

電装部品におけるPbフリーはんだの信頼性とその応用

Reliability of Lead-free solder for Automotive Electronic Devices and Its Applications

畑 恒 久*

Tsunehisa HATA

森 山 正 人*

Masato MORIYAMA

大 村 淳 一*

Junichi OHMURA

渡 辺 朝 生*

Tomoo WATANABE

要 旨

現在、一般的に使用されているはんだはSn-Pb合金であるが、環境への配慮から、Pbを含まない合金が求められている。本研究はPbフリーはんだが従来のSn-Pbはんだの代替をできるかどうか、最初にはんだ接合部の信頼性の評価を行った。劣化モードとして、熱疲労、金属間化合物、クリープと振動疲労、イオンマイグレーションの信頼性5項目の評価を行った。PbフリーはんだであるSn-Ag-Cuはんだは信頼性評価で最も重要な熱疲労寿命に関して、一般的な使用温度環境では、Sn-Pbはんだより優れることが確認できた。次にSn-Ag-Cuはんだを製品として、キーレスエントリトランスミッタに適用し、製造品質及び耐久品質を満足することができた。

ABSTRACT

Although an Sn-Pb alloy is generally used for solder at present, environmental considerations have occasioned a search for lead-free solder alloys. The present research evaluated lead-free solder to determine whether it could replace Sn-Pb solder, beginning with evaluation of the reliability of the solder joint. The evaluation examined reliability under five degradation modes: Thermal fatigue, intermetallic compound layer, creep, vibration fatigue, and ionic migration. Lead-free Sn-Ag-Cu solder showed the longest life under thermal fatigue, which is the most crucial element in reliability, and it was confirmed to have reliability superior to Sn-Pb solder in the thermal environments encountered in ordinary use. The Sn-Ag-Cu solder was then put into use as a product in a keyless entry transmitter, where it was demonstrated to satisfy product quality and endurance quality requirements.

1. まえがき

世界的な環境保護の高まりの中、近年、車においても有害物質の規制が強化されつつある。EUでは家電に関する有害物規制WEEE(08)、車に関する有害物質及び廃車処理規制のEU指令(03)が決定した。国内では家電のリサイクル法が2001年より、施行されており、車においてもリサイクル法案が検討されており、Pbをはじめとする有害物質の削減あるいは全廃は不可避となってきた。一方、車載電装品は安全性の面から、高い信頼性が要求されるため、はんだ材質を変更するということへの抵抗は大きい。また、信頼性が保証されたとしても、はんだ材はもちろん、工程費、周辺材料費の増加が予想されることからコストの面で課題がある。こうしたことから、家電に比べ車におけるはんだ材のPbフ

リー化の動きは鈍いというのが実状である。

本研究は、Sn-Pbはんだで構築したはんだ接合部の信頼性評価技術を用い⁽¹⁾、Pbフリーはんだの信頼性を評価した。この裏付けを基に製品への適用を検討した。そして、信頼性、コスト面の課題を克服し、Pbフリーはんだ電装部品として、キーレスエントリトランスミッタを量産化できたのでここに報告する。

2. はんだの信頼性

車載部品はFig. 1に示す熱、振動、湿度の環境劣化因子の他に、電解、荷重等の内部劣化因子も抱えている。それらの要因とはんだの特性を踏まえてまとめたのが、Fig. 2の信頼性要因図である⁽¹⁾。

