

自動車環境下における Pbフリーはんだ接続部の信頼性評価

Reliability of Pb free Soldered Joints for Automotive Environment

大 釜 俊 洋* 平 田 一 彦**
Toshihiro OKAMA Kazuhiko HIRATA

要 旨

Pbフリーはんだ接続部の物理的特性である組織の粗大化速度、金属間化合物成長速度、機械的特性であるはく離試験の評価を行い、さらに熱疲労における寿命の評価として、熱衝撃試験(加速試験)を行なった。

最初にPbフリーはんだの組織の粗大化速度、金属間化合物成長速度は放物線則に従うことを確認した。次に信頼性工学におけるマイナー則を用い、加速試験による熱ストレスの影響と自動車環境による熱ストレス頻度から、Pbフリーはんだ接続部の市場における寿命を予測した。

ABSTRACT

Tests were conducted to evaluate the grain growth rate of the structure and the intermetallic compound layer fracture rate, which are physical properties, and peeling, which is a mechanical property of Pb free soldered joints. In addition, thermal shock tests (acceleration tests) were performed to evaluate the life span due to thermal fatigue.

First, the grain growth rate and intermetallic compound layer fracture rate of the Pb free soldered structure were confirmed to follow parabolic curves rule. Next, the life span of Pb free soldered joints under market conditions was predicted using Miner's rule in reliability engineering from the effects of heat stress obtained through acceleration tests and the heat stress frequency in an automotive environment.

1. はじめに

昔から使用してきた Sn-Pb 系はんだは Pb の毒性と環境汚染により、重要な環境問題となっている。そのためPbを含まない(Pbフリー)はんだ材の研究が盛んに行われてきている。この活動は、全世界レベルで活発化しており、アメリカ、ヨーロッパを中心に研究が進められ、最近では日本も家電リサイクル法(2001年施行)が立法化し、研究に加速がついてきた。自動車用電子・電装部品においても通産省産業構造審議会から Pb の削減目標が提示された。

自動車用電子・電装部品に使用する Pbフリーはんだの選定は、その使用環境、使用期間内で部品の機能を損なわないようにすることが必要である。そのために自動車に使用される電子・電装部品のはんだ接続部の環境は十分に把握しておく必要がある。また、市場から回収した自動車用電子・電装部品のはんだ接続部を観察すると組織の粗大化、金属間化合物の成長が確認されており、これらの成長が信頼性に大きく影響すると言われている。パルク材強

度、接続部引張強度等、機械的強度の把握だけでは接続部の信頼性評価は不十分である。Pbフリーはんだの組成違いで、組織の粗大化、金属間化合物のミクロ的観点、及び機械的特性のマクロ的観点から熱疲労の信頼性保証について報告された例は多くない。

そこで本研究では、Pbフリーはんだの組織の粗大化速度、金属間化合物成長速度、機械的強度を把握した上で、自動車で使用されている電子部品の使用環境下に即した試験条件を設定し、故障モデルを用い接続部の寿命を算出した。

2. はんだ接続部信頼性評価の考え方

自動車の電子・電装部品はかなり厳しい環境下で使用されている。部品自身の小型化が進み、接続間も狭くなり、特に自動車内は熱ストレス、振動、湿度等が複合的に加わる。その中ではんだ接続部の信頼性として、最も重要な事は熱疲労対策である。はんだは融点も低く、また基板と部

* 栃木研究所

**千住金属工業(株)

品の線膨張係数差に基づく大きな熱応力が発生し、この熱応力が繰り返しかかると熱疲労破壊をおこしてしまう。Pbフリーはんだも同じで、Sn-Pb系と組成が異なることから融点、組織の粗大化速度、金属間化合物成長速度、機械的特性等が異なり、接続部の寿命に大きく影響を及ぼすと考えられる。そこで特に重要なのがPbフリーはんだを用いた部品の評価手法、評価基準である。評価基準は市場環境から想定し試験条件、試験時間を設定し、摩耗故障、劣化故障を見極めていく。評価手法は実験室内での加速試験手法の構築を行なう。ここでは例としてベアチップダイボンディングを取り上げ、その信頼性を評価していく。

3. 実験試料及び実験方法

3.1. 実験試料

実験に使用したはんだは、毒性が少なく、既存のはんだに用いられている元素を選定した。Snをベース金属としてPb, Bi, Ag, Sb, Znの共晶及び種々の元素を組合せ、Sn-37Pb, Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.75Cu, Sn-58Bi, Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi, Sn-5Sb, Sn-9Zn, のはんだを用いた。各試験における試料はこれらのはんだから選定した。尚、Sn-9ZnはNiとの濡れ性が悪く試料の条件設定が困難のため、金属間化合物成長速度試験、熱衝撃試験を取りやめた。さらにSn-5SbはSnとSbの元素番号が近いことから、相を電子顕微鏡で識別するのは困難のため組織の粗大化試験を取りやめた。

3.2. 金属間化合物成長速度試験条件

はんだ溶融接合時に生成される金属間化合物の成長速度が、はんだ組成違いによってどのように異なるかを調べる実験を行なった。成長速度を加速させるため放置温度は120℃で行い、放置時間は成長過程を把握するためにTable 1に示す数回の途中観察を行なった。試験片の作成方法は、はんだペーストから供給しNi板にはんだ付けし、Ni板との接合界面に生成する金属間化合物厚を測定した。測定方法は、各加熱放置時間後、はんだ付けの断面が垂直になるように切断し研磨する。その後はんだ付け断面をEDS(Energy Dispersive Spectrometer)により元素マッピング、BEI(Backscattered Electron Image)により組成観察しながら金属間化合物の厚みを測定した。

