熱粘弾性解析による新 BOC パッケージの層構造と物性の最適化設計

中村 省三*, 後藤 雅彦**, 専坊 由介***, 大橋 和彦****

Optimum Design of Layer Construction and Properties with Thermo-Viscoelastic Stress Analysis in New BOC Package

Shozo NAKAMURA*, Masahiko GOTO**, Yusuke SEMBOU*** and Kazuhiko OHASHI****

*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) / 現, 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社日出工場

***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株式会社 (〒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) / Presently at Texas Instruments Japan Limited, Hiji Plant

***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, Mitsu-cho, Mitsu-gun, Okayama 709-2123)

概要 BOC 型パッケージに生ずる層間熱残留応力と反り変形量を、熱粘弾性解析によって層構造と材料物性の両面から定量的に解明した。次いで、この結果を使用実績のある μ BGA パッケージと比較し、その実用性について検討した。その結果、BOC 型パッケージに生ずる層間熱応力と反り変形量は、構成材料の厚さ寸法の組み合わせ、ならびにフィルムの緩和弾性係数の値にも大きく影響されることを明らかにした。さらに、BOC 型パッケージの望ましい層構造と材料物性値を定量化し、この条件を満たすことで使用実績のある高信頼 μ BGA パッケージと同等以上の信頼性をもつ BOC 型パッケージの実用化が期待できることを明らかにした。

Abstract

Thermal residual stress and warp deformation behavior which generate in new BOC package were analyzed, concerning with material thickness and material properties, using the numerical simulation method based on the linear viscoelastic theory. It was clarified that the interfacial thermal residual stress and warp deformation are strongly influenced by not only material thickness but also the modulus of the film, and that the reliability of BOC package can make equal to that of μ -BGA package, if the properties designs such as material thickness and material properties in BOC package could be achieved.

Key Words: Viscoelastic Analysis, Thermal Residual Stress, Warp Deformation, Semiconductor Device, BOC Package

1. 緒 言

半導体デバイスは、一般に金属、LSI チップ、はんだボール、およびエラストマーやアンダーフィル、プリント配線板などの異種材料で構成されている。このような半導体デバイスが実装時のはんだリフローや温度サイクル試験などで熱負荷を受けると、その半導体デバイス内部に大きな熱残留応力や反り変形が生じる。これが原因となり接着界面の層間はく離や材料亀裂、さらには搭載不良などの問題が発生することがある。これらの問題は、ますます小型・薄形化される携帯情報機器の実用化・高信頼化を実現する上で大きな障壁となっている^{1)~3)}。そのため、発生する熱残留応力や反り変形量を事前に定量的かつ高精度で予測・評価することは、半導体デバイスの材料・プロセス・構造の最適化等、高信頼設計技術の構築の上からもきわめて重要である。

特に、エラストマーやアンダーフィル、プリント配線板などの有機材料は、その熱的・機械的性質が時間と温度に

よって著しく変化するいわゆる熱粘弾性挙動を示すため、既存の弾塑性解析では実態を表現しないという本質的な問題が生じ得る。そのため、熱粘弾性挙動を考慮した数値解析法の導入が必要不可欠となる^{4)~12)}。

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開発し、その妥当性と有効性に関する実験的検証を実施している^{5),6),9),11),12)}。さらに、本技術を用いた熱応力や反り変形挙動の高精度予測をもとに、材料・プロセス・構造の最適化の研究を進めている^{7),8),10),13)~17)}。

本報告では、上記の技術的課題を背景に、熱粘弾性解析手法を用いて新しい BOC (Board on Chip) パッケージの開発指針を明らかにした。具体的には、その構成材料である LSI チップとボンディングフィルムの厚さ寸法、およびボンディングフィルムの緩和弾性係数をパラメータとして熱粘弾性解析を行い、パッケージ内部に発生する熱残留応力と反り変形挙動の点から、それらの最適化を検討した。次いで、これらの結果を現在実用化され、高い信頼性実績のある μ BGA (Ball Grid Array) パッケージと比較することに

よって、BOCパッケージの実力と有用性について言及した。

2. 熱粘弾性基礎式の誘導

各種材料から構成され、外部からの拘束がない n 層からなる矩形断面をもつ多層積層体に発生する積層体内部の熱応力と曲率を求める基礎式を、線形粘弾性理論から誘導した。すなわち、発生する熱応力は積層体の厚さ方向の座標 x と時間 t の関数となり、これを $\sigma(x, t)$ とする。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)}。

$$\sigma(x, t) = \int_0^t E_{ri}(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{Th}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} d\tau, \quad i=1 \sim n \quad (1)$$

