

エポキシ樹脂と鋼材からなる粘弾性積層はりの 反り変形挙動を求める簡易評価法

中村 省三*・川端 拓也**・福井 雄**・磯部 宏倫**

(平成19年10月16日受理)

An Expedient Evaluation Method for Warp Deformation Behavior of Viscoelastic Laminated Beam Consisting of Epoxy Resin and Steel

Shozo NAKAMURA, Takuya KAWABATA, Yu FUKUI and Hironori ISOBE

(Received Oct.16,2007)

Abstract

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 steel was proposed. 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 which 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

熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂は、携帯電話やノート型パソコンなどに用いられる電子部品の封止樹脂として多用されている。これらの電子部品は、近年小型・薄型・高機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、また、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反り変形による搭載・接合信頼性の低下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物性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正確な予測が困難である。世上では、この種の電子部品の反り変形挙動を有限要素解析で検討した例が報告されている^{2)~5)}。一方、著者らは、種々の高分子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

* 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

レーション技術を検討してきた^{6)~18)}。これらの熱粘弾性数値解析技術を用いれば、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、線形粘弾性理論に基づく構成方程式を用いており、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。加えて、熱粘弾性数値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。

本報では、上記の技術的課題を背景に、電子部品を構成する主材料であるエポキシ樹脂と鋼材から構成される粘弾性二層積層はり（以下、積層はり」と略記）を基本モデルとして採り上げ、これに製造工程やその後の信頼性評価試験などの熱負荷が作用した際の反り変形挙動を簡便に予測する簡易評価式を提案する。そして、この簡易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る。次いで、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する。

2. 簡易評価法の提案

2.1 積層はりと粘弾性特性

材料Aと材料Bからなる積層はりの形状を図1に示す。ここで、材料Aには複雑な粘弾性挙動を示す電子部品のICチップを封止するのに用いられるエポキシ樹脂を、材料Bには弾塑性挙動を示す鋼材のSUS 304鋼を採り上げる。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社製エポコート 828）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、150℃で30分間加熱硬化させた。このエポキシ樹脂のガラス転移温度は95℃で、その他の貯蔵弾性率 E' と熱ひずみ ϵ_t の実測値は図2にプロットで表示する。ここで、貯蔵弾性率 E' は動的粘弾性測定装置 Rheogel E 4000（ユービーエム社製）を、熱ひずみ ϵ_t は熱機械分析装置 TMA（島津製作所製）を用いて測定した。図2の上段に示す貯蔵弾性率 E' は、室温のガラス状領域では $E_{eG} = 1.62\text{GPa}$ 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 $E_{eR} = 0.023\text{GPa}$ と小さい値を示す。一方、図2の下段に示す熱ひずみ 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、ガラス転移温度 T_g (95℃) 以下では $\alpha_{eG} = 75.4 \times 10^{-6}/K$ の値を、また T_g 以上では $\alpha_{eR} = 150.3 \times 10^{-6}/K$ の値を示す。このように、ここで用いたエポキシ樹脂はその熱的・力学的特性が著しい温

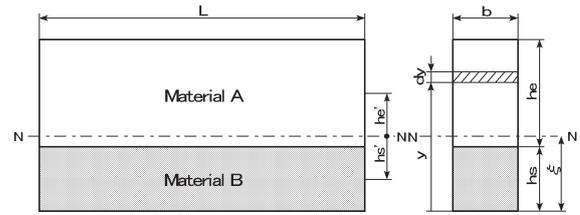


Fig.1 Shape and dimensions of laminated beam.

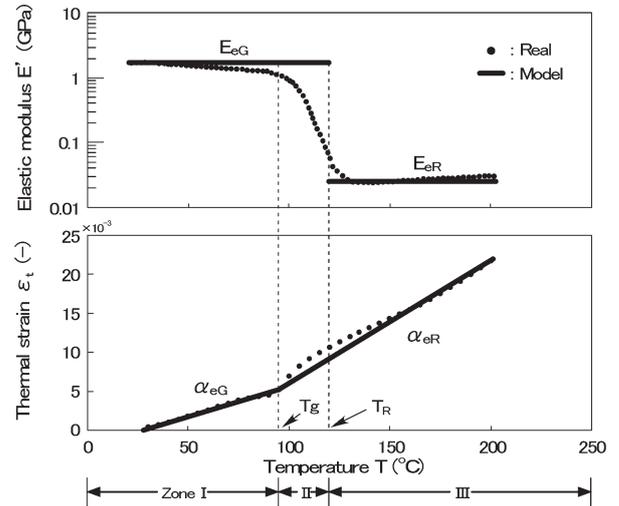


Fig.2 Viscoelastic properties and mechanical model.

