② 鉛フリーはんだ付施工技術 および信頼性*

荻谷 義治**, 大塚 正久***

荻谷 義治

大塚 正久

Current Soldering Technology and Reliability Issue in Lead-Free Solder for Electronic Assembly*

by Yoshiharu KARIYA**, Masahisa OTSUKA***

キーワード：鉛フリーはんだ, Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi, 疲労, 熱疲労, 寿命, めっき, 界面, 信頼性

1. はじめに

プリント基板と電子部品の接合（電子実装）にはSn-Pb はんだが多く用いられている。しかし、近年の環境問題から、鉛を含まないはんだ、すなわち「鉛フリーはんだ」を使用した電子実装への転換が求められている。現在の電子実装施工技術はSn-Pb はんだをベースに発展してきた。このSn-Pb はんだから鉛フリーはんだへの転換は容易ではなく、さまざまな技術的問題を抱えている。ご存知のとおり、電子機器は家電製品から航空宇宙、医療にわたるあらゆる産業分野で使用され、はんだ接合部は極めて高い信頼性が要求される。鉛フリーはんだ実装への転換にあたっては、この信頼性と施工性（融点、濡れ性など）の両立が困難であり、鉛フリーはんだ実用化が進まない大きな理由となっている。大手企業、国立研究機関および大学が参加した鉛フリーはんだ開発の代表的プロジェクトである米国の“NCMS (the National Center for Manufacturing Sciences) Lead Free Solder Project” (1993~1996 年)¹⁾においても、実用化の糸口が見出せず、米国では半ば諦めた状態にあるようである。現在、鉛フリーはんだの研究に関しては、欧州および日本が継続して行っているが、我が国が最も活発であり、実用化に近いレベルまで研究開発が進んでいる。すでに一部の製品には実用化され、段階的にはあるが鉛フリーはんだへの転換が始まったところである。しかし、既存はんだ付プロセスで使用でき、さらに現行Sn-Pb は

んだ接合部以上の信頼性を確保するという制約条件がネックとなり、鉛フリーはんだへの全面的移行は困難を極めている。本稿では、鉛フリーはんだ実用化で特に問題となっている力学的信頼性と施工技術の関連について述べる。

2. はんだ接合部に求められる信頼性

まず、はんだ接合部にどのような信頼性が求められるかを述べる。はんだ接合部に求められる信頼性には、マイグレーションなどの電気化学的信頼性および衝撃および疲労などの力学的信頼性があり、後者の力学的信頼性が鉛フリーはんだ実用化にあたり特に重要な問題となる。はんだ接合部は電子機器の中において電子部品とプリント基板を機械的かつ電気的に接続する重要な役割を担っており、はんだ接合部が一つでも破壊すれば、その製品は機能しなくなる。つまり、はんだ合金はプリント基板上で電子部品を支える構造材料であり、製品の信頼性をプリント基板上のはんだ合金が支えているのである。今日の電子機器は冒頭にも述べたように、航空宇宙から身近な家電製品に至るまであらゆるところに適用され、温度サイクル、衝撃および振動などが存在する厳しい環境で使用される。さらに、はんだ合金は融点が低く（例えばSn-37% Pb[†]合金の融点は183℃）、室温環境が融点の約6割（鉄鋼材料の約1000 Kに相当）という通常の構造用材料では考えられないような高温環境で使用されている。はんだ合金はこのような過酷な状況下で設計耐用年数まで電子部品を機械的且つ電気的に支え続けねばならない。つまり、はんだ接合部には高い力学的信頼性が求められる。エレクトロニクス製品は用途ごとに表

*原稿受付 平成12年1月6日

**正 員 英国オープン大学工学部(日本学術振興会特別研究員) Member, The Open University

***正 員 芝浦工業大学 Member, Shibaura Institute of Technology

†本稿の化学組成単位%はすべてmass%を意味する。

1²⁾に示すようなさまざまな温度サイクル環境下で使
用される。プリント基板上の電子部品は表2に示すよ
うに、それぞれ異なる熱膨張係数を有しており、この熱膨
張係数のミスマッチにより温度サイクル時に、力学的に
最も弱いはんだ接合部に繰り返しひずみもしくは応力が
生じ、はんだ接合部のひずみ集中部においてき裂が発生
および進展し、最終的に製品は寿命を迎える。すなわち、
はんだ接合部が熱疲労破壊するのである。

