

## 無鉛はんだの量産化導入取り組み

A Trial of Mass Production Lead-Free Solder

渡邊 万哲, 野田 紀彦

Masato Watanabe, Michihiko Noda

**要旨** 生産技術部門実装担当の全社組織である実装技術分科会では、1998年より無鉛はんだの導入検討を開始した。各種無鉛はんだの評価と、手はんだ付け、フローはんだ付け、リフローはんだ付けにおける技術的検討を行い、2000年1月より無鉛はんだの量産導入を開始した。

**Summary** The Mounting Technology Subcommittee began investigating the introduction of lead-free solder in 1998. Evaluation of various lead-free solders and the technical examination of Manual soldering, Flow soldering, Reflow soldering was carried out, and the introduction of lead-free solder in mass production began from January, 2000.

**キーワード** : 無鉛はんだ, 無鉛はんだリフロー, 合金組成選定試験, 生産性確認試験, 電氣的マイグレーション, クラック剥離

### 1. まえがき

EUではELV(End of Life Vehicle)やRoHS(Restriction of Hazardous Substances)指令により、鉛などの有害物質の使用を制限する法制化を進め、2006年7月から規制が適用される。従来我々が使用してきたはんだには37～40%の鉛(Pb)が含まれており、鉛を含まないはんだ(無鉛ハンダ)の導入が急務となっていた。これに伴い、実装技術分科会では各種無鉛はんだの評価から始め、各はんだ付けにおける技術的検討を行った。そこで本報告では大きく2つに分け、「フローはんだ付け用無鉛はんだとヤニ入りはんだの選定のために実施した各評価試験結果の報告」と、「無鉛リフローはんだ付けに対する“課題”と“対策”」について報告する。

### 2. フローはんだ付け用無鉛はんだ合金の選定

#### 2.1 情報収集

無鉛はんだの評価に先立ち、各はんだメーカーから発表されている合金組成について調査を実施した。その結果、ベース金属が錫であるのはどこのメーカーも同じだが、第2元素としては4種類の金属がある(図1)。そのうち2種類のはんだ(第2元素がBi, Zn)は実際に使用できる可能性が低いため、評価対象から外し、Sn-Ag系とSn-Cu系の評価を行うこととした。

#### 2.2 合金組成選定試験

(引っ張り強度 / クリープ強度試験)

