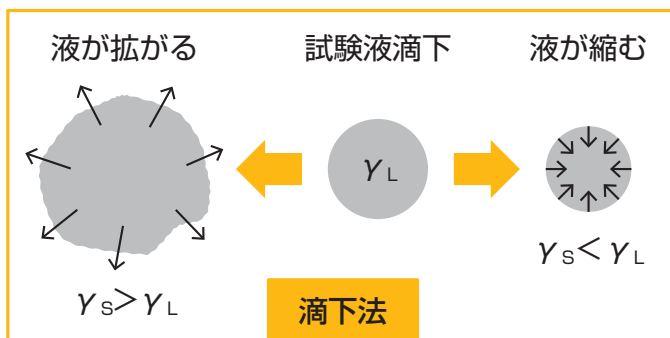
濡れ張力試験用混合液による固体の表面張力測定法



種々の表面張力の濡れ張力試験用混合液が市販されている



いずれかの試験液を、マイクロピペットで測定する表面に微量滴下する



滴下した液が広がったり縮んだりせずに、釣り合ったときの液体の表面張力がほぼ固体表面の表面張力となる。液の表面張力は、瓶のラベルに表示されている

34

接着しやすい表面に
変える表面改質

ドライ処理による表面改質

表面改質は、表面に極性基を生成させて表面張力を高くし、接着剤と強い分子間力(水素結合)で結合させる処理です。水素結合は、分子間力の中でも最も強い結合で、表面に強く吸着した水(H—O—H)や酸素(=O)、カルボキシル基(—COOH)などと接着剤の水酸基(—OH)との間で形成されます。

薬品を用いないドライ処理には、火炎処理やコロナ処理、短波長紫外線照射(低圧水銀ランプの253nmや185nm、エキシマランプの172nmの波長)、大気圧プラズマ処理などがあります。液体を使わないため接着部のみの部分処理が可能、かつ組立ライン中で接着直前の処理が可能などの特徴があります。ドライ処理による表面改質技術の進歩は、技術進化の少ない接着の世界での革新的技術と言えます。

短波長紫外線照射によるプラスチックの表面改質のメカニズムを、次ページ上図に示しました。大気圧プラズマ照射や火炎処理でも原理は同じです。紫外

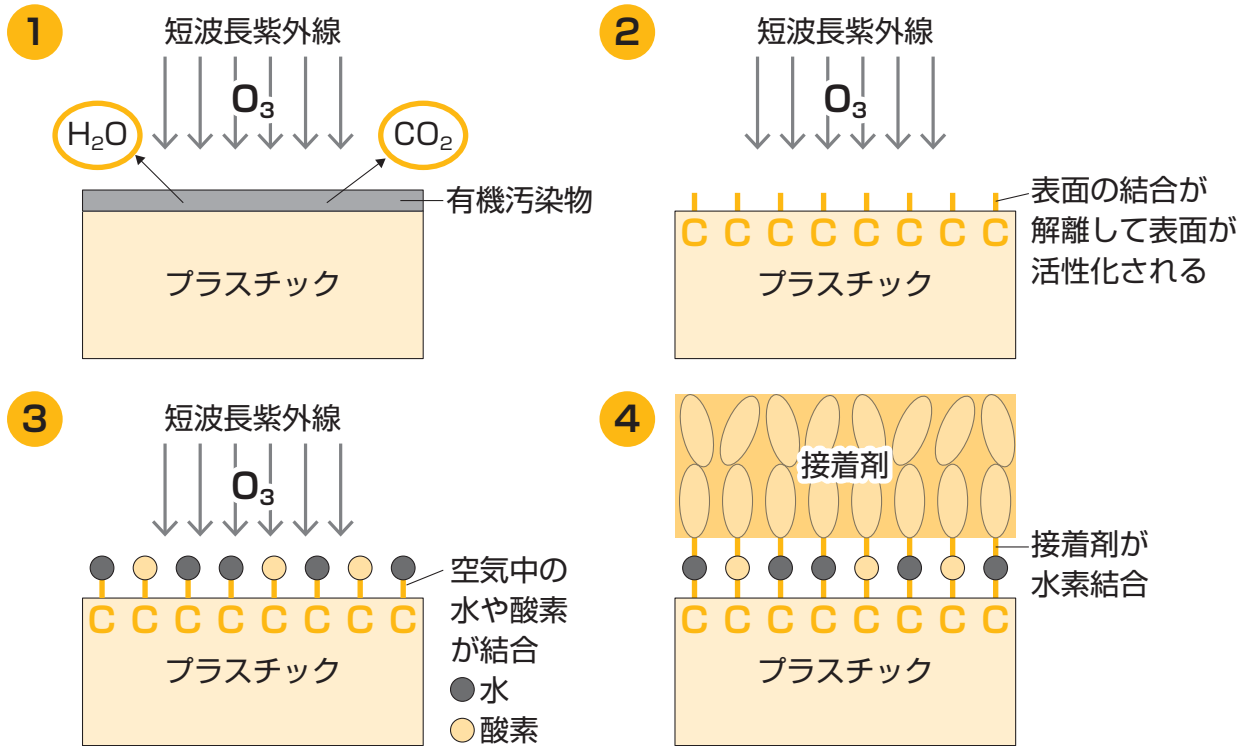
線のエネルギーと紫外線によって発生したオゾンにより、表面の有機汚染物は二酸化炭素と水に分解されて除去され、露出したプラスチックの表面の結合が切断されて活性な状態となり、空気中の水や酸素などと簡単に結合を起こします。この面に接着剤を塗布すると、接着剤との間で強い水素結合が起こり結合します。これらの方法は、金属やガラス・セラミックスなどでも接着性向上の効果が得られます。

次ページ下図は、成形用樹脂のPPSおよびPBTにおける紫外線照射時間と表面張力、接着強さの向上効果の例です。30秒程度の照射で表面張力は36mN/m(滴下法)を超え、接着強さも大きく上昇し、破壊状態は界面破壊から凝集破壊へと変化しています。照射し過ぎると表面が劣化するため、長時間の処理は禁物です。大気圧プラズマ処理では、より短時間に処理ができます。薬品による表面改質は、テフロンの金属ナトリウム処理が代表的です。

