熱粘弾性解析による電子部品の熱残留応力と反り変形挙動に及ぼす層構成の最適化

中村 省三*, 串崎 義幸**, 後藤 雅彦**, 大橋 和彦***, 木戸 光夫*

Optimum Layer Construction with Thermo-Viscoelastic Analysis Influences Thermal Residual Stress and Warp Deformation in Electronic Devices

Shozo NAKAMURA*, Yoshiyuki KUSHIZAKI**, Masahiko GOTO**, Kazuhiko OHASHI*** and Mitsuo KIDO*

*広島工業大学工学部 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

**広島工業大学大学院 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

***ジャパングアテックス (〒709-2123 岡山県御津郡御津町河内 1102-4)

*Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology (2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 731-5193)

**Graduate Student of Engineering, Hiroshima Institute of Technology (2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 731-5193)

***Polymer Science Center, Japan Gore-Tex Inc. (1102-4 Kouchi, Mitsugun, Okayama 709-2123)

概要 携帯情報端末機器に用いる電子部品は、LSI チップ、金属などの弾性体と接着剤、FR-4 基板などの粘弾性体で構成されている。この電子部品に生ずる熱残留応力や反り変形挙動を構成材料の形状寸法の面から理論的に検討した。具体的には、LSI チップと接着剤およびFR-4 基板からなる粘弾性積層体を対象として、熱残留応力や反り変形挙動に及ぼす層構成の影響を熱粘弾性解析した。その結果、積層体に生じる熱残留応力や反り変形挙動は構成材料の厚さ寸法の組み合わせや熱負荷条件により大きく変化すること、また、熱残留応力が極大値を示す層構成の組み合わせが存在することを定量的に明らかにした。

Abstract

Thermal residual stress and warp deformation behavior generate in electronic devices which are composed of different materials, such as LSI chip, metal, adhesive and FR-4 substrate were analyzed, using the thermo-viscoelastic numerical simulation based on the linear viscoelastic theory. It was clarified that thermal residual stress and warp deformation behavior were influenced by not only a thickness of constructive materials but also heat conditions loaded to the devices, and that there was a combination of layer construction which had maximum thermal residual stress.

Key Words: Viscoelastic Analysis, Thermal Residual Stress, Warp Deformation, Layer Construction, Semiconductor Device, Laminated Beam

1. 緒言

近年、電子機器の技術発展はめざましく、特にノートパソコンや携帯電話などの携帯情報機器の分野では、小型・薄形化、高機能化が進み、それに伴い、電子部品も高密度、高信頼化の要求が高まっている^{1)~3)}。これら電子部品の高信頼化を実現するためには、構成材料や製造プロセス、構造の設計最適化が必要であり、有限要素解析を中心とした検討が行われている。しかし、これらの多くは樹脂の熱粘弾性挙動を考慮したものは少なく、実体を表現しないという本質的問題がある。

電子部品には接着剤や充てん樹脂、プリント配線板など時間と温度によってその熱的・機械的性質が著しく変化するいわゆる熱粘弾性挙動を示す材料が使われていることから、電子部品に生ずる熱応力や熱変形挙動を評価するにはこれらの熱粘弾性挙動を考慮した解析方法の導入が必要不可欠である^{4)~15)}。そこで、著者らは線形粘弾性理論に基づいた熱粘弾性解析技術を独自に開発し、その妥当性と有効性を実験的に検証すると共に、熱応力や反り変形挙動を定

量的かつ高精度に予測し、材料・プロセス・構造の最適化の研究を進めている^{4),7),8)~13),16),17)}。最近では、電子部品に生ずる熱応力や反り変形挙動の評価・解明に当たって、LSI チップと複合して用いられる接着剤や充てん樹脂などの物性影響因子¹⁶⁾、ならびに熱負荷条件の影響¹⁷⁾を検討してきたが、これらと共に構成材料の厚さ寸法など、いわゆる層構成の最適化も極めて重要である。

