最近の鉛フリーはんだを取り巻く状況と鉛フリーはんだ合金の耐衝撃性

山部 英喜*, 関 園子*

Recent Situation and Impact Resistance of Lead Free Solder Alloys

Hideki YAMABE* and Sonoko SEKI*

* 株式会社日本スベリア社 国内営業部 東京営業所 (〒135-0042 東京都江東区木場2-7-15 4F)

*Tokyo Office, Domestic Sales Dept., Nihon Superior Co., Ltd. (2-7-15 Kiba, Koto-ku, Tokyo 135-0042)

1. はじめに

2006年7月にEUのRoHS指令が実施となってから、2年が経過した。国内のセットメーカーではそれ以前から基板実装用はんだの鉛フリー化に取り組んでおり、最も対応時期の早かった家電品メーカーでは1999年頃から鉛フリーはんだの導入を開始し、2005年中にはほとんどの家電品メーカーがほぼ完全に鉛フリーはんだへの切替えを完了している。産業機器メーカーにおいてもはんだの鉛フリー化が推進されており、世界的に鉛フリーはんだの需要が日を追うごとに高まっている。IPC[†]の調査によると、2007年第4四半期における全世界のはんだ消費量のうち、62%が鉛フリーはんだとなっている¹⁾。最近では金属価格が全般的に上昇しており、特に製品コストに占める金属原材料の割合が大きい棒はんだでは深刻な問題となっている。このため、Sn-Ag-Cu系はんだのユーザの間では、低AgまたはAg不含有組成への切替え検討が進んでいる。

2. フローはんだ付け用鉛フリーはんだの現状

ウェーブ（フロー）およびディップ工法は、主として棒はんだを溶解させた槽にワークを浸漬させてはんだ付けを行う方法である。これらに採用されている組成は、Sn-Ag-Cu系とSn-Cu系の2種類に大別される。日本で採用されているSn-Ag-Cu系はんだ合金はSn-3.0Ag-0.5Cu組成（融点：217～219℃）のものが大半で、基本的には他の元素を添加せずに、この三元合金のままで使用されている。また、Sn-Cu系はんだ合金については、Snと0.7wt%程度のCuからなる組成の合金（融点：227℃）をベースとし、通常はその特性を改善するための元素が添加されている。中でも0.05wt%程度のNiを添加したSn-Cu-Ni系の組成（融点：227℃）はセットメーカーでの採用の歴史も古く、普及率、実績ともに高い、Sn-Cu系はんだの中心的存在である。単純なSn-Cu二元系合金ではCu-Snの金属間化合物が

粗大に生成し、実装品質や接合信頼性において満足できない点が多い。ところがSn-0.7Cu合金にNiを少量加えることでこれらの特性を飛躍的に改善できる²⁾ことがわかり、現在量産の基板実装で使用されているSn-Cu系はんだの大半がSn-Cu-Ni系の組成である。フローはんだ付けでははんだ槽表面にドロス[†]（酸化物）が発生する。このドロスを低減するために棒はんだに微量添加される元素はP（リン）またはGeである。Pは銅合金の casting 時に脱酸剤として用いられるなど、強力な脱酸効果のあることが知られており、強いフラックスと同様の働きがある。このため、内部が防食処理されていないSUS製はんだ槽や、ヒーターが投げ込み式ではんだと直接触れる場合には、はんだによる溶食に注意すべきである。また、PはNiと化合物を作りやすいことが知られている。このため、Niを含有するはんだ組成へのPの添加は、状況によってははんだ接合に関係のないNi-P化合物が異物として存在することになるばかりか、せっかくのNi添加による合金特性の向上効果が薄れることになりかねない。さらに、Pは酸素と結合してはんだ中から減少するのが早い。ドロスの発生が多くなってきたらP含有量が多めのはんだを追加して調整する方法が取られているが、添加量が多くなりすぎないように気を付けなければならない。

3. 鉛フリーソルダペーストの現状

現在日系メーカーで採用されている鉛フリーソルダペーストは融点が217～219℃のSn-3.0Ag-0.5Cu組成が中心である。以前はパーソナルコンピュータなどの基板実装で、融点がSn-37Pbはんだの183℃に比較的近いSn-Zn系組成（融点：Sn-9Znが198℃、Sn-8Zn-3Biが190～196℃）の採用も見られた。しかし、部品の耐熱保証温度が上がり、リフロー設備も鉛フリーはんだでの実装に適するよう性能が飛躍的に向上している現在では、はんだの融点に対する制限が若干緩和され、Sn-Zn系より扱いやすいSn-Ag-Cu系

