

温度サイクル負荷時におけるLSIパッケージの封止樹脂クラックに関する解析—初期界面はく離の観察とはく離長さの封止樹脂クラック進展への影響評価

齋藤 武博*, 松山 英人**, 戸谷 眞之***

Numerical and Experimental Analysis of Resin Cracking in LSI Packages under Temperature Cyclic Loading : An Observation of Initial Site of the Edge-Delamination and the Effect of Delamination Length

Takehiro SAITOH*, Hidehito MATSUYAMA** and Masayuki TOYA***

*日本電気株式会社NECエレクトロニクス先端デバイス開発本部 (〒229-1198 神奈川県相模原市下九沢1120)

**株式会社日本電気情報システムズ科学技術システム事業部 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1)

***鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

*ULSI Device Development Division, NEC Electron Devices, NEC Corp. (1120 Shimokuzawa, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-1198)

**Scientific Systems Division, NEC Informatec Systems Ltd. (3-2-1 Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 213-0012)

***Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University (1-21-40 Kohrimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065)

概要 温度サイクル負荷を受けるプラスチックパッケージ内の異材界面はく離の発生部位を特定する目的で、放射性同位体元素 Kr^{85} をトレーサとする気密試験を行った。さらに、はく離が成長するにつれ、それがリードフレームのダイパッド上下コーナ部を起点とする封止樹脂クラックの進展に及ぼす影響を及ぼすかに関する数値解析を行った。その結果、Cu合金をリードフレーム材料に用いた場合ははく離発生部位はダイパッド上コーナ部であり、42合金ではダイパッド下コーナ部であることが推測された。また両者の材料共に、はく離が進展するにつれ、ダイパッド下コーナ部を起点とする封止樹脂クラックはより進展しやすくなり、その進展方向はよりパッケージ底面に垂直な方向へ変化することを指摘した。

Abstract

An experimental study using Kr^{85} radioactive tracer techniques is made to determine the initial site of the edge-delamination between dissimilar materials occurring in LSI plastic packages with either Cu alloy (Cu-2%Sn) or alloy 42 (Fe-42%Ni) leadframe under temperature cyclic loading. It is found from the Kr^{85} penetration test that the initial edge-delamination is expected to occur at the upper corner of the die pad edge for Cu alloy leadframe packages whereas it occurs at the lower corner of the die pad edge for alloy 42 leadframe packages. Numerical stress analysis on the effect of delamination length on the encapsulant resin cracking in the packages is also carried out. The delamination is assumed to be located along the top surface of the die pad for Cu alloy leadframe packages and along the bottom surface of the die pad for alloy 42 leadframe packages. The results of numerical stress analysis show that, in both Cu alloy and alloy 42 leadframe packages, resin cracking starting from lower corner of the die pad edge becomes more likely to occur and cracking direction changes toward the bottom surface of the packages as the delamination extends.

Key Words: Plastic Package, Resin Crack, Delamination, Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor

1. 緒言

大規模集積回路 (Large Scale Integrated Circuit : LSI) を搭載するプラスチックパッケージ (Fig.1) は、機械的特性が著しく異なる材料の接着・接合体であることから、温度サイクルなどの熱負荷が原因で、異種材料界面にはく離や封止樹脂中にクラックが生じることがある。このようなLSIパッケージの熱サイクル疲労損傷による信頼性劣化問題を背景に、これまで著者らは線形破壊力学に基づく解析手法を用いて、プラスチックパッケージの損傷機構の解明と設計指針の構築に取り組んできた^{1)~3)}。

従来の著者らの研究^{1)~3)}では、パッケージの異材界面にはく離を想定して、そのはく離が封止樹脂クラックの破壊

パラメータに及ぼす影響を数値的に解析した。その結果、封止樹脂クラックを引き起こす界面はく離をリードフレ

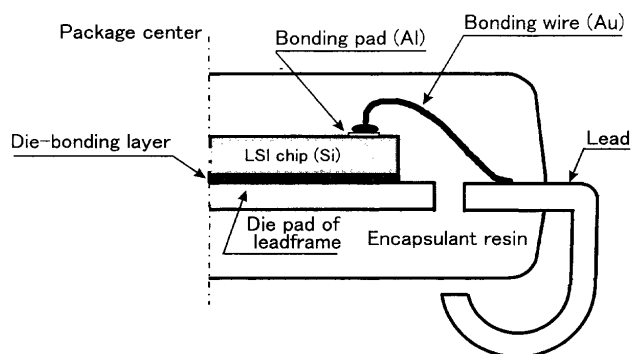


Fig.1 One half of the transverse cross section view of a standard plastic packaged LSI

ム材料ごとに特定すると共に、設計諸要因の影響を明らかにした。また、温度サイクル試験 (150℃～-65℃) 時における実パッケージの損傷を Scanning Acoustic Tomography (SAT) と断面研磨により観察し^{11,2)}、これらの実験結果と数値解析とを比較検討することで、破壊力学の LSI パッケージへの適用は有効であることを検証した。さらに、界面破壊力学解析手法を用いた異材界面はく離の数値解析¹⁾では、リードフレーム材料ごとのダイボンディング層およびダイパッド裏面のはく離先端における応力拡大係数とそのモード比を導出し、はく離の進展傾向を議論した。

