

# 繊維・高分子材料の静電気測定法とその実際

## *Assessing Methods for Static Electrical Propensities of Textile and Polymer Materials*

木村 裕和\*

*Hirokazu Kimura*

(2000年7月7日 受理)

キーワード：静電気，帯電性，繊維・高分子材料，静電気測定法，人体帯電圧

### 1. はじめに

静電気は、狭義には「空間のあらゆる場所において電荷の移動がないような電気」と定義され、広義には「電荷の空間的移動がわずかであって、それによる磁界の効果が電界の効果に比べて無視できるような電気」と定義されている<sup>1)</sup>。実際には、その帯電量、すなわち「電荷の発生量－漏えい量」が問題になる場合が多い<sup>2)</sup>。

一般に、繊維や高分子材料は比抵抗が大きいので、電荷の発生量が多く、漏えいしにくい性質を持つ物質である。そこで、これまでに静電気帯電防止の観点から、繊維・高分子材料を中心に多くの帯電防止材(剤)や静電気除去装置が開発されてきた。一方、静電気の持つ性質を積極的かつ有効に活用した技術も実用化されている。代表例としては、複写機やレーザープリンターなどの電子写真関連機器あるいは集塵用エレクトレットフィルターや静電スプレー塗装法などが挙げられる。

いずれの場合にしても、帯電量を正確に把握することが重要となる。しかし、静電気の測定においては電荷を移動させると瞬時に帯電状態が変化したり、接触するだけで電荷の移動が発生するなどの問題がある<sup>3)</sup>。さらに、静電気の発生は表面現象であり、温湿度などの環境条件や取り扱い条件あるいは物体自身の状態に強く影響され、再現性に乏しいという特徴がある<sup>4)</sup>。

静電気の測定に際しては、これらの特徴を理解した上で実施し、結果を評価することが重要であり、目的

に応じた測定法を正しく選択することが大切である。

本稿では、人体帯電を含め、繊維製品、高分子材料の静電気測定法とその実際を概説する。

### 2. 静電気障災害と制電加工法

静電気が様々なトラブルを引き起こすことはよく知られている。図1には静電気障災害の種類とその一例を示した<sup>5)</sup>。ここでは、静電気障害を電気力障害と放電障害に大別しているが、その内容は、自動車の乗降時に受ける電撃ショックや脱衣時に発生する不快な放電音のように日常的に経験する比較的軽微なものから、精密機器への塵埃の付着や印刷、塗装、紡績現場における生産障害あるいは爆発・火災など人命に係わるような深刻な事故に至るものまで実に多くの事例<sup>6)</sup>がある。

特に近年、半導体素子の高集積化と静電気に対する脆弱化<sup>7)</sup>から、空調の完備したオフィスなどでは人体や椅子からの静電気放電がOA機器の誤動作や故障の原因となることが指摘されている<sup>8)</sup>。また、医薬品分野では顆粒剤や散剤などの薬剤と分包紙間の帯電による付着現象が問題視される<sup>9)</sup>など新たな課題が発生している。

繊維や高分子材料には、何らかの静電気対策が施されていることが多い。繊維や繊維製品に対する制電性の付与方法には、次のようなものがある<sup>10)</sup>。

①一時制電性の付与方法：帯電防止剤による繊維及び繊維製品の表面処理

②永久制電性の付与方法：

1) 帯電防止剤による繊維製品の表面加工

\*評価技術部 産業用繊維グループ



た電荷を積極的に物質外に漏えいさせる目的から界面活性剤系の帯電防止剤がよく利用されている<sup>13)</sup>。帯電防止剤は、分子量により低分子型帯電防止剤と高分子型帯電防止剤に分類される。効果の持続性の点では高分子型の方が優れているといわれている<sup>13)</sup>。

