

## 水底搬送ケーブルの漏洩コンダクタンス

## The Study of the Leakage Conductance of the Subaqueous Carrier Type Cable

八 田 達\* 岩 上 秀 夫\*

Toru Hatta

Hideo Iwakami

## 内 容 梗 概

最近、実用されている水底ケーブルには、ポリエチレン絶縁の星型カッドの上からジュートを巻き、さらに鉄線鎧装して、そのまま水底に沈めて使用するものが多い。水の電位を0とすれば、カッド、浸水ジュートの境界面の電位も0となり、カッドを金属体で遮蔽したと同一の静電容量および漏洩コンダクタンスを示すはずであるが、実測の結果、漏洩コンダクタンスの値はこの予想値をはるかに上回っていることがわかった。これは、浸水ジュートが誘電体の性質を帯びた半導電性物質であるため、このなかに電界が漏洩し、これが導電電流を帯同してエネルギー損失を招く結果である。本稿では、この問題を解析して水底ケーブルの静電容量、漏洩コンダクタンス、実効誘電正接の近似式を求めた。搬送周波数帯では、このケーブルの実効誘電正接は周波数に比例し、浸水ジュートの導電率に反比例する。このため、水底ケーブルの漏洩減衰は周波数とともに急速に増加するが、各カッドを適当な導電率をもつ半導電性テープで遮蔽してやればこの問題を回避することができる。

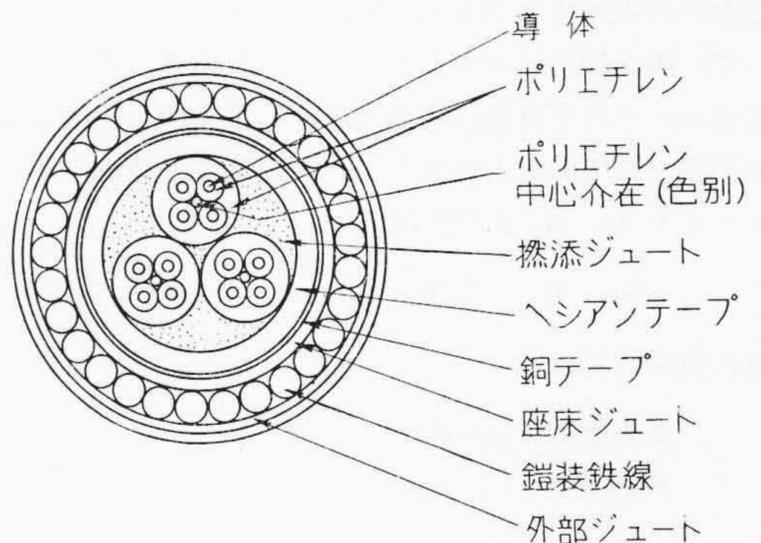
## 〔I〕 緒 言

水底（または海底）通信ケーブルの絶縁体としては、多年にわたりガタパーチャが標準的な絶縁材料として使用されてきたが、最近プラスチック工業の進歩にともなつて、そのほとんどがポリエチレン絶縁方式に切り換えられている。ポリエチレンは、ガタパーチャにくらべ、吸水特性および透水性、機械的特性、化学的特性などがはるかにすぐれていることは今更いうまでもないが、誘電正接が微小なことは通信ケーブル（とくに搬送用）の絶縁材料としてとくに有利な点とされている。

たとえば、第1図は最近実用化されているポリエチレン絶縁水底ケーブルの一例を示しているが、無遮蔽のポリエチレン絶縁星型カッドの間にジュートを介在させ、これをそのまま水底に沈めて使用するものである<sup>(1)</sup>。このとき水は鉄線の間隙を通つてジュートに浸透し、カッド相互を静電的に遮蔽するようになる。このとき、水のポテンシャルを0とすれば、カッドの外周のポテンシャルも0となるわけで、カッドを金属遮蔽体で包囲したと同じ結果になる。したがつて各回線の静電容量および漏洩コンダクタンスも以上の考えで推定すれば良いはずであるが、実測された漏洩コンダクタンスはこの予想をはるかに上回り、ポリエチレンの低誘電特性はほとんど喪失していることがわかった。この現象は周波数の高い場合とくに著しく、またケーブルを淡水に浸した場合一層顕著にあらわれる。

この現象は、カッドの外周を取り巻く浸水ジュートが完全な導体ではなく、誘電体としての特性を帯びた、いわゆる半導電性物質であることに起因するもので、このなかにある程度の電界が漏洩し、これが導電電流を帯同

