広島工業大学紀要研究編
第41巻（2007）pp. 13-18
論　　文

エリアアレイ型LSIパッケージのはんだボールに生ずる残留熱応力と反り変形の有限要素解析

中　村　省　三*　・川　端　拓　也**
岩　本　隆　男***・田　中　孝　明***

（平成18年10月30日受理）

Finite Element Analysis of Residual Thermal Stress and Warp Deformation Generated in Solder Ball of Area Array Type LSI Package

Shozo NAKAMURA, Takuya KAWABATA,
Takao IWAMOTO and Takaaki TANAKA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

The area array type LSI package such as BGA-CSP is an electronic device that mount LSI chip directly on the mother board by the solder balls. This BGA-CSP has some technical problems to cause the solder balls break in a manufacturing process and various heat loads in the use environment. The residual thermal stress in the solder balls and warp deformation in the board of BGA-CSP built-in elastomer were analyzed by Finite Element Method. The optimum thickness, thermal expansion coefficient and Young's modulus of the elastomer were clarified to decrease the residual thermal stress and the warp deformation in BGA-CSP, and the optimum design manual of elastomer was obtained.

Key Words: thermal stress, warp deformation, FEM analysis, Young's modulus, thermal expansion coefficient, elastomer, solder ball, BGA–CSP

1. 緒　　言

近年，電子機器は軽薄短小・多機能・高性能化などの技術発展がめざましく，これに伴ない，半導体パッケージなどの電子部品も小型・薄型化が要求され，かつ強度信頼性の確保や反り変形の防止が必要不可欠である[1)~3)]。

半導体パッケージは，現在エリアアレイ型のBGA-CSP（Ball Grid Array-Chip Scale Package）が主流であり，これらはLSIチップやはんだボールなどの金属材料とプリント配線基板や接着剤などの高分子材料の熱的・機械的性質の異なる異種材料で構成されている。そのため，製造過程や電子機器の使用環境における様々な熱負荷により，高分子材料は収縮と膨張の繰返し熱荷重によって，はんだボール部に亀裂が生じたり，界面層間剥離などの不良が生ずることがある。これらの不良を低減・防止するために応力緩衝材が用いられている。この応力緩衝材には，半導体パッケージとマザーボードであるプリント配線基板を接合するはんだボール層に充填するアンダーフィルと称する樹脂や，他方では，LSIと基板の層間にエラストマと称する軟質材料を充填する方法などが用いられている[4)~21)]。

* 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
*** 広島工業大学工学部知能機械工学科学部生

本報告では，このような観点から，図１に示すような応力緩衝用のエラストマを内蔵するエリアアレイ型 BGA-CSP を対象として，主にはんだボール部の破壊を防止する観点から有限要素法を用いて熱応力解析を行った。具体的には，エラストマの厚さと物性値（線膨張係数，緩和弾性係数）に着目し，冷却過程におけるはんだボール内部に生ずる主応力とせん断応力および BGA-CSP の反り変形量ついて検討した。

２．はんだボールの熱応力と反り変形の数値解析

2.1　解析モデルと構成材料の熱的・機械的性質

今回解析に用いた BGA-CSP は，図１に示すように LSI チップと BT 基板の間に応力緩衝材としてエラストマを充填し，はんだボールを介してマザーボードである FR-4 基板に実装する構造である。構成材料は，図１に示すように，LSI チップ，エラストマ，BT 基板，はんだボールおよび FR-4 基板とした。BGA-CSP は全体長さ 20 ㎜，LSI チップ厚さ 0.2 ㎜，BT 基板厚さ 0.2 ㎜，はんだボール層厚さ 0.3 ㎜および FR-4 基板厚さ 1.0 ㎜とし，エラストマの厚さ h を種々変化させた。

BGA-CSP は図１に示すように複数のはんだボールを有しているが，ここでは簡単化のため中央と端部にはんだボール有する構造とした。解析モデルは，BGA-CSP の形状対称性を考慮して右半分について簡易モデル化して有限要素解析を行った。その解析モデルを図２に，また構成材料の熱的・機械的性質を表１に示す。

