UDC 537.528:621.315.615.2

# 油中沿面放電

井関 昇* 倉橋 晟* 松浦 清*
Noboru Izeki Akira Kurahashi Kiyoshi Matsuura

# Creepage Discharge over Insulation Surface in Oil

**Synopsis**

This paper is a general description on the creepage discharge over insulation in oil, including our studying results. Creepage discharge is divided into two modes, that is, one is the case where a background electrode exists, the other is not the case, As the former mode is distinctive and practically important, it is described in more details. In creepage discharge the microscopic observation, as well as the microscopic characteristics, is very important, thus are shown in considerable detail. The creepage mechanism in oil has scarecely been understood, but a simplified mechanism and streamer model are postulated.

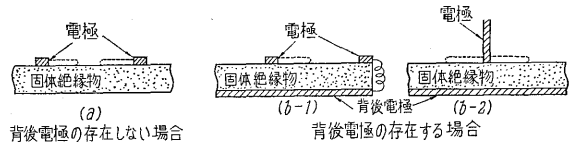
## I. まえがき

油中沿面放電の問題は実用的にもきわめて重要な事項であるにもかかわらず，現象があまりにも複雑なためか，研究例はきわめて少なく，理論的にはほとんど未詳のままである．沿面距離を増してもそのわりには火花電圧は上昇せず，比較的低い電圧でも意外な距離まで火花が伸びるので，絶縁設計では沿面距離に頼れないとさえいわれている．最近は電力系統がしだいに高圧大容量化する傾向にあり，一方では輸送容量増大および経済設計への要求から絶縁を合理的にきりつめることが要求されているが，そのためには沿面方向に対し信頼性ある絶縁基準を確立することが是非とも必要である。

この現状に対処するため当社ではこの問題について研究を行なってきた.[1] まだ今後に残された問題が非常に多いが，油中沿面放電に関する総合報告は全くないという現状にかんがみ，筆者らの研究成果をも含めて油中沿面放電全般についての概要をとりまとめてみた．油中沿面放電といっても，その放電路が対電極に対する静電容量の非常に小さい場合と非常に大きい場合とでその性質がだいぶ異なるのでこの二つの場合を分けて述べる．ついで油中沿面放電の伸びの機構，速度，極性による差異など基本的性質について述べ，最後にまだほんの緒についたばかりであるが，油中沿面ストリーマの理論について述べる。

## II. 背後電極の存在しない場合の油中沿面放電

油中沿面放電には第1図に示すように二つの場合が存在する．(a)はたとえば支持がいしや操作用絶縁棒などの



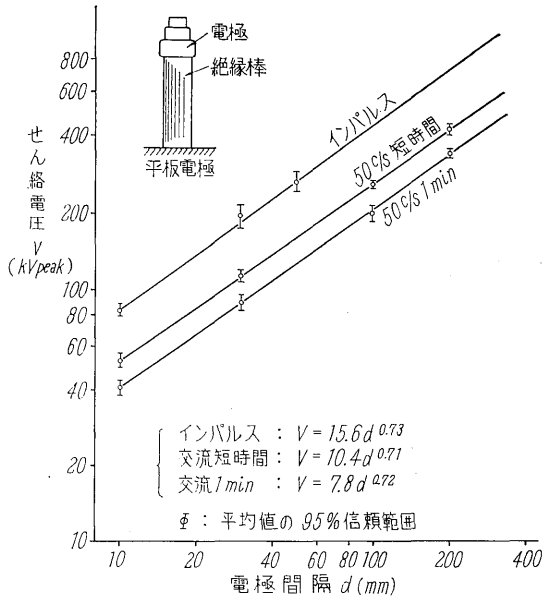

第1図 背後電極の存在しない場合と存在する場合
Fig. 1. Electrode configurations with and without background electrode

ように，放電路が対電極に対して持つ静電容量のきわめて小さい場合である．(b)はケーブル端末やコンデンサブッシングはく端よりの沿面放電のように，放電路が対電極に対して持つ静電容量の大きい場合である．(b)の場合は対電極を特に背後電極と呼び，一般に(a)と比べて沿面放電の伸びは大きく実用上特に問題となる．(a)の場合は純油中のせん絡と(b)の場合との中間的な特性となると考えられるが，まず(a)の場合について述べる。

しゃ断器操作用絶縁棒（積層木材製）を例にとって，その両端間の距離とせん絡電圧との関係を求めた結果を第2図に示す．せん絡電圧は純油中におけると同様に距離の $n$ 乗に比例するが，$n$ の値は一般に純油中の場合より小さく材料および電極形状などにより異なる．せん絡時の外観写真を第3図に示す．すなわち一般的にはまず油中の破壊から始まるが，いったん破壊路が絶縁表面に達すると，その後は表面を伝わって進行する傾向がある．これは絶縁物に付着した charge（表面 charge）は高密度のまま保持されやすく，その結果ストリーマを保ちやすくなるためと考えられる。