使用法としては図4に示したように、プラスチックの成形時に練り込む方法とプラスチック表面に塗布する方法がある<sup>13)</sup>。前者の場合は練り込まれた帯電防止剤が、成形中や成形後に表面に移行することによって、また後者の場合は塗布後に帯電防止剤溶液の溶媒が揮発することによって、プラスチック表面で帯電防止剤が分子会合層を形成し、帯電防止効果が発現するものと考えられている<sup>14)</sup>。したがって、この制電加工法はプラスチック表面の表面抵抗率を低下させるだけで、体積抵抗率にはほとんど寄与しない。材料本来の電気的性質を改変するものではなく、帯電防止剤の使用量も比較的少量である。これらの理由から、プラスチック固有の性質を損なうことなく、制電性が付与できるという特長がある<sup>13)</sup>。しかし、多くの帯電防止剤は湿度依存性が高い<sup>13)</sup>。また、その効果が帯電防止剤の極性によるポリマー母材との相溶性、ポリマー母材のガラス転移温度や結晶性などに影響を受けることから、帯電防止剤の選択には十分な注意を要する。

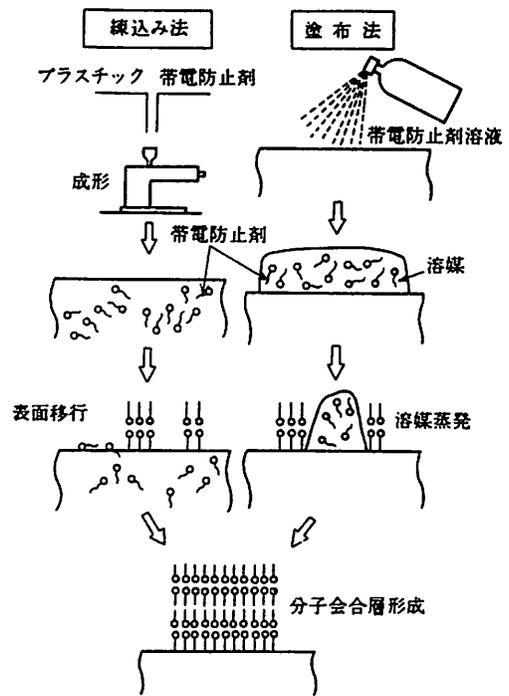


図4 帯電防止剤の使用方法和制電効果の発現機構<sup>13)</sup>

### 3. 静電気の湿度依存性

静電気トラブルは夏場より湿度の低下する冬場に多く発生する。これは、静電気発生量は湿度依存性が高く、湿度の低下にともなって発生量が急激に増加するためである。

カーペット歩行時の人体帯電圧と相対湿度の関係を調べた結果を図5に示した。使用したカーペットは、JIS L 1023. 10に規定のナイロン100%のループパイルカーペット（標準カーペット）とこれに導電性繊維を0.3%混入したものの2種類である。履物は、同JISに規定されている甲が革で底が合成ゴム製の靴および甲底とも革製の靴ならびに市販されている運動靴の3種類を用いた。標準カーペットでは、履物の種類にかかわらず、相対湿度の低下に伴い人体帯電圧が大きくなり、20%RHでは帯電圧が10kV前後にまで達している。一方、導電性繊維を混入した試料でも相対湿度の低下にしたがい人体帯電圧は上昇する。しかし、その程度は小さい。また、両試料間にみられる帯電性の差は、低湿度側ほど顕著に現れている。逆にいえば、50%RH以上の高湿度側では制電加工効果の比較は困難だといえる。それゆえ、制電加工性能を評価する際には、低

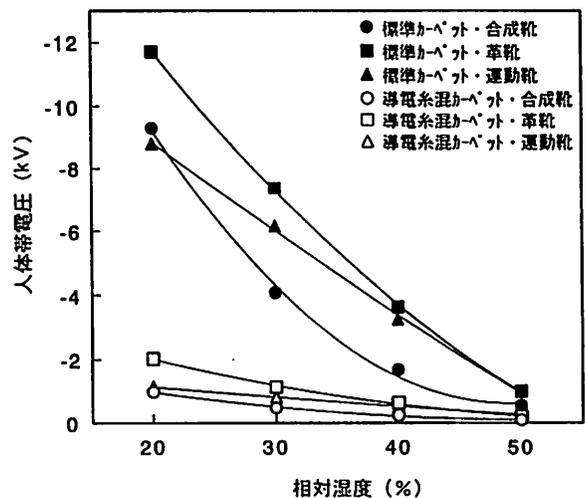


図5 相対湿度と人体帯電圧の関係

湿度環境下で試験・測定を実施すべきである。

なお、このような傾向は人体帯電圧に限ったわけではなく、比抵抗や摩擦帯電圧、布帛のまつわりつき時間なども湿度の低下に伴って悪化することが知られている<sup>5, 15, 16)</sup>。

