

HF 形高周波同軸ケーブルの諸特性

Characteristics of HF Type High-frequency Coaxial Cable

杉 山 正 夫* 山 際 俊 行*
Masao Sugiyama Toshiyuki Yamagiwa
橋 場 弘 道* 大 西 満**
Hiromichi Hashiba Mitsuru Onishi

要 旨

数 GHz までの高周波電力伝送路としては、従来アルミ被同軸ケーブルや銅管同軸給電線などが使用されてきた⁽¹⁾。しかしこれらには機械的特性おもとに曲げ特性、および製造上、布設上のむずかしさなど改善を要する点が多かった。そこで日立電線株式会社では、良好な可とう性を有する外部導体溶接波付構造の HF 形高周波同軸ケーブルを開発し製造を開始した。

本文では HF 形高周波同軸ケーブルの構造ならびに製造法、諸特性を明らかにするとともに、製造時の寸法精度と反射特性の関係につき検討を加えた。

1. 緒 言

数 GHz までの高周波電力の伝送には主として同軸ケーブルが用いられ、その同軸ケーブルには電氣的に良好な特性と同時に機械的な安定性と良好な可とう性を有する構造が要求されている。

日立電線株式会社では従来金属溶接波付シース（タフレックスシースと呼称）を製造してきたが、可とう性が非常に良好であるため同軸ケーブルの外部導体に応用することが考えられ、この技術に日立電線株式会社で従来製造を行ってきたアルミ被同軸ケーブルの技術および経験を生かし、角形ポリエチレンコルデルひも絶縁、銅溶接波付外部導体からなる HF 形高周波同軸ケーブルを開発した。特に本ケーブルは使用周波数が高くケーブル寸法精度が反射特性に大きく影響するため、この点の検討に重点をおき研究した。

2. HF 形高周波同軸ケーブルの構造および製造法

開発を完了している 50Ω 系（D タイプ）高周波同軸ケーブル 3 種類の構造を表 1 に、そして外観写真を図 1 に示す。

2.1 内 部 導 体

HF-20D, 39D には銅管を用いるが、HF-77D では銅テープを溶接し減衰量に影響を及ぼさない程度にコルゲートを施したものをを用いている。この場合コルゲート後正確な寸法にロールで矯正し、良好な可とう性と断面の安定性を得るよう考慮している。

2.2 絶 縁 体

高周波においては、減衰量のうち漏えい損失分の占める割合が大きく、絶縁体の $\tan \delta$ をできるだけ小さく保つ必要があり、さらに所望の誘電率を得ながらじゅうぶんな機械的強度を得なければならぬため、HF 形高周波同軸ケーブルではポリエチレンひもをコルデル状に巻いて絶縁体とする。ポリエチレンひもは押出しのみではじゅうぶんな精度が得られないので機械仕上げを行なう。ケーブル構造の安定性および作業上の点からポリエチレンひもの形状は、HF-20D では長方形断面、HF-39D では台形断面、HF-77D では長方形断面のものをくし形に成形して用いている。

2.3 外 部 導 体

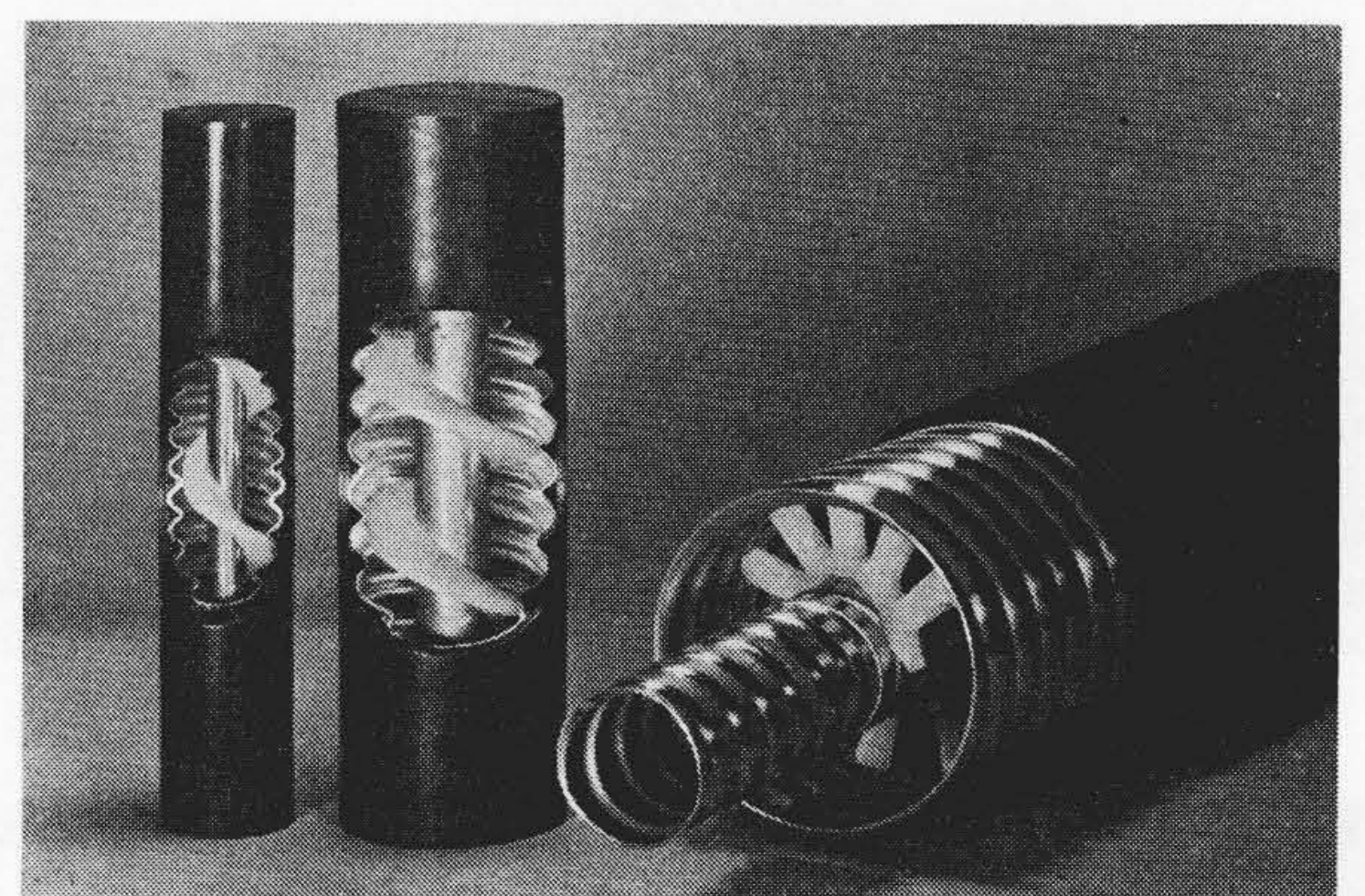
HF 形高周波同軸ケーブルの最大の特長はその外部導体にある。0.5 mm (HF-20D, 39D), 0.7 mm (HF-77D) 厚の銅テープを成形ロールでパイプ状に仕上げ、コアを包み、テープ端を長手方向に連続溶接する。同一工程にてネジ状のコルゲートをつけ、谷部にて絶縁体を支持させている。

* 日立電線株式会社日高工場

** 日立電線株式会社研究所

表 1 HF 形高周波同軸ケーブルの構造および電気特性

項 目		HF-20D	HF-39D	HF-77D
構 造	内 部 導 体 外 径 (mm)	9.0	17.2	32.6
	絶 縁 体 外 径 (mm)	20.1	39.7	71.7
	外 部 導 体 外 径 (mm)	25.4	46.5	81.1
	防 食 層 外 径 (mm)	29.5	51.0	88.0
	概 算 重 量 (kg/m)	0.85	2.0	3.6
電 気 特 性	特性インピーダンス (Ω)	50	50	50
	波 長 短 縮 率 (%)	91	91	96
	静 電 容 量 (PF/m)	74	73	70
	遮 断 周 波 数 (G Hz)	5.6	2.9	1.5



