

最新接着講座 (第2講)

J. Jpn. Soc. Colour Mater., 87 [5], 169-177 (2014)

接着総論：接着技術の現状と高信頼性接着の基礎 (2)

原賀 康介*†

*原賀接着技術コンサルタント 兵庫県芦屋市緑町1-9-301 (〒659-0042)

† Corresponding Author, E-mail: haraga-kosuke@kcc.zaq.ne.jp

(2014年1月22日受付, 2014年2月5日受理)

要 旨

接着技術の現状と、接着の信頼性に関して、考え方、指針、設計基準を示した。高信頼性接着を達成するためには、まず、接着剤の内部で破壊する凝集破壊率を40%以上にすることと、接着特性の変動係数を0.10以下にすることである。耐久性は与えられるものではなく、作り出すものである。接着の欠点はほかの接合方法でカバーするなどの工夫も信頼性向上に効果的である。

キーワード：接着, 信頼性, 耐久性, 設計基準, 設計許容強度

5. 接着の実力強度と設計基準

ここで述べる設計基準は、短い開発期間の中で多くの評価試験や検証試験なしで接着が適用できるかどうかを簡易に判断するためのものである。設計基準は一種のマニュアルであるため、結論だけ示せばそれでよいのだが、その基準に至った経緯を理解することで、接着の信頼性に対する認識が深まるので、以下に、設計基準策定の考え方から示す。

5.1 接着の実力強度

5.1.1 破断強度と平均強度

接着強度は、破断試験を行い破断強度の平均値であらわされることが多い。しかし、この平均破断強度は接着の実力強度とは言えない。接着の実力強度を明確にしなければ、信頼性の高い強度設計はできない。

5.1.2 接着の実力強度に影響する因子

接着の実力強度を求めるために、次の強度低下因子を考える。なお、以下の説明では、高信頼性接着の指針である、凝集破壊率は40%以上、変動係数CVは0.10以下まで作り込まれていることを前提としている。

(1) 接着強度の温度依存性

接着強度は測定温度によって変化し、一般には高温で強度が低下する。製品の接着部の使用温度範囲の最高温度での接着強度で考える必要がある。

(2) 接着強度のばらつき

接着強度にはばらつきがあり、許容不良率の上限強度で考

える必要がある。許容不良率での上限強度 p は、図-6から求めることができる。

(3) 内部破壊の発生

図-13に示すように、接着部に力を加えていくと最終的には破断するが、破断以前に接着部の内部ではすでに破壊が始まっている²⁾。破断以前に生じる破壊を内部破壊と呼ぶ。小さな力で内部破壊が生じる場合や、繰り返し疲労が加わるような場合には、内部破壊が進行して短時間で破壊することになる。内部破壊が始まる強度(内部破壊発生開始強度)を考えることが重要となる。

(4) 劣化による強度低下とばらつきの増加

図-14は、初期と劣化後の接着強度の分布を示したものである。劣化により接着強度は低下し、ばらつきは増加する^{2,5,6,9)}。劣化によるばらつきの増加は、変動係数の増加として扱う。筆

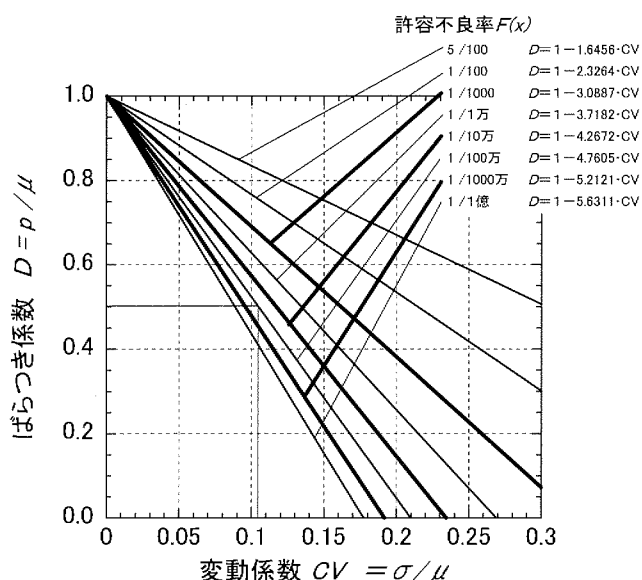
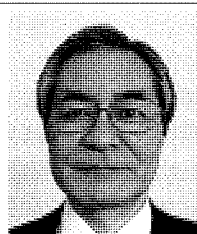


図-6 正規分布における変動係数, 許容不良率, ばらつき係数の関係図



【氏名】 はらが こうすけ
 【現職】 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
 【専門】 接着技術, とくに構造接着と接着信頼性保証技術
 【経歴】 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, 入社以来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月三菱電機株式会社を退職し, 原賀接着技術コンサルタントを設立。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。

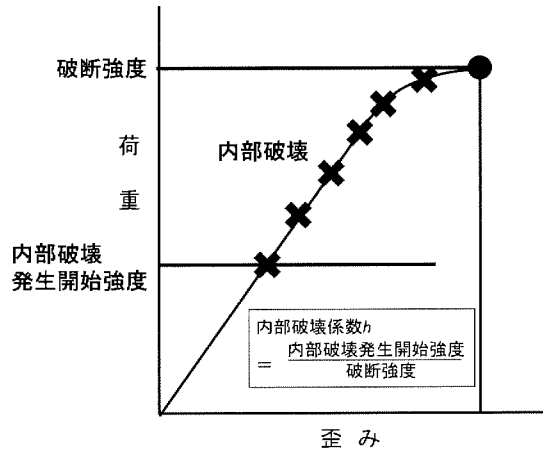


図-13 接着継手の荷重-歪み線図における内部破壊の発生の模式図

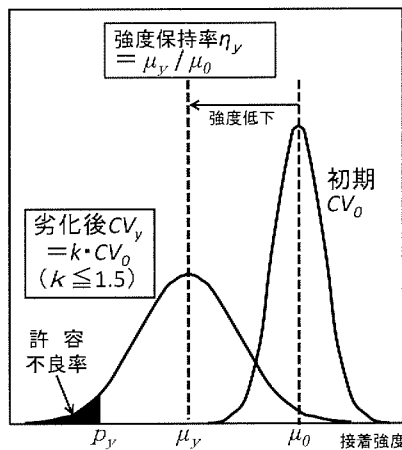


図-14 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大

者が行った多数の長期劣化試験の結果から、劣化による変動係数の増加率 k は、屋外で30年間程度使用された場合でも、最大で初期の1.5倍と考えることができる^{2,5,6,9)}。使用期間や使用環境がより楽な場合は、変動係数の増加率 k を1.4倍や1.3倍としてもよい。