度依存性を示す粘弾性材料であることが分かる。

2.2 粘弾性力学モデルの表示

ここで、上述のように温度依存性の大きいエポキシ樹脂の熱的・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、簡易化して図2の実線で示すような粘弾性力学モデルで表示する。さらに、図示したようにガラス転移温度 T_g より小さい温度範囲を領域I、 T_g 以上でラバー転移温度 T_R 未満の範囲を領域II、ならびに T_R 以上の範囲を領域III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誘導する。なお、この簡易評価式の導出に当たっては、積層はりを冷却した場合と加熱した場合の2種類について行った。いま、積層はりの長さを L 、幅を b 、エポキシ樹脂と鋼材の厚さをそれぞれ h_e 、 h_s とする。また、中立軸 N-N の鋼材端からの距離を ξ 、エポキシ樹脂および鋼材の中央から中立軸までの距離をそれぞれ h_e' 、 h_s' 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 ξ は、

$$\xi = \frac{E_s \int_{A_s} y dA_s + E_e \int_{A_e} y dA_e}{(E_s A_s + E_e A_e)} \quad (1)$$

で表される。ここで、 E_e 、 E_s は、それぞれエポキシ樹脂と鋼材の縦弾性係数である。 A_e はエポキシ樹脂の断面積($b \cdot h_e$)、 A_s は鋼材の断面積($b \cdot h_s$)である。また、エポキシ樹脂と鋼材の中立軸に関する断面二次モーメントをそれぞれ I_e 、 I_s とすると、

$$I_e = \frac{h_e^3 - 3 \cdot (\xi - h_s) \cdot h_e^2 + 3 \cdot (\xi - h_s)^2 \cdot h_e}{3} \cdot b$$

$$I_s = \frac{h_s^3 - 3 \cdot \xi - h_s^2 + 3 \cdot \xi^2 \cdot h_s}{3} \cdot b \quad (2)$$

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 a_e 、熱負荷の温度差を ΔT とすると、一般に $\varepsilon_e = a_e \cdot \Delta T$ 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。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{eI} &= a_{eG} \cdot \Delta T_{I} \\ \varepsilon_{eII} &= a_{eR} \cdot \Delta T_{II} \\ \varepsilon_{eIII} &= a_{eR} \cdot \Delta T_{III} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 a_{eG} と a_{eR} は図2の下段に示すエポキシ樹脂の T_g 以下と T_g 以上における線膨張係数である。また、 ΔT_{I} 、 ΔT_{II} および ΔT_{III} はそれぞれ領域 I、II および III 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、 $\sigma_e = \varepsilon_e \cdot E_e$ 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。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{eI} &= a_{eG} \cdot \Delta T_{I} \cdot E_{eG} \\ \sigma_{eII} &= a_{eR} \cdot \Delta T_{II} \cdot E_{eG} \\ \sigma_{eIII} &= a_{eR} \cdot \Delta T_{III} \cdot E_{eR} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 E_{eG} と E_{eR} は、それぞれ図2上段に示すエポキシ樹脂のガラス状領域とゴム状領域における縦弾性係数である。

さて、エポキシ樹脂に生ずる熱膨張（収縮）力 P_e は、

$$P_e = P_{eI} + P_{eII} + P_{eIII} \quad (5)$$

で表現できるものとする。ここで、 P_{eI} 、 P_{eII} および P_{eIII} は、それぞれ領域 I、II および III におけるエポキシ樹脂に生ずる熱膨張（収縮）力である。したがって、 P_{eI} 、 P_{eII} および P_{eIII} は、

$$P_{ei} = \sigma_{ei} \cdot A_e \quad \text{ただし、} i = I, II, III \quad (6)$$

となる。同様の考え方に基づくと、鋼材に生ずる熱膨張（収縮）力 P_s は、

$$P_s = \sigma_{si} \cdot A_s = (a_s \cdot \Delta T_i \cdot E_s) \cdot b \cdot h_s$$

ただし、 $i = I, II, III$ (7)

