

## 電気集じん装置の放電線振動形態

川崎 元之\*, 原 雅 則\*\*

(1980年11月7日受理)

Corona Induced Vibration Modes of Discharging Wire  
in an Electrostatic Precipitator

M. KAWASAKI\* and M. HARA\*\*

(Received November 7, 1980)

Corona induced vibration of a discharging wire in an electrostatic precipitator (EP) causes the damage, as remarkable reduction of spark voltage or a break of wire. The occurrence of the wire vibration was observed frequently in EP, but the detailed characteristics and its onset mechanism has not been fully understood. In this paper, the vibration modes of discharging wire are investigated to obtain the basic data for the vibration phenomenon in the plate type EP and the cylindrical type EP under the normal atmospheric condition. The vibration mode is a circular motion swinging around the central axis of wire fixed both ends. In the case of torsional wire, vibration mode is not a circular motion, but an elliptic motion or a plane motion, and a revolution of the axis of elliptic motion is induced in the cylindrical type EP. The vibrational frequency of wire agrees well with the natural frequency within 3% errors regardless of the applied voltage. The amplitude of wire is saturated with increasing the applied voltage, and is decreased with increasing the weight of wire. Moreover, the vibrational force and energy are discussed on the basis of the vibration model about one degree of freedom in the plate type EP.

## 1. ま え が き

電気集じん装置(以下EPと略記する)の放電線振動現象は、放電線の疲労、断線および火花電圧の低下等の障害を引き起こし、EPの稼働に支障をきたすことが知られている<sup>1-3)</sup>。放電線振動はコロナ放電によってもたらされる自励振動現象であり、雨天下の送電線振動<sup>4)</sup>ならびに電子コピーのコロナワイヤの振動<sup>5)</sup>とも本質的に同じと考えられる。

コロナ放電によって誘起される線振動現象は、古くから知られている<sup>7)</sup>。しかし、たんなる機械的振動でなく、コロナ放電電場という特殊な条件下で発生するために、その計測ならびに解析においてきわめて複雑な要素を含

んでいる。EPの放電線振動に関しては、放電電極を敲打した場合の振動解析<sup>2)</sup>がなされている。しかしながら、コロナ放電による振動成長機構はもとより放電線振動形態等の現象についての基礎的把握も十分に行なわれていないようである。

われわれは、EPの放電線振動に関する基礎的資料を得るために、現象の把握を目的として基礎実験を行なった。まず、平板型EP(放電線1本)では、放電線振動がコロナ電流に及ぼす影響を調べ、振動形態を考察した。また、円筒型EPでは、電流プローブを用いてコロナ電流の変動を検出し、各プローブ間相互の変動量および位相差に着目して振動形態を考察した。さらに振動数、振幅に関しての基礎特性を把握し、放電線を等価質量集中系とみなした振動モデルから振動作用力および振動エネルギーを推定した。なお、実験は静止大気中で行なった。

本研究では、これらの実験結果に基づいて、いくつかの新しい知見が得られるとともに、実際のEP中に適当な電流プローブを設けてコロナ電流を観察すれば、EP中の線振動検知を行なえることがわかったので報告する。

\* 西日本工業大学電気工学科(800-03 福岡県京都郡苅田町新津 1633)

Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, 1633, Aratsu, Kanda-machi, Miyako-gun, Fukuoka, 800-03 Japan

\*\* 九州大学工学部電気工学科(812 福岡市東区箱崎 6-10-1) Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 10-1, Hakozaki 6-chome, Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

2. 実験の装置と方法

2.1 実験装置の概要

図1(a)は、平板型装置の概要である。放電線 (0.5 mm φ, 長さ 1.1 m のステンレス線) は鉛直に両平板電極の中間 (電極間距離 7 cm) に 1 本配置し, その上端は固定, 重り (0.15~6 kgw) を取り付ける下端は上下に可動とした。両平板電極は 1×1 m で, その端部は平板部と絶縁して端効果対策<sup>8)</sup> を施した。片側の平板電極の中央部には, 側面から放電線振動が観測できるように 2×30 mm の観測用窓を設けた。

図1(b)は, 円筒型装置の概要である。放電線 (0.5 mm φ, 長さ 1.6 m のステンレス線) は鉛直に円筒電極の中心軸に配置した。その上端および下端の取付け方法は, 平板型と同様である。円筒電極は直径 15.5 cm, 長さ 1.5 m で, その両端に端効果対策を施した。円筒電極の中央部で円周を 4 等分する各位置に電流プローブ (感度を高めるため 10 mm φ を 4 個並列使用) ならびに 2×30 mm の観測用窓を設けた。

