

電気集じん器における放電線の振動現象の研究

(第 1 報)

前原 弘典*・足立 宜良**

Study on the Vibration of Discharging Electrode for the Electrostatic Precipitator (1st Report)

Hirofumi MAEHARA and Takayoshi ADACHI

Abstract

The discharging electrode for an electrostatic precipitator is vibrated by various forces. They are the external force and the internal forces. The former is due to the shock with hammer-blowing to remove the adhering dust on the discharging electrode, and the latter the action of gas flow or the electrical forces. The spark over which causes by the large vibration of the discharging electrode decreases the collection efficiency of the electrical precipitator, and so it is desirable to prevent the vibration of the discharging electrode.

The vibration of the discharging electrode for the cylindertype electrostatic precipitator (dia. 10.5cm, length 200cm) was tested in atmospheric air. The vibrational characteristics and the brief analysis of the electrical forces which act on the discharging electrode were considered.

The experimental results are summarized as follows.

- 1) The vibrational amplitude increases with rising applied voltage and diminishing tention of the discharging electrode.
- 2) The vibrational frequency of the discharging electrode corresponds to the calculated natural frequency of it.
- 3) The vibrational mode varies according to change of the discharging condition.
- 4) In the analysis of the electrical forces, six kinds of them are considered, but each force is not treated of its quantity.

1. 緒 言

工業用電気集じん器の放電線は細長く、種々の力が作用するため運転中に振動を生じ、放電極と集じん極の両電極間で火花放電を発生するようになって、集じん器の運転が不能な状態に陥ることがある。

このような放電線の振動は、外部力（放電線に付着したダストを除くための槌打による衝撃作用力）や内部力（排ガスの圧力や電気的作用力）で励発されると言われている。前者による放電線振動現象については、小堀ならびに平松¹⁾により実験および理論的解析がなされているが、後者の場合に関しては、橋本およ

び足立²⁾により推論的考察がなされているだけで、実験ならびに解析については他に報告が見かけられないようである。

内部力による放電線の振動現象は、大気中で放電線に電圧を印加した場合にコロナ輝点の消長現象に伴う作用力、イオン風による風圧、誘電作用力、クーロン力などの電気的作用力が働いて発生すると考えられる。また、ダストを含んだ排ガスを通過させた場合には前記の作用力に加え排ガスの圧力、ダストの荷電による作用力などが働いて発生すると考えられる。このように種々の力が複雑に作用していると思われ、解析はなかなか困難な問題である。

* 大学院工学研究科電気工学専攻

** 電気工学教室

本報告では、円筒型電気集じん器（試作）を用いて上述の大気中における電氣的作用力によって励発される放電線振動形態および放電線振動に与える印加電圧や張力の影響などについて実験を行ない考察したので報告する。ただし、本実験における大気条件は、温度 $25.5^{\circ}\text{C}\sim 33.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $65\%\sim 83\%$ 、気圧 $1004\text{mb}\sim 1012\text{mb}$ である。

2. 実験装置および実験方法

直流電源は過去の研究³⁾に使用したものを、試作集じん器は Fig. 1 に示すように鉄製円筒（長さ 200cm 、内径 10.5cm ）を集じん極とし針金を放電極とした同心円筒電極から成る円筒型集じん器と呼ばれているものである。放電極は直径 d が 0.8mm 、 1.1mm 、 1.45mm の3種類を用い、放電線長はいずれも 240cm である。これらは電気集じん器における放電線の実用範囲（放電線長 l と放電線半径 r の比 $l/r=3000\sim 6000$ ）⁴⁾ を満足するものである。

Fig. 2 に示すように円筒型集じん器の中央部すなわち両端から 1m のところに、円筒の中心に対して互いに直角の位置に4個の孔をあけてある。これらの孔のうち1個は長径 3cm 、短径 1cm の楕円で放電線の振動を写真測定ならびに望遠顕微鏡測定のための孔で、他の3個はいずれも直径 1cm の円となっており、1個は写真撮影に必要な放電線照明用の孔である。残り2個の孔は放電線振動に伴うコロナ電流の変化を検

出するためのプローブ電極設置用となっている。

Fig. 2 において写真測定の場合、孔にはピンホールカメラのレンズが接しており、放電線の振動はピンホールカメラのスクリーン上に再現される。この像を接写装置をつけたカメラで撮影することにより、振動振幅の測定をしている。放電線を直接カメラで撮影することも可能であるが、振幅が大きくなった場合には楕円孔の長径を大きくする必要があり、この孔による放電特性への影響が無視できなくなるので上記の方式を採用した。しかし、このようにして撮影しても一方からではカメラの光軸方向の振動振幅は測定できない。この欠点のある程度補正する意味を含めて2方向から振動現象を観察するため、中心に対して互いに直角の位置にプローブ電極2個を設置したわけである。

プローブ電極は銅製円柱（面積 0.5cm^2 ）で円筒集じん器と絶縁処理をほどこしてある。放電極が振動を開始すると、集じん器と放電極の距離が近い側のプローブ電極ではコロナ電流が大きく、遠い側のプローブ電極ではコロナ電流が小さくなる。このコロナ電流の変化量が Fig. 2 に示したシンクロスコープおよびペンレコーダに記録される。したがって、プローブ電極から検出した微小コロナ電流の変化により放電線の振動数を知ることができる。

