

電界解析器とそのケーブル端末構造への応用

Electric Field Analyzer and Its Application to
the Structure of Cable Terminal

高橋 長一郎* 依田 文吉* 中西 一清*

内 容 梗 概

電力ケーブルの高電圧化に伴い、ケーブル端末の電氣的ストレスが増加し、したがって端末構造が重要な問題となつてきた。

普通端末処理法として考えられているものは

- (1) 静電遮蔽による方法
- (2) コンデンサを応用する方法
- (3) 半導体を利用する方法

等であるが、いずれも長所と短所とをもっている。

本論文では電界解析器を使用して静電遮蔽型套管およびコンデンサ型套管による合理的な端末構造を検討した。

- (1) 高電圧ケーブルの終端函には套管表面のコロナ発生を防止するためにシールドリングを付けることがある。この取付位置は終端函の対称軸に対して最適角があり、それよりはなはだしく偏位する場合には沿面放電を誘起したり、套管下部にストレスが集中する。
- (2) ケーブル終端函にコンデンサ型套管を使用すれば端末部におけるストレスの集中が緩和されるがその作製に若干の困難性がある。

〔I〕 緒 言

ケーブルの使用電圧が高まるにつれて、その端末部の電氣的弱点のため所期の性能がえられない場合が多くなつてきた。したがって恒久的なケーブル端末においては適正な電界調整と絶縁物の合理的な配置を行い、使用中にコロナが発生し絶縁物が劣化しないようにしなければならない。

一方、工場におけるケーブルの破壊試験では、従来試験料の端末を試験用油入套管に入れて行つてきたが、試験高圧が高くなるとケーブル本体の破壊前に端末部で絶縁破壊する場合が増加してきてきた⁽¹⁾。特に、OFケーブルのような高電圧ケーブルの端末補強においては単に補強絶縁層の厚みを増したり、あるいは端末閃絡距離を大きくしただけでは効果的でなくむしろ端末部の体積が不必要に大きくなる欠点が生じる⁽²⁾。この点を考えしかも十分な電氣的裕度を持ちかつ経済的な端末の設計にはどうしても理論的な解決が必要である⁽³⁾。

この観点から、歐洲においては1922年60kVケーブルが布設されて以来高電圧ケーブル用端末処理の研究が進められ、数多くの実験が行われている。この大部分はいわゆる遮蔽型套管を対象としたものであるが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、他方コンデンサ応用の処理法も研究され、重量と価格を軽減することに成功したと報告されている⁽⁶⁾。

本論文では、電界解析器および特殊な模型電極を用いて遮蔽型、コンデンサ型套管の電界分布を求めその合理的構造を考究した。

* 日立製作所日立電線工場

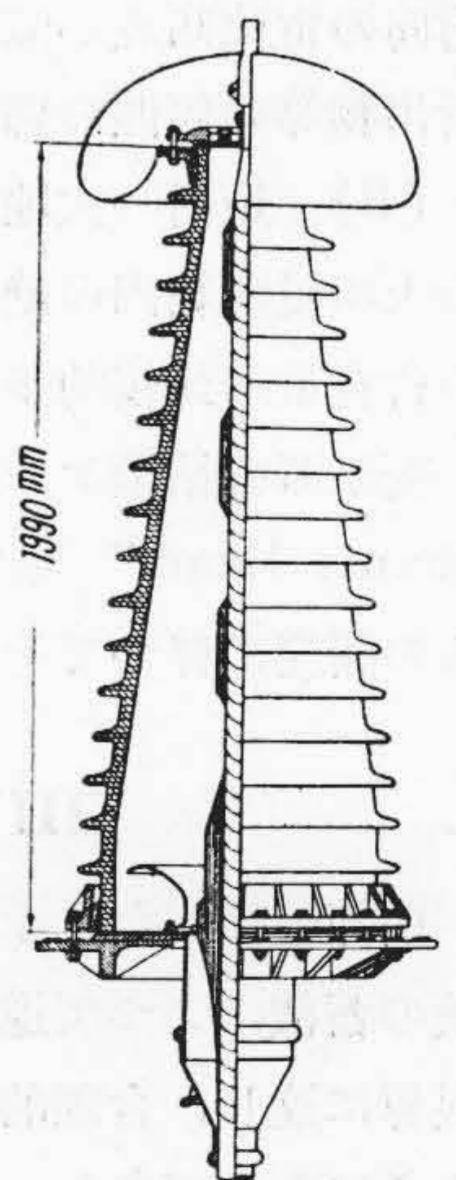
〔II〕 歴 史 的 考 察

(1) 研究の動機

高電圧ケーブルの端末処理の研究は1922年パリに布設された60kVケーブルを契機として始められた。最初はケーブル鉛被上に真鍮製のスリーブを置きこれを碍子で支持した簡単なものであつたが、1935年220kVのOFケーブルが製造されるにおよび端末補強の重要性が急速に増加し、逐次複雑な構造が採用されるようになった。このケーブルの端末補強法は歴史的に意義のあるもので補強油浸紙の厚さは66mm、高さは870mm、下部の電界調整金属環の径は470mmであつた。さらに補強絶縁体と導体露出部の間の線心絶縁上には閃絡距離を増すために高さ300mm、絶縁厚さ25mmの3個の油浸紙を適当な間隙に巻いている。このように設計された終端函が第1図である。

(2) コンデンサ型終端函

1940年リオンケーブル研究所で最初のコンデンサ型終端函が製造された。コンデンサによつて電界を均等に分布させることはケーブル端子の寸法を縮小するのに役立つばか



第1図 220kV OFケーブル終端函
Fig. 1. The End Box of 220kV OF Cable

りでなく、端末におけるコロナ発生電圧を高くする利点がある。一例として1947年に布設された 220 kV のコンデンサ型終端函の各定数を示す。ケーブルの絶縁厚は18 mm, 套管の高さは 1.88 m, 下部の内径は 320mm, 頂部の内径が 140mm である。

コンデンサ型終端函には以上のようにすぐれた点があるが他面作業の巧拙により性能が著しく変化するため非常に慎重な作業を必要とし、かつ組立に長時間を費す欠点がある。この欠点は端末処理を現地で手巻きする時に特に著るしいが、最近特殊の絶縁筒が発明され改善された。すなわちこの方法はケーブル絶縁径に密接する内径を有する絶縁筒上に予めコンデンサを形成したものを金属ケースに封入し OF ケーブルと同様に乾燥浸油処理を行い端末施工時に線心の絶縁露出部に挿入する方法で上述のような施工の巧拙による影響を全く無くしたものである。このようにして現在 380 kV の高電圧ケーブルまでコンデンサ型終端函が採用されている。

(3) 変圧器直結用ケーブル終端函

以上は架空線との接続に用いられる終端函について述べたのであるが、一方変圧器に直結する高電圧ケーブルの接続についても研究が進められている⁽⁷⁾。1940年イタリアにおいて 135 kV OF ケーブルと変圧器との直結が行われて以来、最近まで約十数箇所の発、変電所でこの方式が実施されている。(また 150 kV のガス圧ケーブルによる直結が採用された例もある。)変圧器直結用と従来の屋外用ケーブル終端函との特長を比較すると次のようになる。

