

SEM-DICM による 3 次元積層チップの熱ひずみ計測に基づく非線形有限要素解析精度の評価・改善

岡 大智[†] 池田 徹^{††a)} 宮崎 則幸[†] 田中宏之^{†††} 畑尾 卓也^{††††}

松本圭司^{†††††} 小原さゆり^{†††††} 折井靖光^{†††††} 山田文明^{†††††} 嘉田守宏^{†††††}

Evaluation and Improvement of the Accuracy of Nonlinear Finite Element Analysis for a 3D SIC package using the thermal strain measurement with SEM and DICM

Masatoshi OKA[†], Toru IKEDA^{††a)}, Noriyuki MIYAZAKI[†], Hiroyuki TANAKA^{†††}, Takuya HATAO^{††††}, Keiji MATSUMOTO^{†††††}, Sayuri KOHARA^{†††††}, Hiromitsu ORII^{†††††}, Fumiaki YAMADA^{†††††} and Morihiro KADA^{†††††}

あらまし 有限要素法のような数値解析法が電子実装の信頼性評価に頻繁に使われている。しかし、非線形材料を多数含む電子実装部の解析精度を確保するのは容易ではない。本研究では、三次元積層模擬チップの加熱時の熱ひずみ分布を、実測と解析の両面から評価した。まず、走査型電子顕微鏡にデジタル画像相関法を適用して熱負荷時のひずみ計測を行った。次に樹脂材のポアソン比の粘弾性挙動を考慮して非線形有限要素解析を行ったが、実測と整合性のある結果を得られなかった。そこでナノインデンテーションによって構成材料の物性を取得し、非線形有限要素法解析の精度改善を行った。

キーワード 走査型電子顕微鏡, デジタル画像相関法, 非線形有限要素解析, 粘弾性, ナノインデンテーション

1. まえがき

近年、非常に早いペースで電子機器の小型化・高密度化が進んでいる。その理由の一つは電子機器の最も重要な部品である半導体の集積技術の発展によるものである。今日では、更なる高密度化のため三次元積層

チップ(3D SIC: Stacked IC)が開発されている。三次元積層チップ[1]は、チップをなるべく薄くしてこれを積み重ね実装することにより高密度化をはかるものである。現在はシリコンチップを多数積層し、その間をTSV(Through Silicon Via)と呼ばれる、銅メッキの貫通配線で結線した構造となっている。3D-SIC は従来にない複雑な構造を持つため、構造強度や放熱などの機械的信頼性を確保する必要がある。電子実装部のような微細構造物では、ひずみや変位を直接測定することが容易でないため、有限要素法等の応力解析を用いることが多い。しかしながら、電子実装部を構成する材料の多くが弾塑性、クリープ、粘弾性などの非線形性を有する材料であることや、薄膜などの物性がバルク材料と異なることなどから、精度の良い解析を行うことは容易ではない。そのため、その精度を何らかの実測と比較して検証する必要がある。

解析結果と比較する実測方法としては、反りの計測

[†] 京都大学大学院工学研究科, 京都市
Graduate School of Engineering, Kyoto University, C3-c2N03,
Kyotodaiagakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 615-8246 Japan

^{††} 鹿児島大学大学院理工学研究科, 鹿児島市
Graduate School of Science and Engineering, 1-21-40, Koorimoto,
Kagoshima, 890-0065 Japan

^{†††} 住ベリサーチ株式会社, 宇都宮市
S. B. Research Co., Ltd., 20-7 Kiyohara Industrial Park, Utsunomiya,
Tochigi, 321-3231 Japan

^{††††} 住友ベークライト株式会社, 宇都宮市
Sumitomo Bakelite Co., Ltd., 20-7 Kiyohara Industrial
Park, Utsunomiya, Tochigi, 321-3231 Japan

^{†††††} 超先端電子技術開発機構, 東京都
ASET, Tokyo Daiya Building 8P, 1-28-38, Shinkawa, Cyuo-ku, Tokyo,
104-0033 Japan

a) E-mail: ikeda@mech.kagoshima-u.ac.jp

がよく用いられているが、電子パッケージ内部の応力・ひずみ分布の検証方法としては十分ではない。反り計測に加えて、応力やひずみの分布を直接計測する手法が必要である。そのような手法の一つとして、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method: DICM) によるひずみ分布評価が有効である[2, 3]。デジタル画像相関法は画像の変形解析により観察対象の変形を計測する手法である[4, 5]。熱等の外乱の影響を受けやすいモアレ干渉法と比べて汎用性は高く、高度なグレーティング処理等も要しない簡便な手法である。この手法は、モアレ干渉法などのレーザー干渉法ほど微小なひずみを検出することはできないが、顕微鏡を利用することで、微細領域のひずみを測定することができる。ただし、光学顕微鏡を用いた観察では、光の回折によって、倍率 1000×以上の観察における分解能の向上は期待できない[6]。しかし、DICM では、電子顕微鏡などを用いることで、さらに高倍率な観察画像から、ひずみ分布を計測することが期待できる。

