

シミュレーションによる基板の反り解析システムの導入評価

Evaluation of a system for the analysis of the generation mechanism of PCB warping in reflow soldering

松永 清二, 馬見塚 尚志

Seiji Matsunaga, Hisashi Mamizuka

要 旨 プリント配線板の多層化・小型化・高密度実装化に対応して、実装方式にはリフロー方式が採用されている。また、無鉛ハンダの採用により、リフロー加熱時の温度が高くなり、基板に反りが生じ、はんだ付接合部の不良が発生する。我々は、このトラブル対策として「実測による反り評価システム」を導入し、はんだ接合部の不良発見などで実績を上げている。しかし、この方法では、製品導入の遅れ、生産コスト高などの問題が生じる可能性もある。そこで、反りの発生を基板設計の段階で予測し、それに対応した基板を設計することで、はんだ付接合部の不良の発生を防止することが可能かを検討した。加熱処理時の温度を240℃とし、有限要素法によるシミュレーションでプリント基板の反り挙動の解析を行い、それに基づいて反りの発生を予測した。反り解析のシミュレーションの結果を評価するため、「実測による反り評価システム」で反りの挙動を調べた。その結果、両者の反りの挙動は、ほぼ、同じであることを確認した。

シミュレーションによる反り挙動の解析は、はんだ接合部の不良を未然に防止するのに有効な手段であることが分かった。

Summary Recently, there is a tendency for SMT (surface mount technology) of PCB (printed circuit board) to use reflow soldering due to multilayer, miniaturizing and high mounting density requirements. On the other hand, SMT defects in reflow soldering occur due to PCB warping, which is caused by the high temperature required because lead-free solder is used.

To examine this, we developed "SMT Defects Detection System by Measurement" which is able to detect SMT defects, and confirmed its high ability of detection through actual use. In this method, there are some troubles such as the delay of the product introduction and increasing the production total cost because the pattern of PCB might have to be redesigned when SMT defects is discovered.

To prevent this trouble, we examined whether it was possible to design the pattern of PCB using simulation so that SMT defects should not occur even if PCB warping occurs in reflow soldering. Then, we analyzed the generation mechanism of PCB warping using finite element modeling for simulation and setting the heating temperature to be 240°C as the simulation condition for reflow soldering.

We analyzed the generation mechanism of PCB warping using "SMT Defects Detection System by Measurement" in order to evaluate the analyzed simulation results, and understood that both results are almost the same by comparing them.

As a result, we proved that the analysis of the generation mechanism of PCB warping by simulation was an effective method to prevent SMT defects in reflow soldering.

キーワード : 無鉛はんだ, 多層プリント配線板, 反り, リフロー, シミュレーション

1. まえがき

プリント配線板（以後、本文中は「基板」と記述）の多層化および小型化、さらに電子部品の高密度実装化が進むなか、リフロー方式での部品搭載を採用する

ケースが増えている。そのリフロー方式も、鉛フリーはんだの導入によって、はんだを溶かすために加熱する温度が、従来の加熱温度に比べて高温となった。これにより基板には今まで以上に高い熱が加わることに

なり、熱による基板の変形（以降本文中では、「反り」と表現）が原因となるはんだ付けの品質トラブルが問題となっている。このようなトラブルを防止するため、我々は「リフロープロセス加熱時の基板反りを実測するシステム」（以後、本文中は「実測による反り評価システム」と記述）を開発して、これを運用することで、ある程度の効果をあげていた⁽¹⁾。しかし、開発ステップのより早い段階で評価が必要となったために、シミュレーション技術を利用した基板の反り解析システムの導入検討を開始した。

2. 「実測による反り評価システム」の説明

シミュレーション技術をつかった基板の反り解析システムの取り組みを紹介する前に、実測による反り評価システムを紹介する。このシステムの構成は、「3次元測定システム」と「加熱システム」に大きく分けることができる。

