携帯機器用アンダーフィル実装試験片の強度評価

矢口 昭弘*, 中村 真人**, 石川 高司***, 黒沢 和仁***, 木本 良輔****

Strength Evaluation of Specimens Mounted with Underfill Resins in Mobile Apparatus

Akihiro YAGUCHI*, Masato NAKAMURA**, Takashi ISHIKAWA***, Kazuhito KUROSAWA*** and Ryosuke KIMOTO****

*株式会社日立製作所機械研究所 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町502)

**株式会社日立製作所生産技術研究所 (〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292)

***株式会社カシオ日立モバイルコミュニケーションズ (〒207-8501 東京都東大和市桜ヶ丘2-229)

****株式会社ルネサステクノロジ生産本部 (〒187-8588 東京都小平市上水本町5-20-1)

*Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd. (502 Kandatsu-machi, Tsuchiura-shi, Ibaraki 300-0013)

**Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd. (292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-0817)

***Casio Hitachi Mobile Communications Co., Ltd. (2-229 Sakuragaoka, Higashiyamato-shi, Tokyo 207-8501)

****Production and Technology Unit, Renesas Technology Corp. (5-20-1 Josuihoncho, Kodaira-shi, Tokyo 187-8588)

概要 携帯機器用BGAパッケージのはんだ接続部強度向上に適したアンダーフィル実装構造確立のため、機械的負荷や熱疲労に対するはんだ接続部強度に、樹脂物性や塗布形状が及ぼす影響を実験と有限要素解析を比較して検討した。機械的負荷に対するはんだ接続部の断線強度は樹脂塗布によって塗布無し品より高くなるが、高弾性樹脂では、樹脂割れに対する強度が低下する場合がある。アンダーフィル樹脂の線膨張係数がはんだ材の約2倍であるため、温度サイクル寿命は塗布無し品より短くなった。樹脂割れも考慮した機械的強度の向上には、フィレット形成と樹脂弾性率の適正化が必要であり、温度サイクル寿命の向上には、樹脂の線膨張係数をはんだの値に近づけるのが有効である。

Abstract

The purpose of this study is development of a mounting structure to improve the strength of solder joints for portable devices. In this paper, the strengths of solder joints in chip-scale packages reinforced with various under-fill resins were determined by static-bending, cyclic-bending, impact-bending, and heat-cycle tests. Joint strength during static, cyclic, and impact-bending was improved by reinforcing with resins. The lifetimes in heat-cycle tests ($-40^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$) were increased 1000 times or more. It was found that the shape of the resin fillets and the elastic modulus of the resin must be optimized to further increase the strength.

Key Words: Ball Grid Array, Solder Bump Joints, Bending Test, Impact Bending Test, Heat Cycle Test, Surface Strain, Under-Fill, FEM

1. 緒言

携帯機器の小型・軽量化および多機能化に対応するため、搭載される半導体パッケージも小型化が進んでいる。半導体パッケージの実装には微小なBGA (Ball Grid Array) はんだボールが用いられる場合が多く、このはんだ接続部には外部からの衝撃や曲げなど機械的負荷に対する強度向上が要求されている。はんだ接続部の強度向上の手段として、パッケージと実装基板の間にアンダーフィル樹脂を塗布する場合がある。アンダーフィル樹脂によるはんだ接続部の補強に関しては、温度変化に対する信頼性向上を目的として、機械的物性および塗布形状の適正化を検討した例があり^{1)~5)}、材料選定が適正でないと塗布無しの場合より温度サイクル寿命が低下するとの報告¹⁾がある。同様に機械的負荷に関してもアンダーフィル樹脂の機械的物性や塗布形状を適正化しないと十分な強度向上の効果が得られないと考えられるが、衝撃や曲げなどの負荷に対するアン

ダーフィル実装の信頼性評価はほとんど実施されていない⁶⁾。したがって、アンダーフィル樹脂を塗布したパッケージ基板実装品の強度信頼性を向上させるためには、衝撃や曲げを負荷した場合における樹脂物性や塗布形状の強度への影響を把握し、実装設計に反映させることが不可欠である。

そこで本研究では、携帯機器に要求される機械的負荷に対する接続部強度に関して、アンダーフィル樹脂物性や塗布形状が及ぼす影響を実験的に求め、有限要素解析結果と比較することにより、強度向上に適した実装構造を検討した。また、温度サイクル寿命に対する樹脂物性の影響についても検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

