正 員 津久井 勤

キーワード：高密度実装、プリント回路板、モジュール基板、信頼性、寿命評価、

東海大学

1. はじめに

最近の電子機器の小型軽量化の傾向には目ざましいものがある。この傾向に伴って、機器の小型化が裏打ちされる電子機器構成部品の小型化とともに、実装形態の変化があり、高機能化を伴いながらも一層の高密度化が推進されている。

このような電子機器の開発状況にあつて、当然ながらこれらの機器が、ユーザにとって使いやすく期待通りの保証が得られていなければならない。このことを実行するためには、目立たないが、担当者の日夜怠らない堅実な努力で、素材からシステムに至る一連の評価と使用実績を踏まえて総合的に評価判定されている¹⁾。

ここでは、信頼性評価について現状を認識しつつ、更なる電子機器の高機能化と小型軽量化に対処するために、採られるべき高密度実装技術に対応した今後の信頼性評価の内容とその手法について述べる。この時、次に述べることに考慮が必要である。即ち、最も重要なことは、実装形態が違ってくることによって、劣化形態も違ってくることであり、信頼性を評価すべき重点となる箇所や内容が違ってくることである。一方では、新製品の開発を短期間に行う必要があり、信頼性を早期に評価することが要求される。しかしながら、一概に早期に評価するといっても、過剰な加速試験は、評価を間違えることになるので、信頼性評価にある程度時間がかかることである。また、コスト低減との絡みもあり、前述のことを考慮しつつ、より適切な評価が従来以上に要求されている。これらのことを常に念頭において信頼性評価が行われなければならない。

前述の内容に配慮しながら、今後どのように対応しどのように対処すれば良いかについて、現状の内容を整理し以下に述べる。

2. 電子機器の小型軽量化と高密度実装技術の動向

The Subject of Reliability Evaluation for High Density Electronics Packaging

By Tsutomu Tsukui (Tokai University)

電子機器の小型軽量化と同時に高機能化が推進されているが、その背景には構成部品の小型化と高集積化並びに基板のファインパターン化が一層推進されていることによる。構成部品の動向を見ると、小型化の一途を辿っており、10年前の2012(2.0mm×1.2mm)サイズチップ部品全盛の時代から、最近では1005(1.0mm×0.5mm)サイズチップ部品が全盛であり、0603(0.6mm×0.3mm)サイズチップ部品も実用化が進められている。

一方、半導体実装部品はその機能、用途によって形はさまざまであるが、高集積化と共に多ピン化の動向にあり、これをどう実装するかは課題がある。

即ち、従来からLSIはモールド樹脂でパッケージングされているが、高集積化の推進と共に大きくなり、更にピン数が増加することによってリードフレームを使用したチップではピンピッチが狭く(0.25mmピッチ程度)なり、実装を難しくしていた。このことに対応するため採られてきたのが、BGA(Ball Grid Array) / CSP(Chip Size Package or Chip Scale Package, EIAJ; ファインピッチBGA)のような基本的にはエリアアレイを採用することでピッチが広く採れ(当然、今後はこの間隔も狭くなってゆくことになるが)、ベアチップの採用が可能な実装技術の開発が行われている。このような大きな利点があつて、順次実用化が推進されている。同時に、実装部品のモジュール化も計られているが、単品では優位性が保てなくなっていることと高集積化とも対応してより一層推進されるものと考えられる。

高密度実装化を推進するに当たって、プリント配線板ではファインパターン化と共に前述の実装部品の実装形態変化にも対応して、新しい基板構成の開発がみられる。その代表的なものがビルドアップ多層配線板である。この配線板では、従来の多層配線板の上にさらに何層かを積み重ねた構成を採っている。このビルドアップ配線板にBGAでベアチップ実装が行われるなど高密度実装化が計られている。

