

吸水性絶縁物上負極性直流沿面放電の $V-I$ 特性

菅原 宣義**

保 莉 和 雄**

(昭和58年4月30日受理)

$V-I$ Characteristics of Negative DC Surface Discharge on an Insulator having Water Absorbability

by Noriyoshi SUGAWARA and Kazuo HOKARI

Measures of the $V-I$ characteristics of surface discharges on an insulator having large water absorbability were made. Surface discharges with and without a backing electrode were taken. The insulators were treated in the following three ways, (A) the insulator was soaked in distilled water for about 55 hours, (B) the insulator was dried in a drying oven for about 15 hours and (C) the insulator was dehydrated at 0.93 mPa lower pressure after being dried in a drying oven for 45 days.

Differences of $V-I$ characteristic curves between the insulators treated by the three methods under 10^{-6} A appeared clearly. Flashover voltage (V_f) of the drier insulator was higher than V_f of the insulator including water, i.e. V_f of (A) $<$ V_f of (B) $<$ V_f of (C). These relations existed in surface discharges with and without a backing electrode.

1. 緒 言

負極性直流電圧を定常的に印加した場合の乾燥空気中における沿面放電特性として、コロナ開始電圧 (V_c)、電磁オシログラフによる電流と電圧の同時観測、電圧—電流特性 ($V-I$ 特性)、電流—周波数特性 ($I-F$ 特性)、フラッシュオーバ電圧 (V_f) を測定してきた¹⁻⁶⁾。試料板の絶縁物は乾燥して使用し、電極配置は背後電極のない場合 (背後電極なし) と背後電極のある場合 (背後電極付き) の二種類について実験した。負極性直流電圧を印加した沿面放電で、放電が停止するのは、高電圧が印加されている針電極近傍の絶縁物上に負電荷が蓄積して印加電界を弱めるため針電極先端の実効電界がコロナを開始する電界よりも低くなり放電が停止する^{6,7)}。従って、絶縁物上に蓄積した負電荷の生成と消滅の時間割合がパルス性電流の周期となり、その周波数を決める^{5,6)}。この負電荷の針電極近傍絶縁物表面からの消滅は、(A) 電子分離、(B) 絶縁物表面の表面抵抗を通して対向電極へ漏れる、(C) 絶縁物の体積抵抗を通して背後電極へ漏れるなど

* 昭和57年10月電気四学会北海道支部連合大会と昭和58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

が考えられる。今までの実験結果から、消滅過程は電極配置により違い、背後電極なしの場合は主に (B) が、背後電極付きの場合は主に (C) が (A) よりも効果的に負電荷量を減衰させるようである^{5,6)}。従って、絶縁物の表面抵抗率 (ρ_s) や体積抵抗率 (ρ_v) の違いは電流周波数の違いとなって現われてくるので、絶縁物の違いが電流周波数の違いとなる。

本実験での電流測定は可動コイル形電流計で行っているため、指示される電流値はパルス性電流の平均値であり、同じパルス波高値であっても高い周波数のパルス電流は大きな電流値で示される。このことから、 ρ_s や ρ_v の違いは $V-I$ 特性にも影響を与えることが判る。同じ材質の絶縁物であっても、吸水率の大きなものは吸水量によって ρ_s や ρ_v の値が違う。今まで実験に使用してきた試料板、紙基材フェノール樹脂積層板 (ベークライト)、ソーダ石灰ガラス (ガラス)、アクリル樹脂 (PMMA) を蒸留水中に約 55 時間程度浸したものを、ギャップ 2 cm で $V-I$ 特性を調べた処、PMMA とガラスは乾燥させた場合とほとんど同じ特性曲線が求まったが、ベークライトは違う特性曲線となった。従って、本報告では、吸水性の大きなベークライトを三種類の条件、(一) 蒸留水中に長時間浸した場合、(二) 乾燥させた場合、(三) 脱水させた場合についての $V-I$ 特性や V_f について比較検討を行なった。

2. 実験方法

実験装置の回路構成を図-1 に示す。図の左側の回路は、 $V-I$ 特性、 $I-F$ 特性および V_f を測定するのに使用し、右側に示す回路の高電圧端子は左の回路のコンデンサーより右側の直列抵抗と電圧測定用抵抗を通して直流安定化高電圧電源に接続し、主にオシロスコープによる電流波形とその周波数の観測に使用した。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。電圧の印加方法は 0.45 kV ずつステップ状に昇圧し、各ステップで約 3 分間程度一定電圧を維持した後に測定した。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が、これよりも小さな電流は周波数測定用の抵抗の両端子間にエレクトロニック検流計を入れて測定した。電流周波数は接地電極に直列に接続し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。電流計のレンジの変更や電流測

