

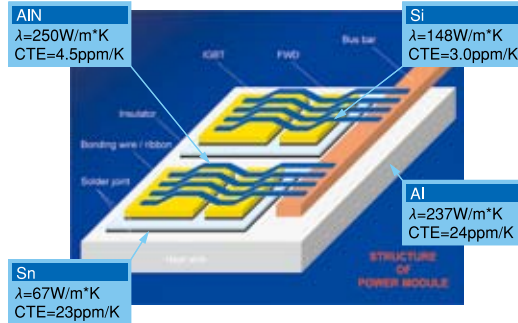
D デジタル画像相関法による電子機器の熱変形計測

電子機器は、その製造工程においてはんだリフローの高温にさらされ、また稼働状態においては素子の発熱による温度上昇を受けるなど、熱に対する耐性が要求される。最近の電子機器の一例として第1図にHEV車に用いられるパワーモジュールの模式図を示す。ここでは構成部材の代表的な熱物性として熱伝導率と線膨張率をあげているが、実にさまざまな熱物性値を有する材料が使われていることがわかる。したがって、これら電子機器が製造時もしくは稼働時に複雑な熱変形挙動を示すことは想像に難くない。こういった熱変形は接合部の疲労をもたらす、機器の信頼性に対して重要な影響を与えるものと考えられるが、従来は電子機器の熱変形挙動を把握する手段はなく、もっぱらCAEによる解析に頼らざるを得なかった。当社ではデジタル画像相関法により電子機器の熱変形を高精度に計測する技術を開発したので報告する。



技術本部
エレクトロニクス事業部
技術部
鈴木 康平

第1図 パワーモジュールの構成要素と熱物性



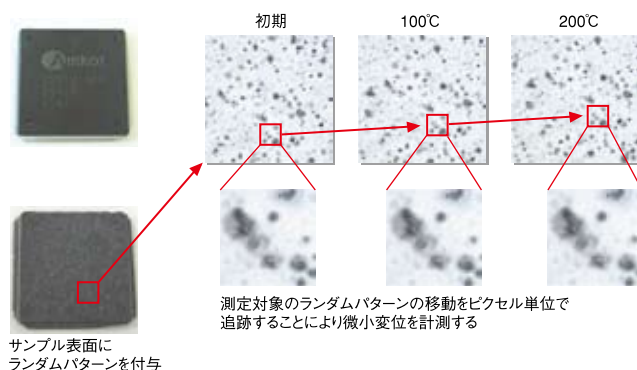
D-1 デジタル画像相関法の概要

デジタル画像相関法とは、測定対象物の表面を2台のCCDカメラで撮影し、変形前後の画像の比較により試料の変形量を求める方法である。第2図に原理を示す。サンプルの表面には白黒のランダムパターンを付与しておき、撮影した画像のパターンマッチングを行うことでピクセル単位のパターン移動量を求める。ここで事前に寸法が既知のパターンを撮影しておくことでキャリブレーションを行い、ピクセル単位の移動量を実空間での距離に変換する。ここで第3図に示すようにCCDカメラを2台用いてステレオ画像を構成し、三角測量の原理を適用することでX、Y方向だけでなくZ方向を含む3次元の変位を計測することが可能になる。

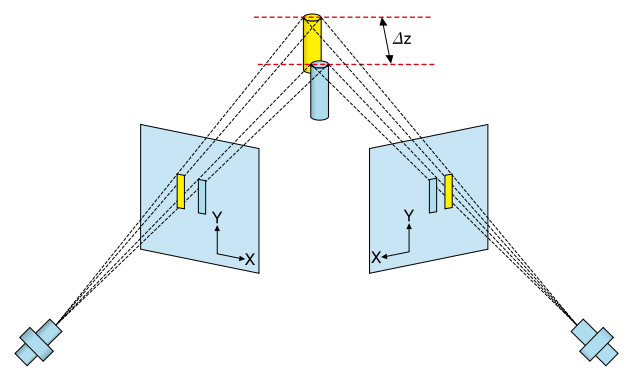
従来、プリント基板などの反りの測定にシャドウモアレ法が適用されてきた。この方法は比較的精度がよく、また測定時間が短いという特徴があるが、測定可能な変位がZ方向に限定されるという原理的な制約がある。一方、デジタル画像相関法は3次元の計測が可能であり、基板の反りだけでなく、線膨張率なども計測できるという利点がある。

