モアレ干渉法による熱サイクル試験下における
電子デバイス熱挙動計測*岸 卓人^{*1}, 三木 健輔^{*1}, 鯉 渕 興 二^{*2}Thermal Behavior Measurement of Electronic Devices
by Moiré Interferometry under Thermal Cycle TestTakato KISHI, Kensuke MIKI and Koji KOIBUCHI^{*3}^{*3} Shonan Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Tsujido Nishikaigan 1-1-25, Fujisawa-shi, Kanagawa, 251-8511 Japan

Electronic devices composed from composite materials are subject to thermal deformation due to environmental temperature change. Thermal deformation caused by the difference in coefficients of thermal expansion of composite materials leads to fatigue failures in micro component. In this paper, thermal strain distribution under thermal cycle test is measured by Moiré interferometry, and creep behavior and residual strain of electronic devices are extracted. On the other hand, to evaluate not only the behavior of cross-section but total Devices behavior, measurement of the out-of-plane displacement is tried by applying Moiré interferometry.

Key Words: Optical Measurement, Thermal Stress, Creep, Fast Fourier Transform, Finite Element Method, Moiré Interferometry, Strain Distribution, Thermal Cycle Test

1. 緒 言

電子デバイスにおいては高密度化にともなう発熱量の増加や使用環境による温度変化により、その構成材料の熱膨張係数の差から生じる熱ひずみが、破壊の要因となっている。設計にあたっては、デバイス中に生じるひずみ集中を避けるために有限要素法が利用されているが、その複雑な構造やはんだのクリープ挙動などに起因する非線形挙動のために、解析結果の正当性の確認が必要である。そのため電子デバイスのような微小領域におけるひずみおよび変位の非接触計測法としてモアレ干渉法[1]を適用した例が報告されている。しかし従来の手法は、高温で試験片表面に回折格子を貼付し、常温に戻した後に光学系に設置し、残留ひずみを計測するというものであり[2]、実時間の熱サイクル試験計測については適用されていない。そこで、本

研究においては、光学系に小型の熱負荷装置を設けることにより、熱サイクル試験下の実時間連続計測を可能とし、熱負荷に対する変化の様子や高温保温時のクリープ挙動、常温時の残留ひずみ、さらには有限要素法では捉えられない多サイクル試験の効果を抽出することを可能にした。また、デバイスの全体挙動を捉える手法として、モアレ干渉法による面外変位計測システムを熱サイクル試験に適用した。

2. モアレ干渉法による熱ひずみ計測

モアレ干渉法は、格子周波数 $f_s=200\sim 2000\text{line/mm}$ の反射型回折格子を貼付した試料に 2 方向から対称にレーザー光を照射し、それぞれの回折光を干渉させることにより、変位、ひずみ分布の情報をもつ干渉縞を得るものである。図 1 に示すように初期状態において、1 次と -1 次の回折光の波面が重なりあうようにするとき、仮想参照格子 f と入射角 α はそれぞれ、

$$f = 2f_s \dots \dots \dots (1)$$

Fig.1 Generation of moiré fringe

Fig.2 A schematic diagram of the moiré interferometry

* 原稿受付 2000 年 1 月 19 日.

*¹ 東京大学大学院工学系研究科.*² 正員, 湘南工科大学工学部(〒251-8511 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25)(元: 東京大学大学院工学系研究科).

E-mail: koibuchi@mech.shonan-it.ac.jp

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{f \cdot \lambda}{2}\right) \dots \dots \dots (2)$$

で表される。モアレ縞は等変位線を表しており、ひずみ量は縞間隔の変化量として現れる。よって、変位・ひずみはそれぞれ、

$$U = \frac{1}{f} N_x, \quad V = \frac{1}{f} N_y, \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{f} \frac{\partial N_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{f} \frac{\partial N_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_x}{\partial y} + \frac{\partial N_y}{\partial x} \right] \dots \dots (4)$$

によって得られる。ここで N は縞次数、 f は仮想参照格子周波数である。本研究における光学系を図 2 に示す。本研究においては、 $f_s=1200\text{line/mm}$ の回折格子を使用しているため、 $f=2400\text{ line/mm}$ となり、モアレ縞 1 本は $1\text{mm}/2400=417\text{nm}$ の変位量を表す。256 階調の CCD を使用することにより、縞 1 本の間隔は 512 階調となり、理想的には $417\text{nm}/512=0.8\text{nm}$ 単位で変位量の計測ができる。

