電子部品の微細はんだ接続強度に及ぼす垂直応力の影響*

土 居 博 昭^{*1}, 初 田 俊 雄^{*1}
河 野 賢 哉^{*1}, 菊 地 広^{*2}Influence of Normal Stress on Micro Solder Joint
Strength in Electronic ComponentsHiroaki DOI^{*3}, Toshio HATSUDA,
Kenya KAWANO, and Hiroshi KIKUCHI^{*3} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

In flip-chip packages, bending deformation of the chip and substrates causes normal stress in the solder joints. In this paper, we study the influence of such normal stress on the flip-chip joint strength. Static loading tests and cyclic bending tests were conducted on flip-chip packages. The static loading test showed that long term loading on the flip-chip joints causes debonding at the interface between the solder bumps and the metal pads on the LSI chips. The cyclic loading test showed that such debonding also occurs under cyclic loading, and that the strain causing such a failure mode is much less than that causing solder fatigue fracture. The relation between the number of cycles to the failure of the debonding at the interface and the static loading test data is investigated, taking stress relaxation caused by creep strain into consideration.

Key Words: Ductile Fracture, Creep, Delamination, Stress Relaxation, Solder, Flip-Chip, LSI chip, Ball Limiting Metallurgy, Interface

1. 結 言

微細なはんだバンプで LSI チップを基板に接続するフリップチップ法は、高密度な接続が可能で生産性も優れているため電子部品において広く用いられている。しかしこの接続法では、チップや基板に変形が生じる場合にははんだにひずみが生じる。一般的に基板はチップより線膨張係数が大きいため温度変化によってはんだにせん断ひずみが生じる。このせん断ひずみによる熱疲労破壊を防止するため、はんだ疲労強度評価に関する研究が数多く行われてきた^{(1)~(3)}。

しかし、フリップチップ法の実装形態が変化し、はんだの厚さ方向に主として垂直方向の応力が生じる場合がある。例えば、チップと基板間を樹脂で封止するアンダーフィル法では樹脂とはんだの線膨張係数差によりはんだに垂直方向の応力が働く。また、実装の高密度化のため多層薄膜配線層を形成した基板を用い

る場合には、温度変化に伴い基板に反りが生じるが、この反りではんだに垂直方向の応力が発生する。このためはんだに垂直方向の応力が生じる場合の強度評価が必要となるが、従来のフリップチップ法のはんだ強度の研究ではこの応力の作用については必ずしも十分な検討が行われていない。

このため本研究でははんだに垂直方向の応力が作用し続ける場合の損傷形態を調べ、その損傷形態がはんだの疲労き裂進展ではなく、はんだとはんだが接続するチップ上の BLM (Ball Limiting Metallurgy) と呼ばれる金属パターンとの界面ではなく離れることを示した。またこの界面はく離はチップや基板が繰り返し曲げを受ける場合に生じる垂直応力によっても発生することを示した。さらにこのはく離に対する寿命評価法を検討し、はく離寿命がクリープによる応力緩和を考慮した応力の作用時間と関係することを示した。

2. 試験方法

はんだの厚さ方向に負荷される垂直応力が定常の場合と、周期的に変動する場合のはんだ接合部の破壊挙動を評価するために、静的負荷試験と繰り返し負荷試験を行った。

* 原稿受付 2001 年 5 月 1 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} (株)日立製作所デバイス開発センター(〒198-8512 青梅市新町 6-16-3)。

