

# 産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1971

## 静電靴の抵抗値とその測定法

田 畠 泰 幸

# 静電靴の抵抗値とその測定法

田 阜 泰 幸\*

## 1. ま え が き

静電気発生のおきな工程等がある工場、事業場では、そこで作業している作業者に静電気が帯電し、これが各種の産業災害の原因となるため、作業者の静電気帯電は従来からもしばしば問題になっている。とくに近年は化学繊維を素材とした衣類が普及したこと、あるいは高分子材料を取り扱う機会が増大したことによって、こういった作業者、いわゆる人体の静電気帯電は単に工場、事業場だけの問題でなく、広く一般的な問題になっている。

たとえば、作業者がゴム底のような絶縁性のよい履物を履いていると、簡単な動作によっても人体に静電気が帯電し、人体の電位は数kVになることがある。その結果、人体の一部が接地体へ触れるようなことがあると、人体に帯電していた静電気がこれに放電して電撃を受けるとか、このときの静電気放電火花が可燃性混合気の着火源になって爆発、火災事故が発生することもある。このような人体の静電気帯電が原因となった災害は静電気事故の約15%近くあることも報告されており<sup>1)</sup>、現在人体の静電気帯電防止は安全上欠くことのできない問題となっている。

以上のような理由から人体の静電気帯電防止についてはいろいろ研究されており<sup>2)</sup>、作業衣の帯電防止も広い意味では人体帯電防止の1つである。しかし、静電気の発生を抑制することが事実上不可能であるため、具体的には人体そのものに静電気が帯電しないようにすること、あるいは帯電している静電気を安全に漏洩させることであって、その1つの方法は人体を接地状態にすることである。これは人体が静電的に導体であることからすると、具体的には抵抗の小さい履物によって、あるいは床が絶縁性の場合、履物のほかに床も導電性の床を使用することによって人体を接

地状態にすることであり、そのような目的のために従来から抵抗値の低い履物、床が開発されてきた。

しかし、これらの抵抗値については、履物1つ採り上げて一部検討されてはいるものの<sup>3),4),5)</sup>、その歴史が浅いため、いまだ不明確な点が多く残されている。以上のような理由から、人体の帯電防止を目的とした履物（以下この履物を静電靴と呼ぶ）の抵抗値について種々の検討を行なってみた。ただし、人体が絶縁性床の上に位置している場合は履物と床の両者が問題となり、履物の抵抗値のみでは定まらないため、ここでは人体が導電性床等いわゆる接地体の上に位置している場合の抵抗値について検討してみた。

実験では革製の短靴を使用して靴の電気的特性について調べたところ、靴の抵抗値を支配する要因、抵抗値と人体帯電の関係、静電靴として必要な抵抗範囲、静電靴の抵抗測定方法等が明らかになったので、以下これらの結果について報告する。

なお、この技術資料では、低圧電気による危険性を防止するために必要な履物の抵抗値についても、その一端を検討したので一部これについても触れておく。

## 2. 履物の抵抗値と人体帯電

人体は静電的に導体であることから、これを完全に接地していれば静電気は帯電しないことになる。しかし、一般には履物を履いており、その履物がある程度の抵抗値をもっているため、人体には静電気が帯電することになる。したがって、ここでは履物の抵抗値と人体帯電の関係について考察してみた。

### 2.1 人体帯電のモデル化とその解析

まず、人体に発生する静電気であるが、これには人体自身の行動によって発生するものとか、あるいは人体が静電気帯電物体に接触すると、これに帯電していた静電気が人体に移り、結果として人体に静電気が発生したと同等になる場合等がある。以上は人体に

\* 電気研究部

静電気が発生する現象の一例をあげたものであり、これがすべてではないが、いずれにしても、人体の静電気帯電現象はこのようにして人体に静電気が発生し、その結果として起こる現象である。

いまこのような人体の帯電現象を静電学的な見地から分析すると、それは図1に示すような電気回路によって表わすことができる。すなわち、静電気が帯電する人体は接地体との間に、これが帯電するような静電容量Cを有しているものであり、また人体は一般に、その人が履いている履物の抵抗Rによって接地されているのである。ここで人体は静電学的には導体であるから、これを考慮すれば、人体は電気回路的にみてこれらの抵抗と静電容量とが、並列に接続された集中定数回路と等価になるのである。一方、先に示した例のように人体に発生する静電気は、単位時間当たりある静電荷が発生するということであって、これは人体に電流発生源 $q$ があることと等価である。しかし、人体に発生する静電気は必ずしも時間的に連続して発生するわけではなく、むしろ一般には断続的に発生する現象であるから、これを電氣的に置き換えると、静電気が発生している場合は図1(b)の開閉器が閉じた状態であり、発生していないときは図1(b)の開閉器が開いた状態と等価になる。以上のようにして人体の帯電現象は、図1のような回路によって表現することができるのである。これより図1(b)の回路に基づいて人体の帯電現象を解析してみる。

いま、人体に帯電している電荷を $Q$ とし、 $dt$ 秒間における静電荷の発生および消滅について考えれば次の式を得る。もちろんここでは、図1(b)の開閉器が閉じた状態である。

$$Q + dQ = Q + qdt - \frac{Q}{C} \cdot \frac{1}{R} dt$$

$$\therefore \frac{dQ}{dt} = q - \frac{Q}{CR} \quad (1)$$

これより(1)式を  $t=0$ ,  $Q=Q_0$  なる一般的な初期条件で解くと、人体に帯電している電荷は、

$$Q = qCR(1 - e^{-t/CR}) + Q_0 e^{-t/CR} \quad (2)$$

となる。また人体に静電気の発生がないときは、図1から(1)、(2)式の  $q=0$  とおき

$$Q = Q_0 e^{-t/CR} \quad (3)$$

を得る。ただし、以上の解析結果は、発生電荷の極性

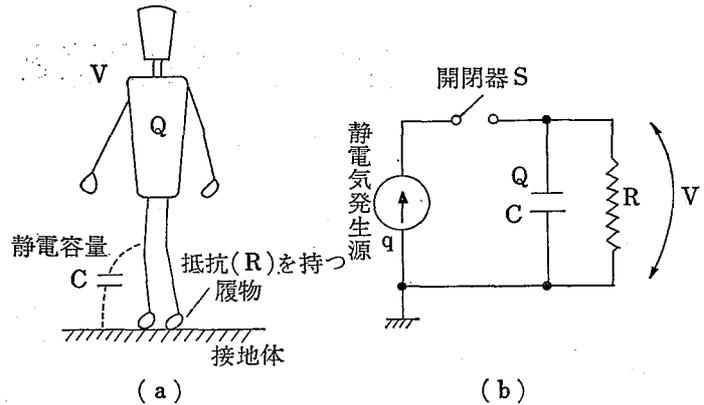


図1 人体帯電現象を解析した電気回路

を問題にせず、絶対値をもって解析したものである。それは正負の電荷が発生していても、これは以上の解析からも明らかのように、互いに打消し合って人体の電荷量が増大しない安全側の現象となるため、ここでは極性が変わらず、しだいに帯電して帯電量の絶対値が大きくなっていく場合のみ取り扱ったのである。

一方、人体の静電気帯電現象を帯電電荷 $Q$ でなく帯電電位 $V$ で表わせば、 $Q=CV$ の関係を以上の解析結果に代入して(2)式からは

$$V = qR(1 - e^{-t/CR}) + V_0 e^{-t/CR} \quad (4)$$

(3)式からは

$$V = V_0 e^{-t/CR} \quad (5)$$

となる。ただし、初期条件についても上式では  $Q_0 = CV_0$  なる関係を用いた。

以上、人体に帯電する電荷ならびに帯電電位については求められたが、ここで上式を解析するのに用いた初期条件の値  $Q_0$ ,  $V_0$  について検討してみる。一般的にはこれらの値はある範囲内

$$Q_{max} \geq Q_0 \geq 0, \quad V_{max} \geq V_0 > 0 \quad (6)$$

にあると考えるのが適当であり、問題となるのは上式の  $Q_{max}$ ,  $V_{max}$  の値である。そこでこの値であるが、いま仮に人体には全く電荷が帯電していない状態で、換言すれば  $t=0$  において  $Q=0$  なる初期条件のもとで(1)式を解くと(1)式からは

$$Q = qCR(1 - e^{-t/CR}) \quad (7)$$

(4)式からは

$$V = qR(1 - e^{-t/CR}) \quad (8)$$

なる解が得られることになる。

すなわち、履物の抵抗値が完全な絶縁状態でない限り、上式に示されるように人体には最大の電荷として

も、 $Q_{\max}=qCR$ 、最大の帯電電位としても、 $V_{\max}=qR$  であって、これ以上にならないことが明らかになった。したがって、一般的にはこれ以下の値が人体に帯電しており、そこに静電気の発生が人体に起こると、人体は(2)式あるいは(4)式で表わされる帯電をたどることになる。

これより初期条件として解いた、(2)、(4)式の  $Q_0, V_0$  の値も取り扱う系が同じであるならば、換言すれば履物、人物等が変わらなければ初期条件は

$$Q_0 \leq qCR, \quad V_0 \leq qR \quad (9)$$

なる条件を満足していることになり(9)式の条件を考慮すると(3)、(5)式において次の関係

$$Q = Q_0 e^{-t/CR} \leq qCR \quad (10)$$

$$V = V_0 e^{-t/CR} \leq qR \quad (11)$$

(2)、(4)式においては次の関係

$$Q = qCR(1 - e^{-t/CR}) + Q_0 e^{-t/CR} \leq qCR \quad (12)$$

$$V = qR(1 - e^{-t/CR}) + V_0 e^{-t/CR} \leq qR \quad (13)$$

が成立することも明らかである。したがって、(10)、(11)、(12)、(13)式から人体の初期帯電がいかなる値にあったとしても、人体に帯電する電荷量は  $qCR$  の範囲内に、人体の帯電電位は  $qR$  の範囲内にあるという結論が得られる。ただし、上式は発生電荷量  $q$ 、履物の抵抗  $R$ 、人体の静電容量  $C$  がすべて一定として解析した結果であり、実際にはこれらが変化するもので、とくに  $q$  は大きく変化するため定量的には多少異なるものである。

## 2.2 人体帯電現象の確認

比較的抵抗値の高い履物を履いていると人体に静電気が帯電する。したがって、2.1 では、このような人体の静電気帯電現象を分析してこれを等価回路で表わし、この等価回路によって帯電現象の解析を行なったが、ここでは以上の解析結果を確認するために以下のようなモデル実験を試みた。

まず、2.1 の解析によって得られた結果は、人体に発生する静電気が時間的に一定であるとしたもので、人体の帯電現象をある程度理想化して求めた結果である。したがって、これを確認する実験も図2に示すような比較的理想的状態に近い人体の帯電現象を模擬して作り、これによって2.1の解析結果を確認することを試みた。すなわち、人体にはその動作等によって静電気が発生するが、これを模擬実験では針電極からの微

弱な放電電流を人体に流し、これによって人体に静電気が発生していると等価な状態を模擬的に作った。一方、解析過程には発生電流が一定という条件があるため、これは高圧電源と放電電極との間に高抵抗を挿入して、放電電流は人体の帯電電位に関係なく一定の電流が流れるようにした。

