

## 電気化学マイグレーションによる配線板の絶縁低下

本山建雄\*, 市川健二\*

### Insulation Degradation of Printed Circuit Board Caused by Electrochemical Migration

by Tatsuo MOTOYAMA\* and Kenji ICHIKAWA\*

**Abstract:** Recently, high density wiring boards have been used in electronic devices in order to achieve its small sizing, therefore the intensity of electric field between lines has become high. On the other hands, electronic devices such as a control apparatus, measuring systems and so on have been used in atmosphere of not only indoor but also outdoor especially in chemical plants where corrosive gases exist. Humidity and corrosive gases accelerate insulation degradation caused by electrochemical migration and failure of electronic devices occurs.

Electrochemical migration is a kind of electrochemical phenomena effected by electric field strength and water with electrolyte. Metal of line is dissolved in water and ionizes. And they are moved by electric field strength and deposits on the board between lines. After the migration occurred, there are some cases that the resistance of deposits is recovered according to decreasing of humidity.

In this paper, the dependence on testing condition to progression of its migration and the reason why the resistance of deposits is recovered are studied to prevent the accidents caused by electrochemical migration. Three experiments in different condition are conducted, mainly. Experiment 1 is constant temperature and humidity test under condition of 40°C, 95% RH, 100V. Experiment 2 is cyclical test under condition of (20°C, 60% RH(20 min.) – 40°C, 90% RH(20 min.))/10V. Experiment 3 is the same test as Experiment 2 except for atmosphere containing 35.5 ppm of SO<sub>2</sub>. Main experimental results are summarized as follows,:

- (1) The exposed time that resistance between lines was decreased until  $10^7 \Omega$  was much different among Experiment 1, Experiment 2 and Experiment 3. In case the distance between lines was 0.4 mm on phenolic resin with paper (Ph), it took 800 hours on Experiment 1, 200 min. (equivalent to 5 cycles) on Experiment 2, and 40 min. (equivalent to 1 cycle) on Experiment 3. In case of the same distance on epoxy resin with glass fiber (GE), it took over 800 hours on Experiment 1, 88 hours (equivalent to 132 cycles) on Experiment 2, and 40 min. (equivalent to 1 cycle) on Experiment 3.
- (2) Tip of dendrite or dendrite like deposits was composed of many hemisphere-particles with the diameter of some micro-m.
- (3) Resistance between lines with deposit generated by electrochemical migration increased at normal experimental room condition. It mainly depended on formation of micro space caused by water evaporation in deposits or increase of resistance caused by oxidation or chemical combination of deposits.

**Keywords;** Electrochemical migration, Insulation failure, Printed circuit board, Degradation

### 1. ま え が き

電子機器の小型化、高機能化に伴い、高密度実装の配線板が使用されるようになってきた。これは配線の狭ピッチ化を招き、絶縁性の他に高電界<sup>1)</sup>という新たな課題を誘起している。一方、電子機器は制御機器、計測機器として産業現場に導入されつつあり、空調の行き届いた室内だけでなく、屋外や化学プラントなどその使用範囲が多様化している。特に、携帯用機器の普及に伴い、結露による障害が増加している<sup>2)</sup>。

配線の狭ピッチ化、使用環境の多様化は絶縁劣化を加速し、絶縁不良による故障を増加させている。その原因の一つとして電気化学マイグレーションによる絶縁劣化がある。

電気化学マイグレーションは、電界と水分の作用で配線金属が溶けだし、配線間に沈積して絶縁性を低下させる現象である。この現象はICやLSIなど配線間の距離が短い集積回路において発生すると考えられていたが、配線の狭ピッチ化に伴い、電子機器の基板や端子板に絶縁劣化を生じている。また、このように劣化した配線板の絶縁性は、周囲の雰囲気によって変化することがあり、電子機器の故障原因の解明を難しくするとともに、災害の原因となる危険性をはらんでいる。

ここでは、配線板、端子板等の絶縁不良による災害の防止を目的として、マイグレーション発生の容易さと周囲雰囲気との関連性について検討した。また、配線間の電気特性、沈積した物質の三次元形状から配線板の絶縁性が変化することについて検討した。

### 2. 電気化学マイグレーション

電気化学マイグレーション（以下、単にマイグレーションと記す。）は、陽極の配線金属が電界と水の作用により、金属又はその化合物のイオンとなって溶け出し、電界の作用で配線間を移動し、配線間に沈積する電気化学現象である。

沈積の過程は金属又はその化合物のイオンが陰極で電気的に中和され、陰極から析出し、テンドライト状の析出物となる場合、陽極付近で電気的に中和され陽極から析出する場合、移動の途中で析出する場合など発生条件によって異なる。その経路は雰囲気の影響を受けるため定まらないが、電解質または電解質と金属の化合物の結晶が生じる場合、その結晶に沿って析出物が生じる。