E-mail: doi@merl.hitachi.co.jp

(a) Specimen and load used in static loading test

(b) Specimen and load used in cyclic loading test

Fig.1 Schematic illustration of experimental setup

静的負荷試験に用いた試験片と負荷方法を図 1(a)に示す。試験片は LSI チップをはんだバンプで基板上の配線層に接続したものである。チップ寸法は $8.35 \times 8.35 \times 0.5$ (mm)、基板寸法は $10 \times 10 \times 1$ (mm) である。182 個のはんだバンプがチップ全面にほぼ均一に分布している。はんだはチップと基板上の円形の BLM によりのみ接続するため球形状となる。基板とチップの背面に接着した治具を介して一定荷重を負荷し続け、荷重と全はんだバンプが破断するまでの破断時間の関係を取得した。また、破面の電子顕微鏡観察と X 線分析により破壊位置を調査した。試験は 150°C と 20°C の温度で行った。静的負荷試験では材料の組み合わせの影響を見るために、はんだと BLM 材料として Pb-1.8Sn/Cu-BLM、Pb-1.8Sn/Ni-BLM、Pb-3.5Ag/Ni-BLM の 3 種類の組み合わせを用いた。なお、温度を 150°C 、はんだ/BLM 材料を Pb-1.8Sn/Cu-BLM とした試験では一方の治具に固定した渦電流式の変位計を用いてはんだのクリープ伸びの時間変化を測定した。

チップや基板の繰り返し曲げ変形ははんだ接続界面に垂直応力を生じるため、静的負荷試験の場合と同

様にはんだ/BLM 界面ではなく離が生じる可能性がある。このため、繰り返し負荷試験を行いのはんだの破壊モードを確認した。なお静的負荷試験では応力が保持されると同時に過大なひずみが生じるため、界面はく離が応力と過大なひずみのいずれに起因するのかは判断できない。一方、発生ひずみが小さく制限される繰り返し負荷試験でも界面はく離が生じるならば、界面はく離が応力に起因することが示唆されると思われる。

繰り返し負荷試験に用いた試験片と試験荷重を図 1(b)に示す。繰り返し負荷試験に用いた試験片は基板寸法が $30 \times 10 \times 1$ (mm)、はんだバンプ数が 596 個であるが、それ以外は静的負荷試験に用いた試験片と同じである。繰り返し負荷は基板に曲げ荷重を加えてチップ端部付近のはんだに垂直応力を作用させる方法を採用した。負荷波形は、荷重保持時間を引っ張り負荷側で t_H 、圧縮負荷側で t_L 、荷重の負荷及び除荷の時間を t_R とし、両振り曲げモーメント範囲を M とする台形波を用いた。この台形波を用い、 $M = 7.35 \times 10^{-2}$ N·m、 $t_R = 10$ s、 $t_H = t_L$ として、 t_H を 2~500 s まで変化した条件で試験を行い、引っ張り荷重保持時間と破断までの繰り返し数の関係を取得した。なお、この波形条件は、温度サイクル試験を模擬したものである。一般的に電子部品の起動停止の繰り返しによる温度変化は温度サイクル試験で模擬される。この試験では電子部品を温度の異なる 2 つの恒温槽に交互に入れ、一定時間保持するサイクルを数百から数千回繰り返す。その結果、電子部品にはほぼ台形波状の温度変化が生じる。このため、繰り返し負荷試験の負荷波形は台形波とし、 M は予備試験の結果から試験可能な繰り返し数で破断が生じる値に設定した。また、破面の電子顕微鏡観察と X 線分析により破壊位置を調査した。試験片のはんだと BLM 材料は Pb-1.8Sn と Cu の組み合わせのみを用い、温度は 150°C とした。はんだの破断は電気抵抗の変化で検出し、LSI の最外列のはんだの 10% が破断した時点破断とした。

3. 静的負荷試験の結果と検討

3.1 損傷形態 静的負荷試験においては、破断は全てはんだと BLM の接続界面付近で生じた。図 2 に Pb-1.8Sn/Cu-BLM 接続のチップ側破断面の電子顕微鏡写真を示す。これらの図で白い部分がはんだで、網目状に残っている。黒く見えるはんだディンプルの底に当たる部分を X 線分析すると BLM 材料の Cu が検出された。このディンプル底に対応するはんだ側の破面には Pb のみが検出される。図 2 の破面形状と X 線分析結果から推定した破面の断面構造を図 3 に示す。

