

はんだ接合部の劣化・寿命診断方法の開発

Degradation and Life Diagnosis Method for Solder Joints

久里 裕二
HISAZATO Yuji

若松 建吾
WAKAMATSU Kengo

齊藤 友治
SAITO Yuji

産業機器の長期安定稼働のためには、電気・電子機器の主要構成部品である制御基板の劣化状態を把握し、トラブルを未然に防止することが重要である。近年、プリント基板に搭載される電子部品の高密度化、高機能化に伴いはんだ接合部への負荷が増大しており、特に基板実装部品を支えるはんだ接合部への影響は大きい。当社では、実際の熱応力をかけた状態でのはんだ接合部の劣化評価を行い、はんだ接合部の熱疲労による劣化メカニズムについて検討し、はんだ接合部の表面粗さをを用いて劣化・寿命を非破壊的に予測する診断手法を開発した。

For stable operation of industrial equipment, it is important to clarify the state of degradation of printed circuit boards, which are the main components of electric and electronic devices, and to prevent any trouble beforehand. In recent years, thermal stress at solder joints has been increasing with the increasing density and functionality of electronic parts mounted on circuit boards.

Toshiba has investigated the mechanism of degradation of solder joints by thermal fatigue, and has developed a diagnostic method using surface roughness to predict the degradation and life of such joints nondestructively.

1 まえがき

交通制御機器や電力用制御機器などの産業用機器の回路には多くの電子部品を搭載したプリント基板が使用されており、それらは高い信頼性を維持して長期間安定して稼働することが求められている。従来のプリント基板では挿入実装(基板に設けられた穴にリードを差し込み、両面からはんだで接合する方法、図1(a))のものが多く使用されていたが、近年では電子機器の小型化や高集積化に伴い、実装スペースを多く必要とする挿入部品に代わり、半導体デバイス部品やチップ部品が小さくできる表面実装(図1(b))の形態で制御基板に組み込まれることが多くなってきている。

表面実装とは、基板上に設けられた銅(Cu)パターンとはんだにより接合する方法で、小型・高集積化が図れるが、部品にかかる熱負荷も増加する。したがって、部品の発熱による温度上昇とともに構成材料の熱膨張差によってはんだ接合部に熱応力が生じ、き裂が発生進展することにより、導通不良などの製品故障の原因となる。

しかし、はんだ接合部に発生するき裂などの劣化現象は、たとえ同一基板内に実装された部品であっても発熱状態や構成材料により異なってくるため、はんだ接合部の劣化寿命を推定することは容易ではなく、その方法もいまだ確立されていない。

