U.D.C. 621.315.2.015.51 : 678.742.4

ブチルゴム電力ケーブルの絶縁破壊の諸特性

Characteristics of Breakdown Phenomena of Butyl-Rubber Insulated Power Cables

依田文吉* Bunkichi Yoda　卜部義清* Yoshikiyo Urabe
増岡信雄* Nobuo Masuoka　吉岡正幸* Masayuki Yoshioka

内容梗概

近年急速度に使用が増大しているブチルゴム電力ケーブルの破壊特性について種々の観点から検討を行った結果，すぐれた性能を有し，安定性があることを確認した。

すなわち，時間特性はソリッド形ケーブルなどに比して短時間で安定し，ケーブルの長寿命が期待できる。また温度特性は高温まで破壊電圧の低下が少なくブチルゴムの良好な耐熱性が電気的に立証された。また屈曲特性はケーブル導体外径と絶縁外径の比が大いに関係することと，導体に接する絶縁体の伸びと破壊電圧の低下に直線関係があることが見出された。これより許容屈曲半径の限度が算出でき，製造，布設，使用にあたり大いに参考となる結果が得られた。

1. 緒言

電気的，化学的にすぐれた安定性を示す合成ゴム(1)~(3)であるブチルゴムがわが国においてケーブル材料として使用され始めてからまだ五年に満たないが，その間，ケーブル構造および使用配合の改良と製造技術の進歩による性能の向上は著しく，近年その需要は急速に増大した。その用途も従来主としてベルトケーブルや，SLケーブルが用いられてきた送配電用電力ケーブルの分野から発変電所の主幹ケーブル，海底ケーブル，竪坑ケーブルなどと次第に範囲を広げ多くの使用実績により安定した性能を認められ，この分野に確固たる地位をきずきつつある。このようなケーブル使用量の増大に伴い使用者と製造者の協力によって，諸種の研究，検討が行われてきた。筆者らもケーブルに致命的な絶縁破壊特性を中心に検討を進めてきた。すなわち設計上で最も基本的な絶縁体厚さと破壊電圧の関係(4)，海底ケーブルの場合の吸水特性(5)，布設時および使用時の外傷や外圧の絶縁破壊に及ぼす影響(6)などであり，いずれもブチルゴムケーブルがすぐれた特性を示すことを明らかにした。しかしケーブルの破壊特性を左右するものとしてはこのほかにケーブル寿命を決定する時間特性，周囲条件や負荷の状態で影響する温度特性，布設時や使用時に問題となる屈曲特性などがあり，今回はこの問題に対して多数のケーブル試料を用いて実験を行った。これらの結果はブチルゴムケーブルの設計基準を与えるばかりでなく，布設上，使用上の特長を明らかにし，さらに問題の多い破壊機構の解明の一助となるものと思われる。

* 日立電線株式会社電線工場

2. 破壊電圧時間特性

電力ケーブルの寿命は破壊電圧の時間特性によって決定される面が大きい，従来より使用されているSLケーブルなどでは，布設条件や，負荷状態によって絶縁油の流下偏在などのため性能の低下が大きくなる欠点がある。これに対して，ブチルゴムケーブルでは周知のように良好な耐熱耐老化性から材質的な変化はほとんどない上に，課電による時間特性がきわめて良好であると予測されていた(7)。これを実際のケーブルについて定量的に裏付け設計基準を確立するために合計数百メートルのケーブルについて実験を行った。

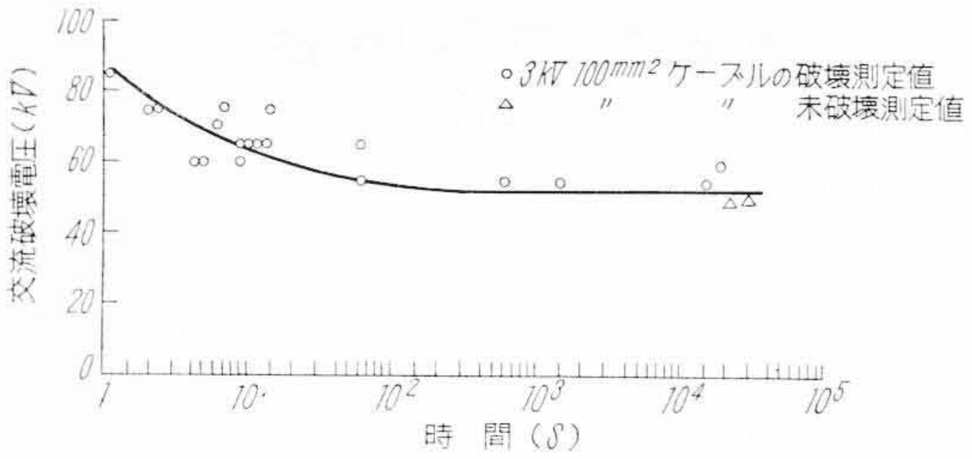
2.1 試料および実験方法

実験に使用した試料は 3 kV の 38 mm², および 100 mm², 6 kV の 150 mm² のブチルゴムケーブルでおのおの試料長を 4.5 m とし遮蔽外径の10倍に屈曲したまま課電し破壊させた。