初期の平均強度 μ_0 に対する環境劣化後の平均強度 μ_y の割合(強度保持率 η_y)は、高信頼性接着である以上、50%以上は確保できていることが必要と考えられる。環境劣化後の強度保持率が50%以下に低下するような場合には、予測できない劣化モードによる破壊を引き起こす可能性があるためである。

初期の変動係数 CV_0 が0.10、劣化による変動係数の増加率 k が1.4倍(劣化後の変動係数 $CV_y = 0.14$)、許容不良率が1/10万とすると、劣化後の許容不良率での上限強度 p_y は、劣化後の平均強度 μ_y の40%となる。劣化後の平均強度の保持率 η_y が初期の50%であったとすれば、劣化後の許容不良率1/10万における上限強度 p_y は、初期の平均強度 μ_0 の20%の強度ということになる。

5.1.3 内部破壊発生開始強度

内部破壊の発生開始強度は、(1) 静的荷重のみが加わる場合、(2) 高サイクル疲労が加わる場合、(3) 冷熱繰り返しなどの低サイクル疲労が加わる場合、の三つの場合について考える。

(1) 静的荷重のみが加わる場合

表-1^{2,3,6,10)}は、アコースティックエミッション(AE)により、

表-1 AEによる内部破壊発生開始荷重比の評価結果

破壊状態	試料番号	AE発生開始荷重比
凝集破壊	1	51%
	2	76%
	3	100%
	平均	76%
界面破壊	1	7%
	2	8%
	3	31%
	平均	15%

AE発生開始荷重比 = AE発生開始荷重 / 破断荷重

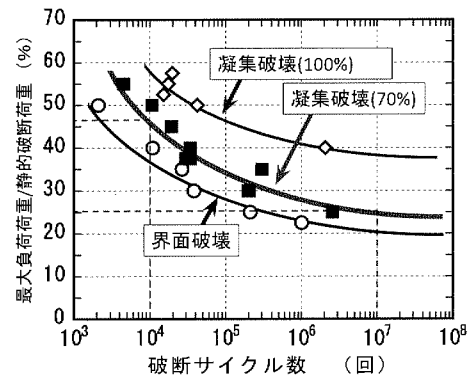


図-15 凝集破壊率と疲労試験結果

凝集破壊する場合と界面破壊する場合について、破断荷重に対して最初のAE(ひび割れ音)が発生する荷重の比を測定した結果である。この結果より、凝集破壊の場合は、破断荷重の50%以上の荷重負荷でひび割れが生じていることがわかる。界面破壊の場合は、破断荷重の10%以下の荷重負荷でも内部破壊が始まっており、界面破壊は凝集破壊にくらべて強度信頼性が非常に低いことがわかる。ここでは凝集破壊の系に限っているので、静的荷重のみが加わる場合の内部破壊係数(破断荷重に対する内部破壊発生開始荷重比) h_1 を0.5と仮定する。仮定としたのは、AE測定データの数は非常に少ないためであり、今後のデータ蓄積が待たれるところである。

(2) 高サイクル疲労が加わる場合

疲労破壊は内部破壊の蓄積によるものと考え、図-15^{2,6)}に示すように、疲労試験の結果から求めた。高サイクル疲労の場合は、破断サイクル数 10^7 サイクルにおける最大負荷荷重の破断荷重に対する比を内部破壊係数 h_2 とし、凝集破壊率70%の試験結果から求めると、 $h_2 = 0.25$ となる。

(3) 低サイクル疲労が加わる場合

(2)と同様に、破断サイクル数 10^4 サイクルにおける最大負荷荷重の破断荷重に対する比を内部破壊係数 h_3 とすると、 $h_3 = 0.45$ となる。

5.2 接着強度の設計基準

5.2.1 設計基準強度と設計許容強度

接着部の強度設計を行う際に適用する接着の上限強度を設計基準強度という。しかし、この設計基準強度で設計してはならず、実際には、設計基準強度を安全率で割った強度が設計に使用できる上限強度となる。この実際に設計に使用できる上限強度を設計許容強度と呼んでいる。

表-2 設計基準強度比 P^* と設計許容強度比 P_S^* の計算結果

内部破壊係数 h	劣化後		設計基準強度比 P^* (安全率 $S=1.0$) $P^* = h \cdot D_y \cdot \eta_y$	設計許容強度比 $P_S^* = P^*/S$	
	保持率 η_y	ばらつき係数 D_y		安全率 $S=1.5$ $P^*/1.5$	安全率 $S=2.0$ $P^*/2.0$
静荷重負荷 $h_1=0.50$	0.75	0.7	0.2625 (1/4)	0.1750 (1/6)	0.1313 (1/8)
		0.6	0.2250 (1/4)	0.1500 (1/7)	0.1125 (1/9)
		0.5	0.1875 (1/5)	0.1250 (1/8)	0.0938 (1/11)
		0.4	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)
	0.50	(0.3)	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
		0.7	0.1750 (1/6)	0.1167 (1/9)	0.0875 (1/11)
		0.6	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)
		0.5	0.1250 (1/8)	0.0833 (1/12)	0.0625 (1/16)
低サイクル疲労 $h_3=0.45$	0.75	0.4	0.1000 (1/10)	0.0667 (1/15)	0.0500 (1/20)
		(0.3)	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
		0.7	0.1575 (1/6)	0.1050 (1/10)	0.0788 (1/13)
		0.6	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)
	0.50	0.5	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
		0.4	0.0900 (1/11)	0.0600 (1/17)	0.0450 (1/22)
		(0.3)	0.0675 (1/15)	0.0450 (1/22)	0.0338 (1/30)
		0.7	0.1313 (1/8)	0.0875 (1/11)	0.0657 (1/15)
高サイクル疲労 $h_2=0.25$	0.75	0.6	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
		0.5	0.0938 (1/11)	0.0625 (1/16)	0.0469 (1/21)
		0.4	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
		(0.3)	0.0563 (1/18)	0.0375 (1/27)	0.0282 (1/35)
	0.50	0.7	0.0875 (1/11)	0.0583 (1/17)	0.0438 (1/23)
		0.6	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
		0.5	0.0625 (1/16)	0.0417 (1/24)	0.0312 (1/32)
		0.4	0.0500 (1/20)	0.0333 (1/30)	0.0250 (1/40)
(0.3)	0.0375 (1/27)	0.0250 (1/40)	0.0188 (1/53)		