で表される。ここで、 σ_s は鋼材に生ずる熱応力、 a_s は鋼材の線膨張係数、 E_s は鋼材の縦弾性係数である。

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 は、熱膨張（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。

$$M_e = P_e \cdot h_e' \quad (8)$$

一方、鋼材に生ずる曲げモーメント M_s は、エポキシ樹脂の場合と同様に考えると、

$$M_s = P_s \cdot h_s' \quad (9)$$

で表される。

この積層はりの反り変形は、エポキシ樹脂と鋼材に作用する曲げモーメント M_e と M_s に起因して生ずると考え、反り変形に關与する曲げモーメント M_d を、

$$M_d = P_e \cdot h_e' - P_s \cdot h_s' \quad (10)$$

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、

$$R = \frac{(E_e \cdot I_e + E_s \cdot I_s)}{M_d} \quad (11)$$

で表現でき、最終的に求める積層はりの反り変形量 δ は、曲率 $\chi = 1/R$ より、

$$\delta = \frac{L}{2} \tan \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[\frac{\chi \cdot L}{2} \right] \right\} \quad (12)$$

で与えられる。

2.4 反り変形の簡易解の求め方

積層はりの寸法は長さ $L=150\text{mm}$ 、幅 $b=15\text{mm}$ で鋼材の厚

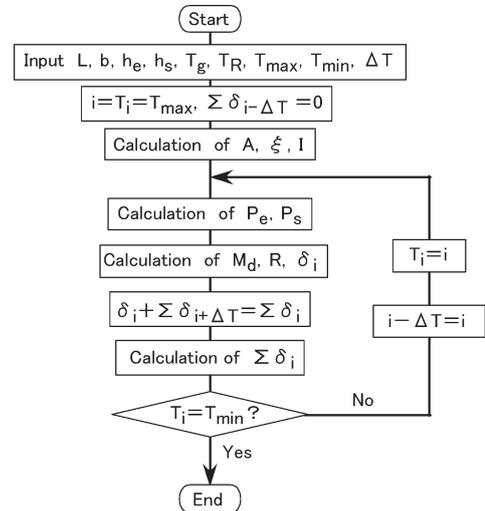


Fig.3 Calculation routine of warp deformation.

さ h_s を0.5mmとし、エポキシ樹脂の厚さ h_e を0.5, 1, 3, 5, 10mmとする。エポキシ樹脂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 $E_{eG}=1.62\text{GPa}$, $a_{eG}=75.4\times 10^{-6}/K$, ゴム状領域では $E_{eR}=0.023\text{GPa}$, $a_{eR}=150.3\times 10^{-6}/K$ である。一方、鋼材の縦弾性係数 $E_s=197\text{GPa}$, 線膨張係数 $a_s=11.7\times 10^{-6}/K$ である。なお、式(1), (11)の E_e は E_{eG} の値を用いる。また、温度条件は130°Cから30°Cまでの冷却過程と30°Cから130°Cまでの加熱過程である。積層はりに生ずる反り変形量の算出手順は、図3のフローチャートに示

すように、冷却および加熱過程において、任意のステップ温度毎に収縮・膨張力、曲げモーメント、曲率半径および曲率を求め、これらから求めた反り変形量を逐次加算して冷却および加熱過程の温度変化に対する反り変形量を算出した。

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数値解析の結果(熱粘弾性解)、ならびに実験値と比較対比して後述する。

3. 熱粘弾性数値解析の基礎理論

3.1 反り変形量を求める粘弾性基礎式

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^{18),20)}。

$$\sigma(x,t) = \int_0^t E_{ri}(t'-\tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \epsilon\sigma(x,\tau) d\tau \quad i=1\sim n \quad (13)$$

$$\epsilon\sigma(x,t) = \epsilon(t) + \kappa(t)x - \int_{T_h}^{T(x,\tau)} a_i(T) dT \quad i=1\sim n \quad (14)$$

ここで、 $E_{ri}(t', T_0)$ は i 層の基準温度 T_0 における緩和弾性係数である。 $\epsilon(t)$ は長手方向の伸縮、 $\kappa(t)$ は曲率、 T_h 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。 $a_i(T)$ 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(13)の t' , τ' は換算時間であり、 i 層の時間-温度移動因子を $a_{iTo}(T)$ とすれば、次式から求められる。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{iTo}\{T(x,u)\}} \quad i=1\sim n \quad (15)$$

