

高電圧ケーブルの絶縁破壊に関するストレス理論の検討

On the Stress Theory of Dielectric Breakdown of High Voltage Cables

依田 文吉* 相田 和男*
Bunkichi Yoda Kazuo Aita

内 容 梗 概

電力ケーブルの絶縁破壊に関する研究はケーブル技術者にとって最も重要な基本的なものである。この究明は絶縁設計の基準や製造方法を改良するための指針を与える。

これに関しては従来数多くの研究が行われたが、どれが正しいのか確定的でない。しかし、最大ストレス理論は有力な学説になっている。

筆者らは数多くの試料ケーブルを用いて広範な実験を行った。結果、最大ストレス理論は不適當であり、ストレス理論を用いるとすれば平均ストレスをとるのが妥當であることが明らかになった。次にケーブルの絶縁破壊が寸法比によって異なった様相を示すことがわかり、従来の最適設計法の合理性が確認された。

1. 緒 言

近年における電力需要の増加は著しい。これに対処して、送電電圧は上昇し、大容量の発電所の建設が各所で行われている。したがって電力ケーブルもまた高電圧、大容量のものが要求されてきた。1950年代初期において試作された380~425 kVの超高圧ケーブルはすでに良好な運転実績をもっており、いまや500 kVケーブルが実用化されようとしている。世界各国のケーブルメーカーは従来用いてきた絶縁紙を改良し、油圧に検討を加え超高圧OFケーブルの製造に努力してきた。

一方、第二次世界大戦中に急激に研究された各種の高分子絶縁材料は戦後すばらしい勢いで開発され、従来用いてきた天然材料を駆逐しつつある。特に合成ゴム、プラスチック材料は各種の電線やケーブルに広く適用されているが、電力ケーブルとして最も著しい発達を示したものは、ブチルゴム-クロロプレン、ポリエチレン-ビニルの2組である。試作は技術向上を意味し、製造はその成果を表わす。しかしながら、電力ケーブルの最も基本となる技術的問題は絶縁設計である。すなわち、与えられた布設条件に適した絶縁体と保護材料を選択し、所用の送電容量を満足する導体の大きさと絶縁厚を設定することである。

このためには、導体径と絶縁厚と破壊強度の関係を知らることが重要である。絶縁厚を一定として導体径を順次大きくしていった時、破壊電圧は大きくなるのか、小さくなるのか、この基本的問題に対しては十分な検討が行われず、いまだに確実には答えられない現状である。

ケーブルは同心円筒間に絶縁体がそう入されているというきわめて簡単な絶縁構成をしているために、大方この問題は解決し尽されているような錯覚に陥いる。筆者らもまた、導体上電界強度が絶縁体固有の破壊強度になれば絶縁破壊するものと考え導体上の半導体しゃへいの意義の検討を試みていた。

しかしながら、導体しゃへいの意義を明確に知るためには使用する半導体および絶縁体を一定とし、その絶縁破壊特性をはあくしておく必要があると考えた。そして、まずこの特性をとるため半導体を使用しないで、絶縁厚と導体径とを変えて交流の短時間破壊特性を測定した。結果は従来考えられてきたことに反して、破壊時における最大電界強度が導体径と絶縁厚で変わるということである。

本論文は、まず電力ケーブルの絶縁破壊に関する各種の理論を考察し、次に筆者の行った実験結果とその検討を行うことにした。

* 日立電線株式会社電線工場

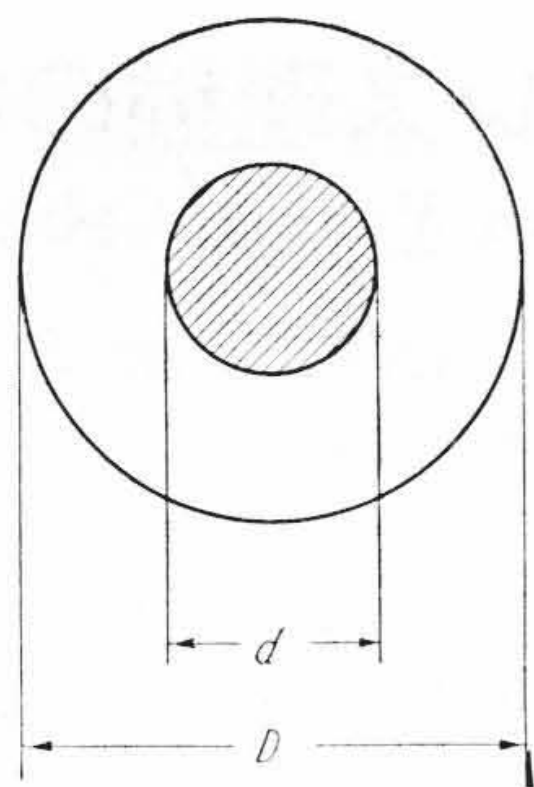
第1表 各種破壊理論の概要

各種理論	提案者	概 要
(1) ストレス理論	A. 最大ストレス理論 A. Russell	絶縁体のいかなる部分でも $G_{max} \geq G_0$ が破壊の条件となる。 $\therefore G_0$ (平板電極の破壊強度)
	B. 平均ストレス理論 H. S. Osborne	絶縁体のある部分には G_0 以上も加わると考え、導体から外方へ広がる小さな針状破壊により弱点から破壊する。
	J. B. Whitehead (支持者)	導体上に G_0 以上のストレスが加わっても分子の成分電荷の引離しによる抑制効果があるために外側は過大ストレスがかからない。
	C. 最小ストレス理論 F. Fernie	数多くの実験を行い、絶縁破壊時における G_{min} が一定となることを主張した。
(2) 非ストレス理論	D. M. Simons の修正	ケーブルを $D/d > e$ と $D/d \leq e$ の2組に分け、前組は絶縁体の内層に Whitehead のいう過大ストレスが存在する。後者は過大ストレス部分を持つ絶縁体は全絶縁体に印加された電圧を比例配分する。
	D. 最大ストレス理論 M. I. Middleton C. L. Dawes ・・ 修正	導体上の G_{max} が $D/d = e$ のとき、最小になることを考慮に入れ $D/d < e$ のときは最大ストレス理論が成立するが $D/d > e$ の時は $d_c = D/e$ が一定となる。すなわち d_c 点におけるストレスが G_0 となったとき破壊する。
	A. 第3導体理論 C. P. Steinmetz J. L. R. Hayden	固体の破壊は本質的に空気の場合と異なり、絶縁体には過大ストレスを印加できる可能性があり、この最高電圧において熱電氣的な第3導体を考えた。
	B. 熱破壊理論 K. W. Wagner S. Whitehead	ケーブルに電圧を印加するとジュール熱および誘電体損によって温度上昇し、熱点が現われ破壊する。
C. ストレイン理論	L. G. Brazier	D. M. Robinson が検討したトラッキング破壊と熱不安定に基くものがある。
	P. L. Hoover	ストレスが弾性限度を越えたケーブルについてはストレインが破壊を規定する。 $\therefore$ ストレスに相当するものは電界強度であり、ストレインは分子分極電流密度である。
D. 電子理論	A. Von Hippel	Von Hippel が初めて固体中の電子ナダレを提案し、その後純電氣的な絶縁破壊の考察が行われている程度で定説がない。

注: d : 導体外径 D : 絶縁体外径

2. 歴 史 的 考 察

電力ケーブルの絶縁破壊理論の歴史はきわめて古く、1900年代にはいると各種の理論が輩出している。ここでは電氣的ストレスがケーブルの絶縁破壊を規定するというストレス理論と熱や機械的な因子によるもの、および化学反応に基づくとする二つのグループに分けて考察する。第1表に各種理論の概容を表わす。



第1図 ケーブル断面

2.1 ストレス理論

ケーブル導体と絶縁体外側（大地）間に電圧を印加すると、絶縁体内部には電氣的ストレスが加わる、ストレスは第1図に示すように導体表面上で最大となり、絶縁体外側で最小となる。これをそれぞれ $G_{\max}$ および $G_{\min}$ とすると

$$G_{\max} = \frac{2V}{d \log e \frac{D}{d}} \dots\dots\dots (1)$$

$$G_{\min} = \frac{2V}{D \log e \frac{D}{d}} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここで V は印加電圧、 D 、 d は絶縁体外径および導体外径である。また、平均ストレス G_{mean} は次式で表わされる。

$$G_{\text{mean}} = \frac{2V}{D-d} \dots\dots\dots (3)$$

これらのストレスを中心にして各種の理論が出たが、最も単純なものはケーブルの絶縁破壊時にいずれかのストレスが一定であるとするものである。すなわち、 $G_{\max}$ 、 $G_{\min}$ あるいは G_{mean} がある一定値をこすと絶縁破壊が起るという最大、最小、平均の各ストレス理論である。

2.1.1 最大ストレス理論

これは A. Russell 氏⁽¹⁾によって提案されたもので絶縁体のいかなる部分でもそのストレスが絶縁体固有の強度 G_0 (平板電極間の破壊強度) をこすと絶縁破壊するという仮説である。この理論は最も古く良く知られており、現在もなおかなりの支持者をもっている。

2.1.2 平均ストレス理論

平均ストレス理論の創案者は H. S. Osborne 氏⁽²⁾である。彼は絶縁体のある部分には G_0 以上のストレスが加わることもあるとし、導体から外方へ広がる小さな針状破壊により弱点から破壊すると考えた。このためほかの部分のストレスは軽減され平均ストレスは G_0 になるというのである。J. B. Whitehead 氏は過大ストレス部を持つ絶縁体 (Overstressed Insulation) に関する物理的説明を行い平均ストレス理論を側面から支持している⁽³⁾。

すなわち、ケーブルの導体上に G_0 と同程度以上のストレスが加わった時でも分子の成分電荷の引離しによる抑制効果があるため絶縁体外側には過大ストレス (Overstress) が加わらないというのである。

筆者はこの説明が必ずしも正しいとは思わないが、後述の実験結果の集積によれば絶縁破壊時において、見かけ上最も一定と思われるのはこの平均ストレスである。

2.1.3 最小ストレス理論と Simons の修正

F. Fernie 氏は上記の理論に反して、破壊時においては、絶縁体外側の最小ストレスが一定であることを提案した⁽⁴⁾。彼の意見

は上記の A. Russell 氏や H. S. Osborne 氏の理論には実験的根拠が少なく、このような現象を説明するには不十分であることを指摘し、当時としては数多くの実験を行って絶縁破壊時における $G_{\min}$ が一定となることを主張したのである。

一方 D. M. Simons 氏はこの説に対して、あざやかな理論的説明を試みた⁽⁵⁾。彼は電力ケーブルを $D/d > e$ の組 (Class 1 とする) と $D/d \leq e$ の組 (Class 2 とする) とに分けた。そして、Class 2 では A. Russell 氏の最大ストレス理論が成立し、Class 1 では F. Fernie 氏の最小ストレスが一定であるというのである。この D. M. Simons 氏の修正はきわめて理論的ではあるが、あくまでも F. Fernie 氏の実験結果が正しいとしての話である。しかしながら筆者らの実験⁽⁶⁾によっても、また F. Fernie 氏自身の結果からみても破壊時の最小ストレスが一定というのは過大評価であり、むしろ同等以上に平均ストレスが一定であるように見える。

2.1.4 最大ストレス理論に対する W. I. Middleton 氏らの修正

W. I. Middleton, C. L. Daives, E. W. Davis 氏らはかなり豊富な実験結果に基づいて最大ストレス理論の修正を試みた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。A. Russell 氏らの最大ストレス理論ではケーブルに加わる電圧 V とケーブルの外径 D が与えられた時、導体上の $G_{\max}$ が $D/d = e$ の時最小になるという特性を考えていないが、W. I. Middleton 氏らはこのことを考慮した。そして彼らの実験結果によれば $D/d < e$ の時には、特に最大ストレス理論が成立するけれども $D/d > e$ のケーブルでは

$$G_c = \frac{2V}{d_c \log e \frac{D}{d_c}} = \frac{5.44 V}{D} \dots\dots\dots (4)$$

$$d_c = \frac{D}{e}$$

が一定となる。すなわち導体が見かけ上大きくなり、 d_c 点におけるストレスが G_0 に等しくなった時に絶縁破壊するというのである。

実験結果は $d < D/e$ になると破壊電圧は減少し $d \sim d_c$ 間の絶縁体は電氣的強度に対してなんら寄与していないことを示している。

2.2 非ストレス理論

以上のストレス理論は現象論的なものであるが、このほかにも各種の物理機構を想定した絶縁破壊理論がある。

2.2.1 第3導体理論

C. P. Steinmetz 氏は電気破壊が単純な機械的破壊と類似なものではなく、また固体の破壊は本質的に空気の場合と異なり最高電圧において熱電氣的効果をもつ第3導体を考えなければならないといっている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2.2.2 熱破壊理論

熱破壊理論に、はじめてメスを入れたのは K. W. Wagner 氏である。彼は絶縁体と直列に木材抵抗を入れて、電圧-電流特性を詳細に検討した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ケーブルに電圧を印加すると、ジュール熱および誘電体損による絶縁体の温度上昇が起り、絶縁抵抗が急減する。そして熱点 (Hot spot) が現われ、この部分はほかの部分よりも上記の傾向が著しくついに絶縁破壊する。その後、V. Fock 氏が熱破壊に関する一般式を提示した⁽¹³⁾。S. Whitehead 氏はこの式をケーブル状絶縁体に適用した⁽¹⁴⁾。

一方、L. G. Brazier 氏⁽¹⁵⁾は電力ケーブルの絶縁破壊には D. M. Robinson 氏が検討した⁽¹⁶⁾トラッキング破壊と上記のような熱不安定に基く破壊とがあると考えた。

2.2.3 ストレイン理論

さきのストレス理論に対して、いま述べた熱破壊理論とは別に

ストレイン理論がある。これはストレスが弾性限界をこえたケーブルについてはストレインが破壊を規定するという説である。P. L. Hoover 氏はストレスに相当するものは電界強度であるが、ストレインに相当するものは分子分極または電流密度であるとして理論を構成した⁽¹⁷⁾。

2.2.4 電子理論

気、液、固3体の絶縁破壊はきわめて複雑な様相を呈するため、多くの歳月とすぐれた研究者の努力にもかかわらず、一貫した理論はない。気体放電に対しては J. S. Townsend 氏⁽¹⁸⁾の理論をはじめとして、L. B. Loeb⁽¹⁹⁾、J. M. Meek⁽²⁰⁾ 氏らの学説がかなり有力であるが、固体の絶縁破壊では A. Von. Hippel 氏⁽²¹⁾がはじめて固体中の電子なだれを提案し、その後、一部の物理学者により純粋結晶固体に対する純電氣的な絶縁破壊の考察が行われている程度で、いまだに定説がない⁽²²⁾。

しかしながら、物質の電氣的破壊である以上、最も根本的な機構は同一であると考えられるので、電力ケーブルの絶縁破壊もまたこの観点から考察しても良いと思う。むしろ絶縁破壊の現象論的考察と物理機構の考察との一致が、これからの研究の終局目標であらう。

