

論文

## 直流電圧印加導体からの水滴コロナ電流特性と 水滴の比電荷に対する水導電率の影響

原 雅 則\*, 金 子 正 光\*, 山 下 敬 彦\*\*  
朴 正 后\*\*\*, 赤 崎 正 則\*\*\*

(1980年6月19日受理)

## Characteristics of Corona Current and Charged Water Drops from a Wetted Conductor with DC High Voltage

from a Wetted Conductor with Damping  
M. HARA,\* T. KANEKO,\* T. YAMASHITA,\*\* C.H. PARK\*\*\* and M. AKAZAKI\*\*\*  
(Received June 19, 1980)

(Received June 19, 1980)

Current carried by charged water drops and corona current from water drops on the ACSR conductor were measured to obtain a basic data on ion flow electrification phenomena in foul weather. Since the rain conductivity is in the range of  $2\text{--}500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , effects of the conductivity on characteristics of currents and specific charge on the drop were also investigated. The results show that the ionic corona current and microdischarge produced between the charged drop and the radio or TV antenna may become an important consideration regarding the design of d.c. transmission lines.

## 1. まえがき

直流送電線上の単極性コロナ放電によって供給されるイオンが送電線下の物体を帯電させる現象をイオン流帶電現象と呼んでいる。この現象が送電線近傍の電気環境と関連して、最近関心を集めている<sup>1)</sup>。降雨中のイオン流帶電現象に関する基礎データを得ると同時にそれを決定している要因を調べる目的で、著者らはこれまでに直流電圧印加導体から落下する水滴の比電荷 $M$ （水滴の単位質量当りの電荷量）と水滴コロナ放電機構を調べてきた<sup>2-5)</sup>。残された検討すべき重要な課題の一部として、水滴によって運ばれる電流値、水滴コロナ電流特性、水滴と物体との間で生じるマイクロ放電の可能性の問題が考えられる。本研究では、これらの特性ならびにまだ報告していない実用上重要と考えられる ACSR 導体を用いた場合の水滴の比電荷特性に対する水の導電率の影響について述べる。

\*<sup>1</sup>, \*\*<sup>2</sup>, \*\*\*<sup>3</sup> 九州大学 (812 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku,  
Fukuoka 812, Japan

\* 工学部電気工学科 Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering

\*\* 大学院工学研究科 Graduate Course, Division of

Engineering  
\*\*\* 総合理工学研究科 エネルギー変換工学専攻 Department of Energy Conversion Engineering, Graduate School of Engineering Sciences

## 2 実験装置

電極系は同軸円筒（金網製、外円筒直径 70 cm）で前報<sup>2,5)</sup>と同一のものであり、内部導体としては実用されている  $810 \text{ mm}^2$  の ACSR を用いた。コロナ電流はペンレコーダで記録したが、その値は可動コイル型電流計で得られる値とほぼ同じで、パルス性コロナ電流の平均値を見てよい。イオン流帶電現象を調べる立場からいえば、電線から放出される電荷量が問題になる場合が多いので、本研究では実効値よりむしろ平均値を示す上記の方法を用いた。金網製外円筒電極の外部にイオン流阻止用のバイアスをかけられるグリッドを設け、その外部に設置した水滴捕集用大型円筒電極を用いて水滴が運ぶ電流（水滴電流と呼ぶことにする）の測定を試みたが、低い印加電圧では水滴電流の流れが間欠的であり、高い印加電圧では暗流ならびにコロナ風とともに水滴捕集電極に達すると思われるイオン電流が水滴電流程度になって正確な値が得られなかった。そこで、水滴電流は水滴の比電荷  $M$ （水の供給流量  $F=0.03 \text{ g/s}$  のときの値を用いた）と水の流量  $F$ との積より求めた。

水滴の比電荷、粒径の測定法は前報<sup>2)</sup>と同じである。

### 3 フロナと水滴電流の特性

### 3.1 コロナ電流のパターン

3.1 図10)電流計の  
オシロスコープを用いて調べた水滴落下時のコロナ電

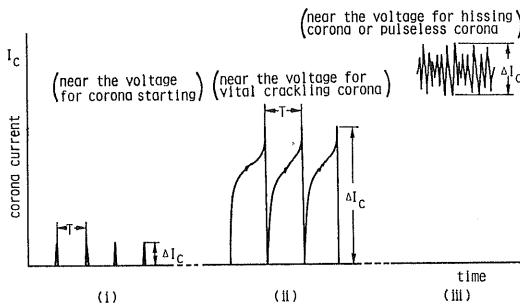


図 1 各種印加電圧におけるコロナ電流パターン

Fig. 1 Patterns of corona current under various applied voltages.

