



電気・電子/光学部品組み立てにおける 接着設計技術(2)

原賀康介*

2. 接着設計技術の要素技術

2.3 材料設計

接着特性や耐久性、施工性は接着剤自体の性能に関わる場所が大きい。それだけに接着剤の選定は重要なポイントであるが、接着に関与している材料は接着剤だけではなく、被着材料も重要であることを忘れてはならない。被着材料に関しては、材料の種類の影響はもちろん、同種のものであっても表面状態の違いによる影響は大きい。接着特性や耐久性に問題がある場合、被着材料の種類の変更や簡単な表面処理で飛躍的に改良されることは多い。また、被着材料と接着剤の間に介在して接着性を改善するプライマーやカップリング剤も重要な接着材料である。

2.3.1 接着剤

接着接合された部品の性能に影響を及ぼす接着剤の物性としては、ガラス転移温度、弾性率、膨張係数、硬化収縮率などが代表的なものである。これらの物性の違いは、図13に示したように、組み立てられた部品のひずみや特性、位置精度などに大きく影響する。

接着剤は一般に、硬い接着剤ではせん断強度は強いがはく離（ピール）や衝撃に弱く、柔らかい接着剤ではせん断強度は低いがはく離や衝撃には強い傾向があり、1種類の試験方法では判断できないため、接着剤の選定の際に考慮が必要であ

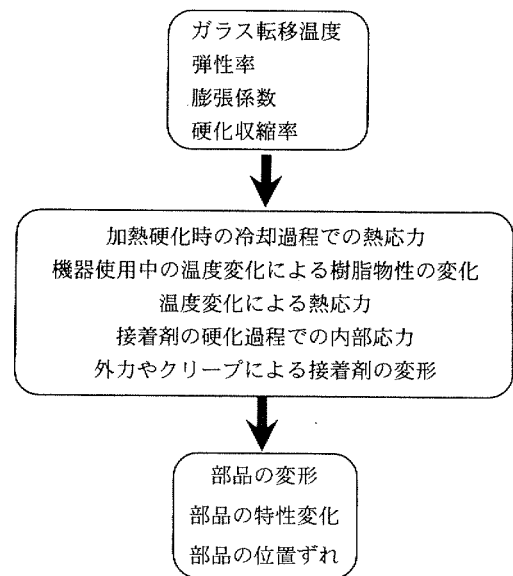


図13 接着接合された部品の性能に影響を及ぼす接着剤の物性

* Kosuke Haraga 三菱電機株 先端技術総合研究所 環境・分析評価技術部 主席研究員

る。

接着剤の選定は、要求特性やプロセスを考慮して可能性が高そうな種類を経験的に絞り込み、評価試験により最終選定を行うのが一般的であるが、CAE (Computer Aided Engineering) 解析を用いて樹脂の最適物性をシミュレーションで絞り込むことにより、評価試験に要する時間やコストを削減することが可能となる。特に、CAE解析の利点は、特定の物性値のみを変化させた架空の材料を作り出せることである⁸⁾。たとえば、熱応力の低い接着剤を開発する場合には線膨張係数とヤング率が影響する。ここで、どちらの因子が支配的か、どの程度の物性値にすればよいのかは、CAE解析ではコンピューター上で物性値を変えるだけで簡単にわかる。物性を変えた接着剤を調製して実験的に評価しようとしても、単独の物性値のみを変化させた材料を作ることは至難である。

2.3.2 被着材料と表面状態

表1⁹⁾は、各種の亜鉛めっき鋼板をウレタン系接着剤で接着した場合のはく離接着強度の比較である。この表から、一概に亜鉛めっき鋼板といっても接着性には著しい差があることがわかる。また、同一の表面処理と表示されていてもメーカーにより接着性には大きな差がある。表2は、普通クロメート処理電気亜鉛めっき鋼板のロットによる再現性の比較である。この結果より、メーカー、品種が同一であってもロットにより接着性には著

表2 普通クロメート処理電気亜鉛めっき鋼板のロットによる再現性の比較

試験回数	せん断強度 (kN/cm ²)		はく離強度 (N/25mm)	
	25℃	60℃	25℃	-20℃
1	1.53	1.17	147	157
2	1.61	0.49	108	118
3	0.40	0.19		

