様　式　C－19、F－19－1、Z－19　(共通)

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ６ 月 １４ 日現在

機関番号：１１４０１

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：１８Ｋ０３８３１

研究課題名（和文）初晶SnとIMCを強度構成部材とした高精度FEAによる微細はんだ接合法の開発

研究課題名（英文）Development of Microsoldering Method Based on High Accuracy FEA Regarding Primary Tin Crystal and Intermetallic Compounds as Structural Members

研究代表者

大口　健一（Ohguchi, Ken-ichi）

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：３０２９２３６１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：微小はんだ試験片の縦断面組織において、初晶Snの方位をその長手方向が負荷方向と成す角と定義し、微小はんだ試験片の引張強さ・耐疲労性と初晶Snの方位の関係を調査した。その結果、方位約45°の初晶Snが多い試験片は、0または90°に近いものが多い試験片に比べて引張強さは低いが、同条件での一定ひずみ振幅引張・圧縮繰返し負荷に対する耐疲労性は高いことが判明した。また、微細はんだ接続部の接続界面に存在するCu/Sn系金属間化合物の引張特性を把握するための新たな材料試験法も開発した。これにより、次世代パワー半導体の接合材料の候補であるCu3Snの室温と200℃における応力－ひずみ曲線を得ることもできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微細はんだ接続では、部品接合時にCu/Sn系金属間化合物(IMC)が必ず生じ、それが接続部の強度・耐疲労性を低下させる。本研究では、これらの低下分を、微細はんだ中の初晶Snの配置を制御することで補える可能性のあることを示した。また、Cu/Sn系IMCの引張特性評価法を開発し、微細はんだ接続部の強度信頼性評価を担う有限要素解析の高精度での実行に必須となる情報を得ることができた。さらに、高温での使用を前提とする次世代パワー半導体の接合材料の候補である、Cu3Snの基本的な高温強度を把握することもできた。

研究成果の概要（英文）：The relationships between the distribution morphology of primary tin crystals in a miniature solder specimen and both its tensile strength and fatigue resistance were investigated. For the investigation, the orientation of the primary tin crystal in the longitudinal cross-section of a miniature solder specimen was defined as the angle between the longitudinal direction of the tin crystal and the load direction. The results showed that the miniature solder specimen which has many primary tin crystals with an orientation of nearly 45 ° has a higher fatigue resistance than that which have many near 0° or 90° crystals while lower in the tensile strength. In addition, a new testing method for understanding the tensile characteristics of Cu/Sn intermetallic compounds were proposed in this work. Using this method, the stress-strain relations of Cu3Sn, which is expected as a bonding material for next-generation power semiconductors, at room temperature and 200℃ were estimated.

研究分野：材料力学・計算力学

キーワード：微小はんだ試験片　初晶スズ　Cu/Sn系金属間化合物　引張特性　引張・圧縮繰返し負荷　疲労　有限要素解析

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

電子機器の設計･開発では､製品の市場競争力を強化するために､高機能化が強く求められる。この要求に対しては、電子実装基板の高密度化で対応しており、これに伴うはんだ接続部の微細化は著しい。微細化したはんだ接続部には、従来よりも厳しい条件での負荷が作用するため、その強度信頼性を確保することが以前にも増して強く求められている。

さらに電子部品実装の際には、はんだと部品電極および銅配線の間に Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 から成る Cu/Sn 系金属間化合物(IMC)層が生じる。従来、はんだ接続部の強度信頼性に対して IMC の存在が及ぼす影響は小さいとされてきたが、高密度実装のために微細化されたはんだ接続部内では IMC の体積割合は高くなる。IMC は脆性材料で、はんだ接続部が負荷を受けた際には、クラックの起点になるとされている。このため、微細はんだ接合では、IMC の存在を考慮した上ではんだ接合部の強度信頼性を確保する技術が必要となる。しかし、強度を低下させるマイナス要因として IMC が存在する状況で、微細はんだ接続部にこれまでと同等以上の強度信頼性を付与するには、従来とは異なる発想で、その強度を担保する接合技術を開発しなければならない。