流パルス特性の詳細は前報<sup>5)</sup>で述べた。この電流をペンレコーダで記録すると、印加電圧の大きさによって図1のような三つのパターンになる。

コロナ開始電圧付近では、水滴の不安定性によってひきおこされるコロナパルスの出現時間Tは短く、パルス振幅も小さいので図1(i)のようなパルス状パターンとなる。供給水量を一定にして印加電圧を上昇させると水滴の変形が印加電界によって促進されるので、水滴の落下時間間隔(コロナ開始電圧の2倍程度までの印加電圧では、水滴落下時にコロナ放電が生じるので、水滴落下時間間隔は図1(i)のTに対応する)はしだいに小さくなり、電流振幅  $I_c$  (電流の変動幅を  $\Delta I_c$  と記したが、図1(i)では電流振幅に等しい)はしだいに大きくなる。頗著な crackling corona<sup>3,6,7)</sup> が現われるような電圧になると、水滴先端にコロナ放電が現われると同時に電流は急に立ち上がり、水滴が長く伸びるに従って電流は徐々に増加する。水滴が導体から離れて破裂すると電流は急にゼロまで減少し、図1(ii)のような電流パターンとなる。この場合も印加電圧の上昇とともに  $\Delta I_c$  は増加し、Tは減少する。さらに電圧を上昇させると図1(iii)のように直流成分を含むパターンとなる。

### 3.2 コロナ電流と水滴電流の特性

導体表面に形成される水滴突起の個数は、本研究の実験条件では印加電圧が低いときは1個であるが、印加電圧が高くなるとACSRの素導体間に水が流下する途中で突起を形成する場合がしばしば観測された。このような場合、全コロナ電流はコロナ発生点の個数に影響され、コロナ電流に対する水の導電率と流量の影響はマスクされてしまう。このため、ここでは水滴突起が1個形成された場合の値のみを示す。

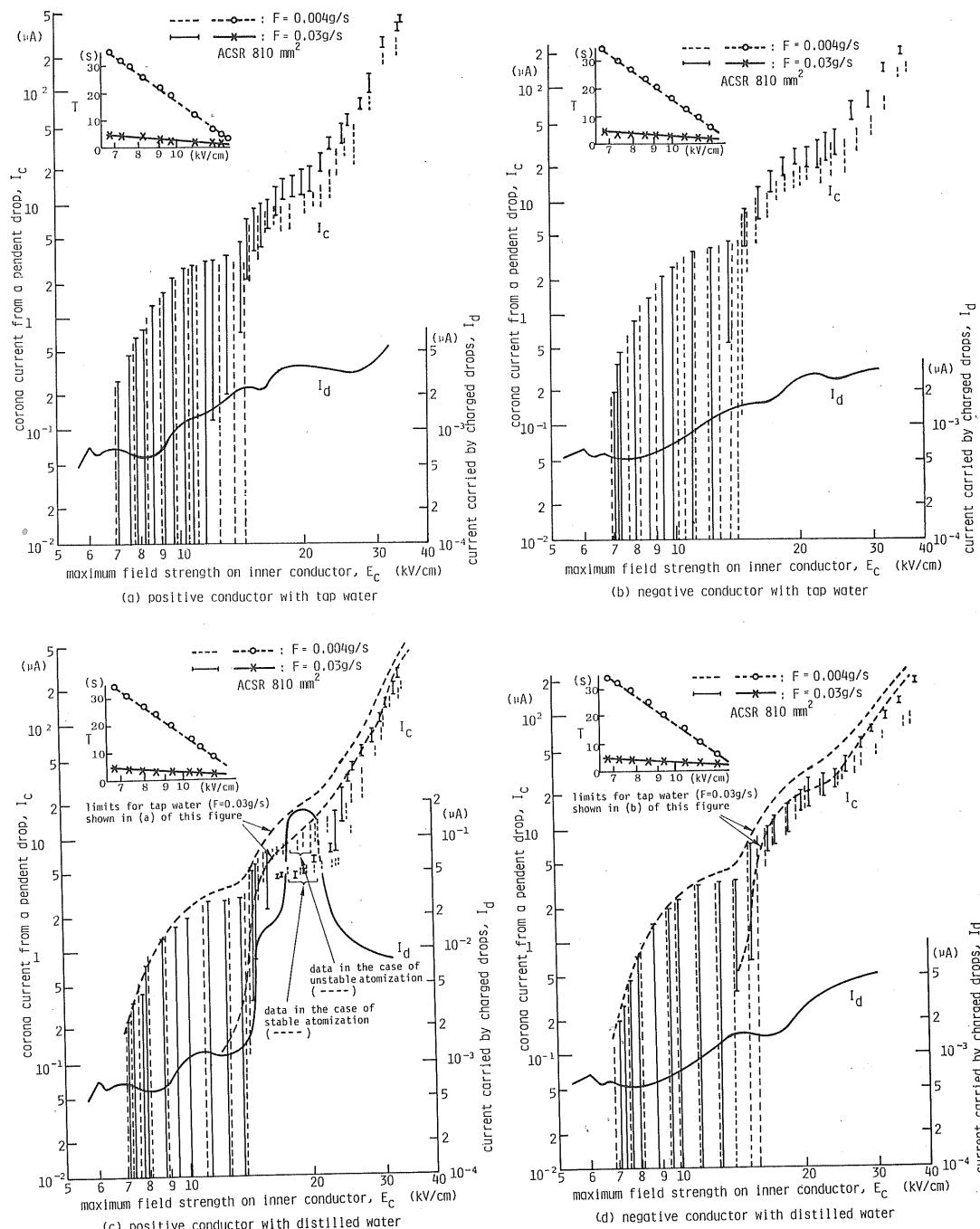
図2は水滴電流  $I_d$  ならびに図1に示したコロナ電流  $I_c$  の変動幅  $\Delta I_c$ 、コロナ電流の出現周期Tを示したものである。水滴電流が小さいので、 $I_c$  にくらべて  $I_d$  の目盛を2桁小さくなるように縦軸をずらせてある。

