

# 熱負荷による粘弾性二層積層体の反り変形挙動の 理論的および実験的検討

中村 省三\*・福井 雄\*\*・磯部 宏倫\*\*・岩本 隆男\*\*

(平成19年10月31日受理)

## Theoretical and Experimental Examination of Warp Deformation Behavior of Viscoelastic-Two-Layer Laminated Body Caused by Thermal Load

Shozo NAKAMURA, Yu FUKUI, Hironori ISOBE, Takao IWAMOTO

(Received Oct.31,2007)

### Abstract

The transient and residual warp deformation of viscoelastic two-layer-laminated body caused by thermal load was examined by the experiment, the finite element analysis and the thermo-viscoelastic analysis. The finite element analysis was analyzed in consideration of temperature dependency, and the thermo-viscoelastic analysis was analyzed based on the linear viscoelasticity theory referring to time and temperature dependency.

As a result, it was clarified that the residual warp deformation is influenced by the ratio of the thickness of epoxy resin and steel material, and that the time and temperature dependency should be considered in the analysis when the composition material contains the polymeric one, and that the warp deformation behavior could be predicted with precision in practical use by thermo-viscoelastic analysis.

**Key Words:** warp deformation, thermo-viscoelastic analysis, finite element analysis, laminated body, epoxy resin

### 1. 緒 言

近年、パソコンや携帯電話などに代表される電子機器は小型・薄型・多機能化などの技術開発がめざましく、内部に実装されている電子部品の強度確保や実装時の反り変形防止が重要な技術課題となっている。電子部品はICチップやCu箔、はんだなどの金属材料、ならびに接着剤やFR-4基板といった高分子材料などで構成される複合構造体である。従って、はんだリフローなどの製造工程や使用環境において熱負荷が加わると、構成材料の熱膨張量の違いか

ら部品内部に熱応力・ひずみが生じ、これが原因で材料亀裂や反り変形などの不良が生ずることがある。これらの不良を未然に防止する上からも、電子部品に生ずる熱応力や反り変形を抑制するための構成材料の物性や構造、ならびに製造プロセスの最適化が必要不可欠である<sup>1)~4)</sup>。加えて、高分子材料は時間依存性と温度依存性を示す粘弾性特性があり、このような材料を含む電子部品の熱応力や反り変形解析に当たっては、現在主流の弾塑性有限要素解析では実態を表現できず、粘弾性挙動を考慮した数値解析が不可欠である。

\* 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

本報告では、上記観点から、電子部品の反り変形挙動の予測・評価を行うため、これをモデル化した積層体を取り上げ、加熱から冷却までの一連の熱負荷が加わった際の反り変形挙動を理論と実験の両面から検討した。具体的には、エポキシ樹脂と鋼材からなる二層積層体に、加熱から冷却までの一連の熱負荷が加わった際の反り変形挙動を実験で求め、これらの実験値を有限要素解析、ならびに熱粘弾性解析の結果と比較・検討した。

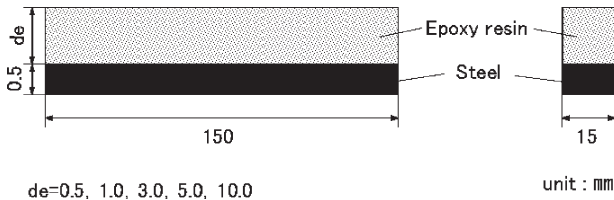


Fig.1 Shape and dimensions of laminated body.

## 2. 反り変形挙動の実験的検討

### 2.1 二層積層体形状

図1に、電子部品を簡略化した基本的モデルとしてエポキシ樹脂と鋼材からなる二層積層体の形状を示す。ここで、エポキシ樹脂は主剤のエピコート 828 と硬化剤のエピキュアTを5：1の割合で混ぜ合わせた2液混合型で、鋼材はステンレス鋼SUS304である。二層積層体の長さを150mm、幅を15mmとして、鋼材の厚さを0.5mm一定でエポキシ樹脂の厚さを0.5～10.0mmの5パターンに変化させ、これらを25℃程度で接着接合させて作製した。

### 2.2 実験方法

作製した二層積層体を25℃程度からエポキシ樹脂の熱的・機械的性質が変化するガラス転移温度（以下T<sub>g</sub>と略記）以上の130℃まで加熱し、その後加熱槽から取り出して30℃まで空気冷却した。また、エポキシ樹脂中央部に付けた熱電対により時々刻々変化する温度を測定するとともに、反り変形挙動をCCDカメラで撮影し、これから二層積層体の反り変形量を計測した。

