

(論文)

超音波を利用したスタックタイプパッケージの微小欠陥の評価法

Ultrasound Evaluation of Chip Stacked Packages with Micro Defects



上野一也*
Kazuya Ueno

Generally, both the C-mode and through scan mode acoustic microscopy images are analyzed to evaluate the bonding state in chip stacked packages. However these conventional methods could not detect the poor bonding interfaces detected in multi-chip stacked packages. In this study, the reflected waveform, which was calculated, and FFT analysis were used to evaluate the bonding state in stacked chip packages. Results showed that the calculated waveform and spectrum distribution could be used to detect poor bonding interfaces in stacked chip packages.

まえがき = 携帯端末機器の小型化・軽量化に伴い、それらに搭載されるパッケージには複数のチップを1パッケージ化して、実装効率を高めた SiP (System in Package) が数多く実用化されている。SiP では複数のチップを用いるため、歩留まりの悪化や、パッケージコストの問題が課題としてあげられる。そのため、良品保証されたチップを入手し、個々のチップを問題なく実装することが必要不可欠となる。

SiP にはチップを並列に配置したマルチタイプと、チップを多段に積層するスタックタイプに大別される。マルチチップタイプの場合、基本的な構造は PBGA (Plastic Ball Grid Array) パッケージと同様であり、チップの密着性評価などでは従来の評価法がそのまま適用できる。一方、スタックタイプの場合、例えば超音波を利用した密着性評価では最上層のチップと樹脂との界面に関しては従来どおりであるが、下層チップの密着性評価に関しては、一般的な超音波測定では特定界面の情報を抽出して、密着性不良領域を検出することは困難であり、透過法と反射法を併用する評価法が一般的に実施されている。しかしながら、透過法では微細な領域での評価は難しく、適切な評価法が確立されているわけではない。

そこで、本研究では2段スタックタイプパッケージをモデルパッケージとして、超音波の伝播経路をもとに波形解析¹⁾を行い、実測波形と比較しながら、近似波形の有効性について明らかにした。そして、近似波形を利用して、任意の階層に密着性不良部位を想定した波形解析と、その近似波形のFFT (First Fourier Transfer) 解析²⁾から得られるスペクトル密度の変化に着目して、チップの積層によって生じる微小欠陥 (20 ~ 40 μm程度) 領域の検出方法について検討を行った。

1. 実験方法

1.1 超音波測定原理

図1は超音波測定法の原理を模式的に示している。超音波測定では、音波の指向性を高めるために試料を媒質に浸漬させて測定を行う水浸法が一般的である。音響レンズより発信された超音波は、図に示すようにまず音響特性の異なる界面 (水 / 試料表面) において一部が反射 (S) され、残りは試料内へ透過する。試料内に透過した超音波は、再び異材界面において反射 (I) および透過が起こる。異材界面における反射波の振幅は、次式で示す反射率 (R) に依存している。

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \dots\dots\dots(1)$$

ここで Z_1 は音響インピーダンスであり、音波が伝播する媒質の密度とその中を伝播する超音波の音速の積で表される定数である。異材界面において未接合部のような欠陥がある場合、 $Z_2 = 0$ となり、反射率は1となる。欠陥部において振幅が増大するのは、上記のように剥離層 (空気) が存在し、その界面における反射率が1となるためである。