コロナ放電開始電圧以下では、導体からの電荷輸送は水滴のみによって行なわれる所以、全電流に対する水滴電流の比率%  $I_d$  ( $=100 I_d / (I_d + I_c)$ ) は100%となる。コロナ放電が開始されると、 $I_c \gg I_d$  であるので%  $I_d$  は急激に減少する。実送電線は十数 kV/m 以上の導体表面電界で運転されると予想されるが、このような電界では正極性蒸留水の場合には水滴の霧化現象が出現し、 $I$  が減少するが  $I_d$  は増加するので%  $I_d$  は増加する。その他の場合は、一般に印加電圧の上昇とともに  $I_c$  が大きくなるので%  $I_d$  は減少する(図2中の  $I_d$  の特性を参照)。

図2では、 $I_c$  と  $I_d$  の広い範囲の値を示すために縦軸が対数になっている。このために、 $I_c$  に対する水の導電率ならびに供給水量の影響はややわかりにくくなっているが、供給水量  $F$  が0.03 g/s の水道水の場合を基準(蒸留水の場合の図には、水道水の  $F=0.03$  g/s における  $I_c$  の上限と下限を太破線で示した)にして、各極性におけるコロナ電流値に対する  $F$  と水の導電率  $\sigma$  の影響を調べると次のことが認められる。

- (1) 正極性の水道水の場合、印加電圧の上昇とともに  $I_c$  は増加し、対数で示したときの  $I_c$  の変動幅  $\log \Delta I_c$  はしだいに小さくなる。これに対して蒸留水の場合は、水滴が霧化する電圧領域で  $I_c$  の印加電圧に対する増加率が小さくなり、この領域で  $\Delta I_c$  も著しく小さくなる。さらに、 $F$  が大きい場合は図2(c)の細実線に示したように、霧化領域の  $I_c$  が霧化時より低い電圧時の  $I_c$  に比較してかなり小さくなる。また、たとえば  $F=0.03$  g/s における霧化時の  $I_c$  は、同一の  $F$  と  $E_c$  における水道水の場合の  $I_c$  の約0.34倍になる。その他の本研究における印加電圧範囲での  $I_c$  は、一般に蒸留水の場合のほうが水道水のときより小さいが、その比は  $1 > I_c$  (蒸留水) /  $I_c$  (水道水)  $> 0.58$  の範囲にある。

$I_c$  に対する  $F$  の影響は次のようになる。水道水の場合、高い印加電圧では  $I_c$  は  $F$  の増加とともに上昇するが、低い印加電圧での  $F$  の影響は少ない。蒸留水の場合、 $F$  が小さくなると霧化現象の発生がしだいに困難になり、 $F$  がゼロ付近の値になるとついには霧化現象は生じなくなる。この場合、オシロスコープ上で観測される電流波形は霧化発生時の無パルス性からパルス性に変わる。このために、霧化現象を生ずるような電圧領域では、 $F$  を減少させると  $I_c$  はかえって増加する(図2(c)の  $E_c=15 \sim 25$  kV/cm の領域で  $F=0.004$  g/s の場合、霧化がやや不安定になる場合があるので、図のように二つの場合を分離して示した)。その他の特性は水道水の場合

図 2 水滴コロナ電流  $I_c$  と水滴電流  $I_d$  特性Fig. 2 Characteristics of corona current  $I_c$  and current carried by charged drops  $I_d$ .