２．研究の目的

報告者は、微細はんだの変形特性を調査するために、標点部外径が 0.5mm の微小 Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC)はんだ試験片を用いた引張試験を実施してきた。その際、微小 SAC はんだ試験片の引張強さは、同負荷条件であっても、通常サイズの試験片ではみられない大きなばらつきを示すことが判明した。この原因を探るために、高強度と低強度の試験片の縦断面を試験後に比較したところ、初晶 Sn の分布形態に違いがみられた。このことは、微小 SAC はんだの強度と初晶 Sn の分布形態の関係を明らかにすれば、微細はんだ接続部に高強度が付与できる組織構造の提案につながる可能性のあることを示唆している。すなわち初晶 Sn は、微細はんだ接続部の強度を担う構成部材になり得ることを意味している。そこで本研究では、この関係を明らかにして、初晶 Sn の配置を制御することで IMC の存在による微細はんだ接続部の強度の低下を補う、新たな微細はんだ接合技術の提案を目指すこととした。

３．研究の方法

微細はんだ接続部は耐疲労性も要求されるため、上述のような新たな微細はんだ接合技術を提案するには、微小はんだ試験片中の初晶 Sn の分布形態は強度に加えて、疲労強度との関係も明らかにする必要がある。また、微細はんだ接続部の強度信頼性に影響を与える Cu/Sn 系 IMC の変形特性を把握することも重要となる。これらのことから本研究では、以下のことを重点的に実施した。

(1) 微小 SAC はんだ中の初晶 Sn の分布形態と引張強さの関係の解明

上述の微小 SAC はんだ試験片を用いた引張試験を実施し、試験後に試験片の縦断面組織において､初晶 Sn の形状とその分布形態に着目した調査を行った｡その結果を強度の高低で比較し、微小 SAC はんだ試験片の強度に対して初晶 Sn の形状と分布形態が与える影響について検討した。微小 SAC はんだ試験片は、長さ 2mm、直径 0.5mm の中実円柱状の標点部をもつ全長 7mm のドッグボーン形状であり、5 本同時に鋳込むことができる炭素工具鋼製の鋳型を用いて鋳造した[①]。引張試験には、小型卓上試験機(島津製作所製)に負荷用の変位分解能が 20 nm の電動アクチュエータ(オリエンタルモータ製)を組込んだ装置を用いた。試験中は、高精度デジタル光学変位センサ(Keyence 製)を用いて、試験片つかみ部の上下間の距離を測定した。その測定値をフィードバック信号として、アクチュエータの動きを制御した。また、この測定値からは、ひずみも算出した。応力は、容量 500 N のロードセルで検出した荷重値から算出した。すべての引張試験は、室温、ひずみ速度 0.01 %/s で、ひずみ 10 %を与える条件で実施した。引張試験後の試験片縦断面を観察するための試料は、試験片をエポキシ樹脂に埋めてエメリー紙で研磨し、その後粒径 1 μm のアルミナでバフ研磨して準備した。このように仕上げた断面に塩化第二鉄溶液によるエッチングを施して観察に用いた｡組織観察には､オプトデジタルマイクロスコープ(OLYMPUS)を用いた。組織画像は、高倍率画像を貼り合わせて試験片標点部全体を 1 つの画像とする、パノラマ撮影により作成した。

(2) 微小 SAC はんだ中の初晶 Sn の分布形態と疲労強さの関係の解明

微小 SAC はんだ試験片を用いて、ひずみ制御の引張・圧縮繰返し負荷による疲労試験を実施し、試験中の応力－ひずみ関係と疲労寿命に対して初晶 Sn の分布形態が与える影響について調査した。そのために、微小試験片に対してひずみ制御による引張・圧縮繰返し負荷を確実に与えることができる試験装置を製作した。この試験装置では、負荷用のアクチュエータとして、分解能 1 nm での変位をバックラッシなしで試験片に与えることができるピエゾアクチュエータ(メステック製、MPA-UA6S)を使用した。荷重計測部には、定格容量±100 N の低荷重用のロードセル(共和電業製、LUX-B-100N-ID)を、計装用コンディショナ(共和電業製、WGA-670A)と組み合