2.2　解析方法

有限要素解析には，汎用非線形構造解析ソフト MARC2005 を用いた。解析条件は４節点四角形要素，２次元平面応力状態とした。拘束条件は図２に示すように左端最下部を完全固定，左側面は X・Z 軸方向を固定とし Y 軸方向は自由および底面は Y・Z 軸方向を固定とし，X 軸方向は自由とした。

温度条件は，453 K から 293 K への冷却とし，その際の熱伝達率は空気冷却を想定して予備実験の結果から 46W/㎡ K とした。要素分割は総分割数を 9730 分割とし，はんだボール部に着目するため１要素 10 μ m × 6.5 μ m とし，はんだボール部の要素分割を 1200 分割とした。

エラストマのガラス転移温度は 273K であるが，今回の解析温度範囲に入らないため，ここではエラストマを弾性体として扱った。まず，エラストマ厚さ h を 0.1 ㎜～ 0.5 ㎜と変化させ，エラストマの物性値の線膨張係数 α を 10 × 10^{-6}/K ～ 150 × 10^{-6}/K と変化させて解析を行った。

次いで，エラストマの厚さ h が 0.2 ㎜，0.5 ㎜の場合について，緩和弾性係数 E を 0.01GPa ～ 1.0GPa と変化させて解析を行った。

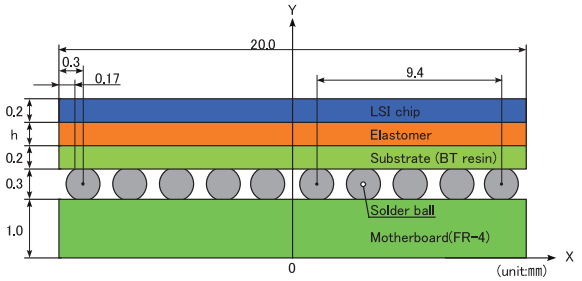

Fig. 1　Cross section of BGA-CSP

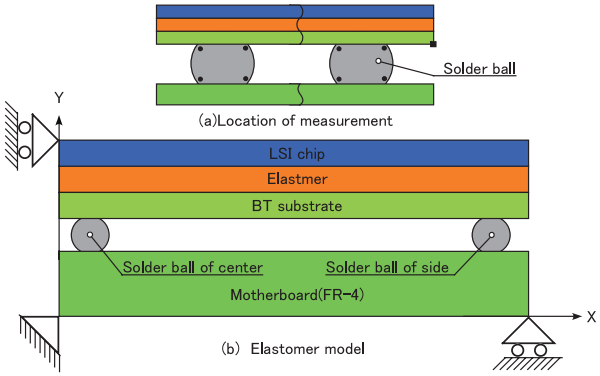

Fig. 2　Finite Element Analysis model

Table. 1　Thermal and mechanical characteristics of materials

Property / Material		Thermal conductivity λ (W/mK)	Specific heat C (kJ/kgK)	Density ρ (kg/m^3)	Glass transition Temperature Tg (K)	Thermal expansion coefficient α (10^{-6}/K) T≦Tg	Thermal expansion coefficient α (10^{-6}/K) Tg<T	Young's Modulus E (GPa) T≦Tg	Young's Modulus E (GPa) Tg<T	Poisson's ratio ν (-)
LSI chip		147.7	0.799	2328	-	3.6		192.0		0.30
Elastomer	(1)	0.163	1.090	1400	273	10.0～150.0		1.0		0.40
	(2)	0.163	1.090	1400	273	150.0		0.01～1.0		0.40
Solder ball		34.7	0.180	8510	-	19.9		15.2		0.28
Substrate (BT resin)		0.372	1.256	1810	418	10.4	5.0	12.0	6.9	0.30
Motherboard (FR-4)		0.372	1.256	1810	413	12.9	4.8	18.0	3.7	0.28