左より HF-20D, HF-39D, HF-77D

図 1 HF 形高周波同軸ケーブル

2.4 外 被

機械的保護および防食のため、コンパンドが塗布され、その上にポリエチレン被覆を施している。

3. HF 形高周波同軸ケーブルの電氣的特性

3.1 VSWR

実際のケーブル特性のうち、減衰量とともに重要なのは長手方向の均一性である。この特性は VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) によって数値として表わされるが、各サイズとも 100 m 長にて 1 GHz 近辺まで 1.05 以下におさえることができ、最もきびしい特性が要求されるテレビ放送用給電線としてもじゅうぶんな性能を得ることができた。ケーブル内部反射の周波数依存性は非常に大きく、VSWR の測定には周波数帯全域にわたって連続的に行なう必要

がある。高周波ブリッジを使った測定状況を図2に、測定結果例を図3に示す。この特性には、両端に使用される接栓(せん)の特性および取付作業に基づく影響が含まれている。これらは短尺ケーブルにとりつけて測定することにより知ることができるが、図4に示すように1.02以下の値であり実用上問題にならない。

3.2 VSWR と製造精度の関係⁽²⁾

ケーブル長手方向の均一性のうち特に問題にする必要があるの

は、周期的なインピーダンスの変動である。わずかなインピーダンス変動が特定周波数で重ね合わされて大きな反射となる。

周期的不均等はその形状のいかんにかかわらずフーリエ展開することができ、そのおのこの成分につき独立に考えることができる。 Z_0 を特性インピーダンス、 ΔZ をインピーダンス変動量、 h を不均等周期とすると、正弦波状不均等については振幅は $\Delta Z/2$ となり反射係数 Γ は次式で表わされる。