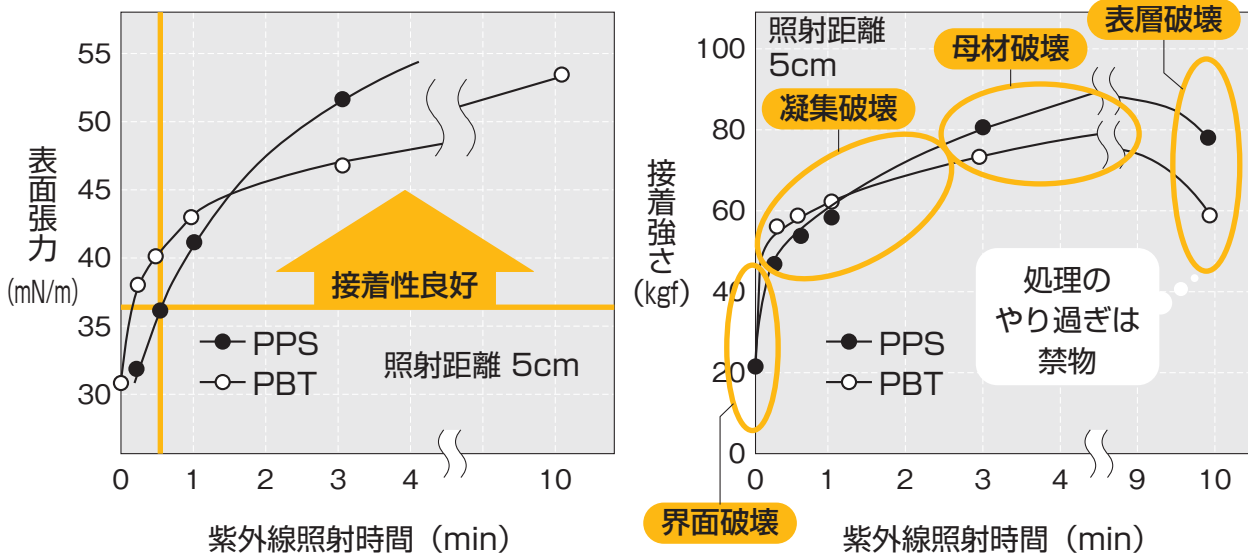
要点
BOX

- 接着しにくい素材表面に極性基を生成させ、表面張力を高くして分子間力を高くする
- 大気圧プラズマ処理や短波長紫外線照射など

表面改質のメカニズム



紫外線照射時間と表面張力、接着強さの変化の例



出典：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、1993年

5

第

章

接着部の劣化について知る



37

接着部の劣化因子 と劣化箇所

接着剤自体が界面か
被着材表面かを
見極める

接着したものを種々の環境や力が加わる状態で長期使用していると、接着部が劣化して強度などの特性が低下します。

劣化に影響を及ぼす因子には、大きく分けると環境的因子と力学的因子が挙げられます。また、環境と力学的因子の複合作用もあるほか、微生物による生物的因子もあります。環境的因子は、熱(高温長期間、極低温)や水分(液体、蒸気、氷)、薬品(酸、アルカリ、塩水、各種の水溶液、溶剤、界面活性剤、各種の食品、その他)、光(紫外線、X線・γ線などの放射線)、ガスなどです。一方の力学的因子には、繰返し応力の負荷と継続荷重の負荷があります。高温低温の繰返しによる劣化は、熱応力によるものであるため、応力劣化に分類しています。

接着部の強度が低下したときに、よく「接着剤が劣化した」と言われることがあります。確かに接着剤は樹脂やゴムが主成分であるため、「接着剤自体」が

劣化する場合も考えられます。ただ、接着部には、接着剤と被着材表面が分子間力で結合している界面という、単体材料にはない部分があることが特徴です。

この分子間力で結合している界面には、硬化収縮応力や熱収縮応力などの内部応力や、接着部に加わる外力による応力も加わっています。さらに、接着剤とは異なる材料が被着材として存在しています。環境や外力により、被着材料自体が変化するという問題もあります。

接着部の劣化では、接着剤や界面での結合部、被着材料の劣化を考えなければならぬ点、単体の材料の劣化と異なる点です。劣化を少なくするには、どこが原因で劣化しているかを見極め、そこを改良することが重要です。

ただし、接着部は被着材料には含まれているため、液体やガス、光などが直接当たりにくいという有利な面を持っていることも、単体の材料と異なる点です。

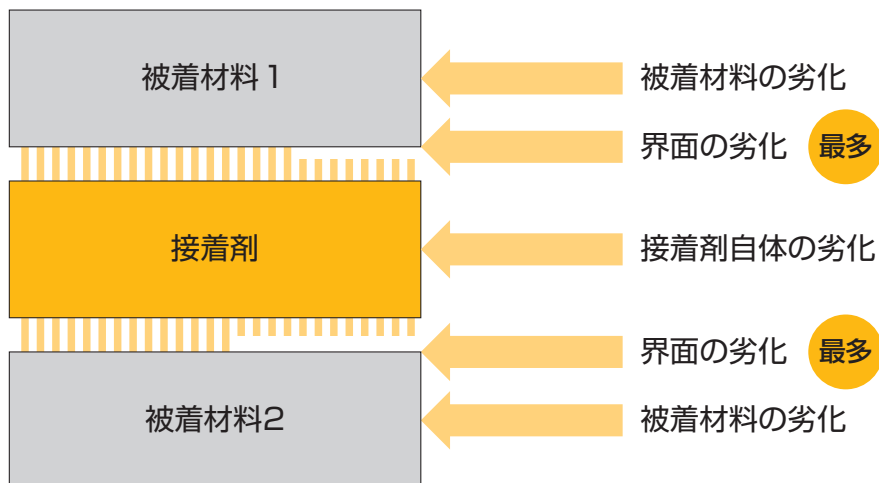
要点
BOX

- 環境劣化、応力劣化、複合劣化がある
- 劣化箇所は接着剤自体とは限らない。界面や被着材表面の劣化が主要因であることも多い

代表的な接着部の劣化要因

- 環境劣化
- 1 熱
 - 2 水分 … 接着するまでは、あって欲しいもの
接着後は、あって欲しくないもの
 - 3 薬品
 - 4 光(可視光、紫外線、X線、γ線など)
- 応力劣化
- 5 継続荷重(クリープ)
 - 6 繰返し荷重(疲労)
 - 7 ヒートサイクル、ヒートショック(熱疲労)
 - 8 その他

接着部の劣化箇所



39

水分劣化の
4つのモード

界面結合の破壊、
被着材表面の変質、
加水分解、吸水膨潤

水は極性が非常に高い分子であるため、接着の劣化に最も影響の大きい因子です。水分での劣化のパターンは、次の4つのモードがあります。

①接着界面に水分が浸入し、接着剤と被着材表面の分子間力による結合を破壊します。これは、極性の高い水が水より極性の低い分子間力での結合を破壊し、水が結合するためです。界面は、接着剤中に含まれる充填剤と接着剤の結合部にもあり、接着剤中に侵入した水によって充填剤と接着剤の結合も切られます。界面に水が浸入するのは、界面の結合は接着剤の極性部分と被着材表面の極性部分が点状に接合し、接合点の間は空間になっているためです。

②界面に浸入した水により被着材表面が腐食や変質を起し、弱い層を形成します。たとえば、鋼板の接着部に水が浸入すると、鋼板の接着表面に赤錆の弱い層が形成されることです。

③接着剤が水によって加水分解します。一部のポ

リウレタン系接着剤などで起こります。

④接着剤が水を吸うと、体積の増加(膨潤)と弾性率の低下(可塑化)が起こります。接着剤が柔らかい状態でせん断強さや引張強さを測定すると、低い強度になります。接着剤が③の加水分解を起こしていない場合は、乾燥すると接着剤は元の体積と弾性率に戻ります。

接着剤が水分を吸収するのは、接着剤は分子鎖が絡み合ったり架橋したりして網目構造となり、内部に空間があるためです。接着剤は、飽和状態までに数%程度の水を吸います。被着材が水を通さない場合は、水は接着部の周辺から内部に拡散してくるため、接着剤や被着材が同じでも耐水性は「接着部の寸法や形状」に大きく影響されます。接着剤や界面に水が侵入した状態で低温になって水が凍ると、膨張して界面ではく離が進行することもあり、吸水状態での低温環境は要注意です。