とはほぼ同様である。

- (2) 負極性の場合、高い印加電圧の領域で水の導電率が高くなるに従って  $I_c$  は大きくなり、また、 $F$  が大きくなると  $I_c$  が大きくなる傾向がある。

(3) (1), (2)項で述べた特性は、コロナパルス振幅の観測結果とも一致する。

図 1 で定義した  $T$  は、3.1 節で述べたようにコロナ開始電圧付近では水滴落下の時間間隔に相当し、これは水

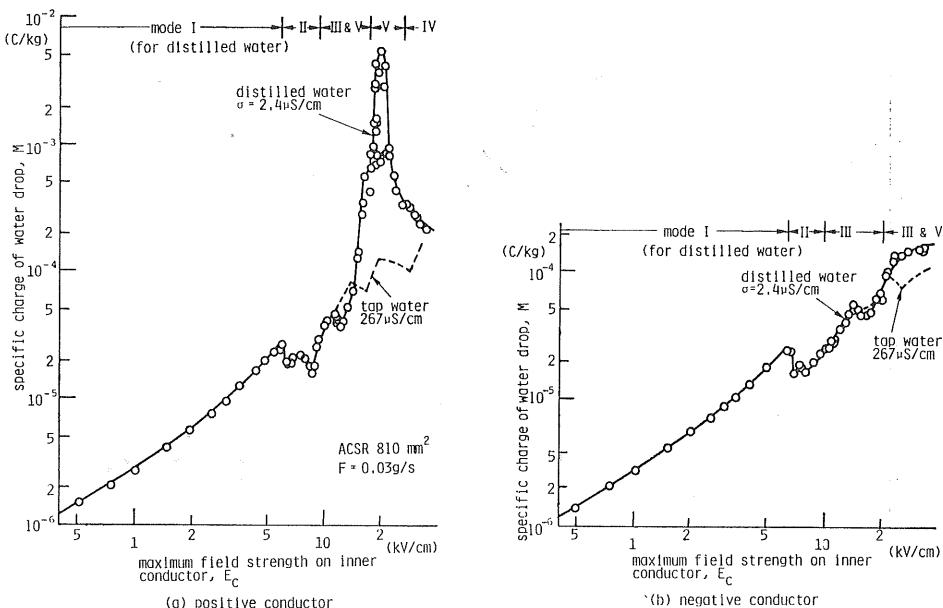


図 3 水滴の比電荷特性

Fig. 3 Characteristics of specific charge on water drop.

滴の重力による不安定性の条件からきまる。印加電圧を上昇させると水滴の変形に対する電界の寄与が著しくなって、1回当たりの水滴落下量が減少する。したがって、 $T$ は  $E_c$  の増加とともに減少するが、ついには導体から垂れ下がった水滴から連続にコロナ放電が生ずるようになり（このような電圧領域のコロナ放電を hissing corona<sup>3,6,7)</sup>と呼んでいる）、 $T$ はゼロとなる。以上の議論からわかるように、 $T$ は本質的には水滴の重力、表面張力、表面電界強度によってきまる性質のもので、水の導電率にはほとんど影響されない。図2によれば、 $T$ は  $\log E_c$  の増加とともにほぼ直線的に減少する。

#### 4. 水滴の比電荷と粒径特性

##### 4.1 比電荷のモード

蒸留水、水道水ならびにこれらの混合水を用いて求めた水滴の比電荷  $M$  が図3である。水道水を用いた前報<sup>2)</sup>で次の四つの比電荷モードを定義した。

モードI :  $M$  が導体表面の電界  $E_c$  とともに上昇し、 $E_c$  が比較的小さい領域

モードII : コロナ放電の開始に伴って  $M$  が急に減少するときの  $E_c$  から、 $M$  が再びモードIの最大値程度に増加するまでの領域

モードIII : モードII以上の電界で、 $M$  が頗著な極大値を示すまでの領域

モードIV : モードIII以上の電界で、 $M$  が  $E_c$  の増加と

ともに減少する領域

ところが、水の導電率が小さくなると、正極性の場合文献5)で述べたように、水道水の場合には生じなかつた霧化現象が現われて図3(a)に示した  $E_c \approx 15 \sim 20 \text{ kV/cm}$  の領域におけるように  $M$  の著しい上昇が認められる。この霧化が生じる場合のコロナ放電は、電線に垂れ下がった水滴のフィラメント部に沿って生じる無パルスコロナである。そこで、このような霧化が生じる場合の比電荷モードを新たにモードVと定義する。霧化現象の安定性は水滴の導電率  $\sigma$ 、水滴の極性、水の供給量  $F$  に依存し、正極性蒸留水で適当な  $F$  と印加電圧のもとでは霧化現象は一時間以上連続に安定に現われる。しかし、 $\sigma$  が大きくなると霧化現象はしだいに不安定になり、モードIIIとVが混在するようになる。

