

## 7. モニター用配線板を利用した実装配線板の絶縁評価

本山建雄\*

### 7. The Evaluation of Insulation in a Mounted Wiring Board by the Monitor Using Wiring Board of the Comb-pattern

by Tatsuo MOTOYAMA\*

**Abstract :** Recent progress on wiring boards has made them more weather-resistant, and narrow-pitched wiring boards have been used in severe environments, such as chemical processes, for instrumentation and control equipment. Such equipment is vital for production systems, and related maintenance problems can spread to other parts of a system and increase the risk of an industrial accident. The failure in wiring board is generally caused by loss of conductivity of wire and loss of insulation between wirings. The causes of loss of insulation are primarily dust adhesion, electrochemical migration, and aging of polymers. Loss of insulation is greatly dependent on environmental factors. The evaluations of insulation between wires can be accomplished satisfactorily in electric power fields; however, no adequate technique exists for use in printed wiring boards. In a mounted wiring board, it is technically difficult to apply the methods mentioned above to the evaluation of loss of insulation since electronic components and elements are mounted between wirings.

Under such background, the method for evaluating loss of insulation of mounted wiring board by the method using wiring board of the comb-pattern as a wiring board for the monitor was studied on. With this method, the frequency characteristics of the impedance of the wiring board for the monitor evaluate the environment in which the mounted wiring board is set. Furthermore, the loss of insulation of the mounted wiring board is indirectly estimated by the frequency characteristics. Alternating current was used as a measuring source, because the main cause of the loss of insulation is the fouling between wirings. And the frequency  $f$  in proportion to the loss factor  $D$  between wirings, which is similar to the loss factor of the capacitance, was applied as the index to the loss of insulation.

The loss factor  $D$  is defined in the following equation, and it is also defined as a function of the measuring frequency  $f$ , where  $R_p$  or  $C_p$  is the parallel equivalent resistance or the parallel equivalent capacitance on parallel equivalent circuit of the impedance between wirings, respectively.

$$D = 1 / (\omega C_p \cdot R_p) = 1 / (2\pi \cdot C_p \cdot R_p \cdot f)$$

The loss factor is also defined as a function of  $(C_s/C_p)$ , where  $C_s$  is the series equivalent capacitance on a series equivalent circuit.

$$D = (C_s/C_p - 1)^{1/2}$$

In this study, the frequency characteristics of  $C_p$  and  $C_s$  are measured, and the loss of insulation of the wiring board is evaluated by the frequency in which  $(C_p/C_s)$  nearly equals 1 or 2, where  $(C_s/C_p)=1$  or 2 corresponds to  $D = 0$  or  $D = 1$ , respectively.

The frequency obtained by the experiment is almost proportional to the resistance  $R_p$  of the parallel equivalent circuit at 1Hz at the negative gradient. Therefore, the frequency may be adequate for an evaluation index of the loss of insulation because  $R_p$  is stable in a lower frequency range in spite of the dependency on the frequency in the high-frequency range. The frequency range in which  $R_p$  is an adequate index is under consideration.

**Keywords;** Narrow pitched wiring board, Diagnosis method, Insulation degradation, Loss factor

---

\* 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

## 1. まえがき

電気・電子機器の軽量化・高機能化，また，配線板自体の耐候性の向上に伴い，化学プロセスなどの過酷な環境でも，狭ピッチの配線板が計測・制御機器の部品として，使用されつつある。

計測・制御機器は化学プロセスに不可欠な機器であり，障害が発生すると，システム全体に波及し，物的な損害のみならず，現場の作業者の死傷事故など，産業災害に至る可能性が高い。

制御機器・計測機器の障害のうち，配線板に起因する主な障害としては，配線間の絶縁低下，配線の接続部での導電性不良がある。

配線間の絶縁低下の原因は，主として配線間の汚損，電気化学マイグレーションにより溶出した金属の付着，絶縁物の経年劣化等であり，これらの現象は環境の影響を強く受ける<sup>1)~3)</sup>。

配線間の絶縁状態を診断する方法は電力関連分野において実用化されているが，プリント配線板については適当な方法がほとんどなく，また，実装された配線板では配線間に電子素子・部品が存在するため，技術的に困難さを伴っている。

このような背景から，本研究では，モニター用配線板により，実装配線板が置かれている環境をモニターし，実装配線間の絶縁性を間接的に診断する方法について検討した。

## 2. 配線間の絶縁低下現象と評価方法

### 2.1 配線間の絶縁低下現象と要因

配線板の絶縁低下要因としては，化学的ストレス，熱的ストレス，機械的ストレス，電氣的ストレスおよび環境的ストレスなどがあり，これらが相互に影響し，**Fig. 1**に示すような様々な絶縁劣化現象を引き起こす。

配線板における絶縁低下は主として電氣的ストレス，熱的ストレス，化学的ストレス及び環境ストレスの相互作用によって発生し，汚損，電気化学マイグレーション，トラッキングなどの現象として発生する<sup>1), 4)</sup>。

### 2.2 既存の絶縁低下診断方法

配線間の絶縁低下を示す指標として，配線板表面の分子構造や組成等の化学的な特性，表面の粗さや接触角などの物理的な特性，抵抗，インピーダンスなど電氣的特性等が考えられる<sup>5)~7)</sup>。

化学的な特性は分析のために試験片を加工する必

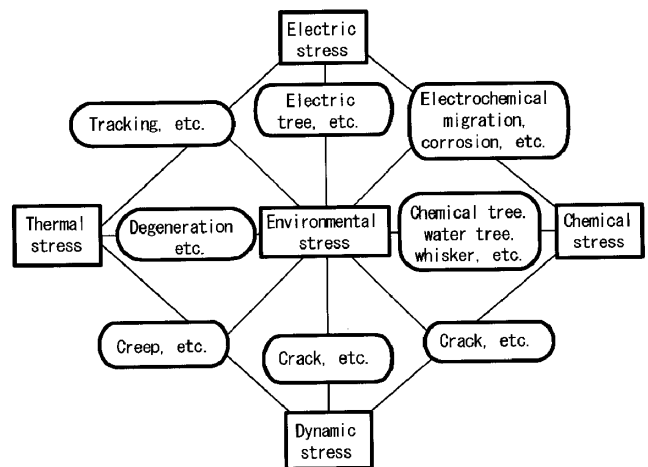


Fig. 1 The relationship between degradation factors and the degradation phenomenon of the wiring board.  
配線板の劣化要因と劣化現象

要があり，一般には破壊検査になる。表面の粗さは汚れ等の付着を助長するが，絶縁性との対応は必ずしも明確ではなく，診断の指標としては適さない。接触角については，分子構造との関連についての報告があるものの，その対応がまだ明らかになっていない<sup>5)</sup>。