3. 実 験

電力ケーブルの絶縁破壊は導体形状、構成絶縁体の種類および印加電圧の種類(衝撃、直流、交流など)、課電時間、課電方法などによって異なるのはもちろんであるが、ケーブル寸法、すなわち導体径および導体径と絶縁体外径の比によっても異なる。したがってそれらの組み合わせによって結果は複雑な様相を呈するが、今回は自己融着性絶縁テープの交流短時間破壊に限定して実験を行った。しかし、現象の考察を行うに当っては過去に得られた数多くの各種の結果をあわせて考慮した。

3.1 試 料

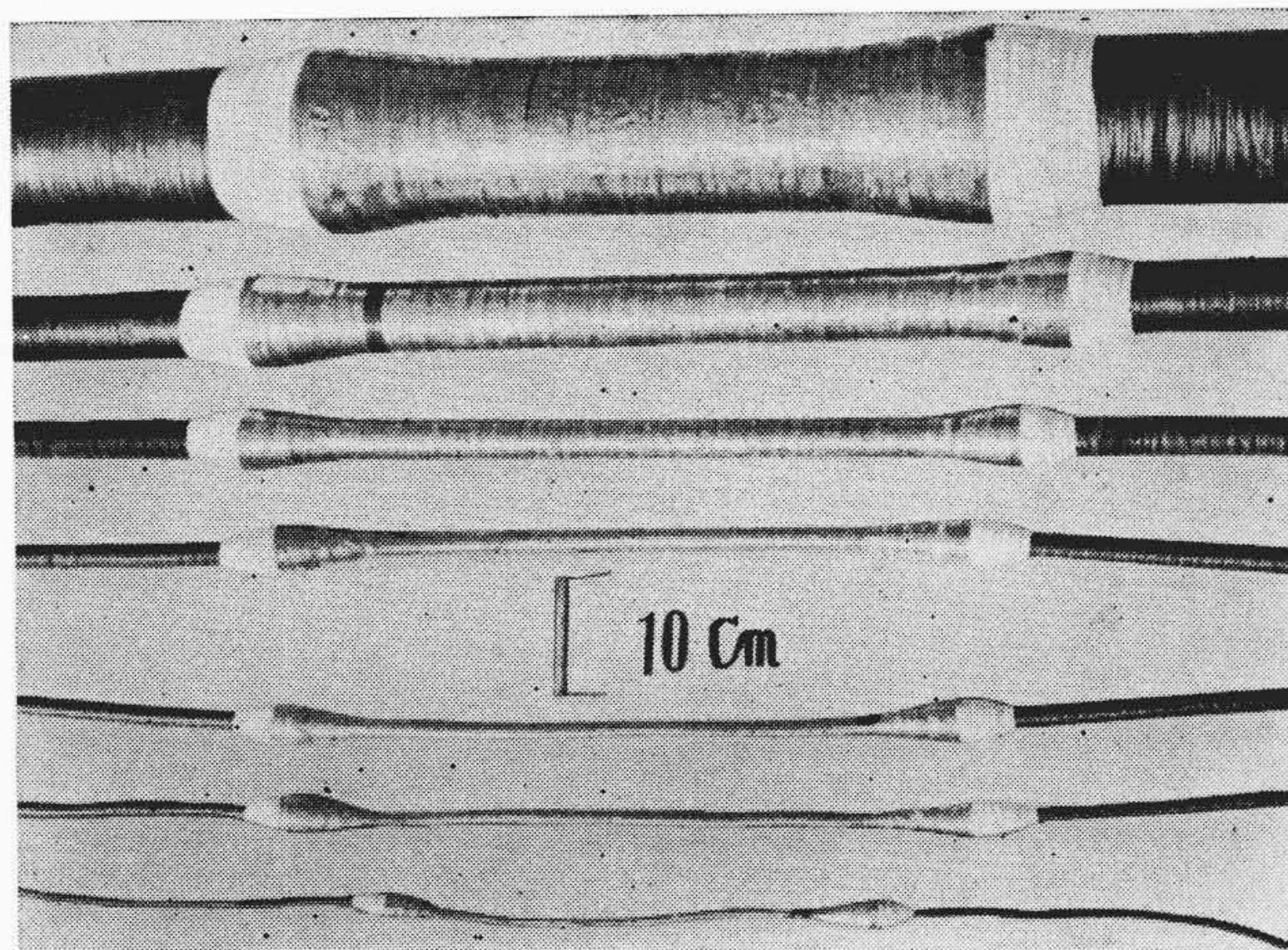
電力ケーブルの導体には一般により線が用いられるが、ここでは導体近傍の電界形状の乱れを除去し、完全な同心円筒間に絶縁体をはさまれている場合を検討するために単心円形銅導体を用いた。すなわち 0.5 mmφ, 1 mmφ, 2 mmφ, 5 mmφ, 5.8 mmφ (より線), 10 mmφ および 21 mmφ の銅線および銅棒を使用し、また特に大サイズケーブルの場合を検討するためには 32 mmφ, 45 mmφ および 120 mmφ の銅パイプ(厚さ約 2~3 mm) を用いて、かなり広範囲な実験を行った。

絶縁体には自己融着性テープ⁽²³⁾を用い、これを導体上に緊密に巻いてボイドのないようにした。絶縁体厚としては 0.5 mm の導体外径では 2.0 mm, 1 mmφ 外径では 2~10 mm の厚さ 3 種類, 2 mmφ 導体では 0.4~6.8 mm の厚さで 7 種類, 5 mmφ では 0.5~8 mm で 5 種類, そのほかの導体外径でも 1~10 mm 程度の範囲内それぞれ 2~5 種類絶縁厚を変えて実験を行った。

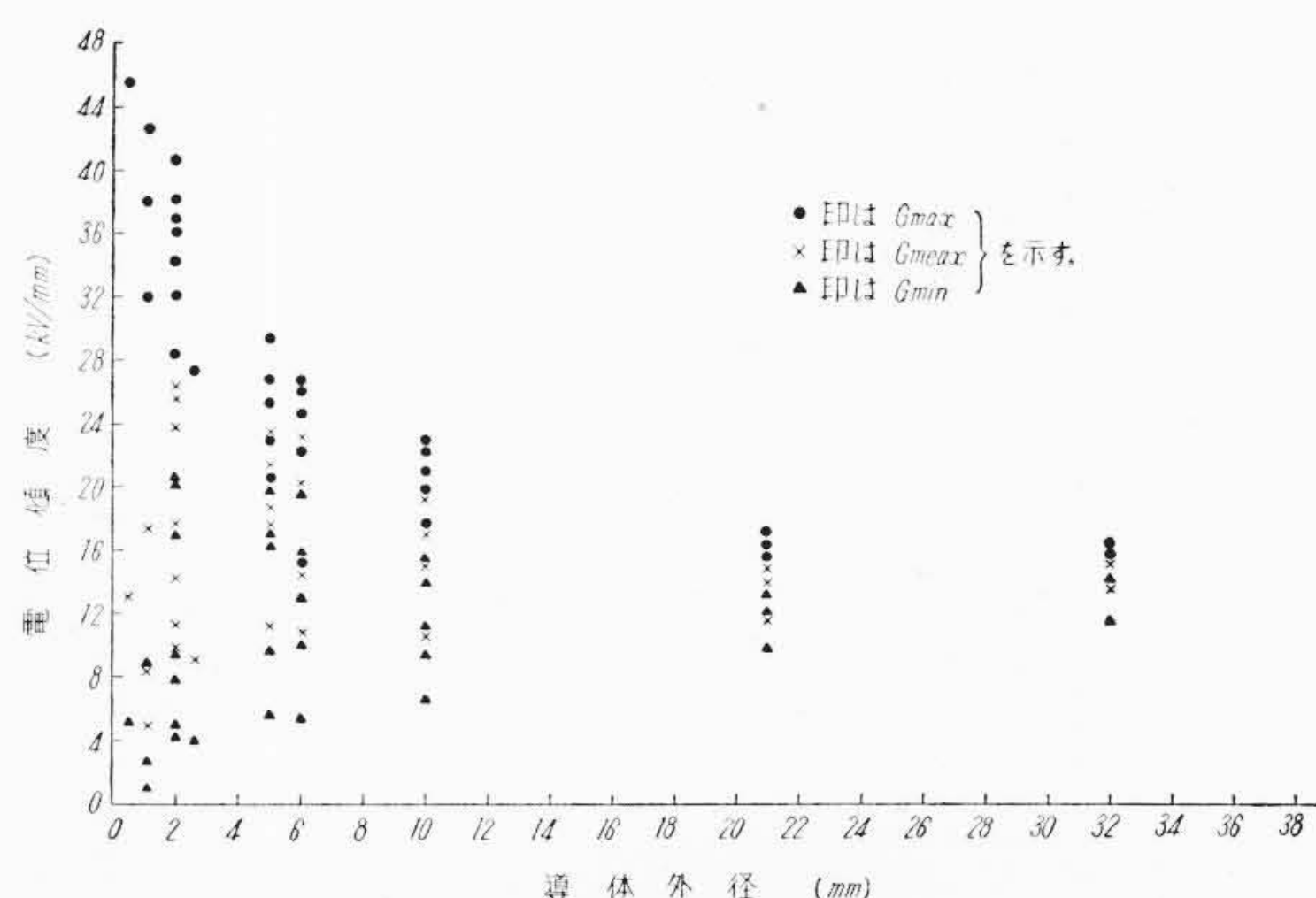
試料長 1.5~2.0 m の上記モデルケーブルの端末部に補強処理を施して、この部分の絶縁破壊およびせん絡を防止し、交流電圧を印加し、破壊に至るまで 500 V/s の割合で上昇した。第2図にこれらの代表的な試料を示す。なおこの緊密性を確認するためにコロナ開始電圧を測定したところ、たとえば導体径 5 mm, 絶縁厚 2 mm の試料で約 6.3 kV となり、これより存在するボイドの大きさは導体上で最高 0.03 mm, 絶縁体外側で 0.17 mm 以下であるといえる⁽²⁴⁾。

3.2 結 果

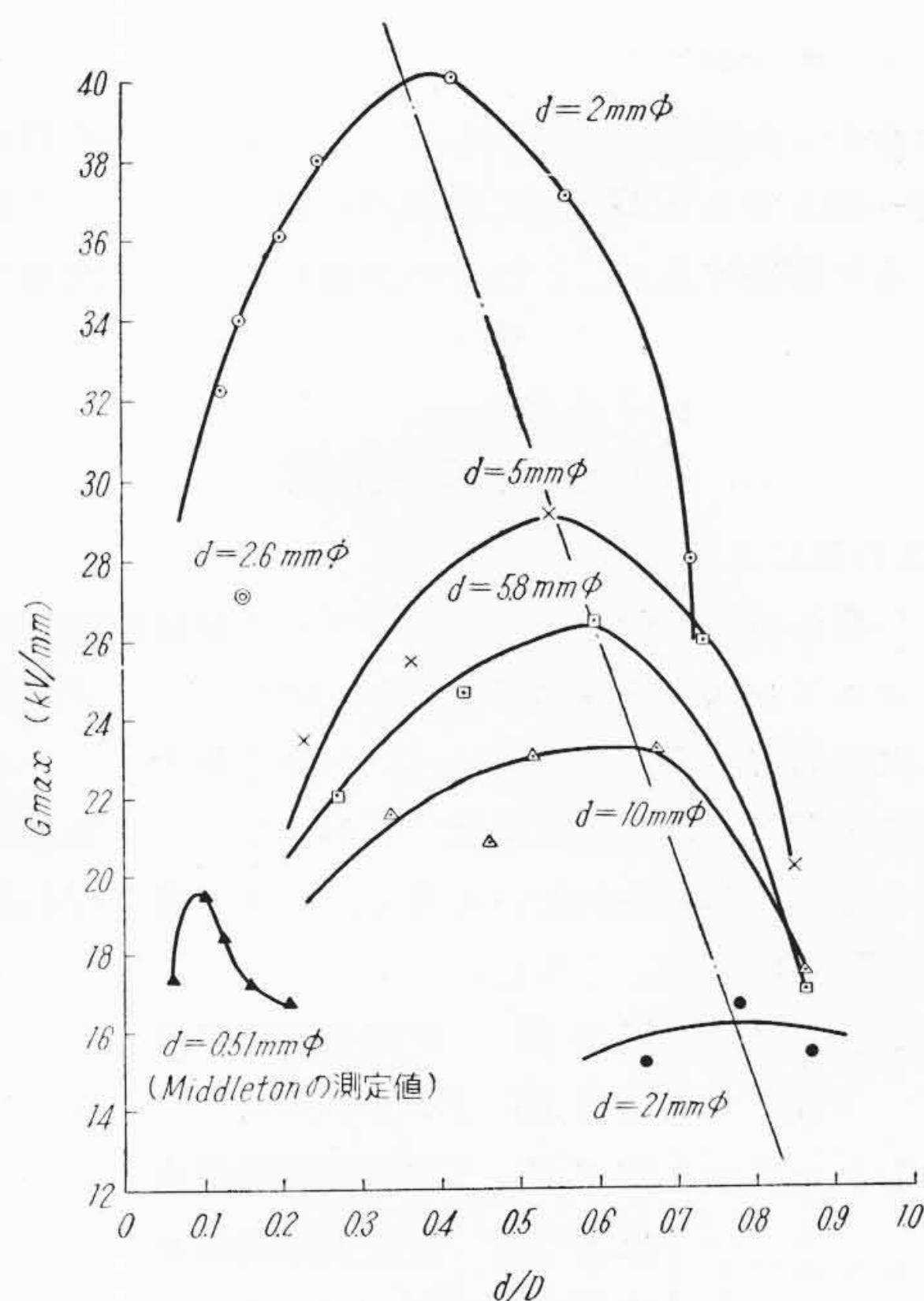
導体外径に対する破壊時の各電位傾度を図示すると第3図のようになる。図中 ●印は G_{max} , ×印は G_{mean} , ▲印は G_{min} を示す。導体外径の小さいところでは非常に G_{max} , G_{min} の差が認められるが、導体外径の増加に従って、 G_{max} は減少、 G_{min} はいくらか



