樹脂-シリコンの微細不完全接合層を考慮したはく離強度評価*

松 本 翼^{*1}, 松 崎 富 夫^{*2}
澁 谷 忠 弘^{*3}, 于 強^{*3}

Evaluation of Interfacial Strength with Micro-Scale Interfacial Layer Between Resin and Silicon

Tsubasa MATSUMOTO, Tomio MATSUZAKI,
Tadahiro SHIBUTANI and Qiang YU^{*4}^{*4} Department of Mechanical Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

This paper presents a fundamental method predicting the interfacial strength between a silicon and a resin with micro scale bonding structure. Scanning electron microscopy (SEM) observation of the interface with the application of mechanical force was carried out. The interface between the silicon and the resin consists of micro-scale bonding structures. Finite Element Analysis was performed to evaluate interfacial strength between the silicon and the resin. Interfacial bonding structures affect the stress singularity field near the edge of interface. By removing elements which satisfy the failure criteria, interfacial strength was evaluated for tensile and three point bending tests. The predicted critical force for the initiation of interfacial crack show good agreement with experimental results.

Key Words: Interfacial Strength, Finite Element Analysis, Micro-Scale Bonding Structure, Observation, Silicon and Resin

1. 緒 言

近年, 携帯電話やノート型パソコン等の普及に伴い, 電子機器の小型化・高機能化などが求められている。これらの要求を実現するために, BGA (Ball Grid Alloy)や CSP (Chip Size Package) などの実装が適用され, 小型化・高機能化に大きく貢献している⁽¹⁾⁽²⁾。多様な材料が用いられる電子デバイスでは, 小型化・高集積化が進むとともに, 異材界面強度信頼性が重要な問題となっている。とくに, 実装後の温度サイクルや衝撃などにより生じる応力を緩和するために用いられる樹脂とシリコンとの界面では線膨張係数差が大きく, 界面破壊が生じやすい^{(3)~(5)}。従って異種界面での強度信頼性評価が重要になっている^{(4)~(9)}。

異種材料間の接合強度評価においては界面破壊力学が用いられてきた⁽¹⁰⁾。界面に生じる応力特異場を駆動力として, 応力拡大係数を力学パラメータとして評価することができる^{(11)~(13)}。

デバイスのサイズが小さくなるとともに, 界面における微細で不完全な接合構造が顕在化する。図1は, 界面に負荷を与え観察された樹脂-樹脂接合部の変形挙動の例を示す。接合層は部分的に接合した複雑な様相を呈しており, 電子デバイスのサイズとしては無視できない大きさとなっている。このように, 微細化の進む電子デバイスでは, 接合層を異材界面として取り扱う界面破壊力学の適用が困難なケースが存在する。

本研究では, 接合部の微細構造を考慮した界面強度予測技術について検討した。界面に適切に負荷を与えて観察することにより, 接合部の微細な構造を抽出し接合層をモデル化する。有限要素解析により, 接合部の構造が応力場に及ぼす影響を調べると共に破壊基準に基づく要素削除によって界面に沿ったき裂進展解析を行った。また, シリコン片2枚を樹脂で接合した試験片と, シリコンとFR4基板を樹脂で接合した試験片を対象として, それぞれ引張, 3点曲げ試験を実施した。試験片を模擬した解析結果と実験結果との比較より提案した手法の妥当性について検証した。

2. 界面層を考慮した破壊シミュレーション

2.1 有限要素モデル 図2に示す異材接合体について有限要素解析を行い, 微細接合構造が応力場に

* 原稿受付 2008 年 10 月 9 日。

^{*1} 横浜国立大学大学院工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。^{*2} カシオ計算機(株) (〒198-0022 青海市藤橋 3-3-2)。^{*3} 正員, 横浜国立大学大学院工学研究院。

E-mail: qiang@swan.me.ynu.ac.jp

与える影響について検討した。界面接合部の幅と高さは a と h であり間隔幅 s で周期的に配置されている。右端と下端は垂直変位が拘束されており、樹脂側の上端に一樣負荷 (10 MPa) もしくは強制変位が負荷されている。表 1 に示すように、 a , h , s を変化させた 5 つのモデルについて解析を実施した。用いた要素は 4 節点 1 次要素であり、総要素数、総節点数を表 1 に併せて示す。材料は等方性を仮定して表 2 に示す材料特性を用いた。解析に用いたソルバーは、汎用解析ソルバー MSC. Marc 2005 である。また、接合部における

Table 1 Properties of FEA models. Unit is μm

h1	h2	w	a	s	h	numbers	numbers
						of elements	of nodes
500	500	500	5	5	1	7626	8372
500	500	500	5	3	1	9532	10459
500	500	500	5	1	1	10230	11154
500	500	500	5	5	0.5	7626	8373
500	500	500	5	5	2	7626	8372

Fig. 1 Interfacial structure between resins in the front of crack tip with imperfect bonding

Fig. 2 FEA model with micro-scale bonding parts

破壊プロセスを解析するために、接合部の破壊基準を設定した。破壊基準として塑性ひずみが 0.4 を超えた場合に要素が消去されるよう、ユーザーサブルーチン“uactive”を用いている。