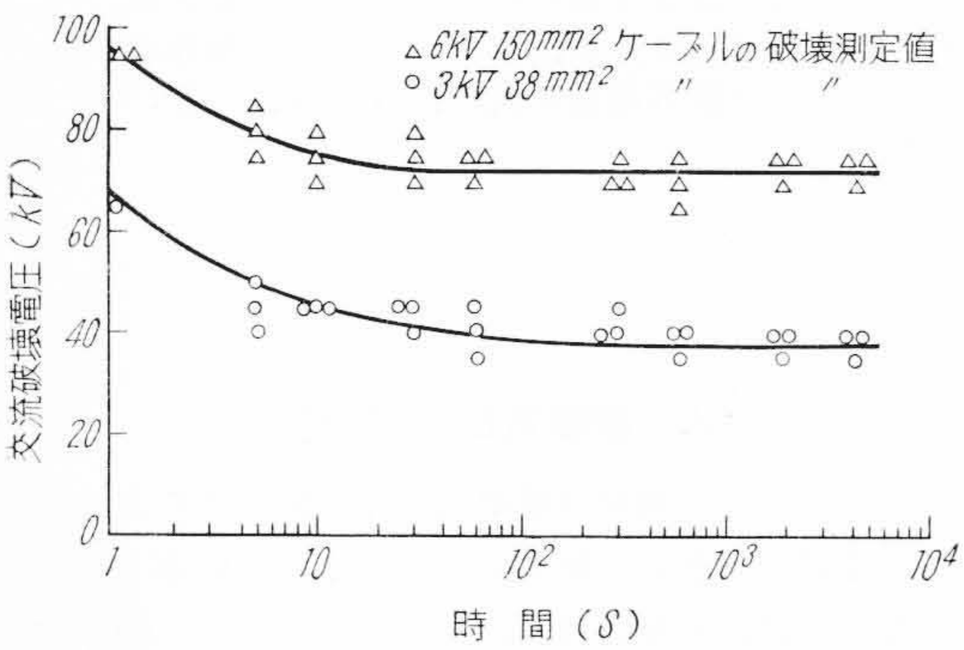
試験の種類としては，(a) ケーブルなどで従来より行われていたいわゆる $V-t$ 特性試験，すなわちある一定電圧まで電圧を急上昇してそのまま維持して破壊に至るまでの時間を測定する方法と，(b) 普通，ケーブルの破壊試験で実施されている階段状に電圧を上昇して破壊させる方法で印加電圧の昇圧単位を 5 kV 一定とし各段階の課電時間を，1，5，10，30秒，1，5，10，30分，1時間と変えて破壊させる方法の二方法について実施した。試料は(a)方法で破壊電圧近傍で 2.5~5 kV の間隔で 20 数本，(b) 方法では各点3本計60数本あまり使用した。

2.2 実験結果

(a)方法による課電時間と破壊電圧の関係を第1図に



第1図　ブチルゴムケーブルの破壊電圧—課電時間特性（$V-t$ 特性）

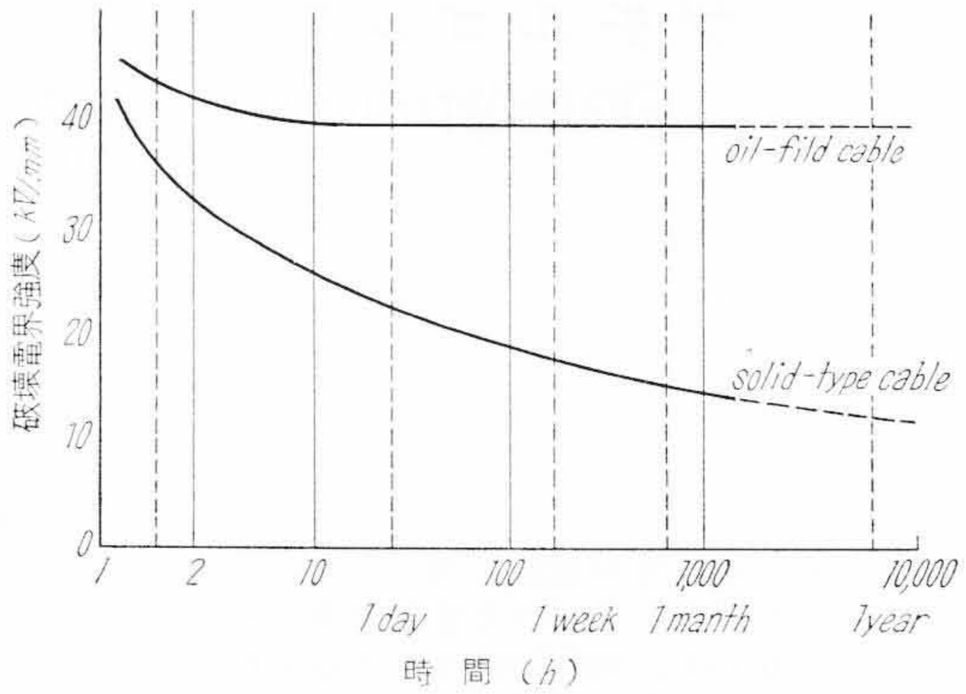


第2図　ブチルゴムケーブルの破壊電圧—昇圧時間特性

示す。この場合は急速に1分前後で安定しており，破壊電圧に対する課電時間の影響がきわめて少ないことを示している。**第2図**は（b）方法による昇圧時間単位と破壊電圧の関係である。やはり1分昇圧付近で安定し，それ以上の昇圧時間単位では破壊電圧に影響のないことを示している。

