U.D.C. 621.315.2

ヒョウタン型通信ケーブルに関する静電的問題

Electrostatical Problems Related to a Star Quad, Surrounded by Several Layers of Dielectric Materials

八田 達*

内容梗概

ヒョウタン型小対ケーブルでは，減衰定数の増加をさけるため，金属遮蔽体を省き伝送系の上から直接にビニルシースを被せる方式が標準的な構造となつている。このように遮蔽体のない構造のものは，雨雪の際，外界の影響を受けて伝送定数の変動の生ずるおそれがあるが，ビニルシースの厚さを適当にえらぶことによつて，この変動を充分に小さく保ち，安定した特性を維持することができる。本稿では，この問題を明らかにするため，ポリエチレン絶縁ビニル被覆の星型カッドに関する静電的問題を数学的に取扱い，このケーブルの設計の基礎を与えた。なお，本文には，任意の設計寸法について，静電容量が直ちに読み取れるような図表が与えられている。

〔I〕緒言

最近，われわれの日常生活の各分野にまで広く普及してきたポリエチレンは，誘電率が比較的小さいこと，誘電損失が微小なことから，通信ケーブルの絶縁材料としてもきわめて好適なものであり，さらにそのすぐれた物理的化学的特性のために，きわめてひろく用いられている。ポリエチレン絶縁通信ケーブルは，その上から金属化紙または銅テープなどによつて静電遮蔽を施し，その上からビニルシースを被せて使用する場合が多い。しかしこの方法では，静電容量および渦流損失の増大，インダクタンスの低下などによつて減衰が大きくなることが多く，特に小対ケーブルの場合はいつそうはなはだしい。このため架空用の小対ケーブルでは金属遮蔽を取り除いてしまうのが得策であつて，たとえば日立製作所製のヒョウタン型2対ケーブルにおいてはいずれもこの方式が採用されている。

ビニルの保護被覆は，架線工事または使用時における外傷より保護，雨水氷雪などの伝送系への浸入の阻止などに不可欠なものであつて，これを全く省いた R.D ケーブル (Rural Distribution Wire)[1] などでは実用上相当の不便を伴うことは容易に予想される。星型カッドの上をビニルで被覆する場合，伝送系は外周のビニルの静電的影響を直接に受けるわけであるが，ビニルの誘電率は 5~6 程度であつて，ポリエチレンのそれ (実効 1.9 ~2.1) に較べて著るしく大きく，さらに誘電正接においては 2~3 桁程度大きいのが普通である。このため保護被覆 (ビニルシース) を被せることによつて伝送系の静電容量および漏洩コンダクタンスはある程度増大するのであつて，このため減衰量の増加，インピーダンスの低下をまねく結果となる。

しかし一方，誘電率の高いビニルシースで取巻かれることによつて，外界に結氷が生じたり豪雨によつて多量の水分が附着しても，伝送定数の変化は相当に小さく保つことができるのである。しかし，現在までのところ，このような問題を定量的に取扱つた文献はほとんど見当らないので，新らたにこれを取り上げ，誘電体シースで取巻かれた星型カッドの静電容量および漏洩コンダクタンスの近似式を誘導し，実際問題との関連について二，三の実例を示すこととした。

〔II〕近似方法の選定

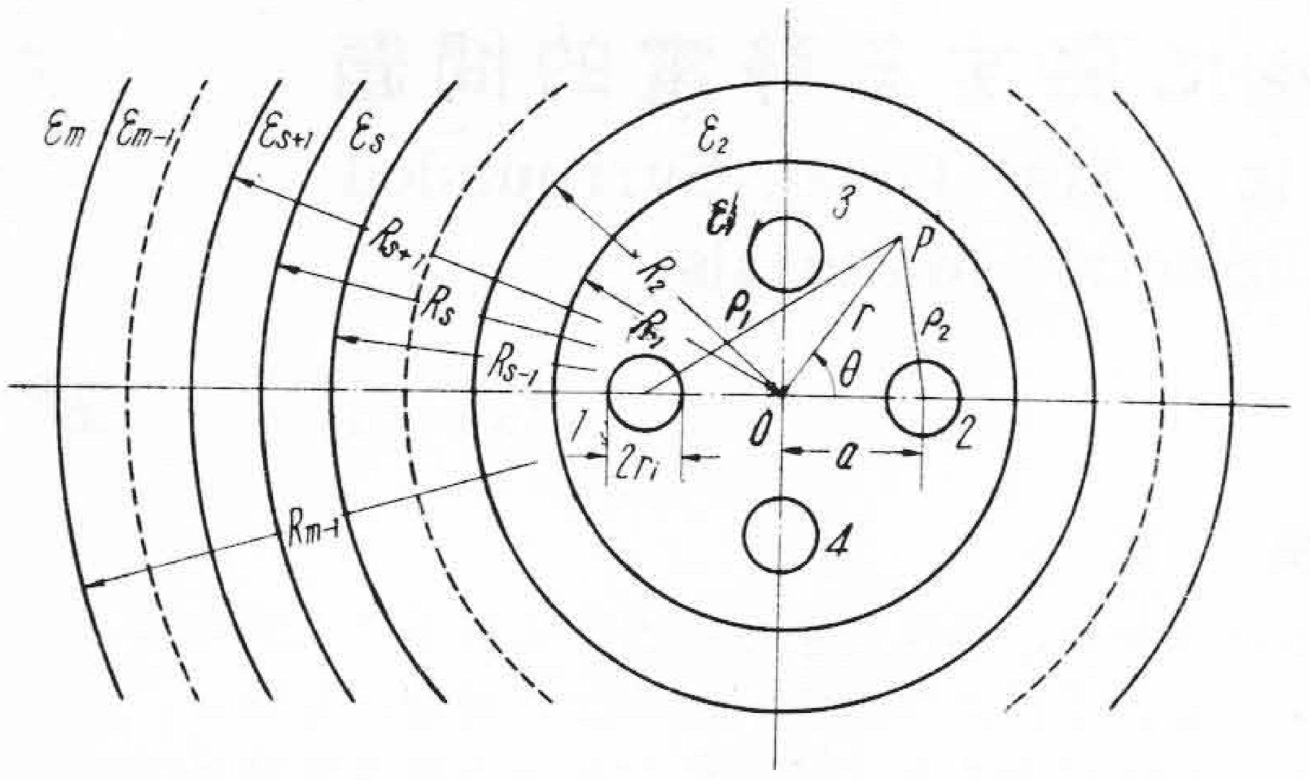
星型カッドの静電問題の解析は，簡単な境界条件の場合について，すでに相当の文献が知られている。たとえば，心線径が線間距離に較べて十分に小さいと考え，これを双極子に置き換えて計算する Kaden 氏[2] の方法，多くの線電荷を考え技巧的に近似静電界を組立ててゆく Meinke 氏[3] の方法，加法定理を繰返して応用し，境界条件を満足する静電界を代数的に定めてゆく楊氏[4]の方法などはその代表的なものであつて，これらに多少の修正を加え一般化をはかつた研究[5][6]も少くない。

さて，当面の問題を解析するにあたつて，上述の各方法のうちでどの考えになろうのが適当かということになるが，Meinke 氏流の技巧的方法ではまず見込がないようであるし，楊氏の方法を応用するとしても[7]，演算は著るしく複雑となつて見易い型を得るのは容易なことではなく，さらに複雑な問題への一般化はまず不可能ではないかと思われる。筆者がここで採り上げた方法は Kaden 氏の考えを一般化したものであるが，演算は簡潔で物理的意味の把握にも便利であり，境界条件がさらに複雑な場合にもそのまま応用することができる。

〔III〕実回線の静電容量

問題を一般化して，星型カッドの上を数層の誘電体が同軸円筒状に取りまいている場合を考えよう。(**第1図**)

* 日立製作所日立電線工場



第1図　数層の誘電体シースで包囲された星型カッドの断面

Fig. 1. Cross-Sectional View of Star Quad, Surrounded by Several Layers of Dielectric Materials

半径 R_{s-1} および R_s ($s=1, 2, \ldots, m$) の円にかこまれた領域を第 S 領域として，その比誘電率を ε_s とする。まず実回線の場合から考えることとして，心線1および2の単位長にそれぞれ q および $-q$ の電荷が存在し，他の心線3および4に電荷はないものとする。第0近似として1, 2上の電荷を線電荷と見なすことにすれば，これら電荷による1次静電界は

$$\Phi_0=\frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\log\frac{\rho_2}{\rho_1}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

で与えられる。ここで単位は MKS 合理化単位系，また

$$\varepsilon_0=8.86\ \mathrm{pF}/m$$

とする。(1) を0を原点とする円筒座標に書き直せば，

$$\Phi_0=-\frac{q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2n+1}\left(\frac{a}{r}\right)^{2n+1}\times\cos(2n+1)\theta,\quad(r>a)\quad\cdots\cdots\cdots(2)$$

(2) の第 n 項は0に配置された $2n+1$ 位の多極子の界と等価である。(2) で示される1次界は外周の反作用界 Φ_h を誘発するが，この量はつぎの級数表示に書き下すことができる。

$$\Phi_h=-\frac{q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{A_{2n+1}}{2n+1}\left(\frac{r}{a}\right)^{2n+1}\times\cos(2n+1)\theta\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

