

絶縁物中ボイド放電の放電図形

Discharge Figure of Void Discharge in Dielectrics

橋本博治*
Hirozi Hashimoto

内容梗概

絶縁物中のボイド放電は絶縁物の電氣的破壊の主原因となつてゐるが、ボイド放電の機構を明かにするために放電図形とコロナパルスの同時観測を行つた。

放電図形の観測結果によるとボイド放電はボイド内面の正および負の沿面放電と放電柱からなつており、ストリーマー放電に成長していることが明かとなつた。放電図形の大きさはボイド厚さ、絶縁物厚さなどのボイド条件によつて変化するが数ミリメートルの直径である。また、導体上ボイドでは導体正の時の方が負の場合よりも放電図形は拡がりやすい。この現象はボイド放電の本質に由来するものであるが、パルス電圧における極性効果の原因である、同時に測定されたパルス電圧より求めた等価放電面積と放電図形の比較結果によれば放電後のボイド電圧はほとんど零であることが確認された。

〔I〕 緒言

絶縁物中のボイドが絶縁設計上実用的にはもつとも大きな欠陥となつてゐることは S. Whitehead⁽¹⁾, J. B. Whitehead⁽²⁾ 氏などの研究結果をまつまでもなく明白な事実であり^{(3)~(6)},これが現用の絶縁構造における電氣的破壊の主原因となつてゐる。

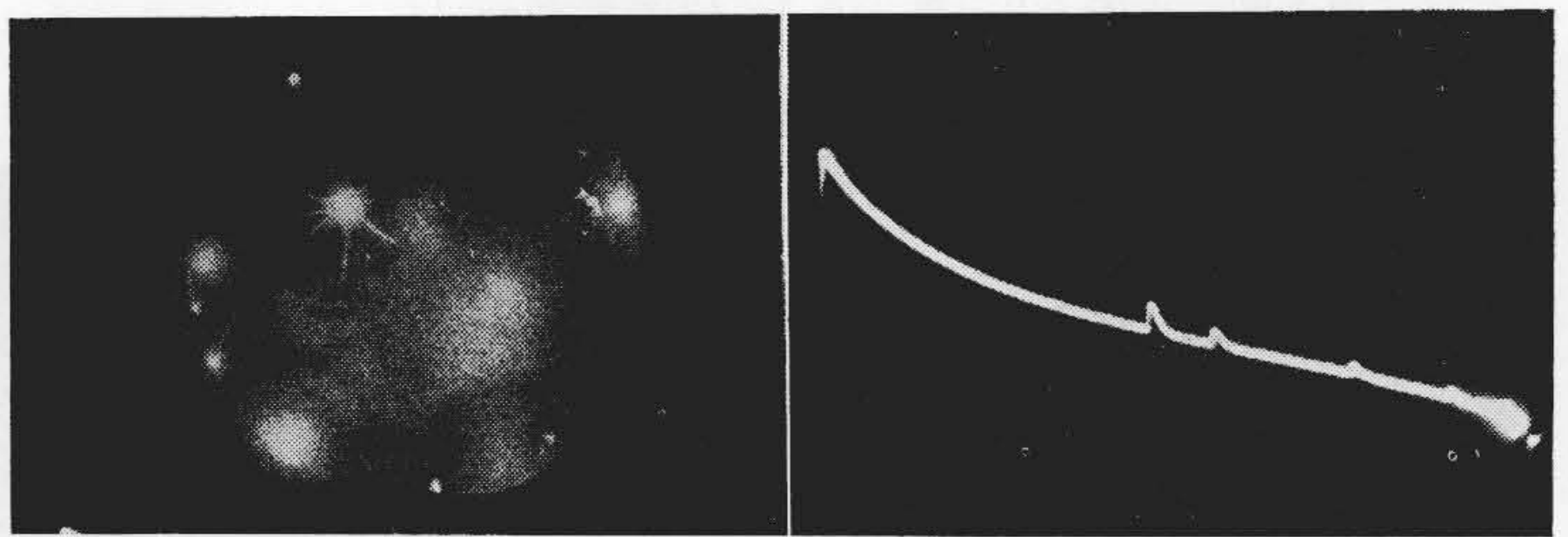
したがつてボイド放電の機構あるいは形態を問題とし、これらを明かにしようとする意図の研究が^{(7)~(10)} 数多く行われている。しかしながら対象は絶縁物中の微小ボイドであるためにこれを直接観測しようとする意図は仲々実現されない。わずかに等価的に拡大されたモデル (たとえば池田, 堀井両氏⁽¹¹⁾ のガラス板を電極とするモデルボイド) によつて肉眼的に観測されてゐるにすぎない。あるいはオゾナイザー研究⁽⁹⁾ におけるようにボイド放電に伴うパルスのターミナル的観測方法は直接的方法でないにしても推測する一つの手段である。

先に J. H. Mason氏⁽¹²⁾ が写真フィルムにボイド放電跡(放電図形)をかかせて放電面積に関する若干の報告を行つたがこの方法は筆者にボイド放電観測法の一暗示を与えるに到つた。先に筆者が行つたボイド放電のモデル的解析⁽¹³⁾ においては放電後のボイド電圧および放電面積などは未解決な点であり、これらはケーブル中のボイド放電によるコロナパルスの計算に必要な条件である。今回の報告においては放電図形の観測によつて以上の点を明かにし、ボイド放電がタウンゼントの放電領域にとどまるかストリーマー放電に達しているかの疑問に対しても解答を与えたいと考える次第である。

* 日立電線株式会社電線工場



ボイド径=9 mmφ
第1図 インパルス電圧印加時の放電図形およびコロナパルス



ボイド径=9 mmφ
第2図 放電時の放電図形およびコロナパルス

〔II〕 実験方法

ボイドの放電状態を検討するためにはボイドの放電によつて生ずるパルス電圧を測定する方法と放電図形の観測とが考えられる。両者を同時に測定して比較対照することにした。放電図形を観測する場合には数多くの図形が発生し、それらが重畳したのでは解析が不可能であるので試料に印加する電圧は極く短時間でなければならない。また、立上りの急峻なインパルス電圧では波頭部の時定数と試料回路の時定数とがほとんど一致するのでパルス電圧の分離が困難であるなどの問題がある。すなわち第1図はインパルス電圧印加時の試料充電電流と放電図形であるが、放電図形が生じているにもかかわらずパルス電流はみられない。一方、一定直流電圧に充電された試料を放電させた場合の放電図形およびパルス電流を第2図に示す。この場合には海星型の正放電図形と円形

の明瞭でない負放電とがみられ、パルス電流は負パルス（上方向）がある。パルス電流方向と放電図形の対照によれば図にみられるパルス電流は海星型の図形に相当し、負放電図形に相当するパルス電流は直流電圧充電時に生じていることが判明した。また、この結果によれば第 1 図の放電図形はインパルス電圧の波頭部で生じていたものであり試料の時定数とインパルス電圧波頭の時定数とが一致し、パルス電流の分離ができないものと想像される。したがって以上のような電圧では放電図形とコロナパルス電流の対比は困難である。

