

ポリエチレンケーブルの絶縁破壊に関する極性効果

The Polarity Effect of Dielectric Breakdown for Polyethylene Insulated Cables

依田 文吉* 佐藤 祈美男*
Bunkichi Yoda Kimio Satō

内 容 梗 概

電力ケーブルに衝撃電圧を加えた場合、導体を負にしたほうが破壊電圧が低いといわれている。しかし、ポリエチレンケーブルではまったく逆となっている。筆者などはこの間の事情を調査し、実験結果を解析して正負特性を明らかにした。この結果ポリエチレンケーブルでは衝撃波、直流ともに導体正の場合に破壊電圧が低いことを確認し、ソリッドケーブルの絶縁破壊に新しい機構を導入することができた。

1. 緒 言

電極構成が非対称で不平等電界分布を有する場合、あるいは平等分布でもその電極使用物質が両方で異なる時には、いずれの電極を正にするかによって破壊状況が変化する。このような現象を極性効果といい、絶縁破壊の物理機構を究明するための有力な手がかりとなっている。

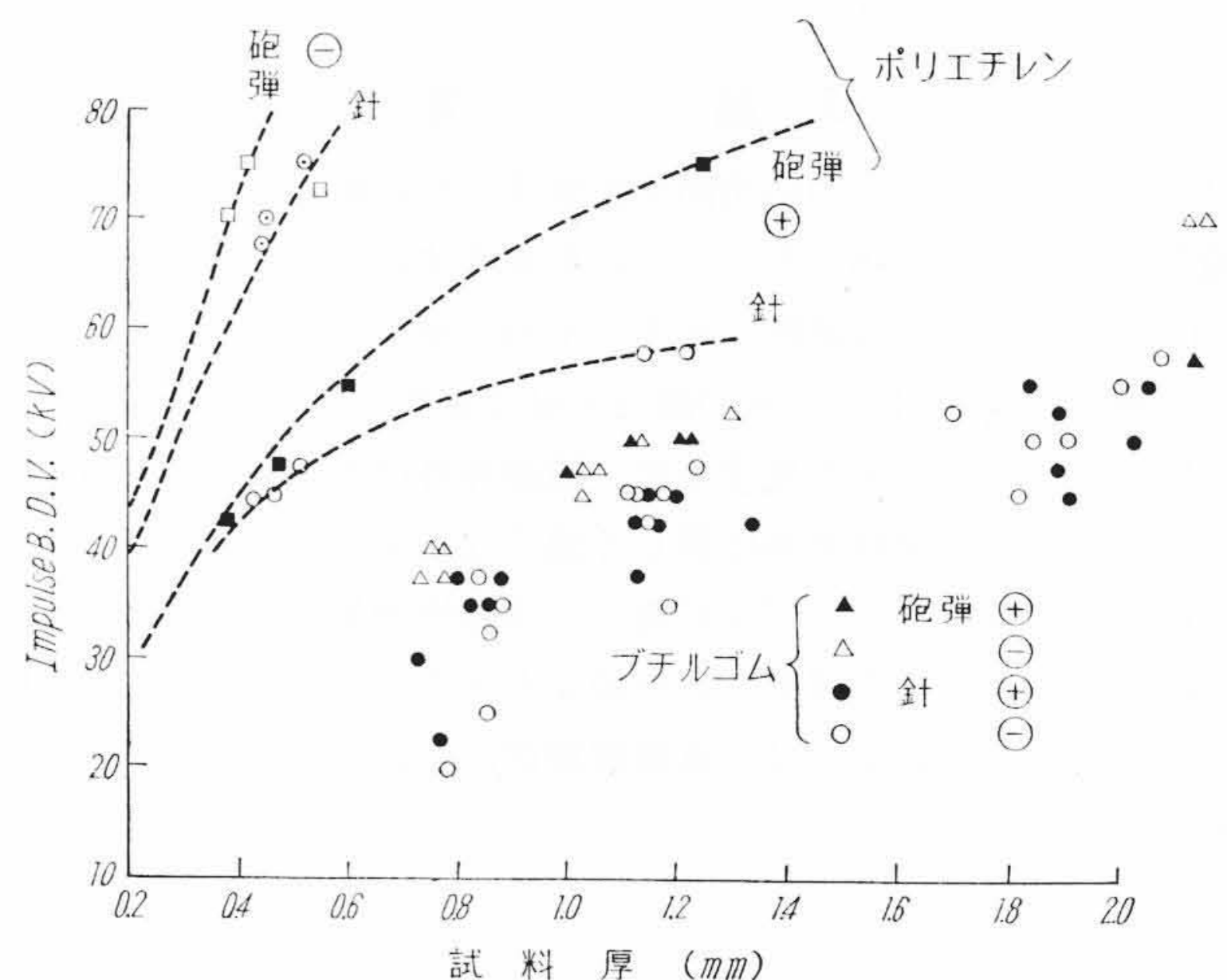
従来気体絶縁物に対しては、同心円筒状電極配置について検討が行われ、衝撃電圧を加えたときの導体負コロナは、正コロナより臨界電圧は低い正コロナのほうがのび方が大きいとされていた⁽¹⁾。また針対平板間隙の火花電圧の実測例は数多いが、間隙の長いほうでは、針が正のほうが低い値を示している⁽²⁾ (H_2 ガスおよび、間隙長が4 mm以下では逆になっている)。

