

論 文

沿線ストリーマと逆放電の伸展と電荷図

遠藤正雄*, 高橋雄造**, 渡辺真人***

(1985年10月11日受理)

Propagation of Line Streamers and Back Discharges Observed with Dust Figures

M. ENDO,* Y. TAKAHASHI** and M. WATANABE***

(Received October 11, 1985)

Line streamers propagate over the surface of polyethyleneterephthalate sheet just above the knife edged backing electrode. Polarity of residual charge on the surface is discriminated with powdering of bicolor particles. (1) Polarity of residual charge on the locus of line streamers is same as that of applied impulse voltage. Polarity of the residual charge reverses if back discharges due to chopping of applied voltage occur. When the back discharges take place, some charge of the same polarity as that of applied voltage are repelled and moves toward to the periphery of the locus of the line streamers. (2) When back discharges repeat, multiple concentric structure appears in the dust figures. (3) Back discharges occur also when the needle electrode is removed from the sheet surface after the voltage application. These back discharge result in change of dust figures around the needle electrode. The change is more significant when potential of the needle is negative in reference to the residual charge. (4) Length of back discharges decreases very steeply according as the time to chopping of positive applied voltage increases. The time to chopping exerts no remarkable influence to length of back discharges for negative applied impulse.

1. まえがき

複合誘電体の境界面で生じる沿面放電現象の研究は、1777年G.C. Lichtenbergが固体絶縁物表面に表面放電图形を発見したときに始まる¹⁾。この沿面放電は二次元的進展であり、空間放電に比べて観測は比較的容易であるが、時間的、空間的観測にはなお制約がある。このため、沿面放電が特定の方向へ進展するように絶縁物表面に溝をつけたり²⁾、背後電極に加工を施す³⁾などの工夫

がなされている。著者の一人は、針と刃形電極との間に薄い誘電体シートを挿入して、針電極にインパルス電圧を加えるとシート上を刃形電極に沿って沿面放電が一次元的に伸展することを確かめ、これを沿線ストリーマ(line streamer)と名づけた⁴⁾。沿線ストリーマは背後電極(刃形)の形状に沿って伸展するので、背後電極を直線状にすることにより、その伸展瞬時速度が容易にわかり、電圧、電流、伸展速度などの関係が明らかになってきた^{5,6)}。

本報告では、沿線ストリーマの伸展過程をもとに表面電荷図(dust figure以下電荷図という)によって検討し、さらに波尾で電圧をさい断した場合の再発光現象について考察した。この再発光は印加電圧が正極性あるいは負極性のいずれの場合も、針端近傍からシート上を刃形電極に沿って非常に高速で伸展する。このような再発光を逆放電(back discharge)と呼び、印加電圧が正の場合を正極性逆放電、負の場合を負極性逆放電と呼ぶことにする。この逆放電をくり返すと電荷図に多重構造の現われることを明らかにした。また針電極を誘電体表面から引き離すときの電荷図の変化についても検討した。

* 中央大学理工学部電気工学科 (112 東京都文京区春日1-13-27)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 13-27, Kasuga 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 112 Japan

** 東京農工大学工学部電気工学科 (184 小金井市中町2-24-16)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 241-6, Nakamachi 2-chome, Koganei, 184 Japan

*** 東北電力株式会社 (980 仙台市一番町3-7-1)
Tohoku Electric Power Company, Incorporated, 7-1, Ichibancho 3-chome, Sendai, 980 Japan

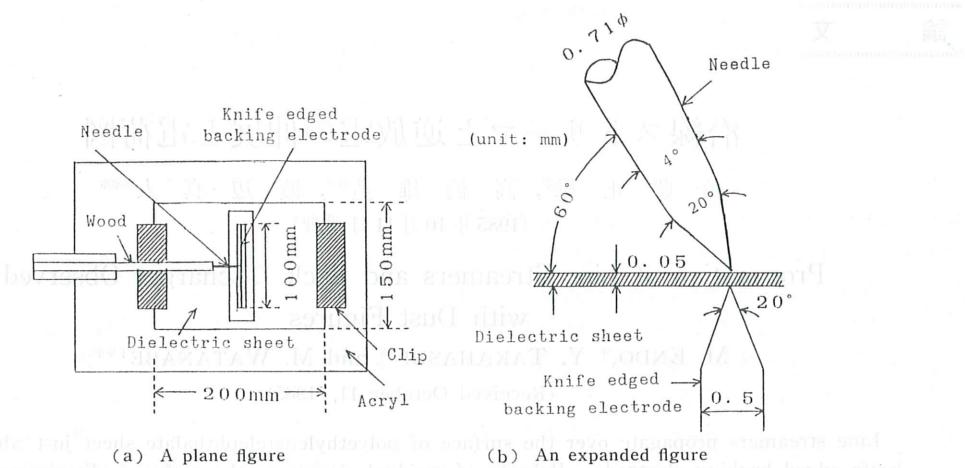
(a) A plane figure
(b) An expanded figure

図1 電極構成

Fig. 1 Electrode arrangement.

