リフロー加熱による封止樹脂物性変化を考慮した 半導体パッケージ反り粘弾性解析

中 康弘*, 川下 道宏*, 佐々木 康二**, 鈴木 一成***, 堤 安己***, 井上 俊浩***

Visco-Elastic Analysis for Warpage of Electronic Package Considering Change in Material Properties of Mold Resin Caused by Reflow Heating

Yasuhiro NAKA*, Michihiro KAWASHITA*, Koji SASAKI**, Kazunari SUZUKI***,
Yasumi TSUTSUMI***, and Toshihiro INOUE***

* 株式会社日立製作所機械研究所 (〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口832-2)

** 株式会社日立製作所電機システム事業部 (〒319-1221 茨城県日立市大みか町5-2-2)

*** ルネサスエレクトロニクス株式会社生産本部 (〒187-8588 東京都小平市上水本町5-20-1)

*Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd. (832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki 312-0034)

**Electric Systems Division, Hitachi, Ltd. (5-2-2 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1221)

***Production and Technology Unit, Renesas Electronics Corp. (5-20-1 Josuihon-cho, Kodaira-shi, Tokyo 187-8588)

概要 BGA (Ball Grid Array) 半導体パッケージのリフロー加熱時反り挙動を検討した。パッケージを実装基板にリフロー接続する工程での反りによる接続不良発生の懸念があるため、反り挙動を把握することは重要である。検討の結果、反り挙動は加熱履歴によって変化する可能性があることを明らかにした。また、この場合、封止樹脂の線膨張挙動も加熱履歴によって変化するのを明らかにした。この加熱履歴に伴う封止樹脂の線膨張挙動の変化を考慮した反り粘弾性解析を実施したところ、解析結果は実際の反り挙動とよく一致し、前述の加熱に伴う反り挙動の変化は、主に封止樹脂の線膨張挙動の変化に起因した現象であることを明らかにした。

Abstract

We evaluated the warpage behavior of ball grid array (BGA) electronic packages during reflow heating. In the BGA packages, the warpage under reflow heating might disconnect several solder joints. Therefore, the warpage behavior should be investigated in order to make more reliable BGA packages. Our investigation found that the warpage behavior sometimes changes depending on the heating history. Furthermore, we found that the change in the warpage behavior is accompanied by a change in the thermal expansion behavior of the mold resin. Thus, the warpage behavior was analyzed by visco-elastic analysis while considering the change in the thermal expansion of the mold resin. The analysis agreed well with the experimental results. Accordingly, the change in the warpage behavior was found to be mostly caused by the change in the expansion behavior of the mold resin.

Key Words: Warpage, Visco-Elastic Analysis, Mold Resin, Thermal Expansion, Mold Shrinkage, Curing Shrinkage

1. 緒 言

近年、BGA (Ball Grid Array) 半導体パッケージでは、高密度実装のための薄型化と、接続部の多ピン、微細化が進んだ結果、パッケージを実装基板にリフロー加熱接続する際の反りが原因となって接続ピンの一部が接続不良となる懸念が従来以上に増加した。そのため、反りを考慮したパッケージ設計が必須となり、事前に反りを正確に予測する解析技術の重要性が高まった。これを反映し、樹脂材料の粘弾性挙動まで考慮したパッケージ反りの解析が広く行われるようになった。特に、フリップチップ型のPoP (Package on Package) の解析では、基板の配線まで考慮したモデル化を行うことにより、比較的高い精度で反り挙動を再現した事例が複数報告されている^{1)~3)}。

一方、樹脂封止型パッケージの解析としては、封止樹脂の成形工程で発生する硬化収縮を考慮した方法^{4)~7)}が提案されている。しかし、種々のパッケージに対し上記硬化収縮を考慮した解析手法を適用していったところ、封止樹脂の種類によっては十分な再現性が得られない場合があった。調査を進めたところ、過去に受けた加熱履歴によって反り挙動が変化する可能性があるためであることが明らかとなった。その原因として、加熱により封止樹脂の材料特性が変化したことが考えられる。これに関連した報告として、エポキシ樹脂を一定期間高温でさらした場合に、粘弾性特性や線膨張係数が変化する現象が近年指摘されている⁸⁾。そこで、半導体用封止樹脂に対してリフロー加熱履歴を与えた場合の材料特性の変化を評価し、反り挙動への影響を検討した。

