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)

北 野 誠^{*1}, 西 村 朝 雄^{*1}, 河 合 末 男^{*1}

A Study of Package Cracking during the Reflow Soldering Process (2nd Report, Strength Evaluation of the Plastic by Using Stress Singularity Theory)

Makoto KITANO, Asao NISHIMURA and Suel KAWAI

The plastic packages of ICs have been changing from insertion types to surface mounted types. Reflow soldering is used for surface mounted ICs onto printed circuit boards. During this process, packages are heated to above 200°C. If the encapsulant absorbs moisture, package cracking may occur during the reflow soldering. It is known that the cracks are caused by vapor pressure generated inside the packages, causing excessive stress in the plastic. In the former report, moisture diffusion analysis in the plastic was performed and vapor pressure could be obtained. Since the edge tip of the chip pad where package cracking occurs is a singular point within the elastic stress field, strength evaluation for package cracking is not established. In this study, the quantitative strength evaluation of the plastic is investigated by using the stress singularity theory.

Key Words: Fracture Criterion, Finite Element Method, Reliability, IC, Stress Singularity, Vapor Pressure

1. 緒 言

IC, LSI のプラスチックパッケージでは, 高密度実装, 実装の高効率化のため, リードを基板に直接はんだ付する面付実装形パッケージ(図 1)が主流になっている。はんだ付実装には, 基板全体を赤外線などで加熱するリフローソルダリングが用いられ, IC パッケージは 200°C 以上の高温に加熱される。ところが, パッケージの封止樹脂が大気中の水分を吸湿している状態でこの加熱を行うと, 図 2 に示すように, 樹脂にクラックが生じる場合があり, 信頼性上大きな問題となっている。本報では, このクラックをリフロークラックと呼ぶ。

リフロークラックは, 樹脂中に吸湿された水分が, リフロー時の加熱によりパッケージ内部で水蒸気になり, その蒸気圧により発生する樹脂の応力が過大となるために生じることが知られている⁽¹⁾。著者らはこの問題に対し, パッケージ内の水分拡散解析と樹脂の諸物性の測定を行い, 樹脂の水分濃度分布とパッケージ内部に発生する蒸気圧を求める手法を開発した⁽²⁾。ところが, リフロークラックの起点となる素子搭載板

(Chip pad) コーナ部は, 応力特異場となるため, 強度評価法が確立していなかった。すなわち, コーナ部の樹脂の応力は, 弾性論的には無限大となり, 有限要素法は(FEM)などの数値解析で得られる応力値は要素寸法に依存する。このため, この応力とレンジの強度試験で得られる破壊応力との対応は不明であった。

そこで本報では, 接着の強度評価などで用いられている応力特異場理論⁽³⁾を用い, 素子搭載板コーナ部の樹脂の強度評価とリフロークラック発生の定量的予測手法について検討したので, 以下に報告する。

図 1 面付実装形パッケージ

図 2 リフロークラック

* 原稿受付 平成 2 年 10 月 17 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町 502)。

2. 水分拡散解析の概要

リフロークラックは、湿った雰囲気中に放置したパッケージを加熱することにより生じる。放置時および加熱時のパッケージ内部の水分濃度分布と水蒸気圧を水分拡散解析により求める手法については、前報にて報告したので、本章ではその概要について簡単に述べる。

図3に解析モデルを示す。素子搭載板下方の樹脂部分を拡大した(b)において、樹脂と素子搭載板の界面に圧力 p 、体積 V 、質量 m の水蒸気が発生している。素子搭載板の短辺長さを a 、長辺長さを b 、面積を $A(=ab)$ とし、樹脂の厚さを h とする。樹脂中の水分濃度分布 C は、素子搭載板下面を原点とした座標 x と時間 t の関数であり、次の拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{..... (1)}$$

$$\text{初期条件: } C(t=0) = C_0(x) \quad \text{..... (2)}$$

$$\text{境界条件: } C(x=0) = pS \quad \text{..... (3)}$$

$$C(x=h) = \rho p_s S \quad \text{..... (4)}$$

ここで、 D は水分の拡散係数、 S は水分の溶解度係数であり、温度との関係はアレニウスの式で表すことができる。 $C_0(x)$ は初期水分濃度分布、 ρ は雰囲気中の相対湿度、 p_s は雰囲気中の飽和蒸気圧を表す。時刻 $\tau=0$ から $\tau=t$ までにすきまに供給される水分の全質量 m