本研究では三次元積層チップの接続部を模擬した試作チップに対して、走査型電子顕微鏡 (SEM) とデジタル画像相関法 (DICM) を組み合わせて熱負荷時のひずみ計測手法を開発し、計測結果と有限要素法 (Finite Element Method: FEM) による解析結果を比較することにより解析精度の検証を行った。さらにその結果より、不十分と考えられた構成材料の物性値をナノインデンテーション法により計測し、その解析精度の改善を行った。

2. 3D-SIC の熱ひずみ解析精度評価

2.1 デジタル画像相関法の原理

デジタル画像相関法では、図 1 に示すように、基準となるデジタル画像上での任意の画素に着目し、その点を中心とする小さな画像領域 (サブセット) が、物体変形後の画像ではどの領域に相当するかを探索する。このとき得られたサブセット中心の移動画素数から、着目点の物体上での変位を算出する。本手法では、Bruck らの提案した変位探索手法[7]を用いた。

この手法では、式(1)の C 値を用いて輝度値分布の相関を評価し、着目したサブセットに対してこの値が極大となるようなサブセットを変形後の画像上で探索する。

$$C(u^*, v^*) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X + u^* + i, Y + v^* + j) \times I_u(X + i, Y + j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X + u^* + i, Y + v^* + j)^2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X + i, Y + j)^2}} \quad (1)$$

ここで、 X, Y はそれぞれ着目点の座標、 i, j は着目点を原点とするサブセット内局所座標、 M はサブセット寸法、 I_u, I_d は変形前後のデジタル画像上の輝度値を表す。このとき、サブセットの変形には式(2)で表される剛体変形及び、一様ひずみまで考慮した。

$$u^* = u + \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j, \quad v^* = v + \frac{\partial v}{\partial x} i + \frac{\partial v}{\partial y} j \quad (2)$$

u, v は着目点の変位を表し、 $\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y$ はいずれもサブセット内で一定かつ独立の変形量を表す。

Newton-Raphson (N-R) 法を用いて、サブセットの変形量を未知変数とする C の極値を求めるにあたり、その初期値には次式の S 値を評価関数として、これを最小とする変位(u_0, v_0)を用いた。

$$S(u_0, v_0) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M (I_d(X + u_0 + i, Y + v_0 + j) - I_u(X + i, Y + j)) \quad (3)$$

ここで、(u_0, v_0)はサブセットの平行移動量を表し、サブセット自体の変形や回転は考慮していない。式(1)の C 値を用いたサブセット探索は詳細探索、式(3)の S 値を用いたものは粗探索と呼ばれる。

詳細探索によって得られた式(2)に示すサブセットの変形量は、輝度値に含まれるノイズの影響などで、画像上の着目点毎に不規則な誤差を含む[5, 7]。そこで、このような誤差を含む変形量をひずみ算出に直接利用することは行わず、DICM により求めた離散点変位から移動最小自乗法(Moving Least Square Method: MLSM)を用いてひずみ分布を求めた。移動最小自乗法による近似では、滑らかなひずみ分布を得ることができる[8]。

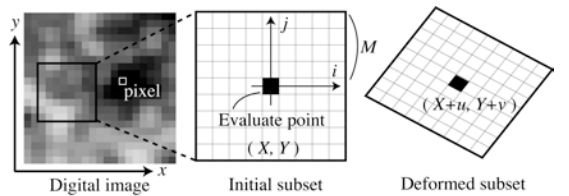


図 1 座標系とサブセットモデル

Fig. 1 Coordinate system and subset models.

2.2 試作積層チップ

本研究で計測対象とする試作チップは上下二枚の厚さ 725 μm のシリコンチップの間に直径 50 μm 、高さ 30 μm の銅と鉛フリーはんだの bumps が 250 μm ピッチで配置されており、その間にアンダーフィル材が充填されている。試作チップの外形寸法を記したモデルを図 2 に、試作チップの bumps 周辺の断面を図 3 に示す。

2.3 実験計測

熱負荷時のひずみ計測のために、SEM で取得したデジタル画像を用い、初期温度 25 $^{\circ}\text{C}$ から 130 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温した際に生じるひずみをデジタル画像相関法と移動最小二乗法により算出した。試験片には DICM のために耐熱インクを用いて模様付けを行い、チャージアップを防止するために Au スパッタを厚さ約 10nm で施し、導通をとった。観察は高真空モードで、加速電圧：20kV、倍率：1,500x (100 x 80 mm)、0.1mm/pixel 画像解像度:1024 x 884 pixel とした。熱サイクル時の温度履歴を図 4 に示す。取得した画像とひずみ分布表示領域を図 5 に、DICM のサブセットサイズ 100 pixels、MLSM の影響半径 50 pixels としたひずみ分布計測結果を図 6 に示す。

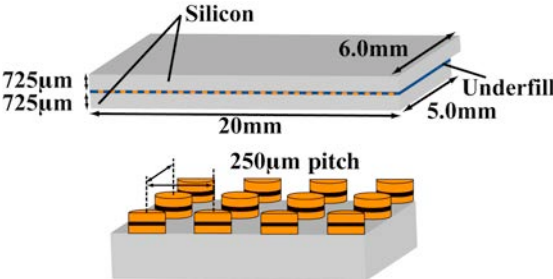


図 2 3D-SIC テストチップ

Fig. 2 Test chip for 3D SIC.

