

電子部品における反り熱粘弾性解析技術

Thermo-Viscoelastic Warpage Analysis for Electronic Components of Semiconductors

三宅 清* 垣野 学*
Kiyoshi Miyake Manabu Kakino

高密度半導体パッケージや実装基板などの電子部品においては、微小な応力や反りが機械・電氣的信頼性に与える影響が無視できないことから、高精度な応力解析技術が要望されている。そこで、汎用有限要素ソフトを利用し、電子部品や基板の反りを高精度に予測する熱粘弾性解析技術を開発した。

As the effects of very small stresses or warpage on mechanical and electrical reliability cannot be disregarded, high precision analytical technology is desired for high-density semiconductor packages. Therefore, a thermo-viscoelastic analytical technology has been developed for predicting the warpage of electronic components and substrates at high accuracy using conventional finite element method software.

1. 電子部品の残留応力・反り

高密度化された電子部品においては、微小な応力が特性信頼性に影響することから、高精度な応力解析技術が求められている。半導体パッケージは、通常175 で成型され常温に冷却され、実装時にはリフローはんだ炉の250 の熱負荷を受ける。電子部品も樹脂複合材料であることから、高温負荷時には通常考えられる熱応力以外に、応力緩和（粘弾性）や水分濃度変化による膨潤応力も考慮する必要がある。本文では熱粘弾性解析法の理論と解析例を概説する。

2. 粘弾性構成式

汎用有限要素法ソフト（ANSYS[®]やMSC.Marc[®]など）^(注)を用いて粘弾性解析を行う場合、一般に用いられる弾性率の代わりに、弾性率を時間 t の関数として緩和弾性率 $G(t)$ で与える必要がある。温度一定とした場合、応力と歪（ひずみ） の関係を表す粘弾性構成式は、 $G(t)$ を用いて（1）式で表現できる¹⁾。

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots (1)$$

一方、時間と温度が同時に変化する熱粘弾性構成式は、緩和弾性率 $G(e, T_0)$ を用いて（2）式で表現できる¹⁾。

$$\sigma(t) = \int_0^t G(e-\tau, T_0) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 e は（3）式で示される擬似時間、 T_0 は後述の時間 - 温度換算シフト関数 a_T で定義される基準温度である。

$$e = \int \frac{dt}{a_T [T(x, t)]} \dots\dots\dots (3)$$

3. 粘弾性定数の算出方法

3.1 粘弾性試験

緩和弾性率 $G(t)$ を得るため、静的応力緩和試験、動的周波数分散試験、動的温度分散試験のいずれかが行われている。静的応力緩和試験では、各温度の応力緩和カーブを基準温度 T_0 のカーブに重ね合わせて、緩和弾性率のマスターカーブを得ている。このカーブの時間 - 温度シフト量 $a_T (= t_T / t_{T_0})$ は、WLF (Williams-Landel-Ferry) 則、またはアレニウス則で表現される¹⁾。動的粘弾性試験は静的粘弾性試験に比べて、非常に短時間で簡便に行えるメリットがある。周波数分散試験では、各温度の周波数分散カーブを T_0 のカーブに重ね合わせて、同様にマスターカーブを得ている。温度分散試験では、一つの温度分散カーブをWLFシフト則で T_0 の周波数分散マスターカーブに変換できるので、試験コストは最少であるがWLFシフト則の適用範囲に注意が必要である。

3.2 粘弾性定数の算出法

有限要素解析の粘弾性モデルには、バネとダッシュポットを直列接合したMaxwellモデルをさらに k 個並列接合した一般化Maxwellモデルが用いられている。一般化Maxwellモデルの応力 - 歪の関係方程式は、（4）式で表現できる¹⁾。

$$\frac{d\varepsilon_k}{dt} = \frac{1}{G_k} \frac{d\sigma_k}{dt} + \frac{\sigma_k}{\eta_k} \quad \sigma = \sum \sigma_k \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 G_k 、 η_k は一般化Maxwellモデルの k 番目要素のせん断緩和弾性率と粘度、 $\tau_k (= \eta_k / G_k)$ は緩和時間である。この方程式を解くと（5）式が得られる。

$$\sigma_k = \varepsilon_0 G_k \exp(-t/\tau_k) \dots\dots\dots (5)$$

* (株) SiM24
SiM24 Co., Ltd.