マイグレーションの発生は主に電界の強さ、相対湿度、温度に依存する。特に、狭ピッチ化した配線板では電界が強くなるため、マイグレーションが発生し易い。析出物は放電やトラッキングなどを誘発し、電子

機器の故障を引き起こすことがある。

### 3. 実 験

#### 3.1 試験片

試験片は片面銅張積層板を Fig. 1 のパターンにエッチングしたものである。配線の幅は1 mm、配線間距離0.16 mm (4組)、0.4 mm (4組)、1.0 mm (3組)、2.5 mm (2組)、6.3 mm (2組) の15組の配線から構成されている。材質はガラス基材エポキシ樹脂基板（以下、ガラエポまたはGEと記す。）及び紙基材フェノール樹脂基板（以下、フェノールまたはPhと記す。）である。これらをアルコール中で超音波洗浄した後、試験片とした。

#### 3.2 実験回路

試験回路は Fig. 2 に示すように、直流電源（電圧  $V_0$ ）、漏れ電流検出用抵抗  $R_d$  および試験槽内の試験片からなる。 $R_d$  の出力を  $V_d$  とすると配線間の抵抗  $R$  は (1) 式で算出される。

$$R = V_0 \cdot R_d / V_d - R_d \quad (1)$$

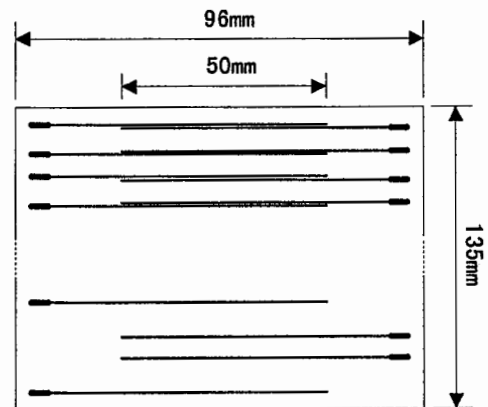


Fig. 1 Wiring pattern and size of specimen. 試験片の配線パターン

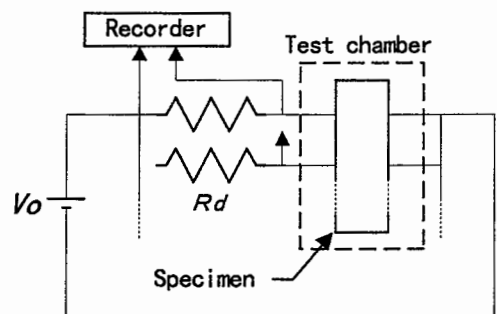


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup. 実験回路

### 3.3 実験条件

マイグレーション試験に関する規格<sup>1)</sup>は、国内では、JIS-Z-3284, JIS-Z-3197, 米国ではIPCとMIL規格がある。これらは主にソルダペーストやフラックスに関係するものであり、プリント配線板自体の試験に関するものはない。このようなことから学会などで報告されている試験方法を参考に、Table 1に示すような条件下でマイグレーションの実験を行った<sup>1),3),4),5)</sup>。サイクル試験は2つのステップからなり、例えば、Table 1のEXP.2の場合、20°C/65%RH/10Vの第一ステップ20分間、その後、40°C/90%RH/10Vの第二ステップ20分間を1サイクルとして、試験を行っている。また、二酸化硫黄（以下、SO<sub>2</sub>と記す。）濃度35.5 ppmは検知管式ガス測定器で測定した平均ガス濃度を示しており、測定値と測定時間間隔との積を測定時間間隔の和で割って平均化した値である。

### 3.4 実験方法

試験片を試験槽に入れ、試験環境にしばらく暴露した後、電圧を印加し、試験を開始した。その後、マイグレーションの進展により配線間の抵抗が10<sup>7</sup>Ω以下となったとき、絶縁が劣化したと見なしたが、絶縁性が回復する場合もあることから10<sup>5</sup>Ω以下となる時点まで各配線での実験を継続した。

サイクル試験では、試験槽の温度が低い方から高い方に变化した直後、試験片表面の相対湿度が高くなり、配線間の抵抗は大きく低下するが、10<sup>7</sup>Ω以下となる時間が1サイクル以上持続するとき、絶縁劣化が生じたと見なした。

## 4. 結果

### 4.1 マイグレーションの進展過程における配線間抵抗の変化

一例として、Table 1に示すEXP.1の実験条件下でPh, 配線間距離0.16 mmにおける配線間の抵抗と経過時間との関係をFig. 3に示す。時間の経過とともに配線間の抵抗は減少傾向を示し、80時間付近と600時間付近において大きく低下するのが観測された。これらの時点において析出物が配線間を橋絡したと推定されるが、絶縁低下が持続せず、回復している。

このような現象はマイグレーション試験において一般に観察され、これを繰り返しながら配線間の絶縁性が低下していく。この原因として、一時的な結露、橋絡時の大きな電流による析出物の切断や他の析出物の影響を受けて電界が減少し、析出物が分離することなどが考えられている<sup>1),2)</sup>。

