

# 日立コンデンサブッシング

## Hitachi Condenser Type Bushings

池本徳郎\* 磯貝時男\*\* 柏木光義\*\*\*  
 Norio Ikemoto Tokio Isogai Mitsuyoshi Kashiwagi

### 要 旨

日立製作所で研究開発した油浸紙式、塗工紙式、加圧モールド式の三方式のコンデンサブッシングの一般的特性と課電寿命特性、電界強度の緩和法、取付部とコンデンサコーンとの相対関係の電界解析による基礎的特性検討などを紹介した。

### 1. 緒 言

コンデンサブッシングは最近の機器容量の増大、運転電圧の上昇などに対して合理的絶縁による機器の小形化、軽量化を図るために開発されたもので、その用途は増加の一途をたどっている。この種コンデンサブッシングには油浸式と乾式の二方式があり、これらに共通する特長は次のようなものである。

- (1) 胴径が細く従来のバリヤー絶縁油入ブッシングの約50%となる。
- (2) 取付フランジの下面よりの油中部の長さが短く従来品の約50%となる。
- (3) がい管の平均直径が細くなり汚損特性が向上し、耐塩害設計が容易である。
- (4) 全体的に小形、軽量となり、取り扱いと保守が簡単である。

日立製作所では昭和34年より研究に着手し、油浸紙式、塗工紙式、合成樹脂注入による加熱加圧モールド式の三方式の開発に成功した。以下これらの特性について紹介する。

### 2. コンデンサコアの設計と製作

コンデンサコアの設計方法は中心導体(高電位側)と取付フランジ(接地側)間に使用する絶縁材の内部に電界調整電極をそう入して絶縁材内部の電界を均一化し絶縁材の利用率高め、コアの外径を小さくすることを目的とする。すなわち、従来の油入ブッシングでは絶縁体内部の半径方向の電位分布は中心導体付近に集中し、がい管表面の軸方向の電位分布は支持金具付近に集中するため、均等電位分布の場合と比較して絶縁体の体積およびがい管の有効フラッシュオーバー長を増加しなければならない。これに対してコンデンサブッシングはコンデンサコア内にそう入された電界調整電極間の静電容量分圧により絶縁体内部の半径方向の電界強度を調節し、がい管表面の軸方向電位分布を均等化し、絶縁体の厚さおよびがい管表面の有効フラッシュオーバー長を著しく短縮することができる。

一般に同心円筒電極間の静電容量は(1)式で表わされる。

$$C = \frac{\epsilon \cdot l}{2 \log \frac{d_2}{d_1}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\epsilon$ : 誘電率  
 $l$ : 電極の長さ  
 $d_1$ : 内径  
 $d_2$ : 外径

コンデンサブッシング内の各二層間の電極の長さの平均を内側より外側へ、それぞれ  $l_1, l_2, \dots, l_n$ , 電極そう入個所の直径を  $d_0$ ,

$d_1, d_2, \dots, d_n$  とすると,

$$C = \frac{\epsilon \cdot l_1}{2 \log \frac{d_1}{d_0}} = \frac{\epsilon \cdot l_2}{2 \log \frac{d_2}{d_1}} = \dots = \frac{\epsilon \cdot l_n}{2 \log \frac{d_n}{d_{n-1}}} \dots \dots (2)$$

すなわち,

$$\frac{l_1}{\log \frac{d_1}{d_0}} = \frac{l_2}{\log \frac{d_2}{d_1}} = \dots = \frac{l_n}{\log \frac{d_n}{d_{n-1}}} \dots \dots \dots (3)$$

となるように選ぶと各電極間の静電容量は等しいので、電極間の電圧も等しく分圧される。上記がコンデンサブッシング設計の原理であるが、実際に設計する場合には次の三種類の方法が考えられる。

- (a)  $l_1, l_2, \dots, l_n$  を等しいステップで等差級数的に変化させ、(3)式を満足するように  $d_1, d_2, \dots, d_n$  を変える。
- (b) 絶縁物の厚さ、すなわち、 $d_1 - d_0, d_2 - d_1, \dots, d_n - d_{n-1}$  を等しくし、(3)式を満足するように  $l_1, \dots, l_n$  を変える。
- (c)  $l_1, l_2, \dots, l_n, d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$  を等差級数的に変化させて多少静電容量の変化を許す方法で、この場合は各電極間の電圧分担は多少異なり、(3)式は満足しない。

以上の三種類のうち利用率および工作上から(a)の  $l_1, l_2, \dots, l_n$  を等差級数的に変化させる方法を採用した。この場合、(3)式は(4)式のようになる。

$$\frac{l_1}{\log \frac{d_1}{d_0}} = \frac{l_2}{\log \frac{d_2}{d_1}} = \dots = \frac{l_n}{\log \frac{d_n}{d_{n-1}}} = \frac{n(l_1 + l_n)}{2 \log \frac{d_n}{d_0}} = \frac{nl_{\text{mean}}}{\log \frac{d_n}{d_0}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに,

$$l_{\text{mean}} = \frac{l_1 + l_n}{2}$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} \log \frac{d_1}{d_0} &= \frac{l_1}{nl_{\text{mean}}} \log \frac{d_n}{d_0} \\ \log \frac{d_2}{d_1} &= \frac{l_2}{nl_{\text{mean}}} \log \frac{d_n}{d_0} \\ &\vdots \\ \log \frac{d_n}{d_{n-1}} &= \frac{l_n}{nl_{\text{mean}}} \log \frac{d_n}{d_0} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