第2図 試 料

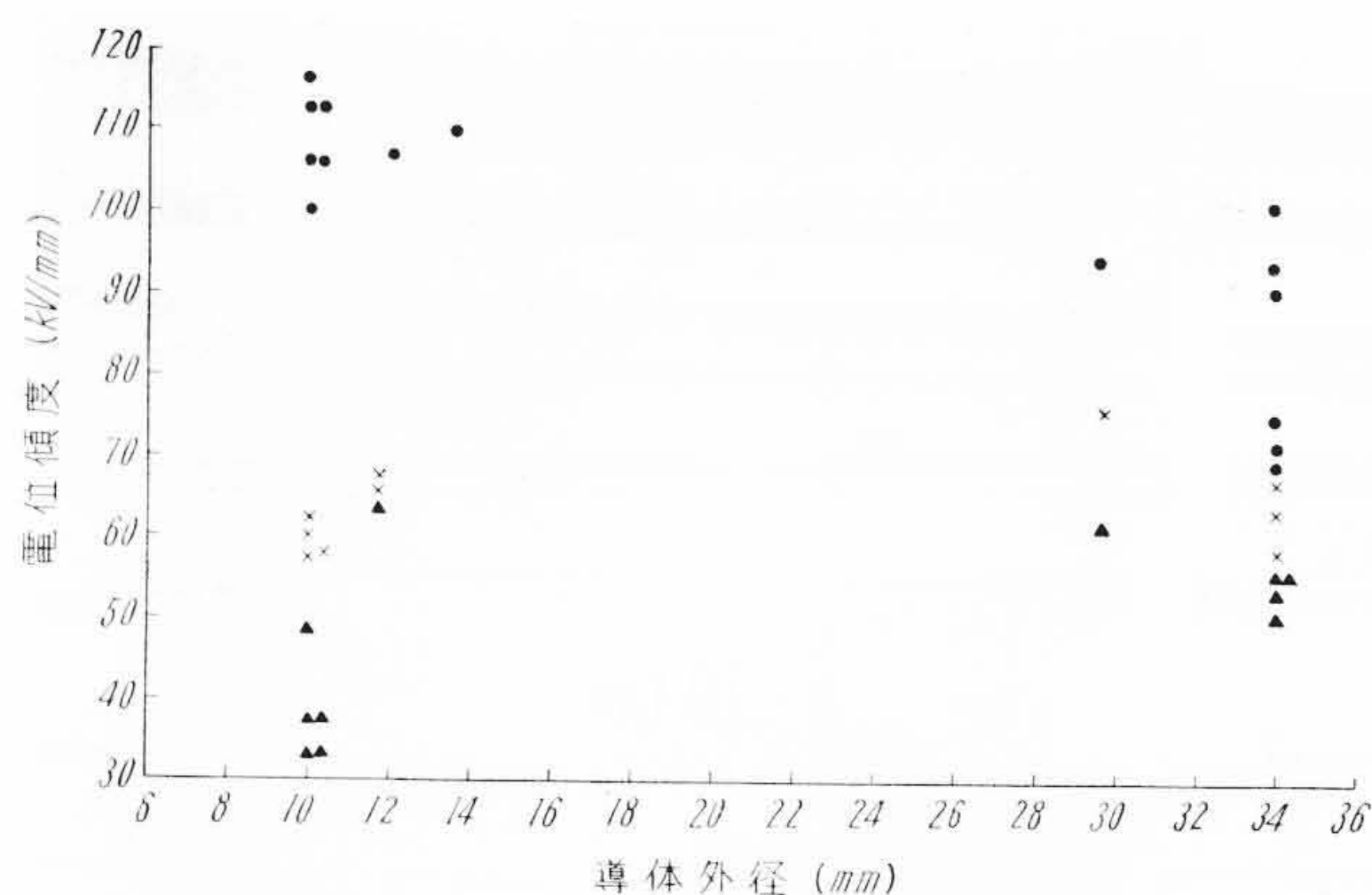


第3図 導体外径に対する各電位傾度の変化

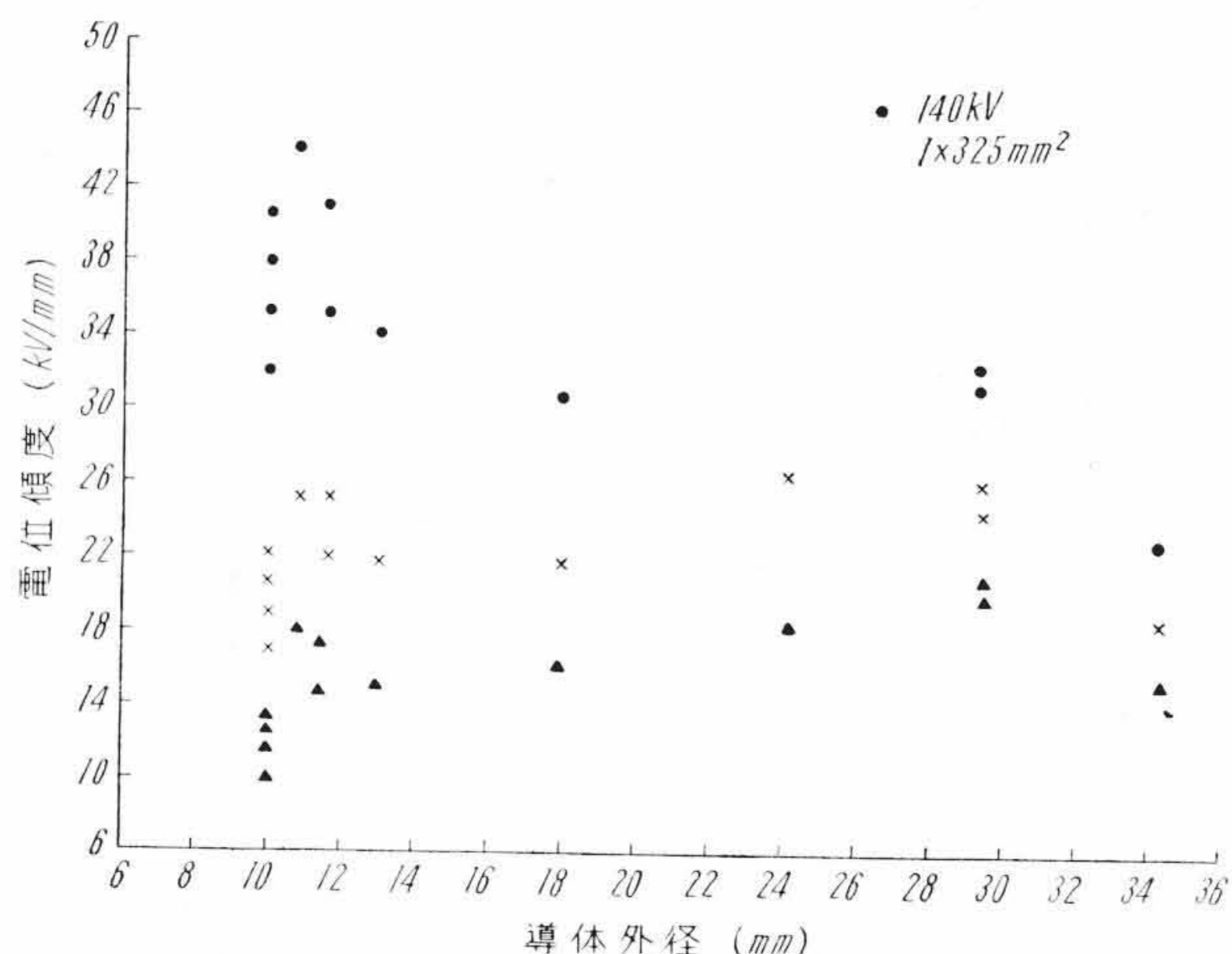


第4図 ケーブル寸法 d/D に対する G_{max} の変化

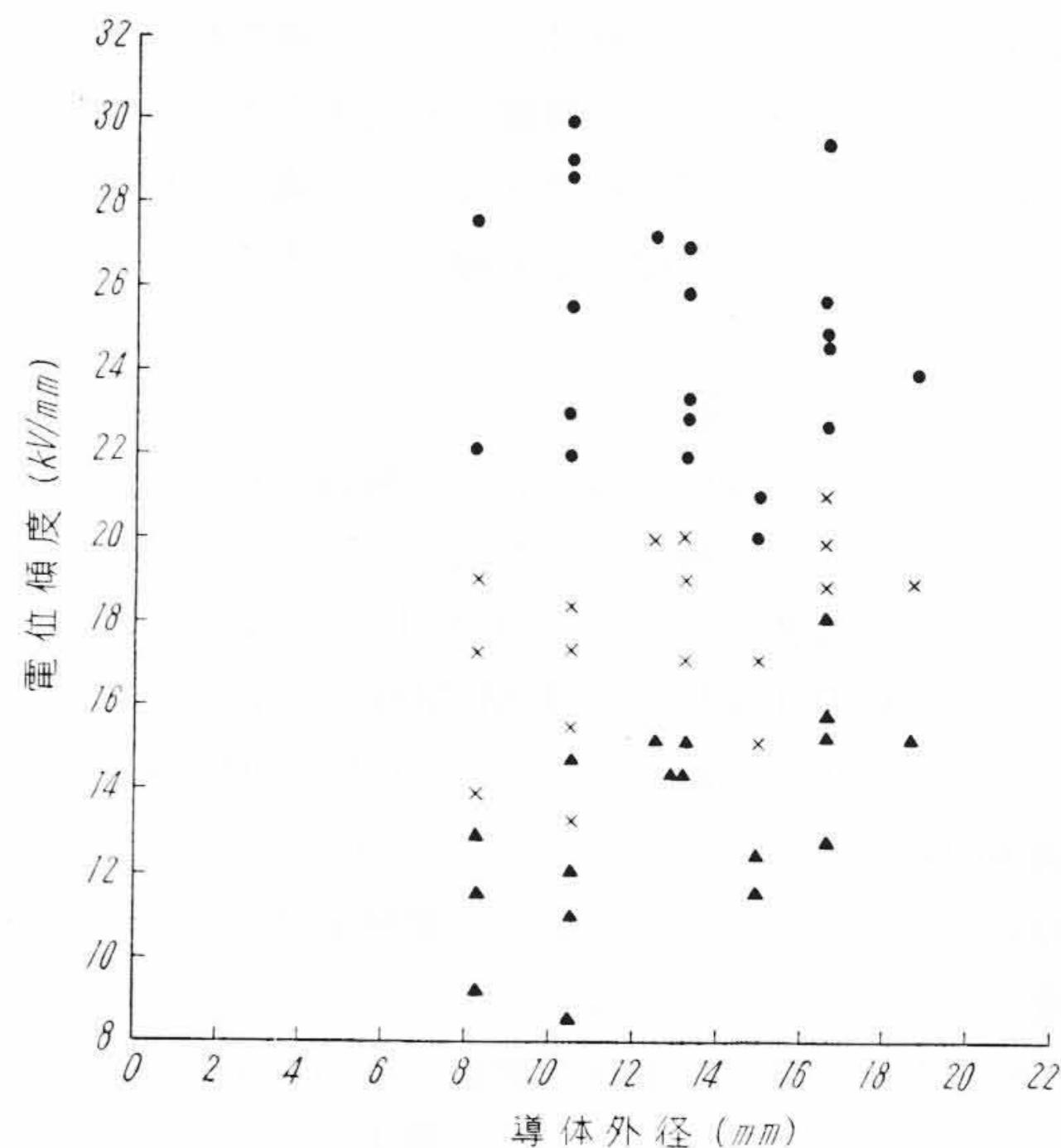
増加して、その差は僅小となる。そしてさらに、導体外径が増加すると、 G_{max} もゆるやかに上昇する傾向を示す。第3図には導体外径 120 mmφ のデータを記入していないが、120 mmφ ではさらに G_{max} の増加が認められる。次にこれをケーブル寸法 d/D に対する G_{max} の変化で示すと第4図のとおりとなる。この結果は今までの研究論



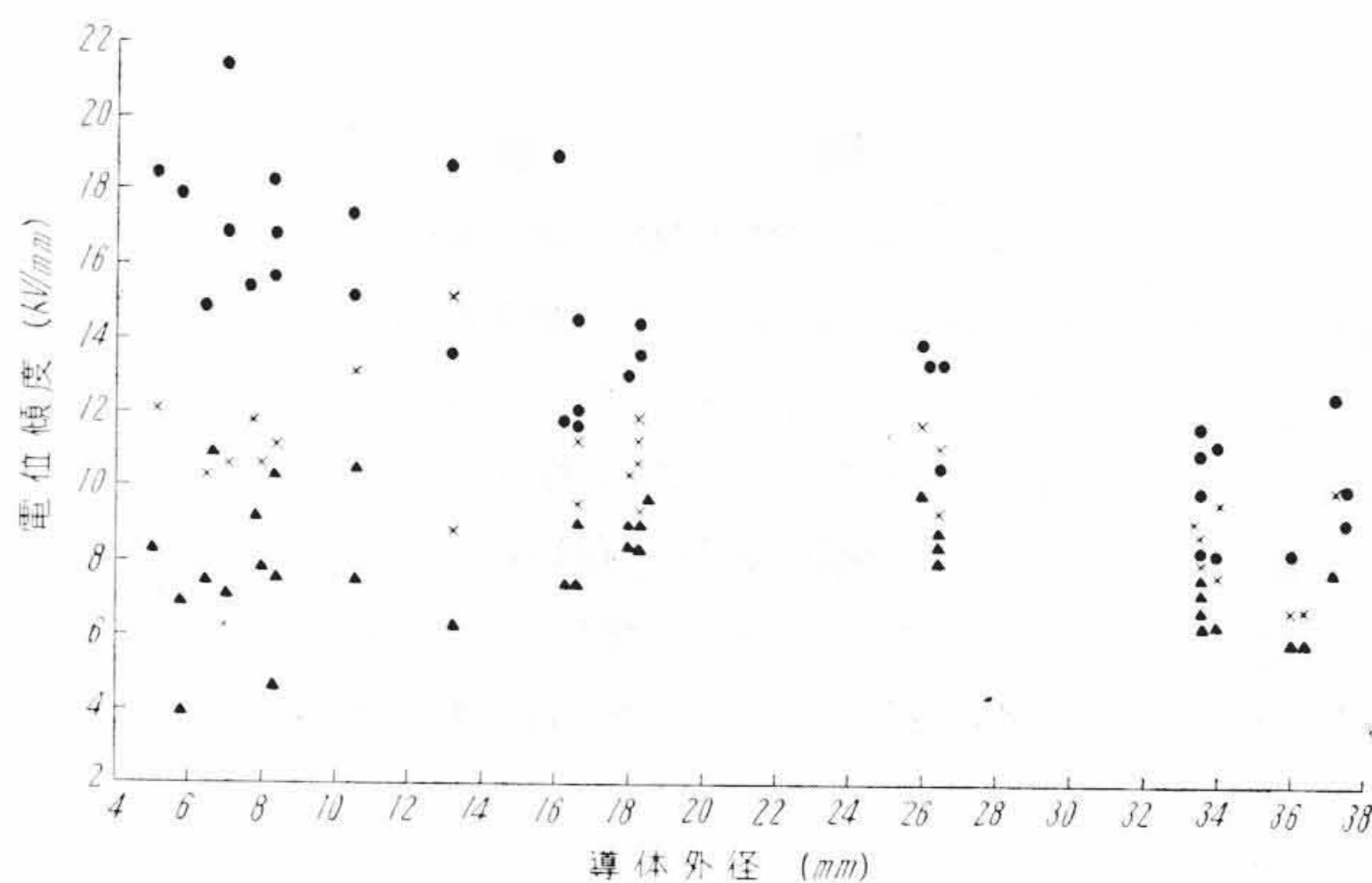
第 5 図 OF ケーブルの導体外径に対する電位傾度の変化 (交流長時間破壊)