### 4.2 析出物の発生条件と外観

Fig. 4は析出物の外観の例を示したもので、その形状は絶縁材料、配線材料、発生条件などによって異なる。

Fig. 4(a)はEXP.1のように高湿度雰囲気中における析出物を示しており、変色やデンドライト状の析出物が見られた。サイクル試験では、配線間に結露を生じることが多く、EXP.2ではFig. 4(b)に示すように、デンドライト状の析出物が生じた。また、EXP.3では、雰囲気中にSO<sub>2</sub>が存在するため、腐食や硫化物の結晶(Fig. 4(c)の白色の部分)が成長し、それにそってイ

Table 1 Experimental condition for electrochemical migration test.  
実験条件

Item	Temp./R.H. /Applied voltage °C/%RH/V	Maximum testing time hour (number of cycle)	Substratum	Wiring metal	Remarks
EXP.1	40/95/100	800	GE,Ph	Cu	Constant temp., R.H.
EXP.2	20/65/10-40/90/10	89.3 (134)	GE,Ph	Cu	Cyclic test
EXP.3	20/65/10-40/90/10	8 (11)	GE,Ph	Cu	Cyclic test in 35.5 ppm of SO <sub>2</sub>
EXP.4	5/60/50-25/90/50	500 (750)	GE	Cu	Cyclic test
EXP.5	40/95/50	240	Glass plate	Ag	Constant temp, R.H.

Notes; Cyclical test is composed of two steps and duration time for each step is 20 min..

GE: Epoxy resin with glass fiber, Ph: Phenolic resin with paper

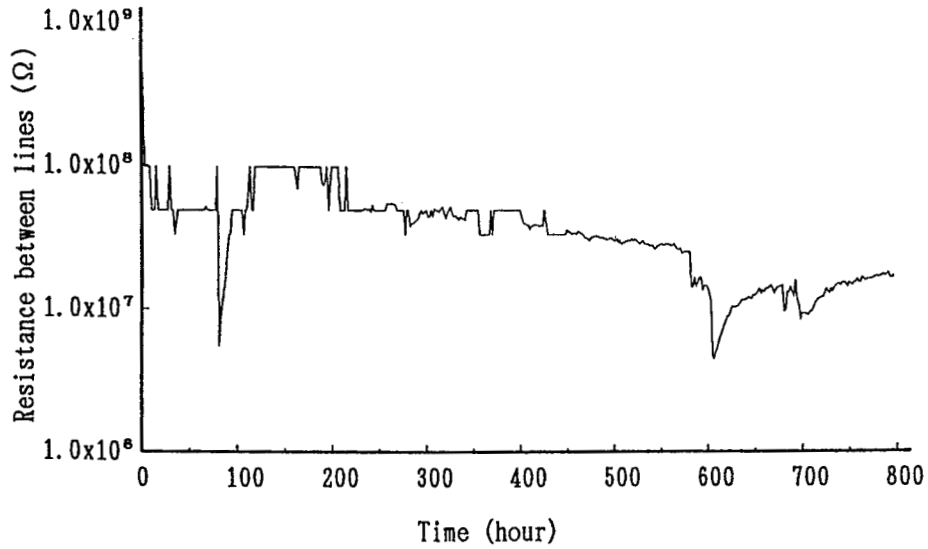
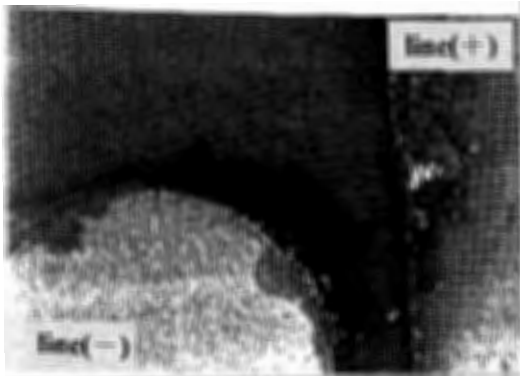


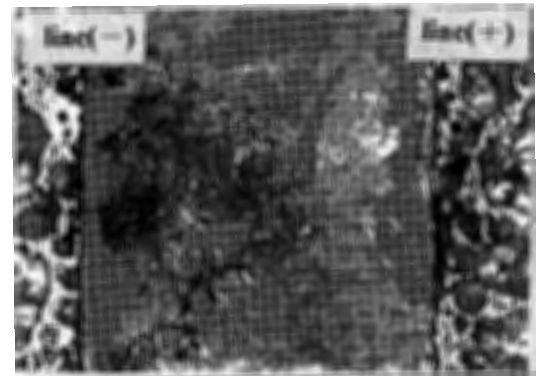
Fig. 3 Time-dependence of resistance between lines on EXP.1(Ph, 0.16 mm).  
配線間の抵抗の経時変化



(a) EXP.1 (Ph, 0.4 mm).



(b) EXP.2 (GE, 0.16 mm).



(c) EXP.3 (GE, 2.4 mm).