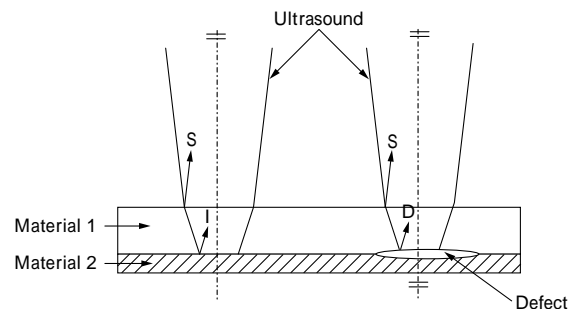


図1 測定原理
Fig. 1 Principle of measurement

* 鋼コベルコ科研 藤沢事業所

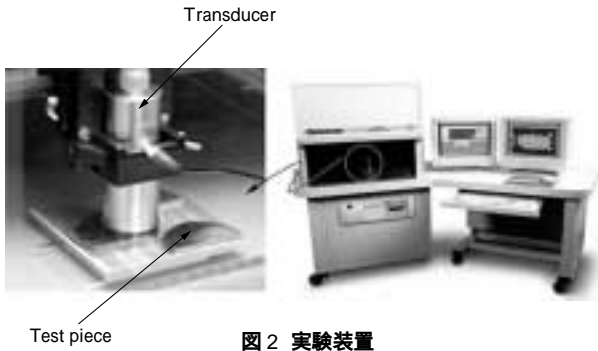


図2 実験装置
Fig. 2 Equipment set-up

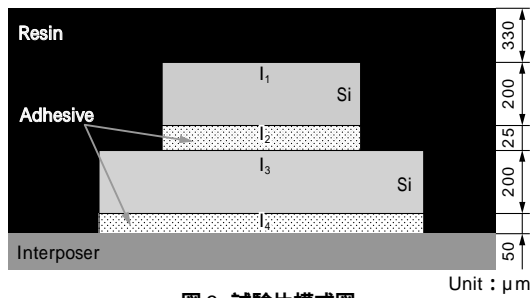


図3 試験片模式図
Fig. 3 Schematic illustration of specimen

表1 音響特性
Table 1 Acoustic property

	Velocity(m/s)	Density(kg/m ³)
Resin	3 930	2 100
Si	8 500	2 330
Adhesive	2 900	3 500

図2は評価に用いた超音波顕微鏡の外観と測定状況を示している。試料を浸漬させる測定媒質として蒸留水を用いた。装置はSONOSCAN社D9000, 使用した音響レンズは, 50MHz (焦点距離 = 12.7mm) である。

図3は, 評価を行った2段スタックタイプパッケージの断面模式図を示している。上段チップ上の樹脂厚は330 μm, チップ厚は200 μm, チップ間の接着層の厚さは25 μm, インタポーザと下段チップ間の接着層の厚さは50 μm である。表1は図3で示した材料の音響特性を示している。

2. 実験結果および考察

2.1 波形解析

図4は図3に示すパッケージについて, 上段チップと樹脂の界面に焦点を合わせた波形の測定結果を示している。図中のSで示す範囲は樹脂表面からの反射波を示している。一方, 図中で示すI₁ ~ I₅は材料中を伝播する超音波の音速から算出した, 各界面からの反射波が出現する時間を示しており, 本図で示されるように波形は一般的に各界面からの反射波が重畳されたものであることがわかる。ここで, 材料中を伝播する主な波を縦波と仮定すると, 図4の近似波形は次式で与えられる。

$$F(t) = P_i \cdot R_i \cdot (t - t_i)^2 \cdot C^2 \cdot \exp[-(t - t_i)^2 \cdot 2C^2] \cdot \sin\{\omega \cdot (t - t_i)\} \dots \dots \dots (2)$$

