PbフリーはんだBGA接続部の衝撃信頼性設計技術

矢口 昭弘*, 山田 宗博**, 山本 健一**

A Design Method for Estimating the Reliability of Lead Free Solder Joints in Ball-Grid-Array-Type Packages under Impact Load

Akihiro YAGUCHI*, Munehiro YAMADA** and Kenichi YAMAMOTO**

*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)

**株式会社ルネサステクノロジ生産技術本部 (〒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)

**LSI Manufacturing Technology Unit, Renesas Technology Corp. (5-20-1 Jyosuihoncho, Kodaira-shi, Tokyo 187-8588)

概要 衝撃負荷に対するPbフリーはんだBGA接続部の信頼性設計技術を確認するため、衝撃曲げ試験による種々の構造仕様での寿命評価を行い、破壊寿命と有限要素法解析で得た接続部の界面応力に対応させることで、界面応力を用いた寿命評価が可能であることを明らかにした。Pbフリーはんだ接続部の破壊は、Pb共晶はんだの場合と異なり、接続界面近傍の金属間化合物内で発生し、寿命には、実装温度、基板ひずみの立上り時間およびバンプ高さが影響することを解明した。実験条件と同等の有限要素解析を行い、はんだ接続部の界面応力を算出して、はんだ接続部の界面応力と寿命の関係を求めた。本評価法の妥当性を検討するために、バンプ配置と接続部構造が信頼性へ及ぼす影響を本方法を用いて検討した。その結果、界面応力を寿命評価に用いることで、PbフリーはんだBGA接続部の定量的な信頼性設計が可能であることが明らかになった。

Abstract

A design method for quantitatively estimating the life of lead free solder joints in ball-grid-array-type packages under impact load was developed by an experimental result and a calculation of the finite element method. It was found that the interfacial stress between the solder and copper plating in the solder joints is the most important structural parameter in the life estimation of the solder joints. It was also found that the package structure, such as the layout of the solder bumps and the assembly temperature, has a significant effect on the life of the solder joints.

Key Words: Ball Grid Array, Solder Bump Joints, Impact Bending, Lead Free Solder, Interfacial Stress, Surface Strain, FEM

1. 緒言

携帯電話などの携帯情報機器の小型・軽量化および多機能化に対応するため、搭載される電子部品の小型化が進んでいる。電子部品の実装には微小なBGA (Ball Grid Array) はんだボールが多く用いられており、BGA はんだ接続部には携帯機器特有の落下衝撃に対する信頼性向上が要求されている。このため、衝撃に対するBGA はんだ接続部の破壊特性を把握するとともに信頼性評価手法を確立し、はんだ接続部の信頼性向上のため、電子部品のパッケージ構造および実装構造を適正化する定量的な信頼性設計技術の開発が不可欠となっている。

はんだ接続部の衝撃信頼性は、実装基板表面に発生する基板ひずみを指標として、姿勢制御を取り入れた落下試験や硬球またはロッドを実装基板に衝突させる衝撃曲げ試験などで評価されている^{1)~7)}。また、信頼性設計のためには、衝撃解析によるはんだ接続部の応力またはひずみ評価が必要であり、実機や実装試験片をモデル化して解析し、はんだ接続部の応力に及ぼす実装構造の影響などの評価が行われている^{8)~11)}。

本研究では、Pbフリーはんだを対象として、まず、衝撃負荷が加わった場合のBGA はんだ接続部の寿命に及ぼす実装温度やはんだ接続構造などの影響を、実装基板表面に発生する基板ひずみを指標として把握し、信頼性設計のための評価データベースとした。次いで、はんだ接続部に発生する界面応力を評価パラメータとして用いることで汎用的な信頼性設計が実施できると考え、実験と解析から妥当性の検討を行った。有限要素法による衝撃解析を用いて衝撃曲げ試験時のはんだ接続部の界面応力を算出し、実験で得られた破壊寿命との関係から定量的に信頼性評価を行う方法を検討した¹⁰⁾。