一方、液体絶縁物の電気伝導現象を観察した結果によれば、同心円筒で導体正の電流値は、負の場合より40%近くも大きく、針対平板では針が正の場合に大きな電流が流れ、不安定であるといわれている⁽³⁾。A. Nikuradse 氏は球対平板電極に液体を入れて破壊電圧を測定し、小球電極が負の時に破壊電圧が高くかつ電極間距離が大きいほどその差が著しいと報告している⁽⁴⁾。また、T. J. Lewis 氏は針対平板電極では針が正の場合に大きなコロナが発生し、かつ破壊電圧も低いといっている⁽⁵⁾。液体絶縁物の破壊寸前電流については電極の脱気の有無により極性効果が逆転するといわれている。すなわち、H. Edler氏⁽⁶⁾、坂本氏⁽⁷⁾らは針が負の時に大電流が生ずると報告しているのに反して、鳥山、長尾氏⁽⁸⁾らは同軸円筒電極により電極処理を行って逆の結果（針正の時に大電流を観測）を得ている。

固体絶縁物では吹田氏がKClに対して低温では針が正の時に、破壊電圧が低く、高温になると逆転する実験をしている⁽⁹⁾。また、A. V. Hippel 氏はNaClに対して、一方の電極を蒸発金属とし、他方を飽和水溶液としたとき蒸発金属を負にしたほうが正の場合より破壊電圧が低いことを見出した⁽¹⁰⁾。

一方、J. H. Mason 氏はポリエチレンを試料として用い、針端の曲率半径、絶縁体厚さを変えて実験した。この結果曲率半径が小さく、絶縁体の厚いほど、極性効果は大きい、高温になると正負の差が小さくなっている。しかしいずれの場合も、針が正の場合の破壊電圧が低く、この原因を針端周囲の空間電荷から説明している⁽¹¹⁾。これに対して P. T. G. Flynn 氏は特殊な対応を考えて電界計算を行い、実測によく一致することを示した⁽¹²⁾。

さて、電力ケーブルでは従来ほとんどの報告が導体負のときの破壊電圧が低いとしている。すなわち P. R. Howard 氏⁽¹³⁾ および R. Davis 氏⁽¹⁴⁾ は約数%, H. Baaty 氏⁽¹⁵⁾ は約10%, H. Halperin 氏と G. B. Shanklin 氏⁽¹⁶⁾ らは、導体正の時が5~10%高いことを



第1図 シートの破壊電圧(衝撃波)

認めている。以上はいずれも紙絶縁の電力ケーブルであるが E. W. Davis 氏と W. H. Eddy 氏⁽¹⁷⁾ などのゴムケーブルに対する実験ではほとんど極性効果がない結果を得ている。

これに対してポリエチレンケーブルでは、まったく様子が異なり H. Pairitsch 氏の実験によれば衝撃電圧に対しては導体正極性の場合には負極性の時よりも10~40%低い、直流に対してはほとんど差がない⁽¹⁸⁾。また、D. W. Kitchin 氏と O. S. Pratt 氏などは、絶縁破壊に先行するトリ- (tree) を顕微鏡的に観察し、トリ-が正極側から出発していることを認めている⁽¹⁹⁾。この事実と短時間交流を印加した場合には必ず導体からトリ-が成長するという観察結果から想像すれば明らかに導体正の場合に破壊電圧が低いことになる。

