

バロン形搬送ケーブルの特性

Characteristics of Ballon Type Carrier Telephone Cables

今 沢 正 博* 高 山 啓 一**
Masahiro Imazawa Keiichi Takayama

岩 崎 直 之** 田 中 真 喜 彦**
Naoyuki Iwasaki Makihiko Tanaka

要 旨

バロン形絶縁方式は初め細心同軸ケーブル用として開発されたものであるが、実効誘電率が小さいため低容量・低損失であるなどの利点を生かして、同軸ケーブルだけでなく市外搬送ケーブルなどの平衡ケーブルにも適用することが可能である。その製品化に際し、二次定数・漏話特性および遮蔽(しゃへい)テープの高周波損失に及ぼす影響の検討を行なった。

結果を要約すれば、紙コルデル絶縁より 10%、発泡(ぼう)ポリエチレン絶縁より 25% 程度の低損失な特性を有し、漏話特性は従来のものと同等以上のバロン形絶縁搬送ケーブルが開発され広い用途に使用されている。

1. 緒 言

バロン形絶縁平衡ケーブルは実効誘電率が 1.3~1.4 と紙や発泡ポリエチレン (PEF) に比べて小さく、低容量・低損失であるため線路長の長い電話回線への使用および市外・搬送用として音声周波数から搬送周波数まで広い利用が可能である。また、中部電力株式会社から長距離回線用の低損失ケーブルの開発を要望されたので以下の検討を行なった。

従来、搬送ケーブルとしては、PEF、紙コルデル絶縁ケーブルが用いられており、これらの電氣的諸特性はすでにいろいろ紹介されている。本研究は従来の搬送ケーブルと同等以上の性能をもつバロン形絶縁平衡ケーブルを製造するための設計資料を得ることおよび特性の向上を目的としている。種々の試作ケーブルの二次定数を測定、比較検討を行ない、特性の向上、安定化を図った。以下それらの検討結果について述べる。

2. ケーブル構造

平衡ケーブルの設計に際し、まず問題となることは導体の絶縁構造であり、特に搬送周波数においてはこの絶縁方法がケーブル回線の減衰および漏話特性を決定する大きな要因となる。この絶縁体に要求される条件としては次のことがあげられる。

- (1) 導体への被覆が容易なこと
- (2) 誘電率が小さい材質・構造であること
- (3) 占積率を良くするため外径を小さくできること
- (4) 特性が安定であること

バロン形絶縁方式は、その被覆の押出しが一工程で容易である。また、誘電率は 1.3~1.4 と紙コルデル、PEF 絶縁に比べても小さい。バロン形絶縁ケーブルの減衰量は、同一導体径の PEF 絶縁ケーブルの約 75% であり、同じ減衰量とするときは PEF の 85% 程度に細くすることができる。機械的特性に関しては後述するが、架設の際に受ける力に対してじゅうぶん安定なものが得られている。以上からバロン形絶縁方式が同軸ケーブルだけでなく平衡形ケーブルの絶縁にも適していることがわかる。

次に、心線径と絶縁体外径は要求される静電容量、減衰量、導体抵抗などに応じて決まるもので、図 1 に示した星形カッドの場合の静電容量 C の簡略式は多対ケーブルでは次式となる。

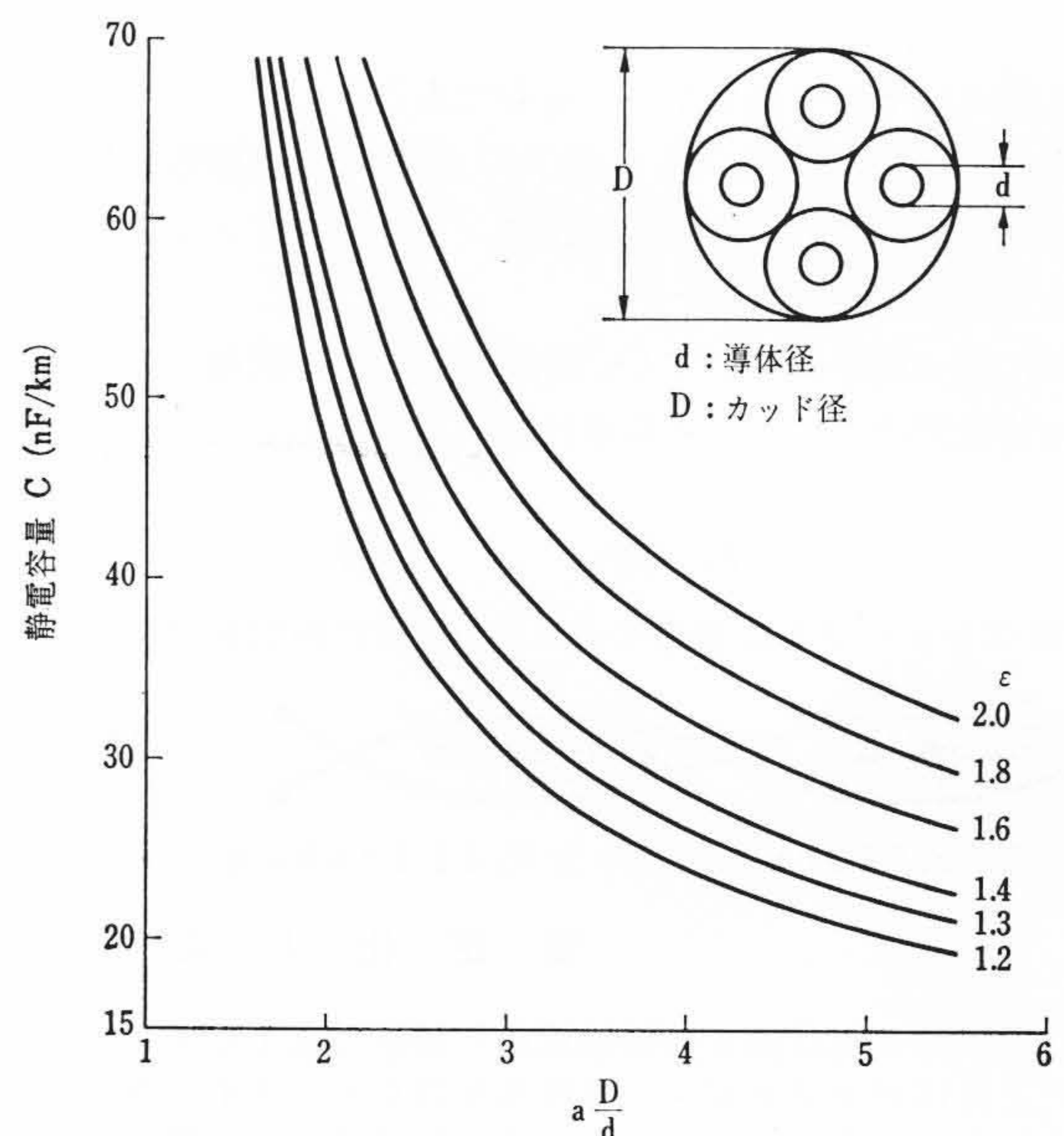


図 1 星形カッドケーブルの静電容量と占積率の関係

$$C = \frac{12.1 \epsilon}{\log_{10} \left(a \frac{D}{d} \right)} \quad (\text{nF/km}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

a : より形状係数 対 $a = 0.94$
星形カッド $a = 0.75$
DM形カッド $a = 0.65$

ϵ : 実効誘電率
(1)式の C , ϵ および

$$\left(a \frac{D}{d} \right)$$

の関係は図 1 に示すとおりである。このうち絶縁構造と製造上の要因から ϵ が決まるので、所定の静電容量を得るためには

$$\left(a \frac{D}{d} \right)$$

をいくらしなければならないかが決まる。また、減衰量は導体抵抗によるところが大きく、この要求から最適な導体径が決定する。この導体径としては $0.9 \text{ mm}\phi$ と $1.2 \text{ mm}\phi$ を採用した。静電容量はできるだけ小さくなるようかつ図 1 からわかるとおり、ある程度以上カッド径を大きくしてもききめが少ないことから、絶縁体外径を

