金属基板実装におけるチップ形部品の熱応力損傷評価*

佐山利彦^{*1}, 高柳 毅^{*2}, 森 孝男^{*3}Evaluation of Thermal Stress Failure of Square Type SMD
in Mounting Process on Metal Base PWB

Toshihiko SAYAMA, Takeshi TAKAYANAGI and Takao MORI

Thermal stress failure of square type surface mount device(SMD) such as ceramic capacitor has been evaluated in surface mounting process on metal base printed wiring board(PWB). For the evaluation, a series of transient thermal stress analyses with FEM model and thermal stress failure experiments for the surface mount assembly were carried out with complementary relation. As a result, thermal stress failure probability of the capacitor is estimated by utilizing the distribution function of three-point bending strength and the maximum value of major principal stress in the vicinity of failure initiation point. Additionally, influence of deformation properties of solder and insulation layer, which is formed on the surface of the PWB, on the failure probability is also evaluated quantitatively by introducing two parameters E_{tg} and σ_{ys} . E_{tg} is related to glass transition temperature and Young's modulus of the layer and σ_{ys} indicates yield stress of the solder at ambient temperature. Consequently, the present evaluation has led us to appropriate choice of the solder and the layer in order to prevent the capacitor from the thermal stress failure in the surface mounting process of square type SMD on metal base PWB.

Key Words: Thermal Stress, Finite Element Method, Reliability, Electronic Device, Solder Joint, Surface Mount Technology, Metal Base PWB, Square Type SMD

1. 緒 言

電子機器の小形化, 高機能化の一因として, 電子デバイスのプリント基板への高密度実装技術, 表面実装技術があげられる。その反面, プリント基板の熱密度が急増し, 熱応力に起因する損傷が問題となっている。すなわち, 実装時の急激な熱負荷によるデバイス自体の損傷, および熱サイクル負荷によるはんだ接合部の疲労損傷⁽¹⁾である。特に前者については, パワーモジュールやスイッチング電源などの分野を中心に普及しつつある金属ベース基板(金属基板)において深刻な問題となっている。金属基板はそれ自体がヒートシンクの役割を担っているために, デバイスの実装に際しては, はんだの部分だけでなく基板全体を加熱する必要があり, このときの過大な熱負荷によりデバイスが損傷を受ける。これまで, 損傷事例についていくつかの報告^{(2)~(4)}はあるが, 金属基板上への表面実装におけるデバイスの熱応力損傷を解析および実験の両面

から詳細に評価した研究は見当たらない。

本研究では, 典型的な表面実装デバイスであるチップ形積層セラミックコンデンサを金属基板へ実装する際の熱応力損傷を評価した。まず, 有限要素法による非定常熱応力解析および試験基板を用いた損傷再現試験を実施した。その結果, コンデンサチップの熱応力による損傷確率は, その三点曲げ強度の累積分布, および熱応力解析によって得られる最大主応力を用いて評価できることが明らかとなった。さらに, 金属基板において熱応力に影響を及ぼす主要因子⁽⁵⁾であるはんだ, および金属ベース表面に形成される絶縁層について, それらの変形物性の影響を評価した。すなわち, 絶縁層材料のガラス転移温度および縦弾性係数に関連するパラメータ E_{tg} , およびはんだの常温における降伏応力 σ_{ys} に着目することにより, 基板構成部材の材質の違いがコンデンサチップの熱応力による損傷確率に及ぼす影響を定量的に評価することが可能となった。これらのパラメータを用いた損傷評価は, コンデンサチップの熱応力損傷を防止するための材料選択にとって非常に有効であることが明らかとなった。

2. 基板実装方法および損傷状況

コンデンサチップが表面実装された金属基板の一部

* 原稿受付 1997 年 12 月 8 日。

^{*1} 正員, 富山県立大学大学院, 富山県工業技術センター機械電子研究所(☎ 930-0866 富山市高田 383)。

^{*2} コーセル(株)(☎ 930-0816 富山市上赤江町 1-6-43)。

^{*3} 正員, 富山県立大学工学部(☎ 939-0311 富山県射水郡小杉町黒河 5180)。

を模式的に図1に示す。最も典型的な金属基板は、アルミニウムベースの表面をエポキシ樹脂/アルミナ複合体の電気絶縁層で被覆した構造を有している。また、コンデンサチップはその端部の電極をととして回路パターンのランド上にはんだ接合されている。