表1. 合金特性値の一例 (参考値)

合金組成 (wt%)	溶融温度 (°C)		比重	引張強度 (MPa) (10 mm/min)	伸び (%)
	固相線温度	液相線温度			
Sn-37Pb	183	183	8.4	44	25
Sn-3.5Ag	221	221	7.4	46	33
Sn-3.0Ag-0.5Cu	217	219	7.4	50	32
Sn-0.7Cu-0.05Ni	227	227	7.4	32	48

図1. 合金組成別、金属原材料コストの推移 (参考値)

ソルダペーストへの移行も見受けられる。Sn-Ag-Cu系より融点が若干低い組成としてはSn-AgまたはSn-Ag-Cu系にInやBiを含有する組成が使用されている。Inは合金の特性を極端に低下させることなく融点を下げるのに効果的な元素であることが知られており、中温系はんだの場合、3~8wt%の含有量で使用されている。ただし、Inは産出量の少ない高価なレアメタルであるため、はんだの価格も高めとなる。

参考として、表1に代表的なはんだ合金の特性を示す。

4. 金属相場高騰によるはんだ価格の影響

昨今、工業製品の原材料価格が全般的に高騰を続けており、はんだに使用される各種金属についても例外ではない。技術的な内容ではないが、鉛フリーはんだの動向を語る上では無視できない問題であるため、以下に金属相場および原材料価格の概要を説明する。

図1はSn、Ag、およびCuの年間平均相場（2008年は1月から4月までの平均）をもとに計算したSn-0.7CuとSn-3.0Ag-0.5Cu合金の1kgあたりの金属原材料コストシミュレーションである。Ag相場は2005年末頃から高騰しており、Sn-3.0Ag-0.5Cuのコストが年々上昇している。2006年後半からはSnの値上がりもあり、コストアップが加速している。

また、図2は、図1の原材料コストをもとにSn-0.7CuとSn-3.0Ag-0.5Cuの1kgあたりの金属原材料コストの差額を年平均で表している。両者の格差は年々広がりつつあり、今後も右肩上がりになることが予想される。特に、フローはんだ付けに使用される棒はんだは製品単価に占める金属原材料コストの割合が大きく、このような状況から、

図2. Sn-0.7CuとSn-3.0Ag-0.5Cuの金属原材料コスト差の推移 (参考値)

JEITA⁺では低コストのフロー用鉛フリーはんだの検討が行われ、「第2世代フロー用鉛フリーはんだ」として、Sn-0.3Ag-0.7CuとSn-1.0Ag-0.7Cuの2組成が提案されている。多くのセットメーカーでは、これらの合金について早速評価を始めている。さらに、この2種の組成以外にも、古くから量産品に採用され、すでに実績の高いSn-Cu-Ni系など、組成にAgを含有しないはんだも並行して評価するケースが多くみられる。

5. 鉛フリーはんだの接合信頼性

これまでに述べたとおり、現時点では基板実装用鉛フリーはんだは、フローはんだ付けではSn-Ag-Cu系とSn-Cu-Ni系、リフローではSn-Ag-Cu系を中心として展開されている。この2種のはんだ合金の特長としては、Sn-Ag-Cu系は硬くて強度が高い、Sn-Cu-Niは軟らかくて伸びが良い、といえる。また、どちらもクリープ強度はSn-37Pbはんだ合金に比較すると非常に高い。合金自体の強度が高ければはんだのバルク破壊に対する信頼性は増す。しかし、はんだと母材の界面には金属間化合物による硬くて脆い合金層が必ず形成されるため、はんだ接合部の破壊はバルクよりも合金層でのほうが多く見られる。接合部の信頼性を考えた場合、この合金層になるべく応力がかからない（伝わらない）よう、応力を緩和できる柔軟さを有するはんだ合金での接合が理想的である。

