

SEPT. 1968

RIIS-RR-17-1

UDC 621.319.7:621.039.8

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-17-1

放射性同位元素による静電気の除去 —帯電物体の電位減少について—

田島泰幸・坂主勝弘・児玉 勉

労働省産業安全研究所

MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

放射性同位元素による静電気の除去*

—帯電物体の電位減少について—

田 島 泰 幸** 坂 主 勝 弘*** 児 玉 勉**

Elimination of Static Electricity by Use of Radioisotopes

—Electric Potential Decay of Charged Body—

Yasuyuki TABATA** Katsuhiko SAKANUSHI*** Tsutomu KODAMA**

Static electricity charged on the insulating materials leads to spark ignition in the explosive gas or the vapour atmosphere. It can often cause serious accidents in the various industries and consequently several counterplans are considered in order to eliminate static electricity.

One of the safe methods for eliminating positively static electricity is to produce a number of ion pairs in the atmosphere. Writers have tried to do it by the use of radioisotopes and neutralize static electricity. It has been definitely shown by the previous experiments that it is able to eliminate static electricity on running vinyl sheet, in powder or in oil by using radioisotopes. This eliminating mechanism, however, has not been well established. It has been vague, in other words, how ion pairs produced by radioisotopes behave in the static electric field.

This experiment is carried out with a view to define the eliminating mechanism of static electricity in case of using radioisotopes, Polonium-210. When the charged body is applied radioisotopes to, writers, as the first steps, investigate quantitatively how the electric potential of the charged body is decaying with elapsed time. Also we tried to formularize the eliminating mechanism and analyze approximately the electric potential decay of charged body, too.

It has become clear from the above experimental and analytical results that the electric potential decay of the charged body is converging to the zero potential through the following three regions during several time.

- (1) The decaying region shown in the trigonometric function or the hyperbolic function.
- (2) The decaying region shown in the linear function.
- (3) The decaying region shown in the exponential function

On the other hand, on the occasion that the charged body is not applied radioisotopes to and left alone in the air, it has been led that the electric potential decay of the charged body is roughly indicated by the hyperbolic function. Those detail data are shown in the appendix.

Following those experimental and analytical results, we, as the next steps, will further research on the fundamental data owing to develop the eliminator using radioisotopes in a simple experimental model of the charged system.

1. 緒 言

静電気による災害は種々の産業において問題となっており、その除電対策がいろいろ検討されている¹⁾。そ

の1つとして放射性同位元素（以下 RI と記す）によって電離されたイオンを利用する方法があり、これはコロナ式除電機のように着火源となる危険性がないため、現在注目されている除電方法である²⁾。筆者らは、過去に、ビニールシート、油、粉体などに帯電している静電気を、この方法によって除電することを試みた結果、有効な方法であることが明らかになった³⁾。し

* 高分子学会第13回静電気研究発表会 (June 1968) で発表

** 電気課 Electrical Section

*** 防爆課 Explosion Prevention Section

かし、過去の実験は、再現性に乏しかったこと、絶縁物の中の静電気帯電分布が測定できなかったこと、イオンの挙動に起因している電気伝導現象に不明確な点が多かったことから RI を用いた静電気の除電機構はまだ定量的に明らかにされていなかった。

ここでは、この RI を利用した除電機構について、定量的に調べることを目的として実験を行なった。その第 1 段階としては、静電気が均一表面帯電している場合を採り上げ、除電とともに帯電物体の電位がどのように減衰して行くかについて調べてみた。この報告はその実験結果とこれに対する検討である。

実験は静電気が均一表面帯電している状態を、金属板に直流高圧電源を供給することによってモデル的に作り、これに RI を照射した。このとき RI によって発生したイオンが静電気の除去に寄与している関係を、イオン電流の測定から推定し、これを基にして静電気が除去されたとき、帯電物体の電位が順次減少して行く除電現象について、考察を試みた。

その結果、静電気が除去されるにしたがって、帯電物体の電位が、主として次の 3 つの領域

- (1) 三角関数的、あるいは双曲線関数的減衰領域
- (2) 1 次関数的減衰領域
- (3) 指数関数的減衰領域

を経て零電位に減少して行くことが判明した。

また均一表面帯電している帯電物体に、RI を照射しないで自然放置しておくと、この場合にもやはり、帯電物体の静電気が除去される。これについても考察したので、その結果を付録に示しておいた。この自然放置した場合の除電は、コロナ放電によって生成されたイオンによる除電であるため、帯電物体の減衰もかなり複雑である。しかし、だいたい双曲線関数に近い減衰をして行くことが、検討の結果明らかになった。

2. RI による静電気の除去

RI を用いた静電気の除去は Fig. 1 に示すとおり、RI の電離作用によって発生した正と負のイオンを利用することである。すなわち、これらのイオンの内、物体に帯電している静電気と逆極性のイオン (Fig. 1 では負イオン) は静電気と互いに結合、中和を起し、結果的に物体に帯電していた静電気が、除去されるこ

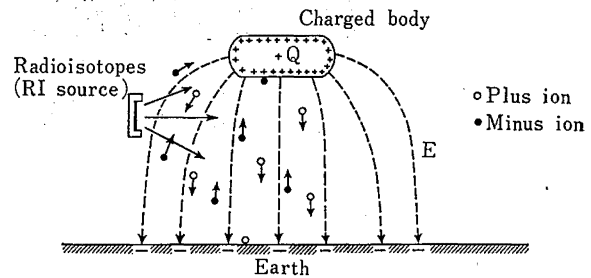


Fig. 1 Illustration of an eliminating phenomenon.

除電現象の説明

とになるのである。したがって、RI を用いた静電気の除電現象は、静電界と正、負イオンとの相互作用に基づいた現象であり、次のように考えられるのである。

いま、静電気帯電物体に向けて、RI を照射すると RI によって、この近傍には正と負のイオンが作られる。この正と負のイオンは帯電物体自ら作っている静電界の作用でクーロン力を受け、帯電物体と逆極性のイオンだけが帯電物体の方へ移動して、静電気と中和する。一方中和に寄与しなかった帯電物体と同極性のイオンは、帯電物体の近傍にある接地体へと移動して行くのである。以上のようにして、物体に帯電していた静電気が中和される結果、静電気は順次除去されたことになり、静電気帯電物体の電位も次第に零電位へと収斂して行くのである。

この除電現象を電気回路論の立場から考察すると、帯電物体と接地体との間を、正と負のイオンが移動する現象はこの間をイオン電流が流れたことと等価であり、このイオン電流が流れる電気回路は、見方を変えれば、静電気の漏洩する回路でもある。このような回路がイオンによって形成されたため、帯電物体の静電気は除去されるのである。以上のように、RI による除電現象を電気回路論の立場に置き換えて考えると、帯電物体から接地体へ発生している静電界は静電容量 C に、帯電物体と接地体との間を移動するイオンは、イオン電流 I が流れる抵抗回路 R に置換されるので、Fig. 2 に示すような等価回路が導かれるのである。