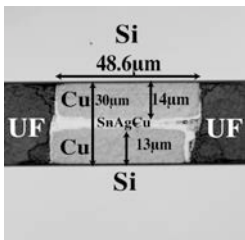


図 3 銅 bumps 近傍のチップ断面図

Fig. 3 Cross sectional image around a Cu bump in a test chip.

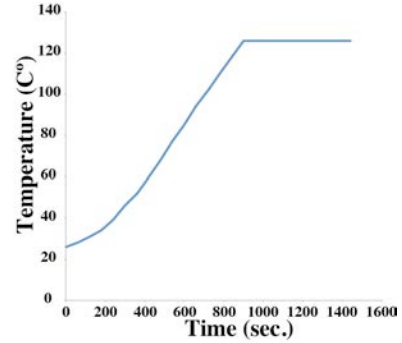


図 4 温度履歴

Fig. 4 Temperature history.

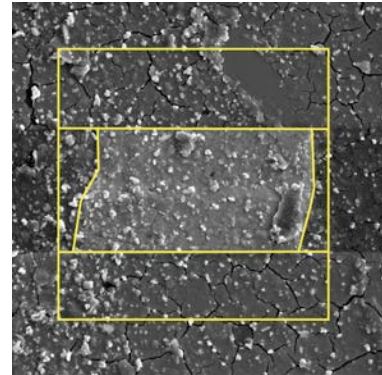


図 5 取得画像

Fig. 5 An Obtained image of the chip.

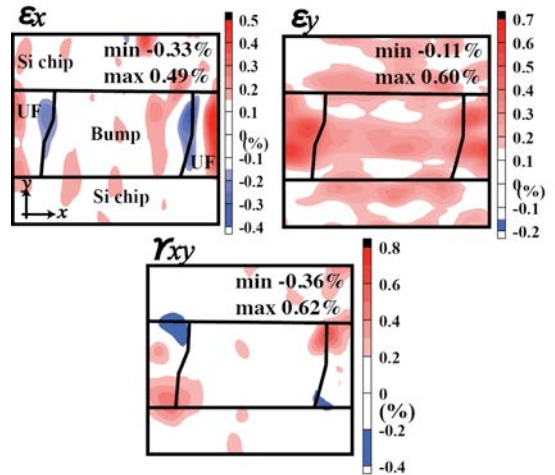


図 6 SEM-DICM による計測ひずみ分布

Fig. 6 Strain distributions measured using a SEM and the DICM.

まず、 ϵ_x の分布からバンプと UF 材の界面に圧縮が生じ、その外側には膨張が生じていることが分かる。 ϵ_y の分布からは定性的にはバンプと UF 材が膨張し、接合層全体を押し広げるように膨張していることがわかる。 γ_{xy} の分布には、バンプの上下左右に逆向きのせん断が生じている。これは上下がシリコンチップであり、CTE ミスマッチがないため全体で一様なせん断が生じないことによると考えられる。

3. 粘弾性を考慮した非線形 FEM 解析

UF 材は高分子特有の粘弾性挙動を示す。そのため粘弾性挙動を無視した解析では信頼性評価の精度が低下してしまう可能性がある。そこで粘弾性特性の影響を考慮した FEM 解析を行った。ここでは粘弾性特性の影響を考慮した FEM 解析結果と DICM 実測の比較を示す。

3.1 Underfill (UF) 材の粘弾性物性値測定[9]

FEM 解析に用いる物性値を取得するため UF 材の粘弾性物性を応力緩和試験で測定した。このとき弾性率の粘弾性特性だけでなく、ポアソン比の粘弾性特性も計測した。

粘弾性の体積挙動を測定するため、DICM により応力緩和試験中の引張方向のひずみとこれに垂直な方向のひずみを同時に計測し、ポアソン比の粘弾性特性を計測した。温度を変えて応力緩和試験を行うため、INSTRON 製のマイクロフォース万能試験機と加熱炉を用いた。試験片には厚さ約 1mm、幅約 10mm の板状の UF 材を用いた。初期ひずみは室温で約 0.45% のひずみとなる引張量を 1 秒間で与えた。試験開始後 10 秒～1000 秒の間、CMOS カメラを用いて変形過程の画像を取得した。

