

電装部品におけるハンダ接合の信頼性

Reliability of Soldered Joints for Automotive Electronic Devices

森 山 正 人*

Masato MORIYAMA

喜 多 晃 義*

Teruyoshi KITA

向 坊 長 嗣*

Nagatsugu MUKAIBOH

安 藤 敬 祐*

Keisuke ANDOH

高 木 善 昭**

Yoshiaki TAKAGI

要 旨

電気接合材として最も使用頻度の高いSn-Pb共晶ハンダ材に関して、劣化モード5種(①熱疲労②金属間物成長③クリープ④振動疲労⑤イオンマイグレーション)の信頼性評価を行った。

信頼性工学的手法を取り入れ、最初に劣化メカニズムを究明し、加速試験方法および特性パラメータを設定した。その上で、数水準の条件で加速試験を実施しストレス依存性を求め、劣化のモデル化を行った。一方で環境ストレス頻度を求め、それらをマイナ則を用いて融合することで、寿命保証に必要な加速試験条件の設定を可能とした。

ABSTRACT

Concerning the Sn-Pb eutectic solder that is used most frequently as electric joint material, we have evaluated the reliability of five kinds of degradation modes. (① Thermal fatigue ② Intermetallic compound layer fracture ③ Creep fracture ④ Vibration fatigue ⑤ Migration).

Adopting the reliability engineering method, first, the mechanism of degradation was investigated, then the accelerated test method and characteristic parameter were fixed.

On the basis of the establishment as above, the accelerated test was executed under several conditions to find the stress dependency and the solder degradation was modeled.

While the environmental stress frequency was obtained and they were put together by using a minor method, which enabled us to fix the accelerated test condition that was needed to guarantee the life of solder.

1. まえがき

自動車のエレクトロニクス化の進展はめざましく、電装部品の種類と数は右肩上がりの傾向にある。社会的に重要性を増す、安全、環境対策を考えると、制御の高度化と併せこの傾向は加速すると考えられる。

そうした電装部品の電気接合という、地味ではあるが屋台骨を担うのがハンダである。ハンダの歴史は古く、構造用接合材としての使用は紀元前にまで逆戻り。電気接合用としては、それに比べると歴史は浅く近代になってからであるが、ハンダは一貫して主役の座に君臨してきた。その間、一部クリームハンダという形態の変化はあったものの、Sn-Pb共晶という合金ベースは不変で今

日に至っている。それは、低融点性を始めとして、他に並ぶ物のない、ハンダの優れた特徴によるものである。

しかし、最大の特徴である低融点性(Sn-Pb共晶で183℃)は、常温環境下でも組織変化、物性変化を起こしやすいことを意味し、耐久性では逆に欠点ともなりうる。“ハンダは金属であって金属でない”といわれる所以である。特に、民生と違いエンジンルーム内等、過酷環境下に搭載される場合がある車載では、ハンダの信頼性を十分に知り尽くした上で使用しなければならない。

民生、車載を問わず、ハンダの信頼性、特に疲労に関しては、モデル化まで踏み込んで研究された例は少ない。

*和光研究所

** (株) 田中エンジニアリング

過去の経験に基づいて加速試験条件（要件）を設定しているのが実状である。今後益々過酷化、複雑化する使用条件に対して、適用可能な評価技術を構築するというのが本研究の狙いである。

2. 信頼性保証の考え方

2. 1. 劣化要因

車載部品は、Fig.1に示す熱、振動、湿度の環境ストレス因子の他に、電界、荷重等の内部ストレス因子も抱え

ている。それら要因とハンダの特性を踏まえてまとめたのが、Fig.2に示す信頼性要因図である。環境劣化モードとしては、①熱疲労、②クリープ、③金属間化合物成長、④振動疲労、⑤イオンマイグレーションが考えられる。

