静電気測定器と帯電防止加工 の効果の評価との関係*

会 員 村 崎 憲 雄**
松 井 満
水 野 慎一郎
西 広 昭 徳

1. 序 言

合成繊維は優れた特性をもっているが、吸湿性に乏しいため静電気を発生しやすい。静電気が繊維に発生すると、静電気障害と呼ばれる好ましくない現象が誘発する。そのため、一般に、帯電防止加工と呼ばれる処理が合成繊維に施されている。静電気は合成繊維にのみ発生するものではないけれども、合成繊維に対する帯電防止加工の付加価値は、他の工業資材に対する帯電防止加工の付加価値よりもはるかに大きい。そのため、合成繊維の出現が帯電防止加工技術の発展をうながしたことは、事実である。しかし、これらの加工技術の内容をみると、(1)生じた静電気をすみやかに逃がす(漏洩)という方法か(2)生じた電荷と反対極性の電荷を外部から供給し、正電荷と負電荷とを中和させて消滅させる(再結合)という方法かのいずれかに属する。

合成繊維の出現を境として、静電気についての研究文献と帯電防止加工についての特許出願件数は急増している。しかし、帯電防止加工効果(以後加工効果と称する)を評価することを対象とした研究例はきわめて少なく、科学的な評価方法として万人が信奉する評価の体系は現在でも得られていない。そのため、加工効果を評価する手段として採用されている測定器およびその測定器を使

用して評価された結果に対して不満足意向を表明する人達も多い。

そこで本報告では帯電防止加工技術の加工目的と加工によって達成される静電気の存在様式との関係についての概要、静電気現象の問題点(帯電防止の対象となる静電気現象の範囲の限定)、測定器および測定方法の問題点(測定可能な問題と不可能な問題との分離)などについて検討を加えてみた。

2. 評価に関係する諸問題

2.1 静電気測定の問題点

諸般の事情から、静電気測定器は金属導体を標準の帯電体とみなし、調整その他が行なわれる。しかし、導体の帯電と絶縁物の帯電とは、巨視的にみて同類とみなしうる性質も多いが、同時に同類とみなしえない性質もある。公知のことであるけれども、導体の帯電と絶縁物との間のもっとも大きな相違点は以下になる。

(1)帯電体が導体であれば、導体の有する電荷は単一極性の電荷である。(正の電荷のみか負の電荷のみ)それに対し、絶縁物が摩擦帯電したときは、一般には、正電荷と負電とが両方とも絶縁物上に発生する。

(2)帯電体が導体であれば、帯電体のいずれの場所もすべて皆同電位である。すなわち、導体の表面は等電

* Measurement of the Effect of Antistatic Agent through Static Charge Meter.

** N. Murasaki, Member M. Matsui, S. Mizuno and A. Nishihiro, 東京農工大学 工学部 電気工学科

位面である。これに対し、絶縁物が帯電した時には、絶縁物の表面が等電位面にならない。

(3) 帯電体が導体であれば、電荷は正または負のいずれか一方のみであるから、帯電量とは帯電体のもっている全電荷量である。しかるに、帯電体が絶縁物であれば、試料上には正電荷も負電荷も存在する。それゆえ、帯電量とは試料のもっている全電荷量であるというだけでは不十分で、帯電量の表現形式が工夫されなければならない。

(4) 帯電している導体に測定器を近づけると、その間の距離が小さくなるほど測定器の指示は一般には大きくなる(導体の形状によっては必ずしもこのとおりにならないときもある)。ところが、絶縁物が帯電しているときに、帯電体に測定器を近づけると、指示量が減少することがしばしば経験される。この相違は、帯電体の周囲の物体、帯電体の電荷の状況、および測定器の三つの相対的な関係によって生じるものである。それゆえ、導体が帯電体であるときに成立した比例関係はすべて絶縁物が帯電体であるときにも適用できるといえない。

上記記した(1)～(4)は、帯電体が導体であるときと、帯電体が絶縁物であるときとの基本的な相違点で、これらのことを要約すると、絶縁物の帯電に関しては、試料上の電荷の質(正電荷か負電荷であるかということすなわち電荷の極性とその極性をもった電荷が試料から漏洩しやすいかそれとも漏洩しにくい電荷であるかということ)と電荷の量(電荷が絶縁物上で位置する場所を座標に対応させて表わすことと、その座標位置における電荷の密度)とを同時に表わさなければ帯電状態を明確に表わしたことになるということになる。

電荷の質と量を同時に測定することを目的とする測定法のことを一般には電荷の mapping と称されている。良質の mapping が可能な測定器は技術的に困難な問題が多いので、通常は汎用の電位計または電場計を用いて平均化させた値を測定し、巨視的現象を研究する場合が多い。

2.2 帯電防止加工の対象となる静電気

表1 帯電に関する諸要素(固体)

