

[No.05-100]

講習会

締結・接合・接着部のプロセス・強度・
設計の実際と今後の展開

教材

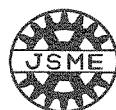
開催日：2005年10月28日（金）

会場：ぱるるプラザ岐阜（岐阜）

〔合同・機械材料・材料加工部門〕
〔企画・東海支部〕

協賛

〔日本塑性加工学会東海支部，日本材料学会東海支部，
日本材料学会破壊力学部門委員会〕



社団
法人

日本機械学会

6 リベット併用接着締結の諸特性と適用例

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 原賀康介

1. はじめに

制御盤や操作盤用の金属製筐体は、多品種小ロット生産の代表的なもので、主として手作業によるアーク溶接で組み立てられてきた。しかし、アーク溶接による組み立ては、熱による歪みの発生、溶接の熟練技能者の必要性、作業環境の悪さ、製造におけるエネルギー使用量の多さなどの問題を有している。そこで、次のような目的を達成させるために、アーク溶接を全廃して接着剤とリベット（ファスナー）の併用による板金筐体の組立方法を開発した。

開発の目的

- (1) 溶接作業や歪み修正作業のような熟練作業を廃止する。
- (2) 溶接作業やパテ作業を廃止して作業環境を改善する。
- (3) 無歪み接合法（接着接合）の採用により製造工程を簡素化しコストダウンを図る。
- (4) 軽量性と高剛性を両立させる。
- (5) 製造工程におけるエネルギー消費量を低減する。

図1¹⁾は、接着・リベット併用組立法による金属筐体の構造の一例である。基本的に板金曲げのパネル構造である。

以下に、接着・リベット併用法による板金筐体組立の概要と特徴、性能と効果、エネルギー使用量の低減などについて述べる。また、接着接合物の長期間の耐久性を定量的に評価する方法についても述べる。

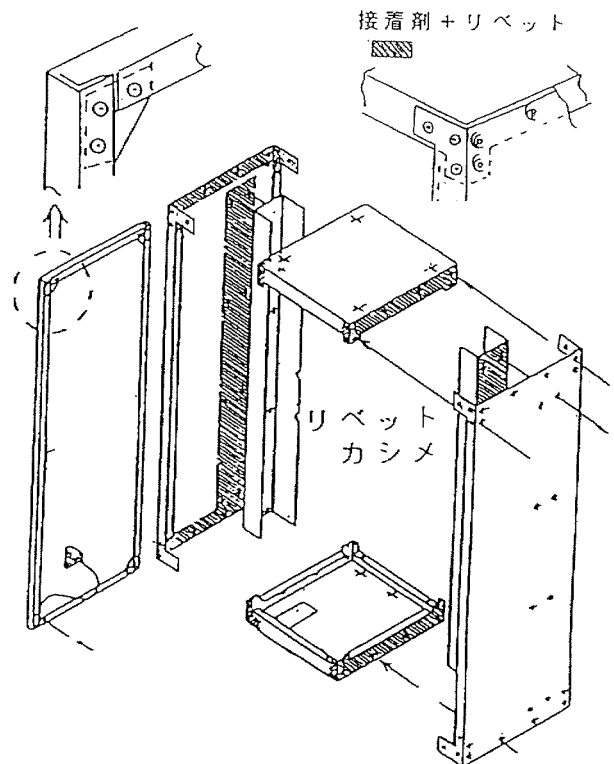


図1. 接着・リベット併用組立法による板金筐体の構造の一例 (800W×800D×2300H)

2. 接着・リベット併用組立法の概要と特徴

2.1 接合手順

接着・リベット併用組立法における接合は、図2に示す手順で行われる。まず、リベット用の穴がつけられた部品の接合部に接着剤を塗布して部品を貼り合わせる。次に、接着剤が硬化する前に、リベットをリベッターに装着して片面から穴に挿入してステムを引っ張って反対側をかしめると同時にステムを引きちぎる。

