固体絶縁物の静電特性評価法

正員 村崎 憲雄 (千葉大)

正員 松井 満 (農工大)

正員 藤林 宏一 (農工大)

1. はじめに

固体絶縁物の静電特性を表す指標として、従来は表面抵抗率が使用されてきた。表面抵抗率は測定しやすく、測定者による偏差が小さいので、測定値に対する信頼性が高い。しかし、抵抗値は電荷の伝導現象を記述する指標であって、帯電量を直接支配する要素の指標ではない。また、工業用資材には粉粒体、繊維、表面梨地加工フィルムなどのように表面抵抗測定困難なものが多い。この点を改良したものが半減期測定器(JIS L 1094)である。これは、試料表面をコロナ荷電し、電荷量半減時間を測定する装置であるが、電荷量の減衰は抵抗・コンデンサ並列接続回路で表されるような線形特性ではない。

表面抵抗率と電荷量半減期を種々の物質について測定すると、この二つの量の相関性はあまり高くない。この原因は、電荷担体(キャリア)移動度が測定時印加電界強度に依存する⁽¹⁾ためであると解釈できる。

表面抵抗率と電荷量半減期のみでは、固体絶縁物の静電特性を表すには実用上不十分であることから、前記二つの指標のほかに摩擦帯電量を併記することが、その後提案された。現在は、上記三つの指標を用いて固体絶縁物の静電特性が総合評価されている。固体絶縁物の使用目的によっては、上記三要素で十分な場合もある。

IC パッケージおよびコンテナ用の摩擦静電気発生量の少ない材料、静電気放電による電磁波雑音の遮へいの開発などの静電気制御・応用技術が進むにつれ

て、三指標のみでは評価不十分な場合が増加している。三指標と静電気現象との関係を考察すると、そこには幾つかの不足点が存在する。

まず、JIS L 1094 および直偏法による抵抗測定は、表面抵抗と体積抵抗とに相当する抵抗測定であって、接触抵抗に相当するものが測定されていない。例えば、雰囲気湿度が高いとき、帯電した絶縁物フィルムを金属板上に乗せた場合と、木綿布上に乗せた場合とでは、後者の場合のほうがはるかに速やかに絶縁物フィルムの電荷が減衰する。すなわち、帯電絶縁物フィルムと金属板、あるいは帯電絶縁物フィルムと木綿布との界面を、電荷が貫通するときの抵抗相当分が存在する一つの例である。

次に、電界中に固体を保持すると、電界帯電とでも称すべき帯電が固体に生じる。おそらく、固体表面で極短時間ではあるが微弱なコロナ放電が発生し、その結果、固体保持位置の空間電位に相当するまで固体が充電されるためである。この現象は、従来は誘導帯電と混同され、電界帯電として独立して観察されたことがなかった。

今回、固体絶縁物が帯電時に示す接触抵抗相当分と電界帯電相当分を実験で確認することができたので、報告する。また、従来から使用されてきた三指標のほかに、今回の二指標および従来から測定されている誘導帯電量を加味した六指標を並列表示すると、固体絶縁物の静電特性を用途別的な確かな評価が行えることがわかった。

2. 実験方法および実験結果

〈2・1〉 静電抵抗(接触抵抗相当分) 絶縁物の接触抵抗相当分は、導体で使用する接触抵抗とは、その意味が異なる。すなわち、電荷が一方の物体から他方の物体へ界面を横切って移転する度合いを表す量であり、従来、商業用語として使用されている制電性に密

A Method to Evaluate Electrostatic Characteristics of Insulating Materials. By Norio Murasaki, Member (Faculty of Education, Chiba University), Mitsuru Matsui, Member & Koichi Fujibayashi, Member (Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology).

