

ガラス円筒電極先端の水滴に働く力

吉田 信夫*・石丸 力也*・足立 宜良**

On the Force for Water Drop at the Tip of Capillary Tube Electrode

Nobuo YOSHIDA, Rikiya ISHIMARU and Takayoshi ADACHI

Abstract

The experiment about corona discharge phenomena on a water drop at the tip of the tube electrode for capillary tube electrode-to-plate electrode was made and the result of this experiment was investigated. This study is important for the basic study of corona induced vibration of a transmission-line conductor in rainy weather or of charging droplet schrorbor (CDS), Which is one of the sub-micron particles collecting apparatus.

The result of this experiment is summarized as follows. Water falls as a water drop at no voltage and the dripping Period become short with increasing applied D. C. voltage. On the other hand, when voltage is higher than corona onset voltage, spray phenomenon is observed. The Coulomb force that operates on a water drop at the tip of electrode is calculated with surface tension and gravity force. Hence this characteristic of the Coulomb force vs. applied voltage is not influenced by the polarity of D. C. voltage. The charge of water drop is calculated with Coulomb force, and increases with increasing applied voltage. Under the conditions that the distance between both electrode is 5 cm, and corona onset voltage is 4.6kv, Coulomb force is about 1×10^{-4} N, charge of a water drop is about 1×10^{-8} c.

1 ま え が き

人間の健康にとって粒径 $5 \mu\text{m}$ 以下の微粒子が特に危険であるとされているが、電気集じん装置（以下 EP と略す）にとって、このような微粒子の捕集は今後の課題の一つである。その対策として EP とスクラバ集じん装置を組み合わせた方式の荷電水滴スクラバ（以下 CDS と略す）¹⁾の研究がなされ、すぐれた成果を収めている。CDS の基本となる水からのコロナ放電に関しては毛管電極からのコロナ放電とそれに伴う現象の研究^{2),3)}がある。また別に水滴からのコロナ放電については雨天下の送電線振動⁴⁾の解明の基礎実験として、円筒電極導体から落下する水滴からのコロナ放電に関する研究⁵⁾がある。しかし水の表面張力などを考慮してのガラス毛管電極先端の水滴への電圧印加時の作用力や、電極先端からの水のスプレ現象に

ついでの文献はみあたらない。

そこで水滴からのコロナ放電とそれに伴う諸現象を解明するための基礎実験として、水を充填したガラス毛管電極対平板電極に直流高電圧を印加した。この電圧を印加させた場合の電極先端水滴の挙動を観察し、さらにクーロン力を実測することにした。

ガラス毛管電極を鉛直方向に設置すると、電極内部の水が毛管先端より滴下する。この状態で水滴印加電圧を上昇させると落下水滴は小さくなる傾向を示し、さらにコロナ放電が開始する電圧以上ではスプレ現象が発生する。そこで、コロナ開始電圧より低い電圧において、水の表面張力による水滴とガラス管の付着力と、その水滴に働く重力の差から水滴に働くクーロン力を実測した。またこのクーロン力から水滴の電荷を計算によって求めることができた。ただし、実験は静止大気中に行なった。

* 宇部短期大学情報計数学科

** 電気工学科

2 実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。両電極間距離は電源電圧の関係ならびに落下水滴の観察を考慮して 50 mm と定めた。落下水滴の個数の測定には肉眼と H_e - N_e ガスレーザを併用した。また、水滴落下による水量の変化は望遠顕微鏡により水面移動距離を測定して算出した。ガラス円筒電極先端に付着した水滴の挙動ならびにコロナ放電に伴って煙霧状に飛散する微細水滴の挙動などは写真に基づいて解析検討した。ここで使用した水は蒸留水で比電気伝導度は約 $5 \mu S/cm$ である。

