

● 総 説

治療衣等の帯電による災害・障害と帯電防止技術

田 畠 泰 幸*

キーワード：治療衣，静電気，災害，障害，帯電防止

Hazards due to Static Electrification of Outer Garments and Antistatic Technologies

Yasuyuki TABATA *

Keywords : _____

Outer Garment
Static Electricity
Electrostatic Hazards
Antistatic Technology

_____**1. はじめに**

治療衣を含めて各種繊維製品の帯電は，爆発・火災，電撃を始め，種々の静電気災害・障害（以下，災障害と略記）の原因となる。中でも，石油化学の進歩によって誕生した化合織は，電気抵抗率が $10^{12} \Omega \cdot m$ 以上の絶縁物である¹⁾。そのため，これを生地とした繊維製品には，多量の静電気が帯電し，災障害の原因となる。

一方，最近の災障害を分析すると，これは，科学と技術の進歩によって登場した半導体デバイス，細胞・遺伝子操作等とも無関係ではない。それは，半導体デバイス等が，マイクロ・ナノテクノロジーの結晶で，微細構造であるために静電気には極めて脆弱で²⁾，静電気の影響を大きく受けるからである。その結果，デバイスの誤作

動・破壊，細胞操作等におけるサンプルのコンタミネーション等³⁾，従来とは異なる新しい型の災障害が発生している。

上記のような災障害は，高気圧酸素治療においても例外ではない。高気圧酸素治療装置の中では，治療衣に代表されるが，静電気が帯電するとともに，可燃性物質でもある種々の繊維製品が使用されている。その上，環境は酸素濃度の高い高気圧下である。

以上のような背景から，高気圧酸素治療においては，既に，災障害の防止を目的とした「高気圧酸素治療の安全基準」が制定され，これには帯電防止対策が明記されている⁴⁾。したがって，ここでも災障害防止対策の視点から，帯電物体の一つとして治療衣に注目し，これに類似した衣服および繊維製品の帯電とその帯電防止技術の現状について調査したので，以下，その結果を報告する。

なお，本論文で使用する物理量の単位は，全てMKS単位である。

2. 衣服等の帯電特性

静電気は，主として物体と物体との機械的な作用である摩擦，接触・剥離等によって発生する。また，発生と同時に，発生した静電気が他の部分へ漏洩（緩和）し，摩擦等を受けた部分には，発生した静電気と漏洩したそれとの差が蓄積（帯電）する。