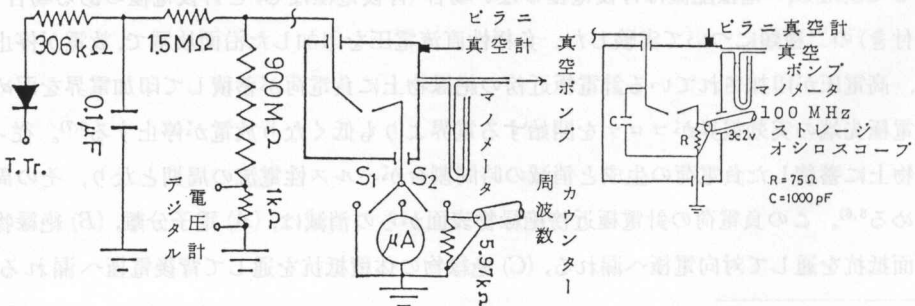


図-1 実験回路の構成図

定から周波数測定へと測定項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。右の回路のコンデンサ C は電流波形の振動分を取り除くためのセラミックコンデンサーで、これと電極間の接続には導体のインピーダンス等に十分注意し、極力正しい電流波形が観測されるように心掛けた。電流波形はストレージオシロスコープで観測し、電圧変化に対する波形の変化や周波数の変化に関して調べた。

実験容器内は、13.33 Pa まで低圧にした後、約 $-14 \sim -20^\circ\text{C}$ で低温除湿した空気をシリカゲルを通して送気し、気圧 101.32 kPa 一定で実験を行なった。この時の実験環境空気の相対湿度は 20°C で約 6.5~8.5% である。

電極の配置は、背後電極なしの場合と背後電極付きの場合の二種類で、先報と同じである^{3,5,6)}。

高電圧針電極の半球状先端の曲率半径は 0.2 mm ($\pm 5\%$) で、接地電極は両刃のカミソリ刃を使用した。針電極は実験毎にビカールで磨いて使用し、接地電極は新しいものと取り換え、気中の 10 mm ギャップで $5 \mu\text{A}$ のコロナ電流を 10 分間通電したものを使用した。

試料板はペークライトで、その大きさは $120 \times 120 \text{ mm}$ で厚さ 3 mm である。試料板は実験に使用する毎に静電電位計で表面電位が $\pm 100 \text{ V}$ 以内のものを使用した。試料板の処理方法は次の三種類について行なった。

A. 試料板が完全に浸る程度の蒸留水 ($20 \sim 25^\circ\text{C}$) 中に試料板を立てて 55 ± 15 時間浸し、試料板に水を吸収させた。水から取り出した試料板の表面の水分をガーゼで完全にふき取ってから電極台にセットした。この様にして作った試料板を浸水試料とする。

B. アルコールと蒸留水で試料板表面の汚れと残留電荷を除去したものを $40 \pm 1.5^\circ\text{C}$ の恒温槽中で $15 \sim 48$ 時間乾燥した後で実験に使用した。この様にして作った試料板を乾燥試料とする。

C. B の場合と同じようにして清浄にした試料板を恒温槽中で、 $40 \pm 1.5^\circ\text{C}$ で 30 日間、 $60 \pm 5^\circ\text{C}$ で 14 日間程度乾燥した後、これを真空蒸着装置に入れて約 0.93 mPa で $5 \sim 6$ 時間真空引き運転し、その後運転を止めそのまま約 16 時間放置した後で相対湿度約 0% の乾燥空気装置

表-1 試料板の電気的性質

試料 性質	アクリル	ペークライト	ガラス
比誘電率 (1 MHz)	2.6	4.9	6.2
体積抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)	10^{15}	$10^{10} \sim 10^{13}$	$> 10^{13}$
表面抵抗率 (Ω)	10^{16}	$10^{13} \sim 10^{13}$	2.3×10^{13}
吸水量 (24h.) (%)	0.3~0.4 (3.2 mm^t)	0.2~4.5 (3.2 mm^t)	0