2. 加熱履歴による反り挙動変化

2.1 測定方法

Fig. 1に、今回反りを評価したパッケージの概略構造を示す。樹脂製インターポーザ上にチップが搭載され、チップ搭載面側が封止樹脂で保護された構造である。インターポーザは、Fig. 2に断面構造概略を示したように、エポキシ系樹脂の基板材料を絶縁材として4層の配線層を有する。封止樹脂は金型で約180°Cで成形され、金型から取り出された後、さらに5時間、180°Cでの硬化のためのベークが施されている。反りは、このベーク後を起点とし、リフローに相当する加熱、すなわち、260°Cまで約7分で昇温させる履歴を2回与えた場合の挙動を測定した。降温過程は自然冷却とした。2回の加熱は、はんだボール搭載のための加熱と、実装基板への接続のための加熱を想定したものである。4種の封止樹脂で、それぞれFig. 1に示したパッケージを作製して反りを評価したが、そのうち典型的な挙動を示した2種を抽出して以下では主に論じることとする。2種の樹脂は、いずれも一般的な半導体用封止樹脂の1つ、ビフェニル型と呼ばれるエポキシ樹脂をベースとしたものである。一方の樹脂Aは、ハロゲン系難燃剤が添加されており、かつ、シリカ粒子が体積分率で約80%充填されている。もう一方の樹脂Bは、ハロゲン系難燃剤は添加せず、体積分率約90%のシリカ粒子が充填されている。今回詳細には論じない他の2種もビフェニル型エポキシ樹脂で、ハロゲン系難燃剤が添加され、シリカ粒子が一方には70%、もう一方には75%充填されている。

反りの測定には、干渉縞の原理を利用したAkroMetrix社製TherMoire System model PS88+を用いた。Fig. 3に、イ

ンターポーザ側の面内高さ分布の測定結果と反り量算出の例を示す。測定された面内高さ分布(Fig. 3(a))に対し2次曲面を近似(Fig. 3(b))し、その頂点と端部の高低差を反り量とする。符号は、封止樹脂側に凸の反りを正とした。近似曲面を用いた理由は、単純に各点の測定値から高低差を算出すると、各点の測定誤差分が加算され、実際の反り量よりも大きめに見積もるためである。

2.2 測定結果

Fig. 4に、樹脂Aを用いたパッケージの反り挙動測定結果を、Fig. 5に、樹脂Bの場合の反り挙動を示す。反り量の測定はそれぞれパッケージ3個ずつに対して行い、平均値としてFig. 4, 5に示した。測定ばらつきは約 $\pm 5\mu\text{m}$ であった。Fig. 4に示したように、樹脂Aを用いたパッケージは、1回目の加熱では、昇温と降温過程で不可逆な挙動を示し、加熱後の室温での反りが変化した。2回目の加熱では、加熱後の反りの変化は見られなかったが、昇温と降温とで異なる挙動を示し、ヒステリシスループを描いた。一方、樹脂Bの場合は、Fig. 5のように、1回目加熱での不可逆挙動は樹脂Aの場合よりも小さく、2回目加熱でのヒ

Fig. 1 Diagram of package specimen for evaluation of warpage

Fig. 2 Diagram of layer structure of interposer

(a) Unprocessed data

(b) Approximated quadratic surface

Fig. 3 Example of measured warpage

Fig. 4 Warpage behavior of package with mold resin A during reflow heating

Fig. 5 Warpage behavior of package with mold resin B during reflow heating

ステリシス挙動はほとんど現れなかった。なお、両パッケージとも、さらに3回、4回と加熱を繰り返した場合の反り挙動も測定したが、ほぼ2回目加熱時と同じ挙動を繰り返した。なお、今回評価した他の2種の封止樹脂では、シリカ粒子充填率75%の方が樹脂Aと近い挙動を示し、もう一方の充填率70%の樹脂は、樹脂Bと近い挙動を示した。

上記のように加熱履歴により反り挙動が変化することとして、当初は、封止樹脂成形工程でパッケージ内部に発生した残留応力が、リフロー加熱により解放されるためと考えた。しかし、残留応力を考慮した解析を実施して検討したところ、封止樹脂のガラス転移温度は通常180°C以下であるため、180°Cでの成形、バーク工程ですでに残留応力が解放され⁹⁾、残留応力の影響でFig. 4のような不可逆挙動が生じることはないことが明らかとなった。そこで、上記のような反り挙動は、封止樹脂の材料特性の加熱による変化で引き起こされると考え、封止樹脂材料特性の加熱に伴う変化を評価した。