わせて用いた。試験片変位は、変位分解能 1 μm の静電容量センサ(MICRO-EPSILON 製、CS1HP)で検出し、ここで検出した値をフィードバック信号として、上記のピエゾアクチュエータを制御した。疲労試験は、室温(25°C)で実施した。ひずみ振幅$\Delta\varepsilon$は±0.5%と±1%の 2 種類とし、各ひずみ振幅での疲労試験は、2 種類のひずみ速度 $d\varepsilon/dt = 0.1\%/s$ と $d\varepsilon/dt = 1.0\%/s$ で実施した。すなわち、合計 4 種類の負荷条件での疲労試験を実施した。その際、同負荷条件での試験を複数の試験片を用いて実施し、微小 SAC はんだの疲労寿命がどの程度のばらつきを示すのかも調査した。疲労寿命は、はんだの低サイクル疲労試験法標準(JSMS-SD-3-00)に従って算出した。

(3) 複合材料型試験片を用いた Cu/Sn 系 IMC の変形特性評価法の妥当性検証とその応用

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 IMC 層の存在を考慮した FEA を実行しなければならない。そのためには、Cu/Sn 系 IMC の引張応力-ひずみ曲線が必要となることから、報告者は微小複合材料型はんだ（MCS）試験片（銅めっきした微小はんだ試験片に熱処理を施すことではんだと銅めっきの間に Cu_6Sn_5 層と Cu_3Sn 層を設けた試験片）を作製し、その引張試験を実施することで Cu/Sn 系 IMCs の引張応力-ひずみ曲線を導出する方法を開発した。その結果、Cu/Sn 系 IMCs が材料非線形性（塑性変形能）を有する可能性のあることが判明した①。しかし、これは従来にない知見であり、その妥当性について検証する必要があった。このことから、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、Cu/Sn 系 IMCs の材料非線形性の有無について検討した。すなわち、Cu/Sn 系 IMCs 層の材料非線形性の有無が異なる 2 種類の銅－はんだ接合体の有限要素（FE）モデルを用いてせん断試験 FEA を実行し、どちらの解析結果が実際のせん断試験で確認された実験事実を反映するのかを調査した。そして、その結果に基づいて Cu/Sn 系 IMCs の材料非線形性の有無について検討し、MCS 試験片を用いた Cu/Sn 系 IMC の変形特性評価法の妥当性を検証した②。さらに、この検証結果を踏まえて、直径 0.5mm の銅線の周囲に Cu/Sn 系 IMC 層を設けた複合材料型試験片を作製し、高温における Cu/Sn 系 IMC の引張応力－ひずみ曲線の導出も試みた。ここでは、今後、次世代パワー半導体の接合材料としての実用化が期待されている Cu_3Sn の 200℃における応力－ひずみ曲線の導出を試みた。

４．研究成果

研究方法で示した 3 項目を実施して得た成果を以下に順に示す。

(1) 微小 SAC はんだ中の初晶 Sn の分布形態と引張強さの関係

図 1 は、ひずみ速度 1.0×10^{-2} %/s、室温の条件で実施した引張試験で得た、微小 SAC はんだ試験片の応力－ひずみ曲線である。図 1 には、同時に鋳込んだ 5 本の試験片の応力－ひずみ曲線が示されている。図 1 中の番号は、図中の鋳型写真における鋳込み位置を示す番号と対応している。図 1 から、微小 SAC はんだ試験片の応力－ひずみ曲線は、同時に鋳造した試験片で同負荷条件であっても、強度にばらつきを示すことがわかる。このような強度のばらつきは、ほかの鋳造作業 2 回で得た試験片(5 本×2=10 本)でも認められた。なお、各鋳込み位置における引張強さの平均値には、大きな差は認められなかった。

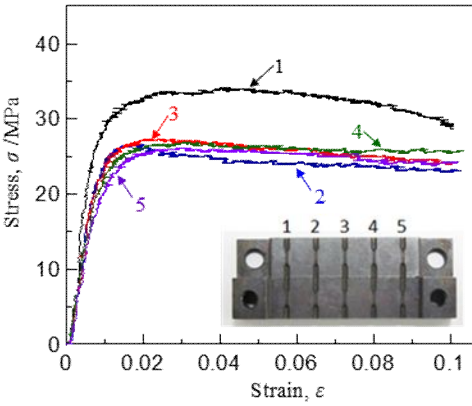


図 1 微小 SAC はんだ試験片の応力-ひずみ曲線

図 1 でみられる強度のばらつきと組織の関連を調べるために、引張試験後の微小 SAC はんだ試験片の縦断面組織画像を処理し、初晶 Sn の形状とその分布形態に着目した調査を行った。すなわち、図 2 に示すように、組織画像を二値化して画像中の各初晶 Sn の形状を抽出し、その形状を楕円近似した。そして、各近似楕円の長軸長さと長軸の方位をデータ出力し、これらのデータを比較することで、強度と初晶 Sn の形状および分布形態との関係を調査した。なお、長軸の方位は、図 2 の下部に示すように引張方向と成す角として求めた。