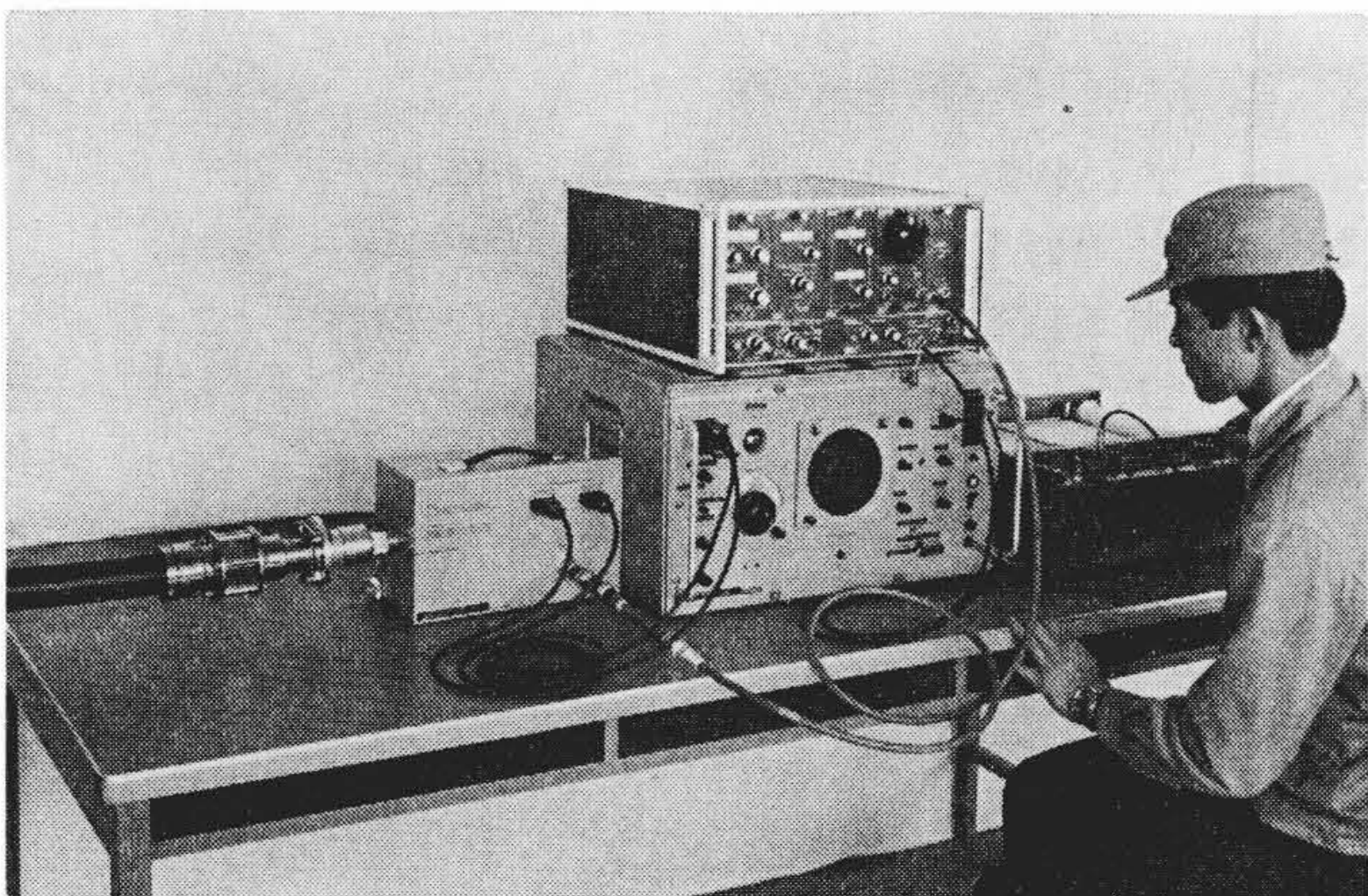


図2 VSWR 測定状況

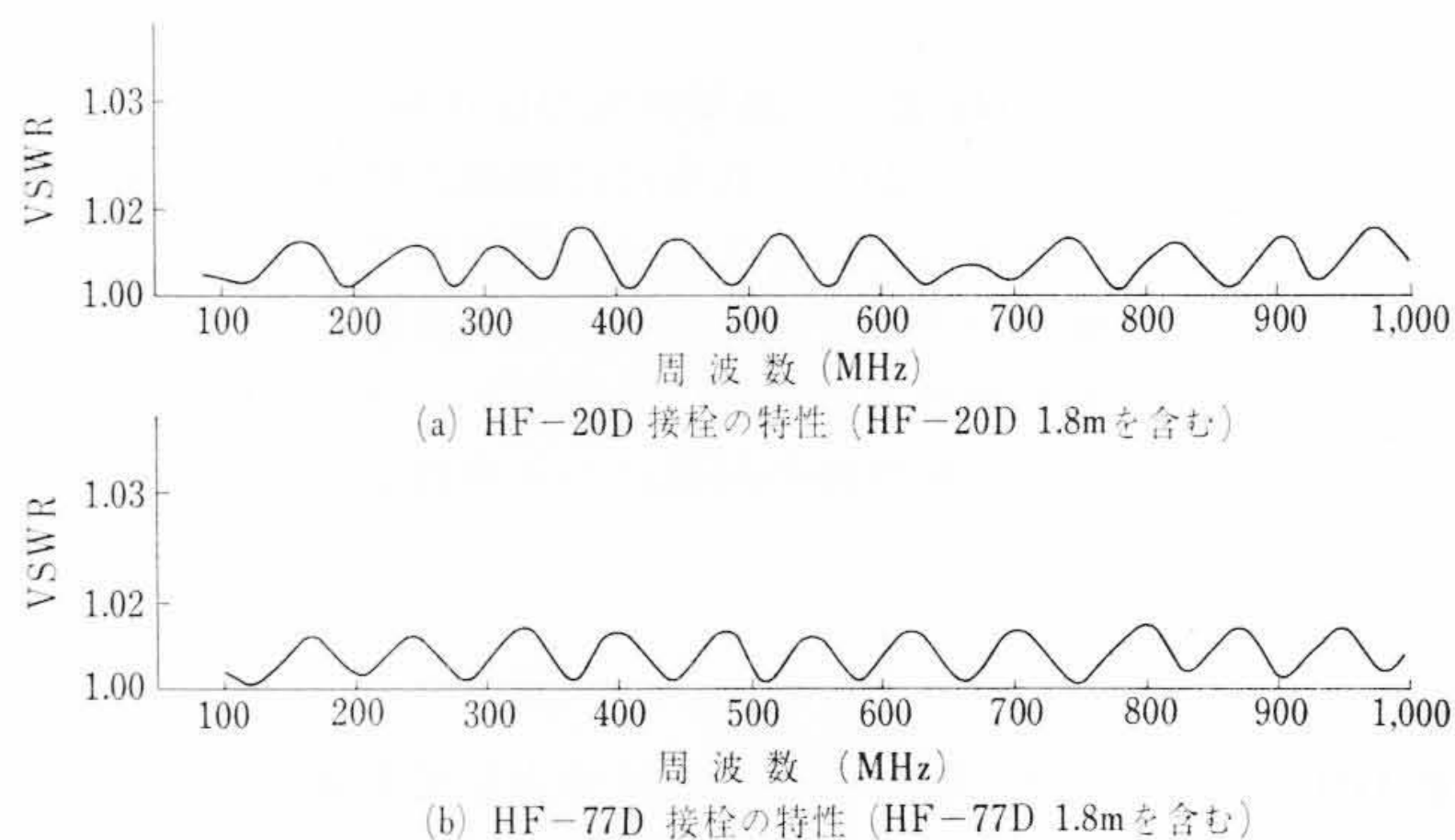


図4 接栓の特性例

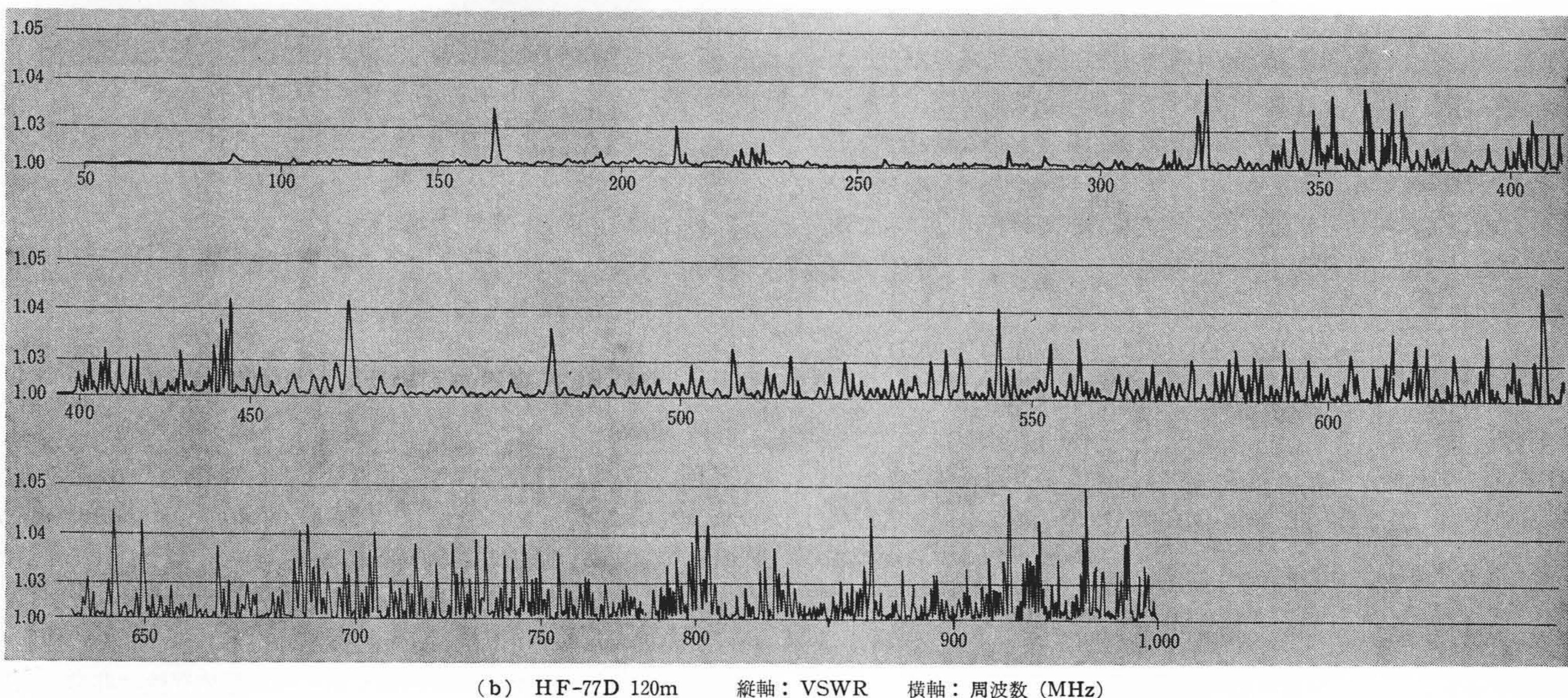
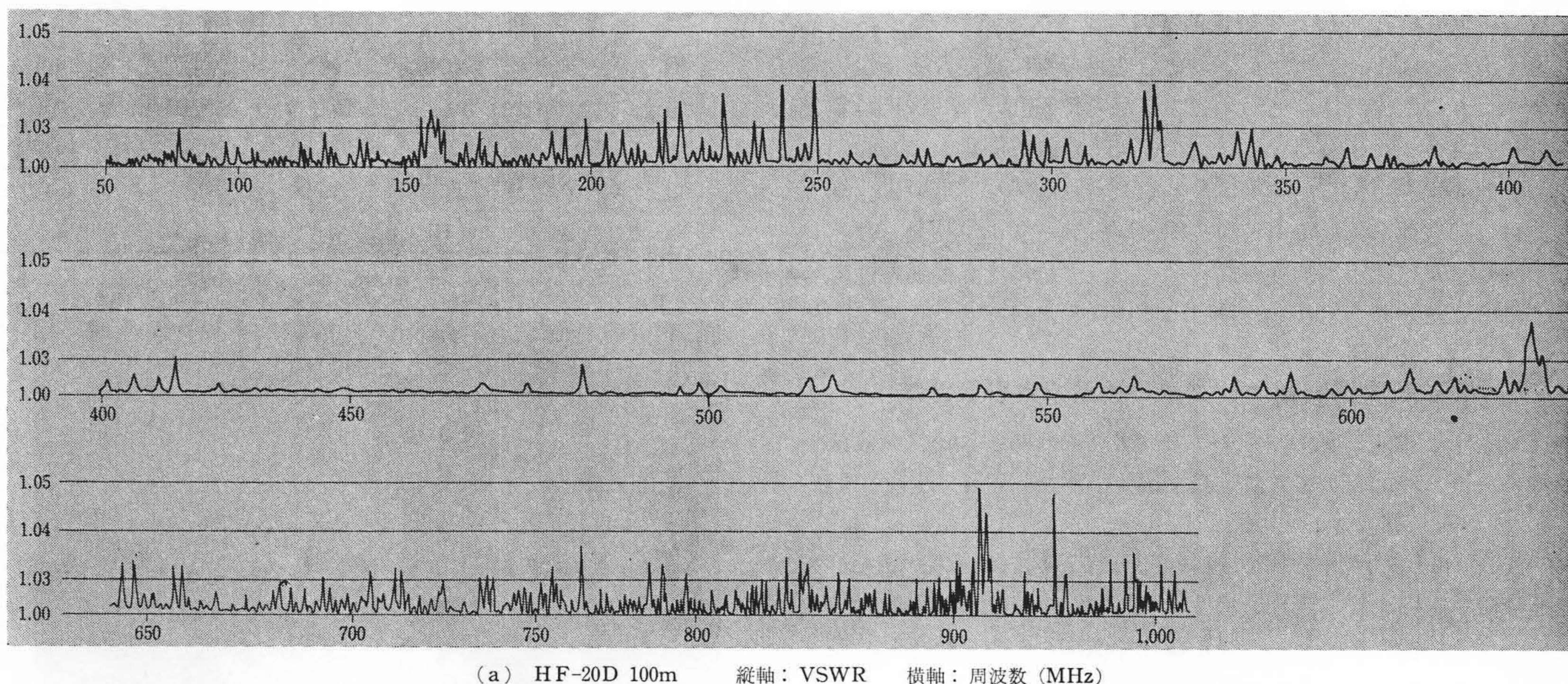


図3 VSWR 周波数特性

$$\Gamma = \frac{1}{2Z_0} \frac{\partial Z_0}{\partial x} = \frac{1}{4} \frac{\Delta Z}{Z_0} \frac{d}{dx} \left(\sin \frac{2\pi x}{h} \right) \dots\dots\dots (1)$$

