

電力ケーブル用カーボン紙の導体遮へい効果 (続報)

On the Conductor Shielding Effect of Power Cable's Carbon Papers (Continued)

佐 藤 春 枝*
Harue Satô

内 容 梗 概

電力ケーブル用カーボン紙の遮へい効果をしらべるためモデルケーブルを用い、導体構造、カーボン紙の分散剤、絶縁紙の厚さ、課電効果ならびに緩波頭波に対する影響を検討した。

これらの結果から、平滑、圧縮、より線導体に対する、カーボン紙の交流破壊に及ぼす遮へい効果は約 20～30%であるが、インパルス破壊にはカーボン紙の欠陥が影響し、ほとんど効果が認められない。ただし $10^8 \Omega\text{-cm}$ の特殊カーボン紙は 16% の上昇を示した。また、カーボン紙は分散剤で遮へい効果が異なるから、長期間安定したケーブルを製造するには、接着性に富む分散剤を用い、誘電損失の小さいカーボン紙を使用するのが有効である。

なおこのほか、主絶縁に使用する絶縁紙の厚さによって遮へい効果が変わり、交流の場合は厚紙ほど、インパルスに対しては薄紙ほど顕著な効果のあることがわかった。

1. 緒 言

高電圧ケーブルの導体ならびに絶縁体表面にカーボン紙の半導電層遮へいを行ない、ケーブルの破壊強度を高めることは、1954 年 L. Domenach 氏⁽¹⁾ や H. Brauns 氏⁽²⁾ により試みられたが、その効果が顕著なため、今日では電力ケーブルにほとんどカーボン紙が遮へい体として使用されている。

しかし系統的に行なわれた実験が少なく、カーボン紙のケーブルに対する遮へい効果は、実験者により異なった見解が示されている⁽³⁾⁽⁴⁾。わが国においても 275 kV OF ケーブルが実用化され、近い将来 500 kV の OF ケーブルが実用化される情勢においては、ケーブルの破壊強度を増加させる手段として、カーボン紙の遮へい効果を検討することが重要な意味をもつものと考えられる。

筆者はさきに平板とより線効果を模擬したコルゲート電極を用いて、各種市販カーボン紙、その抄紙条件とカーボン粒子の種類あるいはカーボン紙の抵抗値がどのように油浸紙の破壊電圧ならびに誘電正接に影響するかを明らかにした。また、従来明らかでなかった交流とインパルス破壊に対する導体遮へい機構の解明を行なった⁽⁵⁾。

しかし、実際のケーブルは導体遮へいのみでなく、絶縁体遮へいを併用しているので、材料試験で得られた導体遮へいの結果から、構造の異なるケーブルの遮へい効果を定量的に知ることは困難である。今回は実験に油浸モデルケーブルを用い、導体構造、カーボン紙の製造条件と絶縁紙の厚さならびに緩波頭波について、遮へい効果を交流長時間破壊強度およびインパルス破壊強度から種々検討を行なったので、この結果を報告する。

2. 導体構造に対する電位傾度の変化

2.1 より線導体上の最大電位傾度の増加率

完全な同心円筒電極間に電圧 V を印加すれば、内部導体表面の電位傾度 $E_{\max}$ は (1) 式で表わされる。

$$E_{\max} = \frac{V}{r \log \frac{R}{r}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 r : 内部導体半径

R : 外部導体半径

である。

* 日立電線株式会社日高工場

電力ケーブルの導体はより線を使用しているが、このようなより線の凹凸によって最大電位傾度は増加する。大竹氏⁽⁶⁾、Levi-Chivita 氏⁽⁷⁾の理論式および Serguis Vesselowsky 氏⁽⁸⁾の実験式が、より線表面の電位傾度を与えている。最近加賀谷氏⁽⁹⁾は等角写像を用い、より線と遮へいより線表面の電位傾度を求めた。

実際にはより線による最大電位傾度の増加率が必要で、この場合の増加率 (f) を (2) 式に示す。

$$f = \frac{\text{より線導体の最大電位傾度}}{\text{より線導体包絡円の最大電位傾度}} \\ = \frac{N^n}{H} \cdot \frac{J'}{J \sqrt{1 - \left(\frac{2H}{J}\right)^2}} \cdot \frac{n \log \frac{R}{r}}{\log \frac{J}{2H} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2H}{J}\right)^2} \right\}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし

$$J = \left(\frac{R}{r}\right)^n N^n + \left(\frac{r}{R}\right)^n \frac{H^2 - M^2}{N^n} \\ J' = \left(\frac{R}{r}\right)^n N^n - \left(\frac{r}{R}\right)^n \frac{(M - H)^2}{N^n}$$

r : より線包絡円の半径

R : 絶縁表面の半径

n : 最外層のより線数

実用上 60 kV 級以上のケーブルでは (3) 式のように簡単になる。

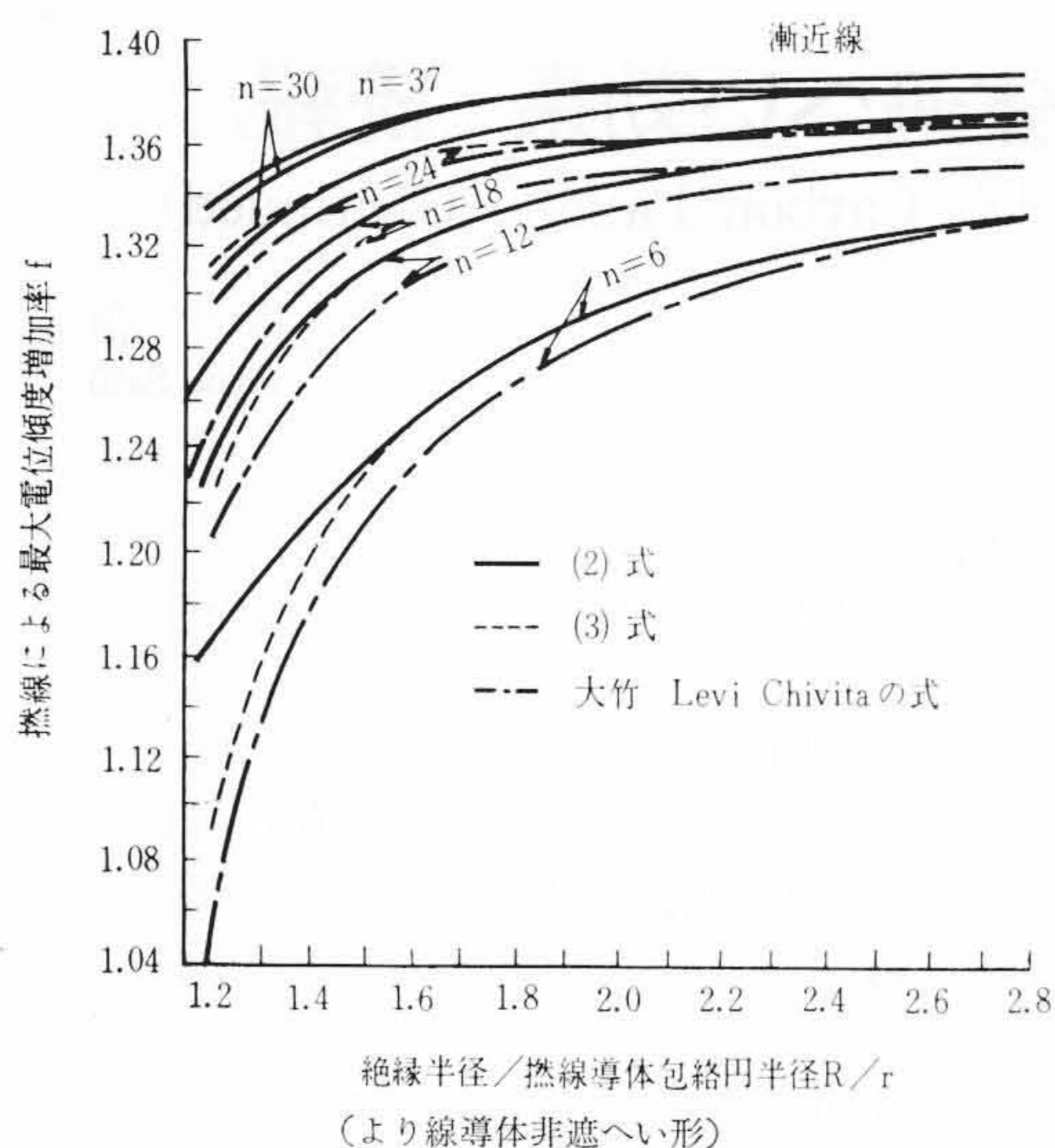
$$f = \frac{N^n}{H} \cdot \frac{n \log \frac{R}{r}}{n \log \frac{R}{r} + \log \frac{N^n}{H}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また N , H の常数を代入し (4) 式が得られた。

