繊維製品の帯電性評価法と 帯電による着火危険性

平 川 董

1. はじめに

合成繊維の使用頻度が高まるにつれて、繊維製品の帯電による着火、爆発などの障害は重大な問題となりつつある^{1,2)}。一方、絶縁物の帯電、放電特性に関する最近の研究により、帯電したプラスチック・フィルムや布からの放電によって爆発性混合気体が着火することも実証され³⁾、さらに綿などの天然繊維においても着火危険性のあることが改めて指摘されるに至っている⁴⁾。

このように、従来単に不快感の原因とだけ考えられていた繊維製品の静電気は、産業安全の面から再検討され、安全な帯電防止法が真剣に検討されている^{5~8)}。

帯電性の一般的な測定法についてはすでに多くの解説が著わされている^{9~18)}ので、本稿では主として繊維製品の帯電性評価に用いられる種々の実験手段と、それを用いて得られている実験結果を中心に述べることにする。

2. 電荷の発生・消失過程

静電気の発生機構についての詳細は他の総説^{19~26)}を参照していただくことにして、ここでは電荷の発生から消失までの全過程を簡単に記述するに留める。

二物体が接触すると一方から他方に電荷担体が移動して界面に電気二重層が形成される(接触過程、図1 a)。
このとき発生する正負両電荷の組み合わせの数を発生電荷量と呼ぶ。次いで、これら二物体を分離すると、気中放電によって発生した電荷の一部あるいは大部分が漏洩し(分離過程、図1 b)、残りの電荷、すなわち残留電荷のみが帯電として観測される。分離後、帯電した布に導体、特に接地導体が接近すると、この導体の先端曲率半径に応じた放電が起る(接近過程、図1 c)。一般に、「帯電電荷」とは、残留電荷を指すことが多いが、分離

図1 帯電・放電のモデル

過程においても接近過程と同様に大きな放電が起る可能性があることを考慮すれば、発生電荷量の測定も帯電性の評価にとって重要な量であることが明らかである。また、着火、電撃などの障害をもたらすのは気中放電であるから、分離、接近両過程における放電特性を解析し、帯電性との関係をしらべることは、これらの障害を防止する上で重要な役割を果たす。

3. 帯電性に関する測定法と測定例

3.1 試料の清浄・調湿

試料布および摩擦に使用する布は中性洗剤を用いて洗濯後、水洗を十分行ったのち試験に供する。耐洗濯性の試験を行う場合、洗濯5分、水洗15分の清浄を10ないし20回以上行うべきであろう。試料は乾燥後、測定湿度で24時間以上調湿する。

繊維製品の帯電性は一般に20~25% R.H.において最も大きいことが明らかにされており²⁷⁾、測定湿度は可能

*Evaluating Static Propensity and Ignition
Hazards in Textiles.*

TADASHI HIRAKAWA

Central Research Institute, TEIJIN Limited
帝人株式会社中央研究所(現 繊維加工研究所) 研究員

であればこの程度に保つべきであるが、35% R.H. 以下に保てば最大値に近い値を得ることができる。なお、ポリプロピレンのように、60% R.H. 付近に最大の帯電性を示す場合もあり²⁷⁾、未知の試料については湿度変化を測定して最大値を求めることが望ましい。

3.2 帯電方法

帯電機構の解明を目的とする場合には、要因を単純化するため摩擦因子をできるだけもち込まないような工夫がなされている。すなわち、接触・分離帯電装置¹⁶⁾、あるいは磁気ブラシ²⁸⁾などが用いられる。しかしこれらの方法によって後述の限界帯電量まで帯電させることは困難であり、特に繊維製品は凹凸が多く真の接触面積が小さいために接触のみによる帯電は小さい。したがって、実際の帯電状況を再現する意味と、よりシビアな条件で検討するという安全性の見地からも、可能な限り大きな帯電を与えることが望ましい。このためには、帯電序列の大きく異った布で強く摩擦することが必要である。図2(a)に摩擦帯電の方法を示す。