(3) は $r=0$ で有限となる境界条件を満足している。A_{2n+1} の値は附録 (A.8) の関係より

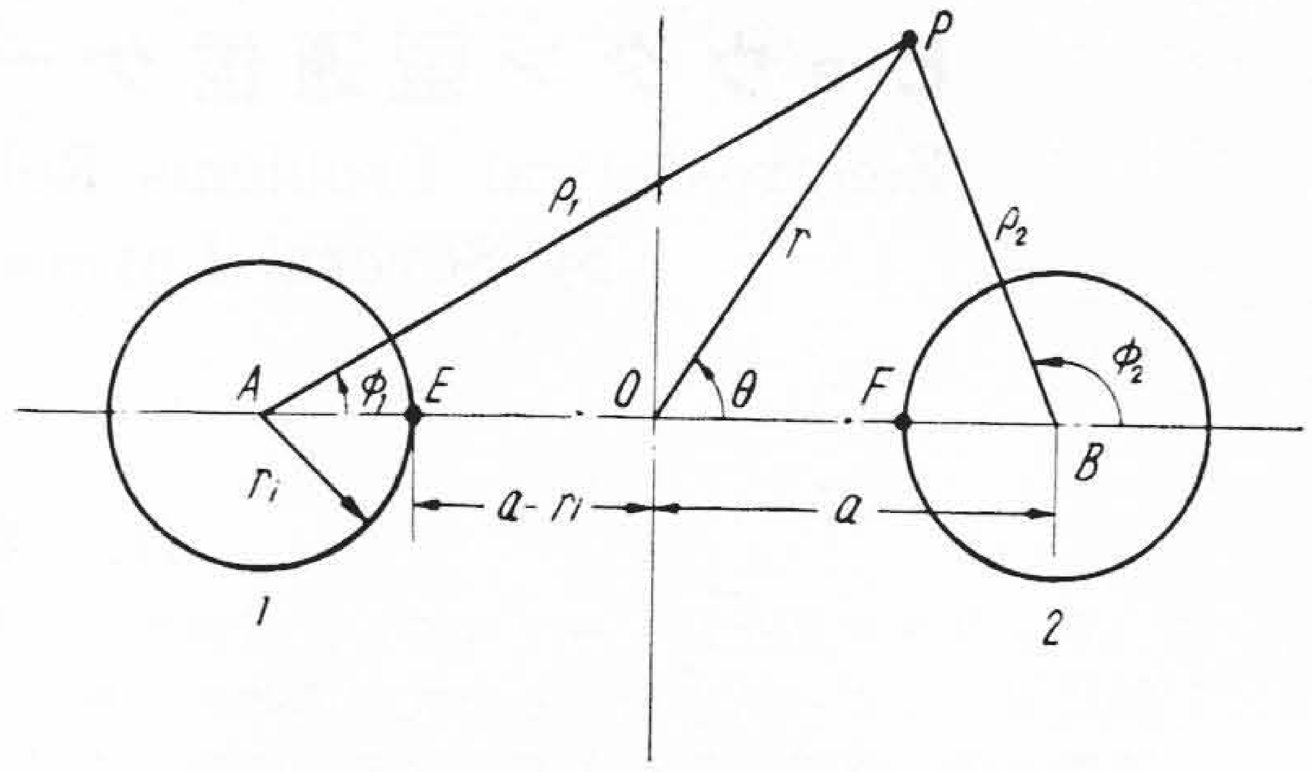
$$A_{2n+1}=-\frac{C_{12}^{(2n+1)}}{C_{11}^{(2n+1)}}$$

となる。$C_{12}^{(2n+1)}$, $C_{11}^{(2n+1)}$ はつぎのマトリクスのマトリクス要素として与えられる。

$$\begin{bmatrix}C_{11}^{(2n+1)} & C_{12}^{(2n+1)}\\ C_{21}^{(2n+1)} & C_{22}^{(2n+1)}\end{bmatrix}\equiv\prod_{s=1}^{m-1}\frac{1}{(1+\alpha_s)x_s^{2n+1}}\begin{bmatrix}1 & \alpha_s x_s^{4n+2}\\ \alpha_s & x_s^{4n+2}\end{bmatrix}\quad\cdots\cdots(4)$$

ここで

$$\alpha_s\equiv\frac{\varepsilon_{s+1}-\varepsilon_s}{\varepsilon_{s+1}+\varepsilon_s},\qquad x_s\equiv\frac{R_{s-1}}{R_s},\qquad R_0\equiv a$$



第2図　第1図の重要部分

Fig. 2. Principal Part of Fig. 1

また (4) においてマトリクスの掛算の順序が問題となるが，これは**第1図**の内側（第1空間）より逐次外側へ向けて掛けてゆくものとする。

第1空間内のポテンシャル Φ_1 は (1) および (3) の和として与えられ，これより0近次のポテンシャルが同空間内の任意の点について計算することができる。いま**第1図**の主要部分を拡大して**第2図**とし，この図の E および F 点における Φ_1 の差を $\Delta\Phi_1$ とし，これを展開して $(r_i/a)^2$ の項まで取れば

$$\Delta\Phi_1=\frac{q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\left\{\log\frac{2a}{r_i}+2S_{s3}-\left(\frac{r_i}{a}\right)\left(\frac{1}{2}+2S_{s1}\right)-\left(\frac{r_i}{a}\right)^2\left(\frac{1}{8}-S_{s4}\right)\right\}\cdot\cdot(5)$$

ここで S_{s1}, S_{s3}, S_{s4} はそれぞれつぎの級数の和として定義される。

$$S_{s1}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}A_{2n+1}$$

$$S_{s3}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}\frac{A_{2n+1}}{2n+1}$$

$$S_{s4}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}2n\,A_{2n+1}$$

以上の演算では各心線上の電荷は線電荷と考えられてきたが，つぎに各心線上の電荷分布を顧慮して補正を行う。0近似のポテンシャル Φ_1 を微分して心線1, 2, 3および4の中心位置の電界を計算し，一まず電界は心線の近傍で均一なものと考える。一様な電界内に円筒導体がこれと垂直におかれた場合，静電誘導によつて導体表面に電荷の移動が生じ，双極電荷が発生するが，導体の外部空間におよぼす反作用界は，外部電界と同一の方向をもち，導体の中心位置におかれた双極子の界と等価となることが知られている。したがつて1次補正としては各心線の中心位置に双極子がおかれたものと仮想すればよい。すなわち，心線1, 2の中心には

$$r_i^2\frac{q}{a}\left(\frac{1}{2}+2S_{s1}\right)$$

3, 4の位置には

$$r_i^2\frac{q}{a}\left(\frac{1}{2}+2S_{s2}\right)$$

の能率をもつ双極子が**第1図**の $\theta=0$ の方向をむいて配置されたと考えるのである。ここで

$$S_{s2}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}(-)^n A_{2n+1}$$

これら双極子の界はコア外周の反作用界を誘発するが，この界は (2)～(3) の誘導と相似の方法で計算することができる。たとえば**第2図**のBにおかれた双極子の界は，

$$\Phi_i=\frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\left(\frac{r_i}{a}\right)^2\left(\frac{1}{2}+2S_{s1}\right)\times\frac{a}{\rho_2}\cos\phi_2 \quad\cdots\cdots(6)$$

であるが

$$\left(\frac{a}{\rho_2}\right)\cos\phi_2=\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a}{r}\right)^n\cos n\theta,\quad (r>a)$$

の関係を利用すれば (6) は0を原点とする座標で表示することができ，これに附録 (A.8) の関係を応用することによつて外周の反作用界を容易に計算することができる。

第2図 E, F 間の電位差の1次補正項は

$$\Delta\Phi_1^{(1)}=\frac{q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\left[\left(\frac{r_i}{a}\right)\left(\frac{1}{2}+2S_{s1}\right)-\left(\frac{r_i}{a}\right)^2\left\{\left(2S_{s1}+\frac{1}{2}\right)^2+(2S_{s2}+1)^2\right\}\right] \quad\cdots\cdots(7)$$