3. 封止樹脂物性の加熱による変化

3.1 実験方法

樹脂Aと樹脂Bについて、樹脂単体の材料特性を評価した。試験片はパッケージ作製時と同様の加熱プロセスで作製し、180°Cでのバーク処理まで実施した試験片と、バーク後、さらに、リフロー炉で260°Cまでの加熱履歴を1回与えた試験片を用意し、それぞれの粘弾性特性と線膨張特性を測定して比較した。

粘弾性特性は、オリエンテック社製RHEOVIBRON DDV-25FPを用いて測定した。試験片は、50×6×1 mmの寸法で作製した。この場合、引張りモードでの測定では、装置の上限荷重を超えないようにするためには微小な変位しか与えられず、誤差が大きくなる懸念があったため、支点間距離30 mm、両端自由の3点曲げモードで、変位振幅200 μmを与えて測定した。温度は-100から260°Cまで2°C/minの速度で変化させ、上記振幅のサイン波変位を周波数0.1, 1, 10 Hzで与えた場合の貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' 、損失正接 $\tan \delta$ を測定した。

線膨張特性は、セイコーインスツル社製TMA/SS6000を用いて測定した。試験片寸法は20×4×4 mmとし、温度を-60°Cから260°Cまで4°C/minの速度（降温は自然冷却）で変化させた場合の膨張挙動を、ガラス製プローブを一定荷重50 mNで接触させて測定した。なお、試験片が薄い場合、プローブと試験片との間で片当たりを生じやすく、その場合、特に高温でプローブとの接触部で局所変形を生じるため正確な測定ができない。経験的には、少なくとも3 mm以上の厚さが必要であり、今回は上記の通り厚さ4 mmとした。

3.2 実験結果

樹脂Aの粘弾性測定結果をFig. 6に、樹脂Bの結果をFig. 7にそれぞれ示す。後述する粘弾性解析で用いる貯蔵弾性率の、周波数0.1 Hzと10 Hzのときの測定結果をそれぞれ示した。なお、図中に、 $\tan \delta$ がピークに達した温度を T_g として示した。樹脂A、Bともに、リフロー加熱履歴の有無で貯蔵弾性率の特性の変化はほとんど認められなかった。リフロー加熱では、200°C以上の温度でさらされる時間は1分程度だが、その加熱時間では、両樹脂とも粘弾性特性の変化はほとんどないことが明らかとなった。

次に、温度変化に伴う両樹脂の線膨張挙動測定結果をそれぞれFig. 8, 9に示す。いずれも各測定開始点(-60°C)での伸び率をゼロとして表示した。樹脂Aの場合、高温にさらされる時間が短時間でも、リフロー加熱の有無で差異が認められた。樹脂Aのリフロー加熱処理をしていない試験片では、昇温と降温過程で不可逆な挙動を示し、加熱後の寸法が加熱前から変化した。リフロー加熱処理をした試験片では加熱前後の寸法変化はなかったが、昇温、降温の挙動はヒステリシスループを描いた。一方、樹脂Bは、リフ

(a) 0.1 Hz

(a) 0.1 Hz

(b) 10 Hz

(b) 10 Hz

Fig. 6 Storage modulus of resin A

Fig. 7 Storage modulus of resin B

Fig. 8 Thermal expansion behavior of resin A

Fig. 9 Thermal expansion behavior of resin B

ロー加熱処理なしの試験片の不可逆挙動は樹脂Aの場合よりも小さく、リフロー加熱処理をした試験片のヒステリシス挙動はほとんど認められなかった。さらに、リフロー加熱を2回、3回与えた試験片の挙動も測定したが、1回加熱

した試験片とほぼ同じ挙動を示した。これらの挙動は、Fig. 4, 5に示したそれぞれの反り挙動と対応しており、この線膨張挙動が、加熱履歴に伴う反り挙動の変化の原因と考えられる。そこで、以下のようにFig. 8, 9の線膨張挙動を反

映させた反り解析を実施し、実測の反り挙動と一致するかを確認することとした。

なお、以上のようなリフロー前後で線膨張挙動の変化が発生する原因としては、1つは、ピーク温度よりも高い温度にさらされたことにより硬化反応がさらに進展し、材料特性が変化したことが考えられる。しかし、樹脂Aの場合のように、リフロー加熱を複数回与えても同じヒステリシス挙動を描くメカニズムは不明である。また、前述したように、今回評価した4種の樹脂のうち、もう1種で樹脂Aの場合と同様なヒステリシス挙動が見られたが、このような挙動の発生と材料組成との相関も見いだすことができなかった。