表1によれば、固体に生じる静電気現象は、電荷が発生することに関係のある部門と、電荷が消滅することに関係のある部門とに分けることができる。

静電気障害の発生する現場では、静電気を発生する場所(たとえば摩擦が生じる場所)と障害が発生する場所(たとえば静電汚損の生じる場所)とは違った位置で、その間を試料が移動している。試料が移動する時間の大きさは現場の種類によって異なるが、試料上の電荷は時間の大きさと現場の状況に応じたある関係のもとに発生した当初の電荷量よりも少なくなっている。ただし、現場の状況が、電荷の蓄積個所を有しているようなとき(たとえば布を巻取るところなど)には蓄積量は発生個所の電荷量よりもはるかに大きい。しかし、この場合でも発生電荷の全量が蓄積されたのではなくて、時間経過に応じて減量された電荷の蓄積量になっている。上記したことは、静電気障害を生じる静電気とは、発生した静電気の全量のことではなくて、障害が発生するときまで試料上に残留している電荷のことであるという意味になる。

残留電荷量は発生電荷量よりも途中で消滅した量だけ必ず小さいが、なお一層残留電荷量を小さくすることを目的として加工することが帯電防止加工の目的である。それゆえ、発生電荷量そのものは必ずしも小さくしなければならないということはない。したがって、加工効果は、試料上の残留電荷量の大小によって評価されるべきで、発生電荷量は直接の関係は有しない。

加工効果を残留電荷量を指標として評価することになると、残留電荷量を測定できる測定器はすべて帯電防止加工の加工効果を評価するための測定器になりうる。また、残留電荷量を直接測定するものでなくても、それによって残留電荷量を推測できるものであれば、これもまた評価手段として使用できる。

2.3 帯電防止加工の加工効果を評価するために整理されなければならない事項

静電気障害は試料上の残留電荷によって発生させられるものであるから、残留電荷量を加工効果を評価するための指標として評価することは妥当なことである。しかし、試料が絶縁物であれば、残留電荷を測定するためには良質の mapping 装置が必要となる。ところで、良質の mapping 装置は取扱いがむずかしく値段も高額であるから、mapping 装置を使用せずに残留電荷を測定する方法または推測する手段が実用上要求される。一般には、試料の電気抵抗、電荷の漏洩速度、静電汚損等を測定し、これらを実用上の指標として帯電防止加工の加工効果を

評価している。それゆえ、加工効果を評価するためにおこなわなければならないことは、つぎの二つの事項となる。

- (1) 取扱いやすく値段のやすいmapping装置の開発
- (2) mapping装置を用いて得られる残留電荷量と実用性を主とした指標(抵抗等)を用いて測定したときの評価結果とを比較し、電気抵抗、漏洩速度、静電汚損等が指標として利用できる範囲と信頼性を明らかにすること。

上記した二つのことはいずれも大切なことであるが、(2)について以下に述べる。

3. 実用性を主とした指標とその測定器

実用上の便利性を重視するときには、試料の電気抵抗、試料上の電荷の半減期、および静電汚損のいずれかが使用され、それらの測定器と測定法には多くの種類がある。

3.1 電気抵抗と抵抗測定器

A. 電気抵抗が指標として利用される理由

試料の電気抵抗は試料上の残留電荷量の大小とmappingされたときの電荷の分布状態を直接表わすものではない。しかし、加工効果を評価する手段として電気抵抗値が広く受け入れられている理由は、測定が容易であることと、測定値の再現性が比較的良好で、しかも残留電荷に関係のある物理量であるためである。

試料を繰返し測定して得られる数値の再現性について、電気抵抗測定と静電気測定を比較すると、電気抵抗の測定値は再現性がはるかに良好である。また、大きな物体から数個の試験片を取出したとき、それぞれの試験片から得られる測定値の偏差は電気抵抗測定の方が静電気測定の偏差よりもはるかに小さい。

B. 電気抵抗測定器

絶縁物の電気抵抗測定にもっとも多く利用されている方法はJIS規格に採用されている直偏法で、図1のような形式で測定される。図1(a)は表面抵抗、(b)は体積抵抗を測定するときの電極、試料、および電池の結線図であるが、このような測定は板またはフィルム状の絶縁物に適用できる区分された電流の電流経路に対する測定法である。繊維製品では(b)の体積抵抗と呼ばれるものでも、実質は繊維の表面電導による電流経路がPとP'の間に形成されているにすぎないので、抵抗測定に関しては試料の電流経路を明らかにしておく必要が繊維製品では特に必要である。

図1から使用する電流計の感度が高ければ高いほど、試料に与える印加電圧が大きければ大きいほど高抵抗を

測定できることになる。実際には、実用上つぎのような制約が生じ、測定可能な上限が存在する。電流計の最高感度は約 10^{-12} Aが現在の技術では上限である。試料に約1500 Vをこえる電圧を印加すると、試料表面に放電が生じる場合がある。それゆえ、 $10^{15} \Omega$ 以上の測定は信頼度があまり高くない。