実験では、この放電電流が  $10^{-7}$  c/sec 一定となるように電源電圧を 10kV、挿入抵抗を  $10^{13}\Omega$ 、針電極と金属板との距離を 5mm とした。これは人体に発生する静電気として比較的大きな発生量に相当するものであるが\*、この条件のもとに履物の抵抗値と人体の帯電電位の関係について測定した。図3はその実験結果を示したものであるが、実験値と解析結果から求めた計算値とは比較的良く一致し、2.1 で解析した人体帯電現象の正しいことが確認された。また、人体に静電気の発生がない場合 ( $q=0$ ) についても確認するため、人体帯電電位が飽和した時点(実験では  $t=60$  秒)で電源の開閉器を切り、人体帯電電位が降下していく経過を測定した、その結果も図3に示すように電位が非常に低い場合を除いては実験値と計算値とがよく一致した。なお、ここで計算値とは図3の実線で表わしたものであり、これは人体に初期帯電のない場合について解析した(8)式に  $q=10^{-7}$  c/sec,  $c=90$  pF を代入して導いた次の式

$$\left. \begin{aligned} V &= 12000(1 - e^{-0.093t}) \quad [R=1.2 \times 10^{11}\Omega \text{ の場合}] \\ V &= 5400(1 - e^{-0.21t}) \quad [R=5.4 \times 10^{10}\Omega \text{ の場合}] \\ V &= 1800(1 - e^{-0.62t}) \quad [R=1.8 \times 10^{10}\Omega \text{ の場合}] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

より求めた結果が示されている。また、人体の電位降下については(5)式にそれぞれの初期条件と、 $c=90$  pF を代入して導いた次の式

$$\left. \begin{aligned} V &= 12000 e^{-0.093(t-60)} \quad [R=1.2 \times 10^{11}\Omega \text{ の場合}] \\ V &= 5400 e^{-0.21(t-60)} \quad [R=5.4 \times 10^{10}\Omega \text{ の場合}] \\ V &= 1800 e^{-0.62(t-60)} \quad [R=1.8 \times 10^{10}\Omega \text{ の場合}] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

より求めた結果が示されている。

次に、発生電荷量が測定できないため定量的な確認はできないが、実際の帯電現象に近い実験によって2.1の解析結果を確認することを試みた。それは図4に示すように、いろいろな抵抗値の履物を履いている実験者のポリエステル製衣服をビニルシートで摩擦し、これによって発生した静電気によって人体の帯電電位がどのように変化していくか実験したものであ

\* 詳しくは 3.1 を参照すること。

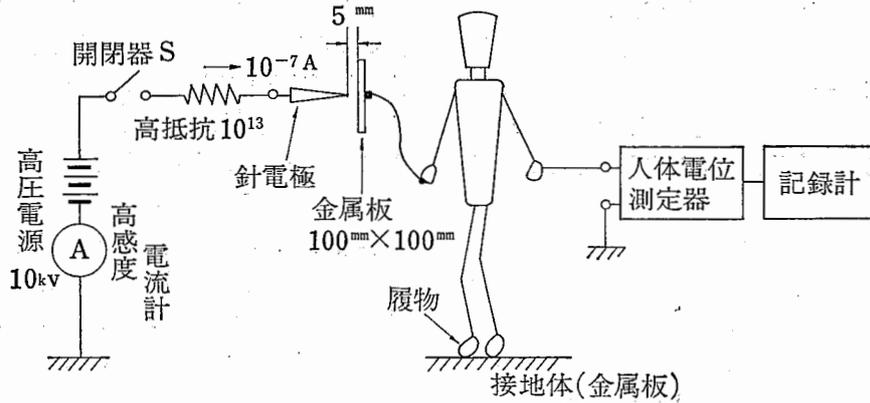


図2 人体帯電モデル実験

る。図5はその実験結果を示したものであるが、やはり履物の抵抗値が大きいものほど人体は高電位になることが明らかである。また、人体の最高帯電電位の平均をみると、だいたい抵抗値の次数に比例している結果が得られており、これからも人体の帯電現象は2.1の理論解析によって表わすことができると判断される。なお、この実験結果に見られる振動はビニルシートによって衣服を断続的に摩擦したためであり、振動の谷から次の山までの部分がビニルシートと衣服が接触して摩擦されている過程である。

以上の実験結果から、人体の帯電現象には履物の抵抗値が大きく関係しており、結果的には履物の抵抗値が小さいものほど帯電電位は低くなっている。したがって、それだけ危険性も少なくなるであろうことが容易に推察される。

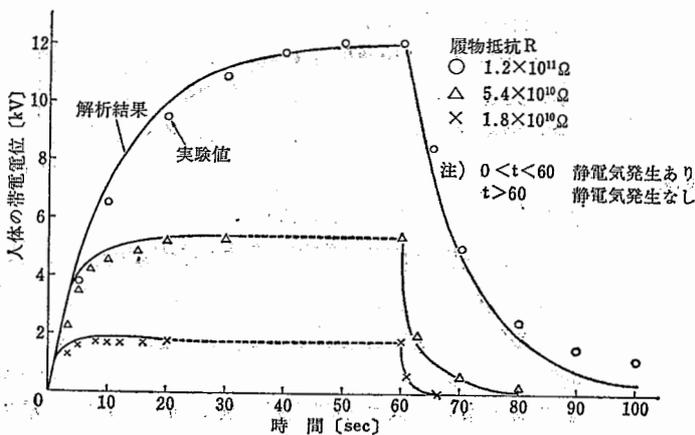


図3 人体の静電気帯電現象モデル実験結果

### 3. 静電靴の抵抗値検討

静電靴は人体を接地状態にして人体に帯電している静電気を積極的に漏洩させることが目的である。そのためには以上の解析結果、実験結果からも明らかなように、静電靴の抵抗値は当然のことながら小さいほど望ましいことになる。すなわち、静電靴としての機能を満足するには、その目的にもよるが、抵抗値がある値以下のものでなければならないことになる。したがってここでは、その抵抗値の最大許容値がいくらか、これについて安全性の立場から検討してみた。

一方、静電靴の抵抗値があまりにも小さいと、これを履いている作業者が低圧の電気機器または配線の充電部に触れた場合、感電する危険が生じてくる。したがって、この感電防止も合わせて行なう必要のある場合には、人体への漏洩電流を制限する意味で、静電靴の抵抗値にはある値以上のものが要求されてくる。ここでは参考のためこれについても検討してみたので、3.2にその検討結果を示しておく。

#### 3.1 帯電防止に要求される抵抗値

先に述べたように人体の帯電防止を目的とした静電靴も、その抵抗値は防止しようとする内容によって当然変わってくる。したがってここでは、産業安全を優先してこの抵抗値について次の2つの点から検討してみた。

まず安全性の点から、人体の静電気原因した問題を取り上げると、1つは人体の帯電防止

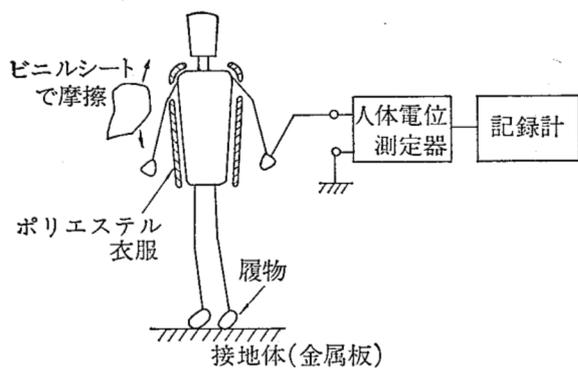


図 4 人体帯電実験

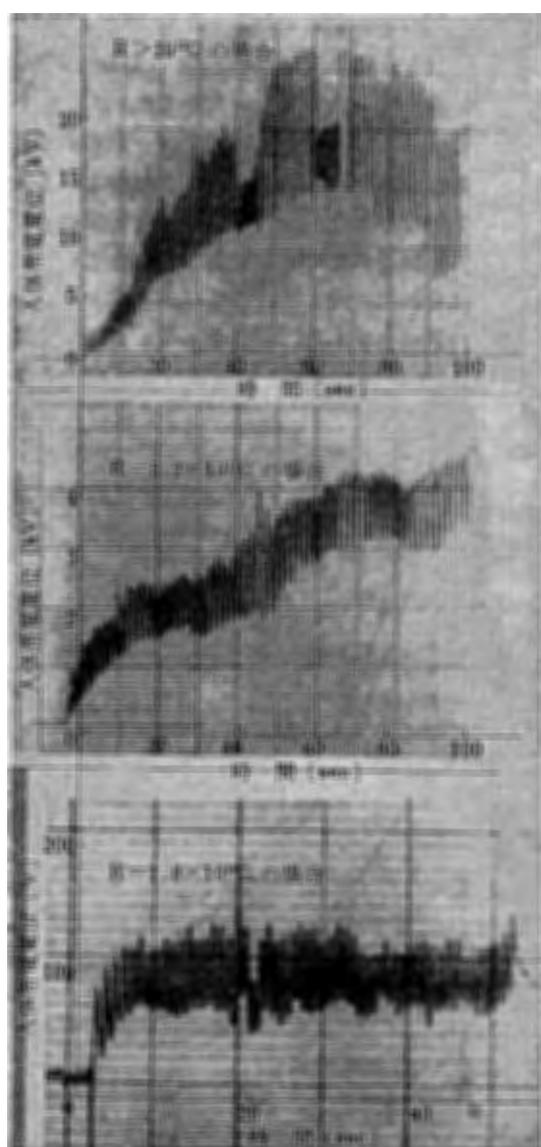


図 5 履物の抵抗と人体帯電電位の関係

によって爆発等の着火源を除去することである。これは人体に帯電した静電気が指先、あるいは持っている工具等から放電を起こすと、この放電が爆発の着火源になることがあるからである。また、指先等からの放電は、非常に着火源になりやすい火花放電<sup>6)</sup>となるものが多いことも1つの理由である。これより、このように危険な人体帯電は当然防止しなければならず、その1つの方法は人体に大きなエネルギーが蓄積しないように静電靴の抵抗値を小さくすることである。したがって、これに要求される抵抗値を、ここでは最小着火エネルギーから求めてみる。すなわち、いま人体から放電が起こったとき、放電によって放出されるエネルギーがガス、溶剤、粉じん等の最小着火エネルギー以下であれば着火源になることはないため、人体には最小着火エネルギー未満のエネルギーしか蓄積しないように静電靴の抵抗値を定めてみる。ただし、実際には人体に蓄積しているエネルギーが放電によってすべて放出されるとは限らず、一部のエネルギーは人体の中で消費、あるいは人体の中に蓄積したままである。しかし、これらのエネルギーは無視し、ここでは放電によってすべてのエネルギーが放出されると仮定してみる。一方、放電が起こっている間にも人体に静電気が発生していると厳密には、このエネルギーが問題となるが、これは着火源となるような放電が数 10 $\mu$  秒の間に終了する極めて短い現象であるため、ここではこの間に発生したエネルギーも無視している。したがって、このような仮定のもとでは、結果的に、人体に帯電している静電エネルギーがガス、溶剤等の最小着火エネルギー以下であればよいことになるため、以上のような条件から静電靴の抵抗値を求めることにした。これよりこの基本から人体に帯電している静電気エネルギーを計算してみると、2. の解析結果の(2)式を用いて、そのエネルギーは

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{[qCR(1 - e^{-t/CR}) + Q_0 e^{-t/CR}]^2}{2C} \quad (16)$$