4. 封止樹脂物性変化を考慮した反り粘弾性解析

4.1 解析方法

4.1.1 封止樹脂の特性

4.1.1.1 緩和弾性率

解析モデルをFig. 10に示す。対称性を考慮した全体構造の1/4部分のモデルとし、対称面の法線方向変位を拘束した。要素は6面体2次要素とし、汎用非線形有限要素解析コードABAQUSを用い解析した。封止樹脂の成形温度は180℃とし、室温(20℃)までの冷却時間は30秒とした。また、リフロー加熱では、最高到達温度を260℃とし、昇温・降温時間はともに7分として解析した。

測定した封止樹脂の貯蔵弾性率から、Fig. 11に示す緩和弾性率 E_r の挙動（マスターカーブ）と、Fig. 12に示す時間-温度移動因子 a_{T_0} を求め¹⁰⁾、解析に用いた。 E_r は、材料に一定ひずみを与えた場合に発生する応力の時間経過に伴う緩和現象を表し、 a_{T_0} は、各温度ごとの E_r の平行移動量、すなわち、 E_r の温度依存性を表す。 E_r の曲線は、Fig. 6と7のように測定した貯蔵弾性率の値を、横軸に測定周波数(0.1, 1, 10 Hz)の逆数をとって各温度ごとにプロットし、それらを適宜横軸方向に平行移動してつなぎ合わせることで求めた。 a_{T_0} は、このときの平行移動量と温度との関係をプロットして取得した。なお、Fig. 11には、 a_{T_0} の変曲点の温度 T_0 （基準温度）での E_r の特性を示した。貯蔵弾性率はリフロー加熱有無で変化しなかったため、 E_r 、 a_{T_0} はリフロー加熱後の特性のみを用いた。

4.1.1.2 硬化収縮と線膨張特性

封止樹脂は、180℃での成形、ベークの工程で、硬化収縮と呼ばれる収縮をする。この硬化収縮に、さらに180℃から室温までの冷却工程で発生する熱収縮を加えた収縮率を、一般に成形収縮率と呼んでいる⁴⁾。この硬化収縮を模擬するため、解析上の初期温度を、封止樹脂のみ実際の成形温度180℃より仮想的に高く設定した⁹⁾。これにより、解析第1ステップ目でその温度差に相当した次式の初期ひずみ ε_c が封止樹脂に発生する。

$$\varepsilon_c = \alpha_{Ti}(T_{Ti} - T_i) \quad (1)$$

Fig. 10 Analysis model

Fig. 11 Relaxation modulus of mold resin at T_0

Fig. 12 Time-temperature shift factors of mold resin

ここで、 T_{Ti} は封止樹脂の仮想的初期温度、 T_i は真の初期温度(180℃)、 α_{Ti} は T_i における封止樹脂の線膨張係数である。 T_{Ti} は、解析上での樹脂単体の180℃から20℃までの収縮率が、実際の封止樹脂の成形収縮率と一致するように設定した。

本解析では、1回目と2回目のリフロー加熱の解析は、それぞれ個別に解析した。すなわち、個別に上記の180℃から20℃までの成形工程の解析をした後、解析を止めずに260℃までのリフロー昇温過程を解析し、さらにその後、

Table 1. Experimental mold shrinkage factor of mold resin

Mold resin	Mold shrinkage factor (%)	
	After cure	After reflow
A	0.26	0.32
B	0.30	0.29

解析コードのリスタート機能を活用して降温過程を解析した。ただし、Fig. 8で示した樹脂Aの場合のように、1回目のリフロー加熱を経てさらに収縮が発生する場合もあるため、硬化収縮量は1回目と2回目の加熱の解析でそれぞれ異なる値を定義した。Table 1に、樹脂A、Bそれぞれの成形収縮率として、180°Cバーク後の樹脂単体実測寸法から算出した値と、リフロー加熱を1回与えた後の寸法から算出した値の両方を示した。樹脂Bは両者の値にほとんど差異がないことが確認できたが、樹脂Aはリフロー加熱後収縮率が増加した。そこで、Table 1を参照し、1回目、2回目リフローそれぞれの解析での硬化収縮量を決定した。

また、封止樹脂の線膨張特性は、Fig. 8, 9で示した特性を参照した。1回目リフローの解析ではリフロー加熱処理なしの試験片で測定した特性を用い、2回目の解析ではリフロー加熱した試験片での特性を用いた。昇温過程の解析には昇温時の特性を用い、降温過程では降温時の特性を用いた。