Fig.2 SEM images of fracture surface of chip side (Pb-1.8%Sn/Cu-BLM)

Fig.3 Schematic illustration of cross section of fracture parts

図3は破壊分離した2つの部分を表し、下部分は図2の破面を含み上部分はこの破面に対向する破面を含む。このことからこの破壊は、はんだ中のSnとBLM材料のCuの接合により形成されたCu/Sn合金層と、この合金層の形成に伴い合金層に隣接するはんだ中のSn量が減少することにより形成されたPb層との間のはく離によることが分かった。図2では応力大きい(A)より応力が小さい(B)の方がはく離領域が広くなっ

Fig.4 SEM images of fracture surface of chip side

Fig.5 Rupture time vs. tensile stress at solder/BLM interface

ている。これは界面ではなく離が進行し、接着面積の減少による応力増加がはんだの引っ張り強度を超えた時点ではんだ内で破断が生じたことを示している。室温試験の破断面(C)は残存するはんだ量が多いものの同様なく離が進行していることを示している。

Pb-1.8Sn/Ni-BLM、Pb-3.5Ag/Ni-BLMのはんだとBLMの組み合わせの場合の試験結果も、強度は異なるもののPb-1.8Sn/Cu-BLMとほぼ同様の破壊モードを示した。図4にこれらの接続構造のチップ側の破断面を示す。いずれの破断面でもPb-1.8Sn/Cu-BLMの場合と同様にはんだディンプルの底でBLM材料のNiが検出され、はんだ/BLM界面ではなく離が生じていることが明らかとなった。なお、(b)では少量のはんだ

Fig.6 Creep strain rate in steady state

Fig.7 Geometry of a stress analysis model for a solder bump

が破面に細い網目状に残り通常のディンプルとは様相がやや異なる。しかしこの破面に対向する破面にははんだのディンプルが見られディンプル先端とこの網目模様に対応するため、この破面はディンプルと考えられる。以上の結果から、垂直応力下のはんだ/BLM 界面ではなく離現象は特別なはんだ/金属界面材料構成に固有な現象ではなく、汎用的はんだ材料と接合金属に広く生じる可能性のある現象と思われる。

3.2 破断寿命 図5に各はんだ/BLM 材料組み合わせのはんだの接続面における平均垂直応力と破断時間の関係を示す。150℃における Pb-1.8Sn/Cu-BLM 接続の破断時間 t_f (s)と応力 σ (MPa)の関係は近似的に式(1)で表される。この実験式は4.3節の検討で用いる。

$$t_f = 5.2 \times 10^8 \sigma^{-5.2} \quad \text{.....(1)}$$

3.3 はんだのクリープひずみ速度 4.3節で繰り返し負荷試験における応力緩和挙動を検討するため、はんだのクリープ特性を測定した。静的負荷試験において、測定したはんだ両端の伸びを負荷時間で割って破断までの平均的なクリープひずみ速度を得た。破断伸びは約 40 μm であった。150℃において Pb-1.8Sn はんだバンプに対して得られた結果を図6に示すが、クリープひずみ速度は式(2)で表された。

Table1 Material Properties

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Solder	13	0.36
Substrate	139	0.24
LSI	150	0.165
Circuit Layer	3.68	0.3

