

## 負極性直流沿面放電における表面空間電荷の コロナ電圧と電流周波数に与える影響\*

菅 原 宣 義\*\*  
保 莉 和 雄\*\*

(昭和55年9月30日受理)

### Effects of Surface Space Charges on the Corona Voltage and Frequency of Current in Negative DC Surface Discharges

by Noriyoshi SUGAWARA and Kazuo HOKARI

Measures of the Voltage vs. Current and Current vs. Frequency of Current characteristics of atmospheric discharges were made. Surface discharges with and without a backing electrode using the needle-to-blade of a razor gap were also taken. The experiments were performed in dry air of 6.5-6.7% relative humidity at 101.32 kPa pressure. Acryl resin was used in the sample plates as the electrical insulator.

In the results, the Voltages vs. Current characteristics of the surface discharge had nearly the same curve as that of the atmospheric discharge, and a 115-143% higher voltage region than that of the atmospheric discharge. This rise of voltage was determined by surface space charges accumulated on the insulator. The Current vs. Frequency of Current characteristics of the surface discharge had nearly the same curve as that of the atmospheric discharge. This was about 100-300 kHz lower in frequency region than the atmospheric discharge.

#### 1. 緒 言

全長 167 km に及ぶ我国初の直流送電による北海道—本州間の電力連系は、最終的に 600 MW DC $\pm$ 250 kV, 120 A になる予定である<sup>1)</sup>。今後、このような長距離大容量の直流送電に対する需要の増大を予想して、直流高電圧送電線の実用面での実験的研究が数多く行なわれ<sup>2)</sup>、多くの技術的開発がなされているがなお未解明の点も多く残されている。この中には汚損碍子の沿面せん絡現象と送電線の絶縁設計の問題があり、直流沿面放電の基礎研究の充実が望まれる処である。

\* 昭和55年4月電気学会全国大会にて一部発表

\*\* 北見工業大学電気工学科

このような観点から筆者らは、幾何学的電極配置を変えずに、気中放電（以下、気中と略す）および沿面放電の背後電極なし（以下、背後なしと略す）と背後電極付き（以下、背後付きと略す）の3種類の放電状態で昇圧 200 V/s の電圧を印加して、フラッシュオーバー電圧<sup>3)</sup>および絶縁材料と湿度がコロナ開始電圧に与える影響<sup>4)</sup>等に関して調べた。

この結果、絶縁板上に蓄積された空間電荷の影響が一部定性的に明らかとなったので、これを定量的に調べるために、本研究では、一定電圧を3分間印加してから測定することを繰り返して、電圧—電流 ( $V-I$ ) および電流—電流周波数 ( $I-F$ ) 特性について調べ、絶縁板上表面空間電荷の影響について検討した。

## 2. 実験方法

実験装置の回路構成を図-1に示す。印加電圧はデジタル電圧計で最小 0.09 kV まで読み取れる。印加電圧は、0.001  $\mu\text{A}$  程度の電流が流れ始める電圧の約 8 割程度低い電圧から、昇圧幅が沿面で 0.09~0.45 kV、気中で 0.9 kV 程度ずつステップ状に上げ、各昇圧ステップで3分間以上定電圧を印加してから測定した。コロナ電流は可動コイル形直流電流計を使用し、フルスケール 3  $\mu\text{A}$  レンジで 0.001  $\mu\text{A}$  程度まで読み取れる。電流周波数の測定は直列に入れた検出抵抗を介してデジタル周波数カウンターで測定した。この検出抵抗のシールドには十分注意をするとともに、電流測定から周波数測定へと測定項目を変える時にはスイッチ  $S_1$  と  $S_2$  を使用して、回路が開放状態にならないように注意した。

