電子デバイスはんだ接合部の熱疲労強度における 解析・実験ハイブリッド評価* (第 2 報, 機械的疲労試験による評価)

于 強^{*1}, 白鳥正樹^{*1}, 金子誠史^{*2}
石原達也^{*3}, 王樹波^{*3}

Analytical and Experimental Hybrid Study on Thermal Fatigue Strength of Electronic Solder Joints (2nd Report, Evaluation by Isothermal Mechanical Fatigue Tests)

Qiang YU, Masaki SHIRATORI, Seiji KANEKO,
Tatsuya ISHIHARA and Shubo WANG

An isothermal mechanical fatigue test method and fatigue testing equipment were developed to investigate the low cycle fatigue strength of Sn-Pb eutectic solder joints. Based upon the results of finite element analysis, it is found that the rate of inelastic strain components (plastic strain and creep strain) in the solder joints can be accurately controlled by the displacement rate of the linear-actuator of the test equipment. The isothermal mechanical fatigue tests were carried out by controlling the displacement at a very high displacement rate, and a very low displacement rate, respectively; only plastic strain was generated in the solder joints at the high displacement rate, and only creep strain at the low rate. It is found that the low cycle fatigue life of Sn-Pb eutectic solder joints is not greatly affected by the ratio of inelastic components. Therefore, it can be said that the low cycle fatigue life can be estimated from the equivalent inelastic strain range, and the relationship of the cycles to failure and the strain range follows Coffin-Manson's law. In comparison of the mechanical fatigue strength results with the results of the cyclic thermal tests, it was found that the mechanical fatigue test method can be used as a good accelerated test method for the thermal fatigue strength of Sn-Pb eutectic solder joints.

Key Words: Microelectronic Solder Joint, Thermal Fatigue Strength, Mechanical Fatigue Test, Low Cycle Fatigue, Finite Element Method, Accelerated Test, Strain Rate

1. はじめに

Sn-Pb 共晶はんだ材料は室温においても顕著なクリープ特性を有するため、熱サイクル負荷を受けるとき、はんだ接合部に繰返して生じる非線形ひずみによって低サイクル疲労が発生する。共晶はんだの熱サイクル疲労強度評価法に関して Coffin-Manson 則、修正 Coffin-Manson 則、あるいはひずみレンジ分割法、ひずみエネルギー分割法などが提案されてきた^{(1)~(4)}。それぞれの強度則の相違ははんだ接合部の応力・ひずみの評価方法によるもの大きいと考えられる。例えば応力・ひずみ評価解析においてははんだ材料の時間依存性(クリープ特性)を正確に考慮していなければ、周波数などの影響を考慮した強度評価則を用いてはんだの熱サイクル疲労寿命を説明する必要がある。また、はんだ材料の温度依存性を考慮した解析を

行わなければ、平均温度あるいは最高保持温度などの影響を考慮した強度評価則を用いてはんだの熱サイクル疲労寿命を評価しなければならない。

著者らは本研究の第 1 報においてははんだ材料の特性(降伏応力、クリープ特性など)の温度依存性、温度変化時間および温度保持時間において生じるクリープ挙動を考慮した応力・ひずみ評価を正確に行うことによって、修正 Coffin-Manson 則ではなく、次式のような Coffin-Manson 則によつてはんだ接合部の低サイクル熱疲労強度を評価することができるとの結論を得た⁽⁵⁾。

$$N_f = 1/2(\Delta\epsilon_{eqin}/\epsilon_0)^n \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\Delta\epsilon_{eqin}$ は温度サイクルの周波数と試験温度などの影響はすべて考慮した応力・ひずみ解析から得られたはんだ接合部ひずみ集中部に生じた相当非線形ひずみ振幅である。

はんだ接合部の熱疲労強度について検討するとき、直接に熱衝撃試験機を用いて熱サイクル試験を行って、強度評価を行うことが考えられる。しかし、熱衝撃試験機では高温と低温の保持温度を比較的正確に制