そして $\lambda_0 = 2h$ なる波長によって決定される共振周波数においてインピーダンス変動による影響は最も著しく現われる。

いま、減衰量を無視し入力端に換算した反射係数 Γ をもとめると

$$\Gamma = \frac{\Delta Z \cdot \pi}{2Z_0 h} \int_0^l e^{-\frac{4\pi}{\lambda} x} \sin \frac{2\pi}{h} x dx \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 l ： ケーブル条長

反射係数の最大値 $|\Gamma|_{\max}$ は共振周波数にておこり

$$|\Gamma|_{\max} = \frac{\Delta Z}{4Z_0} \frac{l}{h} \pi \dots\dots\dots (3)$$

これより、周期的不均等の場合には、局部的にはごくわずかのものでも大きな反射となって現われることがわかる。

また VSWR と反射係数 $|\Gamma|$ の間には次式の関係がある。

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \dots\dots\dots (4)$$

同軸ケーブルの特性インピーダンスは内部導体外径 d 、外部導体内径 D 、内外導体間の誘電率 ϵ とによって決定される。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d} \dots\dots\dots (5)$$

$\frac{D}{d} \div 2.5$ とすると

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} \div 1.1 \frac{\Delta D}{D} \quad \text{あるいは} \quad \div -1.1 \frac{\Delta d}{d} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \dots\dots\dots (7)$$

外部導体がコルゲート状の場合には、上式は完全ではないが、概略精度を得るにはじゅうぶんである。

絶縁用ポリエチレンひもによって誘電率は変化するが、幅を W 、ピッチを P とすると概略的に次の関係が得られる。

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} \div -0.07 \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} \div +0.07 \frac{\Delta P}{P} \dots\dots\dots (9)$$

一例として、HF-39D にて製造時ケーブル長にして 25 cm の周期的正弦波状不均等がおこったとする。条長を 100 m とする。このとき 545 MHz にて反射係数は最大となり、VSWR を 1.05 以下におさえるには (4) 式から $|\Gamma| = 0.025$ となり、(3) 式から $\Delta Z/Z_0 = 0.025\%$ が得られる。おのおのの要素が独立して変化するものと考えれば、計算上求められる許容変動 Δd 、 ΔD 、 ΔW 、 ΔP はそれぞれ 4 ミクロン、10 ミクロン、20 ミクロン、0.1 ミリメートル程度のオーダーになる。

以上の結果、ごくわずかの周期的不均等でも VSWR に重大な影響を及ぼし、良好な VSWR を得るには各寸法とも非常に高精度で製造されねばならないことがわかる。このため本ケーブルの製造にあたっては製造機械の精度を上げるとともに材料に対する要求精度も非常にきびしくおさえる必要がある。

3.3 減 衰 量

減衰量は一般に抵抗減衰量 α_r と漏えい減衰量 α_g とで表わされそれぞれ次式で示される。

$$\alpha_r = \frac{R}{2Z_0}, \quad \alpha_g = \frac{GZ_0}{2} \dots\dots\dots (10)$$

$$R = 2\sqrt{f} \left\{ \frac{\sqrt{\rho_{\text{in}}}}{d} + \frac{\sqrt{\rho_{\text{out}}}}{D} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$G = 2\pi f c \tan \delta \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 R ： 内外導体の高周波抵抗の和

G ： 内外導体間漏えい量

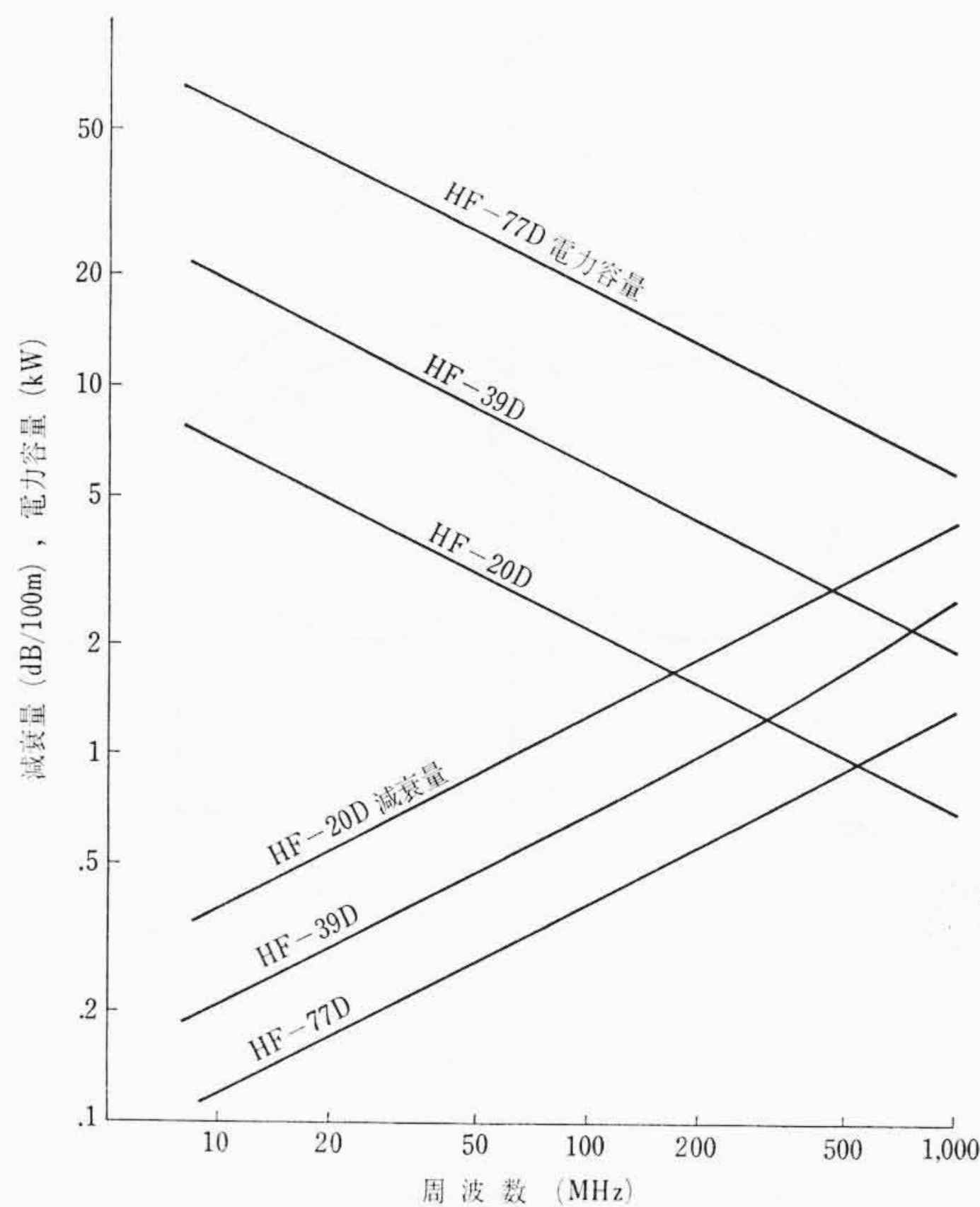


図5 減衰量、電力容量周波数特性

f ： 周 波 数

ρ_{in} , ρ_{out} ： 内部導体、外部導体の比抵抗

d , D ： 内 外 導 体 径

C ： 静 電 容 量

3.3.1 抵抗減衰量

電気的外部導体内径がコルゲートの中間にあり、同じ径のストレートな銅管と比べると高周波抵抗は 1.15~1.20 倍程度となる。しかし、コルゲートをつけたことによる全減衰量としての増加分は約 6% 程度であり、外部導体にアルミを使用した場合とほぼ同じになる。

3.3.2 漏えい減衰量

絶縁体としてポリエチレンを使用していることおよび内外導体間に空間が非常に多いことから、 $\tan \delta$ は小さく保たれ、各サイズとも 5×10^{-5} 以下である。したがって漏えい減衰量は非常に小さく、実測結果 1 GHz においても全減衰量中で占める割合は 20% 以下である。

