產業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-18-5

導電性繊維による静電気の除去

田畠泰幸

労働省産業安全研究所 MINISTRY OF LABOUR THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

導電性繊維による静電気の除去*

畠 泰

田

Elimination of Static Electricity by Use of Electrically Conductive Fiber*

Yasuyuki TABATA**

幸**

With the widespread acceptance of synthetic fiber, which absorbs relatively little moisture even at high humidity, the problems and dangers of static electricity have been greatly increased. Especially, the discharge of static electricity can take the form of a spark, quite often an energetic spark. If the spark discharge should occur in an explosive atmosphere, disastrous consequences could follow. Safe methods for eliminating static electricity have been investigated in various fields; utilization of the corona discharge is one of them.

It has been recognized that the fine metallic wire eliminates static electricity of the charged body. Here, some characteristics of the Electrically Conductive Fiber (ECF), recently developed by Teijin Limited, were investigated. The resistivity of the ECF is about $10^2 \sim 13^3$ ohm per centimeter as shown in Table 1. In early stages of this research, it has become apparent that the ECF has the elimination faculty of static electricity and that the elimination mechanism depends upon the corona discharge. In this paper, the discharge characteristics for the ECF, so-called "current-voltage characteristics" of the corona discharge, are experimentally scrutinized in various conditions. Fig. 8, Fig. 11 and Fig. 14 etc. give the examples of the experimental results in various kinds of electrostatic field. It has been definitely shown by these results that

- (1) Static electricity of the charged body is approximately eliminated until the corona starting voltage of the ECF.
- (2) The ECF has the elimination faculty of static electricity in low humidity as well as in high.
- (3) The elimination faculty of static electricity of the high electric resistance ECF, with the resistance more than 10⁹ ohm per centimeter, is not different from that of the low electric resistance ECF.

A program is underway to ascertain the function of the ECF in eliminating the static electricity of cloth.

1. まえがき

高分子化学の発達によって生れた合成繊維には,数 々のすぐれた特長があるが,その一方には静電気の 発生,帯電が大きいため,これが原因となって起こる 種々の問題が提起されている.このため合成繊維の静

- * 高分子学会第 14 回静電気研究発表会 (June 1969) で1部発表.
- ** 電気課 Electrical Section.

電気除電方法については多くの関心がもたれ,近年これに関する研究結果も発表されている¹⁾. その中の1 つに数 10 µ 程度の細い金属線を合成繊維製品の中に 織り込む方法があり,その効果のあることが指摘され ている²⁾⁸⁾.

ここでは最近帝人株式会社で新しく電気抵抗の小さ な導電性繊維 (Electrically Conductive Fiber,以下

in the state of the hold of the state of the

単に ECF と記す)が開発され、これについて調べた ところ、細い金属線と同様、これに静電気を除去する 能力のあることを確認した.またその静電気除電能は 原理的にも定量的にも細い金属線と等価であることを 立証した.

5

本稿では、ECF の静電気除電能について調べたこ とを出発点とし、これを用いた場合の除電現象を定め る基本因子が、その放電特性であることを述べてい る.次にこのような意味から ECF の放電特性につい ては、簡単な静電気モデル帯電物体を用いて最も基本 的な角度からのみ検討し、これが 3. にまとめて示し てある.またこの結果から導かれる ECF を用いた場 合の除電現象についても 2.3 検討を試みている.

なお ECF を用いた場合の除電現象についてはこの 他にも検討を試みており,これについては第2報で述 べる.

2. ECF の静電気除電能

2.1 ECF の電気抵抗

本研究の対象である ECF° は普通の合成繊維と比較 した場合外観,特性等においてほとんど変ることなく 表面の電気抵抗のみが非常に小さな繊維である. 繊維 の表面には多少の凹凸があるが,その断面は円形に近 く,直径は 47~50 μ 程度である.

Table 1 は ECF の電気抵抗を測定した結果であ る. 測定に用いた ECF の長さは実効長 40~42 mm に切断したものであり,その両端にはアルミ箔をつけ これを抵抗測定用の電極としている. 測定試料は1本 の繊維から,任意に3箇所取り出し,試料 A,B,C と した. 測定方法は電位降下法であり,電源には直流安 定化電源を使用している. Table 1 の測定結果から

Table 1	. Resis	Resistance of ECF.		
	ECF	の電気抵抗		
Sample				

Voltage	A 42 mm	B 40 mm	C 40 mm
2 V	360 Ω/cm		
4	$290 \Omega/cm$	280 Ω/cm	330 Ω/cm
6	$270 \ \Omega/cm$		
8	$230 \Omega/cm$	220 Ω/cm	320 Ω/cm
10	$170 \ \Omega/cm$		
12	150 Ω/cm		170 Ω/cm

A, B, C : Drop method

も明らかなように, ECF の抵抗は測定電圧が高くな るにつれて減少するという非直線性であった.また抵 抗値は時間とともに多少減少する傾向であったため, 測定には時間をかけ抵抗値の安定したことを確めてか ら読み取った.

一方キャパシターに充電している電荷を被測定 ECF によって放電させ、そのときの時定数からも ECF の電気抵抗を求めてみた.その結果、先の試料とは別 の試料であるが、充電電圧が 12 V であるとき 1 cm 当りの抵抗値が 263Ω と求まり、電位降下法による 測定値と比較し大差なかった.なお以上の電気抵抗の 測定から、ECF は $0.15 \sim 0.20$ W/cm の電気エネル ギーによって切断に至ることが判明した.

測定結果では試料によって抵抗値に多少の差異が出 ているが、これは ECF の場所によるばらつきであ る. ちなみに ECF 15 mm 間の電気抵抗を 2 m にわ たって 100 箇所測定し、場所による抵抗分布を調べ てみた. その結果、ECF の電気抵抗には Table 1 に 示す程度のばらつきはあるが、すべて 400 Ω /cm 以下 の値になっていることが判明した.

