

# 合金強化設計による車載用・長寿命鉛フリーはんだの開発

Development of High-Reliability Lead-Free Solder by Design of Strengthened Alloys for Automotive Devices

北 浦 秀 敏  
Hidetoshi Kitaura

日 根 清 裕  
Kiyohiro Hine

中 村 太 一  
Taichi Nakamura

森 将 人  
Masato Mori

酒 谷 茂 昭  
Shigeaki Sakatani

日 高 将 人  
Masahito Hidaka

## 要 旨

自動車のエンジン補機類を制御するための電子機器を車室内からエンジンルーム内に搭載することで、配線類が削減され軽量化が可能である。しかし、一般的なSnAgCuの鉛フリーはんだ合金は、エンジンルーム内の高温環境下で信頼性を確保することが困難であった。この課題を解決するために、はんだ合金のSn結晶格子中にInを置換することで、強度が向上する固溶強化に着目し合金設計を行った。その結果、車載の信頼性基準であるヒートサイクル試験-40/150℃、1000サイクル後においても、はんだ接合部にクラックの発生を抑制可能なはんだ合金を開発した。

## Abstract

Reductions of wire harnesses resulting in reduced vehicle weight can be achieved by moving electronic devices that are used by the operating system to control engine accessories from the car interior to the engine room. However, it has been difficult for universally-adopted lead-free SnAgCu solder alloy to assure the reliability of junctions under high-temperature environments such as the engine room. We noticed improved strength from strengthening of solid solution by displacement reaction in which Sn crystal was displaced by In, and designed a solder alloy system. As a result, we developed a new solder alloy that can satisfy in-vehicle reliability in heat-cycle testing of -40 C/150 C (1000 cycles).

## 1. はじめに

現在、使用されている家電や業務用のエレクトロニクス機器は、多くの電子部品を基板に実装した実装基板を用いて構成されている。これらの実装基板に実装された電子部品は、基板との電気的な導通を確保するために、はんだ材料によって接合されている。

一方、2000年以降RoHS (Restriction of the use of the certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) 指令やELV (End of Life Vehicles directive) 指令による環境規制が強まり、鉛の使用が制限されたことから、電子機器に用いられる鉛フリーはんだの開発・導入が加速している。現在エレクトロニクス業界では、電子情報技術産業協会が推奨するSn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu (以下、SACと記す) 合金を広く使用している。

しかし、車載向けの電子機器や太陽電池のような使用環境の温度変化が激しく、長期の接合信頼性が必要とされる製品において、SACはんだ合金では接合信頼性が十分に確保できないために、現在も鉛はんだが用いられている。

特に、自動車でも最も高温となるエンジンルーム内のような、125℃を超える過酷な環境で使用できる優れた耐熱疲労を有する鉛フリーはんだ合金は実用化されていない。

そのため、自動車の燃費向上に効果的なハイブリット車が急速に普及し、自動車の電装化が進んでいる[1]にもかかわらず、エンジンルーム内で使用される電子機器は限定されている。現在は、電子部品を実装した制御基板は車室内に設置し、ハーネスを使用して配線を行い、エンジンルーム内での接合は溶接やコネクタを使用している。

また、一部エンジンルーム内で使用されている電子機器については、水冷機器を使用するなどの耐熱対策が施されている。このように、ハーネスや水冷機器を用いることで、自動車の重量が増加するため、燃費の悪化を招くという問題点がある。

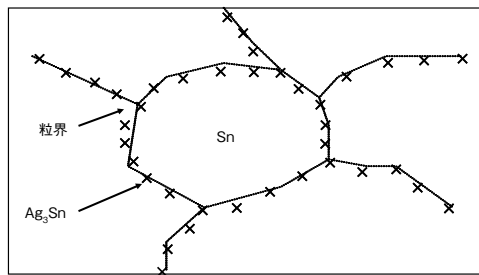
本稿では、自動車のエンジンルーム内のような125℃以上の使用環境においても、車載基準の信頼性を確保する鉛フリーはんだ合金の開発について報告する。