従来のSn-Pb共晶はんだと無鉛はんだの各種合金組成について、引っ張り強度およびクリープ強度試験を実施し、比較した。図2はSn-Pb

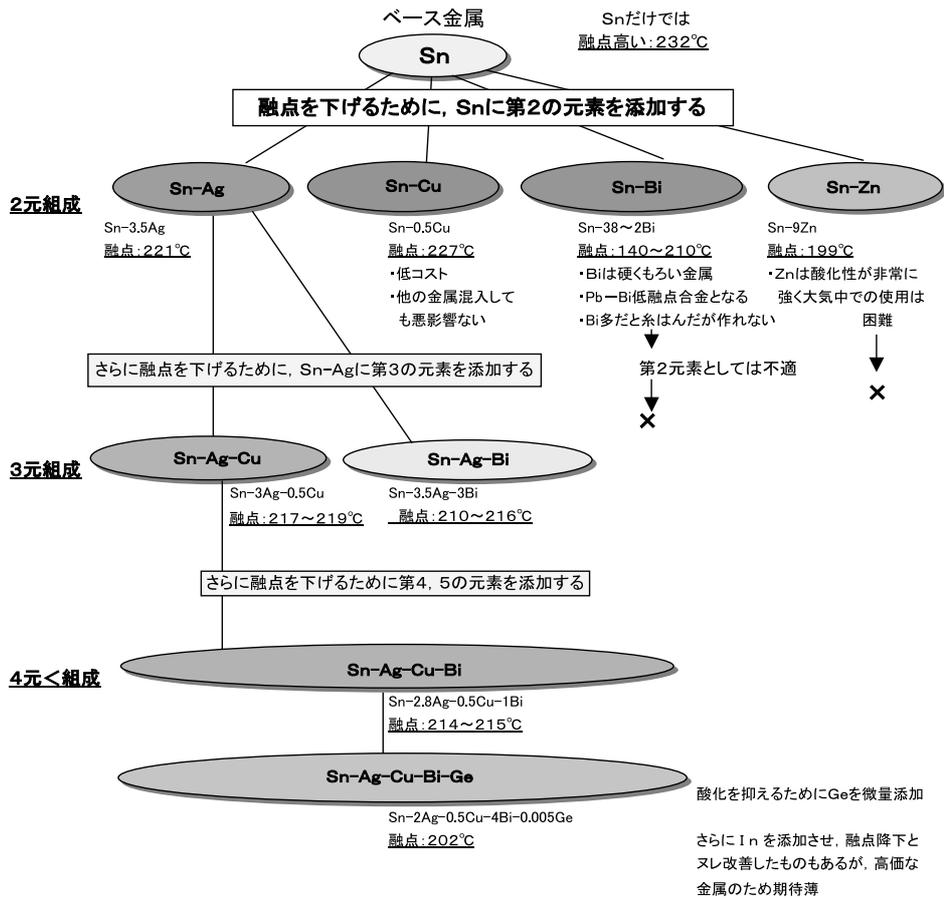


図 1 無鉛はんだの候補合金組成

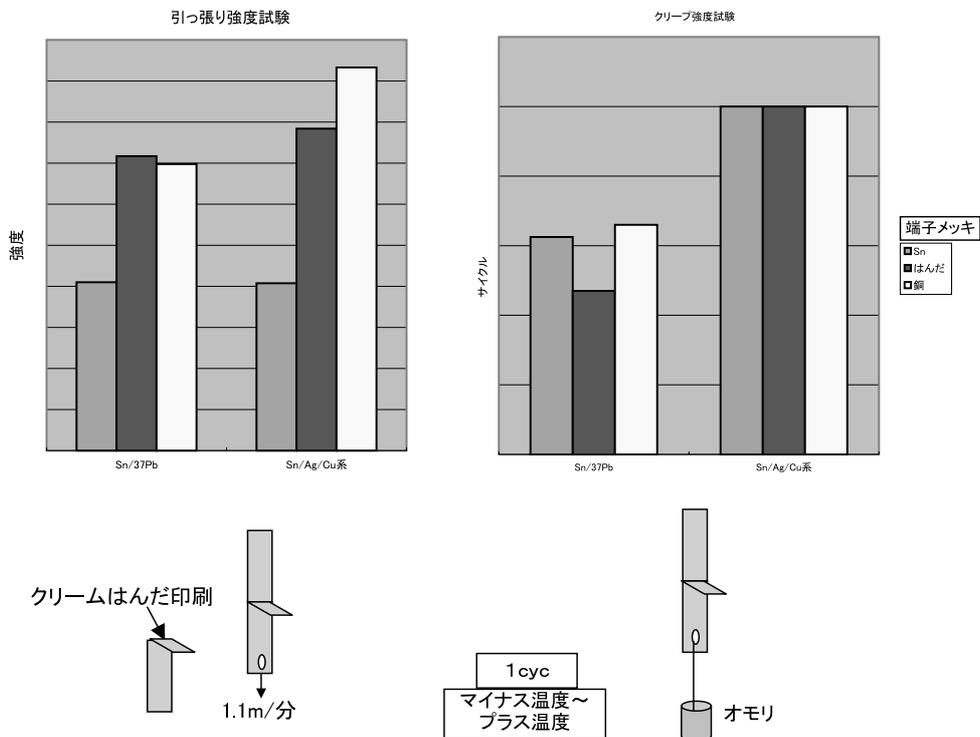


図 2 引っ張り / クリープ強度試験

共晶はんだと Sn-Ag-Cu 系無鉛はんだの比較結果を示す。無鉛はんだの Sn-Ag-Cu 系はんだおよび Sn-Cu 系はんだとも引張り強度およびクリープ強度とも Sn-Pb 共晶はんだより強いことが分かった。

### 2.3 合金組成選定試験

(スルホール充填 / 生産性確認)

#### 1) スルホール充填率比較

Sn-Pb 共晶はんだと無鉛はんだの Sn-Ag-Cu 系はんだおよび Sn-Cu 系はんだでのスルホール充填性(スルホール上がり)の比較をした。図3は、その3種類のはんだにおけるスルホール充填率の比較結果を示す。スルホール充填性につ

いては、Sn-Cu 系無鉛はんだが他のはんだより劣ることが分かった。

#### 2) 生産性確認試験

Sn-Pb 共晶はんだと無鉛はんだの Sn-Ag-Cu 系はんだおよび Sn - 高 Ag-Cu 系はんだ(高 Ag とは、Ag の含有率 3.5wt% 以上をいう)でのフローハンダ付けにおけるブリッジ、未はんだ、ピンホール発生数の比較をした。

