

# 高電圧ブチルゴム絶縁ケーブルの絶縁破壊に関する二、三の考察

## Studies on the Breakdown Phenomena of Butyl-Rubber Insulated High Voltage Power Cables

ト 部 義 清\* 依 田 文 吉\* 今 井 利 宣\*  
 Yoshikiyo Urabe Bunkichi Yoda Toshinobu Imai

### 内 容 梗 概

ブチルゴム電力ケーブルの絶縁破壊機構を解明し、設計基準を得る一方、製造ならびに布設に対する指針を与える目的で人為的に楔形電極をケーブル絶縁体に挿入した場合および加圧変形時の絶縁破壊現象を調べ、破壊電圧と有効絶縁厚の関係につき検討を加えた。

楔形電極を挿入した場合の破壊値は有効絶縁厚と同じ絶縁体厚の正常ケーブルよりも低く、有効絶縁厚に対する破壊電圧の関係は上に凹の曲線となる。

これに反して、加圧変形時の破壊特性はきわめて良好で、加圧時の最小有効絶縁厚を絶縁体厚とした正常ケーブルの破壊値にほぼ等しい。したがって圧縮過度はあまりケーブルの絶縁性に悪影響を与えないことがわかった。有効絶縁厚に対する破壊電圧の関係は上に凸の曲線となり、破壊時における加圧電極縁端の最大電位傾度はほぼ一定となる。これは破壊電圧の低下を有効絶縁厚の減少によるものと考えたと説明できる。

### 〔I〕 緒 言

従来、高電圧電力ケーブルには主として紙絶縁鉛被ケーブルが使用されてきたが、合成ゴム的一种であるブチルゴムケーブルは、化学的に安定で、耐熱劣化、耐オゾン、耐老化、耐水性のすぐれた特長<sup>(1)(2)</sup>の上に、実際布設使用に際しては、すぐれた可撓性と軽量なことおよび端末処理の簡単なことなどの長所があり、普通高圧はもちろんのこと特別高圧の領域にまで紙ケーブルに代つて実用化され着々とその実績をあげている<sup>(3)(4)(5)</sup>。

これらブチルゴムケーブルの設計基準を決める上において、絶縁破壊機構の解明は重要な課題の一つである。特に破壊強度とケーブル構造間との関係を知ることは電力ケーブルの合理的、経済的な設計にとつて基本的な事からとなる。

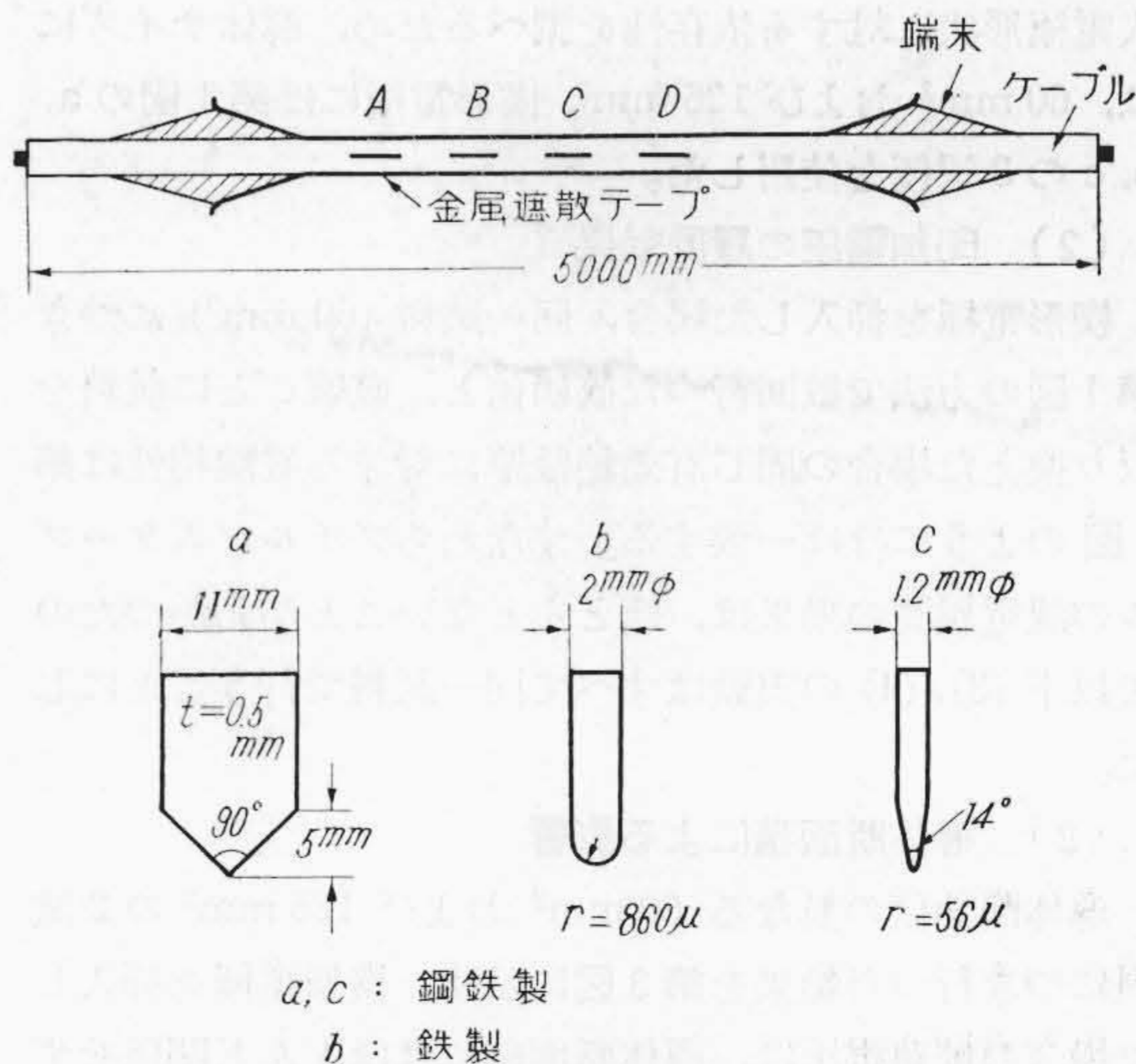
過去におけるケーブルの絶縁破壊に対する理論は種々あるが、筆者などは多くの実験結果よりケーブル絶縁体は固有の臨界破壊強度をもち、それを越したとき破壊が進行するとし最大電位傾度説が適用できることを認めた。すなわちケーブル絶縁体の破壊時における導体表面の最大電位傾度はほぼ一定である。この点に着目してケーブルに楔形電極を挿入した場合および加圧変形時の絶縁破壊がこの説に従うかどうか、すなわち最大電位傾度が破壊強度に達したとき、果して正常ケーブル同様破壊に至るものかどうかを吟味し、破壊電圧対有効絶縁厚の関係を比較検討した。これらの結果は単に絶縁設計の基準を与えるのみではなく、製造および布設時における注意事項を明らかにし、さらにブチルゴムケーブルの保守