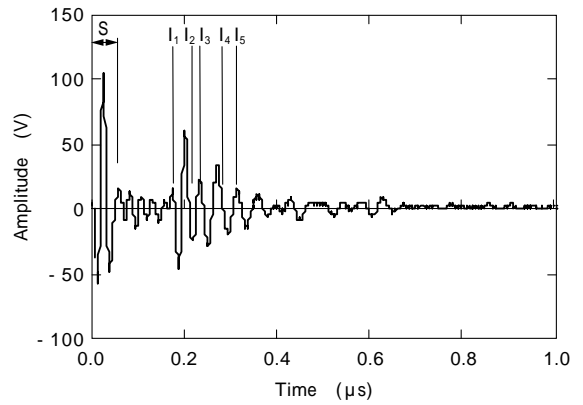


図4 チップ上段にフォーカスを合わせた反射波形
Fig. 4 Waveform from focused on daughter chip

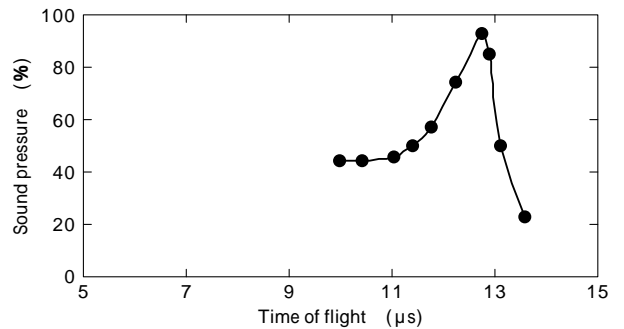


図5 音圧分布
Fig. 5 Distribution of sound pressure

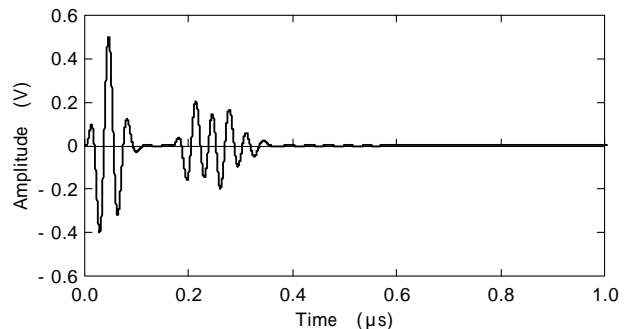


図6 計算波形
Fig. 6 Calculated waveform

ここでP_iは図5に示す音圧分布を示しており, 鋼球を水中に浸漬させてTOF (Time of Flight) ことの反射波の音圧を計測して求めた。R_iは各界面における反射率, t_iはパッケージ最上面の樹脂からの反射波に対する遅延時間, Cは波形の形状を決める定数 (3.0 × 10⁻⁸) を示している。

図6は式(2)より求めた近似波形を示している。実測波形と比較すると, 縦波しか考慮していないために単調な形状となっているが, 実測波形の特徴はとらえている。そこで, 本解析を利用して図3中に示すI₂およびI₃の界面の密着性が悪いと想定した近似波形解析結果を図7に示す。通常, I₃, I₄における界面の反射率は式(1)より0.32であるが, (a)は剥離を想定して反射率を1, (b)は密着性の低下を想定して0.4, 同様に, (c)は1, (d)は0.5として超音波の伝播経路に基づいて(2)式におけるR_iを算出して近似波形を求めた。本図より, I₃

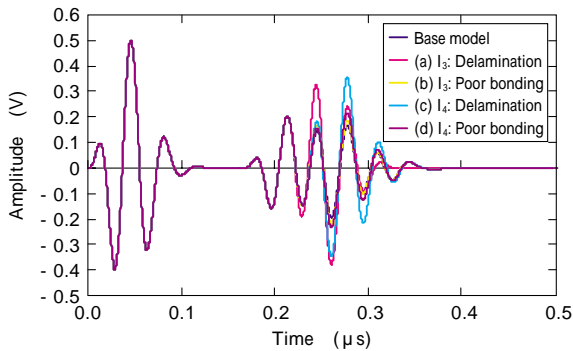


図7 接合状態の差異を考慮した近似波形
Fig. 7 Calculated waveform depending on bonding state

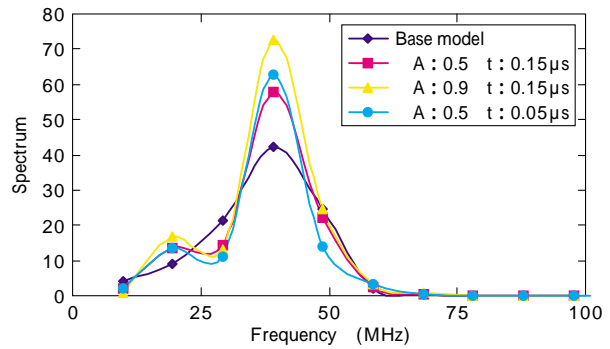


図8 遅延減衰した波が重畳した反射波のFFT解析結果
Fig. 8 FFT results from superposition on delay and attenuation wave

あるいは I_4 の界面の剥離を想定した波形では振幅の変化も大きく、遅延時間より剥離面の推定も可能であることがわかる。一方、密着性が低下しているような場合は振幅の変化は小さく、また界面からの反射波が1波長に満たないような場合、振幅の変化をpeak to peakで評価することはできない。そこで、 I_2 から I_5 までの反射波に着目してFFT解析を行い、スペクトル密度から剥離層あるいは密着性の弱い領域の検出性について検討を行った。