(i) 長所 終端函が油中にあるので絶縁特性がよい。すなわち電気力線が良く分散され終端函外側の半径方向の電位傾度が減少する。また塵埃、煤煙および酸性折出物等の周囲の悪条件より保護される。

(ii) 短所 大地電位と終端函との絶縁距離が少くなる上に浸漬箱内の絶縁油中の空気、水分その他の不純物の含有量が比較的多い⁽⁸⁾。

変圧器直結型ケーブル終端函にはその形状から“Elephants Head” と呼ばれているものもあり、地下発電所の開発に伴ってその実績を増加している。

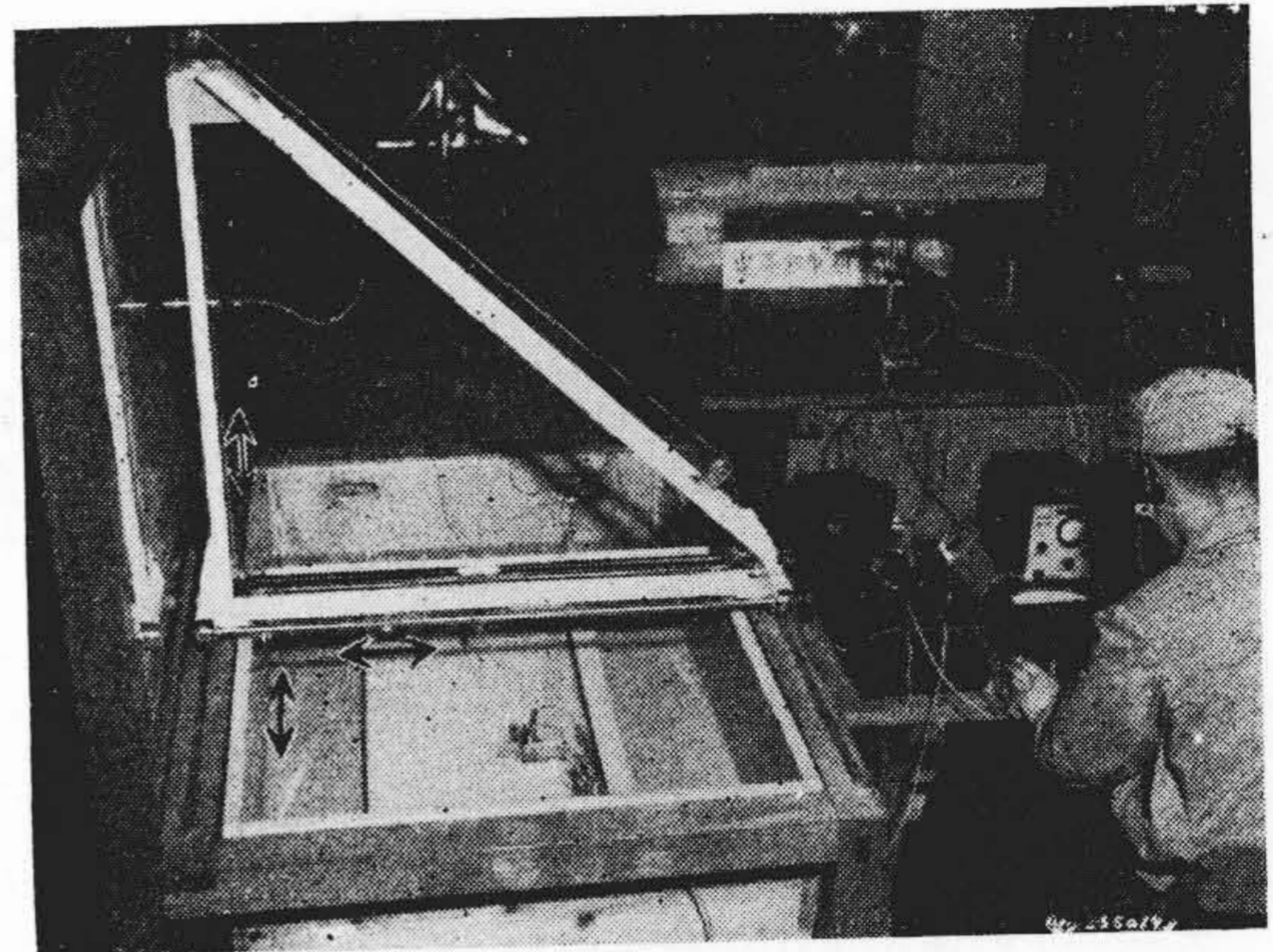
〔III〕 電界解析器

前節で述べたようにケーブル終端函は長年にわたる経験の蓄積によつて進歩してきたが最近に至つて遂にその限界に達し、合理的な電界分布に基く設計が要求されるようになってきた。電気機器および套管類の電界分布や電位傾度の大きさを求めるには、理論的方法、図描的方法、模型的方法の3者が考えられてきたが、ここでは第3者を用い電解液槽法によつて套管の電界を求めることにし

第 1 表 静電界と電流界における物理量の対応

Table 1. Correspondence of Physical Quantities in Electro-Static Field and Current Field

静電界	電流界
電気変位	電流密度
誘電率	導電率
電気力線	電流流線
等電位面	等電位面



第 2 図 電界解析器
Fig. 2. Electric Field Analyzer

た。

(1) 原理

電解液槽法は探針による零電位法であり Maxwell の当時より考えられていた古い方法である。したがつてその理論的展開もかなり行われているが、基本的概念は第 1 表に示したように実際の電気機器内の静電界と電解液槽内におかれた模型に対する電流界との等価対応表現である。Maxwell の表現に従えば“現象それ自身の間にはなんらの類似性がなくても現象を記述する数学的關係が同形であれば、すなわち違つた物理表現が同一形式の方程式で与えられるならば一つの型の場 (field) で測定されたものは他の場の状態を解釈するのに役立つ”のである。このようにして電解液槽による電界解析の指導原理は電磁方程式から導出される。

今均質等方性誘電体が 2 個の電極によつて限られている時、もし内部電荷がないとすれば

$$\text{div } \vec{D} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

が成立する。D は電気変位、→ はベクトルを意味する。一方等方性導電体内ではオームの法則が成立するから電流密度を \vec{J} , 導電率を σ とすれば

$$\vec{J} = \sigma E \dots \dots \dots (2)$$

となる。また媒質内の定常電流に対しては

$$\text{div} \vec{J} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

であるから(1)と(3)とは全く同形である。さらに誘電体内における

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \dots\dots\dots (4)$$

の関係は(2)と同一である。これらから第1表の妥当性が立証される。したがって、電流界の等電位線の測定は直ちに静電界の電位分布を指示することになる。

(2) 実験装置

電界解析装置の全景を第2図に示す。基本回路は簡単なホイートストン・ブリッジからなり探針による平衡点の電位を連動的に描写板に記入する。電源は交流 50V, 50 \sim を用い検出装置にはブラウン管と振動検流計を併用した。

