

第6回 委員会資料

2006年3月14日

日本接着学会関東支部
構造接着委員会

< 綜 説 >

接着強さの評価法—接着耐久性評価法—

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

電気・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

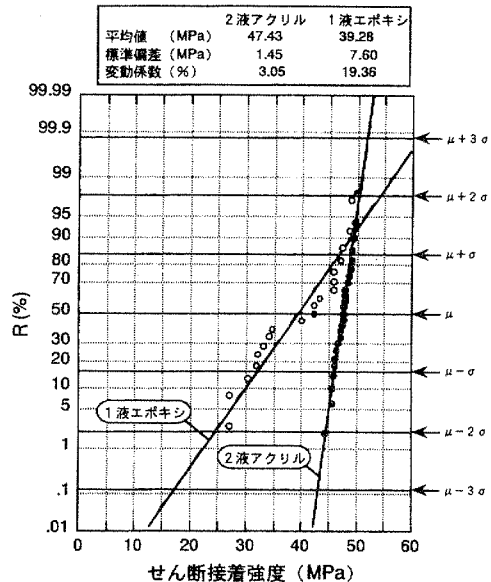


図1 接着強度のばらつきの比較 (正規確率プロット)

原 賀 康 介



略歴：昭和48年（1973年）京大工学部工業化学科卒業、同年三菱電機 ㈱ 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 ㈱ 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

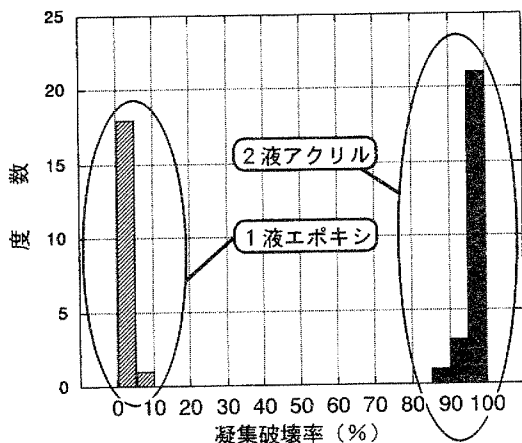


図2 凝集破壊率の比較 (度数分布)

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。ばらつきの大きき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)と凝集破壊率には関係があり、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(SUS304)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)

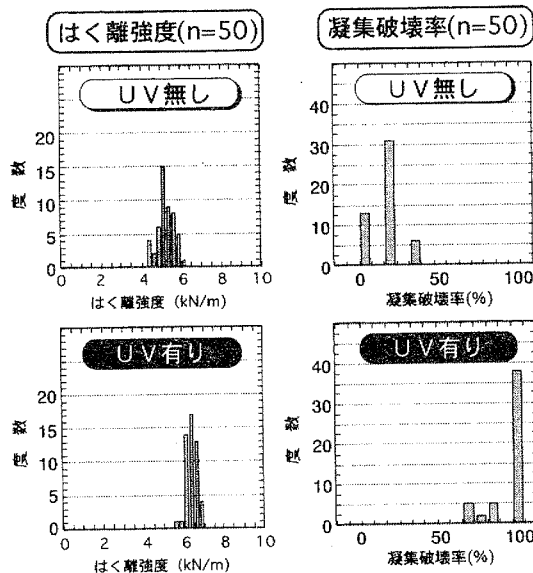


図3 ステンレス鋼板の短波長紫外線処理の効果

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%	33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

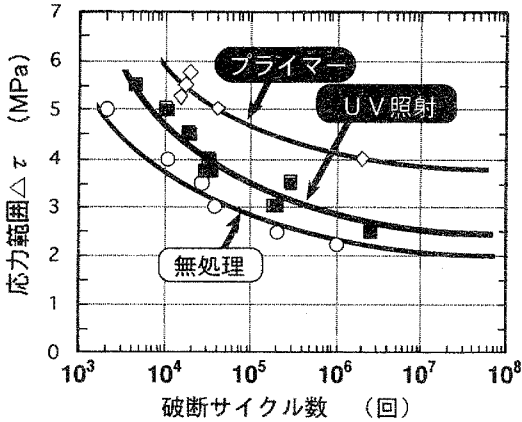


図4 接着の疲労特性における表面処理の効果

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5⁷⁾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6⁷⁾は、図5と同じ試験片(接着面積:12.5×25mm)に3.0kNの荷重を負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。

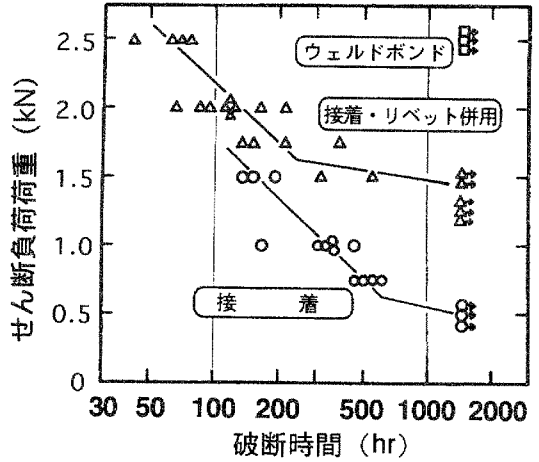


図5 接着、リベットボンド、ウェルドボンドのクリープ破断特性の比較(60℃90%RH 雰囲気中)

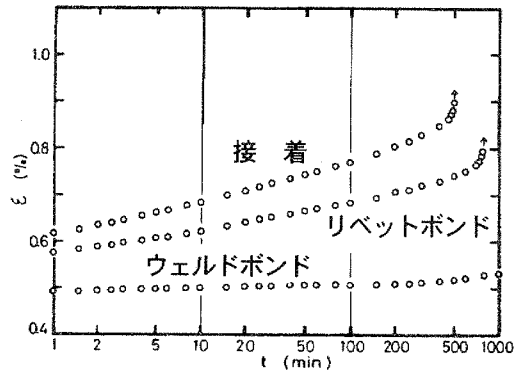


図6 接着、リベットボンド、ウェルドボンドの各試験片に60℃雰囲気中で3.0kNのせん断荷重を負荷した時のクリープ変形率εの経時変化

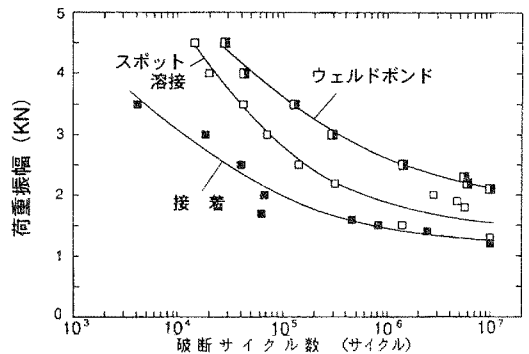


図7 接着、スポット溶接、ウェルドボンドの疲労特性の比較

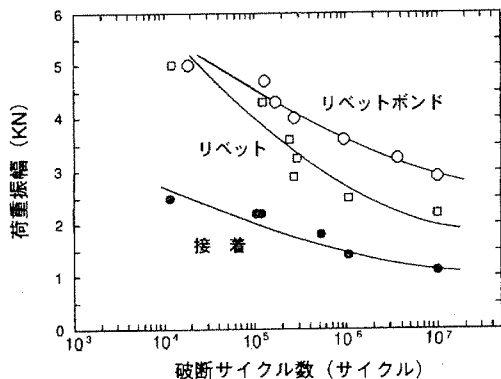


図8 接着, リベット, リベットボンドの疲労特性の比較

3. 接着部の形状・寸法と耐久性

図9³⁾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

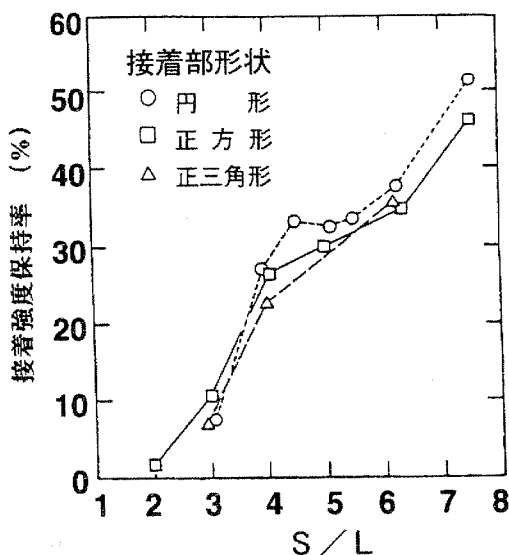
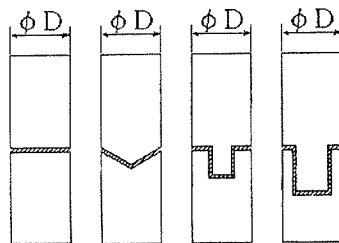


