

マイクロ接合部の疲労損傷評価のための非破壊ひずみ測定の可能性試験 Feasibility Study of Nondestructive Strain Measurement for Evaluation of Thermal Fatigue Damage in Micro Joints

岡本 佳之^a, 高柳 毅^a, 釣谷 浩之^b, 佐山 利彦^b, 上杉 健太郎^c, 星野 真人^c,
長瀬 達則^d, 森 孝男^d

Yoshiyuki Okamoto^a, Takeshi Takayanagi^a, Hiroyuki Tsuritani^b, Toshihiko Sayama^b, Kentaro Uesugi^c,
Masato Hoshino^c, Tatsunori Nagase^d, Takao Mori^d

^aコーセル(株), ^b富山県工業技術センター, ^c(公財)高輝度光科学研究センター, ^d富山県立大学
^aCosel Co., Ltd., ^bToyama Industrial Technology Center, ^cJASRI, ^dToyama Prefectural University

SPring-8 における放射光光源を利用した X 線マイクロ CT 装置(SP- μ CT)を用い、フリップチップの Sn-Ag-Cu 鉛フリーはんだ接合部を対象として、デジタル画像相関法による、ひずみ分布の非破壊計測の可能性について検証を行った。ひずみ計測の前段階として、変位ベクトルの粗探索を行った結果、Ag₃Sn 相のような特徴点の周囲では、比較的高い精度で、ひずみ計測を行うことができる見通しが得られた。今後、追加の実験を行うことでマイクロ接合部における新たな信頼性手法の開発が期待できる。

キーワード： フリップチップ、鉛フリーはんだ、ひずみ計測、非破壊評価、熱疲労損傷

背景と研究目的：

電子基板の高密度実装化に伴い、そのマイクロはんだ接合部における熱疲労損傷が、信頼性に大きな影響を与える要因となっている。このため、マイクロ接合部の微細な欠陥や損傷を非破壊で検出する技術の開発が強く望まれている。しかし、非破壊検査の手法としては、超音波検査や、X 線管球を用いた透過検査などが試みられているものの、十分な空間分解能が得られていないのが現状である。一方、SPring-8 においては、上杉らを中心として、放射光光源を用いた非常に高分解能の X 線マイクロ CT 装置(以下、SP- μ CT)が開発されており[1]、著者らはこれまで、Sn-Pb 共晶はんだを用いた簡単なフリップチップ接合部について、熱サイクル負荷による、微細な金属組織の成長過程や、熱疲労き裂の進展過程の観察に SP- μ CT を適用してきた[2]。しかし、鉛フリーはんだについては、き裂の進展過程の評価に留まっており、き裂発生前の段階での熱疲労損傷の評価の実現には至っていない。一方でこれまでの研究の過程で、SP- μ CT を用いて Sn-Ag-Cu 鉛フリーはんだ中の微小な Ag₃Sn 相を明瞭に確認できることを見出している。このような特徴点を確認できることから、SEM(Scanning Electron Microscope)画像や光学顕微鏡画像、産業用 X 線 CT など実績のあるデジタル画像相関法を用いて SP- μ CT により撮影した画像からひずみを計測できる可能性がある。ひずみを計測することが可能となれば、それを基にしたはんだ接合部の信頼性評価を行うことが可能である。そこで、本研究では、SP- μ CT により撮影したフリップチップはんだ接合部の画像に対する、デジタル画像相関法によるひずみ計測の可能性について検証を行った。

実験：

SP- μ CT を用いた実験を、SPring-8 の共用ビームライン BL20XU において実施した。SP- μ CT では、アンジュレータから発生した放射光を、Si の二結晶分光器により単色化して用いる。このように単色化された X 線を試料に照射し、CT 撮影を行う。単色化された X 線を用いることにより、その X 線エネルギーにおける線吸収係数(LAC, Linear Attenuation Coefficient)の 3 次元分布を定量的に評価することが可能である。また、この X 線は、極めて平行度が高く、高い指向性を持つため高分解能の 3 次元画像を再構成することが可能である。

観察に用いた試験体は、Si チップが FR-4 基板に直径約 120 μ m の Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu 鉛フリーはんだによってフリップチップ実装されたものである。この試験体を縦 1mm×横 1mm×長さ

10mm に加工して使用した。はんだバンプのひずみの状態を変化させるために、この試験体に高温保持温度 125°C、低温保持温度 -40°C、保持時間 30min、およびランプ時間 2min の熱サイクル負荷を加えた。

