

鉛フリーはんだ実用化へのシナリオ

平野 正夫*

A Lead-Free Solder Application and the R&D Scenario

Masao HIRANO*

*オムロン株式会社生産技術開発センタ (〒525-0035 滋賀県草津市西草津2-2-1)

*Production Engineering Center, OMRON Corp. (2-1-1 Nishi-Kusatsu, Kusatsu-shi, Shiga 525-0035)

1. はじめに

90年代の初期からはんだに含まれる鉛の毒性が問題視され、鉛の使用を抑制しようとする法制化の動きがでてきた。われわれは自主的にはんだの鉛フリー化に取り組み、98年度から光電センサに鉛フリーはんだ付けを実用化した。

鉛フリー化を、ソルダリングの信頼性と製造性を向上する機会と捉えて開発した。鉛フリー化の開発に先立って、ソルダリングのクライテリアと開発のロードマップを定め、鉛フリーはんだの高融点とぬれ性の課題を克服するために工程を機能から見直した。

本稿では、実用化した光電センサの開発事例と鉛フリーはんだ実用化のシナリオについて述べる。

2. 鉛フリーはんだの実用化事例

'98/7に、鉛フリーはんだを用いた光電センサ(形E3G)を実用化し、ついで'99/9に光電センサ(形E3Z)を実用化した¹⁾。図1に、実用化した光電センサ(形E3G)の外観と用いたSMT基板を示す。

この光電センサは産業用であるため、接合の信頼性を重視して、はんだ合金を選定した。信頼性と製造安定性の評価から、SMTにはSn-Ag-Cu-In合金のクリームはんだ、ロボットはんだにはSn-Ag-Cu合金の糸はんだを採用した^{2,3)}。

図1に示すように、SMTでは12個の多数個取りを行い、2枚の小基板の電気接続と組み立てをスライドはんだで行い、少数の挿入部品をポイントはんだ付けしている。鉛フリー糸はんだは、Sn-Pbはんだと比べるとぬれ広がり性が

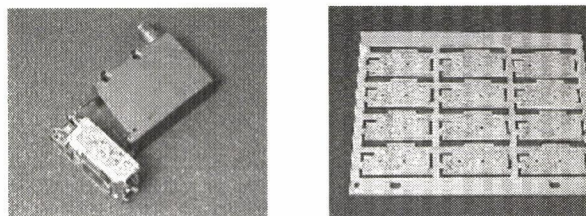


図1. 鉛フリーはんだを使用した光電センサと、用いたFR4基板(12個取り)

劣るため、工程条件を見直した。その結果、Sn-Pbはんだでも難しかったファインピッチ(1.0mm/p)のスライドはんだ(基板間の接続)を実現し、ポイントはんだ付けでは、1s/点以下の高速はんだ付けを実現した⁴⁾。

SMTの生産では、鉛フリー化を機に当該工場のライン条件を全面的に見直し、Sn-Pbはんだを用いる既存機種と鉛フリーはんだを用いる新商品の生産を同一設備/同一条件で生産する体制(混流生産)を実現した。従来以上に高い製造品質と飛躍的な生産性の向上を図ることができた。

3. 鉛フリーはんだ付けの開発シナリオ

鉛フリーはんだ付けの開発では、SMT(クリームはんだ)、フロー(棒はんだ)およびロボットはんだ(糸はんだ)の3種類の工法(材料)を総合的に開発した。開発に先立って、以下の実用化のシナリオを設定した。

- (1) 鉛フリー化を契機に実装生産力を強化する。
- (2) 鉛フリー化によって実装信頼性を向上する。
- (3) 既存装置を用いて鉛フリー化を実現する。
- (4) まず、鉛入り従来部品で実用化する。

4. ソルダリングのクライテリア

はんだの鉛フリー化は、IEの代替の影響評価に従うと、影響と効果が最も大きいMaterialの代替にあたる。鉛フリーはんだはぬれが遅いなどの課題があったので、その影響を抑えるために、表面実装・フロー・ロボットはんだ付けの3工法それぞれを機能的に見直した。