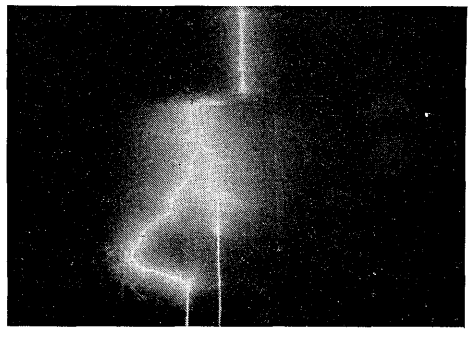
この場合，絶縁棒の電極端に接した油中には集中電界が生じているので，もし高圧電極のまわりにしゃへいを付して電界集中を緩和すればせん絡電圧が上昇することが期待される．第4図[2]はその一例で同図(a)のように銅線を木棒に巻きつけた電極に，同図(b)のようにさらにシー

* 中央研究所



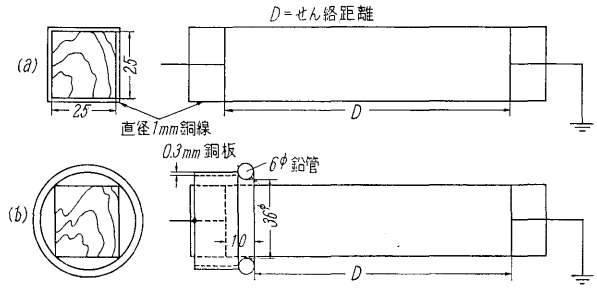

第2図　操作用絶縁棒の距離とせん絡電圧（油中）

Fig. 2. Flashover voltage and creepage distance of dielectric rod (in oil)



第3図　しゃ断器操作用絶縁棒のせん絡状況（油中）

Fig. 3. State of flashover of dielectric rod (in oil)

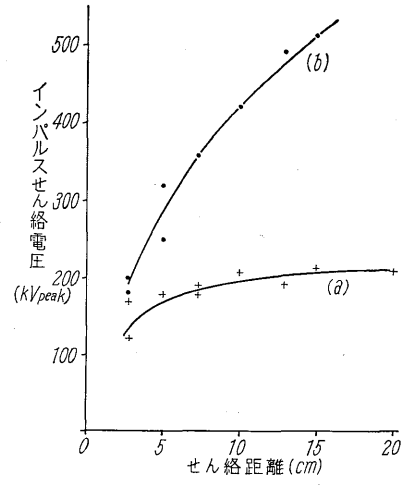



第4図　電極のシールドリング

Fig. 4. Electrode configurations with and without shield ring

ルドリングをつけるとせん絡電圧は第5図のようにかなり上昇する。

また，せん絡電圧は固体絶縁材料によって異なり材料の絶縁特性の良好でないものほどせん絡電圧は低下して，せん絡距離を増してもそのわりにはせん絡電圧は高くはならない[(1),(2)]．ただし，固体絶縁材料の絶縁特性が悪く




第5図
電極しゃへいの効果

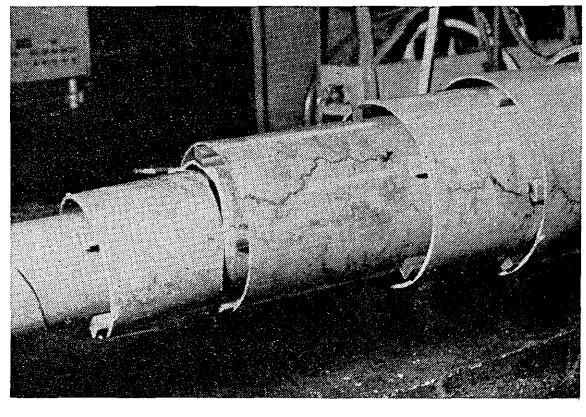
Fig. 5.
Effect of shield ring

なると，その材料自体の破壊もてつだってくるので；これは沿面放電のみの性質ではないと思われる。

上記の説明からわかるように沿面せん絡には固体絶縁物の種類による差異もあって種々複雑な様相をていするが，純油中のせん絡と本質的に異なる点は，(1)固体が併存するために電極近傍における油中のひずみ電界が高くなること，(2)表面 charge は空間 charge より保持されやすいことの2点に要約されよう。

## III. 背後電極の存在する場合の油中沿面放電

背後電極の存在する場合の例として，イコーライザ付油入ブッシングの絶縁筒に沿ってせん絡を起こしたときの状態を第6図に示す．電位傾度は沿面方向より厚さ方向の方が強いが，放電路（ストリーマ）は沿面方向に伸び，順次に内側の絶縁筒表面に沿って進んでいる．この場合イコーライザによって，それのない場合よりブッシング全体としては電位傾度は緩和されているが，なんらかの原因でいったん放電路が伸び出すと，イコーライザはくが背後電極の作用をするため，ストリーマはかえ