今回、はんだ接合部のトラブルを未然に防止する観点から、制御基板のはんだ接合部における破壊現象の一つである熱疲労について、き裂発生までの劣化現象を有限要素法

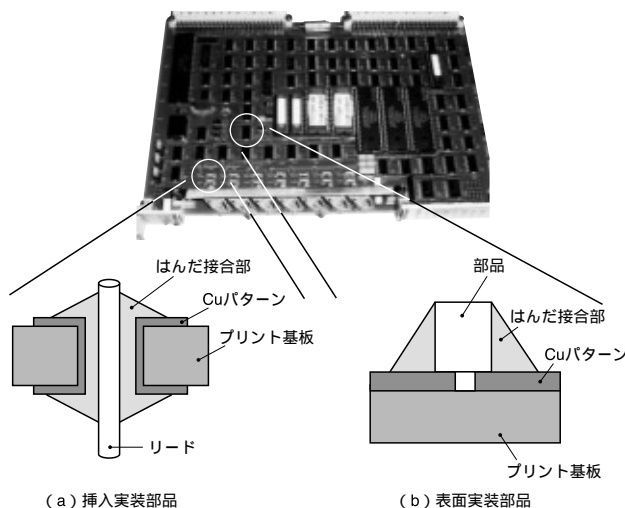


図1．制御基板の例とはんだ接合部 現在は表面実装部品が主流となっている。

Example of control board and solder joints

による解析(FEM解析)や断面の組織観察などから検討し、その劣化寿命をはんだの表面粗さから非破壊的に推定する診断手法を開発したので以下に述べる。


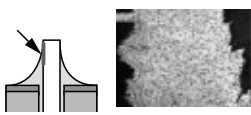
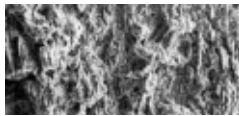
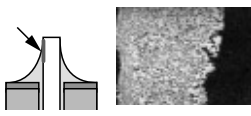
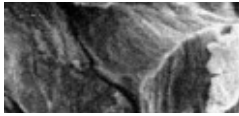
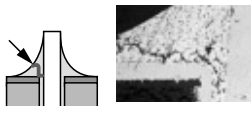

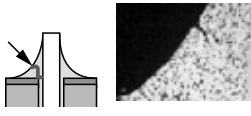
2 はんだ接合部の各種破壊形態

一般にはんだ接合部に見られる破壊現象は、次の四つが挙げられる。

- (1) 引張りやせん断荷重が短時間で負荷されたことにより破壊する延性破壊
- (2) 高温で一定応力が継続的に負荷されたことにより破壊するクリープ破壊
- (3) 加熱冷却で部品の構成材料の熱膨張差による熱応力が繰り返し負荷されたことによる熱疲労破壊
- (4) 輸送や装置の振動などの繰返しにより破壊する機械的疲労破壊

はんだ接合部の破断位置,破断面の様相について表1にまとめた。

表1. 破壊現象とその破断面の様相
Fracture phenomena and fracture surfaces

現象	破断面の特徴的様相	破断位置と断面
(1) 延性破壊		
(2) クリープ破壊		
(3) 熱疲労破壊		
(4) 機械的疲労破壊		

延性破壊やクリープ破壊は,リードとはんだ接合部の境界部分から発生し,その破断面にはゴルフボールの表面のようなデンプル模様が現れる。一方,クリープ破壊の破断面には,はんだ接合部が擦れ合うように徐々にぬけ落ちるため,川の流に似たすじ状模様が現れる。

熱疲労破壊や機械的疲労破壊は,はんだ接合部のフィレット中央部付近で発生する。熱疲労の破断面には結晶粒界が認められ,その表面には細かなステップ状の模様が現れる。これは,応力が高い部分の金属組織が粗大化し粒界に沿って破壊したからである。機械的疲労破壊の破断面には疲労破壊特有のストライエーションと呼ばれる縞(しま)模様が現れる。以上のように,破壊原因は破断位置や破断面の様相を見て容易に区別することが可能である。

はんだ接合部における製品の不具合を,破壊現象ごとに

分類した結果を図2に示す。図2から,熱疲労による不具合が全体の約70%を占めていることがわかる。この熱疲労による不具合は稼働中に発生し,装置の異常停止などを生じさせる。したがって,熱疲労によるき裂の発生を事前に検出し対策をとることができれば,はんだ接合部の不具合による機器の異常の大部分を防止することができる。

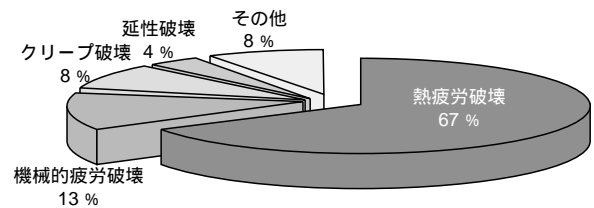


図2. はんだ接合部の破壊現象割合 製品トラブルを破壊現象ごとに分類すると,熱疲労による破壊がもっとも多いことがわかる。
Percentages of solder fracture phenomena

3 熱応力によるはんだの劣化現象

3.1 はんだ接合部に発生するひずみ状態

はんだ接合部のき裂発生の原因であるひずみ分布を明らかにする目的で,FEMによる弾塑性クリープ解析を行った。なお,解析は,図3に示すチップコンデンサをモデル化し,温度変化時(125 - 55)は弾塑性解析,等温保持時(各温度30分間保持)はクリープ解析を実施した。チップコンデンサは誘電体と電極から構成されており,プリント基板の表面にはCuパターンとチップコンデンサがすず・鉛(Sn-Pb)はんだで接合されている。

