

エポキシ樹脂とプリント基板からなる積層はりの 冷却過程における反り変形簡易予測法

中村 省三*・田中 孝明**・木村 建斗**

(平成20年8月18日受理)

An Expedient Evaluation Method for Warp Deformation Behavior of Laminated Beam Consisting of Viscoelastic Materials in Cooling Process

Shozo NAKAMURA *, Takaaki TANAKA ** and Kento KIMURA **

(Received Aug. 18, 2008)

Abstract

This paper is intended as a proposal for a simplified evaluation equation that simply predicts the warp deformation behavior arising when the thermal load was given to a viscoelastic laminated beam consisting of epoxy resin and FR-4 substrate. The validity of the equation was verified by comparing its solution with the exact solution based on linear viscoelastic theory and the experimental values. The proposed simplified evaluation equation is composed of the glass transition temperature, the rubber transition temperature, the elastic modulus and the linear thermal expansion coefficient of the component material. In this study, it was clarified that the warp deformation behavior of the viscoelastic laminated beam could be simply predicted by using the proposed simplified evaluation equation where the elastic modulus is divided into three regions such as glassy state, leathery state and rubbery state.

Key words: warp deformation, viscoelasticity, linear viscoelastic theory, numerical analysis, laminated beam, epoxy resin

1. 緒 言

近年、携帯電話やノート型パソコン、カメラなどに用いられる電子部品は、小型・薄型・高性能化が要求されることから、設計開発段階において、その形状・構造は極限まで薄く、製造プロセスは限界まで苛酷な条件となる。これに伴って、電子部品は残留熱応力による強度低下や実装基板の反り変形が大きな問題となり、これらの防止技術の確立が急務である¹⁾。ICパッケージなどの電子部品の信頼

性は、これに用いられるエポキシ樹脂の性質が大きく関与している。すなわち、電子部品はICチップやプリント基板、金属、エポキシ樹脂などの性質の異なる材料で構成されており、電子部品の強度や反り変形は、特にエポキシ樹脂の熱的・力学的性質に影響されることが多い。エポキシ樹脂は、金属やセラミックスと違ってその力学的特性が時間と温度によって複雑に変化する粘弾性挙動を示すことから、強度や反り変形挙動の予測が困難であり、世上でもこの種の研究が進んでいる^{2)~5)}。一方、著者らは、種々の粘弾

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

性複合体について残留熱応力や反り変形挙動の線形粘弾性理論に基づくシミュレーション技術を検討してきた^{6)~18)}。これらの熱粘弾性解析技術を用いれば、粘弾性複合体の反り変形挙動を高精度に求めることが可能であるが、他方では線形粘弾性理論に基づく構成方程式を用いているため、その取り扱いが非常に煩雑であるうえ、各種粘弾性材料の時間と温度に関する物性測定に多大な時間と労力を要する問題もある。加えて、熱粘弾性解析に当たってはコンピュータを使った煩雑な計算を行う必要があるため、計算時間が膨大となるだけでなく、現在主流となっている薄膜多層構造の銅箔と有機材料からなる電子部品の解析においては、金属の熱伝導率が大きいため数値解析が不可能になる恐れが生ずる。このような技術課題を背景に、前報では鋼材とエポキシ樹脂の粘弾性積層はりについて反り変形量を求める簡易評価法を検討した¹⁹⁾。

本報では、これに引き続いてより実用的な観点から、電子部品のマザーボードに用いるFR-4基板とエポキシ樹脂との粘弾性材料同士の組合せからなる積層はりを採り上げた。そして、この積層はりの製造工程時を考え、180℃で接着接合してから室温まで冷却する途中の反り変形挙動を簡便に予測する簡易評価式を提案した。次いで、この評価式を用いて積層はりの反り変形挙動の簡易解を求めた。さらに、これらの簡易解を線形粘弾性理論に基づいて解析した厳密な値（熱粘弾性解）、ならびに実験値と比較対比することによって、本提案の簡易評価法の妥当性と有効性を検討した。

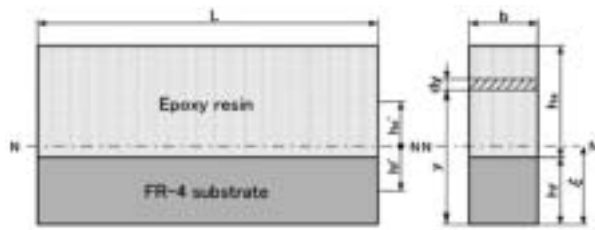


Fig.1 Shape and dimensions of laminated beam.