Table 1 Measurement time

Time (hr)	0	250	500	1000
-----------	---	-----	-----	------

3.3. 組織の粗大化試験条件

実験はいずれもJIS A級の不純物レベルのはんだを用いた。本実験は組織の経年変化を、温度を上げてその速度を加速させ観察する事とした。試験片作成方法は、NiメッキCu

板(17.5 × 17.5 × 1.75 t)にフラックス(活性化ロジン)を約0.12cc滴下し、さらに、0.2gのはんだをのせる。これを、はんだの融点+50℃に調整したはんだバス上にパラフィン紙を敷き、その上に試験片を置き、はんだが溶けてから約30秒間加熱し、はんだ付けする。放冷後、フラックス残渣をイソプロピルアルコールで洗浄し、乾燥させた。

試験方法は、120℃に保持してある恒温槽に試料を入れ、途中観察はSn-58Biの融点(138℃)が低い相の成長が他のはんだより速いと考え、0, 10, 20, 60, 120, 240, 1200, 3000, 12000, 24000, 30000 (min)ごとに取り出し、電子顕微鏡(日本電子JSM-5310LV)を用いて組織観察(×1000, ×3500倍)を行った。観察した写真は、線分析法によって処理し、その例をFig.1に示した。

例えばSn-58Biの場合、観察結果の一辺に平行な長さLの直線を引いた時、線上に存在するBi相の割合をBi相と交差した数で割ることで、Bi相のサイズを導いた。

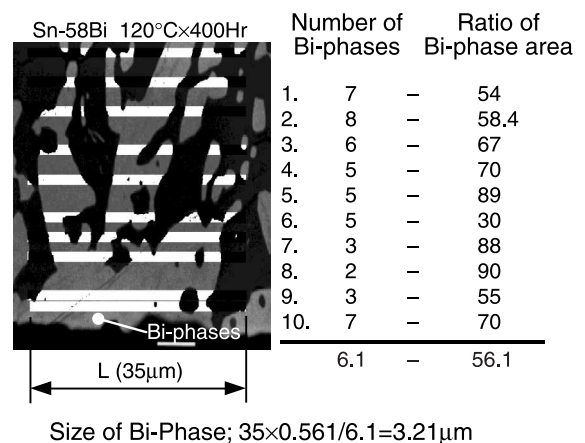


Fig.1 Linear analysis data

3.4. はく離試験条件

はんだ接続部を加熱した時、はんだ組成違いで、接続部強度にどのように影響するか実験を行なった。試験片の作成方法は、はんだテープから5 × 15 × 0.1mmに切り出したはんだをFig.2のように銅板で挟み、はんだバス上でリフローする。リフロー時間は、はんだ溶融してから20secと

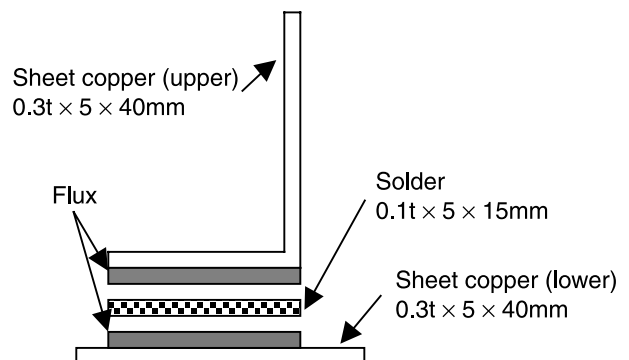


Fig.2 Test piece

し、はんだバス温度は各融点に応じて設定した。Sn-58Biは200℃、Sn-5Sbは270℃、その他は250℃とした。加熱温度は120℃で行い加熱時間は経時変化を把握するために6条件で行なった (Table 2 参照)。

Table 2 Heat exposure time

Time (min)	0	10	20	60	6000	12000	60000
------------	---	----	----	----	------	-------	-------

試験方法は、引張試験機(Shimadzu AG-2000B)を使用し、試験片の曲げた部分に試験機のチャックを取り付け、試験片に引張荷重をかけてはく離試験を行なった。引張速度は10mm/minで行なった⁽¹⁾。はく離試験の評価方法として、Fig.3に示す定常荷重を用いた。クラックが入るまでを寿命とすると、ピーク荷重の方が類似していると思われるが、フィレット形状等で出力値に影響を及ぼすと考え、比較的安定している定常荷重を用いた。

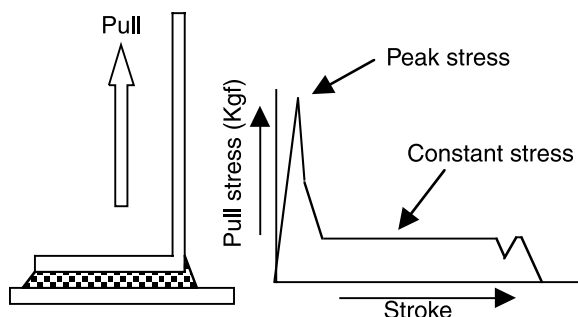


Fig.3 Pull test method

3.5. 熱衝撃試験条件

はんだ接続部に熱衝撃を与えた時、はんだ組成違いで、接続部にどのような影響を及ぼすか実験を行なった。試験片は超音波探査装置で観察するためベアチップダイボンディングを用いた。(Fig.4参照)試験条件は自動車に使用されているさまざまな電子・電装部品を想定し3条件を設定した (Fig.5参照)。熱衝撃試験は熱衝撃試験機によって行い寿命を比較した。はんだ接続部の観察は、超音波探査装置を用い、はく離形態を把握するために途中観察した (Table 3 参照)。