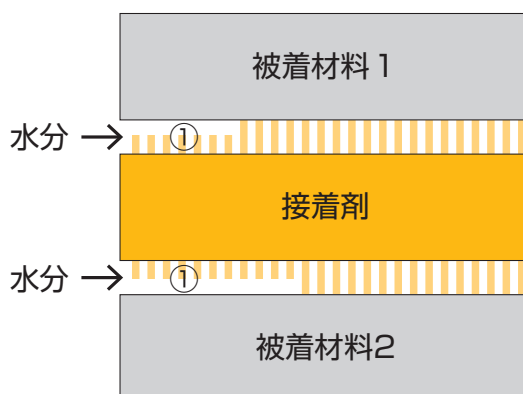
要点
BOX

- 水分は劣化の最大の要因
- 界面や被着材表面で特に劣化しやすい
- 劣化速度は接着部の形状・寸法により変化

水分劣化の4つのモード

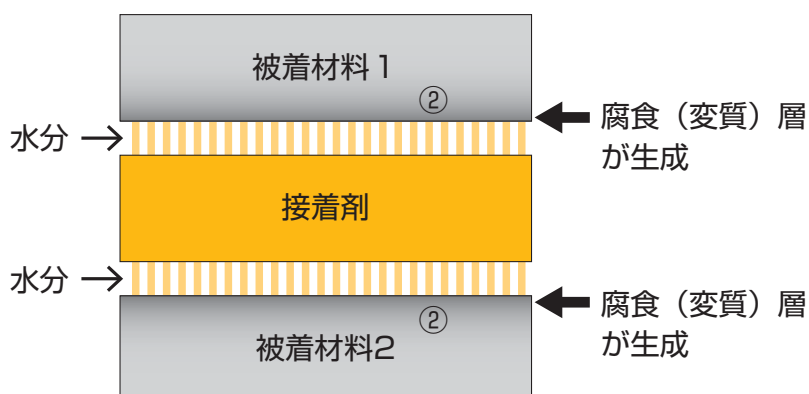
▶ 接着界面での結合の破壊

① 接着界面に水が浸入拡散し、分子間力による結合を破壊する(極性の高い水が、分子間力での結合を破壊して結合する)



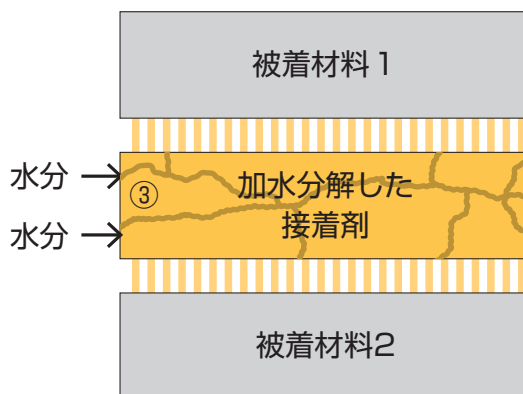
▶ 被着材表面の変質

② 接着部に浸入した水分により被着材料の接着面が腐食(変質)する



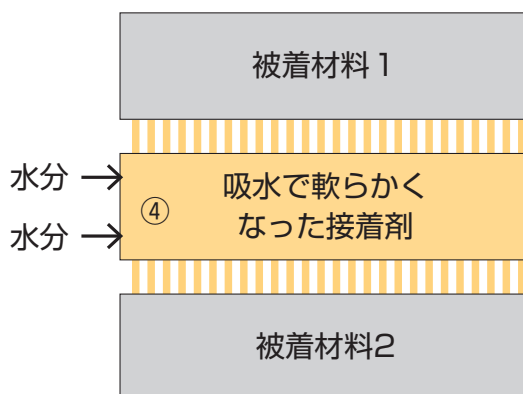
▶ 接着剤が加水分解

③ 接着剤が水分によって加水分解する



▶ 接着剤の吸水による可塑化

④ 接着剤中に水が拡散し、接着剤が吸水膨潤や可塑化して柔らかくなり、接着剤自体の強度が低下する



水分は接着部の周囲から内部に向かって浸入してくるため、接着接合物の耐水性は「接着部の寸法、形状」に大きく影響される

42

接着部に加わる
継続荷重は劣化の大敵

クリープによる劣化

19項で解説していますが、接着剤は粘弾性体であるため、20項で紹介したようなクリープ現象を示します。接着剤が柔らかいほど、また温度が高いほど、荷重が大きいほどクリープ変形の色度は大きく、クリープ破断時間は短くなります。

このクリープによる劣化は、接着部の劣化の中でも影響の大きい因子です。回転体で接着部に常に遠心力による引張力が加わっていたり、接着された部品の重さが下向きに加わっていたりするなど、目立たない力でもクリープは生じます。

柔らかい変成シリコン系接着剤(弾性接着剤)のクリープ破断特性の一例を、次ページ上図に示しました。Larson-Millerのマスターカーブと呼ばれるもので、縦軸は接着部に加えられる応力値、横軸の T は環境温度の絶対温度($^{\circ}\text{K}$)で摂氏に273を加えた値、 t は破断時間(hr)、 C は材料定数と呼ばれるものでここでは30です。

この結果から、40 $^{\circ}\text{C}$ で10年間壊れない負荷できる応力値の上限値は0・07 MPa、60 $^{\circ}\text{C}$ で15年間壊れない負荷できる応力値の上限値は0・03 MPa程度となります。これらの応力値は、この接着剤の室温での静的せん断破壊強さは3・4 MPaのため、室温強度の約1/50、約1/100となります。

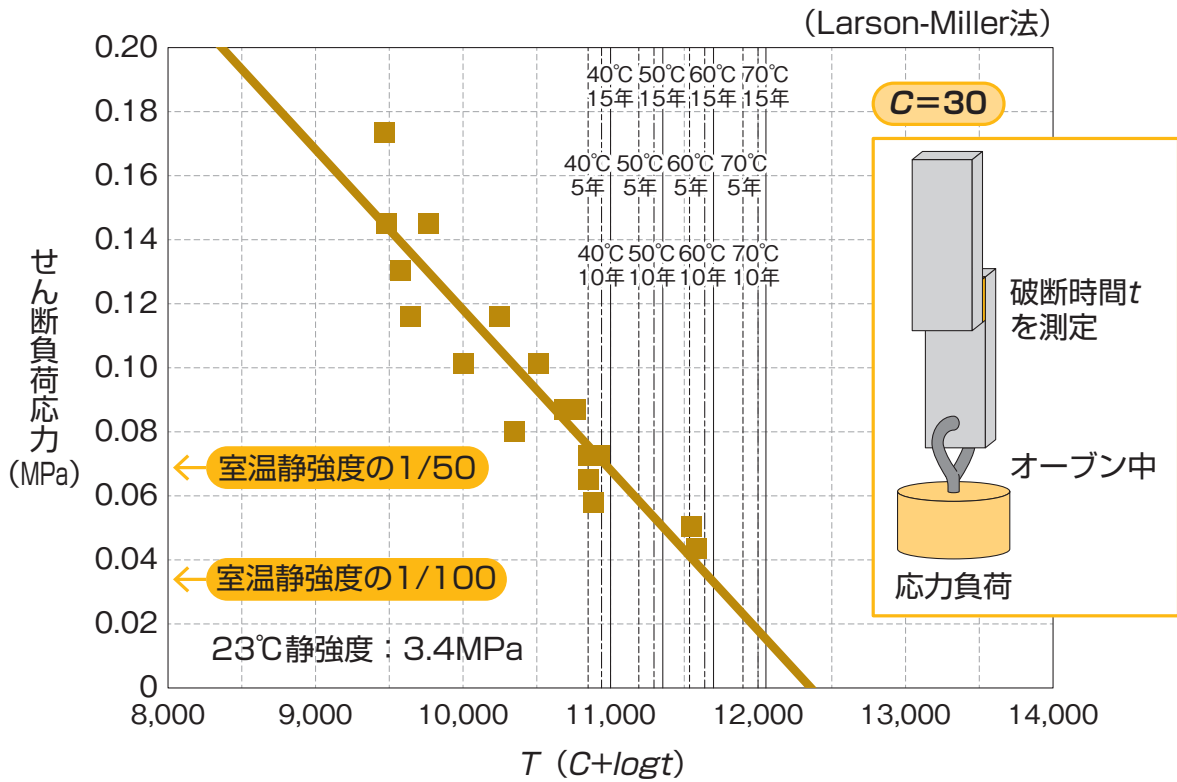
硬い接着剤ではこれほど小さな値にはなりません、クリープは生じるので十分な注意が必要です。

