

大容量 OF ケーブルの問題点

Problems on Bulk Power Oil Filled Cable

橋本 博 治*
Hiroji Hashimoto

比企野 恭 二**
Kyôji Hikino

渡辺 靖 明**
Yasuaki Watanabe

網 野 弘**
Hiroshi Amino

内 容 梗 概

最近、大容量火力発電所の引き出しに使用されるケーブルは布設ルート上の用地難、経済性などのため1回線当たりの送電容量はますます大きなものが要求される傾向にある。

ケーブルの送電容量を大きくするためにとられる方法として、本稿では主に導体断面積を大きくする方法について検討した。ケーブルの性能面からみると導体断面積が、 800 mm^2 を超えると曲げ剛性の増加と、電気性能特にインパルス耐電圧の低下が問題となるが、前者については分割導体の採用、後者については絶縁層上にカーボン紙と金属化紙の組合せ巻きの遮へい層を用いることによって改善できることを明らかにした。送電電圧と導体断面積について送電容量当たりの線路建設費を検討したが、地中ケーブルについてのみ考えると、 140 kV における導体断面積が $1,000\sim 1,200\text{ mm}^2$ 分割導体 OF ケーブルが最も経済的であることが明らかとなった。

1. 緒 言

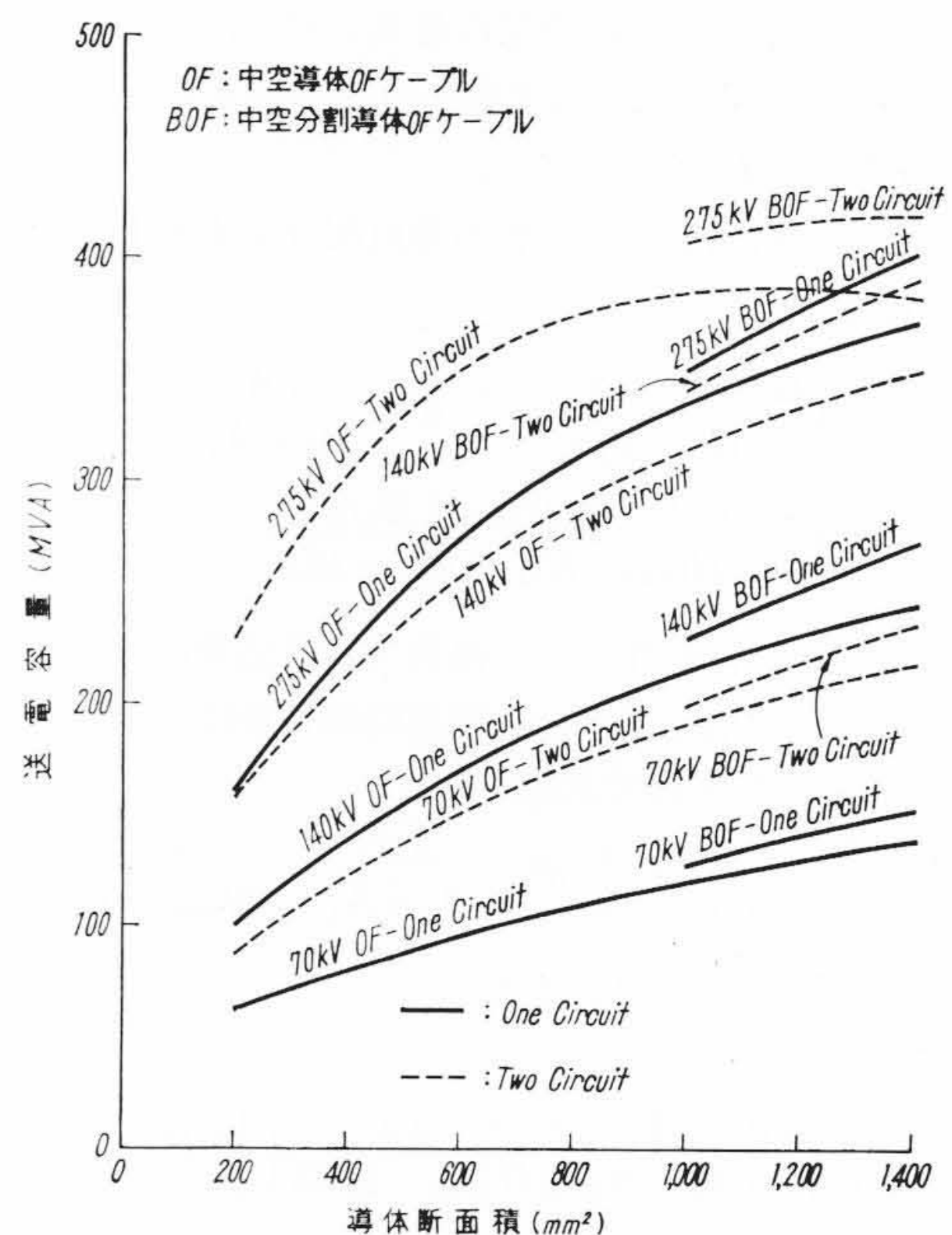
日本においては水力電源開発可能地点の減少ならびに急激な電力需要に応ずるため、1地点 500 MVA 以上の大容量火力発電所の建設が進められている。これらの火力発電所は大都市内または近郊の電力需要地域に設置されるため、架空送電線による引き出しはむずかしく、多数条の地下ケーブルによって需要地域の変電所まで連絡されている。これらの例として京浜地区の川崎発電所では 525 MVA の容量に対して 140 kV 単心ケーブル6回線が使用されており、関西地区の堺港発電所では 750 MVA に対し 140 kV 単心ケーブル2回線、 70 kV 単心ケーブル2回線の使用が計画されている。以上はすでに実現したかあるいは計画のほぼ決定したものであるが、今後の計画においては単位容量はますます増大する傾向にあるので、これに伴ってケーブル送電システムに対しても大送電容量をもつものが要求されると考えられる。