図5は各サイズの標準減衰量周波数特性を示したものである。

3.4 電 力 容 量

電力容量の周波数特性は図5に示されている。

周囲温度 50°C、内部導体温度上昇 25°C としたときの、無変調、無反射状態での電力容量を示したものである。

3.5 特性インピーダンスおよび波長短縮率

各サイズ HF 形高周波同軸ケーブルの特性インピーダンス、波長短縮率、静電容量は表1に示すとおりである。

特性インピーダンスは、次の関係から求められる。

$$Z_0 = \frac{1}{vC} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 C は静電容量、 v は平均位相速度である。位相速度はケーブルの受端短絡状態での共振周波数の平均差から求められる。

50Ω 系ケーブルでは特性インピーダンスは、49.5~50.5Ω の範囲におさえられており部分的な変動は VSWR として表わされる。

同軸ケーブルの特性インピーダンスは (5) 式によって決定されるが、外部導体がコルゲート形状の場合には電気的等価径を考える必要があり、従来、コルゲートみぞが絶縁半径に比べて小さい場合には

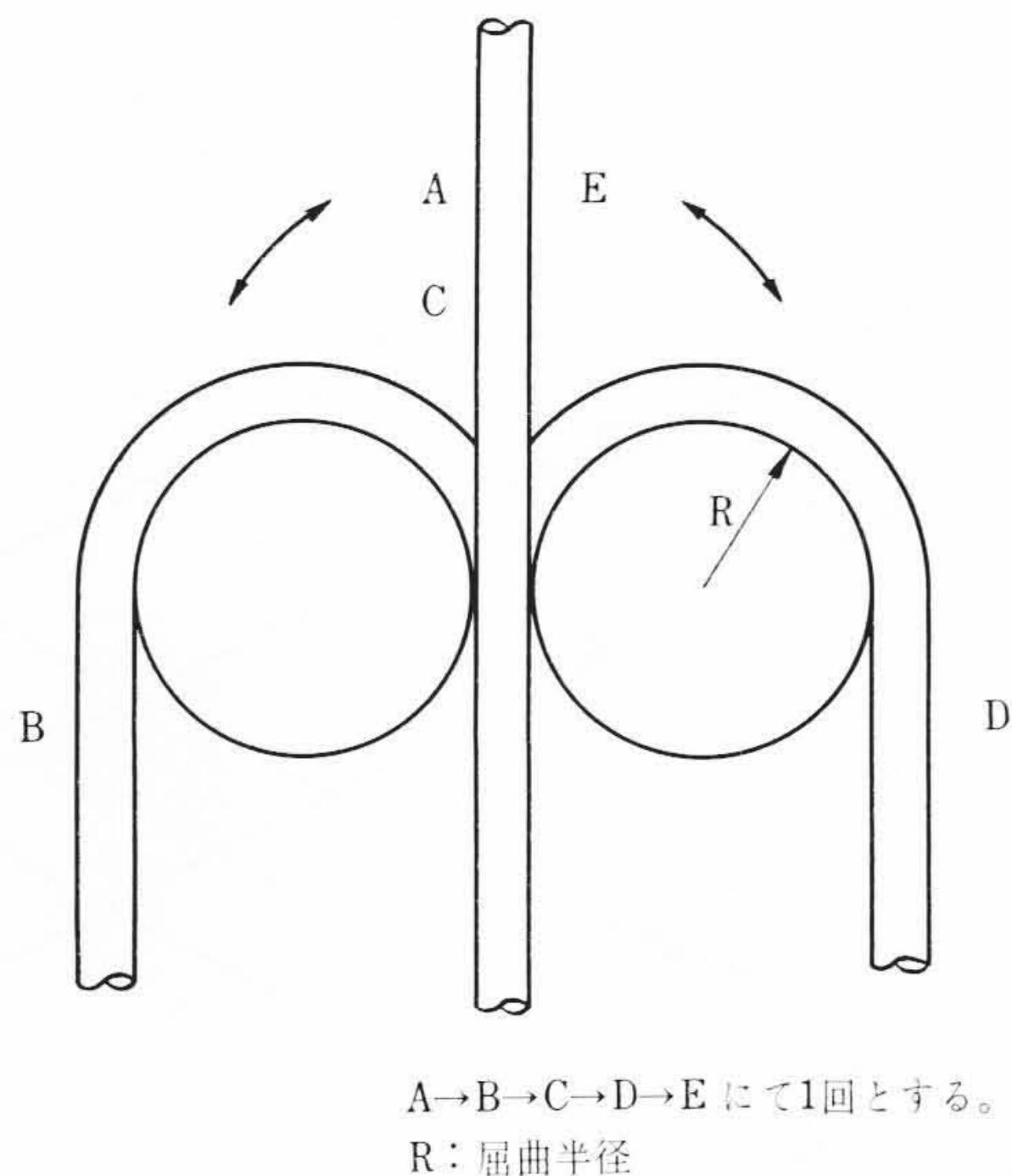


図 6 屈曲試験手順

平均みぞ径を等価外径として扱ってきたが、コルゲートが深い場合にはこの方法では不じゅうぶんで厳密に解析する必要があり、方形波状コルゲート同軸に関する検討結果が報告されている⁽³⁾。しかし、HF 形高周波同軸ケーブルのコルゲート形状は正弦波状に近いこと、およびポリエチレンコルデルひも絶縁であることにより先の報告とは一致せず、実験の結果次の関係が得られた。なお静電容量等価径には補正係数 k を導入している。

$$D_L \doteq \sqrt{D_i \cdot D_0} \dots\dots\dots (14)$$

$$D_C = \frac{D_i + D_0}{2} - kh \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 D_L : インダクタンス等価径

D_C : 静電容量等価径

D_i : コルゲート谷部内径

D_0 : コルゲート山部内径

h : みぞ深さ

P : コルゲートピッチ

補正係数 k は h, P の関数で表わされ

$$k = f\left(\frac{P}{h}\right) \dots\dots\dots (16)$$

HF-20D, 39D, 77D では補正係数は 0.4~0.8 の範囲にある。本検討の結果 HF 形高周波同軸ケーブルの伝送特性設計法が確立された。

4. HF 形高周波同軸ケーブルの機械的特性

HF 形高周波同軸ケーブルの機械的特性の特長は、溶接波付外部導体にに基づくものであり、可とう性、耐圧縮特性が非常に良好になっている。

4.1 屈曲特性

コルゲート状外部導体の繰返し曲げによる疲労特性の目安としてクラックを発生するまでの屈曲回数をとる。図 6 に示す手順で屈曲を行なった場合、屈曲回数は材質および厚さ、コルゲートピッチ、みぞ深さおよび屈曲径の関数であり次の関係が成立する⁽⁴⁾。