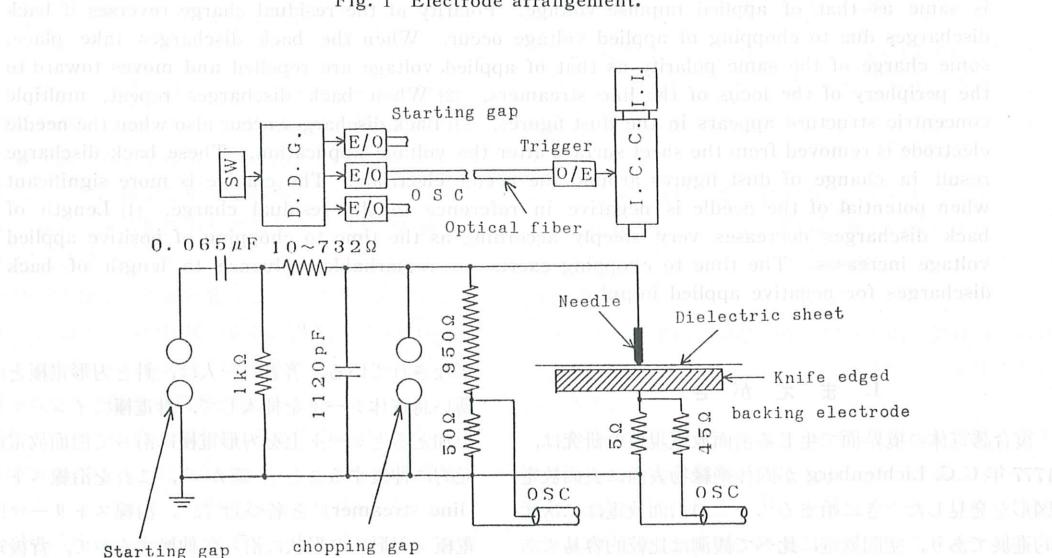


図2 実験回路

Fig. 2 Experimental circuit.

2. 実験装置および方法

電極構成および実験回路をそれぞれ図1、図2に示す。背後電極には刃形導体(100 W×20 h×0.5 dmm)を用いた。使用する誘電体シート(200×150 mm, 50 μm厚)はPET(polyethylene terephthalate)フィルムであり、比誘電率は約3.3である。シートは残留電荷の影響を避けるため最初エタノールで洗浄し、デシケータに保存したものを用いて、電圧印加ごとに取り替えた。

沿線ストリーマと逆放電の伸展によってシート表面に残る電荷の分布を観察するため正極性に帶電したtoner(BM-5 T, 赤, carrier: BM-5 D)と負極性に帶電

したtoner(CT-2101, 黒, carrier: CD-2101)との混合粉末(混合比は1:1)をシートに散布した。電荷図の観察には硫黄と鉛丹(Pb_3O_4)との混合粉末を用いる場合が多いが、上記粉末は正極性あるいは負極性の残留電荷分布の識別が容易であり、分解能も高いので電荷図から得られる情報量はかなり多い。

インパルス電圧の発生には急峻波パルス発生装置(パルス電子社)を用いた。電圧および電流波形の観測には2ビームオシロスコープ(7844型, 400 MHz, ソニーテクトロニクス社)を用いた。放電の伸展過程の観測にはイメージインテンシファイア(I.I.)付のI.C.C.(IMACON 790, Hadland Photonics社)による流し撮り(ス

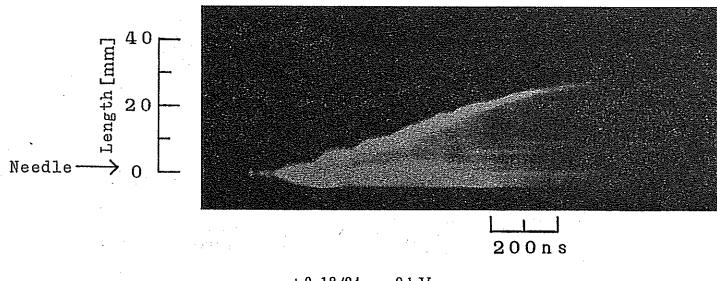


図3 正極性沿線ストリーマのストリーク写真

Fig. 3 Streak photograph of positive line streamer.

トリック, 10 ns/mm) と駒撮り(フレーミング, 2×10⁷駒/s)の写真を用いた。フィルムはポラロイド Type 47 (ISO 3000) である。

オシロスコープと I.C.C. のトリガ信号はデジタルディレイジェネレータ (D.D.G.) によってタイミングを取りっているが、インパルス電圧発生時に生じるアース電位の変動や電磁干渉により D.D.G. が誤動作するため逆放電の観測が不可能となる。そこでノイズ対策としてトリガ信号伝送部に光ファイバ(エスカ, 三菱レイヨン)を採用した。光ファイバの発光部は LED, 受光部はシンフォトダイオードである。

3. 沿線ストリーマの伸展と電荷図

3.1 正極性沿線ストリーマ (P.L.S.)

