

基板実装加熱時の反り・変形メカニズムの解析

Analysis for warp mechanism at reflow soldering PCB Assembly

榎本 洋一，馬見塚 尚志

Yuichi Enomoto, Hisashi Mamizuka

要 旨 リフロー加熱時の実装不良の重大な要因と考えられる基板・部品の反りの発生要因を解析した。発生要因を解析するために、加熱中の基板の変位を測定する3次元計測システムを開発し、基板の反り測定実験を行った。本実験では、基板の銅箔の面積、配線の方向性、実装部品パターンをパラメータとして、基板の反りへの影響を求めた。その結果、銅箔の状態が基板の反り発生に大きな影響を与えることが分かった。この結果に基づいてBGA搭載基板の反り低減へ取り組んでいる。

Summary We analyzed the generation mechanism of PCB warping, which is a cause of SMT defects in reflow soldering. We developed equipment for three-dimensional(3D) direct observation and measured the displacement which is generated in reflow soldering of a PCB Assembly using this. We used the area of the copper foil on the PCB, the directionality of wiring and the mounting part patterns as parameters, and observed the influence of each parameter on PCB warp. As a result, it has been understood that the state of the copper foil has an important influence on the occurrence of warping in the PCB. In addition we are attempting to decrease the warping of PCB assembly mounted BGA.

キーワード : 無鉛はんだ，多層プリント配線板，BGA，反り，リフロー，
3次元測定

1. まえがき

プリント配線板の多層・小型化，電子部品の高密度実装化が進み，実装方式はリフロー方式を採用するケースが増えている。さらに無鉛はんだの量産化導入に伴い，従来鉛はんだでは想定されなかったリフロー加熱時の実装不良が発生している。鉛はんだでのプロセスと異なり，はんだ熔融温度が高いため，基板や各種電子部品の選定を誤ると反りや曲がりなどの欠陥を引き起こしてしまう。我々は，こうした不良を未然防止し，リフロー実装加熱時の反りのメカニ

ズムを解明するため，さまざまな取り組みを行ってきた。これまでの取り組みをまとめ，本稿で報告する。

2. 多層プリント配線板の反り検証

- ICリード浮き問題 -

2.1 発生経緯

基板の反りが起因となった過去の不良事例として，DVDレコーダーのMAIN基板で発生したICリード浮き問題を述べる。このICは256PinのQFPで，リフロー実装である。基板は6層ビル

ドアップ基板で、基板サイズは122mm × 101mm、基板厚は0.8mmである。試作生産にてリフロー実装後にICリード先端が基板上のはんだから完全に浮く不良が発生した(発生率1~2%)。発生箇所は4辺あるICリード辺のある1端に集中しており、はんだ量、またリフロー温度プロフィールを確認しても特に問題はなかった。問題は基板の反りで、IC側の基板端の反り量を測定すると、他の基板端に対して1mm程度反っていることが分かった。そこで良品の基板の反り量も調査した結果、基板反り量とICリードの浮き量が相関関係にあることが分かった(図1)。基板反り量が0.3mm-0.5mm程度の場合はICリードも浮きはなく、はんだフィレットも正常である。ところが基板反り量が0.6mmを超えて

くるとICリードの浮きを確認でき、リード下部にはんだ接合は見られるものの、リード先端にはんだフィレットが形成されなくなってくる。最悪の場合(1.0mm以上)ICリードは基板上のはんだから完全に剥離する。我々は、試作での100台余りの台数でこれだけ基板反り量が増加するという事実に驚かされ、すぐに量産に向けて基板反りを抑える検討に入った。

2.2 多層基板の層構成

基板の反りを抑制する手段としてまず考えられるのは、基板の厚みを増やすことである。図2に6層ビルドアップ基板の層構成を示す。6層ビルドアップ基板は4層板コア材にスルーホールメッキ・パターニングした後、絶縁樹脂(プリプレグ)を積層し、その上にIVH加工・表面層の

