技術資料

はんだ付け部の信頼性とその評価法*

原 賢 治**

Reliability of Soldering and its Evaluation*

by Kenji Hara**

キーワード：はんだ付け，はんだ付け性，信頼性，はんだ不純物，疲れ強さ，プリント基板，電子部品

1. ま え が き

はんだ付けは古くから用いられてきた接続法であり，多くの経験に基づいた蓄積がある。しかも，今なおますます適用領域を広めて進展を続けている要素技術である。

特に，電子機器を中心に小型化，高性能化，低コスト化および高信頼性化の要求が強まるにつれて，はんだ付け技術はますます重要度を増してきている。すなわち，機器は多くの部品から構成されており，それぞれにまた多数のはんだ付け部を必要とする。したがって，機器の信頼性ははんだ付け部に左右されるといっても過言ではない。

そこで，このような電子機器の高密度実装のためのマイクロソルダリングを中心にして，はんだ付け部の信頼性とその評価法について述べる。

2. はんだ付け方法の変遷

図1に¹⁾，はんだ付けが最も多く適用されている電子産業の生産高の推移を示す。このように，全体的にみれば，経済情勢の変動にもかかわらず増加傾向を示している。これを支えてきたのは，多数の電子部品を一度にプリント基板に自動はんだ付けする技術である。図2に示すプリント基板の生産高の推移²⁾はこれを裏付けており，基板の高密度化，多層化の様子をみることができる。

プリント基板へのはんだ付け方法の変遷を関連材料の変遷等と併せて表1³⁾に示す。電子部品が真空管→半導体→IC→LSI→VLSI→ULSIへと小形化が進むにつれ

図1 電子産業の生産高の推移

図2 プリント基板の生産高の推移

*原稿受付 昭和63年11月30日

** ㈱安川電機製作所 Yasukawa Elec. Mfg. Co., Ltd.

表 1. はんだ付けの実装方法と部品、材料の変遷

世代 項目	1. (～昭和 34)	2. (昭和 35～39)	3. (昭和 40～44)	4. (昭和 45～54)	5. (昭和 55～?)
実 装	パネルシャーシ 組立図, 配線図	挿入実装 折曲げ フロー方式	挿入実装 DIP セラミック, 面付	面付実装 SMT ハイブリッドテクノロ ジプリント基板へ拡大 SOP, チップ部品	三次元実装 ビルドアップ法
能 動 部 品	真空管 検波, 増幅, 整流	半導体 ミニモールド IC	LSI MOS IC ハイブリッド IC	VLSI モノリシック IC マルチチップ IC	ULSI 化合物半導体 (GaAs) 第三の半導体 光デバイスの発展
受 動 部 品	アキシャルリード部品 ラジアル 〃 端 子 〃	リードのハンダめっき	膜技術 ボンディング技術 チップ部品	高集積化 チップ化, 標準化 グリーンシート (多層・積層)	薄膜ダイヤモンド (放熱) ハンダバンプ 部品の印刷化 サブミクロン回路
配 線	電線, ケーブル 片面 PWB フェノール 3,000KM	両面 PWB 各種樹脂 30M	セラミック基板 貴金属ペースト スルーホール基板, FPC 3M	高密度実装(多層化) 金属心基板 導体間隔 CAD, CAM 30 cm	熱ストレス 石英, ポリイミド, ケブラ基板 光ファイバの発展 15 cm以下
ハ ン ダ フ ラ ッ ク ス	棒ハンダ コアード溶ダ 松脂	棒ハンダ } ディップ フラックス } (松脂, 溶剤, 活性剤)	ソルダクリーム (リフロー法) (印刷, デスペンサ)	各種金属入ハンダ ソルダクリーム松脂	ソルダゴムシート
実 装 設 備 (生産方式)	電気ゴテ コンベヤシステム	フロー溶ダリング 浸漬装置 リード, 挿入 機械化	リフロー装置 ソルダクリーム 塗布装置 チップマウンタ 自動化	赤外線, V.P.S. ジュール熱加熱機 レーザー加熱器, 洗浄 装置 ライン化	CAT(三次元画 像認識) FA 自動システム化

