# 異方性導電樹脂接合部の接合信頼性評価

Won-Keun Kim\*, 池田 徹\*\*, 宮崎 則幸\*\*

## Evaluation of Reliability of a Joint Using Anisotropic Conductive Adhesive

Won-Keun KIM\*, Toru IKEDA\*\* and Noriyuki MIYAZAKI\*\*

\*九州大学大学院(〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

\*\*九州大学工学研究院(〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

\* Department of Material Process Engineering, Kyushu University (6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 812-8581)

\*\*Faculty of Engineering, Kyushu University (6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 812-8581)

**概要** 異方性導電フィルムは、液晶ディスプレイ実装分野などでの電気的接続に広く用いられている接着材料である。異 方性導電フィルムによる接合部は、樹脂の収縮によって、バンプ間に圧力を発生させ、これによって導通を確保する。一方 で、樹脂の収縮は、半導体チップや基板との接合部をはく離させる推進力となるため、その両者のバランスのとれた設計が必 要である。本研究では基板、半導体チップと異方性導電フィルムの界面のはく離試験方法を開発し、異種材界面き裂の応力拡 大係数を用いて接合強度の評価を行う手法を提案する。

#### Abstract

Anisotropic conductive adhesive film (ACF) is an interconnection material in electronic packages such as connecting a LCD panel on a circuit substrate. It is expected to be a key technology for the chip size packaging. The goal of our work is to provide an optimum design scheme to achieve the best combination of the electrical performance and the mechanical reliability. This study presents an evaluation technology for the delamination at connections using ACF. We utilized the stress intensity factors of an interface crack between jointed dissimilar materials to evaluate the delamination strength of a connection. As the result, the residual stress of an interface between a chip and ACF is higher than that between ACF and substrate. And also we investigated the mode dependence of mechanical test, and found out that an interface crack between ACF and substrate was more affected by mode II rather than mode I at high temperature.

Key Words: Anisotropic Conductive Film (ACF), Delamination Test, Stress Intensity Factor, Residual Stress

#### 1. 緒 言

異方性導電樹脂あるいは異方性導電フィルム (ACF: Anisotropic Conductive adhesive Film)は、金属粒子や金属 コートプラスチック粒子を分散した接着フィルムであり、 その異方導電性および接着性を利用して、液晶ディスプレ イ (LCD: Liquid Crystal Display)などの実装分野での電気的 接続に広く用いられている。この異方性導電樹脂を使った 液晶ディスプレイの実装技術の発展で、ベアチップを直接 プリント配線板 (PWB: Printed Wiring Board)に接続するフ リップチップ (Flip-Chip)実装技術が活発に開発されている<sup>11)</sup>。 そして、高密度化、小型化、薄形化の進む電子デバイス実 装<sup>2)</sup>において、はんだ材料に替わる電子デバイスの接合方 法として有望視されている。

この実装方法が信頼性の高い接合方法として普及するためには、はんだ材料のような有効な信頼性評価技術が必要である。ACFによる接合部は、樹脂の収縮によって、バンプ間に圧力を発生させ、これによって導通を確保する。一

方で、樹脂の収縮は、半導体チップや基板との接合部をは く離させる推進力となるため、その両者のバランスのとれ た設計が必要である。

著者らは、これまでプラスチックパッケージ中の界面き 裂や接合角部からのき裂の発生の予測を行ってきた<sup>3)~8)</sup>。

本研究ではFRP基板,半導体チップとACFの界面のはく 離試験方法を開発し,異種材界面き裂の応力拡大係数を用 いて接合強度の評価を行う手法を提案する。さらに,異な る2種類のACFを用いた接合部の評価結果について,比較, 検討を行った結果について述べる。

#### 2. 異方性導電樹脂接合部の設計コンセプト

異方性導電樹脂接合は, Fig. 1に示すように樹脂の収縮 によってバンプ間に圧縮応力を働かせ,導通を確保する方 法である。したがって,バンプ間には,導通のために必要 な圧縮応力が働いていなくてはならない。しかしながら, 一方でバンプの根本や接合端部では,樹脂の収縮に伴って, 大きな特異性はく離応力が発生する。このはく離応力に



