

電力ケーブルに用いられる導体遮蔽の意義 (続報)

On the Conductor Shield of Power Cables

依 田 文 吉*

Bunkichi Yoda

内 容 梗 概

高電圧電力ケーブルの最も基本的な問題はケーブル絶縁体の電氣的強度を明確にし、合理的に絶縁体厚を決定することである。

このためにはケーブルの絶縁破壊機構の物理化学的究明が必要であるが、ともかくケーブルの破壊電圧を上げるという工学的努力もまた重要である。

電力ケーブルに用いられる導体遮蔽はこの意味においてきわめて有効なものであり、理由はともあれ破壊電圧の向上にかなりの寄与を示している。

この報告では前報に引き続き主としてブチルゴム電力ケーブルを対象とした導体遮蔽材料の諸特性を考察し、次に電気抵抗、熱抵抗の測定を行った結果と導体遮蔽の絶縁破壊に与える影響に関する実験および考察を行っている。

この結果、半導電体の電氣的諸特性には特異な現象がないが、絶縁破壊電圧の向上には著しく寄与することがわかった。また導体遮蔽の意義は従来考えられてきた通り撚線効果の低減が最も大きい、コロナ遮蔽、段絶縁そのほか固有の効果も半定量的に確認された。

1. 緒 言

高電圧電力ケーブルに用いられる導体遮蔽の意義はきわめて大きい。筆者はさきにこの機構を究明する目的で、次の諸項目について検討することを提案した⁽¹⁾⁽²⁾。

すなわち

(1) 撚線効果の軽減による導体表面の電位傾度を低下させる機能

(2) 導体遮蔽材料により異なるが、半導電体を用いた場合のケーブル断面における静電的段絶縁

(3) 導体と絶縁体との密着をよくし、導体表面上のコロナ放電を阻止する機能

(4) 半導電体を使用した場合の特有の効果、すなわち導体から半導電体へ、または半導電体から絶縁体への電子の注入やストリーマの伸展阻止

などである。

しかしながら、使用する材料の電気絶縁に及ぼす特性の把握はいっそう基礎的であるので、今回はまずこの測定を行った。初めに体積および表面固有電気抵抗の電圧、温度特性を測定し、次に固有熱抵抗を求めた。さらに誘電特性を調べ、最後にこの材料を適用したブチルゴム電力ケーブルについて絶縁破壊電圧を測定した。まず導体遮蔽の有無と厚さの影響を検討し、次に導体圧縮の効果を確認した。またこれらのケーブル試料に対して、交流長時間、短時間、衝撃波などの印加電圧の種類による変化をも明確にした⁽³⁾。

本報告はこれらの一連の実験結果をとりまとめたものであるが、得られた結果がケーブルの絶縁設計に与える示唆には興味深いものがある。

2. 半導電体の諸特性

導体遮蔽材料は適用する電力ケーブルの種類により異なる。油浸紙ケーブルでは金属化成紙やカーボン紙など、ゴムケーブルでは導電性ゴム混和物またはこれを塗布したテープ、プラスチックケーブルでは同じく導電性プラスチック混和物またはそれを塗布したテープなどが用いられている。

これらはそれぞれ別々に導体遮蔽の意義を考察しなければならないが⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、この報告では主としてブチルゴム電力ケーブルに用いられている半導電体の諸特性について測定した結果について記述する。

2.1 固有電気抵抗

平板電極間に試料A、Bをはさみ、電圧電流計法により交流50 c/sによる体積固有抵抗を測定した。

一般にこのような半導電体は電圧、周波数、電圧印加時間、温度、湿度などによって変化するため測定が困難であるが、この場合には予想されたほどではなかった。

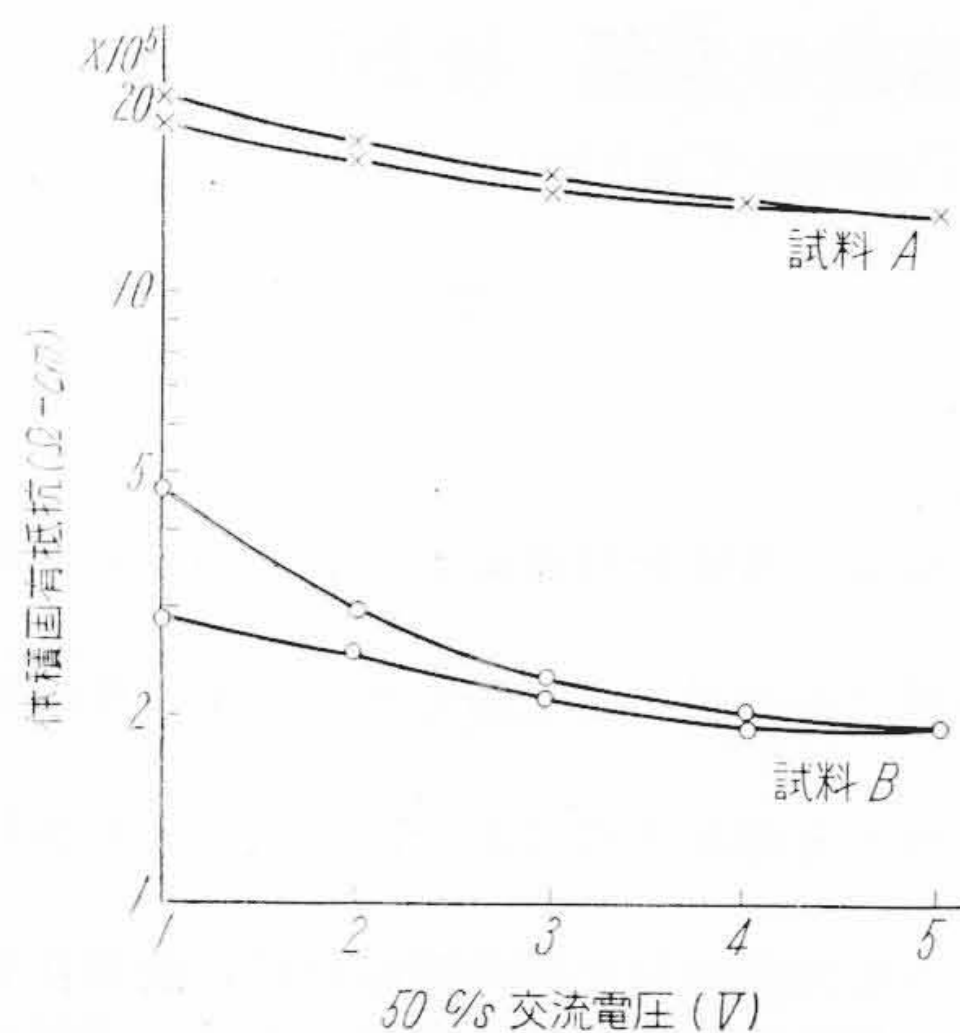
第1図は40°Cにおける体積固有抵抗の交流電圧特性を示したものである。電圧の上昇時と下降時で若干抵抗が異なるが、これは残留電荷の影響と思われる。概して、電圧特性は予想していたよりも少ないことがわかった。