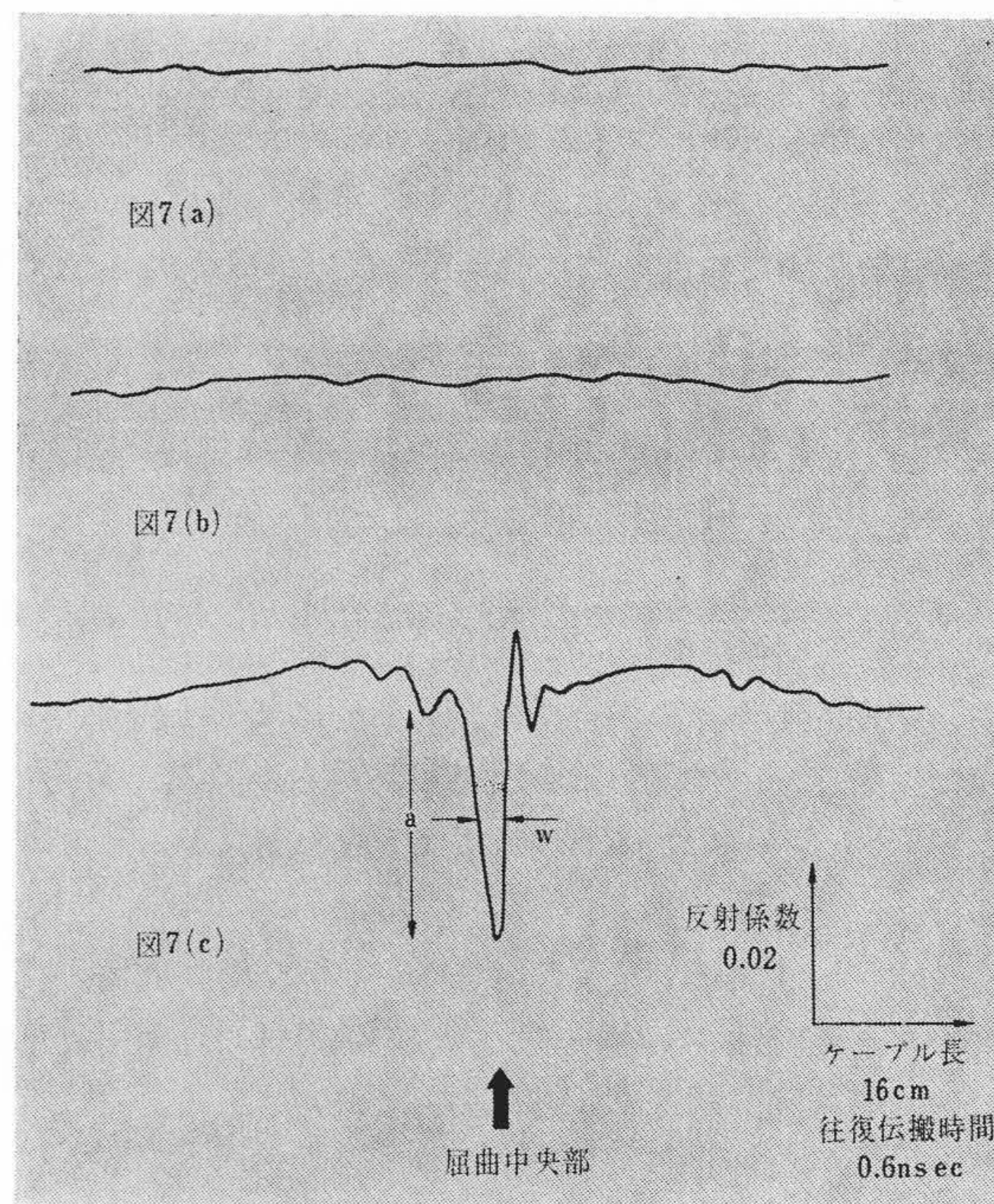
$$N = g\left(\frac{P}{kh}\right) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 N : クラック発生までの屈曲回数

P : コルゲートピッチ

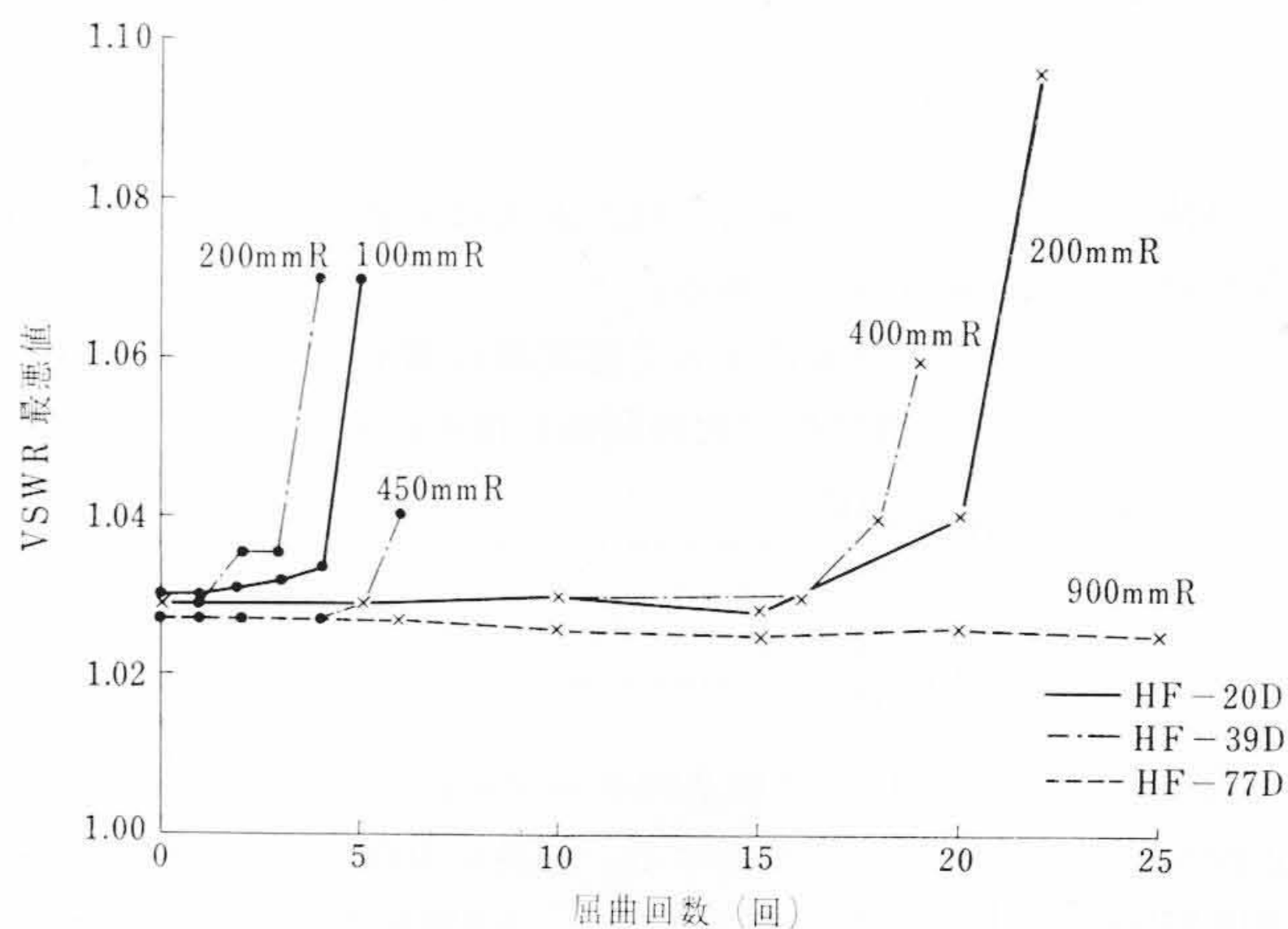
h : みぞ深さ

k : 曲げ倍率 (屈曲半径/外部導体外径)