2.3　結果に対する考察

まずケーブルの導体径と絶縁厚さの時間特性に及ぼす影響は使用した三種の試料がいずれも導体径，絶縁厚を異にしているにもかかわらずその破壊特性はほぼ同一傾向をもつことからその影響はほとんどないものと推察される。次に課電時間の影響はSL形やベルト形のソリッド形のケーブルが前述のように著しく時間の経過とともに低下をつづけ安定しないのに比し，ブチルゴムケーブルでは短時間で一定値に達している。同じ紙ケーブルでも比較的時間特性の少ないOFケーブルではその傾向は同一でも安定するのには約10時間を要している。**第3図**はソリッド形ケーブルとOF形ケーブルの時間特性の一例である[8]。ブチルゴムケーブルの場合，1分前後で安定するがその初期の数秒間の変化はかなり急激である。その原因はまだ明らかでないが高電界のためケーブルのコロナ開始電圧が下っていく[9]ことも一因と思われ



第3図　紙ケーブルの破壊電界強度—課電時間特性（$V-t$ 特性）

る。油浸紙の破壊時間特性については，ソリッドケーブルの場合，Peek の（1）式[10]が与えられており，OFケーブルでは（2）式[11]が与えられている。

$$V=V_0\left(1+\frac{a}{\sqrt[n]{t}}\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$V=\frac{b}{\sqrt[n]{t}} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここでVは破壊電圧，tは破壊までの時間，V_0はtが∞の時の破壊電圧，すなわち何時間経過しても破壊しない電圧，a，b，nは定数でnの値がソリッドケーブルでは4，OFケーブルでは6～8となる。**第1図**の結果からブチルゴムケーブルの場合について破壊電圧が安定する範囲内で検討すると次の（3）式がよく特性を表わしている。

$$V=\frac{C}{\sqrt[n]{t}} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここでC，nは定数でnが8～9となる。すなわち破壊電圧は破壊までの時間の8～9乗根に逆比例することとなる。このような時間特性は熱破壊の要素が少ないことを暗示していると同時に初期の性能をあまり低下せずに使用でき，長寿命を期待できることを示している。昇圧時間が破壊電圧に与える影響も1分以上の昇圧単位ではほとんどない。これはケーブルの各種破壊試験を行う際，その昇圧単位をいかにすればよいか，あるいは昇圧単位の異なる試験結果を比較する場合などに一つの基準を与えることになり，合理的な試験規格作成の一助ともなるであろう。

3.　破壊電圧温度特性

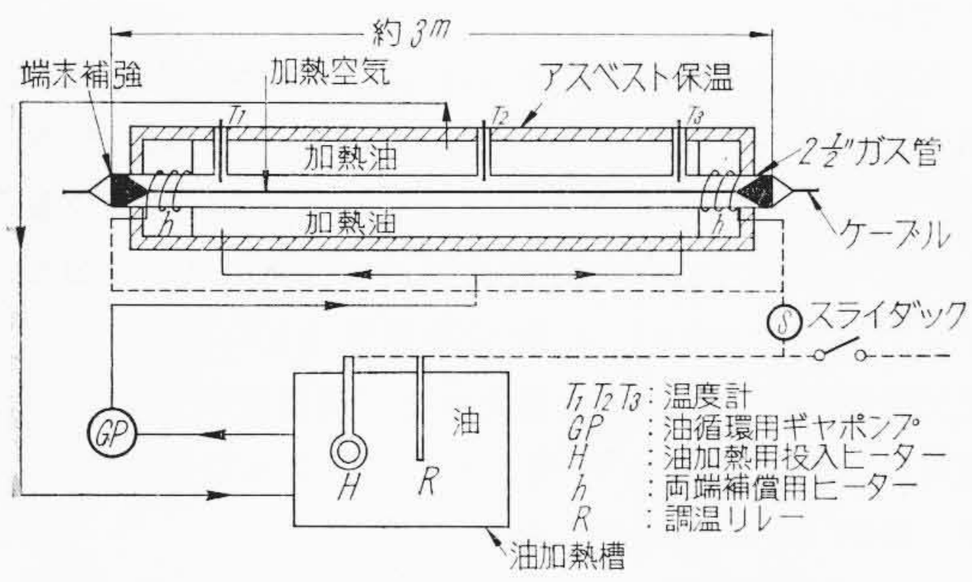
実際の電力ケーブルの運転状態は負荷電流，誘電体損による発熱と周囲温度の影響によりかなり高温で課電されている。したがって高温におけるケーブルの破壊特性

をきわめることはケーブルの最高許容温度を決定する上からも実際使用する場合の安全性からも重要なことである。ブチルゴムが物理化学的に耐熱性の良好なことは周知のとおりであり電気的な温度特性もブチルゴムシートの場合については検討されている[12][13]。ケーブルの場合についても短絡による瞬間的な高い温度上昇が破壊に及ぼす影響は実験されているが[14]，長時間高温下におかれた場合の実験はされていない。筆者らは熱空気加熱方式によりブチルゴム電力ケーブルの交流長時間，短時間および衝撃電圧の破壊温度特性を検討した。

