

異方性導電樹脂接合型フリップチップの吸湿リフロー試験時の はく離予測解析

Won-Keun KIM*, 池田 徹**, 宮崎 則幸**

Analysis of Delamination in a Flip Chip Using Anisotropic Conductive Adhesive Film during Moisture/Reflow Sensitivity Test

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

*九州大学大学院工学研究府（〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1）

**京都大学大学院工学研究科機械工学専攻（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

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

**Department of Mechanical Engineering, Kyoto University (Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8501)

概要 異方性導電樹脂フィルム／ペースト (Anisotropic Conductive Adhesive Film/Paste; ACF/ACP) は液晶ディスプレイ実装分野等での電氣的接続に広く用いられている接着材料である。近年、コストの安さと小型化の容易さなどから、Flip Chip や SiP (System in Package) などの中核技術として注目されている。しかし、微細はんだ接合に比べて、信頼性が劣ることが問題となっている。本研究では基板、半導体チップ、アルミニウム (Al) パターンと ACF の界面のはく離試験を行い、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った。また、吸湿リフロー試験時に、ACF を用いたフリップチップの内部に発生する水蒸気圧を予測し、吸湿リフロー試験時のはく離発生を予測する手法を開発した。

Abstract

Anisotropic conductive adhesive film (ACF) has been used for electronic assemblies such as the connection between a liquid crystal display (LCD) panel and a flexible printed circuit board (FPC). Recently, ACF is expected to be a key technology in flip-chip and system-in-package (SiP) packaging. The goal of our work is to provide an optimum design scheme to achieve the best combination of electrical performance and mechanical reliability for electronic packages using ACF. The stress intensity factors of an interface crack between jointed dissimilar materials were utilized for the evaluation of the delamination occurring in a flip chip connected with ACF under moisture/reflow sensitivity tests.

Key Words: Anisotropic Conductive Film (ACF), Adhesive, Flip Chip, Reliability, Delamination, Fracture Toughness, Stress Intensity Factor, Moisture/Reflow Sensitivity Test

1. 緒言

異方性導電樹脂は、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剤であり、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氣的接続に広く用いられている。また、その供給時の形態から、フィルム状のものが異方性導電樹脂フィルム (ACF: Anisotropic Conductive Film)、ペースト状のものが異方性導電樹脂ペースト (ACP: Anisotropic Conductive Paste) と呼ばれている。この異方性導電樹脂を使用することで、実装コストの低減や小型化が可能となることから、フリップチップ (Flip-Chip) や、システムインパッケージ (SiP: System in Package) の実装分野において、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^{1)~4)}。今後、異方性導電樹脂がはんだ代替接続材料として使用されるためには、異方性導電樹脂を用いたフリップチップなどの電子部品の構造信頼性を確保する必要がある。

異方性導電樹脂接続を用いたフリップチップなどは、はんだによって実装を行う他の表面実装電子デバイス (SMD: Surface Mount Device) と共用されることが多く、240~245°C のピーク温度ではんだリフロー処理を行うことが多い。このようなはんだリフロー処理の際に、異方性導電樹脂を用いたフリップチップの電氣接続抵抗値が上昇するか、あるいは接続不良になって、導通が取れなくなることがある^{5),6)}。このような現象を定量的に示すために、IPC/JEDEC J-STD-020⁷⁾ による製品の耐吸湿リフロー等級試験がよく用いられているが、高い等級の製品を開発するには試行錯誤による改良だけでは不十分と考えられる。

そこで、本研究では異方性導電樹脂接合を用いたフリップチップの吸湿リフロー試験時に発生するフリップチップ内部ではく離評価手法を開発した。電子パッケージの耐吸湿リフロー性能を評価した例としては、北野らによる IC パッケージの封止樹脂に対する吸湿リフロー割れに関する研究^{8)~10)}や、著者のグループが行った、北野らの手法を改良した設計手法の研究¹¹⁾などがある。しかしながら、これ

らの封止樹脂の割れに対する評価手法を、そのまま異方性導電樹脂接合部に適用することはできない。本研究で開発した評価手法では、まず異方性導電樹脂とフリップチップ構成材料間のはく離強度を、き裂の応力拡大係数を基準とした破壊靱性値として定量的に評価する。次に、フリップチップの吸湿解析を行い、はんだリフロー時にフリップチップ内部に発生する水蒸気圧の予測を行う。最後に、構成材料間の破壊靱性値と、予測した水蒸気圧による初期はく離部の応力拡大係数を比較し、初期はく離が進展して異方性導電樹脂接合部の導通に影響するかどうかを評価した。

2. 実験および評価の方法

2.1 模擬フリップチップの吸湿リフロー試験

本研究では、開発したACF接合部の吸湿リフローはく離予測手法の有効性を確認するために、模擬フリップチップの吸湿リフロー試験を実施した。評価対象を明確にするために、評価手法の説明を行う前にこの吸湿リフロー試験の概要を述べる。Fig. 1に吸湿リフロー試験に用いた模擬フリップチップの概念図を示す。この模擬フリップチップでは、バンパとターミナル間の導通状況を確認するために、すべてのACF接続部が直列となるようにデージーチェーン構造に結線してある。模擬フリップチップの仕様は、金(Au)バンパ数184で、バンパ直径100 μm 、バンパ高さ30 μm 、バンパピッチ200 μm 、基板厚さ0.8mm、基板上の電極(Cu/Ni/Au)の厚み20 μm である。

この模擬フリップチップを、ACFに3種類の異なるものを用いて製作した。一方、基板、Si Chip、Alターミナルには、いずれの模擬フリップチップにも同じ材料を用いた。これらの材料の材料定数を Table 1, 2に示す。用いたACFは、いずれもエポキシ系の接着剤に直径3 μm のNi粒子が分散されたものである。また、ACF(A)は、低弾性でガラス転移点が高いもの、ACF(B)は、高弾性でガラス転移点が高いもの、ACF(C)は高弾性であるが、Si Chip側と基板側でガラス転移点が大きく異なる樹脂を張り合わせた2層構造となっている。以下、ACF(A), ACF(B), ACF(C)を用いて作成された模擬フリップチップを、それぞれSystem A, System B, System Cと呼ぶ。