2. BGA はんだ接続部の衝撃信頼性評価

2.1 衝撃曲げ試験

本研究では、BGA はんだ接続部の信頼性を衝撃曲げ試験⁷⁾で得られた実装基板表面の基板ひずみとはんだ接続部の破壊寿命とで評価した。衝撃曲げ試験は、Fig. 1に示すようにパッケージを実装した実装試験片のパッケージ実装面を下向きにして固定し、実装部分の裏面に落下ロッドを衝突させることで実装基板に衝撃的な曲げ変形を与え、は

Fig. 1 Outline of impact bending test system

んだ接続部の信頼性を評価する方法である。実装基板表面のひずみは、パッケージコーナーに位置するバンプの近傍にひずみゲージを貼り付け、ストレージ機能を有するメモリレコーダを使用し、サンプリング周期 $10\mu\text{s}$ で測定した。Fig. 2は、測定した基板ひずみ波形の例であり、図中に示す正弦半波状の第1波の基板ひずみのピーク値(ϵ_{max})を用いて評価した。衝撃曲げ試験では、第1波基板ひずみピーク値までのひずみ立上り時間(t_r)を固定間スパンを変えることで調整することができる。実装試験片の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（デジチェーン）を形成し、接続部の抵抗値が初期値の2倍以上になった時点を破壊発生とし、寿命を決定した。

2.2 信頼性に及ぼす構造因子の影響

BGAはんだ接続部の衝撃負荷に対する信頼性を衝撃曲げ試験で評価し、信頼性に及ぼす実装温度や実装構造の影響を検討した。

BGAタイプのパッケージでは、パッケージへのバンプ形成時と、実装基板へのパッケージ実装時にはんだ溶融温度以上の熱履歴を受ける。このバンプ形成および基板実装時の温度を変えた実装試験片を作成し、実装温度が信頼性に

Fig. 2 Strain wave on surface of PWB

及ぼす影響を測定した。評価にはインタポーザに樹脂基板を用いたFan-in&outタイプの336ピン試作パッケージ（外形 17mm □、バンプピッチ 0.8mm ）の基板実装品（実装基板サイズ $102\times 52.5\times 1.2\text{mm}$ 厚）を用いた。バンプは、 $\phi 0.5\text{mm}$ のはんだボールを溶融して形成した。使用したはんだボール材は Sn-3.0Ag-0.5Cu とし、基板実装時のペースト材もボール材と同じにした。パッケージは、実装基板の片面中央に1個搭載した。パッケージ側のはんだ接続部の表面処理は電解 Ni/Au めっきであり、実装基板側は酸化防止用のプリフラックスを塗布した。衝撃曲げ試験での実装基板の固定間スパンは 60mm とした。

Fig. 3(a), (b)は、バンプ形成温度を 230°C 、 250°C 、 270°C と変えたパッケージを最高温度 235°C と 250°C でそれぞれ基板実装した実装試験片の破壊寿命と基板ひずみの関係である。バンプ形成温度 230°C と 250°C では、基板実装温度に

(a) Reflow temperature : 235°C

(b) Reflow temperature : 250°C

Fig. 3 Influence of bump soldering temperature on life of solder joints

よらず基板ひずみと破壊寿命の関係がほぼ一致している。バンプ形成温度270°Cの破壊寿命は、他の温度の場合に比べて基板ひずみの大きな範囲で短くなっており、特に(b)に示す基板実装温度250°Cと高温の場合の寿命低下が著しい。Fig. 4は、バンプ形成温度(230°C)一定のもとで、基板実装温度を変えた場合の破壊寿命である。基板ひずみの大きな範囲において、基板実装温度が高くなるほど破壊寿命が短くなっており、破壊寿命の基板実装温度依存性が現れている。はんだ接続部の衝撃破壊寿命は、バンプ形成時および基板実装時の温度がともに高くなると減少し、信頼性が低下することが明らかになった。

