

電力ケーブル用カーボン紙の導体遮へい効果

On the Conductor Shielding Effect of Semi-Conductive Carbon Papers
for Electric Power Cables

佐 藤 春 枝*
Harue Satô

内 容 梗 概

電力ケーブル用カーボン紙はケーブルの破壊強度を上昇させる重要な材料の一つであるので、市販カーボン紙あるいはカーボンブラックの種類および抵抗値を変えた試抄カーボン紙について、誘電特性と破壊特性に及ぼす導体遮へい効果に関する一連の実験を行なった。

この実験からカーボン紙によるイオン化係数は小さいが、交流破壊に対する遮へい効果は大きく、インパルスへの効果はマイナスであることが知られた。なお特殊グラファイト紙を開発したほかに、カーボン紙の遮へい機構について一知見が得られた。

1. 緒 言

高電圧ケーブルにおける導体遮へいとは、電位傾度を緩和させるための半導体被覆であり、ケーブルの破壊強度を向上させるために重要な材料の一つである。

電力紙ケーブルの遮へい層にカーボン紙が用いられたのは、1954年 L. Domenach 氏⁽¹⁾や H. Brauns 氏⁽²⁾が最初であり、この場合に交流破壊強度は12%、また P. G. Priarrogia 氏⁽³⁾の結果では、インパルス破壊強度が5~10%増加している。その後 C. T. W. Sutton 氏ら⁽⁴⁾はコンプレッションケーブルにカーボン紙を用い、インパルス破壊強度は25%の上昇が得られている。

日立電線株式会社においては1957年比企野氏ら⁽⁵⁾が、SLケーブルに対するカーボン紙と金属化成紙の遮へい効果を検討した。すなわちカーボン紙を用いた場合に交流破壊強度は30%、インパルス破壊強度は17%の上昇を認めた。なおシルバグラファイト紙では効果は認められなかったが、金属化成紙では28%上昇した。

しかしカーボン紙を遮へい層に用いることによって、ケーブルの破壊強度は前述のように上昇するが、1960年 J. N. Johnson 氏⁽⁶⁾はケーブルのイオン化係数が増加することを指摘して注目をひいた。これに対しわが国から1961年に CIGRE Study Committee へ提出した論文⁽⁷⁾によると、カーボン紙によるケーブルのイオン化係数の増加はあまり問題にするほどでないことが報告されている。

このようにケーブルの遮へい効果は、遮へい材料あるいは金属化成紙とカーボン紙の組み合わせ方式などにより影響することが理解されてきたが、カーボン紙の本質的問題については少しも触れていない。また破壊強度を上昇させる説明として、より線効果の低減、導体と絶縁体との密着をよくするなどをあげているが、これだけで遮へい効果の十分な説明とはいえないと考える。すなわち一般にカーボン紙の選択基準として絶縁抵抗を測定しているが、材料による遮へい効果の相異を考えれば、一義的に抵抗値だけで規正すること自体に問題があろう。

電力ケーブルの超高圧化につれて、遮へい体の研究はますます重要な課題となっているが、今後に残されている未解決の問題は多いと考える。筆者はカーボン紙の抄紙条件や抵抗値ならびにカーボンの種類が、油浸紙の誘電特性と破壊特性に及ぼす遮へい効果を実験し、この結果から遮へい機構に関する一知見を得たので、これらについて報告する。

2. カーボン紙の誘電特性

2.1 誘電率特性

カーボン紙はケーブル導体のより線効果を除去して、円形導体に近づけるだけでなく、静電的な段絶縁の役割をもっており、またイオン化係数の計算にも誘電率は必要である。しかしなにぶんにも抵抗値が小さく測定が困難なため、次のような電位分布測定法を試みた。

カーボン紙は絶縁抵抗と静電容量の直並列回路で示されるが、計算を簡略化するため第1図のような並列回路を考えた。

回路に流れる全電流 i_0 は $V_1 \gg V_2$ の状態で、

$$i_0 = \frac{V_1}{Z_p} = \omega c V_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

カーボン紙と真空管電圧計の合成インピーダンス Z_{KV} は $c_K \gg c_v$ とすれば(2)式で表わされ

$$Z_{KV} = \frac{V_2}{i_0} = \frac{R_K R_v}{\sqrt{(R_K + R_v)^2 + (\omega c_K R_K R_v)^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore c_K = \frac{1}{\omega R_K R_v} \sqrt{\frac{R_K^2 R_v^2}{Z_{KV}^2} - (R_K + R_v)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり静電容量が(3)式から求められるので、誘電率は(4)式から計算できる。

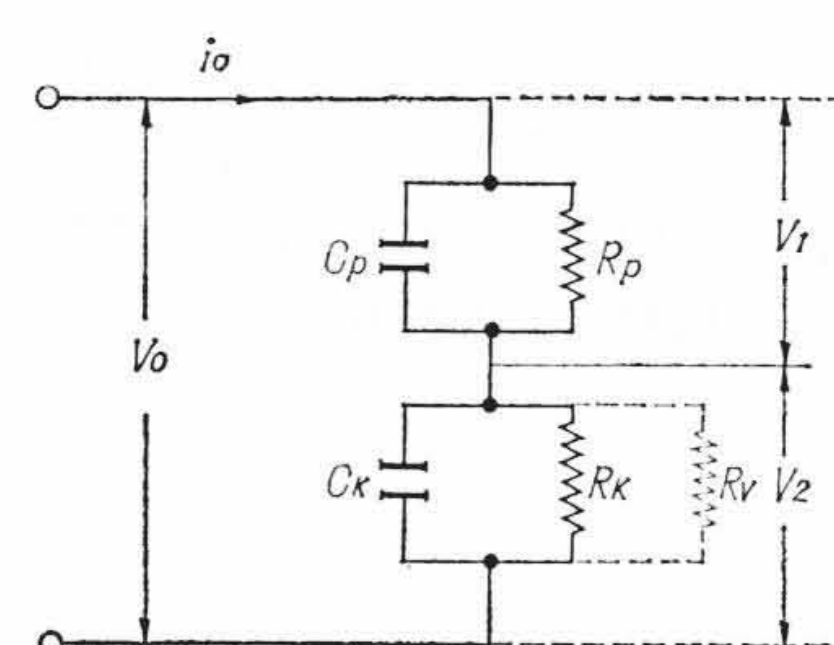
$$\epsilon_K = \frac{c_K t}{0.06954 D^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし t : カーボン紙の厚さ (cm)

D : 電極の直径 (cm)

(4)式から計算したカーボン紙の体積抵抗率と誘電率の関係を第2図に示したが、実用に供されている低抵抗カーボン紙の誘電率は非常に大きく10,000程度である。油浸紙モデルケーブルについても同様な測定を行なったが、シートの試験結果と一致している。

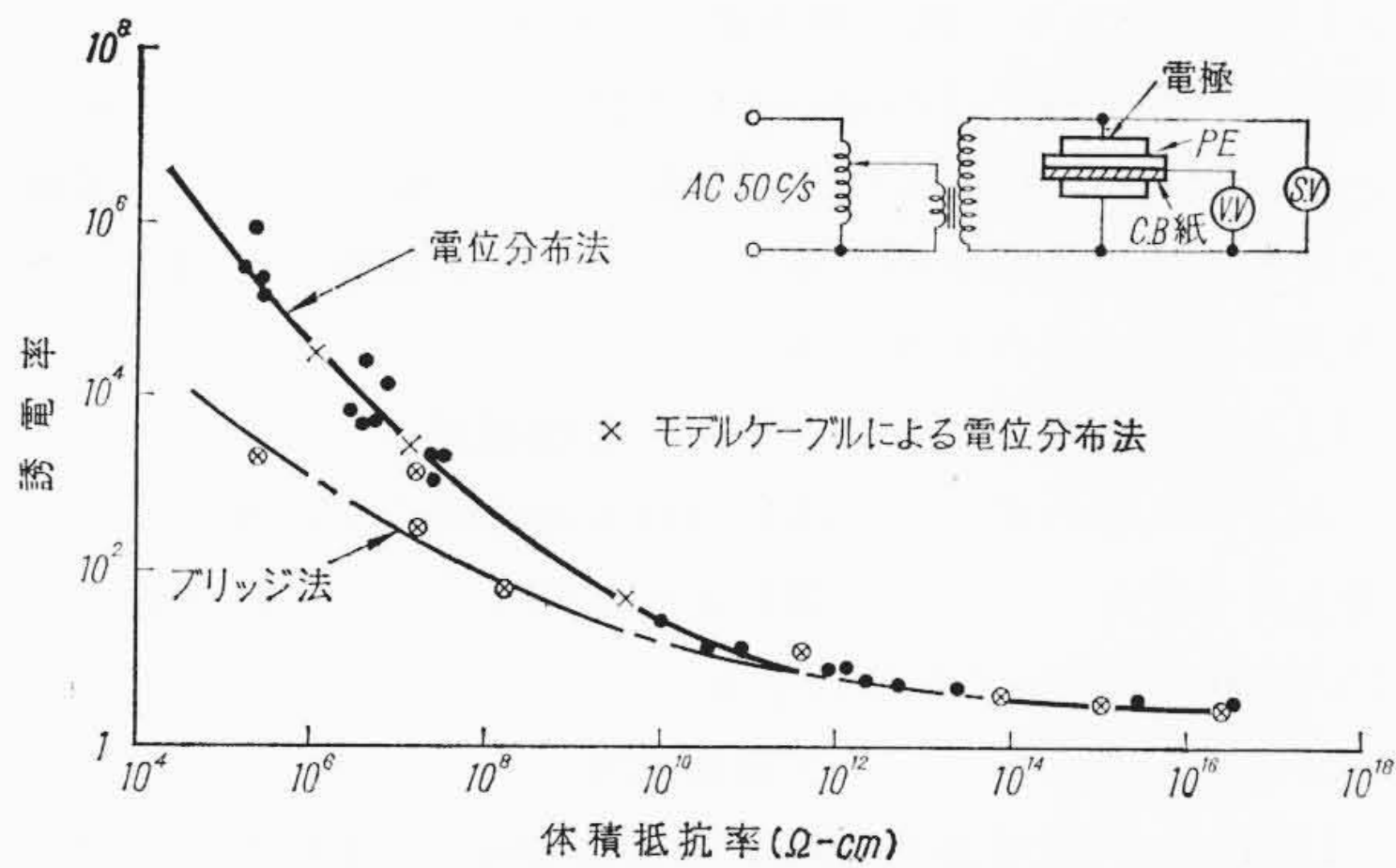
さらに標準コンデンサとカーボン紙を組み合わせ、シェリングブ



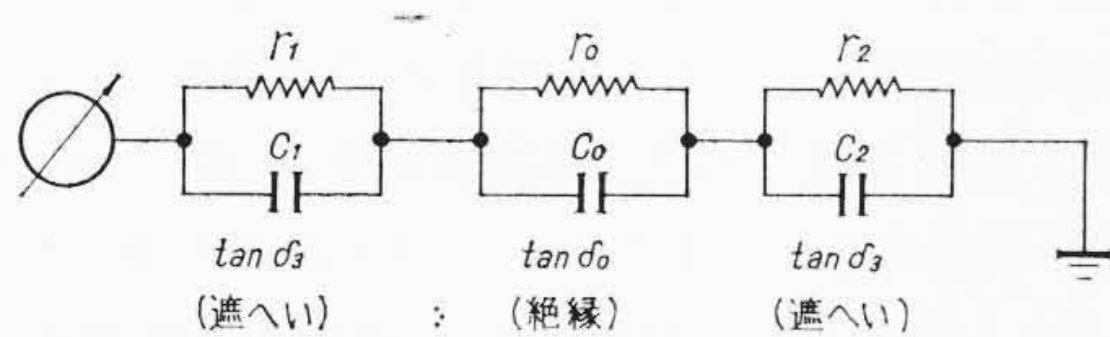
C_p, R_p : 絶縁体の実効
静電容量, 抵抗
 C_K, R_K : カーボン紙の実効
静電容量, 抵抗
 R_v : 真空管電圧計の
入力抵抗