内を置換してから試料板を取り出して実験に使用した。この様にして作った試料板を脱水試料とする。

試料板の電気的性質を表-1に示す。アクリルとガラスは参考用である。ベークライトの吸水量が他の二つよりもオーダ的に1ケタ程度大きい。

3. 実験結果および考察

3.1 $V-I$ 特性

印加電圧とコロナ電流との関係を図-2と図-3に示す。乾燥試料と脱水試料はほぼ同じ様な特性を示し、両者とも $g=1\text{cm}$ の特性曲線は示されない。しかし、図-4に示される様に $0.1\mu\text{A}$ 以下の微小電流領域では観測されてフラッシュオーバーしてしまう。浸水試料はこれら二つの試料とは違って $g=1\text{cm}$ でも 10^{-10}A オーダから連続的に $V-I$ 特性曲線が求まり、これ以外のギャップでも連続的に求まる。この様に、 10^{-6}A 以下の微小電流の $V-I$ 特性を観測するために、電流目盛に対数を使用した片対数グラフで電圧と電流との関係を示したのが図-4である。従って、図-2や図-3の下に図-4を足して見ると 10^{-10}A 程度からフラッシュオーバーまでの $V-I$ 特性が見られる。図-2と図-3に示される様な電流領域の特性曲線の再現性は良く、ほぼ線の太さ程度のバラツキであるが、図-4に示す電流領域では特に乾燥試料と脱水試料の実験毎の再現性が良くない。この $V-I$ 特性を見ると、浸水試料は 10^{-10}A オーダからフラッシュオーバーまで特性曲線が連続しているが、乾燥試料と脱水試料はそれぞれ図-4の特性曲線と図-2および図-3の特性曲線とは不連続となっている。これは、図-4の特性曲線が求まる電圧領域では、高電圧針電極近傍の絶縁物表面に蓄積した負電荷が消滅せずに印加電界を弱めて放電を停止する事ができる電圧領域であり、絶縁物表面蓄積電荷と放電とが密接に関係していると考えられる事からこのような電圧領域を沿面放電単独の電圧領域とした⁶⁾。一方、図-2や図-3の様に数十 μA 程度以上の大きな電流領域で $V-I$ 特性が求まり、コロナの発光写真や $I-F$ 特性等を沿面放電と同じ電極配置で求めた気中放電の実験結果と比較検討した処、絶縁物表面に蓄積した負電荷の印加電界緩和作用を受けながらさらに気中放電状態にあるものと考えられる。従って、この様な電圧領域を気中放電を伴う電圧領域とした⁶⁾。この様に、乾燥試料と脱水試料では沿面放電単独の電圧領域と気中放電を伴う電圧領域に分けられる事が $V-I$ 特性曲線から明らかに判るが浸水試料ではこれらの電圧領域の区分が不明瞭であり、果して分ける事が可能かどうかを調べた。

この実験方法は、図-1の右の回路を使用して、電圧をステップ状に上昇させながら、気中放電と三種類に処理した試料板上の沿面放電の電流波形と周波数を観測した。気中放電の場合は V_a になった直後から規則正しい数十 kHz~1 MHz 程度のパルスが観測される。沿面放電の乾燥試料と脱水試料の場合、図-2や図-3に示される曲線が求まる電圧範囲では気中放電の場合と同じく規則正しい数十 kHz~1 MHz 程度のパルスが観測されるが、図-4に示される様