第6図　イコーライザ付油入ブッシングせん絡状況

Fig. 6. State of flashover of oil-filled bushing with equalizer

って激化され伸びやすくなったものと思われる．このように背後電極がある場合には，放電路は意外に長い距離まで延びる性質がある。

インパルス印加の場合と交流印加の場合とでは沿面放電の様子は大分異なるので，以下これらを分けて述べる。

## 1. インパルス印加の場合

1） 沿面放電を開始する電圧（以下コロナ開始電圧とよぶ）

油中沿面放電はまず導体近傍の絶縁油が局部的に絶縁破壊する（すなわち油中コロナが始まる）ことから始まる．はく電極端からのコロナ開始電圧を理論的に求めることは非常にむずかしいのでここでは第7図のような油浸紙と絶縁油とからなる複合絶縁のコロナ開始電圧について考える．[3] この場合にはオイルギャップ $g$ にかかる電圧 $V_g$ が油の破壊電圧 $V_{gs}$ になったときにコロナが始まり，以後は主絶縁紙表面にそって $x$ 方向に沿面放電がのびる．印加電圧を $V$ とすると $V$ と $V_g$ との関係は次式となる。

$$V=\frac{V_g}{g}\left(g+\frac{\varepsilon_g\cdot t}{\varepsilon_t}+\frac{\varepsilon_g\cdot d}{\varepsilon_d}\right)=V_g\left(1+\frac{1}{\beta g}\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

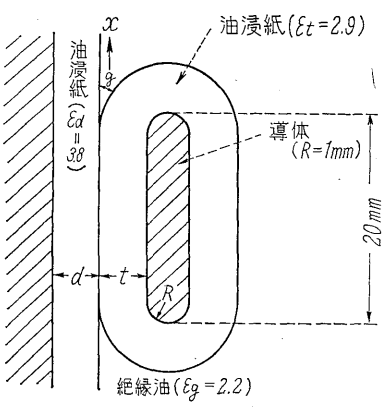
ただし $\frac{1}{\beta}=\left(\frac{t}{\varepsilon_t}+\frac{d}{\varepsilon_d}\right)\varepsilon_g$ ……(2)

すなわち $\beta$ は固体絶縁物（ここでは油浸紙）の固有静電容量と油の誘電率との比である。

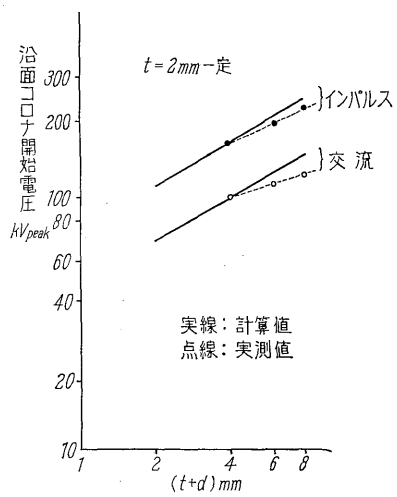
油の破壊電圧 $V_{gs}$ とオイルギャップ $g$ との間には一般に $n$ 乗則 $V_{gs}=kg^n$（ただし $0<n<1$）が存在するので，これを用いるとコロナ開始電圧 $V_s$ は

$$V_s=V_{gs}\left(1+\frac{1}{\beta_g}\right)=K\left(g^n+\frac{1}{\beta}g^{n-1}\right) \quad \cdots\cdots(3)$$

これよりコロナ開始電圧は油の破壊電圧とギャップ長との関係および固体絶縁物の固有静電容量と油の誘電率との関係によって決まることがわかる．上式による計算




第7図 油入複合絶縁モデル
Fig. 7. Model of oil-filled winding insulation

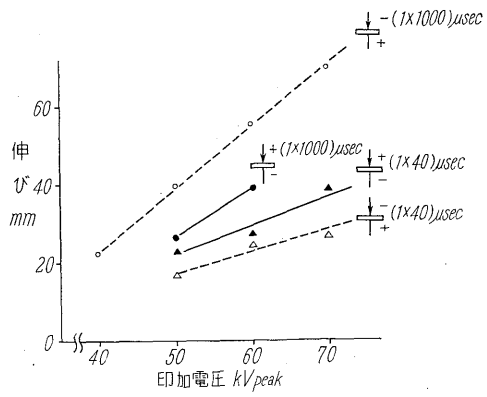



第8図 沿面コロナ開始電圧と絶縁厚さとの関係
Fig. 8. Relation between creepage corona starting voltage and thickness of dielectrics

結果と実測値との関係を第8図に示す．両者はかなりよく一致し，この考え方が沿面放電開始電圧をよく説明していることがわかる。

2） 印加電圧と伸びとの関係

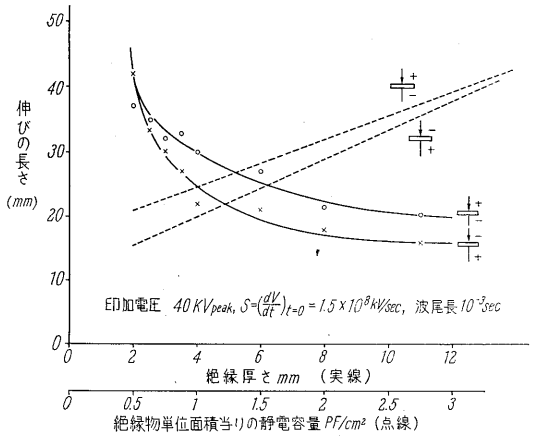
印加電圧と沿面放電の伸びとの関係をリヒテンベルグ図形により求めた（第9図）．伸びは印加電圧とともに直線的に増大すること，および標準波形（1×40 μs）の場合には正ストリーマの方が負ストリーマより伸びやすいことがわかる。




第9図 印加電圧と伸びとの関係
Fig. 9. Relation between streamer propagation and applied voltage