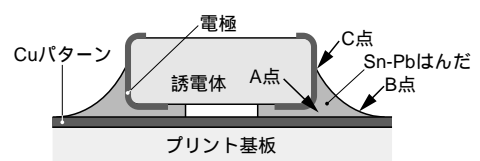


図3. チップコンデンサ 解析に用いたチップコンデンサのはんだ接合部の構造を示す。クリープひずみはA,B,C点に集中する。
Structure of chip capacitor

FEM解析によるクリープひずみ分布の解析結果を図4に示す。クリープひずみは,図3に示すはんだ部のA,B,C点の3か所で集中する傾向を示し,図4下のように温度変化の繰返し数(以下,繰返し数と略記)が増えるに従って,クリープひずみの高い黄色や赤色の領域が広がる傾向を示す。各点におけるひずみ集中の度合いは,B点を1とした場合,A点は2.6,C点は2.4と高めであり,実際にA点にき裂の発生

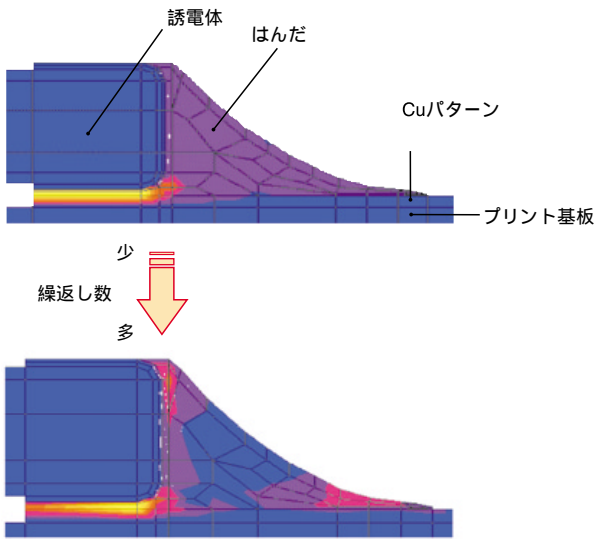


図4．有限要素法で解析したコンデンサのクリープひずみ分布
繰返し数により、クリープひずみ分布の集中が生じることがわかる。
Creep strain distribution analyzed by finite-element method (FEM)

する場合が多いことから、解析結果の妥当性がうかがえる。

3.2 劣化寿命診断への応用

一般的なFEM解析に基づいたはんだ接合部の劣化寿命診断フローチャートを図5に示す。

- (1) FEM解析に必要なチップコンデンサのはんだ接合部の形状、寸法、構成材料を明らかにする。
- (2) FEM解析により、はんだ接合部のひずみを解析する。
- (3) ひずみ集中部(A, B, C点など)の最大ひずみを算出する。

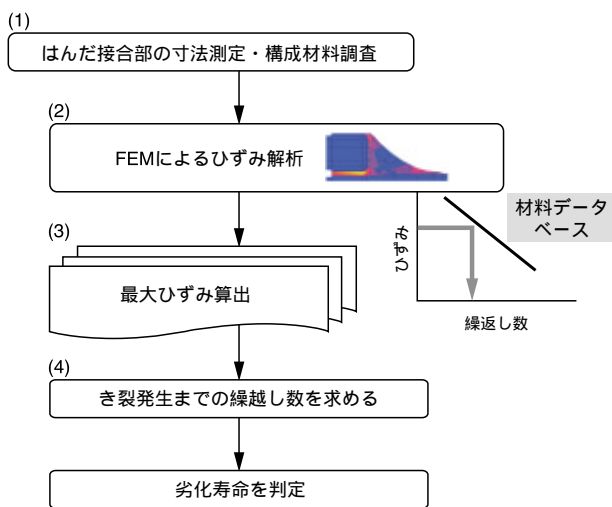


図5．FEM解析による劣化寿命評価フローチャート FEM解析と材料データベースに基づいて、はんだ接合部の劣化寿命を判定する。
Flowchart of solder joint degradation life diagnosis using FEM