\* 日立電線株式会社電線工場



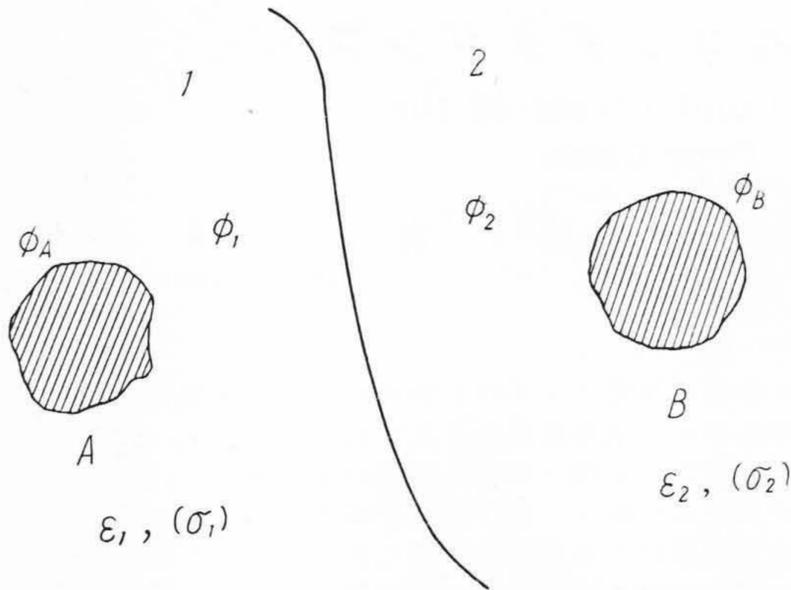
第1図 ポリエチレン絶縁水底搬送ケーブルの断面図

してエネルギー損失を招く結果と考えられる。各回線の漏洩コンダクタンスは、ケーブルの寸法および構造、周波数、材質の定数などによつて変化するのは当然であるが、いまのところこの現象を取り扱った資料はいまだに見当たらない。

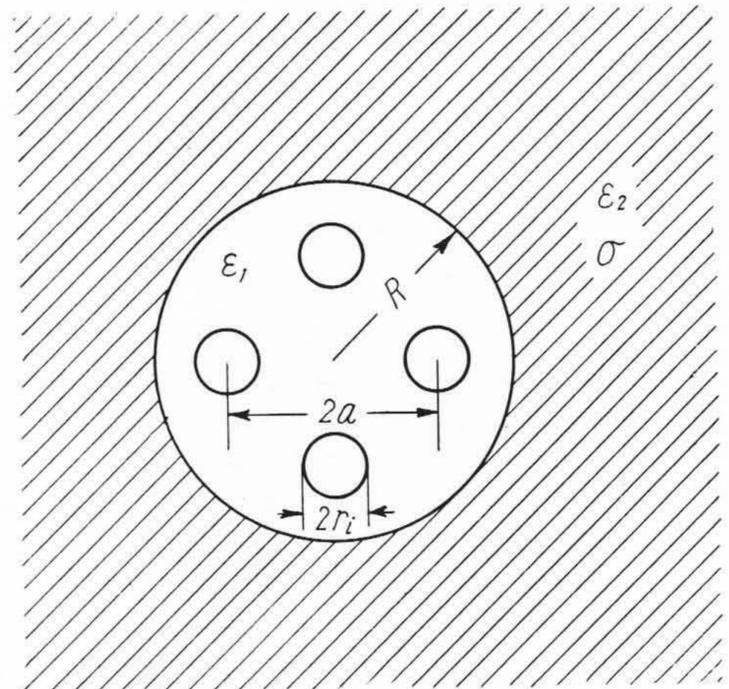
伝送系の上を半導電性物質で取り巻く方法は、渦流損失をとまなうことなく静電遮蔽を果す利点があり、優秀な半導電性プラスチックの出現が期待されている現在、上述の問題を解明する意義はこの点から見ても少なくないと考える。本稿に示される取扱いは、多少数学的な厳密性を欠く点のあることは認めなければならないが、上述の問題の定量的考察に基準を与え、実測の結果をほぼ満足に説明するものである。

## 〔II〕 半導電性空間の解析

静電界および電流界のポテンシャルはいずれも Laplace の方程式を満足し、また、導体表面の境界条件もまったく同一に考えてよいことはすでによく知られた事柄



第 2 図 物理常数が非連続的に変る半導電性空間内におかれた二つの導体



第 3 図 半導電性物質で包囲された星型カッド

であるが、ここで気をつくことはこの事実を利用して半導電性空間の解析が簡単にできないかという点である。

いま、第 2 図に示すとおり、2 個の導体 A, B が相対しており、それぞれ比誘電率  $\epsilon_1, \epsilon_2$  の第 1 および第 2 媒質に包囲されているものとしよう。媒質 1, 2 内のポテンシャルを  $\phi_1, \phi_2$  とすれば、

$$\nabla^2 \phi_1 = 0, \quad \nabla^2 \phi_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また境界条件は

$$\left. \begin{array}{l} \text{A 表面で } \phi_1 = \phi_A \quad (\text{一定}) \\ \text{B 表面で } \phi_2 = \phi_B \quad (\text{一定}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