本研究では、上記観点から、電子部品の層構成の最適化を目的とし、電子部品を構成する材料の厚さ寸法を種々変化させて層間熱残留応力や残留反り変形量を理論的に検討した。具体的には、LSI チップと接着剤およびFR-4 基板からなる積層体を対象に、それらの厚さ寸法を変化させて熱粘弾性解析を行い、熱残留応力や反り変形挙動に及ぼす層構成の最適設計指針を明らかにした。

2. 熱粘弾性解析の理論

前述のように、有機材料は時間や温度によりその熱的・機械的性質が変化する。そこで、有機材料を含む多層積層体の内部に生ずる熱応力と曲率を求める基礎式を、線形粘

弾性理論に基づき誘導した。すなわち、積層体に発生する熱応力 σ は厚さ方向の座標 x と時間 t の関数となり、これを $\sigma(x, t)$ とする。そして $\sigma(x, t)$ は、構成材料が線形粘弾性体であり、かつ時間-温度換算則¹⁸⁾が成立すれば、次式で表現できる^{19), 20)}。

$$\sigma(x, t) = \int_0^t E_{ri}(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \varepsilon_\sigma(x, t) d\tau \quad (1)$$

$i = 1 \sim n$

ここで、 $E_{ri}(t', T_0)$ は i 層の基準温度 T_0 における貯蔵弾性率である。また、 $\varepsilon_\sigma(x, t)$ は長手方向の熱応力により生じるひずみで、次式で表される。

$$\varepsilon_\sigma(x, t) = \varepsilon(t) + \kappa(t) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, t)} \alpha_i(T) dT \quad (2)$$

$i = 1 \sim n$

ここで、 $\varepsilon(t)$ は長手方向の伸縮、 $\kappa(t)$ は曲率、 T_h は保持温度、 $T(x, t)$ は時々刻々変化する温度分布で、構成材料の熱伝導率が温度によって変化せず一定として、1次元非定常熱伝導の式²¹⁾から求められ、厚さ方向の座標 x および時間 t の関数となる。また、 $\alpha_i(T)$ は i 層の温度 T における材料の線膨張係数、式(1)の t' 、 τ は換算時間で、これは i 層の時間-温度移動因子を $a_{iT_0}(T)$ とすれば次式で求められる。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{iT_0}\{T(x, u)\}} \quad (3)$$

$i = 1 \sim n$

さて、この積層体は冷却過程を通して外部からの拘束がないことより、次に示す力の釣り合い式ならびにモーメントの釣り合い式が成立する。

$$\int_0^d \sigma(x, t) dx = 0 \quad (4)$$

$$\int_0^d \sigma(x, t) \cdot x dx = 0 \quad (5)$$

そこで、式(4)、(5)に式(1)~(3)を代入すると次の微分積分方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_{ri}(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} d\tau \cdot dx = 0 \quad (6)$$

$i = 1 \sim n$

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_{ri}(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} d\tau \cdot dx = 0 \quad (7)$$

$i = 1 \sim n$

式(6)、(7)は積層体を冷却した場合に生ずる熱応力を求める基礎式である。すなわち、式(6)、(7)を満足する $\varepsilon(t)$ 、 $x(t)$ を求めることができれば、式(1)、(2)から時々刻々変化する熱応力 $\sigma(x, t)$ を求めることができる。そして、 $\sigma(x, t)$ 、 $\kappa(t)$ は冷却終了時になお残留する場合に、これらは熱残留応力 σ_r 、残留曲率 κ_r となる。

3. 積層体の熱粘弾性解析

3.1 積層体の形状

今回、解析の対象とした2層積層体はLSIチップ/接着剤、およびLSIチップ/FR-4基板の2種類で、それらの形状をFig. 1に示す。

実際の電子部品は多層で複雑な構造・形状で構成されているが、ここでは、その最も基本となる2層積層体を対象に、熱的・機械的性質が時間と温度に著しく依存し、かつ電子部品の主要な構成材料である接着剤とFR-4基板をLSIチップの相手材として採り上げた。ここで、LSIチップ厚さを d_c 、接着剤とFR-4基板の厚さをそれぞれ d_a 、 d_p 、全体厚さを d とする。