表1 各種の亜鉛めっき鋼板の構造用ウレタン系接着剤によるはく離強度の比較

めっきの種類	めっき後処理	メーカー	はく離接着強度 (N/25mm) と破壊状態	
			+25℃	-20℃
溶融亜鉛	普通クロメート	A	196 界面	78 界面
		B	167 界面	0 界面
		F	108 界面	0 界面+P
	特殊クロメート	F	196 界面+凝集	59 界面+P
電気亜鉛	無処理	F	0 界面	0 界面
		D	0 界面	0 界面
	普通クロメート	D	49 界面	0 界面
		F	108 界面+凝集	118 凝集+界面
	リン酸塩処理	F	196 凝集	206 凝集
	樹脂コーティング	F	157 凝集+界面	147 界面+凝集
複合コーティング	D	0 界面	0 界面	
Fe-Znアロイ化	熱処理	E	216 界面+凝集	0 全面P
	特殊クロメート	F	0 全面P	0 全面P
合金	特殊処理	E	294 凝集	275 凝集

P: めっきと素材鋼板間での破壊

しい差があることがわかる。表3は、鋼板および亜鉛めっき鋼板を2液型アクリル系接着剤で接着したのち、焼き付け塗装を行った場合の短時間高温耐熱性を示したものである。この結果より、熱劣化を起こさない耐熱限界温度は、鋼板素材面の接着では210℃であるが、リン酸塩被膜処理がなされた亜鉛めっき鋼板では130℃と低いことがわかる。これは図14に示したように、リン酸塩被膜自体の結晶水の脱離が生じて水蒸気となり、水蒸気の圧力により界面での結合が破壊されるためと考えられている。亜鉛めっき鋼板は種類が多く耐熱限界温度がそれぞれ異なるので、事前のチェックが重要である。

図15¹⁰⁾は、各種の金属をエポキシ系接着剤で

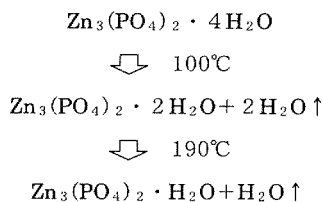


図14 リン酸塩皮膜の加熱による結晶水の脱離

接着し、60℃90%RH雰囲気中に30日間曝露した場合の、初期強度に対する引張りせん断強度の保持率であるが、金属の種類により耐久性が大きく異なることがわかる。

図16¹⁰⁾は、各種の表面処理を行った銅板をエポキシ系接着剤で接着し、80℃90%RH雰囲気中に曝露した場合の引張りせん断強度の経時変化で

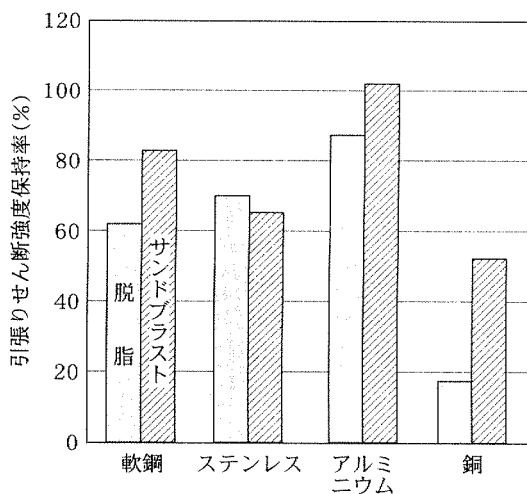


図15 各種金属の耐湿性の比較

表3 鋼板および亜鉛めっき鋼板における塗料焼き付け温度の影響と耐熱限界温度

被着材料	焼き付け温度 (°C)	焼き付け時間 (分)	接着強度保持率 (%)		耐熱限界温度 (°C)
			せん断強度	はく離強度	
鋼板 (素材面)	210	10	148	—	210 (せん断)
	230	10	62	—	
	250	10	64	—	
電気亜鉛 めっき鋼板 (リン酸塩皮 膜処理品)	130	60	—	100	130
	150	60	103	49	
	180	60	69	—	
	200	60	67	—	
合金化亜鉛 めっき鋼板 (無処理・塗 油品)	150	60	111	118	180
	180	60	—	117	
	200	60	100	55	
	220	60	83	—	