(5)式によって  $l_1, l_n, d_0, d_n, n$  が決まれば  $d_1, d_2, \dots, d_{n-1}$  は順次、計算される。  $l_1, l_2, \dots, l_n$  を等差級数に選べば(5)式によって決まる絶縁物の厚さ、すなわち  $d_1 - d_0, d_2 - d_1, \dots, d_n - d_{n-1}$  は高電位側と接地側との中程で最大厚さとなり、逆に電位傾度は最小値となる。このようにして設計されたコンデンサコアは次のように製作される。

\* 日立製作所国分工場  
 \*\* 日立製作所日立研究所  
 \*\*\* 日立化成工業株式会社研究開発部



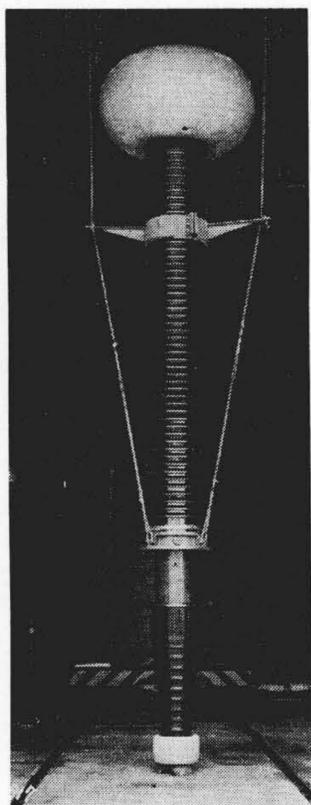


図2 525 kV, 1,200 A 変圧器用油浸紙式コンデンサブッシング

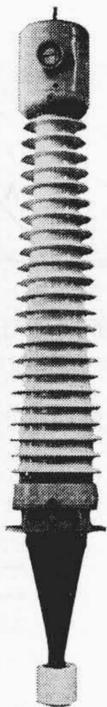


図3 287.5 kV, 600 A 変圧器用塗工紙式コンデンサブッシング

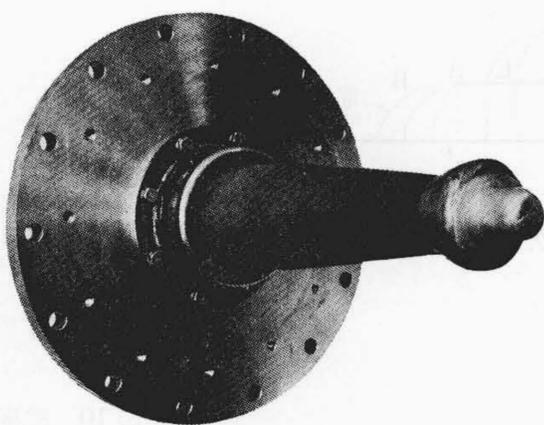


図4 80.5 kV, 800 A ガス絶縁変圧器用壁ぬき加圧モールド式コンデンサブッシング

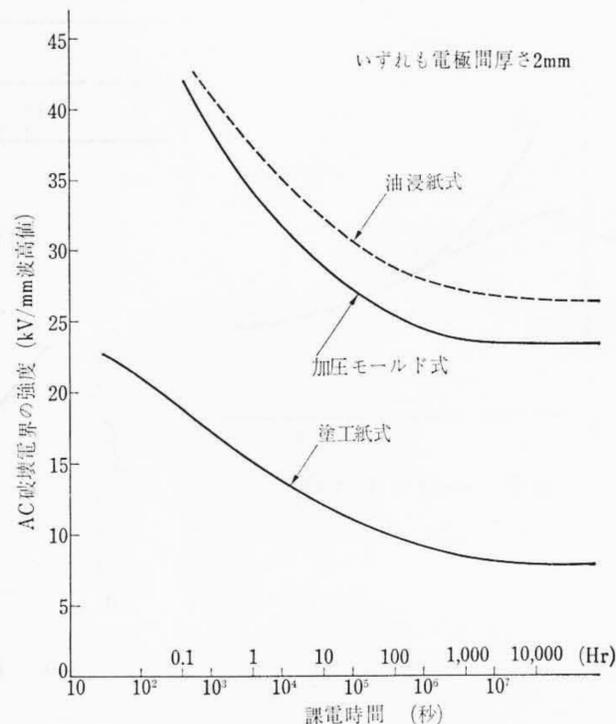


図5 課電寿命特性

表3 諸特性比較

項目	種類	油浸紙式 コンデンサブッシング	塗工紙式 コンデンサブッシング	モールド式 コンデンサブッシング
耐圧		良	良	良
内部コロナ開始電圧 (kV)		$> \frac{E}{\sqrt{3}} \times (1.5 \sim 2.0)$	$> \frac{E}{\sqrt{3}} \times (1.1 \sim 1.5)$	$> \frac{E}{\sqrt{3}} \times (1.5 \sim 2.0)$
tan δ 値(常温) (%)		<0.4	<0.8	<0.4
温度上昇限度		JEC どおり	JEC どおり	JEC どおり
耐汚損性		大	大	大
コンデンサコア胴径 (%)		60	100	60
コンデンサコアの膨張係数		小	中	大
フランジ下長 (%)		115	100	100
BCT		付	付	付
パイプ式, スタッド式		可	可	可
油量		大	小	小
重量		大	中	小

AC 試験電圧値を基準にとれば運転時の常規対地電圧では、2倍以上の裕度があり、寿命的にはじゅうぶんである。寿命は温度一定として Dakin 氏の式より  $V-t$  特性曲線を次のように考えることができる。

$$V = a \log_{10} t + b \dots\dots\dots (6)$$

これより塗工紙式の場合を試算すると長時間破壊電界強度の下限値に 7 kV<sub>peak</sub>/mm をとると約 60 年の寿命を有している。したがって  $V-t$  特性のみからはほかの二方式の寿命は非常に長いものとなるが、前章に述べたように使用条件, 重要度, 経済性を含めたその機能に適した方式のブッシングを使用することが重要なことである。