2. 簡易評価法の提案

2.1 積層はりと粘弾性特性

図1にエポキシ樹脂とFR-4基板の粘弾性材料同士の組合せからなる積層はりの形状を示す。ここで、エポキシ樹脂は電子部品のICチップの封止や充填材として用いられる材料で、FR-4基板はマザーボードに用いられるガラス-エポキシ樹脂である。実験に用いたエポキシ樹脂は、主剤がビスフェノールAタイプ（JER社製JER828）で硬化剤が変性脂肪族アミンタイプ（JER社製エピキュアT）の2液混合型で、主剤と硬化剤を5：1の割合で常温硬化した後、180℃で30分間加熱硬化させた。図2(a)にエポ

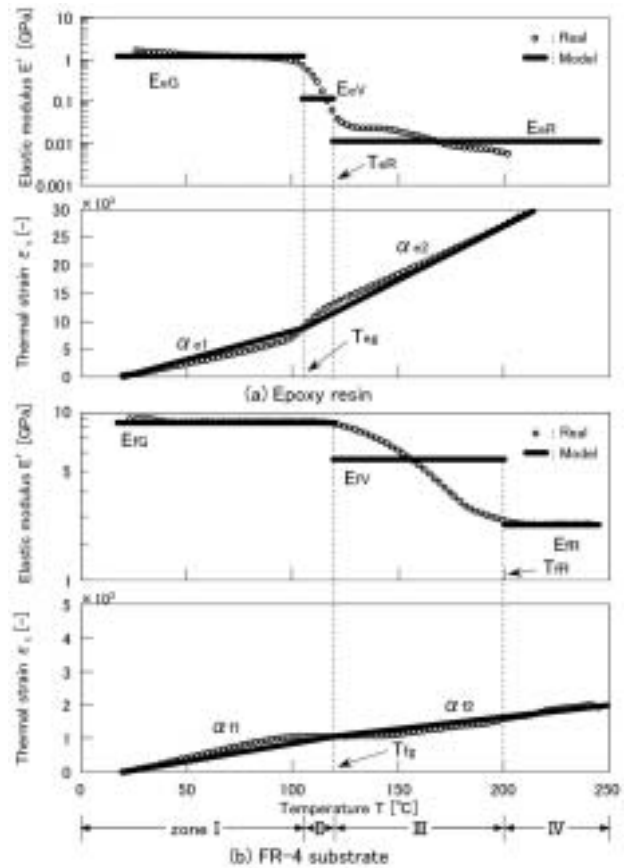


Fig.2 Viscoelastic properties and mechanical model.

キシ樹脂の粘弾性特性を、図2(b)にFR-4基板の粘弾性特性を示す。ここで、貯蔵弾性率 E' は動的粘弾性測定装置Rheogel E4000（ユービーエム社製）を、熱ひずみ ϵ_t は熱機械分析装置（島津製作所製）を用いて測定した。なお、動的粘弾性の測定条件はチャック間距離：15mm、ひずみ：約0.01%の正弦波を加え、周波数を1, 10, 100Hzと三段階に変化させて E' を測定し、図2には10Hz時の測定値を示している。図2(a)に示すように、エポキシ樹脂の貯蔵弾性率 E' は室温のガラス状領域では $E_{eG} = 1.56\text{GPa}$ 程度と高い値を示すが、温度の上昇に伴って皮革状領域では徐々に低下し、120℃以上のゴム状領域では $E_{eR} = 0.0057\text{GPa}$ と小さい値を示す。また、熱ひずみ ϵ_t は温度の上昇に伴って増大し、その勾配である線膨張係数 α は、エポキシ樹脂ではガラス転移温度 T_{eg} （105℃）以下では $\alpha_{e1} = 81.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ の値を、また T_{eg} 以上では $\alpha_{e2} = 173.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ の値を示す。同様に、図2(b)に示すように、FR-4基板の貯蔵弾性率 E' は室温のガラス状領域では $E_{fG} = 9.35\text{GPa}$ 程度と高い値を示すが、温度の上昇に伴って皮革状領域では徐々に低下し、120℃以上のゴム状領域では $E_{fR} = 2.1\text{GPa}$ の値を示す。また、FR-4基板の線膨張係数は、ガラス転移温度 T_{fg} （120℃）以下では $\alpha_{f1} = 10.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ の値を、また T_{fg} 以上では $\alpha_{f2} = 7.4 \times 10^{-6}/\text{K}$ の値を示す。このように、ここで用いたエポキシ樹脂とFR-4基板はその熱的・力学的特性が著

しい温度依存性を示す粘弾性材料であることが分かる。

2.2 粘弾性力学モデル

前述の温度依存性の大きい両材料の熱的・力学的性質(図2中のプロットで示す貯蔵弾性率 E' と熱ひずみ ϵ_t)を簡易化して、ここでは、図2の実線で示すような粘弾性力学モデルを導入する。そして、これらの材料特性を図示のように転移温度で区分し、低温部から高温部にわたって領域I, II, IIIおよびIVとする。

2.3 簡易評価式の導出

図1に示す積層はりの反り変形挙動を求める簡易評価式を、前述の粘弾性力学モデルを用いて導出する。いま、積層はりの長さを L 、幅を b 、エポキシ樹脂とFR-4基板の厚さをそれぞれ h_e 、 h_f とする。また、中立軸N-NのFR-4基板端からの距離を ζ 、エポキシ樹脂およびFR-4基板の中央から中立軸までの距離をそれぞれ h'_e 、 h'_f とする。この積層はりに熱負荷が作用した場合、各部材には熱膨張力または熱収縮力が生ずることになり、これらの力の均衡状態によって積層はりに反り変形が生ずると考える。

まず、積層はりの中立軸までの距離 ζ は、

$$\zeta_i = \frac{E_{fi} \int_{A_i} y dA_i + E_{ei} \int_{A_e} y dA_e}{(E_{fi} A_i + E_{ei} A_e)} \quad (1)$$