3.2 解析に用いた材料物性値

Fig. 1に示す積層体の構成材料の熱的・機械的性質をTable 1に示す。接着剤とFR-4基板は熱粘弾性挙動を示し、かつ時間-温度換算則が成立する材料である。また、接着剤とFR-4基板の貯蔵弾性率は、極短時間から極長時間にわたって1本の滑らかなマスタ曲線²²⁾が得られた。さらに、このマスタ曲線を作成する際の時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ は、高温部と低温部とで活性化エネルギー ΔH の異なる2本のアレニウス式で近似することができた。なお、これらの詳細については前報¹⁷⁾で述べたので、ここでは省略する。

3.3 熱粘弾性解析方法

熱粘弾性解析に当たっては、温度条件としては一般に製造プロセスで用いられる180℃から20℃まで冷却した場合を採り上げた。また積層体の厚さ寸法は、全体厚さを0.5mmと一定にし、各材料の厚さ寸法を0.05mmから0.45mmま

Fig. 1 Shape and coordinate of two layer laminated beams

Table 1. Thermal and mechanical characteristics of constructive materials

Properties Materials	Thermal conductivity	Specific heat	Density	Glass transition temperature T _g	Thermal expansion coefficient		Relaxation modulus	
	(W/mK)	(kJ/kg K)	(kg/m ³)	(°C)	(10 ⁻⁶ /K)		(GPa)	
					T ≤ T _g	T _g < T	T ≤ T _g	T _g < T
LSI Chip	147.7	0.799	2328	—	3.6		192	
Adhesive	0.186	1.424	1220	89	88	217	3.4	0.03
FR-4 Substrate	0.372	1.256	1810	140	12.9	4.8	18.0	3.7

で種々変化させた組み合わせとした。一方、解析に用いた構成材料の熱的・機械的性質はTable 1に示す値を使用した。貯蔵弾性率についてはマスタ曲線を次式のプロニ級数で近似した値を用いた。

$$E_n(t') = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t'}{\tau_i}\right) \quad (8)$$

ここで、 $E_n(t')$ は貯蔵弾性率、 E_i はプロニ級数の係数で常に正の値、 τ_i は緩和時間($\tau_i > \tau_{i+1}$)、 n はプロニ級数の項数である。さらに、時間-温度移動因子は高温部と低温部とで活性化エネルギー ΔH の異なる2本のアレニウス式で近似した値を用いた。また、積層体を空気冷却する際の熱伝達率は、予備実験の結果から46 W/m²Kの値を採用した。

4. 結果と考察

4.1 層間熱残留応力からみた層構成

(1) 熱残留応力分布

Fig. 1のLSIチップ/接着剤およびLSIチップ/FR-4基板の積層体について、ここでは種々の厚さ寸法の組み合わせの中から一例として、LSIチップの厚さを0.3mm、接着剤とFR-4基板の厚さを0.2mmとした。そして、これを接着温度180°Cから20°Cまで冷却した場合について、熱粘弾性解析

で求めた積層体内部に生ずる熱残留応力分布をFig. 2に示す。ここで、熱残留応力は積層体の長手方向(y方向)に発生し、かつ厚さ方向(x方向)に分布する。この図から、接着剤およびFR-4基板の内部では引張の熱残留応力が、またLSIチップ内部では表面(x=0.5mm)近傍の引張の熱残留応力から界面(x=0.2mm)近傍の圧縮の熱残留応力へと直線的に分布していることがわかる。ここで、LSIチップと接着剤およびFR-4基板の接着界面において、LSIチップ側に生ずる熱残留応力と、接着剤およびFR-4基板側に生ずる熱残留応力との差を層間熱残留応力と表示する。すなわち、この層間熱残留応力が界面接着はく離の主原因となるせん断応力に相当するものと考えられる。Fig. 2から、層間熱残留応力はLSIチップ/接着剤の場合に約230 MPa、LSIチップ/FR-4基板の場合には約65 MPaとなり、LSIチップ/接着剤の方が4倍程度大きな値をとる。

