鉛フリーはんだのイオンマイグレーション劣化の要因解析

津久井 勤*

Factor Analysis of Electrochemical Migration Deterioration of Lead-Free Solders

Tsutomu TSUKUI*

*東海大学電子情報学部 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokai University (1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292)

Abstract

The life time due to electrochemical migration of lead-free solders was evaluated by the water drop test method. In this case, the test results was evaluated separately for at the beginning time and the time until the short-circuit. As a result, lead-free solders became long-life time from lead eutectic solder in many cases according to the forecast. However, the life time of lead-free solders is reversed with lead eutectic solder to which the ionizing of lead was suppressed in the situation with dirt matter. Moreover, when the surface of copper has been exposed, the migration is generated from this copper. Therefore, it is necessary to note these factors. The water drop test is effective as the test method by which a relative life time comparison and deterioration in the state with dew.

Key Words: Lead-Free Solder, Electrochemical Migration, Reliability, Water Drop Test Method, PWB

1. 緒言

電子機器の小型軽量化の大幅な推進によって、従来以上に信頼性を考慮した設計が要求されている。同時に地球環境調和の観点からの構成材料の制約と共に、リサイクル化を考慮した製品に向けての設計が不可欠となっている。

この地球環境調和型の一環として、実装時に使用される鉛共晶はんだの鉛がプリント回路板の廃棄時に流れ出し、これが人体に影響するとの観点から、鉛フリーはんだの開発と同時にこれを使用した実装技術の開発が急ピッチで推進されている。今までの経過を見ると、鉛共晶はんだに対応する材料の選択と、併せてプロセスの検討がまず優先されてきた。しかし、実用化に当たっては、信頼性の検討が不可欠となり、ある程度材料に対する選別ができてきた段階で、電気的・機械的信頼性に対する検討が盛んに行われるようになってきている。

電気的信頼性の検討の中で耐イオンマイグレーション（以後単にマイグレーションと呼称する）性の検討^{1),2)}やめっき部からのウイスカの発生についての報告^{3),4)}が見られるようになってきている。

本論文は、鉛フリーはんだの耐マイグレーション性を検討した内容について述べている。試料に種々の鉛フリーはんだを選び、銅や鉛共晶はんだを比較材料として、水滴下試験法による寿命を比較検討した論文である。今までの論文は、脱イオン水で検討され、現象を詳細に把握されているが、水中を伸びるマイグレーションを見たもので、基板

表面に沿ったものではなく、また、単に短絡までの時間比較に止まっていることである²⁾。本論文の特徴は、櫛形基板を使用し、実用的な基板表面に沿ったマイグレーションによる発生開始時間と短絡までの時間（寿命）とに分けて計測している点である。このような試みはより実用的な寿命評価にとって有用であり、以前なされたことがなかった。この結果から、マイグレーション劣化によって寿命に至る経過がより明瞭になるからである。さらに、脱イオン水のほか水道水や、より純度の高い蒸留水の滴下によっても寿命比較している点である。すなわち、汚れや洗浄の影響を受けて評価が違ってくることが考えられる。そのため、これらを考慮した条件で、はんだの種類が寿命に与える影響を検討した。もちろんこのような研究は他には見られない。

2. 鉛フリーはんだの耐マイグレーション性の基本特性

鉛フリーはんだとして現在検討されている主なはんだ成分は、Sn-Ag系、Sn-Zn系、Sn-Bi系などで、さらにこれらにCu、Bi、Inなどが添加されている。これらの中から、ぬれ性、融点、機械的強度、電気的・機械的信頼性などが考慮され、製品に応じた生産性の観点から選択されている。

これらのはんだ材料の基本ベースはSnであり、組み合わせられる金属の配合比が小さい。このことからFig. 1に示すようにPbとは違って、Sn⁵⁾は原理的には防止対策としてあげられる金属の種類に特有の電位とpHとの関係で決まる溶出域⁶⁾を避けることができ、溶出域が狭い酸性側に偏った金属である。したがって、鉛共晶はんだに比べて基本的

Fig. 1 Potential-pH diagram⁵⁾

にはマイグレーションが起りにくい素材であるといえる。なお、Znは腐食を起こしやすい金属であるが、表面が酸化しやすいのでこのことが発生を抑える役目を持つ一方で、ぬれ性が悪くなる場合があるので、リフロー時に留意が必要である。このようなことは今までの研究から推察されるが、実用化に当たっては、製作条件、使用条件など種々の要因とが重なって、必ずしも基本通りには行かない所が見受けられる。今回はそのような実用的な観点から研究を行った。