2.2 ECF の静電気除電能

通常の繊維ではなく、その表面が導電化されて電気 抵抗の小さくなった ECF には、伝導による静電気除 電能のみならず、次のような放電による静電気除電能 のあることが考えられる.

電気抵抗が小さく金属に近い特性をもった ECF は 静電気的な意味での誘電率が大きいため, ECF が静 電気帯電物体の近傍に位置すると,その静電界分布は Fig. 1 (a) に図示している.通常の繊維 F の場合と 比較して大きく乱れる.すなわち Fig. 1 (b) に図示 するよう静電気帯電物体から発散される電気力線が ECF に集められ,この近傍には不平等電界が形成さ れることになる.このようにして ECF の近傍に最も



強い静電界が形成されると空気の絶縁破壊が起りこの 近傍にはいわゆるコロナ放電が発生することになる.

以上のようにしてコロナ放電が発生すると,この結 果生じた正,負のイオンは静電界の作用を受けて移動 することになる.特にこの正,負のイオンの内,帯電 物体の極性とは逆極性のイオンのみがこれに向って移 動し,帯電物体の静電気と結合する結果,いわゆる中 和現象が起って,物体に帯電している静電気が除去さ れるのである.結果的には ECF が帯電物体の静電気 エネルギーによってコロナ放電を起し,そのコロナ放 電電流が帯電物体と ECF, ECF と接地体との間に流 れる結果,静電気帯電物体と接地体との間には静電気 の漏洩する電気回路が形成されたことになり,物体に 帯電している静電気が除去されるのである.

いまこの ECF を接地すると、この場合の ECF は いわゆるコロナ放電電極でもあり、接地体ともなるの である.したがってこの場合は、静電気帯電物体の電 位が ECF のコロナ放電開始電圧以上になると、ECF の近傍にはコロナ放電が発生し、物体に帯電していた 静電気が除去されるのである.結局物体に帯電してい る静電気は帯電物体の電位が ECF のコロナ放電開始 電圧に等しくなるまで除電されることになるのであ る.厳密には帯電物体の電位が ECF のコロナ放電消 減電圧に等しくなるまで除電されることになるのであ る.

以上のように ECF には伝導の他,放電による静電 気除電能もあると考えられる.静電気的な意味での誘 電率が大きい細い金属線では、以上のような放電によ る静電気除電能のあることは云うまでもないことで ある.

2.3 実験による確認

先に述べたように ECF には放電による静電気除電 能もあると考えられる. すなわち ECF がコロナ放電 を誘発するような電極として働くため,物体に帯電し ている静電気は放電の結果生じたイオンによって除去 されるのである. したがって,これを以下の実験によ って確認してみた.

ここでは基本現象の解明のみを目的としたため、帯 電物体としては静電気が表面に均一帯電したものを対 象に選んでいる.実験モデルは Fig. 2 に示すとおり であり、静電気帯電物体としては 14×200 mm の金属 平板を使用している.これに直流高圧電源から正の高 電圧を印加し、金属平板に正の静電気が帯電したと等 価な状態をモデル的に作った.この金属平板の中央部 前方に 14 mm の距離をおいて 100 mm の ECF を金 属平板と平行に張り、 ECF の静電気除電能を次の実 験によって確めてみた.

先ず実験モデル Fig. 2 において,開閉器Aを倒し て金属平板に静電気を 5 kV まで帯電させた後これを 開き,次に開閉器Bを1に倒すと金属平板の電位は 3.8 kV まで降下し、 \odot 金属平板に帯電していた静電気 が放電によって除去されていることが判明した.そこ で開閉器A,開閉器Bを1に倒した状態で帯電物体で



実験装置の概要





(a) V_m=5 kV, Horizontal axis=50 μsec/div, Vertical axis=1 V/div

ある金属平板と ECF との間に流れる放電電流を測定 してみた.その結果, Fig.3(〇印で示す放電特性) が得られ,金属平板の電位が 3.8kV 以上になると放 電電流の流れていることが確認された.またこの実験 結果から得られる放電開始電圧 3.8kV が,先の実験 における金属平板の除電後の電位に等しくなっている ことも確認された.

実験結果 Fig. 3 において●印で示す放電特性は金 属平板と垂直な位置関係に長さ 15 mm の ECF を接 地し,そのときの放電電流を測定した結果である.放 電開始電圧は明らかにこちらの方が低くなっており, ひいては除電後の電位も低くなることを示している. 以上のように ECF と金属平板との放電は,ECF が 金属平板と平行な位置関係にあるより垂直な位置関係 にある方が低い電圧で放電を誘発している.この結果 は帯電物体からの電気力線が ECF に集中し,ECF 近傍の静電界分布が不平等であればあるほど放電の起 り易いこと,すなわち,この放電がコロナ放電である ことを示すものである.またコロナ放電であると一般 にはコロナ放電開始電圧とコロナ放電消滅電圧が異な るいわゆるヒステリシス特性を示すが,以上の2つの 実験ではこれが観測されなかった.

