

< 綜 説 >

(受理：平成 15 年 10 月 16 日)

電機・電子機器における接着品質設計と安全率の定量化 Quality Design and Quantification of Safety Factor on Adhesive Joints in Electric and Electronics Apparatus

原 賀 康 介*
Kosuke HARAGA

1. 緒 言

電機・電子機器の高性能化、高機能化、生産性向上が追求される中で接合・組立方法として接着が採用されるケースが増加している。電気・電子製品の不良発生原因は多々あるが、接着を含めて接合方法に原因がある場合も非常に多い。接着接合部で不良を発生させないためには、まず、接着強度のばらつきを小さくして信頼性を向上させること、次に、各種の環境や応力の組合せ条件下での長期接着耐久性を正確に評価し、製品の耐用年数経過後における安全率を定量化することが必要である。耐久性評価試験においては、試験片と製品の接着部の形状・寸法の違いを考慮しておかねば重大な過ちを犯すこととなる。また、接着の欠点をカバーする方法の検討も重要である。

以下に、接着強度のばらつきが小さく信頼性に優れた接着を行うための基本的な考え方、接着の欠点をカバーする方法、耐久性に影響する形状・寸法効果、耐用年数経過後の安全率の定量化法について述べる。なお、これらの内容は特に電機・電子機器に限定されるものではなく、多くの産業分野に共通するものである。

2. 高信頼性接着の基本的考え方

2.1 凝集破壊率と変動係数

図1は、2種類の接着剤（1液エポキシ系接着剤と2液アクリル系接着剤）の正規確率プロットで、接着強度

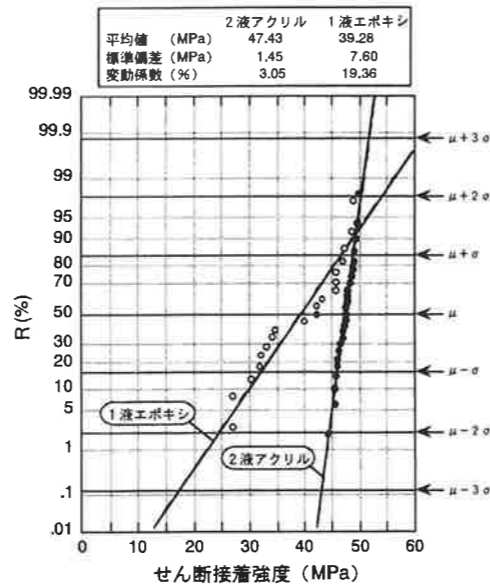


図1 接着強度のばらつきの比較 (正規確率プロット)



原 賀 康 介

略歴：昭和48年（1973年）京都大学工学部工業化学科卒業、同年三菱電機(株)入社、生産技術研究所、材料研究所を経て現在に至る。入社以来現在に至るまで一貫して接着接合技術の研究・開発に従事。特に、構造接着技術と接着信頼性保証技術の開発に注力。

受賞：日本接着学会技術賞（1989）、日本接着学会学会賞（2003）、日本電機工業会技術功績賞（1998）

所属学会：日本接着学会、溶接学会、自動車技術会

*三菱電機(株)先端技術総合研究所マテリアル技術部
 尼崎市塚口本町8-1-1 〒661-8661
 Mitsubishi Electric Corporation
 Advanced Technology R & D Center
 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki City, Hyogo
 661-8661, Japan

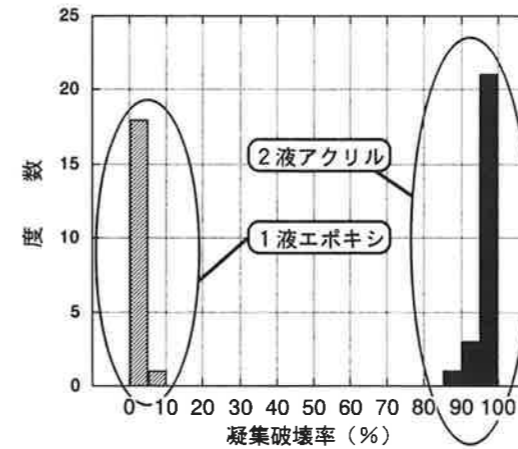


図2 凝集破壊率の比較 (度数分布)

