

超高压 OF ケーブルの誘電特性に関する二、三の考察

Some Considerations for Dielectric Properties of EHV Oil Filled Cables

遠 藤 恒* 沼 尻 文 哉**
Takeshi Endô Fumiya Numajiri

要 旨

OF ケーブルの誘電特性は使用されている油浸紙絶縁体の誘電特性により決定されるわけであるが、実際にはこのほかにケーブルの紙巻き条件およびしゃへい用カーボン紙の影響を受ける。また油浸紙自身の誘電特性も測定法により値が若干異なり、特に使用電界の高い超高压 OF ケーブルではこの影響が無視できない。筆者らは油浸紙絶縁体の特性を詳細に検討することによって超高压複合構成 OF ケーブルの誘電特性の推定法を導いた。

1. 緒 言

電力需要の増大に伴いわが国においても 500 kV 送電が開始されようとしている。このような超々高压送電系統に使用する電力ケーブルでは絶縁体の誘電特性が重要な問題になってくる。これはケーブル絶縁体の誘電体損が誘電率と誘電正接の積に比例し、送電電圧の 2 乗に比例して増加する一方、充電電流もまた誘電率と送電電圧の積に比例して増加するためである。また、絶縁厚さの増加は絶縁体の熱抵抗を大きくし、ケーブルの熱放散を悪くする。このため電圧を上昇しても必ずしも送電容量が比例的に増加しないという問題を生じてくる。したがって超高压ケーブルはできる限り誘電体損を低減されなければならない。

油浸紙絶縁体の誘電特性改善策として脱イオン水抄紙、低密度化、有害不純物の除去および紙繊維配列⁽¹⁾の適正化などが考えられ、また含浸油として合成油の適用がある。絶縁破壊電圧向上策として絶縁紙の密度、気密度の増加、薄紙化などがある。

一方、大外径の大容量地中送電ケーブルでは曲げ特性などの機械的強度に対する要求も非常に過酷である。絶縁紙の機械的強度改善法としては高密度化、厚紙化、原料パルプの選択などが考えられるが、高密度化は誘電特性の点から、また厚紙化は絶縁破壊電圧の低下の点から制約がある。さらに誘電特性のすぐれたパルプは一般に機械的強度が劣る。したがってケーブル絶縁体の絶縁構成にはケーブルの電氣的なものからと機械的なものからの両方の要求を勘案し、最適絶縁紙の組合せを決めなければならない。

本論文は超高压 OF ケーブルで最も重要視される誘電特性について材料特性の測定法、実ケーブル誘電特性の推定法などについて検討した結果を述べたものである。

2. 油浸紙の誘電特性

2.1 平板電極法による測定

表 1 は代表的 OF ケーブル紙の主要特性値を示したものである。

No. 1, No. 2 は汎用の OF 紙で密度の異なるもの、また No. 3 は低密度高気密度の低損失紙であり、また No. 4 は高密度の低損失紙、No. 5 はさらに低損失化された絶縁紙である。

図 1 はこれらの絶縁紙の油浸状態における誘電正接の温度特性を平板電極法により測定した結果を示したものである。油浸紙の誘電特性は有効直径 65 mm の平板電極に供試紙を 2~3 枚重ねて OF 油を含浸し、60 Hz, 10 kV/mm で測定した値で示した。汎用の OF 紙 (No. 2) は高温における誘電正接の立上りが著しく、No. 5 の低損失紙は全般的に誘電正接が低く、とくに高温における誘電正接の立上りが少ない。これに対し No. 2, No. 4 の高密度紙は No. 2, No. 5 に比べ全般的に誘電正接が高くなっている。

2.2 油浸紙誘電特性測定法の検討

これまで油浸紙絶縁体の誘電特性はおもに有効直径 65 mm の平板電極を用いて測定されてきた。この電極は面圧荷重 0.25 kg/cm² であり、供試絶縁紙の重ね枚数は 2~3 枚である。しかし油浸紙の誘電特性は測定条件によってかなり異なることがある。たとえば、電極材質の問題、測定面圧、供試紙の重ね枚数、測定周波数、測定電極とガード電極間の間げきによる電界変歪(わい)などである。すなわち真鍮電極に鉱油を含浸して誘電特性を測定すると、電極により触媒反応を起こして含浸油の誘電特性を悪くすることがある⁽²⁾。また後述するように絶縁紙表面にはかなり凹凸(おうとつ)があり、このため面圧荷重により厚さが変化する。この厚さ変化により誘電特性も変化する。また、高温のイオン伝導損領域では 50 Hz と 60 Hz との測定で 5~10% の差 (100℃において) を生じ、60 Hz より 50 Hz のほうが高目の値になる。さらに電界変歪は最も問題になる。すなわち、通常の平板電極には測定電極とガード電極との間に 0.3 mm の間げきがあり、この間げきにより電界が変歪する。とくに 500 kV 級 OF ケーブルでは使用電界の 2 倍である 25~35 kV/mm まで材料の誘電特性を求める必要があり、このような高電界を平板電極に加えると電極端の電界変歪により誘電正接の電圧特性が異常に高くなるという問題がある。このように平板電極法には種々問

表 1 代 表 的 O F ケ ー ブ ル 紙 の 主 要 特 性

項目 No.	厚 さ (μm)	密 度 (g/cm ³)	気 密 度 (s/100 cc)	引張強さ (kg/15mm)		伸 び (%)		油 浸 100℃		破壊強さ (kV/mm)		備 考
				タ テ	ヨ コ	タ テ	ヨ コ	誘 電 率	誘電正接 (%)	交 流	インパルス	
1	80	1.10	1,650	16.5	4.4	2.9	11	4.3	0.35	36	125	汎 用 紙 I
2	125	0.88	470	19.0	5.4	3.0	11	3.6	0.25	32	106	汎 用 紙 II
3	125	0.68	1,000	10.0	5.6	2.1	4.9	3.3	0.18	34	110	低 損 失 紙 I
4	80	0.88	5,500	9.0	4.0	3.0	10	3.7	0.21	36	123	低 損 失 紙 II
5	125	0.60	2,000	9.8	4.4	3.3	7.0	3.0	0.14	33	109	低 損 失 紙 III