[IV] 遮蔽型終端函

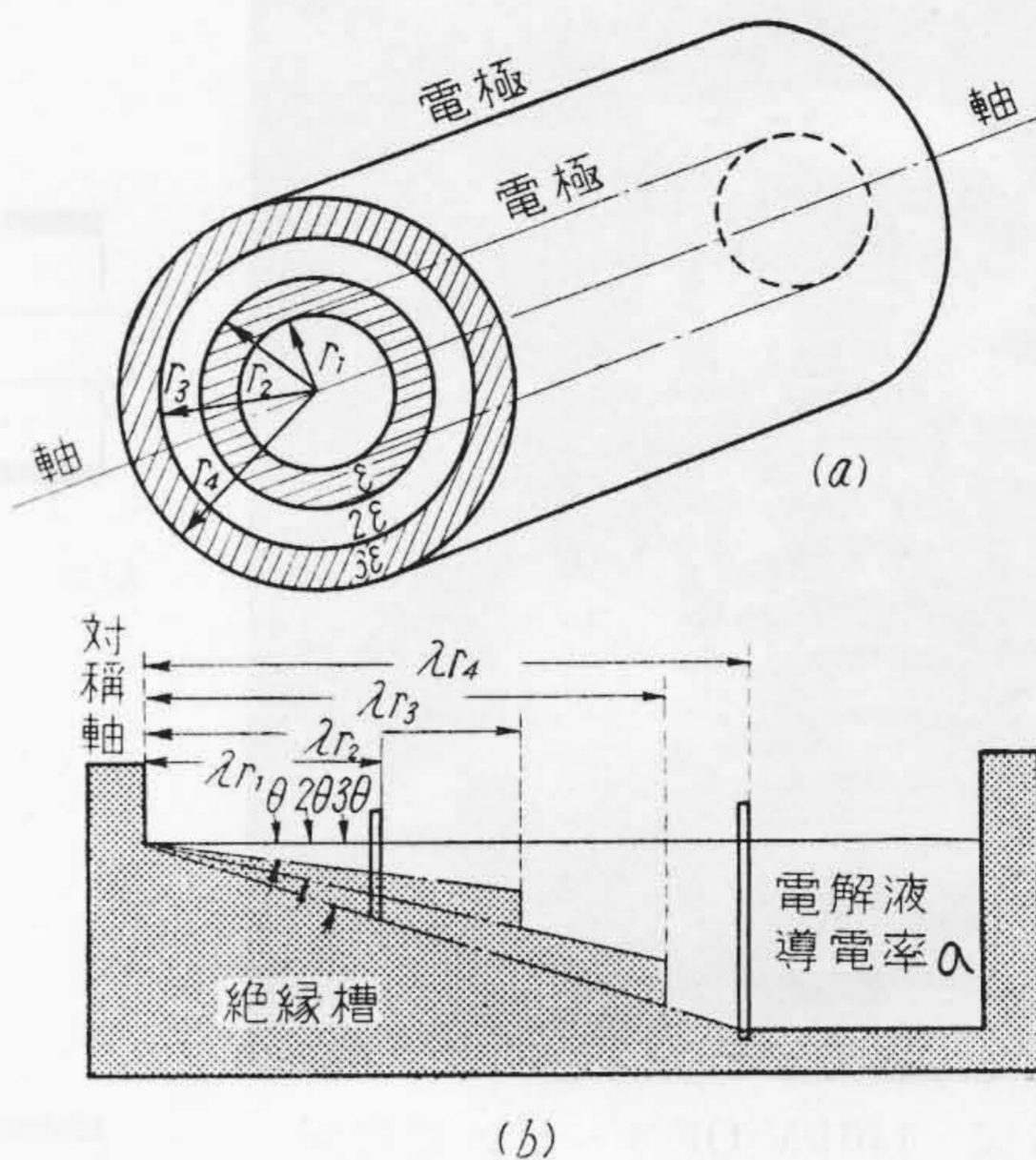
(1) 60 kV OF ケーブル用終端函

60 kV およびそれ以下の電圧階級のケーブルに対して現在最も多く用いられている終端函は遮蔽型である。筆者等は実際この終端函の電界の様子を調べるために模型電極を作製した。勿論ケーブル終端函内の電界は三次元であるが一般の三次元電界の解析は困難であるから次のような特殊な模型電極を用いた。先ず簡単な場合として第3図のように誘電率が $\epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon$ なる3種の誘電体が同心的に円筒電極間にある場合を考える。この場合、円筒内部の三次元電界は同図(b)に示したように模型槽底部に傾斜を設け、かつ異種誘電体境界面で急激に深さを變えて電解液の等価導電率を變え誘電率の變化に対応させた。この模型電極の階段の深さ、すなわちこの深さを決定する底部の水平面に対する傾斜角は電解液の導電率が各誘電体の誘電率に比例するよう $\theta, 2\theta, 3\theta$ とする。したがって、電流の流線密度は原型のファラデー誘電束密度に応じて變化することになる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この原理を用いて作製した模型電極およびその電界分布は第4図のようになった。作成した電気力線は必ずしも等電位線に対応するものではないが、ベルマウスおよび取付金具近辺の電界が比較的強いことがわかる。