図3は正極性インパルス電圧(+0.18/24 μs, 9 kV)を印加した場合の刃形電極に沿って片側方向に伸展する正極性沿線ストリーマのストリーク写真である。図4はそのときのシート表面と裏面の電荷図である。

正極性沿線ストリーマの伸展によるシート表面の残留電荷分布の様子を観察すると、図4に示すように針電極の存在した部分の近傍には負電荷帯Aが伸び、そのまわりに電荷の存在しない空帶が橍円状に広がっている。鳥山は電荷図中心部の逆極性图形は印加電圧がゼロに減衰した直後に残留電荷が平衡を失い、もとの電極へ引き返す際の現象と説明した⁷⁾。また電圧印加後に誘電体を電極から分離するときや、電圧がゼロになる以前に逆極性图形が生じるという報告もある⁸⁾。逆放電のときはストリーマ伸展時と逆向きの電流が観測されるはずであるが、本実験ではインパルス電圧波尾ではそれが観測されないことから負電荷帯Aは放電直後に針電極を分離する際に形成されたと思われる。さらに、刃形電極方向およびこれに垂直な方向に正電荷帯B, Cが伸び、正電荷帯Cを包み込むように負電荷帯Dが雲状に分布する。負電荷帯Dは正極性沿線ストリーマの伸展時に電離形成された電子、負イオンが正電荷帯B, Cに吸引される過程でシ

トにトラップされた結果、形成された图形と思われる。電荷図の最外殻にはヒゲ状の正電荷帯Eが散在する。

インパルス電圧印加時にシート裏面と刃形電極の間で放電が生じていないと仮定すると、シート裏面の電荷図はシート表面に残留する電荷帯によって誘導された電荷により形成したものと考えられる。したがってシート裏面の電荷図は、シート表面のそれとは逆極性の图形となる。両图形にはこの傾向が明瞭に示されている。いま、中心部を考えると、表面のAのまわりの空帶に相当するところは裏面では負電荷が存在している。このことは、正極性沿線ストリーマの伸展時は、表面のAおよびそのまわりの空帶には正電荷が存在していたが、針電極を引きはなすときの逆放電により中和され、さらに刃形電極に沿って負電荷Aが残ったものと思われる。さらにシート裏面の電荷図最外殻の正電荷帯D'はシート表面の電荷図の負電荷帯Dの電荷量がかなり多いことを示している。

3.2 負極性沿線ストリーマ (N.L.S.)

図5は負極性インパルス電圧(-0.18/24 μs, 8 kV)を印加した場合の刃形電極に沿って片側方向に伸展する負極性沿線ストリーマのストリーク写真である。図6はそのときのシート表面と裏面の電荷図である。

負極性沿線ストリーマは図5のようにスムーズに伸展することから、その構造をかなり明らかにすことができた。すなわち、その先端部は電離が活発に行なわれている領域(active region)である。中間部は電界の小さいプラズマ状の部分(passive region), そして針近傍には針電極から沿線ストリーマに電子を供給するためのcathode fallに相当する部分(dark space region)が見える。

負極性沿線ストリーマの伸展によるシート表面の残留電荷分布の様子を観察すると、図6に示すように針電極の存在した部分の近傍には正電荷帯Aが伸びている。これは正極性沿線ストリーマの場合と同様にシートを電極から分離するときに形成されたと思われる。刃形電極方

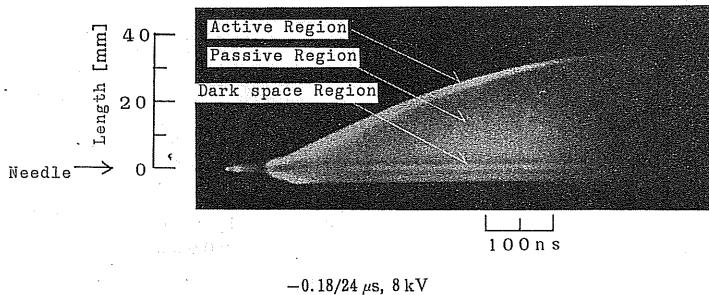


図5 負極性沿線ストリーマのストリーク写真

Fig. 5 Streak photograph of negative line streamer.

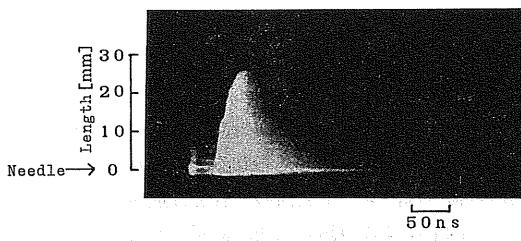


図7 正極性逆放電のストリーク写真

Fig. 7 Streak photograph of back discharge after positive voltage application.