実験に用いたアンダーフィル樹脂は、Table 1に示す2種類の材料である。Table 1に示した物性値はメーカーカタログ

Table 1. Material properties of under-fill resins

Material	Young's Modulus (MPa)	Coefficient of Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		Glass Transition Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
		α_1	α_2	
A	790	60	180	145
B	2800	57	170	140

Fig. 1 Shape of under-fill resins

値である。また実験には、Fig. 1に示すアンダーフィル樹脂の塗布状態が異なる2種類の実装試験片を用いた。1つは、(a)に示すようにパッケージの連続した2辺から塗布してパッケージと実装基板の間に樹脂を流入させた形状であり、2辺塗布品と称する。2辺塗布品では、樹脂塗布していない側ではフィレットが小さくなっている。もう1つは、フィレット大小の影響を検討するため、2辺塗布品に追加で樹脂塗布を行い、(b)のように4辺すべてに大きなフィレットを形成した形状であり、4辺塗布品と称する。アンダーフィル樹脂の硬化条件は、両材料とも温度 120°C 、時間60分とした。

実装したパッケージは、外形 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.9\text{mm}$ 厚、バンプピッチ 0.5mm 、搭載ボールサイズ $\phi 0.5\text{mm}$ の225ピンCSP (Chip Scale Package)であり、はんだ材はSn-3Ag-0.5Cuとした。実装基板は $50\text{mm}\times 100\text{mm}\times 0.8\text{mm}$ 厚のFR-4相当基板とした。はんだ接続部は、パッケージ側、実装基板側ともにSMD (Solder Mask Defined)構造とした。

2.2 実験方法

Fig. 2に示す静的3点曲げを用い、試験片に静的に曲げ負荷を与えてはんだ接続部の断線強度を測定した。支点間のスパンは 50mm であり、パッケージ実装面を下向きして支点上に設置し、裏面側から負荷を加えた。クロスヘッド速度は $6\text{mm}/\text{min}$ とした。

一定荷重を繰り返し与えて疲労寿命を測定する繰り返し曲げ試験も静的曲げ試験と同様、Fig. 2に示した3点曲げ試験で行った。繰り返し周波数は $0.1\sim 0.3\text{Hz}$ (クロスヘッド速度は $30\sim 60\text{mm}/\text{min}$)である。

衝撃曲げ試験^{7)~9)}では、Fig. 3に示すようにパッケージ実装面を下向きに固定し、パッケージ実装部分の裏面に落下

Fig. 2 Outline of bending test

Fig. 3 Outline of impact bending test

ロッドを繰り返し衝突させ、はんだ接続部が断線するまでの衝撃回数を測定した。試験片の固定スパンは 60mm とした。

上記した静的曲げ、繰り返し曲げおよび衝撃曲げの各機械的負荷試験では、Fig. 1中に併せて示すように、実装基板表面のパッケージコーナー近傍にひずみゲージ (グリッド長 1mm)を貼り付け、基板表面ひずみを測定した。塗布無し品ではパッケージコーナー1箇所、樹脂塗布品は、対角コーナー2箇所で基板ひずみを測定した。はんだ接続部の断線発生は、パッケージと実装基板のはんだ接続部を直列に連結した回路 (デジーチェーン)の抵抗または導通電圧を測定して判定した¹⁰⁾。

温度サイクル試験は、A材、B材の2辺塗布品と樹脂塗布無し品を用いて、 $-40^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$ 、1サイクル20min (低温10min/高温10min)の条件で行った。サンプル数は各仕様5個である。はんだ接続部の断線は、所定の回数ごとに試験槽から試験片を取り出し、室温でののはんだ接続部抵抗を測定して判断した。また、温度サイクル試験中の温度とはんだ接続部抵抗の挙動を観察するため、 $-55^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ 、1サイクル60min (サンプル数各仕様3個)の温度サイクル試験中の抵抗を連続的に測定する実験も行った。