* 日立電線株式会社研究所
** 日立電線株式会社日高工場

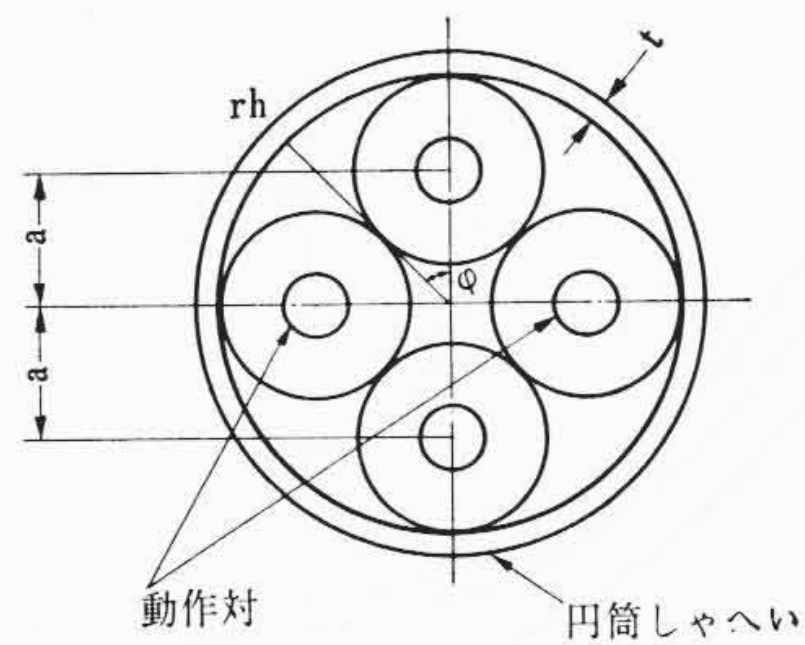


図2 対および同心の円筒遮蔽の配置図

導体径 $0.9\text{ mm}\phi$ には $2.0\text{ mm}\phi$, $1.2\text{ mm}\phi$ には $3.0\text{ mm}\phi$, $3.6\text{ mm}\phi$ の2種を設計した。

ケーブル集合後、静電遮蔽層を設けることが必要で、この材料としては銅またはアルミテープ、金属化紙などが一般に使われており、簡単にしかも完全な遮蔽効果が得られている。ただし、遮蔽層内に渦流が生ずることによって回線の抵抗増加をきたすので、少対ケーブルや多対ケーブルの外層の対においては問題となる。つまり、ケーブルに要求される減衰量規格を満足させるため、遮蔽層の材質や厚さなど適切な構造の選択が必要である。この資料を得るため1.2/3.6バロン形絶縁2対ケーブルの遮蔽テープとして0.1mm厚軟銅テープ、0.1mm厚アルミテープ、金属化紙(0.025mm厚アルミテープと等価)をそれぞれ1/3ラップ巻きしたときの抵抗および減衰量の測定値と理論値⁽¹⁾の対応を行なった。

平行導体中心と同心の円筒遮蔽がある図2の場合について抵抗の増加を考える。動作対以外の導体および金属体がないときの任意点(座標, r, φ)の動作単位電流あたりのベクトルポテンシャルを A_0 とすれば

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \left(\frac{a}{r}\right)^{2n+1} \sin(2n+1)\varphi \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。遮蔽内側空間のベクトルポテンシャル A_1 はこれに遮蔽による反作用磁場のベクトルポテンシャル A_r を加えて

$$A_1 = A_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n}{(2n+1)} r^{2n+1} \sin(2n+1)\varphi \quad (r \leq r_h) \dots\dots\dots (3)$$

から得られる。次に、遮蔽層内のベクトルポテンシャル A_h は次式となる。

$$A_h = \sum_{n=0}^{\infty} a_n H_{2n+1}^{(1)}(k_h r) \sin(2n+1)\varphi \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 c_n, a_n : 境界条件より決まる定数

$H^{(1)}$: 第1種のHankel関数

$k_h = \sqrt{j \frac{4\pi\omega\mu_m}{\rho_h}}$: 遮蔽による固有伝播定数

ρ_h : 遮蔽層の導電率 (C. G. S. emu)

μ_m : 比導磁率

$\omega = 2\pi f$: 角周波数

f : 周波数 (Hz)

c_n, a_n を決定する境界条件としては、境界 $r=r_h$ および $r=r_h+t$ (遮蔽層の厚さを t とする) における磁場の接線成分の連続性

$$\frac{\partial A_1}{\partial r} = \frac{\partial A_h}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

磁気誘導の法線成分の連続性

$$\frac{\partial A_1}{r \partial \varphi} = \frac{1}{\mu_m} \frac{\partial A_h}{r \partial \varphi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