衣服も，下着や周辺に存在する物体との摩擦，あるいは脱衣等による剥離によって静電気が発生

* 社団法人産業安全技術協会
Technology Institution of Industrial Safety

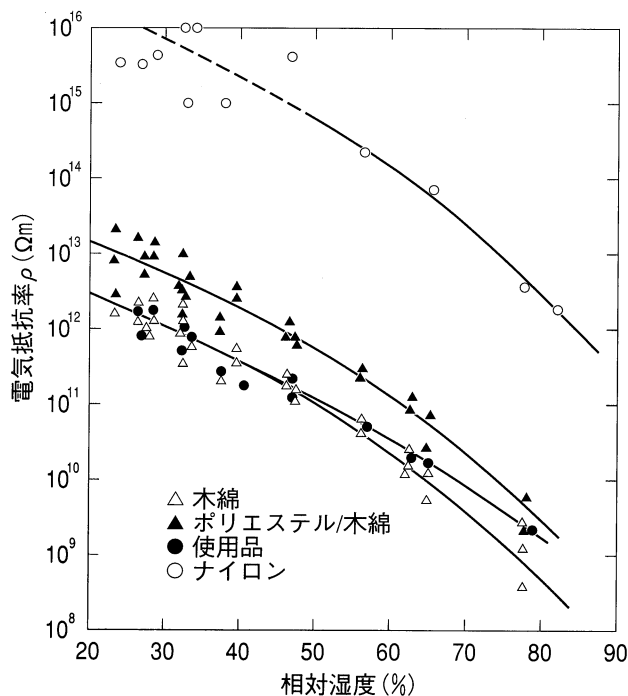


図1 相対湿度と繊維の電気抵抗率

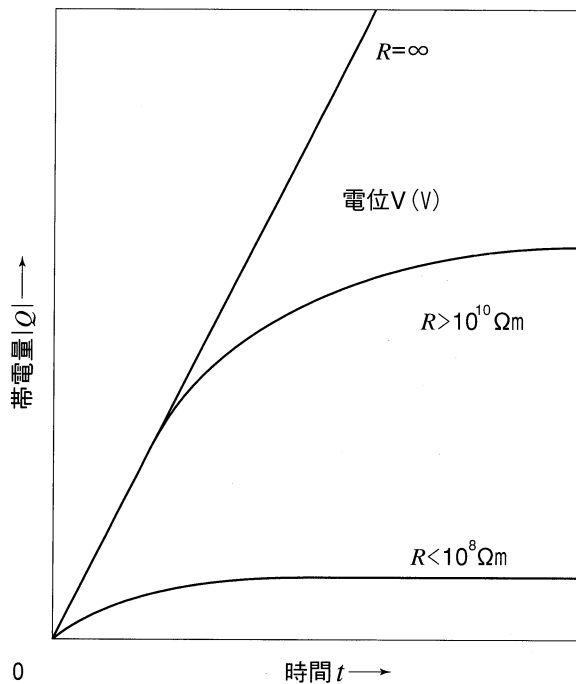


図2 電気抵抗と帯電特性

する。このとき、繊維の電気抵抗率 ρ は、図1に例示するように、一般には $10^{10} \Omega m$ 以上である⁵⁾。そのため、衣服に発生した静電気は他へほとんど漏洩せず、大部分が帯電する。

帯電は、上記のように、主として電気抵抗率に依存しており、衣服の帯電量 Q は、概ね次式によって表される。

$$Q = qCR \{1 - \exp(-t/CR)\} \quad (1)$$

ここで、 q は単位時間あたりの静電気発生量、 R は繊維の電気抵抗率で定まる衣服の電気抵抗、 C はその静電容量、 t は時間である。

図2は、式(1)の模式図で、これからも明らかであるが、衣服の場合は、素材である繊維が、電気抵抗率の極めて大きな絶縁物である。そのため、摩擦等の機械的な作用が加わると、その都度、静電気が発生し、そのほとんどが帯電する。その結果、衣服の帯電量は次第に増大し、電位 V ($V = Q/C$) も、一般には数100V以上に上昇する。特に、繊維の電気抵抗は、環境の湿度に依存するため(図1参照)、低湿度であると、大きな帯電

をするとともに、図3に例示するように電位 V も高くなる⁵⁾。

このように、注目すべきことは、環境の湿度で、これと繊維の吸湿特性が帯電に大きく影響する。たとえば、素材が木綿のように、数%の水分を吸収する吸湿特性に優れたもので、環境が多湿であると、環境に存在する水の分子を吸着するため、電気抵抗が減少し、帯電量も小さくなる⁵⁾。また、下着、靴下等のように、身体に直接接触する衣類の場合は、10分程度の着用によって、それらは発汗した水分を吸着するため、電気抵抗が小さくなり、帯電量も小さくなる。

以上のように、帯電特性は、主として電気抵抗(電気抵抗率)に依存しており、衣服の場合は、電気抵抗が環境の湿度と繊維の吸湿特性に依存するため、帯電もそれらに大きく影響される。通常、夏季の多湿なときより、冬季の乾燥したときに静電気をしばしば体験するが、これは、環境の湿度が繊維の帯電特性に影響しているからである。