で表される。ここで、 i は前述の領域I, II, IIIおよびIVを表す。 E_{ei} 、 E_{fi} は、図2(a)(b)上段に示すエポキシ樹脂とFR-4基板の各領域におけるガラス状領域、皮革状領域およびゴム状領域の縦弾性係数であり、いわゆる $E_{ei} = E_{eG}$ 、 $E_{eII} = E_{eV}$ 、 $E_{eIII} = E_{eIV} = E_{eR}$ 、 $E_{fiI} = E_{fiII} = E_{fiG}$ 、 $E_{fiIII} = E_{fiV}$ 、 $E_{fiIV} = E_{fiR}$ である。 A_e はエポキシ樹脂の断面積($b \cdot h_e$)、 A_f はFR-4基板の断面積($b \cdot h_f$)である。また、エポキシ樹脂とFR-4基板の中立軸に関する各領域における断面二次モーメントをそれぞれ I_{ei} 、 I_{fi} とすると、

$$I_{ei} = \frac{\{h_e^3 - 3 \cdot (\zeta_i - h_i) \cdot h_e^2 + 3 \cdot (\zeta_i - h_i)^2 \cdot h_e\} \cdot b}{3}$$

$$I_{fi} = \frac{\{h_i^3 - 3 \cdot \zeta_i \cdot h_i^2 + 3 \cdot \zeta_i^2 \cdot h_i\} \cdot b}{3} \quad (2)$$

いま、熱負荷を与えた場合のエポキシ樹脂に生ずる熱ひずみ ϵ_e は、エポキシ樹脂の線膨張係数を α_e 、熱負荷時の温度差を ΔT とすると、一般に $\epsilon_e = \alpha_e \cdot \Delta T$ で表される。そこで、ここでは熱ひずみ ϵ_e を次式のように変形して表示する。

$$\epsilon_{ei} = \alpha_{ei} \cdot \Delta T_i \quad (3)$$

ここで、 α_{ei} は図2(a)下段に示すエポキシ樹脂の線膨張係数であり、 $\alpha_{ei} = \alpha_{eI}$ 、 $\alpha_{eII} = \alpha_{eIII} = \alpha_{eIV} = \alpha_{eR}$ である。また、 ΔT_i はそれぞれ領域I, II, IIIおよびIVにおける温度差である。

次に、エポキシ樹脂に生ずる熱応力 σ_e はこの積層はりに微小ひずみが生ずるものとすれば、Hooke則よりエポキシ樹脂の縦弾性係数を E_e として、 $\sigma_e = \epsilon_e \cdot E_e$ で表される。ここでは、この熱応力 σ_e を次式のように変形して表示する。

$$\sigma_{ei} = \epsilon_{ei} \cdot E_{ei} \quad (4)$$

また、エポキシ樹脂の各領域に生ずる熱収縮力 P_{ei} は、

$$P_{ei} = \sigma_{ei} \cdot A_e \quad (5)$$

となる。同様の考え方に基つくと、FR-4基板に生ずる熱ひずみ ϵ_f 、熱応力 σ_f および熱収縮力 P_{fi} は、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{fi} &= \alpha_{fi} \cdot \Delta T_i \\ \sigma_{fi} &= \epsilon_{fi} \cdot E_{fi} \\ P_{fi} &= \sigma_{fi} \cdot A_f = (\alpha_{fi} \cdot \Delta T_i \cdot E_{fi}) \cdot b \cdot h_f \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

で表される。ここで、 α_{fi} はFR-4基板の線膨張係数であり、 $\alpha_{fiI} = \alpha_{fiII} = \alpha_{fiI}$ 、 $\alpha_{fiIII} = \alpha_{fiIV} = \alpha_{fiR}$ である。 σ_{fi} 、 E_{fi} はそれぞれ各領域に生ずる熱応力、縦弾性係数である。

以上のことから、エポキシ樹脂に生ずる曲げモーメント M_e を、熱収縮力 P_e とエポキシ樹脂断面中央部から中立軸までの距離 h'_e の積として表現する。

$$M_{ei} = P_{ei} \cdot h'_e \quad (7)$$

一方、FR-4基板に生ずる曲げモーメント M_f は、エポキシ樹脂の場合と同様に考えると、

$$M_{fi} = P_{fi} \cdot h'_f \quad (8)$$

で表される。

この積層はりの反り変形は、エポキシ樹脂とFR-4基板に作用する曲げモーメント M_e と M_f に起因して生ずると考え、反り変形に関与する曲げモーメント M_d を、

$$M_{di} = P_{ei} \cdot h'_e - P_{fi} \cdot h'_f \quad (9)$$

で表現する。

また、積層はりの曲率半径 R は、慣用の曲げ理論から、

$$R_i = \frac{(E_{ei} \cdot I_{ei} + E_{fi} \cdot I_{fi})}{M_{di}} \quad (10)$$

で表現でき、各領域における反り変形量 δ_i は、

$$\delta_i = \frac{L}{2} \tan \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{L}{2 \cdot R_i} \right) \right\} \quad (11)$$

