絶縁細線上の沿面放電の電流と放電電荷

正員 高橋 勉 (成蹊大学)
 正員 金田 輝男 (東京電機大学)
 正員 杉沼 義隆

Surface Discharge Current and Injection Charges on an Insulated Fine Wire

Takahashi Tsutomu, Member (Seikei University) Kaneda Teruo, Member (Tokyo Denki University)
 Suginuma Yosataka, Member

We investigated surface discharge elongation phenomena on an insulated fine wire under the application of an impulse voltage in both of positive and negative polarities. In this study because the surface streamer was guided along a single linear discharge path, so the streamer elongated in one dimensionally on the wire. The streamer observed in this studies exhibit intermittent and stepping growth. Injection charge to the surface streamer was measured to clarify the mechanism of surface discharges. The backward discharge always occurs owing the existence of excessive charge injection process through the forward discharge. The backward discharge plays very important roles in the charge injection mechanisms, as it keeps total line density injected into the discharge to be nearly constant.

キーワード：沿面放電、絶縁細線、放電電荷、極性効果

1. まえがき

筆者等は絶縁表面上の沿面放電の解析を針-絶縁細線構造の電極を用いて行っている [1]-[5]。この研究は沿面放電を直線状にすることで、ストリーマ相互間の干渉を無くした状態で測定を行い、沿面ストリーマに関する知見を得ることを目的にしている。ここで得られる放電はその進展長に比べて幅がきわめて小さく、1本の線状と見なすことができる。

本論文のように、直線状あるいはそれに近い状態で沿面放電を発生させて測定を行う研究が近年試みられている。その例をあげると、細長い背面電極を取り付けた絶縁体平板上に空隙を設けた櫛状の金属電極を配置し、電極間にインパルス電圧を印加して絶縁板上をほぼ直線的に進展する沿面放電 [6]、絶縁体平板上に設けた溝に沿う負極性沿面放電の進展 [7]、直線状背面電極の上に置いた絶縁フィルム上を進展する沿面放電 [8]、刃型電極上に置いた絶縁フィルム上を進展する直線状沿面放電 [9]、線径 10mm 程度の架空絶縁電線表面上を進展する沿面放電の研究 [10] などがある。

本研究において、この絶縁細線上の沿面放電をイメージコンバータ・カメラのストリークモードを用いて観測した結果、正極性および負極性ともに気中放電と同様にステップ状に発生、休止を繰り返しながら進展する状況が明らかになっている [2]。

沿面放電は絶縁体上を帯電しながら進展するのであるか

ら、その進展には絶縁体の帯電電荷量が大きく関係する。本論文では沿面放電についてその放電電荷量に着目し、放電に注入される電荷量を順放電電荷、逆放電電荷および全電荷の3種類に分類して議論する。これにより放電電荷量と放電進展の関係を明らかにすると共に、いままで定量的に未知の部分の多かった沿面放電のバックディスチャージについて新しい知見を見い出した。

沿面放電は殆どの場合において導体電極で発生し、絶縁体表面上を進展するのであるから、絶縁体表面が金属導体に対する一方の放電電極として動作している。また、その電極構造も幾何学に非対称な状況で行われている。本研究で使用される放電電極も図1に見られるように、材質および構造共に非対称な構成である。このような非対称性を持つ電極で現れる沿面放電電流のインパルス電圧に対する極性効果について、バックディスチャージとの関係を用いて明らかにした。

2. 実験装置および測定

使用した実験装置は文献 [2] とほぼ同様であるが、ここでは放電直列抵抗として 12.3k Ω (但し、図4に示すストリーク像は 10k Ω で撮影した) を使用したこと、デジタルストレージ・オシロスコープからの測定データの処理に、GP-IB により接続されたパーソナルコンピュータ NEC9801 を用いた点が異なっている。放電直列抵抗の変化に対する影響については文献 [4] 等に示す。

絶縁細線として、導体直径が 0.32mm で絶縁体の厚さが 0.15, 0.2, 0.3 および 0.4mm の 4 種類のフッ素樹脂 (ETFE) 電線を主に使用した。この電線は IC 等の基盤の配線用に使用されているものである。長さ 50cm 程度の細線の中央部に、先端を直角にした 0.5mm の針電極を取り付けた。