次に ECF によって起ったコロナ放電の特性,特に 電流波形を調べるため,開閉器 Bを 2 へ倒 し,シン クロスコープによってこれを観測した.波形観測に用 いた抵抗値は 100 k Ω であり,その結果は Fig. 4(a) (b) に示すとおりである. Fig. 4(a) は金属平板 に正の高電圧 5 kV を,(b) は 7 kV を印加した



(b) $V_m = 7 \text{ kV}$, Horizontal axis = 10 μ sec/div, Vertical axis = 1 V/div

Fig. 4 Current wave form of ECF corona discharge. コロナ放電電流の波形 ときの放電電流の波形である.この結果からも明らか なように電流波形は微小なパルスとして観測され,金 属平板の電位が高くなるにつれてパルスの数は増大す る傾向であった.また ECF の放電を肉眼によっても 観察したところ,・ECF 表面の各場所からコロナ放電 の起っていることがわかり,電位の上昇につれて放電 を起す場所が多くなっていることも明らかになった. 以上の結果より総合的に判断すると, ECF が電極 となって起る放電は時間的にも場所的にも,放電が現 れては消え,また現れるという明滅を繰り返すコロナ 放電であることが明らかになった.

一方 ECF の放電による静電気除電能を別の立場か ら確めるため、定量的な解析を試みてみた.とこで定 量的な解析の対象として取り扱かったものは ECF に よって除電されるその静電気除電量であり、その解析 結果は付録に示すとおりである.すなわちいま金属平 板に帯電している静電気が ECF の放電によって接地 体へと漏洩し、除電されるならば、Fig.2 に示す実 験モデルにおいて開閉器Bを3に倒しておくと、この 金属平板から除電された静電荷は ECF と接地体との 間に接続されているキャパシターへ充電されることに なる.しからば金属平板から除電された静電荷とこの キャパシターへ充電された静電荷とは当然等しいはず であるからこれを実験によって確めてみた.解析結果 および実験結果は Fig.5 に示すとおりである.Fig. 5 は金属平板から除電された静電荷とキャパシターに 充電された静電荷を電位に換算して示したものである が,理論解析の結果 (Fig. A-3) と実験結果 (Fig. 5) とは比較的良く一致している.ここで Fig. 5 の図中 に示した容量は ECFと接地体との間に接続したキャ パシターの容量である.Fig. 5 では ECF の放電開始 電圧以上になるとこれによる除電が起り金属平板に帯 電していた静電気がこのキャパシターに充電されるた め,これに電位が現れており,ECF によって金属平 板に帯電していた静電気が除去されていることを裏づ けている.

2.4 金属線との比較

細い金属線に放電による静電気除電能のあることは 当然であるが, ECF にもその能力のあることが確認 された.したがってここでは金属線と ECF との静電 気除電能を比較する意味で,両者の放電特性について 調べてみた.

比較実験に使用した金属線の直径は ECF の直径に 近い 50μ のステンレス線である. これを Fig. 2 に 示す実験モデルの ECF に代えて,その放電特性を測 定してみた. その結果, Fig. 6 に示す測定結果が得 られ,細い金属線の放電特性は ECF の特性とほとん ど変らないことが判明した. ここで Fig. 6 に図示し ている ECF の特性は Fig. 3 より転写したものであ





--- 5 ---

産業安全研究所研究報告



6 -









コロナ放電特性

る. また Fig. 7 は ECF, 金属線両者の放電電流に ついて広範囲に測定した結果であるが, これをみても ECF と金属線とは全く同じような放電特性であり, 共にコロナ放電特性を示している⁴⁾. これより ECF の静電気除電能は細い金属線のそれと全く等価である ことが判明した. また金属線による静電気の除電現象 もコロナ放電であるため,除電現象は両者とも原理的 に同じであることが確認された.

3. ECF の放電特性

先の実験によって, ECF を用いると物体に帯電し ている静電気は除去されることが確認され,またその 静電気除電能は ECF にコロナ放電を誘発する有効な 働きがあるためであることも確認された.そのために 2.2 でも述べたとおり,コロナ放電の結果生じたイオ ンと静電界との相互作用によって物体に帯電している 静電気は除去されるのであり,このイオンの振る舞い が ECF を用いた場合の静電気除電特性を定める基本 因子となるのである.巨視的な立場から視るとこれは ECF のコロナ放電電流であり,除電特性はこの ECF コロナ放電特性に依存しているのである.したがっ て,ここでは ECF のコロナ放電特性について種々な 立場から実験的に検討してみた.

3.1 静電界分布と放電特性

ECF は電気抵抗の小さいことと径の細いことで不 平等静電界を形成し、その結果コロナ放電が発生する のである.したがってここでは ECF の形成する不平 等静電界のモデルとして、次の3つの場合を考え、そ れぞれの場合の放電特性について調べてみた.

先ず,平板電極と平行に ECF を張り,面と線とで 形成される不平等静電界の場合の放電特性について調 べてみた.実験モデルは Fig. 2 に示すとおりである が,この実験に静電気モデル帯電物体として選んだ金 属平板は 500×500 mm である.この金属平板の中央 部前方に 20~100 mm の距離をおいて長さ 450 mm の ECF を張った.静電気モデル帯電物体である金属平 板へは直流高圧電源から負の高電圧を印加し, ECF は電流計を通して接地されている.このときの放電特 性は Fig. 8 に示すとおりである.放電開始電圧は金 属平板と ECF との距離が長くなるほど高くなり,放 電電流は減少するという結果が得られた.この結果は ECF を用いて静電気を除去する場合静電気帯電物体

導電性繊維による静電気の除去



Fig. 8 Corona discharge current versus impressed voltage for plate. 金属平板のコロナ放電特性

と ECF との距離が短い程除電効率の良いことを示す ものである⁵⁾. また実験結果から得られた放電開始電 圧は,除電現象の解析の場合,除電後の電位を定める という意味では貴重な情報である. したがって実験結 果 Fig. 8 より距離と放電開始電圧(除電後の電位) との関係を求めた. この結果は Fig. 9 に図示すると おりである.