で与えられる。そして、最終的な残留反り変形量は、次節のように、以上のように算出した各領域の総和で求められると考えた。

2.4 反り変形量の簡易解の求め方

積層はりの寸法は長さ $L = 150$ mm、幅 $b = 5$ mmでFR-4基板の厚さ h_f を1.3mm一定とし、エポキシ樹脂の厚さ h_e を0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10mmとした。実測したエポキシ樹脂の縦弾性係数と線膨張係数は図2のプロットで示すように、それぞれガラス状領域では $E_{eG} = 1.56$ GPa、皮革状領域では $E_{eV} = 0.78$ GPa、ゴム状領域では $E_{eR} = 0.0057$ GPa、

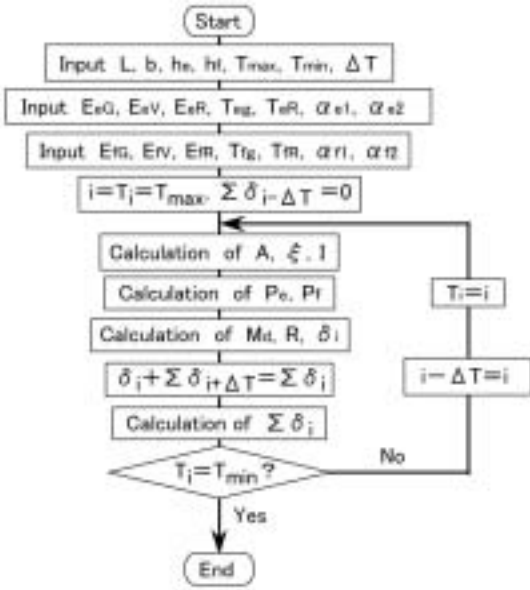


Fig.3 Calculation routine of warp deformation.

$\alpha_{e1} = 81.3 \times 10^{-6} / K$, $\alpha_{e2} = 173.8 \times 10^{-6} / K$ である。一方、FR-4 基板の縦弾性係数と線膨張係数はそれぞれガラス状領域では $E_{fg} = 9.35 \text{ GPa}$ 、皮革状領域では $E_{fv} = 5.61 \text{ GPa}$ 、ゴム状領域では $E_{fr} = 2.1 \text{ GPa}$ 、 $\alpha_{r1} = 10.7 \times 10^{-6} / K$ 、 $\alpha_{r2} = 7.4 \times 10^{-6} / K$ である。ここで、皮革状領域における縦弾性係数の値は、両材料ともガラス状領域とゴム状領域の値の中間値とした。また、積層はりを作製する際の温度

3. 熱粘弾性解析の基礎理論

3.1 反り変形量を求める粘弾性基礎式の導出

各種材料から構成された n 層からなる矩形断面を持つ多層積層はり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する。すなわち、熱応力は積層はりの厚さ方向の座標 x と時間 t の関数となり、これを $\sigma(x, t)$ とする。この $\sigma(x, t)$ は、構成材料が線形粘弾性体で、かつ時間-温度換算則が成立すれば、次式で表現できる²¹⁾。

$$\sigma(x, t) = \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau'} \varepsilon_\sigma(x, \tau) d\tau' \quad i = 1 \sim n \quad (12)$$

$$\varepsilon_\sigma(x, t) = \varepsilon(t) + \chi(t)x - \int_{T_0}^{T(x, t)} \alpha_i(T) dT \quad i = 1 \sim n \quad (13)$$

ここで、 $E_n(t', T_0)$ は i 層の基準温度 T_0 における緩和弾性係数である。 $\varepsilon(t)$ は長手方向の伸縮、 $\chi(t)$ は曲率、 T_0 は初期の保持温度、 $T(x, t)$ 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、一次元非定常熱伝導の式から求められ、厚さ方向の座標 x および時間 t の関数になる。 $\alpha_i(T)$ は i 層の温度 T における材料の線膨張係数である。また、式(12)の t' 、 τ' は換算時間であり、 i 層の時間-温度移動因子を $a_{iT_0}(T)$ とすれば、次式から求められる。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{iT_0}\{T(x, u)\}} \quad i = 1 \sim n \quad (14)$$

さて、この積層はりは熱負荷を通して外部からの拘束がない場合、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。これらの釣り合い式と式(12)、(14)の関係から、次式の微分積分方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau'} \left\{ \varepsilon(\tau) + \chi(\tau) \cdot x - \int_{T_0}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} \cdot d\tau \cdot dx = 0, \quad i = 1 \sim n \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau'} \left\{ \varepsilon(\tau) + \chi(\tau) \cdot x - \int_{T_0}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} x \cdot d\tau \cdot dx = 0, \quad i = 1 \sim n \quad (16)$$

そこで、式(15)、(16)を解くことによって曲率 $\chi(t)$ が求まり、この $\chi(t)$ を用いて慣用の曲げ理論から積層はりの反り変形量が算出できる。