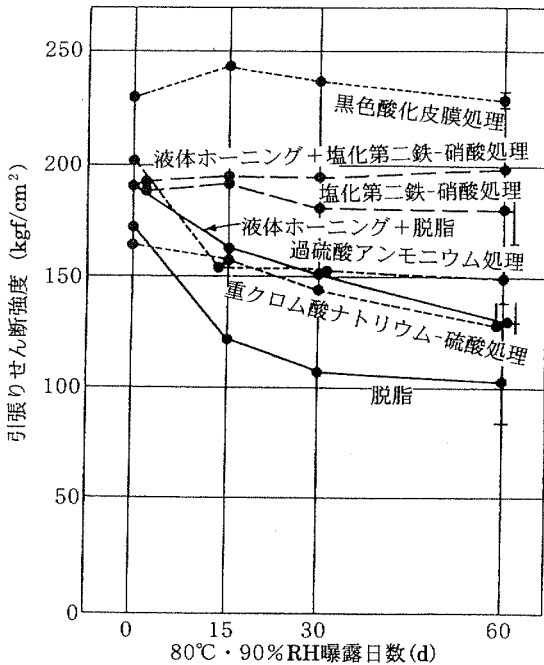


図16 銅板接着の耐湿性に及ぼす表面処理方法の影響

あるが、表面処理により強度、耐久性が大きく異なることがわかる。

表4⁽¹¹⁾は、メーカーやロットが異なるステンレス鋼板(SUS304)をアクリル系接着剤で接着した場合のはく離強度の比較であるが、同種材といどもメーカーやロットが異なると接着強度は大きく異なることがわかる。なお、表4にはプライマーF100(含水有機リン酸化合物系:電気化学工業製)を塗布した場合の接着強度も示されているが、プライマー処理によりいずれの材料も高い接着強度が得られるようになることがわかる。図17⁽¹²⁾にはプライマー塗布量と接着強度、破壊状態の関係を示したが、プライマーやカップリング剤は塗布量により接着性能が変化する。安定して少量を塗布するためには、濃度をできるだけ薄くしておき、スプレーやはけなどの簡易な方法で塗布しても少量しか付着しないようにしておくな

表4 メーカーやロットが異なるステンレス鋼板(SUS304)のはく離強度とプライマーの効果

SUS304	はく離強度 (kgf/25mm)	
	未処理	F-100処理
A製作所購入品	3.7(界面破壊)	24.0(凝集破壊)
B製作所購入品	10.5(界面破壊)	22.2(凝集破壊)
C製作所購入品	8.3(界面破壊)	23.6(凝集破壊)
D製作所購入品	15.2(凝集+界面)	22.7(凝集破壊)
E製作所購入品	22.6(凝集破壊)	22.9(凝集破壊)

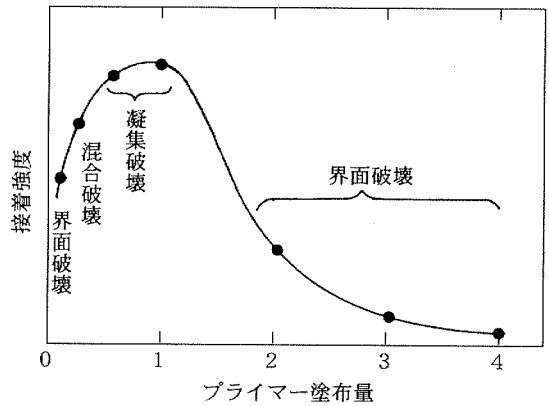


図17 プライマー塗布量と接着強度、破壊状態の関係

どの対策が必要である。

プラスチックの接着性は、プラスチックの極性と結晶性により左右される。表5にエンジニアリングプラスチックの種類と極性、結晶性の関係を示した。極性が低く結晶性が高いほど接着性に劣る。最も接着しにくいテフロンは結晶性で最も極性の低い材料である。無極性のプラスチックを接着する場合には表面処理が必要であり、低圧水銀ランプによる短波長紫外線照射やコロナ放電処理、プラズマ処理などが行われている。図18⁽¹³⁾、図19⁽¹⁴⁾は、PPS(ポリフェニレンサルファイド)[®]、PBT(ポリブチレンテレフタレート)に低圧水銀ランプによる短波長紫外線照射を行った場

表5 エンジニアリングプラスチックの種類と極性, 結晶性

汎用 エンブラ	結晶性		
	ポリアミド	PA	
	ポリアセタール	POM	
	ポリブチレンテレフタレート	PBT	
	ガラス繊維強度ポリエチレンテレフタレート	GF-PET	
	超高分子量ポリエチレン	UHPE	
汎用 エンブラ	非晶性		
	ポリカーボネート	PC	
汎用 エンブラ	変性ポリフェニレンエーテル		
		PPE	
スーパー エンブラ	結晶性		
	ポリフェニレンサルファイド	PPS	
	ポリエーテルエーテルケトン	PEEK	
	液晶ポリマー	LCP	
	スーパー エンブラ	非晶性	
		ポリサルフォン	PSF
ポリエーテルサルフォン		PES	
ポリアリレート (Uポリマー)		PAR	
ポリアミドイミド		PAI	
ポリエーテルアミド		PEI	
	ポリイミド	PI	