(a) 初期値 (b) 10 回屈曲後 (c) 22 回屈曲後
ただし屈曲半径は 200mm である。

図 7 HF-20D ユニットパルス反射波形



縦軸は 1 GHz までの VSWR 特性の最悪値を示す。

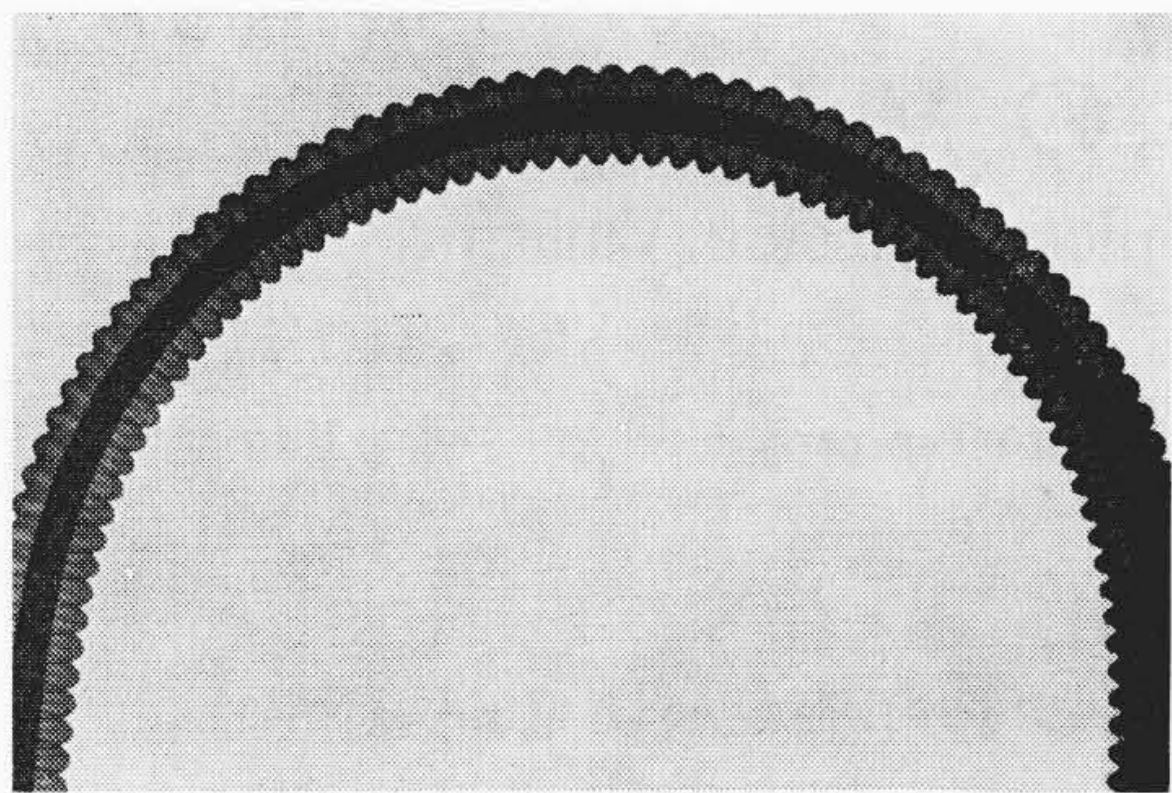
図 8 屈曲による VSWR の変化

しかし、ピッチを小さくみぞ深さを深くすることは屈曲特性は改善できても経済的ではない。同軸ケーブルの外部導体に使用したときは、ケーブルの屈曲特性はほとんど内部導体によって決定される。したがって、減衰量の増加の点も考慮したうえで $P/h=3\sim 4$ に決定した。この結果、10 回程度の屈曲では HF-20D, 39D, 77D でそれぞれ 200 mmR, 400 mmR, 900 mmR にて電氣的にも機械的にも何んら異常はおこらない。屈曲による特性の変化は、パルス試験および VSWR 測定によって観測できるが、特に前者は異常発生位置と異常の内容を直視できる利点がある。

HF-20D についてユニットパルスを使用した反射波形と屈曲回数の関係を図 7 に示す。図 7 (c) では部分的に微小静電容量が発生したと考えられ、その値は図にて半値幅を W 、反射係数を a とすると

$$C \doteq \frac{2 \cdot a \cdot W}{50} \dots\dots\dots (18)$$

となり、本例では 0.2 pF であり、1 GHz にて VSWR 1.06 となる。



(内外導体の相対位置, 形状には全く異常はみあたらない。)

図 9 HF-20D 100mmR 屈曲状態 X 線写真

この状態は内部導体に異常が生じておこるものである。

次に屈曲による 1 GHz 以下での VSWR 最悪値の変化の実測例を図 8 に示す。小径での繰り返し屈曲が可能であることがわかる。

さらに単一 U 字曲げでは HF-20D, 39D, 77D にて, 100 mmR, 200 mmR, 450 mmR まで曲げることができ, これらはケーブル外径の 3.5 ~ 5 倍に相当する。一般のアルミ被同軸ケーブルが 20 倍径程度であるから格段に改善されている。図 9 は屈曲状態での X 線写真を, 図 10 はテレビ放送用電力分配器に組み込んだ状態での写真を示したものである。

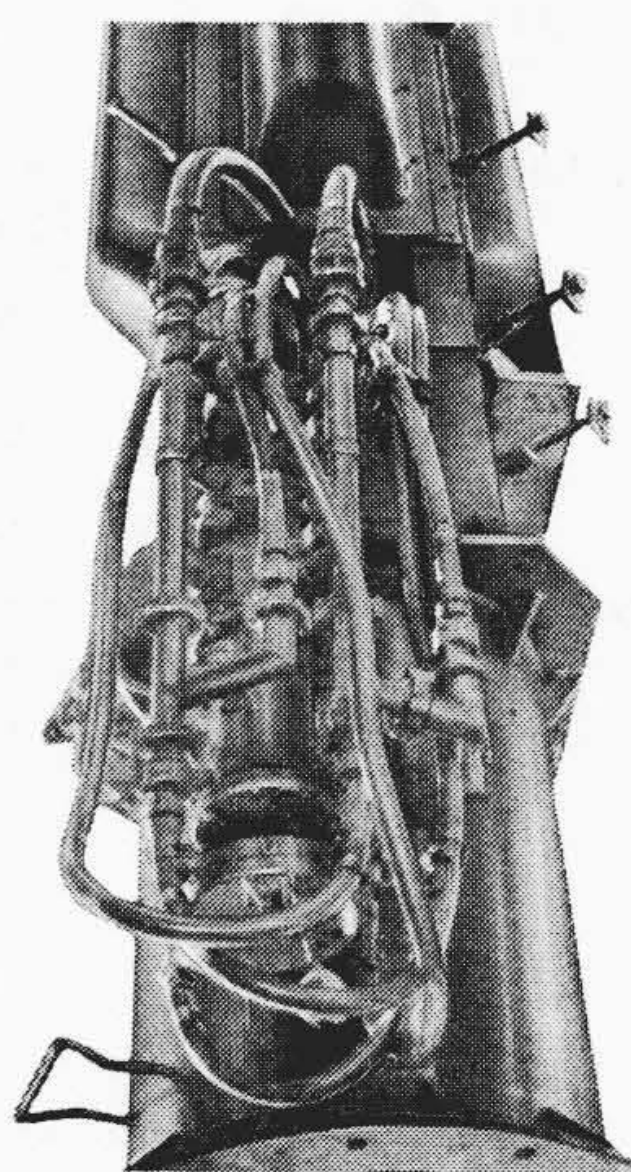


図 10 電力分配器に組込まれた HF-20D

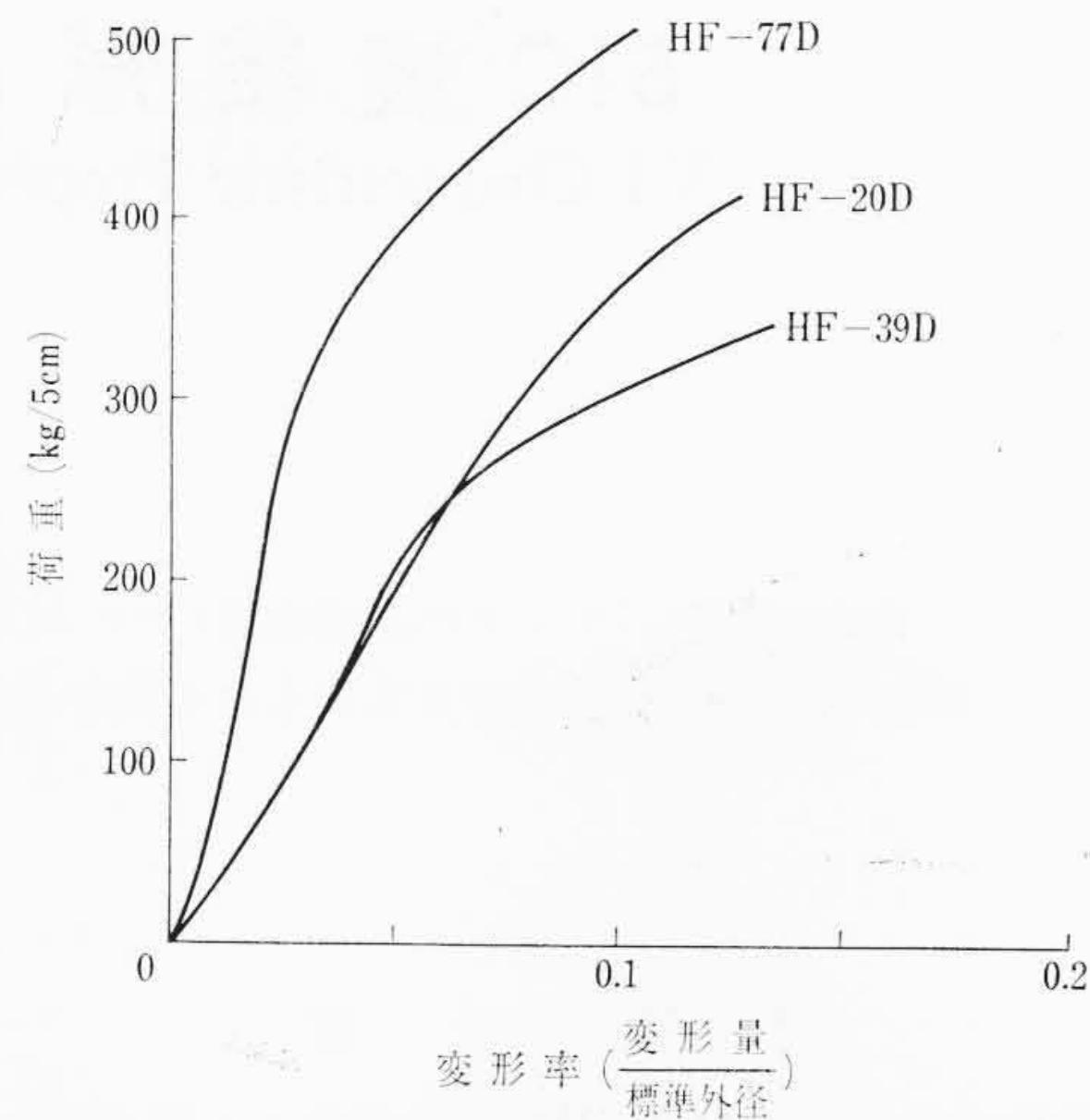
以上のようにすぐれた屈曲特性のため, 小さな鉄塔内での配線が可能になり, また比較的小さなドラムに巻くことができるため運搬が容易であるなどかすかすの利点が生ずる。