はんだ接続部の破壊は、バンプ形成温度270°Cの試験片では、基板実装温度に依存して破壊個所が異なり、基板実装温度235°C以下の場合にはパッケージ側接続部で、250°Cはパッケージ側と実装基板側の破壊が混在していた。一方、バンプ形成温度250°C以下では基板実装温度に依存せず、実装基板側接続部で発生している。き裂発生状態の観察結果をFig. 5に示す。破壊個所はいずれの場合も接続界面に形成された化合物層内部であった。Fig. 6にバンプ形成温

Fig. 4 Influence of reflow temperature on life of solder joints

Fig. 6 Thickness of intermetallic compound layer at the solder bump joints

Fig. 5 Crack at the solder bump joints

度230°Cのパッケージを220°C、250°Cでそれぞれ基板実装した試験片の実装基板側接続部の断面写真を示す。短寿命であったFig. 6(a)の基板実装温度250°Cでの化合物層厚さは、Fig. 6(b)の実装温度220°Cより厚いことがわかる¹²⁾。実装温度が高い場合に化合物層が厚く成長する傾向は、実装基板側ほど明確ではないもののパッケージ側接続部でも同様に見られた。Pbフリーのはんだ接続構造では、熱処理によって金属間化合物層が厚く成長すると接続強度が低下する場合^{13,14)}が報告されており、本結果においてバンプ形成時および基板実装時の実装温度が上昇すると寿命が低下する原因は、硬くて脆い化合物層の成長に依存していると考えられる。バンプ形成温度270°Cの試験片でパッケージ側接続部破壊が発生したのは、バンプ形成時にパッケージ側接続部で化合物層が成長し、基板実装前の段階で接続部分の強度が著しく低下していたためと考えられる。

次にはんだバンプ高さが衝撃信頼性に及ぼす影響を検討する。評価には樹脂基板インタポザのFan-in&outタイプ264ピン試作パッケージ(外形15mm□, バンプピッチ0.8mm)の基板実装品(実装基板サイズ102×52.5×1.27mm厚)を使用した。はんだ材はSn-3.0Ag-0.5Cuである。実装後のバンプ高さを変えるため、φ0.5mmのはんだボールでバンプを形成したパッケージと、ペースト状のはんだ印刷によってバンプを形成したパッケージを用意し、それぞれ最高温度約235°Cで実装基板の片面中央に1個搭載した。実装後のバンプ高さは、約0.4mmと約0.1mmであった。はんだ接続部の表面処理はパッケージ側、実装基板側いずれも電解Ni/Auめっきである。

Fig. 7 Influence of bump height on life of solder joints

Fig. 7に、はんだバンプ高さを変えた実装試験片の破壊寿命と基板ひずみの関係を示す。バンプ高さ0.1mmの実装試験片の破壊寿命は、バンプ高さ0.4mm品より2倍以上長くなっており、信頼性に対する顕著なバンプ高さ依存性が認められる。なお、本実装試験片の破壊箇所も、Fig. 5と同じはんだ接続界面近傍の化合物層内であった。

衝撃曲げ試験では実装試験片の固定間スパンを変えることで、Fig. 2に示した正弦半波状の基板ひずみ立上り時間 (Fig. 2中のtr) を変えることができる。これまで、構造の異なる2種類のパッケージについて固定間スパン60mmと90mmで衝撃曲げ試験を行い、低剛性パッケージに立上り時間の依存性が顕著に現れることを明らかにしている¹⁰⁾。本報告では、基板ひずみ立上り時間が短い場合に対して検討するため、固定間スパンを40mmにした実験を行った。

評価には、インタポザにテープ基板を用いたFan-outタイプパッケージ¹⁵⁾ (外形23mm角, 352ピン) 試作品を実装基板 (サイズ108mm×55mm×1.2mm厚) に搭載した実装基板試験片を用いた。はんだはボール材, 実装ペースト材ともにSn-3.0Ag-0.5Cu, ボール径はφ0.5mmで、基板実装は最高温度約240℃とした。