図9 S/L と接着強度保持率の関係



外周の長さ $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$
 接着面積 $S_1 < S_2 < S_3 < S_4$
 $\varepsilon = S/L$ $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3 < \varepsilon_4$

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

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。

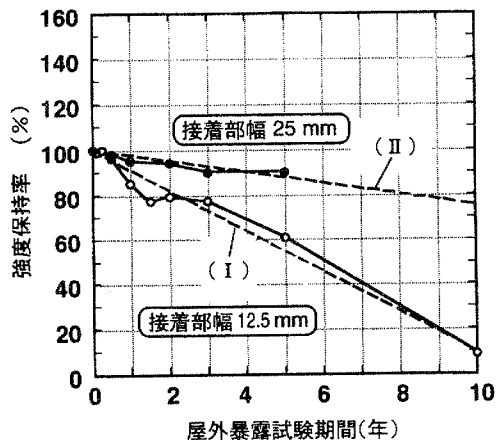


図11 屋外暴露試験における接着部の幅と劣化時間の関係

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

Mx : 時間 t, 端部からの距離 x における吸水率
 Mm : 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法

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、過剰品質は不相当である。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

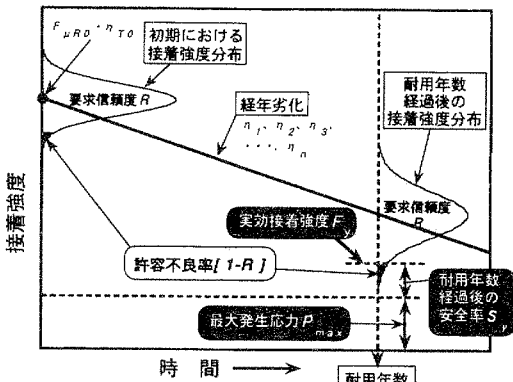


図12 接着強度の経年変化の概念図

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

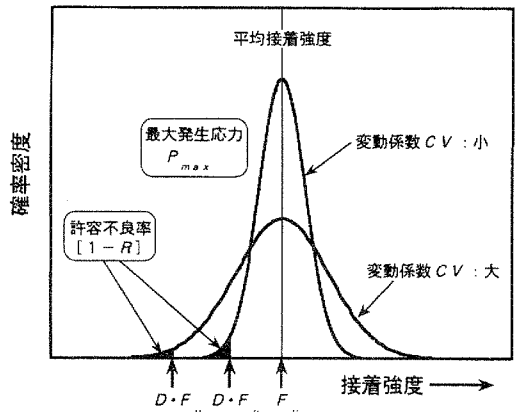


図13 平均接着強度 F_{μ} 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の概念図

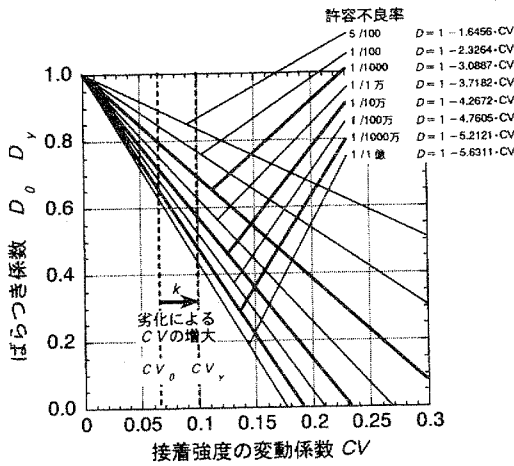


図14 接着強度の変動係数 CV, 許容不良率 [1-R] とばらつき係数 D の関係

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 $F_{\mu R0}$ と温度係数 η_{TD} 、クリープ試験や疲労試験の η_i は不要である。

耐用年数経過後の安全率の S_y は、(5) 式により求める。

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

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の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は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_{TD}	-
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	1/1000 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。

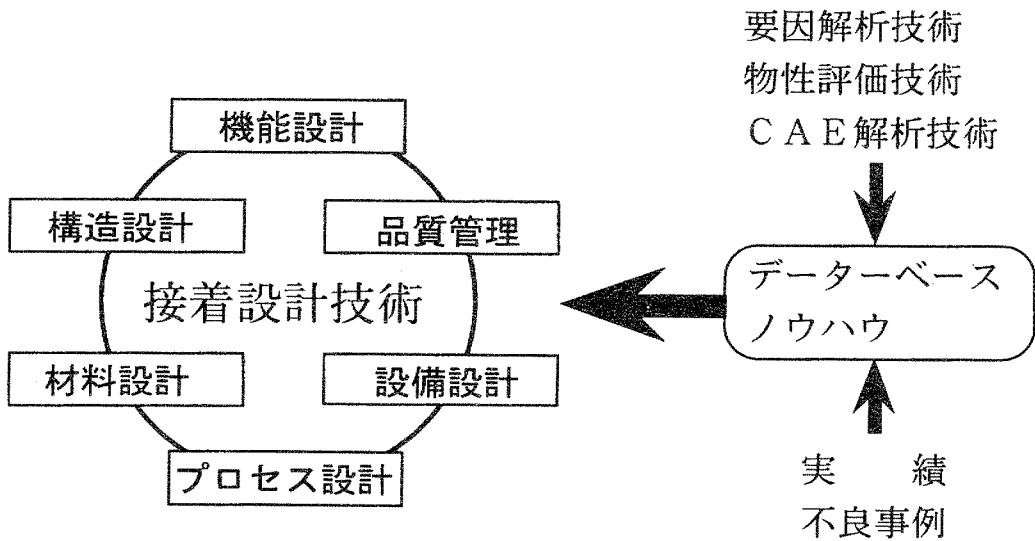


図15 接着品質設計の概念

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)

接着の耐久性評価

1. 理想的な接着状態とは

接着強度が高く、接着強度のばらつきが少なく、耐久性にも優れた接着を実現するための理想的な条件は次の通りである。

(1) 接着部の破壊面が「100%接着剤の凝集破壊」になっていること

「凝集破壊」とは、接着剤の内部での破壊である。「凝集破壊」に対して、接着剤と被着材料の界面での破壊を「界面破壊」と呼ぶ。

(2) 接着強度の変動係数 CV が0.10以下であること
 変動係数 $CV = \text{標準偏差 } \sigma / \text{平均値 } \mu$

変動係数は0.15程度までであれば良好な接着状態といえるが、0.20以上になると「信頼性」を論じる状態ではなくなる。凝集破壊が減少し界面破壊が増加すると変動係数は大きくなる。

図1に、二種類の接着剤の接着強度の度数分布の比較の例を示した。2液アクリル系接着剤は強度のばらつきが小さく、変動係数 CV は0.03と非常に小さく良好な接着状態であることがわかる。一方、1液エポキシ系接着剤では、強度のばらつきが大きく、変動係数

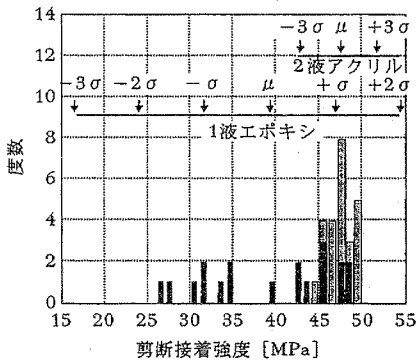


図1 1液エポキシ系接着剤と2液アクリル系接着剤の剪断接着強度の分布の比較

	2液アクリル	1液エポキシ
平均値 [MPa]	47.43	39.28
標準偏差 [MPa]	1.45	7.60
変動係数 [%]	3.05	19.36

CV は0.19と大きくなっており、信頼性の高い接着とは言いがたい状態である。図2には、同様に凝集破壊率の比較の例を示した。図1で変動係数が小さい2液アクリル系接着剤はほぼ完全な凝集破壊を示しているが、図1で変動係数が大きい1液エポキシ系接着剤では、ほぼ完全な界面破壊となっていることがわかる。

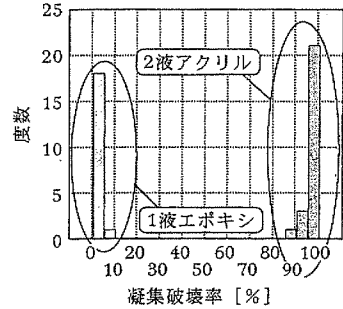


図2 1液エポキシ系接着剤と2液アクリル系接着剤の凝集破壊率の比較

2. 接着接合における劣化の要因

接着接合物が劣化を起こすのは、接着剤自体が劣化するためと思われることが多い。ところが実際には、接着剤自体の劣化だけではなく、接着剤と被着材料の結合界面での劣化や被着材料自体の劣化によって強度低下する場合も多い。このため、接着接合物の劣化は、接着剤と被着材料の組み合わせで評価することが重要である。

接着接合物に劣化を生じさせる代表的な外的要因としては次のようなものがある。

2.1 熱

熱劣化の原因としては、

- ①酸素により接着剤自体が分解を起こして接着剤自体の強度が低下する
 - ②酸素により接着界面における結合が切断されてしまう
 - ③酸素により被着材料の接着表面が酸化して弱い酸化層が生成し被着材料自体の強度が低下する
- などがある。