(注) ANSYSは米国ANSYS社の登録商標
MSC.Marcは米国MSC Softwareの登録商標

一般化Maxwellモデルの緩和弾性率 $G(t)$ は、(5) 式を (4) 式に代入して、(6) 式に示すようなプロニー級数で表現できる。

$$G(t) = G_0 + \sum_k G_k \exp(-t/\tau_k) \dots\dots\dots (6)$$

したがって、前述のように静的応力緩和試験によって緩和弾性率のマスターカーブ $G(t)$ が得られると、最小二乗法などのカーブフィット法を適用することで、緩和関数 $G(t)$ を表現する粘弾性定数 G_k, τ_k を算出することができる。ここで、マスターカーブから τ_k の範囲がわかるので、約 1 桁ほどの間隔で 10 ~ 15 個ほどの適切な τ_k を決めている。

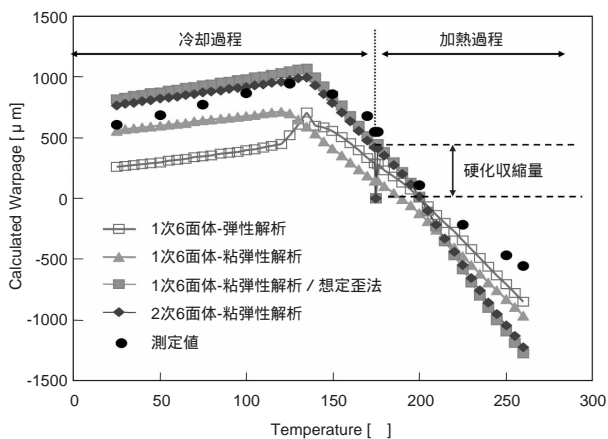
周波数分散試験法、あるいは温度分散試験法でも、周波数分散マスターカーブから (7) 式のカーブフィットをするか、 $G(t) = G'(\omega), t = 1/\omega$ として (6) 式のカーブフィットをすることで、粘弾性定数の算出が可能である。

$$G'(\omega) = G_\infty + \sum_k G_k \frac{\omega^2 \tau_k^2}{1 + \omega^2 \tau_k^2} \dots\dots\dots (7)$$

4. 熱粘弾性解析事例

4.1 半導体パッケージの反り解析

半導体パッケージでは、構造面での設計変更はほとんどなく、封止樹脂 (EMC : Epoxy Molding Compound) 物性の設計によって反りを抑制する場合が多い^{2), 3)}。BGA (Ball Grid Array) パッケージの成型温度を 175℃ とし、反りと温度の関係を解析した結果³⁾ を、第1図に示す。まず、成型時の硬化反応収縮を有限要素解析に導入することで、反りの予測精度が向上することがわかる。成型冷却過程の反りについては弾性解析よりも粘弾性解析の方が測定値に近い結果になっており、成型温度からリフロー温度ま