電氣的な特性を指標とする方法としては，単に，配線間の抵抗を測定する方法の他，絶縁の状態を常時監視する方法がある。これらの方法は，電力機器などで実用化されているが，実装された配線板では配線間に電子素子・部品が存在するため，技術的に困難である。

このほか，信号を回路に重畳し，その反射波の解析によって，実装された基板の断線等を診断する手法（Time Domain Reflectometry : TDR）<sup>8), 9)</sup>も開発されているが，絶縁低下を評価する方法としてはまだ確立されておらず，また，高機能，高精度の測定器を必要とするため工場など産業現場への適用は困難と思われる。

防食の分野では楕円パターンのプリント配線板をモニター用配線として利用し，誘電体の電気特性を計測する方法<sup>10)</sup>が開発されている。また，楕円パターンのプリント配線板の誘電特性とイオンマイグレーションの進展との関連についての報告<sup>11)</sup>がある。これら楕円パターンのプリント配線板は，配線間の絶縁性を診断するためのモニター用配線板としても利用が可能であると思われる。

### 3. 楕円パターンモニター用配線板を使用した絶縁低下診断の検討

#### 3.1 絶縁低下現象と測定信号

対象とする絶縁低下現象はFig. 1 に示すように、主として電気的なストレス、化学的なストレス及び環境からのストレスにより発生するものである。配線間の劣化状態は、吸着された水分、配線からの析出物、汚損物質等から形成され、配線板表面に発生するものとする。

このような絶縁低下現象を直流で検出した場合、配線間には電気化学的な現象が発生し、イオンの移動や配線金属表面での分極現象のため、配線間の抵抗を正しく測定できないことが予想される。このため、測定に使用する信号としては直流でなく交流が適当である。

#### 3.2 モニター用配線板

モニター用配線板は、実装配線板の設置環境をモニターし、配線板の絶縁低下を間接的に診断するために使用するもので、配線板と同一材質の基板で構成される。この場合、モニター用配線板の絶縁低下現象は実装配線板においても発生するものと想定している。

このような目的で使用する配線パターンとしては、絶縁低下現象を明らかにしやすく、また、基板の試験に用いられている楕円パターンの配線板が適当である<sup>12)</sup>。ここでは配線間の距離に比べて平行配線の長さが十分に大きく、配線間をコンデンサーと抵抗の等価回路に置き換えることが可能な配線板とした。この場合、配線間のインピーダンスは電氣的に損失を有するコンデンサーと同様に扱うことができる。

#### 3.3 モニター用配線板の等価回路とインピーダンス

モニター用配線板として、Fig. 2 (a) に示すように、長さ $m$ 、配線間距離 $d$ の線が絶縁材料の基板に平行に配置された配線板を想定する。配線間をキャパシタンスと抵抗の等価回路に変換し、並列の場合のキャパシタンス分を $C_p$ 、抵抗を $R_p$ とするとFig. 2 (b) の左図として、直列のそれらを $C_s$ 、 $R_s$ とおくとFig. 2 (b) の右図として表すことができる。

Fig. 2 における配線間のインピーダンス $|Z|$ は角周波数を $\omega (= 2\pi f)$ とおくと、(1)、(2) 式のように表される。また、並列等価回路における損失係数 $D$ は(3) 式となる。

$$|Z| = (1 / ((\omega C_p)^2 + 1 / R_p^2))^{1/2} \quad (1)$$

$$|Z| = (1 / (\omega C_s)^2 + R_s^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$D = (1 / \omega \cdot C_p) / R_p \quad (3)$$

損失係数 $D$ はコンデンサーなどの $\tan \delta$ に相当する値であり、 $D$ が大きいほど配線間を通過する電流の抵抗成分(実数成分)が大きいことになる。すなわち、配線間の絶縁低下が進行したことを意味する。

一方、 $C_s$ 、 $R_s$ と $C_p$ 、 $R_p$ の関係は(4)、(5) 式で表すことができる。

$$C_s = (1 + D^2) C_p \quad (4)$$

$$R_s = D^2 / (1 + D^2) R_p \quad (5)$$

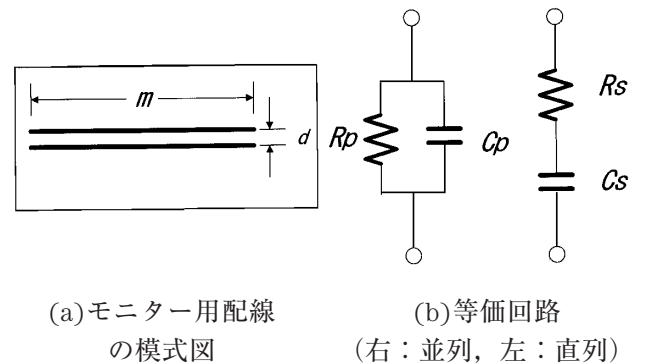


Fig. 2 Equivalent circuitis between wirings. 配線間の等価回路

#### 3.4 損失係数と絶縁低下の測定指標

Fig. 2 (a) から配線間のキャパシタンス $C_p$ は、空気を介した部分のキャパシタンス、配線板表面に吸着された水や汚れによるキャパシタンス、有機絶縁材料の基板を介したキャパシタンスの並列回路の和で表される。絶縁低下によって主に変化するのは配線板表面の誘電率であり、それを $\epsilon \cdot S$ とおき、それ以外を $C_0$ とおくと、 $C_p$ は(6) 式で表される。なお、 $S$ は形状により決まる値であり、 $\epsilon \cdot S$ は静電容量を表す。また、誘電率は真空の誘電率 $\epsilon_0$ と比誘電率 $\epsilon_s$ からなり、 $\epsilon_s$ は空気において約1、水では

約 80, ポリマーにおいて約 4 ~ 10 である。

$$C_p = \varepsilon \cdot S + C_o \quad (6)$$

一方、配線間の抵抗 $R_p$ は、キャパシタンスと同様に空気、配線板表面、基板を通る 3 つの抵抗の並列抵抗となるが、配線板表面の抵抗に比較して空気、基板を経路とする抵抗は十分大きく、 $R_p$ は配線板表面の抵抗とほぼ同じと考えることができる。ここで配線板の表面抵抗率を $\rho$ とすると、表面抵抗 $R_p$ は(7)式となる。

$$R_p \doteq \rho \cdot d/m \quad (7)$$

損失係数 $D$ は(3)、(6)、(7)式から、(8)式のように変換される。

$$\begin{aligned} D &= 1 / (\omega \cdot (C_p) \cdot (\rho \cdot d/m)) \\ &= (1 / 2 \pi f) \cdot (1 / (\varepsilon \cdot \rho \cdot S \cdot d/m) \\ &\quad + 1 / (C_o \cdot \rho \cdot d/m)) \quad (8) \end{aligned}$$