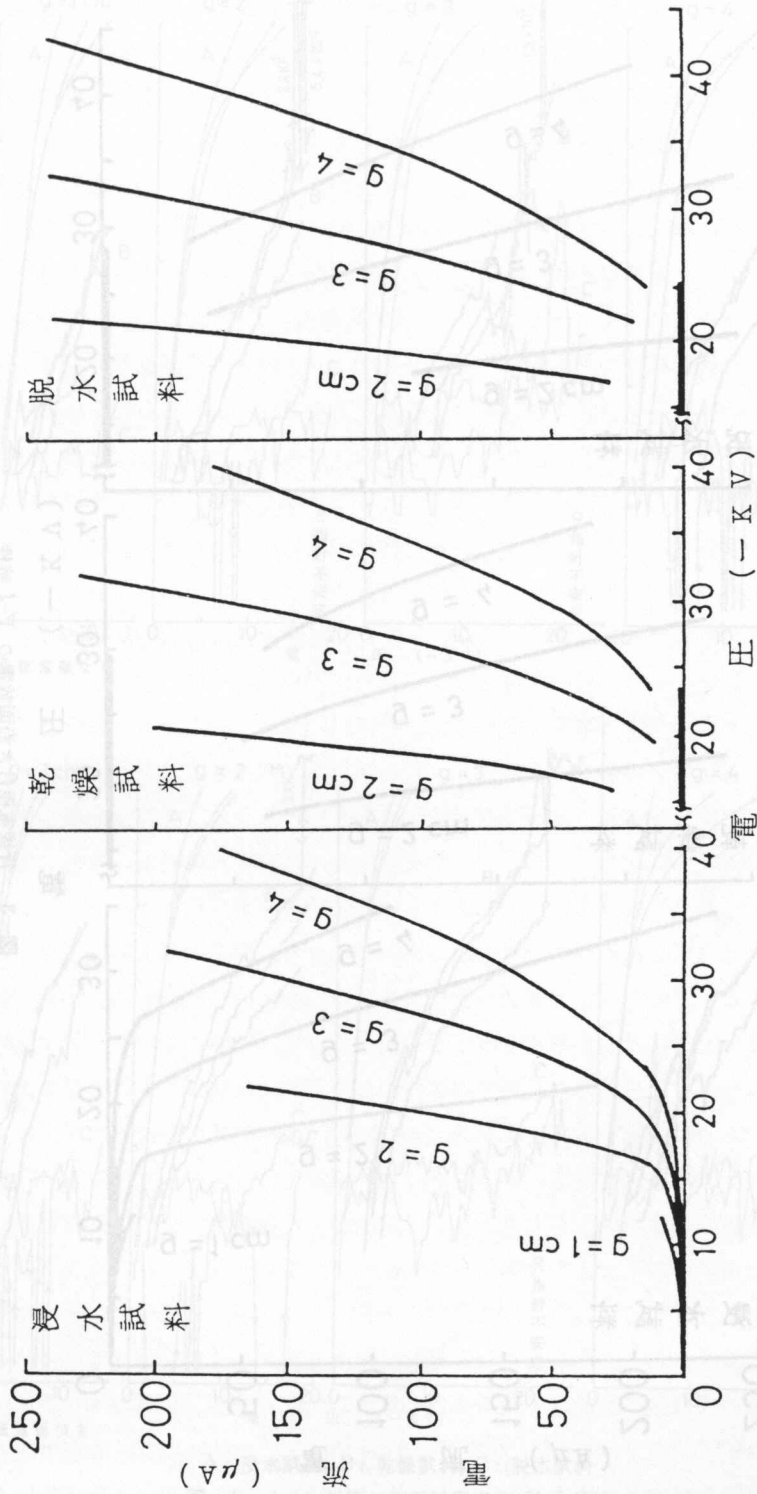


図-2 背後電極なし沿面放電の V-I 特性

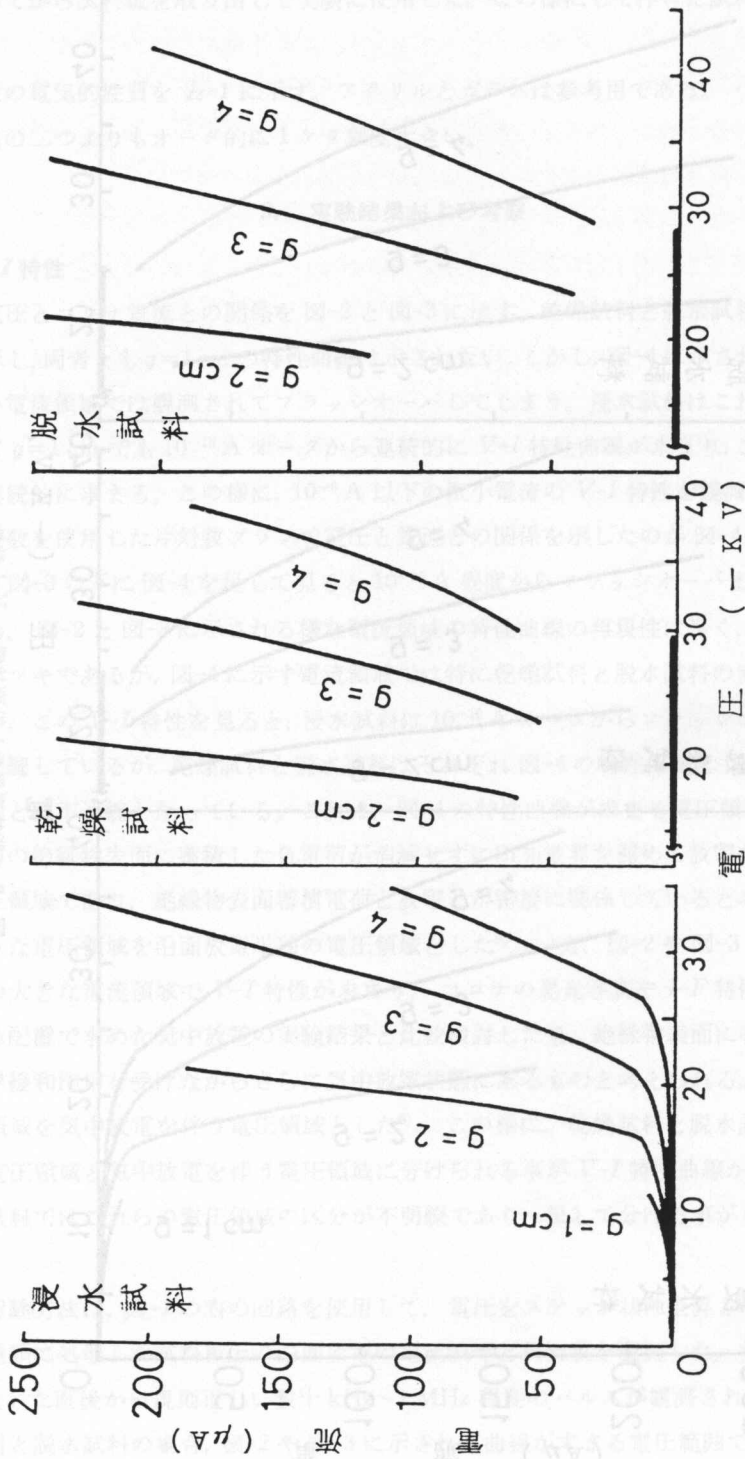
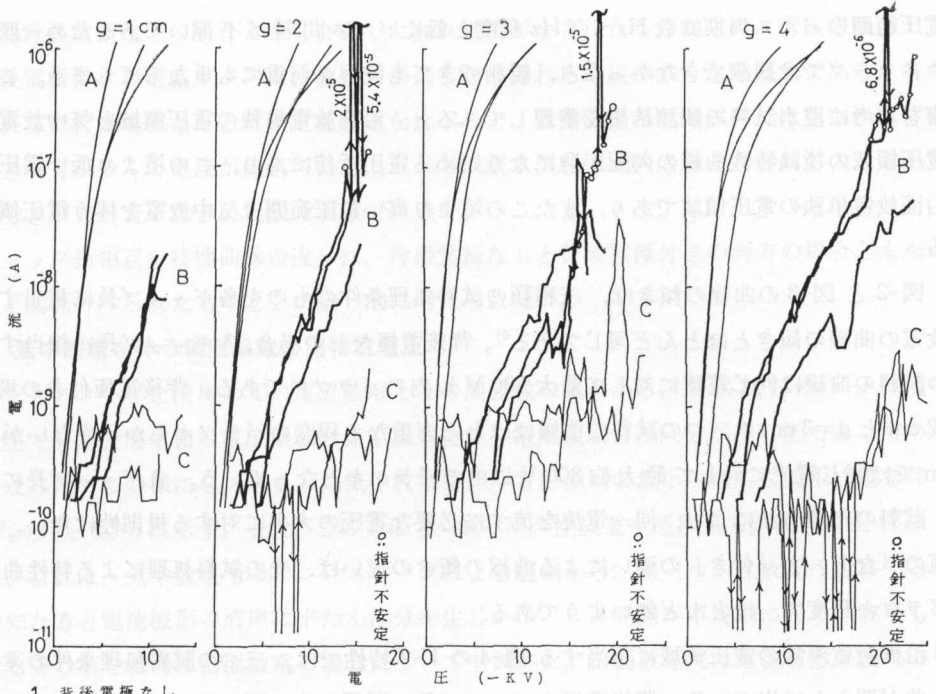
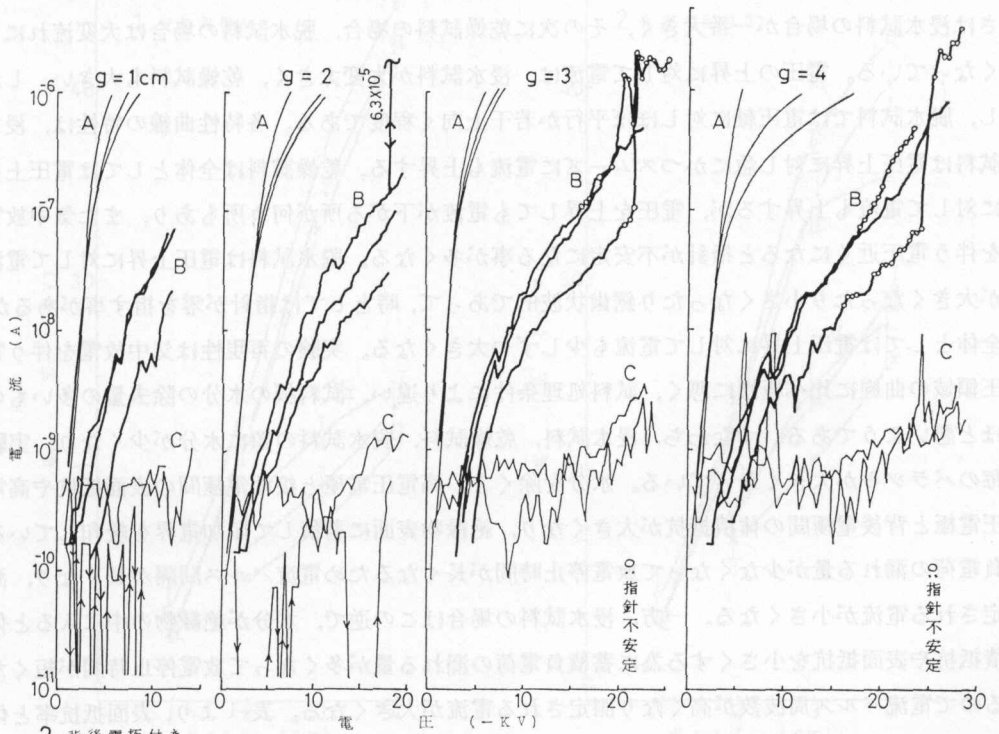


図-3 背後電極付き沿面放電の V-I 特性



1 背後電極なし



2 背後電極付き

A: 浸水試料, B: 乾燥試料, C: 脱水試料

図-4 1 μ A 以下の広領域電流の V-I 特性

な電圧範囲のパルス周期は数 Hz～百 Hz 程度と低くパルス間隔が不揃いであるため一般のオシロスコープでは観測できなかつたり、観測できても波形が何重にも重なってしまう。これらの事を参考に浸水試料の観測結果を整理してみると、沿面放電単独の電圧領域と気中放電を伴う電圧領域の境は特性曲線の勾配が急になり始める電圧近傍にあり、この境より低い電圧範囲は沿面放電単独の電圧領域であり、またこの境より高い電圧範囲は気中放電を伴う電圧領域である。