条件は、実際の工程を考慮して 180°C から 35°C までの冷却とした。図3に積層はりに生ずる反り変形量の算出手順をフローチャートで示す。すなわち、冷却過程において任意のステップ温度毎に中立軸、収縮力、曲げモーメント、曲率半径および反り変形量を求め、この反り変形量を逐次加算することによって、任意の温度における反り変形量を算出した。ここで、このような計算方法を採用したのは以下のような考えに基づくものである。すなわち、(1) 図2に示すようにエポキシ樹脂とFR-4 基板の貯蔵弾性率は高温になると低下するが、これは広義の緩和現象であること、(2) 簡易式に関する一連の式は、この緩和現象を包含した内容で展開していること、(3) 冷却過程においては、高温時の小さい貯蔵弾性率から緩和がより生じ難くなる大きい貯蔵弾性率の方向への変化であること、に基づく。これらのことから、冷却過程における積層はりの反り変形量の算出に当っては、高温時の低弾性率の反り変形に対する寄与を逐次加算するという単純な操作によって、冷却に伴う緩和の進行も大まかには取り入れた計算ができるものと考えた。

なお、このような手順で求めた反り変形に関する簡易評価法の妥当性については、厳密な線形粘弾性理論に基づく熱粘弾性解析の結果(熱粘弾性解)、ならびに実験値と比較対比して後述する。

Table 1 Thermal and mechanical characteristics of constructive materials.

Properties Materials	Thermal conductivity	Specific heat	Density	Glass transition temperature	Thermal expansion coefficient		Relaxation modulus E_r [GPa]
	λ [W/(m·K)]	C [kJ/(kg·K)]	ρ [kg/m ³]	T_g [°C]	α [10 ⁻⁴ /K] $T \leq T_g$	α [10 ⁻⁴ /K] $T_g < T$	
Epoxy resin	0.166	1.423	1220	155	81.3	173.8	Fig4
Substrate (FR-4)	0.372	1.260	1810	120	10.6	7.43	Fig4

3.2 熱粘弾性解析方法

前節の粘弾性基礎式を用いて熱粘弾性解析を行い、積層はりの反り変形挙動を求める。解析対象は、前述の図1のエポキシ樹脂とFR-4基板からなる積層はりで、解析に用いた構成材料の物性値を表1に示す。また、エポキシ樹脂とFR-4基板の緩和弾性係数は、図4に示すマスタ曲線で表示でき、数値解析にはこれを次式のprony級数で近似して用いた。

$$E_r(t') = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t'}{\tau_i}\right) \quad (17)$$

ここで、 $E_r(t')$ は緩和弾性係数、 E_i はprony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prony級数の項数である。なお、マスタ曲線を作成する際の時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ は図5のようになり、活性化エネルギー ΔH の異なる二本のArrheniusの式で近似して数値解析に用いた²⁰⁾。

解析に当たっての温度条件は、180℃から35℃までの冷却過程である。なお、熱伝達率は実験値と対応させた値を用いた。

4. 反り変形の実験

先の図1に示す積層はりを用いた。すなわち、長さ $L = 150\text{mm}$ 、幅 $b = 5\text{mm}$ でFR-4基板の厚さ h_f を1.3mm一定とし、エポキシ樹脂の厚さ h_e を0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10mmと7種類変化させた積層はりを作製した。ここで、積層はりの作製に当たっては、所望の寸法のエポキシ樹脂帯板とFR-4基板帯板を予め作り、これらを180℃で接着させた。次いで、エポキシ樹脂帯板の中心部に熱電対を装着した積層はりを拘束しないように設置した。この積層はりを180℃から35℃まで炉中冷却(熱伝達率は0.8~3.7W/m²K)し、その際の反り変形挙動をCCDカメラにより逐次撮影し、計測ソフトを用いて反り変形量を求めた。図は省略するが、その際のエポキシ樹脂の時間に対する温度変化を熱電対によって逐次計測した。

5. 簡易評価法の妥当性検証

2.3節で提案した簡易評価法を用いて算出した値(簡易解)と3.1節に示す厳密な熱粘弾性解、ならびに実験値と

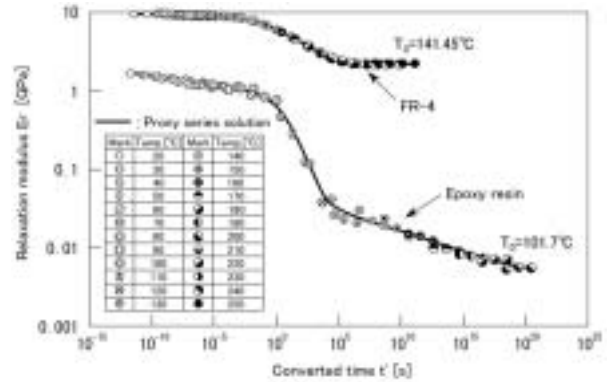


Fig.4 Master curve of relaxation modulus for epoxy resin.

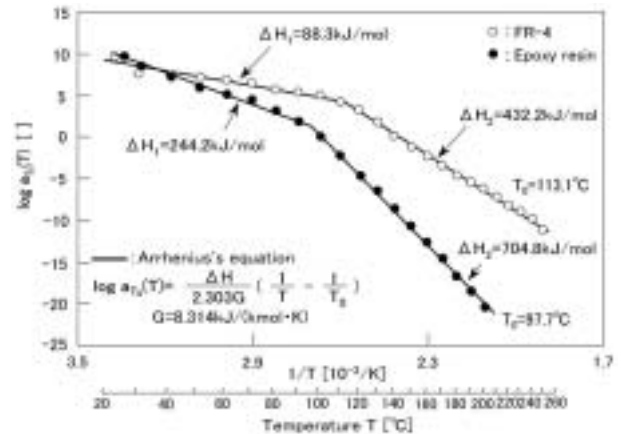


Fig.5 Time-temperature shift factor for epoxy resin.

