

MAR. 1970

RIIS-RR-18-5

UDC 537.22 : 537.56

# 産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 島 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\*

田 島 泰 幸\*\*

## Elimination of Static Electricity by Use of Electrically Conductive Fiber\*

Yasuyuki TABATA\*\*

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  $10^2 \sim 10^3$  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  $10^9$  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

電気除電方法については多くの関心もたれ、近年これに関する研究結果も発表されている<sup>1)</sup>。その中の一つに数  $10 \mu$  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<sup>2)3)</sup>。

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

\* 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.

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。

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. Resistance of ECF.  
ECF の電気抵抗

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

A, B, C : Drop method

も明らかのように、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か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 1cm 当りの抵抗値が 263 Ω 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 0.15~0.20 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 は静電的な意味での誘電率が大きいので、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

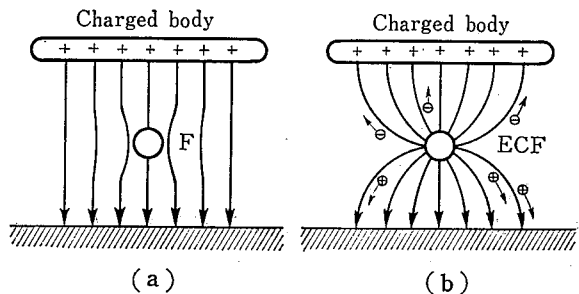


Fig. 1 Electrostatic field pattern.  
静電界分布

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 のコロナ放電消滅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いたため、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  $14 \times 200$  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かめてみた。

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、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

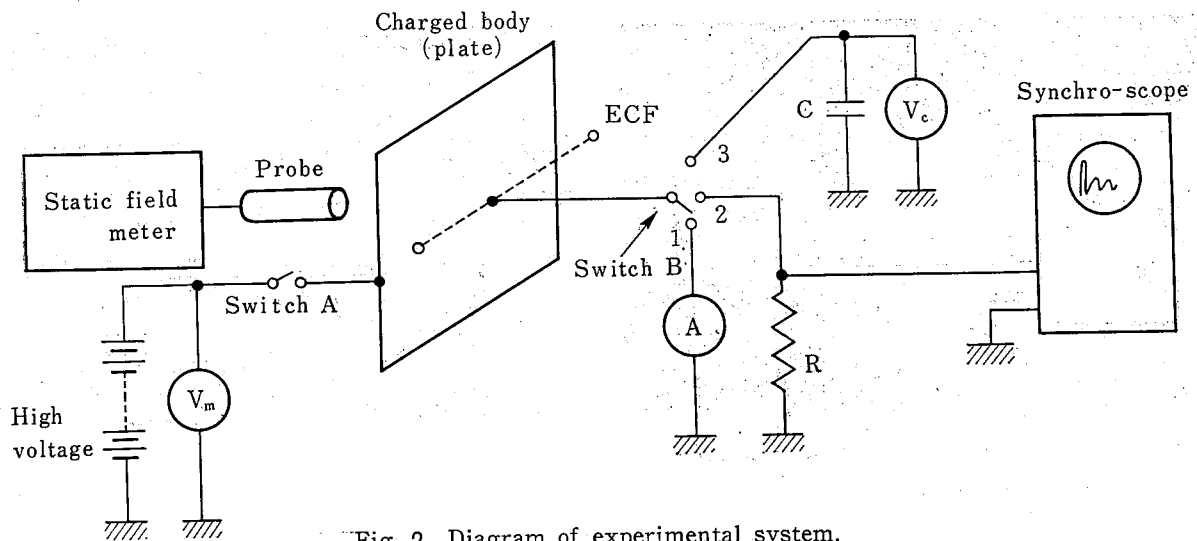


Fig. 2 Diagram of experimental system.