実装時の基板の熱履歴を図2に示す。コンデンサチップは、リフローはんだ付けおよび実装不良修正のための再加熱という二つの段階で熱負荷を受ける。コンデンサチップの損傷は後者の段階で発生しており、このとき基板は、図3に示す温度プロファイルにより加熱される。すなわち、 3.9°C/s の初期温度こう配をもって、約 165°C まで120sで加熱される。

また、損傷発生時期の確認のため、損傷確率が最も大きい絶縁層材料Aを用いた基板について、実装の各段階の終了後にコンデンサチップを基板から取り外し損傷の有無を調べた。その結果、損傷確率は、リフローはんだ付け後において0/128、再加熱後において70/128であり、再加熱以前には損傷の発生が認められなかった。さらに、基板の加熱中にコンデンサチップから放出されるAE波の検出もあわせて行った。コンデンサチップの破壊に対応する大きなエネルギー放出

は再加熱時のみに観測され、そのときの基板表面温度の平均は約 84°C であった。以上より、コンデンサチップの損傷は再加熱時における熱負荷によって発生するものとして、損傷評価を行った。

次に、コンデンサチップの典型的な割れ形態を図4に示す。図4はコンデンサチップの側面付近における切断面を示したものであるが、割れはコンデンサチップの下面から発生し、電極本体の中央部へと延びている。また、割れの発生点は電極端部の境界点に対してややコンデンサチップの中心側に位置している。

3. 熱応力解析

コンデンサチップの割れ発生点付近における熱応力の変動状況を調べるために、有限要素法による非定常熱応力解析を実施した。解析に用いた有限要素モデルおよび概略寸法を図5に示す。割れと直角方向の断面において、コンデンサチップが表面実装された金属基板を二次元問題としてモデル化した。モデルの要素数は約3400、節点数は約3500であり、4節点平面ひずみ要素を用いた。実装基板は、コンデンサチップ本

Fig. 1 Surface mount assembly of square type ceramic capacitor mounted on metal base PWB

Fig. 2 Mounting process of the assembly

Fig. 3 Temperature profile on the surface of the PWB in reheating step

Fig. 4 Typical thermal stress crack of the capacitor

Table 1 Some material properties of the assembly

Component	Material	Young's Modulus E (GPa)		Poisson's Ratio ν	Yield Stress σ_y (MPa)		Work Hardening Coefficient H (GPa)		C.T.E. α ($10^{-6}/K$)		Specific Heat C_p (kJ/kg/K)	Thermal Conductivity λ (W/m/K)
Capacitor Chip	PbTiO ₃	69		0.23	N/A		N/A		12		0.38	1.5
Electrode	Ag-Pd	75		0.37	N/A		N/A		19		0.24	390
Solder	Sn-Pb-Ag-Sb (Solder 1)	30		0.40	20°C	68	0.0		24		0.15	50
					50°C	56						
					100°C	32						
Land	Cu	129		0.34	N/A		N/A		17		0.40	400
Insulation Layer	Epoxy/Alumina (Material A)	20°C	42.9	0.34	20°C	138	20°C	10.3	20°C	14	0.77	1.4
		50°C	38.5		50°C	104	50°C	5.9	50°C	14		
		100°C	15.1		100°C	12.9	100°C	2.8	100°C	29		
Metal Base	Al	70		0.35	N/A		N/A		25		0.88	240

Fig. 5 Finite element model and some dimensions of the assembly

体、電極、はんだ、ランド、絶縁層および金属ベースという各々の材質が異なる6種類の部材で構成されている。この内、絶縁層を弾塑性体、はんだを弾完全塑性体、その他の部材を弾性体として取扱った。