図4は、その3種類のはんだにおける不良発生ポイント数の比較結果を示す。

不良発生ポイント数では差はないが、はんだ付け生産性および Ag の含有率(コスト)の面から Sn-Ag-Cu 系はんだが優位と判断した。

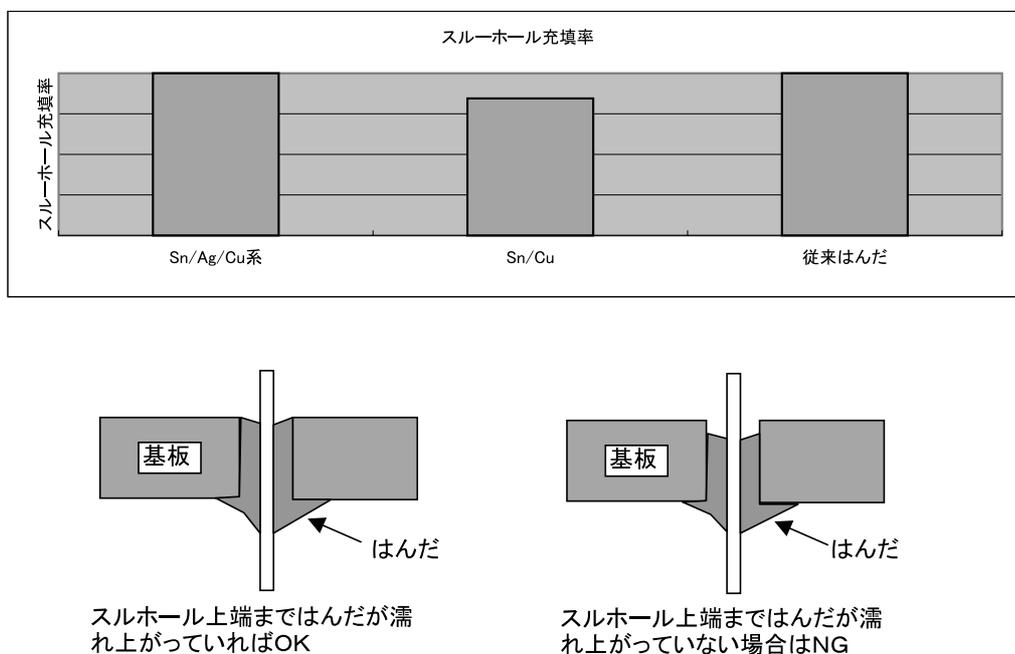


図3 スルホール充填率比較

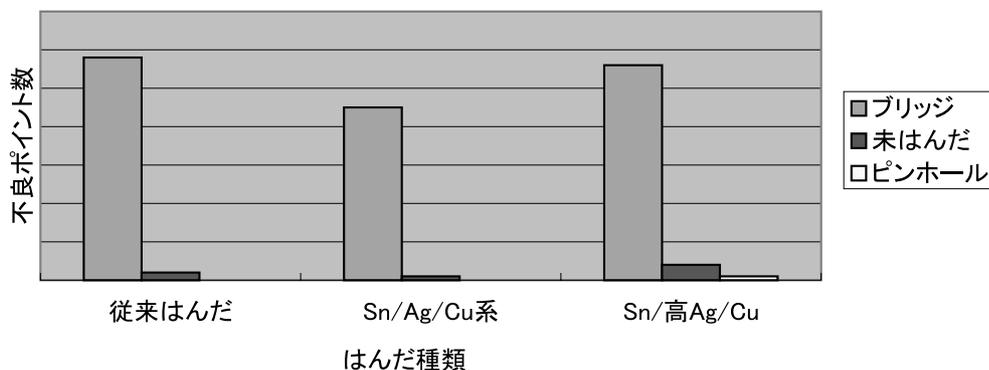


図4 フローはんだ付け実験不良調査結果

表 1 Sn-Pb 共晶はんだ / 無鉛はんだ物性値比較

はんだ特性		Sn-Pb共晶はんだ (H63A)	無鉛はんだ (Sn/Ag/Cu系)	懸念事項 その他
物 性 ( 合 金 )	溶融温度 (°C)	183	214-215	スルーホール上がり熱容量 の大きい部分ではんだ付け性
	比重	8.4	7.4	
	線膨張係数 ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	23.7	23.4	
	インピーダンス(at 500MHz) (mΩ)	500	480	
	引っ張り強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	4.9	4.2	接合信頼性
	伸び (%)	44	35	
そ の 他	外観	光沢有り	艶消し状態	
	はんだ付け条件 手はんだ	280~320	280~320	
	フロー用はんだ	240~260°C 3~6秒	240~260°C 3~6秒	
	リフロー用はんだ 200°C以上の時間 ピーク温度	20~40秒 MAX 230°C	30~60秒 MAX 250°C	(参考) 鉛フリー: 230°C以上の時間
	クリープ破断時間 (h)	28.7	89.7	信頼性向上
	濡れ時間 (sec)	0.2	0.37	
	引張り強度 (kgf)	11	12.13	
	特 許	無し	有り	ライセンス契約をしているメーカ からの購入

## 2.4 Sn-Pb 共晶はんだと Sn-Ag-Cu 系

### はんだの特性値比較

Sn-Pb 共晶はんだ / 無鉛はんだ物性値の比較を表 1 に示す。無鉛はんだはクリープ破断時間で優れ、信頼性が向上している。

## 2.5 電氣的マイグレーション検討

無鉛はんだで接合強度と共に懸案となるのが、電氣的マイグレーションの発生である。

そこで、Sn-Pb 共晶はんだと無鉛はんだ(Sn-Ag/Cu 系)でマイグレーションを発生(印可電圧: 10V)させ、析出した金属を調査した結果、Sn-Pb 共晶はんだは鉛(Pb)が成長し、無鉛はんだは銀(Ag)が入っているが微量のため錫(Sn)が析出した。