向には負電荷帯Bが伸び、正電荷帯Cおよび空帶Dが電荷図の外殻を形成する。シート裏面の電荷図はシート表面の残留電荷によって誘導された電荷が形成する图形であるとすると、負電荷帯C'の存在は空帶Dの外側に最初正電荷が正電荷帯Cのように分布していたことになる。しかし、いつの時点で正電荷が中和されて消失したかは明らかでない。

4. 逆放電と電荷図

逆放電現象は複雑で不明な点が多いが、それは主として前の放電による残留電荷分布の定量化が困難なためである。ここでは沿線ストリーマの逆放電について残留電荷電位を仮定した伸展とその電荷図の説明を試みることにする。

4.1 正極性逆放電 (N.B.D.)

図7は正極性インパルス電圧(+0.18/24 μs, 9 kV)を印加してから約1.0 μs後にさい断したときに発生する正極性逆放電のストリーク写真である。図8はそのとき形成されたシート表面の電荷図である。

正極性沿線ストリーマが伸展した後には図4で示したように正電荷が刃形導体に沿って帯状Bに残り、かつそこから放射状Cにも残る。この正電荷帯によって伸展直後は針電極近傍は針電極と同電位に、正極性沿線ストリ

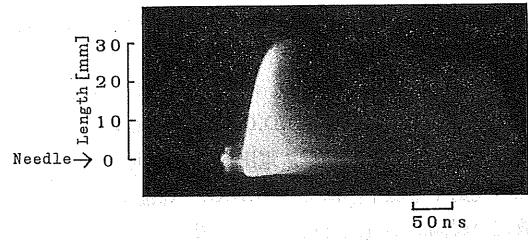


図9 負極性逆放電のストリーク写真

Fig. 9 Streak photograph of back discharge after negative voltage application.

ーマの先端部ではほぼ6 kV(伸展開始電圧)⁹⁾に保たれているものと仮定する。この状態で印加電圧をさい断すると、針電極電位は残留電荷による電位に対して負電位となり、針電極と残留電荷間で放電が起こり、残留電荷は中和される。その結果、全体的に逆放電後の残留電荷密度は小さく、図4の正電荷帯B, Cの後には逆極性の負電荷aが残り、負電荷帯Dはその一部がbとしてわずかに残る。一方、残留電荷相互間には反発力が働くいているので、残留電荷の一部は外部に押しやられると考えることもできる。すなわち、正極性逆放電により、図4の表面電荷図の正電荷B, Cは中和され(Aおよびそのまわりの空帶も正電荷があるので中和される)、かつ、その過程で残留正電荷の一部は平衡を失い、外部に追われて正電荷帯bが生じ、図8のような图形が形成される。

4.2 負極性逆放電 (N.B.D.)

図9は負極性インパルス電圧(-0.18/24 μs, 8 kV)を印加してから約1.0 μs後にさい断したときに発生する負極性逆放電のストリーク写真である。図10はそのときに形成されたシート表面の電荷図である。

負極性沿線ストリーマが伸展した後には図6に示したように刃形電極に沿って負電荷が帯状Bに残る。この負電荷によって、伸展直後には針電極近傍は、針電極と同電位に、負極性沿線ストリーマの先端部は、ほぼ-5 kV

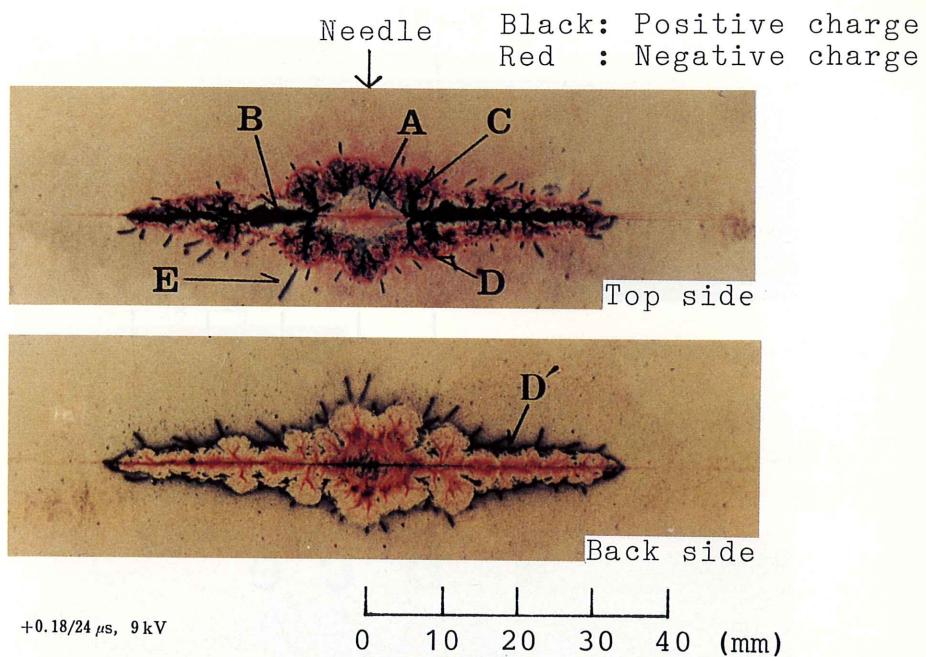


図4 正極性沿線ストリーマの電荷図

Fig. 4 Dust figures of positive line streamer.