3. 実験結果

3.1 静的曲げ試験結果

A材-2辺塗布品の静的曲げ試験の変位量に対する基板表面ひずみと導通電圧の挙動をFig. 4に示す。フィレット

Fig. 4 Measurement results of static-bending test

が小さい側のコーナーに発生する基板ひずみが、フィレットが大きい側より高くなっており、フィレットが小さい側の実装基板の変形が大きくなることを示している。導通電圧を示す曲線には、電圧が急激に低下する挙動が見られ、この時点 (Fig. 4中a点) で、はんだ接続部に断線が発生したと判断した。Fig. 4の曲線には、断線発生前に図中b点のような基板ひずみの急増点が見れており、このb点では、アンダーフィル樹脂に割れが発生していることを確認している。b点では、アンダーフィル樹脂が割れるのに伴って樹脂で抑えられていた実装基板の変形が解放されるため、基板ひずみが増加する。この樹脂割れは、A材-4辺塗布品およびB材でも同様に発生した。樹脂塗布無し品ではb点のような変曲点は見られず、Fig. 4のa点のように導通電圧が急激に低下し、はんだ接続部に断線が発生する。

樹脂割れとはんだ接続部断線発生時の荷重と基板ひずみそれぞれの値を、各実装仕様についてプロットした結果をFig. 5, Fig. 6に示す。樹脂塗布品のはんだ接続部断線時の各測定結果は、塗布無し品よりばらつきが大きくなっている。樹脂塗布品の断線発生荷重および基板ひずみは、塗布無し品より増加しており、荷重および基板ひずみのいずれもA材-2辺塗布、A材-4辺塗布、B材-2辺塗布の順に強度が高くなっている。一方、塗布形状の違いによる樹脂割れ強度は、荷重で見ると4辺塗布が高くなるが、基板ひずみでは塗布形状による差異はほとんど見られない。A材とB材を比較すると、荷重、基板ひずみのどちらもB材が高くなっている。また、樹脂割れは、塗布無し品のはんだ接続部断線発生より低い荷重、低い基板ひずみで発生する可能性があることがわかる。

A材-2辺塗布品およびB材-2辺塗布品で、クロスヘッド速度 60 mm/minで曲げ試験を行い、Fig. 5に示した 6 mm/minの曲げ試験と比較した結果をFig. 7, Fig. 8に示す。Fig. 7に示したA材は、負荷速度が変わっても樹脂割れ荷重、断線発生荷重ともにほぼ一定となっているが、Fig. 8

Fig. 5 Failure load of solder joints and under-fill resins with static bending test

Fig. 6 Failure strain of solder joints and under-fill resins with static bending test

のB材は、負荷速度の上昇に伴って樹脂割れ荷重、断線発生荷重ともに低下しており、負荷速度の依存性が現れている。また、負荷速度が速い場合のB材の樹脂割れ荷重は、A材より低くなっている。

Fig. 9は、A材-4辺塗布品の静的曲げ試験を行った試験片のはんだ接続部断面観察写真である。観察した断面位置は最外周列にあるバンプである。パッケージコーナー部分のAバンプとその隣のBバンプに断線が発生しており、フィレット表面上端部から発生したき裂が実装基板方向へ進展し、このき裂が進展したAバンプでは実装基板側接続部の接続界面近傍で断線している。樹脂のき裂が達していないBバンプでははんだ母材の破壊が発生している。なお、樹脂塗布品の断面の破壊状態は、A材-2辺塗布およびB材-2辺塗布品でもほぼ同じであるが、2辺塗布品ではフィ

Fig. 7 Relationship between failure load and cross-head rate (Resin A)

Fig. 8 Relationship between failure load and cross-head rate (Resin B)

レットの小さい側で樹脂割れとはんだ接続部の断線が発生していた。また、はんだバンプの実装基板側接続部近傍には、A材、B材いずれの場合もアンダーフィル樹脂の未充てんが発生していた。

3.2 繰り返し曲げ試験結果

A材-2辺塗布品の基板表面ひずみと導通電圧の挙動をFig. 10に示す。Fig. 10に示した基板表面ひずみはアンダーフィル樹脂のフィレットが小さい側の測定値である。繰り返し曲げでは、はんだ接続部の抵抗と固定抵抗を直列に連結した回路に電圧を加え、固定抵抗部の電圧を測定して断線発生を判断した。はんだ接続部の抵抗が初期値の2倍になると、固定抵抗部の電圧が初期値に対して約10%低下するため、この電圧10%低下時点を断線と定義し、Fig. 10では図中に示すa点を断線寿命とした。断線発生前には図中b点のような基板ひずみの急増が見られ、静的曲げと同様