5.2.2 設計基準強度

5.1で述べた接着強度の低下因子から設計基準強度 P を求める。ここで、ベース強度としては、初期の室温における平均強度ではなく、使用環境の最高温度下における高温平均強度 μ_T を用いる。

ベース強度 (高温平均強度) μ_T に対する設計基準強度 P の比率を「設計基準強度比 P^* 」とあらわすと、

$$\text{設計基準強度比 } P^* = \text{設計基準強度 } P / \text{高温強度 } \mu_T$$

$$= \text{内部破壊係数 } (h_1 = 0.5, h_2 = 0.25, h_3 = 0.45)$$

$$\times \text{劣化後のばらつき係数 } D_y (\geq 0.4)$$

$$\times \text{劣化後保持率 } \eta_y (\geq 0.5)$$

となる。

表-2に、設計基準強度比 P^* の計算結果を示した。劣化後の強度保持率が50%で劣化後のばらつき係数が0.40の場合の、高温強度に対する設計基準強度比 P^* は、静的荷重負荷の場合は1/10、低サイクル疲労負荷の場合は1/11、高サイクル疲労負荷の場合は1/20となる。

5.2.3 設計許容強度

設計許容強度は、設計基準強度 P を安全率 S で除した強度である。ベース強度 (高温平均強度 μ_T) に対する設計許容強度の比率を設計許容強度比 P_S^* とすると、

$$\text{設計許容強度比 } P_S^* = \text{設計基準強度比 } P^* / \text{安全率 } S$$

となる。設計基準強度には、接着強度の温度依存性、内部破

壊、劣化、ばらつきなどの強度低下要因が含まれているため、安全率 S は大きくとる必要はなく、1.5~2.0倍程度でよいと思われる。

表-2に、設計許容強度比 P_S^* の計算結果を示した。劣化後の強度保持率が50%で劣化後のばらつき係数が0.40の場合で、安全率が2.0倍の場合は、高温強度に対する設計基準強度比 P^* は、静的荷重負荷の場合は1/20、低サイクル疲労負荷の場合は1/22、高サイクル疲労負荷の場合は1/40となる。

6. 最適設計のための耐用年数経過後の安全率の尤度の定量化

6.1 定量評価法の必要性

5章では、多大な評価試験や検証試験を行わないで接着が適用できるかどうかを簡易に判定するための設計基準を説明した。しかし、最適設計や限界設計を追求する場合には、製品の耐用年数が経過した時点で安全率の尤度がどのくらい残っているかを定量的に評価して、尤度がある場合には、尤度分をさらなる信頼度の向上やコストダウンに再配分していくことが必要となる。

そこで、ここでは、製品の耐用年数経過後における接着強度の安全率の尤度を定量的に求める方法を説明する。なお、ここで説明する方法は、オリジナルの方法^{11,12)}を、さらに使いやすく改良した改良法である。

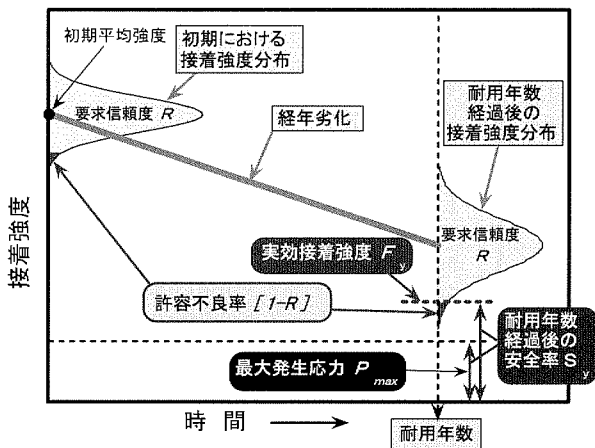


図-16 接着強度の経年変化の概念

なお、本方法でも、高信頼性接着の指針の(1)凝集破壊率は40%以上である、(2)初期の接着強度の変動係数CVは0.10以下になっている、の二つの条件を満たすところまで作り込まれた系についての評価であり、接着剤や被着材料の表面処理などの選定のための相対評価試験ではないので、適用に当たっては注意していただきたい。

6.2 接着強度の経年変化の概念

図-16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・応力によって劣化して強度が下がっていく。初期の状態でも接着強度にはばらつきがあり、劣化にともなってばらつきは増加する。製品・部品ごとに設計時点で許容不良率が設定されている。接着部に加わる応力の最大値を最大発生応力 P_{max} とすると、耐用年数が経過した時点での接着強度の分布において、許容不良率における接着強度の上限値(この強度を実効接着強度 F_y と呼ぶ)が最大発生応力 P_{max} 以上であれば不良率は許容不良率以内に収まる。この評価法で求めたいのは、この実効接着強度 F_y である。実効接着強度 F_y が求まれば、最大発生応力 P_{max} との比較で、耐用年数経過後の安全率の尤度 S_y を求めることができる。耐用年数経過時点で実効接着強度 F_y と最大発生応力 P_{max} が一致するのが理想的で、最適設計では安全率の尤度 S_y は1.0倍となる。

6.3 耐用年数経過後の安全率の尤度の算出法

耐用年数経過後の安全率の尤度 S_y は、式(2)であらわされる。

$$S_y = F_y / P_{max} \dots\dots\dots (2)$$

F_y : 実効接着強度

P_{max} : 最大発生応力

実効接着強度 F_y は、式(3)であらわされる。

$$F_y = F_s \times D_y \times \eta_y \dots\dots\dots (3)$$

F_s : 疲労やクリープなどの応力試験から求めた耐用年数経過後の推定強度(応力試験は使用環境の最高温度下で実施する)

この強度を基準強度とする。

D_y : 耐用年数経過後の接着強度のばらつき係数

劣化後の接着強度の変動係数 CV_y は、初期の変動係数 CV_0 の k 倍に増大する。 k は最大で1.5程度であるが、環境や応力、耐用年数によっては1.3~1.4でよい。初期の変動係数 CV_0 は、室温での接着強度試験から

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
【許容不良率】	1/10万
【負荷応力】	
最大発生応力 P_{max}	せん断 0.10 MPa
負荷の形態	繰返し疲労(片振り) max10 ⁸ 回
【温度】	
機器による昇温	60℃
輸送時	
冬期最低温度	-40℃
夏期最高温度	+40℃
輸送回数	1回
据え付け後停止時	
冬期最低温度	-20℃
夏期最高温度	+40℃
1日の環境温度変化	20℃
運転時	
冬期最低温度日	-20℃~+60℃
夏期最高温度日	+20℃~+100℃
運転・停止回数	1回/日(9125回/25年)