ところで、前述のようなプリント配線板のファインパターン化の中で実装部品の狭ピッチ化と共に導体間隙や層間が小さく採られるようになっている。文献²⁾と最近の情報からこの代表例を図1に示す³⁾。同図に示すように、導体間隙で30μm程度、ビルドアップ配線板で層間絶縁が

40 μ m程度にまで薄く設計されており、一層の狭ピッチ化や層間絶縁の薄膜化が計られようとしている。

以上述べたように、このような大幅な高密度実装化が計られている中で、コストを加味しながら信頼性が伴っていないと大変なことになる。そのためには、従来以上にきめ細かい、しかも早期に評価を行って品質保証を計る必要がある。これらの内容については次章以下で述べる。

3. 電子機器の事故状況と劣化形態の種類

〈3.1〉 電子機器の事故状況 PL(Product Liability)法が施行(1995年7月1日)されて3年以上になるが、図2に示

(a) 配線密度の推移

(b) 薄板多層PWBの相対重量比較

図1 プリント配線板のファインパターン化のトレンド

図2 事故情報収集件数の年度別推移⁴⁾

す事故通知件数の年度別推移に見るように⁴⁾、事故件数が増える傾向にある。最近の統計を見ても家電用機器からの発火事故が年間4千件以上にも達していると報告されており⁵⁾、かなりの件数に上っていることがわかる。しかし、この中には製品の欠陥と云うよりユーザの使い方が良くないことによる火災も含んでいる。これらの発火原因となった主な内容は図3に示すように整理される。

いずれにしても、電子機器が小型軽量化し、随所に使用

図3 電子機器の発火原因

図4 安全性、信頼性、保安性の関係⁶⁾

表1 小型パーソナル機器におけるEMI設計の重要度⁷⁾

	EMI① (他の機器へ侵入)	EMI② (他の機器からの侵入)	EMI③ (配線板内の問題)	EMI④ (電磁ノイズの侵入)
パソコン	重要度=大 ・TV、ラジオ等への妨害	重要度=小	重要度=中 ・クロストークによる誤動作等	重要度=小
オーディオ機器	重要度=小	重要度=大 ・パソコン、無線機等からの妨害	重要度=大 ・デジタル、アナログ回路間の干渉	重要度=中 ・車庫ノイズの侵入等
携帯電話	重要度=大 ・不要輻射	重要度=大 ・感度低下、受信スプリアス、感度調整等	重要度=大 ・送信機、クロックによる感度低下等	重要度=大 ・電磁ノイズの侵入 ・他のシステムの妨害

されるようになっているが、それだけに信頼性に対する十分な対策が必要となる。対策には、図4に示す安全性・信頼性・保全性の面⁶⁾を考慮して行われなければならない。

更に、電子機器のトラブルに、電磁ノイズ障害によるものがあり、重大事故に至ったケースも見られている。これには、EMC（電磁適合性：Electromagnetic Compatibility）があり、EMI（電磁妨害：Electromagnetic Interference）とイミュニティ（電磁妨害耐性：Immunity）の面からの対応が必要となる。表1に小型パーソナル機器のEMIの重要度を示す⁷⁾

〈3.2〉劣化形態の種類 故障の要因は使用条件によっていろいろ存在するけれども、基本的には顕在的不良と潜在的劣化要因を内在した要因と、外部環境条件による誘因によって劣化が加速される。その結果故障を誘発する。

電気・電子機器では電氣的、電気化学的、機械的並びに熱的なものが主な要因となる。これに環境条件が加味されると劣化が加速される。このことによる発火を招く電子機器の故障要因を図3に示したが、その劣化要因と劣化形態の関係図を図5に示す。同図に示すように、劣化要因が複合して劣化が促進され、それに伴う劣化形態がみられることになる。これらの劣化が、チップ部品の機能低下から故障を、配線の断線や短絡を、絶縁性でみれば誘電特性や絶縁抵抗の低下などを経て絶縁破壊を引き起こし、電子機器の故障を起こす主なものとなる。