ならびに適用性に対して有力な指針を与えるものである。

### 〔II〕 楔形電極による絶縁破壊

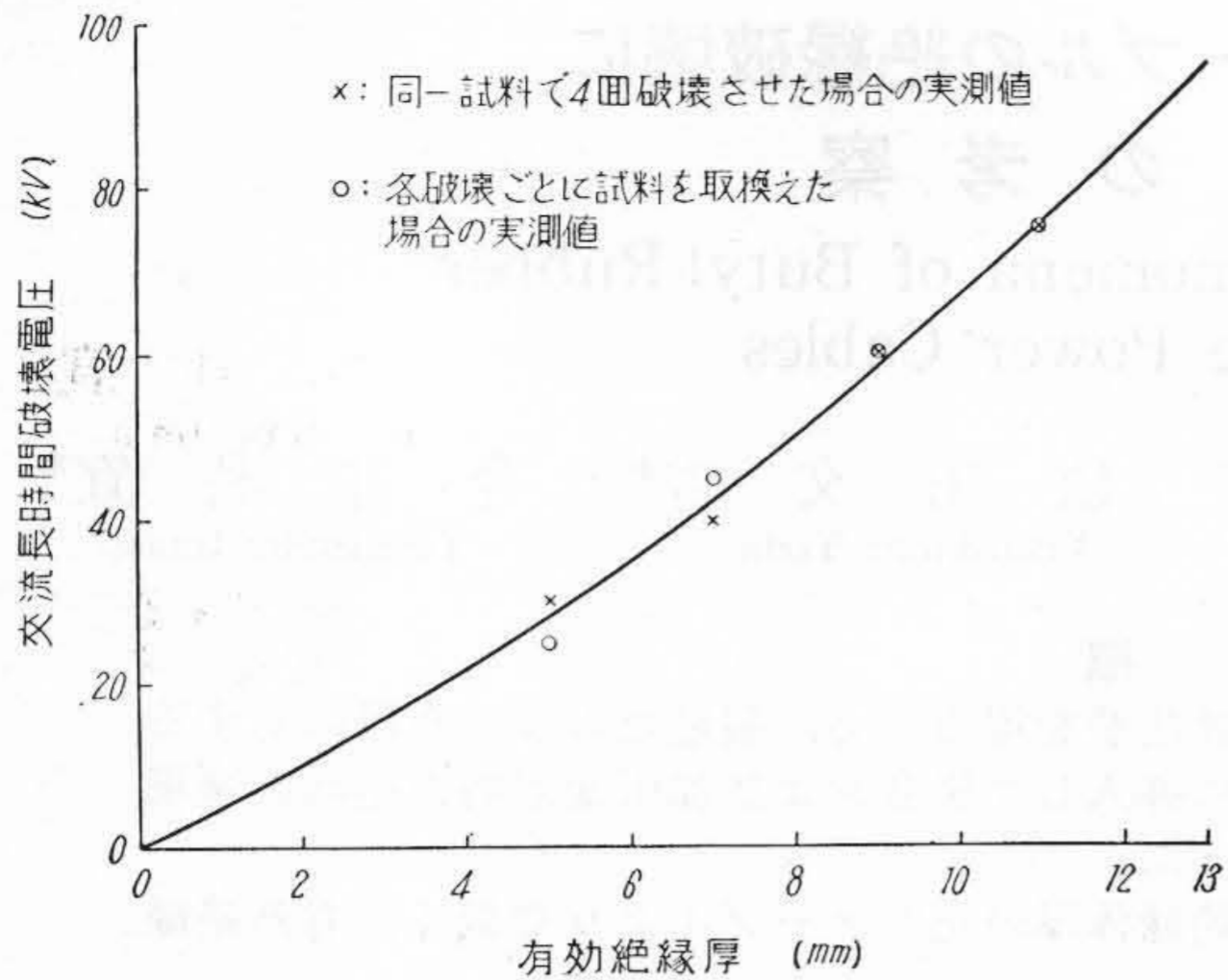
#### (1) 実験方法

実験に使用したケーブルは、20 kV ブチルゴムケーブル (60 mm<sup>2</sup> および 125 mm<sup>2</sup>, 絶縁厚いずれも 13 mm) である。第1図に示すように絶縁体上より楔形電極をA点に挿入して長時間破壊試験を行い、A点が破壊すれば破壊部を補強し、挿入位置をB点に移して前と同様に破壊させた。このようにして順次挿入位置および深さを変えた場合の有効絶縁厚に対する破壊電圧を測定した。課電上昇速度は従来の慣習に従つて 5 kV/h とし、開始電

