

2012B1490

BL20XU

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 健太朗^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い空間分解能を有する 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、疲労き裂が発生する以前の段階において、熱疲労寿命を評価することは実現していない。一方、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、光学顕微鏡画像、あるいは産業用 X 線 CT など実績のあるデジタル画像相関法^[3]を用いて SP- μ CT により撮影した CT 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 CT 画像に対して、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討を行った。

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-3.0 wt%Ag-0.5 wt%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 1 mm×横 1 mm×長

さ 10 mm 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 30 min、およびランプ時間 2 min 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、0.15 sec とした。また、透過画像の撮影領域は 960 μ m \times 720 μ m、および画素寸法は 0.5 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、はんだの微細組織における 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。また、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 (浜松ホトニクス社製ビームモニター:AA50、CCD カメラ:C4880-41S) の距離に応じて再構成画像の画質が変化する。まず、最適な画質が得られる距離を判断するために、20 mm から 45 mm まで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：

まず、CT 画像の撮影条件について検討する。図 1 は、試験体と検出器との距離を変化させた際の各距離における再構成画像を示す。図は、いずれも熱サイクル負荷前の初期状態であり、同一のはんだバンプにおけるほぼ同一の断面である。図において、はんだバンプは灰色の部分として表されており、これを本研究におけるデジタル画像相関法の対象とする。その他に、Si チップ、Cu パッド、アンダーフィル、および FR-4 基板も明瞭に観察できる。また、バンプ内部の微細組織において、灰色素地中に分布する微小な明るい点群が Ag_3Sn 相であり、素地の部分が β -Sn 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、徐々に損なわれていたりしている。そこで、はんだバンプ内部において、 Ag_3Sn 相のノイズレベルが低く、かつ鮮明さがあまり損なわれていない 40 mm の距離において以後の実験を行うこととした。

さて、デジタル画像相関法では、変形前の画像における各画素が、物体の変形後にどの位置に移動したのかという変位ベクトルを決定するために、変形前の画像において対象とする画素を中心とする $M \times M$ のサブセットと呼ばれる領域を設定し、これと最も類似している領域を変形後の画像において探索する。すなわち、変位ベクトルの探索では、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。

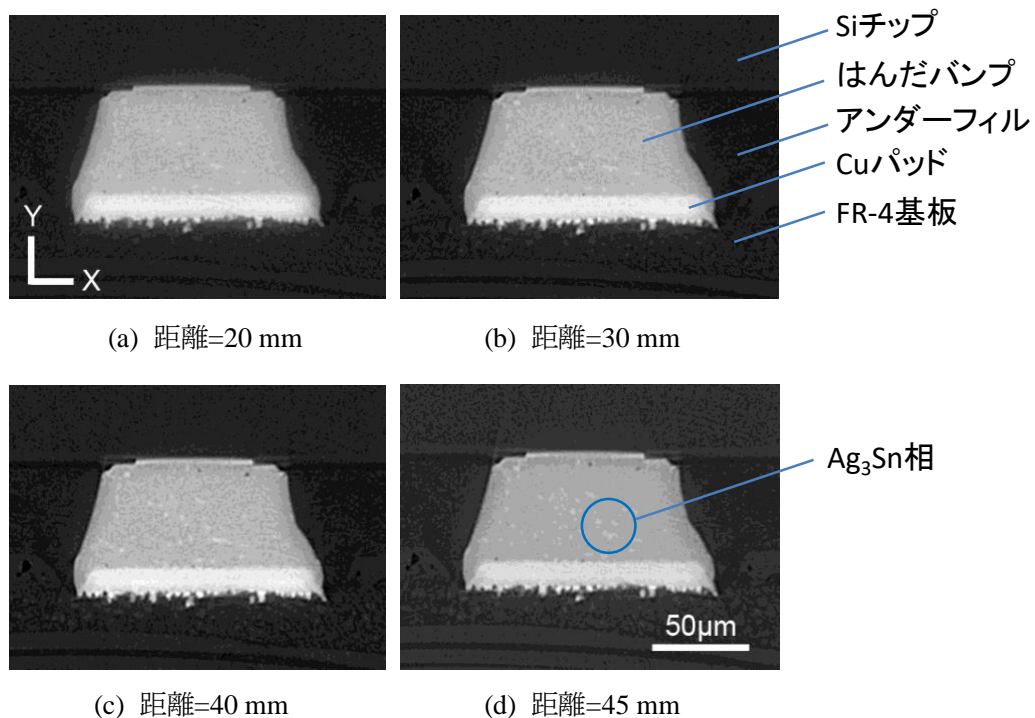


図 1 試験体と検出器との距離による再構成画像の画質の違い

$$S(u, v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(x+u+i, y+v+j) - I_u(x+i, y+j)| \quad (1)$$

ここに、 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。

具体的には、変位ベクトル探索の第一段階として、変形前と変形後の 2 つの画像から、画素単位での大まかな変位ベクトルの分布を計算する (粗探索)。SP- μ CT により撮影した CT 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を評価するために、変形前の画像として無負荷初期状態での画像を用い、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。すなわち、(1) 全く同一の条件下で同じ無負荷の試験体をもう 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 サイクル加えた後に撮影した画像である。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。