材質 / 電氣的には鉛(Pb)の方がマイグレーションが発生しやすいので、この結果より考察すると、Sn-Pb 共晶はんだよりも無鉛はんだの方がマイグレーションの発生に関し有利になる

ものと考えられる。

なお、マイグレーションの発生し易さ(イオン化傾向)は

$$\text{Ag} > \text{Pb} \quad \text{Cu} > \text{Sn} > \text{Au}$$

である。

## 2.6 フローはんだ付け用はんだの最終選定

以上の結果、強度的にも、はんだ付け性にも優位な Sn-Ag-Cu 系無鉛はんだを選定した。また、スルーホール充填性には劣るものの Sn-Pb 共晶はんだと同等以上の接続強度があり、コスト面でも有利な Sn-Cu 系はんだについてもフローはんだ付け用として導入している。

## 3. 無鉛ヤニ入りはんだ(手はんだ付け用)の選定

### 3.1 メーカー選定試験 1

ヤニ入りはんだの場合は、従来の Sn-Pb 共晶はんだでもヤニ(フラックス)によって優位さ

が生じることは分かっていたため、合金組成が同じ無鉛ヤニ入りはんだでも複数メーカーのものを評価した。表2に無鉛ヤニ入りはんだの基本性能を比較した結果を示す。

評価基準による合否判定では、評価した各社の無鉛はんだは全て合格水準であった。また、はんだ付けはできるが、Sn-Pb共晶はんだに比べると溶けにくく、拡がりにくいなど作業性は劣る。

### 3.2 メーカー選定試験2

無鉛ヤニ入りはんだの基本性能を評価した結果、評価した全ての無鉛ヤニ入りはんだは合格水準であったため、実際の作業時での作業性を

確認した。評価方法は、作業条件を同じにするために、ロボットにて引きはんだ付けを実施し、ブリッジの発生件数にて評価をした。表3にその評価結果を示す。合金組成ではどの品種も大きな違いはないが、メーカーやフラックスによって大きな差が生じている。手はんだ付けの場合、はんだの切れ性が重要であるため、合金特性よりもフラックス特性の方がはんだ付け不具合の発生に有効であることが分かった。

### 3.3 無鉛ヤニ入りはんだの最終選定

以上の結果、ブリッジ不良の少なかったS社の無鉛ヤニ入りはんだを第一推奨とした。

表2 無鉛ヤニ入りはんだ基本性能評価結果

メーカー	合金組成	フラックス	ヤニ入りはんだ合否判定結果		
			濡れ広がり	フラックス広がり	ハンダホール
<比較用従来はんだ>					
	Sn-37Pb	RMA	OK	OK	OK
	Sn-40Pb	A	OK	OK	OK
A社	Sn-2.0Ag-0.5Cu	A	OK	OK	OK
	-4.0Bi-0.05Ge				
	Sn-3.5Ag	B	OK	OK	OK
B社	Sn-3.5Ag-0.7Cu	RMA	OK	OK	OK
	Sn-3.5Ag-0.7Cu	A	OK	OK	OK
S社	Sn-3.0Ag-0.7Cu	RMA	OK	OK	OK
	Sn-3.0Ag-0.7Cu	A	OK	OK	OK
	Sn-0.7Cu	RMA	OK	OK	OK
	Sn-0.7Cu	A	OK	OK	OK

表3 無鉛ヤニ入りはんだ、ブリッジ発生評価結果

メーカー	合金組成	フラックス	ブリッジ発生数 コテ先温度設定			合計	実用温度 320~360	判定
			280°C	320°C	360°C			
比較用一般はんだ								
	Sn-40Pb	A級	0	0	7	7	7	
A社	Sn-3.5Ag-1Cu-0.05Ge	A級	24	6	10	40	16	×
	Sn-3.5Ag-1.0Cu	A級	37	25	29	91	54	×
B社	Sn-3.5Ag-0.7Cu	RMA	30	25	37	92	62	×
	Sn-3.5Ag-0.7Cu	A級	62	19	22	103	41	×
S社	Sn-3.0Ag-0.7Cu	RMA	0	0	5	5	5	○
	Sn-3.0Ag-0.7Cu	A級	33	41	58	132	99	×

#### 4. 量産評価試験の実施

##### 4.1 製品試験項目および結果

実際の製品を無鉛はんだ化したときに、その製品が従来通りの機能・性能を有しているか、さらには、同等の接合信頼性を有しているかが大きな課題となる。そこで、評価実験により選定したSn-Ag - Cu系はんだでフローおよび手はんだ付けをした製品を用いて評価した。評価に用いた製品は量産している製品(図5)を選定し、信頼性評価は、はんだ接合信頼性を確認するのでヒートサイクル試験を中心に実施した。試験の結果、製品状態での全ての評価項目で問