クリープ劣化を防止する手段としては、接着部にクリープ応力が加わらない構造にするしかありません。次ページ下図に、接着剤とリベットやスポット溶接を併用した複合接着接合法(9項を参照)を用いた場合のクリープ破断特性を紹介しました。金属締結の併用で、クリープ特性が大きく改善されることがわかります。ちょっとした引っかかりができるような簡単な構造でもよいので、クリープ力が加わらない構造を考えてください。

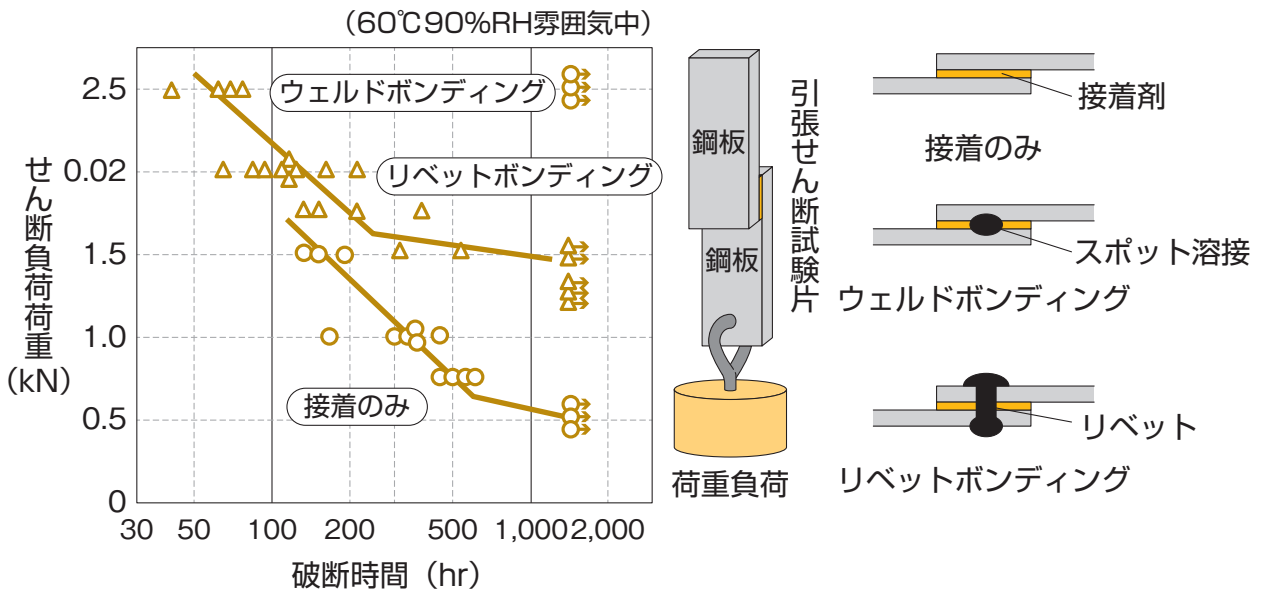
要点
BOX

- クリープ劣化は接着劣化の重要因子
- 柔軟な接着剤では低荷重でクリープを起こす
- クリープは構造的に回避すること

変成シリコン系弾性接着剤のクリープ破断試験結果



複合接着接合法による耐クリープ性の向上



6

第

章

設計・施工時に留意すべきこと



47

接着層の厚さで強度や 壊れやすさは変化する

接着層の厚さと強度、
変形追従性

信頼性ととも品質に優れた接着を実現するためには、施工はもとよりその前段階から配慮すべき事項が多数待ち受けています。本章では、その対策アプローチについて取り上げていきます。

【接着層の厚さと強度の関係】

接着剤層の厚さと接着強さの関係を示したものを次ページ上図に示します。せん断強さや引張強さは、一般に接着層が10mm程度で最大となり、厚くなるにつれて低下します。極端に薄くなると内部応力が高くなったり、被着材同士の間で有効接着面積が減ったりするなどで、強度は低下します。一方、はく離強さや衝撃強さは、mmオーダーのところでも最も高い強度になります。

【最適な接着層の厚さはどの程度か】

せん断強さとはく離強さのバランスがとれた接着層の厚さは、一般に0.1～1.5mm程度です。接着層の厚さが薄過ぎると、種々の方向の力に対して変

形できる許容ひずみ量が小さくなり、よいことはありません。接着は隙間埋めと接合を同時に行うことも多く、接着層の厚さが5mmや10mmになる場合も多々見られます。接着層が厚いと変形に対する追従性は上がり、厚くて問題となることはないでしょう。

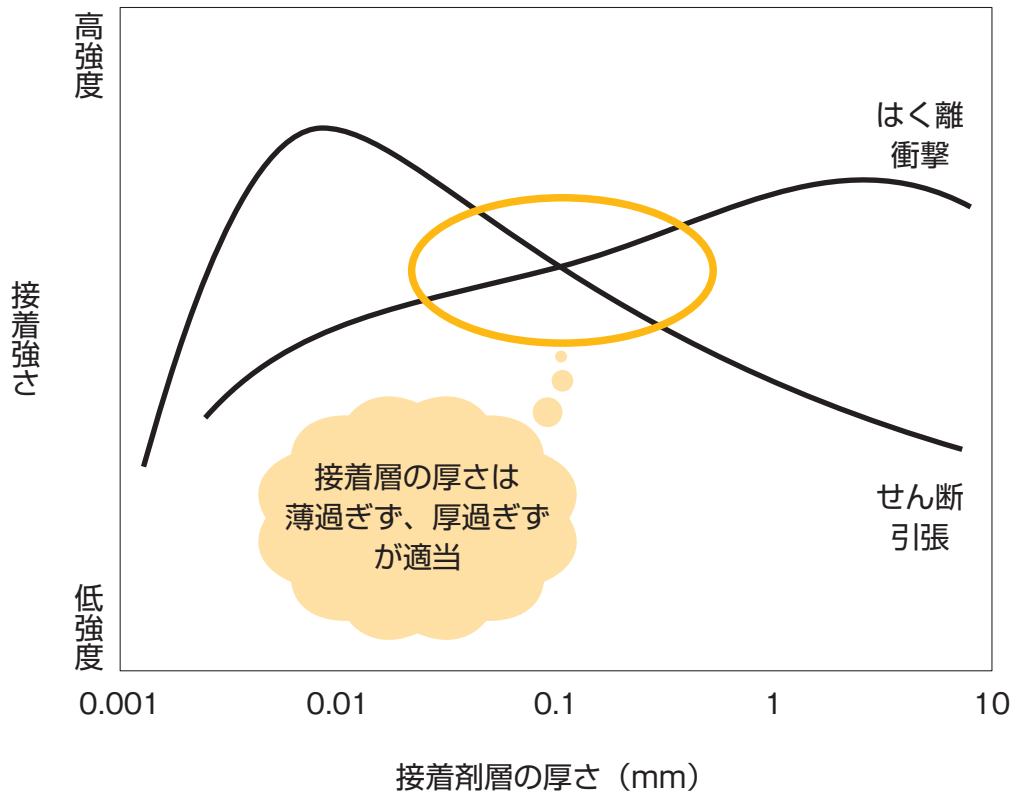
【接着層が厚くなるとはく離強さが向上する理由】

接着剤の伸びが、破断伸び率を超えると破壊します。次ページ下図に示す通り接着層が厚くなると、接着剤の破断までの伸び量は大きくなるため、荷重を受ける面積が増加します。たとえば、接着層の厚さが0.1mmで接着剤の破断伸び率が100%の場合、0.1mm伸ばされたところで破壊しますが、接着層の厚さが1mmであれば1mmまでの伸びには耐えることになります。すなわち、被着材の反りへの追従性は接着層が厚い方が大きく、接着層が厚ければ広い面積で力を受けることができるため、はく離強さが高くなるわけです。