となる。ここで(16)式で表わされる人体の静電気エネルギーについて(12)式の条件を考慮すると、その最大エネルギーは  $q^2CR^2/2$  となり、これが最小着火エネルギー  $E_{\min}$  以下でなければならないという条件から次の式

$$\frac{q^2CR^2}{2} < E_{\min} \quad (17)$$

を得る。これより静電靴の抵抗  $R$  は

$$R < \sqrt{\frac{2E_{\min}}{Cq^2}} \quad (18)$$

でなければならないことになる。

次に安全性の点からは、人体が静電気による電撃を受けたとき、墜落等の2次災害に発展するおそれがあるためこれを防止しなければならない。ここでは人体帯電による電撃のみを防止する\* 立場から検討すると、人体が電撃を受けるような電位まで上昇しないようにすることであるから、電撃を受ける最小電圧を  $V_{min}$  として、(4)式とこの条件から次の

$$qR(1 - e^{-t/CR}) + V_0 e^{-t/CR} < V_{min} \quad (19)$$

式を得る。(19)式についても同様に(13)式の関係を考慮すると、人体の最高帯電電位は  $qR$  になるから、これが電撃を受けない条件を満足するために、静電靴の抵抗は

$$qR < V_{min} \text{ あるいは } R < V_{min}/q \quad (20)$$

でなければならないことになる。

以上、静電気が人体に帯電しても安全確保の立場から静電靴の抵抗値について検討したところ、(18)、(20)式が得られた。これより(18)、(20)式に実際の数値を代入して抵抗値を求めてみる。まず(18)式の最小着火エネルギーであるが、これは水素、アセチレン等の特に最小着火エネルギーの小さな可燃性ガスを除くと0.1mj以下のエネルギーで着火するものがない<sup>8)</sup>。したがってここでは、(18)式の  $E_{min}$  の値としてこれを採用することにした。ただし、水素等のようにとくに小さな最小着火エネルギーであるものを取り扱っているところでは、もちろんこの値によって抵抗値を定めるべきではなく、最小着火エネルギー、 $E_{min}$  の値としては0.01mjを採用することにした。また、電撃を受ける人体の最小帯電電圧は、多少個人差があるが、だいたい3000V程度であるので<sup>9)10)</sup>、(20)式の  $V_{min}$  の値はこれを採用することにした。次に人体の静電容量  $C$  であるが、これは種々の肉厚の履物を履いてあるいは絶縁板の上に乗って人体の静電容量を測定した結果、図6に示すように人体の静電容量は履物(絶縁板)の肉厚と1次的な相関関係になり、立つ、かがむ、立った状態で重心を前後にずらす等の人体動作によっては、その値に大きな変化がなかった。したがって、誘電率の大きな靴を履いた場合でもその値は400pFとするのが妥当であると判断した。なお、この値は計算によっても検討してみたがこれに近い値が得られた\*\*。一方、人体に発生する単位時間当りの電荷量

であるが、これも実験によって調べてみた。その結果、人体に発生する電荷量は一般には  $10^{-9}c/sec$  程度であり、その1例をあげれば図7に示すようなウレタンシートの上で激しいすり足運動を行なったときでも人体に発生する電荷量は図8のように最高でも  $10^{-8}c/sec$  程度であった。また、下着と上着を激しく摩擦、剥離したときでも発生電荷量をシンクロスコープで観測した結果によると、図9に示すように瞬時値としては  $10^{-6}c/sec$  に近い値が観測されたが、平均としては  $10^{-8}c/sec$  以下であった。以上のように発生電荷量は、実験した範囲によると瞬時のみ尖頭値が  $10^{-6}c/sec$  という大きな場合があるが平均としてはすべて  $10^{-8}c/sec$  程度であり、しかもこの値が連続して発生することもなかった。したがって、発生電荷量の値  $q$  としては安全側の値を求めるという考慮をしても  $10^{-7}c/sec$  を採用しておけば十分であると判断した。すなわち、(18)、(20)式における発生電荷量  $q$  は一定の値が連続して発生しているという条件のもとで解析した2.1の解析結果から導かれたものであり、また実際の物理現象においても瞬時に静電荷が発生したからといって人体の電位はそれに同期して瞬時には上昇せず時定数に関係した時間遅れがある。したがって、人体の電圧、詳しくは人体付近の電界が急に増大して人体から放電

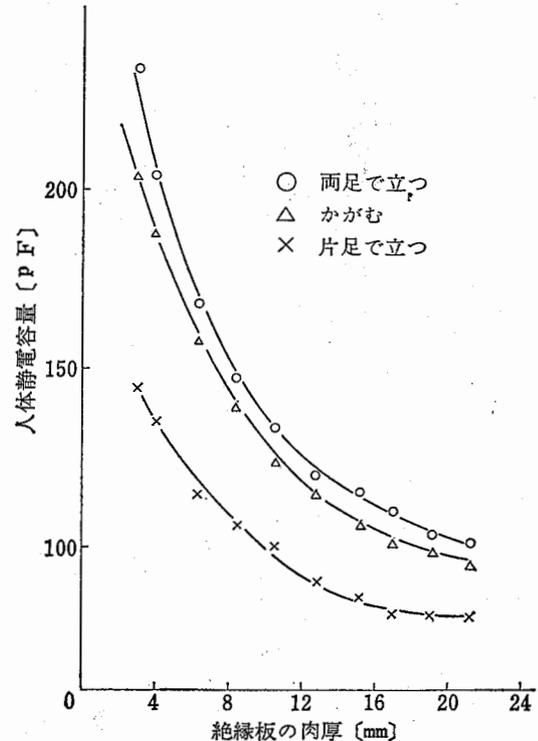


図6 人体の静電容量

\* 帯電物体からの放電によって受ける電撃は履物によって防止することが出来ない。

\*\* 履物を平行平板に近似すると、静電容量は  $C = \epsilon_s \epsilon_0 S/l$  となり、ここで面積  $S$  最大値、距離  $l$  の最小値をそれぞれ  $240 \text{ cm}^2$ 、 $0.3 \text{ cm}$  とすると  $\epsilon_s = 2$  のとき  $140 \text{ pF}$  となり両足では約  $300 \text{ pF}$  になる。

の起こるようなこともなく、連続して静電気が発生したときのみ人体の電位が上昇して放電の起こる条件が生まれてくるのであるから、このような意味でも発生電荷量は瞬時値でなく平均的な  $10^{-7} \text{c/sec}$  を採用した。これより以上の数値を(18)、(20)式に代入して静電靴の抵抗値を求めてみると、爆発の点火源防止という立場からは、一般の可燃性混合気の場合

$$R < \sqrt{\frac{2 \times 0.1 \times 10^{-8}}{400 \times 10^{-12} (1 \times 10^{-7})^2}} \doteq 7.1 \times 10^9 [\Omega]$$

水素、アセチレン等の特に着火エネルギーの小さいものに対しては

$$R < \sqrt{\frac{2 \times 0.01 \times 10^{-8}}{400 \times 10^{-12} (1 \times 10^{-7})^2}} \doteq 2.2 \times 10^9 [\Omega]$$

人体の受ける電撃防止という立場からは、一般に

$$R < \frac{3000}{1 \times 10^{-7}} = 3 \times 10^{10} [\Omega]$$

なる値が得られる。これより人体の静電気帯電防止を静電靴によって行なう場合、結果としては、着火源の除去という条件によって静電靴の抵抗値が定められることになり、その値は両足で一般の可燃性混合気に対

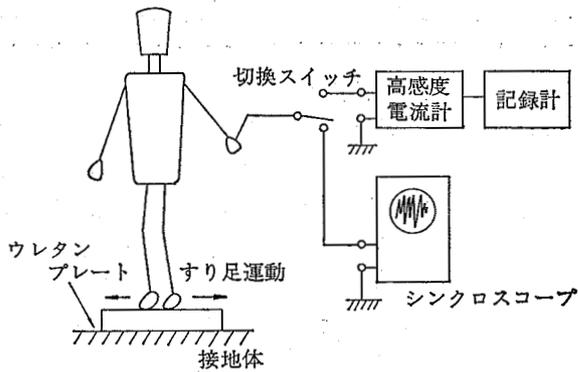


図7 人体に発生する静電気測定

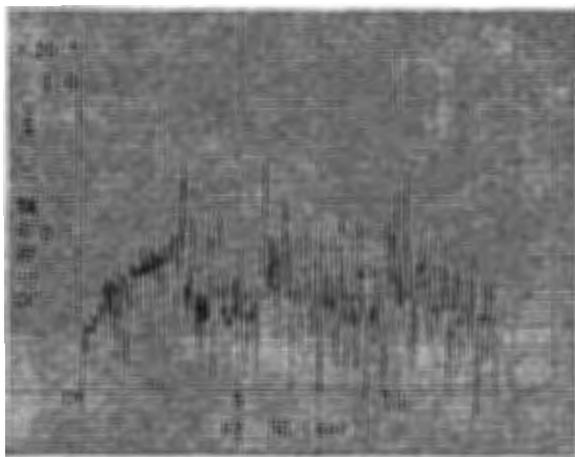
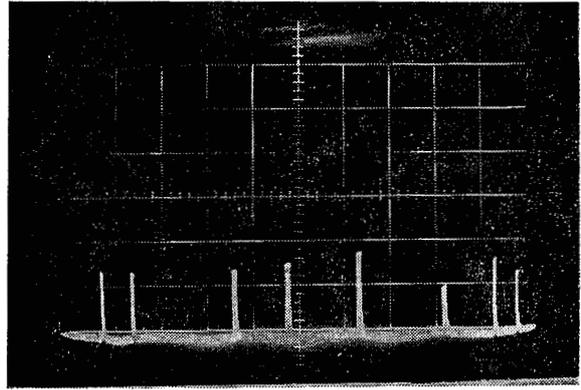


図8 すり足動作によって人体に発生する静電気



Y軸  $5 \times 10^{-7} \text{A/div}$  X軸  $10^{-2} \text{sec/div}$

図9 人体動作による発生電荷

しては  $7.1 \times 10^9 \Omega$  以下のもの、とくに危険性の高い水素等に対しては  $2.1 \times 10^9 \Omega$  以下のものを使用しなければならないことになる。ただし、以上の結果は理論解析によって得られたものであることを考慮すべきである。

### 3.2 感電防止に要求される抵抗値

作業者が低圧配線の充電部に触れた場合、静電靴の抵抗が極端に小さいと感電するおそれがある。したがって、この感電を防止するためには静電靴の抵抗値にどのような制限が生まれてくるかその1つの目安について検討してみる。

まず人体の一部が充電部に触れた場合、人体に流れる電流  $I$  は充電部の電圧を  $V$ 、人体の抵抗を  $R_m$  とすれば、これと静電靴の抵抗  $R$  とは直列にはいることになるから

$$I = \frac{V}{R + R_m} \quad (21)$$

として求まる。ここで感電を防止するためには、人体に流れるこの電流を抑制しなければならず、その意味で、静電靴にはある程度以上の抵抗が必要となる。しかし、感電は必ずしも電流の大きさのみでなく、その電流が人体に流れた時間にも関係している<sup>11)</sup>。したがって、本来はこの通電時間の関係も考慮すべきであるが、これを考慮すると静電靴の抵抗値がそれのみで定まらないため、ここではこの感電災害をさらに安全側に拡大したものである可随電流を感電防止を行なうための基準と定め、これ以下の電流しか人体には流れないような静電靴の抵抗値を定めることにした。すなわち、人体に流れる電流を静電靴によって可随電流以下におさえおけば、感電防止が行なえるであろうという考

え方を採用したのである。そこでの考え方によると、可随電流を  $I_m$  としたとき、静電靴の抵抗は次の関係

$$R > \frac{V}{I_m} - R_m \quad (22)$$

を満足するものでなければならないことになる。

以上のようにして求められた条件式に数値を代入して抵抗値の範囲を求めてみる。可随電流としては電流値の小さな方である女子の平均値<sup>12)</sup>を採用して  $I_m = 10.5 \text{ mA}$ 、低圧充電部の電圧としては  $440 \text{ V}$ 、人体の抵抗としてはこれも種々の条件によって変わるので<sup>12)</sup>安全側を求める意味でゼロとすれば、これらを(22)式に代入して、静電靴の抵抗範囲は

$$R > \frac{440}{1.05 \times 10^{-2}} - 0 \div 4.2 \times 10^4 (\Omega)$$

として求まってくる。すなわち、低圧の動電気による感電防止も考えるならば、静電靴の抵抗値が両足で  $4.2 \times 10^4 \Omega$  以上のものでなければならないことになる。