3種類の放電線のコロナ放電特性を Fig. 3 に示す。この特性は一般につきのような方程式⁴⁾で表わすことができる。

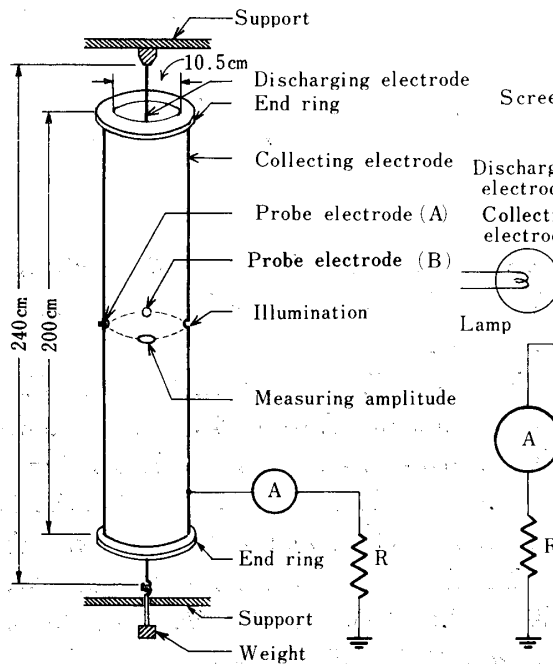


Fig. 1 Electrostatic precipitator for the test

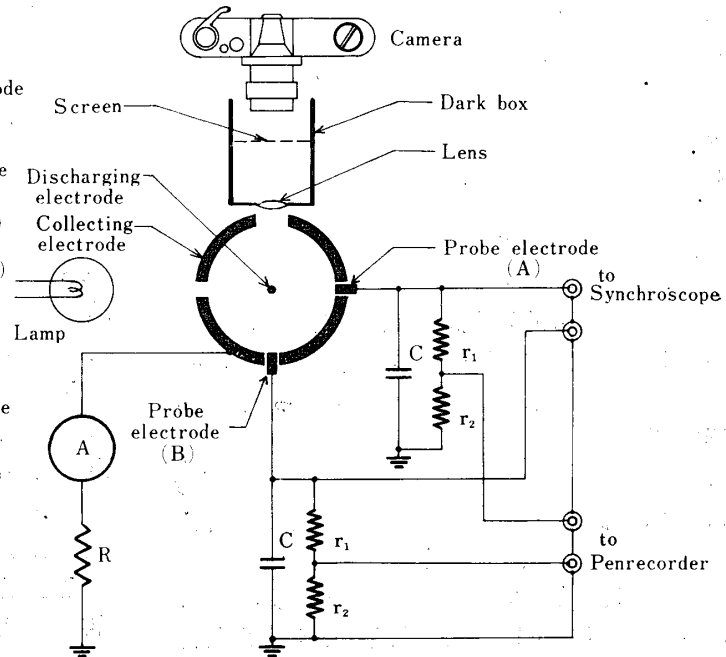


Fig. 2 Measuring equipment

$$\log I = \alpha_1 \log E + \beta_1 \dots \dots (1)$$

$$\log I = \alpha_2 \log E + \beta_2 \dots \dots (2)$$

I : コロナ電流 [mA]

E : 印加電圧 [kV]

α : 放電極寸法などによる定数

β : 雰囲気ガスの状態や性質ならびに電極寸法などに関する定数

$$\alpha_1 > \alpha_2, \beta_1 < \beta_2$$

(1)式は印加電圧が低い場合に、(2)式は印加電圧が高い場合に相当する。また、プローブ電極に流れるコロナ電流も同様の関係にあるが、電圧一定で放電線位置の変位とコロナ電流の変化が比例しないために写真測定した振動振幅値を完全には修正できないという不都合が生じてくる。

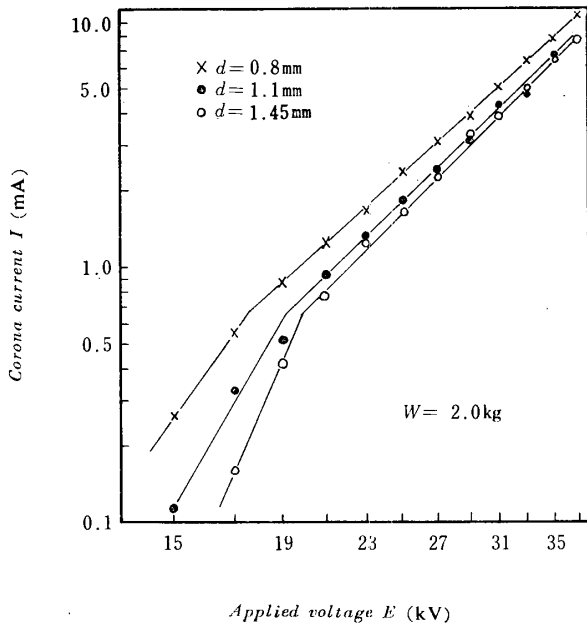


Fig.3 Discharging characteristics of applied voltage vs. corona current

3. 実験結果および考察

3.1 放電線振動開始について

印加電圧を零電圧より徐々に上昇させて行くと、はじめて観察される放電線振動は、連続している場合もあり、断続状態にある場合もある。このように、振動開始時の現象が不確実であると同様に振動開始電圧も不確実であるが、数回の実験測定における最低電圧を Table 1 に示す。ただし、Table 1 の振動開始電圧より低い電圧においては放電線が静止しているわけではなく、条件が満たされれば振動を開始する可能性が考えられる。このことは、Fig. 3において振動開始電圧以下でもコロナ電流が流れ、それによる加振力の存在が