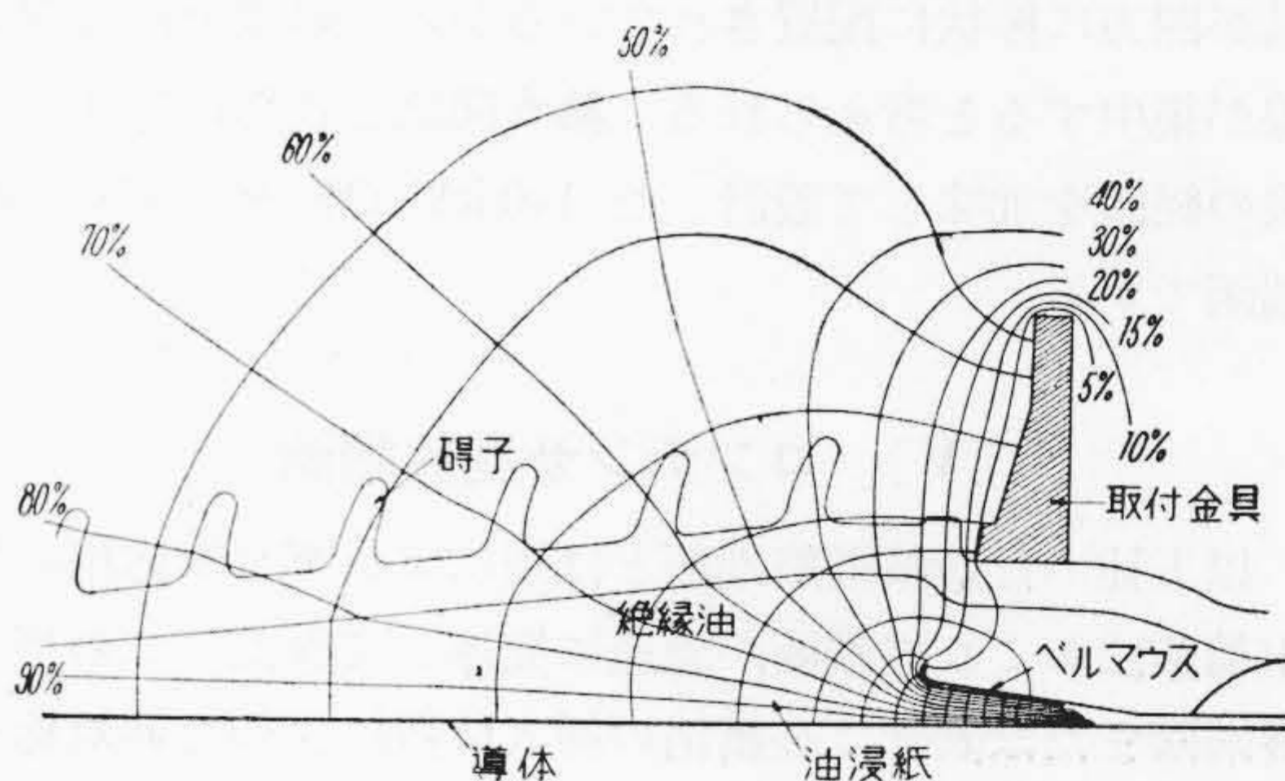
現在なおベルマウスの最適位置および傾斜は明らかでなく多くの研究余地を残している。

(2) 140 kV OF ケーブル用終端函

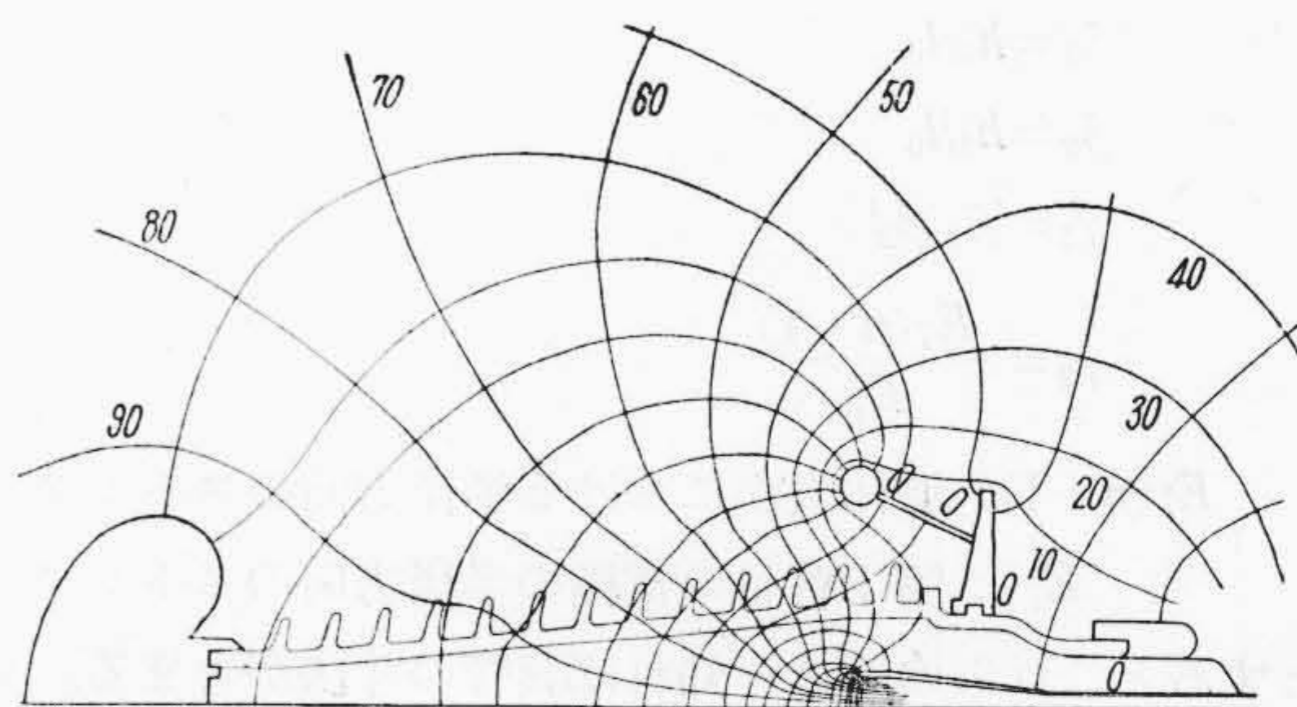
前と同様な方法で模型電極を作製し等電位線および電気力線の分布を求めると第5図のようになった。下部シールドリングの位置および套管の対称軸に対する傾斜を變えて電界の様子を調べると、套管上部の状態はあまり