得られた観察領域の平均ひずみを用いて算出した各温度での緩和弾性率を UF 材が熱レオロジー的に単純であり、時間-温度換算則が成立すると仮定して、時間軸方向にシフトさせることで図 7 に示す緩和弾性率のマスターカーブとシフトファクターを同定した。基準温度として $T_0=91.2^\circ\text{C}$ を選びシフトファクターは基準温度に対して Arrhenius 型の 2 直線でよく近似できた。求めたシフトファクター a_t の近似式を次に示す。

$$\log a_t = \beta \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

$$\beta \frac{\Delta H}{R} = \begin{cases} 2.37 \times 10^4 & T \geq T_0 \\ 9.53 \times 10^3 & T < T_0 \end{cases} \quad [\text{K}]$$

緩和弾性率と同じシフトファクターを用いて各温度でのポアソン比をシフトさせて得られたマスターカーブを図 8 に示す。得られたそれぞれのマスターカーブを最小二乗法を用いて次式の Prony 級数に近似し、図に重ねて示す。

$$E(t) = E_\infty + \sum_{k=1}^n E_k \exp(-t/\tau_k) \quad (5)$$

$$\nu(t) = \nu_\infty + \sum_{k=1}^n \nu_k \exp(-t/\tau_k) \quad (6)$$

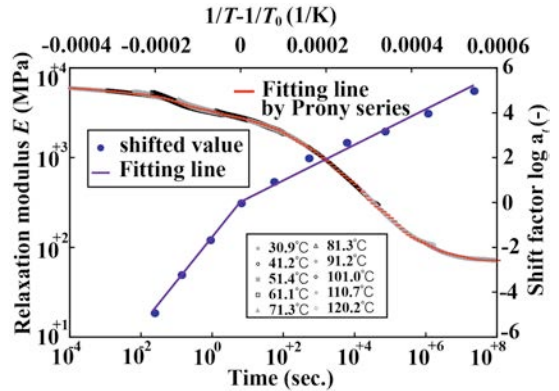


図 7 UF 材の緩和弾性率のマスターカーブとシフトファクター

Fig. 7 Master curve of the relaxation modulus and shift factor of UF resin ($T_0=91.2^\circ\text{C}$).

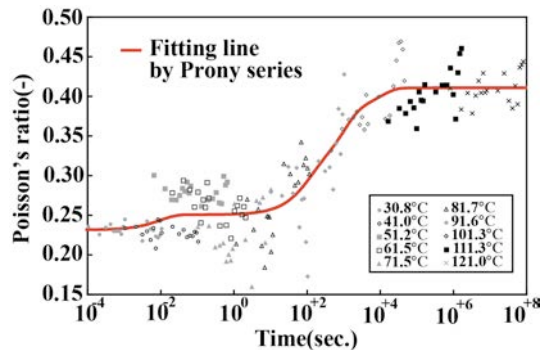


図 8 UF 材のポアソン比のマスターカーブ

Fig. 8 Master curve and the fitting curve approximated by Prony series of Poisson's ratio of UF resin ($T_0=91.2^\circ\text{C}$).

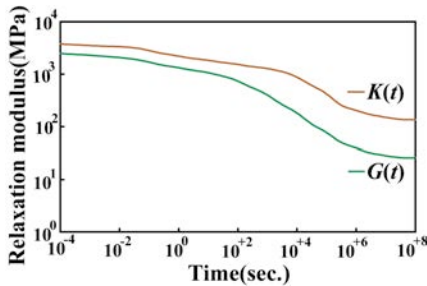


図 9 体積，せん断弾性率のマスターカーブ
Fig. 9 Master curves of bulk and shear moduli ($T_0=91.2^{\circ}\text{C}$).

以上より求めた緩和弾性率 $E(t)$ とポアソン比 $\nu(t)$ から緩和弾性率 $G(t)$ と体積弾性率 $K(t)$ を求め，式(5)と同様の Prony 級数で近似した． $G(t)$ と $K(t)$ の Prony 級数近似のマスターカーブを図 9 に示す．

3.2 試作チップの熱負荷時 FEM 解析

試作チップの有限要素モデルには，対称性より全体の 1/4 モデルを用いた．解析モデルを図 10 に示す．解析モデルではバンパ周辺の詳細構造を模したモデル(local model)とその他の粗いモデル(global model)に分け，接触面の変位が一致するように MSC MarcTM の Glue contact オプションを用いて結合した．表 1 にモデルの要素数，節点数を示す．

解析温度は初期温度の UF 材の硬化温度である 150°C で応力フリーとし，100 秒で 25°C まで下げた後，DICM 測定と同様の温度履歴を与えた．UF 材は粘弾性特性を，Sn-3.0Ag-0.5Cu の鉛フリーはんだは弾塑性クリープ特性を考慮した．Si と Cu は等方弾性体を仮定した．UF 材の CTE は TMA で測定して，図 11 のように与えた．また，UF 材のポアソン比を考慮した体積，せん断緩和弾性率は前節の手法で計測された図 9 に示す物性値を与えた．表 2 に Si，Cu，鉛フリーはんだの物性値を，表 3[10]にはんだの降伏応力-塑性ひずみの関係を示す．またクリープ構成則について以下の Norton 則を用いた．