3） 絶縁厚さと伸びとの関係

Staack[4] は固体絶縁物の厚さを変えて沿面放電の伸びをリヒテンベルグ図形の半径から調べ，第10図実線の関係を得ている．これより固体絶縁物の絶縁厚さがうすいほど沿面の伸びは大となることがわかる．この関係を絶縁物の固有静電容量 $C_0$（絶縁物の単位面積当たりの静電容量）と伸びとの関係に換算すると第10図点線の



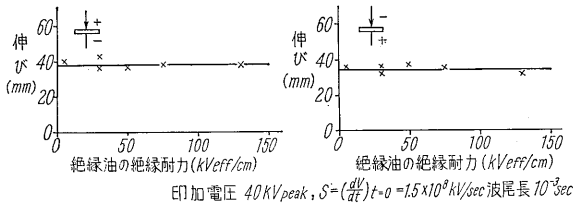

第10図　絶縁厚さと伸びとの関係

Fig. 10. Relation between streamer propagation and thickness of dielectrics

ようになり，伸びは $C_0$ の増加とともに直線的に大きくなっている．ストリーマと背後電極との間はコンデンサとなっていて，ストリーマはその周囲に電荷を充電しながら伸びると考えられる．$C_0$ が大きくなるとストリーマと背後電極との間の静電容量は大きくなるので充電する電荷を多く必要とし，ストリーマ内の電流は大きくなる．この電流増加がストリーマを激化するので $C_0$ の増加とともに伸びやすくなるものと思われる．すでに 1) で述べたようにコロナ開始電圧も $C_0$ に関係することを考えあわせると背後電極がある場合の沿面放電の特長は $C_0$ の存在に帰せられることがわかる。

4)　絶縁油の絶縁耐力と伸びの関係

絶縁油の影響を見るために，Staack[4] は絶縁耐力の異なる絶縁油中での伸びをリヒテンベルグ図形で調べ，第11図のように印加電圧がひとしければ絶縁油の絶縁耐力に関係なく伸びは一定であると報告している．このことは注目に値することがあるが，絶縁油の影響よりもフィルム乳剤の影響の方が大きいのではないかとも考えられる．筆者の経験では，少なくともインパルス印加の場合には乳剤の影響はほとんどないように考えているが，今後さらに充分な確認を必要とする。




第11図　絶縁油の絶縁耐力と伸びとの関係

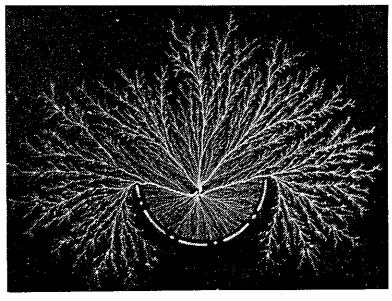
Fig. 11. Relation between streamer propagation and dielectric strength of oil

5)　インパルス波形の影響

印加電圧が特に高くないかぎり油の破壊は印加電圧より 2～5 μs 程度おくれて発生する（たとえば後述第 15 図参照）．よって沿面伸びに対して一般に波頭長より波尾長の影響の方が大きい．既述第 9 図において (1×40) μsec と (1×1,000) μsec とを比べると，印加電圧の波尾が長いほど伸びは大となることがわかる．また，極性的に見ると標準波形の印加電圧では負の方が伸びは短いが，長波尾では逆に正より長くなる．Staack[4] は立ち上がり $\left(\dfrac{dV}{dt}\right)_{t=0}$ の影響について実験し，印加電圧が低いときは伸びは立ち上がりによって変化しないが，電圧が非常に高い場合には立ち上がりのおそいほど（すなわち緩波頭になるほど）伸びがいくぶん大きくなることを示した。

6)　衝 立 の 効 果

沿面放電の進展を阻止するための一方法として沿面方向に直角に固体絶縁物（衝立）を設置することが考えられる．その効果の一例を第 12 図に示す．[4] ストリーマは衝立のあるところでは完全にさえぎられているのがよくわかる。



第12図　放電路に衝立を置いた場合のリヒテンベルグの図形

Fig. 12. Lichtenberg figure of surface creepage over oil-filled insulation with barrier

## 2.　交流印加の場合

交流の場合にも考え方としてはインパルス印加の場合と大きな差はないはずであるが，現象的にはインパルスの場合よりさらに複雑となる。

1)　沿面放電開始電圧

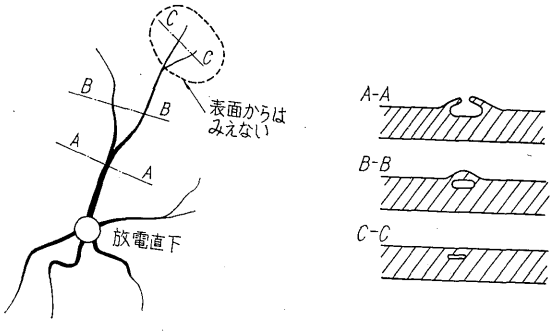
理論的には既述式(3)が適用される．ただし油のインパルス比が約 2 前後であるので，交流のコロナ開始電圧はインパルスの場合の約½前後となる。