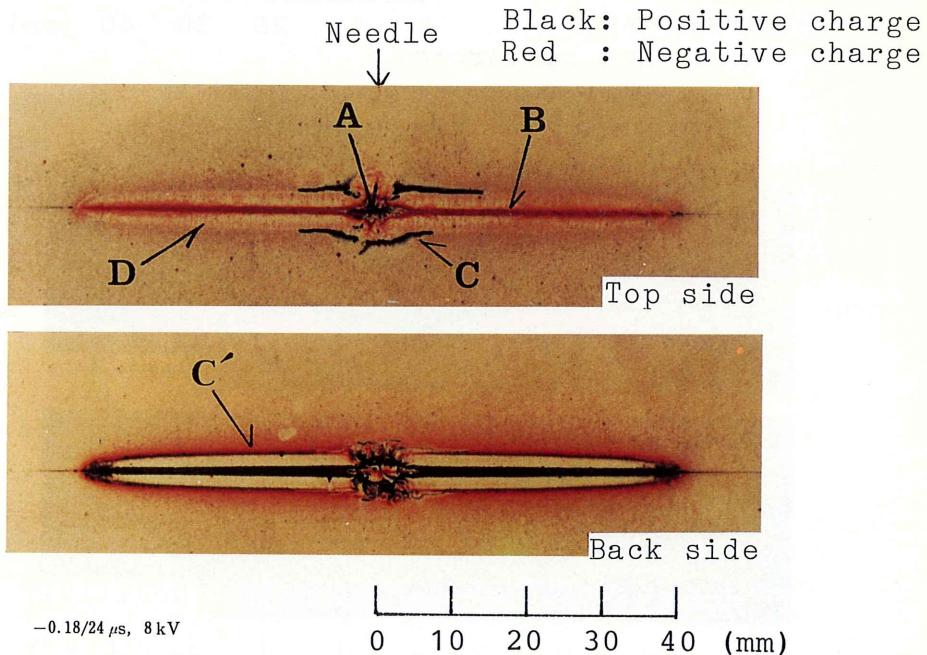


図6 負極性沿線ストリーマの電荷図

Fig. 6 Dust figures of negative line streamer.

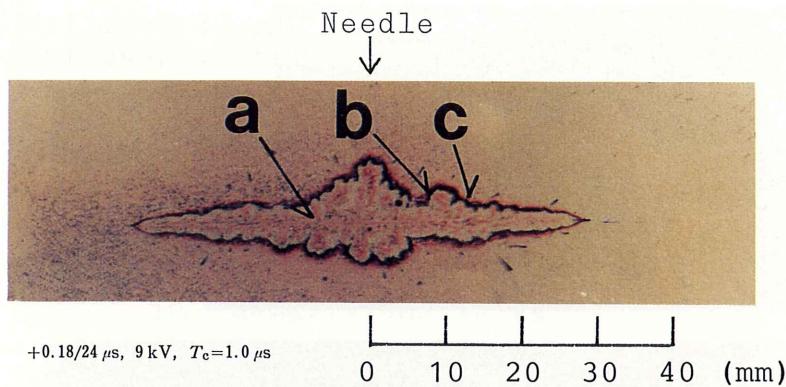


図8 正極性逆放電の電荷図
Fig. 8 Dust figures of positive back discharge.

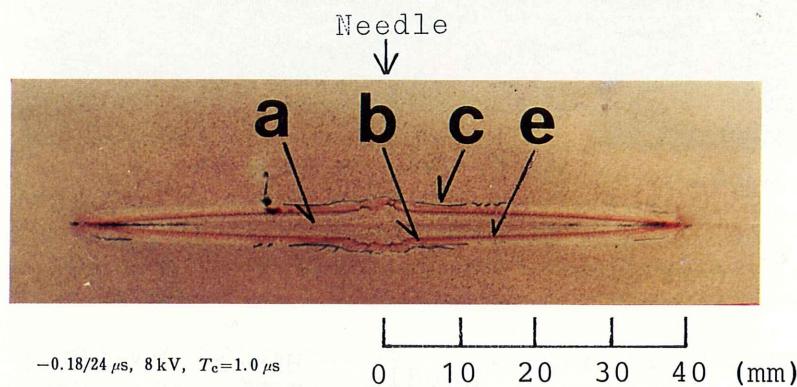


図10 負極性逆放電の電荷図
Fig. 10 Dust figures of negative back discharge.

