

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：84431

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15303

研究課題名(和文) はんだ接合部の接合信頼性に及ぼすはんだのクリープ変形機構と累乗則崩壊応力の影響

研究課題名(英文) Effect of Creep Deformation Mechanisms and Power-law Breakdown Stress on Thermal Fatigue Properties of Solder Joints

研究代表者

濱田 真行 (Hamada, Naoyuki)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任研究員

研究者番号：90736282

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：クリープ変形機構および累乗則崩壊応力がはんだ接合部の熱疲労特性に及ぼす影響について調査した。Sn基二元合金のクリープ変形機構を調査した結果、調査した条件では全て同じクリープ変形機構であった。一方、累乗則崩壊応力は、合金組成により10MPa以上の差があり、熱疲労特性に影響しうることが分かった。はんだ接合部の熱疲労による損傷率を調査し、損傷率と累乗則崩壊応力の関係を解析した結果、累乗則崩壊応力と損傷率の間に負の相関がある合金と相関がない合金に分類された。接合部組織のEBSD解析により、相関の有無は熱疲労時の再結晶挙動の違いに起因していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はんだ接合部の熱疲労特性を向上させるために、固溶型の合金元素を添加した固溶強化型のはんだが検討されている。合金元素の中には、累乗則崩壊応力や耐力などの機械的性質が上昇しても熱疲労特性の向上に寄与しない元素が存在することが本研究で明らかになった。熱疲労特性を改善させるためには、再結晶挙動も考慮した元素選定が必要であり、実用はんだ合金の設計において重要な指針を示した。

研究成果の概要(英文)：The effects of creep deformation mechanisms and power-law breakdown stress on the thermal fatigue properties of solder joints were investigated. In this study, all Sn-based binary alloys exhibited the same creep deformation mechanism. In contrast, the power-law breakdown stress varied by more than 10 MPa depending on the alloy composition and could influence the thermal fatigue properties. Furthermore, the damage rate owing to the thermal fatigue of solder joints was investigated, and the relationship between the damage rate and power-law breakdown stress was analyzed. The alloys were classified into those with a negative or no correlation between the power-law breakdown stress and damage rate. The electron backscatter diffraction analysis of solder joints indicated that the presence or absence of correlation was attributable to the differences in the recrystallization behavior when the alloy was subjected to thermal fatigue.

研究分野：材料工学

キーワード：鉛フリーはんだ クリープ 熱疲労 固溶強化 累乗則崩壊

1. 研究開始当初の背景

電子機器の破損原因として最も多いのは、はんだ接合部の熱疲労破壊である。そのため熱疲労破壊の発生抑制は、電子機器の信頼性上の重要課題となっている。はんだは室温以上でクリープ変形するため、熱応力によるクリープひずみを低減することが、熱疲労破壊の抑制につながる。そこで、はんだ（Sn 合金）に固溶する合金元素を添加した、固溶強化型はんだの開発が積極的に進められている。はんだに固溶する合金元素の添加は、はんだのクリープ変形機構に影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、はんだのクリープ変形機構の違いが熱疲労特性に及ぼす影響は、明らかになっていない。また、はんだのクリープ変形は、応力の累乗に比例してひずみ速度が上昇する累乗則クリープであるが、累乗則が破綻する応力（累乗則崩壊応力）の大小が、熱疲労特性に及ぼす影響も明らかになっていない。クリープ変形機構や累乗則崩壊応力が、はんだ接合部の熱疲労特性に及ぼす影響を明らかにすることにより、これまでにないはんだの設計方針を見出すことができれば、優れた熱疲労特性を有するはんだの開発につながる。

2. 研究の目的

本研究は、はんだのクリープ変形機構および累乗則崩壊応力が、はんだ接合部の熱疲労特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。また、重要な機械的性質である耐力、最大応力、および破断伸びが、熱疲労特性に与える影響についても調査する。