2)　沿 面 の 伸 び

後述第 17 図に示すようにコロナ 1 発についてはインパルスに比べ伸びは非常に小さい．これはIV 章で述べるような機構で，いわゆる corona stabilization が起きるためではないかと考えられる．しかし電圧がさらに高くなるとストリーマは激化し，既述 1)，2)，3) と同様な

伸び特性がみられる。[1]

交流印加の場合の著しい特長として時間効果があげられる．すなわち沿面放電でもボイド放電でも油中で放電が持続すると油の分解によるガス（主に $H_2$）の発生およびコロナによる固体絶縁物の損傷などが起こり，そのため放電は著しく複雑化する．[5] この場合放電は時間とともに厚さ方向にも伸びるが沿面方向にも広がる．この沿面方向の伸びは電圧印加時間により異なるが，厚さ方向に比べて著しく長い．ここで沿面と書かずに沿層と書いたのは絶縁物表面には異常はなくとも表面より少し内側に沿層方向に管状孔が発達し意外に遠くまで放電路がのびるからである．表面上をのびないで絶縁物内部を伸びるのは，表面にできた気泡は浮上するに対し，内部にできたものはそこにたまるためと考えられる．沿層方向の伸びの一例を第 13 図に示す。




第 13 図　油浸プレスボード中の沿層方向放電の伸び
Fig. 13. Tangential propagation of streamer in oil-impregnated pressboard

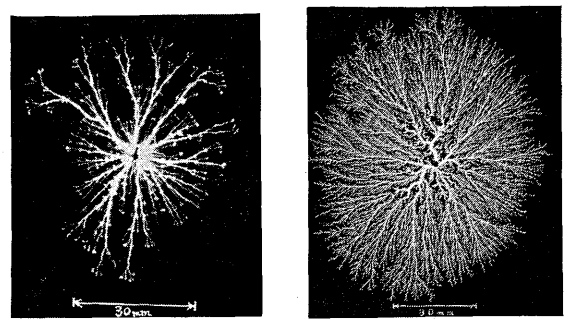
## IV. 油中沿面ストリーマの性質

II，III章では主として実用的な立場からみた油中沿面放電の巨視的特性について述べたが，その本質的な特性はもっと微細な機構に根ざすものであるから，その進展状態を微視的あるいは分析的に観測する必要がある．このような研究はきわめて少なく，高速度カメラおよびプローブを用いた Anderson らの研究[7]があるにすぎない．そのほか古くからリヒテンベルグ像による観察的研究もあるが，この方法による研究さえもまだ充分ではない．またこの方法のみによっていたのでは放電進展の時間的経過を知ることはできない．そこで筆者からリヒテンベルグ像法による観察をさらに詳細に行なうと同時に沿面放電のとる電流および電荷量の時間的変化を観測し，これらの対応から沿面放電の進展状態を推定しようとした．以下主として筆者および Anderson らの研究結果の概要を紹介する。

### 1. インパルス印加の場合

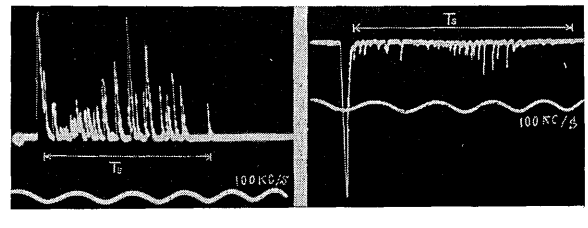
1） リヒテンベルグ図形

第 14 図 (a)，(b) におのおの正波，負波を印加した場合のリヒテンベルグ図形を示す．どちらも樹枝状の沿面ストリーマが放射状に長く伸びているが，正と負の図形を比較するとその枝状の部分はおのおの特長ある形を呈し，両者ははっきりと区別がつく．また，電極直下には多くの場合逆放電図形も見られる．これは，最初の順放電によって固体絶縁物上に蓄積された電荷が逆電界を形成するために生じるものである。




(a) 正　波　　(b) 負　波

第 14 図　インパルス印加によるリヒテンベルグ図形
Fig. 14. Lichtenberg figures of impulse creepage discharge



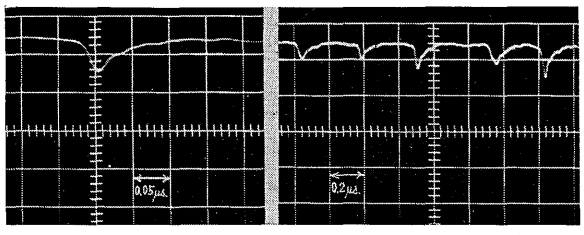

(a) 正　波　　(b) 負　波

第 15 図　インパルス印加による沿面放電電流波形
Fig. 15. Current wave forms of impulse creepage discharge

2） 沿面放電電流波形

ブラウン管オシログラフにより得られた沿面放電電流波形を第 15 図に示す．最初のパルスはインパルスの充電電流で放電は電圧の最大値よりいくぶん遅れて始まる．リヒテンベルグ図形でみると 1 発の放電であるのに電流的にみると間欠的な電流パルス群よりなっておりその一連によって 1 発の放電が完成されていることがわかる．その電流パルスの 1 発の波形を拡大して観測したものを第 16 図に示す．これより 1 個のパルス持続時間 $t_s$ はきわめて短く，0.1 μsec かそれ以下である。