Fig. 4 Examples of migration deposits.  
マイグレーション析出物の例

オン化した配線金属が移動し、析出物 (Fig. 4(c)の黒色の部分) を形成した。配線が銀であるEXP.5の場合、Fig. 12(a)に示すように、粒子状の銀が繋がり、デンドライト状の析出物が観察された。

#### 4.3 マイグレーションによる劣化時間

配線間の抵抗が  $10^7 \Omega$  に達するまでの時間を劣化時間とすると EXP.1~4 における劣化時間は Fig. 5 のようになる。試験条件によって劣化時間が大きく異なり、恒温恒湿の条件よりも温度湿度の変化、さらには雰囲気中の  $SO_2$  ガスの影響<sup>5)</sup> を強く受けることがわかる。

#### 4.4 マイグレーション析出物と配線間距離

Table 2 はマイグレーション試験終了後の試験片 (EXP.1~4) を観察し、析出物による配線間の架橋と

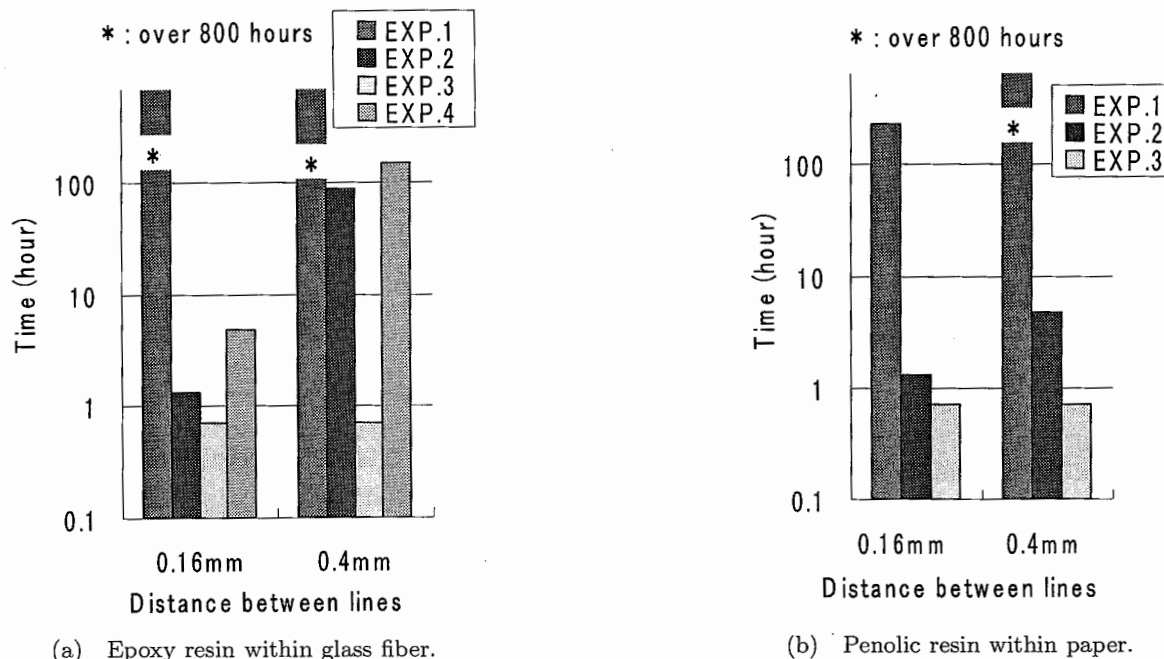


Fig. 5 Time taking the resistance between lines below  $10^7 \Omega$ .  
配線間の抵抗が  $10^7 \Omega$  となるまでの時間

Table 2 Distance between lines formed dendrite or dendrite like deposits.  
デンドライト状析出物が形成された配線間距離

Item		Distance between lines (mm)									
		Bridged					Unbridged				
		0.16	0.4	1.0	2.5	6.3	0.16	0.4	1.0	2.5	6.3
EXP.1	GE	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Ph	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×
EXP.2	GE	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×
	Ph	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×
EXP.3	GE	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
	Ph	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○

Note ○ : with dendrite or dendrite like deposits, × : without dendrite or dendrite like de posits  
GE: Epoxy resin with glass fiber, Ph: Phenolic resin with paper

配線間距離および目視で観察される析出物の発生の有無と配線間距離の関係を示している。実験時間が異なるため各試験条件間の比較は難しいが、劣化時間と同様に、試験条件の影響を受け、特に雰囲気中の  $SO_2$  ガスが存在する EXP.3 では 6.3 mm の配線間距離においても、デンドライト状の析出物が観察された。

## 5. 検 討

### 5.1 配線間の抵抗と湿度

析出物の特性を検討するため、紙基材フェノール樹脂

基板について、未試験片および実験室雰囲気中で数ヶ月保管した被試験片 (EXP.1; 配線間距離 0.16 mm) の配線間抵抗を測定した。測定条件は温度  $40^\circ C$ 、湿度 65%RH, 80%RH および 95%RH であり、その結果を Fig. 6 に示す。なお、測定値は 1 分値 (測定電圧 100V) である。