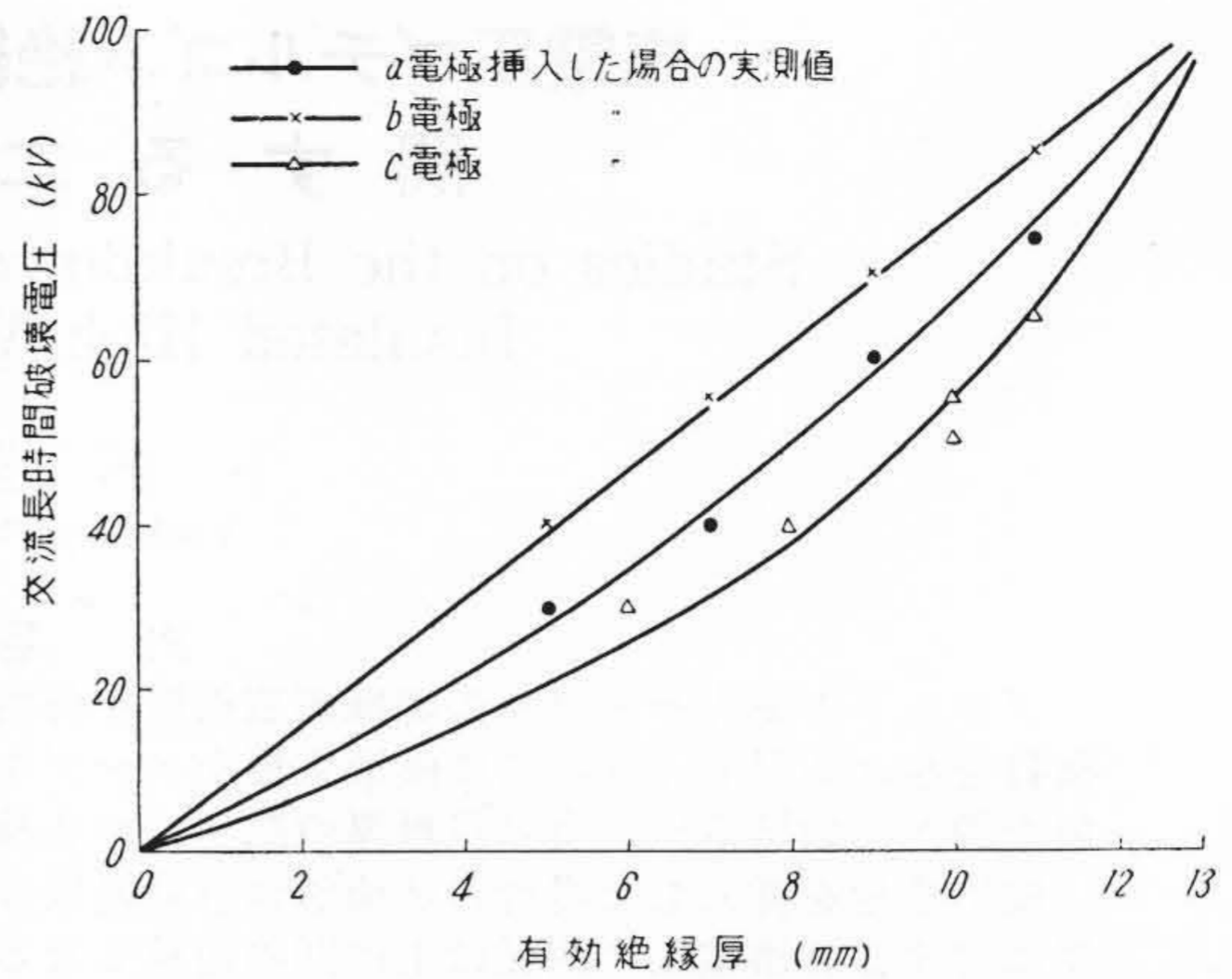


第1図 各種楔形電極および挿入位置

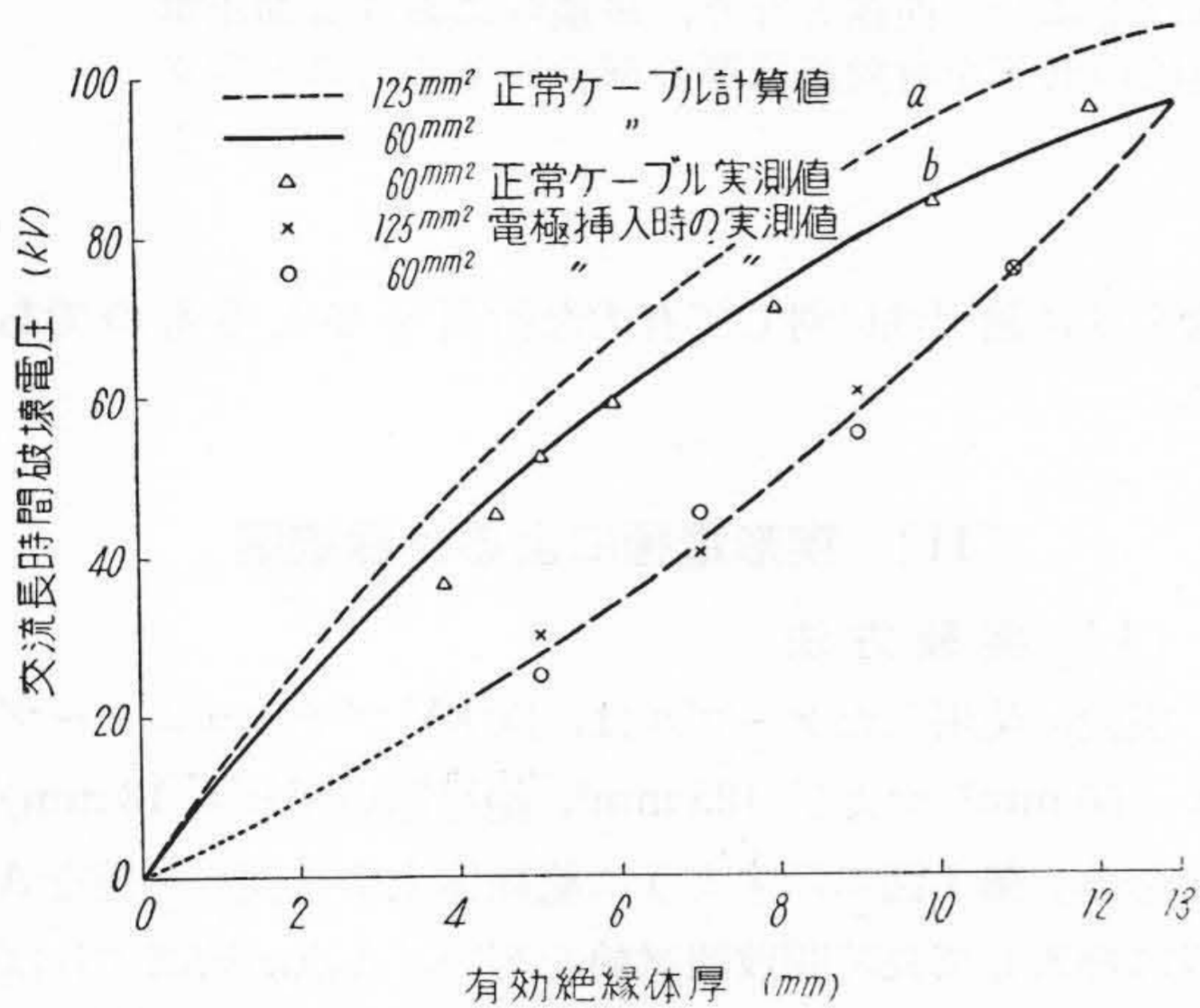
\* 日立電線株式会社電線工場



第 2 図 課電履歴による有効絶縁厚に対する破壊電圧の比較



第 4 図 各種楔形電極形状差による有効絶縁厚に対する破壊電圧の比較



第 3 図 ケーブル導体径の差による有効絶縁厚に対する破壊電圧の比較

圧は有効絶縁厚の減少に伴い低電圧とした。

楔形電極を挿入した場合、破壊電圧の導体径および挿入電極形状に対する依存性を調べるため、導体サイズには、60 mm<sup>2</sup> および 125 mm<sup>2</sup>、楔形電極には第 1 図の a, b, c の 3 電極を使用した。