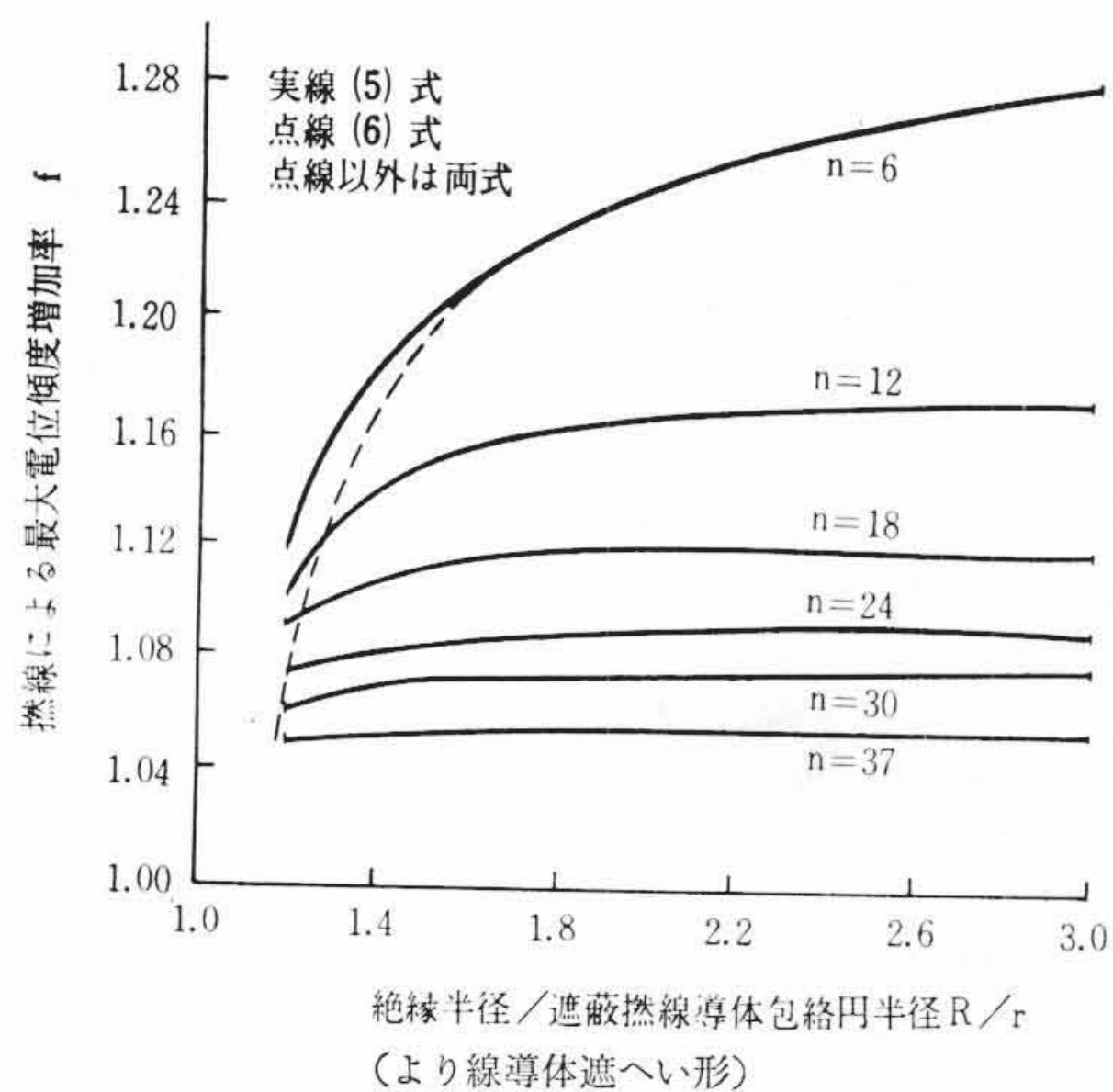
$$f = \frac{1.4 n \log_{10} \frac{R}{r}}{0.145 + n \log_{10} \frac{R}{r}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

より線の最外層より線数と最大電位傾度の増加率の関係を第 1 図に表わしたが、大竹氏や Levi-Chivita 氏の理論値より 1～1.5% 大きく、 n の小さいところでは大竹氏の結果と一致している。

現在電力ケーブルのより線上はカーボン紙で遮へいを行なっているが、等角写像を使用した最大電位傾度の増加率は (5) 式で与えられる。



第 1 図 最外層より線数と最大電位傾度増加率⁽⁹⁾



第 2 図 最外層より線数と最大電位傾度増加率⁽⁹⁾

$$f = \frac{N^n}{H_s} \cdot \frac{J'}{J \sqrt{1 - \left(\frac{2H_s}{J}\right)^2}} \cdot \frac{n \log \frac{R}{r}}{\log \frac{J}{2H_s} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2H_s}{J}\right)^2} \right\}} \quad (5)$$

ただし

$$J = \left(\frac{R}{r}\right)^n N^n + \left(\frac{r}{R}\right)^n \frac{H_s^2 - M_s^2}{N^n}$$

$$J' = \left(\frac{R}{r}\right)^n N^n - \left(\frac{r}{R}\right)^n \frac{(M_s - H_s)^2}{N^n}$$

r : より線遮へい上の包絡円半径

また 60 kV 級ケーブル以上に対しては(6)式が適用できる。

$$f = \frac{N^n}{H_s} \cdot \frac{n \log \frac{R}{r}}{\left(n \log \frac{R}{r} + \log \frac{N^n}{H_s} \right)} \quad (6)$$

なお(5)式と(6)式による計算結果を第 2 図に示す。

2.2 より線導体上の最大電位傾度の減少率

より線では最大電位傾度が増加しても、電位傾度の減少率は大きいので、絶縁体が均一であれば、より線による電位傾度の増加率だけ破壊電圧が低下するとは考えられない。より線表面の最大電位傾度における減少率 ΔE_y を求めると(7)式となり、減少係数 G は(8)式で示される。

第 1 表 最大電位傾度の減少係数⁽⁹⁾

n	1	6	12	18	24	30	37
G (非遮へい形)	1	1.4	3.8	6.2	8.6	11	13.8
G_s (遮へい形)	1	1.02	1.32	1.30	1.35	1.45	1.37

第 2 表 供試絶縁紙とカーボン紙の物理特性

供 試 紙	厚 (mm)	密 度 (g/cm ³)	気 密 度 (s/100cc)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	体積抵抗率 (Ω -cm)20℃ 油 浸
OF-125 紙	0.125	0.85	670	7.5	3.2	5.0×10^{16}
No.1 カーボン紙	0.095	0.78	540	5.1	1.8	7.5×10^5
No.2 カーボン紙	0.150	0.70	130	3.8	1.7	2.8×10^8

$$\Delta E_y|_{y=r} = |E_y|_{y=r} \frac{G}{r} \quad (7)$$

$$G = 1 + n \left(\frac{N^n}{H} - 1 \right) \quad (8)$$

また遮へいより線導体について同様な減少係数を求めると(9)式のようになる。

$$G_s = 1 + n \left(\frac{N^n}{H_s} - 1 \right) \quad (9)$$

なお、 n が多いほど最大電位傾度の増加率は大きい、第 1 表から減少係数も大きくなるので、破壊最大電位傾度は増加する。

3. 導体構造に及ぼすカーボン紙の遮へい効果

3.1 実験方法

モデルケーブルの導体には、16 mm ϕ ×500 mm の普通より線、圧縮ならびに平滑導体を用いた。この導体上にあらかじめ 100℃ の恒温槽中で 18 時間予備乾燥した、第 2 表に示す物理特性の 16 mm 幅の OF-125 μ クラフト紙 9 枚を、30/70 バットラップで巻き、絶縁厚 1 mm のモデルケーブルを製作した。

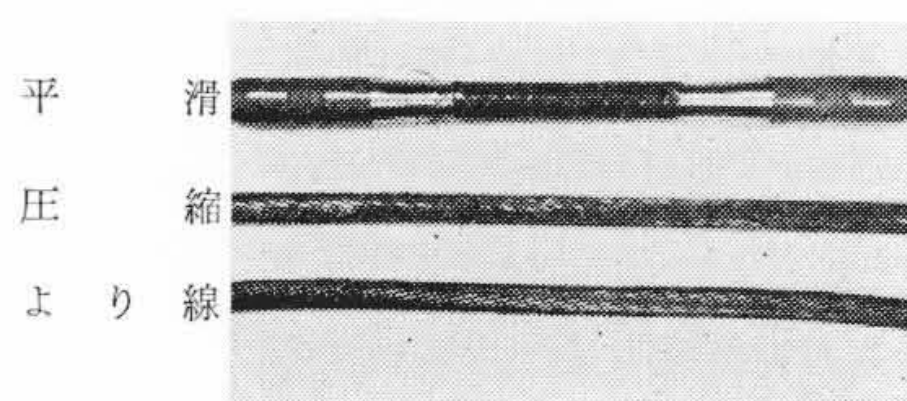
遮へい用カーボン紙としては No. 1= 7.5×10^5 と No. 2= 2.7×10^8 Ω -cm (特殊試作カーボン紙)の 2 種類を用い、これを導体と絶縁体表面に各 2 枚を遮へい層として巻いた。これらの供試モデルケーブルは 100℃ で 24 時間真空乾燥を行ない、その後 OF ケーブル油を含浸した。このモデルケーブルの構造と供試導体の形状を第 3 図に示す。