2.2 フーリエ解析

まず、実測波形あるいは近似波形のFFT解析を行う前に、スタックタイプパッケージのように各界面から遅延する反射波がスペクトル密度に及ぼす影響について検討を行った。

信号 $x(t)$ と、時間だけ遅れた振幅が A 倍に減衰した信号 $Ax(t - \tau)$ とが重畳した観測波形を $y(t) = x(t) + Ax(t - \tau)$ 、 $x(t)$ のフーリエ変換を $X(\omega)$ 、 $y(t)$ のフーリエ変換を $Y(\omega)$ とすると

$$Y(\omega) = X(\omega) + Ae^{-j\omega\tau} X(\omega) \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる²⁾。従って、 $y(t)$ の振幅スペクトル密度は元の信号 $x(t)$ の振幅スペクトル密度と

$$|Y(\omega)| = |X(\omega) + Ae^{-j\omega\tau} X(\omega)| \dots\dots\dots(4)$$

$$= |X(\omega)| \cdot |1 + Ae^{-j\omega\tau}| \dots\dots\dots(4)$$

の関係にある。ここで、

$$|1 + Ae^{-j\omega\tau}| = \{(1 + A\cos\omega\tau)^2 + (A\sin\omega\tau)^2\}^{1/2} \dots\dots(5)$$

である。以上の関係を利用して、 I_4 以降の遅延のない近似波形のFFT解析結果を(2)式における $X(\omega)$ として、式(5)より任意の減衰率および遅延時間を設定してスペクトル密度の変化を調査した。その結果を図8に示す。各々、 $A=0.5$ 、 $\tau=0.15\mu s$ 、 $A=0.9$ 、 $\tau=0.15\mu s$ 、 $A=0.5$ 、 $\tau=0.05\mu s$ の遅延信号が重畳した場合のスペクトル密度の変化を示している。なお、Base modelは遅延・重畳のない波形のスペクトル分布を示している。図中の A は減衰率、 τ は遅延時間である。本結果より、遅延・減衰した反射波が元の信号に重畳することで最大スペクトルは増大することがわかる。

次に、19MHz近傍のスペクトルに着目すると、遅延がある場合スペクトルはわずかに高くなっていることがわかる。さらに(8)と(9)の比較から、減衰率が等しい場合は遅延時間はスペクトルに影響を与えていないことがわか

る。一方、最大スペクトルに着目すると、(8)と(9)の比較から遅延時間が遅い場合、遅延時間が大きくなると、スペクトルは小さくなることがわかる。(8)と(9)の比較からは、遅延時間が等しい場合、減衰率の値が高いほうがスペクトルも大きくなっていることがわかる。以上の結果より、遅延・減衰した波が重畳することでスペクトル分布は変化することが明らかになった。そこで、実測波形についてFFT解析を実施した。

図9は図4に示す実測波形について I_2 から I_5 までの反射波に着目して、以下に示すハミング関数^{3),4)}を利用してこの区間の波形を切出して、FFT解析を実施した結果を示している。

$$y = 0.54 - 0.46 \cdot \cos(2\pi t/T) \dots\dots\dots(6)$$

ここで t はサンプリング時間、 T はサンプリング区間を示している。図8と比較すると、遅延・減衰した波が重畳したスペクトル分布となっていることがわかる。本結果には48あるいは59MHz近傍に小さいピークが観察される。これは実測波形では、先に示した $y(t) = x(t) + Ax(t - \tau)$ に加えて、さらに別の反射波が遅延・重畳しているものと考えられる。

次に図6および図7に示す波形をもとに、 I_2 から I_5 までの反射波に着目してFFT解析を実施した結果を図10に示す。図中に示すBase modelと図9の結果を比較すると、おおむねスペクトル分布は一致しており、近似波形のFFT解析が有効であると考えられる。そこで、図3に示す I_3 、 I_4 の界面における反射率を先述のように、意図的に変化させてスペクトル分布の変化を調査した。 I_3 、 I_4 の界面が剥離していると想定した場合のスペクトル分布は、図8に示すBase modelと同様な単一のピークであ