4. 金属間化合物成長速度試験結果について

金属間化合物については、Snなどのはんだ成分は、各種金属と相互拡散により金属間化合物を形成する。はんだ溶融接続時、接続後の加熱放置によっても成長し、接続部をもろくしたり、カーゲンダールボイドや割れを発生させる。特に自動車に使用する電子・電装部品は低温、高温の繰り返し温度サイクルがかかるので、各種材料間の熱膨張差によ

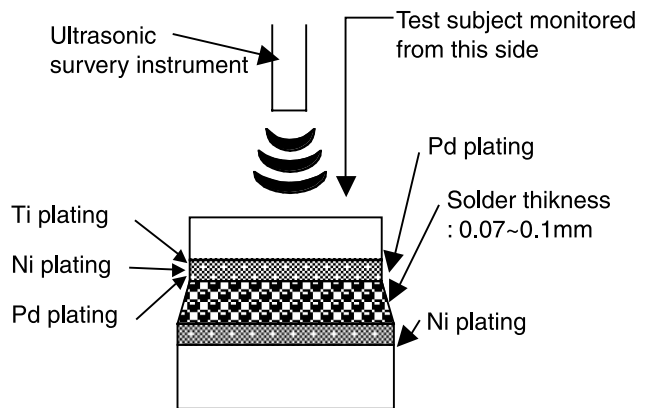


Fig.4 Specification of test subject

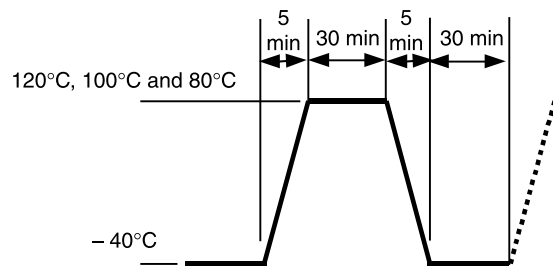


Fig.5 Conditions of thermal shock test

Table 3 Measurement time

Temperature	Time (hour)
$\Delta T 120^{\circ}\text{C}$	0, 505, 1000, 1500, 2000, 3770, 5000
$\Delta T 140^{\circ}\text{C}$	0, 406, 1000, 1732, 3000, 4000, 5000
$\Delta T 160^{\circ}\text{C}$	0, 100, 240, 537, 1060, 1533, 2000, 3000

て発生する熱応力が接続部のクラック、機械的強度劣化に大きく影響し、信頼性が低くなることから、十分な配慮が必要である。Fig.6は金属間化合物の成長を観察した結果である。

試験に用いたはんだの全てに Sn-Ni 金属間化合物が生成されており、各種はんだにより金属間化合物の厚みがことなる。またFig.7より、Sn-3.5Ag-0.75Cu、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Biは Sn-Cu 金属間化合物が生成していると考えられる。次に Sn-Ni 金属間化合物成長速度を Fig.8 に示した。Pbフリーはんだにおいても Sn-Pb 系はんだと同様に、金属間化合物の成長速度は時間の平方根に比例し、放物線則⁽²⁾に従うことが確認できた。

$$X = k \sqrt{D \cdot t}$$

成長厚さ：x，保持時間：t，定数：k，拡散定数：D
 その中で最も成長が遅いのは Sn-3.5Ag-0.75Cu、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi である。これは Fig.7 から分かるように Sn-