吸湿リフロー試験にあたっては、まず、フリップチップを125°Cで24時間乾燥し、試験片を絶乾状態にする。次に、環境試験器を用いて、温度85°C、相対湿度85%RH (Relative Humidity)の環境下に168時間曝露して吸湿させた。この際、一定時間ごとに試験片の吸湿量を電子天秤で測定し、吸湿量の変化を調べた。最後に乾燥炉を用いて、吸湿させた模擬フリップチップを240°Cで40秒間加熱し、はんだリフローを模擬した熱処理を行った。この際、前述のデージーチェーン結線された回路の電気抵抗を測定し、抵抗値が急に増大する時点をもって断線と判断した。

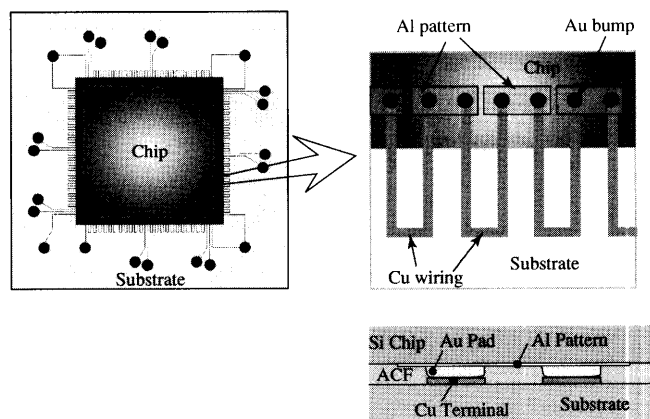


Fig. 1 Schematic of test flip chip under a conductive test

Table 1. Material properties

Material	E (GPa)	ν	T_g (°C)	CTE ($10^{-6}/^\circ\text{C}$) < T_g	> T_g
ACF (A)	1.84	0.38	126	100	800
ACF (B)	2.52	0.38	160	100	400
ACF (C)-Chip	2.78	0.38	155	80	300
ACF (C)-Sub.	2.65	0.38	126	90	600
Substrate	16.5	0.20	156	11.6	1.4
Si chip	170	0.30		3	
Al	68.9	0.355		23	

E : Young's modulus, ν : Poisson's ratio, at room temperature,

T_g : glass transition temperature, CTE: coefficient of thermal expansion,

ACF (C)-Chip: Chip side of the ACF (C), ACF (C)-Sub.: Substrate side of the ACF (C)

Table 2. Variation of Young's moduli (GPa) with test temperature

	ACF (A)	ACF (B)	ACF (C)		Substrate
			Chip	Sub.	
60°C	1.18	1.87	2.21	1.32	16.3
95°C	1.02	1.61	1.97	1.08	15.7
120°C	0.76	1.42	1.71	0.82	15.3
240°C	0.02	0.06	0.12	0.03	5.13

2.2 はく離強度評価

2.2.1 はく離試験

前述のSystem A, B, Cの3種類の模擬フリップチップについて、はく離発生の可能性が想定される、Si ChipとACF、基板とACF、AlパターンとACFの界面のはく離強度を測定した。このためのはく離試験には、Fig. 2のような開口型はく離試験片、Lap Joint型はく離試験片および3点曲げはく離試験片を用いた¹²⁾。これらのはく離試験片では、Si Chip、基板あるいはAl板の一部に離型剤を塗布して、Si ChipとACF、基板とACF、Al板とACFの界面に初期はく離を導入した。また、半導体チップは大変脆く壊れやすいため、Fig. 2(a), (b)に示すように半導体チップと基板をACFを用いて接合した後に、半導体チップの裏面をCyano-Acrylate系もしくはエポキシ系接着剤で、ガラスのサポート板

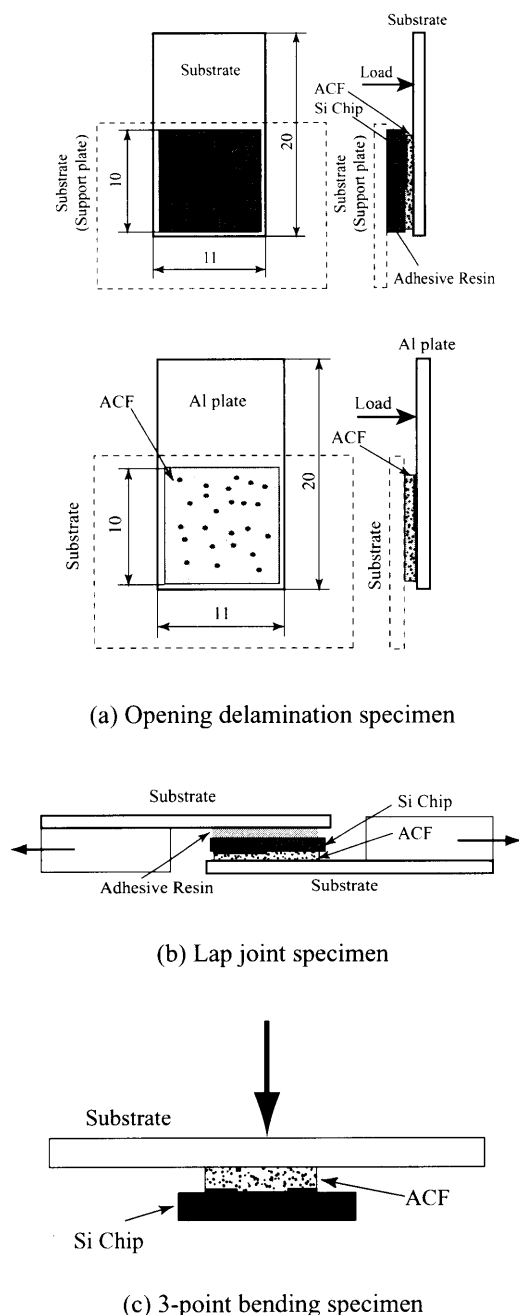


Fig. 2 Schematic of delamination test specimens

や基板材に貼り付け、半導体チップに曲げ変形が作用して破壊しないように配慮した。試験温度は常温、60°C、95°C、120°C、240°Cとし、すべてのはく離試験を試験速度1mm/minの変位制御で行った。さらに、同様の材料の組み合わせよりなる接合はりを作成し、その反りを計測しながら温度を変化させ、見かけ上の残留応力が0となる温度（応力フリー温度）¹²⁾を求めた。はく離試験より得られ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る線形熱弾性解析を行い、以下に示す異種材界面き裂の応力拡大係数基準の破壊靱性値を求めて、はく離強度の評価を行った。