デジタル画像相関法における測定分解能は視野の大きさとCCDカメラのピクセル数に依存する。メガピクセル級のCCDを用いたとしてもX方向およびY方向のピクセル数は数千程度であるが、各ピクセルが多ビットの階調を持っていることを利用した補間処理を行うことで、サブピクセルレベルの測定分解能をえることができる。当社システムの公称分解能は視野の一万分の一であり、これは0.01%歪に相当する。第4図に当社システムの測定精度を評価した例を示す。ここでは15mm角に切断したシリコンウエハの180℃における線膨張を評価している。座標系の原点のサンプルの中心に置いたとき、サンプルの両端で±4 μmの伸びが観測され、この結果から線膨張率を求めると3.09ppm/Kおよび3.25ppm/Kとなった。理科年表のデータを内挿して求めた180℃におけるシリコンの線膨張率は3.27ppm/Kであり、実測値は文献値とよい一致を示す。また実測値の回帰直線からの乖離は1 μm以内に収まっており、実力値として視野の一万分の一という分解能は達成されていることがわかる。

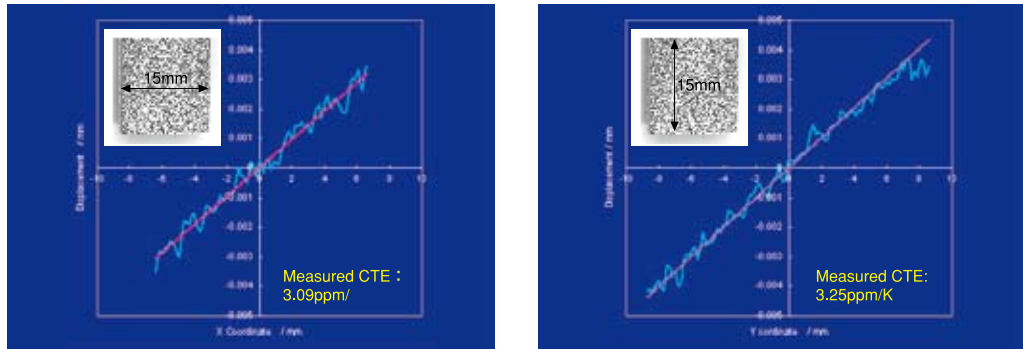
第2図 デジタル画像相関法の測定原理



第3図 ステレオ画像による3次元計測



第4図 デジタル画像相関法の測定精度評価例(シリコンの線膨張率測定)



CTE of Silicon~3.27ppm/K @180C (理科年表のデータを内挿)

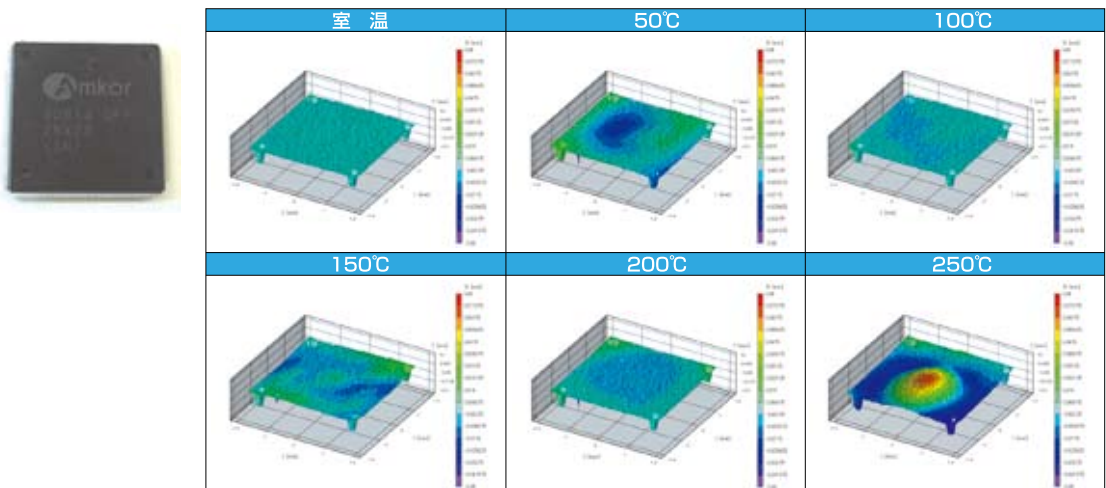
D-2 デジタル画像相関法による熱変形計測例

第5図にICパッケージの熱変形を計測した例を示す。ここでははんだリフロー時の熱変形を想定して250℃までの測定を行った。ICパッケージは100℃まではほとんど変形を示さないが、150℃から徐々に変形が始まり、250℃においてはシリコンチップ部が隆起し、樹脂部分が陥没するといった変形挙動を示す。こういった複雑な変形挙動は、ICを構成するシリコンチップ、リードフレーム、モールド樹脂などの線膨張率の違いに起因したものと考えられる。

