電子部品実装用接合材の疲労試験方法の提案

春別府 佑^{*1}, 谷江 尚史^{*1}, 北野 誠^{*2}

Proposal of experimental method on fatigue of bonding materials for electronic packaging

Yu HARUBEPPU^{*1}, Hisashi TANIE^{*1} and Makoto KITANO^{*2}^{*1,*2}Hitachi,Ltd., Research & Development Group, Center for Technology Innovation – Mechanical Engineering,
832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki 312-0034, Japan

Received: 6 September 2019; Revised: 8 January 2020; Accepted: 4 February 2020

Abstract

Various bonding materials have been developed for power semiconductor products. However, the fatigue characteristics of many of these materials are difficult to evaluate uniformly using a conventional test, and this difficulty represents an obstacle to ensure proper material selection. In this report, we developed a new experimental method that can evaluate the fatigue properties of thin bonding layers. The conclusions of this report are shown below. (a) In developed method, the specimen with bonding layer is subjected to a two-way, four-point bending load. This method enables an evaluation even for a bonding material that can form only a thin layer. Furthermore, our method enables carrying out a fatigue test without any additional deformation even when substantial creep or ratchet deformation occurs in the bonding material. The high-speed examination is also possible to obtain high-cycle fatigue strengths. (b) We conducted a fatigue test on a Sn3.5Ag0.75Cu solder bonding layer. The results were that the fracture mode was good agreement with an actual joining structure. Moreover, the fatigue life obtained by our method in this test range followed the Coffin-Manson rule with high accuracy. (c) We found the relationship between the strain of bonding layer and the fatigue life using finite element analysis. The result was that the fatigue life curve of bonding layers was good agreement with that of bulk materials.

Keywords : Fatigue property, Bonding material, Semiconductor packaging, Experimental method, Reliability, Solder

1. 緒 言

近年、インバータなどに用いられるパワー系半導体製品では、実装の高密度化や使用環境温度の上昇によって動作時のチップ温度が上昇している。また、SiC などの材料を用いたワイドバンドギャップ半導体チップの開発が進み、従来の Si 製チップよりも高温環境での動作が可能となっている。これらのことから、チップと金属回路部材を接合する接合材には高い耐熱性が求められており、従来から使用されている Sn 系はんだに加えて、焼結銅 (Suzuki et al., 2016), 焼結銀 (保田他, 2013), Zn/Al クラッド接合材 (山口他, 2013) などさまざまな材料が開発されている。

新規の接合材を製品構造に適用する場合、接合部の信頼性を確保するために、事前に接合材の機械特性や疲労特性を把握する必要がある。従来、これらの特性は、バルク材から採取した試験片の引張試験やねじり試験によって測定されてきた (北野他, 1988, Shi et al., 2000, 能瀬他, 2002, Woo et al., 2010)。しかしながら、近年開発された接合材には、バルク材としては存在せずに薄い接合層の形態でのみ存在する材料が多く、引張試験やねじり試験用の試験片を作成できないことがある。また、同じ材料組成であっても、バルク材と薄い接合層では金属組織の違いなどによって特性が異なるものがある。そのため、薄い接合層自体の機械特性や疲労特性を直接評価する手法の開発が求められている。さらに、これまで接合材の疲労は主に低サイクル領域について検討されてきたが、製品に要求される耐用年数の長期化やモータとインバータの一体構造化などによる耐振性要求の増加によ

って、接合材の高サイクル疲労特性の把握も必要となってきた。そのため、接合部の特性を高速に評価できる手法が求められている。

本研究では、これらの課題を解決して統一的手法で適切に接合材を比較、選定できる設計環境の構築を目指し、薄い接合層自体の材料特性を高速に評価する試験方法を提案する。本論文では、試験方法として接合層評価に適した両振り四点曲げ試験方法を提案し、Sn3.5Ag0.75Cu はんだ接合部を対象として疲労特性を評価した結果について述べる。