## 3. 反り変形量の数値解析

### 3.1 熱粘弾性解析方法

#### 3.1.1 線形粘弾性理論

図2に示すような材料1, 2, 3, ..., nのn層からなる矩形断面をもつ積層体を考える。積層体の長さをl、深さをd、厚さをhとする。深さ方向をx、厚さ方向をy、長手方向をzとする直角座標系を設け、表面をx=0、材料1と材料2の界面をx=x<sub>1</sub>以下同様にx=x<sub>2</sub>, x=x<sub>3</sub>, ..., x=x<sub>n</sub>とする。

積層体に発生する熱応力σは厚さ方向の座標をxと時

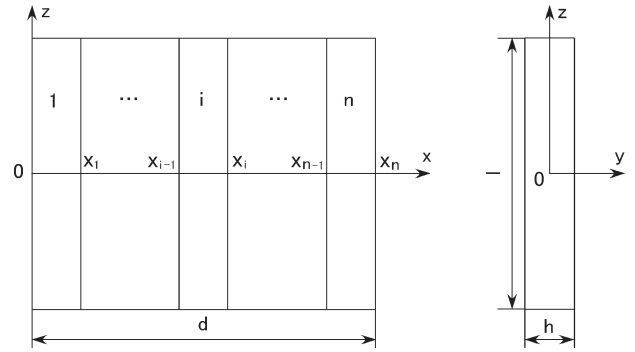


Fig.2 Multi-layer laminated beam and its coordinates

間tの関数になり、これをσ(x, t)とする。そしてσ(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<sup>6)</sup>が成立すれば次式で表現できる<sup>7)</sup>。

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

ここで、E<sub>ri</sub>(t', T<sub>0</sub>)はi層の基準温度T<sub>0</sub>における緩和弾性係数である。また、ε<sub>σ</sub>(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。

$$\varepsilon_{\sigma}(x, t) = \varepsilon(t) + \chi(t)x - \int_{T_h}^{T(x,t)} \alpha_i(T) dT, \quad i=1 \sim n \quad (2)$$

ここで、ε(t)は長手方向の伸縮、χ(t)は曲率、T<sub>h</sub>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から求められ、厚さ方向の座標x及び時間tの関数となる。また、α<sub>i</sub>(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<sub>iT<sub>0</sub></sub>(T)とすれば次式で求められる。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{iT_0}\{T(x, u)\}}, \quad i=1 \sim n \quad (3)$$

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

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

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

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。

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

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

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  $\epsilon(t)$ 、 $x(t)$  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、 $\sigma(x, t)$ 、 $x(t)$  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  $\sigma_r$ 、残留曲率  $x_r$  となる。

### 3.1.2 解析モデルの形状と熱的・機械的性質

解析モデルは実験と同じ形状である。表1に構成材料の熱的・機械的性質を示す。ここで、エポキシ樹脂は高分子材料であり、Tgを境に線膨張係数や緩和弾性係数が大きく変化する粘弾性特性を有する。そこで、エポキシ樹脂の線膨張係数は熱機械分析装置（島津製作所社製）で、また、緩和弾性係数は動的粘弾性測定装置（ユービーエム社製）で測定し、これらの値を熱粘弾性解析に用いた。

Table.1 Thermal and mechanical characteristics of constructive materials

Properties Materials	Thermal conductivity $\lambda$ (W/mK)	Specific heat C (kJ/kgK)	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Glass expansion temperature T <sub>g</sub> (°C)	Thermal expansion coefficient $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /K)		Young's modulus E (GPa)		Poisson's ratio $\nu$ (-)
					T ≤ T <sub>g</sub>	T > T <sub>g</sub>	T ≤ T <sub>g</sub>	T > T <sub>g</sub>	
					Epoxy resin	0.186	1.423	1220	
Steel	147	0.452	7870	—	11.7		197		0.34

図3に、エポキシ樹脂の線膨張係数 ( $\alpha$ ) を示す。図からわかるように、エポキシ樹脂の Tg は 95°C で、Tg を境に低温部 ( $\alpha_1$ ) と高温部 ( $\alpha_2$ ) で線膨張係数は大きく異なり、高分子材料特有の温度依存性を示す。このエポキシ樹脂の  $\alpha$  は、 $\alpha_1 = 75.36 \times 10^{-6}/K$ 、 $\alpha_2 = 150.03 \times 10^{-6}/K$  で高温部は低温部に比べ2倍程度大きな値を示す。