から反作用磁界と透過磁界が決定される。これより求められた薄い円筒遮蔽による増加抵抗 R_h およびインダクタンス L_h は次式となる。

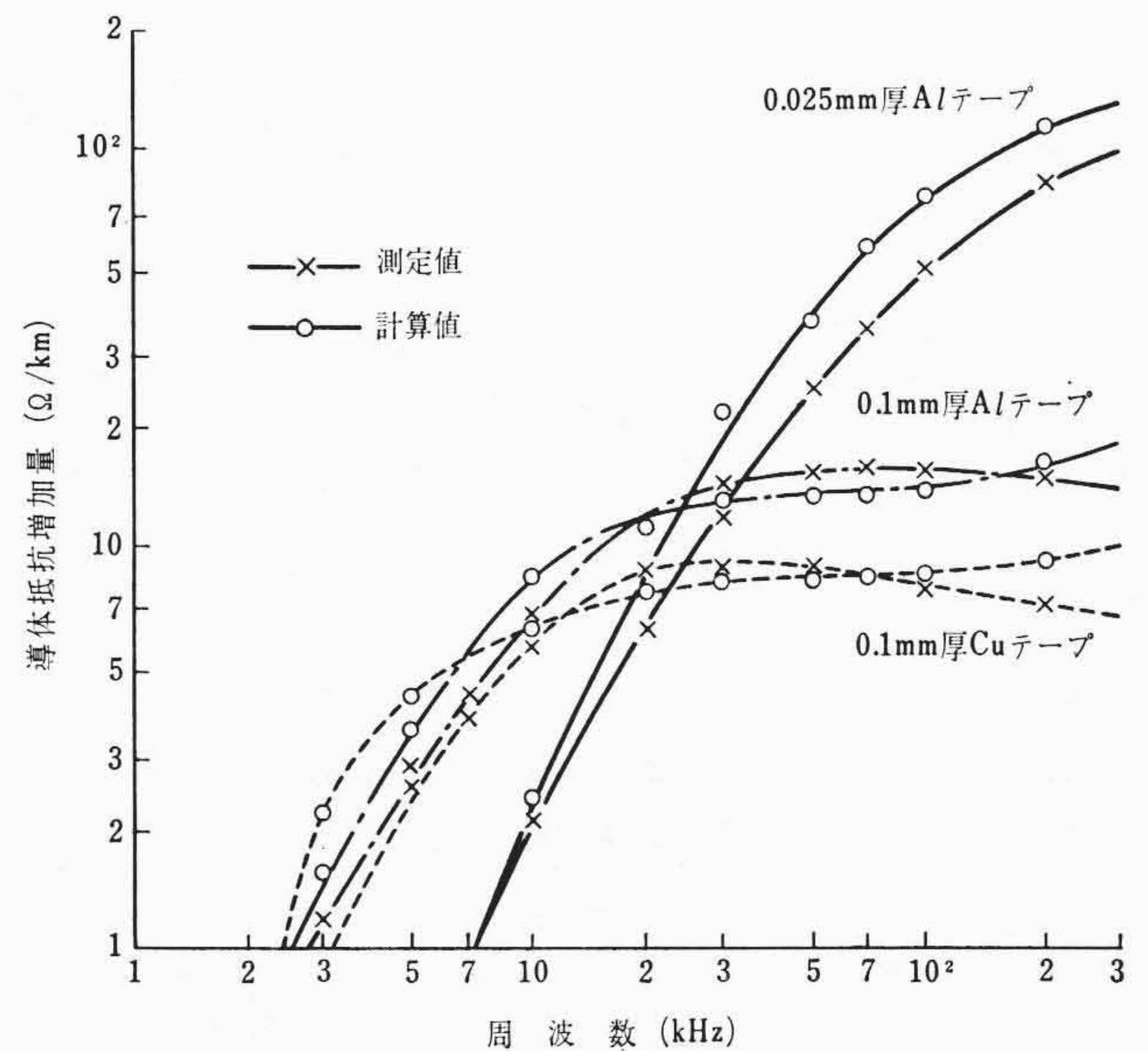


図3 1.2/3.6バロン形2対ケーブルの遮蔽テープによる導体抵抗増加量の比較

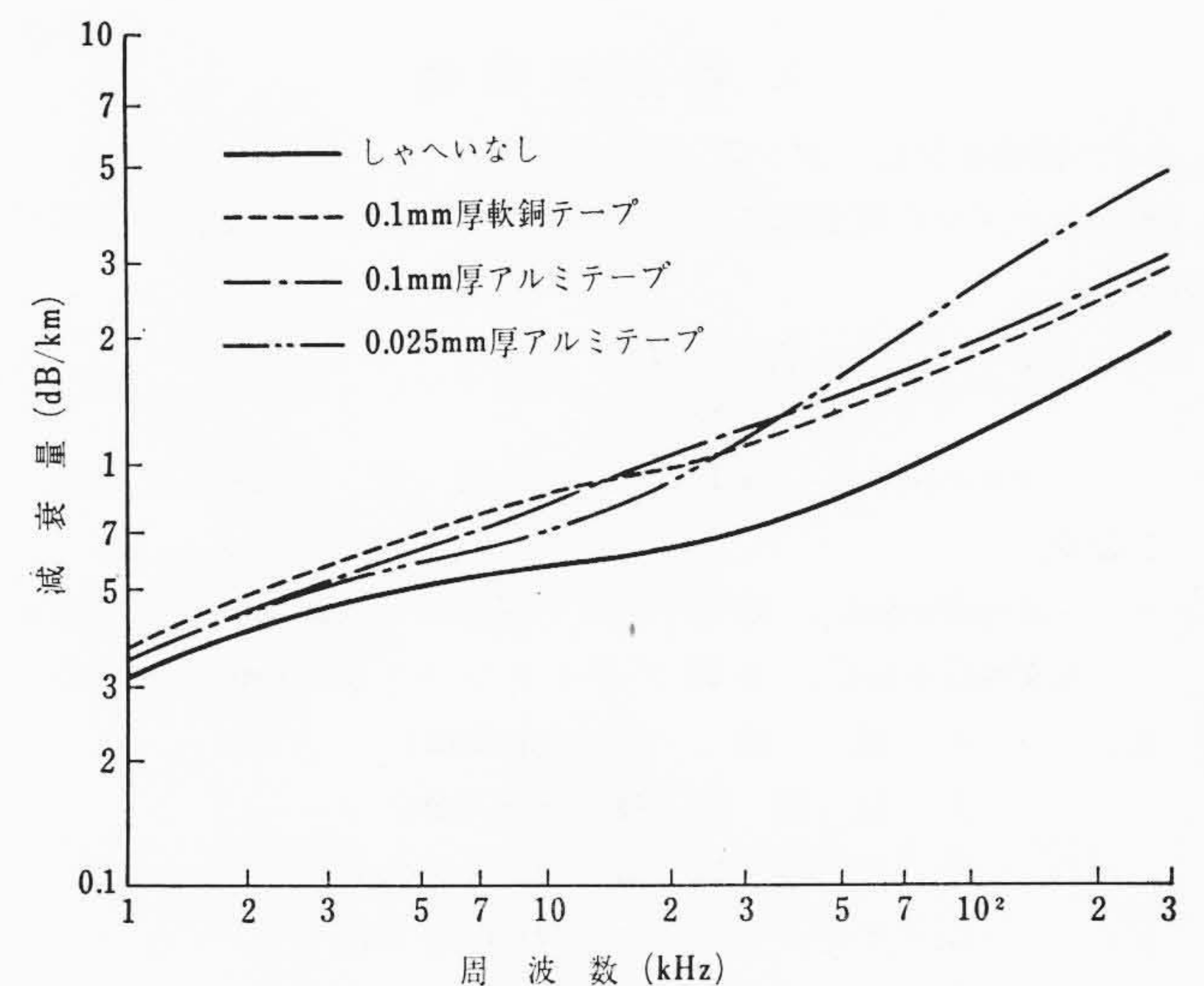


図4 1.2/3.6バロン形2対ケーブルの遮蔽テープによる減衰量の比較

$$\Delta R_h + j\omega \Delta L_h = -j4\omega \left(\frac{a}{r_h}\right)^2 \left[\frac{1}{2} S \cdot j k_h r_h \sinh j k_h t \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S = \frac{1}{\cosh j k_h t + \frac{j}{2} \left(k_h r_h + \frac{1}{k_h r_h} \right) \sinh j k_h t} : \text{磁束の透過率} \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式の抵抗増加 ΔR_h を計算容易な形に直すと、

$$\Delta R_h = 8 \times 10^{-4} \omega \left(\frac{a}{r_h}\right)^2 X \quad (\Omega/\text{km}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$X = I_{\text{mag}} \left[\frac{1}{2} S \cdot j k_h r_h \sinh j k_h t \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

となり、薄い遮蔽層による抵抗増加量が導かれる。今、無遮蔽のものとの対の抵抗値と遮蔽層のあるものとの差が遮蔽層内の渦流による抵抗の増加分の測定値とし、上式の理論値と合わせて周波数特性を示したのが図3である。この特性曲線においては、数キロヘルツまでは遮蔽による影響はなく、また、周波数の増加に伴う変動もなく

表1 バロン形絶縁4カッドビニル被覆
搬送ケーブルの構造と特性

項 目		単 位	0.9/2.0×4Q	1.2/3.0×4Q	1.2/3.6×4Q
構	導 体 径	mm	0.9	1.2	1.2
	絶 縁 体 外 径	mm	2.0	3.0	3.6
造	遮 蔽 層	—	0.1 mm 厚軟銅テープ重ね巻		
	仕 上 外 径	mm	17	25	28
電 気 特 性	標 準 静 電 容 量	nF/km (1kHz)	30	25	21
	特 性 インピーダンス	Ω (120kHz)	140	170	185
	標 準 減 衰 量	dB/km (120kHz)	3.0	1.85	1.7