まず、(1)の全く同一の条件下で同一の無負荷の試験体を 2 度撮影した画像を用いた場合について述べる。図 2 は、1 回目に撮影した画像を変形前画像とし、2 回目に撮影した画像を変形後画像として、変位ベクトルの粗探索を行った結果をまとめる。(a)は変形前の画像として用いた 1 回目の撮影による再構成画像、(b)は変形後の画像として用いた 2 回目の撮影による再構成画像、(c)から(e)は、サブセットサイズ M を各々 5、10、および 15 ピクセルとした場合の変位ベクトル (u_0, v_0) の絶対値の分布を画素単位で示している。同一の試験体を同一の条件下で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すべて 0 となるはずである。(c)のサブセットサイズ $M=5$ の場合は、バンプの輪郭が青く表示されていることから、Ag₃Sn 相やバンプ表面の境界などの特徴点の周辺では、正しく計算が行われているが、それ以外の領域では変位ベクトルが 0 となっておらず、正しく計算が行われていないことが分かる。さらに、(d)の $M=10$ および(d)の $M=15$ の場合は、サブセットサイズが大きくなるに従って全体が青色になり、変位ベクトルが正しく計算される領域が広がっていくことが分かる。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、高い精度での変位の計測が期待できなくなる。具体的には、サブセットサイズ $M=10$ 以上であれば、変位ベクトルを決定できる可能性があるといえるが、これは、 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ の領域における平均の変位ベクトルであり、期待できる変位の空間分解能が $5 \mu\text{m}$ 程度であることを意味する。