電気回路論の立場から導かれた Fig. 2 に示す等価回路によって、この除電現象を考察すると、除電現象を表わす次のような式が誘導されるのである。いま帯電物体と接地体との間を、イオン電流 I が微小時間 dt 流れると、静電気帯電物体の方へは、 Idt なるイオンが運ばれたことになる。この静電気帯電物体の方

* 詳細については、3. 実験装置のところで説明する。

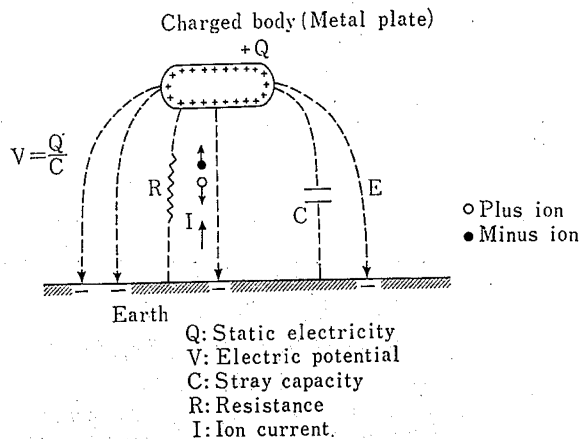


Fig. 2 The equivalent circuit indicating elimination phenomenon of static electricity.

静電気の除電現象を説明する等価回路

へ運ばれたイオンと、物体に帯電している静電気とは、互いに極性が逆のイオンであるから中和してしまう。この結果、物体に帯電していた静電気 Q は微小時間 dt の間に dQ だけ除電されたことになる。よって除電現象を表わす式はその両者を等しいと置くことによって、次の式

$$-dQ = Idt \quad (1)$$

が導かれる。ここで負 (−) の符号は静電気の減少 (除電) を示すものである。あるいは帯電物体に、静電気が均一表面帯電している場合には、帯電物体の静電容量 C が定義できるため、 $Q = CV$ の関係から $dQ = CdV$ をを用いて、式 (1) は次のように、書き換えることも出来るのである。

$$-CdV = Idt$$

$$\therefore \frac{dV}{dt} + \frac{I}{C} = 0 \quad (2)$$

ここに導いた2つの式 (1), (2) は、静電気の除去につれて、帯電物体の電位が減少して行く除電現象そのものを表わした式である。したがって以下これらの式に基づいて除電現象を検討してみた。

3. 実験装置

ここでは静電気が均一表面帯電している場合の除電現象に問題を絞ったため、帯電物体には金属板 (500×600) を選び、これをもって、静電気モデル帯電物体とした。一方、この金属板と相対峙させて接地された金属板 (700×1000) を置き、これをもって接地体とし

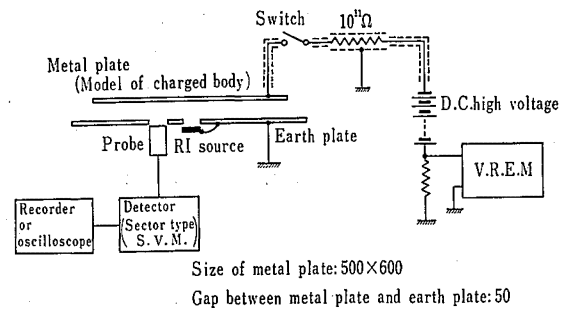
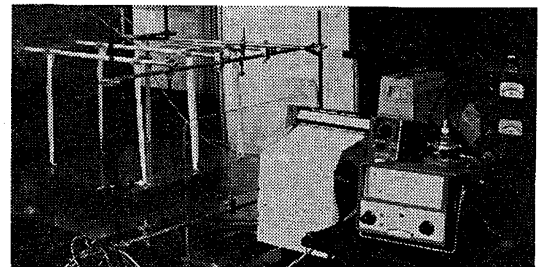
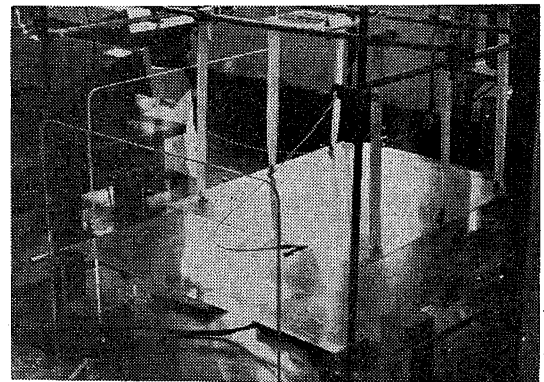


Fig. 3 The outline of experimental equipment
実験装置の概要



(a) The whole view of experimental equipment.

実験装置全景



(b) The model of charged body.

モデル帯電物体

Fig. 4 The experimental equipment.
実験装置

た。これら2枚の金属板を5cmの間隔で互いに平行となるように設置した。その概要をFig. 3, Fig. 4に示す。金属板に帯電している静電気が漏洩しないように静電気モデル帯電物体である方の金属板はテフロンシートによって吊した。この金属板へは、直流高圧電源から、高抵抗 $10^{11}\Omega$ を通して高電圧を供給し、これによって静電気が均一表面帯電したと等価な状態を作った。金属板へ供給する電圧は最高10kVとしている。これは高電界のもとで起るイオンの α 作用⁴⁾が

発生しない状態で実験するためである。また金属板の電位が高くなると、その端からコロナ放電が発生するが、この影響を最小限度に抑制するために、金属板の端は誘電体（マイラテープ）でもって被覆されている。

金属板に帯電している静電気の値は帯電電位を検出することによって測定した。これにはセクタ型静電界検出器を用いた。また、静電気の除去とともに帯電電位が減少して行く状態は同じくセクタ型静電界検出器によって検出し、これをオシロスコープによって観測した。一方イオン電流の方は振動容量型電位電流計によって測定した（Fig. 3 参照）。

実験では RI に α 線源、 ^{210}Po を選び、これを接地体の方の金属板に設けてある窓（40φ）の部分に、帯電物体の方を向けて設置した。線源の特性ならびに形

Table 1 Properties of radioisotopes used in experiment.

実験に使用した放射性同位元素の特性

RI source	Intensity	α -energy (max)	Half time
Polonium-210	100(mc)	5.3(MeV)	128.4(days)

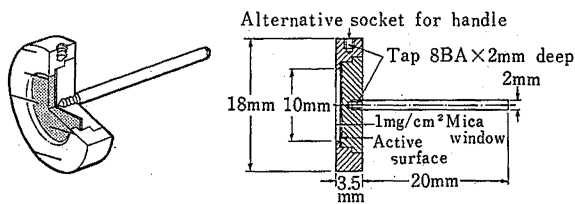


Fig. 5 A Shape of radioisotope used in experiment.