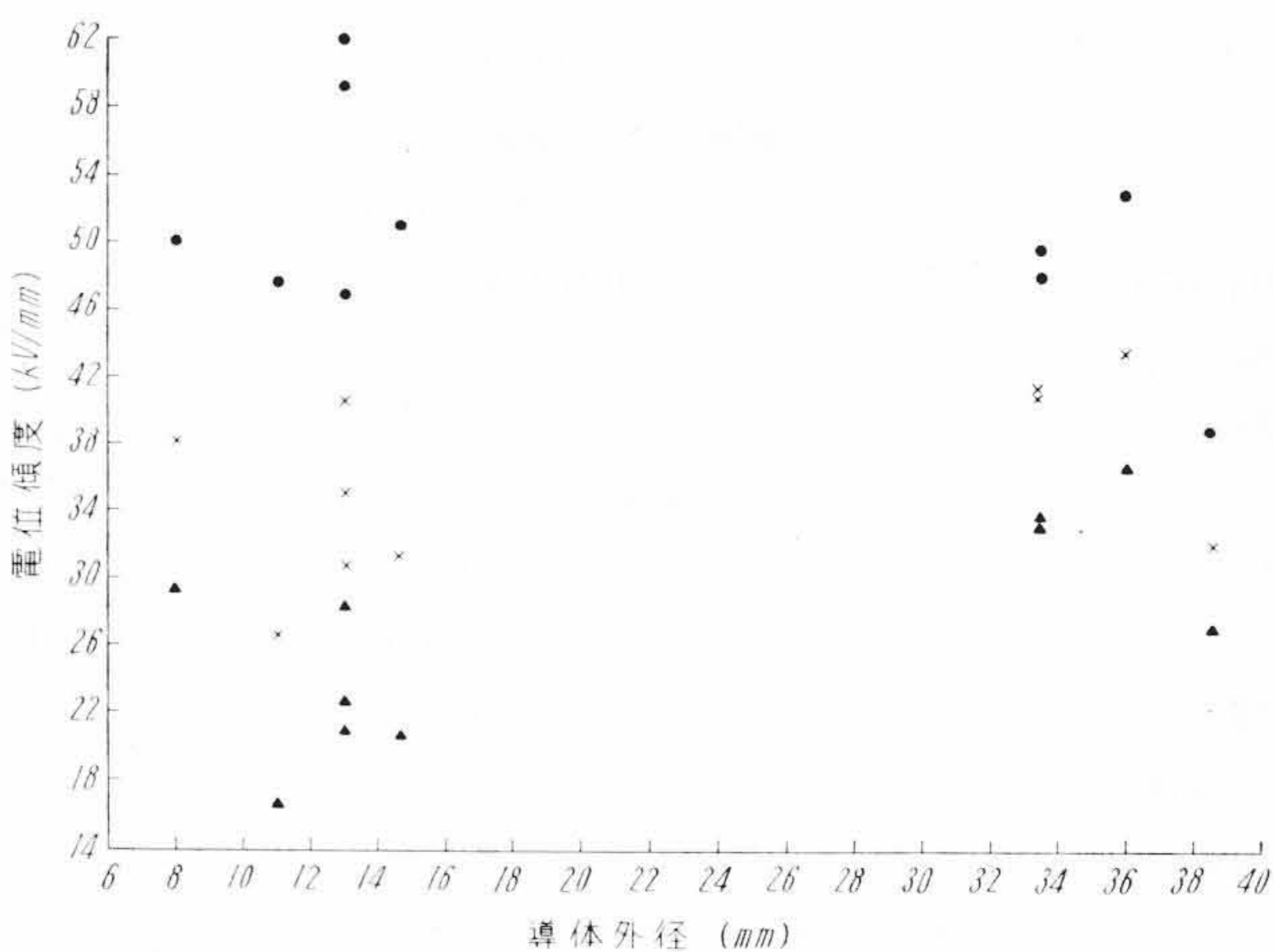
第 6 図 OF ケーブルの導体外径に対する電位傾度の変化 (インパルス)



第 7 図 SL ケーブルの導体外径に対する電位傾度の変化 (交流長時間破壊)



第 8 図 プチルゴムケーブル (BN) の導体外径に対する電位傾度の変化 (交流長時間破壊)



第 9 図 プチルゴムケーブル (BN) の導体外径に対する電位傾度の変化 (インパルス)

文に見られなかった特異現象を示している。すなわち d/D に対して導体外径を一定とすると $G_{\max}$ に最頂点が認められ、この頂点が導体外径とともに移動するが、これらの詳細については次項で述べることにする。

4. 結果の検討

4.1 導体外径による変化

第 3 図から明らかなとおり、電力ケーブルの絶縁破壊時における導体上の最大ストレスは絶縁厚さのいかんにかかわらず導体外径が大きくなるに従って減少する。これはいわゆる最大ストレス理論に対して、完全に反対する事実である。しかしながら、筆者の実験にあるいは誤りがあるかも知れないと考え、従来工場で行われた各種の絶縁破壊実験値を集録してみた。

OF ケーブル	第 5 図	交流長時間破壊
	第 6 図	インパルス
SL ケーブル	第 7 図	交流長時間破壊
	第 8 図	交流長時間破壊
BN ケーブル	第 9 図	インパルス
	第 10 図	交流長時間破壊
EV ケーブル	第 11 図	交流短時間破壊

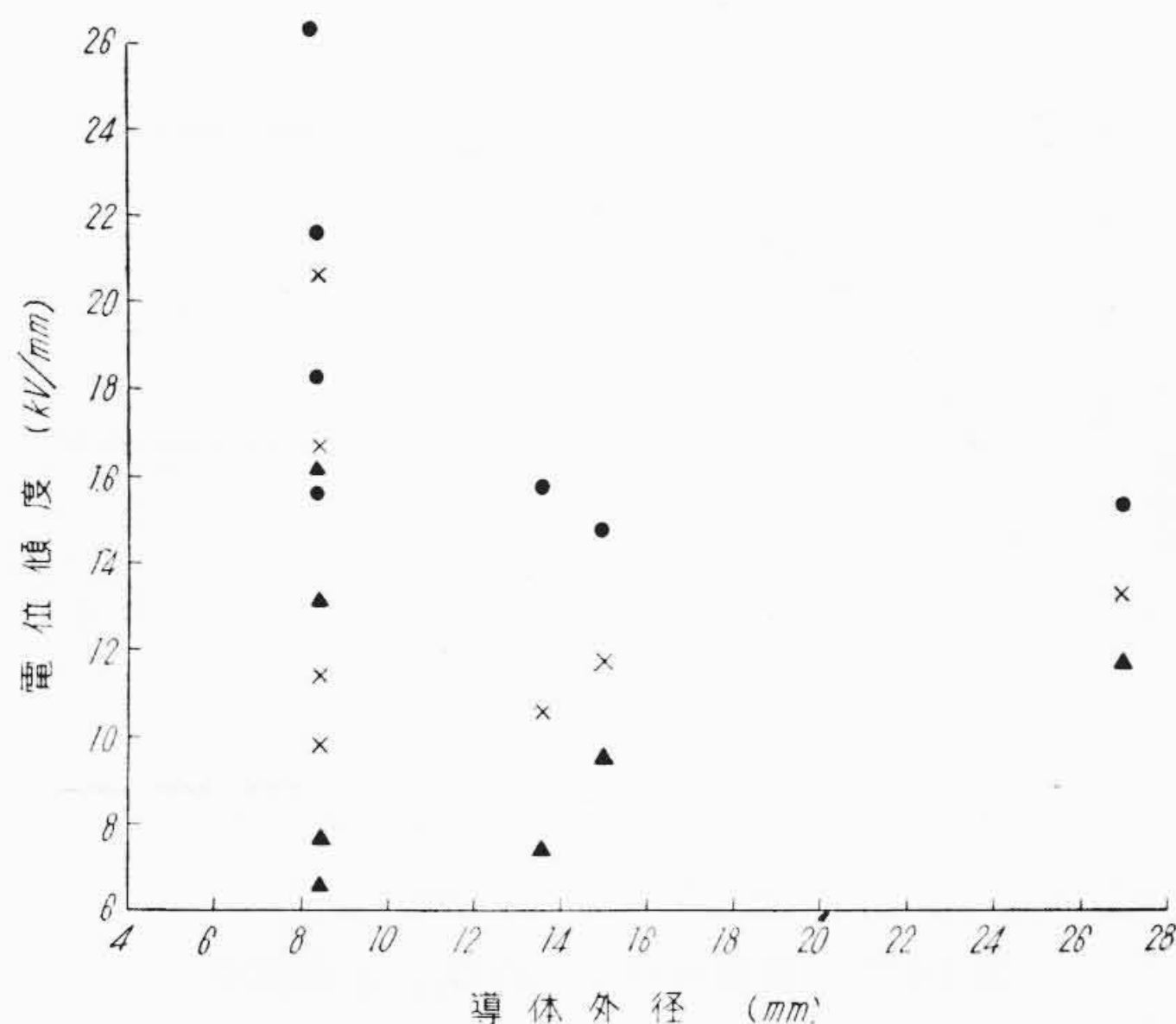
いずれも●印は $G_{\max}$ 、×印は G_{mean} 、▲印は $G_{\min}$ を表したものである。

これらの結果は絶縁体の種類と印加電圧方法が異なるために絶対値は一致していないが、第 3 図に得られた傾向が正しいことを示している。このうち OF ケーブルのある領域では清水氏もまた同様の

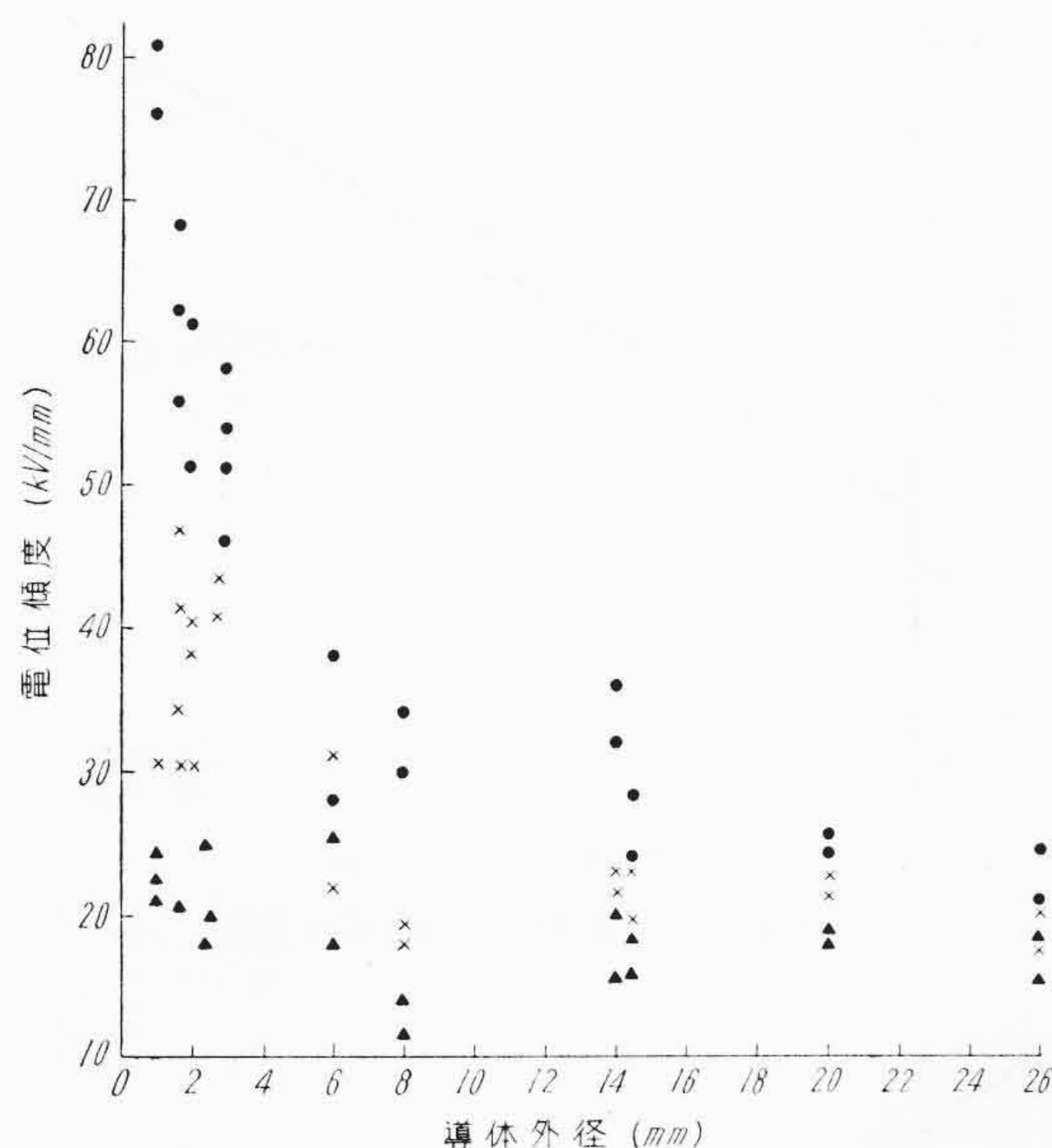
結果が得られたことを報告している⁽²⁵⁾。

さて、この原因が何であるかを考えると当惑する。すなわち、絶縁体の厚さが同一であれば導体径の大きいほど絶縁体内のストレスは均一となり平板電極間に置かれた状態に近づくからである。

この大サイズに対する一つの弁解は製造がむずかしいので小サイズほど上手にできないということである。しかしながら 8 mm² と 80 mm² の関係が 80 mm² の 850 mm² に対すると同様であれば問題



第10図 ポリエチレンケーブル(EV)の導体外径に対する電位傾度の変化(交流長時間破壊)



