

論文

導体下部に付着している水滴1個のコロナ電流特性

足立宜良*, 谷辺俊幸*, 川崎元之**, C. LUAN PHAN***

(1980年5月16日受理)

Corona Current Characteristics of One Water Drop Hanging Beneath the Conductor

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

(Received May 16, 1980)

Corona discharge, which occurs from water drops hanging beneath a transmission-line conductor in rainy weather, causes vibration of the conductor. In recent years, this vibration phenomenon has become a serious problem following with the rise of the transmission-voltage. On the basic study to analyse this vibration phenomenon, the corona current characteristics in the case that a single water drop is hanging beneath the smooth conductor was measured. When field intensity is between corona-onset field intensity and hissing corona-onset one, corona current wave form is pulse shape. Peak value of the pulse becomes large with increasing field intensity and is independent of the volume of water supplied to the conductor. Besides, peak value of the pulse in negative corona is larger than that in positive corona. Frequency of the pulse increases with increasing both the volume of water and field intensity. Meanwhile, when field intensity is above hissing corona-onset field intensity, hissing corona and crackling corona repeat alternately. Each duration time of hissing corona and crackling corona has a maximum at a certain field intensity, and this field intensity of hissing corona is nearly equal to that of crackling corona. Moreover, this field intensity is lower in positive corona than in negative corona.

1. まえがき

送電線におけるコロナ放電に関しては、従来から電力損失¹⁾、コロナ雑音²⁾、イオン流帶電³⁾ならびに送電線振動などの観点から多くの研究がなされている。近年、送電電圧の上昇ならびに直流送電の検討に伴ってコロナ放電に基づく送電線の線振動が再び研究課題となってきた。この送電線の線振動に関しては、すでに多くの報告⁴⁻⁶⁾がなされているが、その振動機構を十分に解明するにはいたっていないようである。

われわれは、雨天下のコロナ放電による送電線振動機

構解明の基礎的研究として、振動しやすい4個のスプリングに支持された導体に水道水をスプレイしたときの導体のコロナ振動について実験検討⁷⁾を行なった。一般に雨天下におけるコロナ放電現象は多数の水滴が導体に付着したときの個々の水滴からのコロナ放電の合成されたものである。したがって、導体付着水滴1個におけるコロナ放電特性に関する研究は重要であって、これまでに水滴1個のコロナ放電について印加電圧変化に対応した水滴の挙動変化や粒径と比電荷の関係等の報告^{8,9)}がなされている。しかし、水滴落下と同期して発生するコロナ電流パルスの波高値特性とこの周波数の特性ならびにヒッシングコロナ放電（以下 HC 放電と略）とクラックリングコロナ放電（以下 CC 放電と略）¹⁰⁾の持続時間特性等に関する報告は見あたらないようである。そこで、これらの特性に着目して導体付着水滴が1個だけの場合におけるコロナ放電特性の実験を行ない検討したので報告する。

実験は、試作した同軸円筒型模擬送電線装置に直流高電圧を印加し、装置上部より針状ガラス管によって水道水を内部導体（以下導体と略）に供給して、導体に水滴を1個付着させてコロナ放電実験を行なった。まず電圧

* 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, Nishinippon Institute of Technology, Kanda-machi, Miyako-gun, Fukuoka 800-03, Japan

*** Faculty of Sciences, University of Quebec at Chicoutimi, 930 est, Rue Jacques-Cartier, Chicoutimi, Quebec, G7H 2B1, Canada

電流特性を測定することによってコロナ電流パルスおよび HC 放電が発生する条件について考察した。次にコロナ電流パルスの波高値特性とこの周波数特性ならびに HC 放電と CC 放電の持続時間特性を測定し検討を試みた。各特性のパラメータとしては導体の表面電界強度ならびに供給水量を用いた。また印加電圧の極性を変えることにより正極性と負極性の間の相違について検討した。なお、実験はすべて静止大気中において行なった。