実験装置の概要

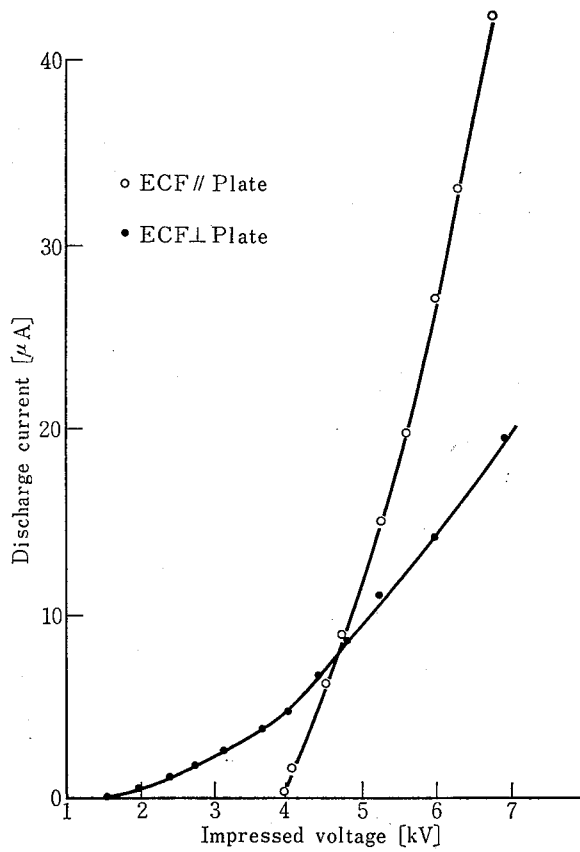
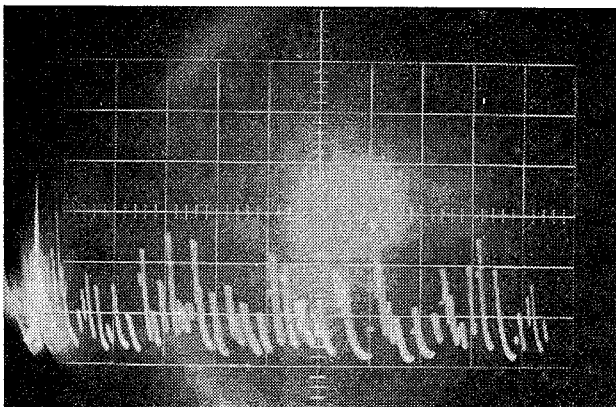


Fig. 3 Corona discharge characteristics of ECF.  
ECF の放電特性

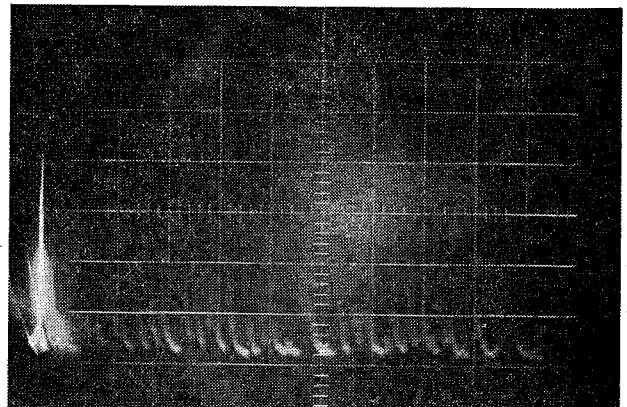
ある金属平板と ECF との間に流れる放電電流を測定してみた。その結果, Fig. 3 (○印で示す放電特性) が得られ, 金属平板の電位が 3.8kV 以上になると放電電流の流れていることが確認された。またこの実験結果から得られる放電開始電圧 3.8kV が, 先の実験における金属平板の除電後の電位に等しくなっていることも確認された。

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 15mm 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 kΩ 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 5kV を, (b) は 7kV を印加した



(a)  $V_m=5\text{ kV}$ , Horizontal axis= $50\ \mu\text{sec/div}$ , Vertical axis= $1\ \text{V/div}$



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

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の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かめるため、定量的な解析を試みてみた。ここで定量的な解析の対象として取り扱ったものは 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、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かめてみた。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  $50\mu$  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わ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