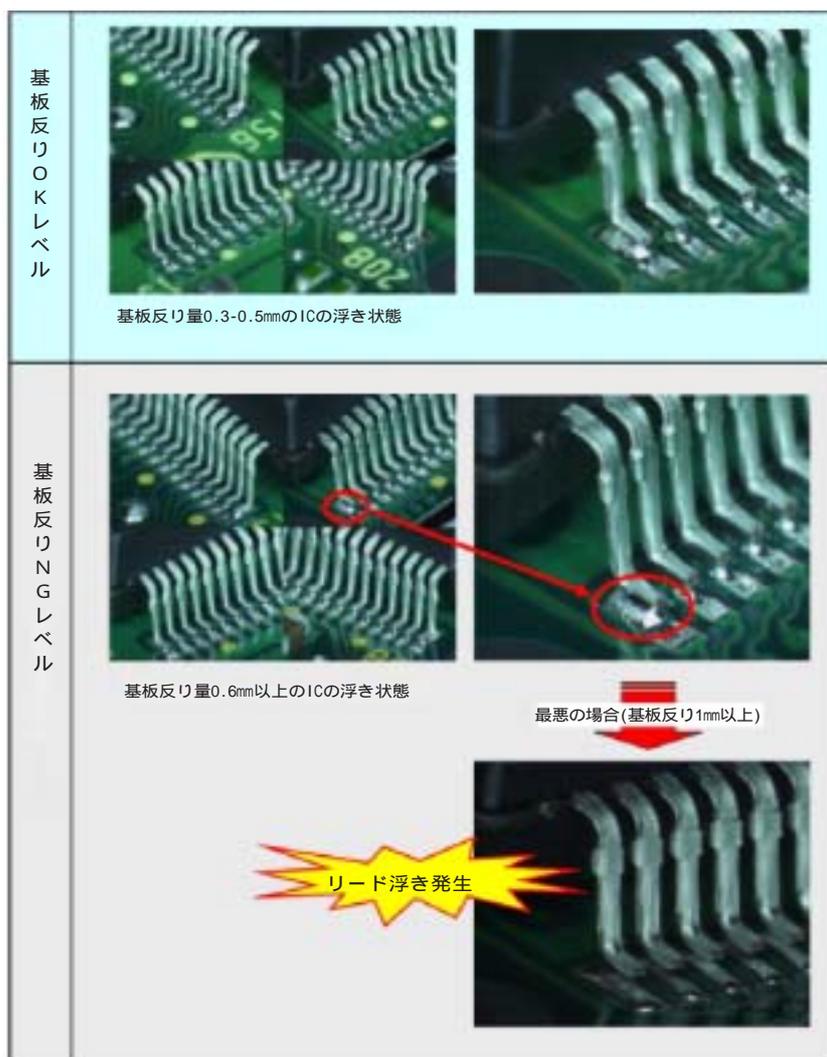


図1 基板反り量とICリード浮き量の相関関係

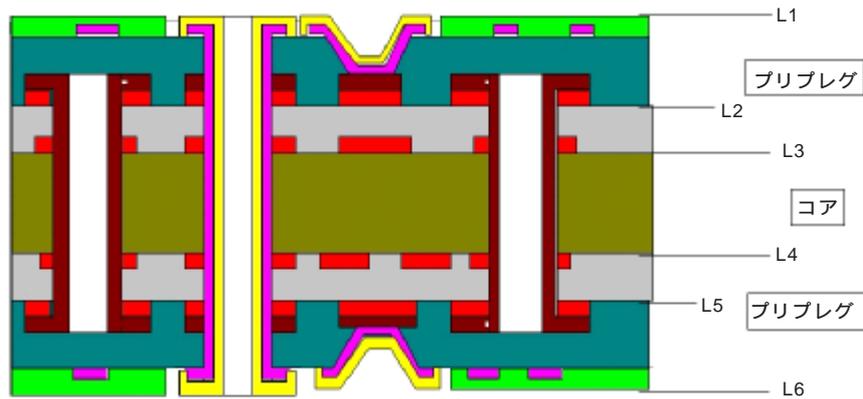


図 2 6層基ビルドアップ基板の層構成

パターンニングといった工程で製造される。基板の厚みを増やすにはコア材、およびプリプレグの層厚を増やせばよいのだが、プリプレグの層厚については単純に増やせばよいというわけにはいかない。L1-L2、およびL5-L6間にはLaser-Viaと呼ばれるパイヤーホールがある。Laser-Viaはレーザーで穴あけを行うが、その際内層パターン(L2,L5)はレーザー照射時のズレを考慮して外層パターン(L1,L6)に対しクリアランスを設けており、層厚を増やすことでクリアランスをより広く取らなければならないため、パターン設計上大きな制約となるからである。この点を考慮して、我々はコア材の厚みを増やすことを検討した。まずコア材の厚みの違う2種類の基板を用意した。コア厚は現行の127 μm と、伝搬特性(インピーダンス)に支障の無いレベルでかつ供給面を考慮して200 μm の2種類である。MAIN基板は中国の基板メーカーを採用しているが、基材の違う日本の基板メーカーのコア厚200 μm 品も比較として用意した。

2.3 基板の反り測定治具

基板の反り測定の最も単純で一般的な方法は、基板を定盤の上に置き、隙間ゲージなどで定盤と基板端との隙間を測定する方法である。この方法の問題点は精度の高い測定には時間がかかること、また両面に部品を実装した後では測定が不可能であることである。そこで我々は、図3に示す反り測定用の簡易的な治具を作製し

た。SMTラインのコンベアに似せたレール上に基板を載せ、アームの先に変位センサを付けた。これにより基板上の任意のポイントを測定でき、両面実装後も反りの測定が可能となった。

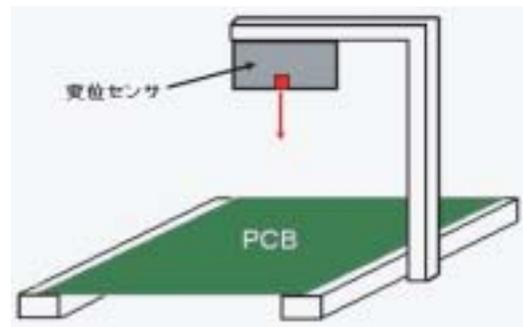


図 3 簡易測定治具の構成

2.4 反り測定結果

前述の基板をそれぞれリフロー加熱後に反り量を測定した結果が図4である。A社が中国系基板メーカー、B社が日系基板メーカーである。A社のコア厚127 μm 品は0.6mm以上の基板反りの発生率が1.3%であったのに対し、コア厚200 μm 品は0.24%に低減した。B社の基板は、コア厚200 μm で0.6mm以上の基板反りの発生率は0%である。ヒストグラムで見ても、B社の基板は反り量0-0.2mm以内に収まっており、B社の方が反りに対して優れた基板材料を使用していることが分かった。結論として、基板サイズと搭載部品(部品サイズ、搭載点数)に