またパルスの生じる間隔は 0.1 μsec～1 μsec である．放電の発生期間 $T_s$ は電圧の大きさ，波形によって異なり，電圧が高いほど，また印加電圧の波尾長が長いほど




(a) パルス1発 (0.05μsec/cm)　(b) パルス数発 (0.2μsec/cm)

第16図　パルス電流の波形

Fig. 16. Wave form of pulse current of impulse creepage discharge

長くなる．逆放電が生じれば，順放電パルス終了後しばらくたって逆極性のパルスが見られる。

3) 沿面放電電荷

インパルスコロナ測定法[6]によって沿面放電の全電荷量 $Q$ を測定すると，印加電圧 $V$ 対 $Q$ の関係は，沿面ストリーマの広がりの状態によって異なる．沿面ストリーマが一方方向のみに直線的に伸びるときは，$V-Q$ 特性が直線的になるが，放射状に広がるようなときはそれだけ多くの電荷が要求されることになるので $V$ の上昇とともに $Q$ は指数関数的に増加する．もし放電路の途中に衝立を置いて沿面方向への伸びをさえぎると，沿面ストリーマが衝立のところえ到達した後においては $V-Q$ 特性は $V$ の上昇による $Q$ の増加がほとんど見られなくなる．これは沿面ストリーマがそれ以上伸びなくなるためである。

4) Anderson, Liao の研究[7]

Anderson, Liao は高速度カメラ (Boys カメラ) とプローブにより油中沿面ストリーマの機構を研究している．それによれば負ストリーマは雷放電の stepped leaders (階段的前駆放電) に非常によく似ている．雷放電では stepped leaders の前に連続的に進む pilot streamer の存在が推定されているが，彼らはプローブによりその存在を確認している．すなわち，pilot streamer (光にはならない) が stepped leaders に先んじて放電路を開拓すると，これに続いて stepped leaders が進んでこの放電路を埋める．するとまたその先から pilot streamer が出発して新たに放電路を開拓する．その間だけ stepped leaders は消えている．これらの過程がくり返されてストリーマは進展する．stepped leaders の伸びの速度は非常に速いが止まっている期間が長いので，平均的な伸びの速度はずっとおそく約 1.25～2.5 mm/μsec であると報告している．また正ストリーマは負ストリーマほど規則的には伸びず満足な測定ができなかったが，やはり負と同様に stepped leaders の機構で伸びていくと述べている。

5) 油中沿面ストリーマの伸びの機構

上記 Anderson らの研究成果を参考にし，われわれの得たリヒテンベルグ図形と電流波形を対応させながら検討すると放電機構に関し次のような推定がえられる。

(1) 電流波形では，きわめて短時間のパルスが 0.1～1 μsec のオーダの間隔で観測されたが，これらの各パルスは各 stepped leaders のとる電流を示すと考えられる．このような stepped leaders が順次進展してリヒテンベルグ図形に見られるような一つの放電が完成される。

(2) リヒテンベルグ図形をよく観察すると，1～3mm 位の間隔でほぼ同一円周上に光の強い点が存在し，あたかも年輪のようなものが認められる．これは stepped leaders が 1～3 mm 位ずつ段階的に伸びたためにできたものと推定される。

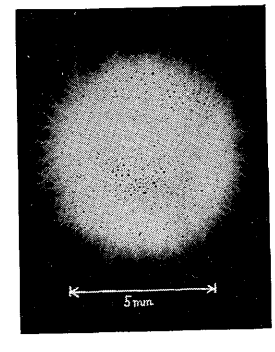
(3) パルス電流の大きさは初めは小さく，だんだん大きくなり最大値を経て終端はまた小さくなって終わる．これは初期は伸びが小さいため終期はストリーマの進展が衰えるためにストリーマ電流が小さくなると考えれば説明がつく。

(4) ストリーマの伸びの長さをストリーマの発生期間 $T_S$ で割ればストリーマの平均的な伸びの速度 $v_m$ が得られる．測定結果によれば正負とも $v_m$ は 1 mm/μsec のオーダで Anderson らの測定結果とよく一致している．しかし，正ストリーマの $v_m$ の方が負よりいくぶん大きいようである。

(5) 各 stepped leaders の伸びの長さ (1～3 mm) を1発のパルス電流の持続時間 $t_S$ で割れば，stepped leaders の速度 $v_S$ を求めることができる．正負のストリーマとも $t_S$ は 0.1 μsec 前後あるいはこれ以下と考えられるので，$v_S \geqq 10 \sim 30$ mm/μsec と推定される。