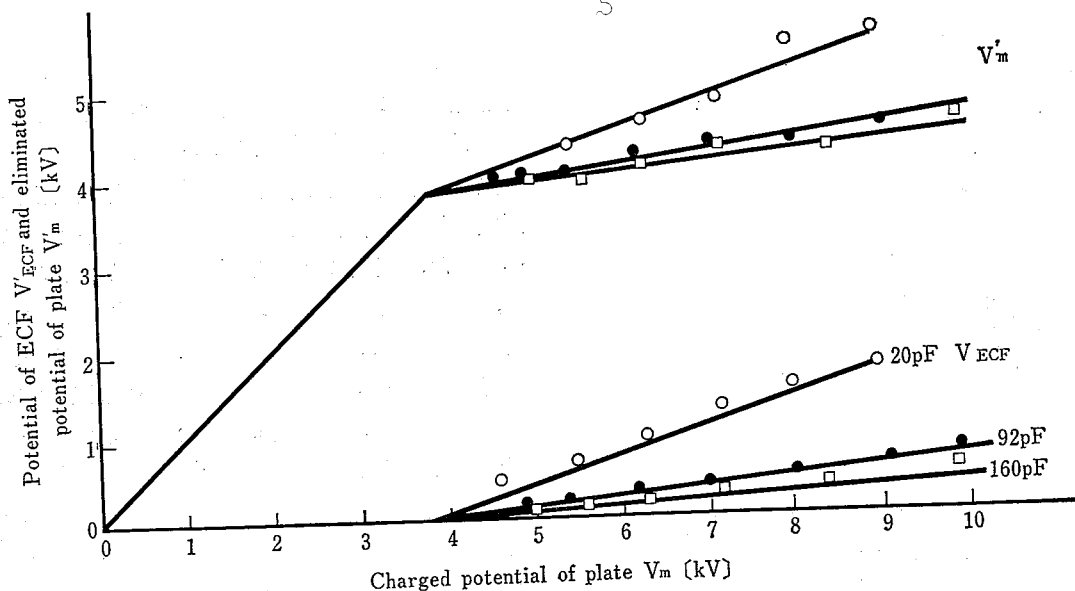


Fig. 5 Confirmation of ECF elimination faculty.  
ECF 除電能の確認

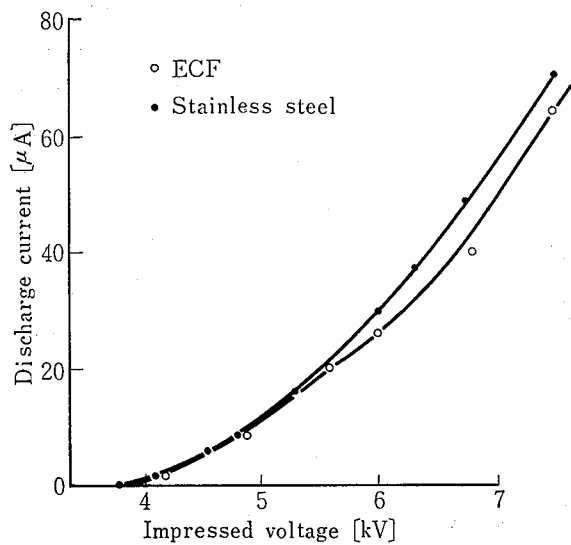


Fig. 6 Comparison with the fine stainless steel and ECF.  
ECF と金属線との比較

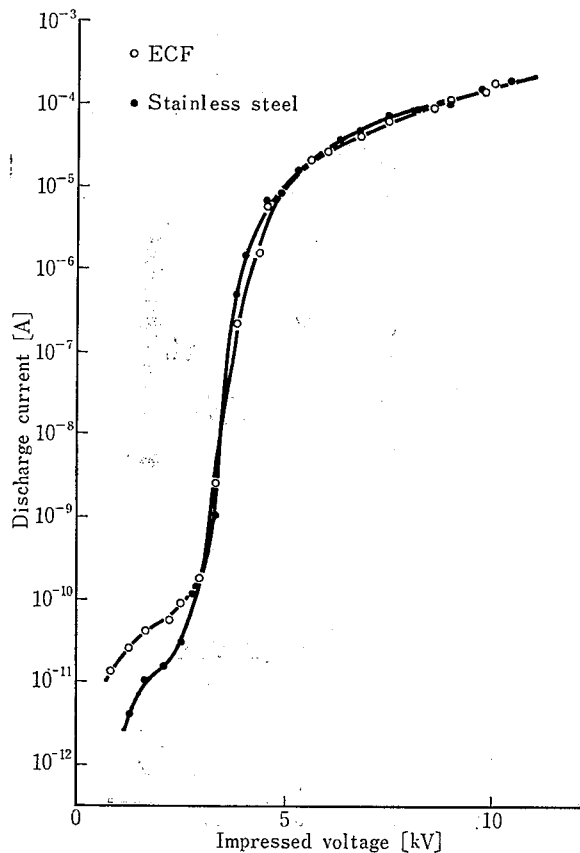


Fig. 7 Corona discharge characteristics in wide range of voltage.  
コロナ放電特性

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<sup>4)</sup>。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。