図4に、エポキシ樹脂の緩和弾性係数のマスター曲線を示す。これは、動的粘弾性測定装置を用いて、1、10、100 Hzと周波数を変化させ、所望の各温度で貯蔵弾性係数を測定した。次いで、これらのデータを基準温度 T<sub>0</sub> の下で換算対数時間軸上にプロットすると、極短時間から極長時間まで1本の滑らかなマスター曲線で表示することができた。熱粘弾性解析にはこれを Prony 級数で近似して用いた。また図5は、マスター曲線を作成する際の時間-温度移動因子である。図のように、エポキシ樹脂は低温部と高温部で活性化エネルギー  $\Delta H$  の異なる2本の Arrhenius 式で近似することができた。このことから、ここで用いたエポキシ樹脂は時間-温度換算則が成立する材料であることがわかる。

### 3.1.3 解析条件

反り変形挙動の熱粘弾性解析には、前述の線形粘弾性理論に基づいて著者らが独自に開発した数値解析ソフトを用い、エポキシ樹脂の厚さを実験と同様に5パターン変化させて行った。温度条件は25°C程度から130°Cまでの加熱過

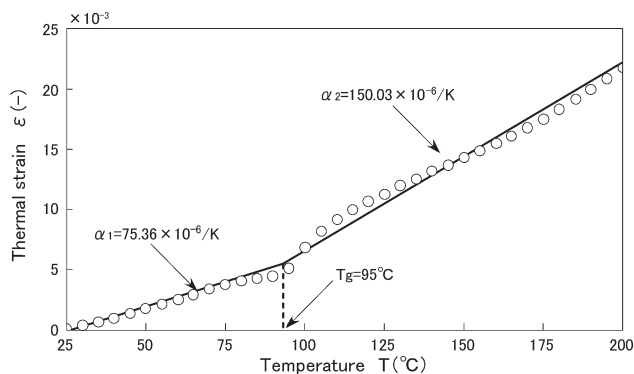


Fig.3 Thermal expansion coefficient of epoxy resin

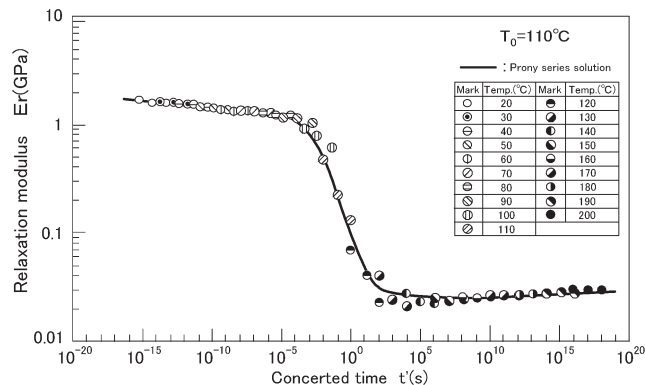


Fig.4 Master curve of relaxation time modulus for epoxy resin