媒質 1, 2 の境界面では

$$\phi_1 = \phi_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \dots\dots\dots (4)$$

$\partial/\partial n$  は境界面に垂直方向の微分を意味する。

次に、媒質 1, 2 に導電率  $\sigma_1, \sigma_2$  が追加され、導体 A, B 間に角周波数  $\omega$  の交番電圧が印加された場合を考えよう。このとき、 $\phi_1, \phi_2$  が依然として Laplace の方程式を満足するものとするれば、

$$\nabla^2 \phi_1 = 0, \quad \nabla^2 \phi_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

次に境界条件は

A 表面で

$$\phi_1 = \phi_A \quad (\text{一定})$$

B 表面で..... (6)

$$\phi_2 = \phi_B \quad (\text{一定})$$

また、媒質 1, 2 の境界面では、ポテンシャルおよび電流（導電電流 + 変位電流）が連続となる境界条件も与えなければならない。

$$\phi_1 = \phi_2 \dots\dots\dots (7)$$

すなわち

$$\left. \begin{array}{l} (\sigma_1 + j\omega\epsilon_0\epsilon_1) \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = (\sigma_2 + j\omega\epsilon_0\epsilon_2) \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \\ \text{または} \\ \left( \epsilon_1 - j \frac{\sigma_1}{\omega\epsilon_0} \right) \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \left( \epsilon_2 - j \frac{\sigma_2}{\omega\epsilon_0} \right) \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \end{array} \right\} \dots\dots (8)$$

$$\epsilon_0 \equiv 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

(1)~(4) と (5)~(8) をくらべて見ればあきらかなように、(4) の  $\epsilon_1, \epsilon_2$  が (8) ではそれぞれ  $\epsilon_1 - \frac{j\sigma_1}{\omega\epsilon_0}, \epsilon_2 - \frac{j\sigma_2}{\omega\epsilon_0}$  に置き換っているほかはなんら異なるところはない。このように、 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  (完全絶縁体) の場合の解がわかつておれば、その表示式中の  $\epsilon_1, \epsilon_2$  をそれぞれ  $\epsilon_1 - \frac{j\sigma_1}{\omega\epsilon_0}, \epsilon_2 - \frac{j\sigma_2}{\omega\epsilon_0}$  に置き換えることによつて、 $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0$  の場合の解は新たな計算を必要とせず誘導することができる。以上、導体数 2 個、媒質数 2 個の場合について考察を行つたが、さらに一般の場合もこれと同様の考えで容易に処理することができる。

ここで問題となることは、電流が流れる交番電磁界であるから、電流による磁界の渦を顧慮した Maxwell の微分方程式から出発しなければならないのに、これを (5) で見られる通り、簡単に Laplace の微分方程式で片付けている点である。またこのときは導体表面の境界条件も (6) のように単純なものではない。しかし、問題の水底ケーブルの場合は周波数も比較的 low、ケーブルの断面寸法も小さいので、上述の近似で実用上おおむね満足な結果がえられる。事実、Maxwell の方程式を満足する特殊函数を用いることにしても、その展開式の第 1 項だけでほとんど大勢が定まつてしまうため、結果において Laplace の方程式から出発したと大差ないことになつてしまう。しかし、周波数が上昇し、波長が電極間隔に近づいてくるにしたがつて上述のような単純な取扱いは不適當となる。

〔III〕 半導電性物質で包囲された星型カッド

第3図は半導電性物質に包囲された星型カッドの断面である。いま、

- 2a: 線間距離                      2R: カッド外径
- r<sub>i</sub>: 心線半径
- ε<sub>1</sub>: カッド絶縁材質の比誘電率
- δ<sub>1</sub>: カッド絶縁材質の誘電正接
- ε<sub>2</sub>: 半導電性物質の比誘電率
- σ: 半導電性物質の導電率
- x ≡ a/R

の記号を定めておく

いま、δ<sub>1</sub> = 0, σ = 0 (完全絶縁体) の場合の実回線静電容量を求めてみると<sup>(2)</sup>,

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_1}{\log \frac{2a}{r_i} - \alpha \log \frac{1+x^2}{1-x^2} - \left(\frac{r_i}{2a}\right)^2} \times \left\{ \left(1 - 4\alpha \frac{x^2}{1-x^4}\right)^2 + 4 \left(1 - 2\alpha \frac{x^2}{1+x^4}\right)^2 \right\} \dots (9)$$

$$\alpha \equiv \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \dots (10)$$