ケーブル送電容量の増加手段としては(1)電圧を高くする方法、(2)導体断面積を大きくする方法、(3)並列条数を多くする方法、および(4)強制冷却を行なう方法などがある。これらの中でケーブル自体の問題は(1)～(3)である。電圧を高くする方法は経済的であるが送電システムの他の機器との連系という点を考慮しなければならないので一義的には決定できない。したがって現存の送電電圧の範囲内で考えるとすれば(2)および(3)が検討の対象となりうる。本論文ではこの2点について経済性および技術上の問題を比較検討したい。

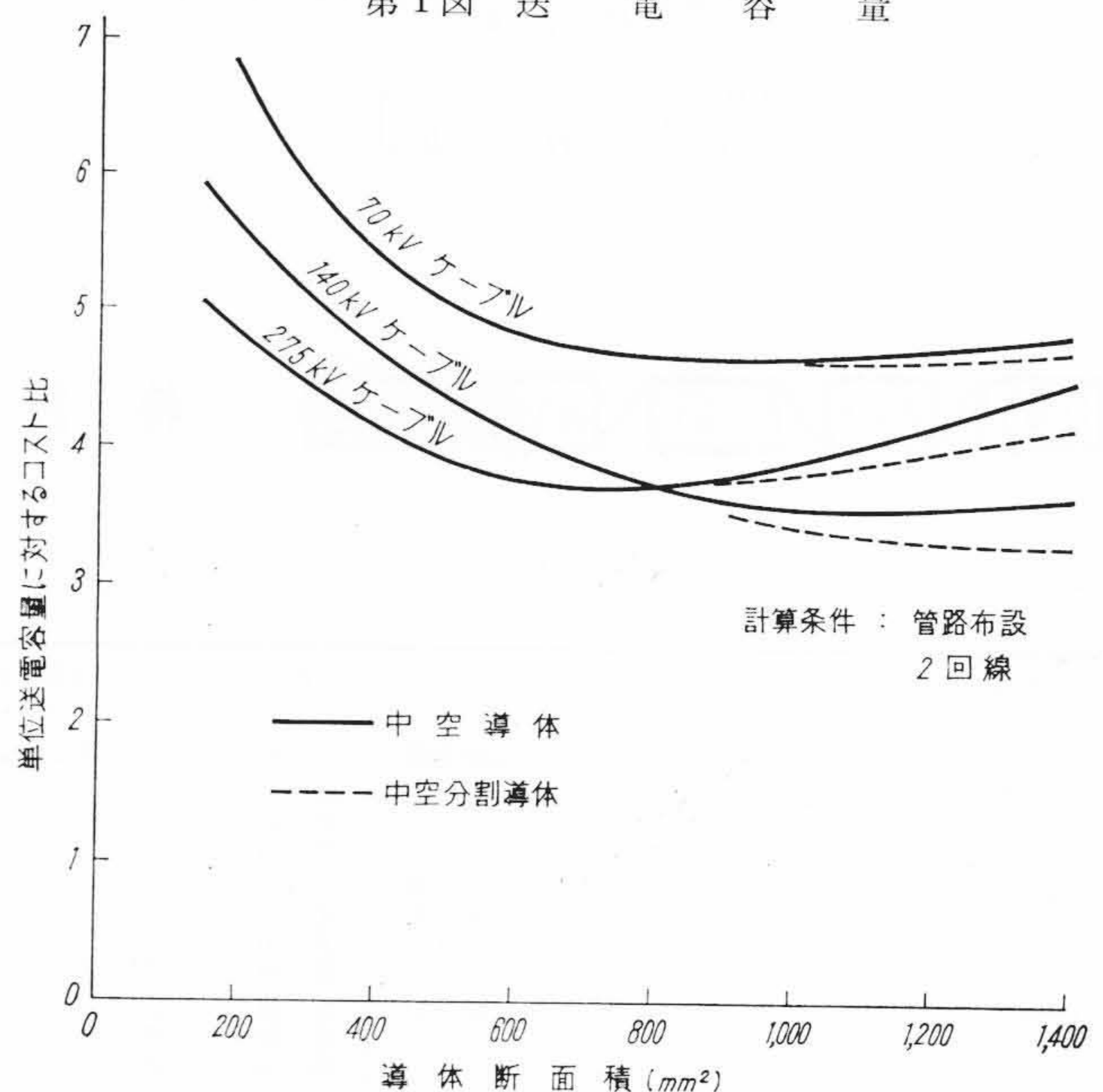
2. 送 電 容 量

大容量を地下ケーブルによって送電する場合、これを1回線で送るか2回線で送るかは経済的な問題と技術的な問題とから検討する必要がある。技術的に可能であるならばできるだけ大きなサイズのケーブルを使用して回線数を減少させたほうが有利と考えられる。各電圧における導体断面積と送電容量の関係を示すと第1図のとおりである。 275 kV の場合には導体断面積の大きい場合には断面積を大きくしても送電容量はそれほど増加しない。この理由は静電容量の増加による誘電損失の増加のためであり、興味深い点である。