第1図 BGAパッケージの反りと温度の関係
Fig. 1 Relationship between warpage and temperature of BGA

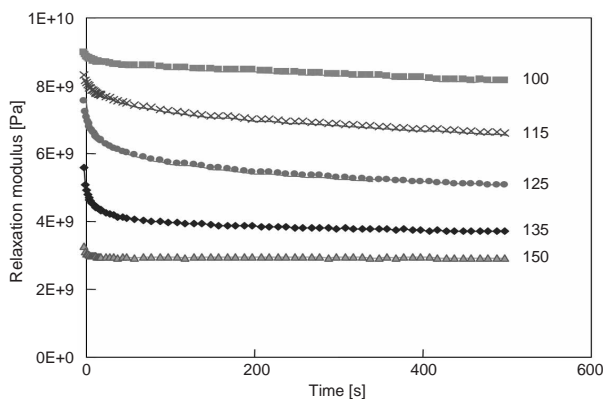
での加熱過程については逆の結果になっている。本解析では冷却と加熱過程の計算で同じ粘弾性定数を用いたが、現実にはキュア工程によって樹脂硬化が進んでいる。したがって、加熱過程では硬化の進んだサンプルの粘弾性定数を用いたとすると、弾性解析に近い結果になると考えられる。これに関連して、中⁴⁾、平田⁵⁾らは、成型温度を変えるなど樹脂の硬化度の違いによって応力緩和量が異なり、反り挙動が変化する結果を報告している。

4.2 リフロー過程のパッケージと基板の反り解析

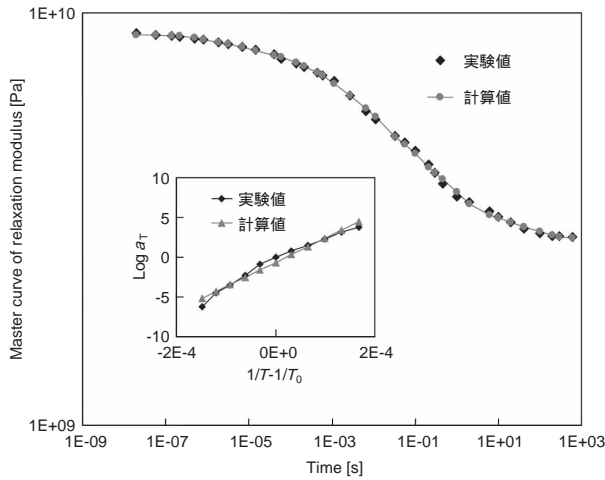
リフロー実装過程においては、反りとはんだ接合部の信頼性が課題となっており、基板の粘弾性と銅配線パターンを考慮した解析⁶⁾、多層ばり理論に粘弾性を連成させた解析⁷⁾、アンダーフィルを粘弾性体としたフリップチップの解析⁸⁾など種々報告されている。

筆者らが開発した粘弾性解析技術と解析事例を以下に示す。第2図(a)に、文献6)より引用した基板の応力緩和実験結果を示す。各温度の応力緩和カーブをアレニウス時間 - 温度シフト則を用いて、基準温度 125℃ のカーブに重ね合わせた結果を、第2図(b)に示す。このマスターカーブについて、(6) 式のカーブフィットを行った緩和弾性率 $G(t)$ の理論計算値も同図中に示した。上記で求めた、粘弾性定数を用いて、各温度の応力緩和を有限要素解析 (FEM : Finite Element Method) した結果を、第2図(c)に示した。100℃ ~ 150℃ の粘弾性挙動は、第2図(a)の実験値とおおむね一致することがわかる。なお、30℃, 250℃ の計算結果も示すが、(6) 式より、それぞれ弾性と粘性挙動を示すことが理解できる。

次に、上記と同じ粘弾性定数を用いたモデルパッケージ QFP (Quad Flat Package) のリフロー実装後の反り解析結果を、第3図に示した。前述のように、樹脂物性が弾性が粘弾性かで応力緩和量の差異が生じて、反り計算値