第1図 電位分布測定時の等価回路

* 日立電線株式会社日高工場



第2図 カーボン紙の誘電率と体積抵抗率の関係



第3図 遮へい層をもつ電力ケーブルの等価回路

リッジで複合誘電体の静電容量を測定し、(5)式からカーボン紙の静電容量を計算することを試みた。

$$c_K = \frac{1}{\frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_0}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし c_s : 標準コンデンサの静電容量
 c_0 : 合成静電容量

この方法で得られた高抵抗カーボン紙の誘電率は、電位分布法の結果と一致しているが、低抵抗カーボン紙になるほど小さくなり、 $10^6 \Omega\text{cm}$ では約1けた小さく1,000となった。これは $c_s=100 \text{ pF}$ に対して低抵抗カーボン紙の c_s と c_0 の差が1 pF 以下となるので、かなりの測定誤差を考えなければならない。しかし $10^{10} \Omega\text{cm}$ 以上のカーボン紙では、その差が5 pF 以上となり誤差が小さくなるので、電位分布法と一致するものと考えられる。

2.2 誘電正接特性

カーボン紙が半導体から誘電体に変化する $10^9 \Omega\text{cm}$ 付近では、ケーブルの誘電正接の増加が懸念される。またこのほかにケーブルのイオン化係数が増加することを J. N. Johnson 氏⁽⁶⁾ が発表しているので、この確認の意味で体積抵抗率の広範囲に変化した試料について、誘電正接の関係を実験した。

2.2.1 誘電正接の増加に関する理論

遮へい層の上に接地した金属シースがある場合、導体および絶縁体上にカーボン紙の遮へいをした等価回路は、第3図のようになり、複合誘電体の誘電正接($\tan \delta$)は(6)式で示される⁽⁸⁾。

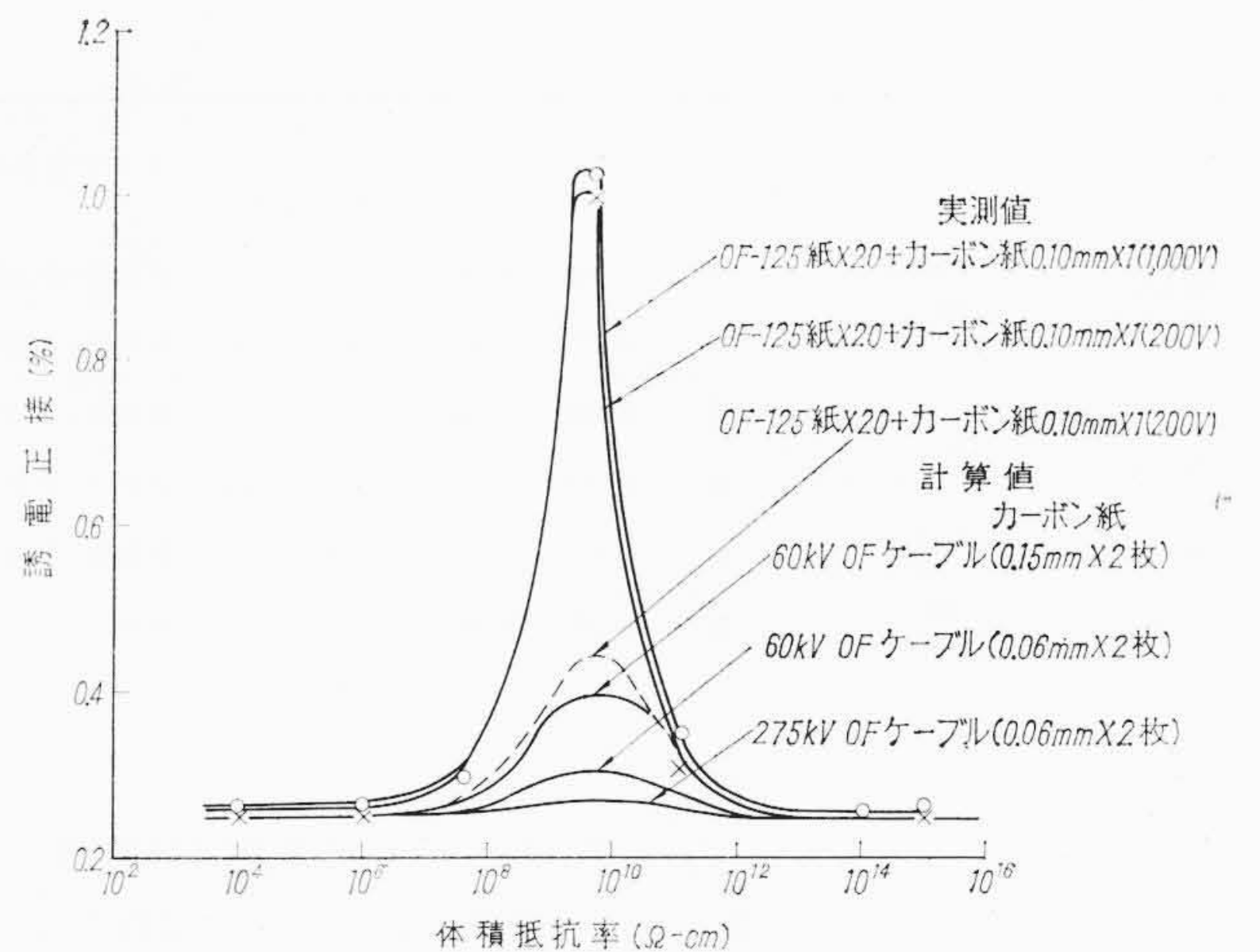
$$\tan \delta = \frac{c_0(1 + \tan^2 \delta_0) \tan \delta_3 + c_3(1 + \tan^2 \delta_3) \tan \delta_0}{c_0(1 + \tan^2 \delta_0) + c_3(1 + \tan^2 \delta_3)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{ここに } c_3 = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$$

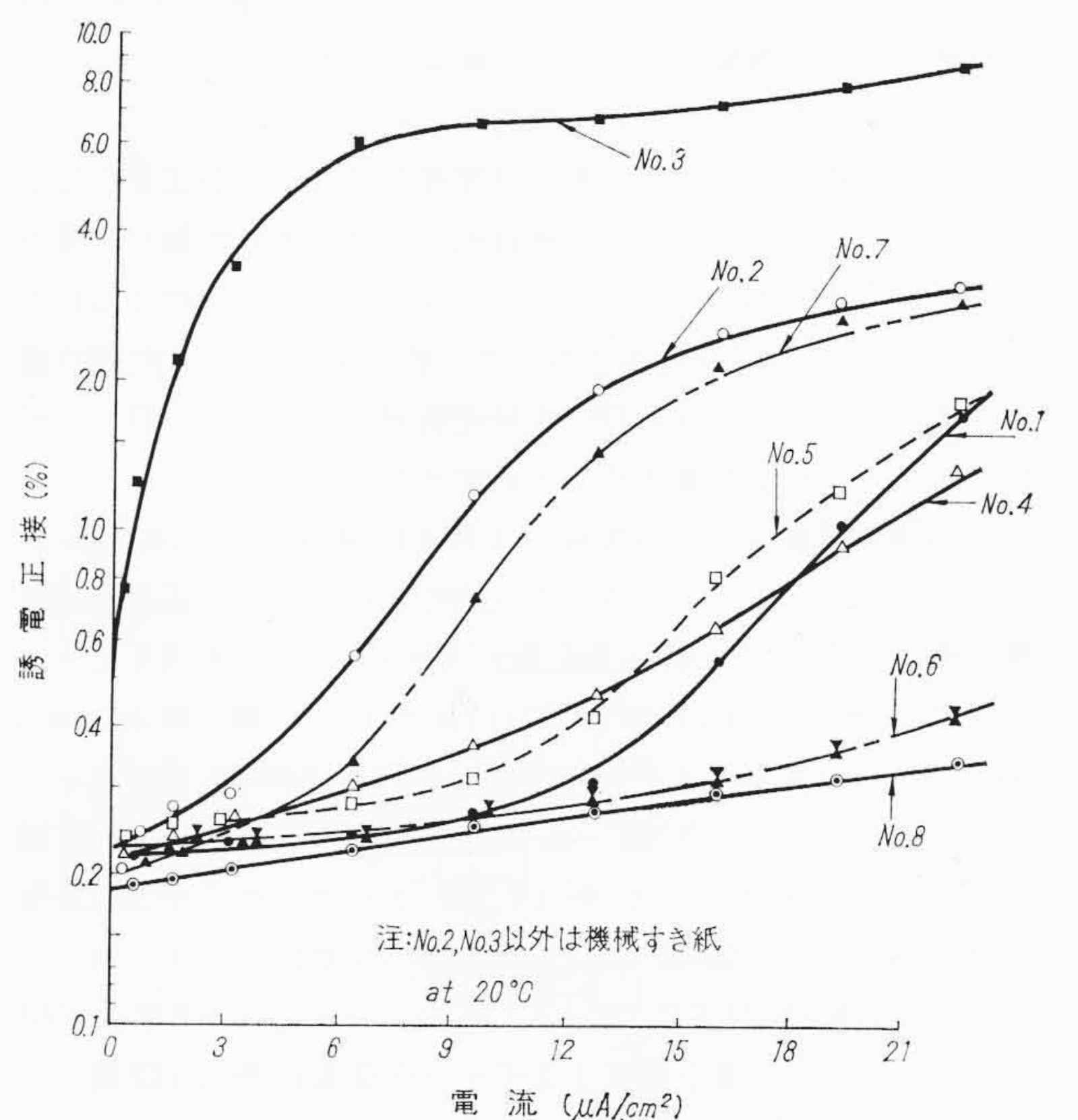
カーボン紙の体積抵抗率を ρ_K 、誘電率を ε_K 、 $\mu = \frac{c_0}{c_3} = \mu_0 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_K}$ とし、また $\tan \delta_0 \ll 1$ の関係から、ケーブルを同軸円筒形として $\tan \delta$ を求めると(7)式が得られる。

$$\tan \delta = \frac{5.55 \cdot 10^{-13} \mu f \varepsilon_K \rho_K + [1 + (5.55 \cdot 10^{-13} f \varepsilon_K \rho_K)^2] \tan \delta_0}{(\mu + 1) (5.55 \cdot 10^{-13} f \varepsilon_K \rho_K)^2 + 1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