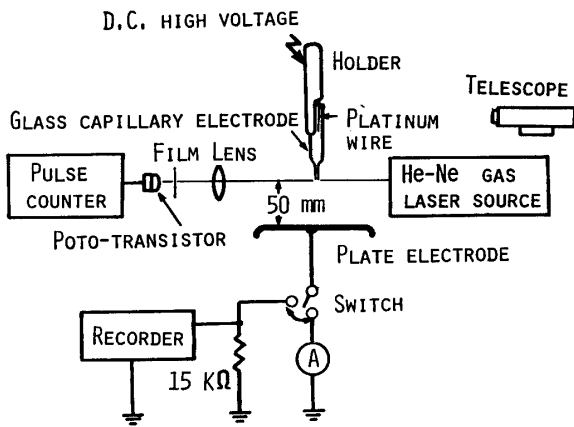


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

コロナ電流測定にはコロナ開始電圧近傍の微小電流の場合には検出抵抗 $15 k\Omega$ で最大感度 $10 \mu V/div$ の自動平衡型記録計(日本電子科学製)を使用し、安定したコロナ放電の場合には指針型マイクロアンペア計(横河電機製)を使用した。

放電極であるガラス毛管電極は外径 $4 mm\phi$ 程度の硬質ガラス管の一端を加熱、引張することにより注射針状に形成した電極である。その各部分を Fig. 2 に示すように軸、肩、径および先端と呼ぶことにする。今回の実験で使用したものは、軸部の内、外径が $1.7 mm\phi$, $3.86 mm\phi$, 先端の内径 d_i , 外径 d_o が $264 \mu m\phi$, $528 \mu m\phi$ である。電圧印加のため軸部上端より挿入した白金線の直径は $48.5 \mu m$ であった。また軸、肩、径部のそれぞれの長さは約 $100 mm$, $10 mm$, $40 mm$ である。

このガラス円筒電極は Fig. 1 のように黄銅製のホルダに固定し、そしてホルダに固定された白金線はスポイトで軸部上端より注入された水に電圧を印加するためにホルダの下端よりやや上方まで挿入した。この

白金線は軸部上端より約 $55 mm$ である。

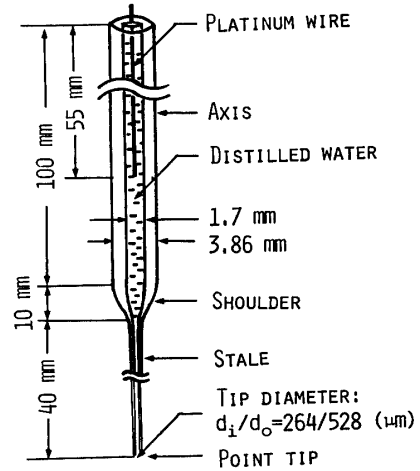


Fig. 2 Schematic diagram of the glass capillary electrode.

3 ガラス円筒電極先端の水滴に働く力

針状のガス管の先端から水滴が自由落下する場合、表面張力で付着した水滴は Fig. 3 に示すような形で次第に成長しながら管壁を上昇し、この水滴の重力が表面張力より大きくなると落下する。本実験ではガラス管内部より常に水が供給されるのでこの現象を繰り返す。ここで Fig. 3 c に示すように落下直前の水滴とガラス管の接触角を θ_N , m_N を落下水滴の質量とすると水の表面張力 T は

$$2\pi r T \cos \theta_N - m_N g = 0 \quad (1)$$

より与えられる。ここで r はガラス管先端の外半径 g は重力の加速度である。 m_N は、軸部における水面の移動距離を Fig. 1 に示すように望遠鏡で観測し、その間の水の体積 V_w と落下水滴数 N を観測すれば

$$m_N = \frac{\rho V_w}{N} \quad (2)$$

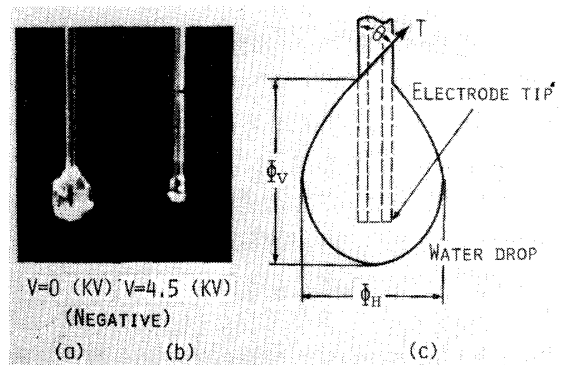


Fig. 3 Schematic representation of the water drop on the tip of glass capillary electrode.

