

意真 哲也

Abstract

The use of electronic devices in engine control systems, safety systems and telecommunications is increasing. Compared to home electronics, electronic devices for motor vehicles are often exposed to a more severe environment, such as higher temperatures, thumping vibration and higher humidity. Furthermore, considering the longer product life expected for a motor vehicle, these electronic devices are expected to have a high level of reliability that lasts over a longer period. The method largely used for attaching electronic components like resistors and condensers to the circuit boards of electronic devices is soldering.

Circuit boards and electronic components for motor vehicles are subjected continuously to large temperature fluctuations due to changes in environmental temperature, radiant heat around the engine, the heat generated by the electronic components themselves, etc. Generally, the circuit boards and the electronic components mounted on them have different coefficients of thermal expansion, and the difference in the amount of expansion and contraction they undergo causes thermal stress in the solder connecting them (Fig. 1). This results in “solder cracks” forming in the joint and eventually breakage that leads to defective electrical conductivity (Fig. 2). The thermal fatigue characteristics and reliability of solder can be evaluated by means of temperature cycle test that subjects the solder to repetitive cycles of high and low temperature conditions, but even accelerated test cycles can often require several months. On the other hand, there is a need to shorten development time and reduce the number of rework tasks involved. Reducing cost by optimizing product quality is also an important issue, and all of these increase the need for technology that can estimate the thermal fatigue life of solder joints.

In response to these needs, we have been developing reliability technology for solder joints in electronic devices for motor vehicles, focusing on the temperature fluctuations in such devices. In this report, we introduce technology that uses simulations employing the finite element method for estimating the thermal fatigue life of solder joints in thermal cycle conditions.

1

はじめに

エンジン制御を始め、安全・通信などの分野で車載用電子機器は今後さらに増加傾向にある。車載用電子機器は、温度・振動・湿度などの面で、家電製品と比較して過酷な環境で使用されることが多く、また耐用年数が高いことから高い信頼性が要求される。電子機器を構成する抵抗およびコンデンサなどの電子部品と配線基板を接合する方法として、はんだ付けが多く用いられる。

車載用の配線基板および電子部品には、環境温度の変化並びにエンジン周辺の輻射熱および電子部品の自己発熱などによって、大きな温度変化が繰り返される。一般的に配線基板と電子部品の熱膨張係数は異なることから、膨張収縮量の差によってはんだ接合部に熱応力が発生する(図1)。その結果、はんだ接合部に疲労亀裂(はんだクラック)が発生し、破断することで導通不良を引き起こす(図2)。はんだの熱疲労特性は、高温・低温を繰り返し印加する温度サイクル試験によって

その信頼性が検証されるが、加速試験でも数ヶ月を要する場面が多い。一方、開発期間の短縮および手戻り工数の削減が求められ、最適品質によるコストダウンも重要な課題となっていることから、はんだ接合部に関する寿命予測技術の必要性が高まっている。

このような背景から、車載用電子機器における温度変化に着目して、はんだ接合部の信頼性技術について開発を進めている。今回は、有限要素法シミュレーションを用いた温度サイクル環境下におけるはんだ接合部の寿命予測技術について紹介する。