これらの一連の研究^{1)~11)}から、温度サイクル負荷時におけるプラスチックパッケージの損傷機構は、用いるリードフレームの素材により異なることが判明した。例えば、Cu合金リードフレームを用いたパッケージにおいては、ダイパッド側面とダイボンディング層のはく離が生じると、ダイパッド下コーナ部を起点とした封止樹脂クラックが生じることを指摘した。また、ダイパッド側面のはく離はモード I が支配的な破壊モードとなるが、ダイボンディング層の界面はく離はモード II が支配的であることを示した。一方、42合金リードフレームを用いたパッケージでは、温度サイクルの進行に伴って、ダイパッド裏面/封止樹脂界面がはく離すると、クラックはダイパッド下コーナ部から進展することがわかった。さらに、ダイパッド裏面/封止樹脂界面のはく離モードはモード II が支配的であることを指摘した。

しかしながら、構造物 (ここではパッケージ) の任意の界面にはく離や任意の材料にクラックを導入して、はく離先端の応力拡大係数やはく離進展におけるエネルギー解放率の値を算出する破壊力学手法のみでは、はく離の発生部位は必ずしも的確に特定できるとは言えない。換言すれば、破壊力学は有限の長さを有するはく離や鋭い欠陥の先端近傍の応力場に対して応用可能であって、このような幾何学的条件を満足しない構造における損傷過程の取り扱いについては論じることができないのである。したがって、異材界面はく離の発生部位を特定するためには、実験的手法に頼らざるを得ない。

また、著者らの従来報告^{1)~11)}の中では異材界面はく離の進展長さがダイパッド上下コーナ部を起点とする封止樹脂クラックの進展傾向へ及ぼす定量的な影響に関しては言及していない。他にもはく離長さの影響を明確にしている報告は見当たらない。パッケージの損傷機構をより深く理解するためには、異材界面はく離の発生部位と共に、熱サイクル疲労破壊によりはく離が成長するにつれ、封止樹脂クラックの破壊パラメータがいかに変化するかを把握することは重要である。

以上説明した背景のもと、本論文の第 2 章では放射性同位体元素 Kr⁸⁵ をトレーサとする気密試験を行うことで、温

度サイクル負荷時におけるプラスチックパッケージの初期異材界面はく離の部位を実験的に特定する。さらに、第 3 章では数値解析により、異種材料界面はく離の長さ (ダイパッドエッジからはく離先端までの距離) が変化するときの、ダイパッド上下コーナ部における破壊パラメータ (周方向応力) の強さとその方向の定量的変化を、リードフレーム材料ごとに導出する。

2. 放射性同位体元素 Kr⁸⁵ 気密試験による初期異材界面はく離の観察

2.1 供試サンプルと Kr⁸⁵ 気密試験方法

実験に用いたパッケージは、26ピン 350mil 幅の Single Outline J-lead (SOJ) パッケージである。Fig. 2 に短辺に平行な断面の構造と各部の寸法を示す。サンプルは通常条件で作製した。ダイボンディング材料には Ag ペースト (エポキシ樹脂) を用い、樹脂封止は 175℃ で行った。実験は Table 1 に示した 4 ケースのサンプルを用いて行った。これらのサンプルは既報¹²⁾の温度サイクル試験で使用したサンプルと同じものである。すなわち、リードフレーム材料に Cu 合金 (Cu-2%Sn) と 42 合金 (Fe-42%Ni) を用い、通常工程で作製したサンプルと、樹脂封止前にダイパッドを含むリードフレーム裏面にワックスを塗布しダイパッド裏面/封止樹脂界面強度を低下させたサンプルを準備した。以下、Kr⁸⁵ 気密試験の手順を示す。

まず、試験温度範囲 150℃～-65℃、各温度の保持時間 30min. の温度サイクルを負荷する。温度サイクル負荷数 1, 20, 50 サイクルにて、ケース 1, 3 では 6 サンプル、ケース 2, 4 では 3 サンプルずつ試験機から取り出した。ケース 1, 3 においては、初期界面はく離を観察する目的で、

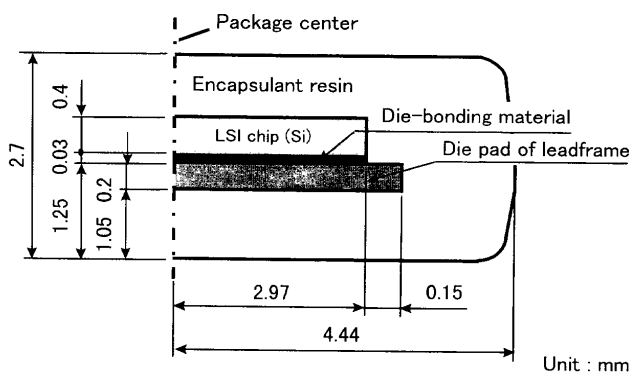


Fig. 2 Dimensions for one half of the transverse cross section of a package model

Table 1. Test samples

Case	Leadframe material	Artificial delamination
1	Cu alloy	No
2	Cu alloy	Between bottom surface of the die pad and the resin
3	Alloy 42	No
4	Alloy 42	Between bottom surface of the die pad and the resin