熱劣化特性は被着材料の材質に大きく影響される。図3～図5、表1には、長期間の熱劣化試験の例を示した。熱劣化には、温度、接着剤の種類、被着材料の表面処理などが影響することがわかる。

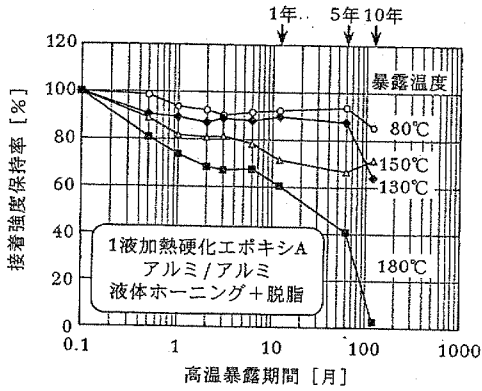


図3 長期熱劣化試験の一例(暴露温度の影響)

2.2 ヒートサイクル, ヒートショック

接着接合部に高温と低温の繰り返し加わると、接着剤と被着材料との線熱膨張係数が異なるため接着部に熱応力が作用する。熱応力は、高温、低温の温度差、接着剤と被着材料の線熱膨張係数の差が大きいほど、接着剤のヤング率が高いほど、被着材料の厚さや剛性が大きいほど、接着部の長さが長いほど大きくなる。接着剤のガラス転移温度を超えると接着剤のヤング率が低下するため、熱応力は発生しにくくなる。

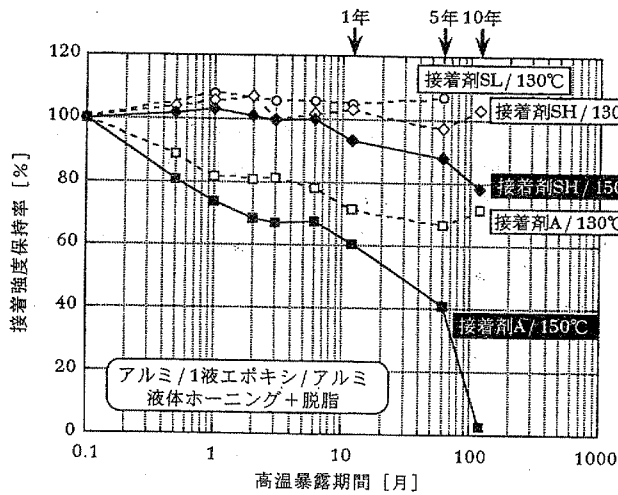


図4 長期熱劣化試験の一例(接着剤の差)

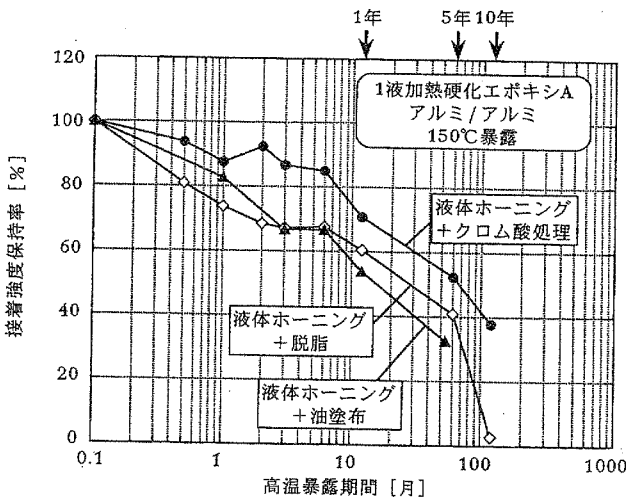


図5 長期熱劣化試験の一例(表面処理の影響)

表1 供試接着剤

接着剤	種類	性状	硬化条件	T _g
SL	1液加熱硬化エポキシ (エラストマー変性)	ペースト状 (アルミ粉入り)	120℃ 40分	89℃
SH	1液加熱硬化エポキシ (エラストマー変性)	ペースト状 (アルミ粉入り)	120℃ 40分	130℃
A	1液加熱硬化エポキシ	高粘度液状 (無機フィラー入り)	150℃ 4h	126℃

2.3 水分

水分は接着接合物の劣化に最も影響の大きい因子である。

水分による劣化の原因としては、

- ①接着界面に水分が拡散して接着剤と被着材料表面との結合が破壊されてしまう
- ②接着剤中に水分が拡散して接着剤が吸水膨潤したり可塑化して接着剤自体の強度が低下する
- ③水分により被着材料が腐食してしまう

などがある。

図6～図8には、長期間の耐水性試験の例を示した。接着剤は表1と同じである。耐水性には、水温、接着剤の種類、被着材料の表面処理などが影響することがわかる。

被着材料が金属のように水分を通さない場合には、接着部の周囲から接着剤自体や接着界面を通して接着部内部へ水分が拡散していく。このため、接着接合物の耐水性や耐湿性は、接着部の寸法、形状に大きく影響される。図9¹⁾は、図10¹⁾に示す接着部が円形、正方形、正三角形で寸法が異なる同種材同士の突き合わせ引張り試験片を、80℃90%RH雰囲気中に5日間暴露した後の接着面積Sと引張り強度保持率の関係である。接着剤は2液型アクリル系、被着材料はステンレス鋼である。同一形状であれば接着面積Sが大きいほ

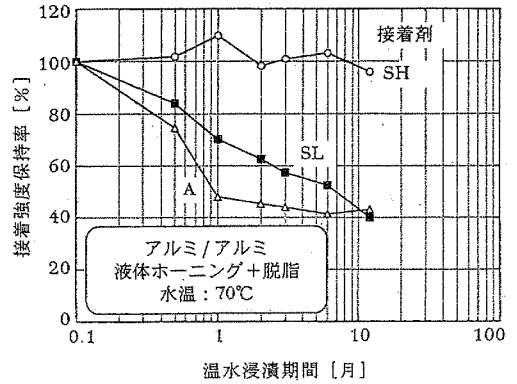


図7 水中浸漬試験の一例(接着剤の差)

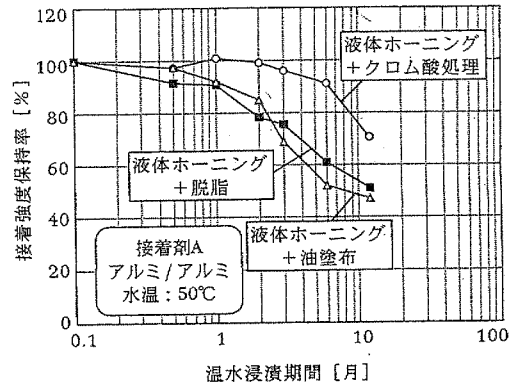


図8 水中浸漬試験の一例(表面処理の影響)

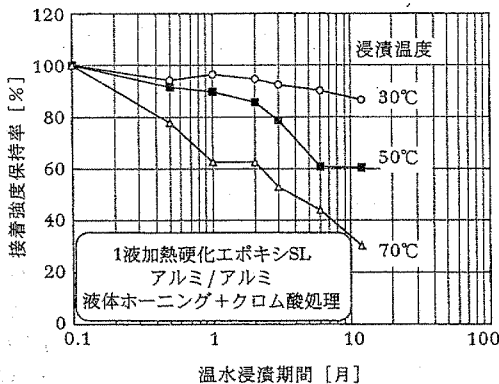


図6 水中浸漬試験の一例(水温の影響)

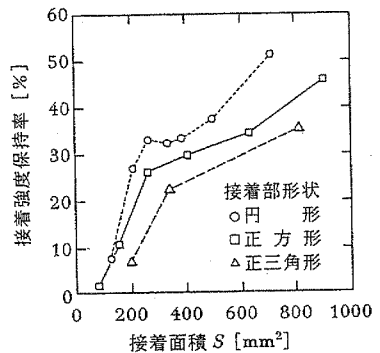
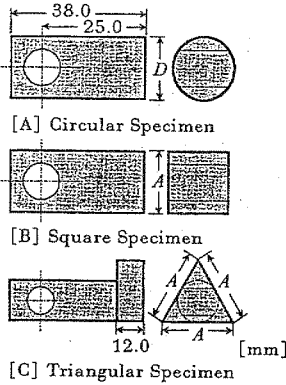


図9 突き合わせ引張り試験片の形状、面積と高温露出後の接着強度保持率の関係



No.	D [mm]	S [mm ²]
A-1	12.0	118
A-2	16.0	201
A-3	18.1	256
A-4	20.4	327
A-5	22.0	380
A-6	25.0	491
A-7	30.0	707

No.	A [mm]	S [mm ²]
B-1	8.0	64
B-2	12.0	144
B-3	16.0	256
B-4	20.0	400
B-5	25.0	625
B-6	30.0	900
C-1	20.8	187
C-2	27.7	383
C-3	43.3	812