4. 信頼性評価の現状

〈4.1〉電子機器構成部品 電子機器を構成するチップ部品はそれぞれにメーカでの品質管理やユーザでの受け入のために機能試験や信頼性試験が実施されている。一例として、半導体について言えばその実装時に生じるパッケージングのクラック防止に対する応力解析が綿密に行われており、改善に効果を上げている。これらの解析をもとに、パッケージング材料の選択やモールド条件が決められている。また、半導体チップ部品としてその出荷前の品質管理に欠かせないバーニンイン試験（高温、高バイアスで半

導体製品を作動させるもので、出荷製品の故障率を保証値以下に維持管理するために出荷前に実施され、欠陥を含む初期故障を除去する目的を持っている）が行われる。この試験はバイアス電圧に対してあるいは温湿度に対して採られている。中でもPCT（Pressure Cooker Test）が検討されている。最近では、この試験が水蒸気飽和条件に対して呼ばれており、水蒸気の不飽和条件に対してはHAST（Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test）の呼び名が使われている⁸⁾。

プリント配線板に対しては、温度サイクル試験のほかイオンマイグレーション劣化による寿命判定のため、温湿度バイアス試験がよく実施される。時には、素材検証のため脱イオン水滴下試験などの簡易評価試験が行われる。また、HASTが短時間に評価できることもあってよく使用されている。

〈4.2〉実装機器 実装機器に対しては、その製作工程中に種々のチェックがなされており、最終的には製品試験の形で行われる。一般には、これより前に必要に応じた部分モデルで行われることが多い。部分モデルで重要な試験としてははんだ接続信頼性であり、不完全接続に対してはリペアされることによる不良の発生防止が重要となる。また、樹脂封止接合部の耐クラック性試験が実施される。

〈4.3〉信頼性評価結果の寿命式 劣化による寿命の式については各方面から種々提案されている^{9, 10, 11)}。即ち、バイアス電圧に対する寿命や、歪と繰返し応力との関係から求められる寿命は両対数表示で直線性が得られ、逆指数則と呼ばれる。また、温度に対しては、絶対温度の逆数に対して片対数表示で直線性が得られるアレニウスプロットととして良く知られている。更に、湿度に対しては、相对湿度に対して、現時点では、両対数表示と片対数表示いずれの場合にも直線性が得られ、現実的には片対数表示の方が低湿度側で安全サイドに評価されるので、後者を採用しているのが現状のようである。これら劣化特性式の採用に当たって、留意する必要があるのは、

- 1) これらの劣化特性式は経験に基づく半理論式か、実験式である。
- 2) どんな範囲においても成り立つものではなく、自ずから限界がある。

ので、これらのことに留意して、当初は予備的検討を行い、実績を積み重ねることにより有用なものに仕上げるのが大切である。

また、電圧劣化に対して、両対数表示と片対数表示の両方の劣化特性式が示されているが、筆者は前者の表示が適切と考えている。また、イオンマイグレーションに対しても、理論要因も含めて複雑な式が紹介されているが、なかなか理論通りにはいかないと思われ、単純化された逆指数則で示される式の方がより適切な場合も多い。

図5 劣化要因と劣化形態の関係図

＜4.4＞ 信頼性評価に当たっての留意事項 前記した劣化特性式が成立し、図6にその一例を示すように直線性が得られれば、ここから得られる推定寿命が耐用年数に相当する目標寿命を満足しているかどうか判断される。これらは時間軸が対数で示されるので、両対数表示か片対数表示のいずれかであることが多い。ところで寿命推定に当たって留意する必要があるのは次の点である。

1) 目標とする耐用年数までの広い範囲にわたって劣化特性式に直線性が得られるかどうかについて吟味しておくこと。即ち、次の点に留意が必要である。

- (1) 部品の寿命とその周囲条件との関係は、部品の種類を問わず本質的には同様である。
- (2) 故障にいたる機構は、寿命試験でもフィールドの実働においてもほとんどの場合本質的には同様であって、2つの物質間の化学反応として取り扱える。
- (3) 2つの物質のうち一方は部品の周囲環境、他方は部品を構成する特定の物質。