4.2 コンデンサブッシングの電極端の電界

コンデンサブッシングの電極は薄いので電極端には電界が集中する。この集中の度合を考察してみる。

コンデンサブッシングの電極は同心円筒をなしているが、これを平行な平面電極に近似し、また電極間の絶縁層の厚さに比べ電極のステップ長が非常に長いので平行な二平面電極の一方が無限長の場合を考える。

電極端を図6のように  $R$  と  $C$  の分布回路と考える。

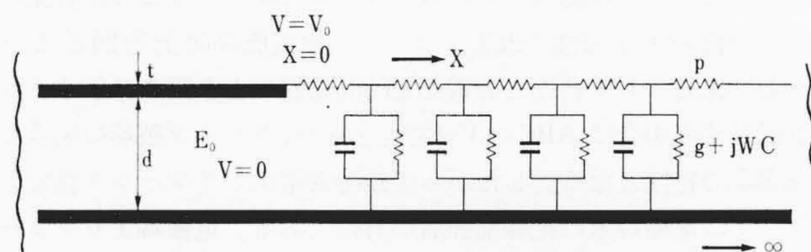


図6 CR 分布回路による近似法

単位長当たりの直列抵抗を  $r$ 、並列アドミッタンスを  $g + jwC$  とすると、電極端より  $X$  だけ離れた位置の電位  $V_x$  および  $X$  方向の電流  $I_x$  の関係は次のようになる。

$$-\frac{dV_x}{dx} = I_x \cdot r \dots\dots\dots (7)$$

$$-\frac{dI_x}{dx} = V_x (g + jwC) \dots\dots\dots (8)$$

これらの式を解くと電極端 ( $X=0$ ) の  $X$  方向の電界は次のようになる。

$$E_{x=0} = - \left[ \frac{dV_x}{dx} \right]_{x=0} = (\alpha + j\beta) V_0 = \sqrt{r(g + jwC)} \cdot V_0 \dots\dots\dots (9)$$

電極内の平等電界を  $E_0$  とすると、 $V_0 = E_0 d$  であり、また電極端付近では  $(g + jwC) \propto 1/d$ 、 $r \propto 1/t$  と考えられるので、結局電極端の電界  $E_{x=0}$  と電極内の平等電界  $E_0$  の間には次のような関係がある。

$$\frac{E_{x=0}}{E_0} \propto \sqrt{\frac{d}{t}} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式によればコンデンサコア内の電極層数を1層, 2層, …… ,  $n$ 層とする場合、電極端の電界集中の程度  $E_{max}/E_0$  の比が  $\sqrt{n} : \dots\dots \sqrt{2} : \sqrt{1}$  であることがわかる。課電寿命特性の最低破壊電界強度は電極端の電界集中の強さによると考えられる。いいかえれば、低電圧長時間破壊は電極端の電界集中の強さにより起こり、電極端の電界の強さがある電界強度以下では絶縁破壊の起こらないことを示している。また電極端末のコロナ開始電圧を求めるには各点の電界集中の程度を別々に求め、そのうちの最低のものが実際上のコロナ開始電圧となる。