このケーブルに対する交流長時間破壊試験は、28 kV を 1 時間印加した後 2 kV 1 時間の割合で昇圧した。またインパルス破壊試験は標準波のプラスを導体に 68 kV を 3 回印加した後、3 kV を 3 回の割合で破壊まで昇圧した。この試験は常温、常圧で行ない、各試験条件に対し 4 試料を用いた。

後述の実験には、特記しない限り平滑導体のモデルケーブルを使用し、試験数ならびに破壊試験法はいずれも本章に準じた。

3.2 モデルケーブルの破壊特性

導体構造の異なるモデルケーブルの、交流長時間破壊強度とインパルス破壊強度を第 3 表に、また最大電位傾度を第 4 図に示した。図より非遮へいより線導体を用いた交流破壊強度は、圧縮や平滑導体より 3% 低かったが、導体構造による有意差は認められなかった。カーボン紙の遮へいを行なったより線導体の破壊強度は 30%、圧縮と平滑導体は約 20% の上昇である。これらの値は 60 kV OF

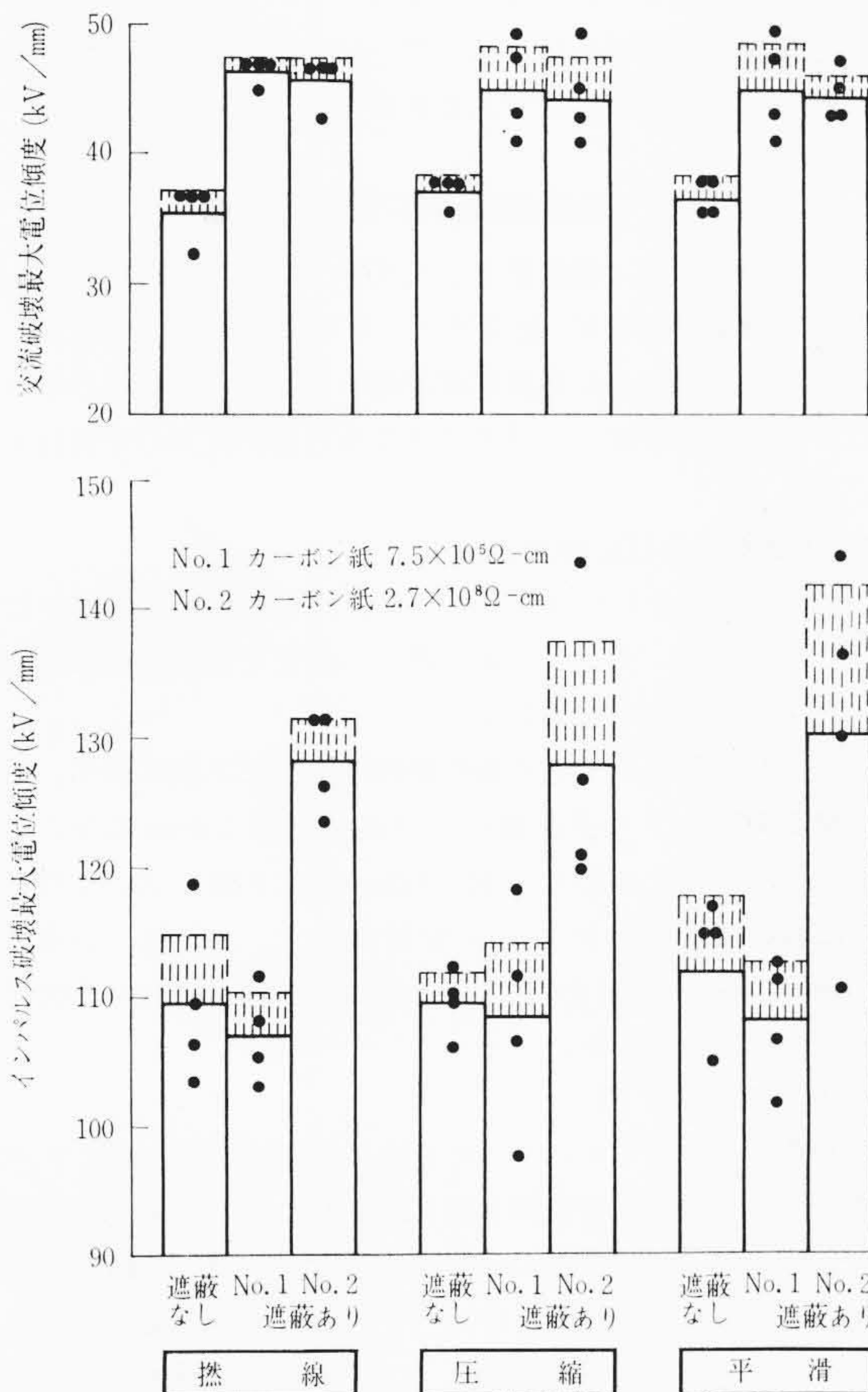


第 3 図 モデルケーブルと供試導体の構造

第3表 モデルケーブルによるカーボン紙の遮へい効果

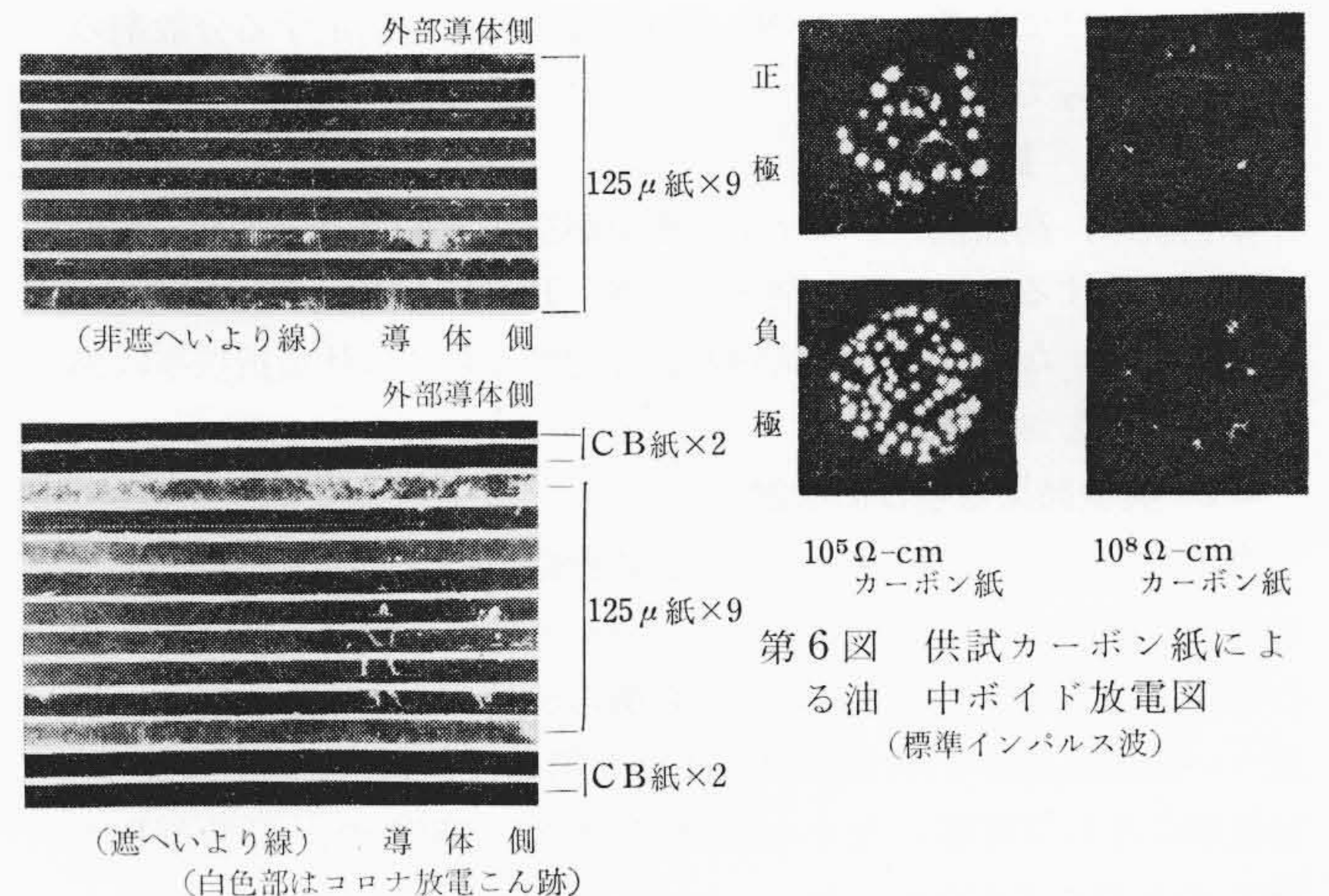
導 体	カーボン紙 遮 へ い	交流破壊電位傾度			インパルス破壊電位傾度			インパ ルス比
		平均 (kV/mm)	最 大 (kV/mm)	遮へい 係 数	平 均 (kV/mm)	最 大 (kV/mm)	遮へい 係 数	
より線	無	33.0	35.6 (1.9)	1.00	102.5	109.7 (5.4)	1.00	2.18
	No.1	43.5	46.4 (1.0)	1.30	100.5	107.2 (3.2)	0.97	1.63
	No.2	43.0	45.7 (1.8)	1.28	120.3	128.2 (3.4)	1.16	1.98
圧 縮	無	33.0	37.1 (1.1)	1.00	99.0	109.8 (2.2)	1.00	2.09
	No.1	42.0	45.0 (3.3)	1.21	101.1	108.7 (6.0)	0.98	1.70
	No.2	41.5	44.3 (3.1)	1.19	119.6	128.0 (9.5)	1.16	2.04
平 滑	無	33.0	36.5 (1.9)	1.00	101.9	112.2 (5.9)	1.00	2.17
	No.1	42.0	45.1 (3.4)	1.23	100.8	108.4 (4.3)	0.96	1.70
	No.2	41.5	44.3 (1.8)	1.21	121.9	130.4 (12.2)	1.16	2.08