第2図は同一資料に対する温度特性を示したものであり、明らかに半導電体特性を表わしている。

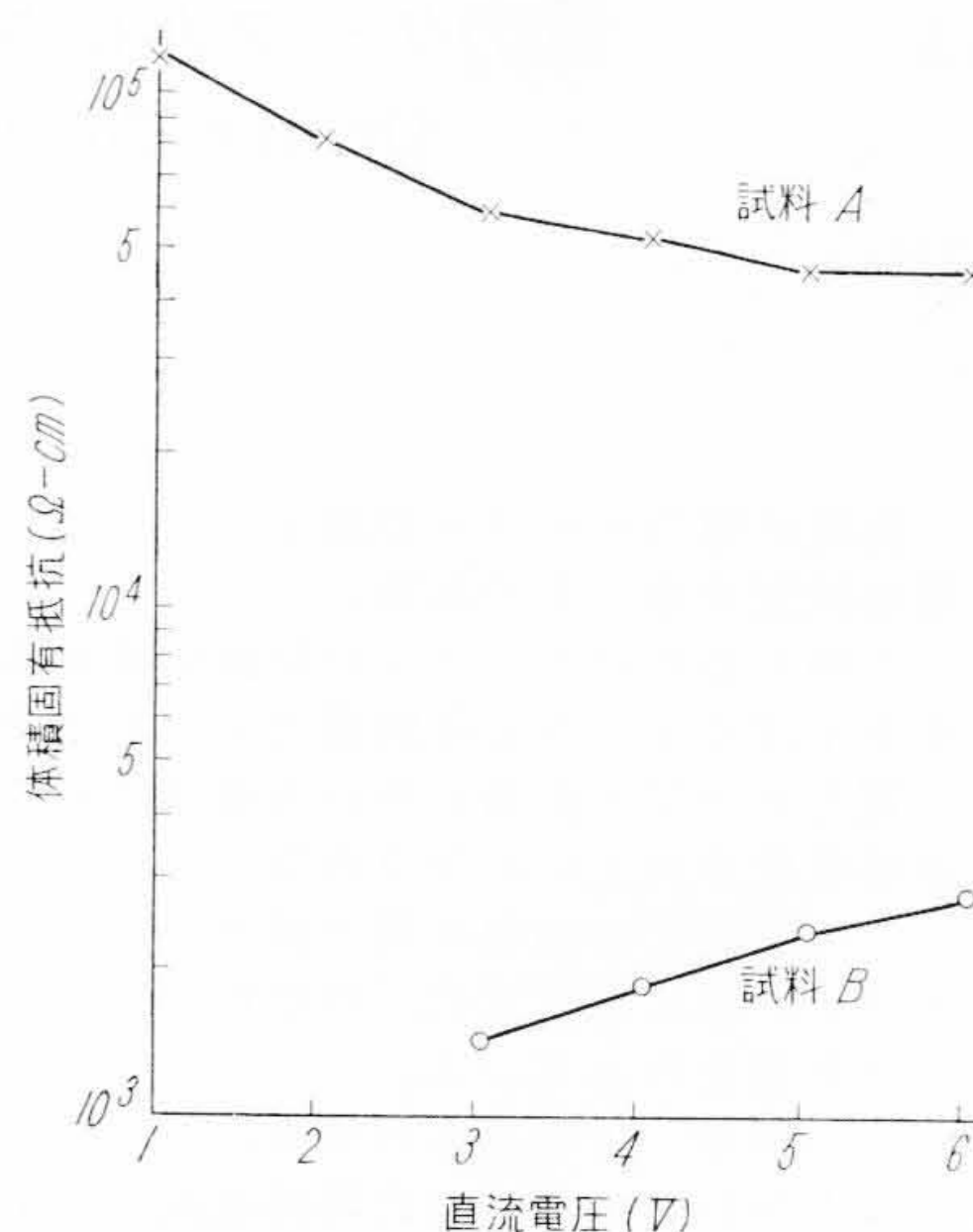
一方、直流によって同様な特性を求めたものを第3、4図に示す。直流の場合には交流と異なり、電圧の上下による履歴は観測されなかった。また直流印加時の吸収現象を調べるために電圧印加後の電流の時間的変化を求めたが、予想に反してほとんど一定であった。

