UDC 621.3.015.533: 621.3.015.33
621.316.5

論 文

54-A 22

正極性開閉インパルスによる沿面放電の 発光図形

正 員 川 島 章 弘 (成蹊大)

1. はじめに

絶縁性の気体、液体、固体の三状態のうちの、それぞれの相状態の境界面で起こる沿面放電は、実際の絶縁系における問題点として、また放電機構に関する興味とから古くから研究されてきた。大気中の固体絶縁物面上における沿面放電は、特に多く調べられたものの一つであるが、これらの測定法は、大気圧中で接地平板電極上に固体絶縁板をのせ、その上に棒電極を立てて、これに高電圧を印加して、沿面放電図形を得る手法が非常に多い。これらの沿面放電図形を記録に止めるために表面電荷図法や、固体絶縁物の上に写真フィルムを重ねたり、固体絶縁物の代わりに写真フィルムまたは写真乾板そのものを絶縁物として、その上で沿面放電を起こさせて沿面放電図形を得る写真図法はよく知られている。しかし、これらは表面電荷図を得ることができる絶縁物であること、または放電沿面が写真感光膜であるという制約を受ける。そこで、絶縁物上方から高感度のカメラ系で沿面放電の発光を撮影するカメラ法は⁽¹⁾⁽²⁾、感度に問題があるが、一般の固体絶縁物面上での沿面放電が測定できるばかりでなく、絶縁物の材料試験に⁽³⁾⁽⁴⁾、絶縁性能向上の実験に⁽⁵⁾、また高温に熱せられた絶縁材料上の沿面放電の測定⁽⁶⁾にも用いられて、より一般的な絶縁材料面上の沿面放電の測定へと範囲が広げられた。しかし、以上はおおむね沿面発光放電が起こり、終了するまでの集積された結果⁽⁷⁾の図形を記録しているものであり、比較的微弱な発光で高速度な現象を伴った沿面放電を普通のカメラで時間的に沿面放電図形の進展を記録することは困難である。

沿面放電図形を時間的に記録する方法としての歴史的なものに、遅延回路を用いたテイノグラフ⁽⁸⁾がある。また沿面放電にイメージコンバータカメラを用いることは⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、沿面放電図形の進展を時間的に記録することであり、著者はこれを早くから手がけ、Gleitbüschel 領域の進展にはステッピングリーダを伴っていることを見いだした^{(11)~(13)}。

沿面放電図形に時間軸を与えるいま一つの方法として、沿面放電による発光を光電子増倍管を用いて、その時間的な変化を記録し、写真図法によって得た沿面放電図形とを対比させて、その時間的な進展を読取るとは比較的簡単であり、十分有用かつ可能な方法であると思われる⁽¹⁴⁾。

沿面放電と一口に言っても、の中には発光を伴わない放電もあるかも知れないが⁽¹⁵⁾、放電の主たる部分である発光放電を写真フィルムに沿面放電図形としてとらえ、同時に光電子増倍管を用いて沿面放電の光の変化を時間的にとらえて、沿面放電図形の進展について考察した。本実験の印加電圧は沿面放電の発光時期を印加電圧の波頭、波尾にわたって細かく測定するためと長い放電発光期間を期待して、開閉インパルスを用いて行なった。

2. 実験方法

開閉インパルスの各種波形はインパルス発生装置の抵抗を取換えることによって、また回路を変えることによって得た。本実験では $[25 \times 1, 400] \mu\text{s}$, $[30 \times 900] \mu\text{s}$, $[250 \times 8, 600] \mu\text{s}$, $[2, 500 \times 21, 000] \mu\text{s}$ の各波形の正極性について実験を行なった。第1図に示すように、接地された銅平板電極の上に絶縁材料として 0.25mm の SSS パンクロマチックシートフィルム ASA 200 のをせ、その上に先端が半球状になった 3mm のステンレス鋼丸棒電極を高電圧電極として置いた。その上

The Radiant Figures of Surface Discharges on Positive Switching Impulse. By Akihiro Kawashima, Member (College of Technology, Seikei University).