*栃木研究所

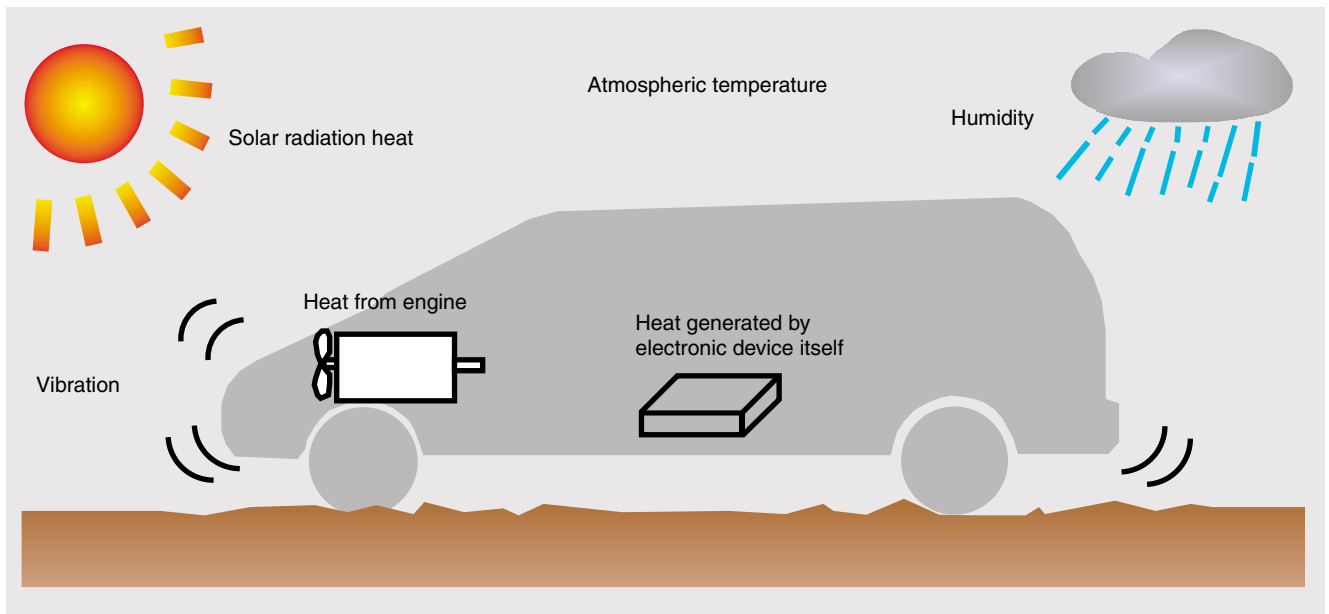


Fig. 1 Stress factors in the automotive environment

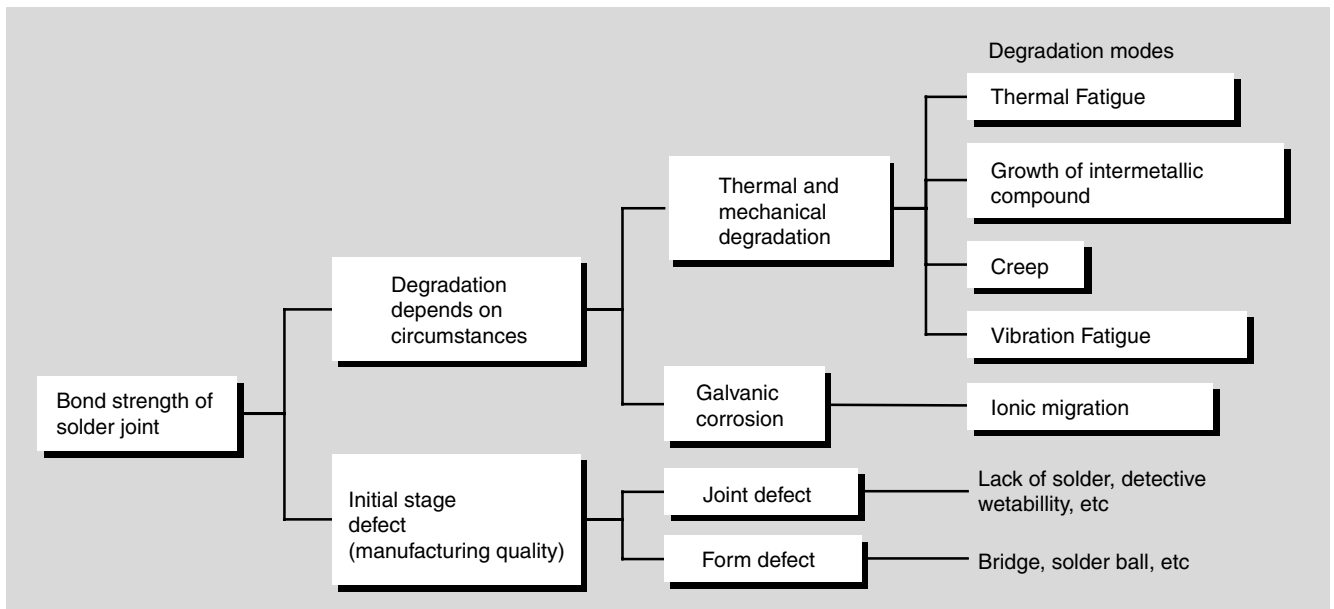


Fig. 2 Solder joint reliability factors

環境劣化モードとしては、1)熱疲労、2)金属間化合物成長、3)クリープ、4)振動疲労、5)イオンマイグレーションが考えられる。信頼性とは、与えられた条件、期間で所定の機能を維持出来るか否かの判断を行なう評価作業である。具体的にいえば、使用保証期間において環境劣化型故障が発生しないことを証明することである^{(3), (4)}。

以上を踏まえ、Pbフリーはんだとしては、各種低融点のSn基共晶型合金をSn-Pbはんだとの比較で信頼性評価を行なった。以下劣化モード5種に関して説明する。

2.1. 熱疲労

熱疲労の発生メカニズムを Fig. 3 に示す^{(1), (2)}。

劣化因子は温度変化(ΔT)であることから、加速試験と

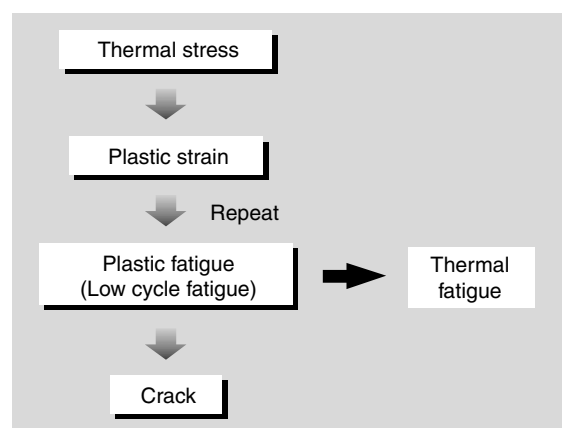


Fig. 3 Mechanism of the occurrence of thermal fatigue

しては高温と低温を交互に負荷する温度サイクル試験が最適である。まず、はんだ組成を変えて評価を行った。

① Sn-37Pb ② Sn-3.5Ag-0.75Cu ③ Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu ④ Sn-8Zn-3Bi の4種のはんだを用い、基板との熱膨張係数の差が大きいセラミックス製のチップ抵抗(2125サイズ)をガラスエポキシ基板に実装した。温度サイクル条件は $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 、30/30分である。結果をFig. 4, Table 1, Fig. 5に示す。破壊形態と内部健全性から、現状、Sn-Bi系、Sn-Zn系の保証は困難として、以下はSn-Ag-Cu はんだに絞って評価を行った。

Sn-Ag-Cu はんだを用いて、 ΔT 違い① $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ ② $-40^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ ③ $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ の3水準の温度サイクル試験を行った。結果をFig. 6, Fig. 7に示す。Sn-Pbと比較すると、Sn-Ag-Cu は通常使用領域である低 ΔT 領域(165°C 以下)では高寿命を示すことが分かる。