以上の結果から電圧波形は立上りの緩慢であることが望ましいが、結局減衰振動電圧を印加し、かつ電圧印加後の 2~3 サイクルのみでボイド放電が生ずるようにコロナ開始電圧の 1.2 倍の電圧とした ($\alpha=1.2$ と定義する)。

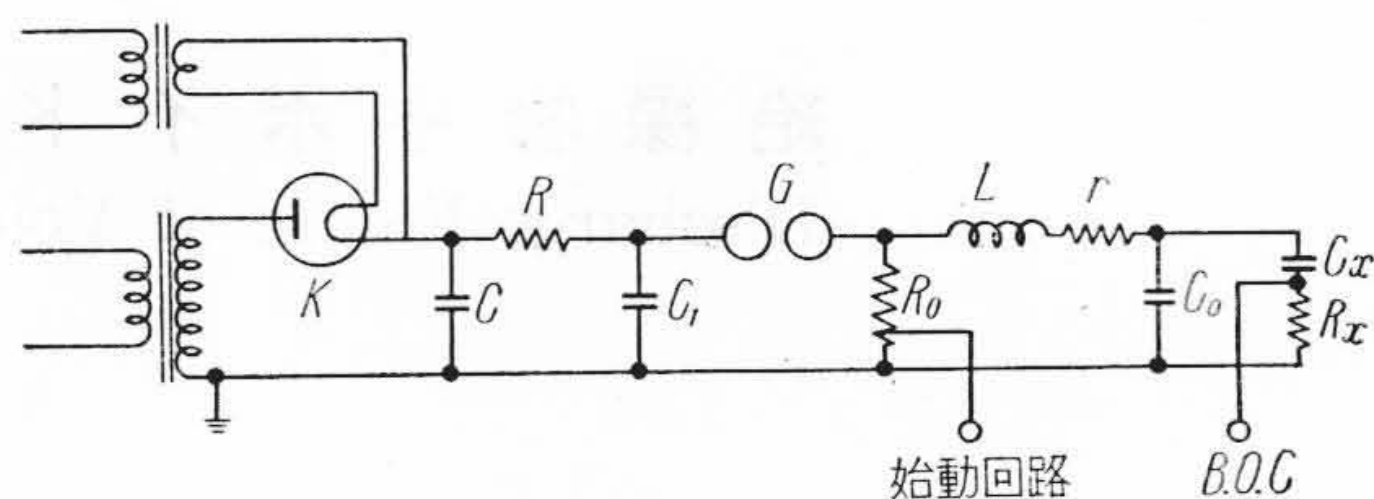
これらの諸条件をみたすために筆者は第 3 図に示す回路を用いた。 C_x は円板型ボイドを有する絶縁板で、これに直列に接続された測定用抵抗 R_x の電圧降下をブラウン管装置の現象入力とし、 R_0 の分圧電圧によつて同期をとつた。各回路定数は振動周波数 400 c/s、減衰時定数 0.01 秒になるように選択されたが測定結果は第 4 図に示すように振動数 413 c/s であつた。

試料は第 5 図に示すような断面をもつ平板絶縁物（こたわりのないかぎりポリエチレンシート）で 3 枚のシートからなり、中間のシートにボイドとして円型の打抜き部分がある。この 3 枚のシート間にボイド放電状況をとらえる X 線用フィルムを感光面をボイドに接してボイドの上または下面に挿入し、真鍮電極間に装填した。また、ボイド以外での放電を避けるため全体を油中に浸漬した。試料は暗室中におかれ、電圧印加後フィルムをとり出して現像する。一方、前述の回路において R_0 よりとり出した起動パルスによつてブラウン管装置を起動させ、ボイド放電によつて生ずるパルスを撮影する。

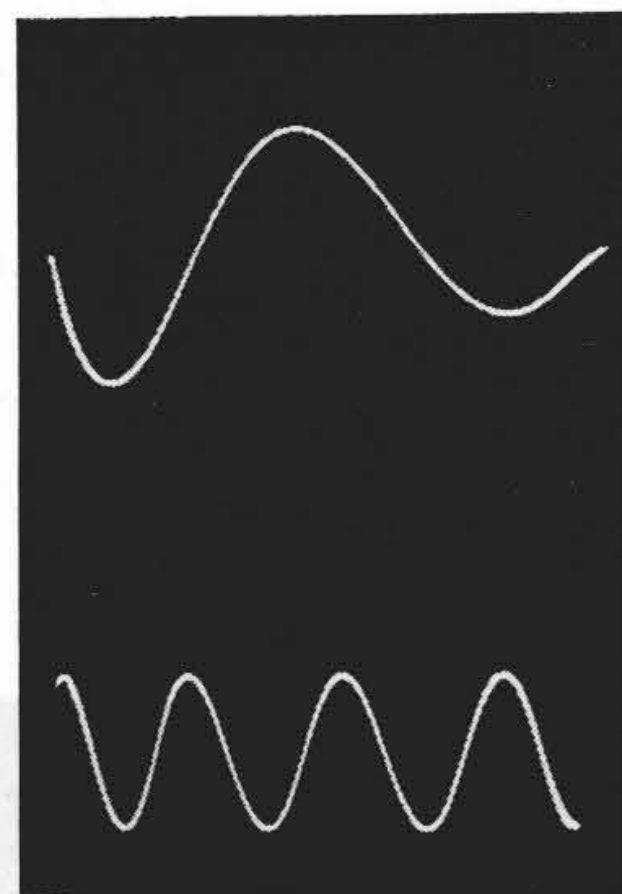
〔III〕 放 電 図 形

(1) 放電図形と放電形式

以上の方法によつて観測した放電図形および同時に記録されたパルス電圧の一例を示すと第 6 図の通りである。図はフィルムを下面においた場合で、放電図形は針対平板電極配置における正の沿面放電図形に類似している。それぞれの放電の極性は同時に記録されたパルス電圧の方向によつても確認できる。これに対し同一の電圧極性でフィルムをボイド上面に入れた場合の放電図形は第 7 図に示す通り

