Akita University

氏名（本籍）	黒沢　憲吾（秋田県）
専攻分野の名称	博士（理工学）
学 位 記 番 号	理博甲　第４号
学位授与の日付	令和３年３月 22 日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当
研究科・専攻	理工学研究科　総合理工学専攻
学位論文題目 （英文）	Cu/Sn 系金属間化合物の変形特性評価のための材料試験法に関する研究
論文審査委員	（主査）教授　大口　健一 （副査）教授　齋藤　嘉一 （副査）教授　林　滋生 （副査）准教授　棗　千修

論文内容の要旨

電子実装基板では，線膨張係数が異なる部材がはんだで接合されているため，基板の周辺温度が変動すると，はんだ接合部に熱応力が生じる．これが繰返された場合，はんだ接合部は熱疲労破壊に至ることもある．このような疲労破壊は，航空機などの高い安全性が要求される機械構造物が電子制御されている現状を考慮すると，重大事故につながる恐れがあり，はんだ接合部の強度信頼性の確保は必須となっている．現在，はんだ接合部の強度信頼性評価の精度は，有限要素解析（FEA）の精度に大きく依存している．このため，電子実装基板の有限要素（FE）モデルに熱負荷や機械的負荷を与えるFEAでは，はんだ接合部の変形を高精度で予測することが求められている．

一方，はんだによる電子部品の実装工程では，電極および銅配線とはんだの界面にCu_3SnとCu_6Sn_5の2層から成るCu/Sn系金属間化合物（IMCs）層が生じることが知られている．従来は，はんだ接合部中に占めるCu/Sn系IMCsの体積割合は低かったため，上述のはんだ接合部のFEAでその存在を考慮することはなかった．しかし，小型化・多機能化のために高密度化が進んだ現在の電子実装基板では，はんだ接合部の微細化が著しい．この結果，はんだ接合部中に占めるCu/Sn系IMCsの体積割合は高くなり，はんだ接合部のFEAでIMCs層の存在を考慮することが必須となりつつある．

Akita University

このようなFEAを高精度で実行するには，Cu/Sn系IMCsの変形特性を正確に把握する必要がある．しかしながら，Cu/Sn系IMCsのバルク試験片の作製は困難であり，その材料試験法すら確立されていないのが現状である．このことから本研究では，Cu/Sn系IMCsの変形特性を的確に評価するための材料試験法の確立を目指した．その成果をまとめた本論文は，6章から構成されている．各章の概要を以下に示す．

第 1 章は序論であり，研究背景として，高密度実装基板はんだ接合部の強度信頼性評価の高精度化に関する課題を示した上で，本研究の目的と意義について述べた．

第 2 章では，まず，Cu/Sn 系 IMCs の引張変形特性を調査するために考案・作製した，Sn-3.0Ag-0.5Cu（SAC）はんだを母材とした複合材料型微小はんだ（MCS）試験片について述べた．次いで，MCS 試験片の引張試験結果を示し，その結果から，Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 の引張応力－ひずみ関係を導出するデータ解析法について述べた．そして，導出したこれら 2 種類の Cu/Sn 系 IMCs の引張応力－ひずみ関係を用いて，いずれの IMC も一様伸びは 1.4%と小さいが，材料非線形性を有する可能性があることを示した．

第 3 章では，上述の Cu/Sn 系 IMCs が材料非線形性を有することは従来にない新知見であったため，その妥当性について検討した．すなわち，Cu/Sn 系 IMCs 層を有する銅－はんだ接合体のせん断試験と，その FEA を実施して，Cu/Sn 系 IMCs の材料非線形性の有無について検討した．銅－はんだ接合体の FE モデルには，Cu_3Sn 層と Cu_6Sn_5 層の材料モデルに「材料非線形性がある」ことを意味する弾・塑性構成則を適用したものと，「材料非線形性がない」ことを意味する弾性構成則を適用したものの 2 種類を用意した．これらのモデルを用いたせん断試験 FEA の結果は，接合体に 0.3 mm のせん断変位を与えると，Cu/Sn 系 IMCs に「材料非線形あり」の場合には接合部の角の Cu_6Sn_5 層でき裂が生じるのに対し，「材料非線形なし」の場合にはき裂が生じないことを示すものであった．実際に，接合体に 0.3 mm のせん断変位を与える試験を実施した結果，Cu_6Sn_5 層でき裂の発生が認められたことから，Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 が材料非線形性を有する可能性は極めて高いと結論づけた．

第 4 章では，熱疲労過程にある微細はんだ接合部の FEA を実行する上で必要となる，Cu/Sn 系 IMCs の高温域での変形特性を評価するための材料試験法について検討した．ここでは，Cu/Sn 系 IMCs のうち Cu_3Sn は，高温動作が可能な次世代パワー半導体チップの接合材料としての実用化が期待され，473 K（200 ℃）以上での強度を把握することが求められていることも考慮して，Cu_3Sn の 473 K での引張応力－ひずみ関係を得るための材料試験法について検討した．そのために，銅線の周囲に Cu_3Sn 層を設けた複合材料型銅線（CCW）試験片を作製し，その引張試験を実施した．そして，そこで得た引張応力－ひずみ関係に，第 2 章で述べたデータ解析法を適用すれば， Cu_3Sn の 473 K での引張応力－ひずみ関係が導出できることを示した．