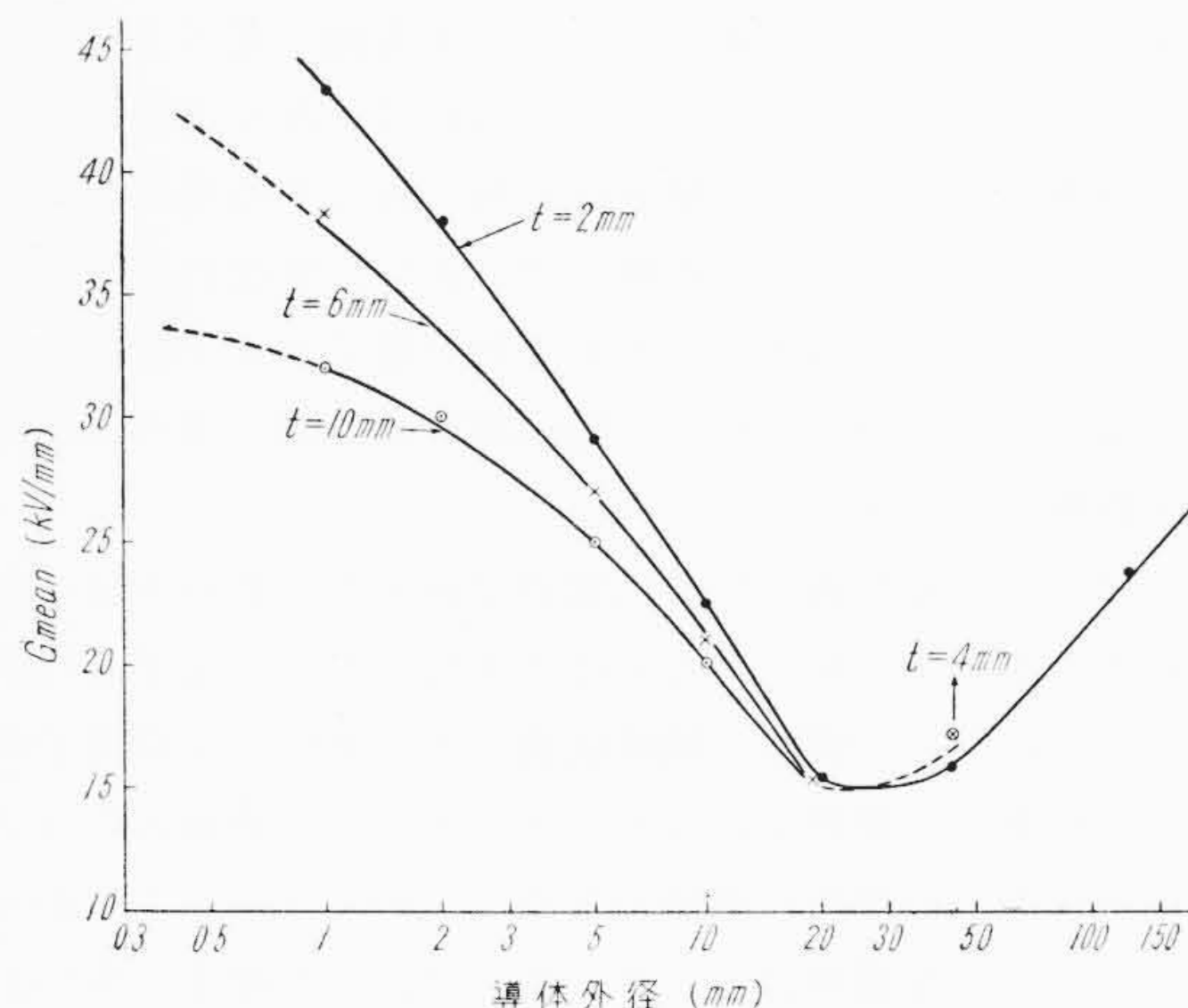
第11図 ポリエチレンケーブル(EV)の導体外径に対する電位傾度の変化

はない。実際、H. C. Hall 氏と D. J. Skipper 氏は導体径 8~16 mm で絶縁体厚を 4 種類変えた OF ケーブルの衝撃電圧試験を行い、破壊時の最大ストレスの平均が、約 10% 異なることを示した⁽²⁶⁾。また、R. A. Tellier 氏は最近 60 kV の OF ケーブルに関する試験を行った結果から 250 mm² のケーブルでは 150 mm² のケーブル相当の最大ストレスで動作させることはできないといっている⁽²⁷⁾。

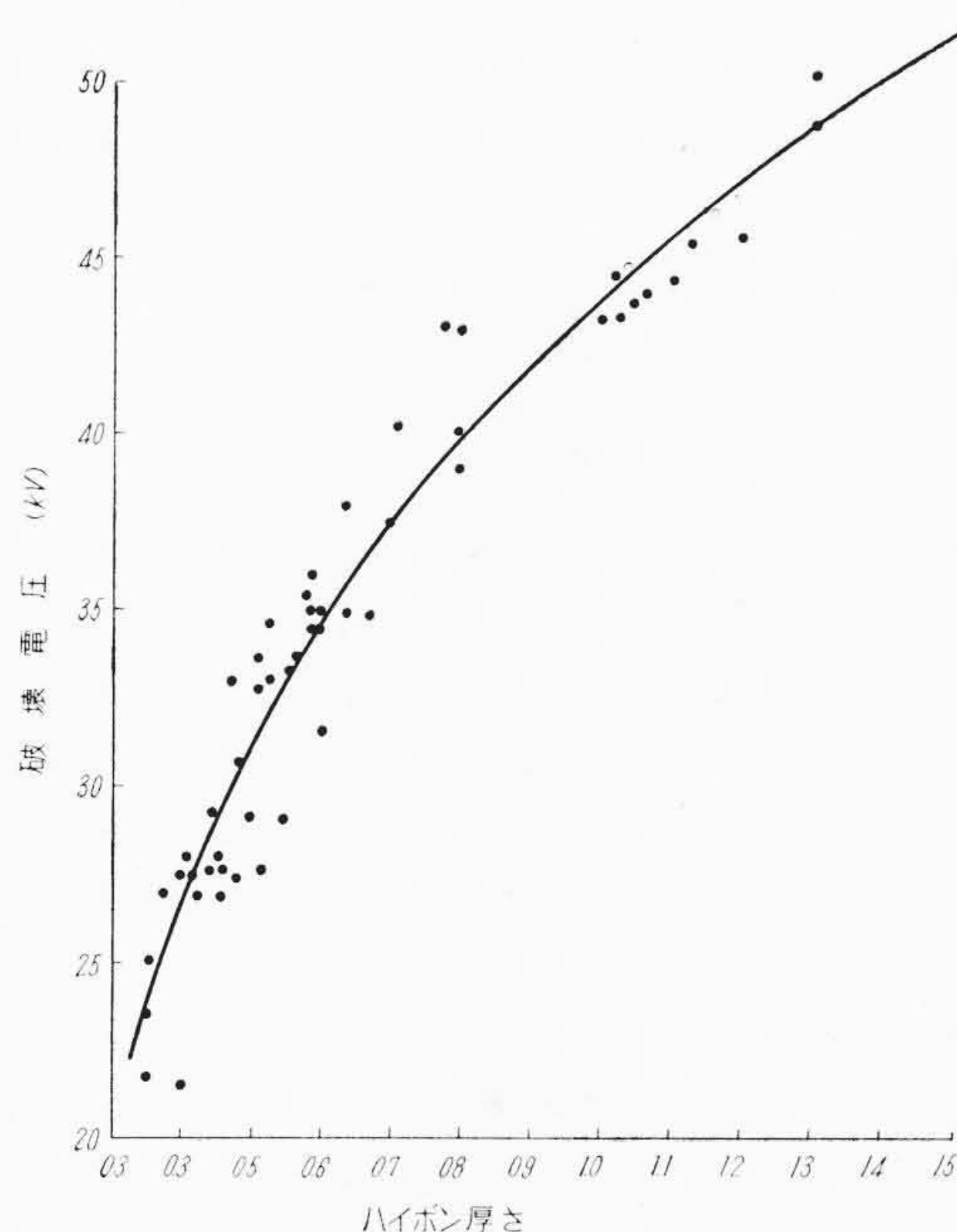
さらに最大ストレス理論を修正しようとするほかの試みは大サイズ導体では小導体よりも表面積が広いために弱点が存在する確率が大きいということである。しかし、ケーブルの実用試験の結果からは小サイズ導体ケーブルの試料長を長くしても結果に変わらないことが明らかにされている。この点に関しても H. C. Hall 氏と D. J. Skipper 氏のデータは一致することを示している。

もちろん、なかには G. Priaroggia 氏や G. Palandri 氏の OF ケーブルの実験におけるように、衝撃破壊電圧による破壊時の最大ストレスがほぼ一定となるような報告もあり⁽²⁸⁾、L. Domenack 氏のように平均ストレスが等しいとするものもある⁽²⁹⁾。

筆者らの実験はきわめて広範囲であるので、導体径による破壊時のストレスの変化の全貌が明らかとなった。もちろん、結果にばらつきのあることは避けにくい、特に交流の絶縁破壊において第3



第12図 導体外径に対する G_{max} の関係



第13図 平板電極におけるハイボンテープの破壊電圧

図のように導体径の増加するに従って、最大ストレスは急激に減少し、ある点で最小値となり、漸次増加してゆく。また平均ストレスはほぼ一定であり最小ストレスはゆるやかに増加して、一定値に近づく。絶対値の差は導体径の大きくなるに従って減少し、最大ストレスの最小点でほとんど零となり、その後は少しずつ増加している。この現象をさらに明確にするために横軸を対数表に示すと第12図のようになる。 t は絶縁厚である。これより最大ストレスが最小になる導体径は 25~28 mm の間にあることがわかった。

一方、平板電極間にこの種の絶縁体をはさみ厚さを変えて行った実験結果は第13図のとおりである。この特性を考慮すると、第3、12図の絶縁体厚による差はさらに減少することになる。

第12図の曲線から破壊時の最大ストレス G (kV/mm) と導体径 d (mm) との関係式を求めると

$$G = A - \frac{A - G_0}{\log d_0} \log d \quad [1 < d < d_0] \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ただし G は $d = d_0$ で最小となり、この時の G の値を G_0 とした。また、 A は厚さと絶縁体の種類に関する常数でハイボンテープの場合には、絶縁体厚を t (mm) とすると

$$A = 46 - 1.5 t \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。

この現象は次のように説明される。導体表面の電界は導体径の小さいほど強いから、この場合のコロナ開始はかなり低電圧で起る。しかし、導体径の大きいほど絶縁体外側へ向っての電界の低下はゆるやかであるからストリーマの伸びは大きい。すなわち、導体大地間に電圧を印加すると導体から放射された電子および絶縁体中の自由電子は電界方向に加速される。特に導体径の細い場合には当然初期の電子放射量は大きい。

しかしながら、走行後ただちに電界は弱まり、絶縁体分子を衝突電離させるエネルギーをうることはできないので、電子なだれが伸びにくいことになる。実際、絶縁破壊が走る条件は初期電子の数ではなく、走行電子が電界からうるエネルギーと、絶縁体の分子構造に失うエネルギーの均衡の破壊である。このようにして、かつて考えられていたような導体径の大きいものは弱点の確率が多いという説明は誤りといえる。一方、 $d \geq d_0$ になると、導体表面のコロナは、かなりの高電圧になるまで発生しないが、一度、固体内の電離が起ると、ただちに絶縁破壊となる。したがって導体表面の電界が印加電圧に比べて弱いほど、破壊時の最大ストレスは大きくなると考えられる。しかし、第3図からわかるようにこの間の上昇はきわめてゆるやかである。

4.2 絶縁体厚と導体径とに関連する変化

次に、導体径を一定として絶縁体厚さを順次厚くしてゆくと、破壊時の最大ストレスは第4図のように変化する。この図の横軸は導体径と絶縁体外径の比をとってある。

この第4図はきわめて異常な形をしている。すなわち、導体径を一定として、絶縁体厚を順次厚くしてゆくと、それに伴って最大ストレスは増加し、ある臨界点を過ぎると下降する。この傾向は導体径の小さいものほど著しく、導体径の大きくなるに従って最大ストレスは一定値に近づく。また、導体径の増加するに従って、この臨界点（以後 $(d/D)_c$ と呼ぶ）は d/D の大きいほうへ移動し、この点の最大ストレスの絶対値は減少する。

W. I. Middleton氏⁽⁷⁾のデーターより抜萃して d/D に対する G_{max} の変化を求めると、前の第4図▲印で示す値となる。これは0.51 mmφ銅線で測定したものであり、絶縁体が異なるために絶対値を比較することはできないが、筆者の実験とほぼ類似している。

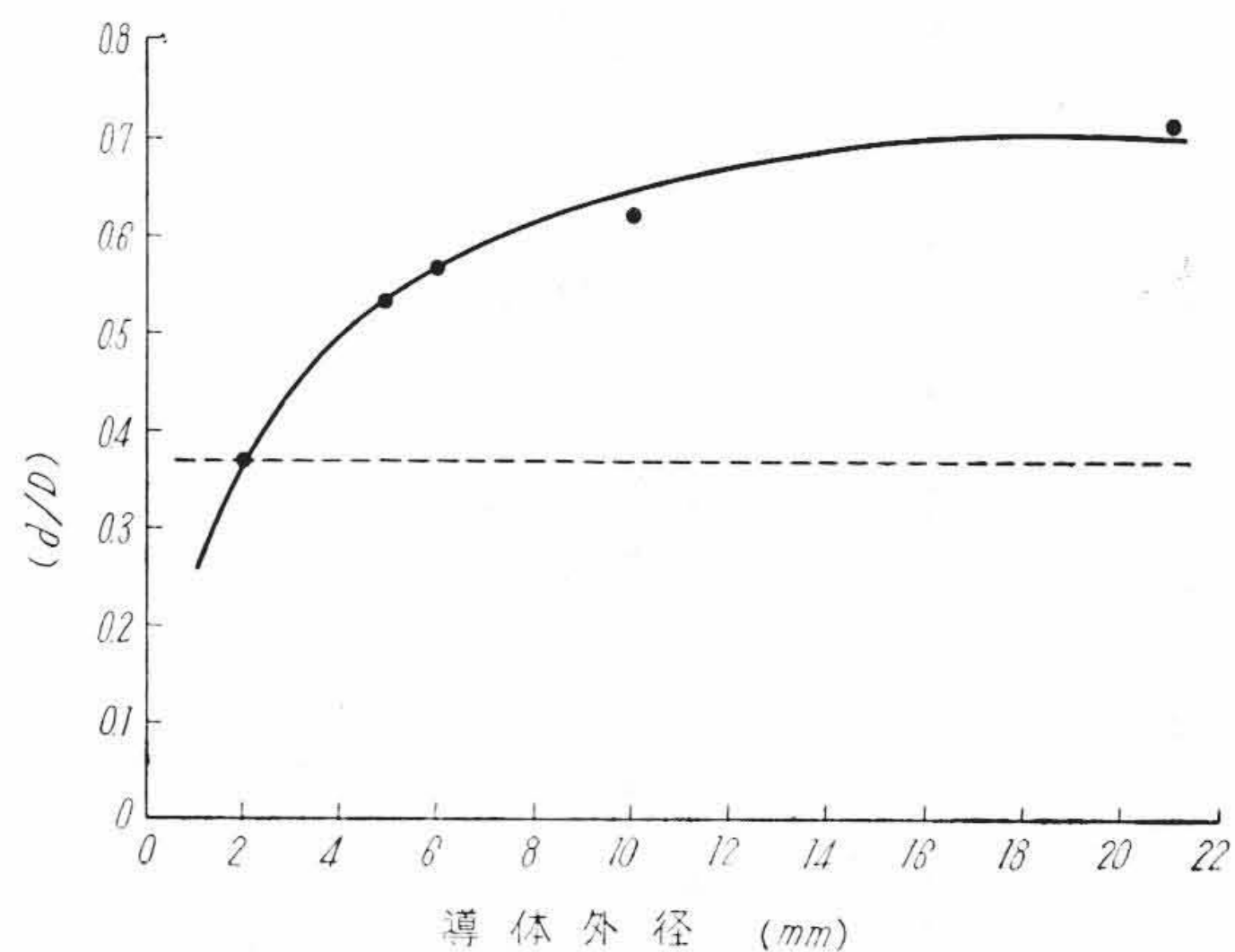
第4図において、各導体径の d/D に対する最大ストレスの最高値を結ぶとほぼ直線となり、この場合の d/D の値 $(d/D)_c$ の導体外径に対する変化を求めると第14図のようになる。図の点線は $d/D=1/e$ の直線である。なお d を対数で表わすと第15図のようにほぼ直線となり、 $(d/D)_c=0.265+0.375 \log d$ となる。