て、それを搭載するプリント基板のアセンブリ工程は片面挿入方式→両面スルーホール→混載→片面面実装→両面面実装→三次元実装へと高密度化し、はんだ付けの実装方法も手作業→自動フロー→リフロー方式へと高生産性を遂げてきた。

この様子を模式的に図 3 に示すが、さらにリフロー方式も加熱方法でつぎのように分けられる。

- (1)接触加熱ツール (2)赤外線 (3)光ビーム (4)レーザー
(5)気化潜熱 (6)ホットプレート (7)エアヒータ

このような各種実装方式は、それぞれの特長から対象機器の要求に応じて使い分けられている。

図 3 実装方式変遷の模式図

3. はんだ付け信頼性に及ぼす要因

はんだ付け部は、機器のライフサイクルから要求される電氣的、機械的、化学的機能を果たさなければならない。

要求機能は機器ごとに異なり、また、それに応えるはんだ付け部の形状や材料、実装方法も多様であるので、はんだ付け部の信頼性は個々の対象物について検討する必要がある。しかし、標準化して考えれば、つぎのように製品の開発ステップで信頼性に影響を及ぼす要因をきちんと押えて、はんだ付けシステムの信頼性を確保することが基本である。

- (1) 製品企画、設計段階で考慮すべき要因
- (2) 部品購入、製造段階で考慮すべき要因
- (3) 製品の使用段階で考慮すべき要因

表2. 実装プロセス上の主要管理項目

工 程 名	管 理 項 目
1. チップ部品の貯蔵、保管	1. 保管環境、周囲温度、湿度 2. 保管期間 3. 保管包装状態
2. 基板設計	1. パターン形状 2. パターンランド寸法 3. 部品配置 4. 基板プレイクの設計
3. クリームはんだ印刷	1. はんだパターン寸法 2. はんだ塗布厚
4. チップ装着	1. 基板のそり ●正 (サポートピン) 2. 吸引ノズル下死点位置 3. 吸引ノズル、荷重 4. センタリング爪荷重 5. 吸引ノズル、センタリング爪の保守、点検 6. チップ装着位置
5. リフローはんだ付け	1. 予熱温度、時間 2. はんだ付温度、時間 3. はんだ付け状態 (はんだ上がり量)
6. 接着剤塗付	1. 接着剤塗付パターン形状、寸法 2. 接着剤粘度 3. 接着剤塗付厚 4. 接着剤塗付位置
7. 接着剤硬化	1. 硬化温度、時間
8. リード付部品挿入	1. 基板の固定
9. フラックス塗付	1. フラックス塗付量 2. フラックス塩素含有量
10. フローはんだ付け	1. 予熱温度、時間 2. はんだ付温度、時間 3. はんだ付け状態 (はんだ盛量)
11. コテ修正	1. コテの種類、出力 2. コテ先形状 3. コテ先温度 4. 予熱温度、時間 5. はんだ付温度、時間 6. はんだ付け状態 (はんだ盛量)
12. 洗浄	1. 超音波出力、槽容積、洗浄時間 2. 洗浄溶剤
13. 検査	1. 基板の固定 (バルクアップピン)
14. 基板プレイク	1. プレイク工法 2. 基板の固定 (専用治具)

具体的な個々の製品では、さらにステップごとに詳細に検討する必要がある。一例として、チップ部品の実装工程として、(1)リフロー (2)フロー (3)こてはんだ付けの混流ラインにおける主な管理項目を表2⁹⁾に示す。

このような項目を製造段階で管理して良好なはんだ付けを行っても、機器の使用中にトラブルを起すとすれば、その原因は設計段階にある。

品質管理では源流の製品企画、設計の段階が重要であるが、はんだ付けで特に考慮すべき項目はつぎのとおりである。

- (1) 機器の使用環境の把握
- (2) 良好なはんだ付けが得られる部品の選定
- (3) 電氣的、機械的、化学的機能を満足する継手形状と回路配置
- (4) 作業性と管理レベルを把握した部品配置