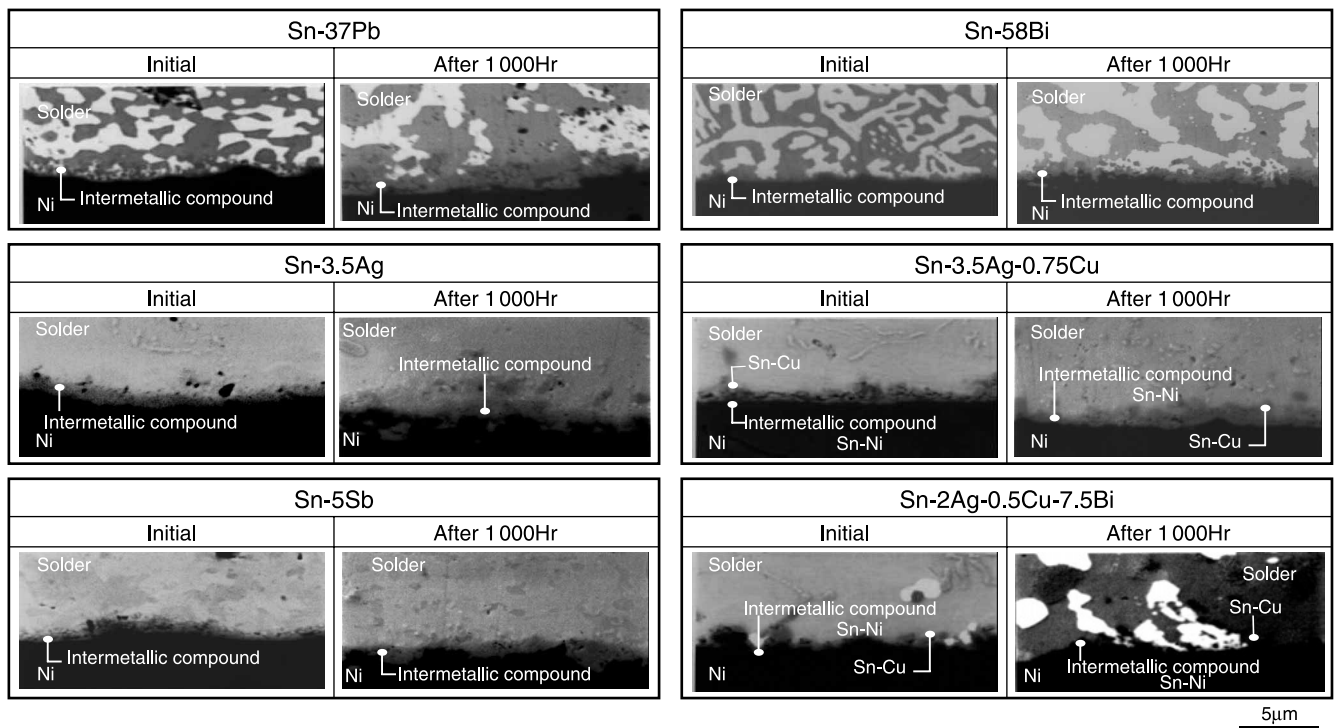


Fig.6 SEM image of intermetallic compound layer

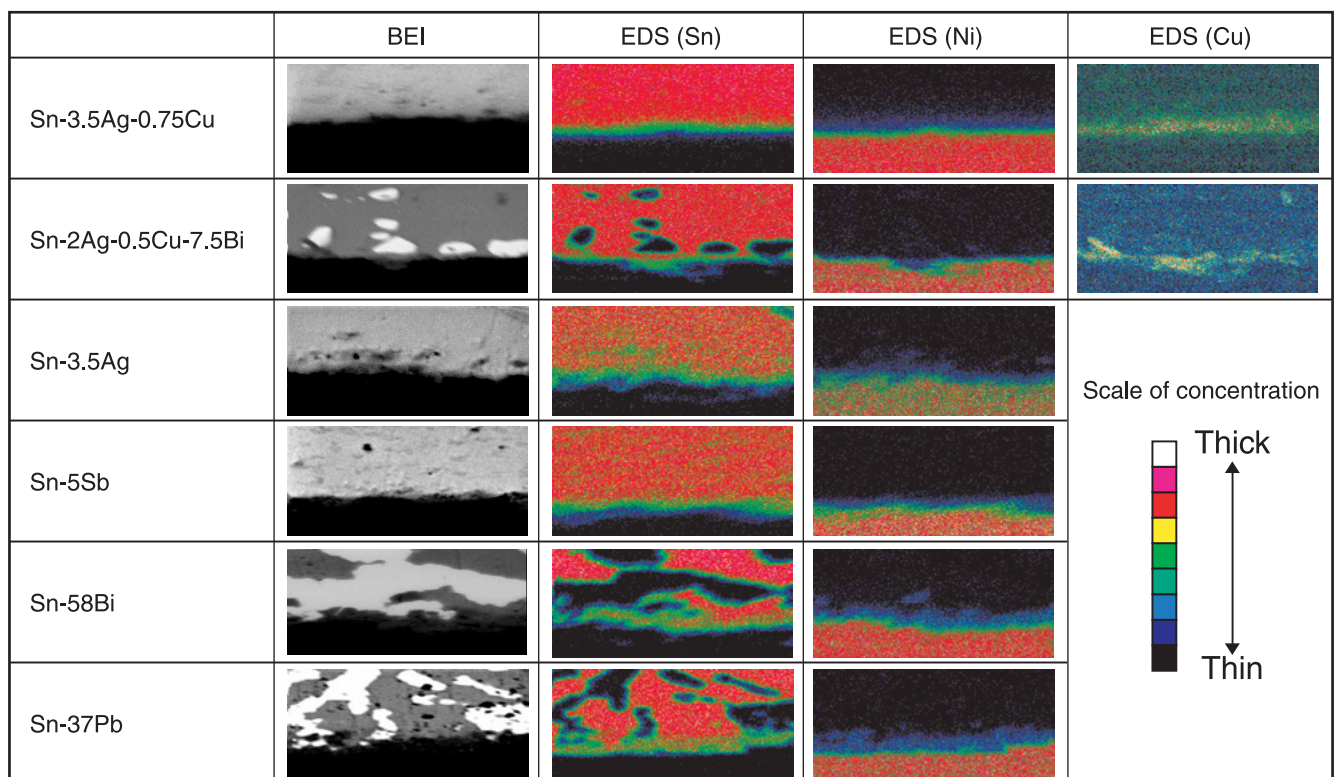


Fig.7 Distribution maps of each elements intermetallic compound layer

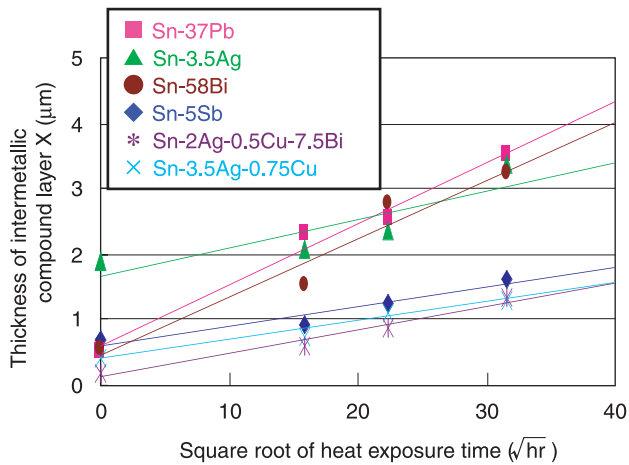


Fig.8 Growth pattern of the intermetallic compound layer

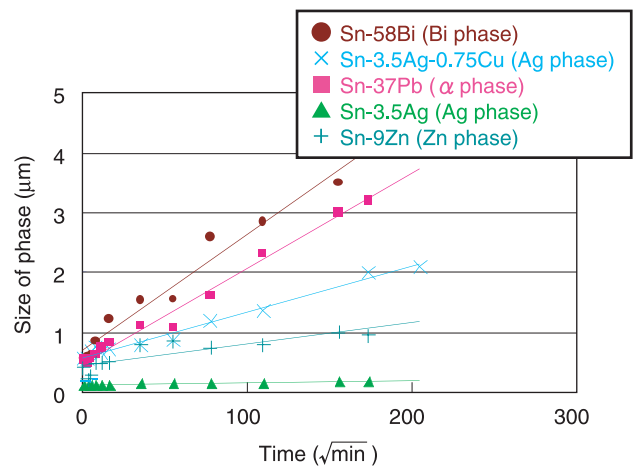


Fig.9 Change in phase size due to aging of each solder

3.5Ag-0.75Cu, Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi は、共に Cu が界面に集まる現象が有り、Cu が添加されていると Sn-Ni 金属間化合物が抑制される傾向⁽³⁾にあるためと考える。

5. 組織の粗大化試験結果について

Pb フリーはんだの粗大化は、Sn-Pb はんだ同様各相の各固溶限濃度、界面エネルギーの変化であり、相平衡の自由エネルギーを下げる方向⁽⁴⁾に進み、その速度も放物線則に従

うことが確認できた (Fig.9 参照)。その成長速度は Sn-Bi 系の Sn-58Bi が最も速く、Sn-Ag 系の Sn-3.5Ag が最も遅かった。これは、各 Pb フリー はんだの状態図からも分かるように各温度での固溶限濃度変化が大きい程その速度も速い傾向にあると言える。また、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi の組織変化は特徴ある変化を得た (Fig.10 参照)。120℃ 放置を 10min もかけると Bi が Sn のマトリックス中に拡散し、Bi が存在していた跡がポイドとなり、このポイドはさらに放置していくと大きくなったり、消失または新たに発生することが