図1は試料と電極との基本的な位置関係であるが、市販の抵抗測定器は種々の工夫が施され、使用目的に便利なようになっている。しかし、いずれの計器も、試料

(a) 表面抵抗の測定 (b) 体積抵抗の測定

V : 印加電圧	a : p の外径
I : 電流	b : G の内径
R : 抵抗	t : 試料の厚さ
A : 電流計	ρ_s : 表面抵抗率
P : 主電極円核	ρ_v : 体積抵抗率
P' : 対電極円核	
G : ガード電極リング	
S : 試料	
$R = V / I$	
$\rho_s = \pi (a + b) R / (a - b)$	
$\rho_v = \pi a^2 R / 4 t$	

図1 電気抵抗の測定

が均質であることを前提としているから、不均質な試料を測定するときは、不均質の程度に応じ、電極の構造を考える必要がある。

繊維製品の抵抗値は印加電圧の大きさと電極の構造によって異なった値となって測定される。これは、試料が圧縮または引張りを受けたときの繊維間の接触状態と電極と繊維との接触状態が変化することに原因があるので、測定条件を一定に保つことが大切である。特に、このような変化は空隙率の大きな製品ほど大きく生じる傾向がある。

電気抵抗を加工効果を評価する手段に利用できる理由としては、抵抗値が小さい程電荷が漏洩しやすいということにある。それゆえ、測定された電気抵抗は電荷が漏洩するときの漏洩抵抗でなければならないから、電極による圧縮等の影響ができるだけ小さい状態をつくることよりは、静電気障害が生じるときの試料の状態に近い状

況下での電気抵抗を測定することが目的に沿った測定結果を得ることになる。

抵抗測定器は試料の均質性を前提として構成されているから、もし、電荷の漏洩が不均質に行なわれるようであれば、電気抵抗の信頼性は不均質の度合に応じて低下する。たとえば、カーペットのように、主たる繊維の配列方向と基布の繊維の配列方向とが異なるような製品では、電荷の漏洩経路の想定から検討することが必要となる。も

図2 金属線と合成繊維との混紡品をモデル化した場合

し、電荷の漏洩経路に無関係な方向での電気抵抗を測定しているとすれば、この場合には指標としての意味を失う。

図2は、細い金属線と繊維とを混紡した布についての、電荷の漏洩と電気抵抗との関係を説明するためにモデル化した図である。このような不均質な試料では、抵抗測定を行なうと金属線の電気抵抗のみが測定され、繊維の部分はまったく無関係となる。実際には、図2の合成繊維の部分が摩擦されると静電気が生じ、合成繊維の部分に帯電防止加工が施されていなければ電荷は漏洩しない。極端な例としては、フィルムの裏側に金属箔を貼りつけた場合で、金属箔の電気抵抗とフィルム面の電荷の漏洩とはまったく無関係である。

3.2 電荷の半減期と半減期の測定器

A. 半減期が指標として利用される理由

帯電防止剤の効果の評価するときには半減期を使用する場合が多い。その理由は、試料上の残留電荷量を測定して半減期を求めているからゆえに、得られた評価に安心感を抱くからである。

半減期測定器が電気抵抗測定器よりも優れている点は、電流測定用の電極を使用する必要がないので、試料に電

極をつけることによって生じる歪みが生じない。また、凹凸の多い試料や形状が簡単でない試料では特別な形状をもった電極を用意しなければ抵抗測定ができないが、半減期測定器ではその必要がない。その他、カーペットのような方向性をもった材料であっても、電荷の漏洩経路を主体とした測定が可能であるし、図2のような混紡品であっても、特定成分の抵抗測定に陥る恐れがなく、一応は均一化された漏洩速度を測定できる。

上記したように、半減期測定は試料の性質に対する適応性が抵抗測定よりも大きいので実用性に優れている。しかし、これらの性能が発揮されるためには、

$$Q = Q_0 e^{-\left(\frac{1}{\tau} \cdot t\right)} \dots\dots\dots (1)$$

Q_0 : 初期電荷量, Q : t 秒経過したときの電荷量

τ : 試料の時定数

電荷の減衰が(1)式に従って行なわれなければならない。実際には、(1)式のような簡単な数式に従った減少を生じない試料もあるので、そのときは半減期に固執しないで、減衰状態を指標とする必要が生じる。

B. 電荷の半減期測定器

試料上の電荷の半減期測定は電荷が(1)式で減少することを仮定し、図3のように等価回路で量関係が計算される。(1)式は初期帯電量 Q_0 と減少状態を表わす $e^{-\frac{t}{R\epsilon}}$ との二つの項からなりたっている。それゆえ、測定器は試料を荷電する部分と減す状態を時間に対して記録する部分とから構成される。