2. 実装用接合材の疲労試験方法

2・1 接合材の機械特性、疲労特性評価に必要な試験条件

パワー系実装構造向けの代表的な接合材としては、はんだや焼結金属が挙げられる。はんだ接合部では、はんだと、被接合体の金属とが接合界面で合金層を形成し、多層構造となる(宮崎, 池田, 2015)。はんだ接合部の疲労は通常はんだ母材で生じることが知られている(谷江, 寺崎, 2007)が、接合界面の合金層が過剰に成長した場合やカーケンダルボイドなどによって合金層が低強度となった場合には合金層での破壊も生じ得る。しかしながら、この合金の機械特性や疲労特性を取得するための試験片作成は困難であり、接合層の破壊予測の障害となっていた。焼結金属接合は、ナノスケールの金属を焼結して接合するものである(Suzuki et al., 2016)。これらの接合材は、薄い層しか形成できず、大型のバルク試験片を作成することが困難である。また、これらの接合材は多孔質体であり、空孔の形状や割合が機械特性や疲労特性に影響すると考えられることから、実際の接合層の寸法で試験することが求められる。実際の実装構造では接合層の平面寸法や被接合体の厚さは数 mm オーダに制限されることが多いので、これらの寸法制約を持つ試験片を試験可能なことが必要条件となる。

高耐熱実装に対応するために接合材が使用される温度域が高くなると、接合材のクリープ変形やラチェット変形が顕著になる(Tanie et al., 2011)。疲労試験中にクリープやラチェットによって一方向に変形が進むと試験の妨げになることから、試験中に一方向変形が進行しない試験方法が必要である。

高サイクル疲労強度を評価するためには、高速での試験が必要となる。具体的な目標試験速度として、 10^6 回の疲労試験を2週間以内に実施可能なこととすると、1 Hz以上の周波数で試験できる必要がある。

実際の接合部では、2つの被接合部間の熱変形差が接合部に作用することから接合部全体にはせん断負荷が作用し、熱反り変形によって接合端部には引張負荷が作用する。ひずみは接合端部で最大となり、接合端部においてき裂が発生して内部に進展する。この負荷モードを再現するため、接合端部で、引張負荷による最大ひずみが発生する試験方法である必要がある。

上記に実装用接合材の疲労試験に必要な条件を列挙したが、これらの条件全てを満足する試験方法はこれまで存在せず、評価する材料や取得する特性ごとに実施可能な試験方法を探索して、個別に試験されてきた。そのため、開発されたさまざまな接合材を同一手法で比較評価することは困難であった。本論文では、上記の条件を全て満足する試験方法を開発し、疲労試験を実施する。

2・2 両振り四点曲げ試験方法

表1に、接合材の疲労試験方法の比較を示す。これまでのはんだ材の機械的物性や疲労特性を測定してきた(a)ねじり試験や(b)引張/圧縮試験は、バルク材から試験片を採取する必要があるため、薄い接合層しか形成できない材料は試験片作成が困難である。また、ひずみは試験片に均一に発生し、端部で最大ひずみを発生させることはできない。さらに、引張/圧縮試験ではクリープ変形やラチェット変形が顕著な材料では試験中の座屈が懸念される。曲げ試験として一般的な(c)片振りの曲げ試験は、クリープ変形やラチェット変形が顕著な材料では試験中に一方向に変形が進み、疲労試験の妨げとなる。また、被接合体の寸法によっては四点曲げの支点間距離が制限されて、評価したい接合層に十分な負荷を与えることが困難となる。曲げ試験で接合層を評価する試験方法として、(d)に示す接合層を三点曲げで評価する方法が提案されている(遠藤他, 2018)。しかしながら、この手法では、一方向変形を防止するために被接合体が塑性変形しない範囲で試験する必要があるため、剛性の大きい薄い接合層の評価への適用に限界がある。また、接合層の剛性によって、三点曲げによる接合層への負荷が変化するため、事前に接合材の機械特性を取得する必要がある。より実機構造に近い試験方法として、(e)温度サイクル試験やパワーサイ