図-2 と 図-3 の曲線の傾きは、三種類の試料処理条件のものを各ギャップ長に相当する気中放電の曲線の傾きとほとんど同じである⁹⁾。背後電極なしの場合、各ギャップ長に相当する三つの試料の曲線は同じ電流に対して最大 500 V 以内のバラツキである。背後電極付きの場合、 $g=2\text{ cm}$ と $g=3\text{ cm}$ の三つの試料の曲線はほとんど重なる程度のバラツキしか示さないが、 $g=4\text{ cm}$ では同じ電流に対して最大約 300 V 以内のバラツキとなっている。各ギャップ長において、試料の処理方法により、同一電流を流すに必要な電圧の大小に対する規則性は無い。背後電極の「なし」と「付き」の違いによる曲線の傾きの違いは、先の試料処理による特性曲線間のバラツキ程度で、ほとんど無いようである。

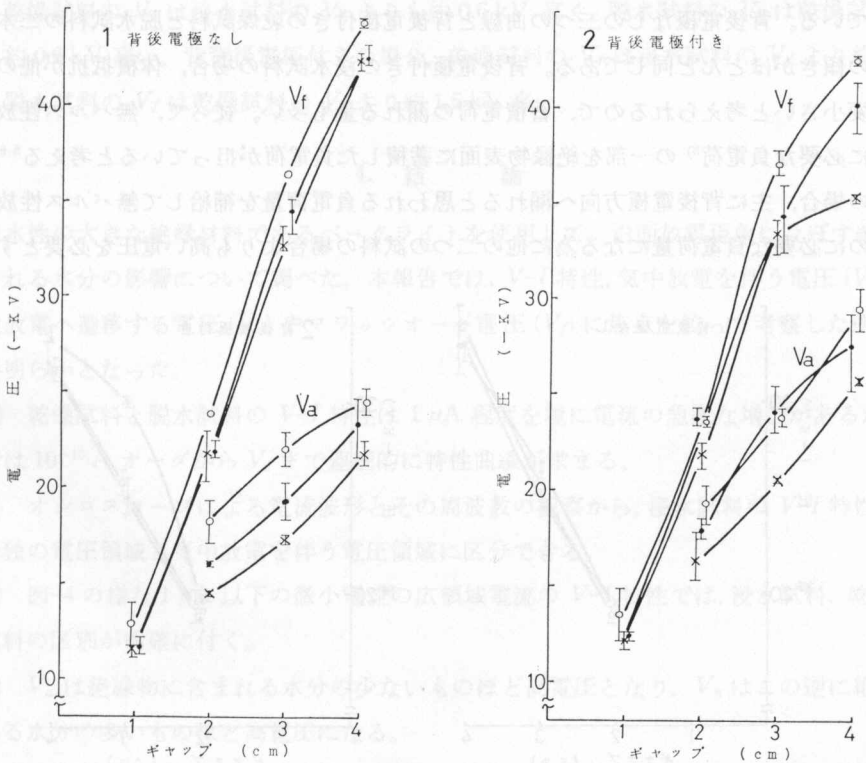
沿面放電単独の電圧領域に相当する 図-4 の $V-I$ 特性では、三つの試料処理条件の違いによる差が明らかに出ている。背後電極やギャップ長に関係なく、同一電圧に対する電流の大きさは浸水試料の場合が一番大きく、その次に乾燥試料の場合、脱水試料の場合は大変流れにくくなっている。電圧の上昇に対して電流は、浸水試料が大変大きく、乾燥試料も大きい。しかし、脱水試料では電圧軸に対しほぼ平行か若干上向く程度である。各特性曲線の特性は、浸水試料は電圧上昇に対し急にかつスムーズに電流も上昇する。乾燥試料は全体としては電圧上昇に対して電流も上昇するが、電圧を上昇しても電流が下がる所が何か所もあり、また気中放電を伴う電圧近くになると指針が不安定になる事が多くなる。脱水試料は電圧上昇に対して電流が大きくなったり小さくなったり鋸歯状波動的であって、時としては指針が零を指す事があるが、全体としては電圧上昇に対して電流も少しずつ大きくなる。実験の再現性は気中放電を伴う電圧領域の曲線に比べ極端に悪く、試料処理条件により違い、試料板の水分の除去量の多いものほど悪いようである。すなわち、浸水試料、乾燥試料、脱水試料の順に水分が少なくなり、実験毎のバラツキが大きくなっている。水分を除くと、高電圧電極と接地電極間の表面抵抗や高電圧電極と背後電極間の体積抵抗が大きくなり、絶縁物表面に蓄積して印加電界を緩和している負電荷の漏れる量が少なくなって放電停止時間が長くなるため電流パルス間隔が長くなり、測定される電流が小さくなる。一方、浸水試料の場合はこの逆で、水分が絶縁物の中に入ると体積抵抗や表面抵抗を小さくする為に蓄積負電荷の漏れる量が多くなって放電停止時間が短くなるので電流パルス周波数が高くなり測定される電流が大きくなる。表-1 より、表面抵抗率と体積抵抗率がほぼ同じであり、試料板の厚さが 0.3 cm であるので体積抵抗の方が表面抵抗よりも小さく、また背後電極付きの場合は表面抵抗と体積抵抗が蓄積負電荷に並列に接続されたよう