注：誘電特性は平板電極法、破壊試験はモデルケーブル法

* 日立電線株式会社 研究所
** 日立電線株式会社 研究所 工学博士

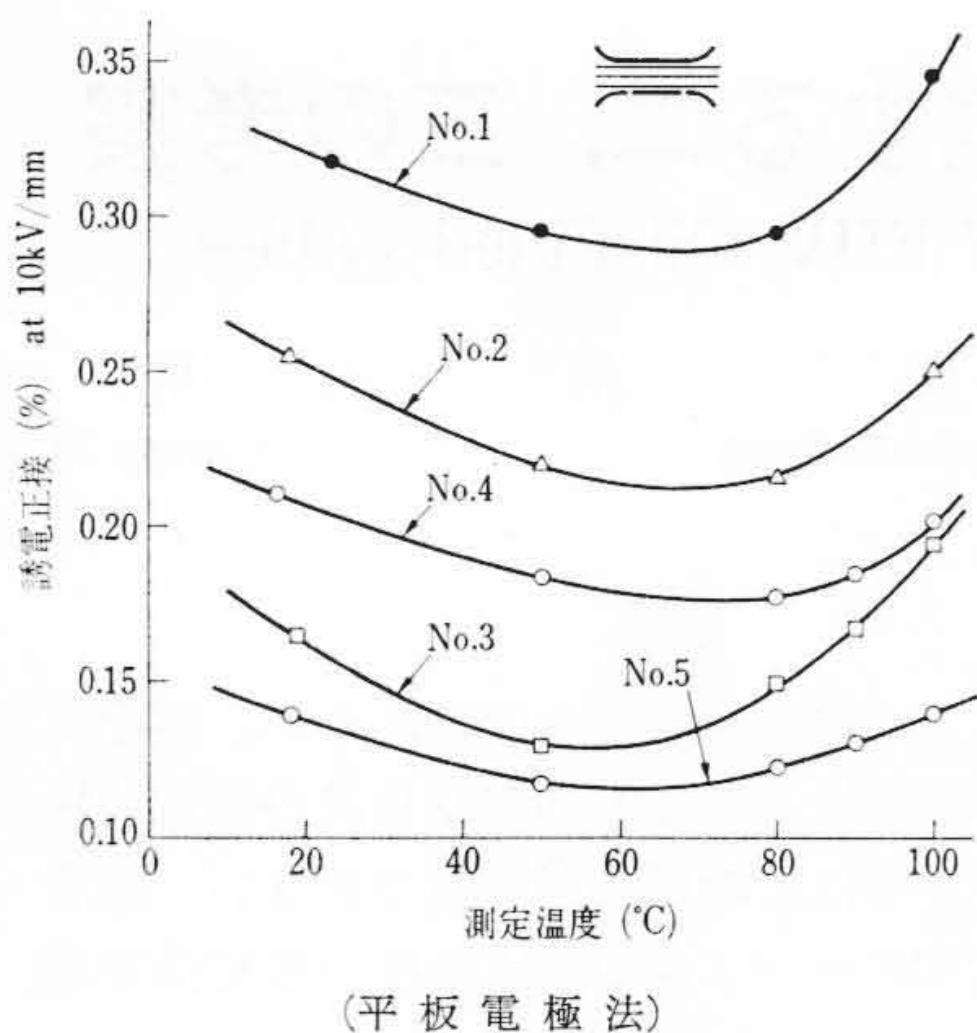


図1 代表的油浸紙の誘電正接特性

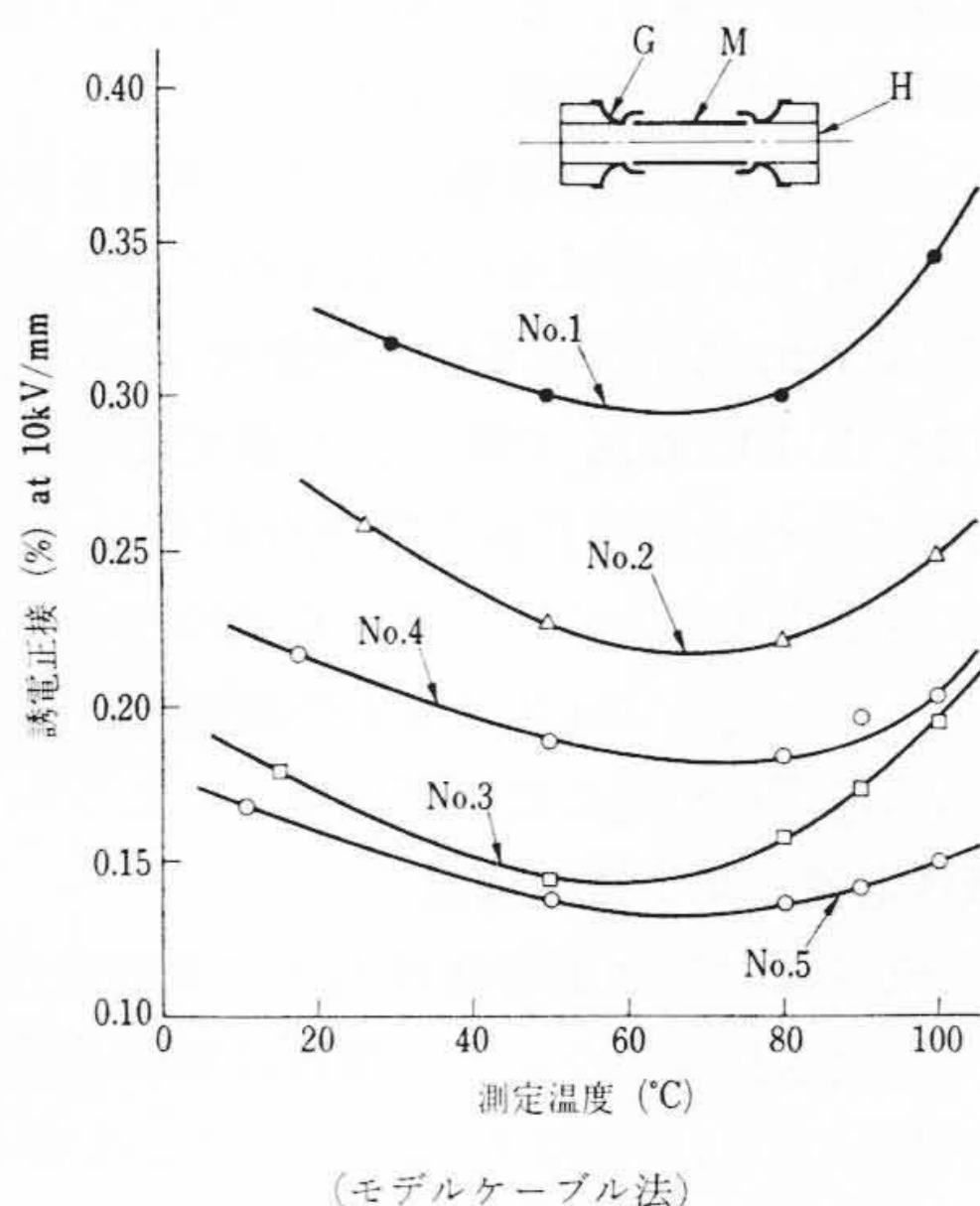


図2 油浸紙の誘電正接-温度特性

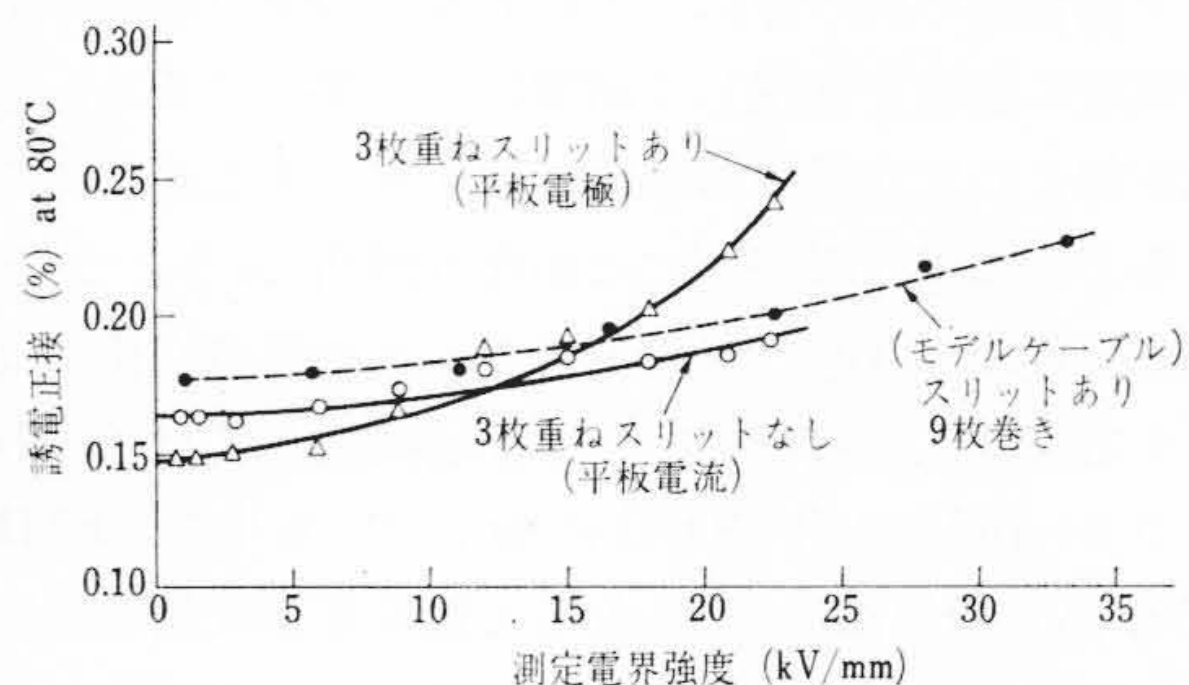


図3 油浸紙の誘電正接-電圧特性

題があるので、筆者らは絶縁厚さ1mm、測定電界40kV/mmまでじゅうぶん測定可能なモデルケーブルにより材料の検討を行なうことにした。このモデルケーブル法によれば測定電極端の電界変歪をほとんどなくすることができる。