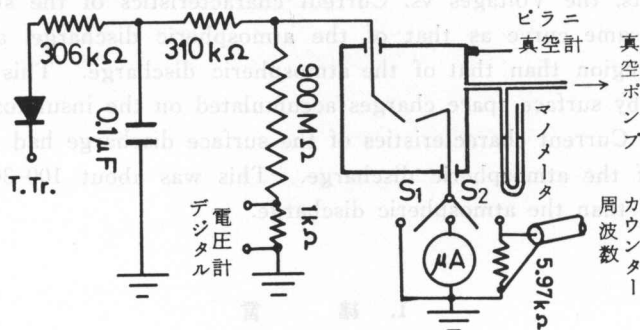


図-1 実験回路の構成図

実験容器内は、13.33 Pa まで真空にした後に低温除湿した空気をシリカゲルを通して送気し、気圧を 101.32 kPa 一定とした。この時の実験容器内の相対湿度は 6.5~6.7% である。

電極の幾何学的配置は図-2に示すように、気中、背後なしおよび背後付きである。高電圧は針電極に印加し、可動電極 (Blade 電極) は電流計と接続されている。気中の場合、これら電極は電極台からギャップ長よりも高い位置にセットしてある。背後なしの場合、試料板は電極台に置いた 6 mm 厚さのスペーサに乗せている。背後付きの場合は、可動電極と電氣的に接続された 1 mm 厚さのアルミ板で作った背後電極の上に試料板に乗せている。この背後付き

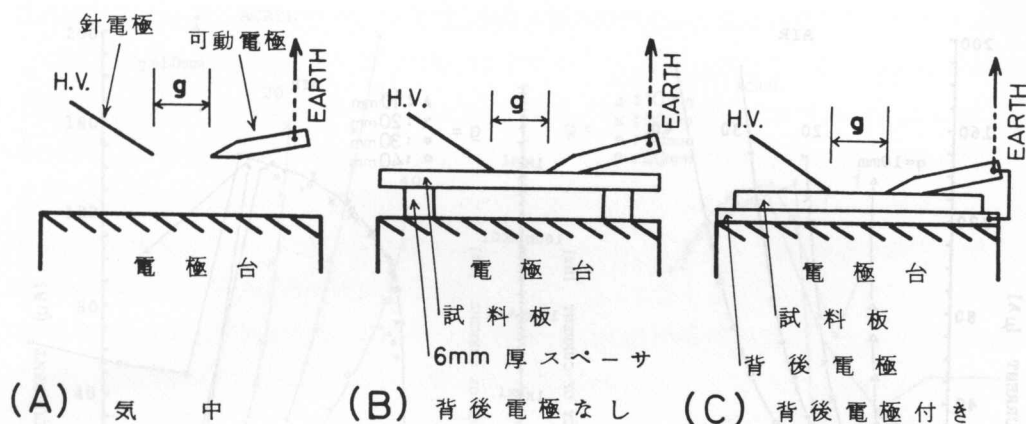


図-2 電極系の幾何学的配置

の場合で、試料板の片面にスズを真空蒸着し、試料板と背後電極との接触性を良くした場合はスズ蒸着背後電極付き(以下、スズ背後付きと略す)とする。これら沿面放電における針と可動電極の置き方は図-3に示す。試料板に対して針電極の角度は $30^\circ$

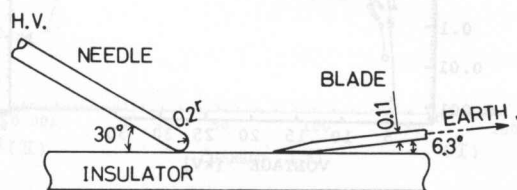


図-3 電極の状態

で、“三ノ五”の“がす針5号”の先を曲率半径 $0.2\text{ mm}$  ( $\pm 5\%$ )の半球状に加工して使用した。可動電極には両刃のカミソリ刃を使用し、図の様に試料板との角度を約 $6.3^\circ$ に固定して使用した。針電極は実験毎にピカールで磨いて鏡面仕上とし、可動電極は新しいものと取換え、気中の $10\text{ mm}$ ギャップで $5\text{ }\mu\text{A}$ のコロナ電流を10分間通電したものを使用した。