Table 1 Comparison of test method for bonding materials.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	Existing method					Proposed method
	Mechanical test				Temperature cycling test / power cycling test	Mechanical test
	Torsion	Tensile / compression	One-way, four-point bending	One-way, three-point bending		Two-way, four-point bending
Testing thin bonding layer	Difficult to make specimen	Difficult to make specimen	OK	Only elastic deformation range	OK	OK
Testing multilayer structure	Difficult to make specimen	Difficult to make specimen	OK	OK	OK	OK
Strain maximum point	Uniform	Uniform	Edge of bonding layer	Edge of bonding layer	Edge of bonding layer	Edge of bonding layer
Testing high-creep or high-ratchet material	OK	Buckling occurs	One-way deformation occurs	One-way deformation occurs	OK	OK
Order of test speed	10^{-1} s/cycle	10^{-1} s/cycle	10^{-1} s/cycle	10^{-1} s/cycle	10^{-10^3} s/cycle	10^{-1} s/cycle
Obtaining mechanical properties	OK	OK	OK	Measurement required beforehand	Difficult	OK

クル試験がある。温度サイクル試験は実装構造全体の温度を変化させる試験であり、パワーサイクル試験は、発熱する素子を回路に接合した実装構造を対象として、素子を間欠的に発熱させることで、素子周辺部の温度を変化させる試験方法である (Lutz et al., 2011)。目標である 1 Hz 以上の試験は困難であり、また、機械特性の取得も困難である。

図 1 に、本論文で考案した試験方法を示す。初めに 2 つの被接合体を評価したい接合材で接合した試験片を作成し、次にそれぞれの被接合体を寸法拡張用の治具に取り付け、寸法を拡張した試験片を両振りの四点曲げ試験することで、接合材を評価する試験方法である。パルク材ではなく、接合後の状態を対象とするため、薄い接合層しか形成できない接合材に対しても評価が可能である。また、寸法拡張用の治具を用いて試験片寸法を拡張することで、被接合体の寸法が数 mm オーダ以下と小さくても四点曲げ試験を行うことができる。通常、四点曲げ試験は片振り条件にて実施されるが、その場合はクリープやラチェットによって一方向に変形が進行してしまう。提案方法では両振り条件とすることで、クリープ変形やラチェット変形が顕著に生じる接合材を評価する場合でも一方向に変形が進行することなく疲労試験を実施できる。機械的な四点曲げ試験であるので、汎用的な疲労試験機を用いることで目標とする 1 Hz 以上の周波数での実施が可能である。さらに、提案方法では、全断面に均一な曲げモーメントを負荷することから、接合端部で最大ひずみが発生し、最も低強度な断面で破壊する。

図 2 に、提案した試験方法を実現するために開発した、両振り四点曲げ治具の模式図を示す。治具は上側治具と下側治具に分かれ、使用時にはそれぞれをロードセルとアクチュエータに固定することで、荷重と変位を求め

Fig. 1 Concept of test method.

Fig. 2 Concept of jigs for proposed bending test.

る。上側治具は四点曲げの内側の支点となり、下側治具は外側の支点となる。試験片の支持は4点全て単純支持として、固定端にならないよう、試験片と支持部の間にギャップを設けられる構造とした。

図3に、上記の条件を満たすように設計して作成した試験治具を示す。内側、外側の支点間距離はそれぞれ60 mm, 150 mmを基準として、約50 mmの範囲で変更可能な構造とした。外形寸法は、使用する疲労試験機の恒温槽内へ設置できるように定めた。試験片を治具側面から挿入することができ、治具を疲労試験機から外さずに試験片交換が可能である。各治具の支点となる部位は降伏応力の大きい工具鋼 NAK55 を用いることで塑性変形を防止すると共に、試験片との接触の繰返しで摩耗した場合にも交換可能なように、独立した部材とした。試験中に接合層が位置する上側治具中央部には窓を設けることで試験片観察や配線引き出しを可能とした。支点の固定には、側面のボルトだけでなく荷重方向と平行に設けた位置固定用ボルトも用いることとした。ギャップはすきまゲージを用いて調整し、調整した位置で位置固定用ボルトを固定することで、試験中にギャップが変化することを防止した。本試験においてギャップを設けないと、寸法拡張用の治具の角度が固定されて両端固定の曲げ試験となるため、ギャップの管理が重要となる。なお、本治具は、いずれの位置でも十分な断面積を確保しており、曲げ試験片に対して十分に大きな剛性を持つ。