次に Fig. 10 に示すように金属球とある距離をお いて ECF を張り,球と線とで形成される不平等静電 界の場合の放電特性について調べてみた.実験に使用 した球は直径 12 mm の金属球であり,この球に負の 直流高電圧を印加して静電気モデル帯電物体とした. ECF へは電流計を接続して接地した.実験結果は Fig. 11 に示すとおりである.図中●印は電極間隙の小さ い領域において放電電流が急激な立上りを示したもの である.先の実験ではこのように急激な立ち上がりが 観測されなかったが,この点は Fig.7 に示す広帯域 放電特性の立ち上がり部分に相当するものである.ま た★印をした点では ECF による放電がコロナ放電か



実験方法の概要(金属球)

ら火花放電に移ることを示している.実験では金属球 と ECF の距離が 2 mm 以下になるとコロナ放電電 流が急激に上昇し,直ちに火花放電となったり,さら に間隙を小さくすると火花放電のみが起ったため測定 出来なかった.これは不平等静電界が平等静電界に近 くなるためであり ECF によってこのような平等静電 界が形成される場合には火花放電によって静電気が除 去されることを示している.一方実験によって得られ た Fig. 11 より,距離に対するコロナ放電開始電圧

- 7 -

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-5





(図中○印)と火花放電電圧(図中★印)とを求め, これを図示すると Fig. 12 が得られる.○印と★印 とで囲まれる範囲がコロナ放電の起っている領域であ りこの場合には距離によってコロナ放電と火花放電の 2つがあることを示している.

第3番目の静電界モデルは、Fig. 13 に示すような



Fig. 12. Sparkover and corona-onset voltage versus distance. 火花およびコロナ放電開始電圧



場合である.すなわち金属円筒の中心軸上に ECF を 張り,半径方向に不平等静電界が形成される場合の放 電特性について調べてみた.実験方法は Fig. 13 に示 すとおり外側の金属円筒には負の直流高電圧を印加 し,中心軸上の ECF には電流計を接続して接地し た.実験に使用した金属円筒は半径がそれぞれ 16, 27,42 mm,長さはすべて 180 mm の3種である. 実験によって得られた印加電圧と放電電流との関係は Fig. 14 に示すとおりである.実験結果では最初の金 属平板の場合と同様,金属円筒と ECF との距離が長 い程,すなわち半径が大きい程放電電流は小さくなっ



impressed voltage for cylinder. 金属円筒の放電特性

ている.しかし放電開始電圧は,半径の大きさに関係な くほぼ同じ値となった.すなわち先の2つの場合と異 り,放電開始電圧が距離にあまり依存しなかった.こ れは静電界分布が半径の大きさによっては変化せず, ECF のごく近傍に出来る最初の強い静電界によって コロナ放電がいったん誘起されると,他の大部分の空 間はコロナ放電の結果生じたイオンによって空間電荷 制限領域になってしまうためであると考えられる.

3.2 ECF の数と放電特性

3.1 で調べた放電特性の電界分布依存性にも関連す ることであるが、ここでは帯電物体の静電気を除去す るために、多数の ECF を用いた場合、その放電特性 がどのように変化するか調べてみた.

実験は 150×150 mm の金属平板と平行に, 長さ 150 mm の ECF 1~50 本を金属平板と 15 mm の距 離をおいて並べて張り, そのときの放電特性を測定し た. 金属平板へは正の直流高電圧を印加し, ECF へ は電流計を接続して接地した. Fig. 15 は接地体へ流 れた全電流を ECF の数で割り, ECF 1本当りの平





均放電電流を図示したものである. この実験結果で は、ECF の間隔が 75 mm であるとき ECF 1本当 りの平均放電電流は最大となり、除電効率が最大とな ることを示している. しか し ECF の間隔が 75 mm 以下になると1本当りの平均放電電流は減少し、放電 開始電圧も多少高くなる傾向であった. これは ECF の数が多くなり、間隔がせまくなると静電界分布がど うしても平等電界に近くなるためコロナ放電が起りに くくなるからであると考えられる. ちなみに、金属平 板と 15 mm の距離をおいて ECF のみで出来た布を 平行に張ると、ほとんど平等電界に近くなるため放電 開始電圧は 4 kV 弱から 15 kV に上昇するという実 験結果が得られた.

3.3 極性と放電特性

静電気帯電物体には正に帯電したものもあれば負に 帯電したものもある.したがって、ここでは帯電物体 の極性が ECF の放電特性にどのような影響を及ぼす か、これについて調べてみた.

実験は Fig. 13 に示している金属円筒(半径 27 mm)を用いて行った. 先の実験では外側の金属円筒に負の直流高電圧を印加したが,ここでは同じ状態で



r

これに正の直流高電圧を印加し、このときの放電特性 を測定した. またこれとは逆に Fig. 13 に図示して いる中心軸上の ECF に正, 負の直流高電圧を印加し 外側の金属円筒には電流計をつないで接地した場合の 放電特性についても調べてみた. 実験結果は Fig. 16 に示すとおりである. Fig. 16 の(a)は ECF に負の 直流高圧電源を印加した場合,あるいは外側の金属円 筒に正の直流高圧電源を印加した場合の実験結果であ り, 一方(b)はその逆の場合である. この実験では前 者がいわゆる負のコロナ放電の起る場合,後者が正の コロナ放電の起る場合である. この結果から明らかな ように, 印加電圧が 7~8 kV 程度までは負のコロナ 放電の方が大きな電流を示し, 8 kV 以上になると正 のコロナ放電は払子コロナに変化するため電流値もば らつき値も急激に増加する傾向を示している.

コロナ放電の極性依存性については, Fig. 10 に図 示する金属球にも正, 負の直流高圧電圧を印加して調 べてみた. その結果, 放電開始電圧は金属球に正の高 電圧を印加した場合(負のコロナ放電が発生)の方が 負の高電圧を印加した場合(正のコロナ放電が発生) よりも高くなり, 放電電流は先の金属円筒の場合と同 様, 印加電圧の低い領域において負のコロナ放電の方 が大きくなった.