3. 研究の方法

(1) 耐力、最大応力、および破断伸びの測定

Sn および Sn 基二元合金を本研究の調査対象組成とした。合金元素は、実用はんだ合金に添加可能な元素を選定し、添加量は、合金価格および固溶限を考慮して検討した。調査対象とした Sn 基二元合金の組成は、Sn-0.01mass%Au、Sn-0.05mass%Au、Sn-1mass%Bi、Sn-3mass%Bi、Sn-0.2mass%Ga、Sn-0.5mass%Ga、Sn-0.5mass%In、Sn-1mass%In、および Sn-0.2mass%Sb（以下、すべての組成について mass% を省略して表記）の 9 組成とした。

Sn および Sn 基二元合金は、金型鋳造により製造した。99.995%以上の純度を有する Sn を炭素つるば内で溶解し、配合に従って秤量した 99.99%以上の純度を有する合金元素を添加し（Sn は合金元素の添加なし）、鋳造ピレットを製造した。鋳造ピレットは、均質化処理、押出加工、焼鈍後、平行部長さ 12mm、直径 4mm の丸棒試験片に加工した。溶体化処理後、温度 125℃、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で引張試験を実施し、真応力 - 真ひずみ曲線を作成した。作成した真応力 - 真ひずみ曲線より、Sn および Sn 基二元合金の 0.2%耐力および最大応力を求めた。また、破断時の試験片の平行部長さから破断伸びを算出した。

(2) Sn および Sn 基二元合金のクリープ変形機構と累乗則崩壊応力の解析

上記(1)と同様の方法で作製した引張試験片を用いて、温度 125℃、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ から $1.0 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ の範囲で引張試験を実施した。引張試験により得られた最大応力を流動応力と定義した。流動応力とひずみ速度の関係より、Sn および Sn 基二元合金のクリープ変形機構と累乗則崩壊応力を調査した。

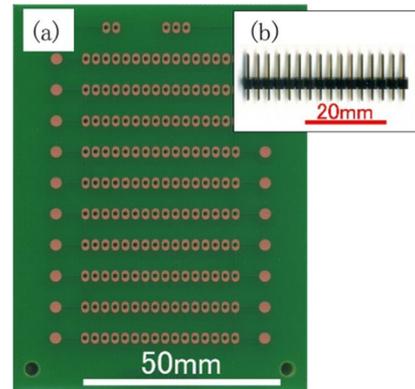


図1 実装基板の製造に用いたプリント基板(a)とコネクタ部品(b)

(3) 損傷率によるはんだ接合部の熱疲労特性の評価

熱衝撃を付与するための実装基板の製造には、図1(a)および(b)に示すプリント基板とコネクタ部品を用いた。はんだ付に用いる系はんだは、上記(1)と同様の方法で製造した鋳造ピレットを直径 0.8mm に押出加工し、製造した。コネクタのはんだ付は、キセノンランプを集光した光ビームを熱源とし、あらかじめ液体フラックスを塗布したプリント基板にはんだを供給してコネクタを接合した。コネクタをはんだ付した実装基板に、低温さらし（0℃、30分）と高温さらし（125℃、30分）を1サイクルとする熱衝撃を3000サイクルまで付与し、500、1500、および3000サイクル付与後のはんだ接合部の外観状態をマイクロスコップで観察し、き裂などの損傷の発生の有無を確認した。接合部における損傷の発生率（損傷率）を調査し、Sn および Sn 基二元合金の熱疲労特性を評価した。

(4) 損傷率と機械的性質の相関解析

機械的性質（累乗則崩壊応力、耐力、最大応力、および破断伸び）と熱衝撃の付与により得られた損傷率との相関を解析した。熱疲労によるはんだ接合部の損傷挙動を調査するために電子後方散乱回折（EBSD: Electron Backscatter Diffraction）による組織観察を実施した。