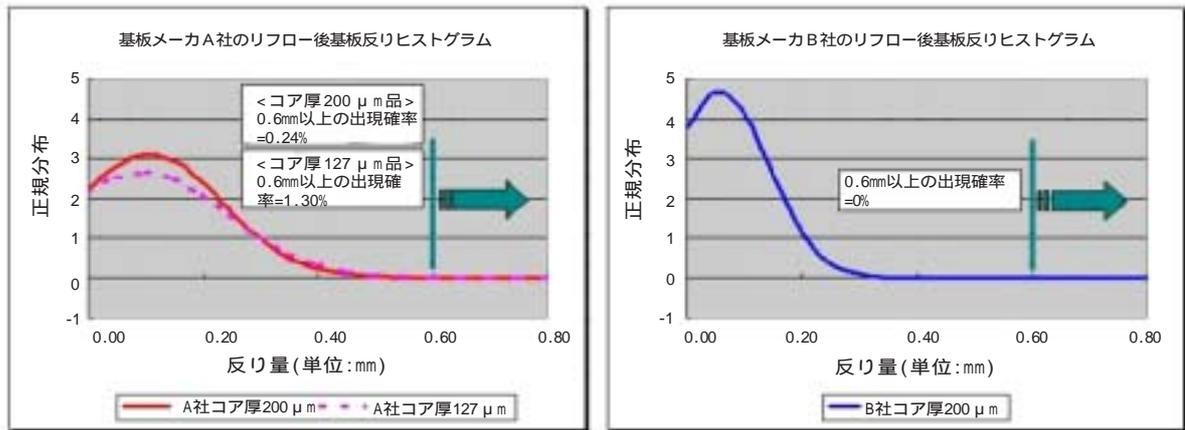


図4 MAIN基板のリフロー後の反り量比較

応じた基板厚の決定も重要だが、反らない基板材料選定がより大きなファクターであることが分かった。

3. BGAの加熱反り・変形解析

3.1 BGA搭載基板の不良分析

図5は前述したMAIN基板の生産工程で発生した不良の内訳である。この基板は37.5mm、564PinのPBGAを搭載している。はんだ付け不良が15%、部品不良13%に対して要解析が70%を占めている。要解析というのは外観検査では問題はないが、基板上のいずれかのパターンがショートまたはオープン状態であり、不良箇所が特定できないことを示している。BGAバンプのはんだ付け状態は外観検査で検査不可能であり、ファンクションテスターなどのポー

ドテスターでも特定することは非常に困難である。よってこの中にBGAはんだ付け不良が内在していると考えられる。つまり、BGA搭載基板の生産品質はBGAのはんだ付け品質向上が急務であるということがいえる。

3.2 BGAの加熱反り・変形測定

前節では基板全体の反り量を分析したが、BGA単品としての反り・変形を見極めるために、BGAパッケージメーカーの協力を得て、加熱時の反り・変形量を測定した。測定は無鉛はんだリフロープロファイルを想定し、BGA単品を常温から260℃まで加熱させ、その後除冷するまで10℃毎に反り量を測定した。その結果が図6である。興味深いのは170-180℃域でパッケージの反りが逆向きに变化する点である。この現象は次のように説明できる。BGAはモールド部

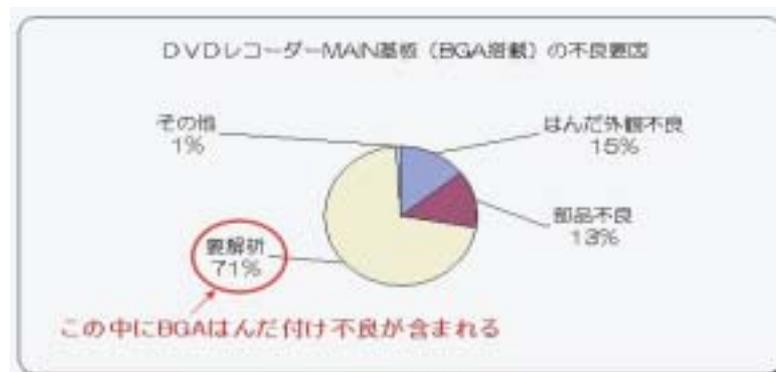


図5 DVDレコーダMAIN基板の不良要因の解析

(レジン材を主とする)とインターポーザー(基板), BGA パンプによって形成されている。加熱始めはインターポーザーの熱膨張がモールド部に勝り, パンプ側の基板面が膨張するが, 樹脂のガラス転移点である 170-180 を過ぎると, ガラスクロスの入ったインターポーザーの熱膨張は収束し, モールド部の熱膨張が勝るため, モールド側の基板面が膨張する。

加熱中の BGA パッケージの変形量(変位量) 500 μm は基板単体のそれと比較しても想像以上に大きく, BGA の選定についてはインターポーザー(基板)厚さ, レジン厚さ, 熱膨張係数などについての調査と検証が必要である。また, BGA はんだ付け不良を回避するためには, はんだ印刷時の基板 Pad への適正なはんだ転写量の確保も重要である。

4. テストパターン基板の 3 次元測定

4.1 概要

我々は, これまでの検証から, リフロー加熱中の基板・部品の反り挙動を解明することが必要であると考え, 加熱中の反りを測定可能なシステムを準備してプリント配線板の反りのメカニズムを解明する取り組みを始めた。プリント

配線板においては,

ベースとなるガラス・エポキシ樹脂の材料特性

各配線層の銅箔残存率の違い

基板上の部品配置や割り取りのレイアウトなどが反りに影響する。本節では銅箔のパターンに着目してテストパターン基板を作製し, 基板の反りを測定した。

4.2 3次元計測システム

本節では, 加熱中に基板の変位を測定する。計測中も温度が上昇するため基板の測定は, 短時間に終了する必要がある。そこで, 非接触で高速に基板全体を計測できるシステムを使用した。計測システムを図7に示す。このシステム