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_c &= \exp(0.1595T - 50.841) \cdot \sigma^n(T) \\ n(T) &= -0.0321T + 11.889 \end{aligned} \quad (7)$$

解析結果を図 12 に示す．解析結果と実測結果を比べるとひずみ分布は一致していない．解析では ϵ_x においてはバンパ中央層に大きなひずみが生じており， ϵ_y において Si 部とバンパ中央層に解析では実測に見られない大きなひずみが生じており， γ_{xy} の分布においてはバンパ中央層にも上下左右に逆方向のせん断ひずみが生じており，解析モデルの改良が必要であること

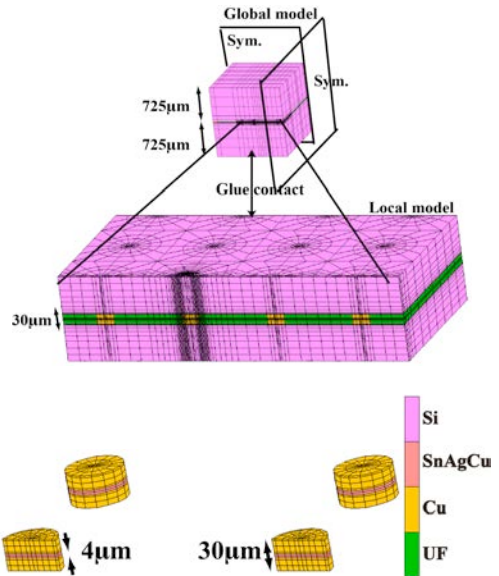


図 10 FEM モデル

Fig. 10 FEM model.

表 1 要素数と節点数

Table 1 The number of elements and nodes for Analysis.

	Element	Node
Local	39,772	44,282
Global	2,474	3,150
All	42,246	47,432

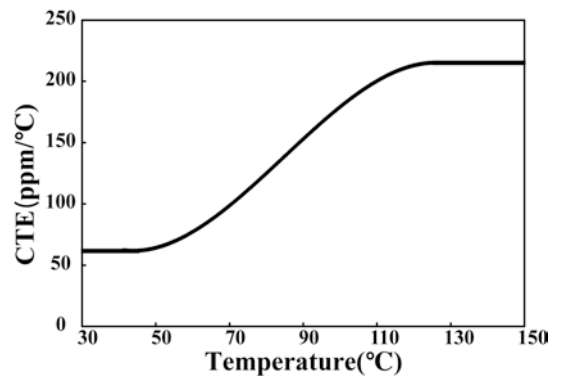


図 11 UF 材の熱膨張係数

Fig. 11 CTE of Underfill resin.

がわかる．解析結果と実測結果の乖離の原因として，解析では銅バンパに最大約 400MPa の応力がかかっているため銅の塑性変形が起きていることと鉛フリーは

表 2 構成材料の材料特性

Table 2 Material properties of components.

	Young's Modulus(GPa)	CTE (ppm/K)	Poisson's ratio
Silicon	131	3	0.28
Copper	65	17	0.3
Solder	40	21	0.3

表 3 Sn3.0Ag0.5Cu の降伏応力と塑性ひずみの関係

Table 3 Yield stress and plastic strain relationship of

Sn3.0Ag0.5Cu solder alloy.

Temperature(°C)	-40	-25	0	20	25	40	50
Plastic strain	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	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

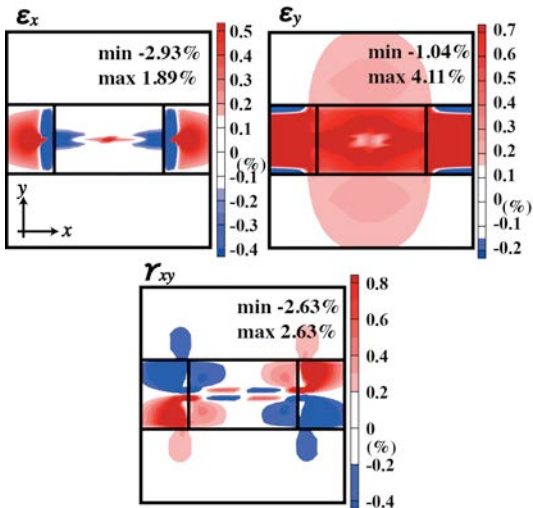


図 12 FEA によるひずみ分布

Fig. 12 Strain distributions analyzed by the FEA.