3. 接合部の疲労試験

3・1 接合試験片作成方法

試験片は、Sn3.5Ag0.75Cu はんだで Ni 製の角柱2本を接合した接合体とした。図4に、試験片の作成方法を示す。まず複数の溝を持つカーボン治具を用意し、溝内に Ni 棒、はんだシート、Ni 棒、コイルスプリングを順で並べて固定する。このとき、はんだシートの厚さによって、接合後のはんだ層の厚さを制御できる。また、溝の長さ、各部材の寸法、コイルスプリングの寸法、ばね定数によって、はんだシートに作用する面圧を制御できる。次に、上側のカーボン治具を用いて、各部材の上下方向の位置を固定し、カーボン治具全体をリフロープロセスに通すことで、はんだ融点以上に加熱されて各はんだシートが両側の Ni 棒と接合されて試験片が完成する。はんだはカーボン治具とは接合しないため、接合後の試験片は容易に取り出せる。本方法を用いることで、被接合体の平行度を確保した試験片を同時に大量作成可能である。

Fig. 3 Jigs for proposed bending test.

Fig. 4 Manufacturing method of specimen.

3・2 疲労試験方法

図5に試験片を示す。はんだシートの寸法は5 mm×5 mmで厚さ0.1 mmとし、Ni棒の長さは30 mmとした。評価対象であるはんだ接合層のひずみを直接計測することは困難なため、被接合体であるNi棒の表面の接合層から6 mm離れた位置にひずみゲージを設置した。図6に、試験片1個を抜き取って確認した断面画像を示す。観察にはScanning Electron Microscope (SEM)を用いた。0.1 mmの均一な厚さのはんだ層を形成しており、接合界面には合金層を形成して良好に接合できていることを確認した。図7に、寸法拡張用の治具への取付け後の試験片を示す。寸法拡張用治具取付け時のボルト締めの際には、寸法拡張用治具が動かないように固定し、試験片に予ひずみが発生しないよう注意した。また、寸法拡張用の治具は質量が大きいため、四点曲げ治具への取付け時や運搬時には板状の治具などに乗せ、自重により接合層に予ひずみが発生しないよう注意した。なお、疲労試験時を高速で実施し、慣性による曲げモーメント成分を無視できない場合でも、本評価では試験片表面のひずみを直接測定するため、慣性の成分も含めて試験片に実際に作用する曲げモーメントと、接合材の寿命との関係性を評価できる。図8に四点曲げ試験時の位置関係を示す。治具から露出する試験片の長さ（治具間のスパン）は20 mmとした。四点曲げ条件は内側スパンを60 mm、外側スパンを150 mmとした。上下治具のギャップは0.3 mmとし、室温環境において変位制御で1 Hzの三角波を負荷した。疲労試験装置としては、島津製作所製の疲労試験機サーボパルス EHF-Eを用いた。

Fig. 5 Specimen for fatigue test of bonding layer.

Fig. 6 Cross section of bonding layer.

Fig. 7 Bonding specimen fixed to jig.

Fig. 8 Positional relationship with fulcrums in four-point bending.