以上より電極端の電界を緩和すれば低電圧長時間破壊の  $V-t$  特性がよくなり、コロナ開始電圧も高くなる。

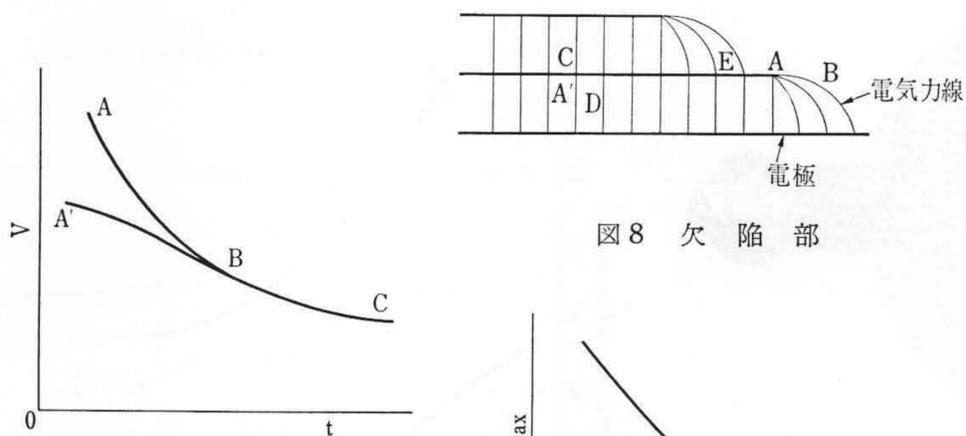


図7 一般の V-t 特性

図8 欠陥部

図9 Emax と log T の関係

4.3 電極端電界緩和について

コンデンサブッシングの種類により製法がことなるため電極端電界緩和法にも差異はあるが常に(10)式の関係を満たすよう電界集中の強さを決め V-t 特性の改善, コロナ開始電圧の向上を図ることが必要である。V-t 特性で高電圧短時間破壊のとき図7に示すように貫通破壊の場合は  $\overline{ABC}$  の V-t 特性となり, クリープ破壊の場合には  $\overline{A'BC}$  の特性となる。したがって短時間電圧のインパルス波などに対しては電極末端の絶縁補強層が有効である。電極端よりクリープ破壊する場合は電極層数にはほとんど影響しない。

一方, 低電圧長時間破壊では電極端の貫通破壊は電極端電界集中によって起こり, この電界集中は電極層数が多いほど弱いので電極間厚みが薄いほど破壊電圧が高くなる。また実験的には電極端の電界強度は電極間厚みが電極間ステップ長に比べ小さい場合にはステップ長に関係しないことが知られている。

ここで電極間内にある欠陥は低電圧では電極端で破壊しやすく, 高電圧では電極間内の欠陥で破壊しやすい原因を考えてみる。

欠陥部分には電界集中が起こるために局所的な温度上昇が起こると考えられる。この局所的な温度上昇は電極端の場合には図8において電極端Aより電極の外側Bまたは上側Eでは電界が弱まるためA点の電界集中によって発生した熱はBまたはE方向へ発散するため局所的な温度上昇は少ないが電極内の欠陥の場合はその個所A'の周囲Dおよび上側Cにも電界が加わっているため, A'の周囲温度はAのそれより高くA'点の電界集中により発生した熱は発散しにくく, したがってA'点の局所的な温度上昇は大きいと考えられる。

次に絶縁破壊の過程としてコロナによる侵食を考える。欠陥部の電界集中により徐々にコロナによる侵食路がのびていき, この長さが電極間絶縁厚さによって決まるある値に達したとき, 破壊が起こる。またそのコロナによる侵食路ののびる速度が簡単に電界集中の強さ  $E_{max}$  とある一定の電界強さ  $E_b$  との差の  $n$  乗に比例するとする。ここで  $E_b$  は材料に固有の値で最低破壊電界強度に相当する。いま侵食路ののびる速度 ( $V$ ) を比例定数  $K$  を使って

$$V = K(E_{max} - E_b)^n \dots\dots\dots (11)$$

と表わす。また(11)式で速度で侵食路がのびていき, 侵食路の長さ  $l$  になったとき, 急に破壊が起こると考えれば破壊までの時間を  $T$  とすると次の式となる。

