

デジタル画像相関法を用いた電子実装部の熱ひずみ分布計測[†]

宍戸 信之* 池田 徹** 宮崎 則幸**
中村 健太郎*** 宮崎 政志**** 猿渡 達郎***

Thermal Strain Measurement on Electronic Packages Using Digital Image Correlation Method

by

Nobuyuki SHISHIDO*, Toru IKEDA**, Noriyuki MIYAZAKI**, Kentaro NAKAMURA***,
Masashi MIYAZAKI**** and Tatsuro SAWATARI***

An effective strain measurement system for small region in electronic packages using digital image correlation method (DICM) was developed. The accuracy of measurement using the DICM was affected by the distortion of captured images. An error correction method using a piezo-stage was proposed to improve the accuracy of the DICM. The measured distribution of thermal strain in a print circuit board accurately correlated to the macroscopic warpage measured by a laser displacement meter. It proved the accuracy of the measured strain. The distributions of thermal strain in chip embedded print circuit boards were measured using the DICM. The measured distributions of strain qualitatively corresponded with those calculated by the finite element method.

Key words : Digital image correlation, Electronic package, Thermal strain, Lens aberration, Calibration

1 緒 言

電子実装部の小型化に伴って、接合部は微細化が進むだけでなく、複合材料や有機材料および金属など多様な材料が複雑に組み合わせられるようになっている。このような電子デバイスの信頼性を確保するためには、反りなどのマクロな評価方法だけでなく、微細接合部周辺のひずみを実測することも重要である。

ひずみ分布計測技術としてのデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method : DICM) は、計測システムの取り扱いが簡単であり、目的に応じて光学系の設定を変えることで任意の倍率で計測が可能となる特徴をもつ。しかしながらレンズの収差などの光学系の誤差に計測精度が左右されるため、光学系により変位の分解能が $\pm 0.1 \sim \pm 0.01 \text{ pixel}$ のような大きな幅を持つ^{1), 2)}したがって、DICM による計測の際には、光学系の誤差を考慮に入れなくてはならない。

本研究では、光学顕微鏡と DICM を組み合わせることで、微細領域でのひずみ分布を計測する手法を開発した。その際に光学系の誤差に起因する計測誤差については、移動ステージを用いてこの誤差を排除する較正手法を提案する。これにより、光学系の影響を受けることなく高精度な変位計測が可能となった。また、本計測システムの適用性を検証するために、積層基板の断面部やシリコ

ンチップ内蔵基板内部の熱ひずみ分布計測をおこなった。積層基板では、複合材料基板内部の複雑なひずみ分布とマクロな反りの間に整合性がとれていることを示す。また、チップ内蔵基板では有限要素解析の結果と比較を行い、解析支援手法としての DICM の有効性を示す。

2 デジタル画像相関法の原理

デジタル画像相関法では、Fig. 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³⁾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

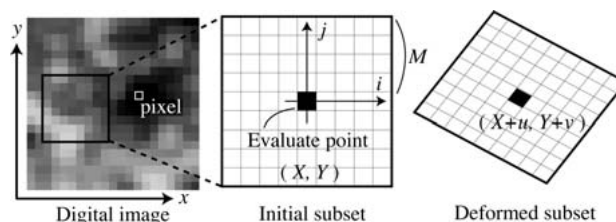


Fig. 1 Coordinate system and subset models.

[†] 原稿受理 平成 19 年 2 月 15 日 Received Feb. 15, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Mech. Eng. and Sci., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

** 正会員 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Mech. Eng. and Sci., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

*** 太陽誘電㈱ 〒370-3347 群馬県群馬郡榛名町, Central R&D. Laboratories, Taiyo Yuden, Gunma-gun, Gunma, 370-3347

**** 正会員 太陽誘電㈱ 〒370-3347 群馬県群馬郡榛名町, Central R&D. Laboratories, Taiyo Yuden, Gunma-gun, Gunma, 370-3347

となるようなサブセットを变形後の画像上で探索する.

$$C(u^*, v^*) = \quad (1)$$

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

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 は变形前後のデジタル画像上の輝度値を表す. このとき, サブセットの变形には式 (2) で表される剛体变形および, 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, サブセットの变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, サブセット自体の变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变形量は, 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^{3), 4)}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.⁵⁾

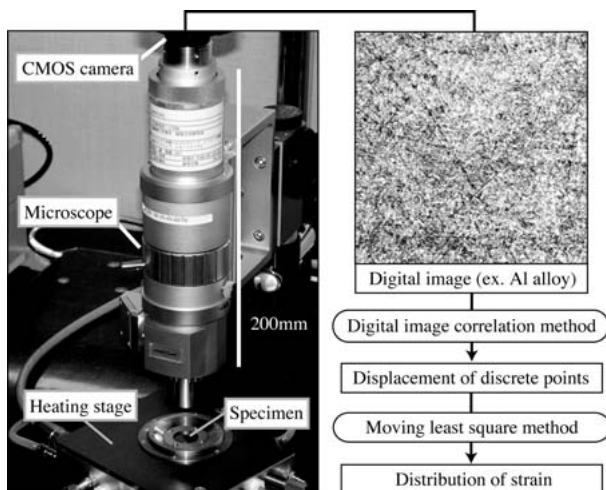


Fig. 2 Schematic diagram of a measuring system.