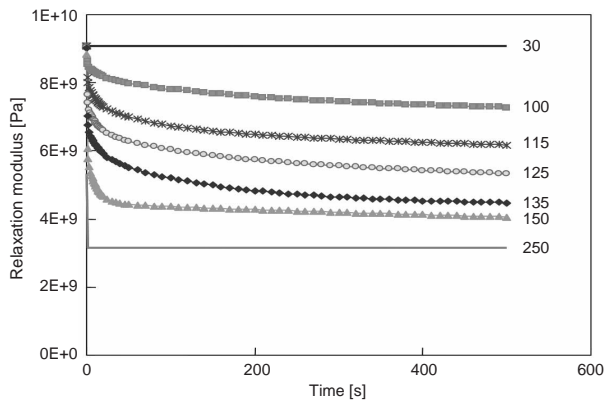


第2図 (a) 基板の応力緩和実験値
Fig. 2 (a) Measured relaxation modulus of substrate



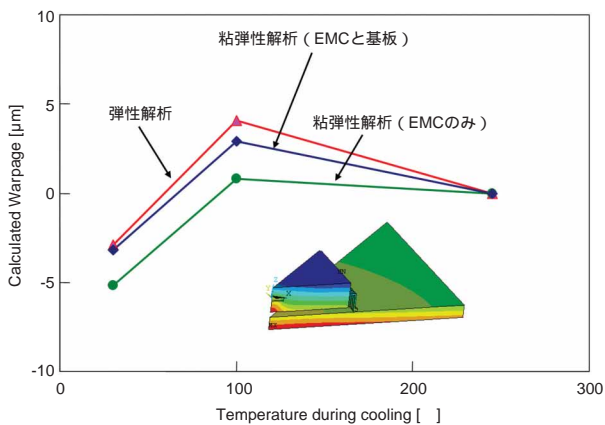
第2図 (b) 基板の応力緩和マスターカーブ実験値と理論計算値

Fig. 2 (b) Measured and theoretical calculated master curves of relaxation modulus of substrate



第2図 (c) 基板の応力緩和FEM計算値

Fig. 2 (c) FEM calculated relaxation modulus of substrate



第3図 QFPパッケージのリフロー実装後の反りFEM計算値

Fig. 3 Warpage change during cooling process after reflow soldering of QFP

が異なっている。モデルパッケージのため以降の検討はしていないが、本来は反り測定によって解析技術の妥当性をさらに検証し、構造設計解析へと進む手順になる。

5. 今後の展望

熱粘弾性解析では、熱負荷で発生する応力緩和量を計算することで、電子部品の応力や反りの予測精度を向上できることを示した。そのためには、実際の硬化状態に応じたサンプルの適切な粘弾性定数を得ること、また最小限の実験との比較検証が重要である。最近、半導体パッケージや液晶パネルの膨潤応力解析技術も報告されており⁹⁾、熱応力と合わせて評価することで高精度な応力・反り解析技術がさらに進むと思われる。

参考文献

- 1) MSC.Marcマニュアル：A編 ver.2003,pp.7.100-7.108 (2003).
- 2) Kiyoshi Miyake, et. al. : Viscoelastic warpage analysis of surface mount packages. ASME Journal Electronic Packaging 123,pp.101-104 (2001).
- 3) 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 7, No.1, pp.54-61 (2004).
- 4) 中康弘 他：半導体の反り挙動に及ぼす残留応力の影響 MES2006予稿集 pp.279-282 (2006).
- 5) 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 Mate2009予稿集 pp.119-122 (2009) .
- 6) 伊東伸孝 他：プリント配線板の反り解析技術の研究 Mate2006予稿集 pp.461-466 (2006).
- 7) 平田一郎：パッケージの粘弾性反り計算ツール MES2007予稿集 pp.223-226 (2007) .
- 8) Hiroyuki Tanaka : Plastic material solutions for advanced thin packages. International conference on solid state devices and materials, Tsukuba, pp.48-49 (2008).
- 9) 水谷友徳 他：LCDパネルにおける水分拡散と膨潤応力による反り解析 エレクトロニクス実装学会誌 12, pp.144-153 (2009).

会社紹介

株式会社 SiM24

設立：2005年 社長：大木 滋

事業内容：電子機器一般に関する受託シミュレーションサービス、CAEに関するソリューション提供
 ビジョン：高品質、低コスト、短納期のシミュレーション技術の提供でものづくりの革新に貢献する。

URL：http://www.sim24.co.jp/