で与えられる。ここで ρ は水の密度である。

この水滴にコロナ開始電圧以下の電圧を印加すると水滴下方にクーロン力 F が働くため、先端に付着した水滴は小さいうちに落下する。そして、体積 V_w の水の落下水滴数 n は増加する。したがって、このクーロン力 F は水滴落下直前の表面張力と水滴重力の差によって求められる。故に

$$F = 2\pi r T \cos \theta - mg \quad (3)$$

となり(1)式より

$$T = g \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_N} m_N - m \right) \quad (4)$$

となる。ここで θ 、 m はそれぞれ F が働いているときの落下直前の接触角と落下水滴の質量であり

$$m = \frac{\rho V_w}{n} \quad (5)$$

であるから

$$F = g \rho V_w \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_w} \cdot \frac{1}{N} - \frac{1}{n} \right) \quad (6)$$

より F を求めることができる。

4 実験結果

4.1 スプレ現象の視覚的観察

コロナ開始電圧よりやや高い電圧では微水滴は電極先端直下1~2mmで霧状になりしかも連続的噴出しはじめるのが観察される。この状態は Fig. 4a に示すように電気力線分布に似た形に拡散する。さらに電圧を上昇させると正と負極性での微小水滴飛散現象に大きな相違が生じてくる。まず正極性放電では水量の噴出が激しくなり、ギャップ中を飛散する水滴は Fig. 4b に示すように、円筒電極先端直下に集中するようになり、飛散速度も増してくる。負極性では水の噴出は逆に穏やかになり、ガラス円筒電極先端出する水量も減少する。したがって、正ならびに負極性電圧と噴出水量 V_w の変化は Fig. 5 に示すように大きな相異がある。

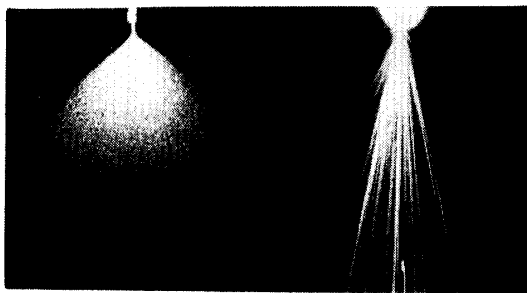


Fig. 4 Water spray phenomena from the tip of glass capillary electrode (Positive, $D=50\text{mm}$).

ここで電極内の水が先端における水の表面張力で自由落下しないほど微細な内径の毛管を使用した場合、負極性においてはスプレ現象は全くみかけられない。しかし、正極性では上記のスプレ現象がそのまま生じて、正と負極性の現象に極端な差が生じる。

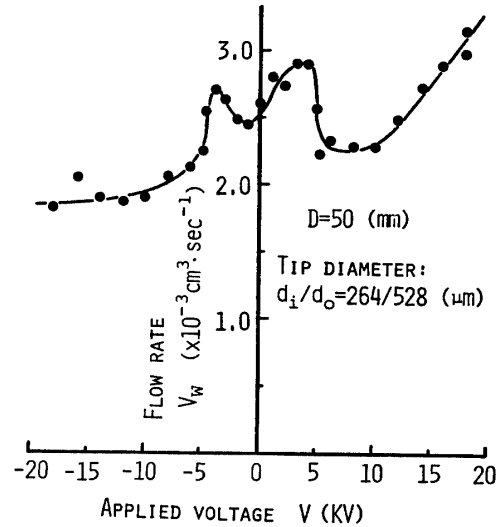
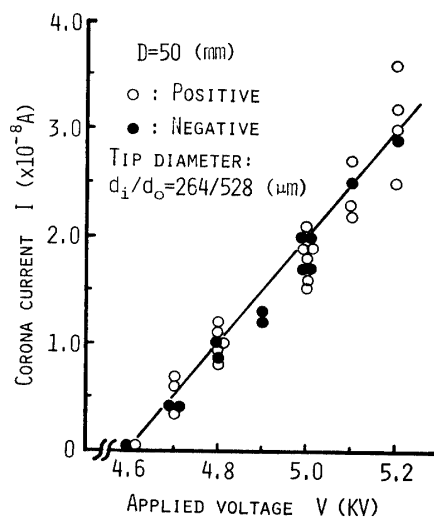


Fig. 5 Dependence of flow rate of the supplied water on applied voltage.