図2はモデルケーブル法で測定した各油浸紙の誘電特性である。図には10kV/mmにおける値を示した。図よりわかるように低温ではモデルケーブル値が平板電極値よりかなり高くなっている。これは平板電極法で認められる重ね効果がモデルケーブル法では少ないためと、モデルケーブルのテープ巻き張力が高く、実効面圧荷重が高くなったためと考えられる。一方、高温における誘電正接は両測定法でかなり差が少なくなっている。これは平板電極法の場合、誘電正接の温度による上昇がモデルケーブル法より大きいためである。この原因は測定値を10kV/mmで表示しており、この電圧による誘電正接の増加(以下 $\Delta \tan \delta$ と略す)が、電界変歪がある場合、高温ほどその影響が大きくなるためである。なお、誘電率は両測定

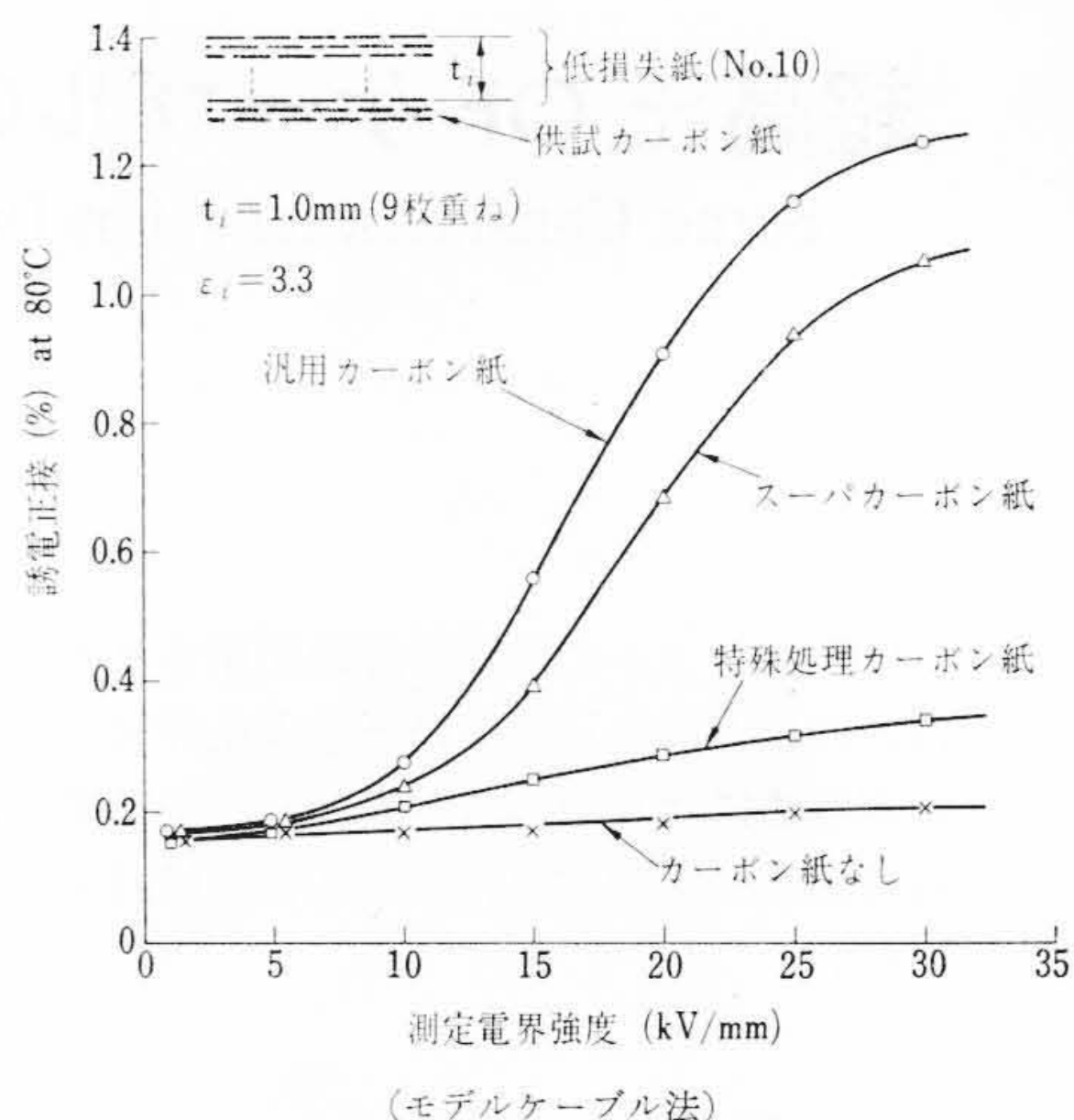
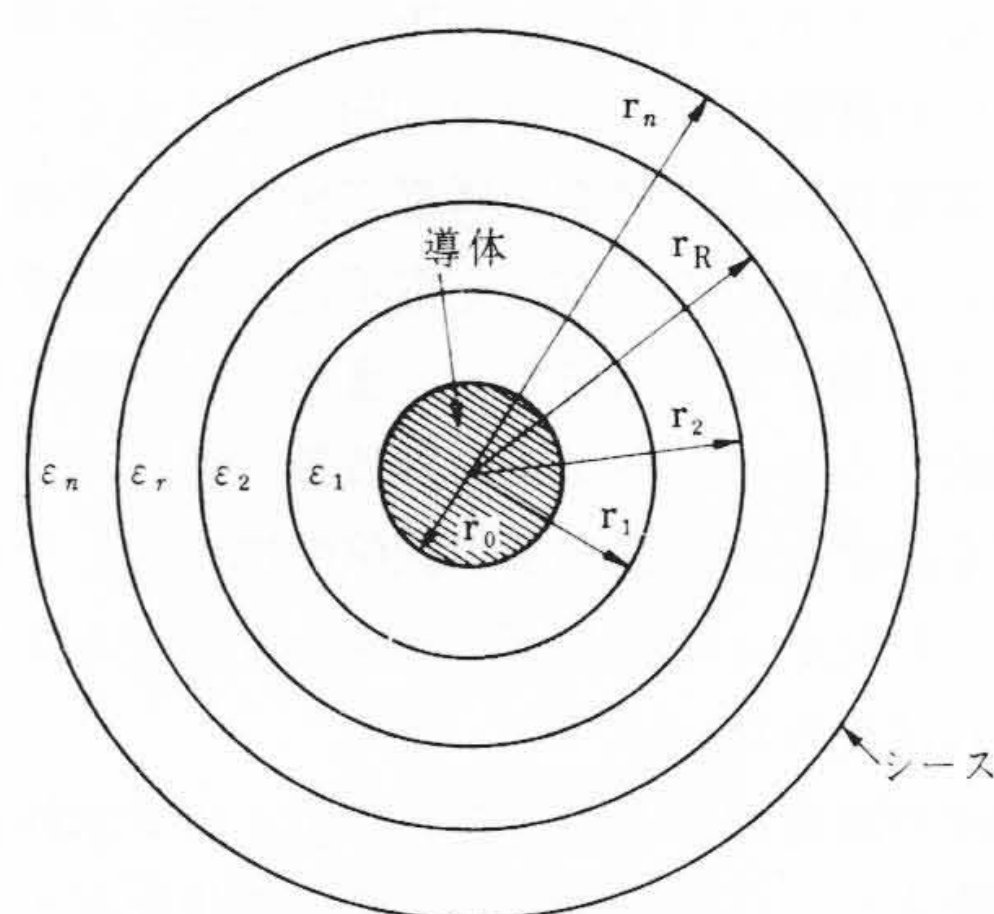