(2) 印加電圧の履歴効果

楔形電極を挿入した場合、同一試料 (60 mm<sup>2</sup>) につき第 1 図の方法で数回行った破壊値と、破壊ごとに試料を取り換えた場合の同じ有効絶縁厚に対する破壊特性は第 2 図のようにほぼ一致する。すなわちブチルゴムケーブルの課電履歴の効果は、ほとんどないことがわかったので以下 (3), (4) の実験はすべて同一試料で行うことにした。

(3) 導体断面積による影響

導体断面積の異なる 60 mm<sup>2</sup> および 125 mm<sup>2</sup> の 2 試料につき行った結果を第 3 図に示す。楔形電極を挿入した場合の破壊電圧は、導体断面積にはほとんど関係せず有効絶縁厚のみで決まる。しかも有効絶縁厚に対する破

壊電圧の関係は上に凹の曲線となり、同一絶縁厚をもつ正常ケーブルよりはるかに低い破壊値を示す。

(4) 楔形電極の形状差による影響

楔形電極には第 1 図に示した a, b, c の 3 電極、試料ケーブルには 60 mm<sup>2</sup> を使用して同様な方法で実験を行った結果を第 4 図に示す<sup>(6)</sup>。3 電極とも同じ傾向を示すが明らかに差があり、尖端形状の急峻なものほどその低下が急激である。

(5) 有効絶縁厚と破壊電圧

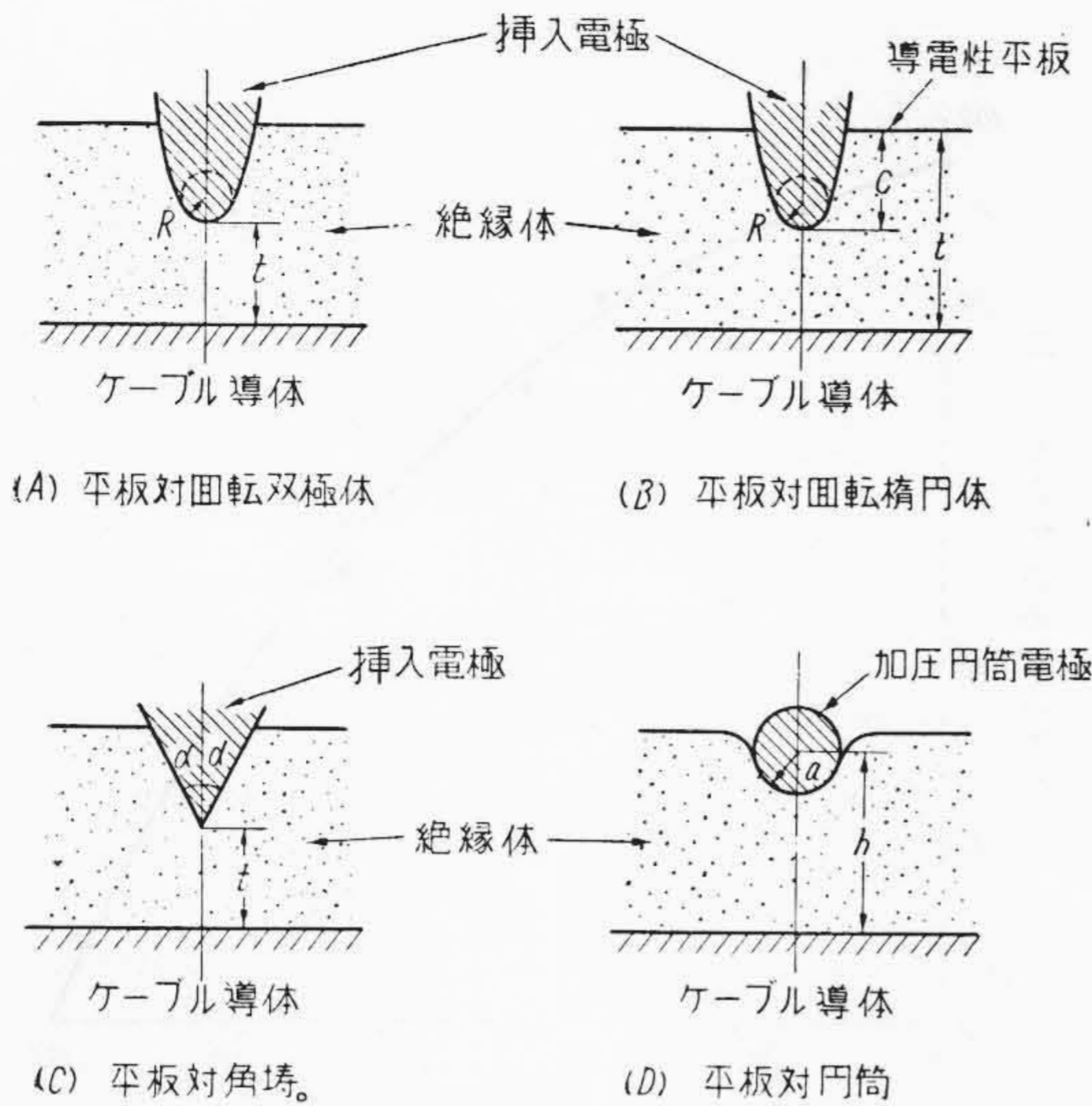
ブチルゴムケーブルの絶縁破壊をストレス現象とすると正常ケーブルの場合は、ほぼ最大電位傾度説に適合する。すなわち最大電位傾度の導体表面がブチルゴムケーブル固有の破壊強度に達したとき、導体表面より破壊が進行すると考えると絶縁厚と破壊電圧の間には次式が成立する<sup>(7)</sup>。

$$V = \frac{1}{2} d G_m \log \frac{D}{d} \dots\dots\dots (1)$$

- V : 破壊電圧 (kV)
- G<sub>m</sub> : 破壊時導体表面電位傾度 (kV/mm)
- d : 導体外径 (mm)
- D : 絶縁体外径 (mm)