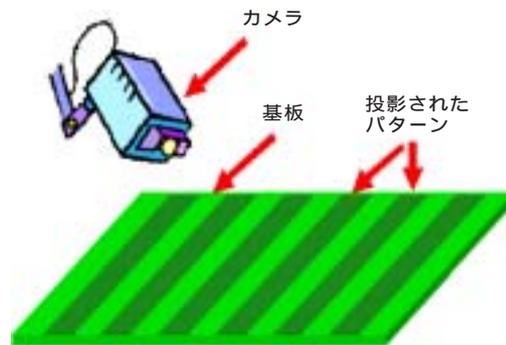


図7 3次元計測システム略図

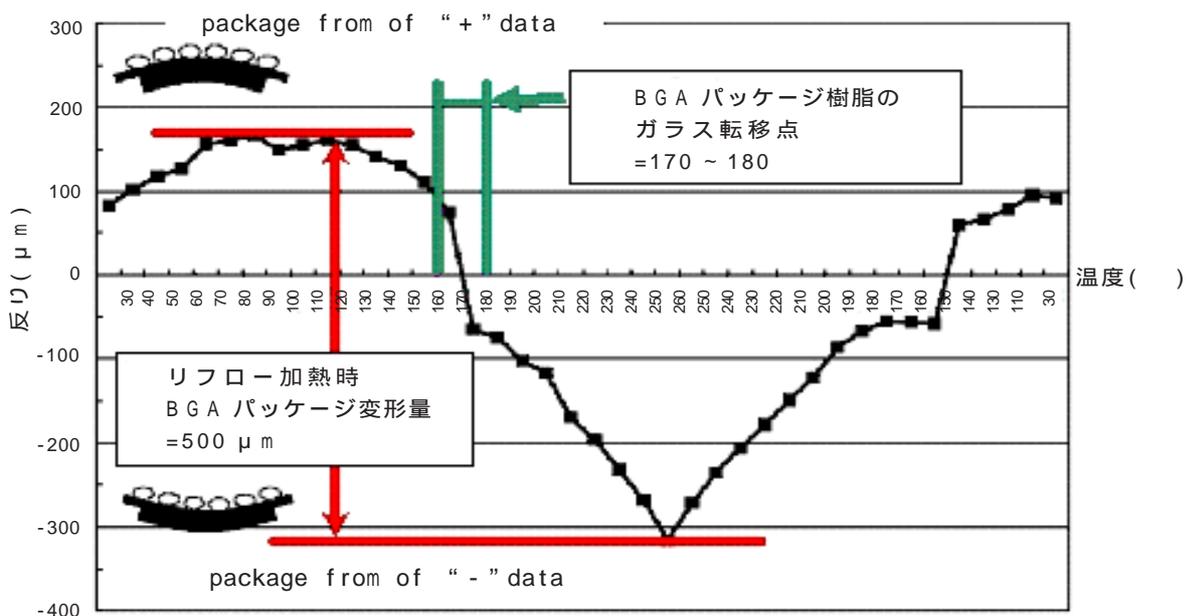


図6 516pinPBGA 高温反り測定結果

は基板上に複数のパターンを連続で投影してカメラで測定する。撮影した複数の画像を処理して、位相シフト法などを用いることで高速非接触全面測定を可能としている。一回の測定時間は約1秒である。投影パターンを撮影するために基板に白色塗装が必要である。

4.3 加熱システム

加熱には、基板全面の撮影が可能な観察窓付きの加熱炉を使用した。加熱システムの構成を図8に示す。基板の両側からホットエアで加熱を行うシステムで、基板の保持機構は、画像処理のために熱膨張率が極めて小さいセラミック(線膨張率-0.2ppm)を使用して加熱による位置変動をなくしている。加熱プロファイルを図9に示す。昇温は1秒に約0.60。140までの冷却は1秒に約0.35である。

基板形状の測定は、加熱前と冷却終了後(共に室温)のほかに加熱時は100から240まで

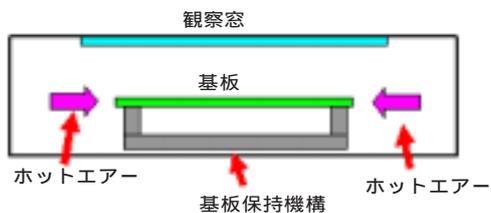


図8 加熱システムの概要

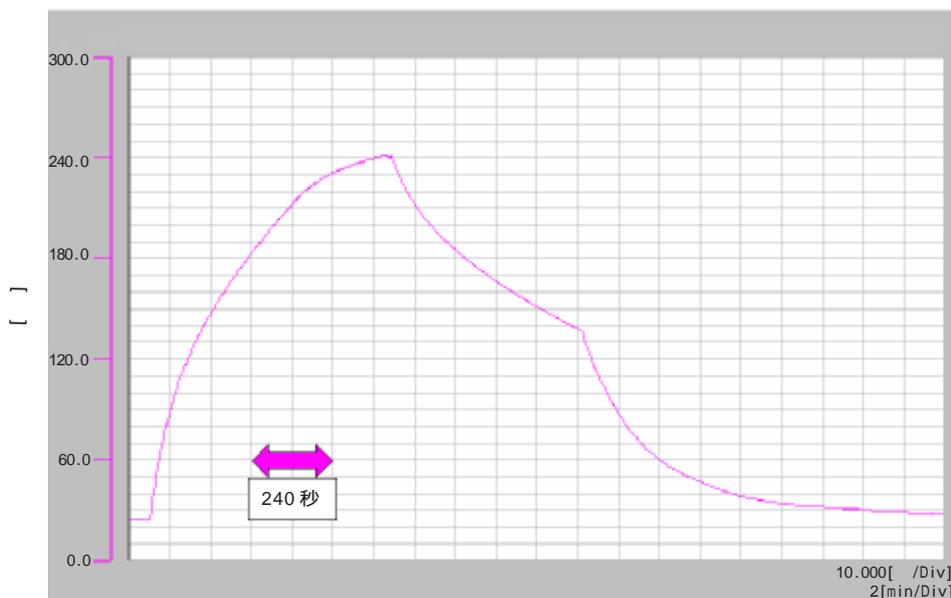


図9 加熱プロファイル

20 毎、冷却時は240 から140 まで20 毎に計測を行った。なお、基板のガラス転移温度は150 付近にある。事前に測定した基板内の温度バラツキは、加熱途中が最大で約24、240 の測定時で約8 であった。形状測定時は、裏面中央の温度を基準とした。

