繊維および繊維製品の帯電測定

齊 藤 洋*

1. は し が き

好むと好まざるとにかかわらず、衣および住における合繊のウェイトは大きくなってきた。時を同じくして生産面では工程の高速化、自動化が行なわれ、静電気面での管理が必要となってきた。また、消費面では薄地や、バルキ仕上げが好まれ、大気汚染や、冬季集中暖房の一般化の影響もあって、静電気対策は商品研究の一分科となりつつある。

管理あるいは対策は測定から始まるのであるが、方法（測定器・測定位置・測定対象）の吟味および測定値の解釈も欠くことはできない。

本文では首題に関連して、これまであまり触れられていなかった実験技術を含めて述べたいと思う。

2. 基 礎 測 定

この部分は、村崎教授などの稿と重複するところもあるかと考えられるが、繊維を相手の特殊な事情もあるので1章を設けた。

2-1. 人体による帯電検出

現場で帯電をはだで感ずることがある。これは静電力によって体毛が起立することに基く。この毛が細かく振動するときは、体毛からコロナ放電が起きているのである。セータを脱ぐとき髪型の崩れるのは静電力もあり、パチパチと音のするのは放電音である。現場用電位計をうっかり近づけると scale out するような大きな帯電が認められる。しかし音のわりにたいしたことがないのは、帯電したセータは耳と放電し、音を特に大きく感ずるのである。手指、髪や耳は人体の先端にあるため現場において帯電体からの静電作用を受けやすい。

2-2. 簡単な帯電測定法

振動容量型電位計はともかく、後述の現場用計器にしても数万円はするので各現場ごとに備えるというわけにはいかない。そのような要求にこたえられる測定法を紹介しよう。

第1図 ネオン検電棒

毛羽法：約 30cm のひご竹（模型材料として売っている）の一端にごく細巻縮スフ 2~3cm を接着する。ひご竹を持ってスフを帯電体に近づけるとスフは帯電方向に引張られる。引張りの感じから帯電位置と大きさを判定する。しかし風（帯電体の移動などによる空気流を含む）があるとむしろ風向計になってしまう。経費は約 10 円。

ネオンランプ法：これは著者が高電圧実験時に安全確認のため使用したものの変形である。フューズ型のネオンランプは内径 6mm、長さ 30cm のベーク管先端に挿入され、ベーク管に内蔵する 20MΩ×10 の高抵抗を通じて接地用金具につながれている。これを操作して帯電体に近づけるとランプは一瞬発光する。整経、乾燥などのように連続的な強い電荷発生があると、発光も連続的となる。毛羽法と同様に帯電の位置と大きさを判定することができる。この方法はコロナ放電式除電器の有効範囲を測定したりフロック加工の電極位置を調整する場合にも有効であろう。経費は約 300 円。

タバコ灰法：紙巻きタバコの灰を軽く崩し、金属板に落としてばらまく。この板を帯電体に近づけると灰は吸い上げられる。いったん上がった灰は帯電体から電荷を受け取って反発され、板と帯電体との間を忙しく往復する。タバコ灰の代わりにフロックを使用してもよい。これはフロック加工の up-method と原理的に同じである。吸い上げの距離は板上の電界に比例し、粉の種類によって違ってくる。しかし、この判定によって試料は汚染されるので最終工程では試みるべきではない。経費は喫煙者負担として、ただ。

* Hiroshi Saito 大阪教育大学助教授・理博
How to Measure Static Electrification on Textiles
and Garments

第2図 現場用電位計(著者研究室製), 特長は次の通り。 $\pm 25\mu\text{A}$ の指示は $\pm 2.5\text{V}$ の電極電位に対応する。分圧筒を被せると $\pm 10\text{kV}$ までの端子電圧がはかれる。オシロおよびレコーダに接続できる。人体電位の測定に適している

2-3. 現場用電位計の条件

われわれの感覚は、よほどの帯電でなければ感じないし、主観的になってしまう。しかし現場では振動容量型電位計の高感度が測定上かえってじゃまになることもある。また、現場での帯電はいろいろの条件のため変動が大きいので精度は問題でないことが多い。それよりも portable でがんじょうで fool-proof であることがよく、特に、繊維工業では minimize したものが必要かと思う。市販の現場用電位計は 5886 なる sub-miniature 管を使っているが、機構的な難点のために、また、商品としての体裁を考慮してかごぞんじの通りの大きさである。第2図は体裁よくまとめた計器の1例(著者研究室製)であるが、同様な性能のものがピースの空かんに十分入る。しかしどれほど小さくても接地(機械取付あるいは測定者保持)して使用すると電界を乱して異なった結果になるおそれがあるので、EFT、(電界効果型トランジスタ)や IC(集積回路)を使った浮遊型(接地しない)微小電界計の開発が望まれる。電位または電界の真値や方向がわかるようになれば、繊維工業における静電気対策はおおいに進歩するであろう。