$$V \cdot T = l \dots\dots\dots (12)$$

(11)式を代入すると

$$KT(E_{max} - E_b)^n = l \dots\dots\dots (13)$$

$$n \log(E_{max} - E_b) = (\log l - \log K) - \log T \dots\dots\dots (14)$$

(14)式をグラフに示すと図9のようになる。

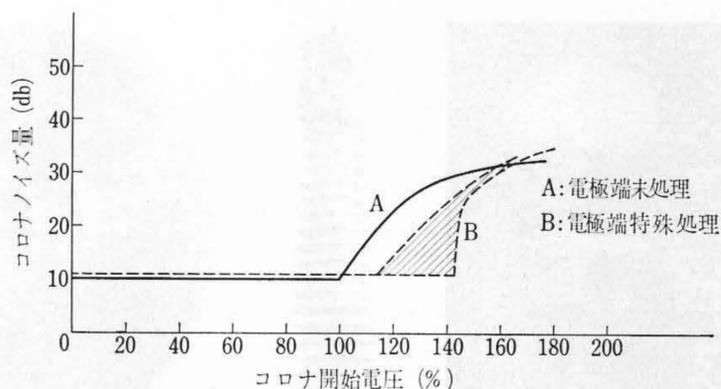


図10 電極末端処理によるコロナ特性の向上

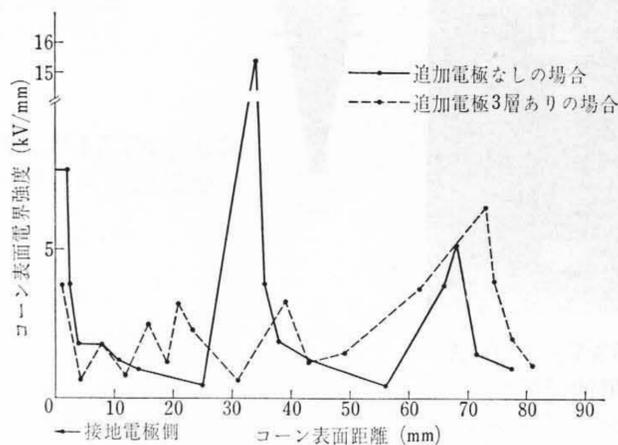


図11 追加電極有無の場合のコーン表面電界強度

(11) 式の  $K$  は材料の耐コロナ性および周囲温度による定数であり, 周囲温度が高いほど大きい値をとると考えられる。欠陥部の発熱量は電界強度の二乗に比例するので電界強度が低い場合は温度上昇もわずかであるが電界強度が高くなるにつれ温度上昇が急激にいちじるしくなる。

前述のように電極端では温度上昇は少ないが電極間内の欠陥では大きい。そこで電極端での破壊と電極間内の欠陥部での破壊では電界強度が高い範囲で(11)式の  $K$  が違ってくる。図で示すと図7で  $\overline{ABC}$  が周囲温度の比較的低い電極端部での破壊によるもので  $\overline{A'BC}$  が周囲温度の比較的高いところでは温度上昇により  $K$  が増しただけ, 電極間内破壊のほうが破壊までの時間が短くなってくる。

次に, 電極端電界緩和についての二, 三の実測例を紹介する。

(a) 電極末端を処理加工した場合

電極末端に特殊な処理加工を施すと V-t 特性の改善が期待されるほか, 図10に示すようにコロナ開始電圧が15%以上改善される。これは電極端部の欠陥がなくなるためである。

(b) 電極層数を増す場合

電極層数を増すと高電圧短時間破壊特性は改善されないが低電圧長時間破壊の特性とコロナ開始電圧の特性が改善される。実際に電極層数の増した場合の等電位線分布を電解槽法により求めた結果を紹介する。

コンデンサブッシングのコロナ発生は電極末端の電界集中の大きさによるが多くは接地側に近い電極端から発生する機会が多い。したがって電極端を所要の電界強度に押えるためには電極層数を増加するのが良く, いま,  $n$  層電極と  $n-1$  層電極との間に新しく電極を1層から4層入れた場合の例について説明する。電極1層を追加した場合,  $n$  層目電極の電極端の電界強度は最初に比べ平均電界強度で70%に減少し, 電極4層を追加すると平均電界強度で45%に減少する。これは電極端の電界強度が均等化されたことを示す。図11に追加電極有無の場合のコンデンサ下部コーンの表面電界強度の変化を示した。

4.4 コロナ開始電圧に及ぼす因子

前述のようにコンデンサブッシングには油浸紙式, 塗工紙式, 加

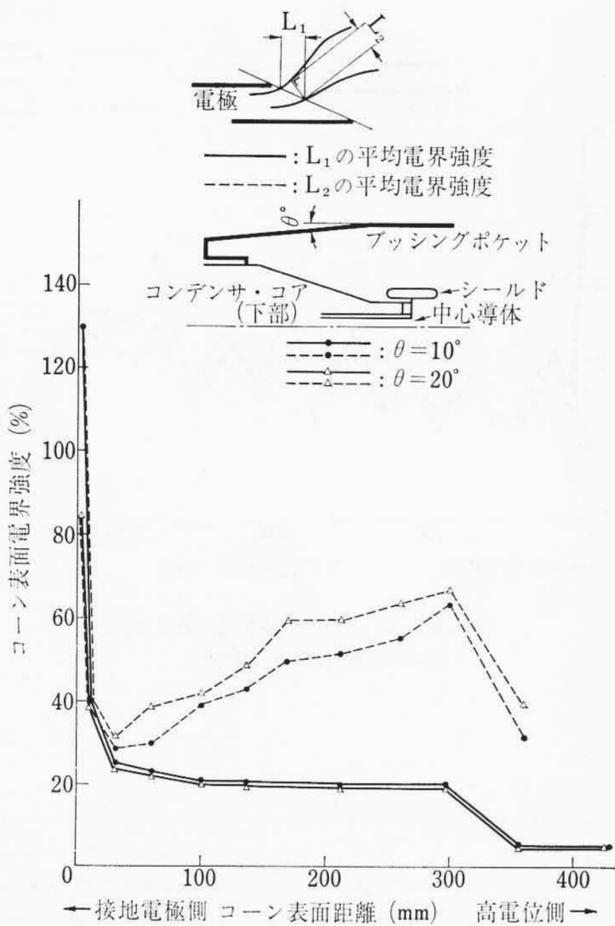


図12 下部コーン表面電界強度

圧モード式があり、コロナ開始電圧におよぼす因子も種々雑多であるが次のようなものが代表的なものと考えられる。

- (a) 電極末端処理の程度
- (b) 加熱真空乾燥の程度
- (c) 加圧モード品ではその加圧力、樹脂と基材との親和性。
- (d) 電極材の差
- (e) 絶縁層厚さと電極層数
- (f) コンデンサコア巻き付け時の温度分布、速度管理
- (g) 塗工紙式では樹脂の特性、接着性の良否