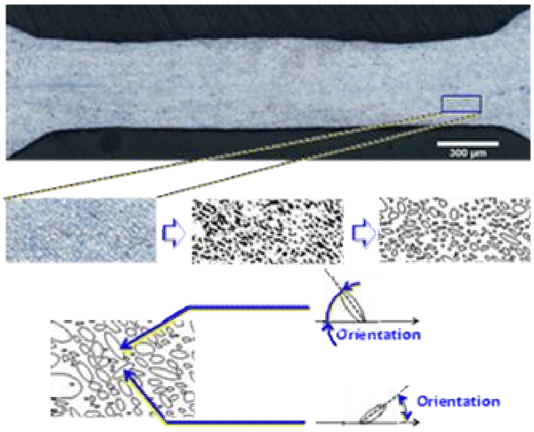
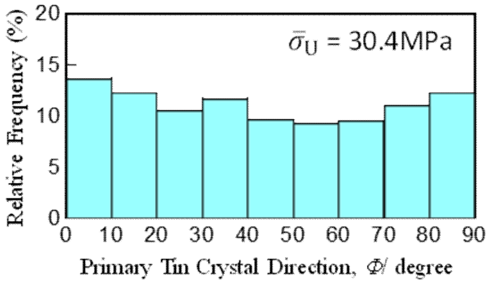


図 2 試験片断面の画像処理方法

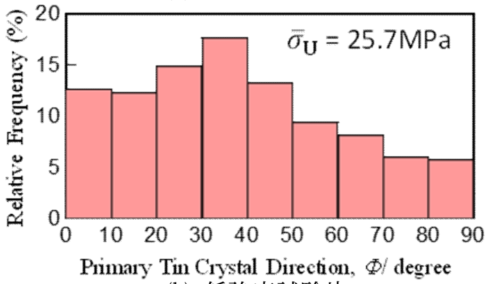
すべての試験片の断面を調査した結果、いずれの試験片においても、長軸長さが 10～15μm の初晶 Sn が最も多いことが判明した。そこで、長軸長さが 10～15μm の初晶 Sn に着目し、その方位を各試験片において 0～90 °の範囲で 10 °幅刻みに度数を求め、相対度数をヒストグラムで表した。図 3(a)は、同時に鋳造した 5 本の試験片中で

最大引張強さを示した試験片の断面から得たヒストグラムを、3 回の鋳造作業分で平均して得たものである。一方、図 3(b)は、最小引張強さを示した試験片について同様に平均して得たヒストグラムである。図 3 で(a)と(b)を比較すると、高強度試験片では、0～10°と 80～90°の方位の初晶 Sn が比較的多いのに対し、低強度試験片では 30～40°のものが多いことがわかる。

この現象について考察するために、初晶 Sn（β-Sn）の方位を 0、45、90°に設定した、図 4 中に示す FE モデルを用いて引張試験の FEA を実行した。その際、初晶 Sn の変形は弾性モデルで、共晶部の変形は弾・塑性・クリープモデルで表した。また、初晶 Sn の弾性モデルには、β-Sn が示すヤング率の異方性の有無が異なる 2 つのモデルを用意した。図 4 の応力-ひずみ曲線は、解析結果から導出したものである。45°の FE モデルの引張強さが最も低く、実験と同じ傾向を示していることがわかる。この傾向は、β-Sn の異方性ヤング率の有無に関わらず認められたため、初晶 Sn の方位が引張強さに与える影響に異方性ヤング率は関与しないと推定された。そこで、引張試験 FEA における変位増加に伴う初晶 Sn の移動の様子に着目した調査を行った。その結果、45°のモデルでは、初晶 Sn の回転により 0、90°に比べて早い段階で共晶部に大きな変形が生じ、低い応力で変形が進行することが判明した。このことから、初晶 Sn の配置により、微小 SAC はんだの強度が制御可能になることが示唆された。