村崎憲雄: 正員, 千葉大学教育学部技術科

松井 満: 正員, 東京農工大学工学部電気工学科

藤林宏一: 正員, 東京農工大学工学部電気工学科

接な関係がある。ここでは導体の接触抵抗と区別するため、絶縁物の接触抵抗相当分を静電抵抗と呼ぶことにする。現象の内容は電荷が一方から他方に移転する程度を表示することにある。それゆえ、図1のように帯電体が試料と接触する前後で電荷がどれだけ帯電体から消失するかを測定すればよい。なお、電荷量と電位とは比例するという前提のもとに、実験では電位を測定した。

図1において、 M は電位計、 A は帯電体、 B は実験対象となる試料で、接地金属製試料台上に乗っている。帯電体は〔I〕の位置で針電極 N からのコロナ放電による荷電が行われたのち、〔II〕の位置に移動させられ、初期電位 V_0 が測定される。続いて、帯電体は位置〔III〕に移動させられる。ここで、帯電体は下方より垂直に上昇する試料と t_c 秒間接触し、再び分離される。その後、試料は位置〔II〕まで後退し、ここで残留電圧 V_r が測定される。

図2は、模式的な図1を具体化した静電抵抗測定装置の概略である。機構的・電気的な細部の設計と製作をシンド静電気 に依頼した。

直方形 (90 mm×75 mm ほど) に切出した次の試料を用いた。

- ポリメチルメタクリル酸樹脂 (PMMA) 板 (協和ガス化学)
- アクリルニトリル・塩素化ポリエチレン・スチレン共重合樹脂 (ACS) 板 (昭和電工)
- ポリプロピレン (PP) 板 (東洋紡)
- IC 包装用界面活性剤練込耐静電気ポリエチレン (PE) 袋 A (リッチモンド社, 商標名 ANTIS-TAT, 通称 pink poly)
- 同上 (PE) 袋 B (生産日本社, 通称 blue bag)
- 同上 (PE) 袋 C (興人)

帯電体として厚さ 1 mm, 直径 50 mm の円形ステンレス鋼板, 帯電方法として -16 kV 印加されたコ

図1 残留電位測定方法の概要

Fig. 1. Scheme of static potential measurement of the charge carrier (A) before and after contact with the sample material (B).

ロナ電極によるイオン照射, 試料押え枠として、直径 70 mm の円形の開孔部をもつ 3 mm 厚のアルミ板を使用した。接触時間 $t_c = 1 \text{ s}$ と設定したときの初期電位と残留電位の比 V_r/V_0 を求めると表1のようになった。

なお、以下の実験も含めて、実験室の気温 20°C , 相対湿度 33% に保った。

〈2・2〉 摩擦帯電 繰返し摩擦によって発生する平衡電荷量を測定した。実験装置を図3に示す。直径 160 mm の円形に切出した試料を定速回転接地円盤に試料押え枠を用いて取付けた。試料押え枠は直径 155 mm の円形の開孔部をもつ。

文鎮形の摩擦電極としてステンレス鋼板製ビーカを使用した。ビーカ内に重りを入れ、全体の重量 W を 105 g とした。垂直下方に突き出してある直径 8 mm の鋼丸棒をビーカの中途まで差入れ、ビーカの運動範囲を制限した。試料を 12 rpm で回転させると、この

図2 静電抵抗測定装置

Fig. 2. Electrostatic resistance meter.

図3 摩擦帯電測定装置

Fig. 3. Apparatus to measure triboelectricity.

表 1 固体絶縁物の静電特性測定例

Table 1. Measured electrostatic characteristics of insulating materials.