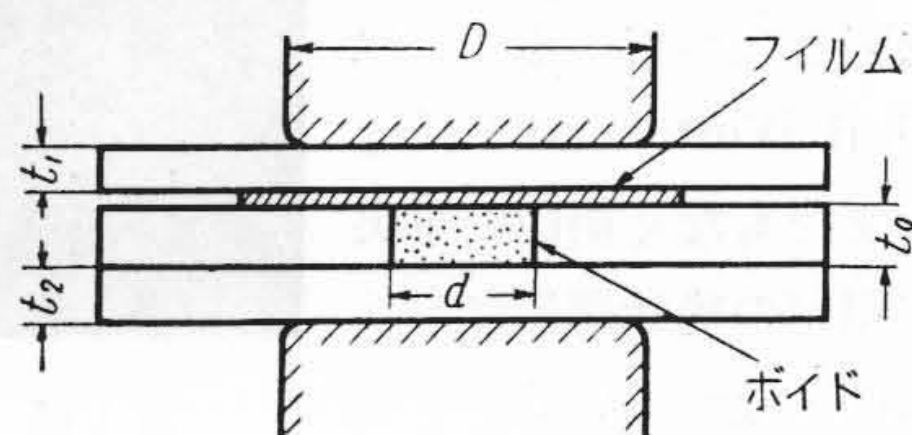


第 3 図 減衰振動電圧による実験回路



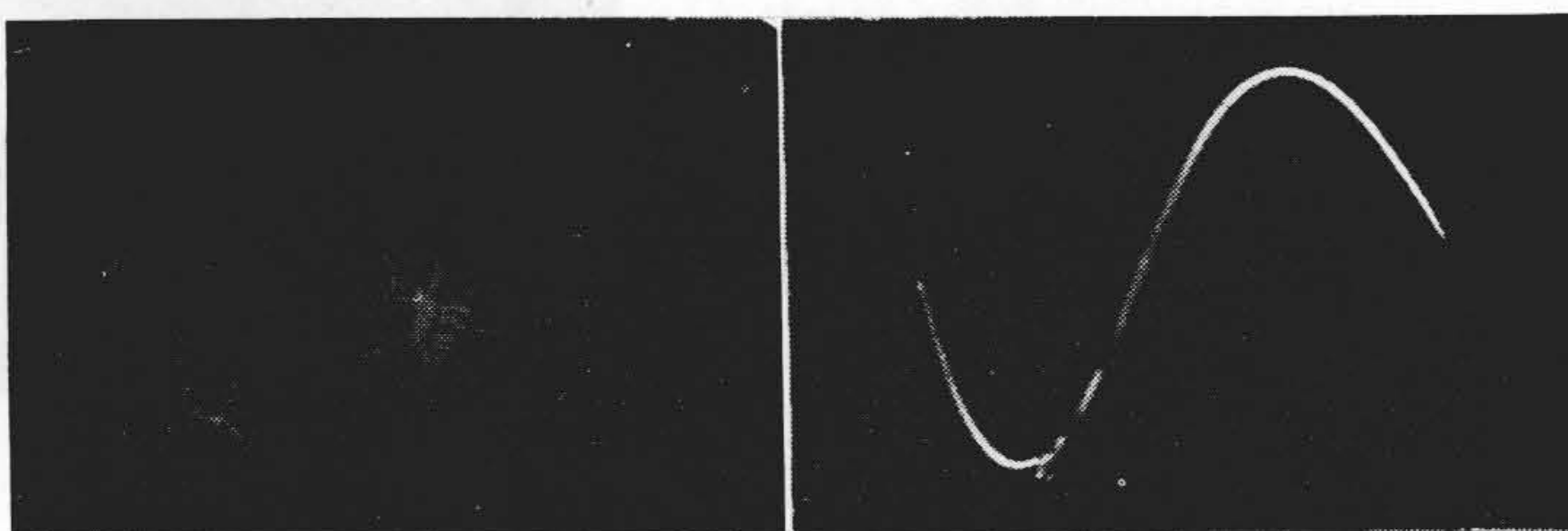
第 4 図 減衰振動電圧

(校正用 1,000 c/s)



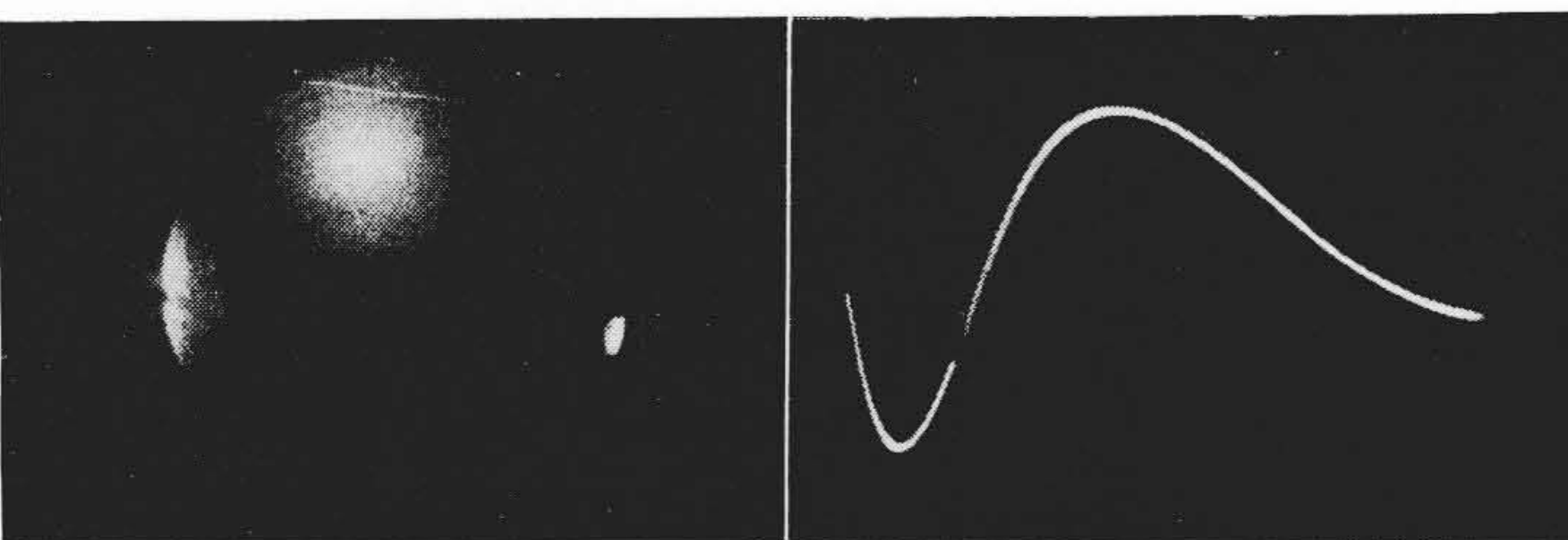
$D = 25 \text{ mm } \phi$
 $d = 9.0 \text{ mm } \phi$
 $t_0 = 1.0 \text{ mm}$
 $t_1, t_2 = \text{可変}$

第 5 図 試 料 の 断 面



ボイド径 = 9 mm ϕ

第 6 図 放電図形およびコロナパルス (I)



ボイド径 = 9 mm ϕ

第 7 図 放電図形およびコロナパルス (II)