* 原稿受付 1997 年 2 月 19 日。

^{*1} 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台)。

^{*2} 横浜国立大学大学院 [現: 京セラ(株)]。

^{*3} 横浜国立大学大学院。

御することができるものの、高温から低温へ、低温から高温への温度変化時間を制御することが難しい。また、はんだ接合部の構造と形状が決まると、異なる疲労寿命の試験を行うために、温度レンジを変えなければならない。コンプレッサが低温源になる熱衝撃試験機の低温側の最低温度は約 -60°C までであるため、大きい温度レンジの熱サイクル試験を行うとき、しばしば高温側の温度を 125°C ~ 150°C まで設定することがある。しかし、共晶はんだの融点は 183°C で、一般の使用温度は 20°C ~ 80°C であることを考えると、上記のような熱サイクル試験条件の妥当性について考え直す必要がある。

熱サイクル試験ははんだ接合部の熱疲労強度の加速試験法として利用されているが、はんだ接合部の実際使用条件のシミュレーション試験として使われることは少ない。これは、実験使用条件ではんだ接合部の疲労寿命は最低 10^4 サイクル以上となるように設計される場合が多く、温度サイクル試験の1サイクルに要する時間は短くても約20分であるため、 10^4 サイクルの試験を行うためには多大な労力と時間が必要とされることによる。

近年になって、熱疲労試験の代用として、等温機械疲労試験法が提案された⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし数百ミクロンのマイクロはんだ接合構造の強度信頼性評価を行うためには、最低0.1ミクロンの変位制御精度を有するマイクロ構造の強度評価試験機が必要とされている。この精度を満足するためには従来の強度試験機の技術だけでは難しい。また、機械的疲労試験と熱サイクル疲労試験の相関関係についてあまり論理的に議論されていない。温度サイクル負荷を受けるはんだ接合部に生じる繰返し非線形ひずみの成分(クリープひずみ ε_{cc} と塑性ひずみ ε_{pp})の比が温度変化速度などに影響されるが、基本的に ε_{cc} 成分に占められている。しかし、機械的疲労試験を受けるはんだ接合部に生じる非線形ひずみにはほとんど ε_{pp} 成分が占められる。一般的な高温材料の低サイクル疲労強度は非線形ひずみの成分に大きく影響されるものが多く、 $\Delta\varepsilon_{cc}$ と $\Delta\varepsilon_{pp}$ による低サイクル疲労強度をそれぞれ評価しておかなければならない。しかし、共晶はんだ接合部の $\Delta\varepsilon_{cc}$ と $\Delta\varepsilon_{pp}$ による低サイクル疲労強度について正確に検討された研究はほとんどない。

本研究の前報において、はんだ材料の特性(降伏応力、クリープ特性など)の温度依存性などを考慮した応力・ひずみ評価から得られた非線形ひずみ幅を用いて、熱サイクルの平均温度などに関係なく統一した熱疲労強度評価則によってはんだ接合部の低サイクル熱

疲労強度を評価することができるとの結論が得られた。この結論は同時に一定温度においてはんだ接合部に機械的繰返し負荷を与え、熱サイクル負荷を受けるはんだ接合部に生じる繰返し非線形ひずみをシミュレートすることによって、はんだ接合部の熱疲労強度を評価できると示唆している。本報では、共晶はんだ接合部の $\Delta\varepsilon_{cc}$ と $\Delta\varepsilon_{pp}$ による低サイクル疲労強度を調べるために、はんだ接合部に生じるひずみ速度および非線形ひずみ成分の比を正確に制御できる機械的疲労試験法(ひずみ成分分割法)を提案した。また、マイクロはんだ接合部の機械的疲労試験を行うために、マイクロ構造の疲労試験機を開発した。開発した試験機を用いてはんだ接合部の変位制御形の疲労試験を行い、異なるひずみ速度で行われた試験で、はんだ接合部に生じる非線形ひずみの成分を制御し、その実験結果を用いてはんだ接合部の疲労寿命に及ぼすひずみ成分の影響を明らかにし、繰返し塑性ひずみと繰返しクリープひずみによってはんだ接合部に与えられるダメージの特性を明らかにすることを目的とした。さらに、機械的疲労試験と熱サイクル疲労試験の相関関係について検討し、熱サイクル疲労試験の加速試験として機械的疲労試験の妥当性について確認した。