2.2 接着剤

接着剤は、専用に開発された2液型変性アクリル系接着剤「ハードロックM372」(電気化学工業(株)製)が使用されている。この接着剤は、優れた油面接着性を有しているので脱脂は不要で、室温で15分から20分で硬化する。ラジカル反応で硬化するため、正確な計量・混合は不要である。性能的には、せん断強度、はく離強度、衝撃強度のいずれにも優れており、耐環境性にも優れている。この接着剤は、屋外環境ですでに20年間以上の多くの適用実績を有しているものである。

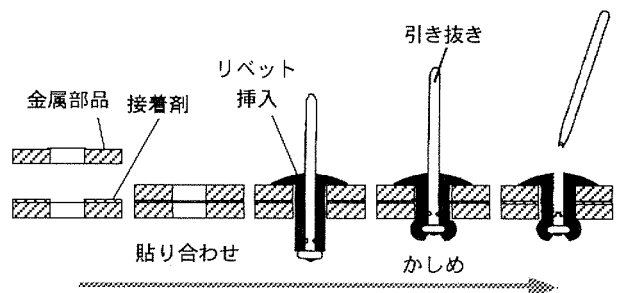


図2. 接着・リベット併用組立法における接合手順

2.3 接着剤とリベット（ファスナー）の役割

接着・リベット併用組立法では、接合強度や耐久性を基本的に接着剤に依存し、接着接合の欠点をリベット締結により補い、総合的に優れた作業性と高い信頼性を両立させたものである。接着剤とリベットはそれぞれ次のような役割を果たしている。

接着剤の役割：

- (1) 接合強度と耐久性の確保
- (2) 面接合による筐体の剛性向上
- (3) シール性の確保
- (4) 応力分散による耐震性の向上
- (5) 異材接合における電食の防止

リベット（ファスナー）の役割：

- (1) 接着剤が硬化するまでの固定治具の代用
- (2) 容易で正確な位置合わせ
- (3) アースや電着塗装、電磁シールドのための電気的導通の確保
- (4) 焼き付け塗装時の高温における接着部の変形や破壊の防止
- (5) はく離力による接着部の破壊の防止
- (6) クリープ変形の防止
- (7) 火災による接着剤焼失時の形状維持

2.4 製造工程

溶接組立と接着・リベット併用組立の製造工程の比較を図3¹⁾に示した。接着・リベット併用組立では接合時に熱歪みが生じないため、歪み修正やパテ作業が不要となり、製造工程の大幅な合理化ができる。プレコート鋼板を使用すれば、塗装工程も全廃できる。プレコート鋼板（板厚1.6mm）は、接着・リベット併用組立用に専用に開発したものを使用している。素材の亜鉛めっき鋼板と接着剤の双方に優れた接着性を有し、しかも板金加工性にも優れたポリエステル系塗料が使用されている。

3. 性能と効果

図4²⁾は、アーク溶接、スポット溶接、リベット、接着、接着・リベット併用の引張りせん断強度の比較である。この結果より、接着・リベット併用接合はアーク溶接と同等の強度を有していることがわかる。なお、接着と接着・リベット併用接合の強度は同等であり、併用による強度上昇は認められない。これは、リベットの強度が接着に比べて低いことと、リベットが接着部の中央にあるためリベットに力がほとんど伝わっていないためと考えられる。