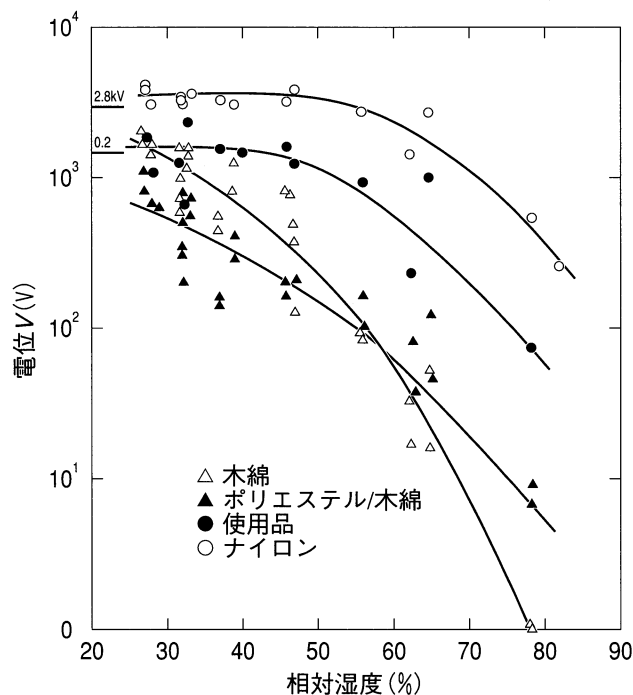


図3 相対湿度と衣服の帯電電位

3. 衣服等の帯電による災害・障害

静電気による災害は、その原因となる静電気の物理的な作用によって分類すると、二つに大別される。

一つは、磁石に類似した吸引・反発という力学作用によって発生する災害である。吸引・反発力は、高々数100mg/cm²程度であるが⁶⁾、これによって環境の中のダスト、ミスト等が吸引され、コンタミネーション、細菌等の汚染・繁殖、あるいは繊維の毛羽立ち、下着のまつわり付き等の災害が発生する。

もう一つは、主として空気のような気体の電離作用によって発生する災害である。この電離作用は、電位が数100V以上になると生起する放電現象であり⁶⁾、放電が起こると、帯電物体に蓄積されていた静電気エネルギーは、放電空間に放出される。

その結果、このエネルギーによって放電空間に存在する可燃性物質の温度上昇、燃焼反応が生起されると⁷⁾、着火から爆発・火災、あるいは放電による半導体デバイスの熱的な破壊²⁾、細胞の興奮・破壊から電撃・皮膚障害等の災害が発生

する。また、放電に伴っては、光および数1,000MHzに及ぶ広帯域の電磁波が放射されるため⁸⁾、X線フィルム等の感光、あるいは電磁波が電子システムの電磁ノイズ源となって、電子機器、情報処理装置等の誤作動⁸⁾、暴走等の災害が発生する。

衣服の帯電も、上記の災害を生起する原因となるが、この場合は、必ずしも衣服の帯電だけが原因ではない。衣服が帯電した場合は、その極く近傍の人体も、これが接地されていないと静電誘導作用によって帯電してしまう。

後者の帯電は、電氣的に絶縁物である衣服のそれとは異なり、電気抵抗の小さな人体の帯電である。そのため、放電が発生すると、人体に帯電していた静電気のほとんどが瞬時に放出される。換言すれば、人体に蓄積されていた静電気エネルギーが数 μ sという瞬時に放出される火花放電となり⁹⁾、災害の原因になる確率も高いことが判明している⁹⁾。

たとえば、帯電した衣服からの静電誘導作用によって人体が帯電すると、人体にも衣服とほぼ同量の静電気が帯電する。その結果、人体には、次

表1 界面活性剤の付与による電気抵抗率の減少

| 素材名 | 電気抵抗率 (Ωm) | |
|--------|------------------------|------------------------|
| | 0.1%付与 | 未付与 |
| ポリエステル | 2.0×10^9 | $> 1.0 \times 10^{14}$ |
| アクリル | 1.8×10^{10} | $> 1.0 \times 10^{14}$ |
| ナイロン | 3.0×10^{10} | $> 1.0 \times 10^{14}$ |
| 木綿 | $> 1.0 \times 10^{14}$ | 3.0×10^{10} |