所定の温度サイクルを負荷した6サンプルのうち、3サンプルは Kr^{85} 気密試験を行う前にサンプルを短辺と平行に半分研削した。他の研削処理を施さないサンプルは、リークパスの存在を確認する目的で実験に供した。ワックスを塗布したサンプル(ケース2, 4)は、温度サイクル試験後の超音波探傷装置による観察でダイパッド裏面にはく離が生じることがすでに判明していることから^{1),2)}、 Kr^{85} により、はく離の状態が観察可能かを確認する目的で実験に供した。

次に、用意したすべてのサンプルを圧力タンクに入れ真空引きを行い、ガス状の Kr^{85} を圧力条件0.52MPaで圧入する。24hr.経過後、サンプルを圧力タンクから取り出し、各サンプルを短辺と平行に半分研削した。 Kr^{85} ガス圧入前にあらかじめサンプルの半分を研削したものについては、研削のダメージによる Kr^{85} 侵入を除去するため、さらに表面(研削面)から3mm研削した。この研削処理後、サンプルの研削面とX線フィルムが接触するようにサンプルを放置する。 Kr^{85} ガスがパッケージ内部に侵入した場合、 Kr^{85} (ガス比放射能160GBq/m³)から放射される β 線によりX線フィルムが感光されるので、異材界面の発生状態を観察することが可能となるのである。なお、温度サイクル負荷なし(0サイクル)のサンプルも比較のため同様な試験を行った。

2.2 試験結果および考察

2.2.1 研削処理を施さない通常工程サンプルの場合

Fig. 3に50サイクル負荷後のCu合金リードフレームパッケージにおける Kr^{85} 像を一例として示す。 Kr^{85} が侵入した部分は白色部を示している。 Kr^{85} はパッケージの封止樹脂表面から深さ約0.2mmまで侵入しているが、通常条件で組み立てたサンプルでは、50サイクルまで Kr^{85} のパッケージ内部界面への侵入は見られなかった。42合金リードフレームパッケージの場合も同様な結果であり、通常工程で作製したサンプルでは外界とのリークパスがないことが判明した。

2.2.2 ダイパッド裏面にワックスを塗布したサンプルの場合

Fig. 4 (a), (b)にそれぞれCu合金、42合金リードフレ

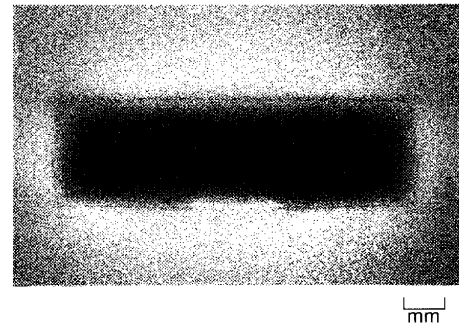


Fig.3 An example of Kr^{85} penetration test image of the Cu alloy leadframe package after 50 cycles (The packages were manufactured in a standard assembly process)

ムを用いた、50サイクル負荷後におけるサンプルの Kr^{85} 像を例として示す。ワックスをリードフレーム(ダイパッド)裏面に塗布した場合、Cu合金、42合金リードフレームパッケージ共に、温度サイクル負荷なしのサンプルを含む全数ダイパッド裏面に Kr^{85} の侵入が見られた。これは、リードフレームのダイパッドを支持するサポートリードの裏面から Kr^{85} ガスが侵入し、間隙を有するダイパッド裏面に滞留したものと考えることができる。しかし、チップ表面および側面、ダイボンディング層におけるはく離は確認されなかった。前述の結果とこの結果を考え合わせると、 Kr^{85} をトレーサとする気密試験を用いてプラスチックパッケージの内部に発生する界面はく離の観察が可能であることがわかる。

2.2.3 Kr^{85} ガス圧入前に研削処理を施した通常工程サンプルの場合

Kr^{85} ガス圧入前にあらかじめサンプルの半分を研削した通常工程パッケージの試験結果をFig. 5に示す。ここでは Kr^{85} が微量でもパッケージ内部界面に侵入した場合、界面はく離が生じているものとし、侵入数として計数した。 Kr^{85} 侵入が見られたサンプル数は、Cu合金リードフレームを用いた場合では0~50サイクルまでの12サンプルのうち10サンプルであった。一方、42合金リードフレームを用いた場合では、12サンプルのうち4サンプルであり、はく離の発生数はCu合金リードフレームを用いた場合より少なかった。また、温度サイクルの進行に伴って、若干強くフ