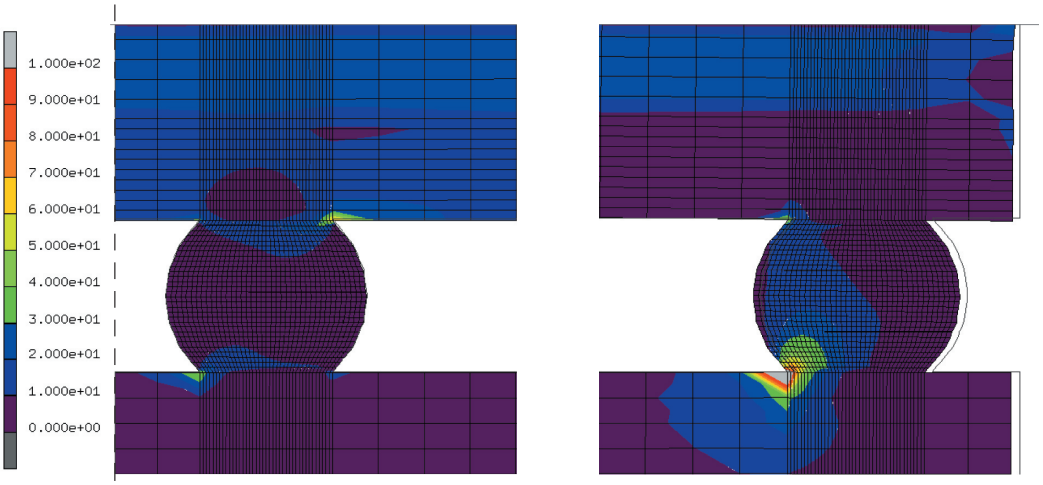

Fig. 3　Distribution model of Maximum Principal stress

解析箇所は，はんだボールの中央部と端部の２箇所とし，主応力を，各はんだボール内部の４点の平均値として表示した。また，残留反り変形量は，BT 基板の右端下部の変位から求め，せん断応力は，はんだボール部の上部２点，下部２点の平均値として表示した。これを図２(a)に示す。

３．はんだボール部の熱応力と反り変形量の数値解析結果

図３に，今回用いた図２に示す BGA-CSP について，熱応力分布の有限要素数値解析結果の代表例を示す。図には，中央部と端部のはんだボール部に生ずる熱応力分布を概観的に示している。

3.1　線膨張係数の影響

図４に，エラストマ厚さをパラメータとして，線膨張係数とはんだボール部に生ずる主応力の関係を示す。この図から，はんだボール部に生ずる主応力はエラストマ厚さが 0.1 ㎜の場合は，エラストマの線膨張係数の大小によらず 23.5MPa とほぼ一定値を示している。一方，エラストマ厚さが 0.2 ㎜～ 0.5 ㎜と厚くなるほど，はんだボールに生ずる主応力は線膨張係数の増加とともに低減する。このことから，はんだボールに生ずる主応力を小さくするためには，エラストマ厚さを厚く，かつ線膨張係数が大きいエラストマを用いれば有効であることがわかる。

図５に，エラストマ厚さをパラメータとして，線膨張係数とはんだボール部に生ずるせん断応力の関係を示す。

ここで，せん断応力は，はんだボールの上部と下部について示している。この図から，はんだボール上部ではエラストマ厚さに関係なく，線膨張係数の値が増加するに従ってせん断応力は増加傾向にあり，その値は 5MPa 程度と比較的小さな値を示しており，はんだボール上部での剥離の可能性は低い。一方，はんだボール下部に生ずるせん断応力は，エラストマ厚さによって線膨張係数の影響が大きく異なることがわかる。すなわち，エラストマが厚い（0.5 ㎜）場合，線膨張係数の増加に伴ってせん断応力は減少す