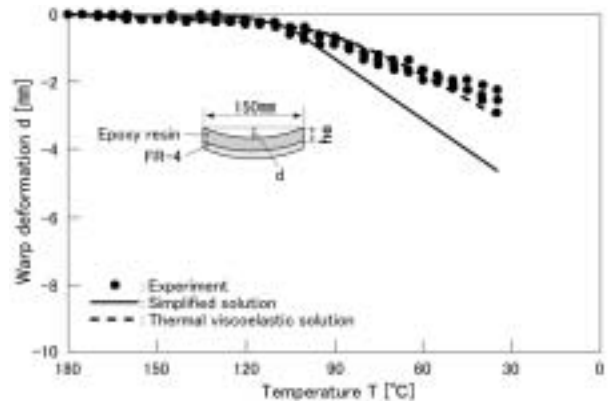


Fig.6 Warp deformation with cooling ($h_e=0.5\text{mm}$).

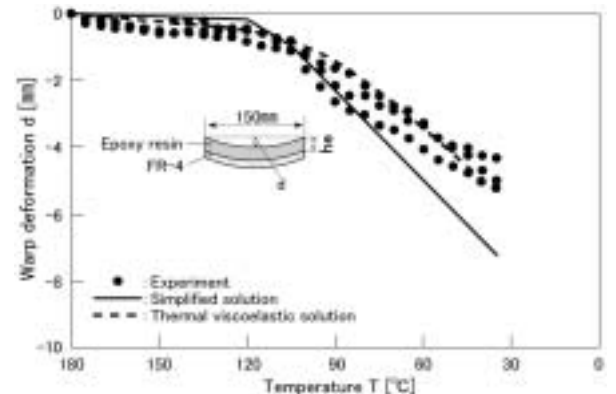


Fig.7 Warp deformation with cooling ($h_e=1\text{mm}$).

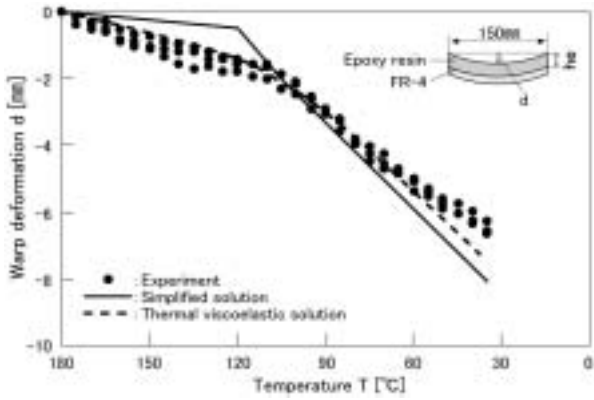


Fig.8 Warp deformation with cooling ($h_e=2\text{mm}$).

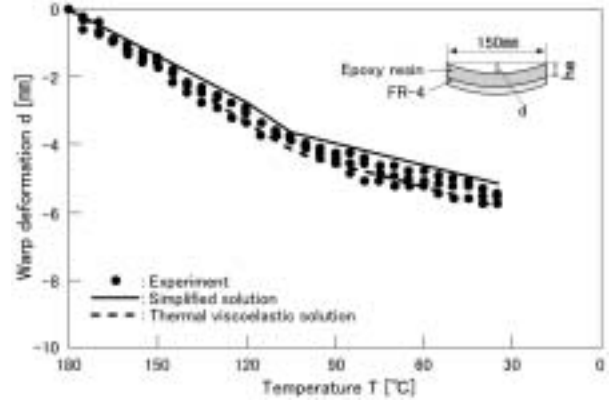


Fig.12 Warp deformation with cooling ($h_e=10\text{mm}$).

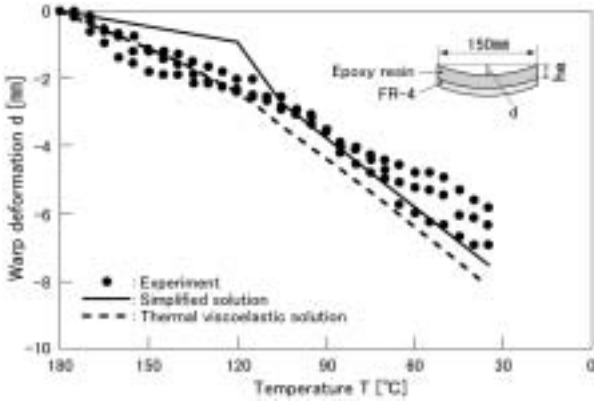


Fig.9 Warp deformation with cooling ($h_e=3\text{mm}$).

