

紙絶縁電力ケーブルの過度屈曲下における特性

Characteristics of Paper Insulated Power Cable under Excessive Bending

池 上 久 也* 今 井 利 宣**
Kyûya Ikegami Toshinobu Imai

要 旨

近年、電力ケーブルは高電圧・大サイズ化の傾向にある。これらのケーブルは製造中や布設時の曲げによって絶縁層に紙しわなどの異常が発生しやすいため、曲げ特性のすぐれたケーブルが要求されるとともに、曲げがケーブルに与える影響なども重要視されてきている。本稿は、これらの曲げがケーブルに与える影響を調べ、その問題点を明らかにするため、単心 OF ケーブルの過度屈曲試験を行ない、あわせて、SL ケーブル線心の過度屈曲下における電氣的破壊特性を調査した結果を報告するものである。

1. 緒 言

近年、発電所の単一容量が増大し、その大電力送電用ケーブルも高電圧・大サイズ化の傾向にある。そのためケーブルの外径はますます大きくなり、その製造や布設などの取扱いにあたり、曲げ径も大きくとる必要がある。しかし、既設の管路や人孔を利用してケーブルを布設する場合や、輸送および作業上の問題から、従来と比較し小さい屈曲径が要求されたり⁽⁵⁾、また絶縁層が厚いことなどのため、曲げ特性が重要な問題となりつつある。たとえば、ケーブルの屈曲による紙しわ・紙切れ、曲げをうけた状態の絶縁厚の変化、ケーブルの変形に伴う油膜の発生などの問題がある。また、分割導体を採用した場合は、導体の変形やそれに伴う絶縁層への影響などが問題となり、これらによる電氣的性能の低下が懸念される。

そこで、ケーブルの過度屈曲試験を行ない、屈曲下の導体の変形や絶縁層の状況などを調査し、ケーブルが曲げを受けた場合の問題点を検討するとともに、「曲げ」が電氣的特性に及ぼす影響について調査し、一応の結論を得たのでこれらについて述べる。

2. OF ケーブルの曲げ試験

2.1 試 験 方 法

OF ケーブルの曲げ特性を調査する方法として普通行なわれている曲げ試験は、単心ケーブルの場合、鉛被外径の 20 倍の直径のマンドレル外周にそってケーブルを往復 2 回（4 回の曲げ）曲げた後屈曲中央部を解体点検する方法をとっている。この方法は曲げたケーブルをもとのまっすぐな状態に戻して解体するため、紙切れなどの曲げの影響は調査できても、曲げを受けている状態の絶縁層の状況や、導体やケーブルの変形などはわからない欠点がある。それに対し、AEIC 規格⁽²⁾の曲げ試験は、曲げた試料を曲げたままの状態で切断し、その切断面の絶縁厚や絶縁層の状況を調査する点に大きな特長があり、この試験方法を適用した。

試験方法は、所定の径のマンドレルの外周にそって 3 回（1 往復半）の曲げを行なった後（ここまでは一般に行なわれている試験方法と同じ）4 度目の曲げを行ない、そのまま曲げた状態に保ち、屈曲中央部およびその両端、おのおの 30 cm を切断採取し、そしてそれ

表 1 被 試 験 単 心 OF ケ ー ブ ル 構 造 表

項 目		単 位	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
定 格 電 圧		kV	275	154			77		66
公 称 断 面 積		mm ²	1,000	1,500	1,200	800	1,500	100	290
導 体	構 成	—	91 本/扇形より線 中空 6 分割	61 本/扇形圧縮 中空 6 分割	61 本/扇形圧縮 中空 6 分割	165 本/中空円 形より線	91 本/扇形より線 中空 4 分割	19 本/中空円 形より線	51 本/中空円形 より線
	バ イ ン ダ	mm	0.25	0.25	0.25	な し	0.3	な し	な し
	外 径	mm	43.3	52.5	49.8	40.4	53.4	19.0	23.6
絶 縁	導 体 遮 へ い	mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.25
	絶 縁 構 成	μ	40, 70, 100, 125	70, 100, 125	70, 100, 125	70, 100, 125	125	125	70, 100, 125
	絶 縁 厚 さ*	mm	22.1	13.7	14.6	12.6	8.4	8.2	5.1
	絶 縁 遮 へ い	mm	0.5	0.5	0.5	0.25	0.3	0.3	0.75
	絶 縁 遮 へ い 構 成	—	カ ー ボ ン 紙 金 属 化 成 紙	カ ー ボ ン 紙 金 属 化 成 紙	カ ー ボ ン 紙 金 属 化 成 紙	カ ー ボ ン 紙	カ ー ボ ン 紙 金 属 化 成 紙	カ ー ボ ン 紙	カ ー ボ ン 紙 ア ル ミ テ ー プ
鉛 被	材 質	—	純 鉛	E 合 金	E 合 金	E 合 金	E 合 金	E 合 金	E 合 金
	厚 さ (平 均)	mm	4.3	3.8	3.7	3.5	3.3	2.4	2.9
	外 径	mm	96.0	88.5	86.1	72.3	78.1	40.3	40.8
補 強 層	ク ロ ロ プ レ ン 引 綿 テ ー プ	mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	黄 銅 テ ー プ	mm×枚	0.2×2	0.2×2	0.2×2	0.2×2	0.2×2	0.2×2	硬 銅 テ ー プ 0.1×2
防 食 層	ク ロ ロ プ レ ン 厚 さ	mm	4.3	4.7	4.2	4.2	3.0	3.0	ポ リ エ チ レ ン 3.5
	ク ロ ロ プ レ ン 付 帆布	mm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	黄 麻 布 2.0
ケ ー ブ ル 外 径		mm	109	102	98.5	85	88	50	55.5

*印：絶縁厚にはカーボン紙厚を含む

* 日立電線株式会社日高工場
** 日立電線株式会社本社

らの切断面でケーブルが曲げられた状態における導体の変形、絶縁厚の変化、絶縁層の状況を調査し、その後試料を解体して紙切れや紙しわの有無などを点検するものである。ケーブルの屈曲径は過度屈曲下の特性を検討するため、鉛被外径の約25~10倍径に選ばれた。試験したOFケーブルの構造は表1に示すとおりである。

2.2 屈曲状態におけるケーブルの断面

曲げたままの状態で切断した試料の断面のおもな観察結果を表2に示す。ケーブルが曲げられた場合、屈曲の外側の絶縁厚はうすくなり、反対に屈曲内側または側面では絶縁層がゆるんだ状態となってみかけの厚さは厚くなる。この絶縁層がゆるんだ状態になった所は、絶縁層の中間部や導体上、鉛被下などに間げきが発生し油膜を形成する。図1は分割導体および中空円形より線導体OFケーブルの屈曲状態の切断面の代表例である。図1(a)は過度屈曲によって鉛被下に間げきを発生した例であるが、このケーブルでは鉛被外径の23倍径屈曲でも間げきが発生しており、ケーブルによっては過度屈曲を与えなくてもある程度の間げきは発生するものとみななければならない。また図1(b)は、分割導体ほどケーブルの変形はない