2.2.2 評価のための特異性パラメータ

測定したはく離荷重は、そのままでは試験片のサイズや

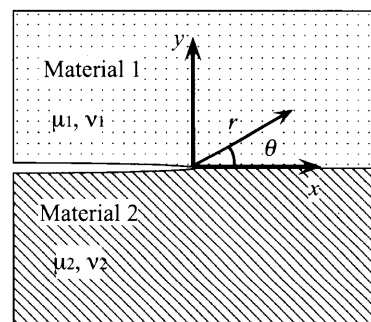


Fig. 3 Coordinate system around an interface crack tip

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。

Fig. 3のように、異種材界面き裂先端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¹³⁾。

$$(\sigma_{yy} + i\sigma_{xy})_{\theta=0} = \frac{K_I + iK_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l_k} \right)^{ie} \quad (1)$$

ここで、 ε は次式のような材料1, 2のせん断弾性係数 μ_j ($j=1, 2$)とポアソン比 ν_j ($j=1, 2$)の組み合わせにより決まる異種材の材料定数 (Bimaterial constant), i は複素定数 ($i^2=-1$), K_I, K_{II} は、それぞれモードI (開口モード) とモードII (面内せん断モード) の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。

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

$$\kappa_j = \begin{cases} 3-4\nu_j & (\text{Plane Strain}) \\ (3-\nu_j)/(1+\nu_j) & (\text{Plane Stress}) \end{cases} \quad (3)$$

厳密には、界面き裂の K_I と K_{II} は、均質体中のき裂のように独立ではなく、 l_k の値によって変化する相対的なものである。したがって、 l_k の値は任意であるが、比較対象とす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¹⁴⁾。

$$\begin{Bmatrix} K'_I \\ K'_{II} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Q & -\sin Q \\ \sin Q & \cos Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$Q = \varepsilon \ln \left(\frac{l'_k}{l_k} \right) \quad (5)$$

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Riceにより推奨されてい

る¹⁵⁾が、実際のプロセスゾーン寸法を知ることは難しい。異方性導電樹脂接合部の混合モード破壊靱性を評価した既報¹²⁾においては、便宜的にすべて $10\mu\text{m}$ とした。

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。

$$K_i = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (6)$$

この総括応力拡大係数は、モードIとIIの負荷モードの違いを区別できないが、 l_k の値に依存しない。今回の評価では、負荷モードがほぼモードIと見なせることから、負荷モードの違いを考慮する必要はないと考え、式(6)の総括応力拡大係数を用いて評価した。

一方、き裂のエネルギー解放率 G は、次式で示される。これより、 K_i は、エネルギー解放率より直接求められることがわかる。

$$G = \beta(K_I^2 + K_{II}^2) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{16 \cosh^2(\varepsilon\pi)} \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \quad (8)$$

本研究における異種材界面き裂の応力拡大係数の解析は、有限要素法による線形熱弾性解析の結果に著者らが以前に開発した数値解析手法¹⁶⁾を適用して行った。しかし、上述のように総括応力拡大係数 K_i は、エネルギー解放率より直接求めることができるため、商用の汎用有限要素法コードに付属するエネルギー解放率の解析オプションを使用して解析することも可能である。

2.3 フリップチップの吸湿リフローはく離評価

2.3.1 フリップチップ内部の水蒸気圧の予測

吸湿は、雰囲気から材料中への水分の拡散現象としてとらえられる。材料中の水分の拡散がフィックの法則に従うと仮定すると、材料中の水分濃度 C は、次式で支配される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (9)$$

ここで、 t は時間、 D は拡散係数である。また、材料中の水分濃度は材料の質量に対して微小であるため、材料と雰囲気との境界では、次式のヘンリーの法則に従う平衡状態が成り立つと仮定した。

$$C = \rho H p_{sv} \quad (10)$$

ここで、 ρ は相対湿度、 H は溶解度係数（ヘンリー係数）、 p_{sv} は飽和水蒸気圧である。両面が雰囲気に暴露された厚さ L の薄板において、拡散が1次元的に生じると仮定すると、式(9)を式(10)の境界条件の下に解くことで次式の1次元拡散方程式の解が得られる。

$$C(x,t) = \rho H p_{sv} \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin\left(\frac{2k+1}{L} \pi x\right) \times \exp\left(-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{L^2} D t\right) \right\} \quad (11)$$

吸湿リフロー試験時の模擬フリップチップ内部に発生する水蒸気圧の予測を行うために、まず、各ACFと基板の吸湿試験を行い、それぞれの拡散係数と溶解度係数を求めた。吸湿試験には、板厚方向の1次元拡散が支配的になるように薄板あるいは、フィルム状のものを用いた。以前の研究より¹¹⁾、板状の試験片の端部から板厚程度内部に入った部分では、ほぼ1次元拡散が支配的となることがわかっているため、試験片の長さや幅が板厚の少なくとも十倍以上大きくなるように配慮した。85°C以下の温度範囲では、試験片を環境試験器中で吸湿させ、一定時間ごとに精密天秤で重量を測定した。また、120°Cの場合については、滅菌用のオートクレーブを用いて100%RHの湿度で吸湿させた。120°Cの場合、吸湿速度が速く、加圧したオートクレーブから試験片を取り出して繰り返し重量を測定することが困難であるため、いったん、飽和吸湿に至った後に120°Cの乾燥器に入れ、脱湿過程の重量変化を一定時間ごとに精密天秤で測定した。今回溶解度係数と拡散係数を測定した材料では、85°C以下の温度範囲での吸湿過程と乾燥過程で計測した拡散係数がほぼ等しかったため、120°Cにおいても吸湿過程と乾燥過程の拡散係数に大きな違いはないと仮定した。

