ホログラフィックパターン計測システムと そのプリント配線板の熱変形解析への応用

正員 谷口 正成 (名城大)

正員 高木 相 (東北大)

Holographic Pattern Measuring System and its Application to Thermal Deformation Analysis of Printed Circuit Board

Masanari Taniguchi, Member (Meijo University), Tasuku Takagi, Member (Tohoku University)

A new measuring system (Holographic Pattern Measuring System, HPMS) has been developed to the thermal deformation analysis of printed circuit board (PCB) due to thermal stress. The HPMS combines both techniques of holography and graphic image processing. The temperature on the PCB surface was measured by using a thermographic video system, and the relationship between temperature and displacement of the PCB was studied. As a result, the microscopical displacement of the displacement can be quantitatively measured, and the distribution of the displacement can be displayed as a three dimensional graphic image. The temperature distribution of the PCB surface showed the various relationship between the characteristics of the deformation. Therefore, the holographic pattern testing method may be useful in analysis of the detail thermal stress evaluation of the PCB.

キーワード：プリント配線板，熱変形解析，ホログラフィー干渉法，画像処理

1. ま え が き

近年，マイクロエレクトロニクスの発展と共に，プリント配線板（以下，PCB と略記）は実装部品の高密度化，配線パターンの微細化の傾向にある⁽¹⁾。特に，PCB は周囲の温度変化，あるいは，実装部品の発熱などの熱ストレスを受けた場合，膨張，変形する。従って，熱ストレスを繰返し受けた場合，微細なピッチリードのはんだ接続部の不良⁽²⁾，あるいは，銅はくのはく離などの潜在的な欠陥が現れ⁽³⁾，更に，腐食性有害ガスなどの影響を受けて接続と絶縁の信頼性に重大な影響を与える場合がある⁽⁴⁾。このような問題を解決するため，現在，PCB の熱解析，ならびに熱対策についていろいろ調査，研究が進められている^{(5)~(9)}。また，PCB の信頼性を評価するには従来の温度分布測定による熱解析と共に，熱応力，熱変形

析が重要視され⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾，そのシステムの実用化が急務と考えられる。

一般に，熱変形のような微小な変位を高精度で測定するには光学式パターン計測法の応用が最良と言われている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。本研究では，更に，定量的，かつ三次元可視化解析を目的として，ホログラフィー技術と画像処理技術とを組合せた新しい計測システム（以下，ホログラフィックパターン計測システム，あるいは，HPMS と呼ぶ）を開発し，PCB の熱変形解析に応用した結果，HPMS の有効性とその実用化の見通しが得られた。更に PCB の表面温度を測定し，変位との相関について実験的に比較検討を試みた結果，温度分布と変形との関係は必ずしも単純ではなく，単に温度分布の計測結果から変形を予測することは困難であることが明らかになった。

本論文では，HPMS の概要，ならびに HPMS を

図1 ホログラフィー干渉法の原理
Fig.1. Principle of holographic interferometry.

利用してPCBの熱変形解析を試みた結果とその温度分布との比較検討結果の一部を述べる。

2. HPMS の概要

HPMSはホログラフィー干渉装置とホログラム再生像の干渉じまの情報処理する画像処理装置と組合せたものである。以下に、ホログラフィー干渉法と干渉じまの画像処理の概要について述べる。

〈2・1〉 ホログラフィー干渉法 ホログラフィー干渉法を変形解析に応用する場合、一般に二重露光法、あるいは実時間法が利用される⁽¹⁴⁾。

二重露光法は図1に示すように、コヒーレントな光源を用いて、被測定物体の変形前と変形後の像を同一ホログラム乾板に重ねて露光する手法である。この手法で記録したホログラム乾板を現像処理した後、参照光を照射すると被測定物体像が観測される。このときの被測定物体上の任意の点 r の光の再生強度 $I(r)$ は、

$$I(r) = k \cos^2\left\{\left(2\pi/\lambda\right) \cdot d(r) \times (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)\right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 k ：比例定数、 λ ：光源の発振波長、 $d(r)$ ：任意の点 r の変位、 θ_1 ：被測定物体の変位方向と照明光との角度、 θ_2 ：被測定物体の変位方向と反射光との角度

と表される⁽¹⁵⁾。従って、物体の変位に応じて光の明暗のしま（干渉じま）が観測され、 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ とすると、しまとしまの間の変位は $\lambda/4$ （光源をHe-Neガスレーザとすると、おおよそ $0.16 \mu\text{m}$ ）として算出できる。

〈2・2〉 干渉じまの画像処理 干渉じまの情報から被測定物体の変位分布を自動的に算出し、更にその三次元立体図形を表示するためにパーソナルコンピュータと若干の周辺機器を利用した簡便な画像処理装置とそのソフトウェアを独自に開発した。

本装置では、座標入力装置（ディジタイザ）から入力した干渉じまの情報を基に、微分オペレータ方式で

図2 サンプルデータの数と誤差率との関係
Fig.2. Relationship between the number of sampled data and the error rate.