可能であるという理由による。

Table 1 Starting voltage of vibration for discharging electrode

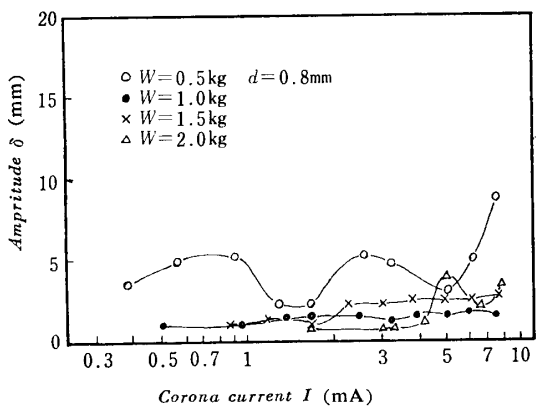
Dia. of wire	$d=0.8$ mm	$d=1.1$ mm	$d=1.45$ mm
Weight			
0.5 kg	15.0kv	16.0kv	17.0kv
1.0	16.0	17.0	20.0
1.5	14.0	17.8	20.0
2.0	16.5	17.0	21.0

3.2 印加電圧上昇に伴う振動振幅の変化

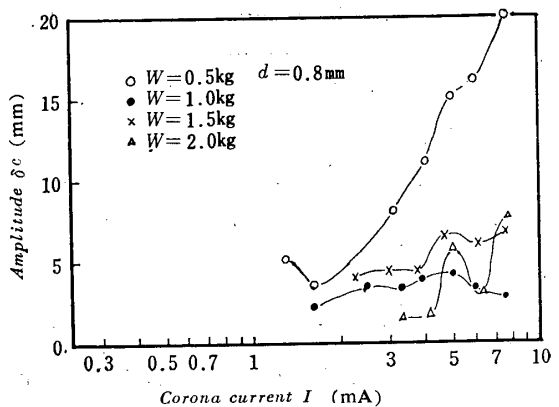
Fig. 4 ~ Fig. 6 は電圧を徐々に上昇させたときの振動振幅の変化をコロナ電流値を変数として示したグラフである。振幅の測定は電圧変化後定常値に達してから、2分、5分および10分経過直後の3回撮影して、その最大振幅値を示している。カメラの露光時間は15秒~60秒の範囲で振動状態に応じて、振幅が小さいときは短時間、振幅が大きくなった場合は長時間露光している。振幅が微少のときは放電線の振動速度が遅いので短時間露光でも振幅撮影に必要な十分な光量が得られ、またフィルムのハレーションによる振幅測定誤差も小さくなって好都合である。

振幅値を時間的に観察すると、10分経過直後に最大振幅値となる場合が多いが、2分および5分経過直後に最大振幅値の現れる場合もある。10分以上経過した場合については、放電線径 $d=1.1\text{mm}$ 、放電線に吊したおもりの重量 $W=1.5\text{kg}$ 、印加電圧 $E=30\text{kV}$ の条件で、40分間にわたって測定してみたが10分経過直後の振動状態と大差がなく、振幅は10分経過後には定常値に達していると考えられる。しかしながら、実験を行なった範囲の d 、 W および E のすべての場合について検討を行なったわけではないので上述の結果が一般的な傾向とは断言できない。ただし、振幅値は経過時間のみでなく不確定な他の要素（放電線の吊り下げ状態、線内部ひずみ、線表面および集じん極面の微小凹凸、コロナ輝点の不定常性、イオン風等）によっても種々の値を示し、数値的には再現性がうすいことから測定時間を10分間とした。

Fig. 4 ~ Fig. 6 のグラフにおいて、(a) 図は写真測定による振幅値を示したもので (b) 図はプローブ電極からの検出電流値に比例したペンレコーダの振幅によって修正したグラフである。写真測定した振幅の修正はつぎのようにして行なった。Fig. 7 (a) のような振

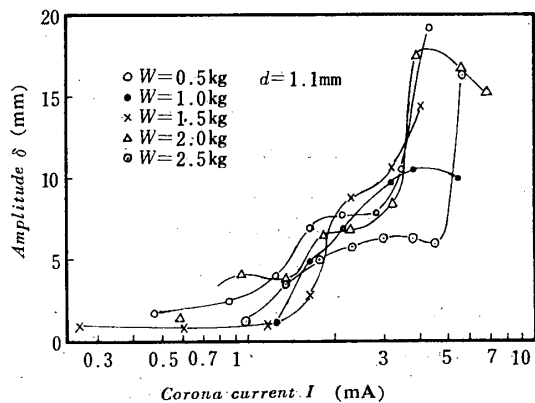


(a) Experimental values

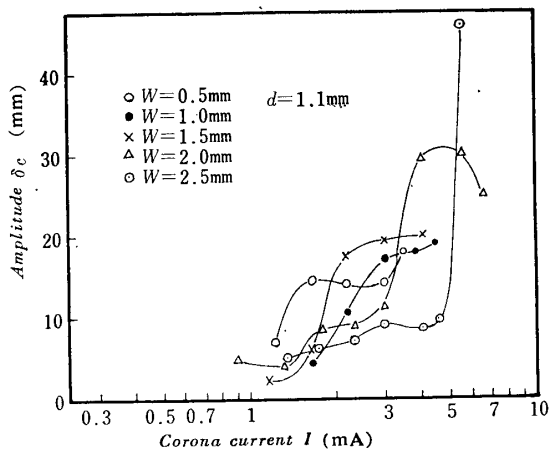


(b) Corrected values for Fig.4(a)
(See Equation 3)