2-4. 現場用電位計測定値の意味

電圧計で電源のターミナル電圧をはかると、電源内部抵抗、計器内部抵抗(倍率器を含む)および接触抵抗で定まる電流が計器に流れてある電圧値を指示する。この値は測定ターミナルの電圧と等しく、また、起電力にこれらの抵抗値で定まる分圧比をかけたものとなる。電位計の内部抵抗は非常に高くしてあるので、測定電極と電源とが接触していなくても、容量分圧あるいは容量分圧を加味した抵抗分圧によって、電極にある電位が誘導される。分圧比は幾何学的(大きさ、距離、方向)や電氣的(抵抗率、電位)などの条件によって定まる。現場用電位計はこれを利用して電源の電位によって目盛りづ

第3図 較正時と仕掛品帯電測定時との電荷分布

け(較正)を行なっている。すなわち、現場用電位計では電圧計の倍率器に相当するものが、測定電極前面の空間にあって、較正時と同じ条件で測定することを前提としている。条件から一つでもはずれた測定は対象の電荷分布が違うので指示電位は正しくなくなる。たとえば、距離を近づけた時、被測定物がその大きさの平板導体でないとき、また、その近くに第3の物体があるときなどである。このことは較正や測定における電荷分布を考えてみるとよい。第3図において測定電極が近づくと、較正電極上に電源から電荷が補充されつつ中央に集まり、測定電極に大きな電荷が誘導される。絶縁性の仕掛品では、電荷が均一に分布して周辺集中(edge-effect)がない。測定電極を近づけても移動しやすい電荷がわずかに(裏から表に)移動するだけで、電荷分布はほとんど変わらない。このように両者は全く異質である。しかし、同種の測定が同一の条件で行なわれる限り、指示と真値とは一定の関係にあり、十分管理の手段となりうる。異種の測定についても指示は測定電極上の電界に比例しているから、任意目盛りの電界と考えてよく、真の電位でないことにこだわってはいけないうる。この場合、測定対象ごとに経験的事実をふまえて指示との関連をつかまねばならない。

2-5. 現場用電位計の種類

直流増幅方式は容量分圧による電極電位を 5886 のような電位計管を使って増幅したものである。この回路は簡単になるが、グリッド電流や漏洩抵抗のため電極電位はゆっくり変わる。また、正の過大信号が入ると、グリッドへの電子流がふえて入力を除いたとき、負のグリッドバイアスが残ることがある。交流電源から大きな誘導を受けると、半周期ごとにバイアスが生長する。この電極を接地したり、電極を入力からシールドしたりする zero-check をかなりひんぱんに行なう必要がある。RI 式はイオン化した気柱の導電性により帯電体の電位を抵抗分圧する形式である。比較的内部抵抗が低く安定であるが、わずかながら除電作用があり、帯電量の小さいものには使えない。空気流の強いところでも分圧比が変わって使えない。

回転セクタ方式はセクタを回転させて電極をシールドすることにより、zero-check を自動的に高速で行なっているものといえる。この方式は zero 点に関しては無調整となる。電極電位は交流で、これをセクタ回転と同

期した整流回路を使用して直流にかえす。さらに、直流出力で、測定電極に負帰還すると感度についても無調整となり、使いやすいが高級な現場用測定器である。しかし、同期モーターによってセクタを回転させているものでは電源周波数のノイズを拾って zero-shift を生じやすい。

3. 応 用 測 定

3-1. 繊維と現場測定

合成繊維の紡績工程では帯電した繊維が互に反発し手指や機械部品にまつわりつくことが原因で能率が落ち、品質が悪くなる。製織中での fog-marking は帯電による汚れの付着と考えられている⁹⁾。

これらの静電障害は静電力=電界×電荷が繊維の張力と弾性力あるいはほりに与えられる自然力（風力と重力）に対して無視できなくなることから発生する。

2-4. に述べたとおり、電位計の指示を電界とみなし、測定対象ごとに経験的事実（障害の程度）と指示との関係をつかまねばならない。障害は単に形容詞的な表現でなく、具体的に適当な数値化が行なわれ、測定場所が適正ならば両者の間により相関が得られると思う。ここで適正な場所とは、いわゆる（signal/noise）の大きな場所のことである。仕掛品について測定する場合、1. コロナ放電式除電器からのケーブルと除電バー、2. 動力配線、3. 帯電した紡機部品、4. 帯電した人体からの誘導、5. 強力な RI 線源からのイオン流入、6. 相対位置の不規則変化などが noise を大きくする。一方、接地した機械部品は signal を小さくするが noise をも押える。これは signal または noise 源としての電荷と極性が反対で接地導体上に生じた別の電荷（影像電荷）とが拘束し合っ、外部への影響を少なくするためであって接地導体の静電シールド作用である。等価回路上では電荷の電位が浮遊容量の増加によって下るのに対応している。この作用は電荷から導体をみた立体角の大きいほど（距離が小さく面積が広いほど）有効である。signal に対して作用が小さく、noise に対して作用が大きくなるようにシールドを行なわねばならない。流動する仕掛品の電位変化は電気容量の変化や電荷の分布を考えたらうで