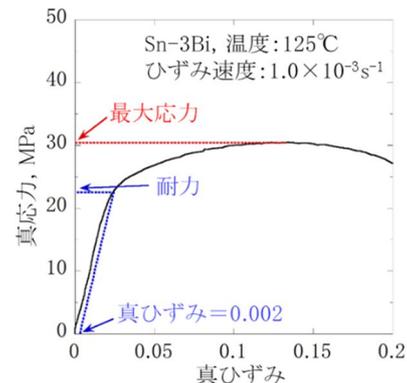


図2 耐力と最大応力

4. 研究成果

(1) 耐力、最大応力、および破断伸びの測定

SnおよびSn基二元合金について、温度125℃、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で引張試験を実施し、真応力-真ひずみ曲線を作成した。図2はSn-3Biの真応力-真ひずみ曲線における耐力と最大応力を示したものである。破断伸び(%)は、破断時の平行部長さ(L)をクロスヘッドの変位量より算出し、初期の平行部長さ($L_0=12\text{mm}$)から、 $100 \times (L - L_0) / L_0$ より算出した。SnおよびSn基二元合金の耐力、最大応力、および破断伸びをまとめたものを表1に示す。

表1 SnおよびSn基二元合金の125℃、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ における最大応力、耐力、および破断伸び

組成	最大応力, MPa	耐力, MPa	破断伸び, %
Sn	6.8	3.4	81
Sn-0.01Au	8.6	4.2	92
Sn-0.05Au	12.7	5.0	85
Sn-1Bi	18.2	10.9	64
Sn-3Bi	30.5	21.8	36
Sn-0.2Ga	17.1	8.8	90
Sn-0.5Ga	26.0	15.9	56
Sn-0.5In	9.1	4.4	79
Sn-1In	10.5	4.8	102
Sn-0.2Sb	7.9	4.4	62

(2) SnおよびSn基二元合金のクリープ変形機構と累乗則崩壊応力の解析

引張試験で得られた最大応力(図2参照)を流動応力と定義した。流動応力を横軸に、ひずみ速度を縦軸にとった両対数グラフから、クリープ変形機構と累乗則崩壊応力を解析した。図3はSnおよびSn-Au合金、図4はSn-Bi合金およびSn-Ga合金、ならびに図5はSn-In合金およびSn-Sb合金の両対数グラフを示す。

図3(a)に示すSnの流動応力とひずみ速度の関係は、傾き(n)が5.6の直線になる。傾き(n)は応力指数と呼ばれ、その値よりクリープ変形機構が判定できる。応力指数が5または7の場合、転位の上昇運動律速のクリープ変形(以下、上昇運動律速のクリープと表記)に分類される。よって、得られた応力指数よりSnは、上昇運動律速のクリープであることが分かった。図3(b)に示すSn-0.01Auも、図3(a)のSnと同様に直線関係を示した。得られた応力指数は6.3で、5と7に近い値であることから上昇運動律速のクリープと判断した。一方、Sn-0.05Auでは、低応力側から高応力側に向かって応力指数が6.3となり上昇運動律速のクリープとなるが、途中より応力指数の上昇が認められた。この応力指数の上昇は累乗則崩壊であり、累乗則崩壊が始まる応力を累乗則崩壊応力と呼ぶ。本研究では、累乗則崩壊が認められる前後の流動応力の算術平均値を累乗則崩壊応力とした。