また上式から、 $\rho_{K \max}$ ならびに $\tan \delta_{\max}$ の式を求めれば、(8)、(9)式のようになる。



第4図 油浸紙の誘電正接に及ぼすカーボン紙抵抗値の影響



- No.1 現用カーボン紙×0.144 mm ($9.93 \times 10^5 \Omega\text{cm}$)
 No.2 手抄きカーボン紙×0.130 mm ($3.65 \times 10^5 \Omega\text{cm}$)
 No.3 手抄きカーボン紙×0.138 mm ($1.775 \times 10^{11} \Omega\text{cm}$)
 No.4 手抄きカーボン紙×0.150 mm ($5.5 \times 10^{11} \Omega\text{cm}$)
 No.5 手抄きカーボン紙×0.06 mm ($2.90 \times 10^7 \Omega\text{cm}$)
 No.6 手抄きカーボン紙×0.055 mm ($7.77 \times 10^{11} \Omega\text{cm}$)
 No.7 シルバークラフト紙×0.135 mm ($6.99 \times 10^5 \Omega\text{cm}$)
 No.8 クラフト紙×0.124 mm ($5.13 \times 10^{16} \Omega\text{cm}$)

第5図 カーボン紙を使用した油浸紙の誘電正接—電流特性

$$\rho_{K \max} = \frac{10^{11}}{2.8 \varepsilon_K \sqrt{\mu + 1}} \quad (\Omega\text{cm}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\tan \delta_{\max} = \frac{\mu}{2 \sqrt{\mu + 1}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

2.2.2 OFケーブルの誘電正接に及ぼすカーボン紙の効果

電位分布法により求めた第2図の体積抵抗率と誘電率の関係を、(7)式に代入して275 kV OFケーブルの誘電正接を計算した結果は、第4図に示したように誘電正接の増加は無視できるほどに小さかった。しかし60 kV OFケーブルでは μ が大きくなるので、 $\rho_K=3.3 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ において $\tan \delta_{\max}$ となり、特に遮へい層が厚いときにはかなり増大している⁽⁹⁾。これらの関係を実証するため、平板電極にカーボン紙0.1 mm×1枚と絶縁紙0.125 mm×20枚を組み合わせて実測した結果を同図に表わしたが、 $\tan \delta_{\max}$ 付近での著しい増加を除けば実測値とほぼ一致していること

第1表 OFケーブルのカーボン紙による
イオン化係数の増加⁽⁷⁾

電圧	導体数	導体断面積	カーボン紙の有無	誘電正接(%)		イオン化係数
				$E/\sqrt{3}$	$2E/\sqrt{3}$	
60 kV (70 kV)	1	600mm ² (400~1,200mm ²)	無	0.260~0.345	0.285~0.372	0.009~0.046
			有	0.274~0.330	0.301~0.362	0.022~0.078
60 kV (70 kV)	3	150mm ² (60~150mm ²)	無	0.269~0.346	0.289~0.365	0.010~0.038
			有	0.275~0.353	0.310~0.409	0.022~0.077
140 kV	1	400~800mm ²	有	0.275~0.311	0.278~0.349	0.020~0.055
250 kV	1	200~850mm ²	有	0.252~0.293	0.266~0.318	0.017~0.030

が知られた。このように $\rho_K=10^8\sim10^{12}\Omega\text{cm}$ の範囲では誘電正接が増加するので、遮へい体としての使用は避けなければならない。

つぎにカーボン紙によるイオン化係数の増加を検討するため、OF-125紙×3枚にカーボン紙×1枚を重ねたものの誘電正接の電流特性を第5図に示す。手抄(す)きカーボン紙の $\Delta\tan\delta$ は、抵抗値の等しい機械抄きカーボン紙よりも大きく、シルバーグラファイト紙も手抄き紙に近い特性を示した。

カーボン紙を用いたとき複合誘電体の $\Delta\tan\delta$ が大きくなるのは、カーボン粒子が隣接する絶縁紙との間げきに移動し、電界によってカーボン粒子が変位するためであろうと考えられている⁽¹⁰⁾。またこれは油浸紙とカーボン紙を組み合わせた複合誘電体に課電したとき、接している油浸紙表面にカーボン粒子が付着していることから理解することができる。

わが国の電線メーカーが共同でCIGRE Study Committeeに提出した、OFケーブルのカーボン紙によるイオン化係数の増加を第1表に示す⁽⁷⁾。この値は測定数が480点以上で、使用したカーボン紙の体積抵抗率は $10^4\sim10^7\Omega\text{cm}$ である。第1表から60 kV 600 mm²ケーブルのイオン化係数は0.009~0.046%であるが、カーボン紙を用いると0.022~0.078%に増加している。第5図のNo.1カーボン紙を用いた60 kV OFケーブルのイオン化係数を計算した結果は、0.031%で、第1表の文献値とほぼ一致している。また140 kVおよび250 kV OFケーブルでは0.017~0.055%であるから、カーボン紙によるイオン化係数の増加は問題にするほどでないと考えられる。

3. カーボン紙の導体遮へい効果

導体遮へいの意義は電氣的破壊強度を向上させるのが目的なので、本章では市販カーボン紙、抵抗値とカーボンの種類が異なる手抄きカーボン紙を導体遮へいに用いて、電氣的破壊強度を定量的に確めるためつぎの実験を行なった。

3.1 市販カーボン紙の導体遮へい効果

絶縁体としてOF-125紙×4枚と供試カーボン紙1枚を組み合わせ、平板(25 mmφ)とより線を模擬した1 mm コルゲート電極間にはさんで、油浸状態での交流とインパルス破壊強度を測定した。印加方式としてつぎの方法を用いた。

(1) 油浸紙の交流コロナ開始と破壊強度

AC 50 c/sの電圧を15 kV/30 s印加後に1 kV/30 sの割合で段階上昇を行なってコロナ開始電圧を測定し、さらに破壊するまで1 kV/30 sの割合で上昇させる。

(2) 油浸紙のインパルス破壊強度

1×40 μsの標準波を30 kV/1回印加後に3 kV/1回の割合で段階上昇を行ない破壊させる。

測定はいずれも8回実施して、平均値と標準偏差を求めた。カーボン紙の物理特性とともに油浸紙の破壊強度ならびに遮へい効果(E_c/E_p)を第2表に示す。体積抵抗率が $10^4\sim10^6\Omega\text{cm}$ のカーボン紙を用い導体遮へいを行なった油浸紙の交流コロナ開始強度(E_{cc}/E_{cp})は、非遮へいに対して17~28%、破壊強度(E_{bc}/E_{bp})では33~46%上昇しているが、インパルス破壊強度(E_{ic}/E_{ip})に対する効果はマイナスであることが認められた。特に低抵抗カーボン紙ではこの傾向があり、約10%の低下を示した。

以上の結果から、供試カーボン紙の体積抵抗率によっては遮へい効果に有意差が認められなかったが、抵抗率が高いほど交流やインパルス破壊強度は高いように思われる⁽¹¹⁾。

さらにカーボン紙の遮へい効果を検討するため、16 mmφの平滑導体に約1 mmの紙絶縁をしたモデルケーブルを製作し、非遮へいと第2表のNo.6カーボン紙を遮へい層に用いた場合の、交流とインパルス破壊強度を測定した。この結果は第3表から明らかのように、より線効果のない平滑導体においても、交流破壊強度は導体遮へいのみで6%、導体と絶縁体遮へいをした場合には21%の上昇であるが、インパルス破壊強度は7%の低下を示した。これは材料試験結果と同様に、カーボン紙がインパルス波に対して、遮へい効果がないことを表わしている。

3.2 抵抗値が異なるカーボン紙の導体遮へい効果

3.1章の実験結果から、カーボン紙の遮へい効果は抵抗値が高いほどすぐれているように思われるが、この種の文献はあまり見受け

第3表 モデルケーブルによるカーボン紙の遮へい効果

遮へい方式	交流破壊強度 (kV/mm)	インパルス 破壊強度 (kV/mm)	遮へい効果	
			E_{bc}/E_{bp}	E_{ic}/E_{ip}
非遮へい	33.8 (2.4)	85.7 (3.6)	1.00	1.00
導体遮へい	35.9 (3.4)	—	1.06	—
導体・絶縁体遮へい	40.9 (1.9)	80.2 (7.0)	1.21	0.93

(注) (1) 試料数 交流各10本、インパルス各6本の平均値
(2) 弧内は標準偏差を示す。
(3) E_{bc} , E_{bp} , E_{ic} , E_{ip} は第2表の注記を参照。

第2表 市販カーボン紙の物理特性ならびに遮へい効果

試番	試料	厚さ (mm)	密度 (g/cm ³)	気密度 (s/100 cc)	体積抵抗率(Ωcm)		交流コロナ開始・破壊 強度(kV/mm)		インパルス 破壊強度 (kV/mm)	遮へい係数		
					65%RH 乾紙	絶乾油浸	E_c	E_b		E_{cc}/E_{cp}	E_{bc}/E_{bp}	E_{ic}/E_{ip}
1	国産カーボン紙	0.100	0.758	340	2.1×10^4	2.5×10^4	53.5 (1.0)	59.0 (1.5)	122 (5.0)	1.22	1.33	0.89
2	外国カーボン紙	0.115	0.614	124	5.8×10^4	5.5×10^4	—	—	127.5(5.5)	—	—	0.93
3	外国カーボン紙	0.045	0.666	2,490	1.7×10^5	1.7×10^5	—	—	128.5(3.4)	—	—	0.93
4	外国シルバーグラファイト紙	0.090	0.904	880	2.3×10^5	3.2×10^5	51.5 (0.5)	59.5 (2.0)	128 (4.0)	1.17	1.33	0.92
5	国産カーボン紙	0.110	0.862	437	3.4×10^5	3.7×10^5	52.5 (0.7)	62.0 (3.0)	129 (0.5)	1.19	1.41	0.93
6	国産カーボン紙	0.157	0.772	368	1.8×10^6	2.6×10^6	55.0 (1.0)	66.5 (2.0)	127 (5.5)	1.25	1.46	0.92
7	国産カーボン紙	0.048	0.763	420	1.9×10^6	1.9×10^6	56.0 (2.0)	65.0 (1.5)	133 (2.5)	1.28	1.43	0.96
P-1	OF 125 紙	0.125	0.740	493	1.4×10^{12}	5.1×10^{16}	44.0 (1.0)	45.5 (0.5)	138 (4.5)	1.00	1.00	1.00