Fig.4 Characteristics of amplitude vs. corona current

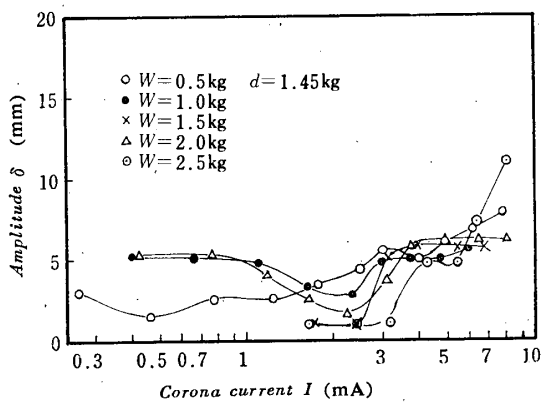


(a) Experimental values

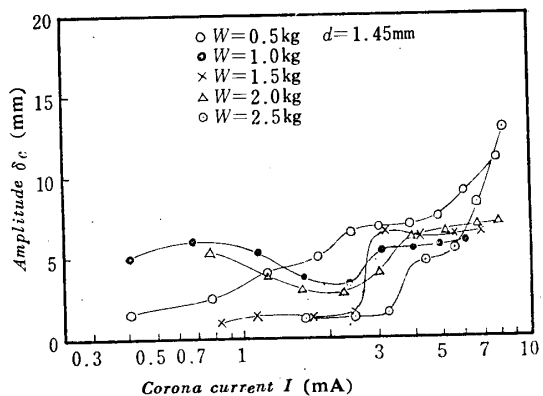


(b) Corrected values for Fig.5(a)
(See Equation 3)

Fig.5 Characteristics of amplitude vs. corona current



(a) Experimental values



(b) Corrected values for Fig.6(a)
(See Equation 3)

Fig.6 Characteristics of amplitude vs. corona current

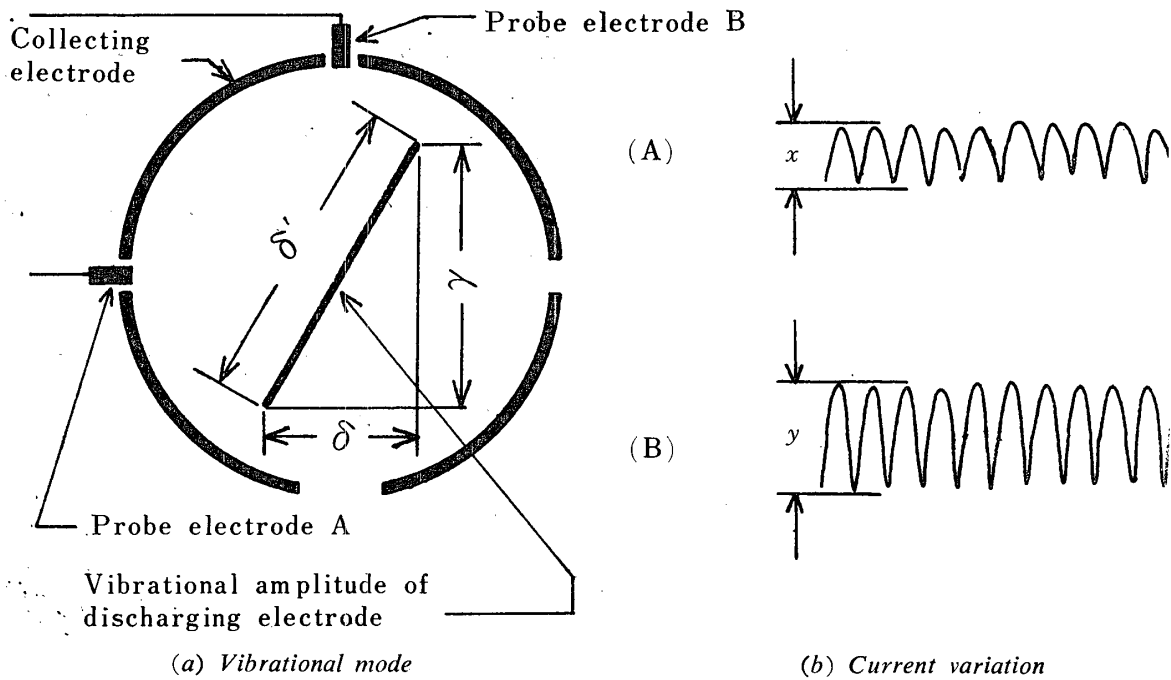


Fig.7 Correction method for vibrational amplitude

動状態にあるとき、写真測定による振幅値は δ となるが、実際の振幅値は δ' である。このときのプローブ電極AおよびBのコロナ電流値変化が Fig. 7 (b) のようであれば、振幅の修正値 δ_c は次式で与えられるものとする。

$$\delta_c = \delta \times \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x} \quad (3)$$

このようにして修正した振幅値 δ_c も、前述のごとく放電線の変位と検出電流変化が直線的比例関係にならないので実際の振幅値 δ' を得たことにならない。しかしながら写真測定による振幅値 δ と修正した振幅 δ_c から本実験に必要なと考えられる範囲内の振幅変化の傾向を知ることは可能である。