帯電列に関しては多くの研究者の報告があるが、これらは二、三の例外を除いてほぼ一致した結論となってい

表1 繊維の帯電列²⁹⁾

+
羊毛
ナイロン
ビスコース・レーヨン
綿
絹
ポリビニル・アルコール
ポリエステル
ポリアクリロニトリル
ポリ塩化ビニル
ポリエチレン
-

る。表1はMontgomeryによって求められた帯電列²⁹⁾である。著者の実験結果³⁰⁾によると、ポリビニル・アルコール、綿、ポリエステル、ポリアクリロニトリルの各織布は、ポリ塩化ビニルの編布を用いて正の限界帯電量まで帯電させることができ、ポリエステル、ポリアクリロニトリルの各織布は羊毛の編布を用いて負の限界帯電量まで帯電させることができる(図4参照)。

3.3 発生電荷量

発生電荷が電気二重層を形成している限りこの電荷を観測する手段がないので、発生電荷量を求めるためには分離過程における放電を極力防ぎつつ分離を行う。すなわち高真空条件での測定³¹⁾、あるいは金属の裏張りによって外部電荷を低下させる方法^{32~34)}などが試みられている。Deryaginsら³²⁾はこの方法によりニトロセルローズ/水銀の界面において最大 $2.3 \times 10^{-6} \text{C/cm}^2$ の電荷密度を得ている。

一方、著者³⁰⁾は摩擦により帯電した織布について発生電荷量を求める試みを行った。すなわち、図2(a)の方法に従って帯電させた試料布の上部を図2(b)に示すようにキャパシタを結合した金属板Bで覆い、金属板Bと試料布を両面接着テープで接着して試料布を金属板Bとともに引き上げた。このとき金属板Bに誘導される電荷量から発生電荷密度を求めると最高 $4.5 \times 10^{-6} \text{C/cm}$ の値が値られた(図4参照)。この場合には電気二重層は敷布を界して金属板Aとの間に形成しており、接触界面の電気二重層とは異なるためDeryaginsらの値よりかなり小さい。

3.4 帯電電荷量

分離後の帯電電荷量、すなわち残留電荷量は、通常帯電した物体をファラデー・ケージに投入することにより測定される(図3)。内箱が完全に密閉されていれば帯電体の形状、電荷分布がいかなるものであっても、内箱に誘導される電荷 Q' は帯電体の総電荷量 Q に一致する^{14,15)}。すなわち、外箱と内箱の間の静電容量を C 、外部結合容

図2 布の帯電性測定法

図3 ファラデー・ケージ法による電荷量測定

量を C' , 内箱の電位を V とすれば,

$$Q = (C + C')V$$

により帯電電荷量が求められる。電位計は入力抵抗の高いことが必要であり、通常振動容量型電位計 (VREM, 入力抵抗 $10^{10} \Omega$) が使用される。

ファラデー・ケージに試料を投入する際、外箱への放電などには十分注意する必要がある。(内箱への放電は誘導電荷に加算される形となるため誤差の原因とならない。) 開口部分からの電気力線の洩れによる誤差を少なくするため容器は深い方が望ましいが、帯電体が布、フィルムなどの薄葉物であればむしろこの帯電体を浮遊した金属板上に(静電力により)密着させて(図2d), 金属板に誘導される電荷量を測定の方が誤差が少い。後者の方法により求めた帯電電荷量と、3.3の方法(図2b)

により求めた発生電荷量の関係を図4⁸⁰⁾に示す。この図では、分離後の帯電電荷量が $1.2 \sim 1.8 \times 10^{-9} \text{C/cm}^2$ の限界帯電量で飽和することが明らかに示されている。この値は、平行電場を仮定して気中放電理論より求めた理論限界値 ($2.3 \times 10^{-9} \text{C/cm}^2$)⁸⁰⁾ の約 $2/3$ である。

3.5. 帯電電位

帯電電位の測定には通常回転セクター型、静止電極型 (VREMを結合)、集電式のいずれかが用いられる¹⁰⁾。

帯電電荷量が同一であっても、試料の周辺にある物体、特に接地導体の幾何学的配置によって電位は大きな影響をうける。したがって、再現性のよいデータを得るには電位測定の際、試料の対地容量を常に一定にする必要がある。最も簡易な方法は、絶縁物で支持した試料を可能な限り空間に浮遊させることである。また、静電場測定器のプローブへの放電を防ぐため、プローブを試料布から少くとも 10cm 離すか、あるいはプローブの尖端部分を絶縁被覆することが必要である。