注) 測定環境: 温度25°C、湿度60%rh

式によって見積もられる静電気エネルギー W が蓄積する。

$$W = Q_i V_h / 2 = C_h V_h^2 / 2 \quad (2)$$

ここで、 Q_i は衣服からの静電誘導作用によって帯電した人体の帯電量、 V_h は人体の帯電電位、 C_h は人体の静電容量である。 Q_i は衣服の面積を $1m^2$ 、衣服の帯電電荷密度を $10^{-6} C/m^2$ とすると、それからの誘導により $10^{-6} C$ 、 V_h は人体の静電容量を $100pF$ とすると、 $10,000V$ となり、 W は $5mJ$ となる。

上記のようなエネルギーが人体に蓄積し、万一、放電が発生すると、このエネルギーが一度に全て放出されるとは限らない。しかし、たとえ $1/10$ のエネルギーが放出されたとしても、可燃性物質の着火を誘発する確率は小さくない。特に、酸素濃度の高い雰囲気では、着火エネルギーが小さくなるため⁹⁾、空気中では着火しないような繊維、毛髪等でも着火し、爆発・火災を誘発することは十分に推算される。また、電撃は、 $3,000V$ 以上の人体帯電によって発生するため⁹⁾、電撃を受けることにもなる。

このように、衣服の帯電は、静電誘導作用によって人体の帯電にまで進展することがある。したがって、災障害の原因は、前者だけとは限らず、後者の場合も少なくない。特に、後者から放電が発生すると、数 mJ のエネルギーであるが、これが数 $10 \mu s$ 以内という瞬時に放出される。これは、電力に換算すると数 $100W$ にも達する放電であり、そのために災障害の原因となる確率も高いのである。

4. 繊維製品の帯電防止方法

衣服を始めとする繊維製品の帯電防止については、主として化合織を対象に、多くの研究・開発が試みられている¹⁰⁾。しかし、いずれの方法も、帯電防止の基本的な手法は、化学的な方法、物理的な方法およびそれらを組み合わせた方法である。

以下、基本的な方法である化学的な方法と物理的な方法について、それぞれの帯電防止の手法、効果、特徴等に関する調査結果について述べる。

1) 化学的な方法による帯電防止

繊維が帯電する主たる要因は、2で述べたとおり、繊維の電気抵抗率が $10^{10} \Omega m$ 以上と大きいからである。したがって、この帯電防止方法は、繊維の電気抵抗率を見かけ上小さくすることに着眼し、それを化学的な手段によって達成したものである。

具体的には、繊維に界面活性剤（帯電防止剤）を付与することによって、表面の化学的な特性を親水性、イオン性に改質したものである¹¹⁾。換言すれば、化学的な手法によって繊維の吸湿特性を増し、環境の水分を繊維に吸着させることにより、電気抵抗率を小さくする方法である。現在、帯電防止を目的とした主な界面活性剤としては、アニオン、カチオン、両極性、非イオンの4種類のものが開発され¹²⁾、これらは素材の特性、帯電防止の目的等によって使い分けられている。

たとえば、界面活性剤の代表例であるアルキルリン酸エステルを、繊維に 0.1% 付与すると、表1に例示するように、繊維の電気抵抗率は、 $22^\circ C$ 、 $60\%rh$ の環境で、ほぼ $10^{10} \Omega m$ 以下に減少する¹³⁾。

