

デジタル画像相関法による微細実装接合部のひずみ計測

池田 徹, 貫野 敏史, 穴戸 信之, 宮崎 則幸, 田中 宏之, 畑尾 卓也

溶接学会誌 第79巻 第3号 別刷

平成22年4月

特集

マイクロ接合部の最新評価技術 —信頼性試験と寿命予測—

デジタル画像相関法による微細実装接合部のひずみ計測*

池田 徹**, 貫野敏史**, 穴戸信之**, 宮崎則幸**, 田中宏之***, 畑尾卓也***



池田 徹



貫野敏史



穴戸信之



宮崎則幸



田中宏之



畑尾卓也

Strain Measurement in Micro-Electronic Packages using the Digital Image Correlation Method*

by IKEDA Toru **, KANNO Toshifumi **, SHISHIDO Nobuyuki **, MIYAZAKI Noriyuki **, TANAKA Hiroyuki *** and HATAO Takuya ***

キーワード

電子実装, 強度信頼性, デジタル画像相関法, ひずみ計測, 非線形有限要素法

1. 緒 言

電子デバイスの小型化・高密度化により Flip-Chip (FC) 実装や多層基板のインターポーザなどの高密度実装技術が普及してきている。FC 実装では、従来の Quad Flat Package (QFP) のようにリードによる接続ではなく、はんだバンプにより面で接続がされているため、チップとインターポーザ間の線膨張係数 (CTE) ミスマッチによる熱応力を受けやすい。この熱応力の緩和のために Underfill (UF) 材を用いた樹脂封止が用いられるが、この特性により熱疲労強度信頼性が変わることが知られている¹⁾。また、多層基板においては、Buildup (BU) 材の厚さや特性により配線基板のみかけ上の剛性や CTE が変化し、パッケージの反り挙動やはんだバンプの接続信頼性に影響を与えることが示唆されている²⁾。

これらの実装信頼性評価手法として、有限要素解析 (FEA) などによる数値シミュレーションがよく用いられているが、はんだバンプの弾塑性クリープ挙動や UF 材などの樹脂材の粘弾性挙動といった非線形挙動を考慮しなくてはならず、その精度は、実験的計測によって保

証される必要がある。良く用いられている実験的計測手法としては、デジタル画像相関法 (DICM)³⁾やモアレ干渉法⁴⁾などが挙げられる。

本研究では、構成材の異なる FC 実装された模擬多層基板パッケージを用い、熱サイクル負荷時に走査型共焦点レーザー顕微鏡により取得したパッケージ断面のデジタル画像に DICM を適用し、はんだバンプ周辺に生じるひずみ分布を計測した。また、汎用有限要素法 (FEM) コード MSC.Marc を用いて粘弾塑性クリープ解析を行い、実験結果と比較することで非線形解析の精度の検証と共に構成材の違いによる接続信頼性の評価を行った。

2. 模擬 FC パッケージの構成材

本研究では、UF 材と BU 材について CTE が高い物と低いもののそれぞれ 2 種の材料を用意し、組み合わせにより 4 種の模擬 FC パッケージを作成した。多層基板は基板両面に 3 層の BU 層が形成された 3-2-3 構造となっている。各々の模擬パッケージ構成材組み合わせを Table 1 に、UF 材、BU 材の物性値を Fig. 1 に示す。CTE は Thermo-Mechanical Analysis (TMA) 試験により昇温

Table 1 FC パッケージ構成材料の組合せ。

Name	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
BU resin	BU-1	BU-1	BU-2	BU-2
UF resin	UF-1	UF-2	UF-1	UF-2