(注) E_c : 交流コロナ開始強度 c : 導体遮へいあり
 E_b : 交流破壊強度 p : 導体遮へいなし
 E_i : インパルス破壊強度
抄紙条件: 機械抄き紙

第4表 抵抗値の異なるカーボン紙の物理特性ならびに遮へい効果

試 番		厚 さ (mm)	密 度 (g/cm ³)	気 密 度 (s/100 cc)	体積抵抗率 (Ωcm)		交流コロナ開始・破壊強度 (kV/mm)		インパルス 破 壊 強 度 (kV/mm)	遮 へ い 係 数		
					65%RH	絶乾油浸	<i>E_c</i>	<i>E_b</i>		<i>E_i</i>	<i>E_{cc}/E_{cp}</i>	<i>E_{bc}/E_{bp}</i>
混抄 カー ボン 紙	TK-A	0.200	0.465	13.7	4.3×10 ³	5.5×10 ³	42.0 (0.5)	52.0 (1.0)	114 (4.1)	1.06	1.13	0.82
	TK-A'	0.130	0.719	180	4.8×10 ³	6.5×10 ³	41.5 (1.5)	48.0 (0.5)	110 (6.0)	1.05	1.05	0.80
	TK-B	0.128	0.485	55	2.2×10 ⁵	4.2×10 ⁵	46.5 (2.5)	51.0 (1.5)	114 (5.0)	1.18	1.10	0.82
	TK-B'	0.064	1.02	299	3.0×10 ⁵	4.0×10 ⁵	46.5 (4.0)	52.0 (2.5)	114 (1.0)	1.18	1.13	0.82
	TK-C	0.112	0.61	326	2.1×10 ⁷	1.4×10 ⁷	47.0 (3.0)	51.5 (2.0)	123 (7.5)	1.18	1.12	0.87
	TK-C'	0.064	1.07	1,615	3.1×10 ⁷	7.4×10 ⁶	48.0 (2.2)	52.5 (2.0)	125.5 (2.5)	1.21	1.15	0.89
	TK-D	0.076	0.909	160	2.5×10 ¹²	2.5×10 ¹⁵	43.5 (4.5)**	56.9 (1.3)**	137.5 (10.2)	1.11	1.28	0.99
	TK-D'	0.074	0.845	474	1.2×10 ¹²	2.4×10 ¹⁵	45.0 (3.5)**	53.7 (1.8)**	135.5 (6.5)	1.14	1.21	0.98
P-2	0.125	0.82	590	1.4×10 ¹²	5.1×10 ¹⁶	39.5 (3.5)	44.5 (0.5)	139.0 (3.0)	1.00	1.00	1.00	
片面 カー ボン 紙	TK-10	0.075	0.903	9,608	2.5×10 ^{3*}	—	31.5 (5.5)	50.0 (2.0)	107.5 (5.0)	1.22	1.18	0.82
	TK-11	0.075	0.85	3,950	8.9×10 ^{5*}	—	28.5 (0.5)	52.0 (1.0)	123.5 (5.0)	1.11	1.24	0.94
	TK-12	0.075	0.84	5,400	2.3×10 ^{7*}	—	26.5 (1.0)	52.0 (8.5)	116.0 (1.0)	1.04	1.24	0.88
	TK-13	0.075	0.94	658	2.2×10 ^{10*}	—	24.0 (2.5)	53.0 (1.0)	130.0 (8.0)	1.03	1.25	0.98
	P-3	0.070	—	—	2.5×10 ^{10*}	—	25.5 (0.7)	42.0 (0.5)	131.5 (2.5)	1.00	1.00	1.00

- (注) (1) *: 表面抵抗率 (Ω)
 (2) **: カーボン紙の誘電率による電圧分担を考慮して破壊強度を補正
 (3) 破壊強度は8回の平均値, カッコ内は標準偏差を示す
 (4) たとえば試料 TK-A カレンダーなし TK-A' カレンダーあり
 (5) E_c , E_b , E_i などは第2表の注記を参照
 (6) 抄紙条件: 手抄き紙

第5表 種類の異なるカーボン紙の物理特性ならびに遮へい効果

カ ー ボ ン 紙		厚 さ (mm)	密 度 (g/cm ³)	気 密 度 (s/100 cc)	体積抵抗率 (Ωcm)		交流コロナ開始・破壊強度 (kV/mm)		インパルス 破壊強度 (kV/mm)	遮 へ い 係 数			
試 番	カーボン種類				65%RH乾紙	絶乾油浸	E _c	E _b	E _i	E _{cc} /E _{cp}	E _{bc} /E _{bp}	E _{ic} /E _{ip}	
V-1	バルカン (XC-72)	ρ ₁	0.135	0.729	28.7	2.9×10 ⁵	2.5×10 ⁵	50.0 (2.0)	54.0 (1.5)	129.5(4.5)	1.18	1.24	0.92
V-2		ρ ₂	0.105	0.530	71.8	9.2×10 ⁹	1.0×10 ¹⁰	48.0 (2.0)	55.5 (0.7)	133.0(3.8)	1.13	1.27	0.95
V-3		ρ ₁ '	0.094	0.720	134.0	4.5×10 ⁵	1.4×10 ⁵	49.0 (3.7)	55.0 (2.5)	128.5(6.3)	1.16	1.26	0.91
V-4		ρ ₂ '	0.082	0.647	92.0	2.3×10 ¹⁰	1.8×10 ¹⁰	47.5 (2.0)	53.5 (0.7)	131.0(4.2)	1.12	1.22	0.94
E-1	EPC	ρ ₁	0.121	0.614	32.0	1.2×10 ⁷	6.7×10 ⁷	49.0 (2.0)	54.0 (2.5)	128.0(3.7)	1.16	1.24	0.91
E-2		ρ ₂	0.108	0.805	64.7	1.5×10 ⁹	1.0×10 ¹⁰	48.0 (2.3)	55.5 (1.5)	132.0(6.5)	1.14	1.28	0.94
E-3		ρ ₁ '	0.088	0.536	126.5	2.5×10 ⁷	7.2×10 ⁷	47.3 (1.5)	52.3 (2.5)	129.0(3.8)	1.11	1.19	0.92
E-4		ρ ₂ '	0.086	0.679	124.5	4.5×10 ¹⁰	3.1×10 ¹⁰	49.0 (2.5)	53.3 (1.5)	134.0(5.0)	1.16	1.22	0.96
H-1	HAF	ρ ₁	0.118	0.579	32.7	7.5×10 ⁵	1.8×10 ⁵	50.0 (4.0)	55.0 (1.7)	128.0(4.5)	1.18	1.26	0.91
H-2		ρ ₂	0.110	0.820	45.4	1.1×10 ⁹	1.1×10 ¹⁰	47.8 (4.0)	54.2 (2.7)	134.0(5.2)	1.13	1.25	0.96
A-1	アセチレン	ρ ₁	0.131	0.667	11.3	3.7×10 ⁵	3.1×10 ⁵	46.5 (2.8)	52.9 (2.7)	128.5(4.5)	1.10	1.26	0.92
A-2		ρ ₂	0.105	0.799	24.7	6.6×10 ⁸	5.0×10 ⁹	46.2 (1.8)	53.7 (0.7)	133.0(5.7)	1.09	1.23	0.96
G-1-1	グラファイト No.1	ρ ₁	0.143	0.600	33.5	1.3×10 ⁵	1.2×10 ⁵	53.0 (1.7)	60.5 (1.5)	132.0(3.9)	1.25	1.39	0.94
G-1-2		ρ ₂	0.104	0.660	56.0	5.0×10 ⁹	4.5×10 ⁹	53.5 (3.0)	60.0 (3.5)	138.5(5.0)	1.26	1.38	0.99
G-2-1	グラファイト No.2	ρ ₁	0.125	0.630	58.0	7.0×10 ⁶	3.3×10 ⁶	49.7 (1.7)	56.7 (1.7)	133.5(10.3)	1.15	1.33	0.95
G-2-2		ρ ₂	0.124	0.650	68.0	6.5×10 ⁹	2.0×10 ⁹	52.3 (1.2)	61.0 (2.5)	136.5(7.8)	1.24	1.40	0.97
P-2	ク ラ フ ト 紙		0.124	0.820	59.0	1.4×10 ¹²	5.1×10 ¹⁶	42.3 (0.9)	43.4 (0.5)	140.5(4.0)	1.00	1.00	1.00

- (注) (1) カッコ内は標準偏差を示す。
 (2) E_c , E_b , E_i は第2表の注記を参照。
 (3) 抄紙条件: 手抄き紙

られないようである。そこでこの効果を知るため、広範囲に抵抗値の異なるカーボン紙および片面カーボン紙を12種類試作し、これを導体遮へいに用いたときの、交流およびインパルス破壊強度について検討した。

以上の供試カーボン紙の物理特性ならびに交流とインパルス破壊強度に及ぼす遮へい効果を第4表に示す⁽¹²⁾。カレンダー掛けのA/B/C/D'紙は密度、気密度が増加し繊維間のすきまは小さいが、抵抗値には変化が認められなかった。

体積抵抗率の低いTK-A, A'カーボン紙を用いた交流コロナ開始強度は5~6%, 次にTK-B, Cでは18%, 高抵抗紙TK-D, D'では11~14%の上昇である。また破壊強度はTK-AからTK-C'まで10~15%, TK-D, D'はカーボン紙の分担電圧を差し引いても21~28%の上昇が認められた。この結果からカレンダーの有無によって、遮へい効果に有意差が認められなかったが、このような手抄きカーボン紙は、第2表の機械抄き紙より遮へい効果の小さいことがわかった。

片面カーボン紙の交流コロナ開始強度は低抵抗紙ほど高く、TK-10では22%の上昇であるが、抵抗値が増すと低下してTK-13では3%である。この場合にはコロナ放電が起きても破壊しがたいので、破壊強度は18~25%上昇している。