#### 4. 静電靴の静電気漏洩回路

理論解析の結果、静電靴としてはその抵抗値が  $7.1 \times 10^9 \Omega$  以下のものでなければならないと求められた。また、低圧動電気の感電防止も考慮するならば、先の条件にさらに  $4.2 \times 10^4 \Omega$  以上の抵抗値をもった静電靴が望ましいという結果が得られた。このように理論解析によっては以上のような結果が得られ、これはその解析過程からいっても靴を実際に履いている状態で満足されていなければ、静電靴としては全く意味のないものであることも当然である。しかし、実際に静電靴を履いている状態でその抵抗値を測定すること、あるいは抵抗値を定量的に管理することは困難でもあり、非効率なことでもある。したがって、実際問題としては靴単体で予めその抵抗値を測定しておくことになるが、そのとき人体に帯電している静電気が静電靴のどのような経路を通して漏洩するのか、靴の静電気漏洩回路を明らかにしておく必要がある。換言すれば、静電靴の静電気漏洩回路を明らかにし、その漏洩回路の抵抗を測定しておかなければ、得られた測定結果も全く意味のないものになってしまうからである。以上のような観点より、ここでは静電靴の静電気漏洩回路について実験から検討してみた。なお、この実験に使用した試験用の靴は、作業靴として比較的使用頻度の高い短靴である。

実験に使用した短靴ならびに一般の短靴は図 10 に示すような部分から構成されているが、これを静電気の漏洩回路という立場からみれば、これは 2.1 でも述べたとおり、単に抵抗回路があるに過ぎないということになる。すなわち、これを履いている人の足と接地体とが電極となり、その間に存在する靴は抵抗体であるということになる。しかし、この抵抗体の各部に構成されている漏洩回路については定量的に分析されてなく、またどの漏洩回路が支配的であるかについても明らかでないため、ここではこれを実験によって調べてみた。

実験では図 11、図 12 に示すように靴の抵抗値を測定するために、靴の内部には靴型の全面にアルミ箔を張りつけた電極 a を用い、一方、靴底の部分には金属平板電極 b を用いた。そうして被測定靴をこの金属平板電極 b の上に置いた。なお、被測定靴と金属平板電極との間には接触をよくする意味で導電性ペーストを使用した。また、この実験では、靴各部の抵抗値(漏洩状態)を測定するために、腰革の上部周辺にはアルミ箔の帯状電極 c を、靴底の上部周辺には直径 1.6 mm のメッキ線電極 d を導電性ペーストによって固定した。

まず、実際の使用状態に比較的近い条件で靴の抵抗値を測定するため、a 電極に電圧を印加し、c、d 電極を浮遊して a-b 電極間の抵抗を測定した。その結果は表 1 に示すとおりであり約  $10^8 \Omega$  であった。次に a 電極の他 c 電極にも電圧を印加した場合と、d 電極にも電圧を印加した場合、ならびに c、d 電極にも電圧を印加した場合の 3 つについて b 電極との抵抗値を測定したところ、やはり表 1 に示すように抵抗値は約  $10^8 \Omega$  であって大差なかった。これは靴の内部に入れた靴型電極 a に電圧を印加すると、それだけで靴底を

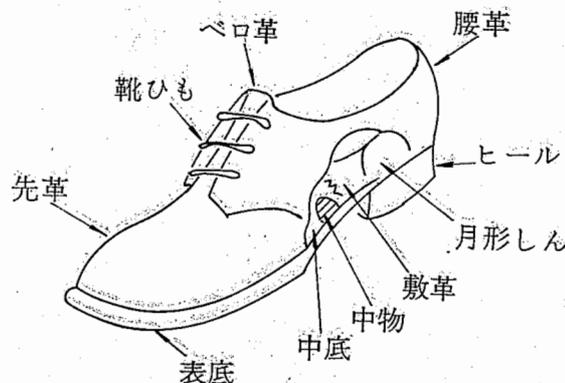


図 10 短靴の構造

除く先革とか腰革がすべて同電位に近くなるため、c ならびに d 電極を a と同じ電圧にしたからといってその電位分布がほとんど変化せず、各電極からの電流は靴底の内部を通して b 電極へ流れていることを示すものである。これは c、あるいは d 電極に電圧を印加した場合でも抵抗値に大きな変化が生じなく、多少小さくなる程度であるから、表面抵抗がそれほど靴の抵抗値を支配するものではないという結果であり、この場合には以上のことから電流が主として靴底に向かって流れ、靴の抵抗値がこの靴底によって定められていることを示している。また以上の測定条件は、先にも述べたように実際の使用状態に近いものであるから、この結果より靴を実際に履いている場合の状態が推察され、人体に帯電している静電気が主として靴底を通して漏洩すること、換言すれば靴底の抵抗値が主として漏洩状態を支配していると判断される。

以上のように、靴底より上部の先革、腰革等は靴型である a 電極に電圧を印加するだけで比較的同電位になることは明らかになったが、この部分の漏洩状態に

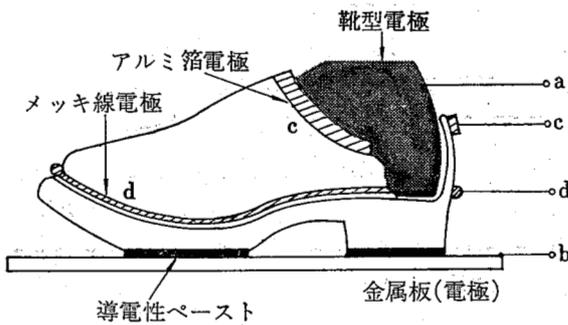


図 11 体積抵抗と表面抵抗測定法



図 12 短靴各部の抵抗測定に用いた電極

表 1 短靴の a-b 間の抵抗測定

測定電圧	測定条件			
	a 電圧印加 c, d 浮遊	a, c 電圧印加 d 浮遊	a, d 電圧印加 c 浮遊	a, c, d 電圧印加
V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
200	$4.25 \times 10^8$	$4.20 \times 10^8$	$3.64 \times 10^8$	$3.22 \times 10^8$
400	$4.04 \times 10^8$	$3.92 \times 10^8$	$3.47 \times 10^8$	$3.27 \times 10^8$
600	$3.87 \times 10^8$	$3.87 \times 10^8$	$3.44 \times 10^8$	$3.19 \times 10^8$
800	$3.81 \times 10^8$	$3.85 \times 10^8$	$3.47 \times 10^8$	$3.22 \times 10^8$
1000	$3.80 \times 10^8$	$3.85 \times 10^8$	$3.45 \times 10^8$	$3.22 \times 10^8$

注) 測定に使用した荷重は 20kg

ついてさらに確かめるため、使用状態とは多少異なるが a 電極に電圧を印加して b 電極、d 電極を接地し、これに流れる電流を同時に測定した。その結果より求めた抵抗値は表 2 に示すとおりである。これによると a-d 間の抵抗値は a-b 間の抵抗値の約 1/100 であり、a 電極から先革、腰革等を通して d 電極に流れ込む漏洩電流が非常に多いことを示している。また、d 電極の方へ向う電界が生ずるため a-b 間の抵抗も先程より多少大きくなっている。この結果は革の肉厚の薄いことにもよるが、本質的には革の部分の抵抗値が小さいことを示すものであり、先の実験で靴型の a 電極に電圧を印加すると靴底より上部がほとんど同電位となってこの部分に生ずる電位差が小さかったのはこのためでもある。これより靴の上部である先革、腰革等は靴底の抵抗値よりもその体積抵抗が非常に小さく足にも接触しているため、通常の使用状態ではほとんど足と同じ電位になり、足の表面が大きくなった電極効果のような作用をしていると推察される。またこの結果は、d 電極が接地体となるような異常な場合、靴の抵抗値が正常な場合の約 1/100 になることを示しており、このような状態にならないためにも静電靴の靴底にはある程度の肉厚が必要であることを示している。たとえば、靴底が水たまりにはっていると、この実験による d 電極が接地されたような状態に等価となるため、そのときには抵抗値が非常に小さくなるということである。

一方、人体の静電気は主として靴底を通して漏洩すること、換言すれば静電靴の抵抗値が主として靴底によって定まることをさらに確かめるため、靴底のみを切り出してその抵抗値を測定してみた。表 3 は靴全体の抵抗値と靴底の抵抗値とを比較して示したものであ

表 2 短靴各部の抵抗測定結果

測定電圧	a-b間の抵抗	a-d間の抵抗
V	$\Omega$	$\Omega$
200	$8.47 \times 10^8$	$4.39 \times 10^6$
400	$8.33 \times 10^8$	$3.88 \times 10^6$
600	$8.33 \times 10^8$	$3.63 \times 10^6$
800	$8.16 \times 10^8$	$3.43 \times 10^6$
1000	$8.10 \times 10^8$	$3.31 \times 10^6$

注) c電極は浮遊, a, b, c電極は絶縁, 測定に使用した荷重は20kg

るが, これによると抵抗値はほとんど同じ値であり, 多少靴底のみの抵抗値のほうが小さかった. これは靴底のみを取り出して測定すると, 靴型であるa電極から靴底の表面を通して流れる表面電流が靴全体の場合より多少大きくなったからであると推察される.

以上静電靴の漏洩回路について検討したところ, それは図13に示したように主として靴底を通じての漏洩であり, 靴の抵抗値も靴底によって支配されることが明らかになった. また先革, 腰革等は抵抗値が靴底よりも小さいため, 一般にはほとんど電極効果として作用し, 静電気の漏洩には作用していないことが判明した. しかし, 靴底全体が接地体になったような異常な場合には当然この部分を通しての漏洩が支配的になり抵抗値が小さくなることも確かめられた. このように先革, 腰革等の抵抗値が小さく, ほとんど電極効果であることを確かめるため, a電極である靴型電極全体にアルミ箔をつけた場合とその底部のみにアルミ板電極をつけた場合についてそれぞれの抵抗値を測定してみたが, 表4に示すようにほとんど同じ測定結果が得られた. したがって, この結果からも先革, 腰革等が静電靴の抵抗値に支配的でないことが明らかである.

以上のこれらの結果は, 靴底の肉厚が薄いもの, 靴の裏が平坦なもの等についても確かめたがすべて同じ傾向であった. しかし以上の結果は, 新しい短靴についての結果であり, 一般に表面抵抗等が各種の条件によって変化することを考えると, 靴の抵抗値もそれらの条件によって変化すると推察されるが, これについては次の5で検討する.

### 5. 抵抗値を支配する要因

人体の静電気帯電防止を実現するためには静電靴の

表 3 靴全体と靴底の抵抗値比較

測定電圧	靴全体の抵抗	靴底のみの抵抗
V	$\Omega$	$\Omega$
200	$1.16 \times 10^9$	$9.63 \times 10^8$
400	$1.11 \times 10^9$	$9.41 \times 10^8$
600	$1.07 \times 10^9$	$9.23 \times 10^8$
800	$1.02 \times 10^9$	$8.95 \times 10^8$
1000	$0.98 \times 10^9$	$8.60 \times 10^8$

注) 測定に使用した荷重は20kg

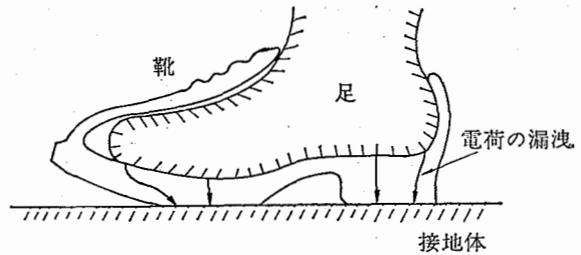


図 13 静電気の漏洩回路

抵抗値が約  $10^9 \Omega$  以下でなければならないこと, ならびにその抵抗は短靴の場合だと一般に靴底によって定められることが先の検討によって明らかになった. しかし, 靴単体でもってその抵抗値を測定したり, 靴の抵抗値を管理しようとする以上検討事項だけでは不十分である. すなわち, 靴単体の抵抗値と実際に靴を履いている状態での抵抗値とは必ずしも一致せず, むしろ条件が異なるために抵抗値も異なって当然である. したがって, 靴単体でもって測定したときの抵抗値と実際に履いているときの抵抗値とはいかなる相関関係にあるか, これを求める意味でも, あるいは靴が実際に使用されているときには汚れ, 湿度等の種々の条件によって抵抗値が変化すると考えられるため, これについて探求しておく意味でも, 靴の抵抗値を支配