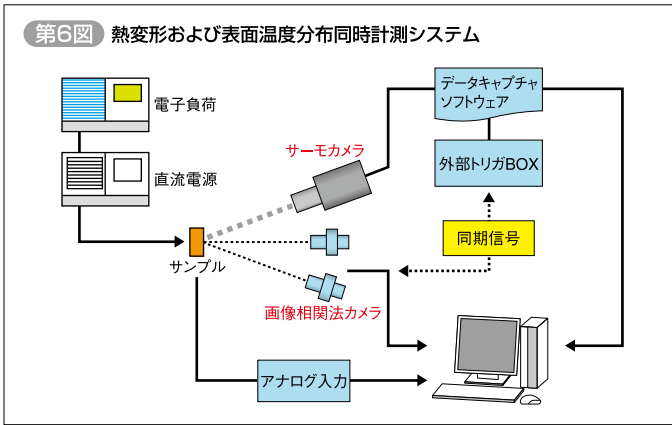
下記の測定事例は電子部品が高温雰囲気置かれたときの変形を想定したものであるが、CPUやパワー半導体に代表されるように電子部品の中には動作中の自己発熱が問題となるものが少なくない。このような電子部品の変形挙動を評価するためには、表面温度分布と変形挙動というふたつの事象を時系列で計測する必要がある。第6図は当社が構築した熱変形および表面温度分布同時計測システムである。2台の画像相関法カメラに加えて熱画像を撮影するためのサーモカメラを備えており、これらは外部からの同期信号により同一タイミングでデータを取り込む。このシステムにより、電子デバイスの過渡的な温度上昇と変形挙動を把握す

ることが可能になった。このシステムの有効性を評価するために、パワーモジュールを模擬した構造のテストサンプルを試作した。第7図にこのサンプルの構造を示す。アルミ基板の上に絶縁性セラミック基板を接合し、その上にパワー半導体に代えてヒーターチップを接合している。このヒーターチップに通電して発熱させることにより、パワー半導体の発熱を模擬する。各部件はPbフリーはんだを用いてリフロー工法により接合している。第8図はヒーターチップに通電したときのサンプルの熱変形と表面温度分布を1分ごとに測定した例である。ヒーターチップに通電する前の初期状態において、アルミ基板とセラミック基板の表面形状は上に凸に反っていることがわかる。これは、リフロー工程においてアルミ基板とセラミック基板がともに熱膨張した状態で接合された結果、その後の冷却過程において両者の線膨張率の差により上に凸に反ったものと考えられる。ヒーターチップに通電すると時間の経過とともにサンプル温度が上昇し、それとともにアルミ基板およびセラミック基板がフラットな形状へと回復する様子が見られている。