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(13), (15)の関係から、次式の微分積分方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_{ri}(t'-\tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \epsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x,\tau)} a_i(T) dT \right\} \cdot d\tau \cdot dx = 0, \quad i=1\sim n \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_{ri}(t'-\tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \epsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x,\tau)} a_i(T) dT \right\} x \cdot d\tau \cdot dx = 0, \quad i=1\sim n \quad (17)$$

そこで、式(16), (17)を解くことによって曲率 $\kappa(t)$ が求まり、この $\kappa(t)$ 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。

3.2 熱粘弾性数値解析方法

前節の粘弾性基礎式を用いて熱粘弾性数値解析を行い、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のエポキシ樹脂と鋼材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。

$$E_r(t') = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left[-\frac{t'}{\tau_i}\right] \quad (18)$$

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 $a_{To}(T)$ 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¹⁹⁾。

解析に当たっての温度条件は、130°Cから30°Cまでの冷却過程と30°Cから130°Cまでの加熱過程の2種類である。なお、熱伝達率は予備実験の結果から46W/(m²・K)とした。

Table.1 Thermal and mechanical characteristics of constructive materials.

Properties Materials	Thermal conductivity λ (W/mK)	Specific heat C (kJ/kgK)	Density ρ (kg/m ³)	Glass transition temperature T_g (°C)	Thermal expansion coefficient α (10 ⁻⁶ /K)		Relaxation modulus E_r (GPa)
					$T \leq T_g$	$T_g < T$	
Epoxy resin	0.186	1.423	1220	95	75.4	150.3	Fig4
Steel	147	0.452	7870	-	11.7		197

4. 反り変形の実験

実験には、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 $b=15\text{mm}$ で鋼材の厚さ h_s を 0.5mm 一定とし、エポキシ樹脂の厚さ h_e を $0.5, 1, 3, 5, 10\text{mm}$ と5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鋼材帯板を予め作り、これらを室温 25°C 程度で接着接合させた。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平板上に拘束しないように設置した。また、エポキシ樹脂帯板には反り変形量を計測するためのケガキ線を描いた。加熱過程では、この積層はりを 130°C の炉中に投入し、積層はりの側面から 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。また、図は

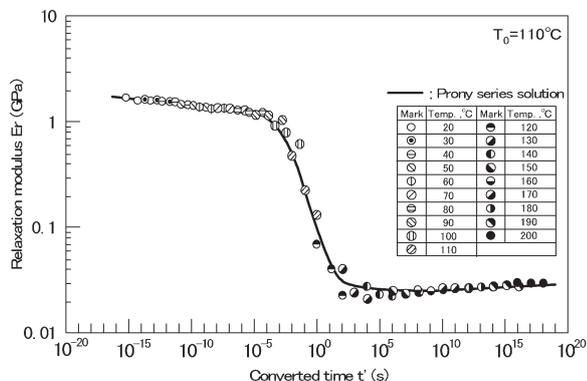


Fig.4 Master curve of relaxation modulus for epoxy resin.

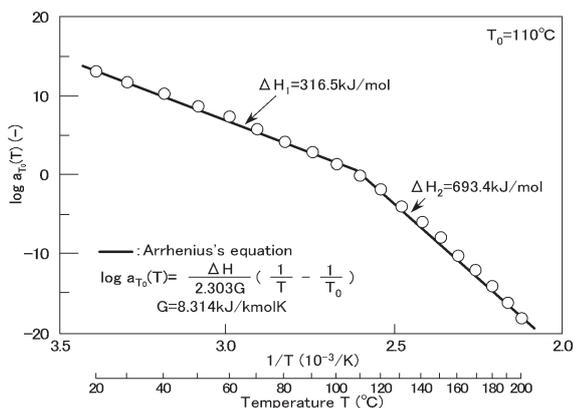


Fig.5 Time-temperature shift factor for epoxy resin.

