

わかる!
使える!

接着 入門

原賀康介 [著]
Haraga Kousuke

即！理解

基礎知識

段取り

実作業

日刊工業新聞社

【はじめに】

この本を書いている間にも、モノづくりの根幹を揺るがすような品質問題が日本の複数の大企業で起こりました。品質の維持と向上は、企業と技術者の社会的責務で、終わりのない活動です。

「接着」という技術は、完成後の検査で不良品を排除することができない「特殊工程の技術」に分類されるものです。そのような特殊工程の技術で品質を確保するためには、設計段階で工程ごとの作業の最適条件と許容範囲を明確に決め、製造段階では各工程での作業が許容範囲内で適切に行われたかどうかを確認・記録することが基本です。

寸法加工では、図面に書かれた公差を守ることは常識です。接着工程での作業の許容範囲は、加工公差と同じ意味で、絶対を守るべきことです。

本書は、単なる「接着技術」の解説書ではなく、「接着で組み立てられる機器や部品の品質をいかに確保し、向上させていくか」を主題にしています。接着を製品組立に用いようとする設計技術者や生産技術者、品質関係技術者が、特性・信頼性・品質・コストに優れた接着を行うための必須知識を身につけ、実践するための書です。

接着の原理・原則と、接着設計や接着作業などの実務をつなぐ前準備・段取りに注目し、接着剤を使う側の目線に立ってノウハウをわかりやすく整理しました。また、これまでに、接着に必要な規準や指針はほとんど示されてきませんでした。しかし、それでは実際の製品に接着を活用することは困難です。そこで、本書では、著者の経験に基づいた規準や指針をできるだけ多く開示したつもりです。

接着剤を用いる接着接合は、機械系技術者や電気系技術者など化学系以外の技術者にはなじみにくい技術です。本書では、接着の専門家ではない多くの分野の技術者に、接着接合を理解していただき、最適な設計を行い、品質に優れた接着作業を行うための知識と段取りについてまとめました。

接着接合物の品質は、接着剤によって与えられるのではなく、設計に

目次

【第1章】

これだけは知っておきたい 接着の基礎知識

1 接着の品質とは

- ・ 高品質接着とは・8
- ・ 高品質接着達成のための基本条件① 界面で壊れないー凝集破壊率ー・10
- ・ 高品質接着達成のための基本条件② ばらつきが小さいー変動係数 Cv ー・12
- ・ 接着の脆弱個所・14

2 接着接合の特徴

- ・ 欠点と利点・16
- ・ 接着接合の利点から得られる効果・18
- ・ 接着と他の接合との比較・20
- ・ 接着の弱点は組合せで補うー複合接着接合法ー・22

3 接着のメカニズム

- ・ 接着の結合の種類・24
- ・ 分子間力接着の過程と最適化・26
- ・ 水素結合、表面改質、プライマー・28
- ・ 表面張力の測定方法・30
- ・ 表面の違いによる耐久性の差・32

4 接着特性を低下させる内部応力

- ・ 内部応力（残留応力）による不具合と内部応力の分類・34
- ・ 内部応力の種類① 接着剤の硬化収縮応力・36
- ・ 内部応力の種類② 加熱硬化後の熱収縮応力・38
- ・ 内部応力の種類③ 使用中の温度変化による熱応力・40
- ・ 内部応力の種類④ 吸水膨潤応力・42
- ・ 内部応力の種類⑤ 被着体の変形による応力・44

よって接着剤の性能を最大限まで引き出してつくり込むことと、つくり込まれた条件に従って、工程ごとに適切な作業を行うことで達成されることを認識いただければ、筆を執ったものとして嬉しく思います。接着の品質確保と向上の一助になれば幸いです。

本書をまとめるに当たり、図表の転載や引用など多くの企業や学会・協会にご協力をいただきました。また、日刊工業新聞社の矢島氏には、構成や編集に関して多大なるご支援をいただきました。ここに、ご協力に対して感謝の意を表します。

2018年2月

原賀 康介

- ・接着剤の粘弾性特性と応力緩和・46
- ・内部応力による不具合と改善策① 異種材料接着・48
- ・内部応力による不具合と改善策② 異種材料の勘合接着・50
- ・内部応力による不具合と改善策③ 部品の構造・52
- ・内部応力による不具合と改善策④ 接着剤の塗布量と塗布位置・54
- ・内部応力による不具合と改善策⑤ 接着剤の物性、部品の厚さ・56
- ・内部応力による不具合と改善策⑥ 接着剤の短時間硬化、後硬化・58
- ・内部応力の評価法① 応力を直接求める方法・60
- ・内部応力の評価法② 有限要素法で求める方法・62

5 接着剤の種類と長所・短所

- ・構造用接着剤、準構造用接着剤・64
- ・エンジニアリング接着剤・66
- ・柔軟接着剤・粘着テープ・68

6 接着強度に影響する因子

- ・接着部に加わる力の方向と代表的な評価方法・70
- ・接着剤の硬さ・伸び・72
- ・接着層の厚さ・74
- ・温度・ガラス転移温度 (T_g)、速度・76
- ・重ね合わせせん断強度に影響する因子・78
- ・継手効率・80

【第2章】

準備と段取りの要点

1 接着の出来映えは設計したい

- ・接着設計技術と構成要素・84
- ・接着管理技術と構成要素・86
- ・設計段階での段取り・88

2 接着剤の選定と評価

- ・欠点から候補接着剤の種類を絞り込む・90
- ・使用・管理上のポイントを考慮して接着剤を絞り込む・92

- ・カタログの見方① 強度データ・94
- ・カタログの見方② 耐久性データ・96
- ・カタログの見方③ その他に確認すべきこと・98
- ・選んだ接着剤の適性を評価する・100
- ・接着のデータベース・102

3 被着材料の選定

- ・塗料の密着性が良い材料が、接着性にも適しているとは言えない・104

4 強度設計、耐久設計上のポイント

- ・接着強度の実力値はどのくらいか・106
- ・クリープ対策は重要・108
- ・耐水性確保のための接着部の寸法設計・110

5 構造設計上のポイント

- ・壊れにくい構造にする・112
- ・不連続性を回避する・114
- ・クリープを防止する構造・116
- ・作業が容易な構造・118
- ・検査がしやすい構造とダミーサンプル・120

6 プロセス、設備の最適化

- ・チェックリストや特性要因図の活用・122
- ・最適条件と許容範囲を決める・124
- ・トラブル時の工程の連動停止を考える・126

7 試作時の注意点

- ・試作時のチェックポイント・128

【第3章】

実務作業・加工のポイント

1 接着作業の注意点

- ・2液型接着剤の手混合の仕方① 計量の仕方・132

- ・ 2液型接着剤の手混合の仕方② 混合、脱泡、シリンジ詰め替え・134
- ・ プライマーは塗り過ぎてはいけない・136
- ・ 気泡を入れない接着剤の塗布・貼り合わせ方法・138
- ・ 表面の凹凸を埋めて欠陥部をなくす・140
- ・ 加圧力の大きさと二度加圧・142
- ・ 治具での圧縮が困難な部品の対策・144
- ・ 硬化における注意点・146

2 接着作業は特殊工程の作業

- ・ 特殊工程の作業と管理・148
- ・ 生産開始までに行うこと・150

3 生産開始後の管理

- ・ 作業環境、設備・治工具の管理・152
- ・ 部品、接着前処理の管理・154
- ・ 接着剤の管理・156
- ・ 接着作業の管理・158

4 作業結果の確認と改善

- ・ 作業結果の確認・160
- ・ 工程能力指数による管理と改善・162

コラム

- ・ 日本における構造接着と精密接着の現状・82
- ・ 接着技術を製品組立に用いる技術者の育成・130
- ・ 接着を使う技術者に望むこと・164

- ・ 引用文献・165
- ・ 索引・166

【 第1章 】

これだけは知っておきたい 接着の基礎知識

1 接着の品質とは

高品質接着とは

①品質とは

品質は、JIS Z 8101（品質管理用語）では、「品物またはサービスが、使用目的を満たしているかどうかを決定するための評価の対象となる固有の性質・性能の全体」と定義されています。図1-1-1に示すように、「高品質」とは、顧客が要求する種々の条件に対して「満足度が高い」とことと言えるでしょう。

②高品質接着とは

接着に要求される特性は多くあります。図1-1-2に示すように、接着強度などの特性や耐久性に優れていることはもちろんですが、それだけでは高品質な接着とは言えません。接着特性（強度など）のばらつきが小さい、不良率が低い（信頼性が高い）、さらに、生産性にも優れていてコスト的にも有利、ということも必要です。これらを兼ね備えた接着を「高品質接着」と呼んでいます。

③接着の世界での品質に対する状況

日本製品は、品質の高さで世界をリードしてきました。しかし、日本の接着の世界では、これまで「ばらつき」や「品質」については、あまり関心を持たれてきませんでした。欧米では、軽量化が重要な航空機産業が牽引役となり、接着にも厳しい品質要求がなされ、多くの力学系技術者による強度や破壊などに関する研究開発が、接着の品質向上に大きく寄与してきました。日本では戦後、航空機産業が途絶えたことで、接着の力学的取組みが遅れ、人材も育たず、損傷や破壊が致命傷となる部位への、接着の適用の裾野が広がらなかったことが、接着の品質に対する取組みの弱さの要因の1つではないでしょうか。

④接着の品質の重要性

製品や部品の小型化・軽量化、高機能・高性能化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り、適用が拡大するのは間違いありません。接着部の損傷や破壊が重大事故につながる可能性もあります。これからは、「接着の品質」への取組みがきわめて重要となってきます。

⑤接着は「特殊工程」の技術

「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」のことを「特殊工程」と言います。接着は、組立後に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という点から、まさに「特殊工程」の接合技術です。特殊工程の技術で高品質を確保するためには、工程ごとに作業の最適条件と許容範囲を明確にして、作業の前後に検査を行うことが重要です。

図 1-1-1 | 高品質の条件

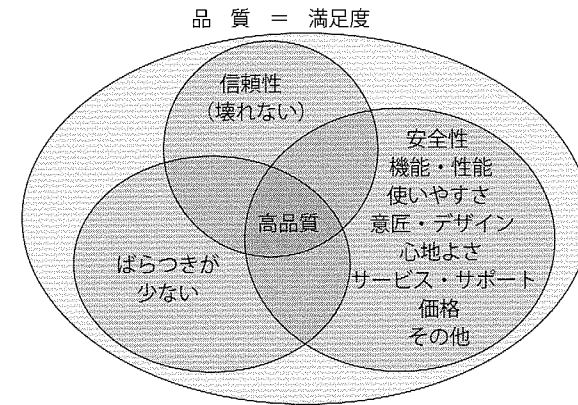
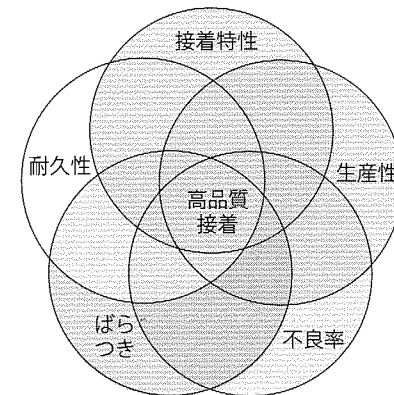


図 1-1-2 | 高品質接着の条件



要点 **ノート**

接着は、組立後の検査で低強度品を排除できない「特殊工程」の接合技術です。特殊工程の技術で高品質を確保するためには、工程ごとに最適条件と許容範囲を明確にし、作業の前後で検査を行うことが重要です。

1 接着の品質とは

高品質接着達成のための基本条件① 界面で壊れない—凝集破壊率—

①破壊の場所

良好な接着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のが一般的です。図1-1-3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（接着される部品の材料のことを被着材料と言います）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ます。図1-1-4に示すように、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」と呼ばれています。凝集破壊した部分では、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ます。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、相対する相手面は被着材料の表面が露出した状態になっています。

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、図1-1-5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、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度のばらつきが大きくなり、適正な破壊状態とは言えません。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、理想的な破壊状態と言えます。

②凝集破壊率

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言います。筆者が測定した多数のデータと長年の経験から、凝集破壊率が40%以上確保されていれば、強度ばらつきが少ない高品質の接着ができていると判断できます。凝集破壊率が40%以下（界面破壊が60%以上）になると、低強度品が頻出するようになり、強度のばらつきが大きくなってきます。

③内部破壊発生開始強度

図1-1-6に示すように、接着部が破断に至る前から、接着部の内部では細かい破壊が繰返し起こっています。これを「内部破壊」と言います。内部破壊がある程度蓄積したところで破断に至ります。筆者の測定例¹⁾では、界面破壊の場合は、破断強度の10%以下の負荷で内部破壊が発生しますが、凝集破壊の