- (4) ひずみと繰返し数の材料データベースから、き裂発生までの繰返し数を求め劣化寿命を判定する。

しかし、はんだ接合部の形状が必ずしも一様でないため、この方法ではそのつどの解析が必要となる。そこで次に、表面粗さ計測に基づく高精度はんだ接合部劣化寿命診断法を開発した。そのフローチャートを図6に示す。

- (1) 実際に診断するチップコンデンサのはんだ接合部(B点)の表面粗さを、レーザ顕微鏡などの粗さ測定器を用いて計測する。
- (2) データベースとして持っている表面粗さとひずみの関係から、測定したB点のひずみを算出する。
- (3) あらかじめFEM解析を基に作成した材料データベースを用いて、各点のひずみ集中係数を求めておき、(2)で求めたB点のひずみを基にA点の最大ひずみを算出する(例えばB点が1の場合A点は2.6倍となり、この値がそれぞれのひずみ集中係数となる)。
- (4) 求めたA点のひずみを基に、はんだ接合部のき裂発生までの繰返し数を算出し、劣化寿命を判定する。

以上のような方法を構築することでB点の粗さからA点のひずみを推定することができ、き裂発生までの繰返し数を求めることが可能となる。

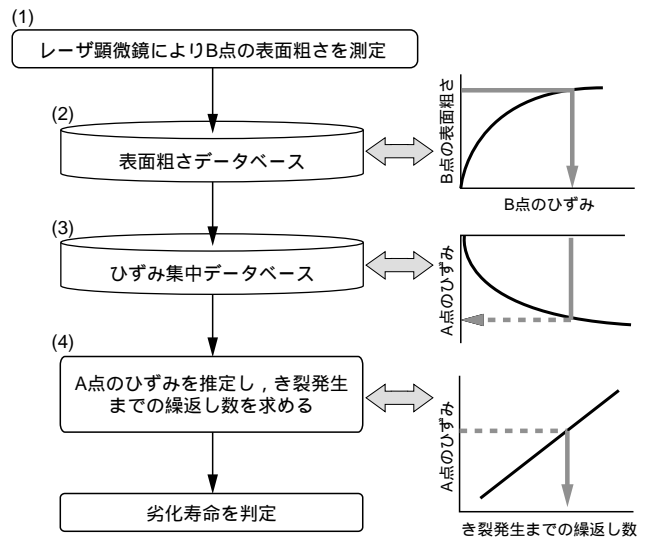


図6．表面粗さによる劣化寿命評価フローチャート 表面粗さの計測結果に基づいて、はんだ接合部の劣化寿命を判定できる。
Flowchart of solder joint degradation life diagnosis using surface roughness

3.3 劣化寿命診断の有効性の検証

図6で示した劣化寿命評価方法の有効性を検証するため冷熱サイクル試験(125 - 55 ,各30分ごと繰返し)を実施した。実際の冷熱サイクル試験後のはんだ接合部の表面状態の変化を図7に示す。また、レーザ顕微鏡により測定