Fig. 4 ~ Fig. 6 をみるとコロナ電流が増加した場合、すなわち印加電圧上昇に伴い振幅は増加の傾向を示している。この傾向を最もよく示しているのは Fig. 5 の $d=1.1\text{mm}$ の場合である。

放電線振動はごくわずかのコロナ電流が流れると発生し、コロナ輝点の消長がその原因であることを説明している。写真測定は行っていないが、コロナ電流が小さいときの振動は断続的であり、電流値が増加するにつれて振動は連続的になる。このときの境界値としての電圧あるいはコロナ電流値は、同じパラメータ条件でも一定ではないが、Fig. 3 のコロナ放電特性において2直線の交点にあたる電圧値近傍(コロナ開始電圧 E_0 にあたる)になっているようである。

Fig. 6 の $W=1.0\text{kg}$ および 2.0kg の場合にみられ

るところの $I=2\text{mA}$ 程度で振幅値の減少する現象については、放電状態の変化に伴う制振力と加振力の位相差変化(7式参照)など原因は種々考えられるが、本実験では明らかにするに至らなかった。

つぎに振動の増大して行く様子を見ると段階的に増加している場合が多いことに気づく。この現象は望遠顕微鏡を用いて振幅を測定した実験結果 Fig. 8 ~ Fig. 10 にも認められる。この原因は、電圧をわずかに増加したときの加振力の増加が振幅を増大させるに至らず、ある程度以上電圧が上昇したときはじめて振幅を増大させる加振力として作用することにあると考えられる。しかし、この現象に関しては印加電圧上昇に伴う振幅増加の定量的な把握という問題に関係してくるので、今後明確にされなくてはならない。

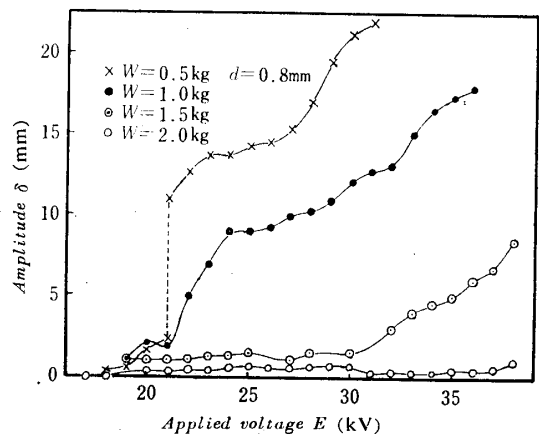


Fig.8 Characteristics of amplitude vs. applied voltage

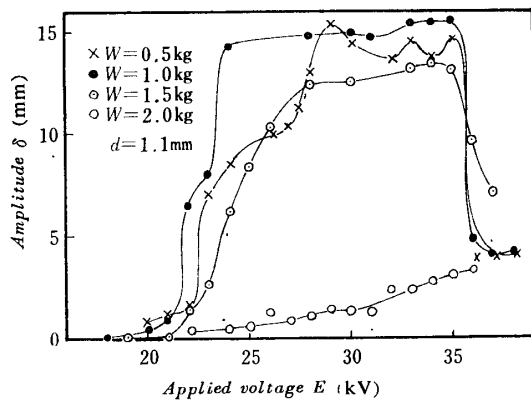


Fig. 9 Characteristics of amplitude vs. applied voltage

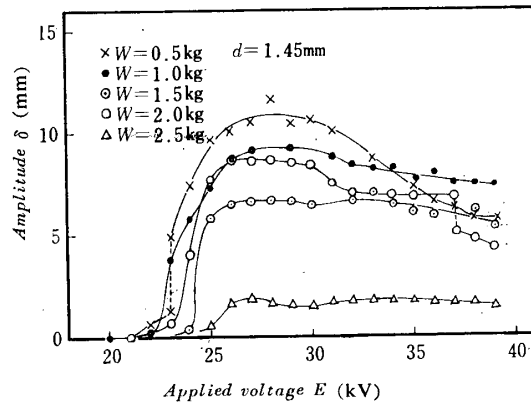


Fig. 10 Characteristics of amplitude vs. applied voltage

電圧を上昇させて行って、ある振幅値で振動している状態から電圧を徐々に下降させた場合の振幅変化を Fig. 11 に示す。一度振動をはじめた放電線は電圧を降下させても容易に振幅が減少しないことがわかる。

以上の他に興味ある現象として、放電線がスパーク直前になるとコロナ電流密度あるいはコロナ輝点密度の飽和による制振力が作用すると思われ、たとえば、Fig. 5 (a) $W=2.0\text{kg}$ のように振幅が減少する場合がある。

3.3 放電線に吊したおもり重量 (張力) の影響

振幅測定値は再現性がとぼしいが、実験回数を多くすることによっておもりの重量による振動振幅への影響はかなり明確になり、その結果を Fig. 8 ~ Fig. 10 に示している。ただし、測定には望遠顕微鏡を用い、それぞれの電圧において測定した振幅の最大値を示したものである。

これらの図から、張力が大になった場合には振幅 δ は小で、張力が小のときは振幅 δ は大となっていて、

放電線径が大になるほど張力が振幅に与える変化割合が小さくなっていることがうかがえる。

放電線の振動を抑制するだけの目的であれば、張力を大きくすることによって解決できるが、実用集じん器においては放電線の寿命およびその他の経済性という問題もあって張力をそう大きくすることができない。