Fig. 9 Cross section of solder joint after static bending test

Fig. 10 Measurement results of cyclic-bending test

にアンダーフィル樹脂に割れが発生した。なお、フィレットが大きい側では基板ひずみの急増は見られず、2辺塗布品での樹脂割れはフィレットの小さい側で発生した。断線発生前の樹脂割れはA材-4辺塗布品およびB材でも発生していた。

荷重振幅とはんだ接続部の断線発生寿命の関係をFig. 11に、樹脂割れ発生寿命との関係をFig. 12に示す。本試験では、上記したように試験途中で樹脂割れが発生して基板ひずみ変動するため、基板ひずみによる寿命の整理は実施していない。Fig. 11に示すように樹脂塗布品の断線発生寿命は塗布無し品より長くなり、A材、B材間の断線発生寿命の差はほとんど見られないが、2辺塗布より4辺塗布が高寿命であることがわかる。Fig. 12に示した樹脂割れの寿命に関してはB材が短く、本試験範囲では10回以下で樹脂割れが発生した。4辺塗布品は、樹脂割れ寿命も2辺塗布品より長くなっている。また、2辺塗布品の樹脂割れ寿命は、Fig. 12に併せてプロットした樹脂塗布無しの断線寿命より短くなる場合が見られている。Fig. 11に示した接続部断線寿命と荷重の関係は、樹脂塗布無し品がほぼ1本の線上にプロットされるのに対して、樹脂塗布品は静的曲げ試

Fig. 11 Relationship between load range and bending fatigue life of solder joints

Fig. 13 Measurement results of impact-bending test

Fig. 12 Relationship between load range and bending fracture life of resin

Fig. 14 Relationship between strain of PWB and cycles to failure of solder joints

験と同様にばらつきが大きくなっている。

繰り返し曲げ試験片の破壊は、静的曲げ試験と同様に、アンダーフィル樹脂に発生したき裂が実装基板側の接続部方向へ進展し、はんだ接続部の断線はパッケージコーナー部パンプの実装基板側接続部で発生していた。樹脂割れの先端がはんだ接続部に達している場合は、Fig. 9のAパンプのように接続界面近傍をき裂が進展して断線していた。また、樹脂割れが接続部から離れたところへ進展し、実装基板割れに至るような場合には、Fig. 9のBパンプのようにはんだ母材をき裂が進展する破壊も発生していた。

3.3 衝撃曲げ試験結果

衝撃負荷回数と測定した基板ひずみの関係をFig. 13に示す。この試験片の断線発生寿命は79回である。試験初期には、フィレットの小さい側の基板ひずみが大きくなっているが、フィレットの大きい側の曲線に、図中a点で示す基板ひずみの急増が現れている。この点でアンダーフィル

樹脂の割れが発生していることを目視で確認した。負荷が小さい場合には、断線発生前に基板ひずみが増加する傾向は認められたが、Fig. 13のa点のような樹脂割れによる明確なひずみ急増が現れない場合もあった。衝撃曲げ試験では、基板ひずみの変動が明確に検知できなかったため、樹脂割れ発生寿命は測定できなかった。また、2辺塗布品ではフィレットの大きい側で樹脂割れが発生する場合がありますが、フィレットの小さい側で樹脂割れが発生した静的曲げや繰り返し曲げとは挙動が異なっていた。

Fig. 14には、基板ひずみとはんだ接続部の断線寿命の関係を示す。断線寿命は、接続部抵抗が初期値に対して2倍以上になった時点と定義した。また、樹脂塗布品の基板ひずみの値には、2箇所測定した基板ひずみのうち大きい側の測定値を用い、回数20回まで、もしくは樹脂割れ発生前までの平均値とした。Fig. 14より、樹脂塗布品の断線寿命は、塗布無し品より1桁以上長くなっており、樹脂塗布

Table 2. Number of failed specimens after -40 to 85°C temperature cyclic test

Underfill	Number of temperature cycles (cycles)									
	210	315	525	855	1050	1470	1635	1800	2200	3000
A	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	1/5	0/4	0/4
B	0/5	0/5	0/5	0/5	1/5	3/5	3/5	4/5	5/5	—
None	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5