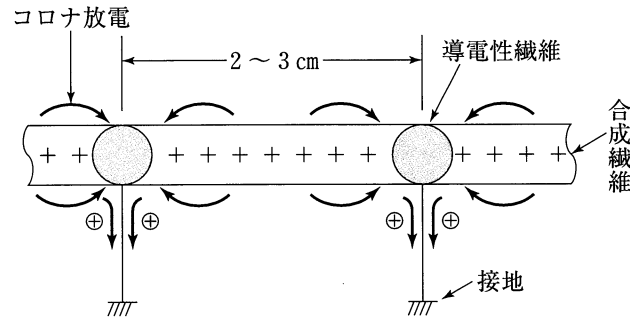


図4 導電性繊維からの放電による衣服の帯電防止の原理

表2 導電性繊維による衣服の帯電防止効果の例

| 衣服の生地 | 電位 (kV) | 電荷密度 ($\mu\text{C}/\text{m}^2$) |
|-----------------|---------|-----------------------------------|
| ポリエステル65/レーヨン35 | 40~45 | 30~32 |
| 同上に導電性繊維を縞状に混入 | 3 | 6.0~6.5 |
| ポリエステルに界面活性剤付与 | 25~35 | 15~20 |
| 木綿 | 38~42 | 18~25 |
| 同上に導電性繊維を縞状に混入 | 2~3 | 4.5~6.0 |

注) 測定環境: 温度22°C、湿度30%rh

しかし、この電気抵抗率の減少は、この帯電防止方法の基本原則のとおり、環境の水分を吸着することによって行われている。したがって、基本的には、電気抵抗率が環境の水分によって変化する見かけ上の減少であり、一般には、環境条件が室温、相対湿度50%以下のような低湿度になると、効果が半減する。また、表1から明らかであるが、界面活性剤の効果は、素材との組み合わせにも依存しており、素材によっては逆効果になったり、界面活性剤は、洗濯によって洗い流されるために、長期間にわたる効果は期待できないことに留意すべきである。

2) 物理的な方法による帯電防止

この方法は、電離作用である放電によって生じた正・負のイオン対（電離した正・負の気体分子）を、帯電防止に応用したものである。すなわち、放電によって生じたイオン対を活用して、帯電している静電気を電氣的に中和する方法である¹⁴⁾。しかし、3でも述べたが、放電は災害の原因になることがある。したがって、この方法では、災害の原因とならない極く微弱な放電を積

極的に起こし、静電気を中和することが必須の条件となり、これにカーボン・金属粉、金属メッキ繊維等の導電性物質が使用されている。

たとえば、図4は、この方法によって衣服等の帯電を防止する原理で¹⁰⁾、ここでは、極く微弱なコロナ放電を積極的に起こすために、生地の中に、一部分ではあるが、導電性繊維が織り込まれている。具体的には、生地の中に、直径約50 μm 以下の金属・カーボン等からなる導電性繊維を、一定の間隔あるいは混入率で織り込むと、図4に示すように、生地が帯電したとき、それからの静電気的作用（電気力線）は、導電性繊維に集中する。その結果、導電性繊維の近傍で微弱なコロナ放電が発生し¹⁴⁾、正・負のイオン対が生起される。この内、生地に帯電している静電気の極性と逆極性のイオンは生地の方へ、同極性のイオンは導電性繊維の方へ移動するため、生地の静電気は中和される。また、導電性繊維の方へ移動した同極性のイオンは、接地を通して大地に、あるいは接地されていなくても、導電性繊維が微弱な放電を起こすために空間に放出され、生地の帯電が防止される。

表2は、衣服用の生地の中に、カーボン繊維を

縞状に5cm間隔で織り込んだときの帯電防止効果を調べた一例である¹⁰⁾。これからも明らかのように、電位、帯電電荷密度とも、カーボン繊維が混入されていないものより小さくなっており、カーボン繊維による帯電防止効果を裏付けている。また、導電性繊維を織り込むと、生地帯電している静電気的作用によって発生する微弱なコロナ放電のみならず、導電性繊維の周辺に存在する他の帯電物体との間でも、微弱なコロナ放電が発生し、その帯電防止のほか、これとの間で、災害の原因となるような危険な放電の発生も抑制されることが判明している¹⁵⁾。

このように、物理的な方法による帯電防止は、帯電防止効果のほかに、微弱な放電を応用したものであるため、災害の原因となる危険な放電を抑制し¹⁶⁾、安全性の面でも優れている。また、環境の湿度および洗濯の影響も小さいことから、帯電防止方法として注目されており、現在では、導電性繊維のほかに、帯電防止を目的とした多くの導電性材料が開発されている。しかし、積極的に微弱な放電を起こす方法であれ、放電は、基本的に電位がある程度以上に上昇しないと発生しない。したがって、この方法では、わずかの静電気ではあるが、放電が発生しない程度の静電気が残留してしまうことは避けられない。