以上のようにコロナ放電特性には当然極性依存性が あるが⁶⁾,実験から金属球の場合には特にその違いが 顕著であることが明らかとなった.したがって静電気 的な意味では狭い範囲に帯電している静電気,あるい は曲率の小さな物体に帯電している静電気を ECF に よって除去する場合,極性の違いを考慮しなければな らないことを示している.

3.4 相対湿度と放電特性

静電気の帯電,除電現象は一般に湿度の影響を大き く受ける. ECF もコロナ放電による除電であるため, 空気中の水分,すなわち湿度に依存すると予想され る.したがってこれを実験によって調べてみた.実験 はやはり Fig. 13 に示している金属円筒(半径 27 mm)の中心軸上に ECF を張ったものを用いて行っ た.この実験モデルを調湿した雰囲気(デシケータ) の中にセットし,中心軸上の ECF に正の直流高圧電 源を印加して放電特性を測定した.雰囲気の調湿は絶 対湿度で行なうことが望ましいが,Table 2 に示す 調湿剤をデンケータの中に入れて調湿し,相対湿度に

Fable 2	Agents control.	used	for	moisture
	e	岡洞 刘.	_ 膨 =	

Relative humidity	Agents		
0%	Silica gel		
19%	Saturated aqueous solution of $CaBr_2$		
33%	Saturated aqueous solution of $MgCl_2$		
51%	Room air		
75%	Saturated aqueous solution of $NaCl_2$		
90%	Saturated aqueous solution of $BaCl_2$		
100%	Water		

よる影響を調べた. 調湿の効果が完全であることを確 めるため,放電特性は時間の変化とともに測定し,放 電特性が完全に飽和し再現性のあることを確認した上 でその湿度による放電特性とした. 調湿時間はだいた い 48 時間以上であり,得られた測定結果は Fig. 17 に示すとおりである. この結果によると湿度の増加と ともに電流値は多少小さくなる傾向であるが 20~100 % r.h. の範囲内ではほとんど変らず ECF のコロナ 放電特性は湿度にあまり影響されないと判断出来る. この結果はコロナ放電が主として空気中の酸素分子の



Fig. 17 Corona discharge current in various relative humidity. 相対湿度と放電特性

- 10 -

電離によるものであるため,湿度の影響をあまり受け なかったと考えられる.またこの結果は ECF を用い た静電気除電法が湿度の低い雰囲気でも充分な効果の あることを示すものであり,他の除電法と比較して大 きな特長である.

3.5 ECF の電気抵抗と放電特性

先の実験結果はすべて電気抵抗が 1 cm 当り数 100 Ω という小さな抵抗値の ECF を用いて測定した放電 特性であるが、ここでは ECF の電気抵抗と放電特性 の関係について調べてみた.

実験に使用した ECF はその電気抵抗が 1 cm 当 り 10⁶ Ω , 10⁸ Ω , 10⁹ Ω という高い値のものである. この ECF を用いて先の実験と同じ方法によって放電 特性を測定したところ,この範囲の抵抗値をもつ ECF では,先の ECF とほとんど同じような放電特性を示 し,放電による静電気除電能の変らないことが確認 された.

4. 検 討

ECF の静電気除電能は細い金属線と同様, コロナ 放電にあり, 定量的にも両者は等価であることが明ら かになった. したがってここではそれらのコロナ放電 特性とそれらを用いた場合の静電気除電特性について 以下検討してみる.

コロナ放電の特性については過去にも詳細なる研究 がなされており⁷),放電電流の実験式も提案されてい る⁸⁾.特に同心円筒電極のコロナ放電特性に対しては すでに理論解析もなされている⁹⁾.しかしいずれも本 実験によって得られた金属線ならびに ECF のコロナ 放電特性とは一致せず,従来の特性式を適用すること は好ましくないと考えられる.そこで本実験で得られ たコロナ放電特性について検討したところ,実験式と しては

$$I = a(V - V_s)^n \tag{1}$$

が導かれ、上式がコロナ放電特性を表す実験式として 適用出来ることが判明した. ここで a,n は定数であ り、Vs はコロナ放電開始電圧に相当するものである. 上式は本実験によって得られた金属平板,金属円筒い ずれの場合のコロナ放電特性に対しても適用出来た. すなわち(1)式は静電界分布によらず適用出来る実 験式であった. (1) 式を適用して求めたコロナ放電特性の1例を 示せば、半径 27 mm の金属円筒の場合に対して、そ の実験式は

 $I = 6.1 \times 10^{-11} (V - 3.4 \times 10^{8})^{1.67}$ (2)

となる. ただし上式の $a=6.1\times10^{-11}$ A/V^{1.67}, n=1.67 は Fig. 14 に図示している実験結果を両対数方 眼紙に log $(V-V_s)$ – log I でプロットして求めたも のであり, 放電開始電圧 V_s は 3.4×10^3 V としてい る. Fig. 18 はこの実験式と測定点との比較を示した



Fig. 18 Analysis of corona discharge characteristics. 放電特性の解析

Table 3 Constants of experimental formula a, n, V_s 一覧表

		S EX		
Electrode	Distance between ECF and electrode	Corona onset voltage V _s	а	n
. •	20 mm	3.6kV	6.0×10 ⁻¹¹	1.89
	40	4.5	3.5×10 ⁻¹⁰	1.85
Plate	60	5.6	6.6×10 ⁻¹¹	1.48
	80	6.1	$7.5 imes 10^{-10}$	1.63
	100	7.5	2.1×10 ⁻¹¹	1.42
	16	3.2	3.1×10 ⁻¹¹	1.89
Cylinder	27	3.2	5.6×10 ⁻¹¹	1.68
	42	3.2	2.1 \times 10 ⁻¹²	1.67
N. S. Statistica Sci			·	

- 11 -

ものであるが、コロナ放電が不安定となり測定値にば らつきを生じる 8.5 kV 以上の高電圧を除いては非常 によく一致していることがわかる. その他本実験によ って得られたコロナ放電特性を(1)式で表わし、そ れぞれの場合について a, n, V_s の値を求めたのでこ れを Table 3 にまとめて示しておく.