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、 $\varepsilon(t)$ は長手方向の伸縮、 $\kappa(t)$ は曲率、 Th は保持温度である。また、 $T(x, t)$ は時間的に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。 $\alpha_i(T)$ 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(1)の t', τ' は換算時間であり、これは 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。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{iTo}\{T(x, u)\}}, \quad i=1 \sim n \quad (2)$$

さて、厚さ d の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、式(3)に示す力の釣り合い式ならびに式(4)に示すモーメントの釣り合い式が成立する。

$$\int_0^d \sigma(x, t) dx = 0 \quad (3)$$

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

そこで、これらの釣り合い式と式(1)、(2)の関係から、次式の微分積分方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_{ri}(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{Th}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} \cdot d\tau \cdot dx = 0, \quad i=1 \sim n \quad (5)$$

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

式(5)、(6)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、これらの式(5)、(6)から求めた $\varepsilon(t)$ 、 $\kappa(t)$ と式(1)から熱応力分布 $\sigma(x, t)$ を求めることができる。

3. 積層体の熱粘弾性解析

3.1 積層体の形状

今回、BOCパッケージに生ずる熱応力ならびに反り変形挙動を熱粘弾性解析で求めるため、これを4層からなる積層体として取り扱い、解析対象とした。また、比較対象とした μ BGAパッケージも3層からなる積層体として取り扱い、これらをFig. 1に示す。ここでは、特にBOCパッケージに生ずる熱残留応力と反り変形挙動に大きく影響を及ぼすと考えられるエポキシ樹脂系のボンディングフィルムとLSIチップの厚さ寸法、ならびに、熱的・機械的性質が温度と時間に著しく依存するエポキシ樹脂系のボンディングフィルムの物性の中から緩和弾性係数に着目した。その際、BOCパッケージの厚さ寸法は封止レジン 0.1 mm 、BTレジン基板を 0.256 mm と一定にし、LSIチップの厚さを d_s 、エポキシ樹脂系の単層ボンディングフィルム（以下、フィルムAとする）の厚さ寸法を d_e として、それらの寸法を種々変化させた。また、 μ BGAパッケージの厚さ寸法についてはLSIチップを 0.35 mm 、エポキシ樹脂系の3層ボンディングフィルム（以下、フィルムBとする）を 0.175 mm 、ポリイミド樹脂基板を 0.05 mm とした。

3.2 解析に用いた材料物性値

Fig. 1に示すBOCパッケージと μ BGAパッケージを構成する各層の材料の熱的・機械的性質をTable 1に示す。ここで、封止レジン、フィルムA、フィルムB、BTレジン基板、ポリイミド樹脂基板は有機材料であり、その物性値は温度と時間の影響を大きく受ける熱粘弾性挙動を示す材料である。

そこで、これらの積層体のフィルムA、フィルムBについて低温から高温までの広い温度範囲で1, 10, および100 Hzの3種類の周波数を変化させて動的粘弾性特性を測定した。測定にはユービーエム社のRheogel-E4000を用いた。この測定結果を基準温度 T_0 の下で換算対数時間軸上にプロットし、緩和弾性係数のマスタ曲線²²⁾を作成した。これらの結果をそれぞれFig. 2, Fig. 3に示す。これらの図からわかる

Fig. 1 Analysis models of BOC and μ BGA package

Table 1. Thermal and mechanical characteristics of constructive materials

Materials	Thermal conductivity λ (W/mK)	Specific heat C (kJ/kgK)	Density ρ (kg/m ³)	Glass transition temperature Tg (°C)	Thermal expansion coefficient α (10 ⁻⁶ /K)		Relaxation modulus Er (GPa)
					T $\leq$ Tg	Tg<T	
LSI Chip	147.7	0.80	2328	—	3.6		192.0
Encapsulant	0.866	0.863	192.0	162	15.2	47.0	17.8~1.07
BT Resin Substrate	0.372	1.257	1810	145	10.43	5.06	16.6~6.61
Polyimide Substrate	0.163	1.089	1413	420	25.0	47.2	4.3~1.75
Bonding Film A	0.223	0.241	1490	123	83.26	161.1	1.16*~0.08
Bonding Film B	0.249	0.243	1560	124	86.0	210.0	0.61~0.041