注: (1) より線, 圧縮導体は包絡線の最大電位傾度
 (2) ()内は標準偏差を示す
 (3) カーボン紙 No.1=7.5×10⁵Ω-cm, No.2=2.7×10⁸Ω-cm
 (4) より線, 圧縮導体の最外層より線数 $n=18$, 導体径 16 mmφ
 (5) 常温, 常圧

第4図 カーボン紙遮へいモデルケーブルの破壊最大電位傾度 (より線, 圧縮導体の最外層より線数 $n=18$ 本, 導体径 16 mmφ, 絶縁厚 1 mm)

ケーブルでの遮へい効果 24% とほぼ一致している⁽¹⁰⁾。また実験に供した No. 1 と No. 2 カーボン紙の抵抗値による遮へい効果はほぼ等しかった。

インパルス破壊の最大電位傾度は, 非遮へいより線と圧縮導体より 2% 低かった。また, No. 1 カーボン紙を遮へいに用いたときは, 材料試験⁽⁵⁾の結果と同様に破壊強度は 2~3% の低下であるが, No. 2 の特殊カーボン紙では導体構造に影響なく 16% の上昇であった。なお, この場合のインパルス比は第 3 表から, 非遮へい方式は 2.09~2.18 であったが, No. 1 紙では 1.63~1.70 となり, No. 2 紙遮へい方式に対しては 1.98~2.07 の値が得られた。実際の No. 1 カーボン紙を用いた OF ケーブルでは 1.6 であるから⁽¹⁰⁾, モデルケーブ



第5図 モデルケーブルのコロナ放電状況

ルと一致する。

3.3 結果の検討

非遮へいケーブルではより線と圧縮導体ともに素線間の油膜でコロナ放電が起こっている。これは交流破壊試験後の試料をフクシン染色すると, 第 5 図のように放電によるワックス化が認められる。ただし絶縁破壊は油膜の部分からでなく, 非遮へいと遮へいのいずれの場合も, より線は電界の最も強い素線の凸部側面で圧縮導体は素線の角から出発し, 最内層絶縁紙のバットスペースを貫通している。平滑導体は平等電界に近いので, このような絶縁厚の薄いモデルケーブルでは, 油膜のできやすい外部導体側から破壊が起きやすい。

モデルケーブルのより線は外側が 18 本よりなので, 第 1 図から非遮へいの場合における最大電位傾度の増加率は 24% になるが, 実験では 3% に過ぎなかった。これにはつぎの三つの原因が考えられる。すなわち, (1) より線表面の電位傾度の減少率が第 1 表のように大きい。(2) 心線とクラフト紙の密着性が良好になることが, 理論計算には考慮されていない。(3) 電界の高い素線凸部では, クラフト紙の張力が大きくなり, 見かけ密度や気密度が増加する。事実 154 kV 200 mm² OF ケーブルのインパルス破壊電圧は, 普通より線と圧縮導体で差異は認められていない⁽¹¹⁾。

交流破壊に対するカーボン紙の遮へい効果はより線が 30%, 圧縮や平滑導体は約 20% の上昇で顕著に表われている。モデルケーブルのより線導体 ($n=18$ 本, $R/r=1.13$) にカーボン紙の遮へいを行なった場合は, 最大電位傾度の増加率は第 2 図から約 8% であるが, 実測では約 3% にすぎなかった。したがって, 他の破壊強度の増加分は, カーボン紙による紙縁紙と導体との密着, ならびに, コロナ放電の抑制効果によるプラスの効果と考えられる。

インパルス破壊強度は No. 1 カーボン紙を用いると, むしろ若干低下する傾向にあるが, No. 2 の特殊カーボン紙では 16% の上昇を示した。供試カーボン紙を遮へい体に用いた絶縁体の, 標準インパルス波による油中ボイド放電図は, 第 6 図より明らかなように, No. 1 カーボン紙より No. 2 カーボン紙を用いたときのほうが放電数は少ない。このように放電数の少ないことが, No. 2 カーボン紙のインパルスに対する遮へい効果をもたらした原因であろうと考えられる。

4. カーボン紙製造条件の検討

カーボン紙の遮へい効果は当然抄紙条件によって異なることが予想される。すなわち, 油浸紙の $\tan \delta$ が小さくなるように, カーボン粒子が均一に分散し, しかも繊維と強固に接着した遮へい材が

望ましいわけである。ここではこのような条件を満足する分散剤の検討を行なってみた。

4.1 供 試 料

本実験は、高抵抗グラファイト紙を製造するときの分散剤の効果を明らかにするため、分散剤として A, B, C を用いテストマシンで抄紙した。なおこれら供試料の物理特性ならびに体積抵抗率は第 4 表に示すとおりである。

4.2 実験結果ならびに検討

供試カーボン紙を圧縮導体ならびに絶縁体遮へいに用いたモデルケーブルの、交流長時間破壊とインパルス破壊試験を行ない、これらの結果を第 5 表に示した。表から明らかなように、分散剤により遮へい効果が異なり、分散剤 A を用いた場合の交流破壊強度は 58%，分散剤 C ならびに用いなかった場合は 32～35% で、分散剤 B は 18% の上昇にすぎなかった。

またインパルス破壊強度は高抵抗カーボン紙のため、分散剤 A, B が 17～19%，C ならびに分散剤を使用しなかった場合は 8～11% の上昇であった。供試カーボン紙の体積抵抗率はいずれも $10^{15}\Omega\text{-cm}$ であるが、破壊に対する遮へい効果は第 5 表のように異なっており抵抗値からのみカーボン紙の良否を決めることは妥当でない。

カーボン紙の抵抗率はカーボストラクチャーの接触抵抗に支配される。したがって、分散が均一で接触抵抗の小さいような配列をすれば、等しい抵抗値を得るに必要な、すぎ込むカーボン量は少なくすむと考えられる。このため、供試カーボン紙中のグラファイト含有量を定量してみた結果は第 6 表に示すとおりで、分散剤を用いた試料はいずれもグラファイト含有量が少なかった。遮へい効果の最もすぐれた分散剤 A を用いた場合は、用いないときの 1/2 なので、均一な分散の行なわれていることが予想される。

これら供試カーボン紙 1 枚を、OF-125 μ 紙 3 枚と組み合わせた油浸状態の誘電正接と電流特性の関係は、第 7 図から明かなように分散剤の種類によって異なる。分散剤 A, B を用いたカーボン紙は、その他の分散剤 C または用いなかった場合より $\Delta \tan \delta$ が小さく、このようなカーボン紙で遮へいを行なったモデルケーブルは、15 kV を 24 時間課電した後においても誘電正接の変化は認められ

第 4 表 供試カーボン紙の物理特性と電気抵抗

試 番	分散剤	紙 厚 (mm)	密 度 (g/cm ³)	気密度 (s/100cc)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	体積抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)	
							65%RH 乾紙 (20℃)	絶乾油浸紙 (20℃)
No.1	A	0.102	0.76	702	6.0	2.3	1.5×10^{12}	1.4×10^{15}
No.2	B	0.100	0.77	1,175	5.5	2.2	2.3×10^{12}	1.7×10^{15}
No.3	C	0.102	0.75	951	4.7	2.5	7.0×10^{12}	4.5×10^{15}
No.4	な し	0.100	0.80	509	4.5	1.8	1.4×10^{12}	2.7×10^{15}