補間処理し、更に、照明光の角度 (θ_1) と反射光の角度 (θ_2) を考慮して変位分布を算出する。その算出結果は入力データファイルとしてフロッピーディスクに記憶される。このデータファイルから被測定物体の断面変位分布図、ならびにワイヤフレーム手法による変位分布の三次元立体図形をCRTディスプレイ装置の画面、あるいは、 $X-Y$ プロッタに作図した。また、本装置では、詳細な図形を表示するため三次スプライン関数を応用した。

〈2・3〉 HPMS の特徴 HPMSを変形解析に応用した場合、

- (1) 被測定物体の材質ならびにその表面の影響を受けない。
- (2) 被測定物体とは非接触で、かつパターン計測できる。
- (3) 被測定物体の微少な（ $0.1 \mu\text{m}$ のオーダー）変位分布を定量的に測定できる。
- (4) 被測定物体の変位分布を任意の視点からの三次元可視化が可能である。

などの特徴があげられる。

また、本システムでは干渉じまの情報が少なくても、三次スプライン関数で補間処理した結果、滑らかな曲線で詳細な図形を表示できる。その場合の入力するデータのサンプル数と誤差について、三角関数（ $\cos$ ）の1周期分の曲線を利用して360個のデータを補間したときの誤差率を求めた結果の一例を図2に示す。この結果から、1周期あたり15個以上のデータをサンプルすれば、誤差の平均値は1%以内に納められる。

3. PCB の熱変形解析

〈3・1〉 被測定 PCB HPMSの有効性を実験的

図 3 被測定 PCB と実験回路

Fig. 3. Measured PCB and experimental circuit.

に確認するため図 3 に示すような 4 種類の簡単な銅はくのパターンの PCB を被測定物とした。実験では、図 3 に示すように、いずれも PCB の銅はく表面に接触した電極から電流を通电したときの電極接触部、あるいは銅はく部で発生するジュール熱を熱源とし、PCB 表面の温度分布と変位分布を測定した。なお、PCB の寸法は 30×40 mm、基板厚さ 1.6 mm、基板材質ガラスエポキシ材である。電極は U 字形のリン青銅のワイヤの先端とし、それを約 10 g 程度で接触させた。

〈3・2〉 実験条件 実験では、銅はくの配線幅の影響と銅はくへの電流通電による影響を調査することとし、次のような実験条件で測定を試みた。

- (i) 実験条件 A : 図 3 (a) に示すように PCB の片面全体を銅はくとし、電極から電流を通电。
- (ii) 実験条件 B : 図 3 (b) に示すように銅はくの配線幅を約 2 mm とし、電極から通电。
- (iii) 実験条件 C : 図 3 (c) に示すように U 字形の銅はくの配線パターンについて、一方の電極から他方の電極に通电。
- (iv) 実験条件 D : 図 3 (d) に示すように U 字形の銅はくの配線パターンについて、上部二つの電極から下部の端子に通电。

〈3・3〉 温度分布測定 PCB の表面温度を測定するため、図 4 に示すサーマルビデオシステム（アビオニクス社製 TVS-5000）を利用した。

本システムでは、赤外線カメラから PCB 表面の温度を非接触で測定できる。温度分布の測定結果はデジタル画像処理によってカラー表示され、必要によってはプリント出力できる。更に、その変化を連続的に

図 4 PCB の温度分布測定方法概略図

Fig. 4. Schematic diagram of experimental set up for measurement of temperature on PCB surface.

図 5 ホログラフィー干渉装置概略構成図

Fig. 5. Schematic diagram of holographic interferometry system.

観測しながら VTR に録画することも可能である。

また、HPMS の画像処理装置を利用して、温度分布の三次元可視化を試み、変位分布と比較検討した。

〈3・4〉 変位分布測定 PCB の変位分布の測定には、図 5 に示すホログラフィー干渉装置を使用した。なお、実時間法は被測定物体の変形前の像のみをホログラム乾板に記録し、現像処理後、その再生像と被測定 PCB の像とを重ねる手法である。従って、二重露光法の場合と同じ条件で PCB の変形に応じて干渉じまの情報を実時間で、かつ連続的な観測が可能となり、必要に応じてその変化を VTR に記録した。

図 6 PCB 表面温度測定結果例
Fig.6. Experimental results of temperature on PCB surface.