B: 静電気測定器 (Field mill)

G: ガード電極 S: 試料 Q: 電荷量 V: 表面電位

C: 試料の静電容量 R: 試料の抵抗 τ : 半減期

図3 電荷の漏洩速度(半減期)を求める方法

試料を荷電する方法には、直流コロナを照射して帯電させる方法と、試料を摩擦片で摩擦して摩擦帯電させる方法とがある。図4はコロナを照射して試料を帯電させ、半減期測定を行なう装置でオネストメータと呼ばれている。図5は摩擦帯電を試料に生じさせて半減期測定を行なうもので、スタチックマシンと呼ばれている。いずれの装置でも図3(c)のような減衰曲線が得られるので、時間 t を十分大きくとれば、抵抗測定器で測定

しえないほどの大きな抵抗でも測定することができる。特に高抵抗測定用に半減期測定器がつくられているとき、一般にはこの種のものを電流減衰法による電気抵抗測定器と呼んでいる。

図4 コロナ放電によって帯電した電荷の減衰特性測定装置

図5 摩擦帯電電荷の減衰特性測定装置

C. コロナ照射による帯電と摩擦による帯電との相違
試料の表面の凹凸状態と放電極の形によっては、試料の表面に同一密度で帯電させることがむずかしい場合もあるが、コロナの照射時間を十分に長くすると、半減期測定に使用する目的に支障のない程度に均一とみなしうる荷電をおこなうことができる。また、コロナ照射による荷電では、初期帯電量の大きさはコロナ電極に印加した電圧の大きさで決まるので、半減期の測定は再現性が良い。これに対し、摩擦帯電で試料を帯電させるときは、摩擦帯電の再現性の悪さが測定結果に影響するので、半減期測定の再現性はさほど良好ではない。そのため、現場関係ではオネストメータの方が利用されている。

荷電方法が違くと試料上に生じた電荷の質が異なる。コロナは印加電圧の正負の極性によって、正極性コロナと負極性コロナとがあり、正極性コロナによる荷電時の半減期と負極性コロナによる荷電時の半減期とでは、試料の質によっては一致しないこともある。

通常、このような場合には、正コロナの半減期、負コロナの半減期の両方が測定されている。摩擦によって試料

を荷電したときの試料上の電荷は摩擦電気であるが、コロナを照射したときの電荷は空気イオンである。そのため、電荷が試料に付着する力と保持される力とは荷電方法によって異なるので、スタチックメータとオネストメータでは試料が同じでも半減期は同じ値とならない。

帯電防止加工の目的は、摩擦電気の残留量を小さくすることが目的であるという制約をつけるならば、たとえ再現性が悪くても、スタチックメータの方が信頼性が高いということになる。

摩擦方法には、対称摩擦と非対称摩擦とがあるが、スタチックマシンに使われている摩擦の仕方はほぼ非対称摩擦であるから、実際に繊維が使用されたときの摩擦とはほぼ同じとみなしうる。しかし、摩擦帯電には帯電列と呼ばれる電荷の極性に関する経験則がある。この法則を尊重するならば、摩擦によって試料を帯電させるための摩擦材料を考慮して荷電すべきことになる。実際問題として、何が最も適当な摩擦材料であるかということは結論が与えられていないから、少なくとも、帯電例における上位のものと下位のものおよび同じ試料を用いて摩擦帯電させたときの半減期の三つを測定する必要がある。

摩擦帯電は摩擦時の圧力と速度によって生じる電荷の状態が変動する。それゆえ、摩擦によって試料を傷つけない程度の摩擦の強さにとどめることが測定に望まれる。

D. 半減期の利用できる範囲

試料上の電荷が減少してゆく状態を測定する手段として静電気測定器が使用される。そのため、半減期の測定結果の中には静電気測定器の特性も含まれているので、静電気測定の可能域が半減期測定器の使用範囲をきめる一つの要素となる。