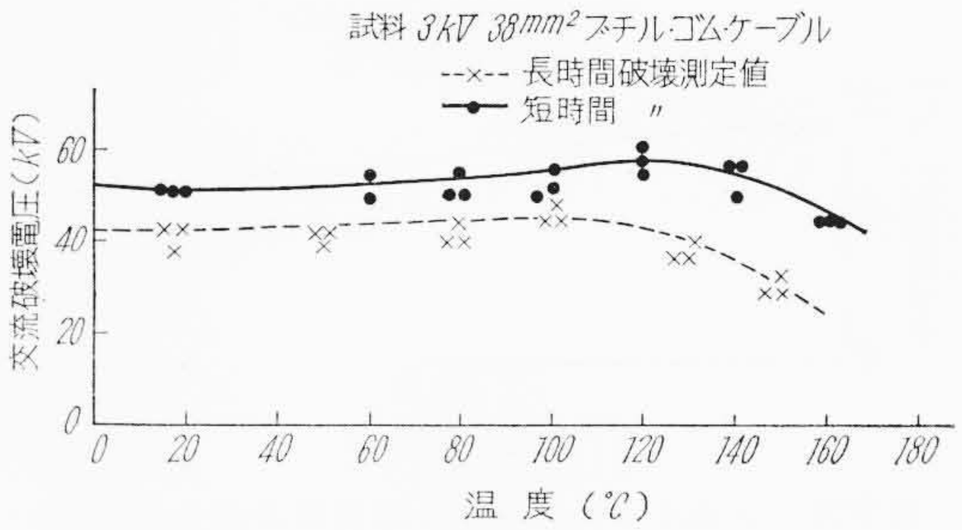
3.1 実験装置，試料および実験方法

試料を高温度に保ち課電する方法には種々あるが直接電流を流し高電圧を印加する方式が多い。すなわち，(a) 加熱用大電流変圧器で通電し高圧試験変圧器で課電する方式，(b) 同様の組合せであるが加熱変圧器の二次巻線として直接供試ケーブルを用いる方式，(c) 電動大電流発電機を用い通電し高圧試験変圧器で課電する方法などである。しかしこれらの方法はいずれも試験装置が複雑で，またケーブル絶縁体の温度測定がやや困難である。そこで筆者らはケーブルの加熱は外部の熱空気によって行い温度分布測定が容易で調整も簡単な装置を作成した。**第4図**に示すような二重同心円筒中に試料ケーブルを挿入しケーブル周囲の空気を自動温度調節によって加熱した油で加熱しこれにより試料を間接的に規定温度に保つようにした。両端末における温度勾配を補償するためヒーターを両端にもうけ温度の均一化を計った。試料全長にわたる温度分布の測定は高温空気槽内に挿入した3本の温度計と試料上にとりつけた数本の熱電対によって行い，±1℃前後にばらつきを押えた。実験に使用した試料は 3 kV の 38 mm² のブチルゴム電力ケーブルで試料長を 4.5 m とし各温度とも3本で約 70 本に近い試料を使用した。

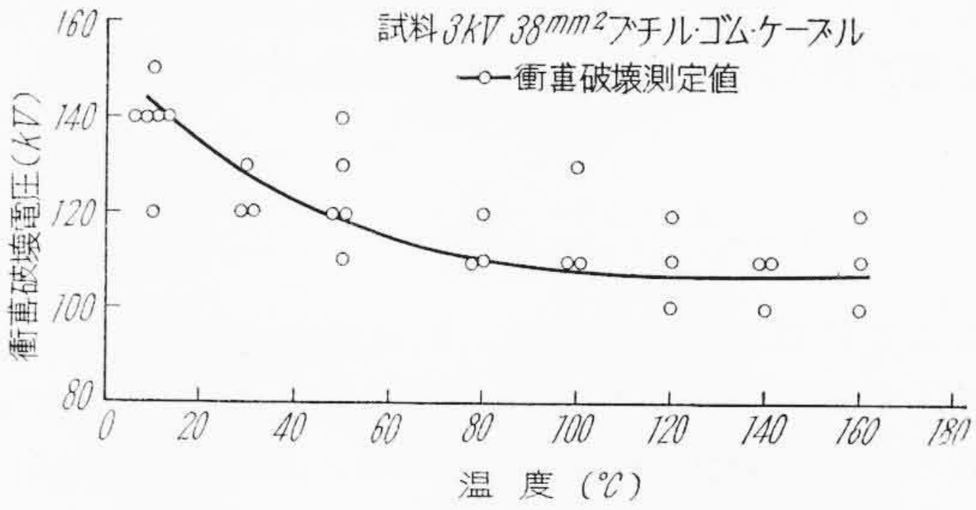
課電方法は試料ケーブルが規定温度に達してから約2時間同一温度に保持し温度の均一化を計った。長時間破壊の場合は 20 kV/1 h 課電後 5 kV/30 min の昇圧，短時間破壊の場合は 500 V/s の昇圧速度，衝撃破壊の場合は 1×40 μs の標準波を 80 kV/3回 課電しその後 10 kV/3回で昇圧課電して破壊させた。