Fig. 8は、固定間スパンを変えて測定した基板ひずみと破壊寿命の関係である。スパン60mmと90mmの場合は、破壊寿命50回以下の高ひずみ領域でスパン60mmの寿命が短くなるが、低ひずみ領域ではほぼ同程度になっている。一方、ひずみ立上り時間が短くなるスパン40mmの場合は、低ひずみ領域でも高ひずみ領域と同様に破壊寿命が短くなっており、スパンが広い場合とは明確に挙動が異なる。その結果、基板ひずみと破壊寿命の関係は、固定間スパンが短くなるほど水平に近づく傾向が見られる。なお、本実装試験片の破壊箇所もFig. 5と同様にはんだ接続界面近傍の化合物層内であった。

Fig. 8 Influence of fixed distance of specimen on life of solder joints of fan-out type package

以下に立上り時間で破壊挙動が異なる理由を考察する。Fig. 9は、落下ロッドの落下高さ200mm一定で、固定間スパンを変えて測定した基板ひずみ波形である。スパン60mmと90mmの場合は基板ひずみ最大値までの立上り時間に差異はあるものの、基板ひずみはほぼ同じ値となっている。一方スパン40mmの場合は、基板ひずみが立上る傾きはスパン60mmとほぼ同一であるが、基板ひずみの最大値は2/3程度と小さくなっており、最大値までの立上り時間が短くなっている。固定間スパンが狭くなると実装試験片全体の剛性が増加し、実装基板の面外変形に依存する基板ひずみが小さくなり、その立上り時間も短くなる。実装基板の面外変形量が小さくなるのに伴ってはんだ自体の塑性変形が生じにくくなり、これによる接続界面応力の緩和がなされなくなるため寿命が短くなると考えられる。固定

Fig. 9 Influence of fixed distance of specimen on strain waveform of PWB of fan-out type package

Fig. 10 Influence of solder material on life of solder joints of fan-out type package

間スパンが短くなると基板ひずみと破壊寿命の関係が水平に近づくのは、はんだ接続部の変形が拘束されることで、脆性的な破壊挙動が顕著になるためと考えられる。この他、はんだ接続界面強度のひずみ速度依存性も考えられるが、明確な相関は得られていない。

Fig. 10は、Pbフリーはんだ(Sn-3.0Ag-0.5Cu)とPb共晶はんだ(Sn-37Pb)の破壊寿命を比較した結果である。評価には前述のFan-outタイプパッケージを用いた。Pb共晶はんだの寿命は、Pbフリーはんだより特に高ひずみ域で長くなっており衝撃に対する信頼性が高い。また、Pbフリーはんだの基板ひずみと破壊寿命の関係を示す直線は、Pb共晶はんだより明らかに水平に近くなっており、基板ひずみの変動に対する感度が高い。はんだ接続部の断面観察写真をFig. 11(a), (b)に示す。Pbフリーはんだの破壊箇所は接続界面の化合物層内であるが、Pb共晶はんだははんだ母材で破壊していることがわかる。

Pb共晶はんだは、はんだ自体の弾性率が低いためはんだの変形によって界面応力が緩和されるが、弾性率が高いPbフリーはんだでは、はんだ変形による応力緩和が少ないため、界面に大きな応力が発生しやすい。そのため、化合物

層で破壊が生じ、寿命が短くなったと考えられる。また、Pb共晶はんだ実装品の接続界面強度が、Pbフリーはんだより高いことも要因の1つと考える。Pbフリーはんだ基板実装品の基板ひずみと破壊寿命の関係が水平に近いのも、化合物層内の脆性破壊であることに起因していると考えられ、Pbフリーはんだを使用する実装品では、基板ひずみのわずかな違いで寿命が大きく変わることがあるので、信頼性設計では注意する必要がある。

BGAはんだ接続部の衝撃信頼性の定量評価には、信頼性に及ぼす上記のような構造、材料などの影響因子の依存性を把握し、基板ひずみと破壊寿命の関係を定量的にデータベース化することが必要である。