2) 使用状態のような環境ではしきい値がみられるかどうか検討しておくこと。

3) 製品には必ずばらつきがあるので、それをどう評価に組み入れるかについて検討しておくこと。特に、経年変化によってばらつきが大きくなり、しかも、累積破壊確立の低い方で特性の低下の割合が大きくなることに留意しておく必要がある。そのため、特に早く故障した場合の原因究明を怠ってはならない。

以上述べたところから、寿命は、周囲環境と稼働時のストレスの複合劣化によって決まる。従って、加速による寿命試験で得られた結果が、実使用条件における状況と掛け離れたところのものであってはならない。この場合には、過大評価したり、逆に過小評価をする危険性がある。過大評価すると、使用中に故障を起こす危険性があり、逆に過小評価をするとその部品やシステムが実使用に持たないと判断され、耐用年数を必要以上に満たす過剰品質で製品化することになる。

各段階でのシステム評価では、試験点数として、10～20個が大半で、多くても100個以下である。ところが、

半導体部品など個数の極めて多いものでは、FIT数(Failure in Time)が用いられる。この値は、(不良数×10⁹)/(サンプルの個数×作動時間)で表される。例えば、1FITは、10⁶個のサンプルに対して10³時間の動作で1つの不良が出たことを示す。この値が厳しくなってくると、サンプル数や試験時間が多大に必要となることから、製品製造工程管理を厳重にして、その工程が守られておれば、少ない部品チェックで十分との考えも採られている。

残念ながら絶対的なものは存在しないので、寿命推定に当たって重要なことは、試験と経験的なものの繰返しで判断していくことになるということである。

5. 今後の高実装密度化に対応した信頼性評価

電子機器の初期の段階においては、実装部品、プリント配線板それぞれのメーカーがセットメーカーからの依頼で製作納品後、セットメーカーで実装する形態を採っていた。ところが、前記したように電子機器の小型軽量化と高機能化のニーズによって、高密度実装が益々推進され、実装部品のモジュール化や部品と基板が一体化してきている。このような状況において、各パートのモデルによる信頼性評価とこれに加えてモジュールとしての信頼性評価が不可欠になってきている。更に、信頼性評価に時間が掛かりすぎて、機器の開発スピードとマッチングしないというところまで来ていることである。これらのことに対応するにはどのようにすれば良いかについてこの章で検討する。

＜5.1＞ 取り組むべき信頼性評価の内容 取り組むべき信頼性評価の内容を述べるに当たって、このところ各メーカーから発表の多いビルドアップ多層配線板を使用した場合について説明する。図7はMCM(Multi Chip Module)を搭載したビルドアップ多層配線板の例を示す^{1,2)}。この例で、同図中に示されているように予想される検討すべき劣化箇所がピックアップされている。これらの箇所は基本的には界面の問題か、クラックや断線の問題である。更に考慮を必要とされる項目は、層間や樹脂モールド部分の電気的あるいは電気化学的劣化防止である。このような複合構成の

図6 劣化特性図

図7 ベアチップ実装ビルドアップ多層配線板の故障モード^{1,2)}

評価で重要となるのはどの部分の劣化が対象機器の劣化を導くかということになる。即ち、最も重要なことは、図中の各所で機能低下あるいは故障の原因があったとしても、それらの中で最も早く機能低下や故障を招くところがどこにあるか把握することである。ここで留意を必要とすることは、同じ構成であっても、使用条件が違えば劣化モードが違ってくるとが往々にして見られることである。このような実験例は少ないがその一例を図8に示す¹²⁾。同図は、BGAをマザーボードに実装して各種温度差の熱サイクル試験を行った結果である。故障をフリップチップ接合部の故障、絶縁層樹脂のクラックによるBGA基板の断線による故障、BGAはんだ接合部の疲労破壊による故障について示している。同図に示すように、試験温度差の小さいところでBGA接合部寿命が短くなっていることが報告されている。ただ、加速試験では温度差の大きいところで試験されるので、そのような領域では逆に判定されるので使用条件からみてどの領域で判断するかについて留意する必要がある。以上のことを踏まえて次節で、今後の信頼性評価のあり方について述べたい。