図 1 には測定に使用される放電電極の構造を沿面ストリーマの模式図と共に示す。細線導体を放電電流測定用の 50 Ω の抵抗を介して接地し、針電極との間にインパルス電圧を印加する。印加インパルス電圧波形は 2/40 μ s であり、正極性および負極性の両方を用いた。放電気体には実験室内の空気を使用した。

測定は印加電圧ごとに絶縁細線の交換および電荷の除去はおこなわず、約 1 分の時間間隔をおいて電圧を印加し測定を行った。

図 1 放電電極構造と放電概念図
Fig.1 Configuration of discharge electrode

まずここで取り扱う沿面放電の概要を簡単に説明する。針電極と細線導体の間にインパルス電圧を印加することで、針電極の先端から絶縁体表面上を沿面放電が両側に向かって進展して行く。この沿面放電は見かけ上 1 本であり、直線的に進展するので、筆者らはこの放電を絶縁細線上の沿面ストリーマと呼んでいる。

図 2 には針電極に正極性インパルス電圧を印加した場合の電圧波形と、これによって生ずる放電電流波形を、図 3 には説明のための電圧、電流波形の模式図を示した。負極性のインパルス電圧を印加した場合には、電圧および電流の極性をそのまま逆にしたものと考えていただい

上: 電圧 (16.5kV/div) 下: 電流 (80mA/div) 10 μ s/div

図 2 印加インパルス電圧および電流波形

Fig.2 Applied impulse voltage and current waveform

本論文で取り扱われる順放電電荷、逆放電電荷および全

電荷の 3 種類の沿面放電注入電荷量は、測定された放電電流をそれぞれの定義区間で直接数値積分して求める。

電流波形は細線導体とアース間に接続された 50 Ω の抵

図 3 電圧、電流波形概念図

Fig.3 Sketch of voltage and current waveform

抗器の電圧降下として、帯域幅 100MHz、サンプリング時間 10ns のデジタルストレージ・オシロスコープで測定される。電流、電圧およびその他の全ての測定系は、整合された 50 Ω の同軸ケーブルで接続されている。波形データは 8 ビットのデジタル信号として出力され、これを GP-IB を用いてパソコンに導入する。電流波形は帯域幅 400MHz のアナログ・オシロスコープでも観測し、デジタルストレージ・オシロスコープでは波形の欠損が少し見られるが、電流波形の最大値および電流積分値には殆ど影響を与えない範囲であると考ええる。

2.1 順放電電荷

インパルス電圧が印加されてある値に達すると放電が開始され、ほぼ単一のスパイク状の放電開始電流 I_s が生じ、針電極のごく近傍で放電発光が生ずる。放電開始電圧 V_s は細線の種類が決まればほぼ一定値となるので、同一細線では、放電開始電流の大きさはインパルス電圧尖頭値 V_p によらずほぼ同一の値をとる。

更に印加電圧が上昇すると、多数のスパイク状の電流の発生に伴って沿面放電発光が中心の針電極より絶縁細線上を両側に進展する。放電電流には、スパイク電流の他に時間的にゆっくりした成分が存在する。この電流成分は、ステップ状に進展する沿面放電と接地電極間の静電容量に、印加インパルス電圧の時間微分値を掛けた変位電流として計算できる。

これらの放電電流は印加したインパルス電圧の極性と同一であるから、この電流を順放電電流、この区間を順放電区間、また放電開始から順放電終了までの放電電流を時間積分した値を順放電電荷と呼ぶ。順放電区間は印加電圧が尖頭値に達し、その時間微分値が逆転するとほぼ終了する。

放電は順放電区間において絶縁細線上を進展するので、順放電電荷は沿面放電の進展に直接関係する電荷量である。

図4(a)には正極性の順放電区間で観測されるストリーク像の例を示す。順放電区間においては、ほぼ一定の平均進展速度が得られる。同ストリーク写真は、インパルス電圧尖頭値が45.6kV、放電直列抵抗 $R=10\text{k}\Omega$ の場合であり、沿面放電の平均進展速度は 3.2×10^6 [cm/sec] である。平均進展速度は、同図において補助線で示した包絡線の傾きとして表している。

ここに示す像は $R=10\text{k}\Omega$ における例であるが、観測されるステップ進展は $R=0$ の場合であっても観測され、本質的に直列抵抗に依存しない現象である [4]。