2.2 界面近傍での応力分布 図 3(a) および (b) は、それぞれ一樣応力を負荷としたときの界面に沿った σ_y と τ_{xy} の応力分布を示している。応力値は界面接合部の中心部をプロットしたものであり、図 2 にデータ取得位置の一例として A 点を示す。軸は、界面端部からの距離である。表 1 に示す 5 つのモデルに加え、接合層を考慮せずに界面が完全に接合されたモデルの応力分布を実線で示す。グラフは両対数上にプロットされており、とくに完全接合モデルが示すよう

Table 2 Material properties for FEA

Material	Young's modulus GPa	Poisson ratio ν	Yield stress MPa
Resin	10	0.30	60
Interface	10	0.30	60
Silicon	130	0.26	-

(a) Distributions of σ_y (b) Distribution of τ_{xy}

Fig. 3 Stress distribution along the interface when uniform tensile stress was applied on the upper of resin

に応力特異性が表れている。 s が小さくなるにつれて、グラフは実線に近づいている。これは界面構造の間隔幅が小さくなるにつれて、界面が完全に接合された状態に近づくためである。一方、 h が低いときには σ_y の値も小さくなっている。樹脂とシリコンの変形特性の差(ミスマッチ)に起因して応力は界面近傍に集中し、垂直方向のひずみは界面構造の高さに依存している。 τ_{xy} の応力分布の場合でも h が低くなると応力が小さくなっており、界面構造の高さが界面のせん断応力に影響を与えている。すなわち、接合部の微細構造が異材界面のミスマッチにより生じる応力特異場に与える影響は大きく、界面微細構造を考慮した界面はく離強度の必要性を示唆している。

2・3 界面の破壊条件を考慮したき裂進展の評価

図4に樹脂の上端に強制変位(100 $\mu\text{m}/\text{min}$)を与えたときのき裂先端部の破壊プロセスを示す。界面構造の破壊は先端部で発生し、変位が増加することによってき裂進展は進行し、最終的に不安定破壊を生じた。

3. 接合部の微細構造を考慮したはく離強度評価

3・1 供試材および試験条件 提案した接合層モデルの有効性を検証するため、シリコン-樹脂接合部を対象として引張試験と3点曲げ試験によるはく離試験を行った。引張試験片は、図5に示す10 mm 角の

2枚のシリコンを、楠本化成製のアンダーフィル材として用いられる硬化性樹脂(硬化条件:120°C×5 min)で接合した。この試験片の下側を拘束し、上側に強制変位(140 $\mu\text{m}/\text{min}$)を与え、はく離荷重を測定した。3点曲げ試験は、図6に示すように6 mm 角のシリコンを、同じ樹脂を用いて寸法が30×6×0.8 t [mm] であるFR4基板に接着させたものである。支点間距離20 mmで試験片を支持して中央部に強制変位(50 $\mu\text{m}/\text{min}$)を与えた。両試験とも、荷重ドロップが生じる直前の最大荷重をはく離荷重としている。

3・2 樹脂界面のSEM観察 界面近傍のミクロン構造をモデル化するため、3点曲げ試験片に曲げを加えて接合部の微細構造を走査型電子顕微鏡(SEM キーエンス, VE-9800)を用いて観察した。図7は、3点曲げ試験片に曲げを加えるためのジグを示す。中央のねじを用いて曲げを加えたまま、SEM中で観察できる。図8は、負荷を与えた状態での接合部のSEM写真を示す。接合層は、柱状の微細接合部で構成されている。接合部の平均寸法は、幅7.0 μm 、高さ0.5 μm で、間隔3.5 μm である。

3・3 解析条件 図9および図10はそれぞれ引張試験と3点曲げ試験の有限要素解析モデルを示す。はく離が生じたシリコンと樹脂との間に前節で得られた

Fig. 4 Cracking at the crack tip (contour maps show equivalent Von Mises stress)

Fig. 5 Tensile test

Fig. 6 Three point bending test

値を用いて微細接合構造を作製した。用いた要素は4節点1次要素であり、メッシュサイズは予備的な検討を行った上で、実際に生じる破壊現象を勘案してモデル化によって生じる角部の意図しない応力集中場の影響を避けるため、解析で生じる破壊挙動が大きく変化しない範囲で粗いメッシュを採用した。材料特性を表3に示す。材料特性はカタログ値を用いている。界面構造の破壊特性を考えることにより、界面はく離・き裂進展を再現する。破壊基準として樹脂の特性値である引張破壊伸び0.04を用いた。

3・4 実験結果と解析結果の比較 図11は引張試験の実験結果および解析結果を比較したものである。引張試験では3回の実験におけるはく離荷重は平均

83.3 Nであり、いずれの試行においても荷重ドロップと同時にシリコン/樹脂界面で破断した。解析では、界面構造の要素がはじめて削除されたときの荷重をはく離荷重と定義した。このとき、引張試験のはく離荷重は85.3 Nであり、実験結果との差は10%以下となっている。比較して極めて良好な結果を得ることができた。

