

水滴付着高圧導体の振動とコロナ放電の関係

羽野光夫*・谷辺俊幸**・柴田典顕***・渡部雅人****・足立宜良*****

A Relation between Corona Discharge on Water Drop Beneath
a High Voltage Conductor and Conductor-vibration

Mitsuo HANO, Toshiyuki TANIBE, Noriaki SHIBATA, Masato WATABE
and Takayoshi ADACHI

Abstract

Vibration of a transmission-line conductor is set up by corona discharge on water drops hanging beneath the conductor under rainy weather. This corona-induced vibration of a transmission-line conductor has become more serious problem owing to the rise of transmission voltage. The purpose of this study is to make the mechanism of corona-induced vibration clear.

In this experiment, vibration waveform and corona current waveform were recorded. Moreover, photographs of a water drop were taken. By means of those waveforms, a peak value of corona current, vibration amplitude, outbreak frequency of corona current pulse and a phase lag angle between corona current and vibration were measured.

The main results are summarized as follows;

- (1) The occurrence of corona current pulses causes vibration.
- (2) Corona current pulses are synchronized with vibration. This synchronization promotes vibration.
- (3) There is a phase lag angle, γ , between corona current and vibration. When γ is near $\pi/2$, vibration amplitude grows radically with increasing field intensity. Meanwhile, when γ is allowed to come near π by too much field intensity, vibration falls off.
- (4) In the decline of vibration, corona current contains d.c. component. This d.c. component hastens the decline and stops vibration.

1. ま え が き

送電線におけるコロナ障害として電力損失, ラジオ雑音¹⁾, イオン流帯電²⁾, 送電線振動等が挙げられる。近年電力系統の拡大は著しく, これに伴って上記諸障害は重要な研究課題となっている。送電線振動についてもすでに多くの研究報告^{3~6)}がなされているがその振動機構を解明するにはいたっていない。そこで本研究では振動機構解明の基礎研究として模擬送電線装置を試作してコロナ放電と振動の関連性について実験検討を行った。

送電線のコロナ振動は雨天時に起きることが報告されている⁷⁾が, この時送電線に働く作用力として

- (1) コロナ放電時に発生する空間電荷と送電線の間のクーロン斥力
- (2) 帯電落水滴と送電線間のクーロン斥力
- (3) 付着水滴落下によるクーロン引力の減少
- (4) 付着水滴落下による重力の減少
- (5) コロナ放電に伴って生じるイオン風^{8,9)}の反作用力等が考えられる。本研究では主として(1)の空間電荷によるクーロン斥力に注目して実験を行った。

実験では, まず付着水滴を一滴だけにしてコロナ電流を観測して水滴付着時のコロナ放電モードを明らかにした。次に多数の水滴を付着させて導体を振動させ, このときのコロナ電流を付着水滴一滴の場合と比較することによってコロナ放電と振動の関連を考察した。またコロナ電流と振動の位相差という観点から解析を

* 電気工学科

** 大学院電気工学専攻

*** 電気工学科 (現・九州電気工事(株))

**** 電気工学科 (現・三洋電機(株))

***** 電気工学科 (現・大分大学工学部電気工学科)

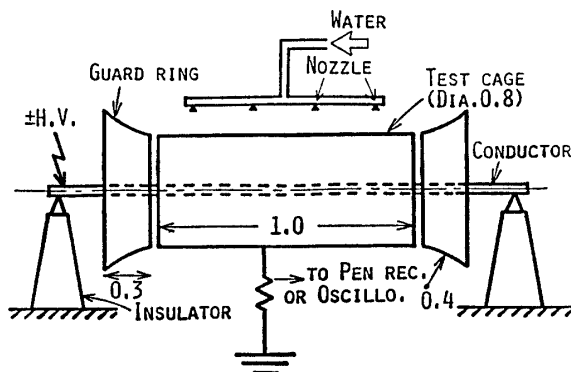
試みた。なお実験は大気中、室温で行った。

2. 実験装置および方法

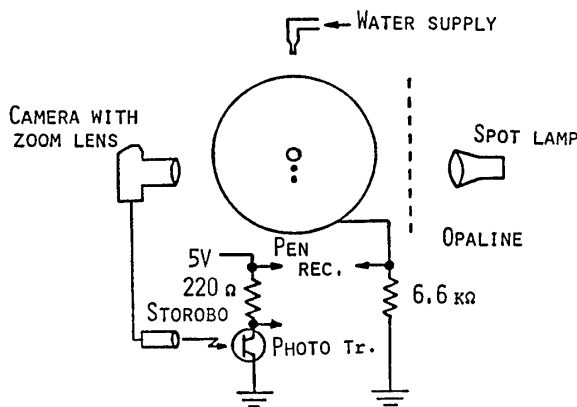
模擬送電線実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。内径 80 cm の外部円筒導体の中心軸上に長さ 3 m のスチール製円筒からなる内部導体（以下導体と略す）が両端支持で設置されている。外部導体は 5 mm メッシュの金網製で三部分に分かれている。長さ 30 cm の両端部は縁効果対策¹⁰⁾用のもので、長さ 1 m の中心円筒内の電界が軸方向で一様になるようにしている。導体は径の異なるもの数本を用意したが、導体の表面電界強度（以下電界強度と略す）をパラメータとすればコロナ放電特性に大きな差のないことを確認した後、振動数の点で付着水滴撮影に有利な直径 1.0 cm の導体を使用した。なお電界強度 E は次式から計算によって求めた。

ただし、 V (kV) は印加電圧、 a (cm) は導体半径、 b (cm) は外部導体半径である。

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



(a) a front view



(b) a side view

Fig. 1 Experimental apparatus.