による耐衝撃性向上が明らかに見られる。A材, B材間の寿命差はほとんどなく, 2辺塗布品に比べて4辺塗布品が高寿命になっている。また, Fig. 11に示した繰り返し曲げと同様, 樹脂塗布品の寿命ばらつきが塗布無し品より大きくなっている。

衝撃曲げ試験を行った試験片のはんだ接続部の断線はFig. 9と同様に実装基板側で発生しており, 接続界面近傍で破壊する場合や, はんだ母材内をき裂が進展して破壊する場合が混在していた。

3.4 温度サイクル試験結果

$-40^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル試験結果をTable 2に示す。表に示した数字は, サンプル数(5個)に対する累積断線発生数である。弾性率が低いA材の断線は1800回から発生し始めており, B材の断線発生寿命より約2倍長くなっている。樹脂塗布無し品は, 3000回でも断線が発生していない。樹脂塗布品の寿命は塗布無し品より短くなっており, 温度サイクルについてはアンダーフィル樹脂による補強効果は得られていない。

Fig. 15は, A材-2辺塗布品で, $-55^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル試験中に連続的に測定したはんだ接続部抵抗と雰囲気温度である。図中a点から, 高温保持中の抵抗値変動が始まっており, 回数を増すごとに抵抗値が増大している。低温保持中の抵抗増加は高温より小さいことから, 高温保持中に破壊が進行していることを示している。なお, この温度サイクル試験での2辺塗布品の断線寿命は, A材は73, 120, 129回, B材は55, 69, 71回となっており, A材の寿命がB材より長くなる傾向は, 上記 $-40^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル試験結果と同じであるが, その寿命は $-40^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$ に比べて著しく短くなっている。A材4辺塗布品の断線寿命は, 38, 76, 113回となっており, 塗布形状による顕著な差異は認められない。

樹脂塗布による寿命向上効果が得られないのは, 樹脂の線膨張係数がはんだ材の約2倍と大きいことが原因であり, 温度条件が厳しい $-55^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ の試験でさらに寿命が短くなるのは, 温度サイクル試験の高温側温度が樹脂のガラス転移温度に近づいたため, 線膨張係数もさらに大きくなったためと考えられる。

$-55^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル試験を行ったA材-2辺塗布品のはんだ接続部断面観察写真をFig. 16に示す。観察した断面は最外周に位置するバンプ列であり, そのうちFig. 16

Fig. 15 Measurement results of resistance of solder joints on temperature cyclic test

Fig. 16 Cross section of solder joint after temperature cyclic test

に示したバンプは, バンプ列の中央部分にあるバンプである。断線は実装基板側の接続部で, はんだ母材内で発生しており, き裂が大きく開口している。断線が発生したバンプ周囲も含め, 外周部分でもアンダーフィル樹脂の割れは見られなかった。なお, Fig. 16に示した破壊状態は, B材でも同様であった。

3.5 実験結果のまとめと考察

アンダーフィル樹脂A材とB材の機械的負荷に対するはんだ接続部の断線強度を比較すると, 静的曲げ強度は高弾

性率のB材が高いが、繰返し曲げおよび衝撃強度ではA材、B材には差異がない。アンダーフィル樹脂の樹脂割れ強度は、負荷速度が遅い場合の静的曲げはB材が高くなっているが、負荷速度が速い静的曲げや繰返し曲げでは、A材より低くなっていた。B材の負荷速度が速い場合の樹脂割れ強度の低下は、負荷速度上昇によって弾性率の高いB材はA材より塑性変形が生じにくくなり、割れの起点であるパッケージコーナー部のフィレット上端部の応力が増大したためと考える。B材の繰返し曲げ試験の樹脂割れ強度が低下したのは、Fig. 8に示したB材の負荷速度依存性のためであり、樹脂割れ強度が低下したため、繰返し曲げと衝撃曲げのはんだ接続部の断線強度がともにA材と同等になったと考えられる。この結果から、高弾性アンダーフィル樹脂による補強は、衝撃のような高速負荷に対しては補強効果が得られないことがわかる。樹脂を4辺に塗布して大きなフィレットを形成すると、静的曲げ、繰返し曲げおよび衝撃曲げいずれにおいても、樹脂割れ強度とともにのはんだ接続部の断線強度が増加した。大きなフィレットを均一に形成すると、パッケージ搭載部の剛性が増加し、荷重制御型の負荷に対してはフィレットが小さい場合よりパッケージ端部での基板変形量が減少する。これによって樹脂割れ発生が抑制され、機械的負荷に対する強度が向上するものと考えられる。