図1にICパッケージ (Quad Flat Pack)/Sn-37%Pb
はんだ接合部に-30 ⇄ 130℃の温度サイクルを 400 サイ
クル負荷した後の断面写真を示す。はんだフィレット部
表面からリードフレームに向かって熱疲労き裂が進展し
ているのがわかる。また、熱疲労のみならず、製品組立
工程および製品使用時における基板の曲げ変形 (たとえ
ば、携帯電話でボタンを押すことによる基板の繰り返し
曲げ変形)、振動などにより、はんだ接合部には繰り返し
ひずみが負荷され、同様に疲労破壊する。さらに、最近
の携帯電話などでは落下による衝撃破壊なども問題と
なっている。このように、はんだ接合部の疲労特性およ
び衝撃特性などの力学的信頼性が製品の寿命を左右す
る。電子機器のトラブルの原因はほとんどはんだ接合部
にあるといっても過言ではない。鉛フリーはんだ実用化

にあたっては、既存はんだ付プロセスで使用でき、さら
に力学的信頼性が当然ながら現行 Sn-Pb はんだ接合部
以上であることが求められ、これが大きな障壁となっ
ている。さらに真の環境調和を目指すなら、環境負荷物質
の低減のみならず、製品の長寿命化が必要であり、従来
に比較し疲労寿命に優れる鉛フリーはんだ接合部の確立
が求められている。

3. 従来の施工技術と鉛フリーはんだ候補合金

続いて、鉛フリーはんだを用いて電子実装を行う場合
の施工技術について簡単に触れる。現在の電子実装施工
技術は、プリント基板上の孔に電子部品を差込みはんだ
付する挿入実装と、プリント基板上にペースト (はんだ
粉とフラックスを練り合わせたもの) を印刷し、その上
に電子部品を置いてはんだ付する表面実装に大別され
る。挿入実装ではプリント基板を噴流式はんだバス上を
通過させるフローソルダリング (以下、フローと略記) に
より、また表面実装では電子部品を搭載したプリント基
板を赤外線加熱式もしくは熱風式加熱炉内を通過させる
リフローソルダリング (以下、リフローと略記) によりは
んだ付される。これらの施工技術は Sn-37% Pb はんだ
の融点をベースに開発されてきた。プリント基板には熱
容量の小さなチップ抵抗から熱容量の大きな大型の IC
(QFP や BGA など) に至るまで様々な電子部品が搭載
され、既存リフロープロセスでは基板表面に最大約 40℃
程度の温度差が存在する。短時間にすべてののはんだ接合
部をはんだの融点以上 (濡れを開始する温度) にするた
めにははんだの融点に加え 40~50℃の温度マージンが
必要となる。これを考慮し、従来のはんだ付施工温度と
してはリフローにおいては 220~230℃付近 (部品温度)、
フローにおいては、はんだバス温度で 240~250℃付近が
一般的である。現在使用されている電子部品の耐熱性は
すべて 220~230℃を基準に設計されている。なお、フ
ローではこれより高い温度ではんだ付されているが、こ
れは基板および部品電極をはんだ付可能な温度に加熱す
るためのものであり、基板と溶融したはんだの接触時間
が短いため、部品にダメージを与えることはない。した
がって、鉛フリーはんだを使用する場合も、リフローで
は 220℃付近で基板上の全はんだ接合部が完全に溶融す
ること、またフローでは 250℃以下ではんだ付できるこ
とが求められる。