んだを銅と結合した状態でリフロー温度まで加熱すると金属間化合物 (IMC: Inter Metallic Compound) が生成されることを考慮していないことが考えられる。(IMC 化の状況については、次章に記述する。)

そこでナノインデンテーションにより銅バンプ、IMC、鉛フリーはんだの物性を取得し、それらを

FEM 解析に組み込むことによって、三次元積層チップの FEM 解析精度の改善を試みた。

4. チップ構成材の弾塑性物性値測定

図 13 にバンプ接合層の EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) による測定結果を示す。図 13 から銅バンプの間の鉛フリーはんだはほとんど全てが銅と錫の金属間化合物 (Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn) に変化していることがわかる。また、銅バンプの物性もバルク銅の物性値とは異なると考えられる。そこで、チップの構成材料である銅バンプと IMC の実際の物性値を測定するため、ナノインデンテーションによる弾塑性物性の取得を行った。

4.1 弾塑性物性計測方法

ナノインデンターには島津製作所製の超微小硬度計 DUH-W201 を用いた。銅バンプの試験片には、試作チップの製造途中で銅バンプの上にハンダをつけ、その後ハンダ部を削り取ったものを用いた。IMC は電解メッキで製作した銅と鉛フリーはんだを接合し、リフロー温度 (260°C) に加熱して IMC を生成させたものを用いた。最大負荷荷重は 50mN とし、負荷速度は 3.3mN/sec とした。

4.2 チップ構成材の弾塑性物性計測結果

銅バンプおよび IMC を次式のべき乗硬化則に従う応力-ひずみ関係の等方連続体材料と仮定した。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ R\varepsilon^n & \text{for } \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 E はヤング率、 R は材料定数、 σ_y は降伏応力、 n は硬化指数である。弾塑性パラメータの決定には、図 14 に示すナノインデンテーションによる負荷除荷試験により得られる荷重と押込み深さのグラフから、負荷過程の曲率 C と除荷過程の初期勾配と最大

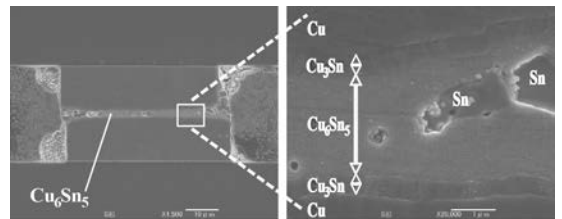


図 13 Cu 端子間の IMC の SEM による EDX 解析

Fig. 13 SEM-EDX analysis of IMCs between Cu terminals.

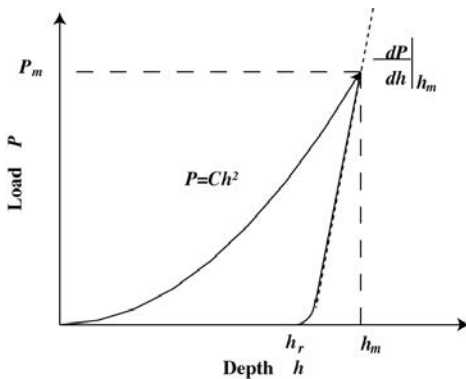


図 14 ナノインデンテーションの P-h 関係模式図

Fig. 14 Schematic illustration of P-h response at nanoindentation.

表 4 Cu と IMC の弾塑性物性

Table 4 Elastic-plastic material properties of Cu and IMCs.

	Young's Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Hardening Exponent
Cu Bump	73.2±18.3	254.1±7.6	0
Cu ₆ Sn ₅	88.2±5.1	1749.6±223	0.0195
Cu ₃ Sn	98.9±3.1	1521.8±192	0.063

押込み深さ h_m と最終押込み深さの比 を取得し, M. Dao らが提案した方法[11]を用いて, E , σ_y , n を算出した. 計測結果を表 4 に示す.

5. 改善した非線形有限要素解析

本章では, 一般には物性測定が困難なため考慮されない金属間化合物や微細な構成材特有の弾塑性物性を解析で考慮することで解析精度の改善を行う. 解析精度の確認は 2 章の SEM-DICM で測定した熱ひずみ分布と比較して行う.

5.1 解析条件

解析モデルと解析温度履歴は 3 章と同様なものを用いた. Si は等方弾性体, UF 材は粘弾性体を仮定した. 4 章の EDX の結果より, IMC の大部分が Cu₆Sn₅ であったので, 解析では IMC はすべて Cu₆Sn₅ とした. 解析に用いた IMC と銅バンプの物性値を表 5 に示す. その他の材料は 3 章と同様の物性値を用いた.

5.2 解析結果

図 15 に銅の塑性変形と IMC 生成を考慮した解析の結果を示す. 改善前と比較すると Si 部のひずみとバ

表 5 構成材料の材料特性

Table 5 Material properties of components.