次に除電現象についての検討を行なってみる. 金属 線, ECF は共に電気抵抗が小さいため, それらを用 いた場合の静電気除電現象としては先ず伝導によって 起こるものが考えられるが, ここではコロナ放電によ って起こる除電現象に焦点を絞ってみた. 後者の場合 には金属線あるいは ECF と静電気帯電物体とが必ず しも同一媒体でなく,分離されている場合にも起こる 除電現象であり,これはいわゆる放電によって起こる 除電現象の特徴でもある. したがって後者の除電現象 について考察してみた.

放電による除電現象を除電過程から大別すると次の 2つの場合が考えられる. 1つは最初から ECF と静 電気発生源とが共存していて除電の起こる場合であ り, 他の1つは静電気発生源, あるいは帯電物体に ECF が接近して, あるいはこの逆で, 除電の起こる 場合である.

前者の場合は、静電気の発生によって物体に静電気 が帯電するとその電位は上昇して行くが、ECF のコ ロナ放電開始電圧になるとこれからコロナ放電が起っ て除電が始まるため、電位の上昇は止まることにな る. すなわち静電気発電源から単位時間当り発生する 静電荷の値と ECF のコロナ放電によって流れる電流 とが等しくなる電位において平衡となり、帯電物体の 電位はこの電位に保持されることになる. しかし実際 には静電気の発生が時間的に連続していたり、その発 生量が一定ではないため、上に述べたようなコロナ放 電特性における放電開始電圧以上の電位で平衡するこ とは少く、一時的に帯電物体の電位が ECF のコロナ 放電開始電圧以上になっても, コロナ放電開始電圧ま では除電されるため帯電物体の電位はほとんどコロナ 放電開始電圧に維持されることになる. ただし, ECF のコロナ放電開始電圧と消滅電圧とが等しくない場合 は、帯電物体の電位がこれに近い電位でリップルする ことになる.

次に後者の場合では、 ECF と帯電物体との距離が 時間によって変化する場合の除電現象であり、前者の 場合の除電現象にいわゆる速度の要素が入って来たも のである.したがってこの速度が小さい場合には,先 と同じような除電現象となる.すなわち帯電物体の電 位は接近するにつれて,例えば Fig.9 に図示してい る距離対放電開始電圧(除電後の電位)特性の電位曲 線に沿って降下することになる.逆に速度が大きい場 合には,この電位曲線によって定まる電位まで除電さ れずに接近することとなるから,帯電物体の電位は前 の電位よりも多少高くなることになる.すなわち実験 結果 Fig. 8,14 等によっても明らかなように, ECF と帯電物体との距離が短くなる程コロナ放電電流は大 きくなり,放電開始電圧も低くなるため,先程の電位 まで除電されないまでも接近するにつれて帯電物体の 電位は低くなることになる.

5. あとがき

径が細く,電気抵抗の小さい ECF には静電気除電 能があり,これは細い金属線と同様コロナ放電である ことを確めた.また ECF と細い金属線とは定量的に も,それらの静電気除電能が等価であることを実験に よって確かめた.したがって本稿に示している結果は 当然細い金属線に対しても適用出来るものである.

本稿では ECF を用いた場合の除電現象の基本要素 についてのみ考察することを目的としたため、表面に 均一帯電しているものを対象として考え,除電現象を 定める ECF のコロナ放電特性について種々な角度よ り検討した.その結果

- (1) ECF はそれと同一媒体にある静電気を除去 することは勿論,同一媒体にない静電気も除去 する.すなわち第三者の静電気をも除電する能 力がある.
- (2) 一般には帯電物体の静電気が ECF のコロナ 放電開始電圧相当値まで除去される.
- (3) 湿度依存性は非常に少ないが、湿度の低い程 除電能は大きくなる傾向である.
- (4) 局部的に帯電している静電気を除去する場合 には、除電される静電気の極性によって多少の 違いがある.
- (5) 局部的に帯電している静電気を除去する場合 にはコロナ放電でなく火花放電によって除電さ れる場合がある。
- (6) ECF 1 cm 当りの電気抵抗が 10⁹ Ω 程度までは金属線と等価な除電能がある.

- 12 ---

以上のことが明らかになった.

これらの結果は均一表面帯電しているものを対象に 基本問題のみを取り上げたため,問題の範囲を狭くし ているが,ECF,金属線による除電現象については, さらに問題の範囲を広げて検討し明るい見通しを得て いる.これについては第2報で報告する.

(謝辞) 終りに本研究に当り御指導いただいている 上智大学大滝教授をはじめ上月研究部長,坂主技官, 実験に御協力下さった帝人中央研究所平川研究員に深 謝する.本研究に使用した資料 ECF は帝人株式会社 より提供を受けたことを付記しておく.

参考文献

1) 例えば H. W. Cleveland "Static Electrification" Institute of Physics and Physical Society, pp. 139~ 146 (1967).

2) Richard A. Compton "The Cornell Hotel & Restaurant Administration Quarterly" Cornell University, February (1967).

3) Robert E. Thompson, Fire Journal, 15~19, November (1969).

4) 高分子学会編"静電気ハンドブック"地人書館, p.10 (1967).