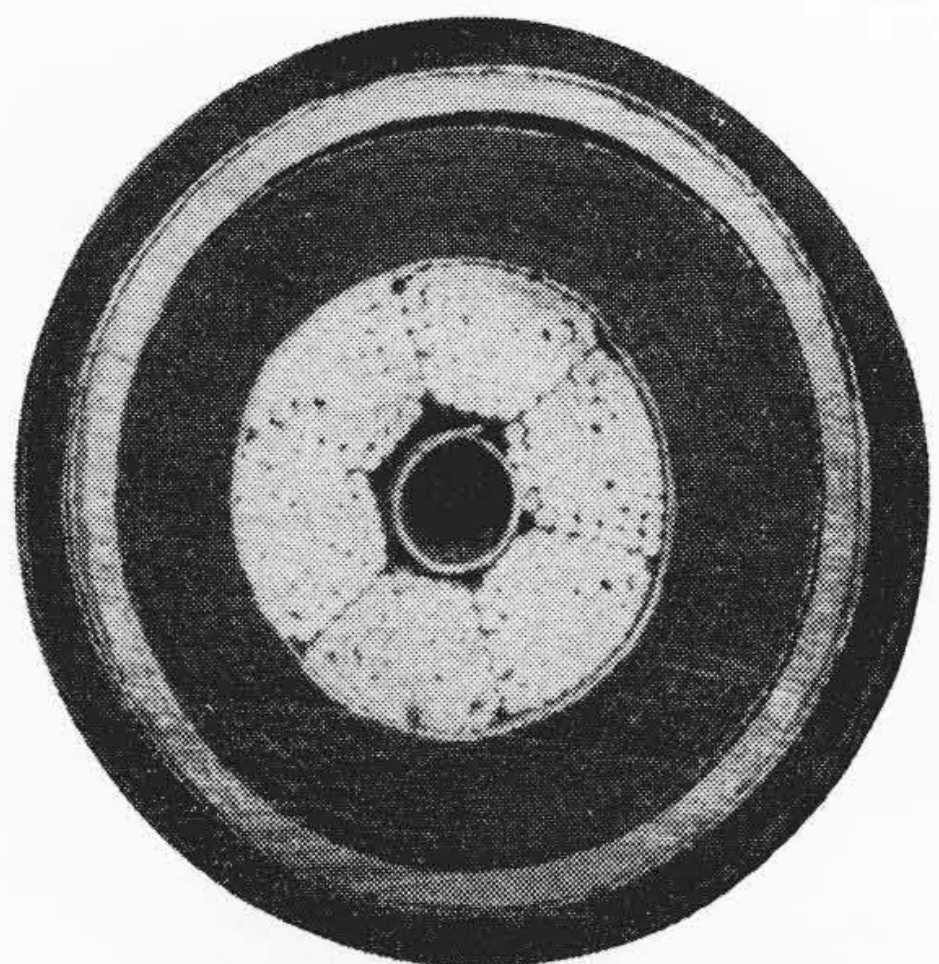
ので大きな間げきはないが、やはり鉛被下に微小間げきが発生している。

このように間げきの発生した場合、すなわち油膜が増大した場合の電気的特性は、特にインパルス特性が低下することが予想される⁽³⁾。また大サイズケーブルの場合は最大電位傾度と平均電位傾度の比が小さいことから、絶縁層外部の遮へいも重要である⁽¹⁾。この点試料No.4のようにカーボン紙のみの絶縁遮へいは、カーボン紙がインパルス電圧に対し絶縁性を示すことから好ましくない。日立電線株式会社では表1に示すように試料No.1, 2, 3, 5など大サイズOFケーブルの絶縁遮へいには金属化成紙を使用して鉛被下の実害ある油膜の影響を除去している。

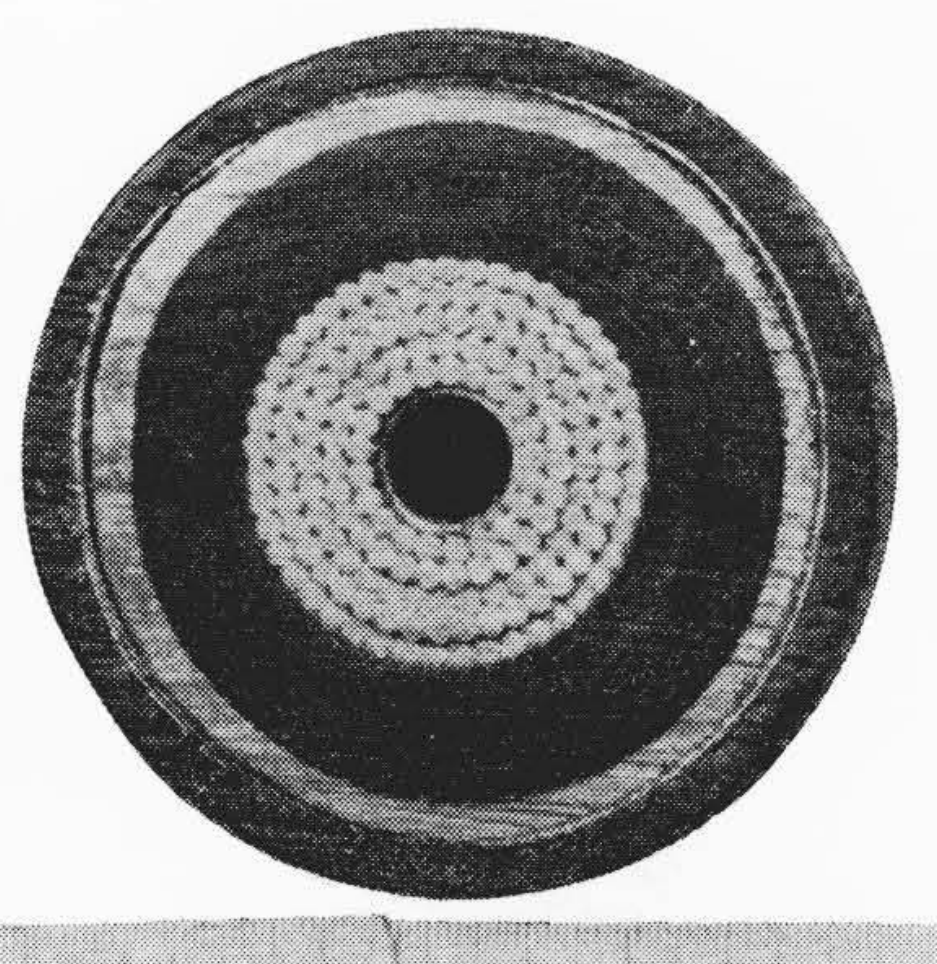
図2はケーブルが曲げられた状態における導体の変形率を示す。導体変形率は屈曲によって起こった変形分を屈曲前の導体外径に対する百分率としてあらわしたものである。図2にみられるように、この導体変形率は両対数目盛でほぼ直線的傾向を示し、154kV 1×800mm² OFケーブルについて実験式を求めた結果(1)式が得られた。