直流抵抗とほとんど変わらない。しかし、10 kHz 前後から遮蔽テープに応じて急激に増加しており、搬送周波数帯において理論値と測定値はよく一致している。図4は遮蔽テープの差による減衰量周波数特性の測定値の比較を示したものである。これには抵抗の周波数特性との対応があるので減衰量の理論解析が可能なることから、要求された値を得るために経済性をも考慮したうえの最適な遮蔽テープの設計ができる。この遮蔽テープとしては0.1 mm 厚軟銅テープを用いた。この際の各サイズのパロン形搬送ケーブルの構造と電気特性をまとめて示したのが表1である。

3. 電 気 的 特 性

3.1 特性インピーダンス

通信ケーブルの電気的特性には、よく知られている次式の関係がある。

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} : \text{特性インピーダンス} \dots (11)$$

$$r = \alpha + j\beta = \sqrt{Z \cdot Y} : \text{伝搬定数} \dots (12)$$

ここで、

$$Z = R + j\omega L : \text{直列インピーダンス } (\Omega/\text{km}) \dots (13)$$

$$Y = G + j\omega C : \text{並列アドミタンス } (\text{S}/\text{km}) \dots (14)$$

α : 減衰量 (np/km)

β : 位相定数 (rad/km)

R : 往復抵抗 ($\Omega/\text{loop km}$)

L : インダクタンス ($H/\text{loop km}$)

G : コンダクタンス (S/km)

C : 静電容量 (F/km)

$\omega = 2\pi f$: 角周波数

f : 周波数 (Hz)

特性インピーダンス Z_c は(11)式で表示されるが、ここで $j\omega C$ に比べて G は無視できる。また、低周波では $j\omega L$ は R に比べ非常に小さいので Z_c は

$$\sqrt{\frac{R}{j\omega C}}$$

となる。高周波では R が $j\omega L$ に対して無視できるので

$$\sqrt{\frac{L}{C}}$$

で表わされる。図5は1.2/3.6パロン形絶縁ケーブルの特性インピーダンスの実測値と合わせて、比較のために同じ導体径の紙コルデル絶縁ケーブル・PEF絶縁ケーブルの実測値を示したものである。10 kHz 程度までは周波数の増加につれて特性インピーダンスは急激に減少している。この原因は低周波では $j\omega C$ が周波数に伴って増加するのに対して抵抗の変化は小さくかつ $j\omega L$ が抵抗に比べて小さいためである。しかし、高周波では R は $j\omega L$ に対し小さくなるので、特性インピーダンスの減少はインダクタンスの若干の減少のみによって決まりほぼ一定値となる。図7のパロン形絶縁ケー

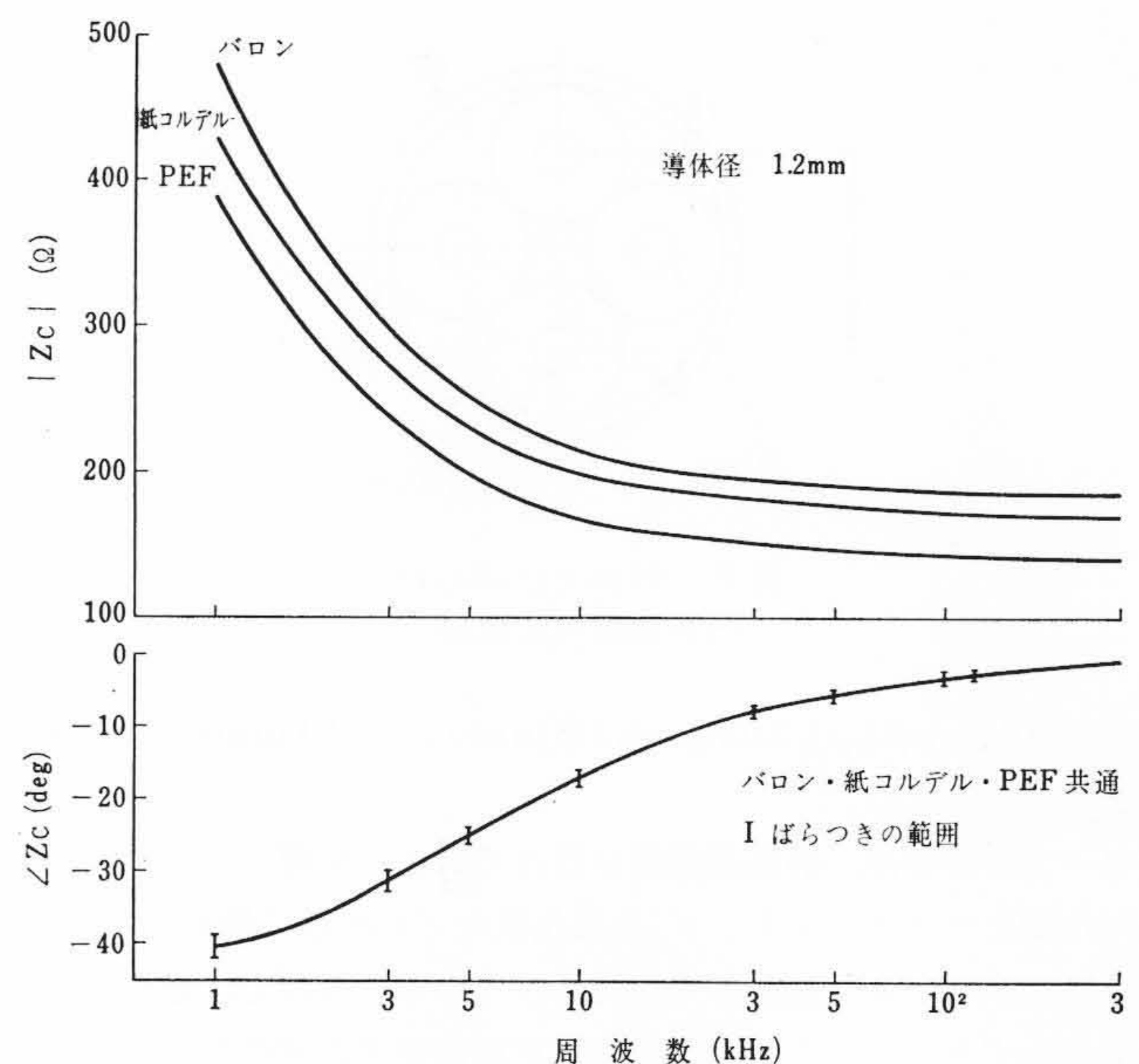


図5 特性インピーダンスの周波数特性

ルの場合、特性インピーダンスの絶対値と位相角は300 kHz でそれぞれ185Ωと0度に収束している。紙コルデルおよびPEF絶縁の場合も同様で前者は170Ω, 0度, 後者は140Ω, 0度に収束することが示されている。位相角がいずれも0度に漸近するのは、高周波になるほど特性インピーダンスが

$$\sqrt{\frac{L}{C}}$$

に近似するからであり、この傾向は異なる絶縁体の間でも差が小さく、図7に記入したばらつき程度であつた。特性インピーダンスの絶対値の差はケーブルの寸法構造が等しければ、すべて誘電率 ϵ によって生ずるもので、 ϵ が小さいほど静電容量は小さくなり特性インピーダンスが高くなる。パロン形絶縁ケーブルがほかのものに比べて高いのは、構造の差によるところもあるが、この ϵ が1.3~1.4と低いためである。このことは次に述べる減衰量を小さくするために有効であり重要な点である。