図10 突き合わせ引張り試験片の形状・寸法(同種材同士を接着)

ど耐湿性に優れていることがわかる。一方、接着面積が同じでも形状により耐湿性に差が見られる。これは、接着面積 S が同じでも形状により接着部の外周の長さ L が異なるためである。被着材自体が水分を通さない場合は、水分は接着部の外周のみから侵入してくるため、外周の長さ L が長い形状ほど耐湿性に劣っている。このように、耐湿性は接着部の面積 S と外周の長さ L に影響されるので、接着面積 S を外周の長さ L で割った値 ϵ で図9の横軸を整理し直すと、図11¹⁾に示すようにほぼ1本の線に一致する。 ϵ が大きいほど耐湿性に優れている。

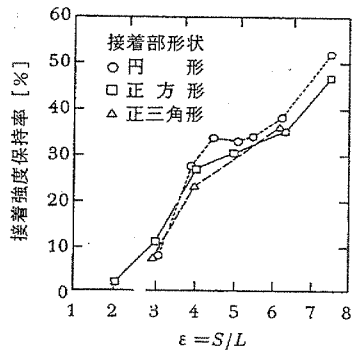


図11 ϵ と接着強度保持率の関係

接着部への水分の侵入は、Fickの拡散の法則にしたがっており²⁾、接着部の幅が W で長さが非常に長い接着部の両側面から水分が侵入する場合の側端面からの距離 x における t 時間後の吸水率 M_x は(1)式で表わされる²⁾。

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

- 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

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

図12²⁾は、幅 W が 50mm の剥離試験片(接着剤は2液型アクリル系)を70℃ 90% RH 雰囲気にて t 時間暴露した後の接着部の吸水率分布であり、(1)式による計算

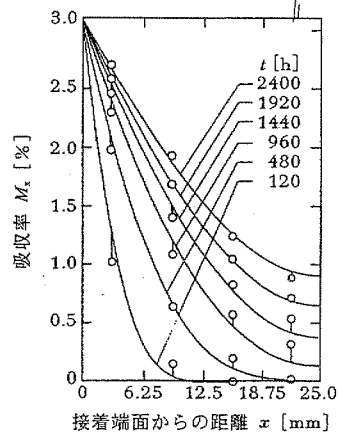


図12 接着部の吸水率分布の計算結果と実測値の比較 (幅50mmの接着部の半分を表示) (○: 実測値, -: 計算結果) (幅 $W = 25\text{mm}$)

と実測値との比較である。両者はよく一致している。図13²⁾に吸水率と剥離強度保持率の関係を示した。図14²⁾は、幅 50mm の剥離試験片における70℃ 90% RH 雰囲気中240h, 1200h, 1920h後の吸水率と剥離強度保持率の分布、破壊状態の関係である。

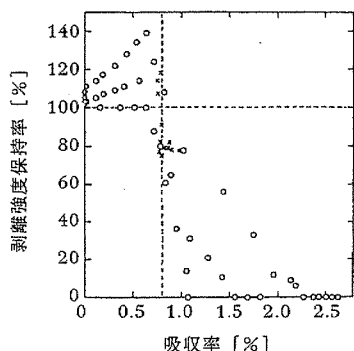


図 13 接着層の吸水率と剥離強度保持率の関係

吸水率の式(1)により、種々の幅 W の接着部において一定の平均吸水率 M_{ave} となるまでの時間 t と、その時の吸水率の分布を求めてみると図15³⁾のような結果が得られる。図15の結果を整理すると、表2に示すように、接着部の幅 W が2倍、3倍、4倍となると、

時間 t はそれぞれ4倍、9倍、16倍となることがわかる。すなわち、同一の平均吸水率 M_{ave} になるまでの時間 t は接着部の幅 W の比の2乗に比例していることがわかる。接着部の幅を広げると耐湿性は大きく向上し、逆に、接着部の幅が狭くなると耐湿性は大きく低下することになる。図16⁴⁾は、接着部の幅が12.5mmと25mmの場合の屋外暴露試験の比較である。○●が実測値、破線(I)は幅12.5mmの実測値の近似直線で、直線(II)は直線(I)の傾きを1/4にしたものである。その結果、直線(I)は幅25mmの実測値とよく一致している。

図17に示すように、高温高湿中に暴露すると接着部に水分が侵入し接着強度は低下する。しかし、乾燥して水分を追い出すと接着強度はある程度回復する。接着強度の回復の程度は接着剤、被着材、表面状態により異なる。接着強度が回復するという事は、水分の侵入により被着材と接着剤の界面での結合が破壊さ

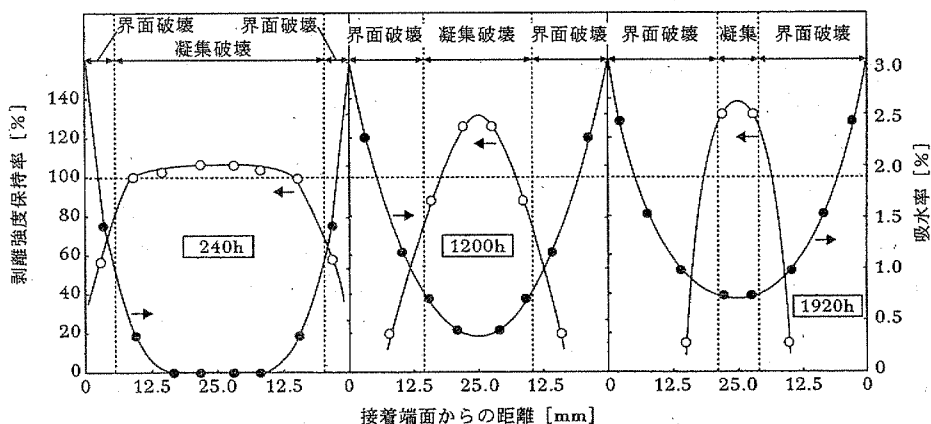


図 14 幅 50mm の剥離試験片における 70°C 90% RH 雰囲気中 240h, 1200h, 1920h 後の吸水率と剥離強度保持率の分布、破壊状態の関係

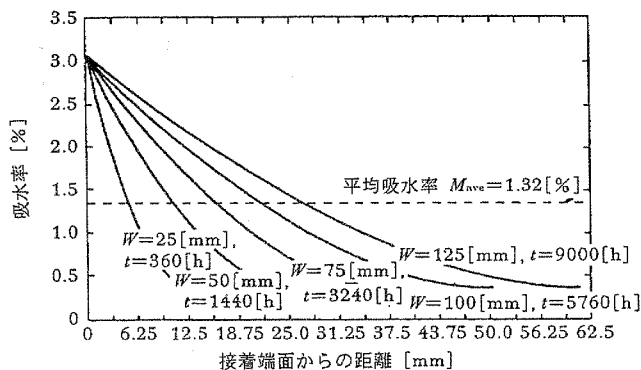


図 15 平均吸水率が同一(ここでは 1.32%) の場合の、種々の幅 W の接着部における吸水率の分布と暴露時間 t (70°C 90% RH 暴露)

表2 接着部の幅と平均吸水率が同一(ここでは1.32%)
になる時間の関係(70°C 90% RH 雰囲気暴露)

接着部の幅 W [mm]	到達時間 t [h]
25 (1)	360 (1)
50 (2)	1440 (4)
75 (3)	3240 (9)
100 (4)	5760 (16)
125 (5)	9000 (25)

()内は幅25mmに対する比率
 $t = (W/W_0)^2$

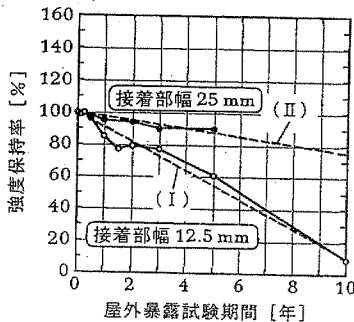


図16 屋外暴露試験における接着部の幅と劣化時間の関係

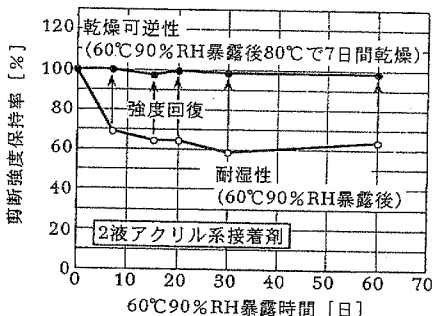


図17 高温高湿度暴露後の乾燥による接着強度回復の一例

れていないことを意味している。接着剤や被着材、表面処理法の選定試験を行う場合に、高湿度暴露試験のみでは数種類の試料が同一保持率を示した場合には優劣がつけられないが、乾燥による強度回復試験を実施すると回復性に差が見られることが多く、適切な判定が可能である。乾燥による強度回復の評価は接着剤、被着材、表面処理法の選定にあたって非常に有効であり、また、重要な評価項目である。