吸湿試験の結果より、まず試験片の飽和水分濃度から、式(10)のヘンリーの法則を用いて溶解度係数を求めた。また、吸湿重量（あるいは、脱湿重量）の時間変化から、式(11)の1次元拡散の解を用いて、試行錯誤法により拡散係数を求めた。

エポキシ系樹脂の吸湿に対する、溶解度係数と拡散係数の温度変化は、次式のアレニウス型の温度依存性をもつことが知られている⁸⁾。

$$\begin{cases} D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \\ H = H_0 \exp\left(-\frac{E_H}{RT}\right) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 D_0 、 H_0 は頻度因子、 E_D 、 E_H は活性化エネルギー、 T は絶対温度、 R は気体定数(8.314 J/mol·K)である。そこで、測定した各温度の溶解度係数と拡散係数について、式(12)を近似式として最小2乗法により係数を求め、解析に使用した。このようにして得られた溶解度係数と拡散係数を用いて、商用の汎用有限要素法コード MARC(MSC Software)により、模擬フリップチップの3次元非定常拡散解析を行い、吸湿時のチップ内部の水分濃度分布を求めた。この際、式(9)のフィックの拡散方程式が非定常熱伝導方程式とまったく同じであることから、汎用有限要素法の非定常熱伝導解析機能を用いて解析した。

いま、模擬フリップチップの金バンプおよび銅ターミナル(Cu/Ni/Au)とACFの接合界面に体積が無限に小さい空隙の存在を仮定すると、ACF中の水分濃度と空隙中の水蒸気

圧には、ヘンリーの法則で示される平衡状態が成り立つと考えられる。すなわち、リフロー温度における、金バンプおよび銅ターミナルとACFの接合界面の最大水分濃度と発生水蒸気圧の関係は、次式のように近似される。

$$\begin{cases} p_v = p_{sv} & (C_{\max} \geq H p_{sv} \text{ at } T_R) \\ p_v = \frac{C_{\max}}{H} & (C_{\max} < H p_{sv} \text{ at } T_R) \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $C_{\max}$ は最大水分濃度、 T_R はリフロー温度、 p_v は空隙に生じる推定水蒸気圧を示す。この式より、吸湿解析によって得られるACF接合部付近の最大水分濃度から、リフロー時の発生水蒸気圧が予測できる。

2.3.2 フリップチップのリフロー時のはく離評価

はんだリフロー温度においては、金バンプと銅ターミナルの間には、ほとんど圧力がかかっていないか、ACFの膨張により、引張応力が生じていると考えられる。また、今回使用したACFの基材として用いられているエポキシ樹脂と貴金属である金バンプとの接着力は非常に小さいため、リフロー温度では、わずかな水蒸気圧でもはく離するものと予測される。そこで、はく離評価においては、金バンプとACFは、完全にはく離しているものと仮定した。このとき、金バンプとACFの間隙には、Fig. 4に示すように全面に水蒸気圧が作用することになる。この状態を、破壊力学を用いて評価するために、金バンプと銅ターミナルを、チップとACF、AlパターンとACF、あるいは、基板とACFの間にバンプと同じ直径の円形界面をはく離(Penny shaped interface crack)が存在する場合に置き換えて考えた。

さらに、き裂面に水蒸気圧が作用した際に、このPenny shaped interface crackが進展するかどうかを評価するために、Fig. 5に示すような半無限異種接合材の界面に存在するPenny shaped interface crackの表面に一樣圧力が作用する場合の応力拡大係数の解析解(次式のKassirの解析解¹⁷⁾)を用いた。

$$K_I + iK_{II} = 2p\sqrt{a} \frac{\Gamma(2+\gamma)}{\Gamma(0.5+\gamma)} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{1}{2\pi i} \ln \frac{\mu_2 + \mu_1(3-4\nu_2)}{\mu_1 + \mu_2(3-4\nu_1)} \quad (15)$$

ここで、 p は異種材界面の円形はく離の表面に作用する圧力、 a は円形はく離の半径、 γ 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、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数を示す。一般的な材料の組み合わせでは、 γ の絶対値は、0.5よりかなり小さい。このため、式(14)は、次式の有名なSneddonの解¹⁸⁾で近似できる。

$$K_I = 2p\sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (16)$$

したがって、内圧を受けるPenny Shaped Interface Crackの K_I を求めるために式(14)の代わりに式(16)を用いても、実用上は問題ない。今回の材料の組み合わせで、最も γ が大き

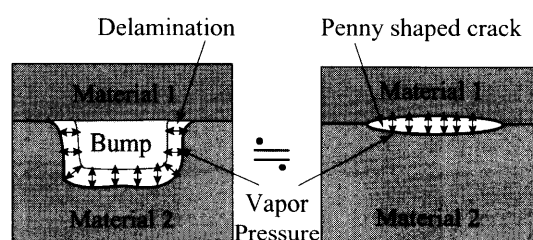


Fig. 4 Assumption of penny shaped crack using in this study

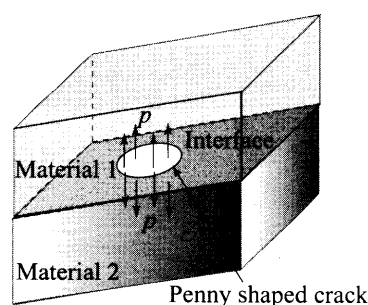


Fig. 5 Penny shaped crack between dissimilar materials

Table 3. Number of disconnected flip chips after moisture/reflow sensitivity test