試料名*1 (製造会社)	PMMA 板 (日東樹脂)	ACS 板 (昭和電工)	PP 板 (東 洋 紡)	IC 包装用界面活性剤被膜耐静電気 PE 袋		
				A (リッチモンド)	B (生産日本社)	C (興 人)
静電抵抗 残留電圧比 V_r/V_s (実測値 推算値)	1.0 1.0	1.0 0.982	1.0 0.996	0.123 0.986	1.0 0.994	0.0323 0.833
摩擦帯電 σ/pv (C·s/N·m) 等価電位 V_s (V)	$+2.6 \times 10^{-7}$ +290	-2.5×10^{-7} -510	-3.1×10^{-7} -400	$+4.3 \times 10^{-9}$ +1.3	-1.1×10^{-8} -235	$+2.7 \times 10^{-10}$ +0.05
電界帯電** $\sigma_f/\epsilon_0 E$ Q_f (C)	-3.4×10^{-8} -1.70×10^{-9}	-2.7×10^{-8} -1.33×10^{-9}	$+3.8 \times 10^{-8}$ $+1.90 \times 10^{-9}$	-6.0×10^{-8} -1.50×10^{-9}	$+2.0 \times 10^{-1}$ $+5.10 \times 10^{-9}$	-3.2×10^{-1} -8.00×10^{-9}
誘導帯電** $\sigma_i/\epsilon_0 E$ Q_i (C)	$+9.2 \times 10^{-9}$ $+4.60 \times 10^{-10}$	$+3.0 \times 10^{-8}$ $+1.52 \times 10^{-9}$	-2.3×10^{-8} -1.17×10^{-9}	-8.4×10^{-1} -2.10×10^{-8}	-3.4×10^{-1} -8.50×10^{-9}	-6.0×10^{-1} -1.51×10^{-8}
半減時間 τ (s)	1.50×10^4	4.26×10^3	1.16×10^5	5.1	7.95×10^3	4.0
表面抵抗率 ρ_s (Ω)	1.88×10^{13}	3.20×10^{13}	8.48×10^{13}	6.03×10^{12}	1.04×10^{13}	2.83×10^{11}
厚 さ l (mm)	1.0	2.0	1.0	0.15	0.10	0.10
比誘電率 ϵ_r	3.39	3.66	2.87	1.91	1.85	2.09

*1: PMMA: ポリメチルメタクリル酸樹脂, ACS: アクリルニトリル・塩素化ポリエチレン・スチレン共重合樹脂, PP: ポリプロピレン, PE: ポリエチレン。

** 前列の3試料については $E=2.0 \times 10^6$ V/m, 後列の3試料については $E=1.0 \times 10^6$ V/m で実験を行った。

摩擦電極は跳躍・揺動せず試料表面を定常的に摩擦した。摩擦電極接触円の直径が 40 mm であるから、摩擦圧 p は 8.19×10^2 Pa となる。

回転円盤の中心軸と摩擦電極の中心軸との距離を r とすると、試料と摩擦電極との相対速度 v が求まる。本実験では $r=33$ mm で、 $v=4.15 \times 10^{-2}$ m/s であった。

摩擦帯電密度を σ (C/m²) とする。測定手順を図 4 に示す。厚さ l の試料表面と電界計の感应電極表面との距離を d に設定した。摩擦開始後、1 分程度で電界計の指示は安定した。その指示値を読取った。次に、厚さ 1 mm、直径 150 mm のステンレス鋼板製円形平板電極を、接地円板の上に絶縁板を介して乗せた。平板電極表面と電界計の感应電極表面との距離を、今度

も d に設定した。電界計の指示が摩擦時と同一になるように、平板電極に電圧 V_s を印加した。この V_s の値を用い、試料の比誘電率を ϵ_r として摩擦帯電密度 σ を次式に従って求めた。

$$\sigma = (1/d + \epsilon_r/l) \epsilon_0 V_s \dots\dots\dots (1)$$

各試料の比誘電率 ϵ_r を横河ヒューレットパッカード製万能ブリッジ 4225 A で測定した値を表 1 に示す。

ポリメチルメタクリル酸樹脂板 ($\epsilon_r=3.99$, $l=10$ mm) を用い、 $d=22$ mm のとき $V_s=+290$ V を得た。摩擦帯電密度 σ を (1) 式に従って算出し、 8.821×10^{-6} C/m² を得た。

摩擦帯電量は消費された仕事率に比例すると仮定し、慣用されている摩擦帯電能 σ/pv (C·s/N·m) で表すこととした。ポリメチルメタクリル酸樹脂では、

図 4 摩擦帯電測定方法

Fig. 4. Procedure to measure triboelectricity.