は、

$$m = m_0 + A \int_0^t D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} d\tau \quad \text{..... (5)}$$

となる。ここで m_0 は初期水分質量である。すきま(蒸気)の体積 V と最大すきま厚さ δ の関係は次式で表される。

$$V = \eta \delta A \quad \text{..... (6)}$$

ここで η は比例定数であり、パッケージ構造に関係なく $\eta \approx 0.5$ であることが FEM 解析よりわかっている。蒸気の比容積 v は、

$$v = V/m = f(p, T) \quad \text{..... (7)}$$

で表される。 f は蒸気の状態方程式を示す。最大すきま厚さ δ は、蒸気圧 p に比例し、FEM 解析により、次式で整理できることがわっている。

$$\delta = \alpha \frac{p}{E} + \delta_0 \quad \text{..... (8)}$$

ここで、 E は樹脂の縦弾性係数、 δ_0 は初期すきま厚さである。 α, γ はパッケージ構造により決まる定数であり、後述する三次元の有限要素法解析により求めることができる。

以上の式より、パッケージ放置時および加熱時における温度 T と湿度 ρ が時間 t の関数として与えられた場合、パッケージの水分濃度分布 $C(x, t)$ 、蒸気圧 $p(t)$ を求めることができる。

3. リフロークラック起点の 応力特異場解析

3.1 応力特異場パラメータ 前節では、リフロー加熱時にパッケージ内部に生じる蒸気圧 p を求める手法について述べた。この蒸気圧を分布荷重として与え、FEM 等の数値解析を行うことにより、パッケージ内部の応力分布を求めることができる。ところが、クラックの起点となる素子搭載板コーナ部近傍の樹脂は、コーナ頂点で応力が無限大となる応力特異場となっている。このため FEM 解析によるこの部分の応力値は、分割した要素の寸法に大きく依存するため、普遍的な強度評価ができない。

そこで、本報では、応力特異場における応力の分布が、特異点からの距離のべき乗で表されることに着目した強度評価を行った。特異場の応力 σ は、特異点からの距離 r の関数であり、次式で表される⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\sigma(r) = K r^{-\lambda} \quad \text{..... (9)}$$

ここで、 K は特異場の強さ、 λ は特異性の指数である。

リフロー加熱中の素子搭載板コーナ部の拡大図を図4に示す。素子搭載板下方の樹脂は、蒸気圧 p により下方に押されている。素子搭載板側面 [図4(a) A-B

図3 水分拡散解析のモデル

間]と樹脂の間には滑りが生じ、蒸気圧 p と熱膨張により、樹脂のコナCは素子搭載板のコナBよりも下方に変化する。したがって、樹脂のコナ部は、図4(b)に示すように、開き角 $\phi=90^\circ$ の自由面にモデル化することができる。この場合の特異性の指数 λ は、次の応力特異場の特性方程式 Q の解として表される⁽⁴⁾。

$$Q = \sin^2\{(1-\lambda)\phi\} - (1-\lambda)^2 \sin^2 \phi = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$\phi=90^\circ$ の場合の $0 < \lambda < 1$ の範囲における解は、 $\lambda=0.456, 0.092$ となる。特異点のごく近傍では、応力分布は最大の特異性の指数に支配されると考えられるため、図4(b)のモデルの特異性の指数としては、0.456を採用する。