で、この場合は円形放電図形がえられ、負の沿面放電図形に類似している。

以上の二つの例によれば放電図形は正側と負側で特長的な形状をなし、鳥山氏⁽¹⁴⁾がかつて針対平板電極配置でえたと同様の図形である。この種の放電図形は明かに

ストリーマー放電形式に類するものであるが、一個の放電に対し、正および負の放電図形がいかなる関連にあるかをみるためにボイドの両面にフィルムを入れてえられたのが第8図である。

図の(B)はフィルムを反対方向に焼つけたものであるからA-A', B-B', C-C'およびD-D'はそれぞれ対応し、一對の放電の正負両面における放電図形である。

すなわち、ボイド放電においては絶縁物両面でそれぞれ正および負の沿面放電が行われ、それらは空隙部の放電柱によつて連絡されている。放電状況を横からみれば池田、堀井両氏⁽¹¹⁾がガラス板間において観察したように第9図のようになっているものと考えられる。

正負の両面の放電図形について考えるならば負側における正放電図形は海星型であり、正側における負放電図形は円形である。これらの特長はここに説明するまでもなく、放電図形の生成が主として電子の挙動によるものであり、負側においては電子が放電柱の中心部へ吸引され正側では反対に外方へ押し出されるためである。放電図形の形状からみてボイド放電は明かにストリーマー放電形式に属し、本多氏⁽¹⁵⁾がパルス波形からえた結果と一致している。

第10図は振動電圧の第2波においては反対極性の放電が発生した場合で、第1半波においてフィルム側では正放電が行われ、第2半波においては負放電が行われたものである。これと反対に第11図は始めに負放電が行われ第2半波において正放電が行われた例である。ほかの場合もそうであるが最初の放電が発生すると電圧極性が変つたときには同一箇所放電する例が非常に多い。恐らく前の放電によつて生じた電荷のためであろう。

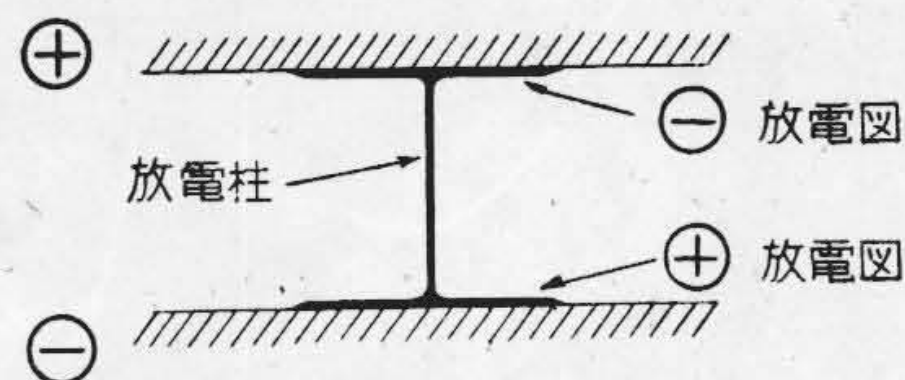
(2) 放電図形の大きさ

放電図形の大きさはイオン化した部分をあらわすので放電エネルギーあるいは放電電荷量に比例すると考えられるが、個々の放電図形をみるとその大きさは一定でない。ただ一般的にいえることはボイドに直列に重ねられた絶縁物の厚さの減少によつて一個の放電図形は大きくなる傾向にある。この傾向の一例を示すと第12図(A), (B)および(C)に示す通りである。この傾向はパルス電流の大きさでは特にあきらかである。以上のようにボイドに直列に重ねられた絶縁物の厚さの減少によつて一個の放電図形は大きくなる傾向にある。これは針対平板電

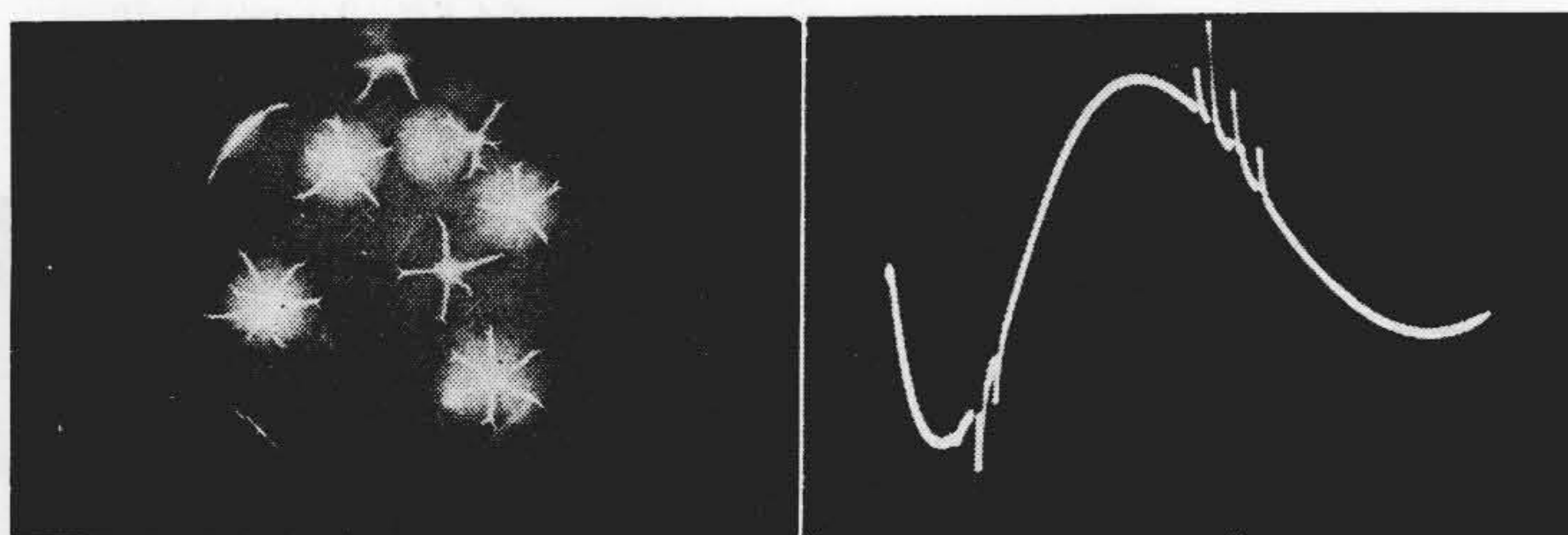


(A) 正放電図形 (B) 負放電図形
ボイド径=9mm

第8図 ボイド両面の放電図形



第9図 ボイド内放電形態



ボイド径=9mmφ

第10図 放電図形およびコロナパルス (III)