2. 2. 信頼性保証の考え方

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う評価作業であ

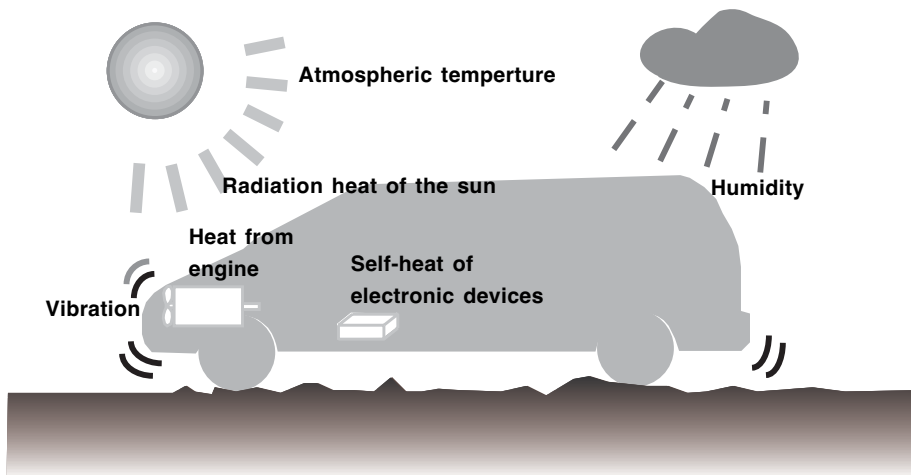


Fig.1 Stress factors of automotive circumstances

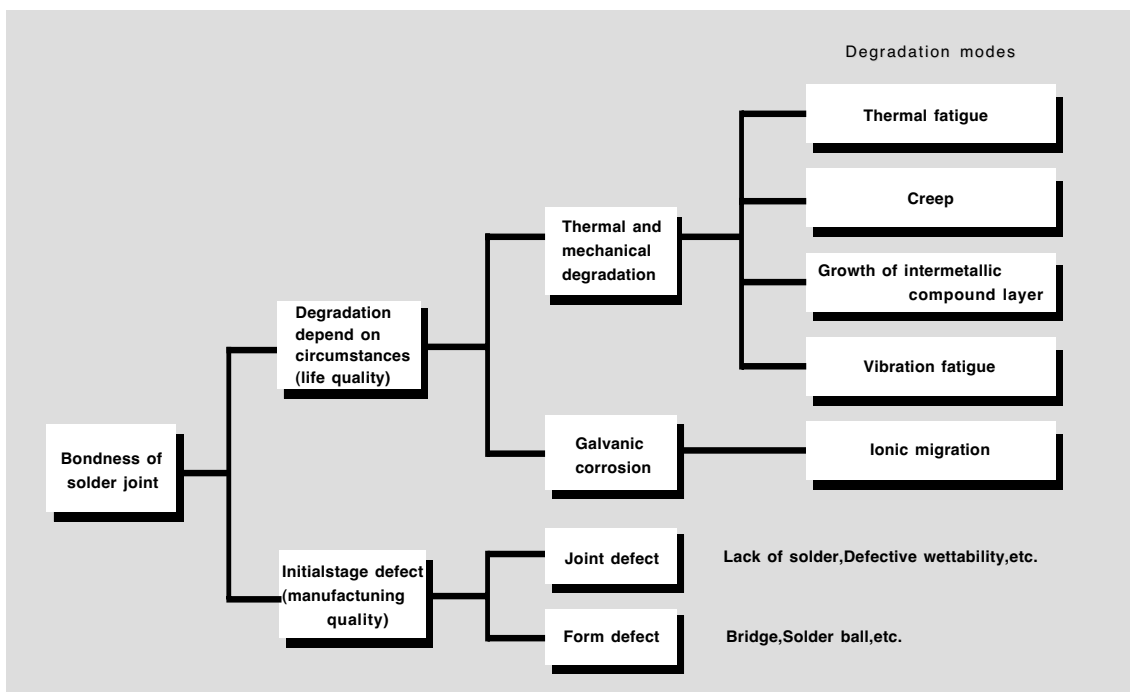


Fig.2 Reliability factors diagram of solder joint

る^{1)~5)}。具体的にいえば、使用保証期間内において、環境劣化型故障（磨耗故障）が発生しないことを証明することである。

ホンダでは電子制御ユニット（ECU）の実装は全て外注となっている。こうした場合必要となるのは、実装メーカが設定した仕様で市場寿命保証可能かどうかの判断手段（信頼性評価技術）を持つことである。その基本が要件である。以下、劣化モードごとの要件設定方法を説明していく。

3. 熱疲労

3. 1. 熱疲労とは

熱疲労の発生メカニズムを Fig.3 に示す。ストレス因子は温度変化（ ΔT ）であることから、加速試験としては温度サイクル試験が最適である。また、劣化事象はストライエーション（疲労破面に特有な条根模様）によるクラック進展であることから、特性パラメータには断面観察によるクラック進展率を選択するのが理想である。接合強度変化、抵抗値変化で判定する例もあるが、二次パラメータとなることから劣化過程を観察するには無理がある。

ハンダは、最大の特長である低融点性から、常温レベルでも原子拡散が活発であり、クリープを含めた塑性ひずみを起こしやすい材料である。つまり、被接合部品保護という観点では、熱応力を塑性ひずみに置き換えて解消する、いうならば自己犠牲型の優秀な材料といえる。しかしながら、逆に、熱応力による塑性ひずみの繰り返して疲労につながる可能性のある材料でもある。特に、民生と比較し、温度変化の大きい車載用の電装部品では、その信頼性レベルを熟知した上で使用する必要がある。以下、熱疲労の信頼性保証方法に関して考察する。

3. 2. 熱疲労耐久限界線

量産 ECU の実装基板（リードスルー、SMD 混載両面ガラエポ基板）をテストピースとして、温度サイクル試験（気槽）を行った。使用ハンダ材は、Sn-Pb 共晶ハンダである。温度サイクルの試験条件は、 $-40^{\circ}\text{C}/30\text{分} \sim +120^{\circ}\text{C}/30\text{分}$ で、所定サイクルごとに取り出し断面を200倍の金属顕微鏡で観察し、継手全長に対するクラック進展率を算出した。Fig.4 に結果を示す。継手構造により、寿命サイクルはもちろん、劣化パターンにも大きな違いがある。Table 1 は劣化パターンをモデル化し示すが、低寿命性と指数関数的な劣化パターンを考えると、一番問題となるのはチップ抵抗であることが分かる。

展率を算出した。Fig.4 に結果を示す。継手構造により、寿命サイクルはもちろん、劣化パターンにも大きな違いがある。Table 1 は劣化パターンをモデル化し示すが、低寿命性と指数関数的な劣化パターンを考えると、一番問題となるのはチップ抵抗であることが分かる。