2. 機械的疲労試験機および試験法の開発

2・1 試験機 機械的加速試験の特徴として以下の点を挙げることができる。

(1) 熱サイクル試験より非常に幅広い試験速度(試験時間)で試験を行うことができる。

(2) はんだ接合部に与えるひずみ速度は正確に幅広く制御することができる。

(3) ひずみ速度を正確に制御することによってはんだ接合部に生じる非線形ひずみ成分の比を正確にコントロールすることができ、各ひずみ成分(ε_{cc} , ε_{pp})によってはんだ接合部に与えるダメージの相違を調べることができる。

(4) 一定温度下においてはんだ接合部に任意のひずみレンジを与えることができる。それによって熱サイクル試験で与えることができない大きい、または小さいひずみレンジでの試験結果(疲労寿命)を得ることができる。

マイクロ構造の疲労試験は荷重制御形試験、および変位制御形試験の2種類に大きく分けることができる。荷重制御は基本的にロードセルの精度に依存すると考えられる。幸いにしてフルレンジの1/5 000まで正確な計測のできるロードセルが開発され、市販され

ている。しかし、電子デバイスのはんだ接合部の疲労破壊はパッケージと基板の間に生じる線膨張のミスマッチによるもので、はんだ接合部が受ける負荷は強制変位モードに近い。そのため、はんだ接合部の熱疲労強度のシミュレーション試験を行うとき、荷重制御より変位制御により行われなければならない。しかし電子デバイス部品とはんだ接合部の小形化のために、はんだ接合部の変位制御形の試験を行う場合は、変位ストロークをしばしば10ミクロン～数十ミクロンに設定することがある。そのため変位精度として0.5ミクロン以上の制御が必要とされる。

本研究では、はんだ接合部の変位制御形の疲労試験をより正確に行える試験機を開発した。図1に試験機の外観と基本的性能を示す。試験機に接続された制御盤(操作パネル)で試験モード、変位速度、変位振幅、疲労試験の最大サイクル数などの設定を行う。試験時はワークホルダを固定するテーブルが、試験機本体のリニアアクチュエータにより左右方向に往復運動させる。変位制御の場合は、本体に設置された変位計で最大・最小変位量を計測する。試験片は熱サイクル試験

と同じものを用いた。接着剤で試験片のパッケージ上部がチャックに、またプリント基板下部がワークホルダにそれぞれ接着固定される。

既に述べたように、マイクロはんだ接合部の変位制御形疲労試験では強制変位のストロークは非常に小さいので、その変位量の正確な制御および計測は疲労試験の結果の信頼性に対して重要なことである。また、試験機全体の変位発生部分の制御精度が十分であっても、試験片周囲の構造の弾性変形の試験結果に対する影響は無視できない。したがって、実際直接に試験片に与える変位の出力としてアクチュエータの制御および計測は不十分である。そのため、本試験機では、試験片に与える変位量は直接に試験片チャック間の相対変位を計測したものとする。計測はレーザ変位計を用いて行われた。ここで用いたレーザ変位計は東京精密製であり、その変位計測精度は0.01 μm である。マイクロはんだ接合部の寸法は非常に小さいため、わずかな負荷でもはんだ接合の降伏および破断を招くことになる。そのために、試験片のグリップング方法は試験結果の信頼性を左右する要因の一つとして考慮する必要がある。ここでは、グリップングによって試験片に与えるグリップング負荷を避けるために、特別なグリップングデバイスを設計し、試験片を固定するために適用した。

2.2 機械的疲労試験における非線形ひずみ成分分割試験法

ここで述べる機械的疲労試験は熱サイクル試験のシミュレーション試験としての性格を有するため、すべての試験は変位制御形で行われた。試験片に与える変位量は、温度負荷を受けた場合のパッケージとプリント基板の熱膨張のミスマッチの差を概算することで求めた。また与える変位波形は、ひずみ速度を一定に制御するために、三角波を使用することとした。