まず, 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

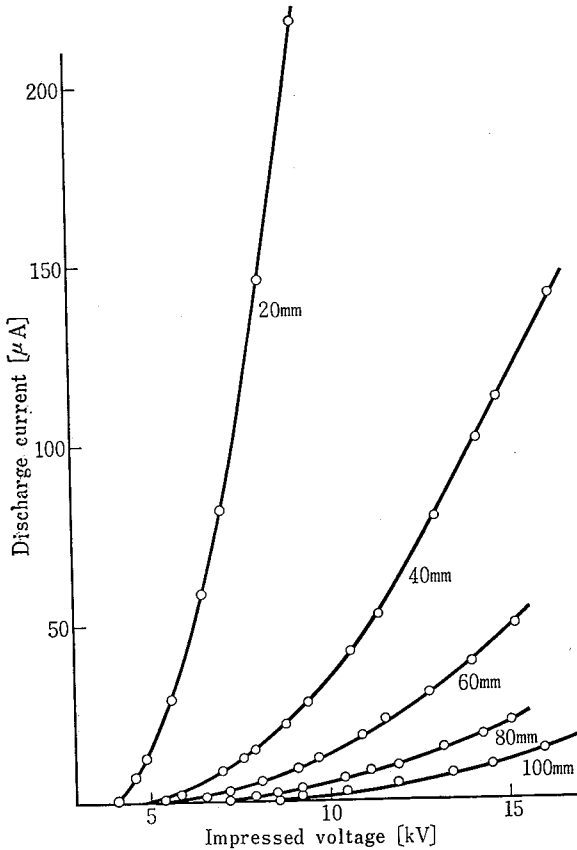


Fig. 8 Corona discharge current versus impressed voltage for plate.  
金属平板のコロナ放電特性

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<sup>5)</sup>。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において 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ち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

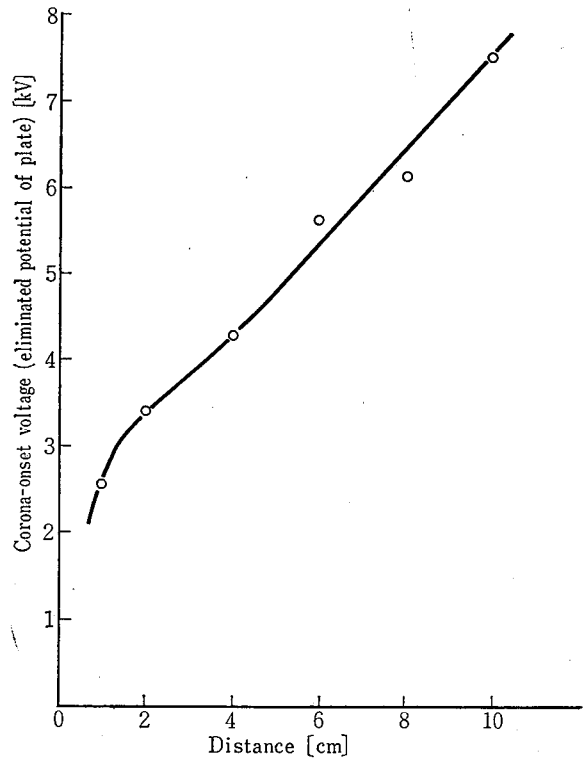


Fig. 9 Corona-onset voltage (eliminated potential of plate) versus distance between ECF and plate.  
距離と放電開始電圧

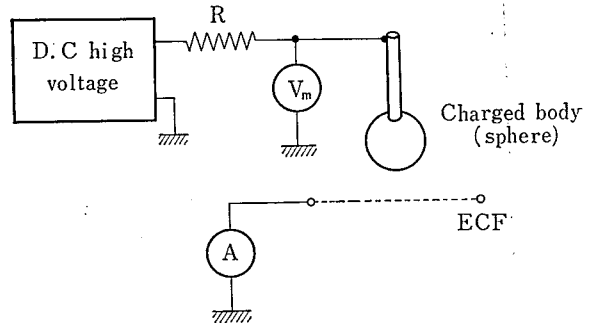


Fig. 10 Diagram of experimental method in use of metallic sphere.  
実験方法の概要（金属球）

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



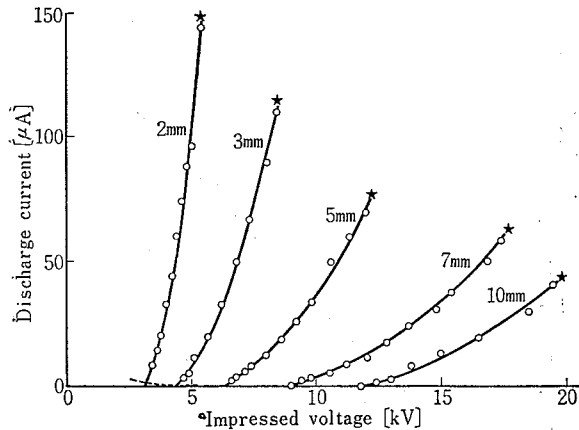


Fig. 11 Corona discharge current versus impressed voltage for sphere.  
金属球のコロナ放電特性