第5図は測定した電流値から計算した体積固有抵抗の

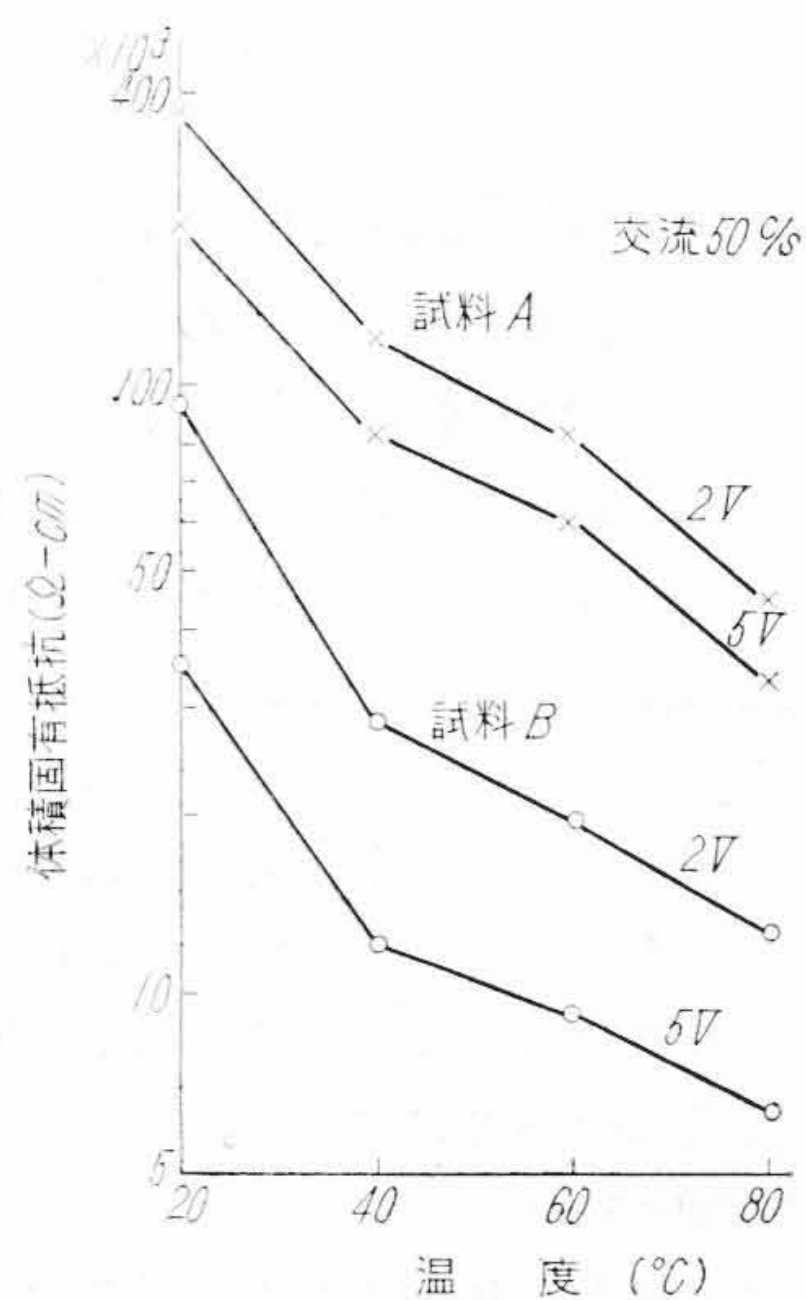
* 日立電線株式会社電線工場



第1図 半導電体の40°Cにおける体積固有抵抗—電圧特性



第3図 半導電体の40°Cにおける体積固有抵抗—電圧特性

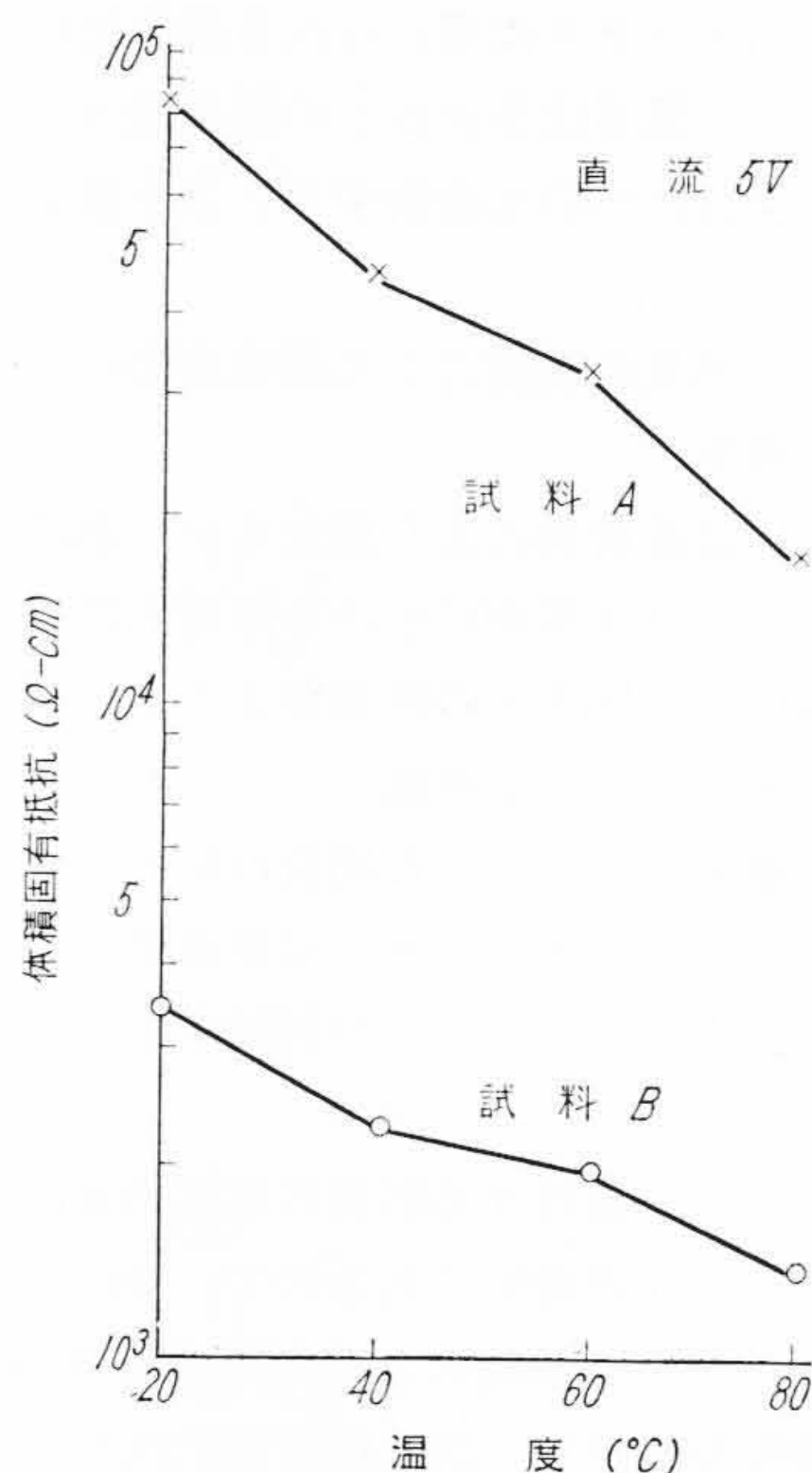


第2図 半導電体の体積固有抵抗—温度特性

時間特性である。結局この種の半導電体は吸収の立場からは誘電体というよりはむしろ抵抗体に近いと考えられる。

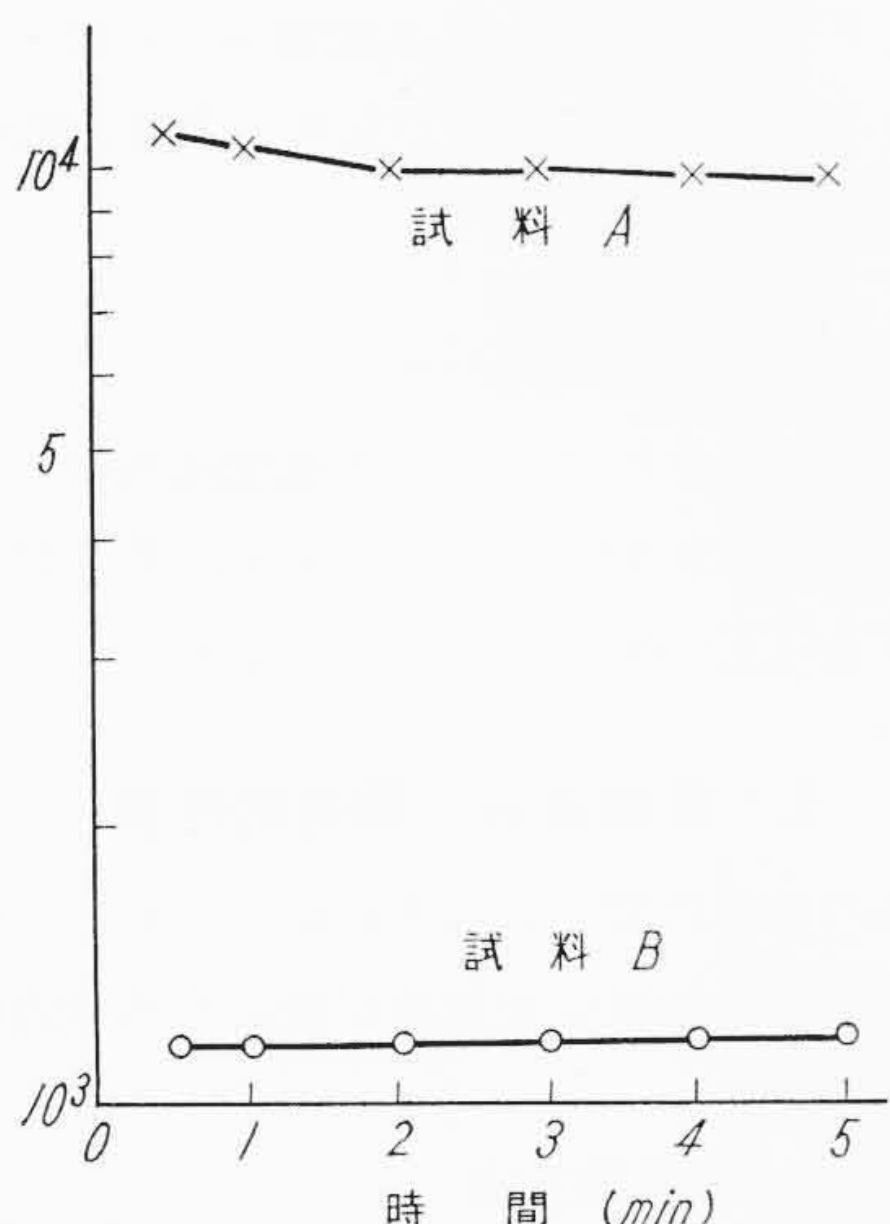
次に常温および40°Cにおいて表面固有抵抗を測定した。この測定にあたっては厳密な意味で体積抵抗と区別するのが困難であるが、一応第6図のような方法でこれを分離した。なお、時間特性もほとんど一定であり、総じて体積固有抵抗と同様あまり著しい特長は見当らなかった。

以上の電気抵抗の測定は導体遮蔽を施したケーブルではどの程度まで燃線効果を防止できるか、あるいは絶縁破壊時において果して導体遮蔽上を完全に高圧電極表面と考えてよいかどうかを調べるために行ったものである。