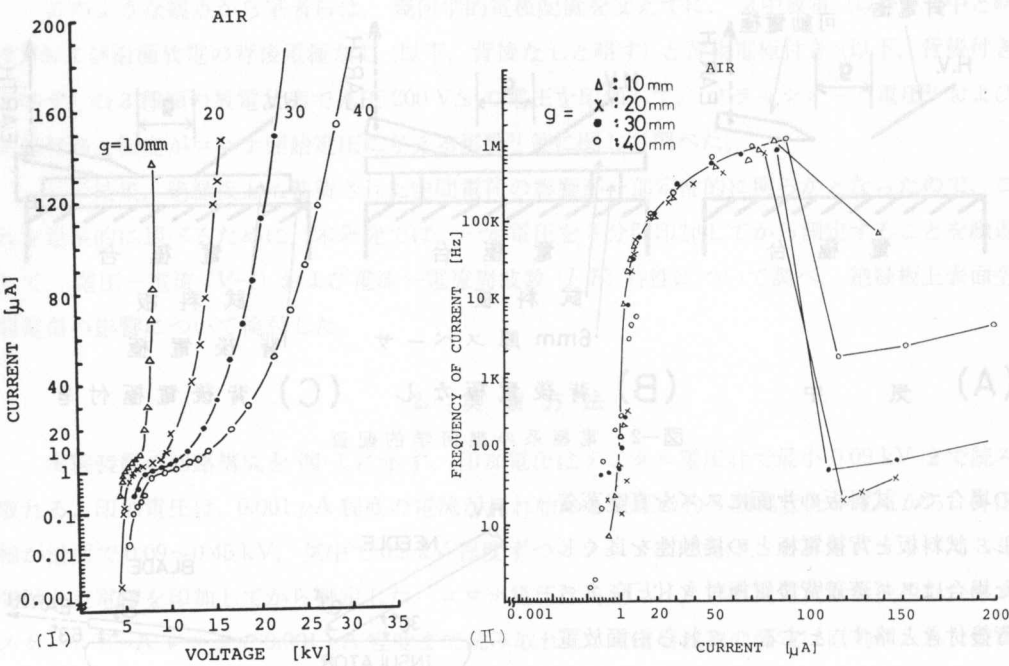
試料板は透明なアクリル板( $100\times 100\text{ mm}$ 、厚さ $3\text{ mm}$ )とし、純水とアルコール処理により表面電荷を除去するとともに、約 $40^\circ\text{C}$ の恒温槽内で30分以上乾燥させ、実験に使用する毎に静電電位計により表面電位が $\pm 100\text{ V}$ 以内であるものを使用した。

なお、本実験では紫外線照射などによる初期電子供給は行なっていない。

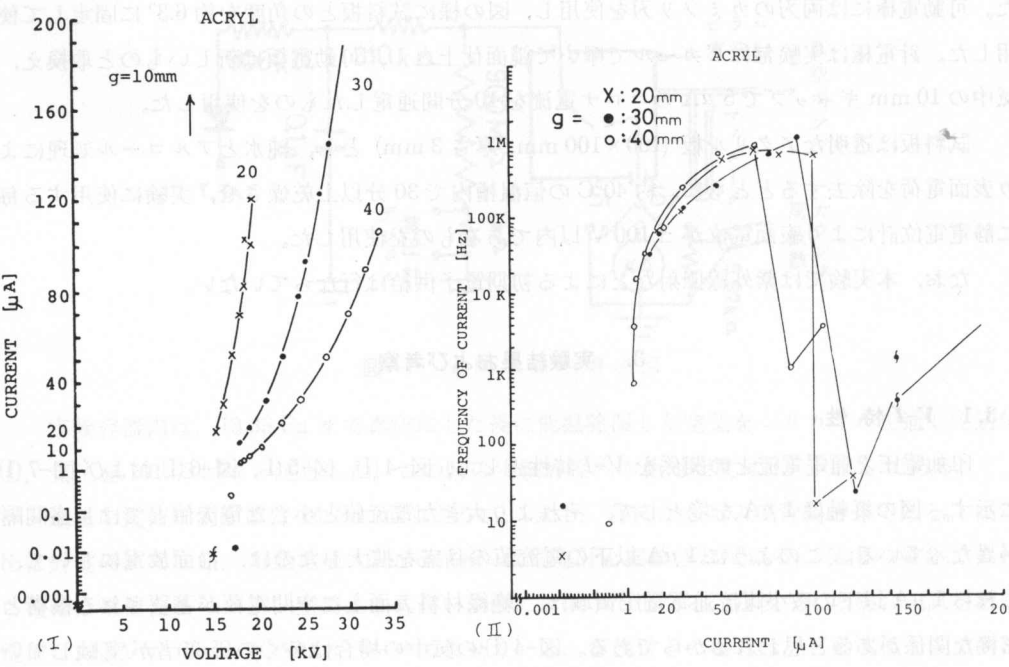
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 $V-I$ 特性