図5³⁾は、接着、接着・リベット併用（1.6t）と溶接、リベット（2.3t）の疲労特性の比較である。接

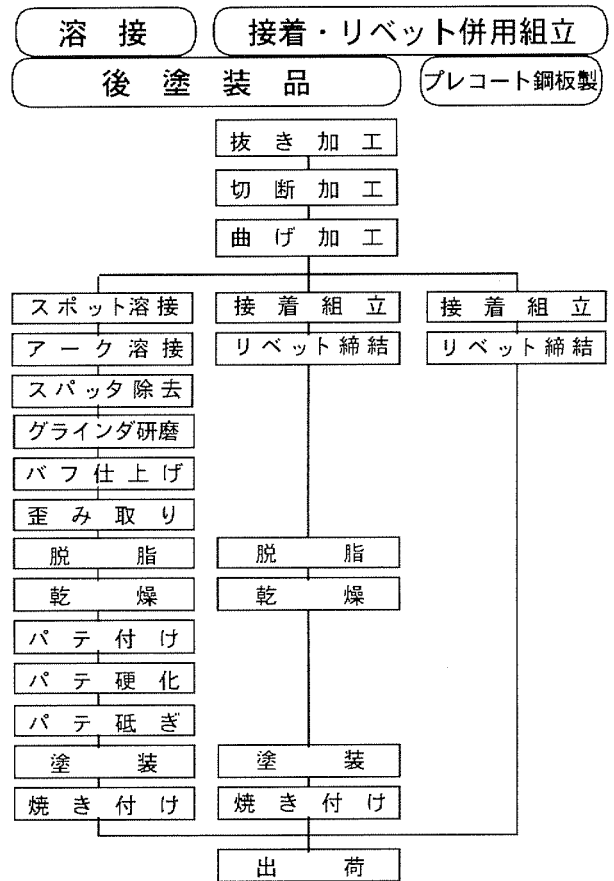


図3. 溶接組立と接着・リベット併用組立の製造工程の比較

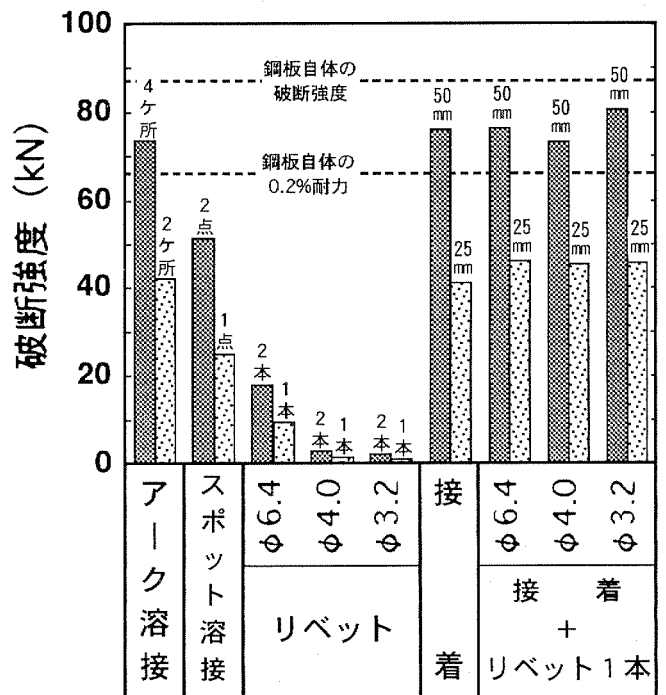


図4. アーク溶接、スポット溶接、リベット、接着、接着・リベット併用の接合強度の比較（板厚2.3mm、幅100mmの鋼板同士）

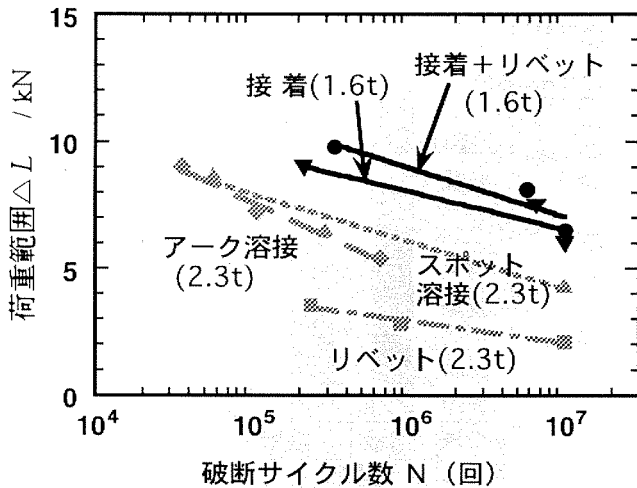


図5. 接着、接着・リベット併用 (1.6t) と溶接、リベット (2.3t) の疲労特性の比較

着、接着・リベット併用接合は面接合で応力分散が図れるため薄板でも優れた疲労特性を示している。

表1は、図1に示した筐体の振動試験における共振周波数である。接着・リベット併用筐体の共振周波数は溶接筐体より高くなっており、剛性に優れていることがわかる。

図6³⁾は、各種の被着材料における接着の屋外暴露耐久性である。長期間屋外においても強度低下は小さいことがわかる。

表2には、重量、作業時間、コスト、工期、工場騒音の比較を示した。

4. エネルギー使用量の低減

図1に示した制御盤用筐体の製造におけるエネルギー使用量を計算した。接合方法、材料、板厚、塗装は図7～図9¹⁾に示した5種類である。板厚の低減による筐体強度の低下に対しては、溶接筐体と同等の強度となるように構造変更により対処している。

