

鋼球落下による基板の衝撃強度信頼性評価

Method of Shock Analysis for PCBs Subjected to Ball Impacts

あらまし

携帯電話などモバイル機器に搭載されているLSIパッケージおよびメモリなどは、微細なはんだボールによって実装するBGA（Ball Grid Array）タイプが主流である。これらの実装部品は落下衝撃に対する実装強度が重要であり、その接合信頼性は自由落下試験で確認している。しかし、この試験では落下姿勢を一定にすることは難しく、衝撃の再現性がないため評価が安定しないなどの問題があった。これらの解決方法として、プリント基板（PT板）の自由落下と同程度の衝撃歪み^{ひずみ}を与える鋼球落下による評価法を検討してきた。そこで鋼球落下による衝撃寿命測定のための装置を開発し、BGAの寿命試験に関して、PT板の固定方法と衝撃歪み、鋼球の落下高さ^{高さ}と衝撃歪み、およびBGA破断判定などを評価した。同時に、自由落下と鋼球落下衝撃による歪みを衝撃解析ソルバ“LS-DYNA”によって計算し、LSIパッケージ近傍のPT板表面に発生する衝撃歪みをそれぞれの実測結果と比較した。

Abstract

The LSI packages of mobile devices are mainly BGA (Ball Grid Array) packages, which are soldered onto PCBs using minute solder balls. Obviously, the solder joints of these packages must be strong so the device can withstand being dropped, and this is usually checked by conducting drop tests. However, because it is difficult to reproduce the same device orientation and kinetics at the time of impact in each test, the results are not very consistent. To improve the results, we examined a testing method in which the device under test is subjected to the same forces as in a free fall by striking it with a falling steel ball. Then, we developed a device that tests resistance to repeated impacts by a falling steel ball and evaluated its performance. Also, we analyzed the strains and distortions that occur on PCB surfaces during free-fall impacts and impacts by falling steel ball and then compared the analysis results with measurements made in experiments with actual devices. This paper describes the method of shock analysis we used in this investigation.



館野 正（たでの ただし）

PLM/開発革新センター物理シミュレーション技術部 所属
現在、エレクトロニクス実装技術、および製品開発における数値解析に従事。



井門 修（いど おさむ）

PLM/開発革新センター物理シミュレーション技術部 所属
現在、エレクトロニクス実装技術、および製品開発における数値解析に従事。



伊東伸孝（いとう のぶたか）

PLM/開発革新センター物理シミュレーション技術部 所属
現在、エレクトロニクス実装技術、および製品開発における数値解析に従事。

ま え が き

携帯電話などモバイル機器に搭載されているLSIパッケージ（以下、PKG）およびメモリなどは、微細なはんだボールによって実装するBGA（Ball Grid Array）タイプが主流である。これらの部品を実装するプリント基板（以下、PT板）設計では落下衝撃に対する信頼性が重要である。実装信頼性の確認は製品レベルの試験とPT板レベルの試験がある。本来は製品内に実装された状態で試験する方が、より正確な信頼性評価であるが、製品が高価であることや数量が必要な点で実際に試験は行えない。その代用として、PT板での試験を行っているが、手作業で落下試験を行っているためPT板の落下姿勢を一定にすることが難しく、安定した評価を行うことができないなどの問題があった。これらの解決方法として、PT板の自由落下と同程度の衝撃歪みを与える鋼球落下による評価法を提案し {図-1 (a)}, その適用方法を検討してきた⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾ また、落下プローブによる衝撃曲げ試験⁽⁷⁾のやPT板を治具に固定

し垂直落下させる試験方法⁽⁸⁾なども提案され研究が続けられている。そこで、鋼球落下による衝撃寿命測定のための装置を試作しBGAの寿命試験方法に関して実験を行った。例えば、鋼球落下衝撃ではPT板の固定方法の違いと衝撃歪みの大きさの関係、鋼球の落下高さ⁽⁹⁾と最大衝撃歪みの関係、およびBGA破断判定法などを検討してきた。同時に、自由落下と鋼球落下衝撃による歪みを衝撃解析ソルバ“LS-DYNA”によって計算し、PT板表面に作用する衝撃歪み波形をそれぞれの実測結果と比較した。