解析しなければならない。

図のような装置の各部で測定を行なうとき、A では鉄ローラにより、B では起毛針布によりそれぞれシールドされて signal は小さい。また、D では除電バーや巻取りビーム（ここに電荷が集積されるおそれがある）からの noise が大きい。A 点は A' 点に移す必要がある。また B 点は C 点で測れるとすれば不必要である。摩擦点から離れるとシールド効果は小さく電位は高くなるに従って気中放電も起りやすく¹⁷⁾、以後電位の下ることもある。電位最大があるかどうかは仕掛品の導電性や速度にも関係するが、あるとすればその位置で測るのが s/n を最大にすることになる。D では除電バー（除電は前述の電位最大の位置で行なうとよい）などからシールドして noise を小さくする。非対称摩擦を受ける絶縁物（ここではゴムローラ）や高電位導体からの影響はシールドの背部にまで回りこむことがある。しかし、シールドを除電バーに近接させすぎると、除電効率を下げたり、かえって“加電”することもあるから注意せねばならぬ。

3-2. 仕掛品の電荷

一般に現場測定器の指示は任意目盛りの電界であると前に述べた。これを電位および電荷と関連せしめる便法を次に述べる。仕掛品上に金属板を接続する。これに与えた電位と指示との関係を plot する。次に金属板の対地電気容量を直読容量計で測定する。インピーダンスブリッジの測定ターミナルは接地できないので不適当である。電荷は電位と容量の積であるから、仕掛品の電荷が算出できる。この方法は金属板を用いるための誤差が入るので、次の Faraday-cylinder 法で check しておくべきである。

Faraday-cylinder とは Faraday-cage（衣料の項参照）の変形である。繊維関係で糸や布のように流動する仕掛品の一部を金属板 A で囲み、その外側を別の金属板 B で囲む。B を接地し A を電位計に接続する。こうすれば仕掛品上の電荷（代数和）はすべて A に作用して仕掛品の位置に無関係に A の電位を生じ、電荷 cv あるいは電荷密度 cv/bl がわかる。ここに c は電位計を含めた A の電気容量、 v は試料を挿入したときの電位（現場用電位計の指示でなく、電極電位）である。zero 合わせは試料を挿入しないとき A を接地して行なう。挿入したまま接地してしまうと、その後の電荷変動分のみが出てくる。A は B によってシールドされるから、近くに noise 源があっても比較的安心して使える。しかし連続的な使用では、仕掛品からの気中放電によって、徐々に zero-shift が起こる。仕掛品をはずしてときどき check しなければならぬが、cage を筒状にしていたのでは困る。仕掛品と接触して zero-shift すればまた zero-check のやりなおしになる。それで図のように仕掛品の幅方向に開いたものとする（cylinder ではなく channel だ！）。

第4図 帯電測定位置の選定

第5図 Faraday cylinder (奥行: A は $b+w$, B は $b+2w$)

第6図 プーリまたはガイドの帯電測定

第7図 電位指示の大きい場所

毛羽や結び目の長さおよび仕掛品の動揺を見込んで、Aのすきま w を設計すべきである。寸法は第5図のようにすれば、電荷の洩れはあまりない。 l を短くガイドを付けると感度は下がるが電荷分布もわかる。寸法の詳しい検討結果は橘高²⁾ などによって述べられている。仕掛品の経路においた後述の Faraday-cage の中で、第6図のように、pulley で仕掛品を折り返している論文を見たことがある。これは、仕掛品と pulley との摩擦帯電を測定しているのである。

3-3. 着衣および脱衣の帯電

着用中に衣料の帯電を電位計で測定するとワイシャツのカフス、ズボンやスカートのすそなどで大きな指示になる場所がある。これらは人体や肌着との摩擦があった後現在先端にある場所である。発生した電荷は密着状態

第8図 脱衣による人体電位測定法

にある限り、人体のシールド作用によって外部に影響を現わさない（人体に対しては静電力のためまといつたまま摩擦して電荷を発生する）。しかし人体がこれを振り払うことによって帯電部分は外部に影響をもつに至る。衣料上の電荷が漏洩しないとすれば電位は距離に比例してふえ、ほこりや毛羽に対する静電力も大きくなる。測定の条件が複雑だから、測定値をそのまま採用できないが、衣料の静電汚れやビル研究（ビルは静電気による毛羽立ちが原因との説がある）のために現場用電位計は有効な手段であろう。人体が電位計の接地側と絶縁されていると、人体電位も重なって指示される。

脱衣の際の著しい帯電は特に薄物の場合脱衣作業が困難となり商品価値に響く。この帯電は未処理のテビロンシャツで $3 \times 10^4 \text{ pC}$ に達する³⁾。帯電により皮膚炎などの生理障害を生じるとの報告もある⁴⁾。人体が絶縁（合成ゴム底靴やスリッパを着用）状態にあると、脱衣によって人体の電位が上り、その直後にロッカーやドアにふれて電撃を受けることがある。人体の電位は衣料のそれと逆極性であるが、両者の電荷の和は必ずしも0にならない⁵⁾。衣料の電荷は人体に対すると同時に接地に対しても気中放電で失われるからである。現場用電位計をつないだオシロによって、人体電位は脱衣開始とともに上昇していくが、突然1回、2回と急降下するのが見られる。これは衣料と人体との間に放電が起こったことを意味する。接地との放電は接地から絶縁した金網製の大きなかご (Faraday-cage) の中で脱衣を行なわせると観察できるはずである。