6. BGA接合部の耐衝撃性

高密度実装基板に搭載される部品にはリードが短い、またはノンリードタイプの部品、狭ピッチBGAやCSPが多用されている。これらの部品は、たとえば、大きなガルウイングリード⁺のように、部材がたわむことで応力を緩和することの難しい構造である。このため、負荷された応力は、はんだ接合部に対して直接伝播されやすくなる。特にモバイル機器製品では落下による大きな衝撃が加わり、硬くて脆い合金層付近で破断する危険性が高くなる。部品側で応力の緩和が期待できない以上、はんだ合金自身が応力を吸収するしかない。そこで、各種はんだ合金について高速度

シェア試験による耐衝撃接合強度試験を行ってみた。

6.1 試験方法

本実験で使用した合金は、鉛フリーはんだとして現在一般的に使用されている組成である Sn-3.0Ag-0.5Cu（以下 SAC）と、われわれの開発した合金であり、Sn-Cu系に Ni および Ge を微量添加した Sn-0.7Cu-0.05Ni+Ge（以下 SCNG），および、従来はんだ合金として実績のある Sn-37Pb（以下 SP）とした。これら3種類の合金を用いて、液滴噴霧法⁺により作製した直径 0.5 (±0.01) mm のボールはんだを実験に供した。作製したボールはんだを、リフローによって基板に実装したものを試験片とした。なお、基板は OSP（プリフラックス処理）および Ni/Au めっき基板である。インパクト試験には、ハイスピードボンダテスター（Dage 社、DAGE-4000HS）を用いた。

図3にインパクト試験の模式図を示す。シェア（せん断）試験では、ボールはんだ接合部に対してせん断応力を負荷した。試験速度は 10~2000 mm/s の範囲とした。

6.2 シェア試験結果

図4にシェア試験で得られる荷重-変位曲線および、そのときの破断面を示す。ここでは、試験速度の違いによるグラフと破断面箇所を示す例として、SAC と OSP との接合部の試験結果を示す。

試験速度 10 mm/s の場合、接合界面における破壊は生じることなく、荷重-変位曲線では十分な伸びを示している。一方、試験速度 2000 mm/s の場合は、接合界面にほとんどはんだを残さずに破壊した。このときの荷重-変位曲線は、負荷開始から急激な荷重の上昇を示し、最大荷重を示した後すぐに低下する。このことから、接合界面で破壊を生じた場合は、ごくわずかの伸びしか生じていないことがわかる。はんだ接合部に対するシェア試験についての報告例は多数あるが、その多くは低速度における試験である^{3),4)}。

実装基板など、実際の製品が自由落下により衝突する場合の速度は数千 mm/s のオーダーに達する。例えば、物体が机などの 20 cm 程度の高さから自由落下する場合、衝突時の落下速度は 2000 mm/s に達すると計算される。このため、低速度における試験によって接合界面で破壊が生じず、健全なはんだ接合部であると判断された場合であっても、高速度では異なる試験結果になりうることもあるため、はんだの選定には注意が必要である。また、試験速度ごとに示される最大強度はほとんど変化のない一方、伸びは大きく異なることがわかる。このことを踏まえ、得られた荷重-変位曲線と横軸とで囲まれた領域の、「吸収エネルギー」による評価を行った。

図5にシェア試験におけるはんだ接合部の吸収エネルギー量を示す。縦軸は吸収エネルギー量であり、横軸は試験速度である。また、(a)はOSPであり、(b)はNi/Auめっきを施した基板である。(a)、(b)ともに、吸収エネルギー量は、すべての合金で試験速度の増加に伴い、低下する傾向を示す。し

図3. シェア試験の模式図

図4. SAC/OSP接合部のシェア試験における荷重-変位曲線および破断面

かし、その変化量に着目した場合、SPおよびSCNGは速度による変化量が小さいのに対して、SACの吸収エネルギー量は速度の増加に伴い、急激に低下していることがわかる。

SCNGの場合、吸収エネルギー量は試験速度を変化させてもほとんど低下せず、SPと比較して同等以上の優れたエネルギー吸収を示していることがわかる。このため、SCNGは衝撃的な負荷の加えられるような、動的な環境において優れた信頼性を有するといえる。