以下に、特に3項目について述べる。

4. 機器の使用環境の把握

機器の信頼性を確保するためには、設計段階で使用環境を適確に把握し、それに対する寿命予測を行うことが第一である。

使用環境はつぎのように大別できる。

- (1) 温度、湿度ストレス
 - 温度、湿度の単独
 - 温度、湿度のサイクル
- (2) 機械的ストレス
 - 短時間荷重 (引張、せん断、ねじり、衝撃等)
 - 長時間静荷重 (高温でのクリープ)
 - くり返し荷重 (熱サイクルによる疲労)
- (3) 腐食性ストレス

- 硫化系、塩化系等のガス
- 液状・じんあいの付着

さらに、これらが複合して問題を起すことが多い。

そこで、環境ストレスを正確に把握するためには、過去の蓄積データを活用することと併せて、現地での実測も必要となる。測定計器は各種ストレスに対して整備されてきているが、長期間にわたる測定が必要である。

このような各種ストレスに対して、フィールドでの劣化を短時間で再現するために促進試験法が行われる。多くの試験法が、例えば MIL STD-202E, STD-883 や各種工業団体等で規格化されているが、フィールドとの促進係数については問題が残っているものも多い。したがって、独自のフィールドデータの蓄積と促進試験を基にして寿命予測をすることも必要となる。

5. 良好なはんだ付けを確保するための条件

はんだ付け部の良否は、電子部品（母材、表面処理）、作業材料（はんだ、フラックス）の選定とはんだ付け作業条件（温度、時間）によって大きく左右され、条件が適性でないとはんだ付け欠陥が発生する。

観で認められる主な欠陥はつぎのとおりである。

- (1) はんだブリッジ
- (2) つらら
- (3) はんだ不足（部品浮き）
- (4) ぬれ不足（ルーズコンタクト）
- (5) フィレット不足
- (6) 位置ずれ

このようなはんだ付け後の異常を非破壊で行う方法には、X線、AE、サーモグラフやレーザ照射⁹⁾によるはんだ付け部の温度上昇測定等がある。

しかし、このような検査は高密度実装では不完全なものとなるので、電気的動作チェックに頼る部分が多い。

したがって、実装作業の段階で良好なはんだ付け部を作り込むことが基本である。

5.1 はんだ付け性の評価法

はんだ付け管理システムの中で、基礎的で重要な項目、「はんだ付け性」の評価法は、表3に例示するように、いずれも母材とはんだとのぬれの接触角や表面張力を利用して、はんだの広がり面積、ぬれ力、ぬれ時間等を測定している。

各評価法には一長一短があるが、自動はんだ付けラインとの相関がとりやすい点では、メニスコグラフ法がすぐれていると考えられるので、以下に筆者が行った実験例を報告する。

5.2 電子部品リードのはんだ付け性

メニスコグラフ法の原理や⁹⁾それによるはんだ組成、フラックス、母材の影響⁷⁾等については多くの報告がある。

図4に示すように、所定のはんだ付け条件下で試料を溶融したはんだ浴中に浸漬すると、試料がぬれていくに従って溶融したはんだの表面張力(γ)の垂直分力が変化していく。これをトランスジューサで検出し、時間に対してXYレコーダに記録していくと、図5のようなメニスコグラフが得られる。

トランスジューサの出力(F)は、試料に対する下向きの力を正にとれば、次式で求められる。

$$Fg = \gamma l \cos \theta - \xi V g$$

ここで、 l ：試料が溶融はんだの浴面と接する長さ

θ ：試料に対するはんだの接触角

ξ ：溶融はんだの密度

V ：溶融はんだ中に浸漬した試料の体積

g ：重力の加速度

t_2 はぬれが完了するまでのぬれ時間(t_1 は接触角が零となる時間)、 $\gamma \cos \theta$ はぬれ力である。 t_c は接触時間と呼び、試料が引きあげ開始からはんだ浴との接触が断たれるまでの時間をタイマで測定したもので、つららの長さを示すメジャーとなる。