表2 屈曲状態におけるOFケーブルの切断面観察結果

試料	定格電圧 (kV)	公称断面面積 (mm ²)	ケーブル断面観察事項				D: 屈曲直径 d: ケーブル鉛被外径 () は屈曲直径 (mm)
1	275	1,000	D≒22 d (2,150)		D≒18 d (1,700)		
			屈曲内側の絶縁層中間部にわずかにゆるみあり。		屈曲内側の絶縁層中間部にわずかにゆるみあり。 (ゆるみの程度はわずかに大きい)		
2	154	1,500	20 d (1,800)	16 d (1,450)	12 d (1,100)	11 d (950)	
			屈曲内側の導体直上に微小間げき発生し、絶縁層にゆるみあり。	屈曲内側の導体直上、および絶縁層間に微小間げき発生。	屈曲内側の絶縁層間に0.2～0.5 mmの間げき、導体直上に微小間げき発生。	屈曲内側の絶縁層間に最大 1 mmの間げき、導体直上に微小間げき発生。	
3	154	1,200	23 d (2,000)		17 d (1,500)		
			鉛被と絶縁遮へい層との間に 0.2 mm の間げき発生。 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。		鉛被下と絶縁遮へい層との間に 0.2 mm の間げき発生。 間げき最大 1.6 mm 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。(ゆるみ程度やや大)		
4	154	800	20 d (1,450)	16 d (1,150)	12 d (900)	10 d (750)	
			鉛被下に 0.2 mm の間げき発生。 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。	鉛被下に微小間げき発生。 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。	鉛被下に 0.4 mm の間げき発生。 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。 (ゆるみやや大)	鉛被下に 1.2 mm の間げき発生。 屈曲内側の絶縁層にゆるみあり。 (ゆるみ大)	
5	77	1,500	22 d (1,750)		17 d (1,350)		
			屈曲内側絶縁層にわずかにゆるみあり。		屈曲内側絶縁層にわずかにゆるみあり。		
6	77	100	25 d (1,000)		18 d (750)		
			変化は認められない。		変化は認められない。		
7	66	290	17 d (700)	15 d (600)	12 d (500)	10 d (400)	
			変化なし。	屈曲内側にわずかにゆるみあり。	屈曲内側にわずかにゆるみあり	屈曲内側にわずかにゆるみあり。	



154 kV 1×1,200 mm² B-OFF ケーブル
鉛被外径の17倍径屈曲 (屈曲径 1,500 mm)



154 kV 1×800 mm² OF ケーブル
鉛被外径の16倍径屈曲 (屈曲径 1,100 mm)

図1(a) 屈曲状態のケーブル切断面 図1(b) 屈曲状態のケーブル切断面

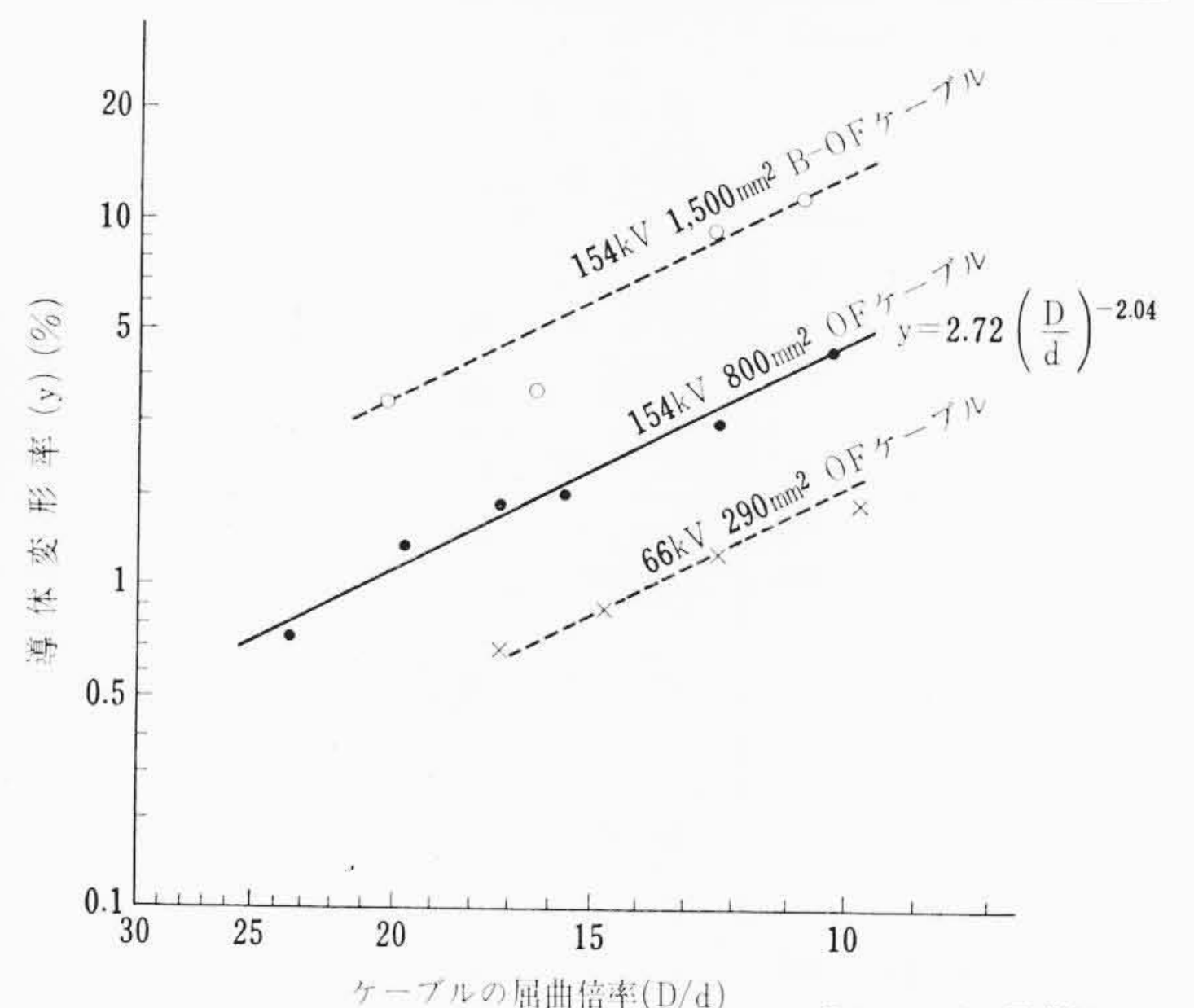


図2 屈曲状態におけるケーブルの導体変形率

$$y=2.72\left(\frac{D}{d}\right)^{-2.04} \quad \left(10<\frac{D}{d}<25\right).....(1)$$

ここに、 y : 導体変形率 (%)
 D : ケーブル屈曲径 (mm)
 d : ケーブル鉛被外径 (mm)

同じような試験をした他の2試料(試料No. 2, No. 7)については、実験式を導くまでに至っていないが、図2の点線に示すように、(1)式にはほぼ平行な直線的な傾向をとるとみることができる。また、図3は中空円形より線と中空分割導体の変形の度合を比較するため、鉛被外径の約17倍径屈曲における導体変形率を示したものである。この図から明らかなように、導体外径が大きくなるにつれ導体変形率は大きくなっていき、さらに分割導体は円形より線導体より変形率が大きく、すなわち変形しやすいことがわかる。

そこで導体の変形率を一般に

$$y=k\left(\frac{D}{d}\right)^{-a} \quad \left(10<\frac{D}{d}<25\right).....(2)$$

