

# 耐熱疲労特性に優れた鉛フリーはんだ合金の開発

Development of Lead-Free Solder Alloy with High Thermal Fatigue Property



石川俊輔 / 研究開発カンパニー 研究開発センター 電子材料開発室  
Shunsuke Ishikawa Electronics Materials Development R&D Center R&D Company

## 1 はじめに

近年の自動車は高機能化が急速に進んでおり、燃費、安全性、快適性および利便性などが大きく向上している。これらの機能はECU (Electronic Control Unit) と呼ばれる車載電子機器により制御されている。従来、ECUは車室内に設置されていたものの、広い車室空間の確保や高機能化によるECU搭載数の増加に伴い、エンジンルーム内やエンジン上に設置されるようになってきた。さらに、電気自動車やハイブリッド車では、モーターなどの機械部分とインバータなどの制御部分を一体化する試み（機電一体）も進められている。ECUをエンジンやモーター周辺に設置することで、ワイヤーハーネスと呼ばれる配線を短くでき、重量減少にもつなげることができる。一方、これまでより高温環境下へ設置されることとなり、ECUには高い温度に対する耐久性が求められる。表1に車内設置場所における電子機器の耐熱温度範囲を示す<sup>1)</sup>。

表1 車内設置場所における電子機器の耐熱温度範囲

	車室内	エンジンルーム	エンジン直載	機電一体
上限温度	80°C	110°C	125°C	150°C
下限温度	-30°C	-30°C	-40°C	-40°C

ECUをはじめとする電子機器には、電子部品を回路基板に接続した電子基板が組み込まれている。これら多数の電子部品と回路基板を一括接合し、電気的な導通を得る材料として“はんだ”が用いられる。はんだはスズ (Sn) を主体とする合金であり、現在は人体に有害な鉛を含まない鉛フリーはんだ合金としてSn-3.0%銀 (Ag)-0.5%銅 (Cu) (以下、SAC305) が広く使用されている。しかし、エンジンやモーター周辺のような厳しい温度変化のある環境下においては、十分な接合信頼性を確保することができない。そこで当社では、保有する合金設計技術を活用し、機電一体化製品にも適用可能な温度変化環境 (-40°C~150°C) でも優れた耐熱疲労特性を有する鉛フリーはんだ合金を開発した。本稿では、はんだ合金の耐熱疲労特性の改善へ向けた検討内容と、新たに開発した合金の接合信頼性について報告する。

## 2 熱疲労によるはんだ接合部の破壊

熱疲労によりはんだ接合部が破壊するメカニズムについて、代表的な電子部品であるチップ抵抗を例に説明する。接合部外観と断面の模式図を図1に示す。セラミック基板上に抵抗体および電極を形成させたチップ抵抗と、ガラス繊維にエポキシ樹脂をしみ込ませた材質の回路基板(以下、ガラエポ基板)とは熱膨張係数が大きく異なる。チップ抵抗が接合された回路基板が低温および高温環境に晒されると、回路基板に比べてチップ抵抗は伸縮しにくいいため、回路基板とチップ抵抗の間にズレが発生する。このズレがせん断応力としてはんだ接合部に加わり、その応力にはんだが耐えられないとクラックが発生する。冷熱サイクル試験(低温から高温の温度変化を繰り返し加える環境試験)を施し、破断したはんだ接合部の断面を図2に示す。チップ抵抗と基板間のはんだ接合部にクラックが発生、せん断応力が繰り返し加わることでクラックが成長し破断に至る。そして、高温環境下でチップ抵抗サイズが大きいほど熱膨張差は拡大するため、はんだ接合部の破壊=故障を引き起こす危険性は増大する。