3. 実験の方法

3.1 試料

試料はエポキシ基板からなるJIS 2型の櫛形銅電極（間隙：0.318mm，重ね代：15.75mm）である。まず，前処理としてエタノールで超音波洗浄した後，乾燥した基板にマ

スクを当て，その上からはんだペーストを塗布する。その後，リフロー炉あるいは恒温槽内で焼き付ける。なお，1回のペースト塗布ではぬれ性の問題から銅の地肌が出るため，再度はんだごてで修正した。はんだ材料の種類は以下の通りである。

鉛共晶はんだ(Sn63)を比較対象に，Sn-Ag系，Sn-Bi系，Sn-Zn系から2元系ならびに3元系の鉛フリーはんだを選び試験に供した。

①第1次試験：電極材質は，CuとこれにSn63を比較対象に，Sn-3.5Ag (Ag3.5)，Sn-6.0Bi (Bi6.0)，Sn-9.0Zn (Zn9.0)（この3種類はいずれもリフロー）の各鉛フリーはんだよりなる。試料ははんだ焼き付け後エタノール水溶液による超音波洗浄を行い，その後乾燥した。

②第2次試験：Sn63（恒温槽）を比較対象に，Sn-Ag-Cu系2種類，Sn-57Bi-1Ag（恒温槽）とSn-7.5Zn-3Bi（Zn系：窒素リフロー）の各鉛フリーはんだよりなる。はんだ焼き付け後洗浄しない場合と塩化メチレン洗浄とエタノールでリンスした洗浄ありの場合で比較した。ただし，Sn-7.5Zn-3Biの場合には試料作製時汚れがあり，洗浄のみとした。

③第3次試験：試験方法は第2次試験と同様である。ただ，試料作製者や時期が違っているなどの多少の違いがあるが，実験結果に与える影響はほとんどないと見ている。

3.2 試験の方法

前記の試料に，蒸留水（ $\approx 16\text{M}\Omega\text{cm}$ でイオン交換樹脂と蒸留処理した水），脱イオン水（ $\approx 8\text{M}\Omega\text{cm}$ でイオン交換樹脂処理した水）または水道水（ $\approx 0.3\text{M}\Omega\text{cm}$ ）を $2.0\mu\text{l}$ 滴下し，直流電圧印加によって，マイグレーションが発生するまでの時間（発生開始時間：100倍拡大し，目視で1mm伸びた時点の時間を計測した）とこれが成長して対電極に到達する時間（寿命）をそれぞれ観察によって計測した。また，同時に試料に直列の検出抵抗 200Ω によって漏洩電流を検知した。なお，印加電圧は1.5Vから5Vで，開始から15分までにマイグレーションの発生を見ないときには実験を打ち切った。これは，リーク電流による滴下水の蒸発などの影響を除外するためである。実験は5回実施し，データはワイブルプロットして整理した。さらに，これらの図の中央値を代表値として電圧時間特性を求めた。

また，劣化試料をXPSで分析し，マイグレーション生成物の元素を特定した。

4. 実験結果と検討

4.1 漏洩電流の変化とマイグレーション成長の状況

脱イオン水を滴下し直流電圧を印加すると，Fig. 2に示すように数秒のうちに数 μA オーダの微少の漏洩電流が検出され，今回基板表面に雲状の膜が形成されていることが新たに見出された。継続して電圧を印加していると雲状の生成物の下部にデンドライト状のマイグレーションが陰極

Fig. 2 Relationship between migration growth and leak current

から発生成長し、これが電極間を短絡する。漏洩電流は電極間を短絡しだした状況から増加し始める。この値は数十 μA オーダ前後である。以前、雲状の生成物が表面に生成し、その下部にデンドライトが成長しているとの発表を行っていたが⁷⁾、今回雲状の成長過程を確認することができた。

4.2 第1次試験結果と検討

4.2.1 ワイブルプロット

ここではマイグレーションの発生と成長に伴う時間について整理した結果を述べる。実験データは前記のように、マイグレーション発生開始時間とこれが成長して電極間を短絡する寿命をワイブルプロットした。結果の一例を第1次試験結果から Fig. 3 に示す。いずれも形状パラメータが1より大きく摩耗型を示した。Fig. 3は5Vの結果であり、Cu, Sn63, Ag3.5, Bi6.0, Zn9.0の順に長くなっており、500秒以内にすべてが寿命となった。なお、Ag3.5のばらつきがさらに低電圧印加においても大きい値を示した。