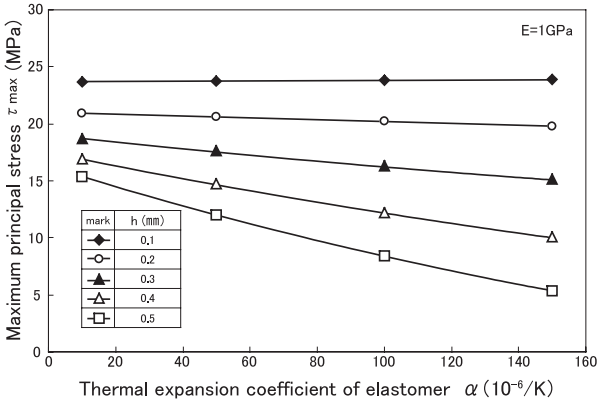

Fig. 4　Effect of elastomer thickness in relationship between thermal expansion coefficient of elastomer and maximum principal stress

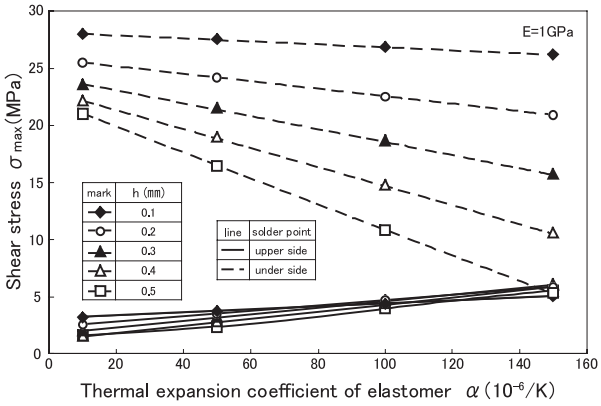

Fig. 5　Effect of elastomer thickness in relationship between thermal expansion coefficient of elastomer and shear stress

るのに対して，エラストマが薄い（0.1 ㎜）場合には，線膨張係数の影響を余り受けず 28MPa 程度のせん断応力を示す。このことから，はんだボールはマザーボードである FR-4 基板との界面下部のほうが破壊する可能性があり，かつエラストマが薄い程その危険性は大きいと思われる。

図 6 に，エラストマ厚さをパラメータとして，線膨張係数と残留反り変形量の関係を示す。先の図 4 の主応力の場合と同様に，エラストマ厚さが厚くなるほど，残留反り変形量は線膨張係数の値に大きく影響を受けている。すなわち，エラストマ厚さが厚く，かつ線膨張係数が大きいほど残留反り変形量も小さくなることがわかる。

3.2　緩和弾性係数の影響

前節の結果より，エラストマ厚さが 0.5 ㎜の場合にはんだボール部の主応力は線膨張係数によって大きく変化することから，ここではエラストマ厚さが 0.5 ㎜の場合に着目して解析を行った。なお，比較のためエラストマ厚さ 0.2 ㎜の場合も同様の解析を行った。

図 7 に，エラストマ厚さが 0.2 ㎜と 0.5 ㎜の場合の緩和弾性係数とはんだボール部に生ずる主応力の関係を示す。ここで主応力は，はんだボール中央部と端部の場合を比較して示している。この図から，はんだボールの主応力は中央部に比べ端部に大きく生じており，かつエラストマ厚さが厚い方が主応力が小さいことがわかる。一方，緩和弾性係数については，はんだボールに生ずる主応力はエラストマ厚さが 0.2 ㎜で 0.3GPa ～ 1.0GPa の場合に増加傾向にあるが，エラストマ厚さが 0.5 ㎜の場合には緩和弾性係数が大きくなるにつれて減少する傾向にある。一方，はんだボール中央部に生ずる主応力は，エラストマ厚さに影響を受けず緩和弾性係数が小さくなるに従って減少する傾向にあり，主応力の値も 2.5MPa と小さいため，この部分からの亀裂の心配は少ないものと考えられる。

図 8 に，エラストマ厚さが 0.2 ㎜と 0.5 ㎜の場合の緩和弾性係数とはんだボール部に生ずるせん断応力の関係を示す。ここで，せん断応力は，はんだボール上部と下部を比較して示している。この図から，エラストマ厚さが 0.2 ㎜と薄く，かつ緩和弾性係数が 0.3GPa 以上の場合には，はんだボール下部に生ずるせん断応力の値が 42MPa 程度と