水の供給は、付着水滴一滴の場合には針状ガラス管で行い、振動実験の場合には四本のノズルによるシャワーで行った。付着水滴一滴の場合には水量の変化による影響をすでに検討している¹¹⁾ので、今回供給水量はコロナ放電モードを明確にするのに適した 0.85 cc/min 一定とした。一方シャワーの場合には、振動振幅に供給水量が影響しない範囲内で、本研究では降水量 15 mm/hour 一定のもとで実験を行った。なお供給水は一般の水道水を利用しており、その導電率は約 260 μ S/cm である。

実験は、導体に正負直流高電圧を印加してコロナ電流波形をペンレコーダ（渡辺 WTR 331 型）で記録することによって行った。併せて、付着水滴観察のために写真撮影を行った。このとき付着水滴形状とコロナ電流波形の相関をみるために、写真撮影時にストロボを発光させ、この光をフォトトランジスタで受光することによってチェックを行った (Fig. 1 (b))。また振動実験の際には、ベークライト棒を介して導体の一端に接続したストレインゲージの出力として振動波形を取り出している。この振動波形とコロナ電流波形の間には位相差が存在し電界強度によって変化するが、二つの波形を同時記録することによってこれを測定した。

本実験装置のような同軸円筒電極における水滴がない場合のコロナ開始電界強度 E_c は

$$E_c = 31.0\delta(1 + 0.301/\sqrt{r\delta}) \text{ (kV/cm)} \quad (2)$$

である¹²⁾。ただし、 δ は相対空気密度、 r (cm) は導体半径である。そこで $\delta=1$, $r=1.0$ cm として本実験装置における E_c を求めると約 44 kV/cm となる。一方、使用した電源で得られる最大電界強度は約 31 kV/cm である。このため水滴がない場合のコロナ放電については測定を行っていないが、通常の送電線の電界強度は 15~20 kV/cm である¹³⁾ので本研究の目的のためには十分な電界強度であると思われる。

3. 実験結果および検討

3.1 付着水滴一滴の場合のコロナ放電

これまでにガラス細管先端の付着水滴一滴からのコロナ放電についての研究^{14~16)}はなされているが導体付着水滴一滴についての研究はほとんどなされていない。

Fig. 2 に付着水滴一滴の場合のコロナ電流波高値特性を、Fig. 3 に代表的な電流波形を示す。付着水滴からのコロナ放電はその電流波形から三つのモードに分類される (Fig. 2 の I, II, III)。電界強度がコロナ

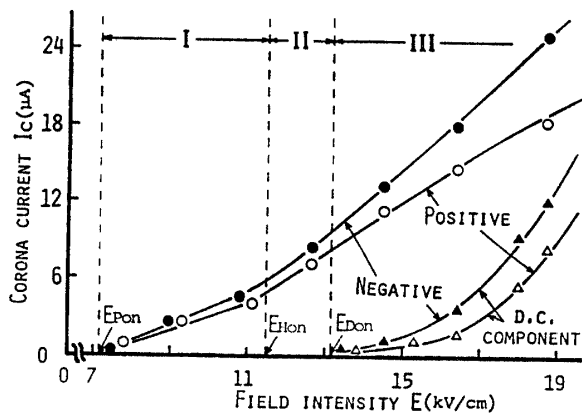
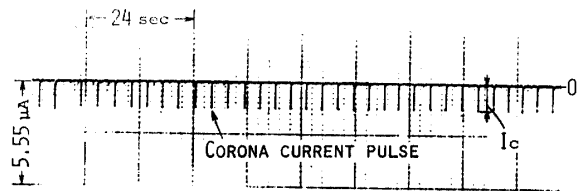
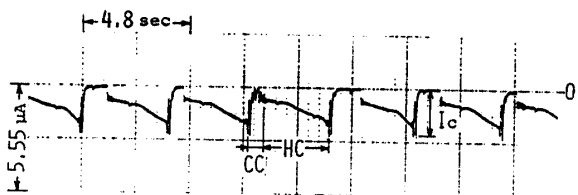


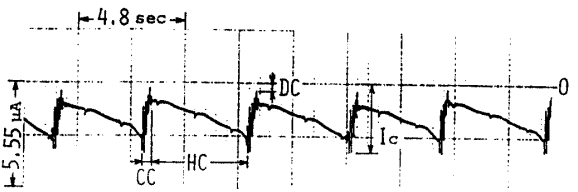
Fig. 2 Characteristics of height of corona current and d. c. component at one drop.



(a) $E = -10.4$ kV/cm



(b) $E = -12.3$ kV/cm



(c) $E = -13.8$ kV/cm

Fig. 3 Corona current waveforms at one drop.