3. Pbフリーはんだ接続部の界面応力解析

BGAパッケージはんだ接続部の衝撃信頼性は基板ひずみで定量的に評価でき、実製品の製造および使用環境に対応した評価方法として有効である。しかし、Fig. 7に示したバンプ高さのようなパッケージ構造や実装構造の影響を構造設計に取り入れるためには、破壊発生個所の応力やひずみを用いるのが有効であり、構造設計の汎用化が図れると考えられる。そこで、Pbフリーはんだ接続部の界面応力に注目し、汎用的構造設計への適用を検討した。

3.1 解析方法

Sn-Ag-Cu系Pbフリーはんだを用いた基板実装品の衝撃破壊は、接続界面に形成される化合物層で発生し、実装基板の面外変形に伴う界面に垂直な方向の負荷が破壊発生の主要因と考えられる⁹⁾。そこで、PbフリーはんだBGA接続部の衝撃破壊は、接続界面に発生する法線方向応力で評価することにした。また、衝撃負荷のようにひずみ速度が速くなると、はんだの降伏応力が上昇するため^{16),17)}、応力解析でははんだを弾性体として扱うことにした。

界面応力と破壊寿命の関係を把握するため、衝撃曲げ試験ではんだ接続部界面に発生する応力を有限要素法で解析した。解析は2段階のズームング手法を用い、まず、Fig. 12(a)に示す基板実装品の全体モデルで衝撃曲げ試験条件での動的解析を行う。全体解析モデルでは、はんだバンプを角型にモデル化している。全体モデル解析で得られたパッ

Fig. 11 Crack at the solder bump joints of fan-out type package

Fig. 12 Three dimensional analysis model

ケージコーナーのはんだバンプ部分の変形量をFig. 12(b)のはんだバンプ接続部の詳細モデルに強制変位として与えて静的解析を行い、はんだ接続部界面の法線方向応力を算出した。解析モデルは全体モデル、詳細モデルともに6面体ソリッドの2次要素で作成し、詳細モデルの最小要素サイズを約 $20\mu\text{m}$ とした。解析に用いた材料定数をTable 1に示す。

基板実装品全体モデルによる動的解析の精度を確認するため、衝撃曲げ試験で基板ひずみを測定した位置に発生する基板表面ひずみの解析値を算出し、実測値と比較した結果をFig. 13に示す。評価は、樹脂基板インタポータのFan-in&outタイプ240ピンパッケージ（外形 13mm □、バンプ

Table 1. Material properties of fan-in&out type package

Component	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (10^3kg/m^3)
Encapsulant	20.0	0.25	1.85
Chip	190.0	0.07	2.30
Interposer	35.0	0.16	1.85
Solder Bump	40.1	0.35	7.30
Printed Wiring Board	21.0	0.16	1.85

Fig. 13 Investigation of the result of three dimensional impact analysis

ピッチ 0.65mm)の基板実装品（実装基板サイズ $101\times 52.5\times 1.27\text{mm}$ 厚）で行った。実装試験片の固定間スパンは 60mm とした。Fig. 13から明らかなように、基板ひずみの実測値と解析値はほぼ一致しており、動的解析による実装試験片の変形量算出では十分な精度が得られることが確認できた。

Fig. 14は、はんだバンプ接続部の詳細モデル解析で得られたはんだバンプの応力分布図である。はんだ接続界面に応力が集中しており、衝撃曲げ試験の破壊発生個所と一致している。評価には、接続界面に発生するはんだバンプ内要素の最大応力を用いた。

3.2 はんだ接続部界面応力の評価

Fig. 15は、Fig. 4にプロットしたFan-in&outタイプパッケージ基板実装品の基板実装温度 220°C と 250°C の試験結果について、各試験条件で応力解析し、得られたパッケージ側接続部の界面応力と破壊寿命との相関をまとめたものである。破壊寿命は界面応力の減少とともに増加し、基板ひずみと同様の相関関係が認められる。Fig. 15のような界面応力と破壊寿命との関係を把握しておくことで、パッケージや実装構造を変更した場合の信頼性を仮想的に試作評価でき、設計効率の向上が図れると考える。