実験に使用した放射性同位元素の形状

状は、Tabl 1, Fig. 5 に示す通りである。この実験において α 線源を用いた理由は、その飛程距離が約 4 cm^{*1} と短いために、帯電物体が直接 α 線源の照射を浴びる心配がないためである。したがって β 線源が金属板に直接当たったときに生じるような、2 次効果^{*2}の影響も無視できるのである。また接地体と帯電物体の間に、RI によって電離された空気イオンができるだけ均一に分布するように飛程距離の小さな α 線源を選んでいる。このような意味からも、実験では接地体と帯電物体に相当している金属板との距離を 5cm としたのである。

*1 標準状態の空気中では、 α 粒子の飛程とエネルギーとの間に成立する関係⁵⁾から導いたとき、3.85 cm となる。

*2 実験では金属板にアルミニウムを使用しているので、これに β 線が直接当たると 2 次効果として、これから X 線の放射が起る。

*3 Fig. 3 のスイッチを閉じた状態で実験を行なった。

4. 実験結果

4.1 イオン電流の測定

静電気モデル帯電物体である金属板に直流高圧電源を供給したままで^{*3}、下方より RI を照射すると、RI によって発生した空気イオンが、イオン電流となって金属板と接地体との間を流れる。このイオン電流 I と金属板の電位 V との関係を調べた。その実験結果を、Fig. 6 に示す。

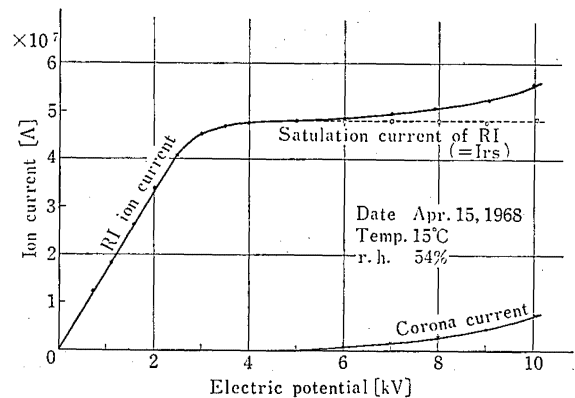


Fig. 6 Examples of V-I characteristics of ion current.

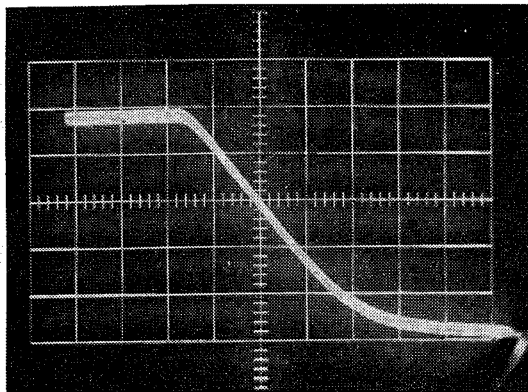
イオン電流の V-I 特性の例

実験結果から明らかなように、金属板の電位が低い領域、すなわち帯電物体の電位が約 3kV 付近までは、RI によって発生したイオンが再結合を起し、イオン電流 I と帯電物体の電位 V とは比例関係になっている。換言すれば、この領域ではオーム則が満足されている。しかし電位がこれ以上になると、イオンは再結合することもなく、帯電物体と接地物体との間を全てのイオンが移動するため、イオン電流は飽和し、一定（約 0.5 μA ）になっている。さらに電位が高く、約 5 kV 以上になると、帯電物体である金属板からコロナ放電が発生し、これによる電流が電位が高くなるにつれて増加している（Fig. 6 参照）。このコロナ電流が RI によるイオン電流に重畳されている結果、この領域では結果的にイオン電流が増大している。以上のように、イオン電流は帯電物体の電位によって、それぞれ、様相を異にしているのである。したがって、以下このイオン電流をそれぞれ 3 つの領域、オーム則が成立する領域、イオン電流飽和領域、コロナ発生領域に分け、これらの領域における除電現象をそれぞれ検討

して行くことにする。

4.2 除電現象の測定

最初、金属板に 10kV の直流高圧電源を供給し、金属板に静電気が帯電した状態を作る。次に金属板の下方から RI を照射すると同時に、金属板へ供給していた直流電源を切ると、金属板に帯電していた静電気が次第に除去されて行く。これによって金属板の電位も順次減少して零電位に収斂して行く。この電位減少をセクタ型静電界検出器、ならびにオシロスコープによって観測した。その実験結果を Fig. 7 に示す。



Vertical axis : 2kV/cm
Horizontal axis : 0.5sec/cm
Date Apr. 15, 1968
Temp. 15°C
r. h 54%

Fig. 7 Examples of electric potential decay of charged body.

帯電物体の電位減少の例

Fig. 7 において、フラットな直線部分は、金属板に帯電していた静電気が 1 秒間程度の短い時間では、ほとんど除去されていないことを示すものである。一方、RI を照射すると静電気が除去され、帯電物体の電位が、次第に減少するが、実験結果、Fig. 7 から明らかのように、最初の約 1.0 秒までは、だいたい直線的に、後半は指数関数曲線的に、減少している。そうして約 3.0 秒後には、均一表面帯電していた静電気がほとんど除去されてしまう実験結果が得られた。

5. 考察 (除電現象の解析)

除電現象は、帯電物体の作っている静電界と、その作用を受けた、空気イオンの挙動に起因しているもの

である。したがって、除電現象は、イオンの挙動から考察して行くことが、本来の道筋であろう。しかし、今回は前に述べたように、イオンの挙動を、イオン電流として捕らえた立場、換言すれば、電気回路論の立場から導いた除電現象を表わす式 (1), (2) に基づいて考察、検討して行く。

方針としては、次のような、2 段階に分けて考察した。まず、イオン電流の実験式を、実験結果 4.1 から導き、これを除電現象を表わす式へ代入した。次に、この基本式を解析して、静電気帯電物体の、電位減少を推察するとともに、この解析結果と実験結果との比較を行なった。

5.1 イオン電流の実験式

イオン電流 I と帯電物体の電位 V との間には、実験の結果 Fig. 6 に示すような関係が得られている。このように、イオン電流の電圧、電流特性は二極放電管の暗電流特性と類似した結果が得られている。これは、RI によって発生した空気イオンが、帯電物体と、接地体との間をイオン電流となって、流れたことを裏づけているものでもある。帯電物体の電位が高い場合にはコロナ放電の電流も流れ多少複雑になっているが、ここでは、このようにして得られたイオン電流の電圧、電流特性を、Fig. 8 に示すような特性に近似してみた。

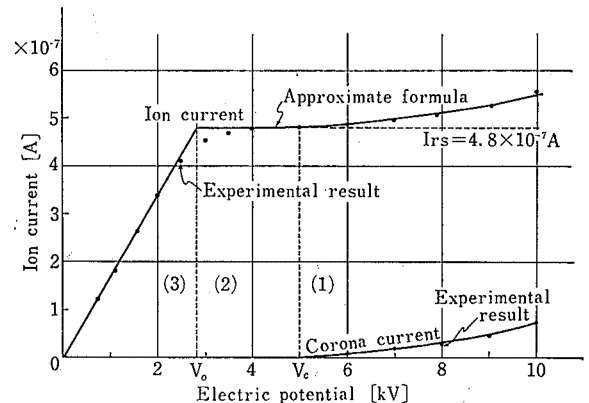


Fig. 8 An approximation of V-I characteristics.