場合は、破断強度の50%以上の負荷で内部破壊が発生しています。内部破壊の点からも、凝集破壊は界面破壊より信頼性が圧倒的に高いことがわかります。

図1-1-3 接着部における破壊の箇所

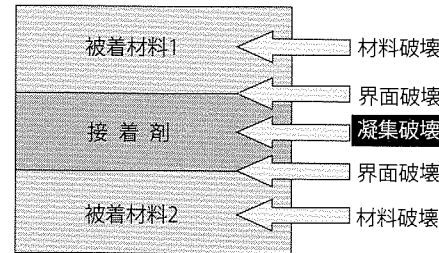
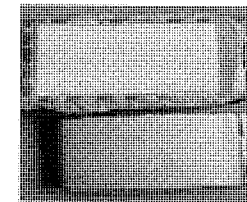
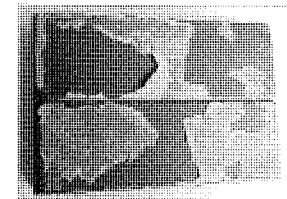


図1-1-4 凝集破壊と界面破壊の例
(軟鋼同士、接着剤：SGA)



(A) 凝集破壊



(B) 界面破壊

図1-1-5 金属の表面付近の模式図

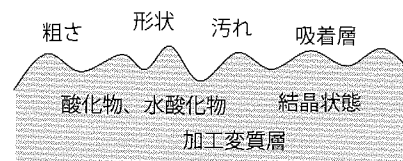
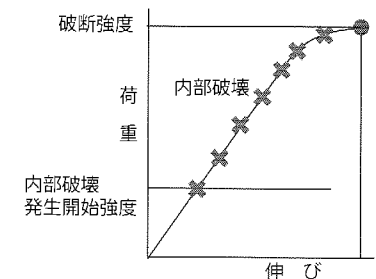


図1-1-6 破断以前に生じる内部破壊



要点 ノート

接着部の破壊には凝集破壊と界面破壊があり、界面破壊は強度のばらつきが大きく、凝集破壊では強度のばらつきが小さくなります。高品質接着を達成するためには、凝集破壊率を40%以上確保することが必須の条件です。

1 接着の品質とは

高品質接着達成のための基本条件② ばらつきが小さいー変動係数 C_v ー

①接着強度のばらつきの指標ー変動係数 C_v ー

接着強度のばらつきを表す指標としては、一般に標準偏差 σ が用いられますが、平均値 μ が異なる複数の系のばらつきを比較するには不便です。そこで、平均値 μ に対する標準偏差 σ の割合を示す変動係数 $C_v (= \sigma/\mu)$ を用います。

図1-1-7(左)は、2種類の接着剤のせん断接着強度の度数分布と変動係数 C_v の比較の一例です。測定はせん断試験です。いずれの接着剤も平均強度は非常に高いですが、ばらつきの程度は大きく異なります。2液アクリルは強度のばらつきが少なく、変動係数 C_v は0.03 (3.05%) と非常に小さいですが、1液エポキシでは、強度のばらつきが大きく、変動係数 C_v は0.19 (19.36%) と大きくなっています。

図1-1-7(右)は、図1-1-7(左)の横軸を凝集破壊率に変えた場合の度数分布の比較です。変動係数 C_v が小さい2液アクリルではほぼ完全な凝集破壊を示していますが、変動係数 C_v が大きい1液エポキシではほぼ完全な界面破壊となっています。このように、凝集破壊率と接着強度の変動係数 C_v には相関関係があります。

②変動係数 C_v はどのくらいに抑える必要があるか

図1-1-8は、変動係数 C_v と強度ばらつきの大きさの関係を示したものです。試料数が多くなるほど、ばらつきの範囲は大きくなります。破線の曲線は、試料数が1,000万個の場合に、下から3番目に低強度のもの(要求される工程能力指数が1.67の場合の合格品の最低強度)の値を示しています。変動係数 C_v が0.10の場合は、平均値の50%の強度となります。この点から、ばらつきが小さく品質に優れた状態を確保するには、変動係数 C_v は最低限0.10以下であることが必要と言えます。

最近では、合格品の最低強度が平均値の70%以上であることが要求される場合も多く、この場合は、変動係数 C_v を0.06以下に抑える必要があります。なお、界面破壊では、変動係数 C_v が0.2を超える場合も頻出しますが、これほどばらつきが大きくなると、統計的に扱うことが困難な状態となり、品質を論じることができなくなってしまいます。

図1-1-7 接着強度のばらつきと凝集破壊率の関連性

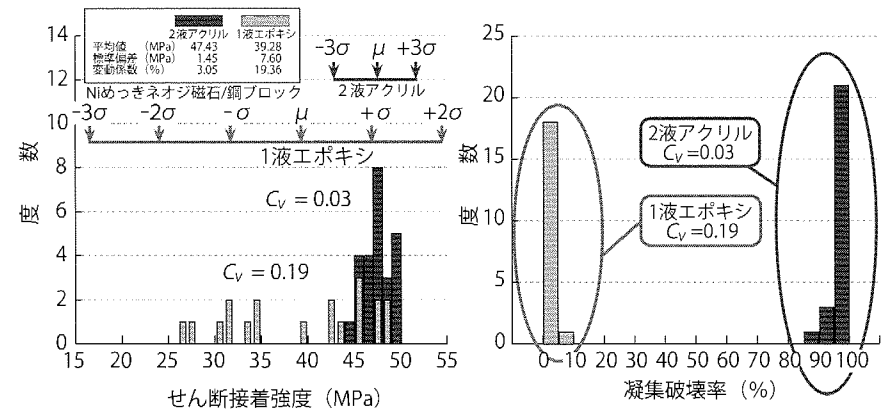
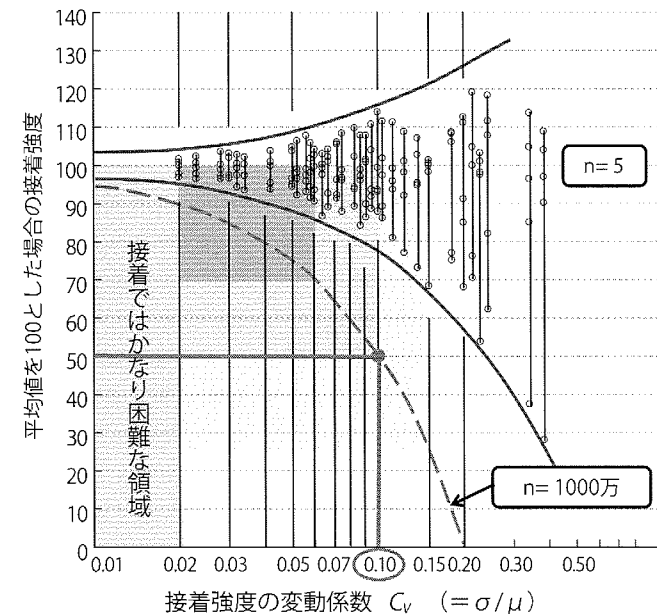


図1-1-8 接着強度の変動係数 C_v とばらつきの範囲



要点 ノート

- 接着強度のばらつきを表す指標として変動係数 $C_v (= \sigma/\mu)$ を用います。
- 変動係数と凝集破壊率には相関があります。変動係数 C_v は、最低でも0.10以下に作り込む必要があります。最近では、0.06以下が要求される場合もあります。

【4】接着特性を低下させる内部応力

内部応力(残留応力)による不具合と内部応力の分類

①高信頼性・高品質接着の達成は「内部応力との戦い」

接着剤による接合では、弾性率や線膨張係数など物性が異なる2種類の材料が、さらに物性の異なる接着剤で接合されています。2つの材料は界面で接着剤と結合して拘束されているため、それぞれが自由に動くことはできません。このため、部品の材料や接着剤の物性、接着部の構造や寸法、接着条件、使用環境などによって、接着特性の低下や部品の変形や位置ずれなど多くの問題が生じてきます。

接着特性および接着した部品の機能・性能を満足させるためには、接着の内部応力(残留応力)を理解して、影響を最小限に抑える種々の検討が必要となります。この点で、高信頼性・高品質接着の達成は「内部応力との戦い」と言っても過言ではないでしょう。接着の内部応力について書かれた書物は少なく、ここで少し詳しく述べていきます。

②内部応力で生じる不具合

接着部の内部応力による不具合を大別すると、接着特性の低下と接着される部品の機能や特性の低下に分けられます。

接着特性の低下としては、①接着強度の低下や接着部の破壊が起こる、②めっきや塗装膜の上で接着した場合にめっきや塗膜が素地から剥がれやすくなる、③接着耐久性が低下するなどがあります。

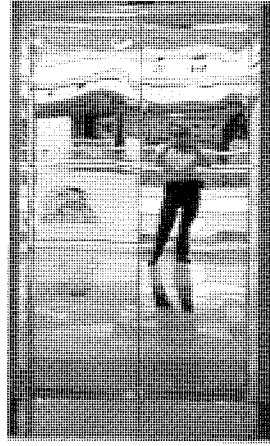
接着される部品の機能や特性の低下としては、①意匠部品における意匠性の低下、②精密部品の微小変形、③精密部品の微小位置ずれ、④脆性部品の割れの発生、⑥磁気部品の特性低下などが起こります。

図1-4-1は、鏡面ステンレス製の平面パネルの裏面に金属製の補強材を接着したのですが、接着剤の硬化で生じた内部応力によって、表面に大きな変形が生じているのがわかります。図1-4-2は、平面状の光学ミラーを金属の台座にスペーサーを介して接着したときのミラーの変形の例です。接着層の厚さを一定にするために、リング状のスペーサー(図示なし)が入れているため、接着剤の硬化収縮によって生じた応力によって、接着層の厚さ方向にミラーが引っ張られています。

③内部応力(残留応力)の種類

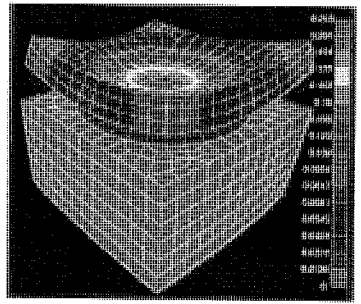
図1-4-3に示すように、内部応力には、①接着剤の硬化時の収縮によって発生する硬化収縮応力、②加熱硬化後室温までの冷却過程で生じる熱収縮応力、③使用中の温度変化によって生じる熱応力、④接着剤や被着材料の吸水によって生じる吸水膨潤応力、⑤被着材自体の変形によって接着部に加わる応力などがあります。

図1-4-1 鏡面ステンレス製平面パネルの接着による歪み



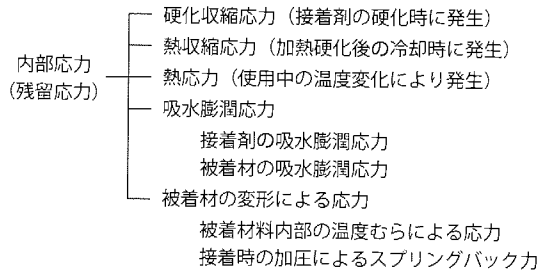
撮影：原賀康介

図1-4-2 接着剤の硬化収縮応力による光学ミラーの変形例



出所：「高信頼性接着の実務一事例と信頼性の考え方」原賀康介著、日刊工業新聞社、(2013)、P.164-166
"Finite Element Analysis for Internal Stress of Room Temperature Cured Adhesives." HARUNA K, HARAGA K, Tech Pap Soc Manuf Eng, No. AD97-207, (1997), P.1-7

図1-4-3 内部応力の種類



要点 ノート

接着部に作用する内部応力は、接着特性の低下や部品の変形や位置ずれなど多くの問題を生じさせます。高信頼性・高品質接着の達成は「内部応力との戦い」と言っても過言ではないでしょう。

4 接着特性を低下させる内部応力

内部応力の種類① 接着剤の硬化収縮応力

①接着剤は硬化時に体積収縮を起こす

図1-4-4に示すように、工業用に用いられている接着剤のほとんどは、硬化して液体から固体に変化するときに体積収縮を起こします。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。

②接着剤と被着材表面は液体の時に結合していて動けない

接着剤の硬化が始まると体積収縮が始まりますが、図1-4-4(A)のように、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、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ず、硬化が終わったときには図1-4-4(B)のような形になっています。

③動けない結合面付近は接着剤の中心に向かって引っ張られた状態

図1-4-4(B)のようになると、結合界面付近の接着剤は接着剤の中心に向かって引っ張られた状態となります。すなわち、界面付近にはせん断と引張りの力が働いています。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。