筆者などはこの現象を究明し、極性効果を明白にする目的でポリエチレンケーブルについて各種の実験を行った次第である。

2. 針対平板電極

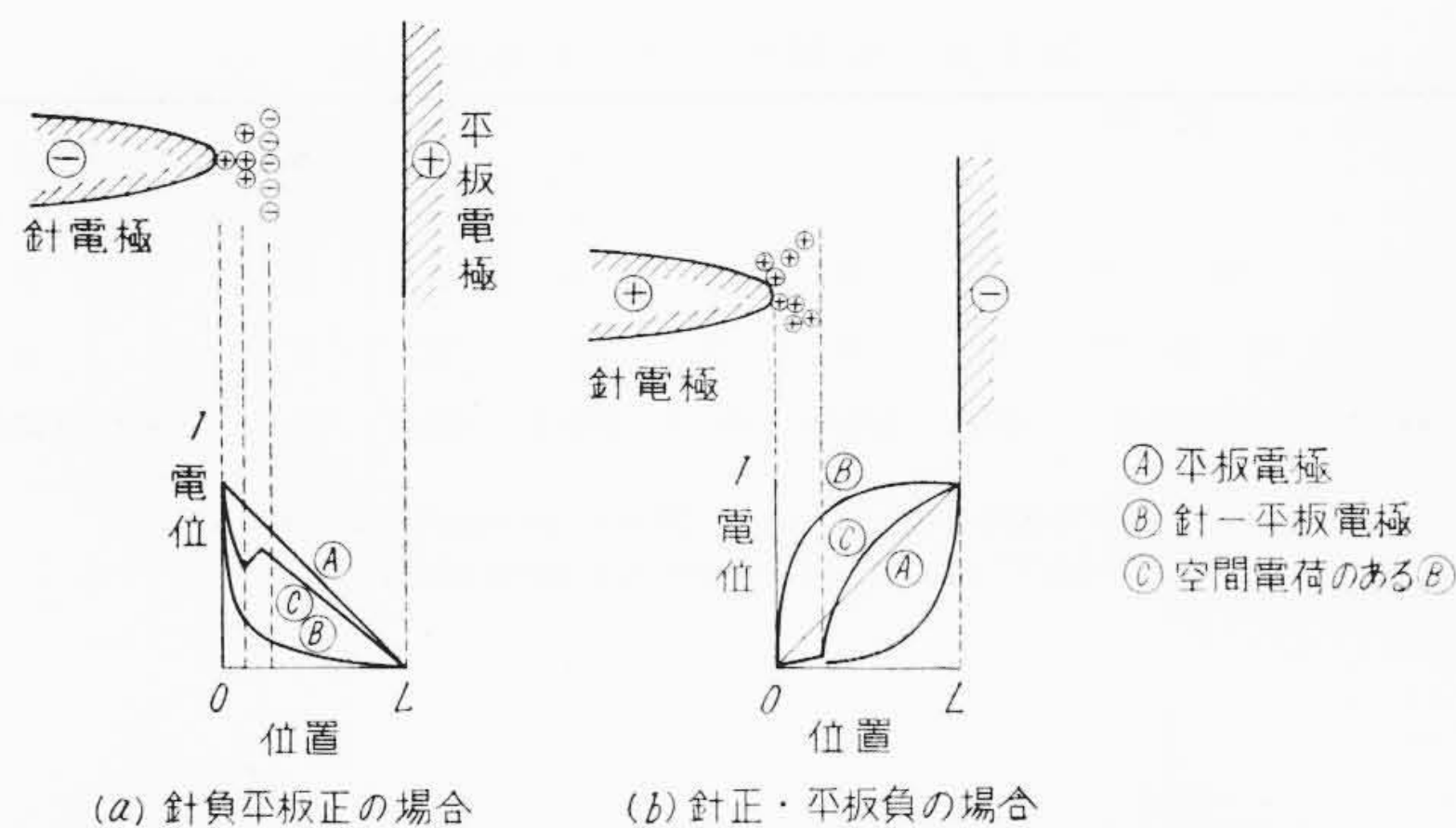
2.1 実 験

高圧重合法で作成したポリエチレンシートを黄銅製の針および砲弾形電極 ($R=2.5$ mm) と平板電極間にはさみ、油中に浸した。これに30 kV から2.5 kV ずつ昇圧し、各3回ずつ印加して破壊させた。ポリエチレンのシート厚さは約0.4~1.2 mm であり、同時に行ったブチルゴムシートでは0.8~2.2 mm のものを用いた。大気条件はおおむね20°C, 760 mmHg であった。

2.2 結果と考察

得られた結果は第1図のとおりである。ポリエチレンシートの場合に、尖鋭電極径の大きいほうが破壊電圧は高く正極性の場合には著しく低い。この結果は先に J. H. Mason 氏の得たものとほぼ一致し

* 日立電線株式会社電線工場



ている。ただし、ブチルゴムシートでは極性による有意差は認められなかった。

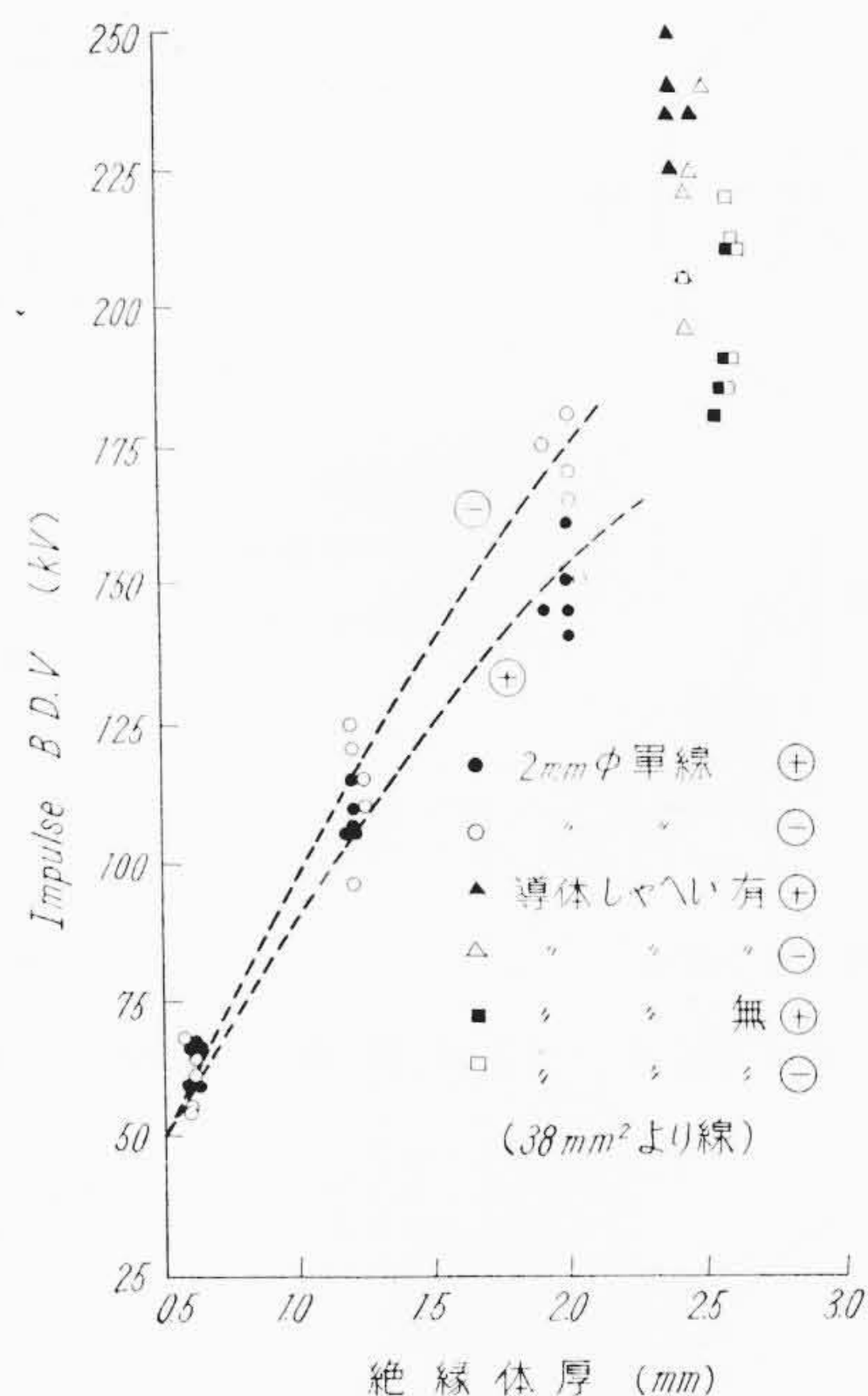
第1図からわかるとおり針が正の場合には特に絶縁体厚さの増加に従って平均破壊強度は急速に減少している。また筆者らは実験しなかったが高温になると極性の差がなくなるといわれている。