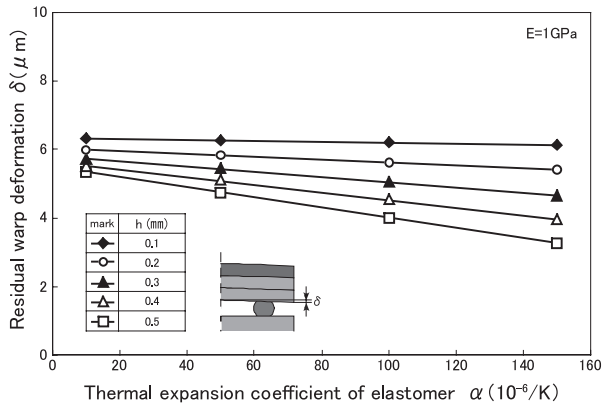

Fig. 6　Effect of elastomer thickness in relationship between thermal expansion coefficient of elastomer and residual warp deformation

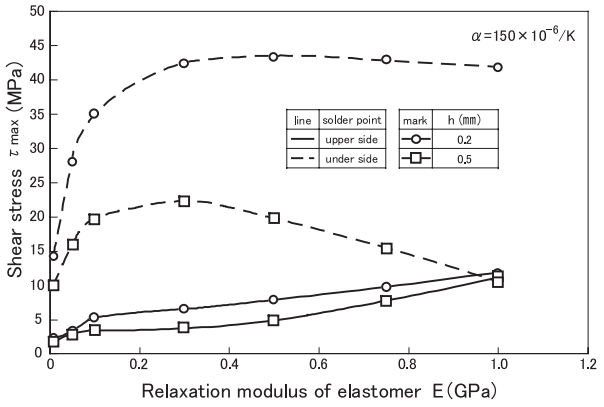

Fig. 8　Effect of elastomer thickness in relationship between relaxation modulus of elastomer and shear stress

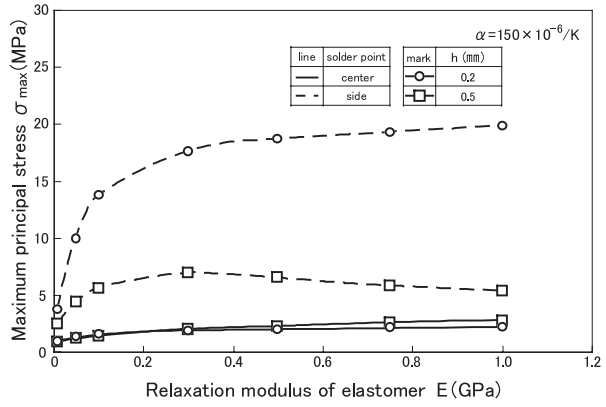

Fig. 7　Effect of elastomer thickness in relationship between relaxation modulus of elastomer and maximum principal stress

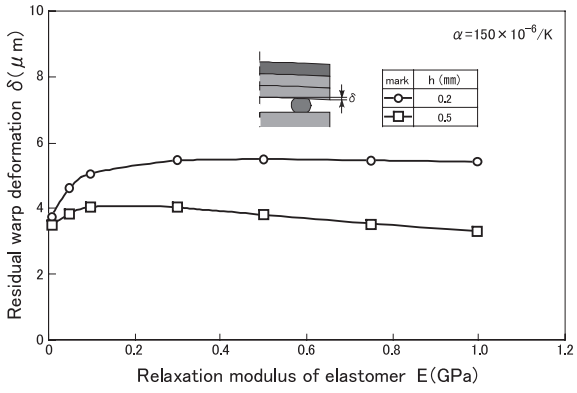

Fig. 9　Effect of elastomer thickness in relationship between relaxation modulus of elastomer elastomer and residual warp deformation

なり，はんだボールのせん断強度との関係で亀裂が生ずる恐れがある。一方，はんだボール上部に生ずるせん断応力は，エラストマ厚さに余り影響を受けず緩和弾性係数が大きくなるに従って増大する。