インパルス破壊強度にはカーボン紙と片面カーボン紙による相異がなく、低抵抗カーボン紙を導体遮へいに用いた際には約20%低下しているが、遮へい体の抵抗が大きくなるにつれて破壊強度は次第に増加する。したがってTK-D, D'あるいはTK-13のような高抵抗紙では、非遮へいの場合とほぼ等しい破壊強度である。

3.3 カーボンの種類が異なるカーボン紙の導体遮へい効果

今までの結果から、機械抄きカーボン紙と手抄きカーボン紙のような抄紙条件あるいは体積抵抗率が、導体遮へい効果に関係することが明らかになったので、つぎにカーボンの種類を変えた場合の効果について検討した。

実験に供したカーボンの種類は、アセチレンブラック、バルカンXC-72、チャンネルブラックのコンチネンタルAA (EPC)、ファー

ネスブラックのフィルブラック O (HAF) の 4 種と、超微粒子特殊グラファイトの 2 種類である。カーボンブラックの粒度は $0.018 \sim 0.037 \mu$ の範囲であるが、供試中 EPC の粒度がもっとも細かであった。また今回用いた特殊グラファイトは、第 2 表に示したシルバグラファイトの 1μ に比較して小さく $0.018 \sim 0.10 \mu$ 程度であり、No. 2 のほうが粒度は細かである。

供試カーボン紙は体積抵抗率が $10^5, 10^{10} \Omega \text{cm}$ の手抄き紙で、このうちバルカン XC-72 の V-3, V-4 およびコンチネンタル AA の E-3, E-4 はカレンダの効果を検討した。また表面抵抗率が $10^5, 10^9 \Omega$ の片面カーボン紙についても検討を行なったが、第 4 表の片面カーボン紙と同様な結果が得られたので説明を省略した。

手抄きカーボン紙の物理特性および交流とインパルス破壊強度に及ぼす遮へい効果は第 5 表に示したように、カーボン紙の種類によって有意差は認められなかった。すなわち交流コロナ開始強度は $10 \sim 18\%$ 、破壊強度においては $20 \sim 28\%$ の上昇が示された。これに対して特殊グラファイト紙の遮へい効果はカーボン紙よりすぐれており、交流コロナ開始強度が $15 \sim 26\%$ 、破壊強度では $33 \sim 40\%$ の上昇が認められた。なおグラファイト紙の遮へい効果のすぐれていることは、機械抄き紙においても確認している。

インパルス破壊強度は低抵抗カーボン紙において約 10% 、 $10^{10} \Omega \text{cm}$ では数 % の低下が認められたが、特殊グラファイト紙はインパルスに対しても良好で、 $5 \times 10^9 \Omega \text{cm}$ では非遮へいの場合とほぼ等しく、その効果はマイナスにならないことがわかった。

4. 導体遮へいの機構

4.1 結果の総括

以上実験した結果から、カーボン紙の体積抵抗率と油浸紙の破壊特性の関係を第 6 図に示したが、手抄きカーボン紙は機械抄きのカーボン紙より、交流ならびにインパルス破壊強度に対する遮へい効果が小さいことが知られた。手抄きカーボン紙はカーボン粒子の分散が不均一で方向性がなく、しかもカーボン粒子が繊維との接着性

が弱いので、課電されたとき半導電粒子は移動して油浸紙の表面に付着しやすい。このようなカーボン紙を遮へい体に用いると、 $\Delta \tan \delta$ は第 5 図のように大きくなり、破壊に対する遮へい効果が小さいことを実験的に知ることができた。

交流コロナ開始ならびに破壊強度に対する遮へい効果は、カーボン紙の体積抵抗率が $10^{14} \Omega \text{cm}$ 以下ではほとんど変わらないが、さらに高抵抗紙になると急激に小さくなる。すなわち $10^{14} \Omega \text{cm}$ 以下の手抄きカーボン紙の交流コロナ開始強度に対する遮へい効果は第 6 図から平均値を求めれば 15% 、破壊強度は 18% の上昇であるが、機械抄き紙ではそれぞれ 29% あるいは 35% で、手抄き紙の約 2 倍の上昇が認められた。なお機械抄き紙でも $40 \sim 60 \mu$ 紙は破壊に対する遮へい効果が大きく、 48% の上昇である。

本実験の絶縁構成を用いたときインパルス破壊強度に対する遮へい効果は、 $10^3 \Omega \text{cm}$ のカーボン紙で約 20% 低下しているが、体積抵抗率が増加するにつれてマイナスは小さくなり、 $10^{10} \Omega \text{cm}$ 以上ではカーボン紙を用いたためのマイナスはほとんどなくなることが認められた。また抵抗値は等しくても破壊強度の変動が大きいことがあり、これは抄紙条件によってカーボン粒子の繊維への分散あるいは接着性の相異によるものであらうと考えられる。

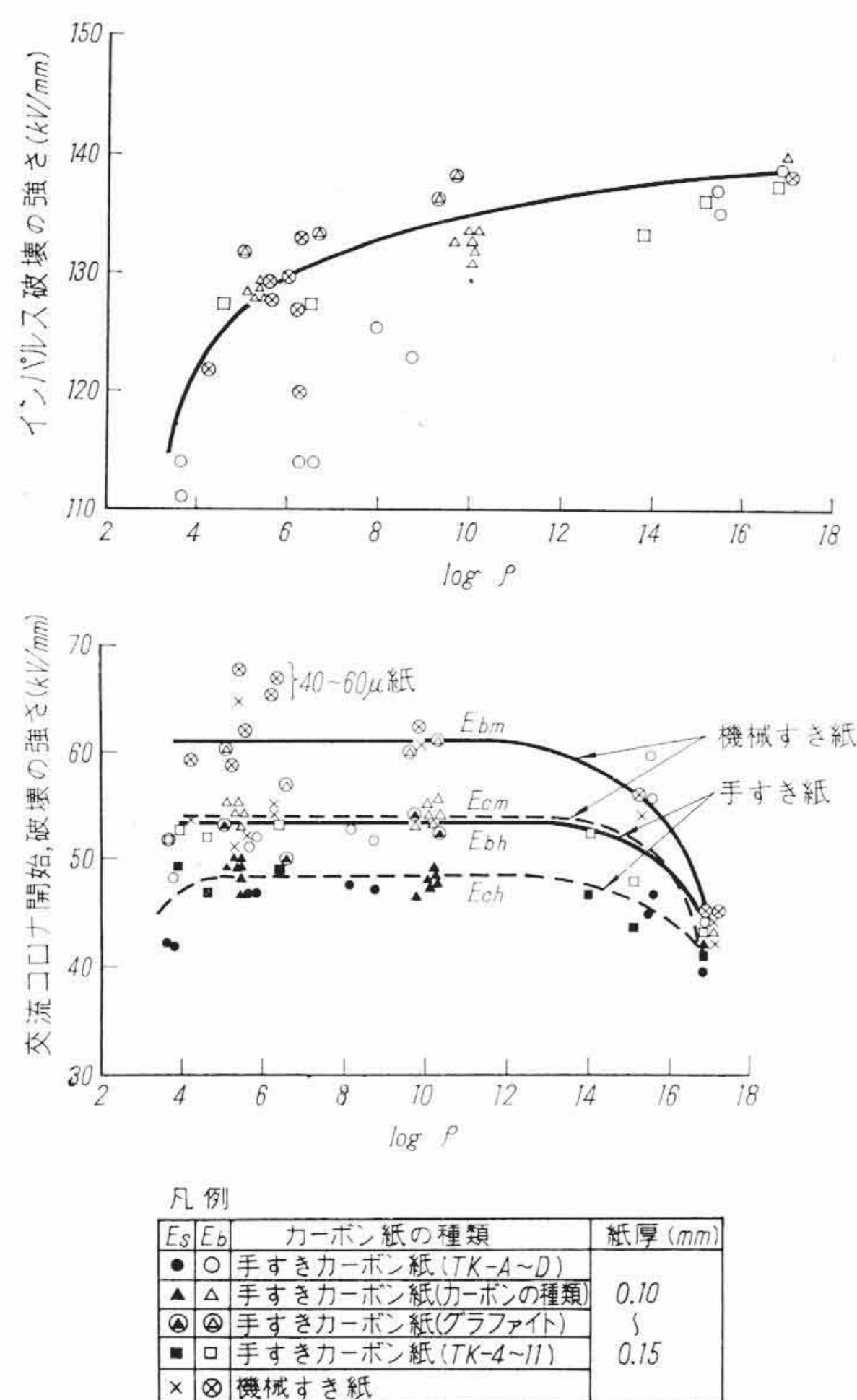
4.2 遮へい機構

カーボン紙の導体遮へい効果としてはより線効果の低減⁽¹³⁾、絶縁層と導体との密着によるコロナ放電防止⁽¹⁾、導体からのイオン放出抑制効果⁽¹⁴⁾、カーボン紙の表面活性⁽¹⁵⁾、カーボン紙の抵抗による高周波成分の減衰作用⁽¹⁶⁾あるいは絶縁油の劣化抑制⁽¹⁷⁾などがあげられている。しかしこのほかに破壊強度を向上させる効果が認められるので、以上の実験結果の考察を含めてカーボン紙の遮へい機構についての検討結果を以下に述べる。