〈5.2〉 今後の信頼性評価のあり方 以上述べてきたところから、今後信頼性評価のあり方について整理すると次の2項目が挙げられる。

1) 構成が複合体からなる場合の評価の問題。

2) 如何に短期間に精度良く評価するかの問題。

まず、1) 構成が複合体からなる場合の信頼性評価については、前節でも述べたことではあるが、複合体のためその中に劣化要因がいろいろ含まれているので、その中で最終的な寿命となる劣化はどの箇所の劣化に起因するかを的確につかむことが最も大切なことである。しかし、厄介なことに使用条件によって違ってくとも考えておかないと、寿命を決める劣化箇所がどの場合においても同じところとはいかないからである。そこで問題になるのは、当然ながら短期間に寿命評価するためには、加速試験が実施されることになるが、フィールドにおける使用条件が加速試験条件の延長線上にあるかどうかと云うことである。この事が保たれていないと評価を間違えることになる。この点が最も注意を要するところである。

図8 故障モードごとの寿命曲線（外挿値）¹²⁾

次に、2) 如何に短期間に精度良く評価するかの問題であるが、これには、短期間に評価する場合の試験条件の設定の問題と、信頼性を向上させるための手法の問題とが考えられる。

短期間に評価する場合の試験条件の設定の問題については前述のように、フィールドでの使用条件が加速試験条件の延長線上にあることが不可欠である。例えば、図9に示したような場合¹³⁾、温度変化に対して途中で見掛けの活性化エネルギーが変化し折れ線となっているので、高温側での評価によって過小評価する可能性がある。また、別の場合には、この逆の過大評価する場合も十分あり得ることである。従って、これらのことに十分留意が必要となる。特に、HAST 結果の評価に当たって、このことが重要である。

次に精度良く短期間に評価を実施することであるが、精度良く評価するには試料数がかなり多く必要となる。このことを避けるために、製作工程管理を従来以上に良くし、中間段階でのチェックを行って製品のばらつきを少なくし、評価に必要な試料数を必要以上に増やさないことが大切である。このために、LSI プロセスでは TEG (Test Element Group) の技術が早くから導入されており、量産立ち上げの効率化に成果を挙げている¹⁴⁾。

しかし、これを有効なものとするためには、日頃からデータの収集と劣化メカニズムの的確な把握が不可欠である。また、最大限シミュレーション技術を取り入れて、実験点数を減らすことも重要なことである。最近では、フラクタルとカオスの導入によって将来予測する手法が開発されている。しかし、信頼性の分野では少なく¹⁵⁾、まだ十分活用されているとは云えない段階なので、これを効果的に導入することも重要である。ただ、この導入にはしっかりしたデータの収集は不可欠であり、日頃からデータの蓄積を図っておくことが必要である。

ここで重要なことは、今までと違ったシステムの開発に当たっては、一度は長期の信頼性試験を行って裏付けをとっておくことである。

図9 プリント配線板劣化の温度依存性¹³⁾

6. むすび

電子機器の小型軽量化と伴に高機能化が、速いスピードで推進されている。これを達成するためのチップ部品の小型化や、プリント配線板のファインパターン化と伴に部分的にはモジュール化が推進されている。

しかし、これらの製品がユーザにとって安心で使いやすいものであることが不可欠で、そのための信頼性、安全性と保全性を備えていることが必要である。ところがこれらを保証するためには、従来の方法に加えてよりきめ細かい試験を通した評価を必要としている。