3-4. Faraday-cage (付 絶縁物の使い方)

Faraday-cage は電位計と併用して電荷を求める2重容器である。衣料の電荷測定のために、著者の研究室では大小のバケツを組合せて使用している。小バケツは大バケツの中に円周方向の3カ所で絶縁して支持されている。大バケツに円孔をあけ、その孔に向け電位計を取付け、小バケツの電位を測定する。通常大バケツを接地して使用する。絶縁物の使い方を図に示す。テフロン板 (5 mm 厚, 1.5 cm 幅) の上下にL金具を①, ②で止め、これを小バケツの外側に③で固定する。最後に、外バケ

第9図 F. C. の支持法とコンデンサ付加

第10図 F. C. の校正と帯電測定

ツに取り付ける。テフロンはすぐれた絶縁物であるが摩擦係数が小さく、ねじがゆるみやすいので、必ずスプリングワッシャーを入れる。また、L金具を上下に置くことは、機械力を受けてもすべりが少ないように、絶縁距離が長くなるように工夫されたものである。もしずべると摩擦電荷を発生し、悪くすると金具がショートすることもあるからである。

電位計前面の幾何学的条件は校正時と同じでないから新たに校正を行なわねばならない。今既知の電位差（積層乾電池を利用してよい） v_0 を内外のパケツに与え v_1 を得たとする。この時、接地した外側に電源の一端をあらかじめ接続し、他端に接続したリード線を内パケツにふれすぐ離す。ラジオ部品のスイッチは役に立たない。読み v_1 が漸減するのは測定系の漏洩のためである。時定数が1分以上であれば測定にさしかえない。次に、内外のパケツをいったん短絡した後開放しておく。これに v_0 で充電した標準容量 c_0 （既知）をふれすぐ離して、 v_2 を得たとする。 c_0 は $100 \sim 500 \text{ pF}$ 。ポリスチレン（スチコン）、ポリエチレン（ポリコン）、またはポリエステル（エスコン）を誘電体とするものがよ

い^{*1}。マイカ、ペーパーはだめである。衣料をケージに投入して読み、 v を得たとすれば、電位は $v \times (v_0/v_1)$ 。測定系の容量は $c=c_0(v_0-v_2)/v_2$ だから電気量は $q=c'v$ 、ここに c' は $c'=c_0v_0(v_0-v_2)/v_1v_2$ なる計器定数である。測定を終わったら小パケツを接地し（外パケツに板バネ製の接地スイッチを取り付けておくといよい）衣料を取り出す。以下、電位計の zero-check, 接地 off, 測定のサイクルとなる。この結合法によるとプローブの挿入程度によって感度を変えることができる。測定電極が小パケツに接触すると、感度はよくなりすぎるかもしれない。校正用と同種のコンデンサーをL金具に接続すれば感度を下げ、時定数を伸ばす効果がある。このほかに、特殊なシールド線（同軸ケーブル 3C-2V）を使用し、電位計と接続する方法もあるが、いろいろの点でよろしくない。小パケツをよくシールドしておかないと、開口側に向っている試料上の電荷が小パケツの電位に関与しにくいばかりでなく、外部からの静電誘導を生じて誤差をもたらす。しかしシールドをよくすると、試料を投入しにくくなるので妥協しなければならない。大パケツの周辺を約 $D/10$ （ D は直径）小パケツからせり出しておき、試料面が小パケツの $2/3$ 以下に沈むならば誤差は小さい。小パケツをシールドする目的で大パケツの開口を狭ばめると、投入せんとする試料がシールドと接触して電荷の変化を生じうる。この目的のためには大パケツを高さ方向に伸ばすのがよい。

3-5. 繊維の帯電と安全管理

繊維製品の工程は最近非常に speed-up されている。たとえば精紡のスピンドル回転数は $15,000 \text{ rpm}$ で糸速は 40 m/s 、経メリヤスの編立は $1,000$ コース/分である。精練、染色後の乾燥や樹脂加工工程の速度は精紡ほど上らないが、加工量（mass velocity）や摩擦力はずっと大きくなり、水分量も少ない。これら仕上工程は、帯電増加のための条件をすべてそなえ、準備や製織とは次元の異なる帯電障害があっても不思議ではない。これらの工程では仕掛品の張力が大きいので整経や精紡での静電力に基く問題は少ない。また、仕掛品が高速度であるため、製織における静電汚れの問題もない。ここでは人体への電撃の問題が持ち上がる。人体は仕掛品と接触し、直接摩擦帯電を生じ、あるいは近接するだけでも、仕掛品からの気中放電によって高電位になりうる。これを防ぐには絶縁性の高純度ゴム靴を避けて、carbon 量の多い安全靴を着用することである。安全靴は油脂にも比較的強いといわれ、一石二鳥である。

仕上工程の製品は揺動装置を経て容器（竹かご）に振り落とされるが、ここでは無張力だから静電反発力で

^{*1} 静電気実験用のコンデンサを取り扱うときの注意、①、リード線をピンセットで持つこと、②、水、アルコール、ベンゾールなど液体溶媒やその蒸気に接触させぬこと、③、ハンダ付けには熱が本体に伝わぬように保持し、また絶対ペーストを用いないこと。