## 2. SACはんだ合金の問題点と開発コンセプト

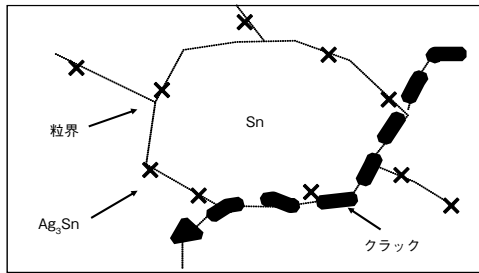
### 2.1 SACはんだ合金の問題点

現在、多くの電子機器で使用されているSACはんだ合金は、第1図 (a) に示すように、Agを添加しSnの粒界に微細なAg<sub>3</sub>Sn粒子を分散させる分散強化により、Ag<sub>3</sub>Snが障害物となり、クラックの進展を防止している。

しかし、熱応力によって金属元素の拡散移動が加速さ



(a) SAC分散強化の模式図  
(a) Schematic diagram of dispersion strengthened SAC



(b) クラック進展の模式図  
(b) Schematic diagram of crack propagation

第1図 SAC組織の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of SAC structure

れ、SACはんだ合金中のSn相の粒成長が起こる。Sn相が粒成長を起こすことで、 $Ag_3Sn$ も拡散移動を起こし、第1図 (b) に示すように $Ag_3Sn$ が粗大化するため、分散強化の効果が低下する。この状態で、熱応力が集中する箇所を起点としたクラックが発生すると、Snの粒界をクラックが進展し接合部の破断に至る。

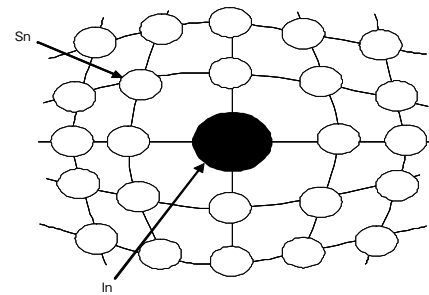
## 2.2 材料設計コンセプト

筆者らはこれまで、はんだ合金の強度向上のために、第2図に示すような、SnにInを固溶させる固溶強化によって、高強度かつ低融点であるSn-3.5wt%Ag-0.5wt%Bi-8wt%In (SAB8I)を開発し実用化した[2][3]。

Sn系はんだ合金へ、数%の量を固溶可能な元素としては、InのほかにSbがある。しかし、Sbは毒性が懸念されることや、Sn系はんだ合金にSbを固溶させることによって、はんだ合金の融点が250℃付近に上昇するため、実装部品の耐熱温度が問題となる。そこで、本研究では、固溶強化を発現する元素としてInに着目し、はんだ合金の開発を行った。

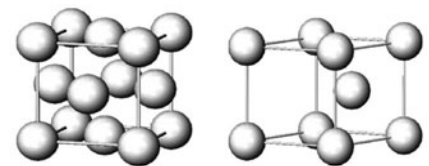
この固溶強化とは、Snの結晶格子の一部をInにより置換させることで、第2図に示すように、結晶格子に歪(ひずみ)を発生させ、結晶中の転位の移動に必要なエネルギーを増加させる金属組織強化の機構である。

しかし、SAB8Iは125℃以上の温度で相変態により、第3図 (a) に示す $\beta$ -Sn(面心正方晶)から第3図 (b) の $\gamma$ -Sn(最密六方晶)へと結晶構造が変化し体積変化を起



第2図 固溶強化の模式図

Fig. 2 Schematic diagram of solute effect



(a)  $\beta$ -Snの結晶構造  
(a) Crystal architecture of  $\beta$ -Sn  
(b)  $\gamma$ -Snの結晶構造  
(b) Crystal architecture of  $\gamma$ -Sn

第3図 結晶構造の模式図

Fig. 3 Schematic diagram of crystal structure

こす。この体積変化により、はんだ合金が変形するため、エンジンルーム内のような高温環境下での使用は困難であった。

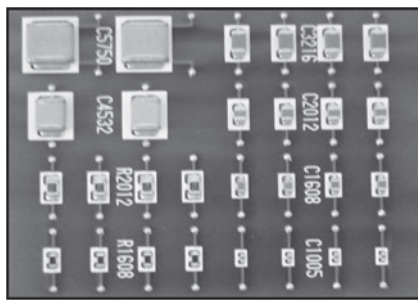
そこで、Inによる固溶強化を発現しつつ、高温環境下では、発生した熱応力を相変態による体積変化で吸収可能な合金設計を行った。熱応力を相変態の体積変化により吸収させることで、元素の拡散移動が低減され、 $Ag_3Sn$ の粗大化が抑制される。このように $Ag_3Sn$ による分散強化と、Inによる固溶強化の金属組織強化を併せもつことで、エンジンルーム内のような高温環境下でも使用可能なはんだ合金となると考えた。