(a) 高強度試験片



(b) 低強度試験片

図 3 初晶 Sn の方位分布の試験片強度による比較

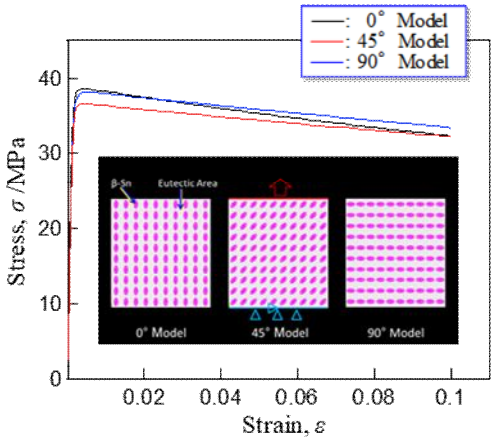


図 4 初晶 Sn の方位が異なる SAC はんだの引張試験 FEA から得た応力-ひずみ曲線

(2) 微小 SAC はんだ中の初晶 Sn の分布形態と疲労強さの関係

図 5 に示す 2 つのヒステリシスループは、ひずみ振幅$\Delta\varepsilon$ =±1%、ひずみ速度 dε /dt = 1.0%/s の条件での微小 SAC はんだ試験片の疲労試験で得たヒステリシスループである。2 つのループは、同一負荷条件によるものでありながら、その応力レベルには大きな差がみられる。すなわち、繰返し負荷でも引張試験と同様に、同一の負荷条件での応力－ひずみ曲線のばらつきがみられる。また、図中の N_f は各ループに対応する疲労寿命で、応力レベルの高いループの疲労寿命は低いループの 1/4 と、疲労寿命にも大きな差がみられる。図 6 は、図 5 を得たひずみ振幅$\Delta\varepsilon$ =±1%、ひずみ速度 dε/dt = 1.0%/s の条件で実施した、5 本の微小 SAC はんだ試験片の疲労試験から得た、ヒステリシスループの応力振幅と疲労寿命の関係である。図 6 から、同一負荷条件でも試験片により応力振幅は異なり、その大きさの小さい方が長寿命となることがわかる。この現象は、すべての負荷条件で認められた。そして、同一負荷条件で応力振幅が小さかった微小 SAC はんだ試験片の破断後の縦断面では、引張試験での低強度試験片と同様に、試験片軸方向に対して 30～40°の傾きをもつ初晶 Sn が多く認められた。すなわち、ある条件での一定ひずみ振幅の引張・圧縮繰