3.4 振動形態の考察

放電線の振動数はつぎに示す固有振動数の方程式¹⁾によって計算した。

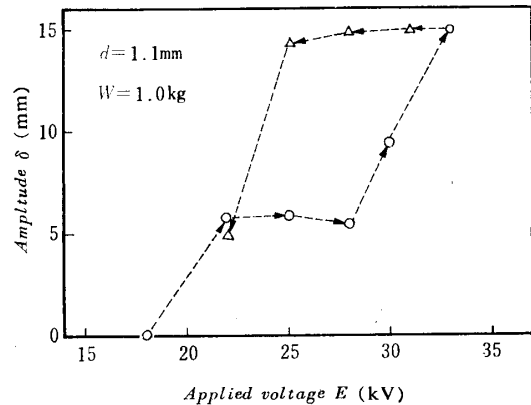


Fig. 11 Hysteresis loop of amplitude for applied voltage

$$n_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{P}{\rho S}} \quad (4)$$

ただし、 P : 放電線の全張力 (おもりの重量 g)

L : 放電線長 ($=240\text{cm}$)

ρ : 放電線の比質量 ($=7.8/980\text{gcm}^{-3}\text{S}^2$)

S : 放電線の断面積 ($=\pi r^2 \text{cm}^2$)

T : 放電線の張力 ($=w/\text{sg} \cdot \text{cm}^2$)

Fig. 12 に実験値と(4)式による理論計算値の比較を示す。この図から両者はほとんど一致しており、放電線は高次の項を含まない基本振動をしていることがわかる。

振動の形態は直線的な形態 (1次元運動) をとることとはまれで、ほとんどの場合が楕円運動 (2次元運動) である。そして楕円運動も安定であることはまれで、楕円運動をしながら軸の方向が回転するような運動が重なる場合がある。筆者らはこれを回転運動 (3次元運動) と呼ぶことにする。

Fig. 13はペンレコーダ (渡辺測器製作所製, WTR 281) に記録した2つのプローブ電極 (Fig. 2 参照) のコロナ電流変化の一例を示したものである。図中の負方向が放電線と集じん極が近づく方向に相当する

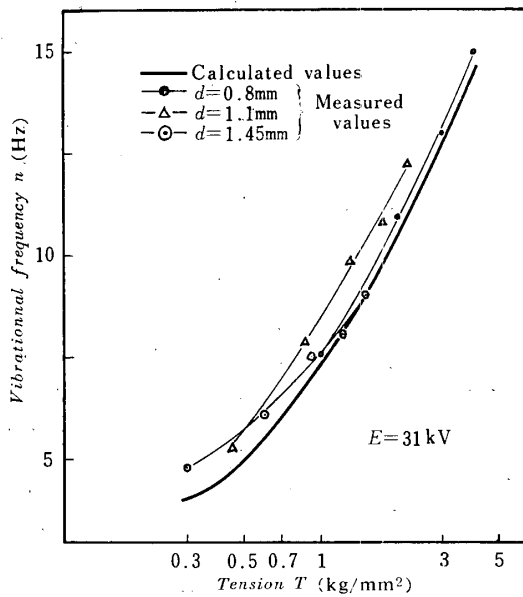


Fig. 12 Characteristics of vibrational frequency vs. tension of discharging electrode

が、振動波形は負方向に先鋭になっている。この原因は、同一印加電圧においても放電線の変位とコロナ電流変化に直線の関係がないことによる。すなわち、放電線がプローブ電極に近づくにしたがって、コロナ電流は指数関数的に増加するために負方向に先鋭な波形となるのである。Fig. 13において、(a)(b)両波形の位相差は時間と共に変化しているが、これは放電線の

振動方向が変化していることを示すもので振動形態が前述の回転運動(三次元運動)であることを示している。Fig. 13の矢印で示した時間のリサーチ波形のシンクロスコープ写真をFig. 14に示す。これらから振動形態の変化を知ることができる。なお商用周波数のハムのために曲線に微小振動が現れている。

Fig. 15は、Fig. 14の区間 T_1 および T_2 について (a) (b) 両波形を合成したもので、放電線は楕円振動しな

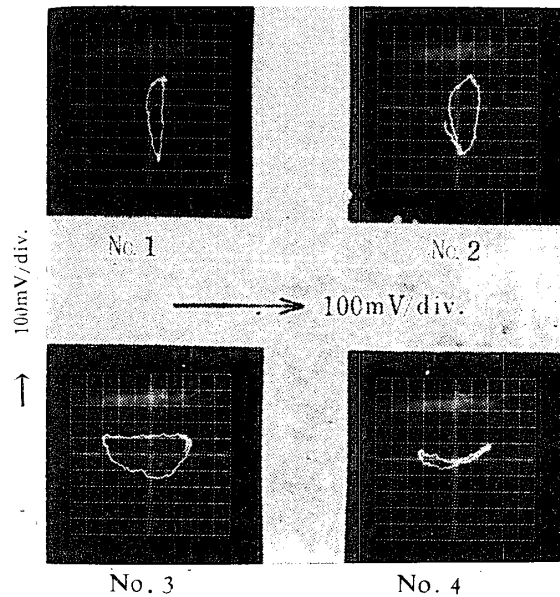


Fig. 14 Lissajous' figures for Fig. 13 (shutter speed 1/4 sec.)