これまでは実装の小型化が著しく進歩したにもかかわらず、ソルダリング現象の把握が十分ではなかった。特にSMTでは、はんだ材料とリフローのソルダリング現象がブラックボックスになっていた。そこで、リフローシミュレータを製作し、50mmφの石英管の中でリフローと同じ加熱状態を再現してリフロー中のはんだの振る舞いを観察したり、不良発生の再現と対策を行えるようにした。詳細な観察から得た知見をもとにソルダリングのクライテリア(工程の機能特性)を定めた⁵⁾。

表1. ソルダリングの製造性評価用クライテリア

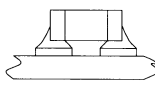
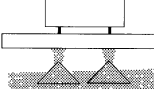
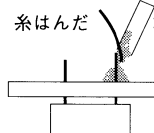
機能・特性	リフロー	フロー	ロボット・手付け
はんだの種類	ペースト	棒	糸
はんだ供給位置 (方法)	ランド上 (印刷)	ランド・端子部 (浸せき)	ランド・端子部 (押し込み)
はんだフィレット の形成の作用と はんだの振る舞い	 必要などころへ 必要量のはんだを置き、 その場で溶かす。	 はんだ浴から、 必要量を切り取る。	 コテ先から熱を与え、 コテと端子の狭空間に はんだを流し込む。
機能特性	・印刷熱だれ性 ・凝集体性 ・ぬれ性 ・表面張力	・ぬれ性 ・切れ (凝集力) ・表面張力	・熱伝達 ・フラックス流動速さ ・ぬれ (はんだ流動速さ) ・切れ (凝集力)

表1にソルダリングのクライテリアを示す。工法を特徴づける機能特性を測定することで製造安定化の効果と鉛フリーはんだへの代替の影響を定量した。表から、ソルダリング工法によってはんだの必要特性が異なることがわかる。

図2に、鉛フリー化に用いたSMTの機能研究のアプローチを示す。ブラックボックスになっていたクリームはんだの特性と工程機能に関係づけることによって、不良撲滅と接合信頼性の向上を図り、フラックス作用の研究によってクリームはんだのぬれ性の低下を克服した。

5. 開発のロードマップ

産業用にふさわしい信頼性と高い生産性を実現するために、「接合の高寿命化とはんだ材料の選定のロードマップ」と「製造安定化のロードマップ」をあらかじめ作って開発を実行した⁹⁾。それらの開発ロードマップを図3に示す。開発では、まず接合の高寿命化とはんだ材料の選定を製造安定化に優先して進めた。

5.1 接合の高寿命化とはんだ合金の選定

はんだ合金の選定と接合構造の高寿命化のロードマップに従ってはんだを評価した。

はんだ継ぎ手の信頼性を高くするには、まず継ぎ手を設

II 製造安定化のロードマップ

(リフローの事例)