3.2 減 衰 量

減衰量 α には(12)式で示した関係があるが、高周波においては近似的に次式で表示できる。

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} \dots (15)$$

低周波においては次式となる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} \dots (16)$$

搬送周波数における減衰量 α は(15)式から得られ、かつ、第2項の漏えい減衰量

$$\frac{GZ_c}{2}$$

は第1項の抵抗減衰量

$$\frac{R}{2Z_c}$$

の数パーセントであることから無視でき、

$$\frac{R}{2Z_c}$$

のみで表わされる。したがって、特性インピーダンスが高いほど、つまり静電容量が小さいほど、減衰量は小さくなる。また、低周波においても(16)式が示すとおり静電容量の平方根に比例することか

表2 標準静電容量の比較 (1 kHz)

絶縁方式	実効誘電率	標準静電容量
バロン	1.3~1.4	22.0 nF/km
紙コルデル	1.4	31.0
PEF	1.6	38.5

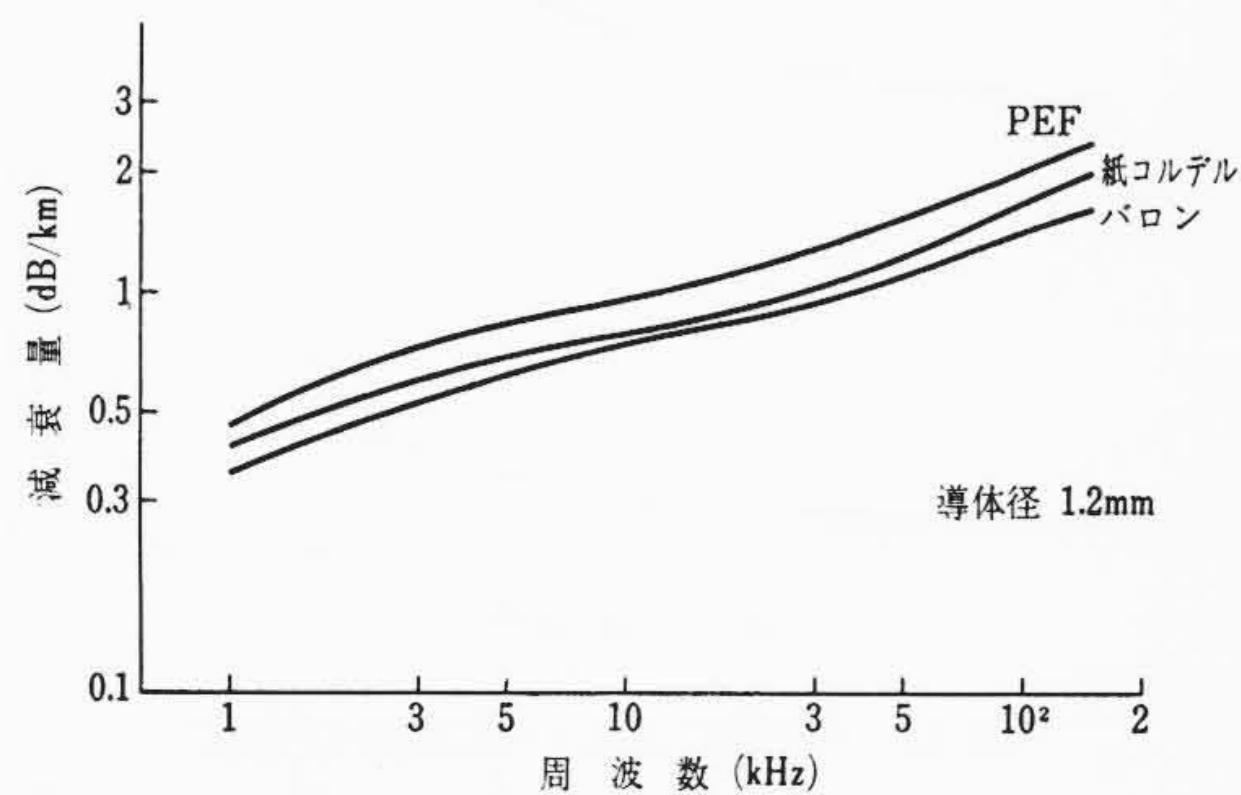


図6 減衰量の周波数特性

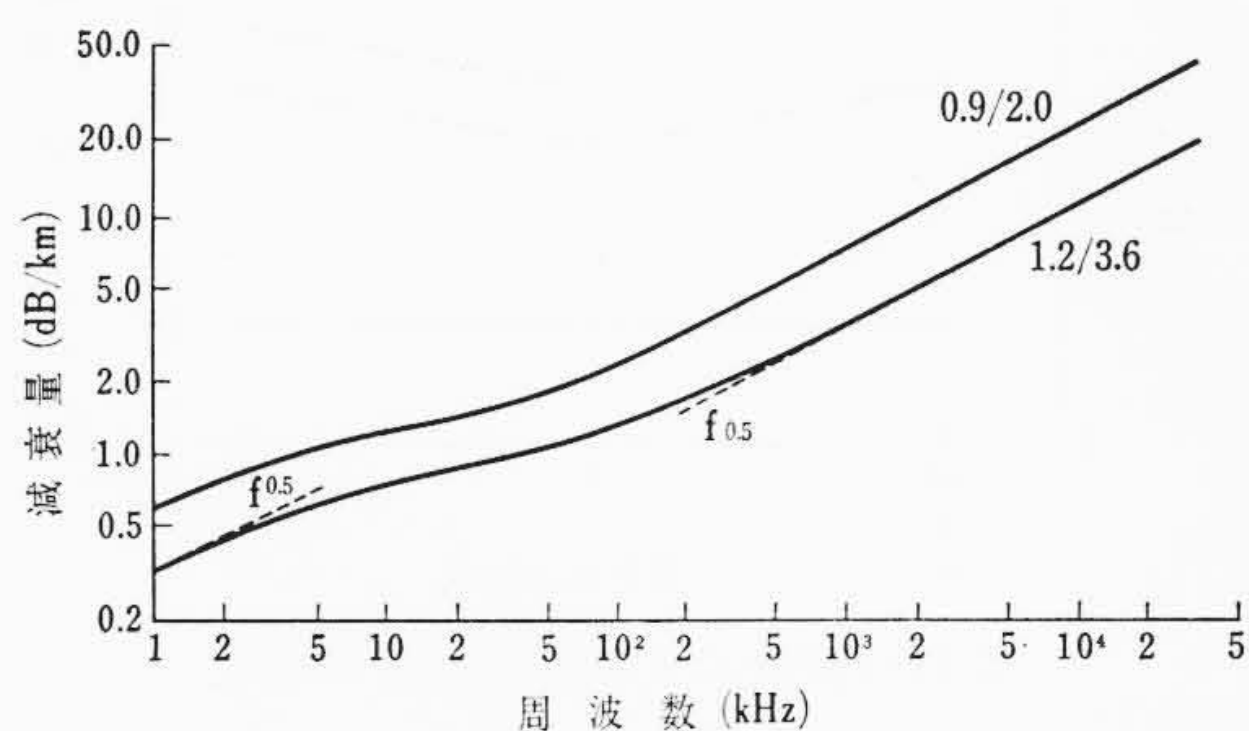


図7 バロン形絶縁ケーブルの高周波減衰特性

ら、低容量であることが望ましい。表2は導体径1.2mmφの絶縁方式ごとの実効誘電率の概略値および静電容量を示したものである。表2よりバロン形絶縁が、この小減衰量となるための条件を満たしていることがわかる。図6は1.2/3.6バロン形絶縁ケーブルの減衰量の周波数特性および同じ導体径の紙コルデル・PEF絶縁ケーブルの特性を示したものである。この比較はバロン形絶縁の低損失性を示している。