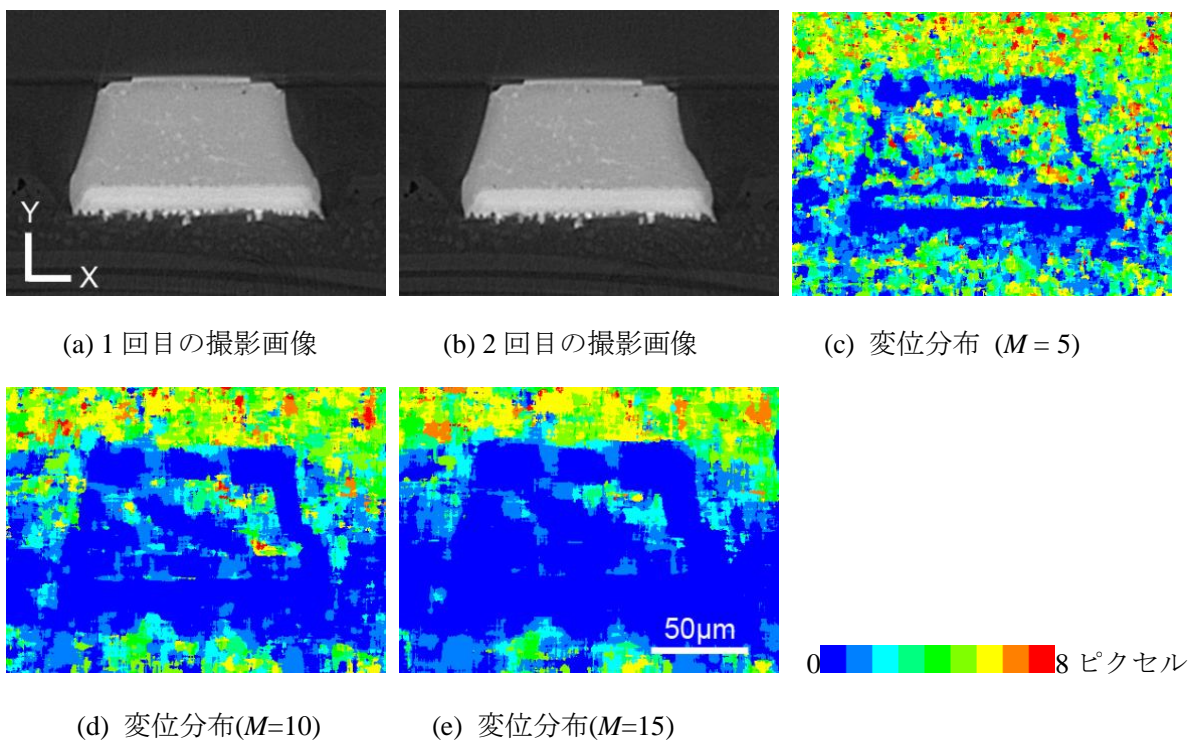


図 2 同一条件下で 2 回撮影した再構成画像と変位ベクトルの絶対値の分布

次に、(2)の場合について述べる。すなわち、図3は、同一の試験体に対して、無負荷の初期状態において撮影した再構成画像を変形前の画像とし、熱サイクルを1サイクル負荷し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まとめる。(a)は変形前の画像として用いた1回目の撮影による再構成画像、(b)は変形後の画像として用いた1サイクル負荷後の再構成画像、(c)から(e)は、サブセットサイズ M を各々5、10、および15ピクセルとした場合の変位ベクトル (u_0, v_0) の絶対値の分布を画素単位で示している。この場合は、熱変形によりバンプの形状が実際には変わっているので、変位ベクトルの絶対値は、画像全域で0になることはなく、最大で2から3ピクセル程度の値をとるものと推測される。また、バンプ内にき裂等が存在せず変位の連続性が保証される限りでは、変位ベクトルは滑らかに分布するはずである。サブセットサイズ $M=10$ 以上の場合を見ると、バンプ内のほとんどの領域において、変位ベクトル絶対値は3ピクセル以内の値をとっており、かつ滑らかに変化しているので、概ね計算が正しく行われているといえる。しかし、 Ag_3Sn 相が希薄である画像に特徴のない領域では、変形領域の探索が収束せず、変位ベクトルが大きく得られており、正しく計算が行われていないことが分かる。したがって、バンプ内部における変位ベクトルの分布を完全に決定するためには、変位ベクトルが正しく計算される領域のデータを用いて、バンプ内部全体の変位ベクトル分布をなめらかに補完する技術の開発が必要であることが、課題として明らかになった。

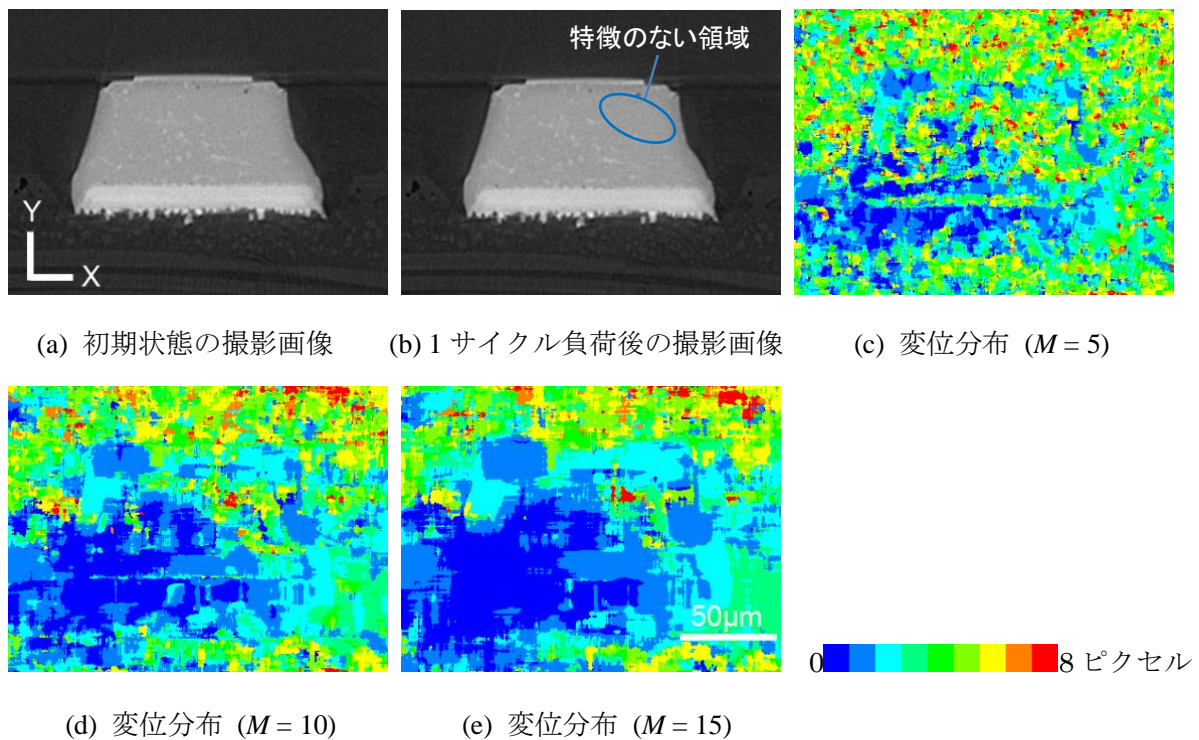


図3 初期状態および1サイクル負荷後の再構成画像と変位ベクトルの絶対値の分布

まとめ：

X線マイクロCT装置 (SP- μ CT) により撮影したフリップチップはんだ接合部のCT画像に対して、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討を行い、次の結果が得られた。

(1) Ag_3Sn 相のような特徴点のある部分では、デジタル画像相関法による変位計測を、空間分解能が $5\mu\text{m}$ 程度で行える見通しが得られた。

(2) はんだバンプ全体の変位ベクトル分布をなめらかに補完する技術の開発が必要である。

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。また、さらに追加の実験を行い、計測したひずみに基づいた熱疲労損傷を評価する手法の開発を進めたい。

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).
- [3] 宍戸信之ほか, 材料, **57**(1), 83-89, (2008).

©JASRI

(Received: February 13, 2015; Early edition: April 28, 2015; Accepted: June 29, 2015;
Published: July 21, 2015)