

論 文

## スプリングで支持された導体のコロナ振動

足立宜良\*, 川崎元之\*\*, C. LUAN PHAN\*\*\*

(1980年2月18日受理)

### Corona Induced Vibration of the Conductor Supported with Springs

T. ADACHI,\* M. KAWASAKI,\*\* and C. LUAN PHAN\*\*\*

(Received February 18, 1980)

In order to investigate the mechanism of corona induced vibration of the high voltage conductors under rain, the experimental set-up was made with the conductor (the dia. is 2.3 cm and the length is 300 cm) suspended by two pairs of springs in the axis of the cylindrical mesh cage (the dia. is 100 cm and the length is 100 cm). A wide angle nozzle was used to spray the conductor with a controlled precipitation intensity. It is found that the field intensity at which the vibration starts is equal to the corona onset field intensity under spray, the field intensity at the maximum amplitude is equal to the corona onset field intensity of the conductor with hanging many drops under no spray and that the vibration becomes damped when the corona current contains a DC component due to the hissing corona. In the steady state of the vibration of which the frequency is the natural frequency of this system, there is a synchronization between the motion of the conductor and the current pulses due to the ejection of the drops from the suspended drops.

#### 1. まえがき

導体のコロナ振動は高電圧を印加された導体からのコロナ放電に基づく種々の作用力によって生じる現象である。この現象は次の2通りに分類される。

(1) 導体表面からのコロナ放電による振動

(2) 導体表面の付着物からのコロナ放電による振動

前者の例としては、電子複写器<sup>1)</sup>ならびに電気集じん装置の放電線振動<sup>2)</sup>があげられる。後者の例は送電線に水滴(雨、霧、雪溶けによる)または雪が付着した場合、これらの付着物からのコロナ放電による送電線振動が観察されており、多くの報告<sup>3-6)</sup>がなされている。そしてこの振動現象の理論的解析<sup>7)</sup>も試みられている。ここで、雨天下の導体下部に付着した水滴からのコロナ放電

に基づく種々の作用力として、(1)コロナ放電に基づく空間電荷によるクーロン斥力、(2)分離水滴の電荷によるクーロン斥力、(3)導体からの水滴分離による重力減少の作用力、(4)コロナ放電によって生じるイオン風<sup>8,12)</sup>作用力などが考えられる。

付着水滴からのコロナ放電によって生じる線振動については上記の論文や他の多くの論文について大いに論じられているが、水滴の形状、コロナ放電のモード(たとえば、クラックリングコロナやヒッシングコロナ<sup>9,10)</sup>)や振動系における導体の表面の電界強度などとの互いに関連した報告はみあたらないようである。

われわれは振動しやすい振動系として、図1に示す装置を試作した。この装置は、4本の同一のバネ定数を持つスプリングで支えられた高圧の導体を、接地された円筒金網の中心に設置したものである。そして、水滴を導体に付着させるため金網上部よりスプレイで水を供給した。このマス・スプリング振動系は実際の送電線の弦振動を十分に再現しないが、簡単であって、振動を開始するための必要なエネルギーは非常に小さくてすむという長所がある。

本報告では主として、(1)振動を開始する条件、(2)振動の振幅が最大になる条件、ならびに、(3)振動が減衰する条件の三つの点に注目して前述の水滴の形状、コロナ放電のモードや電界強度の関連などについて実験研究を行

\* 山口大学工学部電気工学科 (755 宇部市常盤台)  
Department of Electrical Engineering, Faculty  
of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai,  
Ube 755, Japan

\*\* 西日本工業大学電気工学科 (800-03 福岡県京都郡苅田町)  
Department of Electrical Engineering, Nishi-  
nippon Institute of Technology, Kanda-machi,  
Miyako-gun, Fukuoka 800-03, Japan

\*\*\* Faculty of Sciences, University of Quebec at  
Chicoutimi, 930 est, rue Jacques-Cartier, Chicou-  
timi, Quebec, G7H 2B1, Canada

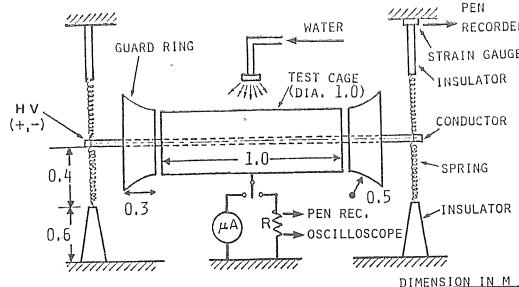


図1 実験装置の概要

Fig. 1 Apparatus of experimental set-up.