図4 各種カーボン紙複合油浸紙の誘電正接-電圧特性

図5 n 層複合絶縁ケーブル

法ではほぼ一致した値が得られた。

図3は油浸紙の誘電正接-電圧特性である。平板電極法の場合、供試紙にケーブル絶縁体のテープ間バットギャップを模擬したスリットを設けると $\Delta \tan \delta$ が大きくなっていく。しかし、同じようにスリットのあるモデルケーブルは電極端における電界変歪がほとんどないため $\Delta \tan \delta$ は非常に小さい。

2.3 シャヘイ用カーボン紙の誘電正接-電圧特性に与える影響

OFケーブルは一般に導体上およびシース側に絶縁体に接してカーボン紙を使用している。このカーボン紙を用いると、

- (1) 交流破壊電圧の上昇
- (2) より線効果の低減
- (3) 油中不純物の吸着

などの効果をもつ反面、 $\Delta \tan \delta$ を大きくするという問題がある。

図4は各種カーボン紙シャヘイを行なった油浸紙の誘電正接-電圧特性である。表面の平滑なスーパーカーボン紙は $\Delta \tan \delta$ が若干小さく、さらに特殊処理カーボン紙を用いると上記カーボン紙の特徴をそこなうことなく $\Delta \tan \delta$ を低減させることができる。本カーボン紙はケーブルの使用電界が高い超高圧OFケーブルでとくに有効なものである。

3. 電力ケーブルの誘電特性算出法

3.1 複合絶縁ケーブルの等価誘電特性

一般に超高圧OFケーブルは絶縁破壊電圧、誘電特性、機械的強度などを考慮して数種の絶縁紙による複合絶縁構成とすることがある。いま図5に示すような n 層の複合絶縁体について考える。これは各絶縁体の直列接続回路とみなすことができるので、その等価誘電特性は(1)および(2)式で示される⁽⁴⁾。

$$\tan \delta_{1n} = \frac{\sum_{R=1}^n \frac{\log \frac{r_R}{r_{R-1}}}{\epsilon_R} \cdot \tan \delta_R}{\sum_{R=1}^n \frac{\log \frac{r_R}{r_{R-1}}}{\epsilon_R}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_{1n} = \frac{\log \frac{r_n}{r_0}}{\sum_{R=1}^n \frac{\log \frac{r_R}{r_{R-1}}}{\epsilon_R}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$\tan \delta_{1n}$: n 層複合絶縁ケーブルの等価誘電正接 (%)

ϵ_{1n} : n 層複合絶縁ケーブルの等価誘電率

r_R : 導体側より R 番目誘電体の内半径 (mm)

$\tan \delta_R$: 導体側より R 番目誘電体の誘電正接 (%)

ϵ_R : 導体側より R 番目誘電体の誘電率

r_0 : 絶縁体最内層部半径 (mm)

r_n : 絶縁体最外層部半径 (mm)

である。上式より絶縁体自身の誘電特性が算出できる。なお、ケーブルの誘電正接-電圧特性を算出するにはある電圧印加時の各絶縁層に加わる電界強度を求め、その電界強度における材料の誘電正接値を(1)式に代入すればよい。 n 層複合絶縁体内の各層平均電界強度は(3)式で示される。

$$G_{R\text{mean}} = \frac{\frac{\log \frac{r_R}{r_{R-1}}}{\epsilon_R} \cdot V}{\sum_{R=1}^n \frac{\log \frac{r_R}{r_{R-1}}}{\epsilon_R} \cdot (r_R - r_{R-1})} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$G_{R\text{mean}}$: 導体側から R 番目誘電体の印加電圧 V における平均電界強度 (kV/mm)

V : ケーブル印加電圧 (kV)

次に、カーボン紙しゃへいを行なった OF ケーブルではそれによる $\Delta \tan \delta$ の増加がある。ここで、カーボン紙による $\Delta \tan \delta$ はカーボン紙とそれに接する絶縁紙の境界においてのみ発生し、その油げき部電界の関数で示される⁽⁵⁾とすると(4)式が成立する。

$$\Delta \tan \delta_{H,L} = \frac{t_i}{r_0 \log \frac{r_n}{r_0}} \cdot \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{1n}} \times \left\{ (\tan \delta_{C,H} - \tan \delta_{C,L}) + \frac{r_0}{r_n} (\tan \delta_{S,H} - \tan \delta_{S,L}) \right\} \dots\dots (4)$$

ここで、

$\Delta \tan \delta_{H,L}$: 印加電圧 H, L 間のカーボン紙によるケーブル $\Delta \tan \delta$ の増加分 (%)

t_i : カーボン紙複合油浸紙の油浸紙部厚さ (mm)

ϵ_i : カーボン紙複合油浸紙の油浸紙部誘電率

$\tan \delta_{C,H}$: 印加電圧 H (kV) における導体上電界強度の ϵ_{1n}/ϵ_i 倍の電界で測定した上記複合油浸紙の誘電正接 (%)

$\tan \delta_{C,L}$: 印加電圧 L (kV) における導体上電界強度の ϵ_{1n}/ϵ_i 倍の電界で測定した上記複合油浸紙の誘電正接 (%)

$\tan \delta_{S,H}$: 印加電圧 H におけるシース上電界の ϵ_{1n}/ϵ_i 倍の電界強度で測定した上記複合油浸紙の誘電正接 (%)

$\tan \delta_{S,L}$: 印加電圧 L におけるシース上電界の ϵ_{1n}/ϵ_i 倍の電界強度で測定した上記複合油浸紙の誘電正接 (%)