(8)式の $(S \cdot d/m)$ 及び $C_o \cdot d/m$ は配線間の形状で決まる値であり、配線板の絶縁低下にほとんど依存しない。また、配線間の絶縁が低下した場合、 $\rho$ は $\varepsilon$ よりも大きく変化し、 $10^3$ 程度の変化が予想されることから、 $D$ は主に $\rho$ と絶縁低下を判定するための損出係数 $D_o$ の関数 $F(\rho, D_o)$ となる。

$D=D_o$ となる周波数 $f$ は(8)式から求まり、(9)式で表される。(9)式に示されるように、 $f$ は絶縁診断の指標として利用できる。

$$\begin{aligned} f &= 1 / (2 \pi \cdot D_o) \cdot (1 / (\varepsilon \cdot \rho \cdot S \cdot d/m) \\ &\quad + 1 / (C_o \cdot \rho \cdot d/m)) \\ &\propto F(\rho, D_o) \quad (9) \end{aligned}$$

本研究で扱う絶縁低下は $10^7 \Omega$ 程度の抵抗を想定しており、損失係数が小さい状態に相当する。したがって、 $D_o \doteq 0, 1$ での周波数 $f$ が絶縁状態推定の目安となる。

$D=D_o$ となる状態を示す変数として、 $R_p$ と $R_s$ および $C_p$ と $C_s$ が考えられる。 $D_o$ が 0 に近づくこと、 $D_o \doteq 0$ となる $R_s$ の定義は難しくなる。一方、 $C_p$ と $C_s$ の関係は $D_o$ の一乗の関係にあり、(4)式から $D_o \doteq 0$ 場合、 $C_s \doteq C_p$ となり、 $D_o = 1$ のとき、 $C_s = 2 C_p$ となる。

したがって、周波数 $f$ を求めるために $C_s$ と $C_p$ の

関係を指標とすることが適当であると考えられる。

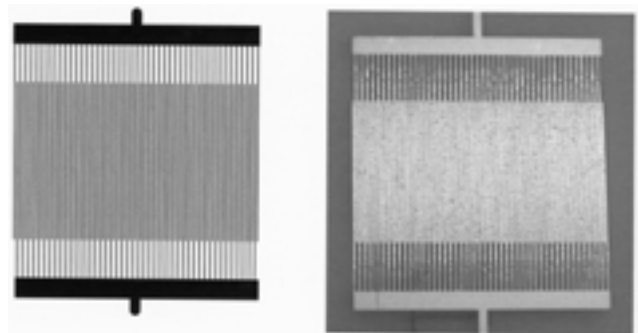
#### 4. 実験

前章の検討に基づき、モニター用配線板の絶縁低下時の特性を明らかにするため、試験片を恒温恒湿槽で絶縁劣化させ、配線間インピーダンスの周波数特性、 $D=1, 2$ となる周波数と絶縁低下状態との関係について検討した。

(試験片)

実験に使用したモニター用配線板は、Fig. 3 に示すような楕形プリント配線板である。配線間距離 0.165 mm, 厚さ約 50  $\mu$ m (銅箔約 20  $\mu$ m, ハンダコート約 30  $\mu$ m) の平行部分 20 mm を単位として、90 個の並列回路からなる。実験は 8 枚の配線板について実施した。

配線間の静電容量は、測定周波数 100 kHz において約  $6 \times 10^{-11}$ F であり、直流の配線間抵抗は約  $3 \times 10^9 \Omega$ であった。



(a)試験片のパターン

(b)試験片

Fig. 3 Pattern of the specimen and photograph.  
試験片のパターンとその写真

(試験片の劣化)

Fig. 4 は実験回路の概要を示している。試験片を恒温恒湿槽 (40  $^{\circ}$ C, 90 %) に入れ、外部から直流電圧 (50 V) を印加する。この条件は、電気化学マイグレーションの実験条件としても利用される条件の一つである<sup>(1)</sup>。

電圧は電流を制限するための抵抗 (10 k  $\Omega$ ) を介して、試験片に印加される。この抵抗は配線板の漏れ電流監視にも利用している。

実験時間は約 2000 時間とした。8 枚の配線板の



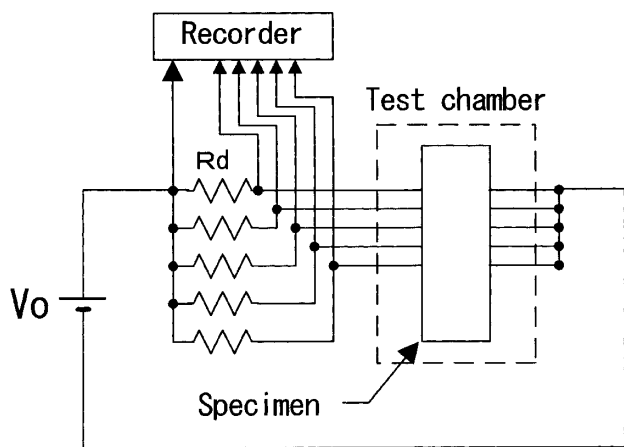


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup.  
実験回路の概要

うち、2枚は、実験環境の影響を検討するため電圧を印加していない。

(周波数特性の測定)

配線間の絶縁低下が時間経過とともに進行し、周波数特性が変化することを確かめるために、適宜、端子間のインピーダンスをLCRメータで測定した。

実験開始から 100 時間程度は結露等の影響でマイグレーションが発生しやすく、インピーダンスが変化しやすいことから、ほぼ 24 時間ごとに、それ以降はモニター抵抗の出力を参考にして、適宜測定を実施した。測定中は通電を停止している。

測定項目はインピーダンス、並列等価回路の静電容量  $C_p$ 、抵抗  $R_p$  及び直列等価回路の静電容量  $C_s$ 、抵抗  $R_s$  である。測定周波数は 0.1 Hz から 100 kHz までを対数目盛に置き換えたとき、できるだけ等間隔になるような周波数とした。なお、測定周波数が低い条件ではばらつきが大きく、1 Hz 未満の測定値は示していない。

5. 実験結果と検討

5.1 周波数特性

(試験前)

Fig. 5 は試験前の試験片を所定の恒温恒湿条件下に置き、24 時間、前処理した後、恒温恒湿状態のまま測定した配線間の周波数特性を示している。

未劣化試験片であるため、配線間に吸着された水分が少なく、 $|Z|$ 、 $R_p$ 、 $R_s$  は試験終了後より大きく、 $C_p$ 、 $C_s$  は試験終了後の  $C_p$ 、 $C_s$  より小さい。