本稿では、衝撃という特殊な状況におけるPT板やBGAの挙動を再現するための取組みについて紹介する。

鋼球落下衝撃試験

● 鋼球落下衝撃試験装置

鋼球によって、繰り返しPT板に衝撃を与える装置を試作した {図-1 (b)}。装置仕様は以下のとおりである。

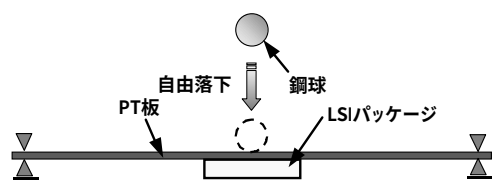
- (1) 試験可能なPT板寸法：□50～300 mm
- (2) 鋼球の重量：3～20 g（6種類）
- (3) 落下高さ：50～1,000 mm
- (4) 落下回数：任意に設定可能
- (5) A/D入力：歪みゲージ=3本

：はんだ破断判定（電圧）=4本

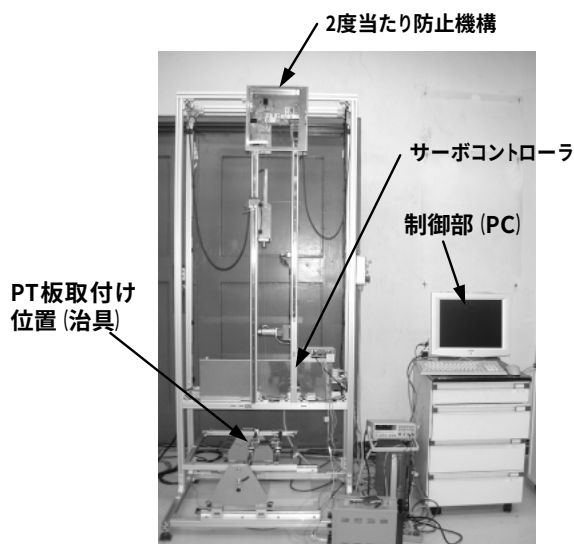
この装置では、初めにナイロン製の紐⁽¹⁰⁾につながれた鋼球を設定高さの位置決め用ブロックまで引き上げて、紐を押さえて固定する。つぎに紐の押さえを開放し、PT板上に鋼球を自由落下させ衝撃を与える。装置は衝突して跳ね上った鋼球が再びPT板に当たらないように紐の長さを調整する「2度当たり防止機構」が装置上部に設けてある。衝撃歪みと破断電圧は、紐が開放されてから1.0秒間記録される。装置は破断電圧、または最大、最小歪みが設定した範囲を超えた場合、自動的に停止するようになっている。

● 繰返し精度

表-1は落下高さと落下位置のばらつきを円の直径で、最大衝撃歪みのばらつきを標準偏差で表したものである。この結果から、安定した衝撃負荷を繰返し与えられる装置であることが分かる。例えば、落下高さが900 mmの場合、衝撃負荷1サイクルは約30秒であり、100回の衝撃試験が1時間でできる。