沿面放電は図1に示すように基本的には針電極を立てた細線表面を進展するが、同図のように一直線ではなく、蛇行し針電極の背面(図1の下側)に廻る場合もある。ストリーク像は針電極の上面、図4において紙面に鉛直方向から撮影しているので、途中が黒く抜けている部分は、沿面放電が写真には写らない細線の背面に廻っているからである。細線の直径は0.5mm程度であるのでこの程度の蛇行は、進展速度および静止カメラで測定される放電進展長に殆ど影響を与えないと考えられる。沿面放電の太さは精密な測定は行っていないが、最大で0.3mm程度であり細線の全面を覆って進展するのではない。

負極性においても正極性の場合とほぼ同様のストリーク像が得られるが、静止写真で見ると負極性の方が若干直進性が良く背面への蛇行が少ない。

図4 進展する沿面放電のストリーク像 ($R=10\text{k}\Omega$)

Fig.4 Streak images of positive discharge

<2.2>逆放電電荷

印加電圧が減少し始めると電圧の極性とは逆方向のスパイク状電流が流れ、これに伴って図4(b)のストリーク像に示す発光が生じる。この電流は印加電圧の極性とは逆であるので、この電流を逆放電電流、この放電区間を逆放電区間、また逆放電の開始から放電終了までの放電電流を時

間積分した値を逆放電電荷と呼ぶ。この逆放電がいわゆるバックディスチャージであろうと考えている。

順放電とは電流の方向が逆であるから、逆放電では順放電の進展過程で細線表面に注入され蓄積された電荷の一部が、放電を介して中和(排除)される過程であると考えられる。ここでどれだけの電荷が排除されるかを考察してみる。排除される電荷量は、放電が終了した後に絶縁細線にどれだけの電荷の蓄積が可能であるかで決定される(数値的検討は<3.4>にあり)と考えられる。つまり、順放電発生過程では細線表面に蓄積可能な電荷量よりも多量の放電電荷が必要とされ、放電進展中は印加電界により保持されている。印加電圧が零になっても蓄積可能な電荷と順放電電荷の差が過剰電荷として逆放電で排除される。

バックディスチャージの提案者である鳥山氏は、印加電圧が零に減衰した後に電荷図形の中心部で表面残留電荷が平衡を失い開始されるとして。横井氏もこの考えを支持し、電圧が零になってから生じるとしている [11]。本研究で得られる放電電流波形からすると、順放電が終了した後に電極近傍の電荷図形の中心部において、印加電圧が低下する過程で表面の蓄積電荷が中和されると解釈すれば、ここで扱う逆放電は、いわゆるバックディスチャージであると考えられる。

<2.3>全電荷

本論文では更に、放電の全電荷を定義する。順放電電荷と逆放電電荷を加えた値を全電荷と呼び、これは全放電区間に亘って積分された電荷であるから、最終的に沿面放電に注入される電荷量である。

上記に定義した各電荷量を図2に示す記号を用いて式(1)-(3)に示す。

$$Q_f = \int_{t_f}^{t_{of}} (I) \cdot dt \quad [C] \quad (1)$$

$$Q_b = \int_{t_{ob}}^{t_{ob}} (I) \cdot dt \quad [C] \quad (2)$$

$$Q_t = Q_f + Q_b = \int_{t_f}^{t_{ob}} (I) \cdot dt \quad [C] \quad (3)$$

Q_f : 順放電電荷

Q_b : 逆放電電荷

Q_t : 全電荷

図表示の都合上、論文では電荷量は全て絶対値で示すことにする。ここに示す電荷量の極性は以下の通りである。正極性放電において、順放電電荷および全電荷は正、逆放電電荷は負である。また、負極性では正極性の場合とは反対符号になり、順放電電荷と全電荷は負、逆放電電荷は正である。

3. 測定結果および考察

<3.1>放電電荷量のインパルス電圧尖頭値依存特性

正極性および負極性で測定した放電電荷量のインパルス

電圧尖頭値依存性を図5に示す。同図は導体直径0.32mm、絶縁体厚さ0.15mm（0.32/0.15mmと表示する）の細線を用いて測定した例である。このグラフで示される放電電荷の示す大きな特徴として次に示す3点が挙げられる。(1)正負どちらの極性においても、順放電電荷の絶対値は逆放電電荷の絶対値より大きな値を取る。つまりどの場合においても、順放電電荷と同極性の全電荷が存在する。(2)順放電電荷が大きくなると、それにつれて逆放電電荷も増大する。(3)同一のインパルス電圧尖頭値においては、負極性における順放電電荷は、正極性におけるよりも大きく観測される。(1)-(3)に示されるような基本事項は細線の種類を変えても変化せずに保持される。