表 4 靴型電極の違いと抵抗値の関係

測定電圧	靴型全体を電極とした場合	靴型の底部のみを電極とした場合
V	$\Omega$	$\Omega$
200	$4.25 \times 10^8$	$4.38 \times 10^8$
400	$4.04 \times 10^8$	$4.25 \times 10^8$
600	$3.87 \times 10^8$	$4.25 \times 10^8$
800	$3.81 \times 10^8$	$4.00 \times 10^8$
1000	$3.80 \times 10^8$	$3.97 \times 10^8$

注) 測定に使用した荷重は20kg

する要因を明らかにしておかなければならない。したがってここでは、これについて実験から検討してみた。実験では試験用の靴として先と同じく短靴を用いた。また、抵抗値の測定は表4から明らかなように靴型の底面のみにアルミ板を張りつけた電極を使用しても測定値には大差がないため、特別な目的の実験を除き、靴の内側にはこの靴型を入れてこれを一方の電極とし、被測定靴を置く金属板を他方の電極として靴の抵抗を測定した。なお、この実験でも靴の底には凹凸模様があるため、これと金属板電極との接触をよくする意味でこの部分には導電性ペーストを塗って実験した。

### 5.1 湿度と抵抗値

静電靴の漏洩回路について考察した4の結果によれば、静電靴の抵抗は主として靴底の体積抵抗によって定まることが確認された。すなわち、先革、腰革等は靴底よりも抵抗値が極端に小さく、これと靴底の抵抗とが電気回路的には直列にはいつているため靴底の抵抗によって定まることが確認された。また、靴底は表面抵抗よりも体積抵抗が非常に小さく、これらが電気回路的には並列にはいつているため体積抵抗が支配的であるという結果が得られた。しかし靴の表面抵抗は、種々の要因によって変化することが考えられ、なかでも雰囲気湿度によっては大きく変化することが推察される。したがって、ここでは湿度と抵抗の関係について調べてみた。

実験方法は表5に示すような調湿剤によって相対湿度の異なる雰囲気を作り、その中へ被測定靴を10~15日放置した後、その雰囲気の中で抵抗測定するという方法であり、測定時には靴型に30kgの荷重をのせて測定した。その実験結果は図14に示すとおりであるが、実験では同じ靴でも湿度の低い場合に測定値に多少のバラツキを生じたため、測定は数回(5~10回)繰返して行ない図14にはその平均値が示されている。

実験結果、図14によれば靴の抵抗値はやはり当初予想したように湿度の増加によって減少する傾向であり、とくにこの場合は湿度が60%以上になると抵抗値は急激に減少することが明らかになった。すなわち、この結果は靴の表面に水分が付着したため、その表面抵抗が減少し、それによって全体の抵抗も減少したものであると推察される。そこでここでは、これを確認する意味で、概略ではあるが低湿度である20%の

場合と高湿度である91%の場合について靴の体積抵抗と表面抵抗をそれぞれ測定してみた。測定方法は4で検討した図11に示した方法であり、体積抵抗はa-b間を、表面抵抗はa電極を接地し、d電極を浮遊してb-c間を測定した。その結果、体積抵抗は湿度20%の場

表5 調湿剤一覧表

相対湿度	調湿剤
0%	シリカゲル
20	臭化カルシウム
34	塩化マグネシウム
50	室内雰囲気
64	臭化ナトリウム
75	塩化ナトリウム
95	塩化バリウム
100	飽和水溶液

合  $2.5 \times 10^8 \Omega$ 、湿度91%の場合  $7.1 \times 10^8 \Omega$  と求まり、湿度によってそれほど変化していないことが確認された。しかし表面抵抗は前者の場合が  $1.5 \times 10^{10} \Omega$ 、後者の場合が  $6.5 \times 10^8 \Omega$  と求まり、湿度によって大きく変化していることが判明した。

しかし以上の結果だけで、湿度が高い場合は靴の抵抗値が体積抵抗よりも表面抵抗によって支配されるとは判断できないため、これについてさらに調べたところ、湿度が高くなるにつれて靴の表面抵抗が減少するという抵抗そのものの本質が変化することのほかに、靴底の底面がある部分電極と接触していても実質的に

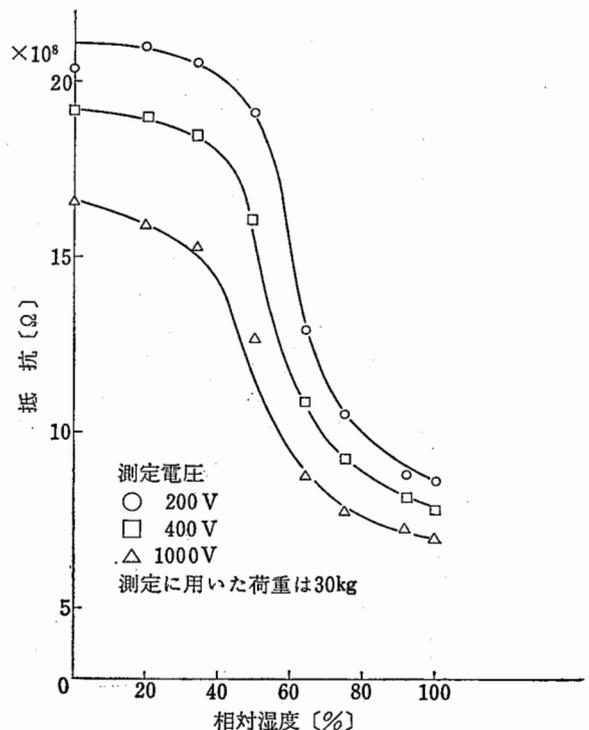


図14 湿度と靴の抵抗特性

はそれ以上の部分が接触していると等価な効果が現われて、みかけの抵抗値が減少していることも明らかになった。先の実験結果において湿度が高くなると体積抵抗も減少するという結果はその現象を裏付けているものである。

### 5.2 温度と抵抗値

短靴の主たる構成材料はゴム、革であり、これらの固有抵抗値は温度によって変わるものである。すなわち、一般的にはゴムが負の温度特性をもち、革が正の温度特性をもっているため靴の抵抗値は本来から温度特性をもっていると判断される。したがって、ここでは温度によって靴の抵抗値がどのように変化するか、その温度特性について調べてみた。

図 15 に示す特性がその実験結果であり、これは被測定靴を恒温槽の中へ入れて 5°C~40°C に対する抵抗値の変化を測定した結果である。この結果によると靴の抵抗値は温度が上昇するにつれて減少する傾向にあることが明らかになり、その変化は約 1 桁の範囲であることも確認された。以上の結果は測定に使用した靴がゴム底であり、温度に対しては革よりもその影響のほうが大きく現われたためにこのような実験結果が得

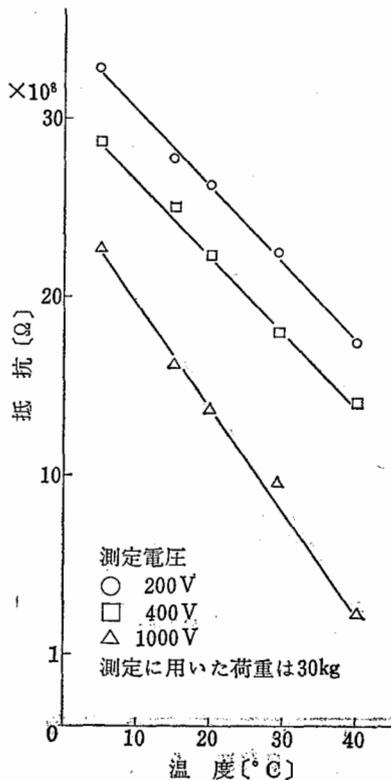


図 15 温度と靴の抵抗特性

られたのであると判断される。また同時に、この結果と 4 の実験結果とを合わせて検討すれば、この結果は靴の抵抗値が主として靴底の材質によって定まることを示している。

### 5.3 荷重と抵抗値

実際に静電靴を履いている状態では、これを履いている人の体重が靴にかかっている。換言すれば靴には荷重がかかっている状態である。したがって、この荷重と抵抗値との関係を求めるために、また靴を履いている状態での抵抗値と靴単体での抵抗値との相関を求めておくために、靴に加える荷重をいろいろ変えて抵抗値の測定を行なった。実験では、通常両足に成人の体重が平均に加わると仮定して、片足につき最高 35kg までの荷重を加え、荷重の加え方は靴型の上に重錘を乗せるという図 16 に示すような方法によって行なった。

図 17 はその実験結果を示したものであるが、これによると靴の抵抗値は荷重が 30kg までは荷重の増加によって減少していくのに対し、30kg 以上になるとほとんど変化しない傾向にあることが明らかになった。この結果は荷重が靴の抵抗値を支配する要因の 1 つであることにまちがいないことは示しているが、物性的には靴の抵抗そのものを変える要因というよりも、荷重は被測定靴と電極との接触状態を変える測定に関係した要因として作用するものであると予想される。したがって、これを確認する意味でここでは荷重を変えながら抵抗値の他に靴の静電容量も測定したところ図 18 に示すような結果が得られた。この図 18 には荷重に対する抵抗値の逆数、ならびに抵抗と静電容量との積である時定数も計算して示されているが、これから明らかのように時定数は荷重の小さい部分を除いて、ほとんど一定という結果であった。また抵抗の

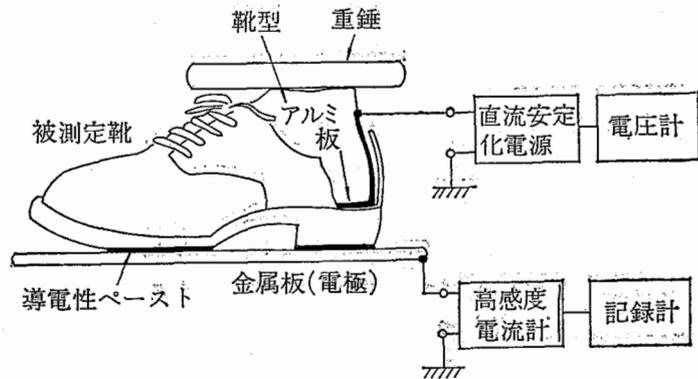


図 16 荷重を用いた抵抗値測定法

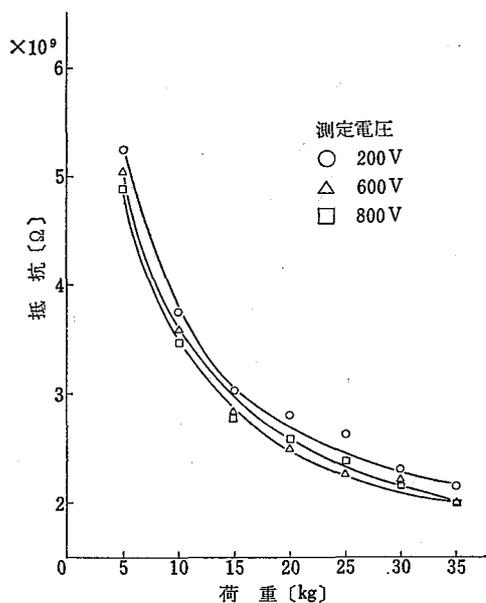


図 17 荷重と靴の抵抗特性

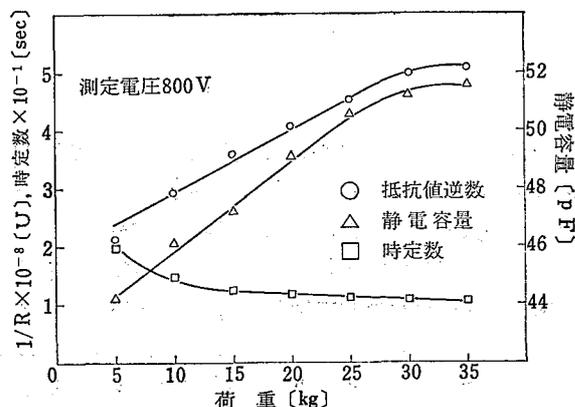


図 18 荷重と靴の抵抗, 静電容量, 時定数の関係

逆数も, 静電容量も荷重に対して約 30kg まではほとんど直線的に増加し, 30kg 以上ではほとんど変化せず一定という結果であった. これより荷重は靴の抵抗値そのものを変えるような物性とは無関係で, 抵抗値を測定するときの測定条件を変える要因に過ぎないことが判明した. すなわち, 時定数がほぼ一定ということからは, 荷重が靴の抵抗値そのものを変えるような靴の物性とは無関係であることが明らかであり, 抵抗の逆数, 静電容量が直線的であるということは, 荷重が靴の抵抗測定における電極の接触面積とか, 測定間隔等の幾何学的条件を変えるいわゆる測定条件に関係しているものに過ぎないことが判明した.