2. 実験装置および方法

図 1 に同軸円筒型模擬送電線装置の概略図を示す。装置は同軸円筒状に設置された二つの導体からなっている。外部導体は内径 80 cm、長さ 1 m のスチール製金網（メッシュ、 0.5×0.5 cm）円筒で、この両端に中央部の円筒と絶縁した長さ 30 cm の縁効果対策を施した金網円筒を設けている。導体は実験の再現性を考慮して表面が滑らかな半径 1.0~2.5 cm、長さ 3 m のスチール製円筒である。

この導体の中央部の上方から針状ガラス管によって水道水を供給して、導体の下部に 1 個の水滴を付着させた。水の供給は水槽とガラス管先端との落差による自由落下方式で、供給水量は先端部の径が異なるガラス管を交換することによって変化させた。使用した水道水の導電率は $2.6 \times 10^2 \mu\text{S}/\text{cm}$ であった。

電源は AC 200 V, 60 Hz をトランスにより昇圧したのち半波整流しコンデンサによって平滑したものである。印加電圧はスライダックによって調整し、正負極性は整流部のダイオードの方向を変えることによって切り換えた。そして導体付着水滴からのコロナ電流の値は可動コイル型電流計（横河、2011 型）で測定し、電圧波形はペンレコーダ（渡辺測器、WT 331 型）で記録した。なお、シンクロスコープを用いての波形観測結果の検討は省略する。

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

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

である¹¹⁾。ただし、 δ は相対空気密度、 r は内部導体の半径 (cm) である。いま $\delta=1$ 、 $r=1.0$ cm として (1) 式より実験装置におけるコロナ開始電界強度を求めるところ約 44 kV/cm となる。一方、使用した電源の最大印加電圧は 70 kV で直径 1.0 cm の導体表面電界強度に換算すると約 31 kV/cm に相当する。このために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、通常の送電線で用いられる電界強度は 15~20 kV/cm である¹²⁾ので本実験の目的のためには十分な電界強度であると思われる。

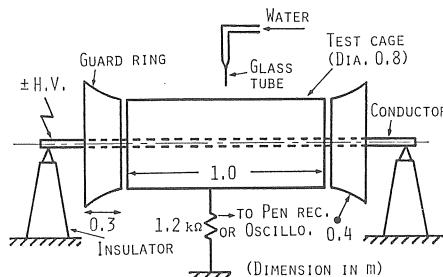


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

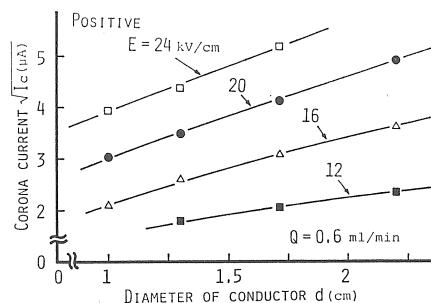


図 2 導体径-コロナ電流特性

Fig. 2 Corona current characteristics vs. diameter of conductor.

3. 実験結果および検討

3.1 コロナ放電特性

導体の直径を変化させた場合のコロナ電流特性を電界強度をパラメータとして図 2 に示す。この図から明らかなように、同一電界強度においては導体径が大きいほどコロナ電流が大きくなる。今回の実験では、電界強度を広範囲に変えられるという理由から主として直径 1.0 cm の導体を使用した。なお本論文で用いている電界強度とは導体の表面における電界強度であって、次式によつて計算した。

$$E = V / \{r \ln(R/r)\} \quad (\text{kV/cm}) \quad (2)$$

ただし、 E は表面電界強度 (kV/cm)、 V は印加電圧 (kV)、 r は導体半径 (cm)、 R は外部導体半径 (cm) である。

図 3 は電流計で測定したコロナ電流特性である。図 3 (a) は導体に水滴を付着させ水の供給がない場合、図 3 (b) はガラス管によって連続的に水を供給した場合における特性である。図 3 (a) では導体に水滴を付着させたのち、すみやかに電圧を上昇させてコロナ電流を測定したので、とくに図 3 (b) の領域 I での特性と大きな相違がある。そして、コロナ放電状態で電圧を一定に保つと円錐状の付着水滴先端から霧状の小さな水滴を多数放