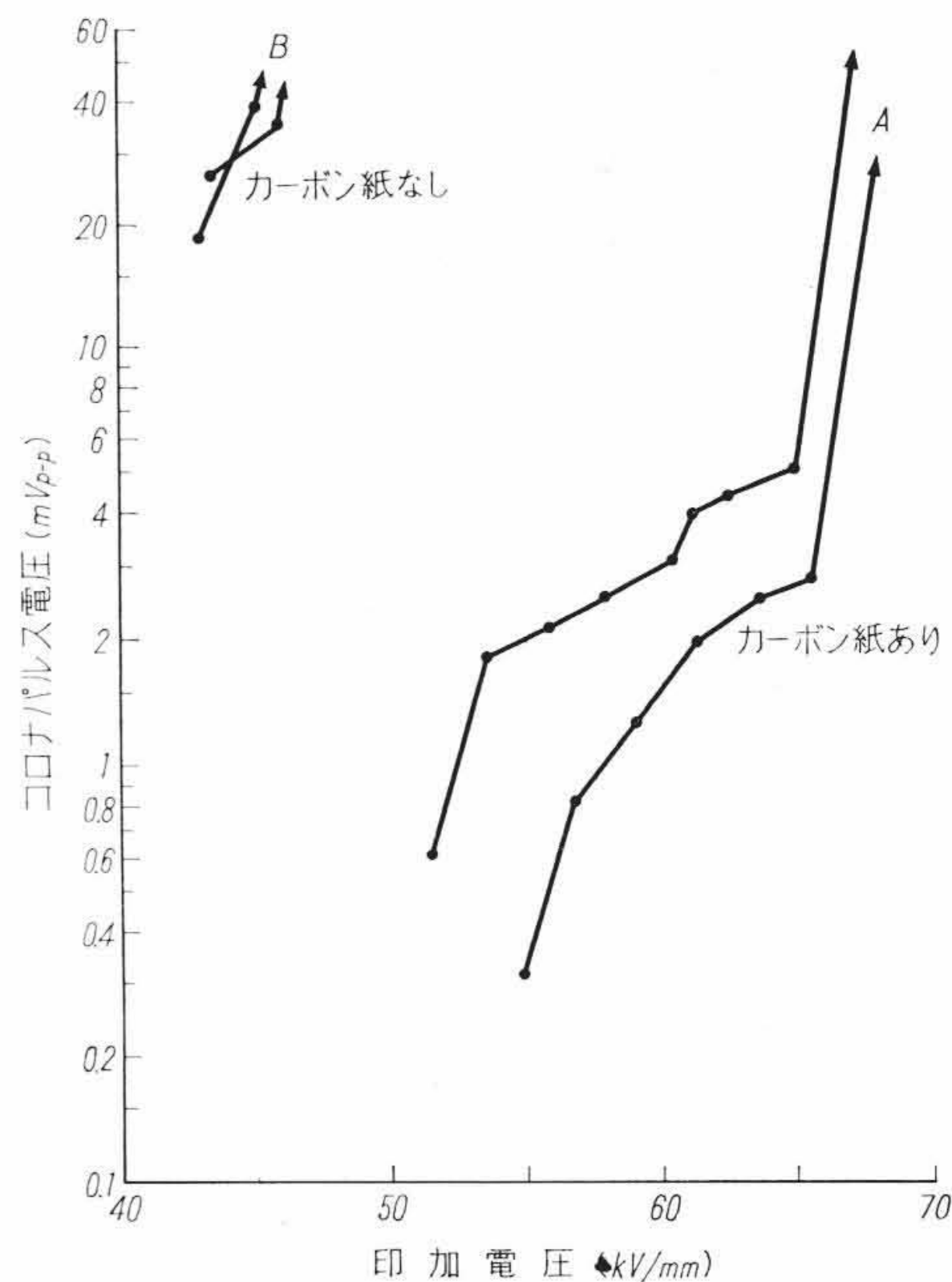
4.2.1 交流破壊に対する遮へい機構

カーボン紙を導体遮へいに用いた油浸紙に交流電圧を印加して徐々に上昇しながら、コロナ放電の大きさを測定すると、第 7 図のようにカーボン紙なしのときよりコロナ開始電圧は高く、コロナ放電は大きくなりにくいので、破壊電圧は高くなる。このようにコロナパルス電圧が小さいことは、カーボン紙にコロナ放電を抑制する性能があるためであらうと考えられる。

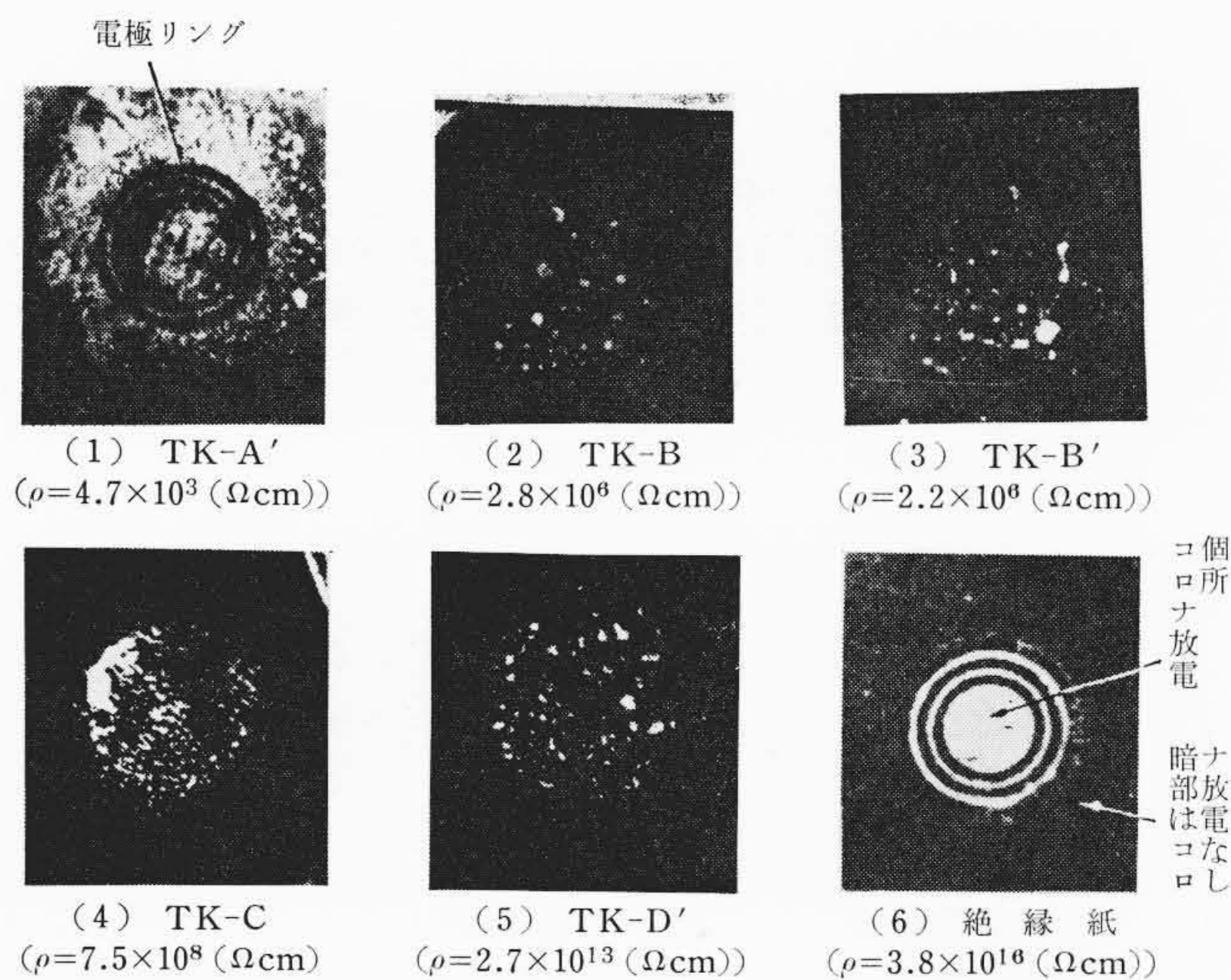
第 4 表の抵抗値の異なったカーボン紙を導体遮へいに用い、交



第 6 図 油浸紙の破壊特性とカーボン紙の体積抵抗率の関係

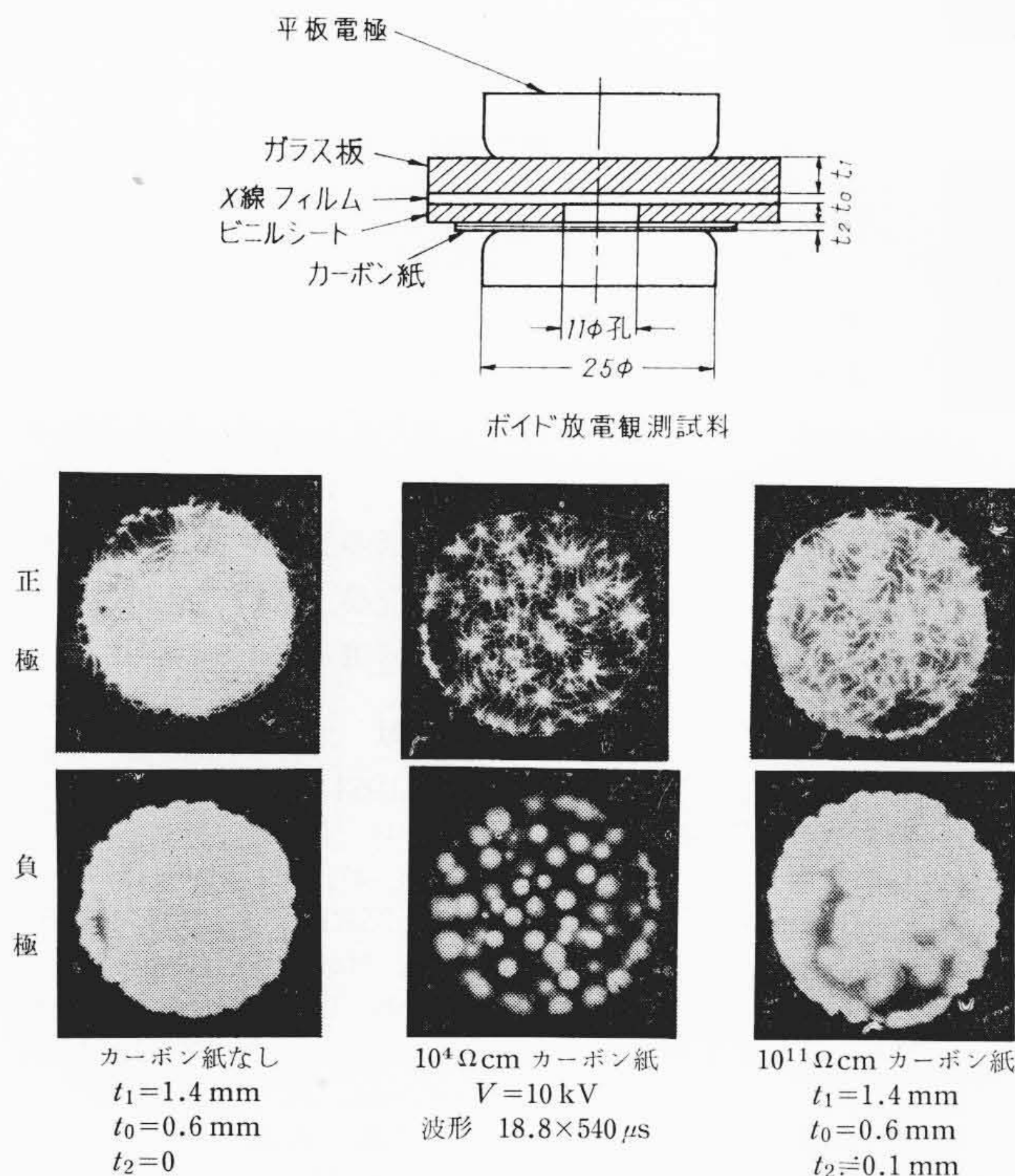


第 7 図 油浸紙の印加電圧とコロナパルス電圧の関係



- No.1: カーボン紙の繊維層間にすきまが多いので、導体からの放出イオンが完全にトラップできずに電極形状が認められる。
- No.2~5: カーボン紙の断面構造はクラフト紙と等しくすきまが少ないのでコロナ放電は小さい。
- No.6: 遮へいなしのため電極凹部の油膜でコロナ放電が起こっている。