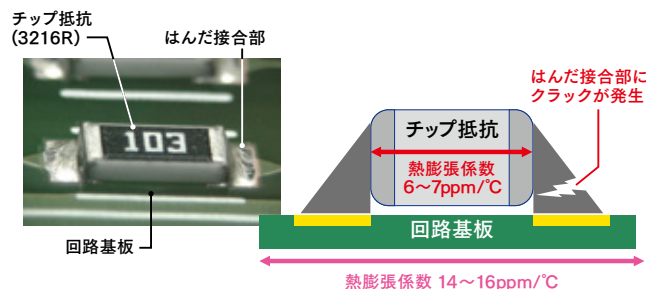


図1 チップ抵抗のはんだ接合部外観と断面の模式図

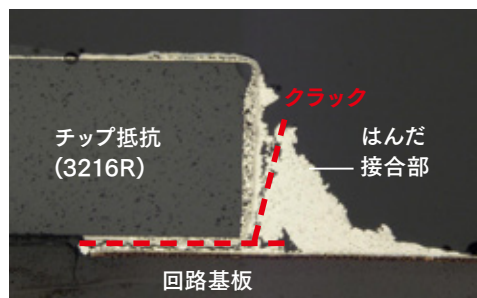


図2 冷熱サイクル試験後のはんだ接合部断面

## 耐熱疲労特性に優れたはんだ合金の開発

### 3-1. はんだ合金の強化手法

前項のはんだ接合部が破壊するメカニズムより、接合部の強度が冷熱サイクルで生じる応力よりも十分に大きいとクラックは発生せず、もしクラックが発生した場合でもその進展を抑制できれば破断には至らないと考えられる。そこで、**図3**に示す固溶強化と析出・分散強化という手法を組み合わせてはんだ合金の強化を試みた。

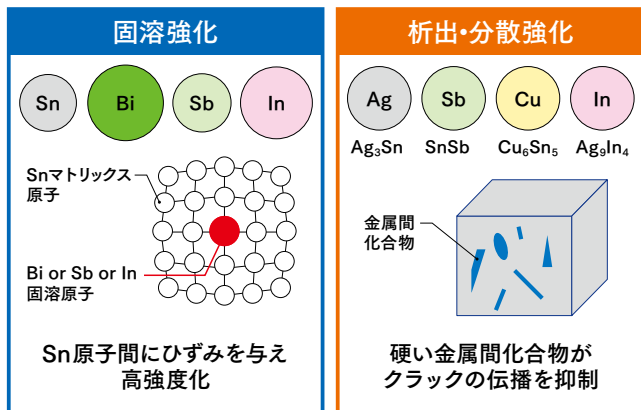


図3 はんだ合金の強化手法

固溶強化とは、元の金属に他の金属などの元素を混ぜることで金属自体を強くする手法である。Snに固溶できる別元素を加えると、原子配列に大きさの異なる別元素が入り込む。規則的なSnの配列にひずみが生じ、Sn全体の強度が上昇する。

析出・分散強化とは、金属中に微細な硬い結晶を析出させることで強度を向上する手法である。はんだ合金では、硬い性質を持つ金属間化合物を析出させるのが有効である。クラックの進展経路上に硬い金属間化合物が存在することで、クラックの伝播を抑制し大きな破壊につながることを防止する。

はんだ合金の強化に用いられる添加金属には、Snに固溶もしくは金属間化合物を形成するビスマス (Bi)、インジウム (In) およびアンチモン (Sb) が考えられる。Inを含有するはんだ合金は低融点かつ耐熱疲労特性に優れるが、Inは高価な金属であり透明電極（酸化インジウムスズ）の原料でもあることからコストおよび供給面で課題がある。そこで当社では、SAC305にBiおよびSbを添加した合金を作製し、その合金物性に与える影響と耐熱疲労特性について調査を行った。

### 3-2. はんだ合金の作製

**表2**に作製したはんだ合金の金属組成を示す。SAC305にニッケル (Ni) を一定量a (0.01~0.1 mass%) とコバルト (Co) を一定量b (0.001~0.01 mass%) 含有させた合金をベースとし、Biを4.0~4.8%、Sbを1.0~4.0%添加した。

表2 はんだ合金の金属組成

No.	合金組成 (mass%)						
	Sn	Ag	Cu	Ni	Co	Bi	Sb
SAC305	Bal.	3.0	0.5	-	-	-	-
1	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.0	1.0
2	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.0	2.5
3	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.0	3.5
4	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.8	2.5
5	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.8	3.5
6	Bal.	3.0	0.5	a	b	4.8	4.0

a: 0.01~0.1 mass%内の一定量 b: 0.001~0.01 mass%内の一定量

### 3-3. 合金物性の評価結果

合金物性は引張試験により評価を行った。JIS4号（全体185mm×Φ20mm）の試験サンプルを作製し、オートグラフを用いて引張速度10mm/minの条件で引張強さと破断伸びを計測した。

**図4**にBiおよびSb含有量と引張強さの関係を示す。BiおよびSb添加量の増大に伴い引張強さは増加した。この結果はBi、Sb共にSnへの固溶および析出・分散強化により強度が向上していることを示しており、はんだ接合部のクラック抑制効果が期待できる。

**図5**にBiおよびSb含有量と破断伸びの関係を示す。Bi添加量の増大に伴い破断伸びは減少した。一般的に、金属は引張強さが増加すると破断伸びは減少する。破断伸びの減少は金属が脆くなっていることを示唆しており、耐衝撃性の低下に懸念が生じる。一方、Biと異なりSbからは、添加量の増大に伴い破断伸びの増加が認められた。BiとSbを併用することで、強度を向上させつつ破断伸びの低下を緩和させることが可能となる。