題がなかった。

##### 4.2 ヒートサイクル試験断面観察結果

製品状態での評価項目で問題のないことが判明したが、はんだ付け部を無鉛化したことにより、クラックなどの発生状況がどうなっているのかを調査するために、ヒートサイクル試験を実施した製品のはんだ接合部の断面写真を取り確認した。典型的な部品を図6に示すが、全ての部分でSn-Pb共晶はんだに比べヒートサイクル後の接合部の状況に遜色のないことが分かった。これらのことにより、十分量産導入できることが分かった。



図5 評価に用いた量産製品

部品	Sn-Pb共晶はんだ	無鉛はんだ
リード部品		
チップ抵抗		

図6 断面観察

5. 無鉛リフローはんだ付けの課題と対策  
従来のSn-Pb共晶はんだは、183の融点に対して、現在無鉛はんだの主流となっているSn-3.0Ag-0.5Cu(通称JEITA(Japan Electronics and Information Technology Industries Association)組成)はんだの融点は217であり、34も高くなる。

リフローはんだ付け実装工程においては部品全体をはんだ融点以上の温度条件下にさらすことになることから、部材・工法・設備の全てにおいて、はんだ付け信頼性をSn-Pb共晶はんだ同等の品質に保つことは我々実装技術担当にとって非常な困難をもたらすものである。

### 5.1 業界動向とパイオニアの方向性

一般的に、電機業界他社においては、「リフローはんだ付けの無鉛化を、フローはんだ付けより先行させて導入している」とのJEITA報告もある。

しかし、これから報告する「課題」と「対策」に対し、部品業界全体の対応は進んでおらず(特に基板を含む部品材料耐熱・リードメッキ)、他社の先行導入に対してパイオニアは、フロー

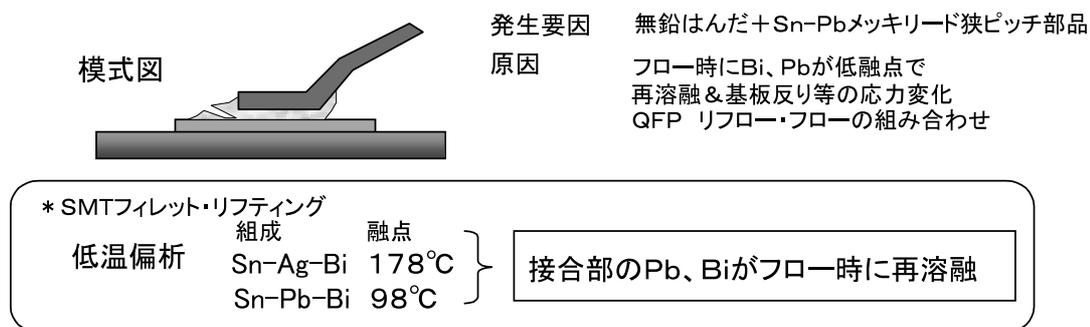
はんだ付けの無鉛化導入を先行し、無鉛リフローはんだ付け導入に対し、慎重な信頼性検証を行って導入を図っている。部材・工法・設備業界全般についても、2003年になりようやく無鉛はんだ対応策の足並みが揃った状態である。これには、欧州の環境規制ELV・RoHSが大きく影響している。現在も進化の過程途上であることから、今後は無鉛リフローはんだ付けの導入が加速されることは確実であり、その方法も変化・進化させなければならない。

### 5.2 課題と対策

無鉛はんだに対する信頼性レポートは、はんだメーカー、セットメーカーから数多く出ており、重複が多い内容は、本報告では割愛する。部品耐熱、はんだ濡れ性、大気/N<sub>2</sub>(窒素)雰囲気での品質差など課題は多い中で、1点に注目した報告とする。