求める。

η_y : 耐用年数経過後の複合環境劣化係数

$$\eta_y = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots \times \eta_n \dots\dots\dots (4)$$

η_i : 個別の環境・応力因子における劣化係数

個別の環境因子における劣化係数 η_i は、耐熱性、耐湿性、耐ヒートサイクル性など製品の接着部に加わる個別の環境劣化因子に対する耐用年数経過後の強度低下係数(強度保持率)であり、加速試験により求める。たとえば、長期間の耐熱性は、温度加速試験からのアレニウスプロットによる方法¹³⁾、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¹³⁾ やアレニウスプロットによる方法¹³⁾、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¹³⁾、耐疲労性は、接着でも金属と同様に10⁷回以上で一定値となるかどうかは明確化されていないため、安全サイドの推定を行うため直線外挿で求める方法¹³⁾、などを用いる。耐ヒートサイクル性は、接着剤の凝集破壊を前提とする場合は接着剤内部での塑性破壊的劣化と考えて、サイクル数と残存強度の関係を外挿する方法から求める。

疲労やクリープなどが加わらず、一時的な静荷重だけが加わる場合は、式(5)を用いる。

$$F_y = \mu_T \times h_1 \times D_y \times \eta_y \dots\dots\dots (5)$$

μ_T : 高温強度(使用温度範囲の最高温度下での平均強度)

※1サイクルで破壊する疲労強度と考える

h_1 : 内部破壊係数 $h_1 = 0.5$ を用いる

※低い応力は複数回加わるため内部破壊係数を加味する

$\mu_T \times h_1$ を基準強度とする

6.4 耐用年数経過後の安全率の尤度の算出事例

6.4.1 接着部の要求条件と評価試験条件

一例として、耐用年数25年の製品の接着部の要求条件を表-3に示した。接着剤は、ガラス転移温度 T_g が110℃の二液室温硬化型変性アクリル系接着剤(SGA)である。

表-4 評価試験の項目, 条件

評価項目	試験条件
【高温疲労試験】	+100℃ せん断(片振り) 10 ⁷ 回まで実施 10 ⁸ 回を推定
【ばらつき係数の算出】	室温 サンプル数≥25個 CV ₀ =σ/μ 耐用年数経過後CV _y =1.5CV ₀ →D _y 計算
静的強度試験	
【ヒートサイクル試験】	
最大温度変化 (年サイクル試験)	室温→輸送時-40℃ 1回 その後 -20℃↔+100℃ 25回(1回/年, 25年分)
1日の中の温度変化 (日サイクル試験)	冬期 -20℃~+60℃ 300回まで試験 4500回後を推定
【熱劣化試験】	130~200℃で加速劣化試験 アレニウス法により90℃以上の 3000日後を推定

表-3の要求条件に対して設定した評価試験条件を表-4に示した。与えられた環境, 応力に対する最適な評価条件を設定することは重要である。評価条件は, 過大, 過小のいずれも不適であるが, あくまでも安全サイドの推定を行うことが基本である。表-4の評価条件を設定した考え方を, 次に説明する。

6.4.2 評価条件の最適化

図-17⁹⁾は, 接着部の使用環境温度(最低温度, 最高温度)と機器の発熱による運転時の接着部の最高温度の1年半の温度変化の模式図である。機器のON/OFFは1日1回で, 製品の耐用年数は25年間なので9125サイクルの温度変化が加わる。図-17からわかるように, 最低温度は-20℃, 最高温度は100℃である。そのため, -20℃~+100℃での9125サイクル後の強度を求めようとする場合が多い。しかし, それは過大な試験条件であり, 適切な条件とは言えない。-20℃~+100℃の温度差が加わるのは, 1日1回ではなく, 1年間で1回だけのためである。そこで, 年間の最大の温度変化に対するヒートサイクル試験を「年サイクル試験」として, 耐用年数分, すなわち25サイクルだけ実施している。このくらいのサイクル数であれば, 容易に実測できる。

図-18⁹⁾は, 1日の中の温度変化を示したものである。1日の中の最大の温度幅は80 degであるが, 最低環境温度, 運転時の最高温度は季節とともに連続的に変化する。このような変化では試験が困難であるので, 図-18のように, 半年間は真冬, 半年間は真夏と単純化する。高温では接着剤の膨張や柔軟化により熱応力は低下する場合が多い。バイメタル試験片を用いて, 温度による接着部の熱応力の変化を測定した結果より, 夏の温度範囲では, 熱応力は低減するのでヒートサイクル試験は不要であると判断できる⁹⁾。よって, 1日以内での温度変化によるヒートサイクル試験(これを「日サイクル試験」と呼ぶ)は, -20℃~+60℃で25年×365日÷2=4562サイクルでの強度を求めればよいということになる。

熱劣化においては, 最高温度100℃で25年分の熱劣化を予測すると過大な評価になってしまう。熱劣化は接着剤のガラス転移温度T_g以下では起こりにくいため, T_g-20℃を一つの基準