4.2 ガラス円筒電極のコロナ放電特性

Fig. 6 にガラス円筒電極対平板のギャップ長 D が 50mm での大気中コロナ放電特性を示す。コロナ開始電圧 V^s は、電流値が暗流から急激に上昇しはじめる電圧とすれば同図(a)に示すように、正負共に等しくほぼ 4.6KV である。コロナ電流値 I は 4.6kv から 5.2KV 程度までは正負にほとんど差がなく V に比例して増加する。しかし、 5.2KV より高い電圧にお



(a) LOW APPLIED-VOLTAGE

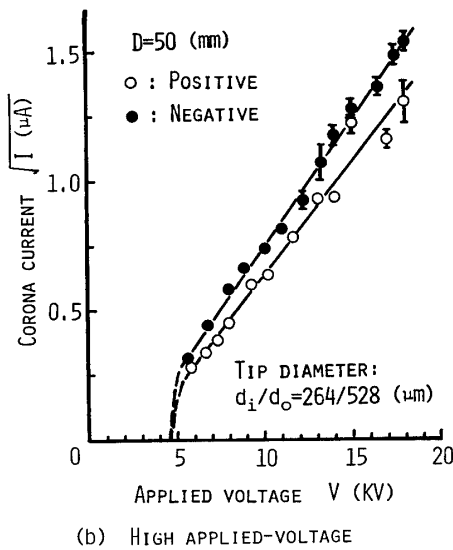
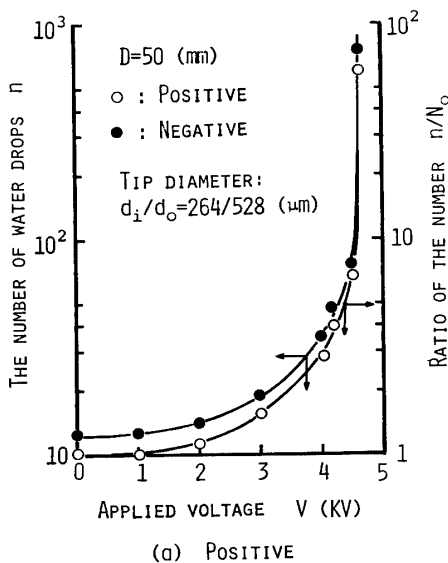


Fig. 6 Voltage vs. current characteristics

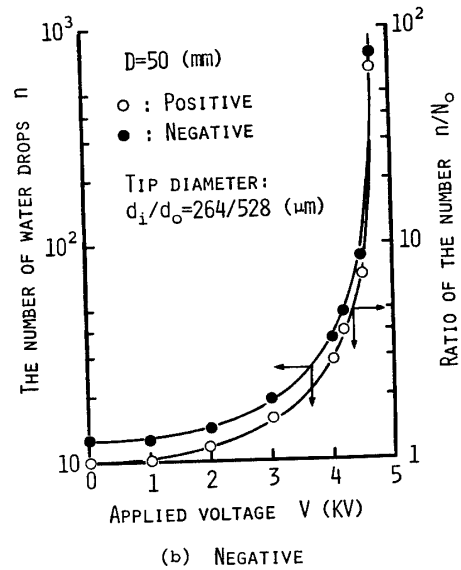
いては針対平板電極でのコロナ電流特性と類似な \sqrt{I} が V に比例する特性を示し、負が正より少し高い電流値を示す。