J. H. Mason 氏はこれに対して次のような説明をしている。すなわち針が負の場合に針端が高電界になるとここから電子が放射される。これは固体内に侵入し主として電位傾度最大の方角に移動するが、固体分子と衝突してエネルギーを失い針のまわりに捕獲されて空間電荷を形成する。この空間電荷は針の有効半径と長さを急激に増大させ、針端の電界強度を弱めることになる。

他方、針が正の場合には電子は針に向かって動き針のまわりに正の空間電荷を残す。しかしポリエチレン絶縁体内には自由電子が少なく針が負の場合ほど空間電荷の影響は大きくない。したがって破壊電圧は針正のほうが針負より低いことになる。ところが高温になると針の極性は電気的ストレスにあまり影響しなくなる。この理由の一つは高温になると針負からの電子放射が少なくなることと、誘電体中に自由電子が増し針正の周囲に空間電荷が増加するためである。

また、絶縁体厚さによる破壊強度の変化は P. T. G. Flynn 氏によって説明された。彼は針端周囲の誘電体の電導度が電界強度に依存すると仮定し、Laplace の式を満足する associated potential を導入してグラフ法で破壊電界を評価した。この結果は J. H. Mason 氏の実験をたくみに説明している。

今回、筆者などの行ったシートの実験では特に変わったところはなく、Mason-Flynn 両氏の結果を踏襲したものではあるがポリエチレンケーブルの極性効果を検討するための予備実験の意義をもって。ただし、筆者らの説明はちよっと異なり、固体内でも気体、液体内と同様に正のストリーマが伸びやすいという一貫した思想に基いている。すなわち針負の場合には針端から電子が放射される。これは電界方向に加速され衝突電離により後方に正イオンを残す。するとこの正イオンは針負電極との間に強電界を生じるので絶縁体全体に加わる電界の大部分を占めることになり、電子なだれを加速するためのなだれ面先端の電界が弱められることになる。この状態を第2図(a)に示す。したがって針負の場合は電子放射は早く、いわゆるコロナ開始電圧は低い電子なだれの発達はしにくい。すなわち、負ストリーマは伸びにくいことになる。一方、針正の場合には、誘電体内の電子が針電極に集ってくる。実際、自由電子の数は少ないけれども衝突電離により正イオンを誘電体内に残してくる。J. H. Mason 氏はこの正イオンの数が少ないため針の有効径を大きくできないと説明しているが、筆者などは第2図(b)のように正イオンの残留している先端の電界強度は針端以上に強くなると考えたのである。したがって、ますます電子の集中は大となり正イオンのなだれすなわち、正ストリーマは負電極に向かって急速に発達してい



くことになる。この現象は気体放電で以前から観測されてきたと同様のものであり、気・液・固三体にわたって一貫した物理模型で説明可能な訳である。高温になって極性効果が少なくなることは J. H. Mason 氏のいうように自由電子数が増すため、正針電極の有効径が大きくなるためと考えられる。なお、ブチルゴムで極性効果が少ないのはポリエチレンに比して自由電子の数および電子を捕獲する中心(Trapping center)の数が著しく多いためと思われる。

3. ケーブルの衝撃破壊

3.1 実験

2 mmφの単線にポリエチレン絶縁体を0.6, 1.2, 2.0mm厚さに施したもののおよび38mm²の撚線導体に約2.5mm厚さにポリエチレンを被覆したものを試料とした。次に撚線導体に0.1 mm厚さの半導電性テープを1/2ラップで巻いたものを作り導体しゃへいの影響を調べた。また、50mm²の撚線導体に8 mm厚さのポリエチレンを被覆したケーブルを用い絶縁体外側に針をさして絶縁破壊させたものもある。