平板電極間距離および円筒電極直径は, 実用集じん電界 (4~6 kV/cm)<sup>9)</sup> を考慮して各図に示したように定めた。また, 放電線の径と長さは, (放電線長)/(放電線半径) ≈ 3,000~6,000<sup>1)</sup> が実用されることから定めた。なお, 放電線には負の直流高電圧 (脈率率 0.1% 以下) を印加した。

2.2 実験の方法

放電線振動がコロナ電流に及ぼす影響を知ることは, 振動状況を把握するうえで重要と思われる。本研究にお

けるような負極性の放電線からのコロナ電流は急峻な立上りのトリチェルパルスが多数同時に出現しうるので, コロナ電流はトリチェルパルスの重なりによる直流分と各パルスの波頭部に対応する周波数の高い振動成分からなっており, 線振動に伴ってゆるやかに変動する成分がさらに重畳される。そこで, 図1(a) および (b) に示すように RC 並列回路のインピーダンス特性を利用して前述の周波数の高い振動成分を大地に逃がし, 直流分と線振動に伴う低周波成分を 10 kΩ の抵抗の両端に取り出し, さらに 0.5 μF の直列コンデンサで直流分をカットして低周波成分のみをシンクロスコープまたはペンレコーダで記録した。

とくに, 円筒型 EP では電流プローブを用いてコロナ電流密度の変動分をペンレコーダで記録した。その変動波形相互の振幅と位相差を比較検討して, 放電線の振動形態を考察した。

放電線の振動数はコロナ電流の変動周期から測定できるが, ここでは振動数を精度よく測定するために, レーザ光線を放電線中央部に当てこれをフォトランジスタで受光した。放電線が振動を生じ, 固定されたレーザー光線を横切るとフォトランジスタ回路にパルスが発生する。そのパルスを周波数カウンタで測定して振動数を求めた。この方法によって, コロナ電流の変動状況と放電線変位との関連がシンクロスコープで観測できる。また, 肉眼では観察できない微振動開始時がフォトランジスタパルスの検出によって容易に確認できた。