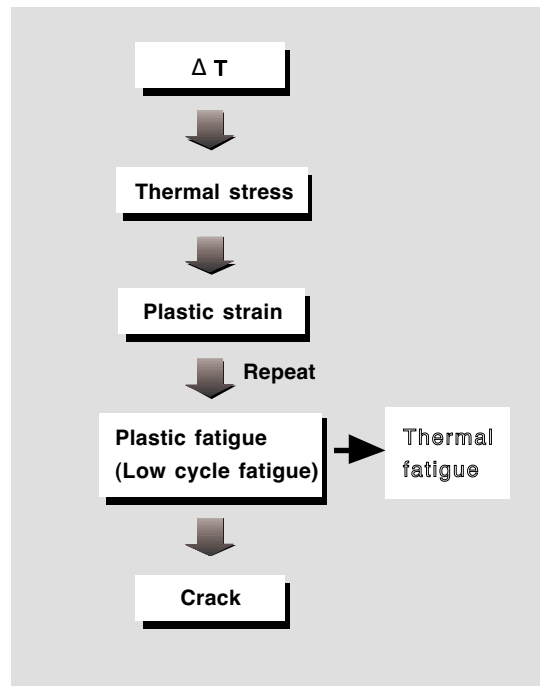


Fig.3 Mechanism of the occurrence of thermal fatigue

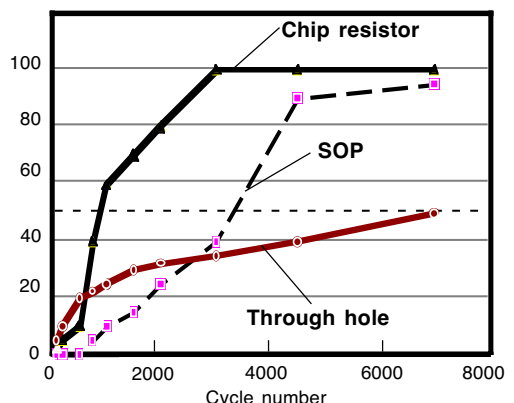
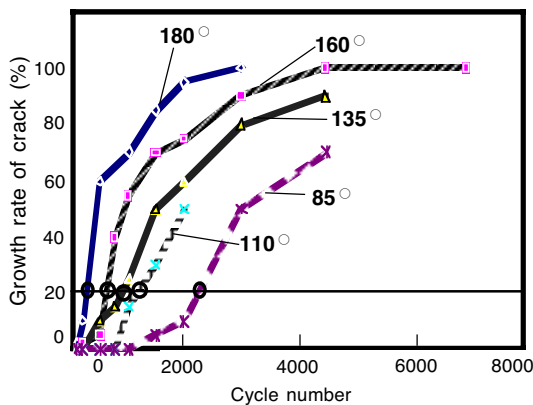


Fig.4 Tendency of degradation classified by parts type

Table 1 Comparison of degradation form classified by solder joint structure

	section structure	Crack form	Life of thermal fatigue and growth of crack (cycle)
S M D	Chip parts (ex. Chip resistor)	● The growth speed of the crack increases exponentially functionally.	$x=k\exp(ct)$ 50% crack life
	Flat package (With lead) (ex.SOP)	● The growth speed of the crack is almost constant by the stress relaxation effect of the pin.	$x=kt$
Lead through	Through hole	● After the crack reaches land, the constraint is lost and the growth speed of the crack decreases instantly. ● At last, the contact surface of the through hole and land is broken.	$x=k\log t$

Fig.5 Tendency of chip resistor degradation classified by ΔT

次に、このチップ抵抗に焦点を当てて、温度変化 (ΔT) 違いでの温度サイクル試験を行った。Fig.5に、その結果を示す。

一般的に、ハンダ接続の熱疲労寿命に関する関係式は、Coffin-Manson の経験式で表すことができる^{6)~8)}。

$$N_f = c \cdot (\Delta \varepsilon)^{-n} \quad (1)$$

N_f ; サイクル寿命

$\Delta \varepsilon$; 接合部の塑性ひずみ量

c, n ; 定数

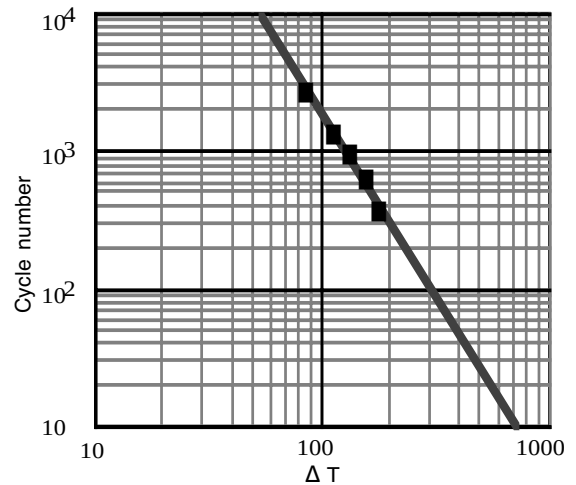


Fig.6 Limit line of durability of thermal fatigue (Chip resistor)

ここで、延性クラック進展において弾性ひずみは微小と考えられることから、 $\Delta \varepsilon$ が ΔT に比例すると仮定すると、上記式は

$$N_f = c \cdot (\Delta T)^{-n} \quad (2)$$

に置き換えることができる。さらに両辺を対数化すると、

$$\log N_f = -n \log(\Delta T) + \log c \quad (3)$$

$\log N_f$ を y 、 $\log(\Delta T)$ を x に置き換えると、

$$y = -nx + C \quad (4)$$

となり、両対数グラフ上で直線となることが分かる。

Fig.6は、クラック進展率20%を寿命点とした時のサイクル数 N_e と ΔT をプロットしたものであるが、ほぼ直線を示す。

3. 3. 市場 ΔT 頻度解析

ハンダは高クリープ性から、熱応力による塑性ひずみが短時間でほぼ平衡に達すると考えられる⁹⁾。よって、市場環境を考える場合、Fig.7のように季節変動を含めた年間での ΔT_{max} ではなく、1サイクルごとの ΔT { ΔT_1 (エンジン伝達熱+自己発熱) + ΔT_2 (気温変化)} を求める必要がある。

Fig.8はある部品の夏、冬それぞれの市場走行における温度変化を示す。 ΔT の絶対値に大きな差は無いが、冬の方が走行風の影響を大きく受けることから、サイクル頻度が多くなっている。地域差、季節変動を考慮して、 ΔT 頻度 (10℃以上、5℃間隔) を10年分に拡張したのがTable 2である。