System	Disconnected Chips		
	RF1	RF2	RF3
System A	10/10	—	—
System B	2/10	2/10	2/10
System C	7/10	7/10	7/10

(Disconnected Chips/Number of test specimens)

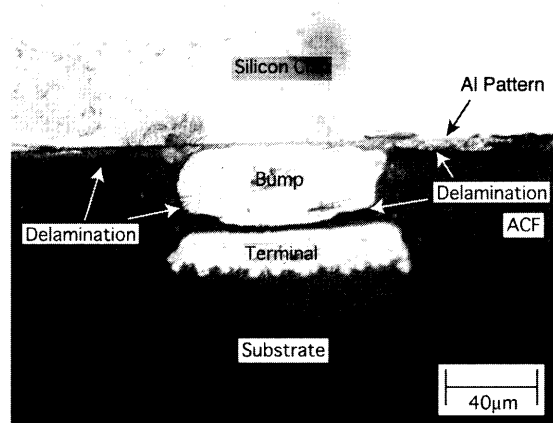
RF1, RF2, RF3: First, second and third reflow processes

くなるSi ChipとACF(A)の場合でも、 $\gamma=0.06i$ であり、式(14)と式(16)より求めた K_I の違いは、たかだか0.8%にすぎない。また、これらのことより、内圧を受けるPenny Shaped Interface Crackの K_I は、材料の組み合わせの影響をほとんど受けないことがわかる。

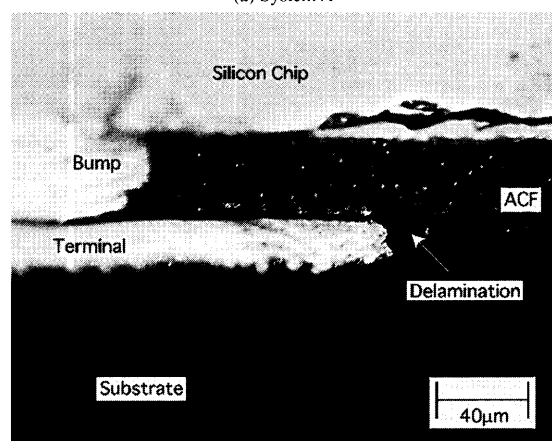
3. 実験と評価の結果

3.1 模擬フリップチップによる吸湿リフロー試験結果

2.1で説明した吸湿リフロー試験後の模擬フリップチップの導通試験結果をTable 3に示す。System Aは、10個の試験片のすべてが接続不良になったが、System Bは2/10個、System Cは7/10個が接続不良になった。また、1回目のリフロー処理で接続不良にならなかった模擬フリップチップは2,3回目リフロー処理を行っても接続不良にはならなかった。これは、吸湿試験時に吸湿された水分が1回目のリフロー処理で蒸発してしまい、2,3回目のリフロー処理では、模擬フリップチップ内部の水分濃度が低くなり、ACFの接合界面をはく離させるレベルの水蒸気圧が発生しなかったためと考えられる。また、この吸湿リフロー試験の結果より、System Bの耐吸湿リフロー信頼性が優れていることが



(a) System A



(b) System C

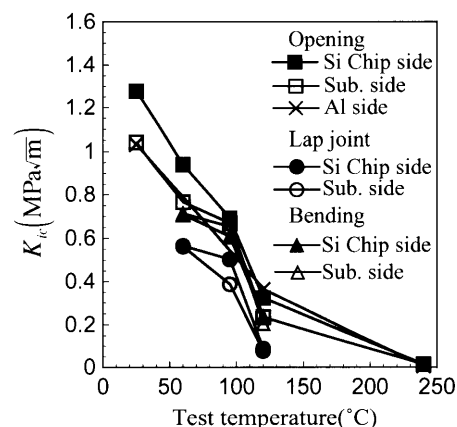
Fig. 6 Microphotograph of flip chip after moisture/reflow sensitivity test

わかる。次に、吸湿リフロー試験後に接続不良になった System A と System C のフリップチップの横断面を光学顕微鏡を用いて観察したものを Fig. 6 に示す。写真を見ると、System A では、金バンプおよび Al パターンと ACF の界面 (Fig. 6(a)) に、一方、System C では、銅ターミナルおよび基板と ACF の界面 (Fig. 6(b)) にはく離が生じ、チップ側のバンプと基板側のターミナルが離れて接続不良になったことがわかる。

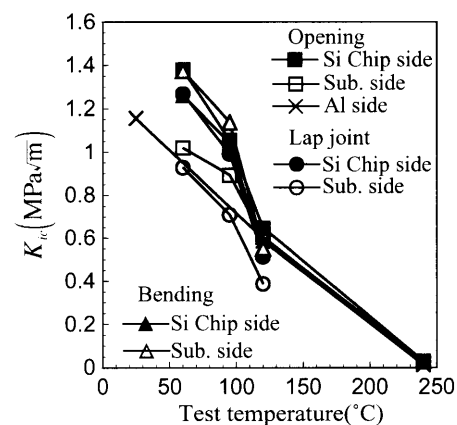
3.2 はく離靱性評価

2.2.1 に示す方法で、System A, B, C のそれぞれの模擬フリップチップに使用された Si Chip と ACF, Al パターンと ACF, 基板と ACF の界面のはく離試験を行い、はく離が発生する荷重を求めた。この中で、常温における、System A の Lap joint 試験と曲げ試験、System B のすべてののはく離試験、System C の Lap joint 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、はく離靱性の評価は行えなかった。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。また、アルミニウムと ACF との界面のはく離試験は、開口型はく離試験のみ行った。

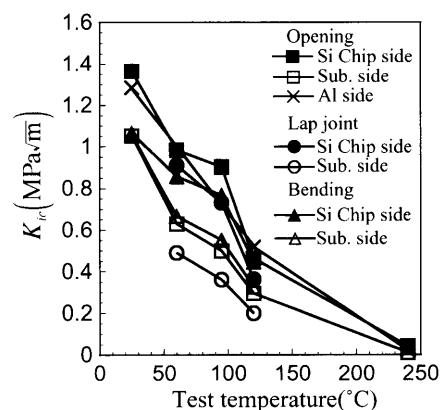
その結果得られた総括応力拡大係数を用いたはく離靱性の温度依存性を、Fig. 7 に示す。これより、異種材界面き