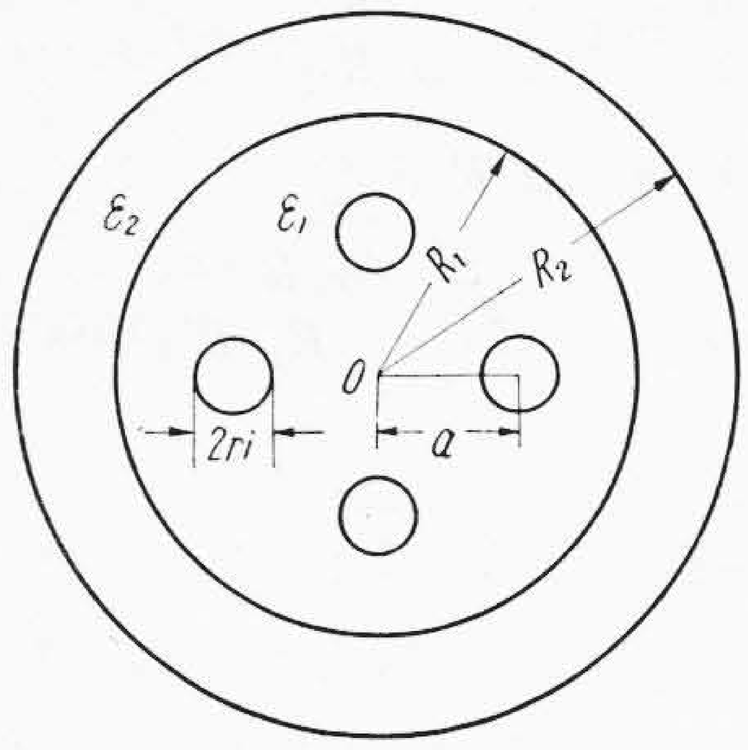
となる。(5) および (7) の関係より，EF 間の電位差が第1近似において計算されるわけであるが，ここに注意しなければならないことは，(7) を誘導する際，心線に作用する外部電界が心線近傍で均一であり，このため1次補正としては各心線の中心位置に双極子のみを仮想すればよいと考えてきた点である。実際にはこの仮定は正しくなく，このため心線の中心には4極子が生じていると考えられるのであつて，これが**第2図** E, F におよぼす影響は無視できない。すなわち，本稿の計算のように $(r_i/a)^2$ 程度の精度を意図する場合は，この事実を顧慮して補正を加える必要があるが，この点 Kaden 氏の原論文には明確な記述がなく，あいまいな点を残していた。この補正の演算の詳細は省略して結果だけを記すことにすれば，**第2図**のEF間の電位差に対する補正項は

$$\Delta\Phi_1^{(2)}=\frac{q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\left(\frac{r_i}{a}\right)^2\left(\frac{1}{8}-S_{s4}\right) \quad\cdots\cdots(8)$$

で与えられる。(5)，(7) および (8) よりEF間の電位差が $(r_i/a)^2$ 程度の精度で求められ，これより線路の単位あたりの静電容量を求めると

$$C=\frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}{\log\dfrac{2a}{r_i}+2S_{s3}-\left(\dfrac{r_i}{a}\right)^2\left\{\left(2S_{s1}+\dfrac{1}{2}\right)^2+(2S_{s2}+1)^2\right\}} \quad\cdots\cdots(9)$$

$$S_{s1}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}A_{2n+1},\quad S_{s2}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}(-)^n A_{2n+1},\quad S_{s3}\equiv\sum_{n=0}^{\infty}\frac{A_{2n+1}}{2n+1} \quad\cdots\cdots(10)$$



第3図　誘電体シースを有する星型カッド
Fig. 3. Star Quad Covered by a Dielectric Sheath

〔IV〕 重信回線の静電容量

この回線においては，心線1および2には $q/2$，3および4には $-q/2$ の電荷が分配される。この場合の静電容量の計算は実回線の場合と大略平行的であるため，重複を避けて結果のみを記すことにする。

$$C=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}{\log\dfrac{a}{r_i}+4S_{p2}-\left(\dfrac{r_i}{a}\right)^2\left(4S_{p1}+\dfrac{1}{2}\right)^2} \quad\cdots\cdots(11)$$

ここで，S_{p1}，S_{p2} はつぎの級数の和として定義される。

$$S_{p1}=\sum_{n=0}^{\infty}A_{2(2n+1)},\quad S_{p2}=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{A_{2(2n+1)}}{2(2n+1)} \quad\cdots\cdots(12)$$

〔V〕 ポリエチレン絶縁コアおよびビニルシースを有する星型カッドの静電容量

さて，われわれがいま問題にしているのは，カッドを取りまく誘電体シースが一層だけの場合である。(**第3図**) このとき，附録 (A. 7) および (A. 8) の関係において $m=3$ とおけば A_{2n+1} (または $A_{2(2n+1)}$) の値は直ちに求められ，級数 (10) (または (12)) は数値計算に便利な型に書き直すことができる。

(1) 実回線の場合

$$S_{s1}\equiv-\alpha\frac{(a/R_1)^2}{1-(a/R_1)^4}+f_{s1} \quad\cdots\cdots(13)$$

$$f_{s1}\equiv\beta(1-\alpha^2)(a/R_2)^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(a/R_2)^{4n}}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^{4n+2}} \quad\cdots\cdots(14)$$

$$S_{s2}\equiv-\alpha\frac{(a/R_1)^2}{1+(a/R_1)^4}+f_{s2} \quad\cdots\cdots(15)$$

$$f_{s2}\equiv\beta(1-\alpha^2)(a/R_2)^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-)^n(a/R_2)^{4n}}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^{4n+2}} \quad\cdots\cdots(16)$$

$$S_{s3} \equiv -\frac{\alpha}{2}\log\frac{1+(a/R_1)^2}{1-(a/R_1)^2}+f_{s3} \quad \cdots\cdots\cdots (17)$$

$$f_{s3} \equiv \beta(1-\alpha^2)(a/R_2)^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2n+1}\frac{(a/R_2)^{4n}}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^{4n+2}} \quad \cdots\cdots (18)$$

ここで

$$\alpha \equiv \frac{\varepsilon_2-\varepsilon_1}{\varepsilon_2+\varepsilon_1}, \quad \beta \equiv \frac{\varepsilon_2-1}{\varepsilon_2+1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

なお，β の表示は最外空間を空気 ($\varepsilon_3=1$) と考えて導いたものである。ここでコア絶縁材質をポリエチレン，シース材質をビニルとすれば

$$\varepsilon_1=2.1, \quad \varepsilon_2=6$$

くらいにえらぶのが実際に近いようである。ε_1 の値はカッド内部に空隙のあることを顧慮した実効的な値であり，またビニルの誘電率は配合いかんによつて，さらに測定周波数によつて相当に変化するものであるが，ここでは一先ず ε_2 の値を6とおくことにする。このとき

$$\alpha=0.481, \quad \beta=0.714 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (20)$$

上記の級数において，$(a/R_2)^4$ の値は実際の場合1/20以下となる場合が多く，したがつてこれら級数の収斂はきわめて迅速であり，最初の少数項だけで十分に満足な近似をうることができる。

(13)～(18) において $\varepsilon_2\to\infty$ とすれば，カッドが半径 R_1 の金属遮蔽内に収容された場合の解がえられ

$$\alpha=\beta=1, \quad f_{s1}=f_{s2}=f_{s3}=0$$

$R_2\to\infty$ とすれば，シース厚みが無限大の場合の解がえられ

$$f_{s1}=f_{s2}=f_{s3}=0$$

$R_1\to\infty$ とすれば，カッドが誘電率 ε_1 の空間に孤立した場合の解がえられ

$$S_{s1}=S_{s2}=S_{s3}=0$$

$\varepsilon_2=1$ とすれば，カッドが直接外気に接する場合の解がえられ

$$\alpha=-\frac{\varepsilon_1-1}{\varepsilon_1+1}, \quad \beta=0, \quad f_{s1}=f_{s2}=f_{s3}=0$$

また $\beta=-1$ とすれば，このケーブルをそのまま水に浸した場合の解がえられる。これからわかるように，(13)，(15) および (17) の第1項はシース厚が無限に厚い場合の解を与え，第2項はシース厚みが有限な事実に基ずく補正項とみなすこともできよう。

(2) 重信回線の場合

この場合，(12) の各級数はつぎのように書き直される。

$$S_{p1} \equiv -\alpha\frac{(a/R_1)^4}{1-(a/R_1)^8}+f_{p1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

$$f_{p1} \equiv \beta(1-\alpha^2)(a/R_2)^4\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(a/R_2)^{8n}}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^{8n+4}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (22)$$

$$S_{p2} \equiv -\frac{1}{4}\alpha\log\frac{1+(a/R_1)^4}{1-(a/R_1)^4}+f_{p2} \quad \cdots\cdots\cdots (23)$$

$$f_{p2} \equiv \beta(1-\alpha^2)(a/R_2)^4\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2(2n+1)}\frac{(a/R_2)^{8n}}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^{8n+4}} \quad \cdots (24)$$

級数 (21)～(24) の収斂は (13)～(18) に較べてさらにいつそう迅速である。以上の結果からあきらかな通り，重信回線の静電容量は，実回線の場合に較べ，カッド外周から受ける影響は著るしく少ない。

〔VI〕 漏洩コンダクタンス

ポリエチレンの誘電損失はきわめて微小なものであつて，この材料が通信ケーブル絶縁材料として賞用される理由の一つもこの点にあるわけであるが，しかし，このケーブルの周囲がビニルのように誘電体損失の大きな物質で包囲された場合，外周の影響を受けて伝送系の実効的な誘電正接 ($\tan\delta$) は著るしく増大する。いま，**第3図**の ε_1，ε_2 に微小な虚数部分が追加されたものとして複素静電容量を考え，分布アドミタンスを求めてその実数部分を漏洩コンダクタンスとする。すなわち，**第3図**の第1および2空間の $\tan\delta$ をそれぞれ δ_1，δ_2 とし，(13)～(18) または (21)～(24) において

$$\varepsilon_1\to\varepsilon_1(1-j\delta_1), \quad \varepsilon_2\to\varepsilon_2(1-j\delta_2)$$

の置換を施して複素静電容量 $\dot{C}$ を求め，δ_1 および δ_2 に関する高次の項をいつさい省略して

$$\dot{C}=C(1-j\delta_c), \quad (\delta_c\ll 1) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