$|Z|$  は抵抗性成分  $R_p$  (または  $R_s$ ) と容量性成分  $C_p$  (または、 $C_s$ ) からなり、 $1/(\omega C_p)$  が周波数の増加とともに減少するため、 $|Z|$  は減少する。 $R_p$  は変動しながら減少傾向を示すものの、大きな低下はみられない。なお、周波数の増加に対して  $R_s$  は減少するが、本試験片のように直列等価回路よりも並列等価回路の方が等価回路として適している場合は、 $R_s$  の物理的な意味は小さい。

一方、 $C_p$  は低周波数の範囲において大きくなっている。この原因として、試験片表面に吸着された水分に含まれているイオンの移動の可能性が指摘されているが<sup>(8)</sup>、明確ではない。

$D \approx 0$ 、すなわち  $C_s \approx C_p$  となる周波数は約 10 Hz であった。ここで、 $C_s \approx C_p$  は、 $1 < (C_s/C_p) < 1.09$  の場合を意味する。この定義は以下でも同じとする。

(941 時間後の試験片)

試験開始 941 時間後に測定された  $|Z|$ 、 $R_p$ 、 $R_s$ 、 $C_p$ 、 $C_s$  の代表的な周波数特性を Fig. 6-8 に示す。

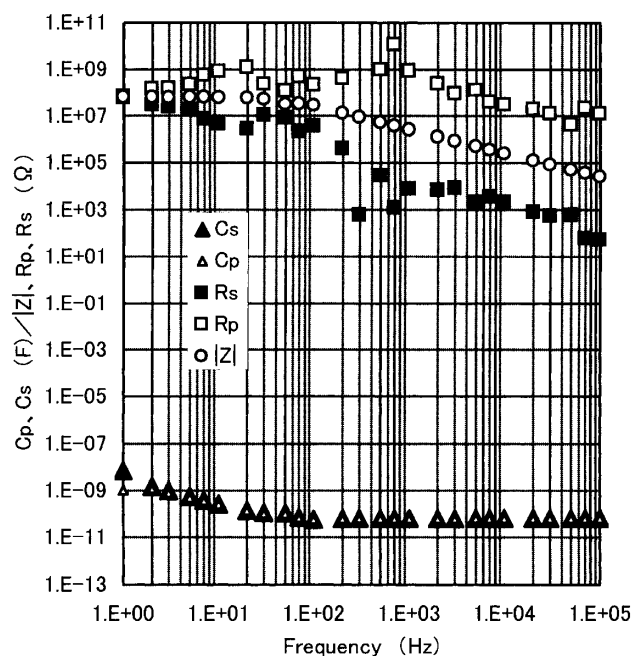


Fig. 5 Frequency dependency of the impedance  $|Z|$  and equivalent resistance and capacitance ( $R_p$ ,  $C_p$ ) in a parallel equivalent circuit and equivalent resistance and capacitance ( $R_s$ ,  $C_s$ ) in a series equivalent circuit of the wirings in specimen No. 6 (original).  
試験片No.6の周波数特性 (試験前)

Fig. 6 は印加電圧無し状態で、試験温度湿度環境に置かれていた試験片No. 6 の周波数特性を、Fig. 7 は所定の電圧 (50 V) が印加され、中程度に絶縁低下がみられた試験片No. 1 の周波数特性を、そして、Fig. 8 は大きく絶縁低下がみられたNo. 2 の周波数特性である。

Fig. 6 によると、 $|Z|$ ,  $R_p$ ,  $R_s$  は Fig. 5 と同様の傾向を示している。低周波数領域において、 $|Z|$  は減少しているものの、これらの値は周波数に対して変動しているため絶縁低下の程度は十分に把握できない。一方、 $C_p$ ,  $C_s$  は Fig. 5 と異なり、低い周波数において変動がみられ、 $D \approx 0$  となる周波数は約 100 Hz であった。この周波数は試験前の試験片の周波数約 10 Hz と比較して大きく、恒温恒湿槽において試験片が吸湿したことにより、配線間の電流の抵抗成分 (実数成分) が増加し、損失が大きくなったためと推定される。

Fig. 7 はインピーダンスの時間的変化から中程度に絶縁低下が予想された試験片の、配線間インピーダンスの周波数特性を示している。

$|Z|$  は Fig. 6 と同様に周波数に依存するものの、 $R_p$ ,  $R_s$  の周波数特性は異なり、周波数に対して滑らかに

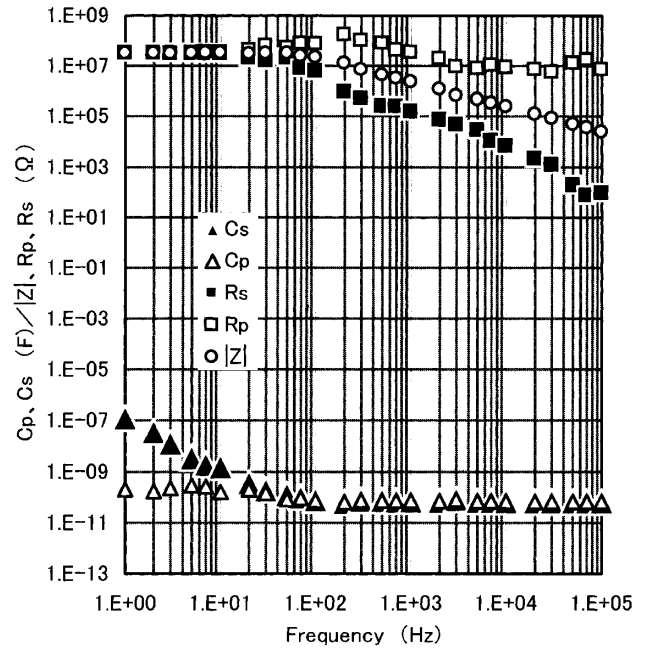


Fig. 7 Frequency dependency of  $|Z|$ ,  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $R_s$ , and  $C_s$  in specimen No. 1. (90% RH at 40°C ; after 941 h aging in 50 V; moderate degradation in insulation)  
試験片No.1の周波数特性 (40°C, 90%RH, 941時間後, 絶縁低下: 中)