これまで述べた実験結果やFig. 9に示した断面観察結果から、アンダーフィル樹脂を塗布したはんだ接続部の破壊は、アンダーフィル樹脂の割れ発生に依存しており、機械的負荷に対する補強効果を向上するためには、樹脂割れ発生を抑制する実装構造の採用が必要である。樹脂割れは樹脂の弾性率と伸びに依存すると考えられ、樹脂割れも考慮した強度向上には、樹脂弾性率の適正化と、十分大きなフィレットをパッケージの4辺に形成する必要がある。樹脂割れ発生後、すぐにはんだ接続部が断線しないのは、樹脂内をき裂が進展するために時間を要するのと、き裂がはんだ接続部に達しても、複数のはんだバンプがき裂をピン止めし、進展を妨げるためと考えられる。樹脂塗布品の強度ばらつきが塗布無し品より大きいのは、樹脂の塗布形状のばらつきによる発生応力の違いに加えて、樹脂割れの進展方向にもばらつきがあるためと考えられる。

温度サイクル試験でのアンダーフィル樹脂塗布品のはんだ接続部の断線は、機械的負荷試験のようにパッケージコーナー部バンプではなく、中央部分のバンプに発生していた。また、Fig. 15に示した温度サイクル試験時の抵抗変化において、高温保持中の接続抵抗の増加が顕著であるのは、高温時の樹脂の膨張によってはんだに破壊が生じたことを示している。したがって、温度サイクル時の樹脂塗布品の断線には、パッケージと実装基板の線膨張係数差によるせん断変形よりも、はんだと樹脂の線膨張係数差による垂直方向の変形が主に影響しているものと考えられる。B

材のように樹脂の弾性率が高いと、樹脂自体の変形による緩和量が少なくなり、寿命が短くなる。したがって、アンダーフィル樹脂実装品の温度サイクル寿命向上には、はんだ材との線膨張係数差を小さくする低熱膨張材と低弾性材の使用が必要となる。

今回測定した実装試験片の強度と、実際の使用環境で発生する負荷とを比較し、実負荷に対する強度のマージンを検討した。静的に負荷が加わった場合に携帯電話の実装基板に発生するひずみを測定した例¹¹⁾では、最大0.4%のひずみ発生が報告されている。Fig. 6に示した静的曲げ実験結果では、強度が低いA材-2辺塗布品の樹脂割れ時の基板ひずみは最小値でも約0.5%、はんだ接続部の断線発生は約0.8%であり、実負荷以上となっている。また、携帯電話を1.5mからLCD面を下向きにした姿勢で落下させた場合、実装基板には最大約0.09%のひずみが発生した報告例¹²⁾がある。Fig. 14に示した樹脂塗布品の衝撃曲げ試験結果から、上記基板ひずみが発生する衝撃負荷での寿命は1000回以上になると推定できる。ここで検討したのは、実使用環境での一部分の負荷例についてではあるが、今回検討した樹脂による補強構造は、携帯機器の実使用環境に十分耐える強度であると考えられる。

4. 有限要素解析による破壊挙動の検討

4.1 解析方法

静的曲げ試験と衝撃曲げ試験を模擬した3次元モデルを用いて有限要素法解析を行い、アンダーフィル樹脂表面応力¹³⁾、はんだ相当塑性ひずみや実装基板の変形挙動などを評価し、機械的負荷に対するアンダーフィル実装時の破壊挙動や補強効果を検討した。静的曲げ、衝撃曲げいずれの解析でも、アンダーフィル樹脂の表面応力や実装基板変形を評価する場合は、はんだバンプは角型形状にモデル化した。はんだバンプの相当塑性ひずみを評価する場合は、パッケージコーナーバンプのみ球状バンプでモデル化した。モデルは6面体ソリッドの2次要素であり、材料は基本的に弾性体とみなし、はんだの相当塑性ひずみを評価する場合のみはんだを弾塑性体とした。