3・3 疲労試験結果

まず、強制変位量 ± 1 mm の条件で、試験片上下両面のひずみを確認した。図 9 に上下面のひずみの時間変化を示す。1 周期ごとに下に凸の曲げ変形と上に凸の曲げ変形が発生しており、両振りの曲げを負荷できていることを確認した。各周期においてひずみの変化がない時間があるのは、上下の治具間にギャップを設けている影響である。ひずみの変化がなくなる前後で、時間変化に対して非線形なノイズのようなひずみの変動が見られるのは、ギャップ前後での試験片と支持部との接触によるものである。ひずみのピーク値 0.05 % に対して、ノイズ成分は最大約 0.01 % だった。

次に、強制変位量の異なる複数の条件の試験を実施した。図 10 に、サイクル数と各サイクルにおける最大反力の関係の一例を示す。破断直前まではほぼ一定の反力が発生し、3300 サイクル後に急激に反力が低下して破断しており、破断直前まで安定して試験できていることが確認できる。図 11(a)に破断面を示す。破断面の両面に同様のはんだ層が残存しており、破断は界面ではなく接合層の厚さ方向中央部近傍のはんだ母材で生じたことが確認できる。実構造においても、適切な接合界面を持つはんだ接合部では、疲労破壊は界面ではなくはんだ母材で生じることが報告されており（谷江，寺崎，2007），本試験結果と一致する。このことから、本試験方法を用いることで、接合部の疲労寿命を適切に評価できると考える。図 11(b)に破断面角部の SEM 観察結果を示す。拡大した接合端部においても、はんだ母材で破壊していることを確認できた。ストライエーションは観察されなかった。原因として、両振り試験で破面が繰返しの圧縮を受けてストライエーションが残存しなかったことが考えられる。

Fig. 9 Time variation of strain. The bending deformation of downward and upward occur every cycle. It means two-way bending is loaded.

Fig. 10 Relationship between number of cycles and reaction force. The reaction force was almost constant until just before fracture.

Fig. 11 Fracture surface after fatigue test. It was broken in the solder base material. Fracture mode was good agreement with an actual joining structure.

図 12 に、異なる強制変位量にて試験を実施して求めた Ni 棒表面の片振幅でのひずみと、破断寿命との関係を示す。Ni 棒表面のひずみは、四点曲げの支点間に作用する曲げモーメントと 1 対 1 に対応するものである。今回試験を実施した破断回数 400~148000 サイクルの範囲において、ひずみと破断寿命の関係は両対数グラフではほぼ直線となり、Coffin-Manson 則で表される。これは、はんだバルク材やはんだ接合部の疲労寿命評価に関する従来の結果（谷江，寺崎，2007）と一致する。今回実施した 13 点データの最小二乗近似から求まる近似曲線を青実線で示し、各ひずみにおけるサイクル数が 2 倍、0.5 倍となる線（Factor of 2）を赤点線で示すと、試験結果はおおよそ Factor of 2 の範囲に含まれており、本試験結果のばらつきがねじり疲労試験結果（寺崎，2010）と同等であることを確認できる。また、図 9 で見られた、最大約 0.01 % のひずみのノイズ成分は、寿命に対する影響が十分小さく、評価には影響しないと言える。

3・4 接合部ひずみと疲労寿命の関係

図 12 では、被接合体である Ni 棒に生じるひずみと疲労寿命の関係を示したが、接合部の疲労寿命を評価するには、接合部に生じるひずみと疲労寿命の関係を求める必要がある。しかしながら、薄い接合部のひずみを直接測定することは困難なため、応力解析を用いて Ni 棒表面のひずみとはんだひずみの関係を求めた。四点曲げでは Ni 棒とはんだ接合部に負荷される曲げモーメントは同じなので、材料力学モデルではんだのひずみを導出することも可能だが、材料力学モデルでは体積拘束の影響の考慮が困難である。本試験サンプルでは、Ni 棒よりも剛性の低いのはんだが薄い接合部を形成し、大きく塑性変形するため、体積拘束の影響が大きいと考え、材料力学モデルではなく Finite Element Analysis (FEA) による応力解析を用いた。体積拘束の影響の検証のため、平面応力、平面ひずみそれぞれの 2 次元 2 次要素モデルと、3 次元 2 次要素モデルの計 3 種類のモデルでの FEA を実施した。図 13 に FEA モデルと境界条件を示す。3 次元モデルは、被接合体と接合部のうち、構造の対称性を考慮した 1/4 構造とし、2 次元モデルは、図 13(b) に示した正面図の構造とした。被接合体の上下面に互いに逆向きの強制変位を与えることで曲げ変形を模擬し、被接合体のひずみと接合部のひずみの関係を評価した。図 11 に示したようにのはんだ接合部は厚さ中央部で破断したことから、はんだひずみは接合部の厚さ中央部で評価し、疲労寿命を支配すると考えられる Mises 相当塑性ひずみ範囲を評価した。両振り試験 2 周期分の強制変位を与え、最後の 1 周期分の相当塑性ひずみ変化量の半分を相当塑性ひずみ範囲と定義した。表 2 に、FEA に用いた材料物性値を示す。接合材の機械特性を取得する試験方法は別途開発中のため、本論文における Sn3.5Ag0.75Cu はんだの材料物性は、室温での応力-ひずみ関係（寺崎，2010）を基に 2 直線近似した弾塑性体とした。Ni は弾性体とした。