第 3 図は 60 mm<sup>2</sup> および 125 mm<sup>2</sup> の正常ケーブルにつき絶縁体厚さの増加により破壊電圧がどのように変わるかを実測した結果である。図中 a, b 曲線は最大電位傾度 G<sub>m</sub> を筆者らの測定した従来の実績から 15 kV/mm とし計算した値を示す。これはケーブルを遮蔽外径の約 10 倍の直径の円筒に 180 度以上巻き付けて課電した結果であり、いわゆる長時間破壊電圧値である。導体外径の差により明らかに破壊値は異なり、同一絶縁厚に対し導体外径の小なるものほど低い値を示すが両者の絶縁厚に対する破壊特性は上に凸の曲線となる。

楔形電極を挿入した場合の実験結果はこれとまったく異なつた特性を示し、次の実験式で表わされる。



第5図 各種模擬電極配置図

$$V = At^n \dots\dots\dots (2)$$

$t$  : 有効絶縁厚

$A, n$  : 実験常数

すなわち有効絶縁厚に対する破壊電圧の関係は上に凹の曲線となる。正常ケーブルの測定結果が(1)式でよく表わされることから、楔形電極による場合も、またストレス現象と考え適当な模擬電極配置を仮定して最大電位傾度を計算してみると次のとおりである。

(A) 平板対回轉双曲体の電極配置

楔形電極を挿入した場合の破壊電圧が導体径にあまり影響しないことより第5図Aのようにケーブル導体を平板電極、楔形電極を回轉双曲体電極と仮定し、両電極間に電位差を与えた場合双曲体電極尖端における電界強度  $E_m$  は次式で表わされる<sup>(8)</sup>。

$$E_m = \frac{2VP}{\log q} \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $P = \left(1 + \frac{R}{t}\right)^{\frac{1}{2}} / R$

$$q = [2t + R + 2t^{\frac{1}{2}}(t + R)^{\frac{1}{2}}] / R$$

$V$  : 両電極間の電位差

$R$  : 電極尖端の曲率半径

$t$  : 有効絶縁厚

楔形電極を挿入した場合の有効絶縁厚  $t$  は、ケーブル絶縁体厚と楔形電極尖端の貫通する深さとの間の差として計算できるから尖端の電界強度  $E_m$  は  $V, R, t$  の測定より決定できる。

(B) 平板対回轉楕圓体の電極配置

供試ケーブルは絶縁体表面に密着して金属遮蔽テープが巻いてあるから第5図Bのように近似的に導体を平板電極、楔形電極を導電性平板より絶縁体中に突出した回轉楕圓体の突起と仮定して両電極間に電位差を

与えた場合、突起尖端における電界強度  $E_m$  は次式で表わされる<sup>(8)</sup>。

$$E_m = \frac{2CV}{t'R \left[ \log \left( \frac{4C}{R} \right) - 2 \right]} \dots\dots\dots (4)$$

$C$  : 突起尖端の導電性平板よりの突出深さ

$t'$  : 絶縁体厚

尖端の電界強度は突起の突出深さ、すなわち楔形電極挿入深さ  $C$  と尖端の曲率半径  $R$  の函数となつてゐる。

(C) 平板対角罫の電極配置

第5図Cのように導体を平板電極、楔形電極を角罫電極と仮定して両電極間に電位差を与えた場合、角罫尖端における電界強度は次式のように  $\Gamma$  函数で表わされる<sup>(9)</sup>。

$$E_m = \frac{V}{\pi t} \left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \frac{z}{2t} \right\}^{\frac{2\alpha/\pi - 1}{2 - 2\alpha/\pi}} \left[ \frac{\left\{ \Gamma \left( -\frac{\alpha}{\pi} \right) \right\}^2}{\Gamma \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} \right)} \right]^{\frac{1}{2 - 2\alpha/\pi}}$$

$2\alpha$  : 角罫尖端の角度

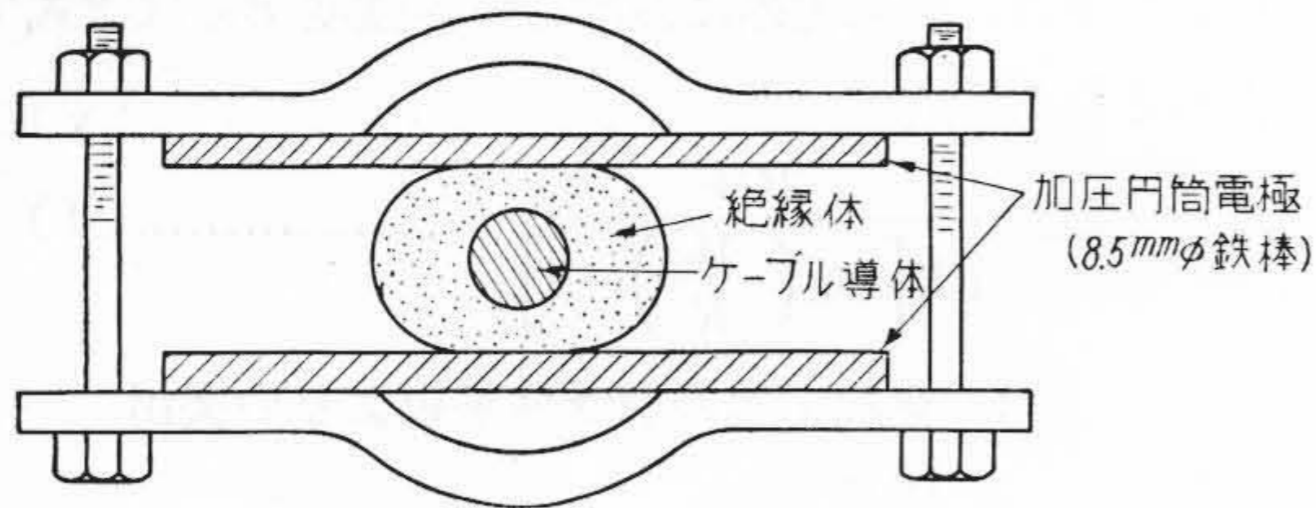
角罫尖端の電界強度は有効絶縁厚  $t$  と角罫度の函数である。

以上三つの模擬電極配置により計算した(3),(4)式において楔形電極尖端の電界強度  $E_m$  を(1)式の最大電位傾度  $G_m$  と等しく、破壊時には一定と仮定すると、有効絶縁厚に対する破壊電圧の計算値はすべて上に凸の曲線となり実験結果と相反する。すなわちこの異常現象を最大電位傾度説から説明することは困難である。一方、絶縁体に楔形電極を挿入した場合は、尖端には空隙の生ずる可能性もあり、尖端近傍の強い電界のため激しいイオン化が起り、その空隙の電界が局部破壊の大きさに達すればコロナ放電が始まり、さらに電界強度が大きい場合は増殖電離によつて空隙が短絡され、それに応じて尖端近傍の絶縁物の電界強度をさらに大きくして破壊を促進させると考えることもできる<sup>(10)</sup>。しかしこのようなコロナ現象として説明するには実験結果があまりにも規則的でありかつ測定値に再現性があること、破壊直前で課電を中止して解体後断面を顕微鏡で観測したがストリーマー状の形跡はみられなかつたことなどより不十分である。したがつて現在のところその原因は明確でなくさらに検討を要する現象と考えている。