一方、経済的にはこれに要する初期建設費と送電時の運転コストが比較の対象となるがこれを示すと第2図および第3図のとおりで



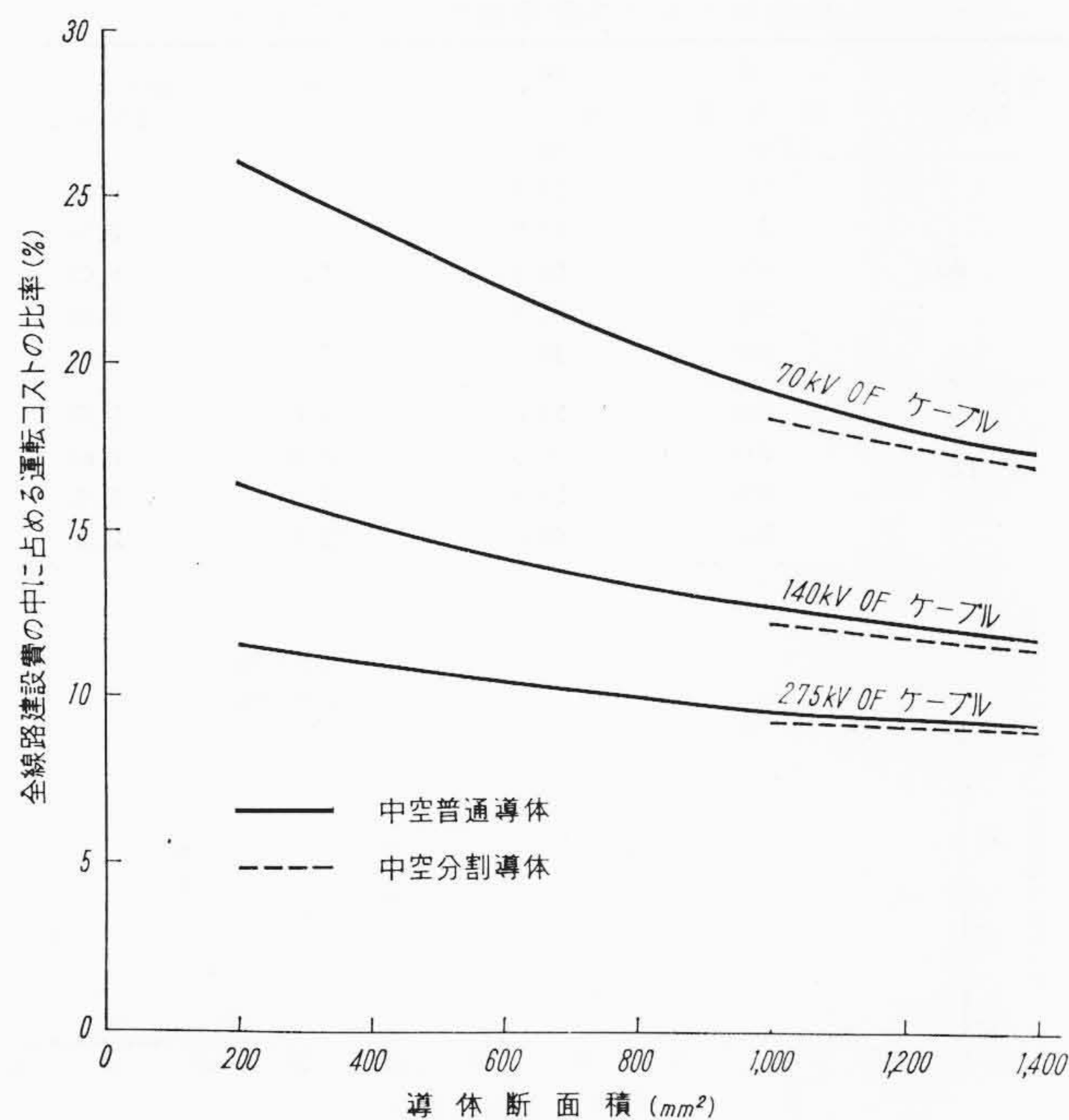
第1図 送 電 容 量



第2図 送電容量当たりの線路建設費

* 日立電線株式会社電線工場 工博

** 日立電線株式会社電線工場



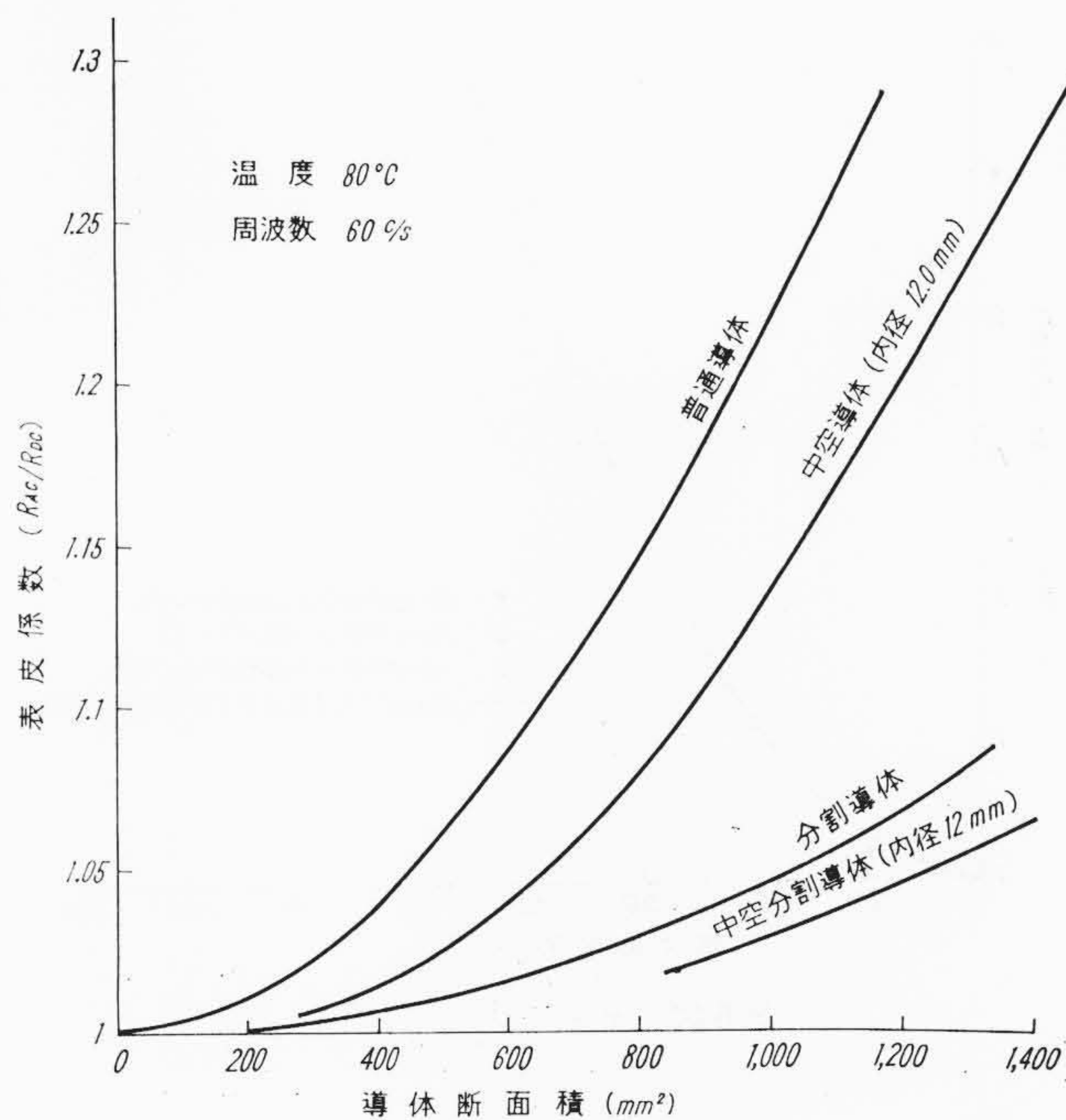
第3図 運 転 コ ス ト

ある。送電容量当たりの建設費は各電圧階級のケーブルとも最小値となるもっとも経済的な導体断面積がある。これ以上では導体断面積の増加は不経済となる。分割導体の採用はこのコスト自体を低減しかつもっとも経済的な導体断面積を大サイズ側へ移動させることになる。運転コストは導体損失および誘電損失とを金額に換算し、線路の新設時にこの金額を投下する必要があるものとして試算した結果である。導体断面積の増大に伴って初期建設費中に含まれる割合は低下し、この場合にも分割導体が有利であることが明らかである。

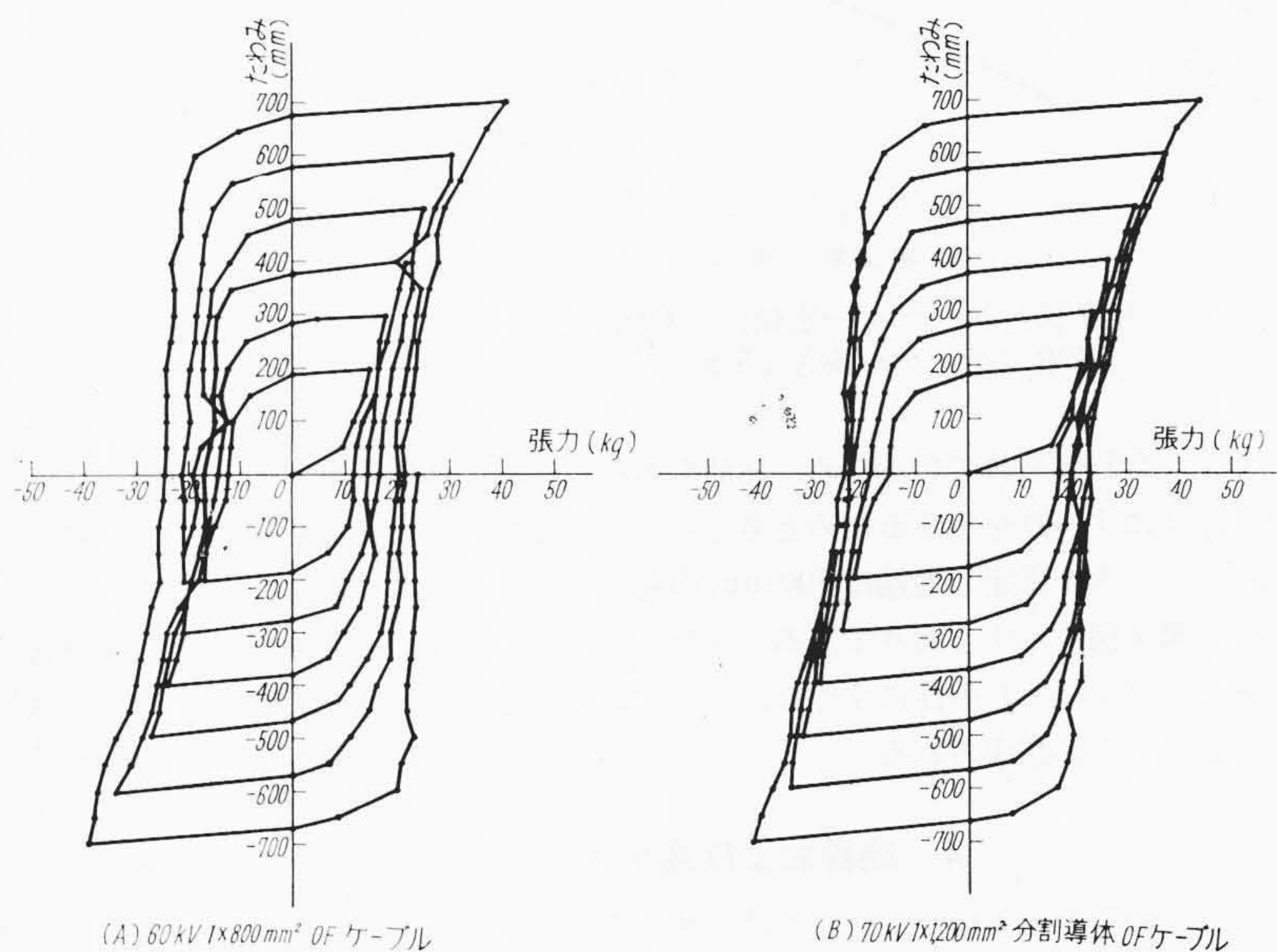
以上の経済的な比較結果では 140 kV の大サイズ導体による送電がもっとも有利であることおよびこれを分割導体とすることによってさらに有利となり、また絶対送電容量も増加することが明らかである。