CCD により得られたモアレ縞画像は、場所に対する輝度分布とみなすことにより、任意の波形はフーリエ級数で表される。縞画像は一般にほぼ一定の周波数範囲に限られており、他の周波数成分は輝度むらやノイズなどの不要成分とみなせ、特定の周波数成分（1 次調和波）のみを抜き出すフィルタリングを施し逆フーリエ変換により注目する現象のみを取り出すことができる。これを利用し無負荷状態においてあらかじめ与えたキャリアパターンを取り除くことにより、熱負荷時のモアレ縞を得る[3]。

しかし、電子デバイスのような複雑構造物においては、構成する各部材の熱膨張係数の違いから、得られる縞画像は図 3(a) に示すように複雑であり、それぞれ

Fig.3 Fourier transform of the fringe pattern

れの部材上の干渉縞は特徴的な周波数帯域を有する。この画像から得たフーリエスペクトルは同図(b)のように広範囲にまたがっており、同図(b)から、ひずみ分布を求めるとノイズを多く含んだ画像が得られる。ひずみを求める動作は微分動作であり、ノイズを含む場合それが強調されるため、不必要な情報は取り除く必要がある。そこで元の画像から注目している部材のみを抽出し(同図(c))、フーリエ変換を施すことにより(同図(d))、同図(b)におけるスペクトルの一部だけが得られ、この部材に対してノイズとして作用していた同図(b)における他のスペクトルを取り除くことができる。本論文では、各部材内の正確なひずみ分布を求めるために、この手法を用いることとし、それぞれの部材のひずみ分布画像を得て、それらを重ね合わせることで全体のひずみ分布画像を得た(図 8(e))。

3. 熱サイクル試験下における断面計測

3・1 熱サイクル試験 従来の電子デバイスの熱負荷計測における手法は、緒言に示したようにサイクル試験に適用できない。本研究においては、光学系に小型の熱負荷装置を設け(図 2)、常温にて回折格子を貼付した試料を用いることにより、熱サイクル試験下の実時間連続計測を可能とした。すなわち、熱負荷に対する変化の様子や高温保温時のクリープ挙動、常温時の残留ひずみ、さらに有限要素法では捉えられない多サイクル試験の効果の抽出が可能となった。

実際に実装されるデバイス(図 4)についてこのシステムにより、熱サイクル試験を施しその際の熱挙動の解析を行った。計測したサンプルは面外変形の影響を避けるため、細長く切り出した。熱サイクル試験の条件としては、室温から 80℃まで加熱、80℃で保温、室温に冷却、室温保温を 3 サイクル(各工程 40 分)繰返した。

Fig.4 Ball grid array

3・2 はんだ接合部付近の熱変形 第 1 サイクル目に得られた U field(x 方向の変位)および V field(y 方向の変位)の 80℃ 加熱直後および室温冷却後のモアレ

Fig.5 Fringe pattern of the 1st cycle

縞画像を図 5 に示す。V フィールドの縞画像(c)を見るとそれぞれの部材の熱膨張率の差が明確に現れている。また、冷却後の縞画像にもモアレ縞が生じており、第 1 サイクルですでに残留変位が現れている。

モアレ縞画像は多くの情報を含んでいる。図 6 は第 1 サイクルにおける各基板のはんだ接合面に着目した

Fig.6 Behavior of the substrates near the solder joints

Fig.7 Relative displacement between the substrates

際の y 方向の変位である。横軸ははんだ番号であり、最も内側のはんだ($n=1$)を基準とした相対変位を縦軸に示す。上下の基板においてそれぞれ、高温保温後にクリープによる変形が見られ基板の変位の変化量を一定にする方向に変化している様子がわかる。また冷却後基板は初期値に戻らず変形が残る。

図 7 は各はんだ接合面における上下基板間の相対変位の熱サイクルにおける履歴を示すものである。x 方

Fig.8 Thermal strain distribution at the 1st cycle:(a),(b),(c):x-direction,(d),(e),(f):y-direction