(2) 冷却過程で生じる層間熱応力

前述の層間熱応力が、180°Cから20°Cまで冷却する過程でどのように変化するかを解析した結果をFig. 3に示す。ここで、LSIチップ/接着剤とLSIチップ/FR-4基板について、それぞれの厚さ寸法は前述と同じLSIチップは0.3mm、接着剤とFR-4基板は0.2mmである。

Fig. 3から、層間熱応力は、LSIチップ/接着剤、LSIチッ

Fig. 2 Thermal residual stress distribution of laminated beams for constructive materials

Fig. 3 Interfacial thermal stress changes of laminated beams by cooling

ブ/FR-4基板ともに、冷却時間の経過に伴って増大することがわかる。また、この層間熱応力の値はLSIチップ/接着剤の方がLSIチップ/FR-4基板より4倍程度大きくなる。

LSIチップ/接着剤の組み合わせの場合、冷却初期の高温では接着剤の線膨張係数は大きいが貯蔵弾性率が小さいため、層間熱応力がほとんど生じない。その後、冷却が進むにつれて貯蔵弾性率が大きくなるため層間熱応力は急激に増加する。そして、ガラス転移温度の90℃以下になると、線膨張係数が小さくなるため、層間熱応力の増加は緩やかになり、室温近傍で一定値に収束し、最終的な層間熱残留応力は約230 MPaとなる。

一方、LSIチップ/FR-4基板の組み合わせの場合には、冷却初期の高温ではFR-4基板の線膨張係数と貯蔵弾性率が小さいため層間熱応力はほとんど生じない。その後、冷却が進みFR-4基板のガラス転移温度の140℃以下になると、線膨張係数と貯蔵弾性率がともに大きくなるため層間熱応力は増加する。そして、室温付近で一定値に収束し、最終的な層間熱残留応力は約65 MPaとなる。

(3) 層間熱残留応力と層構成

前項では、LSIチップ/接着剤およびFR-4基板の厚さ寸法がそれぞれ0.3 mm、0.2 mmの場合を検討した。

近年の電子部品はベアチップ実装が脚光をあびており、構成材料の厚さ寸法も対象製品によって大きく異なり、種々の厚さの組み合わせが考えられる。ここでは、実際の電子部品を想定して実用性、普遍性を考慮した厚さ寸法を採り上げた。すなわち、積層体の全体厚さ寸法を0.5 mm一定とし、各材料の厚さ寸法を0.05 mmから0.45 mmまで種々変化させた組み合わせについて数値解析した。その一連の解析結果をFig. 4に示す。

Fig. 4から、層間熱残留応力はLSIチップ/接着剤の方がLSIチップ/FR-4基板より最大値で8倍程度大きくなっている。これは接着剤とFR-4基板の物性すなわち、貯蔵弾性率やガラス転移温度および線膨張係数などが相互にかつ密接に影響を及ぼしあった結果である。特に、接着剤の線膨張係数がFR-4基板に比べて大きいことが強く影響していると考えられる。また、層間熱残留応力は、LSIチップ/接着剤

Fig. 4 Interfacial thermal residual stress against layer construction for laminated beams

とLSIチップ/FR-4基板の両者の組み合わせともに極大値をもつという興味ある結果を得た。

すなわち、LSIチップ/接着剤の場合は、LSIチップの厚さ0.13mm、接着剤の厚さ0.37mmの組み合わせの場合に層間熱残留応力は極大値を示し、その前後の厚さ寸法の組み合わせでは減少する。一方、LSIチップ/FR-4基板の場合にはLSIチップの厚さ0.21mm、FR-4基板の厚さ0.29mmの場合に極大値をとる。