④被着材の弾性率、剛性によって被着材の変形は異なる

両被着材料とも弾性率や剛性が高く、変形しにくい場合は、図1-4-4(B)に示すように、被着材はほとんど変形しません。ただし、弾性率や剛性が低ければ、図1-4-5(A)に示すように被着材の界面付近は圧縮されて反ったり、図1-4-5(B)に示すようにしわになったりします。被着材が変形することで、界面での応力は低下します。

⑤硬化収縮応力は接着剤のゲル化までは発生しない

図1-4-6は、接着剤の硬化過程における体積収縮率、弾性率、硬化収縮応力の経時変化を示したものです。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り、弾性率が増加します。弾性率がある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続きます。

⑥硬化終了後に硬化収縮応力は若干低減する

硬化が終了した時点で硬化収縮応力は最大になりますが、図1-4-6に示すよ

うに、放置時間とともに若干低下します。この応力が低下する現象は「応力緩和」と呼ばれています。応力緩和については46ページで説明します。

図1-4-4 硬化収縮応力

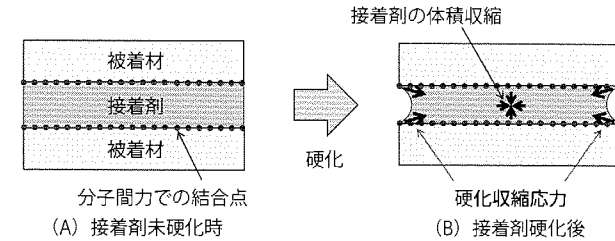
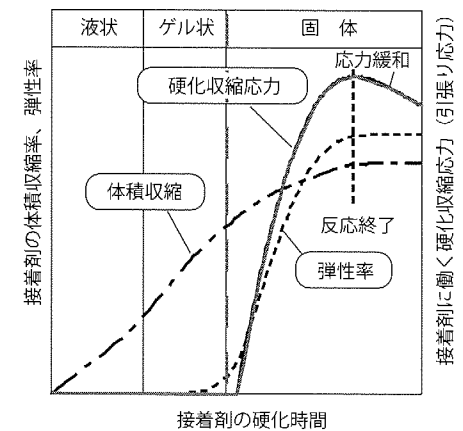


図1-4-5 被着材の弾性率、剛性が低い場合の硬化収縮応力による変形



図1-4-6 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



出所：「高信頼性接着の実務―事例と信頼性の考え方―」原賀康介著、日刊工業新聞社、(2013)、P.166-167
「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、日刊工業新聞社、(2013)、P.50-52

要点 ノート

接着剤は硬化するときに体積収縮を起こします。接着剤と被着材表面は分子間力で結合していて自由に動けないので、界面付近は縮めずに接着剤が引っ張られた状態になります。これを硬化収縮応力と言います。

【4】接着特性を低下させる内部応力

内部応力による不具合と改善策① 異種材料接着

①異種材料の加熱硬化接着における熱応力

加熱硬化型接着剤を用いて加熱硬化し、室温まで冷やしたときや低温での使用中に生じる内部応力は、同種材料同士の接着の場合は図1-4-7および図1-4-10に示したように、接着剤と被着材料との線膨張係数の違いが問題となります。一方、異種材料接着の場合は図1-4-19に示すように、2つの被着材料の線膨張係数の違いで変形が生じ、内部応力はさらに大きくなります。

一方の被着材の剛性が高く、一方の被着材の剛性が低い場合には、剛性の高い部材は曲がらないため、接着端部の界面付近では大きな応力が加わってきます。

線膨張係数が異なる低剛性材料を加熱硬化後、室温まで冷却すると、図1-4-20に示すように、両部材ともに反りが生じます。接着層の厚さは、端部より中央部で若干厚くなります。

②異種材の室温硬化後の温度変化による熱応力

図1-4-21は、接着部が平面状の高剛性・低膨張係数材料Aと低剛性・高膨張係数材料Bを室温硬化接着した後、加熱したときの変形状態です。接着端部で接着層が厚くなるような変形をします。

図1-4-22は、線膨張係数が異なる低剛性材料同士を室温硬化接着した後、低温に冷却した時の変形状態です。①のように、両部材が同じ方向に反るのが一般的ですが、被着材料の弾性率や剛性が非常に低く、線膨張係数の差が小さい場合には、②のように接着層の中央部が厚くなるような変形が生じます。

③加熱硬化では、高温で被着材が伸びた状態で硬化している

加熱硬化の場合は、被着材が加熱温度まで熱せられて大きく伸びた状態で接着剤が硬化するため、室温に戻しても元の室温での寸法に戻らなくなるという問題も生じます。

④異種材接着における内部応力の低減策

①②で述べたように、加熱硬化型接着剤を用いるか室温硬化型接着剤を用いるかで、接着された部品の使用温度範囲における接着部の熱応力や熱変形の程度は異なります。中温硬化など硬化温度の最適化によって、使用温度範囲での

熱応力や熱変形の影響を低減できます。部品の剛性の組合せの最適化でも、熱応力や熱変形の影響を抑えることが可能です。

図1-4-19 接着部が平面状の高剛性・低膨張係数材料Aと低剛性・高膨張係数材料Bの加熱硬化接着後、室温まで冷却した時の熱応力による変形

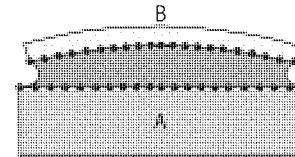


図1-4-20 線膨張係数が異なる低剛性材料の加熱硬化接着後、室温まで冷却した時の熱応力による変形 (線膨張係数: 被着材B > 被着材A)

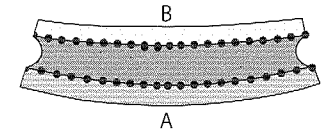


図1-4-21 接着部が平面状の高剛性・低膨張係数材料Aと低剛性・高膨張係数材料Bの室温硬化接着後、加熱した時の変形

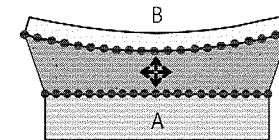
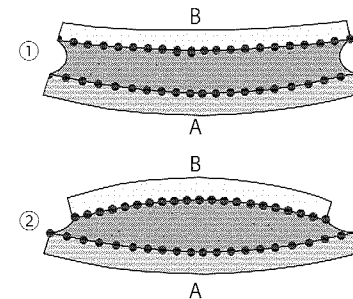


図1-4-22 線膨張係数が異なる低剛性材料の室温硬化接着後、低温に冷却した時の熱応力による変形 (線膨張係数: 被着材B > 被着材A)



要点 ノート

異種材料の接着では、同種材の接着の場合より熱応力や熱変形が大きくなります。接着剤の硬化温度や被着材の剛性によっても大きく異なります。接着剤の硬化温度や部品の剛性の最適化を考えましょう。

5 接着剤の種類と長所・短所

構造用接着剤、準構造用接着剤

①構造用接着剤、準構造用接着剤とは

「構造用接着剤」は、JIS K 6800「接着剤・接着用語」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。もともとは、航空機の部品組立に用いられる接着剤が対象でしたが、現在は多様な用途で使われる高強度・高耐久性接着剤の総称となっています。

「準構造用接着剤」は明確な定義はされていませんが、要求を満たす十分な強度と機能、耐久性を有している接着剤と考えればよいでしょう。代表的な構造用接着剤、準構造用接着剤としては、エポキシ系接着剤、アクリル系接着剤(SGA)、ウレタン系接着剤などがあり、耐熱性が要求されるブレーキシューの接着などでは、フェノール系接着剤も使われています。

②構造用接着剤、準構造用接着剤の種類、形態、反応機構、長所・短所

表1-5-1に、エポキシ系、アクリル系(SGA)、ウレタン系接着剤の種類、形態、反応機構、長所・短所を示しました。接着剤を選ぶときには、どうしても長所に目を奪われてしまいます。しかし、接着の作業工程や市場での不具合は、接着剤の短所に起因するものがほとんどです。この点から、短所を十分に理解しておくことは、高信頼性・高品質接着の基本となります。

- ①エポキシ系接着剤：エポキシ樹脂自体は、機械特性や電気特性に優れていますが、硬化後硬いものが多く、接着剤としてはせん断力が高くても、はく離力や衝撃力には弱いのが一般的です。構造強度を確保するためには、各種の樹脂やエラストマーで変成して強靱性が付与されています。
- ②アクリル系接着剤(SGA)：優れた油面接着性、配合比の許容範囲の広さ、非混合でも接触すれば硬化するなど作業性の良さが最大の特徴です。各種の力に対する抵抗性や耐久性の良さも特徴です。
- ③ウレタン系接着剤：構造用には主として2液型が用いられます。各種の力に対する抵抗性や耐久性の良さが特徴ですが、高温多湿環境での接着作業では水分で発泡を起こしやすいのが最大の欠点です。

表 1-5-1 構造用・準構造用接着剤の種類、形態、反応機構、長所・短所

種類	形態	反応機構	長所	短所
エポキシ系接着剤	2液型	主剤(エポキシ樹脂)と硬化剤(アミンなど)との接触による付加重合反応で硬化。室温～加熱で硬化	<ul style="list-style-type: none"> 各種の充填剤や樹脂やエラストマーなどによる変性がやりやすいので、品種がきわめて多い エポキシ樹脂自体は、機械的特性や電気的特性、耐久性に優れている ナイロン、フェノール、ニトリルゴムなどにより変性されたものは構造用接着剤として優れた接着強度と耐久性を有している 充填剤として銀粉や銅粉などが多量に添加された導電性接着剤もある 柔軟で弾力性を有した弾性エポキシ接着剤もある 加熱硬化型の一部のものは油面接着性を有している 	<ul style="list-style-type: none"> 2液型は、界面Bでの接着性という点では今ひとつのものが多く 2液型のほとんどのものは、油面接着性はない 硬化後硬いものが多く、はく離強度に劣るものが多い 2液室温硬化型接着剤は、10℃以下の低温では硬化しにくい 1液型は、冷蔵や冷凍保存が必要 1液型は、硬化温度には下限温度がある 粉末硬化剤の1液型での浸透接着では、昇温の途中でエポキシ樹脂は粘度が低下して浸透するが、硬化剤はまだ溶融していないので接着部に浸透できず、未硬化となる(液状の硬化剤を配合した1液加熱硬化型もある) 加熱硬化時のガスによる皮膚がぶれに注意が必要
	1液フローズン型	2液型を計量・混合・脱法してシリンジに充填し、冷凍で反応を止めてあるもの。室温～加熱で硬化		
	1液型			
	フィルム状 固形、粉末状	加熱により活性化する硬化剤が添加されている。加熱で反応硬化する		
アクリル系接着剤(SGA)	2液主剤型	主剤と硬化剤またはプライマーの接触によるラジカルが発生し、連鎖反応的に硬化する	<ul style="list-style-type: none"> 非常に優れた油面接着性を有している 海鳥構造によりせん断、引張り、はく離、衝撃のいずれにも優れた強度を示す 凝集破壊性が高く、接着強度のばらつきが少ない 耐久性に優れている 配合比の許容範囲は非常に広く、簡易混合でも硬化する 2液を混合しないで、重ね塗布や両面別塗布での接着も可能 可使用時間経過後、急速に反応して短時間で硬化する ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)を表面処理なしで接着できるものもある 内部応力を緩和しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> MMA(メチルメタアクリレート)含有タイプはアクリル臭が強く、第一or二石油類に分類される。(非MMAタイプは低臭気・非危険物である) 硬化収縮率が大きい プライマータイプは、はみ出し部が硬化しにくい 低臭気非MMAタイプは、はみ出し部の表面硬化に時間がかかる
	1液+プライマー型			
ウレタン系接着剤	1液型	加熱により活性化する触媒が添加されている。加熱で反応硬化する		
	2液型	主剤(ポリオール)と硬化剤(イソシアネート)の接触による付加重合反応で硬化。室温～加熱で硬化		<ul style="list-style-type: none"> 金属への密着性に劣る場合が多く、プライマーが必要な場合も多い 2液型のイソシアネートは水分と反応して二酸化炭素を発生させるため、高湿度時には発泡しやすい 2液型のポリオールは空気中の水分を多量に吸収するため密閉保管が重要 ポリエステルタイプのポリオールは加水分解性があるので高温高湿度中での使用には注意が必要。ポリエーテルタイプは加水分解性はない 油面接着性はない 1液水分硬化型は、季節(湿度)により硬化時間が変化する 1液水分硬化型は、水分を通さない材料の大幅面積接着では内部まで硬化しないことがある 皮膚に付着すると取れにくい
	1液型	空気中の水分と反応して硬化する	<ul style="list-style-type: none"> 硬化物は柔軟なものが多いが、2液型には硬いものもある 1液型の場合はシール材としても多用される 一般に樹脂への密着性に優れている 	
反応性ホットメルト型	熱溶融で短時間に接着した後、空気中の水分と反応して硬化する			