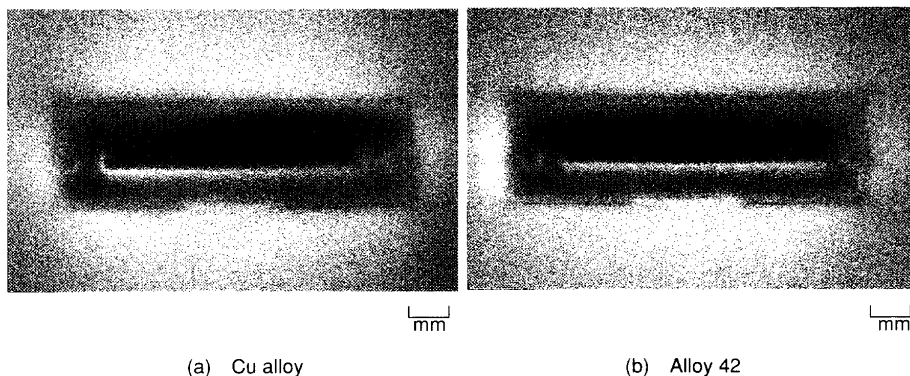


Fig.4 Kr^{85} penetration test images of the packages with wax after 50 cycles

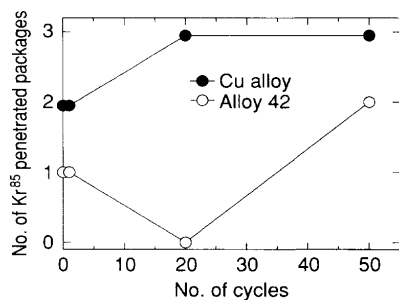


Fig.5 The results of the packages which were divided prior to Kr⁸⁵ penetration test (The packages were manufactured in a standard assembly process)

イルムが感光される傾向が認められたが、温度サイクル負荷数の増加による顕著な結果の変化はないことがわかる。さらに、Cu合金、42合金リードフレームを用いたパッケージ共に、Kr⁸⁵はダイパッドエッジ近傍のみに観察され、チップ上面、チップ側面、ダイボンディング層エッジ部におけるKr⁸⁵侵入の痕跡はまったく見られなかった。すなわち、これらの異材先端部は損傷なく接合が保持されていることが判明した。ところで、既報^{11,12)}においては、Cu合金リードフレームでは、封止直後の断面研磨でダイパッド側面にはく離が見られなかった。一方、42合金リードフレームでは1000サイクルまでダイパッド側面のはく離は見られなかった。これらのことと本実験結果を考え合わせると、Kr⁸⁵侵入像は必ずしもマクロ的な異種材料間の空間を示すものではなく、はく離の兆候 (Kr⁸⁵ガスが侵入可能なマイクロな間隔を有する空隙) をも示唆するものと考えられる。

次に、初期界面はく離の発生部位について考える。Cu合金、42合金リードフレームを用いた場合の代表的な試験結果 (50サイクル後) をFig.6 (a), (b)に示す。Cu合金リードフレームの場合ではダイパッド側面に、また42合金リードフレームの場合ではダイパッド側面と裏面 (底面) にKr⁸⁵ガスの侵入が認められる。しかし、これらの侵入像のみからでは、初期はく離がダイパッドの上下コーナ部のどちらで発生するのかが明確に判定することはできない。そこで、既報¹¹⁻¹²⁾との関連において、初期はく離の部位を特定する。Cu合金リードフレームを用いた場合では、既報の数値解析⁹⁾で、ダイボンディング層エッジからのはく離はダイパッドエッジより生じにくいことが判明している。

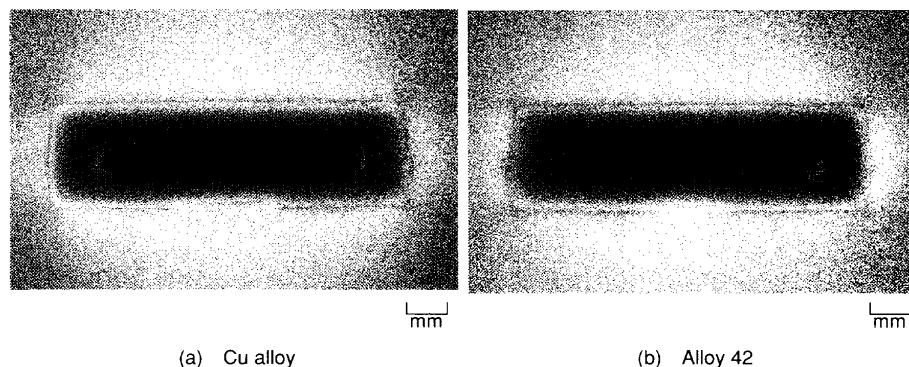


Fig.6 Kr⁸⁵ penetration test images of the packages which were ground prior to the penetration test after 50 cycles (The packages were manufactured in a standard assembly process)

また既報の温度サイクル試験⁹⁾において1000サイクルまでダイパッド裏面/封止樹脂界面のはく離は生じないことを確認している。さらに、Cu合金をリードフレーム材料に用いたパッケージの温度サイクル実験では、最終的にダイボンディング層とダイパッド側面にはく離が進行し、はく離の進行中に封止樹脂にクラックがパッケージ裏面に向かって進展することも明らかとなっている。これらの事実を考え合わせると、ダイパッド下コーナ部からのはく離が発生するのではなく、ダイパッド上コーナ部からのはく離が発生すると考えることが妥当である。

一方、42合金をリードフレームに用いた場合では、ダイパッド裏面にエッジから0.4mmを越えるはく離が発生したサンプルが上記の侵入数4個に対し2個観察された。また数値解析⁹⁾により、42合金リードフレームの場合においてもダイパッド下コーナ部よりダイボンディング層エッジやダイパッド上コーナ部からのはく離は生じにくいという結果を得ている。つまり、42合金リードフレームパッケージではダイパッド下コーナ部から界面はく離が生じるものと考えられる。