	Young's Modulus (GPa)	CTE (ppm/K)	Poisson's ratio	Yield Stress (MPa)
Cu	73	17	0.3	254
IMC	100	18.5[12]	0.3	1750

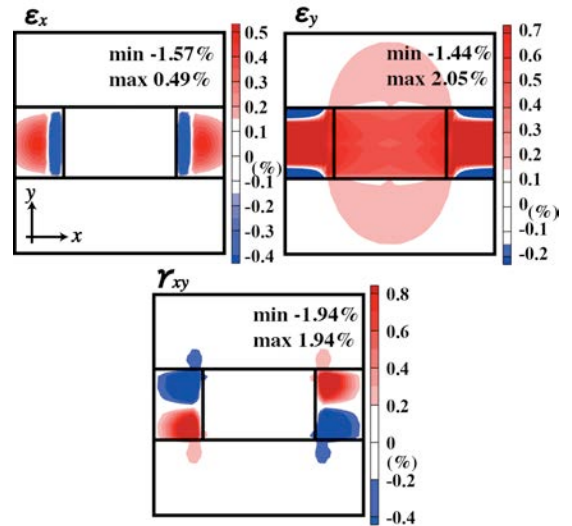


図 15 Cu バンプと金属間化合物の材料特性を考慮した FEA によるひずみ分布

Fig. 15 Strain distributions analyzed by the FEA considering the material properties of Cu bumps and IMC.

ンプ中央層のひずみが小さくなっている. その理由は銅の塑性変形を考慮することで Si 部分の応力が小さくなり, バンプ中央層ではんだの IMC 化を考慮すると硬い材料となり, ひずみが小さくなるからだと考えられる. 次に 2 章の SEM-DICM による実測のひずみ分布と比較すると, ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} の分布は実測とほぼ一致したが, ひずみの最大値や最小値が実測の 2 倍以上となっている. これは実測においては, ひずみの基となる変位データを DICM によって求める際に, ある範囲のサブセットの相関をとっているために, 急峻な変位の変化が平滑化されてしまうことが原因の一つと考えられる. また, 解析においては ϵ_y については Si と UF の界面で圧縮が生じており, γ_{xy} では Cu と UF と Si の接合角部で最大値と最小値をとっていることから, 材料界面の物性値の非連続性から局所的にひずみの最大値が大きくなっていることが考えられる.

6. むすび

三次元積層チップ開発のために、接合部の強度評価をする目的で作成した試作チップの熱負荷時のひずみを SEM-DICM により測定し、FEM の結果と比較して解析精度の検証を行った。解析には UF 材のポアソン比の粘弾性特性を考慮することでせん断弾性率と体積弾性率の両方の粘弾性特性を考慮し、また銅バンブと IMC の弾塑性物性も考慮した。得られた結果から、銅と IMC の弾塑性物性を考慮すると Si チップのひずみの緩和が確認された。依然として実測との差があるが、これは実測においては DICM に用いた画像解像度の限界からひずみ分布が平滑化されていることが考えられる。また、解析においては材料界面の物性値の非連続性から局所的にひずみの最大値が大きくなっていることが考えられる。

本研究で開発した SEM と DICM を組み合わせた高倍率の熱ひずみ計測技術により、微細な電子部品の接合部の非線形解析の精度を向上させることができた。また非線形有限要素解析では EDX によって IMC の存在を明らかにし、微細な構成材料をナノインデンテーションで直接試験することで、解析精度を向上させる必要があることがわかった。このように、SEM-DICM を用いた微細領域のひずみ計測技術は、シミュレーション解析結果との対比、検証などを可能とするため、微細構造物の解析精度の向上に大きく貢献することが期待できる。

謝 辞

本研究は、NEDO 技術開発機構から委託された「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」プロジェクトの援助を受けて実施された。

文 献

- [1] 三浦英生, 西村朝雄, 河合末男, 西邦彦, “IC プラスチックパッケージ内応力測定素子の開発とその応用”, 日本機械学会論文集 Vol.53, No.493, A, pp.1826-1832, 1987.
- [2] 池田徹, 貫野 敏史, 宍戸 信之, 宮崎則幸, 田中 宏之, 畑尾 卓也, “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”, 溶接学会誌, 第 79 巻, 第 3 号, pp.237-242, 2010.
- [3] Toru Ikeda, Toshifumi Kanno, Nobuyuki Shishido, Noriyuki Miyazaki, Hiroyuki Tanaka and Takuya Hatao, Non-linear analyses of strain in flip chip packages improved by the measurement using the digital image correlation method, *Microelectronics Reliability*, Vol. 53, pp. 145-153, 2013.
- [4] M.A. Sutton, W.J. Wolaters, W.H. Peters, W.F. Ranson and S.R. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital image correlation method”, *Computer Vision*, pp.133-139,

1983.