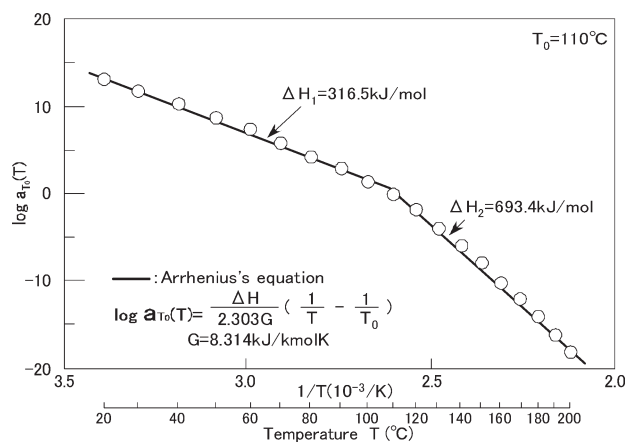


Fig.5 Time-temperature shift factor  $a_{T_0}(T)$  of epoxy resin

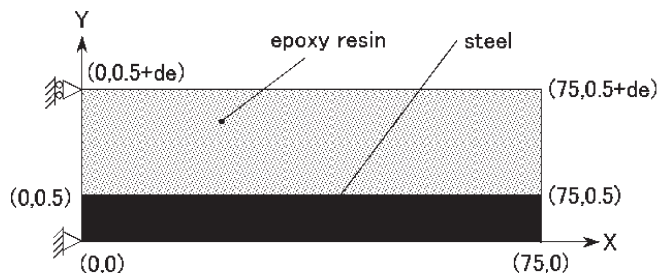


Fig.6 Finite element analysis condition of laminated body

程、および130°Cから30°Cまでの冷却過程を別々に解析した。この際、熱伝達率は実験で測定した温度変化を反映させて設定した。

### 3.2 有限要素解析

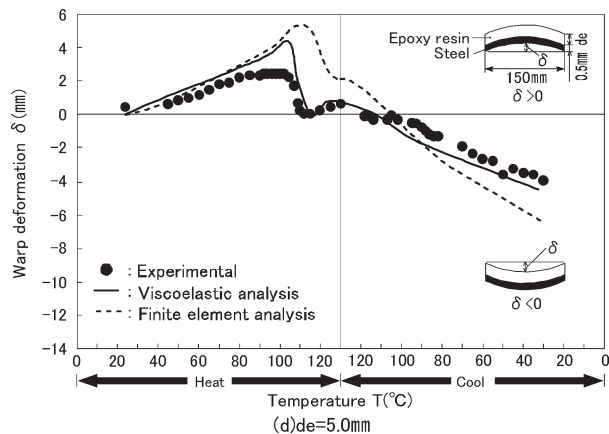
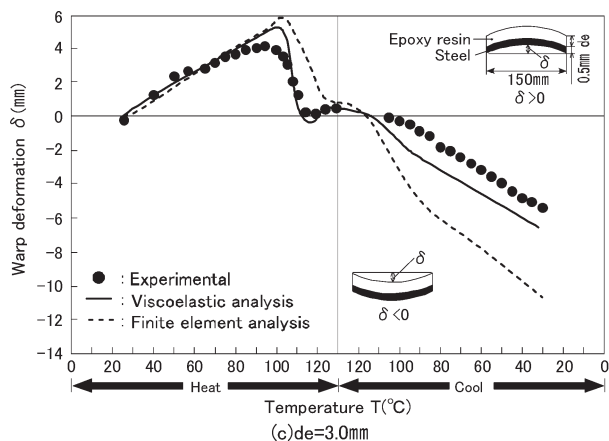
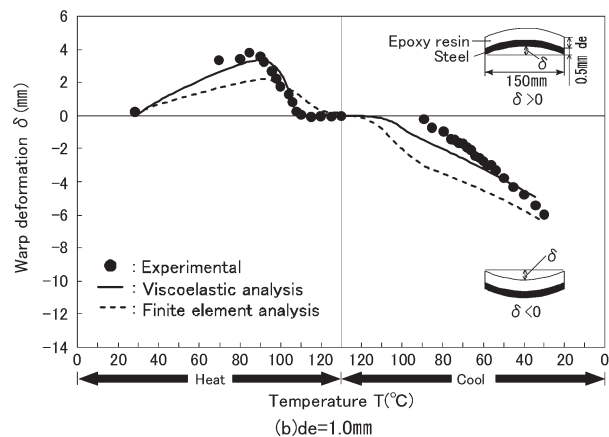
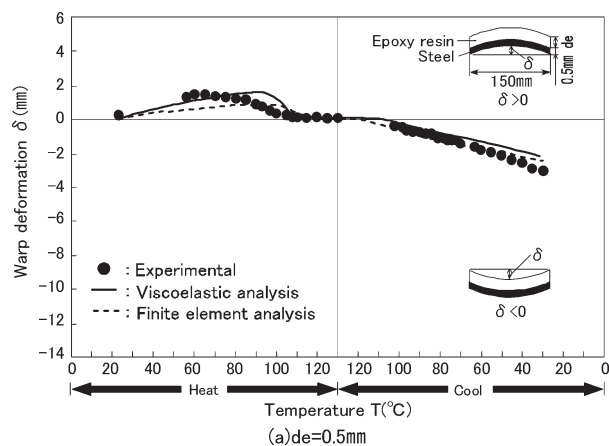
有限要素解析には、非線形構造解析ソフト MARC2005 を用いた。モデル形状および熱的・機械的性質は、実験および熱粘弾性解析と同様であるが、二層積層体の形状対称性から図6に示すように右側半分のみを解析対象とした。また、拘束条件は左端最下部を完全拘束、最下部以外の左端をY軸方向のみ自由とし、要素分割は4節点四角形要素で平面ひずみ状態である。また、温度範囲と熱伝達率は熱粘弾性解析と同様で、実験の温度変化を概ね一致させることで設定した。なお、有限要素解析に当たっては温度依存性のみを考慮している。