さきに説明したD. M. Simons氏やW. I. Middleton氏らの理論はすべてのケーブルを $d/D > 1/e$ の組と $d/D < 1/e$ の2組に分けて論じているが、筆者は

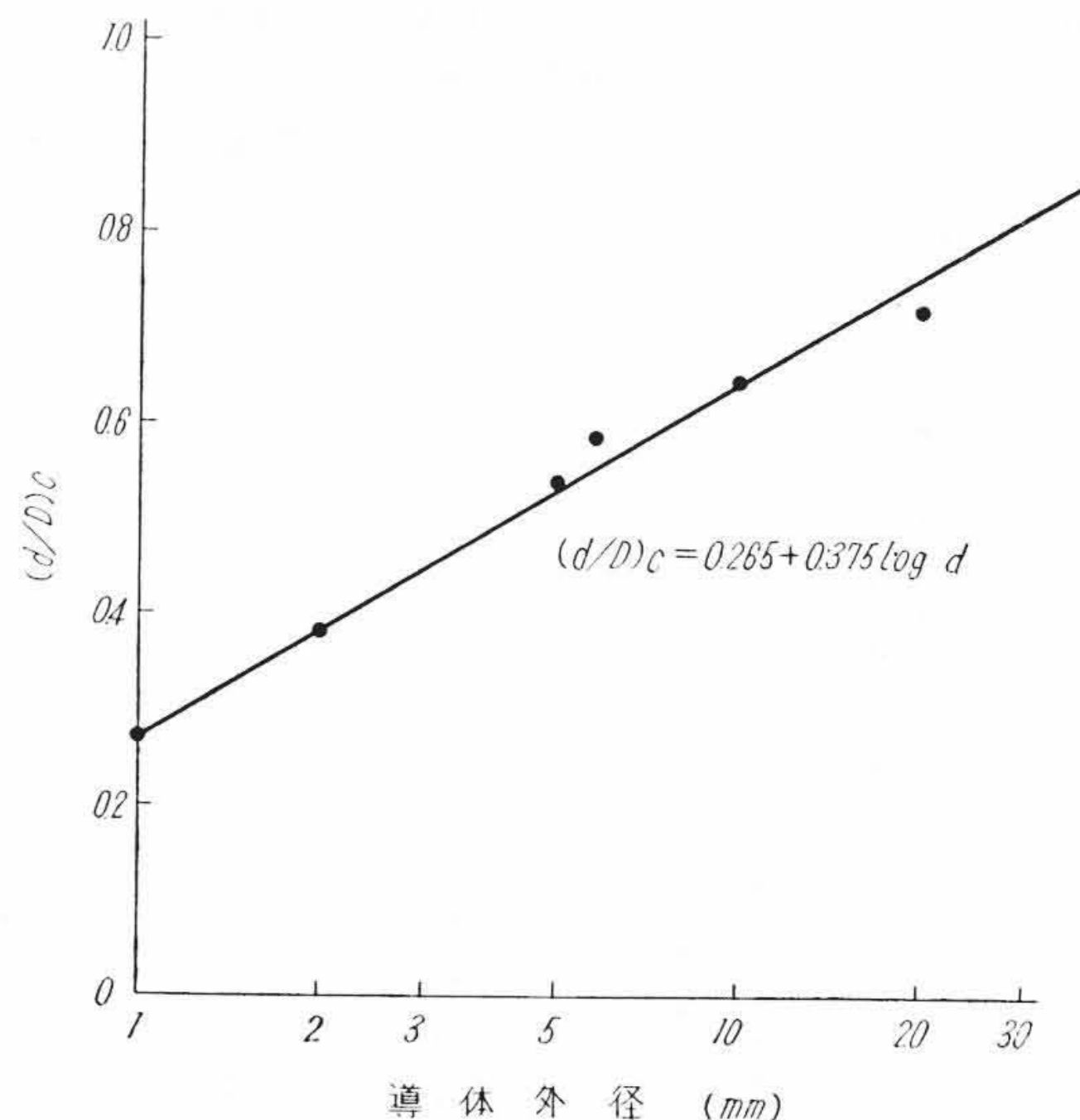
$$\left(\frac{d}{D}\right) \geq \left(\frac{d}{D}\right)_c = 0.265 + 0.375 \log d \dots \dots \dots (7)$$

で表わされる2組に分けて考察しなければならないと思う。しかもこのどちらの領域においても従来のストレス理論が成立しないのである。實際上、 $(d/D)_c$ 近辺は、いわゆる極点であるから導体径一定の場合に限り、この点近傍で最大ストレス理論が成立すると考えるのは設計上便利なことではある⁽³⁰⁾。

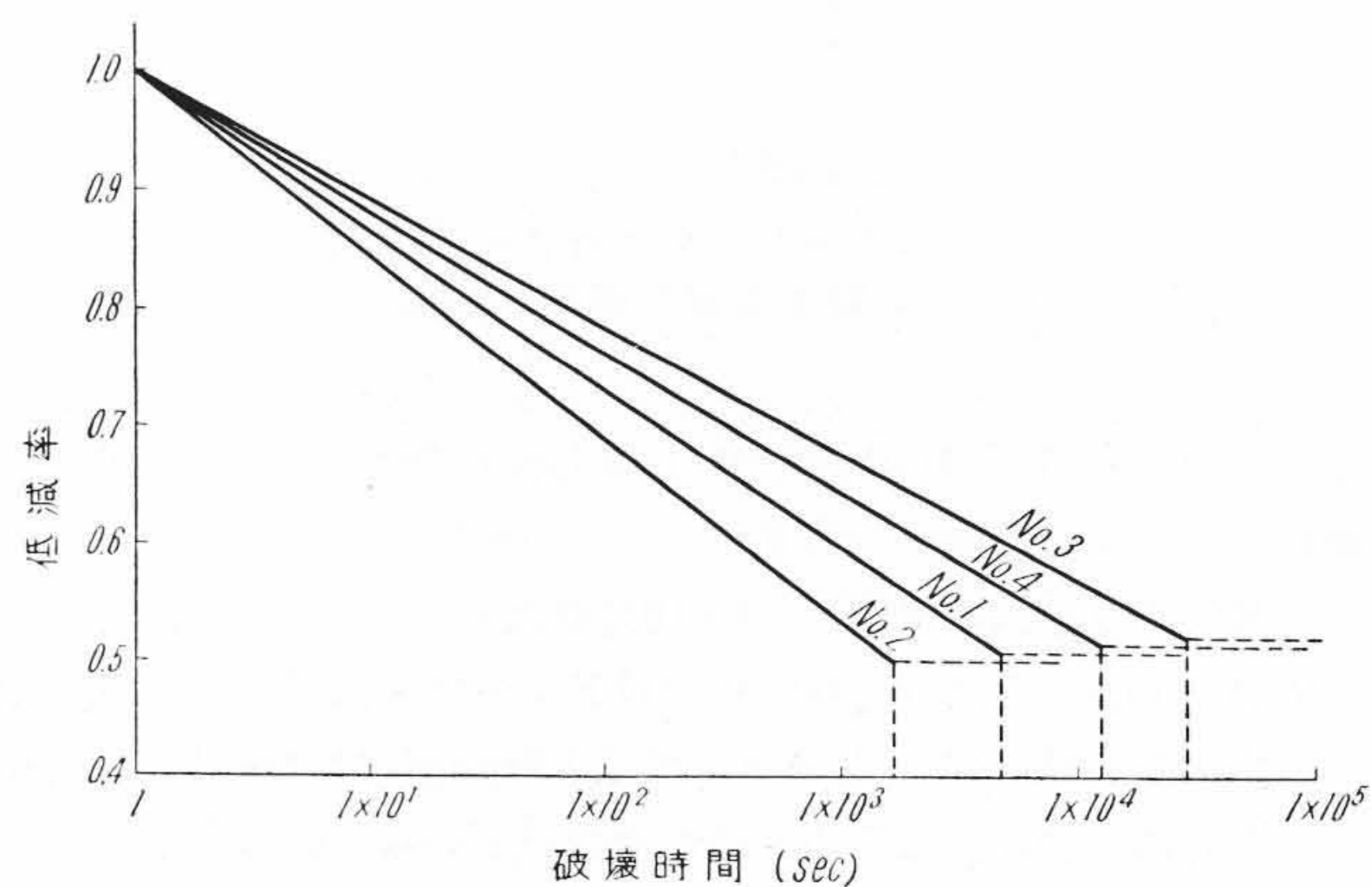
さて厳密に第4図の現象を説明することはきわめて困難であるが筆者は次のように考えた。すなわち $d/D < (d/D)_c$ の領域では先行放電による劣化が支配的な破壊であり、 $d/D > (d/D)_c$ の領域では純電氣的な現象が支配的な破壊である。いまこれを便宜上、コロナ破壊と非コロナ破壊と呼ぶ。もちろん実用される電力ケーブルの絶縁破壊はきわめて複雑な要素を多量にもっているため、必ずしもこの名称が示すとおりの現象とは考えられない。しかしながらコロ



第14図 導体外径と $(d/D)_c$ との関係



第15図 $(d/D)_c$ と $\log d$ の関係



第16図 ハイボケーブルの時間特性（交流長時間破壊）

ナ破壊領域では長時間課電による絶縁耐力の低下が観測されるが非コロナ破壊の領域ではこれが少ない。

これを実証するため、第4図における代表的なケーブル4種類を選択して交流の破壊電圧-時間特性を観測した。

試料は次に示す2 mmφおよび10 mmφ銅棒で行い、絶縁厚は d/D が $(d/D)_c$ 点の両領域になるような厚さを選んだ。

試料 No. 1 2 mmφ銅棒、絶縁厚 0.75 mm $d/D=0.57$

試料 No. 2 2 mmφ銅棒、絶縁厚 4.0 mm $d/D=0.20$

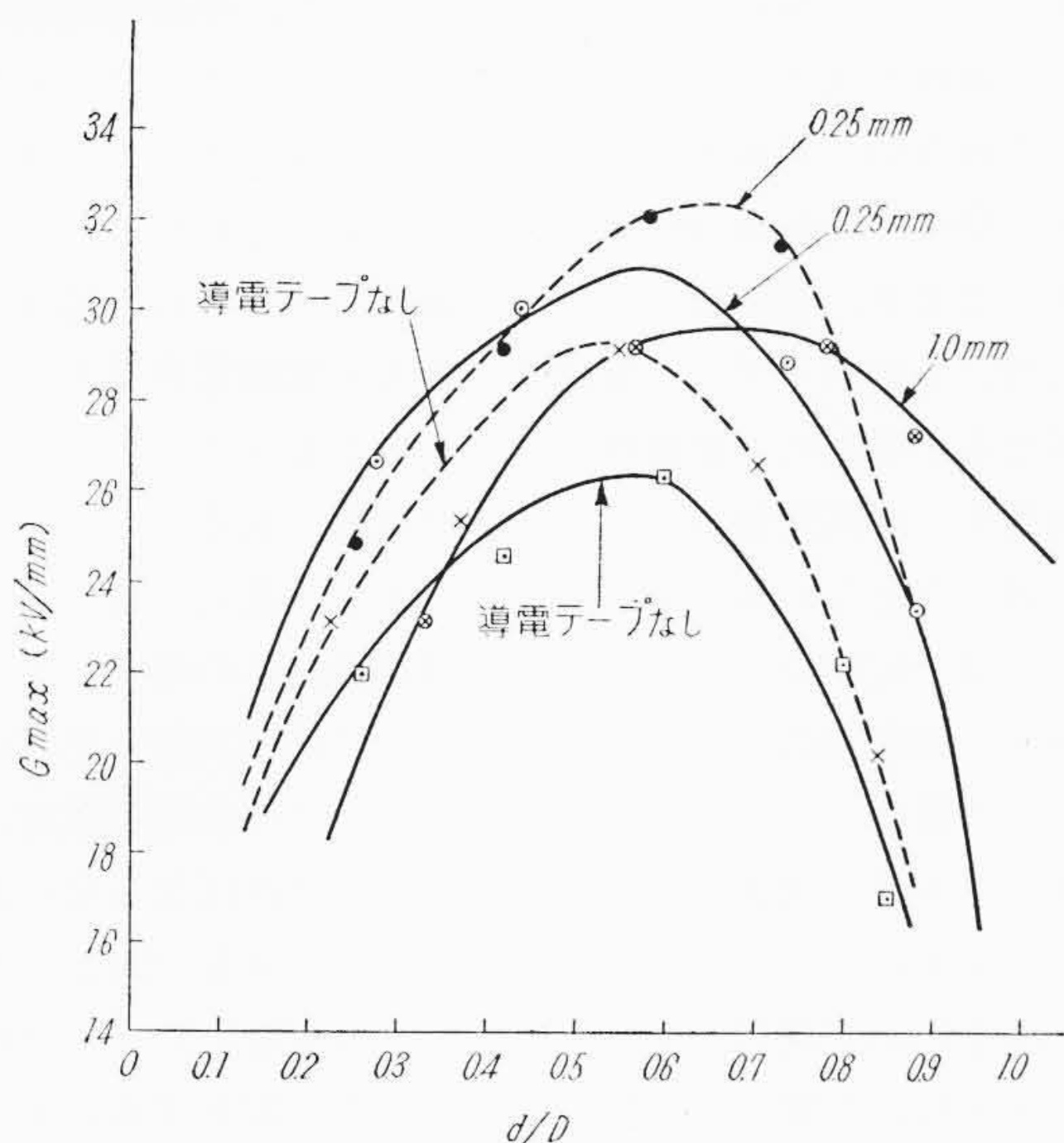
試料 No. 3 10 mmφ銅棒、絶縁厚 1.5 mm $d/D=0.77$

試料 No. 4 10 mmφ銅棒、絶縁厚 6.5 mm $d/D=0.435$

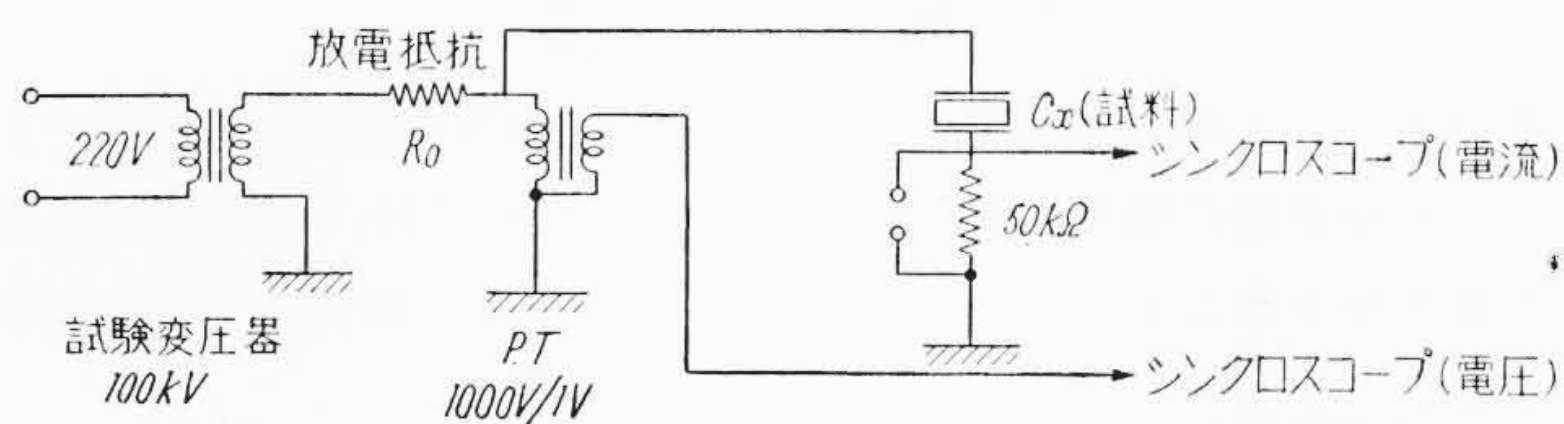
結果を第16図に示す。第16図は破壊電圧低減率で示したもの

である。この図から明らかなように時間特性の傾向はコロナ破壊の領域において著しく大きい。すなわち導体外径一定の場合 $2\text{ mm}\phi$ (試料 No. 1, No. 2) においては No. 2 が $d/D < (d/D)_c$ 領域であり、 $10\text{ mm}\phi$ (試料 No. 3, No. 4) では No. 4 である。このようにして電力ケーブルの絶縁破壊に対しては従来、かなり広く用いられてきたストレス理論は完全に崩壊しなければならなくなった。