などで電極端の電界強度の緩和策とともにじゅうぶん、検討、管理されねばならない問題である。

### 5. コンデンサブッシングの取付部に関する基礎特性

コンデンサブッシング単体ではすぐれたコロナ特性を有するものも、その適用にあたってブッシング下部コーン部表面の電界強度を変えるような電位分布を作ると前述の諸特長を有効に利用することがむずかしくなることがある。ここでは電解槽法を用いて求めたいくつかの興味深い事実を紹介する。

#### 5.1 ブッシングポケットの形状

ブッシングの特長をじゅうぶん活かすためにはポケットの形状が重要な役割を果たす。コンデンサコーン表面電界強度のとり方に二つの見方があり、両者の間には図12に示すように、 $L_1$ 、 $L_2$ の平均電界強度に開きがある。これより $L_1$ による平均電界強度 $E_1$ 、 $L_2$ によるそれを $E_2$ とおくと $E_1$ は高電位部ほど小さくなるが逆に $E_2$ は漸増することがわかる。したがって平均沿面電位傾度が低い場合でも $E_2$ が高い電位傾度になればコロナが発生する。そしてクリープ絶縁破壊に至る。一方ブッシングポケットの傾き角度 $\theta$ の影響をみると $\theta$ が大きいほどコーン沿面電界強度は接地電位側で低く高電位側で高くなるため $\theta$ は小さいほうがよい。図13は $\theta=0^\circ$ の場合の等電位線分布の一例を、図14は $\theta=20^\circ$ の場合の等電位線分布の一例を示したものである。

#### 5.2 ブッシング取付座の直径、高さ

ブッシング取付座の直径、高さを変えることによって接地電極付

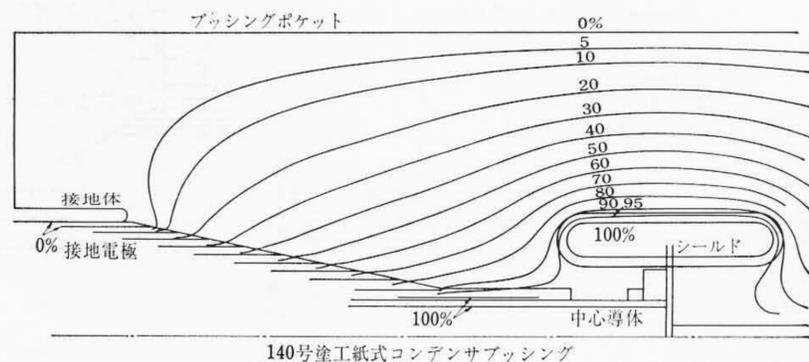


図13 ブッシングポケットを変化させた表面電位分布 ( $\theta=0^\circ$ )

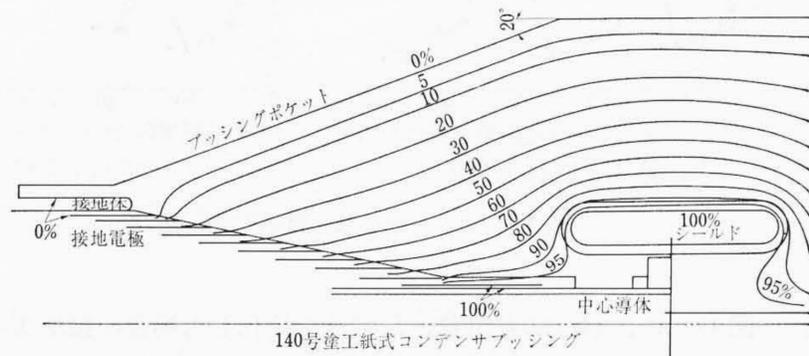


図14 ブッシングポケットを変化させた表面電位分布 ( $\theta=20^\circ$ )