未試験片は湿度が 65%RH から 95%RH に増加すると絶縁抵抗は 1/100 程度に減少した。これは湿度の変化による表面抵抗の変化に起因すると考えられる。

被試験片には配線間に褐色の変色及びデンドライト状析出物の橋絡が見られ、そのうち 3 組の配線間には

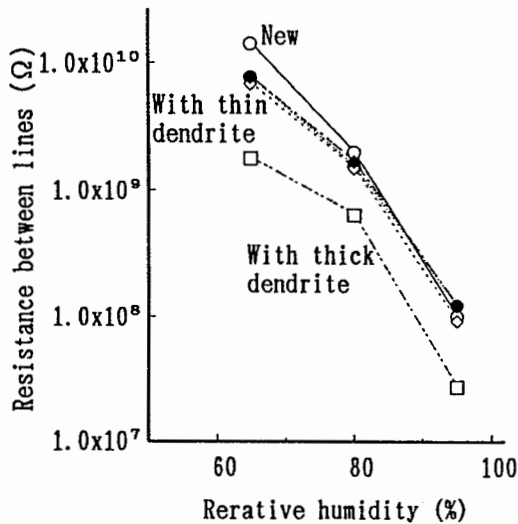


Fig. 6 Changes in resistance between caused by humidity. (EXP.1, Ph, 0.16 mm).  
湿度に対する配線間の抵抗変化 (EXP.1, Ph, 0.16 mm)

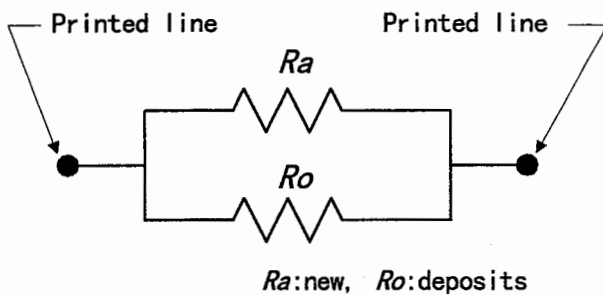


Fig. 7 Equivalent circuit between tested lines.  
配線間抵抗の等価回路

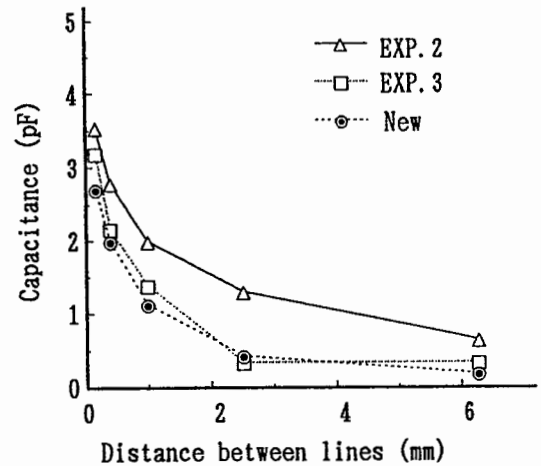
細いデンドライト状析出物 (幅 0.01 mm 程度), 1 組には太いデンドライト状析出物 (幅約 0.1 mm 程度) があった。

細いデンドライト状析出物がある配線間では 65%RH において, 配線間の抵抗は未試験片よりも小さいが, 80%RH, 95%RH では未試験片と同程度の抵抗になっている。一方, 太いデンドライト状析出物がある配線間では, いずれの湿度でも配線間の抵抗は未試験片の 1/10 程度となっている。

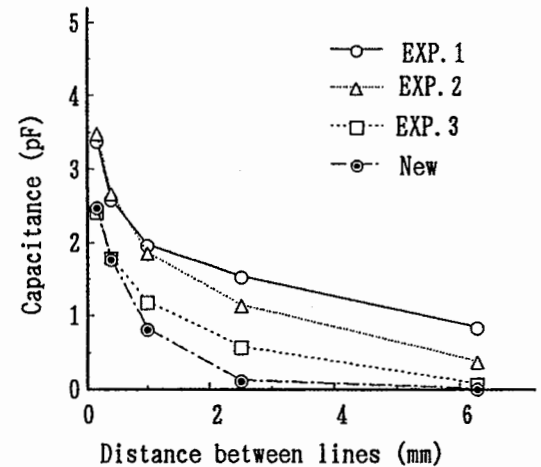
ここで, 被試験片の配線間抵抗  $R$  を Fig. 7 に示すように, 未試験片の抵抗  $R_o$  と析出物によって生じた抵抗  $R_a$  の並列回路からなるものとし,  $R_a$  を  $R$  と  $R_o$  で表すと (2) 式のようなになる。

$$R_a = R \cdot R_o / (R_o - R) \quad (2)$$

各湿度での測定値を (2) 式に代入し, 細いデンドライト状析出物がある場合の  $R_a$  を求めると, 65%RH では約  $1.56 \times 10^{10} \Omega$ , 80%RH では約  $0.77 \times 10^{10} \Omega$  として



(a) Epoxy resin with glass fiber.