図5は両対数グラフで示すが、この程度の電圧範囲だと片対数グラフを用いても、ほぼ直線で近似することができる。最小二乗近似で求めた、順放電電荷量のインパルス電圧に対するべき値は、正極性で4.3、負極性で3.2程度である。

図5 順放電電荷量のインパルス電圧尖頭値依存特性
Fig.5 Impulse voltage dependence of injection charge

3.2 順放電電荷の経過時間特性

図6には順放電で注入される放電電荷量を、放電開始からの経過時間に対する積分値として表した。パラメータはインパルス電圧尖頭値である。各々の測定点は、放電開始から0.3μs毎の放電電流の時間積分値を10回の放電に対して平均した値である。

図5にはインパルス電圧尖頭値と放電電荷量の関係を示すので、ここでは電荷量を各々の最大値で正規化したグラ

フを示す。更に、時間軸も放電が開始してから電荷量が最大値に達するまでの時間で規格化してある。

図6 順放電電荷量の時間経過特性
Fig.6 Time dependence of the injection charge

放電開始電圧は、インパルス電圧の大きさによらずほぼ一定であるので、尖頭値の大きい方が放電持続時間の絶対値は長い。このような正規化を行うと、順放電電荷量の時間経過特性をほぼ同一の曲線で記述することができる。

また、図4(a)のストリーク像に示すように、放電進展領域においてはストリーマの平均進展速度はほぼ一定である。順放電電荷の時間経過がほぼ直線になることが、放電進展速度を一定値にし、更には図6に示すように放電進展長と放電電荷量が直線関係になることを示すのであろう。

3.3 放電電荷量と進展長の関係

図7には0.32/0.15mmの細線で測定した沿面放電進展長と放電電荷量の関係を示す。放電進展長は絞り3.5、焦点距離75mmのレンズとISO-20000フィルムを使用してポラロイドカメラで撮影した静止写真より測定した。各放電進展長はそれぞれ10回程度の平均値で示してある。放電電荷量については、順放電電荷と全電荷について示してある。

同一のインパルス電圧における放電電荷は、負極性の場合が正極性よりも約1.5倍程度大きい。放電進展長にも同程度の開きがあるので、正負両極性についてはほぼ同一の直線で表すことができる。

ちなみに同図における直線の傾きは順放電電荷では1.03、全電荷では0.92で、順電荷を示すグラフの方が全電荷よりも進展長と放電電荷量の直線性が良い。

このグラフより求めたストリーマの単位進展長あたりの正極性と負極性の平均電荷密度を表1に示す。放電電荷量の進展方向の分布は測定していないので、ここに示す値は全放電長に対する単純平均値である。また、細線上での電荷付着の測定は行っていないので、正確には放電発光長に対する電荷密度である。

イメージ・コンバータカメラのストリーク像から、逆放電の放電進展長は、順放電のそれよりも短いことが確認されている。実際の逆放電進展長は、順放電に対して0.6～

0.7の大きさを持つ。

図7 放電進展長と放電電荷の関係

Fig.7 Relation of discharge length and injection charge

表1 放電電荷の線密度

Table 1 Line density of the injection charge

種類	電荷密度 [C/mm]
順放電電荷	1.1×10^{-9}
全電荷	5.5×10^{-10}

逆放電は静止写真により求めた放電進展長に変化を与えることはない。順放電終了時におけるストリーマ先端部に近い部分では、逆放電による発光が見られない。これは放電先端部分では順放電による電荷量が少なく、この部分では逆放電が発生せずに放電が終了しているものと思われる。ただし、順放電電荷量と逆放電電荷量の両方について、順放電進展長で除した平均電荷密度が一定になる事実には興味を持たれるところである。

放電電荷量を測定するに当たり各放電毎に残留電荷の除去は行っていないので、放電開始時に残留電荷が存在すると思われる。アルコール等で電荷除去を行うと同一電圧で放電長が増加するが、電荷量と放電長の関係には殆ど変化がないことを確認している。