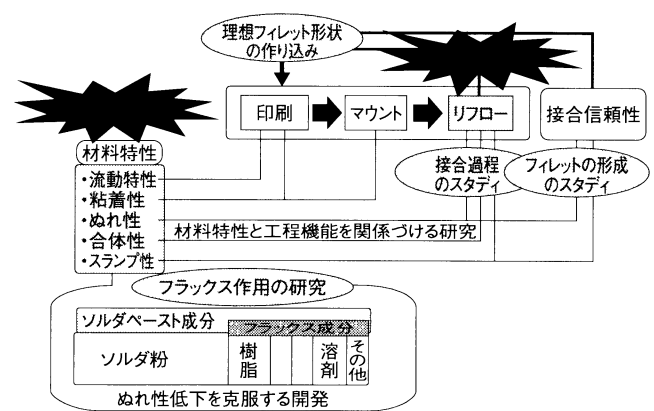


図2. SMTを鉛フリー化する機能研究のコンセプト

I 接合の高寿命化とはんだ合金の選定のロードマップ

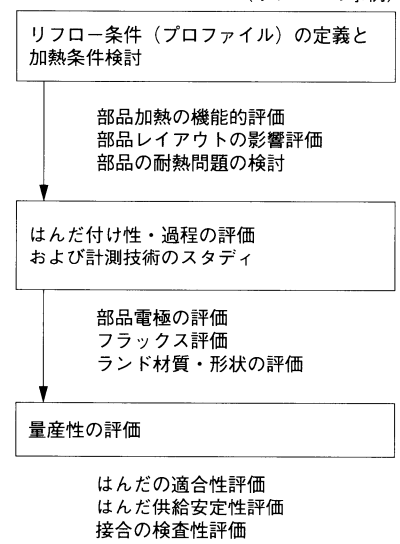
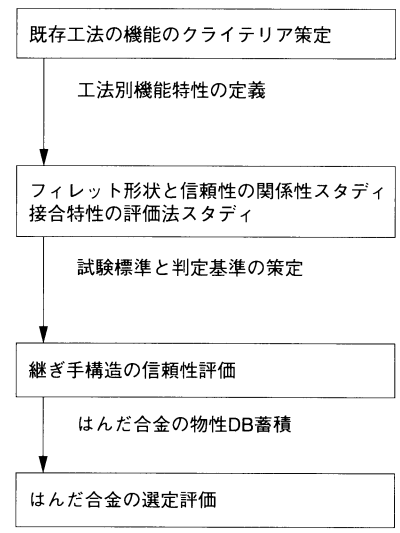


図3. 信頼性・製造性評価のロードマップ

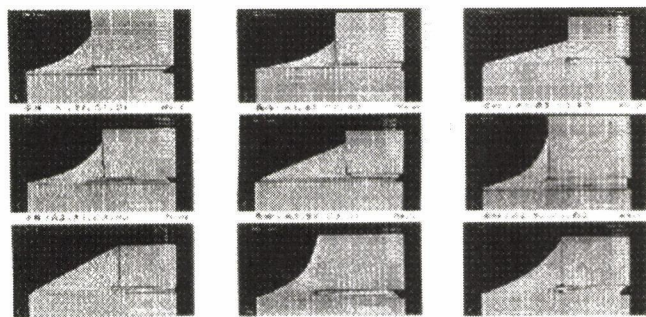


図4. チップ部品のはんだ継ぎ手の高寿命設計

(ヒートサイクルではんだ継ぎ手に発生する歪みのCAE解析)

計段階で高寿命化し、その上ではんだを比較評価すべきである。評価に当たっては、劣化に対する感度が高い接合特性を選定する必要があった。

継ぎ手の構造が違っていると評価すべき信頼性項目が異なる。少し乱暴ではあるが、小型部品が主体のSMTでは熱の影響を、大型部品が主体のフローやロボットはんだでは振動の影響を重視した。ここではSMTの接合を高寿命化した事例を示す。

5.1.1 継ぎ手の高寿命設計

これまで「はんだフィレット形状と寿命の関係」を示す知見が不十分であった。フィレット形状を変えてヒートサイクルの際に発生する歪みの大きさをCAEで評価し、継ぎ手を高寿命化するフィレットの作り方を検討した。チップ部品の解析事例を図4に示す。

ヒートサイクル試験(−55~125℃)において、チップ部品の継ぎ手に発生する歪みをCAEで解析した。図から、はんだフィレットの形状を変化させると、熱荷重によってフィレット中に発生する「歪みの大きさと位置が変化すること」がわかる。つまりはんだ量とランド形状の設計によってフィレット形状を制御することで、継ぎ手の耐ヒートサイクル性を向上できることを明らかにした⁷⁾。

リフローシミュレータを使ってフィレット形成を観察すると、溶融したはんだはチップの電極をぬれ上り、その後電極とランドの間で表面張力が釣り合うまではんだが流動

してフィレットを形成する。このようにはんだの複雑な挙動によって継ぎ手の形状が作り込まれる。接合信頼性は、SMTの印刷におけるはんだ供給の安定化とリフローにおけるぬれと流動が、フィレットの形成を介して接合寿命に影響を与えることを明らかにした。