川島章弘: 正員, 成蹊大学工学部

第 1 図 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

方、フィルム面から約 84mm のところに有効直径 5 mm、長さ 1.4m のガラスファイバ製ライトガイドを置いた。これによって観測し得る範囲は、フィルム面上直径約 12cm の円形内である。

ライトガイド内を伝わる光は、シールドボックス内の光電子増倍管 R 446 UR に導かれる。この光測定システムの応答特性は遅れ時間 30ns、立上り時間 10ns である。光の時間変化と印加電圧の時間変化は、周波数帯域が 20MHz のデュアルビームオシロスコープを用いた。従って、オシロスコープには印加電圧と光波形を同時に描かして、それらの波形と沿面放電をしてその発光を受けたシートフィルムを現像して得られるリヒテンベルグ図形と対応させて検討を加えた。

また、印加電圧をさい断ギャップで任意時刻でさい断させて、沿面放電の生長を止めて、沿面放電図形の時間的進展についても検討をした。

3. 沿面放電図形

沿面放電の一般的な進展過程としては⁽¹⁶⁾、まず低い電圧で電極周辺に沿面グローコロナが現われる。それから電圧が少し上昇すると、Polbüschel と呼ばれる沿面コロナが現われ、更に電圧が上昇すると Gleitbüschel と言われる沿面火花コロナとなる。これよりもっと電圧が高くなると、高電圧電極と接地電極間を絶縁板沿面を介して橋渡し、沿面フラッシュオーバーとなる。しかし、これは絶縁板の幅が十分大きいと、最後にはその絶縁物の貫通破壊となる。

本実験では印加電圧を順次高めながら、放電図形を求めてゆき、沿面グローコロナから沿面フラッシュオーバーまでの沿面放電図形を S, P, T, G, F の五つのパターンに分け、電極から発生したストリーマの形状に注目した。第 2 図は [25×1, 400]μs の開閉インパルスによる沿面放電図形と、その電圧、光波形を対応させて示したものである。

まず、電圧が非常に低いと電極からストリーマが全然出ず、電極の周りだけに丸く放電跡が現われる沿面グローコロナの状態がある。これは Polbüschel 以前

第 2 図 沿面放電図形

Fig. 2. Figures of surface discharges.

の沿面放電の発生初期の領域で、沿面放電の開始(Starting)の意味で、ここでは S 図形と名づける。

次に印加電圧を約 1.5kV から 6kV、または 10kV までで現われる純然たる Polbüschel の放電図形で、ここでは単に P 図形と名づける。この図形は沿面ストリーマが全体として真円に近い放電の伸びで、放電の枝(沿面ストリーマ)は、中心電極より放射状に割直線的に枝分れも少なく、各枝同じ長さで伸びている。しかし、第 3 図に示すように印加電圧が低いと、電極から沿面ストリーマが均等に不出ず、数本だけ非対称に出る場合がある。このときの沿面発光が行なわれたのは、第 3 図の光波形を見ればわかるように、電圧印加後 118μs の波尾においてである。この場合も沿面ストリーマが一応発生しているので、P 図形に入れた。

従って P 図形の特徴は、沿面ストリーマが発生していること、また単一発光を伴った瞬時の放電であり、図形としては伸びた放電の枝の枝分れが割合少なく、ほぼ同じ長さであることと言えよう。

第3図 P 図形

Fig. 3. Figure P.

次に、6kV から 12kV までの印加電圧で、Polbüschel から Gleitbüschel への過渡状態 (Transient) として現われる放電図形 T である。この図形は、文献(17)の第5図にも指摘されているものであるが、従来からは放電図形 P と T を含めて Polbüschel と名づけられている。Polbüschel 図形と言うものが、円形で鳥の羽毛状の伸びをしたものと言うのなら、そのようにも表現できるが、沿面放電の発光を時間的に観測すると、P 図形は必ず1個の光パルスで形成され、T 図形は必ず複数個の光パルスで形成される点で、放電図形 T は放電図形 P と本質的に放電形態が異なるものと考え独立させた。

また、この放電図形 T は、第2図の T 図形に見られるように、電極中心から沿面ストリーマが伸びて、先端で急に枝分れした長い枝を有するのが一つの特徴である。T 図形は P 図形よりも印加電圧波高値が高いわけであるが、この T 図形の枝は P 図形の枝が印加電圧が高いためにもっと伸びて、そして枝分れしてできたというのではなく、T 図形固有の枝として独自に電極から発生、成長したものである。そのことは、特徴あるその枝の電極近傍の部分が細くなっている、P 図形の対応する部分と太さが異なることからわかる。第2図の T 図形は、印加電圧が 6.5kV と割合低いが九つの発光パルス波形で構成されている。後でも述べるが、P 図形は単一の発光放電であるので、電極中心から外側へ放電の各枝が同時に直線的に伸びて、いわゆる Polbüschel 図形を形成するのである。一方、T 図形は多重の発光放電であり、T 図形特有の先端枝分れの伸びは、後で述べるさい断実験の第9図からわかるように、第2発目以後の発光パルスで時間的にずれて形成されるものであり、また、これらの枝が多少直線性に欠けているのは、最初に何本かの枝が発生し、それ以前の放電による残留電荷の影響を受けながら次々と枝が発生、進展してゆくので曲がっているものと思われる。

また、T 図形からその固有の先端枝分れの伸びを取り去った残りの図形は、Polbüschel 状の図形になる

第4図 G 図形

Fig. 4. Figure G.