第 11 図 電撃の等価回路

状の重なりがかさ高になり、容器から通路にこぼれ落ちることがある。揺動のために除電器の効率は低くなるが、必ず設置して適正に（表裏の分極がない）除電すべきである。製品は巻取られることもあるが、帯電しているとかさ高で形が崩れやすいばかりでなく、放置中に芯が高電位となり危険である。芯は巻取中、軸受によって接地されているが、これからはずすとロールの外周は接地、芯は開放の状態になり、芯の電位を徐々に高めていくことになる。放置中、芯を接地しておくことと安全であるが、少なくともロールの移動（芯を持って）直前に接地するのがよい。製紙工場の紙ロールについて木脇⁸⁾は調査結果を出している。

人体の電撃について、いろいろの調査結果があるが、静電気との関連において、定量的に行なったものは著者⁷⁾およびその後の木田⁸⁾らによるもの以外にない。静電気による電撃は一過性であって、直接人体への危険はないが、それが誘因となって機械に巻込まれたり、高所から転落するなどの二次的な災害になりうるとはよく話されることである。電撃は人体に入出入する電流と時間とに関

第 12 図 往復動摩擦装置¹¹⁾

係する。すなわち、人体（仕掛品から電荷を受けとった場合）や芯（放置中の原布）の電位が高いと電流の初期値が大きくなるが、それだけではなく両者（高電位人体と機械やドア、高電位芯と人体）の電気的特性を通じて放電の時定数も関係する。対象の過渡インピーダンスが小さいと、初期値は大きくなるが時定数は短くなる。これらの事情は第 11 図から汲んでいただきたい。しかし、同種の電撃問題では、両者の電気的特性が同じであるから現場用電位計によって安全管理を行なうことができる。

4. 帯電試験装置

衣料の着用テストでは大量の試料と労力が必要であるし、現場測定では測定条件の吟味が重要である。いずれにしても細かい点にまで方法や条件を統一しないと、特に摩擦帯電の測定では測定値の再現性が失われやすい。

試験装置の philosophy は測定原理の簡単なこと、小さい試料ですみ、expert を必要とせず、短時間で実用試験、または現場測定と対応のよいデータを得ることである。

第 13 図 摩擦帯電試験装置（A：試料，B：摩擦子，M：測定器）

4-1. 摩擦帯電測定

くり返し摩擦を与え、これによる帯電を測定するものに、Hayek⁹⁾ の rotary static tester (京大化研式として興亜商会および static machine として竹内電気が商品化) 著者の装置 2 種(ローラ送り出し¹⁰⁾、往復動¹¹⁾)がある。第 12 図は往復動式(大栄科学製)の要部を示したもので、摩擦条件、測定条件の広い任意性が特長である。また、制御されたふんい気中で主として単繊維あるいは、スライバについて測定を行なう Montgomery 一派^{12),13)}、や佐々木¹⁴⁾の装置がある。Sereda-Feldman¹⁵⁾は装置といえぬような装置(フエロタイプをかける要領で布を摩擦し、絶縁トングでこれを挟んで Faraday-cage に投入)で、R. H. による変化(帯電量は 65 % R. H. で P・P、ナイロン、木綿、羊毛の順であるが、20%R. H. では、ナイロン、木綿、羊毛、P・P の順)を求めている。Atlas 社¹⁶⁾は偏心カムを利用して試料に往復動を与え、摩擦子の電位を静電電圧計で、調べる装置を開発した。各種装置の機構を第 13 図に示す。

装置の種類が異なれば、指示の変化時間や、指示の大きさが異なるのは当然であるが、判定結果の順や帯電の極性が常識と違っているような装置では測定を続ける意味がなく、測定条件や試料を検討すべきである。繊維関係に限ったことではないが、同一試料についての摩擦帯電測定値は再現性があるにもかかわらず、同一群中の試料間について大きなばらつきのあることがわかっている¹⁸⁾。なお、極性反転のような摩擦帯電のおもしろさ(同時に複雑怪奇さ)は連続的に指示される装置によって初めて明らかにできるので、必要に応じてペン記録やオシロ写真のとれるものがよい。

繊維の帯電障害は仕掛品やはだ衣のように繊維側にあるものが大部分であるが、粗紡機のゴムローラやカーペット上の人体のように摩擦子側にあるものもある。改造などの手段をとらず必要に応じて試料電位と摩擦子電位のどちらでも測定できる装置が望ましい。そして両者が併行に得られるものであればいっそう望ましい。

4-2. 電荷減衰測定

Medley¹⁷⁾は第 14 図のように電気抵抗によって帯電障害の有無が判定できるとした。抵抗値は電圧印加後の定常電流によって求められる。電位分布の変化を第 15 図に示す。a は理想的に CR の 分布定数回路と考えられるものであるが、実際は b のように電極付近に blocking を生じたり、摩擦電荷の残留によって定常電流を小さくする。接触状態が悪い、印加電圧が小さいと、b のことが強調されて抵抗値が高くなり、高電圧では電極間の気中放電がきいて低く観測される。抵抗値と試料の有効寸法とによって、比抵抗(またはその逆数の比電導度)が算出され比較される。糸やスライバでは、単位長さあたり、あるいはデニルあたりに換算し、布では長