Fig.9 Thermal strain distribution at the 3rd cycle

向については、サイクルを繰り返すにつれ上基板と比較して下基板が外側に伸びていく傾向を示し、はんだに引張りの繰返し荷重が加わりしかもその負荷が増加していく傾向にある様子がわかる。また y 方向については、第 1 サイクルの冷却時からはんだに圧縮荷重が加わり、熱サイクル負荷により引張り圧縮の繰返し荷重が加わっている様子が捉えられる。

3.3 ひずみ分布 逆フーリエ変換によって得られる余弦波状の輝度値（モアレ縞画像）を現す複素振幅の虚部と実部の比の逆正接を計算すると位相が得られる。この位相分布を 2π で割ることにより得られる変位分布を方向で微分することによりひずみ分布が求られる。図 8 に第 1 サイクルの 80°C 加熱直後、 80°C 保温後、冷却後の x 方向、 y 方向それぞれのひずみ分布を示す。

x 方向のひずみについては、加熱直後、はんだ接合部間の基板上に局所的なひずみ集中が見られ、値は大きいところで 1550μ 以上である。はんだについては最も内側のはんだに対して 1550μ 以上の最も大きなひずみ集中が見られる。 80°C 保温によって基板内では、ひずみは値としては全体的に低下するものの接合部間などの局所的なひずみ集中は残留する。はんだについては局所的なひずみ集中は緩和される傾向にあり、高い

ひずみ値を示す領域がはんだ全域に広がっており、クリープ挙動による影響が現れている。冷却時には基板内に局所的なひずみ集中は見られないが、はんだ全域で高温時より高い値のひずみが見られる。

y 方向に着目すると、 80°C 加熱直後にははんだよりもむしろ基板内に 4500μ 以上の局所的なひずみ集中が見られた。この基板は実際に配線の施された多層基板からなり、ひずみ集中はこの層に沿って現れている。 80°C 保温後はクリープの効果により、基板内のひずみ値が減少している様子がわかる。しかし冷却後には、基板内には 1000μ 程度の引張りひずみ、はんだ内には -2600μ 以上の圧縮ひずみが観測された。

はんだのクリープ挙動により、高温時には基板内のひずみ集中を緩和するものの、はんだ自体のひずみ量は増加する。また冷却時には逆に基板に残留ひずみを与え、はんだにはさらにひずみが増加する。

図 9 に第 3 サイクルのひずみ分布を示す。図 8 と比較して、 x 方向についてはサイクルを繰り返すことにより、高温時における基板内のひずみは 470μ 以下の領域が減少しており、全体的にひずみは増加し、局所的なひずみ集中は緩和される。はんだではサイクルを重ねた結果ひずみ集中は緩和され、 1500μ 以上の高いひずみを示す領域が全域に広がる。冷却後と比較すると、はんだでは 1500μ 以上のひずみが全域に見られる。 y 方向については、高温加熱時には、基板内にひずみ集中が見られるが、全体としてその値は減少する。冷却後については 1 サイクル目に見られた基板内の引張りひずみは減少し、はんだについては圧縮ひずみが増大し、 2500μ 以上のひずみが全域で見られる。すなわち、サイクルを繰り返す結果、基板内のひずみ集中は常に存在はしているもののその値としては緩和される傾向にあり、はんだ内の残留ひずみは増大する。

3.4 基板内の配線の影響 有限要素法により同

Fig.10 Moiré fringe by FEM analysis

サンプルの解析を行った結果を図 10 に示す。図 5(a)(c)と比較して基本的な変化の方向は一致するものの基板内に見られた複雑な縞模様は再現されていない。またひずみ分布についても、計測された結果のような基板内にひずみ集中は見られなかった。本解析においては配線はモデル化していないことから、配線の無い試料との比較を行った。多層プリント基板を用いた試料の計測結果を図 11 に示し、また図 17 に金属板によって構成された試料(図 15,16)の計測結果を示すが、双方とも図 5 にみられた基板内の複雑な縞模様や図 8(d)(e)(f)、図 9(b)に見られた基板内のひずみ集中は見られず、よって解析結果と計測結果との違いは内部の配線にあると考えられる。

Fig.11 Measurement of the non-wired specimen

4. 面外変位計測への応用

電子デバイス断面のモアレ干渉法による計測により有限要素法によっては得られない実挙動を捉えることができた。しかし被測定物は断面を切り出したものであり、実物とは異なるものである。一方でモアレ干渉法の応用として面外変位を計測した例[4]が報告されており、本研究においては断面における熱挙動をデバイ