## 4. 結果および考察

### 4.1 反り変形挙動

図7(a)~(e)は、二層積層体に加熱から冷却までの一連の熱負荷を加えた際の反り変形挙動を、各種エポキシ樹脂厚さに対して示したものである。ここで、プロットは実験値、実線は熱粘弾性解析の結果、破線は有限要素解析の結果を示している。これらの図からわかるように、二層積層体の反り変形挙動は実験値と解析値のいずれも、加熱とともにエポキシ樹脂側が凸の状態に反り始め、温度上昇に伴って反り変形量は増大してT<sub>g</sub>の95℃近傍で極値を示す。その後の温度上昇とともに、反り変形量は急激に減少し始めて、130℃近傍では反り変形量がほぼ零になる傾向を示している。一方、冷却過程における反り変形挙動は、加熱の場合とは逆に鋼材側が凸のいわゆる逆反りが生じ、温度の降下とともに反り変形量は増大し、冷却後の30℃では残留する。

このように加熱・冷却過程において興味ある反り変形挙動を示すが、このことを図8に示すエポキシ樹脂厚さが1mmの場合を例として考察する。なお、図8は反り変形挙動の実験値の他にエポキシ樹脂の緩和弾性係数と線膨張係数の温度依存性を併記したものである。図のように、加熱過程においては90~130℃の温度範囲で反り変形量が減少して微小となるが、これは、T<sub>g</sub>以上の高温ではエポキシ樹脂の緩和弾性係数が急激に低下し、鋼材の緩和弾性係数に比べて極めて小さい値となるためだと考えられる。すなわち、130℃付近ではエポキシ樹脂が軟化して変形しやすい状態となるのに対して、他方では緩和弾性係数の極めて大きい鋼材が元の状態に戻ろうとするために、エポキシ樹脂の線膨張係数の変化に関係なく反り変形量が微小になったものと考えられる。一方、冷却過程においては、T<sub>g</sub>を境にエポキシ樹脂の緩和弾性係数が増大し始め、軟化している状態から再び硬化して緩和弾性係数も増大することから、エポキシ樹脂と鋼材の線膨張係数の違いで90℃近傍から反り変形量が急激に増加したのと考えられる。また、い



れの図からも明らかなように、熱粘弾性解析の結果は有限要素解析の結果より実験値と一致することがわかる。このことは、有限要素解析がエポキシ樹脂の物性の温度依存性のみを考慮しているのに対して、熱粘弾性解析はエポキシ樹脂の物性の時間および温度依存性を考慮しているためである。

以上のことから、二層積層体の反り変形挙動は線膨張係数と緩和弾性係数の双方が密接に関係しており、熱粘弾性解析を用いれば、加熱から冷却過程までの一連の過程における反り変形挙動を実用上差し支えない程度に予測できることが明らかとなった。

#### 4.2 残留反り変形量

図9に、エポキシ樹脂厚さと残留反り変形量の関係を示す。この図から、残留反り変形量はエポキシ樹脂厚さが1mm～3mm程度で極値をとり、その後、エポキシ樹脂厚さが厚くなるに従って、減少する傾向にある。これは、二層積層体全体の厚さに対してエポキシ樹脂の占める割合が大きくなることで、エポキシ樹脂単体の収縮と同様にみることができ、鋼材の影響が無視できるほど小さくなるために、残留反り変形量が減少するものと考えられる。

このように、残留反り変形量はエポキシ樹脂と鋼材の厚さの割合によって大きく異なることがわかる。

#### 5. 結 言

エポキシ樹脂と鋼材からなる二層積層体を対象に、加熱から冷却までの一連の熱負荷を加えた際の反り変形挙動を実験と数値解析の両面から検討し、以下の結論を得た。

- (1) 加熱から冷却までの一連の熱負荷を加えた際の二層積層体の反り変形挙動は、熱粘弾性解析で予測することが可能である。また、高分子材料を含む積層体の反り変形挙動の数値解析に当たっては、材料物性の時間依存性と温度依存性を考慮する必要がある。
- (2) エポキシ樹脂と鋼材からなる二層積層体の反り変形挙動は、エポキシ樹脂ならびに鋼材の緩和弾性係数と線膨張係数の双方が密接に関係している。
- (3) 本実験の範囲では、残留反り変形量はエポキシ樹脂厚さが1～3mmで極値をとり、残留反り変形量はエポキシ樹脂と鋼材の厚さの割合に大きく依存する。

#### 参 考 文 献

1) S.Nakamura, Y.Kushizaki, G.Murakami and M.Kido, "Thermo-Vis-coelastic Numerical Analysis of Residual Stress Influenced by Material Properties in Semiconductor Devices", JIEP, Vol.5, No.4, pp. 379-384, (2002).