が求められたものとする。線路の単位長当りの漏洩コンダクタンス G は

$$G=\delta_c\omega C \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (26)$$

で与えられ，δ_c は，この回線の見かけの $\tan\delta$ となる。

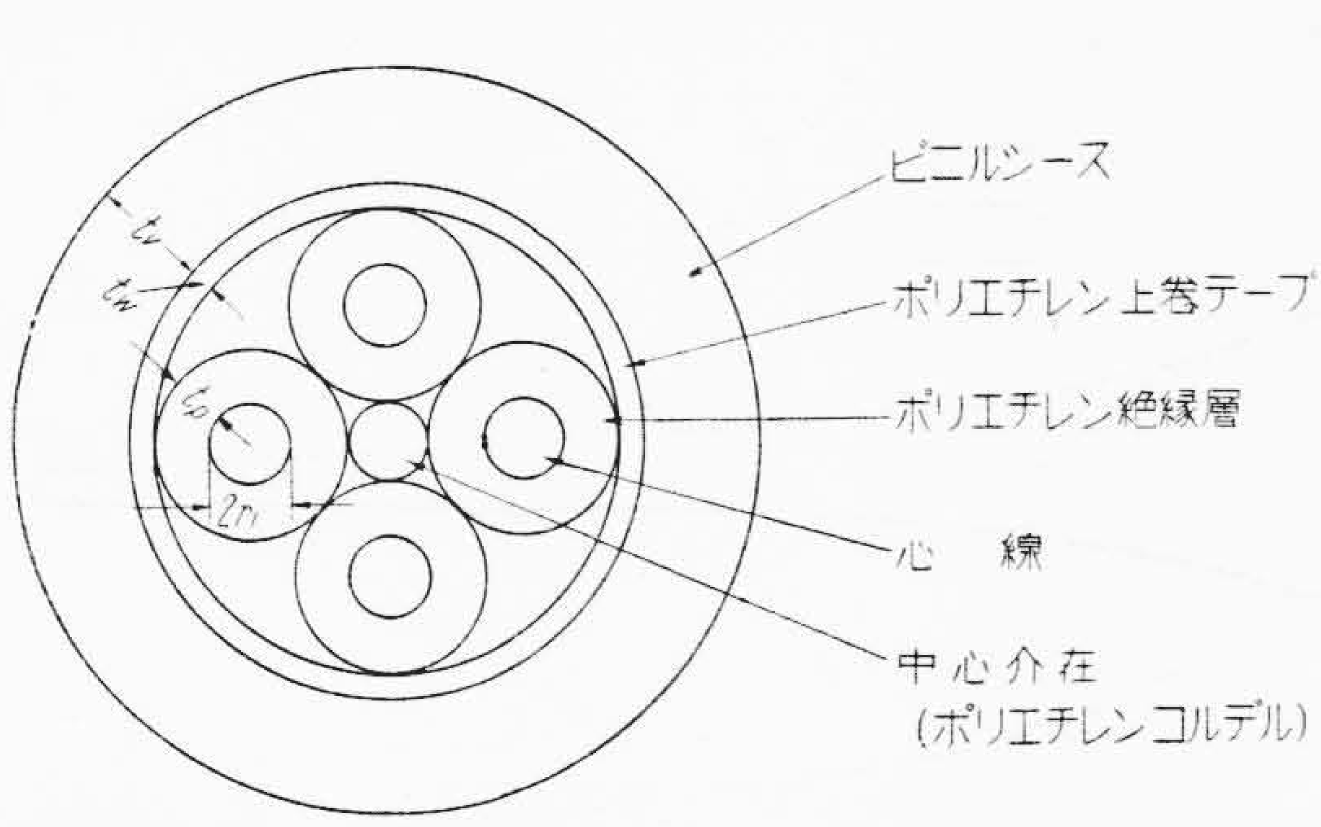
δ_1，δ_2 の値はいずれも微小なものであるから，(25)，(26) にあらわれる C は，誘電損失を無視して計算された静電容量に等しくなることはいうまでもない。δ_c の解析的な表示は相当に面倒であるが，多少の省略を行えば実用上ほぼ満足な近似式としてつぎの関係がえられる。

(1) 実回線の場合

$$\delta_c=\delta_1\{1-(N_1/D)\}+\delta_2(N_2/D)$$

$$N_1=(1-\alpha^2)(a/R_1)^2\Big[\Big\{1+\frac{1}{3}(a/R_1)^4\Big\} +2\alpha\beta\frac{(R_1/R_2)^2}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^2} -\beta^2(1-\alpha^2)\frac{(R_1/R_2)^4}{\{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^2\}^2}\Big]$$

$$N_2=(1-\alpha^2)(a/R_1)^2\Big[\Big\{1+\frac{1}{3}(a/R_1)^4\Big\} -(1-\beta^2-2\alpha\beta)\frac{(R_1/R_2)^2}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^2} -\beta\{\beta(1-\alpha^2)+\alpha(1-\beta^2)\}\frac{(R_1/R_2)^4}{\{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^2\}^2}\Big]$$



第4図 ポリエチレン絶縁ビニル被覆の星型カッドの断面
Fig. 4. Cross-Sectional View of PE-Insulated PVC-Covered Star Quad

ここでDは実回線の静電容量の表示式 (9) の分母を意味する。コア絶縁にポリエチレン，シースにビニルを用いる場合には，δ_2 は δ_1 に較べて著るしく大きいので，δ_1をふくむ項は完全に無視することができる。このとき (20) の関係が成立するものとすれば

$$N_2=0.768\,(a/R_1)^2\Big[\Big\{1+\frac{1}{3}(a/R_1)^4\Big\}-0.253\frac{(R_1/R_2)^2}{1-0.118(R_1/R_2)^2}-0.437\frac{(R_1/R_2)^4}{\{1-0.118(R_1/R_2)^2\}^2}\Big]$$

このように，この伝送系の実効的な $\tan\delta$ はシース材質の誘電正接によつて致命的に左右されてしまうことがわかる。

(2) 重信回線の場合

実回線の場合と同様

$$\delta_c=\delta_1\{1-(N_1/D)\}+\delta_2(N_2/D)$$

の関係が成立するものとすれば，

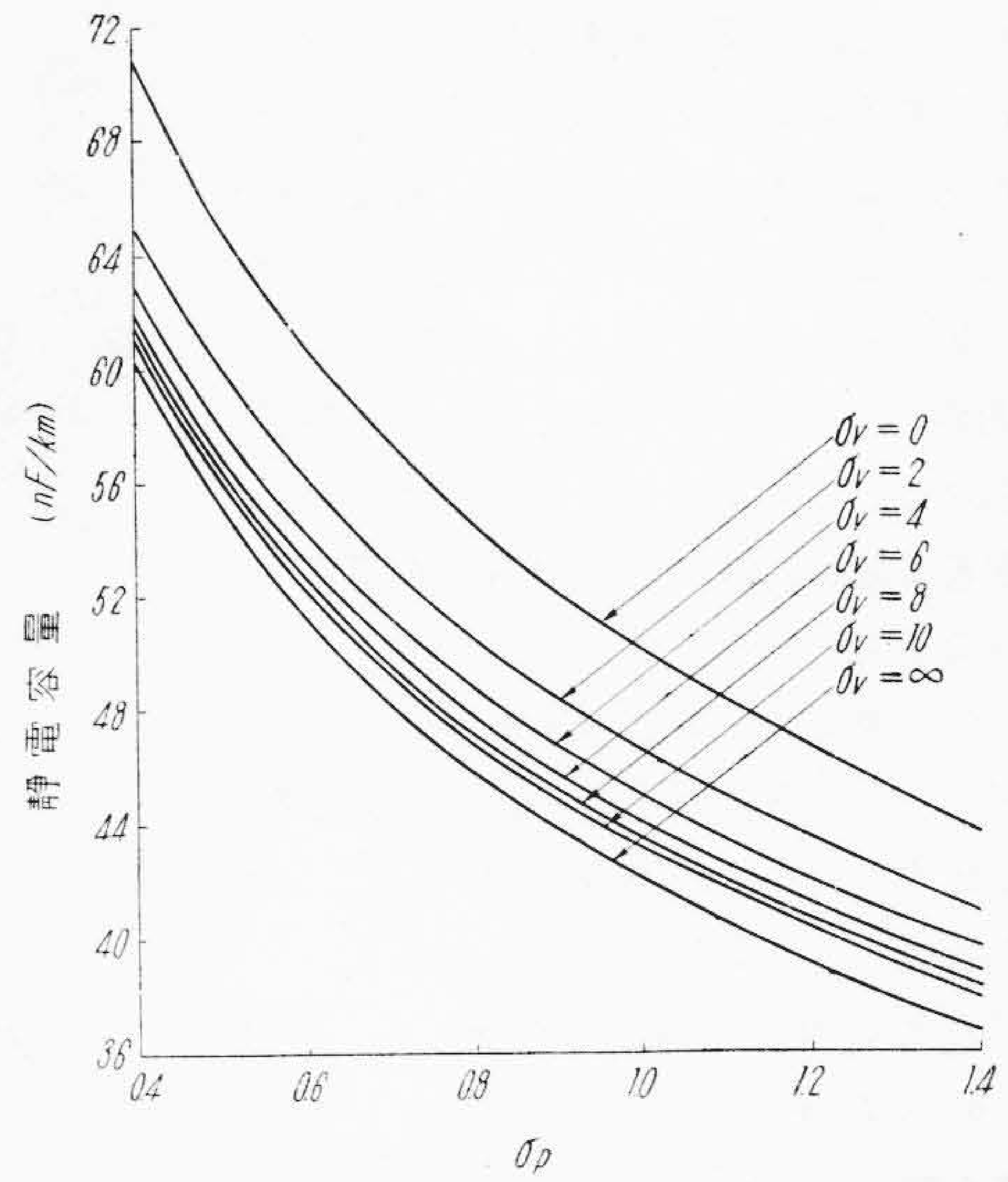
$$N_1=(1-\alpha^2)\,(a/R_1)^4\Big[1+4\,\alpha\beta\frac{(R_1/R_2)^4}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^4}-2\,\beta^2(1-\alpha^2)\frac{(R_1/R_2)^8}{\{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^4\}^2}\Big]$$

$$N_2=(1-\alpha^2)\,(a/R_1)^4\Big[1-2(1-\beta^2-2\,\alpha\beta)\frac{(R_1/R_2)^4}{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^4}-2\beta\{\beta(1-\alpha^2)+\alpha(1-\beta^2)\}\frac{(R_1/R_2)^8}{\{1-\alpha\beta(R_1/R_2)^4\}^2}\Big]$$