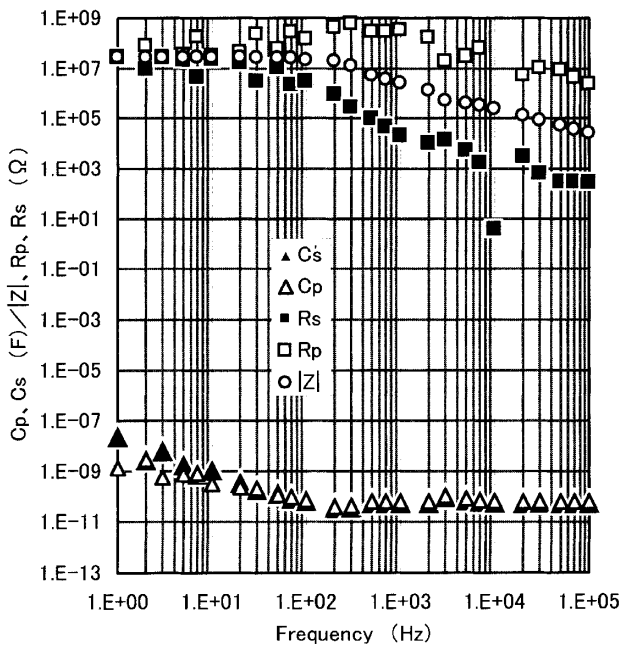


Fig. 6 Frequency dependency of  $|Z|$ ,  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $R_s$ , and  $C_s$  in specimen No. 6. (90%RH at 40°C; after 941 h aging in 0 V)  
試験片No.6の配線間インピーダンス周波数特性 (40°C, 90%RH, 941時間後, 電圧印加無)

変化している。これは、配線間表面は吸湿や配線金属の溶出等により、配線板表面にある程度以上の導電性が生じ、結果として、表面の乾燥や測定環境のノイズの影響が小さかったことによると推定される。一方、周波数の増加に対して  $C_p$  は減少傾向にあるものの、ほぼ一定である。 $C_s$  も周波数の増加に対して減少するが、 $D \approx 0$  になる周波数は約 300 Hz となっている。

Fig. 8 は絶縁低下が大きい場合の例を示している。

$|Z|$  は Fig. 6 と同様に周波数に依存するものの、 $R_p$ ,  $R_s$  は Fig. 7 と同様に、周波数に対して滑らかに変化している。この場合の  $|Z|$  は  $10^7 \Omega$  以下となっており、 $|Z|$  から明らかに絶縁低下が生じたことを確認できる。一方、周波数の増加に対して  $C_p$ ,  $C_s$  は Fig. 7 と同様の傾向を示すが、1 Hz での  $C_s$ ,  $C_p$  の差は大きく、 $D \approx 0$  になる周波数は 1000 Hz を超えている。

### 5.2 $C_s/C_p \approx 1$ 及び 2 となる周波数と $R_p$ の関連

試験片No. 6, 1, 2 について、 $C_s/C_p \approx 1$  ( $1 < (C_s/C_p) < 1.09$  (以下, 同じ。)) 及び  $C_s/C_p \approx 2$  ( $2 < (C_s/C_p) < 2.09$  (以下, 同じ。)) となる周波

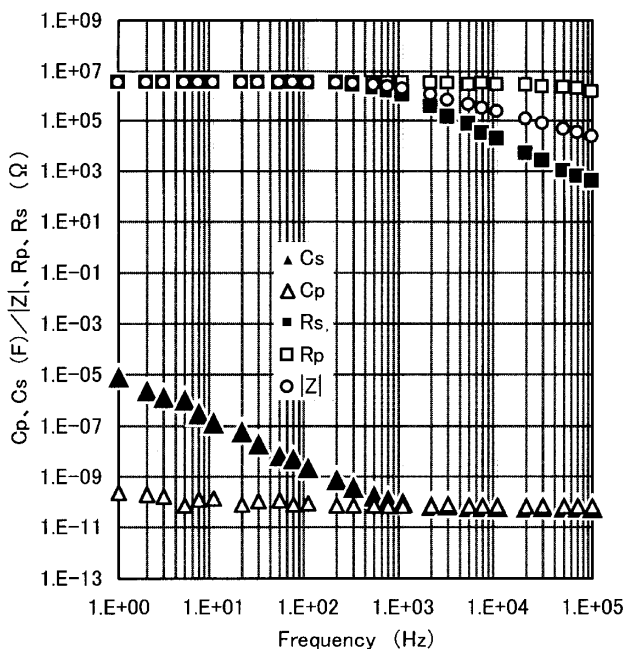


Fig. 8 Frequency dependency of the impedance between lines in specimen No. 2. (90% RH at 40°C ; after 941 h aging in 50 V; large degradation in insulation)  
試験片No.2の周波数特性 (40°C, 90%RH, 941時間後, 絶縁低下:大)

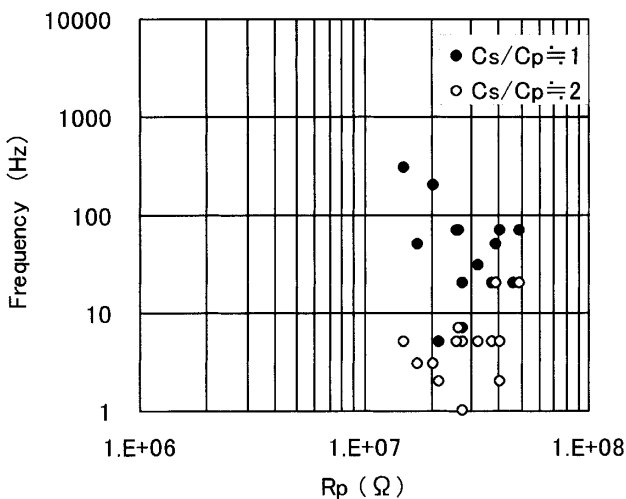


Fig. 9 The relationship between frequency and aging time as  $Cs/Cp \simeq 1$  or 2 in specimen No. 6. (90% RH at 40°C ; after 941 h aging in 0 V)  
 $Cs/Cp \simeq 1$ 及び2となる周波数と $Rp$ の関係 (90% RH, 40°C; 941 h, 電圧印加無: No.6)

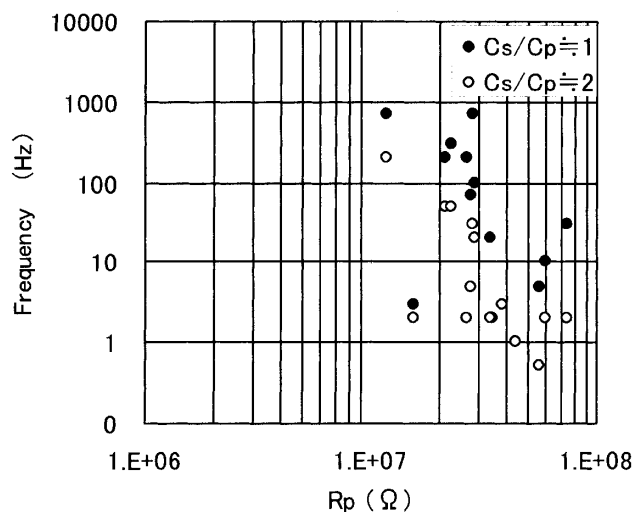


Fig. 10 The relationship between frequency and aging time as  $Cs/Cp \simeq 1$  or 2 in specimen No. 1, in which the degradation is moderate. (90% RH at 40°C ; after 941 h aging in 50 V; moderate degradation in insulation)  
 $Cs/Cp \simeq 1$ 及び2となる周波数と $Rp$ の関係 (絶縁劣化の程度(中): No.1)