のばらつきの比較を示している。この結果では、1液エポキシ系接着剤は2液アクリル系接着剤に比べて傾きが小さく、ばらつきが大きいことがわかる。平均強度 μ は両者で大差ないが、 $\mu-3\sigma$ を見ると、1液エポキシ系接着剤では17MPa、2液アクリル系接着剤では43MPaと大きな差があることがわかる。ばらつきの大きさの指標としては変動係数(=標準偏差/平均値)を用いる。変動係数が小さいほどばらつきは小さい。図1の結果では、1液エポキシ系接着剤の変動係数は0.1936(19.36%)、2液アクリル系接着剤は0.0305(3.05%)である。図2は、図1の試験片の凝集破壊率の度数分布である。この結果より、ばらつきが小さい2液アクリル系接着剤はほぼ完璧な凝集破壊を示しており、ばらつきが大きい1液エポキシ系接着剤は凝集破壊をほとんど示さず界面破壊であることがわかる。

接着強度のばらつき(変動係数)と凝集破壊率には相関があり、凝集破壊率が大きいほど接着強度の変動係数は小さくなる。

信頼性に優れた接着の条件として、当社では、これまでに評価してきた多くの事例から、凝集破壊率は40%以上、変動係数は0.15以下、望ましくは0.10以下であることを基本としている。変動係数が0.2を越えるともはや信頼性を議論できる状況ではなくなる。

2.2 凝集破壊率の向上法

表1は、メーカーやロットが異なるステンレス鋼板のはく離強度、破壊状態とプライマー塗布の効果を示したものである(接着剤：2液アクリル系、プライマー：含水有機リン酸塩化合物)。未処理では強度、破壊状態に大きな差異があるが、プライマー処理によりいずれも高い接着強度で凝集破壊に変化している。図3は、ステンレス鋼板(SUS304)の短波長紫外線照

表1 メーカーやロットが異なるステンレス鋼板のはく離強度とプライマーの効果

	はく離強度 (kN/m)	
	未処理	プライマー処理
A 製作所購入品	1.5 (界面破壊)	9.4 (凝集破壊)
B 製作所購入品	4.1 (界面破壊)	8.7 (凝集破壊)
C 製作所購入品	3.3 (界面破壊)	9.3 (凝集破壊)
D 製作所購入品	6.0 (凝集+界面破壊)	8.9 (凝集破壊)
E 製作所購入品	8.9 (凝集破壊)	9.0 (凝集破壊)

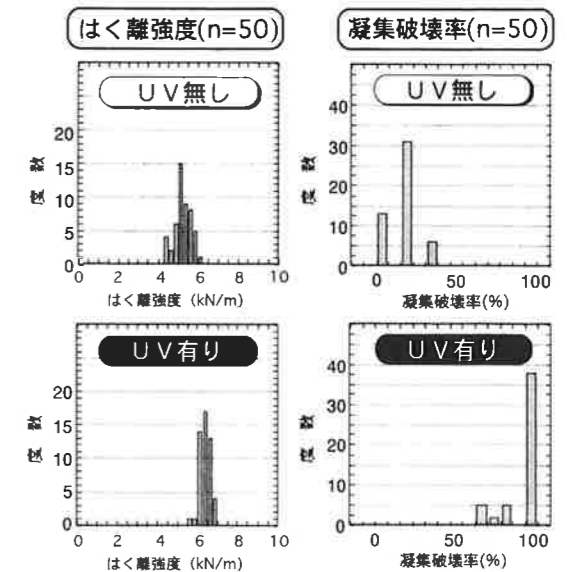


図3 ステンレス鋼板の短波長紫外線処理の効果

表2 短波長紫外線処理による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
有り	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