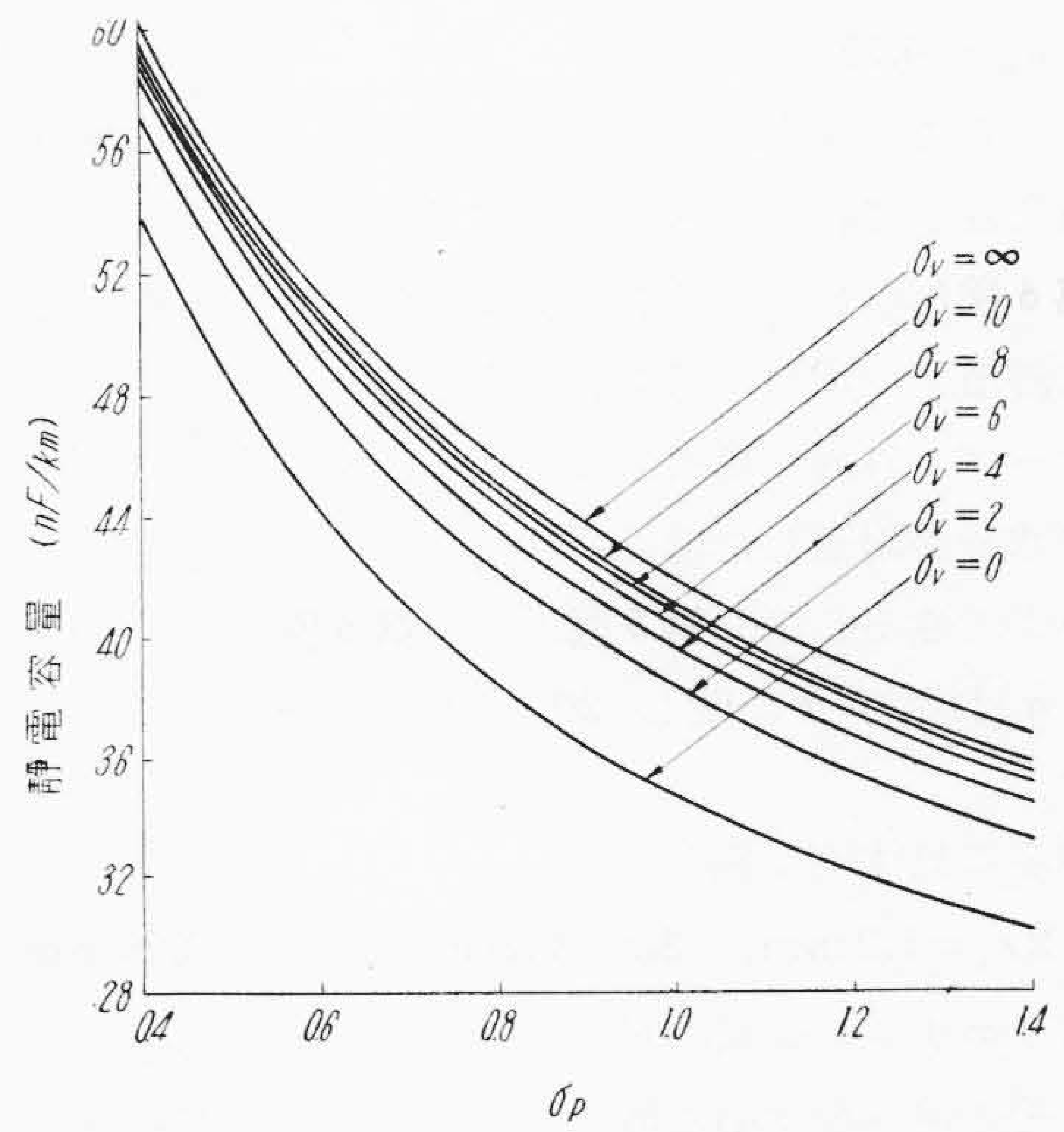
このときの D は重信回線の静電容量の表示式 (11) の分母を用いる。この回線では，シースの影響による誘電正接の増加は実回線の場合程著るしくはない。

〔VII〕 数 値 的 検 討

以上述べた通り，誘電体シースをもつ星型カッドの静電容量は，ケーブルの寸法，各誘電体の誘電率の値などによつて複雑に変化するものであつて，すべての場合を包



第5図 実回線の静電容量と σ_v および σ_p との関係
Fig. 5. Numerical Values of Electrostatic Capacity of Side Circuit of Our Cable, as Function of σ_v and σ_p



第6図 ケーブルを水に浸したときの実回線の静電容量と σ_v および σ_p との関係
Fig. 6. Numerical Values of Electrostatic Capacity of Side Circuit of Our Cable, as Function of σ_v and σ_p, when It Is Immersed in Water

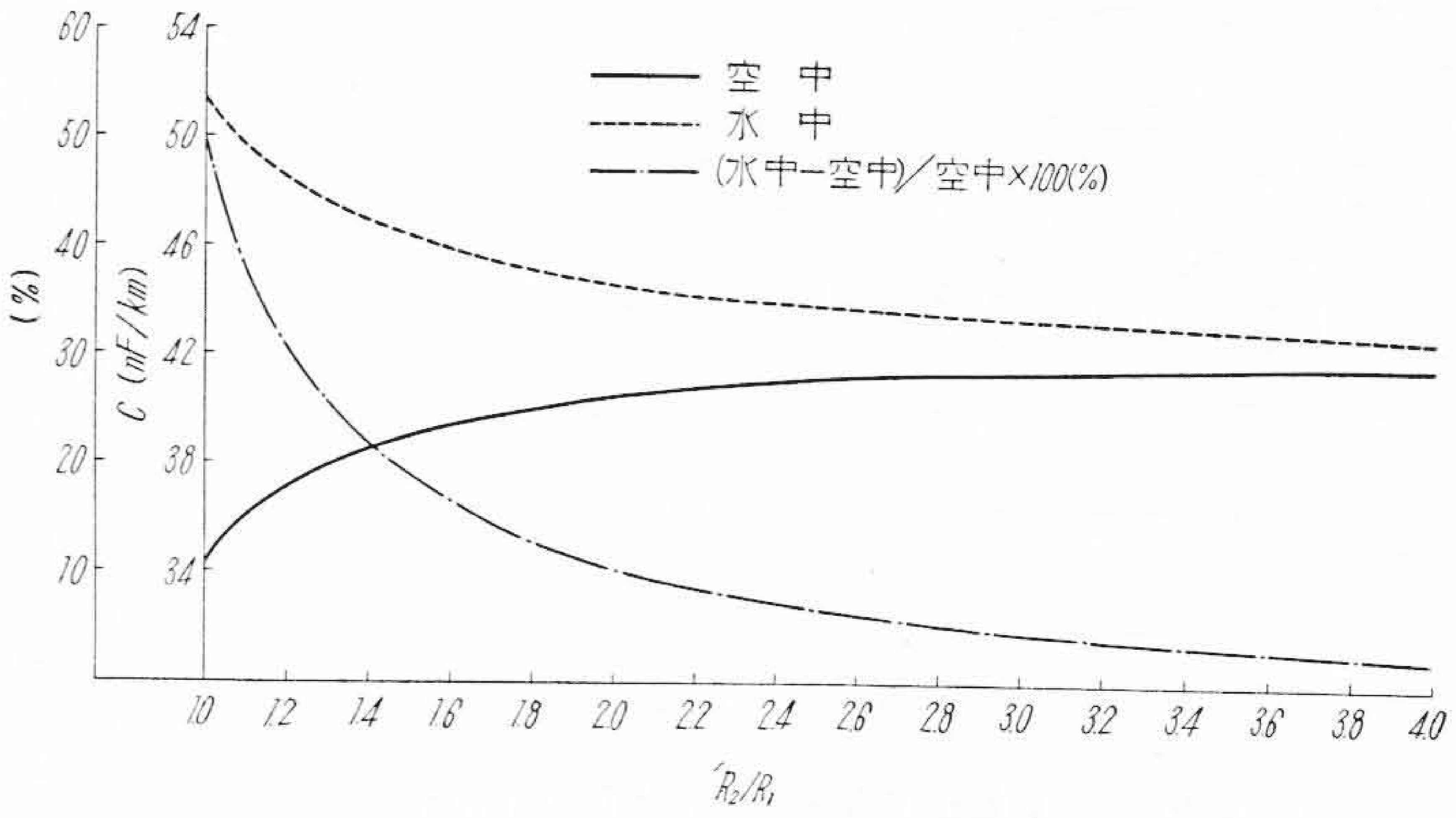
括する数値例を示すことは難かしい。ここでは実際に問題となるポリエチレン絶縁ビニル被覆の星型カッドの場合に議論を集中することにする。日立製作所製のヒョウタン型2対ケーブルにおいては，上述の構造の近くを0電位の鋼線が走ることになるが，鋼線の影響はそれ程大きくないと考えて一まずこれを度外視することにする。