次に参考として、チップ部品側の電極表面処理仕様の検討を行った。Sn-3.5Ag はんだを用いて、チップ抵抗表面処理違い品4種(①Sn-10Pb ②Sn100% ③Sn-3.5Ag ④Sn-10Bi)を実装したテストピースを用い、 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 、30/30分の温度サイクル試験を実施した。Fig. 8に結果を示す。Sn-10Biは、低サイクルでのクラック進展率が大きく、Fig. 9に示すように部品とはんだ界面での剥離を起こす等の問題があることから、使用不可と判断した。

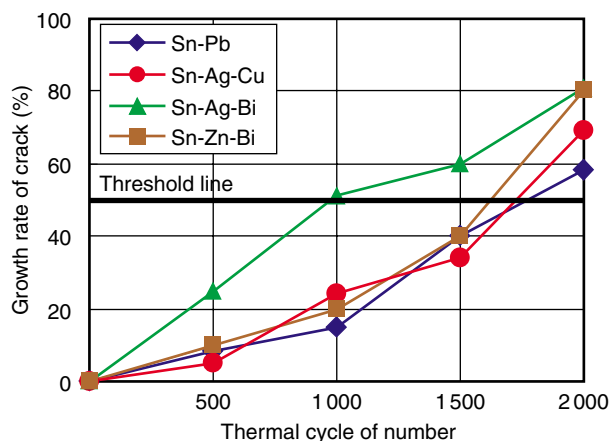


Fig. 4 Tendency of chip resistor degradation classified by solder material

Table 1 Results of thermal cycle test

Solder composition	Mean life-cycle (50% crack)	Internal soundness
Sn-Pb	1 800	OK
Sn-Ag-Cu	1 750	OK
Sn-Bi	1 000	OK
Sn-Zn	1 650	OK

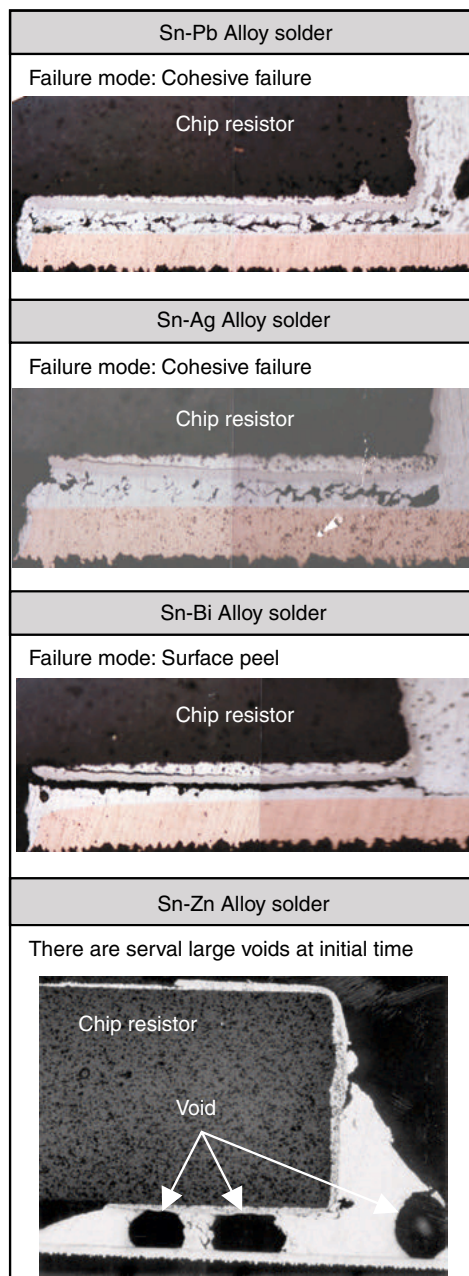


Fig. 5 Cross cut section of solder joint

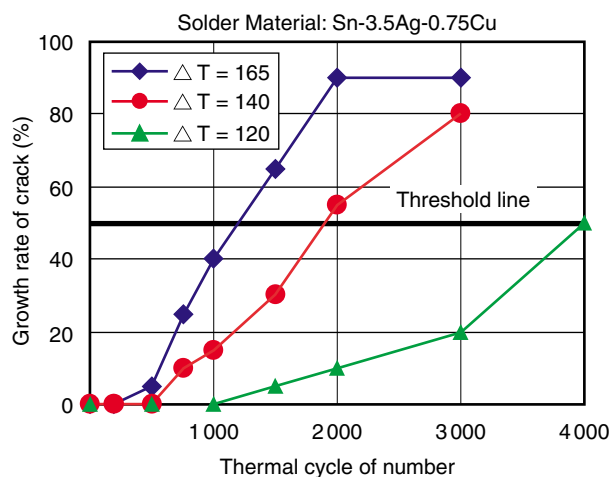


Fig. 6 Tendency of chip resistor degradation classified by ΔT

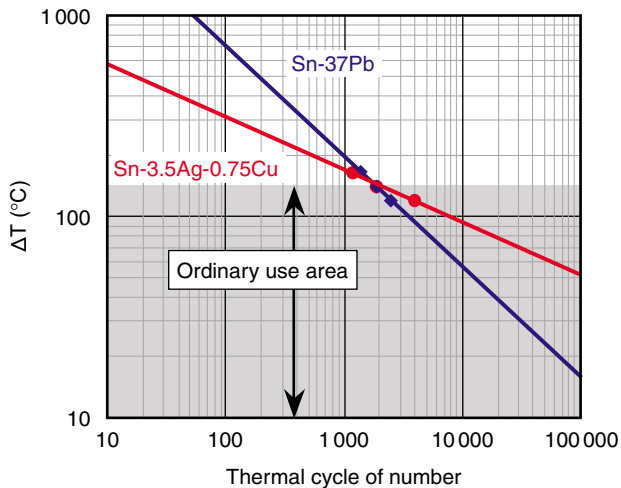


Fig. 7 Limit line of durability of thermal fatigue (chip resistor)