放電線の振幅は写真撮影によって測定した。とくに, 平板型 EP では正面と側面 (観測窓側) から同時撮影を

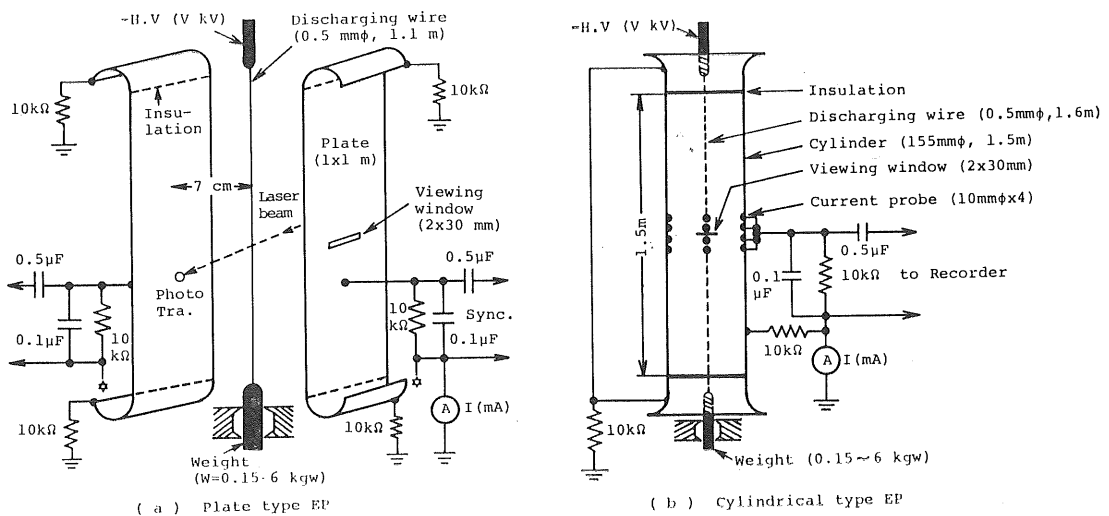


図1 実験装置の概要  
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

行なった。円筒型 EP では一つの観測窓から撮影した。

以上の計測方法は平板型、円筒型ともに放電線が第 1 次の基準振動のみであることを確認した結果に基づいている。

### 3. 実験の結果と検討

#### 3.1 負コロナ電流特性

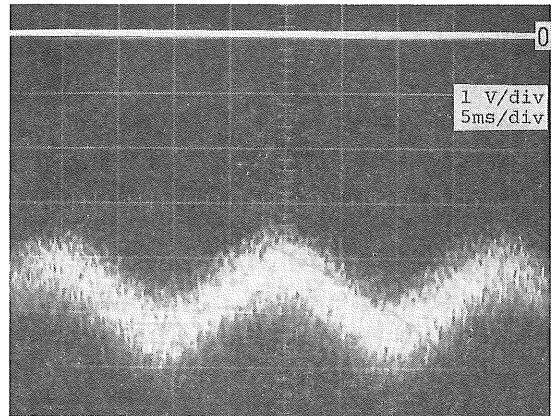
図 1(a), (b) の電極配置における負コロナ電流特性を図 2 に示す。図 2 は放電線単位長当りのコロナ電流の平方根で整理したものである。後述するように放電線の重りによって放電線の振動数および振幅は変化する。したがって、振動時の電極間距離はたえず変化することになるが、全コロナ電流は振動の影響をほとんど受けない。これは、放電線の変位した側でコロナ電流の増加を生じ、その反対側では減少を生じる。重りが重い場合は放電線の振幅が小さいために、その増加分と減少分の差は直流成分に較べて無視できるほど小さく、全コロナ電流は重りを変えてもほとんど変化しない。これに対し、重りが軽くなると図 2 の円筒型の重り 0.15 kgw の場合にみられるように振幅が大きくなり(図 9 参照)、電流の増加分が減少分より著しく大きくなるために全コロナ電流は増加する。

#### 3.2 平板型 EP での振動形態

図 3 は片側の平板電極におけるコロナ電流波形(抵抗 10 kΩ のみで検出) の一例である。放電線振動に呼応して、片側電極のコロナ電流は変動していることがわかる。他方の平板電極のコロナ電流とは位相が 1/2 周期異なる。なお、各平板電極のコロナ電流の変動分は振幅の増大とともに指数関数的に増大する。

図 3 の波形を RC 並列回路に通し、直流成分をカットした変動分の波形を図 4 に示す。図 4 中のフォトラン

ジスタのパルス波形は、放電線が中心軸(初期静止位置)を通過した瞬間を示す。RC 並列回路の位相差を考慮してもコロナ電流の変動分は、放電線変位よりも若干(図 4 の場合は 0.52 ms)遅れている。このことは放電線振動機構を検討するうえで重要な手掛りになるものと思われる。なお、印加電圧が一定であっても放電線振動に伴って、放電空間の電界が変化する。この放電線振動に伴う変位電流の存在が考えられ、この変位電流は放電線が中心軸を通過するとき最大となるが、図 4 では放電線が平板電極に近づいたときに最大電流を示しており、放電線変位による電極間距離の変化に基づくコロナ電流の変動と判断される。



$V=35\text{ kV}$ ,  $I=1.12\text{ mA}$ ,  $W=2.0\text{ kgw}$

図 3 片側の平板電極におけるコロナ電流の波形

Fig. 3 Wave form of corona current for the one side plate electrode.

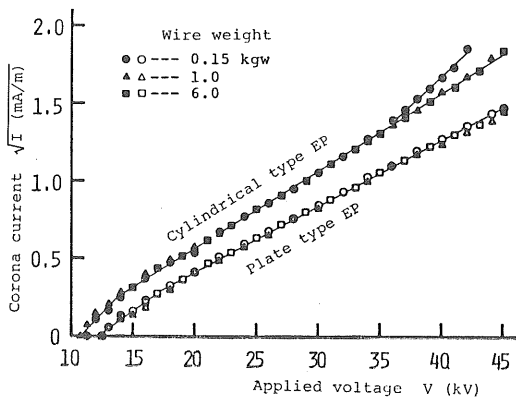
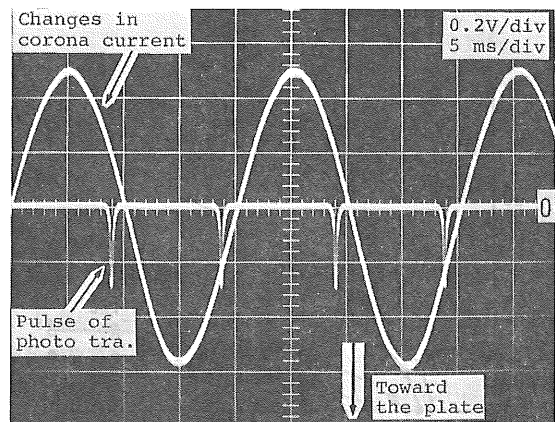


図 2 負コロナ電流特性

Fig. 2 Characteristics of negative corona current.



$V=35\text{ kV}$ ,  $I=1.12\text{ mA}$ ,  $W=2.0\text{ kgw}$ ,  $A=3.7\text{ mm}$ ,  $f_d=50.26\text{ Hz}$

図 4 片側の平板電極におけるコロナ電流の変動波形

Fig. 4 Changes in corona current for the one side plate electrode.