さてこのケーブルの構造は**第4図**に示す通りで，ポリ

エチレン絶縁の素線を4箇撚りした上からポリエチレンの上巻テープをまき，その上からビニルで同心円筒状に被覆されている。このポリエチレンの上巻テープは，カッドの崩れを防止するほか，シース押出作業の際，ポリエチレンが加熱軟化されたりビニルがカッド内部に浸入して静電容量が異常に増大するのを阻止するのに効果がある。

いま心線半径をr_i，ポリエチレン絶縁層および上巻層の厚みをそれぞれt_p，t_wまたビニルシースの厚みをt_vとし，r_iを基準長としてつぎの諸量を定める。

$$\sigma_p \equiv t_p/r_i, \quad \sigma_w \equiv t_w/r_i, \quad \sigma_v \equiv t_v/r_i$$



第7図 PVC シース厚みを増加してゆくときの静電容量の変化

Fig. 7. Variation of Electrostatic Capacity, when Thickness of PVC-Sheath Is Increased

第5図（前頁参照）はこのケーブルの実回線の静電容量を，σ_vをパラメータにとり，σ_pの函数として図示したものである。このとき上巻層の厚さσ_wをいかに選ぶかが問題となるが，ここでは製造上価格上などの条件を考えて

$$\sigma_w = 0.75$$

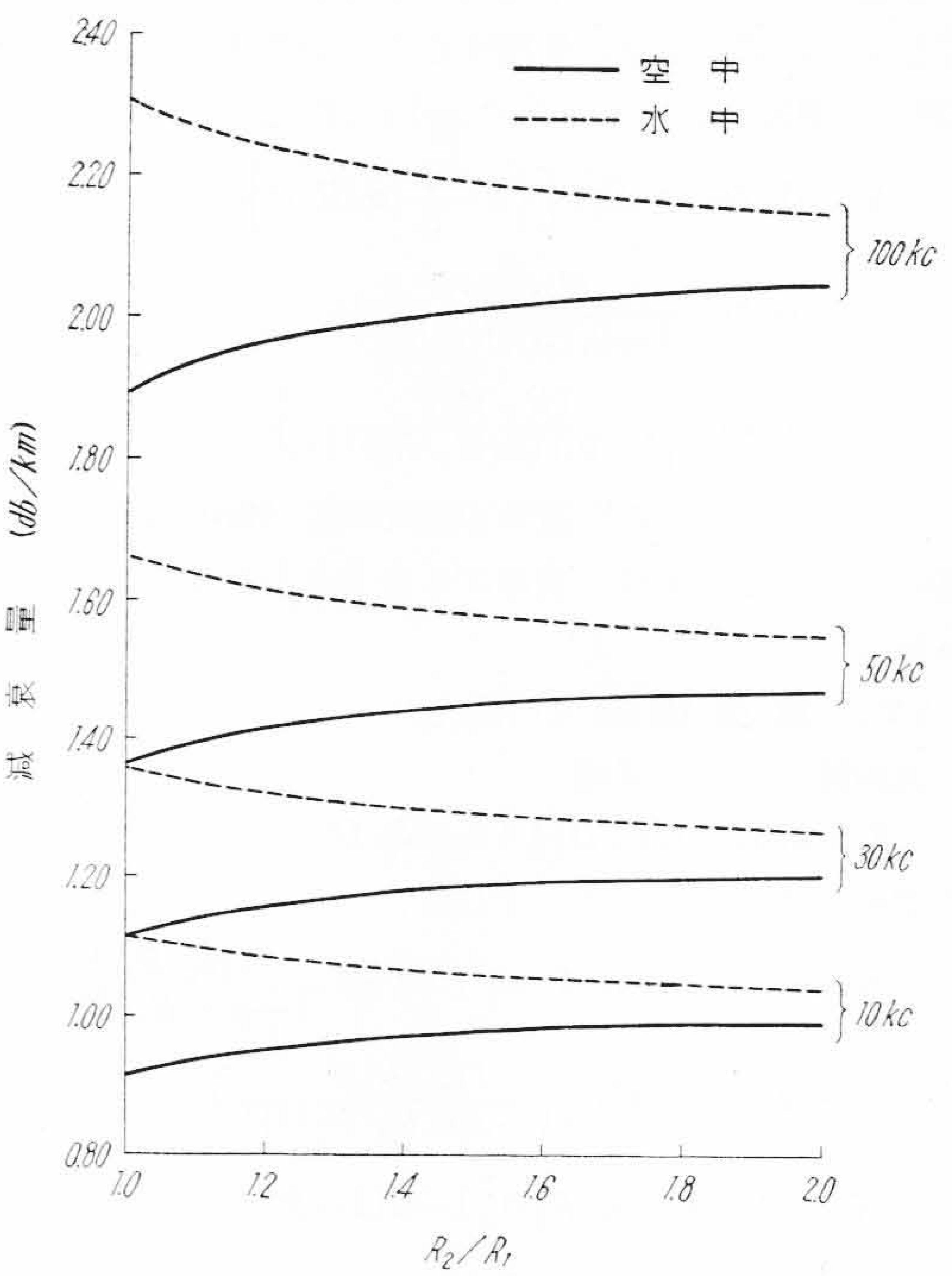
とした。この図表より任意の設計例についての静電容量をほぼ満足に推定することができる。

第6図（前頁参照）はこの構造のケーブルをそのまま水中に浸漬した場合の静電容量を示しているが，この図からケーブル外周に積雪結氷が生じたり，豪雨によつて多量の水分が附着した場合の伝送定数の変化量を予知することができる。なお**第5図**および**第6図**の作成においては，αおよびβに関し(20)の関係が成立するものと考えた。

さらに具体的な例として

$$2r_i = 1.2\,\mathrm{mm}, \quad 2a = 3.39\,\mathrm{mm}, \quad R_1 = 3.25\,\mathrm{mm}$$

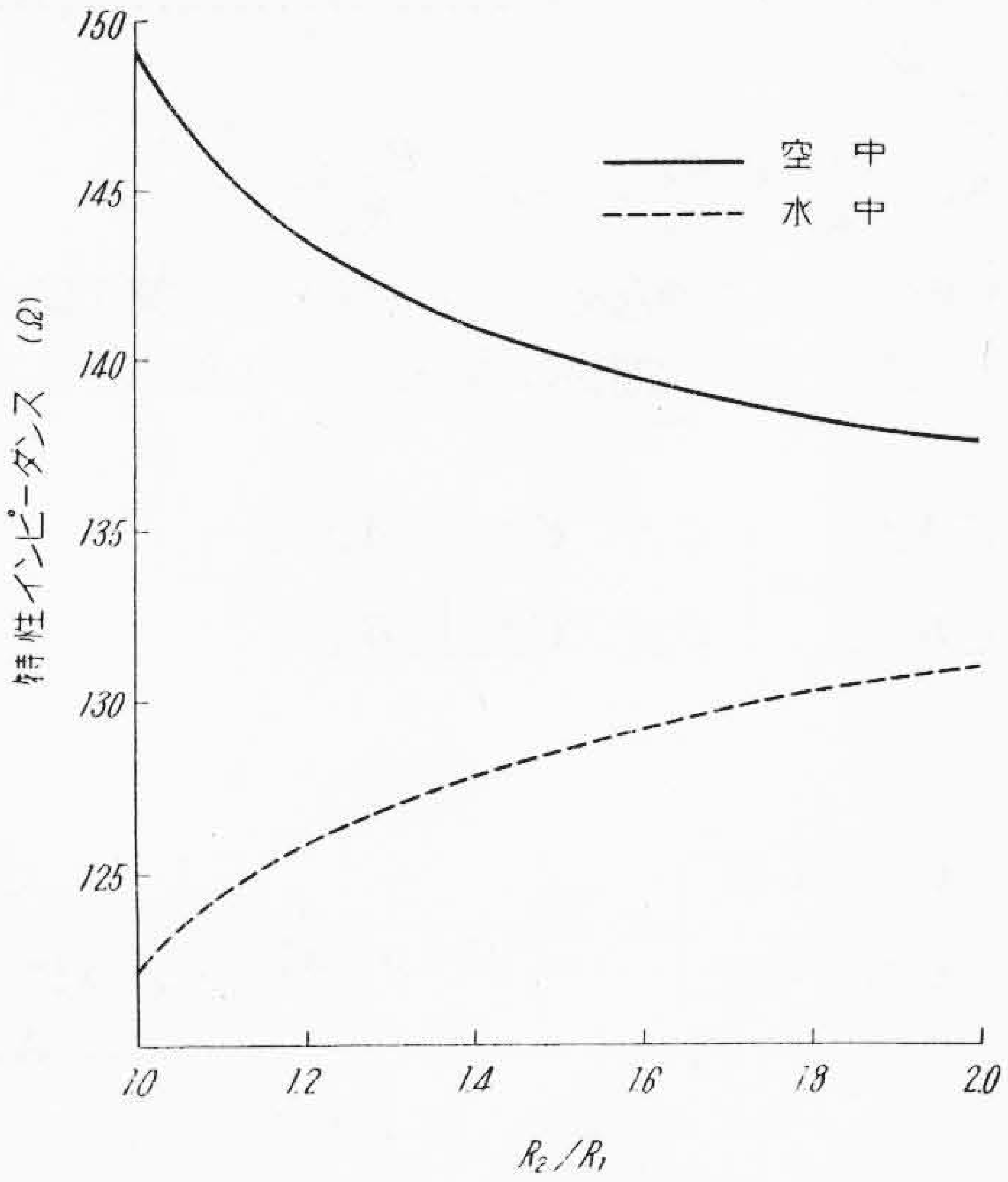
のポリエチレン絶縁の星型カッドの上をビニルで被覆し，その厚みを次第に増加してゆくとき静電容量の変化する傾向を**第7図**に示した。実線はこのケーブルを空中に吊した場合，破線はこれを水中に浸した場合の値を示している。さらに鎖線は，このケーブルを空中に吊した場合の値を基準に取り，これを水中に浸した場合の静電容量の増加率を%で示したものである。これより理解される通り，ビニル厚みの増加に基ずく静電容量の変化は，初めのうちは著るしいが次第に飽和する傾向をたどっており，水中に浸した場合の静電容量の増加率にも同様の傾向が認められる。すなわち，空中および水中の静電容量の変化を小さく保つためにビニルシースの厚みを増大させてゆく場合，ある一定の厚さ以上はその効果はあまり顕著でなくなつてくることがわかる。