(a) 鋼球落下衝撃法

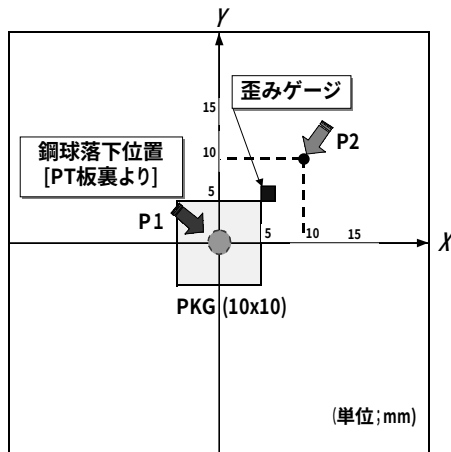


(b) 鋼球落下衝撃試験装置

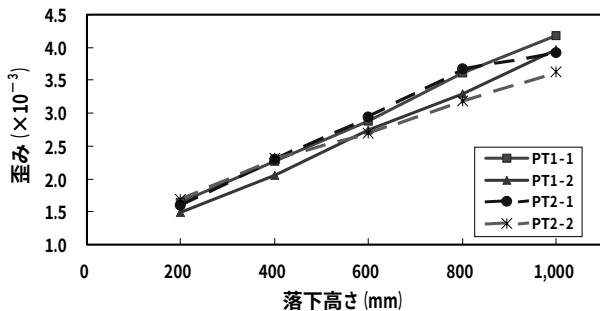
図-1 鋼球落下衝撃試験装置
Fig.1-Automatic ball impact machine.

表-1 繰返し精度 (鋼球重量=5.4 g, 繰返し数=20)

落下高さ (mm)	落下位置精度 (mm)	衝撃歪みのばらつき (標準偏差: σ)
150.0	ϕ 1.5	0.063195
200.0	ϕ 2.5	0.093963
300.0	ϕ 3.5	0.174111
500.0	ϕ 2.5	0.103797
700.0	ϕ 5.0	0.369454
900.0	ϕ 6.0	0.557059



(a) 鋼球落下位置と歪み測定位置



(b) PKGコーナの最大衝撃歪み (鋼球落下位置P1)

図-2 鋼球の落下高さと衝撃歪み

Fig.2-Steel ball height of fall and impact distortion.

PT板の衝撃歪み

● 鋼球の落下高さと衝撃歪み

落下高さと衝撃歪みの関係を求めることは、落下試験機で衝撃寿命試験を行うときの指標になる。そこで、5.4 gの鋼球をPKGの中心 (P1) に落下させ、PKGコーナ近傍の歪みを測定した。また、歪みは同じ高さで20回測定した平均で、同じPT板を2度測定している。図-2 (b) は落下高さで最大衝撃歪みの関係を示すグラフである。このグラフは落下高

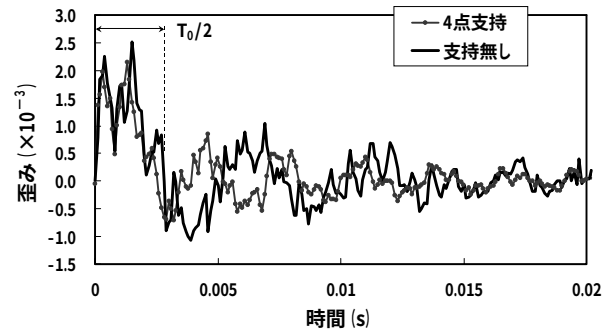


図-3 PT板拘束条件と衝撃歪み波形

Fig.3-Condition of PCB constrain and result of mechanical shock strain.

さと衝撃歪みが比例関係にあることを示している。

● PT板の拘束条件と衝撃歪み

PT板の固定法を変えたとき、衝撃歪み波形がどのような変化をするか測定した。固定方法は、

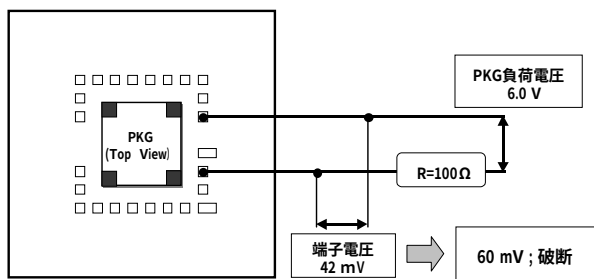
- (1) PT板コーナ4箇所固定
- (2) 固定なし (PT板コーナのみ台に載せた状態)で行った。試験条件は、鋼球重量=5.4g, 落下高さ=500 mm, 落下位置=PKG中心から ($x=10$, $y=10$) の位置である {図-2 (a) のP2}。図-3は歪み波形の測定結果である。初期歪み周期 $T_0/2$ を比較すると、