放電線の重りに対する振動数の特性を図5に示す。測定点は振幅が約1mm以上(フォトトランジスタのパルス確立)に達する印加電圧の広い範囲にわたっての平均値である。平均値に対する実測値のばらつきは3%以内であって、印加電圧に関係せず、放電線の固有振動数によく一致する。しかし、重り  $W$  が増加するにしたがって、放電線の振動数は固有振動数を下まわる。これは空気の粘性抵抗ならびに放電線内部の固体摩擦によるためと考えられる。

放電線の振幅特性を図6に示す。放電線は上下の固定点を中心軸としてふれまわっているため、正面および側面の振幅を同時に写真撮影して調べた。その結果、図6に示すように振幅は印加電圧と重りの影響を受けるが、正面と側面方向の振幅はほぼ同じであり、ふれまわりの円運動を行なうことがわかった。ただし、この場合の放

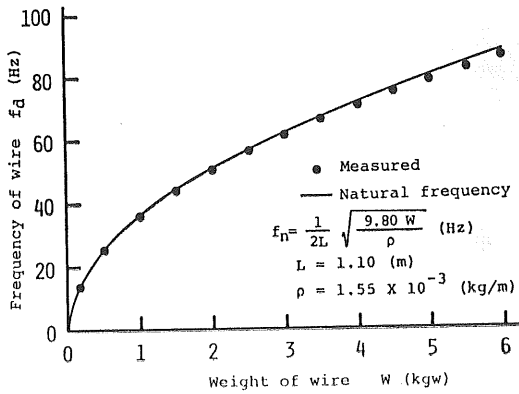


図5 放電線の重りと振動数の関係 (平板型 EP)

Fig. 5 Relation between weight and frequency of wire for the plate type EP.

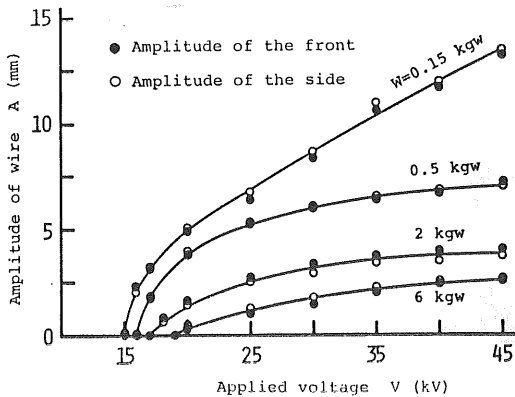


図6 印加電圧と振幅の関係 (平板型 EP)

Fig. 6 Relation between applied voltage and amplitude of wire for the plate type EP.

電線は取付け時にねじれがないように配慮した。放電線のねじれは振動数および正面の振幅にほとんど影響を及ぼさないが、側面の振幅は小さくなる。したがって、ねじれがある場合は、長円運動あるいは平面運動となる。ここでいうねじれとは、放電線下端の重りの1回転以内のひねりである。

振幅は印加電圧の上昇とともに飽和する傾向にあり、振動系としては安定である。振動開始電圧は重りが軽いほど低く、コロナ開始電圧よりわずかに高い印加電圧で微振動を開始する。この微振動は肉眼で観察されないが、フォトトランジスタパルスの検出で容易に確認できる。

微振動の開始機構は次のように考えられる。コロナ開始電圧の時点で放電線から始発するイオン風は、印加電圧のわずかな増加に対し、場所的には不均一であるが急激にその勢力を増す<sup>10)</sup>。そのため、放電線はイオン風の反動によって微動すると、運動方向側のコロナが活発になってイオン風の反動力が生じ、放電線をもとにもどすようになる。このような微動箇所が放電線上で不均一に生じるため、微振動が開始すると考えられる。

### 3.3 円筒型 EP での振動形態

図7は、円筒電極の中央部に取り付けた電流プローブによるコロナ電流密度の変動波形の一例である。それぞれの波形において、ゼロレベル(等価電極間距離)より上側がそのプローブに放電線が近づいた場合で、下側が遠のいた場合を示している。各プローブにおける波形の変動値はほぼ等しく、放電線の各プローブ方向への変位は等しいとみなされる。そして、各プローブ間の位相差はプローブの配置順に従って、それぞれ1/4周期ずつ異

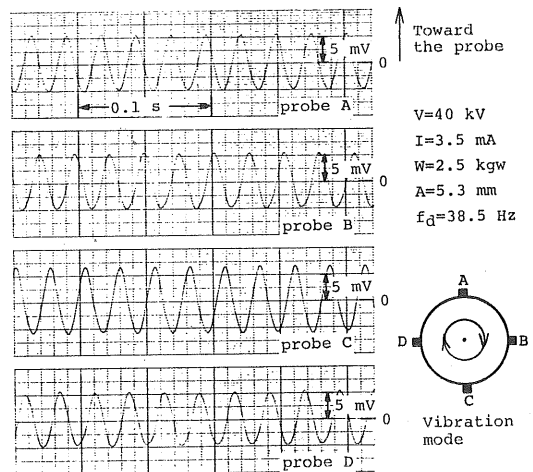


図7 コロナ電流密度の変動波形と振動形態

Fig. 7 Changes in corona current density and vibration mode for the cylindrical type EP.