3. 導 体 の 形 状

一般の電力ケーブルでは導体断面積が大きくなると表皮効果のために交流電流に対する実効抵抗が増大する。そのため断面積 600 mm² 以上では導体を 4 ないし 6 のセグメントに分けてより合わせ、実効抵抗の減少を計ることがかなり以前⁽¹⁾から行なわれている。一方、単心 OF ケーブルでは導体中心部に油通路があるためいわゆる中空導体となって普通導体に比べて若干表皮係数が小さくなる。また中空導体ではこれをさらに数個のセグメントに分けてより合わせときの成形が技術的にむずかしい点および表面の平滑度がそこなわれる点などとも関係して比較的大きい断面積まで中空同心より導体が使用されてきた。各種導体の断面積と表皮係数の計算⁽²⁾結果を示すと第 4 図に示すとおりである。普通導体では表皮作用による増加分が 10% となるのは 650 mm² であるが中空導体では約 900 mm² である。したがって、中空導体の場合でも 1,000 mm² 以上では分割導体としたほうが有利である。一方、他の観点からみて分割導体の利点はケーブルの曲げ剛性を減少させることである。一般的に考えて、ケーブルの重要な特性の一つである剛性すなわち曲げにくさは普通導体では導体断面積の約 2 乗に比例して増加す