3 計測精度と画像

電子デバイス中の微細領域における表面像を取り込むために, 本研究では Fig. 2 に示す計測システムを用いた. ここで, Heating stage に入れられた試験片は, Microscope を通して CMOS カメラによって撮影され, その画像は IO ボードを通じてパーソナルコンピュータに取り込まれる. このデジタル画像を DICM によって処理し, 離散点の変位を求める. 次に MLSM を用いて, 変位からひずみを求める. このとき, DICM による計測変位は光学系の誤差を含んだ画像の变形から算出したものであるために, 実際の物体表面での変位とは必ずしも一致しない. 画像がレンズ収差などの影響でゆがみ, 計測変位に偏差が生じるためである. したがって, 高精度な計測をおこなうには, 計測変位と実変位とを正しく対応させる必要がある.

本計測システムにより取り込まれた画像では, 光路上のレンズ系の収差や観察窓による屈折, 計測対象表面との幾何学配置などの影響を受ける. Fig. 3 (a) (b) に示す変位分布は, アルミ合金片を対象とした移動ステージによる平行移動時の計測変位分布である. 移動ステージには変位分解能 2nm のピエゾステージを使用した. ステージの移動量は $(\Delta x, \Delta y) = (-20\mu\text{m}, 20\mu\text{m})$ とし, 撮影倍率は約 1.6 (pixels/ μm) で, 計測領域は $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ であった. 平行移動により生成された変位は一様であるはずだが, 実際には一様な変位分布ではなく, 画像外周部で変位の勾配が存在している. このように光学系の影響により生じる誤差は計測領域内で滑らかに分布しているため, 画像の輝度値のノイズに起因するランダムな誤差^{3), 4)}と異なり, 誤差としての判別が困難である. 全視野に渡って高精度な計測をするためには, この誤差を排除する変位較正が必要となる.

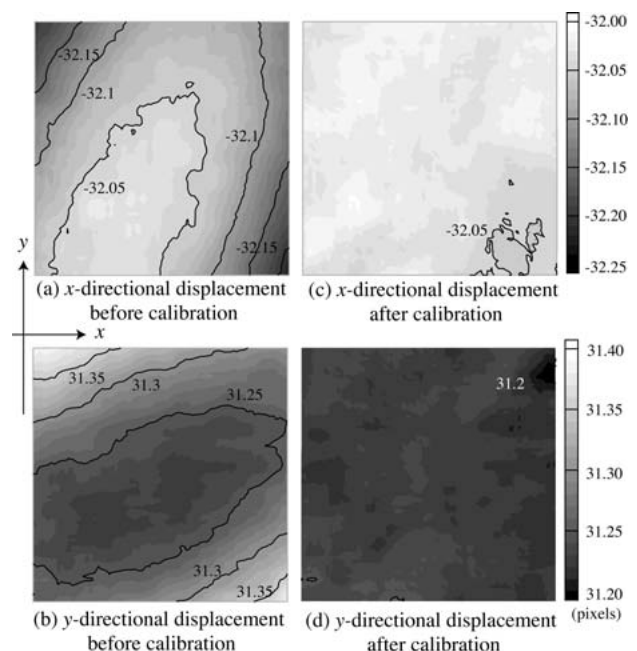


Fig. 3 Distributions of measured displacement for a rigid body movement using a piezo-actuated stage.