射処理の効果を示したものである。短波長紫外線照射処理により凝集破壊率が大きく増加していることがわかる。表2は、短波長紫外線照射処理無し品(界面破壊)と照

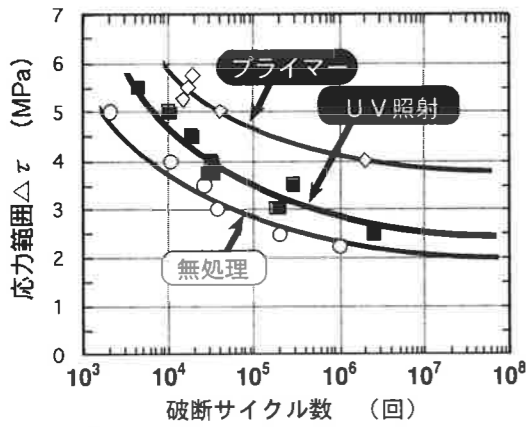


図4 接着の疲労特性における表面処理の効果

射処理有り品（凝集破壊）の引張りせん断試験中のAE（アコースティックエミッション）発生開始強度と発生開始時点での発生回数の測定結果である。この結果より、界面破壊の場合は凝集破壊の場合に比べて、非常に低い引張り応力でAEが多数発生しており、低い応力で界面での破壊が始まっていることがわかる。図4には、ステンレス鋼板（SUS304）の短波長紫外線照射処理およびプライマー処理による疲労特性の向上効果を示した。無処理で界面破壊の場合は疲労特性が劣っているが、これは表2のAE発生開始応力の低さと関係していると考えられる。

以上に示したように、信頼性に優れた接着を行うためには、界面破壊する系の場合は表面処理により凝集破壊率を向上させることが必要である。

2.3 接着の弱点への対策

図5³⁾は、接着、リベットボンド、ウェルドボンドの高湿度中でのクリープ破断特性の比較である（接着剤：2液アクリル系、被着材料：軟鋼板）。接着は高温でのクリープに弱く、水分が複合されるとさらにクリープ特性が低下するという大きな問題がある。表面状態の改良だけでは対応が困難な場合が多い。リベットやスポット溶接などの金属による接合を併用することにより接着の欠点を解消することができる。図6¹⁾は、図5と同じ試験片（接着面積：12.5×25mm）に3.0kNの荷重を负荷したときの変形率の経時変化の比較である。金属による接合を併用することにより伸びの変化が小さくなることわかる。図7は接着、スポット溶接、ウェルドボンドの疲労特性の比較、図8は接着、リベット、リベットボンドの疲労特性の比較である。スポット溶接やリベットの併用により疲労特性も向上することがわかる。