3・2 FEMによる樹脂コナ部の特異場解析

特異性の指数 λ は、前節で示したように理論的に求められるが、特異場の強さ K は、FEM等の数値解析によらなければならない。特異場の強さ K の算出方法

図4 素子搭載のコナ部

図5 樹脂コナ部 FEM 解析モデル

はいくつかあるが、本報では、FEMによる応力分布を式(9)に当てはめることによって求めることとする。

特異場の強さ K を求める上で必要な要素寸法、要素の種類等の計算条件を調べる目的で、図5に示す単純な形状のモデルについて、FEM応力解析を行った。このモデルの全体寸法は、後述する樹脂の強度試験片と同一である。図5(a)(モデルA)では、要素の最小寸法が $2\mu\text{m}$ であり、精度の高い8節点の二次元平面ひずみ四辺形要素を用いた。図5(b)(モデルB)では、要素の最小寸法が $50\mu\text{m}$ と粗く、4節点要素を用いた。荷重としては、モデルの右端に1Nの集中荷重を与えた。また両モデルとも厚さは1mmである。

$2\mu\text{m}$ 8節点要素モデル各要素の四つの積分点における応力を線形補間し、特異点を中心とする極座標 (r, θ) と応力との関係を計算した。計算を行った範囲は、特異点を中心とする一辺0.2mmの正方形領域内である。円周応力 σ_θ と最大主応力 σ_1 について、半径方向の応力分布を求め、式(9)における特異性の指数 λ の値を調べた。図5(a)のO-C面からの角度 $\theta=135^\circ$ における σ_θ の分布を図6に示す。 σ_θ は、両対数グラフ上で直線状に分布している。この傾きから λ を最小二乗法により求めると、 $\lambda=0.468$ となり、理論値0.456に近い値となる。また、 $50\mu\text{m}$ 4節点要素モデルのコナ部の要素[図5(b)の要素b]の四つの積分点における応力の平均値から求めた σ_θ を要素中心の値として図6にプロットした。この値は、 $2\mu\text{m}$ 8節点要素モデルの応力分布とよく一致している。

このような方法により、特異点を中心としたすべての方向について、 σ_θ, σ_1 による特異性の指数 λ を計算した。結果を図7(a), (b)に示す。図7(a)において、自由境界面では、理論的に $\sigma_\theta=0$ となるため、 θ が 0° に近い場合と 270° に近い場合は λ の計算精度が悪く

図6 円周応力 σ_θ の分布

なり, λ の値は理論値 0.456 から離れるが, その他の場合は, λ は理論値によく一致している。また, 図 7 (b) に示す σ_1 から求めた λ は, どの方向でも理論値によく一致している。以上のことから, 8 節点要素を用いて特異点付近を $2\mu\text{m}$ に分割したモデルを用いることにより, コーナ部分の応力特異場の解析を行うことができることがわかった。

次に, $\lambda=0.456$ として, σ_θ, σ_1 の分布から最小二乗法により各方向の特異場の強さ K_θ, K_1 を求めた。結果を図 7 (a), (b) に併記する。 K_θ は $\theta=128^\circ$ において最大値 $0.283\text{ MPa m}^{0.456}$ をとることがわかった。 σ_1 から求めた特異場の強さ K_1 は, $\theta=135^\circ$ 付近において極小になり, $\theta=60^\circ, 210^\circ$ 付近において極大になる。

$50\mu\text{m}$ 4 節点要素モデルの特異点に接する要素 [図 5 (b) の要素 a, b, c] から求めた特異場の強さ K_θ, K_1 を図 7 (a), (b) にそれぞれ併記したが, これらの値

(a) K_θ の分布

(b) K_1 の分布

図 7 特異性の指数と特異場の強さの分布

は, $2\mu\text{m}$ 8 節点要素モデルの値とほぼ一致している。したがって, 本報で対象としている IC パッケージ素子搭載板コーナ部については, 特異点付近を $50\mu\text{m}$ に分割した 4 節点要素を用いても, 特異場の強さを求めることができる。図 5 に示したモデルは, 形状が単純なため, $2\mu\text{m}$ まで細く分割した高精度の 8 節点要素を用いることができたが, 後述するように, 実際の IC パッケージの強度評価では, パッケージ全体の三次元応力解析を必要とするため, このように細い要素分割は現実的には不可能である。そこで, 実際の強度評価では, 本章で得られた知見を基に, 二次元の 4 節点四辺形要素に相当する最小寸法 $50\mu\text{m}$ の三次元六面体要素を用いて解析を行うこととする。また, 円周応力 σ_θ から求めた特異場の強さ K_θ と最大主応力 σ_1 から求めた特異場の強さ K_1 のどちらかを強度評価に用いるか, あるいはどの方向の特異場の強さをを用いるかについては, 次章で述べる。