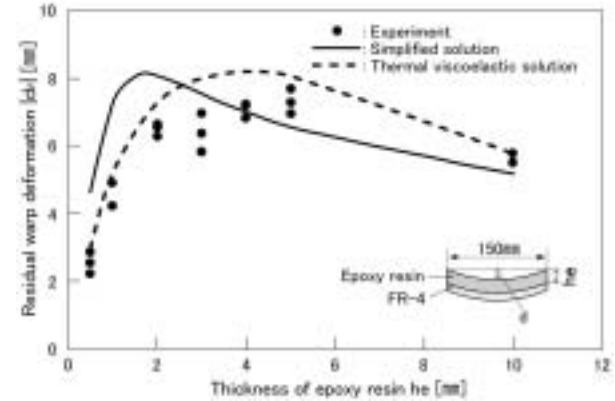


Fig.13 Relation between epoxy resin thickness and residual warp deformation.

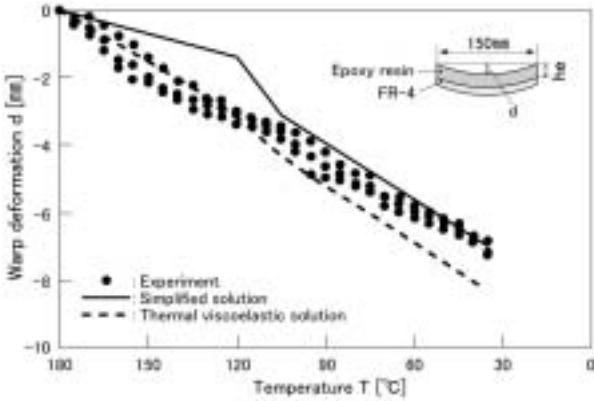


Fig.10 Warp deformation with cooling ($h_e=4\text{mm}$).

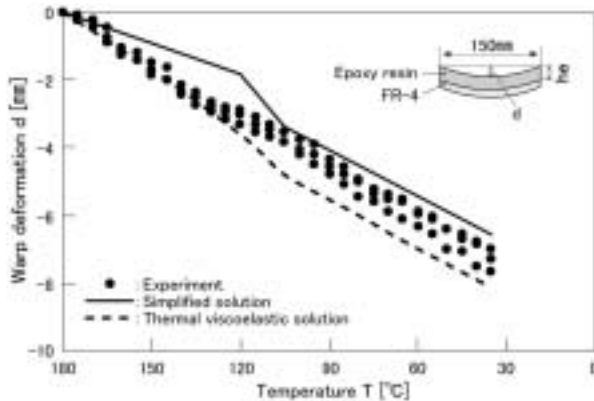


Fig.11 Warp deformation with cooling ($h_e=5\text{mm}$).

比較対比することによって、簡易評価法の妥当性と有効性を検証する。

図6～図12は、エポキシ樹脂厚さの異なる各種積層はりの冷却過程における反り変形挙動について、実験値、熱粘弾性解および簡易解の三者を比較して示したものである。ここで、実験値は再現性を考慮して3回のデータをプロットした。これらのいずれの図からも分かるように、180℃から35℃までの冷却過程では、積層はりはFR-4基板側が凸に反り変形が進行し、その値も温度の低下に伴って増加する。また、厳密な熱粘弾性解はいずれのエポキシ樹脂厚さの場合においても実験値とよく一致しており、熱粘弾性解析の妥当性が明らかである。一方、簡易解は各領域の分岐点で多少の変化が見られ熱粘弾性解ほどはよく一致していないものの、概ね実験値を反映した値となっており、簡易評価法を用いれば、実用上問題ない範囲で反り変形挙動の予測が可能と思われる。

図13は、各種エポキシ樹脂厚さに対する冷却後の残留反り変形量について、実験値、熱粘弾性解および簡易解の三者を比較して示したものである。この図から分かるように、残留反り変形量はエポキシ樹脂厚さによって大きく異なり、厚さが0.5mmと薄い場合や、逆に10mmのように厚い場合では概して小さく、3～5mm近傍で極大値を示

している。このようにエポキシ樹脂の厚さによって残留反り変形量は異なるが、これは積層はり全体の厚さに対するエポキシ樹脂とFR-4基板の厚さの割合に大きく依存し、かつ両材料の弾性係数や線膨張係数の粘弾性特性、ならびに積層はりの曲げ剛性が相互に影響を及ぼし合った結果と推測される。また図から、理論的に求めた熱粘弾性解と簡易解は、実験値と概ね類似の傾向を示しており、本提案の簡易評価法を用いれば概ね反り変形量を予測することができると思われる。

6. 結言

粘弾性材料同士の組合せであるエポキシ樹脂とFR-4基板からなる二層積層はりを対象として、これを冷却した際の反り変形量を求める簡易評価法を提案し、これを厳密な理論に基づく熱粘弾性解析の結果、ならびに実験値と比較し、以下の結論を得た。

- (1) 粘弾性二層積層はりの冷却過程で生ずる反り変形挙動を求める簡易評価法を導出した。この評価法は、温度によって性質が変化するエポキシ樹脂とFR-4基板の弾性係数と線膨張係数を極めて簡単な粘弾性力学モデルで表現し、さらに、これをガラス状領域からゴム状領域に至る温度範囲に区分し、はりの曲げ理論を適用したものである。
- (2) 簡易評価法を用いて算出した積層はりの反り変形量は、実験値、ならびに厳密な線形粘弾性理論に基づく熱粘弾性解析の結果とも概ね一致することから、その妥当性が明らかとなった。
- (3) 簡易評価式を用いれば、積層はりの冷却過程における反り変形挙動を簡便に予測することが可能となり、今後、電子部品の反り変形防止のための材料設計に関わる有益な武器になるものと思われる。