2.1 「3次元計測システム」について

反りの測定は、図1に示す3次元計測システムで行った。加熱した基板表面に複数の縞模様パターンを連続投影して、その縞模様パターンをカメラで撮影する。その撮影した画像をパソコンに取り込み、画像処理を行った後に、位相シフト法などを用いて反り量を計測する。このシステムの測定時間は約1秒間隔で、加熱や冷却中の指定した温度で連続して測定することが可能である。測定に際して、投影する縞模様パターンを精度よく撮影するために、基板表面を白色に塗装することが必要となる。

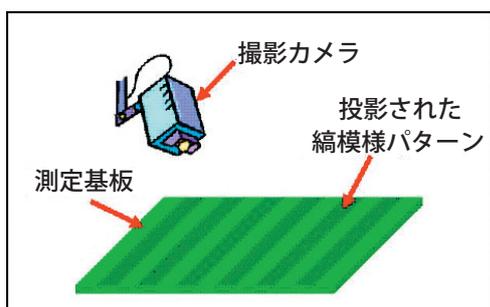


図1 3次元計測システムのご概念

2.2 加熱システムについて

加熱システムのご概念を図2に示す。加熱システムは、測定する基板の全面が撮影可能な観察窓付きの専用加熱炉を使用している。この加熱炉は、一般的な反り測定システムに使われている加熱炉に比べて観察窓から

測定する基板までの距離を大きくとることができる。これにより、高さのある部品を実装した基板でもそのまま測定することができる。

加熱方法は、測定対象の基板に向け両側からホットエアーを流入させて加熱させる。測定対象の基板を保持する機構は、熱による影響が少なくなるように熱膨張率が極めて小さなセラミック（線膨張率＝0.2ppm）を使用して作製している。加熱炉の昇温能力は約0.60℃/秒で、240℃から140℃までの冷却能力は約0.35℃/秒である。また、このときの基板温度を測定した場所は、測定する基板の裏面中央部に温度センサーを取り付けて測定した。

2.3 測定方法

前述した二つのシステムを使用して反り挙動を測定する手順を説明する。まずは、測定基準となる加熱前の状態で基板を撮影する。次にその状態で加熱を開始して、240℃を最高温度として昇温時には100℃から240℃まで20℃ごとに、冷却時も240℃から140℃まで20℃ごとに撮影する。最後は、常温（室温）に戻った時点まで撮影して測定終了となる。これらの条件は、基板に使用されている基材のガラス転移温度が約150℃付近であることから決めた。

2.4 「実測による反り評価システム」での課題

現在は、前述した「実測による反り評価システム」を運用して製品開発ステップ途中で測定することで問題の発見や原因調査、対策後の効果確認に利用して、品質維持に貢献している。しかし、問題が発見された時点では、すでに製品の構造は決まっていることが多く、そのために基板の設計を変更するなどの大幅な対策を実施するには大変困難で、対処に苦慮することがあった。仮に基板の設計を変更できたとしても、再度基板を作製後、評価を行う必要があり、人手とコスト

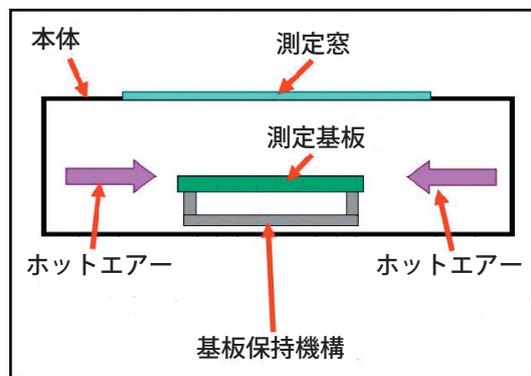


図2 加熱システムのご概念図

がかかる。これらを改善するためには、製品開発ステップの上流である基板設計プロセスの時点で、反りの挙動を評価できることが望ましい。

3. シミュレーション技術を利用した基板の反り解析システムの導入に向けて

基板設計プロセスで基板の反り挙動を評価するためには、有限要素法（FEM：Finite Element Method）を用いたシミュレーションが有効ではないかと考えて導入に向け検討を開始した。有限要素法を用いたシミュレーション・ソフトは、ANSYS Workbench11.0を使用する。