V-I 特性の近似

したがってこの特性をそれぞれ次の 3 つの領域に分け、イオン電流の実験近似式を導いてみる。

(1) コロナ放電が発生している領域 ($V \geq V_c$)

静電気帯電物体の電位が、コロナ発生電圧 V_c よりも高くなると、帯電物体から、コロナ放電が発生する。これによるコロナ放電電流が、RI によって発生

している、イオン電流に加わっていると考えれば、この領域ではイオン電流の実験式

$$I = I_{rs} + KV(V - V_c) \quad (3)$$

が近似式として導かれる。ここで第1項 I_{rs} は RI によって発生した飽和イオン電流を、第2項はコロナ放電によるコロナ電流⁶⁾を表わしている。 K は電極形状、雰囲気などによって定まる定数である。

(2) RI によるイオン電流が飽和している領域 ($V_c > V \geq V_0$)

この領域は RI の電離作用によって発生したイオンが全てイオン電流となって飽和している領域であり、帯電物体の電位には依存しない領域である。したがってイオン電流の実験式は

$$I = I_{rs} = \text{一定} \quad (4)$$

とした。実験結果からはこの飽和イオン電流 I_{rs} が 4.8×10^{-7} A となっている。この値は実験に使用した α 線源の特性から検討したとき、ほぼ妥当な値である。すなわち実験に使用した α 線源が1秒間当りに生成するイオンの数 N_0 は

$$N_0 = 3.7 \times 10^{10} \times R \times \frac{W \times 10^6}{W_0} \quad (5)$$

ただし R : α 線源のキューリ数

W : α 線源の最大エネルギー

W_0 : イオン化エネルギー*1

から⁷⁾計算して、 $N_0 = 5.5 \times 10^{14}$ 個/sec となる。ここで線源の半減期による補正をすると、イオンの数は

$$N_0' = N_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{T'/T_h}$$

ただし T' : 経過日数*2

T_h : 半減期

から $N_0' = 8.6 \times 10^{12}$ 個/sec となり、この N_0' を用いて飽和イオン電流 I_{rs}' の概略値を計算すると、効率 50% と仮定して*3

$$I_{rs}' = en'_0 dS = eN'_0 \quad (6)$$

$$N'_0 = n'_0 dS$$

ただし e : イオンの電荷量

d : 電極間の距離

S : 電極面積

から⁸⁾、 $I_{rs}' = 6.8 \times 10^{-7}$ A が得られる。これより実験から得られた飽和イオン電流の値はほぼ妥当な値であると考えられる。

(3) RI によるイオン電流がオーム則を満足している領域 ($V_0 > V$)

この領域はイオン電流が帯電物体の電位と比例関係になっているから、線形電気回路のオーム則がそのまま成立し、実験式としては

$$I = GV \quad (7)$$

が得られる。ここで G は比例定数、すなわちコンダクタンスである。

ここで以上のように近似したイオン電流の実験式に実験結果 Fig. 6 から求まる定数 $K = 1.4 \times 10^{-15}$ A/V², $V_c = 5.0$ kV, $I_{rs} = 4.8 \times 10^{-7}$ A, $G = 1.7 \times 10^{-10}$ A/V, $C = 85$ pF を代入すると、イオン電流の実験式は3つの領域においてそれぞれ

$$I = 1.4 \times 10^{-15} V(V - 5 \times 10^3) \quad (V \geq V_c)$$

$$I = 4.8 \times 10^{-7} \quad (V_c > V \geq V_0)$$

$$I = 1.7 \times 10^{-10} V \quad (V_0 > V)$$

と表わすことができる。

5.2 除電現象の解析

5.1 から得られたイオン電流の実験式 (3), (4), (7) を除電現象を表わす式 (2) へ代入すると、3つの領域に対してそれぞれ次の微分方程式が得られる。

(1) コロナ放電が発生している領域 ($V \geq V_c$)

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} [I_{rs} + KV(V - V_c)] = 0 \quad (8)$$

(2) RI によるイオン電流が飽和している領域 ($V_c > V \geq V_0$)

$$\frac{dV}{dt} + \frac{I_{rs}}{C} = 0 \quad (9)$$

(3) RI によるイオン電流がオーム則を満足している領域 ($V_0 > V$)

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} GV = 0 \quad (10)$$

ここで微分方程式 (8) を解くと、定数の間に

$$\frac{I_{rs}}{K} - \left(\frac{V_c}{2}\right)^2 \geq 0$$

なる関係がある場合は、式 (8) の解として

$$V = -V_A \tan \left[\frac{KV_A}{C} t - A_1 \right] + \frac{V_c}{2} \quad (11)$$

*1 α 線が空気イオン1対を生成するに必要なエネルギー W_0 は、35.5 eV として計算した⁵⁾。

*2 実験に使用した α 線源は、1966 年 1 月に製造されたものであるしたがって経過日数は約 800 日強である。

*3 α 線源は Fig. 5 に示しているとおり、アルミニウムのソケットにコーティングされている。したがって、このソケットの方へ放射された α 線はアルミニウムに吸収されて、空気の電離用には寄与しないと考え、効率は 50% と仮定した。

ただし

$$V_A = \sqrt{\frac{I_{rs}}{K} - \left(\frac{V_c}{2}\right)^2}$$

が得られる。ここで A_1 は積分定数である。これを求めるため、いま初期条件

$$t=0, V=V_s$$

ただし V_s : 帯電物体の初期電位
を式 (11) へ代入して A_1 を求めると

$$A_1 = \arctan \left[\frac{1}{V_A} \left(V_s - \frac{V_c}{2} \right) \right] \quad (12)$$

となる。これより上に求まった積分定数 A_1 を式 (11) へ代入して整理すると、コロナ放電が発生している領域では、除電とともに帯電物体の電位減少を表わす式

$$V = -V_A \tan \left[\frac{KV_A}{C} t - \arctan \frac{V_s - V_c/2}{V_A} \right] + \frac{V_c}{2} \quad (13)$$

が得られる。これは静電気が除去されるにしたがって帯電物体の電位が最初三角関数的に減少して行くことを表わすものである。

次に式 (9) を解くと、これは定数項からなる一階の微分方程式であるより、次の解が得られる。

$$V = -\frac{I_{rs}}{C} t + A_2 \quad (14)$$

ただし A_2 は積分定数である。ここでいま求めた式 (14) と、前に求まっている式 (13) は、領域が違っても、共に同じ帯電物体の電位減少を表わしたものである。したがってこれら 2 つの式が表わしている電位は、任意の時刻において同じ電位になり、なお連続でなければならない。これよりいま任意の時刻 $t=t_c$ において、次の 2 つの条件

$$(V_1)_{t=t_c} = (V_2)_{t=t_c} \\ \left(\frac{dV_1}{dt} \right)_{t=t_c} = \left(\frac{dV_2}{dt} \right)_{t=t_c}$$