ここで、鉛フリーはんだ候補合金について簡単に触れ
てみる。融点 (T_m)、毒性、コストおよび可採資源量など
を考慮すると、Sn-3.5%Ag ($T_m=221^{\circ}\text{C}$)、Sn-9%Zn
($T_m=198^{\circ}\text{C}$) および Sn-58%Bi ($T_m=139^{\circ}\text{C}$) の 3 種の共
晶合金が候補合金のベースとなる。最近では、コストを
重視して、Sn-0.7%Cu ($T_m=227^{\circ}\text{C}$) も考慮されはじめて
いる⁹⁾。

図2に示すように、それぞれの合金をベースに融点調

表1 電子実装機器の使用環境例 (ワーストケース)¹⁾

カテゴリー	T_{min} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	使用サイクル数 (回)	使用年数 (年)
一般家電製品	0	+60	365	1~3
コンピュータ	+15	+60	1460	~5
電話	-40	+85	365	7~20
航空機	-55	+95	3000	~10
自動車(室内)	-55	+65	185	~10
自動車(エンジンルーム)	-55	+125	300	~5
軍事機器	-55	+95	100	~5
軍用航空機	-55	+95	500	~5

(注) T_{max} : 最高使用温度, T_{min} : 最低使用温度

表2 各構成部品の材料特性

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	熱膨張係数 (10^{-6}K^{-1})
セラミックパッケージ	250	0.30	-	5.0
Alloy42(Fe-42Ni)	140	0.30	380	4.4
銅	120	0.35	380	17.7
はんだ	35	0.28	30	20.0
プラスチックパッケージ	14	0.30	-	18.6
プリント基板(FR-4)	11	0.28	-	14.7

図1 温度サイクルによりはんだ接合部に生じた熱疲労き裂
(-30 ⇄ 130℃, 400 サイクル後)。

図2 鉛フリーはんだ候補合金と融点の一例。

図3 Sn-3.5Agの疲労寿命におよぼすBiおよびCu添加の影響^{10,11)}

図4 Sn-3.5Agの疲労寿命におよぼすIn添加の影響¹¹⁾

整を主な目的としてBi, CuおよびInなどの元素が添加される⁴⁻⁹⁾。融点のみを考慮すれば、Sn-Zn系が実用化に向けては最短距離にあるように思われる。しかし、Sn-Zn系は、はんだに求められる重要な特性である濡れ性がきわめて悪いので、敬遠される傾向にある。最近になり、Sn-Zn系もフラックスの改良が進み、リフローでは実用化に近いレベルに到達しつつあるが、大気中でZnが安定な酸化膜を生成するためフローに使用できない。またCu基板上にZnの拡散を抑制するためのバリアーメタルが必要となるなど、施工上の問題点が多い。

他方、Sn-Bi系は融点が低すぎるため用途が限られる。また延性がひずみ速度に敏感で、高速変形では非常に脆い性質を示し、信頼性の観点から好ましくないという問題を抱えている。

残るSn-Ag共晶合金は良好なクリープ特性と高い延性を有するため、優れた熱疲労特性を示すことが知られており、信頼性の観点からはSn-Ag系が最有力候補となる。しかし、融点が高いため、既存のリフロー装置を使用して、基板上のすべてのはんだ接合部を完全に溶融させるとなると、電子部品の耐熱温度を超える恐れがある。ただし、鉛フリーはんだへの移行にあたっては、信頼性を重視するため、リフローでは融点が高すぎるという難点はあるものの、Sn-Ag系の使用に対する要望は強い。また、リフローおよびフローいずれの施工法でも使用できるため、Sn-Ag系はこの点でも有利である。

したがって、Sn-Ag共晶をベースとして、これにBi, CuおよびInなどの第3および第4元素を加え、Sn-Ag共晶の信頼性を生かしつつ、融点を下げるといった試みがされてきた。しかし、後述する力学的信頼性の制約から合金添加による大幅な融点降下は期待できず、合金開発の面からは行き詰まりの感がある。既存のプロセスを使用できる鉛フリーはんだの開発に対する要望は強いが、今後は新たなアプローチが必要であると思われる。