4.3 落不水滴の数と幾可学的形状

落不水滴の数 ガラス円筒電極軸部における水面の移動を望遠鏡を用いて観測し、水面が60mm降下する間(体積で $1.3 \times 10^2 \text{mm}^3$ 落下することになる)の落不水滴数とそれに要する時間を測定した。特に時間測定は Fig. 5 に示した供給水の流量を求めるためである。印加電圧の上昇と共に落不水滴数は多くなり、水滴の大きさは小さくなる。水滴数の計数は肉眼で可能であるが、コロナ開始電圧付近で急激に増加するため特に 4.7KV での測定結果だけは Fig. 1 で示すように $\text{He} - \text{Ne}$ ガスレーザービームと光電素子を用いて得



(a) POSITIVE



(b) NEGATIVE

Fig. 7 The number of water drops per unit mass ($1.3 \times 10^2 \text{mm}^3$) and its ratio to the number of drops at no voltage

たものである。Fig. 7 に供給水量 $1.3 \times 10^2 \text{mm}^3$ の落不水滴数 n とそれを自由落下 ($V = 0 \text{KV}$) の落不水滴数 N で規準化したものの V に対する変化の様子を示す。Fig. 7a, b を比較して正負の極性効果はほとんどみかけられない。

水滴の幾可学的形状 電極の先端から落下する水滴に作用する力は(6)式に示すように水滴とガラス管との接触角に関係する。そこで落下直前の水滴の写真を撮影し、スライド映写機により15倍程度に拡大したものを筆写してその接触角を測定した。接触角 θ の値は同一電圧での十数枚の水滴写真の中で水滴が大きく成

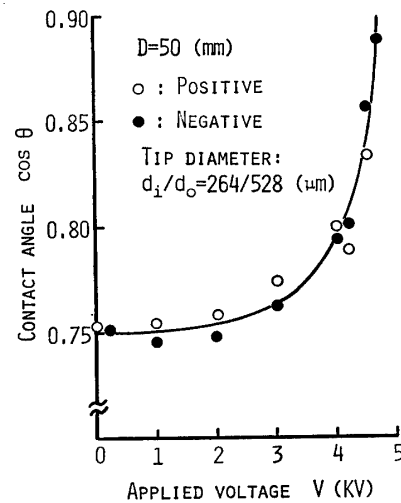


Fig. 8 The contour angle of the water drops contact to the surface of glass capillary electrode (See Fig 3 c).

長している写真3枚を選出して測定した値の平均である。この結果を Fig. 8 に示す。この図から明らかなように正負の極性効果はほとんど見かけられない。

水滴の大きさは電圧の上昇と共に小さくなるので、Fig. 3 に示す ϕ_H , ϕ_V を接触角の測定と同様な方法で測定してその値を Fig. 9 に示す。同図の r_D は供給水量 V_w を落下滴数 n で除して、落下水滴を球形として、その半径に換算した値である。

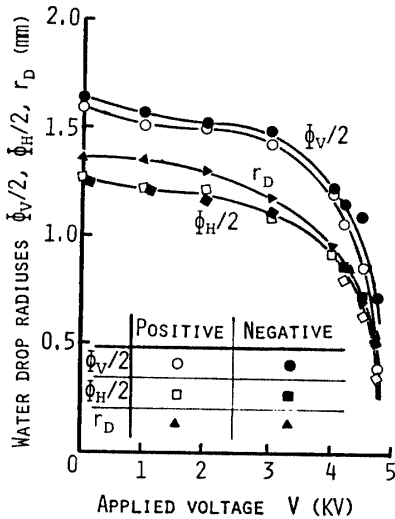


Fig. 9 The dimension of water drops varies with voltage applied (See Fig. 3c).