図7¹⁾は、制御盤製造段階(材料受け入れから出荷まで)での電力使用量の比較である。電力使用量は、溶接から接着・リベット化することにより36%削減され、亜鉛めっき鋼板化して内面の塗装を省くことにより60%も削減されることがわかる。塗装鋼板を用いた場合には84%もの削減ができ、溶接構造のわずか16%の電力で製造できることがわかる。内訳で見ると、接着・リベット併用法では部品組立工程での溶接の電力がゼロとなり、亜鉛めっき鋼板化するとパテ作業が不要なため塗装工程での電力使用量が大きく低減され、塗装鋼板化した場合は当然であるが塗装工程での電力使用量はゼロになっている。

図8¹⁾は、制御盤製造工場で使用される塗料・パテ焼き付け用の燃料ガスの使用量の比較である。溶接構造から接着・リベット化することにより、パテの乾燥硬化が不要になるためガス使用量は半減している。塗装鋼板の場合は当然ゼロになる。

接着・リベット化、亜鉛めっき鋼板化、塗装鋼板化により、制御盤製造工場内のエネルギー使用量が低減できたとしても、素材の高機能化に伴い素材メーカーでのエネルギー消費量が逆に増加しているとすれば問題である。地球環境的観点からは原料採掘段階からの総使用エネルギーで考える必要がある。そこで、素材料であ

表1. 接着・リベット併用筐体と溶接筐体との共振周波数の比較

	加振方向	接着・リベット併用筐体	溶接筐体
共振周波数	左右	8.8 Hz	5.0 Hz
	前後	9.5 Hz	9.3 Hz
	上下	> 55.0 Hz	> 55.0 Hz

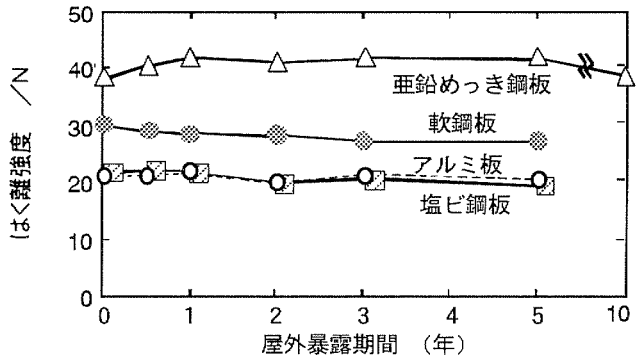


図6. 各種の被着材料における屋外暴露試験結果 (接着部の幅: 25mm)