であらわした場合、 a はほぼ2に近い値であり、 k は導体によって異なる定数で中空円形より線では約2~3、分割導体では約3~6くらいと推定される。

つぎに、図4は屈曲径を変えた場合のケーブル断面の絶縁厚の変化を示したものである。ケーブルが曲げられた状態の外側における絶縁厚の減少程度は、中空円形より線および分割導体とも、約15%程度の減少で飽和し相当過酷な曲げをうけてもそれ以上は変化しない。しかし屈曲内側における絶縁厚の増加は、曲げ径が小さくなるにつれてみかけの絶縁厚はますます増加する傾向を示し、特に分割導体ではこの傾向が顕著である。これは分割導体では、導体バイン

ダの使用でその変形の度合が相当改善されているが⁽⁵⁾、やはり中空円形より線と比較した場合、導体の変形しやすいためであり、分割導体のOFケーブルではこの点に特に留意してケーブルを取扱う必要がある。すなわち、中空円形より線では導体の変形しにくいいため普通の曲げでは局部的に絶縁厚が薄くなったり、みかけ上極端に厚くなったりする可能性は少ない。一方、分割導体OFケーブルでは導体の変形しやすく、しかもその変形する方向も図1(a)にみられるように鉛被の変形する方向とは一致せず、導体セグメントのより合せ位置によって左右される。このため局部的に絶縁厚が薄くなったり、みかけ上極端に厚くなったりする可能性が大きい。大サイズOFケーブルで分割導体を採用する目的は表皮効果を低減し実効抵抗の増大を防ぐ以外にケーブルのたわみ性の増加にある⁽⁴⁾。従来単心OFケーブルの中空導体においては普通の中空でない導体と比較して比較的大サイズまで中空円形より線が採用されてきたが、曲げ剛性が大きくケーブルが曲げにくいという曲げ特性のすぐれたケーブルの製造を困難にしている。そのため4分割や6分割の分割導体採用されてきているが、前述のような変形しやすいという問題がある。曲げやすく変形しがたいという背反条件をみたすケーブルの構造を開発する必要から、セグメントの構成の検討、バインダテープの採用とその材質、構成の改善などを行ない、曲げ特性のすぐれたケーブルの開発に効果をあげ、分割導体はすでに数多くの納入実績をあげている⁽⁵⁾。

