

特高ブチルゴムケーブルの絶縁強度

The Dielectric Strength of High Voltage Butyl Rubber-insulated Cable

依田 文吉* 吉岡 正幸*
Bunkichi Yoda Masayuki Yoshioka

富田 一男* 佐藤 祈美男*
Kazuo Tomita Kimio Satō

内 容 梗 概

ここ数年ブチルゴムケーブルの応用範囲は拡大の一路をたどり、種々の目的に使用される交直両用高電圧ケーブルの分野へと発展するに至った。

ブチルゴムを使用した新しいケーブルの開発にあたっては、独自の優秀な特性を生かした絶縁設計と、十分な研究による実態はあくが必要である。

本報告ではこのような観点からブチルゴムケーブルの絶縁破壊特性の二、三を説明し、40 kV 電力ケーブルの試作例と直流 60 kV コットレルケーブルへの応用例を述べた。

1. 緒 言

数年前ブチルゴムケーブルが生産されはじめた初期のころは、絶縁体の設計基準も先進諸国の規格に準じたり、天然ゴムとの材料特性の比較検討から、天然ゴムケーブルの基準を受継いだりして出発した。しかし驚異的な需要の増加は標準構造の制定をうながし、品質の向上に拍車をかけた。3~6 kV のケーブルは昭和31年に電気学会規格調査会制定の JEC-139 に統一され、つづいて昭和34年、日本工業規格 JIS-C-3603 に規格化された。

このようにしてブチルゴムケーブルの特質が究明され性能が明確になるに従って、単に従来の天然ゴムや紙ケーブルに置き換える需要が増加しただけでなく、たわみ性を必要とする 20 kV 級の移動変電車用ケーブル、可搬形変圧器直結ケーブル、交流電気機関車主回路用ケーブル、DC 150 kV レントゲンケーブル、DC 60 kV コットレルケーブルなど、特殊な分野にまで応用されてきた。

すなわち1950年代のブチルゴムケーブル界は幼年期より青年期まで異常な発展をとげた。ここで新たに1960年代に課せられた問題点は、過去に得られた貴重な経験に基いた新しい用途の開発と、信頼性および経済性の両面を満足する特高ケーブルへの応用にあると考えられる。

この報告では上記の観点からケーブルの絶縁強度に関する二、三の問題を取上げ、設計上の基準をうるとともにその適用例を説明することにした。

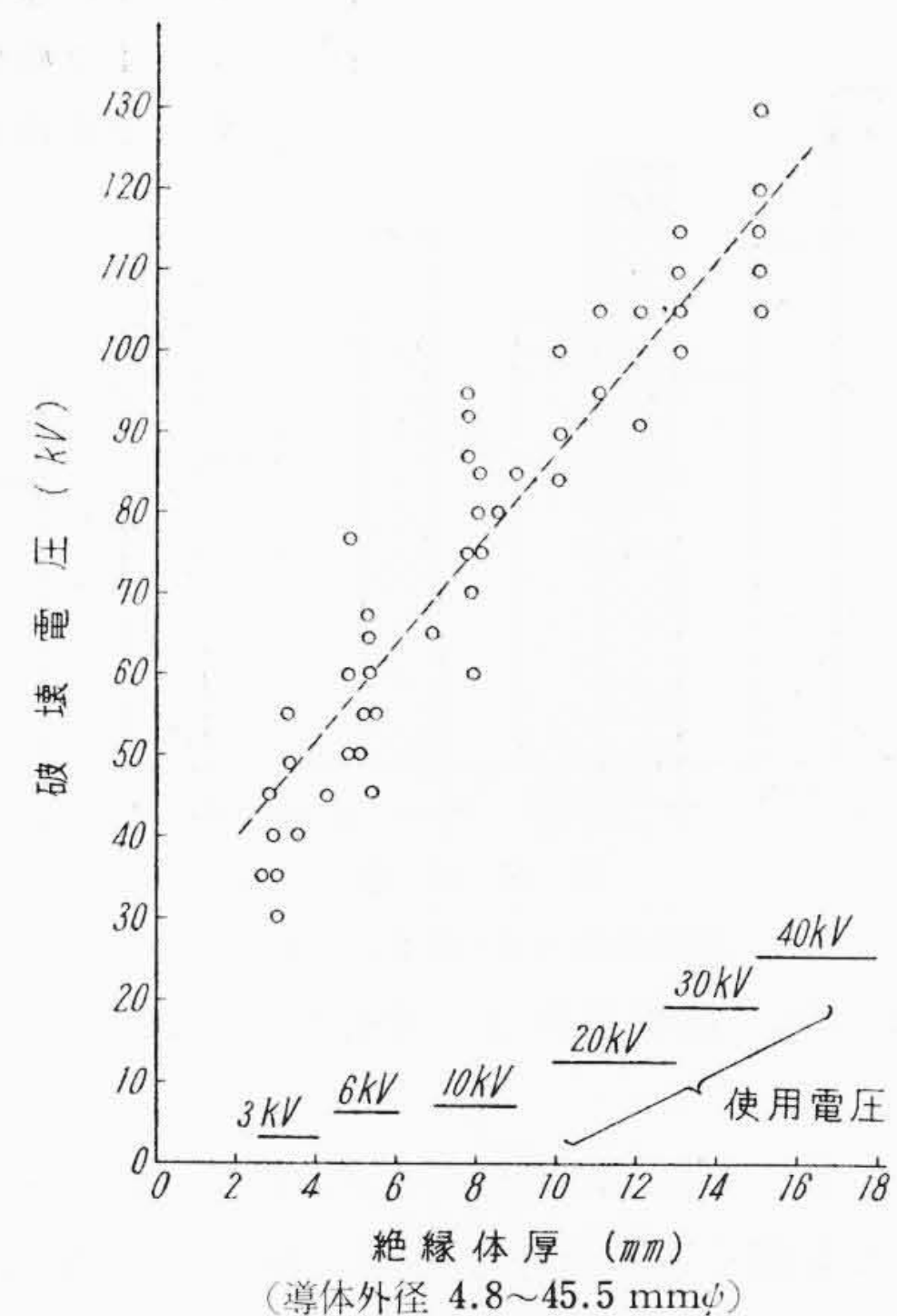
2. 絶縁設計の基準

ブチルゴムケーブルに関しては長期間の性能を左右する電氣的、機械的、化学的、物理的特性が種々の角度から論じられ、他のゴム、プラスチック、紙ケーブルに見られないすぐれた特性が確認されてきた^{(1)~(5)}。一方需要は激増し今日までに膨大な数量の製造実績と商用試験結果をうるに至った。したがってここでは絶縁設計上の基準となる絶縁破壊の一部と構造上の問題点を取上げる。

2.1 絶縁構造と長時間破壊特性

絶縁体の電氣的破壊強度を裏づける試験方法として、ケーブルを自己外径の10倍の直径に屈曲し、一定時間ごとに課電電圧を昇圧してゆく、いわゆる長時間破壊試験がある。第1図は全般的な傾向を表わすために種々のブチルゴムケーブルの長時間破壊電圧を絶縁体厚さに対応して示したものである⁽⁶⁾。これから使用電圧（ただし10 kV 以上は中性点接地方式）に対する裕度は4~10倍の大きさで