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計測した。一方、冷却は 130°C から 30°C までの温度範囲での自然空気冷却として加熱と同様の方法で反り変形量を計測した。

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節に示す厳密な線形粘弾性理論に基づく熱粘弾性数値解析から求めた値（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、簡易評価法の妥当性を検証する。

5.1 冷却時の反り変形挙動

図6～図10に、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す。これらの図から分かるように、 130°C から 30°C まで冷却すると、積層はりは鋼材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比較的よく一致しており、熱粘弾性数値解析の妥当性が明らかである。一方、簡易解は、熱粘弾性解ほどよく一致していないものの、概ね実験値を反映したものとなっており、本提案の簡易評価法を用いれば積層はりの反り変形挙動を概ね予測することが可能である。なお、簡易解については図6～図10のいずれの図も、 130°C から 120°C の冷却過程で反り変形が上に凸のいわゆる逆反りが発生している。この原因は、前述のように式(1)、(11)の E_e に全温度範囲にわたって E_{ec} の一定値を固定して用いているためである。この逆反りを示す反り変形量は微少で、実用上差し支えない程度と思われるが、今後さらに全体的傾向をより詳細に検討する必要がある。

図11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

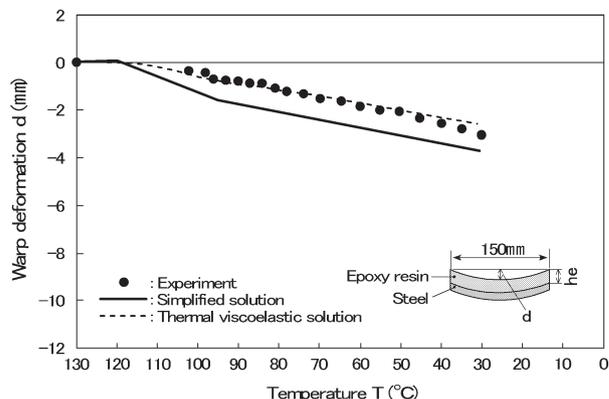


Fig.6 Warp deformation with cooling ($h_e=0.5\text{mm}$).

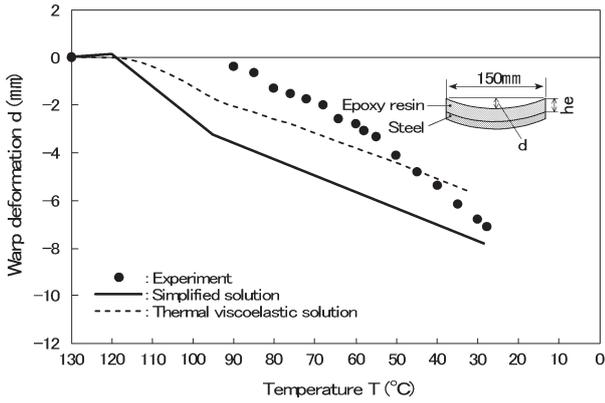


Fig.7 Warp deformation with cooling ($h_e=1$ mm).

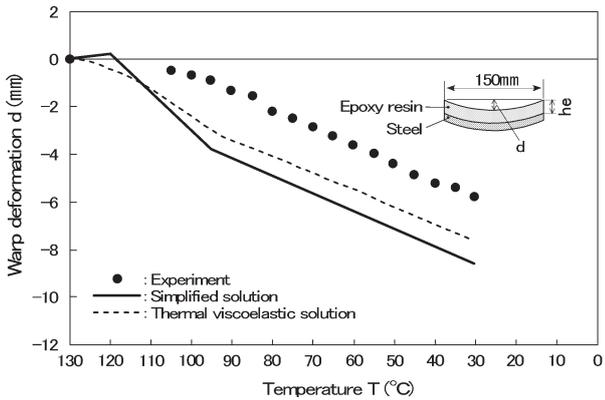


Fig.8 Warp deformation with cooling ($h_e=3$ mm).

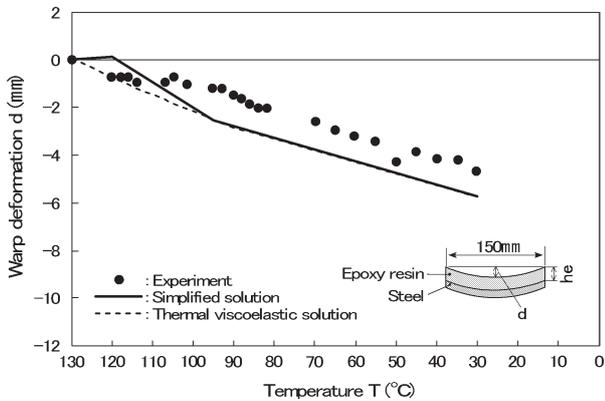


Fig.9 Warp deformation with cooling ($h_e=5$ mm).