なお、前述のように、フロー処理においては、Sn-37%Pbはんだでも250℃付近で行われるので、Sn-Ag系は

はんだの場合、濡れ性に問題は残るものの、温度的には問題なく、実用レベルにあることが確認されている³⁾。

4. Sn-Ag系はんだ接合部の力学的信頼性と添加元素の影響

これまで述べてきたように、信頼性の観点から候補合金としてはSn-Ag共晶合金をベースにBi, InおよびCuなどを添加した合金が期待される。ここで、Sn-Ag共晶合金にこれらの元素を添加した場合の接合部の力学的信頼性について筆者らの実験結果を用いて見てみる。

図3および図4にSn-3.5%Ag-Bi, Sn-3.5%Ag-CuおよびSn-3.5%Ag-In各3元系鉛フリーはんだバルク材の引張モードにおける疲労寿命におよぼす塑性ひずみ範囲の影響を示す^{10,11)}。なお、化学組成の単位はすべて%である。図の縦軸は塑性ひずみ範囲の対数、横軸は50%荷重低下までの繰返し数の対数である。低サイクル疲労特性について各合金別に見てみる。Sn-3.5%Agはきわめて優れた疲労寿命を有することがわかる。これにBi

を添加した3元系合金では、疲労寿命はBi濃度の増加とともに顕著に低下する。他方、CuおよびInの添加は疲労寿命に大きな影響は与えず、2%までの添加であれば、Sn-3.5%Agと同等の優れた疲労特性を維持することがわかる。現行はんだであるSn-37%Pb並みの信頼性を確保するには、Biでは2%が限界であるのに対し、Inであれば5%添加しても依然Sn-37%Pbより優れた疲労寿命を有することがわかる。この第3元素添加による低サイクル疲労寿命低下の傾向は引張破断延性の低下に支配されている¹¹⁾。Bi添加は延性を顕著に低下させ、その結果、疲労寿命をも低下させる。一般に延性の低下は衝撃特性も低下させるため、力学的信頼性の観点からBiの多量添加は好ましくないこととなる。機械的特性から、添加元素の候補としては少量のCuもしくはInとなる。ただし、Inは資源が少なく、また高価な元素であるので、添加元素として推奨できないことを付け加えておく。

次に、これらの合金を用いてICパッケージを実装した場合の熱疲労特性について見てみる。図5は、ICパッケージ(100ピンタイプ プラスチックQFP; 図1参照)をSn-3.5%Ag-X (X=BiおよびCu)系鉛フリーはんだで実装したプリント基板の熱サイクル(0⇔100℃)に伴う劣化過程を示す^{12,13)}。縦軸はリード線と基板との接合強度を初期強度で規格化した強度低下率であり、横軸は熱サイクル数である。また、接合強度はリードフレームをCuパッドの垂直方向に引っ張る方法(プルテスト)により求めたものである。

各合金の熱サイクル数と強度低下率の関係をみると、Sn-3.5%AgおよびCu添加合金の接合強度低下は比較的緩やかであり、Biを添加したものはいずれの合金も熱サイクル数の増加とともに接合強度が著しく低下している。特にSn-3.5%Agはんだは1200サイクルまで熱疲労損傷を受けず、きわめて優れた熱疲労抵抗を示している。

図5 QFPリード/はんだ接合部の接合強度とヒートサイクルの関係 ($\Delta T=100^{\circ}\text{C}$)^{12,13)}

図6に600サイクル経過後のSn-3.5%AgおよびSn-3.5%Ag-5%Bi接合部の光学顕微鏡写真を示す。Sn-3.5%Agではき裂が見られないのに対し、Sn-3.5%Ag-5%Biではフィレット表面でき裂が発生し、その後リードフレームに沿って進展しているのがわかる。上記の実験結果には接合部の幾何学形状および材料の組み合わせなど様々な因子が介入しているため、普遍性はない。しかし、バルク材の低サイクル疲労特性の傾向とよい一致を示しており、現行Sn-37%Pb以上の熱疲労抵抗を確保するためのBi添加量は、バルク材と同様に2%程度であると考えられる。