5. むすび

化合織が誕生して以来、繊維製品の帯電が原因となって発生した災害は少なくない。したがって、ここでは、治療衣などの繊維製品が使用される高気圧酸素治療における静電気安全対策を視野に、繊維製品の帯電危険、帯電防止の現状等について調査したところ、概ね以下の結果が得られた。

- (1) 繊維製品の帯電に關与する主たる要因は、繊維の電気抵抗（電気抵抗率）である。
- (2) 繊維の電気抵抗（電気抵抗率）は、環境の湿度および繊維の吸湿特性に依存する。
- (3) 治療衣等の衣服の帯電は、そのみならず静電誘導作用によって人体の帯電ともなり、後者の帯電は災害の原因となる確率が高い。
- (4) 繊維製品の帯電防止方法は、化学的な方法と物理的な方法の二つに大別され、それぞれ長短が

ある。しかし、高気圧酸素治療では、環境が低湿度になる場合も少なくないため、後者による帯電防止が望ましい。

なお、本論文では触れなかったが、繊維製品の帯電防止については、防止技術に関する成果のほか、帯電防止性能の試験・評価方法等についても、多くの取り組みがなされ¹⁷⁾、既に成果も得られていることを付記しておく。

〔参考文献〕

- 1) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック，オーム社，1998，1228-1232
- 2) B.A.Unger: Electrostatic Discharge Failure Mechanisms of Semiconductor Devices, Proc. of 19th Annual Conf., IRPS,1981,211-214
- 3) クリーンルーム専門委員会編：クリーンルームにおける静電気対策指針，日本空気清浄協会，1993，1-12
- 4) 日本高気圧環境医学会：高気圧酸素治療の安全基準（改正案），日本高気圧環境医学会・安全対策委員会，2001，7（印刷中）
- 5) P.S.H.Henry: Risks of Ignition due to Static on Outer Clothing, Static Electrification, 1971, The Institute of Physics, London, 1971, 212-225
- 6) 田島泰幸監修：静電気災害・障害の防止，オーム社，1995，2-11
- 7) B. Lewis and G.von Elbe: Combustion, Flame and Explosions of Gases, 3rd Edition, Academic Press, New York, 1961, 334-343
- 8) Y.Tabata and H.Tomita: Mulfunctions of High Impedance Circuits Caused by Electrostatic Discharges, J. Electrostatics, 24, 155-166, 1990
- 9) 労働省産業安全研究所編：産業安全研究所技術指針-静電気安全指針，RIIS-TR-88-1，産業安全研究所，1988，7-10
- 10) 田島泰幸：導電性繊維による作業服の帯電防止，産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-72-1，産業安全研究所，1972
- 11) K.Johnson: Antistatic Compositions for Textiles and Plastics, Noyes Data Corp., New York, 1976, 45-106
- 12) P.S.Hersh: Review of Electrostatic Phenomena on Textile Materials, DECHEMA Monogr., Brawnschweig, 1974, 199-124
- 13) M.Hayek: Antistatic Finishes for Textiles, Am. Dyest. Report, 43, 1954, 1-66
- 14) 田島泰幸：導電性繊維による静電気の除去，産業

- 安全研究所研究報告, RIIS - RR - 1, 産業安全研究所, 1969
- 15) Y.Tabata: Electrostatic Hazards and Recent Preventive Techniques, Technocrat, 18, 10 - 15, 1985
 - 16) Y.Tabata: Electrostatic Properties of Antistatic Cloth Woven Partly with Electrically Conductive Fibers, IEEE Trans. 24, 245 - 249, 1988
 - 17) 労働省産業安全研究所編：産業安全研究所技術指針－静電気用品構造基準, RIIS - TR - 84 - 1, 産業安全研究所, 1984, 8 - 13