### 4. 繊維・高分子材料の帯電性評価方法と留意点

前述したように、静電気の発生量や帯電性能を厳密かつ高精度で測定することは、なかなか困難である。したがって、これまでに様々な状況に対応した静電気測定法や評価対象物を限定した帯電性評価方法が多数、

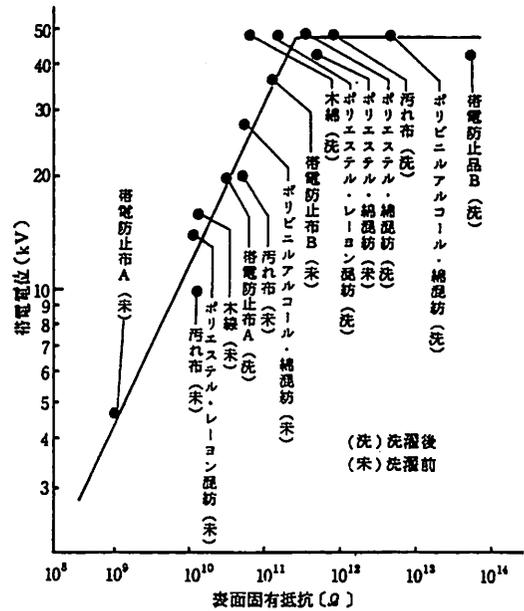
研究・考案されてきた<sup>17-22)</sup>。JIS, ISOやASTMには、摩擦帯電圧、半減期、摩擦帯電電荷量測定法や電気抵抗測定に関する試験方法が制定されている。中でも、JISには「静電気帯電防止作業服」や「静電気防止用安全・作業靴」のように製品毎に特化させ、安全性に重点を置いた規格票が充実している<sup>23, 24)</sup>。

各試験方法には、それぞれに目的と特徴があり、用い方を誤ると間違った判断を下すことになる。

例えば、図6に表面固有抵抗値と帯電電位の関係を示した<sup>25)</sup>。電気抵抗値が $10^{11}\Omega$ を超えると帯電電圧に大きな変化はみられない。また、 $10^{10}\Omega \sim 10^{11}\Omega$ の領域に存在している物質の摩擦帯電圧は、10kV~50kV程度の範囲に広く分布している。さらに、図7には床材の電気抵抗値と人体帯電圧の関係を示した<sup>26)</sup>。両者間の相関性は低く( $r^2=0.55$ )、バラツキも大きい。電気抵抗は静電気を考える上での必須のパラメーターであるが、このように単に電気抵抗の測定結果からだけで、実用上の性能を評価することは危険である。

その他、一般的な注意事項については、JIS L 1094の解説が詳しい。試験法の選択にあたっては、最低限これを参照すべきである。

試験片の性状や状態によっても誤ったデータを探取してしまうことがある。一例を図8に示した。これはポリエチレンシートの帯電減衰性を半減期測定法により調べたものであるが、測定前に中性洗剤で試料を洗浄している。印加電圧は+10kVで、印加時間は30秒間である。図中に矢印で示したところで電圧の供給を停止している。①に示したデータは、中性洗剤が十分に洗い落とされておらず、試料に残存していたものである。②は、全く同じ試料をアルコールで洗浄し、中性洗剤を完全に除去したものである。①では、初期帯電電圧は600V程度、帯電減衰性は極めて良好で、半減期は



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6 表面固有抵抗値と帯電電位の関係<sup>25)</sup>