(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

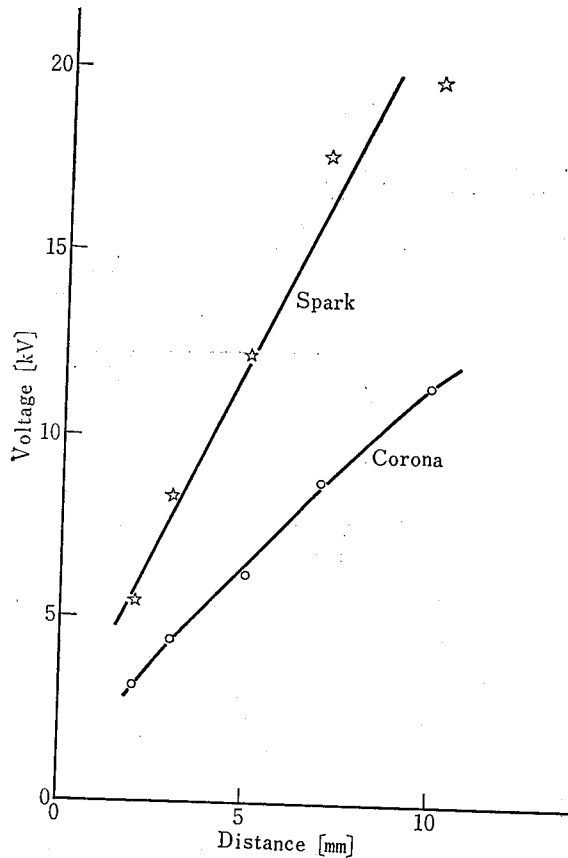


Fig. 12. Sparkover and corona-onset voltage versus distance.  
火花およびコロナ放電開始電圧

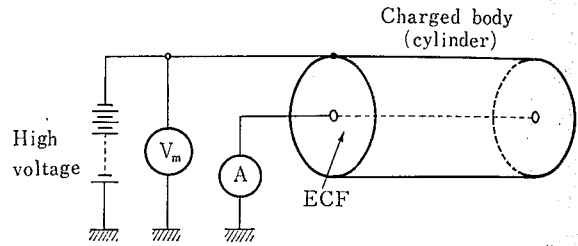


Fig. 13 Diagram of experimental method in use of cylinder.

実験方法の概要(金属円筒)

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, 長さはずべて 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

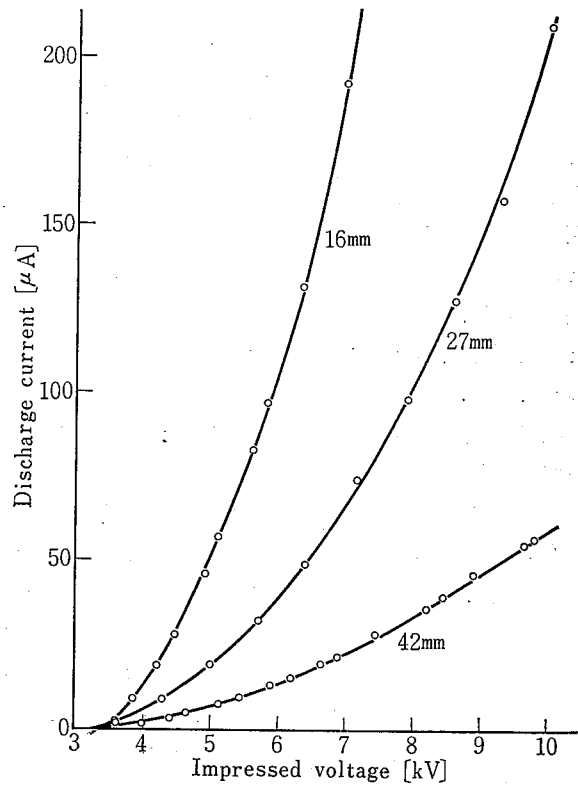


Fig. 14 Corona discharge current versus impressed voltage for cylinder.  
金属円筒の放電特性

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つの場合と異なり、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