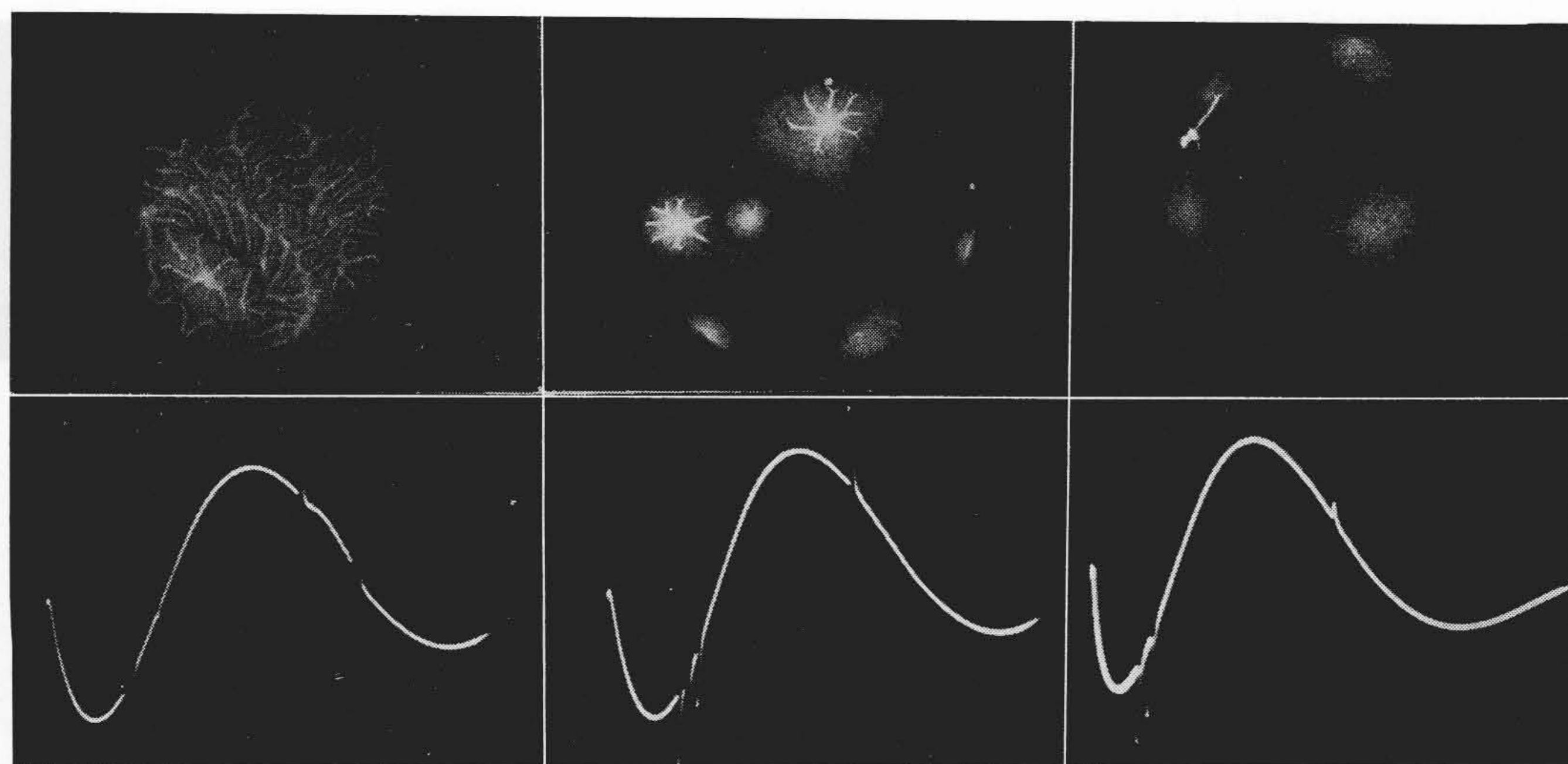


ボイド径=9mmφ

第11図 放電図形およびコロナパルス (IV)

極配置における針端近傍の沿面電位傾度が絶縁厚さの減少によつて増大することと同一原理に基くものである。すなわち、第13図のような場合には針端付近の沿面方向の電界強度は絶縁厚さの減少によつて増大する。ボイド放電の場合も放電柱が針端電極と同様の作用をなし、試料下の電極が平板電極に相当するから同様の考え方が成立し沿面放電はのびやすい。ただボイド放電の場合は正負の放電が対となつていて放電は両面の放電の影響をうけるから両面の絶縁厚さの影響をうける。