*: Reference Fig. 11

Fig. 2 Master curve of relaxation modulus for bonding film A

Fig. 3 Master curve of relaxation modulus for bonding film B

ように、両フィルムともに緩和弾性係数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が得られる。

また、これらのマスタ曲線を作成する際のフィルムA、フィルムBの時間－温度移動因子は Fig. 4 および Fig. 5 に示すように、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 Arrhenius 式²²⁾で近似することができた。このことから、ここで採り上げたフィルムAおよびフィルムBはともに著しい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といえる。

3.3 数値解析方法

熱粘弾性の数値解析を行うに当たり、温度条件としては鉛フリーはんだのリフロー温度を想定して、260℃から室温の20℃まで自然空気冷却した場合を採り上げた。また、BOCパッケージにおいて、LSIチップの厚さ d_s を0.1mm、0.19mm、0.23mmの3パターン、フィルムA厚さ d_e は0.03mm、0.04mm、0.05mmの3パターンとそれぞれの組み合わせについて合計9パターンの解析を行った。

熱粘弾性数値解析に用いたフィルムA、フィルムBの熱的・機械的性質をTable 1に、またFig. 2, Fig. 3に示す緩和弾性係数のマスタ曲線を次式のProny級数で近似した値を用いた。

$$E_r(t') = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t'}{\tau_i}\right) \tag{7}$$

ここで、 $E_i(t')$ 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。さらにFig. 4, Fig. 5に示す時間－温度移動因子を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 Arrhenius式で近似した値を用いた。

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 熱残留応力分布

Fig. 6に、260℃から20℃に冷却した際に生ずるBOCパッケージの熱残留応力分布の一例を示す。ここでは、各種厚さ寸法の組み合わせの中からLSIチップが0.23mm、フィルムAが0.05mmの場合を採り上げた。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、封止レジン内部では引張の熱残留応力が、LSIチップ内部では圧縮の熱残留応力、フィルムAおよびBTレジン基板内部では引張の熱残留応力が直線的に分布することがわかる。

また、各材料に生ずる熱応力の差である層間熱応力が界面はく離の原因であると考えられる。

4.2 冷却過程の層間熱応力と反り変形挙動

Fig. 1に示すBOCパッケージを、前節と同様にはんだリフロー時の260℃から20℃まで冷却した際の冷却過程にお

Fig. 4 Time-temperature shift factor $a_T(T)$ for bonding film A

Fig. 5 Time-temperature shift factor $a_T(T)$ for bonding film B

Fig. 6 Thermal residual stress distribution of BOC package

Fig. 7 Interfacial thermal stress changes of BOC package by cooling

Fig. 8 Curvature and warp deformation changes of BOC package by cooling

ける層間熱応力、曲率ならびに反り変形挙動をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 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。

$$d = \frac{s}{2} \tan \left\{ \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{2} \kappa \cdot s \right) \right\} \quad (8)$$

ここで、 s は積層体の長さで、 $s=12\text{mm}$ とした場合の反り変形量を示している。

Fig. 7 から、封止レジン/LSI チップ、LSI チップ/フィルム A、およびフィルム A/BT レジン基板の各界面の層間熱応力は冷却時間の経過とともに増加する。ここで、各界面の層間熱応力の発生挙動において、冷却過程に変曲点が存在する。まず、封止レジン/LSI チップ界面の層間熱応力は、冷却過程の初期段階では急激に増加するが、これは冷却に伴い封止レジンの緩和弾性係数の値が大きくなるためである。しかし、封止レジンのガラス転移温度である 160°C 以

下になると、封止レジンの線膨張係数の値が小さくなるため緩やかな増加傾向をとる。次に、LSI チップ/フィルム A 界面では、冷却初期段階で緩やかな増加傾向を示すが、冷却が進みフィルム A の緩和弾性係数が大きくなる 160°C 以下になると急激な増加傾向となり、さらに冷却が進み、フィルム A のガラス転移温度 123°C 以下の温度では緩やかな増加となる。さらに、フィルム A/BT レジン基板界面は、両材料とも粘弾性材料であるため、高温領域ではほとんど層間熱応力は発生していない。しかし、両材料のガラス転移温度付近になるとお互いの緩和弾性係数と線膨張係数、ならびにガラス転移温度が複雑に影響を及ぼし、その結果として層間熱応力は増加する。また、冷却終了時の層間熱応力、すなわち層間熱残留応力が最も大きい界面は LSI チップ/フィルム A 界面であり、この界面が接着はく離の恐れが大きいと考えられる。