(b) Phenolic resin with paper.

Fig. 8 Capacitance between lines.  
配線間のキャパシタンス

95%RH では  $R_o$  とほぼ同程度となり, 湿度の増加に対して減少しているが  $R_o$  よりも大きい。

一方, 太いデンドライト状析出物がある場合の  $R_a$  を求めると, 65%RH では約  $0.21 \times 10^{10} \Omega$ , 80%RH では約  $0.096 \times 10^{10} \Omega$  そして 95%RH では約  $0.0039 \times 10^{10} \Omega$  となり, 湿度の増加に対して析出物の抵抗は減少しているものの, いずれの湿度においても  $R_o$  より小さい。析出物が配線間に占める面積が小さいにもかかわらず,  $R_o$  と同じような割合で減少することから, 単に析出物の表面に水分が吸着されただけでなく, 微少な空間や亀裂に浸透し, 導電性の部分を形成したものと推定される。

このことから, マイグレーションが発生した時点では析出物に水分が十分含まれていて導電性があったが,

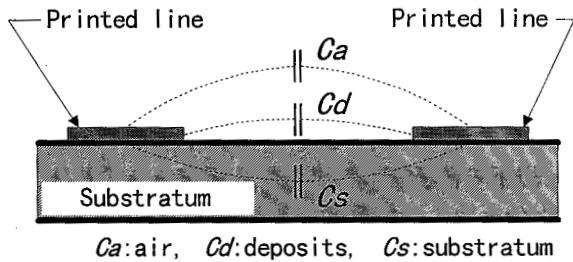


Fig. 9 Model of capacitance between lines.  
配線間のキャパシタンスモデル

乾燥すると水分が存在していた部分に空間やその周辺に亀裂が生じ、絶縁性が回復すると推測される。

なお、ガラス基材エポキシ樹脂の場合、析出物が生じなかったため測定していない。

## 5.2 配線間のキャパシタンス

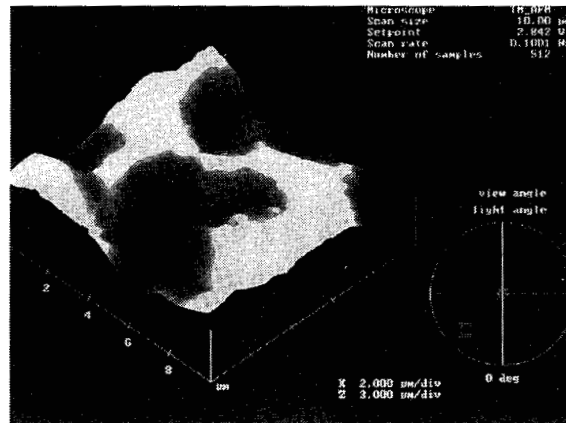
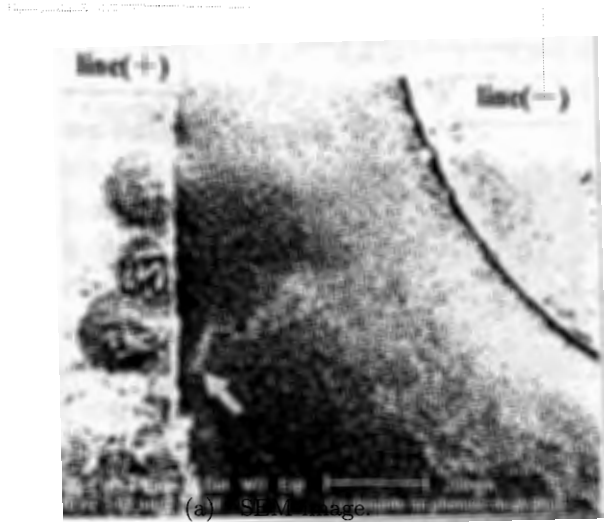
LCRメータ (100 kHz : 1V) を用いて、室内で測定した未試験片および EXP.1, EXP.2, EXP.3 の被試験片の配線間のキャパシタンスと配線間の距離の関係を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 によると、被試験片のキャパシタンスは未試験片のキャパシタンスと同程度か、より大きくなっている。また、試験時間が長いほど大きくなっている。この原因は次のように考えられる。

まず、配線間のキャパシタンスを Fig. 9 に示すように、空気を介したキャパシタンス  $C_a$ 、配線間表面の析出物を介したキャパシタンス  $C_d$  および絶縁材料を介したキャパシタンス  $C_s$  に分けて考えると、配線の面積  $S$  が大きくなると浮遊キャパシタンスが増加し、 $C_a$ 、 $C_s$  は大きくなり、配線間の距離  $d$  が小さくなると  $C_a$ 、 $C_d$ 、 $C_s$  は大きくなる。