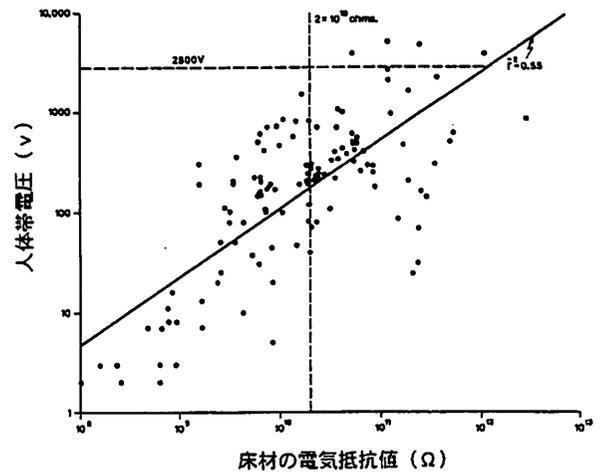


図7 床材の電気抵抗値と人体帯電電圧の関係<sup>26)</sup>

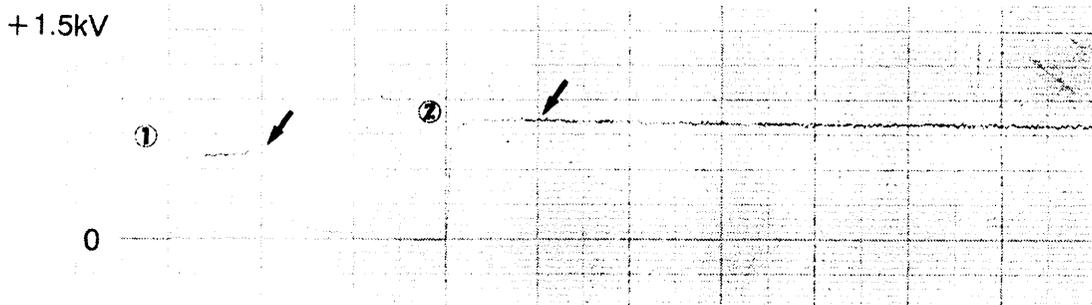


図8 ポリエチレンシートの半減期測定にみられた異常なデータ

・印加電圧：10kV

・試料

①：PEシート

②：①をイソプロピルアルコールで洗浄したもの

約3秒であるが、②では同じ試料であるにもかかわらず、初期帯電圧は850V前後と①に比べてやや高く、減衰性はほとんど認められない。①の試料は、優れた制電性を有するかのような挙動を示しているが、これは明らかに残存洗剤の影響であり、①は正しいデータとはいえない。このように静電気測定にあたっては、試験法の適切な選定に加え、試料の状態や調湿時間などにも気を配る必要がある。

図9には、JIS T 8103に規定の「静電気防止用安全・作業靴」の電気抵抗測定法と基準値を示した。引火、爆発など危険性の高い作業環境で用いられる靴の電気抵抗は、ここに示したように製品全形で測定、評価することが規定されている。破壊試験では、全体の制電性を誤認する可能性があるためと考えられる。さらに、主電極に金属板を用いる方法と水を含んだ軟質スポンジを用いる方法の2種類の測定法が定められている。また、最小着火エネルギーをもとに作業現場での取り扱い物質の危険性を考慮して2つの基準が規定されている。なお、静電気帯電防止作業服についても試料を破壊せず、製品の全体形状を保持したままで帯電性能を評価することが定められている。危険な状況下で使用される物品については、できるだけ使用実態や使用状況に近似した形での計測が必要であろう。

粉体や粒体試料の帯電性評価には、アッシュテストやブローオフ法がよく利用される。アッシュテストは、

煙草の灰を利用するものである。一般には、被測定物を摩擦やはく離などの適当な方法で帯電させ、煙草の灰に近接させ、付着状態を観察・評価する方法である。アッシュテストの応用例を図10に示した。試料はポリアミド系の粉体原料で、静電気帯電によると思われる生産障害が発生したものである。そこで、これを方形のシャーレに入れ除電後、ナイロン布であらかじめ摩擦帯電させたポリエチレンシートを接近させた。その結果、図10に示したようにポリアミド樹脂粉が静電気力によりシート側に引き寄せられ、樹氷のように立ち上がっていることが分かる。クレームが起こっていない同系粉体原料では、このような現象は観察されなかった。したがって、このクレームは静電気により発生したものと類推される。後に、然るべき制電対策を施したところ、問題の障害は解消した。