回転セクター型、および静止電極型においては、測定系の等価回路は図5のように与えられ、測定電極に誘導される電荷 q_S と試料の帯電電荷 q_P との間には次式の関係が成り立つ¹⁷⁾。

$$q_P = q_S \left[1 + \frac{C_A(C_E + C_S)}{C_E \cdot C_S} \right]$$

C_S および C_A , したがって q_S は、試料の大きさ、プローブと試料の間の距離に依存するため、正しい電位を求めするには、試料と同一形状の導体を高圧電源に接続して校正を行うべきである(図6)。

測定温湿度: 22°C , $35\% \text{ R.H.}$

試料布: 1.ポリエステル/レーヨン, 65/35 2.ポリビニル・アルコール 3.ポリビニルアルコール/綿, 50/50

4.綿, 5.ポリエステル/綿, 65/35 6.ポリエステル 7.ポリアクリロニトリル

摩擦布: ○羊毛 ●綿 □ポリアクリロニトリル ■ポリ塩化ビニル

図4 布の発生電荷量と帯電電荷量⁸⁰⁾

図5 布の電位測定

図6 電位較正法
金属板は帯電試料と同一形状のもの

図7 帯電電位と帯電電荷密度の関係

図7は、種々の織布について、3.4の方法(図2d)により求めた帯電電荷量と、回転セクター型電位計を用いて測定した帯電電位の関係を求めたものである。1.2～

$1.8 \times 10^{-9} \text{C/cm}^2$ の限界帯電量に達した織布の帯電電位はいずれも50～70kVの値を示す。

以上述べたような電位、電荷量の限界値は、逆に帯電評価法のチェックにも利用できる。すなわち、帯電序列の大きく異った布で摩擦した試料布の電位および電荷量がこれらの限界値に達しないときは、試料の清浄、あるいは測定系に何らかの問題があると考えらるべきであろう。帯電防止処理を施した布を評価する場合にも、通常の布と同一条件で清浄、測定を行い比較検討すべきであろう。

なお、図4および図7より明らかなように、布の帯電電位、電荷量は試料の種類によって一義的に定まるものでなく、試料布と摩擦布の組み合わせによって定まるものである。したがって、低湿度で測定する限り、従来帯電性が低いと言われてきた綿も、他の繊維と同様に高い帯電電位を示す。

3.6 表面抵抗値および減衰特性

表面抵抗値は、帯電の減衰特性をあらわす重要な量である。表面固有抵抗値を R_s 、表面の分布静電容量を C_s とすれば、 t 秒後の帯電電位 Q_t は次式で表わされる。

$$Q_t = Q_0 \exp(-t/k R_s C_s)$$

ただし k は接地電極の形状などによって定まる定数である。

表面抵抗値の測定には振動容量型電位計あるいは超絶縁計が用いられる。電極は同心円、または平行板のいずれかの形状が用いられる³⁰⁾。

帯電電荷量、帯電電位などは摩擦布の種類などに大きく影響されるのに対し、表面抵抗値は試料の特性に由来するものであるため、帯電性の評価には最も基本的な用いられる量である。

摩擦布の種類など、帯電条件が同一であれば、表面抵抗値と帯電電圧の間には一定の関係があり³⁷⁾、限界帯電に至るまでは一次的な関係がある(図8³⁾)。したがって、ブレンドあるいは表面加工によって繊維製品全体の表面抵抗値を低下させる従来の帯電防止法の評価には有効な測定手段である。しかしながら、最近次第に一般化してきた導電性繊維による帯電防止法のように、繊維製品のごく一部に導電材料を混入し、気中放電を利用する方法においては、上に述べた関係が成り立たないことに注意を要する。

帯電電位の減衰特性を直接求めるには、帯電した試料布の一端あるいは両端を、接地した金属電極に固着して電位の減衰を記録する³⁸⁾(図9)。図10はこの方法により求めた減衰曲線の一例である。