*原稿受付 平成 22 年 1 月 6 日

** 京都大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Kyoto University

*** 住友ベークライト(株) Sumitomo Bakelite Co., Ltd.

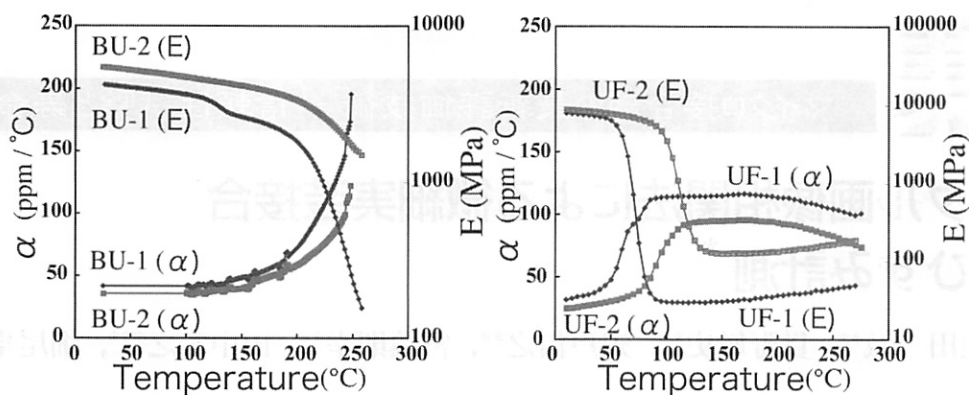


Fig.1 BU 樹脂と UF 樹脂のヤング率 (E) と CTE (α) の温度依存性.

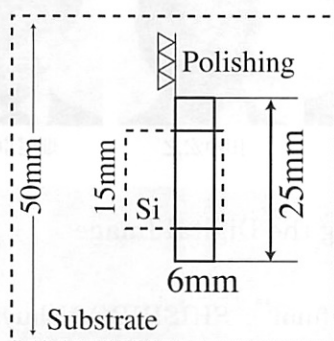


Fig.2 観察用試験片の FC パッケージからの切り出し.

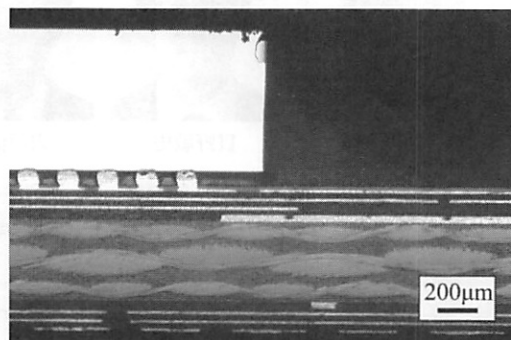


Fig.4 No.1 試験片の断面.

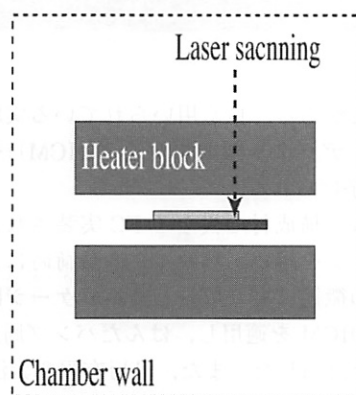


Fig.3 試験片加熱の模式図.

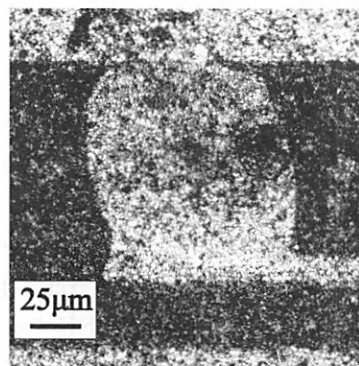


Fig.5 はんだ周辺.