50 mm²のケーブルに対しては80 kVより衝撃波を印加したが、ほかはすべて180 kVより開始し階段形上昇で5 kV各5回ずつ電圧を印加し破壊に至らしめた。

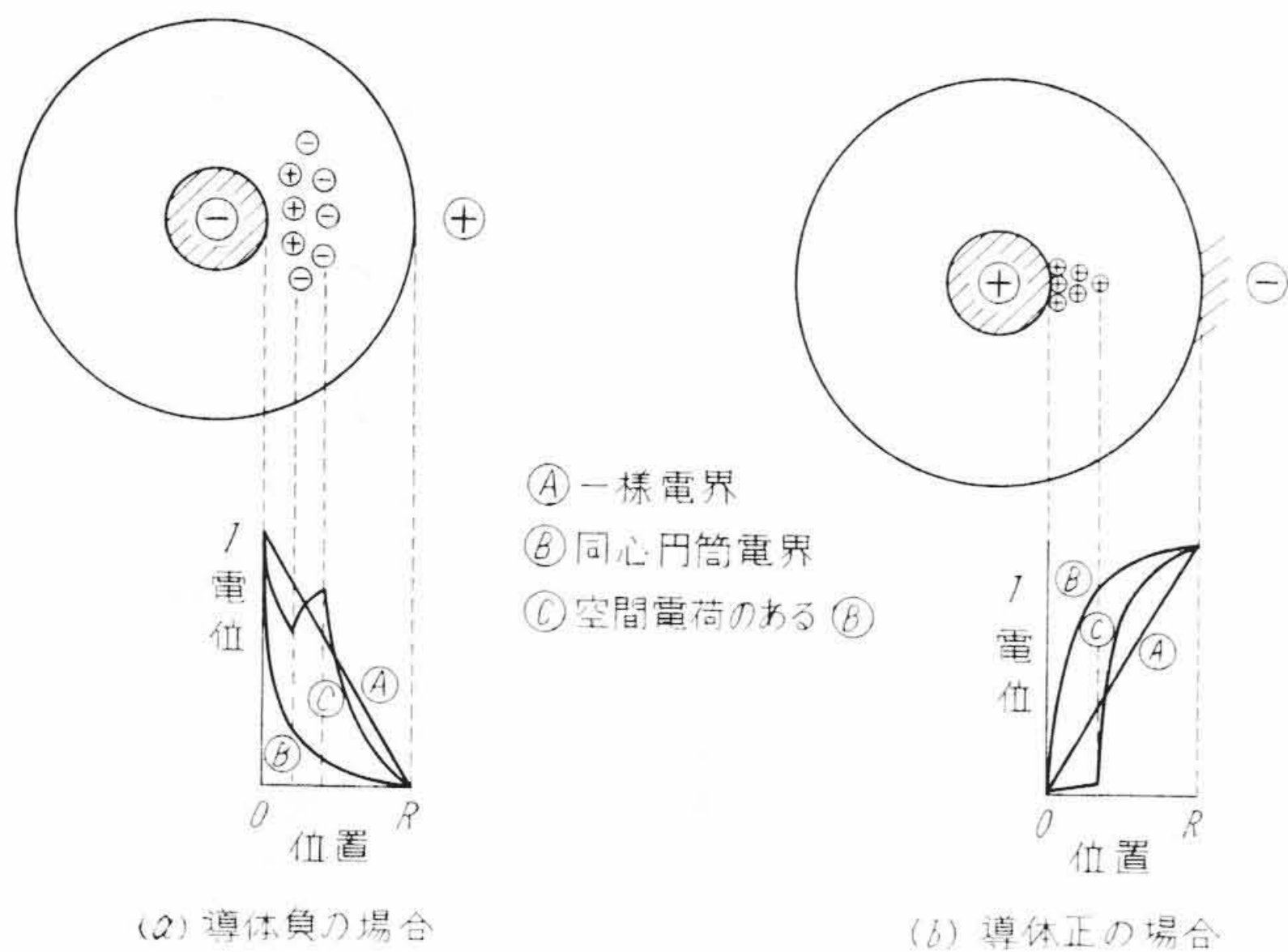
3.2 結果と考察

上記の実験で得られた結果は第3図のとおりである。同一導体径で絶縁体厚さを増していくと極性効果が顕著になる。これは電界の不平等性が増加するためであるが、いずれにせよ導体正の場合が負の場合よりも低い電圧で破壊している。

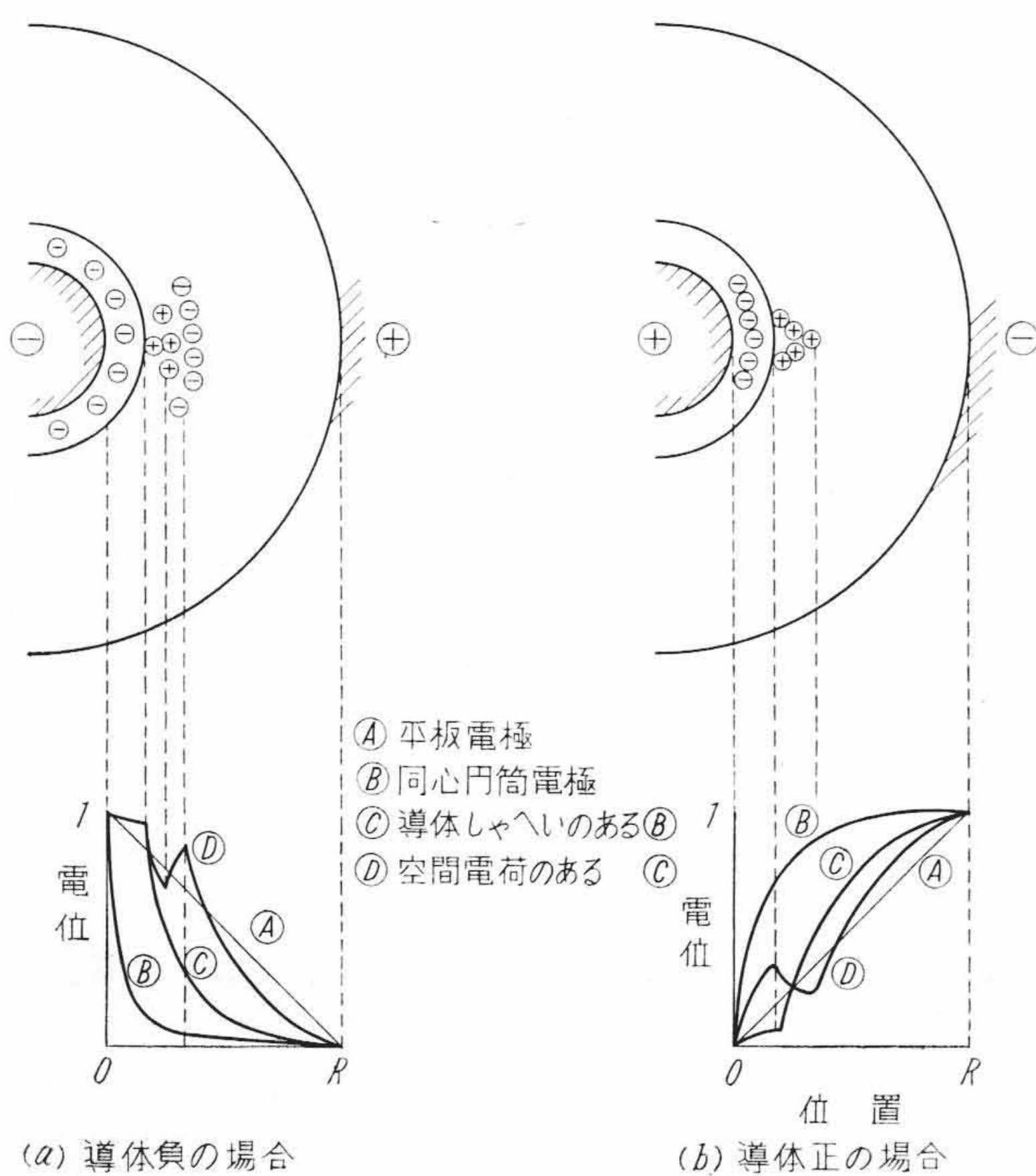
この種の実験は従来数が少なくCIGREに発表されたH.Pairitsch氏が約10~40%負極性が高いと報告している程度であり空間電荷のためとしている⁽¹⁸⁾。彼はまた0.36~10 mmの間において導体径の影響はないといっている。