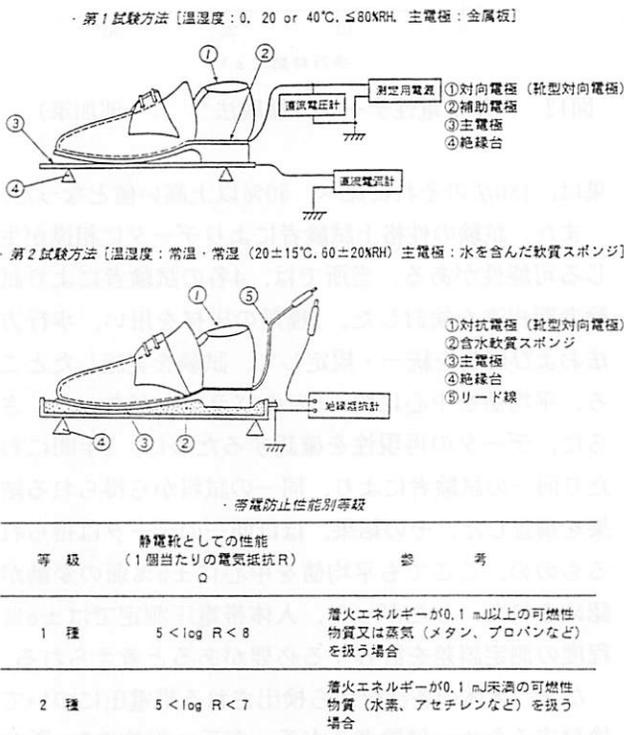
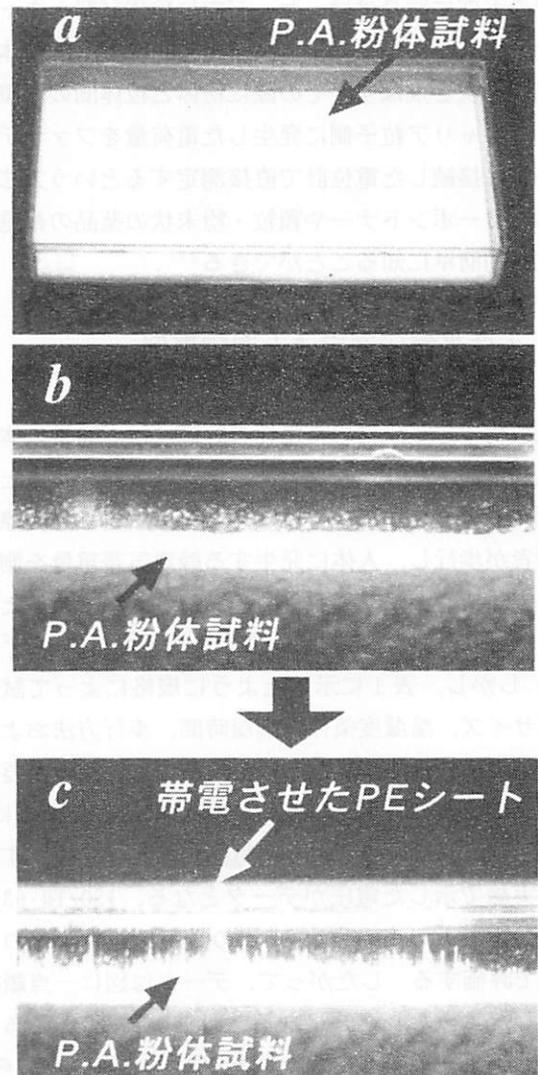