2.4 継続荷重(クリープ)

接着部に継続して応力が加わっている場合には、クリープ現象により強度低下を起こすことがある。接着接合物のクリープにおいては、接着剤自体の変形や破壊だけでなく接着剤と被着材料との界面における変形や破壊も生じるため、以下の説明では両者を含めてクリープと示す。クリープ変形やクリープ破壊は接着接合物の耐久性に大きな影響を及ぼす重要な因子である。クリープ耐久性は、負荷応力が大きいほど、温度が高いほど悪くなるが、湿度が加わるとさらに低下する。

クリープ耐久性の評価を行うためには、試験片に応力を負荷する装置が必要である。一般には、重錘吊り下げ式のクリープ試験装置が使用されるが、応力を負荷した状態で種々の環境暴露試験を行うためには、応力負荷装置は数多く使用できるように小型で安価なものが便利である。引張り剪断試験片(JIS K 6850)に応力を負荷する装置の一例を図18⁵⁾に示す。この装置は非常に小型で300kgfまでの荷重が負荷できる。

図19⁵⁾は、図18に示した応力負荷装置を用いて単純ラップ試験片に剪断応力を負荷した状態で、60°Cにおいて相対湿度を5% RHから90% RHまで変化した各雰囲気中に暴露し、破断するまでの時間を測定した結果である。被着材料は軟鋼板、接着剤は変性アクリル系接着剤である。この結果より、相対湿度が高くなるほど同一応力の負荷において破断時間が短くなることがわかる。これは、図20⁶⁾に示すように、①接

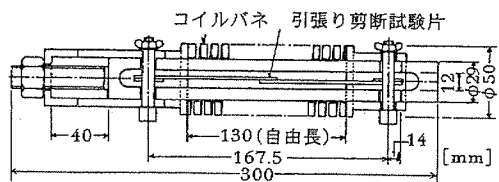


図18 三菱電機式スプリング応力負荷装置の形状・寸法

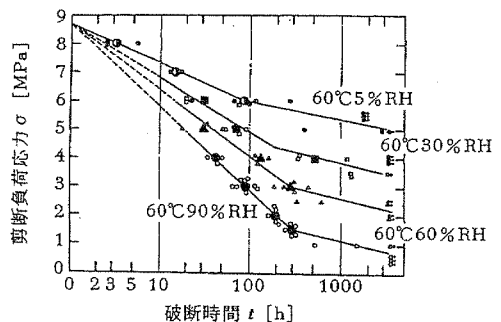


図19 60°Cにおける相対湿度とクリープ破断特性

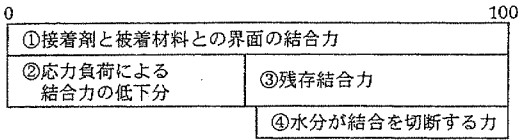


図20 応力による結合力の低下と残存結合力、水分が結合を破壊する力の関係

接着剤と被着材料との界面の結合力、②応力負荷による結合力の低下分、③①から②を減じた残存結合力、④水分が界面での結合を破壊する力の関係によるものと考えられ、③の残存結合力に対して④の水分が結合を破壊する力が大きい場合に接着部に水分が侵入しやすくなりクリープ破断を起こしやすくなると考えられる。負荷応力が大きいほど②が大きくなり③の残存結合力は低下し、湿度が高いほど④の水分が界面での結合を破壊する力は大きくなる。

2.5 繰り返し荷重(疲労)

接着部に応力が繰り返し加わる場合には強度低下の要因となる。繰り返し疲労による強度低下は、接合部での応力集中が大きいほど生じやすく、スポット溶接やリベットのような点接合で起こりやすい。接着剤による接合は、面接合であるため応力集中は少ないが、繰り返し疲労により強度は低下する。

2.5.1 疲労耐久性の評価方法

疲労耐久性は、ISO 9664に規定されているような引張り剪断繰り返し試験により評価されることが多い。図21に示すように、繰り返し応力は、平均応力 τ_m に対して応力振幅 τ_a の正弦波が負荷される。板材の接合の場合は、被着材料の圧縮による座屈が起こらない

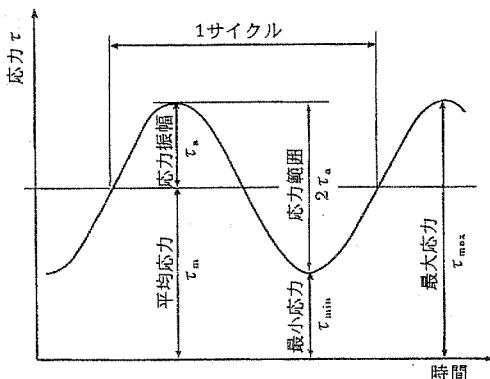


図21 疲労試験における応力の負荷状態

ように、平均応力 τ_m より応力振幅 τ_a を大きく設定して片振り試験を行う。応力の設定は、一般に、応力比 $R_r (= \tau_{min} / \tau_{max})$ が一定となるように、最大応力 τ_{max} と最小応力 τ_{min} を変化させる。応力比 R_r は0.1に設定されることが多い。周波数は一般に30 Hz程度で行う。

疲労試験の結果は、縦軸に応力振幅 τ_a 、応力範囲($\tau_{max} - \tau_{min}$)、最大応力 τ_{max} などを普通軸または対数軸でとり、横軸に破断までのサイクル数 N を対数軸で示した $S-N$ 線図で示される。両対数で図示した場合は $S-N$ 線図は一般に直線となる。また、指定された繰り返し回数 N_F に耐える剪断応力の上限值を時間強さといひ、 $N_F = 10^7$ または 10^6 回における時間強さを示すことが多い。

なお、接着接合物は応力の加わる方向により強度が大きく異なるので、実際の接合部に加わる応力の方向と大きさに準じた試験を行うことが必要である。

2.5.2 接着の疲労特性に影響を及ぼす因子

接着の疲労特性には温度が大きく影響する。図22⁷⁾は、ウレタン系接着剤でステンレス板を接着した試験片の、0℃、25℃、30℃、40℃雰囲気中における片振り疲労試験の結果である。この結果より、温度の上昇に伴い疲労特性は低下することがわかる。図23は、変成アクリル系接着剤の疲労試験の結果である。片振り、20 Hzの試験において、図22と同様に、測定温度が-15℃、25℃、50℃、80℃、100℃と上昇するにつれて疲労特性が低下している。高温において疲労特性が低下するのは、高温では接着剤のヤング率が低下するため剪断接着強度が低下することと、片振りの剪断疲労試験においては常に平均応力 τ_m が加わっているためクリープ変形も同時に起こっているためと考えられる。

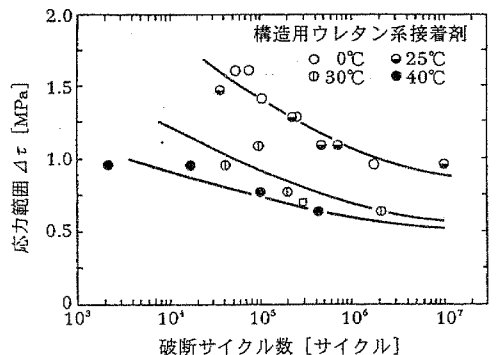


図22 接着の疲労特性における温度の影響 (ウレタン系接着剤、ステンレス板)

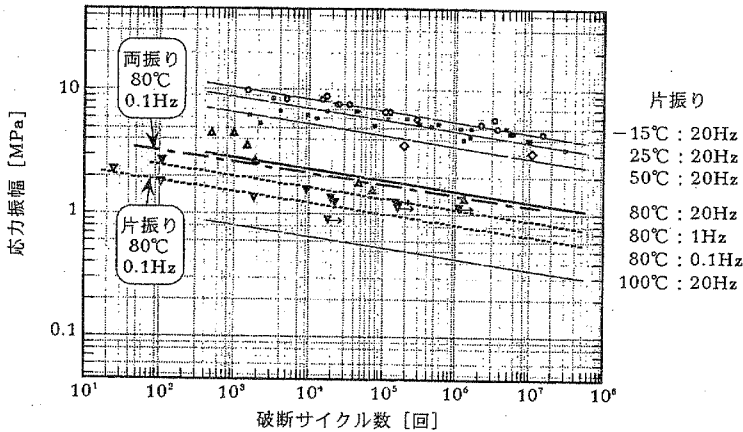


図23 疲労試験結果(温度, 周波数, 振り方向の影響)
(変成アクリル系接着剤, 鋼)

図23では、周波数依存性も測定しているが、周波数の低下につれて疲労特性は低下していることがわかる。また、80°C, 0.1Hzの試験において、片振りと両振りの比較も行っている。その結果、応力振幅が同じ場合は、片振り試験の方が両振り試験より疲労特性が劣っている。片振り試験が両振り試験よりも劣っているのは、片振りの場合は平均応力に相当するクリープ応力が負荷されているためと考えられる。