しかし、これらの結果は従来の紙ケーブルとはまったく逆である。J. H. Mason 氏の紙ケーブルに対する説明は内部放電から絶縁破壊が生じ、導体正のほうが負の場合よりも10%高いがこの原因は導体が正ならば小放電があり導体負の時には大放電があり放電のエネルギーが大きいためとしている。

これに対しても筆者などはやはりシートの場合と同様に正ストリーマの伸び方の難易から説明したい。



第 4 図 ケーブル断面の電位分布



第 5 図 導体しゃへいのある場合の電位分布

第 4 図はこの状態を示したものである。また、燃線導体で極性の差が少ないのは、導体径が大となり電界の不等性が減少するほかに燃線間隙の内部放電が問題になるためと考えられる。ただし外部絶縁体に針を刺した場合には不平等電界が助長され完全に針正のほうで低い電圧で破壊している。第 1 表に示した結果は正負交互に課電して得たものである。

ところが導体上に半導電性テープを巻いたものでは事情が一変し、いずれも導体しゃへいがない場合よりも高い破壊電圧を示すが、導体負の場合が正の時よりも低い。この理由は導体が負の時には電子が放射しにくくなって破壊電圧は上昇するのであるが、導体正の時には誘電体から電極に向かって加速された電子がカーボンに捕獲され負イオンを形成する。これが正導体を取囲む結果、この部分での電圧降下が大きく正イオン先端の電界強度が非常に弱くなるため破壊電圧は上昇すると想像される。第 5 図はこの状態を説明したものである。