図12は、3点曲げ試験による界面がはく離した様子を示す。はく離はシリコンと樹脂との界面で起こっている。図13は解析による、はく離開始時の様子を表している。界面端部で要素が削除されており、実験と同じ界面端部より破壊が発生している。図14は、実験(はく離荷重:12.3 N)と解析の荷重-変位の関係を示す。はく離荷重にはわずかに差が認められる

Fig. 7 The jig with the test specimen

Fig. 8 The interfacial structure between silicon and resin

Fig. 9 FEM model (tensile test)

Table 3 Material properties

Material	Young's Modulus [MPa]	Poisson Ratio -	Yield Stress [MPa]	Fracture Strain -
Resin	1800	0.30	52.5	-
Interface	1800	0.30	52.5	0.04
Silicon	130000	0.26	-	-
FR4	18600	0.25	-	-

Fig. 10 FEM model (3-bend test)

Fig. 11 Experiment vs. FEM analysis in delamination load (tensile test)

Fig. 12 Interfacial delamination between silicon and resin (experiment)

Fig. 13 Interfacial delamination between silicon and resin (FEA)

が、強制変位の増加に対する反力の値はほぼ同じであり、荷重ドロップの挙動もよく一致している。図 15 は、実験及び解析における破壊荷重値を示す。3 回の実験におけるはく離荷重は平均 11.4 N であるのに対して、解析により予測される荷重は 13.0 N と両者の誤差は約 12.5% になっている。異なる 2 種類の試験について、実験と解析はよい一致を示しており、本論文で提案された手法の有効性を示唆している。

4. 結 言

本論文では、樹脂-シリコンの微細接合層を考慮したはく離強度予測手法を提案した。負荷を与えた状態で SEM 観察を行うことで接合部の微細構造を把握するとともに、実験と解析の比較を行うことで提案した手法の有効性を検証した。得られた結果は、以下の通り要約される。

(1) 樹脂/シリコン界面では、接合層は部分的に接合された微細構造によって構成されている。

(2) 接合層をモデル化した有限要素解析を行った。接合層の微細接合構造により、界面端部の応力場

Fig. 14 Load-displacement curve in 3-point bending test

Fig. 15 Experiment vs. FEM analysis in delamination load (3-point bending test)

は変化する。

(3) 樹脂とシリコンの界面強度を評価するために引張試験と 3 点曲げ試験を実施した。実験結果より、樹脂とシリコンの界面において界面はく離が起きていることを確認した。

(4) 接合層をモデル化した有限要素解析により予測された破壊荷重は実験から得られた値とよく一致していた。

文 献

- (1) Joseph, F., Strategies for Creating Compliant IC Packages at Near Chip Size, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 2 (1999), pp. 1083-1091.
- (2) Michelle, M. H., The Supercsp Package Solution: A Wafer Level Package, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 2 (1999), pp. 1099-1102.
- (3) Petri, J. S. and Jorma, K. K., Area Array Package-Materials Requirements for Diminishing Devices, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 2 (1999), pp. 1507-1510.
- (4) Yu-Wen, H., Keng, H. T. and Khoon L. C., The Effect of Underfill on the Pressure Cooker Test Performance of Flip Chip on Board Assembly, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 2 (1999), pp. 1121-1127.
- (5) Hirohata, K., Kawamura, N., Mukai, M., Kawakami,

- T., Aoki, H. and Takahashi, K., Mechanical fatigue test method for chip/underfill delamination in flip-chip packages, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 25, No. 3 (2002), pp. 217-222.
- (6) Dutta, I., Gopinath, A. and Marshall, C., Underfill constraint effects during thermomechanical cycling of flip-chip solder joints, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 31, No. 4 (2002), pp. 106-110.
- (7) Miyoshi, T., Shiratori, M., Okuda, H. and Takano, N., Stress singularities at the Interface Crack and the Corner of Edge-Bonded Dissimilar Materials, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 1, No. 1 (1992), pp. 551-557.
- (8) Yuuki, R., Xu, J. and Kayama, N., Stress Singularity at the Interface edge and the Tip of an Interface Crack under Thermal Stresses, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 4, No. 1 (1993), pp. 119-125.
- (9) Miura, H. and Kumazawa, T., Effect of Delamination at Chip/Encapsulant Interface on Chip Stress and Transistor Characteristics, *Applications of Experimental Mechanics to Electronic Packaging*, Vol. 13 (1995), pp. 73-78.
- (10) Yuki, R., *Mechanics of Interface*, (1993), pp. 85-204, Baifukan Ltd.
- (11) Timothy, F. and Jianmin, Q., Effect of Moisture on the Interfacial Adhesion of the Underfill/Solder Mask Interface, *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 124, No. 2 (2002), pp. 106-110.
- (12) Srikanth, N., Teng, H. and Shu, C., Finite Element Analysis of the Degating Process in IC Packaging, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 1 (1999), pp. 817-826.
- (13) Iwasa, M. and Hattori, T., Fatigue Strength Fatigue Strength Evaluation of FRP/Metal Adhesive Joints at Low Temperature, *7th Japan International SAMPE Symposium*, (2001-11), pp. 267-270.