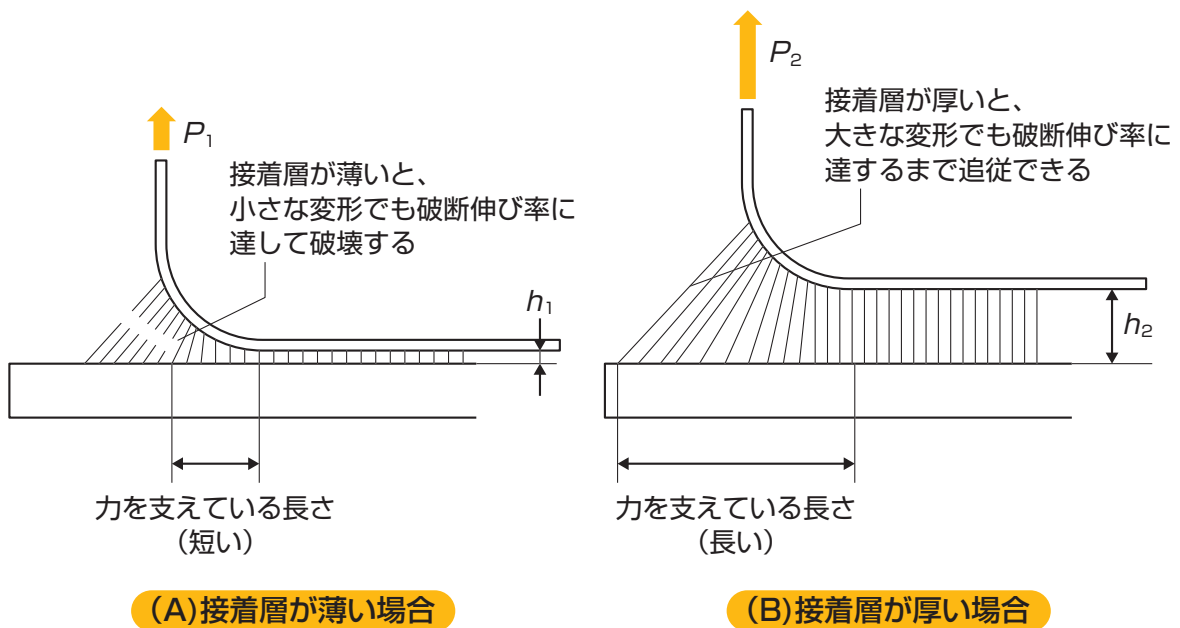
要点 BOX

- 接着層が厚いとせん断・引張強さは低下する
- 接着層が厚いとはく離・衝撃強さは高くなる
- 接着層は厚い方が壊れにくい

接着層の厚さと接着強さの関係



接着層が厚くなるとはく離強さが高くなる理由



50

異種材の嵌合接着での 接着層厚さ方向拘束①

線膨張係数が
軸部品V穴部品の場合

異種材料の嵌合接着は、接着層が厚さ方向に拘束されているため種々の課題があります。小型モーターでの線膨張係数の小さなリング状の焼結磁石と、鋼製のローター軸の接着の例で考えてみましょう。

次ページ下図①に示すように、室温で接着剤を塗布して軸を穴に挿入した時点では、クリアランス（接着層厚さ）は所定の寸法になっています。加熱硬化を行うために加熱すると、軸径は穴径より膨張が大きいため、同図②のようにクリアランスは狭くなり、この状態で接着剤が硬化します。硬化後室温まで冷却すると、部品は元の寸法に戻ろうとするため、同図③のようにクリアランスは硬化中より大きくなります。接着剤は両界面で結合しているため、接着剤は厚さ方向に引っ張られた状態となります。

引張力が界面での接着強さよりも大きいと、界面で破壊します。接着剤の伸びがクリアランスの増大に追従できなければ、接着剤の中で破断します。同図

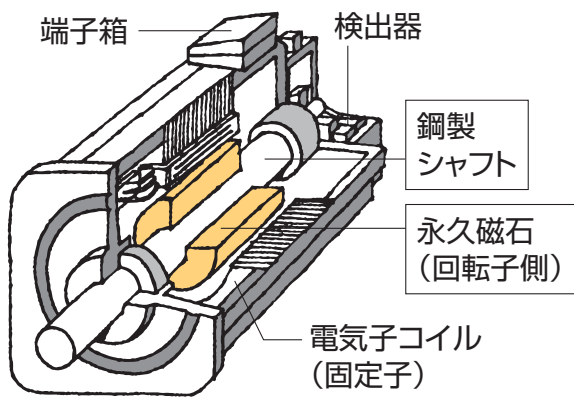
④のように使用中に低温になった場合は、クリアランスはさらに大きくなり、接着部での破壊は起きやすくなるのです。こうした接着部の破壊回避策は、もとのクリアランスを大きく設計して接着剤の伸び率を小さくすることに加え、室温硬化型の接着剤の使用を検討します。

室温硬化型接着剤で室温で硬化したものは、使用中に高温になると、軸径の膨張は穴径の膨張より大きいことでクリアランスは小さくなり、接着層に圧縮が加わります。圧縮のため接着部の破壊は生じませんが、穴部品がガラスやセラミックスなどの割れやすい材料では、高温で接着層に圧縮力が加わると、穴部品の表面には円周方向に引張力が生じ、部品が割れる問題が表れることもあるため注意が必要です。低温使用時は、硬化温度と使用温度の温度差は加熱硬化接着剤の場合より小さく、加熱硬化型接着剤の場合よりも破壊しにくいと言えます。