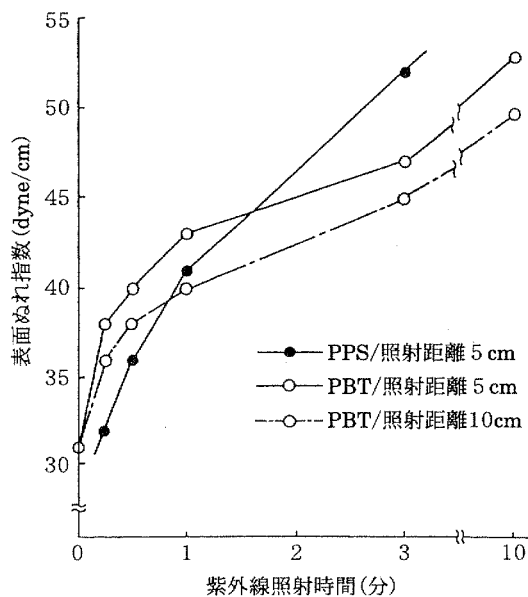


図18 PPS, PBTにおける短波長紫外線照射による表面ぬれ指数の変化

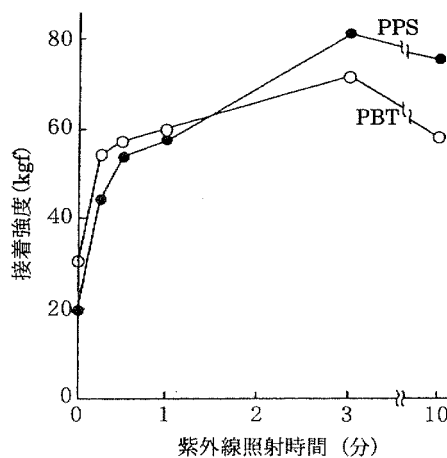


図19 PPS, PBTにおける短波長紫外線照射による接着強度の変化

合の表面ぬれ指数と接着強度の変化である。照射したものは表面ぬれ指数が増大し、プラスチック自体が材料破壊するほど接着強度が向上していることがわかる。

2.3.3 材料設計の諸因子と凝集破壊率

材料設計においては、接着特性に影響を及ぼす諸因子をすべて洗い出して、各因子に対する許容範囲ができるだけ広い材料や表面処理を選定することが、以下のプロセス設計や設備設計、品質管理を容易にするポイントとなる。たとえば、接着剤については被着材料の種類や表面状態への鈍感さ（油面接着性接着剤など）、配合比の許容範囲の広さ、混合の程度の影響の小ささ、接着剤の混合後のポットライフの長さ、作業環境（温度、湿度）への鈍感さなどの因子があり、被着材料につ

いてはメーカーやロット、保管状態の違いによる影響の少なさなどの因子がある。また、表面処理については処理時間、温度、処理の作業環境（温度、湿度）、処理後の放置時間・環境の影響の少なさなどや、プライマーについては塗布量、塗布作業環境（温度、湿度）、塗布後の放置時間・環境の影響の少なさなどの因子がある。

ばらつきが少なく信頼性の高い接着を行う基本は、凝集破壊率が高くなるように、接着剤、被着材料、表面状態・表面処理を最適化することである。図20は、2液型アクリル系接着剤によるステンレス鋼板のはく離接着強度と凝集破壊率のばらつきを示したものである。ステンレス鋼板への紫外線照射により凝集破壊率が大きく向上していることがわかる。その結果、表6に示すように、