デジタル画像に含まれるゆがみの修正に、収差や幾何学的配置の影響を直接的に考慮したモデルが考案されている^{6), 7)}。その一方で、Schreier ら⁸⁾は DICM のような高い精度を要求する画像のゆがみの補正には、それぞれの影響に関する直接的なモデルの組み合わせでは複雑な要因を全て網羅することは不可能であり、誤差要因を間接的な関数で包括的にとらえる手法の方が適しているとしている。そこで、本システムでは収差を含め全ての画像に加えられる影響を間接的な分布関数で表現し、これを用いた次式の座標変換式を利用することで、計測変位の較正を行った。

$$\begin{cases} x_{re} = \lambda_x x_{id}, & x_{id} = x_{im} + x_{dis} \\ y_{re} = \lambda_y y_{id}, & y_{id} = y_{im} + y_{dis} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 x_{im} , y_{im} はデジタル画像上の座標、 x_{id} , y_{id} はゆがみのない理想的な画像上の座標、 x_{re} , y_{re} は物体表面上の座標を表す。また、 x_{dis} , y_{dis} はゆがみによる偏差量であり、 λ_x , λ_y は計測の倍率を表す。倍率項は計測結果として重要なひずみの分布には影響を与えないため、以下では x_{im} - y_{im} 系から x_{id} - y_{id} 系へのゆがみの較正についてのみ述べる。

式 (4) による変位較正には、画像上でのゆがみ量 (x_{dis} , y_{dis}) の分布が必要となる。本手法では、ピエゾステージによる既知の変位量 (u_{id} , v_{id}) と DICM による計測値 (u_{im} , v_{im}) を比較することで、この値を得る。まず Fig. 4 のような、基準とする画像 Image-O とピエゾステージにより (Δu_{id} , 0) だけ平行移動させた Image-X の 2 状態の画像を用いる。ゆがみの影響が小さいとされる画像中心付近を原点とし、(x_{dis} , y_{dis}) = (0, 0) を仮定する。基準画像における原点 (Fig. 4 中の点 O) に関して、DICM による計測変位から移動後の画像における点 O の座標 O' (Δu_{im} , Δv_{im}) が得られる。また、ピエゾステージの変位量から実際の物体上における座標は、(Δu_{id} , 0) であることがわかっているため、式 (4) より点 O' におけるゆがみ (x_{dis} , y_{dis}) が得られる。このとき、ステージの移動方向と物体表面が空間的に平行とみなせるならば、移動後の画像上の点 O' を基準画像での新たな着目点 A (Δu_{im} , Δv_{im}) としたとき、この新たな点に関して実際の物体上における座標は (Δu_{id} , 0) であり、移動後の座標は ($2\Delta u_{id}$, 0) である。この点 A の移動後の画像の座標も、同じ画像の組 Image-O と Image-X を用いることで得られるため、新たに ($2\Delta u_{id}$, 0) におけるゆがみを得ることができる。これを繰り返し、さらに y 方向への変位を与えた画像 Image-Y も組み合わせ

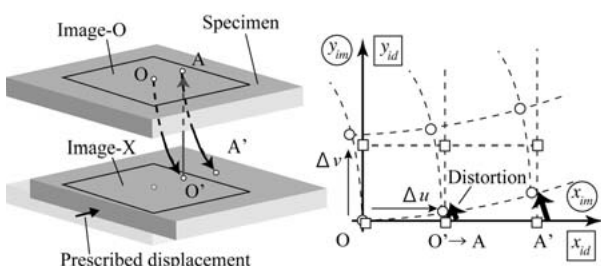


Fig. 4 Coordinate system for the calibration method.

ることで、Fig. 4 のように格子点上のゆがみ量が得られる。輝度値ノイズから生じた不規則な計測誤差が格子点上で得られたゆがみ量 x_{dis} , y_{dis} に含まれるため、その平滑化および画像全領域での補間を目的として、MLSM を用いた。Fig. 5 は平滑化後のゆがみ分布である。

Fig. 5 のゆがみ分布を用いて Fig. 3 (a) (b) の計測変位分布を較正した結果を Fig. 3 (c) (d) に示した。画像のゆがみによる影響が排除され、計測領域内で一様な変位が得られていることが判る。このときの計測変位は (Δx , Δy) = (-32.04pixels, 31.22pixels) を中心に、DICM における理想的な計測精度 ± 0.02 pixels に収まる結果であった。³⁾

本較正手法により、任意の光学系において基準画像、x 方向への移動画像、y 方向への移動画像の計 3 状態の画像を用いれば、全視野において画像のゆがみの影響が排除できる較正関数を作成できる。これにより光学系の設定に依存することなく、DICM による高精度な変位計測が可能となった。

4 計 測 例

4・1 積層基板

開発した DICM によるひずみ計測システムを利用し、電子実装用基板の断面における熱負荷時のひずみ分布計測をおこなった。試験片の層構造を Fig. 6 に示す。

まず、室温で反りを有する試験片に対して、レーザフォーカス変位計を用いて温度を変化させたときの反りを計測した。このとき曲率は、試験片長手方向 (x 軸) に沿って一定であった。曲率の温度変化を Fig. 7 に示す。図に示すとおり、初期の温度サイクルとそれ以降のサイクルで、曲率が異なる履歴を示した。これは試験片作成時の残留応力による影響と考えられる。一旦樹脂のガラス転移点 T_G 以上に加熱すると、しばらくは温度に対してただ一つの曲率の履歴を辿る。以降では、簡単のために T_G 以上に一旦加熱した後の状態のみを取り扱った。