数と $Rp$  (1 Hz) の関係を両対数のグラフで示すと Fig. 9, 10, 11 となる。ここでは,  $Rp$ の測定周波数を仮に, 1 Hzとしたが,  $Rp$ は周波数の影響を受けることから配線間の真の抵抗値であるか否かは明らかでない。しかし, 実験データから低周波数において $Rp$ はほぼ一定であり, 配線間の抵抗に対応している値と推定される。なお,  $(\omega Cp)^2 \ll (1/Rp)^2$  となり,  $|Z| \simeq Rp$ となる。

絶縁低下が進行したFig. 10, 11の周波数と表面抵抗との関係には相関性があり, 前述した(9)式から予想される傾向を示しているものと考えられる。

### 5.3 試験後の試験片の外観

Fig. 12 は試験終了後に撮影した顕微鏡写真である。これによると, 試験片No. 6 の場合, 配線間に異物は見られないが, 試験片No. 1 及びNo. 2 には異物が見られる。

### 5.4 $Cs/Cp \simeq 1$ 及び 2 となる周波数と経過時間

Fig. 13, 14, 15 は $Cs/Cp \simeq 1$  及び $Cs/Cp \simeq 2$  となる周波数を経過時間との関係で示してある。

Fig. 13 は印加電圧無の条件であるが, 経過時間の増加とともに $Cs/Cp \simeq 1$  及び 2 となる周波数は増加

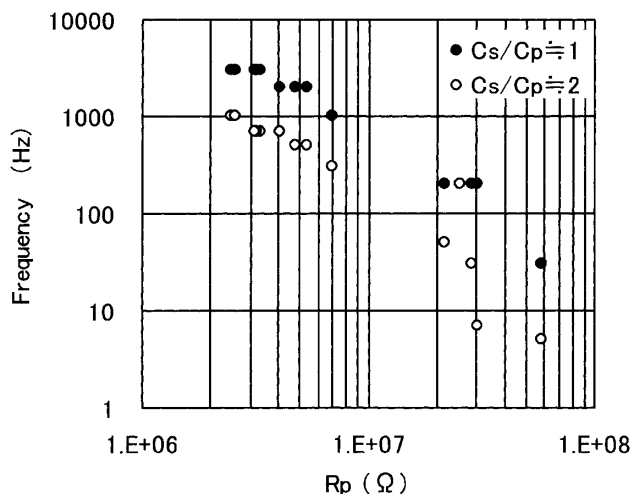


Fig. 11 The relationship between frequency and aging time as  $C_s/C_p \approx 1$  or 2 in specimen No. 2, in which the degradation is large. (90% RH at 40°C; after 941 h aging in 50 V; large degradation in insulation)  
 $C_s/C_p \approx 1$ 及び2となる周波数と $R_p$ の関連 (絶縁劣化の程度 (大) : No.2)

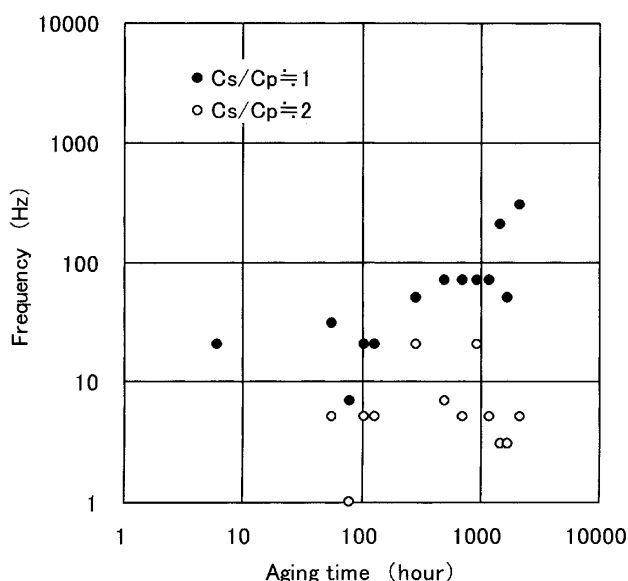


Fig. 13 The relationship between frequency and impedance of wirings as  $C_s/C_p \approx 1$  or 2 in specimen No. 6 (90% RH at 40°C; aging in 0 V).  
 $C_s/C_p \approx 1$ 及び2となる周波数と経過時間 (90%RH, 40°C, 電圧印加無, No.6)

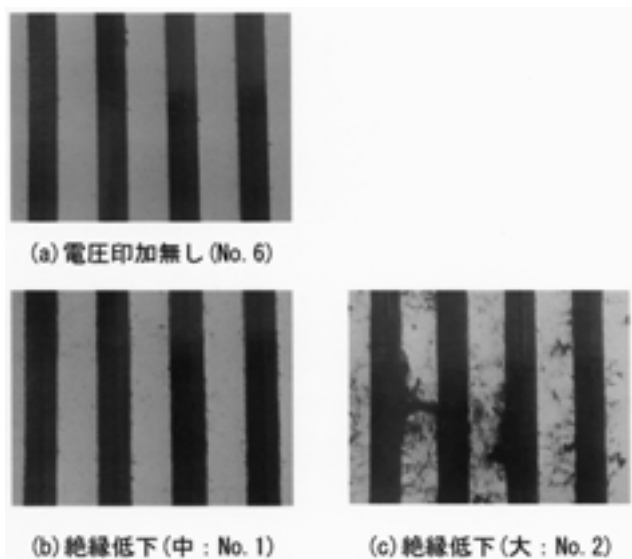


Fig. 12 The surface of a specimen after the 941 hours of aging (90% RH at 40°C).  
 941時間後の試験片表面状態

している。インピーダンスの低下もみられることから、試験片が吸湿し、絶縁性が低下したことが推定される。

Fig. 14 は絶縁低下が中程度の試験片における変化を示している。実験時間の増加とともに、 $C_s/C_p \approx$

1 及び 2 となる周波数は顕著に増加している。

Fig. 15 は絶縁低下が大程度の試験片の $C_s/C_p \approx 1$  及び 2 となる周波数の変化を示している。試験片 No. 2 は試験開始後 24 時間以内に絶縁が大きく低下しており、Fig. 15 の周波数の変化から同様の様子が推定される。