第 5 章では，Cu_3Sn にとって第 4 章で試験温度とした 473 K は，融点 T_m の半分（$T_m/2$: K）程度の高温に相当しクリープ変形の発生が予想されることから，Cu_3Sn のクリープ特性を評価するための試験法について検討した．すなわち，負荷・除荷速度を変えた荷重保持過程を含むマイクロインデンテーション試験を種々の温度で実行し，Cu_3Sn のクリープ変形について調査した．その結果として，Cu_3Sn のクリープ変形は温度 373 K 以上で発生することを示すと共に，負荷過程の荷重と押込み深さの関係からクリープ則の応力指数を導出することが可能であることを示した．さらに，Cu_3Sn のクリープ変形は，転位クリープによるものであることを簡易的に評価した．

第6章では，本研究によって得られた主要な知見をまとめて総括とし，最後に今後の課題を述べた．

Akita University

論文審査結果の要旨

航空機などの高い安全性が要求される機械構造物が電子制御されている現在，電子実装基板はんだ接合部の破壊による通電不良は重大事故を招く恐れがある．このため，有限要素解析（FEA）により，はんだ接合部の強度信頼性を的確に評価することが必須となっている．はんだによる電子部品の実装工程では，電極および銅配線とはんだの界面に Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 の 2 層から成る Cu/Sn 系金属間化合物（IMCs）層が生じることが知られている．従来は，はんだ接合部中に占める Cu/Sn 系 IMCs の体積割合は低かったため，はんだ接合部の FEA でその存在を考慮することはなかった．しかし，高密度実装により微細化が進んだ現在のはんだ接合部では，その中に占める Cu/Sn 系 IMCs の体積割合は高くなり，その FEA で IMCs 層の存在を考慮することが必須となりつつある．このような FEA を高精度で実行するには，Cu/Sn 系 IMCs の引張変形特性を正確に把握する必要があるが，そのための材料試験法すら確立されていないのが現状である．また，Cu/Sn 系 IMCs のうち Cu_3Sn は，473 K 付近での使用を前提とする，次世代パワー半導体の接合材料として実用化することが期待されている．その実現のために，473 K 付近の温度における Cu_3Sn の基本的な変形特性の把握が急務となっているが，これを可能とする材料試験法も未確立である．

本論文は，Cu/Sn 系 IMCs の変形特性を評価するための新たな材料試験法を提案したものであり，6 章から構成されている．各章の概要は以下の通りである．

第 1 章では，微細はんだ接合部の強度信頼性を的確に評価するには，Cu/Sn 系 IMCs の変形特性評価法の確立が必須となることを示した上で，本研究の目的と意義を述べている．

第 2 章では，直径 0.5mm，長さ 2mm の試験部をもつ，Sn-3.0Ag-0.5Cu（SAC）はんだ微小試験片の外周に Cu_6Sn_5 層，Cu_3Sn 層，Cu 層を順に配置した，複合材料型の微小はんだ試験片を作製し，その引張試験を行えば，Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 の応力－ひずみ関係が導出できることを示している．そして，この方法により，いずれの IMC も一様伸びは 1.4%と小さいが，材料非線形性（塑性変形能）を有する可能性があるという知見を得ている．

第 3 章では，第 2 章で示した Cu/Sn 系 IMCs が材料非線形性を有するという知見は従来にないものであったため，その妥当性について検討している．すなわち，Cu/Sn 系 IMCs 層を有する銅－はんだ接合体のせん断試験と，その FEA を実施して，Cu/Sn 系 IMCs の材料非線形性の有無について検討している．そして，Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 が材料非線形性を有する可能性は極めて高いと結論づけている．

第 4 章では，次世代パワー半導体チップの接合材料として期待されている，Cu_3Sn の 473 K での引張応力－ひずみ関係を得るための材料試験法を提案している．すなわち，第 2 章で提案した材料試験法を応用して，銅線の周囲に Cu_3Sn 層を設けた複合材料型の銅線試験片を作製し，その引張試験を行えば，Cu_3Sn の 473 K での引張応力－ひずみ関係が導出できることを示している．

Akita University

第 5 章では，第 4 章で導出した Cu_3Sn の 473 K での応力－ひずみ関係の形状がクリープ変形の発生を示唆するものであったため，Cu_3Sn のクリープ変形について，発生の有無も含めてマイクロインデンテーション試験で調査している．その結果として，温度 373 K 以上の温度ではクリープ変形が生じることと，この温度域では，3 種類の荷重速度による荷重－押込み深さ曲線があれば，べき乗クリープ則の応力指数が導出できることを示している．

第 6 章では，本研究によって得られた主要な知見と今後の課題について述べている．

以上のように，本論文は，Cu/Sn 系 IMCs の存在を考慮した微細はんだ接合部の FEA を実行する上で不可欠となる知見と，次世代パワー半導体チップの接合技術を開発する上で極めて有用となる知見を含む，電子部品実装技術の高度化に大いに貢献するものである．したがって，本論文は，博士（理工学）の学位論文として十分に価値があると認められる．