4.2 耐圧縮特性

コルゲート外部導体は耐圧縮特性のうえでもすぐれており, 平板の上においたケーブルに幅 5 cm にわたって荷重を加えた場合, HF 形高周波同軸ケーブルの荷重変形率特性は図 11 のカーブとなる。この特性はおもに外部導体厚さ, 形状(みぞ深さおよびピッチ)により決定される。HF-39D の特性が HF-20D を下回っているのはみぞ深さが相対的にやや浅いためであるが, 各サイズ HF-20D, 39D, 77D とともに弾性限荷重はそれぞれ 200 kg, 170 kg, 250 kg と非常に大きな値を示しており, 電気的な面からみてもこの範囲では全く異常はみられない。

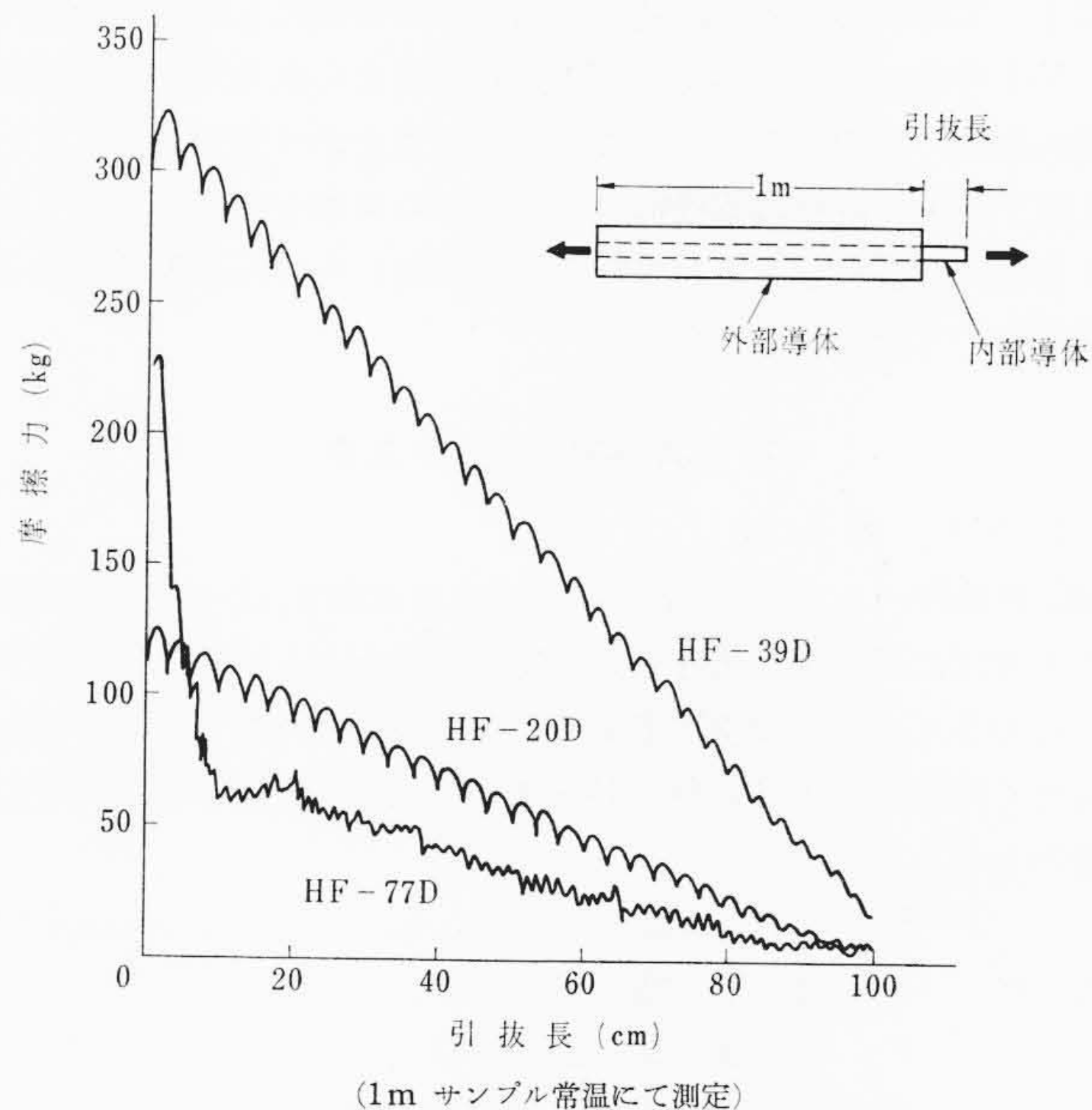
4.3 温度変化にもとづく内外導体の伸縮

同軸ケーブルでは昼夜あるいは夏冬の温度差あるいは通電時の温度上昇などにより, 内部導体と外部導体が相対的に移動することがあり長尺ケーブルの場合問題となることがある。しかし, HF 形高周波同軸ケーブルでは内外導体とも銅でできているため熱膨張係数に差がなく, アルミ被同軸ケーブルに比べると有利である。内外導体間の摩擦力の測定結果を示したのが図 12 である。HF-77D が特異な特性を示しているが, これは絶縁形状が HF-20D, 39D と異なりくし形をしているためである。しかし, 各サイズとも最大摩擦力は内部導体の動き始めにみられ, その値は 100 kg 以上あるため内外導体間の相対的ずれはおさえられ実用上問題にならない。



(5 cm 幅に荷重をかけた場合)

図 11 圧縮荷重変形率特性



(1m サンプル常温にて測定)

図 12 内外導体間摩擦力

5. 結 言

HF 形高周波同軸ケーブルの最大特長は, その溶接波付外部導体にあり, これにより次に示すおもな特性が決定される。

- (1) 可とう性が良好である。曲げ径を小さくすることができ, さらに繰り返し曲げ回数が多くとれる。
- (2) 内外導体間の摩擦力が大きく相対的ずれがおこりにくい。
- (3) 耐圧縮特性が良好である。
- (4) 電力容量が大きい。
- (5) 均等性が良好である。
- (6) 減衰量が小さい。

用途としては, UHF, VHF テレビ放送, 中短波 FM 放送送信用, マイクロ波中継施設, レーダ施設用などに適しており, 多方面にわたる使用に期待がもたれている。

参 考 文 献

- (1) 八田, 堀口, 星, 萩原: 電気通信学会全国大会 No. 453 (昭 36)
- (2) E. Scheffler: Telefunken Ztg., 35, 101 (Juni. 1962)
- (3) 熊丸: 信学誌 50, 16 (昭 42-12)
- (4) 吉岡, 山際, 高橋: 電気学会東京支部大会 No. 315 (昭 42)
- (5) 萩原, 花岡, 安達: 電気通信学会全国大会 No. 452 (昭 36)