表1 使用したAl導体

Table 1 Aluminum conductor for the test.

Conductor	A	B	C
Dia. (cm)	1.83	2.30	2.65
Length (cm)	300	300	300
Weight (kg)	1.24	1.74	1.54

なった。ただし、実験は温度調節された室内で行ない、気温は 18~22°C であった。

## 2. 実験装置

図1に示すように、直径 2.3cm の滑らかな中空アルミニウム導体が、4本のスプリングによって接地された円筒メッシュケージの中心軸上に支えられている。この導体に印加される電圧は電源の関係からコンデンサで十分に平滑された正ならびに負の直流電圧である。そして導体は表1の3種類（主としてB導体を使用）を使用し、四つのスプリングのバネ定数は 6.8 kg/m であった。メッシュは金網内側近傍の電位分布と観察条件を考慮して  $0.5 \times 0.5$  cm を選定した。図1の振動系の固有振動数の計算値は 1.84 Hz で、定常振動中に印加電圧をゼロとしたダンピングテストの値（コロナ振動数とほぼ同じ値）と 2 % 以内で一致した。内径 100 cm のテストケージはお互いに絶縁された三つの部分から構成され、中央部分は 1 m の長さで、二つの放電線端効果対策<sup>11)</sup>を行なったガード部分は曲率半径 50 cm、長さ 30 cm である。

図2は広角ノズル 3 個から水（水道水）をスプレイして、平均直径約 300 μm の水滴を降雨量 22~82 mm/h の範囲で変化させた特性である。この図から明らかなように振動振幅ならびにコロナ電流は降雨量の影響をほとんど受けないので主として 26 mm/h の値を使用した。ここで、実験データの再現性を保つために、各実験開始前に洗剤で導体をよく洗って行なった。その結果、水滴

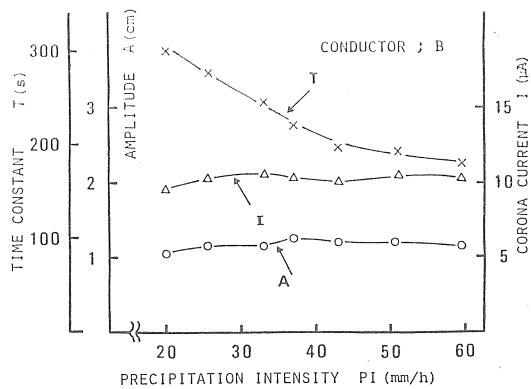


図2 スプレイの水量変化による振動振幅などの特性

Fig. 2 Amplitude and corona current characteristics at various rates of precipitation intensity.

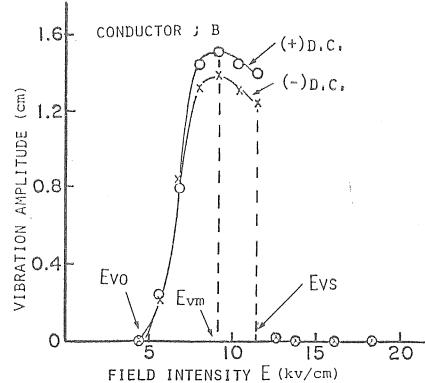


図3 導体のコロナ振動の振幅特性

Fig. 3 Amplitude characteristics for corona induced vibration of a conductor.

は約 2.5 cm 間隔で導体の下部に付着した。

導体の振動数と振動振幅はスプリングの一端に取りつけたストレインゲージの出力を增幅したペンレコーダの記録から測定した。この振動振幅の測定値の校正は導体の変位を写真測定（露出時間 4 秒）した値で行なった。コロナ放電電流は広帯域真空管電圧計（Hewlett Packard 4100, 以下 VTVM と略記する）によって測定した。その他の測定上の注意すべきことは文献 9) の手法にしたがった。

## 3. 実験結果

### 3.1 振動振幅

図3は降雨量 26 mm/h の場合の導体 B の振動振幅の p-p 値と導体表面の電界強度との関係を示している。この導体表面電界強度（以下、電界強度と略記）は印加電圧  $V(kV)$  を次式に代入して得られた値である。