4. 樹脂コーナ部の強度試験

素子搭載板を起点とするリフロックラックの強度評価データを得ることを目的に, 実際の IC パッケージの樹脂コーナ部に曲げ荷重を加え, 破壊試験を行った。

4.1 実験方法 試験片の製作方法を図 8 に示す。IC パッケージのリードをニップで切断し [図 8 (a)], パッケージの中央部分を厚さ約 1 mm にダイヤモンドブレードで切断する (b)。次に図 8 (c) に破線で示した部分を同じくダイヤモンドブレードで切断した後, 素子および素子搭載板をピンセットで除去し, (e) に示す試験片を製作した。なお, 用いた樹脂は, 通常の IC パッケージで用いている溶融シリカを充てん

図 8 樹脂コーナ部強度試験片の製作方法

したエポキシ樹脂である。

強度試験装置を図9に示す。40×40×40 mmのガラス製恒温槽内に試験治具を取付け、図9(b)に示すように試験片側面を締付けて固定する。最小変位量0.25 μmのパルスモータ駆動ステージにより試験片先端に変化を与え、このときの荷重を容量20 Nのロードセルで測定した。試験機の制御とデータの記録には、パーソナルコンピュータを使用した。変位速度は約2 μm/s、温度は室温から300°Cの範囲で実験を行った。また、クラックの発生を倍率40倍の実体顕微鏡で観察しながら実験を行った。

4・2 実験結果 20°C、150°C、200°Cにおける変位と荷重の関係を図10に示す。20°Cでは、荷重負荷の初期は変位と荷重が線形の関係にあるが、変位が大きくなると、樹脂が示す粘弾性のため、変位と荷重の関係は多少非線形になる。ガラス転移点近傍の150°Cでは、粘性の影響が強く、線形の部分はほとんどない。ところが、ガラス転移点を超えた200°Cでは、変位と荷重の関係は線形になり、粘性挙動は示さない。このように温度により変位と荷重の関係が変化するのは、レジンの変形を支配するメカニズムがエネルギー弾性(20°C)、粘弾性(150°C)、エントロピー弾性(200°C)と変化するためである。

顕微鏡で樹脂のコーナ部を観察しながら実験を行っ

(a) 全体図

(b) 試験片部分拡大図

図9 強度試験装置

たところ、いずれの温度でも荷重が最大値に達したときにクラックの発生が認められた。そこで、荷重の最大値を破壊荷重 P_b と定義する。

破断後のクラックの例(試験温度200°C)、を図11に示す。クラックの起点では、素子搭載板に対し約135°の方向にクラックが進展している。この方向は、他の試験片、温度でも同じであった。図7より、クラックの発生方向は、円周応力 σ_θ の分布から求めた特異場の強さ K_θ の最大値の方向とよく一致しているが、最大主応力 σ_1 の分布から求めた特異場の強さ K_1 の最大値の方向とは一致していない。しかも、 K_θ は、 $\theta = 135^\circ$ 付近に分布が集中しているのに対し、 K_1 は一様に分布している。樹脂のコーナ部の強度試験で発生するクラックの方向が135°付近に集中していることは、破壊を支配する強度パラメータの分布が同じく135°付近に集中していなければならないことを意味する。以上のことから、コーナ部の強度評価で用いる強度パラメータとしては、円周応力 σ_θ から求めた特異場の強さ K_θ が妥当であると考えられる。このことをクラックの発生と関連して考察すると、円周応力はコーナを起点とするクラックに垂直な方向の応力であり、クラックを開口させる応力である。一般に本実験で用いた樹脂のような脆性材料では、モードIのクラックが破壊を支配するため、クラックに垂直な応力成分のみが問題となる。特にコーナ部の応力では、図7