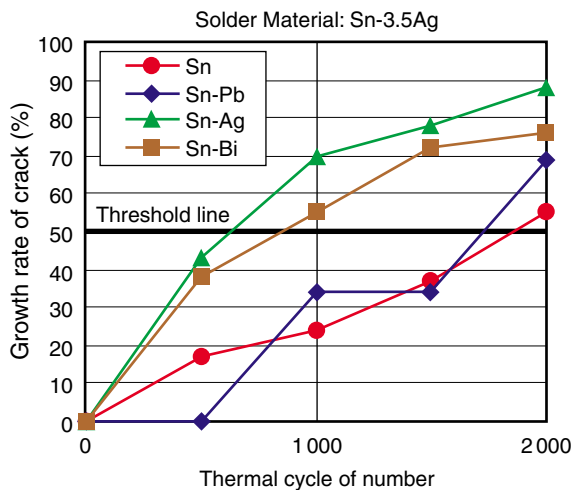


Fig. 8 Tendency chip resistor degradation classified by electrode material (chip resistor)

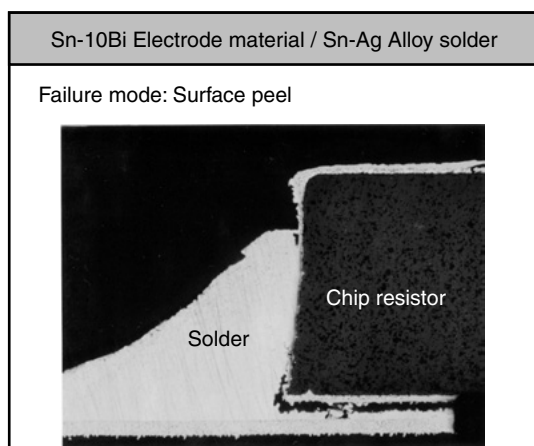


Fig. 9 Cross cut section of solder joint

2.2. 金属間化合物成長

はんだ溶融接合時、はんだ中の Sn と基板パターンを形成する金属(ここでは Cu)は、相互拡散により Fig. 10 の金属間化合物層を形成する。使用初期におけるはんだと基板上の Cu とは強固な結合を示す。しかし、使用環境下で金

属間化合物層が成長すると、安定した化合物相となり、逆に脆くなり継手寿命に影響を及ぼすことが懸念される⁽¹⁾。

Fig. 11 に金属間化合物層成長のメカニズムを示す。これより、熱が劣化因子であり、加速試験は恒温放置試験が最適であることが分かる。チップ抵抗(3 216 サイズ)をガラスエポキシ基板に実装、恒温放置条件は① 150°C

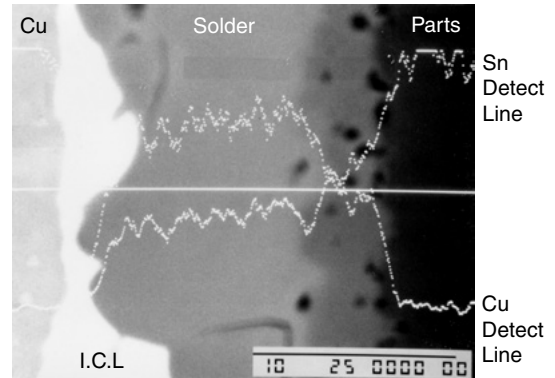


Fig. 10 Micrograph of intermetallic compound layer (I.C.L)