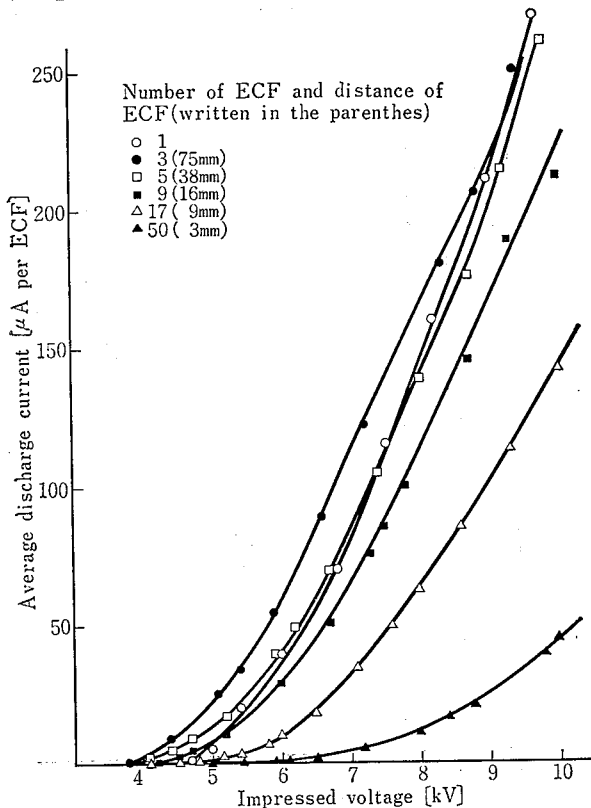


Fig. 15 Discharge characteristics of many ECF.  
多数 ECF の放電特性

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き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

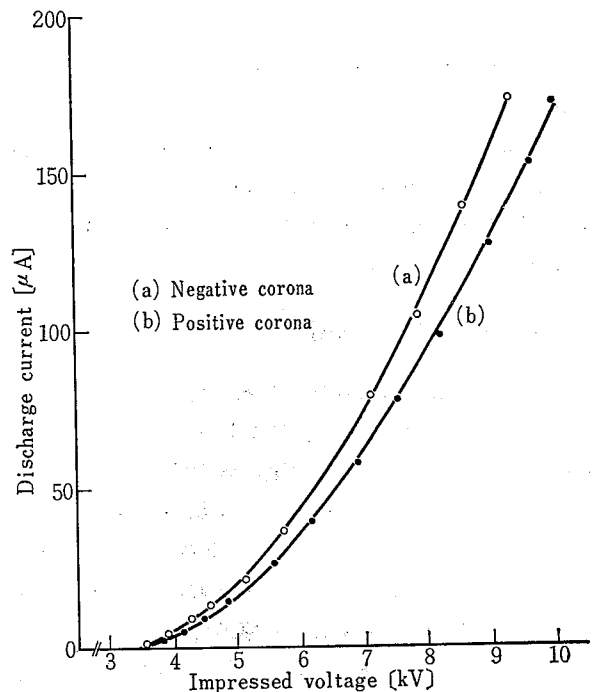


Fig. 16 Positive and negative corona discharge characteristics.  
極性とコロナ放電特性

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 に負の直流高電圧を印加した場合、あるいは外側の金属円筒に正の直流高電圧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のように、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粒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<sup>6)</sup>、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。したがって静電氣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 に正の直流高電圧を印加して放電特性を測定した。雰囲気調湿は絶対湿度で行なうことが望ましいが、Table 2 に示す調湿剤をデシケータの中に入れて調湿し、相対湿度に

Table 2 Agents used for moisture control.

調湿剤一覧表

Relative humidity	Agents
0%	Silica gel
19%	Saturated aqueous solution of CaBr <sub>2</sub>
33%	Saturated aqueous solution of MgCl <sub>2</sub>
51%	Room air
75%	Saturated aqueous solution of NaCl <sub>2</sub>
90%	Saturated aqueous solution of BaCl <sub>2</sub>
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認するため、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わらず 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