静電気測定器の一つの特長は、電荷の位置と測定器との位置関係によって、電荷量が等しくても指示量が変化

図6 一様に電荷が減少する帯電円板

A : 帯電体 (円板)
B : 静電気測定器
x : 帯電円板の中心と測定器との距離

図7 測定器と帯電円板の位置関係

a : 図9の帯電円板による指示
b : 図6の帯電円板による指示

図8 測定器の指示変化に及ぼす測定器の位置と帯電体の電荷の分布状態との作用

し、しかもその変化する割合は位置関係に比例していないということである。図6は円板上の試料が一様な電荷密度 h_a で帯電していた状態から電荷密度 h_b に一様に減少した状態を図のハッチをいれた部分の高さで示したものである(実際にこのような見事な減少状態は存在しない)。このような帯電体の近傍に余分な導体などがなければ、測定器を帯電体に近づけたときの状態は、図7のように位置関係を示すことができる。帯電状態が図6に示されるような帯電体であれば、図7における x (測定器と帯電体との距離)が変わると測定器の指示は図8の曲線bのように変化する。ただし、この曲線は図6の帯電円板の半径 r が10cmのときのものである。図9は、一様な電荷密度で帯電しているけれども、試料上に正電荷と負電荷が存在しており、正電荷量と負電荷量とは相殺状態になるような帯電を示す一例である。半径 $\frac{r}{\sqrt{2}}$ の円周内に正電荷が σ クーロン/ m^2 で、内径 $\frac{r}{\sqrt{2}}$ 、外径 r の円環上に負電荷が σ クーロン/ m^2 で帯電しているから、見掛け上は電荷0と称する状態である。この帯電円板に測定器を図7のようにおくと、 x が変

化すると測定器の指示は8図の曲線aのように変化する。変化する割合は曲線bよりも速い。

実際の半減期測定器は、図4、図5に示すように、試料は設けられた金属性の回転テーブルまたは回転円筒D上に固定される。そのため、試料上の電荷は金属面に反対極性の電荷を静電誘導するので静電気測定器に対しては電荷のあり方は図10のように電気二重層として作用することになる。図7と同じ条件で x を変化させて測定器の指示の変化を求めること、図11のようになり、変化の割合は図8の(a)よりも大きい。電気二重層の強さは電荷密度 σ と二重層の厚み t (試料の厚みには等しい)との積 $[\sigma t]$ で表わされる。したがって、測定された数値には試料の厚みも関係しているから、半減期測定に際しては試料の厚みを一定にしておく方がよい。

コロナを試料に照射するとほぼ図6のような帯電状態となる。しかし、摩擦によって試料を帯電させたときは図6のような帯電状態を期待することはむずかしい。一般には正と負の両電荷が試料に発生するのでつぎの問題を考慮して半減期を処理する必要がある。

図9 一様な電荷密度で帯電しているけれども、正電荷量と負電荷量とが相等しく、全電荷量が0となる帯電円板

A : 二重層
B : 静電気測定器
t : 厚み
r : 円板半径
x : メータ～二重層の距離
 σ : 電荷密度

図10 二重層の帯電

図11 電気二重層による測定器の指示と位置との関係

図9の帯電板では、正電荷量は $\sigma \pi r^2 / 2$ 、負電荷量も $\sigma \pi r^2 / 2$ であるから、正負の電荷量が相殺して総量は0となる。しかし、測定器には指示が得られた。このことは、試料上に正電荷と負電荷があるときには、たとえその総和が0であっても分布状態によって(1)測定器の指示が0になるとき、(2)測定器の指示が正の側にふれるとき、(3)測定器の指示が負の側にふれるとき、の三つの場合が生じることを意味する。また、上記のことは、正と負の電荷の総和が等しくなくても測定器の指示は0となることもある。すなわち、摩擦帯電の半減期を静電気測定器で検出している限り、測定器の指示は、漏洩した電荷量を正しく指示しているとみなすことは危険で、一応、見掛け上漏洩したものとみなしうる状態という配慮を加えて判断することが必要である。

以上のことを総合すると、半減期測定の意味は、試料が図6のような帯電状態であるときには効果的であるが、図9のような帯電状態が生じる恐れのあるときには、測定器の特性を考慮して判断しなければならない。

E. 半減期測定に必要な付属事項

電荷の半減期が帯電体の電荷の減少状態を表わすことができるのは、電荷の減衰が(1)式で表わすことができることで、図3の等価回路が成立することを前提としている。もし、図3のRとCが帯電量によって変わるものであれば、半減期の意味を拡大して解釈する必要がある。オネストメータは、他の方法に比べ、諸種の面で半減期測定に都合の良い条件を備えている。このオネストメータを使用した場合でも、しばしば図12のような電荷の減少状態が測定される。オネストメータは、荷電方法としてコロナ照射を利用しているから、

図12 単純な数式に従わない電荷の減少例

この場合の帯電は図6の帯電状態にもっとも近い帯電であるから、試料によっては、電荷は指数関数的に減少しないものもあると解釈することが必要となる。電荷が指数関数的に減少しないときには、半減期は、帯電防止加工の効果を評価する指標としての信頼度が小さい。一般には、実質的に電荷が0となる時間、初期帯電の減少速度、および半減期の三つの量が並記される。