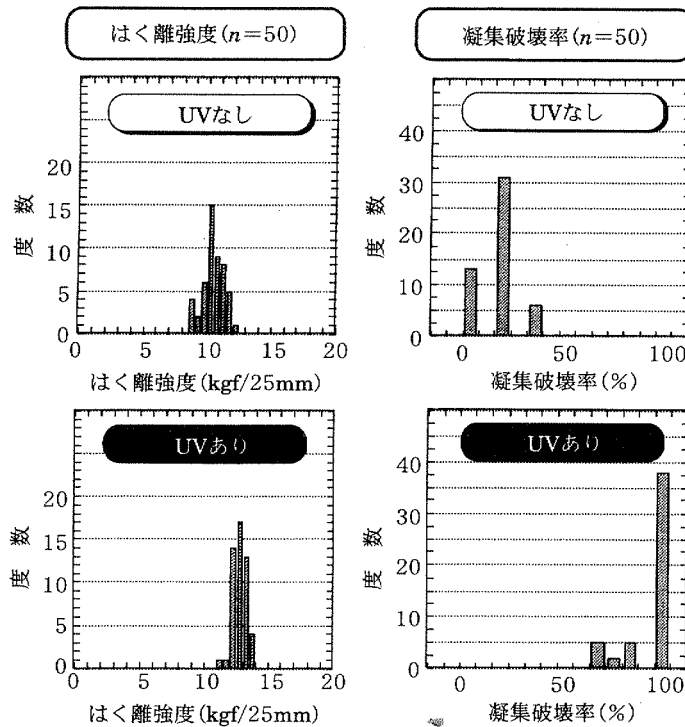


図20 ステンレス鋼板のUV処理の有無とはく離接着強度、凝集破壊率

表6 ステンレス鋼板のUV処理によるAE発生特性の向上

UV照射	サンプル	AE発生開始強度比	破断までのAE総発生回数
なし	1	7%	25回
	2	8%	17回
	3	31%	117回
	平均	15%	53回
あり	1	51%	19回
	2	76%	11回
	3	100%	1回
	平均	76%	10回

AE発生開始強度比=AE発生開始強度/破断強度

アコースティックエミッションで調べたAE発生開始強度および破断までのAE発生回数は大きく改善されていることがわかる。また、図21に示すように、疲労特性にも大きな差が生じている。

2.4 プロセス設計

プロセス設計は、製品を高性能に効率よく製造するための工程設計であり、プロセス設計を容易にするためには、材料設計や構造設計の段階で接着特性に影響を及ぼす諸因子を洗い出して、各因子の影響度を把握して、許容範囲ができるだけ広くなるような材料、構造を採用しておくことが重要である。

2.4.1 接着の前後工程

接着工程を設計する場合は、接着工程だけでなく、接着の前後工程を十分に考慮して決めることが重要である。

接着より前の工程でシリコーン離型剤が使用されていたり、接着の後の工程で高温や溶剤・薬品などにさらされたり、大きな力が加わって接着部にダメージを与える工程がある場合には、前後の工程を改善したり、接着工程を前や後ろにまわすことなどを検討しなければならない。また、シリ

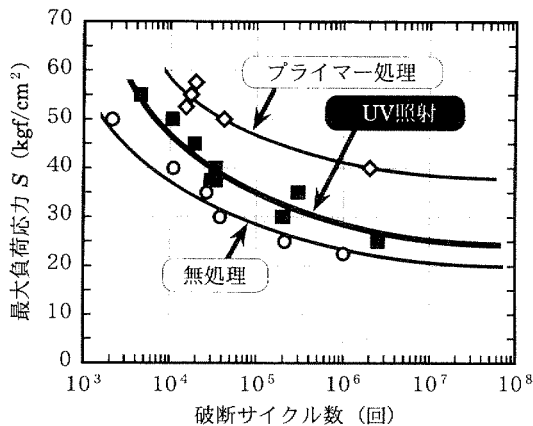


図21 ステンレス鋼板のプライマー処理、UV処理による疲労特性の向上

コーン系接着剤を使用している場合は後工程の塗装ラインに影響を及ぼすことがあるので、後工程との関連も考慮すべきである。

接着部の近傍に使用されている材料との関係も考慮が必要である。たとえば、付加型シリコーン系接着剤は接触している物質によっては硬化が阻害されることがある。硬化阻害物質としては、有機ゴム、軟質塩ビ、アミン硬化系のエポキシ樹脂、ウレタン樹脂のイソシアネート類、縮合タイプのシリコーン樹脂、一部の粘着剤・接着剤・塗料、ワックス類、はんだフラックスなどがある。硬化阻害が起こる場合は、材料設計段階で硬化阻害物質を他の材料に変更したり、接着硬化の後で取り付けることなどを検討しなければならない。