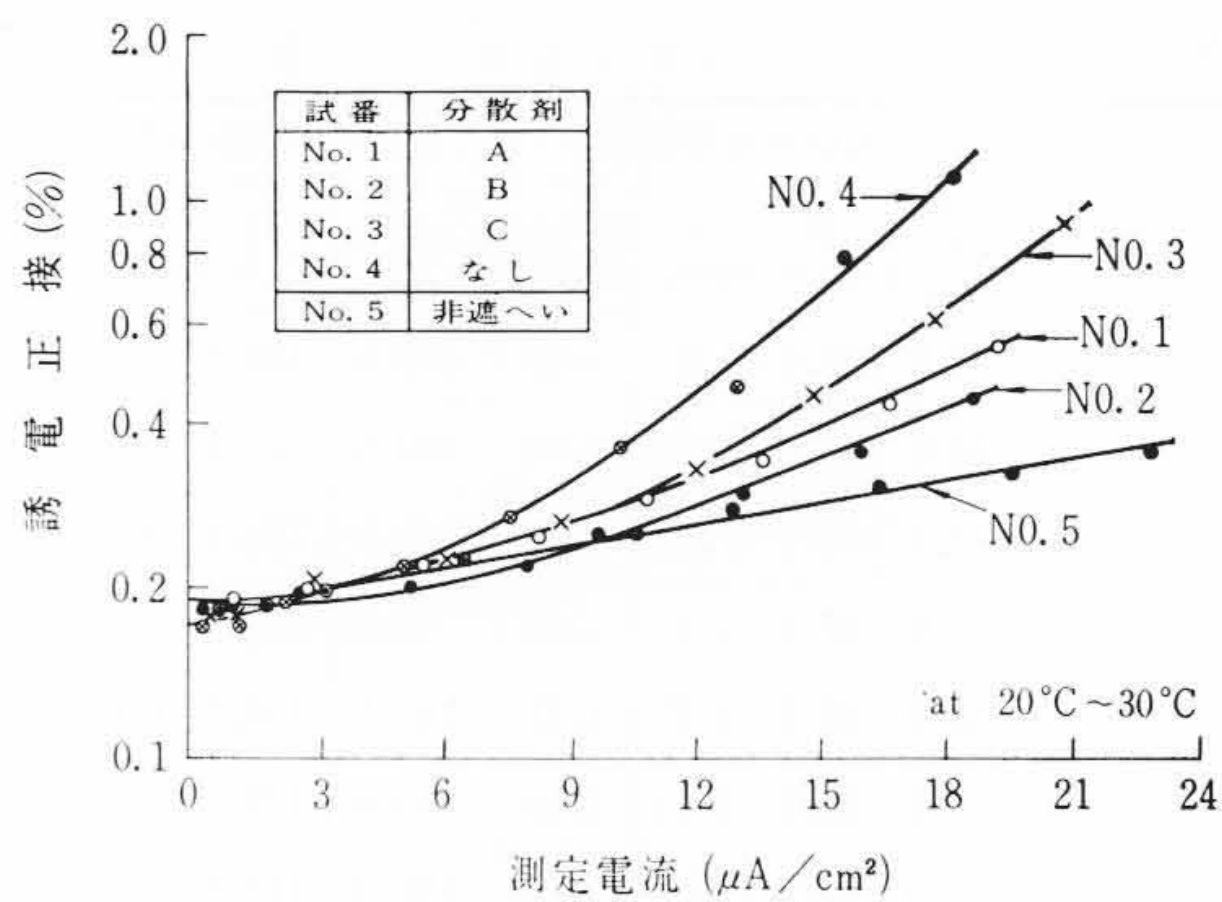
第 5 表 モデルケーブルによる分散剤の異なるカーボン紙の遮へい効果

試番	分散剤	交流破壊強度 (kV/mm)		インパルス破壊強度 (kV/mm)		遮へい係数		インパ ルス比
		平 均	最 大	平 均	最 大	交 流	インパ ルス	
No.1	A	54.0	57.2(1.51)	117.7	124.8(4.39)	1.58	1.17	1.54
No.2	B	40.5	42.9(3.14)	119.7	127.2(3.72)	1.18	1.19	2.09
No.3	C	45.0	47.7(2.39)	112.5	119.3(5.26)	1.32	1.11	1.77
No.4	な し	46.0	48.7(1.51)	109.0	115.5(4.32)	1.35	1.08	1.67
No.5	非遮へい	34.0	36.0(0.5)	100.5	106.7(3.04)	1.00	1.00	2.09

注： 弧内は標準偏差

第 6 表 供試カーボン紙中のグラファイト含有量

試 番	分 散 剤	グラファイト含有量 (%)
No.1	A	3.88
No.2	B	4.84
No.3	C	5.85
No.4	な し	8.55



第 7 図 カーボン紙を使用した油浸紙の誘電正接—電流特性

なかった。たとえば、分散剤 A を用いた No. 1 カーボン紙で遮へいを行なった 60 kV 80 mm² OF ケーブルのイオン化係数は 0.03% であるから、第 3 章の No. 1 市販カーボン紙よりむしろ小さいことが確認された。このように、 $\Delta \tan \delta$ の小さいカーボン紙は、カーボン粒子と繊維の密着が良好であって、しかも分散が均一であるためすぐれたケーブル遮へい材であると考える。

5. 絶縁紙厚さに対する影響

前章までの実験は、絶縁紙として OF-125 μ 紙を用いたカーボン紙の遮へい効果であるが、超高压ケーブルにおいては 40, 70, 100, 125 μ 紙を組み合わせた絶縁構成が用いられる。絶縁紙の厚さが変わればカーボン紙の遮へい効果は異なると思われるので検討を行なった。

5.1 供試料ならびに実験方法

ここでは絶縁紙として 40, 70, 125 μ の 3 種の厚さを用いたモデルケーブルに対し、カーボン紙の遮へい効果を交流長時間破壊とインパルス破壊試験から検討した。

実験に供した OF ケーブル紙の物理特性を第 7 表に示す。これらの供試紙を 16 mm ϕ の平滑銅パイプに絶縁厚 1 mm になるよう、40 μ 紙は 27 枚、70 μ 紙は 15 枚、125 μ 紙は 9 枚を 30/70 のバットラップに巻いてモデルケーブルを製作した。なお遮へい用として $10^5\Omega\text{-cm}$ のカーボン紙を、導体上と絶縁体上におのおの 2 枚ずつテーピングマシンで巻いた。

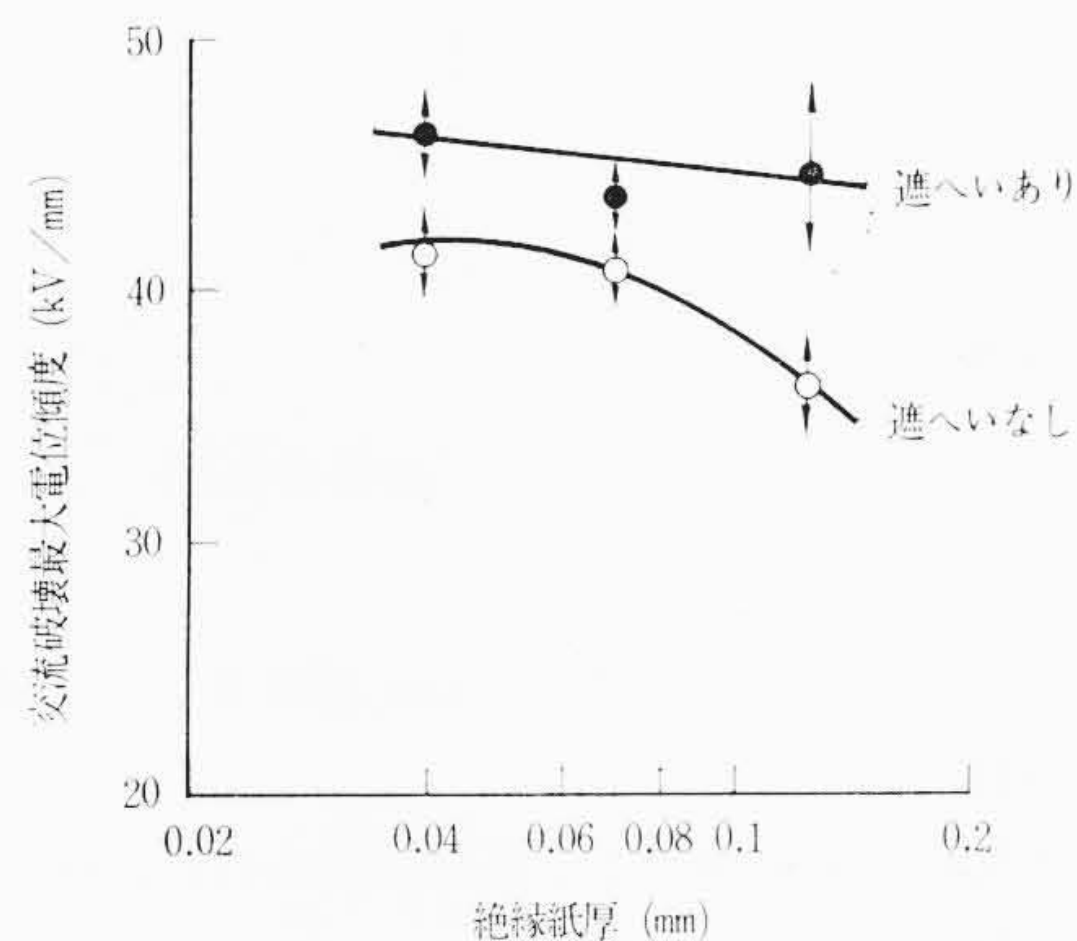
5.2 実 験 結 果

紙厚の異なるモデルケーブルの交流長時間破壊およびインパルス破壊試験を行なった結果を第 8 図と第 9 図に示す。絶縁厚が 1 mm であるから、最大電位傾度は平均電位傾度より 10% 高い程度である。図から明かなように、非遮へいケーブルの交流ならびにインパルス破壊強度は、絶縁紙が薄くなるにつれて増加する傾向にある。したがって、70 μ 紙の交流破壊強度は 125 μ 紙に対し 12% の上昇を示すが、40 μ 紙では薄紙の効果が少なかった。また、インパルス破壊強度も同様に 70 μ 紙は 30% の上昇であったのが、40 μ 紙ではそれ以上の効果が認められなかった。