Fig. 7 上で曲率が零となる温度を応力フリー温度 T_F と定義し、この T_F をひずみ計測の基準状態とした。変

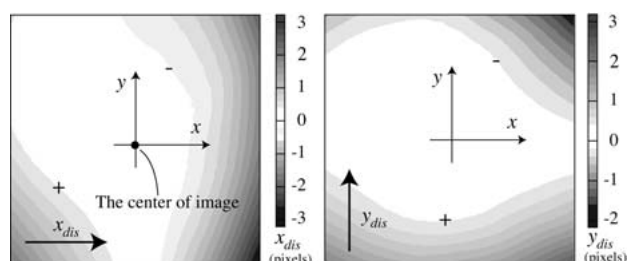


Fig. 5 Distribution of the distortion of a captured image.

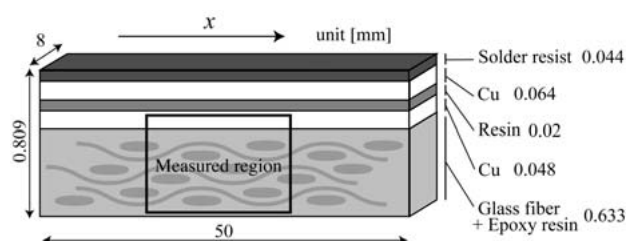


Fig. 6 Configuration of a print circuit board (PCB).

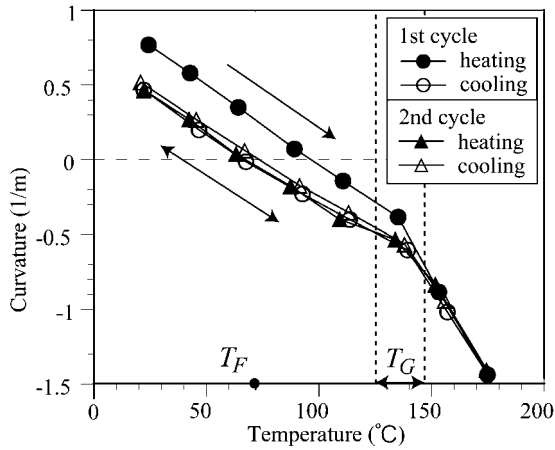


Fig. 7 Variation of the curvature of a PCB specimen with temperature.

Table 1 Temperature histories for the DICM measurements of a PCB specimen.

Temp. history	Reference	Deformed
A	73.4°C (Stress free temp.)	19.7°C (Room temp.)
B	73.4°C (Stress free temp.)	138.3°C (Lower than T_G)
C	73.4°C (Stress free temp.)	168.5°C (Higher than T_G)

形後にあたる温度状態は Table 1 に示す。温度履歴 B において計測されたひずみ分布を Fig. 8 に示す。垂直ひずみ ε_y は、繊維同士の接触部でひずみが抑えられているものの、繊維による y 方向の拘束がないために、樹脂部においては ε_x や ε_{xy} に比べてひずみの値が大きい。逆に ε_x や ε_{xy} はひずみが小さく、より複雑な分布を示した。

内部の熱ひずみの分布には、いずれもガラス繊維の配置と同様の周期性が見られた。そこで、ガラス繊維の織物構造がおよそ一周に当る領域に着目し、位置 y における x 方向の垂直ひずみ ε_x を該当領域で平均した値を評価した。Fig. 9 に示すように平均化したひずみ ε_x^h の y 方向分布は直線性を有するため、梁の曲げモデルと同様に变形すると仮定し、 ε_x^h を線形関数で近似することでマクロな基板の曲率を算出した。各温度履歴で計測されたひずみ分布をもとにして得られた曲率を Fig. 10 に示す。ひずみから得られた曲率は、レーザフォーカス変位計によりマクロに計測された曲率と一致していた。一見ランダムに分布している基板断面のひずみが、平均的にはマクロな反りと一致していることから、本システムで計測された微小試験片上のひずみ分布は、信頼のおけるものであると考えられる。

4・2 シリコンチップ内蔵基板

シリコン (Si) チップ内蔵基板を対象として、チップ角部周辺における熱負荷時のひずみ分布を計測した。このとき、有限要素解析によるひずみ分布の評価も行い、両結果を比較した。