Fig. 1 Concept of the design of ACF connection



Fig. 2 Design process of ACF connection

よって,ACF とチップあるいは,ACF と基板がはく離して しまえば,バンプ間圧力もなくなり,導通がとれなくなる。 このことは,樹脂の収縮力によって生じる,圧縮力とは く離応力が,次式を満たすような適切な範囲に収める必要 があることを意味している。

バンプ間圧力>導通必要圧力

はく離応力<はく離強度

異方性導電樹脂接合部の設計においては、このことを念 頭におかなければならない。このために、Fig.2に示すよ うなはく離強度評価、導通必要圧力評価、接合部の応力解 析と設計手法の確立の3つを実現する必要がある。ここで はこのうちのはく離強度評価に着目して研究を行った。

今回, チップを基板に実装するときの成形温度が ACF の ガラス転位温度より高い温度であるので,成形圧力によっ て生じる圧縮応力は,成形温度からガラス転位温度まで冷 却する間に ACF の滑りによって緩和し,残留応力によるバ ンプ間の圧力には関与しないと考えた。

#### 3. はく離強度評価手法

#### 3.1 残留応力の評価

線膨張係数が大きく異なる半導体チップと基板のACFに よる接合部には、大きな熱残留応力が発生する。したがっ て、はく離強度の測定や、ACF接合部の設計には、残留応 力の定量的評価が必要である。しかし、ACFの基材として 用いられているエポキシ系接着剤の場合、常温付近では、 ほぼ線形熱弾性体として振舞うが、ガラス転移点付近より 高温では、大きなクリープ緩和が生じる。このため、樹脂 の硬化温度を基準にとって、線形熱応力解析を行ったので は、常温付近の残留応力を過大に評価することになる。そ





Fig. 4 System for measuring stress free temperature



Fig. 5 Variation of displacement (1st cycle heating of system B (ACF(B)–Sub.(G))

こで、次に示すような方法で残留応力の評価を行った。

まず, Fig. 3に示すような接合はり試験片を製作して, Fig. 4の応力フリー温度測定装置でバイメタル効果による 試験片の反り量を測定した。測定した結果の一例をFig. 5 に示す。Fig. 5から求めた曲率の温度変化の直線部分を外 挿し,はりの曲率が0となる温度を応力フリー温度(*T*<sub>free</sub>)と 定義した(Fig. 6)。また,常温付近の残留応力は,応力フ リー温度を基準とした線形熱弾性解析によって見積もられ るものと仮定した。

#### 3.2 はく離試験

次に、Fig. 7(a)のような引きはがし試験機を用いて、ACF



Fig. 6 Stress free temperature



(a) Test Machine



Fig. 7 Opening delamination testing equipment

によるチップと基板の接合部の引きはがし試験を行った。 半導体チップは、大変脆く壊れやすいため、Fig. 8(a)に示 すように半導体チップと基板をACF接合した後に、半導体 チップとACF接合した反対の面を、Cyano-Acrylate系接着 剤で同じ基板材に貼り付け、半導体チップを補強した。こ のようにして製作した試験片をスチールの治具で押さえて 試験機に取り付け、基板の部分に、Fig. 7(b)に示すような 鉤状のジグで水平方向に負荷し、ACFによる接合部を引き はがした。

試験片は、ACF 接合部の一部に離型剤を塗布して、初期 はく離をチップとACFの界面、ACF と基板の界面に導入し たものを製作して試験を行った。試験温度は常温、 $60^{\circ}$ C、  $95^{\circ}$ C、 $120^{\circ}$ C とした。引きはがし試験より得られた、はく



Fig. 8 Schematic of specimens

離荷重より,次に示す異種材界面き裂の応力拡大係数で評 価を行った。

また, Fig. 8(b), (c) に示すような Lap Joint 試験片および曲 げ試験片についても同様の試験を行った。この Lap Joint 試 験片においても引きはがし試験片のように, Si チップを ACF で基板材に接合した後, Si チップの反対側を接着力の 強い Cyano-Acrylate 系接着剤で同じ基板材に接合した。こ のようにすることで, Si チップの曲げによる破壊を防ぎ, ACF 接合部からはく離させることができた。

#### 4. 評価のための特異性パラメータ

測定した残留応力やはく荷重は、そのままでは試験片の サイズや形状に依存するため、定量的評価や設計に使用で きない。また、はく離が発生しているき裂の先端は応力特 異場であるため、応力は無限大となってしまう。そこで、 次に示すような、「異種材界面き裂の応力拡大係数」を用 いて、はく離強度を評価することとした。