が、これを P 図形と比較してみると少し異なっている。つまり、T 図形内の先端枝分れの伸びを取り去った Polbüschel 状部分の枝の間隔が多少不均一で、枝先端が曲がり気味である。これは、T 図形において第2、第3の光パルス発生時に、Polbüschel 状部分の枝が伸びることと、新たに発生する枝が多少あるものと思われる。このことは第9図のさい断点が遅くなるにつれて、T 図形の Polbüschel 状部分が大きくなっていることでもわかる。

次いで、印加電圧が 10kV 以上になると、Gleitbüschel となり、強い発光を伴ったストリーマ、Gleitstiel が出て、放電図形は非対称に急激な伸びを示してくる。ここでは、これを単に放電図形 G と名づけておく。

第4図の放電図形は、全体としては円形で T 図形の成長したものと思われるが、電極中心から新たに光条を発生して大きく進展しようとしているもので、G 図形となっているものである。

最後に、印加電圧が 13.6kV 以上になると沿面フラッシュオーバー (Flashover) となり、強烈なアーク光のために写真フィルムは黒くかぶってしまう。写真感度を変えとか、特別なことをしないと、この図形を像として止めることは困難である。これを F 図形として、第2図を見ると強烈なアークが電極から伸び、その光が電極によってさえぎられた写真右上方のところに、G 図形がフィルム原版にはかすかに見られる。

以上述べた S, P, T, G, F の各図形は、その図形特有の放電の枝を電極中心から新たに発生させて、印加電圧に応じて S から P, P から T, T から G, G から F 図形へと順に成長してゆくのである。

4. 沿面放電発光パルス

放電の発光波形をオシロスコープで見ると、放電図形について特徴的な面が見られる。ただし、S 図形は発光が微弱なため、また F 図形は強烈なために測定で

きていない。P図形については単一のパルスの発光であり、電極の形にもよるであろうが、図形の直径が小さくなるにつれ、印加電圧が低くなるにつれて発光が遅くなる。印加電圧波形の波頭長の5倍以上の遅れの発光も記録している。これらの発光期間は数 μs 内であり、沿面ストリーマはほとんど同時に電極から四方に伸びるために直線的な枝で均一な長さとなり、そのために円形の図形になるものと思われる。

一方、T図形は必ず複数個の光パルスである。2発目以後の光パルスで、T図形特有の枝が時間的にずれて次々と発生、発光してゆく。G図形では、沿面火花コロナとなって、光条 (Gleitstiel) が発生するために強い光を伴い、発光波形も大きな光パルス波形と長時間発光が特徴となる。

発光波形からわかるように、沿面放電は印加電圧が低いと波尾で起こり、印加電圧が高くなるにつれて、波頭部分へと移ってくる。また、TやG図形では沿面図形の大きさを最終的に決定するのは終わりの方の光パルスであるから、沿面放電図形の大きさは、印加電圧の波高値や、放電が起こったときの瞬時の電圧値や

そのしゅん度とは単純に対応しないが、何らかの関係がある。

しかし、放電図形の伸びと印加電圧の対応は、手軽さのゆえによく描かれるもので、第5図に示した。ここで言う伸びの長さは、電極位置の中心から放電の伸びの最長の伸びまでの直線距離である。本実験の電極では、ほぼ1kV以上から放電図形が現われ始め、放電図形S (実線で表示) からP図形 (点線で表示) へと移ってゆく。伸びが5mmのところではグラフの曲線が折れ点になるのは、棒電極の先端半球状付近での放電によるものと思われる。それ以後はほぼ直線的にT図形の領域 (実線で表示) を伸びてゆき、G図形 (点線で表示) になると急激に伸びる。各種開閉インパルスによる伸びを同時に示してあるが、波頭長が異なっても伸びにはほとんど影響はなく、ほぼ同じ傾向である。ただ、放電図形Tの領域が波頭長が長くなると広くなってくる。