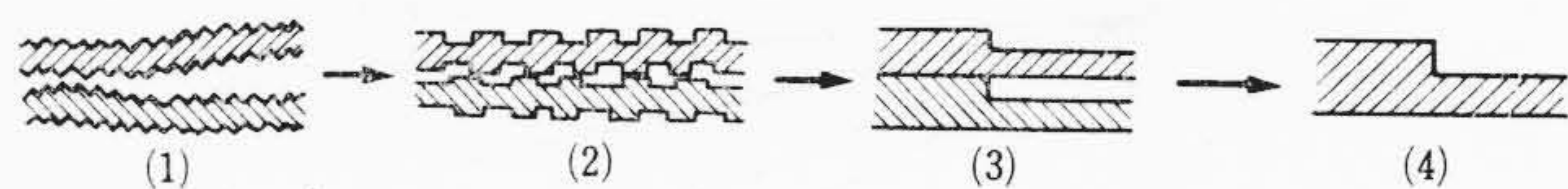


図6 油浸紙のモデル化形状

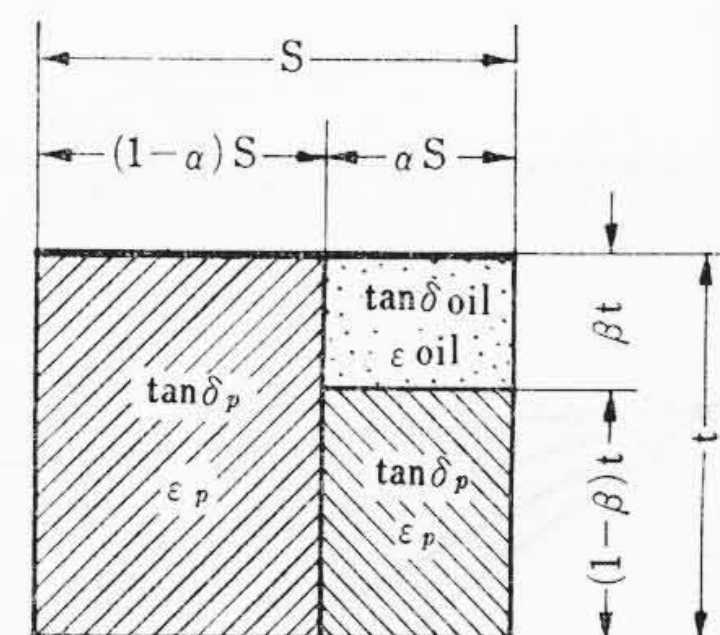


図7 油浸紙の等価形状

(4) 式において右辺第1項は導体しゃへい用カーボン紙による $\Delta \tan \delta$ であり、第2項はシース側カーボン紙によるものである。実用的には $\epsilon_{1n} = \epsilon_i$ とみなして計算しても誤差はわずかである。なお、カーボン紙による影響は誘電正接のみであり、誘電率の変化は無視できる。

3.2 テープ巻き張力の誘電特性への影響

複合絶縁 OF ケーブルの誘電特性は上述した方法により推定できる。しかし、2.2 で述べたように材料の誘電特性は測定条件によりかなり異なる。このため材料測定条件はできる限り実ケーブル特性を推定できる方法が望ましい。この点モデルケーブル法は平板電極法よりすぐれた測定法といえよう。しかし、実ケーブルにおいてもテープ巻き張力あるいはテープの含有水分量などによって油浸状態における絶縁体のかたさが異なり、そのため誘電特性が変化してくると思われる。すなわち、巻き張力を低くすると絶縁体と直列に構成される各絶縁紙テープ間の油げきが大きくなってくる。この油げきは誘電率 2.2、誘電正接 0.01% 以下と考えられるので、ケーブル誘電特性への寄与が大きい。

図6はこの油げきを含む油浸紙をモデル化したものである。絶縁紙表面には微小な凹凸による油げきとテープ巻き張力が低いことによる油げきが存在する。なお、実際の油浸紙はそれ自身絶縁紙と絶縁油とから成る複雑な複合誘電体であるが、ここでは均一な単一誘電体とみなした。図7は油げきを含む油浸紙の等価形状を示したものである。油げきを含む油浸紙は油浸紙のみの部分と、油浸紙と油げきとが直列に構成される部分とから成るとみなせる。この誘電体の等価誘電特性は⁽⁶⁾、

$$\tan \delta = \frac{(1-\alpha) \tan \delta_p + \left\{ \frac{\alpha \epsilon_{oil}}{(1-\beta) \epsilon_{oil} + \beta \epsilon_p} \right\}^2 \times \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\epsilon_p}{\epsilon_{oil}} \tan \delta_{oil} + \frac{(1-\beta)}{\alpha} \tan \delta_p \right\}}{(1-\alpha) + \frac{\alpha \epsilon_{oil}}{(1-\beta) \epsilon_{oil} + \beta \epsilon_p}} \dots\dots (5)$$