本研究において、ストリーマ幅は測定していないが、電極構造、放電形態および静止写真等から判断して0.3mm程度であろうと考えている。この値から放電電荷量を面密度に換算すると、順放電で 3.3×10^{-9} [C/mm²] を得る。

遠藤氏等は厚さ 50 μ m の PET シートと刃型電極を用いた、負極性直線状沿面放電 [9] において測定結果を示している。放電電荷量と進展長は直線関係にあり、その傾きから単位長当たりの電荷量は 9.5×10^{-9} [C/mm] となり、表1の順放電電荷よりも一桁多い。刃型電極を用い絶縁体の厚さは 50 μ m であることから、ストリーマ幅をほぼ同一と仮定して、次項のように刃型電極を同軸近似として静電容量を計算し、この値のみで電荷量を換算しても 3.6×10^{-9} [C/mm] となる。本測定値とは約3倍以上の相違があり、静電容量の充電のみでは説明出来ない値であろう。

<3.4> 絶縁細線の表面に蓄積しうる電荷量の推定値

細線の絶縁体表面上にどれだけの電荷を蓄積することが出来るであろうかを求め、これと測定される全電荷との関係を考察する。ここでは第1次近似のモデルとして、細線表面上に蓄積した電荷による静電界を用いる。これで細線の周囲に放電が起こらず、どこまで電荷が蓄積できるかを評価出来る。針電極に近い部分では繰り返し逆放電が生じ、さらに放電長は絶縁体の厚さに比べて十分に長いのであるから、逆放電終了時にはかなりの均一性が保証されると考えてよいであろう。図2の電圧、電流波形および図4(b)のストリーク写真に見られるように、逆放電発生時における印加電圧の時間変化は放電発光時間 0.1 ~ 0.2 μ s に比べて十分に長く、1回の逆放電発光において定常状態に達していると考えられるので静電界モデルで計算した。

中心導体を接地した絶縁体表面に電荷が一樣に蓄積した場合に、表面電荷から絶縁体内部および外部空間に径方向電界が生ずる。表面電荷により外部空間に向かう電界成分が空気の絶縁破壊電界を越えれば、表面で放電が発生して電荷の中和が生ずる。絶縁体内部では絶縁破壊が生じないとすれば、細線表面に蓄積し得る電荷量は周囲空間にある空気の絶縁破壊電界で決定されることが出来る。絶縁体表面に電荷が存在する場合に、この電荷量まで放電で失われるとみれば、沿面放電の終了時における最大の電荷量がこの値で規定されるであろう。

この考え方で細線表面上に蓄積し得る最大の電荷量を計算してみる。蓄積電荷が周囲空間に作る電界が、空気の絶縁破壊電界と等しいと仮定して行っている。放電電極は同軸円筒状の細線であるので、電界を計算するために必要な周囲の空間もやはり図8の様に円筒状であるとした。

図8 蓄積電荷による細線表面上の電界

Fig.8 Electric field of the fine wire surface

蓄積電荷の幅については絶縁体厚 0.15mm の場合 (細線外径 0.62mm) に 0.3mm であるとし、絶縁体の厚さが増加してより大きな細線外径になる場合には、細線の直径に対して単純比例するとして計算した。これにより細線表面に蓄積可能な単位長当たりの最大電荷量は次式で表される。

$$Q_0 = \epsilon_0 E_w \left(\frac{C_2}{C_1} + 1 \right) \quad [C/m] \quad (4)$$

ここで

- C_1 : 絶縁体表面と周囲空間の等価静電容量(ここに示す数値例では周囲空間を半径 0.5m の円筒とした)
- C_2 : 内部導体と絶縁体表面の間の静電容量
- E : 大気圧空気の絶縁破壊電界 3×10^6 [V/m]
- w : 蓄積電荷の幅(ストリーマの幅に相当する。長さ方向にたいしては一定値と仮定する)

図 9 には式 (4) により計算した最大蓄積電荷の線密度を測定された全電荷より求めた線電荷密度と共に示す。静電容量を計算するに当たり、ETFE 絶縁体の比誘電率は 2.6 を用いた。

図 9 全電荷密度の細線絶縁体厚さ依存性
Fig.9 Insulator thickness dependence of total injection charges

同軸円筒近似による計算であるので、計算値では絶縁体厚さ依存性を示すが、測定された全電荷は絶縁体厚さによらずほぼ一定の値が得られた。絶縁体の厚さに対する依存性では測定値と大きく異なる傾向を示す。しかし、測定範囲内では数倍の範囲に収まっている。