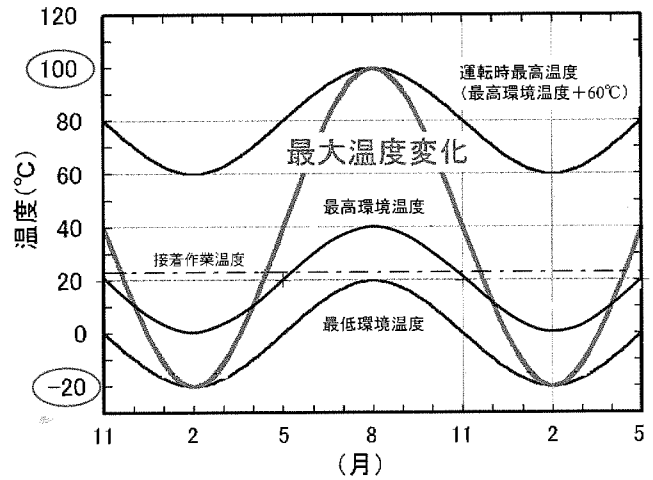


図-17 接着部の使用環境温度(最低温度, 最高温度)と機器の発熱による運転時の接着部の最高温度の1年半の温度変化の模式図

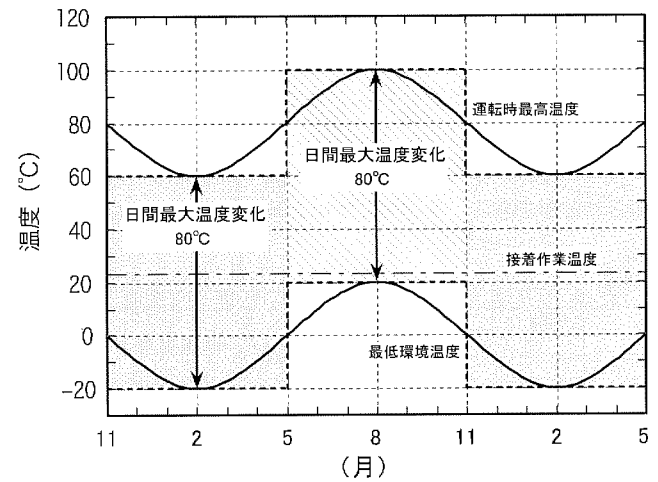


図-18 1日の中の温度変化の1年半における変化

としている。20℃余裕を見ているのは, T_gは測定方法やデータの取り方によって20℃程度は変化するためである。そこで, 90℃以上になる期間を求めると年間に4カ月間だけである。よって, 4カ月×25年≒3000日分を推定している。

6.4.3 評価試験結果

(1) 最高温度における応力負荷試験での推定強度F_S

図-19に示すように, 使用温度範囲の最高温度100℃で疲労試験を実施し, 10⁸サイクル後の疲労強度を求めた。その結果, F_S=0.58 MPaであった。

(2) 耐用年数経過後の接着強度のばらつき係数D_y

まず, 初期の変動係数CV₀を室温での接着強度試験から求めた。その結果, CV₀=0.067であった。劣化による変動係数の増加率kを1.5倍とすると, 劣化後の接着強度の変動係数CV_y=CV₀×k=0.10となる。許容不良率は1/10万なので, 図-6よりD_yは0.57と求まる。

(3) 耐用年数経過後の複合環境劣化係数η_y

年サイクルヒートサイクル試験, 日サイクルヒートサイクル試験, 熱劣化試験を行った。年サイクルヒートサイクル試験は25サイクル実施し, 強度保持率は95%あった¹³⁾ので, η₁=

0.95となる。日サイクルヒートサイクル試験は300サイクルまで実施し、4500サイクルまで直線外挿した。その結果、強度保持率は80%となった¹³⁾ので、 $\eta_2 = 0.80$ となる。熱劣化試験は、アレニウスプロットを行うため、130℃、150℃、180℃で実施したが、強度が低下しなかった¹³⁾ため、90℃~100℃では長期間でも熱劣化はしないと考え、 $\eta_3 = 1.00$ とした。

6.4.4 耐用年数経過後の安全率の尤度 S_y を求める

式(4)より、耐用年数経過後の複合環境劣化係数 $\eta_y = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 = 0.95 \times 0.80 \times 1.00 = 0.76$ となる。

式(3)より、実効接着強度 $F_y = F_S \times D_y \times \eta_y = 0.58 \text{ MPa} \times 0.57 \times 0.76 = 0.251 \text{ MPa}$ となる。

式(2)より、耐用年数経過後の安全率の尤度 $S_y = F_y / P_{max} = 0.251 \text{ MPa} / 0.10 \text{ MPa} = 2.51$ となる。

6.5 安全率の尤度の再配分

基本的に耐用年数経過後の安全率の尤度は1.0倍でよいので、6.4の結果では、安全率の尤度は2.51倍で過剰品質と言える。この過剰な部分は信頼度の向上や作業の効率化に振り分けることができる。

(1) 許容不良率の低減への配分

表-5⁹⁾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尤度は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や修理費用の低減などを図ることができる。許容不良率を低減した場合の安全率の尤度

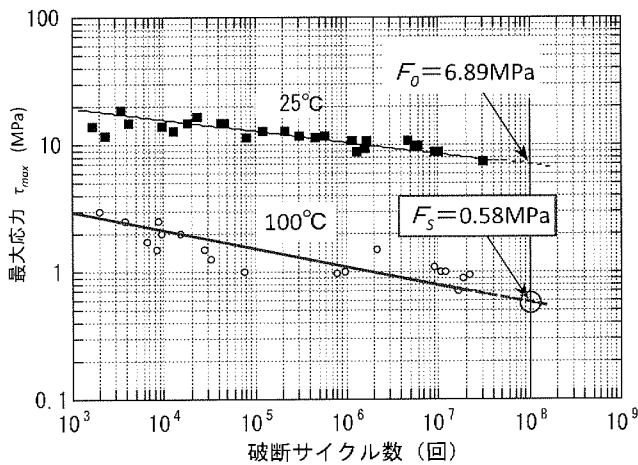


図-19 高温疲労試験結果と基準強度 F_S

表-5 許容不良率、ばらつき係数と安全率の尤度

許容不良率 [I-R]	ばらつき係数 D_y	安全率 S_y
1/10万	0.57	2.51
1/100万	0.52	2.29
1/1000万	0.48	2.11
1/1億	0.44	1.94

表-6 許容不良率、接着剤塗布面積比と安全率の尤度

許容不良率 [I-R]	1/10万	1/1000万	1/1億	
接着剤	1.0	$S_y = 2.51$	$S_y = 2.11$	$S_y = 1.94$
塗布	0.7	$S_y = 1.75$	$S_y = 1.47$	$S_y = 1.35$
面積比	0.5	$S_y = 1.25$	$S_y = 1.05$	$S_y < 1.00$

S_y の再計算は、変動係数 CV_y は変化しないので、図-6から読み取るばらつき係数 D_y が変化するだけである。

(2) 接着作業性の改善への配分

さらに残りの安全率の尤度分については、接着作業性の向上に回すことができる。たとえば、接着剤の塗布面積を減少させることができる。表-6⁹⁾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。ただし、接着面積を減少させた場合には、最大発生応力は増加することとなるため、安全率の計算時に考慮することが必要である。接着面積の低減によって、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。

7. 接着接合系の耐久性設計、信頼性設計

7.1 耐久性、信頼性の作り込みは設計マターである

接着接合物の耐久性や信頼性を高くするために、接着剤に過大な要求がされている場合が多く見られる。もちろん、将来に備えて接着剤の改良を行うことは必要であるが、設計者の勝手な要求に振り回された目先の改良に、多大な時間と労力をつぎ込まれることは考え直さなければならないであろう。耐久性や信頼性は、与えられるものではなく、設計で作り込む物である。性能が少々劣っている接着剤でも、設計次第で問題のない性能に作り込むことは可能であり、接着剤のユーザー、設計者はその努力を惜しんではならない。

