

B 鉛フリーはんだ接続部の熱疲労評価

長年にわたり電子デバイスの接合部に用いられてきたSn-37Pb共晶はんだは、WEEE/RoHS指令などの環境規制を受けてSn-Ag系などの鉛を含有しない代替材料への置き換えが進んでいる。一方で、Sn-37Pb共晶はんだは、熱サイクルによるデバイスへの応力負荷低減性に優れた材料であることから、鉛フリーはんだ接続部が共晶はんだ接続部と同等以上の対熱サイクル信頼性を有することを確認するためにも、鉛フリーはんだ接続部の熱疲労特性を評価することは重要かつ急務となっている。

このような産業界のニーズを受けて、日本機械学会研究協力部会では数値解析を援用した実装信頼性評価手法の開発がRC113分科会（1992年5月～1994年4月）からRC227分科会（2006年5月～2008年4月）まで長期間にわたり精力的に実施され、日本材料学会においても高温強度部門委員会のはんだ強度評価法ワーキンググループⅠ期（1997年開始）からⅢ期（2006年開始）での活動成果が試験標準やデータベースとして出版されるなど、国内の学会でもはんだ接続部の評価手法に関する研究活動が精力的に進められている。

本稿では、当社におけるはんだ接続部の信頼性評価に関する取組みとして、1) 数値シミュレーション（以下:CAE）による熱疲労寿命評価、2) はんだの物性採取試験技術、3) 冷熱サイクル試験技術を紹介する。



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
強度技術部

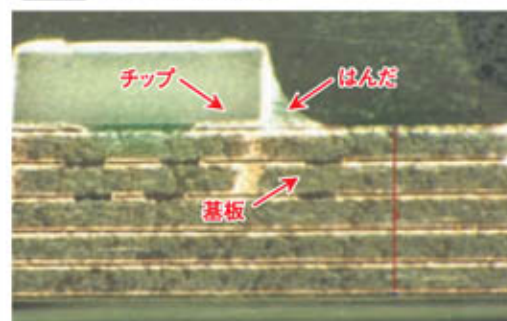
井上 隆夫

B-1 CAEによる熱疲労寿命評価

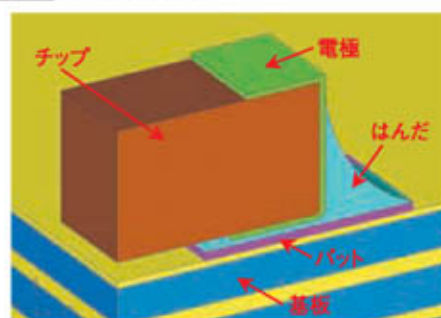
CAEによる熱疲労寿命評価は、実際の使用条件における温度変化を模擬した加熱冷却サイクルをシミュレーションすることによって製品寿命の推定手段として有効であるとともに、信頼性評価試験である冷熱サイクル試験をシミュレーションすることによる開発期間の短縮化手法として活用されている。実使用状態での製品寿命推定シミュレーションでは、内部の温度分布や過渡的な温度履歴などの温度境界条件を計算する熱伝導解析とその温度条件での熱応力・ひずみを計算する応力解析の連成解析や、熱流体解析（CFD）による熱伝導解析の高精度化など、計算の精度と速度の向上への取組みが進められている。一方、冷熱サイクル試験のシミュレーションでは、基板温度を均一と近似し、部材間の熱膨張係数差に起因した熱ひずみを応力解析することが多い。ここでは、最低温度-40℃、最高温度125℃、サイクルタイム1時間の冷熱サイクル試験におけるチップ部品はんだ接続部の熱ひずみ履歴の計算例と、Coffin-Manson則による熱疲労寿命推定手順について紹介する。

最初に、形状モデルを作成するため、評価対象とするチップ部品接続部の観察（写真1）を行い、その観察結果から汎用プリポストソフト（I-DEAS）を用いて3次元モデル（第1図）を作成した。なお、要素分割では自動化に適した4面体要素ではなく、計算精度に優れた6面体要素を用いている（第2図）。