前述のようにボイド放電は正負両面における放電図形が一對となつており、それぞれの総電荷は等量である筈



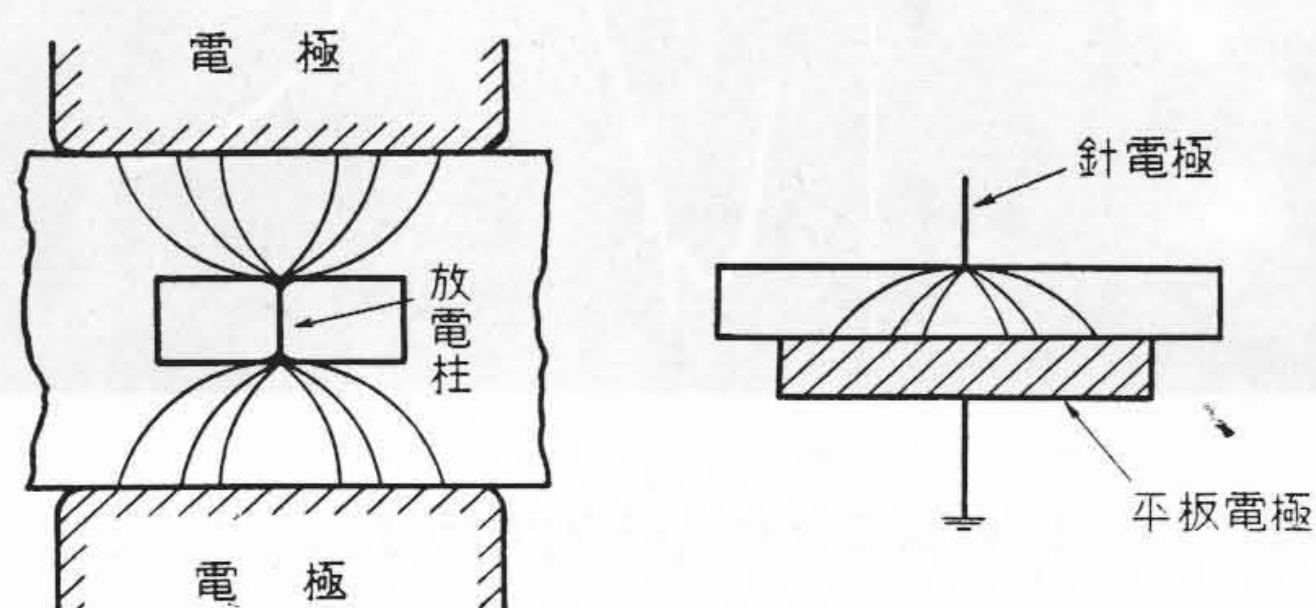
(A) 絶縁厚 (t_2) 0.25m

(B) 絶縁厚 (t_2) 0.50mm

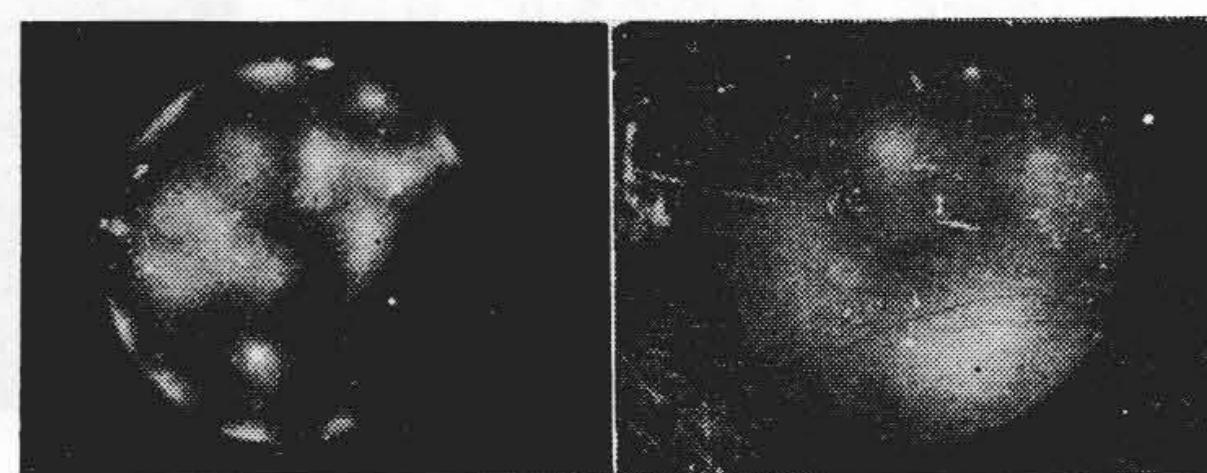
(C) 絶縁厚 (t_2) 1.00mm

ボイド径=9 mm ϕ , $t_1=0$

第 12 図 放電図形およびコロナパルス (V)



第 13 図 ボイド内電界



(A) ボイド厚 0.5mm

(B) ボイド厚 2.25mm

ボイド径=9 mm ϕ

第 14 図 放電図形

であるが、正負両図形の放電面積を比較すると負放電図形の方がはるかに大きい。しかし感光の程度は正の方が非常に強いので電荷密度は後の方が大きいものと考えられる。なお正放電の中心部に強い感光スポットがみられるが(第 8 図および第 10 図)これが放電柱の太さに相当するものであろう。この直径は約 0.5mm である。

次にボイド厚さの異なる二つの試料の放電図形は第 14 図に示す通りで、ボイド厚さ 0.5mm および 2.25mm の場合である。電源の関係で (B) の場合には (A) と同一の α の電圧を印加できなかつたので放電の数は少いけれども負放電で明かなように放電面積は大きい。池田、堀井両氏の研究でもこの点を明かにしているがその理由には触れていない。筆者は放電柱の電圧降下が非常に小さいので放電の拡りは放電開始電圧に支配され、ボイドの厚い程開始電圧が高いためであると考えている。

(3) 導体上ボイドの放電図形

ボイドの一面が電極表面すなわち導体上ボイドの放電図形を示すと第 15 図の通りである。(A) の導体正のとき

の放電はほとんど全面に及ぶに反し、(B) の負の場合には局所的な放電が発生している。このような場合には導体側における沿面放電は発生しないから放電柱とフィルム面上の放電のみからなる。故に放電図形の大きさは一方の沿面放電の拡りやすさからのみ決定される。したがって正放電図形が非常に大きくなつたものと考えられる。導体上ボイドにおいては結局導体が正の場合と負の場合とで個々の放電電荷量は異なることになる。これをほかの点から確かめるために交流電圧印加時のパルス電圧を測定してみた。第 16 図は試料の充電電流(約 1.5 サイクル) およびそれに重畳したパルス電流の単掃引オシロ図形である。図における下側は導体正のときのパルス電流上側は負におけるパルス電流である。導体正のときは個々のパルスは非常に大きいこれは放電図形でもみられたように負側の沿面放電(正放電図形)の大きいことと一致している。これに反し、絶縁物中間ボイドのコロナパルスは第 17 図に示すように正負においてはほぼ対称である。J. H. Mason 氏⁽⁷⁾および G. Mole 氏⁽¹⁶⁾などは筆者の結果と反対に導体負の方が大きいパルスが生ずると

いつているが、この理由については何も触れていない。筆者の結果との差異の理由は不明であるがボイド放電という本質から考えて筆者の結果が正しいように思われる。

(4) 放電図形とパルス数

放電図形の数とパルス個数の関係は個々の場合によつて異なり一概にいうことはできないようである。たとえば第7図ではパルス1個に対し、放電図形は大小3個あるのに対し、第6図では各4個で一致している。また、第15図(B)では負パルス

4個に対し、負放電図形は大小とりまぜて11個もある。ほかの観測例においてもパルス数に比して放電図数が多い。このことはほとんど同時に数箇所の放電が発生していることを示し、測定器の分解能にもよるがパルス数そのものが放電個数をあらわすものでないことを示している。前報⁽¹³⁾においては電圧印加時間の経過によつて放電様相の変化することを示したが、この点は放電図形の点から検討する必要がある。

(5) 等価放電面積

放電図形の観測と同時に行つたパルス電圧の測定結果から、等価放電面積を求めることが可能である。パルス電圧とボイド放電電圧との関係は前報においても報告したが、放電に要する時間と試料の電荷移動時間とが同等ならば計算式は次のようになる⁽¹³⁾。

$$\Delta V = \frac{C_s}{C_x + C_s} \delta V \dots\dots\dots (1)$$

ΔV : パルス電圧

δV : ボイド放電電圧降下 (放電開始電圧—滅火電圧)