要点 ノート

接着の作業工程や市場での不具合は、接着剤の短所に起因するものがほとんどです。この点から、短所を十分に理解しておくことは、高信頼性・高品質接着の基本となります。

6 接着強度に影響する因子

接着部に加わる力の方向と代表的な評価方法

①接着接合は局部荷重に弱い

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度は、共有結合や金属結合などに比べると非常に低強度です。このため、接着は面結合にして、できるだけ面全体で荷重を受け止める構造で使うことが必要です。はく離や衝撃のように局部的に加わる大きな力は苦手です。せん断では、25mm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剥がすこともできる程度の強度になります。

②接着部に加わる力の方向

接着部に加わる力の種類としては、図1-6-1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。圧縮力はマイナス方向の力と考えます。

せん断力は、図1-6-2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)などがあります。

引張り力は、図1-6-3に示すように均等引張り(a)、不均等引張り(割裂)(b1)(b2)、はく離(c)などがあります。(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り力が加わるので、弱い力で剥がれてしまいます。

③代表的な接着強度の評価方法

最も用いられるのは、引張りせん断試験とはく離試験です。

引張りせん断試験は、図1-6-4(a)に示すJIS K 6850規定の単純重ね合わせ引張りせん断試験が一般的です。板幅は25.0mm、重ね合わせ長さは12.5mmと規定されています。接着強度が被着材の引張り降伏強度以上では、板が伸びて正確な接着強度が測定できないので、板の引張り降伏強度が接着強度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。被着材料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。

図 1-6-1 接着部に加わる基本的な力

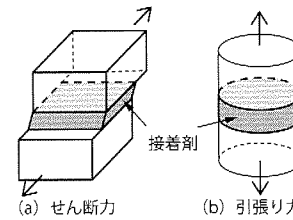


図 1-6-3 引張り力の種々の加わり方

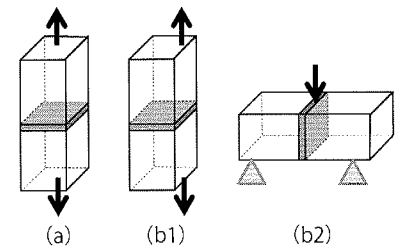


図 1-6-2 せん断力の種々の加わり方

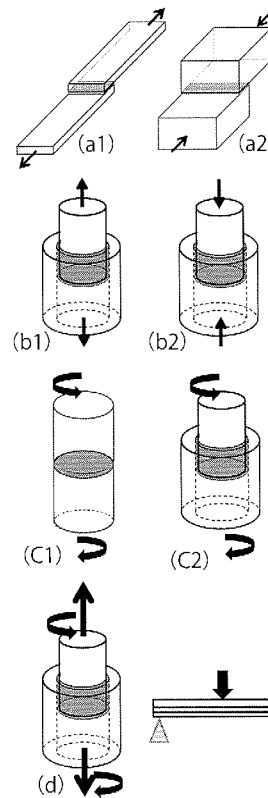
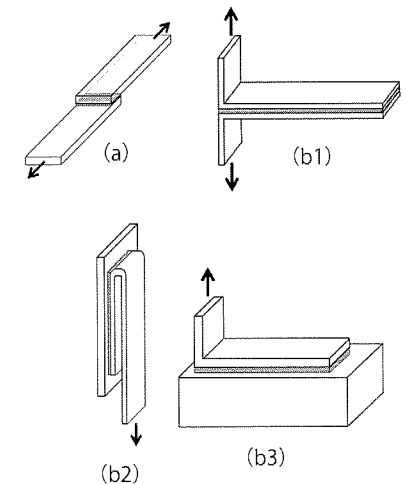


図 1-6-4 代表的な接着強度の試験方法



要点 ノート

接着は局部荷重に弱いので、力の加わる方向で強度が大きく変化します。面全体で支えるせん断や均等な引張りには強いですが、はく離や衝撃には弱くなります。接着強度評価では、せん断とはく離の両方の評価が不可欠です。

● 日本における構造接着と精密接着の現状 ●

▷ 構造接着技術の現状

CO₂削減やEV化の波が押し寄せ、マルチマテリアル化による自動車の車体軽量化のための異種材接合法の1つとして「構造接着」が注目されています。しかし、日本では、構造接着技術の牽引役である航空機産業が戦後出遅れたため、構造接着の技術開発や関連産業育成、人材育成は欧米に大きく引き離され、自動車分野においても、キャッチアップの段階を乗り越えるには大きなハードルがあるのが現状と言えます。しかし、日本にも高いレベルの「構造接着技術」を保有している企業はあり、高品質な構造接着の実績は多くあります。残念ながら、これらの技術は企業内に留まり、汎用技術として多くの産業分野に水平展開されていない状態です。結果として、汎用技術としての「構造接着」は、欧米に比べると遅れているということです。

▷ 精密接着技術の現状

日本が得意とする電子機器や精密機器の組立には、長年にわたって「精密接着」が主要な組立技術として採用されています。しかし、対象の部品や機器が千差万別で、接着剤は多品種極少使用で輸入品も多く、手作業個産から自動化量産まで生産方式も様々で、接着特性の評価はきわめて困難です。このため、接着技術の開発は、部品や機器の開発時点では試行錯誤的、トラブル対策では対症的に行われているのが実情と言えます。

精密接着の研究をしている大学・研究機関はほとんどなく、技術者も育っていない状況です。今後は試行錯誤から脱却し、体系的技術としての確立が望まれています。



【 第 2 章 】

準備と段取り の要点

1 接着の出来映えは設計しだい

接着設計技術と構成要素

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・品質に優れた製品を、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す。簡単に言えば、接着の特徴・機能を「使いこなす技術」と言えます。

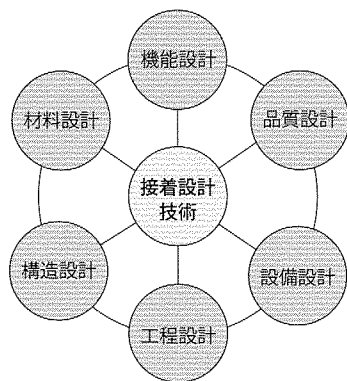
接着設計がうまくできていれば、実際の接着組立工程での管理は楽になり、安定した品質の製品を効率良く生産することが可能になります。逆に言えば、接着設計がうまくできていなければ、組立現場では無駄な作業が増え、安定した品質や効率的生産に支障が生じることとなります。すなわち、「接着組立の品質、生産性は接着設計で決まる」と言えます。

接着設計の段階で、②で述べる各要素技術を総合して、接着作業に関わる工程ごとの最適条件と許容範囲を明確に決定することが重要です。

②接着設計技術の構成要素

接着設計技術は、図2-1-1に示すように、(1)機能設計、(2)材料設計、(3)構造設計、(4)工程設計、(5)設備設計、(6)品質設計などの要素技術で構成されています。これらの要素技術は、それぞれが独立して存在するものではな

図 2-1-1 接着設計技術とその要素技術



く、各要素技術は相互に強く関連しており、それらの強力な連携の下に接着設計技術は成り立っています。

③各要素技術の実施内容

表2-1-1に、各要素技術の概要を示しました。機能設計では、接合という機能だけでなく、表1-2-3で説明した接着から得られる効果をいかに多く盛り込み、22ページで説明したような接着の欠点をいかにカバーするかを検討します。材料設計では、接着剤だけでなく部品の材質・表面状態の検討も行います。性能面と併せて、工程の簡素化や作業の許容範囲を広く取れる材料系（被着材料の材質・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併せて検討します。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、設備だけでなく組立治具の検討も重要です。品質設計では、信頼性やばらつき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。

表 2-1-1 接着設計技術の構成要素の概要

要素技術	技術の概要
機能設計	接着接合が有する多くの特徴・機能を製品設計にいかにもうまく活かすか、接着の欠点をいかにうまくカバーするかという技術
材料設計	製品に要求される機能を満足させながら、刻々と変化する部品の状態、接着剤、作業環境などに広い作業許容条件範囲で対応できるための、材料系の作り込みの技術
構造設計	高強度を得るための「継手設計」だけでなく、貼り間違いを防止する構造、接着剤を塗布しやすい構造、塗布した接着剤が垂れたり掻き取られたりしない構造、硬化までの仮固定が容易な構造、接着剤のはみ出しを防止する構造、工程ごとの検査がやりやすい構造、破壊に対する冗長設計なども考慮した構造最適化の技術
工程設計	候補となる各種の接着剤ごとに組立プロセスがどのようになるのかを検討して、最適な組立プロセスを選定する技術 自動化と人手作業の最適化、いずれかの工程でトラブル停止した場合の対処方法、各工程における検査方法の検討も行う
設備設計	設備面から材料、構造、工程を最適化する技術。接着組立においては治具の出来映えが作業性を大きく左右するため、各工程での治具設計、工具設計も重要
品質設計	「高品質接着の基本条件」である次の2点を満足できるように、材料設計、構造設計、工程設計、設備設計で詰めていく技術 ①凝集破壊率を40%以上確保すること ②接着強度の変動係数Cvを最低限0.10以下にすること

要点 ノート

接着組立品の品質、生産性は接着設計で決まると言えます。接着設計技術を構成する要素技術は相互に強い関連を有しているため、開発段階では、各要素技術の技術者が連携し合って、コンカレントに開発を進めることが大切です。

2 接着剤の選定と評価

使用・管理上のポイントを考慮して接着剤を絞り込む

①接着剤の選定・使用上の注意点、管理のポイントのチェックリスト

前項で述べた「消去法による接着剤の選定チェックリスト」で候補となる接着剤の種類が絞り込まれたら、「接着剤の選定・使用上の注意点、管理のポイントのチェックリスト」を用いて、細かい点をチェックしましょう。表2-2-2には、一例として、1液湿気硬化型接着剤のチェックリストを示しました。他に、2液型エポキシ系接着剤、1液型エポキシ系接着剤、2液型ウレタン系接着剤、2液型アクリル系接着剤（SGA）のチェックリストがあります。以下からダウンロードが可能です。<<https://www.haraga-secchaku.info/checklist/>>

これらのチェックリストでは、選定・使用時の注意点のまとめと、管理項目、管理のポイントを、接着剤の受入・保管、接着作業の準備、接着作業、検査に分けて、細かくチェックできるようになっています。特に重要なポイントは●印で示してあります。接着作業では、チューブやカートリッジから直接塗布する場合、チューブやカートリッジからシリンジに詰め替えて使用する場合、ベール缶などから圧送塗布装置を用いて使用する場合など、使い方にポイントが記載されています。

これらのチェックリストでチェックして、十分な管理ができないと判断した場合は、その種類の接着剤の採用は避けた方がよいでしょう。何とかならうと採用しても、いずれかの時点で必ず不具合に遭遇することになってしまいます。

②具体的な接着剤の選定を行う際の注意点

候補となる接着剤の種類が絞り込まれたら、接着剤メーカーに問い合わせたり、カタログを見たりして、具体的に候補品を選ぶ段階になります。接着剤メーカーに問合せを行う場合には、候補となる種類の接着剤を扱っているメーカーに問い合わせてください。希望する種類を扱っていない場合は、自社が扱っている他の種類の中から候補品を推薦され、思わぬ遠回りをさせられることになりかねません。カタログを見るときは注意点は次項で述べます。問合せや打合せをするときには、「接着剤の選定・使用上の注意点、管理のポイントのチェックリスト」を活用して、疑問点を徹底的に解消しましょう。