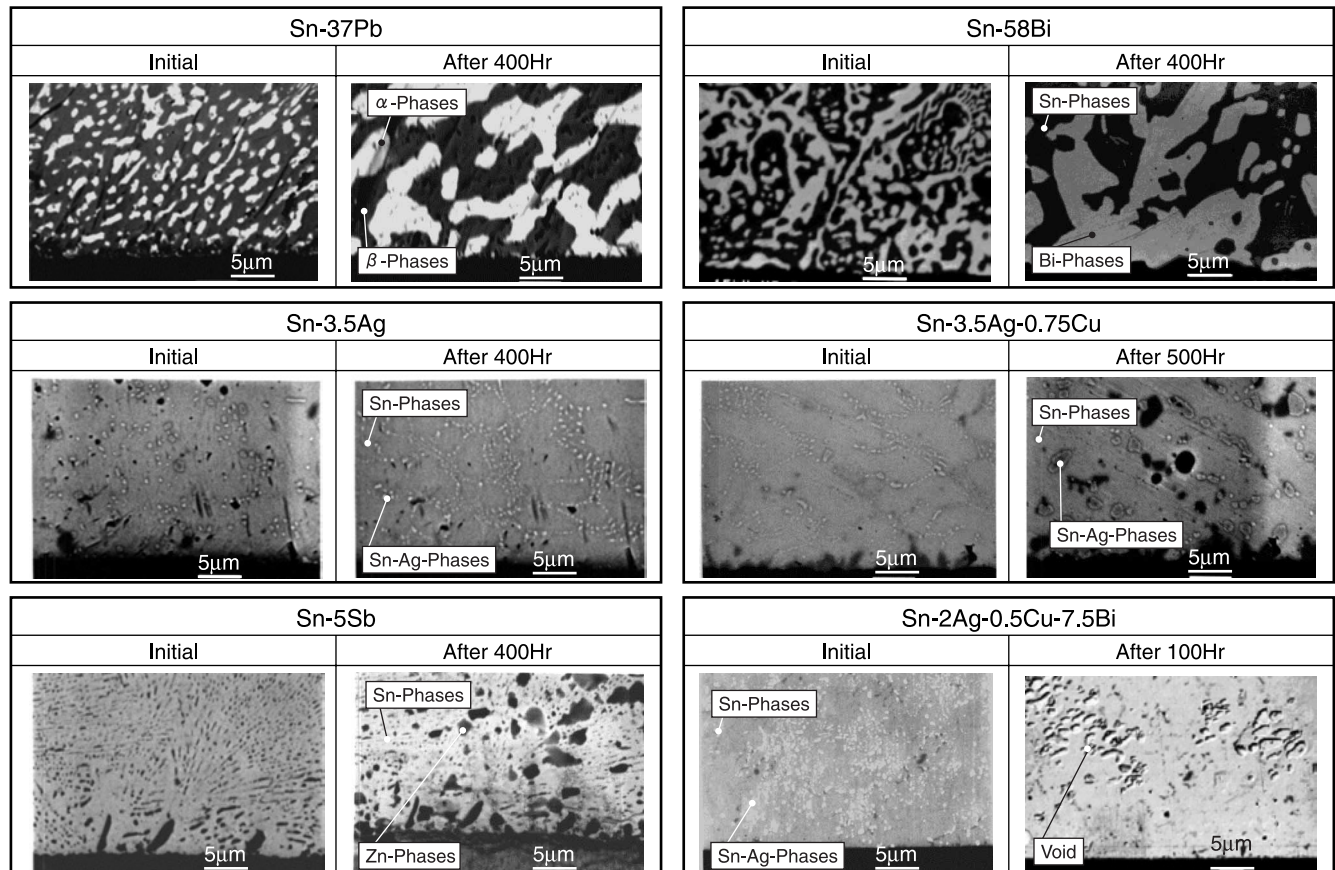


Fig.10 Aging of Pb free soldered area relative to temperature

確認できた。尚、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi の Bi 相が消失してしまうため Fig.9 へのプロットを削除した。

次に、組織の粗大化によるはんだ接続部への影響を考察すると、熱衝撃によるはんだ接続部のはく離は最大応力集中部での繰り返し応力による、局所塑性変形(転位のすべり変形)によりマイクロクラックが発生し進展することから、はんだ内部ではく離は組織の粗大化によるものも一つの要因と考えられる。一般的に組織の粗大化によるはんだ接続部強度劣化はホール・ペッチの法則⁽⁵⁾に従うと考えられている。

相(結晶粒)サイズと強度の関係は相の平均径をDとした時、その強度 ρ は、

$$\rho = k / \sqrt{D} \quad (k \text{ は定数})$$

で表わせる。

上式のように、加熱放置して相が成長するほどその強度は劣化し、はく離し易くなることが分かる。

6. はく離試験結果について

Fig.11 より、120°C、500時間加熱放置後はく離荷重を計測したところ、Sn-Bi 系、Sn-9Zn のはんだの荷重低下が著しかった。Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi の荷重低下は、加熱放置で Sn-Cu 金属間化合物が厚くなることによって、そこのはんだ中にあった Bi が金属間化合物とはんだ界面に取り残される。結果的に界面の Bi 濃度が高くなり、ぜい性的にはく離したと考えられる。さらに Sn-58Bi の荷重低下では、加熱放置による組織の粗大化で、Bi のへき開破壊が顕著に影響したことも一因と考える。Sn-9Zn のはく離荷重が急激に低下することが確認できた。その理由として Cu、Zn の拡散速度が速いため⁽³⁾カーゲンダールボイドによりはく離荷重の著しい低下になったと考える。逆に Sn-Ag 系のはんだは荷重変化が少なく安定していた。これは金属間化合物である Sn-Cu の成長が遅く、金属間化合物—はんだ界面を劣化させる要因が少ないためと考える。

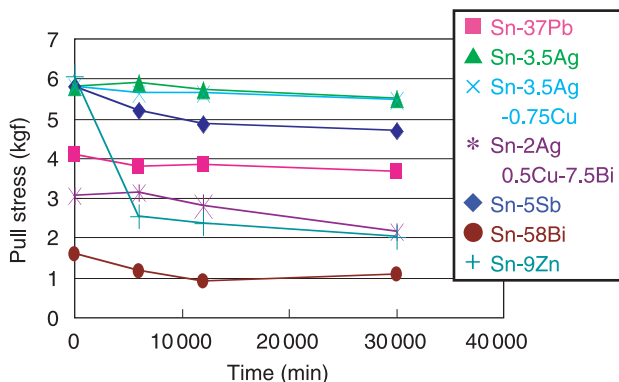


Fig.11 Pull strength of connection point after high temperature exposure

7. はく離観察結果について

熱衝撃試験(Fig.12 参照)、はく離試験結果(Fig.13 参照)から、Sn-58Bi、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi の Bi 系はんだは金属間化合物ではく離が生じ、他のはんだははんだ内部からはく離が生じていることが確認された。理由としては、Sn-58Bi、Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi は伸びが無く非常に固く脆いことから、熱膨張した時に金属間化合物とはんだ界面での歪みに耐えられず強度が最も弱い界面からはく離が生じたこと、また

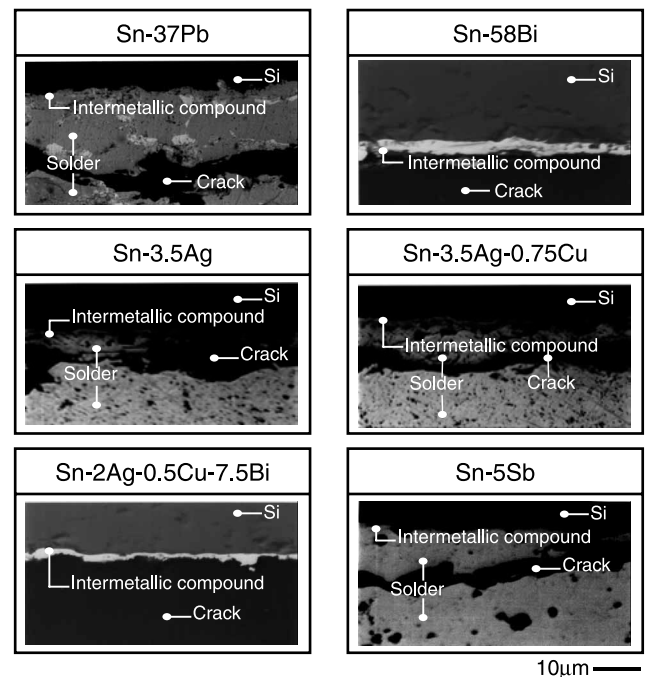


Fig.12 SEM image of cracks after thermal shock (under Si chip)