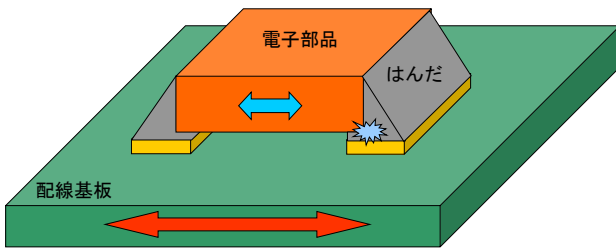


図1 熱膨張係数差によるせん断応力

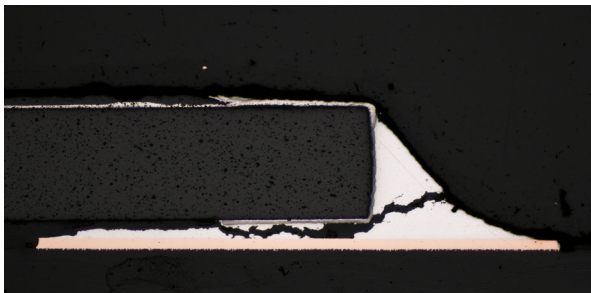


図2 疲労亀裂による導通不良

2 はんだの鉛フリー化

2006年以降、環境保護を目的として環境負荷物質である鉛を規制する動きが欧州を中心に拡大している。配線基板と電子部品を接合するはんだは、これまで中心となってきたSn-Pb系鉛入りはんだから、規制に伴いSn-Ag-Cu系鉛フリーはんだへの切り替えが進んでいる。鉛フリーはんだは、鉛入りはんだと比較して硬く伸びにくい特性を持っているため、鉛入りはんだで接合した場合と比較して疲労特性が低下し寿命が短くなる場合がある。鉛フリー化の面でも寿命の見極めが重要となり、はんだ寿命予測技術の必要性が増している。

3 はんだの寿命予測技術について

はんだ接合部に大きな温度差の温度サイクルが印加されると、はんだには非線形ひずみによる低サイクル疲労が発生し、最終的に破断に至る場合がある。はんだの疲労寿命サイクル数は、式(1)に示すCoffin-Manson則に従うことが知られている^[1]。

$$N = C \cdot (\Delta \varepsilon)^{-n} \quad (1)$$

ここで、Nは疲労寿命サイクル数、Cおよびnは実験から求まる材料固有値であり、 $\Delta \varepsilon$ は1温度サイクル中に発生するはんだ接合部の非線形ひずみ振幅を示す。事前に(1)式のCおよびnが導出できれば、非線形ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ を有限要素法シ

ミュレーションにて算出し、はんだ接合部の疲労寿命サイクル数Nを予測することが可能になる(図3、図4)。

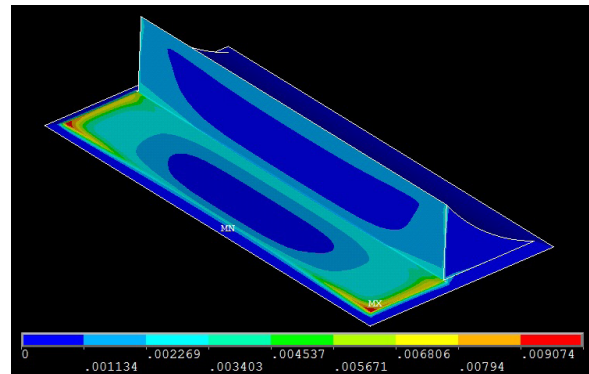


図3 有限要素法シミュレーション

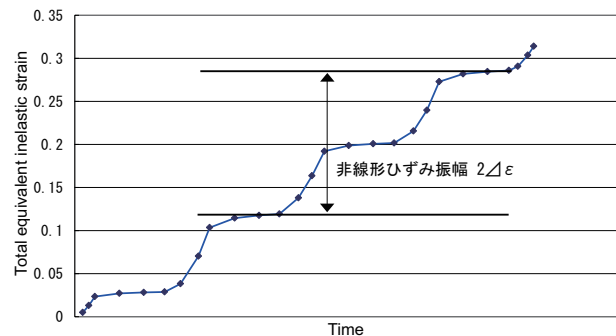


図4 温度サイクル時の累積相当非線形ひずみ

4 鉛フリーはんだ寿命予測式の導出

4-1. 寿命予測式の導出方法

(1)式の材料固有値Cおよびnの導出には、疲労寿命サイクル数と非線形ひずみ振幅の関係を求める必要がある。試験サンプルは、はんだ単品を用いる方法および配線基板と電子部品をはんだ付けした実装基板を用いる方法が一般的であり、疲労寿命サイクル数の取得には回転曲げ試験に代表される機械的疲労試験および温度サイクル試験が中心となっている^{[1][2]}。

今回は実使用状態に近いことを重視して、実装基板を試験サンプルとして用い、温度サイクル試験によって疲労寿命サイクル数を取得し、有限要素法シミュレーションを用いて、非線形ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ を算出した。評価対象は、はんだの疲労亀裂が発生しやすい電子部品の一つであるチップ抵抗とし、構造を単純化した配線基板を用いた(図5)。本評価では、材料固有値の算出に重要となる疲労寿命サイクル数の誤差低減および非線形ひずみ振幅の精度を中心に検討を進めた。