EXP.1, EXP.2, EXP.3 の被試験片の配線間を ESCA で分析すると、銅が検出される。また、一般に、銅イオンは繊維に沿って試験片内部に浸透することから、配線間の析出物によって、 $d$  が小さくなったように、また、析出物が内部に浸透することによって、 $S$  が大きくなったように作用し、 $C_d$ 、 $C_s$  がそれぞれ大きくなり、結果として、Fig. 8 に示す未試験片と被試験片の差を示したと考えられる。また、Fig. 8 に示すキャパシタンスの大小は実験時間の長短と相関性が見られることから、被試験片に吸着した水分の影響も原因の一つとして考えられる。

以上のことから、配線間のキャパシタンスがマイグレーションを検出する指標の一つになる場合があると考えられる<sup>6)</sup>。



(b) Three dimensional figure (AFM image).

Fig. 10 Figure of deposits (EXP.1, Ph, 0.4 mm).  
析出物の形状 (EXP.1, フェノール, 0.4mm)

## 5.3 マイグレーション析出物の三次元形状

配線間の絶縁性を析出物の形状から検討するため、EXP.1 および EXP.5 で得られた dendrite 状析出物の形状を電子顕微鏡 SEM および原子間力顕微鏡 AFM で観察した<sup>7),8)</sup>。

Fig. 10(a) は紙基材フェノール樹脂上に発生した銅化合物の析出物を示しており、dendrite 状析出物が陽極側に向かって成長している。Fig. 10(b) は先端部分の三次元像であり、粒子状の析出物が試験片の凸部に付着している。銅張り積層板の表面は凸凹であることから、高さ、幅を Fig. 11 のように定義し、測定すると高さは 500 nm 以下、幅は約 1 μm 以下であった。

一方、Fig. 12(a) に示すように、ガラス板状の銀の dendrite 状析出物は半球状の粒子が大きくなり、連なった形として観察される。これらのいくつかの部分



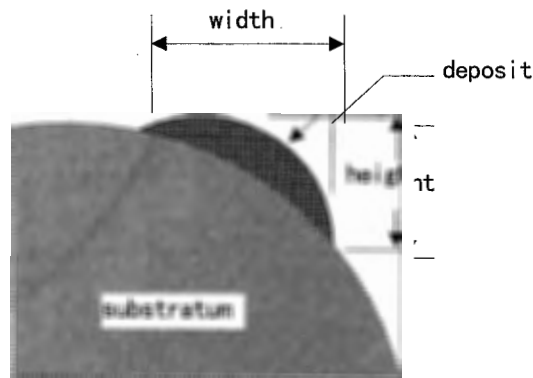
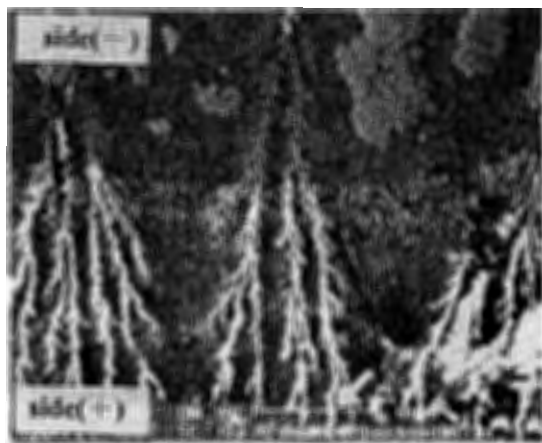
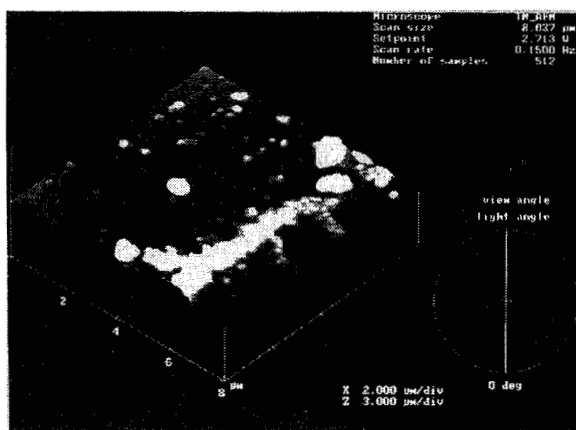


Fig. 11 Definition of height and width of deposits.  
析出物の高さ と 幅



(a) SEM image.



(b) Three dimensional figure (AFM image).