* 日立電線株式会社電線工場



第1図 交流長時間破壊の絶縁体厚さと破壊電圧の関係

あることがわかる。また破壊値の平均値を結ぶとほとんど直線となることから、設計上は平均電位傾度をとるほうが正しいようにも考えられる^{(7)~(9)}。

いま、この結果から絶縁体構成の問題を追求するために最大電位傾度（以下 $G_{\max}$ と呼ぶ）、最小電位傾度（以下 $G_{\min}$ と呼ぶ）、平均電位傾度（以下 G_{mean} と呼ぶ）について考えてみる。

$G_{\max}$ は

$$G_{\max} = \frac{2E}{d \log_e \frac{D}{d}} \quad (\text{kV/mm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$G_{\min}$ は

$$G_{\min} = \frac{2E}{D \log_e \frac{D}{d}} \quad (\text{kV/mm}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

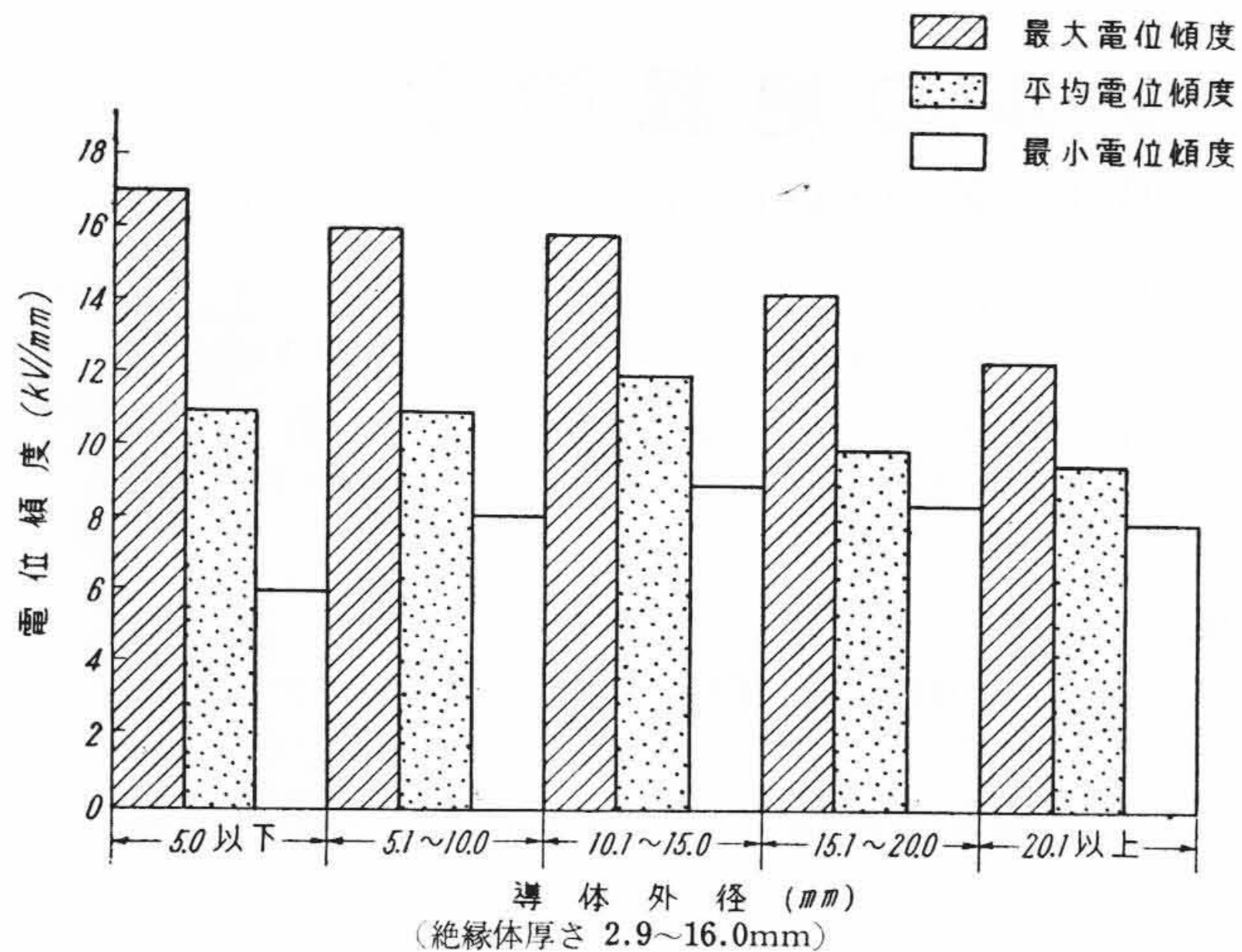
ただし E : 破壊電圧 (kV)

D : 絶縁体外径 (mm)

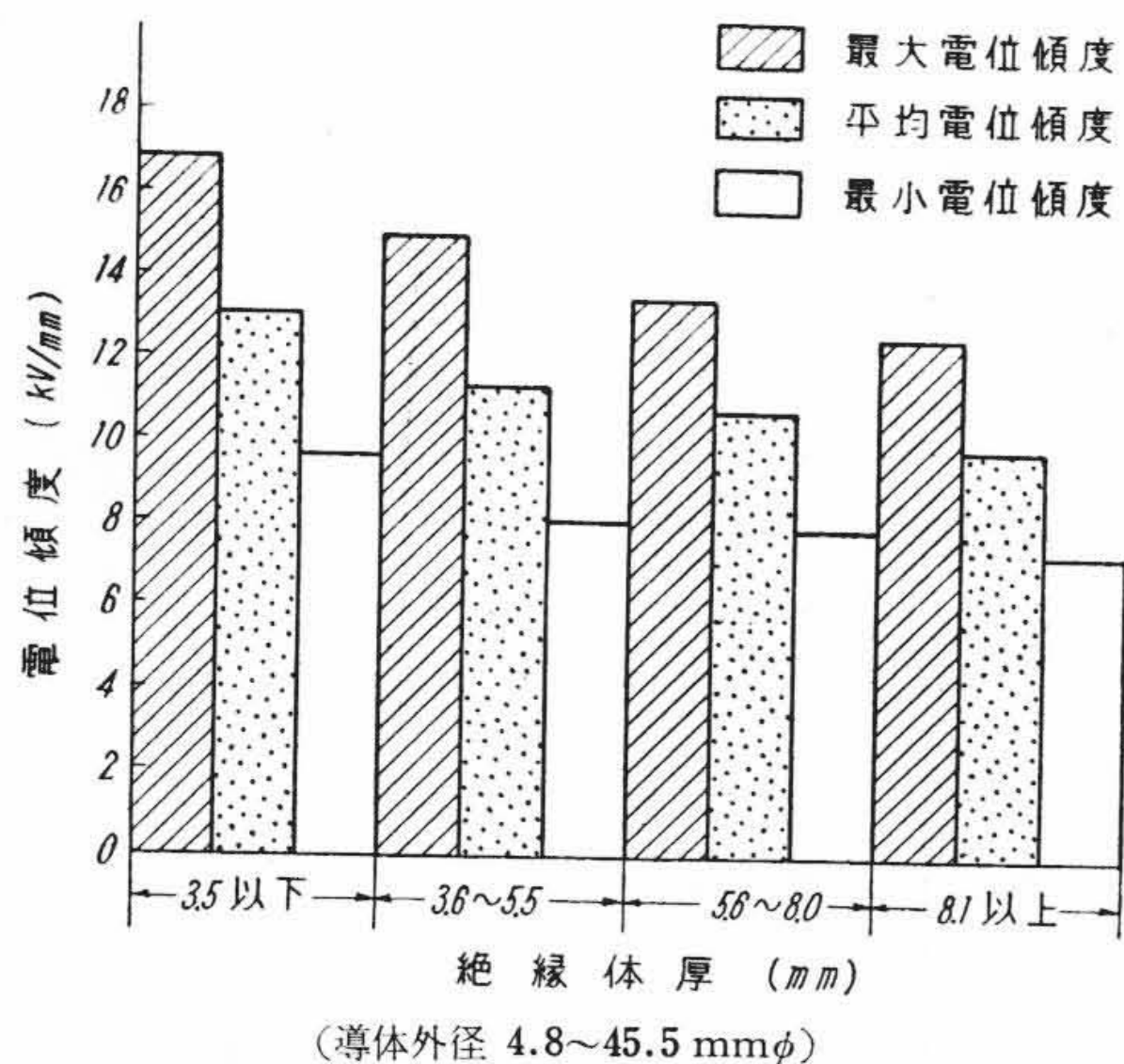
d : 導体外径 (導体しゃへい外径) (mm)