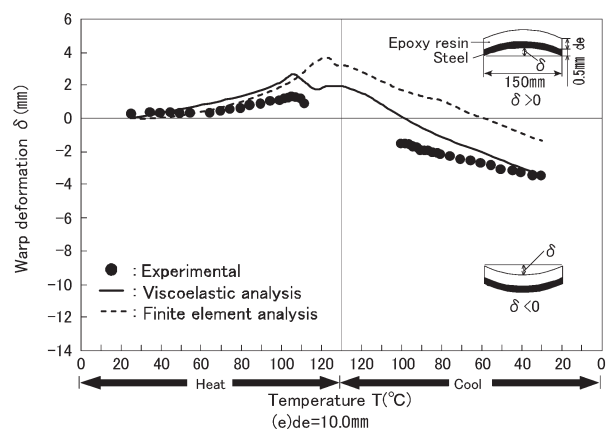


Fig.7 Warp deformation behavior of laminated body

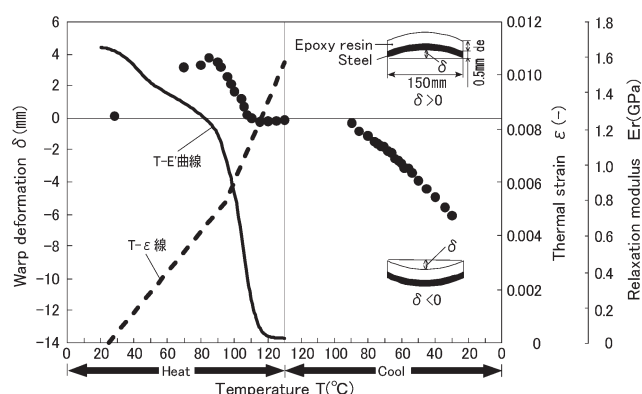


Fig.8 Relation between thermo-mechanical properties and warp deformation of epoxy resin

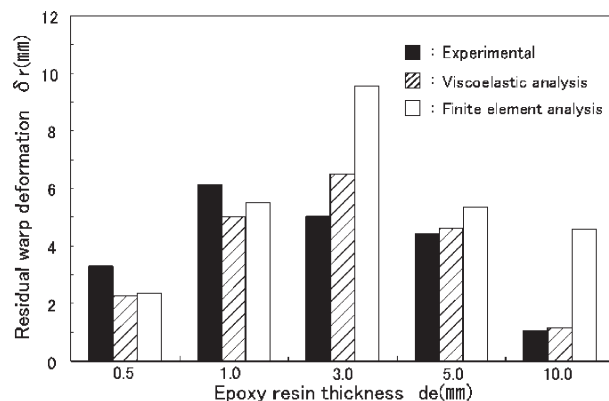


Fig.9 Residual warp deformation versus thickness of epoxy resin

2) S.Nakamura, M.Goto, Y.Kushizaki and M.Kido, "Thermo-Vis-coelastic Analysis of Thermal Residual Stress and Deformation Influenced by Loaded Temperature for Constitutive Materials in Electronic Devices", JIEP, Vol.5, No.7, pp.660-665, (2002).

3) S.Nakamura, Y.Kushizaki, M.Goto, K.Ohashi and M.Kido, "Optim-um Layer Construction with Thermo-Vis-coelastic Analysis Influences Thermal Residual Stress and Warp Deformation in Electronic

- Devices”, JIEP, Vol.6, No.1, pp.80-87, (2003).
- 4) S. Nakamura, M. Goto, “Expedient Evaluation method of Residual Stress for Viscoelastic Laminated Bodies”, The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series A, Vol.71, No. 703, pp.513-519, (2005).
  - 5) S. Nakamura, Y. Miyano, S. Sugimori and A. Kaneda, “Thermoviscoelastic Analysis of Residual Stresses in a Thermosetting Resin/Metal Laminated Beam Caused by Cooling”, The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Vol.3, No.1, pp.126-131, (1988).
  - 6) Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids”, J. Am. Chem. Soc., Vol 77, pp 3701, (1955).
  - 7) T. Kunio, “Base of solid mechanics”, Baifukan, Tokyo, pp 24, (1983).