印加電圧と通電電流との関係を $V-I$ 特性として、図-4(I)、図-5(I)、図-6(I)および図-7(I)に示す。図の縦軸は $1\text{ }\mu\text{A}$ を境として、それより大きな電流値と小さな電流値とは目盛間隔が異なっている。このように $1\text{ }\mu\text{A}$ 以下の電流値の目盛を拡大したのは、沿面放電において、これら $1\text{ }\mu\text{A}$ 以下の微小電流通電電圧領域は、絶縁材料表面上に空間電荷が蓄積される機構と密接な関係があると思われるからである。図-4(I)の気中の場合は多くの研究者が実験している針対平板電極における $V-I$ 特性と同じく、各ギャップに相当した曲線が得られる。これら



図—4 気中放電における  $V-I$  および  $I-F$  特性



図—5 背後電極なし沿面放電の  $V-I$  および  $I-F$  特性

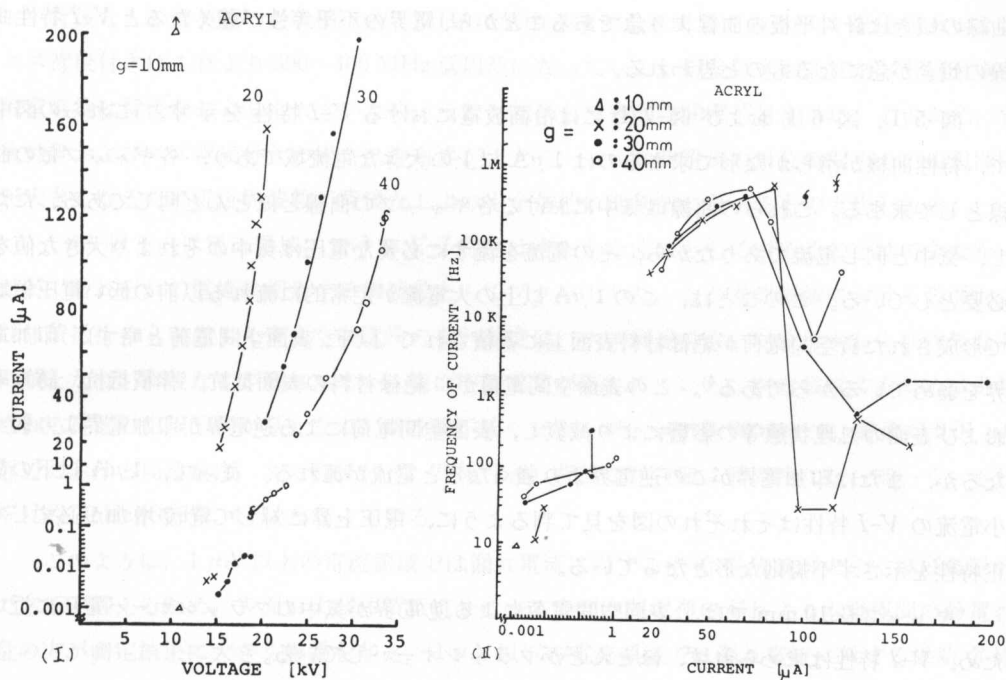


図-6 背後電極付き沿面放電の  $V-I$  および  $I-F$  特性

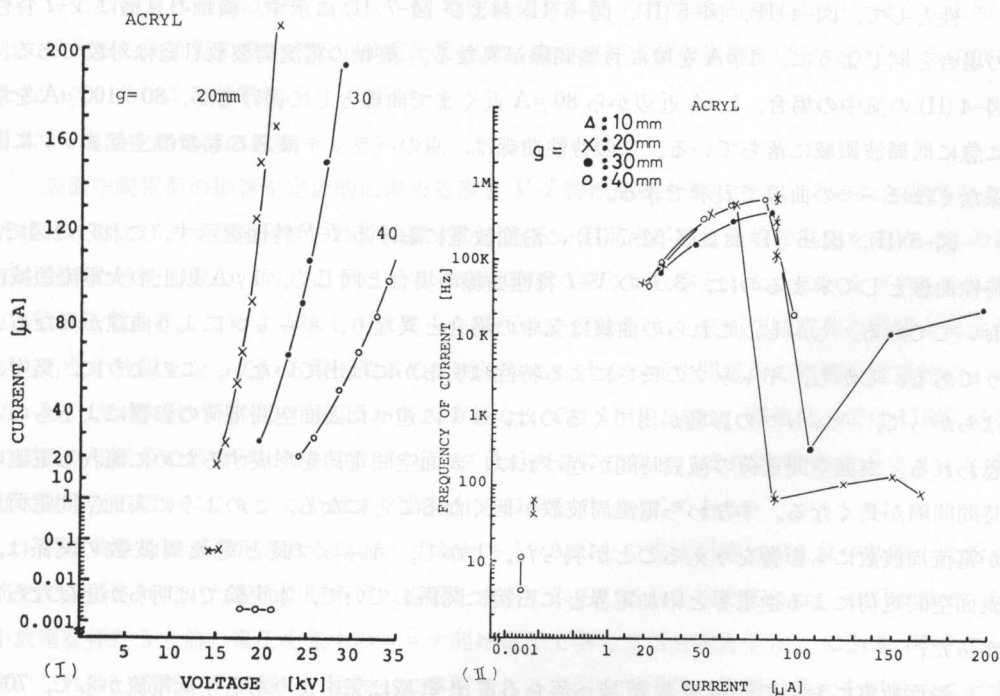


図-7 スズ蒸着背後電極付き沿面放電の  $V-I$  および  $I-F$  特性

曲線の傾きは針対平板の曲線より急であることから、電界の不平等性が強くなると  $V-I$  特性曲線の傾きが急になるものと思われる。