- [5] Zili Sun, J.S. Lyons and Stephen R. McNeill, “Measuring microscopic deformation with digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.27, pp.409-428, 1997.
- [6] M.A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J.J. Orteu, S.R. McNeill, H.W. Schreier and X. Li, “Metrology in a scanning electron microscope: theoretical developments and experimental validation”, *Measurement Science and Technology*, Vol.17, pp.2613-2622, 2006.
- [7] H.A. Bruck, S.R. McNeill, M.A. Sutton and W.H. Peters III, “Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correlation”, *Experimental Mechanics*, Vol.29, pp.261- 267, 1989.
- [8] P. Lancaster and K. Salkauskas, “Surfaces generated by moving least squares methods”, *Mathematics of Computation*, Vol.37, pp.141-158, 1981.
- [9] L.J. Ernst, G.Q. Zhang, K.M.B. Jansen, and H.J.L. Bressers, “Time- and temperature- dependent thermo-mechanical modeling of a packaging molding compound and its effect on packaging process stresses”, *Journal of Electronic Packaging*, vol.125, pp.539-548, 2003.
- [10] K. Do-Seop, Y. Qiang, S. Tadahihiro and S. Masaki, “Nonlinear behavior study on effect of hardening rule of lead free solder joint”, *JSME*, Vol.7, No.2, pp.161-169, 2004
- [11] M.Dao, N. Chollacoop, K.J. Vanvliet, T.A. Venkatesh and S. Suresh, “Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation.” *Acta mater.* Vol. 49, pp. 3899-3918, 2001.
- [12] Nan Jiang , J. A. Clum, R. R. Chromik and E. J. Cotts “Thermal expansion of several Sn-based intermetallic compounds” *Scripta Materialia*, Volume 37, Issue 12, Pages 1851-1854, 1997.



岡 大智

2011 京大・工卒, 2013 同大大学院修士課程在学。電子実装部の信頼性評価の研究に従事。



池田 徹

1986 九大・工卒, 1992 同大大学院博士課程了。博士(工)。1992 九大助手, 1996 同助教授, 2004 京大助教授, 2012 より鹿児島大学教授。現在、鹿児島大学において、電子実装部の信頼性評価に関する研究、界面破壊力学に関する研究に従事。日本機械学会, 日本材料学会, エレクトロニクス実装学会, 日本計算工学会会員。



宮崎 則幸

1972 東大・工学。1977 同大学院博士課程了。工学博士。1977 日本原子力研究所研究員。1983 九大助教授。1996 九大教授。2004 京大教授。現在、電子／光学デバイス用単結晶の材料強度に関する研究、電子実装部の信頼性評価に関する研究、材料の水素ぜい化に関する研究に従事。日本機械学会、日本材料学会、日本原子力学会、エレクトロニクス実装学会等の各会員

IEICE Trans.
Electron., Vol.
E-86-C, No.12,
pp. 2387-2393,
2003

田中 宏之（正員）

1979 北海道大学・工学。1981 同大学院修士課程了。1981 住友ベークライト株式会社入社。高分子の信頼性・物性解析技術の研究、特に、マイクロ波材料定数測定技術の研究に従事。2002 年からエレクトロニクス実装信頼性に関する解析技術研究に従事。2003 北海道大学博士後期課程単位満了中退。2004 博士（工学）取得。2007 上席化学工学技士、現在は住ベリサーチ株式会社に所属。IEEE MTT, IEEE CPMT, 日本機械学会、化学工学学会、エレクトロニクス実装学会の各会員。



畑尾 卓也

1996 九大・理卒。現在、エレクトロニクス実装信頼性に関する解析技術の研究に従事。エレクトロニクス実装学会会員。

縦 26.4mm
横 20mm

松本圭司

1995 東京大学・工学。1997 同大学院修士課程了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。2005 同大学院博士課程了。現在、半導体実装分野の研究に従事。

縦 26.4mm
横 20mm

小原さゆり

1998 ブリティッシュコロンビア大・物理博士課程了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。現在、半導体実装分野の研究に従事。



折井靖光

1986 大阪大学・基礎工学。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。2012 同大学院博士課程了。現在、半導体実装分野の研究に従事（IBM Senior Technical Staff Member）。

縦 26.4mm
横 20mm

山田文明

1972 東京工業大学・理卒。1979 同大学院博士課程了。現在、半導体実装分野の研究に従事。



嘉田守宏

1970 福井大学・工学。同年シャープ株式会社入社。現在、技術研究組合 超先端電子技術開発機構にて三次元集積化技術分野の研究に従事。

Abstract

We evaluated the thermal strain in a test chip for a three-dimensional stacked integrated circuits (3D-SIC) using both measurement and numerical analyses. First, the distribution of thermal strain on the cross-section of the test chip was measured using a scanning electron microscope and the digital image correlation method (DICM). Then, the distribution of strain in the test chip was also analyzed by the finite element method (FEM). We took account of the visco-elasticity of underfill resin and the elastic-plasticity of components measured with the nano-indentation. According to the comparison between the measurements and the analyses, we evaluated the accuracy of the analyses.

Key words

Scanning electron microscope, Digital image correlation method, Nonlinear finite element analysis, Visco-elasticity, nano-indentation