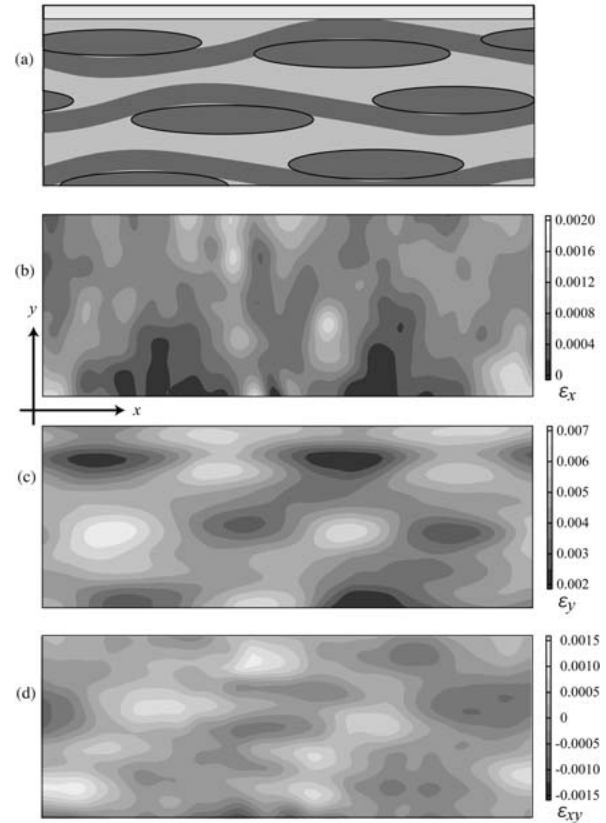


Fig. 8 Distribution of measured strain for state B. (a) : model of measured region. (b), (c) and (d) are ε_x , ε_y and ε_{xy} , respectively.

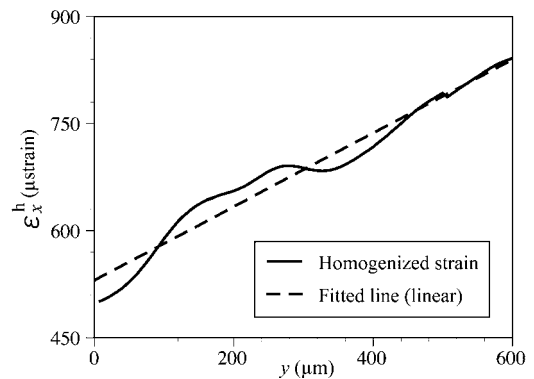


Fig. 9 Homogenized strain along y -direction.

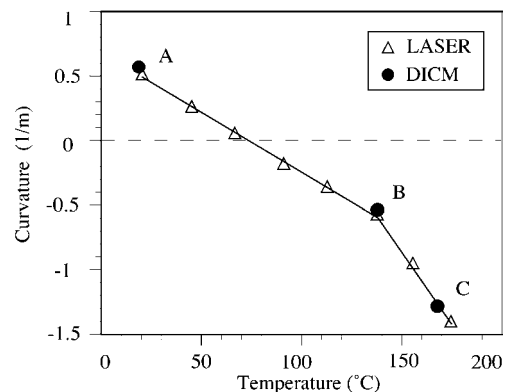


Fig. 10 Comparison between curvature measured using the DICM and that measured using a laser displacement meter.

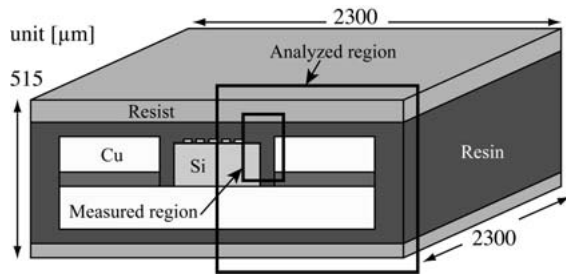


Fig. 11 Schematic of a chip embedded board.

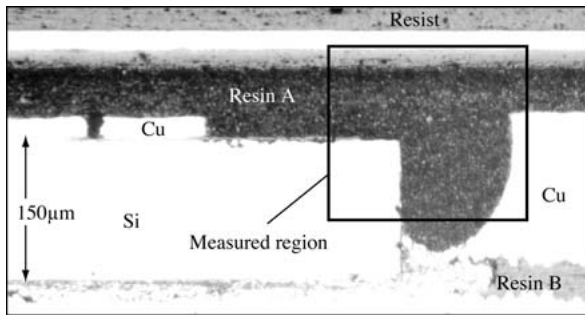


Fig. 12 Captured image and a measured region for the DICM.