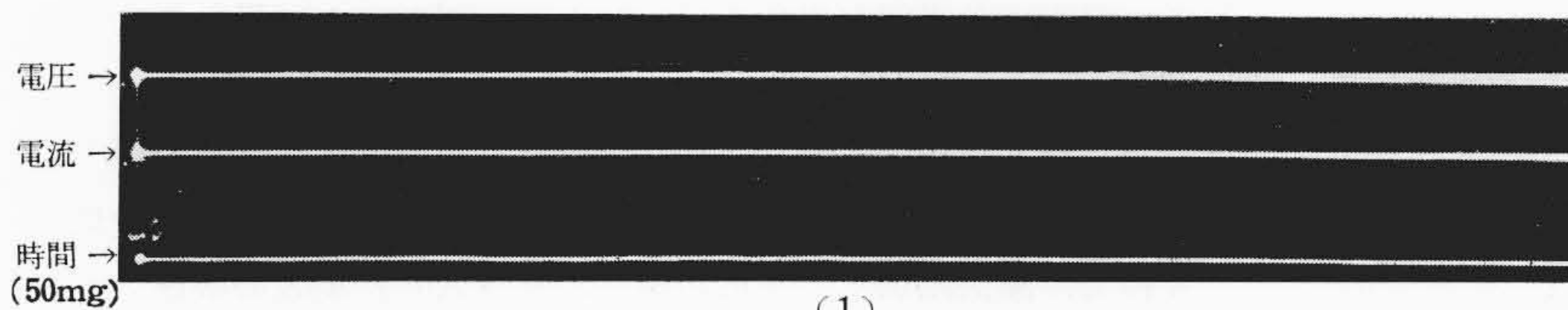
一方、この $(d/D)_c$ の本質を知ること、導体しゃへいの意義を知る目的⁽³¹⁾で 5 mm の単心円導体および $5.8\text{ mm}\phi$ のより線導体に



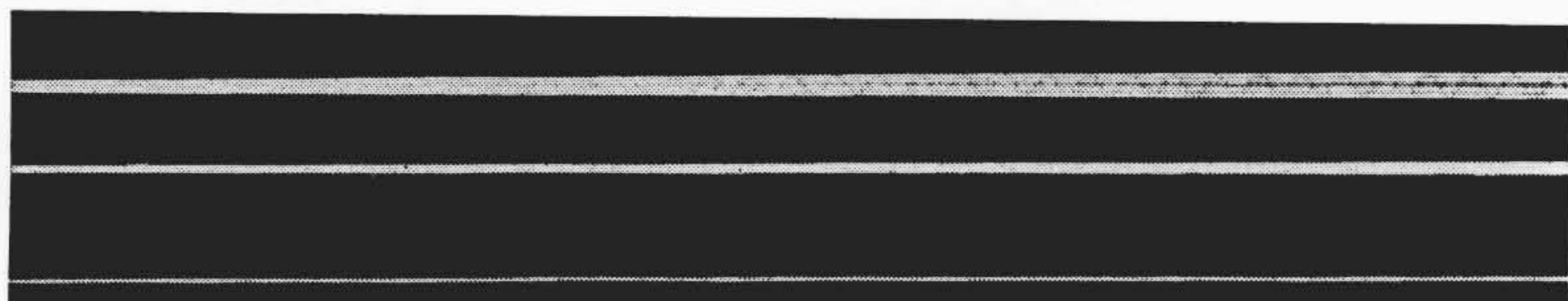
第17図 導体しゃへいによる $G_{\max}$ の変化



第18図 試験回路 (シートの電流-電圧特性)



(1)



(2)



(3)



(4)

第19図 高速度記録写真の一例

それぞれ 0.25 mm 、 1.0 mm の厚さに導体しゃへいを施して上と同様な実験を行った。この結果は第17図のようになった。この図において $5\text{ mm}\phi$ の結果をみると、半導電層による導体しゃへいはより線効果を除くほかにも何か電力ケーブルの破壊強度を増加させる要素があることがわかる。

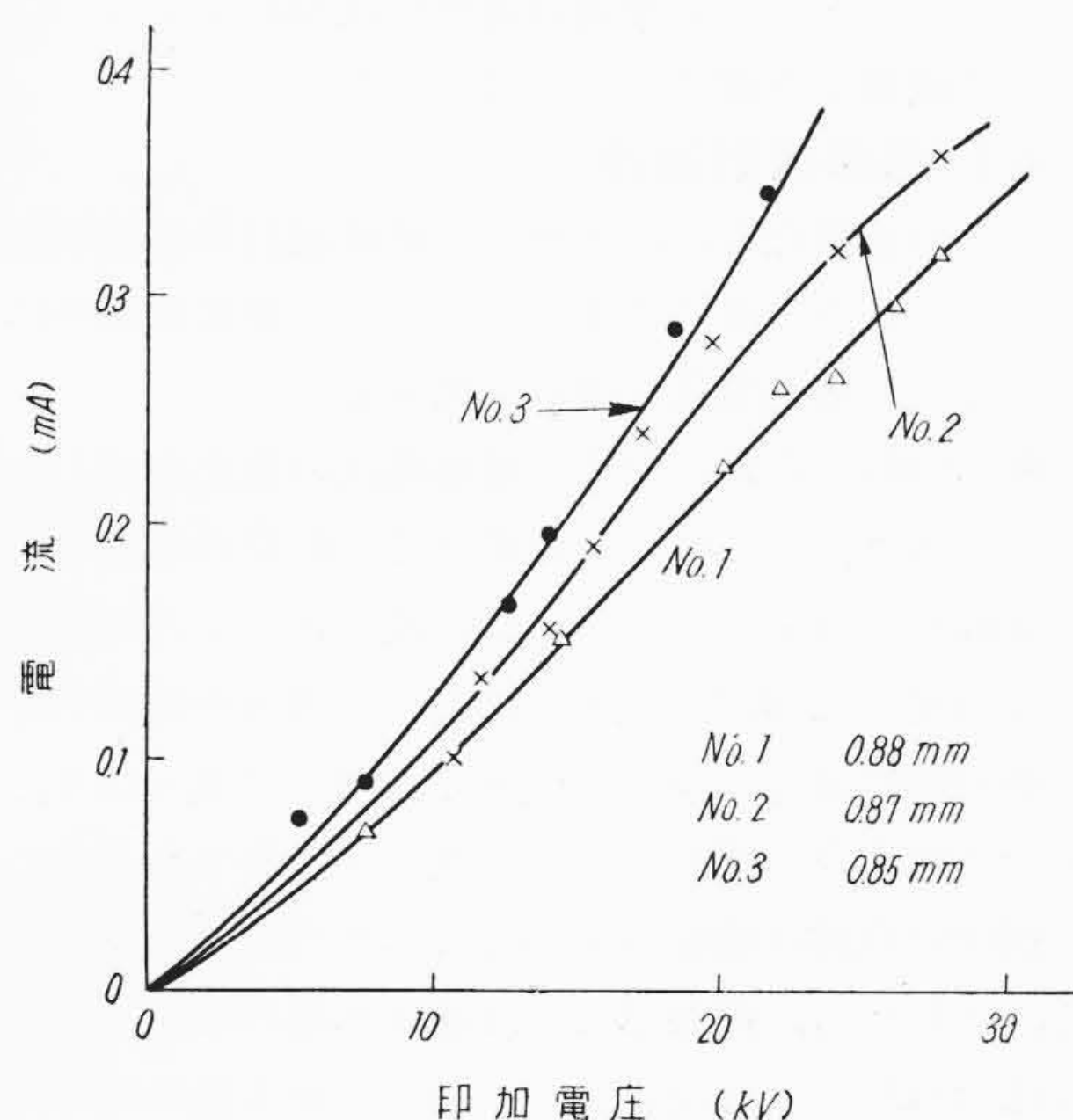
事実上、最大ストレスが銅導体上から、導体しゃへい上に移っているゆえ、見かけ上導体径を大きくしているから第4図より推測すれば最大ストレスの絶対値は低くなる訳であるが、実際にはむしろ高くなっている。すなわち $(d/D)_c$ は d が大きくなると等価的に大きい点に移動しているにもかかわらず、この点の $G_{\max}$ は上昇している。このことは、導体しゃへいが電力ケーブルの絶縁設計に対してきわめて有利であることを示すものである。

すなわち見かけ上導体径が大きくなったことによって、常規課電時において、絶縁体に加わる最大ストレスが減少する、一方、絶縁破壊電界強度は増加しているからである。また $(d/D)_c$ を大きくする傾向は非コロナ破壊領域を縮小させることを意味しているから、もし実際の絶縁破壊がコロナ領域と非コロナ領域における物理機構の組合わせによるものであると仮定すれば導体しゃへいの衝撃電圧に対する効果は少ないことが推測される⁽³²⁾⁽³³⁾。

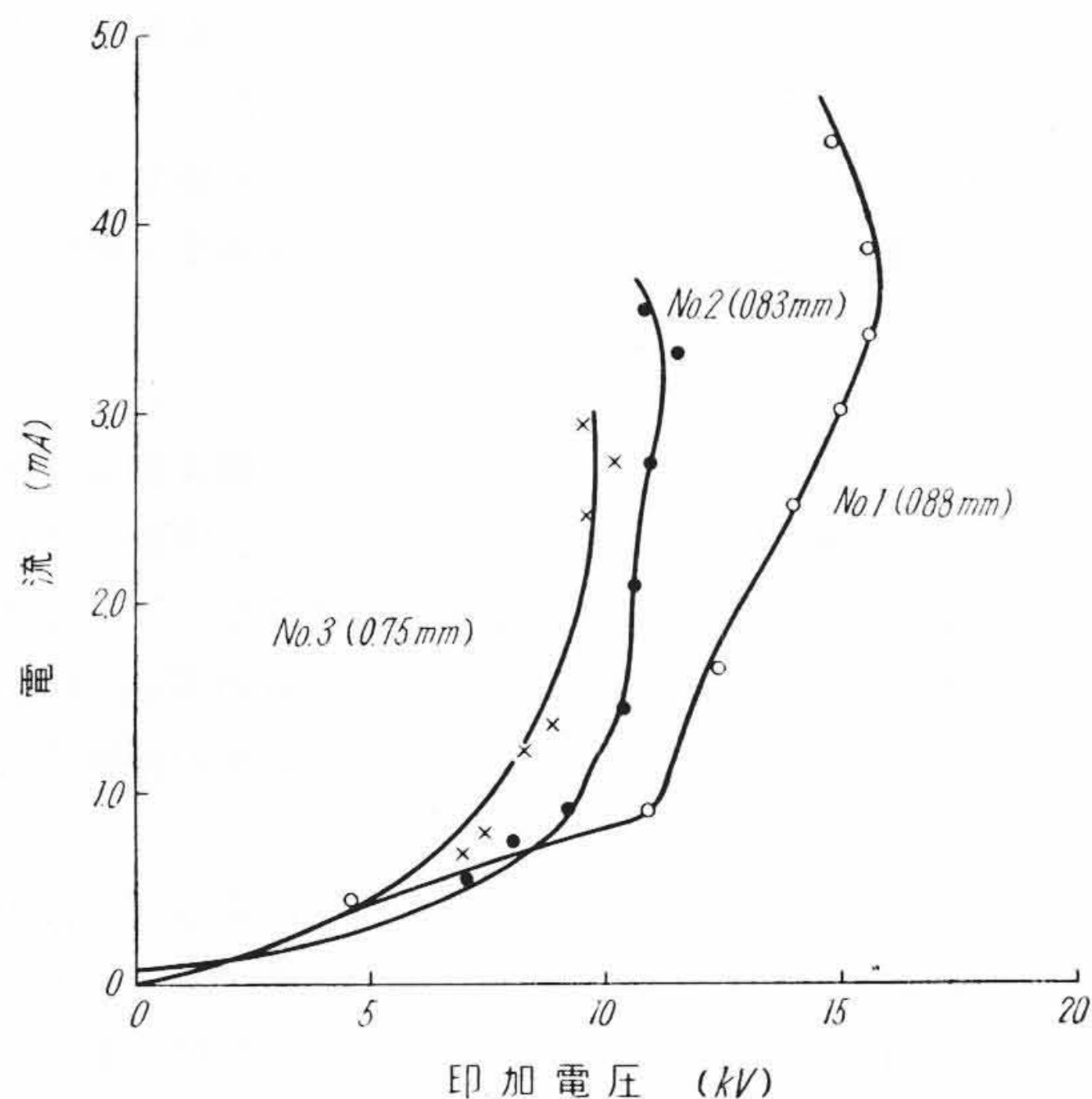
次にストレイン理論その他の熱理論の背景となっている絶縁破壊時の電流-電圧特性を求めてみた。この特性を求める方法は種々考えられるが、筆者らは高性能の長時間高速度記録写真機を用いて試料に加わる電圧とそれを流れる電流の時間的変化を求めた。

実験は第18図で示す回路で厚さ約 1 mm のブチルゴムシートを $20\text{ mm}\phi$ の平板電極間にそう入して行った。交流短時間 (500 V/s) の破壊時における電圧を P. T. の二次側より、また試料の接地側に $50\text{ k}\Omega$ の抵抗をそう入し、その分圧電流をブラウン管オシログラフに導き、かかれた波形の変化をきわめて高速度に回転するフィルム上に撮影した。第19図に波形の一例を示す (秒速 3.8 cm)。これらの図から各時間の電圧-電流特性を求めると第20、21図のようになる。第20図は普通シートの場合であり、第21図は浸水劣化させたものである。