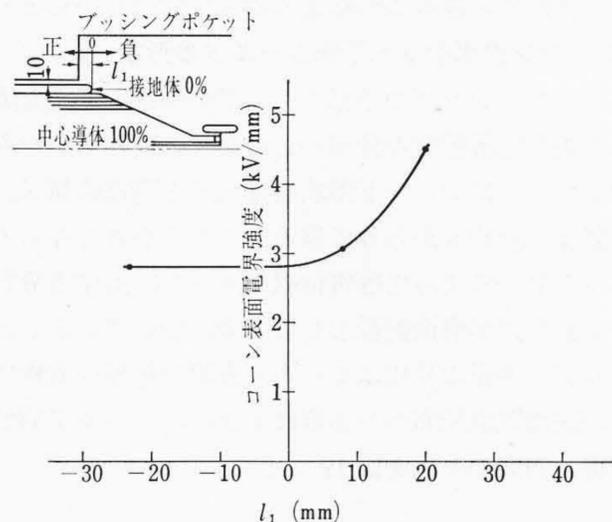


図15  $l_1$ 寸法の変化によるコーン表面電界強度

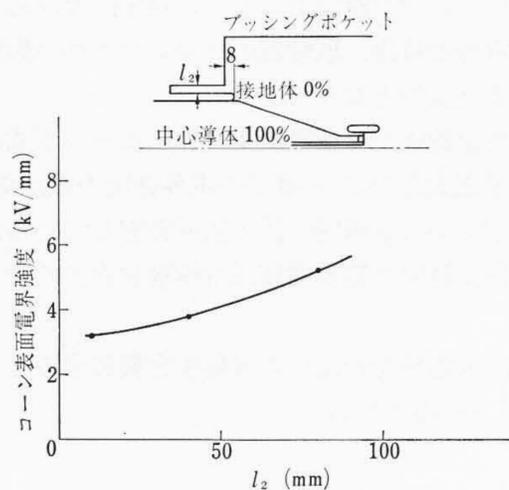


図16  $l_2$ 寸法の変化によるコーン表面電界強度

近の電極端の電界分布がどのようになるかをみる。

ブッシング取付座の高さを変えた場合に $l_1$ 寸法が正のときは図15に示すように接地側電極端部に電界が集中している。 $l_1$ 寸法が負のときは電界集中は緩和されている。しかしブッシングの接地部とブッシング座の直径の差が関係しており、図16に示すように $l_2$ 寸法が大きくなるに従って接地部電極端の電界集中が大きくな

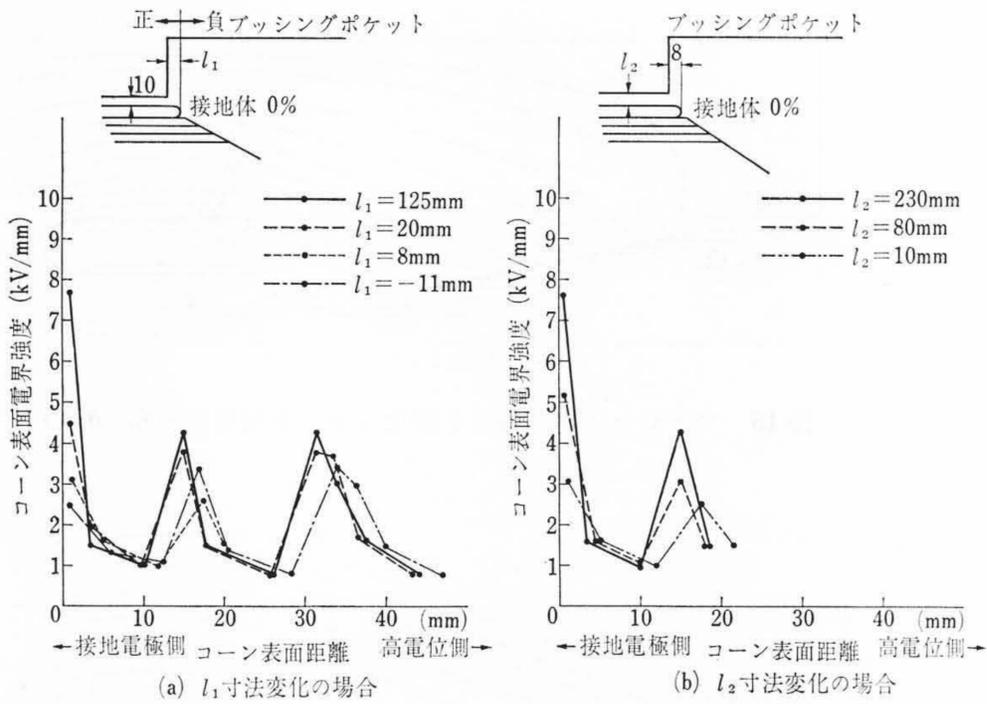


図17 コーン表面電界強度

る。図17(a), (b)は  $l_1$  寸法,  $l_2$  寸法を変化した場合の接地側のコーン表面電界強度の変化を示したものである。これより  $l_1$  寸法が0で  $l_2$  寸法は小さいほどコーン表面電界強度は低く, コロナ開始電圧を高めるのに役立つことがわかる。したがってブッシング形変流器を取り付けるときもこの結果に従って寸法を決めるのがよい。