表 2-2-2 接着剤の選定・使用上の注意点、管理のポイントのチェックリスト（1液湿気硬化型接着剤の例）（●は重要項目）

工程	管理項目	管理のポイント	
接着剤受入・保管	受入	ロット管理	製造日の確認
		納入仕様書	試験結果の適合性確認
	保管	● 有効期限	未開封での期限を明記
		● 保管場所・環境	特に湿度に注意、保管場所の温度・湿度を自動記録する（電池式）
		低温保管時の結晶化	結晶化温度以上で保管、庫内温度の自動記録（電池式）
		● 吸湿	容器の密閉の確認 チューブやカートリッジは、乾燥剤を入れたポリ袋に入れて保管
保管時の姿勢	チューブやカートリッジ内の気泡を集めるため、ノズル側を上向きにして保管する		
工程	管理項目	管理のポイント	
作業環境	● 温度・湿度	許容温度・湿度の範囲を決める。温度を自動記録する 低湿度時は加湿する	
		● 空気溜まりの排除	シリンジを上向きにしたままフランジャーを押し込んで、シリンジの空洞部をなくす
	シリンジなどへの充填	● キャップ	シリンジの先端に密閉キャップをつける
		● 充填日、使用期限の記入	充填当日に使い切らない場合は、充填日時と使用期限をシリンジに明記する
ベール缶などから圧送塗布装置を用いて使う場合			
接着作業	脱泡	圧送タンク投入前か投入後に行う	
	タンク内での沈降・分離確認	投入後時間が経過した場合に実施	目視またはヘラなどで確認
	エア加压式の場合	加圧エア	乾燥空気を使用する
	塗布ノズル	● ノズル内ゲル化	アンチゲルタイマーの設定（夏期高温時基準）
		● 溶剤での洗浄	換気、引火対策（設備の防爆・準防爆）、衛生対策 溶剤洗浄後の乾燥
硬化までの加圧・固定	治具の清掃	接着剤付着などが無いこと	
	加圧力	● 二度加圧	部品の变形や位置ずれが生じず、接着層の厚さが所定厚さになる下限圧力程度 空気の引き込みが生じやすいので二度加圧はしない
		● 温度・時間	最低温度・湿度と硬化時間の管理 硬化場所の温度・湿度の自動記録 低湿度時は加湿する 大量の養生を行う場合は、発生ガスに注意（換気）
工程	管理項目	管理のポイント	
検査	● 抜き取り破壊検査	外観検査	はみ出し部の硬化状態の確認 凝集破壊率
		● 抜き取り破壊検査	未硬化部の有無 強度と変動係数

出所：(株)原賀接着技術コンサルタント <<https://www.haraga-secchaku.info/checklist/>>

要点 ノート

候補接着剤の種類が絞り込まれたら、「接着剤の選定・使用上の注意点、管理のポイントのチェックリスト」で細かい点をチェックしましょう。十分な管理ができない場合は、その種類の接着剤の採用は避けた方がよいでしょう。

4 強度設計、耐久設計上のポイント

接着強度の実力値はどのくらいか

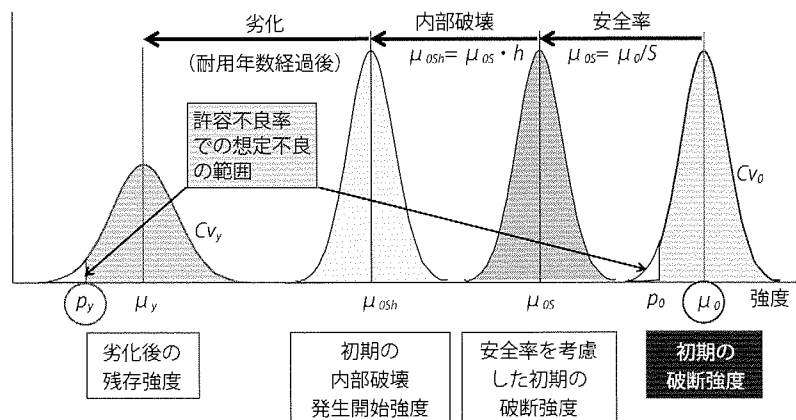
1 破断強度は接着強度ではない

図1-1-6に示したように、接着部が破断する以前に、接着部の内部では繰返し内部破壊が発生しています。また、接着強度にはばらつきもあるので、平均破断強度を接着強度と考えることは適当ではありません。さらに、劣化すると平均強度の低下とともに、ばらつきが増加します。設計に用いる強度としては、さらに、安全率も加味しなければなりません。これらを考えると、設計に用いることができる設計許容強度は、平均破断強度よりかなり低い値となります。

2 設計許容強度の考え方^{10, 12-14)}

図2-4-1に示すように、平均破断強度に対して、安全率、内部破壊の発生開始強度、劣化による強度低下、劣化によるばらつきの増加を考え、設計段階で決められた許容不良率以上の不良が生じない強度を、設計許容強度と考えるべきでしょう。図2-4-1の p_y 、すなわち、耐用年数経過後の良品の最低強度を設

図2-4-1 設計許容強度（接着強度の実力値 p_y ）の考え方



h : 内部破壊係数、 S : 安全率、 $C_{vy} = k \cdot C_{v0}$ (k : 劣化による変動係数の増大率)

設計許容強度と考えることにします。

3 設計許容強度 p_y は平均破断強度 μ_0 の何分の1くらいか

これは、式2-4-1で計算することができます。破断強度に対する内部破壊の発生開始強度の比率 h （内部破壊係数）は、静的荷重負荷のみの場合は0.5、高サイクル繰返しが加わる場合は0.25と考えます。劣化によるばらつきの増加は、変動係数の増大と考え、耐用年数経過後の変動係数 $C_{vy} =$ 初期の変動係数 $C_{v0} \times$ ばらつきの増加率 k とします。

k は、筆者の多くの耐久性試験結果や実績データから、30年間屋外で使用され繰返し疲労もかかる場合でも、初期に凝集破壊していれば1.5以下と考えればよいでしょう。初期のばらつき係数 d_0 は、設計段階で設定された許容不良率において、良品の下限強度 p_0 が平均強度 μ_0 に対してどのくらい必要かという品質レベルを表わすもので、設計段階で設定します。 η_y は、劣化後の強度保持率です。大きく劣化しても、不良さえ出なければそれでよいとも言えますが、大きく劣化すると劣化予測での想定モード以外の劣化が生じてくるので、 $\eta_y = \mu_y / \mu_{0sh}$ は0.5以上くらいに設定すべきでしょう。

4 設計許容強度 p_y /平均破断強度 μ_0 の割合

式2-4-1で求めると、設計許容強度は初期の平均破断強度の1/20～1/40程度となります。低すぎると感じられるかもしれませんが、これが実力です。なお、得られた結果は製品の接着部が曝される温度の範囲で、最も強度が低下する温度で考える必要があります。

式2-4-1 初期の平均破断強度に対する接着強度の実力値の割合を求める式

$$p_y / \mu_0 = h \{1 - k(1 - d_0)\} \eta_y / S \dots (1)$$

- p_y : 耐用年数経過後の良品の下限強度
- μ_0 : 初期の平均破断強度
- h : 内部破壊係数
- k : 劣化による変動係数の増大率
- d_0 : 初期のばらつき係数 $d_0 = p_0 / \mu_0$
- η_y : 劣化後の強度保持率 $\eta_y = \mu_y / \mu_{0sh}$
- S : 安全率

要点 ノート

平均破断強度を接着強度の実力値と考えてはいけません。安全率、許容不良率、強度ばらつき、内部破壊、劣化を考慮すると、設計に用いることができる設計許容強度は初期の平均破断強度の1/20～1/40程度です。

6 プロセスと最適値、許容範囲の決定

最適条件と許容範囲を決める

① プロセスごとに条件を決める

表2-6-3に、一般的な接着のプロセスを示しました。前項で述べたように、接着剤の種類によって重要な管理のポイントは異なりますが、共通的に部品の表面張力（濡れ性）、表面処理や表面改質から接着までの環境条件、時間、接着剤の配合比、混合の程度、混合開始から加圧固定終了までの環境条件と時間、塗布量、塗布位置、貼り合わせの位置精度、加圧力、加圧時間、硬化条件などの最適条件と許容範囲を決める必要があります。

② 最初の工程は特に重要

一連の工程の中で、最初に近い工程ほどしっかりと管理する必要があります。例えば、接着される部品の表面状態の管理がしっかりできていなければ、後の工程がきちんと管理されていても、高品質な接着はできなくなります。

図2-6-4は、ニッケルめっきされた部品の放置期間による表面濡れ指数（表面張力）の変化の例です。表面張力は30ページで述べたように、一般に下限値は36mN/m、最適値は38mN/m以上と規定すればよいでしょう。受入検査では出荷時の濡れ指数を検査表で管理しますが、受入時に合格であっても、接着の段階では不合格になっているかもしれません。接着前に濡れ指数を検査することは必須です。下限値を下回るものが多ければ表面改質の工程を追加し、改質後に検査しなければなりません。

もちろん、表面改質の条件も最適値と許容範囲を決める必要があります。表面改質の管理条件としては、プラズマノズルや短波長紫外線ランプの出力、距離、改質時間、環境温度・湿度、改質から接着までの環境条件、時間などがあります。改質時間が長くなると表面張力は高くなりますが、接着強度が低下することもあるため、上限時間の規定は重要です。

③ インライン作業かバッチ処理かも決める

表面改質後の放置可能時間が長ければサブラインやバッチ処理も可能ですが、放置可能時間が短ければインラインで接着の直前に処理しなければなりません。最適条件と許容範囲によって、工程を考えましょう。

④ 工程内での検査方法も決める

例えば、接着剤が塗布された部品を貼り合わせる段階では、部品の異常の有無、接着剤の混合度合い、塗布量、塗布パターン、塗布位置などをチェックする必要があります。検査項目の明確化が必要です。短時間で多くのことを自動で検査できればよいのですが、むしろ人手作業の方が適しているという場合も多々あります。機械作業と人手作業との最適化も考えましょう。

⑤ 許容範囲を超えたら設備が自動停止すること

自動化された工程では常に作業条件をモニターし、許容範囲を超えた場合はアラームを出して自動的に停止する設備にしておくことも重要です。

図2-6-3 一般的な接着のプロセス

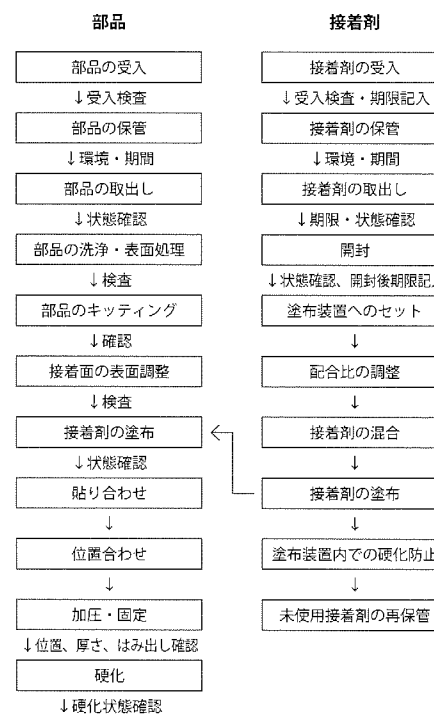
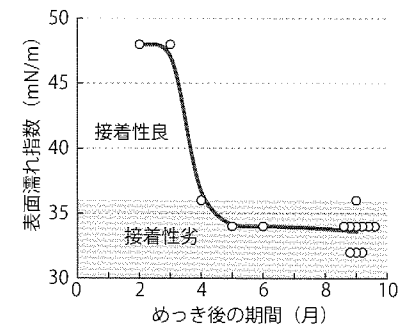


図2-6-4 ニッケルめっきされた部品の放置期間による表面濡れ指数の変化



要点 ノート

接着工程がほぼ決まったら、各工程ごとに最適条件と許容範囲、検査箇所を決めます。工程内での検査のことも考慮して、機械作業と人手作業の最適化を図りましょう。設備は、許容範囲を超えたら自動停止しなければなりません。

● 接着技術を製品組立に用いる技術者の育成 ●

これまでの日本での接着教育は、界面化学や高分子化学など化学偏重でシーズ目線であったと言っても過言ではないでしょう。接着を製品組立に「使う」ためには、実用化のための課題を解決する技術開発と教育が必要で、力学や加工・生産技術、品質などのニーズ面からの取組みが必要です。

広範な機器製造産業での接着接合の適用拡大に伴い、接着に要求される機能・特性は高度化し、信頼性や品質への要求は厳しくなっています。しかし、接着に詳しい技術者を擁している機器製造企業は少ないため、接着に関する品質不具合は増加しています。このような背景から、社内で接着設計・接着管理技術の中核となる技術者を育成するために、2017年から4日間の「接着適用技術者養成講座^{*)}」が開講されています。シーズ側技術者にとってもニーズ側が何を必要としているかを学べ、シーズとニーズのマッチングにも効果的です。

社内には接着の技術者が少なく、十分なディスカッションができないと感じている技術者も多いでしょう。会社の外に出て、大いに議論しましょう。ユーザー技術者には、「構造接着研究会^{**)}」がお勧めです。この研究会では、構造接着に限らず、精密接着の技術課題に取り組むために「精密接着WG^{***)}」が2018年4月から活動しています。このような活動に企業として参画することは、技術者の育成強化に効果的です。