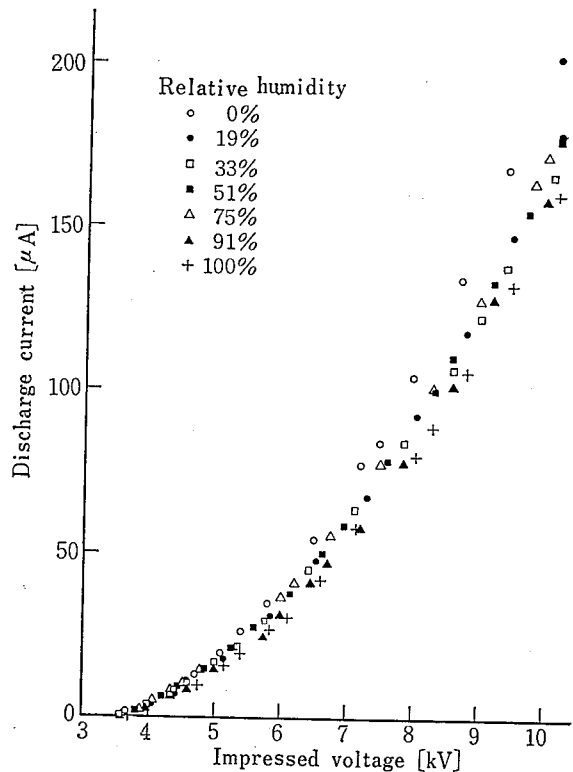


Fig. 17 Corona discharge current in various relative humidity.

相対湿度と放電特性

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 10<sup>6</sup> Ω, 10<sup>8</sup> Ω, 10<sup>9</sup> 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<sup>7)</sup>、放電電流の実験式も提案されている<sup>8)</sup>。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<sup>9)</sup>。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

$$I = a(V - V_s)^n \quad (1)$$

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、 $V_s$  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

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

となる。ただし上式の  $a = 6.1 \times 10^{-11} \text{ A/V}^{1.67}$ ,  $n = 1.67$  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  $3.4 \times 10^8 \text{ V}$  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

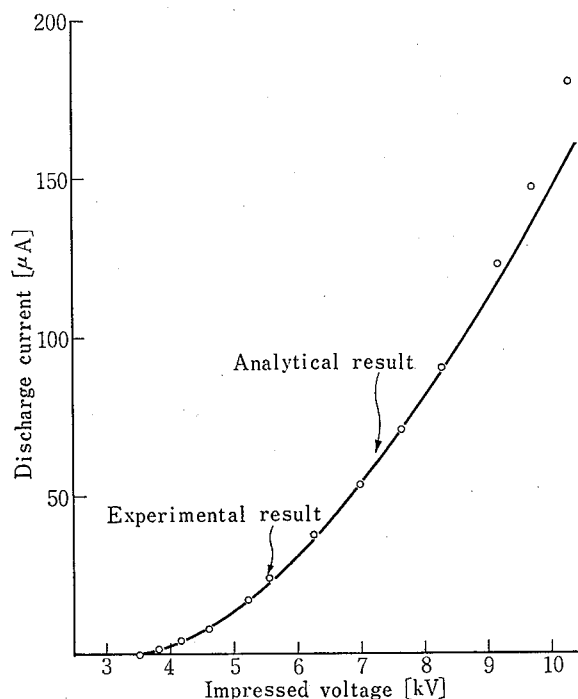


Fig. 18 Analysis of corona discharge characteristics.

放電特性の解析

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

Electrode	Distance between ECF and electrode	Corona onset voltage $V_s$	$a$	$n$
Plate	20 mm	3.6 kV	$6.0 \times 10^{-11}$	1.89
	40	4.5	$3.5 \times 10^{-10}$	1.85
	60	5.6	$6.6 \times 10^{-11}$	1.48
	80	6.1	$7.5 \times 10^{-10}$	1.63
	100	7.5	$2.1 \times 10^{-11}$	1.42
Cylinder	16	3.2	$3.1 \times 10^{-11}$	1.89
	27	3.2	$5.6 \times 10^{-11}$	1.68
	42	3.2	$2.1 \times 10^{-12}$	1.67

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。すなわち静電気発生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  $10^9 \Omega$  程度までは金属線と等価な除電能がある。

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らかな見通しを得ている。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感謝する。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) 田島他, 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

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

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

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

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  $V_{\text{ECF}}$  と差が

$$V_m - V_{\text{ECF}} \geq V_s \quad (\text{A-3})$$

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

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

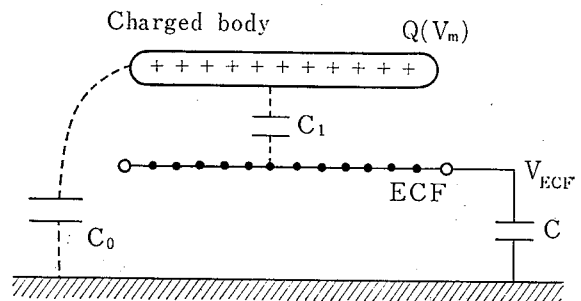


Fig. A-1 Analytical model of elimination phenomena.