図24⁹⁾は、2液型アクリル系接着剤でステンレスを接着した場合の疲労特性である。ステンレスの表面処理は、無処理、短波長紫外線の照射処理、プライマー処理である。この結果より、接着剤、被着材料が同一の場合でも、表面処理を行い界面での接着性を改善することにより疲労特性を改善できることがわかる。低荷重で繰り返し回数が多い場合には、疲労による亀裂の進展は接着剤と被着材料の界面で起こるといわれており⁹⁾、疲労特性の向上には界面での接着性の改善は重要である。

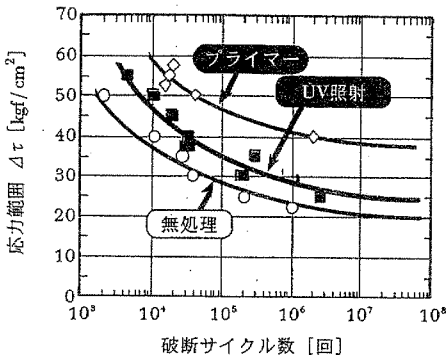


図24 接着の疲労特性における表面処理の影響

3. 長期劣化の予測法

3.1 長期熱劣化の予測法

長期間における熱劣化を予測する方法としてアレニウス法がよく用いられる。アレニウスの一次反応速度式から、接着強度 P がある値 P^* まで低下するのに要する時間 t^* は、

$$\ln t^* = a + E/RT \tag{3}$$

となる。ここで、 E は活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は暴露温度の絶対温度、 a は定数である。したがって、数点の温度 T において t^* を測定し、 $\ln t^*$ と $1/T$ の関係をプロットすれば直線関係が得られ、温度と寿命の関係が推定できる。

図25に、熱劣化試験の結果の一例を示した。アレニウスプロットを行うために、図に示すように、劣化曲線を直線近似する。この近似直線から、それぞれの温度で接着強度の保持率が95%、90%、85%、80%、70%、60%、50%まで低下する時間を求める(150°C

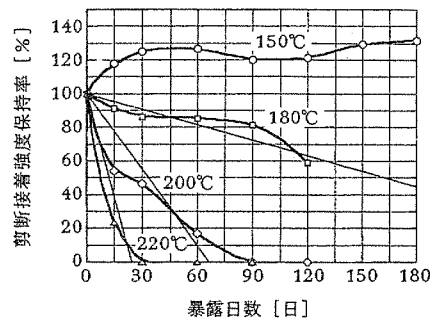


図25 熱劣化試験の一例

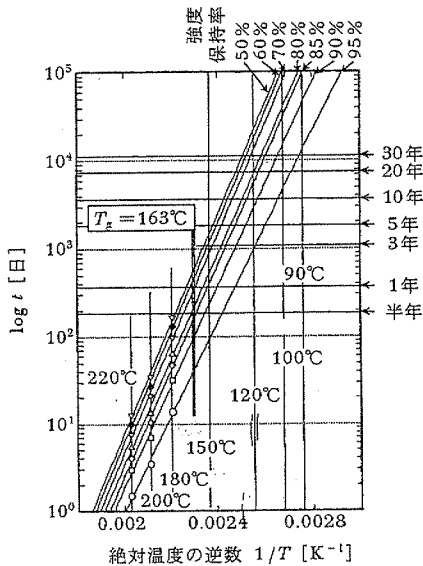


図26 図25の180℃以上の温度でのアレニウスプロット

では強度低下していないので180℃以上の温度についてのみ求めている)。次に、図26に示すように、横軸に絶対温度の逆数(1/T)、縦軸に時間の対数log tをとって、図25から求めた時間をプロットする。プロットした点に対して近似直線を引く。この直線を試験温度以下の温度領域まで外挿することにより、実使用温度における劣化時間を求めることができる。

図26の結果から、150℃半年後の保持率を予測すると91~92%程度となる。しかし、図25の150℃の実験結果では半年後も強度低下は見られない。これは、ここで使用した接着剤のガラス転移温度(T_g)が163℃であり、アレニウスプロットに使用した温度はすべて T_g 以上で、それを直線外挿しているためである。直線の傾きは E/R で、ガラス転移温度(T_g)を境にして E は変化する。 T_g 以下での E は T_g 以上の E より大きくなるため、実際には、図26の直線は T_g を境にして傾きが急な折れ線となる。

3.2 長期耐湿劣化, 屋外暴露劣化の推定法

3.2.1 アレニウス法による推定

熱劣化と同様に耐水性, 耐湿性の長期劣化の予測にもアレニウス法が適用できる。

2液型アクリル系接着剤で鋼/ステンレスを接着したものの25℃90%RH雰囲気における長期間の強度変化を求める例を示す。まず、図27¹⁰⁾に示すように、40℃, 50℃, 60℃の各々90%RH雰囲気における加

速試験を行う。次に、図27において、剪断強度の保持率が80%, 70%, 60%, 50%まで低下する時間をそれぞれ求め、図28¹⁰⁾に示すように、それぞれの保持率 P まで低下する時間の対数と暴露温度 T [°K]の逆数との関係としてプロットする。それぞれの保持率について直線を25℃まで外挿する。保持率と図28より得られた25℃における時間の関係をプロットすると、図29¹⁰⁾に示すように、25℃90%RHに連続暴露した場合の経時変化曲線が得られる。この方法で求めた推定曲線の精度ははかり高い¹⁰⁾。

屋外環境においては湿潤状態と乾燥状態が繰り返される。そこで、乾燥による接着強度の回復を考慮することにより、屋外暴露における長期間の経時変化を予測することができる。図30¹⁰⁾に示すように、加速試験により、湿潤状態における強度低下率と乾燥による強度回復率の関係を求めておく。次に、図31¹⁰⁾に示すように、図29で得られた25℃90%RH雰囲気連続

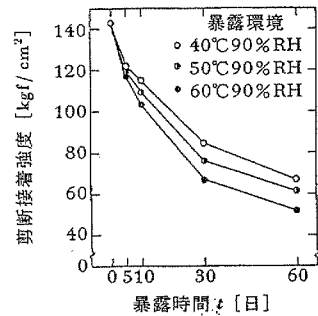


図27 高温高湿暴露による加速試験結果

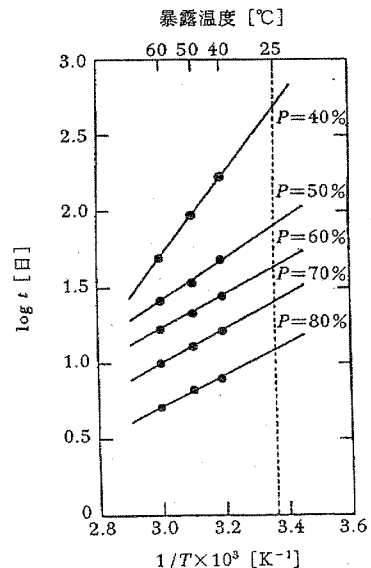


図28 保持率Pにおけるアレニウスプロット

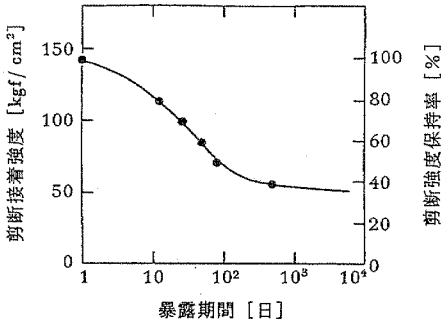


図29 25℃ 90% RH連続暴露における接着強度の経時変化の推定結果

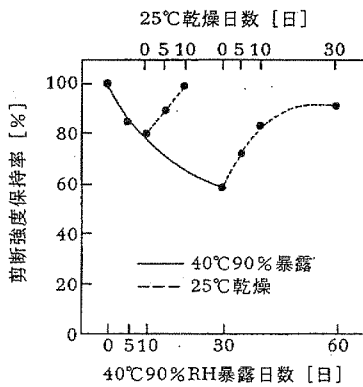


図30 高温湿度中暴露による接着強度の低下と乾燥による接着強度の回復

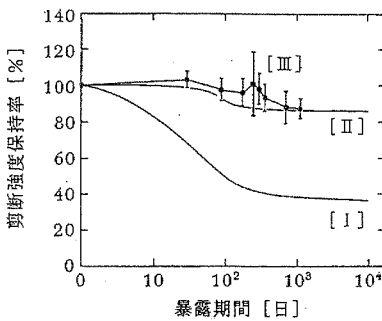


図31 乾燥による強度回復を考慮した屋外暴露劣化の推定結果(Ⅱ)と実測値(Ⅲ)の比較
[曲線(Ⅰ)は図29の劣化曲線]