5.1.2 接合特性の検討

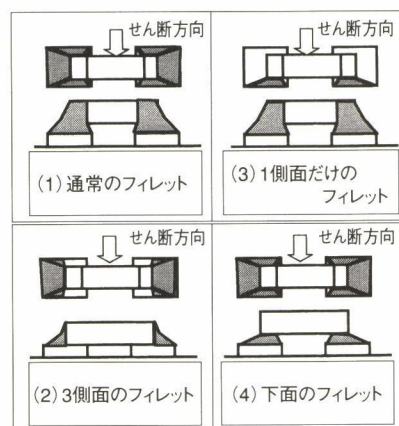
接合強度のヒートサイクルに対する変化を測定した。しかし、せん断強度の測定ではばらつきが大きく、信頼度の高い評価ができなかった。

そこで、接合寿命の判定には、劣化に対する感度が低いせん断強度よりもクラックのカウント(サイクル数×累積発生数の推移)による判定を重視した。

せん断強度が劣化に対して低感度である原因を解析した。図5に示すように、分割したフィレットをもつチップ部品のせん断強度を測定し、通常のフィレットに対する分割フィレットのせん断強度への寄与を調べた。CAE解析で歪みが集中したフィレットの側面(2)と底面(4)に対応する分割フィレットのせん断強度は、通常フィレットの強度の2/3と1/5しかない。一方、劣化が起きにくい側面(2)(3)の強度が無視できない強度であるため、せん断測定の感度が低くなることを明らかにした⁸⁾。

5.1.3 はんだ材料の選定

産業機器としての信頼性を確保するため、筆者らは冷熱衝撃試験(−197~100℃ 各1分)とヒートサイクル試験(−50~125℃ 各30分)を併用し、広範囲な熱サイクル(℃/s)に対して安定なはんだを選定した。まず、クラックの発生を確認しやすいメルフ抵抗5922を用いてスクリーニング試験を実施した。ついで、有望な材料について詳細に信頼性を検討するため、QFPから小チップまで約40種類の代表部品について上記と同じ試験を実施した。図6に代表的な候補はんだに対するスクリーニング試験の結果を示す。Sn-3.5Ag-0.75Cu, Sn-3Ag-0.7Cu-1In, Sn-3Ag-0.7Cu-0.5Sbが広範囲な熱サイクル(℃/s)に対して安定であり、Bi含有はんだとAg含有Sn-Pbはんだは冷熱衝撃に