負極性の場合は、蒸留水の場合でも正極性の場合のような純粋な霧化現象は現われないが、適当な電界のもとでは、正極性の霧化時に現われると同様な水滴フィラメントの横方向振動を伴う分裂が生じ、このときの比電荷は大きな値を示す。水滴形成時のフィラメントの運動が正極性のモードVの場合と似ているので、この場合の負極性の比電荷モードをモードVと定義する。負極性のモードVは安定に現われることはなく、図3(b)に示したように常にモードIIIと混在していた。

図3の高電界領域の  $M$  の値が、前報<sup>2)</sup>の水道水の場合より複雑に変化しているが、これは次の理由によるもの

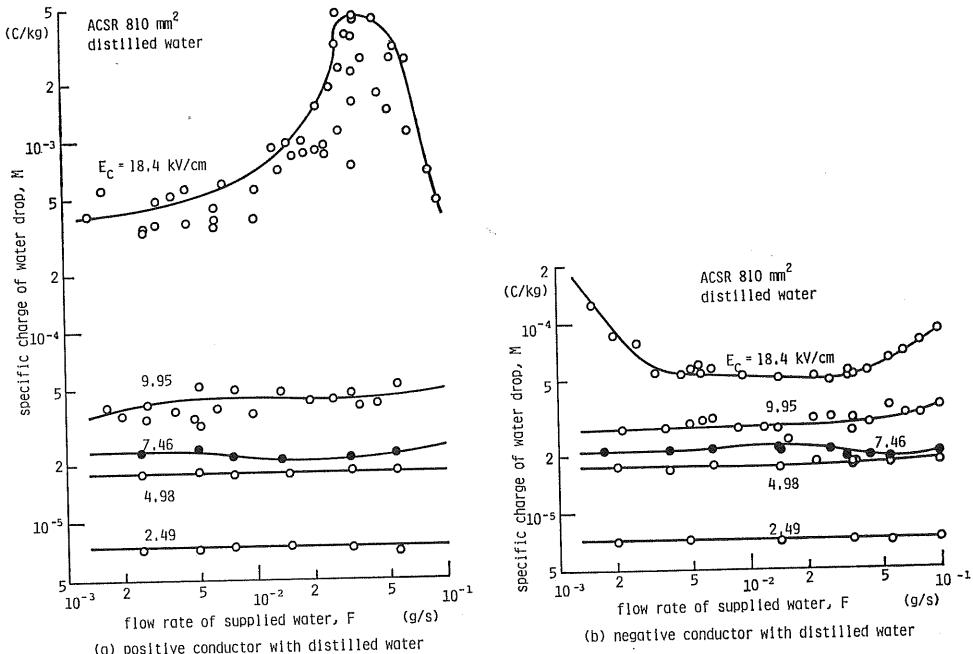


図 4 比電荷に対する供給水流量の影響

Fig. 4 Effect of the flow rate of supplied water on specific charge.

と考えられる。

$M$  の値は、分裂した水滴表面の電荷量によってきまるから、水滴の変形・分裂過程と密接に関連している。この分裂・変形過程は、水滴の自重と水滴表面電界に依存するが、水滴自重の変化すなわち導体下部に垂れ下がった水滴への水の供給量  $F$  が大きくなると、水滴の変形過程が  $E_c$  のわずかな変化によって複雑に変わるものになる。図 3 では、前報の  $F=0.004$  g/s と違って正極性のモード V における  $M$  の値が  $F$  の変化に対してほぼ最大となる  $F=0.03$  g/s ( $M$  に対する  $F$  の影響の詳細は 4.2 節で述べる) を用いているが、このような大きな  $F$  を用いたために水滴の変形・分裂過程が  $E_c$  とともに複雑に変化し、したがって  $M$  も複雑に変化したものと考えられる。しかし、先に述べたモードの定義を本質的に変更する必要はない。