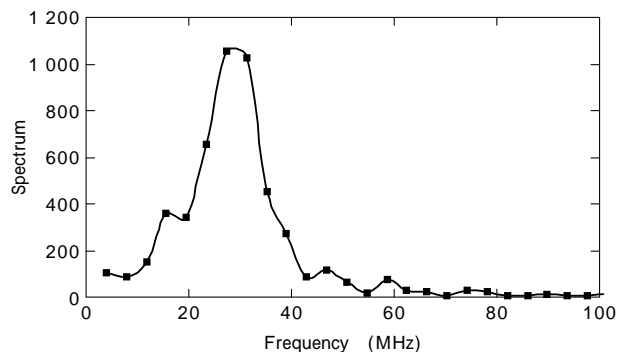


図9 実測波形のFFT解析結果
Fig. 9 FFT result from measured waveform

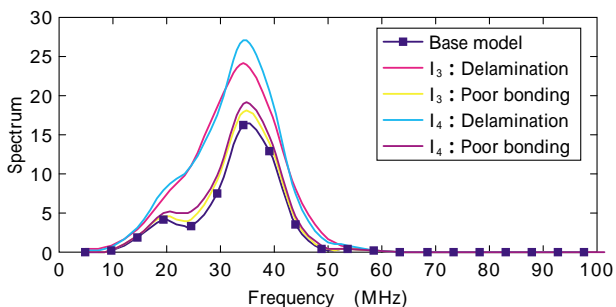


図10 遅延減衰した波の重畳を考慮したFFT解析結果
Fig.10 FFT result from calculated delay and attenuated wave

り、重畳する波がない場合、単一のピークになることが本結果からも明らかになった。また、図中に示す Poor bonding モデルでは図 8 に示す結果と比較検討することで、20MHz 近傍でのスペクトルの変化は反射率（減衰率）の異なる波が重畳していること、最大ピークの変化は反射率と遅延時間の両方の影響を受けて変化していることがわかる。

以上の結果より、FFT 解析から得られるスペクトル分布形態から、接合性が悪い界面の存在を検出することは可能であることがわかった。しかしながら、その界面を特定するためには、遅延時間と反射率（減衰率）の影響によるスペクトル変化を厳密に分離する必要があり、今後さらに検討を続ける必要があると思われる。

むすび=本研究では、2 段のスタックタイプパッケージをモデルパッケージとして、実測波形と超音波の伝播経路に基づいて算出した近似波形とそれらの波形の FFT 解析結果から、積層パッケージの密着性評価法について検討を行った。また、実サンプルを使用した FFT 解析結

果より、スタックタイプパッケージの密着性の評価を実施した。本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 超音波の伝播経路から得られる遅延時間と各界面における反射率から近似波形を算出することが可能であり、実測波形の特徴をとらえることができた。
- (2) フーリエ解析における時間推移定理を利用して、元の波形に対して遅延・減衰した反射波が重畳した信号の FFT 解析結果と元の波形の FFT 解析結果の比較より、最大ピークは減衰率に応じて変化することが明らかになった。また、遅延・減衰した反射波のスペクトルは最大スペクトルに隣接するように出現し、その大きさは減衰率に依存していると予測された。
- (3) 近似波形の FFT 解析結果からも、各界面からの反射の遅延は最大スペクトルに隣接して、ピークが出現することが確認でき、近似波形から得られる遅延時間と FFT 解析から得られるスペクトル密度を利用することで、スタックタイプパッケージの密着性評価に有益な情報が得られることがわかった。

参考文献

- 1) K.UENO et al.：“Ultrasonic Evaluation of Micro Joining of Bumps in FC-BGA Package”, JWS Seventh International Welding Symposium, Vol.2, p.1265.
- 2) 中村尚五：デジタルフーリエ変換，p.62，東京電機大学出版局．
- 3) 上野一也ほか：周波数イメージ像を利用した FC-BGA の非破壊評価，Mate2004, Yokohama, Vol.10 (2004) p.335.
- 4) 佐川雅彦ほか：高速フーリエ変換とその応用，p.86，昭晃堂．