試験片構造を Fig. 11 に、撮影画像および計測領域を Fig. 12 に示す。室温の 28.4℃を基準状態とし、95.4℃まで昇温した状態のひずみ分布を計測した。有限要素解析では、温度条件を計測時と同じものに設定し、汎用コード ANSYS を用いた線形熱応力解析を Fig. 13 に示す 2 次元モデルでおこなった。試験片は観察面が開放していることから二次元解析では平面応力を仮定した。解析における物性値には Table 2 に示すものを用いた。このとき、計測・解析ともにチップ周辺の樹脂 A に関してフィラー充填率の異なる試験片を対象とし、その差が計測と解析の結果に与える影響に着目した。DICM の計測により得られたひずみ分布を Fig. 14 に、解析によって得られたひずみ分布を Fig. 15 に示す。

両図を比較すると、計測結果と解析結果のひずみ分布は定性的には一致していることがわかる。しかし、定量的なひずみの大きさについてみると、DICM による計測結果の方が解析結果よりも一桁大きくなっている。前節の検証結果により実構造物に対する DICM 計測の信頼性は証明されたため、解析におけるひずみが過小評価され

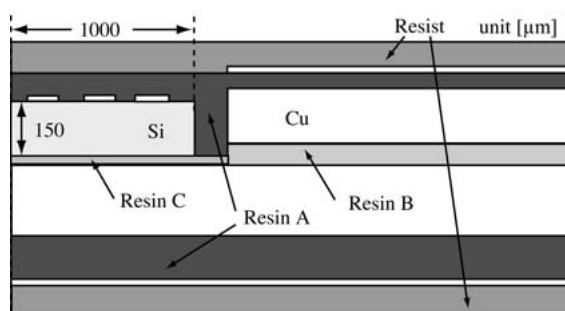


Fig. 13 Analysis model for the finite element method.

Table 2 Material properties of materials in a chip embedded board.

	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	CTE ($10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$)
Cu	25.2	0.343	16.5
Resin A			
higher filler content	8.48	0.3	34.8
lower filler content	5.30	0.3	70.5
Resin B	4.00	0.258	43.3
Resin C	6.40	0.3	57.0
Resist	3.31	0.3	37.3
Si	112	0.28	2.49

CTE: Coefficient of linear thermal expansion.

ているものと考えられる。これは、今回の解析が樹脂のヤング率と線膨張係数に室温のものを用いた線形熱弾性解析であるために、高温でのヤング率の低下や粘弾性効果が考慮されなかったことに起因する。本計測手法により、解析が困難な非線形材料よりなる複雑な微小構造物中のひずみを、簡便に測定することが可能となる。

Fig. 14 の計測結果より、Filler 含有率大の ResinA を用いた方が、Filler 含有率小の ResinA を用いた場合に対して、ひずみの大きさを数分の一に低減できることがわかる。このように DICM を用いた実測により、部品内蔵基板中の微細領域のひずみを定量的に比較することができた。

5 結 言

デジタル画像相関法を用いた微細領域における変位・ひずみ計測システムを開発し、計測精度に対する光学系の誤差の影響を排除する較正手法を開発した。また、本計測システムを用いて、積層基板および部品内蔵基板の熱負荷時のひずみ分布計測をおこなった。それぞれの項目について以下にまとめた。

(1) 光学系の誤差に起因する画像のゆがみは、計測変位に緩やかな分布をもった誤差を生じている。全視野における高精度な変位計測をおこなうために、このゆがみに対する較正手法を開発した。ピエゾステージにより既知変位を与えた画像を利用して較正関数を作成することで、変位のゆがみを修正した。検証のため、平行移動時の変位分布の較正を行い、その有効性を示した。本手法によって、全視野において $\pm 0.02\text{pixels}$ の変位の分解能が得られた。

(2) 実構造物の計測では、実際にミクロン領域での計測を行い、複雑な熱ひずみ分布の計測が可能であるか検証した。まず、積層基板を対象とした計測では、そのマクロな反りがレーザ変位計による計測と一致していることから、DICM による計測の信頼性が間接的に証明された。

(3) 次に、部品内蔵基板中の熱ひずみ分布計測を行い、有限要素解析による解析結果とひずみ分布の傾向が一致することが確かめられた。また、DICM を使った熱ひずみ計測により、材料の違いによるひずみの大きさの違いを定量的に評価することができた。

