

電子実装基板接合部用鉛フリーはんだの 粘塑性変形特性に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、環境問題に対する意識の高まりから従来の鉛はんだ合金の使用が制限されるようになり、鉛を含まないはんだ（鉛フリーはんだ）が使用されるようになってきた。しかしながら新しい合金であるが故にそのあらゆる特性の解明はいまだ充分とは言えない。また電子デバイスに対する小型化や高機能化の要求による電子基板の高密度化により、はんだ接合部サイズが著しく小さくなり鉛フリーはんだ接合部に含まれる結晶粒数が1個から数個になる。この結晶粒数の減少により鉛フリーはんだの主成分である Sn の力学的異方性が顕著になり、これまでの等方性材料と異なる変形挙動を示す可能性がある。本研究はこれまで明らかにされてこなかった鉛フリーはんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu) の繰返し粘塑性変形特性を解明し、その変形に応用できる粘塑性構成モデルの提案を行い、さらに実機でのサイズを考慮するために、引張やクリープ変形特性における微視的構造の影響の実験的考察および結晶塑性有限要素法解析によるはんだバンプの変形解析を行い結晶粒数の影響を明らかにすることを目的としている。

第1章では研究背景と関連する従来の研究について概説し本研究の位置づけと目的について述べた。

第2章では鉛フリーはんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu) と鉛はんだ (Sn-37Pb) を用いて応力振幅一定繰返し試験および後続クリープ試験を行い、鉛フリーはんだと鉛はんだの繰返し変形特性の違いを定性的に以下のように明らかにした。

(1) Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-37Pb とともに、そのひずみ増加量はサイクル数の増加に伴って減少するひずみ硬化が確認された。また繰返し試験後の後続クリープ試験では Sn-3.0Ag-0.5Cu は前負荷である繰返し試験のサイクル数の増加に伴ってクリープひずみが減少するが、Sn-37Pb ではサイクル数と共にクリープひずみが増加し両者に明確な違いがあることがわかった。

(2) Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-37Pb とともに、ひずみ速度の減少に伴いラチェットひずみ（非弾性ひずみ）が増加するひずみ速度依存性が存在し、Sn-3.0Ag-0.5Cu は Sn-37Pb に比べてひずみ速度依存性が小さいことが確認された。また後続クリープ試験では Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-37Pb とともに前負荷の繰返し試験のひずみ速度の増加と共にクリープひずみも増加することが確認された。

(3) Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-37Pb とともに応力比の増加に伴って大きなラチェットひずみが生じることが確認された。また上記の全試験で Sn-3.0Ag-0.5Cu の変形量は Sn-37Pb より小さいことが明らかになった。

第3章では Estrin らが提案した転位密度に基づく粘塑性構成モデルを、その背応力移行式に Ohno-Wang モデルで用いられている臨界状態を導入した動的回復項を追加することにより修正し、応力振幅一定繰返し変形に対するシミュレーションを試みた。導入した動的回復項は背応力が臨界値に達したときのみ背応力の動的回復が生じると仮定したもので2種類の関数形式で表せる。一つは Heaviside のステップ関数を有した関数形であり Model A と呼ぶ。もう一つは、べき関数形を

有しており Model B と呼ぶ。Estrin モデルのオリジナルの関数形を合わせた 3 種類の背応力移行式を用いてシミュレーションを行った結果、以下の結論を得た。

(4) Model A および Model B を使用することによって応力振幅一定繰返し変形に対するシミュレーション精度を大幅に向上させることができた。特に 3 種類のモデル中で Model B の精度が最も良いことがわかった。

(5) Estrin モデルの背応力移行式に動的回復項を加えることで応力振幅一定繰返し変形に対する過大な背応力予測が改善されシミュレーション精度が向上し、動的回復項の有効性を確かめることができた。よって応力振幅一定繰返し変形のシミュレーションでは背応力の発展式が特に重要である。