2.3 屈曲径と絶縁体損傷の関係

切断面の観察を行なった試料を曲げたままの状態で解体し絶縁層の状況を調査した。表3は特に変化の認められた部分を示したもの

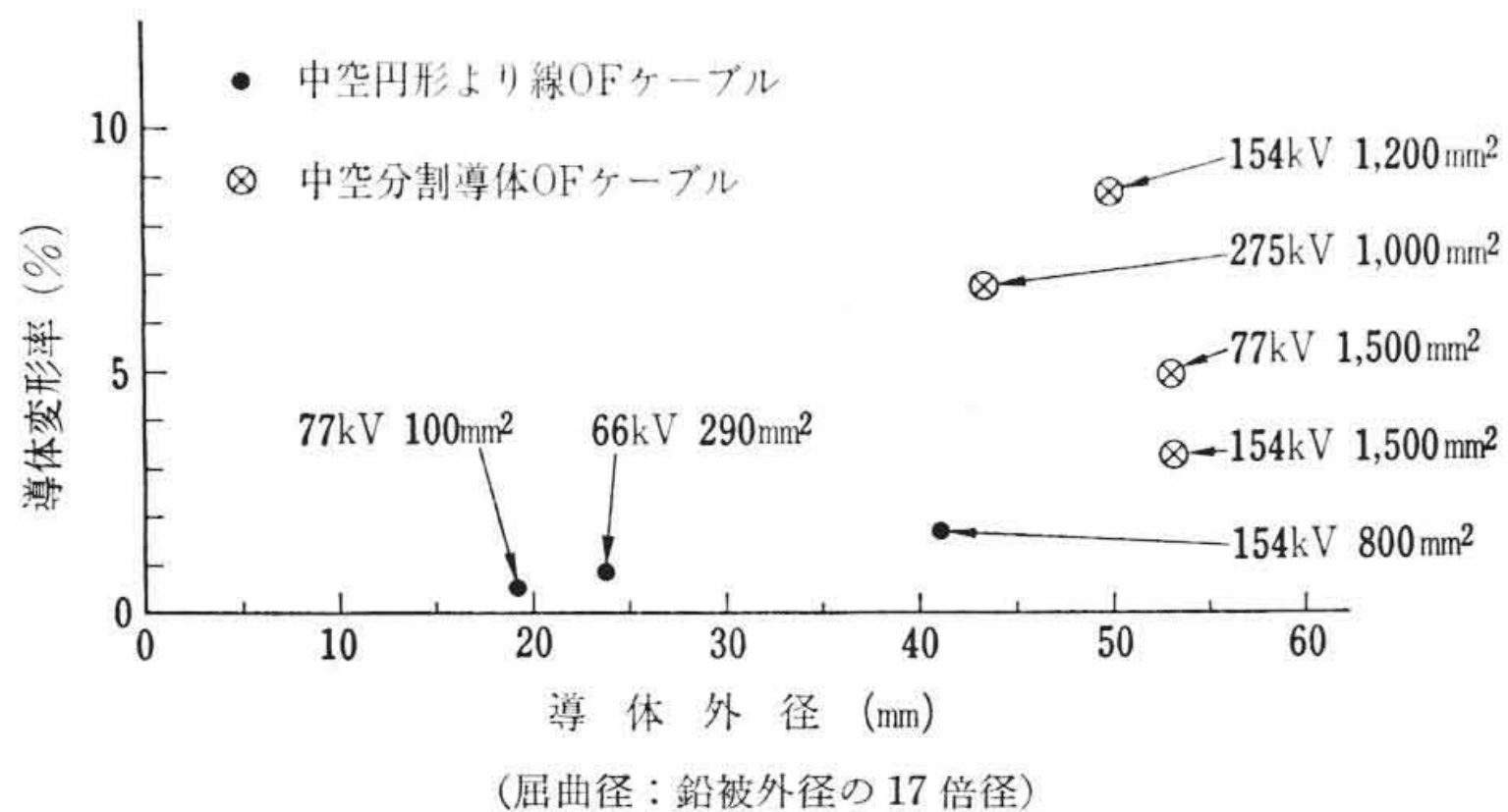


図3 屈曲状態におけるケーブルの導体外径と変形率の関係

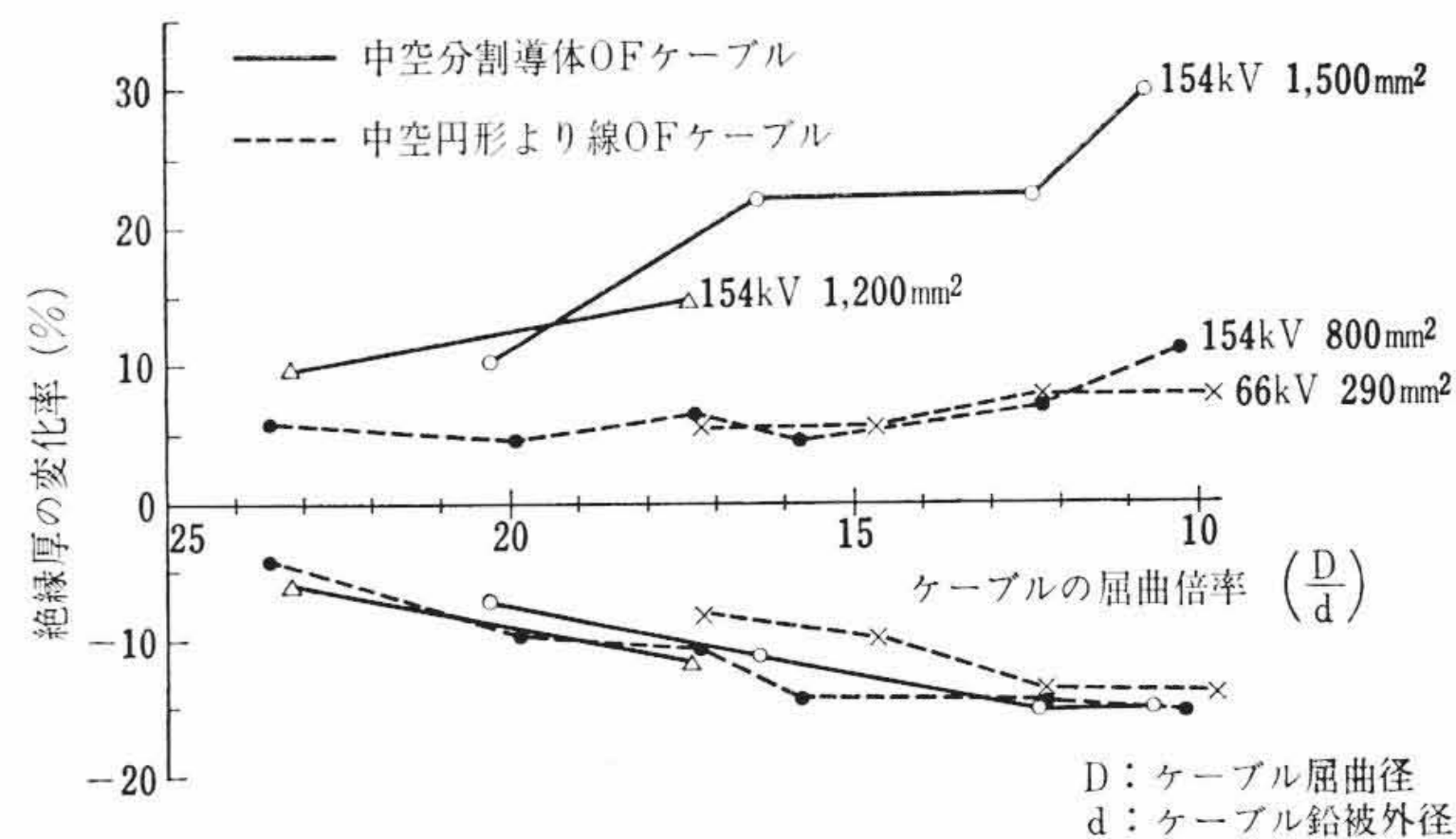


図4 屈曲状態におけるケーブルの絶縁厚変化率

表3 屈曲試験したケーブルの解体結果

試料	定格電圧 (kV)	公称断面積 (mm²)	観察項目	ケーブル解体観察結果				クリーズ: バットスペースへの落ちこみしわ バックル: 座屈しわ ソフトスポット: 絶縁層が局部的にやわらかい所		
				ケーブル解体観察結果						
2	154	1,500	屈曲直径	20d (1,800)	16d (1,450)	12d (1,100)	11d (950)			
			紙切れ*	0	0	10個所	49個所			
			紙しわ	無	バックル(微小), クリーズ(小)	バックル(小), クリーズ(中)	バックル(大), クリーズ(大)			
			その他	—	絶縁層にやわらかい所あり。	ソフトスポットあり	顕著なソフトスポットあり。			
4	154	800	屈曲直径	24d (1,700)	20d (1,450)	17d (1,250)	16d (1,150)	12d (900)	10d (750)	
			紙切れ*	0	0	0	1個所	17個所	87個所	
			紙しわ	無	無	かすかなちりめん状しわ		バックル(中), クリーズ(中)	バックル(大), クリーズ(大)	
			その他	—	—	導体上カーボン紙にクリーズあり。	導体上カーボン紙にクリーズあり 絶縁層にやわらかい所あり	ソフトスポットあり	顕著なソフトスポットあり。	
7	66	290	屈曲直径	17d (700)	15d (600)	12d (500)	10d (400)			
			紙切れ*	8個所	16個所	35個所	179個所			
			紙しわ	クリーズ(小)	ちりめん状しわ(中), クリーズ(中)	ちりめん状しわ(大), クリーズ(中)	バックル(中), クリーズ(大)			
			その他	切れは絶縁内層部うす紙のクリーズ部分に発生。	ちりめん状しわは絶縁中間層にみられた。	ちりめん状しわは絶縁中間層にみられた。	バックルは絶縁外層部にみられた。			