4.2.2 電圧時間特性

電圧時間(V-t)特性を両対数表示で Fig. 4 に示す。同図で印加電圧のより高いところと低いところで、折れ線のグラフとなっている。そこで、実験式を $t=kV^{-n}$ (k, n は定数) で表すと、印加電圧の高いところでは、その n は、ほぼ1.5 近辺であるのに対して、印加電圧が下がると発生開始時間も寿命も長くなって n は大きくなる。その結果、比較的印加電圧の低いところでの寿命は、 $\text{Sn63} < \text{Cu} < \text{Ag3.5} < \text{Bi6.0} \leq \text{Zn9}$ の順に長くなっている。Sn63とCuについては、印加電

Fig. 4 Voltage-migration time curve (1st test)

圧の高いところで、発生開始時間の長いSn63の寿命が長く、印加電圧が下がってくると、逆転して成長時間の長いCuで寿命が長くなる。以上の結果、Cuや鉛共晶はんだに比べて、鉛フリーはんだで、マイグレーション劣化による寿命は予想通り長くなっている。

4.3 第2次試験結果と検討

4.3.1 ワイブルプロット

第2次試験結果の中からSn-Ag-Cuの洗浄試料についてのワイブルプロット例を Fig. 5, 6 に示す。ここでも、形状パラメータが1より大きく摩耗型を示した。Fig. 5は脱イオン水を滴下した試験結果で、Fig. 6は水道水を滴下した試

Fig. 5 Weibull plots of migration time (2nd test: de-ionized water)

Fig. 6 Weibull plots of migration time (2nd test: water-service)

Fig. 3 Weibull plots of migration time (1st test)

験結果である。これらの図から、水道水滴下に比べて脱イオン水滴下の場合の発生時間、寿命とも長くなっている。これは、成長時間が両者でそれほど変わらなかったことから、寿命は発生時間の長い脱イオン水滴下の場合で長くなったと見ることができる。

4.3.2 電圧時間特性

第2次試験結果の一例をFig. 7~10に示す。これらの結果より発生時間と寿命に分けて検討する。

①発生開始時間比較：マイグレーション発生までの時間の電圧特性をFig. 7, 8に示す。Fig. 7に示したように、洗浄した試料の電圧時間特性から、水道水滴下した場合より脱イオン水滴下の実験結果の方が、Zn9.0を除いて発生時間が長いことがわかる。また、鉛共晶はんだと比較して、鉛フリーはんだでは脱イオン水滴下の場合には特に低い電圧において発生までにやや長い時間を示すものの、水道水を滴下した場合も含めて両者でほとんど変わらなかった。

一方、洗浄しない場合には、Fig. 8に示したように、脱イオン水滴下の場合にはSn-Ag-Cuを除いて、全体的に早くから発生する傾向があり、水道水滴下の場合とほとんど変わらない結果となった。この場合にも、鉛共晶はんだと比較して、明らかに鉛フリーはんだでは発生開始時間が長い。しかし、水道水を滴下した場合には、鉛共晶はんだの発生開始時間が大幅に伸びているのが特徴的である。この場合には、鉛フリーはんだの方が短くなって逆転している。

②寿命の電圧特性比較：寿命の電圧特性をFig. 9, 10に示

Fig. 7 Voltage-migration beginning time (2nd test: washing)

Fig. 8 Voltage-migration beginning time (2nd test: no washing)

Fig. 9 Voltage-migration life time (2nd test: washing)

Fig. 10 Voltage-migration life time (2nd test: no washing)

す。Fig. 9に示したように、洗浄した試料では、脱イオン水滴下の場合全体的に寿命が長く、Sn-Ag-Cu-Biで電圧依存性大きいこともあるが、鉛フリーはんだで鉛共晶はんだより寿命が長くなっている。また、水道水を滴下した場合には、全体として電圧依存性がやや大きくなり、どの試料もほぼ同じ程度の寿命になっていることがわかる。

一方、洗浄しなかった試料では、Fig. 10に示したように、脱イオン水滴下の場合の寿命が、洗浄した場合に比べて短くなり、Sn-Ag-CuやSn-Bi-Agを除いて、水道水滴下の結果とほとんど同程度の寿命を示した。それでも、鉛共晶はんだの寿命が短くなったため、鉛フリーはんだは相対的に寿命が長くなっているといえる。しかし、水道水を滴下した場合、発生のところでも述べたように、Sn-Pb共晶の寿命が長くなって、鉛フリーはんだより逆に長い寿命となった。