分割したフィレットのテストピース形状とせん断方向

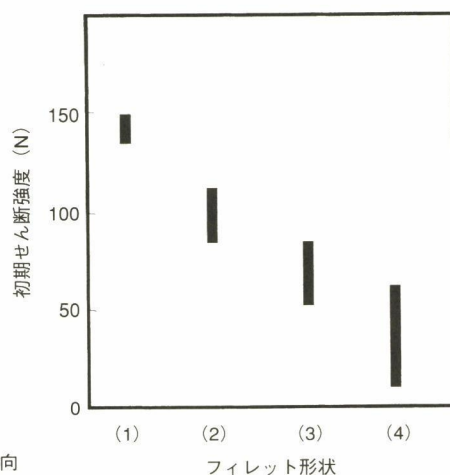


図5. 分割したフィレットをもつチップ部品のせん断強度

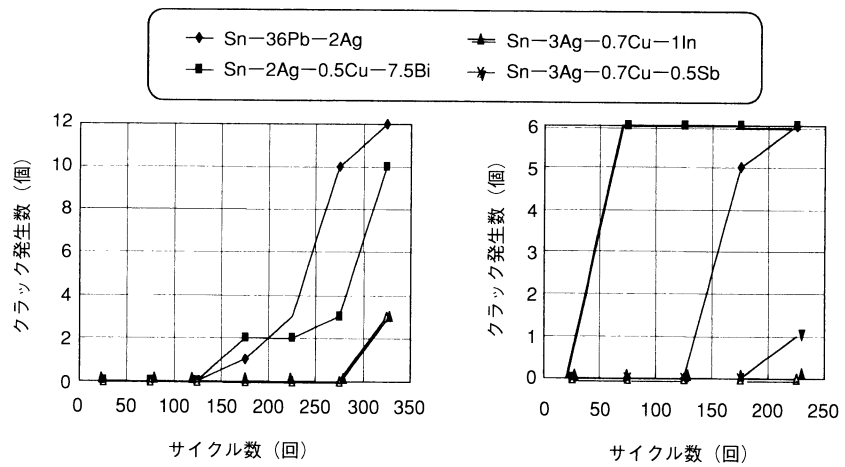


図6. 代表的な候補はんだの信頼性評価

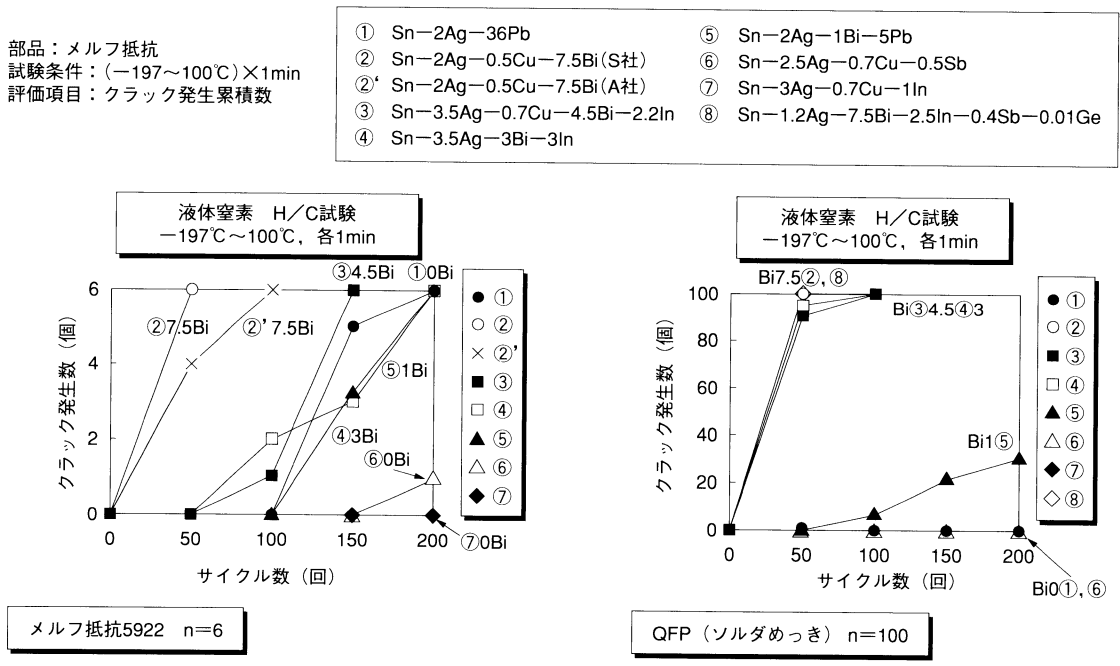


図7. 熱衝撃試験を用いたBi入りはんだの脆性の評価

対してクラックの発生が早いことがわかった。冷熱衝撃試験が脆性の判定に適することがわかったので、Bi濃度を変えたはんだの脆性への影響を調べた。その結果、すべてのBi含有はんだはBi濃度がたとえ1%と低くてもSn-Ag-Cu系はんだと比較して冷熱衝撃性が劣る結果となった(図7参照)。

また、抵抗とQFPとを比較すると、部品形状が変わるので脆性の影響の仕方が大きく異なる。部品構造やフラックス処方に左右されずにはんだを選定するには、合金の特性を直接に測定するか、信頼性を代表する部品のテストピースを用いる評価が望ましい。