- (1) 2.8×10^{-3} 秒 (4箇所固定)
- (2) 2.8×10^{-3} 秒 (固定なし)

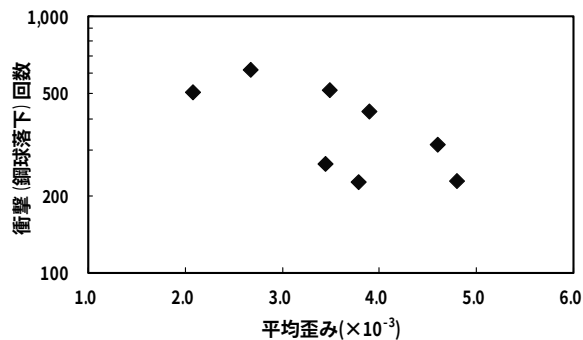
であり、鋼球衝突時の歪み波形もよく似ている。 $T_0/2$ 以降は歪み周期、振動時間にズレが見られるが、全体的な違いは少ない。これより、鋼球落下衝撃による最大歪みはPT板拘束との相関は小さく、鋼球の重さと落下速度、およびPT板の固定間隔で決まる。

基板の衝撃歪みと寿命

鋼球の落下によって繰り返しPT板に衝撃を加えると、BGAに応力が作用し境界面に亀裂が発生する。衝撃寿命とは、この亀裂が成長しBGAが破断するまでの衝撃負荷回数のことである。ここでは、PKGコーナ部の歪みを参考に破断までの衝撃回数について寿命試験を行った。図-4 (a) は、はんだの破断判定回路である。実験に用いたPKGの場合、100 Ω の抵抗を入れ、6.0 Vの電圧を負荷すると、初期端子間抵抗 $R_0=1.38 \Omega$, 電圧 $V_0=42$ mVであった。鋼球による衝撃でBGAの亀裂破壊が進行して、抵抗が30%上昇し $R_1=1.80 \Omega$, 電圧 $V_1=60$ mV以上になったとき「破断」と判定するように設定し



(a) はんだ破断判定回路



(b) 衝撃寿命測定結果 (鋼球重量=5.4 g)

図-4 はんだ破断判断法と測定結果
Fig.4-Method of judging solder rupture and measurement result.

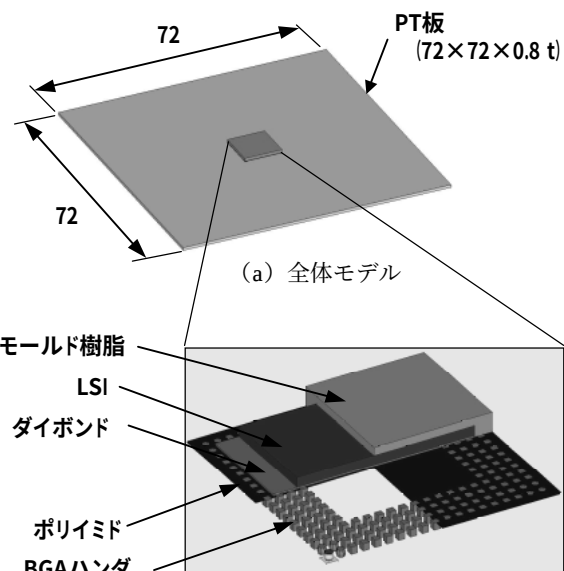
た。図-4 (b) は、破断までの鋼球落下回数とPKGコーナの衝撃歪みの平均をプロットしたグラフである。実験結果にはばらつきが大きく評価法としては不安定なところがあり、試験方法や破断判定法など改良する必要があるが、およそ衝撃歪みと落下回数に相関が見られる。

衝撃解析

鋼球落下試験装置によるPT板の衝撃歪み特性やBGAの破断判定方法など実験による信頼性の検討と同時に、将来、衝撃解析のみでPKGの実装信頼性を予測するための解析手法確立のため、実測の歪み波形と比較を行った。