となる。ここで $\tan \delta_{oil} = 0$ とすると、

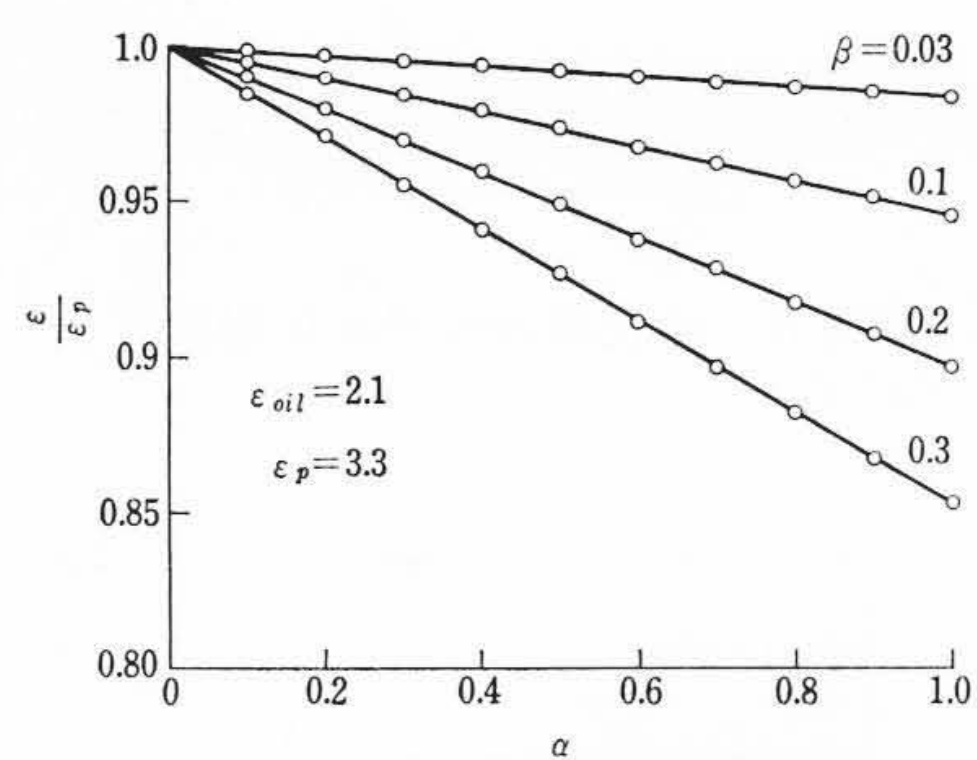
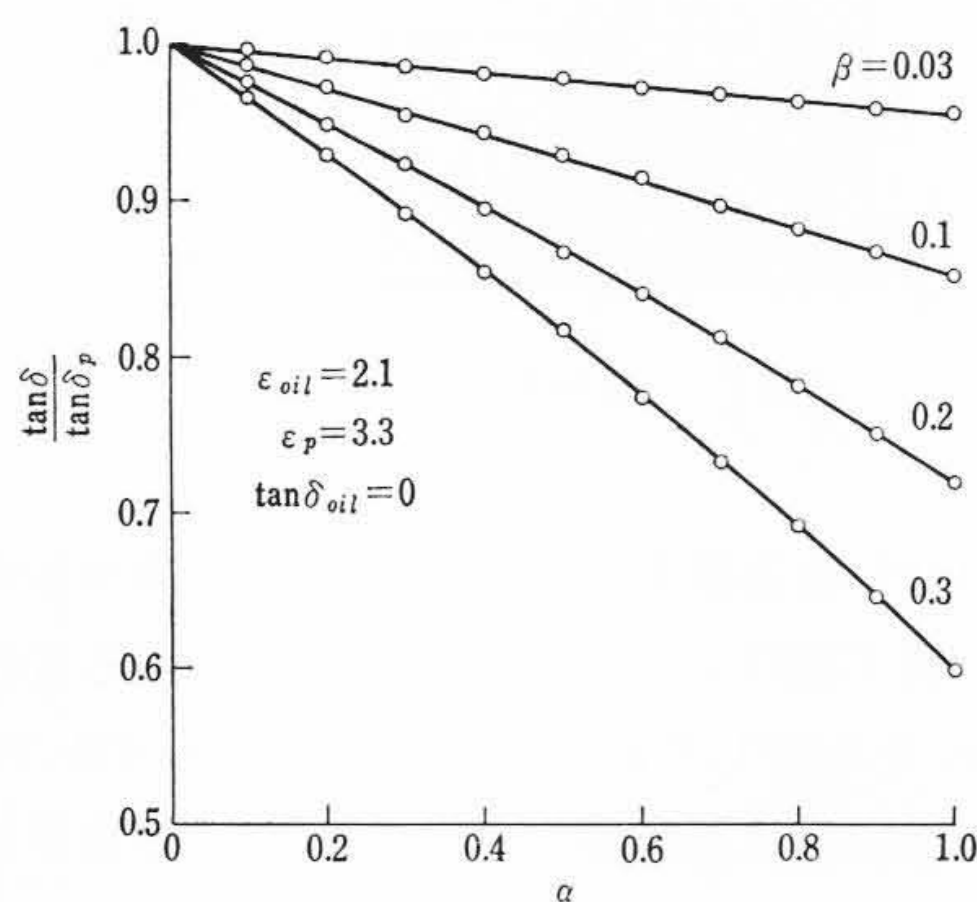
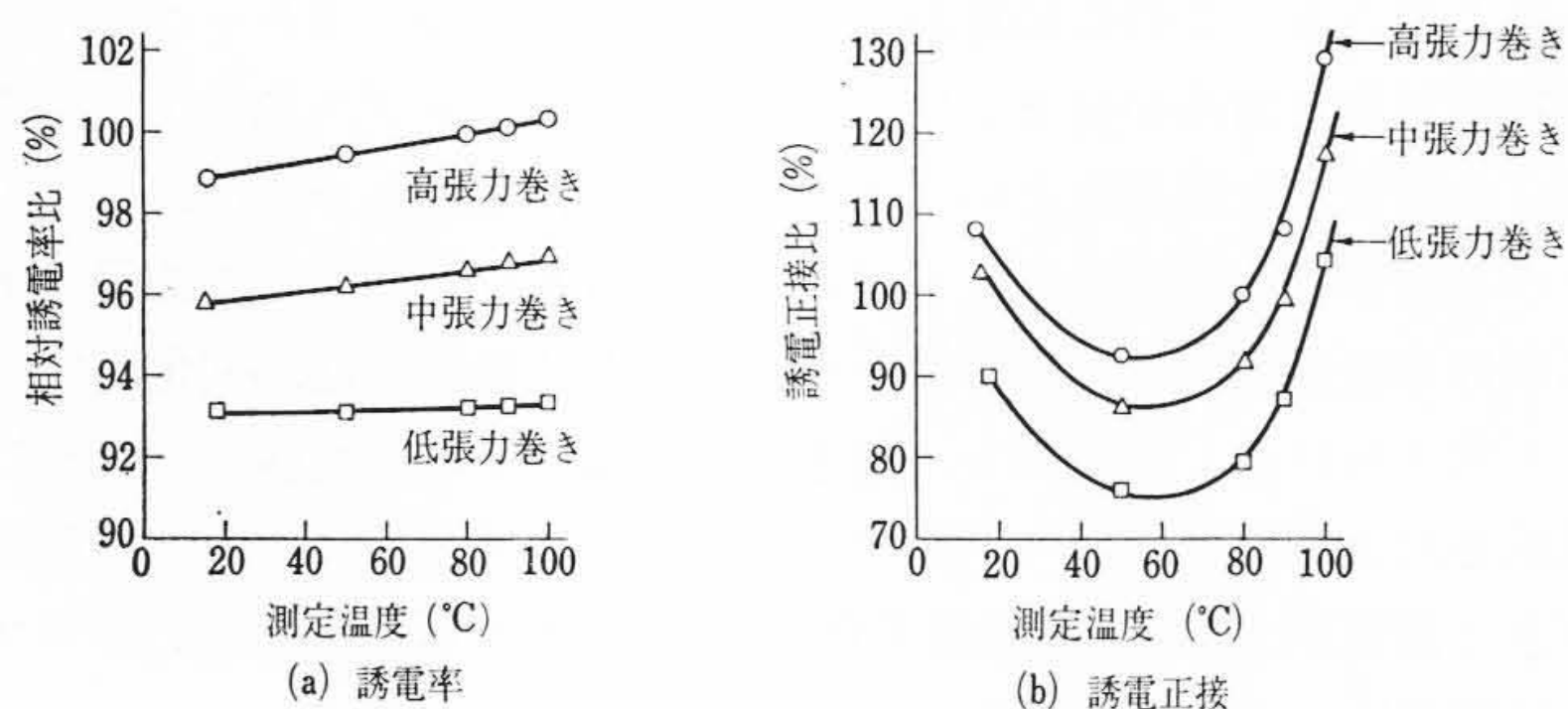
$$\tan \delta = \frac{(1-\alpha) \tan \delta_p + \left\{ \frac{\alpha \epsilon_{oil}}{(1-\beta) \epsilon_{oil} + \beta \epsilon_p} \right\}^2 \left\{ \frac{(1-\beta)}{\alpha} \tan \delta_p \right\}}{(1-\alpha) + \frac{\alpha \epsilon_{oil}}{(1-\beta) \epsilon_{oil} + \beta \epsilon_p}} \dots\dots\dots (5)'$$

$$\epsilon = \epsilon_p \left\{ (1-\alpha) + \frac{\alpha \epsilon_{oil}}{(1-\beta) \epsilon_{oil} + \beta \epsilon_p} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