5 水滴に働く力と電荷の計算

落下する水の体積 $V_w = 1.3 \times 10^{-7} m^3$ における落下水滴数 n と接触角 θ の測定値を用いて、(6)式より電極先端の水滴に働く重力以外の力すなわちクーロン力 F は

$$F = 9.80 \times 1.3 \times 10^{-7} \times 0.997 \times 10^{-3} \times \left(\frac{\cos \theta}{0.749} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{n} \right) \quad [N] \quad (7)$$

より求めることができる。ただし $\rho = 0.997 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ は 25°C における値⁶⁾ である。 θ は Fig. 8 の曲線上の値で、 n は各測定電圧における実測値である。(7)式のクーロン力 F を計算した結果を Fig. 10 に示す。

静電界においては接地平板導体に対して一点 0 に点電荷 q がある場合、平板に対する 0 の鏡像 $0'$ に点電荷 $-q$ を考え、この二つの点電荷が相対しているのと等価である。よって荷電水滴に働く力はクーロンの法則により

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{(2D)^2} \quad (8)$$

である。ただし D はギャップ長である。これより g

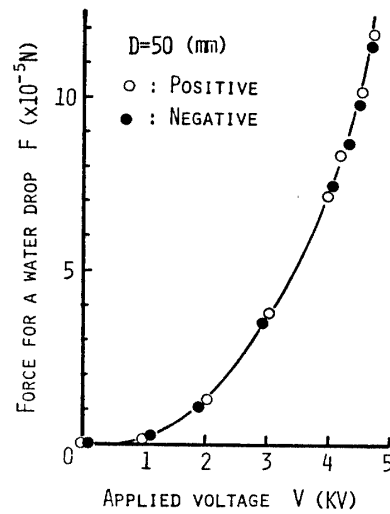


Fig. 10 Force for a water drop at the tip of glass capillary electrode without gravity.

は

$$g = 4D\sqrt{\pi\epsilon_0 F} \quad (9)$$

となり、 D を 0.05 [m] とすると ϵ_0 は $8.854 \times 10^{-12} \text{ [F} \cdot \text{m}^{-1}]$ であるから

$$q = 1.06\sqrt{F} \times 10^{-6} \quad [c] \quad (10)$$

となる。(7)式で求めたクーロン力 F を(10)式に代入して q を計算した結果が Fig. 11 である。この図より一滴当りの電荷は印加電圧とほぼ直線的な関係をなすことがわかる。 q は点電荷として求めた値であるが、電圧が上昇すれば水滴の大きさは小さくなるので、この電荷が水滴の半球表面に均様に分布していると仮定すると、表面電荷密度 q_s は次式で表わされる。

$$q_s = \frac{q}{2\pi r_D'^2} \quad [c/m^2] \quad (11)$$

ここで、 r_D' は Fig. 3 C に示す $\phi_H/2$ と r_D の平均値

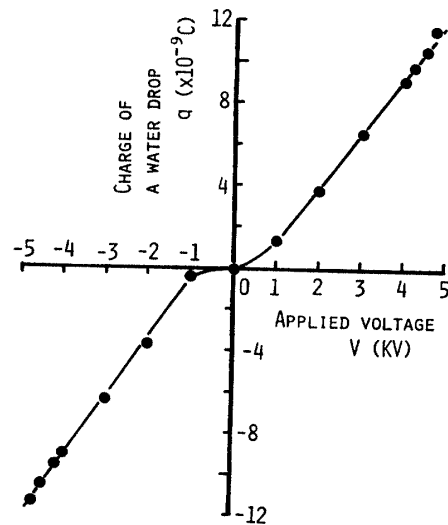


Fig. 11 Charge of one water drop.

である。(11)式の計算結果は Fig. 12に示すように、コロナ開始電圧までは $\log q_s$ が $\log V$ に対してほぼ直線的に増加する傾向を示す。それ以上の電圧ではコロナ放電が活発になる関係で急激に増加する傾向を示す。

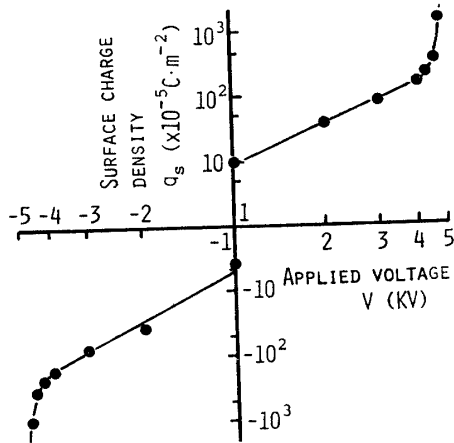


Fig. 12 Surface charge density of one water drop.