3.1 シミュレーションに使用するための3次元CADデータ

有限要素法を用いたシミュレーション解析を行うには、3次元のCADデータが必要となる。しかし、基板の設計は、2次元CADソフトを用いて設計されているため、そのままの状態ではシミュレーション・ソフトに読み込むことができない。そのため、新たに3次元CADソフトを使い、人手をかけて3次元CADデータを作成した。これには膨大な人手と時間、コストを要するため、現実的ではない。この改善策として、2次元CADデータから3次元CADデータに変換することができないかを検討した。ここでの問題は、2次元CADソフトで設計された基板は、図3に示すように、多くの図形を組み合わせた構成となっていることである。これらを、単純に3次元CADデータへ変換すると、3次元CADデータではこれらの図形を、ひとつひとつ別の図形と認識して、ファイル容量が膨大になってしまう。また、2次元CADデータでは、図3に示すように図形同士が重なって作図されるために、3次元データに変換すると図形と図形がお互いに干渉してしまう。これらの問題の解決には、(株)図

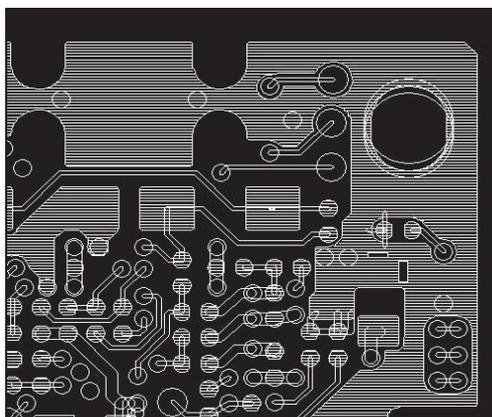


図3 2次元CADデータ

研の協力を頂き、2次元CADソフトでデータ加工した後、Board Modelerで3次元CADデータへ変換し、書き出しすることで、シミュレーション・ソフトに読み込むことが可能となった。2次元CADデータから変換した3次元CADデータを図4に、また図5にデータ変換作業の簡単な流れを示す。

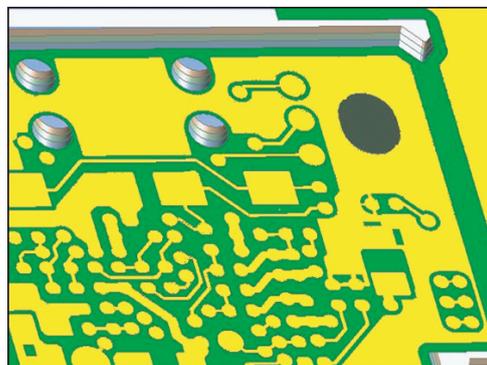


図4 3次元CADデータ

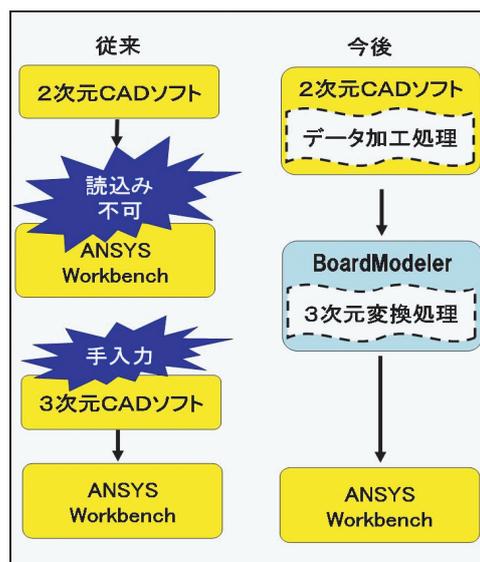


図5 データ変換のフロー

4. 試験基板を使ったシミュレーションの評価

まずは、加熱した際に反りが発生することが分かっている試験基板を使い、有限要素法を用いたシミュレーションの解析結果と、実際に「実測による反り評価システム」を使って反りを測定した結果を比較して、シミュレーションによる反りの解析が有効であるかを確認した。