Fig. 16は、衝撃曲げ試験の条件（スパン、落下ロッド重量、落下高さ）を同一とし、接続径一定ではんだバンプ高さを変えた場合のパッケージ側はんだ接続部の界面応力解析結果である。評価は、樹脂基板インタポータのFan-in&outタイプ256ピン試作パッケージ（外形 11mm □、バンプピッチ 0.5mm)の基板実装品（実装基板サイズ $100\times 50\times 0.8\text{mm}$ 厚）で行った。界面応力はバンプ高さが低くな

Fig. 14 Stress distribution of the corner solder bump

Fig. 15 Relationship between of interfacial stress of solder joints and cycles to failure of solder joints

Fig. 16 Influence of solder bump height on interfacial stress of solder joints

るとともに減少しており、バンプ高さが低くなると、破壊寿命が長くなることを示している。これは、Fig. 7に示した試験結果と一致しており、バンプ高さが低い実装品の寿命が長くなるのは、界面応力の低いことが一因であると言える。Fig. 17は、バンプ高さ0.32mmと0.08mmの実装品について、衝撃曲げ試験時のパッケージ搭載部分の変形挙動を解析した結果であり、実装基板の中心線上の面外変形量を示してある。パッケージ搭載部分の実装基板の変形量は、バンプ高さ依存性が大きく、バンプ高さが低い場合に変形量が小さくなる。バンプ高さが低くなるとはんだ自体の高さ方向の変形量が小さくなり、これに伴って実装基板の面外変形量も減少し、はんだ接続界面の応力が低減したと考えられる。

Fig. 17 Deformation behavior around the package mounted on PWB

4. 実装構造設計への適用

はんだ接続部の界面応力を用いた破壊寿命評価法の妥当性を検討するため、携帯機器搭載用のFan-in&outタイプパッケージ（外形11×10.5mm、ボール径 ϕ 0.45mm、樹脂基板インタポーザ）を一例として実装構造適正化を試みた。評価パッケージのバンプ配置をFig. 18に示す。中央部の信号用バンプ80個の他に、パッケージコーナー部分に補強用バンプをそれぞれ4個、計16個設けてあり、この補強用バンプの効果とはんだバンプ接続径の影響を評価した。

基板ひずみが0.2%となる条件での衝撃曲げ試験を模擬した有限要素解析を行い、Fig. 18に図示した信号用バンプおよび補強バンプそれぞれのコーナーバンプに発生するパッケージ側接続部の界面応力を求めた結果をTable 2に示す。また、表中にはFig. 15に示した実装温度250°Cの破壊寿命曲線より求めた信号用バンプの推定寿命も併記した。補強バンプがある場合の信号用コーナーバンプの推定寿命は、線形損傷則を適用し、補強コーナーバンプが破壊するまでに受ける損傷分を、補強コーナーバンプ破壊後の

Fig. 18 Solder bumps layout of 96pin fan-in&out type package

Table 2. Interfacial stress and resulted life of solder joints

Land size (mm)		Support Bump	Stress (MPa)		Life (cycles)
Package side	PWB side		I/O Bump	Support Bump	
0.4	0.4	None	86		840
0.4	0.4	16 Bumps	24	87	1470
0.3	0.4	16 Bumps	31	113	825
0.3	0.5	16 Bumps	19	169	240

寿命に加算して算出した。補強バンプを設けることで信号用バンプの破壊寿命は約2倍となり、補強バンプ設置の有効性は明白である。また、パッケージ側のはんだバンプ接続径が実装基板側より小さくなると、パッケージ側接続界面の応力が増加し、補強バンプがある場合でも補強バンプなしより破壊寿命が短くなる場合がある。したがって、はんだバンプ接続径の決定は、パッケージ構造や実装構造全体を考慮して適正化することが必要である。