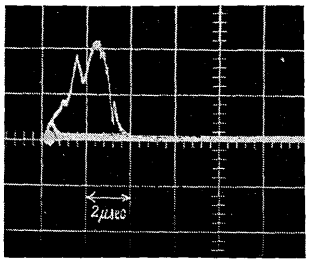
## 2. 交流印加の場合

第17図に 50%交流沿面コロナ1発のリヒテンベルグ図形を示す．その形は周辺のぼやけた真円状を呈しその




第17図　交流沿面コロナ1発のリヒテンベルグ図形

Fig. 17. Lichtenberg figure of AC creepage discharge

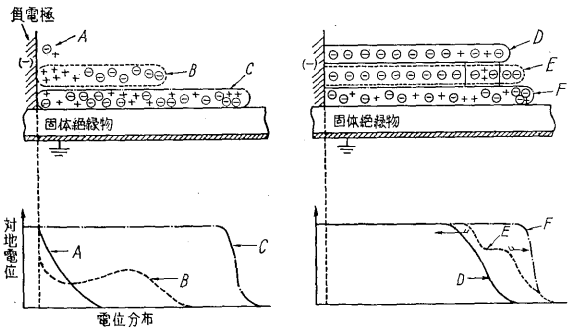



第 18 図
交流沿面コロナ 1 発の電流波形 (2 μsec/cm)
Fig. 18.
Current wave form of AC creepage discharge

半径（沿面方向の伸び）はインパルスの場合と比べて著しく小さい．この機構はよくはわからないが商用周波では，電圧上昇速度よりイオン拡散の方が早いため，インパルスの場合のように強い局部電界ができないためと考えられる．第 17 図に対応した交流沿面コロナ 1 発の電流波形を第 18 図に示す．これにみられるように，数 μsec の間持続した波形となり，インパルスの場合の波形と比べて非常に異なる．このように，油中沿面放電は，電圧印加方法（波形印加時間）によって複雑に現象が変貌する。

## V. 油中沿面ストリーマ理論

油中沿面放電は理論的にはほとんど未詳である．この最大の原因は液体の電気的性質の複雑性にある．液体の電気伝導現象や電気的破壊の機構がほとんど未知であるうえに，実際に使用する絶縁油は純粋なものではなくその組成や不純物の状態なども正確には明らかでない．したがって理論的解析には非常に困難を伴う。




第 19 図　負ストリーマ伸びの機構
Fig. 19. Mechanism of negative-polarity creepage

### 1. Anderson, Liao の理論[7]

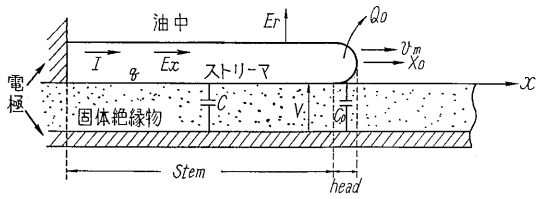
第 19 図に Anderson らの与えた負ストリーマ進展の説明図を示す．その機構は気中長ギャップのストリーマ機構によく似たものであって，最初に(1)電極近傍のイオン化から第 1 段の stepped leader の発生までを，つぎに(2)それ以後につづく stepped leaders の機構を，最後に(3)それが衰えて進展を停止するまでの機構を定性的に説明している．すなわちまず電極近傍の強電界中(図の $A$)に偶存している自由電子を仮想し，これによる「衝突電離→増殖」（すなわち気中における $\alpha$ 機構）を考え，これを first pilot streamer と呼んでいる．streamer の前方にある電子群の移動度に比べ後方にある正イオン群の移動度は小さいので，電極近傍に正イオン空間電荷電界ができる(図の $B$)．それによるひずみ電界の強さが，ある一定値を越すと電極より強力な field emission が起こりこれが第一段の stepped leader となる．これにより生じた電子により channel 中に正イオンが作っていた空間電荷電界は中和されるから channel 中はプラズマとなり導通に近い状態となる（図の $C$．ここまでが上記(1)の段階）．このときストリーマ先端は強い電位傾度になっているから pilot streamer 先端の電子群はひきつづき $\alpha$ 作用を営みつつ伸びるが(図の $D$)，主として正イオン空間電界のために先端近くの電位傾度は漸次大となり（図の $E$)，これがある値にまで達するとここで局部的な破壊が起こる．先に生じた第 1 段の stepped leader の中は多分気化状態にある（水素が大部分と思われる）から低い電位傾度でも channel 全体のなだれにまで発展し，再び電極から強力な field emission が生じ第 2 段の stepped leader となる(図の $F$)．以後このようなくり返しがつづいて stepped leader が伸びつづけるが（ここまでが(2)の段階）電子の一部は油に吸着されて重い負イオンとなったり，固体絶縁物に付着したり，あるいは油分子を励発してエネルギーが弱められたりするのでストリーマは漸次細く弱くなり，ついには停止するに至ると述べている。

以上は Anderson が主としてプローブによりストリーマ中の電位測定を行なった結果をもとにして，気中のストリーマ機構を参考にしながら提起したものである．しかし油中では気中におけるような自由電子の存在は疑わしく，そのうえ $\alpha$ 機構は起こらないとさえいわれている[8]ので，以上の理論は単なる仮想の域を出ないものである。

上記は負ストリーマの進展の説明であるが，正ストリーマは伸び方が不規則であることおよび pilot streamer の存在は認められないことなどの点で負ストリーマと異なる．正ストリーマに対して Anderson らが与えた機構を再述することは避けるが，彼らは streamer の進展の主役としてその先端における光電離作用を考えている。