## 3. 特性評価

### 3.1 試料作製

今回評価に用いたはんだ合金としては、Sn-3.5wt%Ag-0.5wt%Bi-Xwt%In, X=4, 6, 8 (以下、それぞれSAB4I, SAB6I, SAB8I)と、SACを用いた。本研究で用いたTEG (Test Element Group) 基板の外観写真を、第4図に示す。

基板は、高耐熱基材であるFR-5相当の1.2 mm厚の両面銅張基板を使用した。部品は1005サイズから5750サイズまでのSn電極部品のコンデンサチップ部品と1608, 2012サイズのSn電極部品の抵抗チップ部品を評価部材として用いた。基板への部品の実装は、上記はんだ合金をフラックスと混合し、ペースト状にしたものを基板へ



第4図 TEG基板の外観写真  
Fig. 4 TEG image of circuit board

印刷し、印刷後の基板に部品をマウントした後に、リフロー炉を用いて実装を行った。

### 3.2 評価方法

エンジンルーム内での使用環境を想定した、はんだ接合部の接合信頼性を評価するため、温度サイクル条件  $-40^{\circ}\text{C} / 150^{\circ}\text{C}$  (各30分) の試験槽に投入した。

その後、1000サイクル後のサンプルをSEM (Scanning Electron Microscope) による断面観察と、断面観察からクラックの進展率を求めた。クラックの進展率の算出方法は、部品電極の中央断面部で、接合長さに対する進展率10%以上に到達したものをクラックと判定した。

## 4. 実験結果

温度サイクル試験を行った結果、第5図 (a) に示すようにSACを用いたサンプルは、1000サイクルで断線に至るほど、クラックが進展していた。

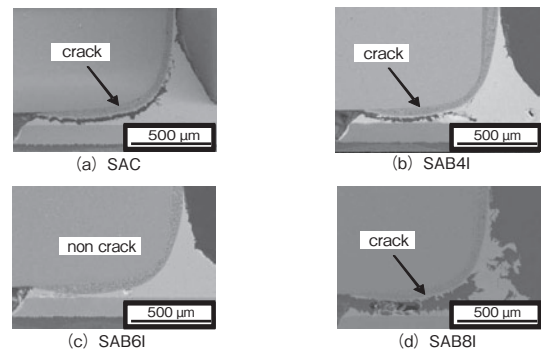
次にSAB4Iを用いたサンプルは、第5図 (b) に示すように、SACと比較してクラックの進展の長さが減少していることがわかる。さらに、SAB6Iを用いた基板では、第5図 (c) に示すように、はんだ接合部にクラックが発生していないことが確認できた。

一方、第5図 (d) に示すように、SAB8Iを用いたサンプルは、ほかのサンプルと比較してはんだのフィレット形状が大きく変化し、クラックの長さは、SACと同レベルであった。

次に、はんだ合金の信頼性を確認するため、クラックの進展率を求めた結果を、第1表に示す。

SACを用いた基板では、評価した部品の中で最もサイズが小さい1005サイズのコンデンサチップ部品以外すべてに、はんだ接合部にクラックが発生していた。

また、SAB4I、SAB8Iを用いた基板では3216サイズ以上のコンデンサと2012サイズの抵抗チップ部品で、はん



第5図 ヒートサイクル1000サイクル後のはんだ接合部SEM写真 ( $-40^{\circ}\text{C} / 150^{\circ}\text{C}$ )  
Fig. 5 SEM images of cross section of solder joint after heat-cycle test 1000 cycles ( $-40^{\circ}\text{C} / 150^{\circ}\text{C}$ )

第1表 ヒートサイクル1000サイクル後のはんだ接合部のクラック発生状況  
Table 1 Solder crack check by cross section analysis after heat-cycle test 1000 cycles

	コンデンサ						抵抗	
	1005	1608	2012	3216	4532	5750	1608	2012
SAC	○	×	×	×	×	×	×	×
SAB4I	○	○	○	×	×	×	○	×
SAB6I	○	○	○	○	○	○	○	○
SAB8I	○	○	○	×	×	×	○	×

クラック有 ○  
クラック無 ×

だ接合部にクラックの発生が見られた。

一方、SAB6Iを用いた基板では、1000サイクル後もはんだ接合部にクラックが発生していなかった。以上の結果より、SAB6Iが耐熱疲労特性に優れたはんだ合金であることがわかった。