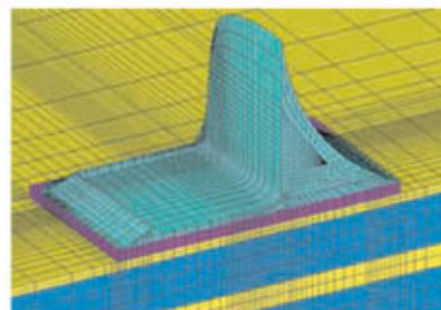
写真1 はんだ接続部の断面



第1図 1/4形状モデル



第2図 はんだ層の要素分割



次に、はんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu) のみ粘弾塑性体とし、基板やチップなど他の材料は弾性体として、汎用非線形構造解析ソフト (ABAQUS) を用いた熱粘弾塑性解析を実施した。はんだの材料物性採取試験は日本材料学会標準に準拠して実施し、引張試験結果から弾塑性構成則を、クリープ試験結果からクリープ構成則 (Norton則) を定式化した。なお、材料物性採取試験については次項で紹介する。

計算結果の例として、 -40°C 保持後と 125°C 保持後の主応力の分布図を第3図に示す。これらから、チップとパットに挟まれたはんだ層に高い応力が発生し、とくにチップの角と辺に添った位置で応力が高くなるのがわかる。また、この高応力発生部位は、冷熱サイクル試験後の断面観察でき裂

が観察される部位と合致している。熱疲労寿命の推定には、共晶はんだ接合部の熱疲労寿命推定法として一般的なCoffin-Manson則を用いることとし、第4図に示すように、評価パラメータである非線形ひずみ範囲の分布から、高ひずみ範囲の位置での応力vs.ひずみ履歴と、ひずみ範囲の値を求めた。

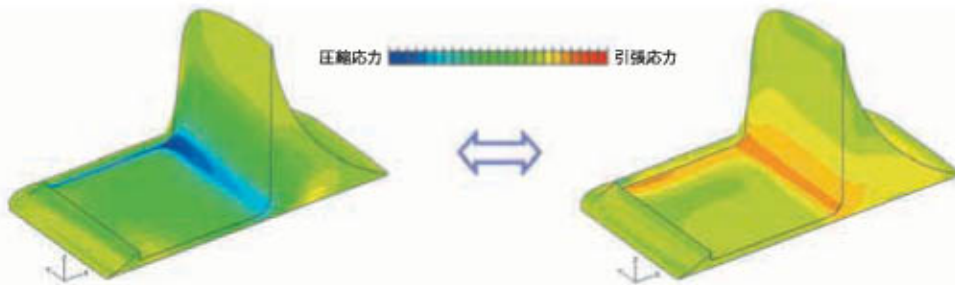
最後に、計算で求めた非線形ひずみ範囲から、第5図に示すS-N線図によって疲労寿命を推定することができる。なお、鉛フリーはんだの熱疲労寿命推定では、非線形ひずみ範囲に代わり、非線形ひずみ範囲に最大応力を乗じた値や、応力vs.ひずみ履歴のヒステリシス面積などのひずみエネルギーによる寿命推定^{*1)} などの鉛フリーはんだに適した損傷評価^{*2)} が報告されている。