4.1 試験基板について

今回の評価に使用する試験基板は、両面銅張積層板の銅箔部を複数の円形で除去させて、銅箔部の面積

比率（以後、残銅率と記述）を調整する構造で、その残銅率を両面で意図的に変化させて反りの発生をコントロールするように設計した基板である。

今回の評価には、一方が残銅率70%になるように調整した面を基準として、もう片方の面を20%増減するように設計した基板を用意して使用した。これを図6に示す。

そのほか試験基板の仕様は、幅92mm×長さ152mm×厚さ1mmで、両面基板、基材はガラス布基材エポキシ樹脂（FR-4）を使用している。

4.2 シミュレーションの解析条件

シミュレーションの評価は、リフロープロセスで加熱温度が240℃に達した時点の基板反り挙動を比較して行う。有限要素法ではシミュレーション解析する際には、3次元図形を細かくメッシュに分割しなければならないが、一般的にメッシュ密度を細かくすればするほど解析精度が良くなるといわれる。しかし、一

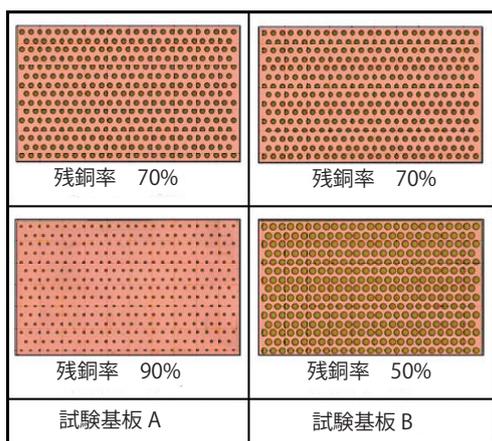


図6 評価に使用した基板

方では解析にかかる処理時間が増大して、解析に時間がかかるという問題がある。そのため、解析精度と解析時間のバランスをとった適切なメッシュを生成する条件を見出すことが大変重要となってくる。図7にメッシュを生成させた状態を示す。

本評価の過程では、数々の条件設定を試みてメッシュの生成を行ったが、今回は基板の素材部分を2mm、配線パターン部を0.6mmに設定したシミュレーションの解析結果を示す。

試験基板Aは、ボディ数が3、節点の数が約9万、要素の数が約6万となり、試験基板Bは、ボディ数が3、節点の数が約8万、要素の数が約5万となった。

4.3 シミュレーションの解析結果

前項の設定条件で実施して得られたシミュレーションの解析結果を図8に示す。

反りの挙動は、基板設計時に想定したとおり、残銅率が大きい面の方に基板が膨らんだ。片面の残銅率を20%減少させた試験基板Aは、基準面に対して反り量は最大で-0.97mm、反対に20%増加させた試験基板Bでは基準面に対して反り量は最大で+0.82mmとなった。

4.4 実測による反り評価システム」の実測結果と比較

次に「実測による反り評価システム」で実際に測定して得られた結果を図9に示す。反り量は、試験基板Aが最大-1.05mm、試験基板Bが最大+0.92mmとなった。シミュレーションの解析結果と実測値の相違は、試験基板Aは0.08mmで約8%、試験基板Bは0.1mmで約11%であった。