なっている。このことから、放電線のふれまわりは円運動を行なっていることがわかった。ただし、平板型 EP と同様に放電線にねじれがない場合である。なお、円運動の回転方向は実験のたびに変わる。これは振動が確立する前の微振動段階の初期値、すなわち微動状態によって決まると思われる。

重りと振動数の関係を図 8 に示す。測定値は放電線の固有振動数の計算値 (実線) とよく一致する。しかし、平板型と同様に重り (振動数) の増加とともに固有振動数より若干 (3% 以内) 低下する。

図 9 は、図 7 に示したように円運動を行なう場合の振幅特性である。円筒型のほうが平板型よりコロナ開始電圧は約 1 kV 低いにもかかわらず、同一重りに対する振動開始電圧は数 kV ほど高い。しかし、振動が開始すれば同じ平均電界強度のもとで、円筒型のほうが振幅は大

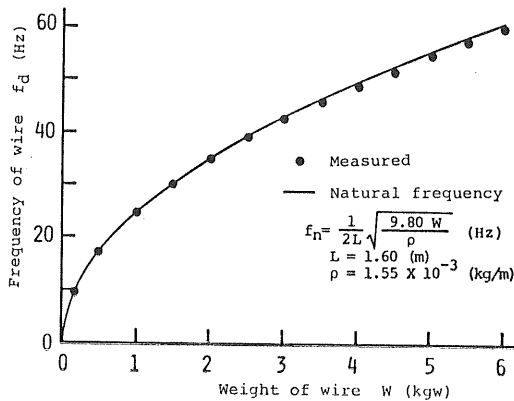


図 8 放電線の重りと振動数の関係 (円筒型 EP)

Fig. 8 Relation between weight and frequency of wire for the cylindrical type EP.

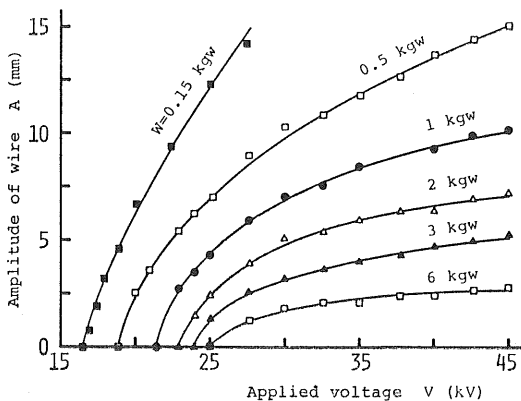


図 9 印加電圧と振幅の関係 (円筒型 EP)

Fig. 9 Relation between applied voltage and amplitude for the cylindrical type EP.

きくなる傾向を示す。このことは、円筒型のほうが平板型より放電線まわりのコロナ分布が均一になりやすいためと考えられる。

放電線の取付け時にねじれがあると、円運動とは異なる振動形態となる。これらの特徴ある形態を図 10(a)~(d) に示す。

図 10(a) において、プローブ A と C の変動値は等しく位相差が 1/2 周期異なっている。プローブ B と D についても同様である。また、B は A よりわずかに位相が進んでおり、D と C の位相関係も同様である。これらのことから、この場合の放電線は図中に示すように長円運動を行なっていると理解される。

図 10(b) において、プローブ A と C の変動値はほぼ等しく、位相差が 1/2 周期異なっている。プローブ B と D の変動値はほとんどゼロである。したがって、この場合の放電線は図中に示すように平面運動と理解される。

図 10(c) において、各プローブにおける変動値はほぼ等しい。プローブ A と D および B と C はそれぞれ同相であるが、互いに位相差が 1/2 周期異なっている。このことは、図中に示すように平面運動と理解される。図 10 の (b) も平面運動であるが、放電線の変位方向とプローブの位置関係によって、プローブの波形は変わる。

図 10(d) において、各プローブの変動値はうなりを生じている。うなりの状況は A と C および B と D がそれぞれ同じであり、互いにうなりの位相が 1/2 周期異なっている。これは図中に示すように長円運動に回転が重なっているとみなされる。

以上のように放電線のねじれによって、振動形態は円運動でなくなり、長円運動、平面運動および長円運動の軸に回転が生じる。ねじれによって振動形態が変わっても、放電線の最大振幅はプローブの変動値から判断してほぼ円運動の場合に等しい。また、振動数はねじれの影響をまったく受けない。なお、ここでいうねじれは、平板型の場合と同様に放電線下端の重りの 1 回転以内のひねりである。そして、ひねりの角度と振動形態を対応させても形態の出現に特徴付けができなかった。

