

(受理:平成16年8月12日)

最適設計のための接着信頼性評価法

Evaluation Method of Adhesion Reliability for Optimum Design

原賀 康介*

Kosuke HARAGA

1. まえがき

電気・電子産業は日本の代表的産業となっているが、70年代のオイルショック、省エネ、軽薄短小化、80年代のハイテク化、電子化、円高による海外シフト、産業構造の変革、空洞化、90年代のバブル崩壊、グローバル化、IT化、2000年代に入っても景気低迷、リストラ、環境問題と常に時代の波に翻弄されながら最先端の開発を行ってきた。このような環境の中で、接着剤や粘着材による接合は電気・電子機器組立における必要不可欠な要素技術の一つとなっている。

しかしながら、接着や粘着はいまだに溶接、リベット、ねじなどのような設計基準や設計マニュアルが整備されておらず、製品に適用するまでに特性評価に多大な時間を要している。一方、コンピュータの高性能化、ITの高度化などにより電気・電子機器の設計環境は一変しており、CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering) の活用による開発期間の短縮、最適設計、限界設計、試作レスの方向にある。このような開発環境の変化の中で、接着や粘着が接合法の一つとして生き残っていくためには新たな展開が必要である。

ここでは、接着接合の最適設計を行うために筆者が開発した製品の耐用年数経過後の接着強度の安全率の裕度の定量化法、接着の信頼性向上の基本である凝集破壊の重要性、開発環境の変化、開発期間の短縮に必要な接着特性のデータベースの必要性について述べる。

2. 耐用年数経過後の安全率の裕度の定量化と最適化¹⁾

2.1 耐用年数経過後の安全率の裕度の算出法

図1に、接着強度の経年変化の概念図を示した。接着

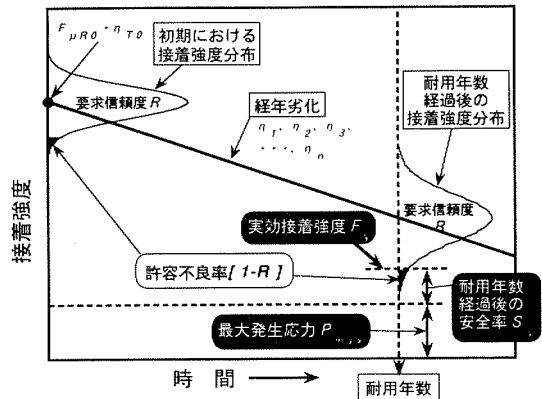


図1 接着強度の経時変化と許容不良率、実効接着強度、最大発生応力、安全率の概念図

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、応力の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、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^{2,3)} 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

* 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

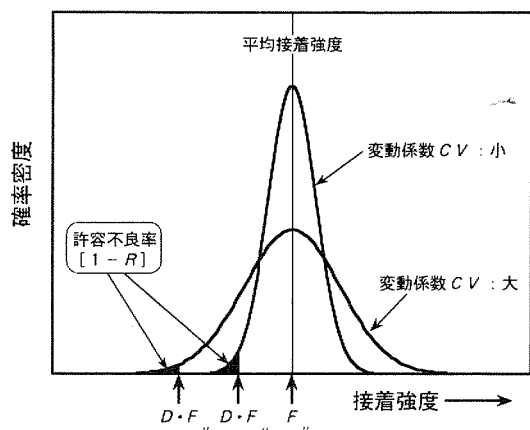


図2 平均接着強度 F_{μ} 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の概念図

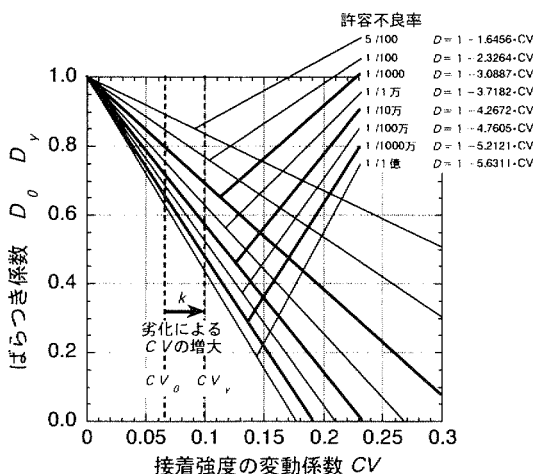


図3 接着強度の変動係数 CV 、許容不良率 $[1-R]$ とばらつき係数 D の関係

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。

接着される部品の重要性によってあらかじめ耐用年数経過時点での信頼度 R が決められており、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。

$$F_y = F_{\mu RO} \times \eta_{TO} \times \eta_y \times D_y \quad (1)$$

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2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 (変動係数 = 標準偏差/平均値) 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3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。