$\sigma/pv=2.596 \times 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{s}/\text{N} \cdot \text{m}$ となった。その他の試料の測定値も表 1 に示す。

〈2・3〉 電界帯電 誘導帯電または誘導電位と区別するため、電界帯電により試料が獲得した電荷を測定した。

実験に用いたギャップの長さ 25 mm、平板部分の直径 100 mm の平行平板電極を図 5 に示す。各々の平板電極には正負 2 系統の直流高圧電源を接続し、それぞれ $\pm V_0(\text{V})$ の電圧を印加した。印加電圧 $\pm V_0 = \pm 25 \text{ kV}$ のとき、電界強度 $E=2.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ となる。絶縁物として硬質ポリ塩化ビニル樹脂を用いた。

直径 60 mm の円に幅 3 mm、長さ 100~120 mm の尾が付いた、おたまじゃくし形に切出した試料をガラス丸棒に取付け平等電界中に 1 分間保持した。厚さ 150 μm 以下の薄い試料では、直径 60 mm の円形部分に円の直径を延長した形の幅 3 mm の支持部が付いた形、すなわちギリシャ文字 ϕ の輪郭内を塗りつぶした形に試料を切出した。試料の支持部を 2 本のガラス丸棒に取付け、試料を操作した。試料はファラデーケージに入れ、帯電量 Q_f を測定した。

ポリメチルメタクリル酸樹脂板を試料としたとき、ファラデーケージに接続したエレクトロメータ Keithley 602 の指示は $-1.70 \times 10^{-7} \text{ C}$ であった。電荷密度は $\sigma_f = -6.0125 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ となった。電界帯電を示す尺度として無次元量である次の値を求め、 $\sigma_f/\epsilon_0 E = -3.395 \times 10^{-2}$ を得た。その他の試料の測定値も表 1 に示す。

表 1 に示す前列の 3 試料については $E=2.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ で実験した。後列の 3 試料の実験では、同一の電界強度 $E=2.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ で、平等電界中に置かれた試料を介して電極間に火花放電が生じた。後列の 3

試料については、試料を平等電界中に置いても火花放電が生じない $E=1.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ で実験を行った。

〈2・4〉 誘導帯電 電界帯電に用いた試料を平行平板電極の負電極上に附着させて、誘導帯電による電荷を測定した。図 5 に示すように負電極に吸気孔を設け、油を用いない真空ポンプで排気して試料と電極とを密着させた。真空ポンプを操作して密着時間を 1 分間とし、試料の得た電荷をファラデーケージで測定した。

負電極上に試料を密着させると、誘電分極により電極に接する試料面は正に帯電する。負電荷が負電極から試料へ移行すると、電極から離れた試料は誘導帯電により負電荷を得るはずである。ポリメチルメタクリル酸樹脂板では、電荷量 Q_f は $+4.60 \times 10^{-10} \text{ C}$ であった。摩擦帯電の実験によると、この材料は摩擦により正に帯電している。電圧が印加されていない場合には、電極に附着させても帯電しないことを実験誤差の範囲で確かめてある。電界が印加されている場合、この材料は電極との接触により正に帯電したと解釈できる。誘導電荷密度 σ_i を平等電界の電束密度 $\epsilon_0 E$ で割って、無次元量 $\sigma_i/\epsilon_0 E$ を求めた。その他の試料の測定値も表 1 に示す。

〈2・5〉 電荷半減期 一辺 70 mm の正方形に切出した試料を、図 6 に示すように接地回転台に取付けた。試料露出面が 65 mm $\times$ 70 mm となるように、試料の 2 辺をセロハン粘着テープで接地回転台にはり付けた。負の 10 kV を印加したコロナ放電針電極下で試料に 1 分間コロナイオンを照射したのち回転台を回して、電界計検出部の直下に試料を設置した。電界計出力信号を記録し電荷半減時間 τ を測定した。各試料についての測定結果を表 1 に示す。

〈2・6〉 表面抵抗率 表面抵抗率 ρ_s は JISK 6911 (熱硬化性プラスチック一般試験方法) を参考にして測定した。図 7 に示すように、表面電極を厚さ 15 μm

図 5 電界帯電・誘導帯電測定用
平行平板電極

Fig. 5. Parallel plate electrodes to measure field-intrusion charging and induction charging.

図 6 電荷半減期測定方法

Fig. 6. Charge-decay-time measurement.

図 7 表面抵抗率測定用電極

Fig. 7. Electrodes to measure surface resistivity.