次に、δ<sub>1</sub> ≠ 0, σ ≠ 0 の場合を考えてみる。前節でも述べた通り

$$\epsilon_1 \longrightarrow \epsilon_1 - j\delta_1\epsilon_1$$

$$\epsilon_2 \longrightarrow \epsilon_2 - j \frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}$$

の置換を行つて、(9) に代入し、複素静電容量  $\dot{C}$  を導入する。この回線の実効的な静電容量 C および漏洩コンダクタンス G は次式によつて与えられる。

$$C = \Re \dot{C}, \quad G = -\omega \Im \dot{C} \dots (11)$$

ここで、 $\Re$  および  $\Im$  はそれぞれ負数部および虚数部を示す記号である。

いま

$$\sigma \gg \omega\epsilon_0\epsilon_2 \dots (12)$$

(導電電流 ≫ 変位電流)

の条件が満足される場合には、 $\omega\epsilon_0\epsilon_2/\sigma$  に関し二次以上の項を省略する近似において次の表示式が得られる。

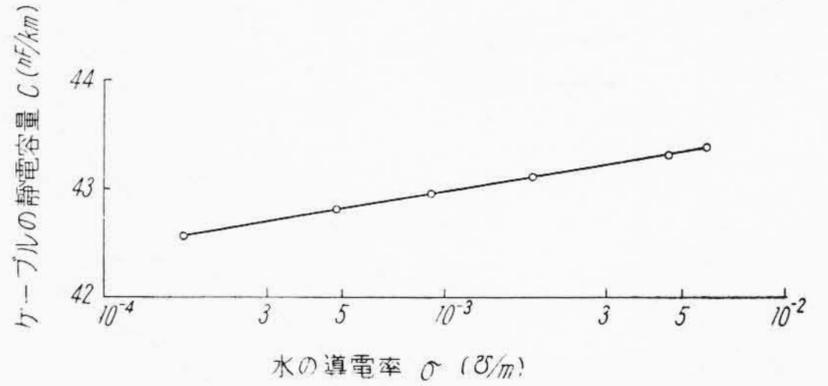
$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_1}{\log \frac{2a}{r_i} \frac{1-x^2}{1+x^2} - \left(\frac{r_i}{2a}\right)^2 \left\{ \left(1 - 4 \frac{x^2}{1-x^4}\right)^2 + 4 \left(1 - 2 \frac{x^2}{1+x^4}\right)^2 \right\}} \dots (13)$$

$$G = \omega\delta_e C \dots (14)$$

δ<sub>e</sub> はこの回線の実効的な誘電正接 (以下 tan δ という) で、多少の省略を行えば次の型に書き出すことができる。

$$\delta_e = 8fx^2 \left(1 + \frac{1}{3}x^4\right) C/\sigma + \delta_1 \dots (15)$$

f: 周波数 (c/s)



第4図 水の導電率と静電容量との関係

(15) の C は (13) で与えられたものを用いる。  
(13) の型はカッドの外周が金属体で遮蔽された場合の静電容量にはかならない。すなわち、この程度の近似では静電容量は周波数や外周の誘電率、導電率などに左右されないことを物語っている。

重信回線の静電容量および漏洩コンダクタンスも(9)~(15)と同じ方法で誘導され、次のように与えられる。

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_1}{\log \frac{a}{r_i} \frac{1-x^4}{1+x^4} - \left(\frac{r_i}{2a}\right)^2 \left(1 - \frac{8x^4}{1-x^8}\right)^2} \dots (16)$$