G_{mean} は破壊電圧を絶縁体厚さで除して得られる。

第2図は第1図の実測値を上式で計算し、導体外径で分類した $G_{\max}$, $G_{\min}$, G_{mean} の平均値を示し、第3図は絶縁体厚さで分類した平均値を示す。 $G_{\max}$ は導体外径が大きいほど、また絶縁体が



第 2 図 導体外径と電位傾度の関係



第 3 図 絶縁体厚さと電位傾度の関係

厚いほど小さくなる。 G_{min} は導体外径に対しては10~15 mm ϕ を最大として太くとも細くとも低下するが、 G_{mean} は G_{max} 、 G_{min} に比べれば比較的平坦である。しかし絶縁体厚さに対してはいずれも厚さの増加とともに減少する。これはシートの実験結果とも似ている。

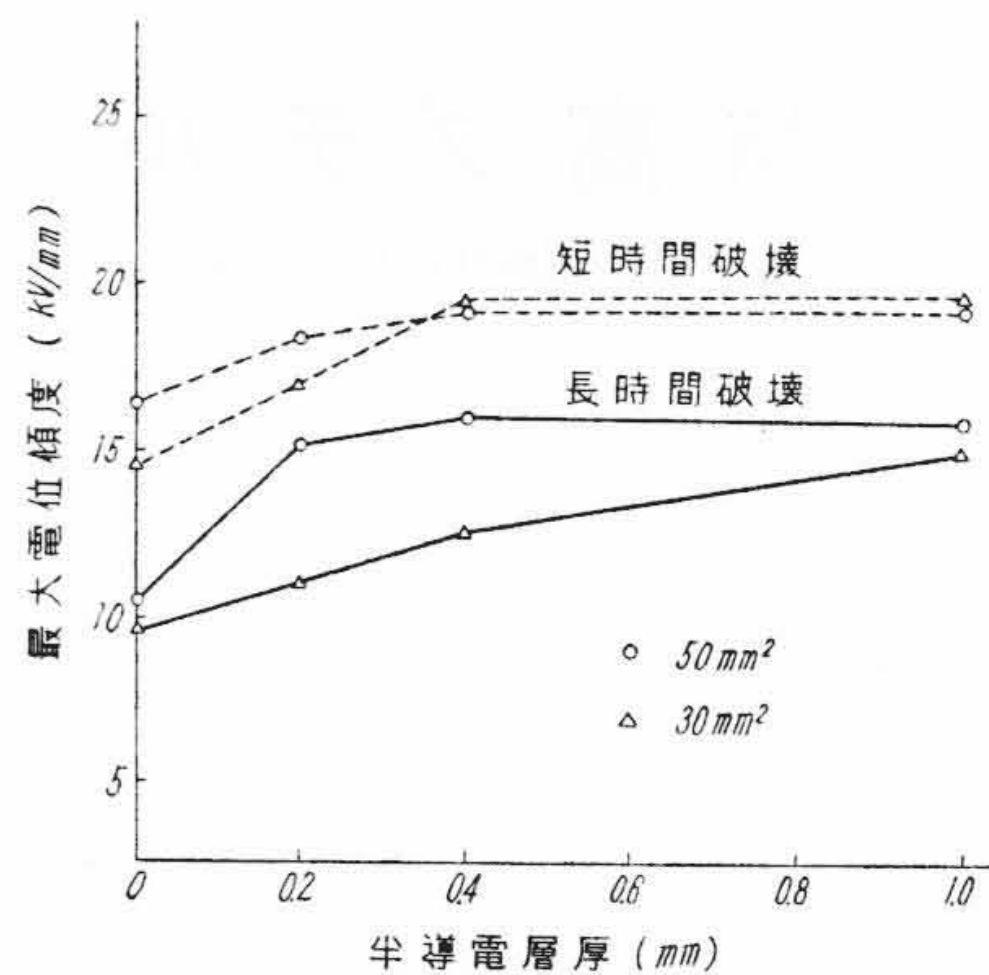
実際ケーブルの設計は電流容量から導体サイズが大体決まり、必要な絶縁強度から絶縁体厚さを求め構造が決定される。したがって以上の G_{max} 、 G_{min} 、 G_{mean} のいずれかに最も妥当な基準が求まれば系統の絶縁階級に必要な最小絶縁体厚さが容易に得られるので、あとは使用条件に応じて電氣的、化学的、機械的、物理的立場から見た安全率を加え、経済的な最終構造が決定できる。

今まで筆者らは破壊時の G_{max} を一定として破壊電圧を推定し、よく一致するものと考えてきた。しかしこれはある限られた範囲の導体サイズのものでは正しいが、同じ基準であらゆるサイズのケーブルに適用することは妥当でない。

次に極端に導体外径が細く、絶縁体の厚い場合と、その反対の場合を考える。前者の場合 G_{max} と G_{min} の差は D/d に比例して大きくなり、絶縁効率は悪くなる。この限度は D/d が3を越すと著しく悪くなるようである。後者の場合には平板電極の場合に近づくので、厚さに対する G_{mean} を基準とするほうが妥当であるが、絶縁体厚さの増加に伴い G_{mean} が低下し、また屈曲に伴う破壊電圧の低下など機械的要素も多く含まれるので注意を要する。

2.2 導体しゃへい

導体しゃへいのもたらす最も大きな効果は破壊特性の向上であり、この意義も次第に究明されてきているが⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、ここでは前項