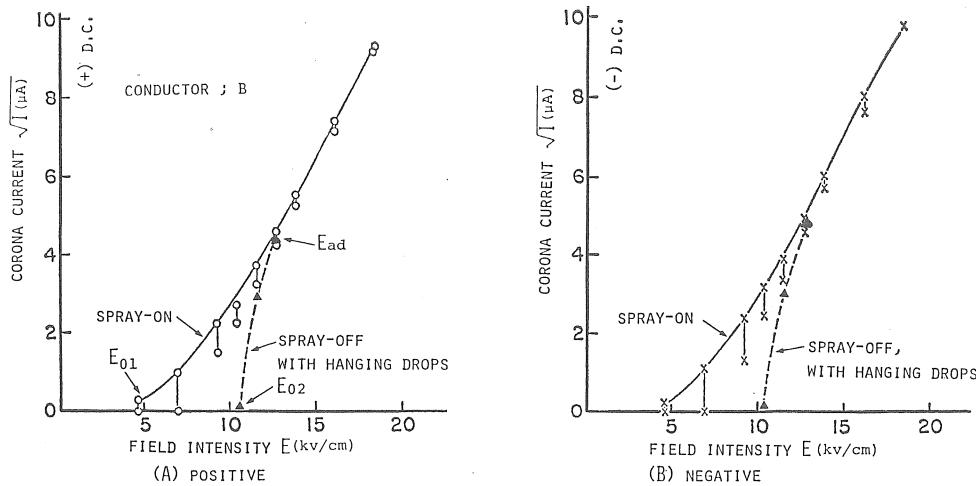


図4 コロナ電流特性

Fig. 4 Corona current characteristics.

$$E = V/a \log(b/a) \quad (\text{kV/cm}) \quad (1)$$

ただし、 $a$ は導体半径 (cm),  $b$ はテストケージの半径 (cm) である。この図3から振動開始電界強度 ( $E_{v0}$ ) は正極性および負極性ではともに約 4.5 kV/cm であって、さらに電界強度を上昇させると振幅は増大する。そして、振幅が最大になる電界強度 ( $E_{vm}$ ) は約  $\pm 9.3$  kV/cm であって、さらに電圧を上昇させると振幅は少しづつ減少し、約 12.7 kV/cm で振幅は急激な減衰を示し、ほとんど停止してしまう。また、図3から明らかなように正極性の場合の振幅のほうが負極性の場合よりも少し高いことが示されている。

図4 (A) の実線は降雨時における正コロナ電流と B 导体表面の正極性電界強度との関係を示す。図中に示されるある電界強度における垂直実線上の 2 点は、不規則なコロナパルス電流 (図6 (B) 参照) によって VTVM の針が振動するため、その読みによるコロナ電流の最大値と最小値をそれぞれ示す。この図中に記入されている点線は、導体に十分水滴が付着するまで水をスプレーしたあとにスプレーを停止し、直ちに導体に電圧を印加して、すみやかに電圧を上昇させながら VTVM でコロナ電流値を測定したコロナ電流特性である。図4 (B) は負コロナ電流特性で前図と大きな相違はない。

図5は導体下に多数の水滴がついた状態で、スプレーを停止した場合の表1に示す3種類の導体における正コロナ電流特性である。導体直径が大きいほど個々の水滴が大きいため、図に示すようにコロナ電流は一般に大きく、コロナ開始電界強度  $E_{o2}$  は小さい。これらの直線の延長を点線とすると、これらの点線と  $E_{o2}$  から立ち上がる

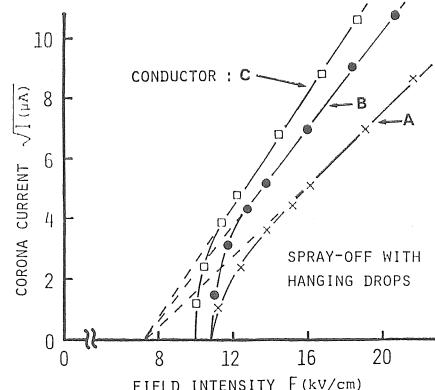


図5 3種類の導体からのコロナ電流特性

Fig. 5 Corona current characteristics of three conductors. (See Table 1)

った実線と一致するところが図4で示した  $E_{ad}$  (値は表2 参照) とほぼ一致する。そして、これらの点線は横軸上の 1 点に集まる傾向を示すが、この物理的意味は明らかでない。

スプレーがある場合もない場合も、コロナ開始電界強度以上で正極性の場合に正パルス、負極性の場合にはトリチエリパルスがシンクロスコープで確認された。しかし、導体には大小さまざまな水滴が付着し、同一電圧でもそれぞれ放電形式が異なるので、きれいな波形ではなかった。そして、電源電圧の関係で付着水滴からのスペーク電圧は確認しなかった。なお導体に水滴が 1 滴も付着していないきれいな状態で、20 kV/cm 以下では導体