#### 4.2 比電荷に対する $F$ と $\sigma$ の影響

水道水の場合の  $M$  に対する  $F$  の影響は前報<sup>2)</sup>で述べた。図 4 は蒸留水の場合の実験結果である。これらの結果から次のことが認められる。 $E_c$  が約 10 kV/cm 以下の場合、正・負いずれの極性の場合も  $M$  に対する  $F$  の影響はほとんどない。これに對して高電界領域、とくにモード V を含む領域では  $M$  に対する  $F$  の影響が大きい。

また、 $F$  を一定にして  $M$  に対する  $\sigma$  の影響を調べると、この場合も図 5 に示したように高電界領域でのみ  $\sigma$

の影響が顕著に現われる。同図で、縦の実線は霧化が生ずるときの  $E_c$ 、 $F$  を変えて得た  $M$  の最大値、点線は霧化が現われない場合の同様な値で、図 3 から推定されるように測定のつど  $M$  の値が変化するので図 5 では  $M$  の測定値に範囲がある。そこで、このような  $F$  と  $\sigma$  の影響を受けやすい印加電圧のもとで  $M$  に対する  $F$  と  $\sigma$  の影響を詳細に調べた。その結果が図 6 で、 $E_c$  を一定にして  $\sigma$  をパラメータとし、 $M$  を  $F$  の関数として測定すると、正極性の場合は図 (a) のように  $M$  の極大値の現われる  $F$  の値が  $\sigma$  の減少とともに増加し、 $M$  の最大値は蒸留水の  $F=0.03$  g/s 付近で現われた。このために、図 3 では  $F=0.03$  g/s の値を用いて測定を行なっている。一方、負極性の場合は図 (b) のように、 $M$  の値が複雑に変化するが、これは前節でも述べたモード V の不安定性に起因している。一般に、 $\sigma$  と  $F$  の変化に伴う  $M$  の変化は正極性の場合より小さい。

#### 4.3 水滴の粒径

図 7 に水滴の粒径特性を示した。蒸留水の場合は同図の点線で示した水道水の場合に比し、正・負いずれの極性の場合も、 $M$  にモード V が現われる場合粒径が小さくなっている。とくに、正極性の霧化が生じる場合は粒径が十数  $\mu\text{m}$  程度になりうる。

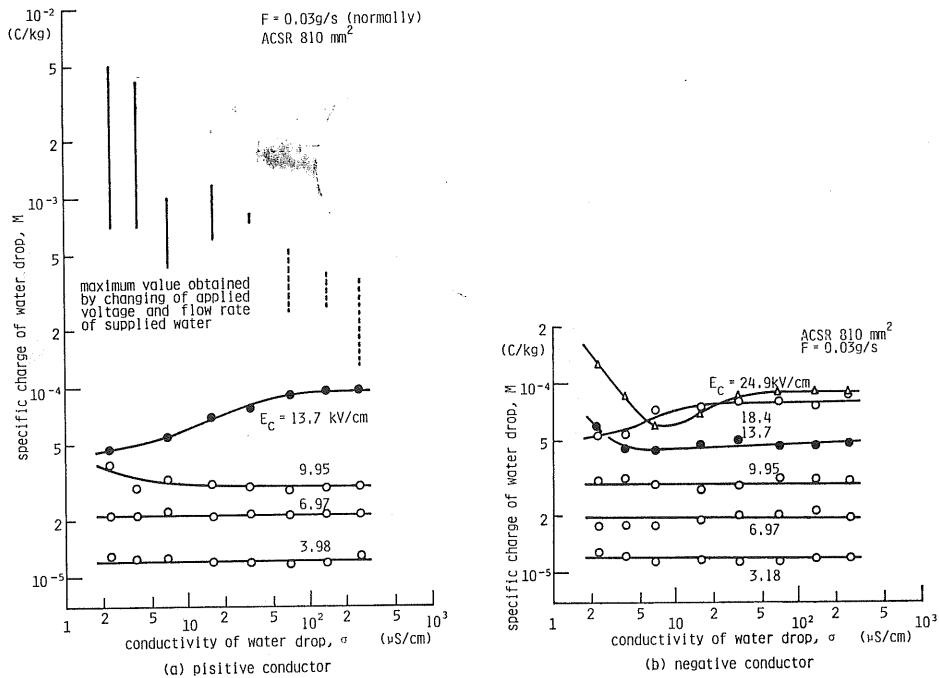


図 5 比電荷に対する水の導電率の影響

Fig. 5 Effect of the water conductivity on specific charge.