速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で求め、弾性率は Dynamic Mechanical Analysis (DMA) 試験により、昇温 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 10Hz で計測した。はんだ材料には、Sn-3.0Ag-0.5Cu の組成の鉛フリーはんだを用いた。

3. DICM によるひずみ計測方法

本研究では走査型共焦点レーザー顕微鏡で取得したデジタル画像に DICM を適用した³⁾。熱ひずみを計測するサンプルは、50mm 角の模擬 FC パッケージから Fig. 2 に示すような $25\text{mm} \times 6\text{mm}$ の断片を切り出し、中央側断面を鏡面研磨した。その後、DICM を適用するために断面にインクスプレーで模様付けを行った。このサンプルを、Fig. 3 のように加熱冷却チャンバーに設置し、断面画像を走査型共焦点レーザー顕微鏡 (OLYMPUS

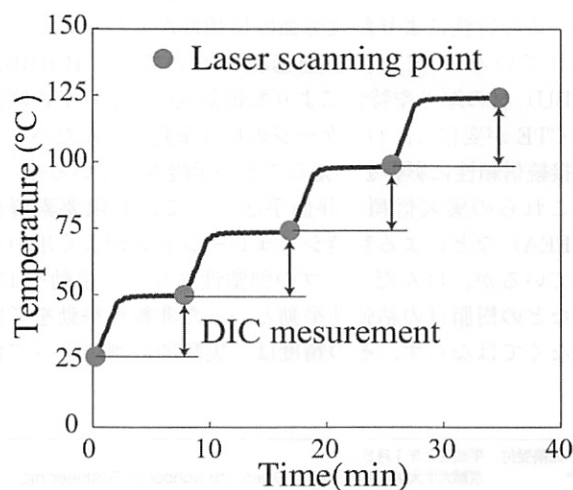


Fig.6 計測温度履歴.

LEXT OLS3000) により取得し、DICM を適用した。Table 1 の No. 1 の試験片の断面撮影画像を Fig. 4 に、インク塗布後ののはんだ周辺の撮影画像を Fig. 5 に示す。また、計測温度履歴の一例を Fig. 6 に示す。保持時間は温度が安定するようにとったため計測ごとに多少異なる。ひずみ計測は保持温度区間ごとに行い、それらを足し合わせることで総ひずみ量を求めた。

4. 実験計測結果と考察

チップと基板間の CTE ミスマッチの影響が強く生じるチップ端部のはんだバンプ内部について、25℃～125℃の加熱時における、構成材の異なるサンプルで行ったひずみ分布計測結果を Fig. 7 に示す。

はんだ内部に生じるひずみ量は、垂直ひずみ、せん断ひずみ共に低 CTE、高 Tg（ガラス転移点）の UF-2（No. 2, 4）を用いた方が小さいことがわかった。また、No. 1（BU-1）と No. 3（BU-2）の比較では、No. 3 の方が No. 1 よりもチップと UF 材の界面付近の垂直ひずみ（ ϵ_y ）が低減され、全体にひずみ集中部が基板側にシフトしている傾向が見られる。これは高温下において、弾性率の高い BU-2 を用いた FC パッケージの方が BU 層を含めた基板の剛性が保たれるためだと考えられる。No. 1～No. 4 のいずれの場合も、はんだ内部に 1% 以上の引張ひずみが生じており、はんだの熱膨張量よりも大きいことから、引張りの負荷が生じていることがわかる。Fig. 7 では引張側（ $\epsilon_y \geq 0$ ）の垂直ひずみしか示していないが、Si chip と UF およびはんだバンプの界面には大きな圧縮ひずみが計測された。これは、チップ接合部界面付近に大きな面外変位が生じるために、面外変位を考慮していない今回の DICM での計測時に、見かけ上圧縮ひずみが生じているように捉えられたものと考えられる。せん断ひずみ（ ϵ_{xy} ）は構成材によらずチップ接合部界面付近で大きくなっているが、UF-1 を用いたサンプル（No. 1, 3）では、基板中央側（-x 側）角部に集中している。一方、UF-2 を用いたサンプル No. 2, 4 ではチップ接合部界面付近にはほぼ一様に分布している。

No. 1～No. 4 の模擬フリップチップについて、-55℃～125℃の範囲の温度サイクルを1000回負荷した後の断線率を Fig. 8 に示す。これより、ひずみが全体的に小さい No. 2 と No. 4 の断線率が 0 となっている。また、No. 1 と No. 3 の比較では、チップ接合部界面付近の垂直ひずみが低減されている No. 3 の方が不良率が低くなっている。いずれも上記の DICM による熱ひずみの計測結果より、定性的に説明できる。