### 5.5 測定用リード線に存在する浮遊容量の影響

測定用リード線に存在する浮遊容量の影響が考えられるが、(3) 式より $C_p$ が、例えばa倍になるとDは1/a倍になり、(9) 式より周波数が1/a倍になる。例えばFig. 8 で示される $C_s, C_p$ の周波数特性が1/a倍シフトすると予想される。したがって、測定に使用するリード線の浮遊容量を事前に測定しておくことにより浮遊容量の影響を十分小さくすることが可能である。

### 5.6 配線間のインピーダンスの周波数特性と抵抗とコンデンサーの並列回路からなる回路の周波数特性との比較

配線間のインピーダンスが抵抗とコンデンサーの等価回路とした場合の例として、1  $\mu$ Fのコンデンサーと 100 k $\Omega$ の抵抗を並列に接続し、LCRメータで測定した周波数特性をFig. 16 に示す。 $|Z|, C_{p1}, R_{p1}, C_{s1}, R_{s1}$ は 3.3 において述べた $|Z|, C_p, R_p,$



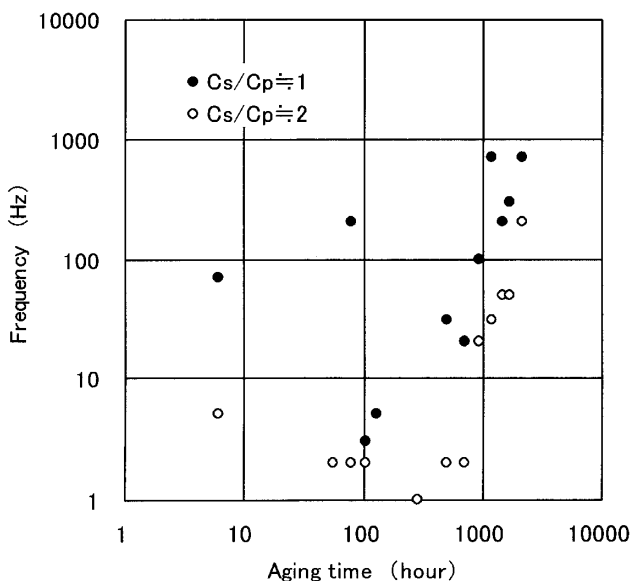


Fig. 14 The relationship between frequency and impedance of wirings as  $C_s/C_p \doteq 1$  or 2 in specimen No. 1 (90% RH at 40°C; aging in 50 V; moderate degradation in insulation).  
 $C_s/C_p \doteq 1$  及び 2 となる周波数と経過時間 (90%RH, 40°C, 50V, No.1, 絶縁低下: 中)

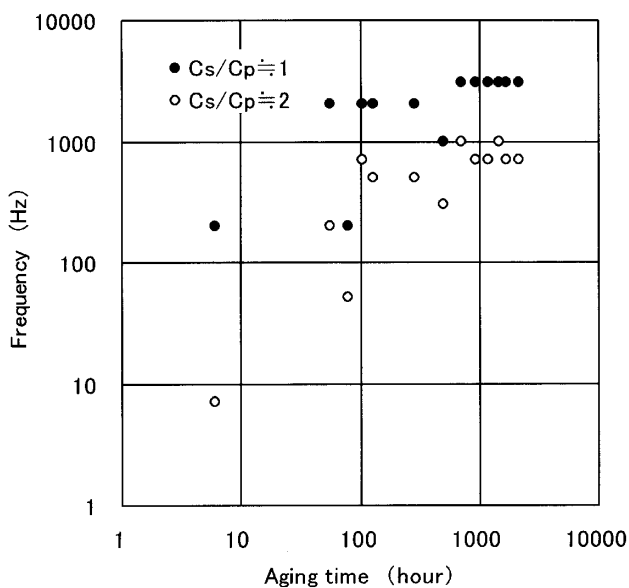


Fig. 15 The relationship between frequency and impedance of wirings as  $C_s/C_p \doteq 1$  or 2 in specimen No. 2 (90% RH at 40°C; aging in 50 V; large degradation in insulation).  
 $C_s/C_p \doteq 1$  及び 2 となる周波数と経過時間 (90%RH, 40°C, 50V, No.2, 絶縁低下: 大)

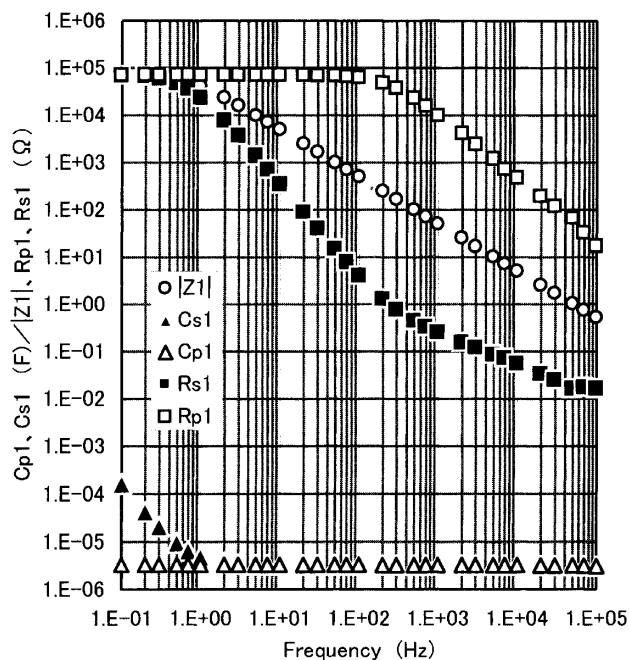


Fig. 16 The frequency dependency of impedance, equivalent resistance, and capacitance ( $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ) in a parallel equivalent circuit and the equivalent resistance and capacitance ( $R_{s1}$ ,  $C_{s1}$ ) in a series equivalent circuit correspond to the capacitor (1  $\mu$ F) and resistance (100k  $\Omega$ ) in the parallel circuit.  
 抵抗, コンデンサーの並列回路における周波数特性 (100k $\Omega$ , 1  $\mu$ F)

$C_s$ ,  $R_s$ にそれぞれ対応する。なお、測定器の精度上、1 Hz以下では誤差が大きくなる。

Fig. 16によると、周波数が高くなると $|Z_1|$ は減少する。これは(4)式で示されるように周波数の増加に対して $1/(\omega C_{p1})$ が相対的に小さくなるためである。また、抵抗成分 $R_{p1}$ は $|Z_1|$ と同様に減少しているがこれは使用した抵抗部品の周波数特性に起因するものと推測される。一方、配線間の絶縁劣化の指標を $C_{s1}/C_{p1}$ とすると、例えば、 $D = 1$ 、すなわち $C_s/C_p = 2$ となる周波数は約 10 Hzとなっている。

