The Society of Materials Science, Japan

205 電子機器の長期使用中の劣化損傷とその対策

日立機械研　○北野　誠

1．緒　言

電子機器は社会の隅々まで普及しており、その劣化損傷が及ぼす影響は大きい。電子機器とは、半導体のような単体の部品からパソコンのような部品を組立てたセットまで広い範囲の総称であるが、本稿では電子部品、特に半導体部品に的を絞って劣化損傷とその対策について概説する。

2．劣化の要因と対策の考え方

2・1　電子部品の構造と劣化損傷　図1に代表的な3つの電子部品の構造と劣化損傷モードを示す。従来から用いられているリード付きLSIパッケージでは、長期間の温度変化の繰返しにより、封止樹脂のき裂、ワイヤ断線、リードはんだ接合部のき裂が生じることがある。これらはいずれも材料の疲労破壊である。近年高密度化に適したパッケージとして需要が拡大しているBGA（Ball Grid Array）パッケージでは、はんだバンプのき裂、封止樹脂の剥離が問題となっている。受動部品の抵抗やキャパシタでは、電極のはんだ接合部にき裂が生じる場合がある。はんだに生じるき裂は、温度変化だけではなく、基板の繰返し曲げ変形により生じる場合もある。さらに高温高湿環境がこれらの劣化損傷を加速する場合もある。

図2に実際に生じた破壊の例を示す。これらはいずれも部品メーカの信頼性試験（温度サイクル試験、繰返し曲げ試験）で生じた破壊である。(a)ではチップを搭載する金属板の端部を起点にき裂が生じており、(b)はワイヤの熱疲労破壊（分解後の観察）を示している。(c)、(d)ははんだの疲労破壊である。

2・2　劣化損傷対策の考え方　これらの劣化損傷は、断線、電気特性の低下、熱抵抗の上昇の原因となるため、信頼性を保証する策を講じなければならない。電子部品は、通常の機械とは異なり、定期点検やモニタリングによるメンテナンスができないため、構造設計段階での信頼性保証が必要となる。

図1に示した樹脂のき裂、ワイヤ断線、樹脂の剥離は、部品単体の損傷であるのに対し、はんだ接合部の破壊はセットメーカで組立てた後の問題である。

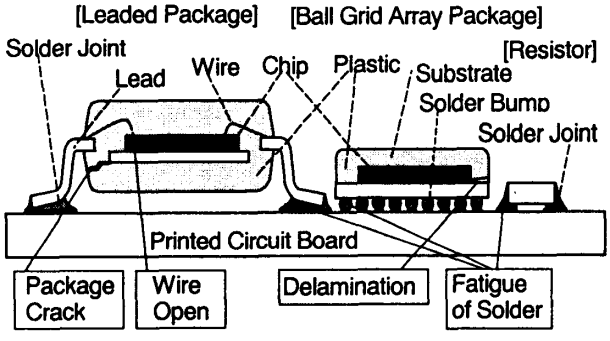

Fig. 1 Structure and Degradation of Electronic Components

電子部品は色々な製品に対して大量に供給されるので、実際に稼動する環境は様々であり、実使用環境を正確に予測する事はできない。そこで、部品単体の損傷に対しては、市場で起こりうる最も過酷な環境に対する信頼性設計が行われている。

これに対し、はんだの疲労破壊など、組立て後の劣化損傷は、製品の市場環境が特定できるため、ある程度の市場環境の予測が可能である。そこで適正な信頼性水準を得るため、市場環境に対応した信頼設計が行われている。

3．部品単体の損傷に対する信頼性設計

本節では、部品単体の損傷に対する信頼性設計の例について述べる。

3・1　樹脂のき裂　樹脂のき裂はほとんど塑性変形を伴わずに進展するので、線形破壊力学による評価が可能であり、き裂進展速度の実験結果と樹脂に発生する応力拡大係数の関係から寿命を予測する手法が提案されている[1]。また、き裂発生点の応力特異性を考慮した応力値からき裂の発生しない構造を求める手法も開発されている[2]。この時に想定している温度範囲と繰返し数はおよそ-50℃～150℃、1000サイクルであるが、樹脂のSN線図の傾きは非常に小さいので、市場においてこのモードの破壊が生じる可能性はほとんどないと考えられている。

3・2　ワイヤの断線　図1に示す樹脂封止型のLSIのワイヤ断線はワイヤ材料（Au）と樹脂の線膨張係数の差による熱応力が原因であるが、最近の封止樹脂の線膨張係数はAuの線膨張係数に近くなっているので、ワイヤ断線による劣化損傷はほとんどなくなっており、メーカでの試験（樹脂のき裂と同条件）で信頼性の確認が行われている。周囲を樹脂で拘束されないワイヤ接合では、振動による断線が生じる場合があり、振動

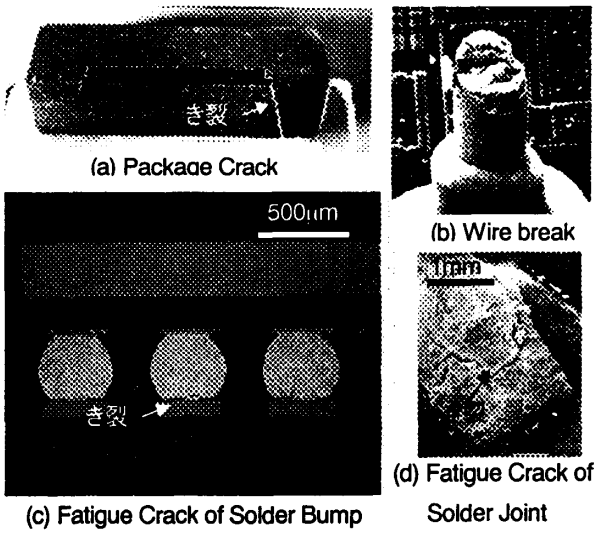

Fig. 2 Failure of Electronic Components

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

試験と応力解析による信頼性設計が行われている。

3・3 樹脂の剥離 図1では樹脂とBGA基板の剥離の例を示したが、リードフレームあるいはチップとの剥離も問題となっている。長期間の使用による剥離の原因としては、繰返しの熱応力の他に、湿度などにより界面の接着強度が劣化する現象もあげられる。剥離の起点はほとんどの場合応力特異点であり、この近傍の応力σの分布は次式で表される[3]。