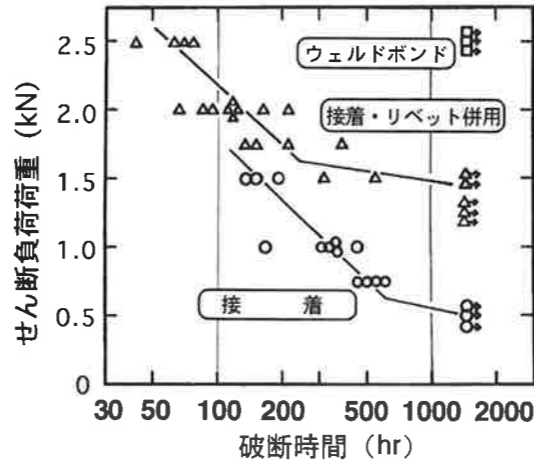


図5 接着、リベットボンド、ウェルドボンドのクリープ破断特性の比較（60℃90%RH 雰囲気中）

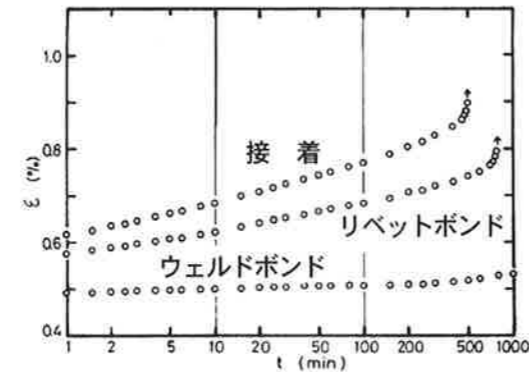


図6 接着、リベットボンド、ウェルドボンドの各試験片に60℃雰囲気中で3.0kNのせん断荷重を负荷した時のクリープ変形率εの経時変化

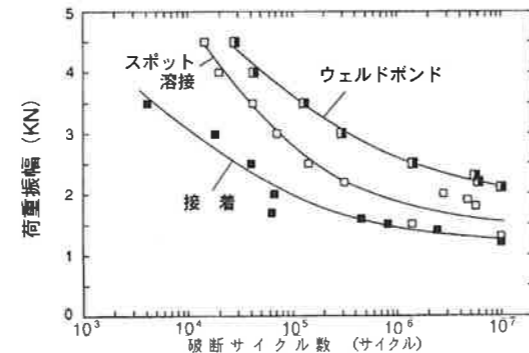


図7 接着、スポット溶接、ウェルドボンドの疲労特性の比較

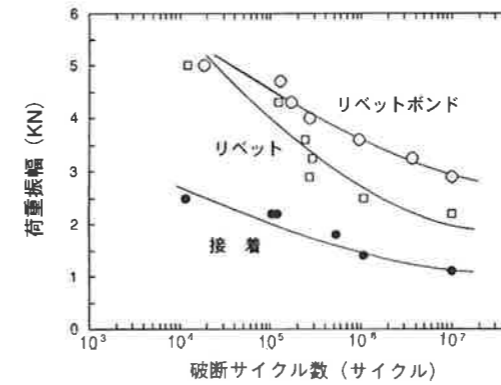


図8 接着、リベット、リベットボンドの疲労特性の比較

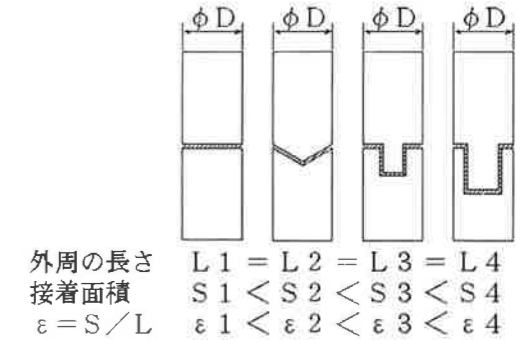


図10 接着部の外周の長さLを一定にしたまま耐水（湿）性を向上させる形状の例

3. 接着部の形状・寸法と耐久性

図9²⁾は、接着部の形状が円形、正方形、正三角形で寸法が異なる突き合わせ引張り試験片（接着剤：2液アクリル系、被着材料：ステンレス）を80℃90%RH 雰囲気中に5日間暴露した後の接着強度保持率である。横軸は「接着面積S/接着部の外周の長さL」で示してある。被着材料が水分を通さず水分が接着部の周囲からだけ侵入してくる場合は、接着面積がSが大きいほど、接着部の外周の長さLが短いほど耐水（湿）性に優れる。このため、耐水（湿）性に優れた接着を行うためには、接着部の設計時点においてはS/Lができるだけ大きくなるようにすること、評価時点では評価に用いる試験片と製品の接着部のS/Lの違いを考慮して評価結果を判断することが重要である。特に、接着面積が小さな電子