(a) System A



(b) System B



(c) System C

Fig. 7 Variation of delamination fracture toughness (total stress intensity factor at the onset of delamination) with temperature (Si chip side: A crack between Si chip and ACF, Sub. side: A crack between Substrate and ACF, Al side: A crack between Al and ACF)

Table 4. Delamination toughness of opening delamination test at 240°C

	Interface	System A	System B	System C
K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)	Si chip side	0.0160	0.0297	0.0422
	Sub. side	0.0143	0.0260	<u>0.0116</u>
	Al side	<u>0.0077</u>	<u>0.0130</u>	0.0230

(Si chip side : A crack between Si chip and ACF, Sub. side : A crack between Substrate and ACF, Al side : A crack between Al and ACF. The underlined value indicates the minimum delamination toughness for each system)

Table 5. Henry's law coefficients and diffusion coefficients of ACFs and substrate

Condition (°C/%RH)	Material	H (mg/mm ³ MPa)	D (10 ⁻² mm ² /hr)
30°C/80%RH	ACF(A)	3.050	0.552
	ACF(B)	4.545	0.402
	ACF(C)	3.120	0.480
	Substrate	1.508*	0.080*
85°C/85%RH	ACF(A)	0.5204	5.70
	ACF(B)	0.6951	3.36
	ACF(C)	0.5405	4.50
	Substrate	0.194	0.75
120°C/100%RH	ACF(A)	0.233	9.72
	ACF(B)	0.2993	5.76
	ACF(C)	0.2326	8.64
	Substrate	0.0808	2.25

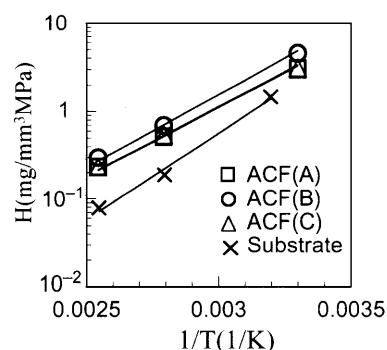
裂の応力拡大係数で示したはく離靱性値は、いずれも温度とともに顕著に低下することがわかる。System Cは、初期はく離がチップとACFの界面にあるか基板とACFの界面にあるかによって、はく離靱性値の差が他の材料の組み合わせより大きくなっている。これはSystem Cに用いたACF(C)が、チップ側と基板側で異なる材料特性を持つ2層構造をしているためと考えられる。

Table 4に、今回問題としているリフロー温度(240°C)での開口型はく離試験より求めたはく離靱性値を示す。表中に下線で示すとおり、System AとSystem Bでは、ACFとAlの界面の破壊靱性値が最も低く、System Cでは、ACFと基板の界面の破壊靱性値が最も低かった。このことは、Fig. 6のはく離形態とも一致している。さらに、下線で示した破壊靱性値は、System B, C, Aの順に大きいことがわかる。

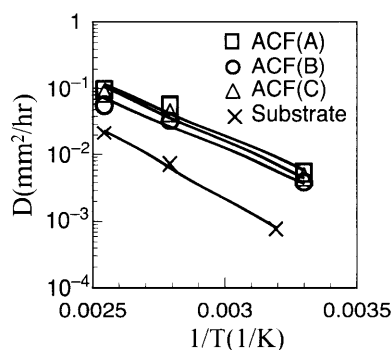
3.3 模擬フリップチップのリフロー時における発生水蒸気圧の予測結果

3.3.1 拡散係数と溶解度係数の測定結果

各環境条件で求めた拡散係数と溶解度係数をTable 5に示す。表からわかるように、すべての環境条件において、溶解度係数と拡散係数はACFの方が基板より高くなっている。ACFのうち、ACF(A)は拡散係数は一番高いが溶解度係数は一番低い。一方、ACF(B)は、拡散係数は一番低いにもかかわらず溶解度係数は一番高くなっている。言い換え



(a) Henry's law coefficient



(b) Diffusion coefficient

Fig. 8 Arrhenius plots of Henry's law coefficient and diffusion coefficient**Table 6.** Variation of activation energies and pre-exponential factors

	ACF(A)	ACF(B)	ACF(C)	Substrate
D_0 (10 ³ mm ² /hr)	2.47	1.42	3.80	12.7
E_D (10 ⁴ J/mol)	3.257	3.228	3.429	4.304
H_0 (10 ⁻⁶ mg/mm ³ /MPa)	20.68	16.92	19.89	0.67
E_H (10 ⁴ J/mol)	-3.019	-3.167	-3.036	-3.792

れば、ACF(A)は早く飽和状態に達するが、飽和水分濃度は比較的低く、ACF(B)の吸湿速度は遅いが飽和水分濃度は高くなる性質をもっていることがわかる。しかし、基板の溶解度係数、拡散係数と比較すると、ACF間の差異は少ない。

次に、各温度で求めた、溶解度係数と拡散係数をアレニウスプロットした結果をFig. 8に示す。図のとおり、アレニウスプロットは、いずれも良い直線性を示している。式(12)の各係数の値をTable 6に示す。

3.3.2 模擬フリップチップの吸湿解析結果

Fig. 9に有限要素法による3次元拡散解析の結果より推定される、模擬フリップチップの重量変化の推定値と実測値を示す。これより、両者がよく一致しており、解析が信頼できることがわかる。この図に示すように、模擬フリップチップは吸湿開始から3日後に飽和吸湿状態になり、System A, B, Cの飽和吸湿率には、ほとんど差がない。これは、飽和状態での吸湿水分のほとんどは、基板に貯えられたも