解析に用いたパッケージ、実装基板¹⁴⁾およびはんだ¹⁵⁾の材料定数をTable 3, Table 4に示す。Table 3に示した材料定数のうち、封止樹脂、インタポーザおよび実装基板はメーカーカタログ値である。

4.2 解析結果と検討

2辺塗布品のフィレットが小さい側の形状をモデル化した樹脂塗布品に、Fig. 3の衝撃曲げ試験による衝撃負荷を加えた場合のアンダーフィル樹脂表面の最大主応力分布をFig. 17に示す。衝撃曲げ負荷の条件は、スパン60mm、落下ロッド重量75g、落下高さ200mmである。パッケージコーナー部分に応力が集中しており、樹脂割れの起点とよく一致している。4辺塗布品のようなフィレットの大きな

Table 3. Material properties of package and PWB

Component	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Coefficient of Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Encapsulant	21000	0.21	9
Chip	190000	0.07	3
Interposer	30000	0.16	13
Printed Wiring Board	21000	0.16	15

Table 4. Material properties of solder bump

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Strain Hardening Exponent (MPa)	Coefficient of Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
-50	41300	0.3	48	1100	23.0
-15	40800	0.3	36	900	23.0
27	38200	0.3	30	700	23.0
75	35500	0.3	22	450	23.0
125	33800	0.3	17	250	23.0

Fig. 17 Stress distribution of under-fill resin

モデルに上記衝撃負荷を加えた場合、樹脂表面の応力は約1/2に減少した。このように解析においてもフィレットが小さいと樹脂表面応力が増加する結果が得られており、樹脂割れの発生は加速されると考えられ、この傾向はFig. 12の結果と一致する。なお、フィレットの大小における樹脂表面の応力の大小関係は、静的曲げにおける解析でもほぼ同じ傾向となった。

Fig. 18は、上記衝撃曲げ負荷での実装基板の板厚方向変形状態をアンダーフィル樹脂塗布の有無で比較したものである。変形を評価した位置は実装基板の中心線上である。塗布無しの場合、はんだバンプが設けられているパッケージ外周部分の変形は小さいが、中央部では変形が大きくなっている。一方、樹脂塗布品の場合では、パッケージ搭載部分はほぼ平坦となっており、塗布無し品の場合より変形量が小さくなっている。衝撃曲げのように荷重制御で負荷が加わる場合は、パッケージ搭載部分の剛性を増加さ

Fig. 18 Deformation behavior of PWB

Fig. 19 Relationship between equivalent plastic strain and Young's modulus of under-fill resin

せて実装基板の面外変形量を低減するのが、はんだ接続部の強度向上に有効である。アンダーフィル樹脂で補強する場合、大きなフィレットを4辺に形成すると、より高剛性になるとともに、発生応力も小さくなり樹脂割れも抑制することができる。

Fig. 19は、機械的負荷に対して補強効果を得るために最適なアンダーフィル樹脂弾性率を検討するため、静的曲げ負荷時の樹脂弾性率とはんだバンプに発生する相当塑性ひずみの関係を求めた結果であり、フィレットの小さいモデルで、変位量を3mm与えた場合の解析結果である。ひずみは樹脂弾性率が高くなると減少し、弾性率が3GPa程度で極小となった後は再び増加する。樹脂塗布無しの相当塑性ひずみは14.7%であり、解析した樹脂弾性率の範囲では

いずれも補強効果が得られている。機械的負荷が加わる場合、樹脂割れに伴ってはんだ接続部が断線するため、実際の破壊挙動とはモデルが異なるが、ひずみが小さい場合に補強効果が大きいと仮定すると、弾性率の適正範囲は1~10 GPaと言える。しかし、本研究で評価した弾性率2.7 GPaのB材では負荷速度依存性が強く、樹脂割れ発生強度が低下する場合がある。したがって、機械的負荷に対しては樹脂弾性率を2.7 GPa以下にする必要がある。

5. 結 言

アンダーフィル実装の構造適正化と設計技術確立のため、アンダーフィル樹脂をはんだ接続部に塗布したBGAパッケージ実装試験片について、機械的負荷や温度サイクル負荷に対するはんだ接続部強度を実験と有限要素解析で検討した。得られた結論を以下に示す。