そこで、引張強度試験機を用いて、変位-荷重特性から引張速度と引張強度、引張速度と伸びの関係を評価した。図8に結果を示す。ここで、引張速度(長さ/時間)の変化がヒートサイクルと冷熱衝撃の熱サイクルの(°C/s)と対応する。(部品長さ×線膨張係数×温度/時間)が

(長さ/時間)のディメンションとなるからである。このデータを利用すれば、継ぎ手を作ることなくBi含有はんだの脆性を知ることができる。Bi含有はんだはその脆性のために糸が引けないことも理解できる。

5.2 製造安定化のロードマップ

鉛フリーはんだは、従来のSn-Pbはんだと比べて、融点が高いことや溶融はんだのぬれ広がり性が低いことが製造を難しくする。そこで表1の工程の機能特性に基づいて製造安定化を図った。

5.2.1 リフロー性の定義

鉛フリーはんだの融点が高いため、リフローの上限温度(部品温度)とはんだ融点との間隔が狭くなる。そのため、安定にリフローを行うには、基板上にあるすべての部品の温度ばらつきを圧縮する必要がある。部品の耐熱性の観点から、ボディ温度の上限の管理と温度上昇が遅れる大型部品の接合部温度の管理、さらにははんだ付け時間の確保な

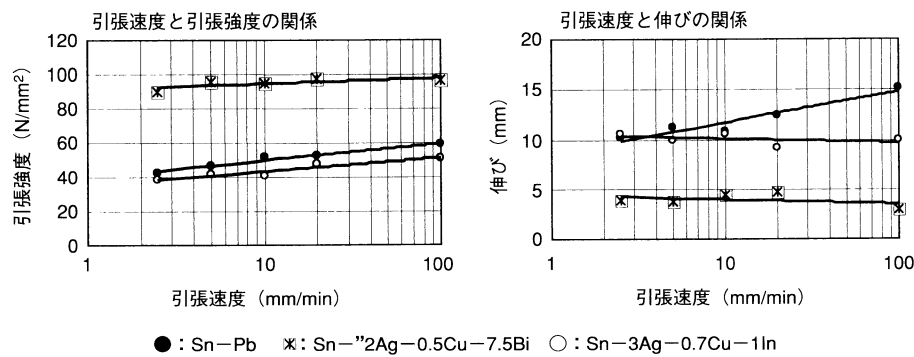


図8. はんだの引張速度が引張強度と伸びに及ぼす影響

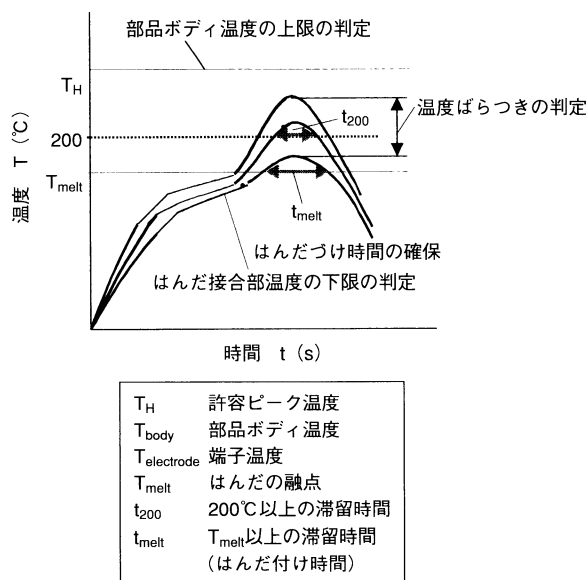


図9. リフロー温度プロファイルの定義

5. 2. 2 加熱の機能的評価と加熱条件の検討

開発当初、部品の熱損傷対策が最重要課題であった。部品の品質保証の観点からはリフロー温度を上げることが困難であると判断し、まずリフローにおける基板温度ばらつき低減技術⁷⁾を開発した。そのために、部品の性質と熱源の性質からリフロー加熱を見直した。図10に加熱の基本機能と熱源の性質を示す。図から、熱源から部品と基板に供給する熱の流れ（入熱と放射）としてリフローを理解できる。赤外-エア併用のリフロー炉を用い、部品温度がエア温度に近づくエア加熱の性質を利用して部品の温度上昇のばらつきを小さくし、高効率な赤外線加熱を使って本加熱の短縮を行い部品への熱ストレスを小さくした。その結果、はんだ融点の直下近傍で接合部温度のばらつきを圧縮するリフロー温度プロファイルを得た。