参照URL

*) <https://www.struct-adhesion.org/trainingcourse/>

***) <https://www.struct-adhesion.org/>

***) <https://www.struct-adhesion.org/precision/>

【 第3章 】

実務作業・加工の ポイント

1 接着作業の注意点

2液型接着剤の手混合の仕方① 計量の仕方

①接着作業工程でのやるべきこと、やってはならないこと

ここからは、実際の接着組立作業の話に入ります。接着作業工程では、接着設計の段階で決められた工程ごとの最適条件と許容範囲（図面の公差のようなもの）を厳守した作業を行わなければなりません。製造側の都合で、勝手に条件（公差）を変更することは厳禁です。また、材料や設備、器具などが常に正常な状態を保てるように管理することも重要です。トラブル時の対応方法を、訓練を行って、作業員各自が身につけておくことも必要です。

実際の接着作業においては、接着設計の段階で規定できていない細かな点が多々あり、最適な作業方法・条件を製造側で決めなければならないことも多くあります。以下に、これらの点について述べていきます。

②2液型接着剤の手混合の仕方

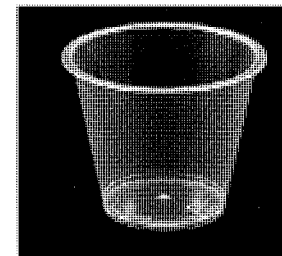
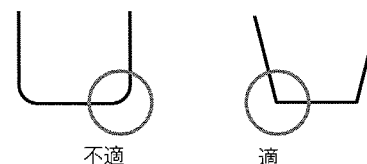
これは、作業員任せになっていることが多々ありますが、ここがうまく行かなければ品質は確保できません。まず計量・混合に用いる容器は、図3-1-1に示すように、底周辺部に丸みがないプリンカップのような形のものを準備しましょう。攪拌棒は、プリンカップの角部も混合できるように先が丸くなく、角があるものが適当です。筆者は、図3-1-2に示すようなばらばらの丸竹箸（つながった割り箸は不可）をよく使います。

③計量の仕方

プリンカップを天秤に乗せて、図3-1-3に示すように先に量が多い液を計量し、量が少ない液を後から、先に計量した液の中央部に滴下して計量します。

使用量がわずかの場合でも、エポキシ系接着剤など配合比の影響が大きい接着剤の場合は、量が少ない液の5%の重量が0.1g（すなわち量が少ない液は2g）以上となる量で計量します。例えば、重量比で主剤と硬化剤の配合比が10:1の場合は、最少量でも主剤を20g、硬化剤を2g±0.1gで計量します。これ以上少ないと、天秤の目盛りを見ながら滴下量を調整するのが困難になるためです。なお、2液の比重が同じとは限らないので、計量の前に最適値が重量比、体積比のどちらで規定されているかを確認し、体積比の場合は比重を掛けて重量換算しておきます。

図3-1-1 カップの断面図



プリンカップ

図3-1-2 丸竹箸

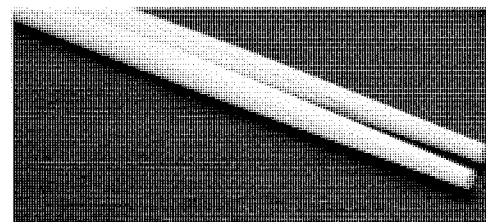
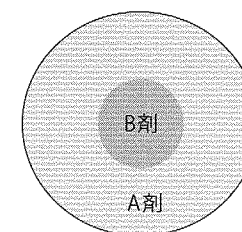
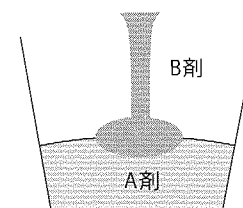


図3-1-3 2液型接着剤の滴下の順番と位置



要点 ノート

接着作業工程では、接着設計の段階で決められた工程ごとの最適条件と許容範囲（図面の公差のようなもの）を厳守した作業を行ない、製造側の都合で、勝手に条件を変更することは厳禁です。2液の計量方法も規定しましょう。

1 接着作業の注意点

プライマーは塗り過ぎてはいけない

①プライマー、カップリング剤、アクチベーター

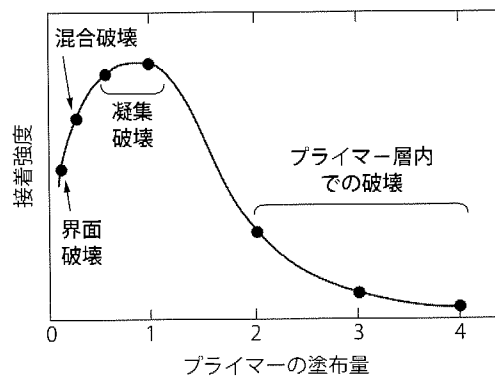
接着界面での結合を強化するために、プライマーやカップリング剤と呼ばれる液体を、接着する前に接着面に塗布することがあります。また、嫌気性接着剤で不活性材料を接着する場合や、硬化を促進するためにアクチベーターと呼ばれる活性剤を塗布することがあります。これらは、密着性や反応性を向上するための成分が、溶剤に溶解された低粘度の液です。プライマーやカップリング剤は、分子中に、被着材表面と結合しやすい基（手）と接着剤と結合しやすい基（手）を持った分子です。アクチベーターは、硬化促進の触媒です。

②プライマー類は塗り過ぎてはいけない

図3-1-8は、プライマーの塗布量と接着強度、破壊状態の関係の模式図です。プライマーを少量塗布すると、接着強度や破壊状態が良好になりますが、塗布量を多くすると接着強度は低下し、破壊状態も界面破壊となり、プライマーを塗布しない場合より悪くなっています。

プライマーやカップリング剤は、①で述べたように、分子中に被着材表面と結合しやすい基（手）と接着剤と結合しやすい基（手）を持っていますが、分

図3-1-8 プライマーの塗布量と接着強度、破壊状態の関係の模式図



子同士が結合する手は持っていません。そのため、図3-1-9(A)のように、単分子層であれば被着材と接着剤はプライマーで結合しますが、塗布量が多くてプライマーの分子が(B)のように重なり合うと、プライマーの分子間での結合は弱くなるためです。

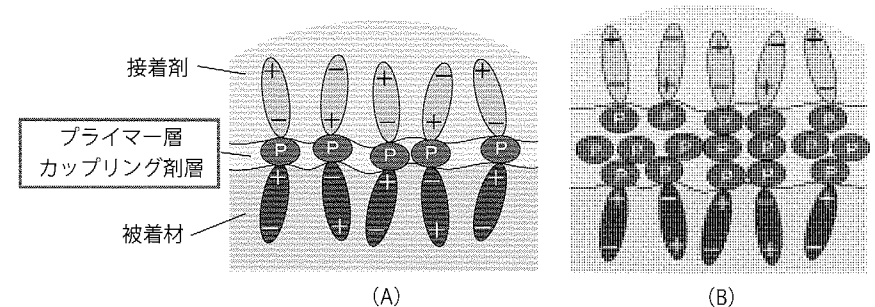
③プライマー類を薄く塗布する方法

では、プライマー類をごく少量塗布するにはどうすればよいでしょうか。特殊な塗布装置を用いると、作業は繁雑になります。また、塗布されたかどうかの判定にも苦勞します。簡単に微量の成分を塗布するためには、通常使用しているプライマー類を溶剤で10倍から30倍程度に希釈し、これまでと同様の方法で同様の量を塗布します。溶剤が乾燥すれば、プライマーの成分はこれまでの1/10～1/30しか表面には残りません。簡単ですが、大きな効果が得られます。

④粗面では付着量が多くなる

プラスチックした表面では凹凸ができているため、低粘度のプライマー類は染み込みやすく、凹部に溜まります。溶剤が乾燥すると凹部の底付近ではプライマーの成分が多くなり、接着性が低下します。ここでも希釈が重要です。

図3-1-9 プライマーを塗り過ぎるとプライマー間の結合が弱い



要点 ノート

プライマー類は、塗り過ぎてはけません。通常使用しているプライマー類を溶剤で10倍から30倍程度に希釈し、これまでと同様の方法で同様の量を塗布すれば、プライマーの成分はこれまでの1/10～1/30しか表面には残りません。

2 接着作業は特殊工程の作業

特殊工程の作業と管理

①特殊工程の作業

「接着」は、特殊工程に区分されている技術です。特殊工程の定義と特殊工程の技術の例を、表3-2-1に示しました。要するに、最終工程の検査では、性能・品質の良否を判断できないため、不良品を排除できない技術、工程、作業ということです。

②接着が特殊工程とされている理由

表3-2-2に、接着作業が終了した後に確認できない事項を列挙しました。すでに述べてきたように、接着の性能に影響を及ぼすが、どの程度の影響が及んでいるかを完成後に評価できない影響因子は、この表に記載した項目以外にも多くあります。「接着」が特殊工程の技術、作業であることはご理解いただけるでしょう。

③特殊工程で品質を確保するには

特殊工程の作業で品質を確保するためには、作業工程ごとに規定された許容範囲の条件内（公差内）で、作業を行うことに尽きます。作業者が、「この程度は大丈夫だろう」と規定された許容条件外の作業を行うと、後工程で不適切さを見つけることは困難になり、品質の悪いものができることとなります。

④品質を担保する記録

最終工程で性能・品質の検査ができないとなれば、作業工程ごとに規定された許容条件内の作業がなされたことを、担保していくしかありません。そのた

表3-2-1 「特殊工程」の定義と例

定義	その作業結果が、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
特殊工程の例	塗装、めっき、接着、圧着、圧接、溶接・ろう付け、はんだ付け、熱処理、アニール（焼鈍）、シンタリング（焼結）、鋳造・鍛造、など

めには、工程ごとの作業記録が重要になります。最終の検査工程では、作業ごとの記録をチェックし、すべての作業が許容条件の範囲内で行われたかどうかを確認します。出荷した製品が、フィールドで不良となった場合の原因究明にも、工程ごとの記録がきわめて重要です。

作業記録は、作業者の手書きでは効率が悪く、記録の信憑性も問題となるため、検査・計測機器を用いて自動記録することが必要です。工程記録には、時刻も同時に記録しなければなりません。時刻の記録により、不適切作業が見つかった海外の工場の例を紹介します。接着剤の塗布後、天秤に乗せて重量と計測時刻を自動記録していました。しかし、最終工程の記録検査で、夜勤時に実際のタクトタイムよりかなり短い間隔でデータが記録されていることがわかりました。毎回計測する手間を省いて、まとめ計測していたのです。時刻の記録がなければ、合格品として流出していたでしょう。

表3-2-2 接着で完成後に確認できない事項

分類	内容
全体	◆完成後に、非破壊で強度を評価することができない
前処理	◆完成後では、接着面が適切に処理されて、規定の接着性を有する状態であったかが確認できない
	◆完成後では、プライマーの塗布量が確認できない
接着剤	◆完成後では、接着面の処理やプライマー塗布後の放置時間や放置環境の影響を確認できない
	◆完成後では、接着剤が適切に計量・混合・脱泡されたかどうか確認できない
	◆完成後では、接着剤の混合開始から貼り合わせ・加圧終了までに要した時間の影響を確認できない
加圧・固定	◆完成後では、加圧が適性になされたかどうか確認できない
	◆完成後では、部品にスプリングバック力が発生しているかどうか確認できない
作業環境	◆完成後では、作業時の温度・湿度が適切であったかどうかの確認ができない

要点 ノート

接着は最終の検査工程で良否の判定ができない特殊工程の作業です。品質を確保するためには、作業工程ごとに規定された許容範囲の条件（公差）内で作業されたことを、記録に残すことが重要です。時刻の記録も重要です。

4 結果の確認と改善

工程能力指数による管理と改善

① 工程能力指数とは

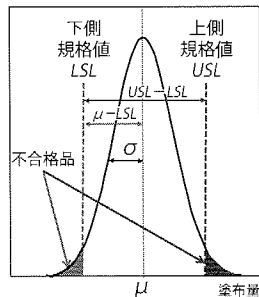
工程能力とは、定められた規格の限度（公差）内で、製品を生産できる能力のことと定義され、その評価を行う指標が工程能力指数で、一般に C_p と表示されます。図3-4-1に示すように、工程能力指数 C_p は一般に平均値 μ に対して、上側規格値（上限値） USL と下側規格値（下限値） LSL が規定され、 USL 以上・ LSL 以下のものは不合格とされます。工程能力指数 C_p は、 $(USL - LSL) / 6\sigma$ （ σ は標準偏差）で求めます。