参考文献

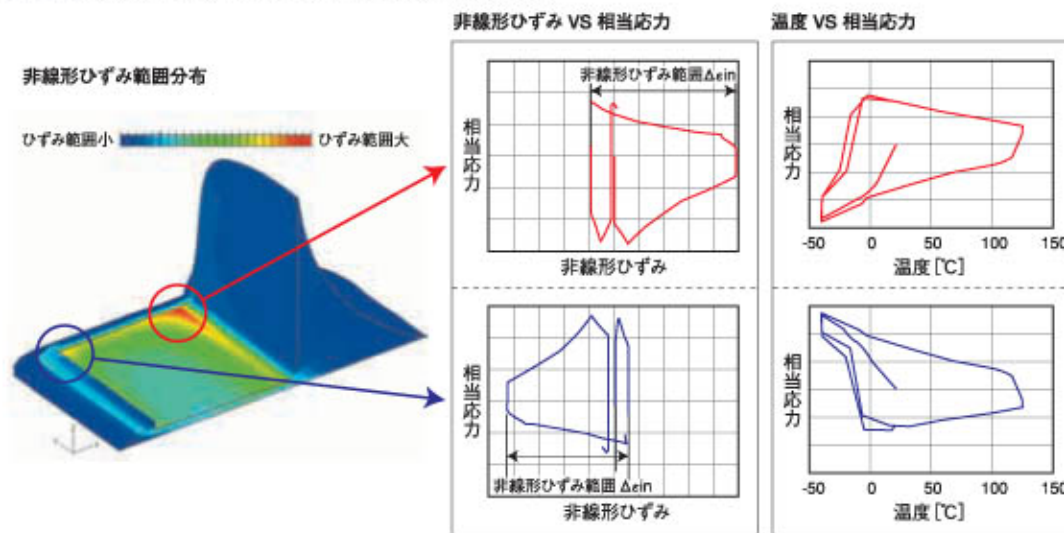
*1) 山本ほか：材料、Vol.44, No503, pp1080-1085

*2) 石橋ほか：日本材料学会第53期学術講演論文集、pp427-428

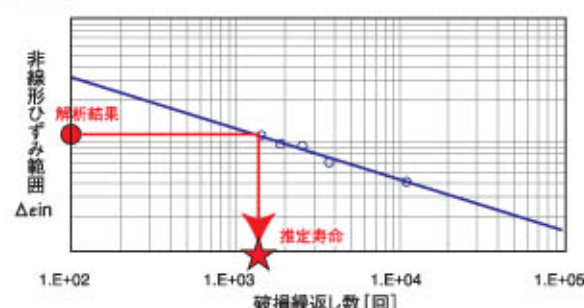
第3図 最低温度および最高温度での主応力分布図



第4図 非線形ひずみ範囲分布図と応力ひずみ履歴ヒステリシス



第5図 Coffin-Manson則による寿命推定例



B-2 はんだの物性採取試験技術

熱粘弾塑性解析に必要なはんだ物性である弾塑性構成則とクリープ構成則の採取試験方法と、疲労寿命推定に必要な低サイクル疲労試験方法を紹介する。

弾塑性構成則は温度制御下での引張試験結果から求められ、従来から行われてきた金属材料の引張試験と同様なサイズの試験片を使用する方法が、JIS Z 2241を参考として材料学会標準 (JSMS-SD-2-00: はんだの引張試験法標準) として提案されている。クリープ構成則は温度制御下での定荷重負荷試験引張クリープ試験から求められ、材料学会標準ではJIS Z 2271,1991を参考に、低融点、軟金属であるはんだに適用した試験方法が材料学会標準 (JSMS-SD-8-04: はんだのクリープ試験法標準) として提案されている。本稿の応力解析に用いた材料物性採取試験にはこれらの試験方法を用いた。

低サイクル疲労試験は、材料学会標準 (JSMS-SD-9-04: はんだのクリープ疲労試験法標準) で提案されている試験方法に準拠し、さらに伸び計取付け方法 (写真2) を工夫することによって高温かつ大ひずみ範囲での試験片座屈を防止し、高融点比 (試験温度/融点=0.8)、大ひずみ範囲 ($\Delta \epsilon = 3\%$)、低ひずみ速度 (0.01%/sec) の試験実績を有している (第6図に、低サイクル疲労試験の応力vs.ひずみ履歴例を示す)。

写真2 疲労試験の状況

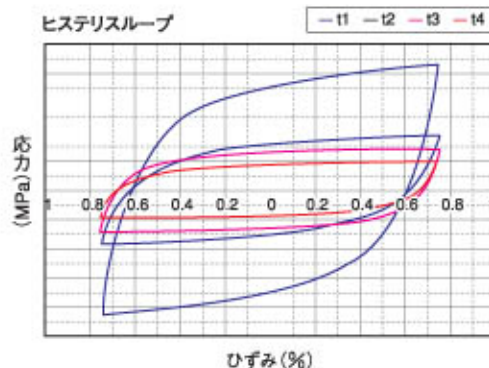


以下に、本稿の計算に用いたはんだの物性と温度領域の一覧を示す。

- ・はんだ材料: Sn-3.0Ag-0.5Cu
- ・弾性特性: $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$
- ・応力-ひずみ特性: $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon = 2\%/sec$
- ・クリープ特性: $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon = 0.1\%/hr$ 前後
- ・線膨張係数: $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$
- ・疲労特性: 三角波、R.T、 $N_f = 1千 \sim 1万$ サイクル

また別稿*3)にて紹介しているように、凝固組織であるはんだ接合部の結晶組織に類似した析出層がえられるミニチュア材試験技術の開発も進めている。

第6図 疲労試験結果例 (応力ひずみ履歴ヒステリシス)



B-3 冷熱サイクル試験

冷熱サイクル試験では、所定の繰返し数終了後に接合部の電気抵抗や断面組織観察を行うことが一般的であるが、この方法では損傷が生じた繰返し数を詳細に把握することは困難である。そこで、温度サイクル試験器 (写真3) に電気抵抗変動データ収集システムを組み合わせることで、冷熱サイクル試験中にリアルタイムで接合部の電気抵抗変化をモニタリングし、き裂の発生・進展などの損