4.4 第3次試験結果

第3次試験結果から洗浄なしの場合で、鉛共晶はんだとSn-Ag-Cuを比較して水道水、脱イオン水、蒸留水をそれぞれ滴下した場合の発生開始時間と寿命を比較してFig. 11, 12に示す。

Fig. 11は発生開始時間で、水道水滴下の場合に比べ脱イオン水と蒸留水滴下の場合で時間が長くなっていることは先に述べてきたことから十分予想されることである。また、水道水滴下の場合で低い電圧のところで鉛共晶はんだが長くなっている以外はSn-Ag-Cuの方が開始時間がいず

Fig. 11 Voltage-migration beginning time (3rd test)

Fig. 12 Voltage-migration life time (3rd test)

れも長いことがわかる。次に、Fig. 12を見ると、寿命は発生開始時間同様に蒸留水で脱イオン水と同じか長くなっており、イオン伝導度の小さい水ではマイグレーションが起こりにくく寿命が長いことを示している。しかしこの場合には、先にも示したように、水道水でのみ鉛共晶はんだの方がSn-Ag-Cuより寿命が長くなっている。このように、実験条件が違った場合でも同様な傾向にあることを示す。

4.5 劣化箇所観察結果

金属顕微鏡ならびにSEMによって、マイグレーションの発生から短絡までの状況を観察した結果を以下に示す。まず金属顕微鏡の観察によって得られたマイグレーション劣化痕をFig. 13に示す。このように、一例を示したが、どの試料でも水滴下試験において、マイグレーションの発生が見られるのは、すでに発表されているように陰極からである。これが陽極に向かってデンドライト状のマイグレーションが成長する。なお、印加電圧が高いと実験期間内で水の電気分解反応が見られ、特に陰極からの水素の発生が観測される場合が多い。このような場合には、マイグレーションは気泡の発生していない場所から伸びている。

次に、SEM-EDXによる面分析の結果をFig. 14~16に示す。CuのマイグレーションではCuが、鉛共晶はんだでは、SnとPbが検出されることは知られている⁷⁾。今回鉛フリーはんだにおいては、Snが全面に検出された他は、Znの場合のみ検出され、貴な金属であるAgやBi等は検出されなかったが、場合によってはCuが検出されることがあった。さらに、マイグレーションによる劣化箇所をXPS分析し、その結果をFig. 17, 18に示す。これらの結果から、鉛共晶

Fig. 13 Vestige due to migration

Fig. 14 SEM analysis (Ag3.5)

はんだはPbとSnが析出しており、Sn-Zn系でZnが析出しているほかは、鉛フリーはんだでSnの析出が認められた。これより貴金属が配合されていても、化合形態であれば、マイグレーションを起こしやすいAgであっても析出することはほとんどないと考えられる。

Fig. 15 SEM analysis (Zn9.0)

Fig. 16 SEM analysis (Bi6.0)

5. 考察

5.1 マイグレーションの発生と成長に対する考察

5.1.1 発生開始時間の比較

マイグレーションの発生開始時間は、Fig. 7, 8, 11に見たように洗浄の有無や、どのような種類の水を滴下するかによって違ってくる。基本的にはイオン伝導度の小さい水を滴下した方が発生開始時間が長くなる傾向がうかがえる。発生時間を左右するのは、電位とpHとの関係で決まる金属の溶出域にあるかどうかである⁶⁾。今回の結果から、各種はんだの寿命比較をすると、洗浄をして脱イオン水を滴下した場合にはほとんどの材料でその差は見られないが、水道水を滴下した場合には、無洗浄において鉛共晶はんだが鉛フリーはんだより寿命が長くなっていた。これはpHが大きくなり溶出しにくい領域になったためと考えられる。また、同じく水道水滴下で洗浄した場合でもSn-Zn系の材

(a) Sn-Pb (Sn63)

(b) Sn-Ag-Cu-Bi

Fig. 17 XPS analysis (2nd test: pt. 1)

(a) Sn-Zn-Bi

(b) Sn-Bi-Ag

Fig. 18 XPS analysis (2nd test: pt. 2)

料で長くなる傾向を示した。これなどは、Znが酸化しやすいことによるため、マイグレーションの発生にはこれら酸化膜を破って金属の溶出が行われなければならない。ただ、この発生開始時間は、カソードでの還元析出した金属