図 7 PCB のホログラム再生像
Fig.7. Holographic interferograms of PCB surface.

4. 実験結果

〈4・1〉 温度分布測定 被測定 PCB の銅はく表面に接触した電極から DC 3 A の電流を通電し、そのときの PCB 表面の温度分布を測定、画像記録した一

図 8 PCB 表面の温度分布の三次元立体図
Fig.8. Three dimensional graphic image of temperature on PCB surface.

例を図6に示す。(a)図は実験条件A、(b)図は実験条件B、(c)図は実験条件C、(d)図は実験条件Dとした場合である。いずれも、電流通電開始30秒後、あるいは40秒後を示す。

〈4・2〉 変位分布測定 電流通電時の被測定 PCB

図9 PCB表面の変位分布の三次元立体図
Fig.9. Three dimensional graphic image of displacement on PCB surface.

をホログラフィー干渉装置で記録、再生したホログラム像の一例を図7に示す。図7(a)は実験条件A、(b)図は実験条件B、(c)図は実験条件C、(d)図は実験条件Dとした場合である。いずれも、通電開始前3秒間と通電開始後20~23秒間を二重露光法で記録、再生した結果を示す。従って、各々、通電開始20~23秒間後に変形した様子をそれぞれの干渉じまのパターンと数から把握することができる。また、電流の通電時間の長さに応じて干渉じまの数が増加する傾向を観測した。

〈4・3〉 三次元可視化 図6で示した温度分布の測定結果からPCB表面の温度分布をワイヤフレーム手法で三次元立体図形表示した一例を図8に示す。これらの図は通電時間開始30秒後、あるいは40秒後である。また、図7で示したホログラム再生像の干渉じまの情報を基に、PCBの変位分布を算出し、その結果を三次元立体図形表示した一例を図9に示す。

これらはいずれも通電開始20~23秒間後の場合についてのみ示した。なお、いずれの図も左側はPCBの下部の固定部分、右側は上部の電極の接触部分を示す。また、X軸、Y軸はPCBの寸法(30×40mm)、Z軸は温度、あるいは変位を示す。

5. 温度分布と変位分布との相関

PCB表面の温度分布と変位分布の測定結果から、

(1) PCB全体が銅はくで覆われている場合、電極接触部近傍の温度は上昇したが、銅はく表面は放熱効果のため銅はくの表面全体の温度を上昇するまでに至らなかった。しかし、そのときのPCB表面の変位分布は発熱部分を中心に全体が湾曲する傾向を示している。これは銅はくと基板の間の保温効果により電極接触部で発生したジュール熱は銅はく裏面の基板の温度を上昇し、PCB全体が膨張、変形したと考えられる。

(2) また、銅はくの幅を狭くした場合、電極接触部近傍の温度と変位は増大する傾向を観測した。特に、通電時間が長くなるに従って、銅はく近傍の基板の温度が上昇する特異な現象を観測した。このような現象が生じた要因としては、前述のように銅はく裏面の保温効果によって、接触部で発生したジュール熱と電流通電による影響で銅はく裏面の基板の温度が上昇し、膨張、変形したと考えられる。

(3) 一方、銅はくのパターンは同じでも、電流の通電方法によって、PCB表面の温度分布に差が生ずる傾向を観測した。特に、実験条件Cの場合は中央部分を中心に変形する様子が見られた。これは二つの

電極接触部で発生したジュール熱と電流通電に伴って発生したジュール熱によって、銅はく裏面の温度が上昇し、膨張、変形したと思われる。

(4) また、実験条件 D の場合も電極接触部と銅はく近傍の温度と変位は上昇する傾向を観測した。更に、下部の接触端子付近の銅はく配線部分で、若干、変位が増加する様子が見られた。これは上部 2 箇所電極から流入した合成電流によって発生したジュール熱の影響を受け膨張、変形したと思われる。

(5) 従って、温度分布と変位分布との関係について、熱源近傍では両者の相関が見られたが、PCB 全体の温度分布と変位分布とは異質な関係にあるため、温度分布の測定のみで PCB の変位を詳細に把握することは困難であると考えられる。