3. 異種材料界面はく離長さが封止樹脂クラックの進展に及ぼす影響

3.1 解析モデルの設定と解析手法

3.1.1 解析モデルの設定

前章の実験で初期界面はく離の部位が特定できた。一方、緒言で述べたように、はく離の進展と共にダイパッド下コーナ部を起点とした封止樹脂クラックがパッケージ底面に向かって進展することは、すでに判明している^{11,12)}。しかしながら、2章のKr⁸⁵気密試験では、さらなる詳細を明らかにするまでには至らなかった。そこでこの章では、数値解析 (有限要素法) によって、温度サイクルに伴うはく離の進展が、いかに封止樹脂クラックの成長に影響を及ぼすかについて調べる。解析対象としたパッケージは、前章と同様、350mil幅のSOJパッケージである (Fig.2)。解析モデルは、パッケージ短辺断面の2次元平面ひずみ状態とし、リードの存在は考えないものとする。ダイボンディング材料はAgペーストとし、リードフレーム素材にはCu合金と

42合金を想定する。前章の実験結果に基づいて設定した、それぞれのリードフレーム材料ごとの異種材料界面はく離の進展モデルをTable 2に示す。Cu合金リードフレームではダイパッド側面のはく離を伴って、ダイボンディング層界面（ダイパッド上面）がはく離するとした。42合金リードフレームではダイパッド裏面以外のはく離は破壊パラメータに大きな影響を及ぼさないことから³⁾、ダイパッド裏面にのみはく離を設けた。本研究でははく離の長さ、ここではダイパッドエッジからはく離先端までの距離 d を0.05, 0.2, 0.6, 1.0, 1.8, 2.6mmに変化させて解析を行い、ダイパッド上下コーナ部における破壊パラメータ(周方向応力)の強さとその方向の変化を計算する。なお、Table 3に、解析に用いた材料の弾性定数および熱膨張係数を示す。封止樹脂とAgペーストはそれぞれ約150℃、約120℃付近にガラス転移温度 (Tg) を有するため、Tg以上の温度では粘弾性効果による応力緩和が生じる。しかし、この影響は封止温度(175℃)から温度サイクル試験の最低温度(-65℃)の冷却過程、すなわち熱荷重240℃の熱弾性応力と比較して小さいと考えられる。そこで、ここでは封止樹脂とAgペーストの温度依存性は考慮しないものとし、すべて等方性を有する線形弾性体であると仮定した。これらの値は前章の実験で使用した材料の特性値に対応している。

3.1.2 破壊パラメータの定義

ダイパッド/封止樹脂コーナ部近傍における特異応力場内の周方向応力 σ_θ は、コーナ先端を原点とする局座標系をFig. 7のようにとると、近似的に式(1)で与えられることが知られている³⁾。

$$\sigma_\theta = K(\theta) \cdot (r/L)^{-\lambda} \tag{1}$$

ここで、 $K(\theta)$ は広義の意味における応力拡大係数、 r はコーナ先端からの距離(既知)である。 L は代表長さであ

り、本解析ではダイパッドの厚さ0.2mmに固定した。 λ は応力特異性の指数を示し、 σ_θ は後述する有限要素法により計算される値である。

脆性材料である封止樹脂のクラックは開口モード(モードI)下において進展し、かつその方向は最大の K を示す方向に進展することが予想される。したがって、本解析ではコーナ先端近傍($r \leq 0.075\text{mm}$)の要素における応力拡大係数を計算して、その最大値を見出し、封止樹脂クラックの進展方向を特定する。なお、一連の計算において、接合先端から1, 2個の要素を除く、少なくとも $r \leq 0.075\text{mm}$ では式(1)の関係を満足することを確認した。また、最大の K の方向に沿ってコーナ先端から0.02mmの周方向応力値をクラック進展を評価する破壊パラメータとし、この値は最大の K のもとで $r=0.02\text{mm}$ を式(1)に代入して再度計算することにより求める。

3.1.3 応力特異性の指数

本節では、 λ の決定方法について説明する。Fig. 8のような異材の接着・接合端を考えると、一般に λ については特性方程式(2)の根 p を用いて、式(3)で表される⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

$$D(\alpha, \beta, \theta_1, \theta_2; p) = 0 \tag{2}$$

$$\lambda = \text{Re}(1 - p) \tag{3}$$

ここで Re は $(1 - p)$ の実数部を表す。特性方程式はDundursの複合パラメータ α, β と接合角度 θ_1, θ_2 を変数とした非線形方程式である。平面ひずみ状態における α, β は横弾性係数 μ_j とポアソン比 ν_j ($j=1, 2$)を用いて、それぞれ

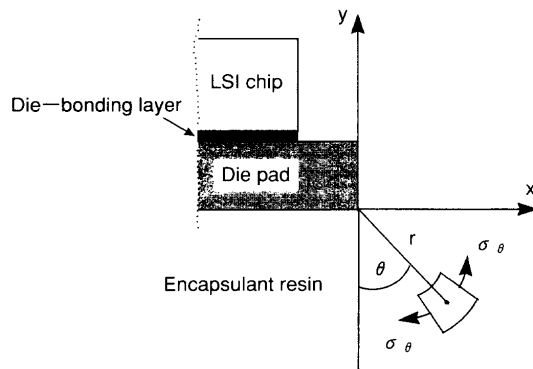


Fig.7 An example of cylindrical co-ordinates at the origin of lower corner tip

Table 2. Analysis models

Case 1	Case 2
Cu alloy	Alloy 42

— Delamination

Table 3. Material properties

Material	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Thermal expansion coefficient α ($\times 10^{-6}$ 1/℃)	
Encapsulant resin	21.07	0.3	17.93	
Die pad material	Cu alloy	112.7	0.3	17.5
	Alloy 42	145.0	0.3	4.0
Die-bonding material	11.76	0.3	42.58	
LSI chip (Si)	169.5	0.3	3.0	