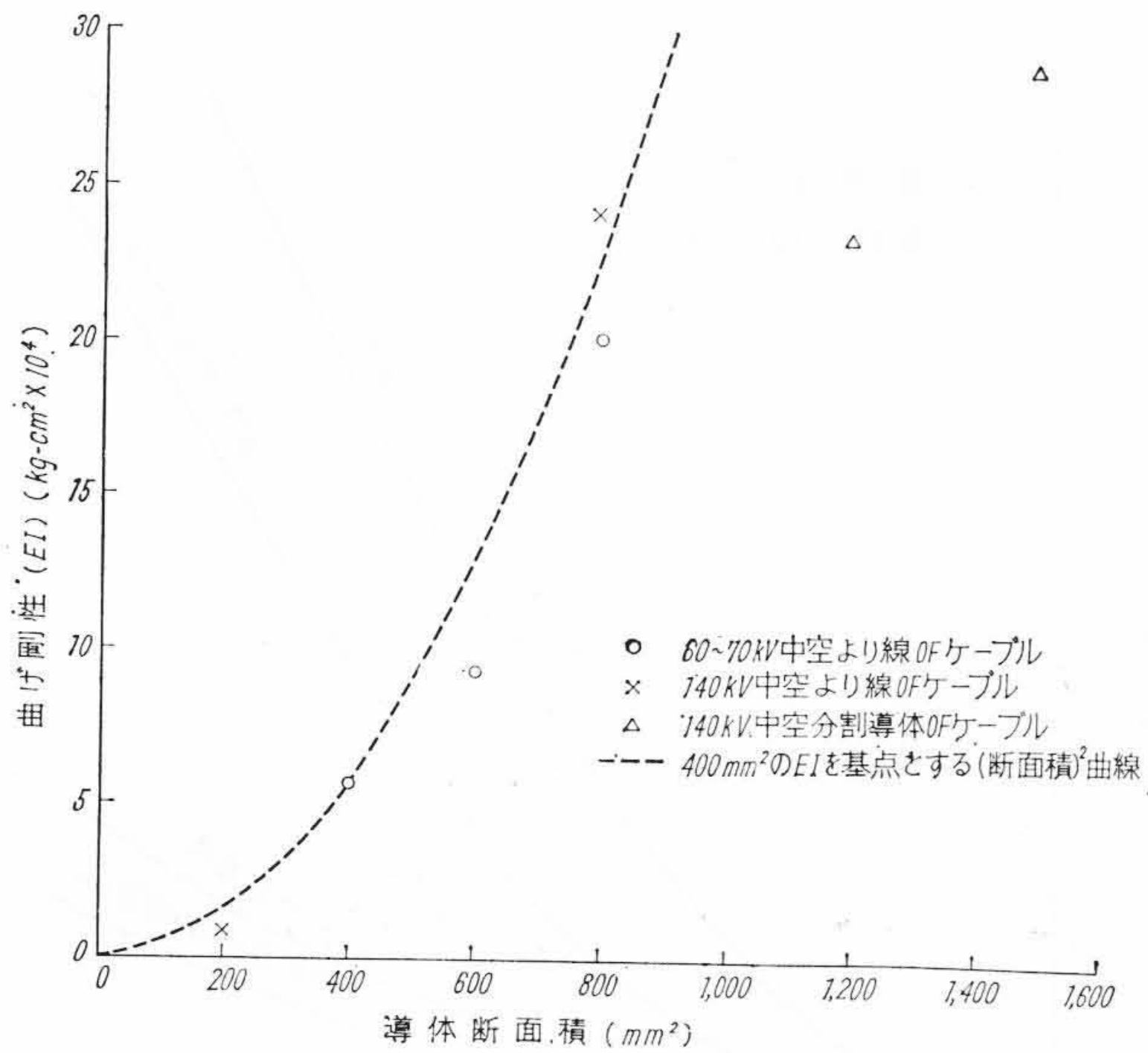
第4図 表 皮 係 数

(A) 60 kV 1x800 mm² OF ケーブル(B) 70 kV 1x1200 mm² 分割導体 OF ケーブル

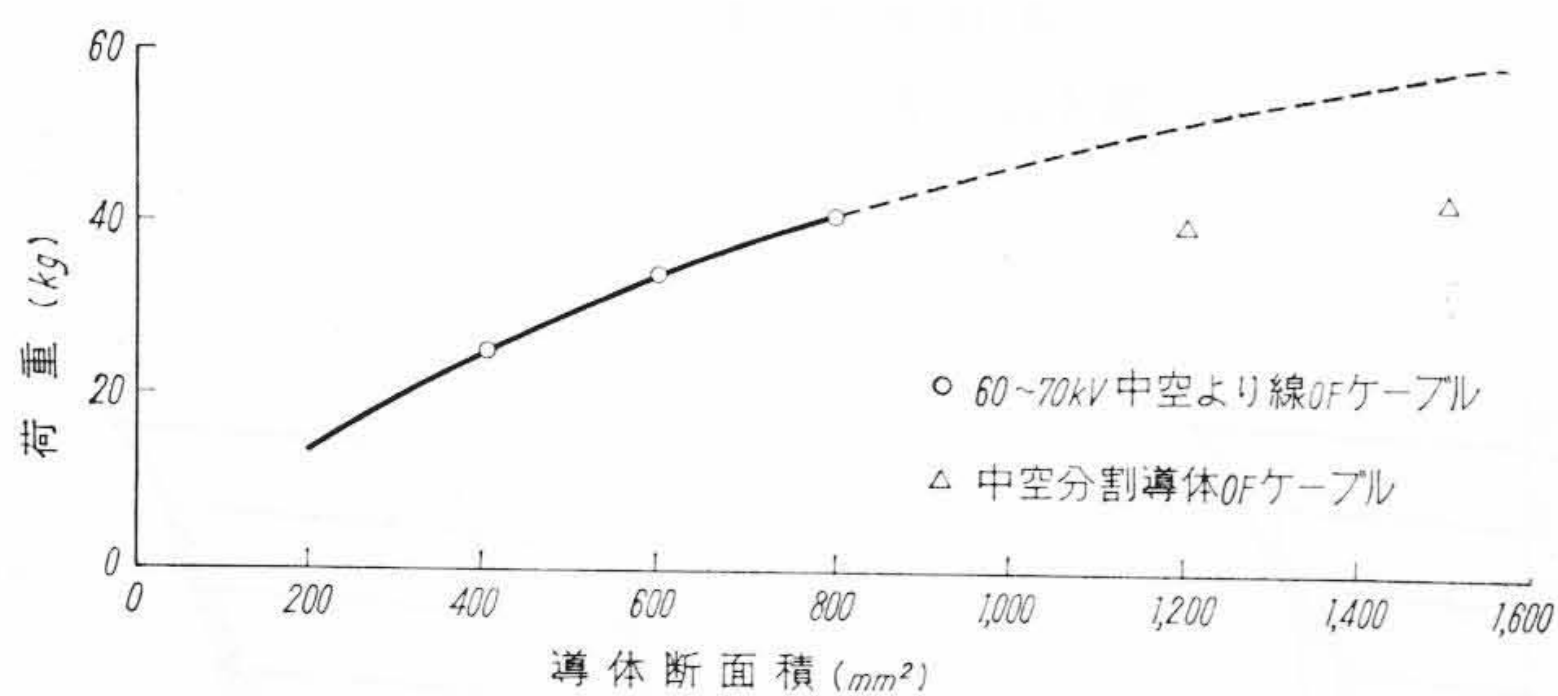
第5図 た わ み 特 性

る。第 5 図はケーブルの一端を固定し、他端に荷重を与えた場合の先端の偏位の変化⁽³⁾状態を示す。図に示すとおり偏位と荷重との関係はヒステリシス特性となるが当初荷重の小さい範囲では偏位は非常に小さく、この範囲ではケーブルの屈曲はほぼ弾性的である。すなわち、ケーブル構成材料の各層間、たとえば導体素線間、絶縁紙間などにおいてすべりを生じていないものと考えられる。この状態からさらに荷重を加えると急激に偏位が大きくなり、この状態ではケーブル構成材料間にすべりを生じているものと考えられ、荷重を除いても偏位はもとにもどらない、すなわち塑性となる。前者の範囲を低荷重範囲、後者を重荷重範囲とよぶことにする。

単心 OF ケーブルの導体断面積と重荷重状態での曲げ剛性との関係を示すと第 6 図のとおりである。図における点線は 400 mm² 中空導体の実測値を基点とし断面積の 2 乗に比例する曲線である。中空導体では実測値がだいたいこの曲線に従う値となっているが、中空分割導体ではこの関係曲線からはずれ、比較的小さい値である。この現象の理由としては、分割導体の各セグメントは 2 m 以下のピッ



第 6 図 ケーブルの曲げ剛性



第 7 図 ケーブル一定偏位 (700 mm) を与える荷重 (ケーブル長さ 1.5 m)

チにより合わせられているため、屈曲をうけた際にこれらのセグメント相互にすべりを生ずるためと考えられる。また、ケーブル長さ 1.5 m の片端を固定し他端に 700 mm の偏位を与えときの荷重を示すと第 7 図に示すとおりである。すなわち、この関係からも分割導体ケーブルはたわみ性にすぐれ、ケーブルの製造、布設作業が容易であることが想像される。