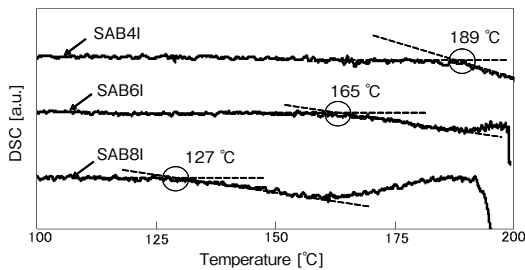
## 5. 考察

### 5.1 相変態挙動について

今回検討したSn-Ag-Bi-In系はんだ合金の特徴は、SACと比較して高強度で低融点であるが、高温環境下で第5図 (d) のSAB8Iの断面写真で示したように、Inを含有したはんだ合金特有の相変態を起こす[4]。

そこでSn-Ag-Bi-In系はんだ合金の変態挙動を定量的に把握するため、DSC (Differential Scanning Calorimetry : 示差走査熱量計) による測定を行った。測定サンプルは、SAB4I、SAB6I、SAB8Iを用いて実装されたチップ部品のはんだフィレットからサンプリングした。

第6図のDSCの結果に示すように、SAB4Iを用いた基板からサンプリングした試料では、 $189^{\circ}\text{C}$ で微弱な吸熱反応ピークの立ち上がりが見られた。SAB6Iの場合は $165^{\circ}\text{C}$ 、SAB8Iの場合は $127^{\circ}\text{C}$ でSAB4I同様の微弱な吸



第6図 はんだ接合部の相変態と温度の関係  
Fig. 6 Comparison of phase transformation temperature of solder joints

熱ピークの立ち上がりを確認した。

この結果より、Inの添加量が増加するにつれて、相変態温度が低温化するため、SAB8Iでは127°Cで相変態による体積変化が起これ、はんだ合金が脆弱化するため、クラックの発生に至ったと考えられる。

一方、150°C以上でピークが立ち上がるSAB6I、SAB4Iの場合は大きな変形が生じなかった。これはβ-Snからγ-Snへの相変態量が減少したと考えられる。

今回開発したSAB6Iは、Inの添加による固溶強化と、γ-Snへの相変態により元素の拡散移動を抑制する効果を発現できるはんだ合金であると考えられる。

## 5.2 SAB6Iの合金物性

次に、高い信頼性が得られたSAB6Iについて、引っ張り試験により、-40°C、室温(23°C)、150°Cでの強度を把握し、SAB6Iの高信頼性のメカニズムを考察した。

第2表に、SACとSAB6Iの引張強度、0.2%耐力および破断伸びのデータを示すように、どの温度条件においてもSAB6Iの引っ張り強度、0.2%耐力はSACと比較して優れており、高強度で塑性変形しにくい合金であることがわかる。これは、Inの固溶強化により、結晶格子に歪が生じることで、結晶中の転位の移動に必要なエネルギーが増加し、塑性変形が抑制されるため、引張強度および0.2%耐力が大きくなったと考えられる。

一方、-40°Cおよび室温の各温度において、SAB6IはSACと比較して破断伸びが小さくなっていった。これは引張強度および0.2%耐力の場合と同様に、Inの固溶強化によるものと考えられる。

しかし、150°Cの高温条件では、SAB6Iは0.2%耐力および引張強度がSACよりも高いにもかかわらず、破断伸びも優れていた。このことはInの固溶強化による挙動と異なる。

SAB6Iの150°Cでの引張試験後のサンプルは、第7図に示すように、破断部の絞りが94.3%と大きく、破断部近傍の伸びが非常に大きいことがわかる。この結果は、室

第2表 SAC, SAB6Iの合金物性

Table 2 Alloy physicality of SAC and SAB6I

	引っ張り強度 [MPa]		0.2%耐力 [MPa]		破断伸び [%]	
	SAB6I	SAC	SAB6I	SAC	SAB6I	SAC
-40°C	98.4	54.2	75.0	39.6	27.3	49.3
室温	60.7	33.1	57.2	28.9	27.3	46.2
150°C	18.9	15.4	17.6	14.7	58.0	35.8