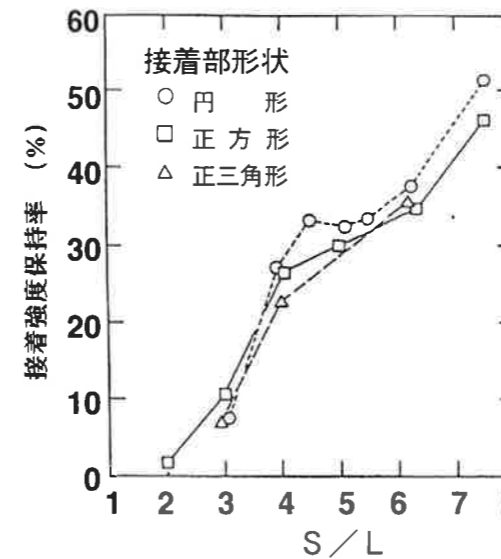


図9 S/Lと接着強度保持率の関係

部品や光学部品の接着においてはS/Lが小さくなるので注意が必要である。図10には、円柱接着の場合において円柱の外形を一定のままS/Lを増加させる例を示した。

接着部への水分の拡散がFickの拡散に従っている場合には、幅Wの接着部内の吸水率の分布は式(1)で求めることができ³⁾、耐水（湿）劣化の速度は接着部の幅Wの比の2乗に比例する。即ち、接着部の幅Wを2倍にすれば一定の強度保持率まで低下する時間は4倍になり、3倍にすると時間は9倍となる。逆に、接着部の幅Wが1/2になると劣化時間は1/4になってしまう。図11に、屋外暴露試験（接着剤：2液アクリル系、被着材料：軟鋼板）における接着部の幅Wと劣化時間の関係の一例を示した。実測値の近似直線Iの傾きは直線IIの4倍となっている。のりしろの設計には十分な配慮が必要である。

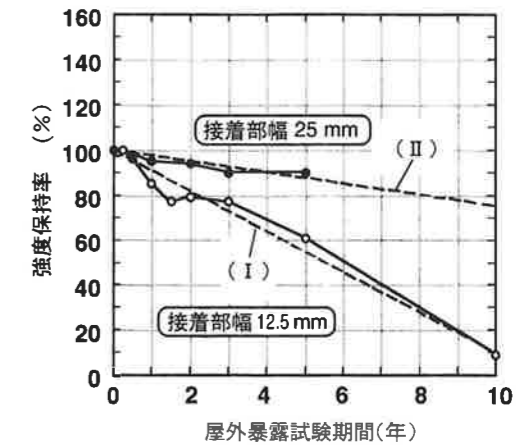


図11 屋外暴露試験における接着部の幅と劣化時間の関係

$$\frac{M_x}{M_m} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)} \cdot \sin \frac{(2j+1)\pi x}{W} \cdot \exp \frac{-(2j+1)^2 \pi^2 D t}{W^2} \quad (1)$$

M_x : 時間 t , 端部からの距離 x における吸水率
 M_m : 飽和吸水率
 W : 接着部の幅
 D : 拡散係数
 M : 時間 t における吸水率
 b : 試料長さ

$$D = \frac{\Delta M^2 \pi}{16 M_m^2 \Delta t} \cdot \frac{1}{(1/W + 1/b)^2} \quad (2)$$

4. 製品の耐用年数経過後の安全率の定量化

実際の製品の使用状態においては接着部には種々の環境・応力が複合して負荷される。製品の耐用年数経過後まで接着不良を出さないためには2.や3.で述べたような点を考慮して設計すればよいが、最適設計や限界設計が要求されている昨今、過剰品質は不適当である。そこで、製品の耐用年数経過時点での接着強度の最低値を予測し、安全率を定量化する方法を開発した^{4,5)}。この方法は当社では既に多くの製品の接着設計に用いられている。以下に、耐用年数経過後の接着強度の安全率の定量化の方法と適用事例を紹介する。

4.1 耐用年数経過後の安全率の算出法

図12に、接着強度の経年変化の概念図を示した。接着強度は使用中の環境・応力により経年変化を生じて低強度側にシフトする。接着強度にはばらつきがあり、経年変化に伴いばらつきは増加すると考えられる。接着強度は、接着部が使用中にさらされる最高温度においては室温強度に比べて低下するため、初期の室温における接