$$G = \omega\delta_e C \dots (17)$$

$$\delta_e = 4fx^4 C/\sigma + \delta_1 \dots (18)$$

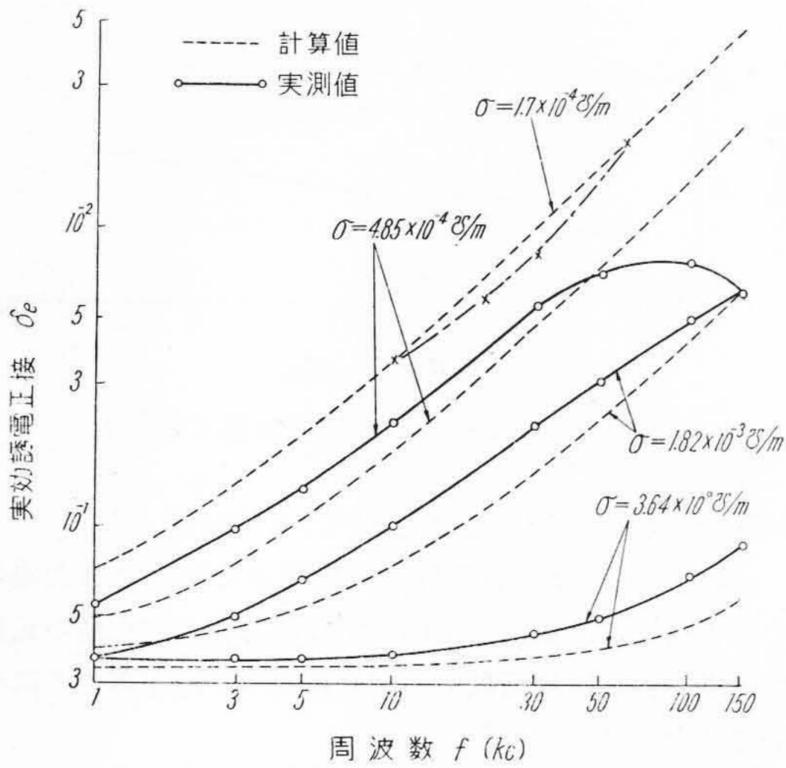
(18) の C は (16) で与えられたものを用いる。

各回線の実効的な tan δ は (15) および (18) に見られる通り、外部空間のエネルギー損失によるものと、カッド絶縁材質内の誘電損失によるものとの重畳によつて与えられ、前者は周波数に比例して増大し、外部空間の導電率 σ に反比例する。また外部空間の誘電率 ε<sub>2</sub> には関係しない。また、f = 0 (直流), または σ = ∞ (導体遮蔽) の場合は、(15), (18) の第1項は消滅して δ<sub>1</sub> の項だけとなり、われわれの常識と矛盾しない。(15), (18) の誘導の基礎となつた (12) の条件は水底ケーブルではおおむね満足されるものである。

第4図は 1 kc で測定された実回線の静電容量と水の導電率の関係を示している。静電容量の表示式 (13) は、 $\omega\epsilon_0\epsilon_2/\sigma$  に関する二次以上の項を省略する近似において誘導されたものであるが、この近似で無視された微量が実測値に表われたものである。これは、導電率の増加とともに電界の外部への漏洩がしだいに阻止されるために静電容量が増加するものと考えてよからう。同様の意味で、静電容量にはわずかながら周波数特性が認められる筈であるが、これは測定誤差に蔽われて検出できなかった。

〔IV〕 水底ケーブルの漏洩コンダクタンス

われわれの水底ケーブルの構造も、ポリエチレン絶縁



第 5 図 水に浸された星型カッドの  $\tan \delta$  の周波数特性

の星型カッドの周囲を浸水ジュートが取り巻いているという意味で、第 3 図に示された構造に該当している。このケーブルの実効  $\tan \delta$  がポリエチレンのそれにくらべて著しく大きくなるのは、ジュートが鉄線によつて固く締めつけられるため、吸水量が少くしたがつてその導電率が小さくなるためである。とくに、ジュートの吸水が不完全な場合は搬送ケーブルとしては実用にならないほど、漏洩コンダクタンスの大きくなることがある。これらの点からみて、ジュートを必要以上に固く締めつけることは避けなければならない。

(15) からあきらかな通り、このケーブルの実効的な  $\tan \delta$  は浸水ジュートの誘電率には関係しない。すなわち、(15) の信頼性を確かめるためには、半導電性物質として導電率の正確に計り得るものであればなにを用いても一般的な検証が可能となるわけである。この実験に用いる半導電性物質としてなにが適当か色々考えてみたが、結局蒸留水を用いることにした。蒸留水の導電率は浸水ジュートとほぼ同程度のものであり、また、その中に電解質を徐々に加えることによつて導電率を広範囲に、しかも簡単に変化することが可能である。