カーボン紙の遮へいを行なえば、交流破壊強度は薄紙ほど若干高くなるが、遮へい効果は 40 μ 紙が 11%，125 μ 紙が 23% の上昇で、その効果は厚紙ほど大きい。また、インパルス破壊強度は 125 μ 紙で 4% の低下であったものが、70 μ 紙以下ではカーボン紙の効果が

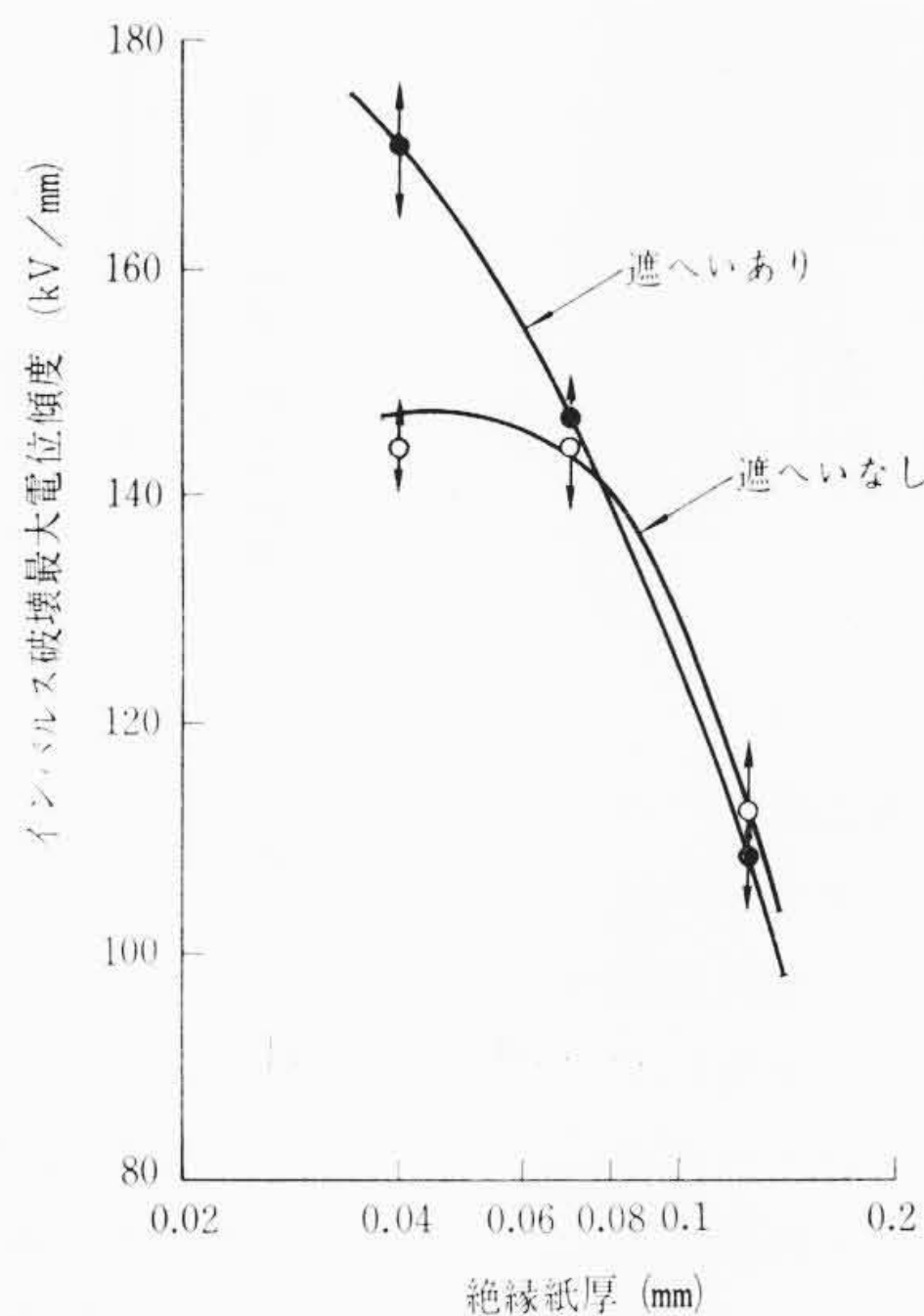
第 7 表 供 試 紙 の 物 理 特 性

紙 の 種 類	紙 厚 (mm)	密 度 (g/cm ³)	気密度 (s/100 cc)
OF- 40	0.040	0.91	5,500
OF- 70	0.070	0.93	870
OF-125	0.125	0.83	590



(交流: モデルケーブル)

第8図 絶縁紙厚に対するカーボン紙の遮へい効果



(インパルス: モデルケーブル)

第9図 絶縁紙厚に対するカーボン紙の遮へい効果

若干あり、40 μ 紙では 20% の上昇で、その効果が顕著に認められた。

5.3 結果の検討

絶縁紙厚さ d と破壊強度 E の間には、平板電極で測定した場合に (10) 式が成立し、破壊強度は紙厚の指数関数として増加する。

$$E = E_0 - K \log_{10} d \quad (10)$$

一方非遮へいモデルケーブルの実験は L. Domenach 氏⁽¹⁾、H. C. Hall 氏⁽¹³⁾らあるいは加賀谷氏⁽¹⁴⁾によって行なわれている。しかし、紙厚以外に密度や気密度あるいは抄紙条件が異なるので、結果は一致しないが、加賀谷氏の結果は第8図と同様な傾向を示した。

モデルケーブルと材料試験との相異は、(1) 薄紙ほど高密度になるので、バットスペースの油膜に加わる電圧が高い。また(2) モデルケーブルの厚さを一定にするには薄紙ほど紙巻数が多いので、乾燥の際紙が収縮しやすく、外部導体側の紙層間に油膜ができるので、コロナ放電の原因となる。したがって破壊強度が低下すると考えられる(第10図参照)。

遮へい効果は厚紙ほど大きかったが、長期耐圧後のモデルケーブルをフクシン染色した結果は第11図のように、カーボン紙を用いた場合は第10図に比べてコロナ放電の痕跡(こんせき)が少なく、特に 125 μ 紙ではほとんど認められなかった。したがって、第11図から紙層間にはコロナ放電が認められず、125 μ 紙に対する遮へい効果の薄紙より大きいことが説明されよう。

カーボン紙の遮へいを特に薄紙絶縁ケーブルに行なうと、インパルス破壊強度が高くなる事実は興味あることである。これについて依田氏⁽¹⁵⁾はボイドの厚さを変えて半導体の遮へい効果をボイド放電図から観察し、ボイドが薄いほど正負コロナ放電の小さいことを確かめている。このことから、薄紙の場合もバットスペースの油膜が薄くなるから、カーボン紙の効果によって、コロナ放電の影響が少なくなり、インパルス破壊強度を上昇させるものと考えられる。

超高圧ケーブルにおいては 40, 70, 100, 125 μ 紙の組合せ方式が用いられるので、この条件を模擬し 40 μ 紙 $\times$ 3 枚と 70 μ 紙 $\times$ 3 枚、さらに 125 μ 紙 $\times$ 6 枚を巻いたモデルケーブルの、インパルス破壊に対するカーボン紙の遮へい効果を測定した。この結果は第8表の試料Aのように 12% の上昇を認めた。また、この構造のケーブルで、125 μ 紙上へさらに 40 μ 紙 $\times$ 2 枚を巻いた試料Bの破壊強度は試料Aよりも 16% 高かった。なお、カーボン紙の遮へいを行なった場合は非遮へいケーブルより 12% の上昇である。このよう