耐用年数経過後の安全率の裕度 S_y は、(2) 式により求まる。

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

2.2 安全率の裕度の再配分による最適化

耐用年数経過後の安全率の裕度 S_y が1以下の場合には設計の見直しが必要である。 S_y が1以上である場合は、この裕度分を許容不良率 $[1-R]$ の低減や、接着剤塗布面積の最小値の管理基準の低下など接着作業プロセスの

効率化に再配分していく。

3. 凝集破壊と変動係数

一般に接着物の破壊で最も多いのは界面破壊であるが、界面破壊では接着強度のばらつきが非常に大きく好ましい状態とは言えない。最も好ましい破壊状態は接着剤の凝集破壊である。凝集破壊の場合は接着強度のばらつきが小さく、信頼性の点で優れている。

接着強度の変動係数 CV が0.15以下であればばらつきの少ない良好な接着状態といえ、0.10以下であれば理想的な接着状態といえる。逆に、0.2以上では接着強度の信頼性を議論することはもはやできない状態である。

図4に、一例として、2種類の接着剤の接着強度の度数分布の比較を示した。2液アクリル系接着剤は強度のばらつきが少ないため標準偏差が小さく、よって変動係数 CV は0.03 (3%) と非常に小さく理想的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接着強度のばらつきが大きいため標準偏差が大きく、変動係数 CV は0.19 (19%) と大きくなっており、信頼性的に問題がある状態である。図5には、同様に凝集破壊率の比較を示した。凝集破壊率とは、接着面積全体に対する凝集破壊面積の比率である。図4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4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。

接着強度の変動係数 CV と凝集破壊率には相関があり、凝集破壊率が高いほど接着強度の変動係数 CV は小さくなる。これまでの多くの事例から、凝集破壊率が約40%以上であれば変動係数は0.15以下が確保できるよ

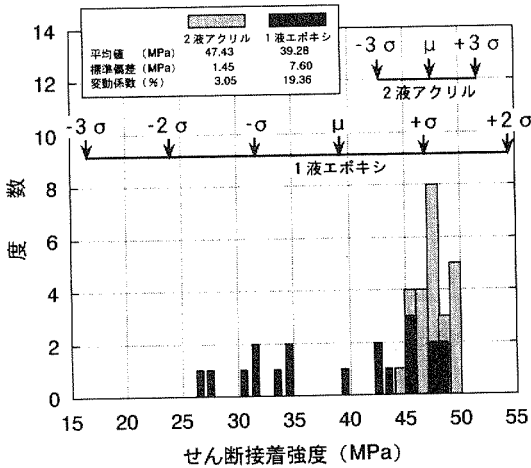


図4 1液エポキシ系接着剤と2液アクリル系接着剤のせん断接着強度の度数分布の比較

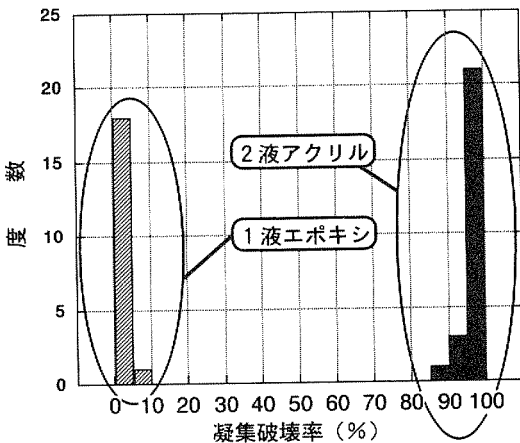


図5 1液エポキシ系接着剤と2液アクリル系接着剤の凝集破壊率の比較

うである。凝集破壊率を高くするためには、被着材料の表面と接着剤の密着性を向上させることが必須条件である。

4. 開発環境の変化

従来の製品開発は、図6に示すように、シリーズ的な開発がなされてきた。しかし、コンピューターの高性能化、IT技術の高度化により情報の共有化が進むにつれて、開発の各ステップがコンカレントに同時進行し、開発期間が大きく短縮されるようになっている。また、製品の構造設計、機能設計においては最適設計、限界設計が追求されており、試作・評価においてはコンピューター