なお、封止樹脂成形工程の前に、チップをインターポーザにダイボンド材を介して150°Cに加熱して接続する工程が存在するが、180°Cの解析起点ではチップとインターポーザ間の応力はゼロと仮定した。

4.1.2 インターポーザの材料特性

インターポーザは、Fig. 2で示した9層構造を9層の板の積層体としてモデル化し、各層は単一材料と仮定して、それぞれに対して材料特性を定義した。各層の厚さ方向の要素分割は1分割とした。樹脂とガラス繊維の複合材である基板材料の特性は次のようにして決定した。前述したように、線膨張特性の測定をする場合には少なくとも厚さ3mm以上の試験片を用いる必要がある。しかし、基板材料は、ガラス繊維で縦横に編まれた薄いガラスクロスにレジンを塗布した後ローラーで成形する製法で作製されるため、厚い試験片作製は困難である。そこで、ベースレジンのみの厚板試験片を作製し、その弾性率と線膨張特性を測定し、基板材料中のガラスの体積分率を考慮した複合材料の複合則^{11),12)}により基板材料としての特性を推定する方法とした。Fig. 13(a)のように、レジン中のガラス繊維が一方向に並んでいる場合の、繊維と平行方向の弾性率 E_p と線膨張係数 α_p は次式で表される。

$$E_p = E_G \rho + E_R(1 - \rho) \quad (2)$$

Fig. 13 Material properties of each directions of glass fibers in substrate

$$\alpha_p = \frac{E_G \alpha_G \rho + E_R \alpha_R (1 - \rho)}{E_G \rho + E_R (1 - \rho)} \quad (3)$$

ここで、 E_G はガラスの弾性率(73 GPa)、 α_G はガラスの線膨張率(5 ppm/K)で、温度によらず一定とした。 E_R はベースレジンの弾性率、 α_R はベースレジンの線膨張率で、3.1節で述べた方法で粘弾性特性と線膨張率の温度依存特性を測定した。また、 ρ はガラスの体積分率(36%)である。一方、ガラス繊維と垂直方向(Fig. 13(b))の物性は次式で表される。

$$E_v = \frac{E_G E_R}{E_G (1 - \rho) + E_R \rho} \quad (4)$$

$$\alpha_v = \alpha_G \rho + \alpha_R (1 - \rho) \quad (5)$$

実際の基板材料は、ガラス繊維が縦横に編み込まれた構造であるため、その物性は次式で近似できる。

$$E_s = (E_p + E_v) \times 0.5 \quad (6)$$

$$\alpha_s = \frac{E_p \alpha_p + E_v \alpha_v}{E_p + E_v} \quad (7)$$

以上のようにして推定した基板材料の粘弾性特性を、ベースレジンの実測値とともにFig. 14に示す。また、Fig. 15に、基板材料の線膨張特性の推定値とベースレジンの実測値を示した。なお、Fig. 15にはリフロー加熱処理をしなかった試験片での測定結果のみ示したが、本基板材料ではリフロー加熱有無による特性変化はほとんどなかった。

ソルダレジストの弾性率としては、Fig. 14に示す粘弾性特性の実測値を用いた。また、ソルダレジストの線膨張係数は材料メーカー公称値、すなわち、100°C以下では60 ppm/K、100°C以上では130 ppm/Kを用いた。

配線層は、配線密度 ρ_{Cu} を考慮した等価な物性を与え、弾性材料として模擬した。等価物性は、式(2)、(3)で、ガラスの物性を銅の値(E : 110 GPa、 α : 17 ppm/K)に、ベースレジンをソルダレジストまたは基板材料の値にそれぞれ置き換えることにより算出することができる。

(a) Relaxation modulus

(b) Time-temperature shift factors

Fig. 14 Relaxation properties of modulus of substrate and solder resist

Fig. 15 Thermal expansion behavior of substrate

チップ、ダイボンド材は弾性を仮定し、Table 2に示した値を参照した。

4.2 解析結果

Fig. 16に、1回目リフロー時の反り挙動解析結果を、Fig.