5. 有限要素解析

5.1 解析モデル

解析には Fig. 9 で示すような実験サンプルを模した 1/4 対称モデルを用いた。Fig. 9 に示したようにチップ端部から 3 つ分、奥行き方向 2 つ分の計 6 つのはんだバンプのみ形状をモデル化し、チップ保護膜のポリイミド層も再現した。はんだ、銅配線の構造については、体積率が

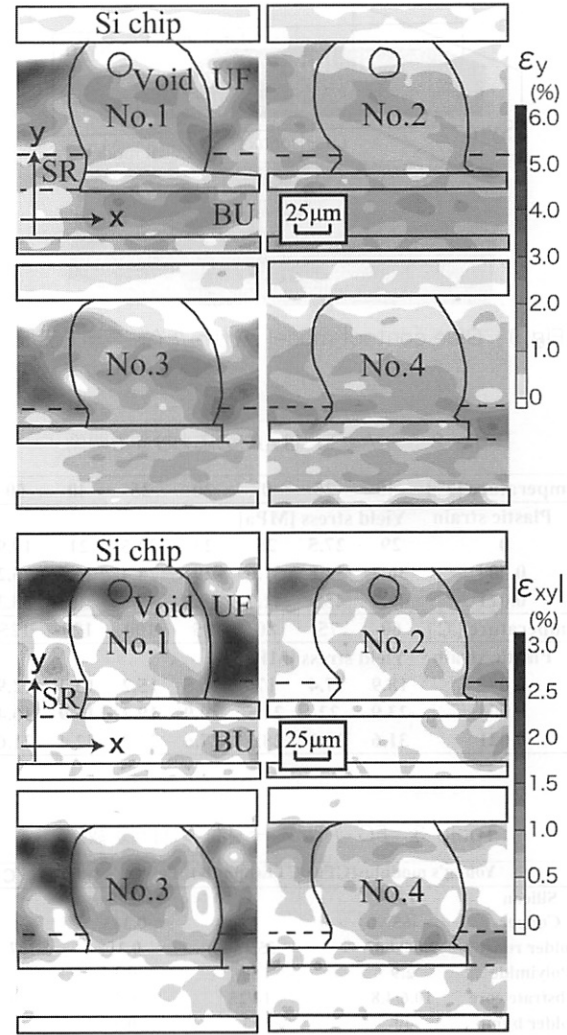


Fig. 7 25℃ から 125℃ まで加熱した際の材料の組合せによるはんだ周辺のひずみ分布の比較。

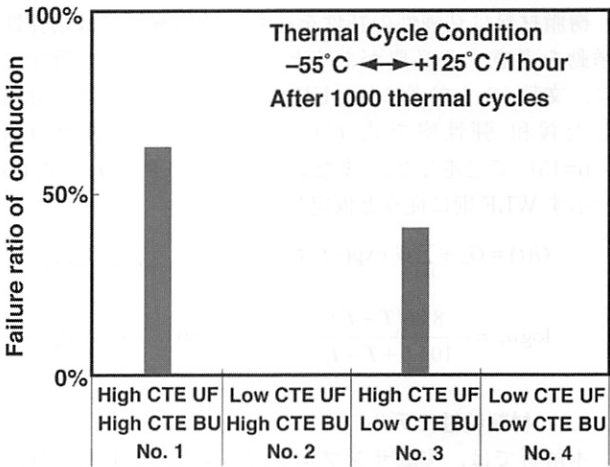


Fig. 8 熱サイクル試験後の断線率の比較。

実際のサンプルとはほぼ同じになるようにした。この解析モデルではメッシュ分割の細かなローカル部分とその周辺のグローバル部分があり、解析コード MSC. Marc™ の Glue 接触オプションによりメッシュサイズの異なるモデルを結合した。要素タイプには、三次元 8 節点アイソパ