#### 5.2.1 課題：フィレットリフティング(はんだ界面剥離)の発生

図7に示す様に、はんだ付け不良症状を総称するもので、特に「先面無鉛リフロー/後面フローはんだ付け」工程での基板に発生する。



◇ フロー時の基板のねじれ・反り、各材料の熱膨張率より応力解析を行った結果、リードの先端に最も応力が発生。

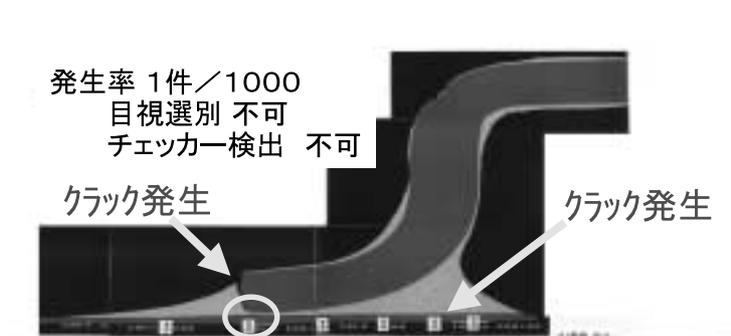


図7 SMT フィレットリフティング

主な特徴を次に示す。

基板銅箔面からクラック剥離

大型の QPF・TSOP などに発生（小型 chip には出ない）

1/1000 ~ 1/3000 の低い発生率

多くの場合疑似接触していて、生産工程で検出が困難

従来部材(基板・鉛メッキ部品・Bi 入り低融点系無鉛はんだ)と従来設備を使用する中では、生産上最適な無鉛はんだ付け条件を整えても収束していかない不良である。

### 5.2.2 原因：低温偏析と機械的ストレス

低温偏析とは、無鉛はんだ中の添加金属である Bi や Ag とリードメッキに含まれる Pb 成分が、結晶して生成される (Bi-Pb, Ag-Pb, 図 8)。

金属強度が弱く、他の金属結合の組み合わせよりも低融点で生成してしまうことから、はんだ硬化時のはんだフィレット内の温度低下のスピード差により基板銅箔側に集中的に発生するものである。

機械的ストレスは、主に基板収縮（反りも含む）と部品との熱膨張差に起因する。

部材そのものの熱膨張差

従来、Sn-Pb 共晶はんだ使用時からの課題ではあるが、より加熱温度が上昇するため線膨張係数差の大きな部品～基材の組み合わせで顕著となる(図 9)。大型 Si チップ・42 アロイリードフレーム部品～CEM3 基材の組み合わせは禁止事項としなければならない。また、樹脂部品の線膨張係数も要調査項目である。

《原因》：後面フローはんだ付け時の先面温度上昇による、Bi-Pb低温偏析(融点100℃以下)発生による リフローはんだ付け部の強度劣化(基板面温度上昇 170℃)

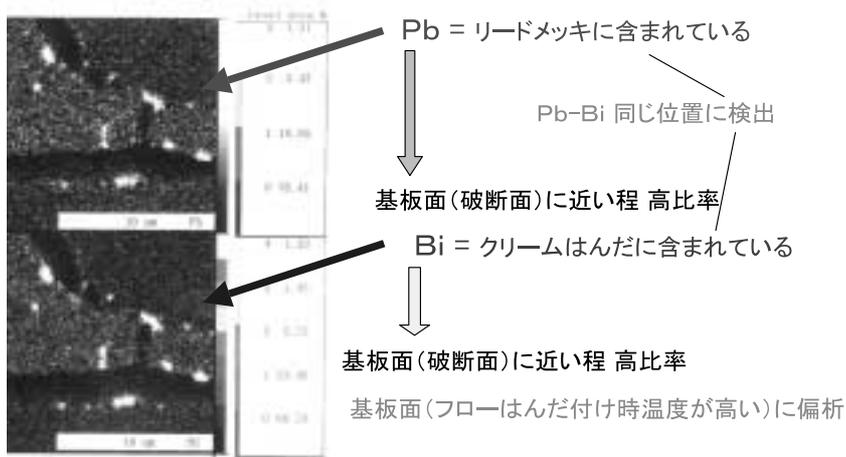


図 8 低温偏析

部品		線膨張係数 × 10 <sup>-6</sup>	基板						
			(CEM-3)		(FR-1)		(FR-4)		
はんだ	リード*		縦	横	縦	横	縦	横	
		30							
		25	CEM-3	CEM-3					
はんだ		20							
	Cu	15				FR-1			
		10			FR-1		FR-4	FR-4	
		5							
	42アロイ								
	Siチップ	1							

図 9 材料別熱膨張係数

リフロー炉内～出口での基板収縮・反りによる残存応力

リフロー炉内での基板表面に発生する歪みは、冷却時に増加し、およそ基材樹脂の軟化点温度(Tg点)で最大となり、残存応力として残る。これは、リフロー後の基板反りの振る舞いと一致していることが判る。

後面フローはんだ時の基板収縮・反りによる応力

上述したと同様に、後面フローはんだ付け時の先面再加熱 / 基板収縮・反りにより、歪みが生じる。

基板先面の温度上昇は、約170前後となり、無鉛はんだそのものは溶融せず、強度の弱い低温偏析成分だけが再溶融し、偏析を加速し、クラックとなる。

### 5.2.3 対策:「偏析」と「機械的ストレス」双方を抑制

低温偏析対策

低温偏析は、はんだ付け箇所から、Pb, Bi成分を取り除く。

- ・部品リード Pbメッキ部品のリフロー先面不採用および全廃

- ・低融点化濡れ性upの目的で、はんだの中に添加物として入っているBiの最小限化  $1Bi \Rightarrow 0.5Bi \Rightarrow$  微 / 無Bi はんだへの「クリームはんだ再選定」をする。但し、紙フェノール基材を多く使用するリフロー / フロー基板においては、低融点系無鉛はんだを使用せざるを得ない状況であり、低Bi化は、はんだ付け性および使い易さを悪化させている。より使い易い低Biの低融点系無鉛はんだの開発が望まれる。