#### 4. 放電線作用力および振動エネルギーの推定

放電線は無限自由度の系であるが、ここでは平板型 EP の放電線を 1 自由度系、すなわち等価質量集中系の簡単な振動モデルを考えた。そして、これから平板型 EP における放電線作用力ならびに振動エネルギーの推定を試みた。

放電線が定常振動を生じている場合は、見掛け上放電線は周期的外力  $P \sin \omega t$  で強制振動を行なっているものとみなされる。この場合の運動方程式は次のように示

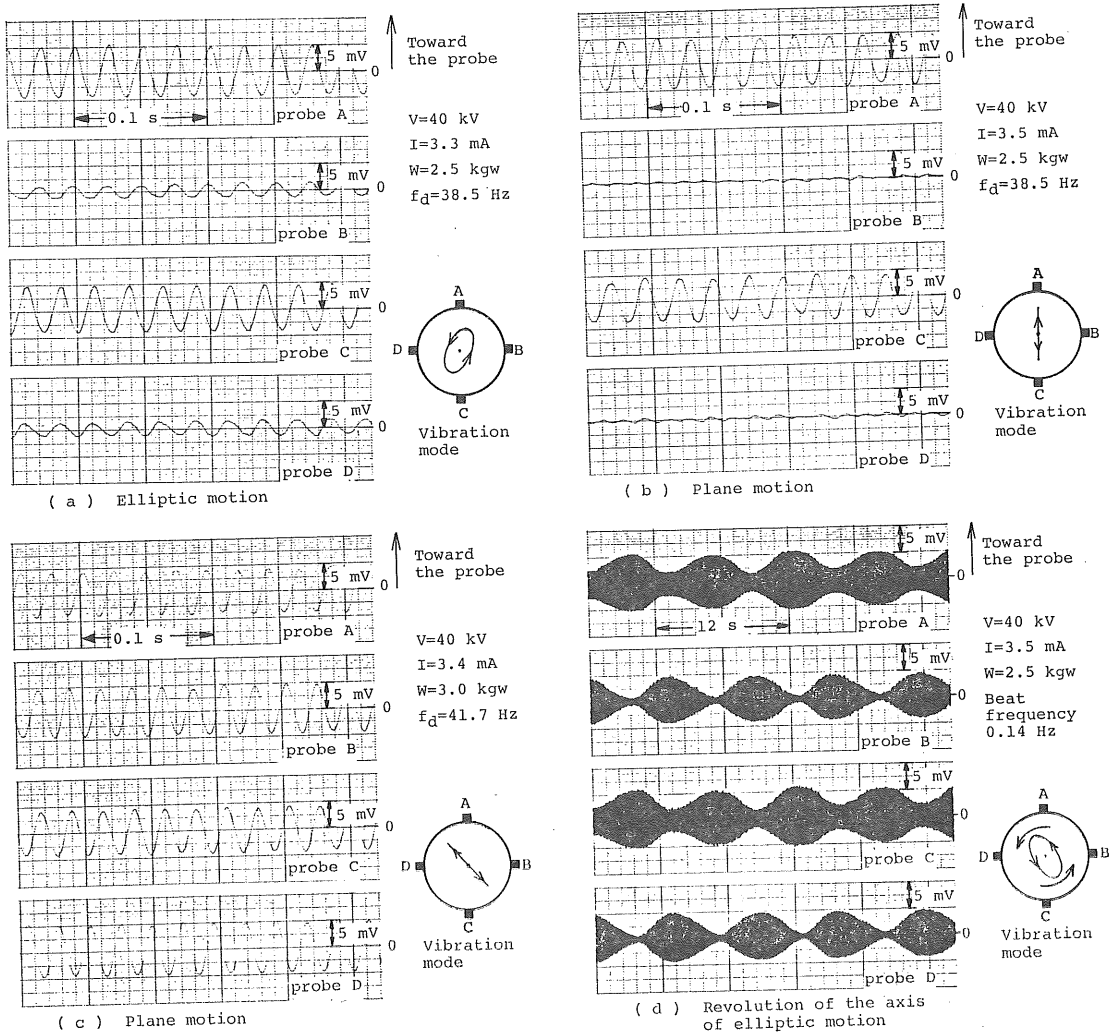


図 10 コロナ電流密度の変動波形と振動形態  
 Fig. 10 Changes in corona current density and vibration modes in the case of torsional wire.