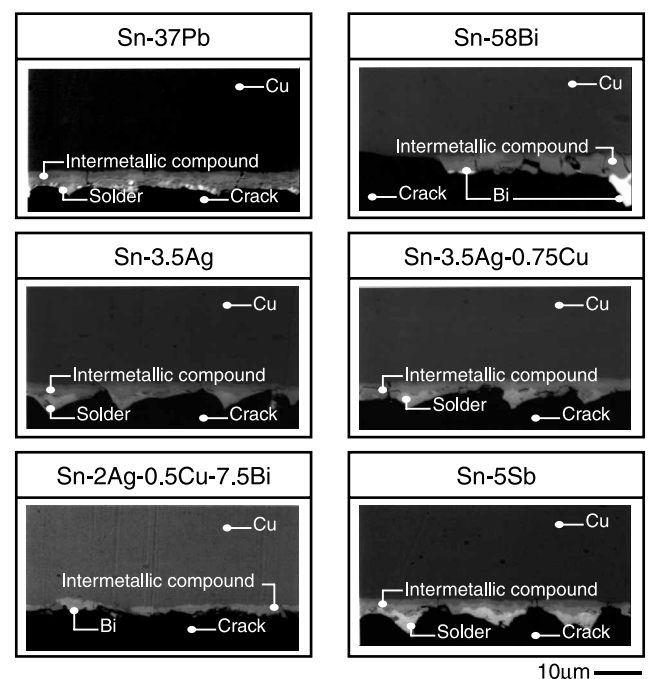


Fig.13 Peel strength of soldered area due to aging

金属間化合物の成長速度(変化率)が両者共に早いことから、金属間化合物界面からはく離が生じたことが考えられる。これに対して、他のはんだについては金属間化合物の成長速度(変化率)が遅く、伸びについても Sn-Bi 系に対しては柔らかい特性を示しており、金属間化合物とはんだ界面ではく離が生じず、結果的に最も強度が弱いはんだ内部からはく離に至ったと考えられる。

8. はんだ接続部寿命予測

8.1. 自動車環境の熱履歴

自動車に使用される電子・電装部品のはんだ接続部の信頼性における最大の課題は熱疲労と考える。はんだ接続部に対して素子の自己発熱、冷却、ユーザーの使用勝手、頻度、さらに四季による環境の温度変化の繰り返しによって熱応力、熱ひずみに加わり、最終的には熱疲労破壊する。

8.2. 熱疲労寿命線図について

はんだの熱疲労破壊は疲労破壊が主体でクリープによって加速性が増す疲労クリープの複合破壊と推定される。一般的に、はんだ接続の熱疲労寿命 N_f に関する関係式は、Coffin-Manson の経験式

$$N_f \propto C \cdot f^m \cdot (\Delta \varepsilon)^{-n} \cdot \exp(Q/k \cdot T)$$

で表わせる。但し、 C を材料定数、 m 、 n を指数、 f を繰り返し周波数、 $\Delta \varepsilon$ を塑性ひずみ量、 Q を活性化エネルギー、 k をボルツマン定数とする。

C 、 f を定数 a 、クリープ項を係数 K とすると、

$$N_f = a \cdot K \cdot (\Delta \varepsilon)^{-n}$$

となる。

両辺を対数化すると、

$$\log N_f = -n \log \Delta \varepsilon + \log a K$$

$$y = -n \cdot X + a \cdot K$$

となり、両対数グラフ上で直線となる。

8.3. 予測寿命算出

そこで、はんだ接続部の機械設計を行なう際には、単に材料強度のみならず、応力と繰り返し回数の関係である $S-N$ 曲線が重要である。 $S-N$ 曲線を用いて接続部の寿命予測する代表的な手法としてマイナー則がある。そのマイナー則は、変動応力で累積疲労の場合、繰り返し応力 S_1 を 1 回、 S_2 を 2 回、……、 S_n を n_t 回加えた時、疲労破壊がおきたとし、 S_t のストレスを加えた時の寿命回数を N_t とすると、

$$\sum_{i=1}^k n_t / N_t = 1$$

という法則である⁽⁶⁾。

ここで N_t を求めるために ΔT (温度変化) 違いの熱衝撃試験を行い、ある一定以上の面積ではく離が生じたサイクル数を寿命と考え、 ΔT 違いの寿命線図を Fig.15 に記載した。熱衝撃試験結果は代表として ΔT 140℃ を Fig.14 に記載した。また使用頻度、四季等を考慮して市場で加わる応力頻度も Fig.15 に記載した⁽⁷⁾。この結果とマイナー則を用い市場における各 Pbフリーはんだ接続部の寿命予測を行った結果を Table 4 に記載した。