Sn-Bi合金(図4(a))、Sn-

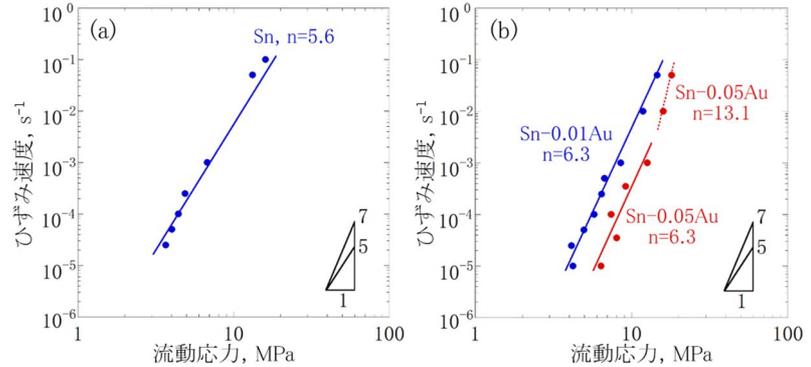


図3 SnおよびSn-Au合金の流動応力とひずみ速度の関係

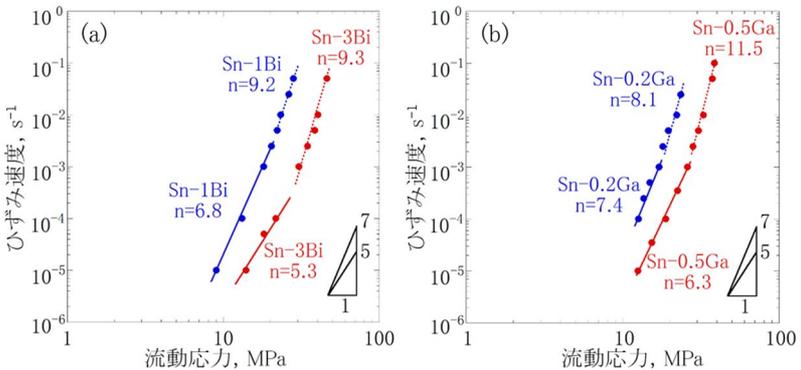


図4 Sn-Bi合金およびSn-Ga合金の流動応力とひずみ速度の関係

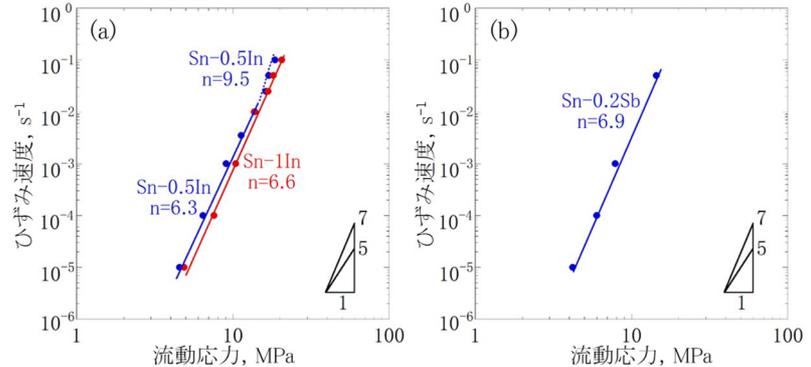


図5 Sn-In合金およびSn-Sb合金の流動応力とひずみ速度の関係

表2 SnおよびSn基二元合金の応力指数と累乗則崩壊応力

組成	応力指数	累乗則崩壊応力, MPa
Sn	5.6	-
Sn-0.01Au	6.3	-
Sn-0.05Au	6.5	14.3
Sn-1Bi	6.8	22.8
Sn-3Bi	5.3	26.2
Sn-0.2Ga	7.4	17.6
Sn-0.5Ga	6.3	27.1
Sn-0.5In	6.3	15.0
Sn-1In	6.6	-
Sn-0.2Sb	7.0	-

Ga 合金 (図 4 (b))、Sn-In 合金 (図 5 (a))、および Sn-Sb 合金 (図 5 (b)) についても 図 3 と同様に応力指数を解析し、累乗則崩壊が認められる合金については、累乗則崩壊応力を求めた。

Sn-Bi 合金、Sn-Ga 合金、Sn-In 合金、および Sn-Sb 合金は、Sn および Sn-Au 合金と同様に上昇運動律速のクリープであった。累乗則崩壊は、表 1 に示す最大応力や耐力が高い組成で認められる傾向があり、Sn-1Bi、Sn-3Bi、Sn-0.2Ga、Sn-0.5Ga、および Sn-0.5In で確認された。図 3 から 図 5 で得られた応力指数と累乗則崩壊応力を表 2 に示す。なお、累乗則崩壊が認められなかった組成については「 - 」を記入している。表 2 より、本研究で対象とした Sn 基二元合金における合金元素の添加量では、クリープ変形機構に影響せず、Sn と同じクリープ変形機構になることが分かった。