図6にシェア試験後の接合界面近傍の断面写真を示す。試験速度はすべて 2000 mm/s である。SPは、OSPの場合は写真欄外・上側の、はんだ合金部分で破壊が生じている。一方、Ni/Auめっきの場合は、形成された金属間化合物（以下IMC）の形状を保ったまま、はんだ/IMCの間で破壊した箇所と、はんだ合金部分で破壊した箇所が混在する。はんだ部分は、粗大なPb相がIMCの上側に位置するため

図5. シェア試験における吸収エネルギー

図6. シェア試験後の断面写真 (試験速度 2000 mm/s)

に、高速度でせん断方向の荷重を負荷した場合、はんだ部分でのエネルギー吸収量が大きく、接合界面に伝播する荷重が少なくなり、はんだ/IMC間とはんだ合金部分の破壊が混在したものと予想される。

SCNGでは、OSPの場合は、SPのOSPと同様に、はんだ中で破壊を生じた。SCNGおよびSACと、Ni/Auめっきとの接合の場合は、ともにはんだ/IMCの間で破壊した箇所が観察された。しかし、SCNGの場合は、接合界面に残存したIMCの形状が判別できるのに対して、SACではごく微細な破片が残っただけであるという違いが確認できた。このことから、SACの接合界面では以下のことが生じたと推測される。はんだ接合部に衝撃的な力が与えられたときに、はんだ合金によって吸収できず、接合界面に強い衝撃力が伝わり、IMC部分で容易に破壊を生じた、ということである。

ボールはんだ接合部に対してシェア試験を行い、各種はんだ合金を評価した結果、次のことがわかった。

- (1) 試験速度の増加に伴い、吸収エネルギー量は低下する。
- (2) 加えられた衝撃エネルギー量がはんだ合金自体の吸収エネルギー量を超えると、接合界面に衝撃が伝わり、接合界面での破壊が生じると考えられる。
- (3) 高速衝撃が加えられた場合ははんだ合金の耐衝撃性は、SCNG $\geq$ SP>SACの順に良好である。

7. おわりに

鉛フリーはんだを取り巻く環境は時々刻々と変化している。電子部品、実装設備、フラックスは鉛フリーはんだ実装に適する製品が続々と開発されている。また、基板設計や実装技術も鉛フリーに対応するべく変遷を遂げ数多くのノウハウが蓄積され、鉛フリーはんだの実装は難しいものではなくなりつつある。しかし、電子機器製品の多様化、小型化、薄型化、多機能化にともなってはんだ接合部の信頼性確保については難易度が高まっている。熱応力、衝撃、振動その他接合部にかかる応力負荷の軽減には、設計面、基板と部品材料の選定に加え、使用するはんだ合金の特性も考慮すべきである。今回その一面として鉛フリーはんだの耐衝撃に関する実験結果を紹介した。このほかにも金属間化合物や合金層の形状、経時変化にも注意して、製品の使用環境に最適なはんだを選定することが重要であると考えられる。

(2008.6.6-受理)

文 献

- 1) IPC ホームページより
- 2) 西村哲郎、池田勝彦：“Sn-Cu系鉛フリーはんだの特性と実装に及ぼすNi添加の影響”，マイクロエレクトロニクスシンポジウム，1999
- 3) “Development of High Drop Performance Solder Ball”，Johney

Seo: IPC Works Asia 2007, pp. 69–82

- 4) 小原泰浩, 佐伯敏男, 上西啓介, 小林紘次郎, 莊司郁夫, 山本雅春: “Cu コア Sn–3.5Ag はんだを用いた BGA 接合部組織とせん断強度”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 4, No. 3, pp. 192–199, 2001

† 用語解説

IPC: アメリカ電子回路協会 (IPC—Association Connecting Electronics Industries)

ドロス: 溶融したはんだと, 空気中の酸素が結びついて生じ

る金属酸化物。

JEITA: 社団法人電子情報技術産業協会 (Japan Electronics and Information Technology Industries Association)。

ガルウイングリード: 表面実装部品に使用されるリード形状の一種。部品のセンターラインから水平に突き出した後, 下向きに曲がり部品本体底部のすぐ下で外向きに曲がった構造。カモメ (ガル) の翼の形に似ているためこのように呼ばれる。

液滴噴霧法: 不活性ガス雰囲気内で溶融した金属を耐熱容器から滴下し, 金属ボールの形状に凝固させる方法。