3. 4. 熱疲労寿命予測と要件設定

以上示してきた結果から、熱疲労では、劣化が不可逆的に蓄積して起きるといふ、蓄積劣化モデルが成り立つ^{10)、11)}。よく知られていものに、マイナ則と呼ばれる材料の疲労寿命に関する関係式がある。変動応力の場合、

$$\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 1 \quad (5)$$

N_i : 応力振幅 (δi) での繰り返し回数

N_{fi} : 一定の応力振幅 (δi) だけが作用した場合の疲労寿命

なる条件を満足するようになったとき、破壊するという法則である。

Fig.9は、Fig.6の耐久限界線とTable 2の ΔT 頻度を組み合わせたグラフであり、いうならばCoffin-Manson-Minorプロットといえるものである。要件線 (L) は、市場走行10年での積算消費寿命を、各 ΔT ごとにプロットしたもので、耐久限界線 (L) に平行となる。このグラフから、該当する部品の要件が設定できる。一例として、 $\Delta T = 100^\circ$ の温度サイクル試験での必要サイクル数は、 $\Delta T = 100^\circ$ の線と要件線の交点から垂直に降ろした点Aから求められる。

Table 2 ΔT frequency for ten years on the market

ΔT	Frequency (Cycle)	ΔT	Frequency (Cycle)
60	11	30	1798
55	300	25	3084
50	378	20	2965
45	780	15	4261
40	1157	10	6078
35	1504	Total	22316

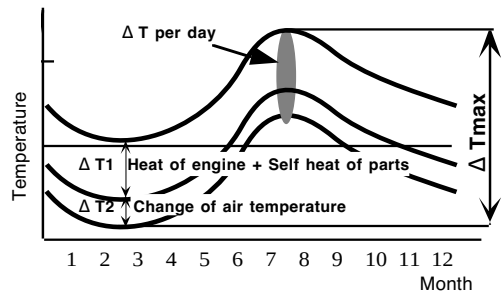


Fig.7 Temperature fluctuation of all year round

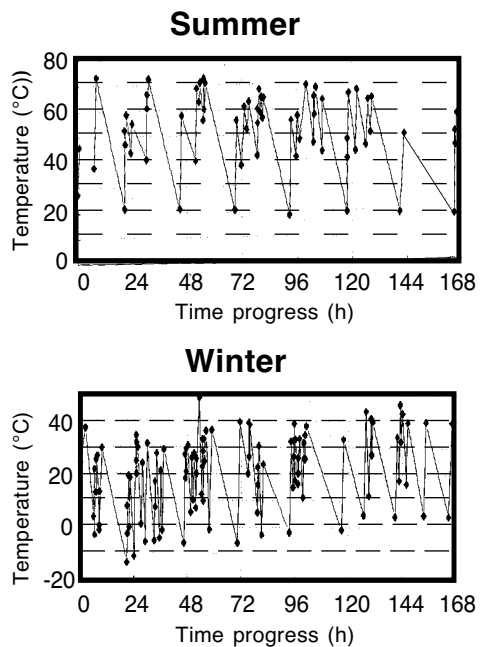


Fig.8 Temperature change in the market

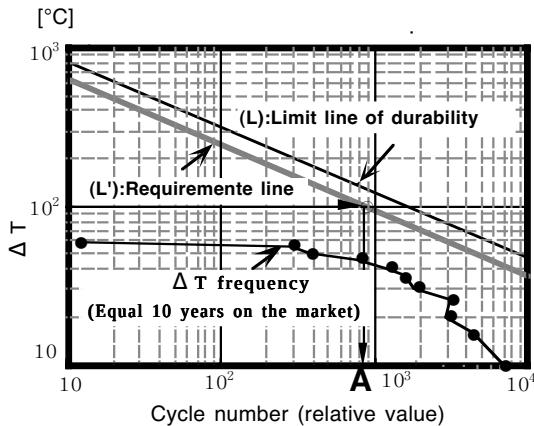


Fig.9 Requirement line of thermal fatigue (Chip resistor)

以上のように、耐久限界線と市場の ΔT 頻度を求め、マイナ則を用いて融合することで、確度の高い熱疲労寿命予測が可能となった。

4. 金属間化合物層成長

ハンダ溶融接合時、ハンダ中のSnと、基板のパターンを形成する金属(ここではCu)は、相互拡散により金属間化合物を生成する。初期における金属間化合物層は強固であり理想的な結合を示す。しかし、使用環境下で金属間化合物が成長すると逆に脆くなり、継手寿命に影響を及ぼすことが懸念される。

Fig.10に金属間化合物層成長のメカニズムを示す。これより、熱がストレス因子であり、加速試験は恒温放置試験が最適であることが分かる。

4. 1. 金属間化合物層の成長パターン

テストピースとして、Cuランドにチップ抵抗をハンダ付け(共晶ハンダ)した基板(ガラエポ)を用いた。それを(田)95℃(月)125℃(火)145℃(水)170℃の4水準の温度で恒温放置し、所定時間毎に取り出し、断面観察により金属間化合物層厚さを測定した。