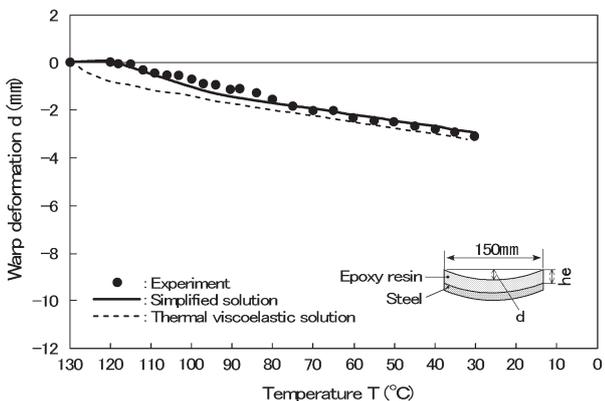


Fig.10 Warp deformation with cooling ($h_e=10$ mm).

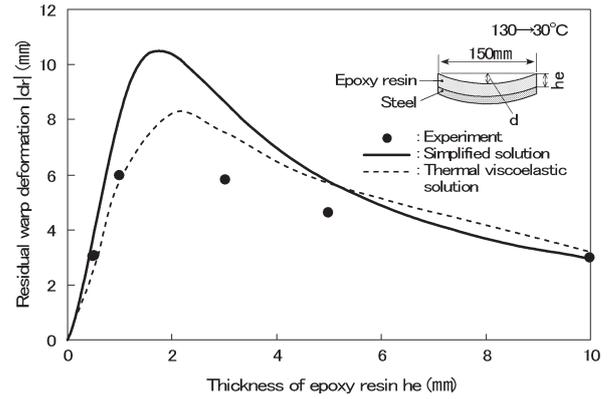


Fig.11 Relation between epoxy resin thickness and residual warp deformation.

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変化し、エポキシ樹脂厚さが0.5mmと薄い場合や、逆に10mmのように厚い場合には概して小さく、1~2mm近傍で極大値を示している。また、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、簡易評価法の妥当性が明らかである。

5.2 加熱時の反り変形挙動

図12~図16に、各種エポキシ樹脂厚さの加熱過程における反り変形挙動の実験値、熱粘弾性解および簡易解を示す。これらのいずれの図からも簡易解は概ね実験値や熱粘弾性解を反映しており、傾向的に一致していることが分かる。また、反り変形量は加熱が進行するとともに実験値、熱粘弾性解および簡易解のいずれも増加し、90°C~100°C付近で極大値を示す。その後、さらに温度が上昇すると、反り変形量は減少し130°C付近では反りのない平坦な状態に至ることが分かる。ここで、90°C~100°Cにおいて反り変形量が増加から減少に転ずるが、このことは、90°C~100°C付近の温度がエポキシ樹脂のガラス転移温度(95°C)に相当し、この温度を境としてエポキシ樹脂の縦弾性係数が急激に低下(軟化)することに起因している。なお、図12に示す実験値においては、70°C以上の加熱途中で接着界面に剥離が

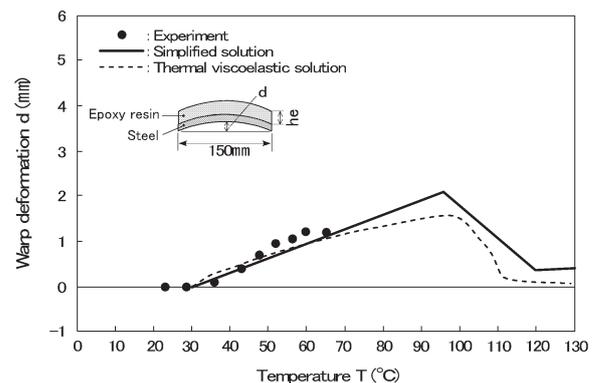


Fig.12 Warp deformation with heating ($h_e=0.5$ mm).

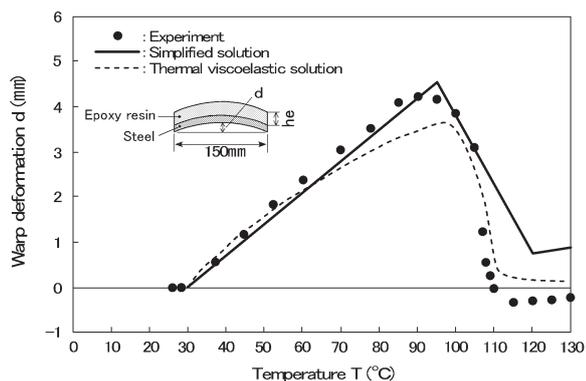


Fig.13 Warp deformation with heating (he=1 mm).