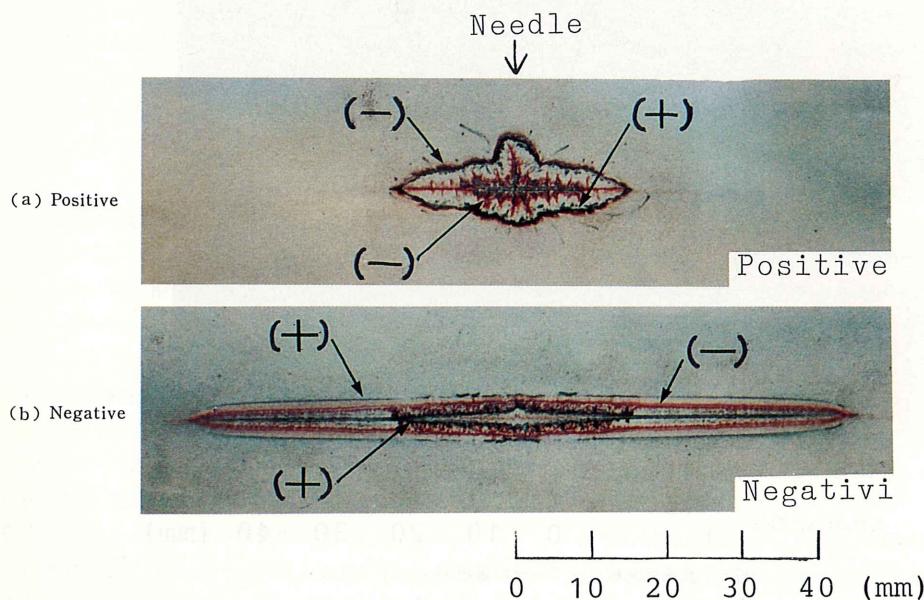


図13 電荷図の多重構造
Fig. 13 Dust figures by triple discharges.

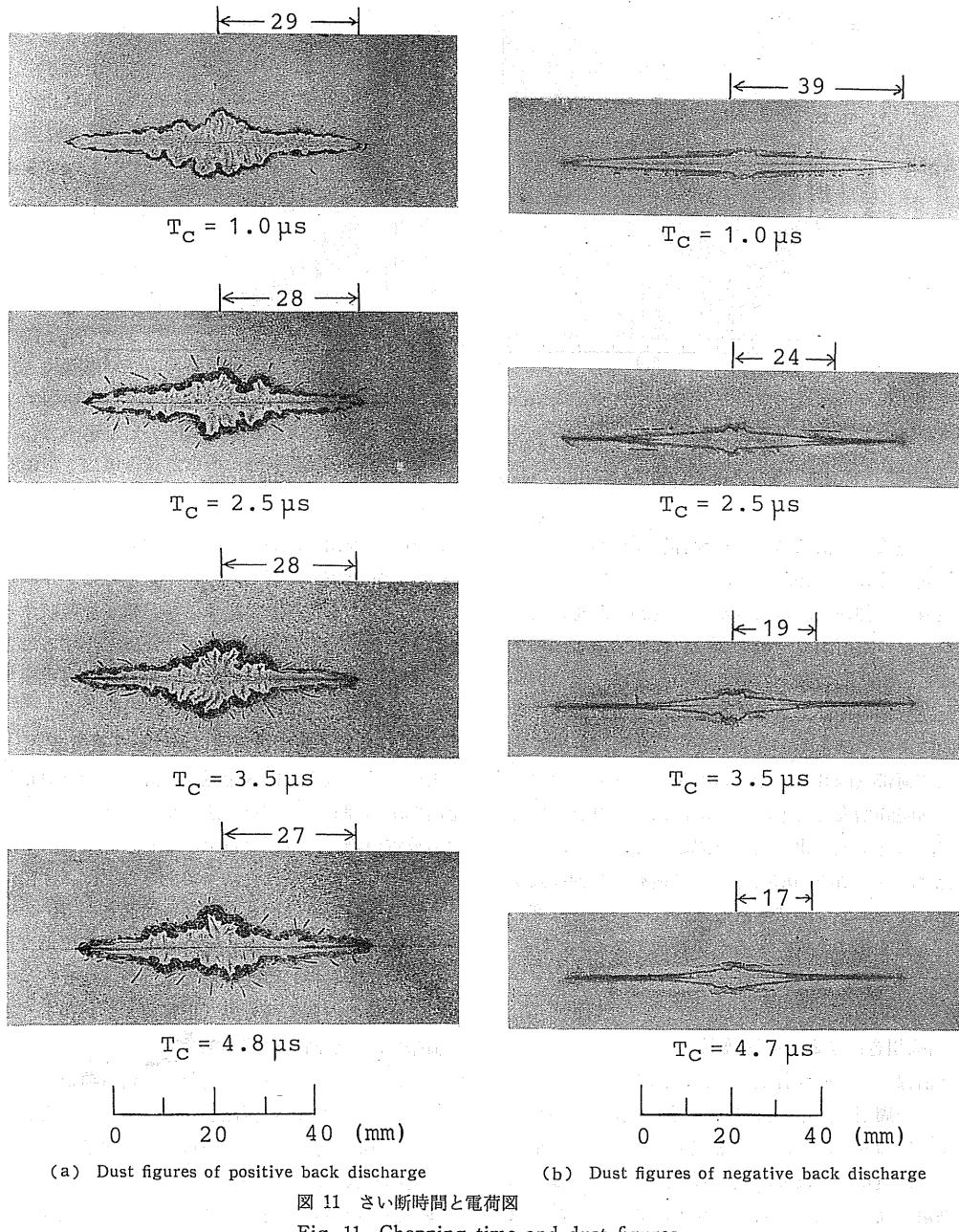


図 11 さい断時間と電荷図

Fig. 11 Chopping time and dust figures.