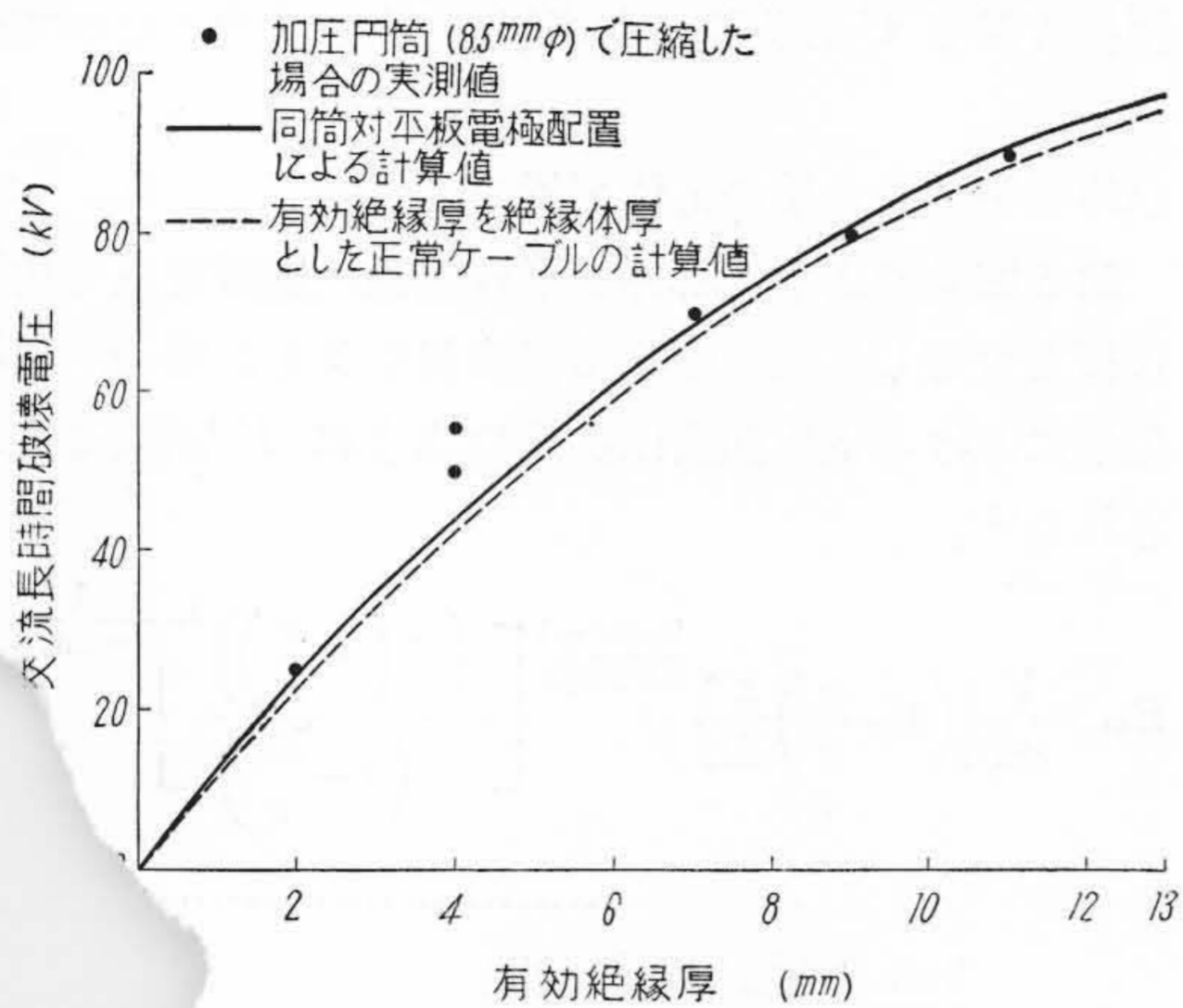
〔III〕 加圧変形時の絶縁破壊

(1) 実験方法

第6図のような加圧試験装置を用いケーブル導体と直角方向に圧力を加えて長時間破壊試験を行い、その時の



第6図 加圧試験装置



7図 加圧変形時の有効絶縁厚に対する破壊電圧の関係

有効絶縁厚に対する破壊電圧を測定した。試料ケーブルは  $60 \text{ mm}^2$ 、加圧電極には  $8.5 \text{ mm}\phi$  の丸鉄棒を使用した。課電上昇速度は  $5 \text{ kV/h}$  とし課電開始電圧は有効絶縁厚の減少に伴い低電圧とした。

ケーブルの有効絶縁厚は加圧試験装置の両側のナットの上め加減により自由に調整できる構造となっている。さらにアムスラ万能引張試験機を使用して加圧変形に対する圧縮荷重を測定し、上記破壊試験時の圧縮荷重を導出した。