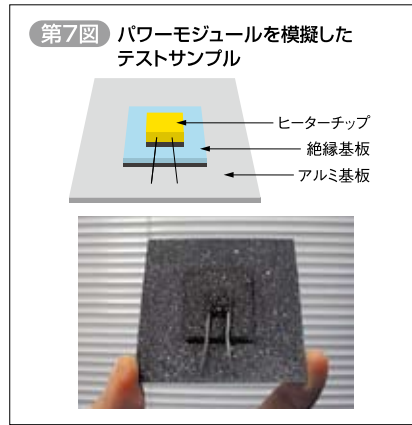
第5図 ICパッケージの熱変形計測例



第6図 熱変形および表面温度分布同時計測システム



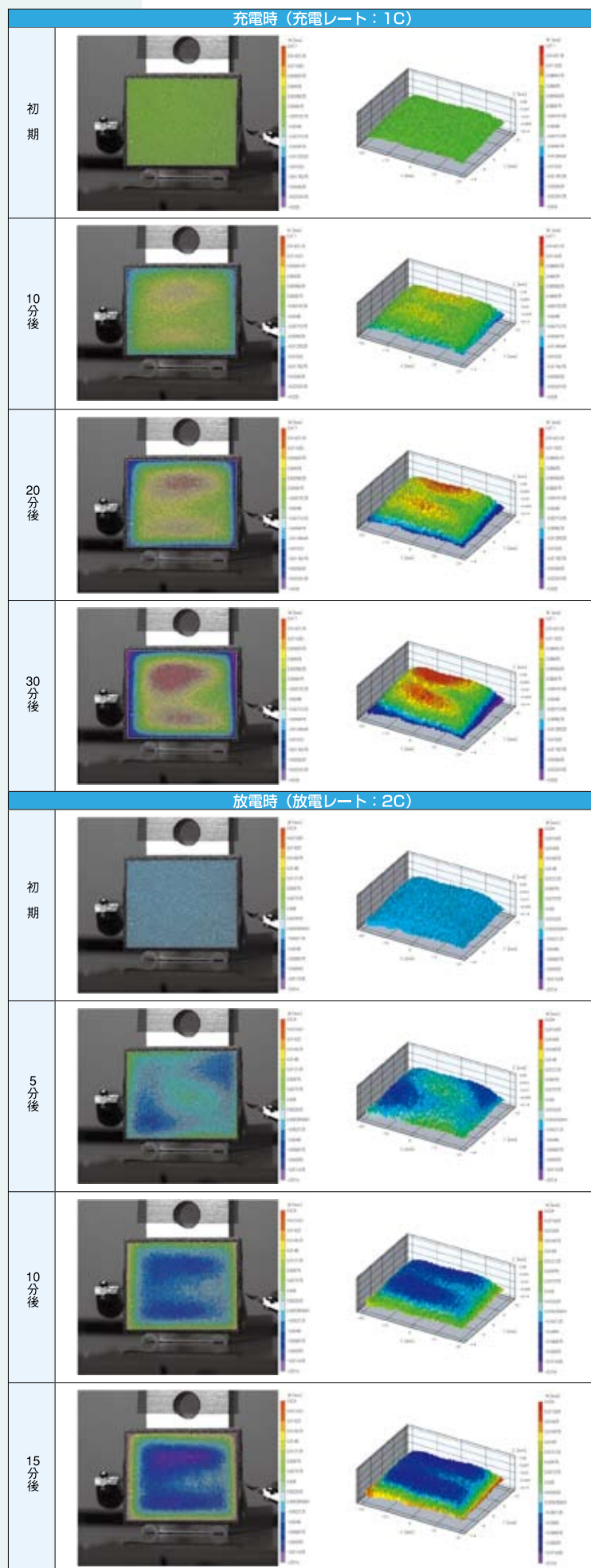
第7図 パワーモジュールを模擬したテストサンプル



第8図 模擬パワーモジュールの通電加熱時の熱変形挙動と表面温度

| | アルミ基板 | セラミック基板 | 熱画像 (サーモグラフィ) |
|-----|-------|---------|---------------|
| 初期 | | | |
| 1分後 | | | |
| 2分後 | | | |
| 3分後 | | | |
| 4分後 | | | |
| 5分後 | | | |

第10図 リチウムイオン電池の充放電中の変形挙動



次にリチウムイオン電池の充放電中の変形挙動を計測した例を示す。サンプルとして第9図に示すような小型のリチウムイオン電池を使用し、充電レートは1C、放電レートは2Cとして、いずれも定電流による充放電を行いながら電池表面の変形を計測した。リチウムイオン電池は充電時に負極のグラファイトの層状構造のあいだにリチウムイオンが挿入されることにより体積膨張するとされるが、第10図に示すように充電が進むとともに電池表面が膨張する様子が捉えられている。一方、充電時とは逆に、放電時には電池表面が収縮することがわかる。なおリチウムイオン電池における放電は発熱反応であり、かつジュール熱が発生するため、電池の表面温度上昇は充電時よりも放電時のほうが顕著に現れる。この例においても同時計測したサーモグラフィによって約12℃の表面温度上昇が観測されている。

第9図 リチウムイオン電池の充放電時の変形計測



第1表に当社のデジタル画像相関法測定システムの仕様を示す。デジタル画像相関法の特徴の一つに、適当な光学系を準備することにより広範囲なサンプルサイズに適用できるという点あげられる。サンプルの温度は-40℃から+250℃の範囲で制御可能である。また本稿で示した測定例はいずれも数分から数十分のあいだの比較的ゆっくりした現象を捉えた例であるが、本システムでは最大毎秒4フレームのデータ取り込みが可能であり、過渡的な変形挙動にも対応可能である。またオプションとしてサーモグラフィだけでなくDC電圧を同期測定することが可能であり、たとえば2次電池の端子電圧と変形挙動を同時に計測するといったことが可能である。

第1表 デジタル画像相関法測定システムの仕様

| 項目 | 仕様 |
|---------|--|
| 測定精度 | 視野の1/10000 (公称値) |
| サンプルサイズ | 温度制御測定の場合、最大300×300×80mm 室温測定の場合は特に制限なし |
| 温度制御範囲 | -40℃～+250℃ |
| フレームレート | 最大4FPS |
| オプション | サーモグラフィ、DC電圧入力 (同期測定) |

デジタル画像相関法を用いることにより、従来は計測が困難であった電子機器の熱変形挙動を把握することが可能になった。ここでえられたデータを機器の熱設計に活用することにより、電子機器の信頼性向上に寄与することが期待される。