Sn-58Bi はんだ以外は Sn-37Pb とほぼ同等以上の寿命があると予測できる。

Table 4 Expect life of solder joint

	Sn-37Pb	Sn-58Bi	Sn-3.5Ag	Sn-2Ag-0.5Cu-7.5Bi	Sn-3.5Ag-0.75Cu	Sn-5Sb
Time to failure (N)	0.93	4.57	0.79	0.95	0.85	0.90

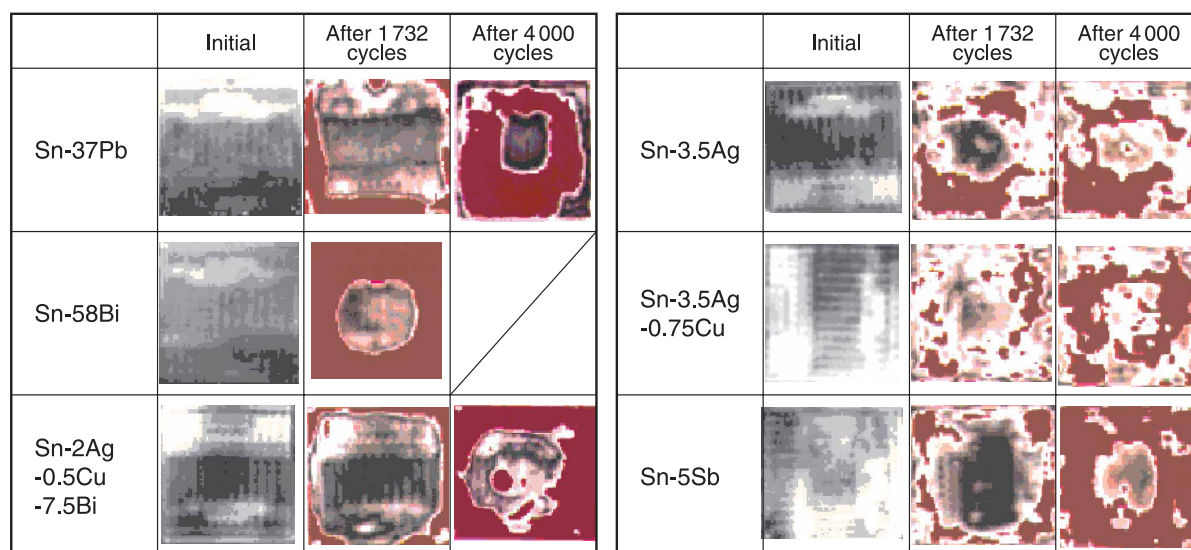


Fig.14 Cracks in soldered area due to heat impact (Red areas represent cracks)

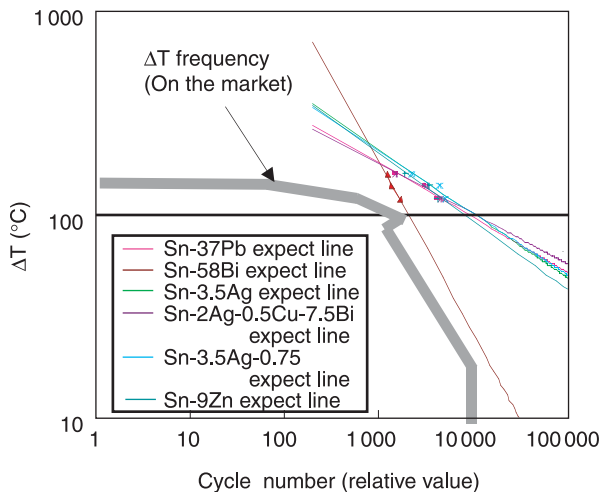


Fig.15 Requirement line of thermal fatigue

- (6) 森五郎：品質保証のための信頼性管理便覧，信頼性管理便覧編集委員会編，日本規格協会，p.176-177，p.206 (1985)
- (7) 森山正人：電装部品におけるはんだ接合の信頼性，HONDA R&D Technical Review vol.9，p.156-166 (1997)

9. 結言

本研究より，以下のことが明らかになった。

- (1) Pbフリーはんだの金属間化合物成長速度，組織の粗大化速度は時間の平方根に比例し放物線則に従うことを確認した。
- (2) 自動車環境下における Pbフリーはんだ接続部の熱疲労寿命予測を行なった結果，Sn-58Bi 以外のはんだは全て Sn-37Pb と同等の寿命を有することが判明した。
- (3) 信頼性工学であるマイナー則を用いることで，Pbフリーはんだ接続部の寿命予測を可能とした。

今後ははんだ組成違い，接続方法違い，さらには環境違い(熱，熱衝撃，振動等)においても同様に寿命予測を行なっていく予定である。

参考文献

- (1) 加藤力弥：環境問題対応 Pbフリーハンダの実用化について，SMIC R&D Report，千住金属工業，p.13 (1998)
- (2) 竹本正，佐藤了平：高信頼性マイクロソルダリング技術，工業調査会，p.318-319 (1991)
- (3) 出川公雄，渡邊裕彦，松村慶一：鉛フリーはんだ接合部に及ぼす基板めっきの影響，3rd Symposium on Micrijoining and Assembly Technology in Electronics，p.52-54 (1997)
- (4) 大釜俊洋：共晶はんだ組織の粗大化速度，溶接学会全国大会講演概要 第58集 平成8年度春季全国大会，社団法人溶接学会
- (5) 末次憲一郎：鉛フリーソルダの実用化および開発課題，27th INTERNEPCON JAPAN，工業調査会，p.44 (1998)

■ 著 者 ■



大釜 俊 洋



平 田 一 彦