図-5 (I), 図-6 (I) および 図-7 (I) には沿面放電における  $V-I$  特性を示す。これらの図中で、特性曲線が滑らかな形で求まるのは  $1\mu\text{A}$  以上の大きな電流域であり、各ギャップ毎の曲線として求まる。これらの曲線は気中における各ギャップの曲線とほとんど同じである。ただし、気中と同じ電流でありながら、その電流を流すに必要な電圧は気中のそれより大きな値を必要としている。このことは、この  $1\mu\text{A}$  以上の大電流が定常的に流れる以前の低い電圧領域で形成された負空間電荷が絶縁材料表面上に蓄積されて（以下、表面空間電荷と略す）、印加電界を弱めているからである<sup>5)</sup>。この表面空間電荷が、絶縁材料の表面抵抗、体積抵抗、誘電率および表面の処理状態等の影響により減衰し、表面空間電荷による逆電界が印加電界より弱くなるか、または印加電界がこの逆電界より強くなると電流が流れる。従って、 $1\mu\text{A}$  以下の微小電流の  $V-I$  特性はそれぞれの図を見て判るように、電圧上昇に対して電流増加が必ずしも正特性を示さず不規則な形となっている。

ギャップ長  $10\text{ mm}$  では、表面空間電荷による逆電界が気中のフラッシュオーバー電圧に近いため、 $V-I$  特性は求められず、ほとんどがフラッシュオーバーしている。