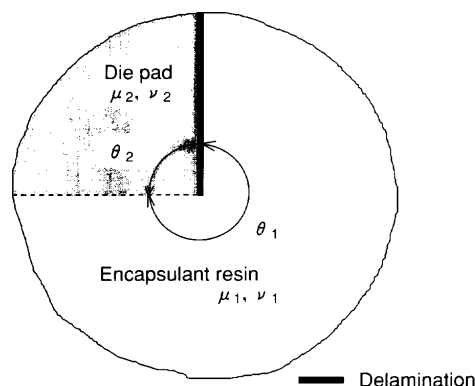


Fig.8 The corner of the die pad edge

$$\alpha = \frac{\mu_1(1-\nu_2) - \mu_2(1-\nu_1)}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\frac{1}{2}[\mu_1(1-2\nu_2) - \mu_2(1-2\nu_1)]}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)} \quad (5)$$

で与えられる。また、特性方程式は $0 < \text{Re}(1-p) < 1$ において、最大で4つの複素根を有するが、本解析では λ はこの範囲における最大値を用いた。なぜなら、この最大実部の値が特異性を支配しているからである⁸⁾。一方、 $\text{Im}(1-p)$ は振動特異性を示すが、振動特異性は異材の接合端のごく近傍で生じる数学的な現象であるため、ここでは考えないものとした。なお、 Im はそれぞれ複素数 $1-p$ の虚数部を表す。

次に、具体的な λ の値を求める。Table 2 に示す解析モデルにおいて、Cu合金をリードフレームに用いた場合のダイパッド上コーナ部は接合が損なわれた状態であるから、 90° の開口角を有する封止樹脂のみのエッジと仮定した。この形状の特性方程式はWilliams⁹⁾ が導出しており、ニュートン・ラフソン法でその解を求めると、 $\lambda = 0.456$ が得られる。一方、42合金をリードフレーム材料に用いた場合、ダイパッド/封止樹脂は接合を保持している。陳ら⁷⁾ はこの接合端の特性方程式を導出しており、横弾性係数 μ_j とヤング率 E_j の関係 $\mu_j = E_j/2(1+\nu_j)$ を用い、Table 2 の特性値から μ_j を求めて、特性方程式を解くと $\lambda = 0.186$ が得られる。ダイパッド下コーナ部に関しては、Cu合金、42合金リードフレーム共に、一辺がはく離、他の一辺が密着している状態である。この接合形状における特性方程式はTheocarisら⁸⁾ が導き出しており、その解はCu合金リードフレームでは $\lambda = 0.584$ 、42合金リードフレームでは $\lambda = 0.595$ であった。

3.1.4 有限要素法による応力計算

応力計算の諸条件は以下の通りである。温度サイクルの条件は、 $150^\circ\text{C} \sim -65^\circ\text{C}$ と設定し、応力の発生源は構成材料間の熱膨張係数の違いのみとした。また、封止温度 (175°C) を無応力状態とし、 -65°C にパッケージ全体が均一に冷却されたとき、最も高い応力が発生するものと考え、温度荷重として 240°C を与え、 -65°C におけるパッケージの内部応力をシミュレートした。ただし、本解析では、前

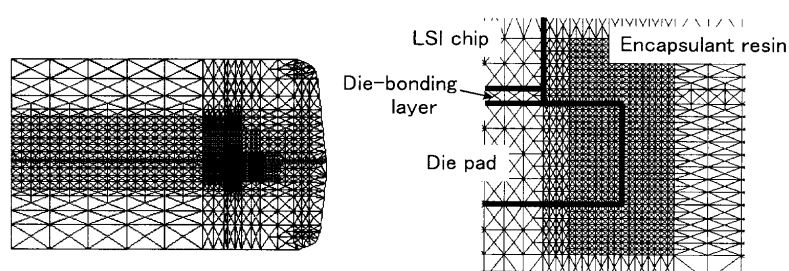
述したようにパッケージを構成する異種材料間に種々の界面はく離を設けているため、異種材料が接触する場合には一体となって変形する連続条件を導入する有限要素法熱応力解析コード¹⁾を用いた。Fig. 9 にメッシュ分割の一例を示す。(a)は全体図、(b)はダイパッドエッジ部近傍の拡大図である。ダイパッド上下コーナ近傍は、一辺0.01mmの三角形に分割した。要素は三角形一次要素とし、要素数は16960~21210、節点数は8600~10830とした。

3.2 数値解析結果および考察

Fig.10, 11にそれぞれCu合金、42合金リードフレームを用いた場合の解析結果を示す。図において、バーの高さは封止樹脂の破壊パラメータの強さを示しており、左右のバーはそれぞれダイパッド上コーナ部、ダイパッド下コーナ部の破壊パラメータを表している。また、 Δ と \bullet はそれぞれダイパッド上コーナ部、ダイパッド下コーナ部を起点とする封止樹脂クラックの進展角度を表している。なお、Fig.10, 11における $d = 3.12\text{mm}$ の場合は、それぞれ文献1), 2)の解析結果を引用した。