機械的疲労試験のほとんどはサイクル周波数を一定にして行われるものである。しかし、同じ周波数で異なるひずみ振幅の試験を行うとき、試験片に生じるひずみ速度が変わってしまうことが考えられる。例えば、0.1 Hz でひずみ振幅0.1%と1.0%の機械的疲労試験を行う場合は、0.1%の試験片のひずみ速度は $2.0 \times 10^{-4}/\text{s}$ となるが、1.0%の試験片のひずみ速度は $2.0 \times 10^{-3}/\text{s}$ になる。このひずみ速度の違いは強度試験結果に対するひずみ速度の影響の正確な把握を妨げることが考えられる。

機械的疲労試験により、はんだ接合部の強度に対するひずみ速度の影響を調べるために、本研究では一定周波数ではなく、一定ひずみ速度で試験を行うことと

Fig. 1 Developed isothermal mechanical fatigue test equipment

した。また、任意のひずみ速度で試験可能という機械的疲労試験のもう一つの特徴を利用して、著者らははんだ接合部に生じる非線形ひずみ成分の割合(塑性ひずみとクリープひずみの比)はひずみ速度に依存する点に着目し、非線形ひずみ成分の割合を制御して行う試験方法を提案した。試験で用いる試験速度は試験片に与える変位量と、後述する応力解析から求めた相当非線形ひずみ範囲の関係から、試験片に生じる非線形ひずみが一定になるように算出することができる。

はんだ材のクリープ構成式を Norton 則で記述されるものと仮定すると、各温度における最大クリープひずみ速度は、はんだ接合部に生じる応力が降伏応力 $\sigma_Y^{(9)}$ は達したとき、次のように求めることができる。

$$\dot{\epsilon}_{cmax} = \epsilon_0(\sigma_Y)^n \exp(-Q/RT) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\sigma_Y = (81.54 - 0.18325 \times T)$$

上式におけるクリープ定数 ϵ_0 とクリープ硬化指数 n について、向井らの結果から各係数は $\epsilon_0 = 3.29 \times 10^{11} [1/h]$, $Q/R = 13180.0$, $n = 5.66 \times 10^{-0.00288(T-273)}$ と求められた⁽⁸⁾。図2に示すように、全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_T$ を塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ とクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ の和として考えると、最大クリープ速度 $\dot{\epsilon}_{cmax}$ と比較して全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_T$ が小さければはんだ材は降伏応力に達しないため、塑性ひずみは生じない。したがって、はんだ接合部における全ひずみ速度を、最大クリープひずみ速度より小になるように設定して機械的疲労試験を行うことで、はんだ接合部に生じる非線形ひずみ成分をすべてクリープひずみとして扱うことが可能になる。また、はんだ接合部に生じる非線形ひずみ成分を塑性ひずみとして扱うためには、次のような考え方を適用すればよい。

全ひずみ速度を最大クリープひずみ速度より大きい

Fig.2 Relation between the ratio of inelastic strain components and total strain rate

とした場合、はんだ材は降伏応力に達するため塑性ひずみが生じる。クリープひずみを非線形ひずみ成分中の5%に留めるには、全ひずみ速度を

$$\dot{\epsilon}_T = \dot{\epsilon}_{cmax} \times (100/5) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

となるように設定して、機械的疲労試験を行えばよい。機械的疲労試験は任意の試験速度で試験が可能のため、以上の考え方を適用することではんだ接合部における非線形ひずみの成分を制御することができる。本研究では常温において図2に示す0.4%/sと0.003%/sの2種類のひずみ速度での機械的疲労試験を行い、疲労強度に対するひずみ速度とひずみ成分の影響を調べた。

J-バンド形リード部品について、機械的荷重を受けるはんだ接合部の応力-ひずみ解析を行い、ひずみ集中点の解析結果を図3に示す。解析における境界条件はパッケージ上部を拘束し、プリント基板下部に図中の左右方向に強制変位を与えるものである。与える強制変位の波形は三角波である。すでに説明したように、ひずみ速度が大きい場合、はんだ接合部に生じる非線形ひずみ成分は塑性ひずみが支配的となる。一方、ひずみ速度が小さい場合、接合部に生じる応力は