今後、平衡ケーブルに数Mb以上のPCM方式が適用されることが想定されるし、画像通信にも利用できるもので0.9/2.0、1.2/3.6バロン形絶縁ケーブルの10MHzまでの動作減衰量の測定結果を図7に示した。この動作減衰量平均値は低周波と高周波において $f^{0.5}$ に近い傾斜特性が得られている。これは低周波では抵抗はほぼ直流抵抗と同一で一定であるが、特性インピーダンスが $f^{0.5}$ の特性をもつため結果として減衰量が(16)式で表示されるからであり、高周波では逆に特性インピーダンスは一定であるが、抵抗が表皮効果のため $f^{0.5}$ 特性をもつためである。

3.3 漏話特性⁽²⁾

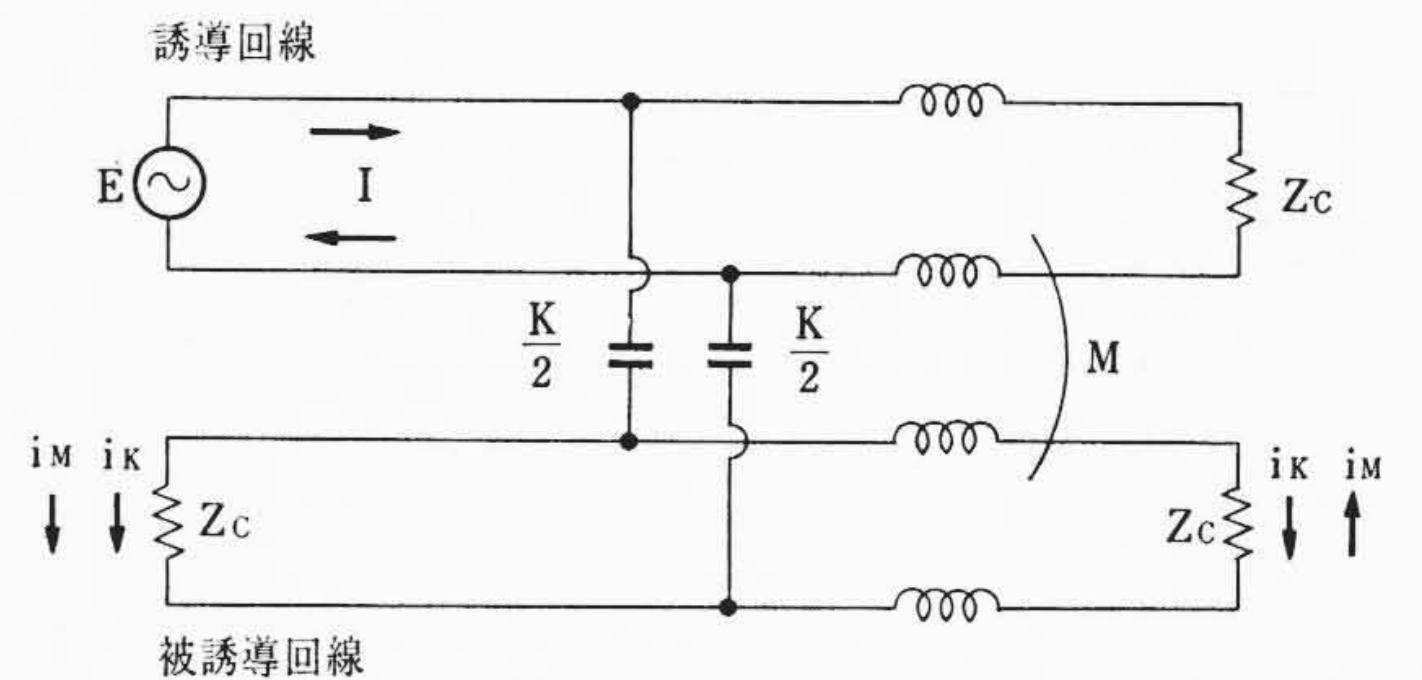
漏話の定義は誘導回線の電力 P_1 に対する被誘導回線の電力 P_2 の比であり、デシベルで表示するならば

$$10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。回線の特性インピーダンスが等しければ、電流または電圧の比の自乗で表わされる。

$$20 \log \frac{I_2}{I_1} = 20 \log \frac{E_2}{E_1} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

図8において誘導回線の電圧 E は、静電結合 K を経て電流 $2i_K$ を誘導するので被誘導回線の両端に電流 i_K が現われる。電流 I は電



Z_C : 特性インピーダンス EI : 誘導回線の電圧と電流 K : 静電結合
 M : 電磁結合 i_K : 静電結合による誘導電流 i_M : 電磁結合による誘導電流

図8 結合と漏話電流の関係

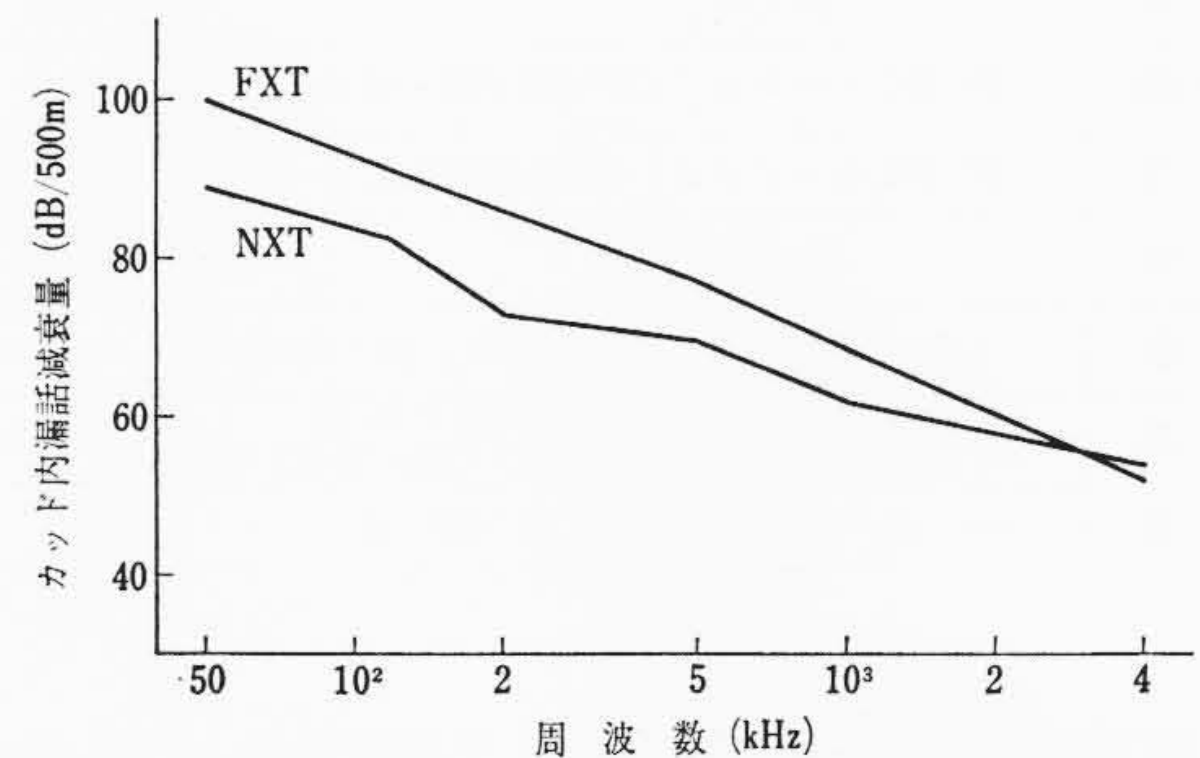


図9 1.2/3.6バロン形絶縁4カッドケーブルカッド内漏話周波数特性

磁結合 M によって被誘導回線の両端に電流 i_M をもたらす。この漏話電流 i_K と i_M は近端では和となり遠端では差となる。これからCompbellの式が得られる。