### 3.2 $I-F$ 特性

$V-I$  特性を測定しながら、各電流に相当する電流周波数を測定し、これらの関係を  $I-F$  特性として、図-4 (II), 図-5 (II), 図-6 (II) および 図-7 (II) に示す。横軸の目盛は  $V-I$  特性の場合と同じように、 $1\mu\text{A}$  を境に目盛間隔が異なる。縦軸の電流周波数目盛は対数である。図-4 (II) の気中の場合、 $1\mu\text{A}$  近辺から  $80\mu\text{A}$  近くまで曲線として書けるが、 $80\sim 100\mu\text{A}$  を境に急に低周波領域に落ちている。この特性曲線は、点のパラッキはあるものの、ギャップに関係なくほぼ一つの曲線で表示できる。

図-5 (II), 図-6 (II) および 図-7 (II) に沿面放電における  $I-F$  特性を示す。これらの図で、特性曲線として求まるのは、3.1 の  $V-I$  特性曲線の場合と同じく、 $1\mu\text{A}$  以上の大電流領域においてである。しかし、これらの曲線は気中の場合と異なり、ギャップにより曲線が異なるようである。しかし、ギャップの長さによる特性は明らかには出ていない。このように、気中とはちがって、ギャップの影響が出てくるのは、3.1 に述べた表面空間電荷の影響によるものと思われる。表面空間電荷の減衰時間が遅ければ、表面空間電荷を形成するために流れる電流の時間間隔が長くなる。すなわち電流周波数が低くなることになる。このように表面空間電荷量が電流周波数にも影響を与えることが判った。しかし、ギャップ長と電流周波数の関係は、表面空間電荷による逆電界と印加電界とに密接に関係していて、本実験では明らかとはならなかった。

沿面放電において低周波数領域へ落ちる電流領域は気中よりも若干低電流からで、 $70\sim 100\mu\text{A}$  となっているが、それらの原因に関しては今回実験していないので除くことにする。

背後なしの周波数の最大値は約 1 MHz で気中とほとんど同じであるが、背後付きおよびスズ背後付きはこれより 300~400 MHz 低周波になっている。背後付きおよびスズ背後付きの静電容量は背後なしよりも大きいため、それに比例して表面空間電荷量も多い。このため、背後付きおよびスズ背後付きの場合は逆電界が大きく、パルス状電流の単位時間当りの出現間隔が大きくなるため電流周波数が背後なしよりも全体的に低周波になるものと思われる。

1  $\mu\text{A}$  以下の低電流領域における  $V-I$  特性は滑らかな曲線として求めることはできなかったが、それぞれの電流に相当する周波数としてプロットした。この電流領域における表面および体積抵抗分も考慮した表面空間電荷の漏れ易さは、スズ背後付き、背後付きおよび背後なしの順となり、背後なしが漏れにくい。表面空間電荷が漏れにくいとこれを形成するために供給される電流の出現間隔が長くなり、周波数が低くなる。ギャップ長 20 mm で、電流が 0.01  $\mu\text{A}$  近辺における周波数は、スズ背後付き、背後付き、背後なしの順に低周波になっていて、それぞれ約 70 Hz, 30 Hz, 4 Hz となっている。

このように、1  $\mu\text{A}$  以上の電流領域では漏れ電流に対する供給電流量が大きくほぼ無限的であると言えるため、表面および体積抵抗分による表面空間電荷の漏れよりも電極間の静電容量の方が測定結果に大きく影響を与え、1  $\mu\text{A}$  以下の電流領域では漏れ電流に対する供給電流量が小さく有限であるため、電極間の静電容量よりも表面および体積抵抗分による表面空間電荷の漏れが測定結果に影響を与えている。

以上の結果と 3.1 の結果より、 $V-I$  特性曲線および  $I-F$  特性曲線が気中とほとんど同じ形で求まる沿面放電の電圧あるいは電流領域では表面空間電荷の影響を受けながらも気中放電となっている<sup>6)</sup>ことが判る。