なお, 靴底に凹凸模様のない比較的平坦な短靴を用いて荷重特性を測定した結果, 図 19 に示すような結

果が得られ, 荷重が 20kg 以上になると抵抗値はほとんど変化しなかった. これは靴底が平坦であるだけに被測定靴と電極との接触状態が前の試料靴よりもスムーズであり, その結果それほどの荷重を加えなくても一定なることを裏づけている. したがって, この結果からも荷重は抵抗測定の測定条件に関する要因として作用するに過ぎないものであることが明らかである.

#### 5.4 測定電圧と抵抗値

一般にゴム, 革等はこれに印加される電界によってその固有抵抗が変わるものである. また人体の帯電電位は 2, 3 の検討から明らかでないように一定ではなく, さまざまな電位となるため, 結果としては人体と接地体との間に存在する静電靴に種々の電位が印加されることになる. したがって, 靴に印加される電位(電界)によってその抵抗値がどのように変化するか, これについて調べてみた. 実験では 3.1 の検討によって人体の帯電電位が最大  $V_{max} = qR = 710V$  までは上昇すると考えられるため, 測定電圧を 1000V まで変えて靴の抵抗変化を調べてみた.

実験結果は図 20, 図 21 に示す通りである. 図 21 は靴底の肉厚が 12mm ある比較的厚いものについて, 図 21 はそれが 5mm と比較的薄いものについて調べた実験結果であるが, 両者とも測定電圧が高くなるにつれて抵抗がほぼ直線的に減少するという特性であった. また電圧に対する靴の抵抗の変化率を

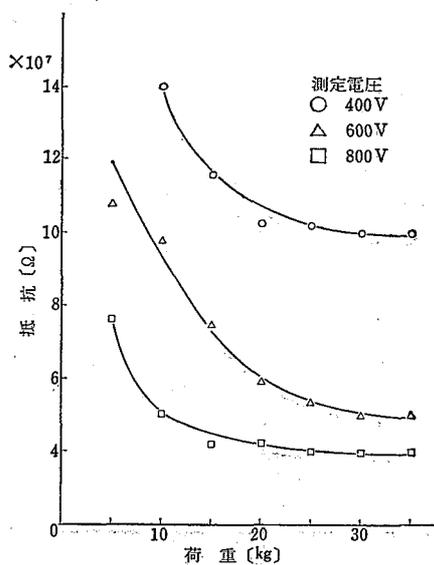


図 19 荷重と靴の抵抗特性 (靴底が平坦なもの)

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{V=V_1} \quad (23)$$

で定義すると、この実験結果からは  $V_1=600\text{V}$ 、荷重  $5\text{kg}$  のとき、靴底の厚いものよりも靴底の薄いもののほうが約4倍大きく、靴の場合にも電界が大きくなるに従って抵抗値の電界依存性が顕著に現われるという一般的な特性<sup>18)</sup>に一致することが明らかになった。

### 5.5 汚れと抵抗値

実際に靴を履いている状態では各種の汚れが付着し、これによって抵抗値が変化すると考えられる。したがって、ここでは靴の表面(先革、腰革)、および靴底に各種の汚れをつけ、汚れと抵抗値の関係について検討した。

まず、靴に人工汚れをつけて靴の抵抗値を測定したところ表6に示すような結果が得られた。この中で靴クリームによる汚れを除いて他はすべて靴の外側表面、靴底全体にこれらの汚れを付けて測定したものであり、中性洗剤によって汚れた場合を除いては、抵抗値に大きな変化がみられなかった。これは先革、腰革の表面抵抗率がもともと約  $10^7\Omega$  と小さい値であるために、それらによって汚れてもその値が差程変化しなかったからであると考えられる。ただ中性洗剤に対しては水分が多いために、靴の表面に水分の膜ができたような状態となり、これによって抵抗値が約1桁小さくなったと推定される。

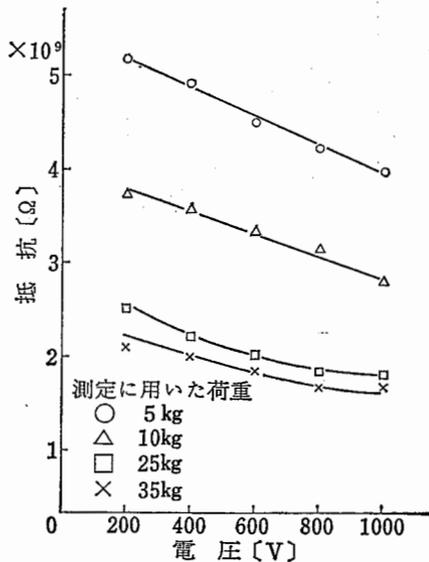


図 20 測定電圧と靴の抵抗特性

\* 図 25 の実験データを参照すること。

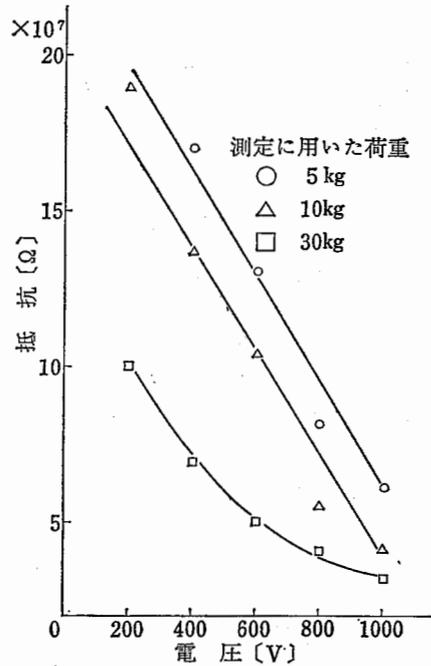


図 21 測定電圧と靴の抵抗特性 (靴底が平坦なもの)

一方、汚れの影響については人工汚れだけでなく実際に汚れの激しい現地で靴を1週間使用し、その抵抗値についても測定した。これは汚れの影響のほかに次の経時変化にも関係するものであるが、現地から回収してきた靴の抵抗値を測定したところ表7に示す結果が得られた。この中には現地によって非常に汚れたものもあったが、これによる抵抗値はすべて約1桁程度小さくなるということが判明した。しかし、これは必ずしも汚れのみの影響ではなくて、むしろ1週間の使用によって靴の内部が非常に多湿状態となったために抵抗値が小さくなっていることが明らかとなり、その影響のほうが大きいことが確かめられた\*。

### 5.6 抵抗値の経時変化

実際に靴を履いている状態では靴底の消耗等によって抵抗値が変化すると考えられる。したがって、ここでは靴を実際に長期間履き、これによる抵抗値の変化を追跡した。その結果は表8に示すとおりである。これによると6ヵ月使用したものについては、図22に示すように靴の表面に多くの傷ができ、靴底のヒール、凹凸模様もかなり摩耗していたが、最初の抵抗値よりも約1桁小さくなる程度で抵抗値にそれほど大きな変化はなかった。とくに靴の抵抗値は使用して1週間後

表 6 汚れと靴の抵抗値の関係

汚 れ	靴 の 抵 抗 [Ω]		
	試料A	試料B	試料C
汚 れ な し	$1.4 \times 10^9$	$8.2 \times 10^8$	$3.8 \times 10^8$
塗 料	$1.1 \times 10^9$	$8.1 \times 10^8$	$3.8 \times 10^7$
油 (灯 油)	$1.4 \times 10^8$	$8.1 \times 10^8$	$3.4 \times 10^7$
使用済み機械油	$8.6 \times 10^8$	$7.5 \times 10^7$	$3.4 \times 10^7$
中性洗剤(液)	$2.0 \times 10^8$	$6.9 \times 10^7$	$3.0 \times 10^7$
靴 ク リ ー ム	$1.0 \times 10^9$	$1.4 \times 10^8$	$3.8 \times 10^7$

注) 測定電圧 500V, 荷重 30kg

にすでに約1桁小さくなっており、その後の抵抗値は大きな変化がみられなかった。したがって、これについても5.5と同様、使用によって靴の内部が多湿状態になるから抵抗値が最初に大きな変化をするのであって、実際には長期間の着用によっても差程抵抗に変化がないと推定される<sup>14)</sup>。ただし、以上の実験は産業安全研究所の屋外実験で長期間使用し、定期的にその抵抗値を測定して得た結果であって、溶剤等の使用頻度が高い現地等における抵抗値の経時変化については現在のところまだ検討中である。

表 7 汚れと靴の抵抗値の関係 (現地実験)

使用した工程	靴 の 抵 抗 [Ω]	
	使用 前	使用 後
グ ラ ビ ア 印 刷	$2.5 \times 10^9$	$3.2 \times 10^8$
ゴ ム 粘 り 製 造	$3.1 \times 10^9$	$6.0 \times 10^8$
塗 料 製 造	$3.2 \times 10^9$	$3.0 \times 10^8$
溶 剤 に よ る 洗 浄	$7.5 \times 10^9$	$3.4 \times 10^8$
機 械 保 守	$7.5 \times 10^9$	$3.0 \times 10^8$

注) 測定電圧 500V, 荷重 30kg

## 6. 抵抗測定法と抵抗値の検討

3の検討からは静電靴の抵抗値が明らかにされ、4、5の検討からは靴の静電気漏洩回路、抵抗値を支配する要因が明らかにされた。しかし、以上の検討によって得られた結果は、前者が理論的な検討から求めた抵抗値であり、後者は静電気の漏洩回路、抵抗値を支配する要因を解明するために採用した抵抗測定法によって求めた結果である。したがって、ここでは以上の検討結果を考慮に入れながら、もう少し実際のな靴

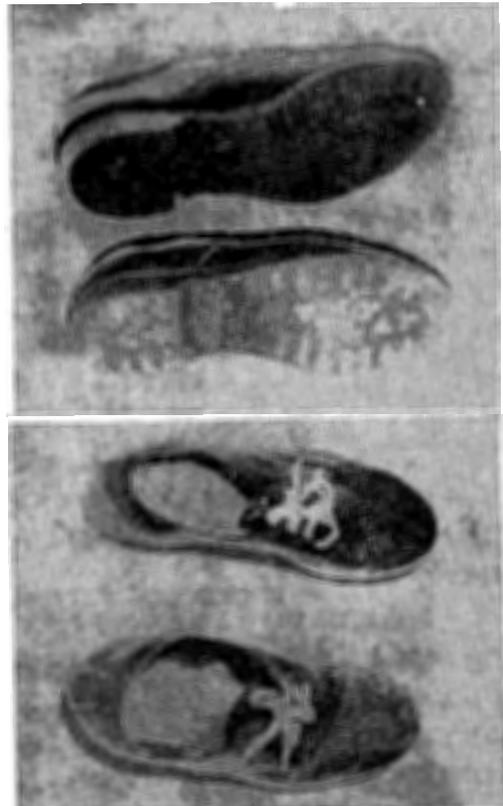


図 22 新しいものと6ヵ月使用したものとの比較

表 8 靴の抵抗値の経時変化

静 電 靴	靴 の 抵 抗 [Ω]					
	使用 前	使用1週間後	使用3週間後	使用1.5ヶ月後	使用3ヶ月後	使用6ヶ月後
試 料 A	$2.8 \times 10^9$	$1.1 \times 10^8$	$1.2 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$	$1.3 \times 10^8$	$1.6 \times 10^8$
試 料 B	$9.4 \times 10^8$	$8.6 \times 10^7$	$7.4 \times 10^7$	$7.0 \times 10^7$	$6.5 \times 10^7$	$6.5 \times 10^7$
試 料 C	$2.5 \times 10^7$	$2.4 \times 10^7$	$1.2 \times 10^7$	$1.4 \times 10^7$	$7.0 \times 10^6$	$7.5 \times 10^6$