まず、Cu合金リードフレームを用いた場合の解析結果 (Fig.10) について考える。既報¹⁾で示したように、材料間が完全に密着している場合ではダイパッド上コーナ部に破壊パラメータ ($\sigma_0 = 50.4\text{MPa}$, $\theta = 55^\circ$) が生じる。しかしながら、いったんダイパッド上面の一部とダイパッド側面がはく離すると、ダイパッド上コーナ部近傍の封止樹脂は圧縮応力場に遷移し、破壊パラメータは負の値となる。それ以降ダイパッド上面が全面はく離 ($d = 3.12\text{mm}$) するまで破壊パラメータは負の値を保持する。つまり、微細なはく離が生じた時点で、ダイパッド上コーナ部から封止樹脂クラックが発生する可能性はないと言えるのである。一方、ダイパッド下コーナ部においては、 d 寸法の増大に伴って、すなわち温度サイクル負荷を受けダイパッド上面にはく離領域が拡大するに伴って、次第に破壊パラメータが増大していくことがわかる。また、破壊角度については 51° ($d = 0.05\text{mm}$) から 10° ($d = 3.12\text{mm}$) に収束していくことが読み取れる。

一方、42合金リードフレームを用いた場合の解析結果 (Fig.11) を見ると、ダイパッド上コーナ部における破壊パラメータは約20MPaの値で推移しており、その角度も約 100° で一定である。しかしながら、ダイパッド下コーナ



(a) An example of the finite element mesh for stress analysis

(b) Enlarged portion of mesh near the die pad edge

Fig.9 FEM mesh

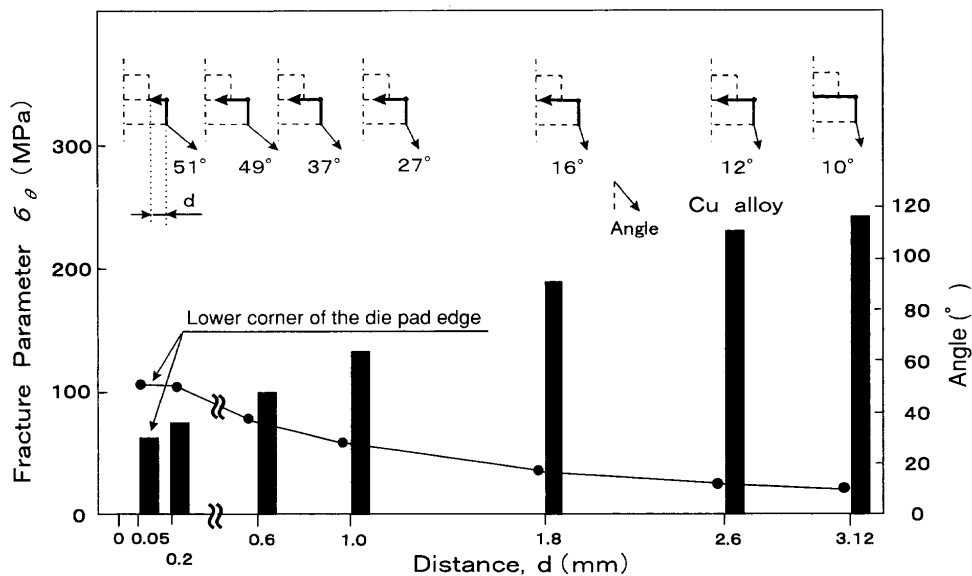


Fig.10 The effect of distance, d on the fracture parameters and cracking angles in Cu alloy leadframe packages

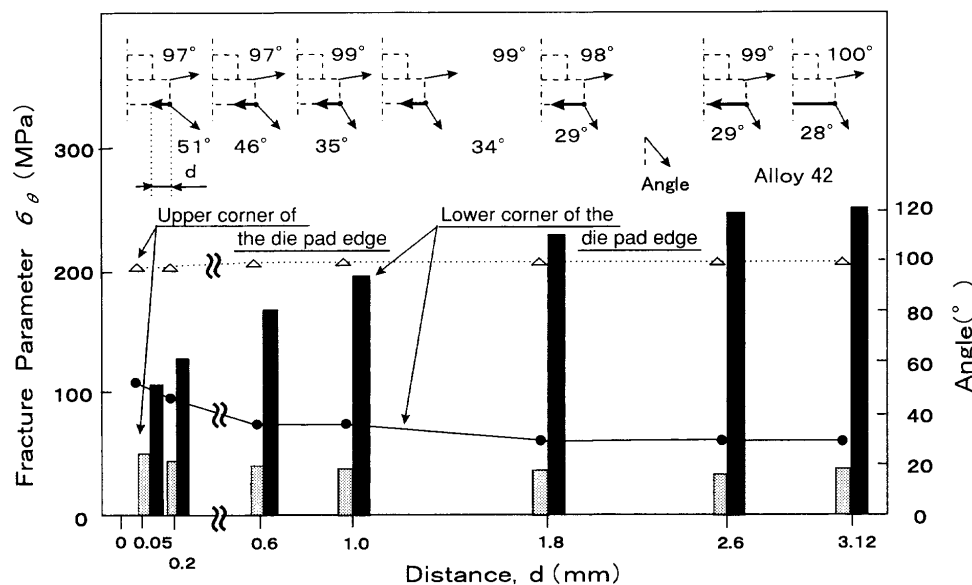


Fig.11 The effect of distance, d on the fracture parameters and cracking angles in alloy 42 leadframe packages