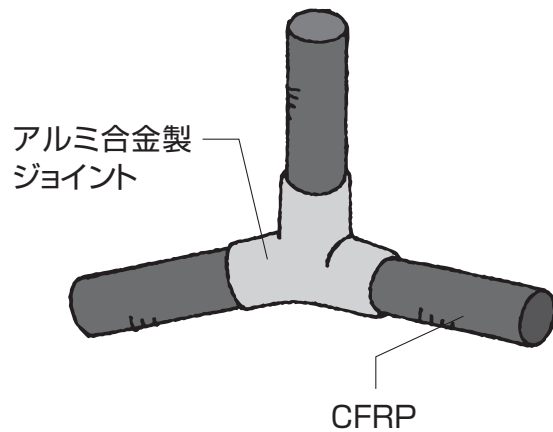
要点
BOX

- 加熱硬化型接着剤では冷却後や低温使用時に破壊しやすい
- クリアランスは大きく設計するのがよい

線膨張係数が大きな軸に線膨張係数が小さな部品を接着する例



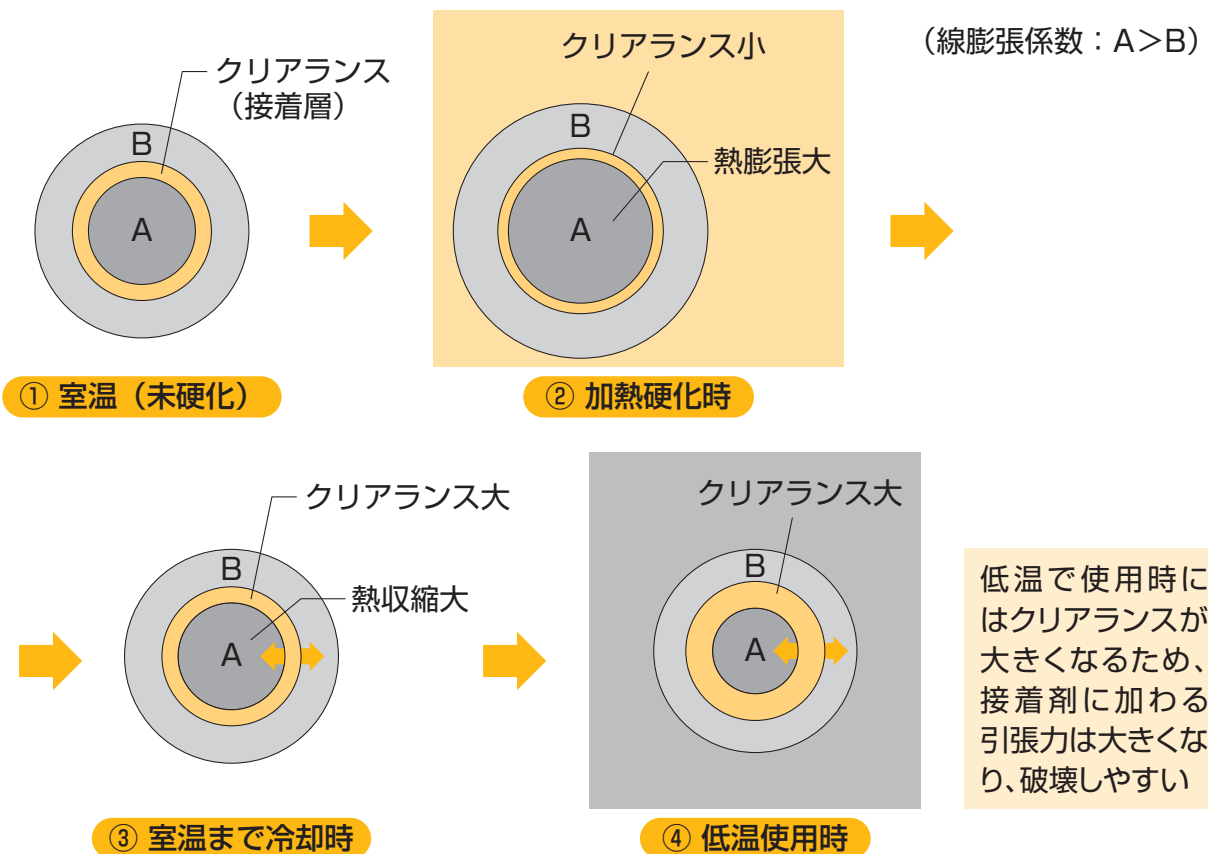
小型モーターの外観と構造図
線膨張係数:永久磁石<鋼製シャフト



CFRPパイプとアルミ製ジョイントの接合
線膨張係数:CFRP<アルミ製ジョイント

出典:原賀康介、「高信頼性接着の実務」、
日刊工業新聞社、P.46、2013年

加熱硬化型接着剤による勘合接着における
クリアランスの変化と接着部に加わる力



55

接着剤の垂れや糸切れ性は粘度でわかるか

接着剤の粘度と揺変性

カタログに表記された粘度が同じでも、塗りやすさや糸切れ性、垂れ性などが大きく異なるものが見受けられます。高粘度でも時間の経過とともに徐々に垂れるものや、低粘度でも垂直面で垂れないものが存在します。粘度の高さと垂れの少なさは、実は無関係なのです。

液状の蜂蜜とマヨネーズをチューブの小さな穴から押し出す場合、マヨネーズは蜂蜜より小さい力で多量に押し出せます。この点では、マヨネーズの粘度は蜂蜜より低そうです。しかし、パンの上に押し出してパンを立てて置いておくと、蜂蜜はダラダラと垂れませんがマヨネーズは垂れません。この点では、マヨネーズの粘度は蜂蜜より高そうです。マヨネーズのように、液体に力が加わっていると粘度が低くなり、力を抜くと粘度が高くなる性質を揺変性やチキソトロピック性と呼んでいます。

揺変性が高い液体は、力が加わっていない状態では

分子鎖が軽く水素結合するほか、ファイラーとの吸着や分子鎖同士の絡み合いなどで動きにくい一方、力が加わるとこれらの結合が切れて流れやすくなる特徴を持ちます。また揺変性が高い接着剤は、塗布時は押し出しやすくして糸切れも良く、塗布後は肉盛り性が良く垂直面でも垂れにくくなります。

揺変性の程度は、回転粘度計で毎分2回転と20回転の粘度を測定し、その比で表します。チキソトロピック指数やT値と呼ばれます(T値(チキソトロピック指数) \parallel 2rpm粘度 / 20rpm粘度)。揺変性については、カタログに書かれていないことが多いためメーカーに確認してください。

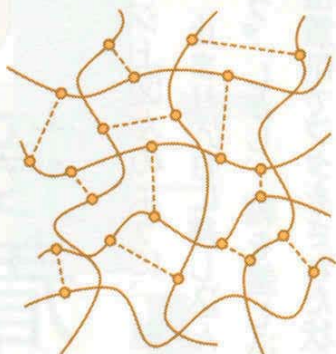
接着剤の粘度は温度で変化します。低温では粘度が高くなって塗布のしやすさに影響し、高温では低粘度となって加熱硬化時の染み込みや垂れにつながります。粘度は温度変化に気を払うとともに、接着剤のロットでも大きく変化するため留意しましょう。

要点
BOX

- 接着剤の流動性を表す指標には、粘度と揺変性がある。
- 揺変性が高いものは塗布しやすく垂れにくい

揺変性(チキソトロピック性)の概念

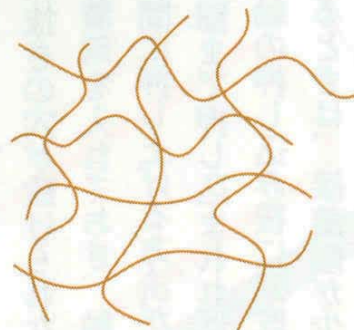
力を加えると低粘度、力を抜くと高粘度になる性質のこと



液体に力が加わっていないときは、分子同士が軽い結合をしていて流れにくい

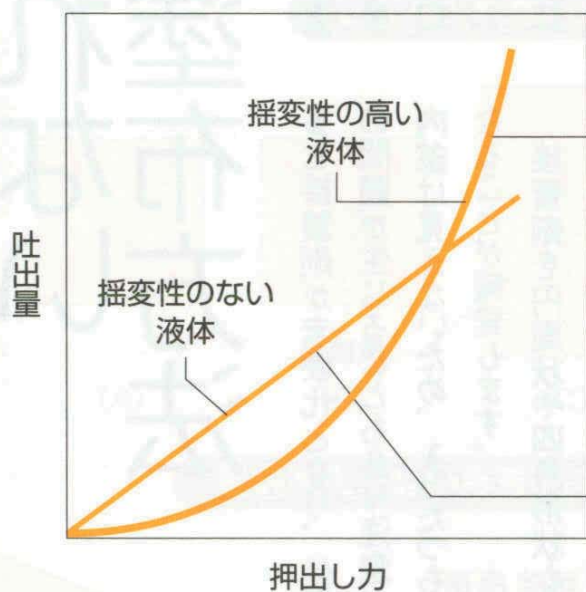


可逆的な変化



液体に力が加わると、分子同士の結合が切れて流れやすくなる

揺変性の特徴



マヨネーズ

マヨネーズは、小さい力でもたくさん出るが、押し出された後は流れず形状を保っている(揺変性が高い)