を導入し*。これから式 (14) の積分定数 A_2 、ならびに任意に仮定した時刻 t_c を求めると

$$A_2 = V_c + \frac{I_{rs}}{C} t_c \quad (15)$$

$$t_c = \frac{C}{KV_A} \left[\arctan \frac{V_s - V_c/2}{V_A} - \arctan \frac{V_c/2}{V_A} \right] \quad (16)$$

となる。これより上に求まった積分定数 A_2 を式 (14) へ代入して整理すると、RI によるイオン電流が飽和している領域では、電位減少を表わす式

$$V = -\frac{I_{rs}}{C} (t - t_c) + V_c \quad (17)$$

が得られる。

ここで上式 (17) に $t=t_c$ を代入すると $V=V_c$ となり、これはイオン電流の実験においてイオン電流の増加した電圧、すなわちコロナ発生電圧に一致している。このように 2 つの境界条件から積分定数を定めて得られた式においても、やはりコロナ発生電圧が一致している。このことは除電現象を表わす微分方程式 (8), (9) に基づいて解析した結果であるから、それらが連続となる境界電圧 V_c に一致して当然のことである。しかしこれによって、微分方程式を解く条件に別の立場から任意に定めた以上の境界条件が成立していることの裏付けにもなったのである。

一方、オーム則を満足している領域における微分方程式 (10) も、同様にして解析する。すなわちこれも任意の時刻 $t=t_0$ において、次の 2 つの条件

$$(V_2)_{t=t_0} = (V_3)_{t=t_0} \\ \left(\frac{dV_2}{dt} \right)_{t=t_0} = \left(\frac{dV_3}{dt} \right)_{t=t_0}$$

を導入して*、微分方程式 (11) を解いたときに現われる積分定数と任意の時刻を定めると、オーム則を満足している領域における電位減少を表わす式

$$V = V_0 e^{-\frac{G}{C}(t-t_0)} \quad (18)$$

ただし

$$V_0 = \frac{I_{rs}}{G}$$

ならびに任意の時刻

$$t_0 = t_c + \frac{C}{I_{rs}} (V_c - V_0) \quad (19)$$

が得られる。

以上の解析によって求まった除電現象を表す式 (13), (17), (18) に、実験結果から得られた定数 $K=1.4 \times 10^{-15} \text{ A/V}^2$, $V_c=5 \text{ kV}$, $I_{rs}=4.8 \times 10^{-7} \text{ A}$, $G=1.7 \times 10^{-10} \text{ A/V}$, $C=85 \text{ pF}$ を代入すると、均一表面帯電している物体の静電気が除去され、その電位が減少して行く状態は次のように表わすことができる。

$$V = -1.9 \times 10^4 \tan(0.31t - 0.38) + 2.5 \times 10^3 \quad V \geq V_c$$

* 電圧 V に付いているサフィックス 1, 2 は、イオン電流の領域 (1), (2) を示す。

* 電圧 V に付いているサフィックス 2, 3 は、イオン電流の領域 (2), (3) を示す。

$$V = -5.7 \times 10^3 (t - 0.81) + 5 \times 10^3$$

$$V_c > V > V_0$$

$$V = 2.8 \times 10^3 e^{-2(t-1.2)}$$

$$V_0 > V$$

以上、これらの結果は Fig. 9 に示すとおりである。これは実験結果と比較したとき、イオン電流を実験近似式で表わして解析したけれども、かなり良く一致している。したがってイオン電流となっているイオンの挙動をさらに物理的に掘り下げて行くと、興味ある除電現象の情報が提供されるものと思ひ、現在検討中である。

以上、除電現象の 1 問題である帯電物体の電位減少

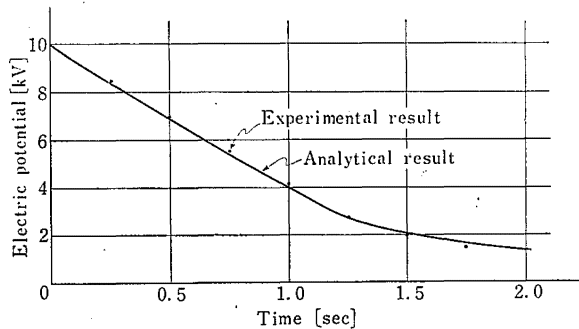


Fig. 9 An electric potential decay curve of charged body.

帯電物体の電位減少特性

について考察した。その解析結果 (13), (17), (18) は、静電気が均一表面帯電している場合の電位減少を示す一例であり、イオン電流を表わす定数 K , V_c , I_{rs} , G , C の関係によっては種々な場合が考えられるのである。したがってこれらの定数の関係によって生じ得る場合を、同様な方法によって解析することを試みた。その結果をまとめて Table 2 に示しておく。

6. 結 言

均一表面帯電している物体の静電気が、RI によって除去されると、その電位が減少して行く。この除電現象を金属板で作ったモデル静電気帯電物体によって調べたところ、実験結果に比較的良く一致した解析結果が導かれ、次のことが明らかになった。

静電気が除去されて帯電物体の電位が減少して行く状態は、帯電物体の初期状態がコロナ放電を伴っていると、次の 3 つの領域

- (1) コロナ放電の影響を受け、三角関数的に減少する領域
- (2) RI によるイオン電流が飽和し、直線的に減

Table 2

V-I characteristics	Condition
	$4KI_{rs} - K^2V_c^2 \geq 0$
	$4KI_{rs} - K^2V_c^2 < 0$
	$4KI_{rs} - K^2V_c^2 > 0$
Remarks K: Constant (A/V^2) G: Conductance (Ω) I_{rs}: Satulation current (A) C: Stray capacity (F)	

少する領域

- (3) RI によるイオン電流がオーム則を満足し、指数関数的に減少する領域

を経て零電位に収斂して行く。ここで (1) の領域は RI によって発生したイオンだけで除電されているのではないため、実際にはかなり複雑な減少状態であると推定される。さらに帯電物体の電位が高い場合* に

* コロナ放電の効果だけでなく、イオンのなだれ現象による効果が現われて来ると予想される。

The table of analytical results.