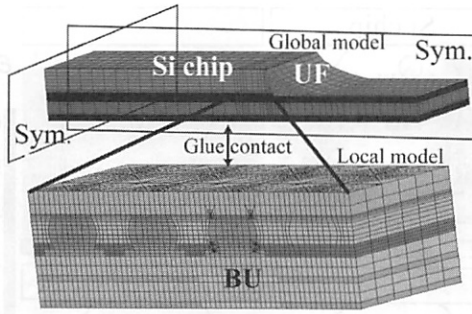


Fig. 9 Glue contact model を使った有限要素モデル.

Table 2 SnAgCu はんだの応力ひずみ関係.

Temperature [°C]	-40	-25	0	20	25	40	50
Plastic strain	Yield stress [MPa]						
0	29	27.5	25	23	22.5	21	19.9
0.004	36.7	34.8	31.6	29	28.4	26.5	25.2
0.021	48.4	45.9	41.7	38.3	37.5	35	33.3
Temperature [°C]	60	75	80	85	100	120	125
Plastic strain	Yield stress [MPa]						
0	18.9	17.4	17	16.5	15.2	13.4	12.9
0.004	23.9	22	21.5	20.9	19.2	16.9	16.4
0.021	31.6	29.1	28.3	27.6	25.3	22.4	21.6

Table 3 FC パッケージ材料の材料定数.

	Young's modulus(GPa)	CTE(ppm/K)	Poisson's ratio	Tg(°C)
Silicon	131	3	0.28	—
Copper	65	17	0.343	—
Solder resist	2.6/0.067	55/140	0.31	107
Polyimide	2.9	50	0.3	—
Substrate core	10.6/4.8	14/25	0.2	170
Solder bump	40	23	0.3	—

ラメトリック要素を用いた.

5.2 粘弾性解析方法

樹脂材料は粘弾性の特性を持ち、数値解析には粘弾性挙動を考慮する必要があるといわれている. 本研究では、文献 (4) を参考にし、UF 材の DMA 試験により計測した緩和弾性率を式 (1) で示すプロニー級数の和 (n=15) で記述した. またシフトファクター a_T が式 (2) で示す WLF 則に従うと仮定した.

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{k=1}^n G_k \exp(-t/\tau_k) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\log a_T = -\frac{8.86(T - T_g)}{101.6 + T - T_g} \quad T_g = T_g + 50 \quad \dots\dots\dots(2)$$

5.3 材料物性モデル

本解析では、実験サンプルと同じように UF 材 2 種、BU 材 2 種の計 4 種の解析モデルを作成した. UF 材については前述の方法により粘弾性を考慮し、BU 材については T_g が比較的高いことから弾性体として扱った. UF 材と BU 材のポアソン比は共に 0.3 とし、Fig. 1 で示した線膨張係数とヤング率を用いた. また、はんだは弾塑性クリープ特性を考慮し⁹⁾、その他の構成材については弾性体として取り扱った. はんだの応力-ひずみ関係を Table 2 に、クリープ則を式 (3) に示す. また、その他の