蜂蜜

押し出された蜂蜜は、だらだらと流れる(揺変性が低い)

接着剤に問われる揺変性

揺変性が高い接着剤

- 塗布時は押し出しやすい
- 糸切れが良い
- スクリーン印刷にも適する
- 塗布後は、肉盛り性が良い
- 垂直面でも垂れにくい

7

第

章

信頼性を確保する ポイント



59

品質や生産性の良し
悪しは設計で決まる開発段階でのつくり込みの
技術「接着設計技術」

接着の特徴・機能を「使いこなす」、すなわち接着の特徴・機能を最大限に活用しながら欠点をカバーし、高性能・高機能で信頼性・品質に優れた製品を高い生産性で製造することが問われています。そのためには、開発段階で接着に関する機能や材料、構造、工程、設備、品質などを考慮したつくり込みが必要です。

もし、いずれかの検討が抜けると、組立現場ではムダな作業が確実に増えます。その結果、安定した品質や効率的な生産に支障が生じるにつながります。

接着に関する機能や材料、構造、工程、設備、品質などを考慮した開発段階でのつくり込みの技術は「接着設計技術」と呼ばれ、機能設計や材料設計、構造設計、工程設計、設備設計、品質設計などの要素技術で構成されます。機能設計では、接着から得られる効果をいかに多く盛り込み、接着の欠点を

いかにカバーするかを検討します。また材料設計では、接着剤だけでなく部品の材質・表面状態の検討もを行います。あわせて工程の簡素化や、作業の許容範囲を広く取れる材料系(被着材の材質・表面状態、前処理関係の材料、プライマー、接着剤など)を検討します。

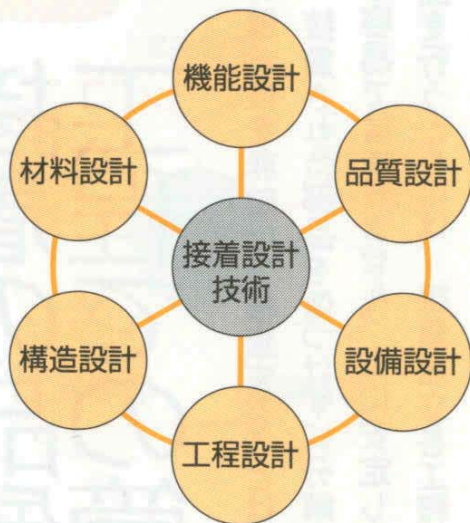
構造設計では高強度を得るためだけでなく、作業がしやすくして間違いを回避でき、破壊に対する冗長性を確保できることも検討します。工程設計では、工程面からどのような接着剤や構造が最適かを考えます。工程内検査の方法や自動化と人手作業の最適化も検討します。設備設計では、組立治具の検討も重要です。品質設計では、信頼性やバラツキの目標値を明確化し、目標値達成の面から各要素技術の検討内容を詰めていきます。

最終的に各要素技術を統合し、工程ごとの最適条件と許容範囲を明確に決定するのです。

要点
BOX

- 接着設計技術は、開発段階で品質・生産性をつくり込む技術のこと
- 工程ごとの最適条件と許容範囲を決める

最適化を目指す接着設計技術



1つの要素だけを深掘りしても全体最適化はできない
関係者全員で最適化できる条件を考えよう!

接着設計技術を支える構成要素

接着設計技術

- ①機能設計 接着から得られる効果をいかに多く盛り込み、接着の欠点をいかにカバーするかを検討する
- ②材料設計 接着剤だけでなく部品の材質・表面状態の検討も行うあわせて工程の簡素化や作業の許容範囲を広く取れる材料系を検討する
- ③構造設計 高強度を得るためだけでなく、作業しやすく、間違いを回避し、破壊に対する冗長性を確保できることも検討する
- ④工程設計 工程面からどのような接着剤や構造が最適かを考える工程内検査の方法や自動化と人手作業の最適化も検討する
- ⑤設備設計 組立治具の検討も重要
- ⑥品質設計 信頼性やバラツキの目標値を明確化し、目標値達成の面から各要素技術の検討内容を詰める

64

見よう見まねでの作業
は不良品の山をつくる

マニュアルの整備と教育訓練

148

生産開始までに行うことを事前に整理しておきましよう。マニュアルは、工程管理表と作業要領書は最低限必要です。まず、工程管理表を作成します。工程ごとの要求仕様や作業のチェック項目、チェック方法、合否基準をまとめます。

次に、作業要領書を作成します。設計段階で決まった工程ごとの最適条件と許容範囲を明確に記載し、わかりやすくビジュアルに作成します。曖昧さをなくして作業者に頼らない、作業者を困らせない書き方にするのが重要です。「綿棒が汚れたら交換する」「接着剤を適量塗布する」「接着剤の粘度が上昇してきたら」などの曖昧な表現を避け、「綿棒は5個ごとに交換する」「接着剤を1g塗布する」「接着剤の混合開始から10分経過したら」などと記述します。

最適条件と許容範囲は数値ではわかりにくいいため、色や図・写真などでビジュアル化して掲載します。トラブル時の対処方法もマニュアル化を図ります。工程

内で発生する恐れがあるトラブルの例を考えられるだけ掘り出し、それぞれの対処方法を決めます。想定外のことまで視野に入れておくとういでしょう。

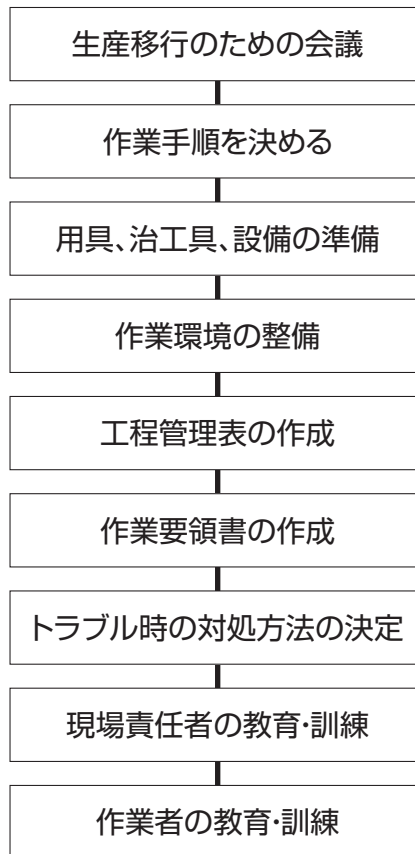
接着には熟練技能は必要ありませんが、教育訓練は必要です。接着に関わる設計・生産・品質関係技術者は、本書のような内容を十分に理解して活用できる知識を習得しなければなりません。習得には、社外の各種セミナーなども有効です。

現場責任者は、設計段階で決められたプロセス、最適条件・許容範囲がなぜ指定されているかの理由を十分に理解・習得し、適切な作業方法、トラブル時の対処方法までを繰り返し訓練します。現場作業者に対して、指定された作業方法が必要な理由を理解させることは重要です。絶対にやってはならないことなど、安全衛生面での教育も確実に行います。また、訓練も重要です。特に重要な工程は有資格者作業とし、認定試験を行います。

要点
BOX

- 工程管理表と作業要領書を作成しよう
- トラブル時の対処方法もマニュアル化
- 接着は熟練技能は不要だが教育・訓練は必要

生産開始までに行うこと



作業要領書は作業者が迷わないように記述

作業者泣かせの書き方

部品Aに接着剤を
塗布する

塗り方は?(面、線、点?)
塗布量は?
1個ずつやるの?
数個まとめてやるの?