図 14 に、Ni の弾性ひずみとはんだの相当塑性ひずみ範囲の関係を示す。いずれの解析でも、はんだの塑性変形後、Ni のひずみの増加に伴ってはんだの相当塑性ひずみが増加するが、3 次元モデルと平面ひずみモデルの解析結果はよく一致したのに対して、平面応力モデルでの相当塑性ひずみは大きく増加した。推定通り薄い接合層では体積拘束の影響が顕著になるため、面外方向の変形を許容する平面応力モデルでは塑性ひずみを過大評価す

Fig. 12 Relationship between number of cycles and strain of bonded member. The fatigue life obtained by our method in this test range followed the Coffin-Manson rule with high accuracy.

る。よって、3次元モデルあるいは平面ひずみモデルでの評価が適切と考え、以降の検討では、3次元要素での解析結果を用いた。図12と図14の関係から求まるはんだの塑性ひずみと破断寿命の関係を図15に示す。図15には、Sn3.5Ag0.75Cuのねじり疲労試験（寺崎，2010）および、Sn3.5AgとSn3.5Ag1Cuの引張疲労試験（Kariya and Otsuka, 1998）で得られたバルク材の疲労試験結果も併せて示す。本試験結果では、バルク材の試験結果と比較して疲労寿命のばらつきが大きかった。はんだでは微細組織の違いによるクリープ変形への影響が大きいことが知られており、バルク材では熱処理等による組織安定化を実施する（日本材料学会，2013）のに対して、本試験では、より実機に近いリフローで試験片を作製したためだと考えられる。寿命曲線の傾きや切片としてはバルク材の試験と同等の結果を得られることがわかった。表3には、図15の各試験結果について、塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ と低サイクル寿命 N_f の関係式である Coffin-Manson 則の式(1)の係数 C 、 α を示す。Coffin-Manson 則の各係数もバルク材と同等になることがわかった。

$$\Delta\varepsilon_p = C N_f^{-\alpha} \quad (1)$$

Fig. 13 FEA model and boundary conditions.

Table 2 Material properties.

Materials	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio	Yield stress [MPa]	Work-hardening coefficient [MPa]
Sn3.5Ag0.75Cu	38200	0.35	30	700
Ni	200000	0.31	-	-

Fig. 14 Relationship between Ni strain and solder strain calculated by finite element analysis.

Fig. 15 Comparison of fatigue life measured by proposed method and that of bulk solder. The fatigue life curve of bonding layers was good agreement with that of bulk materials.

Table 3 Constants in Coffin-Manson's Eq. (1).