電流パルス開始電界強度 E_{Pon} ($=7.1$ kV/cm) を越えると導体から水滴が落下する瞬間にコロナ放電が起きるようになる。水滴の落下と同期してコロナ電流パルス (Fig. 3 (a)) が発生するこの領域 I を電流パルス領域と名付ける。さらに電界強度が大きくなりヒッシングコロナ開始電界強度 E_{Hon} ($=11.5$ kV/cm) を越えると、付着水滴からもコロナ放電が起きるようになる。これは付着水滴が円錐状に伸長しその先端からコロナ放電が行われるものでヒッシングコロナ放電¹⁷⁾ (以下 HC 放電と略す) と呼ばれている。また水

滴落下時には小さな水滴が連続的に落下する。このときのコロナ放電はクラッキングコロナ放電¹⁷⁾ (以下 CC 放電と略す) と呼ばれている (Fig. 3 (b))。この HC 放電と CC 放電が交互に起きる領域 II を HC 領域と名付ける。電界強度が直流分開始電界強度 E_{Don} ($=13.0$ kV/cm) より大きい領域 III を直流分領域と名付ける。この領域におけるコロナ放電形態は領域 II と同様であるが、CC 放電終了時にコロナ電流が零にならないのが特徴である (Fig. 3 (c))。

コロナ電流波高値 I_c は電界強度の増大に伴って単調に増加している。このことからコロナ放電が起きた瞬間に導体に作用するクーロン斥力は、電界強度が増大すればするほど強くなると考えてよいであろう。なお、負極性の方が正極性よりも I_c が大きくなるのは、同一電界強度においては付着水滴先端の実際の電界強度が負極性の方が正極性よりも大きくなっているためと考えられる。これは、負極性では付着水滴が大きく伸長するのに対して正極性では空間電荷による電界弱め効果によって付着水滴の伸長が妨げられるためである。

3.2 振動時のコロナ放電

シャワーによって導体に多数 (40~50個) の水滴を付着させて高電圧を印加すると振動が起きる。このときのコロナ電流波形を Fig. 4 に示す。それぞれの電界強度は (a) と (b) が領域 I, (c) が領域 II, (d) が領域 III に属している。また、付着水滴の写真を振動波形とあわせて Fig. 5 に示す。(a) は領域 II, (b) は領域 III におけるものであり、(c) には比較のために付着水滴一滴の場合の領域 I におけるものを掲げた。なお、振動周波数は 3.75 Hz となっており導体固有振動数の計算値 3.71 Hz と約 1% の誤差で一致した。

領域 I では、付着水滴一滴の場合と同様に水滴の落下と同期してコロナ電流パルスが発生する。しかし、付着水滴が多数存在するために波高値が揃っていない。ここで付着水滴のうち一滴だけが落下したときに生じる波高値がほぼ等しい小さなパルスを標準パルスと名付ける。一方付着水滴が複数個同時に落下したときに生じる波高値の大きなパルスを同期パルスと名付ける。まだ振動が起きていない Fig. 4 (a) ではコロナ電流パルスの発生は不規則で発生頻度も小さいが、振動開始領域の (b) では波高値が増すとともに発生頻度も増加している。

領域 II では付着水滴一滴の場合には HC 放電が発生するが、振動時には領域 I と同様にコロナ電流パルスが発生している。この状態は領域 III まで続く。これは振動時には導体が最上点から下がり始めた時に

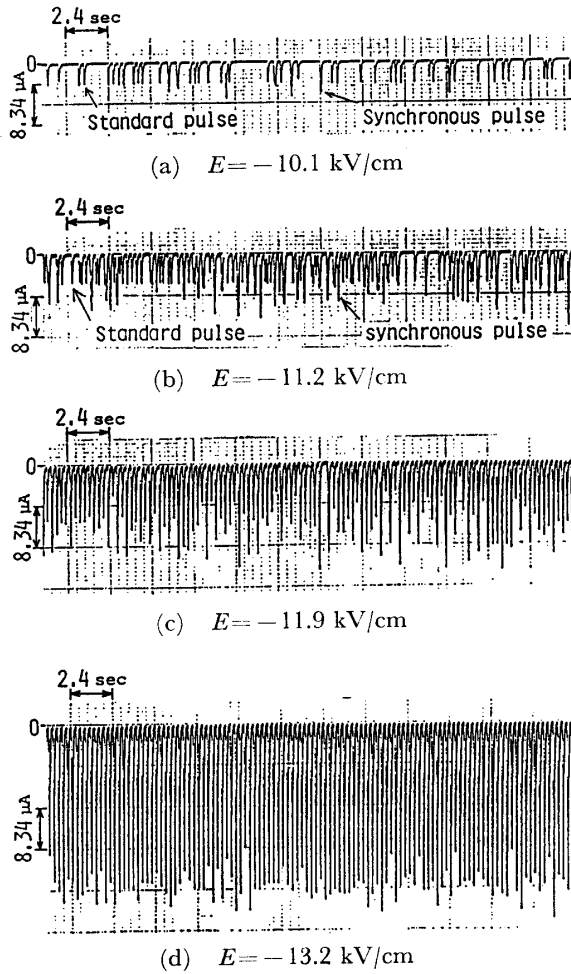


Fig. 4 Waveforms of corona current under shower.