このように層間熱残留応力が各構成材料の厚さ寸法の組み合わせによって大きく変化する理由は次の通りである。すなわち、LSIチップが薄く接着剤とFR-4基板が厚い組み合わせでは、接着剤とFR-4基板の貯蔵弾性率と線膨張係数の影響が大きく、LSIチップのそれらの影響が小さくなる。逆に、LSIチップが厚く接着剤とFR-4基板が薄い組み合わせでは、LSIチップの弾性率と線膨張係数の影響が大きくなり、接着剤とFR-4基板のそれらの影響が小さくなるためと考えられる。また、LSIチップが薄く接着剤が厚い組み合わせでは、接着剤とFR-4基板の収縮応力が強くなるが、LSIチップが薄いために積層体全体の曲げ剛性が小さくなり変形が容易となるため、その結果として層間熱残留応力は小さくなる。逆に、LSIチップが厚く、接着剤とFR-4基板が薄い組み合わせの場合には、接着剤とFR-4基板の収縮応力が小さいため、層間熱残留応力も小さくなる。また、層間熱残留応力が最大となる厚さ寸法の組み合わせでは、接着剤およびFR-4基板の収縮応力と積層体全体の曲げ剛性の関係から決定されると考えられる。

また、LSIチップ/接着剤、LSIチップ/FR-4基板で層間熱残留応力が最大となる厚さ寸法の組み合わせ、いわゆる層構成が異なるが、これは接着剤とFR-4基板の貯蔵弾性率、線膨張係数およびガラス転移温度の違いが複雑に影響を及ぼした結果であるが、これらがどのような割合で影響しているかについての定量的説明は今後の課題である。

4.2 残留反り変形量からみた層構成

(1) 冷却過程の反り変形挙動

前節と同様に接着温度180℃から20℃まで、LSIチップ/接着剤とLSIチップ/FR-4基板を冷却した際の冷却過程における反り変形挙動の解析結果をFig. 5に示す。

なお、反り変形量 d は曲率 κ から次式で算出できる。

$$d = \frac{s}{2} \tan \left\{ \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{2} \kappa \cdot s \right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 s は積層体の長さで、 $s=10\text{mm}$ とした場合の反り変形量を示している。

Fig. 5から、LSIチップ/接着剤およびLSIチップ/FR-4基板の反り変形量は冷却時間の経過とともに増加することがわかる。LSIチップ/接着剤の組み合わせの場合、冷却初期の高温では接着剤の線膨張係数が大きい、貯蔵弾性率が小さいため反り変形量は小さい。その後、冷却が進み温度が低下するにつれて貯蔵弾性率が大きくなるため、残留反り変形量は急激に増加する傾向を示し、接着剤のガラス転移温度の90℃以下になると線膨張係数が小さくなるため、反り変形量の増加も緩やかになり、室温近くで一定値に収束して最終的な残留反り変形量は20 μm 程度となる。

一方、LSIチップ/FR-4基板の組み合わせの場合、冷却初期の高温ではFR-4基板の線膨張係数が低いため反り変形はほとんど生じないが、その後の冷却が進みガラス転移温度の140℃以下になると、線膨張係数と貯蔵弾性率がともに大きくなるため、反り変形量も増加する。そして、反り変形量は室温付近で一定値に収束し、最終的な残留反り変形量は約65 μm となる。

また、反り変形量は前節の層間熱残留応力の場合と同様に、LSIチップ/FR-4基板よりLSIチップ/接着剤の組み合わせの方が最大で11倍程度大きくなる。これは、接着剤の線膨張係数がFR-4基板に比べてガラス転移温度の前後の温度

Fig. 5 Warp deformation change of laminated beams by cooling

Fig. 6 Residual warp deformation against layer construction for laminated beams

でも常に大きいのである。

(2) 層構成と残留反り変形量

LSIチップ/接着剤およびLSIチップ/FR-4基板について、前節と同じように、構成材料の厚さ寸法に対する残留反り変形量の関係を求め、その結果をFig. 6に示す。