第8図 油浸紙の交流破壊時におけるコロナ放電図



第9図 カーボン紙遮へい時の気中ボイド放電図(緩波頭波)

流破壊試験を行なった後の油浸紙をフクシン染色して、コロナ放電による絶縁油のワックス生成状態を示したのが第8図である。図より明らかなように $5 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ の低抵抗カーボン紙 (TK-A, A') は、抄き込みカーボンが比較的少量なので繊維間の結合がゆるやかとなり、このためコロナ放電を防止できず、絶縁紙表面に電極形状の放電図を示したものである。またこのようなカーボン紙は第4表に示したように遮へい効果は小さい。 $10^5 \Omega \text{cm}$ 以上の TK-B から TK-D' では、コロナ放電はカーボン紙の抵抗によって分散するので、電極形状の放電図形は認められない。

さらに緩波頭波を用いて気中ボイド放電図を測定したが、第9図に示したようにカーボン紙を使用すると正負のコロナ放電量は小さくなるが、あまり高抵抗カーボン紙になるとコロナ放電量は若干大きくなる。このようなことから第5図の交流破壊に対する

遮へい効果が $10^{14} \Omega \text{cm}$ 以上で小さくなることが説明されよう。また特殊グラファイト紙の放電図は省略したが、第9図のカーボン紙より小さくなっており、このことが遮へい効果のすぐれていた原因であると思われる。

また片面カーボン紙は、カーボン粒子をにかわに溶かして塗布しているので、半導電層は絶縁紙表面の凸凹部に数ミクロンの厚さに付着している。したがってにかわでかたくなった半導電層の凸部は、カーボン紙のような柔軟性が乏しいので電界が高くなり、コロナ開始強度は低下すると考えられる。

4.2.2 インパルス破壊に対する遮へい機構

カーボン紙に交流電圧を加えて徐々に上昇して行くと破壊を起こさずに、局部的に電流密度が増加して発煙燃焼するが、インパルス波の場合のように早い現象では破壊される。たとえば絶縁厚 1 mm のカーボン紙だけの油浸モデルケーブルについて、インパルス破壊強度を測定した結果は、体積抵抗率 No.1 = $7.5 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ で 11 kV/mm, No.2 = $2.7 \times 10^8 \Omega \text{cm}$ で 21.5 kV/mm であった。

インパルス破壊試験後の油浸紙をフクシン染色した結果を第10図に示した。図より明らかなようにカーボン紙なしのときには、絶縁紙表面にコルゲート部分の油層で放電した痕跡(こんせき)が認められたが、遮へいを行なったときには電極凸部に接したカーボン紙表面が衝撃によって損傷を受けている。しかしカーボン紙と接している絶縁紙には放電が認められなかったので、写真では黒色となっている。これはカーボン紙がインパルス波のように早い現象に対しては、半導体とならずに絶縁体となり、電圧が印加されるためと思われる。

さらに No.1 と No.2 カーボン紙をおのおの2枚導体と絶縁体遮へいに用いた絶縁厚 1 mm の破壊電圧が 100 kV のモデルケーブルについて、遮へい層の破壊電圧を測定した。この結果から No.1 紙のケーブルは、5 kV 1回の印加で第11図のように遮へい層が不完全破壊を起こしている。しかし No.2 紙では 15 kV で始まり 70 kV になっても完全破壊をしなかった。またカーボン紙は不完全破壊をしても、波尾では遮へい層の絶縁が回復して再び電圧が印加される。

このようにカーボン紙はインパルス波に対して、半導体とならずに絶縁体となり破壊しやすいので、遮へい効果の有無は遮へい層が絶縁体より早く破壊するかどうかによって決定される⁽¹⁸⁾。実際に No.1 カーボン紙を用いたモデルケーブルでは、破壊がカーボン紙より始まるので遮へい効果は数%のマイナスとなったが、No.2 カーボン紙を用いたときは絶縁層から破壊が始まるので 16% の上昇が認められた⁽¹⁹⁾。60 kV 級の OF ケーブルにおいて 5~15% 上昇しているのは、上記の考え方を証明しているものと思われる。

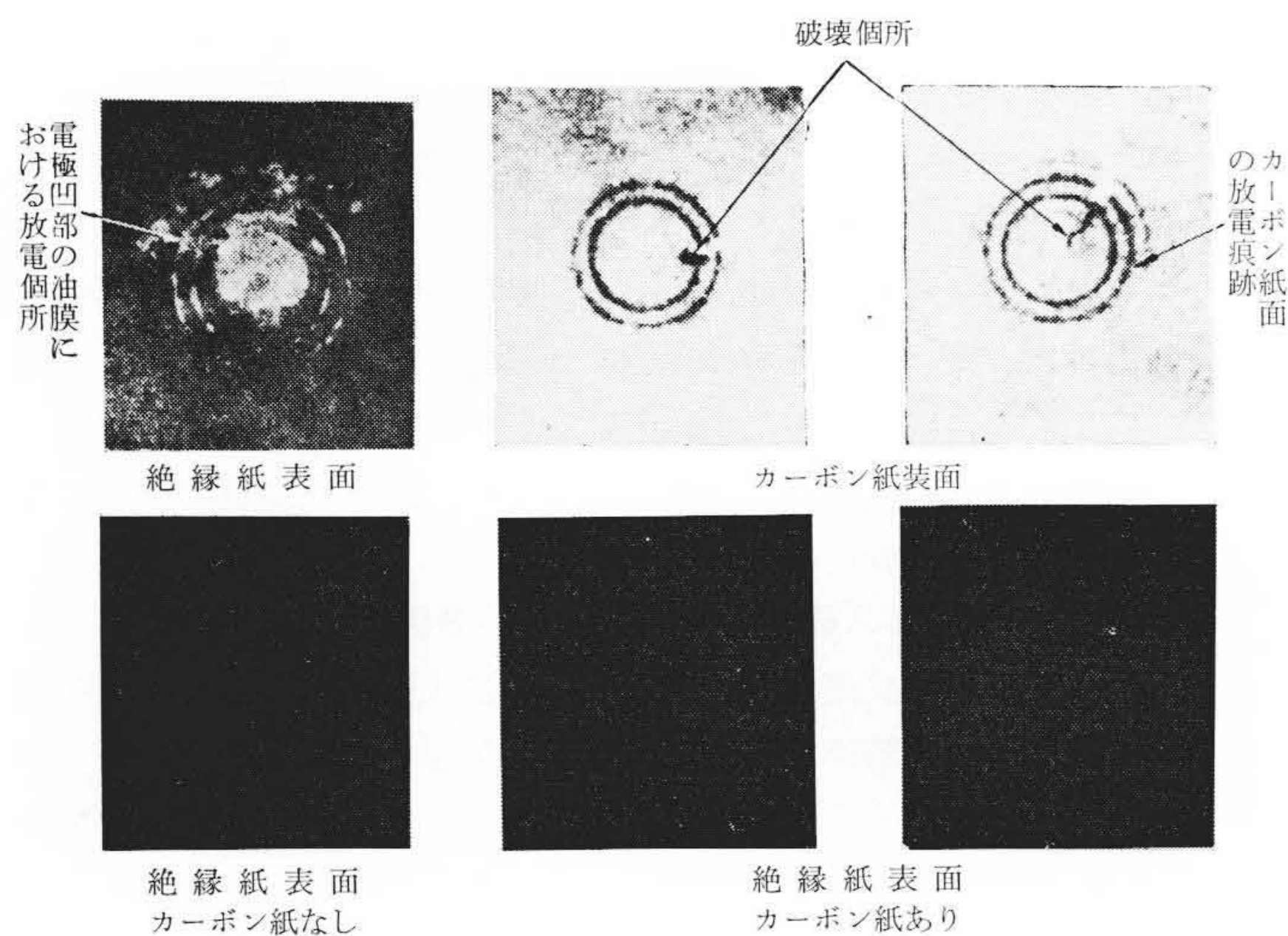
第12図のインパルス波による気中ボイド放電図形は、第9図の緩波頭波によるボイド放電と異なり、抵抗値の高いカーボン紙ほど正負ボイド放電量が小さいので、インパルスに対する遮へい効果は大きいことを示すものである。このような現象は油中ボイド放電図でも同様に確認されている。