第4図　ケーブルの高温特性試験装置（熱空気加熱方式）



第5図　ブチルゴムケーブルの交流長時間，短時間破壊—温度特性



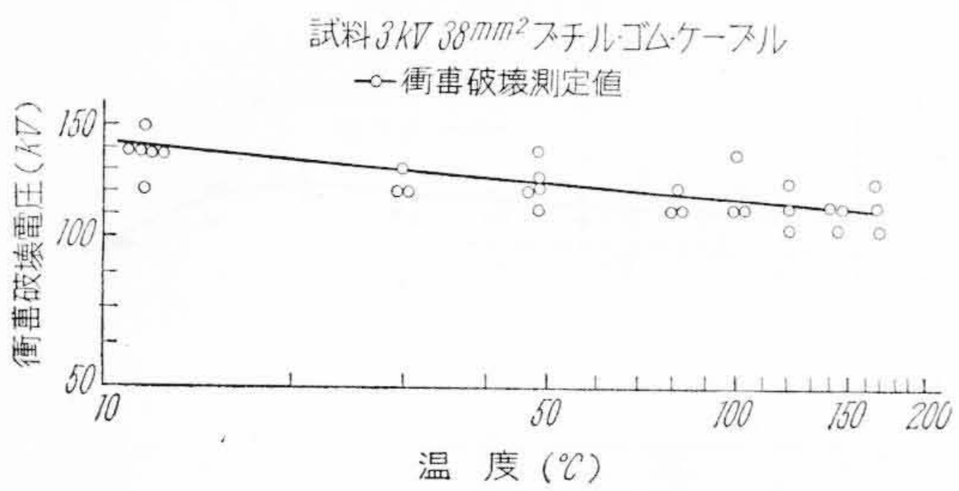
第6図　ブチルゴムケーブルの衝撃破壊—温度特性

3.2 実験結果

長時間および短時間の交流破壊の結果を**第5図**に示し，衝撃破壊を**第6図**に示す。交流破壊の場合は温度に無関係かむしろ温度とともにわずかに破壊電圧が上昇すると思われる 100～120℃ 前後までの低温領域と，逆にゆるやかに下降する高温領域との二つに分かれていると考えられる。この両領域の臨界温度は同一試料については長時間破壊および短時間破壊で異なり，前者は後者よりも低い温度で下降の傾向が現われる。他方衝撃破壊の方は 60℃ 以下の低い温度では破壊値が上昇し，高温度ではきわめてゆるやかに低下し交流破壊の場合とかなり異なった傾向を示した。これは再度試験を行って確認をしたが同様であった。

3.3 結果に対する考察

交流破壊の低温領域のわずかな破壊電圧の上昇は衝撃破壊がそうでないことからも intrinsic な破壊であるとはいえないかもしれない[15]。しかし絶縁体中に空隙のない場合にコロナ放電で誘発される絶縁破壊とも見なされずまたそうかといって破壊電圧の時間特性などからみても単なる熱破壊としてかたづけるわけにもいかない。いずれにしてもブチルゴムの破壊機構はまだ不明の点が



第7図　ブチルゴムケーブルの衝撃破壊—温度特性（対数表示）

多く今後の解析にまたねばならないが興味ある結果を示している。なお衝撃破壊特性はこの結果を対数表示すると第7図のように直線となり次の実験式（4）を得る。

$$V=\frac{d}{\sqrt[n]{T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

ここで V は破壊電圧（kV），T は破壊試験温度（℃），d，n は定数で $d=171$，$n=11$ 程度の値となる。すなわち衝撃破壊電圧は温度の 11 乗根に逆比例する結果となる。

以上の結果からブチルゴムケーブルの温度特性は化学的ばかりでなく電気的にも良好であり，天然ゴムや合成樹脂ケーブルに比して高い許容温度（75～85℃）を取っている基準の妥当性が裏付けられる。

4. 破壊電圧屈曲特性

ブチルゴム電力ケーブルは可撓性の良いことが大きな特色の一つであり，最近では交流電気機関車用や移動変電所用の 20 kV 級の高電圧ケーブルや，コールカッタなどの鉱山機械用の大容量キャブタイヤケーブルなどにも使用されるようになっている。このような特殊な用途に限らず一般の電力ケーブルにおいても輸送，布設などに際して小さな屈曲半径がとれることは経済上，取り扱い上，きわめて有利である。これが端末処理の簡単さと相まって需要増加の一因ともなっているが，この長所も当然限度があり電気的な屈曲の限度を認識することはケーブル設計上はもちろん，製造上，使用上に非常に重要である。

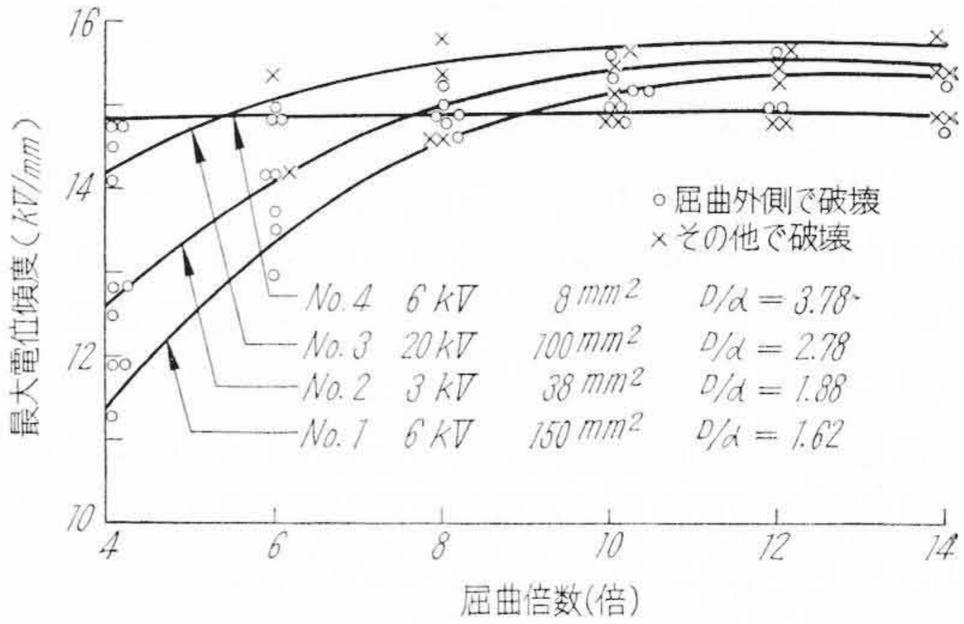
ブチルゴムの屈曲特性試験はシートおよびケーブルについて行われ一応その限度を屈曲部外側のゴムの伸びに対応させて検討した[15]，今回筆者らはさらにケーブルの導体外径と絶縁体厚の屈曲に対する影響を実験し，最も電界強度の強くなる導体に接する部分の絶縁体の伸びに対応させたところ興味ある結果を得ることができた。