(伸展開始電圧)に保たれているものと仮定する。この状態で印加電圧をさい断すると、針電極電位が空間電荷の電位よりも急に高くなるため、針電極と残留電荷間で放電が起り、順次先端部まで急激に伸展してゆく。すなわち、負極性逆放電は残留している負電荷が針に回収される形で放電が伸展するので、逆放電後の残留電荷密度は全体的に小さく、図 6 の負電荷帯 B の後にはほとんど電荷が残らず、その痕跡 a が見えるにすぎない。また正

電荷帯 C はその一部がわずかに C として残る。一方、正極性逆放電の場合と同様、残留電荷相互間には反発力が働くので、逆放電の過程で残留電荷の一部は平衡を失い、外部に押しやられ、負電荷帯 b が生じると考えることができる。

4.3 さい断時間と電荷図

4.1, 4.2 では、沿線ストリーマの伸展機構解明の手がかりの一つとして、印加電圧波形のさい断を試みた。こ

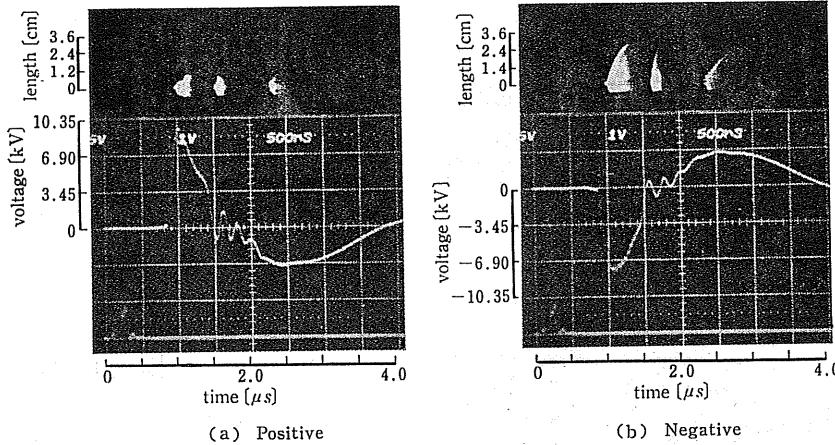


図 12 電圧波形とストリーカ写真

Fig. 12 Applied voltage wave form and streak photographs.

れによって逆放電は沿線ストリーマ伸展時の残留電荷に沿って伸展することがわかった。さらに、さい断時間を使って逆放電の伸びや、電荷図がどう変わるかを検討した。そのときの電荷図の一例を図 11 に示す。各図の下の数値はさい断時間で図上の横線間の数値は、電荷図から求めた逆放電の伸びである。正極性逆放電の伸びはさい断時間によってほとんど変わらない。また、外殻を形成する正電荷帯(図 8 b)や負電荷帯(図 8 c)の輪郭は、さい断時間増大とともにわずかにはっきりとしてくる程度で、ほとんど変化しないと思われる。一方、負極性の場合は、さい断時間増大とともに逆放電の伸展長が著しく短くなり、かつ形状も針の近傍はその太さは変わらないが、先端部は先鋒になるのが特徴である。

5. 考 察

5.1 針を引き離すときの逆放電

正極性沿線ストリーマ伸展直後は、図 4 表面電荷図の A およびその周辺の空帶部分に正電荷が存在していたことは前述のとおりである。針は零電位であるから、正電荷に対しては負電位となり、引き離す際には針先端から電子を供給しながら正電荷を中和する。このような逆放電により、針周辺のかなりの部分にわたって、中和が起こるものと考えられる。一方、負極性沿線ストリーマの伸展直後は、図 6 表面電荷図の A およびその周囲に負電荷が残っていて、針電位は残留電荷に対して正電位となる。針を引き離すとき、負電荷を回収する形で逆放電が起こることになり、その範囲は、せまい領域に限られると思われる。

正極性沿線ストリーマの針を引き離すときの逆放電が、かなり大きな領域に起こるのに対し、負極性のそれ

が、小さい理由は、いまのところ明らかではない。しかし、残留電荷電位に対し針電位が負になるか正になるかにより、針から電子を供給するか、電子を吸収するかにより、残留電荷の中和範囲に大きな差が生ずることは確かである。このことは波形さい断時の逆放電現象でも同様と思われる。

5.2 逆放電と表面電荷図における多重構造

正極性逆放電は、図 8 を見ると外殻の赤(負電荷 C)を内部から押しつける形で黒(正電荷 b)が残る。これは逆放電の際、針電極の電位により、正電荷が平衡を失って外部に押しやられた結果であることは、すでに述べた。負極性逆放電は図 6 の表面電荷図と図 10 のそれを比較すると、正極性逆放電のときと同様に黒(正電荷 c)を内部から押しつける形で赤(負電荷 b)が残る。さらに、その内側に薄く黒(正電荷 e)が残る。この正電荷帯は、さい断時の電圧振動により生じたものと推測できる。このような極性の異なる残留電荷帯を多重構造と呼ぶことにする。正極性逆放電の電荷図は複雑でわかりにくいか、負極性逆放電の電荷図では多重構造がわずかに認められる。