表2. 接着・リベット併用組み立てによる重量, 作業時間, コスト, 工期, 工場騒音の低減効果

	溶接		接着・リベット併用組立		
	鋼板	めっき鋼板	塗装鋼板	塗装鋼板	塗装レス
	塗装	半塗装	半塗装	塗装	塗装レス
	3.2mm	2.3mm		1.6mm	
筐体重量	100% (246kg)	82% (201kg)	82% (201kg)	57% (140kg)	57% (140kg)
作業時間	100%	69%	53%	58%	36%
コスト	100%	80%	69%	70%	61%
工期	100%	82%	73%	73%	64%
工場騒音	98ホーン	80ホーン	80ホーン	80ホーン	80ホーン

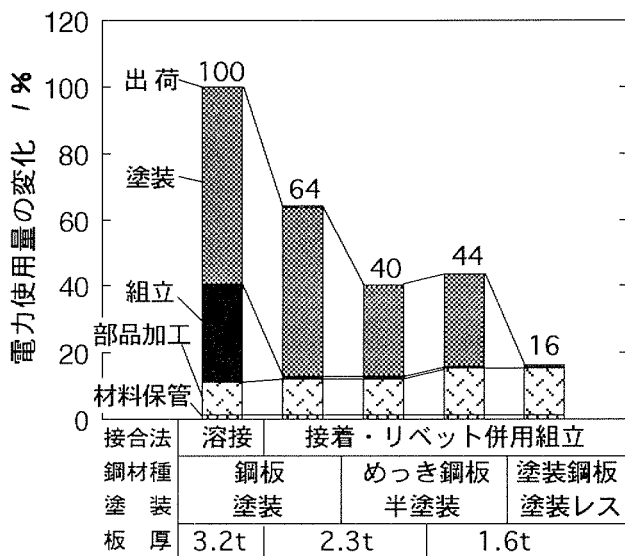


図7. 筐体組立工程における電力使用量の比較

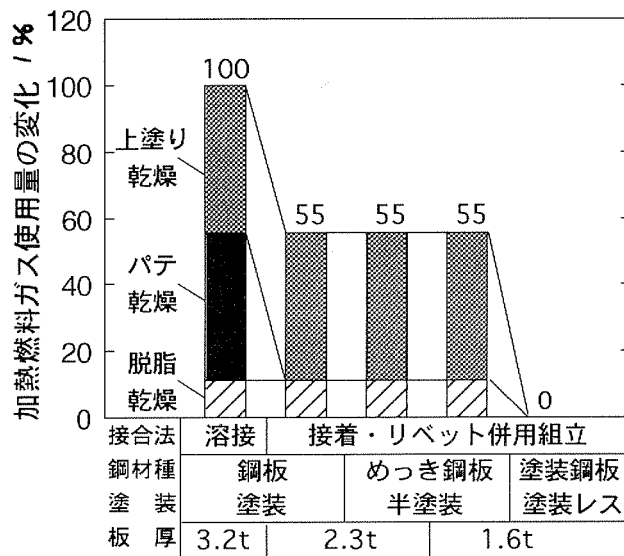


図8. 塗装工程における加熱燃料ガス使用量の比較

る鋼板、亜鉛めっき鋼板、塗装鋼板、塗料、パテ、接着剤について、原料（鉄鉱石、原油）採掘段階から材料完成までに消費されるエネルギー量を計算し、図7、図8に示した電力、燃料ガスのエネルギー使用量と合算して全使用エネルギーを求めた。その結果を図9¹⁾に示した。全使用エネルギー量は、溶接構造から接着・リベット化することによって78%に減少し、亜鉛めっき鋼板で薄板化すると64%に減少し、塗装鋼板化した場合には51%にまで低減されることがわかる。なお、鋼板を製造するために使用されるエネルギーは非常に大きく、さらなるエネルギー削減のためにはいっそうの薄板化が必要である。