急速冷却

低温偏析の発生は、徐冷 > 急冷、であることが知られている。

- ・リフロー炉冷却ゾーンでのチラー装置追加フィレット内での、無鉛はんだ硬化スピード差を無くし、偏析を抑制することに加えて、炉内での歪みを抑制する目的からも、チラー装置(冷却装置)と反りサポート・ラインの設置により基材Tg点(熱的性質の転移点温度をいう。その材料が剛性状態から粘弾性状態に移る温度域を示す。)までの冷却期間において基板をサポートすることが必要である(図10)。

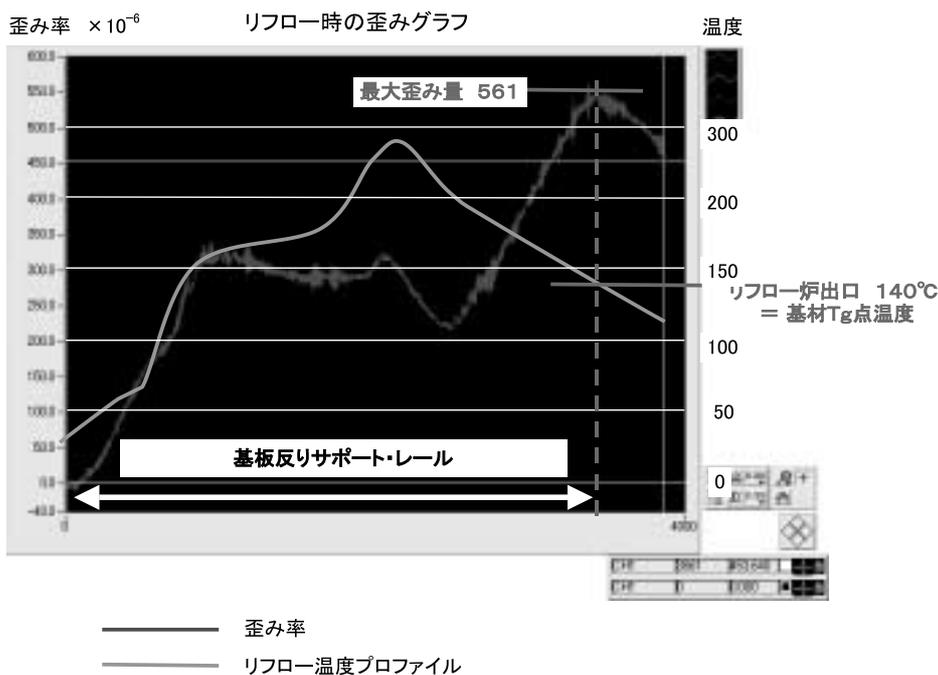


図10 リフロー炉内の基板ひずみ - 温度管理

- ・後面フローはんだ付け時の先面温度低下

図 11 に洗面冷却装置追加改造の様子を示す、はんだ槽表面へのエアブロー冷却により先面リフローはんだ付け部分の温度上昇を抑制する。机上解析と実験の結果、154 程度で抑制効果があった。

機械的ストレスの抑制

- ・線膨張係数差の開きの大きな部材 - 基材の組み合わせを禁止する。

4.2 アロイリードフレームの大型部品 ~ CEM3 基材の組み合わせの他にも、使用基材に近い線膨張係数の部材を設定・使用していくことが、良いはんだ付け信頼性を生む。

- ・基板の小型化

一般的に、図 12 に示す様に基板を小さくすれば「反り」の絶対値が抑制されるのは当たり前のことであるがミクロに見ても、加熱冷却時の微小部分の歪み率において大基板 > 小基板であることが実験で判明した。どこまで小さくすれば安全なのか？は今後の解析課題であるが、設計制約としていかねばならない。