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  $V_m, V_{ECF}$  から  $V_m', V_{ECF}'$  へと変化して行き、 $V_m', V_{ECF}'$  はそれぞれ

$$V_m' = \frac{Q'}{C_0 + \frac{CC_1}{C+C_1}} + \frac{Q-Q'}{C + \frac{C_0C_1}{C_0+C_1}} \times \frac{C_1}{C_0+C_1} \quad (A-5)$$

$$V_{ECF}' = \frac{Q-Q'}{C + \frac{C_0C_1}{C_0+C_1}} + \frac{Q'}{C_0 + \frac{CC_1}{C+C_1}} \times \frac{C_1}{C+C_1} \quad (A-6)$$

となる。しかしここでまだ金属平板と ECF との電位差が

$$V_m' - V_{ECF}' \geq V_s \quad (A-7)$$

なる条件を満足すると、ECF はコロナ放電を持續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

$$\frac{Q'}{C_0 + \frac{CC_1}{C+C_1}} \times \frac{C}{C+C_1} - \frac{Q-Q'}{C + \frac{C_0C_1}{C_0+C_1}} \times \frac{C_0}{C_0+C_1} = V_s \quad (A-8)$$

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

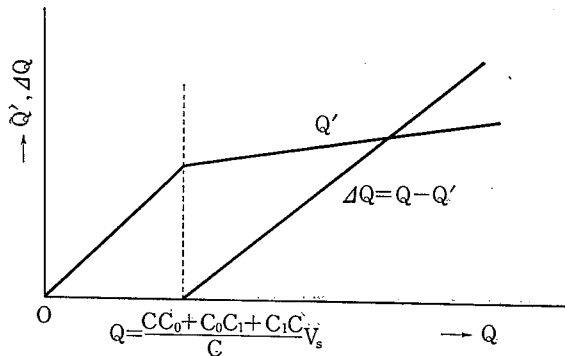


Fig. A-2 Theoretical charge characteristics when static electricity of the charged body is eliminated by ECF. ECF の除電による静電荷の変化

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

となる。また  $Q-Q' = \Delta Q$  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

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - Q' \\ &= \frac{C}{C+C_0} Q - \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{C+C_0} V_s \quad (A-10) \end{aligned}$$

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  $\Delta Q$  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

$$Q' = (C_0 + C_1) V_s \quad (A-11)$$

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

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

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

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

が得られ、この関係を (A-9), (A-10) へ代入すると、金属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

$$V_m' = \frac{CC_0 + C_0C_1 + C_1C}{(C+C_1)(C+C_0)} V_m + \frac{C}{C_0+C} V_s \quad (A-12)$$

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

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

$$V_m \geq \frac{C+C_1}{C} V_s \quad (A-4)'$$

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

$$V_m' = V_m \quad (A-14)$$

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

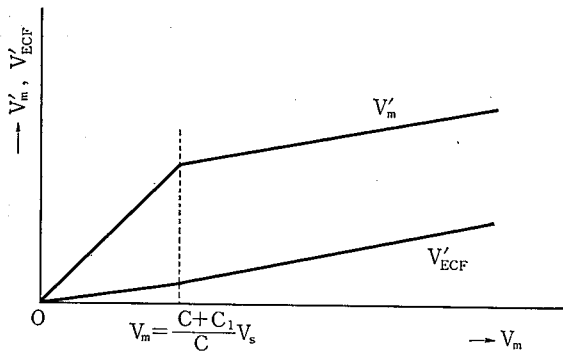


Fig. A-3 Theoretical potential characteristics when static electricity of the charged body is eliminated by ECF.

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) 式において、キャパシターの容量  $C$  が各部の静電容量  $C_0, C_1$  に比較して充分大きいと  $V_m', V_{ECF}'$  はそれぞれ  $V_m \geq V_s$  において

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

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

$V_m < V_s$  において

$$V_m' = V_m \quad (A-14)'$$

$$V_{ECF}' = 0 \quad (A-15)'$$

となり、いままで静電誘導によって現れていた影響はなくなる。

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

以上の解析は最初に述べたように ECF の静電気除電能を確認するために行なったものである。したがって理論展開からも明らかなように ECF によって起る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、この場合には上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認している。

(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

---

昭和 45 年 3 月 25 日 発行

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  
電 話 (0424) 91-4 5 1 2 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

---

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 島 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  $100 \Omega$  程度である  $50 \mu$  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  $10^9 \Omega$  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, 1~15 (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 exists in the Electrically Conductive Fiber, with resistivity about  $10^2 \sim 10^8$  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)