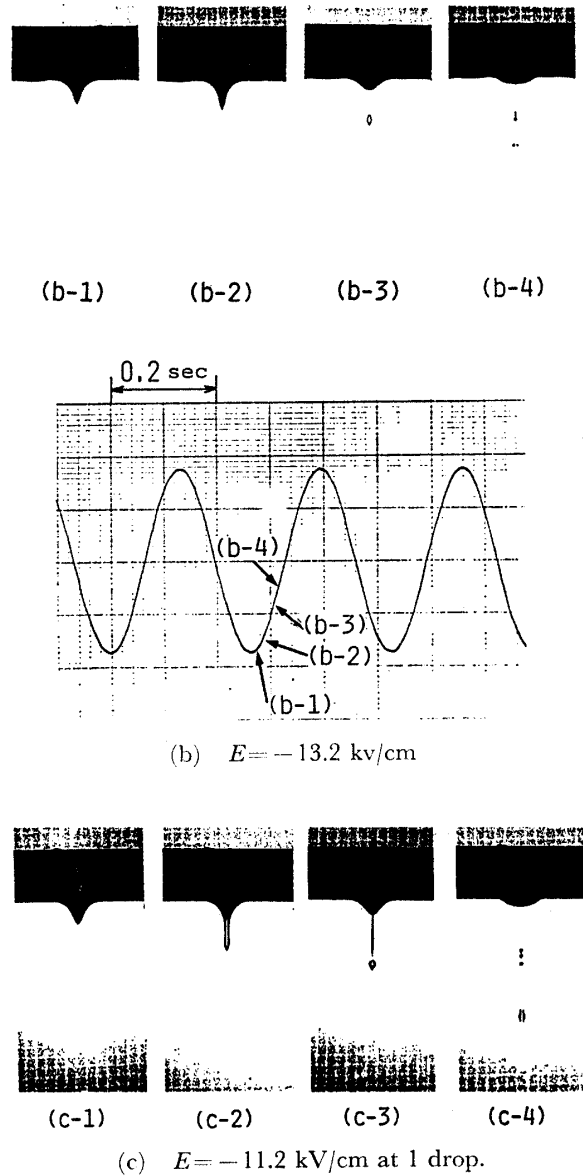
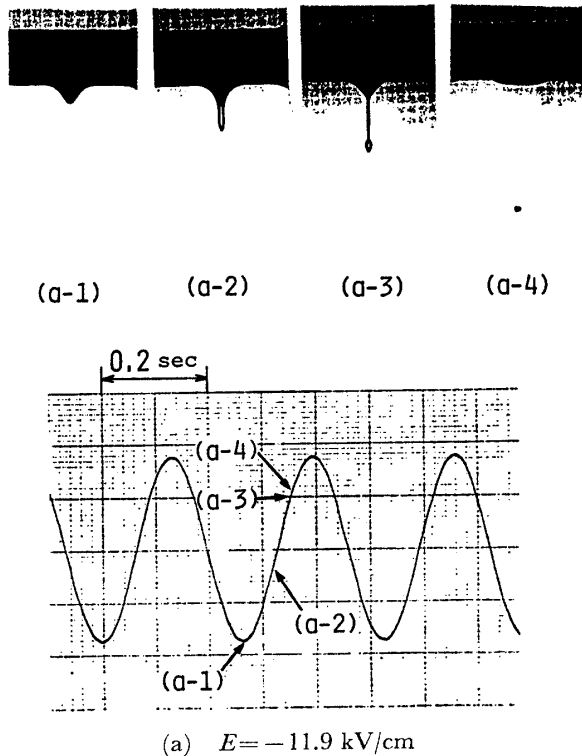


Fig. 5 Water drop figure and vibration waveform.

付着水滴先端が慣性のために押しつぶされコロナ放電が停止するためと考えられる。しかしながら、さらに電界強度が大きくなって約 14 kV/cm を越えると振動による付着水滴の押しつぶし効果に電界が打ち勝つために HC 放電が持続し、コロナ電流波形に直流分が現われる。いったん直流分が現われるとこれに伴って振動が停止するために各々の付着水滴が独立して HC 放電と CC 放電を繰り返す、コロナ電流波形は不規則になる。

コロナ電流パルスが発生している領域においては電界強度の増大に伴って全パルス数に対する同期パルスの発生比率が増し、かつパルス波高値が揃ってくる。同期パルスの発生比率が増すことは、多くの付着水滴が同じ挙動をとり落下が同期するようになることを意

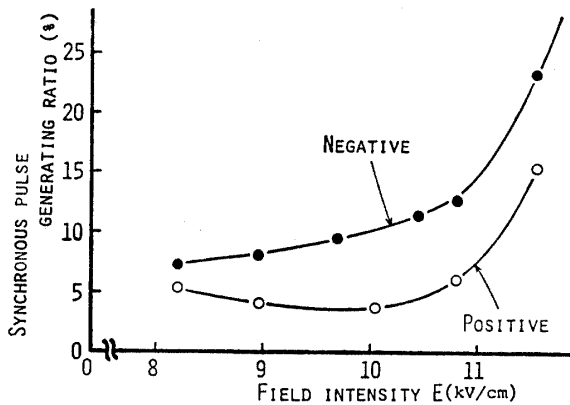


Fig. 6 Characteristics of synchronous pulse generating ratio.

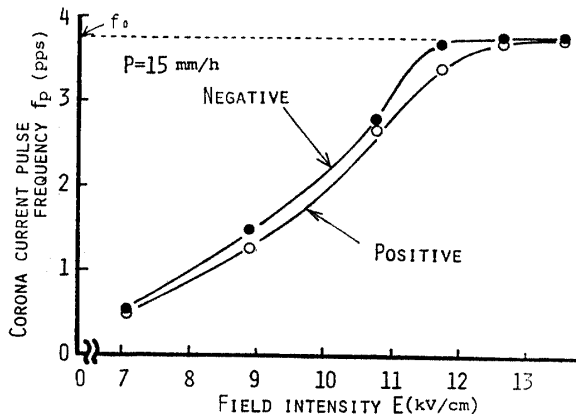


Fig. 7 Characteristics of corona current pulse frequency.