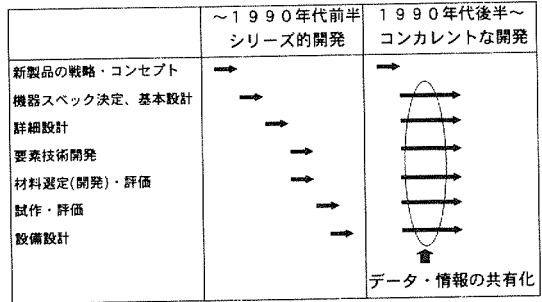


図6 開発プロセスの変化

シミュレーションによる試作レス化の方向にある。

このような開発環境の中で、設計の大半がCAE解析で行われ、3D-CAD, CAMとCAEが連成されて、設計者がコンピューター上で機能・特性を評価しながら設計、試作していくようになる。

このような設計環境においては、まず、接着や粘着の諸現象に対するCAE解析の汎用的ツールが必要である。接着の諸現象に対する専用のソフトというものはまだない。外力に対する接着部の応力解析でも、被着材料とは厚さもヤング率もオーダーの異なる接着層のモデル化には一工夫必要であるし^{4,5)}、硬化収縮応力の解析では、一定温度での樹脂の収縮であるので、熱応力解析ソフトで接着剤だけにある膨張係数(収縮係数)を与えて、両被着材料の線膨張係数をゼロとして、これを冷却したとして解析すればよいが、液体から固体へと変化していく過程でのヤング率と収縮率の変化の扱い方が問題となる⁶⁾。接着層への水分の拡散は、熱伝導解析ソフトで代用することができるが、界面を伝わる水分の拡散の扱いが問題となる。このように、解析法自体の開発も重要な課題である。近い将来このような解析法が確立すれば、設計者が設計段階で自由に使えるツールとなる。

5. データベースの必要性

4で述べた接着の諸現象のCAE解析が可能となったとしても、解析に使用する接着の物性値が揃っていないとすぐに解析を行うことができない。また、2で述べた方法を用いて耐用年数経過後の安全率の裕度を定量的に求める場合にも、環境や応力に対する耐久性のデータや接着強度のばらつきに関するデータが揃っていないと都度評価試験が必要となり、膨大な時間を要し開発速度に対応できないこととなる。このため、接着に関するデータベースの整備が急務である。表1, 表2に必要なデータベースについて示した。

表1 接着接合系に必要なデータベース
(1) 接着剤自体の物性データベース

内 容	T _g , ヤング率, 線膨張係数, 硬化時の収縮率とヤング率の経時変化, 吸水率, 水の拡散係数, 透湿性, 電気的特性, 光学的特性, 難燃性, 純度, など これらの温度依存性 特殊機能接着剤は極力含める。
使用方法	CAEで, 機器の要求スペックを満足できる接着剤の物性範囲を求め, 上記データベースから接着剤を選定する。
データベース作成の可能性	十分できる

表2 接着接合系に必要なデータベース
(2) 強度・耐久性に関するデータベース

内 容	劣化特性 (環境劣化, クリープ, 疲労) ばらつき (変動係数)
使用方法	機器の耐用年数, 使用環境・応力, 設計信頼度, 安全率から必要な実効接着強度を求め, この実効接着強度を満たす接着剤を選定する。または, 候補接着剤のデータから実効接着強度を計算する。 実効接着強度←劣化特性, ばらつき 接着剤・被着材料を絞って徹底的に評価する。 + 特定条件のみで多数の接着剤を比較評価する。
データベース作成の可能性	・因子が多すぎて困難なことは承知の上。 ・できない理由よりもやるための方策が必要。

6. あとがき

データベースの構築や接着現象のCAE解析法の開発を企業単位で行うことは人的, 費用的, 時間的に困難である。接着剤のユーザーメーカーと接着剤メーカー, 接着関連機器メーカー, 大学公的機関との連携, あるいはユーザー側工業会, 学会と接着剤側工業会, 学会との連携, さらには研究組合の設立など企業間の壁を越えた産学官協同の取り組みが必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) 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).
- 3) K.Haruna, K.Haraga: “Moisture Durability Prediction of Adhesively Bonded Joints Using Acrylic Adhesives.”, 8th Int. Conf. on Composites Engineering (2001).
- 4) 春名, 原賀: “数値解析を用いた接着接合体の設計技術”, 三菱電機技報, 70(2) 86 (1996)
- 5) 春名: “接着接合体の有限要素解析と製品設計への適用”, 日本接着学会誌, 34(10) 29 (1998).
- 6) 春名, 原賀: “接着剤の硬化収縮による内部応力を対象とした数値解析手法”, 日本機械学会論文集 (A 編), 60(579) 2589 (1994).