第8図 減衰定数とR_2/R_1の関係

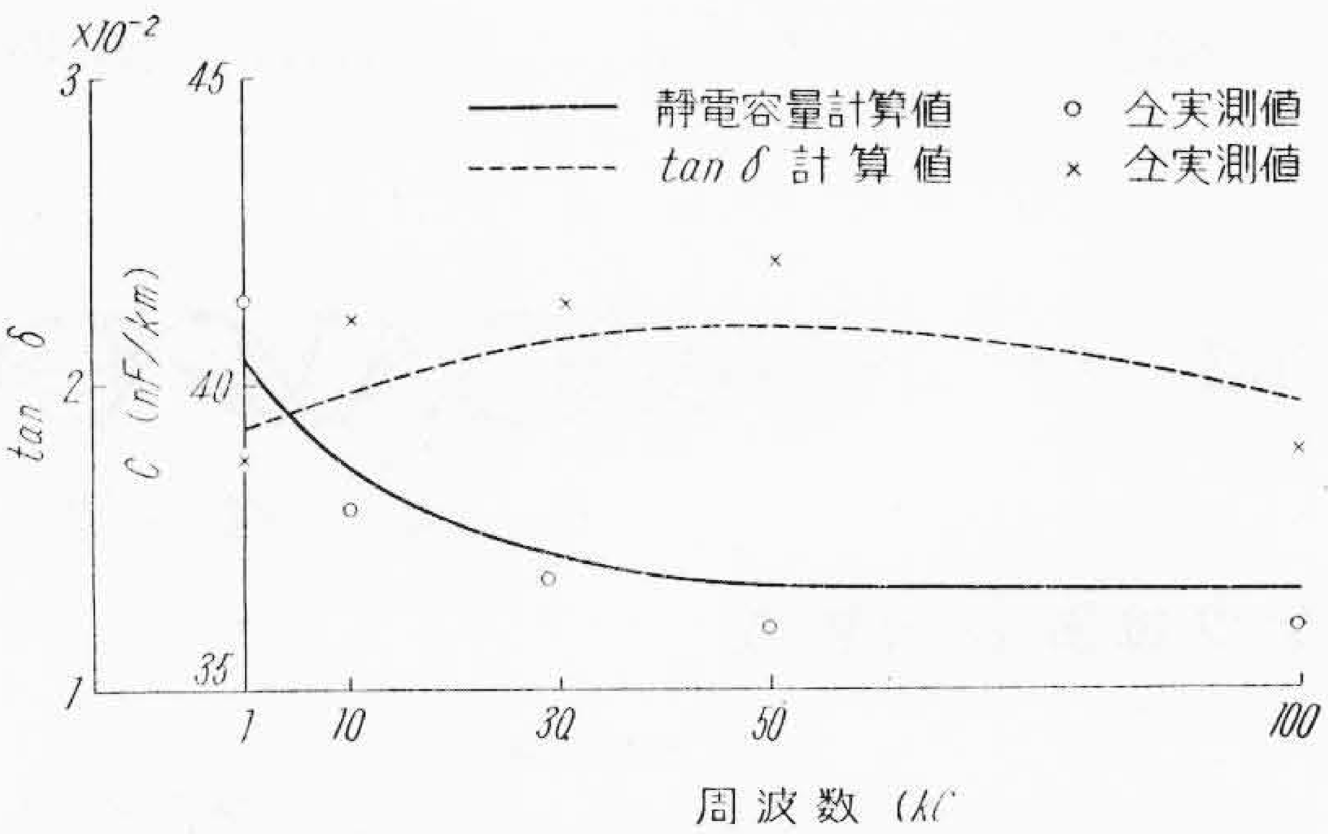
Fig. 8. Relation between Attenuation Constant and R_2/R_1

また**第8図**および**第9図**はこのケーブルの減衰定数および特性インピーダンス(30 kc)の値を空中（実線）および水中（破線）の場合について示したものである。これより理解される通り，ビニルシースをもたない場合，空中（晴天）および水中（雨雪天）の場合の2次定数の変化は20% 以上にもおよぶが，ビニルシースを被せることによつてその変化率を5% 前後に喰い止めることが実用的に可能である。



第9図　特性インピーダンス (30 kc) と R_2/R_1 との関係

Fig. 9. Relation between Characteristic Impedance (30 kc) and R_2/R_1



第10図　静電容量および $\tan\delta$ の周波数特性計算値と実測値との対比

Fig. 10. Frequency Characteristics of Electrostatic Capacity and $\tan\delta$ Together with Observed Values

第9図には

$2r_i=1.2\,\mathrm{mm}$,　$2a=3.39\,\mathrm{mm}$,

$R_1=3.25\,\mathrm{mm}$,　$R_2=6.5\,\mathrm{mm}$

の試料について，実回線の静電容量および誘電正接の周波数特性の計算値が実測値とともに示されている。静電容量および誘電正接に周波数特性が現らわれるのは，ビニルの材料定数が周波数とともに変化するためである。また伝送系の実効的な誘電正接の値は 10^{-2} の程度となつてポリエチレンのそれに較べて著るしく大きいが，これは外周のビニルの損失に基ずくことはさきに述べた通りである。しかし，100 kc 以下の周波数範囲では，この程度の誘電正接の増加は致命的な障害とはならない。

〔VIII〕 結　　言

以上，保護被覆をもつ星型カッドの静電的問題について，種々の観点より定量的な考察を行つて来たが，これらを要約すればつぎのようになる。

(1)　星型カッドの周りを数層の誘電体が取り巻いている場合の静電容量の計算式を求め，その特殊例としてシースが一層だけの場合の計算式を誘導した。

(2)　コア絶縁材質にポリエチレン，シース材質にビニルを用いた場合，任意の設計例について伝送系の静電容量が直ちに求められるように図表(**第5図**)を作成した。

(3)　同上ケーブルを水中に浸した場合の静電容量は**第6図**に示される。これより雨雪天時の定数の変動を予知することができる。

(4)　ビニルシースの影響を受けて伝送系の誘電正接は著るしく増大し，ポリエチレンの低誘電損失特性は喪失する。しかし，100 kc 以下の周波数範囲では致命的な障害とはならない。

以上あきらかにされた通り，星型カッドの上から保護被覆を設けることは，単に伝送系を外傷から保護するばかりでなく，雨雪天時における定数の変動を十分小さな範囲におさえる効果があり，減衰定数の増大の原因となる金属遮蔽を省いても，安定した通信を行うことができる。最近話題を呼んでいる R.D ケーブル (Rural Distribution Wire) では，このような保護被覆を用いない構造が標準型となつており，したがつて雨雪天時の伝送定数の変動がはなはだしい旨報告されているが[8]，この点，日立製作所製のヒョウタン型小対ケーブルのように保護被覆をもつ構造のものは，はるかに安定した実用特性をもつものといえる。