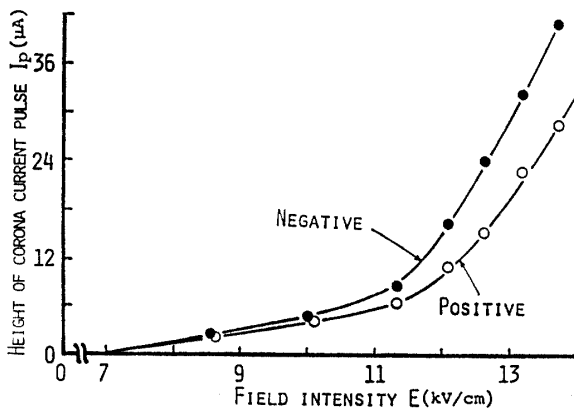


Fig. 8 Characteristics of height of corona current pulse under shower.

味している。同期パルス発生比率は当初横ばい状態であるが、電界強度が 11 kV/cm を越す付近から急激に増加している (Fig. 6)。これは振動の開始によるものと考えられ、これについては後述する。また、当初不規則だった電流パルスの発生が電界強度の増大に伴っ

て周期性をもつようになる。その周波数 f_p は振動周波数 f_0 ($=3.75 \text{ Hz}$) に一致してくる (Fig. 7)。電界強度が約 12 kV/cm で f_p は f_0 とほぼ一致している。 f_p と f_0 の一致は振動の一周期の間に水滴が一回落下することを意味している。

次にコロナ電流パルス波高値 (平均値) の特性を Fig. 8 に示す。振動時においても電界強度の増大に伴ってパルス波高値は増加し続ける。したがって、振動時においても電界強度が大きいほどクーロン斥力は大きいと考えてよいであろう。

3.3 振動振幅特性

Fig. 9 に振動振幅特性を示す。電界強度約 11 kV/cm で振動が開始する。この振動開始電界強度 $E_{v, on}$ は領域 I に属しているから、コロナ電流パルスの発生が振動開始の条件であると思われる。ただし $E_{v, on}$ は $E_{P, on}$ より約 4 kV/cm も大きくなっている。これは導体支持部分や振動測定装置の取り付け部分の機械抵抗のために $E_{P, on}$ 付近ではクーロン斥力が小さ過ぎて振動が起きないものと考えられる。振動が開始すると Fig. 6 および Fig. 7 にみられたように急激に水滴の落下が振動に同期してくる。これは、振動時には導体が最下点から上昇し始めた時に慣性のために水滴が落下するようになるからである。

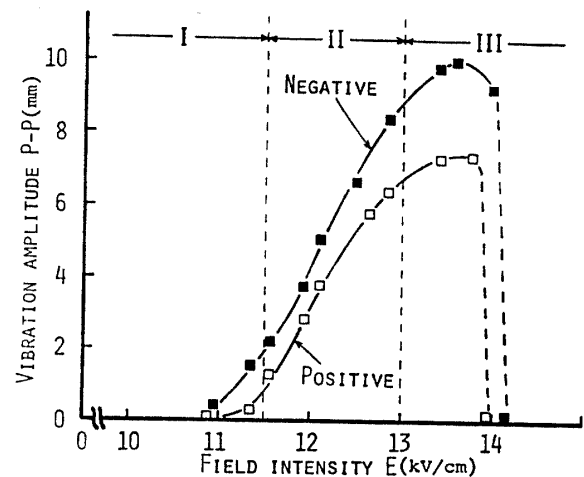


Fig. 9 Characteristics of vibration amplitude.

領域 II では電界強度が大きくなるにしたがって振動振幅が急激に増加している。領域 II ではコロナ電流パルスの波高値増加と振動への同期化が行われていることは前節で述べた。したがって、波高値増加によるクーロン斥力の増大とともに、このクーロン斥力が振動と同期して作用することが振動振幅の増加に寄与していると考えられる。そこで振動の立ち上がり実験を行ってみた。これは振動停止状態において電圧を急

激に印加したもので、その結果を Fig. 10 に示す。(a) は立ち上がり途中、(b) は定常状態における振動波形とコロナ電流波形である。(a) と (b) の間でコロナ電流パルス波高値にはほとんど差が認められない。すなわちクーロン斥力はほぼ等しいはずである。しかし、コロナ電流パルスの発生が振動と同期することによって振動振幅は大きく増加している。

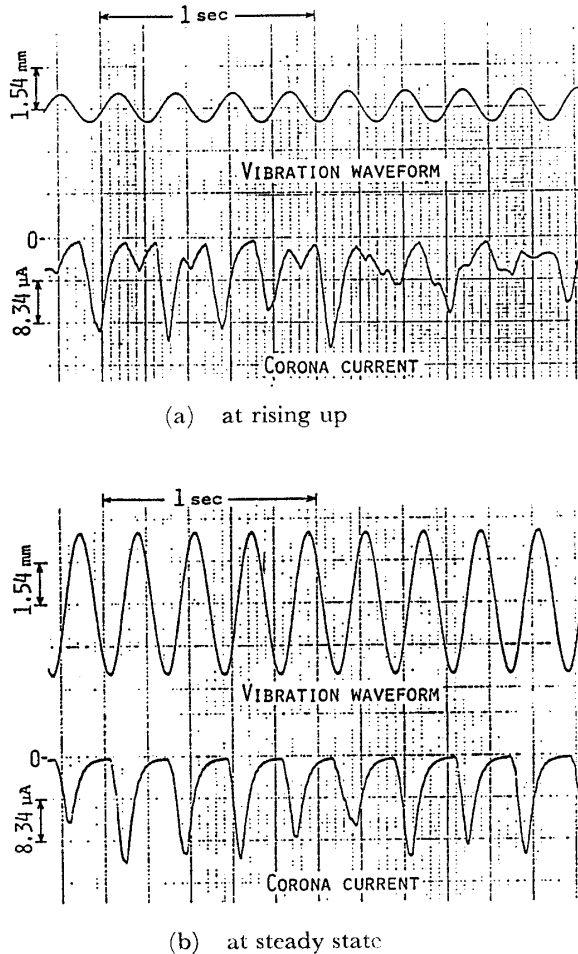


Fig. 10 Waveforms of vibration and corona current in rising up. ($E = -12.3$ kV/cm)