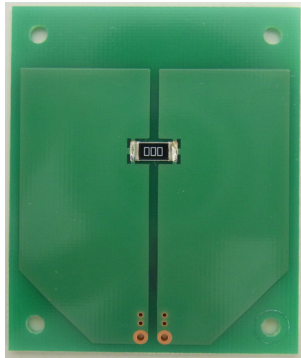


図5 チップ抵抗実装基板

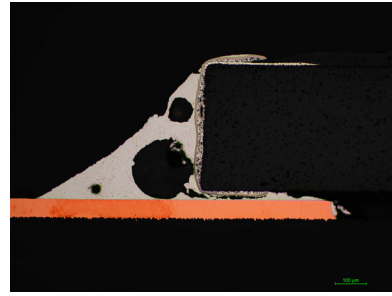


図6 はんだ接合部に発生したボイド

4-2. 疲労寿命サイクル数の誤差低減

疲労寿命サイクル数の誤差要素の一つとしてボイドが挙げられる^[3]。ボイドとは、はんだ接合部に空洞ができる現象で、接合面積低下による強度劣化の原因となる(図6)。鉛フリーはんだは、鉛入りはんだと比較して表面張力が高く、はんだ付け時に発生するガスが抜け難いことから、ボイドが増加傾向にある。ボイドによる疲労寿命サイクル数の誤差を低減するため、低ボイド試験サンプルの検討を行った。

ボイドの低減には大きく2種類の方法が考えられる。1点目ははんだ付け時に発生するガスを低減すること、2点目は発生したガスを排出することである。ガスの主要因ははんだ中に含まれるフラックスや酸化物除去反応時に発生する水の気化と言われている。ガスの低減にははんだ材の変更が有効となるが、使用実績のあるはんだ材の変更は困難である。そこでガスを排出する方法として近年実用化が進められている真空はんだ付け装置に注目した。真空はんだ付け装置とは、はんだ付け工程中に真空ゾーンを設けることで、溶融はんだ中のガスを気圧差によって外部に排出しやすくする工法である。通常の大気はんだ付けおよび真空はんだ付けの両装置でははんだ内部に発生するボイド量を比較し、真空はんだ付けの効果を検証した。

評価サンプルはチップ抵抗実装基板のX線透視画像から電極下部のボイド量を測定し、電極面積に対するボイド面積をボイド率と定義した(図7)。図8に示すとおり、真空はんだ付け装置はボイド率が低く、バラツキも小さいことから、ボイドに起因する疲労寿命サイクル数の誤差低減に有効であることが分かった。

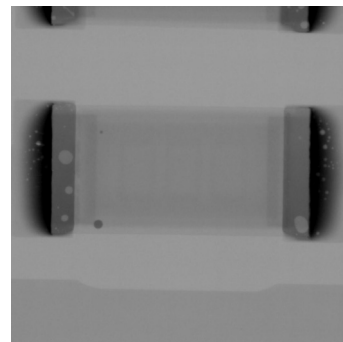


図7 X線透視によるボイド

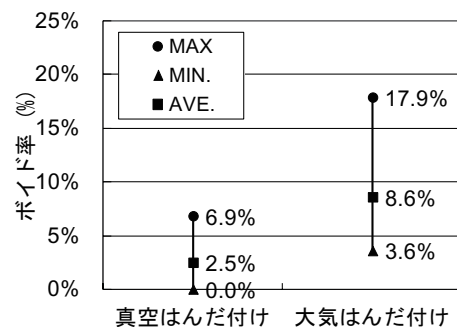


図8 はんだ付け方法によるボイド率の違い

4-3. 疲労寿命サイクル数の取得

真空はんだ付け装置を用いて試験サンプルを作製し、疲労寿命サイクル数を取得した。試験条件は $-40\sim 105^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\sim 105^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\sim 85^{\circ}\text{C}$ の3条件とし、高温・低温時の保持は15分とした。実装用はんだは組成比Sn-3.0Ag-0.5Cu鉛フリーはんだを用いた。疲労寿命サイクル数は、試験槽からサンプルを定期的に抜き取り、はんだ接合部の外観観察により判定した。ワイブル解析を行い、尺度パラメータ(η)を各温度条件における疲労寿命サイクル数とした(表1)。

表1 温度サイクル試験結果

温度サイクル試験条件	$-40^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 105^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 105^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$
温度変化幅	145 $^{\circ}\text{C}$	115 $^{\circ}\text{C}$	115 $^{\circ}\text{C}$
疲労寿命	36サイクル	59サイクル	73サイクル