なお、摩擦を機械的に行わせ、あるいはイオン印加により帯電特性を測定する方法もあるが、これらの方法は求める物理量の意味が明確でなく、実際の帯電性との相

材質・汚れ程度の異なる種々の布を用いて得られた値
摩擦布：ポリ塩化ビニル

図8 表面固有抵抗と帯電電位の関係⁵⁾

図9 電位減衰特性の測定法

関に乏しい場合が多い³⁹⁾。

4. 放電，着火に関する実験方法と実験例

4.1 放電に関する実験方法

帯電した布に接地体が接近する場合（接近過程）の放電特性は図2 (e) のような回路で測定される。

パルス放電電荷量を測定する場合は，観測および解析を容易にするため，測定回路の時定数， $\tau = RC$ を故意に大きくする。この場合，布から金属球に放電した電荷は，いったんキャパシタCに充電させるため，観測されるパルスの時定数と測定回路の時定数はほぼ一致する。

図11はRCを大きくとった場合の測定例である。

パルス放電電荷量 p は，観測されたパルス電流を時間積分することにより求められる。すなわち

$$p = \int \frac{V}{R} dt$$

摩擦布：ポリ塩化ビニル

図10 電位減衰特性の測定例

帯電電圧：-50 kV
球径：15 mm
 $R = 5 \text{ k}\Omega$, $C = 2,430 \text{ pF}$
横軸：10 $\mu\text{sec/div}$.
縦軸：5 V/div.

図11 帯電した布から金属球への放電

ここで V は時間 t における電圧， R は測定抵抗である。

放電現象は100 nsec程度のきわめて高周波の現象であるから，放電波形を観測する場合には，測定系を完全に遮蔽し，終端した同軸ケーブルで波形を伝送する必要がある。（詳細はパルス測定技術の文献を参照されたい。）

帯電電圧: +50 kV
線径: 190 μm
 $R = 50\Omega$, $C = 18\text{ pF}$
横軸: 50 nsec/div.
縦軸: 5 mV/div.

図12 帯電した布から金属線への放電

図13 分離過程における放電特性解析の試み

この場合には、観測されたパルスの時間幅が測定回路の時定数よりはるかに大きいことを確認しなければならない。図12は放電波形を観測した例である。波形に振動成分を含む場合には、遮蔽あるいは整合の方法に問題のある場合が多い。

なお、分離過程の放電特性を、接近過程と同様の方法で解析することは不可能である。たとえば図13のような回路で測定しても、現象のごく一部しか把握することはできない³⁰⁾。現在のところ、分離過程の正確な測定手段は見出されていない。

4.2 放電に関する実験例

帯電した絶縁物の放電については、次のことが明らかにされている。

帯電したプラスチック・フィルムに金属球を接近させると、肉眼で放電光を観測すると、放電光は球からフィルムに向かって広がるが、フィルムに至らず途中で消失する。この放電を火花放電と対比させてブラシ・コロナと呼ぶ⁴⁰⁾。

帯電したプラスチック・フィルムおよび布から金属球

図14 接近過程における放電のパルス電荷量^{8,41)}

への放電におけるパルス放電電荷量は、図14^{8,41)}に示すように、球径の増大とともに大きくなる。正コロナにおいては、パルスを伴わないグロー放電も同時に発生し、特に球径が小さいときパルスは完全に消失する³⁰⁾。

絶縁物の放電によって移動する電荷は、帯電電荷のごく一部分である。たとえば20mm ϕ の球が接近した場合、約200 cm²の範囲から帯電した電荷の一部が消失する⁴²⁾。

4.3 着火に関する実験方法

プラスチック・フィルム、布などの絶縁物（以下フィルムで代表）の放電による着火をしらべる装置の一例⁹⁾を図15に示す。フィルムは駆動ローラーにより定速度

図15 着火実験装置⁹⁾

で駆動される。コロナ帯電電極をローラーに近接させ、ローラーから分離したフィルムを限界帯電量まで帯電させる。爆発室は径 25 cm のアクリル円筒であり、上部を帯電したフィルムで覆う。爆発室には、混合室で混合されたガスと空気が定常的に導入され、ファンで拡散される。混合ガスは一部ガス濃度計に導かれ、爆発室内部のガス濃度が測定される。金属球を定速度でフィルムに接近させると、接近過程において放電が起り、条件が整っていれば着火、爆発する。放電の起りは始める距離は球径により異なるが、20 mm φ の球の場合、約 10 cm である。したがって、爆発室の高さは少なくとも 20 cm 以上とする必要がある。