4.4 テストパターン基板

基板材料としてはFR-4両面材(厚み1mm)とし、国内メーカーC社と中国メーカーD社の基板を準備した。今回は、銅箔の面積、配線の方向性、実装部品(BGA)パターンの影響を重視した。作成したテストパターン基板の概観を図10～図12に示す。テストパターンの配線はL/S = 1.0mm/0.5mmである。BGAは35mm角、516Pin用のパターンを形成した。基板の外形サイズは152mm × 92mmである。他の要因の影響を排除するため、銅箔以外のレジストなどは省略してある。また酸化防止のため吸湿剤と吸酸素剤とともにアルミ製の袋で保管した。

4.5 計測結果

銅箔面積を変えたパターンの基板の測定結果を図13に示す。表裏面の銅箔面積の違いにより銅箔面積が多い側を凸側として変形している。銅箔面積が同じならば変形は極めて少ない。また図示は略するが、C社基板に比較して

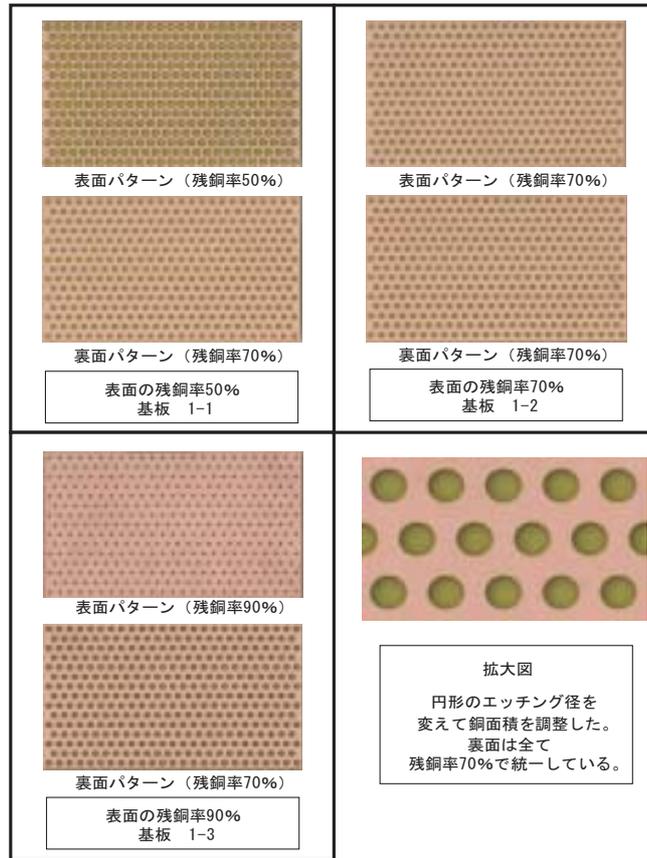


図 10 テストパターン基板 - 1

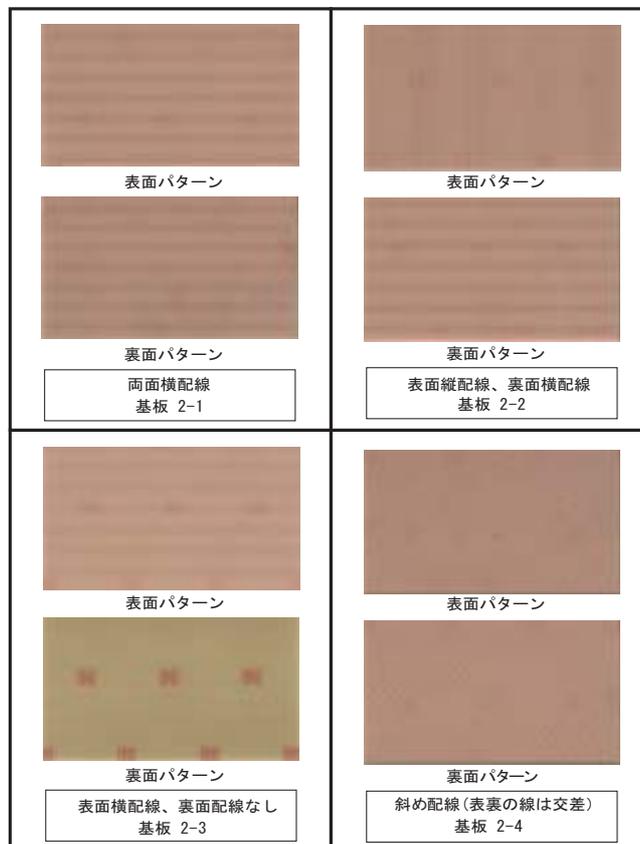