注) 測定電圧 500V, 荷重 30kg

単体での抵抗測定法について、換言すれば靴を実際に使用している状態での抵抗値と相関関係が得られるような測定法について検討してみる。また、この測定法によって得られる抵抗値を採用すると、静電靴としてどの範囲の抵抗値が望ましいかも3の検討を考慮しながら改めて検討してみる。

### 6.1 静電靴の抵抗測定方法

4, 5ではすべて図16に示したような測定方法を採用して靴の抵抗値を検討してきた。すなわち、測定電極としては一方が金属板で、この上に導電性ペーストをつけた靴を置き、これと靴内部に入れた靴型を他方の電極として、抵抗値の測定を行ってきたのである。その結果、靴の抵抗値は主として湿度、荷重等によって大きく変化し、電界、汚れ等によってはあまり変化しないことが明らかになった。なお、靴を実際に使用すると靴の内部が多湿状態になるために、以上のような測定方法だと靴の使用前と使用後の測定値に大きな変化の生ずることも判明した。

以上の結果はその概要をまとめると、靴の抵抗値がこれを本質的に支配する要因である温度、電界等よりも、むしろ測定条件を支配する要因である荷重、電極等によって大きく支配されるということである。ただし、湿度は靴の表面抵抗等を支配する本質的な要因であると同時に、測定条件も支配する要因となっており、静電靴の抵抗測定に湿度の影響は無視することができないことが判明した。

これより問題となるのは主として湿度の影響を考慮した靴単体での抵抗測定法であるから、ここではおもにこれに焦点を絞って検討してみた。まず靴を使用している状態では5.5, 5.6からも明らかなように靴の内部は非常に多湿状態となっており、また靴の外側も湿度が60%以上の雰囲気で使用されていると、5.1の検討から明らかなように、靴底の一部が接地体と接触しているだけで靴底全体が接地体に接触していると等価な効果が現われ、靴の抵抗値は比較的小さくなっていった。したがって、ここではこのような多湿状態で使用されているときの抵抗値と確かな相関関係が得られる靴単体での抵抗測定法を試みた。詳細については付録に示すが、この方法は先と同じく被測定靴の内部に靴型の電極を入れてこれを一方の電極とし、他方は水を十分含

んでいるスポンジがはいっている金属製容器を電極として用いたもので、後者の電極の上へ図23に示すように導電性ペーストをつけない被測定靴を置いて抵抗値を測定する方法である。このような測定方法（これを仮に湿式測定法と呼ぶ）によって得られた結果は図24, 図25, 図26に示すとおりである。

図24は同じ試料の短靴を用いて前の測定方法（これを仮に乾式測定法と呼ぶ）で測定した結果と比較したものであるが、湿式測定法によると約1桁近く測定値が小さくなることが明らかである。しかし、乾式測定法による湿度が100%の測定結果と比較すると、測定値が多少小さい程度であり、5.5, 5.6から明らかにされた実際の使用状態を考慮すると、乾式測定法よりも湿式測定法によって得られた結果のほうが実際の使用状態にむしろ近い測定値が得られていると考えられる。ちなみに図25は乾式測定法によって測定した靴を実際に2時間履いた後、これを履いている状態で測定した結果と湿式測定法によって測定した結果とを比較したものであるが、実際に使用している状態での抵抗値は湿式測定法によって得られた結果に比較的近い値であることが判明した。

また、図26は荷重を10kgまで変えて測定した結果であるが、この測定方法を採用するとやはり乾式測定法によって得られた結果より約1桁近く小さい値であった。しかし、荷重による測定値の影響がほとんどなく再現性も極めて良好であった。これは裏をかえすと乾式測定法で抵抗測定した場合は、5.2で検討したように測定電極の幾何学的条件が荷重によって変化したため、抵抗値も変化したのに対し、この方法ではそのようなこともない極めて安定な測定条件のもとに抵抗値が求まる測定方法であることを示している。また、この結果と前の実験結果を合わせて検討すると、

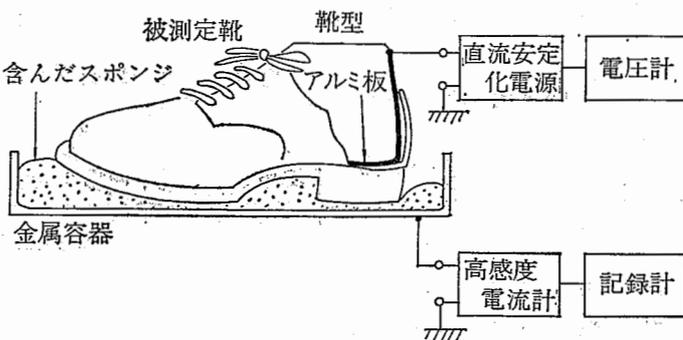


図23 湿式測定法概要

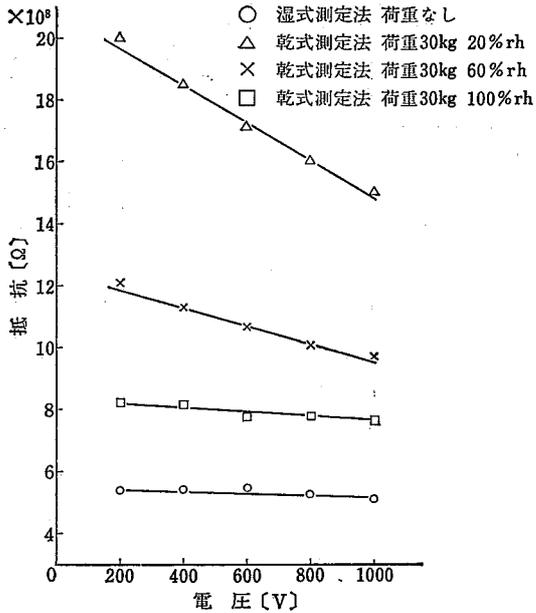


図 24 乾式測定法と湿式測定法の比較実験結果

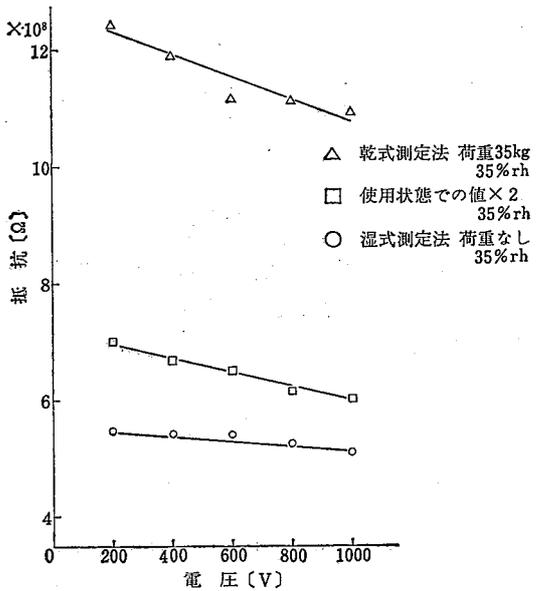


図 25 湿式測定法と使用状態の抵抗値比較実験結果

実際に靴が湿度の高い雰囲気中で履かれているときの抵抗値に近い値が、この測定方法によると荷重をかけなくても測定されることを示しており、簡便な測定法であるといえる。なお、荷重が10kg以上になると湿式測定法ではスポンジに含まれている水が少なくてもスポンジ電極の中に靴がはいりこんでしまうため測定が不可能であった。

これより靴を実際に履いている状態での抵抗値を推

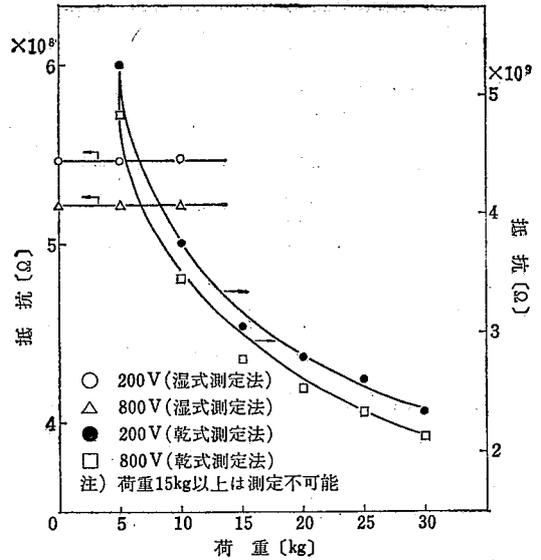


図 26 湿式測定法による荷重と靴の抵抗値

察するには靴単体の抵抗を湿式測定法によって測定すればよく、この方法によって使用状態に比較的近い値の得られることが明らかになった。また、この測定方法は荷重を加えなくても測定できる簡便な方法であり、測定値も再現性の得られる安定な方法であることが判明した。したがって、本報告では以下この測定方法を静電靴の標準測定方法と定め、これについての詳細を付録に示した。

## 6.2 静電靴の抵抗値

靴単体で実際の使用状態に近い抵抗値が求められる測定方法を検討したところ、湿式測定法が望ましいことが明らかになった。すなわち、この方法を採用すると測定条件も簡便であり、再現性も得られて測定値に信頼性の高いことが期待できる。しかし、この湿式測定法は6.1の実験結果から明らかなように比較的湿度の高い状態で使用されている場合の抵抗値を推察することに照準を合わせた方法であるため、一般的にはこれよりも抵抗値の高い状態で使用されていると判断するのが妥当である。したがって、このような点、ならびに3の検討結果を考慮しながら静電靴の抵抗値について改めて考察してみる。

まず湿式測定法によって得られる測定結果を採用すると、これは5.、6.1の検討結果から実際の使用状態の抵抗値よりも小さいか少なくとも同程度であると判断される。すなわち、この湿式測定法では実際の使用状態で抵抗が最も小さい場合を測定していることにな

る。しかし、実際の使用状態では非常に乾燥した冬期もあり、乾燥した室内で使用されることもあるため、先に述べたように湿式測定法で求められた値よりも実際には高い値になる場合があると推察される。また、一般には靴下を履いているのが常識であるため、靴下によって結果的には抵抗値が大きくなってしまいうこともある。したがって、これについて 5.1, 6.1 の実験結果を考慮して検討してみると、実際の使用状態で最も抵抗値が大きくなった場合は、湿式測定方法によって得られた結果の約 1 桁大きいことがあると判断される。また、靴下の影響であるがこれは各種の靴下を履いて人体の帯電電位を実験によって調べた結果、表 9 に示す結果が得られ、とくに厚い靴下を除いては、その影響のないことが明らかになった。ただし、この実験は靴下を履いて 10 分間歩行してから測定であるため、靴下の影響がまだ多少出ているが、実際の使用状態では靴下が吸湿してしまうため、靴下の影響はほとんどないと考えられる。これより抵抗の高い場合としては湿式測定法によって求められた値より実際には約 1 桁大きい場合があるとして、3.1 の結果を考慮すると湿式測定法によって得られた値が片足につき

$$\frac{7.1 \times 10^9 \times 2}{10} = 1.4 \times 10^9 (\Omega)$$

以下であれば人体帯電による静電気の危険性が防止できることになる。ただし、水素、アセチレン等のとくに危険性が高いものを取り扱っている場合は、片足につき

$$\frac{2.1 \times 10^9 \times 2}{10} = 4.2 \times 10^8 (\Omega)$$

以下でなければならないことになる。

これより静電靴は湿式測定法によって得られた結果が以上のような値よりも小さいものでなければならないことになり、この数値は 3.1 の検討結果を考慮したときこのまま採用してもよいが、一般の可燃性混合気を取り扱っているところでは、この値を多少安全側にした  $10^9 \Omega$  以下の靴を、水素、アセチレン等を取扱っているところでは  $10^8 \Omega$  以下のものが望ましいと判断される。すなわち、3.1 で数値を決定するときすでに静電容量、着火エネルギー、発生電荷量の点で安全側の値を採用しており、人体の静電気帯電現象は常時起きているものでないため、それほど大きな安全係数を採用する必要がないからである。