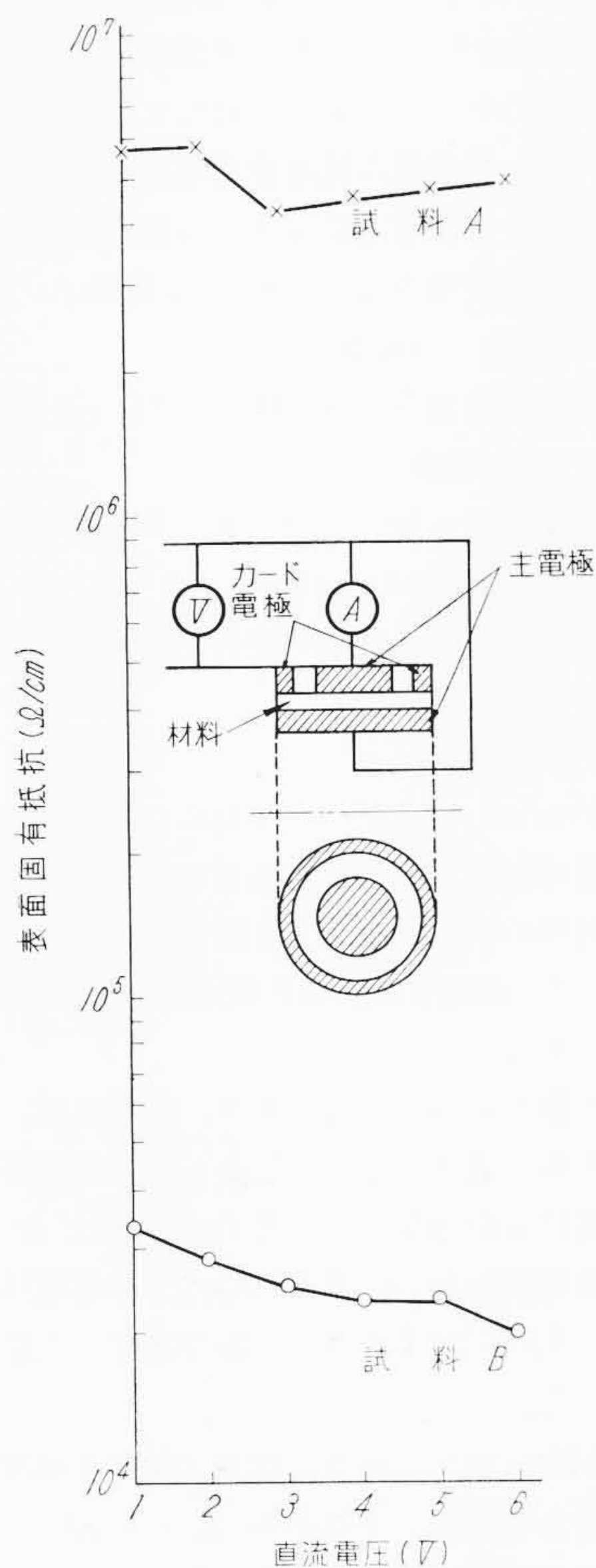


第4図 半導電体の体積固有抵抗—温度特性

一方、もし導体遮蔽として半導電体が用いられ、その名の示すとおり、半導体特有の整流特性を示すならば、絶縁破壊に極性効果が表われ、直流の場合はもちろん、交流の場合にも必ずどちらかの極性の波の尖端で破壊するということがあるかもしれない。この観点から、針対平板電極を用い、電圧—電流特性を求めたところ、正負でわずかに電流の差が認められたが、ブラウン管オシログラフで把握できるほど明確なものではなかった。



第5図 半導電体の体積固有抵抗の時間特性
(印加電圧 3V)



第6図 半導電体の表面固有抵抗—電圧特性
(40°C)

2.2 誘電特性

半導電体が単にケーブル導体の撚線効果を除去して、円筒導体に近づけるのみでなく、静電的な段絶縁の役割を持っているとすればこの材料の誘電率は非常に重要なものとなる。また誘電正接も損失を考慮し、熱破壊との関連を調べるために必要である。