暴露における長期間の強度低下予測カーブ(図31の曲線(Ⅰ))を、図30から得られた湿潤状態における強度低下率と乾燥による強度回復率の関係で補正すると曲線(Ⅱ)が得られる。この曲線が、屋外環境における長期間の強度低下の予測カーブである。実際の屋外暴露試験結果(Ⅲ)と予測カーブ(Ⅱ)とはよく一致している。

3.2.2 吸水率分布からの推定

2.3で述べたように、拡散係数を求めておけば接着部内の吸水率の濃度分布は(1)式により計算できる。非常に細長い接着形状で、水分の侵入が接着部の両サイドだけからの場合は(1)式で計算できるが、四角や円形やさらに複雑な形状の場合は、水分の侵入は一方方向のみではなく、例えば四角形のコーナー部では両辺から水が侵入することとなるため、(1)式では計算が困難である。

複雑な形状においても、水分の拡散方程式は同じであるので、最近ではCAE解析を用いて容易に水分の濃度分布を知ることができる¹¹⁾。図32¹¹⁾に、接着部の形状が正三角形の場合の、80℃ 90% RH 雰囲気中で60h、120h、180h、240h後の吸水率の濃度分布を示した。水分濃度と接着強度の関係はデータが少ないため正確なことはいえないが、水分濃度が飽和吸水率の1/4~1/3以上になると接着強度は急激に低下するようである。安全サイドの推定を行う場合は、水分濃度が飽和吸水率の1/4以上となる部分で接着強度が0とすれば、水分濃度が飽和吸水率の1/4以下の面積比が残存強度比(接着強度保持率)となる。図32の結果では、水分濃度が飽和吸水率の30%以上で接着強度が0となるとして実験結果とよく一致している¹¹⁾。

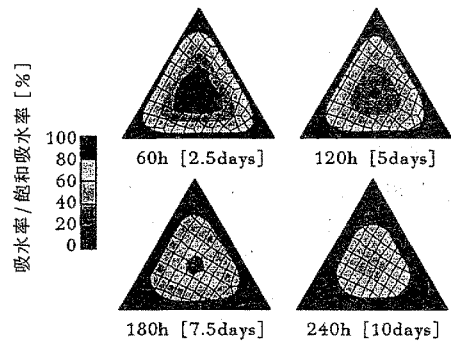


図32 接着層内への水分拡散の解析事例
(三角形試験片：図10のC-2試験片)

3.3 長期クリープ耐久性の予測方法

3.3.1 温度-時間換算による方法

長期間のクリープ強さを短時間で推定する方法の一つに、温度-時間換算法がある。図33¹²⁾に示すように、この方法ではまず、温度を変化させてクリープ破断試験を行う。次に、例えば50℃における10年後のクリープ強さを推定するには、50℃の測定結果の曲線を延長するように、60℃、70℃、80℃の測定結果

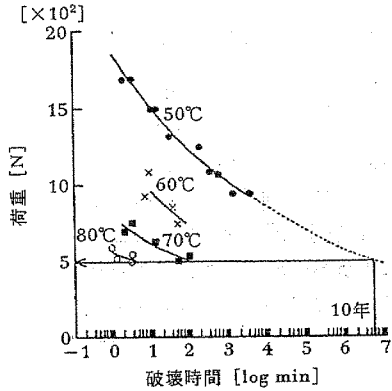


図33 長期クリープ強度の推定方法

を図の右方向にずらして図中の破線のように1本のマスターカーブを作成する。このマスターカーブから10年目の荷重を読めばよい。この結果では約0.5kNとなっている。なお、この実験の被着材料は軟鋼板、接着剤は1液エポキシ系接着剤である。

3.3.2 Larson-Millerのマスターカーブ法

Larson-Miller法はアレニウスの反応速度理論から誘導された方法で、

$$T(C + \log t) = E/2.3R = \text{Const. (応力一定)} \quad (4)$$

となる。ここで、 T は試験の絶対温度、 t はクリープ破断時間、 E は活性化エネルギー、 R はガス定数、 C は材料定数である。よって、同一負荷応力で異なる温度下で求めたクリープ破断時間は、 $T(C + \log t)$ で整理すると一定値を示すことになる。よって、横軸を

$T(C + \log t)$ 、縦軸を負荷応力で図示すると1本の線(直線とは限らない)が得られる。この線がLarson-Millerのマスターカーブである。ここで、材料定数 C を求める必要があるが、全測定値を横軸に $T(C + \log t)$ 、縦軸に応力値でプロットした場合に、最も相関係数が高くなるように決めればよい。

図34に、Larson-Millerのマスターカーブを求めるために行ったクリープ破断試験の結果の一例を示した。接着剤は変成シリコン系接着剤で、プラスチック同士を接着したものである。クリープ試験は、40°C、60°C、70°C、80°C、90°Cで行っている。Larson-Millerのマスターカーブは横軸を $T(C + \log t)$ でとるため、負荷荷重を細かく変えて試験するより、温度を広範囲に変化させて試験を行う方が $T(C + \log t)$ を広範囲にとることができ効果的である。図35にLarson-Miller

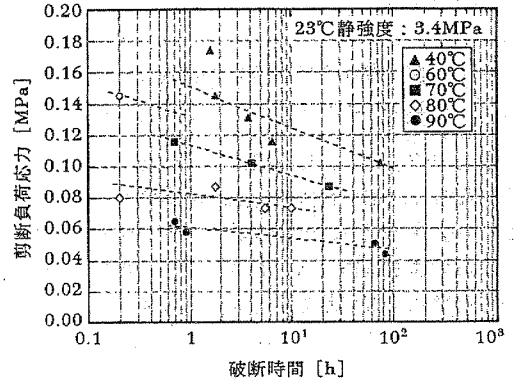


図34 Larson-Millerのマスターカーブを求めるために行ったクリープ破断試験の一例

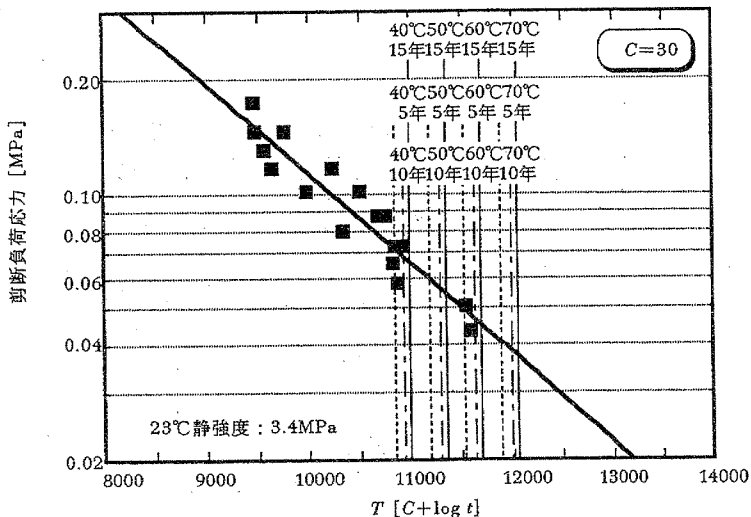


図35 Larson-Millerのマスターカーブ(C=30)

のマスターカーブを示した。この場合は $C=30$ で最も高い相関を示した。図35中に、 40°C 、 50°C 、 60°C 、 70°C でそれぞれ5年目、10年目、15年目の位置を示した。

3.4 疲労寿命の求め方

金属材料の場合、一般に 10^7 サイクルでの時間強度を疲労限界応力として、それ以下の応力では疲労破壊を起こさないとされている。接着接合の場合も金属材料と同じことがいえるかどうかは現時点ではつきりしていない。

図23に示したように、 $S-N$ 線図を両対数で表示し場合は、 $S-N$ 線図は一般に直線となるので、求めたいサイクル数まで外挿して応力値を求めておけば安全サイドの推定ができる。

4. 製品の耐用年数経過後の安全率の定量化法¹³⁾¹⁴⁾

複数の環境・応力複合条件下での長期耐久性を予測し、製品の耐用年数経過時点での接着強度の安全率を求める方法を以下に示す。ここでは、接着強度のばらつきも考慮されている。耐用年数経過時点で接着強度の安全率に余裕がある場合は、その余裕を、製品の許容不良率の低減や構造簡素化、作業性向上に再配分することができ、最適設計が可能となる。

4.1 耐用年数経過後の安全率の算出法

図36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着強度の平均値を $F_{\mu R_0}$ 、最高使用温度における接着強度の室温強度に対する低下率を温度係数 η_{T_0} として、最高温度における初期の平均強度 $F_{\mu R_0} \cdot \eta_{T_0}$ を基準強度とする。熱、湿度、ヒートサイクル、繰り返し疲労、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、3.で述べたように、例えば、長期間の耐熱性は、アレニウスプロットによる方法、耐湿性は、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やアレニウスプロットによる方法、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 $S-N$ 線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