反り挙動を表すカラーパターンを、シミュレーションの解析結果と実測結果で比較すると、非常によく似

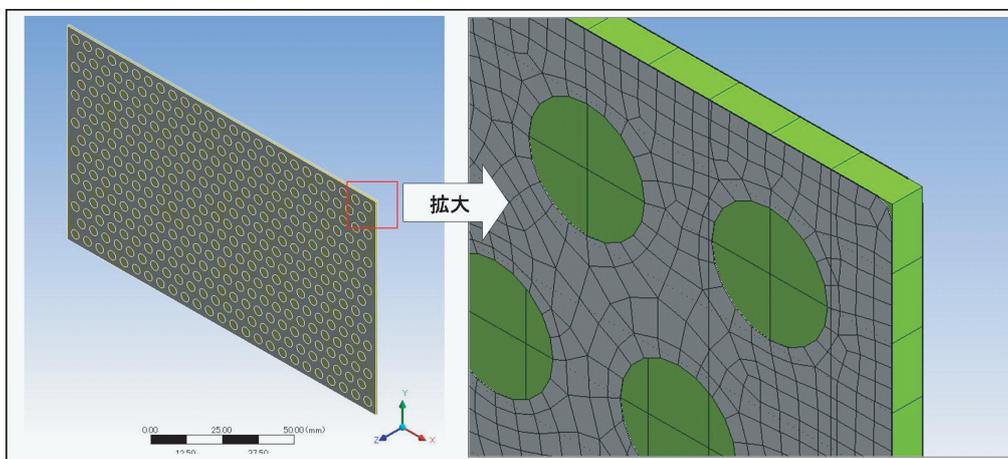


図7 試験基板にメッシュを生成させた状態

たカラーパターンを示していることが分かる。これらの結果から、シミュレーションによる解析結果は十分に反りの挙動を予測できると判断した。

さらに、加熱途中の反り変化量の比較も行ってみた。その比較グラフを図10に示す。このグラフからシミュレーションの解析結果と実測結果は、加熱温度

と反りの変化量の間で相関があることが分かる。但し、180℃付近を境にシミュレーションの解析結果は実測結果より高温時は小さく、低温時は大きくなっている。この現象は、シミュレーションのメッシュを生成するときの条件などの設定をさらに細かく修正したり、素材の物性データを緻密に取得して反映させることで解消し