(3) 損傷率によるはんだ接合部の熱疲労特性の評価

Sn および Sn 基二元合金の系はんだ (0.8mm) を用いて 図 1 に示すプリント基板にコネクタ部品をはんだ付した実装基板に 3000 サイクルまでの熱衝撃 (0 125 、各 30 分保持) を付与した。熱衝撃の付与により、接合部のはんだに熱応力が繰り返し付与される。その結果、熱疲労によりき裂などの損傷がはんだに生じる。図 6 に、熱疲労による損傷の有無を示す。図 6 (a) は Sn-1Bi で接合した接合部に 500 サイクルの熱衝撃を付与後、損傷がない接合部を撮影したものである。図 6 (b) は、3000 サイクルの熱衝撃を付与したものであるが、図 6 (a) では認められないき裂 (白矢印) が複数観察される。

実装基板上の規定した 32 箇所の接合部に対してき裂などの損傷の発生の有無を調査し、損傷の発生が認められた接合部の割合 (損傷が発生した接合部数 / 32 × 100) を損傷率と定義した。500 サイクル、1500 サイクル、および 3000 サイクルの熱衝撃を付与した後の損傷率をまとめたものを表 3 に示す。

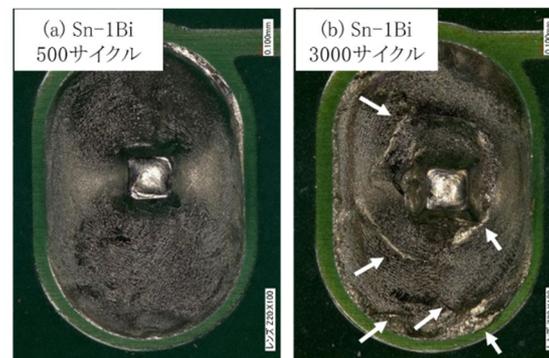


図 6 熱衝撃付与後の外観、損傷なし(a)と損傷あり(b)

表 3 熱衝撃付与後の損傷率

組成	損傷率, %		
	500サイクル	1500サイクル	3000サイクル
Sn	100	100	100
Sn-0.01Au	97	100	100
Sn-0.05Au	97	100	100
Sn-1Bi	91	97	100
Sn-3Bi	81	88	94
Sn-0.2Ga	100	100	100
Sn-0.5Ga	100	100	100
Sn-0.5In	97	100	100
Sn-1In	97	100	100
Sn-0.2Sb	100	100	100

500 サイクルの熱衝撃の付与により、すべての組成において 80% 以上の損傷率を示した。これは、片面に銅箔を施したプリント基板を用いたので、接合部に供給されるはんだ量が少なく、はんだへの負担が大きくなったためと考えられる。1500 サイクルの熱衝撃を付与すると、Sn-Bi 合金以外は損傷率が 100% となった。3000 サイクルでは Sn-1Bi も損傷率が 100% となった。以上の結果より、熱疲労特性を評価した Sn および Sn 基二元合金の中で、最も熱疲労特性に優れるのは Sn-3Bi であることが分かった。

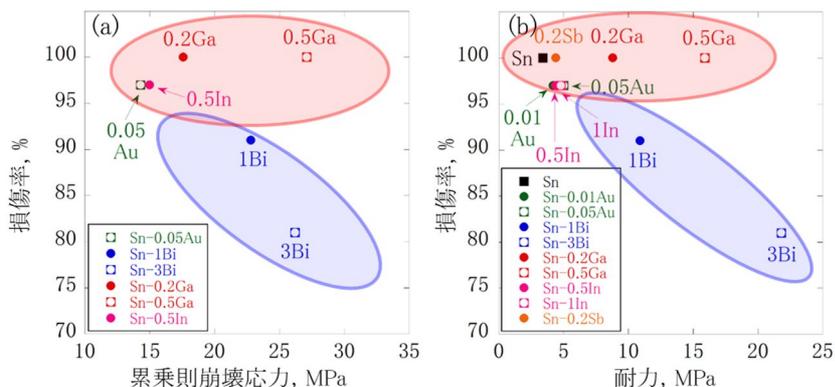


図 7 損傷率と機械的性質の相関関係、累乗則崩壊応力(a)、耐力(b)