3.3 静電汚損と汚損量測定器

A. 静電汚損が指標として利用される理由

電気抵抗測定器と半減期測定器が市販されているにもかかわらず、静電汚損発生器が帯電防止加工の効果を評価する手段として根強い支持を得ている。その理由は、電気抵抗および電荷の半減期は、帯電体上の電荷は単一極性で漏洩に対し均質な試料成分であることを前提としているので、この条件に適用していない試料に対しては、電気抵抗と半減期は十分に指標としての役目を果たすといいきれない。残留電荷があれば、その近傍にある微粒子は電荷に吸引され汚損を生じる。それゆえ、静電汚損法は残留電荷量を測定することはむずかしいけれども、電荷が残留しているかどうかを検出できるという点で、半減期と電気抵抗とを残留電荷検出の手段とするときの弱点を補う手段として役立つ。

B. 静電汚損発生器

試料を自然状態にしておいても、時間が十分に長ければ空中の塵埃が静電気汚損を発生する。静電気汚損発生器とは人為的に短時間に汚損を発生させるため、図13のように人工煙を槽内に強制循環させる槽のことで、装置の性能は気流の状態と人工煙の質によって決まる。しかし、汚損発生に都合の良い人工煙の質についてはほとんど研究されていない。

C. 静電汚損による残留電荷検出に必要な事項

繊維の質によっては帯電していなくても人工煙が付着するものがある。また、試料のおき方によっては人工煙の気流が試料に衝突し、そのために汚損を生じることがあ

図13 静電汚損試験装置

る。それゆえ、静電汚損とそれ以外の原因による汚損を区別して汚損状態を判断することが必要となる。静電汚損の特徴は、電荷のつくる潜像の周辺部ほど多くの汚損が発生し、たとえ中心部に多量の電荷があるときでも、中心部には多くの汚損を生じない。それゆえ、静電汚損による紋様は一様な汚損状態になりにくいという特徴がある。

上記したことは静電気吸引力に基づくことで、人工煙と気流の条件によって相対的に発生する一般的な汚損と重量された汚損が通常の試験結果として得られる。そのため、ある程度の熟練が必要であるが、この問題はあまり詳しく研究されていないらしい。帯電防止加工の技術が年々向上しているので、人工煙の適正を研究し、感度のよい検出が可能となることが期待されている。

4. 残留電荷の種類と測定器の指示との関係

電荷が減少する過程には漏洩と再結合の二つの過程があり、過程が異なると残留電荷の状態が異なる。帯電現象は電荷が空間に位置することによって生じる現象であるから、電荷の量と空間への拡がりとの二つの量が帯電防止に関しても考慮されるべきである。しかし、従来検討されてきた帯電防止技術は主として漏洩を対象とする場合が多く、再結合と電荷の空間的な拡がりに関してはあまり多く検討されていなかった。

4.1 漏洩と再結合

試験料にある電荷が試験料外へ流出する現象が漏洩現象と称され、図6は漏洩を图示するものである。(a)図で、電荷の密度を h_a とすると、半径 r の試験円板上には $\pi r^2 h_a$ の電荷がある。もし、電荷が円板の体積内へ流入することができないならば(b)図のように電荷密度が h_b になるとすると、 $\pi r^2 (h_a - h_b)$ の電荷量は半径 r の円周を

横ぎって円周外へ流出する。この流出する電荷の移動を一般に漏洩電流 i と呼び、漏洩電流と円板上の電荷の減少割合 dQ/dt とは

$$-\left(\frac{dq}{dt}\right) = i$$

の関係がある。これに対し、試験料上の電荷と反対極性の電荷が試験料外から流入してきて、もとの電荷と中和することによって消滅することを再結合と称する。電荷は試験料内へ拡散せず表面上のみを移動するものとして再結合を図示したものが図14である。(a)図は、密度 h_a で正帯電している r の円板を、(b)図は外部から負の電荷が半径 r の円周を横ぎって試験料上へ流入し、正電荷と中和して電荷が消滅した箇所Aと、正電荷が残留している箇所Cと、流入した負電荷の方が多い箇所Bとが生じた状態を示す。 r 、 r_a 、 r_b は電荷の分布域を表わす半径で、 h_b は流入した負電荷のうちBの部分における密度を表わすものとする。このような状態となったときは、流入した負電荷の総量は $\pi (r^2 - r_a^2) h_a + \pi (r^2 - r_b^2) h_b$ 、中和消滅した正電荷(負電荷)量は $\pi (r^2 - r_a^2) h_a$ 、試験料上の残留電荷量は半径 r_a 内に正電荷が密度 h_a で、外径 r 内径 r_b の円環状に負電荷が密度 h_b で位置している。

図14において、流入した負電荷のつくる電流を電流計で測定すると、負電荷が試験料へ流入した場合であるから電流の方向は正電荷が試験料外へ流出したときと同じ方向となる。すなわち、図6の漏洩電流と同じ方向である。したがって、電流計を使用するときは、再結合と漏洩とを区別することができない。