(a) Analytical model of J-bend type solder joint

(b) Analytical results

Fig.3 Analytical results for isothermal fatigue tests

降伏応力に達しないため、非線形ひずみ成分のすべてがクリープひずみとなる。

図4に示すのは機械的疲労試験で使用する変位量-相当非線形ひずみ幅の関係である。J-ベンド形とガルウィング形リードとともに、それぞれ弾塑性解析と弾塑性・クリープ解析の結果がほぼ一致していることがわかる。

3. 疲労強度試験結果

ここでは室温(20°C)において、図2に示した2種類のひずみ速度(0.4%/s, 0.003%/s)による機械的疲労試験結果を用いて、塑性ひずみとクリープひずみが疲労強度に及ぼす影響について考察した。図2に示すようにはんだ接合部に生じるひずみ速度が約0.4%/sである場合、はんだ接合部で生じる非線形ひずみは塑性ひずみ成分のみであり、ひずみ速度が約0.003%/sである場合ではクリープひずみのみが生じる。図5にそれぞれのひずみ速度で行われた実験の結果を示す。両

Fig. 4 Relation of displacement and eq. inelastic strain range

Fig. 5 Fatigue strength results of isothermal and thermal fatigue test

者の結果を非線形ひずみ幅が同じ場合において比較すると、繰返しクリープひずみ $\Delta\epsilon_{cc}$ による疲労寿命と繰返し塑性ひずみ $\Delta\epsilon_{pp}$ による疲労寿命とで、大きな相違が生じていないことが分かる。また、すべての結果はほぼ同一直線で近似できる。したがって、はんだ接合部に生じる非線形ひずみ幅を用いてはんだ接合部の疲労強度評価を行うことで、Coffin-Manson 則に代表される非線形ひずみ振幅と疲労寿命のべき乗則が成立することがわかる。また、J-ベンド形リードとガルウィング形リードにおける実験結果を比較すると、おおむね両者の結果は同一直線で近似できるものと思われる。したがってこの結果はき裂発生源の非線形ひずみ幅で強度評価を行う場合、はんだ接合部形状は疲労寿命評価則に対してほとんど影響しないことを意味している。

4. はんだ接合部の疲労強度評価法

図6に機械的疲労試験の結果とともに熱サイクル疲労試験の結果も示した。各ひずみ速度での機械的疲労強度と熱疲労強度は良く一致していることが示されている。このことは、すべての強度試験結果を1本の寿命曲線で近似することができることを意味している。すなわち、正確にはんだ接合部に生じる非線形ひずみを評価することができれば、はんだ接合部に生じる非線形相当ひずみ幅を用いることによって機械的疲労試験の結果から熱サイクル疲労試験の寿命を直接に予測することができるとの結論が得られた。

今まで得られた疲労強度の結果について、はんだ接合部の疲労寿命とはんだ接合部に生じる非線形相当ひずみ振幅の関係を次式のように表すことができる。

$$N_f = 1/2(\Delta\epsilon_{epin}/\epsilon_0)^n \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\epsilon_{epin}$ ははんだ接合に生じる非線形相当ひ

Fig. 6 Fatigue strength results of isothermal and thermal fatigue tests

ずみの振幅であり、 ε_0 と n ははんだ接合部の疲労強度特性である。しかし、はんだ接合部に生じる非線形ひずみは場合によって要素分割に影響されることがありえる。そのため有限要素法解析から得られた最大ひずみ幅等を用いた Coffin-Manson 則に基づいて、はんだ接合部の疲労寿命の絶対値を必ずしも正確に評価できないことがある。しかし、Coffin-Manson 則に基づいてはんだ接合部の加速強度試験の加速係数 N_{f1}/N_{f2} は次式のように表すことができる。