Fig. 12 Figure of deposits (EXP.5, glass plate).  
析出物の形状 (EXP.5, 板ガラス)

において、三次元形状を観測し、析出物の高さ、幅を測定すると高さは約  $1.2 \mu\text{m}$  以下、幅は約  $2.1 \mu\text{m}$  以下であった。

以上のように、デンドライト状析出物の先端付近は数  $\mu\text{m}$  以下の粒子状の析出物から構成されており、それらは水分を挟んで電氣的に接続している緩い結合状態にあると考えられる。

このことから、実験室雰囲気など湿度の少ない状態に放置されると水分が蒸発して隙間が生じ、配線間の絶縁性は回復すると推定される。

### 5.4 配線間の絶縁性の変化

4.1 で述べたように、マイグレーションが進展し、配線間を橋絡すると配線間の絶縁性は大きく低下する。その後、回復、低下を繰り返しながら絶縁性が低下し、条件によっては短絡に至る。しかし、マイグレーション析出物の存在する配線板を常温常湿の雰囲気中に置くと、絶縁性が回復することがあり、その主な原因として次のようなことが考えられる。

- ・ 析出物の水分の蒸発による微少な空間の生成
  - ・ 金属析出物の酸化や化合による析出物の抵抗の増加
- このような試験片では、配線間の耐電圧が低下するため一時的な故障を発生しやすく、故障原因の究明を難しくするものと予想される。

### 6. あとがき

配線板、端子板等の絶縁不良の原因の一つである電気化学マイグレーションについて、試験条件と発生 の 容 易 さ お よ び 配 線 間 の 絶 縁 性 を 検 討 し た 。 主 な 実 験 条 件 は 恒 温 恒 湿 環 境 下 EXP.1 ( $40^{\circ}\text{C}$ ,  $95\% \text{RH}$ ,  $100\text{V}$ )、温度・湿度サイクル環境下 EXP.2  $\{(20^{\circ}\text{C}$ ,  $60\% \text{RH}$  (20min.)  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $90\% \text{RH}$  (20min.))/ $100\text{V}\}$ 、EXP.3 (EXP.2 +  $\text{SO}_2$ :  $35.5 \text{ ppm}$ ) である。測定結果をまとめると次のようになる。

- a) 配線間距離  $0.4 \text{ mm}$  におけるマイグレーション発生 の 容 易 さ を 配 線 間 の 抵 抗 が  $10^7 \Omega$  となるまでの時間とすると、紙基材フェノール樹脂の場合：EXP.1 では  $800$  時間、EXP.2 では  $5$  サイクル ( $200$  分に相当)、EXP.3 では  $1$  サイクル ( $40$  分に相当)、ガラス基材エポキシ樹脂の場合：EXP.1 では  $800$  時間以上、EXP.2 では  $132$  サイクル ( $88$  時間に相当)、EXP.3 では  $1$  サイクル ( $40$  分に相当)、となり、試験条件によって大きな差がある。
- b) 配線間が橋絡する距離は、紙基材フェノール樹脂の場合：EXP.1 では  $0.16 \text{ mm}$ 、EXP.3 では、 $2.5 \text{ mm}$ 、ガラス基材エポキシ樹脂の場合：EXP.1 では  $0.16 \text{ mm}$  以下、EXP.3 では  $1.0 \text{ mm}$  であった。



- c) EXP.3において、ガラス基材エポキシ樹脂、紙基材フェノール樹脂のいずれも、配線間距離 6.3 mm まで析出物が目視で観察された。
- d) デンドライト状析出物の先端付近の形状は半球状であり、その直径は数 $\mu\text{m}$ 以下の粒子の集まりである。
- e) マイグレーションの進展とともに配線間のキャパシタンスは大きくなる。
- f) マイグレーションによって低下した配線間の抵抗が常温常湿状態におかれた場合、回復する場合がある。これは主に、析出物の水分の蒸発による微少な空間の生成、金属析出物の酸化や化合による析出物の抵抗の増加に起因する。
- 3) 金井優子ほか、イオンマイグレーション試験方法に関する一考察、第 24 回日科技連信頼性・安全性シンポジウム予稿集、2-3, 77~82 (1994).
- 4) 田中浩和ほか、イオンマイグレーションの結露による影響の検討、DEI-96-83, 53~59 (1996).
- 5) 本山建雄, 市川健二, 温湿度サイクル試験雰囲気中でのイオンマイグレーション発生に及ぼす  $\text{SO}_2$  の影響, 電気学会研究会資料, DEI-97-71, 1~6 (1997).
- 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の発生と誘電特性, 電気学会研究会資料, DEI-95-41, 19 (1995).
- 7) 本山建雄, 市川健二, イオンマイグレーション析出物の三次元形状, 平成 9 年電気学会全国大会予稿集, 327 (1997).
- 8) 本山建雄, 市川健二, 走査型プローブ顕微鏡によるデンドライトの形状観察と成長過程の一考察, 電気学会研究会資料, DEI-96-77, 1~9 (1996).

### 参考文献

- 1) プリント配線板の絶縁信頼性に関する研究の動向, 電気学会技術報告第, 615 号, 4 (1996).
- 2) 五十嵐重嘉, 山下伸二, 結露と塵埃の複合した障害の解明, 電子通信学会研究報告 (信頼性), R83-3, 11~16 (1983).

(平成 10 年 2 月 6 日受理)