C_s : 放電部に直列に重ねられた絶縁物の静電容量

C_x : 試料の静電容量

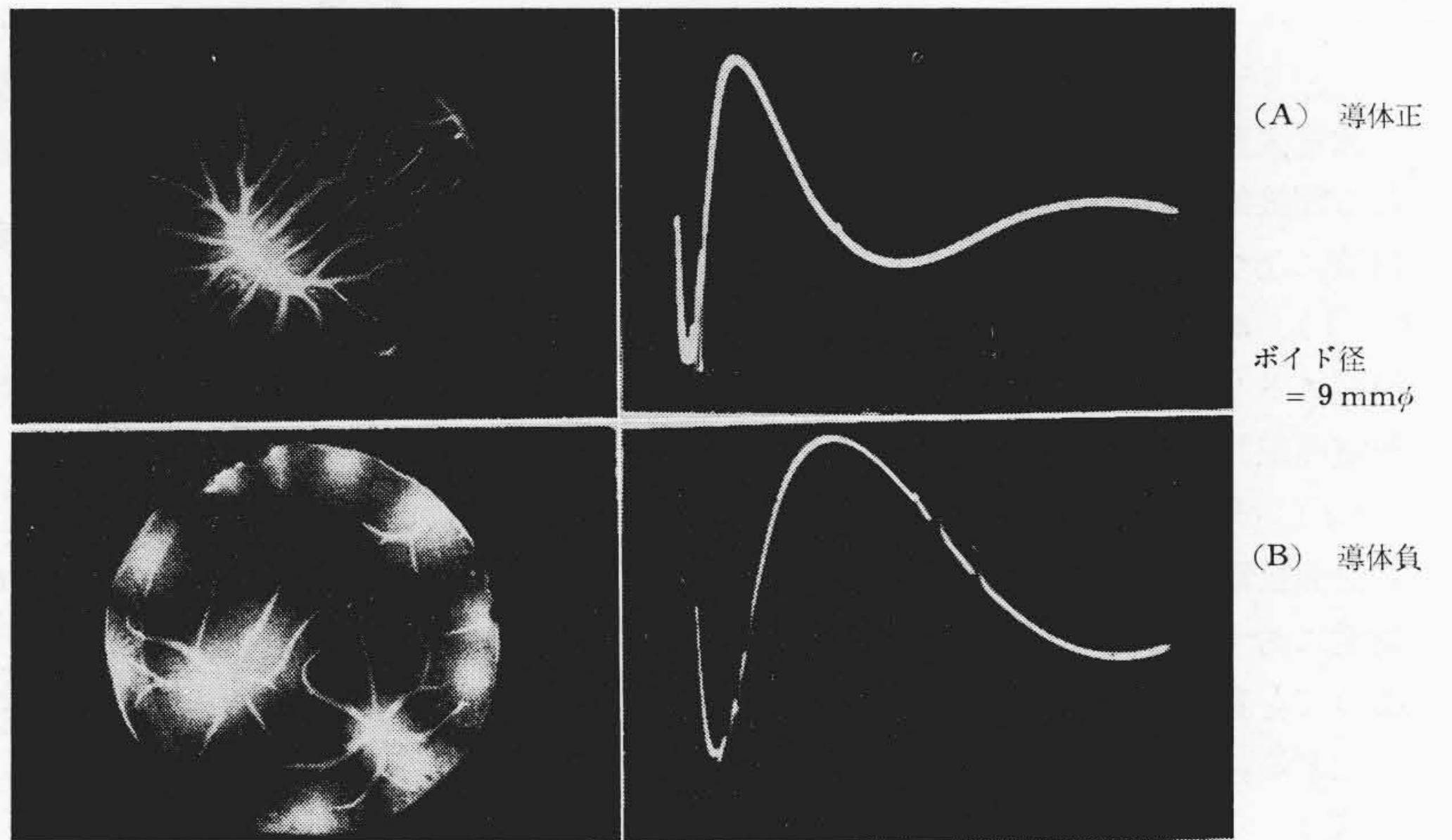
測定によつて ΔV , C_x をもとめ 滅火電圧=0 として等価放電面積を求めうる。