計算された電荷量は順放電電荷量よりも小さい値をもつことが、この計算値の一つの妥当性を示すのであろうか。沿面放電により最終的に注入される全電荷は、細線上に蓄積可能な電荷量で規定されていることが推測される。つまり、逆放電は細線上の電荷が蓄積可能な値に減少するまで発生し続けることを示すと考えられる。沿面放電は、順放電で最終的な蓄積電荷量を越える高い電界の状態を中和放電なしである程度継続した後に、逆放電で中和して最終値に至ることになる。順放電電荷は図 5 に示されるように、全電荷に対して 2～5 倍程度の大きさになる。沿面放電が進展するには、その面に蓄積が可能な電荷よりも大きい電荷量の注入が必要とされる。

沿面放電で一般的に使用される残留電荷との関係について示しておく。残留電荷は沿面放電が終了した後に絶縁体表面に蓄積されている電荷量である。もし放電で注入された全電荷の全てが放電終了後に表面に蓄積されると仮定すれば、残留電荷の初期値は全電荷と等しくなると考えられる。また、逆放電の終了後にも電荷は種類の消滅過程を受

けて減少するので、測定される残留電荷は必ず全電荷より小さい値を取るようになるであろう。

堺氏等は針-平板電極において正ストリーマによる残留電荷量を測定し、3mm のエポナイト板上でのストリーマ先端部分の値をストリーマ 1 本あたり $5 \sim 7 \times 10^{-11}$ [C/mm] としている [12]。この値は表 1 における全電荷の測定値と比較して約 1 桁小さい値である。ここでも同様に蓄積しうる電荷量を平板近似で計算すると、ストリーマ幅を同一としても、1.32/0.15mm の絶縁細線の場合の 50 倍近い値になる。つまり測定される残留電荷は蓄積しうる電荷量と比較して、2 桁以上小さい値となっている。

3.5 逆放電開始特性

図 10 には正極性と負極性における逆放電の開始電圧をインパルス電圧尖頭値の関数として示す。同図にはインパルス電圧尖頭値との電位差も示してある。逆放電は印加電圧が低下し、尖頭値との間に電位差が生ずると発生するようすがうかがえる。インパルス電圧の大きさにもよるが、平均的には負極性の方が正極性よりも尖頭値との電位差が小さく、その値は負極性で数 100V から 2kV、正極性で 4～6kV 程度である。

順放電終了後は針電極付近の放電コラムの電位は、ほぼ印加インパルス電圧尖頭値であると考えられる。この状態で印加電圧が尖頭値より低下し、プラズマの電位がその電荷により保たれていれば針電極の間に逆電界が生じ、この電界により順放電とは逆方向の電流による逆放電が起こされると考えられる。

図 10 逆放電開始電圧
Fig.10 Onset voltage of the backward discharge

図 4(b) の逆放電ストリーク像にも見られるように、逆放電についても、順放電とほぼ同様に発生・停止を繰り返しながら進展する。ある値まで印加電圧が減少すると針電極の近傍で逆放電が発生し、更に印加電圧が減少すると針電極からストリーマの進展方向に向かってその長さを増してゆく。針電極に近い部分では繰り返して逆放電が発生していることになる。

3.6 極性効果について

沿面放電における逆放電は印加電圧が尖頭値を經過し、電圧の時間微分が逆になってから生ずるのである。

順放電の終了時点において絶縁細線上に電荷の蓄積があるので、針電極の電位が降下すれば放電コラムと針電極の間の電界は順放電とは逆になる。表面電荷が保持されていれば、印加電圧の降下に伴い逆方向の電位差は大きくなり、この逆電界によって逆放電が生ずる。順放電と逆放電では逆方向の電界で動作するので、本研究におけるような非対称の電極配置、電極材料を使用すれば、これにより極性効果が生ずると考えられる。またインパルス電圧の極性を逆にすることで、本来の意味での逆極性の効果が順方向放電に現れる。つまり沿面放電では極性を変化させることにより、順放電と逆放電では双対の現象が現れると考えられる。沿面放電の極性効果を示す結果が測定されており、3.7 および 3.8 節で順放電電流との対比の観点から極性効果について述べる。