解析結果の一覧表

Voltage range	Experimental formula of ion current	Electric potential of metal plate	Time to t_0 and t_c
(I) $V \geq V_c$ ($0 \leq t \leq t_c$)	$I = I_{rs} + KV(V - V_c)$	$V = -V_A \tan \left[\frac{KV_A}{C} t - \arctan f(V_s) \right] + \frac{V_c}{2}$	$t_c = \frac{C}{KV_A} [\arctan f(V_s) - \arctan f(0)]$
(II) $V_c > V \geq V_0$ ($t_c < t \leq t_0$)	$I = I_{rs}$	$V = -\frac{I_{rs}}{C} (t - t_c) + V_c$	$t_0 = t_c + \frac{C}{I_{rs}} (V_c - V_0)$
(III) $V_0 > V \geq 0$ ($t_0 < t$)	$I = GV$	$V = V_0 e^{-\frac{G}{C}(t-t_0)}$	
(I) $V \geq V_c$ ($0 \leq t \leq t_c$)	$I = I_{rs} + KV(V - V_c)$	$V = V_A \coth \left[\frac{KV_A}{C} t + \operatorname{arccoth} f(V_s) \right] + \frac{V_c}{2}$	$t_c = \frac{C}{KV_A} [\operatorname{arccoth} f(0) - \operatorname{arccoth} f(V_s)]$
(II) $V_c > V \geq V_0$ ($t_c < t \leq t_0$)	$I = I_{rs}$	$V = -\frac{I_{rs}}{C} (t - t_c) + V_c$	$t_0 = t_c + \frac{C}{I_{rs}} (V_c - V_0)$
(III) $V_0 > V \geq 0$ ($t_0 < t$)	$I = GV$	$V = V_0 e^{-\frac{G}{C}(t-t_0)}$	
(I) $V \geq V_0$ ($0 \leq t \leq t_0$)	$I = I_{rs} + KV(V - V_c)$	$V = -V_A \tan \left[\frac{KV_A}{C} t - \arctan f(V_s) \right] + \frac{V_c}{2}$	$t_0 = \frac{C}{KV_A} [\arctan f(V_s) - \arctan f(V_0)]$
(II) $V_0 > V \geq V_c$ ($t_0 < t \leq t_c$)	$I = GV + KV(V - V_c)$	$V = V_B [1 - (1 - V_B/V_0) e^{-\frac{KV_B}{C}(t-t_0)}]^{-1}$	$t_c = t_0 + \frac{C}{KV_B} \ln \frac{KV_c}{G} \left(1 - \frac{V_B}{V_0} \right)$
(III) $V_c > V \geq 0$ ($t_c < t$)	$I = GV$	$V = V_c e^{-\frac{G}{C}(t-t_c)}$	
(I) $V \geq V_0$ ($0 \leq t \leq t_0$)	$I = I_{rs} + KV(V - V_c)$	$V = V_A \coth \left[\frac{KV_A}{C} t + \operatorname{arccoth} f(V_s) \right] + \frac{V_c}{2}$	$t_0 = \frac{C}{KV_A} [\operatorname{arccoth} f(V_0) - \operatorname{arccoth} f(V_s)]$
(II) $V_0 > V \geq V_c$ ($t_0 < t \leq t_c$)	$I = GV + KV(V - V_c)$	$V = V_B [1 - (1 - V_B/V_0) e^{-\frac{KV_B}{C}(t-t_0)}]^{-1}$	$t_c = t_0 + \frac{C}{KV_B} \ln \frac{KV_c}{G} \left(1 - \frac{V_B}{V_0} \right)$
(III) $V_c > V \geq 0$ ($t_c < t$)	$I = GV$	$V = V_c e^{-\frac{G}{C}(t-t_c)}$	

 V_c : Min. voltage of corona range (V) V_0 : Max. voltage of ohmic range (V) I_c : corona current (A) I_r : RI ion current (A)

$$V_A = \sqrt{\left| \frac{I_{rs}}{K} - \left(\frac{V_c}{2} \right)^2 \right|}$$

$$V_B = V_c - \frac{G}{K}$$

$$f(V) = \frac{V - V_c/2}{V_A}$$

おいては、このことが一層顕著になると考えられる。

しかしこれらの現象は静電気を除去する点からは効果的な現象であり、あまり問題とする必要はないのである。

この報告は RI に α 線源, ^{210}Po を用いた場合の考察であったが、実験には β 線源, ^{90}Sr も使ってみた。その結果、 β 線源は 2 次効果の影響で再現性に欠ける実験であったが、 α 線源の場合とほぼ同様な減少経過を辿り、静電気の除去には十分使用できるという結論

が得られた。

今回の実験では、静電気が均一表面帯電している物体の電位減少の関係だけに問題を絞ったが、この問題だけでもイオンの挙動には不明確な点があり、イオンの移動度、再結合などの問題にまで掘り下げて考察することが出来なかった。したがって現在ではこれらの点について検討を進めている。

最後に本研究について御指導いただいた上智大学、大滝教授、本研究所、上月研究部長に心から深謝の意

を表します。

参考文献

- 1) 例えば R. Beach, Chem. Eng., 71 (26), 73 ~80 (1963)
- 2) 例えば J. J. Conradi, T. R. Miller and J. J. Skelly, Oil and Gas J., 55 (46), 197~203 (1957)
- 3) 例えば坂主他, 産業安全研究所報告, 15 (1), 1~10 (1967)
- 4) W. R. Happer, "Contacts and Frictional Electrification", Oxford, p. 13 (1967)
- 5) 放射性同位元素協会編, "アイソトープ便覧", 丸善, p. 108 (1962)
- 6) H. J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation", Addison-Wesley, pp. 74~125 (1963)
- 7) 上月他, 産業安全研究所報告, 12(1), 22~30 (1963)
- 8) 本多侃士, "放電現象特論(I)", 東京電機大学, pp. 35~70 (1964)

付 録

自然放置による静電気帯電物体の電位減少について

A-1 概 要

均一表面帯電している帯電物体が空気中に自然放置されると、帯電物体の近傍は高電界となり、コロナ放電が発生する。このコロナ放電による電流は、帯電物体とその近傍にある接地体との間を流れる結果、物体に帯電していた静電気が除去される。これは静電気の積極的な除去というより、むしろ静電気の漏洩現象である。しかしこの静電気漏洩現象も、RI を用いた静電気の除電現象と同じようにイオンに起因した現象であり、Fig. 1, Fig. 2 のように説明することができる。したがって、帯電物体を放置した場合、静電気が漏洩して行く現象についても、RI を用いた除電現象

と全く同じ方法によって考察することを試みた。

その結果、静電気が漏洩して行く要因となっているコロナ放電電流は、一般に帯電電位 V の 2 次関数で近似されていたが⁵⁾、実験結果から考察すると V^n でも近似できることが判明した。また後者の近似式を用いて、静電気漏洩による帯電物体の電位減少を解析してみたところ、だいたい時間 t の $(1/n-1)$ 乗に反比例して減少して行くことが明らかになった。この解析結果は実験結果と比較したとき、かなり良く一致し、静電気の漏洩現象と除電現象はやはり同じ現象として取り扱えることが確かめられた。

A-2 実 験

A-2.1 実験方法

実験は Fig. 3 に示している RI を用いた除電実験と全く同じ装置を使って行なった。ただし、空気中に自然放置された帯電物体の電位減少を調べることが目的であるため、RI は使用していない。