4.1 試料および実験方法

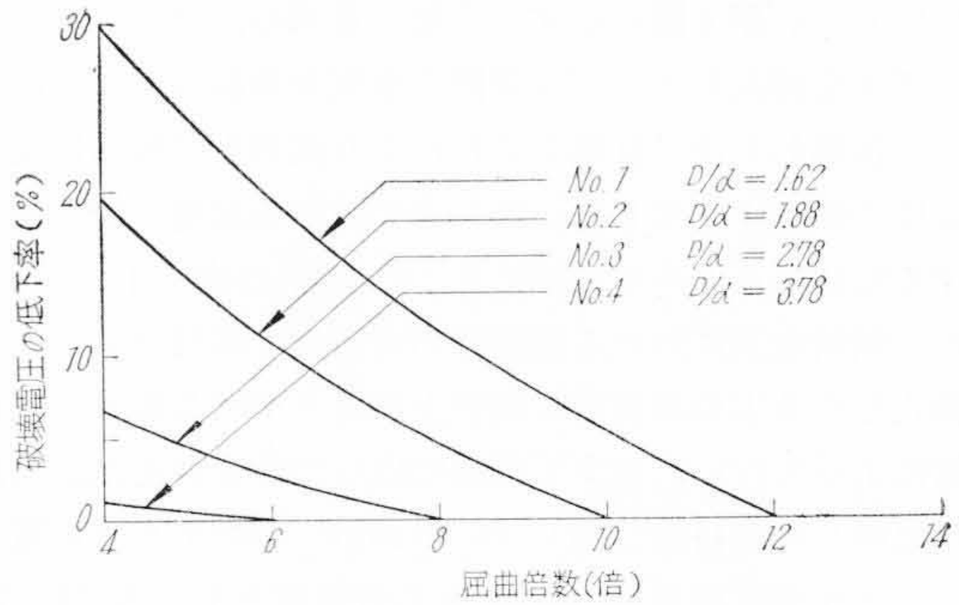
実験に用いた試料は 6 kV 150 mm²，3 kV 38 mm²，20 kV 100 mm²，6 kV 8 mm² であり第1表に示すようにそれぞれ導体外径 d と絶縁体外径 D の比を異にするものである。

第1表　屈曲試験試料

試料 No.	公称電圧	導体断面積	導体外径（d）	絶縁体外径（D）	$\frac{D}{d}$
No. 1	6kV	150mm²	16.2mmφ	26.3mmφ	1.62
No. 2	3kV	38mm²	8.0mmφ	15.0mmφ	1.88
No. 3	20kV	100mm²	12.6mmφ	35.0mmφ	2.78
No. 4	6kV	8mm²	3.6mmφ	13.6mmφ	3.78



第8図　ブチルゴムケーブルの破壊電圧—屈曲特性



第9図　ブチルゴムケーブルの破壊電圧の屈曲による低下率

実験は実際の使用状況よりはるかに苛酷な条件ではあるが絶縁体外径を基準としてその外径の 4，6，8，10，12，14 倍の径に 180 度巻付け，そのままの状態で 3 kV ケーブルでは 10 kV，6 kV ケーブルでは 20 kV，20kV ケーブルでは 40 kV を 30 分課電後 5 kV/30 min の昇圧で破壊させ，その破壊電圧および破壊箇所を求めた。試料は試料長 4.5 m で各点とも 2～3 本のケーブルを用い計約 50 本余使用した。

4.2 実験結果

第8図は屈曲破壊特性で屈曲外径の変化に対する破壊

最大電位傾度への影響を示したものである。ケーブルの屈曲径を次第に小さくするとある屈曲径から破壊電圧は低下し始め破壊点は屈曲部の外側に集中するようになる。**第9図**は直線状態での破壊電圧と屈曲状態での破壊電圧とから屈曲外径に対する破壊電圧の低下を（5）式より算出し百分率で表わしたものである。この図より明らかな

$$\text{破壊電圧の低下率} = \frac{\text{直線状態での破壊電圧} - \text{屈曲状態での破壊電圧}}{\text{直線状態での破壊電圧}} \times 100(\%) \quad \cdots\cdots(5)$$