図10 変位と荷重の関係

図11 コーナ部の強度試験で生じたクラック

の(a)と(b)を比較してわかるように、 $\theta=135^\circ$ では K_θ と K_I が完全に一致している。

以上の考察結果から、円周応力 σ_θ から求められる特異場の強さ K_θ をコーナ部の強度評価パラメータとし、次式でコーナ部の強度 K_{ec} を定義する。

$$K_{ec}=0.283\frac{P_B}{B}[\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.456}] \quad \dots\dots\dots(11)$$

式(11)の係数0.283は、前節の解析で求めた荷重1N、試験片厚さ1mmのときの K_θ の最大値($\theta=128^\circ$ で発生)であり、 P_B は破壊荷重[N]、 B は試験片厚さ[mm]を表す。

本実験で求めたコーナ部の強度と温度の関係を図12に示す。本報で定義したコーナ部の強度は、応力特異場の線形応力解析を基にしているの、粘弾性を示すガラス転移点付近の温度(本実験で用いた樹脂では 150°C 付近)での破壊にそのまま適用するのには問題があるが、参考データとして、他の温度と同様に式(11)を用いてコーナ部の強度を計算した。コーナ部の強度と温度との関係は、前報で示した平滑試験片の曲げ強度と温度の関係と同様に、 $100\sim 200^\circ\text{C}$ の領域において大きく低下し、 200°C 以上ではあまり変化しない。

表 1 リフロックラック強度評価結果

1	2	3	4	5	6	7	8
No.	a mm	b mm	h mm	Absorption	T_c °C	p MPa	K_p MPa m ^{0.456}
1	4.8	14.0	1.2	65°C, 95%, 24h	281	0.383	0.057
2	↑	↑	↑	65°C, 95%, 72h	217	0.661	0.098
3	↑	↑	↑	65°C, 95%, 168h	216	1.080	0.157
4	↑	↑	1.04	↑	198	0.914	0.156
5	↑	↑	0.93	↑	196	0.900	0.173
6	↑	↑	0.91	↑	189	0.815	0.160
7	↑	↑	0.83	↑	182	0.746	0.160
8	8.3	8.3	1.2	120°C, 100%, 6h	238	0.477	0.086
9	↑	↑	↑	120°C, 100%, 17h	194	0.655	0.117
10	↑	↑	↑	120°C, 100%, 87h	186	0.886	0.159
11	6.1	15.5	0.3	120°C, 100%, 48h	157	0.401	0.375

図 12 コーナ部の強度と温度の関係

5. リフロックラック強度評価

応力特異場理論によるリフロックラック強度評価を行う目的で、実際のICパッケージを吸湿させた後、赤外線加熱してリフロックラックの発生状況を調べる実験を行った。

5.1 実験方法および結果 前節の強度試験で用いた樹脂で封止した3種のICパッケージを 120°C の乾燥空气中で48h以上乾燥させた後、高温高湿雰囲気中で吸湿させた。用いたパッケージの素子搭載板短辺長さ a 、長辺長さ b 、素子搭載板下部の樹脂厚さ h 、吸湿条件(温度、湿度、時間)を表1の第2～5項に示す。No.1～No.7, No.8～No.10, No.11の各グループがそれぞれ種類の異なるパッケージで、No.4～No.7は、エメリー紙で研磨することにより樹脂厚さを変化させたパッケージである。

赤外線加熱には、図13に示す前報と同一の装置を用いた。硬質断熱材の上に吸湿後のパッケージを裏向きに置き、赤外線で加熱する。このときのパッケージの厚さ方向の変位を石英ガラス針を介して非接触形変位計で測定した。パッケージ内に発生する水蒸気のため、リフロックラック発生直前にパッケージは大きく変形し、クラック発生とともに水蒸気が外部へ放出されるため、変位は瞬時に減少する。したがって、パッケージ加熱開始からクラック発生までの時間を変位曲線から求めることができる。別の同一形状のパッケージに熱電対を埋め込んで測定した赤外線加熱時の温度プロファイルとクラック発生時間を照合することにより、クラック発生温度を求めた。このようにして求めた各パッケージのクラック発生温度 T_c を表1の第6項目に示す。なお、同一条件で複数の実験を行ったデータについては、平均値を示した。