Fig. 6から、LSIチップ/接着剤の場合には特に接着剤の厚さ寸法が大きい（LSIチップが薄い）組み合わせのときに残留反り変形量は著しく大きく、厚さ寸法の減少に伴って残留反り変形量も単調減少する。そして、LSIチップの厚さが0.45 mm以上になると反りがほとんど発生しなくなる。一方、LSIチップ/FR-4基板の残留反り変形量は接着剤に比べ著しく小さいが、LSIチップの厚さ0.1 mm、FR-4基板の厚さ0.4 mmの組み合わせの場合に極大値が見られるという興味ある結果を得た。

このように、LSIチップ/接着剤の組み合わせの方がLSIチップ/FR-4基板の組み合わせに比べ残留反り変形量が多い原因は、接着剤の線膨張係数がFR-4基板に比べ著しく大きいことが主原因である。

また、LSIチップ/接着剤の場合に残留反り変形量に極大値が存在しない原因は、接着剤の貯蔵弾性率がLSIチップの弾性率に比べ十分小さいために積層体の曲げ剛性との関係から積層体に反りを生じさせるだけの応力が生じないためと考えられる。すなわち、LSIチップが厚くなると全体の曲げ剛性が増加し、この結果として残留反り変形量は単調減少することになる。

一方、LSIチップ/FR-4基板の場合は、接着剤と違いFR-4基板の貯蔵弾性率が大きく、FR-4基板の影響を無視できない。すなわち、LSIチップが薄い組み合わせではFR-4基板の貯蔵弾性率の影響が大きく現れるためである。また、LSIチップが厚い組み合わせではLSIチップの弾性率の影響が強いため、積層体の曲げ剛性も大きくなり、残留反り変形量は小さくなる。そして、LSIチップとFR-4基板の厚さ

寸法に依存する積層体全体の曲げ剛性との関係から、LSIチップ/FR-4基板の場合には残留反り変形が最大になる組み合わせがある。

以上のことより、残留反り変形量を考慮した層構成の最適設計に当たっては弾性率が大きい構成材料を厚くするか、構成材料の線膨張係数の差を小さくすることが望ましい。

4.3 熱負荷条件と層構成

積層体の層間熱残留応力と残留反り変形量に熱負荷条件は大きく影響することが考えられる。前節までは温度条件として、180°Cから20°Cに冷却した場合を検討したが、ここでは電子部品の実際の温度サイクル試験などを想定して、150°Cから-10°Cおよび90°Cから-70°Cについても検討した。すなわち、LSIチップ/接着剤およびLSIチップ/FR-4基板の層構成と層間熱残留応力および残留反り変形量との関係を検討した結果をそれぞれFig. 7, Fig. 8に示す。なお、図中には前節で検討した180°Cから20°Cの場合も破線で併記している。

Fig. 7から、150°Cから-10°Cおよび90°Cから-70°Cの両者の場合とも、LSIチップ/接着剤に生じる層間熱残留応力はすべての厚さ寸法の範囲において、LSIチップ/FR-4基板より大きいことがわかる。ここで、LSIチップ/接着剤の場合、150°Cから-10°Cで発生する層間熱残留応力はいずれの層構成においても破線で示す180°Cから20°Cの場合より大きく、最大値で20%程度大きい。また、90°Cから-70°Cの場合の層間熱残留応力は、180°Cから20°Cの場合より30%程度小さい値を示す。さらに、150°Cから-10°Cおよび90°Cから-70°Cの場合とも、層間熱残留応力が極大値を示す厚さ寸法の組み合わせが存在することがわかる。すなわち150°Cから-10°Cの場合は、LSIチップの厚さ0.12 mmと接着剤の厚さ0.38 mmで層間熱残留応力の値は極大値を示し、一方、90°Cから-70°Cの場合にはLSIチップの厚さ0.14 mm、接着剤の厚さ0.36 mmで極大値を示す。こ