	α	C
Sn3.5Ag0.75Cu, Proposed method	0.48	0.52
Sn3.5Ag0.75Cu, Torsion (Terasaki, 2010) (Estimated value)	0.55	0.64
Sn3.5AgCu, Tensile (Kariya and Otsuka, 1998)	0.43	0.45
Sn3.5Ag, Tensile (Kariya and Otsuka, 1998)	0.50	0.90

4. 結 言

パワー系半導体実装などの用途に向けて、現在さまざまな接合材が開発されている。しかしながら、これらの接合材の多くは、従来の試験方法では同一手法での疲労特性の比較評価が困難であり、適切な接合材選定の妨げとなっていた。本論文では、接合層の疲労特性を高速に評価できる両振り四点曲げ試験方法を開発して疲労試験を実施し、以下の結論を得た。

- (a) 厚さ 0.1 mm の Sn3.5Ag0.75Cu はんだ接合層を対象とした接合試験片を用いて、提案した両振り四点曲げ疲労試験を実施し、実構造と同様にはんだ母材で破断することを確認した。
- (b) 今回疲労試験を実施した破断回数 400～148000 サイクルの範囲において、提案試験手法で求まる疲労寿命は Factor of 2 程度のばらつきで Coffin-Manson 則に従った。
- (c) 提案試験手法と応力解析を組み合わせることで、はんだの相当塑性ひずみと疲労寿命の関係を求め、その関係も Coffin-Manson 則に従うことを示した。提案手法で得られる接合部の疲労寿命曲線が、バルク材の試験結果とよく一致することを明らかにした。

文 献

- 遠藤慶, 松嶋道也, 福本信次, 外菌洋昭, 藤本公三, 3 点曲げ試験によるソルダ接合部の熱サイクル疲労寿命予測における応力勾配の影響, 第 24 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム講演論文集 (2018), pp.115-120.
- Kariya, Y. and Otsuka, M., Mechanical fatigue characteristics of Sn-3.5Ag-X (X=Bi, Cu, Zn and In) solder alloys, Journal of Electronic Materials, Vol.27, No.11 (1998), pp.1229-1235.
- 北野誠, 河合末男, 清水一男, 面付実装形 IC パッケージはんだ接合部の熱疲労強度評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.54, No.505 (1988), pp.1709-1715.
- Lutz, J., Schlagenotto, H., Scheuermann, U. and Doncker, R. D., Semiconductor power devices, Springer (2011), pp.390-394.
- 宮崎高彰, 池田靖, パワーモジュール向け高信頼 Sn-Cu 系はんだの開発, スマートプロセス学会誌, Vol.4, No.4 (2015), pp.184-189.
- 長埜浩太, 矢口昭弘, 寺崎健, 山田宗博, 携帯電子機器 BGA はんだ接続部の疲労強度, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.701 (2005), pp.177-184.
- 能瀬春雄, 坂根政男, 山下満男, 塩川国夫, 鉛系および非鉛系はんだの引張・圧縮低サイクル疲労き裂進展挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.68, No.665 (2002), pp.88-95.
- Shi, X. Q., Pang, H. L. J., Zhou, W. and Wang, Z. P., Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic solder alloy, International Journal of Fatigue, Vol.22 (2000), pp.217-228.
- Suzuki, T., Yasuda, Y., Terasaki, T., Morita, T., Kawana, Y., Ishikawa, D., Nishimura, M., Nakako, H. and Kurafuchi, K., Thermal cycling lifetime estimation of sintered metal die attachment, International Conference on Electronics Packaging (ICEP)(2016), pp.400-404.
- Tanie, H., Nakane, K., Urata, Y., Tsuda, M. and Ohno, N., Warpage variation of Si/solder/OFHC-Cu layered plates subjected to cyclic thermal loading, Microelectronics Reliability, Vol.51 (2011), pp.1840-1844.
- 谷江尚史, 寺崎健, き裂進展解析による半導体はんだ接続部寿命評価手法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.73, No.727 (2007), pp.58-64.
- 寺崎健, 電子機器の疲労寿命予測のための応力シミュレーション技術, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.13, No.7 (2010), pp.497-501.
- 日本材料学会編, 高温強度部門委員会報告: はんだ接合材のクリープおよびクリープ疲労 (2013), p.158.
- Woo, T. W., Sakane, M., Kim, K. S., Kobayashi, K. and Park, H. C., Creep-fatigue crack growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.9 (2010), pp.1410-1426.
- 山口拓人, 池田靖, 秦昌平, 小田祐一, 黒木一真, 高温ダイアタッチ向け Cu 被覆 Zn/Al クラッド接合材, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.16, No.6 (2013), pp.477-483.
- 保田雄亮, 床尾尚也, 井出英一, 守田俊章, 小池義彦, 酸化銀粒子接合を用いた高温環境対応実装技術の開発, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.16, No.6 (2013), pp.457-462.