2.4.2 接着工程の短時間化

接着プロセスでの大きな問題は、接着剤が硬化するまでの仮固定の方法と短時間硬化の方法、接着剤の塗布から貼り合わせまでの時間の短縮化である。

仮固定については、固定治具が後工程の作業の障害にならないように構造設計の段階で治具を

含めて検討しておく必要がある。瞬間接着剤や紫外線硬化型接着剤、両面テープなどを固定治具の代わりに使用することもある。また、図5に示した例のように、リベットを併用したり、ウェルドボンディングのように接着剤とスポット溶接を併用して治工具を廃止することも効果的である。

硬化時間を短縮するために、加熱硬化型接着剤では硬化温度を高くしたり、紫外線硬化型接着剤では紫外線照射強度を強くすることがある。図22⁵⁾は、図8に示したミラーを紫外線硬化型接着剤で接着する場合の、紫外線照射強度とミラーのひずみ量の関係を示したものである。この結果より、急速硬化は内部応力を増加させて部品の機能を低下させることがわかる。紫外線照射時に熱が加わるとさらにひずみが増加している。なお、高周波加熱のような急激な加熱は、接着剤や被着材料中の水分を蒸発させて接着層にポイドを生じさせたりはく離を引き起こすこともある。

2.4.3 季節の影響

水分と反応して硬化する瞬間接着剤（シアノアクリレート系接着剤）や縮合型シリコン系接着

剤、ウレタン系接着剤などは、季節による空気中の湿度変化の影響を受けて硬化時間が変化する。夏季の高湿度環境で硬化時間を決めた場合、冬季の低湿度時には硬化時間内で硬化しない事態となる。湿度と硬化時間の関係を事前に把握して硬化時間を設定するか、冬季は加湿器を使用するなどの対策が必要である。

エポキシ系接着剤やアクリル系接着剤のような2液反応室温硬化型接着剤では、接着剤の混合から貼り合わせ終了までの許容時間（可使用時間）は作業温度により変化する。可使用時間を超えると接着特性は大きく低下する。図23は、2液型アクリル系接着剤の作業雰囲気温度と可使用時間の関係の例である。2液型アクリル系接着剤は、混合しなくてもA剤とB剤を重ねて塗布して使用できる。この場合の可使用時間は混合の場合より長くなるので有利である。

接着剤の保管条件も十分に検討しておく必要がある。たとえば、瞬間接着剤（シアノアクリレート系接着剤）では保管期限が長くなると硬化時間が大きく延びてくる。また、粘度上昇による塗布作業性の変化や、硬化過程での垂れの増大などを

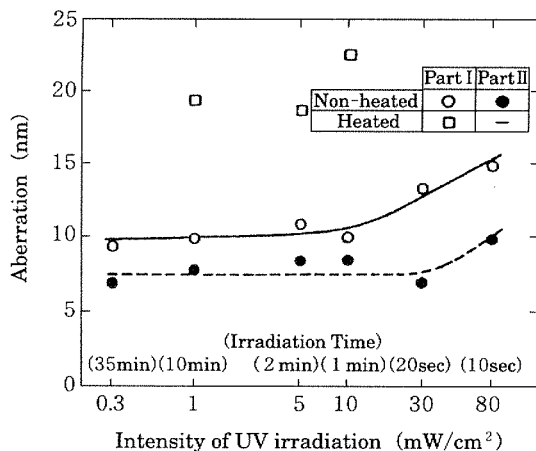


図22 ミラーを紫外線硬化型接着剤で接着する場合の紫外線照射強度とミラーのひずみ量の関係

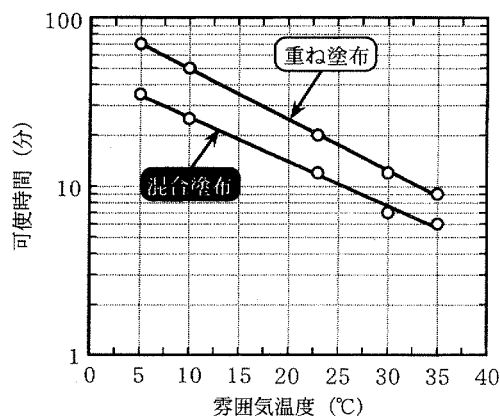


図23 2液型アクリル系接着剤の作業雰囲気温度と可使用時間の関係の例

起こす接着剤もある。

2.4.4 プロセス管理

接着は、組み立て後の検査で良否の判定を行うことが困難であり、各プロセスごとの管理や検査が重要である。そこで、各プロセスごとに各種の検査装置が用いられているが、人間の目でなければ確認できない検査も多い。このため、ポイントとなるプロセスは検査を兼ねて、あえて人手作業にするのが効果的な場合もある。