金属間化合物層成長はFickの法則に従う(固体反応の拡散過程である)ことから、Fig.11に示すように横軸に

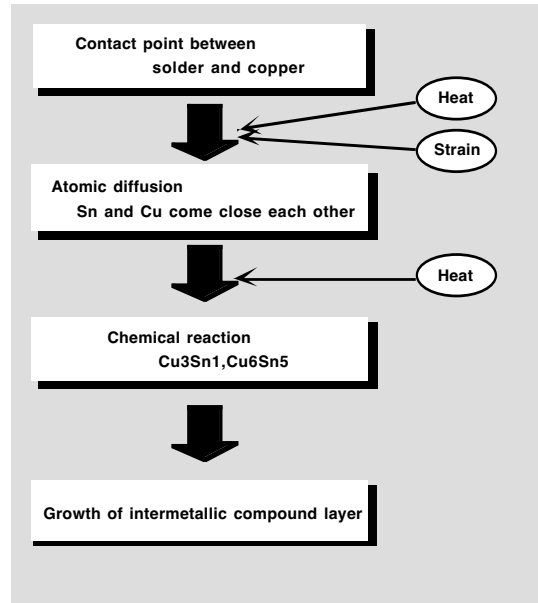


Fig.10 Mechanism of the growth of intermetallic compound layer

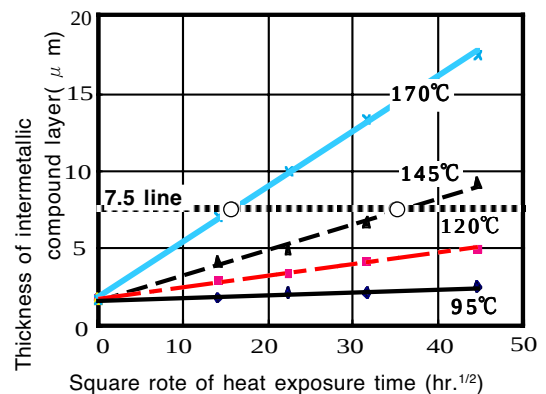


Fig.11 Growth pattern of the intermetallic compound layer

被温時間の平方根をとったグラフでは直線となる。

Fig.12に、金属間化合物層が成長した、ハンダ接合界面の光学およびSEM観察写真を示す。生成する金属間化合物層は二層あり、ハンダ側から η 相(Cu_6Sn_5)、 ϵ 相(Cu_3Sn)である。また、ハンダからSnが拡散することで、Pbが取り残され、 α 相(Pbリッチ相)が層状に形成された状態が観察される。

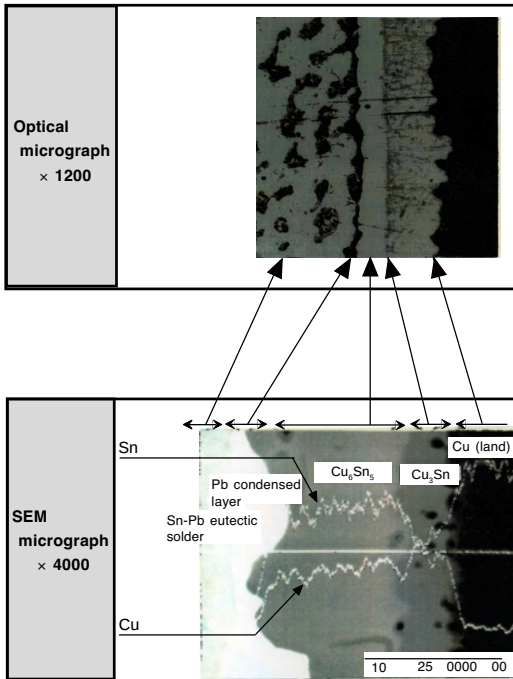


Fig.12 Micrograph of intermetallic compound layer

4. 2. 要件設定方法

Fig.13はFig.11において、金属間化合物層厚さ $7.5\mu\text{m}$ を寿命点（ボイドの発生無しおよび他の劣化モードに影響しない限界層厚さ）とし、アレニウスプロットした寿命線と、ある部品の温度頻度を融合したアレニウス・マイナプロットである。このグラフから要件が設定できる。120℃の恒温放置試験の場合、グラフ中にあるようにB点となる。

5. クリープ

5. 1. クリープとは

金属の場合、クリープは一般的に耐熱材料で問題とされる。しかし、ハンダは金属の中では異質で、その低融点性から、樹脂・ゴムと同じく常温レベルでも注意が必要である。Fig.14にクリープのメカニズムを示すが、ストレス因子は熱と荷重を考える必要がある。