図9 静電気防止用安全・作業靴の電気抵抗測定法と基準値<sup>2,4)</sup>



(a) 試験前試料の全体  
(b) 試験前試料の断面  
(c) 帯電したPEシートを接近させたときの状態

図10 アッシュテストの応用例

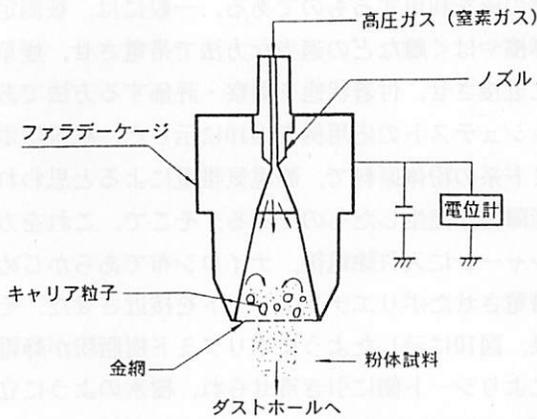


図11 ブローオフ法の概要<sup>27)</sup>

ブローオフ法の概要を図11に示した。キャリア粒子だけが小型のファラデーケージ内に残り、粉体試料は系外に排出されるような適当なサイズのメッシュをケージの下部に取り付け、ケージ内に粉体試料とキャリア粒子を入れる。その後、高圧ガスを噴射し、粉体試料だけを吹き飛ばす。その際に粉体と粒子間の摩擦によってキャリア粒子側に発生した電荷量をファラデーケージに接続した電位計で直接測定するという方法である。カーボントナーや顆粒・粉末状の薬品の帯電性を比較的簡単に知ることができる<sup>28)</sup>。

## 5. 人体帯電圧測定法と測定事例

床敷物や建築床材の帯電性の評価には、通常人体帯電圧測定法 (Walking Testあるいはストロール法とも呼ばれている) が用いられる。これは試料上を実際に試験者が歩行し、人体に発生する静電気帯電量を測定する方法で、実際的で説得力のある試験法であるため、ISO, AATCC, JISなど国際的に広く採用されている<sup>29-31)</sup>。しかし、表1に示したように規格によって試験片のサイズ、温湿度条件、調湿時間、歩行方法および試験結果の分析法が異なるので、その点に注意が要る。データの分析法を図示すると、図12に示したように、AATCC TM 134では得られた帯電曲線のピーク値、すなわち実線で示した電圧がデータとなる。ISO/TR 6356では、ボトムの高い方から5点の電圧を求め、その平均値で評価する。したがって、データは図に一点鎖線で示したようなレベルになる。JIS L 1023.10においては、チャート紙上に描かれた帯電電圧の高い方から5点と低い方から5点を抽出し、その平均値を求めることとなっている。結果的にJIS法で得られるデータは、AATCC法とISO法の間中間程度になる。これについて10点のカーペットを用い、調べたところAATCC法による結

表1 規格による人体帯電圧測定法の相違

規格	ISO/TR 6356	AATCC TM 134	JIS L 1023.10
試験片の大きさ	200×100cm	約70×90cm	90×90cm
温湿度条件	23℃, 25%RH 最低7日間調湿	21℃, 20%RH 最低48時間調湿	23℃, 25%RH 最低24時間調湿
歩行方法	両足を平行に揃え、足の裏を床面と平行になるような状態で垂直に上げ、体の方向を変えずに前進、後退を繰り返す。横に移動する際も体の向きを変えず、同様の歩行動作を繰り返す。すり足、回転は厳禁。歩行時間は60秒。	ステップテスト (同左) & すり足歩行テストを行う。	並足法 (通常の歩行動作) で試料上を円を描くように歩行するか、または8字状に歩行する。歩行時間は30秒以上とし、帯電圧が平衡になるまで続ける。
歩行速度	2歩/1秒	2歩/1秒	100歩/1分
データの取り方	チャート紙に記録された曲線のボトムの高い方から5点を読み、平均する。	異常値を除き、チャート紙に記録された曲線のピークを読み取る。	チャートに記録された曲線から高い方5点、低い方5点を選び、平均する。

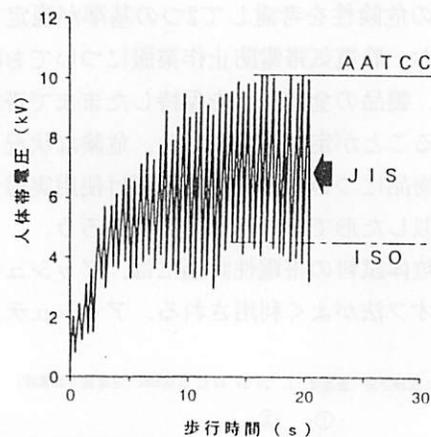


図12 人体帯電性データの採取法<sup>32)</sup> (一部加筆)