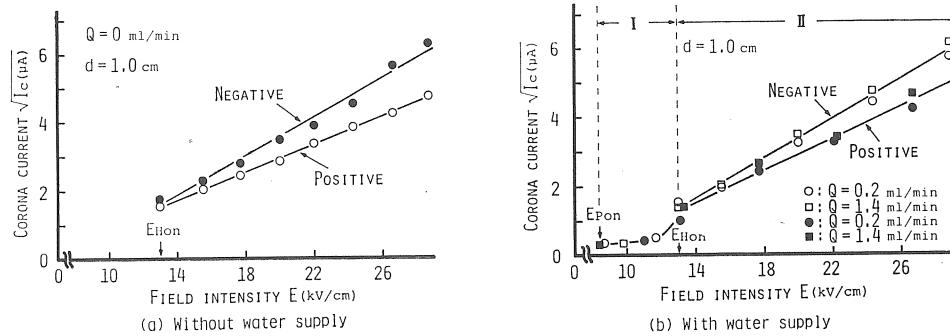


図 3 コロナ電流特性

Fig. 3 Corona current characteristics.

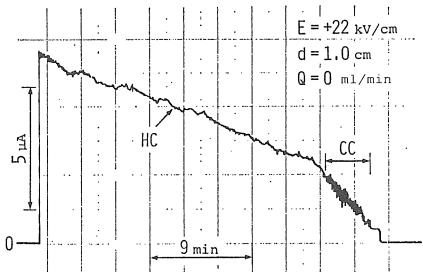


図 4 水の供給がない場合の 1 個の付着水滴からのコロナ電流特性

Fig. 4 Corona current characteristic of one water drop without water supply.

出しながら HC 放電を行なうため円錐状の水滴は時間とともに徐々に小さくなり、これに対応してコロナ電流も減少する。この一例として電界強度が +22 kV/cm のときのコロナ電流特性を図 4 に示す。

水を連続的に供給した場合、電界強度がコロナバルス放電開始電界強度 E_{Pon} より大きくなると水滴が導体から落下する瞬間にコロナ放電が起こるようになる。このときのコロナ電流波形は図 5 (a) に示すようにパルス波形となり、パルスの発生は水滴の落下と同期している。このような状態で高電圧導体から落下する水滴の状態については原ら⁸⁾が写真撮影を行ない検討している。

電界強度がさらに大きくなり HC 放電開始電界強度 E_{Hon} を越えると図 5 (b) に示すように HC 放電と CC 放電を交互に繰り返し、常にコロナ電流が流れようになる。ここで、コロナ電流パルスの発生する領域（電界強度が E_{Pon} 以上、 E_{Hon} 以下の領域）を領域 I、HC 放電と CC 放電を繰り返す領域（電界強度が E_{Hon} 以上の領域）を領域 II と定義する。

E_{Pon} と E_{Hon} の測定値ならびに計算値を表 1 に示す。ここでの計算値は実験式である次式⁸⁾を用いて求め

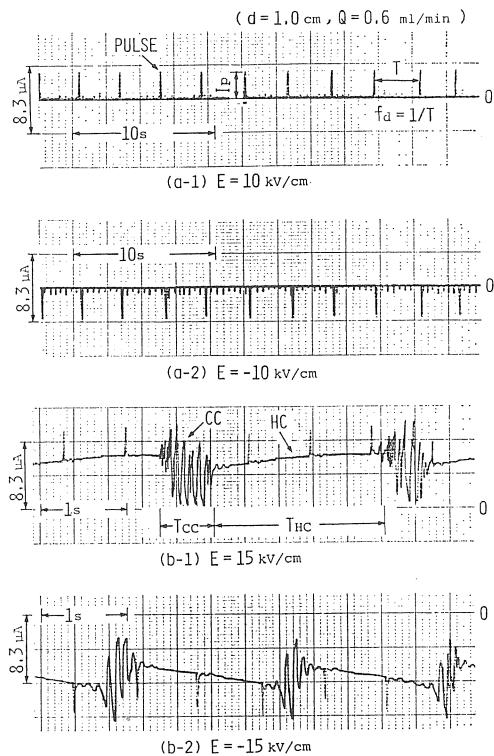


図 5 コロナ電流波形

Fig. 5 Waveforms of corona current.