以下、クリープ破壊寿命の評価方法に関して述べる。

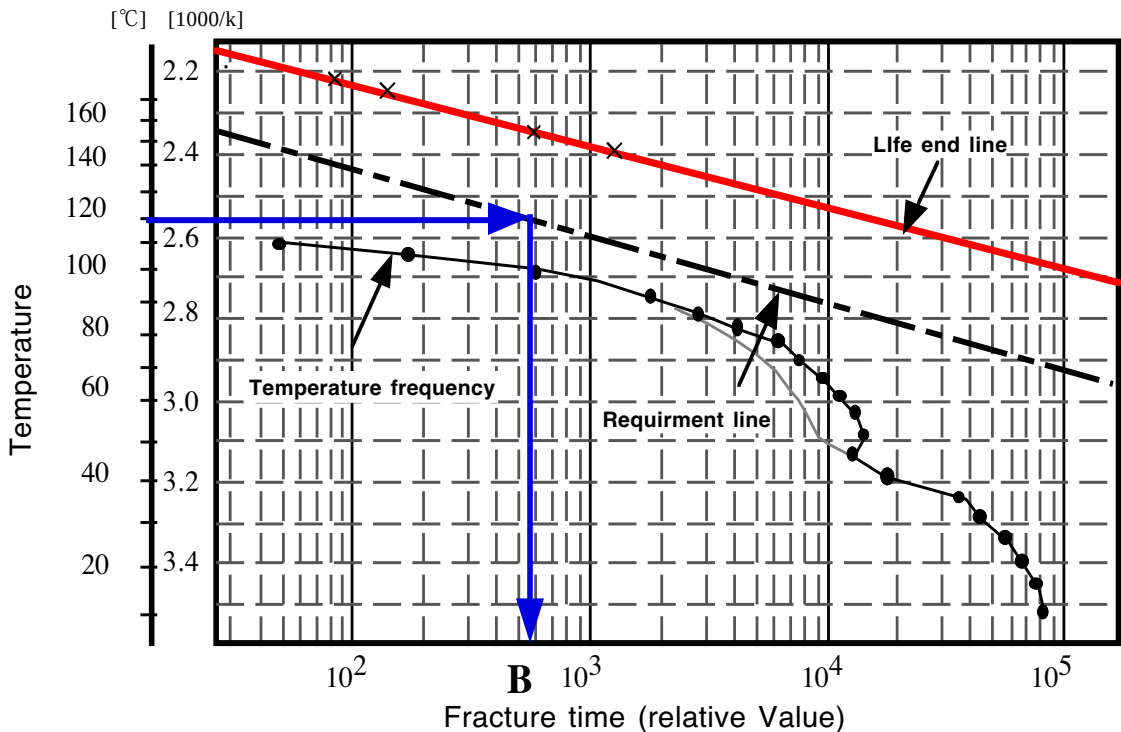


Fig.13 Arrhenius-minor chart of the intermetallic compound layer fracture

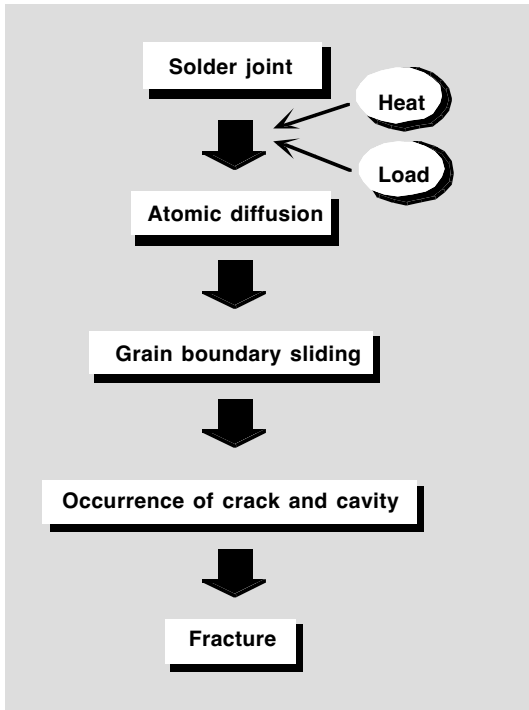


Fig.14 Mechanism of the creep fracture

5. 2. 試験方法

Fig.15 に、テストピースおよび試験条件を示す。ハンダ接合部に応力が発生するよう、実装部品におもりを吊し、恒温層内に放置し、破断するまでの時間を測定した。

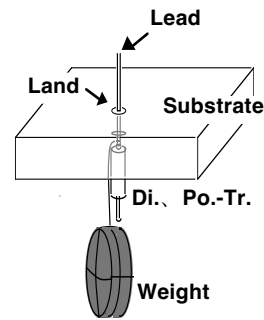
5. 3. 要件設定方法

Fig.16 に試験結果を示す。低寿命域では、ハンダ接合部にかかる公称せん断応力と破断時間（寿命）の対数は直線関係にあり、Larson-Miller（クリープの寿命式）の式に従うが、高寿命域ではハンダの結晶粒粗大化の影響により直線式より高寿命側にずれる。Fig.17 は、アレニウス-マイナプロットである。汎用部品での最大応力をしきい値として、先の章と同じ温度頻度をマイナ則で融合している。このグラフから、120℃高温放置試験での要件は C 点となる。

6. 振動疲労

6. 1. 試験方法

高負荷設定が可能な PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) 44ピンをテストピースとして、Fig.18 に示す方法で振動



One-side nonthrough hole mounting

Test temp. : 80℃, 120℃, 150℃

Test load : 100 ~ 650g

Fig.15 Creep test method

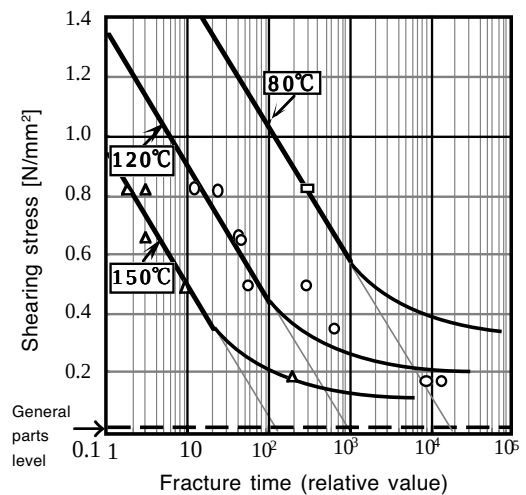


Fig.16 Creep fracture life chart of the one-side nonthrough hole mounting parts

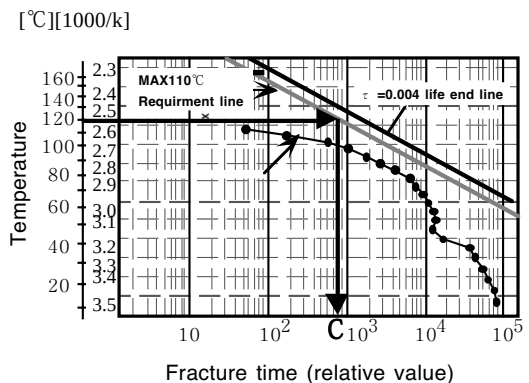


Fig.17 Arrhenius-Minor chart of the creep fracture

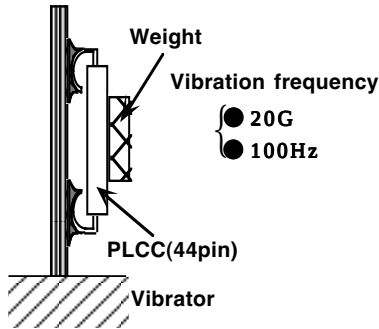


Fig.18 Vibration test method

テストを行った。加振台の周波数 100Hz、加速度 20G 一定として、PLCC 背面に接着した負荷の質量および雰囲気温度を数水準変化させた。また、加振台と PLCC に加速度センサを取り付け、同一の振幅、位相で振動していることを確認した。