果は、ISO法のそれに比べ、50%以上高い値となった。また、試験の性格上試験者によりデータに相違が生じる可能性がある。当所では、4名の試験者により試験者間相違を検討した。2種類の床材を用い、歩行方法および履物を統一・規定して、試験を実施したところ、平均値を中心に約±5%のバラツキがあった。さらに、データの再現性を確認するために、2年間にわたり同一の試験者により、同一の試料から得られる結果を調査した。その結果、ほぼ同一のデータは得られるものの、ここでも平均値を中心に±5%弱の変動が認められた。したがって、人体帯電圧測定では±5%程度の測定誤差を許容する必要があると考えられる。なお、人体の各部位から検出される帯電圧について検討するため、試験者の右手、左手、胴体の3ヶ所から同時に帯電圧を測定した。その結果、どの部位からも同等の帯電圧が検出された。体の部位による有意差

表2 着衣・履物の種類と人体帯電圧の関連

着衣の種類	履物	帯電圧 (V)
なし	なし	-520
下着	綿靴下	-750
下着+綿靴下... (a)	合成靴	-9200
(a)+シャツ	"	-9000
(a)+綿ズボン	"	-8900
(a)+ウールズボン	"	-9000
(a)+カッターシャツ+ウールセーター	"	-9000
作業着	"	-8900
下着+綿靴下	革靴	-11300
作業着	"	-11400
"	ズック靴	-7900
"	綿靴下	-700
"	なし	-480

注) 作業着は、下着、綿靴下、シャツ、カッターシャツ、レーヨン・PET混ズボン着用である。試験室の温湿度は20℃、20%RHとした。

は認められず、人体帯電圧測定についてはマクロ的には人間は一定のレベルに帯電した一つの質点と考えてよいといえる。

次に、着衣や履物が人体帯電に及ぼす影響を調べた結果を表2に示した。床材は、JISに規定の標準カーペットである。履物は、未着用、綿の靴下、JISに規定の靴、甲底とも革製の靴および一般的なズック靴である。着衣の種類は、未着用から順次重ね着をし、最終的にはウールのズボン、カッターシャツにウールのセーターを着込んだ。これにより、無着衣から夏、春秋、冬のスタイルを再現した。ただし、着用物はいずれも制電加工の施されていないものである。無着衣および裸足の場合の帯電圧は約500Vであるが、下着に靴下だけを着用した場合も、冬用のセーターを着込んだ場合も履物が同一であれば、帯電レベルに大きな違いはみられない。しかし、試料と直接接触する履物の種類によって帯電圧に大きな差が現れている。したがって、歩行時に発生する帯電圧は床材と履物に強く依存するが、着衣の種類には影響されないといえる。

そこで履物の影響について、さらに詳細に検討するためJISに規定の合成靴と甲底とも革製の靴の2種類の履物を用い、市販のカーペット約200点を試料として調べた。その結果、両履物間には高い相関性 ( $r^2=0.88$ ) が認められたが、革靴の方が発生帯電圧の高いことが明らかになった。3kVが電撃ショックの限界域であるので、3kV付近に存在するデータ群を抽出して示した(図13)。図中の網掛け部分に存在する試料は、合成靴では3kV以下の範囲に入っているにもかかわらず、革靴では3kVを超えている。したがって、JISに規定の試験法では、電撃ショックを受けることはないと判断されても、履物が異なればそれ以上の静電気が生じている可能性もある。