挿入電子部品のリードは母材および表面処理が様々であり、また、同一仕様でも入手までの履歴や実装までの保管条件が異なると、はんだ付け性に差が生じる。そこでつぎの条件で測定した。

(1) 母材および表面処理

測定に用いた母材とその表面処理はつぎのとおりである。

●母材： $\phi 0.8 \times 25 \text{Cu}$, 65Cu-Zn , Ni , 20Ni-17Co-Fe

表3 各種のはんだ付け性試験法

名 称	規 格	方 法	評 価 例
広がり率法	ASTM	試料に一定量のはんだ粒をのせ、250℃のオープン中に一定時間加熱した後、広がり面積や広がり率を求める。
接 触 角 法	R. C. A. Co.	リード線にはんだ線を1回まきつけ、195℃のポリエチレン・グリコール浴に10秒間浸漬した後、接触角を測定する。
浸 漬 法	MIL, EIA	試料を25.4mm/sの速さで降し、232℃のはんだ浴に5秒間浸漬し、25.4mm/sの速さで引き上げた後、10倍の拡大鏡で検査する。
メニスカス・テスト法	G. E. Co. MIL	幅1.91mmの導体を1.27mm間隔で平行に多数並べたメニスカステスト板を、メニスカステスト板取りつけ板を介して水平に232℃のはんだ浴に12秒間浸した後、各スポットの広がりを測定する。
はんだ球法	IEC	235℃に保持した一定量のはんだ球中に、水平にセットしたリード線を浸し、はんだがリード線を包みこんでしまうまでの時間を測定する。

図4 メニスコグラフの原理

図5 代表的メニスコグラフチャートと測定因子

図6 光沢すずめっき銅線の150°C加熱処理によるぬれ時間の変化

- めっき：4 μ mSn, 90Sn-Pb, 60Sn-Pb, 1 μ mAu, 5 μ mAg

(2) 促進劣化法

室内暴露データに基づいた促進試験法とその劣化因子を表4に示す。

(3) はんだ付け条件

- はんだ浴温度；240°C
- はんだ；H63A (63Sn-Pb)
- フラックス；活性化ロジンタイプ (20°Cで比重0.867)
- 試料浸漬深さ；2mm
- 試料浸漬速度；16mm/s
- 試料引上げ速度；21mm/s

はんだ付け性をぬれ時間とぬれ力、つらら長さによって評価した結果の一例をつぎに示す。図6は光沢すずめっき銅線を150°Cの加熱処理を行った時のぬれ時間の変

表4 はんだ付け性の促進劣化試験法と劣化因子

促進劣化試験法	はんだ付け性劣化因子	湿食	乾食	硫化	拡散
加熱処理	150°C		○		○
加湿処理	40°C 95% RH	○			
温湿度サイクル処理	MIL-STD-202, 106 C法	○			
スチーム処理	95°C 以上 100% RH	○			○
温湿度処理	65°C 75% RH	○			
硫化水素処理	10~100ppm 90% RH			○

(a) ぬれ時間 (t_2)

(b) ぬれ力

図7 各種すずめっき銅線の150°C加熱処理によるはんだ付け性の変化

化である。実際の機器では、接続点数が多いので、評価試験においてもこのように多数の試料数で信頼度を求めることが重要である。そこで、ぬれ時間(97.5%の試料がぬれを完了する時間)と、ぬれ力についてめっきの差を評価すると図7⁹⁾のようになる。

図7 (b)で劣化の大きい試料の母材とはんだの境界には、ぬれ性の悪いCu₆Sn₅の生成⁹⁾に加えて、反応にあずからないPbがめっき皮膜と母材間に集積している(図8)。

図8 150°Cに140h加熱処理した、はんだめっき銅線のXMAラインプロファイル

なお、Snめっき部品のはんだ付け性とはんだ付け部の強度については、いくつかの報告があるが¹⁰⁾、はんだのぬれ性や、はんだ付け部の特性を評価する場合には、このようなXMA等の微細な解析が有効である。たとえば、アルミニウムのはんだ付け部の耐食性が境界層の腐食電位に左右されることは顕著な例である¹¹⁾。