Table 2. Mechanical properties of elastic materials used in analysis

Component	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion (ppm/K)
Chip	190	0.07	3
Die bond	0.5	0.3	120

(a) Resin A

(b) Resin B

Fig. 16 Comparison of analysis with experimental results of warpage during first reflow heating

17には2回目リフロー時の解析結果をそれぞれ実測データと比較して示した。解析結果は、いずれも実測した反り挙動と比較的よく一致し、樹脂Aの場合の1回目リフロー時の不可逆挙動と、2回目リフロー時のヒステリシス挙動も再現できた。また、樹脂Bの場合は、樹脂Aの場合よりも1回目加熱時の不可逆挙動が小さく、2回目加熱時のヒステリシスがほとんど現れない点が再現できた。反り量の絶対値として、樹脂Bの方が実測結果との差異が特に低温領域で大きいのは、線膨張特性の測定誤差に起因して結果的に生じたものと考えられる。しかし、温度変化に対する反り変化率での実測との差異は樹脂A、Bとも同程

Fig. 17 Comparison of analysis with experimental results of warpage during second reflow heating

度であるため、両者の線膨張特性測定誤差は同程度と推定する。

以上のように、加熱履歴に伴う封止樹脂の線膨張挙動の変化を考慮した解析を行うことにより、加熱に伴う反り挙動の変化を再現することが確認できた。このことから、少なくとも今回評価した封止樹脂については、Fig. 4に示した加熱に伴う反り挙動の変化が、主に封止樹脂の線膨張特性の変化に起因した現象であることが明らかとなった。

5. 結 言

樹脂封止型半導体パッケージのリフロー加熱時の反り挙動で、過去の加熱履歴によって反り挙動が変化する場合があります。昇温と降温過程で反り挙動が異なる場合があることを明らかにした。一方、封止樹脂の線膨張挙動を評価したところ、加熱履歴によって上記反り挙動の変化に対応した線膨張挙動の変化を示すことがわかった。この加熱履歴に伴う封止樹脂の線膨張挙動の変化を考慮して反り粘弾性解析

を実施したところ、解析結果は実際の反り挙動とよく一致することが確認できた。以上の検討から、前述の加熱に伴う反り挙動の変化は、主に封止樹脂の線膨張挙動の変化に起因した現象であることを明らかにした。

(2010.6.25-受理)

文 献

- 1) 平田一郎, 橋口良行: “FEM粘弾性解析によるLSI-パッケージの反り変形の研究,” 第11回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(Mate 2005)論文集, pp. 329-332, 2005
- 2) 伊東伸孝, 夏秋昌典, 青木広志, 高島 晃, 水谷大輔, 倉科 守: “PoP構造半導体パッケージ反り予測の高精度化,” 第17回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES2007)論文集, pp. 227-230, 2007
- 3) 松田和敏, 池田 徹, 宮崎則幸: “多層基板の熱変形挙動の予測およびそのパッケージの反り解析への適用,” 日本機械学会論文集, Vol. **76**, No. 762, A, pp. 127-135, 2010
- 4) 三宅 清: “BGAパッケージの硬化収縮を考慮した反り熱粘弾性解析,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **7**, No. 1, pp. 54-61, 2004
- 5) G. Hu, J.-E. Luan, and S. Chew: “Characterization of Chemical Cure Shrinkage of Epoxy Molding Compound with Application to Warpage Analysis,” ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. **131**, pp. 011010.1-011010.6, 2009
- 6) S.-Y. Teng and S.-J. Hwang: “Simulations of Process-Induced Warpage during IC Encapsulation Process,” ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. **129**, pp. 307-315, 2007
- 7) 平田一郎: “樹脂粘弾性と硬化度との連成による基板反り解析,” 第15回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(Mate 2009)論文集, pp. 119-122, 2009
- 8) 中村省三, 田中孝明, 磯部宏倫: “熱劣化したエポキシ樹脂と鋼材からなる積層体の熱負荷による熱粘弾性反り変形解析,” 日本材料学会論文集, Vol. **58**, No. 9, pp. 753-758, 2009
- 9) 中 康弘, 矢口昭弘, 佐々木康二, 鈴木一成, 堤 安己, 中村 篤: “半導体パッケージの反り挙動に及ぼす残留応力の影響,” 第16回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES2006)論文集, pp. 279-282, 2006
- 10) 佐々木康二, 齊藤直人, 天城滋夫, 原口芳広: “樹脂モールド時残留応力の数値解析 (第1報, 硬化後冷却時に発生する応力と変形の粘弾性解析),” 日本機械学会論文集, Vol. **64**, No. 622, A, pp. 1660-1666, 1998
- 11) 福田 博, 邊 吾一: “複合材料の力学序説,” 古今書院, p. 156, 206, 1997
- 12) 日本複合材料学会編: “複合材料ハンドブック,” 日刊工業新聞社, p. 16, 135, 1989