### 2. 油中沿面ストリーマのモデル

気中，油中あるいは油中沿面を問わずストリーマの基本的性質を察知するにはストリーマモデルを考えるのが便利である．沿面ストリーマモデルとして提案されたも




$C$：stem 単位長あたりの対電極に対する静電容量
$C_0$：head の対電極に対する静電容量
$X_0$：head における $x$ 方向の電位傾度
$Q_0$：head の電荷
$v_m$：ストリーマ進展の速度
$E_x$：stem 内部における $x$ 方向の電位傾度
$q$：stem 単位長あたり表面に充電される電荷
$E_r$：stem 表面における半径方向の単位傾度
$V$：ストリーマの対電極に対する単位
$I$：ストリーマのとる電流

第 20 図　油中沿面ストリーマのモデル
Fig. 20. Streamer model of surface creepage

のに Anderson のモデル[7]と本多のモデル[9]とがある．どちらもまだ不充分な段階のものであるが後者の方がすぐれているので以下主として本多のモデル(第 20 図)について述べる。

第 20 図において電極からストリーマが固体絶縁物表面にそって $x$ 方向に伸びると考え，ストリーマ先端の部分を head（既述の pilot streamer に相当），それより後の部分を stem（既述の channel に相当）と呼ぶ．head には印加電圧の極性に一致した charge $Q_0$ がその表面に分布して $X$ 方向に電位傾度 $X_0$ をつくる．この $X_0$ が head より先にある部分の油をイオン化，破壊しながら速度 $v_m$ で先に進む．一方 stem 中はプラズマ状態に近いと考えられ，その電位傾度 $E_x$ は，付着による電子損失を補うていどの衝突電離を必要とする条件から決まると考えられる．いまストリーマのとる電流を $I$ とすると

$$I=qv_m+\frac{dQ_0}{dt}=CVv_m+\frac{dQ_0}{dx}v_m=CVv_m+\frac{d}{d_x}(C_0V)\,v_m \quad\cdots\cdots(4)$$

上式の第 1 項は新たに生じた stem 部分のとる電流，第 2 項は head 先端に要求される電流である．上式において $\frac{dC_0}{dx}\simeq 0$, $\frac{dV}{dx}\simeq -E_x$ およびストリーマ端のポテンシャル $V$ はストリーマの長さとともに低下するという条件を入れて整理すると式(4)は

$$I\simeq CVv_m \quad\cdots\cdots(4')$$

すなわちストリーマのとる電流の主体は $C$ を充電するための電流であることがわかる。

沿面ストリーマの伸展機構の主役をなすものは $X_0$，および $E_x$ である．$X_0$ すなわち油の破壊電位傾度はまだ明らかにされていないが

$$v_m=\mu X_0 \quad\cdots\cdots(5)$$

の関係から，もし carrier の移動度がわかれば $v_m$ の測定より $X_0$ がわかるはずである．Anderson[7] は $\mu=1\times$ cm²/$V$sec とおき $v_m$ の実測値から $X_0$ を一応推定しているが，実情は carrier の本体もわかっておらず[10] $\mu$ の値も測定者により 4 けたもの差異があるというのが現状である。

つぎに $E_x$ であるが Anderson はプローブを用いて測定し $E_x$ は零に近いとしているが，測定確度にはまだ疑問があると思われる．先にのべたように筆者はストリーマのとる電流 $I$ および電荷 $q$ を測定した．これらより stem の太さ，stem の抵抗，stem の半径方向電位傾度 $E_r$ なども推定できるはずであるが，実際には何本ものストリーマが同時にのび，また無数に多くの枝わかれが生じるので解析は容易でない。

以上のモデルでは pilot streamer と stepped leaders を区別しておらず，非常に簡単化したモデルであるが，これを区別するには空間電荷電界を考慮に入れなければならないので問題はきわめて複雑である。

以上述べたように油自身の破壊機構が明らかでないので，油中沿面放電の機構に不明の点が多いのも当然であるが，前述のストリーマモデルから考えて分布容量 $C$ が[9]およぼすであろう作用を上げれば次のようである。

(1) head 先端に対してはコンデンサの edge 効果によりその $X_0$ はより強くなるであろう。
(2) head charge $Q_0$ には space charge のほかに表面 charge も含まれるだろう．そのため charge 密度はより高くなりストリーマを保ちやすくなる。
(3) $C$ が大きいことはストリーマ電流を増し，その結果 stem 内の電位降下は小さくなるだろう。

**謝　　辞**

油中沿面放電の研究に種々ご指導を賜わった本多東京電機大学教授に対し，深く謝意を表する。

**参考文献**

(1) 橋野，井関：電学誌 **79** p 12（昭 34）
(2) 石川，吉田：芝浦技報 **21** p 271（昭 17）
(3) 井関，倉橋．昭 39，連大 No. 503
(4) H. Staack: Archiv für Elerctrotecknik **25** p 607 (1931)
(5) 井関，倉橋：電学誌 **81** p 14（昭 36）
(6) 井関，倉橋：インパルスコロナの測定法（電学誌投稿中）
(7) J.G. Anderson, T.W. Liao: Communication and Electronics, No. 18, p 218 (1955)
(8) P.K. Watson, A.H. Sharbaugh: Jr. Electrochem. Soc. **107** p 516 (1960)
(9) 本多：放電研究 No. 15, p 1 (1963)
(10) British Jr. Appl. phys. **14** p 469 (1963)

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。