つぎに、静電気測定器で図6の試験料を測定すると、(a)図のときも(b)図のときも指示は正電荷であることを指示し、そのときの指示量は(b)図の指示は(a)図のときの h_b/h_a となり量的な比例関係が正立する。これに対し、図14の場合には、静電気測定器の指示は必ずしも流入した負電荷量または再結合により消滅した電荷量に比例して減少しない。

図14 再結合による電荷の減少と残留電荷

電荷量測定の一つにファラデージが使用されるときがある。ファラジージでは図6のような帯電では、得られる指示は(a)図では $\pi r_a^2 h_a$, (b)図では $\pi r_b^2 h_b$ となり、比例関係が保たれる。これに対し、図14の帯電では、(a)図をケージ中に入れると指示は $\pi r_a^2 h_a$ を、(b)図をケージ中に入れると $\pi r_a^2 h_a - \{ \pi (r^2 - r_b^2) h_b \}$ の指示を得る。それゆえ、 $\pi r_a^2 h_a$ と $\pi (r^2 - r_b^2) h_b$ が等しければ指示量は零となり電荷が存在しないように受取られる。

4.2 残留電荷の種類と測定器の指示との関係

4.1 でのべられたことを要約すると、測定器を使用し、測定器のみに依存すると、電極の減少はすべて漏洩によるものであるとみなしても支障のない量関係が与えられる。しかし、空間に分布した電荷の状態については関係のない形で与えられる。したがって、電荷の移動量を測定することが主となるから、帯電防止加工の加工効果を評価するためには不十分となるので、残留状態をあらかじめ予知した上で測定器の指示を評価しなければならないということになる。

A. 見掛けの再結合による残留電荷

図2に示されたような複合材に生じる残留電荷では、つぎのような特異性を試料が有している。

電気抵抗を測定すると抵抗値は比較的小さい値となるが、試料を摩擦すると一部に摩擦帯電が生じる。摩擦電気が正であれば、導体に大地から負電荷が流入し、試料全体としてはファラジージで測定すると電荷量が零の状態となる。しかし、試料の近傍では正と負の電荷がつくる電界が生じ、静電汚損が発生する。

この帯電は、図14に示された再結合と若干類似の点もあるが、絶縁性の材料の部分が良質の絶縁物であれば再結合による電荷の消滅は生じない。

見掛けの再結合は、試料が導体と不導体とから構成されている場合に生じる現象で、導体中の電荷担体の移動度が不動体中の電荷担体にくらべきわめて大きいことに原因する。巨視的にこのような現象を表現すると、絶縁物上の電荷は試料に強く抱束されており、導体中の電荷は移動できる電荷であるということが出来る。

図2のように導体の網目が比較的大きいときは上記の説明が受け入れられる。しかし、網目が段々と小さくなったとき、導体の固有抵抗が大きくなったとき、そしてこの状態が一つの極限状態に近づくときと本来の再結合と区別することが測定器を用いても、静電汚損を用いてもむずかしくなる。今後、人為的に図2の構造をどこまで極限に近づけることが可能であるかは複合材の製造技術の発展に待たなければならないが、帯電防止加工の一

つの方法として、今後に期待できる方法である。

残留電荷を表わすことは、見掛けの再結合の場合には複合状態を表わすことに通じる。試料上の正電荷量を Q_+ 、負電荷量を Q_- とすると、 $Q_+ + Q_-$, $|Q_+| + |Q_-|$, $|Q_+| - |Q_-|$ の三つの帯電量が考えられる。すなわち、正電荷量 Q_+ と負電荷量 Q_- が複合材の状態に応じて帯電しているという表現、正電荷量と負電荷量の総量、およびファラデージで測ったときの電荷量が必要であるが、その他に、正と負の電荷の分散状態を表わす係数も必要である。

B. 再結合による残留電荷

高分子材料の帯電が再結合によって消滅することを示した実験例は少ないが、図15のようなmapping装置で試料上の電荷の減少状態を時間をかけて追跡すると、図16のように外部から異符号電荷が流入することもある。

図16の試料幅は図15の試料Sの大きさのことで、電荷が試料幅よりも大きく画かれているのは、測定器への入力は試料直上よりも若干外方でも試料から得られるためである。この図からわかることは、摩擦帯電の電荷の一部は試料に強く抱束された状態にあるらしいということと、一部は試料上を移動することができるらしいということである。

B: 鉄粉ブラシ M: 磁石 D: 試料移動架台
S: 試料 A: 増幅器 R: XYレコーダ
C: X位置ポテンシオメータ P: 静電気測定器検出電極

図15 摩擦電気の分布の測定器(mapping装置)

(a)摩擦直後(約15sec後), (b)60min後
(c)24hr後

図16 摩擦電気のmappingと時間的变化

摩擦帯電による電荷が試料に抱束されているということは、摩擦によって試料が一部分ではあってもエレクトレットになったことを意味する。文献によると、エレクトレットは熱と電界とを必要とする熱エレクトレットがもっとも詳しく研究されているが、エレクトレットの成因には種々あって、機械的な歪みを与えたとき、コロナを照射したとき、放射線を照射したときなどにもエレクトレット化することが実験で確認されている。摩擦によるエレクトレットを認めるならば、帯電防止加工は漏洩のみでは達成しえないことになる。