図 11 テストパターン基板 - 2

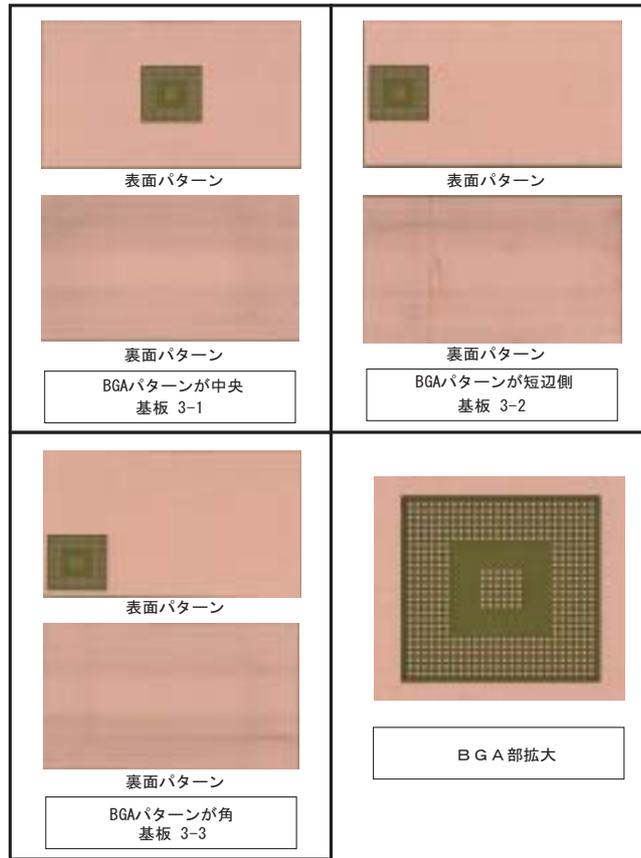


図 12 テストパターン基板 - 3

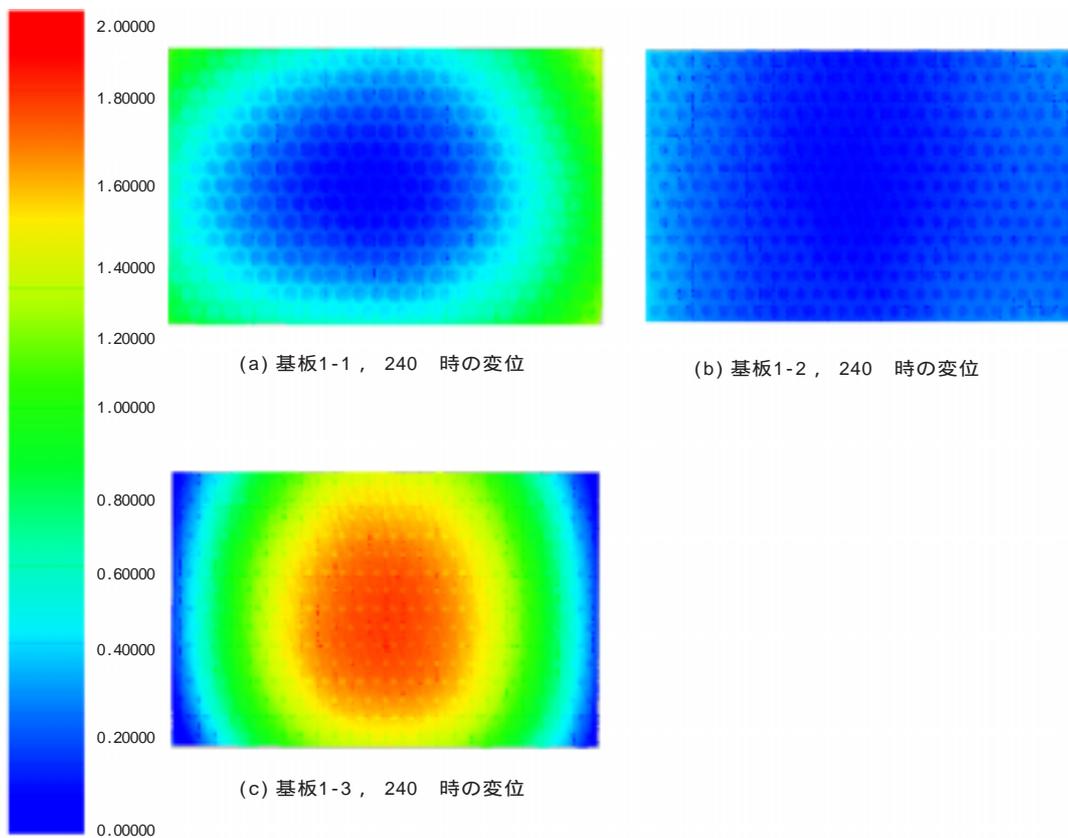


図 13 銅箔面積を変えた基板の変位

D社基板の変形量が多い傾向があった。これは、D社基板の曲げ剛性がC社基板より低いためである。さらに銅箔面積の差が等しく、残銅率が低い1-1基板は、残銅率が多い1-3基板に比較して変形量が少ない。

次に配線方向を変えたパターンの基板の測定結果を図14に示す。基板2-1は、表裏が同一パターンのため変形は少ない。基板2-3は、表面側銅箔の膨張で変形している。基板2-2は表側と裏側の銅箔の曲げ応力が複合して変形量が増大している。また、基板2-4の結果を図15に示す。基板の4角の変形が大きく、非常に大きな変形がみられた。表裏の曲げ応力による変形がそれぞれ一方の対角上に現れ、別方向への変形が生じ、総変形量が多くなった。これらの結果から、銅配線は線方向へ膨張しようとする力が基板を変形させていることが分かる。