3.7 放電最大電流のインパルス電圧尖頭値依存性

図 11 には絶縁細線 0.32/0.3mm における、順放電と逆放電の最大電流のインパルス電圧尖頭値に対する依存性を示す。各測定点は、それぞれ 30 回の測定における平均値で示してある。他の細線においても同様に、ほぼ直線で表すことが出来る。放電最大電流の示す物理的意味はつかめていないが、最大電流のインパルス電圧尖頭値に対する依存性は大きく、更にその関係が放電条件により非常に大きく変化するので、ここで取り上げて記すことにする。

測定された放電電流最大値 I_m は、インパルス電圧尖頭値 V_p に関して次式で近似的に表すことが出来る。

$$I_m = aV_p^b \quad (5)$$

べき数 b はインパルス電圧の極性、および順放電であるか逆放電であるかにより大きく変化するが、絶縁体の厚さ

図 11 インパルス電圧尖頭値と最大放電電流の関係

Fig.11 Impulse voltage dependence of maximum discharge current

に対する依存性は比較的少なく、極性と放電が決まれば、どの厚さの絶縁体においてもほぼ同様の値をとる。表 2 に印加電圧の極性と放電の種類で整理した式 (5) におけるべき数 b の値を示す。この表における各値は、絶縁体の厚さ 0.15, 0.2, 0.3, 0.4mm の 4 種類の細線で測定された値の平均である。括弧内はそれぞれにおける b の範囲を示す。

べき数 b には電流の極性を特徴づける関係が見いだされる。負電流（負極性の順放電および正極性の逆放電）が生ずる場合については、 b は正電流（正極性の順放電と負極性の逆放電）が生ずる放電と比較して大きい値を持つ。ちなみに表 2 における正電流と負電流における b の比率は、正極性で 0.41 負極性で 0.45 であり、いずれの極性においてもほぼ同一の値を取る。

表 2 (5) 式におけるべき数 b

Table 2 Exponent b of Eq.(5)

極性	種類	b (b の範囲)
正極性	順放電	2.2 (2.0 ~ 2.3)
	逆放電	5.4 (3.9 ~ 6.4)
負極性	順放電	3.5 (3.5 ~ 3.8)
	逆放電	1.6 (0.8 ~ 2.8)

この測定結果は、沿面放電における極性効果の一部を示すパラメータであろうと考えられる。また、逆放電は異なる極性における順放電と同様の性質を持つことになろう。

3.8 逆放電の電流パルス数

順放電における印加インパルスに対する極性効果は、放電電流パルスの発生間隔においても見られる。順放電区間では、同一のインパルス電圧において正極性の方が負極性よりも平均の放電発生間隔が短い（係数約 0.6）ことが観測されている [2]。逆放電区間においても、放電電流パルス数の変化を測定することができた。

表 3 には 4 種類の絶縁細線で測定した逆放電区間における電流パルス数の平均値を示す。この値は種々のインパルス電圧尖頭値および絶縁体厚さについて、最大放電電流 I_m の 30 % 以上の値を持つパルス数を測定し、全ての条件での平均値を求めたものである。ここでは、ある電流値以上のパルス数をカウントしたが、顕著に極性の効果が観測されている。但し、逆放電区間における数であるので、順放電区間のそれとは極性に対する関係が逆になっている。

表 3 逆放電区間における電流パルス数平均値

Table 3 Number of current pulses in the backward discharge period

極性	パルス数	(標準偏差)
正極性	1.55	(0.35)
負極性	3.02	(0.47)

この例では負極性の方が正極性と比較してパルス数が多く、その係数で1.95となっている。逆放電で現れる印加インパルス電圧の極性効果は順放電のそれとは逆の関係になっている。

4. まとめ

絶縁細線を直線状に進展する構造の沿面放電電極を用いて測定を行い、インパルス電圧に対する沿面放電の基本的な振る舞いについての知見が得られた。

(1) 沿面放電には順放電とは逆極性の電流による逆放電が必ず存在し、順放電電荷と逆放電電荷を加えると、順方向電荷と同符号の全電荷が存在する。曖昧であった逆放電の振る舞いが電荷測定により明確になった。

(2) 順放電で注入される順放電電荷と放電進展長はほぼ比例し、順放電電荷の線密度は一定値になる。測定された順放電の平均電荷密度は 1.1×10^{-9} [C/mm] である。