表面からのコロナ放電は生じなかった。これらのこととは表1の他の2種類の導体についても同様であった。

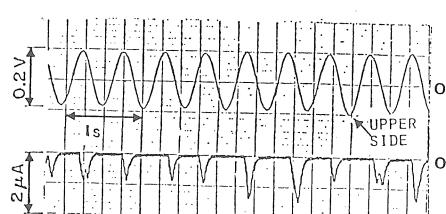
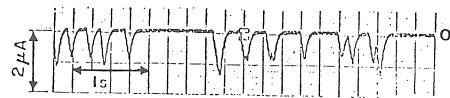
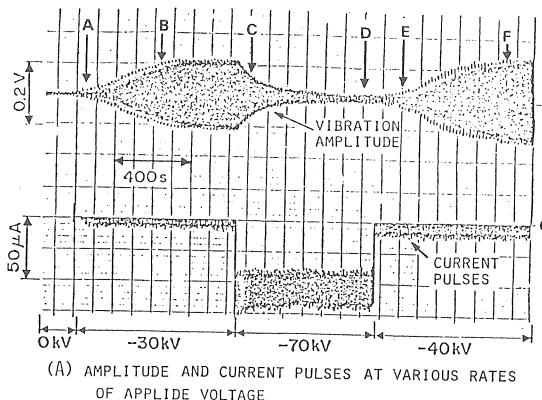
図3と図4(A), (B)を比較して、まず降雨時のコロナ電流開始電界強度( $E_{o1}$ )と振動開始の電界強度( $E_{vo}$ )との間に次の関係がある。

$$E_{o1} \approx E_{vo} \quad (2)$$

表2 コロナ電流特性と振動特性における電界強度 $E$ (kV/cm)(図3, 4参照)

Table 2 Field intensity  $E$  (kV/cm) for the corona current and the vibration characteristics. (See Figs. 3 and 4)

Conductor	A	B	C
$E_{o1}$	+ 5.0, - 5.2	± 4.9	± 4.8
$E_{o2}$	± 11.0	± 10.8	± 10.2
$E_{ad}$	+ 13.0, - 12.3	+ 12.0, - 11.7	+ 10.8, - 10.5
$E_{vo}$	± 5.3	± 5.5	± 5.6
$E_{vm}$	± 9.6	± 9.5	± 10.0
$E_{vs}$	± 1.35	± 12.5	± 12.2



次に付着水滴のみのコロナ開始電界強度( $E_{o2}$ )と振動の最大振幅時の導体表面の電界強度( $E_{vm}$ )との間に次の関係がある。

$$E_{o2} \approx E_{vm} \quad (3)$$

最後に図4中の実線と点線が一致するところの電界強度( $E_{ad}$ )と振動振幅が急激に減少する電界強度( $E_{vs}$ )との間には次の関係がある。

$$E_{ad} \approx E_{vs} \quad (4)$$

表2に3個の導体A, B, Cについての上述の特性電界強度の実験値を示す。この表より、(2), (3), (4)式の関係が直径の異なる3個の導体についても同様に成立することが確かめられた。

### 3.2 振動振幅変化によるコロナ電流パターンの分類

図6(A)は導体Bの場合の導体印加電圧に対する振動振幅とコロナ電流振幅の振動の確立ならびに減衰時のペシレコーダの記録である。前に述べたように、導体の振動振幅は-9.3 kV/cm(V=-40 kV)で最大となり、また、-16.14 kV/cm(V=-70 kV)で非常に小さくなる。導体の振動振幅が大きくなる-7 kV/cm(V=-30 kV)

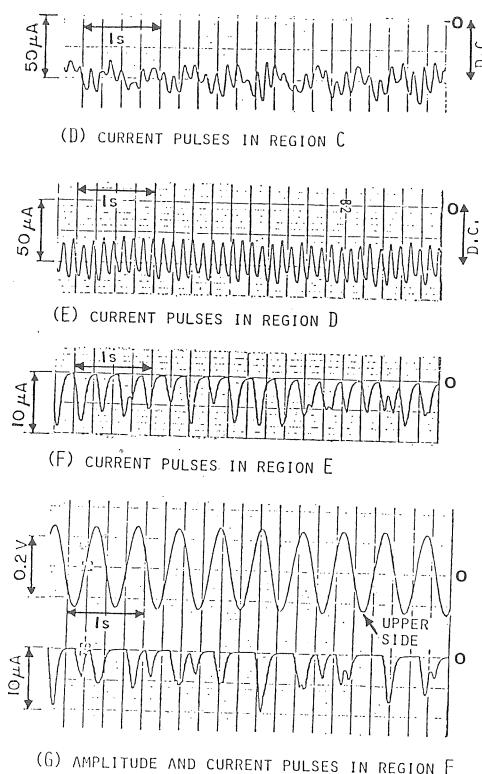


図6 負電圧での振動が異なる場合の振動振幅とパルス電流

Fig. 6 Amplitude and current pulses at various rates of vibration at negative voltage.