### 5.3 ブッシングポケット下部シールドの形状

コンデンサブッシングの下部シールドの形状を変えた場合コンデンサコーン表面電界強度の分布がどのように変わるかをみる。図18に一例を示すようにシールド形状を変えると高電位側  $L_2$  に対する平均電界強度が形状aからbに移るにつれて小さくなっている。これはシールド効果によって等電位線のコーンに対する分布が改良されコーン表面距離が沿面絶縁として有効に働いていることである。一方シールドの半径の変化はシールド表面の絶縁の有無で変化するがコーンの表面電位分布への影響は少ない。シールド形状bの場合の等電位線分布図の一例を図19に示す。

## 6. 結 言

日立製作所で研究開発した油浸紙式, 塗工紙式, 加圧モールド式の三方式について, その機能上よりみた適用区分, 応用例, 特性比較を示し, 課電寿命特性, 取付部のブッシングへの影響などを記述したが要約すると次のとおりである。

- (1) 課電寿命特性では油浸紙式と加圧モールド式は大差ないがこれらと塗工紙式とでは2~3倍の電界強度の差がある。これは塗工紙式は初めから電極間に微小空間を有しているためである。
- (2) 低電圧長時間の電界強度は電極層数を多くそう入するほうが高くなる。
- (3) 電極末端処理を行ない電界集中を緩和するとコロナ開始電圧が15%以上改善される。

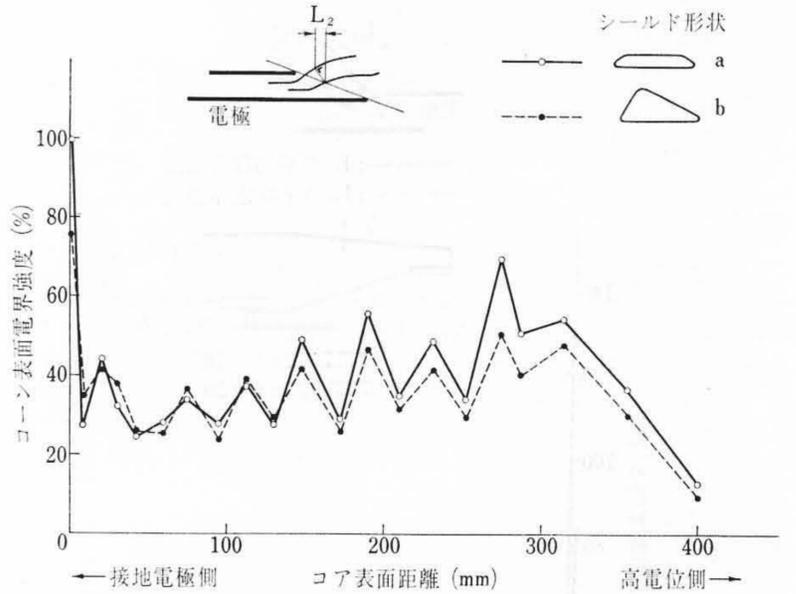


図18 シールド形状を変えたときのコーン表面電界強度

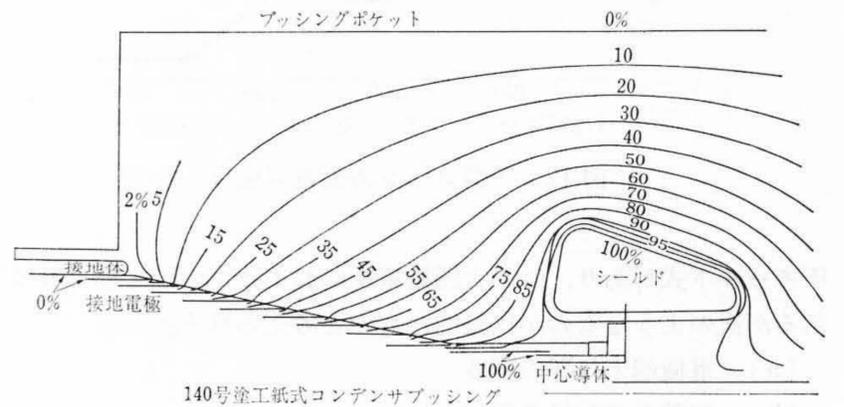


図19 シールド付下部コーンの表面電位分布

(4) ブッシングポケットは傾斜はつけないで円筒形の方が良い。ブッシング座の高さは  $l_1$  寸法が0のとき, またはこれに近いのがよい。座の直径は小さいほうがよい。

(5) ブッシングシールドの形状を考慮すれば, コーン表面に対する等電位面の改良が可能である。

終わりにのぞみ本研究を進めるにあたり, 終始ご協力いただいた日立製作所日立研究所, 日立化成工業株式会社, 日立製作所国分工場の関係各位に厚く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- (1) 谷: 静電場, 河出書房
- (2) 田中: 電気公論 Vol. 548
- (3) 日碍レビュー No. 26 (1963-4)
- (4) S. Silberman: "Design of High Voltage Stress-Controlled Condenser Type Bushings and Capacitors" The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1952, Q/T 123
- (5) 武藤ほか: 東芝レビュー 第19巻 4号
- (6) 磯貝ほか: 昭和44年電気四学会 263
- (7) 磯貝ほか: 日立評論 第50巻 第4号 (昭43-4)