た。

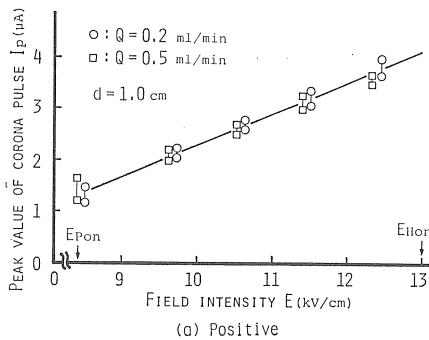
$$E = K (1 + H/r) \quad (3)$$

ただし、 K および H は定数、 r は導体半径 (cm) である。この表に示したように測定値と計算値との間にかなりよい一致が得られた。なお表から明らかなように、 E_{Pon} および E_{Hon} は導体径が大きいほど小さくなる傾向にある。導体径が異なると E_{Pon} および E_{Hon} が異なるのは、導体表面に付着しうる水滴の大きさに差があ

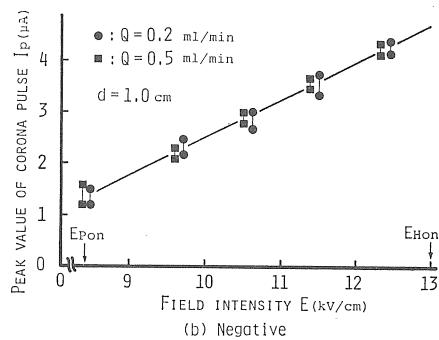
表 1 コロナパルス放電およびヒッシングコロナ放電の開始電界強度

Table 1 Onset field intensity of corona pulse discharge and of hissing corona discharge.

Dia. of conductor <i>d</i> (cm)	Measurement		Calculation	
	E_{Pon} (kV/cm)	E_{Hon} (kV/cm)	E_{Pon} (kV/cm)	E_{Hon} (kV/cm)
1.0	8.4	13.0	8.1	14.3
1.3	7.4	12.8	7.1	13.1
1.6	6.6	12.1	6.4	12.3
1.7	6.6	11.0	6.2	12.0
2.2	5.6	10.4	5.6	11.2



(a) Positive



(b) Negative

図 6 コロナパルス波高値特性 (図 5 (a) 参照)

Fig. 6 Characteristics of peak value of corona pulse. (See Fig. 5 (a))

ること、外部導体ならびに水滴との相対的関係が異なることなどのためと考えられる。さらに、本論文で使用している電界強度は導体の表面電界強度であって、付着水滴先端部における実際の電界強度ではないことも考慮する必要がある。

次にコロナ電流値の特性について考察する。領域Ⅰにおいては水滴が導体から落下する瞬間にのみコロナ放電が起きてコロナ電流が流れるのであって、導体に付着している水滴からのコロナ放電は起きない。したがって水の供給がなければコロナ電流値はゼロであり(図5(a)の E_{Hon} 以下を参照)、水を供給している場合でも水滴落下時以外は電流計はゼロを指示している。

領域Ⅱになると、円錐状に伸びた付着水滴の先端から水の微粒子が霧状に射出されるHC放電が起こる。導体への水の供給がなければ円錐状付着水滴は徐々に小さくなっている、図4に示したようにコロナ電流が減少していく。反対に付着水滴先端から射出される微粒子の総水量より多い水を供給してやると円錐状付着水滴は徐々に成長していく。コロナ電流が増加する(図5(b)のHC領域参照)。そして付着水滴の成長がある点まで達するとCC放電が起きる。このとき、付着水滴先端から比較的大きな粒子が多数連続的に射出されて円錐状付着水滴

は小さくなり、コロナパルスを含むコロナ電流は減少する。そして、ある値になるとコロナパルスを含まないHC放電に移行する。

領域Ⅱにおいてコロナ電流値の平方根をとったものと電界強度はほぼ比例している。また同一電界強度におけるコロナ電流値は負極性のほうが大きい。この一因として、同一電界強度においては負極性のほうが付着水滴のHC放電時における成長が大きいために、付着水滴先端の実際の電界強度が正極性より大きくなっていると予想されることが挙げられる。なお領域Ⅰでは極性による相違がはっきりしていないが、負極性のほうがコロナ電流値が大きくなっているようである。