6. 2. 振動疲労寿命

Fig.19 に結果を示す。縦軸に接合部に加わるせん断応力、横軸に破断サイクル数 (寿命) の対数を示す、S - N 線図 (10% 破損確立寿命) である。各温度とも、ある値でサチュレートする、いわゆる疲労限度の様相を呈している。振動は高周波の繰り返しのため、ハンダの特徴であるクリープが追従せず、弾性変形が支配的な高サイクル疲労となる。

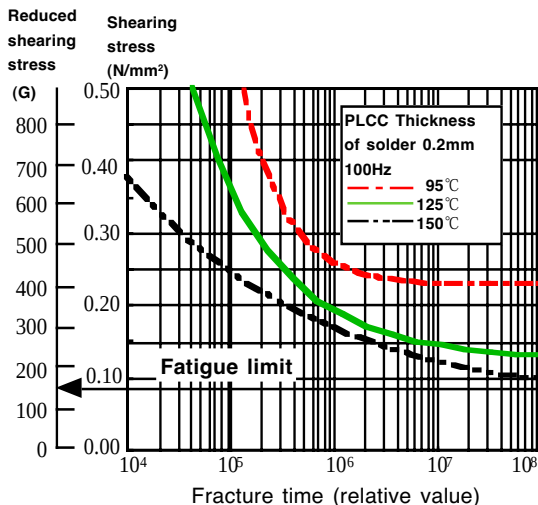


Fig.19 Breakage probability life curve

S - N 線図から、要件を設定することは困難であるが、各温度ごとの限界加速度を導き出し、使用可否判断につなげることが可能である。例えば、150℃での疲労限度せん断応力約 0.08N/mm² (B10Life) を求める。この値は、一般的な 44 ピン PLCC に対する加速度換算で約 150G を示すことから、それ以下の加速度であれば半永久的に保証可能ということになる。

7. イオンマイグレーション

7. 1. イオンマイグレーションとは

イオンマイグレーション (以下 IM と記す) とは、温湿度雰囲気下で電圧を印加した場合、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 (Fig.20 に示す様な樹枝状析出物) 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。

近年、電装部品でもファインパターン化が進んでいることから、マイグレーション解明の重要性が増してきている。

7. 2. 発生パターン

Fig. 21 に示す IM の発生パターンを大別すると以下の二種類となる。一つは絶縁層の抵抗が高い場合に観測される現象で、陽極から溶出した金属イオンが、陽極近傍で還元または酸化物として析出し、陰極へ伸び短絡を起こす場合。もう一つは結露時に観測される現象で、陽極から溶出した金属イオンが陰極迄至り、そこで電子を受け取り還元析出し陽極へ伸びる場合である。

加速試験として、前者は高温高湿バイアス試験、後者は結露サイクル試験が有効である。今回は高温高湿バイアス試験に関して報告する。

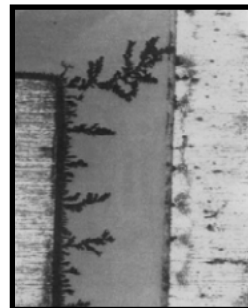


Fig.20 Morphology of IM

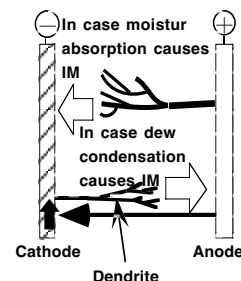


Fig.21 Growth pattern of IM

7. 3. イオンマイグレーション寿命

IMのストレス因子は①湿度(雰囲気)②電解強度(電圧)③温度の三種であり、これらが相互に作用することで短絡寿命が決まる。

以下各ストレス因子での短絡寿命について説明する。

7. 3. 1. 湿度(雰囲気)

Fig.22 と Fig.23 にテストピースおよび試験装置を示す。IMは短絡に至るとすぐデンドライトが焼きつき復帰する事から、常時モニタを行う必要がある。

Fig.24 に試験結果を示す。相対湿度と寿命の関係式をアイリングプロット(両対数化)すると直線になる。

7. 3. 2. 電界強度(電圧)

Fig.25 と Fig.26 にテストピースおよび試験装置を示す。試験時間の短縮を狙い、水滴を直接接触させる滴下試験を行った。

Fig.27 に試験結果を示す。同じくアイリングプロットで直線となる。

7. 3. 3. 温度

テストピースおよび試験装置に関しては、電界強度(電圧)違いによる寿命測定で使用したものと同一である。

Fig.28 に試験結果を示す。温度と寿命の関係をアレニウスプロットすると、直線となる。

IMの場合、上記三種のストレス因子の組み合わせだけでも複雑なのに、それに加えイオン不純物濃度(電極間で電解質として働く)の影響も考えなくてはならない。よって、量産基板においては、周辺材料とか製造工程が変動するため、上記で求めた寿命の絶対値は意味を持たなくなる。しかし、各ストレス因子ごとに求められる活性化エネルギー(ストレスー寿命 関係グラフの傾きから計算できる)は不変的であることから、他劣化モードと同様の方法で要件設定は可能である。

8. まとめ

信頼性工学の観点から、最適評価プロセスを設定し、ハンダ劣化モード5種全てに関して信頼性評価を行った。その結果、各劣化モードごとの市場寿命保証を可能とする、加速試験条件(要件)設定方法を創出した。