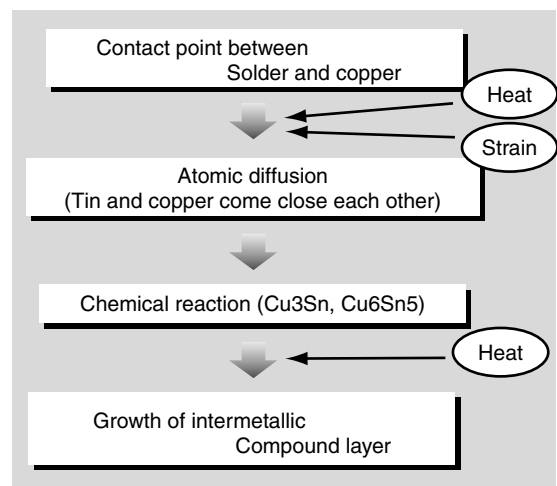


Fig. 11 Mechanism of the growth of an intermetallic compound layer

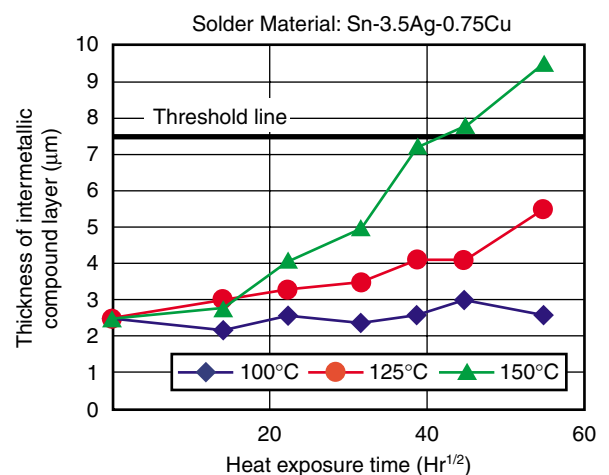


Fig. 12 Growth pattern of the intermetallic compound layer

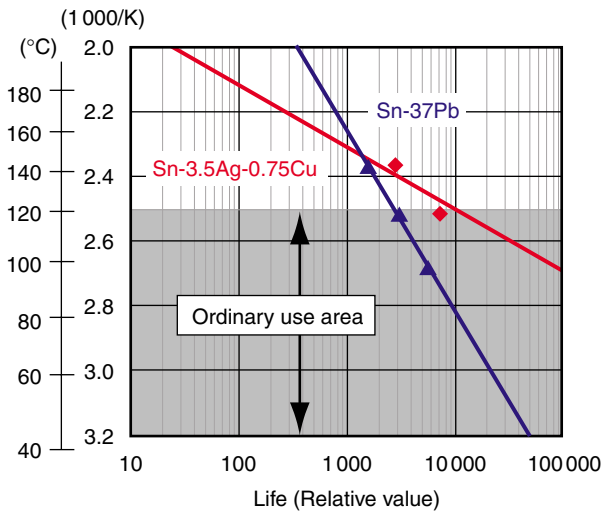


Fig. 13 Limit line of durability of the intermetallic compound layer fracture

②125℃ ③100℃の3水準で試験を行った結果をFig. 12に示す。Fig. 13は寿命線点を7.5 μmとしてプロットした寿命線図である。これにより、通常使用温度領域では、Sn-Ag-CuはんだはSn-Pbはんだに対して同等以上の信頼性を有することが分かる。

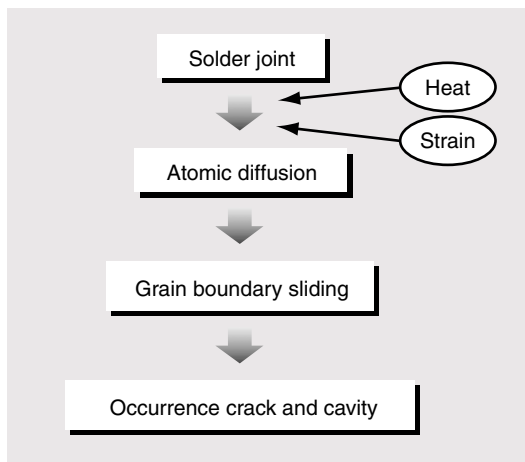


Fig. 14 The creep fracture mechanism

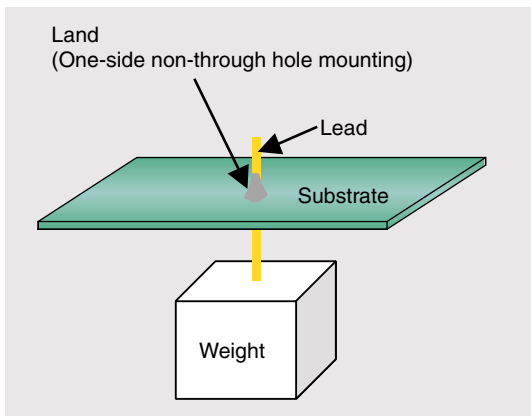


Fig. 15 Creep test method

2.3. クリープ

はんだは融点が高い為、樹脂・ゴムと同じく常温レベルでもクリープ破壊の注意が必要とされる⁽¹⁾。Fig. 14にクリープのメカニズムを示すが、劣化因子は熱と荷重である。Fig. 15に示すテストピースを用い125℃での恒温放置試験を行った。結果をFig. 16に示す。Sn-Pbはんだと比べ、Fracture timeで2ケタ以上の優位性を有することが分かる。

2.4. 振動破壊

高負荷設定が可能なPLCC(Plastic Leaded Chip Carrier)をテストピースとして、Fig. 17に示す方法で振動試験を行った。雰囲気温度125℃、加振台の周波数100Hz、加速度25Gを一定としてPLCC背面に接着した負荷の質量を数水準変化させた。なお、加振台とPLCCに加速度センサを付け、同一の振幅・位相で振動していることを確認した。結果をFig. 18に示す^{(1), (2)}。