以上のように、Fig. 16は使用した抵抗部品の周波数特性の影響を除くと、Fig. 5~8に示す測定結果とほぼ同じ傾向を示している。したがって、ここで使用した櫛型パターンの配線板をコンデンサーと抵抗の並列回路からなるものと想定しても大きな誤りはないと考えられる。なお、市販のコンデンサーの場合、ほとんど損失がない。

## 6. 絶縁低下を表す指標

実験結果の検討から、 $C_s/C_p=n$  ( $n>1$ ) となる周波数は絶縁低下を診断するための指標になりうる事がわかる。

例えば、本実験で用いたモニター用配線板の場合、配線板の静電容量がリード線を含め 100 pF程度であることから $n=2$ とし、100 Hzを絶縁低下の敷居値と考えると、(6)式から 16 M $\Omega$ 前後の抵抗分が配線間に存在する場合を検出することになる。

一方、 $|Z|$ ,  $R_p$ の場合、1 Hzのような低周波数ではほぼ一定であり、絶縁低下を表す指標の可能性はある。しかし、 $|Z|$ ,  $R_p$ は1 Hz未満では測定値がばらつくこと、測定周波数が高くなると、周波数に依存することなどのため、絶縁低下の診断指標とすることは困難であり、今後の検討課題とする。

## 7. あとがき

化学プロセス等で使用される配線板は電気的ストレス、化学的ストレス及び環境からのストレスを受け、配線間の絶縁性は低下する。

本研究では櫛形パターンのモニター用配線板を使用し、実装配線板が置かれている環境を評価し、間接的に絶縁低下を診断する方法について検討した。

絶縁低下を表す指標としては、配線間の抵抗、静電容量、およびインピーダンスが考えられるが、ここでは、櫛形パターンのプリント配線板の、配線間インピーダンスがコンデンサーと同様の特性を示すことを利用し、コンデンサーの性能を示す損出係数に対応する配線間の損失係数を指標とする方法について検討した。

具体的には、配線間を抵抗分とキャパシタンス分からなる並列等価回路および直列等価回路に置き換え、並列の等価キャパシタンス分 $C_p$ と直列のキャパシタンス分 $C_s$ の比 $C_s/C_p$ が1または2となる周波数を指標として、モニター用配線板の絶縁低下を判断し、実装された配線板の絶縁診断する方法について検討した。以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 対象とした配線間の絶縁低下後の抵抗は約 10<sup>7</sup>  $\Omega$ であり、絶縁低下の主な原因は配線間の汚れと推測される。
- (2) 使用したモニター用配線板は、配線間距離 0.165 mm, 平行部分 20 mmを単位として、90個の並列回路からなる櫛形プリント配線板である。
- (3) モニター用配線板は、配線間距離が配線の長さ

と比較して十分に小さく、配線間はコンデンサーと同様に扱うことができる。

- (4) 損失係数は並列等価回路の $R_p$ と $\omega C_p$ の相対的な関係で決まり、ほぼ次式のように表される。

$$D = 1 / (\omega C_p \cdot R_p)$$

$$= 1 / (2\pi \cdot C_p \cdot R_p \cdot f)$$

一方、損出係数は $(C_s/C_p)$ の関数としても表される。

$$D = (C_s/C_p - 1)^{1/2}$$

- (5) 実験では、 $C_p$ ,  $C_s$ を測定し、 $(C_s/C_p)$ が1あるいは2となる周波数により、絶縁低下状態を評価した。なお、 $(C_s/C_p) = 1$ は $D = 0$ に対応し、 $(C_s/C_p) = 2$ は $D = 1$ にそれぞれ対応する。
- (6) 実験結果の検討に利用した1Hzにおける並列等価回路の抵抗 $R_p$ と絶縁低下の指標となる周波数は負の傾き有し、ほぼ比例する。

なお、 $R_p$ は1 Hz未満では測定値がばらつくこと、測定周波数が高くなると、周波数に依存することなどのため、絶縁低下の診断指標とすることは困難であり、今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) プリント基板高信頼性絶縁技術調査専門委員会、「プリント配線板の絶縁信頼性に関する研究の動向 -特に耐イオンマイグレーション性について-」, 電気学会技術報告第615号, 1996.
- 2) 日本材料学会腐食防食部門委員会編「電子部品の腐食損傷と解析」, さんえい出版, 1990
- 3) 電気設備防食専門委員会, 「化学工場における腐食性雰囲気と電気設備の腐食状況に関する調査報告」, 1964.
- 4) 本山建雄, 市川健二, 「電気化学マイグレーションによる配線板の絶縁低下に及ぼすSO<sub>2</sub>ガスの影響」, 産業安全研究所研究報告NIIS-RR-99, 2000.
- 5) Beak-Su Lee, T. Motoyama, K. Ichikawa, Y. Tabata, Duck-Chool Lee, "The Analysis of Surface Degradation on UV-treated epoxy/glass fiber by corona-charging properties", Polymer Degradation and Stability 66, pp271-278, 1999.
- 6) 犬島浩, 「アナログ集積回路の劣化診断」, 電気学会論文誌Vol.120-A, No.4, 2000.
- 7) 犬島浩, 「電子制御装置の劣化診断」, 20th安全工学シンポジウム講演予稿集, 1990.
- 8) Damion Thomas Searls, Cliff Schuring, Willie Hayashida, Chew Hong Tan, and Rich Hardin,

- "Time Domain Reflectometry as a Component Packaging Level Damage Detection Tool", ASME. EEP-26, Advances in Electronic Packaging-1999, Vol. 2, pp2047-2051, 1999.
- 9) 永田弘人, 伊藤浩, 「多層プリント配線板の内装パターン欠損位置非破壊探索法」, 東芝技術公開集Vol.13, No.87, pp91-94, 1995.
- 10) E.P.M.Van Westing, G.M.Ferrari and J.H.W.de Wit, "The Determination of Coating Performance with Impedance Measurements - 1. Corrosion Polymer Properties", Corrosion Science, Vol. 34, No.9, pp1511-1530, 1993.
- 11) 山野芳明・津久井勤: 「プリント配線板のマイグレーション劣化と低周波誘電特性との関係」, 電学論A, 119, 365-370 (1998).
- 12) "Surface Insulation Resistance Handbook", A standard developed by the Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits (IPC-9201), July 1996.

(平成 14 年 10 月 15 日受理)