第 4 章では鉛フリーはんだ接合部微小化に伴う結晶粒数減少が変形特性におよぼす影響を検討するために、微小接合部を想定した微小試験片を用いて変形特性試験を行った。得られた結果をバルク試験片のものと比較し変形特性の違いについて微視組織および変形機構の観点から考察した。その結果、以下の結論を得た。

(6) 顕微鏡観察より Sn-3.0Ag-0.5Cu の組織は冷却速度の増加に伴ってデンドライト厚は薄く細長くなり共晶領域幅は狭くなり微細な組織になる。また EBSP 解析より微小試験片の結晶粒数は 1~数個であることがわかった。

(7) 引張り試験の結果より微小試験片およびバルク試験片はほぼ同様の応力ひずみ曲線を描き最大引張り強さにも顕著な差は見られない。これは組織の微細化による分散強化と結晶粒減少により粒界すべりが容易になったことによる強度低下がほぼ同じであるためと考えられる。

(8) クリープ強度は微小試験片の方がバルク試験片より明らかに大きい。クリープ変形では粒内での転位移動による変形が支配的で組織の分散強化により転位の移動が妨げられることにより粒内変形が抑制されクリープ強度が上昇したと考えられる。

(9) バルク試験片から得られた引張曲線は実機 BGA(Ball Grid Array) 解析に適用できると考えられるが、クリープ試験結果を適用する際には微小試験片の結果と大幅に異なるためパラメータを見直す必要がある。

第 5 章では結晶塑性有限要素法を用いた BGA はんだバンプのせん断変形解析を行い、結晶粒数および結晶分布による変形挙動の違いを検討した。その結果、以下の結論を得た。

(10) 汎用有限要素解析ソフトによる電子実装基板の熱変形解析により、温度変化によりはんだバンプが受ける変形は熱膨張を除いてそのほとんどがバンプの上下面に作用するせん断変形である。

(11) 多結晶モデルの場合、ひずみの高い部分が上面、下面の外周部から球面状に内部にかけて広範囲に分布しており、その最大値は上下面端部に存在する。

(12) 単結晶モデルの場合、ひずみ分布や応力分布は上下左右対称で多結晶モデルと比べて極めて局所的であるが、最大相当ひずみや最大相当応力は多結晶モデルと同様に上下面端部に存在する。

(13) 二結晶モデルの場合、同一結晶方位の組み合わせでも分割面によってひずみ分布や最大相当ひずみ、応力分布や最大相当応力は大きく異なり、その分布は左右非対称である。

(14) 結晶粒数やその結晶方位により、ひずみ分布や応力分布の最大値は大きく異なり、BGA はんだの変形特性は結晶粒数の減少に大きく影響されることがわかった。

第 6 章は総括であり本研究で得られた結果をまとめている。

以上のように本研究では、はんだの繰返し粘塑性変形特性が鉛フリーはんだと鉛はんだで大きく異なることを明確にすると共に、繰返し粘塑性変形に適用可能な粘塑性構成モデルの提案を行った。また鉛フリーはんだ接合部微小化に対応した変形特性試験により微視的構造の影響を明らかにすると共に、結晶塑性有限要素解析により結晶粒の影響を考慮したはんだバンプ解析を行い、はんだ接合部の結晶粒数依存性について示すことができた。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	佐々木 克 彦
副 査	教 授	成 田 吉 弘
副 査	教 授	但 野 茂
副 査	教 授	中 村 孝

学 位 論 文 題 名

電子実装基板接合部用鉛フリーはんだの 粘塑性変形特性に関する研究

近年、環境問題に対する意識の高まりから従来の鉛はんだ合金の使用が制限されるようになり、鉛を含まない鉛フリーはんだが使用されるようになってきた。しかしながら新しい合金であるが故にそのあらゆる特性の解明はいまだ充分とは言えない。また電子デバイスに対する小型化や高機能化の要求による電子基板の高密度化により、はんだ接合部サイズが著しく小さくなり鉛フリーはんだ接合部に含まれる結晶粒数が1個から数個になる。この結晶粒数の減少により鉛フリーはんだの主成分である Sn の力学的異方性が顕著になり、これまでの等方性材料と異なる変形挙動を示す可能性がある。