しかしながら、前節で測定したように抵抗値の小さい材料の誘電率測定はきわめてむづかしい。そこで筆者らは誘電率の比較的小さい既知の材料と組合せて静電容量を測定し、これから逆算して半導電体の誘電率を求めることを試みた。

まず、計算に便利のために直径 10mm ϕ の単心丸導体を用い、これに半導電体を 0.5~2.0 mm の厚さに施し、その上にハイボンテープ(自己融着性絶縁テープ)を巻いた。この試料の仕上径はすべて 17mm ϕ とし、シェーリング・ブリッジを用いて静電容量、誘電正接を測定した。

試料の静電容量は2層の複合同心円筒誘電体を考えて次式で表わせる。

$$C = \frac{0.02413}{\frac{1}{\epsilon_1} \log \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \log \frac{d_3}{d_2}} \quad (\mu\text{F/km}) \dots (1)$$

ただし、 ϵ_1 、 ϵ_2 はそれぞれ半導電体とハイボンテープの誘電率、 d_1 、 d_2 、 d_3 は導体径、半導電体外径、ハイボンテープ巻仕上外径である。(1)式から求めた誘電率 ϵ_1 は

$$\epsilon_1 = \frac{\log \frac{d_2}{d_1}}{\frac{0.02413}{C} - \frac{1}{\epsilon_2} \log \frac{d_3}{d_2}} \dots (2)$$

となる。

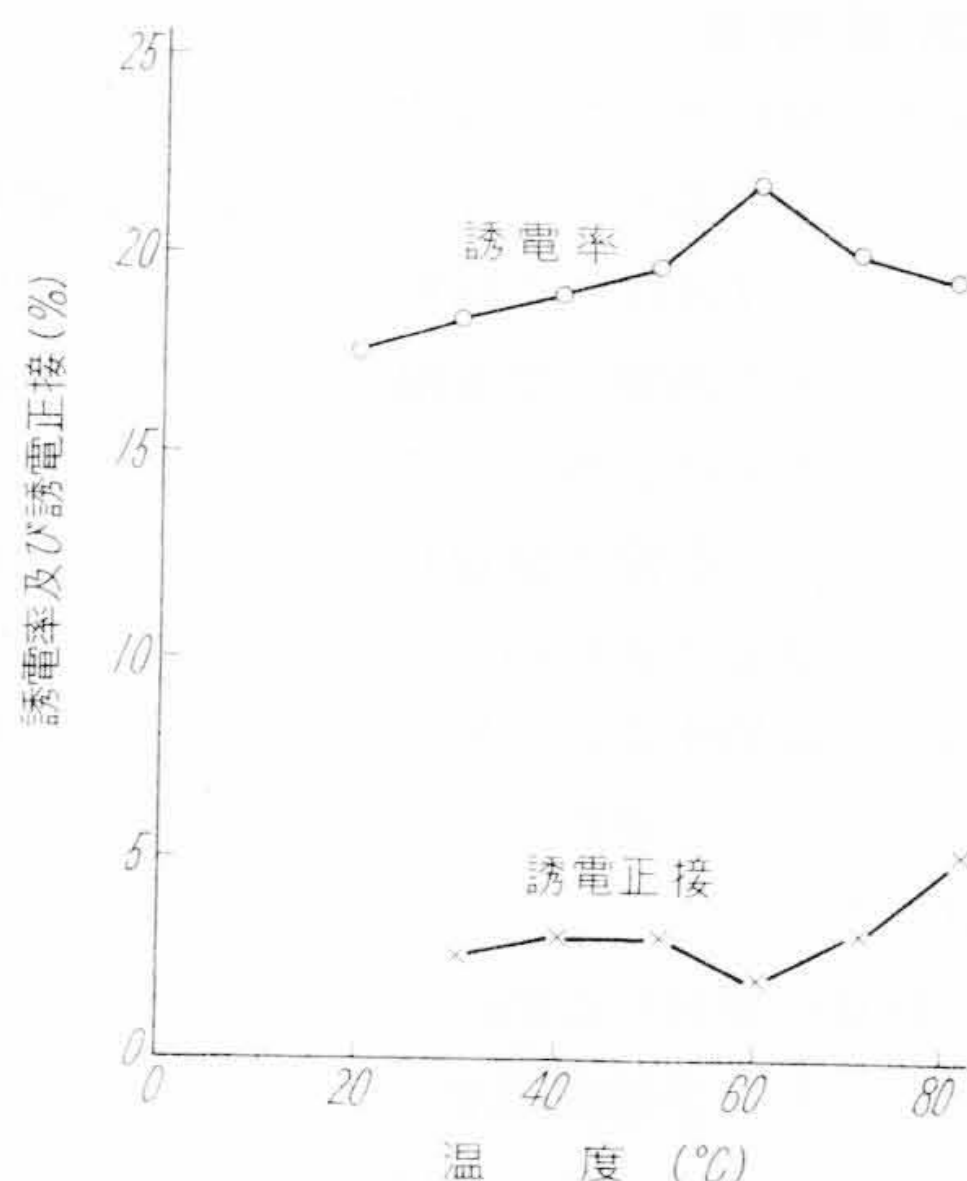
実測値を(2)式に代入して求めた誘電率の温度特性を第7図に示す。これは半導電体厚1.5mm、電圧 15 kV、周波数 50 c/s の場合である。常温における誘電率はさきに筆者が予想したとほぼ同程度であるが、60°C近辺に異常が認められた。この異常は誘電正接の温度変化からみても確からしいが(2)式の計算にはきわめて臨界的なものがあ、 C の変化が鋭敏にきいてくるので断定的なことはいえない。