になる為背後電極なしの場合よりも合成した漏れ抵抗が小さくなる。従って、背後電極なしよりも背後電極付きの電流パルス周波数の方が高くなり流れる電流が多くなるはずである。各ギャップ長毎に背後電極なしと背後電極付きを比べると、浸水試料と乾燥試料では明らかに背後電極付きの方が多くの電流が流れている。しかし、脱水試料では両者ほとんど同じ大きさか背後電極付きの方が若干大きい程度で明確では無い。

ギャップ長相互の特性曲線の違いは、背後電極なしと背後電極付きの両方の場合ともギャップ長と関係付けられたものとして統一的に考えられない。

3.2 氣中放電を伴う電圧領域の諸特性電圧

オシロスコープを使用しての電流波形とその周波数の観測から、浸水試料の $V-I$ 特性や $I-F$ 特性で沿面放電単独の電圧領域と氣中放電を伴う電圧領域との区分が不可能であったのが可能となった。この様にして求めた氣中放電を伴う電圧領域の最小の電圧を氣中放電を伴う電圧 V_a とし、図-5 に示す。また、この方法で、無パルス性放電へ遷移する直前の電圧 (V_n) も求めた。これは、氣中放電でのオシロスコープによる観測から、無パルス性放電へ遷移する電圧近傍になると電流波形の波尾に平坦部分を生じかつパルス間隔が不規則になり⁸⁾ 波形も不揃になる等の事を参考に沿面放電の場合についても調べた。沿面放電では電流波形の波尾の平



×: 浸水試料, ●: 乾燥試験, ○: 脱水試料

図-5 フラッシュオーバ電圧 (V_f) と氣中放電を伴う電圧 (V_a)

たん部分は無パルス性放電へ遷移する電圧よりも低い電圧でも生じ、特に表面抵抗や体積抵抗が小さかったり背後電極付きの場合には生ずるので、無パルス性放電近くの電圧である事の判定には主に電流パルス間隔の不規則性や波形の不揃等を参考に判定した。この様にして求めた V_n は $I-F$ 特性より求めた V_n と良い一致を示しており結果を図-6に示す。

図-5の V_a は、背後電極なしの場合、三つの試料処理条件毎に明らかに違い、蓄積負電荷の漏れ量が多く印加電界緩和作用の小さい試料板ほど低い電圧で空中放電を伴うようになっている。この事は背後電極付きの場合も同じであるが、乾燥試料と脱水試料がほぼ同じような曲線になっている。背後電極の有無では、背後電極付きの方が背後電極なしの場合よりも蓄積負電荷と背後電極との間に確実に容量を形成する為に蓄積電荷量が多くなるものと考えられる。従って、処理条件の異なる三つの試料板の背後電極付きの V_a は背後電極なしよりも高電圧となり、さらにそれらの曲線の傾きは背後電極付きの方が急になっている。これは、背後電極付きの場合、ギャップ長の単位長さ当りの電荷の蓄積割合が背後電極なしの場合よりも大きい事を示す。

図-6で、背後電極なしの V_n は三つの試料処理による差が明確に出ていないが、背後電極付きの場合は乾燥試料と脱水試料はわずかな差があるが、浸水試料はこれら二つとは明らかに差が出ている。背後電極なしの三つの曲線と背後電極付きの乾燥試料と脱水試料の二本の曲線とはその傾きがほとんど同じである。背後電極付きの浸水試料の場合、体積抵抗が他の二つよりも大変小さいと考えられるので、蓄積電荷の漏れる量も多い。従って、無パルス性放電へ遷移するに必要な負電荷⁸⁾の一部を絶縁物表面に蓄積した負電荷が担っていると考える^{5,6)}と、浸水試料の場合、主に背後電極方向へ漏れると思われる負電荷量を補給して無パルス性放電へ遷移するのに必要な負電荷量になる為に他の二つの試料の場合よりも高い電圧を必要とするもの