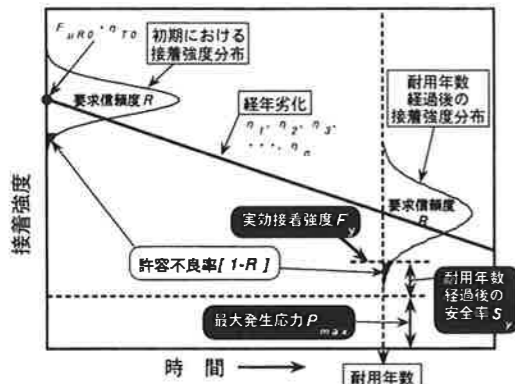


図12 接着強度の経年変化の概念図

着強度を $F_{\mu RO}$, 最高使用温度における接着強度の低下率を温度係数 η_{T0} として、最高温度における初期の平均強度 $F_{\mu RO} \cdot \eta_{T0}$ を基準強度とする。熱、湿度、ヒートサイクル、繰返し疲労、クリープなど接着部に加わる個別の環境的、応力的劣化因子による接着強度の低下係数をそれぞれ $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots \eta_n$ とする。個別の劣化係数は、加速試験により求める。例えば、長期間の熱劣化は、温度加速試験からのアレニウスプロットによる方法、耐湿劣化は、水分の拡散による接着部内の水分の濃度分布を求めて強度分布を予測する方法^{3,6)}やアレニウスプロットによる方法⁷⁾、耐ヒートサイクル性は、温度幅を広げて加速する方法や接着剤が凝集破壊する系の場合はサイクル数と残存強度の関係を外挿する方法、耐クリープ性は、温度-時間換算によるマスターカーブ⁸⁾や Larson-Miller のマスターカーブから求める方法、耐疲労性は $S-N$ 図を外挿して求める方法、などを用いる。環境・応力の複合条件下での劣化係数は、個別の環境・応力による劣化係数 $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots \eta_n$ を掛け合わせたものと考え η_y とする。使用中に接着部に加わる応力の最大値を最大発生応力 P_{max} とする。

耐用年数経過時点での許容不良率 $[1-R]$ における接着強度を実効接着強度 F_y とすると、 F_y は (3) 式で求められる。

$$F_y = F_{\mu RO} \times \eta_{T0} \times \eta_y \times D_y \quad (3)$$

ここで、 D_y は耐用年数経過後の接着強度のばらつき係数で、図13に示すように、平均値に対する許容不良率 $[1-R]$ における接着強度の割合を示す係数である。接着強度のばらつきは、接着特性の劣化により増加することが考えられる。そこで、耐用年数経過後の接着強度のばらつき係数 D_y は、初期の接着強度の変動係数 CV_0 が耐用年数経過後に k 倍に増加するとして、 $k \cdot CV_0$ に