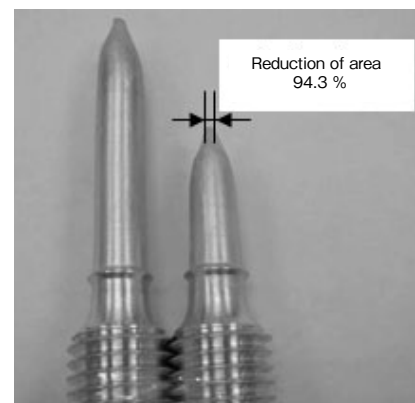
温や-40°CにおけるInの固溶強化による挙動と異なる。

Sn-Bi-Cu系などはんだ合金において、初期の長さに対して高温での引っ張りにより、倍以上に伸びる超塑性挙動を示すことが報告されている[5]。Sn-Bi-Cu系はんだ合金の粒界すべりが発生するメカニズムは、Sn相にBiが固溶し、高強度・低延性化することによって、Sn相周囲のSn-Bi共晶組織はSn相よりも高延性を有しており、この延性の差に起因すると考えられている[5]。SAB6IのSn相もSn-Bi-Cu系と同様に、Inの固溶により高強度・低延性化している。そのため、SAB6Iではβ-Sn相とその周辺のβ-Sn/Ag<sub>3</sub>In<sub>4</sub> (Ag<sub>2</sub>In) 共晶組織との間の延性の差が、SACのβ-Sn相とβ-Sn/Ag<sub>3</sub>Sn共晶組織の間の延性の差よりも大きい。この差が粒界すべりの発生しやすくなる高温領域で影響し、SAB6Iにおいても粒界すべりが発生したと考えられる。

この結果より、高温で発生する熱応力をSAB6Iの伸びにより吸収することで、クラックの発生と進展を抑制できると推測できる。このことから、SAB6Iはエンジンルーム内の高温環境化でも接合信頼性を確保できる耐熱応力性と信頼性を兼ね備えたはんだ合金であるといえる。

## 6. まとめ

今回、筆者らはInの固溶効果による合金の高強度化とInの固溶量による相変態の変化に着目し、150°Cの使用



第7図 150°C試験後のSAB6Iのテストサンプル  
Fig. 7 SAB6I test sample after 150°C test

環境でも相変態を起こさない耐熱疲労に優れたはんだ合金を開発した。SAB6Iのはんだ合金は、ヒートサイクル試験-40/150℃、1000サイクル後においてもはんだ接合部にクラックが発生せず、車載基準の信頼性を実現することが可能である。

このような長期の接合信頼性を確保することが可能な鉛フリーはんだを、世界に先駆け車載電子機器、太陽電池や民生機器へも展開することで、環境規制物質の使用量を削減するとともに、品質が良く、安心・安全な製品をお客様に提供して行く。

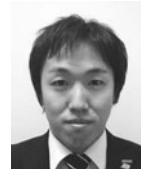
### 参考文献

- [1] 神谷有弘, “HEV, EV車用インバータモジュールの実装技術と動向,” 第39回インターネプコン・ジャパン専門技術セミナー (INJ-10カーエレクトロニクスの実装技術), pp.57-71, 2010.
- [2] 山口敦史 他, “Sn-Ag-Bi-Inはんだ接合部の継手特性,” 10th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics, pp.143-148, 2004.
- [3] A. Furusawa et al., “Practical use of Sn-Ag-Bi-In lead free solder and its advanced technology,” 38th International Symposium on Microelectronics, 2005 WA10, p.23.
- [4] 西浦正孝 他, “Sn-3.5mass% Ag-8.0 mass%In-0.5mass%Bi及びSn-3.0mass% Ag-0.5mass% Cu鉛フリーはんだの熱疲労信頼性,” 13th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics, pp.221-226, 2007.
- [5] 高尾尚史 他, “低温系Sn-Bi-Cu鉛フリーはんだの機械的特性および接合信頼性,” Japan Institute of Electronics Packaging, vol. 5, no.2, pp.152-158, 2002.

### 著者紹介



北浦秀敏 Hidetoshi Kitaura  
生産革新本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



日根清裕 Kiyohiro Hine  
生産革新本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



中村太一 Taichi Nakamura  
生産革新本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



森 将人 Masato Mori  
生産革新本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



酒谷茂昭 Shigeaki Sakatani  
AVCネットワークス社 プロフェッショナルAVビジネスユニット  
Professional AV Business Unit, AVC Networks Company



日高将人 Masahito Hidaka  
ホームアプライアンス社 モータビジネスユニット  
Motor Business Unit, Home Appliances Company