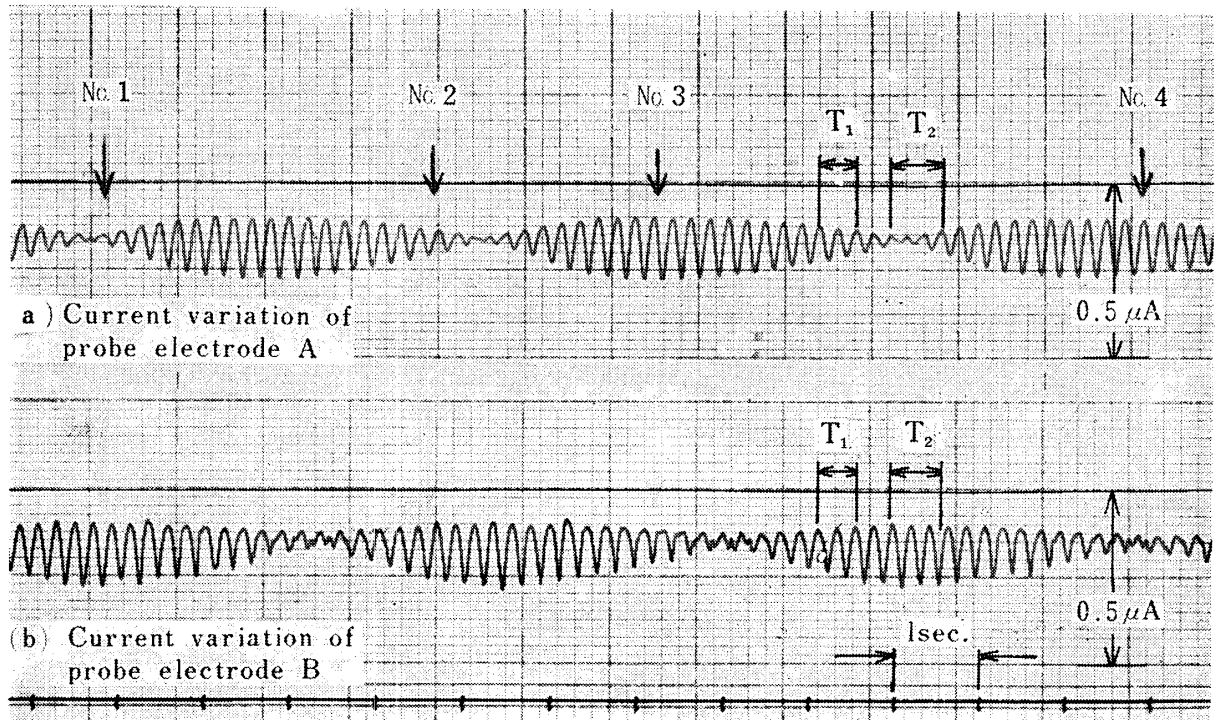


Fig. 13 Current variation of probe electrodes, showing the vibrational mode of the discharging electrode ($d=1.45\text{mm}$, $W=0.5\text{kg}$, $E=39\text{kV}$)

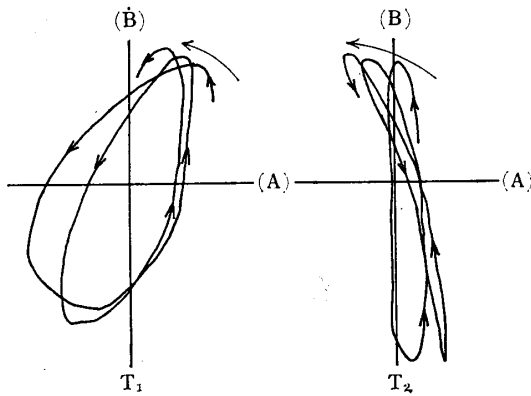


Fig.15 Lissajous' figures during period T_1 and T_2 for Fig.13

がら、その軸が回転している（三次元運動）様子がよく現れている。この回転運動の周波数は種々の条件で異っているようであるが、本実験では $0.08\text{Hz} \sim 0.25\text{Hz}$ の範囲であった。

4. 放電線への作用力

電気集じん器の放電線には垂直方向におもりによる張力が働くが、放電線が x だけ変位したとき、水平方向にはつぎのような作用力 $F(x)$ が働くと考えられる。

(Fig.16参照)

$$F(x) = \ominus F_d + \oplus F_r + \ominus F_w + \oplus F_c + \oplus F_i + \oplus F_g \tag{5}$$

ただし、 F_d : コロナ輝点による作用力

F_r : 風圧による抵抗力

F_w : おもりによる水平方向分力

F_c : クーロン力

F_i : イオン風による作用力

F_g : 誘電作用力

(5)式で \oplus は放電線変位方向の作用力で励振力として働き、 \ominus は変位方向に対して逆方向に作用して制動力として働くことを示す。実用集じん器においては排ガスによる作用力、荷電粉じんによる作用力なども考えられるが、本実験では粉じんを含むガスを通してないので、これらの作用力はない。

放電線が円筒集じん極の中心に位置しているので、電氣的ならびに機械的作用力の中性点であるから、振動は最初コロナ輝点の消長あるいはコロナ放電に伴うイオン風などのごくわずかの作用力によって励発される。前述の原因により振動が開始すると、放電極が集じん極に近づいた側ではコロナ放電が活発に行なわれ、コロナ輝点による圧力は大きくなり、イオン風による圧力、クーロン力も作用するようになる。そのと