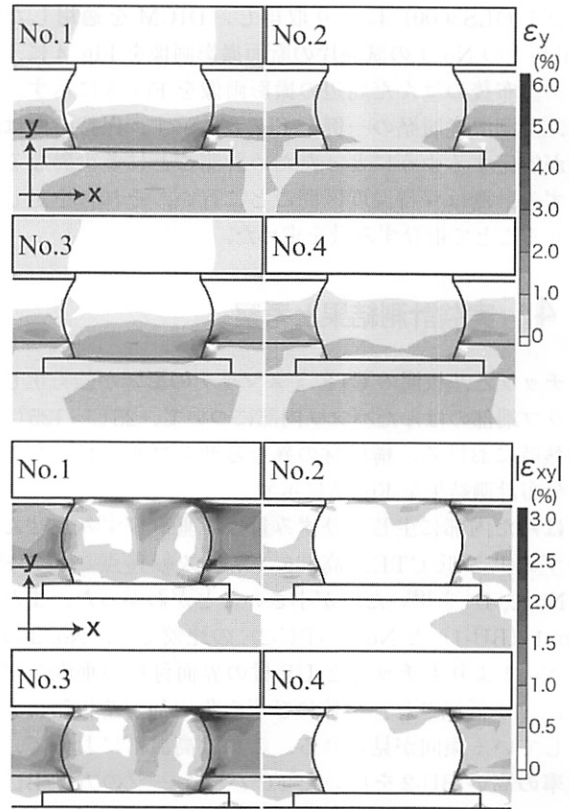


Fig. 10 25°C~125°C まで昇温した後の熱ひずみ分布の有限要素法解析結果.

材料の物性値を Table 3 に示す.

$$\dot{\epsilon}_c = \exp(0.1595T - 50.841) \cdot \sigma^{-0.0321T + 11.889} \quad \dots\dots\dots(3)$$

5.4 解析温度履歴

解析温度履歴は初期温度を 150°C とし、120 分で 25°C まで冷却後 10 分間保持し、その後、昇温速度 12.5°C/分で保持温度はひずみ計測実験と同じにし、保持時間は 5 分とした. また、解析中のモデル内の温度は一樣と仮定した.

5.5 ひずみ分布の解析結果と DICM による計測結果との比較

25°C~125°C への昇温時に得られる最端部に位置する表面はんだバンプ断面のひずみ分布を Fig. 10 に示す. UF-1 の No. 1, 3 では、DICM による計測結果とせん断ひずみ (ϵ_{xy}) の集中位置が反対になっており、ひずみ量も小さい. はんだ内部のせん断帯の方向も計測結果と反対である. 一方、UF-2 の No. 2, 4 では、チップ接合部界面付近にはほぼ一樣にせん断ひずみが分布しており、定性的に計測結果と一致している. また、垂直ひずみ (ϵ_y) では、全体的に実験結果よりも引張ひずみが小さく、特に No. 1, 3 において違いが顕著である. BU 材の物性による影響については、測定した物性値が本解析の熱履歴では大きな差はなく、解析結果に明白な差異が生じなかった. 実際のパッケージでは BU 層ごとに熱履歴が異なるが、本解析では BU 層の積層工程 3 層分の熱履歴を BU 材に加えた後の物性値を用いたことが原因の一つだと推

測される。

6. はんだに生じる圧縮、引張とせん断集中箇所の関係

有限要素法解析結果を DICM による計測結果と比較した結果、UF-1 材を用いた No. 1, 3 において、チップと UF 材の界面におけるせん断ひずみの集中域がはんだの反対側になっていることや、はんだ内部のせん断ひずみ帯の方向が反対であること、全体に垂直ひずみの大きさが解析では計測値よりも小さくなっている原因について考察する。

このために、まず、FEM 解析結果におけるバンプ高さ方向のはんだの変形を調べた。次に、はんだバンプ単体モデルを用いてはんだのせん断変形評価におけるバンプ高さ方向の引張り負荷が与える影響について検討した。

6.1 昇温時のはんだに生じる圧縮、引張

DICM による計測結果でははんだ内部に 1% 以上の垂直ひずみ (ϵ_y) が観察されたが、解析結果では全体に垂直ひずみの大きさが小さい。そこで、はんだ上下接合面の基板厚さ方向の相対変位をバンプ高さで除することではんだに生じる平均ひずみを求め、初期冷却後の 25℃ 時を基準とした時系列変化を取得し、昇温時に生じる基板厚さ方向のはんだの変形を検討した。その結果を Fig. 11 に示す。