される<sup>11)</sup>.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P \sin \omega_d t \quad (1)$$

ただし、 $m$  : 放電線の等価質量、 $c$  : 粘性減衰係数、 $k$  : 放電線のバネ定数、 $x$  : 放電線の変位。

また、1自由度の振動系においては次のような関係が成り立つ。

$$\omega_n = \sqrt{k/m} = (\pi/L) \sqrt{gW/\rho} \quad (\text{rad/s}) \quad (2)$$

ただし、 $\omega_n$  : 固有円振動数、 $L$  : 放電線の長さ (1.1 m)、 $\rho$  : 放電線の線密度 ( $1.55 \times 10^{-3}$  kg/m)、 $g$  : 重力加速度、 $W$  : 重りの重さ (kg-w)。

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n \quad (\text{rad/s}) \quad (3)$$

ただし、 $\omega_d$  : 減衰円振動数、

$\zeta$  : 減衰係数比 ( $c/2\sqrt{mk}$ )。

$L \gg x$  の場合、 $k$  は  $4gW/L$  で与えられる。したがって、(2)式から  $m$  は次式で求められる。

$$m = k/\omega_n^2 = 4\rho L/\pi^2 \quad (\text{kg}) \quad (4)$$

$\omega_d$  を damping test から実測して求め、(3)式から粘性減衰係数  $C$  を算出した。その結果を図 11 に示す。

$W < 0.15$  kgw では放電線が変形して、 $\omega_d$  の実測は困難であった。 $W \geq 0.15$  kgw で  $C$  は  $\sqrt{W}$  に比例する特性を示した。その実験式を図中に示す。なお、damping test から求めた  $\omega_d$  は電圧を印加した場合の定常振動における円振動数  $2\pi f_d$  (図 5 参照) とよく一致する。すなわち、放電線の振動数は印加電圧にまったく無関係

である。したがって、(1)式における外力の円振動数として  $\omega_d$  を用いた。

(1)式の定常解は次の式で与えられる。

$$x = A \sin(\omega_d t - \phi) \quad (5)$$

ただし、 $A = P \sin \phi / C \omega_d$ 、 $\phi = \tan^{-1}(16\rho L \omega_d / \pi^2 C)$  となる。 $m$  の振動数はその固有振動数とほぼ等しく、近似的に共振するので  $\phi$  の値は  $\pi/2$  に近い値でなければならない。実際に  $\phi$  の値は  $83.7 \sim 85.6^\circ$  であり、 $\sin \phi \approx 1$  となる。したがって、図6の実測値  $A$  をもとにして、作用力  $P$  は  $AC\omega_d$  から算出される。その結果を図12に示す。この特性図から作用力としては、たかだか  $22 \times 10^{-2} \text{ N}$  (約 22 gw) である。

振動1周期に粘性抵抗で失われるエネルギー  $W_d$  は次の式で示される。

$$W_d = \oint C \dot{x} dx = \pi C \omega_d A^2 \quad (6)$$

$W_d$  は定常振動における系の1周期の消費エネルギーであるので、振動が持続するためにはこれに等しいエネルギーが外力によって供給されなければならない。

振動1周期当りの電気エネルギー  $W_e$  は  $2\pi VI / \omega_d$  であるので、振動系の効率  $\eta$  は次式で示される。

$$\eta = (W_d / W_e) \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

$W_d$  と  $W_e$  の関係を図13に示す。 $W_d$  は重りが大きいほど増加するけれども、4 kgw を越えると  $W_d$  は低下する。これは、 $C\omega_d$  の増加よりも振幅  $A$  の減少度合が影響するためである。また、振動系の効率は 0.65% 以下で非常に小さく、イオン風の発生効率  $10^{-2}$  オーダのパーセント<sup>12)</sup>と同程度であるため、イオン風力は重要な振動作用力と考えられる。

放電線が電気力で変位した場合、変位側のイオン風は強くなり、その反動力で放電線はもどされて、振動が持続すると考えられる。したがって、振動作用力としてのイオン風力と電気力との関係を今後明確にする必要がある。

### 5. ま と め

平板型および円筒型 EP の常態空気負荷において、放電線の振動形態を調べた。そして、等価質量集中系の簡単な振動モデルで放電線の作用力ならびに振動エネルギーを推定した。これらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) 平板型および円筒型 EP における放電線振動の基本形態は、放電線の固定点を中心軸にしたふれまわりの円運動である。しかし、振動形態は放電線の微妙なねじれに影響され、ふれまわりは長円運動また

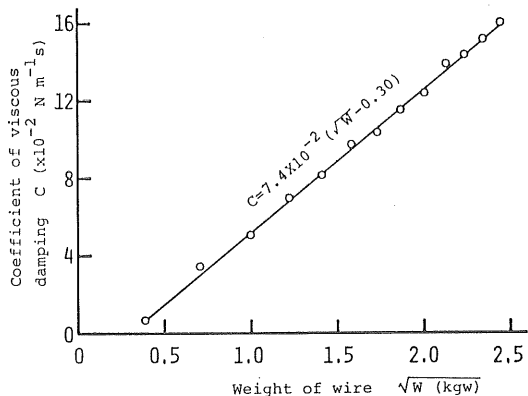


図 11 粘性減衰係数の特性 (平板型 EP)  
Fig. 11 Characteristic of coefficient of viscous damping in the plate type EP.