第 14 図 モーロービングの比抵抗と帯電 (Medley¹⁷⁾)

第 15 図 電位分布の時間変化 ($0 < t_1 < t_2 < \infty$)

さ l と 幅 b とから面積比抵抗 $\rho_s = R \times b/l$ [Ω] を求める。

抵抗の再現性は温湿度、電極の形状、電圧、時間などについて決めておけば、簡単な操作で帯電性(電位、電荷)のそれよりもよいとされている。しかし著者の経験では、比抵抗が $10^{12} \Omega$ 以上の帯電障害を起こす領域になると、それは怪しくなる。絶縁性がよくなるほど摩擦電荷や測定の履歴がきいて測定をくり返すごとに抵抗値が高くなるので、かえって帯電測定の方が簡単である。また、比抵抗が $10^{12} \Omega$ 以下で木綿に匹敵する電導度を得るに至った帯電防止加工試料に対しては、抵抗測定が適当であり、耐洗性などの評価に役立つと考えている。この種の試料は金属と 0.1V order の起電力を電気化学的にもちながら摩擦帯電は出にくい。比抵抗と帯電との測定は、比抵抗が $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ の範囲で over-lap させて相補的に行なわれるべきであろう。

電位分布が与えられると、電気量の時間変化がわかる。筆者¹⁰⁾は摩擦帯電についてこれを適用したが、試料の一端に一定時間加電した後、これを Faraday-cage に落として抵抗を求める方法がある¹⁸⁾。5 kV を 2 時間かけておけば $10^{17} \Omega$ が測れるという。

第 16 図 漏洩測定法 (Wilson²²⁾) 帯電は接地金属棒で摩擦するか、加電した平板で誘導

仕掛品の電気抵抗に基く漏洩 (表面に沿った) のほかに表面から気中への放電が起こりうる。仕掛品の電位は導体に接しているところではほとんど 0 であるが、その位置から離れ、分布容量が減少すると電位は上昇し、上述の放電量が多くなる。仕掛品の電位は帯電位置から少し離れたところで極大になり、漏洩と放電によって減衰している。電位が高いとこの間静電的に汚れを吸着するから、静電汚れは時間積分に関係するともいえる¹⁹⁾。除電装置は放電量を人為的に増加させる役割をもっており、仕掛品の電荷密度と移動速度から放電電流を決定しなければならない。Henry²⁰⁾ はこれを時間要素 (time-factor) として表示している。ただこの表は、現在の作業速度にあわせて大きく訂正されなければならない。放電を測った報告はこれまで見ないが試料で円筒電極をおおい、これを囲む電極に加電して、試料への電流を測ればよいであろう。著者²¹⁾ はこれに似た方法を静電汚れに適用したことがある。Wilson²²⁾ は第 16 図に示す装置で試料にコロナ放電を与えて加電させたあと、接地した棒で吊り、その前面に statigun を置いて減衰を計っている。これは放電の影響を加味した方法というべきである。彼は帯電粒子による中和を否定しているが、繊維の細い糸や起毛した布については、放電が大きな役割をすると考えられる。Shashoua²³⁾ は材質と極性によっても漏洩時定数の異なることを見出している。

5. 測定値の解釈

現場または試験装置で摩擦帯電を測定するとき、試料のうち少なくとも一方は当然絶縁物である。その電位は時間的に普通単純飽和型 $v_0 \{1 - \exp(-t/\tau)\}$ で近似できるが、急激な飽和や極性の反転をすることがある。これら現象の回路的な考え方と気中放電の役割とを述べる。

5-1. 時定数と帯電量

著者⁷⁾ は、carpet 歩行による人体電位は等価回路からはきものの電位 v_f を分圧したものであり、また、 v_f は摩擦の起電力 v によって、

第 17 図 歩行帯電⁷⁾

$vR' \{1 - \exp(-R + R' t / RR'C)\} / (R + R')$ で与えられるとした。激しい摩擦を行なうと $R \rightarrow 0$ と考えて $\lim_{R \rightarrow 0} v_f = v$ で $\lim_{R \rightarrow 0} \tau = 0$ 、逆に摩擦の小さいとき $R \rightarrow \infty$ と考えて $\lim_{R \rightarrow \infty} v_f = 0$ で $\lim_{R \rightarrow \infty} \tau = CR'$ となる。

今、 $v_f - \tau$ 平面にこれらの点を plot して結ぶと、この直線は任意の歩行方法に対応する異なった R のとき、とるべき電位と時定数とを示す。この関係は実験によって確かめられ、摩擦の組合せを変えると異なった直線で現わされることがわかった。著者の結果はガラス球について Peterson²⁴⁾ が自己の実験を解析して得たものと同じ内容を表わしている。