縦軸に接合部に加わるせん断応力、横軸に破断サイクル

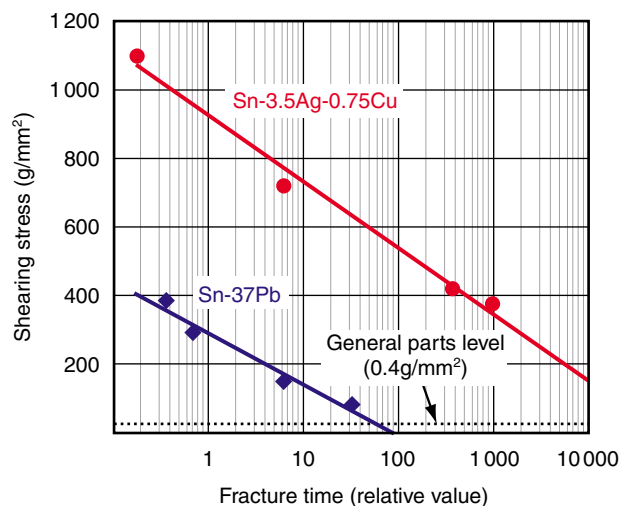


Fig. 16 Creep fracture life chart

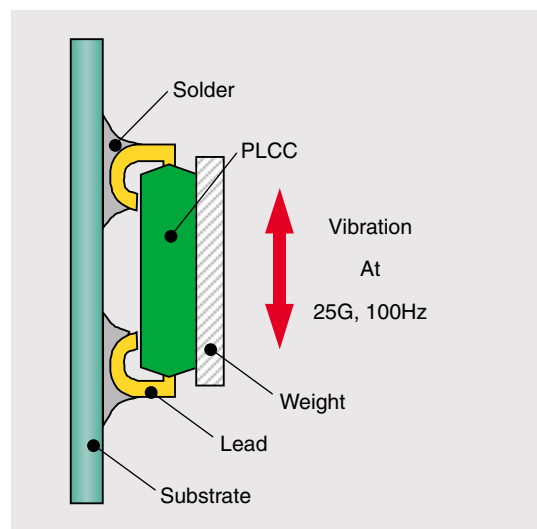


Fig. 17 Vibration test method

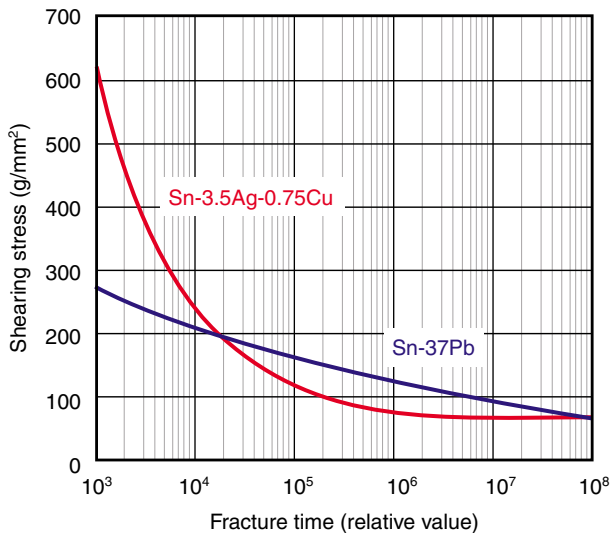


Fig. 18 Breakage probability life curve

数(寿命)の対数を示した S-N 線図(10%破断確率寿命線)である。高サイクル側でせん断応力が一定値に収束する。いわゆる疲労限の様相を呈している。Sn-Ag-Cu はんだは Sn-Pb はんだと比較してパターンに違いはあるものの疲労限レベルは同等と判断できる。

2.5. イオンマイグレーション

イオンマイグレーションとは、温湿度雰囲気下で電圧を印可した場合、プリント配線板の電極間で金属が絶縁層に溶出し、デンドライト(ウイスカともいう)が発生する現象を言う。この現象が連続して発生すると短絡に至る。イオン

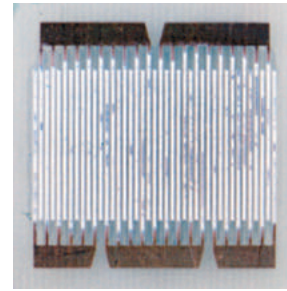


Fig. 19 Sample for ionic migration test

マイグレーションの劣化因子は湿度(雰囲気)、電解強度(電圧)、温度の3種類であり、これらが相互に作用することで短絡寿命が決まる。

試験条件は、Fig. 19 の JIS II 型櫛形電極をプリフラックス処理後、洗浄し、はんだ付けしたものを①高温高湿：85℃、85%RH、バイアス 50V で 1000 時間終了後、②結露サイクル：5℃～25℃、20分/20分、バイアス 50V で 1000 サイクルの試験を行った。本試験条件は実使用環境に対して厳しい条件であるが、結果は Sn-Pb はんだ及び Sn-Ag-Cu はんだのどちらもイオンマイグレーションの発生はなかった。

以上、信頼性工学の観点から 1)熱疲労 2)金属間化合物成長 3)クリープ 4)振動疲労 5)イオンマイグレーションのはんだ劣化モード 5 種に関して、Sn-Ag-Cu はんだの信頼性評価を行った。また、全ての劣化モードに関してマイナー則等を用いて市場寿命についても評価した結果、Sn-Ag-Cu はんだは Sn-Pb はんだと同等以上の信頼性を有することが確認された。

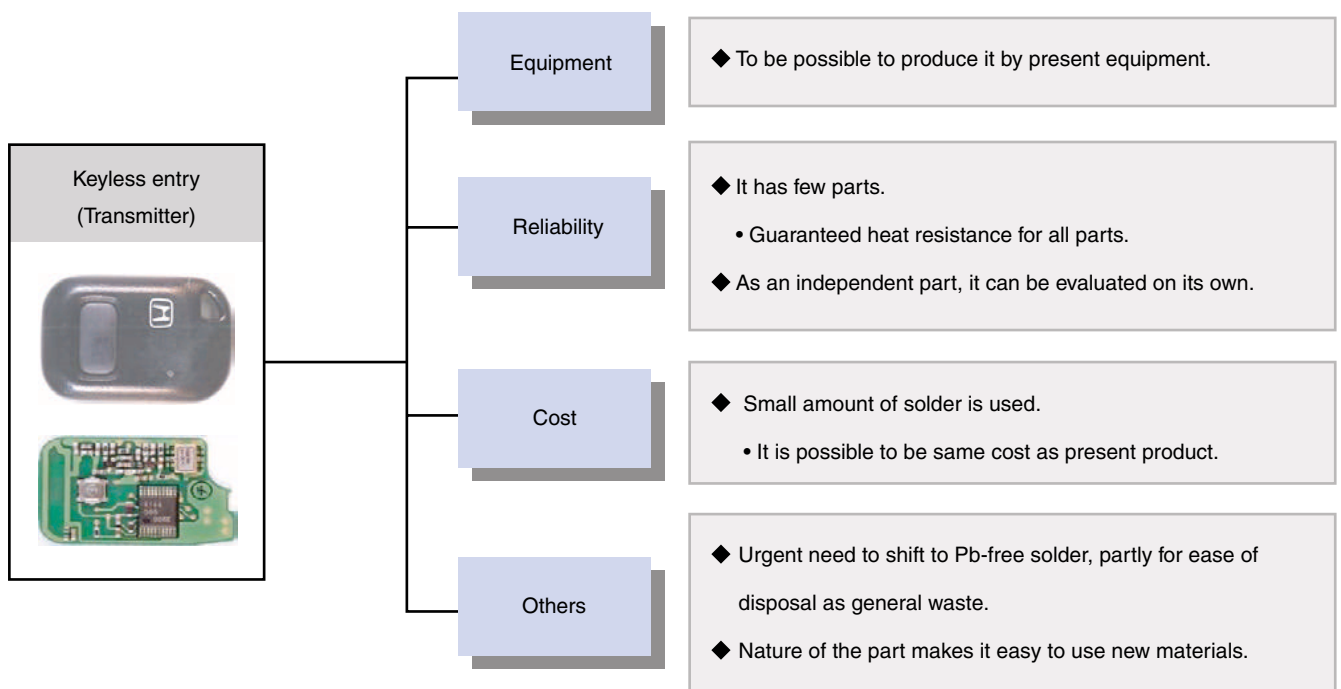


Fig. 20 Reasons for selection of keyless entry (transmitter)