#### 4.1 異種材界面き裂の応力拡大係数

次に、Fig. 9のように、異種材界面き裂の座標系を定義 するとx軸上( $\theta$ =0)のき裂先端近傍の応力漸近解は、次式 のように示される<sup>9</sup>。

$$(\sigma_{yy} + i\sigma_{xy})_{\theta=0} = \frac{K_{\rm I} + iK_{\rm II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l_k}\right)^{i\epsilon} \tag{1}$$

ここで, εは材料1,2のヤング率とポアソン比の組み合わせにより決まる異種材の材料定数(Bimaterial constant)であり,次式で示される。



Fig. 9 Coordinates system around an interface crack

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln\left[\left(\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}\right) \middle/ \left(\frac{\kappa_2}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1}\right)\right],\tag{2}$$

$$\kappa_{j} = \begin{cases} 3 - 4\nu_{j} & \text{(Plane Strain)} \\ \frac{3 - \nu_{j}}{1 + \nu_{j}} & \text{(Plane Stress)} \end{cases}$$

ここで、 $\mu_i$  (*i*=1,2), *v<sub>i</sub>* (*i*=1,2) は材料1,2のせん断弾性係 数およびポアソン比であり、 $K_{I}$ ,  $K_{II}$ は、異種材界面き裂の 応力拡大係数、 $l_k$ は、任意の代表長さである。 $l_k$ の値は、任 意であるが、比較対象となるすべての界面き裂に対して、 同じ値をとらなければならない。 $l_k$  が $l'_k$  に変化するとき、元 の応力拡大係数 $K_{I}$ ,  $K_{II}$  は、次式の変換式に従って $K'_{I}$ ,  $K'_{II}$  に 変換される。

$$\begin{cases} K_{\rm I}'\\ K_{\rm II}' \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos Q & -\sin Q\\ \sin Q & \cos Q \end{bmatrix} \begin{cases} K_{\rm I}\\ K_{\rm II} \end{cases}$$
(3)

$$Q = \varepsilon \ln \left( \frac{l'_k}{l_k} \right) \tag{4}$$

 $l_k$ の値としては、破壊時のはく離き裂先端のプロセスゾーン寸法に近い値を採用することが推奨されている<sup>10)</sup>。本研究では、 $l_k$ の値は、すべて 0.01 mm とした。

また、異種材界面では、き裂に作用するせん断応力の方 向が変形形態に影響するため、 $K_{\Pi}$ の符号を考慮する必要が ある。ここでは、Fig. 9のように、き裂を左側に、材料の インデックスをき裂の上を1、下を2としたときに、 $\epsilon < 0$ の 場合の符号を採用し、 $\epsilon > 0$ の場合は、 $K_{\Pi}$ の符号を反転さ せた。

また,モードIとモードIIの応力拡大係数の影響を総合した総括応力拡大係数を次式で定義することにする。

$$K_{ic} = \sqrt{K_{\rm I}^2 + K_{\rm II}^2} \tag{5}$$

#### 5. 評価結果

本研究では、Si チップ-ACF (A)-基板 (System A)とSi Chip-ACF (B)-基板 (System B)の2種類の組み合わせについ

て試験を行った。それぞれの材料の材料定数を Table 1 に 示す。接合は、清浄にした基板の上に ACF フィルムをの せ、この上にSi チップを重ね、上部よりヒーターブロック を用いて 0.5 MPa の圧力で 20 秒間加熱した。この際の ACF の温度は、180℃となるように設定した。

### 5.1 残留応力の影響

Fig. 3の張り合わせはりの曲率の温度変化の例をFig. 10 に示す。この例では、試験片は、製作直後のものを使用し

Table 1. Material properties (at room temperature; 25°C)

Material	E	v	$T_{g}$	CTE (×10 <sup>-6</sup> /°C)		
	(GPa)		(°C)	< 1 <sub>g</sub>	>1 <sub>g</sub>	
Si chip	170	0.30	—	3	_	
ACF (A)	1.84	0.38	126	100	800	
ACF (B)	2.52	0.38	160	100	400	
Substrate	16.5	0.20	158	11.6	1.4	