最後に，本研究に対し御指導御激励を頂いた日立製作所日立電線工場久本試作課長，取纒めに一方ならぬ御手数をわずらわした試作課野原氏に対し，厚く御礼申上げる。

参　考　文　献

(1)　C. C. Lawson: B.L.R., **32** 167 (1954)
(2)　H. Kaden: E.F.D., **52** 174 (1939)
(3)　H. Meinke: E.N.T., **17** 42 (1940)
(4)　楊: 信学誌, **24** 700 (昭 15-12)
(5)　F. Sommer: E.N.T., **17** 281 (1940)
(6)　H. Meinke: E.N.T., **17** 86 (1940)
(7)　北岡: 住電彙報, **30** 55 (昭 18-10)
(8)　山口，朴木，鈴木: 昭. 30. 電気通信学会秋季大会予稿, 189 (昭 30-10)

附　　録

本文**第1図**の第1空間の中心位置に n 位の多極子をお

き，そのポテシャルを

$$\Phi_0 = B_n^{(1)}\left(\frac{a}{r}\right)^n \cos n\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.1)$$

とする。$B_n^{(1)}$ および a はそれぞれポテシャルおよび長さの元をもつ常数とする。第 s および $s+1$ 空間 ($s=1$, 2, ..., m) 内のポテシャルを

$$\Phi_s = \left\{A_n^{(s)}\left(\frac{r}{R_{s-1}}\right)^n + B_n^{(s)}\left(\frac{R_{s-1}}{r}\right)^n\right\}\cos n\theta$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.2)$$

$$\Phi_{s+1} = \left\{A_n^{(s+1)}\left(\frac{r}{R_s}\right)^n + B_n^{(s+1)}\left(\frac{R_s}{r}\right)^n\right\}\cos n\theta \quad \cdots\cdots\cdots (A.3)$$

(ただし　$R_0 \equiv a$)

であらわし，$A_n^{(s)}$，$B_n^{(s)}$；$A_n^{(s+1)}$，$B_n^{(s+1)}$ の間の関係をつぎの境界条件により定める。

$$\Phi_s = \Phi_{s+1},\quad (r=R_s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.4)$$

$$\varepsilon_s\frac{\partial \Phi_s}{\partial r} = \varepsilon_{s+1}\frac{\partial \Phi_{s+1}}{\partial r},\quad (r=R_s) \quad \cdots\cdots (A.5)$$

(A.2)，(A.3) の関係を (A.4)，(A.5) に代入して展開係数間の関係を代数的に求め，これをマトリクスの型で表示すれば

$$\begin{bmatrix} A_n^{(s+1)} \\ B_n^{(s+1)} \end{bmatrix} = \frac{1}{(1+\alpha_s)x_s^n}\begin{bmatrix} 1 & \alpha_s x_s^{2n} \\ \alpha_s & x_s^{2n} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_n^{(s)} \\ B_n^{(s)} \end{bmatrix}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.6)$$

ここで

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_{s+1}-\varepsilon_s}{\varepsilon_{s+1}+\varepsilon_s},\quad x_s \equiv \frac{R_{s-1}}{R_s}$$

(A.6) の関係を繰返えして応用すれば，**第1図**の最内および最外空間の展開係数間にはつぎの関係のあることがわかる。

$$\begin{bmatrix} A_n^{(m)} \\ B_n^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{(n)} & C_{12}^{(n)} \\ C_{21}^{(n)} & C_{22}^{(n)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_n^{(1)} \\ B_n^{(1)} \end{bmatrix}$$

ここで

$$\begin{bmatrix} C_{11}^{(n)} & C_{12}^{(n)} \\ C_{21}^{(n)} & C_{22}^{(n)} \end{bmatrix} \equiv \prod_{s=1}^{m-1}\frac{1}{(1+\alpha_s)x_s^n}\begin{bmatrix} 1 & \alpha_s x_s^{2n} \\ \alpha_s & x_s^{2n} \end{bmatrix}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.7)$$

このマトリクスの掛算は，第1空間より出発して逐次外側へ向つて掛けてゆくものとする。$A_n^{(1)}$ は第1空間におよぼす外周の反作用界を与える。最外空間(第 m 空間)で $\Phi_m=0$ $(r\to\infty)$ の条件が満足されるためには

$$A_n^{(m)} = C_{11}^{(n)}A_n^{(1)} + C_{12}B_n^{(1)} = 0$$

の関係が満足されなければならない。すなわち

$$A_n^{(1)} = -\frac{C_{12}^{(n)}}{C_{11}^{(n)}}B_n^{(1)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.8)$$

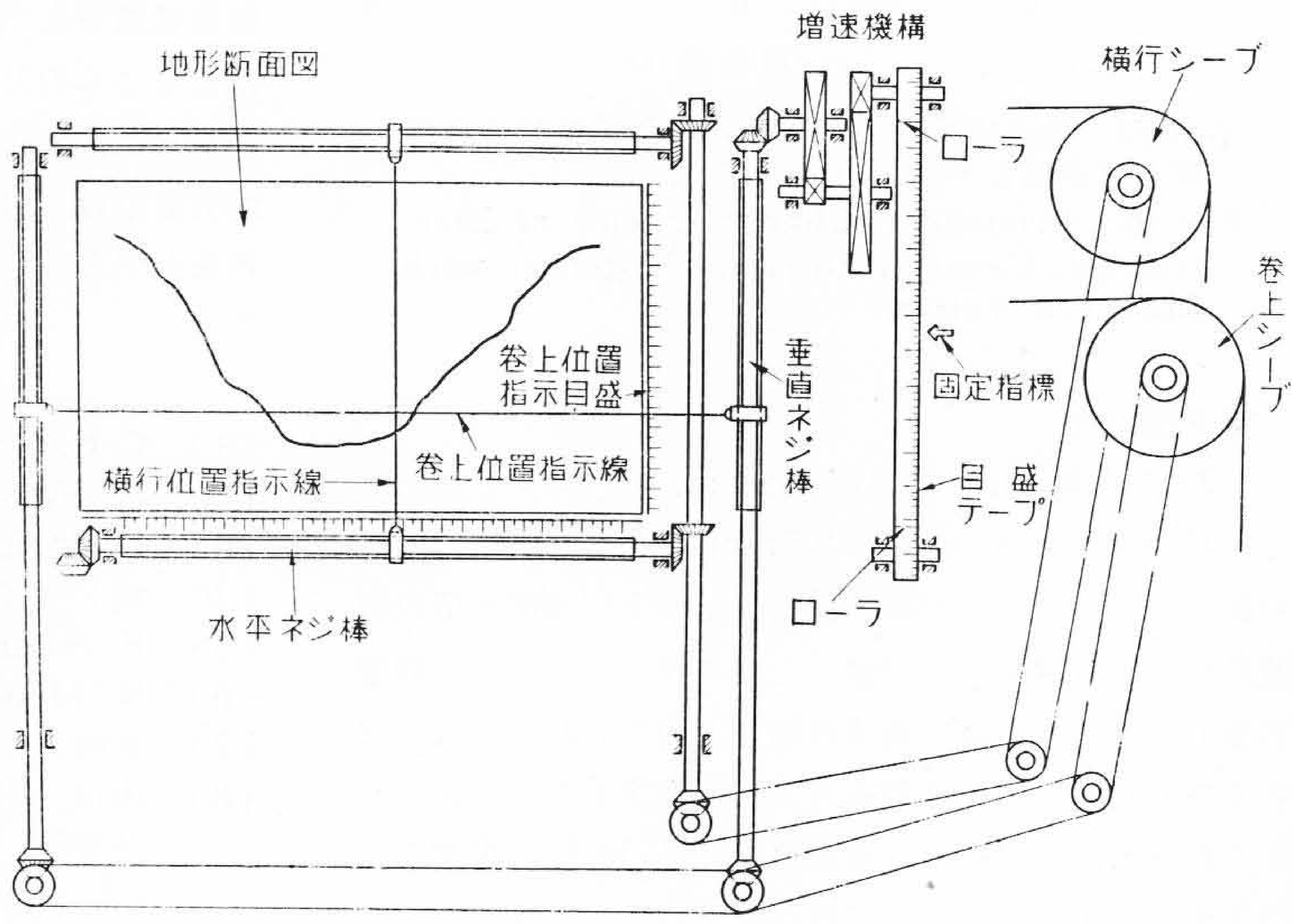
新案の紹介

実用新案　第427380号　　　　松崎直忠

ケーブル起重機用バケツ位置表示装置

ケーブル起重機では，普通巻上ドラムおよび横行ドラムの回転にそれぞれ連動して地形断面図上を移動する巻上位置指示線および横行位置指示線の交点でバケツの位置を表示して運転を行つている。しかし，これではバケツの位置を精密に認識することはなかなかむずかしい。

この考案は，前記装置に拡大指示装置を附加してバケツの位置を正確に表示することができるようにしたものである。すなわち，ネジ棒の運動を増速機構を経てローラあるいはスプロケットホイルに伝え，これと他方に設けたローラとの間に目盛テープを掛け，これに対して固定指標を設けたものである。



このようにして，バケツが所定位置をとつた場合の目盛を巻上位置指示目盛および目盛テープについて正確に読みとり位置決めしておく。その位置に対して，巻上位置指示目盛で大体の位置まで運転した上，さらに目盛テープで所定目盛を指示するまで運転することにより，常にバケツを正確に巻上所定位置で停止させることができる。横行の位置についても同様である。

(富　田)