一方、Fig. 8 からわかるように曲率、反り変形量は冷却

初期ではBT レジン基板を凸に変形するが、160°C 以下になると、逆に封止レジンに凸に反り変形が生じることになる。このように複雑な反り変形挙動を示す理由として、冷却初期ではBT レジン基板に比べ封止レジンの熱収縮力が強いいため、BT レジン基板を凸に反り変形するが、冷却が進み温度が低くなると逆にBT レジン基板の熱収縮力が大きくなり、封止レジンに凸に反り変形が生じたと考えられる。

4.3 層間熱残留応力と残留反り変形量に及ぼす層構造の影響

前節で、積層体に生ずる層間熱残留応力はLSI チップ/フィルムA 界面が最も大きく、この界面が接着はく離の危険性が大であることを述べた。したがって、ここではLSI チップ/フィルムA 界面の層間熱残留応力、ならびに残留反り変形量の値を、種々の厚さ寸法で熱粘弾性解析した結果について述べる。Fig. 9, Fig. 10 に前述の9 パターンの厚さ寸法の条件で解析したBOC パッケージの層間熱残留応力と残留反り変形量を示す。

これらの図から、LSI チップが厚く、かつフィルムA が薄くなるとLSI チップ/フィルムA 界面に発生する層間熱残留応力、ならびに残留反り変形量は減少する傾向が確認で

Fig. 9 Interfacial thermal residual stress generated in contact area between LSI chip and bonding film

Fig. 10 Residual warp deformation generated in various thickness of bonding film and LSI chip

きる。これは、LSI チップが厚くなることで他の構成材料による熱収縮の影響を受けにくく、さらに、フィルムA が薄くなることで冷却による熱収縮力が他の材料に及ぼす影響が弱まるなど複数の因子が複雑に影響したためだと考えられる。このことから、今回の解析条件の範囲内では、LSI チップの厚さ0.23 mm、フィルムA の厚さ0.03 mm が望ましい層構造であると言える。

4.4 BOC パッケージとμBGA パッケージの比較

ここでは、前節で述べた望ましい層構造であるLSI チップ厚さが0.23 mm、フィルムA 厚さ0.03 mm の組み合わせであるBOC パッケージの強度信頼性を、使用実績のある高信頼μBGA パッケージと比較することによってBOC パッケージの実力を把握する。ここで、BOC パッケージにおいてはLSI チップ/フィルムA 界面が、またμBGA パッケージにおいてはLSI チップ/フィルムB 界面が最も接着はく離の危険性が高い。このことから、両パッケージのLSI チップ/フィルムA およびフィルムB 界面に生ずる層間熱残留応力と残留反り変形量について比較し、それぞれ前述の Fig. 9, Fig. 10 に併記する。

Fig. 9 から、LSI チップの厚さ0.23 mm、フィルムA の厚さ0.03 mm のBOC パッケージでは51.63 MPa であるのに対して、μBGA パッケージでは39.22 MPa となり、BOC パッケージの方が30% 程度大きく危険であることがわかる。

一方、Fig. 10 から、望ましい厚さ寸法で構成されるBOC パッケージに生ずる残留反り変形量は9.68 μm であるのに対して、μBGA パッケージでは15.14 μm となり、BOC パッケージの方が38% 程度低減することがわかる。

以上のことから、今後実用化が期待されるBOC パッケージはμBGA パッケージに比べ、反り変形量の点では有利であるが、はんだリフロー時に生じる層間熱残留応力は大きく、この点の対策が必要と思われる。

4.5 フィルムの緩和弾性係数の影響

前節で、望ましい層構造であるBOC パッケージとμBGA パッケージを比較し、発生する層間熱残留応力はBOC パッケージの方が30% 大きく、強度の面で不安が残ることを述べた。そこで、BOC パッケージに発生する層間熱残留応力の低減を目的として、構成材料の物性、特にBOC パッケージに用いるフィルムA の緩和弾性係数に着目して解析を行った。ここでは、フィルムA の緩和弾性係数の影響を検討するため、Fig. 2 の物性を基準値とし、フィルムA の緩和弾性係数として、Fig. 11 に示す基準のパターン(1.16 GPa) に対して、低温領域で2.0 GPa, 1.5 GPa と高いパターン、ならびに0.5 GPa, 0.2 GPa と低いパターンの合計5 パターンとした。それらの解析結果をFig. 12, Fig. 13 に示す。この際、厚さ寸法としては、前節で明らかにした望ましい層構造であるLSI チップ0.23 mm、フィルムA 0.03 mm の組み合わせとした。

Fig. 12 に示す層間熱残留応力では、基準のパターン

Fig. 11 Patterns of relaxation modulus for bonding film A

Fig. 12 Interfacial thermal residual stress generated in contact area between LSI chip and bonding film