Fig.8 Stress-strain relation of solder (Pb-1.8Sn) and solder bumps

$$\dot{\epsilon}_c = K \sigma^{6.1} \quad \text{.....(2)}$$

ここで $K=1.1 \times 10^{-10}$ である。

4. 繰り返し負荷試験の結果と検討

4.1 応力解析による試験中のはんだ応力の推定 繰り返し負荷試験中のはんだバンプの応力を測定することは困難であるため、応力は解析により推定した。解析方法は、まず1個のはんだバンプの剛性評価を行い、次に各はんだをこの剛性を持つトラス要素でモデル化した繰り返し負荷試験モデルの解析を行うものである。はんだバンプ1個の弾塑性解析モデルの形状を図7に示す。図では形状の対称性から8分の1の部分モデル化しており、 $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0$ の各面は形状と変位についての対称面とした。解析モデルには3次元 20 節点ソリッド要素を使用した。要素分割モデルはXYZの3方向にほぼ均等寸法の5要素により分割を行い、要素数は125、節点数は756である。負荷ははんだ接続面に相当する解析モデルの面ABCをX、Y方向に変位拘束し、平面を保持しながらZ方向へ移動することにより与えた。この負荷による界面ABC内のZ方向平均垂直応力と、界面ABCの移動量をはんだの厚さの半分(0.05 mm)で割って得たはんだのZ方向平均ひずみの関係を求めた。解析に用いたはんだ

(a) Geometry of a stress analysis model

(b) Time vs. bending moment used in the stress analysis

Fig.9 Stress analysis model for a cyclic loading test specimen

Fig.10 Strain amplitude distribution in solder bump layer

の弾性係数を表 1 に示す。また、はんだの弾塑性域の応力ひずみ関係には図 8 に破線で示した Pb-18Sn の 150℃での繰返し応力ひずみ関係を用いた。この応力ひずみ関係は純 Pb と Pb-5Sn のデータ⁽⁴⁾から内挿して得た。非線形解析にはひずみ増分理論、降伏条件には Mises の降伏条件を用いた。図 8 には解析によって得たはんだバンプの接続界面における Z 方向平均垂直応力とはんだの Z 方向平均ひずみの関係を実線で示した。得られた見かけのはんだバンプのヤング率は 17 GPa となった。

Fig.11 Stress-strain relation of edge bump

繰返し負荷試験における試験片の弾塑性クリープ解析モデルと負荷条件を図 9 に示す。要素分割モデルは、要素数が 317、節点数が 359 である。はんだバンプは等間隔の 16 本のトラス要素でモデル化し、トラス要素と LSI 及び基板上の配線層とを接続する節点は滑節とした。はりの断面積は 16 本のはりの断面積の合計が実物の試験片の全はんだバンプの接合面積の合計の 2 分の 1 に一致するように設定した。解析モデルの他の部分には 2 次元 4 節点平面応力要素を用い、奥行き寸法は実物の試験片に一致させた。負荷条件は実験の両振り負荷波形の引っ張り荷重部分に対応し、曲げモーメント ($M/2$) を $3.68 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ とし荷重の立ち上がり時間 ($t_R/2$) を 5 s とした。はんだのトラス要素の弾塑性応力ひずみ関係には図 8 に実線で示したバンプ 1 個の解析で得た曲線を用い、クリープ挙動には実験式(2)を用いた。また、試験片の構成部材の弾性係数には表 1 の値を用いた。なお、LSI 材料の Si は弾性係数の異方性を持つため、解析には LSI の回路面の (100) 結晶面内の平均値を用いた。非線形解析にはひずみ増分理論、降伏条件には Mises の降伏条件を用いた。負荷完了時(図 9(b)の点 A)の各はんだバンプの位置に対するひずみを図 10 に示す。C 位置のチップ端のはんだに最大のひずみが生じた。このはんだの応力とひずみの関係を図 11 に示す。図では負荷完了時(点 A)に応力が最大になり、荷重保持時間中に応力緩和が生じている。負荷完了時点での応力 σ_0 は 6.3 MPa、弾性ひずみ ϵ_0 は 0.037 % となった。これらの値は以下の検討で使用する。なお、本試験が荷重制御試験であるにもかかわらず荷重保持時間中のチップ端のはんだバンプの応力が一定に保持されず応力緩和が生じるのは、このはんだバンプと基板や他のはんだバンプが荷重を並列に負担しているからである。