本研究は、これまで明らかにされてこなかった鉛フリーはんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu) の繰返し粘塑性変形特性を解明し、その変形に応用できる粘塑性構成モデルの提案を行い、さらに実機でのサイズを考慮するために、引張やクリープ変形特性における微視的構造の影響の実験的考察および結晶塑性有限要素法解析によるはんだバンプの変形解析を行い結晶粒数の影響を明らかにすることを目的としている。

まず、鉛フリーはんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu) と鉛はんだ (Sn-37Pb) を用いて応力振幅一定繰返し試験および後続クリープ試験を行い、鉛フリーはんだと鉛はんだの繰返し変形特性の違いについて検討した。Sn-3.0Ag-0.5Cu と Sn-37Pb とともに、そのひずみ増加量はサイクル数の増加に伴って減少すること、繰返し試験後の後続クリープ試験において、Sn-3.0Ag-0.5Cu は前負荷の繰返し負荷のサイクル数の増加に伴ってクリープひずみが減少するが、Sn-37Pb ではサイクル数と共にクリープひずみが増加し両者に明確な違いがあること、さらには、Sn-3.0Ag-0.5Cu は Sn-37Pb に比べてひずみ速度依存性が小さいこと、ならびに、Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-37Pb とともに応力比の増加に伴って大きなラチェットひずみが生じることを明らかにした。

ついで、Estrin らが提案した転位密度に基づく統一形粘塑性構成モデルを、その背応力移行式に Ohno-Wang モデルで用いられている臨界状態を導入した動的回復項を追加することにより修正し、応力振幅一定繰返し変形に対するシミュレーションを行った。動的回復項として Heaviside のステップ関数を有した関数形 (Model A) と、べき関数形を有した関数形 (Model B) を採用した。Estrin

モデルのオリジナルの関数形を合わせた 3 種類の背応力移行式を用いたシミュレーションの結果、Model A および Model B を使用することによって応力振幅一定繰返し変形に対するシミュレーション精度を大幅に向上させることが可能となり、なかでもべき関数形を有した Model B が最も良いことを明らかにした。

さらに、実機のはんだ形状を考慮するために、鉛フリーはんだ接合部微小化に伴う結晶粒数減少が変形特性におよぼす影響を、微小接合部を想定した微小試験片を用いた変形特性試験により検討した。まず、顕微鏡観察より Sn-3.0Ag-0.5Cu の組織は冷却速度が増加するに従ってデンドライトは薄く細長くなり共晶領域幅は狭くなり微細な組織になること、EBSP 解析より微小試験片の結晶粒数は 1～数個であることを明らかにした。さらに、微小試験片およびバルク試験片を用いた引張り試験による応力ひずみ曲線にはほとんど差がないが、クリープ強度は微小試験片の方がバルク試験片より明らかに大きくなることを示し、この原因をバルク試験片と微小試験片の微視的組織の違いから明確にした。

最後に、結晶塑性有限要素法を用いたはんだバンプのせん断変形解析を行い、結晶粒数および結晶分布による変形挙動の違いを検討した。多結晶モデルの場合、ひずみの高い部分が上面、下面の外周部から球面状に内部にかけて広範囲に分布していること、一方、単結晶モデルの場合は、ひずみ分布や応力分布は上下左右対称で多結晶モデルと比べて極めて局所的であることを示した。さらに、二結晶モデルの場合、同一結晶方位の組み合わせでも分割面によってひずみ分布、応力分布、最大相当ひずみ、および、最大相当応力が大きく異なることを明らかにした。

これを要するに著者は、鉛フリーはんだと鉛はんだにおける繰返し粘塑性変形特性が大きく異なることを明確にし、繰返し粘塑性変形に適用可能な粘塑性構成モデルの提案を行い、さらに、鉛フリーはんだを用いた微小材料変形特性試験により微視的構造の影響を明らかにし、最終的には実機サイズを模擬した結晶塑性有限要素解析によるはんだバンプの変形解析まで行っており、超高密度電子実装基板技術の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。