Fig.13 Generation of moiré (out-of-plane displacement)

ス全体に拡張する事を目的とし、本研究における実験システムを面外変位計測に適用した(図 12)。

図 12 を見てわかるように図 2 における U フィールド測定用の平面鏡を試料と交換した系であり、試料表面は鏡面状に研磨されている。図 13 に面外変位によるモアレ縞の発生原理を示す。すなわち試料表面に入射した平行光の反射光の回折格子による 1 次の回折反射光と球面鏡からの平行光の回折反射光とが干渉しあう事によりモアレ縞が発生する。このとき回折格子への入射角 β は、

$$\beta = \sin^{-1}(f_s \cdot \lambda) \dots \dots \dots (5)$$

となるよう設定すると、得られるモアレ縞の縞次数 N と面外変位 ω との関係は、

$$\omega = \frac{1}{2f_s} \cdot N \dots \dots \dots (6)$$

で表される。

図 14(a)(b)に図 11 の試験片における面外変位計測例を示す。計測面は鏡面状に研磨されており、(a)は室温(b)は 80°C 加熱時において撮影した。回折格子として 1200line/mm を使用しているため、ある縞の位置する地点と隣の縞との相対面外変位は 417nm として得られる。

Fig.14 Fringe pattern of out-of-plane displacement

次に試料の上下両基板間の相対変位を計測するために図 15(a)に示すように上下基板を鏡面とした試料を用意した。そのモアレ縞から中央線、対角線方向について計測した相対変位をそれぞれ図 15(b)(c)に示す。加熱冷却される中で最も変化量の大きい位置は、計測面のうち四隅に相当する部位であり、熱サイクル負荷が加えられる中でこの四隅から破壊が進むことが予想できる。

次に同様の形状の 2 つの試験片を用意し、面外変位

Fig.12 Out-of-plane displacement measuring system

計測と断面計測のそれぞれのシステムによる計測結果の比較を図 16 に示す。両者の比較は、80℃における変位から初期に有した面外変位を差し引いた値によって行った。両者の計測誤差は 10% 未満であった。

Fig.15 Relative displacement between two substrates

Fig.16 Comparison between the two measuring systems: out-of-plane Moiré and cross-section Moiré

5. 考察

これまで示したように、モアレ干渉法は面内計測においてはサブミクロンオーダーという計測能力で微小領域におけるひずみ分布が得られ、モデル化という仮定を必要とせず、複雑構造物の実際の挙動および多サイクル試験における実際の効果を知ることを可能にする

技術である。しかしながらモアレ干渉法により得られるのは端面情報のみである。図 17 に示すように図 15(a)のような配線のない単純な要素で構成される試料について、モアレ干渉法による断面計測が平面応力状態にあると考え、2次元弾塑性クリープ解析によって平面応力状態としてモデル化したところ有限要素法による解析結果との一致が見られた。モアレ干渉法による断面および面外変位・ひずみ分布の情報から、解析モデルの妥当性を確認し、その上で有限要素法を活用することにより、これまで正確に知ることできなかった様々な情報を得られる可能性がある。

Fig.17 Comparison between Moiré method and FEM

6. 結論

モアレ干渉法により多サイクル熱試験下における電子デバイス断面のひずみ分布を計測する事により、クリープの影響、多サイクルの効果、残留ひずみを抽出した。また実用される電子デバイスにおいては、有限要素法で配線を正確にモデル化することは現状として困難であり、正確な解析は難しい。実際にははんだ接合部のみならず、基板内に注目すべきひずみ集中が現れており、基板内の疲労を考慮した設計をする必要がある。また本実験システムを面外変位計測に適用し、モアレ干渉法による断面計測と比較する事により精度の確認が得られた。

文 献

- (1) Post, D., *High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, (1994), Springer
- (2) Han, B., *Trans. ASME, J. Elect.Pack*, Vol.119, (1997), 189-196
- (3) 森本, 被破壊検査, 第 44 巻 7 号 (1995), 505-514
- (4) Voloshin, A.S., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Elect.Pack*, Vol.120, No.3, Sep. (1998), 314-319