Variations of Young's module with temperature

	ACF (A)	ACF (B)	Substrate
60°C	1.18	1.87	16.3
95°C	1.02	1.61	15.7
120°C	0.765	1.42	15.3



Fig. 10 Variation of curvature of a jointed beam specimen with temperature

た。すべての試験片で1サイクル目の昇温時と降温時では, 曲率は異なる温度履歴を示し、常温に戻した際の曲率が増 加した。その後、常温で3週間デシケータ中に放置すると、 曲率は、再び試験開始時のレベルに近い割合まで緩和した。 示差走查熱量分析 (DSC: Differential Scanning Calorimetry) の結果,試験片を作成した直後のACF中のエポキシ樹脂は 十分に硬化されており、試験片作成直後の曲率が熱サイク ル試験後と異なるのは、架橋反応が不十分なためではない と思われる。むしろ、基板の熱伝導率がSiチップに比べて 小さいために接合時の加熱において基板の温度が、Siチッ プとACFに比べて低くなったのではないかと予測される。 すなわち,接合時の基板の温度が180℃よりも小さいため に常温まで降温した際の残留応力が小さくなり、再び加熱 してT<sub>g</sub>を超えることにより、試験片全体の温度が一様と なった後にT<sub>a</sub>以上での温度でのACFの粘性によって応力 が緩和して安定状態に至ると考えられる。また、応力フ リー温度が接合時の温度よりかなり低く、180℃での曲率 が常温と反対になっているのは、加熱時のACFは、180°C に達する前に硬化を始めており、180℃に達したときには 常温とは反対の残留応力を有しているためと推測される。 このことは、ACFの種類に依存し、もしT<sub>g</sub>付近での粘性す べりが,顕著であれば,応力フリー温度が T<sub>a</sub>付近になるこ とはありえると考えられる。

いずれにせよ、試験片を作成した直後と加熱直後および 空気中での放置後では、残留応力のレベルが異なることは、 確かであり、残留応力の評価では、評価対象がどのステー ジにあるかを考慮しなければならない。各サイクルにおい て求めた、試験片の応力フリー温度をTable 2 に示す。

本研究では試験片を製作した直後にはく離試験を行った ことから、1サイクル目の昇温時の応力フリー温度を用い て25°C, 60°C, 95°Cまで降温させたときの、Fig. 8の3つの 試験片の残留応力による異種材界面き裂の応力拡大係数の 解析を行った。解析には、有限要素法を用い、熱応力下の 異種材界面き裂の応力拡大係数を求められるよう改良し た、仮想き裂進展法を適用して解析した<sup>9)</sup>。解析に用いた 試験片のモデルの境界条件をFig. 11 に示す。残留応力によ るき裂の応力拡大係数の解析結果をTable 3に示す。Table 3よりわかるように、System Bの方がSystem A より熱残留 応力が高くなっているが、これはSystem Bの応力フリー温 度がSystem A より高く、ヤング率も ACF (B)の方が高いた

Table	2.	Stress	free	temperature:	$T_{\rm free}$	$(^{\circ}C)$
		00000		temperature.	- tree	$\langle \cdot \cdot \rangle$

	1st o	cycle	2nd cycle		
-	Increase	Decrease	Increase	Decrease	
System A	94	135	133	137	
System B	115	141	140	145	

System A: Si chip-ACF(A)-Substrate

System B: Si chip-ACF(B)-Substrate



Fig. 11 Analyzed models and boundary conditions (crack between ACF and Si chip)

めと考えられる。そして、材料の組み合わせに関係なく、 チップとACFの接合部の方がACFと基板の接合部より熱残 留応力による応力拡大係数が高い。したがって、もしSi チップ-ACF間と基板-ACF間の接合力が等しければ、熱残 留応力によるはく離は、Siチップ-ACF間の方が発生しや すいと言える。しかしながら、実際には、Siチップ-ACF 間と基板-ACF間では接合強度が異なるため、はく離強度 試験を行って求めた接合力を加味して考察する必要がある。

5.2 初期はく離を導入したはく離試験結果

次に、ACFと基板あるいは、Si チップの界面にあらかじ め離型剤を塗布して、初期はく離を導入した接合試験片を 用い、開口はく離試験とLap Joint試験、曲げ試験を行っ た。