の芽のところで開始と判定しているの、最初のイオンの移動時間も含まれていることになる。

5.1.2 成長時間の比較

マイグレーションが対極まで到達する成長時間は、鉛共晶はんだが他のはんだに比べて短く、特に水道水滴下の場合には著しく短い結果となった。また、Sn-Zn系では逆に水道水滴下で長い結果となっている。その他の鉛フリーはんだは、どの条件でもほぼ一定で電圧依存性の小さい成長時間を示した。これは、主にマイグレーションとして伸びるのが、鉛共晶はんだでPbのイオンが、Sn-Zn系でSnよりもZnのイオンが移行するのに対して、その他の鉛フリーはんだではSnのイオンが移行することの差によると考えられる。すなわち、成長時間は、まず第一にアノードからカソードへのイオンの移動速度が律則になっていると考えられる。次いで、カソードでの還元析出した金属のデンドライトがどのような伸び方をするかによると見られる。Cuの場合においても発生開始時間が鉛共晶はんだより早いものの、電圧の低いところでは成長時間が長くなって寿命としては鉛共晶はんだより長くなることもCuイオンの移行が集中的でないことによっている。マイグレーションはイオンが移行しやすいかどうか、あるいは発生成長が対極に限られた箇所では集中して見られるかあるいは分散して見られるかにも依存している。これらのことの要因によって違ってくる。

5.2 劣化箇所観察結果に対する考察

マイグレーションの劣化箇所の分析によって、マイグレーションするのはCu, Pb, Sn, Znなどであって、化合形態にあるAgなど貴金属は単体でマイグレーションしやすい金属であっても溶出しにくいことがわかった。これはすでに報告されている⁸⁾ことではあったが、改めて確認できた。ただ、銀などが単独で存在するとやはりマイグレーションしやすいので、留意する必要があるのは当然である。また、一部はんだコートした場合にも下地のCuがマイグレーションしており、上記のAgの場合と同様のことを示しているので留意事項の1つである。ファインピッチになって、はんだペーストが十分下地金属をカバーできない場合も十分考えられ、このような場合にはあり得ることである。

5.3 寿命特性に対する考察

以上のマイグレーションの発生開始時間と成長時間ならびにマイグレーション劣化箇所の分析結果より寿命特性に対する考察を行う。

寿命は前記の発生開始時間と成長時間の和である。大方の寿命は発生開始時間で決まっているが、Cuのように成長時間の方が長くて結果的に寿命が延びる場合もある。Sn-Zn系のように、水道水滴下で両方が長く長寿命を示す場合もあれば、同じく水道水滴下でpHがより大きい場合にはPbの溶出が抑えられて他の条件より発生時間が長くなって鉛フリーはんだと逆転する場合も見られた。

以上述べてきたように、基本的には鉛フリーはんだは長寿命となるが、条件によっては必ずしもそうでない場合や、下地金属の溶出や化合形態でなく層形態を成しており、マイグレーションしやすい金属が溶出する場合もあるので、製造工程の把握や機器使用条件の把握に十分な留意が必要である。

5.4 試験法に対する考察

今回は水滴下試験法によって各種はんだの耐マイグレーション性を評価してきた。この種の試験法はさまざまな提案がされている⁹⁾。基本的には短時間で相対評価する簡易試験法と環境槽内で温湿度一定での定常試験がある。

ところが鉛フリーはんだの耐マイグレーション試験に恒温湿度試験を採り入れるとすると、今までの経験から数千時間に及ぶ試験期間が必要となる。

このようなことから、本論文では簡易試験法としての水滴下試験を採用した。この試験法は、簡易的に相対的な比較試験としての有効性は知られているが、実際フィールドでの故障条件と対応をどう考えるかについて古くから論議されており、いまだに定まっていない。筆者は、この試験法は経年変化の劣化によって起こるマイグレーションというより使用環境条件や偶発的な結露によって起こる場合を想定した試験法に対応していると考えている。結露試験槽が市販されているが、基本的には類似の簡易試験であると見ることができる。したがって、これより加速倍数がどうかといった論議は当てはまらない。あくまでも結露に対して耐マイグレーション性はどうかといった評価を与えるのみである。もっとも、サイクル試験があるように、使用期間中に何回結露条件に遭遇するかといった観点から、加速倍数を評価することもできないことはない。