第 5 図は

$$2r_i = 1.2\text{mm} \quad 2a = 4.26\text{mm} \dots (19)$$

$$2R = 8.65\text{mm}$$

のポリエチレン絶縁星型カッドを蒸留水中に浸し、その中に徐々に電解質を加え導電率を増加させながら、実回線

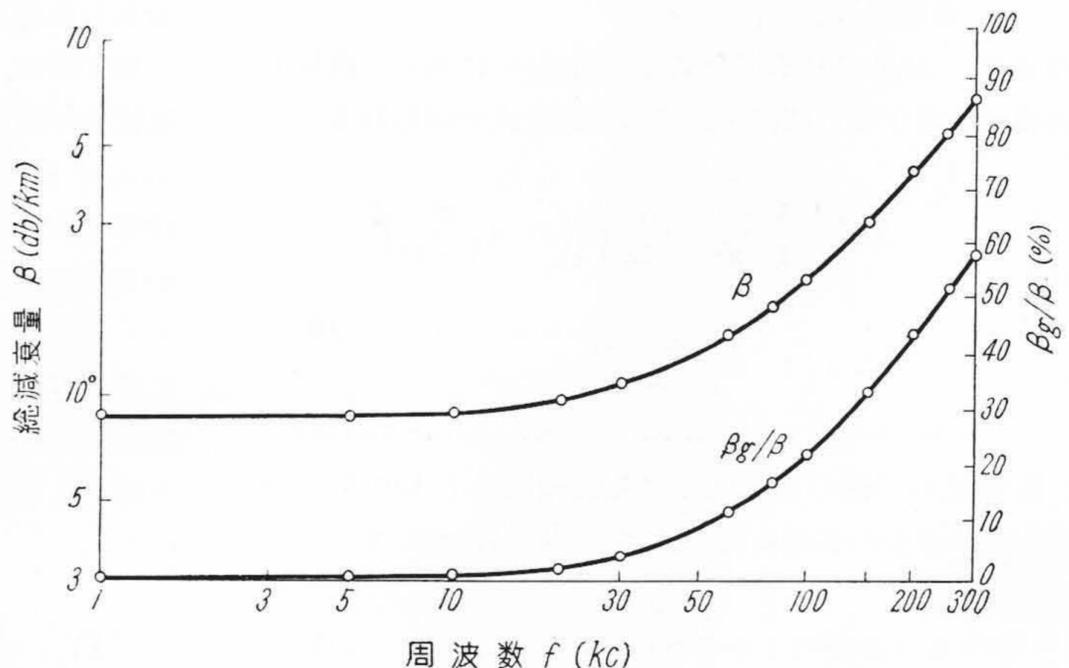
の  $\tan \delta$  の周波数特性を測定したものである。(15) から期待される通り  $\tan \delta$  の値は周波数とともに増大し、 $\sigma$  の増加とともに減少する。実測値、計算値とも完全な直線にならないのは、 $\delta_1$  に周波数特性があるためである。また、 $\sigma = 4.85 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m}$  の場合の実測値は  $f = 50 \text{ kc}$  あたりから勾配が減り、 $f = 70 \text{ kc}$  近傍に極大値が現われている。これは水の誘電率が大きい ( $\epsilon_2 \approx 80$ ) ため、この近辺の周波数から (12) の条件がくずれてくるためとも考えられるがそれだけでは説明のつかない点があり、この問題は今後の検討に譲りたいと思う。

第 5 図の鎖線は試作された  $1.2 \text{ mm} \times 6$  対のポリエチレン絶縁水底搬送ケーブル (カッドの寸法は (19) に示されたものと同じ) を、水道水に約 10 日間浸漬し、完全に吸水させてから測定した実回線の  $\tan \delta$  である。これから見れば、浸水ジュートの導電率は

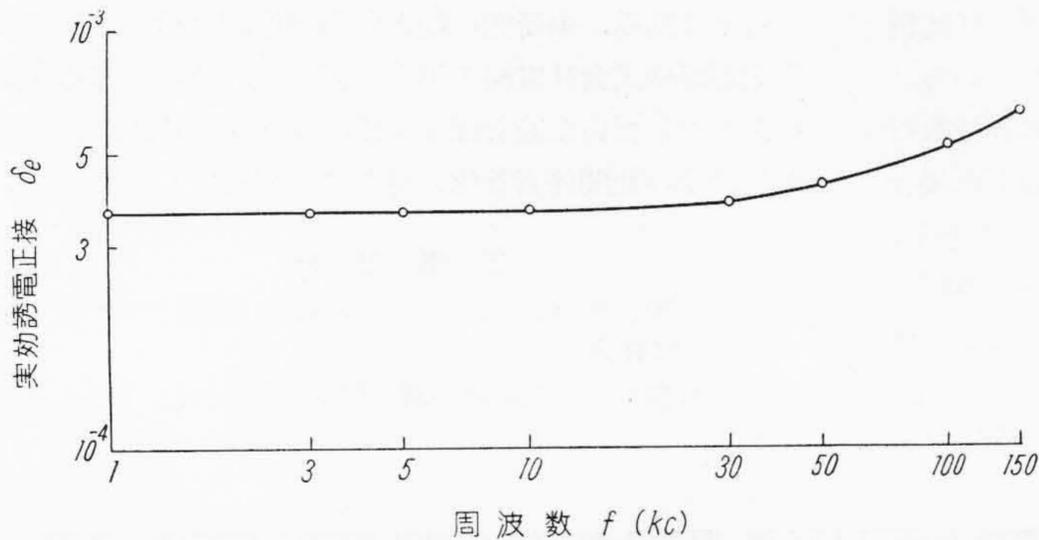
$$\sigma = 1.7 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m} \dots \dots \dots (20)$$