ところが、急テンポな製品化に対処するためには、これが隘路となっており、如何に短期間に精度良く評価するかの必要性がでてきている。そのためには、製造工程中にFMEAとFTAの的確導入と同時にTEGを効果的に導入して製品のばらつきを制御して、最終製品の評価項目を軽減することが検討されている。また、高精度でしかも期間短縮に貢献できるシミュレーション技術を最大限駆使できる体制を作っていくことも大切である。そのためには、例えば機械的信頼性にとってキーとなる熱分布解析や応力解析が進んでいるが、電気的特性を含む全般的な評価に当たって、繰り返しや連続のストレスによる劣化でその進展状況を的確に捉えるにはどうすれば良いかの計測手段や、劣化メカニズムの解析を行っておくことが最も大切なことである。

(平成11年2月15日受付)

文 献

- 1) 津久井 勤: “高密度実装技術に対応した信頼性評価は今後どうなる—信頼性評価の現状と今後の動向—”, 回路実装学会誌, vol. 12, No. 7, p. 516 (1997)
- 2) 桑島邦明: “多層化・薄膜化の将来”, サーキットテクノロジー, vol. 8, No. 1, pp. 9-13 (1993)
- 3) 山村、磯部: “電気・電子部品の寿命診断”, 日本規格協会 p. 85 (1989)
- 4) 通産政策局・製品評価センター編: “平成9年度事故情報収集制度報告書” 日本消費者協会 (1998)
- 5) 柴田義文: “特集「Q & Aでマスターする電子機器の安全対策と信頼性設計」”, 電子技術, No. Q-10, 1994-4, p. 34 (1994)

- 6) 毎日新聞夕刊: “製品の欠陥が原因とみられる家電火災の例”, 1995-10-18 (1995)
- 7) 田村義晴: “EMI対策プリント配線板の将来”, サーキットテクノロジー, vol. 8, No. 1, p. 18-22 (1993)
- 8) J.E. Gunn & S.K. Malik: “Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test Technique” IEEE Proc. IRPS p. 48 (1981)
- 9) 柳沢他: “高湿度環境下のける厚膜回路用銀電極の移行現象” 第12回日科技連、信頼性・保全シンポジウム報文集, p. 305 (1982)
- 10) 白鳥正樹: “表面実装におけるはんだ接合部の強度信頼性”, 第11回回路実装学術講演大会講演論文集, vol. 11, No. 18B-01, p. 147 (1997)
- 11) J.P. Mitchell et al: “Conductive Anodic Filament Growth in Printed Circuit Materials” Printed Circuit World Convention II, No. WC-2A-5, p. 1 (1981)
- 12) 塚田裕: “ビルドアップ配線板入門”, 日刊工業新聞社 (1998)
- 13) P.J. Boddy et al: “Accelerated Life Testing of Flexible Printed Circuits” IEEE 14th Ann. Proc. Rel. Phys. p. 108 (1976)
- 14) 竹田忠雄ほか: “特集「量産立ち上げを高効率化、差を付けるTEG利用技術」”, 日経マイクロデバイス, 1995-4, p. 56 (1995)
- 15) 藤城敏史他: “イオンマイグレーションによるガラス基板上の銀デンドライトの成長とそのフラクタル次元” 電気学会論文誌 vol. 118-A, No. 7/8, p. 838 (1998)

津久井 勤 (正員) 1938年2月22日生。1961年3月名古屋

工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。同社日立研究所において、電気・電子機器絶縁組織、燃料電池などの開発研究に従事。1993年3月退社。同年4月から東海大学教授。工学部電気工学科において、主として電子機器の信頼性解析と燃料電池の開発研究に従事現在に至る。工学博士。エレクトロニクス実装学会、電気化学会、応用物理学会、エネルギー協会などの各会員。