4. ケーブルの直流破壊

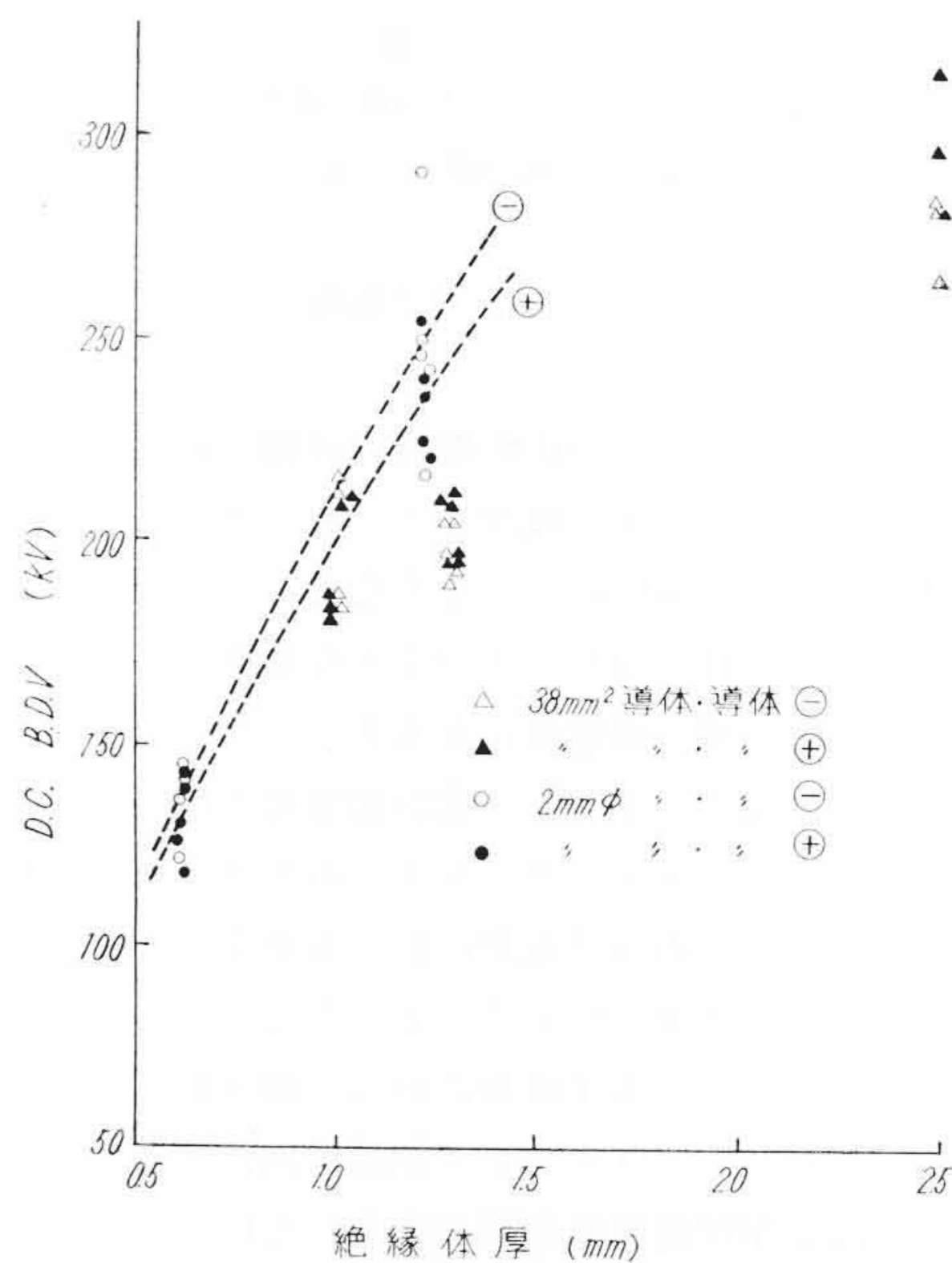
4.1 実 験

2 mmφ の単線にポリエチレンを 0.5~2.0 mm 厚さに被覆した材

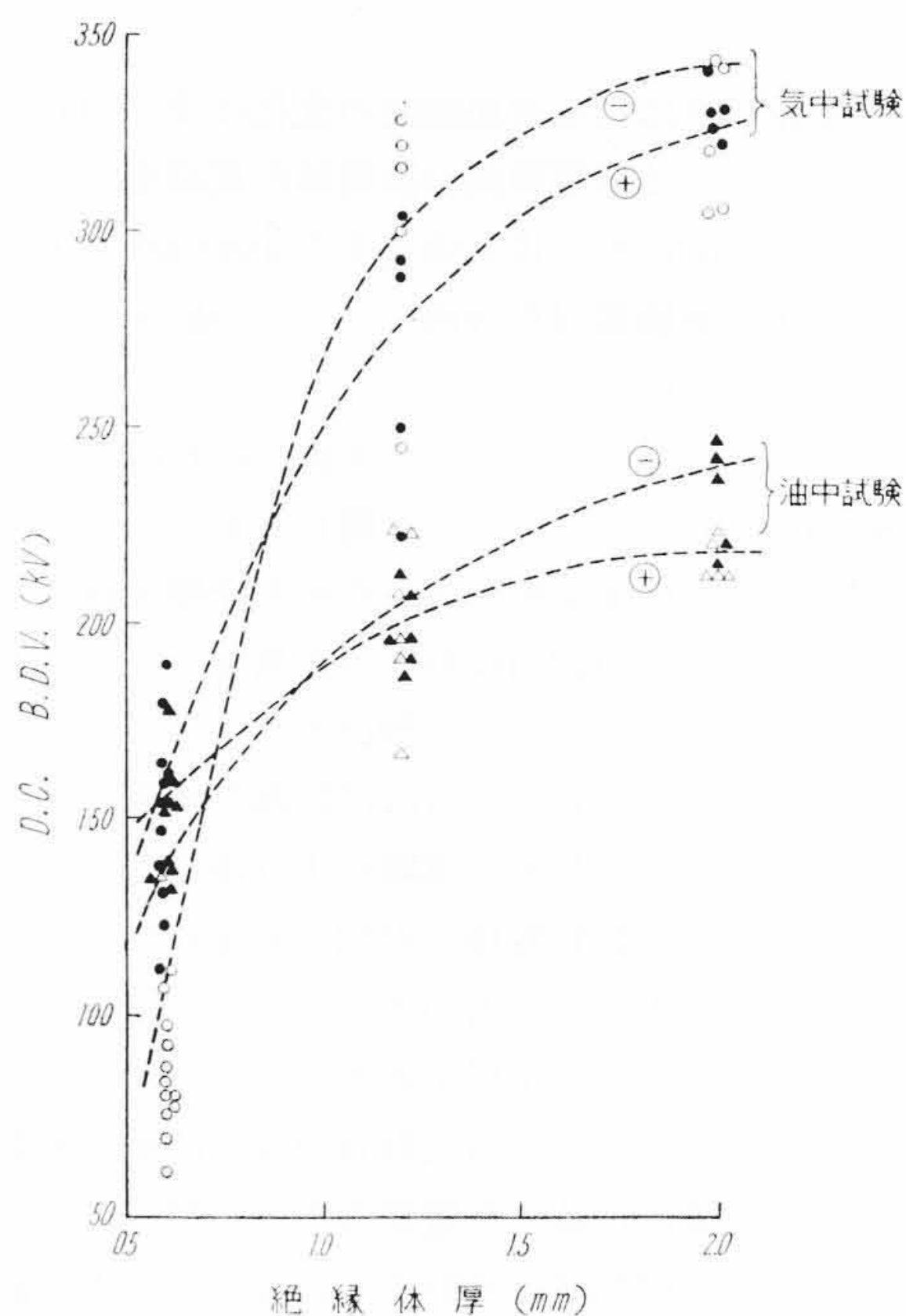
第 1 表 針刺ケーブルの極性効果

試 番	1	2	3	4	5	6	7	8
Start 極 性	正	負	正	負	正	負	正	負
破 壊 時 極 性	正	負	正	正	正	正	正	正
B.D.V (kV/回目)	110/2	100/3	100/1	100/2	95/3	90/1	105/2	100/2