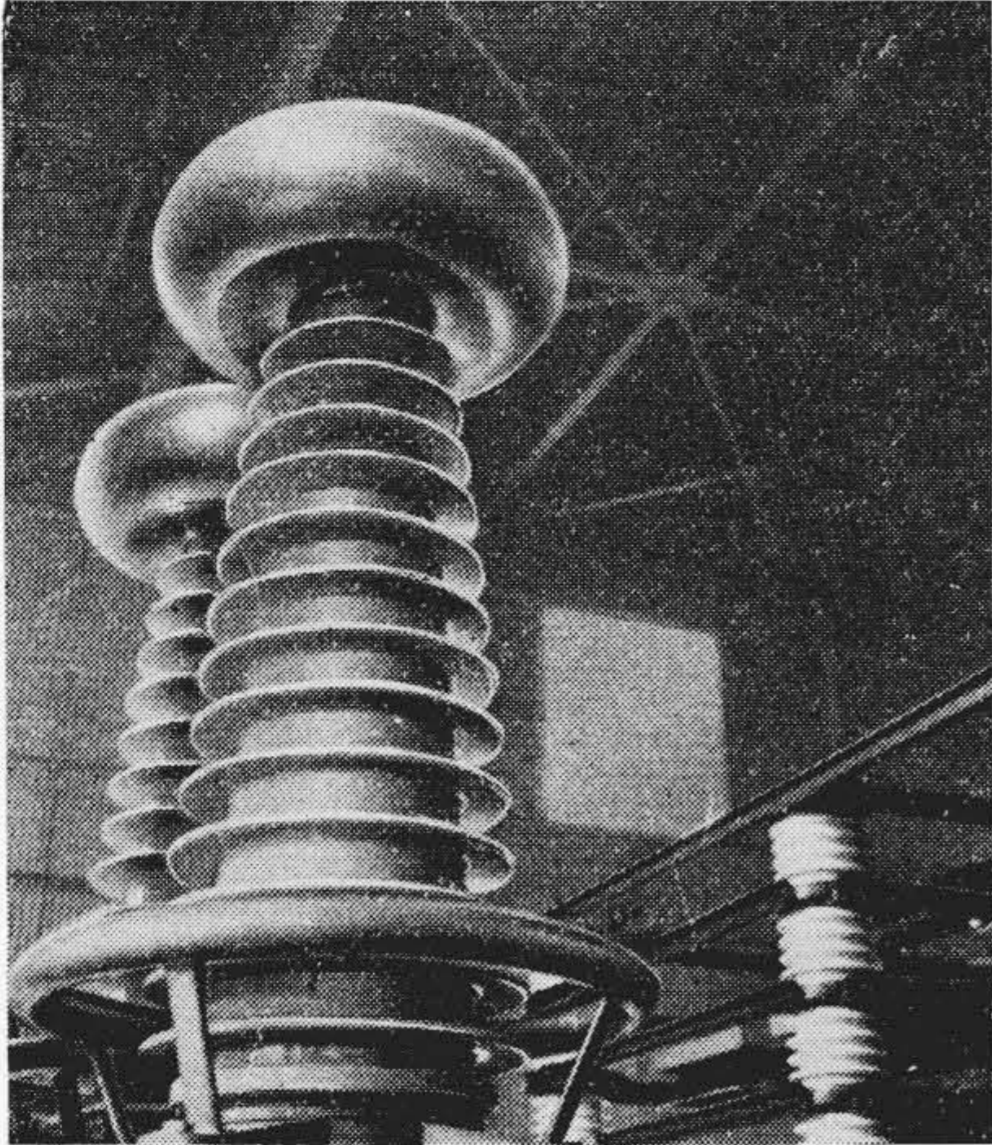
第3図 異種誘電体中の円対称三次元電界
 ϵ = 誘電率, λ = Scale Factor
 (a) 原型 (b) 相似模型
 Fig. 3. Three-Dimensional Electric Field with Circular Symmetry in Heterogeneous Dielectrics.
 ϵ = Dielectric Constant, λ = Scale Factor
 (a) Original Model (b) Analogical Model



第4図 60 kV OF ケーブル用遮蔽型套管の電界分布
 Fig. 4. Electric Field Distribution of Shield-Type Bussing for 60 kV OF Cable



第5図 140kV OF ケーブル用終端函内の電界分布
 Fig. 5. Electric Field Distribution in End Box for 140 kV OF Cable



第6図 140kV OF ケーブル終端函
Fig. 6. The End Box of 140 kV OF Cable

に変化しないが下部ではいちじるしく変化する。第5図は套管の表面閃絡および主要部分の絶縁協調を考慮して最も適当と思われるシールドリングの位置を示したものである。しかし、実際には取付金具が四方に棒状に配置されているからこの部分に電気力線が集中すると考えられる。第6図はこれらの分布と過去の経験を加味して設計した140 kV OF ケーブル用終端函である。

〔V〕 コンデンサ型終端函

以上述べた遮蔽型終端函とは別にコンデンサ応用の端末補強法および終端函が急速に発達してきた。この型の終端函または套管は金属箔の挿入位置によつて非対称型と対称型とに分けられる。