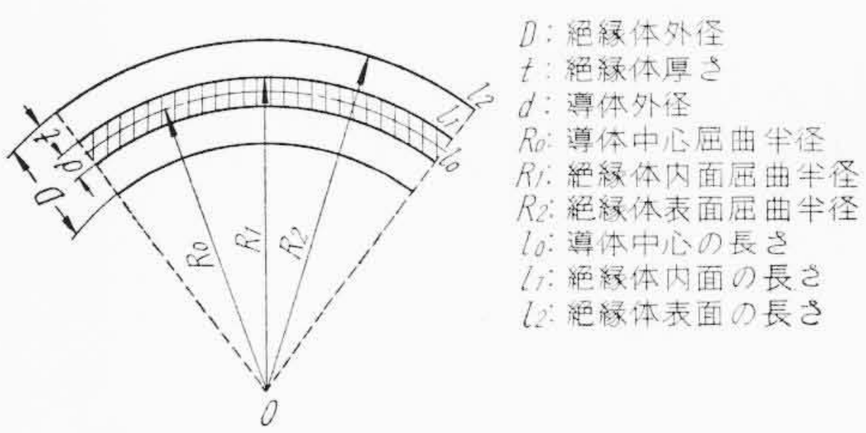
ように破壊電圧の屈曲による低下は導体外径 d と絶縁体外径 D の比 D/d の値によりかなりの開きがあることがわかる。

4.3 結果に対する考察

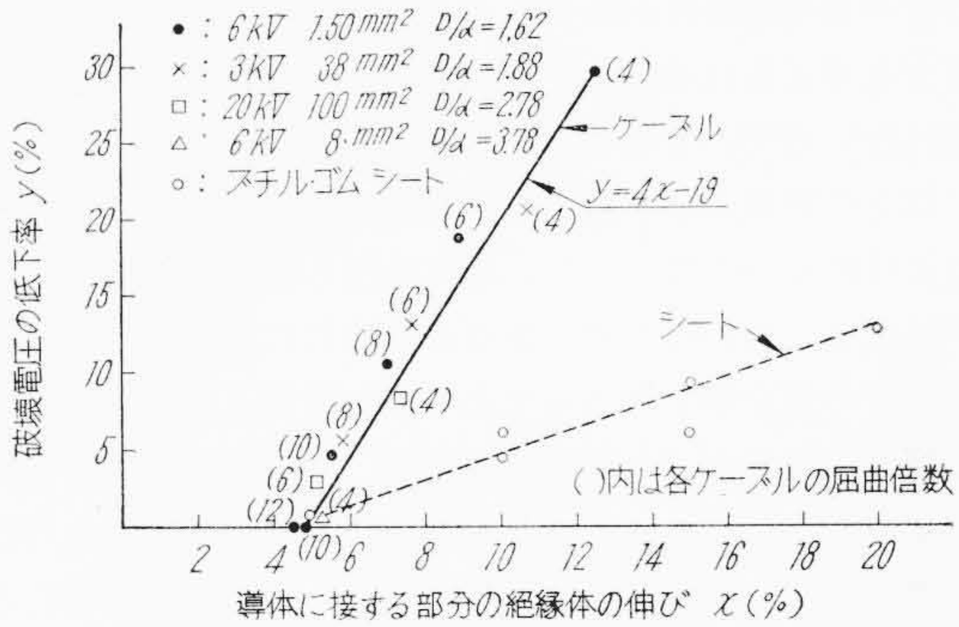
屈曲による破壊電圧の低下の原因には，有効絶縁厚さの減少，ゴムが伸長された状態での本質的な破壊電圧の低下などが考えられる。

実際のケーブルの場合屈曲による有効厚さの減少は計算が複雑で実測も困難であり，またその減少の程度もわずかである（シートの伸びによる厚さの減少率より簡単に略算するとケーブル絶縁体最大伸び 15％の場合でも3％以下である）。したがって，これを無視して**第8図**の破壊最大電位傾度を計算したがあまり大きな影響はないものと思われる。次にゴムの伸びに対する破壊電圧低下はシートの場合と異なる。たとえば導体に接する部分と屈曲の外側の絶縁体表面とでは絶縁体の伸長の程度が異なり，ゴムの伸びといってもどこの伸びをとるかが問題となる。ケーブルの導体中心より屈曲の内側の方は圧縮を受けるが，一応これは問題にしないとして，**第10図**のように屈曲の外側の伸びの場合だけを考えると，次のようになる。

屈曲径とケーブル絶縁体外径 D の比を K で表わす。次に導体に接する部分の絶縁体の最小伸びの割合を Δl_1，絶縁体表面の最大伸びの割合 Δl_2 とすればこれらの間には次式の関係がある。



第10図　ケーブルの屈曲状態図



第11図　ブチルゴムケーブルの絶縁体の伸びと破壊電圧の低下率の関係

$$\Delta l_1 = \frac{d}{(K+1)D} \times 100\% \quad \cdots\cdots(6)$$

$$\Delta l_2 = \frac{1}{K+1} \times 100\% \quad \cdots\cdots(7)$$

すなわち導体に接する部分は絶縁体外径と導体外径の比 D/d に関係しこれに逆比例しているが絶縁体表面の伸びは屈曲倍数 K のみで定まる。他方**第8，9図**の試験結果から明らかに屈曲による破壊電圧の低下は D/d によりかなり顕著な差があることが注目される。また導体に接する部分は機械的な伸びは最少であっても電気的には電界が最も大きい部分であり，電気的破壊現象を考える場合には重要である。したがって各試料の導体に接する部分の伸びの割合と破壊電圧の低下率との関係を図示すると**第11図**のようにきわめて興味ある比例関係が得られた。なお同図の点線はシートを伸長した場合の伸びと破壊電圧の低下率との関係で同じく直線となっている。この直線よりケーブルの場合の実験式を求めると（8）式が得られる。