図 13 赤外線加熱実験装置

5.2 リフロークラック発生時の応力特異場解析

5.1 節の実験におけるリフロークラック発生時の素子搭載板コーナ部の樹脂の特異場の強さを求めるため、実験で用いたパッケージの三次元 FEM 解析と水分拡散解析を行った。まず、2 章で述べた方法により、表 1 の各実験条件に対して水分拡散解析を行い、リフロークラック発生温度における素子搭載板と樹脂の界面の蒸気圧 p を求めた。式(8)における定数 α, γ は、次に述べる FEM 解析により求めた。リフロークラック発生時の蒸気圧 p の計算結果を表 1 の第 7 項に示す。

三次元 FEM 解析で用いたモデルの x - y 平面図および x - z 側面図の例を図 14 に示す。これは、表 1 の No. 1~3 のモデルである。パッケージの対称性を利用して、1/4 をモデル化した。使用した要素は 8 節点三次元中実要素 (6 面体要素) である。3 章で述べた $50\mu\text{m}$ 4 節点要素モデル (図 5 モデル B) に対応させるため、素子搭載板コーナ部の $0.3 \times 0.7\text{mm}$ の領域 (図 14 の Region A) はどのパッケージのモデルでもコーナに隣接する要素の寸法が $50\mu\text{m}$ になるように一定の寸法に固定した。図 14 のリードの部分は、実際にはリードと樹脂が混在するため、この部分の要素の物性値と

してリードと樹脂の平均値を用いて近似した。素子搭載板の下面および側面と樹脂の界面をはく離させ、このすきまに水分拡散解析で求めた蒸気圧を一様な分布荷重として作用させた。

本解析モデルの素子搭載板に隣接する要素の種類と寸法は、3 章で述べた $50\mu\text{m}$ 4 節点要素と同等であるから、次式を用いて特異場の強さ K_θ を求めることができる。

$$K_\theta = \xi \sigma_{\theta 0} r_0^{0.456} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $\sigma_{\theta 0}$ は最大の円周応力が発生する要素 (図 14 の要素 a) の積分点応力の平均値から求めた xz 平面内円周応力、 r_0 はこの要素の中心と応力特異点 (コーナ部) との距離 ($=50/\sqrt{2}\mu\text{m}$) を表す。 ξ は、図 7 の $2\mu\text{m}$ 8 節点要素モデルから求められる特異場の強さを真値とした場合の $50\mu\text{m}$ 4 節点要素モデルにより得られる特異場の強さの補正係数であり、図 7 (a) の結果より $\xi=1.09$ となる。式(12)より求めたリフロークラック発生時の樹脂コーナ部の特異場の強さの計算結果を表 1 の第 8 項に示す。

5.3 リフロークラック強度評価 5.2 節で求めたリフロークラック発生時の樹脂コーナ部の特異場の強さ K_θ とクラック発生温度の関係を図 15 に示す。また図には、図 12 に示した樹脂のコーナ部の強度と温度との関係を併記する。図より、ばらつきはあるものの、リフロークラック発生時の特異場の強さとその温度におけるコーナ部の強度はほぼ一致していることがわかる。したがって、本報にて提案した方法により、パッケージ形状、吸湿条件によらないリフロークラック強度評価が行え、リフロークラック発生温度の予測ができると言える。また、ガラス転移点付近のデータ (図 15 の No. 11) も他のデータと同様にクラック発生時の特異場の強さとコーナ部の強度が一致している。理論

図 14 パッケージの FEM 解析モデル

図 15 コーナ部の強度とリフロークラック発生温度の関係

的には問題が残るが、本評価法は粘弾性を示す樹脂に対しても適用可能なようである。

5・4 強度評価パラメータの検討 前報でも少し触れたが、リフロークラックは、パッケージ内の蒸気圧の上昇に伴って増大する素子搭載板コーナ部の樹脂の強度評価パラメータが限界値を超える温度で発生する。本報では、強度評価パラメータとして、コーナ部の特異場の強さを用いることを提案し、実験的にその妥当性を示した。しかし、本報で用いたコーナ部の強度 $K_{\theta c}$ は、その値を求めるのに樹脂封止したICパッケージを必要とし、また詳細なFEM解析を必要とするため、強度データ測定に手間がかかる。ICパッケージに用いる樹脂の選定、耐リフロークラック性に優れた樹脂の開発ではさらに簡便かつ測定法の確立した強度データを用いることが望ましい。