4.2 試験結果 表 2 に荷重保持時間等の試験条件と破断までの繰返し数を示す。破断した試験片

Table2 Cyclic loading test results

	t_H (s)	t_L (s)	t_R (s)	Number of cycles to failure
1	2	2	10	3500
2	10	10	10	2600
3	30	30	10	2000
4	60	1	5	2100
5	140	140	10	1820
6	590	590	10	1590

Fig.12 A fracture surface after cyclic loading test

でははんだの粒界でき裂を生じているものもあったが大部分は接続界面近くでき裂が進んでいた。図12にチップ側破断面の電子顕微鏡写真を示す。この破断面でもCuが検出された。はんだ側ではCuは検出されなかったことから、この破断もはんだ/BLM界面で生じたことが明らかとなった。

表2の界面はく離寿命とはんだのせん断疲労寿命の文献値を比較する。図13に類似のはんだのせん断疲労寿命曲線⁽²⁾⁽⁵⁾を示した。Pb-60Snや36Pb-62Sn-2Agのはんだについて棒状試験片に捻りと引っ張り圧縮、またはこれらを重畳した変形を繰り返し負荷した疲労試験で得た寿命が相当塑性ひずみ範囲を用いてほぼ一つの関係で整理できること⁽⁶⁾⁽⁷⁾、またPb-60Snはんだバンプの熱疲労試験と機械的疲労試験で得た寿命が塑性ひずみとクリープひずみから成る非線形相当ひずみ範囲によりほぼ一つの直線関係で整理できること⁽⁸⁾⁽⁹⁾が示されている。このため図13において、せん断ひずみ範囲は相当ひずみが等しくなるように垂直ひずみ範囲に換算した。図11の解析結果に表2の各試験寿命データの引っ張り負荷保持時間 t_H を適用し平均ひずみ振幅を求め、この値を2倍してはんだのひずみ範囲とした。このひずみ範囲と表2の

Fig.13 Comparison of number of cycles to failure of cyclic loading test and fatigue test

界面はく離寿命を対応させ、図13に丸印で記入した。図では垂直ひずみによる界面はく離はせん断疲労破壊に比べはるかに低ひずみで生じている。このため、はんだバンプに垂直応力が負荷される場合にははんだ疲労破壊が発生する以前に界面はく離が発生し、界面はく離が寿命を決める破壊モードとなることが分かる。

4.3 繰り返し負荷試験結果の検討 表2において破断繰り返し回数は保持時間の増加と共に減少する。このような荷重保持時間による寿命変化は荷重保持時間の短い加速試験結果から荷重保持時間の長い実稼動条件下の寿命を予測する場合に問題となる。ここではこの挙動を重点に寿命予測法を検討する。

繰り返し負荷試験で生じた損傷形態は静的負荷試験の損傷と同様であるため、この保持時間の増加による破断繰り返し回数の減少は静的負荷試験における破断時間データに関連していると考えられる。線形被害則を仮定し、繰り返し負荷試験の破断は試験中の応力 σ の作用時間 t が式(3)を満たした場合に生じると仮定する。

$$\int \frac{dt}{t_f(\sigma)} = 1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに $t_f(\sigma)$ は応力 σ が作用した場合の静的負荷試験ではんだの破断時間である。以下で、式(3)の左辺を被害と呼ぶことにする。

試験において損傷は負荷除荷過程と荷重保持過程で生じる。荷重保持過程での損傷は引っ張り荷重保持時間中に生じ、圧縮荷重では生じないと仮定する。保

保持時間 t_H 内での被害を図 11 に示した負荷終了時の応力 σ_o が一定に保たれたまま L の時間働き続けた場合の被害に等しいとして時間 L で表現すると L は式(3)を用いることにより次式で表される。

$$L = \int_0^{t_H} \frac{t_f(\sigma_o)}{t_f(\sigma)} dt \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

式(1)を用いて式(4)を書き直すと式(5)が得られる。

$$L = \int_0^{t_H} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{5.2} dt \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