これらの実験結果から半導電体の誘電率はかなり大きく、したがって、段絶縁に寄与することが明確になった。

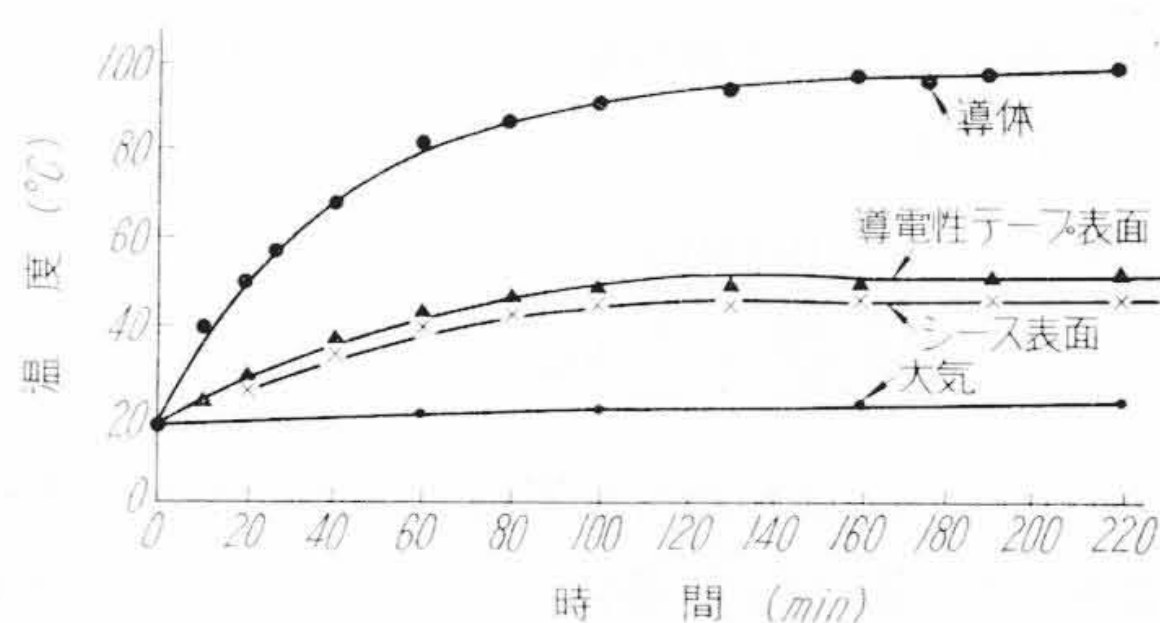
2.3 固有熱抵抗

電力ケーブルに用いる導体遮蔽の意義はケーブルの絶縁破壊機構との関連において考察しなければならない。

もとより、絶縁破壊には複雑な要因があり、特に実用ケーブルにおいて、それが一義的に定まるとは考えられないが、この大きな要因の一つが熱であることは事実で



第7図 半導電体の誘電特性

第8図 電流による温度上昇—時間特性
(通電電流 650A)

ある。ケーブルが運転中導体で発生するジュール熱は最も大きいものであるが、絶縁破壊で問題となるのは誘電体損に基く発熱である。したがって導体遮蔽が破壊の原因となる熱の発生または放散に対してどのようにふるまうか、熱の伝導についてはどうかを知るためにはどうしても固有熱抵抗を求めておかなければならない。たとえ半導電体が電気的には完全に導体とみなされるときにおいてもさえも熱の伝導性は問題となる。

そこで、18mmφの撚線導体に5.0~10.0mm厚の半導電体を施し、その上に鉛テープを巻き、さらにこの表面放散熱抵抗を分離する目的でワニスコンブリックテープを巻いた試料を作製した。この試料に500~1,000Aの電流を通じ、各部の温度上昇を測定した。第8図に温度上昇の時間変化の一例を示す。この測定結果を用いて、半導電体の熱抵抗および固有熱抵抗は次式から計算される⁽⁶⁾。

導体で発生する熱量と放散する熱量とが等しい平衡状態においては

$$I^2 r = \frac{\theta}{R_{th}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が成立する⁽⁷⁾。ただし、 I は通電電流、 r は導体抵抗、 θ は温度上昇、 R_{th} は熱抵抗であり、固有熱抵抗 P とは次の関係にある。

$$R_{th} = \frac{P}{2\pi} \log \frac{D}{d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 d は導体外径、 D は半導電体外径である。

種々の通電電流に対して、 θ を求め、 P を計算した結果を平均すると約880°C/W/cm³となった。

3. 導体遮蔽と電気的性質

導体遮蔽の効果は電気的強度の向上にあるので、これと関連する電気的性質を定量的に確かめる目的から次の実験を行った。

3.1 試料および実験方法

20kV プチルゴム電力ケーブルを用いて次のような試作を行った⁽⁸⁾⁽⁹⁾。30mm²および50mm²の撚線導体と50mm²の圧縮導体にそれぞれ、半導電体を0, 0.2, 0.4, 1.0mm厚に施し、30mm²の場合は絶縁体外径をすべて、33.0mm、50mm²の場合は35.0mm一定とした。

以上12種類のケーブル試料に対して、一般の電気的性質を求め、続いて各種の絶縁破壊電圧を測定した。絶縁破壊させたときの課電方法は次の3種類である。

- (A) 長時間交流 50 c/s: 50 kV/1時間 + … (5kV/1時間昇圧) … → 破壊
- (B) 短時間交流 50 c/s: 44kV/10分 + … (500V/S 昇圧) … → 破壊
- (C) 衝撃波 1×40 マイクロ秒: 200 kV/3回 + … (20 kV/3回昇圧) … → 破壊

これらの実験はいずれも同一資料3個以上について行い測定値を平均した。

3.2 実験結果

まず、30mm²ケーブルの全長について絶縁抵抗、静電容量、導体抵抗を測定した結果を第1表に示す。次に誘電正接特性の一例を第9、10図に示す。第9図は30mm²ケーブルに対する誘電正接の電圧特性、第10図は温度特性である。

また第1表から明らかとなおり、絶縁抵抗、導体抵抗には特異現象は見当たらない。しかし導体遮蔽厚の増加につれて静電容量が増加しているのは予想どおりであった。この測定値から(2)式を用いて、半導電体の誘電率を求めると10.6~14.7となり、2.で測定した結果とほぼ一致している。

第9、10図に示した誘電正接も、特に半導電体の影響はないと考えられる。すなわち2.からわかるとおり半導電体自身の誘電正接はかなり大きい、絶縁体と複合した形で使用される場合、測定値に表われるほど大きな効果は示さないことが明らかになった。

第1表 20°Cにおける試作 30mm² ケーブルの電気的性質

項目 単位 導体遮蔽厚 (mm)	絶縁抵抗 MΩ/km	静電容量 μF/km	導体抵抗 Ω/km
0	18,000	0.109	0.610
0.2	19,000	0.113	0.610
0.4	16,000	0.115	0.615
1.0	18,000	0.124	0.613

第2表 交流長時間破壊時の最大電位傾度比率

導体遮蔽厚 (mm)	0	0.2	0.4	1.0
導体 (mm ²)				
30	1	1.47	1.64	1.89
50	1	1.47	1.54	1.64
50*	1	1.33	1.47	1.45
30	1	1	1	1
50	1.10(1)	1.49(1)	1.41(1)	1.16(1)
50*	1.14(1.04)	1.39(0.93)	1.38(0.98)	1.18(1.02)

* 印は圧縮導体である。また()内の数字は非圧縮導体に対する圧縮導体の比率である。

第3表 交流短時間破壊時の最大電位傾度比率

導体遮蔽厚 (mm)	0	0.2	0.4	1.0
導体 (mm ²)				
30	1	1.07	1.00	1.25
50	1	1.20	1.34	1.39
50*	1	1.15	1.12	1.15
30	1	1	1	1
50	0.89(1)	0.99(1)	1.22(1)	0.99(1)
50*	1.05(1.18)	1.09(1.08)	1.15(0.94)	0.95(0.96)