さらに一滴当りの電荷量とその体積から

$$q_v = \frac{q}{\frac{4}{3} \pi r_D^3} \quad [c/m^3] \quad (12)$$

を求め、Fig. 5に示す供給水の流量 V_w より

$$V_Q = g_v \cdot V_w \quad [c/sec] \quad (13)$$

なる電荷の移動速度を求めると、Fig. 13に示すように Fig. 12と同様な傾向を示す。

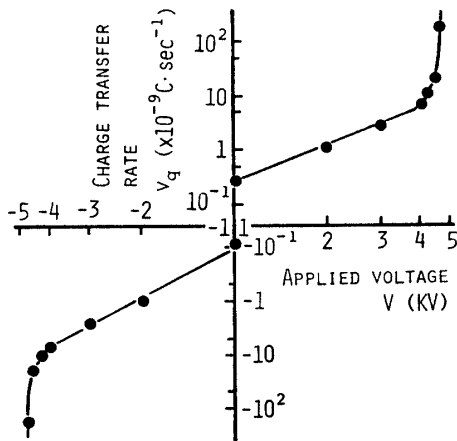


Fig. 13 Transfer rate of charge carried by water drops.

Fig. 13で V_Q が急激に上昇しはじめると値はほぼ $5 \times 10^{-9} c/sec$ であり、この値が Fig. 6に示すコロナ放電特性の立ち上がり付近の電流値に一致する。このことより、この一連の実験と種々の理論式での計算過

程が適切であったと考えられる。また自由落下における実験より(1)式を用いて水の表面張力を求めると $7.24 \times 10^{-2} N/m$ が得られ、 $25^\circ C$ における水の表面張力 $7.197 \times 10^{-2} N/m^{(6)}$ とよく一致した。このことが、この実験を進める前提となっている。

6 結 言

本実験で得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) 水滴に水の供給がなされ水滴が成長する場合、印加電圧の上昇と共にクーロン作用力が大きくなり、水滴は小さい粒径で落下するようになる。そしてコロナ開始電圧近くから急に微小な水滴で落下しはじめる。
- (2) コロナ開始電圧よりやや高い電圧以上では落下水滴は電極先端より $1 \sim 2 \text{ mm}$ で煙霧状となり、スプレ現象を生じるようになる。
- (3) 静電界と考えることができるコロナ開始電圧より低い電圧において、水の表面張力を利用して求めた水滴に作用するクーロン力 F および落下水滴の流量はそれぞれ、直流印加電圧の極性によってほとんど変化がない。
- (4) 水滴一個の電荷量は前述のクーロン力より算出され、ほぼ印加電圧の増加に比例して増加する。そして、両電極間距離 50 mm 、コロナ開始電圧 4.6 KV での F は約 $1 \times 10^{-4} \text{ N}$ である。そのときの水滴一個の電荷量は $1 \times 10^{-8} \text{ C}$ である。
- (5) コロナ開始電圧付近において、クーロン力 F と供給水の流量 V_w より計算して得られた電荷の移動速度 V_Q の値が同一電圧におけるコロナ電流の測定値とほぼ一致したことは有意義である。

本研究の結果が CDS ならば雨天下の送電線振動等の基礎研究に役だつことを期待している。終りに、実験装置についてご支援いただいた山口大学理学部加屋野洋教授に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) J. R. Melcher and K. S. Sacher: EPA6-50/2-74-075 August (1974).
- 2) 石丸力也, 吉田信夫: 宇部短期大学学術報告, 14, 223 (1978)
- 3) A. G. Bailey and E. Bizabad: IEEE-IA, 14, 2 (1991)
- 4) T. Adachi and L. C. Phan, : J.of Electrostatics, 9, 273 (1981)
- 5) 足立宜良, 谷辺俊幸, L. C. Phan: 静電気学会誌 (掲載決定)
- 6) 東京太文台編: 理科年表, 丸善出版社 (1967) 物p. 18, p. 23

(昭和55年10月15日受理)