接着強度など上側規格値を規定する必要がない場合は、下側規格値のみが規定され、 C_{pL} と表記され、 $(\mu - LSL) / 3\sigma$ （ μ は平値）で求めます。接着剤の混合開始から貼り合わせ・圧締終了までの時間のよう、下側規格値を規定する必要がない場合は上側規格値のみが規定され、 C_{pU} と表記され、 $(USL - \mu) / 3\sigma$ で求めます。 C_p 、 C_{pL} 、 C_{pU} は、1.33以上、1.50以上、1.67以上などと設定される場合が多く、数字が大きいほど品質要求が高く設定されていることとなります。

② 工程能力指数による工程管理

個々の製品については、各工程で許容条件の範囲内で作業がなされたかを最終工程で確認しますが、ある工程での作業が、常に許容条件の範囲内で行われているか、すなわち、工程の安定性の監視に工程能力指数は使われます。

図 3-4-1 工程能力指数

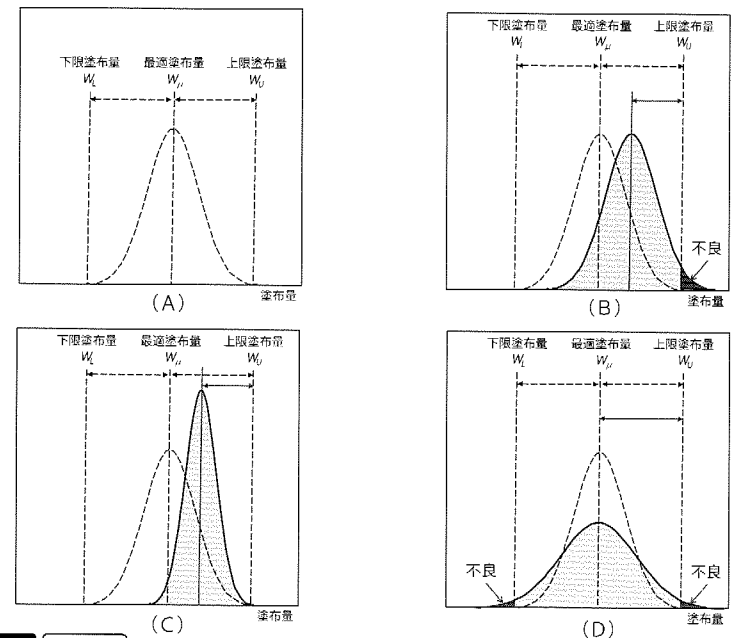


上下限が規定されている場合の工程能力指数
 $C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$
 下限値だけが規定されている場合の工程能力指数
 $C_{pL} = (\mu - LSL) / 3\sigma$
 上限値だけが規定されている場合の工程能力指数
 $C_{pU} = (USL - \mu) / 3\sigma$
 (μ は平均値、 σ は標準偏差)

③ 工程能力指数による工程の安定性の監視の例

図3-4-2は、接着剤の塗布量の管理の例です。塗布量は多すぎても少なすぎてもいけないので、(A)のように、両側で規定されます。実際の工程で塗布量を計測すると、(B)のようにばらつきの大きさは既定の条件と変わらなくても、平均値が多い方にずれると不良品が発生します。工程能力指数を上側だけで計算すると、既定値より小さくなっています。(C)のように、平均値が多い方にずれてもばらつきが小さくなっていて、上側の工程能力指数が既定値と同じか大きくなっていれば、不良品は生じません。(D)のように、平均値が既定値と変わらなくてもばらつきが大きくなると、工程能力指数は上側でも下側でも既定値より小さくなり、不良品が生じます。このように、計測した塗布量から工程能力指数の変化を監視することにより、不良の発生を検知することができます。既定値より工程能力指数が小さくなってきたら、平均値の変化やばらつきの増加などの原因を究明して、改善を図る必要があります。

図 3-4-2 工程能力指数による接着剤の塗布量管理の例



要点 ノート

各工程における作業が、規定の許容範囲（公差）内で適性に行われているかどうかを監視するのに、工程能力指数が有効です。直近の一定回数のデータで計算すれば、工程能力の変化をリアルタイムに求めることができます。

【索引】

数・英

2液型ウレタン系接着剤	134
2液型接着剤	132、134
5点塗布	138
90°はく離試験	70
180°はく離試験	70
Cv接着設計法	88
DMA	62
Fickの拡散の法則	110
Larson-Millerのマスターカーブ	108
SGA	64、72、91、92
SPR (セルフピアシングリベット)	22
SP値	99
tanδ	102
Tg	40、98
TMA	62
T形はく離試験	70、73
UVスケール	154、158
UVラベル	158
X字形塗布	138
Y字形塗布	138

あ

アーク溶接	20
合い具合	128
アウトガス	102
アクチベーター	66、136
アクリル系	90、92
アクリル系接着剤	64、66、72
圧縮	50
圧縮空気	158
圧縮力	70
圧縮	144
圧縮治具	116
圧力測定フィルム	158
後硬化	46、58
アニール	58
アルキメデス法	62
アロイ鋼板	105
アンカー効果	25
安全性	23、102
安全率	89、106
異種材	22、50
異種材接合	18、22
異種材接着	48
異種材料接着	48
意匠性	19
意匠部品	34
板厚	78
位置合わせ	52、54、116、118
位置決め	52、54

位置ずれ	34、54、58、86、142、145
位置精度	129、160
嫌気硬化	66
色見本	150
インライン作業	124
上側規格値	162
ウェルドボンディング	22
受入検査	124、156
薄板化	19
海島構造	72、80
ウレタン系	90、92
ウレタン系接着剤	64
エポキシ系	90、92
エポキシ系接着剤	64
エラストマー	64
エンジニアリング接着剤	66
応力解析	98
応力緩和	37、46、58、146
応力緩和性	80
応力集中	21、52、78、80、113、114
応力耐久性	96
応力分散	18、21
オートクレーブ	141
オープンタイム	123
屋外暴露	33
屋外暴露試験	110
汚染物	31
オゾン	28
オフガス	102
温度依存性	102
温度差	50
温度特性	76、95、98
温度分布	45、158
温度変化	40
温度むら	44、146

か

加圧	44、69、116、142、144、158
加圧力	44、98、141、142
カートリッジ	92
外觀検査	160
開封	156
界面	10、14
界面破壊	10、14、136
カウンタシンク加工	118
火災	28
火災処理	28
掻き取り	117、118、145
火気レス工法	18
拡散	24
攪拌	156

攪拌棒	132
下限強度	107
下限値	150、162
加工精度	18、154
重ね合わせせん断継手	80
重ね合わせ継手	80
重ね合わせ長さ	21、70、78、80、96
可視化	154
可視光	66
可使用時間	158
かしめ	54
化成皮膜	32
硬さ	72、94
カタログ	92、94、96、98、100
活性	32
活性化	26
活性剤	136
活性材料	66
カップリング剤	28、136
割裂	70
加熱硬化	146
加熱硬化後	38
加熱炉	147
ガラス	31、101
ガラス転移温度 (Tg)	38、76、98
感圧接着テープ	68
簡易てこ式ローラーはく離試験具	120
簡易破壊試験	120
簡易評価	100
環境条件	124
勸合接着	50、54、70
乾燥	110
乾燥空気	158
緩和	58
機械的結合	24
希釈	137
キッティング	154
機能設計	84
気泡	138
吸水膨潤応力	35、42
吸水率	42、110
吸着	32
吸着水	29
吸着層	28
教育・訓練	128、150
凝集破壊	10、14、101、107
凝集破壊率	10、14、95、129
強靱	72、76、78
強靱性	64、80
強度	94
強度設計	16、97
強度保持率	107
共有結合	70
極性	24、26
局部荷重	70、94、105、112
局部変形	115
許容条件	162

許容範囲	9、64、84、86、89、124、128、132、148、150、152
許容不良率	106
禁止事項	129
金属結合	70
櫛目ごて	139
口開き	44
区分的線形解析	62
組立治具	85
組立手順	128
クラック	33、52、101、129
クリアランス	50、54、154
クリーブ	22、68、95、108、116
クリーブ試験	96
クリーブ力	45、142
クリーブ劣化	143
繰返し疲労試験	14、21
繰返し疲労特性	22
形状	114
形状・寸法	96、101、110
計量	132
軽量化	18、19、22
計量・混合	132
欠陥	52、101、129、140、146
欠陥部	143
結晶水	104
結晶性	30
欠点	88
結露	156
ゲル化	36、56、58、61、126、153、156
ゲル化防止モード	126
ゲル状	36
嫌気性	90
嫌気性接着剤	66、136
検査	120、149
検査工程	160
検査・品質管理	87
現場作業	16
現場責任者	150
現場施工	18
硬化温度	40、146
硬化過程	36、60、62
硬化機構	66、98
硬化剤	68
硬化時間	66
硬化収縮	14、34、52、53
硬化収縮応力	15、35、36、38、40、46、58、60、147
硬化収縮率	54、56、62、102
硬化状態	120、160
硬化反応	98
硬化不良	66
硬化率	58
硬化炉	147
合金化亜鉛めっき鋼板	104
合金層	105
航空機	8、64

剛性	36、38、40、48、52、56、96、114
構造	52、63
構造設計	56、84
構造用接着剤	64、72
拘束	52
工程管理	87
工程管理表	150
工程記録	149
工程記録表	160
工程合理化	18
工程設計	84、126
工程内検査	85
工程能力指数	12、162
高品質接着	8、10、12、34、61、64、65、123
降伏強度	70
コスト	23
コストダウン	18、119
ゴム	72
コンカレント	85、86、89

さ

サーモスケール	158
サーモラベル	158
最適条件	9、84、86、89、124、128、132、150、152
再保管	156
材料管理	87
材料設計	84
材料定数	108
作業環境	123、152、158、160
作業管理	86
作業記録	149
作業記録検査表	161
作業工程	64
作業者	150
作業性	64、66
作業手順書	129
作業要領書	150
差し込み	117、119
差し込み構造	80
サブライン	124
サルベージ	87
酸化膜	30、32
残留応力	34
シアノアクリレート系接着剤	66
シール材	68
シール性	18
示温ラベル	158
紫外線	28、66
紫外線硬化型接着剤	58、60、62
仕掛品	126
治具	118、128、144
軸心	112
試作	89、100、128
下側規格値	162
自着	24

湿気硬化	68、90
湿気硬化型	92
湿気硬化型接着剤	147
湿潤乾燥	110
湿度	66、96、123、147、152
染み込み	98
充填剤	153
柔軟性	72
重量比	132
縮合反応	68
熟練技能	16
手混合	132、134
主剤	68
出荷検査表	156
循環式オープン	147
瞬間接着剤	66、90
準構造用接着剤	64
昇温カーブ	158
昇温速度	146、147
使用温度範囲	48、95
使用可能期間	156
消去法	88、90
衝撃	70、112
衝撃エネルギー	72
衝撃強度	72、74、76
衝撃力	64
上限値	150、162
照射強度	147、158
冗長性	23、113
照度	58
照度計	154
初期流動管理	160
触媒	136
徐冷	58
シランカップリング剤	28
シリコン系	90
シリコン系接着剤	68
シリンジ	134
真空含浸法	141
親水性	31
浸透性	98
浸透接着	66
信頼性	8、11、23
水酸化膜	30
水蒸気	68
水蒸気圧	123
水素結合	28
水分	14、15、66、96、108、110、134
水分劣化	97
スカーフ継手	114
隙間	116
隙間埋め	74
隙間充填性	18、98
スナップフィット	22
スプリングバック	145
スプリングバック力	35、44、116、142
スパーサー	52

スバック	129
スポット溶接	20、22、108
隅肉接着	141
隅肉接着法	54
スリット	116
寸法	63
寸法設計	110
生産移行	150
生産性	23
脆性部品	34
製造日	156
精度	154
性能評価	100
製品検査表	160
精密機器	8
精密部品	34、54
制約条件	88
設計許容強度	106
接触	66
接触角	27、30
接着管理	152
接着管理技術	86、89
接着強度	70
接着強度の実力値	106
接着強度保持率	110
接着欠陥	44、51
接着工程	86
接着剤	156、158
接着剤選定チェックリスト	88
接着剤層の厚さ	142
接着剤の選定	16、92
接着剤の選定チェックリスト	90
接着剤メーカー	90、92、100
接着作業	64、158
接着設計	86、122、132、150、152
接着設計技術	84、89
接着層厚さ	50、52、154
接着層の厚さ	74、78、98、129
接着部周辺の長さ	110
接着不良	90
接着不良品	86
接着プロセス	98
接着前処理	154
接着面積	96、110
接着劣化	32
設備	152
設備管理	87
設備設計	84、126
セラミックス	101
センター出し	145
せん断	70、112
せん断応力	78
せん断強度	72、74、76、78
せん断強度主体	94
せん断試験片	96
せん断力	64、70
線熱膨張係数	42