*印: 屈曲中央部30cmに起こった紙切れ数

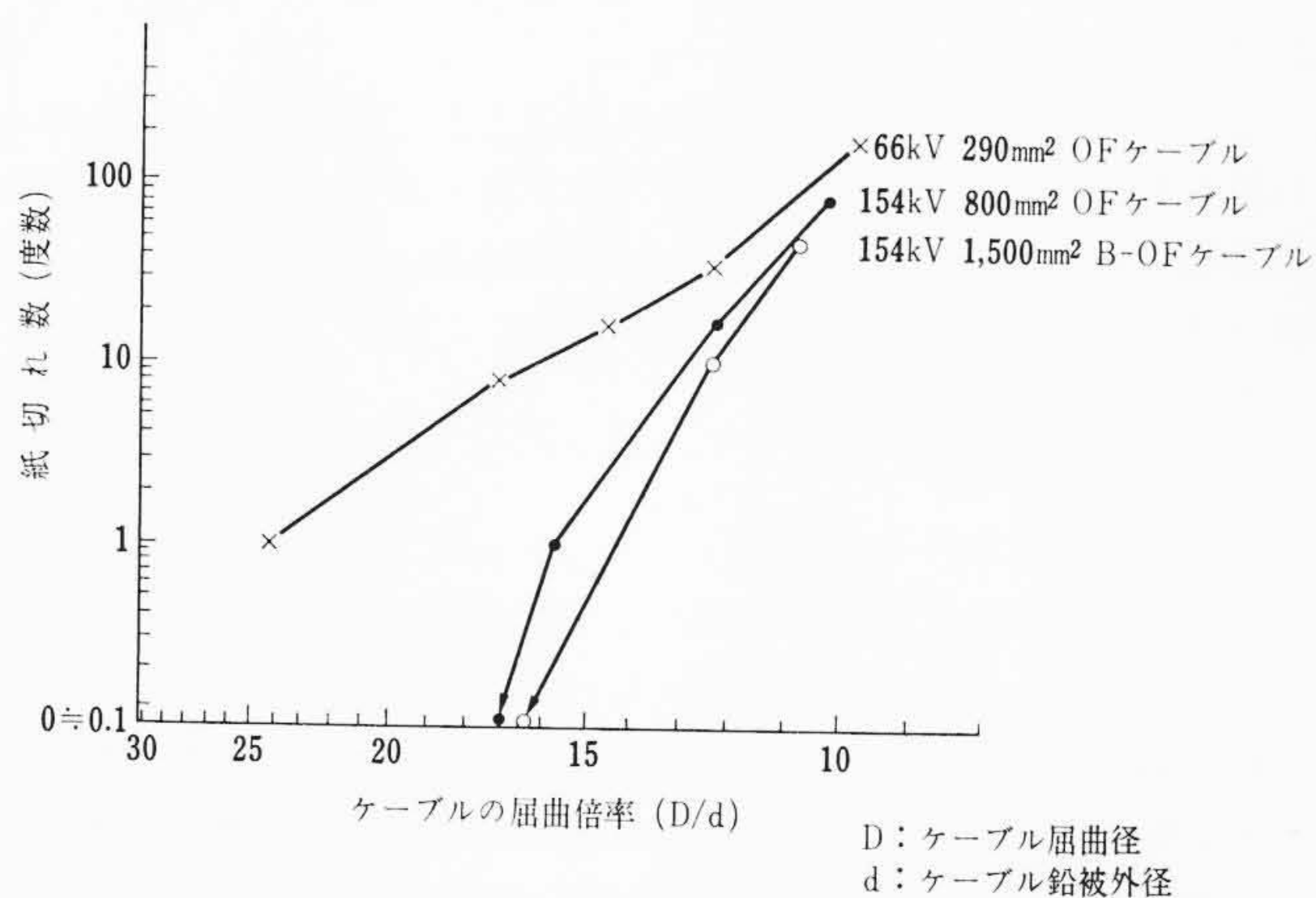
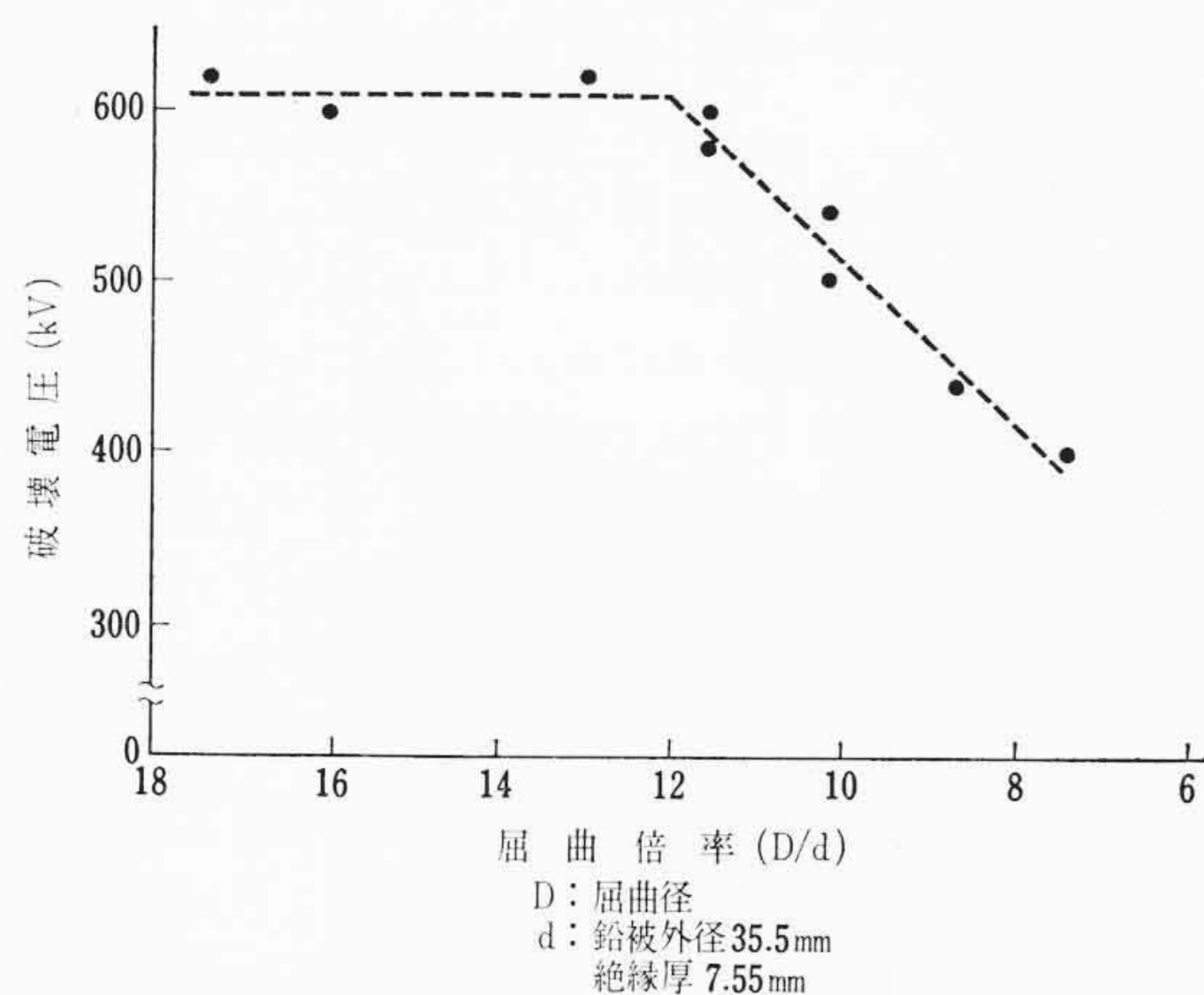
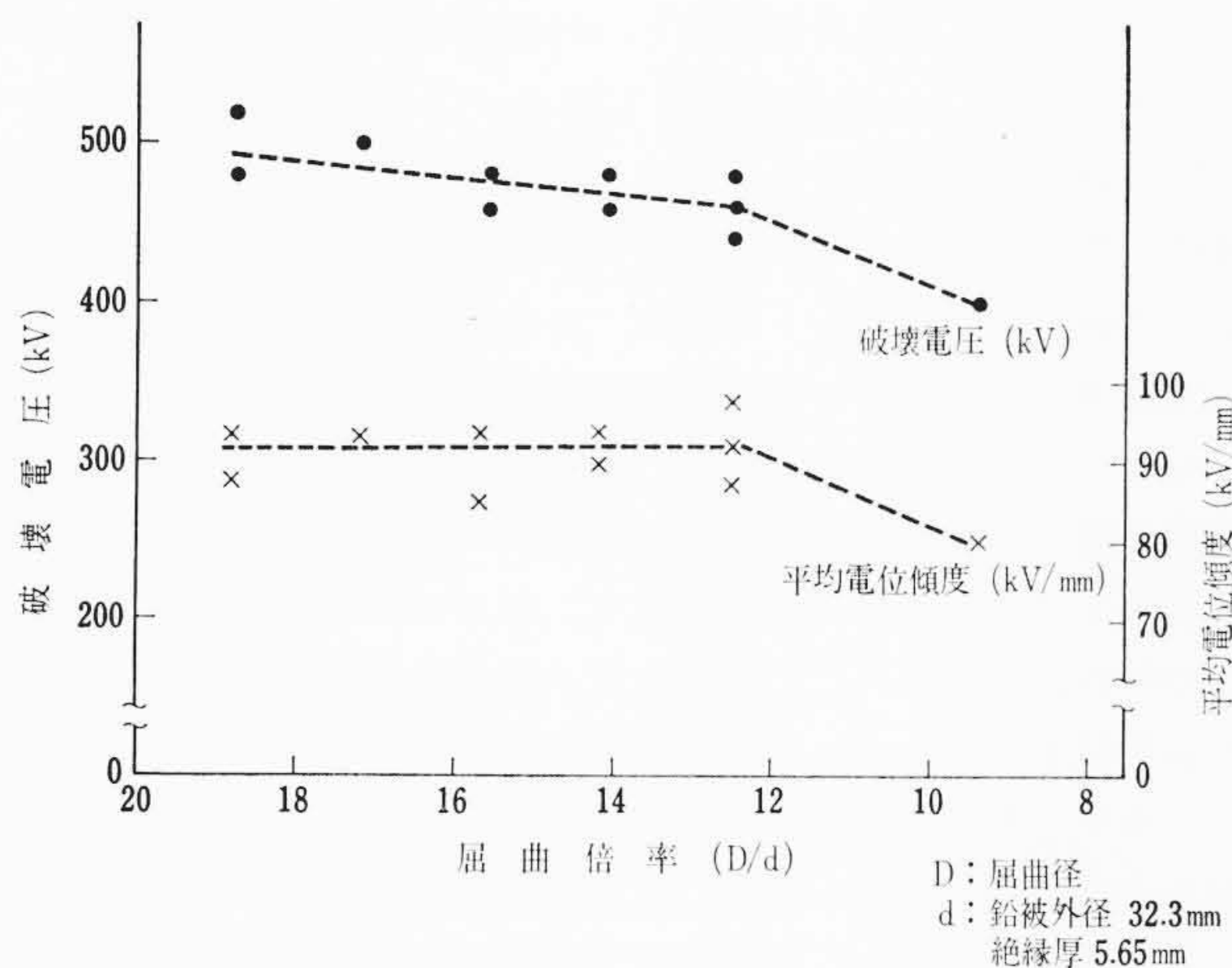
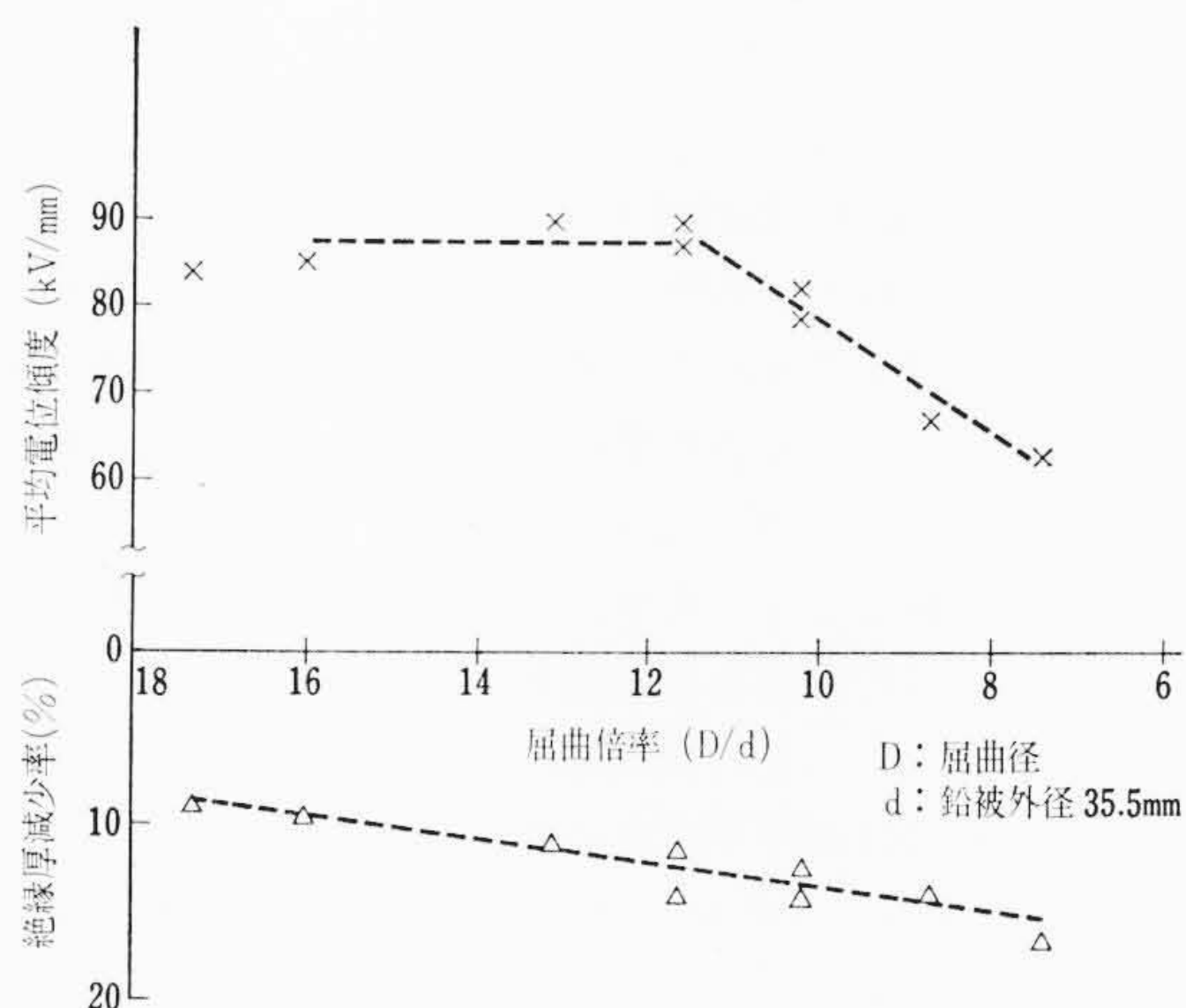