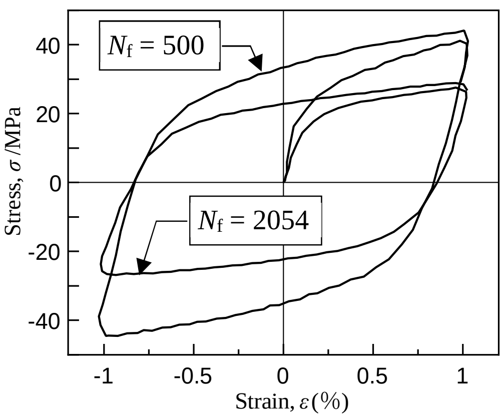


図 5 同一の負荷条件で応力レベルが異なる微小 SAC はんだのヒステリシスループ

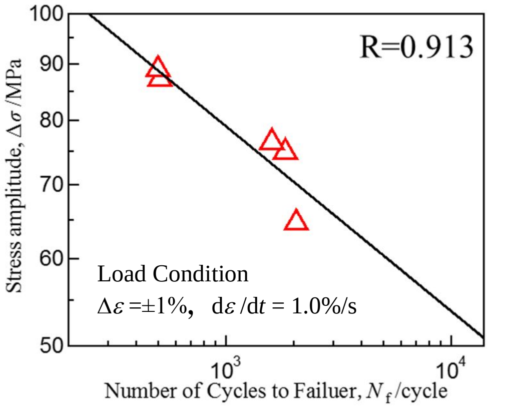


図 6 同一負荷条件での応力振幅と疲労寿命の関係の比較

返し負荷に対する微小 SAC はんだ試験片の耐疲労性は、引張試験で低強度となる試験片の方が高いといえる。

(3) Cu/Sn 系 IMC の変形特性評価法の妥当性検証とその応用

図 7(a)は、せん断試験 FEA に用いた銅－はんだ接合体の FE モデルである。FE モデルのはんだと銅の間には、図 7(b)に示すように IMCs 層を設けてある。図 7(b)に示す各 IMC 層の厚さは、実際のせん断試験用に作製した図 7(a)と同寸法の接合体で、はんだと銅の界面を化学分析して得た値である。既述のように、接合体 FE モデルには、IMCs の変形を弾・塑性モデル（材料非線形有り）で表すものと弾性モデル（材料非線形無し）で表すものの 2 種類を用意した。これらの FE モデルを用いて、図 7(a)の赤線部を固定し、水色線部に強制変位を与えるせん断試験 FEA を、3 種類の変位速度 0.1、1、10 μm/s で実行した。図 8 は、1 μm/s での FEA で、変位が 0.1、0.15、0.2mm に到達した時点での IMCs 層の第 1 主ひずみ分布である。図 8(a)と(b)は、それぞれ、材料非線形性有りと無しでの分布図である。これらから、材料非線形性の有無に関わらず、最大第 1 主ひずみは Cu_6Sn_5 側で生じることがわかる。一方、最大第 1 主ひずみの値は大きく異なり、変位 0.2mm での値は材料非線形性有りの場合は 2.3%であるのに対して無しの場合は 0.17%であり、約 14 倍もの差がある。実験で判明している Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 の破断伸びがいずれも 1.4%程度である[①]ことを考慮すると、このことは、実際のせん断試験で変位 0.2mm を与えると、はんだ接合部の Cu_6Sn_5 層において、IMCs の材料非線形性「有り」の場合はき裂が発生するのに対し、「無し」の場合はき裂が発生しないこと意味する。そこで、すべてのせん断試験 FEA 結果から、3 種類の変位速度 0.1、1、10 μm/s のすべてで材料非線形性「有り」の場合はき裂が生じ、「無し」の場合はき裂が生じない強制変位量を求め、実際にその変位を与えるせん断試験を行った。

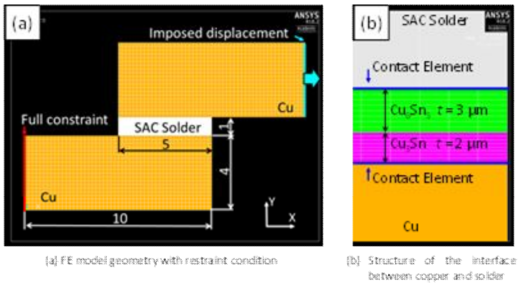


図 7　銅-はんだ接合体 FE モデル

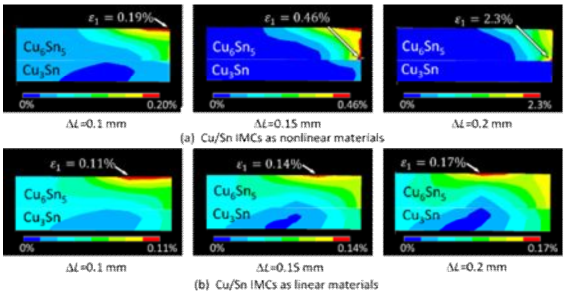


図 8　IMCs 層における第 1 主ひずみ分布

図 9 に、この条件を満たす強制変位量 0.3mm を、変位速度 0.1、1、10 μm/s で与えた接合体試験片の接合部の様子を示す。図 9 から、いずれの変位速度でもき裂が発生していることがわかる。また、その位置は FEA で最大第 1 主ひずみが発生した箇所であった。さらにき裂の発生箇所を化学組成分析した結果、すべて Cu_6Sn_5 部であった。これらの実際のせん断試験で認められた現象を再現した FEA は、Cu/Sn 系 IMCs が材料非線形性を有する場合であった。したがって、Cu/Sn 系 IMCs は材料非線形性を有すると判断される。そして、このことを明らかにした MCS 試験片を用いた Cu/Sn 系 IMC の変形特性評価法は妥当な実験手法といえる。