位と推定される。このように、このケーブルの  $\tan \delta$  の値は  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  程度であり、ポリエチレンの  $\tan \delta$  ( $\approx 10^{-4}$ ) にくらべて著しく大きく、ポリエチレンの低誘電損失特性はほとんど喪失している。普通のケーブルでは、漏洩コンダクタンスはほぼ周波数に比例して増大するが、この構造のケーブルでは周波数の自乗に比例するので、高周波領域では漏洩減衰が著しく大きくなる。

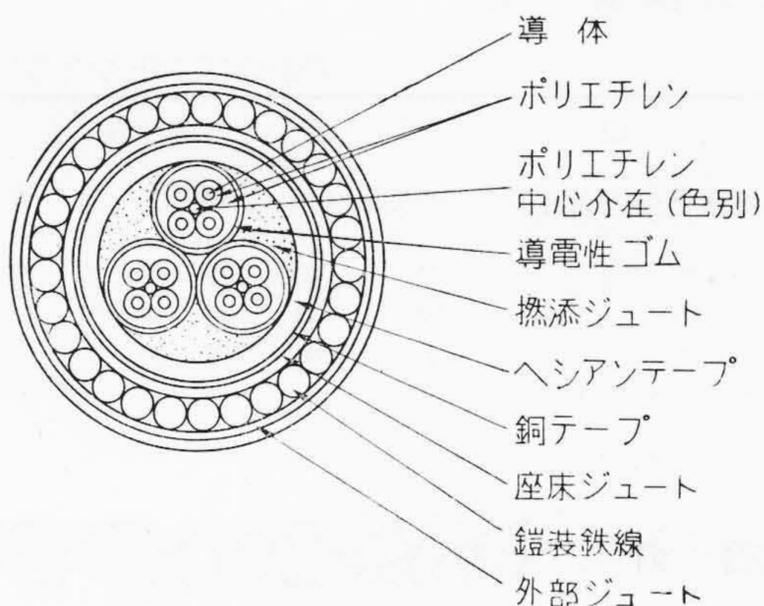
第 6 図はこのケーブルの漏洩減衰 ( $\beta_g$ ) が総減衰 ( $\beta$ ) の何%を占めるかを計算によつて求めたものである。このときの浸水ジュートの導電率は (20) の値を用い、また浸水ジュートの誘電率は水のそれより小さくしたがつて相当の高周波領域まで (12) の関係が維持されると考えて、(14), (15) を用いて  $G$  を計算した。また、浸水ジュートを流れる渦流による抵抗減衰 ( $\beta_r$ ) の増加は小



第 6 図 総減衰に対する漏洩減衰の比率



第7図 導電性ゴムテープで遮蔽された星型カッドの  $\tan \delta$  の周波数特性



第8図 半導電性テープでカッドを遮蔽した水底搬送ケーブル

さいと考えてこれを無視している。第5図からあきらかな通り、このケーブルが実用されるのはせいぜい 100 kc 位までであつて、それ以上の周波数の伝送にはきわめて不適當となることがわかる。もとより、以上はケーブルを淡水中に浸した場合をいつているのであつて、海底ケーブルの場合は  $\sigma$  の値が大きくなるため、これほど極端なことはないが、河底または湖底に使用される水底ケーブルの場合は、使用上十分に注意しなければならない。

しかし、この困難を回避することは不可能ではない。すなわち、カッドに完全な静電遮蔽を行えば  $\tan \delta$  の値はポリエチレンのそれとおなじになる。しかし、遮蔽体として金属テープのように導電率の著しく良好なものを用いると、この中を流れる渦流の影響を受けて抵抗減衰が増大し、かえつて総減衰量が増加する結果となる。これを避けるには適当な導電率をもつ半導電性テープを用いるのがよい。(15) または第5図の実験結果からみて、導電率  $10^{-2} \sim 10^2$  程度の半導電性テープでカッドを遮蔽してやれば抵抗減衰の増加を招くことなしに漏洩減

衰を著しく低下させることが可能である。たとえば第7図は、(19)の寸法をもつポリエチレン絶縁星型カッドの上に導電性ゴムを巻き、さらにこの上から綿テープを巻いてこれを吸湿させ、実回線の  $\tan \delta$  の周波数特性を測定したものである。導電性ゴムの導電率  $\sigma$  はこれに加わる応力によつて非常に変化するものであるから、カッドに巻かれた状態で  $\sigma$  の値を正確に知ることは困難であるが、大体のところ

$$\alpha \approx 10^0 \text{ v/m}$$

と推定される。この推定値は第7図の結果と対比してみても、ほぼ、妥当な数値である。なおテープの厚みは 0.75 mm であつた。以上あきらかにされたとおり、このケーブルの  $\tan \delta$  の値は 150 kc の周波数範囲まで  $10^{-4}$  程度の値を保つており、吸湿綿テープの影響は遮蔽されて、ポリエチレンの低誘電損失特性はおおむね回復されていることがわかる。このように、淡水の底に布設される水底搬送ケーブルで、100 kc 以上の高周波伝送が必要となるときは、第8図に示すように星型カッドを半導電性テープで遮蔽した構造にするのが適當である。