および  $-9.3 \text{ kV/cm}$  ( $V = -40 \text{ kV}$ ) では図 6 (A) で明らかのようにコロナ電流は DC を含まないが、振動がほとんどない  $V = -70 \text{ kV}$  ではこの DC 分 (約  $60 \mu\text{A}$ ) が大きくなる。これらのコロナ電流の状態をはっきりつかむために、図 6 (A) の図中に示す A ~ F の点に対応する電流波形を図 6 (B) ~ (G) に示す。

図中の A 点は  $-30 \text{ kV}$  で振動が定常状態になっていない振動確立途上であって、図 6 (B) に示すように導体からランダムに落下する水滴によるコロナ電流パルスはランダムに発生している。これに対して図 6 (A) の B 点は振動が定常状態になり、図 6 (C) に示すように電流パルスと導体の固有振動 (1.84 Hz) との間に同期現象がみられる。この電流パルスは振動導体が下側から上昇するときに発生するものと考えられる。

図 6 (D), (E) はともに  $-70 \text{ kV}$  のときの振動減衰時の C 点およびほとんど振動停止状態の D 点のコロナ電流であって、ともに DC を含んでいる。前者の波形は不規則であるが後者は規則正しいパルス波形 (7.7 Hz) で固有振動数の 4 倍強の周期を持っている。これら二つの電流波形のときは、あとに示すように非常に小さな水滴が円錐状に付着水滴から分離されるのが観察され、文献 9, 10) に記載されているヒッシングコロナが発生する領域であって、このことが電流波形の DC 分に相当するものと考えてさしつかえない。

図 6 (F), (G) は  $-40 \text{ kV}$  における電流パターンで、前者は振動確立途上であって電流パルス周波数 (3.48 Hz) は固有振動数のほぼ 2 倍である。後者は一見不規則に見えるが導体振動の 1 周期内に 1 または 2 回の電流パルスが発生しており、ある意味では電流パルスは導体振動周期と同期していることになる。この振動周期内に 2 回パルスが発生するのは導体最下位にあるときだけでなく、最上位にあるときにも水滴分離が行なわれていることを意味する。ただし、後者のパルス値は前者より一般に小さい。この  $-40 \text{ kV}$  のときに、DC 分を含まない電流パルス値が最大になって振動振幅が最大となる。

図 7 に示すように正極性の場合にも前述の負極性の場合と同様の結果が得られた。すなわち  $+40 \text{ kV}$  の振動振幅最大の場合に DC 分を含まないパルス値が最大になり、 $+60 \text{ kV}$  の振動減衰時の場合には DC 分を含んだ電流パルスが得られた。

### 3.3 分離水滴の形状

前節でのコロナ電流波形は 40~50 個の付着水滴それぞれからのコロナ電流 (電圧が低いときは放電に関係しないものもある) の合成によるものである。したがって観察を簡単にするために、図 1 のスプレイの代りに注射針を用いて導体の 1 点に水滴 (水道水) を落下させた。図

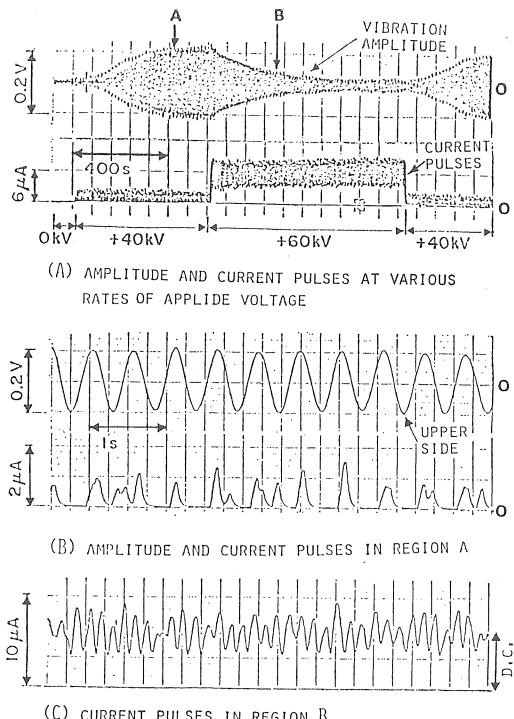


図 7 正電圧での振動が異なる場合の振動振幅とパルス電流

Fig. 7 Amplitude and current pulses at various rates of vibration at positive voltage.