(1) 非対称コンデンサ型終端函

第7図に非対称コンデンサ型の金属箔挿入位置を示す。

ここで、

n : 挿入金属箔の数

$$\beta_1 = h_1/l_0$$

$$\beta_2 = h_2/l_0$$

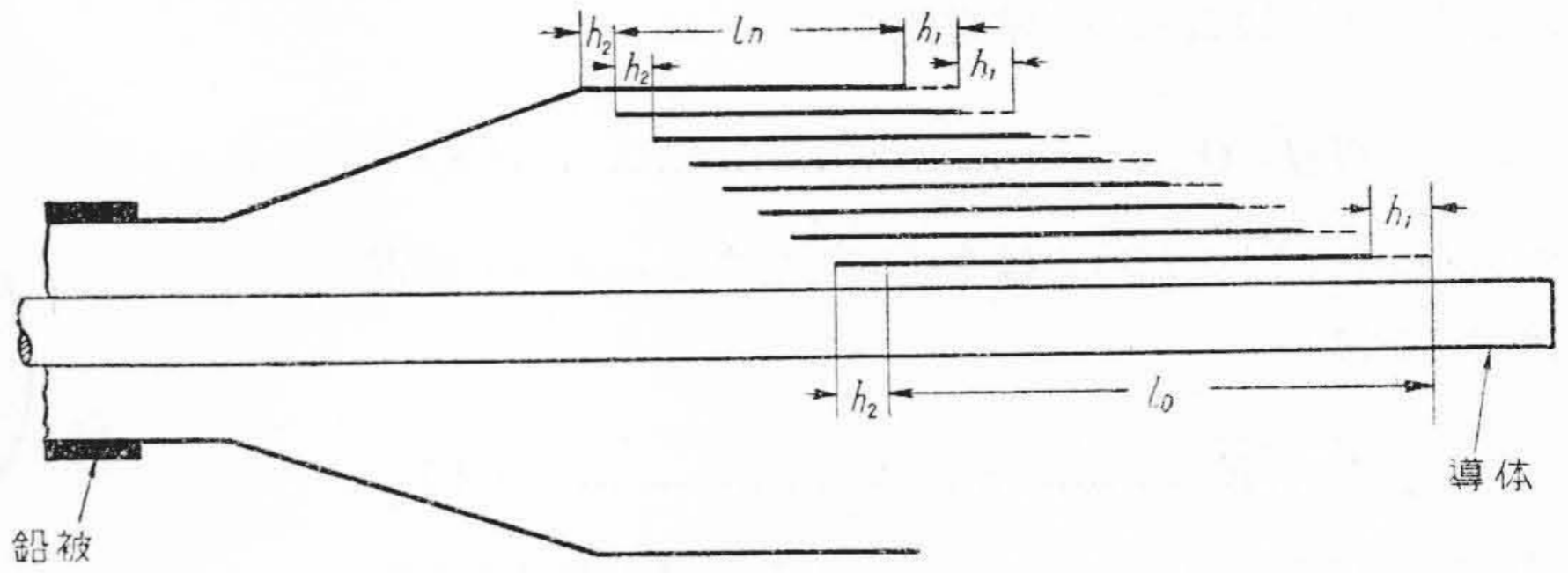
$$\gamma_1 = |\beta_1/\beta_2|$$

$$\gamma_2 = \frac{E_{\gamma}(n+1)}{E_{\gamma_1}}$$

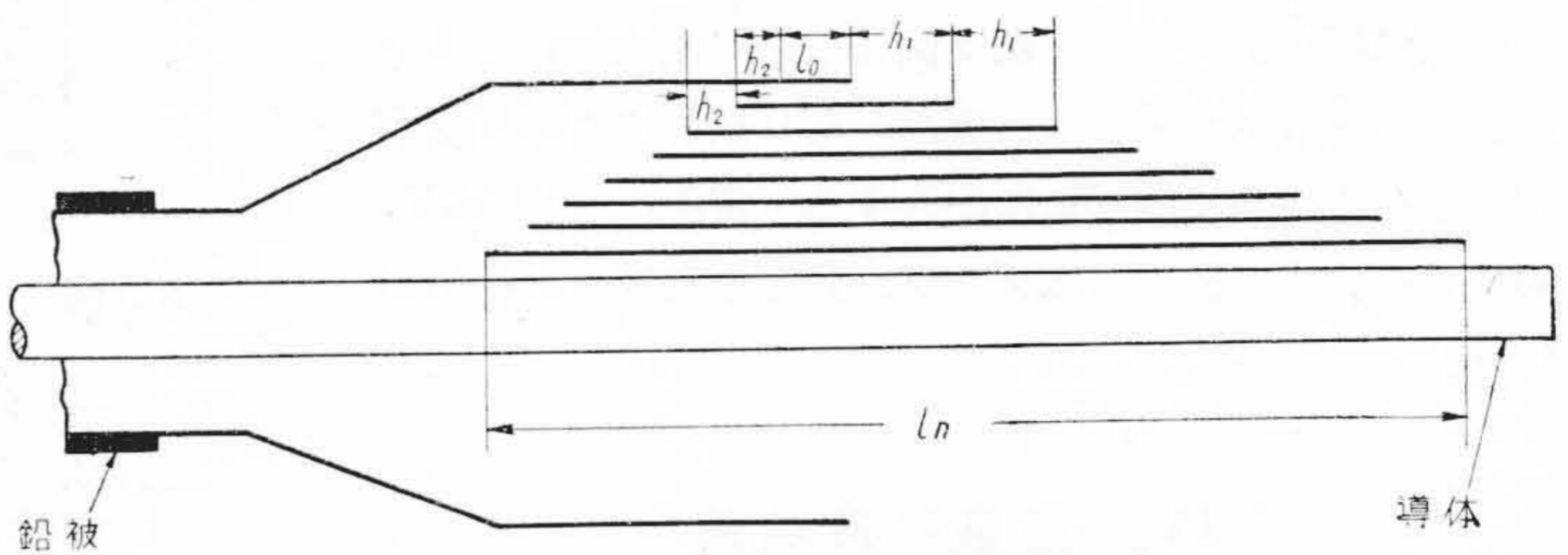
$E_{\gamma}(n+1)$: 導体表面における半径方向のストレス

E_{γ_1} : 第1番目の電極の半径方向のストレス

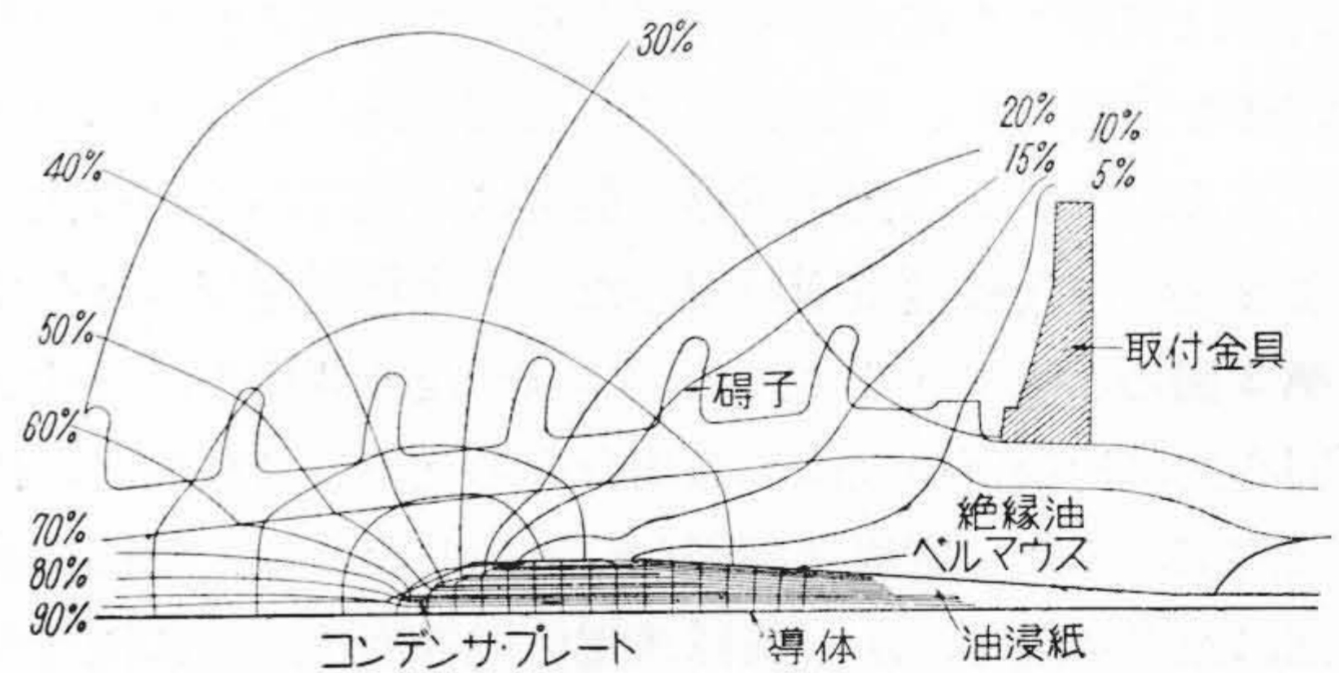
とするとこれらの諸量を知れば套管の寸法がきまる。コンデンサ型套管はケーブルだけでなく変圧器や遮断器等にも使用されるが、後者には大部分対称型のものが使用され非対称型は主としてケーブルに使用される。非対称