4-4. シミュレーションによる非線形ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ 算出

はんだ接合部の非線形ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ は実測が困難なため、有限要素法シミュレーションにより算出した。シミュレーション精度に影響を及ぼす主要なパラメータの一つとして材料物性値が上げられる。前述のとおり、はんだクラックは構成部品の熱膨張係数差によって発生するはんだへの応力が要因となることから、正確な熱膨張係数を把握することが重要である。熱膨張係数の測定は一般的にTMA法を用いることが多い。しかしサンプルサイズに制限があり実使用状態での測定が難しいこと、また反りの影響を考慮することが難しいことから、精度の高い測定が困難な場合がある。

これらの課題を考慮した測定手法として、ひずみゲージおよび画像相関法(図9)による熱膨張係数の取得を進めた¹⁴⁾。またこれらの方法は試験サンプル表面ひずみの測定が可能であることから、シミュレーションの妥当性検証へ活用を検討した。前述のとおり非線形ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ は実測が困難であり、シミュレーションの妥当性を直接検証することが難しい。そこで温度サイクル試験中の電子部品表面ひずみを対象に実測し、シミュレーションとの比較を行い妥当性を検証した。実測にはひずみゲージを用い、シミュレーションは有限要素法解析ソフトANSYSを用いた。

試験条件は $-40 \sim 105^{\circ}\text{C}$ 、 $-30 \sim 85^{\circ}\text{C}$ の2条件とした。高温、低温保持中のひずみ比較結果を図10に示す。全ての温度帯で実測との差異は10%弱であることから、解析の妥当性が確認できる。この結果および前述4-3疲労寿命サイクル数より、寿命予測式Coffin-Manson則の材料固有値Cおよびnを式(2)のとおり導出した(図11)。

$$N = 0.44 \cdot (\Delta \epsilon)^{-1.54} \quad (2)$$

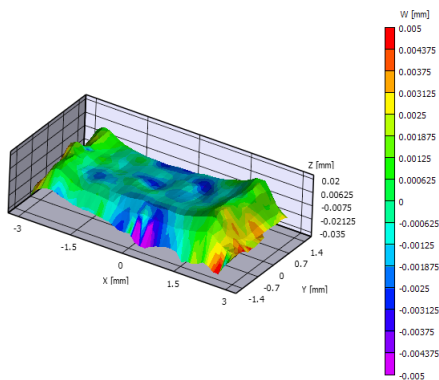


図9 画像相関法によるチップ抵抗のひずみ

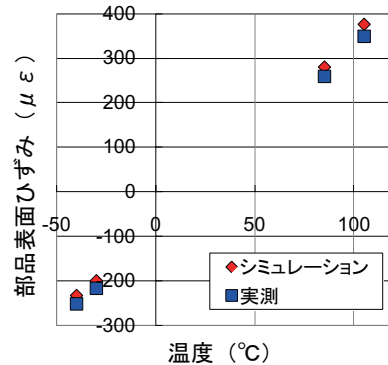


図10 チップ抵抗の表面ひずみ

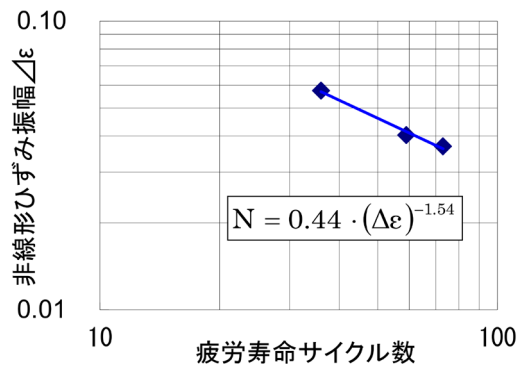


図11 材料固有値の導出

5 寿命予測式の妥当性検証

導出した寿命予測式の妥当性を検証した。解析対象は材質がFR4の6.3mm*3.1mmサイズのチップ抵抗実装基板とし、シミュレーションにてはんだ接合部の非線形ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ を算出した。

温度サイクル試験 $-40 \sim 105^{\circ}\text{C}$ 、 $-30 \sim 85^{\circ}\text{C}$ の2条件について予測寿命と実寿命の比較を行った結果、図12のとおり最大誤差19%となり、良く一致していることが分かる。