まず、No. 1, 3 においては、100℃ までは昇温時にも関わらず圧縮が生じ、その後大きく回復し、125℃ 時では 0.1% 程度の伸びとなった。一方、No. 2, 4 においては、昇温時には常に伸びを示し、125℃ 時には 0.4% 程度の伸びとなった。実験結果では No. 1, 3 の方が大きく伸びていたが、解析結果では、逆に No. 1, 3 の垂直ひずみが小さくなっていた。

6.2 バンプ単体の解析モデルによる検証

バンプに生じる高さ方向の負荷がせん断ひずみの集中位置に与える影響を検討するため、Fig. 12 に示すようなバンプ単体モデルを作成し、(i) 温度を 120℃ と仮定し、銅パッド底部に 300 秒間かけて 2μm のせん断方向の強制変位を加えたとき、(ii) (i) に加えて 3MPa の圧縮荷重を負荷したとき、(iii) (i) に加えて 3MPa の引張荷重を負荷したときの 3 通りについて検討した。

解析結果のせん断ひずみ分布を Fig. 13 に示す。バンプ高さ方向に負荷を与えず、せん断変形を加えたときは左右対称にひずみの分布が生じていることがわかった。一方、圧縮の負荷を受けたときは、ひずみ集中位置がせん断変形方向に、引張を加えたときはその逆に集中位置がシフトすることがわかった。No. 1, 3 においては、実際のサンプルではバンプに引張が生じているが FEM 解析結果では一度圧縮が生じ、ほとんど伸びが生じていないために、 ϵ_{xy} が逆転したものだと考えられる。一方、No. 2, 4 では、実験と解析ともに伸び量が小さいため ϵ_{xy} がチップ接合部に一様に生じたものだと考えられる。

以上のことより、No. 1, 3 においてせん断ひずみの方向が反転したことは、垂直方向のはんだに対する引張り負荷を小さく見積もりすぎていることにありと推測される。この原因として、解析においてはポアソン比 $\nu=0.3$ を用いているが、実際の UF-1 材は Tg が低いために高温域でポアソン比が 0.5 近くに上昇し、その非圧縮性によって垂直ひずみが大きくなっているのではないかと考えた。このことを検証するために、No. 1 の場合について、ポアソン比 $\nu=0.48$ として解析した結果を Fig. 14 に示した。その結果、せん断ひずみの方向は逆転し、垂直ひずみの大きさも大きくなり、DICM の計測結果とほぼ一致した。このことより、ポアソン比の温度特性を計測し、正しいポアソン比の測定値を用いることで解析結果を改善できることが示唆された。

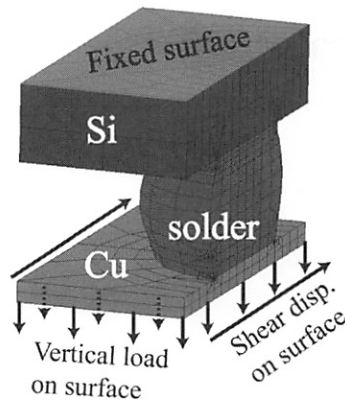


Fig.12 単一はんだバンプモデル.

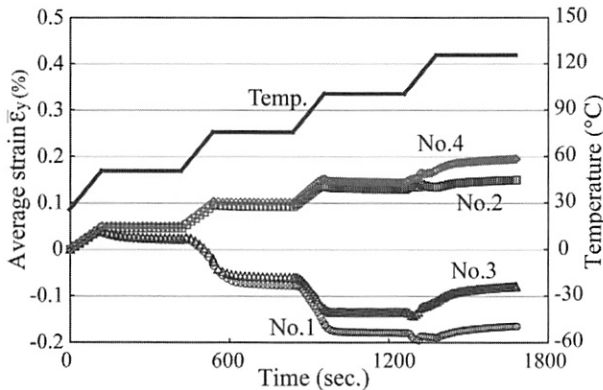


Fig.11 はんだバンプ部の平均ひずみの履歴.