第 4 図 導体しゃへいの効果

に関連した試験結果の一部を述べる。

試験は導体外径 7 mm (30 mm²)、9 mm (50 mm²) のより線に絶縁体を 13 mm に被覆した 20 kV ブチルゴムケーブルで行った。試料はそれぞれ半導電性ゴム引布テープ巻層よりなる導体しゃへい層(以下半導電層という)を 0.2 mm、0.4 mm、1.0 mm に施したものと、全然施していないものを作成した。なお半導電層の厚さは絶縁体の厚さに含め外径 D を一定としたが G_{max} の計算は半導電層外径を d として計算した。

第 4 図は破壊時の G_{max} を表わしたものである。

長時間破壊の場合は 50 kV/h 課電後 5 kV/min の昇圧、短時間破壊の場合は 500 V/s の昇圧速度で課電して破壊させた。

いずれのケーブルも導体外径と絶縁体外径の比 D/d が 3 を越すが、両者を比較すれば、30 mm² ケーブルのほうが 50 mm² ケーブルに比べ、長時間破壊時の G_{max} の値は10~50%低い。

これは、高電圧ケーブルの最小導体外径に限界があることを示していると考えられる。

また半導電層を設けることによって、長時間破壊では約50%、短時間破壊では約30% G_{max} は増加している。このことは半導電層のもつ意義の解明に対し重要な意味があるが、絶縁設計の点からも注目しなければならない。