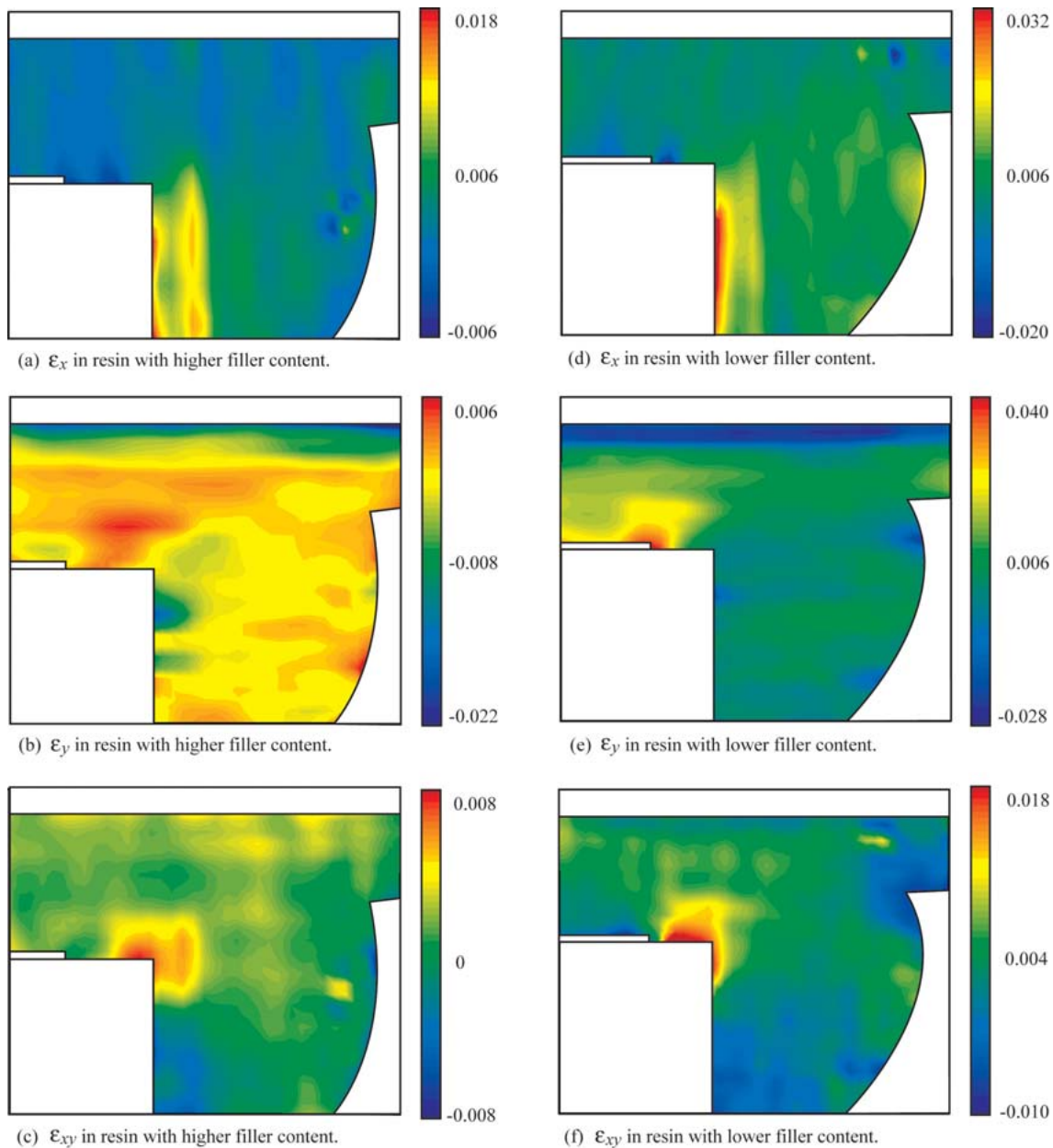


Fig. 14 Distribution of strain around the corner of Si chip measured by DICM.

本研究は、福岡地域の文部科学省知的クラスター創成事業の支援により行われた研究を基にして、日本学術振興会科学研究費補助金の支援により発展させた物である。ここに記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) I. Chasiotis, "Mechanics of thin films and microdevices", IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol.4, No.2, pp.176-188 (2004).
- 2) J. Chen, G. Xia, K. Zhou, G. Xia, Y. Qin, "Two-step digital image correlation in micro-region measurement", Optics and Lasers in Engineering, Vol.43, pp.836-846 (2005).
- 3) H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton and W. H. Peters III, "Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction", Experimental Mechanics, Vol.29, pp.261-267 (1989).
- 4) Z. Sun, J. S. Lyons and S. R. McNeill, "Measuring microscopic deformation with digital image correlation", Optics and Lasers Squares Methods, Vol.27, pp.409-428 (1997).
- 5) P. Lancaster and K. Salkauskas, "Surfaces generated by moving least squares methods", Mathematics of Computation, Vol.37, pp.141-158 (1997).
- 6) L. Lucchese, "Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification", Image and Vision Computing, Vol.23, pp.517-539 (2005).
- 7) S. Yoneyama, A. Kitagawa, K. Kitamura and H. Kikuta, "In-plane displacement measurement using digital image correlation with lens distortion correction", JSME International Journal, Series A, Vol.49, No.3, pp.458-467 (2006).
- 8) H. W. Schreier, D. Garcia and M. A. Sutton, "Advances in light microscope stereo vision", Experimental Mechanics, Vol.44, No.3, pp.278-289 (2004).