傷状況を詳細に把握できる試験システムを開発した。

共晶はんだと鉛フリーはんだ (Sn-3Ag-0.5Cu) を使ったBGA (Ball Grid Array) 接合部を冷熱サイクル試験 ($-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 、1hr/サイクル、初期電流設定値10mA) した例では、共晶はんだ接合部に1700サイクルで電気抵抗の急激な上昇が計測された (第7図)。これは接合部でき裂の急激な進展など電気抵抗を上昇させる損傷劣化が生じた

参考文献

*3) 本誌A

ことによるものと推測される。一方、鉛フリーはんだ接合部では2000サイクル負荷でも電気抵抗の急激な変化は計測されなかった。

はんだ接合部の断面組織観察結果を写真4に示した。共晶はんだでは2000サイクルでき裂の大き

な進展が認められるが、一方、鉛フリーはんだでは2000サイクルでも大きなき裂は認められず、電気抵抗モニタリング結果から推定される損傷劣化とはほぼ一致する傾向がえられた。

写真3 結露試験機能付き温度サイクル試験器



第7図 冷熱サイクルによる電子部品の劣化挙動の例

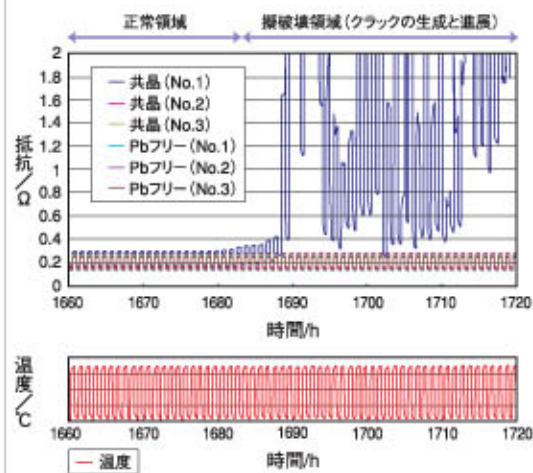
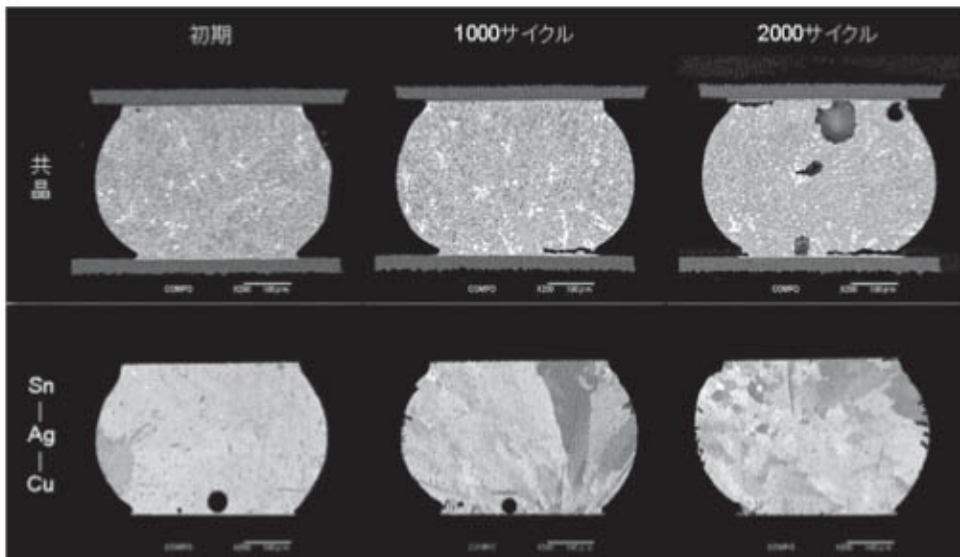


写真4 BGAはんだ接合部の断面



鉛フリーはんだへの置き換えは、共晶はんだ代替材料から高温はんだ代替材料へと、今後さらに適用が拡大しており、本稿で紹介した技術がその一助となれば幸いである。

(共著：技術本部 エンジニアリングメカニクス事業部 解析技術室 宮垣亜希／技術本部 エレクトロニクス事業部 技術部 主席研究員 鈴木康平／技術本部 エレクトロニクス事業部 技術部 戸塚裕文)