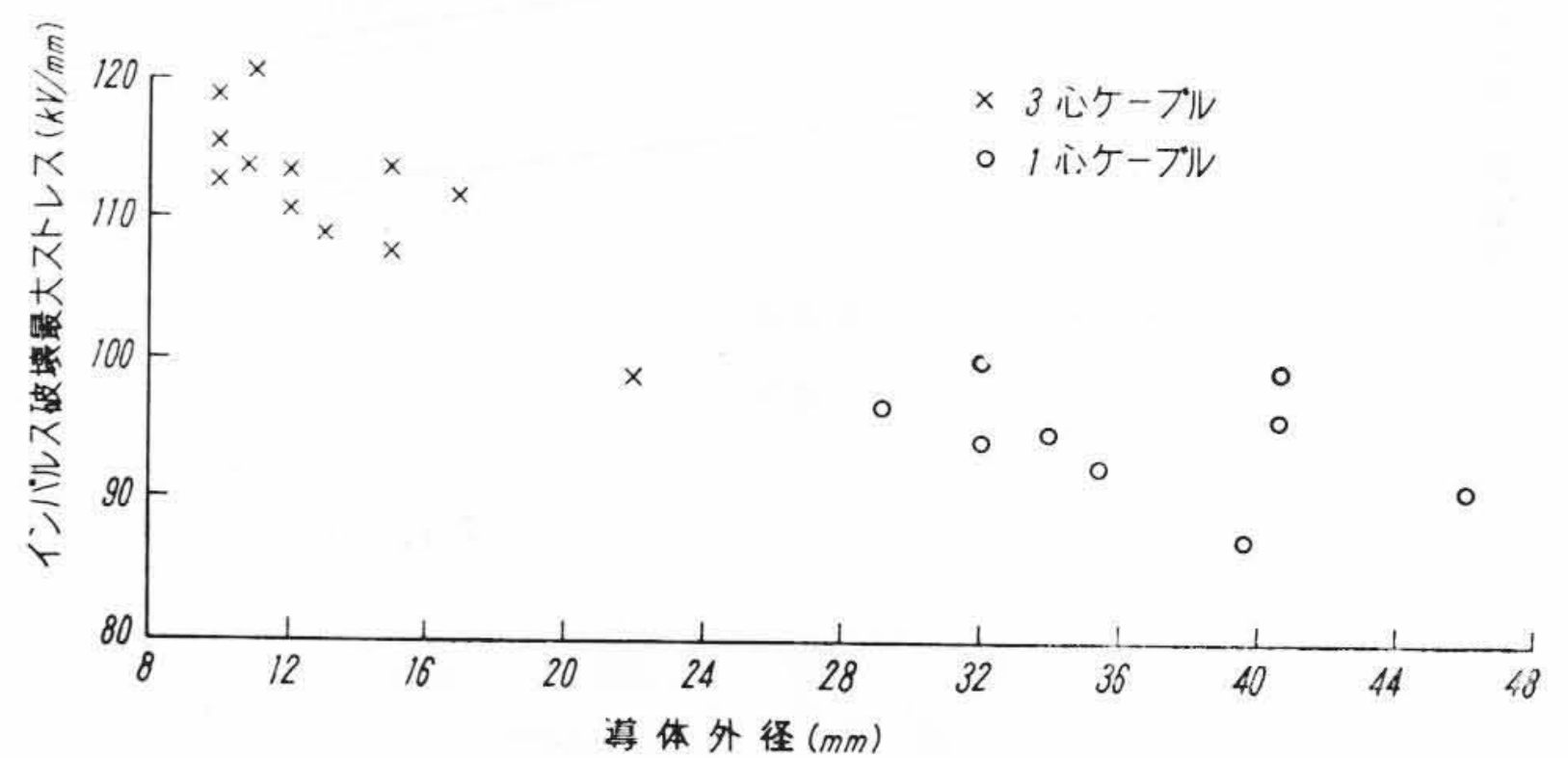
4. 絶縁および遮へい

導体断面積の大きいケーブルでは導体上のストレスを小さくするため、一般には絶縁厚さを低減している。日本における代表的な規格によると 60 kV, 140 kV 単心ケーブルの絶縁厚さおよび使用電圧における最大ストレスは第 1 表のとおりである。一方、導体が太くなった場合のインパルス絶縁破壊時の最大ストレスを示すと第 8 図のとおりであり外径の増大とともに低下する傾向にある。この理由については導体表面積の増加によって弱点が多くなり確率的に破壊電圧が低下するとの説明があるが明確なものでない。筆者らの考えでは以上の理由のほかに導体の太い場合はケーブルを屈曲させたときの絶縁体と導体または絶縁体と鉛被との間のなじみが悪くなったり、油層間げきが厚くなることにも原因があり、また紙巻後のドラムまたは乾燥バスケットに巻き込むときの屈曲によって紙しわが生じやすいとも考えられる。

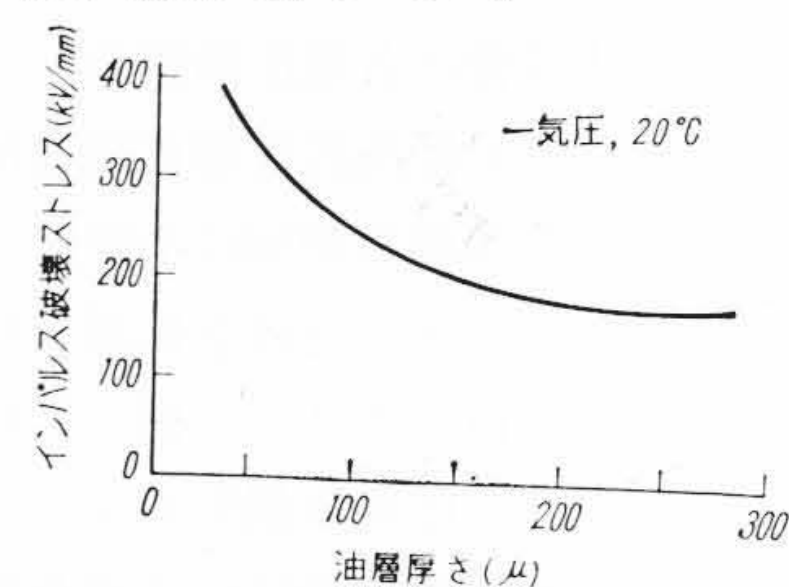
導体断面積の増大に伴い絶縁上のストレスが導体上のそれに近づいてくる。たとえば 60 kV 単心 400 mm² OF ケーブルの場合には導体上のストレスと絶縁上のストレスの比、 $G_{\max}/G_{\min}$ は 1.5 であるのに対し、同じ絶縁厚さをもつ 1,200 mm² の場合にはこの比は 1.32 となる。これを換言すれば絶縁上に対しても導体上における考慮と同じように半導電層を使用したり、また必要な場合には金属テ

第 1 表 絶縁厚さおよび使用電圧における最大ストレス

定格電圧 (kV)	導 体		絶 縁 厚 (mm)	最大ストレス (kV/mm)
	断 面 積 (mm ²)	外 径 (mm)		
60	100	12.0	7.8	6.95
	200	17.0	7.6	6.55
	400	29.2	7.2	6.05
	600	34.4	7.0	5.84
	800	39.6	7.0	5.78
140	200	24.4	14.0	8.68
	400	30.6	13.0	8.63
	600	35.6	12.5	8.55
	800	40.6	12.5	8.30



第 8 図 インパルス破壊最大ストレス (60, 70 kV OF ケーブル)



第 9 図 油層のインパルス破壊ストレス (J. C. Cle Vos)