以上あげた二者の実例から、絶縁設計に際しては

- (1) ケーブル構造に応じた電位傾度の選定
- (2) 半導電層の有効な活用
- (3) 使用目的に合致した性能の検討
- (4) 経済性の考慮

に実績を加味して基準を決定しなければならない。

3. 極性効果と絶縁耐力比

3.1 極性効果

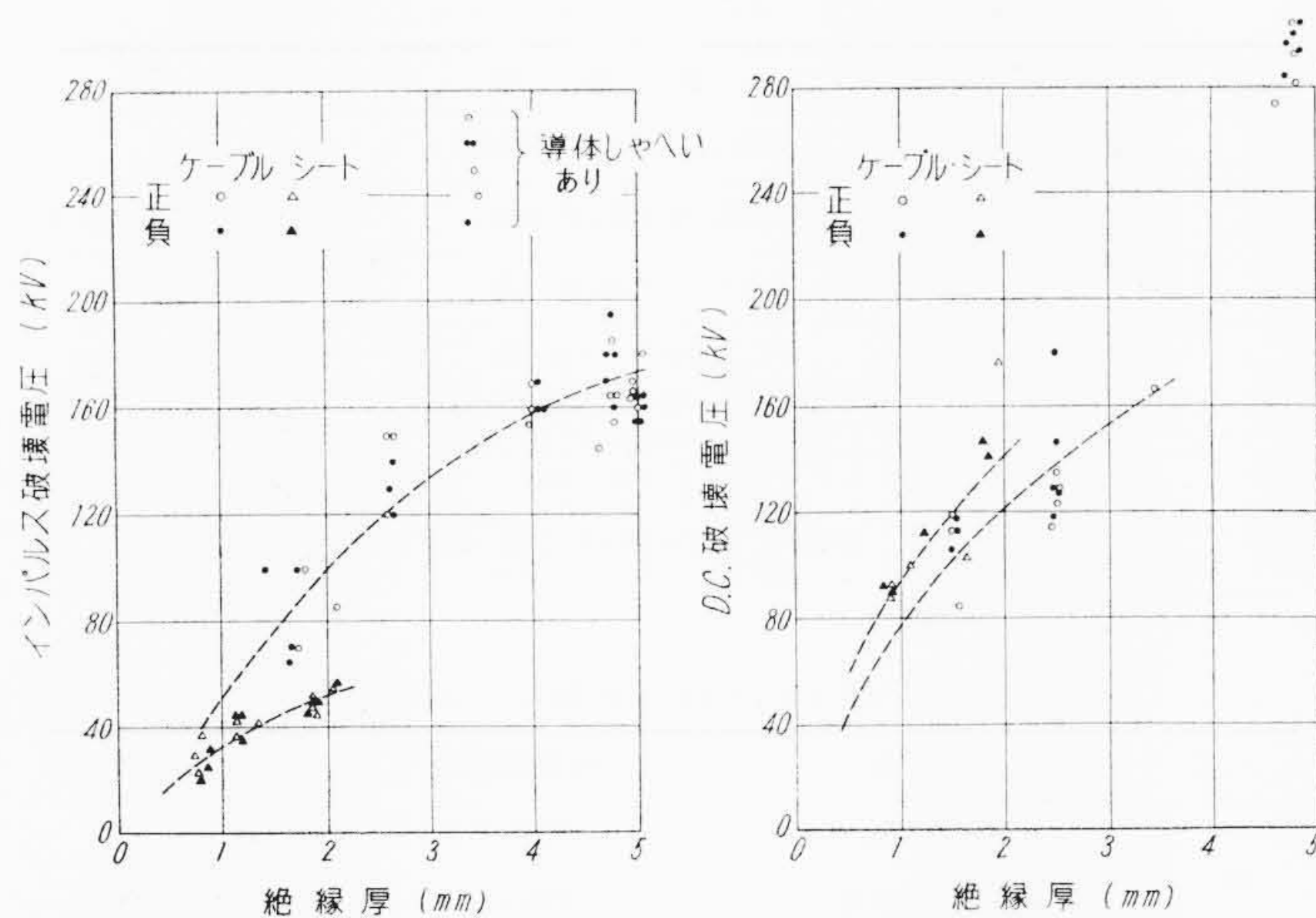
3.1.1 実験

破壊の極性効果をインパルス(1×40 μ s 標準波)および直流電圧について検討した。

試料はシートと種々の絶縁体厚さを有するブチルゴムケーブルを使用した。ケーブルの導体外径は 5.0~16.2 mm ϕ にわたっている。

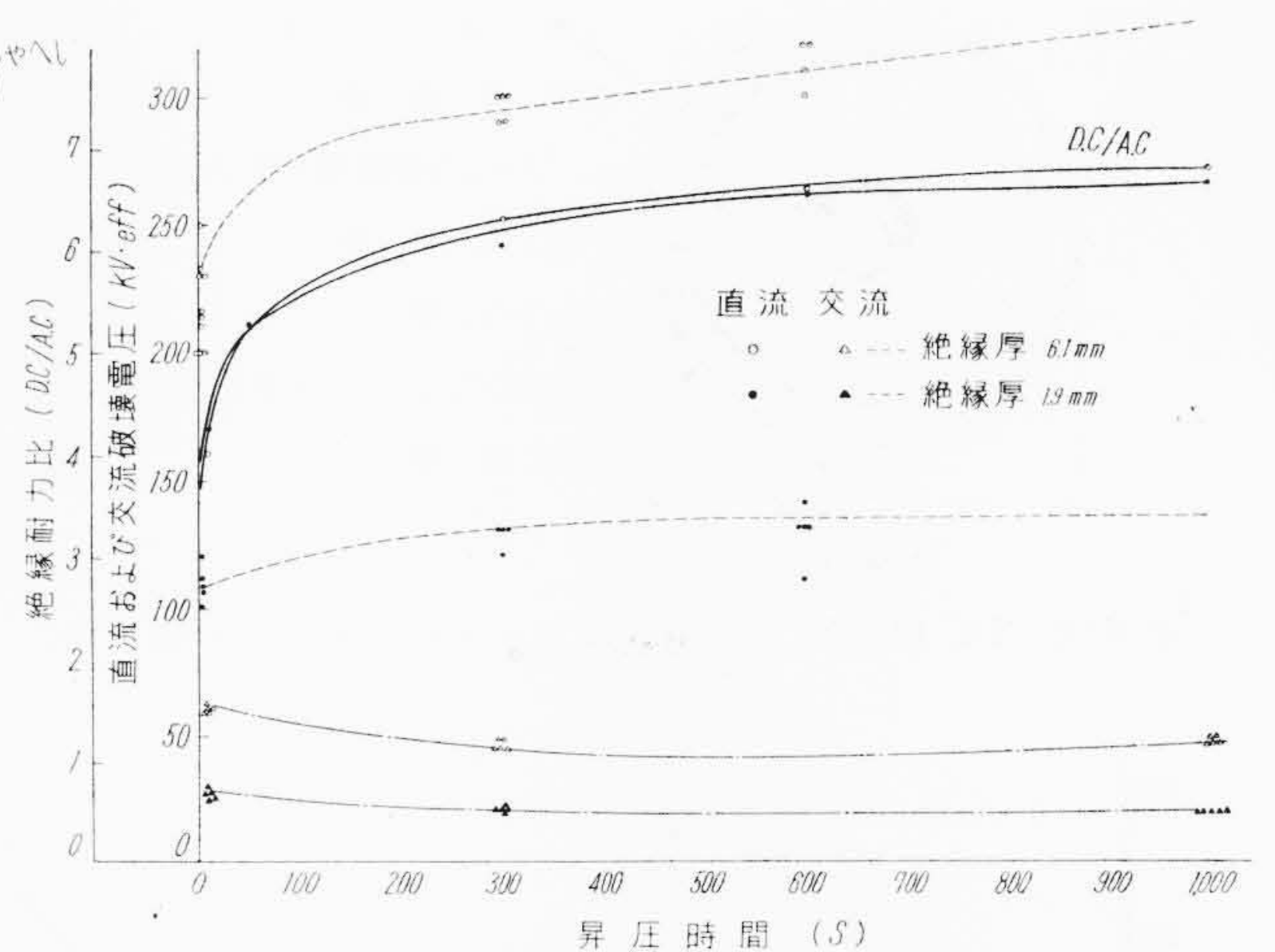
シートは針対平板電極による不平等電界下により実験し、いずれも常温変圧器油中で行った。課電方式は正負ともインパルスでは 30 kV より 2.5 kV ずつ上昇し、各電圧を 3 回ずつ加え、直流では 3 kV/s の連続上昇で破壊させた。

一方ケーブル試料ではインパルスを気中で正負とも 24 kV/mm 近辺から開始し、5 kV ずつ昇圧各 3 回ずつ課電した。直流電圧では試料ケーブルを水中に入れて試験し、3 kV/s で連続上昇し破



第5図 インパルス破壊電圧の極性効果

第6図 直流破壊電圧の極性効果



第7図 直流、交流破壊電圧および絶縁耐力比

させた。なお、ケーブルの場合には、導體上に半導電層を施したいわゆる導體しゃへいのあるものと、これがないものがある。大気条件は5~25°C, 748~764 mmHgである。

3.1.2 結果と考察

上記の実験で得られた結果は第5, 6図のとおりである。いずれの場合も絶縁厚さが増すに従って破壊電圧の増加傾向はいくぶん減少している。また極性による差異は、わずかに負極性が高いようだが、ばらつきの範囲で有意差はないものと思われる。天然ゴムに対しては E. D. Davis, W. N. Eddy 両氏によって実験されている⁽¹²⁾。結局天然ゴムでもブチルゴムでも極性効果は少ないことになる。また極性効果は上記のように電極構成の非対称によって生ずる不平等電界分布に起因するもののほかに、電極使用物質が異なる場合にも生じると考えられている。特に高電圧ブチルゴムケーブルに用いられる導體しゃへいが、印加電圧の極性による破壊電圧に影響するものかどうかは興味ある事柄であったが、いずれの場合にも変化がないことがわかった。

さて、直流破壊電圧の場合には、周囲媒質によって、極性に变化を与えることが考えられる。実際ポリエチレンケーブルでは試料を気中、油中、水中、いずれにおくかによって異なった傾向を示している⁽¹³⁾。しかしブチルゴムシートでは電極材料の差によってもほとんど違いがなく、またケーブルの場合でもやはり極性による差はみられない。

ただし、導體しゃへいのあるものは破壊電圧の絶対値が高い。図中測定点が曲線よりはずれているのは導體しゃへいのあるもので高目になっている。

以上のようにブチルゴムケーブルでは極性効果は認められないので、ポリエチレンのように尖鋭電極周囲の空間電荷が実効的に電界強度を弱め、正のストリーマの進展が破壊を形成するような模型的考察は困難である。

3.2 交 直 比

3.2.1 実 験

測定は導體外径 5.5, 12.6 mmφ, 絶縁厚さ 6.1, 1.9 mm の2種類のブチルゴムケーブルについて行い、それぞれ直流(導體正極性)および交流電圧による破壊電圧を求めた。課電方法としては、連続上昇による短時間破壊試験のみでなく、昇圧時間を変えて、それぞれの時間における比を求めることにした。これは実際問題として、直流破壊試験が一定時間課電しておくという方式がとられているからである。結局、直流および交流の破壊電圧、昇圧時間特性から交直比を算出することにした。

試験はすべて水中で行い、水を接地側とし、昇圧時間間隔を 0, 30, 60, 300, 600, 1,800 秒に分け、10 kV ずつ昇圧し破壊電圧および時間を測定した。短時間連続昇圧は、交流 500 V/s, 直流 3 kV/s とし、大気条件はすべて常温、常圧で行った。

3.2.2 結果と考察

測定の結果は第7図のとおりである。いずれの場合も課電時間によって比が上昇している。

レントゲンケーブルまたは静電容量の大きいケーブルは一般に直流で試験を行うが、この場合の直流試験電圧に相当する交流値、またはこの逆の場合など、それらをいかに選ぶかが問題となる。

今回の実験結果について一応の傾向をみると、交流電圧の昇圧時間特性は、初め低下するが5分間隔以後ではほとんど一定値に落ちついている。これに対し、直流による破壊電圧昇圧時間特性はどちらの場合も、短時間破壊値を最低として徐々に上昇しており、大体30分程度から飽和傾向を示している。特に初期から5分間隔までの変化は大きい。したがって交直比は、直流の昇圧時間特性とほとんど同様な傾向になり、時間間隔の短いほうでの変化が著しい。直流耐圧試験で一般に行われている10分間についてみると、直流破壊電圧/交流破壊電圧(実効値)は約6.5となり、従来考えられていた値よりも大きい値となっている。