第7図 非対称コンデンサ型套管
Fig. 7. Non Symmetrical Condenser Type Bussing



第8図 対称コンデンサ型套管
Fig. 8. Symmetrical Condenser Type Bussing

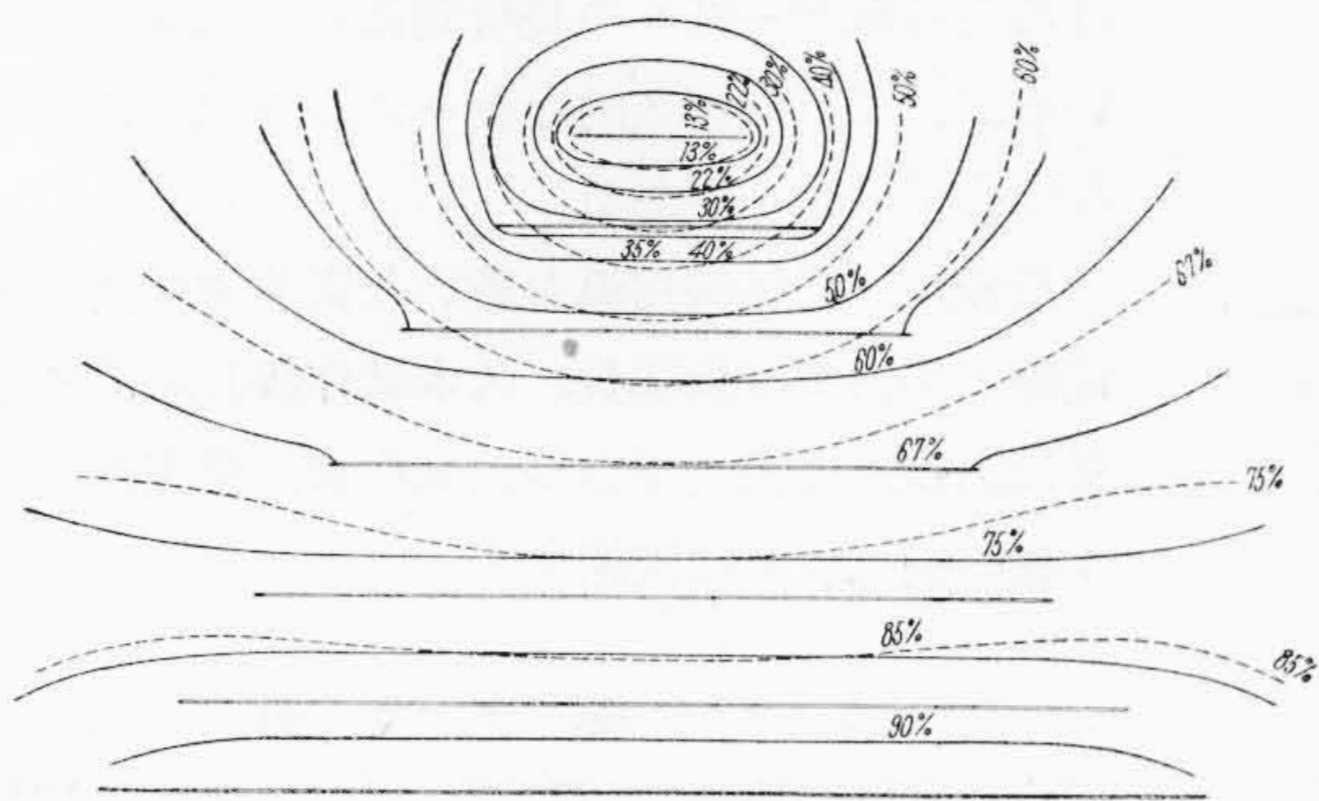


第9図 60 kV OF ケーブル用コンデンサ型套管の電界分布
Fig. 9. Electric Field Distribution of Condenser Type Bussing for 60 kV OF Cable

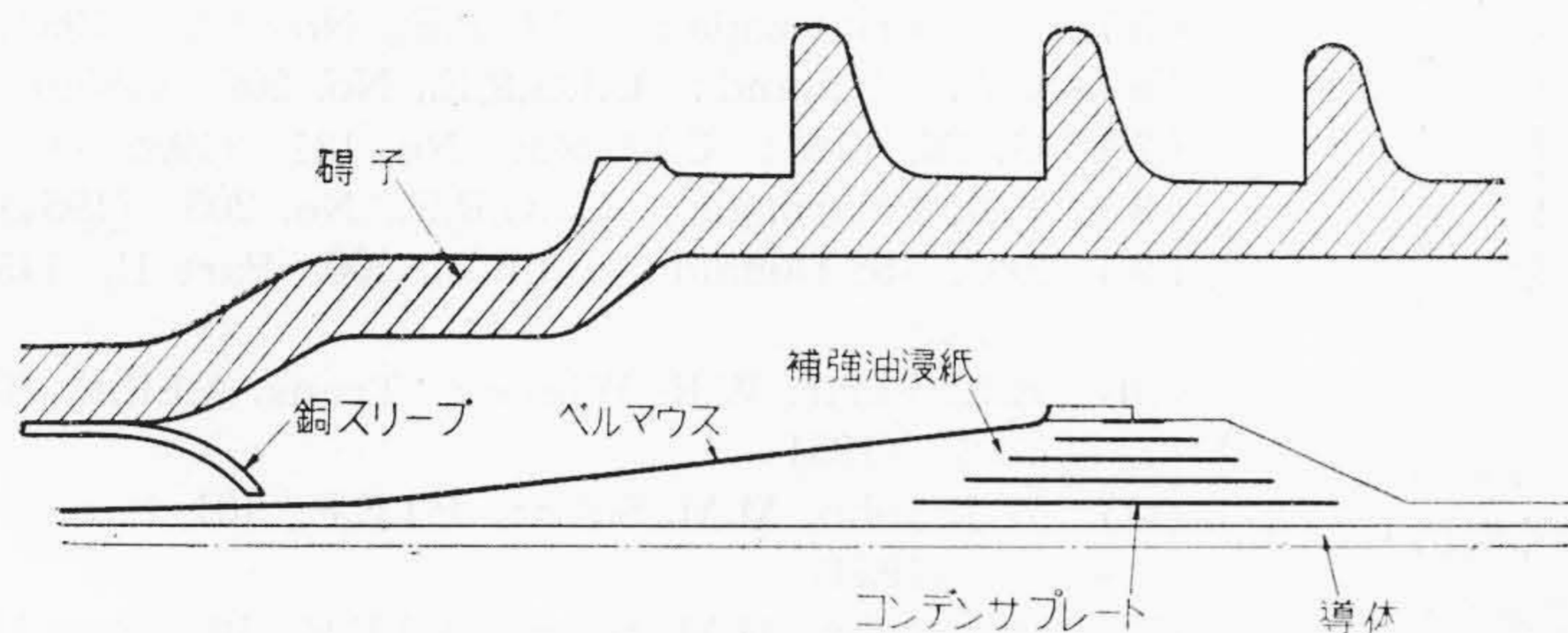
型は対称型と比較して $n, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ 等が同じならば多少寸法が小さくなる。実際ヨーロッパ大陸では対称型が、イギリスでは非対称型が主として使用されており両者の優劣は簡単に論じられない。

(2) 対称コンデンサ型終端函

第8図は第7図に対応する対称コンデンサ型終端函の金属箔挿入位置を示したものである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。筆者等は各種紙ケーブルの破壊試験においてこの型の端末補強を行つてきたがその一つについて模型電極を作製し電界解析器を用いて等電位線および電気力線の分布を求めた。これを第9図に示す。第4, 5, 9図を比較すると明らかなようにコンデンサ型は遮蔽型に比べて遥かに端末部の電位傾度が緩和されている。さらにこの状態を詳細に検討す



第10図 高電圧ケーブル終端函内の電界分布
Fig. 10. Electric Field Distribution in End Box for High Voltage Cable