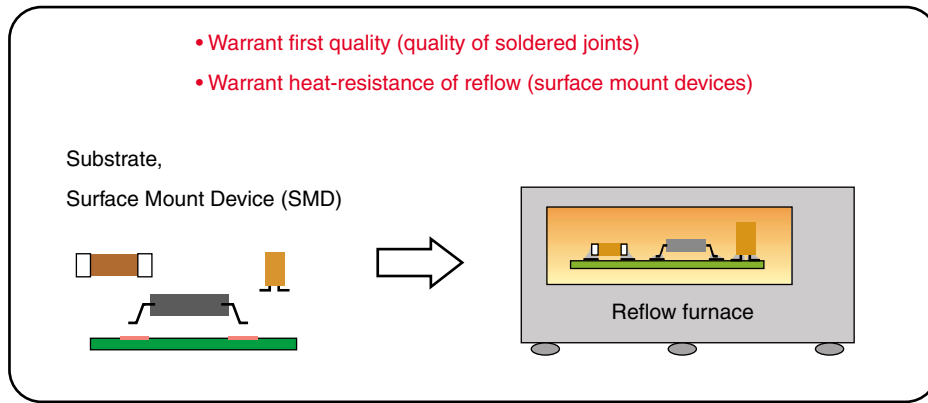


Fig. 21 Reflow soldering process

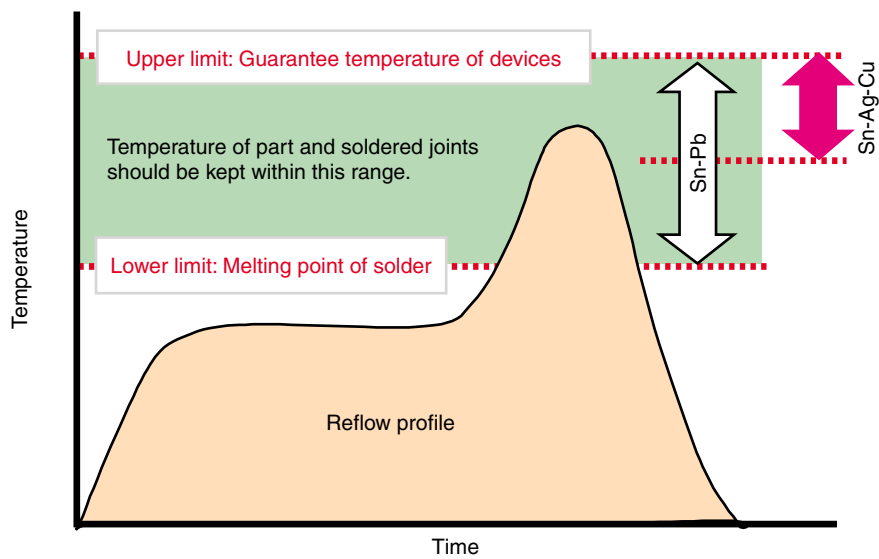


Fig. 22 Temperature profile of reflow soldering

3. 製品への適用

Sn-Ag-Cu はんだが、現行量産 Sn-Pb はんだと比べ同等以上の信頼性を有することが確認できたことより、Pb フリーはんだの製品への適用検討を行った。適用部品はFig. 20 の理由より、キーレスエントリトランスミッタを選定した。

Fig. 21 はその実装工程イメージである。

3.1. はんだ実装の考え方

Sn-Ag-Cu はんだの製品適用に於ける最大の課題は、Sn-Pb はんだに対して融点大幅に上昇(183℃→ 219℃)することである。つまり、製品構成部品の耐熱保証温度以内ではんだ接合部の品質を確保する為に、Sn-Pb はんだに比較して狭いリフロー温度管理幅で製造する必要がある。Sn-Ag-Cu はんだのリフロー実装条件の考え方を Fig. 22 に示す。

キーレスエントリトランスミッタは構成部品点数が少ないことと、部品サイズの差が小さいことより、リフロー実装

時の部品温度バラツキが小さい。この為、既存の Sn-Pb はんだ用のリフロー設備を変更すること無く、はんだ品質及び構成部品品質を確保する条件を見出すことができた。

3.2. 製品性能評価結果

Sn-Ag-Cu はんだが製品性能を満足できるか判定するため、キーレスエントリトランスミッタに必要とされる全ての信頼性評価を行った。その結果、Sn-Ag-Cu はんだはキー

Table 2 Results of model spec test

Test Item	Result
Thermal cycle	OK
Heat resistance	OK
Switch endurance	OK
Transmission performance	OK
General performance	OK

レスエントリトランスミッタに必要な信頼性を確保するとともに、従来の Sn-Pb はんだ同等以上の信頼性を有しており、キーレスエントリトランスミッタへの適合性を有することが確認された。Table 2 に製品性能評価結果の抜粋を示す。はんだの信頼性において重要な熱疲労についてはその評価結果詳細を 3.2.1 項で説明する。

3.2.1. 熱疲労

はんだの信頼性評価項目の中でも最も過酷な条件とされる熱疲労は、量産可能な製造条件のはんだ接合品質下限品にて評価した。また、その熱疲労寿命の予測についても行った。その結果、Sn-Ag-Cu はんだ接合部に熱疲労によるクラック発生は無く、十分な熱疲労寿命を有することが確認された。