Fig. 7 Interfacial thermal residual stress influenced by heat conditions and layer construction

Fig. 8 Residual warp deformation influenced by heat conditions and layer construction

のように、温度条件で極大値を示す層構成が異なる原因は、接着剤の貯蔵弾性率と線膨張係数の大小がLSIチップのそれらと密接に関係するとともに、特に接着剤のガラス転移温度が負荷する温度範囲のどの位置に存在するかによって変わってくる。すなわち、接着剤はガラス転移温度以下では貯蔵弾性率が大きく、線膨張係数が小さいのに対して、ガラス転移温度以上では貯蔵弾性率が小さく、線膨張係数が大きくなるため、これらが相互に影響して層間熱残留応力の大きさや極大値を示す層構成が存在することになる。

一方、LSIチップ/FR-4基板の場合には、層間熱残留応力の値はLSIチップ/接着剤に比べて小さい。これは、FR-4基板の線膨張係数が接着剤に比べ小さく、かつガラス転移温度が高いことに起因している。

また、Fig. 8に示す残留反り変形量に及ぼす厚さ寸法の組み合わせについても、温度範囲が180°Cから20°Cの場合と同様に、LSIチップ/接着剤の残留反り変形量は、LSIチップ/FR-4基板より大きい。特に、LSIチップが薄い領域

では、接着剤やFR-4基板の物性の影響が強く現われ、このため温度条件の違いによる残留反り変形量の差が著しくなる。逆に、LSIチップが厚い領域では、LSIチップの物性の影響が強くなるため、温度条件の違いによる残留反り変形量の変動が少なくなる。この傾向は層間熱残留応力の場合と同様に、接着剤とFR-4基板の貯蔵弾性率、線膨張係数やガラス転移温度に加え、構成材料の厚さ寸法による積層体の曲げ剛性の影響が大きく関わってくる。

今後は、実際の電子部品を想定してより複雑な多層構造体に関する最適層構成の検討が必要である。

5. 結 言

電子部品を想定してLSIチップ、接着剤およびFR-4基板の組み合わせからなる積層体について、層間熱残留応力と残留反り変形量に及ぼす層構成、すなわち構成材料の厚さ寸法の違いと熱負荷条件の関係を熱粘弾性解析し、以下の結論を得た。

- (1) 熱負荷によって接着界面部に生じる層間熱残留応

力は、LSI チップ/接着剤の方がLSI チップ/FR-4 基板より最大で8倍程度大きくなる。

- (2) 層間熱残留応力は層構成の組み合わせによって極大値をとる。すなわち、LSI チップ/接着剤の場合は、LSI チップの厚さ 0.13 mm, 接着剤の厚さ 0.37 mm, また LSI チップ/FR-4 基板の場合は LSI チップの厚さ 0.21 mm, FR-4 基板 0.29 mm の厚さ寸法の組み合わせの場合が極大となる。
- (3) 層間熱残留応力は負荷する温度条件にも大きく影響される。特に、150°C から -10°C の温度条件では 90°C から -70°C の場合より 50% 程度大きい。
- (4) 残留反り変形量は LSI チップと接着剤および FR-4 基板の厚さ寸法の組み合わせと温度条件で大きく異なる。概して、LSI チップが薄い場合には残留反り変形量が大きくなる。

(2002.1.7-受理)