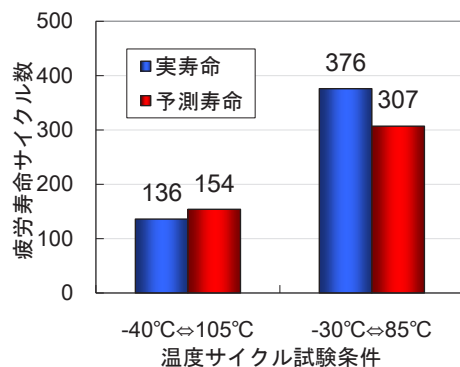


図12 はんだ接合部の実寿命と予測寿命

6 鉛フリーはんだの信頼性試験条件設定

前述のとおり、はんだの熱疲労特性は温度サイクル試験によって検証されるが、市場の要求品質を考慮したサイクル数の設定が重要である。そこで、今回導出した寿命予測式およびシミュレーション解析を用いた試験サイクル数の設定方法について紹介する。

一般的に長期の信頼性を検証する温度サイクル試験は、試験期間の短縮を目的とした加速試験を用いる場合が多く、実際の使用温度に対して厳しい温度にて試験を行う。 N_f を保証すべきサイクル数、 N_t を試験サイクル数、AFを加速係数とすると、試験サイクル数 N_t は式(3)で表すことができる。また実使用温度に対する試験温度の加速係数AFは、本評価にて導出した寿命予測式(2)を用いて式(4)で表すことができる。ここで、 $\Delta \varepsilon_f$ は実使用温度における非線形ひずみ振幅、 $\Delta \varepsilon_t$ は試験温度における非線形ひずみ振幅を示す。

$$N_t = \frac{N_f}{AF} \quad (3)$$

$$AF = \left(\frac{\Delta \varepsilon_f}{\Delta \varepsilon_t} \right)^{-1.54} \quad (4)$$

上記のとおり、製品ごとに市場および試験温度における非線形ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_f$ ・ $\Delta \varepsilon_t$ をシミュレーションにより算出して、保証すべきサイクル数 N_f を設定すれば、各製品に応じた適正な試験サイクル数 N_t を導出することができる。

7 おわりに

Coffin-Manson則および有限要素法シミュレーションを用いてチップ抵抗実装基板に対するはんだ接合部の寿命予測技術を構築することができた。また、これらの技術を用いて、各製品の使われ方に応じた温度サイクル試験条件の設定が可能となった。モーターサイクル用の電子ユニットは、振動・被水の観点から電子基板を樹脂で埋める製品も多い。そのため、温度サイクル時に発生する各電子部品に対する応力が複雑化し、樹脂埋めしていない製品と比較して熱疲労特性が異なることが分かってきている。また、樹脂埋めした電子基板は熱容量が大きいことから、温度サイクル試験の長期化が課題となっている。このような理由から、寿命予測技術および温度サイクル試験の最適化がより重要になる。現在、様々な製品形態に対応できるよう、部品形状や構造を変化させた場合についても検証を進めている。これまでのはんだ寿命は、実機をベースにした試行錯誤による開発が中心となってきた。引き

続き開発を進めてシミュレーション精度を向上させ、開発の効率化へ繋げていきたい。

■参考文献

- [1] 于強、白鳥正樹:「BGAはんだ接合部の形状を考慮した疲労寿命評価」、エレクトロニクス実装学会誌、Vol.1 No.4、pp.278-283(1998)
- [2] 海老原理徳、李ハオ:「鉛フリーはんだマイクロ接合部の熱疲労強度評価に関する研究」、東京学芸大学紀要自然科学系、Vol.58、pp.229 -236(2006)
- [3] JEITA ETR-7024:鉛フリーはんだ接合部の信頼性に対するボイド許容規準の標準化に関する調査報告、(社)電子情報技術産業協会(2007)
- [4] 貫野敏史、穴戸信行、池田徹、宮崎則幸、田中宏之、畑尾卓也:「デジタル画像相関法と有限要素法を用いた多層基板中のはんだ接合部の熱サイクル疲労強度評価」、Mate2009、Vol.15、pp.159-164(2009)

■著者



意真 哲也

Tetsuya Ima

技術本部

研究開発統括部

システム安全技術研究部