のアルミはくから切出し、真空用シリコングリースを用いて試料にはり付けた。ステンレス鋼製、厚さ 10 mm、直径 110 mm の裏面電極の上に表面電極をはり付けた試料を乗せ、エレクトロメータ Keithley 602 で表面抵抗 R_s を測定した。表面抵抗率 ρ_s は次式で求めた。

$$\rho_s = \{\pi(d_e + d_i)/(d_e - d_i)\} R_s \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 d_e : 表面の環状電極の内径 (本実験では 70 mm)、 d_i : 表面電極の内円の直径 (本実験では 50 mm)

測定結果を表 1 に示す。

3. 実験結果の検討

〈3・1〉 実測値の多角形表示 表 1 に示す六指標に関する実測値を一べつできる表示とするために、図

8 に示す多角形表示を試みた。

静電抵抗を示す残留電圧比の変動範囲は最大値 1.0 よりも小さい領域にある。残留電圧比の小さい値でも適切に表示できるように、図 8 において座標軸を残留電圧比の逆数 V_R/V_r (無次元量) で目盛った。

摩擦帯電量として、繰返し摩擦によって発生する平衡電荷量を測定しているため、静電抵抗が小さければ、摩擦電荷発生量がたとえ多くても接地摩擦電極を介する表面電荷漏えい量も多くなる。そのため、見掛けの電荷量は小さくなると推論できる。図 8 において、座標軸を摩擦帯電量の逆数 vp/σ (N・m/C・s) で目盛った。

電界帯電 $\sigma_f/\epsilon_0 E$ と誘導帯電に関しては、静電抵抗が低ければ両者とも最大値 1.0 に近づき、静電抵抗が高ければ移動する電荷量の代数和が小さいので、両者とも 1.0 よりも小さい値をとるものと予想できる。図 8 において、座標軸を無次元数として目盛った。

電荷半減期 τ に関しては、静電抵抗が低いほど電荷半減期 τ は短いことが予想できる。図 8 において、座標軸を電荷半減期 τ の逆数 $1/\tau$ (s⁻¹) で目盛った。表面抵抗率 ρ_s に関しては、静電抵抗が低いほど表面抵抗率 ρ_s も小さいと予想できる。同図において座標軸を表面抵抗率 ρ_s (Ω) の逆数、すなわち表面導電率 K_s (s) で目盛った。

図 8 の多角形で、試料を区別する線分が年輪状に整然と並べば、六指標のうちの一指標の測定値を用いて残りの五指標の値も精度良く推算できることを意味する。同図の多角形では、試料を区別する線分が交差し

図 8 静電特性の表示方法

Fig. 8. Correlation between charging mechanisms and factors for evaluation of electrostatic characteristics of insulating materials.

ない箇所もあるが、交差する箇所もある。

電荷半減期の長短と直偏法による表面抵抗率の高低は必ずしも一致しないという従来の定説を図8は裏付ける。一方、電荷の減衰比 V_r/V_p に関しては、表面抵抗率との相関性および電荷半減期との相関性は、いずれも必ずしも大きくないことが図9から理解できる。

〈3・2〉 静電抵抗の解析 本研究の目的は、試料の静電特性を評価するために新規の指標の必要性を実証することにあるので、静電抵抗を数量的に取扱う。一般に、静電現象は $Q=CV$ の公式に従うものとして解析が進められているので、この慣例に従うと電荷 Q の代わりに電位 V を測定しても良いことになる。

帯電体と試料との接触状態を図9(a)に模式的に示す。直径 $2a$ (本実験では 50 mm) の帯電体と試料表面との接近に際して、電荷転写が無視できる場合をまず扱う。帯電体の電荷は接触時間 t_c 中に電位 V に駆動されて試料表面の表面抵抗 R_{s1} を通って、接地された内径 $2b$ (本実験では 70 mm) の試料押え枠に流込む。試料の体積電導によっても電荷は減衰する。電荷減衰の様子は(b)図の等価回路で表される。図中、 Q_0 は帯電体の初期電荷、 C_0 は金属帯電体と接地試料台との間の静電容量である。投影面積 $S_0=\pi a^2$ である金属帯電体の端部効果が無視できれば、試料の比誘電率 ϵ_r を用いて C_0 は次式で表される。

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r S_0 / l = \epsilon_0 \epsilon_r \pi a^2 / l \quad (3)$$