2.5 設備設計

設備設計は、材料設計、構造設計、プロセス設計で検討した内容を実現するために必要な設備の設計である。接着に関する設備としては、部品の前処理設備、接着剤の計量・混合・塗布装置、部品の貼り合わせ装置、仮固定の設備、接着剤の硬化装置などがある。また、使用する接着剤の種類や、接着剤の塗布から部品の貼り合わせまでの時間的制約によっては、接着作業環境の温度・湿度のコントロールが必要である。さらに、接着剤やプライマーの種類や計量・混合・塗布装置の洗浄に使用する溶剤によっては、設備を防爆構造としたり、換気設備が必要となる。接着剤やプライマーの保管用の冷蔵庫や冷凍庫が必要な場合もある。

これらの設備においては、安定した品質の確保や設備のメンテナンス時間の削減の点から、材料設計、構造設計、プロセス設計で決定された許容範囲につねに収まるような設備設計が必要である。

2.5.1 塗布装置

エポキシ系接着剤のような2液型接着剤の計量・混合・塗布装置においては、ポンプの磨耗やチューブの詰まり、温度変化などにより流量が変化して、配合比や塗布量が変化する。このような

問題に対しては、装置の温調や、ミキシング部の直前に流量計を設けて流量をセンシングしてポンプを制御することにより、許容範囲の逸脱を避けることができる。

2液型アクリル系接着剤や嫌気性接着剤などでは、接着剤が接する部分の材質によりゲル化や増粘を起こす場合もある。

1液型接着剤の精密塗布では、シリンジに接着剤を入れておき空気で吐出させる塗布装置が多用されているが、空気の圧力や流量が一定の場合は、シリンジ内の接着剤の残量により吐出量に変化していく。この問題に対しては、圧力センサーによる制御や、ノズル部分に高速応答バルブを装着するなどの対応がある。

2.5.2 塗布状態の検出

実際に接着剤がノズルから吐出され接着部の所定位置に塗布されたかどうかの確認には、光学センサーや画像処理が使用されている。たとえば、接着剤の中に蛍光染料を添加しておいて、塗布後に紫外線を当てて発光させて、塗布位置や形状を画像処理で判別したり、接着後のはみ出し状態の判別などが行われている。いずれの場合でも制御範囲を超えて許容範囲を外れた場合は、警報を出して自動的に設備が停止する必要がある。警報のみで設備が停止しない場合は不良品を作り続けることとなる。

2.5.3 可使時間の管理

接着剤の塗布から貼り合わせまでの時間が許容範囲を超えると、接着特性は大きく低下する。このため、許容時間内で貼り合わせが終了でき、ライントラブル時に接着剤が塗布された状態で停止することが絶対にならないようにしておかなければならない。

2.6 品質管理

2.6.1 基本的な考え方

接着剤で接合された製品の接着性能の良否の判定はきわめて困難である。たとえ検査ができたとしても、不良品の分解・再生は困難な場合が多い。

そこで、容易な工程管理でしかも信頼性の高い製品を作るための基本は、これまでも説明したように、次のように考えられる。

「まず、材料設計、構造設計、プロセス設計の段階で接着の特性や製品の特性に影響する因子を洗い出す。次に、各因子の影響度をできるだけ小さくして許容範囲が広がるように材料（被着材料、表面状態、接着剤、プライマーやカップリング剤など）、部品の構造や精度、製造工程を最適化する。さらに、つねに許容範囲に入るように設備的に対応し、許容範囲を超えた場合には設備が停止するようにする」

2.6.2 材料・部品の検査

接着の作業工程内で、接着剤や表面状態の性能検査をしながら接着することは困難である。このため、材料や部品の受け入れ検査は重要である。また、材料や部品の仕様に関しては製造メーカーとの間で仕様書を取り交わしておく。この際、部品の材質や表面状態に関しては接着で接合することを明示し、評価試験方法と判定の方法、基準も明記しておく必要がある。部品メーカーでは原料の購入先やグレード、材料の組成や製造工程を改良のために変更することが多々あるが、材料メーカーの常識の範囲での変更の場合には通知がないことが多い。このような改良を行う場合、材料メーカーでは「接着」の対象品であることを忘れている場合が多く、接着性の検討はなされないからである。