$$\delta S = \frac{t}{\epsilon} C_s \dots\dots\dots (2)$$

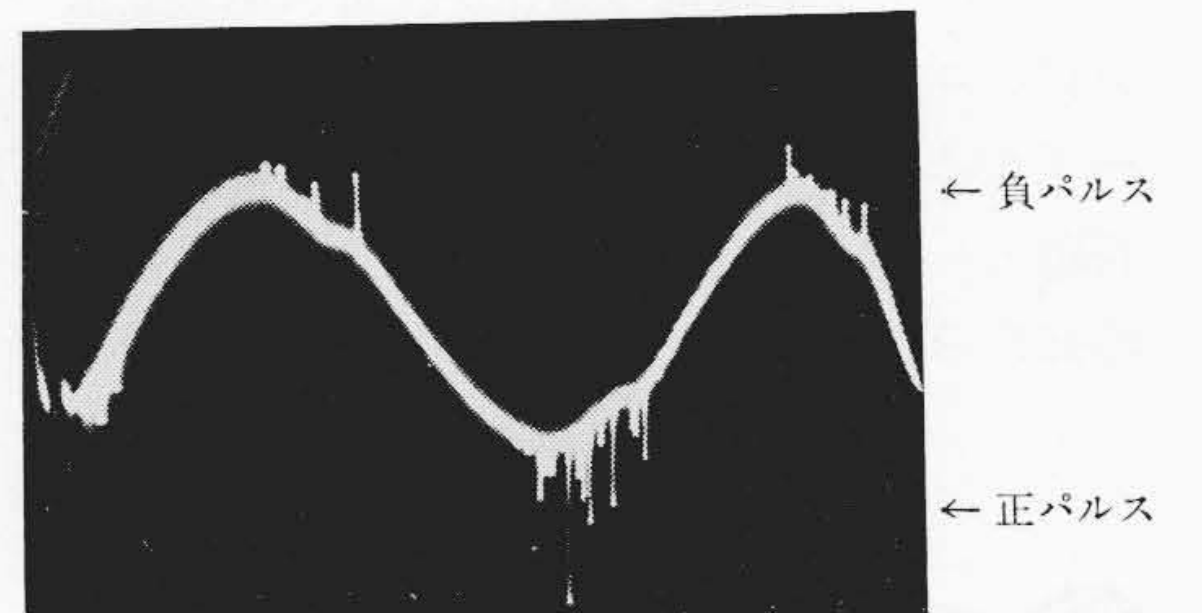
t : 絶縁物厚さ ϵ : 誘電率

放電図形からえられる放電面積としては正負両面で放電図形が異なるためいずれをもつて放電面積と考えられるかは判断にくるしむところである。

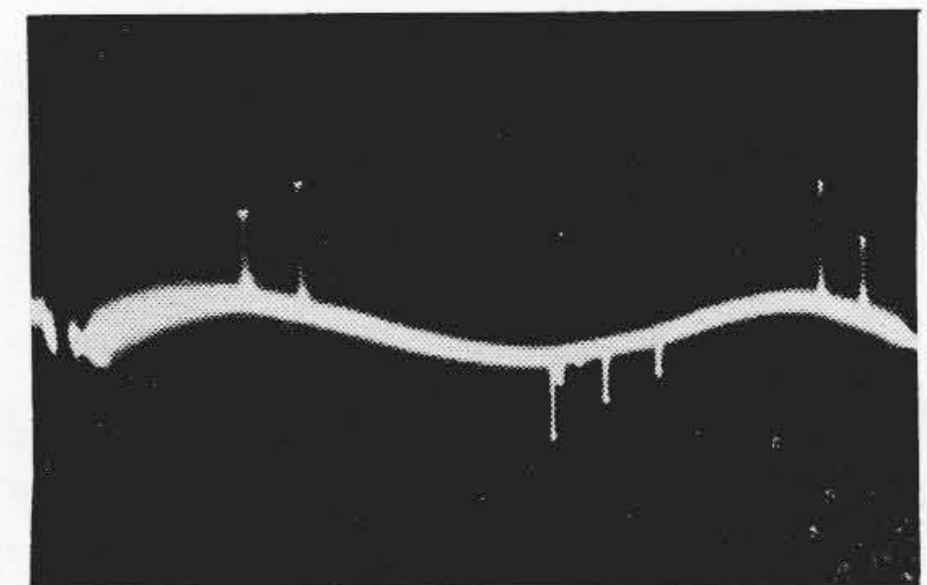
ボイド放電は正および負の沿面放電と放電柱からなり、正負の放電跡に堆積した電荷は等量である筈であ



第15図 導体上ボイドの放電図形



第16図 導体上ボイドのコロナパルス



第17図 絶縁物中ボイドのコロナパルス

第1表 放電面積

試 番	負パルス個数	等価放電面積 (mm ²)	放電図数	放電面積 (mm ²)
⊕-3	4	13.8	6	13.8
⊖-11	5	24.2	9	26.1

る。したがつて放電面積はいずれか一方について求めるとよいので放電部の明瞭な負放電図形を対象とする。二つの例の負放電の面積の和およびパルス電圧から求めた等価放電面積を示すと第1表の通りである。両者の値はほぼ一致しているがボイド放電部分をコンデンサで等価的に置換した場合の電荷は放電によつてほとんど全量失われ、放電後の残留電圧は零と考えられることを示している。すなわち、滅火電圧はほとんど零で放電前における電荷分布と同量の電荷が絶縁物表面に堆積することを示している。

〔IV〕 結 言

放電図形というボイド放電の直接的観測とパルス電圧なる間接的観測との並用によつて、ボイド放電は非常に明瞭になつた。すなわち

(1) ボイド放電は電子雪崩にとどまらず、内面上の沿面ストリーマー放電にまで進展し、その様式は針対平板電極配置におけると同様の機構で説明可能である。

(2) 1回の放電面積は直径数mmのもので両内面上の沿面放電と直径0.5mm程度の放電柱からなつている。放電にあずかる面積は直列絶縁厚さ、ボイド厚さなどによつても変り、導体上ボイドでは電圧極性によつても差が生ずる。

(3) パルス電圧との比較結果、放電後のボイド内電界はほとんど零であることが判明した。

以上、ボイド放電の様相が非常に明かとなつたが絶縁材料がコロナにさらされた場合の劣化の問題、実際のケーブルにおけるパルス電圧の測定上の問題などは今後の課題としたい。終りに本研究の示唆をあたえられかつ終始御教示いただいた東北大学鳥山四男教授に厚く感謝す

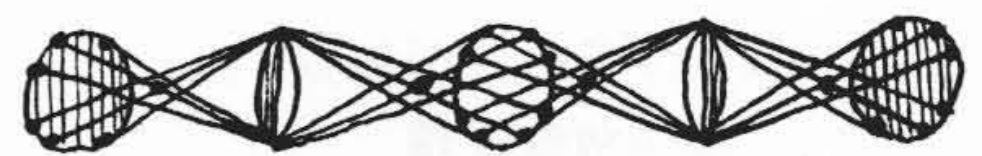
る。また、研究の推進と御激励いただいた日立電線株式会社内藤部長、久本副部長ならびに測定に協力された桑原、佐藤の両氏に御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) A. E. W. Austen, S. Whitehead: JIEE. 88 (II) 88 (1941)
- (2) J. B. Whitehead, J. M. Kopper: TAIEE. 64, 171 (1945)
- (3) 井関: 電気支大会 (東京) 103 (昭28.10)
- (4) 橋本: 電気支大会 (東京) 77 (昭31.11)
- (5) M. K. Weston: JIEE 1, 464 (1955)
- (6) P. R. Howard.: PIEE. 98 (II), 365 (1951)
- (7) J. H. Mason: PIEE. 98 (I), 44 (1951)
- (8) R. Davis, A. E. W. Austen, W. Jackson: JIEE. 94 (III), 154 (1947)
- (9) 藤, 竹村: 電試彙報 14, 283 (昭 25-5)
- (10) 池田, 堀井: 電学誌 75, 11 (昭 30-2)
- (11) 池田, 堀井: 電試彙報 18, 25 (昭 29-4)
- (12) J.H. Mason: Nature, No. 4167, 451 (1949)
- (13) 橋本: 日立評論 38, 81 (昭 31-11)
- (14) 鳥山: 電学誌 49, 393 (昭 4-4)
- (15) K. Honda, Y. Naito: J. Phy. Soc. Japan 10, 1007 (1955)
- (16) G. Mole: CIGRE. 2, 105 (1952)



特 許 の 紹 介



特許第224855号

桑 山 正 俊

断 路 器 空 気 吹 付 消 弧 装 置

断路器により、送電線路の充電電流または変圧器の励磁電流のような、小電流を切る必要のあるものは、固定接触片1に電弧角2を取付け、開路に当り導双4との間に引成される電弧Aに対し、ノズル6より圧縮空気を吹付けて消弧することは一般に考慮されているところである。しかるにこの種空気吹付消弧装置において、ノズル6よりの空気吹付により、空気溜8内の空気圧力がたとえば5 kg/cm²から2 kg/cm²以下に低下すると、急冷して露点以下となり、吹付空気は煙霧状となり、支持碍子の表面に付着して絶縁上悪影響を与える嫌いがある。本発明は前記の点にかんがみ、空気の吹付を3~4 kg/cm²まで低下したとき打切るようにしたものである。図の実施例では空気溜8に圧力応動開閉器9を取付け、その接点を電磁弁7の励磁回路に直列に挿入しておき、制御開閉器10の閉合により電磁弁7を励磁して、ノズル6よりの空気吹付を行い、空気溜内の空気圧力が一定値まで低下すれば、圧力応動開閉器9が開路し、電磁弁を消磁して空気吹付を打切るようにしたものである。

このように空気圧力の低下を一定値におさえれば、ノズルの吹付時間は1~2秒という短時間に制限されるが、前記充電電流または励磁電流の遮断にはこの程度の吹付時間で十分有効である。なお吹付時間を制限することは、空気溜圧力の回復を速かにして、次の操作を容易にする利益がある。

(滑川)