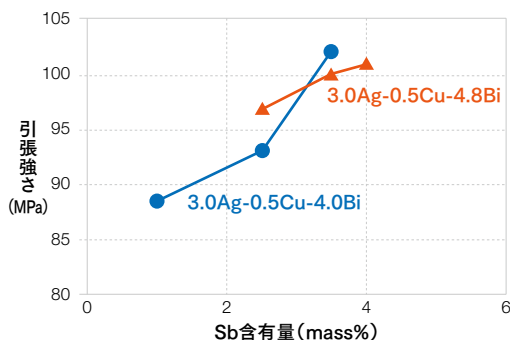


図4 BiおよびSb含有量と引張強さの関係

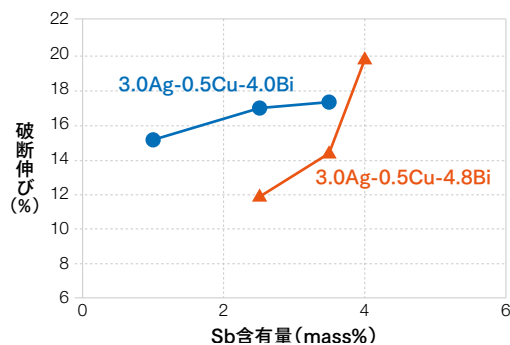
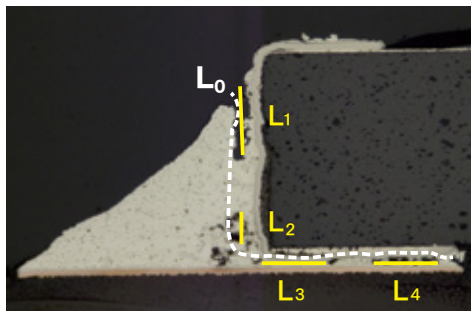


図5 BiおよびSb含有量と破断伸びの関係



- ①完全破断までの亀裂の進展経路を予測  
----- 点線 (L<sub>0</sub>)
- ②実際の亀裂長さを計測  
—— 実線 (L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, …)
- ③クラック進展率 (%)  
= 100 × (L<sub>1</sub> + L<sub>2</sub> + L<sub>3</sub> + …) / L<sub>0</sub>

図6 クラック進展率の計測方法

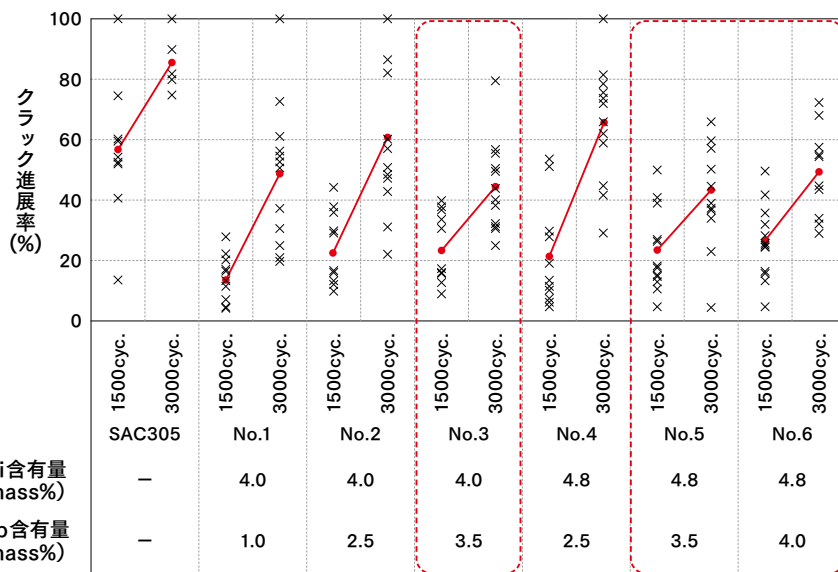


図7 SAC305と合金No.1～6の1,500および3,000サイクル後のクラック進展率

### 3-4. 耐熱疲労特性の評価結果 (-40°C⇔125°C)

冷熱サイクル後のクラック進展率を測定することにより、耐熱疲労特性の評価を行った。試験基板は、ガラエポ基板 (FR-4) 上に3216チップコンデンサ (3.2mm×1.6mm) を実装することで作製した。冷熱サイクル条件は-40°C⇔125°C各30分間を3,000サイクルまでとした。冷熱サイクル1,500および3,000サイクル経過後の試験基板について、はんだ接合部の断面観察よりクラック進展率を計測した。クラック進展率の計測方法を図6に示す。