また、昇圧時間間隔に対する変化は、絶縁体厚さの厚いほうが大きいようであるが、この点については直流の破壊電圧の時間とともに上昇する傾向にさらに多くの検討が必要と思われる。

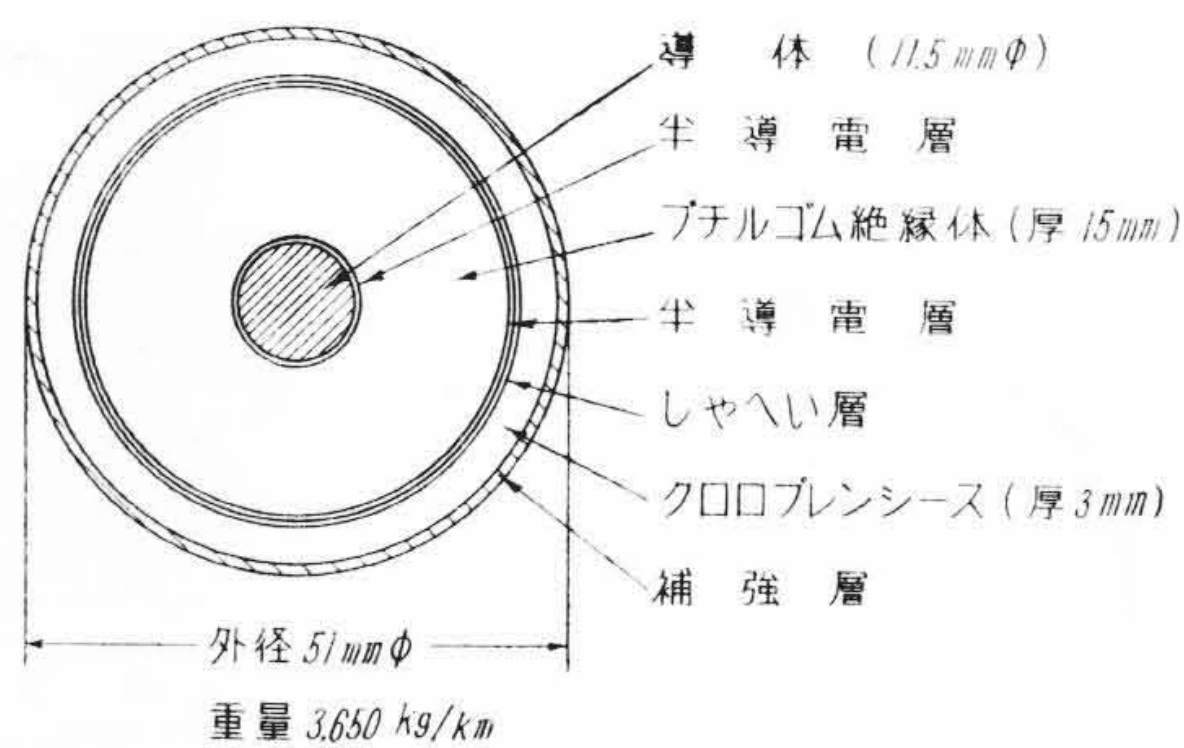
4. 特高ケーブルへの応用

4.1 DC 60 kV ブチルゴムコットレルケーブル

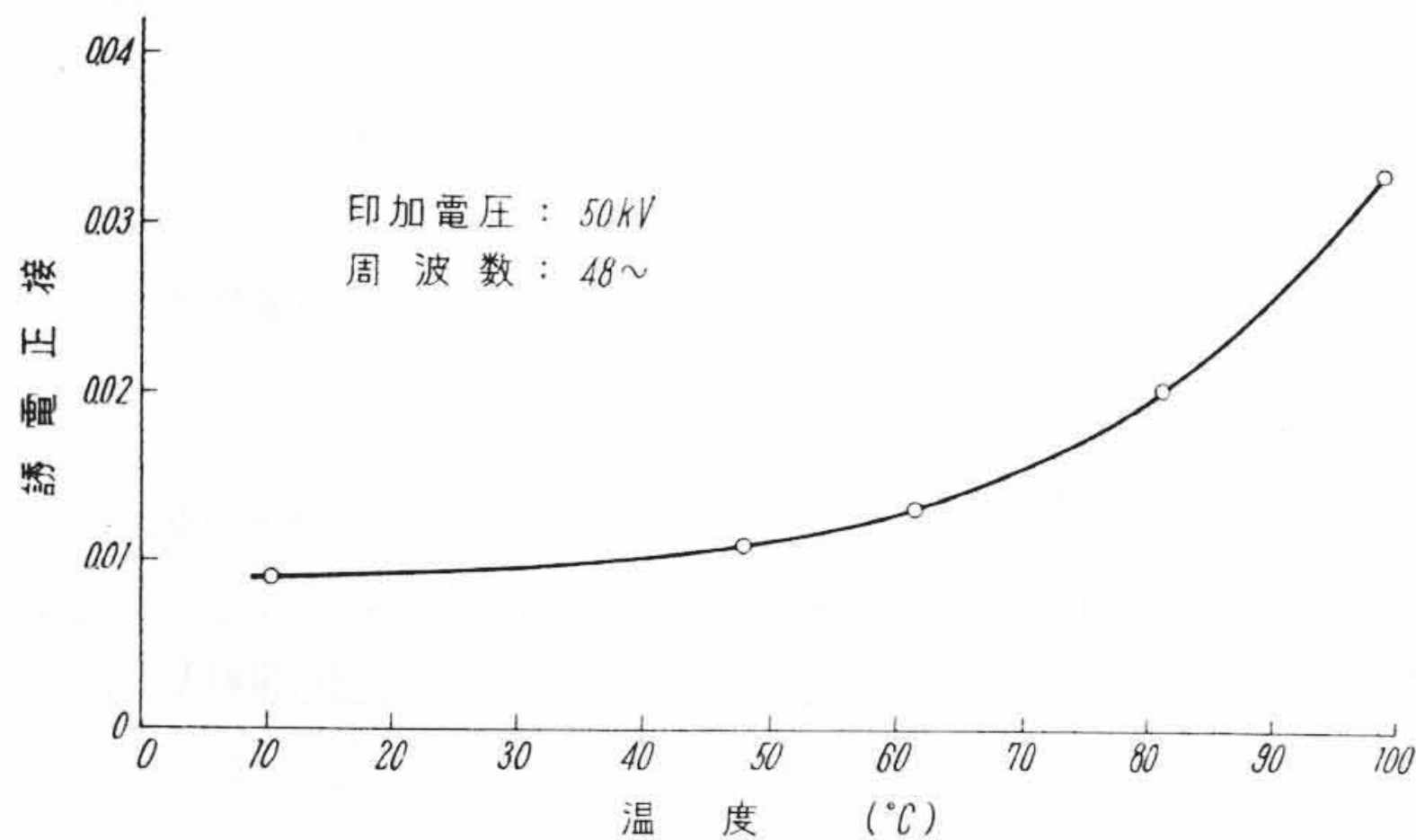
コットレルケーブルの一般電力ケーブルとの相違点は電流容量をほとんど必要としないが、非常に多くの高調波を含む直流高電圧が印加されることである。このため、レントゲンケーブルのように単純な直流ケーブルとしては考えられず、衝撃波耐電圧、交流耐電圧を基礎とし、交流高電圧ケーブルの経験と、ブチルゴムケーブルの直流特性をあわせ考えた構造としなければならない⁽¹⁴⁾。