第4表 衝撃波破壊時の最大電位傾度比率

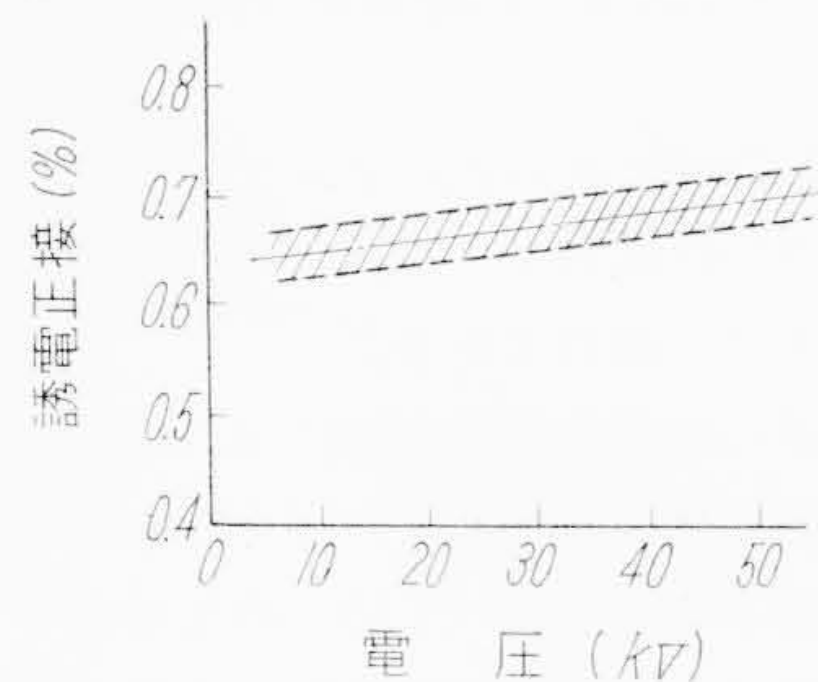
導体遮蔽厚 (mm)	0	0.2	0.4	1.0
導体 (mm ²)				
30	1	1.11	1.09	1.26

次に、橋本氏の試作したボイド検出器⁽¹¹⁾を用いて、ケーブル絶縁体中のボイドで生じるコロナ放電電荷量を測定したところ、ケーブル端末部の作業余長部分を除き10⁻¹² クーロン以下であった。したがって、電気破壊に使用したケーブルはボイドなしのものであり、破壊の原因にボイド放電を考慮する必要はないと思われる。

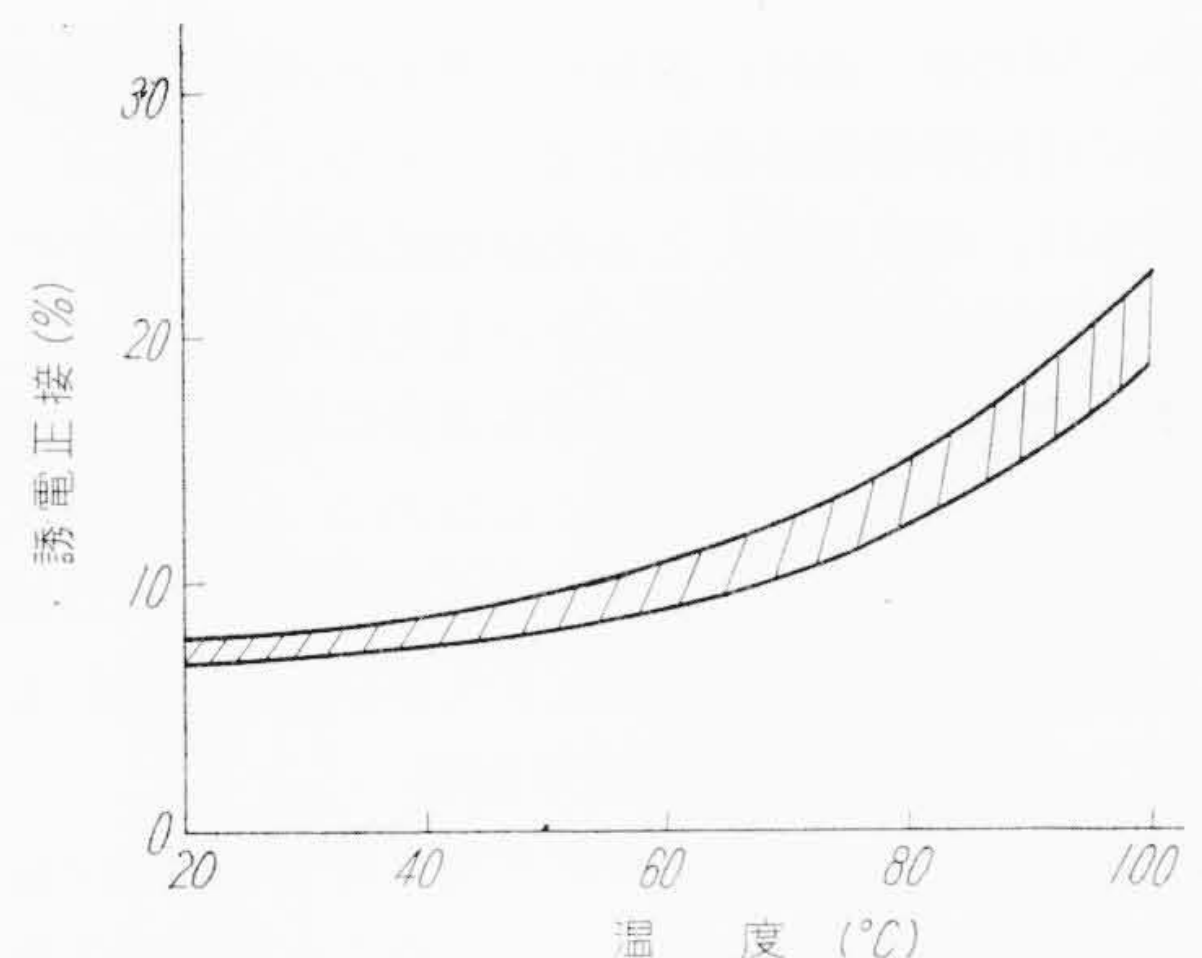
最後に前節で述べた課電方法に従って絶縁破壊させたケーブルの破壊時における導体表面上の電位傾度の比率を表示すると第2～4表のとおりである。

4. 絶縁破壊電圧の向上

ここでは第2～4表を中心に考察する。これはケーブルの絶縁破壊が最大電位傾度説に従うものと仮定して作製したものである。すなわち、導体と大地間に電圧が印加され、漸次増大してゆき、導体表面の電位傾度がその