解析に用いた物性値の概要を表1に示す。絶縁層については、市販のエポキシ樹脂ベースの数種類の異なる材料(A~E)を対象とし、縦弾性係数 E 、降伏応力 σ_{yi} 、加工硬化係数 H 、および線膨張係数 α の温度依存性を考慮した。一例として、 E についての温度依存データを図6に示す。なお、図中の E が大きな領域および遷移領域において曲線に接線を引き、その交点における温度をガラス転移温度と定義した。また、はんだについては、降伏応力 σ_{ys} の温度依存性を考慮した。いわゆる高強度はんだ(Sn: 45 wt.%, Pb: 45 wt.%, Ag: 5 wt.%, Sb: 5 wt.%)を解析の基準材料に設定し、Sn/Pb 共晶はんだおよびそれに近い組成の数種類のはんだとの比較を行った。

再加熱段階における熱負荷を想定し、熱的境界条件として、基板下面に図3に示す温度プロファイルに対応する温度変化を、他の境界に対しては対流熱伝達を設定した。この温度プロファイルの初期こう配 3.9°C/s に対し、コンデンサチップと金属ベースとの

Fig. 6 Temperature dependency of Young's modulus E for some kinds of insulation layer

熱膨張のミスマッチモデル⁽⁶⁾⁽⁷⁾に基づいて、はんだ接合部の平均ひずみ速度を計算したところ、 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$ の結果が得られた。これは、Sn/Pb 共晶はんだの最大クリープひずみ速度⁽⁸⁾の50~100倍の値である。したがって、図3に示す温度負荷条件下では、はんだのクリープ変形は塑性変形に比較して十分に小さく、無視できるものとした。

解析結果の一例として、A~Eの異なる材料の絶縁層を用いた基板について、コンデンサチップ内の最大主応力 σ_{mj} の温度 T に対する変化を図7に示す。ここに、 σ_{mj} の評価点は、図8に示すように電極端部の境界点(点O)から0.15 mmの距離にある積分点Aである。点Aは、応力の特異点である点Oを除き、コンデンサチップ内において最も応力が高い領域を代表する点であり、図4に示した実際の割れ発生源にも対応している。図7において、初期加熱時には、 σ_{mj} は温度とともに単調に増加する。しかし、はんだの降伏や絶縁層材料のガラス転移温度前後における E や σ_{yi} などの変形物性の急変の影響により、 σ_{mj} は最大値をとった後に減少に転ずる。

4. 熱応力損傷確率の評価

コンデンサチップの熱応力による損傷確率を評価するため、A～Eの異なる材質の絶縁層材料を用いた試験基板を作成して、コンデンサチップの損傷再現試験を実施した。A～Eは市販の金属基板に用いられている代表的な絶縁層材料であり、その物性値が取りうる範囲は実用的な範囲であるといえる。また、絶縁層樹脂以外の部材は共通とし、その物性値を表1に示した。試験基板には、図2に示すように実際の基板とまったく同じ熱負荷を与えた。試験後、常温から200℃まで2時間かけて徐々に基板を加熱するという方法でコンデンサチップを基板から取り外し、光学顕微鏡で割れの観察を行った。

損傷再現試験により得られたコンデンサチップの損傷確率を、応力評価点Aにおける最大主応力の最大値 σ_{mj} に対して、Weibullプロットしたものを図9に示す。図中の●点が損傷再現試験によるコンデンサチップの損傷確率であり、実験データの90%信頼限界も

Fig. 7 Major principal stress σ_{mj} change in the capacitor with temperature for some kinds of insulation layers

Fig. 8 Thermal stress evaluation point in the capacitor

あわせて示した。各点は、最小50個から最大128個のコンデンサチップを用いて得られた損傷確率である。また、図中には比較のために、コンデンサチップの三点曲げ強度 σ_b のデータも□点によりプロットした。なお、ここではコンデンサチップ内の応力こう配の影響は考慮しておらず、第一近似として、コンデンサチップの表面に発生する最大応力を用いて損傷確率の評価を行った。

次に、コンデンサチップの三点曲げによる損傷確率分布と損傷再現試験の熱負荷による損傷確率分布との関係について検討する。図9より、 σ_b の累積分布 $F(\sigma_b)$ は次式で表される。

$$F(\sigma_b) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_b - \gamma}{\eta} \right)^m \right\} \quad \text{..... (1)}$$

ここに、 γ , η , および m は Weibull パラメータであり、各々 $\gamma = 62.9$ MPa, $\eta = 52.6$ MPa, および $m = 4.50$ の値をとる。同様に、損傷再現試験の熱負荷による損傷確率分布 $F(\sigma_{mm})$ は、回帰曲線として次式のように得られた。

$$F(\sigma_{mm}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_{mm} - \gamma'}{\eta'} \right)^{m'} \right\} \quad \text{..... (2)}$$

Weibull 分布の形状母数は、式(1)において $m = 4.50$, 式(2)において $m' = 4.13$ であり、大差はない。そこで、両曲線は近似的に平行であると仮定し、 $m = m'$ とおく。さらに、 $\gamma' = \gamma/\beta$, $\eta' = \eta/\beta$ として Weibull パラメータを関連づける定数 β を導入すると、 $F(\sigma_{mm})$ は、次式のように表される。

$$F(\sigma_{mm}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\beta \sigma_{mm} - \gamma}{\eta} \right)^m \right\} \quad \text{..... (3)}$$

ここに、 $\beta = 2.57$ と得られた。

Fig. 9 Weibull's plot of thermal failure probability $F(\sigma_{mm})$ and distribution function of three-point bending strength $F(\sigma_b)$ of the capacitor

式(1), (3)により, 熱負荷と三点曲げとによるコンデンサチップの損傷確率の分布の違いが, 一方の破壊応力を定数倍した関係にあることがわかる。このことは, 熱負荷による破壊および三点曲げ負荷による破壊がともに線形破壊力学に従うならば, 両者の破壊応力の違いが応力拡大係数の修正係数の違いとして現われることとして理解される。

以上のことから, コンデンサチップの三点曲げ強度の累積分布 $F(\sigma_b)$, および熱応力解析による最大主応力の最大値 σ_{mm} により, 式(3)を用いてコンデンサチップの熱負荷による損傷確率 $F(\sigma_{mm})$ を推定することができる。なお, 定数 β の値は応力評価に用いる積分点の位置によって異なるので, 評価点を固定する必要がある。

5. 損傷確率に及ぼす材料物性の影響評価

5・1 絶縁層材料に関する影響評価 図7より明らかなように, 絶縁層材料の違いによりコンデンサチップ内に発生する熱応力は著しく変化する。ここでは, コンデンサチップの熱応力による損傷確率に対する絶縁層材料の変形物性の影響を定量的に評価し, コンデンサチップの熱応力損傷を防止するための材料選択について検討した。

まず, 絶縁層材料の縦弾性係数 E やガラス転移温度 T_g をパラメトリックに変えて熱応力解析を行い, 応力評価点 A における σ_{mm} の変化を調べた。なお, E や T_g を変化させるに際しては, 図6に示す材料 A の温度依存性曲線を基準とし, これを $\log E$ - T 平面内で平行移動することにより, 新たな温度依存性曲線を近似的に定めた。実際, 架橋度やオリゴマ度などが

Fig. 10 Maximum of major principal stress σ_{mm} change in the capacitor caused by glass transition temperature T_g and Young's modulus E_g at T_g of insulation layer

異なる種々のエポキシ樹脂においては, T_g 付近における E の温度依存性曲線の形状はほぼ同じである⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ ことから, このような近似は妥当であるといえる。また, 降伏応力 σ_{yi} についても E と同様に, 材料 A の温度依存性曲線を基準とし, T_g の変化量に応じて新たな温度依存性曲線を近似的に定めた。

ガラス転移温度 T_g における縦弾性係数を E_g と定義し, E_g に対する σ_{mm} の変化を T_g をパラメータとして図10に示す。これより, E_g が小さいほど, また T_g が低いほど σ_{mm} が小さくなるので, 絶縁層にはコンデンサチップ内に発生する熱応力を低減する効果を期待できる。特に, $E_g < 5$ GPa における応力低減効果には著しいものがある。

しかし, E_g のみ, あるいは T_g のみの大小によるコンデンサチップの熱応力評価は, 一面的なものに過ぎない。そこで, 単一のパラメータを用いてコンデンサチップの損傷確率を評価できれば, 絶縁層の材料選択において有効な指標となりうると考えた。まず, σ_{mm} に対する T_g の大小による影響度を E_g による影響度と等価な量に変換するために, 次のパラメータ E_{tg} を定義する。

$$E_{tg} = (E_g/A_n) \exp(-B_n/T_g) \dots \dots \dots (4)$$

ここに, $A_n = 5.98 \times 10^{-3}$ MPa, $B_n = 4.92 \times 10^3$ K の定数である。絶縁層材料 A~E に対応する E_g および T_g の実用的な範囲においては, 単一のパラメータ E_{tg} を用いると, 図10における σ_{mm} の変化は近似的に次のように表される。

$$\sigma_{mm} = \sigma_{mb} \{1 - \exp(-E_{tg}^n)\} \dots \dots \dots (5)$$

ここに, $n = 0.473$ の定数である。また, σ_{mb} は絶縁層の E_g を金属ベースの縦弾性係数と等しいと設定した場合に得られる σ_{mm} の値である。図10の σ_{mm} の変化を表す各曲線は E_g の大きな範囲において σ_{mb} に漸近している。前述の実装形状および熱負荷形態に対しては, $\sigma_{mb} = 54.7$ MPa と得られた。

図11は, パラメータ E_{tg} と σ_{mm}/σ_{mb} との関係を示したものである。図中の実線は式(5)を, ■点は有限要素法による解析結果を表している。これより, E_{tg} の広い範囲にわたって, 式(5)が有限要素法による解析結果をよく近似していることがわかる。

絶縁層材料の変形物性が σ_{mm} に及ぼす影響は式(5)で表される。これを式(3)に代入することにより, E_{tg} を用いてコンデンサチップの損傷確率 $F(E_{tg})$ を求めることができる。図12は, E_{tg} に対する $F(E_{tg})$ の変化を示したものであり, 図9に示した損傷再現試験によるコンデンサチップの損傷確率のデータもあわせてプロットした。両者は非常に一致し

ている。したがって、絶縁層材料としてエポキシ樹脂を用いる金属基板については、絶縁層の材料選択において、 E_{tg} が有効な評価パラメータとなる。さらに、 E_{tg} が十分に小さい絶縁層材料を選択すれば、コンデンサチップの熱応力損傷を防止することが可能である。

5・2 はんだに関する影響評価 次に、絶縁層と並んでコンデンサチップ内の熱応力に大きな影響を与えるはんだについて、その変形物性の影響を定量的に評価した。なお、はんだの縦弾性係数は顕著な温度依存性を示さない⁽¹¹⁾ ので一定とした。また、降伏応力は、常温での値 σ_{ys} から液相線温度で零になるまで、温度 T に関して一次関数で減少する⁽¹²⁾ のものと仮定した。

σ_{ys} に対する σ_{mm} の変化を E_{tg} をパラメータとして図 13 に示す。これより、 σ_{ys} が大きな範囲においては、 σ_{mm} は σ_{ys} の影響をほとんど受けず、式(5)に従

Fig. 11 Relation between σ_{mm}/σ_{ys} and parameter E_{tg} estimated by approximate eq.(5) and FEM analyses

Fig. 12 Thermal stress failure probability $F(E_{tg})$ change of the capacitor with parameter E_{tg} of insulation layer

い E_{tg} によって決定されることがわかる。他方、 σ_{ys} が小さな範囲においては、 E_{tg} が一定の各曲線は σ_{ys} のみに依存する一つの曲線に漸近している。この曲線は、 σ_{ys} を用いて近似的に次式で表すことができる。

$$\sigma_{mm} = \sigma_{mb} [1 - \exp \{-(\sigma_{ys}/C_n)^k\}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $C_n = 32.6 \text{ MPa}$, $k = 1.05$ の定数である。なお、式(6)が成立する領域では、はんだの降伏応力が絶縁層材料の降伏応力に比べて相対的に小さく、はんだの塑性変形が顕著である。

図 13 においては、式(5)に基づいて σ_{mm} が評価できる領域と、式(6)に基づいて σ_{mm} が評価できる領域とが明確に分かれている。そこで、式(5)および(6)の適用範囲を考慮して σ_{mm} を評価し、式(3)を用いることにより、 σ_{ys} に対するコンデンサチップの損傷確率 $F(\sigma_{ys})$ を求めることができる。

図 14 は、 σ_{ys} が異なる実用的な数種類のはんだを用

Fig. 13 Maximum of major principal stress σ_{mm} change in the capacitor caused by yield stress σ_{ys} of solder with parameter E_{tg} of insulation layer

Fig. 14 Thermal stress failure probability $F(\sigma_{ys})$ change of the capacitor with yield stress σ_{ys} of solder for the insulation layer using material A ($E_{tg} = 5.03$)

いて、別途実施した損傷再現試験の結果をプロットしたものである。なお、共通の基板として、絶縁層材料 $A(E_{tg}=5.03)$ の金属基板を用いた。図中の実線は、式(3)、(5)および式(6)を用いて評価した $F(\sigma_{ys})$ である。両者は非常によく一致しており、はんだの材料選択において、 σ_{ys} は有効な評価パラメータであるといえる。

しかし、図12および図14を比較すると、実用的な E_{tg} および σ_{ys} の範囲において、コンデンサチップの損傷確率に及ぼす影響は、絶縁層材料のパラメータ E_{tg} のほうがはんだのパラメータ σ_{ys} よりも相対的に大きい。すなわち、実際の電子基板に用いられている種々のはんだ(Sn/Pb共晶はんだ、高温はんだ、耐熱疲労性はんだなど)においては、おおむね $50\text{ MPa} < \sigma_{ys} < 80\text{ MPa}$ の範囲である。図14より、損傷確率の変動は最大でも30%程度であり、図12に示す E_{tg} による変動のほうがはるかに大きい。したがって、コンデンサチップの熱応力損傷にとって、はんだよりも絶縁層の材料選択のほうが重要な問題であるといえる。

6. 結 言

チップ形積層セラミックコンデンサを金属基板へ実装する際の熱応力損傷を定量的に評価した。金属基板表面を覆う絶縁層の変形物性およびはんだの降伏応力の温度依存性を考慮した非定常熱応力解析、および試験基板を用いた損傷再現試験を実施した。その結果、コンデンサチップ内に発生する熱応力およびコンデンサチップの損傷確率の評価に関して、また、コンデンサチップの熱応力損傷を防止するための絶縁層およびはんだの材料選択に関して、次のことが明らかとなった。

- (1) コンデンサチップの三点曲げ強度 σ_b の累積

分布 $F(\sigma_b)$ および破壊開始点に発生する最大主応力の最大値 σ_{mm} を用いて、熱負荷による損傷確率 $F(\sigma_{mm})$ を評価することが可能である。

(2) 絶縁層材料のガラス転移温度および縦弾性係数に関連するパラメータ E_{tg} 、およびはんだの常温における降伏応力 σ_{ys} に着目することにより、材料の変形物性の観点からも損傷確率を評価することが可能となった。これらのパラメータを用いた損傷評価に基づき、特に絶縁層について適切な材料選択を行えば、熱応力損傷を防止することが可能である。

最後に、本研究の遂行にあたりご指導をいただいた横浜国立大学工学部の白鳥教授ならびに于助教に心より謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば、白鳥正樹、機論, 60-577, A(1994), 1905-1912.
- (2) 佐々木亮・ほか2名, 第24回信頼性・保全性シンポジウム発表報告集, (1994-7), 107-110.
- (3) 村田憲司・ほか2名, 日経エレクトロニクス, No. 650(1995), 153-161.
- (4) 徳丸達雄・ほか2名, 表面実装技術, 6-9(1996), 17-21.
- (5) 佐山利彦・高柳毅, 機構論(I), No. 96-1(1996-4), 263-264.
- (6) 白鳥正樹・ほか3名, 機構論(II), No. 940-10(1994-3), 310-312.
- (7) Shiratori, M. and Yu, Q., *Proc. ISAC'94 on Computational Mechanics for Electronic Devices/Components*, (1994), 177-195.
- (8) 王樹波・ほか2名, 機論, 62-594, A(1996), 527-532.
- (9) 新保正樹編, エポキシ樹脂ハンドブック, (1987), 300, 日刊工業新聞社.
- (10) Nielsen, L. E., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, (1975), 109, Marcel Dekker, New York.
- (11) 例えば, Savage, E. I. and Getzan, G. D., *Proc. ISHM'90*, (1990), 669-674.
- (12) Paydar, N., ほか2名, *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, 116(1994), 265-273.