5. 接着・リベット併用組立法の適用事例

図1に示したようなパネル構造筐体の他にも多くの板金構造物の組み立てに接着・リベット併用法は適用されている。

500系新幹線の空調室内機ではアルミが使用されている。新幹線の高速化につれて機器の軽量化は重要な課題であり、FRPも使用され、アルミ／FRPの接着・リベット併用接合がなされている。接着剤の使用により、薄板でも剛性が高く、振動・疲労にも強く、低騒音の装置となっている。

フレーム構造の大形筐体⁴⁾にも適用されており、フレーム接合部を接着・リベット接合用に最適化することにより、従来の溶接筐体と同等の耐震性、強度、耐久性を有しながら、40%の軽量化と工期短縮を実現している。

6. 耐用年数経過後の接着強度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ず、しかも最適設計により過剰品質を避けるために、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^{5, 6)}。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。

6.1 耐用年数経過後の安全率の算出法

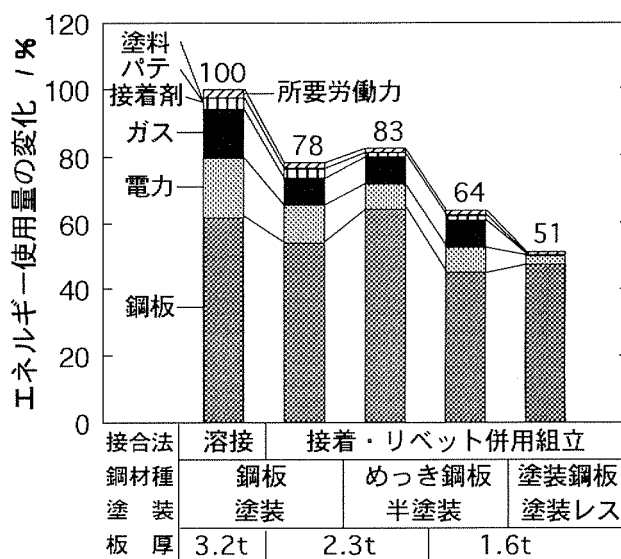


図9. 原料採掘から筐体完成までの全使用エネルギー量の比較

図10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を $F_{\mu R0}$ 、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 $F_{\mu R0} \cdot \eta_{T0}$ 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^{7, 8)}やアレニウスプロットによる方法⁹⁾、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¹⁰⁾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 $[1-R]$ における接着強度を実効接着強度 F_y とすると、 F_y は(1)式で求められる。

$$F_y = F_{\mu R0} \times \eta_{T0} \times \eta_y \times D_y \dots (1)$$

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11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12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。