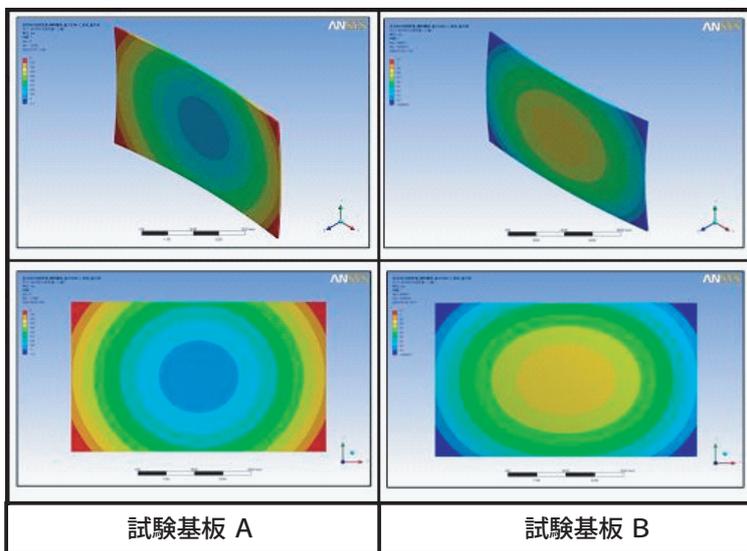


図8 シミュレーションの解析結果

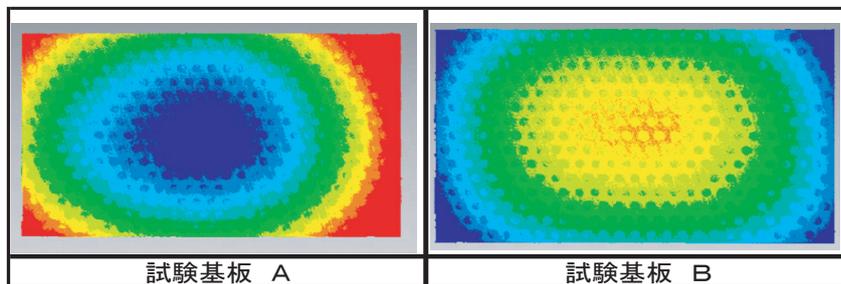


図9 実測による反り評価システムの測定結果

加熱による基板の反り変化量比較

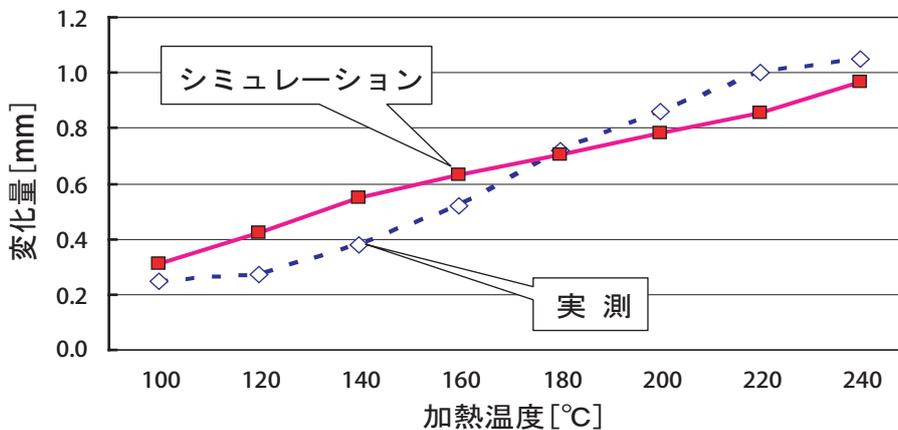


図10 加熱による基板の反り変化量の比較グラフ

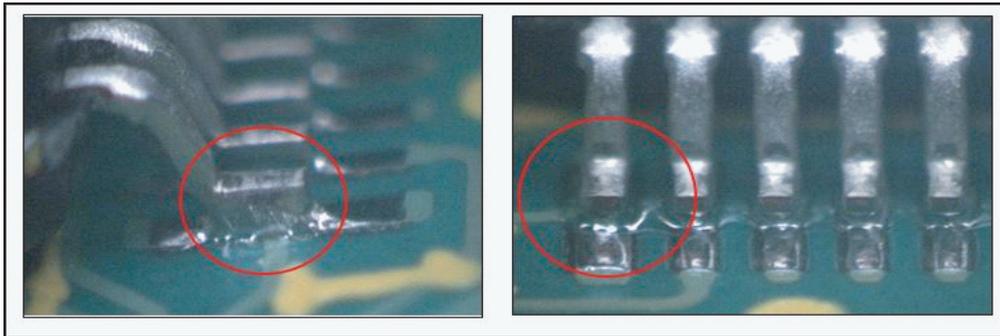


図 11 実際の IC 端子浮きトラブルの外観

ていくと考える。

5. 製品基板を使ったシミュレーションの評価

前項の試験基板を使ったシミュレーションの評価では、基板加熱時の反り挙動傾向が実測した結果と同じ傾向を示していることが確認できた。次のステップとして、実際の製品で使用する基板を使ってシミュレーションの解析を行う。

製品で使用する基板は、試験基板とは違って多層構造で、数多くの複雑な形をした配線パターンが配置してあるので、試験基板と同じように満足できる解析結果が得られるのかを確認する。

5.1 評価に使用する基板について

今回、評価に使用する基板は、リフロープロセス工程において実装した大型 IC の端子部が浮いてしまうトラブルとして報告されたものを選んだ。

このトラブルは、先に述べた「実測による反り評価システム」を使って実測した結果から、リフロー炉で基板を加熱した際に、基板のある部分で変形が大きくなることが判明している。その影響で実装された大型 IC の端子部が浮くトラブルが起きていた。図 11 に、実際の IC 端子部が浮いたトラブルの外観写真を示す。

この基板の仕様は、寸法が幅 106mm × 長さ 182mm × 厚さ 0.6mm の 4 層ビルドアップ構造で、基材にはガラス布基材エポキシ樹脂 (FR-4) を使用、1 枚の基板に 4 台分の同じ小基板を配置した構成となっている。図 12 にその基板の外観写真を示す。あわせて、IC の端子部浮きトラブルが発生した場所を、図 12 の図中に黄色丸で示すが、各小基板の同じ場所で発生していた。