実験方法は、帯電物体である金属板に直流高圧電源を供給して静電気を帯電させた後、直流電源を切って金属板を空気中に放置した。このように自然放置しておく、帯電物体の静電気が接地体へ漏洩し、その電位が減少して行く。この電位をセクター型静電界検出器によって検出し、その出力は電位変動が小さいためオシロスコープでなくペンレコーダーを用いて測定した。なお、直流電源を供給したままで、金属板と接地体との間を流れているコロナ放電電流は、イオン電流と同じく振動容量型電位電流計によって測定した。

A-2.2 実験結果

静電気帯電物体である金属板に直流高圧電源を供給し、このとき金属板に流れるコロナ放電電流を測定した。その実験結果は、Fig. A-1 に示す通りである。一般に電極が針状であると、このコロナ放電電流は電位 V の 2 次関数で近似されている。しかし、いまここに得られた実験結果 Fig. A-1 を両対数方眼紙にプロットすると、その特性は Fig. A-2 に示すように直線となって来る。

この関係は電位が 3kV 以下の低い領域において少しずれているが、だいたい直線と見なすことができる。このように、金属板に静電気が均一表面帯電して

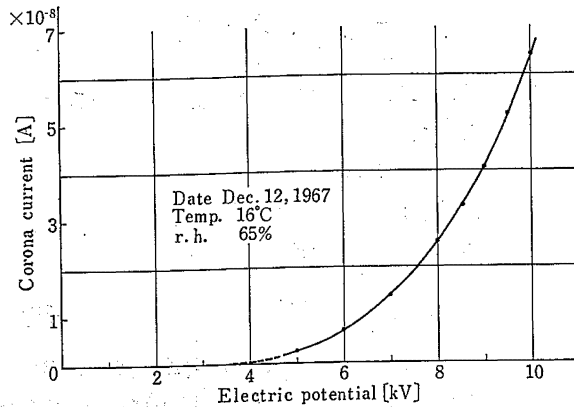


Fig. A-1 Examples of V-I characteristics of corona current.

コロナ電流の V-I 特性の例

いる場合には、電位の高い領域で、コロナ放電電流の $\log I - \log V$ 特性が直線関係になる実験結果を得たのである。したがってコロナ放電電流の V-I 特性を、次のように指数関係で近似することにした。

$$I = aV^n \quad (\text{A-1})$$

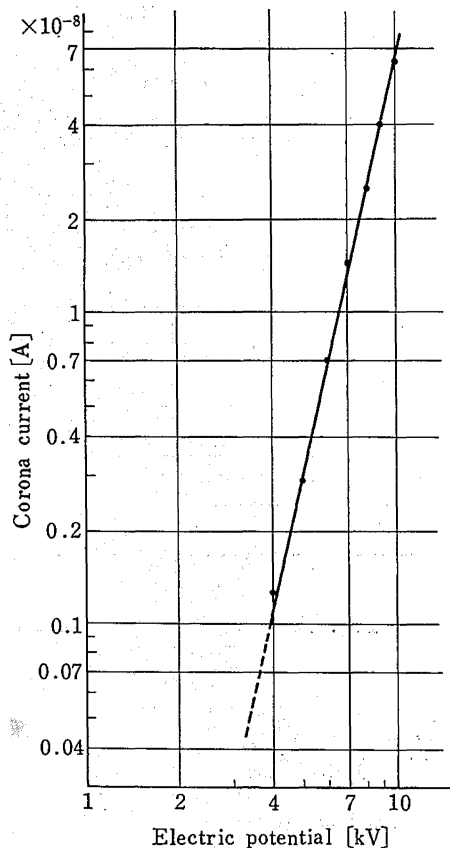


Fig. A-2 $\log V - \log I$ characteristics of corona current.

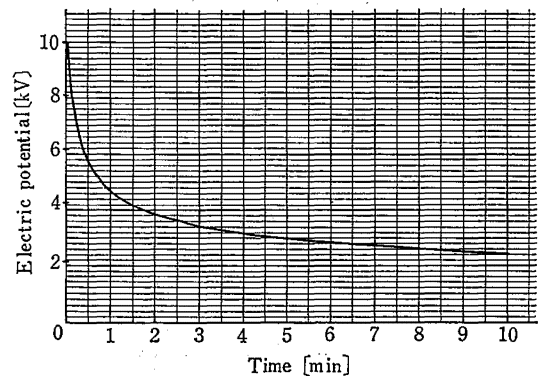
コロナ電流の $\log V - \log I$ 特性

上式 (A-1) で a, n は定数である。実験結果 Fig. A-2 からこれらの定数を求めると $a = 8.4 \times 10^{-26}$, $n = 4.48$ が得られる。これを式 (A-1) へ代入すると、コロナ放電電流の特性を表す実式として

$$I = 8.4 \times 10^{-26} V^{4.48} \quad (\text{A-1}')$$

が得られる。

一方、直流高圧電源によって、最初の金属板を 10 kV に帯電させておき、これを自然放置しておくと、静電気の漏洩によって帯電物体の電位は次第に減少して行く。この電位減少について調べたところ Fig. A-3 に示す実験結果が得られた。



Date Dec. 12, 1967

Temp. 16°C

r. h. 65%

Fig. A-3 The electric potential decay in case of the charged body left alone.

帯電物体を放置した場合の電位減少

この実験結果から RI を照射しないでも、静電気帯電物体が自然放置されると、静電気は次第に漏洩して行き除電されることが明らかである。しかしこの場合は RI を用いて除電する場合と異なり、帯電物体の電位が高いところだけ、急激に電位が減少して行くことが観測されている。したがって、この実験結果から静電気の漏洩現象は帯電物体自から発生しているコロナ放電電流に大きく影響されていることが明らかである。

A-3 考察 (静電気漏洩現象の解析)

静電気の漏洩現象を考察する方針としては、RI を用いた静電気の除電現象と同じように、除電現象を表す基本式 (2) に基いて考察して行く。

実験結果から得られたコロナ放電電流の実験式

(A-1) を, 除電現象を表す式 (2) へ代入すると, 帯電物体の電位減少を表す次の微分方程式

$$\frac{dV}{dt} + \frac{aV^n}{C} = 0 \quad (\text{A-2})$$

が得られる。ここで, 上式はこのままでは解くことができない。したがって, 上式を変換して解くために, いま次のような微分抵抗

$$R_d = \frac{dV}{dI} \quad (\text{A-3})$$

を導入してみる。そうするとこの微分抵抗を表す式 (A-3) と, コロナ放電電流の実験式 (A-1) とから, V を R_d の関数として表した次の式

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_d} &= \frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV}(aV^n) \\ &= naV^{n-1} \\ \therefore V &= \left(\frac{1}{naR_d} \right)^{1/n-1} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

が導かれる。これより dV/dt は R_d の関数として

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{dV}{dR_d} \cdot \frac{dR_d}{dt} \\ \therefore \frac{dV}{dt} &= \frac{-1}{n-1} \cdot \frac{1}{na} \cdot \left(\frac{1}{naR_d} \right)^{-n/n-1} \\ &\quad \cdot \frac{1}{R_d^2} \cdot \frac{dR_d}{dt} \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