7.2 高耐久性、高信頼性に影響する諸因子

7.2.1 凝集破壊率

破壊状態には、凝集破壊と界面破壊とがあり、接着強度のばらつきの点から、「凝集破壊率」は40%以上必要であることを3.3で述べた。また、凝集破壊率の向上は、耐久性の点からも重要であることは、図-15からもわかる。

凝集破壊率を高くすることは、耐久性向上の基本である。

7.2.2 水分劣化における接着部の形状/寸法

図-20^{3,6,14)}は、接着部が円形、正方形、正三角形のステンレス鋼の突き合わせ引張り試験片による耐湿試験の結果である。同じ形状でも寸法を変化させてある。接着剤はSGAで、80℃90%RH雰囲気にて5日間暴露した後の接着強度保持率を示して

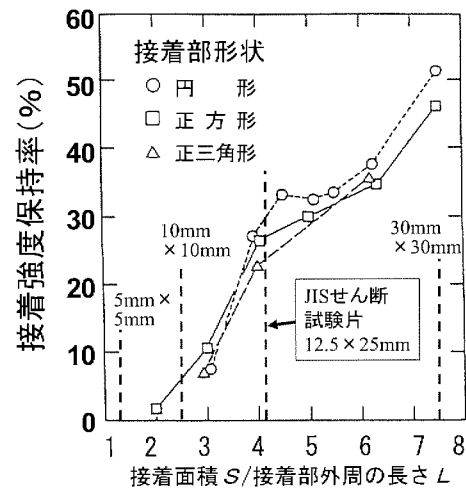


図-20 水分劣化に及ぼす [接着面積 S /接着部外周の長さ L]の影響

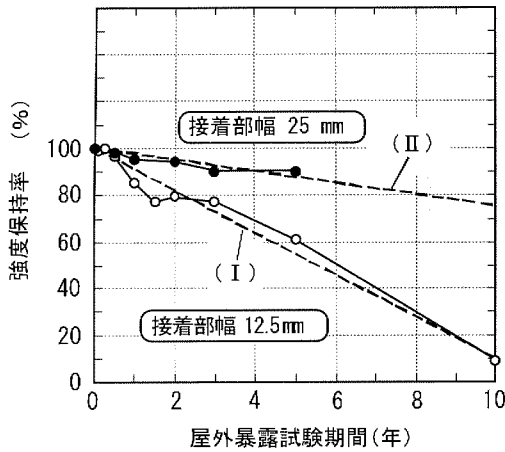


図-21 細長い接着部における接着部の幅と屋外暴露劣化の関係

ある。この結果より、[接着面積 S /接着部の外周の長さ L]が大きいほど劣化が少ないことがわかる。 S/L が大きくなるように接着部の寸法設計を行えば、水分に対する耐久性は自由に設計ができるということである。

図-21^{2,6,14)}は、細長い接着部における接着部の幅と屋外暴露劣化の試験結果である。幅が広いほうが劣化が少ないことがわかる。直線(II)の傾きは、直線(I)の1/4である。接着部の幅を12.5 mmから25 mmと2倍に広げると、劣化速度は1/4に低下している。水分の浸入はFickの拡散の法則に従っているのので、劣化速度は接着部の幅の比の二乗に逆比例する。接着部の幅を少し広げるだけで、水分劣化を大きく低減できる。

7.2.3 水分劣化における致命的損傷と非致命的損傷

水分劣化試験における強度低下は、接着部が致命的損傷を受けることによる強度低下と非致命的損傷による強度低下が合わさった結果としてあらわれる。

水分による接着部の劣化の原因としては、①接着界面に水分が浸入して、接着剤と被着材の分子間力を切断する、②接着部に浸入した水分によって被着材料自体が腐食などの劣化を起こす、③接着剤が加水分解を起こす、④接着剤が吸水膨潤して可塑化する、などがある。原因①②③は、水分を乾燥させても元の状態には戻らない致命的損傷となる。④は、乾燥させると元の状態に戻る可逆的変化で非致命的損傷である。屋外環境や乾湿が繰り返される環境においては④は大きな問題ではない。

水分による致命的損傷劣化のみを正確に評価することは重要であり、乾燥回復性試験で評価できる。

図-22は、三種類の接着剤A, B, Cから最も耐水性に優れたものを選定するための耐水性試験の模式図である。通常行われている水分環境に暴露後すぐに強度試験を行うと三種類とも同じ劣化であった。これでは優劣が付けられないが、乾燥後に強度試験を行うと、破線のように異なった結果となる。乾燥によって接着強度が回復した分は、上記の原因④によるもので、乾燥しても強度回復しない部分が、原因①②③による致命的損傷を受けた部分となる。設計段階での材料選定は、劣化のメカニズムを考えて適切な評価試験を行うことが必要である。