● 衝撃解析用モデル

図-5 (a) は衝撃解析に用いたPT板の全体モデル、図-5 (b) はそのPKG内部を拡大表示したものである。はんだの材料は62Sn-36Pb-2Ag (共晶)、BGAの寸法は直径350 μm × 高さ230 μm 、BGA総数は240個である。モールド樹脂、LSI、ポリイミドおよびダイボンドなど正確に形状をモデル化している。材料物性値はカタログ値を用いたが、PT板だけは引張試験で求めた実測値を用いている。



(b) パッケージ解析モデル (単位: mm)

図-5 PT板の解析モデル
Fig.5-Finite elements model of PCB.

● PT板の粘性減衰係数

PT板の衝撃解析で粘性減衰係数を「ゼロ」とした場合、歪み振幅があまり減衰しない。図-6 (b) の鋼球落下衝撃の歪み波形から周期 $T=5.26 \times 10^{-3}$ 秒が求まる。これより臨界減衰係数 $D_s=2\omega=2 \times 2\pi \div T=2,389$ と計算される。一般的な減衰振動の場合、 $\alpha=0.2D_s$ であることから、本事例の衝撃解析においても粘性減衰係数 $\alpha=0.2 \times 2,389=500$ と定義した。

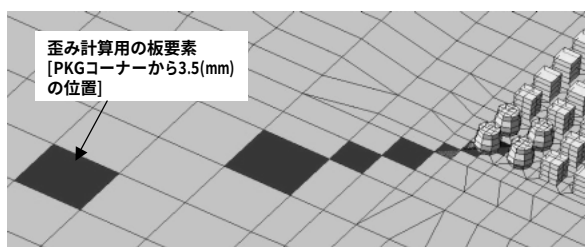
衝撃歪み波形の比較

● 鋼球落下衝撃歪み波形の比較

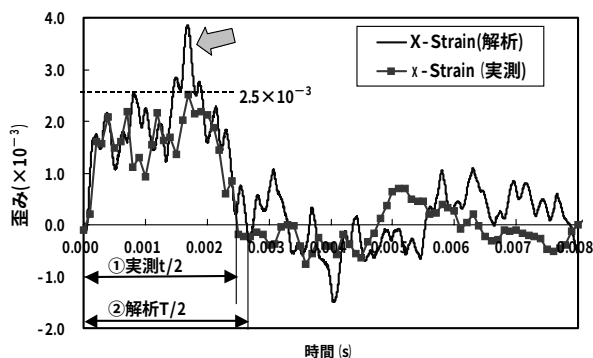
図-6 (a) は衝撃解析におけるPT板表面歪みの計算方法を示している。PT板全体の解析モデル表面に歪みゲージと同じように、計算に影響がない程度の剛性 (縦弾性係数) と厚さを有する板要素 (SHELL) を作成し、この要素の歪みを計算する。

図-6 (b) は、PT板解析モデル (図-5) の四隅を固定し、その裏側中央に鋼球 (重量=5.4 g) を高さ350 mmから落下させたときのPKG近傍 {図-6 (a)} の衝撃歪みを、解析と実測で比較したグラフである。

なお、実測での歪み波形は鋼球落下時の空気抵抗や機械的なロスがあるため理論値より小さくなる。衝突直前の落下速度を計測し、解析での値を参考に落下高さを求めると、鋼球落下では高さ400 mmに



(a) 衝撃歪み計算用板 (SHELL) 要素



(b) 鋼球落下による衝撃歪み波形の比較

図-6 鋼球落下衝撃歪み比較 (実測/解析)

Fig.6-Comparison of steel ball impact strain ripples, analysis and measurement.