後で述べるように実験より得たはんだのクリープひずみ速度を用いると、繰り返し負荷試験の破断寿命の予測値と実験値に差を生じる。この原因の考察を含めた検討を行うため、以下では 4.1 節の解析結果を適用して簡易寿命予測式を導く。

図 11 を用いて繰り返し負荷試験中のはんだの応力緩和挙動を検討する。荷重保持時間中のひずみと応力の関係は、チップ端のはんだバンプの応力緩和に伴いその内側のはんだバンプの塑性変形が増加するためにはわずかな非直線性が見られるが、ほぼ直線上を推移する。このため試験片全体のコンプライアンスに占めるチップ端のはんだバンプのコンプライアンスの比を一定値 C と見なし、 C を荷重保持開始直後のひずみと応力の関係から決めることにした。負荷完了時点 A 以後に生成するはんだのクリープひずみ ϵ_c ははんだの弾性ひずみの減少 $C\epsilon_c$ と同時にはんだ以外の接合部材のコンプライアンスの影響により接合部材の弾性ひずみの減少 $(1-C)\epsilon_c$ に費やされる。このため、はんだの見かけのヤング率を E 、負荷終了時の弾性ひずみを ϵ_o とすると保持時間中のはんだの応力は式(6)で表される。図 11 より式(6)で係数 C は 0.34 となった。また、 $E=17\text{ GPa}$ 、 $\epsilon_o=0.037\%$ である。

$$\sigma = E(\epsilon_o - C\epsilon_c) \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

保持時間中のクリープひずみ ϵ_c は式(2)へ式(6)を代入して式(7)で表される。

$$\dot{\epsilon}_c = K \{ E(\epsilon_o - C\epsilon_c) \}^{6.1} \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

式(7)を $t=0$ で $\epsilon_c=0$ の条件で積分すると式(8)が得られる。

$$E^{-5.1} \{ (\epsilon_o - C\epsilon_c)^{-5.1} - \epsilon_o^{-5.1} \} = 5.1 K E C t \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

さらに式(8)に式(6)、(9)を用いて式(10)が得られる。

$$\sigma_o = E\epsilon_o \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{5.1} = (5.1 K E C \sigma_o^{5.1} t + 1)^{-1} \quad \cdots \cdots (10)$$

式(5)は式(10)を代入して積分できるが、数値誤差を避けるために L が $\sigma_o^{5.1}$ に比例すると近似すると L は式(11)で表される。

$$\begin{aligned} L &= \int_0^{t_H} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{5.1} dt \\ &= \ln(5.1 K E C \sigma_o^{5.1} t_H + 1) / (5.1 K E C \sigma_o^{5.1}) \end{aligned} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここに、 $K=1.1 \times 10^{-10}$ 、 $E=17\text{ GPa}$ 、 $\sigma_o=6.3\text{ MPa}$ 、 $C=0.34$ である。

荷重負荷過程での損傷も便宜的に荷重保持過程での損傷時間 L と同様に、一定応力 σ_o による被害に換算した損傷時間 L_R で表すことにする。その結果、繰り返し負荷試験の破断繰り返し数は L と L_R を用いて式(12)で表される。 L_R は荷重保持時間 t_H が最も短い 2 s の繰り返し負荷試験のデータを用い、この実験寿命が式(12)の予測寿命に一致するように定めた結果 1 サイクル当たり 9 s となった。この損傷時間 L_R は荷重負荷過程での塑性とクリープの重畳した損傷に相当するが、その物理的意味を明らかにするには、本検討の上に更に広範囲な実験に基づく塑性とクリープ損傷評価の検討が必要であると思われる。この場合、破断繰り返し数は簡易寿命予測式(12)で表される。

$$N_f = \frac{t_f(\sigma_o)}{L + L_R} = \frac{t_f(\sigma_o)}{L + 9} \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