### 3.3 表面空間電荷の影響

表面空間電荷の影響を定量的に求める事を  $V-I$  特性曲線を用いてこころみた。背後なし、背後付きおよびスズ背後付きの特性曲線より、ある一定電流が流れる時の電圧を求め、この電圧を気中の特性曲線より同じようにして求めた電圧で割り百分率とした。これをプロットしたのが図-8である。このようにして求まった電圧比の百分率は、表面空間電荷の影響を受けながらも気中放電となっている電圧領域の沿面放電における表面空間電荷の影響を定量的に示している。気中に比べギャップ長 15 mm の背後なしでは 114% 以上、背後付きでは 118% 以上の表面空間電荷の影響が出ており、ギャップ長が大きくなると、また通電電流が小さいと % は大きくなる傾向にある。これはスズ背後付きの場合でも同じである。

$V-I$  特性曲線が測定される以前、すなわち 1  $\mu\text{A}$  以上の電流が流れ出し気中放電となる寸前まで蓄積されていた表面空間電荷の影響を求めてみる。これを求めるには、沿面放電で、気中放電を伴う寸前の電圧を気中のコロナ開始電圧で割って百分率とした。これを図-9に示す。これは、各ギャップ毎に、沿面上に蓄積される表面空間電荷の影響の最大を定量的に示すことになる。この図は折線で示しており、25 mm で最小値を持つようになっているが、今後の



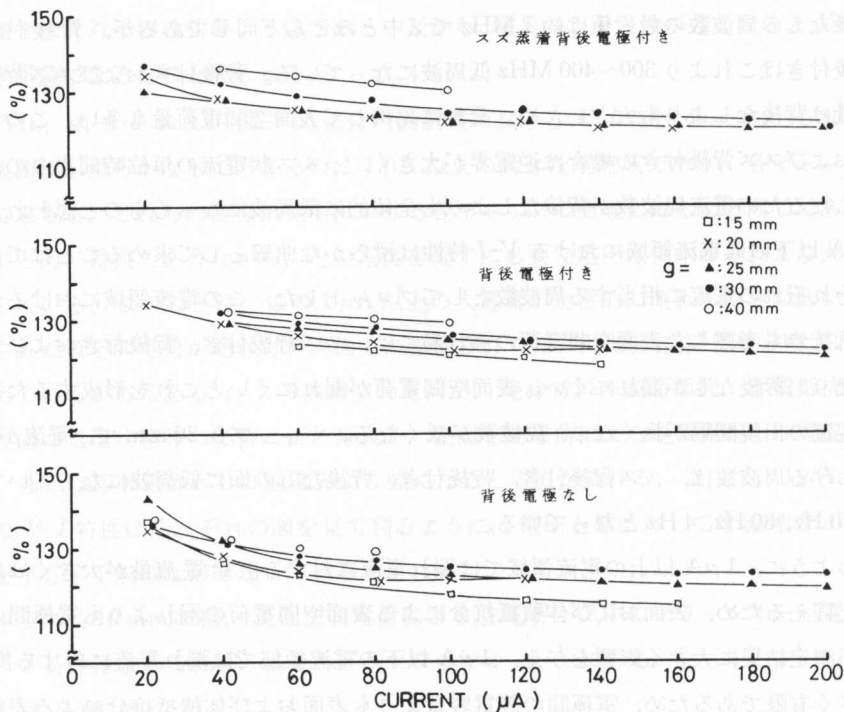


図-8 沿面コロナ電圧の気中コロナ電圧に対する百分率と電流との関係

研究でさらに確かめる必要がある。ギャップ長が大きくなるに従って表面空間電荷の影響も大きくなり、さらに背後付きおよびスズ背後付きの方が背後なしよりも影響が大きくなる。この電圧領域におけるギャップ長および材質を変えた場合の表面空間電荷の蓄積と減衰機構およびその影響に関する研究は現在計画中である。

### 3.4 スズ蒸着背後電極付き試料を使用した場合

背後電極付きの実験をするに当たり、試料板を直接電極板上に置いた場合と、片面にスズを真空蒸着して試料面と背後電極との密着性を良くした場合とについて実験結果を比べてみる。