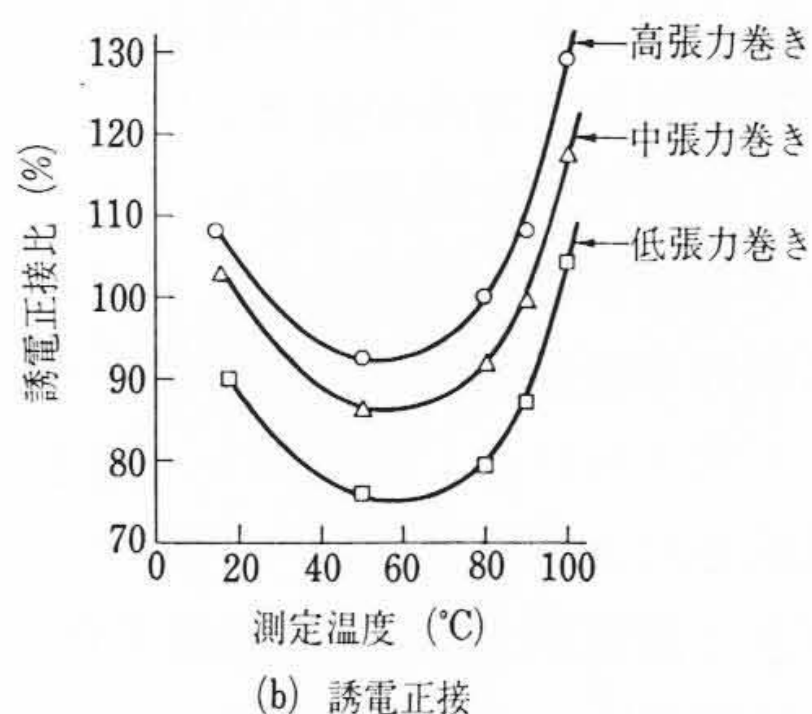
となる。ただし、

$\tan \delta$: 油げきを含む油浸紙の等価誘電正接 (%)

α : 直列油げき部面積の全油浸紙面積に対する比

(a) α と誘電率との関係(b) α と誘電正接との関係図8 α , β と誘電特性との関係

(a) 誘電率



(b) 誘電正接

(モデルケーブル法)

図9 テープ巻き張力と誘電特性との関係

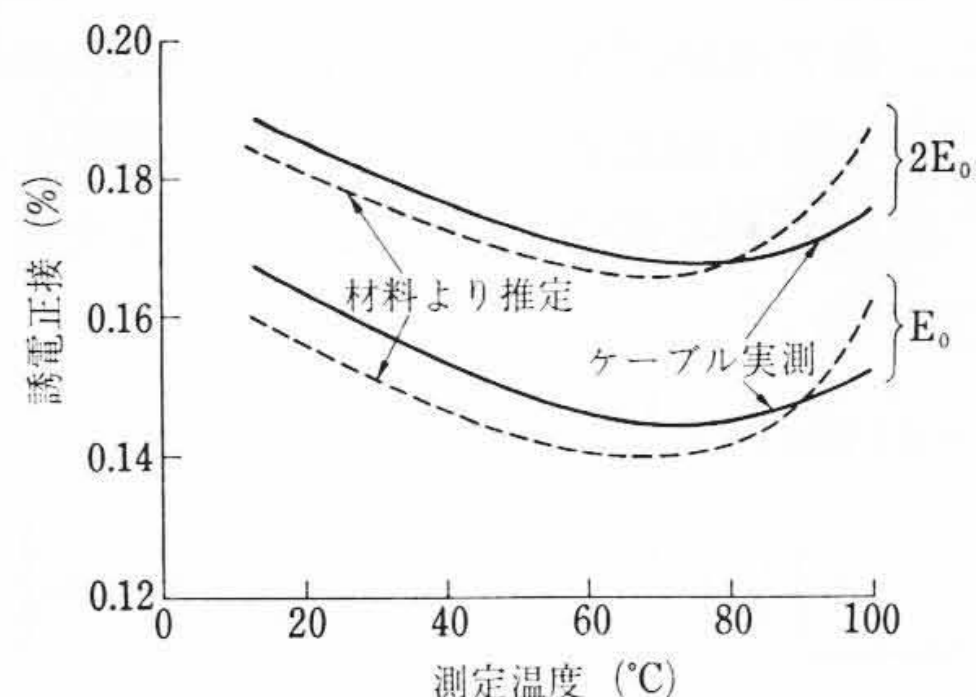


図10 試作 OF ケーブルの誘電正接特性

- β : 直列油げき部厚さの全油浸紙厚さに対する比
 $\tan \delta_p$: 油げきのない油浸紙のみの誘電正接 (%)
 ϵ_p : 油げきのない油浸紙のみの誘電率
 $\tan \delta_{oil}$: 含浸油の誘電正接 (%)
 ϵ_{oil} : 含浸油の誘電率

を示す。図8は(5)', (6)式を用いて α , β と誘電特性との関係を求めたものである。誘電率、誘電正接ともに α の増加によりほぼ直線的に減少しているが、誘電正接のほうが低下割合が大きい。

表2 OF ケーブルの誘電正接—電圧特性に及ぼす
カーボン紙の影響算出値

(500 kV 級ケーブル, 80°C)

供試 カーボン紙	$\Delta \tan \delta$					
	誘電正接増加量 (%)					
	しゃへい体 電圧		導体しゃへいによるもの		絶縁体しゃへいによるもの	
	E_0	$2E_0$	E_0	$2E_0$	合計 E_0	合計 $2E_0$
汎用カーボン紙	0.020	0.054	0.001	0.007	0.021	0.061
スーパーカーボン紙	0.012	0.045	0.001	0.004	0.013	0.049
特殊処理カーボン紙	0.004	0.007	0.0	0.002	0.004	0.009

 E_0 は対地電圧相当

図9は前述したモデルケーブル型試料においてテープ巻き張力と誘電特性との関係を求めたものである。明らかに巻き張力低下により誘電特性は改善されている。さらに、誘電正接の改善率は低温より高温のほうが大きい。すなわち、低張力試料は高温における誘電正接の立上りが少ない。これは温度上昇による絶縁紙自身の誘電率増加に対し、絶縁油の誘電率は減少し、このためますます誘電特性のすぐれた絶縁油に電界が集中するようになるためである。いま、高張力試料を基準にすると低張力試料の β は 0.11 となり、さらに(6)式との関係から α を求めると $\alpha = 0.69$ となる。実際のケーブルについて α , β を調べると、66~154 kV 級ケーブルでは α , β ともかなり小さく、低損失紙を用いた超高圧ケーブルではこの α , β が大きくなる傾向が認められる。

3.3 実ケーブルの誘電特性の推定

複合絶縁 OF ケーブルの誘電特性を推定するには、まず、各絶縁層の誘電特性を求めなければならない。そのためモデルケーブルによる材料測定時の絶縁紙の実効厚さ(絶縁厚さ/絶縁紙巻き枚数)と実ケーブル絶縁層のそれとを比較して β を求める。一方、図8のような材料特性から α と β との関係を把握(はあく)しておき、ある β に相当する α を得る。これよりその絶縁層の誘電特性が(5), (6)式により求まる。このような方法を用いて各絶縁層の誘電特性を求めておき、さらに(1), (2)式により複合絶縁ケーブルの等価誘電特性を算出する。

実際のケーブルではこのほかにしゃへい用カーボン紙による $\Delta \tan \delta$ の増加がある。表2は500 kV 級 OF ケーブル(サイズ 1,200 mm²)の誘電正接におよぼすカーボン紙の影響を図4の結果をもとに、(4)式により計算したものである。これよりしゃへい用カーボン紙の誘電正接におよぼす影響が非常に大きいことがわかる。また、500 kV 級 OF ケーブルでは $2E_0$ において絶縁体しゃへい(シース側)用カーボン紙の影響も無視できないことがわかる。

図10は試作ケーブル(500 kV 級 OF ケーブル相当)の誘電正接と材料特性から推定した値との相関性を示したものである。約10%内の精度で実測値と推定値とが一致している。とくに $\Delta \tan \delta$ については非常によく一致している。ここで $2E_0$ (E_0 = 対地電圧), E_0 間のケーブルの $\Delta \tan \delta$ は 0.025% なのに対し、カーボン紙による $\Delta \tan \delta$ は表2より 0.005% であり、残りは油浸紙そのものの $\Delta \tan \delta$ である。なお実測値と推定値の差の原因としては次のようなことが考えられる。