領域 III ではコロナ電流パルスは波高値が領域 II よりもさらに増加し、かつ振動と同期して発生している。にもかかわらず振動振幅の増加は頭打ち状態となり、電界強度が約 13.5 kV/cm を越すと逆に減少させている。電界強度が約 14 kV/cm になると振動は急激に減衰し停止にいたる。この振動減衰時の振動波形とコロナ電流波形を Fig. 11 に示す。振動減衰時にはコロナ電流波形に直流分が現われている。そして振動振幅が減少していくにしたがって直流分はさらに増加し、コロナ電流パルスと振動の同期も崩れてくる。このために振動は加速度的に減衰してしまう。このよう

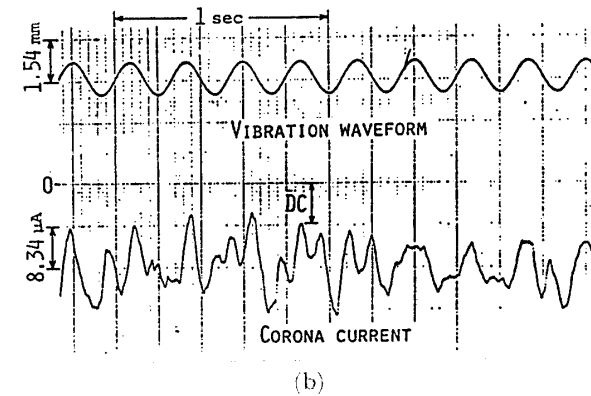
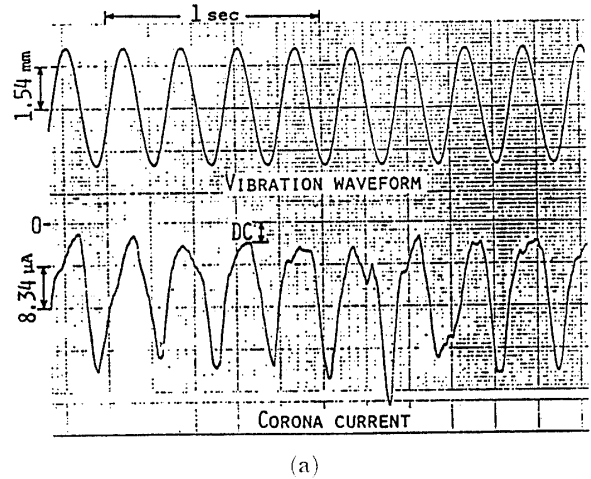


Fig. 11 Waveforms of vibration and corona current in damping. ($E = -14.2$ kV/cm)

にコロナ電流における直流分の発生が振動の減衰に関与していると考えられるが、振動減衰の直接の原因ではないと思われる。すなわち、別の原因（これについては次節で検討する）によって減衰は開始する。これが電界強度 13.5 kV/cm 付近からの減衰である。そして振動がある程度減衰するとコロナ電流に直流分が現われる。これは振動の減衰によって付着水滴の押しつぶし効果が弱くなるためと思われる。直流分は振動減衰と相乗関係にあるため、いったん直流分が現われると振動は急激に減衰し、ついには停止してしまう。これが電界強度約 14 kV/cm における振動停止であり、このようにコロナ電流直流分は振動の減衰を促進する効果をもつと考えられる。

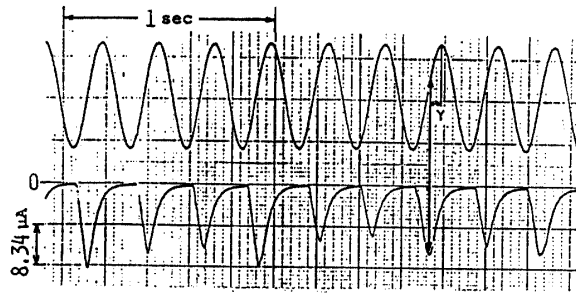
なお、同一電界強度において負極性の方が正極性よりも振動振幅が大きいのは、コロナ電流波高値が大きいため、換言すればクーロン斥力が大きいためと考えられる。

3.4 コロナ電流パルスと振動の位相差

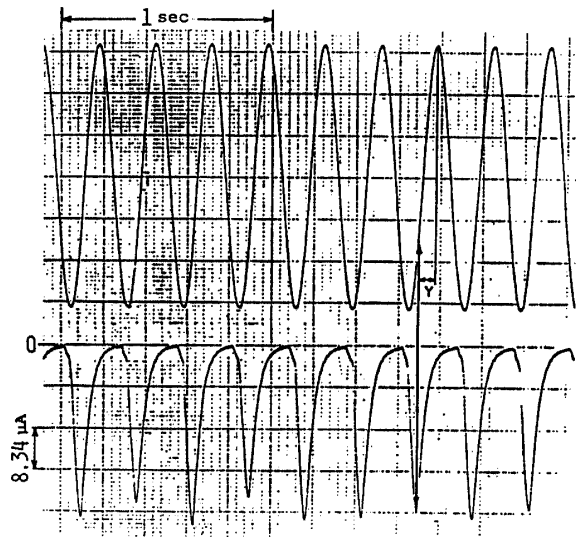
Fig. 12 に示すように、コロナ電流パルスと振動の

間には位相差 γ が存在しその値は電界強度によって変化する。この γ の特性を Fig. 13 に示す。

Fig. 12 と Fig. 5 を比較すると、それぞれ電界強度 11.9 kV/cm では (a-3), 13.2 kV/cm では (b-3) でコロナ電流が最大となっている。そこで両方の付着水



(a) $E = -11.9$ kV/cm



(b) $E = -13.2$ kV/cm

Fig. 12 Waveforms of vibration and corona current in steady state.