線膨張係数	34、38、40、46、48、50、52、62、96、98、102、115
相互拡散	24
相対湿度	96、147
想定外	113、150
速度依存性	76
粗面	137
粗面化	32
反り	60
損失係数	102

た

耐環境性	32
耐寒性	68
大気圧プラズマ照射	28
大気圧プラズマ処理	153、154
耐久性	15、16、32、34、54、64、66、89、96
耐湿性	32、96、110
耐水性	96、110
耐水性試験	96
体積収縮	36、38、54
体積比	132
体積膨張	42
耐熱性	68
耐用年数	106
対流式オープン	147
耐力	80
脱泡	134、158
多品種少量生産	144
タミーサンプル	101、120、158、160
タミー部品	147
垂れ	98
短時間	146
短時間硬化	58、146
単純重ね合わせ引張りせん断試験	70、78
弾性接着剤	68
弾性体	46
収縮率	56
弾性率	34、36、38、40、54、56、58、62、72、76、78、96、98、102
短波長紫外線	126、153
短波長紫外線照射	28
短波長紫外線照射処理	154
チェックリスト	88、92、122
力の流れ	114
チキソトロピック指数	98
チキソトロピック性	98
治工具	87、152、160
チタネート系カップリング剤	28
チューブ	92
突き合わせ	112
突き合わせ引張り接着継手	80
継手効率	80
詰め替え	92
低圧水銀ランプ	126、154

低温 51、105
 低歪み接合 18
 ディラトメーター法 62
 データベース 102
 データロガー 153、156、158
 滴下法 30
 透湿性 68
 投錨効果 25
 特殊工程 8、148、160
 特性要因図 122
 度数分布 12
 塗装膜 34
 突起 116
 塗布 138、140、158
 塗布位置 54
 塗布装置 92、98
 塗布パターン 138
 塗布量 54、136、142、158、163
 トラブル 126
 塗料 104

な

内部応力 34、38、40、42、44、46、48、
 50、52、54、56、58、60、62、68、74、
 146、154
 内部応力測定装置 62
 内部応力評価装置 60
 内部破壊 10、106
 内部破壊係数 107
 難接着性材料 68
 難接着性プラスチック 66
 肉盛り性 98
 二度加圧 142
 認定試験 151
 抜取り 120、160
 濡れ指数 154
 濡れ指数標準液 30
 濡れ性チェック 154
 濡れ張力試験 30
 濡れ張力試験液 154
 濡れ張力試験用混合液 30
 なじり 70
 熱応力14、33、35、40、48、60、62、96、
 115
 熱収縮 52
 熱収縮応力14、15、35、38、40、46、58、
 61
 熱真空環境 102
 熱電対 147、158
 熱分布測定フィルム 158
 熱変形 48
 熱歪み 16、18
 熱劣化 32、96
 粘性 142
 粘性体 46
 粘性の性質 76、108
 粘弾性 46、68

粘弾性体 46、72、74、76
 粘弾性特性 102
 粘着テープ 68、102
 粘度 140、156
 伸び 50、72、74、108
 糊しろ 110

は

配合比 129
 パイプ 144
 バイメタル法 60
 破壊 116
 破壊試験 101
 破壊状態 95
 はく離 70、112
 はく離強度 72、74、76、95
 はく離試験 70
 はく離力 64、78
 はじき 30
 破断 108
 破断荷重 78
 破断強度 106、116
 破断伸び 98
 破断伸び率 42、44、74、102
 撥水性 68
 バッチ処理 124
 発熱 134
 発泡 64、123、134、152
 ハニカム 144
 はみ出し 54、118、139
 はみ出し部 114、120
 はみ出し量 160
 ばらつき 8、10、12、14、52、106
 ばらつき係数 107
 バリ 154
 貼り合わせ 138
 貼り間違い 118
 バンドかしめ 145
 反応機構 64、68
 反応熱 134
 ヒートショック試験 14
 光硬化 147
 光硬化型 90
 光硬化性接着剤 66
 非混合 64
 ビジュアル 150
 比重 132
 被着材料 10、26
 被着材料表面 28
 引張り 114
 引張り強度 72、74、76
 引張りせん断試験 70
 引張り速度 74、76
 引張り力 50、70、112
 非破壊 86、120
 評価方法 70
 標準偏差 12

表面エネルギー 30
 表面改質 15、26、28、31、32、124、
 126、153、154
 表面処理 15、26、31、32
 表面張力26、27、30、32、99、124、154
 表面濡れ指数 124
 疲労強度 21、22
 疲労試験 14、96
 疲労特性 21
 品質 8、119、148
 品質設計 84
 フィレット 114
 フェノール系接着剤 64
 付加重合 68
 不活性材料 66、136
 複合効果 23
 複合接着接合法 22、113、117、145
 複合劣化 108
 副生成物 68
 物性 115
 物性データ 102
 フッ素樹脂 66
 歩留まり 119
 部品管理 87、154
 部品精度 117
 プライマー 26、28、66、136、140、152
 プラスチック 42
 プラスチックス 30
 ブラスト 32、137
 ブラズマ 28
 ブラズマインジケータ 154
 不良品 148、163
 不良率 8
 プレスケール 158
 不連続性 114
 分極 24
 分子間力 24、26、36、70、99
 分離 156
 平均値 162
 平面度 52
 併用 22
 ペール缶 92
 変形 34、36、38、44、48、54、56、58、
 62、63、96、101、114、129、146、
 147、154
 変形解析 98
 変色 101、129
 偏心 54、113
 変成シリコーン 90
 変成シリコーン系接着剤 68
 変動係数 12、107
 ポカヨケ 119
 保管 156
 保管期限 156
 保持力 95
 ポリエチレン 66、68
 ポリプロピレン 66、68

ポリマーアロイ 72
 ボルト・ナット 20

ま

前処理 154
 曲がり 78
 曲げ 70
 マスキングテープ 119
 未硬化部 101、129
 水切り試験 30
 水酸化膜 32
 密着性 104
 メカニカルクリンチング 22
 メカニズム 99
 めっき 32、34
 めっき鋼板 104
 めっき層 105
 めっき剥離 104
 面接合 18、70、112
 モーメント 114、117

や

焼付け塗装 104、116、142
 有限要素法 62、98
 有資格者作業 151
 歪み 56、58、129、146
 歪み速度 74
 歪み量 74
 油面接着性 64
 溶解度パラメーター 99
 揺動性 98

ら

ラジカル連鎖反応 66
 ランク分け 154
 リアルタイム 163
 リークパス 55、145
 リーク不良 55
 リベット 20、22、108
 流動性 26
 流動抵抗 142
 両面テープ 90、95
 リン酸塩 104
 リン酸塩系処理剤 28
 冷却速度 146
 冷蔵庫保管 156
 冷熱繰返し 40
 冷熱サイクル試験 96
 冷熱サイクル試験 14
 レオメーター 62
 劣化 32、96、106、116、143
 連動停止 126
 ロット番号 156、158

著者略歴

原賀康介 (はらが こうすけ)

(株)原賀接着技術コンサルタント 専務取締役 首席コンサルタント 工学博士
日本接着学会構造接着研究会会長補佐、接着適用技術者養成講座講座長

専門：接着技術（特に構造接着と接着信頼性保証技術）

1973年、京都大学工学部工業化学科卒業。同年、三菱電機株式会社入社後は、生産技術研究所、材料研究所、先端技術総合研究所に勤務。以来40年間にわたって一貫して接着接合技術の研究・開発に従事。2012年3月、(株)原賀接着技術コンサルタントを設立し、各種企業における接着課題の解決へのアドバイスや社員教育などを行っている。

開発した技術

接着耐久性評価・寿命予測技術

接着強度の統計的扱いによる高信頼性接着の必要条件決定法

耐用年数経過後の安全率の定量化法

接着の設計基準の作成

原賀式「CV接着設計法」

複合接着接合技術（ウェルドボンディング、リベットボンディング等）

ハニカム構造体の簡易接着組立技術

SGAの高性能化（低歪み、焼付け塗装耐熱性、高温強度・耐ヒートサイクル性、難燃性ほか）

内部応力の評価技術と低減法

被着材表面の接着性向上技術

精密部品の低歪み接着技術

塗装鋼板の接着技術など

受賞

1989年 日本接着学会技術賞

1998年 日本電機工業会技術功労賞

2003年 日本接着学会学会賞

2010年 日本接着学会功績賞

著書

「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—」、日刊工業新聞社、(2013年)

「高信頼性接着の実務—事例と信頼性の考え方—」、日刊工業新聞社、(2013年)

「自動車軽量化のための接着接合入門」(佐藤千明氏共著)、日刊工業新聞社、(2015年)

その他共著書籍 31冊

NDC 579.1

わかる！使える！接着入門

〈基礎知識〉〈段取り〉〈実作業〉

2018年3月30日 初版1刷発行

定価はカバーに表示してあります。

◎著者	原賀 康介
発行者	井水 治博
発行所	日刊工業新聞社 〒103-8548 東京都中央区日本橋小網町14番1号
	書籍編集部 電話 03-5644-7490
	販売・管理部 電話 03-5644-7410 FAX 03-5644-7400
	URL http://pub.nikkan.co.jp/
	e-mail info@media.nikkan.co.jp
	振替口座 00190-2-186076

印刷・製本 新日本印刷(株)

2018 Printed in Japan 落丁・乱丁本はお取り替えいたします。

ISBN 978-4-526-07823-1 C3043

本書の無断複写は、著作権法上の例外を除き、禁じられています。

今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしいトヨタ式作業安全の本

石川君雄 著
A5判 160ページ 定価：本体1,500円+税

「7つのムダ」排除 次なる一手 IoTを上手に使うってカイゼン指南

山田浩貞 著
A5判 184ページ 定価：本体2,200円+税

ポカミス「ゼロ」徹底対策ガイド モラルアップとAIですぐできる、すぐ変わる

中崎勝 著
A5判 184ページ 定価：本体2,000円+税

金を掛けずに知恵を出す からくり改善事例集 Part3

公益社団法人日本プラントメンテナンス協会 編
B5判 180ページ 定価：本体2,300円+税

新 まるごと 5S 展開大事典

中部産業連盟 編
B5判 160ページ 定価：本体2,000円+税

誰も教えてくれない「工場の損益管理」の疑問 そのカイゼン活動で儲けが出ていますか？

本間峰一 著
A5判 184ページ 定価：本体1,800円+税

IEパワーアップ選書 現場が人を育てる

日本インダストリアル・エンジニアリング協会 編
河野宏和・篠田心治・斎藤文 編著
A5判 200ページ 定価：本体2,000円+税

日刊工業新聞社出版局販売・管理部

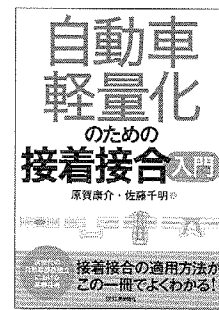
〒103-8548 東京都中央区日本橋小網町14-1
☎03-5644-7410 FAX 03-5644-7400



自動車軽量化のための 接着接合入門

原賀 康介・佐藤 千明 著 A5判/216頁
定価：本体2,500円+税 ISBN 978-4-526-07364-9

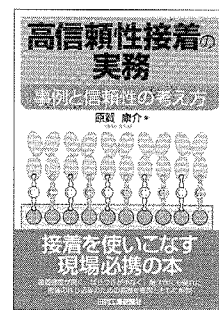
溶接や締結などと比べてあまり知られていない接着を、より理解し活用してもらうことを主眼に置いて解説した。軽量化に貢献する組立方法の中での接着接合法の位置づけを明確にしつつ、接合機能と生産性、コストを並立できる接着剤の活用法と工法をやさしく指南する。



高信頼性接着の実務

原賀 康介 著 A5判/240頁
定価：本体2,400円+税 ISBN 978-4-526-07000-6

接着接合は部品組立における重要な要素技術だが、安易に使用される例が多い。ばらつきが少なく、耐久性に優れた高強度接着を行うには各工程でのつくり込みが不可欠である。本書は接着不良を未然に防ぎ、高信頼性接着を行う基礎と現場で必要とされる急所を解説する。



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 A5判/272頁
定価：本体2,600円+税 ISBN 978-4-526-07156-0

材料設計・構造設計技術者向けに、他の接合方法と比べて「接着」を検討するための必要十分な知識と要点を簡潔にまとめた。接着剤の選定から接着構造、接着強度と製品信頼性、寿命評価法、設計基準と安全率評価などの勘どころを提示。接着設計のつくり込み技術を説く。