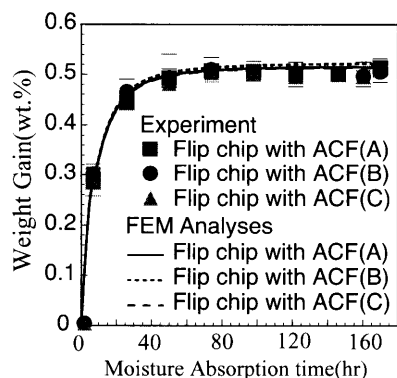


Fig. 9 Weight gains of test flip chips with moisture absorption time

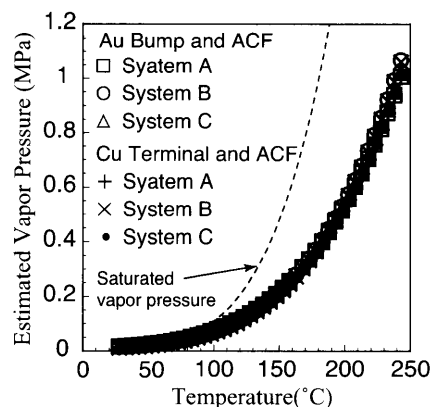


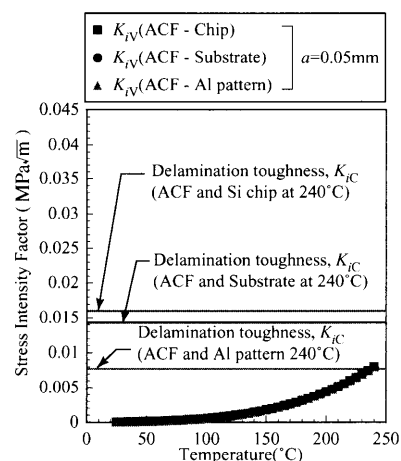
Fig. 10 Expected vapor pressure in test flip chips during the reflow process

のであるため、ACFの違いには、ほとんど左右されないためと考えられる。しかし、ACF接続を用いたフリップチップのリフロー時の破壊は、ACFに吸湿した水分の水蒸気化によって引き起こされる。このため、ACFを用いたフリップチップの耐リフロー信頼性は、ACFの吸湿特性に大きく影響されると考えられるので、注意が必要である。

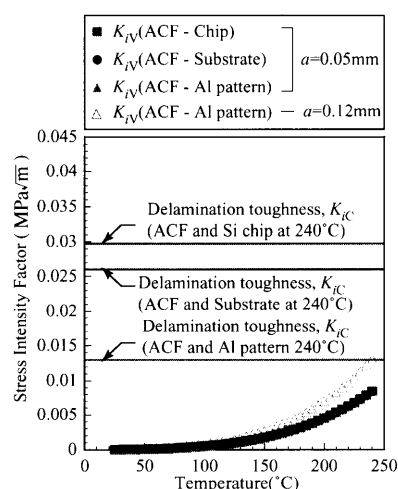
本研究では、模擬フリップチップの吸湿解析の結果、水分濃度が最も高かったフリップチップのコーナーに位置する金バンプと銅ターミナルの間のACF接合部の水蒸気圧を式(13)を用いて予測した。その結果をFig. 10に示す。このとき、はんだリフロー温度での溶解度係数は、式(12)を高温度に外挿して求めた。

3.4 模擬フリップチップ中のはく離進展予測結果

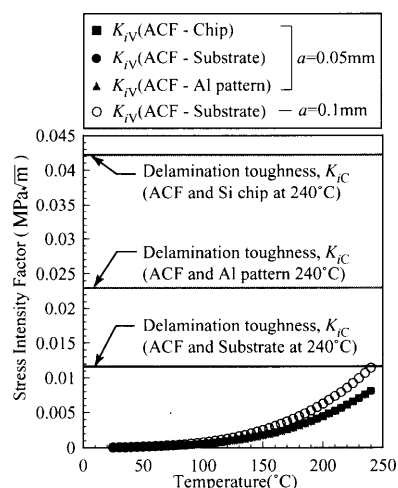
Si Chip、基板およびSi Chip表面のAlパターンのそれぞれとACFの接合界面に金バンプと同じ大きさ($a=50\mu\text{m}$)の円形はく離が存在し、その表面に推定水蒸気圧が働くと仮定したときの総括応力拡大係数(K_{IV})を式(14), (15)より求めた。吸湿リフロー時に発生する水蒸気圧による応力拡大係数と、 240°C での各接合界面のはく離靱性値(開口型はく離試験より求めた K_{IC})をFig. 11に示す。Fig. 11より、水蒸気圧が同じであれば、応力拡大係数 K_{IV} の値は、材料1, 2の組み合わせによらず、ほぼ等しいことがわかる。これ



(a) System A



(b) System B



(c) System C

Fig. 11 Comparison between the delamination toughness and the stress intensity factors during the reflow process after moisture absorption test (K_{IV} ; Total stress intensity factors caused by vapor pressure in a penny shaped crack, K_{IC} ; Delamination toughness measured by delamination test at 240°C)

は、式(15)で求められる γ の値が小さいために、 K_N は使用材料の組み合わせによらない式(16)でほぼ近似できるためである。

System Aの結果を見ると、チップや基板とACF間のはく離靱性値は、リフロー温度での水蒸気圧による応力拡大係数より高くなっている。しかし、Alパターン-ACF(A)間のPenny shaped interface crackの場合、240°Cでの水蒸気圧による応力拡大係数は、はく離靱性値より若干高い値を示している。したがって、ACF(A)を用いた模擬フリップチップでは、吸湿リフロー処理を行った際に、はく離した金バンプの表面に生じる水蒸気圧によって、金バンプの根元のACFとAlパターンの界面にはく離が進展したものと推測される。いったん、ACFとAlパターンの界面が全面はく離してしまうと、界面はく離が大きくなったことによって応力拡大係数は格段に大きくなり、はく離は水蒸気が模擬フリップチップの外部に放出されるまで拡大すると考えられる。