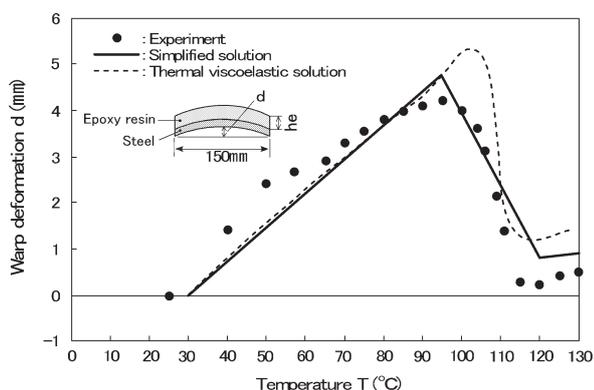


Fig.14 Warp deformation with heating (he=3 mm).

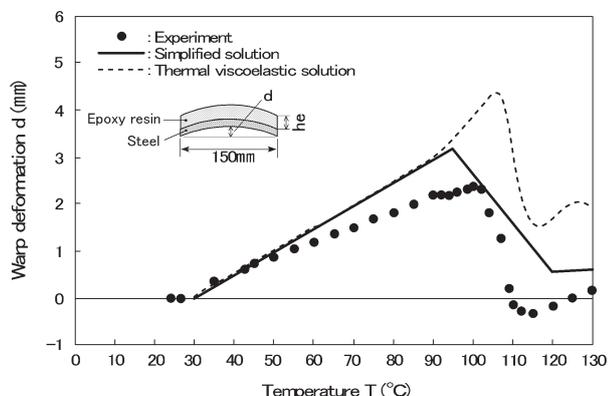


Fig.15 Warp deformation with heating (he=5 mm).

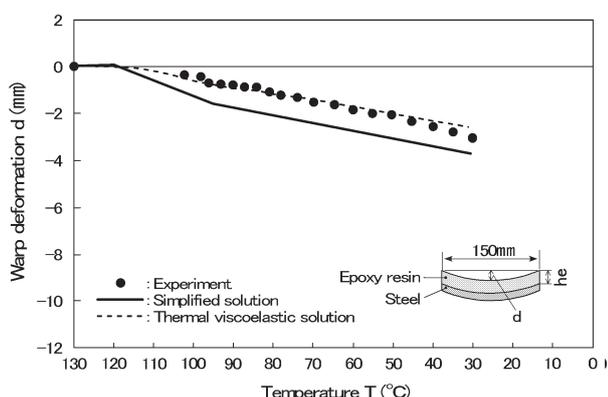


Fig.16 Warp deformation with heating (he=10 mm).

生じたためプロットは図示していないが、その他については剥離などの異常は認められなかった。

以上のことにより、加熱、冷却を問わず、本報で提案する簡易評価法を用いれば、コンピュータによる煩雑な粘弾性数値解析を行わなくても、エポキシ樹脂と鋼材からなる積層はりの反り変形挙動を極めて簡便に予測することができ、今後電子部品の設計段階において、反り変形量を低減させる材料構成や物性の方向性を探ることが可能と思われる。

6. 結 言

粘弾性挙動を示すエポキシ樹脂と弾塑性挙動を示す鋼材 (SUS 304 鋼) からなる粘弾性二層積層はりを対象として、これに熱負荷を与え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数値解析の結果、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反り変形挙動を求める簡易評価式を導出した。この評価式は、温度によって性質が変化するエポキシ樹脂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を3領域に区分し、はりの曲げ理論を適用したものである。
- (2) 簡易評価式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数値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、本報のような積層はりの加熱・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、今後電子部品などの反り変形に関する最適設計に有効であると思われる。

参 考 文 献

- 1) N.Taketani, K.Hatano, H.Sugimoto, O.Yoshioka, G.Murakami, "CSP with LOC technology", ISHM, pp. 594 (1996).
- 2) M.Ohori, C.Sato, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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.Obashi, 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, 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, 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) M.L.Williams, R.F.Landl, 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).
 - 20) T.Kunio, “Base of solid mechanics”, pp.250 (1983) Baifukan.