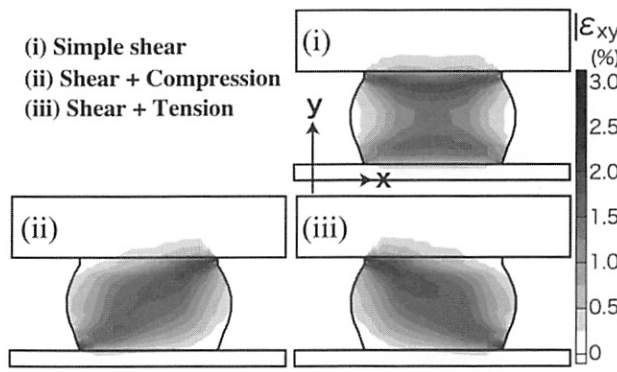


Fig.13 せん断ひずみの分布に与える引張・圧縮負荷の影響.

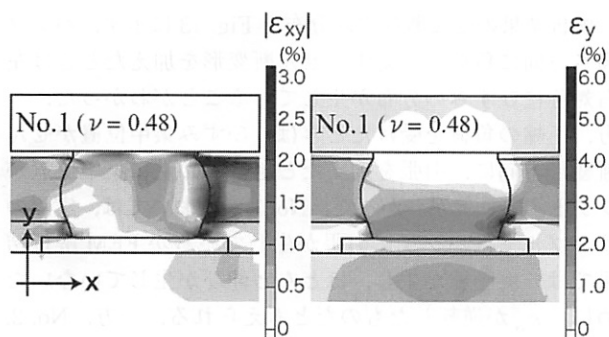


Fig.14 ポアソン比 $\nu=0.48$ とした時のひずみ解析結果.

7. 結 言

- 1) DICM を適用することにより，多層基板 FC パッケージの最端部はんだバンプ周辺に熱負荷時に生じるひずみ分布を計測した．これにより，UF 材と BU 材には低 CTE，高 Tg 材料を用いた方がひずみ量を抑制できることがわかった．この結果は，熱サイクル試験の結果を定性的に説明できる．
- 2) 粘弾塑性クリープ特性を考慮した FEM 解析を行った．DICM による計測結果との比較では，低 CTE，高 Tg の UF-2 を用いた No. 2, 4 においては，ひずみ分布が定性的に一致した．また，No. 1, 3 においては，せん断ひずみの集中位置が解析と計測結果で反対

になった．

- 3) 解析結果と計測結果が一致しなかった原因としては，解析において UF 材のポアソン比が $\nu=0.3$ の一定値と仮定したことが考えられる．No. 1 において，高温時にポアソン比が 0.5 近くまで上昇したと仮定すると，計測結果と良く一致する解析結果が得られた．今後，ポアソン比の変化を考慮することにより，解析精度を改善することが期待できる．

参考文献

- 1) T. H. Wang, *et al.*, "Effect of Underfill Thermomechanical Properties on Thermal Cycling Fatigue Reliability of Flip-Chip Ball Grid Array", *Journal of Electronic Packaging*, 126, (2004), pp.560-564.
- 2) Thoru Nakanishi, *et al.*, "Analysis of Optimal Structure by Finite Element Method for CSP/FCA/MCM Mounting on Build-up Board", *J. JIEP.*, 5, (2002), pp.646-653.
- 3) Nobuyuki Shishido, *et al.*, *Proceedings of Mate2008*, Yokohama, 14, (2008), pp.457-460.
- 4) Kiyoshi Miyake, *et al.*, "Thermo-Viscoelastic Analysis for Warpage of Ball Grid Array Packages Taking into Consideration of Chemical Shrinkage of Molding Compound", *J. JIEP.*, 1, (2004), pp.54-61.
- 5) 于強ら，"電子機器のはんだ接合部の寿命のバラツキ評価手法の確立"，RC227 成果報告書，日本機械学会，(2008)，pp.285-304.
- 6) Akira Tanaka, *et al.*, "Study of Solder Joint Reliability by Heterogeneous Underfill Filling", *Proceedings of Mate2008*, Yokohama, 14, (2008), pp.263-266.