一方、ACF(B)を用いた模擬フリップチップの場合は、すべての接合界面のはく離靱性値が、リフロー時の予測水蒸気圧による、円形はく離の応力拡大係数より高くなっており、今回の吸湿リフロー試験ではく離が生じないと予測できる。言い換えると、はく離が生じるには、初期はく離として採用した金バンプの直径よりも大きな初期はく離が必要である。試みに、AlパターンとACF(B)の接合界面に半径120 μm の円板状のき裂が存在すると仮定して応力拡大係数を求めたところ、240°CでのAlパターン-ACF(B)間のはく離靱性値とほぼ同じ値になった。このことは、Table 3のSystem Bの試験結果において2つの試験片が接続不良になったのは、金バンプ周りのAlパターンとACFの界面に半径120 μm のPenny shaped interface crackに相当する、初期接着不良が存在していたと解釈できる。同様に、System Cの方は、銅ターミナルの周りやACFの界面に半径100 μm のPenny shaped interface crackに相当する接続不良を仮定するとはく離限界に達する。実際に破壊した模擬フリップチップ中のバンプの周囲にこの大きさの初期はく離が存在していたかどうかは不明である。むしろ、この最低許容初期はく離直径は、製造プロセスで許容される初期接着不良に対する耐久性を示す指標として捉える方が適切であると考えられる。これらの結果は、Table 3の実際の実験結果の傾向をよく説明することができ、今回の定量的な評価方法が妥当なものであることを示している。

4. 結 言

ACFを用いた模擬フリップチップの吸湿リフロー試験、吸湿解析およびACF接合部のはく離強度を用いて模擬フリップチップの吸湿リフローはく離の評価を行った結果、以下のような結論が得られた。

(1) 異種材界面き裂の応力拡大係数を用いて評価したは

く離靱性を用いて、ACFなどの接着接合部の定量的なはく離強度の評価を行うことができる。また、これらのはく離靱性値は、実デバイスの設計に用いることができる。

- (2) ACFを用いた、フリップチップの吸湿解析を行うことで、吸湿リフロー試験時のフリップチップ内部に発生する水蒸気圧を予測することができる。
- (3) バンプ直径の円板型初期はく離に吸湿リフロー試験時の水蒸気圧が作用したと仮定したときの応力拡大係数が、ACF接続部のはく離靱性値を超えたときに大規模なはく離が発生するものと考えられる。この考え方を用いて、ACF接合部のはく離防止設計を行うことができる。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金および福岡地域の文部省知的クラスター創成事業の支援を受けた。また、研究の遂行にあたっては、日立化成工業総合研究所と日本機械学会研究分科会(RC202)に全面的なご協力をいただいた。ここに記して感謝する。

(2004.9.1-受理)

文 献

- 1) K. Helge and L. Johan: "Overview of conductive adhesive interconnection technologies for LCD's", IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, Vol. **21-2**, pp. 208-214, 1998
- 2) Y. W. Chiu, Y. C. Chan and S. M. Lui: "Study of short-circuiting between adjacent joints under electric field effects in fine pitch anisotropic conductive adhesive interconnects", Microelectronics Reliability, Vol. **42-12**, pp. 1945-1951, 2002
- 3) G. Reza: "Chip scale package issues", Microelectronics Reliability, Vol. **40-7**, pp. 1157-1161, 2000
- 4) C. J. Jannes: "Reliability of electrically conductive adhesive joints for surface mount applications: A summary of the state of art", IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, Vol. **21-2**, pp. 215-225, 1998
- 5) C. Y. Yin, M. O. Alam, Y. C. Chan, C. Bailey and H. Lu: "The effect of reflow process on the contact resistance and reliability of anisotropic conductive film interconnection for flip chip on flex applications", Microelectronics Reliability, Vol. **43-4**, pp. 625-633, 2003
- 6) A. Seppala and E. Ristolainen: "Study of adhesive flip chip bonding process and failure mechanisms of ACA joints", Microelectronics Reliability, Vol. **44-4**, pp. 639-648, 2004
- 7) "Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices", IPC/JEDEC J-STD-020C, 2004

- 8) 北野 誠, 河合末男, 西村朝雄, 西 邦彦: “はんだリフロー工程で発生するICのパッケージクラックに関する研究”, 日本機械学会論文集A編, Vol. **55**, No. 510, pp. 356–363, 1989
- 9) 北野 誠, 西村朝雄, 河合末男: “はんだリフロー工程で発生するICのパッケージクラックに関する研究 (第2報, 応力特異場理論による樹脂の強度評価)”, 日本機械学会論文集A編, Vol. **57**, No. 538, pp. 1398–1405, 1991
- 10) 北野 誠, 西村朝雄, 河野竜治: “はんだリフロー工程で発生するICのパッケージクラックに関する研究 (第3報, 素子接着剤層の影響)”, 日本機械学会論文集A編, Vol. **60**, No. 570, pp. 556–562, 1994
- 11) 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
- 12) W. K. Kim, 池田 徹, 宮崎則幸: “異方性導電樹脂接合部の接合信頼性評価”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **6**, No. 2, pp. 153–160, 2003
- 13) F. Erdogan: “Stress distribution in a Nonhomogeneous elastic plan with crack”, Trans. ASME Series E, J. Applied Mechanics, Vol. **30**, pp. 232–236, 1963
- 14) 池田 徹, 宮崎則幸, 祖田敏弘, 宗像 健: “異種材界面き裂の混合モード破壊基準”, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. **58**, No. 555, pp. 2080–2087, 1992
- 15) J. R. Rice: “Elastic fracture mechanics concepts for interfacial crack”, Trans. ASME Series E, J. Applied Mechanics, Vol. **55**, pp. 98–103, 1988
- 16) 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**, No. 611, pp. 1377–1384, 1997
- 17) M. K. Kassir and A. M. Bregman: “The stress-intensity factor for penny-shaped crack between two dissimilar material”, Trans. ASME Series E, J. Applied Mechanics, Vol. **39-1**, pp. 308–310, 1972
- 18) 岡村弘之: “線形破壊力学入門”, 培風館, p. 220, 1976