一方、環境試験槽による定常試験ではマイグレーションはアノードから見られカソードに伸びる場合が多く見受けられる。今回の試験ではすべて、カソードから伸びてアノードに向かって進展するマイグレーションであった。結露条件ではこの場合と同様と思われるので、このことを評価するのであれば問題ないと見られる。しかし、比較試験として、使用条件におけるアノードから伸びるマイグレーションを想定した場合には、劣化機構が違うのではないかと見られがちである。しかし、今まで筆者が述べてきたように⁷⁾、両方で劣化機構が違うのではなく、電極間の絶縁層の抵抗の値によって違ってくるに過ぎないことを示してきた。このことから、劣化機構が違うのではなく電極間の抵抗と連動して連続していると見た方がよいと判断する。その意味では、定常試験における試験法と劣化機構が違ってはいない。

以上の見解から、簡易試験を実体にあった状況での劣化とどう対応していけばよいかについて、さらにデータの収集と積み上げによって明確にしていければよいと考えている。

6. 結 言

電子機器の小型軽量化にあたって、高密度実装が推進される一方で、環境問題とも関連して、鉛フリーはんだの使用が急速に進んでいる。このような背景から、今回鉛フリーはんだを中心に、銅、鉛共晶はんだを比較試料として、水滴下試験法により耐マイグレーション性を比較した。本研究の特徴は、マイグレーション発生までの時間と、その後の成長短絡までの時間に分けて寿命比較したことである。その結果得られた主な内容を下記に示す。

- 1) 劣化寿命をワイブルプロットすると、ほとんどの材料で摩耗型破壊を示した。また、電圧寿命特性の傾きが約1.5となった。印加電圧がさらに低下すると閾値が存在するのでその傾きが大きくなる。
- 2) 寿命は、大抵の場合、発生開始時間に左右されることが多いが、イオンの移動が制約される場合や、分散して発生する場合などにおいて成長短絡までの時間が発生開始時間と同じ程度か長い場合も見られるので、寿命に影響する。
- 3) 寿命比較すると、Sn主体の鉛フリーはんだは鉛共晶はんだより大抵の場合予想通り長寿命となったが、汚れや水道水滴下試験では鉛の溶出が抑えられることもあって、Sn-Zn系を除いて逆転することがわかった。
- 4) はんだペーストが十分下地金属を覆えない状況では、その下地金属がマイグレーションすることがあるので留意が必要である。
- 5) 水滴下試験法は、試料の相対的な簡易試験法としてや結露に対しての評価試験として有効である。

以上の検討結果より、鉛フリーはんだは、基本的には耐マイグレーション性の良い組成であると見られるが、他の要因もあり、工程管理、使用条件を十分考慮して評価すべきである。

最後に、この研究に当たり、はんだペーストの提供や試料の作製でご指導いただきました千住金属工業 高木晶子氏、劣化痕の電顕分析をお願いした楠本化成 小林吉一氏、当大学研究推進部 宮本泰男氏に厚くお礼申し上げます。

(2003.4.15-受理)

文 献

- 1) 吉原佐知雄，他：“鉛フリーはんだにおけるイオンマイグレーションの水晶振動子マイクロバランス法による in situ 評価”，9th MES'99, No. 2A-2-4, p. 145, 1999
- 2) 津久井 勤，他：“鉛フリーはんだの耐イオンマイグレーション性の検討”，電気学会誘電・絶縁材料研究会，No. DEI-01-87, p. 31, 2001
- 3) 安藤壽浩，他：“熱衝撃ストレスで発生する Sn ウィスカの信頼性評価”，9th MES'99, No. 2A-2-2, p. 137, 1999
- 4) 遠藤貴志，他：“Sn および Sn 合金めっきを行ったチップ部品のホイスター発生状況”，9th MES'99, No. 2A-2-3, p. 141, 1999
- 5) M. Pourbaix: Atlas “D'Equilibres Electro Chimiques”, Gauthiervillars & Cie E'Diteur, 1963
- 6) 津久井 勤，他：“プリント配線板のイオンマイグレーションと絶縁信頼性評価法”，東海大学工学部紀要，Vol. 34, No. 1, p. 39, 1994
- 7) 津久井 勤，他：“プリント配線板のイオンマイグレーション発生パターンについての考察”，サーキットテクノロジー，Vol. 9, No. 3, p. 19, 1995
- 8) 藤城敏史，他：“イオンマイグレーションによるガラス基板上の銀 dendrite の成長とそのフラクタル次元”，電気学会論文誌，Vol. 118-A, No. 7/8, p. 838, 1998
- 9) 電子機器絶縁信頼性評価方法調査専門委員会：“イオンマイグレーション劣化によるプリント配線板の寿命評価”，電気学会技術報告第722号，2000