一方、低圧動電気の感電防止も行なうならば湿式測

表 9 人体帯電に及ぼす靴下の影響

靴	衣服脱衣直後の人体帯電電位[kV]			
	素足	厚手靴下	毛靴 100% 下	導電性靴 下
ゴム底運動靴	20.0	19.0	21.0	21.0
革靴(新)	5.0	8.5	7.0	6.0
革靴(使用)	3.5	5.0	4.0	3.0
ゴム底革靴A	2.0	4.0	3.5	3.0
ゴム底革靴B	3.0	4.0	3.5	3.5
ゴム底革靴C	4.0	5.5	5.0	5.0

定法で得られた抵抗値が片足につき

$$4.1 \times 10^4 \times 2 = 8.2 \times 10^4 \Omega$$

以上あれば 3.2 の検討結果に基づいて感電する危険性はないことになる。すなわち、実際に使用しているときに非常に乾燥したような場合でも、5.1 の検討から抵抗値は大きくなる傾向であるから感電という点では危険性がより排除され問題のないことになる。これよりこの場合にもさらに安全性を考慮するならば  $10^5 \Omega$  以上のものが望ましいことになる。

以上の結果をまとめると、簡便な点、再現性の点からも静電靴は湿式測定法によって測定することであり、これより得られた抵抗値  $R$  が片足につき、一般の場合は

$$10^5 \leq R \leq 10^9$$

着火エネルギーの小さいものを取り扱っている作業者は

$$10^5 \leq R < 10^8$$

の範囲内にある静電靴を使用することが安全上望ましいことになる。

## 6. 結 言

人体の静電気帯電防止を行なうには人体を静電的に接地状態とすることが基本であり、これを具体的に実現するために履物の抵抗値について検討した。その結果、人体と接地体との抵抗が、換言すれば履物の抵抗が一般には  $7.1 \times 10^9 \Omega$  以下であれば良いという結果が理論解析から求まった。また、これを定量的に管理するために短靴を用いて靴の抵抗値を支配する要因、その測定方法を検討したところ付録に示すような湿式測定法が望ましく、この方法によって抵抗を測定した場合は、抵抗値が片足につき  $10^9 \Omega$  以下であるもの、あるいは水素等を取り扱っている危険性の高いところでは  $10^8 \Omega$  以下のものが望ましいことも判明し

た。すなわち、短靴の抵抗値が以上のようなものが静電靴として望ましく、この範囲にあれば人体帯電による爆発、電撃等の危険性は防止できることになる。一方、低圧機器、配線に触れた場合の感電防止も考えるならば先の条件にさらに  $10^5 \Omega$  以上の抵抗値を持った靴が望ましいことになる。しかし、実際問題としてはかなり複雑な要因もあって、以上の検討結果だけで、あるいは最初の抵抗測定だけで静電靴の性能が常時満

足されていると判断することはできない。したがって、人体の静電気帯電防止をさらに徹底させるためには、やはり実際の使用状態において随時抵抗値の定量的な管理を行なうことが望ましく、これについての具体的な方法は現在本研究所において検討中である。

最後に本研究を行なうにあたって御指導、御便達いただいた本研究所の上月三郎所長に心から謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 田島, 児玉, 上月, “産業安全研究所技術資料” RIIS-TN-70-3 (1970)
- 2) 斉藤, “応用物理” 32(2) pp. 301~308 (1963)
- 3) 三田村訳, “ドイツ規格, 靴の安全装備 DIN-4843” (1968)
- 4) “Draft ISO Recommendation No. 2623. ISO/TC-45” (1969)
- 5) “British Standard Specification” BS-2050 (1961)
- 6) B. Lewis, G. von Elbe, “Combustion, Flame and Explosion of Gas” Academic Press p. 323 (1961)
- 7) 田島, “産業安全研究所技術資料” RIIS-TN-71-1 (1971)
- 8) 高分子学会編, “静電気ハンドブック” 地人書館 pp. 245~255 (1967)
- 9) 田島, “OHM” 2(58) pp. 23~48 (1971)
- 10) 橋高, “プラスチックの帯電防止” 日刊工業, p. 24 (1967)
- 11) C. F. Dalziel, “IEEE Trans, On Industry and General Application” IGA-2(4) pp. 263~273 (1963)
- 12) 田中, 市川, “産業安全研究所安全資料”, RIIS-SD-70-1 (1970)
- 13) 田中, 犬石, “電気材料” オーム社, pp. 323~325

(昭和46年4月8日受付)

付 録

# 静電靴の抵抗測定法

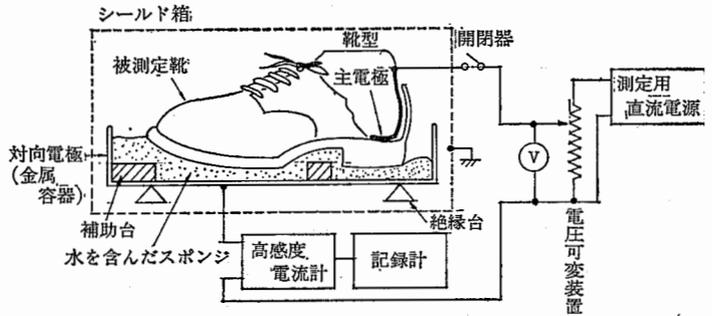
## A.1 測定回路と電極

静電靴単体でその抵抗を測定するには湿式測定法が望ましいことを本論で述べた。そこで、ここでは短靴に関してのその測定方法を具体的に説明する。

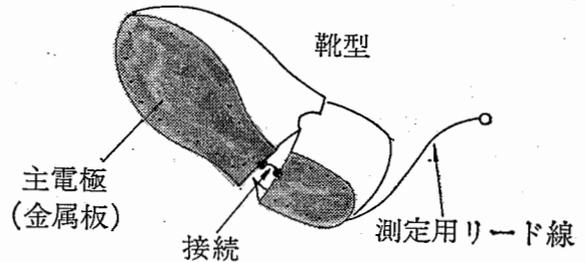
まず測定回路であるがこれは図 A-1 に示すとおりである。ここで電源はリップルの少ない安定化電源か乾電池を直列に接続したものを使用することである。また、被測定靴には零から次第に高い電圧が印加されるように図 A-1 にその一例を示すような電圧可変装置をつけておくことである。電流計は  $10^{-6}A$  程度の微小な電流が測定できる高感度なもので、できれば記録計が接続できる電子式高感度電流計が望ましい。また、接続リード線は絶縁特性の優れたシールド線か同軸ケーブルを使用することであり、外部の雑音もしゃへいする意味で図 A-1 に示すように被測定静電靴をシールドすることである。

なお、ここでは電源、電流計等を用いて抵抗測定する回路を示したが、これだけでなくこれと等価であるならば絶縁計、抵抗測定器を用いて測定してもよい。

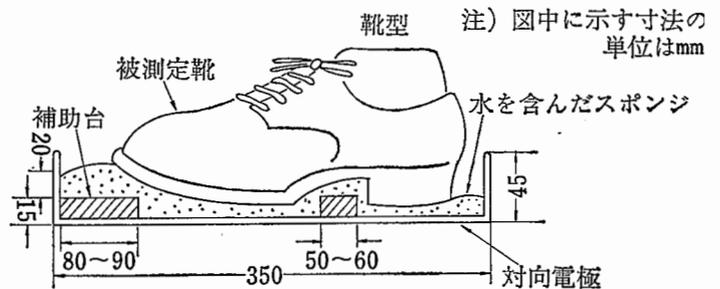
つぎに、測定に必要な電極であるが、主電極は図 A-2 に示すように靴型の底面に薄い金属板 (0.3mm~0.5mm のアルミ板または銅板、黄銅板) を張りつけたものを使用し、対向電極には被測定靴の底面全体が接触するような水を含んだスポンジのはいっている金属製の箱 (たとえば長さ、幅、高さがそれぞれ 350mm×150mm×45mm であるようなもの) を用いる。ここで湿式測定法では対向電極と被測定靴との接触をよくするためにスポンジの下には図 A-3 に示すような補助台によって凹凸を金属製の容器につけることであり、スポンジへの注水は各部の含水量が均一となるように注意すべきである。



図A-1 静電靴の抵抗測定法(湿式測定法)



図A-2 靴型を利用した主電極



図A-3 対向電極と被測定靴との設定法

## A.2 測定電圧と測定時間

図 A-1 に示す測定方法によって静電靴の抵抗を測定するとき、その測定電圧は 3.1 ならび 4.4 の検討結果からここでは 800V ないし 1,000V と定めた。ただし、靴は一般に電界によってその抵抗値が変化するため、その傾向を知る意味でも、被測定靴には瞬時に高電圧を印加せず、電圧を零から次第に測定電圧の 800~1,000V まで上げて抵抗値を測定することが望ま

しい。

つぎに測定時間であるが、これは実験によって調べたところ電圧設定直後の抵抗値が最も小さく、後は時間の経過とともに抵抗値が増大してゆく傾向であった。しかし、その変化が小さいこと、人体の電位が、裏返すと静電靴に印加されている電圧が一般に時々刻々変化していること、またこの測定法が靴の抵抗値の小さい場合を求めることに主体を置いた測定法であること等から、ここでは測定時間を測定電圧に設定してから 30 秒と定め、30 秒後の値を採用することにした。

### A.3 測定における留意事項

最後に抵抗を測定する場合の留意事項について述べると、まず測定に入る前に被測定靴と電極との接触状態について良く検査しておくことであり、とくに対向電極のスポンジと靴底面全体とが接触するようにスポ

ンジには適当なそりを与えることである。また、靴底の側面、ヒールの側面にスポンジ、水が付着しないよう十分注意することであり、水が付着している場合は吸水性のよい紙でふき取ることである。

つぎに測定器の動作を確かめた後、電圧を次第に上げて抵抗値を測定することになるが、そのとき電極、接続リード線等から放電を起こしていたり、電極と被測定靴との接触がスムーズでないと測定値が非常に不安定となる。したがって、このような場合には靴型の上より絶縁のよい棒等で軽く押えるように荷重を加え靴底すべてが電極に接するようにすることである。靴底全面が接触していれば荷重の加え方等によって抵抗値が変化することなく安定な測定が行なえる。ただし、このとき靴底の側面までスポンジが接触しないよう注意しなければならない。

### 本書の刊行にあたって

本書は従来、労働省産業安全研究所において刊行し、関係方面に頒布されていたものでありますが、これだけの貴重な研究資料の配布が限られた範囲内だけにとどまっていることは、まことにもったいないという声もあり、この入手方法などの間合わせも多いので、当協会としましては、労働省産業安全研究所の諒承を得ましてより広く頒布することにしました。関係各方面のご活用を期待いたします。

昭和 46 年 7 月

社団法人 産業安全研究協会

### 産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-71-2

昭和 46 年 7 月 10 日 発行 頒価 200 円

昭和 49 年 12 月 15 日 4 版 (送料 55 円)

著 者 労働省産業安全研究所

発 行 社団法人 産業安全研究協会

〒 108 東京都港区芝 5 丁目 35 番 4 号

電 話 (03) 455-3957