再結合が可能となるためには、試料の帯電極性と反対極性の電荷が必要であるから、半減期測定をオネストメータで行なうときには、コロナの極性を選別する必要がある。また、電気抵抗を求めるときには、その電導性に関する主たる電荷担体が異符号電荷をもつものであることを調べることも必要となる。

電荷量の表現方法は、見掛けの再結合が一つの極限状態に至ったときが再結合であるから、見掛けの再結合と同じ表現を採用すれば良い。また、測定器の指示と残留電荷との関係もみかけの再結合と同じである。

C. 漏洩による残留電荷

(1)式の表現で電荷が漏洩するから、導体の帯電に準じた取扱いが可能で測定器の指示が正しく電荷のあり方を表わす。それゆえ、従来の静電気についての法則に従った評価を適用できる。

4.3 評価に必要な測定器の用法

前記してきたことを要約するとつぎのようになる。摩擦帯電にはエレクトレット化した帯電が含まれていることを認めなければならない。したがって、電荷の消失過程には漏洩と再結合の両方が存在することになる。したがって、電気抵抗のみ、半減期測定のみでは電荷が真に消失したことを保証しえない場合もあるので、補助的手段として静電汚損を併用することが必要である。しかし、静電汚損を人工的に発生させることについては十分研究されていない面が残っているから、長時間の静電汚損発生状態を調べることが必要である。

5. 測定値の変化と試料の履歴

試料にはそれぞれの履歴（加熱、歪み、摩擦などの外的な刺激）があり、履歴の相違が測定値に変動を生じる。それゆえ、測定値を評価するときには、試料の履歴の相違も加味して評価することが望ましい。図17は摩擦によって試料の表面が変化する状態を測定したもので、摩擦条件は、摩擦速度5cm/sec 摩擦圧力11g/cm²、摩擦材料

はナイロン ブラシである。表面特性の一つであるぬれ張力を摩擦したものと摩擦されなかったものを比較したものである。図18は試料に張力を加えわずかに延伸を起こさせたときの表面張力を延伸しないものと比較したものである。延伸条件は、荷重を60 sec間与え、荷重を除くという方法で行なった。ぬれ張力試験はJIS規格に基づいて行なったもので、いずれも相となる2片を1対の試料とし、5対の試料について調べたものである。

h₁ 摩擦されていないポリプロピレン フィルムの ぬれ張力
h₂ 摩擦されてないポリエチレン フィルムの ぬれ張力
温度22℃ 湿度44%

図17 ポリエチレン フィルム、ポリプロピレン フィルムの ぬれ 張力変化と摩擦回数との関係

○：ポリエチレン △：ポリプロピレン ×：ポリ塩化ビニール
h₁ 張力を与えなかったポリプロピレンの表面ぬれ張力
h₂ 張力を与えなかったポリエチレンの表面ぬれ張力
h₃ 張力を与えなかったポリ塩化ビニールの表面ぬれ張力

図18 張力を与えられたフィルムの ぬれ張力 変化と張力との関係

コロナ放電による半減期を上記したものについて調べてみると、半減期も明らかに変化することが観察された。

摩擦、張力の作用にくらべると変化量は小さいが、温度上昇や浸水時間なども表面ぬれ張力およびコロナ照射後の電荷の半減期を変化させる。

6. 結 言

帯電防止加工の効果を評価する指標としては残留電荷がもっとも妥当である。しかし、残留電荷には、漏洩によるもの、再結合によるもの、および見掛けの再結合によるものの3種類があるので、抵抗測定または電荷の半減期測定のみでは残留電荷量を正しく測量することがむずかしい。それゆえ、静電汚損を使用して測定器の不備を補うことが現状では必要である。しかし、見掛けの再結合を促進する加工技術が発展するにつれて、静電汚損を生じさせるための人工煙の改良が必要と思われる。

なお、試料を評価するときの測定値は、試料の履歴に

よって違った大きさの測定値となるから、試料の前歴が評価の中に含まれてくることに留意して測定を実施することが必要である。

説明に前後した部分もあり、理解に苦しむ点多々あることと思うが、この拙文が帯電防止加工の発展にいささかなりとも資することができれば、筆者の望外の喜びである。

参考文献

- 1) H. Krupp; Conference Series No.11 Static electrification 1971, pegel, published by the institute of physics.
- 2) 鳥山四男; Dust figure of Surface discharge and its applications. published by Kinokuniya
- 3) 村崎, 松井, 水野; 電気学会誌, **90**, 2051 (1970)