以上のようなテストデータと促進試験の加速率の評価を基にして、実際のラインの管理限界を設定する必要がある。

5.3 はんだ付け材料とはんだ付け性

はんだ付け性に大きな影響を及ぼす主要材料のはんだの主成分および不純物は、購入段階では厳しく規定されている。そこで、問題になるのは、作業中の部品からの浴中への混入等による変動である。

Sn-Pb はんだ中への各種金属の溶解量については、図9¹²⁾に示すほか、多数の金属の固体-固体および固体-液体のdiffusion dataがまとめられているが¹³⁾、実際のラインではこのようなデータを基にして稼働状態に応じた日常管理を行うことが必要である。

不純物の影響とその管理限界については多くの報告があるが^{14,15)}、図10, 11には前述のメニスコグラフで測定した、ぬれ時間、ぬれ力、つらら長さへの影響を示す。

主要材料のフラックスのはんだ付け性及ばす影響についても報告されているが^{16,17)}、一般に、作業性がよいものは活性度が高く、残さの腐食や部品への悪影響を起し易い。また、洗浄効果を高めるために超音波を用いる場合、条件によっては、はんだ付け部が破損することもある。したがって作業性と洗浄性が重要な選択要因である。さらに、面実装フロー方式で用いられるクリームはんだは、粉末はんだとフラックスを混合したものであるが、はんだ形状やペースト粘度によってもはんだ付け性が左

図9 60Sn-40Pb はんだ浴中への金属の溶解速度

図10 63Sn-37Pb はんだのぬれ時間に及ぼす不純物の影響

右される。

プリント基板は主要部品の一つであるが、スルーホールのはんだ付け性に対するプリフラックスの効果はメニスコグラフで測定した報告もある¹⁸⁾。

プリント基板のはんだ付けでは、特につぎの点が問題となるので選定に際して注意が必要である。

- (1) 部品との熱膨脹の差 (2) 機械強度 (3) 吸湿性

5.4 作業条件とはんだ付け性

はんだ付けで金属学的接合を得るためには、使用材料に最適な温度に十分な時間加熱しなければならない。作業条件の中の加熱温度と時間(コンベヤ速度)が挿入部品のフローはんだ付けの欠陥に及ぼす影響や¹⁹⁾、厚膜試料のはんだ付け強度に及ぼす影響についての報告²⁰⁾等が

図11 63Sn-37Pb はんだのつらら長さに及ぼす不純物の影響

図12 荷重とクリープ量が増大する時間との関係

あるが、実際のラインでは製品の各部について温度測定を行って作業条件を設定する必要がある。

6. はんだ付け部の信頼性

はんだ付け部の使用中の信頼性にとって、前述の機械的および化学的ストレスが問題である。

クリープ強さについては多くの報告があるが²²⁾、図12²²⁾に示すように高温になると大幅に低下するので、特に大きい荷重がかからないように部品配置を考える必要がある。

クリープの経過時間に対して、使用中の温度変化に起

図13 ヒートサイクルによって生じるひずみ S とくり返し回数 N と信頼度 P の関係

図14 プリント基板へのワニス塗布の耐食性効果

因する疲れ強さについては、加熱冷却のくり返し回数が問題となる。はんだ付け部の疲れ強さは継手形状によってストレスが異なるので、挿入部品²³⁾、ラップ部品²⁴⁾、半導体素子²⁵⁾、等について多くのデータが報告されている^{26,27)}。

一般に、低サイクル疲労では Coffin-Manson の関係が知られているが²⁸⁾、製品の寿命を予測する場合には、多数のはんだ付け部に対する信頼度を考える必要がある。