5. 結 言

Pb フリーはんだで実装した BGA はんだ接続部の衝撃信頼性に対する設計法確立のため、衝撃曲げ試験によるはんだ接続部の破壊寿命試験を行い、破壊個所の観察とともに試験時の界面応力を解析して比較した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 衝撃負荷により、Pb フリーはんだの場合は Pb 共晶はんだと異なり、はんだ接続界面近傍の金属間化合物層内で破壊する。
- (2) Pb フリーはんだ接続部の衝撃破壊寿命は、バンプ形成および基板実装温度がともに高くなると短くなり、実装バンプ高さが低くなると長くなる。また実装試験片の固定間スパンが短くなると基板ひずみの高ひずみ域で寿命が短くなる。
- (3) 基板実装品の全体モデルによる動的有限要素解析と、その解析結果を反映したはんだバンプ接続部分の詳細モデルによる静的有限要素解析を行うことで、Pb フリーはんだ接続部の界面応力を算出でき、これを評価パラメータに用いることで、寿命評価が可能である。(2003.5.15-受理)

文 献

- 1) 井門 修, 石川重雄, 伊東伸孝, 長竹真美, 三代絹子, 広島義之: “モバイル機器マイクロ接合の衝撃強度評価”, 第15回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp. 173-174, 2001
- 2) 坂本宏文, 清末明弘: “携帯電話における Pb フリーはんだ評価”, 第10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. 215-218, 2000

- 3) 石川重雄, 長竹真美, 東口 裕, 三代絹子: “携帯電子機器におけるはんだ接合部の落下衝撃強度評価”, 第11回計算力学講演会講演論文集, pp. 523-524, 1998
- 4) 矢口昭弘, 山田宗博: “基板ひずみによる BGA はんだ接続部の落下衝撃信頼性評価”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **6**, No. 1, 2003
- 5) 于 強, 白鳥正樹, 池永 圭: “衝撃負荷を受ける BGA アセンブリはんだ接合部の強度評価”, 第14回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp. 109-110, 2000
- 6) 井門 修, 長竹真美, 伊東伸孝, 三代絹子, 広島義之: “モバイル機器マイクロ接合の衝撃試験法”, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, pp. 529-530, 2000
- 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”, 第16回エレクトロニクス実装学術講演会論文集, pp. 109-110, 2002
- 8) 井門 修, 石川重雄, 長竹真美, 伊東伸孝, 三代絹子, 広島義之: “モバイル機器の落下衝撃解析”, 日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp. 471-472, 2001
- 9) 十河敬寛, 原 悟: “BGA はんだ接合部の衝撃強度に関する検討”, 日本機械学会第13回計算力学講演会講演論文集, pp. 647-648, 2000
- 10) 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”, 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. 407-410, 2002
- 11) 平田一郎, 大田広徳, 村上朝夫, 浦野 渡: “落下解析による CSP はんだ接合部の衝撃応力評価”, Mate2003, pp. 161-164, 2003
- 12) 山下志郎, 原田正英, 山本健一, 木本良輔: “熱履歴による界面状態を制御した高信頼はんだバンプ接合技術”, Mate2003, pp. 109-114, 2003
- 13) 于 強, 白鳥正樹, 金 道燮: “鉛フリーはんだ接合部の接合信頼性に対する金属間化合物層の影響”, 第10回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, pp. 227-230, 2000
- 14) 于 強, 白鳥正樹, 金 道燮, 高橋靖宏: “鉛フリーはんだ接合部における金属間化合物の影響”, 第15回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp. 177-178, 2001
- 15) 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, pp. 509-514, 2001
- 16) 于 強, 白鳥正樹, 菊池宏信, 池田真哉: “落下衝撃を受ける BGA はんだ接続部の動的特性”, 日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp. 473-474, 2001
- 17) 上西 研, 関根 務, 丸市 毅, 黒崎 誠: “高ひずみ速度における鉛フリーはんだ材の引張応力-ひずみ特性”, Mate2003, pp. 253-256, 2003