System Aの常温のLap Joint 試験と曲げ試験,System B の常温の開口はく離試験とLap Joint 試験,曲げ試験にお いて,き裂はチップ内部または基板内部に進展したため, はく離強度の測定は行えなかった。それ以外の場合におい ては,界面に沿ってのはく離が生じた。実験から求めたは く離荷重と応力フリー温度を用いて,有限要素法により界 面き裂の応力拡大係数を解析し,はく離時の熱残留応力を 考慮した界面き裂のはく離靭性値を求めた。まず,式(5)で 示される総括応力拡大係数を用いたはく離靭性値の温度依 存性をFig.12に示す。

これより, 異種材界面き裂の応力拡大係数で示したはく 離靭性値はSystem A よりSystem Bの方が高く, いずれも 温度とともに顕著に低下することがわかる。そして, 開口 はく離試験 と Lap Joint 試験の結果では, ACF と Si チップ の界面の方が ACF と基板の界面よりはく離強度が高いが,

Specimen	K O		System A ( $T_{\rm free}$ =94°C)			System B ( $T_{\rm free} = 115^{\circ}$ C)		
	$K$ (MPa $\forall m$ )		25(°C)	60(°C)	95(°C)	25(°C)	60(°C)	95(°C)
Opening	Chip	KI	0.068	0.023		0.114	0.055	0.017
		$K_{\rm II}$	-0.147	-0.056	_	-0.229	-0.118	-0.039
		$K_i$	0.162	0.061	—	0.256	0.130	0.042
Delamination	Sub.	$K_{\mathrm{I}}$	0.062	0.022		0.100	0.050	0.016
		$K_{\Pi}$	0.068	0.028		0.102	0.054	0.018
		$K_i$	0.092	0.036	—	0.143	0.074	0.024
Lap Joint	Chip	K,	0.065	0.026		0.110	0.055	0.018
1.5		$K_{\mathrm{II}}$	-0.124	-0.047		-0.189	-0.096	-0.032
		$K_i^{''}$	0.140	0.054	—	0.219	0.111	0.036
Test	Sub.	$K_{I}$	0.057	0.022		0.087	0.045	0.015
		$K_{\rm II}$	0.051	0.022	_	0.072	0.040	0.014
		K	0.076	0.031	—	0.113	0.061	0.020
Bending	Chip	K.	0.007	0.003		0.008	0.006	0.002
Domania	emp	$K_{\rm H}$	-0.082	-0.031	_	-0.136	-0.066	-0.022
		$K_{i}$	0.082	0.031		0.136	0.067	0.022
Test	Sub.	$K_{\mathrm{T}}$	0.028	0.012	_	0.039	0.022	0.007
		$\dot{K_{\Pi}}$	0.049	0.021		0.070	0.039	0.013
		K.	0.056	0.024		0.080	0.045	0.015

Table 3. Stress intensity factors of an interface crack caused by residual stress



Fig. 12 Variation of total stress intensity factors at delamination with temperature (Si Chip side: A crack between Si <u>Chip</u> and ACF, Sub. side: A crack between <u>Sub</u>strate and ACF)

曲げはACFと基板の界面の方がACFとSiチップの界面より若干高かった。全般的に,System Bの材料の組み合わせがSystem A より残留応力が高いにもかかわらず,はく離強度も高いのがわかる。

また, 異種材界面き裂の応力拡大係数を用いることで, 界面き裂先端の応力場のモード依存性を考慮することがで きる。はく離時の応力拡大係数を*K*<sub>II</sub>-*K*<sub>I</sub>面にプロットした ものを, Fig. 13~16に示す。ここで,線で結ばれたプロッ ト点のうち原点に近いプロット点が残留応力による応力拡 大係数を,遠いプロット点が残留応力と機械的応力の和に 対する,応力拡大係数を示している。これらより,いずれ の場合もモードIIについては,機械的力は残留応力の影響 を打ち消す方向に作用していることがわかる。

System AのSi チップとACFの界面き裂では、60~120°C いずれの試験温度においても、モードII依存性が高く、界 面に対するせん断応力がはく離を支配していることがわか



Fig. 13 Mode dependence of stress intensity factors at delamination (25°C)



 $K_{II}(MPa\sqrt{m})$ (b)System B 0.5

1

1.5

-1.5

-1

-0.5

Fig. 14 Mode dependence of stress intensity factors at delamination (60°C)