### [V] 結 言

以上、水底ケーブルの漏洩コンダクタンスを中心に、半導電性物質で包囲された星型カッドの静電問題の考察を行つてきたが、ここで注目を要することはこのような構造は渦流損失の増大をとまなうことなく静電遮蔽を行いうる点である。たとえば、プラスチック絶縁の小対ケーブルでは遮蔽体として金属化成紙を用いたものがあるが、この程度の遮蔽では電磁遮蔽の効果はほとんどなく、また渦流損失が非常に大きくなる欠点がある。このような場合は半導体遮蔽に切り換える方が得策であろう。また、高圧線から受ける静電誘導の遮蔽、または雨雪の際の伝送定数の変動を防止する遮蔽体として半導電性物質を用いることも有効と考えられる。このようなケーブルの設計、とくにこれに使用される半導電性物質の材質定数の選択なども、本稿の解析結果を用いて合理的に行うことができる。

最後に、本稿の論旨を要約すれば次のようになる。

(1) 半導電性物質で包囲された星型カッドの静電容量および漏洩コンダクタンスを計算し、このケーブルの実効  $\tan \delta$  が周波数によつて変化する現象を定量的に説明した。

(2) これによつて、水底ケーブルの漏洩コンダクタンスが異常に大きくなる現象を説明することができた。

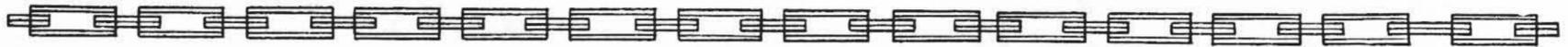
tan δ はほぼ周波数に比例して増大し、導電率に反比例する。また、計算の結果は実測値とほぼ合致している。

(3) このため、このケーブルの漏洩減衰は周波数の自乗に比例して増大し、とくに淡水の底に布設した場合は100kc以上の周波数伝送には不適當となる。しかし、この困難は各カットの外周を適當な導電率(σ=10<sup>-2</sup>~10<sup>2</sup> u/m)をもつ半導電性テープで遮蔽することによつて回避することができる。

終りに臨み、本研究に絶えず御指導御激励いただいた日立電線株式会社電線工場久本副部長、貴重な御助言御援助をいただいた設計課庄司氏、検査課佐藤氏、試作課渡辺氏その他関係者各位に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 庄司, 佐藤, 八田: 日立評論 (別冊) 9号 17 (昭30-3)
- (2) 八田: 日立評論 38 623 (昭31-4)



日立製作所社員社外講演一覽

(その2)

(第72頁より続く)

(昭和31年10月受付分)

講演月日	主催	演題	所属	講演者
1. 13~15	日本学術会議	リアクタンミュレータによる原子炉の過渡特性	中央研究所	鴨井 章
11. 7	日刊工業新聞	フランレジンライニングについて	本社	長浜 克豊
10. 11	中央経済社	設備管理に関する事	本社	村川 武雄
10. 10~12	農業電化協会	農地用ポンプの計画保守について	本社	関岡 始



新案の紹介



実用新案 第447960号  
実用新案 第447961号

松田幸次郎  
大井田浩

ヒューズ台

これらの考案は露出型ヒューズを使用するヒューズ台の絶縁劣化を防止し、遮断容量をたかめることを目的とするものである。

実用新案第447960号の考案はベークライト製台板1のヒューズ2に対向した床面に凹み3を設け、てこれにメラミンなどの耐電弧性絶縁板4をはめこみ、端子金具5, 5'を利用して抜けだしをとめたもので、これによりヒューズ熔断時の電弧による台板1の焼損を防止でき、長期の使用により絶縁板4が劣化した場合にもこの部分だけを取換えればよい。

また実用新案第447961号の考案は絶縁物製支持枠6にV形溝を有する多数の磁性板7を縦にならべて取付けた消弧装置組立品8を各磁性板の溝がヒューズ2をまたぐように台板1の隔壁9, 9'の間にさしこみ、支持枠6よりつきだした磁性板の耳部10を隔壁の溝11にはめて固定したもので、この構造によれば磁性板7の有効な消弧作用により遮断容量を著しくたかめることができるとともに、消弧装置を一体のまま着脱できるのでヒューズを取換えに便利である。

(坂本)