次にBGAパターンの位置を変えた基板の測定結果を図16に示す。BGAパターン部で発生した

曲げ応力の影響で、BGAパターン以外の基板全体に変形の影響が出ている。意外なことに基板3-1ではBGAパターン範囲内だけに限ると変形量は少ない。また、BGAパターンを基板外周に配置した基板3-2、3-3ではBGAパターン範囲内にも0.5mm以上の変形がある。従って基板3-2、3-3のようなBGAを基板外周近傍に配したレイアウトは、実装不良の原因となることが懸念される。

これらの結果は、銅箔と基板絶縁部の熱膨張率の違いが原因と推測される。銅箔の線膨張率は、本検証の温度範囲では約18ppmである。一方、基板絶縁部は樹脂とガラスクロス複合材であり線膨張率は約10～14ppmと小さい。なお、線膨張率は基材の種類、基材の縦横方向、メーカーなどにより異なるがFR-4材では概ねこの値である。さらに樹脂はガラス転移点以上の温度では、ゴム状化現象により軟化するため、基板絶縁部の線膨張率は高温時にはガラス

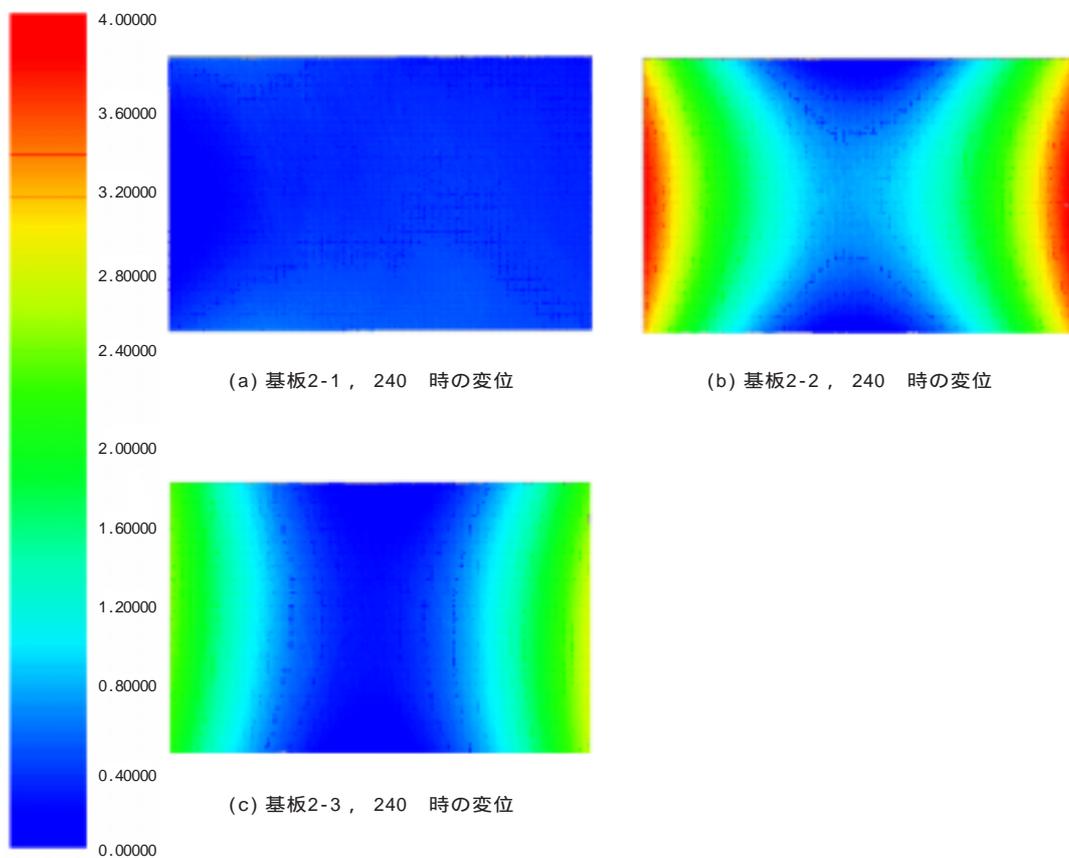


図14 配線方向を変えた基板の変位

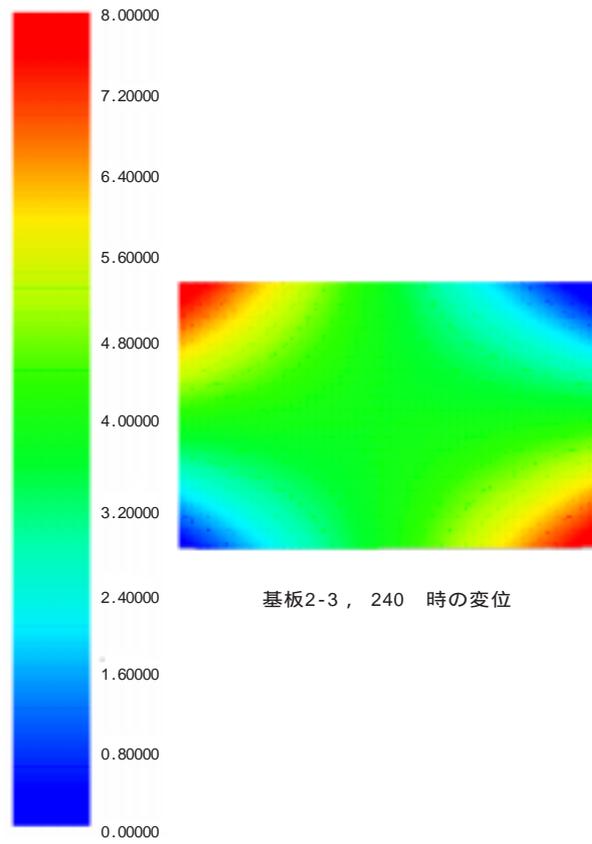


図 15 基板 2 - 4 の変位

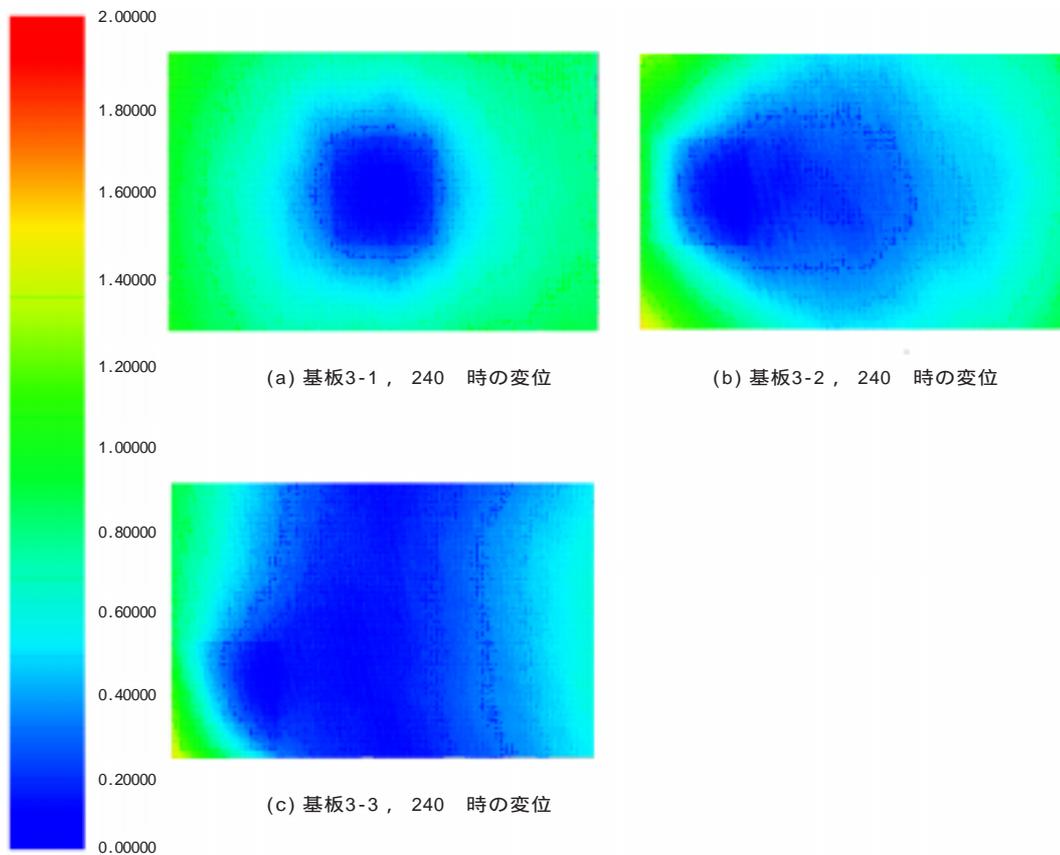


図 16 BGA パターン位置を変えた基板の変位

クロスの特長値に近づき線膨張率が低下するため、銅箔との線膨張率の差がさらに大きくなる。

4.6 まとめ

基板の熱変形は、銅箔が大きな要因となっている。熱変形を少なくするためには、基板の相対する配線層(両面基板ならば表裏)で銅箔の分布を近づける必要がある。また、銅箔の分布にバラツキがある場合は、銅箔面積が少ない方が変形量は抑えられる。