迷わない書き方

- 部品AとBの接着面に汚れなどの付着がないことを確認する
- 部品Aの接着面の中央に、塗布装置を用いて接着剤を1ショット、点状に塗布する
- 塗布後の接着剤の直径は、 $3.0\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$ に入っていることを画像処理装置で確認する
- 確認後、10秒以内に貼り付け工程に回す

禁止事項 2個以上のまとめて塗布を行ってはならない
接着面が汚れている場合の処置 半日分をまとめて保管し、洗浄工程に戻す
塗布量が範囲外の場合の処置 すぐにキムワイプで拭き取り、溶剤を浸ませた綿棒で塗布面を清掃する。清掃した部品は半日分をまとめて保管し、洗浄工程に戻す
確認事項と処置 塗布ノズルの先端に接着剤だまりができていないことを確認する。できている場合は、キムワイプで拭き取り、5ショット捨て打ちを行う
塗布した接着剤がきれいな半球状になっていなかったり、糸引きを起こしたりする場合は、接着剤を新品に交換する

66

接着の信頼性・品質 をどう担保するか

信頼性・品質は
不断の努力で築くもの

接着接合は、完成後の非破壊検査で不良品を発見できない特殊工程の技術です。接着を用いて信頼性・品質に優れた接合を行うためのポイントは、一つひとつはさほど難しいことではなく、積み重ねが重要なのです。

どんな技術にも利点とともに、必ず欠点や限界があります。利点ばかりに目を奪われず、欠点や弱点を十分に理解した上で長所や利点を活かせる設計を心掛けます。すなわち、万が一にも不良が生じた場合の、周囲に与えるリスクの大きさをも考慮した設計が必要です。

接着作業には、高度な熟練技能は必要ありません。しかし、守らなければならないこと、やってはならないことは数多くあり、その理由を十分に理解して身につけておくことが不可欠です。そのためには、社内での接着作業者の教育訓練は必須で、作業認定や指名作業が必要となる場合もあります。現場作業

者の教育訓練は現場監督者や現場責任者の仕事で、現場監督者や現場責任者は接着技術に関する基本的な技術力を身につけなければなりません。また、設計・生産・品質技術者は接着に関する総合的な知識を習得することは当然の対応です。まずは書籍で勉強し、その後は接着剤を用いる設計・施工・管理の技術者向けセミナーを受講して技術力の向上を図るとよいでしょう。

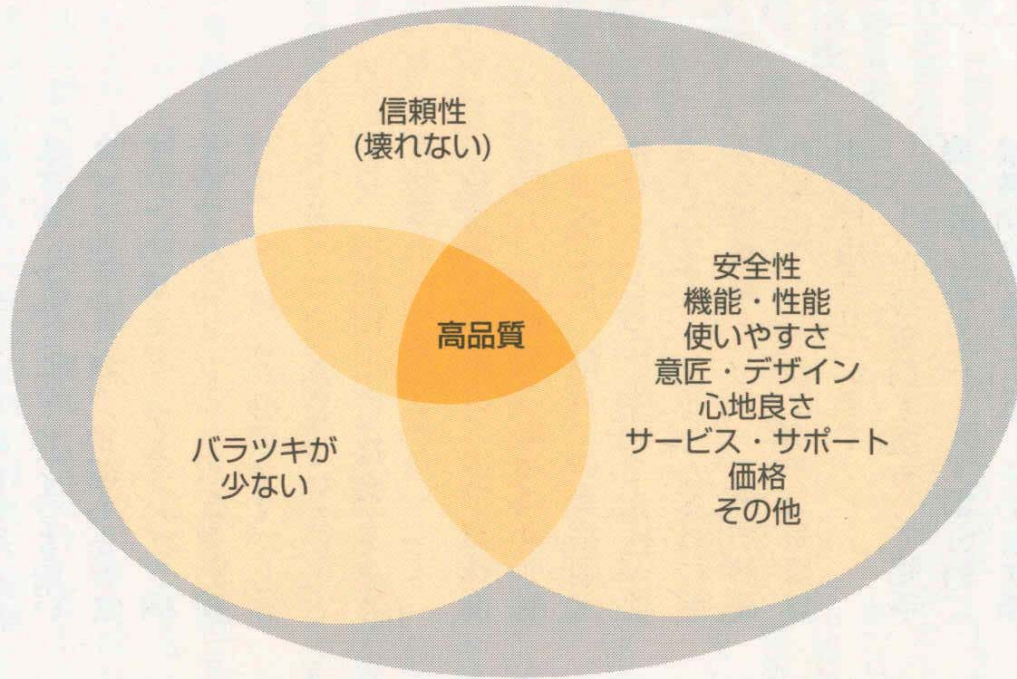
2022年3月に改訂された「ISO21368」接着剤―接着構造物の組立および組立物のリスク評価に適した報告手順の指針」では、技術者の立場に応じた必要な能力・知識・経験が示されています。日本では現在、接着剤を用いて製品を組み立てる技術者の認定制度はありませんが、将来的には国際的な要求から認定制度が設けられることが考えられます。備えあれば憂いなしで、日頃から技術力の向上に努めておくべきです。

要点
BOX

- 接着は特殊工程の技術
- 欠点、弱点を理解した設計・生産・品質管理
- 教育・訓練、技術力向上は重要

高品質の条件

品質 = 満足度



接着を用いて信頼性・品質に優れた接合を行うコツ

欠点・弱点の理解	<ul style="list-style-type: none"> ● 接着接合の欠点や弱点を十分に理解して、構造設計や生産設計、品質管理を行う ● 用いる接着剤によって欠点や弱点は異なるため、その点を理解して設計・施工・管理を行う
品質のつくり込み	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面改質などを活用して、十分な凝集破壊率を確保する。これは、工業接着における基本 ● 初期の変動係数が小さくなるまでつくり込む ● 構造設計では、設計許容強度に対して十分な安全率を確保する ● 破壊に対する冗長設計を行う。これは、技術者と企業の社会的責任
製造段階	<ul style="list-style-type: none"> ● プロセスごとに、最適条件と許容範囲を明確に決めて管理する ● 作業環境や設備、プロセス条件などのリアルタイムでの記録とフィードバックを行う ● ビジュアルで定量的表現の作業要領書を整備する ● 工程内トラブル発生時の対処方法を決めておく ● 抜き取り破壊検査(またはダミーサンプル)による凝集破壊率、混合状態、硬化状態、欠陥部の確認と不合格時の対処方法を決めておく
教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ● 接着に関わる設計技術者、生産技術者、信頼性技術者の教育の実施 ● 現場監督・責任者の教育の実施 ● 現場作業者の教育、訓練と認定