References

- Endo, K., Matsushima, M., Fukumoto, S., Hokazono, H. and Fujimoto, K., Effect of stress gradient on heat cycle fatigue life prediction of solder joints by three-point bending test, Proceedings of the 24th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics” (2018), pp.115-120 (in Japanese).
- Kariya, Y. and Otsuka, M., Mechanical fatigue characteristics of Sn-3.5Ag-X (X=Bi, Cu, Zn and In) solder alloys, Journal of Electronic Materials, Vol.27, No.11 (1998), pp.1229–1235.
- Kitano, M., Kawai, S. and Shimizu, I., Thermal fatigue strength estimation of solder joints of surface mount IC packages, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.54, No.505 (1988), pp.1709–1715 (in Japanese).
- Lutz, J., Schlangenotto, H., Scheuermann, U. and Doncker, R. D., Semiconductor power devices, Springer (2011), pp.390-394.
- Miyazaki, T. and Ikeda, O., Development of Sn-Cu based solder for power modules, Journal of the Smart Processing Society for Materials, Environment & Energy, Vol.4, No.4 (2015), pp.184–189 (in Japanese).
- Nagano, K., Yaguchi, A., Terasaki, T. and Yamada, M., Fatigue strength of BGA type solder joints between package and printed wiring board of portable device, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.701 (2005), pp.177–184 (in Japanese).
- Nose, H., Sakane, M., Yamashita, M. and Shiokawa, K., Crack propagation behavior of four types of lead and lead-free solders in push-pull low cycle fatigue, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.68, No.665 (2002), pp.88–95 (in Japanese).
- Shi, X. Q., Pang, H. L. J., Zhou, W. and Wang, Z. P., Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic solder alloy, International Journal of Fatigue, Vol.22 (2000), pp.217–228.
- Suzuki, T., Yasuda, Y., Terasaki, T., Morita, T., Kawana, Y., Ishikawa, D., Nishimura, M., Nakako, H. and Kurafuchi, K., Thermal cycling lifetime estimation of sintered metal die attachment, International Conference on Electronics Packaging (ICEP)(2016), pp.400-404.
- Tanie, H., Nakane, K., Urata, Y., Tsuda, M. and Ohno, N., Warpage variation of Si/solder/OFHC-Cu layered plates subjected to cyclic thermal loading, Microelectronics Reliability, Vol.51 (2011), pp.1840-1844.
- Tanie, H. and Terasaki, T., Fracture life evaluation of solder joints in semiconductor structures using crack propagation analysis, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.73, No.727 (2007), pp.58–64 (in Japanese).
- Terasaki, T., Stress simulation techniques to fatigue life prediction in electronic devices, Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.13, No.7 (2010), pp.497-501 (in Japanese).
- The Japanese Society of Materials Science Committee on High Temperature Strength of Materials ed., JSMS Report: Creep and creep-fatigue for solder joint specimens (2013), p.158 (in Japanese).
- Woo, T. W., Sakane, M., Kim, K. S., Kobayashi, K. and Park, H. C., Creep-fatigue crack growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.9 (2010), pp.1410-1426.
- Yamaguchi, T., Ikeda, O., Hata, S., Oda, Y. and Kuroki, K., Cu-coated Zn/Al clad solder for high temperature die attachment, Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.16, No.6 (2013), pp.477-483 (in Japanese).
- Yasuda, Y., Tokoo, N., Ide, E., Morita, T. and Koike, Y., Development of bonding technique using silver oxide particles for high temperature environment, Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.16, No.6 (2013), pp.457-462 (in Japanese).