加熱によって変形を生じやすい部品を使用すると、製造工程で良品率が低下する。また、製造工程の複雑化によって製造コストは上昇する。さらに、ユーザーの使用環境下においても、製品動作時に温度が上昇して、部品が熱変形を繰り返し、導通部分などが疲労破壊を起こし、製品寿命が低下する。従って、基板も熱変形を小さくする必要がある。そのためには、銅箔の分布をできるだけ均一にするとともに、銅箔の面積を減少させるべきである。特に、反りやすい薄い基板を使用する場合や曲げ剛性の弱い低コストの基板を選定する場合は、温度による変形の発生も考慮に入れて回路レイアウトを決定するべきである。

今後は、銅箔面積、パターンレイアウト以外の要因(レジスト、スリットなど)についての基板の熱変形の検証を行う予定である。また、さらなるパターンレイアウトの変形検証やガラスクロス層による熱変形の違い(ガラスクロスの種類や枚数など)、熱変形の緩和技術についても検討する。今後の検証においては、シミュレーション技術の併用などによってサンプル数や実験回数を減少させ、実験の効率化を図りたい。シミュレーションの導入には、高温時の材料特性値、特にガラス転移点以上の温度での物理特性値の把握、基板の内層配線も含めた回路パターンの完全3次元モデル化が課題となる。

5. 結言

リフロー加熱時に基板がどのように反るかを解明するため、3次元計測システムを考案した。

基板、およびBGAを始めとした電子部品の反りを低減するための取り組みはまだ道半ばである。今後、この取り組みをさらに進化させて熱応力解析技術を確立し、新部品の実装検討や設計の基板レイアウト検証など設計支援ツールとして活用できるシステムにすることが最終目標である。

筆者紹介

榎本 洋一(えのもと よういち)

所沢事業所HBC生産部AVC生産技術部。ホームエレクトロニクス製品の基板実装設計、実装技術開発

馬見塚 尚志(まみづか ひさし)

生産統括部生産技術センター。種々の製造装置の開発およびフリップチップ実装工法の開発に従事