そこで、測定法の確立した強度データである破壊靱性値と本報で提案したコーナ部の強度との関係について検討した。き裂先端の特異場では、特異性の指数 $\lambda = 0.5$ であり、コーナ部の特異性の指数 $\lambda = 0.456$ と10%程度しか変わらない。したがって、き裂先端の特異場の強さを表す応力拡大係数の破壊限界値である破壊靱性値と本報で述べたコーナ部の強度は、強い相関関係があるはずである。そこで、図9に示した実験装置を用い、コーナ部強度を測定した樹脂と同一の樹脂の三点曲げによる破壊靱性値測定⁽⁵⁾を行った。破壊靱性値 K_{Ic} とコーナ部の強度 $K_{\theta c}$ の測定データを20°Cの値を基準に規格化し、図16に示す。図より、 K_{Ic} と $K_{\theta c}$ の温度特性はほぼ一致しており、したがって、手間のかかる実際のパッケージを用いた強度試験を種々の温度で行わなくても、破壊靱性値のデータからコーナ部の強度の温度特性を推定できる。本報で検討した樹脂については、破壊靱性値からコーナ部の強度が推定できるようである。

種類の異なる樹脂間における K_{Ic} と $K_{\theta c}$ の相関関係など、検討を要する課題は多いが、 K_{Ic} と $K_{\theta c}$ は特異性の指数が近いので、基本的には K_{Ic} から $K_{\theta c}$ が推定できると考えられる。このことから、リフロークラックに対する樹脂としては、高温における破壊靱性が高い材料を用いるべきであると言える。

6. 結 論

吸湿した面付実装形ICパッケージのはんだリフロー加熱時に生じる樹脂クラック(リフロークラック)

図 16 破壊靱性値とコーナ部の強度の関係

は、その起点が素子搭載板コーナであり、この部分が応力特異場となるため、強度評価法が確立していなかった。そこで、この部分の応力 σ と特異点からの距離 r の関係が $\sigma = Kr^{-\lambda}$ (K : 特異場の強さ、 λ : 特異性の指数) で表されることに着目した強度評価法について検討した。

まず、特異性の指数の理論解析を行い、 $\lambda = 0.456$ を得た。次に、特異場の強さ K は、FEM解析により求められることを示し、樹脂のコーナ部の強度試験を行った。その結果、コーナ部のクラック発生には、特異点を原点とした円周応力 σ_{θ} が支配的であり、 σ_{θ} の分布から求めた特異場の強さ K_{θ} が強度評価パラメータとして妥当であることがわかった。本報ではこれをコーナ部の強度と呼ぶ。最後に、寸法、吸湿条件の異なる11種類のパッケージについて、リフロー加熱を行い、クラック発生温度を測定した。これらのパッケージについて、前報で述べた水分拡散解析と三次元FEM解析を行い、クラック発生時の特異場の強さを求めた。この値は、クラック発生温度におけるコーナ部の強度とほぼ一致し、本評価手法の有効性が示された。

最後に、本研究遂行にあたり、ご支援をいただいた(株)日立製作所導体設計開発センター、村上元氏ならびに機械研究所、服部敏雄氏に深く感謝する。

文 献

- (1) Fukuzawa, I., ほか2名, *Proc. 23rd. Int. Reliab. Phys. Symp.*, (1985), 192.
- (2) 北野・ほか3名, *機論*, 55-510, A(1989), 356.
- (3) 服部・ほか3名, *機論*, 54-499, A(1988), 597.
- (4) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, 38(1971), 377.
- (5) 日本機械学会編, 弾塑性破壊靱性 J_{Ic} 試験方法, (1981), 19.