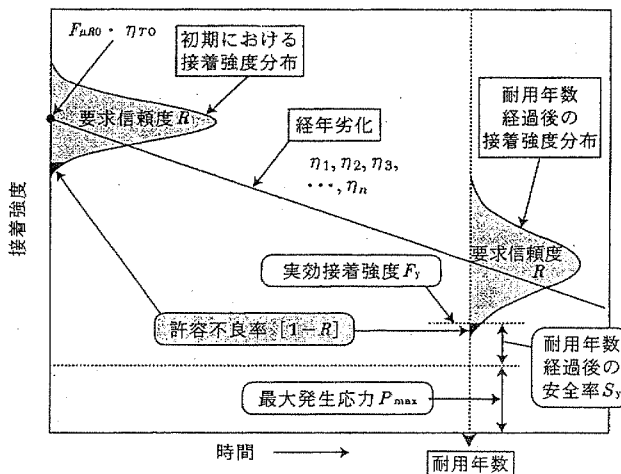


図36 接着強度の経年変化の概念図

る接着強度を実効接着強度 F_y とすると、 F_y は(5)式で求められる。

$$F_y = F_{\mu R_0} \times \eta_{T_0} \times \eta_y \times D_y \quad (5)$$

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37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、 $k \cdot CV_0$ に対する D_y を図38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。

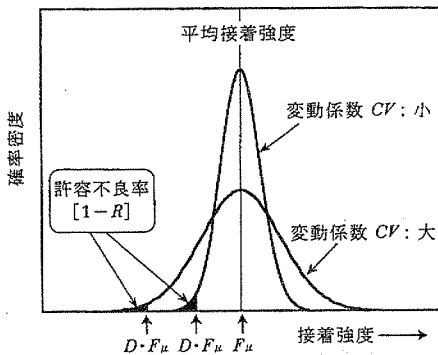


図37 平均接着強度 F_{μ} 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の概念図

耐用年数経過後の安全率の裕度 S_y は、(6)式により求まる。

$$S_y = F_y / P_{\max} \quad (6)$$

なお、接着部がさらされる最高温度下で疲労試験やクリープ試験などの応力負荷試験を実施する場合は、(7)式により、(5)式より直接的に実効接着強度 F_y を求めることができる。

$$F_y = F_{fT} \times \eta_y \times D_y \quad (7)$$

F_{fT} は使用温度範囲の最高温度でのクリープ試験や疲労試験から推定した耐用年数経過時点でのクリープ強度や疲労強度である。 F_{fT} を用いる場合は、初期の室温における静的な平均接着強度 $F_{\mu R_0}$ と温度係数 η_{T_0} は不要である。耐用年数経過後の劣化係数 η_y にクリープや疲労などの係数は含める必要はない。

4.2 耐用年数経過後の安全率の裕度の評価事例

耐用年数25年、最高使用温度100℃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年後の安全率の裕度を評価した。要求条件の詳細を表3に、室温における静強度の平均値を基準強度として(7)式より求めた評価結果を表4に示した。表5には、100℃における疲労試験の結果を基準強度として(7)式より求めた評価結果を示した。表4と表5の結果では、安全率に2.7倍程度の相違がある。これは、片振りの疲労試験においては平均応力分がクリープ応

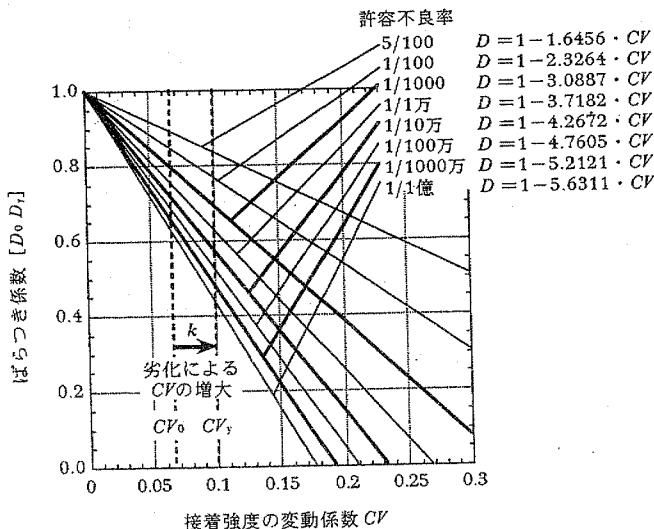


図38 接着強度の変動係数 CV 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の関係

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}	剪断 0.10 MPa
応力負荷状態	繰り返し疲労 10^6 回
温度	輸送時 冬季 -40℃~夏季 +40℃ 1回のみ
	停止時 冬季 -20℃~夏季 +40℃ 冬季 -20℃~ 0℃ 夏季 +20℃~+ 40℃
	運転時 冬季 -20℃~夏季 +100℃ 冬季 -20℃~+ 60℃ 夏季 +20℃~+100℃ 運転による温度サイクル 1回/日

表4 室温初期強度を基準とした場合の25年後の安全率の裕度 S_y

室温での平均接着強度 $F_{\mu R_0}$	26.46 MPa	$CV=0.067$
25年後のばらつき係数 D_y	0.569	$\downarrow \times 1.5$
温度係数(100℃) η_{T_0}	0.23	$CV=0.100$
耐用年数経過後の劣化係数 η_y ($\eta_y = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$)	0.198	
疲労(25℃) η_1	0.26	
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 ($F_y = F_{\mu R_0} \cdot D_y \cdot \eta_{T_0} \cdot \eta_y$)	0.686 MPa	
最大発生応力 P_{max}	0.10 MPa	
25年後の安全率 S_y ($S_y = F_y / P_{max}$)	6.86	

表5 100℃疲労強度を基準とした場合の
25年後の安全率の裕度 S_y

100℃における疲労強度 F_{100}	0.58 MPa
25年後のばらつき係数 D_y	0.569
温度係数(100℃) η_{T_0}	—
耐用年数経過後の劣化係数 η_y ($\eta_y = \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$)	0.76
疲労(25℃) 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 ($F_y = F_{100} \cdot D_y \cdot \eta_y$)	0.251 MPa
最大発生応力 P_{max}	0.10 MPa
耐用年数経過後の安全率 S_y ($S_y = F_y / P_{max}$)	2.51

4.3 安全率の裕度の再配分

表5の結果より、25年後の安全率の裕度は2.51倍であり、まだ許容不良率を低減することができる。表6に示すように、許容不良率を1/1億まで低下させてもまだ安全率の裕度は1.94倍となり、実質的に不良品は発生しないと考えられ、修理部品の在庫の削減、修理費用の低減などを図ることができる。

さらに残りの安全率の裕度分については、発生応力の上昇に回すことができ、すなわち、接着剤の塗布面積を減少させることができる。表6に示すように、許容不良率を1/1億とした場合は、接着剤塗布面積比を70%まで低減することができる。これにより、部品寸法の小型化や接着剤使用量の低減、接着剤はみ出し量の減少による仕上げ作業の廃止などでコストダウンを図ることができる。

力として作用しており、高温試験ではクリープ現象が室温より大きくなるためと考えられる。この結果から、高温で応力が負荷される場合は、高温での応力試験から得られる強度を基準強度として(7)式により求める必要があるといえる。

表6 許容不良率，接着剤塗布面積比と安全率の裕度

許容不良率 [1-R]		1/10万	1/1000万	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	$S_y = 1.25$	$S_y = 1.05$	$S_y < 1.00$

参考・引用文献

- 1) 原賀康介, 児玉峯一; 日本接着協会誌, 16, 6, 224 (1980)
- 2) 原賀康介; 日本接着協会誌, 23, 5, 178 (1987)
- 3) 宮入裕夫編; 接着応用技術, pp.515-540, (日経技術図書) (1991)
- 4) 宮入裕夫編; 先端接着接合技術, pp.372-381, (エヌジーティー) (2000)
- 5) 原賀康介, 山田祥, 児玉峯一; 日本接着協会誌, 19, 8, 333 (1983)
- 6) 宮入裕夫編; 先端接着接合技術, pp.354-359 (エヌジーティー) (2000)
- 7) 原賀康介; 接着の技術, 13, 1, 32 (1993)
- 8) 宮入裕夫編; 先端接着接合技術, pp.360-371, (エヌジーティー) (2000)
- 9) 栢木浩之, 山本拓, 押野幸一, 下鍋達也, 浜原京子, 大橋義暢; 新時代を担う構造接着技術 Part 2 シンポジウムテキスト, p.23, ((社)自動車技術会) (1994年3月10日)
- 10) 原賀康介; 日本接着協会誌, 15, 12, 568 (1979)
- 11) Haruna, K. and Haraga, K.; 8th Int. Conf. on Composites Engineering (2001)
- 12) 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, p.56, ((社)自動車技術会) (1992)
- 13) 原賀康介; Mate2003 (9th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics") pp.139-144 (2003)
- 14) 原賀康介; 第33回信頼性・安全性シンポジウム発表報文集, pp.117-122, ((財)日本科学技術連盟) (2003-7-7)

(原賀康介)