SP- μ CT を用い、はんだ接合部内における初期状態を観察した。さらに熱サイクル負荷を 1 サイクル加えた状態で観察を行った。試験体を回転ステージに固定し、これを 180°回転させて 1800 枚の透過画像を撮影した。透過画像 1 枚あたりの X 線の露光時間は、0.15sec とした。また、透過画像の撮影領域は、960 μ m \times 720 μ m とした。透過画像から CT 画像への再構成には、畳み込み逆投影法(Convolution back-projection method)を用いた。なお、 β -Sn 相と Ag_3Sn 相とのコントラストを明瞭にするために、X 線エネルギーは、Sn の K 吸収端よりもやや低い 29.0 keV を選択した。

SP- μ CT により、はんだ接合部を撮影する際には、X 線の散乱や屈折、回折の影響により、試験体と検出器の距離に応じて再構成画像の画質が変化する。最適な画質が得られる距離を判断するために、20mm から 45mm の範囲で検出器の距離を変化させて撮影を行った。

結果および考察：

図 1 に試験体と検出器の距離を変化させた際の各距離での再構成画像を示す。図は、いずれも初期状態のもので、同一のはんだバンプのほぼ同一の断面である。バンプ下部の明るい領域は、Cu パッドである。バンプ内部の微小な明るい領域が Ag_3Sn 相である。距離が大きくなるに従って、ノイズが減少し Ag_3Sn 相が鮮明になっている。一方で、距離が大きくなると、偽像を生じたり、X 線の屈折や回折の影響により輪郭などの正確さが損なわれる恐れがある。そこで、ノイズの状態や画像の鮮明さがあまり変化しなくなる 40mm の距離で以後の実験を行うこととした。

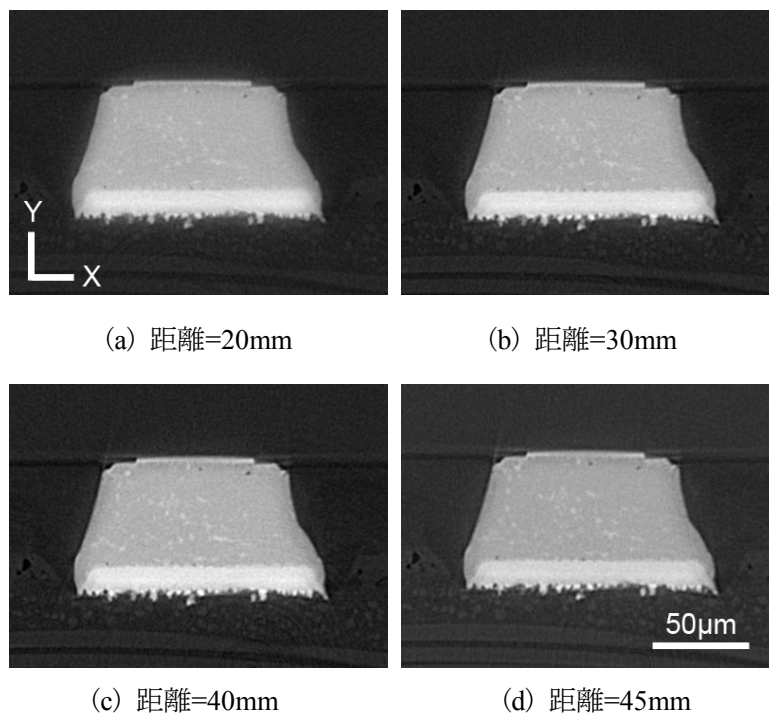


図 1. 試験体と検出器の距離による再構成画像の画質の違い

デジタル画像相関法では、変形前と変形後の 2 つの画像からひずみの分布を計算する。SP- μ CT により撮影した画像が、デジタル画像相関法が適用可能な画質を有しているか確認するために、変形後の画像として以下の 2 種類の画像を用いて評価を行った。1) 全く同一の状態と同じ試験体をもう 1 度撮影した画像、2) 同一の試験体に熱サイクル試験を 1 サイクル加えたもの。

上記 2 種類の各画像について、変位ベクトルの粗探索を行った。変位ベクトルの粗探索では、次式で表わされる、残差 S を計算し、 S が最小となる平行移動量(u_0, v_0)を各画素について求めた。

$$S(u, v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(x+u+i, y+v+j) - I_u(x+i, y+j)|_{I_u \rightarrow I_d}$$

ここで、 I_u は変形前の画素値、 I_d は変形後の画素値、 M は探索に用いるサブセットのサイズ(画素数)、 u, v はそれぞれ、 x, y 軸方向の平行移動量である。