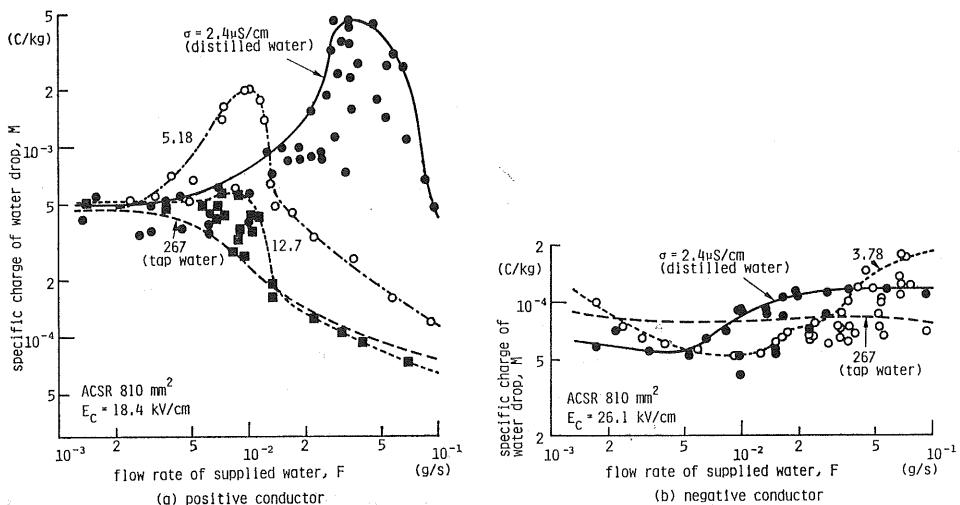


図 6 比電荷に対する供給水流量と水の導電率の影響

Fig. 6 Effect of the flow rate of supplied water and the water conductivity on specific charge.

## 5. イオン流帶電現象と水滴コロナならびに帶電水滴との関連

ここでは、降雨中の直流送電線下におけるイオン流帶電現象と水滴コロナならびに帶電水滴の関連について簡

単に検討する。

### 5.1 イオン源としての水滴コロナと帶電水滴

清浄空気中のよごれのない ACSR 導体では、十数 kV/cm から 30 kV/cm 程度の実用の送電線導体表面電界ではコロナ放電は生じえない。前章までの実験結果か

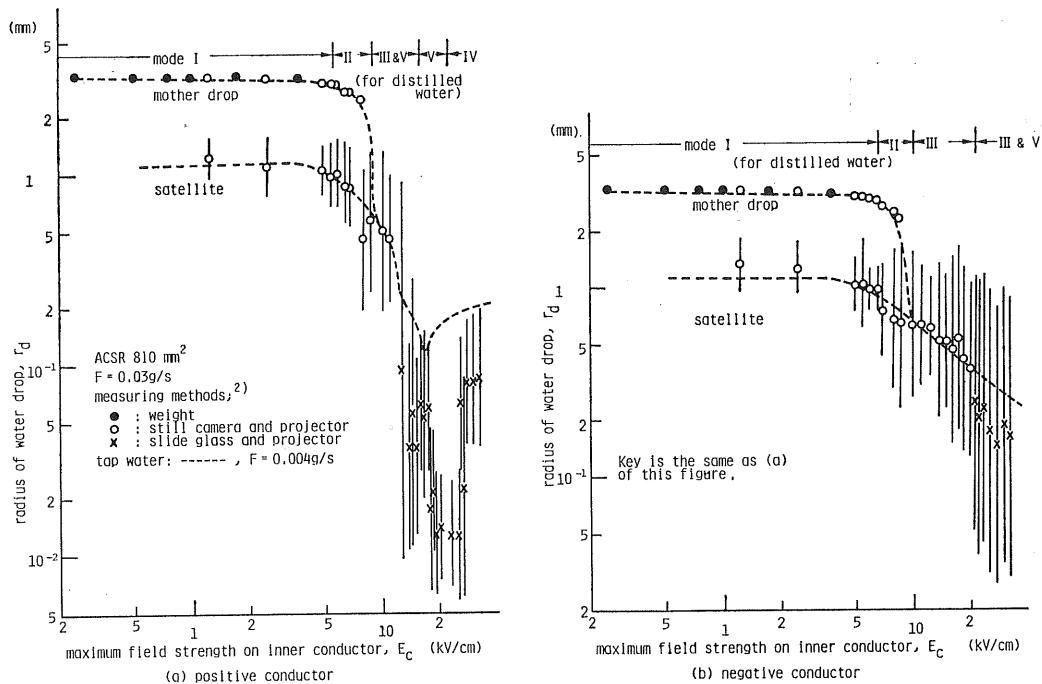


図 7 水滴の粒径特性

Fig. 7 Drop size of distilled or tap water-drops.