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{j\omega}{2} \left(\frac{KZ_C}{4} \pm \frac{M}{Z_C} \right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

(19)式より近端・遠端漏話減衰量はそれぞれ次式となる。

近端漏話減衰量

$$NXT = -20 \log \frac{j\omega}{2} \left(\frac{KZ_C}{4} + \frac{M}{Z_C} \right) \sqrt{\frac{1-e^{-4\alpha l}}{4\alpha l}} \quad (\text{dB/l}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

遠端漏話減衰量

$$FXT = -20 \log \frac{j\omega}{2} \left(\frac{KZ_C}{4} - \frac{M}{Z_C} \right) \quad (\text{dB/l}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 l : ケーブル長

近端漏話減衰量の最後の項は、給電点から漏話の発生点および近端までの減衰の rms 値をケーブル長に関してとったものである。出力対出力を比べる測定遠端漏話減衰量の場合は、誘導・被誘導回線の減衰量が等しい限り、これに関する補正は必要としない。(20)(21)式とから減衰量 α が $f^{0.5}$ 特性をもつとき、近端漏話減衰量は4.5dB/oct., 遠端は6.0dB/oct.の周波数特性で悪化していく。

遠端漏話減衰量に関しては、第3回線を経由した間接的漏話が考えられ、これは次式で表示される。

$$FXT = -20 \log AGl \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 \quad (\text{dB/l}) \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 A : 結合から決まる値

v : 伝搬速度

G : よりピッチ

この影響は係数が小さいためにより大きい直接的漏話に隠されているが、高周波となると間接的漏話は12dB/oct.で悪化することから、この特性が支配的となり現われてくる。

以下、1.2/3.6×4Qバロン形搬送ケーブルの漏話特性の測定結果について述べる。測定回線の組合せは種々あり、しかもその組合せいかんによって値も非常に異なるが最悪値という点から、誘導回線と被誘導回線をカッド内に限定して平均値を求めた。それが図9で

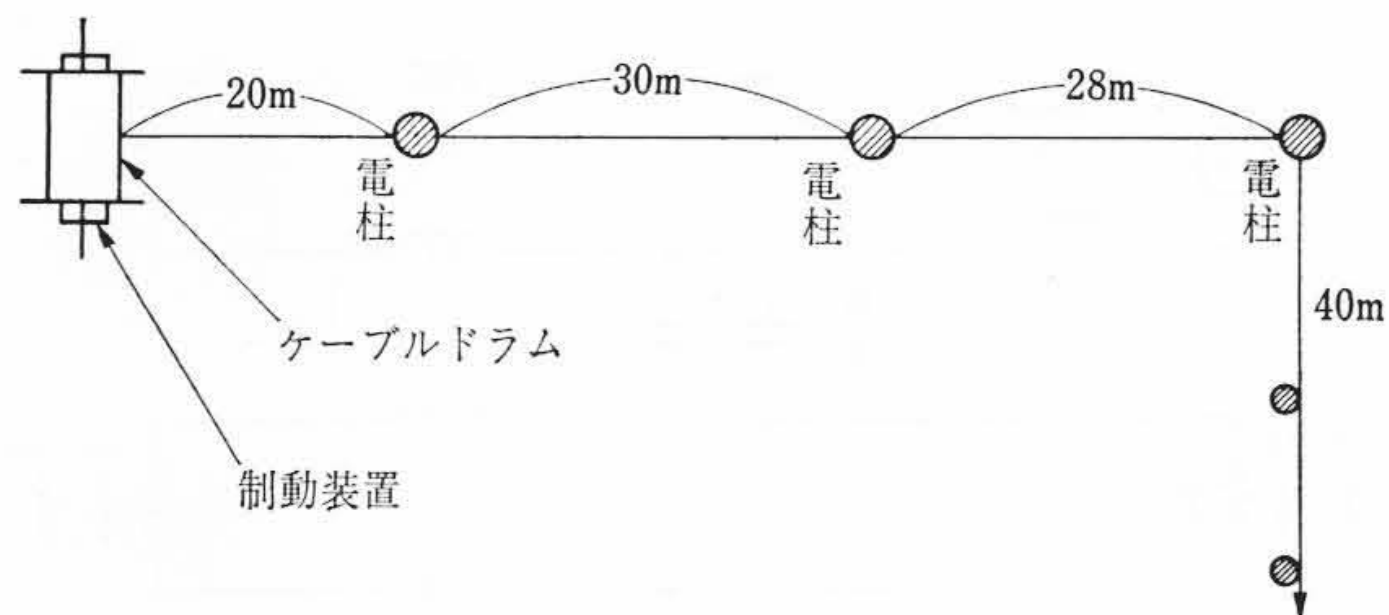


図10 ケーブル架設ルート図

表3 架設条件

項目	条件
架設ルート長	約 120 メートル (20+30+28+40 m)
延線張力	約 100 キログラム (制動装置によりバックテンション調整)
延線速度	2~3 km/h
延線回数	4回 (延線時のみ張力を加え、戻し時はゼロ)
使用金車	2号金車 (中間柱) 38φ(谷部)×54 幅 4号金車 (立上り柱, 曲柱) 138φ(谷部)×58 幅
測定項目	一次定数 静電結合

ある。近端では複雑なハンプをもち、平均値をとっても平坦な特性にはならない。遠端では 12 dB/oct. の周波数特性はまだ生じていない。

4. 機械的特性

バロン形搬送ケーブルの機械的強度について架設時に受ける引張り、圧縮などによって特性が変化しないかどうかを実験、検討した。試料として 1.2/3.6 バロン形搬送ヘリカルヒョウタンケーブルを用い、図10のように直角柱を含むルートにケーブルを架設して架設前後の一次定数、静電結合の変化を測定した。表3は架設条件である。この測定結果が図11, 12である。これより架設によって一次定数、静電結合とも変化が少なく、特性が安定であることがわかった。