また導體よりの発熱がないかわりに、周囲より熱ふく射、熱伝導を部分的に受けることがある。このとき絶縁体の電氣的固有抵抗は、温度の高い外周が低く、直流および衝撃波に対する電界分布は温度こう配により不均一な状態となる。

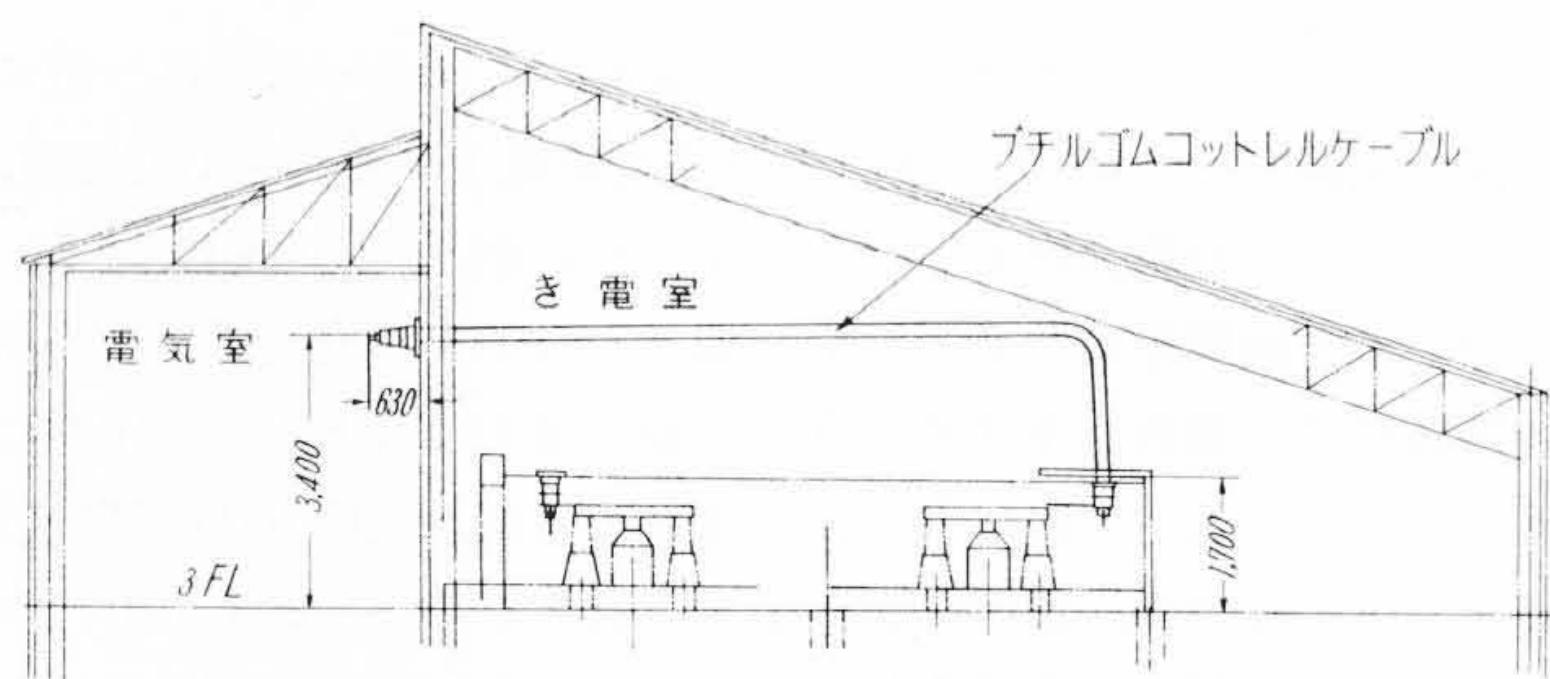
絶縁設計上は、これらをすべて含めて考え、一般電力ケーブルと異なった設計基準から出発しなければならないが一応、従来より多く使用され、実績のある油含浸紙絶縁鉛被ケーブルを参考として、



第8図 DC 60 kV プチルゴムコットレルケーブル断面図



第9図 誘電正接-温度特性



第10図 コットレルケーブルの布設状況

導体構成、絶縁体厚さを決定した。

第8図は関西電力株式会社殿大阪火力発電所の電気集じん装置に使用した DC 60 kV プチルゴムコットレルケーブルの構造を示す。

導体上には約 0.5 mm の厚さに半導電層を設けたのち絶縁体を被覆した。絶縁体上には半導電性布テープを巻いた上に金属しゃへいを設け、クロロプレキシースを施した。

ケーブルの電気的性能を第1表ならびに第9図に示す。常温では衝撃電圧に対する破壊値が使用電圧の6倍以上であること、交流短時間破壊電圧（実効値）が使用電圧の2倍以上であることから、高調波分に対する裕度は大きい。また、常温での直流耐電圧は 300 kV 以上であり、3.の実験結果から直流破壊電圧は 500 kV 程度と予想されるので、今後の研究と使用実績が増加すれば、さらに低減絶縁を採用してもよいと思われる。

また誘電正接は、温度 80℃、周波数 48 サイクルで、約 0.02 程度であるから、高調波分に対する誘電損失を考えても問題とならない。

第10図に本ケーブルの布設状況を示す。油含浸紙絶縁ケーブルの場合と異なり、ケーブルヘッドの取付け方向を限定されないので電気室では横向きに、き電室では上部さかさまに取付け、本ケーブルの特長を遺憾なく発揮させた。

4.2 40 kV プチルゴム電力ケーブルの試作

さて、製造技術の進歩とケーブル特性の解明に伴い、プチルゴム

第1表 DC 60 kV コットレルケーブルの電気的性能

	試験項目	試験結果	備考
商用試験	絶縁抵抗(20℃)	15,000~21,000 MΩ/km	
	静電容量(20℃)	0.106~0.107 μF/km	規格 0.3 μF/km 以下
	交流耐圧	50 kV 10 min 良	全長
参考試験	直流耐圧	DC 300 kV 1 h 良	全長
	交流長時間破壊	50 kV/1 h + 5 kV/30 min up 105 kV/4 min ケーブル	10倍に屈曲
	交流短時間破壊	500 V/sec up 135 kV ケーブル	10倍に屈曲
	衝撃電圧破壊	200 kV/3回 + 20 kV/3回 up 400 kV/1回 ケーブル	屈曲せず