ら明らかなように、この電界領域で電線下に垂れ下がった水滴は顕著なコロナ放電を生じさせて分子状イオンの供給源になっているが、同時に帶電水滴の形態でのイオン供給源にもなっている。イオン流帶電現象の立場から、これらの電荷輸送体を見ると次のような特性がある。

コロナ放電による分子状イオン：イオン流密度が大きく、イオンは電界による駆動速度と風の速度の合成方向に沿って運動する。

帶電水滴：実用の送電線における導体表面電界強度の範囲では、帶電水滴によって運ばれる電荷量は、図2より分子状イオンによるそれの2%以下と推定される。多くの場合、送電線下の物体が存在する領域の電界は小さいので、この領域における帶電水滴の運動は、水滴の重力と空気の粘性力によってきまる。

したがって、送電線下に置かれた物体からの漏れ電流による生物への影響が問題になるような場合、その影響の大きさはコロナ放電電流によってきまり、水滴によって運ばれる電流はそれにほとんど寄与しないと考えられる。一方、たとえば、負極性送電線下で物体が帶電することにより物体電位が上昇して物体に流入する電気力線が少なくなると、分子状イオンによる電流と帶電水滴に

よる流入電流が同程度になりうる。帶電水滴の運動軌跡は電気力線にはほとんど影響されないので、このような状態になると帶電水滴が物体電位の上限決定に重要な意味をもつようになると考えられる。このような現象は、物体の漏れ抵抗が著しく大きいときに起こり、生物への影響は帶電物体に接地された人または動物が接触したときの電気ショックの形で生じると考えられる。直径20 cmの球を送電線下においていたとき、すでに報告している分子状イオンによる帶電電位<sup>8)</sup>と上述の  $I_d$  (この物体に  $I_d = 10^{-10} \text{ A}$  が流れたと仮定する) による物体の電位上昇は、漏れ電流が  $10^{14} \Omega$  程度で同じになる。このような大きな漏れ抵抗は降雨中にはほとんど存在しないので、 $I_d$  による物体帶電に対する寄与は実用上は小さいと考えられる。

## 5.2 水滴が物体に接触するときのマイクロ放電の可能性

実験装置として用いた外部円筒電極の外側にラジオ用アンテナを置き、放送電波が存在しない周波数帯に同調させて、アンテナ上に水滴を落下させると、電線表面電界が約 1 kV/cm 以上になるとアンテナに水滴が衝突したときにラジオ雑音が認められる。この雑音はすべてのラジオ周波数帯で記録された。これはアンテナと帶電水滴との間で生じるマイクロ放電によるものであると考えられる。

えられ、一般にマイクロ放電は高い周波数の電位変化を被衝突物体にもたらすので、将来テレビアンテナに影響を与える可能性があると考えられる。また、このような放電は、水滴が生物に衝突するときにも生ずると考えられる。

## 6. む　す　び

本研究では、直流電圧を印加した ACSR 導体からの水滴コロナ電流特性、水滴電流特性ならびに水滴の比電荷特性に対する水の導電率の影響を示すとともに、降雨中のイオン流帶電現象に関連して水滴コロナならびに水滴と物体間で生ずるマイクロ放電の重要性を指摘した。マイクロ放電の詳細は稿を改めて報告する予定である。

本研究で述べた内容は帶電水滴を利用する CDS (charged droplet scrubber) などにおける水滴特性を理解するうえで役立つものと考えられる。

最後に、大学院修士課程における研究の一部として実

験の遂行に協力された石辺信治氏（現三菱電機㈱）ならびに実験装置の製作に協力された堺巖裕技官に感謝する。本研究の一部は文部省科学研究所によったことを記し、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 原 雅則, 赤崎正則: 放電研究, No. 79 (1980), D-2.
- 2) 原 雅則, 石辺信治, 赤崎正則: 静電気学会誌, 3, 3 (1979), 143.
- 3) M. Hara, S. Ishibe and M. Akazaki : J. Electrostatics, 6 (1979), 253.
- 4) M. Hara, S. Ishibe, S. Sumiyoshitani and M. Akazaki : J. Electrostatics, 8 (1980), 239.
- 5) 原 雅則, 金子正光, 山下敬彦, 赤崎正則: 静電気学会誌, 5, 3 (1981), 142.
- 6) M. Akazaki : IEEE Trans. Power Appar. Syst., 84 (1965), 1.
- 7) 赤崎正則, 林 石象: 電気学会雑誌, 88 (1968), 1430.
- 8) M. Hara, N. Hayata and M. Akazaki : J. Electrostatics, 4 (1978), 349.