なお、この実験は種々の危険を伴うものであるから、実験室内の換気を十分施し、実験はすべて遠隔操作とすべきである。

4.4 着火に関する実験例

帯電した絶縁物に接地した導体が接近するとき起る放電によって、爆発性混合気体が着火、爆発することはすでに確められており⁹⁾、次のようなことが明らかにされている。

負極性に帯電したプラスチック・フィルムに 19 mm φ 以上の金属球が接近すると、プロパン-空気混合気体が着火し、また 3 mm 以上の金属球が接近すると水素-空気混合気体が着火する⁹⁾ (表 2)。正帯電したフィルムからの放電は、負帯電の場合より着火しにくい⁴⁰⁾。帯電した領域が 20 cm² 以下の場合には水素-空気混合気体を着火せず、75 cm² 以下の場合にはヘキサン-空気混合気体を着火しない^{40, 43)}。

このような実験結果は、実験者、フィルムの種類などが異なるにもかかわらずほぼ一致した結論となっており、上記の結果が普遍的な事実であることを示している。放電特性は電界強度分布のみによって定まるものであって、帯電電位と放電電極の幾何学的条件が同一であれば放電特性は一致するはずである。この意味で、異った実験者の実験結果が一致することは驚くに当たらないが、これらの実験に共通なことはいずれも限界帯電したフィルムを用いていることであり、3.2 で述べた帯電方法の重要性が改めて認識される。

表 2 帯電したプラスチック・フィルムから金属球への放電による着火条件²⁵⁾
(フィルム帯電電位: -50 kV)

混合気体	最小着火球径 (mm)	最小着火球径における放電電荷量 (空気中) (C)	金属電極間の放電における最小着火エネルギー (mJ)
プロパン-空気	19	1.6×10^{-7}	0.305
水素-空気	3	4.7×10^{-9}	0.02

最後に、放電エネルギーについて述べる。金属電極間で起る火花放電の放電エネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

(ここで C は高圧側電極の静電容量、 V は放電電圧) を用いて容易に求めることができ、各種爆発性混合気体の最小着火エネルギーがすでに求められている⁴¹⁾ が、絶縁物の放電においては、1 回のパルス放電によって絶縁物の全面が零電位まで降下することはないので、放電エネルギーの計算は現在のところ不可能である。しかしエネルギーに代る指標としてパルス放電電荷量 (図 14) を採用し、着火との関係が求められている⁹⁾。これによると、水素の最小着火放電電荷量は $4.7 \times 10^{-9} C$ であり、プロパンは $1.6 \times 10^{-7} C$ である (表 2)。(いずれも空気中での実験結果で対比させている。実際にはガス混合気体中ではこの値よりやや大きくなる⁴¹⁾。) したがって、 $5 \times 10^{-9} C$ 以上の放電パルスが観測された場合、何らかの爆発性混合気体が着火することは十分考えられる。

以上の結果はすべてフィルムに対する結果であるが、布の放電特性がフィルムとほぼ同様である (図 14) ことを考慮すれば、布の帯電も同様に危険を伴うことは十分推察される。

なお、分離過程における着火について検討した文献は今のところ見当たらない。

5. おわりに

以上、布の帯電、放電についての実験方法と、これまでに得られている実験結果について述べた。これらの実験結果によると、いかなる布も帯電防止を施さない限り条件が整えば大きな帯電性を示し、爆発性混合気体中では着火危険性のあることが明らかである。このことは、綿のような天然繊維においても例外ではない。したがって帯電障害を除去するには何らかの方法によって帯電防止を行うことが不可欠となる。そしてこれらの帯電防止方法を正しく評価するためには、試料の準備や測定条件に細心の注意を払うことが必要である。

なお、静電気の測定法に関しては統一された規格も存在せず、本文中には著者の私見が含まれている部分もあると思うが、この点に関しご意見、ご批判を賜りたい次第である。また、衣服、カーペットなど二次製品の帯電性評価については紙数の都合上触れることができなかったもので別稿⁴²⁾を参照していただきたい。