また、Bi添加は疲労特性を低下させるのみならず、挿入実装部品において、図7に示すようなランド(基板上の電極)からはんだフィレットが剥がれる現象(フィレットリフティング)を助長することが確認されている^{14,15)}。このメカニズムについては種々検討されているが、現時点ではBi添加による固液共存領域(液相線と固相線の幅)の拡大と、それに誘発されたBiの偏析が有力視されている。プリント基板上でははんだの凝固は比較的遅いため、不均一に凝固が進み、最終凝固部分であるランド付近においてBiの偏析を生じ、低融点の組成を生じる。この時、はんだフィレットには凝固収縮とリード線の熱収縮により、フィレットを引き剥がす方向に力が働き、液体状態のはんだ/ランド界面部分が持ち上がってしまうのである¹⁵⁾。このフィレットリフティングは幾何学的にはノッチのようなものであり、力学的信頼性の

図6 600サイクル経過後QFPリード/はんだ接合部の光学顕微鏡写真 ($\Delta T=100^{\circ}\text{C}$)^{12,13)}

図7 挿入実装基板におけるフィレットリフティング現象¹⁵⁾

観点から好ましくない。Bi を2%添加するとすでにフィレットリフティングが観察されるとの報告もあり、この点からも Bi 添加は好ましくない。信頼性と施工性の両立は困難であることがお分かりいただけたかと思う。

5. 鉛フリーはんだに求められる施工技術

これまで述べてきたように、融点および濡れ性などのはんだ付性の観点からは Bi および In を比較的多量に含む合金が有利であるが、信頼性の観点からは Bi 添加は好ましくなく、また In はコストおよび資源の問題を抱えている。最終的には Sn-Ag に Cu を0.5~1%添加した合金が、信頼性も高く、リフローおよびフロー共に使用できる可能性があるという利点から期待される。しかし、融点が217℃付近であり、Sn-37%Pb に対し依然34℃高いという問題が残る。前述のように、実際の基板には熱容量の異なる様々な部品が搭載されている。このため、熱容量の大きな大型 QFP が混載される場合、既存リフロープロセスにおける基板表面では、最大約40℃程度の温度差(ばらつき)が存在する。この基板上の電極すべてをはんだ付温度以上にするためには融点より40~50℃高いリフロー温度が必要となり、Sn-37%Pb はんだを用いたリフロー時のピーク温度は220~230℃(基板電極部温度)で行われる。これを Sn-Ag 系鉛フリーはんだに適用した場合、大型 QFP などの熱容量の大きな部品のリード線を Sn-Ag 系鉛フリーはんだの融点以上にするると熱容量の小さな部品では250℃以上となってしまう、プラスチックコネクタやアルミ電解コンデンサなど耐熱性の低い部品では、耐熱温度を超えてしまうことになる。融点を大幅に下げることが困難である Sn-Ag 系でリフローは不可能であるように思える。しかし、融点は上限温度230℃以下であるので、理論的にはリフローが可能である。合金開発側からのアプローチでは鉛フリー化は困難を極めている現在、高融点である Sn-Ag 系鉛フリーはんだに適したリフロープロセスの研究開発が期待される。

では、どのようにすれば Sn-Ag 系鉛フリーはんだでリフローが可能となるのであろうか。キーポイントは基板の均一加熱にあり、従来40℃程度存在していた基板表面の温度差を20℃以下に抑えることでリフロー可能となる。最近になり、大型部品が搭載されない小型製品(例えば携帯機器など)においては、既存リフロー装置を利用し、予備加熱および部品レイアウトの適正化などの工夫により温度差を20℃以下に抑え、リフローを成功させた例が報告され、一部の製品については量産が開始されている^{16,17)}。しかし、大型の IC パッケージが搭載されるような大型基板においては、既存設備を利用して基板表面の温度差を20℃以下にすることは困難であるのが現状である。大型基板において均一加熱を実現させる