3.2 コロナパルス放電特性

図5(a)に示したコロナパルス波高値 I_p の特性を図6に示す。電界強度が E_{Pon} になるとコロナパルスが発生し、以後電界強度が高くなるにつれてその波高値 I_p はほぼ直線的に増加する。供給水量を 0.2 ml/min から 2.8 ml/min まで変化させたが I_p への影響はほとんど認められなかった。このことから、同一電界強度においては供給水量にかかわらず落下水滴の大きさが一定になっているものと考えられる。印加電圧の極性による比較を行なうと、同一電界強度においては負極性のほうが I_p

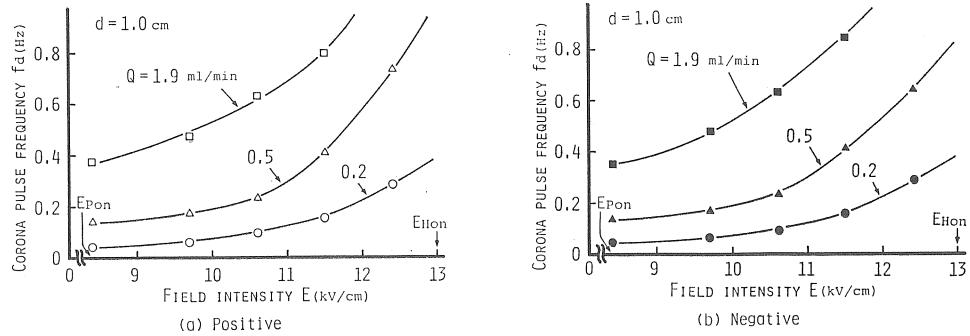


図 7 コロナパルス周波数特性

Fig. 7 Frequency characteristics of corona pulse.

が大きくなっている。この原因としては、先に述べたように付着水滴先端における実際の電界強度が負極性のほうが高くなっていることが考えられる。

図 5 (a) のコロナ電流パルスの周期 T の逆数であるコロナパルス周波数 f_d の特性を図 7 に示す。電界強度が高くなるにしたがって供給水量が一定にもかかわらず f_d が増加していることから、落下水滴が小さくなっていることは明らかである。 f_d の増加は電界強度が 11 kV/cm 以下の領域ではごくわずかであるが、11 kV/cm 以上になると f_d が急激に増加する。また供給水量を増やしてやると f_d が増加するのは、電界強度が等しければ導体からの落下水滴の大きさが供給水量によらず一定であることから当然である。これらの特性において、正負極性による差異はほとんど認められなかった。

3.3 HC 放電および CC 放電の持続時間特性

電界強度 E_{Hon} 以上における HC 放電持続時間 T_{HC} の特性ならびに CC 放電持続時間 T_{CC} の特性をそれぞれ図 8 ならびに図 9 に示す。電界強度が高くなるにしたがって当初 T_{HC} は増加していくが、ある電界強度において最大となり以後電界強度が高くなるにしたがって逆に減少していく。この T_{HC} が最大となる電界強度は正極性において約 20 kV/cm、負極性において約 28 kV/cm であった。また、 T_{CC} も T_{HC} と同様に電界強度に対して山形の特性を示す。そして T_{CC} が最大となる電界強度は T_{HC} が最大となる電界強度とほぼ一致している。なお、正極性の場合、電界強度が 25 kV/cm より大きくなると T_{CC} が再度増加しているが、これは付着水滴 1 個による CC 放電が持続していると考えるよりも、図 8 (a) に見られるようにこの領域では T_{HC} が非常に短時間になっており、かつ HC 放電の発生も不規則になるために見掛け上 T_{CC} が増加していると考えるのが妥当と思われる。