- ・急速冷却の機械的ストレス軽減効果

偏析を抑制する目的で導入したリフロー炉チラーおよびはんだ槽エアブロー冷却装置であるが歪み測定の結果、

### ○ はんだ槽装置への 先面冷却装置追加改造

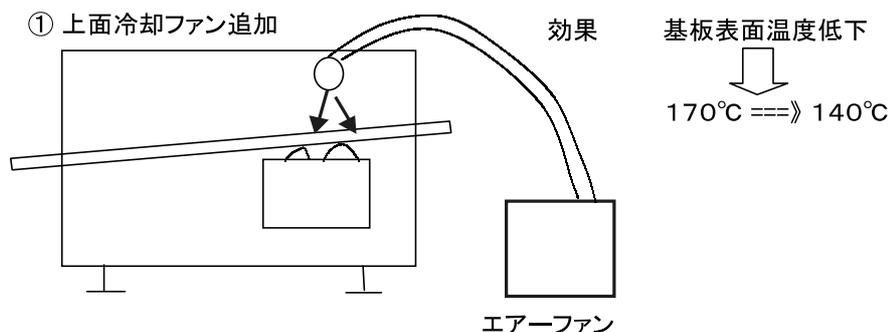


図 11 後面フローはんだ付け時の先面温度低下

### 基板歪み・反り抑制による、はんだ部への剪断ストレス軽減

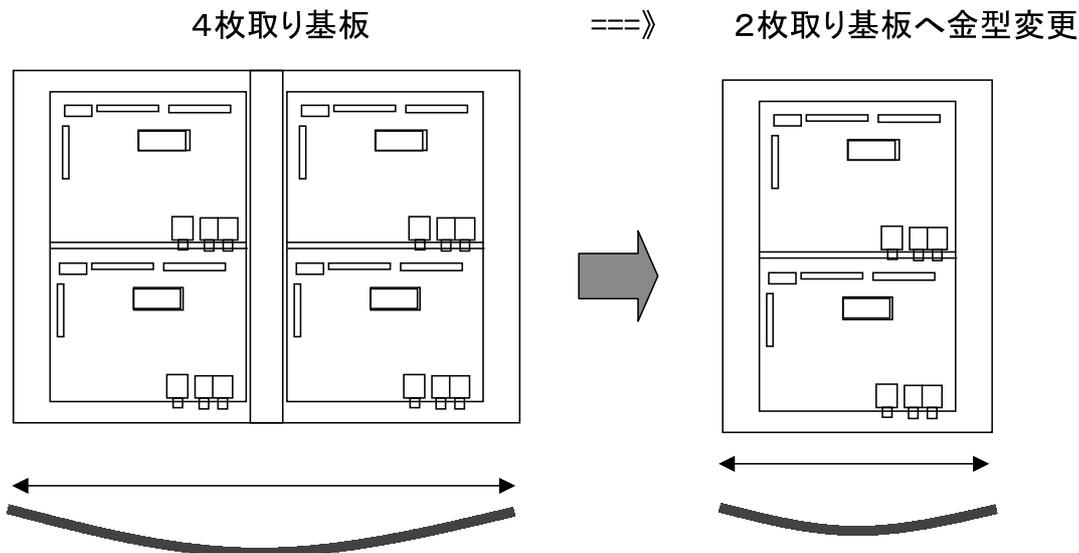


図 12 基板サイズ制約強化

機械的ストレスを軽減 / 基板反り抑制効果も大きいことが判明した。どちらが、効果として支配的なのかは、はっきりと判っている訳ではないが、今後必須の装置であり、温度管理を強化していかなければならない。

### 5.2.3 今後の展開

パイオニアの基板と無鉛はんだ使用状況は、大きくは、次に示す2通りに大別されている。

#### 両面リフロー基板

ガラス基材基板 / JEITA3 元無鉛はんだ

#### リフロー / フロー基板

紙フェノール基材基板 / 低融点系無鉛はんだ

理由は単純で、紙フェノール基材の耐熱が JEITA3 元はんだの融点 217 でのリフロープロファイル加熱を満足していないことによる。このことが、無鉛リフローはんだ付けを難しいものにして最大でかつ最後の原因である。ここまで述べてきたさまざまな対策を実施しながら、現在、生産化に対応している。

今後は、

- ・紙フェノール基材の耐熱を 217 はんだのリフロー条件に耐え、反りが出ないもの
- ・現状の紙フェノール基材の耐熱でも使用可能な、低融点はんだ組成の開発

を期待する。

## 6. まとめ

無鉛はんだの導入を 2000 年から開始したが、その対応製品の台数は、2000 年度は 177 万台、2001 年度は 763 万台、2002 年度は 1838 万台と推移しており、全生産台数の 80% を超える所まできている。パイオニアでは製品から鉛を「2005 年度に全廃」という環境目標がある。残り僅か 2 年であり、まだまだ解決しなければならない課題はあるが、我々担当部門および関連部門では、その目標達成に全力をあげている。

## 7. 謝辞

各種評価実験、原稿作成に当たり、実装技術分科会および各関係部門の協力に感謝します。

### 筆者

渡邊 万哲 (わたなべ まさと)

所属: MEC 川越事業所 生産部 生産技術部

入社年月: 1990 年 4 月

主な経歴: 実装技術開発

野田 紀彦 (のだ みちひこ)

所属: HEC 所沢事業所 生産部 生産技術部

入社年月: 1979 年 4 月

主な経歴: 生技基板ユニット開発・標準化担当

その他: 主な得意分野は基板実装全般