ためには、熱風および赤外線加熱の適正化などリフロー装置の改善、さらには均一加熱を考慮した基板設計が求められる。特にリフロー装置における今後の技術開発に期待したい。

このようなプロセス側からのアプローチにより、これまで実用化困難であると思われていた高融点の Sn-Ag 系鉛フリーはんだにおいても実用化の可能性が開けてきた。量産ラインにおいてはコストの観点から既存プロセスを使用できる合金開発に対する希望は依然強い。しかし、世界に誇れる日本の環境技術としての鉛フリーはんだ実装技術を早期に実現するには、合金開発に期待するよりも、代替合金を定め、それに適したはんだ付プロセスを開発するのが得策と思われる。

参 考 文 献

- 1) Lead Free Solder Project, Final Report, NCMS Report 0401RE96, (1997).
- 2) W. Engelmeier: Solder Joint Reliability, Van Nostrand Reinhold, ed. J. H. Lau, (1991), 572.
- 3) 河野英一: NECにおける鉛フリーはんだ実装技術開発事例, 日本金属学会シンポジウム資料, 鉛フリーはんだ実装の基礎と技術開発の現状, (1999), 39-42.
- 4) C. M. Miller, I. E. Anderson and J. F. Smith: A Viable Tin-Lead Solder Substitute: Sn-Ag-Cu, J. Electron. Mater., 23-7 (1994), 595-602.
- 5) U. R. Kattner and W. J. Boettinger: On the Sn-Ag-Bi Ternary Phase Diagram, J. Electron. Mater., 23-7 (1994), 603-610.
- 6) M. McCormack, S. Jin and H. S. Chen: New Lead-Free Sn-Zn-In Solder Alloys, J. Electron. Mater., 23-7 (1994), 687-690.
- 7) S. Jin and M. McCormack: Dispersoid Addition to a Pb-Free Solder for Suppression of Microstructural Coarsening, J. Electron. Mater., 23-8 (1994), 735-740.
- 8) M. McCormack and S. Jin: New Lead-Free Solder, J. Electron. Mater., 23-7 (1994), 635-640.
- 9) B. Trumble: Get the lead out Lead-Free Electronics Come Age, IEEE Spectrum, 35-5, (1998), 55-60.
- 10) Y. Kariya and M. Otsuka: Effect of Bismuth on the Isothermal Fatigue Properties of Sn-3.5% Ag Solder Alloy, J. Electron. Mater., 27-7 (1998), 866-870.
- 11) Y. Kariya and M. Otsuka: Mechanical Fatigue Characteristics of Sn-3.5 Ag-X (X = Bi, Cu, Zn and In) Solder Alloys, J. Electron. Mater., 27-11 (1998), 1229-1235.
- 12) Y. Kariya, Y. Hirata, and M. Otsuka: Effect of Thermal Cycles on the Mechanical Strength of Quad Flat Pack Leads/Sn-3.5 Ag-X (X = Bi and Cu) Solder Joints, J. Electron. Mater., 28-11 (1999), 1261-1267.
- 13) Y. Kariya, Y. Hirata, K. Warashina, and M. Otsuka: Effect of Additional Element (Bi and Cu) on the Thermal Fatigue Strength of QFP/Sn-3.5 Ag Solder Joint, ASME Advances in Electronic Packaging, EEP 26-1 (1999), 173-180.
- 14) J. H. Vincent and G. Humpston: Lead-Free Solders for Electronic Assembly, GEC Journal of Research, 11 (1994), 76-89.
- 15) 菅沼克昭: 鉛フリー化を迫られるはんだ開発, 回路実装学会誌, 12-2 (1997), 83-89.
- 16) 河野英一, 田辺一彦, 石塚直美: 鉛フリーはんだ技術(須賀唯知編著), 日刊工業新聞社 (1999), 第7章, 118-119.
- 17) 末次憲一郎: 鉛フリーはんだ技術(須賀唯知編著), 日刊工業新聞社 (1999), 第7章, 160-162.