$$\sigma = K / r^{\lambda} \quad (1)$$

ここで、λは特異性の指数であり、特異点の幾何学的形状と接着部材の物性値で決まる。Kは特異場の強さである。実験により破壊が生じるときの特異場の強さを求め、対象とする構造物に発生する特異場の強さと比較することにより剥離の予測が可能になっている[3]。しかし現状では実験データは十分でなく、また環境による接着強度の劣化も十分には解明されていないので、過酷試験による冗長性のある設計をせざるを得ない。

4．市場環境に対応した信頼性設計

本節では、はんだ接合部の疲労破壊を対象に、市場環境に対応した信頼性設計について述べる。

4・1 はんだ接合部の強度設計手法 はんだ接合部の破壊は、電子部品の劣化損傷の多くを占める重要な問題であり、研究の歴史も30年を超えている[4]。はんだの疲労強度は次のCoffin-Manson則で表される事が知られている。

$$\Delta\varepsilon = C_e/N_f^{ke} + C_p/N_f^{kp} \quad (2)$$

ここで、$\Delta\varepsilon$はひずみ範囲、右辺第1項は弾性ひずみ範囲、第2項は塑性ひずみ範囲を表し、C_e、C_p、ke、kpは材料の強度定数である。これらの強度定数のデータは多くの研究者から報告されている[5]。

電子部品の接合に用いられるはんだは、実使用環境において塑性変形するので、寿命を予測するには弾塑性解析が必要となる。計算機が発達した現在では、3次元の有限要素法による弾塑性解析が容易に行えるので、強度解析の主流になっている。しかしながら、リード付きLSIに対して筆者らが以前に開発した簡易手法と機械的疲労試験による強度評価[6]も設計段階で用いるのは有効な手段であると考える。

4・2 市場環境に対応した信頼性試験方法 電子部品の信頼性を適正な水準にするため、冗長性を排除した設計が行われるようになっている。これは先に述べた解析技術の発展によるものである。しかし、実際の設計で問題になるのは、市場における所定の期間内の信頼性をどのように保証するか、である。この問題に対し、筆者らは以下のような提案を行っている。

図3にはんだの疲労過程を示す。初期段階にき裂が発生し、繰返しと共に進展、最後に破断に至る。それぞれのレベルの損傷が生じる繰返し数は、はんだに生じるひずみ範囲$\Delta\varepsilon$が小さいほど長くなる。本提案では、線形被害則の考え方に基づき、それぞれの損傷レベルに達する繰返し数の比率はひずみの大きさによらず一定であると仮定する。市場において発生するひずみ$\Delta\varepsilon_F$を求め、市場の繰返し数N_Fを見積もり、A点をプロットする。そして信頼性試験で発生するひずみ$\Delta\varepsilon_T$まで疲労過程に平行にB点まで溯ることにより、市場環境に対応した信頼性試験の繰返し数を求める事ができる。実際の運用に当たっては、温度、繰返し速度、ばらつきの影響を考慮し、市場と等価な試験条件を求める。このような手法により、市場において所定の年数を経た製品の状況を信頼性試験で確認することができる。

5．結 言

本稿では半導体製品を中心にした電子機器の長期使用中に発生する劣化損傷とその対策について述べた。電子機器は保守点検により損傷劣化を未然に防ぐ事ができないので、設計段階での対策が重要である。劣化損傷については、携帯機器の落下衝撃に対する考慮など、常に新しい課題を含んでおり、市場の状況を見誤らない対策が今後も求められていくと考えられる。

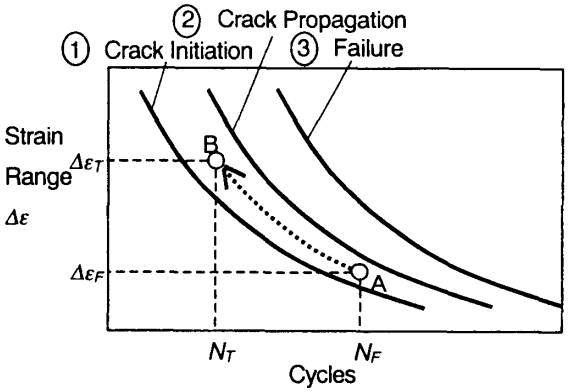

Fig. 3 Damage of Solder in Field and During Temperature Cycling Test

参考文献

1) A. Nishimura, et al., IEEE Trans. on CHMT, **10**-4 (1987)637.
2) A. Nishimura, et al., IEEE Trans. on CHMT, **12**-4 (1989)639.
3) 服部敏雄, 他3名, 日本機械学会論文集, **54**- 499, A(1988)597.
4) K. C. Norris and A. H. Landzberg, IBM Res. Develop., **13**(1969)266.
5) M. Kitano, et al., Current Japanese Materials Research, **2**(1987)235, The Society of Materials Science, Japan.
6) 北野誠, 他2名, 日本機械学会論文集, **54**- 505, A(1988)1709.
7) 北野誠, 他3名, 日本機械学会論文集, **62**- 598, A(1996)146.

NII-Electronic Library Service