Fig. 13 Residual warp deformation generated in various relaxation modulus of bonding film A

(1.16 GPa)で発生する層間熱残留応力に比べ、緩和弾性係数が大きい2.0 GPaのパターンでは17%程度、1.5 GPaのパターンでは5%程度大きい、逆にフィルムAの緩和弾性係数が0.5 GPaのパターンでは18%程度、0.2 GPaでは24%程度小さい。このことから、フィルムAの緩和弾性係数の値を小さくすることが層間熱残留応力を低減させる上で有利であることがわかる。

すなわち、層間熱残留応力を小さくできる緩和弾性係数が0.2 GPaの値を有するフィルムAを採用したBOCパッケージでは、μBGAパッケージより8%程度層間熱残留応力は小さくなり、μBGAパッケージよりも強度信頼性の点で有利になることが予想される。

一方、Fig. 13に示す残留反り変形量については、基準パターンのフィルムAに比べ緩和弾性係数が大きい2.0 GPaのパターンでは10%程度、1.5 GPaのパターンでは4%程度大きい、基準パターンより小さい0.5 GPaのパターンでは8%程度、0.2 GPaのパターンでは12%程度低減できる。そして、残留反り変形量においても、緩和弾性係数が0.2 GPaのフィルムAを用いたBOCパッケージは、μBGAパッケージより44%程度小さく有利であると考えられる。

以上のことから、BOCパッケージに用いるフィルムAの緩和弾性係数の値を0.2 GPa程度に小さくできれば、層間熱残留応力と残留反り変形量の両者とも低減させることが可能となり、使用実績のあるμBGAパッケージと同等以上の高い信頼性が確保でき、工業的実用化の期待が深まると思われる。

5. 結 言

実用化が注目される新しいBOC (Board on Chip) パッケージを対象に、熱残留応力と反り変形挙動の点から望ましい層構造を熱粘弾性解析で求め、これらの結果をμBGA (Ball Grid Array) パッケージと比較検討し、以下の結論を得た。

- (1) BOCパッケージの各種界面に生ずる層間熱残留応力は、封止レジン/LSIチップ界面およびフィルムA/BTレジン基板界面に比べ、LSIチップ/フィルムA界面が最も大きい。
- (2) 緩和弾性係数が基準の値(1.16 GPa)をもつBOCパッケージの最も望ましい厚さ寸法の組み合わせは、本解析の範囲では、LSIチップ0.23 mm、フィルムA 0.03 mmである。
- (3) (2)の厚さ寸法をもつBOCパッケージをμBGAパッケージと比べると、層間熱残留応力は30%程度大きく、逆に残留反り変形量は38%程度小さい。すなわち、BOCパッケージは強度信頼性の面でμBGAパッケージより劣ると思われる。
- (4) (2)に示すBOCパッケージの層構造で、さらにフィルムAの緩和弾性係数の値を0.2 GPaにすれば、μBGAパッケージよりも層間熱残留応力で8%、残留反り変

形量で44%低減でき、 μ BGAパッケージと同等以上の高い信頼性を持つBOCパッケージの実現が期待できる。

(2003.6.20-受理)

文 献

- 1) N. Taketani, K. Hatano, H. Sugimoto, O. Yoshioka and G. Murakami: "CSP with LOC Technology", ISHM, 1996, Proceeding, p. 594, 1996
- 2) 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
- 3) 村上 元: "熱粘弾性解析によるエリアレイ型LSIパッケージの材料および構造の最適化に関する研究", 学位論文, 2000
- 4) 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
- 5) 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成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, Vol. **53**, No. 493, p. 1813, 1987
- 6) 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. **3**, No. 1, p. 126, 1988
- 7) 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, Vol. **56A**, p. 2471, 1990
- 8) 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
- 9) 中村省三, 長谷部昭雄, 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**, No. 12, 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) 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, 1998
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 中村省三, 串崎義幸, 後藤雅彦, 大橋和彦, 木戸光夫: "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", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **6**, No. 1, p. 80, 2003
- 17) 中村省三, 後藤雅彦, 串崎義幸: "プラスチック積層体の熱残留応力と反り変形挙動に及ぼす物性影響因子の熱粘弾性解析", プラスチック成形加工, Vol. **15**, No. 4, p. 302, 2003
- 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, p. 24, 1983
- 21) 川下研介: "熱伝導論", オーム社, p. 96, 1966
- 22) 中川鶴太郎: "レオロジー", 岩波全書, p. 220, 1983