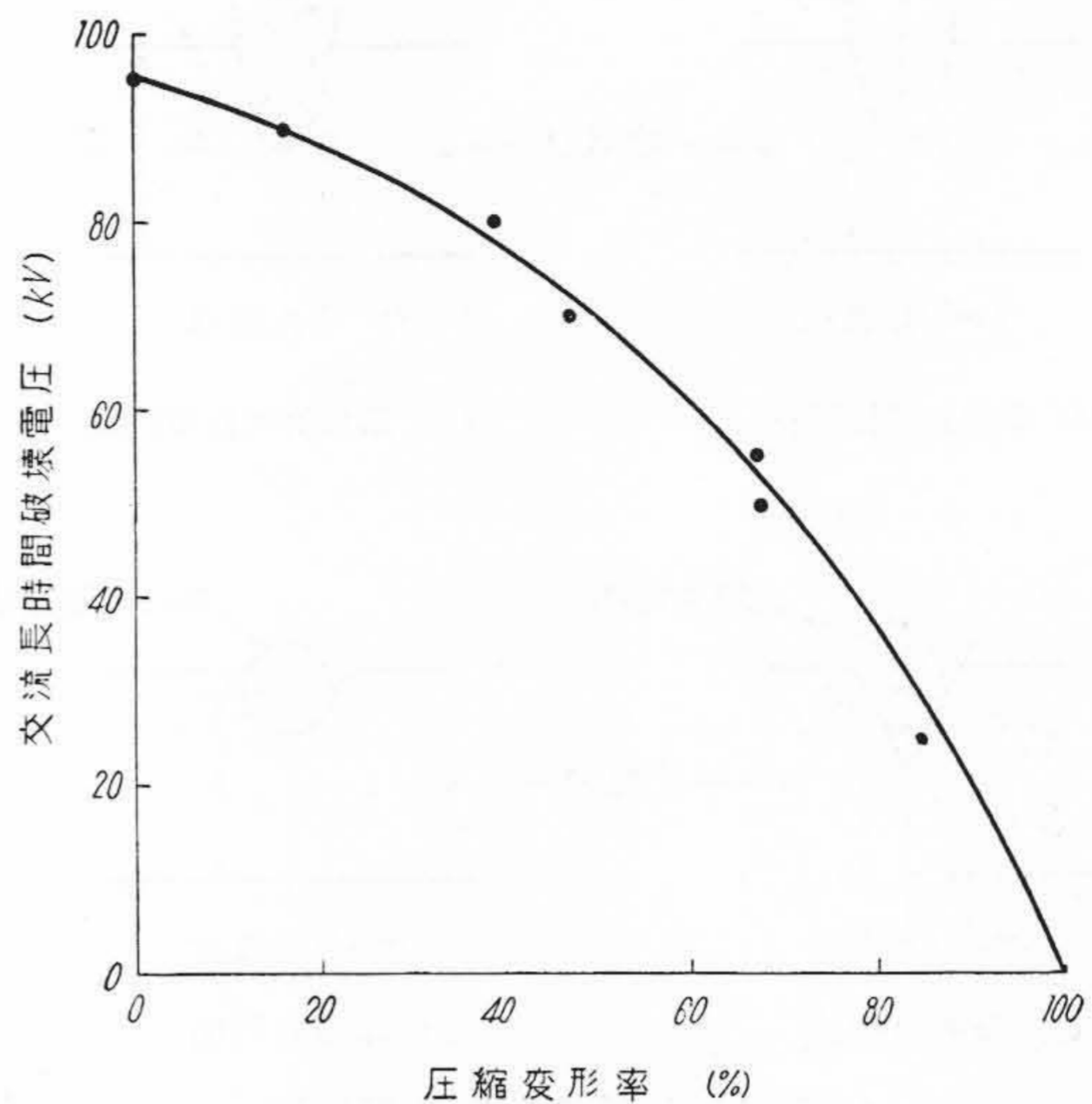
(2) 実験結果

加圧変形時の有効絶縁厚に対する破壊電圧の実測値を第7図に示す。この場合の破壊特性は楔形電極を挿入した場合とはまったく異なり有効絶縁厚に対する破壊電圧の関係は上に凸の曲線となる。すなわち加圧変形に対しては非常にゆるやかな低下状態で、局部加圧はそれほど絶縁性に悪影響を与えない。第8図は加圧変形時の圧縮変形率に対する破壊電圧値を示したもので、この際の圧縮変形率は次式より計算した値である。

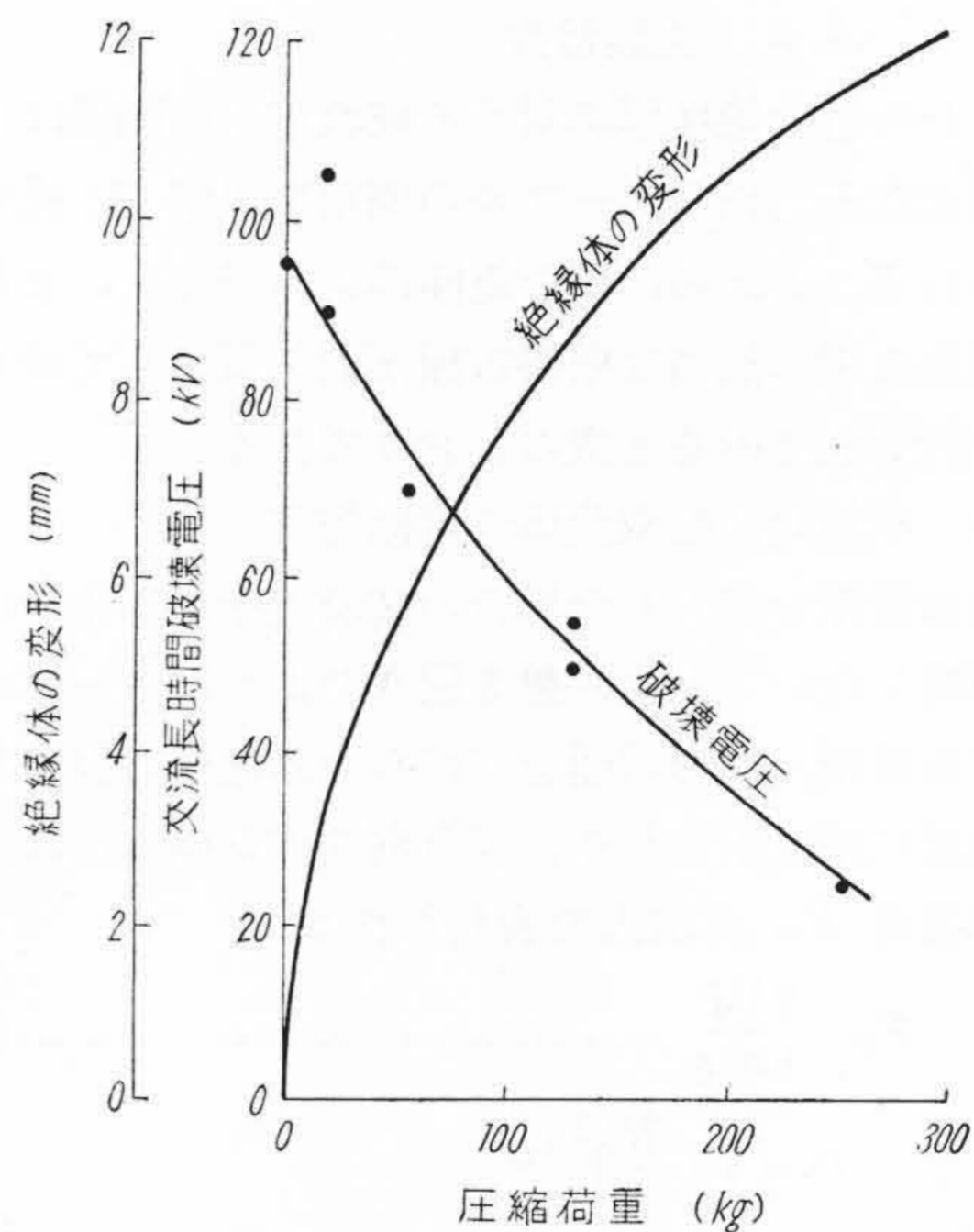
$$\alpha = \left(1 - \frac{t}{D}\right) \times 100(\%) \dots\dots\dots (6)$$