佐々木¹⁴⁾ は Hayek 型の装置で測った帯電が摩擦回数 n 、1 回あたりの摩擦荷重 $\times$ 速度 f 、試料の時定数 τ に関係するとして $Q = qos \{1 - \exp(-n/\alpha)\} \cdot \{1 - \exp(-f/\beta)\} \exp(-t/\tau)$ の式を提示した。ここに q は摩擦の組合せで変わる定数 (帯電係数) で $|q| \leq 1$ 、 σ は気中放電後の電荷密度であって試料の形と気圧によって変わり、たとえば、大気中での平面試料では 8.4 esu/cm^2 となる。また、 s は試料の摩擦表面積、 α と β は試料定数である。今、二つの $\{ \}$ を 1 にすると $Q = Q_0 \exp(-t/\tau)$ の形になる。 t は摩擦から検出までの時間であるから回転速度に反比例する。帯電は $t \approx \tau$ で測定にかかり、 $\tau \approx 1,000 \text{ t}$ で $Q \approx Q_0$ になる。第 18 図の関係で理論曲線 (.....) より実測曲線 (—) は右にずれる。この結果は試料の帯電が摩擦点を分極²⁵⁾ させたことから説明できるように思う。

第 18 図 時定数と帯電比¹⁴⁾ v は速度 ($v_1 > v_2 > v_3$)

第 19 図 摩擦帯電シミュレータ¹⁶⁾

5-2. 特異帯電現象

単純飽和型（以下単飽）以外，すなわち極性反転（以下反転）および，急激な飽和（以下急飽）の傾向をこれに含める。この現象は起電力，抵抗および容量の 3 者からなる帯電 model では説明のつかないもので，摩擦面の变化たとえば温度変化や微粉の発生などと結びつけられていた。著者¹¹⁾は摩擦物体相互や接地との間に生ずる気中放電によって，電荷密度したがって電位（物体の移動により容量が変わるから平均的な電位）が拘束されるとの仮定のもとに定性的な説明を試みてみた。これを実現するためにはネオンランプを一般の帯電 model に導入すればよい。こうして測定系は第 19 図で表わされる。ここに A, B は絶縁物，M は電位計である。A, B の摩擦中 R_1 と C とは有限値であり，停止を経て分離すると R_1 は ∞ ，C は 0（非常に小さな値）となるはずである。これを C の極板（ポリエチレン膜をかぶせて短絡を防いでいる）上下と同期した充電スイッチ開閉によって実現している。この装置でくり返し“摩擦”（スイッチ開閉）中の電位を連続的に記録した。回路条件を変えると，単飽のみならず急飽や反転が観察できた。急飽は， v がある程度大きくて B や C の絶縁がよくてネオンランプが点灯するときから観察され，さらに B の絶縁をよくすると反転の起こることがわかった。

その理由については回路の上に現われていないポリエチレン膜への気中放電の作用か接触分離過程におけるポリエチレン膜の電界効果か議論の分れるところである。

鉄ローラと摩擦する乾燥布の帯電は，ローラ上の酸化物（または水酸化物）膜がとれてくると変わってくる。しかし，ゴムローラで送られるスライバの帯電変化は物質的（ゴムにはほこりや油がついたりとれたり）や熱的な原因のほかに，非対称摩擦による電荷密度増加→気中放電の過程で起こるものもあると考えられる。絶縁物とふれた仕掛品の電荷がほとんど 0 になったり，極性を転ずるのはよく見られることである。

Hersh¹²⁾ らは 90-0（top は全長，bottom は 1 点）や 0-90（その逆）の非対称摩擦よりも 45-45 の対称摩

擦を受けた繊維が最大の電荷を得たとしている。これについても次のような放電説をあてはめうる。すなわち，相手が 1 点ならば摩擦点の電界が直ちに高まって試料の帯電を押える。また試料が 1 点ならば，その電荷密度は放電で押えられ，全量としては小さくなる。

摩擦帯電測定あるいはその相補的手段としての電気抵抗測定前に残っている試料上の電荷は，その周囲に電界を生じて測定値を変える。それで電荷の有無を check するためによく Faraday-cage が使われる。もし残っていると除電装置にかけて 0 になったとして安心していることが多い。除電，すなわち気中放電は異種電荷を送り込んで初期電荷を中和する作用をもつが，大きな異種電荷が島状にあるいは表裏を分極させて付着することもよくあるようである（脱衣の際，音を立てた放電は衣料の局部を過剰に除電し，反対極性の電荷を島状にもっていると考えてよい）。Faraday-cage では電荷の代数和としてしかわからないので電位計のプロブを近づけて sweep させたり背面接地をすると分布がわかる。

以上のように放電または電界は実際の帯電問題に大きな影響をもっていると考えられる。

6. ま と め

現場用電位計の指示は任意目盛りの電界と考えてよく，繊維帯電障害の実際と結びつけてその管理に役立てうるが，測定値の信頼性を大きくするためには電気的によく検討しなければならないとした。

衣料の実用試験についても，現場用電位計を適用できるが，電気的条件はいっそう複雑になる。電荷分布はわからないが Faraday-cage は全電荷量を求めうる便利な装置である。その製作法と較正法にふれた。