図9に，エラストマ厚さが0.2㎜と0.5㎜の場合の緩和弾性係数と残留反り変形量の関係を示す。この図から，エラストマ厚さが0.5㎜の方が0.2㎜より残留反り変形量が小さくなることがわかる。また，エラストマ厚さが0.2㎜の場合には，残留反り変形量は緩和弾性係数の増加とともに増大し，0.1GPa以上では一定値になる。これに対して，エラストマ厚さが0.5㎜と厚い場合には，残留反り変形量は緩和弾性係数が0.1GPaの場合に極大値をとり，その後減少する傾向を示す。

4. 結　　言

エリアアレイ型LSIパッケージであるBGA-CSPを対象として，はんだボール部に生ずる熱応力や反り変形挙動をエラストマの厚さと物性値の両面から有限要素解析をした。得られた結論は以下の通りである。

(1) はんだボール部に生ずる熱応力や反り変形を小さくするためには，エラストマ厚さを0.5㎜とし，かつその線膨張係数を大きくすることが望ましい。

(2) はんだボールに生ずる熱応力は，概してエラストマが薄い場合に，エラストマの緩和弾性係数の影響を大きく受ける。

(3) BGA-CSPにおいて，熱応力の点から，はんだボールは中央部により端部の方が破壊しやすい。

参 考 文 献

1）N.taketani, K.hatano, H.sugimoto, O.yoshioka, G.murakami:“CSP with LOC Technology”, ISHM, 1996, p.594,（1996）

2）山口盛司：“CSP実装の現状と将来”，エレクトロニクス実装学会誌，Vol.4, No6, p457〜463（7),（2001）

3）呉　　強，馬場伸治，松嶋弘倫，原田耕三，林　英二，木村通考：エレクトロニクス実装学会誌，No6，p332〜338（4）,（2003）

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なる積層ば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，No864（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なる積層ばりを冷却した場合に生じる熱応力の粘弾性解析”，日本機械学会 論文集，Vol.53, No493, p.1813,（1987）

6）S.Nakamura, Y.miyano, S.Sugimori, 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）中村省三，長谷部昭男，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，51, 810,（1994）

8）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）

9）G.Murakami,, M.Mita, S.Nakamura, K.Ueno, K.nakamura:“achieving an ㎜ ptimum structural Package Design with Thermo-Viscoelastic Analysis”, Chip Scale Review, Vol2, No5, p55,（1998）

10）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）

11）村上　元，中村省三，御田　護，宮野　靖：“熱粘弾性解析によるCSP-μBGA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）

12）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）

13）中村省三，後藤雅彦，串崎義幸，木戸光夫：“電子部品用構成材料の熱残留応力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）

14）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の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）

15）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学会誌「成形加工」，第15巻，第4号，p.302,（2003）

16）沖野元紀，串崎義幸，中村省三：“COB構造体の熱残留応力に及ぼす樹脂層の有限要素解析”，日本機械学会東海支部三重地区講演会 講演論文集，p.204,（2003）

17）中村省三，後藤雅彦，専坊由介，大橋和彦：“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”，エレクトロニクス実装学会誌，Vol.7, No.3,（2004）

18）中村省三，後藤雅彦：“粘弾性積層体の残留応力を求

める簡易評価法”，日本機械学会論文集，71 巻，703 号，A 編，（2005）
19）中村省三，沖野元紀：“COB パッケージに生ずる残留応力に及ぼす樹脂厚さ寸法の影響”，広島工業大学紀要研究編，第 39 巻，p67-71,（2005）
20）中村省三，吉村幹生：“有限要素解析による電子部品に生ずる熱応力に及ぼすエラストマの影響”，広島工業大学紀要研究編，第 40 巻，p49〜55,（2006）
21）中村省三，川端拓也，篠原　司，福井　雄：“エポキシ樹脂注型電子部品の熱応力解析”，広島工業大学紀要研究編，第 40 巻，p57〜62,（2006）