試料の体積抵抗率を ρ_v とすると、体積電導による抵

抗 R_v は次式で表される。

$$R_v = \rho_v l / S_0 = \rho_v l / \pi a^2 \quad (4)$$

試料の表面抵抗率を ρ_s とすると、表面電導による抵抗 R_{s1} は(2)式を基に次のように表される。

$$R_{s1} = \rho_s (b-a) / \pi (b+a) \quad (5)$$

通常は表面電導が卓越し、 $R_v \gg R_{s1}$ なる条件が成り立つので、接触時間 t_c 後の電荷 Q は次式で表される。

$$Q/Q_0 = V_r/V_p = \exp(-t_c/t_1) \quad (6)$$

ここで、電荷減衰時定数 t_1 は次式で表される。

$$t_1 = C_0 R_{s1} = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_s a^2 (b-a) / (b+a) l \quad (7)$$

帯電体の寸法 a が大きく、試料の厚さ l が薄いと電荷減衰時定数 t_1 は大きく、電荷減衰は小さいこと、すなわち残留電圧比 V_r/V_p は大きいことがわかる。

試料の体積電導が無視できない場合には、(6)式において t_1 を t_2 に代えた式で電荷減衰を表すことができる。

$$t_2 = C_0 R_v \cdot R_{s1} / (R_v + R_{s1}) \quad (8)$$

雰囲気気湿度が低く、試料表面が清拭されており、表面伝導が無視できる場合には、(8)式の R_{s1} は極めて大きく、 R_v のみを考慮すれば良く、電荷減衰時定数 t_3 は次式で表される。

$$t_3 = C_0 R_v = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_v \quad (9)$$

(9)式は体積電導についての周知の式であって、帯電体および試料の幾何学的寸法に無関係である。

帯電体から試料へ電荷が転写される場合には、電荷減衰の様子は図9(c)の等価回路で表される。図中 C_i は試料から離れている状態での帯電体の静電容量である。 $C_0 \gg C_i$ が成り立つ。帯電体と試料表面との接触状態において、両者の間に成り立つ平均的な間げき δ に由来する静電容量を C_c とする。間げき δ は試料の厚さ l に比べて極めて小さいので、 $C_c \gg C_0$ が成り立ち、 C_c は次式で表される。

$$C_c = \epsilon_0 S_0 / \delta = \epsilon_0 \pi a^2 / \delta \quad (10)$$

次の不等式が成り立つ。

$$C_c \gg C_0 \gg C_i \quad (11)$$

電荷転写を表す転写抵抗を R_c とする。帯電体と試料表面との接近は、等価回路では、初期電荷 Q_0 をもち、(11)式の条件に従って高い電位にあるコンデンサ C_i のスイッチ Sw によるコンデンサ・抵抗回路網への接続で表される。転写抵抗 R_c はスイッチ Sw 投入時、抵抗両端の電位差が大きいときに限って電流を流す非線形抵抗である。(11)式の条件から、電荷転写があれば初期電荷 Q_0 の大部分は試料表面に移る。接触

(a) 接触状態模式図
(b) 帯電体から試料表面へ電荷が転写しないときの電荷減衰の等価回路
(c) 帯電体から試料表面へ電荷が転写するときの電荷減衰の等価回路

図9 帯電体と試料の接触

Fig. 9. Charge holder placed on the sheet sample.

していた帯電体と試料表面とが分離するとき、帯電体は C_s に蓄積されている電荷を持ち帰る。このとき、転写抵抗 R_t は両端の電位差が小さいので、電流を流さず無視できる。

試料の厚さ l 、比誘電率 ϵ_r 、表面抵抗率 ρ_s の実測値と、接触時間 $t_c=1s$ の設定値を用い、(6)、(7)式を使って残留電圧比 V_r/V_0 を推算し、表1に載せた。実測値のほうが推算値よりも小さい場合、すなわち、IC 包装用界面活性剤練込耐静電気ポリエチレン袋 A と C については、電荷転写があるものと推定できる。

本研究で用いた静電抵抗測定装置に試料表面と帯電体との接触・分離に伴う電荷転写に由来する試料表面電位変化の計測器を付け加えれば、電荷転写現象をより正確に観測できると考えられる。