相当する。それぞれの初期歪み周期は、

① 実測 $t/2=2.50 \times 10^{-3}$ 秒

② 解析 $T/2=2.64 \times 10^{-3}$ 秒

である。また、最大歪みは実測および解析とも

$$\epsilon_{\max} = 2.5 \times 10^{-3}$$

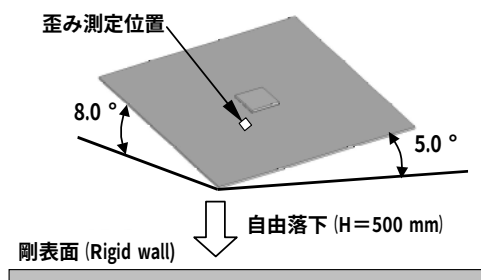
である。鋼球がPT板に衝突して、最も変形した状態から跳ね返ってもとの状態に戻るまでの歪み波形はよく一致している。最初の半波長が衝撃破断の支配的な要因と考えると、精度の良い解析と言える。

なお、衝撃解析で一部歪みが大きく計算されているところがある {図-6 (b) の矢印}。この点はHourglassモードが顕著に現れ、計算精度が悪いので無視した。

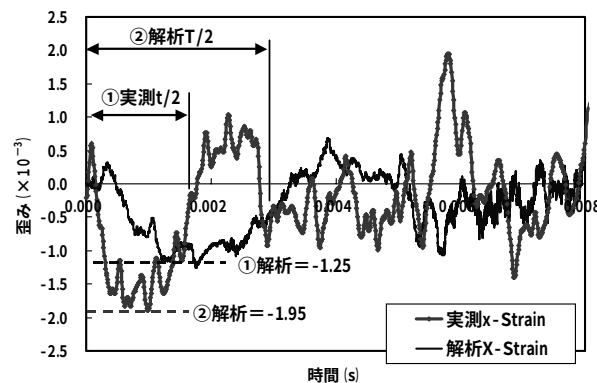
● 自由落下衝撃歪み波形の比較

鋼球落下衝撃は、自然落下衝撃での信頼性評価に替えて行うことを目的に検討してきた。そこで、自然落下に関しても実験と解析の衝撃歪み波形の比較を行い、その特徴を検討した。

図-7 (a) は自由落下用の解析モデルである。PT板を水平の状態から $\phi_x=5.0^\circ$ 、 $\phi_y=8.0^\circ$ 傾け、高さ500 mmから剛表面上に落下させる。なお、PT板の減衰係数は鋼球落下の場合と同じく $\alpha=500$ と



(a) 自由落下衝撃解析モデル



(b) 衝撃歪み波形の比較 (自由落下)

図-7 自由落下衝撃歪み比較 (実測/解析)

Fig.7-Comparison of free drop impact strain, analysis and measurement.

した。鋼球落下用の衝撃解析モデル (図-5) と物性値をそのまま自由落下衝撃解析に用いて計算し、解析と実測とで歪み波形を比較した。図-7 (b) はPKG近傍の衝撃歪み波形である。初期歪みの大きさは、

① 実測； -1.95×10^{-3}

② 解析； -1.25×10^{-3}

である。落下角度など自由落下の条件を精度良く設定することができないので同じ歪みにならないが、およその傾向がつかめる。しかし、歪み周期は

① 実測 $t/2=1.78 \times 10^{-3}$ 秒

② 解析 $T/2=3.36 \times 10^{-3}$ 秒

と実測の約2倍あった。ほかの実測結果と比較しても、歪み周期の差が大きかった。この原因は今後の検討課題であるが、PT板が高速で振動したときは、歪み速度依存の材料特性を考慮する必要がある、通常の引張り試験で得られた物性値では表現できない挙動をしていると考えられる。

考 察

(1) 鋼球落下試験装置

PT板に与える鋼球落下衝撃の影響を正確に把握

するため、鋼球の2度当たり防止機構を設けた自動試験装置を開発した。繰り返し何度も同じ衝撃を与えられる特徴を生かして、鋼球の落下高さやPT板の最大衝撃歪みの関係、およびPT板の拘束条件の違いによる衝撃歪み波形などの確認ができた。

自由落下による衝撃歪みを鋼球落下で再現した場合、図-6 (b) と図-7 (b) のそれぞれの実測結果が示すように、初期歪み周期と最大歪みは、

① 鋼球落下

- ・ 初期半周期 $t/2 = 2.50 \times 10^{-3}$ 秒
- ・ 最大歪み $\epsilon_{\max} = 2.51 \times 10^{-3}$