図7にSAC305と合金No.1～6の1,500および3,000サイクル後のクラック進展率を示す。1,500サイクル後のクラック進展率より、SAC305からは完全破断 (クラック進展率100%) の発生が認められた。一方、合金No.1～6は最高でも進展率は60%以下であり、BiおよびSbの添加によるクラックの抑制効果が確認された。合金No.1～6の1,500サイクル後におけるクラック進展率の平均値に大差はないものの、3,000サイクル後ではSb含有量が少ない合金No.1、2、4でクラックが大きく進展する傾向が認められた。Bi添加による強度だけでなく、Sb添加による伸びの向上もクラック抑制に寄与していることが明らかとなった。ECUに求められる耐久性は年々高くなり、2022年以降では-40°C～125°Cの環境下で最大20年の保証期間が必要とされる<sup>1)</sup>。冷熱3,000サイクルが20年の保証期間を網羅すると仮定し、クラック進展率の最大値が90%未満のものを合格、90%以上のものを不合格として、はんだ合金の良否を判定した。合金No.3とNo.5、6が基準を満足していることから、Bi含有量4～4.8%かつSb含有量3.5～4%の範囲において、良好な耐熱疲労特性を保持することを発見した。

### 3-5. 合金組成の決定

最小限の金属添加量で接合信頼性が良好な合金No.3をベースに微調整を加え、最終的な合金組成をSn-3.2%Ag-

0.5%Cu-4.0%Bi-3.5%Sb-Ni-Co (以下合金48) とした。開発したはんだ合金の性能を表3に示す。融点の上昇はSAC305に比べて5°C以下に抑制されており、従来の製造設備と電子部品をそのまま使用することができる。強度は95MPaとSAC305に比べて2倍以上の高強度化を実現している。

表3 開発した合金の性能

	合金48	SAC305
組成	Sn-3.2Ag-0.5Cu-4.0Bi-3.5Sb-Ni-Co	Sn-3.0Ag-0.5Cu
融点	223°C	219°C
<b>強度</b>	<b>95MPa</b>	<b>42MPa</b>
0.2%耐力	65MPa	32MPa
伸び	20.4%	33.7%
ヤング率	51Gpa	52Gpa
線膨張係数 ※25°C～100°C	21.1ppm	24.2ppm

## 4

### 耐熱温度範囲の拡大

#### 4-1. 機電一体化製品への適用

前項にて、合金48は-40°C～125°Cの環境下で最大20年の保証期間を満足することを示した。一方で、さらに厳しい条件として、より高い温度やサイズの大きいIC部品での接合信頼性はどうか関心が持たれる。これらが良好であれば、適用可能な製品や用途は大きく拡大する。そこで、機電一体化に適用可能とされる-40°C⇔150°C条件下で冷熱サイクル試験を実施した。



#### 4-2. 耐熱疲労特性の評価結果 (-40°C⇔150°C)

試験基板は、ガラエポ基板 (FR-5相当) 上に3216チップ抵抗 (高耐久仕様、3.2mm×1.6mm)、Quad Flat Non-leaded package(以下QFN、7.2mm×7.2mm)およびLand Grid Array(以下LGA、12mm×12mm) を実装することで作製した。図8に使用したIC 部品の接合部外観を示す。QFNは接合部に応力が集中しやすい形状であること、LGAは接合部のはんだ量が少ないことより、特に接合信頼性が懸念される部品である。冷熱サイクル条件は-40°C⇔150°C各30分間を3,000サイクルまでとした。冷熱サイクル1,000から3,000サイクル経過後の試験基板について、はんだ接合部の断面観察よりクラック進展率を計測した。

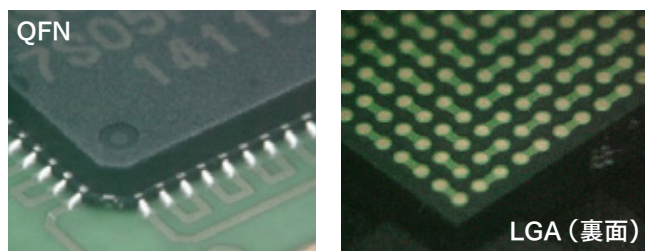


図8 IC部品の接合部外観

図9に、合金48の3,000サイクル後までのクラック進展率 (平均値) の変化を示す。サイクル数の増加に伴いクラック進展率も増加する。しかし、3,000サイクル後のクラック進展率より、いずれの部品においても進展率は平均65%以下であり完全破断 (クラック進展率100%) の発生も認められなかった。特にLGAにてクラック進展が大きく抑制されている。同形状のBall Grid ArrayやChip Size Package等の部品底面に格子状に電極が配置されたIC部品における高い信頼性は、合金48の持つ特徴の1つとなっている。その強度に加え、NiおよびCo添加による接合部界面の改質効果が影響していると考えられる。