〈3・3〉 絶縁物の静電特性評価 〈2・3〉節の実験から、電界帯電は表面抵抗、電荷半減期のほかに、電界中に置かれた試料の形状および微細構造に関係した極短時間の微弱なコロナ放電のしやすさが関係する現象であると思われる。表1によると、〈2・4〉節の実験の誘導帯電以上の大きな電荷を電界帯電で得る場合がある。

電界帯電・誘導帯電による試料の帯電量が半導体デバイスを破壊するのに十分な量に達しているか検討したい。

自動捺印機に MOS デバイスを通したとき、パッケージ表面帯電圧が 650 V 以上になると不良発生率が急増するという報告がある。その解析によると、パッケージ捺印面が帯電された状態で、端子が接地金属に接触すると、デバイスに蓄積されている誘導電荷が流れ出て、デバイスを破壊する⁽²⁾。この報告では、パッケージ帯電量に言及していないので、報告で用いられている解析方法を使って MOS デバイスを故障させる電荷量を求める。パッケージ捺印側の全面積を S_t 、パッケージ材料比誘電率を ϵ_r 、パッケージ捺印面とデバイスとの距離を d_p とする。パッケージ捺印面とデバイスとの間の静電容量を C_B とする。

$$C_B = \epsilon_0 \epsilon_r S_t / d_p \dots\dots\dots (12)$$

(12)式に代入すべき数値を求める。24 ピン DIP パッケージの端子を除いた外寸は $14 \times 32 \times 4 \text{ mm}$ である。パッケージ捺印面とデバイスとの距離 d_p は不詳であるので、パッケージ厚さの半分を $d_p (=2 \text{ mm})$ とみなす。充てん材入りフェノール樹脂系パッケージ

材料を直径 50 mm、厚さ 3 mm に成形・重合済みの試料を、上述の報告者が所属される製造会社とは異なる製造会社から提供してもらい、持ち合わせていた。試料の両面にアルミはくをグリセリンではり付け、静電容量を測定して 31 pF を得た。これから $\epsilon_r=5.4$ を得た。以上の数値を(12)式に代入して $C_B=10.7 \text{ pF}$ を得た。 $Q=C_B V$ より、パッケージ捺印面が 650 V に帯電すると $6.96 \times 10^{-9} \text{ C}$ の電荷を得ることになる。

〈2・3〉節、〈2・4〉節の実験で得た試料の電荷は、半導体デバイスを破壊するのに十分な量 $6.96 \times 10^{-9} \text{ C}$ を超えている。

電界帯電、誘導帯電の推算を可能とするためには、試料の形状、寸法などについての帯電量依存性を詳しく研究することが必要と思われる。

以上のことを総合すると、絶縁物の静電特性評価は、従来から言われてきた表面抵抗、電荷半減期、摩擦帯電量のほかに、静電抵抗、電界帯電能、誘導帯電能の六つの指標を併記することを提案したい。なお、六つの指標を数値で併記するよりは、図8のように一べつできる表示のほうが特性評価法としては用途に対して実用的と言える。

4. ま と め

実験の結果、静電気現象には従来気付かれていなかった静電抵抗および電界帯電現象が存在することがわかった。それゆえ、絶縁物の静電特性を評価するには従来から使用されてきた表面抵抗率、電荷半減期、摩擦帯電能のほかに、静電抵抗、電界帯電能、誘導帯電能を追加することが望ましい。また、実用上は静電特性の図形表示が評価形式として便利ながわかった。静電抵抗および電界帯電の現象論的模型には、今後調査すべき事項が多く残っている。

本研究を進めるに際し、静電抵抗測定装置を製作していただいた菅野 功氏(シンド静電気)、貴重な討論と試料をいただいた静電気学会静電気耐性対策調査研究委員会の委員各位に感謝の意を表します。

(昭和 62 年 1 月 7 日受付, 同 62 年 5 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 家田・沢・篠原:「高分子表面電荷の減衰過程」, 電学誌, 88, 1107 (昭 43-6)
- (2) 福田:「半導体デバイスの静電気サージ対策」, 静電学誌, 8, 6, 387 (昭 59-11)