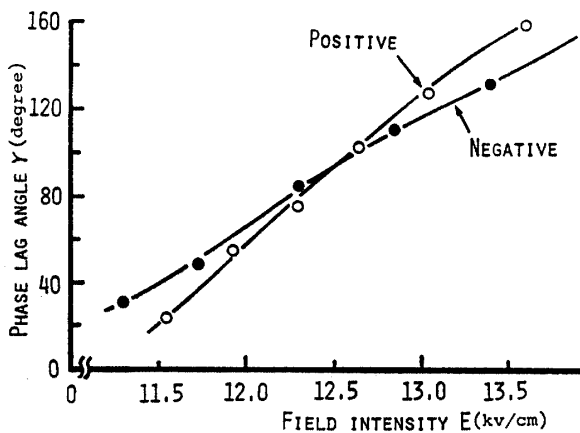


Fig. 13 Characteristics of phase lag angle.

滴写真を比較すると、付着水滴の形態は同様で落下寸前である。すなわち、コロナ電流パルスと振動との位相差とは付着水滴の落下時点と振動との位相差に他ならない。したがって電界強度の増大に伴って位相差 γ が増加するという事は、導体が最下点にある時点からの付着水滴の落下の遅れが小さくなるということである。ここで振動中の付着水滴の挙動を考えてみる。付着水滴の動きは振動と同期しているものの粘性のために振動よりも位相が遅れていると想像される。したがって、導体が最下点から上昇し始めたときに付着水滴は下方に取り残された格好で伸長することになる。そしてその先端部が落下することになるが、ある長さに伸長するまでの時間表面張力によってもちこたえている。付着水滴に作用する主な力は上向きに表面張力、下向きに重力と電気力であるから、電界強度が小さくて電気力が小さい場合には付着水滴が大きく伸長して重力が増加するまで落下が起きない。これに対して電界強度が大きい場合には電気力が大きいから付着水滴はまだ小さい段階で落下してしまう。以上が電界強度の増大に伴って位相差 γ が大きくなる原因であると考えられる。

前節で述べたように、領域 III においては電界強度を大きくしても振動振幅の増加は頭打ち状態となりついには減少し始める。ここで述べてきたコロナ電流パルスと振動との位相差がその原因であると考えられる。すなわち、一定の作用力で振動振幅を最大にする位相差が存在し、この位相差から作用時点がずれると作用力の有効度が減少する。実際には作用力であるクーロン斥力が変化するため位相差と振動振幅との関係は単純ではない。電界強度の増大に伴って位相差と作用力はともに単調増加するから、両者と振動振幅の間には以下のような関係があると考えられる。まず、位相差が最適値に近付いている段階では振動振幅は順調に増加する。次に、位相差が最適値を越すと作用力が有効に働かなくなるが、作用力の増加がこれを補い得る領域では振動振幅は増加し続ける。しかし、位相差が最適値からあまりにかけ離れると、作用力が増加してもそのほとんどが無効になるために振動振幅は減少してしまう。以上のように位相差、作用力と振動振幅との関係には三つの段階があるが、この点について簡単な解析を試みたので次に述べる。

3.5 作用力と振動との位相差に関する理論解析

いま簡単のために実験装置の振動系をばね系と等価とおくことによって、導体の振動を調和加振力を受ける減衰のある一自由度系強制振動¹⁸⁾として取扱う。

調和加振力を $f \cos \omega t$ 、導体の変位を x 、質量を m 、

減衰係数を c , ばね定数を k とすると, 導体の運動方程式は

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \cos \omega t \quad (3)$$

となる. 左辺の各項は, それぞれ $m\ddot{x}$ が運動の時間的変化, $c\dot{x}$ が減衰力, kx が復原力を示している. ここで各項をベクトル表示してみる (Fig. 14). 導体の

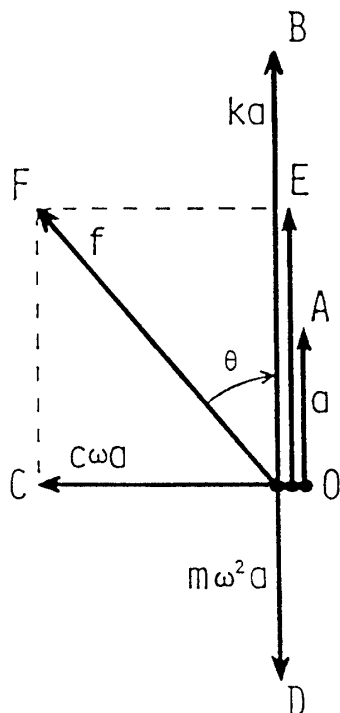


Fig. 14 Vectors of steady forced vibration.

振動周波数は調和加振力の周波数 ω と等しいから, 角速度 ω , 大きさ a の回転ベクトル \vec{OA} で導体の変位 x を表わすと, 復原力は \vec{OB} , 減衰力は \vec{OC} , 慣性力は \vec{OD} となる. (3) 式より加振力ベクトルは $\vec{OB} + \vec{OC} + \vec{OD}$ であるから, \vec{OF} となる. そして, 位相遅れ角 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \{ c\omega / (k - m\omega^2) \} \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (4)$$

と表わすことができる. この θ が前節で述べたコロナ電流パルスと振動との位相差 γ に相当するものと考えられる.