に破壊強度の高い薄紙を内外の導体上に巻くことにより、ケーブルの破壊強度は上昇するものであることが知られる。

6. 課電による遮へい効果の影響

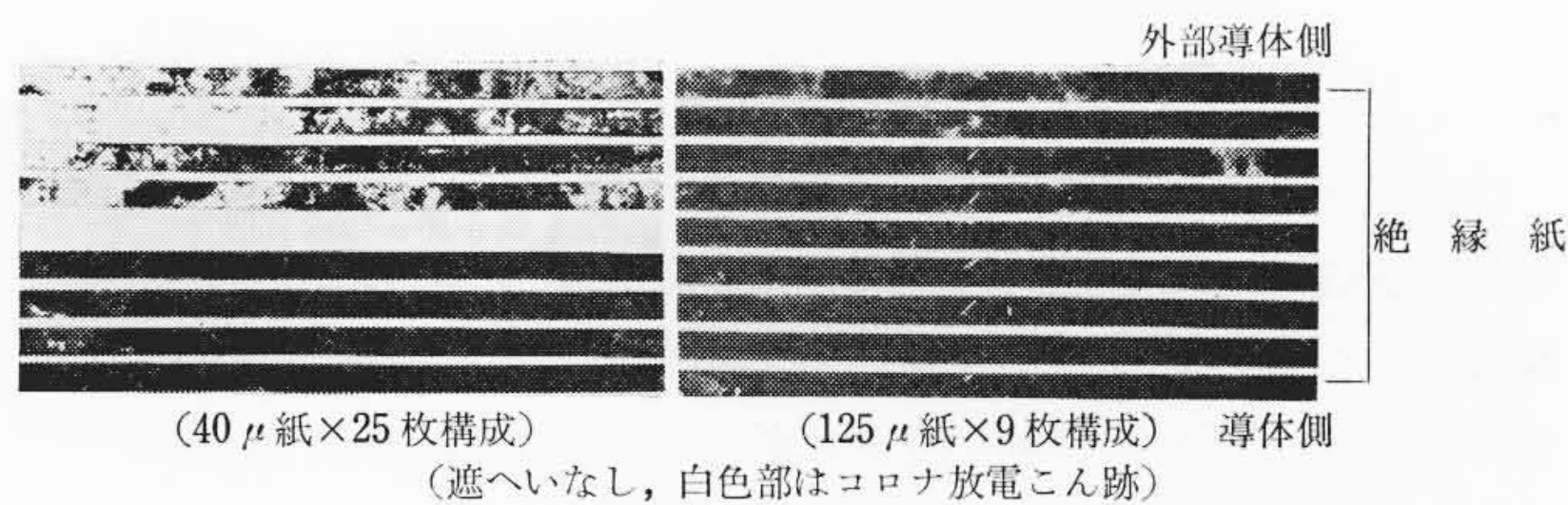
カーボン紙によるケーブルのイオン化係数の増加が、カーボン粒子の移動に原因すると考えれば、ケーブルの安定性を保障するには、課電時の遮へい効果を検討することが必要であるから、つぎに述べる点について検討した。

6.1 誘電特性

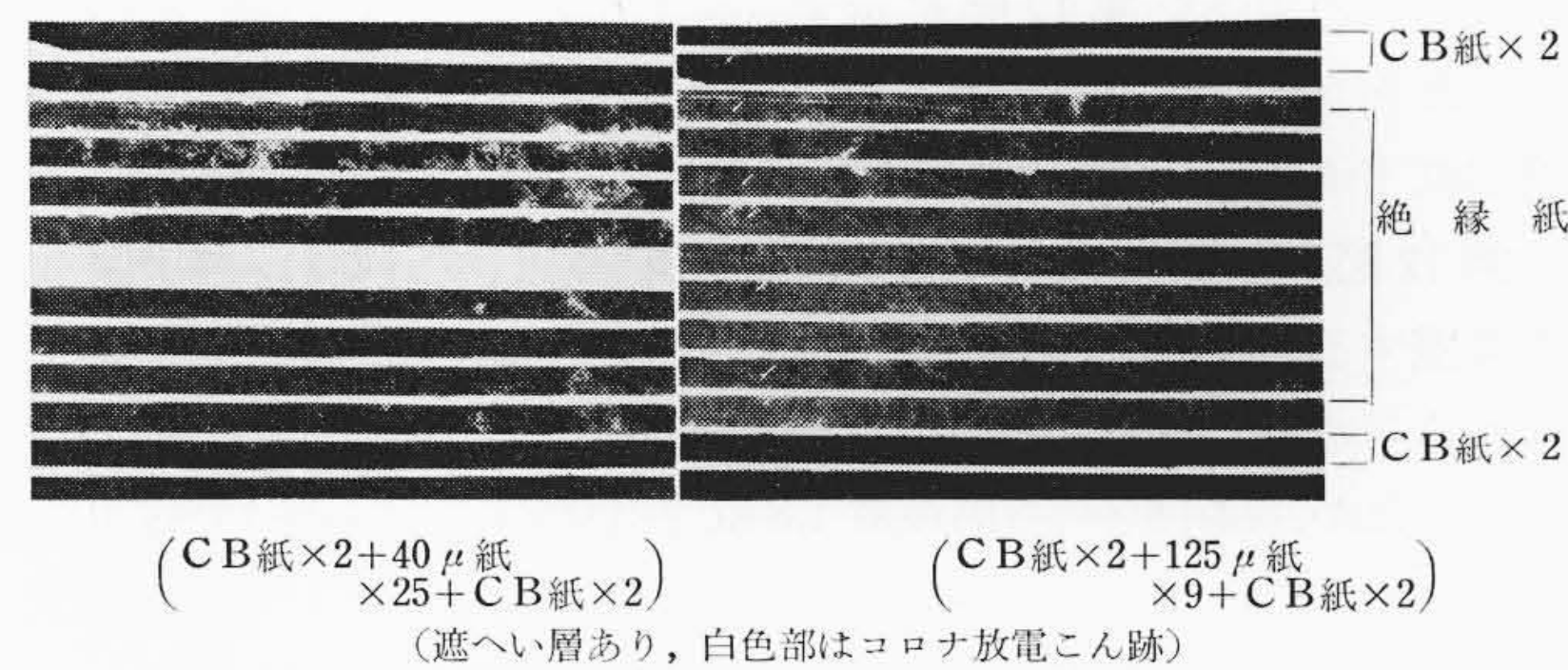
国産製 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ のカーボン紙を遮へい体とし、125 μ 紙を用いた絶縁厚 1 mm のモデルケーブルに、常温で AC 50 c/s 15 kV を 24 時間連続に印加した。その後、7 kV までの誘電正接を 60 c/s で測定した。

結果はここには図示していないが、測定範囲の電圧では課電前の誘電正接が 0.28% であったのが、課電後は 0.29% となりその増加は認められない。また、

この場合に遮へい層の分担電圧は、ケーブルの印加電圧に対し指数関数的に増加するが、課電後の変化は少なかった。ただし、 $\Delta \tan \delta$ の大きいカーボン紙を用いると、課電後にカーボン粒子の移動で分担電圧が変化し、 $\Delta \tan \delta$ の急増する場合が見られる。



第10図 交流長期耐圧後のモデルケーブルによるコロナ発生状況



第11図 交流長期耐圧後のモデルケーブルによるコロナ発生状況

第8表 絶縁構成に対するカーボン紙の遮へい効果

試料名		インパルス破壊電位傾度 (kV/mm)		
		平均	最大	遮へい係数
A	遮へいなし	100.5	109.1(4.6)	1.00
	遮へいあり	115.8	122.5(3.3)	1.12
B	遮へいなし	119.5	126.9(4.8)	1.00
	遮へいあり	134.5	142.7(0.5)	1.12
OF-125	遮へいなし	101.9	112.2(5.9)	1.00
	遮へいあり	100.8	108.4(4.3)	0.96

()内は標準偏差

試料A: 導体側(CB紙 $\times$ 2)+40 μ 紙 $\times$ 3+70 μ 紙 $\times$ 3+125 μ 紙 $\times$ 6+(CB紙 $\times$ 2)+鉛テープ試料B: 導体側(CB紙 $\times$ 2)+40 μ 紙 $\times$ 3+70 μ 紙 $\times$ 3+125 μ 紙 $\times$ 6+40 μ 紙 $\times$ 2+(CB紙 $\times$ 2)+鉛テープ

第 9 表 モデルケーブルの交流課電後の破壊特性

カーボン紙遮へい	交流破壊最大電位傾度(kV/mm)			インパルス破壊最大電位傾度(kV/mm)		
	課電前	課電後	課電効果	課電前	課電後	課電効果
無	36.5(1.86)	30.2 (0)	0.82	112.2(5.9)	112.1(0)	1.00
有	45.1(3.4)	45.8 (5.0)	1.01	108.4(4.3)	122.9(1.2)	1.13

注： (1) モデルケーブルに交流電圧 AC 50 c/s 15 kV 24 時間課電
(2) 弧内は標準偏差

6.2 破壊特性

次に課電後のモデルケーブルにつき、交流長時間破壊とインパルス破壊試験を行ない、結果を第 9 表に示した。非遮へいケーブルは課電後に導体と絶縁紙間にコロナ放電が起きやすいので、交流破壊強度は 18% の低下が認められたが、コロナ放電の影響が少ないインパルス破壊強度には変化がなかった。これに対し遮へいケーブルでは、交流破壊強度に変化が認められず、むしろインパルス破壊強度に 13% の上昇があった。