(a)System A



Fig. 15 Mode dependence of stress intensity factors at delamination (95°C)





Fig. 16 Mode dependence of stress intensity factors at delamination (120°C)

60℃, 95℃では、原点からの距離がほぼ同じである。すな わち,ほぼ同じ総括応力拡大係数で,はく離しているのに 対して,120℃では、モードⅡ支配のはく離に遷移してい ることがわかる。これは、System Aに用いた ACF の方が, ガラス転移点,弾性率とも低いため、低温領域からより延 性的な性質を持っているのに対して、System Bに用いた ACF は、比較的ガラス転移点が高いために、低温では、比 較的脆性的な性質を持っており、高温域で初めて延性的な 性質に移行するためであると考えられる。

基板材料とACFの界面についても同様の傾向が見られる が、曲げ試験のはく離強度がほぼ同じモード比を持つLap Joint試験に比べて、はく離強度が著しく強くなる。この原 因としては、今回の解析においては、基板材料であるガラ ス繊維強化エポキシ樹脂を等方性材料として扱ったが、現 実には、繊維方向とその垂直方向の弾性率は著しく異なる ため、このような違いが出たものと思われる。この点につ いては、今後、基板材料の異方性を考慮して評価を行える ように手法を改良する予定である。

#### 6. 結 言

半導体チップと基板とをACFで接合した,接合界面のは く離強度試験法を開発し,異種材界面き裂の応力拡大係数 を用いてはく離強度を評価した。

接合はりの曲率の温度変化を測定し、応力フリー温度を

決定することにより、残留応力を定量的に評価できた。 試験法としては、ACFとSiチップ、あるいは、ACFと基 板のはく離強度を測定したい側に部分はく離(き裂)を導 入してはく離試験を行い、その応力拡大係数で評価できた。 そして、半導体チップと基板とをACFで接合するとき、 ACF (A)とACF (B)を用いて異なる2種類の材料の組み合わ せで比較、検討を行った。

(2002.6.27-受理)

#### 文 献

- Z. Lai and J. Liu: "Anisotropic Conductive Adhesive Flip-Chip Bonding on Rigid and Flexible Printed Circuit Substrates", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology—Part B, Vol. **19-3**, pp. 644–660, 1996
- K. Y. Chen, R. L. D. Zenner, M. Arneson and D. Mountain: "Ultra-Thin Electronic Device Packaging", IEEE Trans. on Advanced Packaging, Vol. 23-1, pp. 22–26, 2000
- 池田 徹,宮崎則幸: "プラスチックパッケージの強度信 頼性評価",回路実装学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 391–396, 1997
- 4) T. Ikeda, I. Arase, Y. Ueno and N. Miyazaki: "Strength Evaluation of V-notches in Electronic Plastic Packaging Using Stress

Intensity Factor of V-Notch", Modeling and Simulation Based Engneering, Vol. **1**, pp. 965–970, 1998

- 5) 荒瀬 功,上野雄也,池田 徹,宮崎則幸,長竹真美,伊 東伸孝,佐藤 充:"はんだリフロー時のLSI封止樹脂割れ に対する強度評価",日本機械学会論文集,A編, Vol. 65-636, pp. 1656–1663, 1999
- T. Ikeda, I. Arase, Y. Ueno and N. Miyazaki: "Strength Evaluation of Electronic Plastic Packages Using Stress Intensity Factors of V-Notch", Computer Modeling and Simulation in Engineering, Vol. 1-1, pp. 91–98, 2000
- 7)池田 徹,菰原裕二,宮崎則幸: "プラスチックパッケージにおける界面き裂のはく離限界",日本機械学会論文集, A編, Vol. 66-648, pp. 1533–1540, 2000
- 8) 池田 徹, 上野雄也, 宮崎則幸, 伊東伸孝: "LSI プラス チックパッケージのはんだリフロー割れ防止設計法の検討", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 47–55, 2001
- 池田 徹, 菰原裕二, 宮崎則幸: "仮想き裂進展法による 熱応力場での異種材界面き裂の応力拡大係数解析", 日本 機械学会論文集, A編, Vol. 63-611, pp. 1377–1384, 1997
- J. R. Rice: "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Crack", Transactions of ASME Series E, Journal of Applied Mechanics, Vol. 55, pp. 98–103, 1988