5. 結 言

バロン形搬送ケーブルの電気的特性に関して検討し、次の特性が得られた。

- (1) 低損失である。
- (2) 漏話減衰量が少ない。
- (3) 架設時の外力に対し特性が安定である。

上記3点の特長を有するケーブルの設計基準および製造条件が確立され、ここ数年間、中部電力株式会社から採用の榮に浴している。

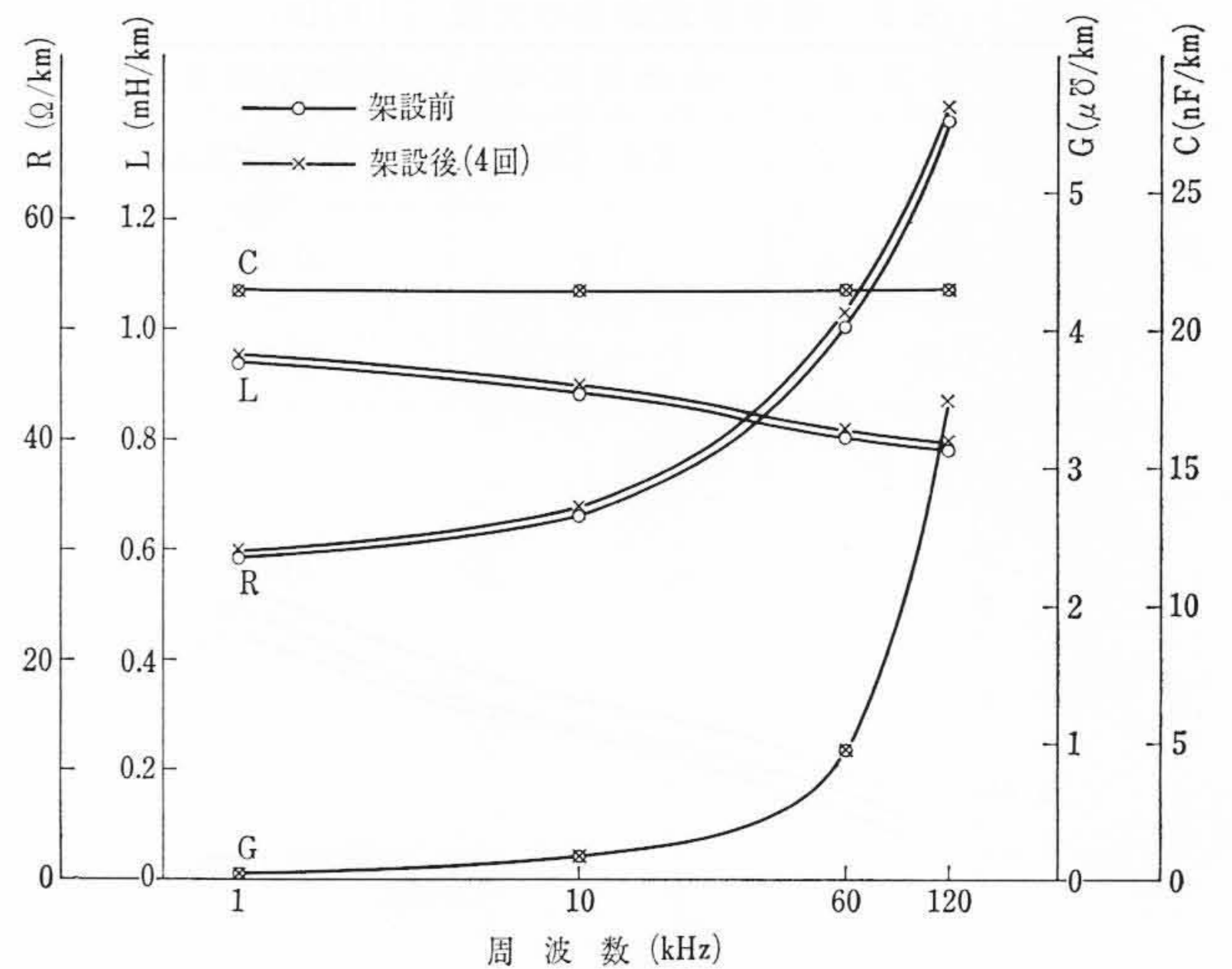


図11 架設による一次定数の変化

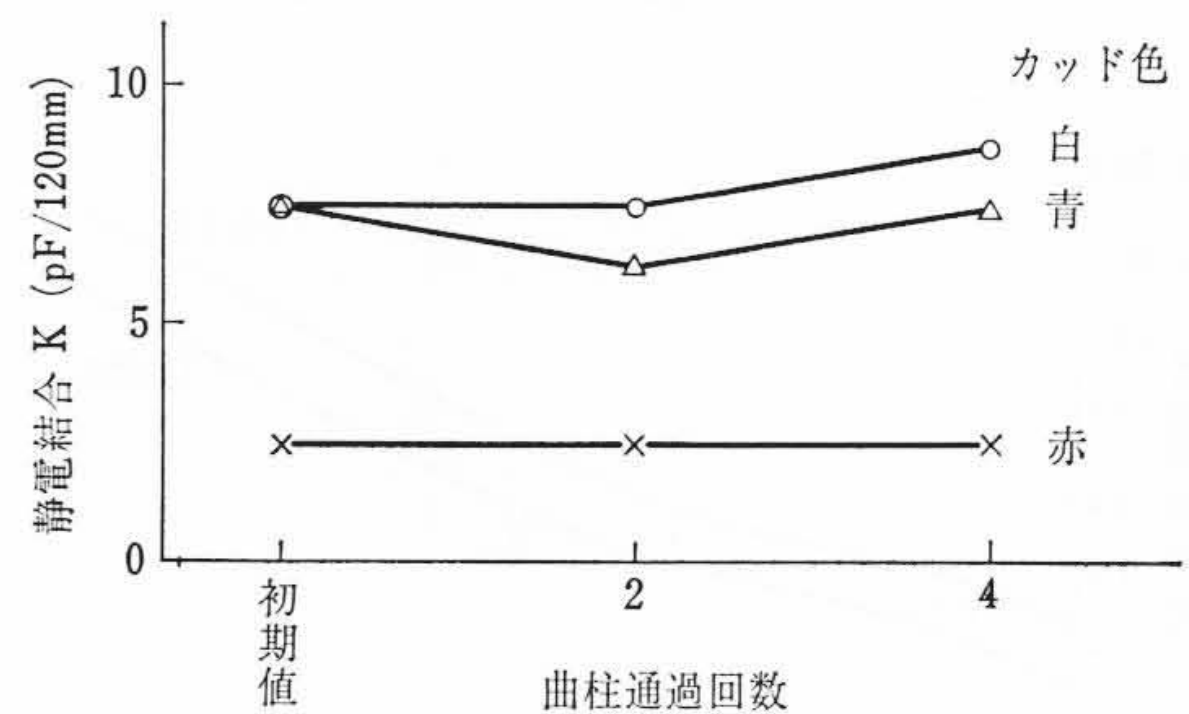


図12 架設による静電結合の変化

今後も、線路長の長い音声電話回線、搬送ケーブルとして多方面にわたる使用が期待されている。

終わりにのぞみ種々ご指導賜った中部電力株式会社の桐生・木下両氏をはじめとする関係者各位ならびに、実験などにご協力いただいた日立電線株式会社日高工場関係者のかたがたに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 河野・村田：電気通信学会誌，25，2，73（昭27-2）
- (2) G. S. Eager ほか3名：Transmission Properties of Polyethylene-Insulated Telephone Cable at Voice and Carrier Frequencies. T. A. I. E. E. Parti: Communication & electronics, 78, 59-778, p. 618~640 (1959)

Vol. 31

日立造船技報

No. 2

目 次

■論 文

- ・高圧用メカニカルシールの研究（第5報）
—静圧形メカニカルシールの密封特性と密封性能—
- ・標準ユニット法による船体局部強度解析
- ・中小形船の伴流係数推定法

- ・風による円柱の振動に関する二、三の考察
- ・噴流層の流動化のための最大圧力降下と流動化状態における圧力降下
- ・ポーラスプラグによる溶銑の脱硫と黒鉛球状化処理
- ・塗布量と膜厚との関係 —表面あらさと膜厚との関係—

………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