第2表 40 kV 系統の絶縁レベル対照表

要 素			所要耐電圧	備 考	
衝 撃 波	基準衝撃絶縁強度		250 kV	(B.I.L.)	
	避雷器制限電圧		195 kV	放電電流 5,000A	
	変圧器耐電圧	全 波	250 kV		
		裁 断 波	290 kV		
	ケー ブ ル 耐 電 圧		300 kV	1.2×(B.I.L.)	
異 常 電 圧 (max)	開 閉 サージ	投 入	3E	ただし E：常規対地電圧 $\frac{44}{\sqrt{3}}\text{kV}$	
		開 放	無再点弧		2.5E
			再 点 弧		4E
	故 障 電 流 の 遮 断		3E		
	三 相 の 非 同 時 投 入		2E		
	永続性地絡に伴う過渡電圧		2.7E		

第3表 40 kV 1×150 mm² プチルゴム電力ケーブルの構造と電気的性能

	項目	構造および性能	備考
構造	導体	断面積	150 mm ²
		構成	61本/1.8 mm
		外径	16.2 mm
	絶縁体	厚さ	15.0 mm
		外径	46.2 mm
	ケーブル仕上外径		約 56 mm
性能	絶縁抵抗	6,600~8,400 MΩ/km	at 20℃
	静電容量	0.158~0.159 μF/km	at 20℃
	誘電正接	25.4 kV	0.067
		44.5 kV	0.070
		57.2 kV	0.074
	長時間破壊	70 kV/1 h + 5 kV/30 min up	
		試料 1	130 kV/20 min
		試料 2	115 kV/20 min
	衝撃電圧破壊	300 kV/3回 + 20 kV/3回 up	
		試料 1	440 kV/1回
		試料 2	400 kV/1回
短時間破壊	500 V/s up		
	試料 1	165 kV	ケーブル部

の特高ケーブルへの応用はますます拡張されてきた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。わが国における 40 kV 級の送電系統はごくわずかであるが、さらに高電圧分野へと前進するための足がかりとして、本ケーブルの試作を行ったのである。

絶縁設計は第2表および次の諸点を考慮して行った。

(1) 絶縁効率を最大とする $D/d \approx 3$ の構造とし、ケーブル外径を最小に選んだ。

(2) 使用時の最大電位傾度を 3 kV/mm とし、長時間破壊電圧に対する裕度を 4 倍以上とした。

(3) 衝撃電圧に対しては、系統の基準衝撃強度(B. I. L.)の120%以上を目標とした。

第3表にケーブル構造と電気的性能を示す。

これより40kVブチルゴム電力ケーブルは初期の設計目標どおり、20、30kVブチルゴム電力ケーブルと同じ構成で40kVの系統の異常電圧にも使用できることが確認された。

本ケーブルは実用試験の結果を待って、さらに性能が明らかとなるが、絶縁体厚さを15mmとして、(これまでの20kV級ケーブルの絶縁厚さ10~14mmに比較し、薄い基準で選定した。)所期の目的を達成できた点は注目に価する。

なお、この級のケーブルで、小サイズあるいは大サイズの導体が必要とする場合には、それぞれの導体に応じて補正を加えた絶縁設計により、再検討しなければならないと考える。

5. 結 言

ブチルゴムケーブルの応用面を拡張するため絶縁破壊特性を中心に設計上の観点から述べたが、これを要約すると次のようになる。

- (1) 交流長時間破壊時の最大、平均、最小電位傾度は、導体外径、絶縁体厚さ、およびその組合わせで変化し、一様にならない。
- (2) なお今後研究を要するが、絶縁体外径 D と導体外径 d の比が3を越すと、絶縁効率は著しく悪くなるようである。
- (3) ブチルゴムケーブルに対しては極性効果が認められない。
- (4) 交直比は従来考えていた値より大きく、常温における10分間間隔昇圧試験結果では、直流破壊値は交流破壊値の実効値と比較し約6.5倍となる。

(5) DC 60kVブチルゴムコットレルケーブルを応用例として示したが、十分な安全度を持つことが確認された。

(6) 40kV $1 \times 150 \text{ mm}^2$ ブチルゴム電力ケーブルの試作結果から、実用可能な電気的特性を持つことが明らかとなった。

これらの諸事項は引き続き検討しなければならないが、今後の研究と実用面に多少なりとも参考になれば、筆者らの最も幸いとするところである。

最後に、執筆にあたり種々ご指導をいただいた武蔵工業大学鳥山教授、適切なご指示を賜った株式会社日立製作所日立工場橋本副部长、日立電線株式会社電線工場の関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 渡辺, 吉川, 庄司: 日立評論別冊 No. 9, 73 (昭30)
- (2) 依田: 電力 41, 1648 (昭32)
- (3) J. C. Carroll, etc.: Pow. App. and Syst. No. 21, 1204 (1955)
- (4) 依田, 増岡, 卜部, 吉岡: 日立評論別冊 No. 28, 45 (昭33)
- (5) S. J. Rorch: PoW. App. and Syst. No. 21, 1219 (1955)
- (6) 依田, 増岡: 日立評論別冊 No. 15, 49 (昭31)
- (7) 庄司, 渡辺, 依田, 増岡: 電三連大 No. 450 (昭31)
- (8) 依田: 電四支部大 No. 242 (昭33)
- (9) 依田, 相田: 電四連大 No. 610 (昭34)
- (10) 依田: 日立評論 40, 1493 (昭33)
- (11) 依田: 日立評論 41, 991 (昭34)
- (12) E. D. Davis, W. N. Eddy: TAIEE 59, 394 (1940)
- (13) 依田, 佐藤: 日立評論本号
- (14) 杉山, 依田, 吉岡: 電四連大 No. 508 (昭32)
- (15) 明楽, 高橋, 川井, 上山: 電三連大予稿 No. 452 (昭31)
- (16) W. H. Couch etc.: Pow. App. and Syst. No. 22, 1387 (1956)

日 立
Vol.22 No. 5

目 次

- ◎電化は文化.....扇谷正造
- ◎ビールので き る ま で
- ◎オートメーションの夢
- ◎新しい照明施設
- ◎ルームクーラのABC
- ◎明日への道標 (ただ一つの国産大形分塊ミル富士鉄室蘭で運転開始)
- ◎お店の実用的マスコット
- ◎ハイライト (キングサイズの電気掃除機)
- ◎歯車とホブ盤の話
- ◎新しい簡易冷房装置
- ◎マイクロ波と通信用測定器
- ◎日立だより
- ◎信号を遅らせるケーブル

発行所 日立評論社
東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
取次店 株式会社オーム社書店
東京都千代田区神田錦町3の1
振替口座 東京 20018 番

日 立 造 船 技 報

Vol. 20 No. 4

目 次

- ◎超大形船の厚板熔接施工法に関する研究
- ◎円筒形内容器胴板の丸さについて
- ◎製かん工作における自動熔接の研究
- ◎循環水ポンプのケーシング内速度について
- ◎かじ性能に及ぼすプロペラの後流の影響について (II)

——かじの流体力学的研究 (その4)——

本誌につきましての御照会は下記発行所へ
御願いたします。

日立造船株式会社技術研究所

大阪市此花区桜島北之町