6. む す び

以上、新しく開発した計測システム(HPMS)を PCB の熱変形解析に応用し、更に PCB 表面の温度測定を試み変形との相関について実験的に比較検討した。その結果、わずかな熱ストレスでも PCB の膨張、変形に多大な影響を与える様子を詳細に観測、解析が可能となった。また、PCB 表面の温度分布と変位分布とは若干の相関が見られたが、全体的には、各々特異な現象を示した。従って、PCB の熱ストレスの影響を詳細に解析するには、ホログラフィー技術の応用が有効であると共に、本計測システムの実用化の見通しが得られた。

最後に、日ごろ種々の御高配を賜っております名城大学教授 井上寿雄先生と同研究室の諸先生方、ならびに、本研究を進めるに際して、温度測定にご後援いただいた労働福祉事業団・労災リハビリテーション工学センターの関係者に深謝いたします。また、本研究の一部は東海産業技術振興財団研究助成、名城大学学術研究助成によるものであり、関係各位に謝意を表します。

(平成 2 年 2 月 26 日受付)

文 献

- (1) 小花:「プリント配線板の現状と動向」, 電学誌, **105**, 831(昭 60-9)
- (2) D. Stone, H. Wilson, R. Subrahmanyam & C-Y. Li: "An Investigation of Creep Fatigue Interaction in Solder Joints", Proc. of Tech. Program Natl. Electron Package Prod. Conf., p. 281(1986)
- (3) 梶原・高見:「プリント配線板における銅箔の接着力とその耐熱性」, フリント回路学会学術講演大会講演論文集, 2nd, p. 69 (昭 62)
- (4) 矢野:「表面実装プリント配線板の信頼性試験」, 継電器研究会特別シンポジウム講演論文集, 368-8, p. 71 (昭 62-8)

- (5) M. R. Labonet & C. Kumar: "Reliability & Thermal Analysis of Printed Circuits", Proc. of Tech. Program Natl. Electron Package Prod. Conf., p. 105 (1986)
- (6) D. W. Almgren & R. J. Rancatore: "Q Board TM: A Thermal Analysis Package for Printed Circuit Board", Proc. of Tech. Program Natl. Electron Package Prod. Conf., p. 113 (1986)
- (7) M. Recht, M. Palmer & J. Naft: "Thermal Reliability Management in PCB Design", Proc. Annu. Reliab. Maintainability Symp., p. 312 (1987)
- (8) L. Smith-Vargo: "Thermal Analysis Explores PCB Behavior", *Electron Pack. Prod.*, **27**, No. 12, p. 30 (1987)
- (9) 伊藤:「プリント配線板の熱対策」, 電子技術, **30**, 44 (昭 63-9)
- (10) 北村・北村・仲西:「プリント配線板のスルーホールにおける熱応力解析」, 電子情報通信学会技研報, **88**, 209, [R88-12], p. 1 (昭 63)
- (11) M. Taniguchi & T. Takagi: "Holographic Pattern Testing of Printed Circuit Board Deformation Due to Thermal Stress", Proc. of 1989 Japan Int. Electro. Manuf. Technol. Symp., p. 277 (1989)
- (12) 新田:「光学式パターン計測の産業への応用」, 電学誌, **100**, 17 (昭 55-3)
- (13) 山口:「応用光学と計測」, 計測と制御, **26**, 5 (昭 62-4)
- (14) 谷口・沖・井上・高木:「ホログラフィ干渉法の変位計測ならびに振動解析への応用に関する実験的検討」, 電子通信学会技報, **85**, 292, [R85-63], p. 59 (昭 62)
- (15) C. M. Vest: *Holographic Interferometry* (1979) John Wiley & Sons, New York

谷 口 正 成 (正員)

昭和 16 年 12 月 20 日生。39 年 3 月名城大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月より名城大学理工学部助手。ホログラフィーと画像処理の計測への応用、コンタクトノイズとトライボロジーなどの研究に従事。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本音響学会、日本潤滑学会、IEEE 会員。

高 木 相 (正員)

昭和 7 年 3 月 31 日生。30 年 3 月九州工業大学電気工学科卒業。35 年 3 月東北大学大学院博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手、同助教を経て、現在同教授。通信方式、EMC、音声、信号処理、電気接点などの研究に従事。工学博士。54 年 EMC 国際シンポジウム(オランダ)論文賞、同年科学計測振興会賞、平成 2 年 Holm 科学功績賞受賞。本会環境電磁工学研究専門委員会委員長など歴任、電子情報通信学会編集顧問。