第9図 試作ケーブルの誘電正接—電圧特性



第10図 試作ケーブルの誘電正接—温度特性

絶縁体固有のある臨界値に到達したとき破壊が起るとする仮定である。実際、この説はきわめて合理的なものと思われやすく、かつ簡単な対数表示式で表わされるので、いかにももっともらしく思われるが、筆者は執筆中にこれに疑問をもちはじめた。

しかしながら、導体遮蔽の絶縁破壊に与える効果の比較にはきわめて便利であるのでこれを用いることにした。だが、この場合ですら、破壊時の最大電位傾度は絶縁体固有のものではなく、ケーブル絶縁体（同心同筒間に絶縁体が充てんされたものの意）固有のものと考えことにする。表から明らかなとおり、この値は導体遮蔽の影響でかなり大きく変化するのである。

4.1 長時間交流破壊電圧に及ぼす影響

導体遮蔽厚0の場合を基準として比較すれば第2表のようになる。30mm²の撚線導体において、47～89%の破壊電圧の増加があり、50mm²の撚線導体では47～64%、圧縮導体で33～45%ある。実際0.2mm厚程度では撚線効果の低減や、段絶縁の効果は少ないことおよび圧縮導体（撚線効果が少ないと考えられる）における増加からみて、半導電体固有の効果と、絶縁体—導体間の密着によるコロナ遮蔽効果が30%程度あると考えられる。このことはまた導体遮蔽厚の影響が圧縮導体の場合には比較的少ないことから了解できる。これらを比較して、

段絶縁効果は10%前後、燃線効果の低減は40%程度あると考えられる。

実際、Levi-Civita氏の式によって、計算した燃線効果は本論文で用いた試料ケーブルに対して38~45%程度あり、この結果は合理的である。

次に導体外径の効果を見るために30 mm²に対する破壊時の最大電位傾度を基準とすれば50 mm²では導体遮蔽厚を適当に選ぶことによって10~49%増加することがわかった。このことは絶縁破壊に対する最大電位傾度説に矛盾するものであるが、詳細な説明は後報することとする。

なお、50 mm²導体に着目して考えれば導体遮蔽のある場合には圧縮導体の効果はほとんどないといえる。この原因には、導体遮蔽による燃線効果の低減のほかに圧縮しても縁端の電界強度に大きな変化がないことや、絶縁破壊の機構が、ケーブルの導体表面にはまったく無関係で、絶縁体内に生じる熱によるためなどが想像される。電界解析装置により電気力線の分布を測定した結果によればこの前者の原因はかなり大きいと考えられる。

4.2 短時間交流破壊に及ぼす影響

第3表に示したように短時間交流に対する効果は長時間交流に比較して非常に少ない。このことから導体遮蔽のない場合には長時間交流印加時においてかなりのコロナが導体表面に発生していると考えられる。すなわち、導体遮蔽が導体と絶縁体との密着によりコロナ遮蔽として演ずる役割はかなり大きい。

一方、純粋な電氣的強度に及ぼす効果も存在するが、30 mm²の場合の導体遮蔽厚の影響は50 mm²に対するものとほぼ等しい。また、50 mm²における燃線導体と圧縮導体の差は長時間交流の場合よりも若干大きい。

4.3 衝撃波破壊電圧に及ぼす影響

第4表からわかるとおり衝撃波に対する効果は最も少なく、30 mm²の場合に最高26%程度の増加がみられるだけである。これは純電氣的な原因によるものと考えられる。そして、短時間交流破壊の場合の25%、長時間交流の場合の30%と比較すれば、コロナ遮蔽の効果は5~10%程度であり、残り、20%程度が完全に半導電体固有の効果と想像される。この物理機構がなんによるかは今後の研究によって明らかにしたい。

なお、導体外径による差はほとんどなく、衝撃破壊電圧は大略、絶縁体の種類と厚さによって決定されることが考えられる。

5. 結 言

電力ケーブルに用いられる導体遮蔽の意義は非常に大きいがこの科学的考察を加えた例は少ない。筆者はさきにこれを研究する方法について報告したが、この論文

ではそれに従い主としてブチルゴム電力ケーブルの導体遮蔽に用いられる半導電体について行った一連の実験ならびに考察を紹介した。

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 半導電体は材料と目的で異なった性質を示すが、筆者らの用いたものの体積および表面電気抵抗は電圧および印加時間によってはあまり変らない。温度特性は対数グラフで直線的に減少している。また印加した電圧が直流か交流かによる差は小さい。

(2) 誘電率はさきに予想したとおり、15~25誘電正接は比較的小さく、10%以内であった。

(3) 固有熱抵抗は平均して約880°C/W/cm³であることがわかった。

(4) 半導電体が導体遮蔽に用いられた場合、最大の効果はケーブルの絶縁破壊電圧の向上にあるが、この効果は長時間交流に対して最も大きく、短時間交流、衝撃波となるに従って小さい。圧縮導体の効果は少なかったが、導体外径により破壊時の最大電位傾度が異なることが観測された。このことはケーブルの絶縁破壊が、導体上の最大電位傾度で一義的に定まらないことを意味している。

(5) 前項の事実および過去における数多くの破壊実験から、筆者はケーブルの絶縁破壊に対する最大電位傾度説に疑問を持った。絶縁破壊したときのケーブル導体上の電位傾度は導体外径と絶縁体厚さおよびその組合せで変化するらしい。

(6) 導体遮蔽の意義は従来単に燃線効果の除去のみにあると考えられてきたが、特に半導電体を用いた場合にはこのほかの意義のあることが実証された。この詳しい物理機構については後述する予定である。

擧筆にあたり、終始御指導御激励いただいた武蔵工業大学鳥山教授、日立電線株式会社久本部長、試作実験に御理解と御援助をいただいた大和部長、杉山課長、庄司課長に御礼申し上げる。

また、試料の作製と実験に御協力下さった増岡、卜部、吉岡、相田、佐藤の諸氏に対して深謝する。

参 考 文 献

- (1) 依田：日立評論 40, 1943 (昭 33)
- (2) 依田：電三連大予稿 No. 171 (昭 31)
- (3) 依田：電気学会東京支部大予稿 No. 242 (昭 33)
- (4) 比企野，依田，庄司：電気学会東京支部大予稿 No. 122 (昭 30)
- (5) 比企野，渡辺，庄司：日立評論 39, 1053 (昭 32)
- (6) 依田，相田，吉岡：日立評論 41, 826
- (7) 依田：電気計算 26, 109 (昭 33)
- (8) 依田，増岡：日立評論別冊 No. 15, 49 (昭 31)
- (9) 依田：電力誌 41, 1648 (昭 32)
- (10) 依田，増岡，卜部，吉岡：日立評論別冊 No. 28, 45 (昭 33)
- (11) 橋本：電学誌 79, 38 (昭 34)