この簡易寿命予測式を用い、引っ張り荷重保持時間 t_H と破断までの繰り返し数の関係を予測し図 14 に示す。図には表 2 の実験結果も示した。引っ張り荷重保持時間の増加と共に破断繰り返し数が減少する傾向は予測結果と実験結果で一致した。しかし、予測寿命は実験値より短く、保持時間が長い場合には両者の結果にかなりの差を生じた。この差の原因として、寿命予測式(12)では考慮していない圧縮保持の影響、式(12)に用いたクリープひずみ速度の影響などの可能性が考えられる。

後者について以下に検討する。繰り返し負荷試験中のはんだには 0.1 %レベルの微小なクリープひずみが生じるが、寿命予測式(12)に用いたクリープひずみ

Fig. 14 Effect of tensile hold time on number of cycles to failure

速度は数十 % のクリープひずみが生じた静的負荷試験の測定値である。図 15 の実線は Frost 等による 100 °C のクリープ試験で得られた Pb-2Sn はんだのひずみとひずみ速度の関係を示す⁽¹⁰⁾。破線で示す外挿線から、負荷開始直後のひずみが小さい範囲でのクリープひずみ速度はひずみが 10 から 20 % の範囲でのクリープひずみ速度に比べ約 10 倍の値になることが予測される。また、本試験片のはんだの組成に近い Pb-5Sn に関しても、同様の傾向があるとの報告がある⁽¹¹⁾。はんだバンプも同様の特性を示し、繰り返し負荷試験中のクリープひずみ速度が静的負荷試験で測定された値より大きな値をとると仮定すれば、荷重保持過程ではんだバンプ応力が短時間で低減し損傷が予測より低下すると考えられる。そこでクリープひずみ速度を測定した平均的クリープ速度の 10 倍に採り図 14 に予測値を示した。測定値の 10 倍のクリープ速度を設定した場合に実験値とほぼ一致した。

はんだと BLM の接合界面のはく離寿命に関して、予測寿命は実験で得た寿命と定性的に一致したため、上記の検討結果から垂直応力の繰り返し負荷に対する界面損傷は応力の作用時間に依存していると考えられる。

5. 結 言

フリップチップ法の微細はんだバンプに垂直方向の応力が作用した場合の損傷形態と寿命を評価し以下の結論を得た。

Fig. 15 Creep strain rate vs. stain (Frost, et al)

- (1) 垂直応力が長時間作用するとはんだと BLM の界面に剥離を生じる。
- (2) 基板の繰り返し曲げ変形により垂直応力が繰り返し作用する場合にも界面剥離を生じ、この場合のひずみ範囲は疲労破壊を生じるせん断ひずみ範囲に比べはるかに小さい。
- (3) 静的負荷試験から得た応力と破断時間の関係から繰り返し負荷の場合の破断繰り返し数を推定し、定性的に実験値と一致する結果を得た。この結果から界面剥離挙動は主として界面の垂直応力の作用時間に依存すると言える。

文 献

- (1) Norris, K.C. and Landzberg, A.H., IBM J. Res. Develop., 13, (1969), 266-271.
- (2) Satoh, R., et al, IEEE Trans. CHMT, 14-1, (1991), 224-232.
- (3) Nir, N., et al, Trans. ASME, 113, (1991), 92-101.
- (4) 北野誠、学位論文(早稲田大学)、(1993).
- (5) Kitano, M., et al, Current Japanese Material Research, Vol.2, (1987), 235-250.
- (6) 北野誠・ほか 2 名、日立地方講演会、(1984-9)、19-21.
- (7) 吉岡純夫・ほか 3 名、材料、39-442、(1990)、908-913.
- (8) 于強、白鳥正樹、エレクトロニクス実装学会誌、1-4、(1998)、278-283.
- (9) Yu Q. and Shiratori M., ASME Advances in Electronic Packaging, (1999), EEP-Vol.26-1, 239-246.
- (10) Frost, H.J., et al, IEEE Trans. CHMT, 11-4, (1988), 371-379.
- (11) 高田暁男・ほか 3 名、機論、67-660、A(2001)、1386-1392.