次に、沿面放電が開始したときの最初の光パルスの発生時刻 $t(\mu\text{s})$ と、そのときの印加電圧の瞬時値 $V(\text{kV})$ をもって沿面放電の $V-t$ 曲線として、波頭長30 μs の場合を第6図に示した。P図形は○印で、最終的にT図形、G図形に成ったものの最初のパルス位置は、それぞれ●、□印で示すと、放電図形が最初のパルス位置で明確に区別される。放電発光はこの場合1.5kV以上で起こり、 $V-t$ 曲線は波頭長の5倍である150 μs から4 μs に至る直線で表わされるP図形領域と、原点からの直線上にプロットされるG、Tの領域によって構成されている。それらの曲線と差交する印加電圧波形の位置によって放電図形が決定される。第6図の場合、Gは1.8~1.3kV/ μs のしゅん度であり、Tは1.3~0.9kV/ μs のしゅん度であって、G、T図形は必ず4 μs 以前で放電を開始している。このようにPとT図形とは図形もさることながら、 $V-t$ 曲線上にも明確な差となって表われる。このように沿面放電の発生に印加電圧しゅん度が大きな要因となっていることがわかる。しかし、前にも述べたように、しゅん度と図形の大きさを直接単純に対応させることには無理があるように思われる。

P図形について言えば、印加電圧があまり高くないことと、4 μs 以上の遅れ時間が必要なことは、電極先端に空間電荷の蓄積ができて、それがある値以上で瞬時に四方に沿面ストリーマが進展するものと思われる。一方、G、T図形範囲で

第5図 放電図形の半径と印加電圧の関係

Fig. 5. Relation between development of surface discharges and applied voltage.

第6図 沿面放電の $V-t$ 曲線

Fig. 6. $V-t$ curve of surface discharge.

第 7 図 各種印加電圧波形による沿面放電の G, T 図形になる V-t 範囲

Fig. 7. V-t region of growing to figure G and T.

は、P 図形の伸展、成長以後の印加電圧の上昇が大きいので、電極の最大弱点部分から数本の沿面ストリーマが発生し、その光による光電離を受け、未放電部分も沿面の電界を緩和させるように、次々と放電発光が起こることが考えられる。そうであれば図形は直線的な均一な放射状とはならず、後から発生する沿面ストリーマは、前に発生したものの影響を受けて曲がり不均一な図形になる。印加電圧がもっと高いと電極から光条が発生し、T 図形を超えて急激に伸展してゆく。

以上述べたように、G, T 図形になるには最初の発光パルスが V-t 曲線のある限られた領域に存在する必要があるわけで、他の波頭長の印加電圧による G, T 図形に発展する最初の光パルスを発生する範囲を V-t 図中に斜線で同時に示すと第 7 図のようになる。

例えば、 $[250 \times 8,600] \mu s$ 波形によって G, T 図形を得るためには、印加電圧の波形が $[250 \times 8,600] \mu s$ で示された斜線の部分を通過する必要がある、この範囲を $[25 \times 1,400] \mu s$ や $[30 \times 900] \mu s$ の波形が通過するときには、 $[25 \times 1,400] \mu s$ や $[30 \times 900] \mu s$ の波形の波頭近傍にあたり、その近傍の電圧の変化は、その電圧の立上り部分の変化と比べて少なく、また波高点 (25, 30 μs 時) を過ぎると印加電圧は低下するのであるから、この範囲で P 図形が発生しても、その後 T, G 図形への発展は困難と思われる。

5. 沿面放電の発光時間

沿面放電の発光時間の測定結果を印加電圧波形 $[30 \times 900] \mu s$ について第 8 図に示す。印加電圧が低いと波尾で放電が起こり、印加電圧が高くなるとだんだんと波頭部分の放電へと移ってくる。P 図形が発生するためには、波頭長 25 μs の開閉インパルスで 2.5 μs, 30 μs の波頭長で 4 μs, 250 μs 波頭長で

120 μs, 2,500 μs 波頭長で 2,000 μs の時間を要する。そして P 図形の発光期間は 1~5 μs ぐらいであった。印加電圧が 2 kV のときの発光時間は 1~2 μs であるので、図上に○印でその位置を示した。T 領域になると発光期間は波頭長 30 μs に達し光は強くなる。G 領域では波頭を完全に越して波尾にまで及び、Gleitstiel はことに強い光を示す。

他の印加電圧波形についても同様であったが、瞬時的な光の強度は印加電圧波形が

緩波頭波になるほど弱くなってくると、発光パルス数は緩波頭波になるほど多くなっていく。沿面フラッシュオーバーになると、強烈なアーク放電で光源としての応用も考えられて興味があるが、ここでは対象外とする。

6. 印加電圧さい断による放電図形

さい断ギャップによって印加電圧をさい断して、沿面放電の進展を止め、その成長の過程をみた。第 9 図に $[250 \times 8,600] \mu s$ の波高値 5 kV の場合の放電図形とその印加電圧、発光波形の時間変化を同時に示す。第 9 図(a)は、さい断されない普通の状態で、光パルスは 20, 50, 65, 98, 113, 233 μs 時に発生していて、合計 6 個の発光パルスで構成された T 図形を示している。(b)図は、同じ波高値で電圧印加後 45 μs で

第 8 図 沿面放電の発光時間

Fig. 8. Radiated duration of surface discharge.