と変換され, また V^n も (A-4) から R_d の関数として

$$V^n = \left(\frac{1}{naR_d} \right)^{n/n-1} \quad (\text{A-6})$$

と変換される。これらの式 (A-5), (A-6) を除電現象を表す式 (A-2) へ代入すると, V を R_d に変換した微分方程式として

$$\frac{dR_d}{dt} - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{C} = 0 \quad (\text{A-7})$$

が導かれる。ここで上式の n , C は定数である。

R_d によって表わされた微分方程式 (A-7) は定数項から成る 1 階の微分方程式であり, これを解くと

$$R_d = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{C} t + A \quad (\text{A-8})$$

なる解が得られる。ここで A は積分定数である。以上式 (A-7) を解析して求まってきた解は微分抵抗 R_d で表わされているため, R_d をもとの V に逆変換する。式 (A-8) を式 (A-4) へ代入すると, 電位 V の関数として, 自然放置による帯電物体の電位減少を表す式

$$V = \left(\frac{1}{an} \right)^{1/n-1}$$

$$\cdot \left(\frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{C} t + A \right)^{-1/n-1} \quad (\text{A-9})$$

が得られる。ここで上式の積分定数 A を決めるため, 初期条件として

$$t=0, \quad V=V_s$$

ただし, V_s ; 帯電物体の初期電位
を適用すると, 積分定数 A は

$$A = \left(\frac{1}{an} \right) V_s^{-(n-1)} \quad (\text{A-10})$$

と求まって来る。これより積分定数 A を式 (A-9) へ代入して整理すると, 帯電物体を自然放置した場合の電位減少を表す式

$$V = V_B^{1/n-1} \cdot (t + V_B V_s^{-(n-1)}) \quad (\text{A-11})$$

ただし

$$V_B = \frac{C}{a} \cdot \frac{1}{n-1}$$

が求められる。以上のようにして求まってきた式 (A-11) に, 実験結果 Fig. A-2 から求まる定数 $a=8.4 \times 10^{-26}$, $n=4.48$ ならびに $c=87 \times 10^{-12} \text{F}$ を代入すると, 自然放置による帯電物体の電位減少を表す式が

$$V = 1.37 \times 10^{14} \times (t + 2.98)^{-2.88} \quad (\text{A-11}')$$

得られる。以上の解析結果を図示すると, Fig. A-4 となる。

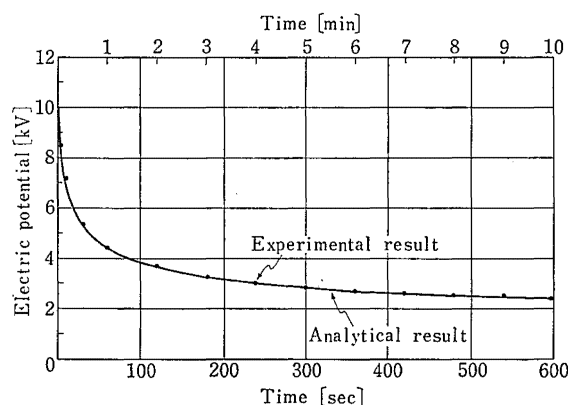


Fig. A-4 Examples of electric potential decay
電位減少の例

一方, 静電気漏洩による帯電物体の電位減少を表わす式 (A-11) の両辺対数をと

$$\begin{aligned} \log V &= \frac{1}{n-1} \log V_B \\ &\quad - \frac{1}{n-1} \log (t + V_B V_s^{-(n-1)}) \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

となる。いま上式の第 2 項に注目し

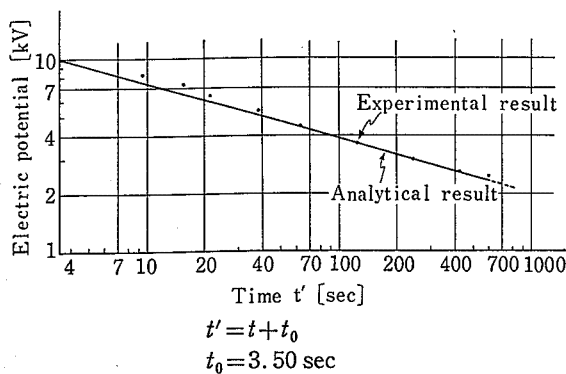


Fig. A-5 Examples of electric potential decay ($\log V - \log t'$ characteristics)

電位減少の例 ($\log V - \log t'$ 特性)

$$t' = t + V_B V_s^{-(n-1)} \quad (\text{A-13})$$

と置くと、式 (A-12) は t' によって表わされ

$$\log V = \frac{1}{n-1} \log V_B - \frac{1}{n-1} \log t' \quad (\text{A-12}')$$

となる。これは両対数方眼紙に表したとき、 $\log V - \log t'$ 特性は勾配 $-\frac{1}{n-1}$ をもった、やはり直線になることを表わしている。これより実験結果から得られた定数 a, n, c の値を上式 (A-13), (A-12') に代入し、両対数方眼紙にプロットしてみると、その結果は Fig. A-5 に示すようになり、これは Fig. A-3 に示す実験結果と比較したとき、かなり良く一致していることが明らかである。

以上のように静電気の漏洩による帯電物体の電位減少についても除電現象を表す式 (2) に基づいて解析した。その結果だいたい 3 次双曲線関数にしたがって、静電気帯電物体の電位が減少することが判明した。

(昭和 34 年 8 月 15 日受付)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-17-1

昭和 43 年 9 月 30 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) 91-4512 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 180-04

UDC 621.319.7 : 621.039.8

放射性同位元素による静電気の除去 —帯電物体の電位減少について—

田島泰幸・坂主勝弘・児玉 勉

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-17-1, 1~13 (1968)

静電気帯電物体に放射性同位元素を放射すると、その物体の静電気が除去される。ここでは、この除電現象を定量的に解析し、放射性同位元素を利用した除電機を開発する場合の定量的な基礎資料を得ることが目的で実験を行なった。この報告は、その第1段階として静電気が均一表面帯電している場合、放射性同位元素の照射によって帯電物体の電位がどのように減衰するかについて調べた実験結果とその検討である。また帯電物体を自然放置していた場合の電位減少についても解析、実験した。その結果は付録に示しておいた。

(図 14, 表 2, 参 8)



~~UDC 621.319.7 : 621.039.8~~

Elimination of Static Electricity by Use of Radioisotopes

—Electric Potential Decay of Charged Body—

Y. TABATA, K. SAKANUSHI, T. KODAMA

The Research Report of The Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-17-1, 1~13 (1968)

It has been definitely shown by the previous experiments that static electricity is eliminated by radioisotopes. This eliminating mechanism, however, has not been well established. This experiment is carried out with a view to define the eliminating mechanism of static electricity in case of using radioisotopes. This report deals with the experimental results and their considerations.

(Fig. 14, Table 2, Ref. 8)