$$y = 4x - 19 \quad (x \geqq 4.8,\ y \geqq 0) \quad \cdots\cdots(8)$$

ただし　y：破壊電圧の低下率（％）

x：導体に接する絶縁体の伸び（％）

$$= \Delta l_1 = \frac{d}{(K+1)D} \times 100 \ (\%)$$

ここにおいて注目すべきことは x 軸との交点がケーブルの場合もシートの場合もいずれも伸び 4～5％であり，破壊電圧が低下し始めるのはその付近からで，その後の低下の割合は伸びに比例していることである。したがってこの実験式を用いれば逆に任意のケーブルの破壊電圧が低下し始める屈曲半径を計算から求めることができる。たとえば 10 kV 1,000 mm² のブチルゴムケーブルでは 13.5 倍が許容屈曲径の限界点となる。

しかし**第11図**においてケーブルの場合とシートの場合で直線の勾配が異なる点は，ケーブルでは絶縁体の伸びが導体表面を離れるに従って次第に大きくなっている

ことや有効絶縁厚が多少なりとも減少していることによるとも考えられる。またもっと根本的な原因があるかも知れないので，さらに検討を要する。

以上の結果から予想どおり屈曲破壊特性は良好であることは明らかとなったが，導体外径と絶縁体外径との比 D/d によってかなり差がある点は注目に値する。一般には多少の安全率を見込んでその径に屈曲したまま使用する場合にはケーブル絶縁体外径の 15 倍以上にすることが望ましい。したがって3心ケーブルの場合にはその仕上外径の 15 倍にとればさらにかなりの裕度があることとなる。

5. 結　　言

ブチルゴム電力ケーブルの破壊電圧の時間特性，温度特性，屈曲特性について検討を行い次の結論を得た。

5.1 時間特性

（1） 課電時間の影響はきわめて少なく，$V-t$ 曲線は1分前後で安定する。この特性はソリッド形ケーブルやOFケーブルに比して良好であり破壊電圧は破壊までの時間の8～9乗根に逆比例する。

（2） 昇圧時間の影響も昇圧単位1分以上ではほとんど安定し，試験法の決定に大きな示唆を与える。

5.2 温度特性

（1） 長時間および短時間破壊特性は 100～120°C まで低下を示さず良好である。

（2） 衝撃破壊特性は低温度で上昇し高温度では 160°C までほとんど低下を示さず温度の 11 乗根に逆比例する。

5.3 屈曲特性

（1） 屈曲による破壊電圧の低下はケーブルの導体外径 d と絶縁体外径 D との比 D/d によって大きく左右される。

（2） 導体に接する絶縁体の伸び x と破壊電圧の低下率 y との間には $y=4x-19$ なる関係があり，伸びが約5％になるとき破壊電圧が低下し始める。

（3） 上記の実験式より破壊電圧が低下しない許容屈曲限界が算出でき，一般にブチルゴムケーブルでは15倍以下の屈曲径で使用しないことが望ましい。

以上の実験検討により，従来より認められていたブチルゴム電力ケーブルの各種特長に加えてすぐれた時間，温度，屈曲特性を有することが確認された。これは設計上貴重な基準を与えるばかりでなく，布設や使用上にも参考になることが多い。

終りに当り本研究に対し種々御指導いただいた東北大学鳥山教授，日立電線株式会社電線工場内藤，久本，大和部長および杉山課長に深謝する。さらに製作にあたり御尽力をいただいた山野井，水上両部長，および庄司課長，また試験に御協力をいただいた武地部長，高橋課長および今井主任はじめ関係諸氏に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

(1) W. H. Couch C. H. Hunt, N. D. Kenney, P. H. Ware: Trans, Paper No. 55～693, 5～24 (1955)
(2) 吉川，渡辺，依田： 電三連大 161 (昭 30)
(3) J. C. Carroll, A. R. Lee, R. B. Mckinley: Power App. & Sys. No. 21 1204 (1955)
(4) 庄司，渡辺，依田，増岡： 電三連大 450(昭 31)
(5) 潮見，井清，久本，庄司，渡辺： 日立評論別冊 21号 15 (昭 32)
(6) ト部，依田，今井： 日立評論 39, 81 (昭 32)
(7) 依田，増岡： 日立評論別冊15号 49 (昭 32)
(8) Pirerri Catalogue 1854/A: Oil-filled Cable Booklet A/1
(9) T. W. Liao, J. R. Nye, H. H. Brustle, A. G. Anderson: Power App & Sys. No. 20, 1046 (1955)
(10) F. W. Peek Jr: Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering P. 245
(11) D. Roper, H. Hrlperin: AIEE 45, p. 505 (June. 1926)
(12) 井川，川井，高橋，神谷： 電四連大 317(昭 33)
(13) 和田，近藤： 電四連大 318 (昭 33)
(14) 宮沢，依田，橋本，相田： 日立評論 35, 81(昭 31)
(15) S. Whitehead: Dielectric Breakdown of Solids (Ox ford Preess 1951)
(16) 永野，依田，今井： 電三連大 450 (昭 31)