第 9 図 さい断沿面放電図形

Fig. 9. Figure of surface discharge by chopped voltage impulse.

さい断したもので、ちょうど二つ目の光パルスのときさい断されている。図形は T 図形に比べて大分小さくなっているし、T 図形特有の枝も数が減っている。

(c) 図は、電圧印加後 35 μ s でさい断したもので、光パルスは 1 個である。これは T 図形の枝がなく、完全な P 図形となっている。このことから、T 図形の枝は P 図形発生後 2 発目以後の光パルスで次々に構成されていくことがよくわかる。

7. む す び

正極性沿面放電図形を分類すると、沿面グローコロナによる S 図形、放電の枝が直線的・放射状的に伸び円形をした従来 Polbüschel と言われている P 図形、多重放電によって形成される T 図形、沿面火花コロナによる Gleitbüschel の G 図形、沿面フラッシュオーバーの F 図形の五つになる。印加電圧が高いとこれらの図形の段階を順に経て成長してゆく。そして、次の段階の放電図形に進むときには、必ず前の放電の伸びとは別に電極から新たな形式の放電の進展をみせる。つま

り、G 図形から F 図形になるには、Gleitstiel がアークになるのではなく、電極からアークが Gleitstiel の位置からはずれた経路を通じて発生する。T 図形から G 図形になるときは、Gleitstiel が T 図形の枝とは別に電極から発生する。また、P 図形から T 図形に進展するときも、電極から固有の枝が既存の枝とは別に発生することを考えれば、T 図形を Polbüschel から独立した図形とみることは妥当と思われる。

次に、印加電圧が低いと沿面放電図形は波尾でも発生するし、波頭で発生した図形が波高値まで、または波頭を超えて持続放電する場合もあるので、図形の大きさは沿面放電開始時の電圧値や電圧しゅん度だけでも決まらない。しかし、印加電圧のしゅん度は図形発生の重要な要因と思われる。印加電圧が大きいと発光時間は長く、発光強度も大きい。また、印加電圧波形の波頭長が長くなると発光期間は長くなるが、瞬時的な発光強度は弱くなる。

終わりに、本研究にあたり、細部にわたり御指導、御教示下さった成蹊大学工学部 鳳 誠三郎先生、東京大学工学部 河野照哉先生、千葉政邦先生に厚く感謝の意を表します。また、本研究の一部は文部省科学研究費の援助によって行なわれた。

(昭和 53 年 7 月 18 日受付、同 53 年 12 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 川島・鳳：昭 50 電気学会全大 111
- (2) 鳳・川島：成蹊大学工学部報告 No. 19, 1455 (昭 50)
- (3) 川島・鳳：電学放電研資 ED-75-10 (昭 50)
- (4) A. Kawashima & S. Hoh: *IEEE Trans. Elect. Insulation* EI-13, 51 (1978)
- (5) 川島・鳳：昭 51 電気学会全大 45
- (6) 川島・鳳：昭 51 同上 166
- (7) 川島・鳳：昭 51 電気四学会連大 65
- (8) J.G. Anderson & R.U. Giacconi: *AIEE Trans. Pt. III*, 46, 1800 (1960)
- (9) 川島・片原・佐藤：昭 48 電気学会全大 121
- (10) A. Kawashima & S. Fukuda: *Rev. Sci. Instrum.* 44, 1142 (1973)
- (11) 川島・片原・鳳：昭 49 電気学会全大 108
- (12) A. Kawashima & S. Hoh: 1975 International Symposium on High-Voltage Engineering, Zurich
- (13) 川島・鳳：成蹊大学工学部報告 No. 22, 1563 (昭 51)
- (14) 川島：電学放電研資 ED-78-42 (昭 53)
- (15) 鳳・川島：片原：成蹊大学工学部報告 No. 17, 1313 (昭 49)
- (16) 電気学会：放電ハンドブック (改訂新版) (昭 48)
- (17) 辻村・中村：電学放電研資 ED-72-6 (昭 47)