図 2 に、全く同一の状態でもう 1 度撮影した画像を変形後の画像として、変位ベクトルの粗探索を行った結果を示す。(a)は変形前の画像として用いた再構成画像、(b)は変形後のものとして用いた再構成画像、(c)~(e)は、サブセットサイズ M を 5, 10, 15 ピクセルとした際の変位ベクトル(u_0, v_0)の絶対値を示している。同一の試験体を同一の状態でもう一度撮影した画像を変形後の画像として用いているので、正しく計算が行われていれば各画素での変位ベクトルの絶対値は 0 となるはずである。サブセットサイズ $M=5$ の場合は、 Ag_3Sn 相やバンプ表面などの特徴点の周辺では、正しく計算が行われているものの、 $\beta\text{-Sn}$ 相のみが広がっている領域では正しく計算が行われていないことが見て取れる。 $M=10, M=15$ の(d)(e)の画像から、サブセットサイズが大きくなるに従って、正しく計算される領域が広がっていくことがわかる。しかし、得られる変位ベクトルは、サブセットサイズの領域全体の平均的な変位となるのでサブセットサイズが大きくなるに従って局所的な変位の情報は得られなくなるため、高い精度でのひずみの計測が期待できなくなる。

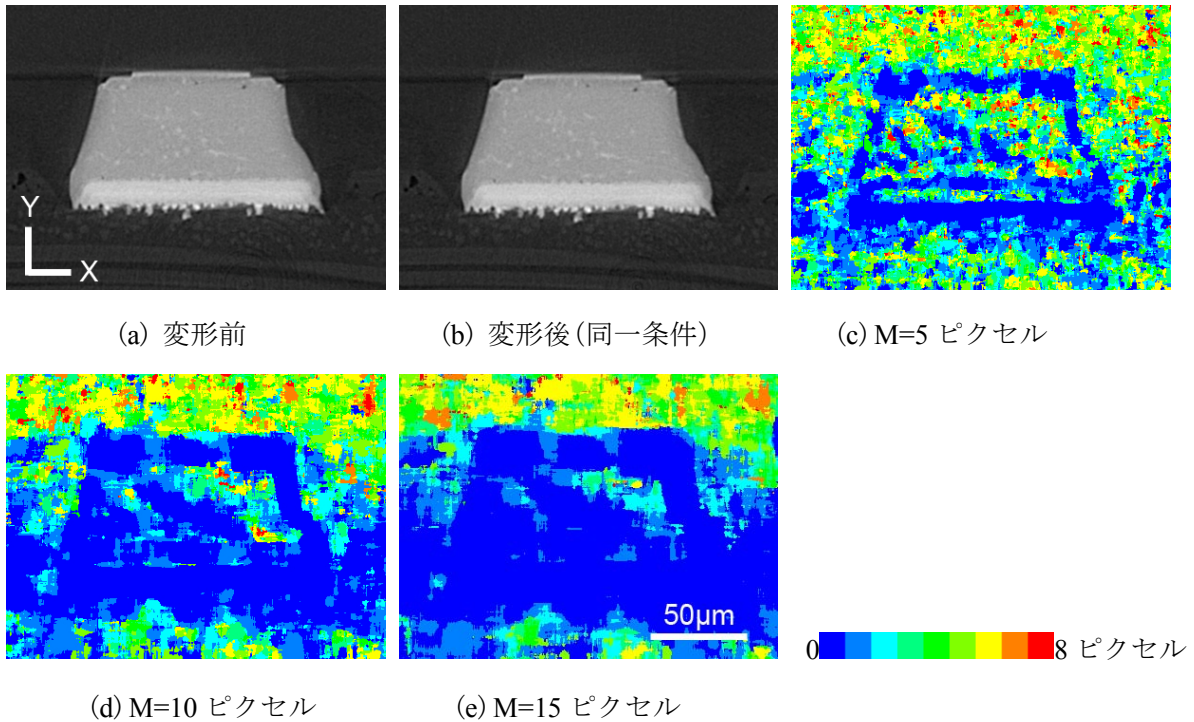


図 2. 同一条件で撮影した再構成画像と変位ベクトルの絶対値の分布

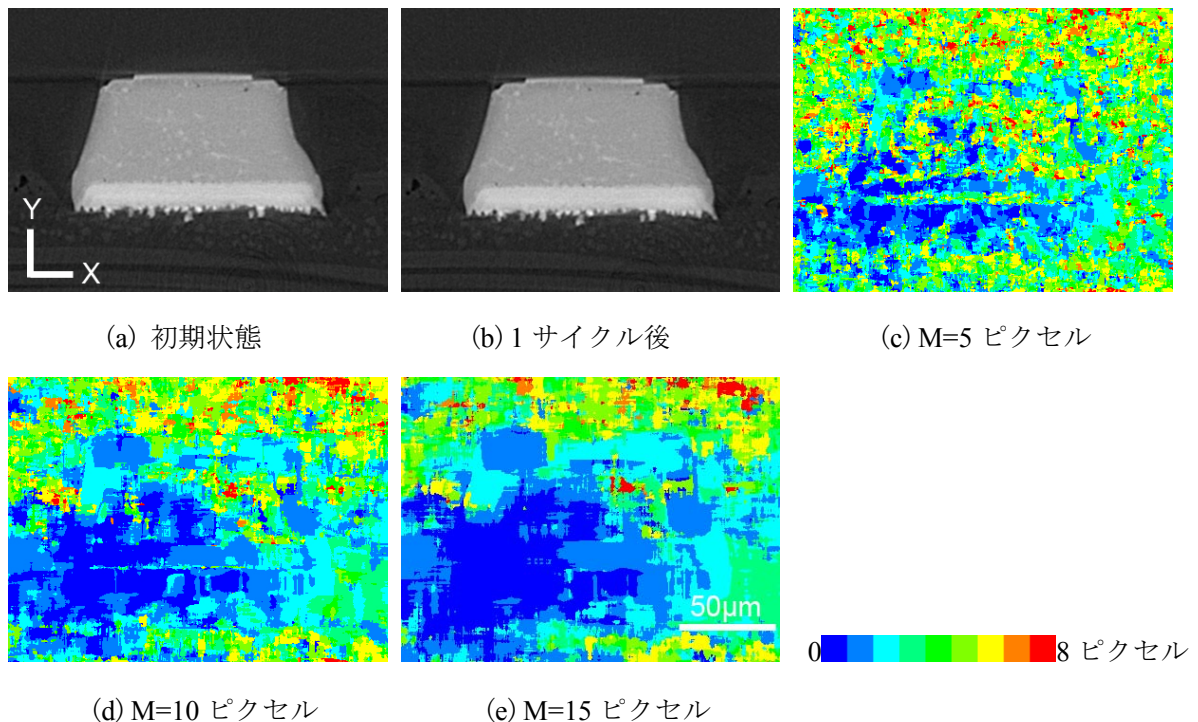


図 3. 初期状態および 1 サイクル後の再構成画像と変位ベクトルの絶対値の分布

図 3 は、同一の試験体に熱サイクル負荷を 1 サイクル加えた後に撮影した再構成画像を、変形後の画像として、変位ベクトルの粗探索を行った結果を示す。(a)は変形前の画像として用いた再構成画像、(b)は変形後のものとして用いた 1 サイクル後の再構成画像、(c)~(e)は、サブセットサイズ M を 5, 10, 15 ピクセルとした際の変位ベクトル(u_0, v_0)の絶対値を示している。