(3) 沿面放電が終了までに注入される全電荷と放電進展長もほぼ比例関係にある。逆放電は順放電で注入された過剰電荷を中和するために発生し、これにより全電荷の平均線密度も一定値になる。この放電における全電荷の平均電荷密度は 5.5×10^{-10} [C/mm] である。

(4) 沿面放電で生ずる放電電流の最大値は、印加インパルス電圧尖頭値に対してべき関数で表すことができる。電圧に対するべき値は、印加電圧の極性により大きく変化し、正極性の逆放電では特に大きな変化を示し、最大電流は電圧の5.4乗に比例する。

(5) 沿面放電の逆放電は、逆極性の順放電に近いインパルス電圧尖頭値—最大電流特性を持つ。インパルス電圧の正負による放電の極性効果と同様の極性効果が、順放電と逆放電の間にも存在する。

(6) 放電電流パルス数は、順放電区間と逆放電区間で極性により大小関係が逆転する。

(平成9年5月20日受付、平成9年11月6日再受付)

文 献

- [1] 高橋、佐藤、杉沼：平成2年電気学会全国大会、No.174「細線上の単一ストリーマ放電」
- [2] 高橋、金田、杉沼：電学論、Vol.113-A, No.7, pp.503-510, 1993「絶縁細線上の沿面ストリーマの進展」
- [3] 高橋、金田、杉沼：電気学会放電研究会資料、Vol.ED-94-10, 1994「絶縁細線上の沿面の進展と電荷量」
- [4] T.Takahashi, T.Kaneda and Y.Suginuma : Proceedings of 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.6759-1 ~ 6759-4, 1995, 「Accumulated Charge of Elongated Streamers on an Insulated Fine Wire」
- [5] T.Takahashi, T.Kaneda and Y.Suginuma : Proceedings of ICIPIG XXI, Vol.II, pp.357-358, 1993「Accumulated Charge of Elongated Streamers on an Insulated Fine Wire」

[6] S.Larigaldie, G.Labaune and J.P.Moreau : J.Appl.Phys. Vol.52, No.12, 1981「Lightning leader laboratory simulation by means of rectilinear surface discharges」

[7] 千葉、日高、河野：電学論、Vol.108A, No.4, pp.162-168, 1988「負極性沿面放電のステップ進展現象」

[8] M.Hikita, Y.Kito, Y.Ishida, H.Okubo and N.Hayakawa : 電学論、Vol.15-A, No.2, pp.108-186, 1995「Creepage Discharge Propagation on Charged Dielectric Surface in SF₆ Gas and Its Optical Observation」

[9] 遠藤、佐藤、佐藤、榊原：電学論、Vol.115A, No.9, pp.845-850, 1995, 「負極性直線状沿面放電の進展特性」

[10] 西、花岡、石橋：電学論、Vol.116B, No.4, pp.482-488, 1996, 「架空絶縁電線表面における乾燥、湿潤状態での沿面放電現象」

[11] 横井、鈴木：電気学会雑誌、Vol.87-3, No.942, pp.128-132「衝撃電荷図における Back Discharge について」

[12] 堺、永田、高田：電学論、Vol.97-A, No.10, pp.37-43, 1978, 「誘電体沿面における正ストリーマと電荷」

高橋 勉(正員) 昭和22年12月19日生。昭和45年3月東京電機大学電気通信工学科卒業、同年4月成蹊大学助手、現在に至る。気体レーザ、放電現象に関する研究を行う。電気設備学会会員、放電研究グループ会員。

金田 輝男(正員) 昭和15年12月26日生。昭和44年3月東京電機大学大学院工学研究科博士課程終了、昭和41年4月同大工学部電子工学科助手、昭和44年4月同講師、49年4月同助教授、55年York大学物理学科準教授、McMaster大学物理学科客員準教授、56年東京電機大学電子工学科教授。工学博士。放電物理およびその応用に関する研究に従事。日本物理学会、応用物理学会、静電気学会、照明学会、放電研究グループ会員。

杉沼 義隆(正員) 昭和7年2月12日生。昭和32年東京大学大学院修士課程(電気工学専攻)修了、同年東京大学理工学研究所(航空研究所に改組)助手、昭和37年成蹊大学助教授、昭和52年同教授、平成9年名誉教授。工学博士。高電圧工学、放電現象に関する研究を行う。電気設備学会会員、放電研究グループ会員。