5) 田畠他, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-17-1 (1968).

6) Y. Toriyama, E. T. Z., 38 (1), 21 (1933).

7) 本多侃士"放電現象"東京電機大学, p.p.80~ 97 (1960).

8) 電気学会編"放電ハンドブック"オーム社 p. 110 (1965).

9) H. J. White "Industrial Electrostatic Precipitation" Addison-Wesley, p. p. 83~100 (1963).

付 🔗 録

静電気除電能の確認 (Fig.5 の理論解析)

以下の解析は ECF の静電気除電能を確認するため に行なった理論解析であり、そのモデルは Fig. A-1 に示すとおりである.いま静電気モデル帯電物体であ る金属平板に帯電している静電荷を Q とすると、そ の電位 V_m は

$$V_m = \frac{Q}{C_0 + \frac{CC_1}{C + C_1}}$$
(A-1)

となり、ECF の電位 (キャパシターCの電位) V_{ECF} は、静電誘導によって

$$V_{\text{ECF}} = \frac{Q}{C_0 + \frac{CC_1}{C + C_1}} \times \frac{C_1}{C + C_1} \qquad (A-2)$$

となる.上式でCは ECF に接続したキャパシターの 容量であり、 C_0, C_1 はそれぞれ金属平板と接地体、金 属平板と ECF との静電容量である.

本文で述べたとおり ECF はコロナ放電によって静 電気を除去するのであるから、その放電開始電圧を V_s とするとき、金属平板の電位 V_m と ECF の電位 V_{ECF} と差が

$$V_m - V_{\rm ECF} \ge V_s \tag{A-3}$$

であれば、ECF にはコロナ放電が起こって、金属平 板に帯電している静電気は除電されるのである. ここ で上式 (A-3) は電圧によって表した条件式である が、(A-1)、(A-2) 式を (A-3) 式へ代入して、こ れを静電荷Qの条件式で表わすと、(A-3) 式は

$$Q \ge \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C} V_s$$
 (A-4)



ig. A-7 mary treat model of chamatric phenomena. 除電現象の解析モデル

となり,結局 (A-4)式を満足するような静電荷 Qが 金属平板に最初帯電していると, ECF によってその 静電気は除去されることを示している.

このようにして (A-4) 式で表わされる条件を満足 すると、金属平板に帯電していた静電荷は ECF によ って除電されるため、最初帯電していた Q から Q'へと減少することになる.すなわち金属平板に帯電し ていた静電荷のうち、Q-Q' なる静電荷は ECF によ って除電されることになる.この除電された静電荷 Q-Q' は本来ならば接地体へと漏洩して行くが、除 電能の確認のために考えているモデル Fig. A-1 であると、 ECF に接続されたキャパシター C へと充電されることになる. この結果、金属平板ならびに ECF の電位は最初の V_m 、 V_{EOF} から V_m 、, V_{EOF} 、 へと変化して行き、 V_m 、, V_{EOF} 、 はそれぞれ

$$V_{m}' = \frac{Q'}{C_{0} + \frac{CC_{1}}{C + C_{1}}} + \frac{Q - Q'}{C + \frac{C_{0}C_{1}}{C_{0} + C_{1}}} \times \frac{C_{1}}{C_{0} + C_{1}}$$

$$(A-5)$$

$$V_{ECF}' = \frac{Q - Q'}{C + \frac{C_{0}C_{1}}{C_{0} + C_{1}}} + \frac{Q'}{C_{0} + \frac{CC_{1}}{C + C_{1}}} \times \frac{C_{1}}{C + C_{1}}$$

$$(A-6)$$

となる. しかしここでまだ金属平板と ECF との電位 差が

$$V_m' - V_{\rm ECF}' \ge V_s \tag{A-7}$$

なる条件を満足すると、ECF はコロナ放電を持続し て金属平板に帯電している静電気をさらに除去するこ とになる.結局最終的には(A-7)式の等式が成立す るまで、ECF による除電作用は続くことになる.こ れより(A-5)、(A-6)式を(A-7)の等式へ代入し、 ECF によって起こった除電作用の最終的な結果を求 めるとそれは

$$\frac{Q'}{C_0 + \frac{CC_1}{C + C_1}} \times \frac{C}{C + C_1} - \frac{Q - Q'}{C + \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}} \times \frac{C_0}{C_0 + C_1} = V_s$$
(A-8)

となる,いまの解析モデルの場合では,以上のように して得られ上式 (A-8) が金属平板より除電される静 電荷の最終結果,すなわち ECF による除電後の結果 を与えるものである.

ここで(A-8) 式を Q について整理すると, 除電後の静電荷 Q' が与えられ



Fig. A-2 Theoretical charge characteristics when static electricity of the charyed body is eliminated by ECF. ECE の除電による静電荷の変化

$$Q' = \frac{C_0}{C+C_0}Q + \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C+C_0}V_s \quad (A-9)$$

となる. また Q-Q'=AQ と置きこれについて整理すると,金属平板から除電されてキャパシターへ移動した静電荷が与えられ

 $\Delta Q = Q - Q'$

$$= \frac{C}{C+C_0}Q - \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C+C_0}V_s \quad (A-10)$$

となる. 上式 (A-9), (A-10) は (A-4) 式の成立 する範囲において適用出来る関係であり, (A-4) 式 が成立しない場合は ECF によって除電が起らないた め当然 $Q=Q', \Delta Q=0$ である.