第11図 60 kV OF ケーブル用コンデンサ型套管
Fig. 11. Condenser Bussing for 60 kV OF Cable

るため金属箔部分の拡大模型電極を作製し電界の分布を求めたのが第10図である。図の点線は中間の金属箔を取除き高電圧側(ケーブル心線)と大地電位側の箔の間に電圧を加えた場合の等電位線を示したものである。このことは金属箔の挿入によつて電極に直交する電気力線の数が増加し、両電極間で電気力線が通る面積が増加することを暗示している。

一方金属箔端部では電位傾度が高くなるためコンデンサ型套管の破壊が主としてこの端部に沿う閃絡であることが予想される。(過去の経験はこの事実を立証している。)しかし、この端部に沿つての閃絡は第11図のように金属箔を補強絶縁紙の内側に深く巻き込み、その沿面放電距離を増すことによつて防ぐことができる。(第9図はこのようにして設計したものである。)

以上の注意を施して設計したコンデンサ型套管を 20 kV SL ケーブルの長時間耐電圧試験に使用した実例を第2表に、またコンデンサ型套管使用前(すなわち、遮蔽型套管使用)の結果を第3表に示す。これら両表の比較はコンデンサ型套管の優位性を保証しているが、恒久布設に対しては今後十分に検討しなければならない。

〔VI〕 結 言

以上の結果を要約すると次のようになる。

第2表 20 kV SL ケーブル長時間耐電圧試験結果(コンデンサ型套管使用時)

Table 2. The Result of High Voltage Time Test for 20 kV SL Cables (Using Condenser Type Bussing)

番号	最高破壊電圧 (kV)	破壊個所
1	90	端 末
2	90	ケーブル
3	105	"
4	90	"
5	110	"
6	105	"
7	90	"
8	90	"
9	90	"
10	90	"
11	90	"
12	90	"
13	90	"
14	90	"
15	90	"
16	90	"
17	80	"
18	80	"
19	90	"
20	90	"
21	105	"
22	90	"
23	90	"
24	90	"
25	90	"
26	105	"
27	90	"
28	90	"
29	90	"
30	105	"
31	105	"
32	120	"
33	105	"

(1) 電力ケーブルの高電圧化に伴い、ケーブル終端函の設計や端末補強の問題が経験による推測の限界に達した。この打開の一手段として電解液槽法によるケーブル終端函の電界分布を求めた。

(2) 140 kV OF ケーブル用終端函の下部シールドリングの効果を検討し最も適切な取付け場所を決定した。

(3) 現在ケーブル端末補強法として考えられている遮蔽型とコンデンサ型の両型を比較検討した。すなわち前者は大地電極(ヘルマウス)の取付角度が重要な問題でありなお多くの検討を要するが、処理方法が容易かつ信頼性があるため広く使用されている。一方後者は理論的に端末の電位傾度を緩和する点ですぐれた特性をもつ

第 3 表 20 kV SL ケーブル長時間耐電圧試験結果 (遮蔽型套管使用時)

Table 3. The Result of High Voltage Time Test for 20 kV SL Cables (Using Shield Type Bussing)

番号	最高破壊電圧 (kV)	破壊箇所	番号	最電破壊電圧 (kV)	破壊箇所
1	80	ケーブル	18	105	端 末
2	70	"	19	120	"
3	80	"	20	105	"
4	70	端 末	21	105	"
5	80	ケーブル	22	90	ケーブル
6	80	"	23	80	"
7	80	"	24	80	"
8	80	端 末	25	70	端 末
9	80	ケーブル	26	80	ケーブル
10	80	"	27	80	"
11	60	端 末	28	80	"
12	70	"	29	80	"
13	70	"	30	80	"
14	110	ケーブル	31	90	"
15	70	端 末	32	90	"
16	100	ケーブル	33	105	"
17	90	端 末			

ている。しかし施工の巧拙により特性が著しく変化する欠点があるため、具体的な応用面で問題が残されている。すなわち筆者等はコンデンサ型套管を使用して工場にお

ける各種紙ケーブルの長時間耐電圧試験に好結果をえているが、これを恒久的なケーブル終端函に応用するにはなほ研究の余地がある。

最後に、終始御指導を戴いた東北大学鳥山教授、日立電線工場内藤技術部長、久本試作課長に御礼申上げる。また実験に御協力下さった試作課、検査課およびケーブル課の関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 赤坂, 池曳: 昭 27 電三学連大 127 (昭 27-5)
- (2) J.A. Giaro: C.I.G.R.E., No. 209 (1952)
- (3) H.D. Short: Trans. A.I.E.E., 68 1275 (1949)
- (4) L. Domenach: C.I.G.R.E., No. 211 (1952)
- (5) P.G. Priaroggia: C.I.G.R.E., No. 212 (1952)
- (6) C.A. Flamand: C.I.G.R.E., No. 209 (1950)
- (7) G. Di. Vito: C.I.G.R.E., No. 121 (1952)
- (8) P.G. Priaroggia: C.I.G.R.E., No. 205 (1954)
- (9) D.C. Mc Donald: P.I.E.E., 100, Part II, 145 (1953)
- (10) H.K. Farir, W.R. Wilson: Trans. A.I.E.E., 70 1301 (1951)
- (11) W.J. John, M.M. Sakr: P.I.E.E., 101, Part IV 91 (1954)
- (12) W.J. John, M.M. Sakr: P.I.E.E., 101, Part II 198 (1954)

 製 品

グリッド付きグラインバー E₃ 型完成

3-Exciting Anode Type, Grid Control
"Glainver" Mercury Rectifier Developed

湯浅電池株式会社よりの要望に応えたグリッド付きグラインバー E₃ 型が、この程日立製作所茂原工場に於て完成した。

この E₃ 型は、従来品種のグリッド付きグラインバーに、さらに励弧極を 1 個追加して、三相励弧を可能とし、励弧出力電圧をグリッドの直流バイアス電源に、使用できるようにしたものである。この結果、格子制御回路を簡単にし、かつ制御を確実に行うことができる特長がある。用途としては、電池の充電に好適であるが、このほか、電流または電圧を制御する必要のある直流電源用として用途は広い。

E₃ 型はすでに湯浅電池株式会社より受注、納入をしているが、その使用結果好評をえており、他の需要家の使用をも期待している。なお E₃ 型の生産品種名はつぎの通りである。

紹 介 

M3GM- 20E ₃	(三極グリッド付)	直 流 出 力 電 圧 250 V	電 流 20 A
M3GM- 30E ₃	(")	"	" 30 A
M3GM- 50E ₃	(")	"	" 50 A
M3GM- 75E ₃	(")	"	" 75 A
M3GM-100E ₃	(")	"	" 100 A

正 誤 表

日立評論第38巻第5号「車輛の左右振動について第1報」中下記の通りの誤りがありましたので訂正致します。

訂正箇所	誤	正
55頁 第4図縦軸	振動加速度 (g) 0.1	バネ撓み (mm) 10