図5 屈曲中央部 30 cm の紙切れ数と屈曲倍率の関係

図7 33 kV 200 mm² SL ケーブル線心
インパルス破壊電圧特性図6 22 kV 200 mm² SL ケーブル線心
インパルス破壊電圧特性図8 33 kV 200 mm² SL ケーブル線心の絶縁厚変化率と
インパルス破壊平均電位傾度の関係

である。曲げ径は鉛被外径の約 20～10 倍であったが、絶縁層の損傷程度はケーブルによって相当異なり、特に試料 No. 7 では損傷がはげしい。これは屈曲倍率は他のケーブルと同じでも屈曲径が相当小さいためである。また、分割導体と中空円形より線導体のケーブルを比較すると、紙切れや紙しわは前者が良い特性を示している。

ケーブルはある程度以上に曲げられた場合、その屈曲内側にはさざ波状の紙しわができ、さらに曲げが過度になると座屈しわが起る。座屈しわは絶縁層の外層ほど大きく、内層になるにつれ小さくなるが、座屈のためそこで一部紙切れが起る。また絶縁紙の突合せ間げきに落ち込んでできるしわ(クリーズ)のため絶縁層内層の薄紙にも紙切れが起る場合がある。またケーブルが過度に曲げられた場合、その屈曲外側では絶縁紙相互のすべりが均一に行なわれず、絶縁層が局部的に突合せ部分で口を開いた状態になり、ケーブルがもとの直線状に戻されても絶縁層はもとに戻らずその部分が柔らかくなるいわゆるソフトスポットに成長する。このソフトスポットは絶縁層の厚い高電圧ケーブルでは特に発生しやすいので、ケーブルの布設などの取扱いの際は特に注意を要する。これらの紙しわやソフトスポットの発生は、曲げにくいケーブルでは均一に曲げが行なわれないこともあって特に起こりやすい。