(1)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

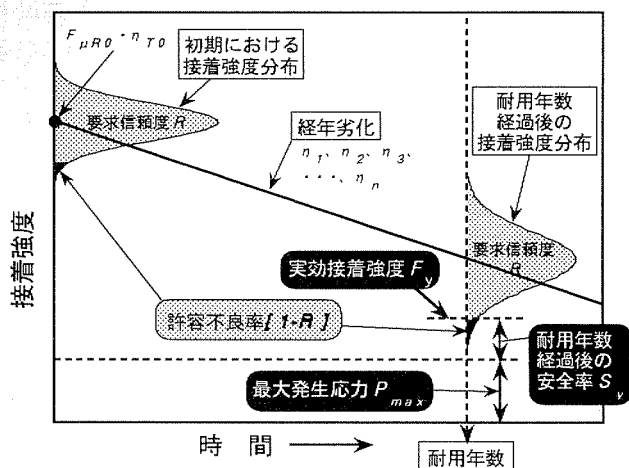


図10. 接着強度の経年変化の概念図

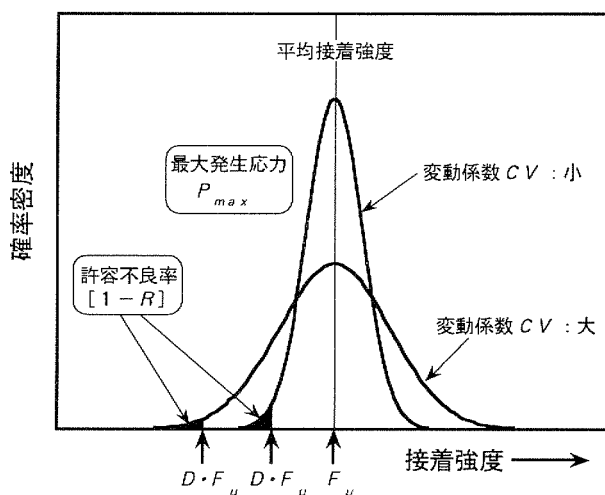


図11. 平均接着強度 F_{μ} 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の概念図

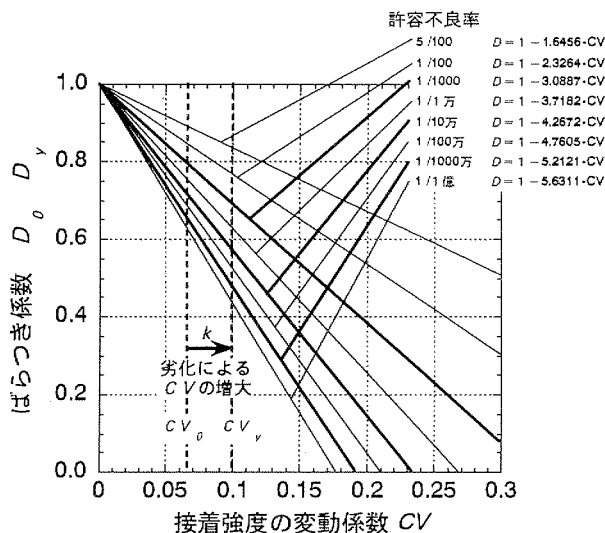


図12. 接着強度の変動係数 CV 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の関係

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_{fT} とすると、実効接着強度 F_y は (2) 式で求められる。

$$F_y = F_{fT} \times \eta_y \times D_y \dots (2)$$

F_{fT} を用いる場合は、初期の室温における接着強度 F_{fR0} と温度係数 η_{T0} 、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、(3) 式により求まる。

$$S_y = F_y / P_{max} \dots (3)$$

基本的に安全率 S_y は 1.0 以上であれば良い。

6.2 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℃ 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を図るなどが可能となる。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着作業工程を合理化できる。

7. さいごに

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。

参考文献

- 1) 原賀康介, 谷 尚記, 緑川 聡: 第 38 回日本接着学会年次大会講演要旨集, (2000)P. 7.
- 2) 緑川 聡, 永田一也, 原賀康介: 接着の技術, VOL.19. No.1. (1999) 85.
- 3) 三菱電機(株)カタログ”接着・リベット併用組立法「MELARS」”
- 4) 三菱電機技報, VOL.72. No.1. (1998) 86.
- 5) 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).
- 6) 原賀康介: 第 33 回信頼性・保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)
- 7) 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).
- 8) K.Haruna, K.Haraga: "Moisture Durability Prediction of Adhesively Bonded Joints Using Acrylic Adhesives."、8th Int. Conf. on Composites Engineering (2001).
- 9) 原賀康介; 日本接着協会誌、15(12)568(1979)
- 10) 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)

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℃ ~ 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. 100℃ 疲労強度を基準とした場合の 25 年後の安全率 S_y

100℃ における疲労強度 F_{f100}		0.58MPa
25 年後のばらつき係数 D_y		0.569
温度係数 (100℃) η_{T0}		-
耐用年数経過後の劣化係数 η_y		0.76
($\eta_y = \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$)		
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		0.251MPa
($F_y = F_{f100} \cdot D_y \cdot \eta_y$)		
最大発生応力 P_{max}		0.10MPa
耐用年数経過後の安全率 S_y		2.51
($S_y = F_y / P_{max}$)		

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	$S_y = 1.25$	$S_y = 1.05$	$S_y < 1.00$