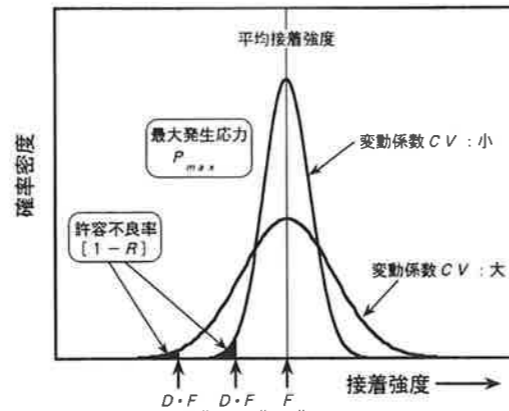


図13 平均接着強度 F_{μ} , 許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の概念図

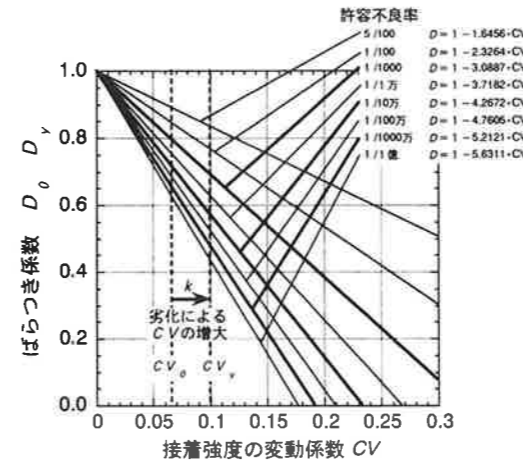


図14 接着強度の変動係数 CV , 許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の関係

対する D_y を図14から求める。 k の値は、材料、環境・応力条件、耐用年数により変化し実測が困難なことからデータがほとんどないため、ここでは $k = 1.5$ としている。接着強度の分布は正規分布としている。

(3) 式では、クリープ試験や疲労試験などの応力試験の劣化係数は室温での測定結果を用いることになるが、クリープ試験や疲労試験を高温下で実施することは容易である。そこで、高温での応力試験から求めた耐用年数経過後のクリープ強度や疲労強度を基準強度 F_{IT} とすると、実効接着強度 F_y は (4) 式で求められる。

$$F_y = F_{IT} \times \eta_y \times D_y \quad (4)$$

F_{IT} を用いる場合は、初期の室温における接着強度 $F_{\mu RO}$ と温度係数 η_{T0} , クリープ試験や疲労試験の η_1 は不要である。

耐用年数経過後の安全率の S_y は、(5) 式により求まる。

$$S_y = F_y / P_{max} \quad (5)$$

基本的に安全率 S_y は 1.0 以上であれば良い。

4.2 耐用年数経過後の安全率の評価事例

耐用年数 25 年、最高使用温度 100°C で疲労とヒートサイクルが加わる接着部 (許容不良率 0.00001) の 25 年後の安全率の評価例を次に示す。要求条件の詳細を表3に、評価結果を表4に示した。この結果より、耐用年数経過後の安全率は十分であることが分かり、この余裕分は過剰品質であるため、さらなる信頼度の向上や構造簡素化、作業性改善などに再配分できる。表5に示すように、許容不良率を 1/1 億に低下させても安全率はまだ 1.0 以上であることから、分解修理ができる構造から分解不要な構造に構造簡素化が可能となった。残りの余裕分は接着剤塗布面積の最小値の管理基準の低下に配分し、塗布量管理の簡略化やみ出し部の清掃作業廃止など接

表3 接着部に要求される条件

要求項目	条件	
耐用年数	25年	
要求信頼度 R	0.99999 (許容不良率 0.00001)	
最大発生応力 P_{max}	せん断 0.10MPa	
応力負荷状態	繰返し疲労 10 ⁸ 回	
温度	輸送時	冬季-40°C~夏季+40°C 1回のみ
	停止時	冬季-20°C~夏季+40°C 冬季-20°C~0°C 冬季+20°C~+40°C
	運転時	冬季-20°C~夏季+100°C 冬季-20°C~+60°C 夏季+20°C~+100°C 運転による温度サイクル1回/日

表4 100°C疲労強度を基準とした場合の25年後の安全率 S_y

100°Cにおける疲労強度	F_{100}	0.58MPa
25年後のばらつき係数	D_y	0.569
温度係数 (100°C)	η_{T0}	-
耐用年数経過後の劣化係数 ($\eta_y = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$)	η_y	0.76
疲労 (25°C)	η_1	-
最大温度変化 (年サイクル)	η_2	0.95
運転時の温度変化 (日サイクル)	η_3	0.80
熱劣化	η_4	1.00
実効接着強度 ($F_y = F_{100} \cdot D_y \cdot \eta_y$)	F_y	0.251MPa
最大発生応力	P_{max}	0.10MPa
耐用年数経過後の安全率 ($S_y = F_y / P_{max}$)	S_y	2.51