T_{HC} および T_{CC} が以上のような特性を示すのは以下

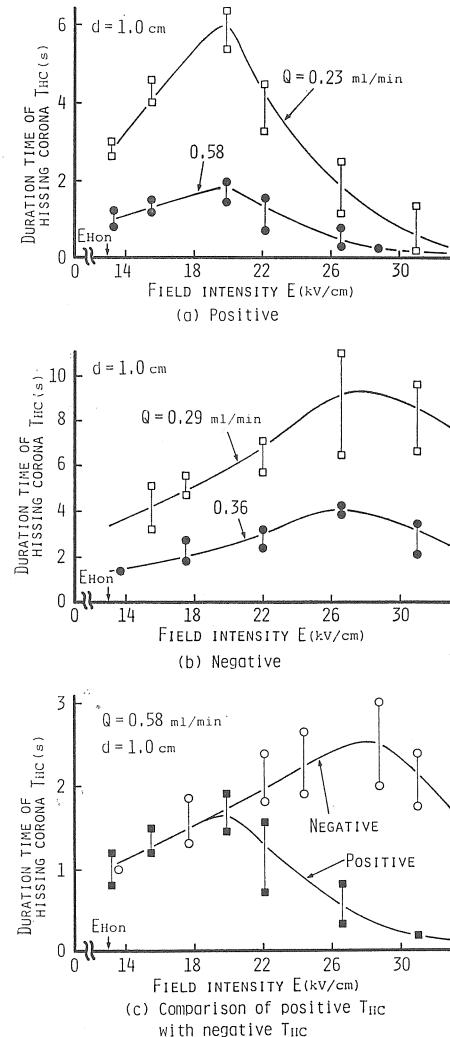


図 8 ヒッシングコロナ放電持続時間特性

Fig. 8 Duration time characteristics of hissing corona discharge.

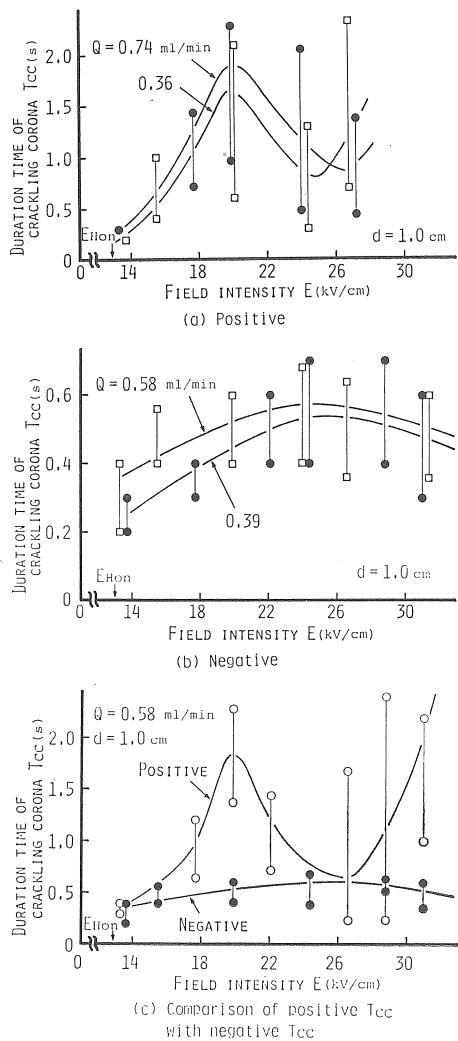


図 9 クラックリングコロナ放電持続時間特性

Fig. 9 Duration time characteristics of crackling corona discharge.

のような理由によると思われる。電界強度が高くなると CC 放電の際に水滴を射出する力が強くなるため慣性力が強く働き CC 放電が長時間持続するようになり、CC 放電終了時において導体表面に残存する付着水滴の水量が少なくなる。このため導体に供給される水量が一定であれば次の CC 放電が開始するまで付着水滴が成長するのに要する時間、すなわち T_{HC} が長くなる。一方では、電界強度が高くなるほど付着水滴の成長が進まないうちに CC 放電が開始するようになる。すなわち CC 放電の開始時点での付着水滴水量が少なくなる。このため CC 放電は短時間で終了する。そして次に CC 放電が開始するまでの時間である T_{HC} も短くなる。以上述べた二つの現象のうち前者のほうが強く影響している領域で