得られた加熱条件で部品ごとの温度プロファイルデータを蓄積すると、基板設計時にリフロー温度を推定することができる⁹⁾。

今後の鉛フリー対応への課題として、図10に示す部品加熱の制御因子である部品の要因（熱容量=厚さ・面積・比熱）に着眼して、小型部品を積極的に採用することや搭載する部品の熱容量を平均化するなど、設計の観点からリフロー性を向上することが重要になる。

5. 2. 3 量産性の改良

量産に用いたリフロー条件には、温度ばらつきの低減の他に、チップ立ちを防止する加熱条件を反映した¹⁰⁾。また、

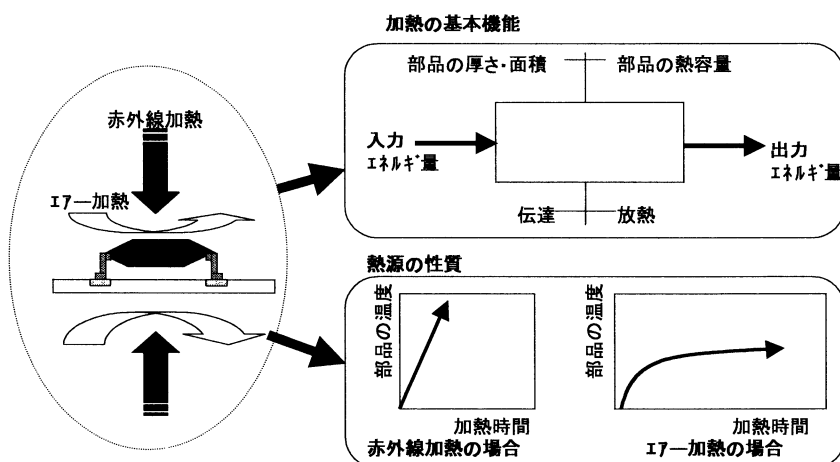
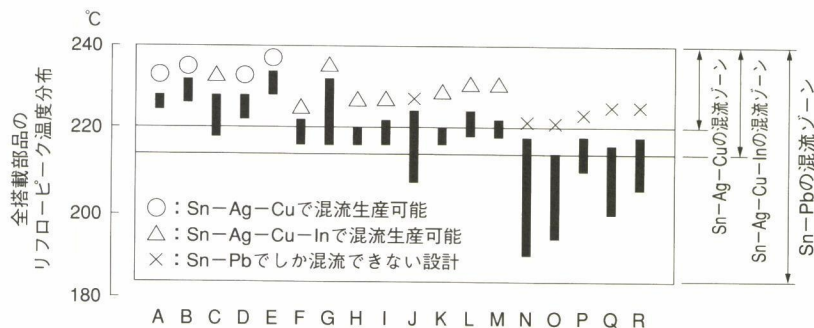


図10. リフロー加熱の工学的理解



PCB設計の階層（基板厚さ十部品品種の組み合わせ）

図11. Sn-Ag-Cu系はんだの量産性評価の一例

クリームはんだを改良し、Sn-Ag-Cu-InとSn-Pbともに印刷寿命に優れたフラックス処方を得て生産が著しく安定した^{11),12)}。リフロー条件を最適化することで、Sn-PbとSn-Ag-Cu-Inが同一リフロー条件でできるようになった。