き、 $[\oplus F_c + \oplus F_i + \oplus F_g]$ の励振力より大きくなると振動は増大し、制振力より小であると一度生じた振動も時間と共に減衰してゆくことになる。増大された振動は、制振力と励振力が釣り合うところで安定な振動を持続する。しかし、実際には振動が定常状態に落ち着くことはほとんどなく、コロナの不定常性のため、振幅の増減あるいは回転運動が発生する。

いま弦の振動が一次元の変位だけであると仮定して作用力の関数関係を調べてみることにする。Fig.16で放電線がちょうど円筒の中心にある場合は、コロナ放電が等方向に発生していると考えられ、種々の作用力の合成は零である。Fig.16は放電線が中心から正方向に x だけ変位した状態を示している。この状態にあるとき、弦の運動方程式はつぎの式⁶⁾で表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x) \tag{6}$$

ただし、 m : 弦質量 (集中荷重と考える) $[\text{kgs}^2/\text{cm}]$

c : 空気の粘性減衰係数 $[\text{kgs}/\text{cm}]$

k : 弦のばね定数 $[\text{kg}/\text{cm}]$

$F(x)$: (5)式で表わされる作用力

ここで $F(x)$ の解析は非常に困難であるが、Fig.16において放電線が右方向に運動しているとして、(5)式の各作用力について考察し、つぎのような関数形式で表わすことにする。

$$\begin{aligned} \ominus F_d &= -f_d \sin \omega t \\ \ominus F_r &= -f_r \cos \omega t \\ \ominus F_w &= -f_w \sin \omega t \\ \oplus F_c &= f_c / (D-x)^2 \\ \oplus F_i &= f_i \sin \omega t \\ \oplus F_g &= f_g \frac{dG^2}{d(D-x)^2} \end{aligned} \tag{7}$$

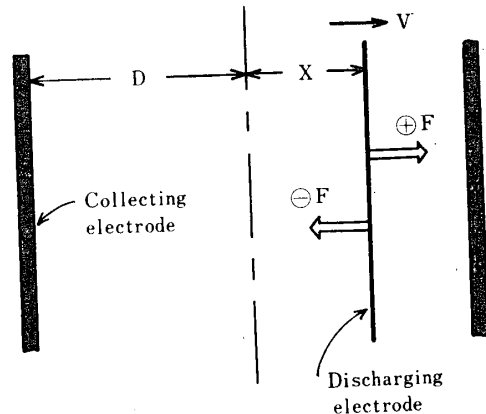


Fig.16 Generation of electrical forces for displacement x

ここで、 ω は弦振動角速度、 t は時間、 G は電界強度、

f は変位 x ならびに速度 v の関数であるが定数の場合もある。したがって、各々の作用力は \oplus , \ominus がついているが位相関係もあり、 f_a などの場合は第3.3節で述べたように変位 x に対して非直線的であり、これらの作用力の全貌を解明することは今後の問題であるが、簡単に解決できるものではない。平面的に考えてかような状態であるので、回転運動（三次元運動）の解析はさらに困難であるが、今後この運動の何らかの原因をつかみたく思っている。

5. 結 言

以上実験の結果をまとめるとつぎのようになる。

1) 放電線の振動は電圧の上昇すなわちコロナ電流の増加に伴って増大する。しかし、スパーク直前で電流密度あるいはコロナ輝点密度が飽和すると制振力が働き振動振幅は減少する場合がある。

2) 振幅値の数値的再現性とほしいが、実験回数を多くすることによりおもりの重量増加に伴う振幅減少の傾向がみられる。

3) 放電線振動の周波数は固有振動数に一致しており、高次の振動を含まない基本振動である。

4) 振動形態は直線的な変化（一次元運動）をすることはまれで、多くの場合楕円運動（二次元運動）をしている。また楕円運動は安定している場合と軸の回転運動（三次元運動）が重なっている場合とがあるが、必然性はみかけられない。

5) 放電線に作用する電気的作用力について6つの作用に分け、その方向ならびに簡単な関数関係（位相関係も含む）を考察した。これは一次元運動と仮定し

ての考察であり、二次元ならびに三次元運動が理論的にどのような原因で発生するかは複雑な問題で、今後の課題である。

このように放電線の振動については不確定な要素が多く理論的に解明しがたい問題であるが、今後何らかの解決へと努力したい。また、これらの実験結果を生かして振動防止を目的とした実験を行ない、振動防止対策を確立したいと思っている。

おわりに、本報告をまとめるにあたり、終始懇切な御指導を賜った西日本工業大学、橋本清隆教授、何かと御支援いただいた本学佐伯節夫助教授に深く謝意を表わします。また熱心に実験を援助された本学44年度卒業生一力弘三君（現在、日立製作所）、45年度卒業生徳本勉君、および何かとお世話になった本学技官池田隆、大学院陶山俊道、川崎元之、卒業生末沢洋介の諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 平松力, 小堀与一: 日立評論, **45**, No. 4, 15 (1963)
- 2) 橋本清隆, 足立宜良: 静電気とその産業技術, 東京電気大学出版局 (1969) p.113
- 3) 前原弘典, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, **20**, 386 (1969)
- 4) Crbmer & Davies: Chem. Eng. Prac., **3**, 500 (1957)
- 5) 浜田満男, 池田隆, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, **21**, 57 (1970)
- 6) 亘理厚: 機械振動, 丸善, (1966) p.103
- 7) 足立宜良: 電気学会誌, **90**, 710 (1970)

(昭和45年11月14日受理)