ケーブルに針をさす (ケーブル 20 kV 50 mm² EV) 80 kV Start, 5 kV おおの 5 回 step-up 極性は針側を示す



第 6 図 直流による PE ケーブル破壊特性



第 7 図 直流による PE ケーブルの破壊特性

料を用い水中、気中、油中に浸して破壊させた。ただし、気中、油中に入れる場合は外部導体として導電性塗料を塗布したのちに鉛テープを巻いたものを用いた。電圧上昇速度はいずれの場合にも 3 kV/s とした。

4.2 結果と考察

得られた結果は第6,7図のとおりである。

第6図は水中に浸したものであり、第7図は油中および気中で行ったものである。

第6図の結果は前節までの模型を用いて説明できるが、第7図では絶縁体厚さの薄いほうで極性が逆転している。すなわち、その中間では極性効果のないところがある。この原因はまったく不明であるが、第6図ではこの現象がないことから外部導体の影響と考えられる。たまたま、絶縁体外径と導体外径の比が e に近いところで極性効果が少ないことは面白い。

実際、絶縁体の薄いところはむしろ平板電極に近づく訳ではあるが、試料の不整またはおそらく空間電荷効果が少なくなるためであろうと想像される。

しかし、これらの現象を明解に説明するためにはさらに多くの基礎的実験を必要とすると思う。

5. 結 言

以上で得られた結果を要約すれば次のようになる。

(1) 針対平板電極間にポリエチレンシートをはさんで衝撃波を印加すると針正の場合が針負の場合よりも破壊電圧は低い。そして針径の細いほど、絶縁体の厚いほどこの効果は大きい。

この理由として従来 J. H. Mason 氏などにより空間電荷効果が提案されているが、筆者らはこのほかに正ストリーマの伸びやすさを取上げて説明している。

(2) ポリエチレンケーブルに衝撃波を印加すると導体正の場合に破壊電圧が低くなる。この現象は従来の電力ケーブルで得られた結果とまったく逆であるが、理由は(1)と同じだと考えられる。またこの効果は絶縁体外径と導体外径の比が大きいほど著し

い。より線導体でも同様の結果が観測されたが導体しゃへいのあるものでは完全に極性が逆転している。この原因は導体しゃへい層による電子の捕獲によるものと考えた。

(3) 直流電圧をポリエチレンケーブルに印加しても上記と同様な結果が得られる。ただし、外部導体の影響が著しく、油中、気中の実験結果はケーブル寸法によって異なり、極性効果はかなり明確になったが、筆者らの提案した正ストリーマの伸展の役割を認めるためにはなお多くの実験が必要である。

擧筆に当り種々ご指導いただいた武蔵工業大学鳥山教授ならびに日立電線株式会社久本部長に深謝する。

参 考 文 献

- (1) Y. Toriyama: E. T. Z 38, 21 (1933)
- (2) 電気学会編: 放電ハンドブック, 106頁 (昭 33)
- (3) 電気学会編: 放電ハンドブック, 403頁 (昭 33)
- (4) A. Nikuradse: Arch. f. Elck 22, 305 (1929)
- (5) T. J. Lewis: Proc. Phys. Soc(B) 66, 425 (1953)
- (6) H. Edler: Arch. f. Elek 25, 448 (1931)
- (7) 坂本: 電学誌 73, 722 (昭 28)
- (8) 杉田, 長尾, 鳥山: 電三連大予稿 (昭 28~31)
- (9) 吹田: 電学誌 71, 278 (昭 26)
- (10) A. V. Hippel, R. S. Alger: Phys. Rev. 76, 127 (1949)
- (11) J. H. Mason: P. I. E. E 102, 254 (1955)
- (12) P. T. G. Flynn: P. I. E. E 102, 264 (1955)
- (13) P. R. Howard: P. I. E. E 100, 315 (1953)
- (14) R. Davis: J. I. E. E 89, 52 (1942)
- (15) H. Baaty: E. T. Z (A) 74, 69 (1953)
- (16) H. Halperin, G. B. Shankli: T. A. I. E. E 63, 1190 (1944)
- (17) E. W. Davis, W. H. Eddy: T. A. I. E. E 59, 394 (1940)
- (18) H. Pairitsch: C. I. G. R. E No. 205 (1956)
- (19) D. W. Kitchin, O. S. Pratt: Elect. Eng 77, 218 (1958)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第 493318 号

水 上 徳五郎・星 武 夫
萩 原 英 二・渡 辺 勇 司

電 磁 し ゃ へ い 付 通 信 ケ ー ブ ル

普通この種ケーブルの電磁しゃへい層は、銅テープのような導電性テープと純鉄テープのような磁性テープとを交互に巻きつけ、外部からの磁束変化によって銅テープおよび鉄テープに電圧を誘起させ、その電流による二次的電磁作用によって一次的電磁作用を打ち消して、ケーブル線心間に誘導する電圧を減少させるものである。

この考案は、このようなケーブルのしゃへい層のうち鉄テープの代りに導磁率のきわめて大きい方向性けい素鋼帯を用いたものである。このようにすれば、鋼帯の巻付層に誘起する電流によって生ずる磁束の方向と、その鋼帯自身の圧延方向(磁化容易の方向)とをほとんど一致させることができるから、線心間に誘導する電圧を著しく押えることができる。したがって交流電化鉄道のトロリ線、あるいは高圧送配電線と平行または近接して架線される通信ケーブルの電磁誘導障害の防止に大きな効果がある。(斎藤)