部の破壊パラメータははく離が生じると増大し、クラック進展角度については $\theta=51^{\circ}$ ($d=0.05\text{mm}$)から $\theta=28^{\circ}$ ($d=3.12\text{mm}$)に変化することがわかる。

Cu合金、42合金リードフレームパッケージを比較すると、 $d=3.12\text{mm}$ では、破壊パラメータは同程度の値であるが、同一のはく離寸法においては42合金を用いた場合の方がCu合金を用いた場合に比較して大きな破壊パラメータが生じている。すなわち、一般に同一のはく離寸法においては42合金をリードフレームに用いた方が封止樹脂クラックの成長速度は速いと予想される。また、封止樹脂クラックの進展はCu合金リードフレームパッケージではダイボンディング層のはく離、42合金リードフレームパッケージではダイパッド裏面のはく離の発生・進展状態に律速されると言える。これらのはく離が界面全体に拡大した後（すなわち、 $d=3.12\text{mm}$ ）に封止樹脂クラックが生じる場合には、封止樹脂クラックはCu合金では 10° 、42合金では 28° の

方向に発生することが推測される。しかしながら、温度サイクルの進行に伴ってはく離が徐々に安定成長し、それに伴って封止樹脂クラックも徐々に進展する場合には、樹脂クラックの進行方向はCu合金リードフレームパッケージでは 51° から 10° へ、42合金リードフレームパッケージでは 51° から 28° へ変化しつつ進展することが予想される。ただし、この予想は応力特異場の性質から得られる破壊パラメータ ($r=0.02\text{mm}$ における周方向応力) によるものであるから、樹脂クラックの先端が十分特異応力場領域内 ($r \leq 0.075\text{mm}$) に含まれる場合に有効である。

4. 結論

温度サイクル負荷時におけるプラスチックパッケージの初期異材界面はく離を特定する目的で、放射性同位体元素 Kr^{85} をトレーサとする気密試験を行った。この実験結果から、リードフレーム材料にCu合金を用いた場合の初期異

材界面はく離はダイパッド上コーナ部であるが、42合金を用いた場合にはダイパッド下コーナ部であることがわかった。さらにCu合金リードフレームを用いたパッケージではダイボンディング層のはく離長さ、42合金を用いたパッケージではダイパッド裏面はく離の長さを変化させ、ダイパッド上下コーナ部における破壊パラメータの強さとその方向の変化を導出した。その結果、同一のはく離寸法では42合金リードフレームを用いた方がCu合金リードフレームを用いた場合に比較して、ダイパッド下コーナ部の封止樹脂クラックは進展しやすいことがわかった。また、両者のリードフレーム共に、はく離の進展に伴って、封止樹脂クラックはより進展しやすくなり、その進展角度はパッケージ裏面に垂直になるよう変化していくことが明確になった。

最後に、本研究を遂行するにあたって、有益な助言をいただいた高密度実装技術本部の皆さんに謝意を表す。

(2000.1.26-受理 2000.5.17-再受理)

文 献

- 1) T.Saitoh : "Numerical Stress Analysis of Resin Cracking in LSI Plastic Packages under Temperature Cyclic Loading", IEEE Trans. on Comp., Packaging, And Manufact. Tech.-Part B, Vol.19, No.3, pp.593-600, 1996
- 2) T.Saitoh and M.Toya : "Numerical Stress Analysis of Resin Cracking in LSI Plastic Packages under Temperature Cyclic Loading-Part II : Using Alloy 42 Leadframe Material", IEEE Trans. on Comp., Packaging, And Manufact. Tech.-Part B, Vol.20, No.2, pp.176-183, 1997
- 3) T.Saitoh, H.Matsuyama, and M.Toya : "Numerical Stress Analysis of Resin Cracking in LSI Plastic Packages under Temperature Cyclic Loading-Part III : Material Properties and Package Geometries", IEEE Trans. on Comp., Packaging, And Manufact. Tech.-Part B, Vol.21, No.4, pp.407-412, 1998
- 4) T.Saitoh, H.Matsuyama, and M.Toya : "Linear Fracture Mechanics Analysis on Growth of Interfacial Delamination in LSI Plastic Packages under Temperature Cyclic Loading", IEEE Trans. on Comp., Packaging, And Manufact. Tech.-Part B, Vol.21, No.4, pp.422-427, 1998
- 5) 服部敏雄, 坂田荘司, 初田俊雄, 村上 元 : "応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価", 日本機械学会論文集 (A編), 第54巻, 第499号, pp.597-602, 1988
- 6) M.L.Williams : "Stress Singularities Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension", J. Appl. Mech., pp.526-528, 1952
- 7) 陳 玳珩, 西谷弘信 : "接合異材の角部近傍での応力場", 日本機械学会論文集 (A編), 第57巻, 第534号, pp.146-152, 1991
- 8) P.S.Theocaris and E.E. Gdoutos : "Stress Singularities in Cracked Composite Full-Planes", International Journal of Fracture, Vol.13, No.6, pp.763-773, 1977