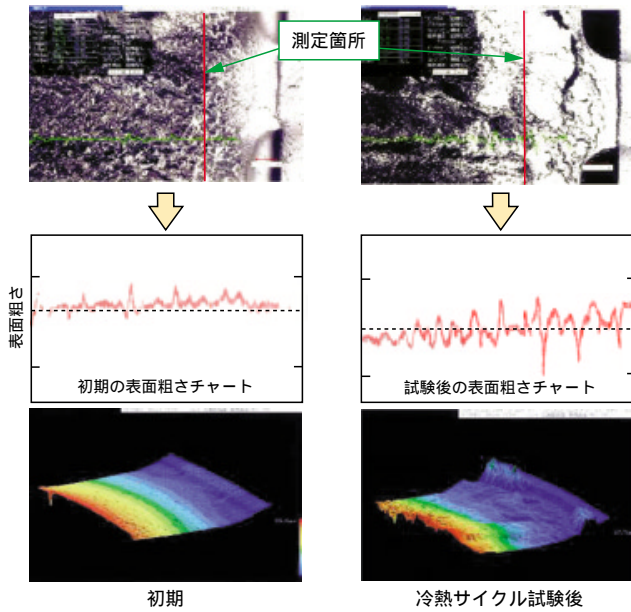


図7．はんだ接合部の表面状態の変化 冷熱の繰返し数が多くなるほどはんだ表面が粗くなり、き裂の発生が見られる。
Degradation of solder joints evaluated by surface roughness

(測定箇所：図3のB点)した中心線平均粗さと冷熱繰返し数との関係を図8に示す。初期の表面状態は滑らか(Ra：1.0以下)であるが、繰返し数が進むにつれ、はんだ接合部にクリープひずみが累積し表面粗さが大きくなる(Ra：1.0以上)傾向にある。そしてA点のき裂は、B点の表面粗さがある粗さ以上で発生していることがわかる。図中にひずみと繰返し数の関係から求めたき裂発生寿命曲線を示しているが、A点のき裂発生寿命が精度よく評価できることがわかる。また、図9に示すようにひずみ発生部分のA点にき裂が観察されていることから、解析とほぼ一致した結果である。

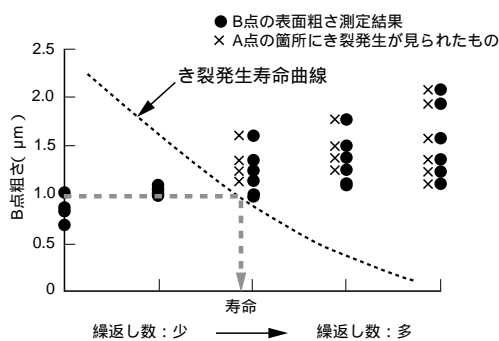


図8．繰返し数による表面粗さの影響 レーザ顕微鏡により測定した、繰返し数ごとののはんだ接合部の表面粗さの変化を示す。
Effect of number of cycles on surface roughness

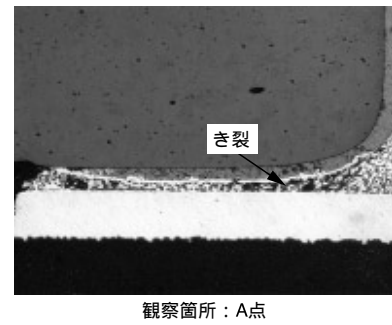


図9．はんだ接合部のき裂発生状態 ひずみ発生箇所と、き裂発生位置とがよく一致していることがわかる。
Crack generation site in solder joint

4 あとがき

今回、産業用基板に見られるはんだ接合部の破壊現象による破断面の様相と、はんだ表面の計測に基づく寿命評価方法を明らかにした。特に、はんだ接合部の表面粗さからき裂発生までの劣化寿命を高精度で評価する方法は当社独自のものであり、今後は製品適用を図り有効性を明らかにする予定である。

文 献

- (1) 久里裕二,ほか,“各種はんだの機械的特性と破面様相”.RCJ信頼性シンポジウム予稿集(財)日本電子部品信頼性センター,1997,p.75-81.
- (2) 向井 稔,ほか,“はんだ接合部の熱疲労寿命に及ぼす保持時間の影響”.日本機化学会論文集,63,611,1997,p.234-240.



久里 裕二 HISAZATO Yuji

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主務。材料強度・解析技術の研究・開発に従事。溶接学会会員。
Power and Industrial Systems Research & Development Center



若松 建吾 WAKAMATSU Kengo

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主務。材料環境評価・分析技術の研究・開発に従事。日本金属学会会員。
Power and Industrial Systems Research & Development Center



齊藤 友治 SAITO Yuji

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 電子モジュール部主務。プリント板実装技術の開発に従事。
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems