606

有限要素法による鉛フリーはんだの寿命解析

明電舎 〇渡辺広光 明星大 山本晴生

Fatigue Life Prediction of Lead-free Solder by Non Linear Finite element method Hiromitu WATANABE and Haruo YAMAMOTO

1 緒 言

地球環境保護のため、電子部品を基板上に固定して電 流を導通する役目を担っているはんだの材料はすず(Sn) と鉛(Pb)の合金から、鉛を含有しない鉛フリーはんだに 置き換わっている。このようなはんだは基板および電子 部品と線膨張係数が異なるため、使用中の温度変化によ り、界面にひずみが発生する。したがって、十分な冷却 が行われない場合は、はんだ部にひずみが繰返されるこ とにより、金属疲労が発生することが考えられる。

そこで、はんだ材料の特性試験、ひずみ算定に必要な 有限体積法を用いた基板の温度分布、次に非弾性有限要 素法を用いたひずみ変化の解析を行い、最後に素材の疲 労試験結果から、ひずみ変化と疲労寿命を推定する技術 について報告する。

2 解析方法および解析結果

2.1 解析対象 解析の対象は、電動機の制御用の基板で、 解析対象の模式図を図1に示す。基板は、表面に FET (Field effect transistor)素子がはんだ付けで固定されてい る表面実装基板である。



Fig. 1 Analysis model

2.2 解析手順 金属材料においては、疲労寿命が 10⁴ 回程度の領域を、低サイクル疲労と言い、破壊の駆動力 は非弾性ひずみの繰返しが疲労き裂発生の主要因と考 えられている^{1,2)}。

そこで、この非弾性ひずみを算定するため、ひずみ発 生の駆動力となる基板上の温度分布解析を行い、次にこ の温度分布の変化で発生するひずみをクリープと弾塑 性を考慮した非弾性ひずみ解析で算定する、最後に解析 で得られたひずみ量と、疲労試験で得られたひずみと疲 労寿命の関係を示す寿命曲線との比較を行い、寿命の算 定を行う。

2.3 温度解析 FET 素子部に発熱を入力し、使用中の温度分布を求めた結果を図2に示す。図から、はんだ部の

温度も大きく上昇する結果が得られた。さらに、基板部 分にも温度差があり、基板の熱変形の影響も考慮しなけ ればならないことがわかった。



fig.2 Temperature distribution

2.3 はんだの非弾性ひずみ解析 はんだの非弾性ひず みは、温度が変化したときに発生する熱応力による塑性 ひずみと、連続使用中で温度が定常状態であっても、時 間とともにひずみが増加するクリープひずみがある³⁾。 ここで、応力とひずみの関係は、使用環境で想定される 種々の温度条件にて、徐々に応力振幅を増加させて、繰 返し応力とそのときの発生ひずみの関係を測定した結 果を用いて、応力のべき乗で示した弾塑性構成方程式を 用いている。また、クリープの特性は、経過時間とひず みの変化を測定し、安定的にひずみが増加する領域での ひずみ速度を測定する。これを応力と温度を種々変えた 場合について実験を行い、得られたひずみ速度に及ぼす 応力と温度の関係は Norton 則を適用して整理した。

解析は汎用解析ソフト ANSYS(米国 AYSYS Inc.)を用 い、材料物性には先に述べた実測したクリープと弾塑性 の2種類の非線形ひずみ特性を与えて、陰解法による過 渡解析を行った。

解析モデルおよび解析結果で得られた非弾性ひずみ の分布を図3に示す。図はヒートサイクル中の最大温度 の結果で、最大ひずみは FET 先端の A 部で発生してい ることがわかる。A 部を拡大すると、電極 R 部の下方に 最大ひずみが発生していることがわかる。ここで、ひず み値については、ピーク値を用いずにピーク部近傍で平 均化した値を代表値として参照している⁴⁾。

非弾性ひずみ解析で得られた、ひずみと応力の時間変 化を図4に示す。図の横軸は時刻、縦軸はひずみ、応力 または温度で、温度の上昇とともに、相当応力とひずみ が増加している。その後温度が一定になると、クリープ が発生するため非弾性ひずみは増加するが、応力はひず みの発生により緩和している。次に温度が低下すると、 縦弾性係数が増加するため、応力が一旦上昇し、これに 伴いひずみも継続的に増加しているが、温度がさらに低 くなると、応力緩和とクリープ速度が遅くなるため、ひ ずみが増加しなくなる。

次に、この応力とひずみの関係から、ひずみ範囲を算 定するため、ヒステリシスループを作成する。ループに は用いる応力を相当応力とすると、符号がないため、温 度上昇時は圧縮応力が発生し、温度低下時は引張り応力 が発生すると仮定すると、図4に示す換算応力のように なる。この換算応力とひずみの関係から、ヒステリシス ループを作成するとひずみ範囲が算定できる。

なお、解析結果の検証のため、スルーホール基板を用 いて、スルーホール部に光ファイバー製のひずみセンサ ー挿入して、ヒートサイクル試験を行いひずみの変化を 測定している。このひずみ値と解析ソフト ANSYS と MARC(米国 MSC.Software.Corp)を用いて計算したひず み値を比較すると、実験値に対して誤差 10%程度の精度 であることを確認している。

2.4 疲労寿命の算定 疲労試験は、繰返しねじり角度が 一定であり、比較的低速で繰返しねじり試験が実施でき る、東京衡機製平面曲げ・ねじり疲労試験機(PWB-30) を用いて行った。図5は、負荷トルクが初期の75%まで 低下しときの繰返し数を破壊と定義した破壊繰り返し 数を横軸に、試験機のねじり角から算定した公称せん断 ひずみから弾性分を除いたひずみ範囲γを縦軸に取り、 実験結果の50%非破壊確率を Coffin-Manson 則で表した 結果である。図5とひずみのヒステリシスループを比較 することで、疲労寿命の推定が可能になる。

なお、実際の設計では疲労試験で得られたばらつきに 対して統計処理を施して、非破壊確率が 95%で示した Coffin-Manson 則を基本として、さらに実機相当の試験 から得られた安全率等を考慮して、十分な安全性を確保 した設計を行っている。





3 まとめ

地球環境保護のため、便利性を重視してきた実績のあ る材料から、より環境に優しい新しい材料を積極的に用 いるためには、機能性と信頼性の両面を確保することが 重要である。このような観点から、材料試験等の基礎実 験から製品での確認試験、および解析精度の向上につい て研究を進め、鉛フリーはんだの疲労寿命の算定が可能 となった。これにより、環境に優しい機器の小型化と信 頼性の両立が可能になった。

参考文献

- 1) 王、于、白鳥、「表面実装部品はんだ接合部の弾 塑性-クリープ有限要素解析法による研究」、日 本機械学会論文集(A)、62 巻-594 号、1996 年 2 月、pp.527-532
- 2) 山田他3名、「はんだ接合部の弾性クリープ有限 要素解析と拡散形半導体ゲージを用いた実験検 証」、日本機械学会論文集(A)、64巻-619号、1998 年3月、pp.703-708
- 3) 酒井他3名、「鉛フリーはんだ材料構成則と熱疲 労寿命特性の関係」、日本機械学会・研究部会 RC202「電子デバイス/電子実装における信頼性 に関する研究分科会報告書、2004、pp.99-117
- 4) 于、白鳥、「マイクロはんだ接合部の強度信頼性 評価と信頼性設計に関する諸問題」、日本機械学 会・研究部会 RC144「エレクトロニックパッケー ジングにおけるマイクロ接合の信頼性評価に関 する研究部会報告書、1998、pp.77-154







Fig.5 Fatigue life curve