筆者は、多数の挿入部品のモデルについて実験を行い、FEM による熱応力解析と信頼性手法を用いて、プリント基板のはんだ付け部の寿命予測システムを構築した²⁹⁾。

すなわち、使用温度サイクルに伴ってはんだ付け部に生じるひずみ S とヒートサイクルのくり返し数 N における信頼度 P との関係は図 13 のように求められるの

で、個々の製品について使用条件の設定と信頼度の予測に役立てることができる。

化学的ストレスで問題になるのは、腐食性ガスと吸湿による導通部の腐食と絶縁低下である。特に、信号レベルの微小化と導通パターンの微細化が進むと、はんだ付け境界部やわずかの銅パターン露出部が問題となる。保護のためにワニスコーティングを行うことも効果があるが、図14に示すようにワニスの種類によって大きな差がある。したがって、作業性やワニス上からのはんだ付け補修性も含めてその選定が重要となる。また、耐食性と耐振性を併せてはんだ付け部を樹脂処理することがあるが、この場合には樹脂の収縮応力や、熱応力によって断線することがある。

このように、はんだ付け部分には多くの故障パターンがあるので、常に故障解析とその再発防止対策が重要である。

7. ま と め

高密度、高生産性の要求が強まる中で、はんだ付け部の信頼性とその評価法について概説した。

特に、はんだ付け信頼性を確保するためには、製品の開発ステップに応じて、考慮すべき要因をきちんと押さえることが不可欠である。

マイクロソルダリングの信頼性は、これからますます重要度を増してくるので、改善への絶ゆまね精進が必要と考える。

参 考 文 献

- 1) 日本電子工業振興協会：電子工業統計月報3月号
- 2) 日本プリント回路工業会：プリント配線板工業の現状(昭和63年度版)，21
- 3) 田中：インターネブコンセミナー(1987) N2-1
- 4) 山名：第21回 ISHM JAPAN 技術講演会予稿集(1988)，35
- 5) R. Vanzetti et al : Conf. Record, Cleveland Electronics Conf. and Exposition, (1980), 103
- 6) Duncan Mackay : Circuit Manufacturing July, (1973), 52
- 7) J. F. Shipley : Welding Research Supplement, Oct. (1975), 357-S
- 8) 高畑，原，八百：溶接学会 56 年春全国大会 P186
- 9) D. S. Dunn, T. F. Maris, W. M. Sherry, C. J. Williams : Mat. Res. Symp. Proc. Vol40 (1985), 129
- 10) D. Olsen, R. Wright, H. Berg : 13th Annual Proceedings of the Reliability Physics Symposium, April (1980), 80
- 11) 原：ぶれいず，第54号，11
- 12) W. G. Bader : Phys. Metall Met. Joining (1980), 257
- 13) Howard Berg, Edward L. Hall : Ann. Proc. Reliab, Phys. Shmp. 11th (1973), 10
- 14) C. A. Mackay, P. E. Davis : Proc. Tech. Program Natl. Electron Packaging Prod. Conf. (1982), 415
- 15) A. M. Stoneman, C. A. Mackay, C. J. Thwaites : Metals Technology, June, (1980), 226
- 16) A. D. Ippolito, R. L. Wolfe : Welding Journal, January, (1974), 20
- 17) J. F. Shipley ; Welding Journal, October (1975), 357-S
- 18) 大竹，国井：材料試験技術，26, 3 (1981), 155
- 19) 深山：第2回 日科技連信頼性シンポジウム，189
- 20) 国井，山下：材料試験技術 28, 1 (1983), 29
- 21) S. T. Lana : Materials Science and Engineering, (1979), 40
- 22) 朝倉：矢崎技術レポート 第12号(1987), 102
- 23) Roger N. Wild : Welding Research Supplement November (1972), 521-S
- 24) V. D. Combs : ASTM, STP515, (1972), 3
- 25) 土方，吉岡，宮崎，水牧：三菱電機技報 53, 3(1979), 229
- 26) 越川：電子技術 25. 6, 101
- 27) John A. Devore : Proc. Tech. Program Natl. Electron Packaging Prod. Conf. (1982), 409
- 28) Coffin, L. P. : Exeperimental Mechanics, May (1968), 218
- 29) 原，井上：第14回 日科技連信頼性，保全性シンポジウム(1984), 339