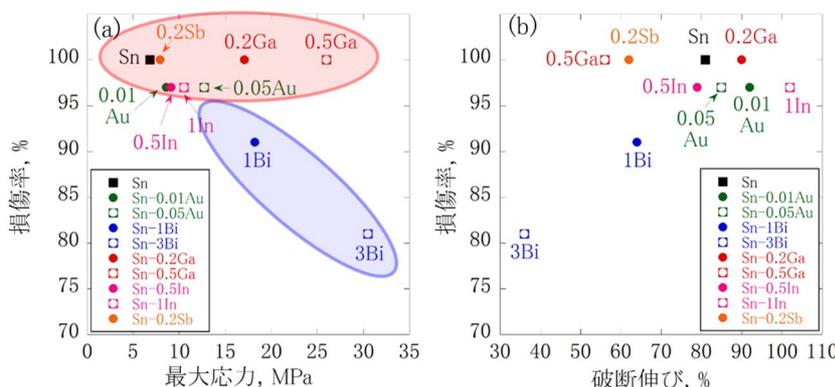


図 8 損傷率と機械的性質の相関関係、最大応力(a)、破断伸び(b)

(4) 損傷率と機械的性質の相関解析

熱衝撃付与による接合部の損傷率とはんだの機械的性質(累乗則崩壊応力、耐力、最大応力、破断伸び)との間に存在する相関関係について解析した。表3に示す損傷率は、1500サイクル以降、多くの組成で100%となることから相関関係を見極めることは難しい。そこで、500サイクルの損傷率を用いて相関関係を調査した。

図7は、縦軸を500サイクルの損傷率として、横軸に累乗則崩壊応力(図7(a))と耐力(図7(b))をとったものである。図7(a)内のSn-Bi合金に注目すると、累乗則崩壊応力が高くなるほど損傷率が低下する。一方、Sn-0.05Au、Sn-0.5In、Sn-0.2Ga、およびSn-0.5Gaに注目すると、累乗則崩壊応力が高くなっても損傷率は高いまま減少しない。すなわち、累乗則崩壊応力の増加に伴う損傷率の低下という相関が認められる組成と累乗則崩壊応力と損傷率の間に相関が認められない組成の2種類に分類される。図7(b)に示す耐力も、累乗則崩壊応力と同様であり、Sn-Bi合金では耐力の増加に伴う損傷率の低下が認められ、その他の組成では、耐力の増加による損傷率の低下は認められなかった。

続いて、損傷率と最大応力の関係を図8(a)に、損傷率と破断伸びの関係を図8(b)に示す。最大応力については、図7(a)、(b)に示す累乗則崩壊応力および耐力と同じ傾向を示すが、破断伸びについては、破断伸びの増加または減少に伴う一定の傾向は認められず相関がないことが分かった。

以上より、損傷率と相関関係がある機械的性質は、2種類のSn-Bi合金における累乗則崩壊応力、耐力、および最大応力であり、Sn-Bi以外の組成では、損傷率と機械的性質の間に相関は認められなかった。

機械的性質の向上に伴う損傷率の低下という相関が認められる組成が限定される要因は、熱衝撃による損傷過程の違いによるものと考えられる。そこで、累乗則崩壊応力、耐力、最大応力は同程度であるが、損傷率で大きな差が出たSn-0.5GaとSn-3Biについて、EBSDによりはんだ接合部の組織観察を実施した。熱衝撃を付与した接合部を切り出し、図9に示す研磨サンプルを製作し、図9内の赤枠で示すフィレット部を観察した。

図10および図11にそれぞれSn-0.5GaおよびSn-3BiのIPF(Inverse Pole Figure)マップを示す。図中の(a)、(b)、および(c)は、それぞれ熱衝撃付与なし、500サイクル付与後、および3000サイクル付与後のIPFマップである。Sn-0.5GaおよびSn-3Biの熱衝撃付与なしでは、複数の粗大な結晶粒が認められた。図10(b)のSn-0.5Gaの500サイクル付与後では、外観検査で損傷が多く認められた箇所付近の破線丸部内で、結晶粒の微細化が認められた。図10(c)の3000サイクル付与後は、微細化の範囲が拡大していた。一方、Sn-3Biでは、500サイクルおよび3000サイクル付与後ともに、Sn-0.5Gaの結果に比べて顕著な結晶粒の微細化は認められなかった。