8 は種々の印加電圧に対するコロナ電流パターンである。図 8 (A) および (B) に示す 1 個の水滴分離における電流パルスの値とパルス数は印加電圧とともに大きくなる。印加電圧が  $-40 \text{ kV}$  (この値のときに振動振幅は最大になる) 以上に大きくなると図 8 (C) ならびに (D) に示すようにコロナ電流には DC 分を含むようになる。これらの図でパルス状のときがクラックリングコロナで、パルスのない領域での放電がヒッシングコロナ<sup>8)</sup>だと考えている。このような同一電圧のもとで水滴 1 滴 (ただし、常時水は針より供給されている) からのコロナ放電に二つの放電状態が存在することが理解される。

図 9 は種々の印加電圧に対する水滴の形状を示す。図 (A) は  $-30 \text{ kV}$  での図 8 (A) に記入してある時刻  $t_1$  および  $t_2$  における付着水滴と分離水滴の形状を示している。分離水滴は  $-30 \text{ kV}$  ではほぼ円形状であるが、図 9 (B) に示すように  $-40 \text{ kV}$  では分離水滴は長く伸びた状態になる。 $-40 \text{ kV}$  以上では、図 9 (C) ならびに (D) に示すように付着水滴は円錐形になり、非常に小さい水滴 (ヒッシングコロナ状態)、またはかなり大きな水滴 (クラックリングコロナ状態) が分離される。そして、付着水滴の高さはかなり大きな水滴が分離した直

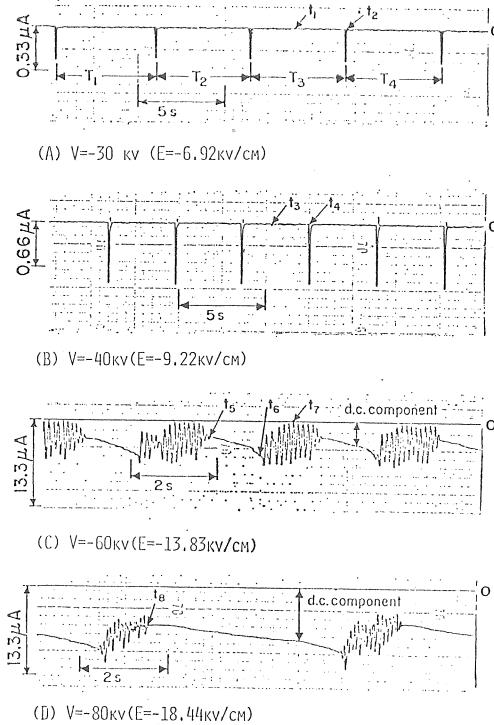


図8 負電圧変化における水滴1個のコロナ電流

Fig. 8 Corona current of one drop at various rates of negative voltage.

後、すなわちクラックリングコロナの終了直後が最も低くなる。このときは図8(C)の図中に示す時刻  $t_5$  であって、そして図9(C)で付着水滴の高さ  $h$  について次の不等式が成立する。

$$h_5 < h_7 < h_6 \quad (5)$$

そして、時刻も  $t_5$  から  $t_6$  の間に付着水滴の高さ  $h$  は  $h_5$  から  $h_6$  まで増大し、水滴先端の電界集中も増加することとなって、図8(C)の  $t_5$  から  $t_6$  まで DC 分のコロナ電流は増大する。

なお、図8(C)と(D)を比較して、ヒッシングコロナに相当する DC 分の時間間隔ならびにその値は印加電圧の増加とともに増大して、その結果として、降雨時に振動振幅の減衰の原因となる大きな DC 分を含むことになる。

#### 4. 減衰エネルギー、機械的エネルギーおよび電気的入力エネルギー

図1で導体に外力を加えて振動を発生させたのち放電すると自由減衰振動をとる。このときのペンレコーダから得られた減衰振動数と振幅との特性を図10に示す。このようにセミログ紙で直流になることは減衰振動の包

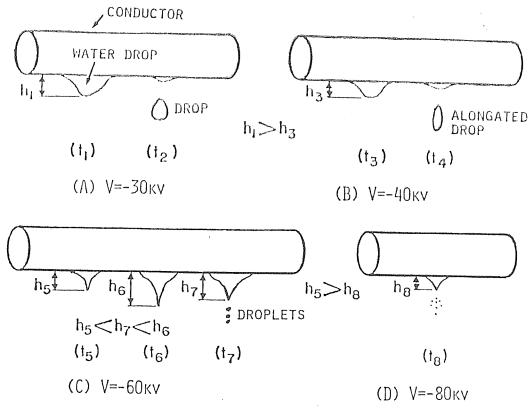


図9 負電圧変化における水滴1個の挙動(図8参照)