最後に、畳表材に化繊を用いた人造畳の帯電性測定

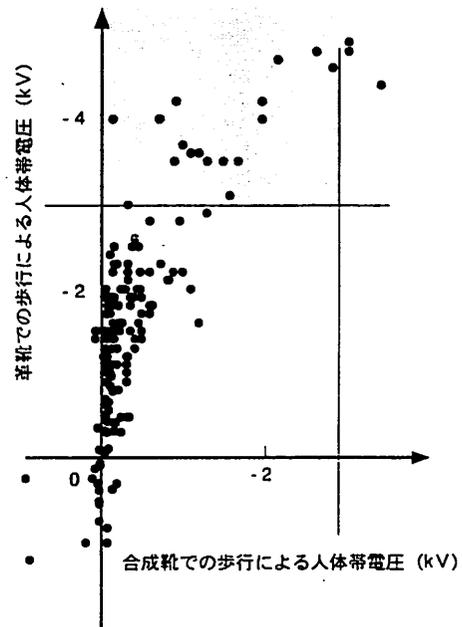


図13 合成靴と革靴による歩行人体帯電圧の関係

の事例を述べる。人造畳の帯電性をJISに規定の方法、すなわち甲が革で底が合成ゴムの靴で調べたところ、人体帯電圧は-4kV近傍にまで達した。次に、畳の実用実態を考慮して数種類の市販の靴下を着用し、同様に測定を行った結果、+600V~+750V程度の帯電圧であり、心配のない数値であった。JIS通りに評価すれば、この試料は、電撃ショックを受ける可能性が非常に高いと判断される。しかし、畳の実際の使用状況から、この場合、靴を履いての評価は適当ではなく、当該試料の帯電レベルは危険なものではないと結論付けるのが妥当であろう。使用実態や状況を考慮に入れない評価は適当ではなく、判断を間違う。なお、靴と靴下で人体帯電圧の極性が変化したが、これは靴と人工畳および靴下の帯電序列によるものと考えられる。極性も含めて静電気を議論する場合は、この点にも配慮する必要がある。

その他、人の諸動作による帯電挙動や靴の電気抵抗値と人体帯電性との関係についても実験を行ったが、これらについては機会があれば別途報告したい。

## 6. おわりに

静電気の測定は、静電気の持つ固有の特性を理解した上で、実施し、評価を行うことが大切である。また、静電気の発生は表面現象であり、再現性に乏しいため、温湿度のような環境条件や処理条件に配慮する必要がある。特に、使用用途や使用目的を考慮し、それに即

した試験・評価法を選定することが重要であると考えられる。当所では20℃～30℃、20%RH～50%RHの範囲で任意の温湿度条件に設定できる静電気測定室を設置し、新製品の開発や品質向上、品質管理の観点から使用実態や使用環境に応じた静電気測定を実施している。

### 参考文献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック，p. 1，オーム社（1985）
- 2) JIS T 8118：静電気帯電防止作業服解説（1994）
- 3) 森田清三，菅原康弘：静電気学会誌，24，8（2000）
- 4) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック，pp. 130-131，オーム社（1998）
- 5) 小野輝道：化繊月報，1980-03，p. 35（1980）
- 6) 田島泰幸，児玉勉：労働省産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-74-2（1974）
- 7) 二澤正行：プラスチックスエージ，1998-11，p. 144（1998）
- 8) 本田昌実：エレクトロニクス，1990-01，pp. 30-32（1990）
- 9) 武田豊，中村貴子，大森栄，北田光一，小河剛史：医薬ジャーナル，30，p. 436（1994）
- 10) 奈良寛久：繊維学会誌，40，p. 333（1984）
- 11) 山本雅晴，永安直人：繊維機械学会誌，41，p. 109（1988）
- 12) 田島泰幸：静電気の災害防止対策（静電気安全専門講習会資料）p. 23（1970）
- 13) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック，pp. 366-377，オーム社（1998）
- 14) 船津実：表面，16，11（1978）
- 15) P. R. Wilkinson：Modern Textiles，51，35（1970）
- 16) N. Gibson and F. C. Lloyd：J. of Applied Physics，16，1619（1972）
- 17) JIS L 1094（1997）
- 18) JIS K 6911（1995）
- 19) NFPA Code 56A（1973）
- 20) 小野英哲：ゆか，1998-04，p. 31（1998）
- 21) 松井雅男，岡本種男，柏村隆光：繊維機械学会誌，43，9（1991）
- 22) ISO 10965（1998）
- 23) JIS T 8118（1994）
- 24) JIS T 8103（1983）
- 25) 田島泰幸，児玉勉：労働省産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-71-1（1972）
- 26) M. T. Pailthorpe：Textile Res. J.，58，335（1988）
- 27) ブローオフ粉体帯電量測定装置カタログ：東芝ケミカル(株)
- 28) 竹内学：粉体と工業，28，4（1996）
- 29) ISO/TR 6356（1982）
- 30) JIS L 1023（1992）
- 31) AATCC TM 134（1996）
- 32) ISO/TC 38/SC12/WG5 N139（1996）