Fig. 23, 24 に熱疲労試験後のはんだ接合部断面観察結果、Fig. 25 に熱疲労寿命の予測グラフを示す。

4. まとめ

(1)信頼性工学の観点から 1)熱疲労 2)金属間化合物成長 3)クリープ 4)振動疲労 5)イオンマイグレーションのはんだ劣化モードの5種に関して Pb フリーはんだの信頼性を評価した結果、Sn-Ag-Cu はんだは、Sn-Pb はんだ以上の信頼性を有することが確認された。

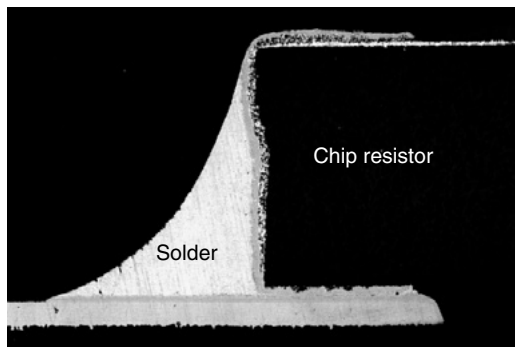


Fig. 23 Sn-Ag-Cu alloy solder cross-cut section (After the thermal cycle test)

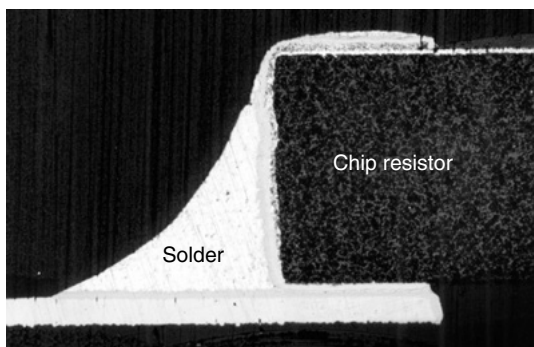


Fig. 24 Sn-Pb alloy solder cross-cut section (After the thermal cycle test)

(2)高い信頼性が確認できた Sn-Ag-Cu はんだをキーレスエントリトランスミッタに適用した。製品適用において、コストを抑えるため、設備及び部品設計変更しないこととしたが、製造品質、製品性能及び耐久性は満足できる結果を得られた。

5. あとがき

Pbフリーはんだの信頼性については、既に本紙テクニカルレビュー(Vol.12 No.1)で報告されている⁽⁵⁾。該研究はベアチップダイボンディングタイプの試験片を用いた評価であるが、本研究は一般的な実装基板を想定し、信頼性評価を行ったものである。両研究により、Pbフリーはんだの信頼性について広い知見が得られた。

現在、家電製品は、Pbフリー化が急拡大しており、はんだ材はもちろん、部品側電極表面処理も含めた Pb フリー化が進んでいる。

はんだ材は本研究と同様、Sn-Ag-Cuはんだに収束されつつあるが、部品側電極表面処理については、半導体及びアルミ電解コンデンサ等にはんだ濡れ性向上及びリード間のウイスカ対策として、低 Bi 濃度(4%以下)の Sn-Bi メッキの採用が拡大している。本研究において、Sn-10Bi%メッキ品は熱疲労試験で信頼性が低下することが確認されており、Sn-Bi メッキ部品の混入には注意を要する。

車載電装部品の Pb フリー化については、2000 年 8 月より、徐々に量産化されつつある。一方、本田では今回、初めて Pb フリーはんだをオデッセイ、アヴァンシア等のキーレストランスミッタに採用した。該製品は 2001 年 8 月より、株式会社ホンダロックで量産を開始した。今後、キーレストランスミッタを皮切りに、電装部品の Pb フリー化の着実な拡大が期待される。

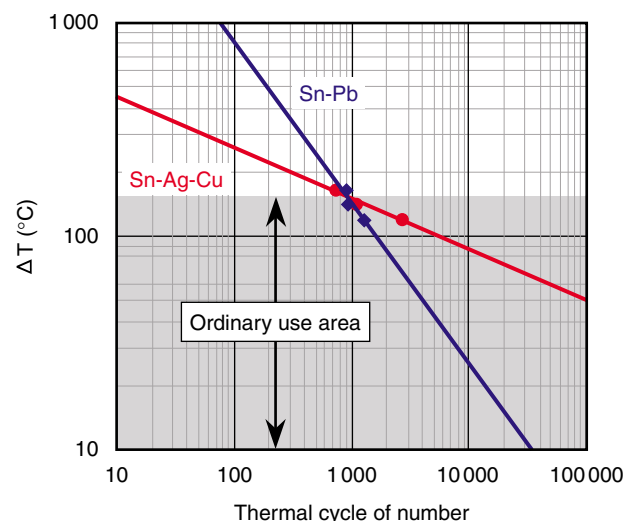


Fig. 25 Limit line of durability of thermal fatigue (chip resistor)

6. 謝辞

本研究を行なうにあたり、試験及び試料作製にご協力を頂きました、株式会社ケーヒン 島野様 佐藤様、株式会社ネステック宮坂様、また製品開発にご尽力頂きました株式会社ホンダロック 陶山様はじめ関係者に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 森山正人ほか：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)
- (2) 大村淳一ほか：電装部品における Pb フリーはんだ実装の研究，溶接学会 Mate 2000, p.307-312 (2000)
- (3) 日本規格協会編：マイクロエレクトロニクスの試験方法及び手順，日本規格協会，1987，東京
- (4) Jennie,S,Hwang：エレクトロニクス・パッケージ用ハンダペースト，工業調査会，1991, p.283-309, 東京
- (5) 大釜俊洋ほか：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，HONDA R&D Technical Review, vol.12, No.1, p.137-144

■ 著 者 ■



畑 恒久



大村 淳一



森山 正人



渡辺 朝生