Fig. 9 Behaviors of one drop at various rates of negative voltage. (See Fig. 8)

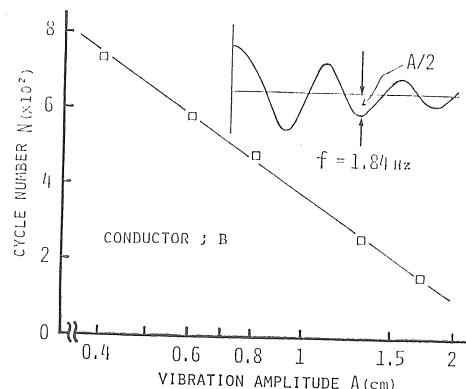


図10 減衰振動特性

Fig. 10 Damping oscillation characteristics.

絡線が指數関係であることを示している。この減衰振動中の導体に働く力の総和はゼロであり、したがって、導体の運動方程式は次式のようになる。

$$m\ddot{y} + \gamma\dot{y} + ky = 0 \quad (6)$$

ただし、 $y$  は導体の変位、 $m$  は導体の質量、 $\gamma$  は摩擦係数、 $k$  はバネ定数である。

バネ系の固有周波数

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{k/m} \quad (7)$$

を使用すると(5)式は次のようになる。

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = 0 \quad (8)$$

$$\zeta = \gamma/2\sqrt{mk} \quad (9)$$

減衰振動系なので  $\zeta$  は 0 から 1 の範囲となり、 $y$  は次のように書かれる。

$$y = y_0 \exp(-\zeta\omega_n t) \sin(\omega_d t) \quad (10)$$

ここで、 $\omega_d$  は減衰周波数 ( $=\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ ) である。1 周期  $T_d$  間の減衰エネルギー  $W_d$  は(6)式の第2項を 0 か

ら  $T_d$  まで積分して得られる。

$$W_d = \pi \gamma \omega_d y_0^2 \quad (11)$$

ここで、 $\gamma$  は自由減衰振動の記録波形の包絡線の傾き(図 10 参照)から決定される。つまりこの傾きは  $-\gamma/2m$  に等しいので  $\gamma$  は対数減衰率  $\delta = 2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2} = \pi\gamma/m\omega_d$  から決定される。そして、振動 1 周期に電源から供給される電気的エネルギー  $W_f$  は

$$W_f = VIT_n \quad (12)$$

で表わされ、 $T_n$  は振動の 1 周期間 ( $2\pi/\omega_n$ ) である。最後に、機械的エネルギー  $W_m$  すなわち運動または位置エネルギーは  $[mj^2/2]$  なので 1 周期の  $W_n$  の平均エネルギーは次式のようになる。

$$W_m = (1/2)m\omega_d^2 y_0^2 \quad (13)$$

導体の振動振幅とコロナ電流の実験データから  $W_d$ ,  $W_f$  および  $W_m$  が電界強度の関係として算出され、その結果を図 11 に示す。 $W_d$  と  $W_m$  の両方とも  $y_0^2$  に比例しているが、 $\omega_d > 1$  の関係のため  $W_m$  の増加率は  $\omega_d$  の増加率よりも大きい傾向を示す。

系のダンピングテストより得られた減衰エネルギー  $W_d$  は定常振動状態の系の消費エネルギーと等しいと考えられるから、振動系の効率  $\eta$  は次式のように示される。

$$\eta = (W_d/W_f) \times 100(\%) \quad (14)$$

図 11 に示した  $\eta$  は明らかにたかだか 1 % である。

### 5. コロナ放電による振動の機構について

導体の振動とコロナ電流パルスとの間の同期化に関する上記の議論と、これに対して種々の電界強度における分離された水滴の形状に関する議論から次の振動確立機構が考えられる。

まず最初に、高電圧が印加されるときに、付着水滴はそれが水滴を分離するまで静電気力を受けて引っ張られ、結果として導体に吸引力が働くことになる。それから分離した荷電水滴<sup>9)</sup>と付着水滴との間に働くクーロン斥力などが導体を押し上げる。その間に、付着水滴は失った水滴を補充して再び静電気力を受けて引っ張られる。これに反して、導体は最下位にあるときその方向変化によって静電気的斥力に寄与する。また、水滴はある運動量をもって分離されるので、上向きの反作用が導体に作用する。この過程が繰り返されて、振動振幅の増大とともに反作用力も大きくなり、導体の振動振幅は導体の上下運動が水滴の分離と同期するまで増加する。