インパルス破壊強度が高くなった原因を追究するため、遮へい層の不完全破壊電圧を測定した。この結果、課電前に 5 kV で不完全破壊していたのが、課電後は遊離しやすいカーボン粒子が除去されるので 25 kV に上昇していた。このように遮へい層の破壊電圧が高くなったため、主絶縁体の破壊が先行し、遮へい効果が表われたと考えられる。これらの結果から、カーボン紙中のフリーカーボン粒子が除去された欠陥のないカーボン紙は、インパルスに対して遮へい効果のあることがわかった。

7. 波頭長に対する影響

以上述べた実験は標準インパルス波に対するカーボン紙の遮へい効果の検討であるが、ケーブルに欠陥があった場合、5~10 μs の波頭長をもつ油中コロナが発生するおそれが考えられる。このような条件下のカーボン紙の効果を次に検討した。

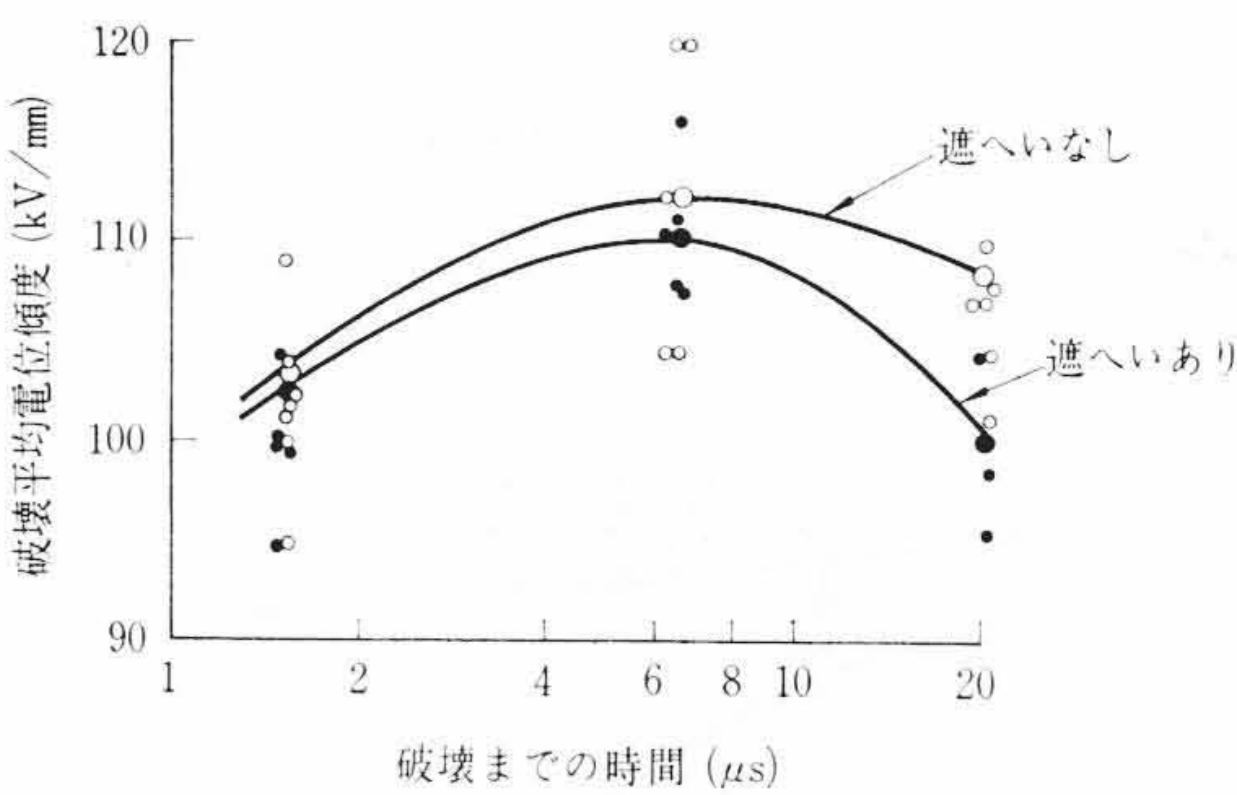
OF-125 μ 紙 9 枚を巻いた平滑導体のモデルケーブルについて、波頭長の異なるインパルス波を用いて破壊試験を行なった。破壊までの時間は 1.5, 6.5, 20 μs である。油浸モデルケーブルの破壊電圧と波頭長の関係を第 12 図に示す。図よりカーボン紙の遮へいを行なったときは、波頭長が長いところで非遮へいの場合より、破壊強度が低下する傾向にある。

第 12 図から 6 μs で破壊強度は最大値を示しているが、測定誤差を考慮すると、この範囲の波頭長では破壊強度は変わらないと考えられる。また、波頭長の長いほど遮へいによるマイナスの効果が大きかったが、開閉サージ(周波数 1.3 kc 減衰時定数 3.3 ms)で約 10% のカーボン紙による遮へい効果が認められていることから、波頭長が長い場合には、第 12 図の結果が逆転するものと思われる。

8. 結 言

モデルケーブルを用いて、導体構造ならびに各種条件下におけるカーボン紙の遮へい効果を実験し、得られた結果を要約すると、

- (1) 非遮へいより線導体の交流とインパルス破壊強度は、より線効果により平滑導体や圧縮導体より若干低かったが、理論値にくらべてかなり小さく、導体構造による破壊値の有意差は認められなかった。
- (2) 遮へいより線導体の効果は交流破壊強度に対して 30%、平滑および圧縮導体に対して 20% の上昇であり、供試カーボン紙の抵抗率による遮へい効果には差がなかった。しかし、インパルス破壊に対する効果は市販の 10⁶ Ω-cm カー



第 12 図 油浸モデルケーブルの破壊電圧波頭長曲線

ボン紙では認められなかったが、10⁸ Ω-cm 特殊カーボン紙では 16% の上昇が認められた。

- (3) カーボン紙の効果には分散剤による影響が認められ、接着性の分散剤 A が最もすぐれていた。
- (4) 絶縁紙は厚紙ほど交流破壊強度は低いのであるが、カーボン紙の遮へいを行なうことにより、破壊強度は紙厚にあまり関係しない結果が得られた。すなわち、紙が厚いほど遮へい効果大きい。しかしインパルス破壊の場合は、その効果が 70 μ 紙以下の薄紙であらわれ、40 μ 紙では 20% の上昇である。
- (5) 内外導体上に破壊強度の高い薄紙を少量用いると、ケーブルの破壊強度は高く、インパルスに対する遮へい効果が認められるようになる。
- (6) 非遮へいケーブルへ課電した場合に、交流破壊強度は 18% 低下したが、カーボン紙の遮へいを行なえば破壊値の変化が認められなくなる。また、インパルス破壊強度は交流の場合のように、非遮へいケーブルでは変化しなかったが、遮へいした状態ではカーボン紙中の欠陥が除かれて 13% の上昇をきたした。なお課電前後でケーブルの誘電正接に変化が認められなかった。
- (7) 1~20 μs の緩波頭波に対して、カーボン紙の遮へい効果はほとんどない。

終わりにカーボン紙の試作に協力された巴川製紙所武主任研究員、日立化成工業株式会社土屋課長ならびに本研究につきご指導を賜った武蔵工業大学鳥山教授、水上副工場長、下山田課長に感謝の意を表わす。また、本実験に協力された蛭田君に感謝する。

参 考 文 献

(1) L. Domenach: CIGRE., No. 217 (1954)

(2) H. Brauns: CIGRE., No. 206 (1954)

(3) P. G. Priarrogia: Electrotechnical, 41, 289 (1954)

(4) C. T. W. Sutton: CIGRE., No. 204 (1956)

(5) 佐藤: 日立評論 45, 2008 (昭 38-12)

(6) 大竹: 九州帝大工科大学紀要 (大 2)

(7) Levi Chivita: Transaction of International Electrical Congress, St. Loics, 11 (1940)

(8) Serguis Vesselowsky 氏 の 原 論 文 が 入 手 し に く い の で , 紹 介 文 を 参 考 に し た 。

(9) 加賀谷: 超高压送電 188 (昭 36, 日刊工業新聞社)

(10) 細川, 中野, 井上, 桐ヶ谷: 電四連大 500 (昭 32-4)

(11) 高橋, 日下部, 桐ヶ谷, 中野: 電四連大 499 (昭 32-4)

(12) 佐藤, 下山田, 坂場: 電四連大 515 (昭 35-7)

(13) H. C. Hall, D. J. Skipper: P. I. E. E., 103, 571 (Apr. 1956)

(14) 加賀谷: 超高压送電 243~261 (昭 36, 日刊工業新聞社)

(15) B. Yoda: HITACHI REVIEW., 9, No. 2, 22 (Aug. 1960)