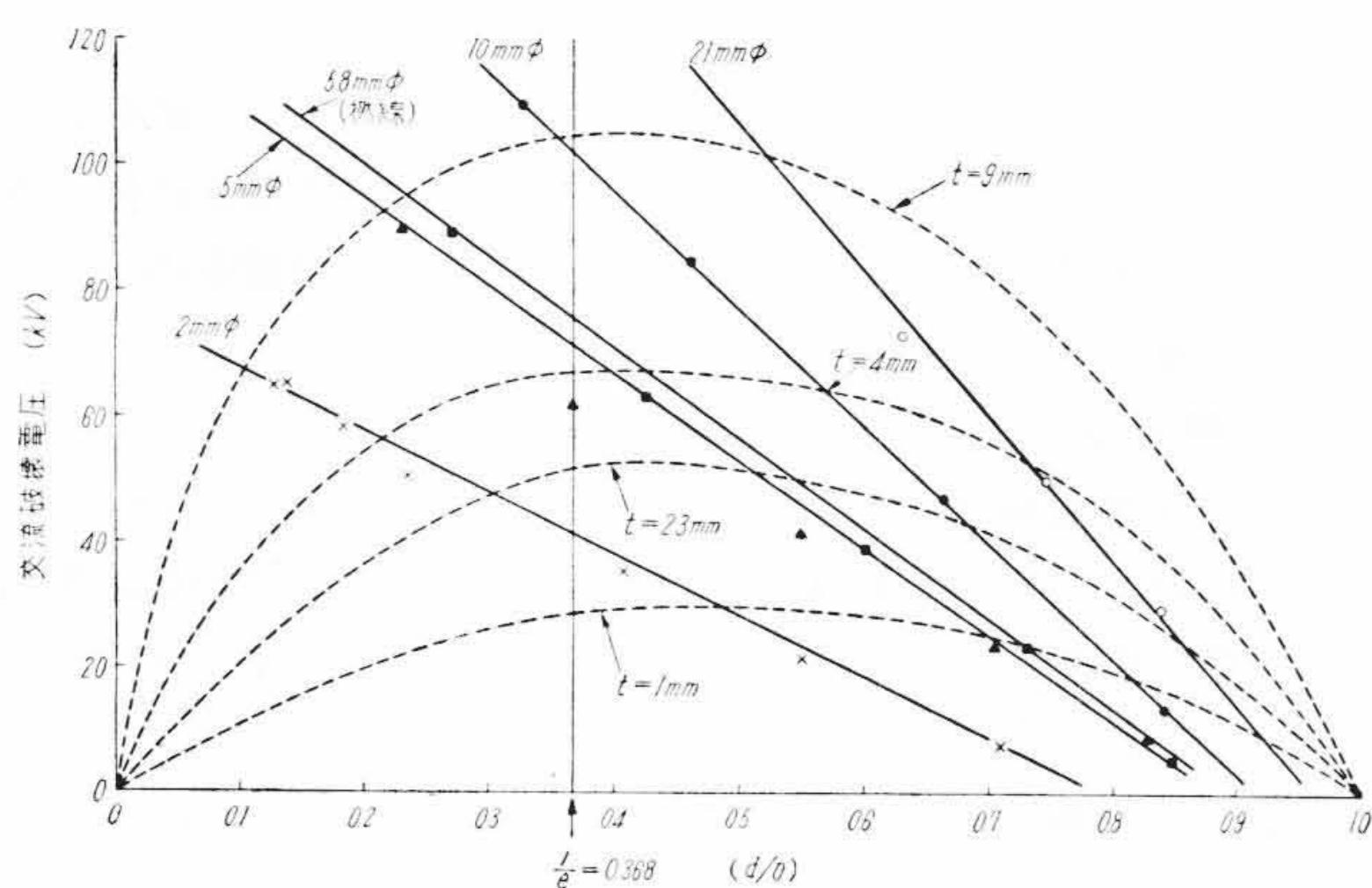
この測定結果から、かつて K. W. Wagner 氏や C. P. Steinmetz, J. L. R. Hayden 氏らの求めた電流電圧特性は絶縁体が劣化している時にのみ観察されることがわかった。したがって第20図から求めた電流 i は電圧 e と比例関係にあり P. L. Hoover 氏の(8)式



第20図 ブチルゴムシートの電流-電圧特性 (普通シート)



第 21 図 ブチルゴムシートの電流-電圧特性 (浸水劣化シート)



第 22 図 破壊電圧- d/D の関係

$$e = \frac{175 i}{1 + 0.1 i^2} \dots \dots \dots (8)$$

のような関係は見出されなかった。すなわち、健全な絶縁体では破壊寸前に至るまで、導電電流はイオン電荷の移動によるものでオームの法則で支配され、最高電界において急激な電子なだれが起り突如として破壊する。一方、絶縁が劣化している場合には、オームの法則から、はずれた非線形電流が流れて、最後に破壊する。いずれにしてもストレイ理論の適用には制限があり、電流-電圧特性を延長して破壊を予測することはできない。

4.3 絶縁設計基準

以上の実験ならびに考察から絶縁設計の基準が得られる。

いま、観点を改めて電力ケーブルの絶縁破壊時にストレスを問題としないで破壊電圧を図示してみる。

第 22 図は d/D に対する破壊電圧の変化を示したものである。実線は導体外径を一定とした場合で、 d/D の増加に従って、破壊電圧は直線的に減少している。また最大ストレスの変化とは逆に絶縁厚一定の場合に $d/D < 1/e$ の範囲では導体外径の大きいほど破壊電圧の絶対値は高く、 $d/D > 1/e$ の範囲では低くなり、導体外径一定の場合には d/D の増加に対する減少が急激である。

図中の点線は絶縁厚を一定として得られた点を結んだものである。これから、絶縁厚または導体外径のどちらかが、与えられた時には $d/D = 1/e$ となるような設計が最も絶縁効率のよいことが立証される。実際このことは印加電圧に対して、導体上のストレスが最小となる条件であるから、ストレス理論の成立の有無を問わず最適

設計条件といえることができる。これはまた、電力ケーブルの絶縁破壊は導体直上から出発することを立証している。したがって、もし絶縁体厚が与えられたとすれば、 $d/D < 1/e$ の範囲にあれば、導体外径はできるだけ大きく、 $d/D > 1/e$ の範囲であれば、できるだけ小さくすることが望ましい。また、導体外径が与えられた場合には、絶縁体厚は厚いほど破壊電圧は高いが、導体径が極端に小さいか、または大きいところではそれほどの上昇は期待できない。

このようにして、電力ケーブルの絶縁設計基準は $d/D = 1/e$ 以外には何もないことが明らかとなった。すなわち、平板電極間にはさんで求めた破壊強度とケーブルの破壊時のストレスとはなんらの関係も見出されない。導体外径の細い場合には過大ストレス部分を持つ絶縁体 (Overstressed insulation) が可能と思われるし、導体外径が大きくなると、極端にストレスは減少する。さらに導体径が与えられた時、そのケーブルの破壊電圧最大と破壊電界最大とでは絶縁厚が異なる。ゆえに、破壊時のストレスをもって、あらゆるケーブルの性能を一律に比較検討することは困難である。

さきに述べたようにある導体外径をこすと、最大、最小、平均ストレスがほぼ一定値に近づくが、この値は絶縁体の種類、ケーブルの製造条件、課電方法で異なる。したがって絶縁設計を正確に行うにはきわめて数多くの実験を行い、そのケーブルの絶縁強度、特に多種の条件における破壊電圧特性を確認しなければならない訳である。しかしながら、実用上破壊時の平均ストレスを一定として設計することはきわめて便利であり、かつ誤りは少ない。また比較的太い導体を与えられた場合に、最大ストレスを一定とするのも一つの目安となる。

5. 結 言

電力ケーブルの絶縁設計の基礎となるものは絶縁破壊強度である。これを正確に知り、新しい設計を行うためには、破壊機構に基いた基準をうる必要があるが、この強度の表現自体にも問題がある。

本論文では従来未解決のままであった電力ケーブルの絶縁破壊機構を考察するため数多くの実験を行った。そして、いままでに知られていなかった異常な現象も現われたが、得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 電力ケーブルの交流絶縁破壊時の最大ストレスは一定ではない。導体外径が大きくなるに従って急激に減少し、ある最低値を経て、漸次増加し、平板電極間にそう入した場合の破壊ストレスに漸近する。この原因は正確にはわからないが、コロナ開始とその伸展に関係すると思われる。
- (2) ともかく、最大ストレス理論は成立せず、実際、破壊時には同心円筒間の電界として、簡単な対数表示することは不可能である。したがって、導体外径の異なるケーブルに対して破壊時のストレスでも絶縁強度を比較することは無意味である。
- (3) 電力ケーブルの破壊時の最大ストレスとケーブル寸法 d/D との関係は上向凸の二次拋物線状となる。この最高値は導体外径の大きいほど小さく、かつ、 d/D の大きいほうへ移動する。この現象はきわめて特異なものであり、最大、最小、平均ストレス、一定という理論は成立しないことを示している。最高値の両側領域の寸法をもつケーブルはそれぞれ違った破壊機構をもっていると考えられる。筆者はこれをコロナ領域と非コロナ領域に分けて考察した。
- (4) 電力ケーブルの設計の基準は d/D に対する破壊電圧から与えられる。一般に絶縁体厚が一定ならば導体外径の大きいほど、導体外径が一定ならば絶縁体の厚いほど、破壊電圧は高い。しかしながら $d/D = 1/e$ となるように設計したケーブルが最も絶縁効

率がよい。

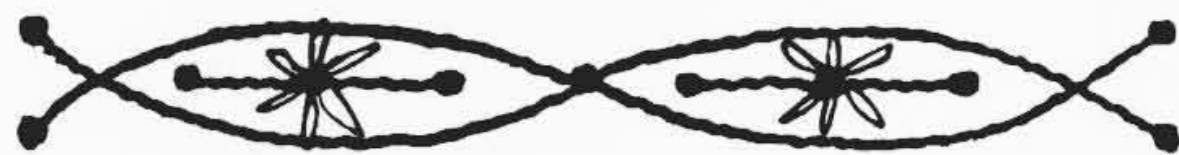
このことは以前より知られていたが、破壊時の最大ストレスを最小にしたほうがよいということ、したがって破壊電圧は導体直上から出発することを示している。

さらに以上の現象を考察するため実験を繰返し、電力ケーブルの絶縁破壊機構を究明したいと考える。

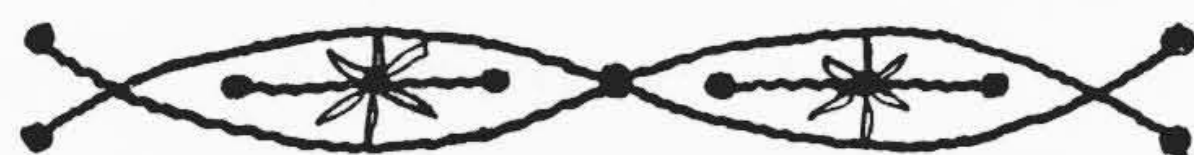
擱筆に当り、終始ご指導をいただいた武蔵工業大学鳥山教授、久本部長ならびに実験の一部を担当された第1研究課佐藤氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) A. Russel: JIEE 40, 6 (1907)
- (2) H. S. Osborne: Trans. AIEE 29, 1593 (1910)
- (3) J. B. Whitehead: Trans. AIEE 29, 1582 (1910)
- (4) F. Fernie: Beama 244 (1920)
- (5) D. M. Simons: Trans. AIEE 41, 557 (1922)
- (6) 依田, 相田: 電四連大予稿 No. 610 (昭 34)
- (7) W. I. Middleton, C. L. Dawes, E. W. Davis: Trans. AIEE 41, 570 (1922)
- (8) N. L. Morgan: Trans. AIEE 41, 618 (1922)
- (9) J. L. R. Hayden, C. P. Steinmetz: Elec. World 80, 865 (1922)
- (10) C. P. Steinmetz: Trans. AIEE 41, 619 (1922)
- (11) K. W. Wagner: Trans. AIEE 41, 288 (1922)
- (12) K. W. Wagner: Arch. f. Elek. 39, 215 (1948)
- (13) V. Fack: Arch. f. Elek. 19, 71 (1927)
- (14) S. Whitehead: Dielectric Breakdown of Solid 115 (Oxford 1951 Kook)
- (15) L. G. Brazier: JIEE 77, 104 (1935)
- (16) D. M. Robinson: JIEE 77, 90 (1935)
- (17) P. L. Hoover: Trans. AIEE 45, 983 (1926)
- (18) 電気学会編: 放電ハンドブック 103 (1958. オーム社)
- (19) L. B. Loeb: Fundamental Prousses of Electrical Discharge in Gases (John Willey Sons 1939)
- (20) J. M. Meek, J. D. Cragg: Electrical Breakdown of Gases (Oxford 1953 Book)
- (21) A. Von. Hippel: Dielectric Materials and Applications (Book) MIT Tech. Press and John Willey and Sons (1954)
- (22) S. Whitehead: Breakdown of Solid (Oxford 1951)
- (23) 川和田, 吉川, 山県: 電三連大予稿 No. 157 (昭 31)
- (24) 橋本: 電学誌 76, 38 (昭 34-1)
- (25) 清水: 電学誌 54, 689 (昭 9)
- (26) H. C. Hall, D. J. Skipper: JIEE 103 A, 571 (1956)
- (27) P. A. Tellier: Trans. AIEE 76, 57 (1957)
- (28) G. Prearoggia, G. Palandri: Trans. AIEE 74 III, 1343 (1955)
- (29) L. Domenach: CIGRE No. 210 (1946), No. 217 (1954)
- (30) 依田, 増岡: 日立評論 別冊 No. 15, 49 (昭 31)
- (31) 依田: 日立評論 40, 1493 (昭 33-12)
- (32) 依田: 日立評論 41, 1516 (昭 34-11)
- (33) C. T. W. Sutton, A. M. Morgan: CIGRE No. 204 (1956)



特 許 の 紹 介



特許第254702号

安河内春雄

ジ ャ ッ パ ド レ ッ ジ ャ の 掘 削 線 指 示 装 置

この発明の指示装置は、ジャッパハンドル機構を運転室内に設けた表示機構に機械的または電氣的連動機構を介して連結し、ジャッパハンドルと垂線とのなす角度の変化はそのまま表示機構に表わし、ジャッパハンドルのサドルからジャッパ爪までの距離の変化は縮尺して表示機構に表わすようにしたものである。

表示機構はたとえばつぎの各部により構成する。

- (1) 連動機構Aを介してサドルと同角度揺動される模型サドル。
- (2) 連動機構Bを介してジャッパハンドルの推力、引込作動に連動して縮尺された運動を行う模型ジャッパハンドル。
- (3) 模型ジャッパ爪。
- (4) 指示板。この上を模型ジャッパハンドルが運動する。

この発明によれば、掘削時におけるジャッパ爪の軌跡は、指示板上の模型ジャッパ爪の動きとして表わされる。よって、運転手はその動きを見ながら操作すれば、掘削作動は円滑、かつ確実となり作業能率をあげることができる。

(富田)