現場測定および実用試験にかかわる繊維帯電試験装置の数例を取り出し，その特長をあげた。

最後に試験装置から得られる結果の傾向とその解釈に関連して，気中放電や電界効果が重要な役割をしていることを述べた。

文 献

- 1) D. Finlayson: *J. T. I.*, **48**, 55 (1957)
- 2) 橘高重義，葛西昭成：第 5 回 静電気要旨，65 (1960)
- 3) 斉藤 洋：あなたのせんい，No 9, 36 (1960)；第 7 回 静電気要旨，18 (1962)
- 4) 川村一男：第 11 回 静電気要旨，90 (1966)
- 5) 浦山武造：産業と電気，No. 115, 15 (1962)
- 6) 木脇久智：電試研究報告，No. 582, 91 (1960)
- 7) 斉藤 洋：応用物理，**32**, 301 (1963)
- 8) 木田徳郎，池田佐喜男，吉田敬丸：繊維製品消費科学，**7**, 159 (1966)

- 9) M. Hayek, F.C. Chromey: *Am. Dyest. Rept.*, **40**, 164 (1951)
- 10) 齊藤 洋: 高分子, **8**, 589 (1959)
- 11) 齊藤 洋: 染色工業, **12**, 271 (1964); 第7回静电気要旨, 23 (1962)
- 12) S.P. Hersh, D.J. Montgomery: *T. R. J.*, **25**, 279 (1955)
- 13) R.G. Cunningham, D.J. Montgomery: *T. R. J.*, **28**, 971 (1958)
- 14) 佐々木寛治: 織学誌, **19**, 373 (1963); 染色工業, **11**, 636 (1963)
- 15) P.J. Sereda, R.F. Feldman: *J. T. I.*, **55**, T 288 (1964)
- 16) Atlas Powder Co.: *Text. Ind.*, June 127 (1956)
- 17) J.A. Medley: *Brit. J. A. P. Sup.*, **2**, S 23 (1953)
- 18) G. Morris, A.N.D. Young: *Nature*, **171**, 220 (1953)
- 19) 齊藤 洋, 松村彰一: 京工織大(工芸)紀要, **7**, 1 (1958) (英文)
- 20) Henry: *Brit. J. A. P. Sup.*, **2**, S 78 (1953)
- 21) 齊藤 洋, 松村彰一: 繊維界, **18**, 60 (1959)
- 22) D. Wilson: *J. T. I.*, **54**, T 97 (1963)
- 23) V.E. Shashoua: *J. Polymen Sci.*, **33**, 65 (1958)
- 24) J.W. Peterson: *J. A. P.*, **25**, 907 (1954)
- 25) E. W. B. Gill, G. F. Alfrey: *Nature*, **163**, 172 (1949)

海外文献紹介誌「海外高分子研究」内容紹介

Vol. 13, No. 3 (通巻 114 号)

1966 年 3 月号雑誌掲載論文題目 '66-L-17

- (37) 単結晶モデルによるポリエチレンオキサイド, ポリスチレンの塊状結晶化の動力学的機構
- (38) 球状粒子の多分散性濁液における粒子径分布の小角X線散乱による決定
- (39) カーボンブラック補強加硫物の応力軟化 ひずみ速度および温度の効果
- (40) 液体の体積弾性率および熱膨張係数を評価する方法
- (41) ジフェニルエーテルから得られるスルホン重合体
- (42) ニトロベンゼン, アニリンの重合
- (43) ルイス酸によるアリルベンゼンの重合——ポリアルキル化反応——
- (44) 弗化水素中におけるベンゼンからの界面陽極ポリマー
- (45) アリルアクリレートおよびアリルメタクリレートのアニオン重合
- (46) アニオンおよびカチオン両リビングポリマーの相互停止
- (47) スチレンのアニオン重合機構. Korotkov 説への批評
- (48) スチレンのベンゼン中でのアニオン重合の動力学. アルカリ金属の対イオンの影響
- (49) 不飽和化合物のラジカルアニオンおよびジアニオンによる重合開始
- (50) CH-活性重合開始剤について 第XIII報 重合と重合開始剤
- (51) O-S-N-ビニル化合物の研究 IV ホルムアルデヒド-S-ビニルメルカプタールの合成と重合
- (52) 水和電子および OH ラジカルに対するカタラーゼの反応性のパルスラジオリシスによる研究
- (53) アクロレインの重合およびポリアクロレインの反応に対するアルカリの影響
- (54) ポリアクロレインの反応
- (55) ロジウム塩によるブタジエンの均一系重合
- (56) テトラヒドロフランの新重合触媒

勤務先・住所などの変更についてのお願い

最近、会誌・論文集などの刊行物の返送されてくるものがとみに多くなっております。住所・勤務先などの移動のあった場合は下記の注意事項を厳守し、すみやかにご連絡下さるようお願いいたします。変更通知のない場合、当学会よりの諸通知や案内、会誌その他の刊行物などがとどきませんし、近々刊行予定で目下整備中の名簿にも誤って記載されることとなります。会員諸氏の強力なるご協力をおねがいします。

▶ 移動通知は下記のひな型に従い、官製ハガキを使用することを必ずお守り下さい。

会員 No.	氏 名
勤務先(所在地) (新)	(旧)
住所(自宅) (新)	(旧)
連絡先 (新)	(旧)
購読誌名および購読者 No.	

▶ あて先 高分子学会会員課 東京都千代田区神田須田町 2-11