表5 許容不良率、接着剤塗布面積比と安全率 S_y

許容不良率 $[1-R]$	1/10万	1/100万	1/1億
接着剤塗布面積比 1.0	$S_y = 2.51$	$S_y = 2.11$	$S_y = 1.94$
0.7	$S_y = 1.75$	$S_y = 1.47$	$S_y = 1.35$
0.5	$S_y = 1.25$	$S_y = 1.05$	$S_y < 1.00$

着作業工程を合理化できた。

5. 結言

信頼性を向上させながら低コストで生産性に優れた接着を行うためには接着品質設計の考え方が必要である。接着品質設計の概念を図15に示す。接着品質設計は開発段階での品質の創り込みと生産段階での品質管理が両輪となるが、その裏付けとなるデータベースやノウハウの蓄積が重要である。

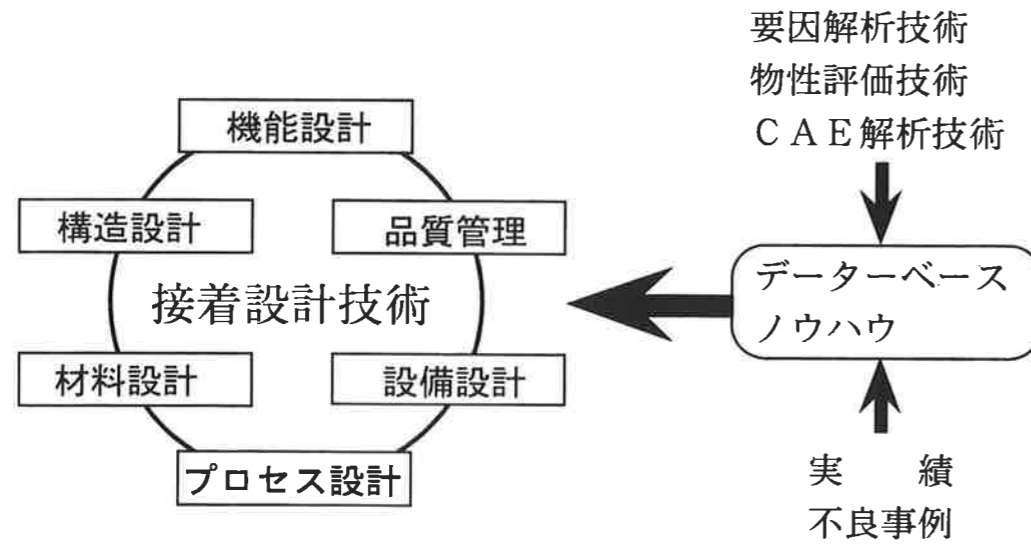


図15 接着品質設計の概念

参考文献

- 1) 原賀康介, 児玉峯一; 日本接着協会誌, 21(1) 4 (1985).
- 2) 原賀康介, 児玉峯一; “接着接合物の耐湿性に及ぼす接着部形状・寸法の影響”, 日本接着協会誌, 16(6) 224 (1980).
- 3) 原賀康介; “接着部における吸水率及び接着強度の分布とその経時変化”, 日本接着協会誌, 23(5) 178 (1987).
- 4) 原賀康介; “接着接合における長期信頼性の定量化法”, Mate2003 (9th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”) P. 139-144 (2003).
- 5) 原賀康介; 第33回信頼性・安全性シンポジウム発表報文集 ((財)日本科学技術連盟), P. 117-122 (2003-7-7)
- 6) K. Haruna, K. Haraga, “Moisture Durability Prediction of Adhesively Bonded Joints Using Acrylic Adhesives.”, 8th Int. Conf. on Composites Engineering (2001).
- 7) 原賀康介; 日本接着協会誌, 15(12) 568 (1979)
- 8) 平沼 勉, 竹内豊和, 栢木浩之, 志村邦久; 自動車構造接着技術特設委員会報告書 ((社)自動車技術会) P. 56 (1992)