$$N_{f1}/N_{f2} = (\Delta\varepsilon_{epin1}/\Delta\varepsilon_{epin2})^n \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 N_{f1} と N_{f2} はそれぞれ加速試験(ケース1: 125 $\sim$ -40 $^{\circ}$ C)と使用条件(ケース2: 65 $\sim$ 20 $^{\circ}$ C)の疲労寿命であり、 N_{f2}/N_{f1} を加速試験の加速係数とする。 $\Delta\varepsilon_{epin1}$ と $\Delta\varepsilon_{epin2}$ はそれぞれ加速試験と使用条件において生じる最大非線形相当ひずみ幅である。 $\Delta\varepsilon_{epin1}$ と $\Delta\varepsilon_{epin2}$ はそれぞれの値は要素分割に影響されることがありえるが、 $\Delta\varepsilon_{epin1}/\Delta\varepsilon_{epin2}$ はほとんど要素分割密度に影響されないことが確認されている。

また、図6に示された疲労強度試験結果から、強度線図の傾きを表す n は約-2.0 になっている。したがって、疲労強度試験から得られる比較的正確な n と有限要素法解析から得られる正確な $\Delta\varepsilon_{epin1}/\Delta\varepsilon_{epin2}$ によって、ほとんどののはんだ接合部の加速試験の加速係数 N_{f2}/N_{f1} を正確に評価することができることがわかった。

5. 結 論

Sn-Pb 共晶はんだ接合部の低サイクル疲労破壊のメカニズムの解明と熱疲労強度評価の迅速化を図るために、機械的疲労試験における非線形ひずみ成分の分割法を提案した。マイクロはんだ接合部の機械的疲労試験を行うために、マイクロ構造の疲労試験機を開発した。任意の速度で試験可能な機械的疲労試験の特徴を利用して、ガルウィング形、J-ベンド形リードのはんだ接合部に塑性ひずみのみが生じる疲労試験とクリープひずみのみが生じる疲労試験を行った。応力・ひ

ずみ解析と実験の結果から次のような結論が得られた。

(1) 共晶はんだ接合部の低サイクル疲労強度はほとんどひずみ速度あるいは非線形ひずみ成分(塑性ひずみとクリープひずみ)に影響されず、全非線形ひずみ振幅を用いて Coffin-Manson 則で整理することができる。

(2) はんだ接合部のき裂発生点の非線形ひずみ振幅で強度評価を行えば、はんだ接合部形状は疲労寿命評価則に対して殆ど影響しない。

(3) 機械的疲労強度と熱サイクル疲労強度とがよく一致し、正確にはんだ接合部に生じる非線形ひずみを評価することができれば、はんだ接合部に生じる非線形相当ひずみ振幅を用いることによって機械的疲労試験の結果で熱サイクル疲労試験の結果を直接に評価できる。

最後に、本研究遂行に際して試験片等をご提供いただいた東芝研究開発センターの川上崇氏、向井稔氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Solomon, H. D., *IEEE Trans.*, CHMT-9(4), (1986), 423-432.
- (2) Engelmaier, W., *IEEE Trans.*, CHMT-6(3), (1983), 232-237.
- (3) 種田元治・奥康浩・上西研, 機論, 58-549, A (1992), 669-675.
- (4) Dasgupta, A., Oyan, C., Baker, D. and Pecht, M., *Trans. ASME*, 114, (1992), 152-160.
- (5) 于強・白鳥正樹・ほか3名, 機論投稿中.
- (6) 北野誠・河合末男・清水一男, 機論, 56-525, A (1990), 1140-1147.
- (7) Uegai, Y., Tani, S., Inoue, A. and Yoshioka, S., *Advances in Electronic Packaging*, EEP-vol. 4-1 (1993), 493-498, ASME.
- (8) 向井稔・ほか3名, IC パッケージ半田接合部の弾クリープ解と疲労寿命, 日本機械学会 [No. 910-79] 第4回計算力学講演論文集, (1991-11), 223-224.
- (9) Pan, T-Y., "Thermal Cycling Induced Plastic Deformation in Solder Joints—part I: Accumulated Deformation in Surface Mount Joints," *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, 113 (1991), 8-15.