7.2.4 応力と水分による複合劣化

図-23¹⁴⁾は、60℃でのクリープ破断試験の結果であり、相対湿度を変化させている。試験片は、鋼板同士をSGAで接着し

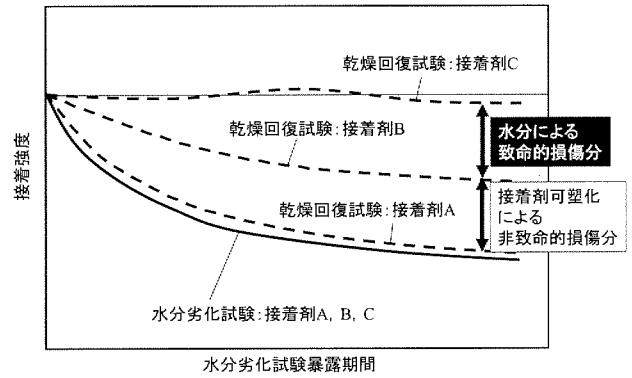


図-22 吸水後の乾燥による接着強度の回復性の模式図

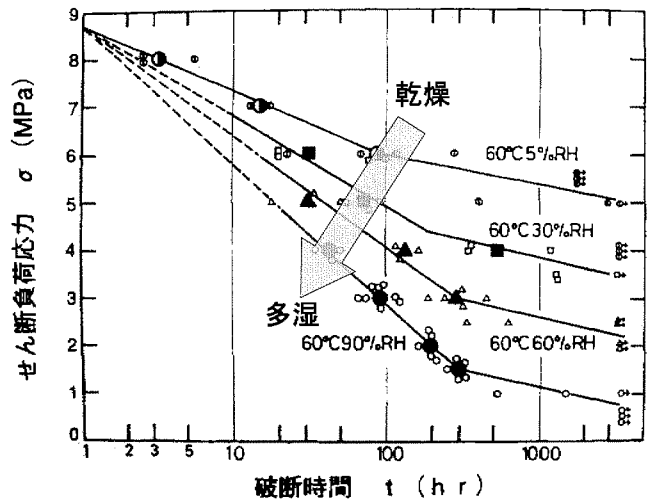


図-23 クリープ試験における湿度の影響

た引張り剪断試験片である。この結果から、温度が同じでも相対湿度が高ければクリープ破断特性は大きく低下することがわかる。設計には、湿度を加えた状態で得られたクリープ強度を用いなければ、思わぬ失敗を起こすことになる。

7.2.5 ヒートサイクル

高温低温の繰り返しによるヒートサイクルやヒートショックにおける劣化の原因は、接着剤と被着材との線膨張係数の違いによって生じる熱応力によるものである。接着部に生じる熱応力の大きさは、接着剤と被着材の線膨張係数と弾性率のほかにも、接着部の寸法・形状、接着剤層の厚さ、被着体の厚さや剛性によっても変化する。そのため、JIS規格の試験片のように、薄板の小さな接着部で評価しても、実際の接着部で生じる熱応力と同等の応力が生じるとは限らない。ヒートサイクルやヒートショック試験は、できるだけ製品の接着部に近い形状・寸法のサンプルで行うことが必要である。

ヒートサイクルやヒートショック試験の加速条件を厳しくするために、温度範囲を広げて試験を行うことが多い。熱応力は接着剤の弾性率が大きいほど大きくなるため、低温側に温度範囲を広げて試験することが重要である。高温側に温度を高くしても、高温で接着剤が柔らかくなれば熱応力は小さくなるため、劣化には繋がりにくい。また、加熱硬化型接着剤の場合は、硬化温度で熱応力は0となる。実際、ヒートサイクルやヒートショッ

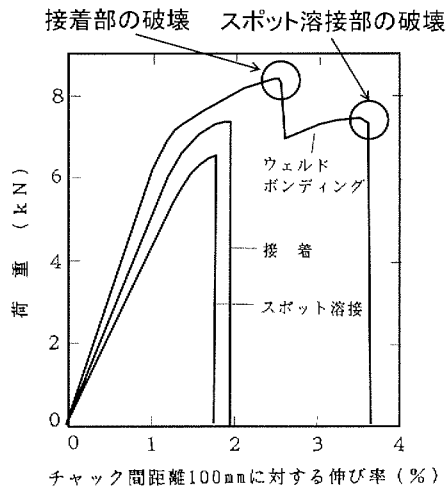


図-24 接着，スポット溶接，ウェルドボンディングの伸びと荷重の関係

クでの破壊は，低温使用時に生じる場合がほとんどである。

7.2.6 併用接合による信頼性，耐久性の向上

接着接合部の強度，信頼性，安全性や耐久性を向上させる手段として併用接合は有効である。併用接合は，接着剤とスポット溶接，リベット，メカニカルクリンチング，セルフピアシングリベット，かしめなどを併用する方法である。接着剤だけで最良の接合を行おうとしても，すべての要求を満足できる接着剤は非常に少なく，改良や新たな開発には膨大なパワーが必要になる。接着剤の長所と欠点を十分に認識したうえで，欠点はほかの接合で補うのが賢い接合設計と言える。以下に，併用接合による強度，信頼性，耐久性の向上効果を示す。

(1) 破壊に対する冗長性の向上

図-24¹³⁾は，接着，スポット溶接，接着とスポット溶接の併用（ウェルドボンディング）の引張り剪断試験における伸びと荷重の関係である。スポット溶接や接着だけの場合は，一度破壊すると破断してしまうが，ウェルドボンディングでは，最初にラップ端部の接着部が破壊してもすぐには破断せず，スポット溶接とその周辺の接着剤でもう一度荷重に耐えている。破壊までに要したエネルギーは，併用接合では，単独接合の約3倍に向上している。一度の破壊で破断に至ることは危険で避けなければならないが，併用接合では破断に対する「冗長性」が大きく改善され，定期検査によるクラック発見での補修も可能となる。

(2) 高温接着強度の改善

図-25¹³⁾は，軟鋼板同士をSGAで接着した物とスポット溶接を併用した物の接合強度の温度依存性である。接着だけでは高温になると接着強度が大きく低下するが，スポット溶接を併用すると，高温でのラップ端部の破壊強度が大きく向上している。たとえば，120℃での強度は，接着だけの場合の150 kgから，スポット溶接併用では700 kgと，約4.7倍に向上している。接着剤だけで高温強度を確保するためには，接着剤のガラス転移温度 T_g は高くせざるを得ないが， T_g が高くなると接着剤が硬くなるため，耐衝撃性やはく離強度は低下する。併用接合により接着剤の最適物性を活用することができる。