定常振動状態においては, 減衰力 $c\omega a$ と加振力の減衰力方向成分 $f \sin \theta$ が釣り合っていると考えられる. したがって, 振動振幅 a が増加すればこれに比例して減衰力が増加するから, $f \sin \theta$ が大きくなる必要がある. そのためには, 加振力を増して f を大きくするか, 位相角 θ を $\pi/2$ に近づけてやればよい. このことから最適位相差は $\pi/2$ であることがわかる.

測定回路の時定数やクーロン斥力の作用の機械的遅れ等の問題はあがるが, 一応ここでは $\theta \equiv \gamma$ として考察を行う. Fig. 13 より, γ が $\pi/2$ になるのは電界強度が約 12.5 kV/cm のときである. この値は領域 II に属し, この領域では振動振幅は急激に増加していた. これは, $\sin \gamma$ が 1 に近いとき電界強度の増大によるクーロン斥力 f の増加がそのまま $f \sin \gamma$ の増加となり, 効果的に振動振幅の増加をもたらしていると考えられる. 一方, 領域 III では $\sin \gamma$ が小さくなるために, f の増加にもかかわらず結果的には $f \sin \gamma$ が小さくなって振動が減衰すると考えられる.

以上述べてきたように, 非常に大まかな解析ではあるが, 作用力の大きさ f と位相差 γ の二つが振動振幅を決定する重要なパラメータであることが明らかになった. すなわち, 振動振幅は $f \sin \gamma$ に比例していると考えられる. したがって, 振動振幅が最大となる電界強度約 13.5 kV/cm で $f \sin \gamma$ が最大になっているはずである. しかしながら, $f \sin \gamma$ の値を求めることは非常に困難であり, この点は今後の課題である.

4. まとめ

本研究では, まず付着水滴を一滴にして高圧導体に水滴が付着した場合のコロナ放電特性を測定した. 次に, これと比較する形で振動時のコロナ放電特性を測定しその特徴を明らかにした. さらにコロナ電流波形と振動波形の位相差に注目することによってコロナ放電と振動との関連について検討した.

その結果, コロナ電流パルスの発生によって振動が開始することがわかった. そして, 振動が起きるとコロナ電流パルスの発生が振動と同期するようになる. このためにクーロン斥力が振動と同一周期で作用することになり, これが振動をさらに助長する. また, 振動がない場合にはヒissingコロナ放電が発生する電界強度領域においても, コロナ電流がパルス化されていることがわかった.

コロナ電流と振動の間に位相差 γ が存在し, その値は電界強度によって変化する. そして, 作用力の大きさを f とすると $f \sin \gamma$ が振動振幅を決定することがわかった. これによって電界強度が大きすぎると振動が減衰することを説明できた. また, 振動の減衰時にはコロナ電流に直流分が現われ, このために減衰が加速され振動停止にいたることがわかった.

以上のように, 振動の作用力をクーロン斥力と考えた実験検討を行い振動特性を説明することができた. しかし, 位相差の解析には大胆な仮定を用いており,

またクーロン斥力以外の作用力については考慮していない。今後は、これらの問題点に関して研究を進めていく必要があると考える。

最後に、本研究を行うにあたってご指導ご支援頂いた本学佐伯節夫教授，ならびに実験その他でご援助頂いた本学池田隆技官に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) M. Akazaki: IEEE Trans. Power Appl. System, **84**, 1 (1965)
- 2) M. Hara, S. Ishibe and M. Akazaki: Jour. of Electrostatics, **6**, 235 (1979)
- 3) 熊谷三郎, 長屋準: 電気学会誌, **53**, 426 (1933)
- 4) A. Edwards: Electra, **12**, 33 (1970)
- 5) 武藤三郎, 津田一男, 渡辺高宏: 名古屋工業大学学報, **5**, 118 (1954)
- 6) 吉田定博, 松林義数: 住友電気, 送電線特集号, 74 (1958)
- 7) 七里義雄, 松林義数, 村野正男, 村上繁吉: 電気学会誌, **77**, 18 (1957)
- 8) 足立宜良, 増田閃一, 阿久津顕右: 電気学会論文誌, **52**-A, 256 (1977)
- 9) 足立宜良, 川崎元之: 静電気学会誌, **2**, 158 (1978)
- 10) 足立宜良, 川崎元之, 岸本勝美: 静電気学会誌, **4**, 44 (1980)
- 11) 足立宜良, 川崎元之, C.L. Phan, 谷辺俊幸: 静電気学会誌 **5**, 89 (1981)
- 12) 赤崎正則: 「基礎高電圧工学」, 昭晃堂 (1980), p. 69.
- 13) 赤崎正則, 林石象: 電気学会誌, **88**, 908 (1968)
- 14) J. Zeleny: Proc. Cambridge, Philos. Soc., **18**, 71 (1915)
- 15) J. Zeleny: Phys. Rev., **10**, 1 (1917)
- 16) 渡辺彰: 応用物理, **37**, 314 (1968)
- 17) M. Hara, S. Ishibe, S. Sumiyoshitani and M. Akazaki: Jour. of Electrostatics, **8**, 239 (1980)
- 18) 前澤成一郎: 「振動工学」, 森北出版 (1973), p. 64.
(昭和 56 年 4 月 15 日 受理)