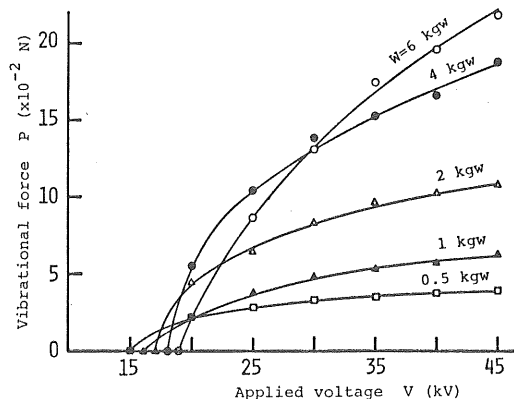


図 12 印加電圧と作用力の関係  
Fig. 12 Relation between applied voltage and vibrational force for the plate type EP.

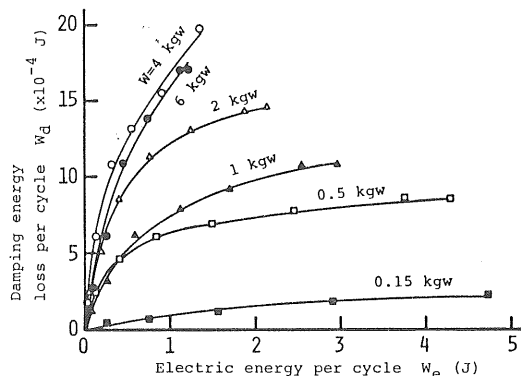


図 13 電気エネルギーと振動エネルギーの関係  
Fig. 13 Relation between vibrational energy and electric energy for the plate type EP.

は平面運動となる。そして、円筒型ではさらに長円運動に回転が生じる。

- (2) 放電線振動に呼応してコロナ電流密度も変動し、放電線の振幅の増加とともに増大する。しかし、振幅が電極間距離の少なくとも20%程度までは、同一電圧に対する全コロナ電流は振幅(重り)の影響をほとんど受けない。
- (3) 重りを増大させると粘性抵抗が増加するため、放電線の振動数は固有振動数より若干低下するが、3%以内でよく一致する。なお、コロナ開始電圧よりわずかに高い印加電圧で微振動を開始する。そして、振動数は印加電圧に関係なく、自由減衰振動の振動数に一致する。
- (4) 振幅は重りが重いほど小さく、また印加電圧の上昇とともに増大する。そして、これらの特性曲線は飽和する傾向にある。また、円筒型は平板型と比べて振動開始電圧は高く、振動確立後の振幅は大きくなる傾向を示す。
- (5) 放電線の作用力はたかだか22 gw程度であり、電気入力エネルギーのたかだか0.65%が振動エネルギーに費やされる。
- (6) 本実験における測定方法は、コロナ電流の観察で線振動を検出する方法であり、線振動モニタとして実用面への応用が考えられる。

最後に、日頃よりご指導ならびにご支援をいただく九州大学総合理工学赤崎正則教授、山口大学工学部足立宜良助教授(現在、大分大学工学部教授)に深く謝意を表します。また、卒業研究の一部として実験に協力された西日本工大田中健二(現在、新日本非破壊検査)、川添亮治(現在、日立家電)の両君に感謝します。

#### 参 考 文 献

- 1) 橋本清隆, 足立宜良: 静電気とその工業への応用, p. 113, 東京電機大学出版局 (1973)
- 2) 平松 力, 小堀与一: 日立評論, 45 (1963) 130
- 3) 服部一郎, 山本清一郎: 静電気学会誌, 2 (1978) 43
- 4) G.M. Lemanczy, R.M. Morris and R.L. Wardlaw: *Proceedings of Canadian Congress of Applied Mechanics*, p. 237 (1975)
- 5) 足立宜良, 川崎元之, L.C. Phan: 静電気学会誌, 5 (1981) 36
- 6) T.G. Davis: *IAS, 77 Annual*, 24-E, p. 587 (1977)
- 7) 熊谷三郎, 長屋 準: 電気学会誌, 53 (1933) 428
- 8) 足立宜良, 川崎元之, 岸本勝美: 静電気学会誌, 4 (1980) 44
- 9) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 235, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1963)
- 10) 川崎元之: 電気学会論文誌B, 99 (1979) 1
- 11) 亘理 厚: 機械振動, p. 103, 丸善 (1977)
- 12) 足立宜良: 電気学会論文誌B, 93 (1973) 273