文 献

- 1) 田島泰幸, 児玉 勉, 上月三郎: 産業安全研究所技術資料, RIISTN-70-3 (1970)

- 2) たとえば毎日新聞, 昭和48年3月6日付
- 3) E. Heidelberg, G. Schon: *Die Berufsgenossenschaft Betriebssicherheit*, p.265(1960)
- 4) P. S. H. Henry: *Proc. 3rd Conf. on Static Electrification, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 11*, p. 212(1971)
- 5) 田島泰幸: 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-71-1 (1971)
- 6) 吉田浩二: 安全工学, **11**, 148(1972)
- 7) 那須野昭文, 別所義雄: 繊維機械学誌, **26**, P 49(1973)
- 8) 田島泰幸: 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-72-1 (1972)
- 9) 高分子学会編: 静電気ハンドブック (地人書館, 1967) p.91
- 10) 村崎憲男: 静電気応用装置 (日刊工業新聞社, 1966) p. 47
- 11) 橋高重義 岸 清: 安全工学, **4**, 314(1965)
- 12) 佐々木寛治: 繊維と工業, **3**, 749(1970)
- 13) 小玉操一, 五十嵐良一: 繊維工学, **25**, 587(1972)
- 14) 田島泰幸: 安全工学, **11**, 293(1972)
- 15) 高分子学会編: 高分子測定法 (上) (培風館, 1973) p.511
- 16) H. Krämer, D. Meßner: *Kunststoffe*, **58**, 673(1968)
- 17) J. Mecheels, E. Kachel: *Melliand Textilber.*, **50**, 1195(1969)
- 18) M. Alanzet, Y. Fleurquin, M. Mourier: *Ind. Textile*, [1990], 325(1970)
- 19) 文献9), p. 45
- 20) 高分子学会, 高分子と吸湿委員会編: 材料と水分ハンドブック (共立出版, 1968), p.126
- 21) 上田 実, 増田閃一, 丸茂秀雄, 村崎憲雄, 渡辺 彰: 静電気の基礎 (朝倉書店, 1971), p.78
- 22) 水島三知: 表面, **7**, 55(1969)
- 23) 橋高重義, 村田雄司: 表面, **9**, 597(1971)
- 24) W. R. Harper: *Proc. 2nd Conf. on Static Electrification, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 4*, p.3(1967)
- 25) H. Krupp: 文献4) p.1
- 26) W. R. Harper: *Contact and Frictional Electrification* (Oxford University Press, 1967)
- 27) E. H. Hartgrove: *Mod. Textiles* Dec. 1970, p.41
- 28) N. Murasaki, N. Kono, M. Matsui, H. Mada: 文献4) p. 44
- 29) 文献26) p. 352
- 30) 平川 董: 第18回静電気研究発表会予稿, p.57(1973)
- 31) J. A. Medley: *Brit. J. Appl. Phys. Suppl.*, **2**, 28(1953)
- 32) B. V. Deryagin, I. N. Alenikova: 表面, **6**, 54(1968) (翻訳)
- 33) E. G. Johnson: *J. Colloid Interface Sci.*, **32**, 377 (1970)
- 34) H. P. Hood: *J. Colloid Interface Sci.*, **32**, 444(1970)
- 35) 文献26) p.14
- 36) E. Kohlhepp, M. Rieber: *Chemiefasern*, **21**, 791 (1971)
- 37) E. M. Ramer, H. R. Richards: *Textile Res. J.*, **38**, 28 (1968)
- 38) V. E. Shashoua: *J. Polymer Sci.*, **33**, 65(1958)
- 39) P. S. H. Henry: 文献4) p.195
- 40) E. Heiderberg: *IEE Conf. Pub.*, **74**, 68(1971)
- 41) 田島泰幸, 平川 董: 未発表
- 42) N. Gibson, F. C. Lloyd: *Brit. J. Appl. Phys.*, **16**, 1619 (1965)
- 43) E. Heidelberg: 文献24) p.147
- 44) 文献9) p.254
- 45) 藤原 繁, 平川 董: 繊維学誌, **29-8**, P-562(1973)

(昭和48年6月22日受理)