多重構造をさらに明らかにするために放電を 3 回くり返したときの電圧波形とストリーカ写真的例を図 12 (a) (b) に、電荷図の例を図 13 の (a) (b) に示す。印加電圧波形は LC の振動波形(HAEFELY 社製 Impulse Amplifier Type 33)であり、放電も 3 回生じている。このとき得られる電荷図は明らかに多重構造を示す。すなわち、負極性の場合を例にとると最初の放電で最外殻の正電荷帯、次の放電でその内側の負電荷帯、さらに内側に正電荷帯ができる。その内部の電荷は針をシートから離したときの放電の結果と思われる。このように、電荷図

の多重構造は、逆放電により電荷の移動が容易になり、針電極と同極性の電荷が平衡を失って外に押しやられるために生じた結果であると推論することができる。

5.3 さい断時間と電荷図

正極性逆放電では針電極は、残留電荷に対して、負電位となるため、逆放電時に多量の電子を供給することが考えられる。これは、針電極近傍の光が先端部よりもかなり長く持続していることとも関連していると思われる。このように逆放電の過程で針電極から多量の電子が放出され、残留電荷が中和されるとすると、残留電荷は比較的容易に中和されることになる。一方、負極性逆放電では、針電極は残留電荷に対して正電位となるため、形の上では残留電荷を回収しながら放電が伸展することになる。この場合は、回収の容易さにより、伸展長が影響されるよう思われる。さい断時間増大により、回収しにくくなると考えれば、負極性逆放電の伸びが変わることは説明できそうであるが、このことに関しての物理的内容は不明である。

6. むすび

針對刃形導体間に薄い誘電体シートを挿入した電極構成において、針にインパルス電圧を印加したときに発生する沿線ストリーマおよび電圧をさい断したときに生じる逆放電を主として表面電荷図から検討した。表面電荷図を作るときは誘電体シートを電極から離す必要があるため、その影響で、本来の图形とは多少異なることはやむをえない。これらのこと考慮しても、なおかつ、ここで得られた電荷図から沿線ストリーマと逆放電の伸展の様子を推論することができた。また、シート表面の電荷図と裏面のそれとの対応も得られ、その電荷分布の様子もより明確になった。

(1) 沿線ストリーマの伸展により、刃形導体に沿った伸展には同極性の電荷が残り、電圧さい断による逆放電でその極性は反転する。この際、同極性電荷の一部は反発されてストリーマ伸展跡の外側に押しやられる。(a) 正極性逆放電は図の樹枝状部分(B, C)の正電荷を中和しながら伸展する。この際、余分の負電荷がaとして残る。逆放電によりB, Cの部分の正電荷がbに押しや

られる。(b) 負極性逆放電は図6の直線部分Bの負電荷を吸収する形で伸展する。逆放電によって、Bの部分の負電荷が反発されてbの部分に押しやられる。

(2) 逆放電をくり返すと、電荷図に多重構造が現われる。

(3) 針電極を誘電体シートから離すときに起こる逆放電により針のまわりの電荷図に変化が起こる。その変化範囲は残留電荷に対する針電極の極性により異なり、針電位が負極性のときが大きい。

(4) さい断時間の増大により逆放電の伸展長は正極性はあまり変わらないが、負極性は急に短くなる。

以上、沿線ストリーマの伸展により生じた電荷図を中心して検討を行なった。しかし、沿線ストリーマ伸展後のシート表面の残留電荷分布密度ならびにその時間的経緯については、ほとんど触れることができなかった。今後は残された課題である。

終りに、実験に協力してくれた大学院生佐藤重範君に感謝します。ここで用いたイメージコンバータカメラは中央大学昭和55年度文部省研究助成金の一部で購入した機器であり、イメージインテンシファイアは昭和57年度文部省特別設備費により購入した東京農工大学工学部共同利用機器である。

参考文献

- 1) Y. Takahashi: J. Electrostatics, 6 (1979) 1
- 2) 千葉政邦: 電気学会放電研究会資料, ED-78-38 (1978)
- 3) 大久保仁, 池田正己, 本多正己: 同上, ED-80-67 (1980)
- 4) 遠藤正雄, 閑利通: 電学論A, 103 (1983) 373
- 5) 遠藤正雄, 阿波根達彦: 電気学会全国大会, No. 64 (1983)
- 6) 遠藤正雄, 渡辺真人, 佐藤重範: 電気学会全国大会, No. 150 (1985)
- 7) Y. Toriyama: *Dust Figure of Surface Discharge and Its Applications*, Kinokuniya Book Store Co. (1961)
- 8) 横井良秀, 鈴木喜彦: 電気学会雑誌, 87 (1967) 568
- 9) 遠藤正雄, 渡辺真人, 高橋雄造: 電気学会放電研究会資料, ED-84-95 (1984)