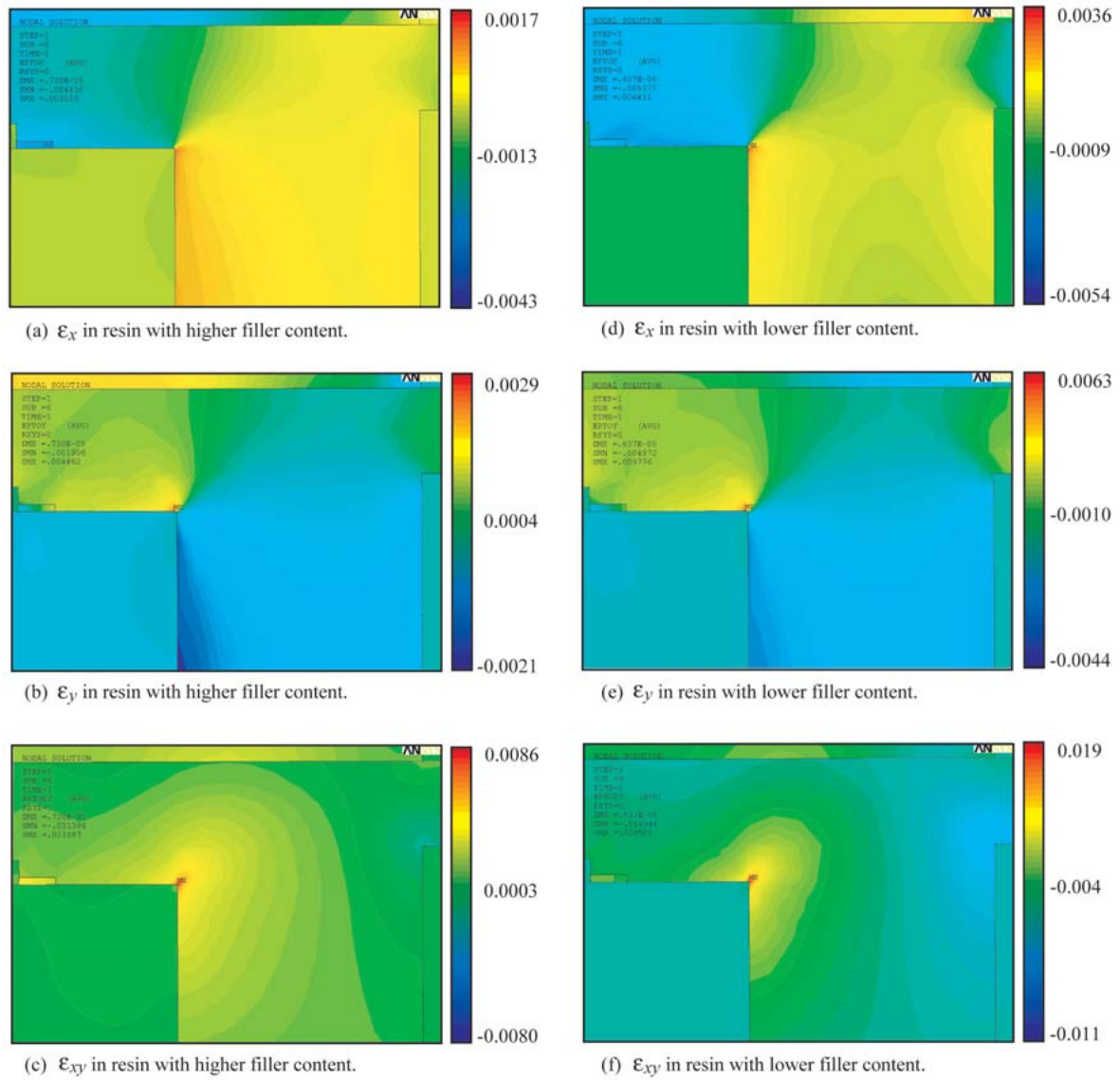


Fig. 15 Distribution of strain around the corner of Si chip calculated by FEM under plane stress condition.