図5は曲げ試料中央 30 cm に起こった紙切れ数と屈曲倍率の関係を図示したものであるが、紙切れの起こった範囲では両対数目盛で直線に近い傾向を示し、いずれも曲げ径が小さくなるにつれ紙切れ数が累積的に多くなっていくことが明らかとなった。

3. 過度屈曲状態におけるケーブルの電氣的破壊特性

3.1 SL ケーブル線心のインパルス破壊特性

過度屈曲下におけるケーブルの電氣的破壊特性を調べるため、SL ケーブル線心を用いて屈曲状態のインパルス破壊試験を行なった。試験としては、曲げ試験を行なったケーブルをマンドレルに 1 回以上完全に巻きつけた状態に保ち、導体に負極性のインパルス電圧を 360 kV より 20 kV 昇圧でおのおの 3 回課電し破壊させた。

図6は 22 kV 200 mm² SL ケーブル線心のインパルス破壊特性である。破壊電圧は屈曲径の 15 倍付近より屈曲径が小さくなるにつれやや低下しており、ケーブルの破壊点はおもに屈曲外側の絶縁層の薄いところで起こりやすい。そして破壊点の近くの絶縁厚で求めた破壊平均電位傾度は低下しない。すなわち、屈曲倍率の 15～12 倍の範囲で破壊電圧がやや低下するのは屈曲によりケーブルの絶縁厚が薄くなっているためであるといえる。次に図7は 33 kV 200 mm² SL ケーブル線心について、さらに過度の屈曲を行なったときのインパルス破壊特性である。またこれを屈曲による絶縁厚の減少程度と平均電位傾度の関係を示したのが図8である。この図でも図6と同じように屈曲倍率が約 12 倍くらいまでは平均電位傾度は低下していないので、この範囲の破壊電圧の低下は絶縁厚が薄くなるためであるといえる。しかしそれ以下の屈曲径では平均電位傾度も著しく低下しており、破壊電圧の低下は絶縁厚の減少だけでは説明できない。つまり 12 倍径以下の屈曲ではほかの要因、すなわち紙切れや紙しわが破壊電圧の低下をもたらすと考えられる。事実、ほとんどの

破壊は屈曲内側の座屈の顕著な紙しわの発生していた部分で絶縁破壊していた。

以上のことから、SLケーブル線心の過度屈曲下のインパルス破壊特性については次の三つの領域に分けることができる。第1の領域は特性のばらつきの範囲で、曲げをうけてもほとんどインパルス特性の低下のない範囲、第2は曲げにより実効の絶縁厚が減少してその分だけ破壊電圧がわずかに低下する領域、第3は屈曲による紙しわや紙切れにより著しく破壊特性が低下する領域である。なお、交流長時間破壊特性についてもインパルスの場合と同じような試験を行ない、インパルス特性とほぼ同じ結果を得ることができた。しかし、これらの特性や、傾向はインパルスの破壊特性も含め、あくまでも新しいケーブルについての短時間の試験による特性であり、過度屈曲下において長期間実負荷がかかった場合の特性とは当然異なると考えられ、以上の結果からそのままSLケーブルの許容限界を求めるには問題がある。

3.2 単心OFケーブルのインパルス破壊特性

SLケーブル線心についての特性は明らかとなったが、OFケーブルについても同様の現象を示すかどうかは興味ある問題である。OFケーブルでは、電気的特性に対する曲げの影響は屈曲倍率20倍以上ではないといわれている⁽⁶⁾。しかしケーブルが高電圧大サイズ化されるに伴い従来より小さい屈曲倍率が要求される状況にあり⁽⁵⁾、屈曲状態あるいは屈曲作業による電気特性の変化が懸念される。そこで、試料No.7を用いてOFケーブルについてもSLケーブル線心と同様の試験を行なったが、屈曲径の大きい3試料（屈曲倍率が17, 15, 12倍径）は端末補強部ケーブル端で絶縁破壊し全体的な傾向は把握できなかった。ただ、屈曲径が400mmφ（鉛被外径10倍径屈曲）の試料では曲げ中央部の紙切れの顕著に発生した部分で破壊し、電圧も普通のOFケーブルより30%近くも低い値であった。OFケーブルとSLケーブルについて紙しわの発生する屈曲倍率を比較すると、前者は約15倍径、後者は12倍径であった。また屈曲による破壊電圧の低下の理由も両者では当然異なると考えられる。すなわち、OFケーブルでは、紙しわ・紙切れのほか油膜の増大、絶縁層のゆるみなどの影響もあると考えられる。これらのことから、OFケーブルの屈曲下における絶縁破壊特性はSLケーブルの特性より当然屈曲倍率の大きいほうで低下がはじまるものとみなけ

ればならない。

このほかOFケーブルの電気的特性に大きく影響を及ぼすと考えられるものに、曲げによって発生するソフトスポットと鉛被下や絶縁層間の間げきの問題がある。これらの問題については短期間の試験だけではなく、ケーブルを長期間使用した場合どうなるかについても十分検討する必要がある。

4. 結 言

従来、曲げ試験はとかく紙切れなど曲げ操作の影響だけを調査する目的で行なわれているが、曲げられた状態のケーブル断面の観察や絶縁層の状態の調査もきわめて有意義であることがわかった。またSLケーブル線心の屈曲状態におけるインパルス破壊特性は、屈曲倍率により三つの領域に分けられることがわかったが、OFケーブルではどのような特性を示すかは今後の課題である。紙絶縁電力ケーブルが、実際に使用されている状態でその特性を低下させるものとしてはおもに外傷や腐食などの外的な原因が多い。しかしそれ以外のケーブルの内的な原因としてはやはり曲げ特性が問題となる。特に高電圧大サイズケーブルではそうであり、今後ますます曲げ特性が重要性を増すものといえる。ケーブル製造中や完成後曲げによって発生する紙しわ・紙切れ、またソフトスポットの防止対策としては導体バインダの構成をはじめ紙厚や紙幅などの設計上の問題はもちろんのこと、製造条件の選定も重要である。すなわち、紙巻時の湿度や張力の調整または紙巻後の曲げ径の選定など特に注意して製造条件を管理する必要がある。そしてこれらの改善策の効果確認や特性調査などのためにも曲げ試験はたいせつである。以上述べた試験結果がケーブルの製造や取扱いのうえになんらかの参考になれば幸いである。

最後に、終始ご指導ご協力いただいた関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 橋本, 比企野, 渡辺, 網野: 日立評論 45, 684 (昭38-4)
- (2) AEIC Specification 5th Edition (Jan. 1951)
- (3) 小島, 久保, 田中: 電気四学会連大会 No. 493 (昭39-4)
- (4) 比企野, 渡辺, 庄司: 日立評論 39, 1053 (昭32-9)
- (5) 飯塚, 内藤, 今井(敏), 千葉, 橋本: 電力 50巻8号(昭41-7)
- (6) T. Takagi, S. Takahashi, T. Tabata, K. Kikuchi: IEEE Transactions Paper No. 31 TP 65-733