材料や部品の先入れ先出しはもちろんである

が、接着剤など有効期限があるものについては、製造メーカーで有効期限を記入したり、受け入れ検査で記入する。また、接着工程においては、使用している材料や部品の有効期限やロット番号を記入する作業チェックリストの準備も必要である。

2.6.3 作業ミスの防止

接着作業者に関しては、基本的な教育の実施は重要である。作業負荷の軽減のためには、ビジュアルな作業指導書の準備や、裏表をまちがったり類似の部品をまちがって接着するなどのうっかりミスを防止するための構造設計でのまちがい防止対策が必要である。また、接着作業者は前工程まで適正にできているかどうかの検査も兼ねているため、作業者が検査しやすくしておく配慮も必要である。たとえば、2液型接着剤の配合比のずれや混合度合いのチェックがしやすいように2液の色を検討しておくことや、プライマーが塗布されたかどうか肉眼では確認しにくい場合が多いので、塗布前のもものと塗布後のものが区別できるようにパレットの色を変えておくことなどがある。

最終の検査で、接着剤の塗り忘れがないかどうかをチェックする。確認しやすくするために、接着剤がはみ出すことを基本とすればよいが、意匠

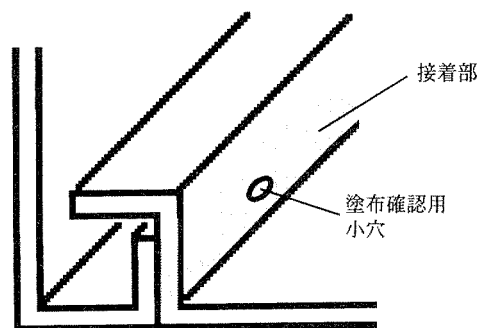


図24 接着剤塗布確認用の穴

性の点からはみ出しが困る場合や、構造上はみ出し部が見えない場合には、図24に示すように、一方の部品の接着部に小さな穴を開けておき、この穴から接着剤がはみ出していけば確実に塗布されていることが容易に確認できる。また、硬化状態の確認もできる。

3. おわりに

以上に述べたように、接着を上手に使いこなすためには、機能設計で接着法の採用によりいかに新しいコンセプトの構造や製造法を創造できるか、構造設計、材料設計、プロセス設計で接着特性に影響する諸因子に対していかに広い許容範囲を確保できるか、設備設計で許容範囲に入りメンテナンスが容易な設備をいかに作るか、品質管理においては不適切なものを未然にいかに容易に見つけ出せるか、が重要である。

これらの要素技術は相反する点も多く、単独での検討だけではうまくいかない。ある部分を変更すると全体に影響が及んでいくので、開発段階では全要素技術がコンカレントに情報を共有化しながら進行する必要がある。これらの要素技術が有機的に結び付いて初めて接着の導入効果が得られ

る。有機的に結び付けるためには、個々の要素技術についてしっかりした評価、解析を行い、データベースを蓄積して情報を共有化することが重要である。

文 献

- 8) 春名, 西川, 原賀, “接着接合体の熱応力に及ぼす樹脂物性の影響”, 日本接着学会誌, 29 (8), 9 (1993)
- 9) 原賀康介, 西川哲也, 山本和美, 服部勝利, 勢力峰生, “新しい構造用ウレタン系接着剤の開発及びエレベーター意匠パネルへの適用”, 三菱電機技報, 64 (3), 81 (1990)
- 10) 原賀康介, “接着耐久性”, 工業材料, 41 (12), 16 (1993)
- 11) 中島義信, 田口広一, 眼龍裕司, 八木直樹, 原賀康介, “接着剤とリベット併用による板金筐体の設計・施工技術”, 機械設計, 41 (4), 87 (1997)
- 12) 原賀康介, “エレベーターの意匠パネル製造”, 接着の技術, 11 (4), 28 (1992)
- 13) 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, 29 (4), 180 (1993)

調査・資料・報道・抄録 半月刊 スマイルケミカル

12-15

Vol.29 No.22

DEC.15, 2000

R&D Report

- 電気・電子/光学部品組み立てにおける
接着設計技術(2)

Market Report

- プラスチック添加剤工業の市場展望

Chemical Profile

- 光学活性N-ベンジル-1-フェニルエチルアミン
- テトラ-N-ブチルアンモニウムヒドロゲン
サルフェート
- トリアリルシアヌレート