5. 結 言

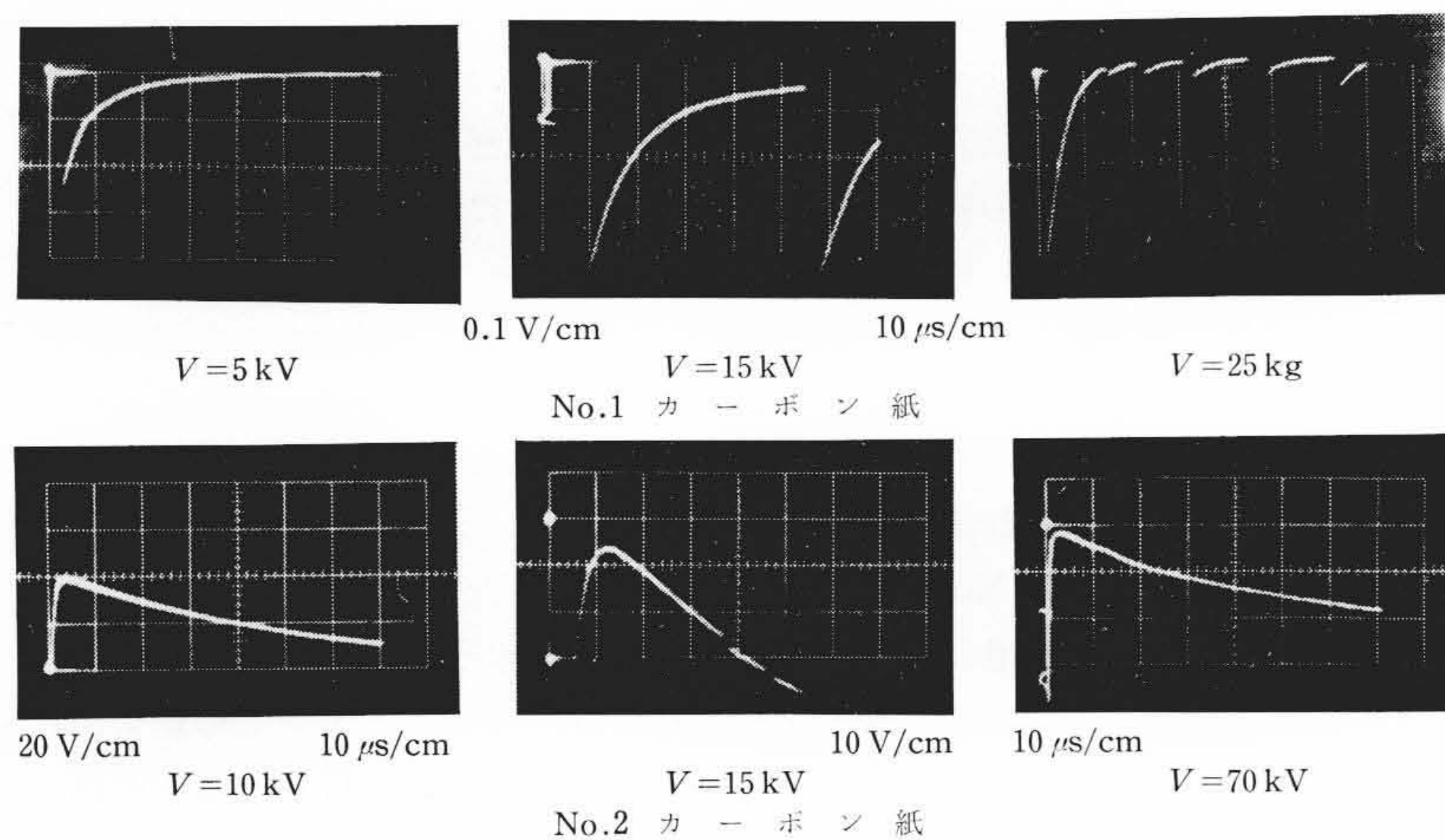
電力ケーブル用カーボン紙の誘電特性と導体遮へい効果に関する実験を行ない、得られた結果を要約するとつぎのようになる。

(1) カーボン紙の誘電率は $10^6 \Omega \text{cm}$ で 10,000 となるが、体積抵抗率が増すと誘電率は次第に小さくなり終局には油浸紙と等しくなる。

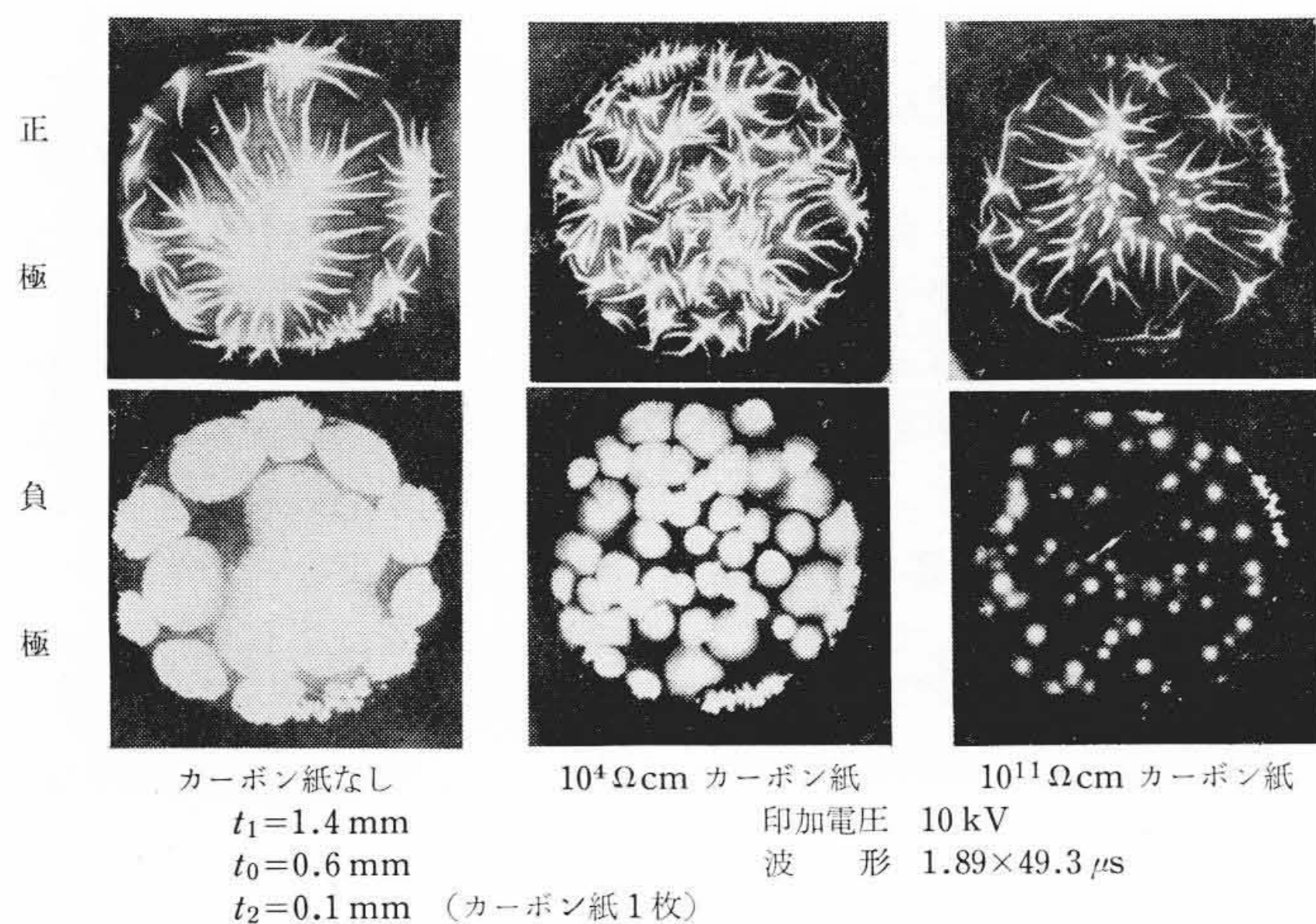
(2) $3.3 \times 10^9 \Omega \text{cm}$ で油浸紙の誘電正接は最大値となるので、 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \text{cm}$ のカーボン紙は使用を避けなくてはならない。ま



第 10 図 油浸紙のインパルス破壊時におけるコロナ放電図



第 11 図 モデルケーブル遮へい層のインパルス波による破壊現象



第 12 図 カarbon紙遮へい時の気中ボイド放電図(インパルス波)

たカarbon紙を用いると複合誘電体のイオン化係数は増加するが、絶縁層が厚い高電圧ケーブルではほとんど問題にするほどでない。しかし手抄き紙は一般に $\tan \delta$ が大きいので、抄紙条件の吟味の重要なことが認められた。

(3) 導体遮へい効果は機械抄きカarbon紙と手抄き紙で異なっているが、 $10^{14} \Omega \text{cm}$ 以下では交流に対する遮へい効果は変化しない。すなわち機械抄き紙による遮へい効果は平均値で 35%，手抄

き紙はその効果が小さく 18% の上昇である。 $10^4 \Omega \text{cm}$ 紙のインパルスに対する効果は約 20% の低下であるが、抵抗率が高くなるにつれてこの傾向は少なくなり、 $10^{10} \Omega \text{cm}$ 以上ではカarbon紙による低下は認められないようである。ただし $10^{14} \Omega \text{cm}$ 以上になると交流の遮へい効果は減少する。

(4) 片面カarbon紙の遮へい効果は機械抄き紙より小さく、交流に対して約 25% の上昇である。しかしインパルスに対しては手抄き紙と同様な特性を示し、 $10^3 \Omega \text{cm}$ 紙で約 20% の低下が認められた。

(5) カarbonブラックの種類によって、遮へい効果に有意差は認められなかったが、特殊グラファイト紙はすぐれていることが知られた。

(6) 最適抵抗値としては $10^3 \sim 10^7 \Omega \text{cm}$ が考えられる。しかし良質な高抵抗カarbon紙が製造できるようになったので、交流破壊に対する遮へい効果を現状に保ち、インパルス破壊を上

昇させるために、 $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \text{cm}$ の高抵抗カarbon紙を使用することが有利である。

(7) 遮へい機構としてはより線効果の低減や導体と絶縁体の密着をよくするほかに、交流に対してはカarbon紙が導体からのイオンや電子の放出を抑制し、コロナ放電を起こりにくくすることが考えられる。しかしインパルスのように早い現象では半導体でなくなり、カarbon紙が最初に破壊しやすいので遮へい効果は認められないが、遮へい層が破壊しにくいような絶縁構成、あるいは高抵抗カarbon紙を用いれば遮へい効果は期待できる。

終わりにこの研究について終始懇切なご指導を賜った武蔵工業大学鳥山教授、ご激励をいただいた日立電線株式会社久本、水上、山本部長ならびに下山田課長に感謝の意を表わす。またカarbon紙の試作あるいは試料を提供された巴川製紙所武主任研究員、日立化成株式会社土屋課長ならびに実験に協力された坂場、蛭田両君に感謝する。

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, A. M. Morgan: CIGRE., No. 204 (1956)
- (5) 比企野, 渡辺, 庄司: 日立評論 39, 1053 (昭 32-9)
- (6) J. N. Johnson: CIGRE Cable Study Committee., (1960)
- (7) K. Kitagawa: CIGRE Study Committee., No. 2 (1961)
- (8) オデネッツ: Вестник Электропром., 31, (5) (1960)
- (9) 坂場, 佐藤, 北郷: 電学東京支大 105 (昭 36)
- (10) 加賀谷, 猪鼻: 電学東京支大 314 (昭 37)
- (11) 佐藤, 坂場: 電四連大 407 (昭 36)
- (12) 佐藤, 坂場: 電学東京支大 104 (昭 36)
- (13) P. R. Howard, D. N. Browning: J. I. E. E., 1 (New Series) 653 (Oct. 1955)
- (14) W. A. Del Mar: T. A. I. E. E., 75, 1361 (Feb. 1956) (Discussion)
- (15) P. G. Priarrogia, G. Palandri: T. A. I. E. E., 75, 1343 (Feb. 1956)
- (16) K. S. Wyatt: T. A. I. E. E., 75, 1358 (Feb. 1956) (Discussion)
- (17) L. G. Brazier, D. T. Hollingsworth, A. L. William: P. I. E. E., 100, Part. II, 641 (Dec. 1953)
- (18) 佐藤: 電学東京支大 109 (昭 37)
- (19) 佐藤: 電四連大 518 (昭 38)