以上の結果より、再結晶による結晶粒の微細化の有無が、損傷率に影響している可能性が高いと考えられる。よって、固溶強化によりはんだの熱疲労特性を向上させるためには、累乗則崩壊応力、耐力、および最大応力などの機械的特性に加え、再結晶挙動にも注目して元素選定すべきであることが分かった。

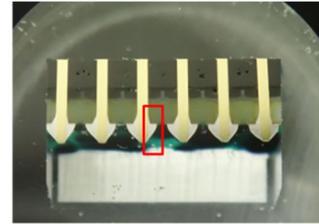


図9 接合部の研磨試料

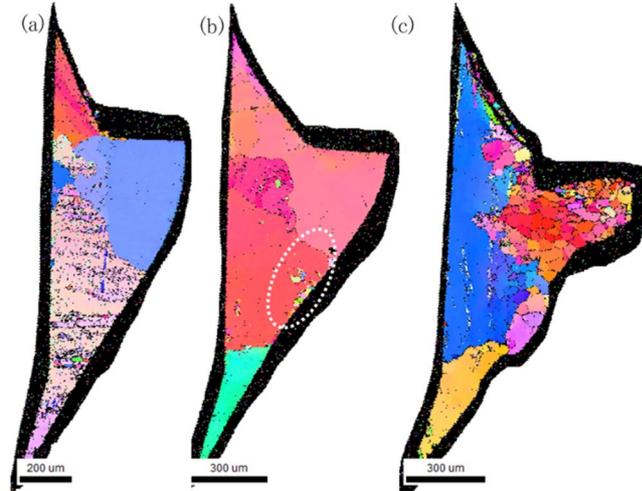


図10 Sn-0.5GaのIPFマップ、熱衝撃付与なし(a)、500サイクル付与後(b)、および3000サイクル付与後(c)

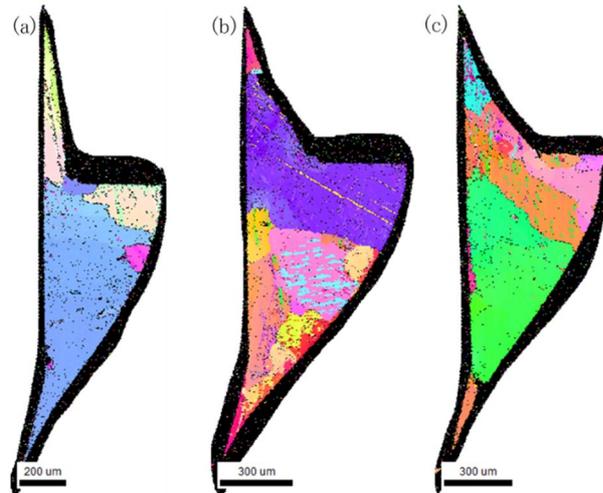


図11 Sn-3BiのIPFマップ、熱衝撃付与なし(a)、500サイクル付与後(b)、および3000サイクル付与後(c)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 濱田真行	4. 巻 27
2. 論文標題 スズの高温引張特性に及ぼすガリウム添加の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第27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論文集	6. 最初と最後の頁 318-319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 濱田真行	4. 巻 28
2. 論文標題 Sn-Ga合金の高温変形挙動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第28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論文集	6. 最初と最後の頁 88-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 濱田真行
2. 発表標題 鉛フリーはんだの耐久性向上を目指して
3. 学会等名 産業技術支援フェア in KANSAI 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱田真行
2. 発表標題 スズの高温引張特性に及ぼすガリウム添加の影響
3. 学会等名 第27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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱田真行
2. 発表標題 はんだ付
3. 学会等名 産創館・大阪産業技術研究所【テクニカルセミナー】
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱田真行
2. 発表標題 Sn-Ga合金の高温変形挙動
3. 学会等名 第28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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱田真行
2. 発表標題 スズの耐クリープ性に及ぼす ガリウム添加の影響
3. 学会等名 第37回電子デバイス実装研究委員会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

○Mate2022優秀論文賞
https://orist.jp/kouhou/kouhyou_jusho_gakui/jyusyou/146371.html

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------