- $\alpha$  : 圧縮変形率
- $D$  : 加圧前の絶縁体厚
- $t$  : 加圧後の有効絶縁体厚

この図から絶縁体厚を 50% 圧縮してもなお正常ケーブ



第8図 加圧変形時の圧縮変形率と破壊電圧の関係



第9図 圧縮荷重に対する変形および破壊電圧の関係

ルの破壊値の 70% を保持していることがわかる。

第9図は圧縮荷重に対する絶縁体の変形および破壊電圧値を示したもので絶縁厚を 50% に変形するに要する圧縮荷重は約 75 kg に相当している。

(3) 破壊機構

ケーブルの加圧変形時の電極配置を楔形電極の場合と同様、第5図Dのようにケーブル導体を平板電極、加圧丸鉄棒を円筒電極と仮定して両電極間に電位差を与えた場合、加圧円筒電極表面縁端の電界強度  $E_m$  は次式で表わされる。

$$E_m = \frac{V \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}}{(h-a) \log \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}\right)} \text{ (kV/mm) } \dots (7)$$

$a$ : 加圧円筒電極半径 (mm)

$h$ : 平板電極より圧縮円筒電極中心軸までの距離 (mm)

$V$ : 両電極間の電位差 (kV)

加圧変形の場合、楔形電極挿入時と同様に加圧円筒電極表面の最大電位傾度がブチルゴムケーブル固有の破壊強度に達したとき、加圧円筒電極表面より破壊が進行すると考え、(7) 式の最大電位傾度  $E_m$  を 15 kV/mm とし有効絶縁厚に対する破壊電圧値を計算すると第7図の実線のようにほぼ実測値とよく一致する。すなわち加圧変形時の絶縁破壊現象には最大電位傾度説が適用でき、加圧による破壊電圧の低下は有効絶縁厚の減少によるものと考えられる。

(1) 式において加圧変形時の有効絶縁厚をケーブルの絶縁体厚と考え、 $G_m$  を 15 kV/mm とした場合の絶縁厚に対する破壊電圧の計算値は、第7図の点線に示すようにほぼ実測値に近い。このことより加圧変形時の破壊値は加圧によつて減少した有効絶縁厚を絶縁体厚とした正常ケーブルの破壊値にほぼ等しいことが推定できる。

以上より局部的異常加圧による破壊電圧の低下はごく少なくきわめて良好な特性といえる。このことはブチルゴムケーブルの絶縁体自体が紙絶縁鉛被ケーブルに比べすぐれた弾性体であることに起因するもので、ブチルゴムケーブルの利点の一つが立証されたものといえる。

#### [IV] 結 言

ブチルゴムケーブルの楔形電極挿入時および加圧変形時における絶縁破壊につき検討を行つて若干の結論を得た。これを要約すると、次のとおりであり。

##### (1) 楔形電極による絶縁破壊

(A) 楔形電極挿入時の絶縁破壊特性は、正常ケーブルにおける場合とまったく異なり、同じ有効絶縁厚をもつ正常ケーブルより低い破壊値を示す。また有効絶

縁厚に対する破壊特性は上に凹の曲線となる。

(B) 破壊電圧値はケーブル導体径には影響されることなく、有効絶縁厚のみで決まる。また挿入電極形状の急峻なものほど破壊値は低い。

##### (2) 加圧変形時の絶縁破壊

(A) 加圧変形時の有効絶縁厚に対する破壊特性は上に凸の曲線となり、局部的な異常加圧に対してブチルゴムケーブルはきわめて良好な特性を示す。

(B) 加圧時の破壊現象には最大電位傾度説が適用でき、破壊電圧の低下を有効絶縁厚の減少と考えると説明できる。

以上の考察結果より、60~125 mm<sup>2</sup> ケーブルの絶縁設計にあつては最大電位傾度説を基準とすればよく、製造、布設にあつては楔形外傷を極力避けるように注意しなければならない。また堅坑ケーブルや海底ケーブルの鎧装鉄線による圧縮過度はあまりケーブルの絶縁性に悪影響を与えないなどの事実が明らかになつた。

擱筆にあたり、種々御指導をいただいた東北大学鳥山教授、日立製作所中央研究所河合博士に深謝する。また種々御協力いただいた日立電線株式会社電線工場の橋本、増岡の両氏および関係者各位に厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- (1) 渡辺, 吉川, 庄司: 日立評論 別冊 9, 73 (昭 31)
- (2) W. H. Couch, G. H. Hunt, N. D. Kenney, P. H. Ware: Trans. paper No. 55~693 5~24 (1955)
- (3) 依田, 増岡: 日立評論 別冊 15, 49 (昭 32)
- (4) W. H. Couch, G. H. Hunt, N. D. Kenney, P. H. Ware: Power Apparatus and Systems No. 22 1887 (1956)
- (5) J. C. Carroll, A. R. Lee, R. B. McKinley: Power Apparatus and Systems No. 21 1204 (1955)
- (6) 卜部, 依田, 今井: 電四連大 507 (昭 32)
- (7) 庄司, 渡辺, 依田, 増岡: 電三連大 450 (昭 31)
- (8) J. H. Mason: P. I. E. E. 102 part C 254 (1955)
- (9) 谷: 静電場 153 (岩波書店 昭 17)
- (10) 橋本: 日立評論 38, 81 (昭 31)