Fig. A-2 は金属平板の除電後の静電荷 Q' ならび に金属平板からキャパシターへ移動した静電荷 4Q を 図示したものであり,除電後金属平板に帯電していた Q とは一次関数の関係になることを示している.また (A-9),(A-10) 式は ECF と接地体との間に接続さ れているキャパシターCの容量が大きい程除電後の静 電荷 Q' が少くなること,すなわち除電効率の良いこ とを示している.いま仮りに ECF を接地すると,こ の場合は ECF に接続されているキャパシターの容量 が無限大になったことと等価でであるから,上式(A-9),(A-10)のCを無限大とおくことによって求めら れ,その場合の関係は

$$Q' = (C_0 + C_1) V_s$$
 (A-11)
$$V_m' = \frac{Q'}{C_0 + C_1} = V_s$$
 (A-11)'

となる. すなわち金属平板に帯電している静電気は ECF によって, ECF の放電開始電圧相当値まで除電 されることを示している.

以上の (A-9), (A-10) 式は ECF によって除電 される関係を静電荷 Q ならびに Q' で表わしたもの であるが,これを電位 V_m ,ならびに V_m' によって 表わしてみる. (A-1), (A-5) 式より

$$Q = \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C + C_1} V_m \qquad (A-1)'$$

$$Q' = \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C} \left(V_m' - \frac{C_1}{C_1 + C} V_m \right) \qquad (A-5)'$$

が得られ、この関係を(A-9), (A-10) へ代入する と、金電平板の除電後の電位 V_m' ならびに ECF の 電位 V_{ECF}' はそれぞれ

$$V_{m}' = \frac{CC_{0} + C_{0}C_{1} + C_{1}C}{(C + C_{1})(C + C_{0})} V_{m} + \frac{C}{C_{0} + C} V_{s}$$
(A-12)

- 14 -

$$V_{ECF}' = \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{(C + C_1)(C + C_0)} V_m - \frac{C_0}{C_0 + C} V_s$$
(A-13)

となる.上式 (A-12), (A-13) も当然 (A-4) 式の 成立する範囲において適用出来る関係である.すなわ ち (A-1)'を (A-4) 式へ代入して,これを電位の関 係で表わすと

$$V_m \ge \frac{C+C_1}{C} V_s \tag{A-4}'$$

となり, (A-4)' 式で表わされる範囲において (A-12), (A-13) 式は成立することになる. 逆に (A-4)' 式を満足しない場合は金属板, ECF の電位がそれぞ れ

$$V_m' = V_m \tag{A-14}$$

$$V_{\rm ECF}' = \frac{C_1}{C+C_1} V_m$$
 (A-15)





ECF の除電による電位変化

となる. **Fig. A-3** はこの関係を図示したものである 以上 (A-12), (A-13), (A-14), (A-15) 式に: いて, キャパシターの容量*C*が各部の静電容量 C_0 , (に比較して充分大きいと V_m' , V_{FOF}' はそれぞれ $V_m \geq V_s$ において

$$V_m' = \frac{C_1}{C + C_1} V_m + V_s \qquad (A-12)'$$

$$V_{\rm ECF}' = \frac{C_1}{C + C_1} V_m \qquad (A-13)'$$

 $V_m < V_s$ において

$$V_m' = V_m \tag{A-14}'$$

 $V_{\rm TCF}' = 0 \qquad (A-15)'$

となり、いままで静電誘導によって現れていた影響/ なくなる.

本文に図示した Fig. 5 の理論計算の結果はこ(A-12)', (A-13)', (A-14), (A-15)'を用いて めたものであり,実験で求めた $V_s=3.8 \text{ kV}$, $C_1=1$ pF ならびに C=20, 92, 160 pF の場合についてそ ぞれ示してある.

以上の解析は最初に述べたように ECF の静電気度 電能を確認するために行なったものである.したが-て理論展開からも明らかなように ECF によって起そ 静的な除電現象について解析した結果であり,静電気 の発生が連続しているような場合には適用出来るもの でない.しかし実際の静電気発生源としては,断続的 であると考えられる場合の方が多く,この場合には」 式が適用出来ること,例えば帯電物体の電位が(A 11)式で表わされることを確めている.

(昭和 45 年 3 月 1 日受付)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-5
発行所/労働省産業安全研究所
東京都北多摩郡清瀬町梅園1丁目4番6号 雪 新 (0424) 91-4512番 (仕)
印刷所 新日本印刷株式会社

, c

郵便番号 180-04

UDC 537,22:537,56 導電性繊維による静電気の除去

田畠泰幸

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-5, 1~15 (1970)

1 cm 当りの電気抵抗が数 100 Ω 程度である 50 μ 以下の細い導電性繊維 (ECF) に は、伝導のみならずコロナ放電による静電気除電能のあることを証明した. なおこの静電 気除電能は細い金属線と定量的にも等価であり、これを用いた場合の除電特性を定める因 子がそのコロナ放電特性にあることも明らかにした. したがって ECF のコロナ放電特性 を種々な立場から実験によって検討してみた. その結果これを用いた場合には物体に帯電 している静電気が ECF のコロナ放電開始電圧相当値まで除電されること、および ECF の除電能は湿度、極性等にほとんど影響されないことを立証した. なお ECF の電気抵抗 が 1 cm 当り 10⁹ Ω 程度までであると、先の ECF と同様コロナ放電による静電気除電 能のあることが実験によって確認された. (図 21、表 3、参 9)

UDC 537, 22 : 537, 56

Elimination of Static Electricity by Use of Electrically Conductive Fiber Yasuyuki TABATA

The Research Report of The Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-18-5, $1\sim15$ (1970)

It has been recognized that the fine stainless steel eliminates static electricity of the charged body by a corona discharge.

This paper shows that the elimination faculty of static electricity exsists in the Electrically Conductive Fiber, with resistivity about $10^2 \sim 10^3$ ohm per centimeter, as well as the fine stainless steel and that the elimination phenomena of static electricity depends upon the discharge characteristics of the ECF.

(Fig. 21, Table 3, Ref. 9)