なお、本提案の簡易評価法の適用限界（構成材料の厚さ寸法や物性値、精度評価）、ならびに応力緩和や温度の分割区分およびその特性値の採り方、さらにはエポキシ樹脂などに生ずる熱応力や熱ひずみ、ならびに反り変形挙動は冷却速度にも大きく影響される。これらの諸問題については、今後さらに引き続き検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) N.Taketani, K.Hatano, H.Sugimoto and O.Yoshioka, G.Murakami, "CSP with LOC technology", ISHM, pp. 594 (1996).
- 2) M.Ohori, C.Sato and K.Ikegami, "Viscoelastic properties and internal stress of thermosetting resin in curing process", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.43, No.484, pp.18-22 (1994).
- 3) H.Matsui and K.Ikegami, "Viscoelastic properties of thermosetting resin in phase transition and effect of curing temperature on internal stress", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.62, No.596, pp.993-1000 (1996).
- 4) M.Fukunaga, T.Yamada, M.Gamou and Y.Kanoh, "Analysis of curing reaction for epoxy resin used for electrical insulators part II stress-strain analysis with a viscoelastic constitutive relationship for epoxy resin using a full adhesion interface model materials", Journal of Japan Society of Polymer Proceeding, Vol.14, No.8, pp.512-518 (2002).
- 5) K.Miyake, "Thermo-viscoelastic analysis for warpage of ball grid array package taking into consideration of chemical shrinkage of molding compound", Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.7, No.1, pp.54-59 (2004).
- 6) S.Nakamura, Y.Miyano, S.Sugimori and A.Kaneda, "Thermoviscoelastic analysis of residual stress by cooling in a thermosetting resin/metal laminated beam", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.53, No.493, pp.1813-1818 (1987).
- 7) S.Nakamura, Y.Miyano, S.Sugimori and A.Kaneda, "Thermoviscoelastic analysis of residual stresses in a thermosetting resin/metal laminated beam caused by cooling", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Vol.3, No.1, pp.126-131 (1988).
- 8) S.Nakamura, A.Kaneda, K.Nishi and Y.Miyano, "Production of residual stress in LSI plastic package by thermoviscoelastic analysis for a 3-layer laminated beam", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.56, No.525, pp.1209-1216 (1990).
- 9) S.Nakamura, A.Hasebe, K.Serizawa, T.Kousaka and R.Haruda, "Warp deformation and residual stress for 2-layer laminated beam composed of metal and resin", Japanese Journal of Polymer Science and Technology, Vol.51, No.12, pp.806-812 (1994).
- 10) S.Nakamura and K.Serizawa, "Thermo-viscoelastic analysis of warp deformation and residual stress for laminated bodies of flip-chip LSI device", The Journal of Japan Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Vol.12, No.3, pp.173-178 (1997).
- 11) G.Murakami, M.Mita, S.Nakamura, K.Ueno and

- K.Nakamura, "Achieving an optimum structural package design with thermo-viscoelastic analysis", *Chip Scale Review*, Vol.2, No.5, p.55-60 (1998).
- 12) S.Nakamura, G.Murakami, K.Isaka, K.Ueno and K.Nakamura, "Estimation by thermo-viscoelastic analysis for warp deformation of flip chip attached LSI", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.2, No.4, pp.291-297 (1999).
- 13) G.Murakami, S.Nakamura, M.Mita and Y.Miyano, "Optimum design of elastomeric structure of CSP- μ BGA with thermo-viscoelastic analysis", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.3, No.1, pp.34-39 (2000).
- 14) S.Nakamura, Y.Kushizaki, G.Murakami and M.Kido, "Thermo-viscoelastic numerical analysis of residual stress influenced by material properties in semiconductor devices", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.5, No.4, pp.379-384 (2002).
- 15) S.Nakamura, M.Goto, Y.Kushizaki and M.Kido, "Thermo-viscoelastic analysis of thermal residual stress and deformation influenced by loaded temperature for constitutive materials in electronic devices", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.5, No.7, pp.660-665 (2002).
- 16) S.Nakamura, Y.Kushizaki, M.Goto, K.Ohashi and M.Kido, "Optimum layer construction with thermo-viscoelastic analysis influences thermal residual stress and warp deformation in electronic devices", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.6, No.1, pp.80-87 (2003).
- 17) S.Nakamura, M.Goto and Y.Kushizaki, "Thermo-viscoelastic analysis of thermal residual stress and warp deformation influenced by material properties in plastic laminated beams", *Journal of the Japan Society of Polymer processing*, Vol.15, No.4, pp.302-307 (2003).
- 18) S.Nakamura and M.Goto, "Expedient evaluation method of residual stress for viscoelastic laminated bodies", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.71, No.703, pp.513-519 (2005).
- 19) S.Nakamura, T.Kawabata, Y.Fukui and K.Yoshimi, "Expedient evaluation method of warp deformation behavior for viscoelastic laminated beam consisted of epoxy resin and steel", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.57, No.5, pp.495-501 (2008).
- 20) 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, pp.3701-3706 (1955).
- 21) T.Kunio, "Base of solid mechanics", p.250 (1983) Baifukan.