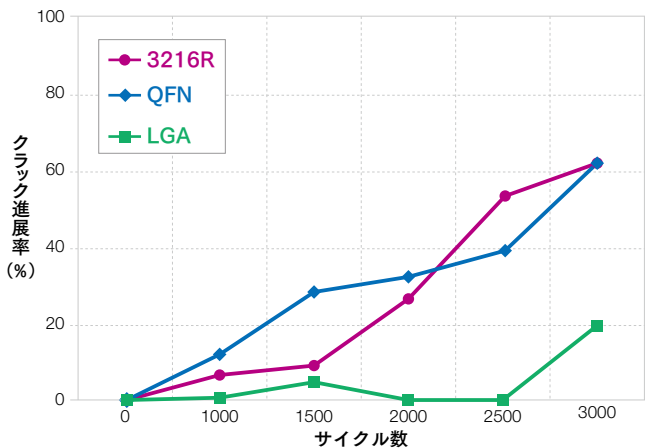


図9 異なる部品でのクラック進展率の変化

#### 4-3. 接合部断面の結晶方位解析

3,000サイクル後もはんだ接合部が保持されていること

を裏付けるため、断面を電子線後方散乱回折法 (以下EBSD) により観察した。SAC305と合金48について、初期と3,000サイクル後における3216チップ抵抗接合部断面のEBSD解析結果を図10に示す。初期は接合部全体が同じ色であり、Snの結晶が同じ方向を向いている=単一であることを示している。冷熱サイクルを施すことにより、SAC305は色の異なる範囲がたくさん出現し、黒い部分はクラックでありほぼ破断している。色の変化は、繰り返し応力によりはんだ接合部が変形し、Snの結晶がバラバラになった状態を表している。合金48は、はんだ表面や部品下部は変色しているものの中心部分は変色しておらず、繰り返し応力に対し変形せずに初期の状態を維持している。この結果より、合金48は機電一体化製品に対応する厳しい温度条件下においても、良好な耐熱疲労特性を持つことが示唆された。高温環境下で使用される車載用途に加え、LEDや高電圧・大電流で使用されるパワーデバイス等の発熱部品への適用も期待できる。

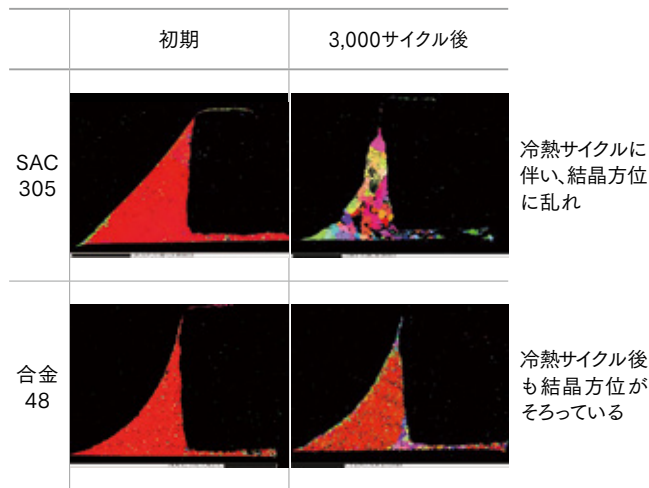


図10 接合部断面の結晶方位解析結果 (EBSD)

## 5

### おわりに

本稿にて紹介した“合金48”は、ソルダペーストの形態で商品名「PS48BR-600-LSP1」(残渣亀裂防止)、「PS48BR-600-HDS-1」(大気リフロー対応)として販売している。現在、国内車載メーカー様への採用が決まりつつあり、海外への展開も進めている。近年、持続可能でよりよい社会の実現を目指すSDGs (Sustainable Development Goals) や温室効果ガスの排出ゼロを目指すカーボンニュートラルが注目されている。その中で、当社の鉛フリーソルダペーストは接合部の信頼性を向上させ、部品の小型化・軽量化により、環境負荷物質や自動車の温室効果ガスの削減に貢献できる商品である。今後もエネルギーや環境問題に配慮した商品を提供できるよう鋭意努力していく。

<参考文献>

1) 「2019年度版実装技術ロードマップ」電子情報技術産業協会、pp.219-224、2019