図-6(I)と図-7(I)のV-I特性では、 $1\mu\text{A}$ 以上の特性曲線の求まる領域では両者ほとんど同じであるが、 $1\mu\text{A}$ 以下の微小電流領域では、スズ蒸着付きの方がプロット点が極めて少なくなっている。

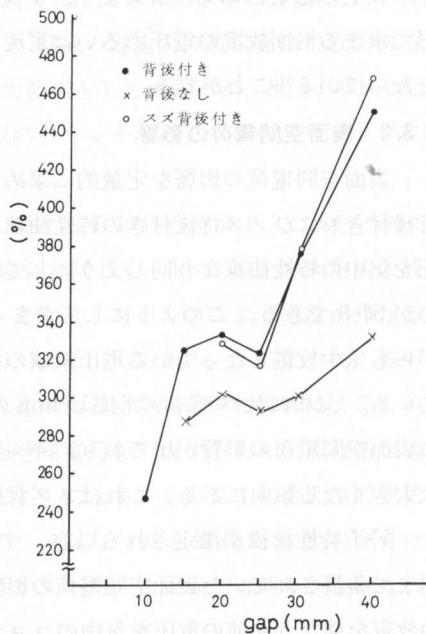


図-9 気中放電を伴う寸前の沿面コロナ電圧の気中コロナ開始電圧に対する百分率と電流との関係



る。図-6(II)と図-7(II)の  $I$ - $F$  特性では  $1\mu\text{A}$  以上の特性曲線は両者ほとんど同じである。 $1\mu\text{A}$  以下の微小電流領域のギャップ長  $20\text{ mm}$ 、電流  $0.01\mu\text{A}$  近辺では、背後付きの最大周波数が  $300\text{ Hz}$  であるのに対してスズ背後付きでは  $70\text{ Hz}$  となっている。スズ背後付きは試料板に密着して導体があるため、背後付きのような試料板と電極との密着の悪い部分が無いので、確実に容量を形成して表面空間電荷を試料表面に蓄積させることができるので電荷の減衰が遅くなるためと思われる。しかし、データ量が少ないので、この電流領域における今後の研究より再度確める必要がある。

図-8における表面空間電荷の影響を調べた図では、スズ背後付きの方がギャップ長の影響を明らかに示しているようにも思われるが明言できるほどではない。また、図-9の沿面上の蓄積される表面空間電荷の影響の最大量に関しても両者に明確な差は認められない。

#### 4. 結 論

以上の実験より以下の事が明らかとなった。

(1) 沿面放電において、 $1\mu\text{A}$  以上の大きな電流が流れるような電圧領域では表面空間電荷の影響を受けながら気中放電状態になっている。

(2)  $1\mu\text{A}$  以下の微小電流部分では絶縁材料の表面および体積抵抗による表面空間電荷の漏れが電流周波数に大きく影響し、 $1\mu\text{A}$  以上の大きな電流領域では電極間で形成される静電容量が電流周波数に大きく影響する。

(3) 背後電極と試料との密着性は  $1\mu\text{A}$  以下の電流領域における電流周波数に影響を与えているようである。

(4) 気中放電を伴わない場合における表面空間電荷の影響の最大は電極間で形成される静電容量の大きさに等しく、またギャップ長が大きくなるほど大きくなる。すなわち、背後付きおよびスズ背後付きの表面空間電荷量は背後なしよりも  $1.4$  倍ほど大きい。

終りに本実験に協力された本学卒業生中村利寿、本間康司、大場 聡、六条昌一の各君に厚くお礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) たとえば、竹之内：電気学会雑誌，Vol. 100，No. 8 (1980)，
- 2) たとえば、放電研究，No. 75 (1979)，No. 79 (1980)。
- 3) 菅原・保莉・土方：北見工大研報，Vol. 11，No. 1 (1979)。
- 4) 大塚・菅原・保莉・土方：北見工大研報，Vol. 11，No. 1 (1979)。
- 5) 菅原・保莉：電気学会全国大会，No. 117 (1980)。
- 6) 菅原・保莉：電気四学会北海道支部連合大会，No. 81 (1980)。