鉛フリーはんだの融点の上昇がSMTの混流性（生産性）へ及ぼす影響を調べた。その結果を図11に示す⁹⁾。図はリフロー条件を固定したラインにおいて、ラインに流す基板設計の水準A～R（搭載する部品によりリフローの難度が異なる）について、融点異なるはんだに対して生産ができるか否かを示す。Sn-PbはんだがA～Rの全機種の混流が可能であるのに対して、Sn-3.5Ag-0.75Cuでは○で示した基板設計だけが混流可能であり、融点が6℃低いSn-3Ag-0.7Cu-Inでは○と△で示す基板設計が混流できることを示す。Sn-3.5Ag-0.75Cuでは混流できない設計が多いことがわかる。一方、採用したSn-3Ag-0.7Cu-Inはんだは混流度が高く、Inを添加した効果が顕著であった。

前述したように、鉛フリーはんだの融点が高いことはSMTの生産性に大きな影響を与える。したがって、現在生産している機種すべてをそのまま鉛フリーに変更することは、決して容易なことではない。鉛フリー化を加速するためには、低融点はんだの開発を急ぐ一方で、設計からの革新を起こして行かねばならないであろう。

6. 終わりに

鉛フリーはんだの実用化事例で述べたように、ライン条件を全面的に見直し、従来以上に高品質と飛躍的な生産性の向上を図ることができた。

鉛フリーはんだの実用化は端緒についたばかりで、今後展開を拡大するには、はんだづけ性の改良、鉛フリー化した電子部品への切り替え、実装プロセスの革新など、まだ多くのハードルを残している。

今後は、鉛フリーはんだを使いこなすことの実用化からさらに一歩進めて、設計と工法の両面での技術革新が必要と考える。IEというMaterial, MannerとMachineを多面的に活用することが望ましい。Measurementの肉付けによって、大きなブレークスルーが期待できる。これが実現すると、業界をまたがる開発や産学の共同研究などがスピ

ードアップできると考える。

(2000.5.8-受理 2000.5.15-再受理)

文 献

- 1) 冷泉為弘，他：“オムロンにおける環境負荷低減への取組”，機械設計76，1999.9
- 2) 谷上昌伸，他：“鉛フリーはんだ技術開発”，オムロンテクニクス，Vol.38，No.3，p.253，1998
- 3) 中村真司：“Pbフリーはんだの評価結果”，回路実装学会鉛フリー研究会資料，1996
- 4) 常松祐之，他：“ロボットはんだづけの高速化の試み”，オムロンテクニクス，Vol.38，No.3，p.244，1998
- 5) 平野正夫：“「はんだ付不良」の撲滅に向けて”，表面実装技術，Vol.6，No.7，pp.18-22，1996
- 6) 平野正夫：“鉛フリーはんだの実用化事例とその開発ロードマップ”，JIEP鉛フリーはんだ研究会平成11年度，第2回研究会資料，No.2
- 7) 別所聖文，他：“CAEによるはんだ接合部の信頼性解析”，オムロンテクニクス，Vol.37，No.1，p.20，1997
- 8) 中井智之，他：“チップ部品のはんだフィレット形状とはんだづけ信頼性検討”，4th Symposium on Microjoining and Technology in Electronics，1998
- 9) 別所聖文，他：“リフロにおける基板温度ばらつき低減技術”，オムロンテクニクス，Vol.38，No.3，p.240，1998
- 10) 上口朋行，他：“表面実装におけるチップ立ち防止技術”，オムロンテクニクス，Vol.37，No.1，p.15，1997
- 11) 阪元智朗：“モデルフラックスによるリフロー現象の観察”，オムロンテクニクス，Vol.37，No.1，p.10，1997
- 12) 阪元智朗：“印刷工程に必要なはんだペースト特性の解析”，オムロンテクニクス，Vol.38，No.3，p.236，1998



平野 正夫（ひらの まさお）
昭和23年生まれ。昭和46年，同志社大学工学部工業化学科卒業。工学博士（大阪大学）。現在，オムロン株式会社生産技術開発センタにおいて，実装技術の研究開発，ソルダリング・COB・実装機能化の研究指導に従事。