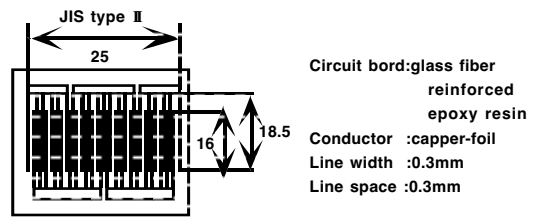


Fig.22 Test piece (for humidity test)

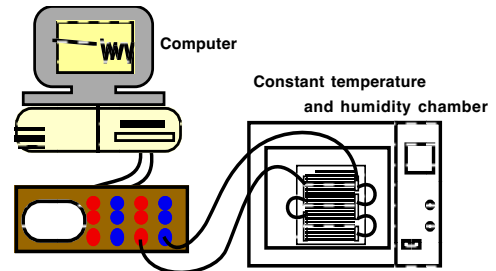


Fig.23 Measurement system (for humidity test)

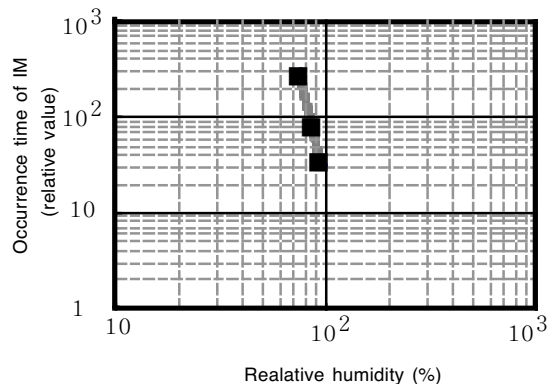


Fig.24 Relation ship between relative humidity and life

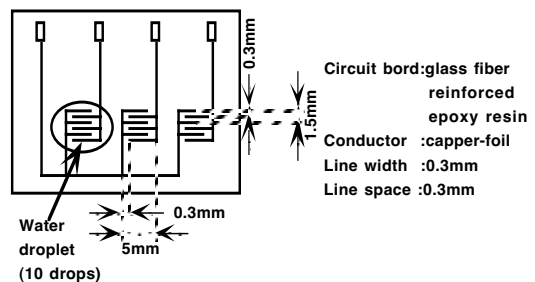


Fig.25 Test piece (for electric field strength test)

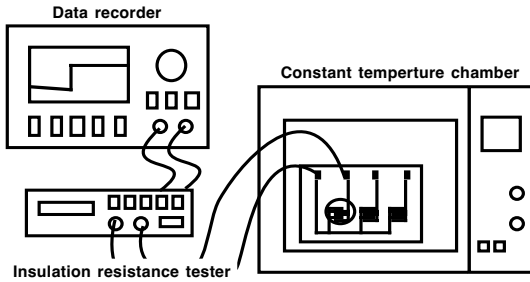


Fig.26 Measurement system (for electric field strength test)

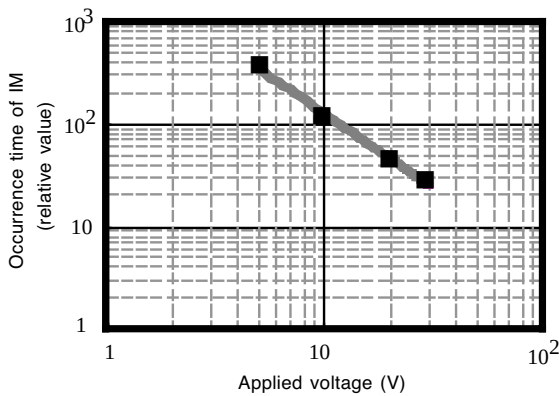


Fig.27 Relation ship between applied voltage and life

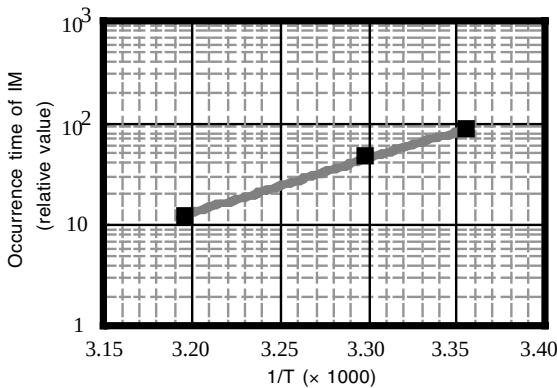


Fig.28 Relation ship between temperature and life

参考文献

- 1) 塩見弘、「故障物理入門」、日科技連出版社
- 2) 「ワイブル確率紙の使い方」、日本規格協会
- 3) 矢野宏、「品質工学入門」、日本規格協会
- 4) 「電気・電子部品の寿命診断」、日本規格協会
- 5) 「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
- 6) 竹本正 佐藤了平、「高信頼度マイクロソルダリング技術」、工業調査会
- 7) 曾我太佐男 小林二三幸 佐々木秀昭 白井貢 保川彰夫、「フラットパッケージはんだ付け継手の熱疲労寿命」、サーキットテクノロジー、Vol.7, No.2, 1992
- 8) 曾我太佐男、「はんだ付け継手の信頼性-1」、サーキットテクノロジー、Vol.7, No.2, 1992
- 9) 種田元治 上西研 准奥康浩、「はんだの疲労寿命予測法に関する一考察」、日本機械学会、No.910-49 シンポジウム講演論文集
- 10) 北川賢司、「寿命試験技術」、(株) コロナ社
- 11) 山村昌 監修、「電気・電子部品の寿命診断」、(株) 日本規格協会

■ 著 者 ■



森 山 正 人



喜 多 晃 義



向 坊 長 嗣



安 藤 敬 祐



高 木 善 昭