5.2 シミュレーションのためのデータ準備

この製品基板は、基板表面や内部に複雑で多くの配線パターンが配置されており、3次元データに変換するとデータ容量が膨大となることが予想された。4. 項

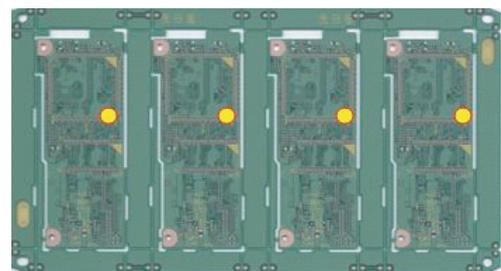


図 12 実際の製品基板とトラブル発生箇所

で述べた試験基板のときと同じような変換手法を用いた場合に不具合が生じないか懸念されたが、多くの時間を要したものの幸いデータの変換自体は無事に行うことができた。

5.3 製品基板のシミュレーションの設定条件

製品基板のシミュレーションは、試験基板の評価と同じ条件設定でおこなった。メッシュサイズを、基板部分は 2mm、配線パターン部は 0.6mm に設定して、メッシュを生成すると、節点の数は約 113 万、要素の数は 74 万となり、先の評価に使用した試験基板に比べると約 12 倍の規模に増加した。今回のシミュレーションに使用した主な物性データ一覧を表 1 に示す。

5.4 製品基板のシミュレーション解析結果

製品基板の 2 次元 CAD データを使いシミュレーションした解析結果を図 13 に示す。

この解析結果をみると基板の同じ場所に、反りの挙動が大きい部分が確認できた。その場所は、「実測による反り評価システム」を使った実測結果でも反りの挙動が大きいと測定された場所と一致しており、今回の製品基板を使ったシミュレーションでも、十分に反りの挙動を予測できていることが分かった。さらに詳しく反りの挙動が大きくなっている部分を拡大して、実測結果と比較して見た。シミュレーションの解析結果を図 14 に、実測結果を図 15 に示す。両方の結果

をみると、高低差を示すカラーパターンの分布は非常に似ていることが分かる。これらの図で表示されているカラーパターンは、黄色の場所が最も低くなるように設定している。さらに IC の外形寸法（矢印は IC の外形寸法と同じ）の間で高低差を測定して比較すると、シミュレーションの解析結果で約 80 μm 、実

測結果では約 100 μm 変化していることが分かった。この変化量の値は、試験基板を使った評価のときと同じく、シミュレーションの解析結果が実測結果より小さく表示されているが、この結果でも IC の端子部が浮いてしまうことは、十分に予測が可能であると考える。

今回の事例で、設計プロセスで作成した 2 次元 CAD

表 1 シミュレーションに使用した主な物性データ

項目	基板 (FR-4)	配線 (銅)	単位
比重	1.91	7.90	
比熱	920	385	J/Kg $^{\circ}\text{C}$
熱伝導率	3,822	1,700,000	W/m $^{\circ}\text{C}$
ポアソン比	0.2	0.34	
Tg (DMA)	155	なし	$^{\circ}\text{C}$
熱膨張率	X	20	ppm
	Y		ppm
	Z		ppm
曲げ弾性率	22,364	110,000	MPa

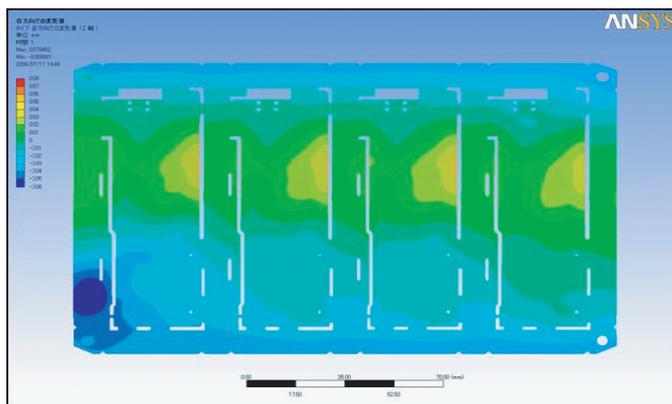


図 13 シミュレーションの解析結果



図 14 シミュレーション解析結果の拡大

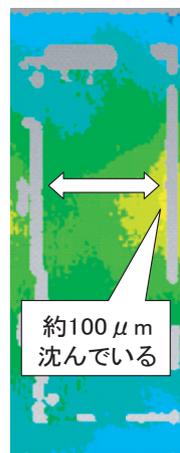


図 15 実測結果の拡大

データを使って実施した基板反りのシミュレーション解析結果と、基板に実装する部品の形状や実装方向などを総合的に考慮することで、十分にトラブルを予測することが可能であると確認できた。しかし、それと同時に、このシミュレーション・ソフトを使った解析方法を運用していくには、幾つかの課題も判明した。