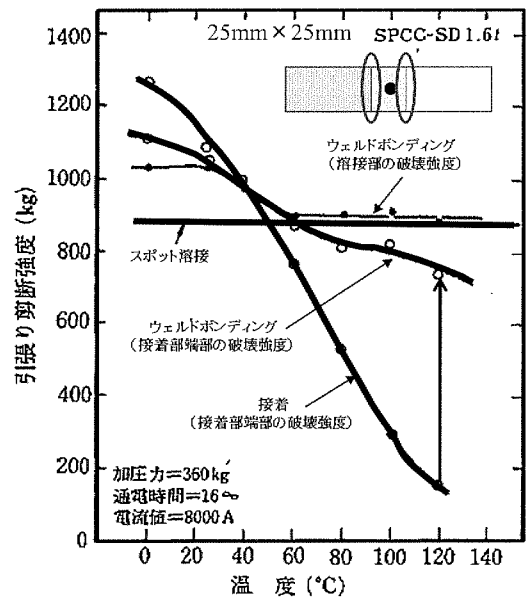


図-25 スポット溶接併用による高温接着強度の向上

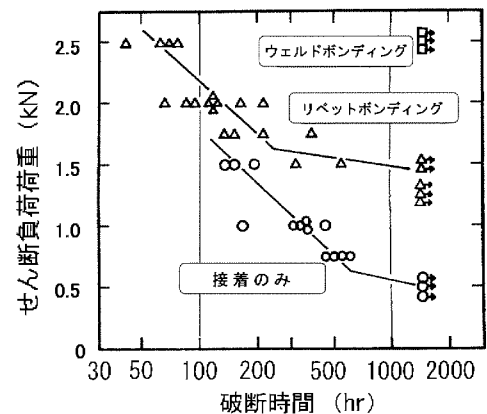


図-26 ウェルドボンディング，リベットボンディングによるクリープ特性の改善（60℃ 90% RH 雰囲気中）

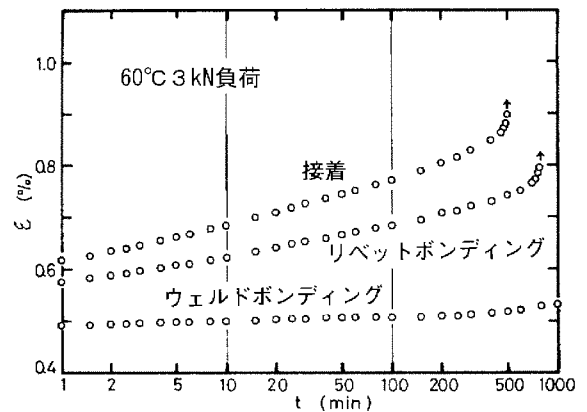


図-27 接着，リベットボンディング，ウェルドボンディングにおけるクリープ変形量εの経時変化

(3) クリープ耐久性の改善

接着剤は有機物であるため，クリープを避けることは困難である。図-26，27¹³⁾に示すように，リベットやスポット溶接を

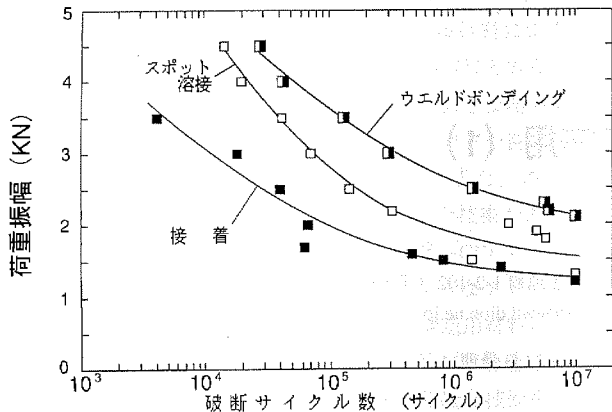


図-28 接着、スポット溶接、ウエルドボンディングの疲労特性の比較 (ウレタン系接着剤, ステンレス鋼板)

併用することにより、クリープ特性を大きく改善することができる。内部応力の低減やはく離強度、衝撃強度などの向上のために柔らかい接着剤を使用する場合も多いが、この場合はクリープが問題となる。併用継手ではこのような問題も解消することができる。

(4) 疲労耐久性の改善

接着接合は面接合で応力集中が少ないため、薄板の疲労特性に優れると言われているが、柔らかい接着剤や高温で接着剤が柔らかくなると疲労特性は大きく低下する。図-28¹³⁾は、柔らかいウレタン系接着剤における接着、スポット溶接、ウエルドボンディングの疲労特性の比較である。接着剤とスポット溶接の併用により、それぞれの単独での性能を上回る性能が得られることがわかる。

(5) その他

はく離開始点の補強、火災などでの接着能力消滅時のバックアップなど、接着の問題点の解消にも効果的である¹³⁾。

8. あとがき

信頼性に優れた接着を行うために必要ないろいろなことを述べてきた。まず、最初に達成しなければならないことは、接着剤の内部で破壊する凝集破壊率を40%以上にすることと、接着特性の変動係数を0.10以下にすることである。耐久性を向上させて劣化を抑えることも重要である。耐久性は接着剤と被着材、表面処理で決まってくるものではなく、同じ組み合わせでも耐久性は要求を満たすように作り出すことができるのである。接着の欠点を接着剤や表面処理だけで解決することは容易ではない。接着の欠点はほかの接合方法の併用でカバーするなどの発想で、接着を超える性能を創出することも可能である。本稿が、高信頼性接着達成の一助となれば幸いである。

文 献

- 1) 国立天文台ALMA: http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/multimedia/files/editor/2013_alma_0002.jpg
- 2) 原賀康介: 接着の技術誌, **32**, 62 (2012).
- 3) 原賀康介: 日本接着学会誌, **43**, 319 (2007).
- 4) 原賀康介: 日本接着学会誌, **40**, 564 (2004).
- 5) 原賀康介: 接着の技術誌, **24**, 58 (2004).
- 6) 原賀康介: 日本接着学会誌, **39**, 448 (2003).
- 7) ウシオ電機㈱エキシマ光照射ユニットカタログ.
- 8) 寺本和良, 岡島敏浩, 松本好家, 栗原 茂: 日本接着学会誌, **29**, 180 (1993).
- 9) 原賀康介: *Polyfile*, **50**, 66 (2013).
- 10) 原賀康介: 工業材料, **58**, 45 (2010).
- 11) 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, 溶接学会 (2003).
- 12) 原賀康介: “耐用年数経過後の安全率の定量化による接着接合の設計品質の創り込み”, 第33回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, p.117, 日本科学技術連盟 (2003).
- 13) 原賀康介: “高信頼性を引き出す接着設計技術”, 日刊工業新聞社, 81-86, 184-206, 228-237 (2013).
- 14) 原賀康介: 接着の技術誌, **16**, 55 (1996).

Introduction to Adhesive Bonding : Current Status of Adhesion Technology and Outline of Highly Reliable Bonding (2)

Kosuke HARAGA^{*,†}

^{*}HARAGA Adhesion Technology Consulting Co., Ltd., 1-9-301 Midori-cho, Ashiya, Hyogo 659-0042, Japan

[†] Corresponding Author, E-mail: haraga-kosuke@kcc.zaq.ne.jp

(Received January 22, 2014; Accepted February 5, 2014)

Abstract

The current status of adhesion technology, the concepts and guidelines for reliable bonding and design criteria are presented. It is important that the cohesive fracture rate is adjusted to 40% or more and the coefficient of variance of the bonding properties is adjusted to 0.10 or less. Durability is not a given property but a produced one. Combined joints are effective in the development of reliable systems.

Key-words: Adhesive bonding, Reliability, Durability, Design criteria, Allowable strength