この例では、変形前の画像と変形後の画像で、実際にひずみが異なっているはずである。そのため変位ベクトルの絶対値が、画像全域で 0 になることはないと考えられる。しかし、変位の分布は連続的に変化すると考えられるので、計算が正しければ変位ベクトルは、滑らかに変化するものと考えられる。サブセットサイズ $M=5$ の場合は、 Ag_3Sn 相やバンプ表面などの特徴点の周辺では、変位ベクトルの絶対値は滑らかに変化しており、計算が正しく行われているが、 $\beta\text{-Sn}$ 相のみが広がっている領域では、不連続な変化を示しており、正しく計算が行われていないことがわかる。図 2 の場合と同様に、サブセットサイズが大きくなるに従って、正しく計算される領域が広がっていくことがわかる。バンプの左下付近を中心に外側にいくに従って、徐々に変位ベクトルの絶対値が大きくなっているように見えるが、これは、変形前の画像と変形後の画像の間で回転にわずかなずれがあるためであると考えられる。画像全体の回転や平行移動は、ひずみを計算する過程で除去されるため、大きなずれがない限りは、問題とはならない。

これらの結果から、 Ag_3Sn 相のような特徴点の周囲では、デジタル画像相関法によるひずみ計測を、比較的高い精度で行う見通しが得られた。

今後の課題：

今後は、実際にひずみの計算を行って最終的な評価を行う必要がある。また、さらに追加の実験を行い、計測したひずみを基にした熱疲労損傷の評価手法を開発を進めたい。

参考文献：

- [1] Uesugi, K. et al., *Nucl. Instr. Method., Sec. A*, **467-468**, 853-856, (2001).
- [2] 釣谷浩之ほか, *機械学会論文集(A)*, **75**, 755, 799-806, (2009).