5.5 課題と今後の活動

5.5.1 解析時間の短縮

今回の、使用した製品基板は、4層構造の集積規模としては一般的な基板に分類されるが、その基板の2次元CADデータをそのまま3次元データに変換して、シミュレーション・ソフトで解析処理を実行させている。

今回の解析した基板規模でも、データ容量は膨大なものとなり、シミュレーションの解析結果が出るまでには、数日を要してしまった。これから設計プロセスの中で運用していくためには、データ変換から解析結果までの作業時間を、いかに短くして設計者へフィードバックできるかが、もっとも重要となってくる。この作業時間を短縮させるためには、作業時間全体の中で大きな部分を占めている解析時の計算を短時間で終了させる必要がある。これを実現するには、データ容量を削減して、解析の計算負荷を軽くする必要がある。データの容量を削減する方法としては、以下の技術を開発していく。

1. 解析結果に影響を与えない銅配線パターンを選択してデータを削減する技術
2. 基板全体を比較的大きなブロックに分割して、そのブロックごとを等価物性データに置き換えてデータを削減する技術
3. 複雑な銅配線パターンを、単純な図形に置き換えてデータを削減する技術

5.5.2 反り挙動の変化量測定精度向上

今回は、基板設計プロセスで基板の反り挙動を評価するために、シミュレーションの解析結果と「実測による反り評価システム」の結果を比較すると、反りの挙動は、ほぼ再現できている。しかし、細かく基板の最大変形量をみていくと、解析結果と実測結果では差がある。今後、解析を行っていく際には良否判断が必要となってくるため、測定精度の向上が必要となってくる。

測定精度に影響をあたえる要因として以下の項目について、実測結果と比較検証を進めて、測定精度の向上をはかっていく。

1. ビルドアップのデータ有無による影響
2. 基板形状（貫通穴、Vカット溝など）の違いに

よる影響

3. レジストのデータ有無による影響
4. 熱や方向による材料物性データの特性値違いによる影響
5. 実基板の製造時の内部応力による影響など

5.5.3 材料物性データの取得

シミュレーションを行うには、材料の物性データが必要である。この物性データは、一般的に公開されていないため、独自に取得する必要がある。必要な物性データを独自に取得しようとするれば、特性項目に合った専用の設備が必要となり多額な投資が必要となってくる。また、外部機関へ委託して測定する方法もあるが、多額の費用が必要となる。基板に使用されている基材は数多く存在するため、それらの物性データを、効率良く、安価に取得する手段を構築していく。

6. まとめ

今回の目的は、設計プロセスの段階で有限要素法を用いたシミュレーションを利用し、反り挙動の発生を正しい解析結果として導き出し、その解析結果からトラブルの発生を予測できるかであったが、現在運用する「実測による反り評価システム」の実測結果と、ほぼ同じ反り挙動の解析結果を得ることができ、それを用いてトラブルの発生を予測することが可能で、トラブルの未然防止に有効な手段であることが分かった。今後は、この有限要素法を用いたシミュレーションを早期に導入するために、今回の評価で分かった課題の解決に向けて技術開発を進めていく。

さらに、我々は、基板反り以外の事象についても、有限要素法を用いたシミュレーションを利用した解析技術の応用開発を進めていき、開発ステップの削減や品質向上などに寄与できる技術開発活動も行っていく。

参考文献

- (1) 榎本, 馬見塚; 基板実装加熱時の反り・変形メカニズムの解析, PIONEER R&D Vol.16 No.1

筆者紹介

松永清二 (まつなが せいじ)

技術生産部生産技術センター。主にカーエレクトロニクス製品の実装技術に従事、2007年から現職。

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。