② 自由落下

- ・ 初期半周期 $t/2 = 1.78 \times 10^{-3}$ 秒
- ・ 最大歪み $\epsilon_{\max} = -1.95 \times 10^{-3}$

であり、鋼球の重さや落下高さを調整すれば、自由落下での初期歪みに相当する衝撃を与えることが可能である。

(2) 鋼球落下衝撃とPT板の歪み

鋼球落下衝撃では、初めは鋼球の衝撃でPT板が変形して最も歪んだ状態になると、鋼球の速度および歪み速度も遅くなる。つぎに、この状態から鋼球に反対方向の力を与えながらPT板はもとの形状に戻る。この間、PT板は鋼球の動きによって変形速度が制限されてしまうため、PT板単体での歪み速度と比較して遅い状態にあると予想される。したがって、材料の歪み速度依存の影響が小さくなり、図-6 (b) のグラフが示すように初期半周期では実測と解析での歪み波形がよく一致している。しかし、これ以降はPT板単体の振動（両端固定の振動）になるため、材料の歪み速度依存特性の影響が顕著に現れ、波長にズレが生じたと考えられる。

(3) 自由落下衝撃とPT板の歪み

自由落下ではPT板の動きを制限するものがなく、衝突した瞬間からPT板単体の振動（両端自由の振動）になる。したがって、歪み測定の開始時刻からPT板材料の歪み速度依存特性の影響が現れ、歪み周期のズレとして測定されたと考えられる {図-6 (b)}。

む す び

繰り返し落下位置精度と衝撃歪みの良さを利用して、衝撃歪みと落下高さの関係、はんだの衝撃寿命測定を行い、ある程度の傾向が把握できた。しかし、実際のPT板衝撃寿命試験との相関があまり見られ

ないなど問題もあり、信頼性試験法として不十分である。衝撃解析ソフト“LS-DYNA”で検討した結果、同じ初期歪みでもその特性が違ってくる。自由落下衝撃では実測と解析とで歪み周期に2倍の差があるなど、材料の歪み速度依存の影響が現れているようである。鋼球落下での試験方法では歪み速度依存の影響を再現できないため、同じ衝撃試験でもPT板の歪み速度が遅く、構造減衰などが作用する、実製品レベル（例えば携帯電話内のPT板など）での衝撃を模擬した試験に適用できるものと思われる。

今後は、はんだの歪み速度を考慮してBGAおよび界面に作用する衝撃歪みの解析を行い、通常のはんだ物性値で計算した結果と比較検討する。また、解析と実験を行いながら鋼球落下試験装置の改良や衝撃歪みとはんだの実装信頼性、および寿命の関係を調査する予定である。

参 考 文 献

- (1) 石川重雄ほか：携帯電子機器における半田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 (1998).
- (2) 井門修ほか：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 (2000).
- (3) 館野正ほか：鋼球落下による基板の衝撃強度評価法. 第15回計算力学講演会講演論文集 (2002).
- (4) 館野正ほか：鋼球落下による基板の衝撃強度評価法〈FBGAパッケージ近傍に作用する衝撃歪みの評価〉. 第16回計算力学講演会講演論文集 (2003).
- (5) 館野正ほか：鋼球落下による基板の衝撃強度評価法 - II. 第17回エレクトロニクス実装学術講演大会論文集 (2003).
- (6) 井門修ほか：モバイル機器の衝撃強度評価試験手法. 第18回エレクトロニクス実装学術講演大会論文集 (2004).
- (7) 矢口昭弘ほか：BGAはんだ接合部の衝撃曲げ試験法. 第16回エレクトロニクス実装学術講演大会論文集 (2002).
- (8) 干 強ほか：繰り返し落下衝撃試験装置の開発と実装はんだ接合部の落下衝撃強度評価. 第15回計算力学講演会講演論文集 (2002).