(1) アンダーフィル樹脂塗布によって、静的曲げ、繰返し曲げおよび衝撃曲げのはんだ接続部の断線強度は、塗布無しの場合より向上する。

(2) 樹脂塗布品では、はんだ接続部断線の前に樹脂割れが発生する。弾性率が高い樹脂では、樹脂割れの強度が塗布無し品の断線強度より低下する場合がある。

(3) 機械的負荷の強度向上には、高弾性樹脂の使用や4辺フィレット形成によるパッケージ実装部分の剛性向上が有効である。しかし、高弾性樹脂は樹脂割れが発生しやすくなるので、剛性向上と樹脂割れを抑制できる樹脂材料の選定が必要である。

(4) 温度サイクル試験における信頼性向上のためには、アンダーフィル樹脂の低熱膨張化、低弾性化が必要である。

(2004.5.14-受理)

文 献

- 1) 小川将志, 村上里奈, 住川雅人, 松原浩司: “CSP用アンダーフィルに関する研究”, 第12回マイクロエレクトロニクスシンポジウム講演論文集, pp. 155-158, 2002
- 2) 加賀靖久, 于 強, 白鳥正樹: “アンダーフィル実装構造のはんだ接合部における熱疲労信頼性評価”, 日本機械学会第11回計算力学講演会講演論文集, pp. 509-510, 1998
- 3) T. Burnette, Z. Johnson, T. Koschmieder and W. Oyler: “Under-filled BGAs for a Variety of Plastic BGA Package Types and the Impact on Board-Level Reliability”, Proceedings of the 2001 Electronic Components and Technology Conference, pp. 1045-1051, 2001
- 4) T. R. Lindley: “BGA Solder Joint Reliability Study for Automotive Electronics”, Proceedings of the 1995 International Conference on Multi Chip Modules, pp. 126-133, 1995
- 5) B. Vandeveld, E. Beyne, J. Van Puymbroeck and M. Heerman: “Thermal Fatigue Analysis of the Flip-Chip Assembly on the Polymer Stud Grid Array (PSGA) Package”, Proceedings of the 1999 Electronic Components and Technology Conference, pp. 823-829, 1999
- 6) 矢口昭弘, 中村真人, 石川高司, 黒沢和仁, 木本良輔: “携帯機器用アンダーフィル実装試験片の強度評価”, 第13回マイクロエレクトロニクスシンポジウム講演論文集, pp. 376-379, 2003
- 7) 矢口昭弘, 山田宗博, 山本健一: “BGA はんだ接続部の衝撃曲げ試験方法”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 6, No. 4, 2003
- 8) 矢口昭弘, 山田宗博, 山本健一: “PbフリーはんだBGA接続部の衝撃信頼性設計技術”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 6, No. 7, 2003
- 9) 長埜浩太, 矢口昭弘, 山田宗博, 柴本正訓: “携帯機器用CSPはんだ接続部の信頼性評価”, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集(VI), pp. 271-272, 2002
- 10) 田中直敬, 寺崎 健, 北野 誠, 春田 亮, 橋爪孝則: “Fan-outタイプCSP (Chip Scale Package)の構造信頼性設計”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 4, No. 6, 2001
- 11) 石川重雄, 長竹真美, 井門 修: “携帯電話開発へのシミュレーションの適用: FUJITSU, Vol. 51, No. 5, pp. 335-340, 2000
- 12) 井門 修, 館野 正, 石川重雄, 伊東伸孝, 三代絹子: “衝撃試験による歪評価”, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集(VI), pp. 255-256, 2002
- 13) J. Pyland, R. Pucha and S. Sitaraman: “Effect of Underfill on BGA Reliability”, Proceedings of the 2001 Electronic Components and Technology Conference, pp. 85-90, 2001
- 14) 矢口昭弘, 田中直敬, 安生一郎: “高信頼ファインピッチBGAの構造設計”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 4, No. 3, pp. 200-206, 2001
- 15) 寺崎 健, 長埜浩太, 三浦英生, 中塚哲也: “周辺端子型LSIパッケージにおける鉛フリーはんだ接合部の熱疲労寿命予測”, 7th Symp. Microjoining and Assem. Tech. in Electronics, pp. 441-446, 2001