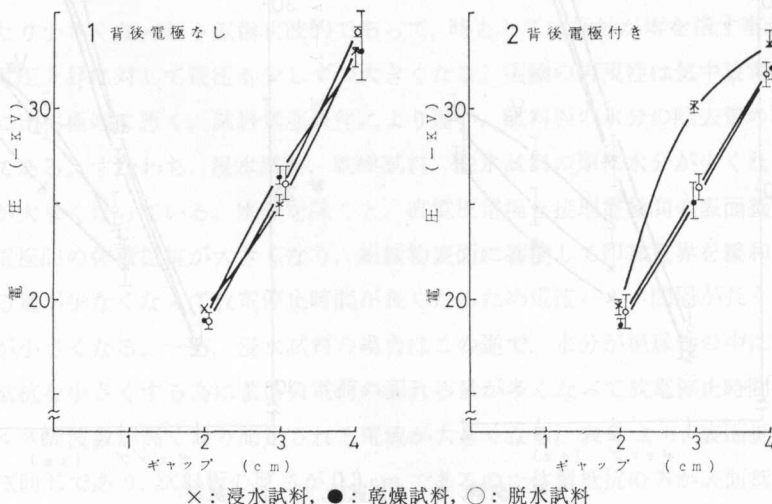


図-6 無パルス性放電へ遷移する直前の電圧

と思われる。

フラッシュオーバー電圧 V_f は図-5 に示してある。背後電極なしと背後電極付きの両方とも絶縁物中の水分が少ない方が V_f が高くなっており、 $g=3\text{ cm}$ までは両方の三つの曲線ともほぼ同じ傾きである。しかし、 $g=4\text{ cm}$ になると、背後電極なしの方が背後電極付きよりも高い電圧となり、背後電極なしは $g=3\text{ cm}$ までの曲線のほぼ延長線上に $g=4\text{ cm}$ の点があるように見える。背後電極付きでは $g=3\sim 4\text{ cm}$ で飽和現象が見られ、特に浸水試料では顕著である。背後電極付きでは、蓄積負電荷が背後電極と容量を形成して絶縁物表面に吸着状態で数多く蓄積されるものと思われるが、一方、背後電極方向への漏れ電荷量も多くある。厚さ 0.3 cm という事で、漏れ量に関して背後電極なしよりも多いのにも拘わらず、背後電極と容量を形成して多くの電荷が蓄積できると言う点で背後電極付きの蓄積負電荷量は何とか背後電極なしと同程度の印加電界緩和作用を $g=3\text{ cm}$ までは行なっていたと考えられるが、 $g=3\text{ cm}$ 以上になるとこの電荷の蓄積量と漏れ量の平衡状態が崩れて漏れ量が多くなり印加電界緩和作用が弱くなるので図に見られる様な飽和現象を示すものと思われる。従って、図から明らかなように体積抵抗の一番小さいと思われる浸水試料の飽和傾向が一番著しい。

各ギャップ長毎の平均 V_f を四つのギャップで平均して比較してみると、背後電極なしの場合、乾燥試料の V_f は浸水試料の V_f よりも約 0.6 kV 高く、脱水試料の V_f は乾燥試料の V_f よりも約 0.6 kV 高い。背背後電極付きの場合、乾燥試料の V_f は浸水試料の V_f より約 1.9 kV 高く、脱水試料の V_f は乾燥試料の V_f より約 1.5 kV 高い。

4. 結 論

吸水性の大きな絶縁材料であるベークライトを使用して、沿面放電現象に及ぼす絶縁物に含まれる水分の影響について調べた。本報告では、 $V-I$ 特性、気中放電を伴う電圧 (V_a)、無パルス性放電へ遷移する電圧 (V_n) やフラッシュオーバー電圧 (V_f) に焦点を絞って考察した所次の様な事が明らかとなった。

(1) 乾燥試料と脱水試料の $V-I$ 特性は $1\ \mu\text{A}$ 程度を境に電流の急激な増加があるが、浸水試料では 10^{-10} A オーダから V_f まで連続的に特性曲線が求まる。

(2) オシロスコープによる電流波形とその周波数の観察から、浸水試料の $V-I$ 特性も沿面放電単独の電圧領域と気中放電を伴う電圧領域に区分できる。

(3) 図-4 の様な $1\ \mu\text{A}$ 以下の微小電流の広領域電流の $V-I$ 特性では、浸水試料、乾燥試料、脱水試料の区別が明確に付く。

(4) V_a は絶縁物に含まれる水分の少ないものほど高電圧となり、 V_n はこの逆に絶縁物に含まれる水分の多いものほど高電圧になる。

(5) 三種類の処理を施した試料板の V_f は、絶縁物中の水分が少ない試料板ほど高電圧になっている。

(6) 以上のような現象が現われる主因は、絶縁物の表面抵抗率と体積抵抗率が浸水試料、乾燥試料、脱水試料によって大きく違うため、絶縁物表面に蓄積する負電荷の漏れる量が試料処理条件によって違う事である。

終りに本実験に協力された本学卒業生田中良雄、武内洋之の両君に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 菅原・保莉： 電気四学会北海道支部大会，S 55 年，No. 81，S 56 年，No. 61，No. 62，S 57 年，No. 56.
- 2) 菅原・保莉： 電気学会全国大会，S 55 年，No. 117，S 56 年，No. 125，S 57 年，No. 99，S 58 年，No. 343.
- 3) 菅原・保莉： 北見工大研報，Vol. 12，No. 2 (1981).
- 4) 菅原： 北見工大研報，Vol. 13，No. 1 (1981).
- 5) 菅原・保莉： 電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-82-56 (1982).
- 6) 菅原・保莉： 電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-82-57 (1982).
- 7) 家田・沢・篠原： 電気学会論文，Vol. 84-5，p. 753 (1964).
- 8) 細川・三好： 電気学会論文 A，Vol. 96，No. 8 p. 365 (1976).