文 献

- 1) 森 茂樹, 西脇俊雄: “CSP 搭載基板の設計仕様と構造”, 回路実装学会誌, Vol. **11**, No. 2, p. 87, 1996
- 2) 長広泰明: “200 ピン級 ASIC から次期 MPU, BGA パッケージの実用化が加速”, NIKKEI MICRODEVICES, 3月号, p. 58, 1997
- 3) 村上 元: “半導体パッケージ実装技術と今後の動向”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **1**, No. 1, p. 19, 1998
- 4) 中村省三, 宮野 靖, 杉森 勝, 金田愛三: “熱硬化性樹脂と金属からなる積層はりを冷却した場合に生じる残留応力の粘弾性解析”, 日本機械学会論文集, **53A**, p. 1813, 1987
- 5) 大堀雅志, 佐藤千明, 池上皓三: “熱硬化性樹脂の硬化過程における粘弾性特性と内部応力”, 材料, Vol. **43**, p. 18, 1994
- 6) 池田順一, 菊川 幸, 牧 春彦: “銅張積層体のはんだ付け工程で生じる反り変形の予測”, 材料システム, Vol. **13**, p. 79, 1994
- 7) 中村省三, 篠田忠夫, 金田愛三, 宮野 靖: “熱硬化性樹脂と金属から成る積層はりを急冷した場合に生じる熱応力の粘弾性解析”, 日本機械学会講演論文集, No. 864 (2), p. 28, 1986
- 8) S. Nakamura, Y. Miyano, S. Sugimori and A. Kaneda: “Thermoviscoelastic Analysis of Residual Stresses in a Thermosetting Resin/Metal Laminated Beam Caused by Cooling”, JSME International Journal, Vol. **31**, p. 126, 1988
- 9) 中村省三, 長谷部昭男, 芹沢弘二, 高坂 崇, 春田 亮: “金属と樹脂からなる二層積層体の反り変形量と残留応力”, 高分子論文集, Vol. **51**, p. 806, 1994
- 10) 中村省三, 芹沢弘二: “FCA 実装構造体の反り変形挙動と残留応力の熱粘弾性解析”, 回路実装学会誌, Vol. **12**, No. 3, p. 173, 1997
- 11) 中村省三, 村上 元, 井坂和博, 上野恵尉, 中村敬一: “FCA 方式による半導体デバイスの熱粘弾性解析による反り変形挙動の予測”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **2**, No. 4, p. 291, 1999
- 12) 村上 元, 中村省三, 御田 護, 宮野 靖: “熱粘弾性解析による CSP- μ BGA のエラストマ構造の最適化設計”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **3**, No. 1, p. 34, 2000
- 13) G. Murakami, M. Mita, S. Nakamura, K. Ueno, K. Nakamura: “Achieving an Optimum Structural Package Design with Thermo-Viscoelastic Analysis”, Chip Scale Review, Vol. **2**, No. 5, p. 55, 1998
- 14) 新保 實, 新野健二郎, 宮野 靖, 高野 希, 小林和仁: “プリント配線板の残留応力に及ぼす内部構成素材の影響”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **4**, No. 7, p. 597, 2001
- 15) 河田裕志, 池上皓三: “IC パッケージ用樹脂の粘弾性特性と残留応力”, 日本機械学会論文集, **56A**, 2471, 1990
- 16) 中村省三, 串崎義幸, 村上 元, 木戸光夫: “半導体デバイスの残留応力に及ぼす材料物性影響因子の熱粘弾性数値解析”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **5**, No. 4, p. 379, 2002
- 17) 中村省三, 後藤雅彦, 串崎義幸, 木戸光夫: “電子部品構成材料の熱残留応力と反り変形挙動に及ぼす熱負荷条件の熱粘弾性解析”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **5**, No. 7, p. 660, 2002
- 18) M. L. Williams, R. F. Landle and J. D. Ferry: “The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids”, J. Am. Chem. Soc. Vol. **77**, p. 3701 1955
- 19) 牟岐鹿桜: “線形粘弾性理論の最近の進歩”, 日本機械学会誌, Vol. **64**, p. 34, 1961
- 20) 國尾 武: “固体力学の基礎”, 培風館, 東京, p. 249, 1983
- 21) 川下研介: “熱伝導論”, オーム社, 東京, p. 96, 1966
- 22) 中川鶴太郎: “レオロジー”, 岩波全書, 東京, p. 220, 1983