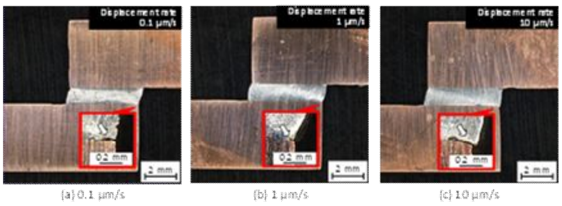


図 9　せん断試験後の銅-はんだ接合体の様子

以上のように、複合材料型の MCS 試験片を用いた Cu/Sn 系 IMC の変形特性評価法は妥当であった。そこで、この方法を応用して、直径 0.5mm の銅線の周囲に Cu_3Sn 層を設けた試験片を作製し、その引張試験を室温と 200°C で実施することで、Cu_3Sn の各温度における引張応力－ひずみ曲線を導出した。その結果を図 10 に示す。図 10 から、Cu_3Sn の引張強さは 200°C になると室温の 50%以下まで低下することがわかる。また、200°C の応力-ひずみ曲線では、ほぼ一定の応力でひずみが増加する領域が認められる。本引張試験は、変位速度一定で実施された試験であることを考慮すると、この現象は定常クリープと同質のものであり、Cu_3Sn は 200°C でクリープ変形する可能性があることを示唆するものである。

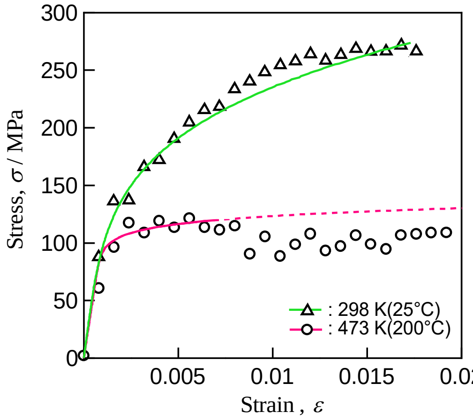


図 10　Cu_3Sn の室温と 200°C の応力-ひずみ曲線

＜引用文献＞
① K. Ohguchi and K. Kurosawa, Journal of Electronic Materials, 45-6 (2016), 3183-3191.
② 黒沢憲吾，大口健一，福地孝平，瀧田敦子，溶接学会論文集, 38-4 (2020), 429-437.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 黒沢憲吾，大口健一，福地孝平，瀧田敦子	４．巻 38
２．論文標題 銅-はんだ接合体のせん断試験FEAによるCu/Sn系IMCsの材料非線形性の評価	５．発行年 2020年
３．雑誌名 溶接学会論文集	６．最初と最後の頁 429～437
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjjws.38.429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 菅絢一郎，大口健一，福地孝平，黒沢憲吾
２．発表標題 微小 SAC はんだ試験片の疲労寿命に対する初晶 Sn の分布形態の影響
３．学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
４．発表年 2020年

１．発表者名 菅絢一郎
２．発表標題 微小 SAC はんだ試験片の疲労寿命に対する初晶 Sn の分布形態の影響
３．学会等名 2020年度塑性加工学会 東北・北海道支部 若手研究発表会
４．発表年 2020年

１．発表者名 菅絢一郎，大口健一，福地孝平，黒沢憲吾
２．発表標題 引張強さにばらつきを示す微小SAC はんだ試験片内部における初晶Sn　の形状と分布形態
３．学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 大口健一，菅絢一郎，福地孝平，黒沢憲吾，瀧田敦子
２．発表標題 微小SACはんだの引張強さに対する初晶Snの形状と分布形態の影響
３．学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
４．発表年 2019年

１．発表者名 黒沢憲吾，大口健一，福地孝平，瀧田敦子
２．発表標題 銅－はんだ接合体のせん断試験FEAによるCu/Sn系IMCsの材料非線形性の検証
３．学会等名 日本機械学会　M&M2018　材料力学カンファレンス
４．発表年 2018年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	福地　孝平 (Fukuchi Kohei) (40707121)	秋田大学・理工学研究科・助教 (11401)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関