- (1) 絶縁体の実効厚さの問題
- (2) 絶縁体バットギャップ部に含まれる含浸油の誘電特性
- (3) ケーブル誘電特性実測上の問題(ケーブル温度の絶縁厚さ方向あるいは長さ方向の分布, 測定法)
- (4) 絶縁紙のロットによるばらつき

などが考えられるが、これらの誤差要因から精度としてはこの程度が限度であろう。

4. 結 言

以上、複合構成超高圧 OF ケーブルの誘電特性に関する検討結果を述べたが、結論は次のとおりである。

- (1) 従来から一般に油浸紙の誘電特性測定に用いられている平板電極は超高圧 OF ケーブルの誘電特性を推定する点から若干問題がある。これに対し筆者らの検討したモデルケーブル法からはかなり良い結果が得られた。
- (2) 複合構成 OF ケーブルの誘電特性を材料の誘電特性から推定する方法を導き、比較のために試作したケーブルの実測値との関連性を検討した。その結果、かなり良い一致がみられた。

- (3) OF ケーブルの誘電特性は製造時のテープ巻き条件によっても左右され、誘電率よりも誘電正接に対するほうがその影響は大きい。

終わりに種々ご意見を賜った日立電線株式会社電力ケーブル部比企野部長および研究所のかたがたに感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 坂本, 吉田: 電気学会誌 75, 504 (May, 1955)
- (2) 遠藤, 岡, 佐藤: 日立評論 50, 45 (昭 43-8)
- (3) 依田: 日立評論 41, 991 (昭 34-8)
- (4) 遠藤: 電気学会東京支部大会 No. 301 (昭 44-10)
- (5) 青木, 中川, 田中: 大日本電線時報 第 28 号 10 (昭 39-12)
- (6) 遠藤: 電気学会東京支部大会 No. 103 (昭 45-10)



特 許 の 紹 介



特 許 第 480048 号 (特 公 昭 41-4241 号)

宮 本 明 雄・三 浦 武 雄

ダ イ オード 関 数 発 生 器

従来のダイオード関数発生器は各折線要素ごとに温度補償回路を付加して調整する必要があり、構成が複雑である。

この発明はこの温度補償回路を簡単にするために、図 1 に示すように、ダイオード $D_8 \sim D_{12}$ の向きを等しくするとともにバイアス抵抗素子 $R_{b8} \sim R_{b12}$ と入力抵抗素子 $R_{i8} \sim R_{i12}$ の抵抗値の割合をほぼ一定値になるようにし、各固定電圧源 $E_8 \sim E_{12}$ および温度に対応して変化する共通バイアス電圧源 $E_{b0}(T)$ を設けて、この共通バイアス電圧源の電圧によりダイオード特性の温度変化を補償するように構成している。

この発明によれば温度補償回路が簡単となるので、部品点数が減少し、価格、信頼性の点でたいへん有利となる。(永田)

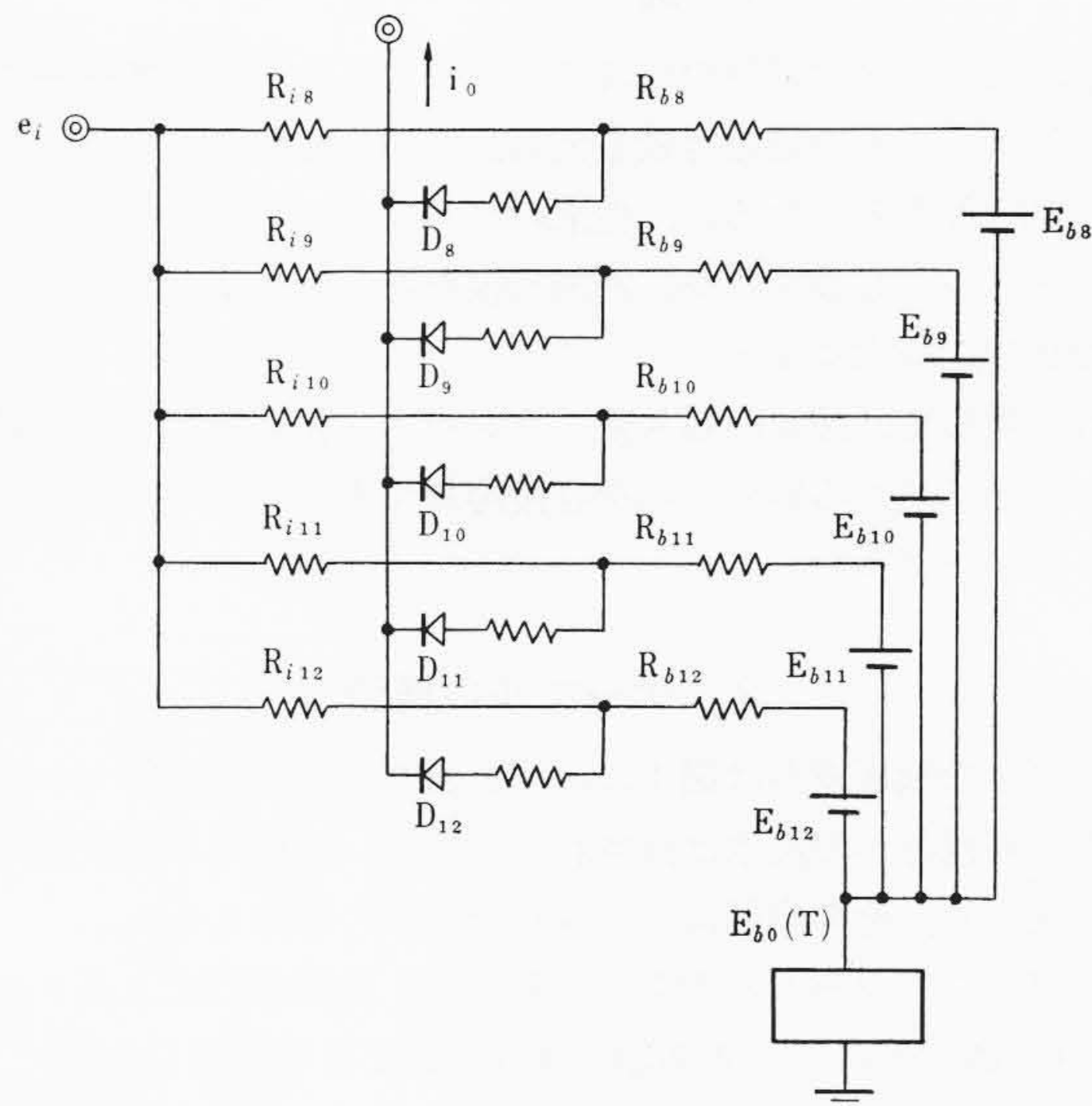


図 1

Vol. 32

日 立 造 船 技 報

No. 2

目 次

■ 論 文

- ・ 舶 用 二 元 燃 料 機 関 の 開 発
- ・ 調質 80 kg/mm² 級高張力鋼溶接継手のボンドぜい化を克服した新しいエレクトロスラグ溶接法 (HINES 溶接法)

- ・ 鉍石専用船および鉍石/油兼用船の横強度の検討
- ・ 秋田県鉍さいのパイプ流送 — 水力輸送に関する検討 —
- ・ S C P 廃 液 の 熱 分 解
- ・ 噴 霧 液 滴 の 噴 出 速 度 の 測 定 法

………本誌に関する照会は下記に願います………

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60 郵便番号 554