は T_{HC} および T_{CC} が増加し、反対に後者のほうが強く影響している領域ではこれらが減少するものと思われる。

正極性のほうが T_{HC} および T_{CC} が最大となる電界強度が低いのは、正極性のほうが同一電界強度における付着水滴水量が少ないために後者の影響が負極性より強く働くためと思われる。また、上述のように T_{HC} と T_{CC} は密接な関係にあるためにそれぞれが最大となる電界強度がほぼ一致したと考えられる。

T_{HC} 特性においては電界強度の低い領域 (13~20 kV/cm) では極性による相違は認められない。しかし、正極性のほうが電界強度が低い時点で T_{HC} の減少が始まるため、電界強度が 20 kV/cm より高くなると負極性のほうが T_{HC} が長くなる。 T_{CC} 特性においては、負極性において値にほとんど変化がみられないのに対して正極性では変化が大きい。また、正極性のほうが CC 放電の際に落下する粒子 1 個当りの水量が小さいためであろう。なお、HC 放電と CC 放電の周期的繰返しの安定性の点では負極性のほうが安定度が高い。

図 8 から明らかなように、供給水量が増加するほど T_{HC} は減少する。そして供給水量が多くなりすぎると付着水滴の成長が早すぎるために HC 放電が発生しないようになる。一方、図 9 の特性から T_{CC} は供給水量の影響をほとんど受けていないようである。このことから、 T_{CC} はほとんど CC 放電開始時の導体付着水滴の水量のみに左右されていると考えられる。

4. まとめ

送電線の線振動解析のための基礎的研究として、導体に付着している水滴が 1 滴のみの場合におけるコロナ放電特性について実験を行なった。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) コロナ放電が起きる電界強度領域は、コロナパルス放電が生じる低電界強度領域ならびに HC 放電と CC 放電が交互に繰り返して発生する高電界強度領域の二つに分けられる。
- (2) コロナパルス波高値は電界強度にはほぼ比例するが、供給水量にはほとんど依存しない。そして同一電界強度においては、コロナ電流値およびコロナパルス波高値は正極性よりも負極性のほうが大である。
- (3) コロナパルスは水滴落下と同期して発生し、その周波数は供給水量の増加ならびに電界強度の増加に伴って増加する。そして正極性と負極性とではこの周波数にほとんど差異は認められない。
- (4) HC 放電持続時間および CC 放電持続時間は電界

強度に対して山形の特性を示す。この両者の持続時間が最大になる電界強度はほぼ一致する。また、この一致する電界強度は正極性のほうが負極性より低い。

- (5) HC 放電持続時間は供給水量の増加に伴って減少し、ついには HC 放電が発生しなくなる。CC 放電持続時間は供給水量の影響をほとんど受けない。また、同一電界強度においては正極性のほうが CC 放電持続時間が長くなる。

終りに、本研究を行なうにあたって、ご指導ならびにご支援をいただいた東京大学工学部増田閑一教授、九州大学工学部赤崎正則教授、原雅則助教授、山口大学工学部榎崎久矩教授に深く感謝する。なお、実験その他について何かとご援助いただいた本学羽野光夫助手、池田隆技官ならびに卒論生江頭頤吾君に感謝する。

参考文献

- 1) 赤崎正則、林 石象：電気学会誌, 88, 956 (1968), 908.
- 2) 角田美弘、荒井健次：電気学会誌, 84, 912 (1964), 1430.
- 3) 赤崎正則、原 雅則、早田信男：電気学会論文誌 A, 98, 2 (1978), 109.
- 4) 熊谷三郎、長屋 準：電気学会誌, 53, 7 (1933), 527.
- 5) 武藤三郎：名古屋工業大学学報, 15, 5 (1954), 113.
- 6) 吉田貞博、松林義数：住友電気、送電線特集号 (1957), 75.
- 7) 足立宜良、川崎元之、C. Luan Phan：静電気学会誌, 5, 1 (1981), 36.
- 8) M. Hara, S. Ishibe and M. Akazaki : J. Electrostatics, 6, 3 (1979), 143.
- 9) 原 雅則、石辺信治、赤崎正則：静電気学会誌, 3, 3 (1979), 143.
- 10) M. Akazaki : IEEE Trans. Power Appar. Syst., 84 (1965), 1.
- 11) 赤崎正則：基礎高電圧工学, p. 69, 昭晃堂 (1980).