実際に図 6 (B) から振動が確立する間にコロナ電流パルス(その周波数が水滴の分離する周波数に等しい)はしばらくの間ランダムに分布していることがわかる。これに対して、振動振幅が大きくなり定常状態になると水滴の分離する周波数図 6 (C) は、振動の固有周波数に等

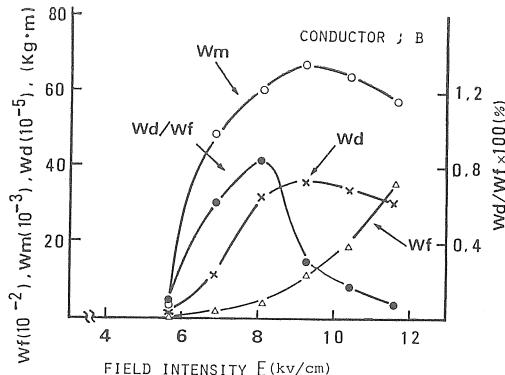


図 11 定常振動でのエネルギーの特性

Fig. 11 Energy characteristics in steady state vibration;  $W_f$  is the input electrical energy,  $W_d$  is the damping energy and  $W_m$  is the mechanical energy during one period.

しくなる。

### 6. ま と め

以上の導体のコロナ振動に関しての実験に基づく検討を要約すると次のようである。

- (1) 印加電圧を徐々に上昇させた場合、初めて導体振動が開始する条件は次の場合である。
  - (a) 分離した水滴の形状がほとんど円形になる。
  - (b) 導体表面の電界強度がスプレイがある場合のコロナ電流開始電界強度とほぼ等しくなったときで、このときのコロナ電流は直流分を含まないパルス電流である。
- (2) 振動の振幅が最大になるのは次の場合である。
  - (a) 長く伸びた水滴が付着水滴から分離される。
  - (b) コロナ電流のパルス振幅が最大になる。そして、この周波数が系の固有周波数に等しいか、ときには 2 倍になるときである。
  - (c) 導体表面の電界強度が付着水滴のみが存在する場合に得られるコロナ電流開始電界にほとんど等しい。
- (3) 振動が減衰するのは次の場合である。
  - (a) 非常に小さな水滴だけが付着水滴から分離する現象(ヒッシングコロナが生じた場合)が生じてコロナ放電電流が大きな直流分を含む。
  - (b) 直流電界強度が二つのコロナ電流と電界強度との曲線(降雨がないときとあるとき、ただし、どちらの場合も付着水滴は存在する)がほぼ一致するところの電界強度に等しい。
- (4) 電圧を急に印加した場合、徐々に振動振幅が増加

はじめて初期にランダムなコロナ電流パルスは振動の確立過程で少しずつ振動数と同期はじめる。コロナ電流のパルスが同期すると振動振幅は急に増加して最後に一定振幅で安定な振動を維持する。

(5) 振動減衰エネルギーは機械的エネルギーおよび電気的入力エネルギーに比較して非常に小さい。

本研究について、ご討議いただいた九州大学赤崎正則教授、九州大学原雅則助教授、放電研究会の方々ならびにご支援いただいた山口大学樋崎久矩教授に深く感謝する。

### 参考文献

- 1) T.G. Davis : IAS '77 Annual, 24-E (1977), 587.
- 2) 川崎元之, 高城 実, 足立宜良: 静電気学会講演論文集 '79, p. 81 (1979).
- 3) 熊谷三郎, 長屋 準: 電気学会誌, 53, 6 (1933), 426.
- 4) A. Edwards : Electra, 12 (1970), 33.
- 5) 武藤三郎, 津田一男, 渡辺高宏: 名古屋工業大学学報, 5, 16 (1954), 118.
- 6) 吉田定博, 松林義数: 住友電気, 送電線特集号 (1958), 74.
- 7) S.K. Shah and D.J. Morgan : IEEE Trans. Power Appr. Syst., A-78 (1978), 168-F.
- 8) 足立宜良, 増田閃一, 阿久津顯右: 電気学会論文誌 A, 52 (1977), 256.
- 9) M. Akazaki : IEEE Trans. Power Appr. Syst., 84 (1965), 1.
- 10) M. Hara, S. Ishibe and M. Akazaki : J. Electrostatics, 6 (1979), 235.
- 11) 足立宜良, 川崎元之, 岸本勝美: 静電気学会誌, 4, 1 (1980), 44.
- 12) 足立宜良, 川崎元之: 同上, 2, 3 (1978), 158.