ープによる遮へいを施して油層間げきの減少に注意する必要がある。

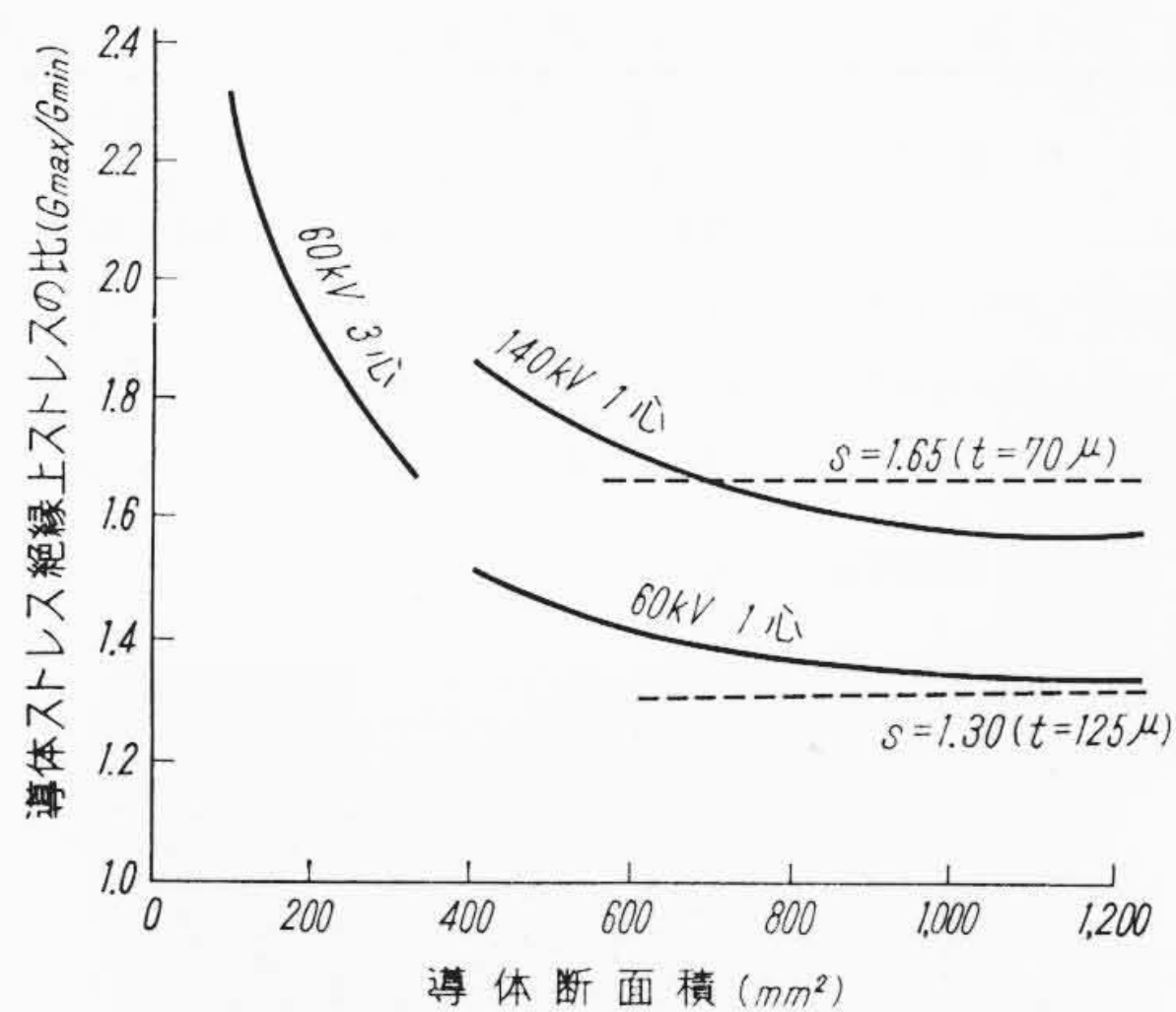
第 9 図は油層の厚さと破壊電圧の関係⁽⁴⁾であるが、油層の厚さとともに破壊強度が低下し 0.2 mm 以上では一定値に達する。この関係は従来導体上の油層厚さを減少させること換言すれば薄紙を使用することが破壊電圧を増加させるとの説明に使用されていたが、この関係は絶縁上の油層に対しても同様に適用される。ケーブルが屈曲された場合、導体上よりも絶縁上すなわち鉛被下に油層間げきの生じやすいことはケーブルを取り扱う技術者にとってはしばしば経験されることである。一方、前述のように導体の太いケーブルでは絶縁上のストレスが導体上のストレスに接近するので、絶縁上の油層から破壊の生ずる可能性がある。第 9 図から導体上に紙厚と同じ厚さの油層があった場合の破壊ストレスと油層の厚さが 200 μm 以上の場合の破壊ストレスの最低値との比 (S) をとると、導体上に 125 μm、および 70 μm 紙を使用した場合にそれぞれ下記のようになる。

$S=1.30$ 絶縁紙厚 125 μm の場合

$S=1.65$ 絶縁紙厚 70 μm の場合

一方、60 kV、および 140 kV ケーブルについて導体上のストレスと絶縁上のストレスの比を求めると第 10 図のとおりとなる。図における点線は $S=1.30$ および 1.65 の値を示すが、 $G_{\max}/G_{\min} \leq S$ の場合には絶縁上の油層から破壊の生ずる可能性がある。日本においては 140 kV, 60 kV ケーブルでは導体上にそれぞれ 70 μm, 125 μm 厚の絶縁紙が使用されているので、140 kV ケーブルの 700 mm² 以上の導体断面積のケーブルでは以上の点が問題になってくる。

また、日本においては 140 kV ケーブルまでは一般に絶縁上の遮



第10図 導体上および絶縁上ストレスの比

へいとしてカーボン紙のみが使用される例が多いが、インパルス電圧に対してはカーボン紙の遮へい効果は期待できないとの報告⁽⁵⁾もあるので、このような点の問題となる導体断面積の大きいケーブルでは絶縁上に金属性の遮へい層を設ける必要がある。

絶縁上に適用できる金属性遮へい層の構成としては現在下記のもの採用されている。

- (A) カーボン紙と金属化成紙
- (B) カーボン紙と金属（銅またはアルミニウム）テープ
- (C) カーボン紙、金属テープおよび金属線入り布テープ⁽⁶⁾

これらの遮へい層に要求される点は、前述のように金属性であるという点のほか、絶縁層とのなじみのよいこと、すなわちケーブルが屈曲された場合に絶縁層の曲がり、あるいはしわに応じて絶縁層につねに密着することである。この点では(A)のカーボン紙と金属化成紙との組み合わせがもっともよい。しかしながら、ケーブル乾燥時の加熱による接着能力の低下、および油に溶解性のないような金属はくとよい接着剤を用いた絶縁紙を使用しなければならない。(B)のカーボン紙と金属テープの組み合わせでは0.1mm以下の軟質の金属テープを使用すれば問題ないが他方、金属テープのシャープエッジがケーブルが屈曲されたとき鉛被に食い込む懸念がある。特に管路布設ケーブルのように接続箱用マンホールにおけるケーブルオフセット部でのくり返し曲げをうける場合には鉛被の寿命が短くなるともいわれている。したがって直埋式の布設以外では問題がある。(C)の構成では金属テープと鉛被との間にクッションとして布テープを使用するとともにこれらの間の電氣的接触を保つために、布テープに細い銅線などの金属線を織り込んだものである。この構成はもっとも好ましいものと考えられるが経済的に高いという難点がある。

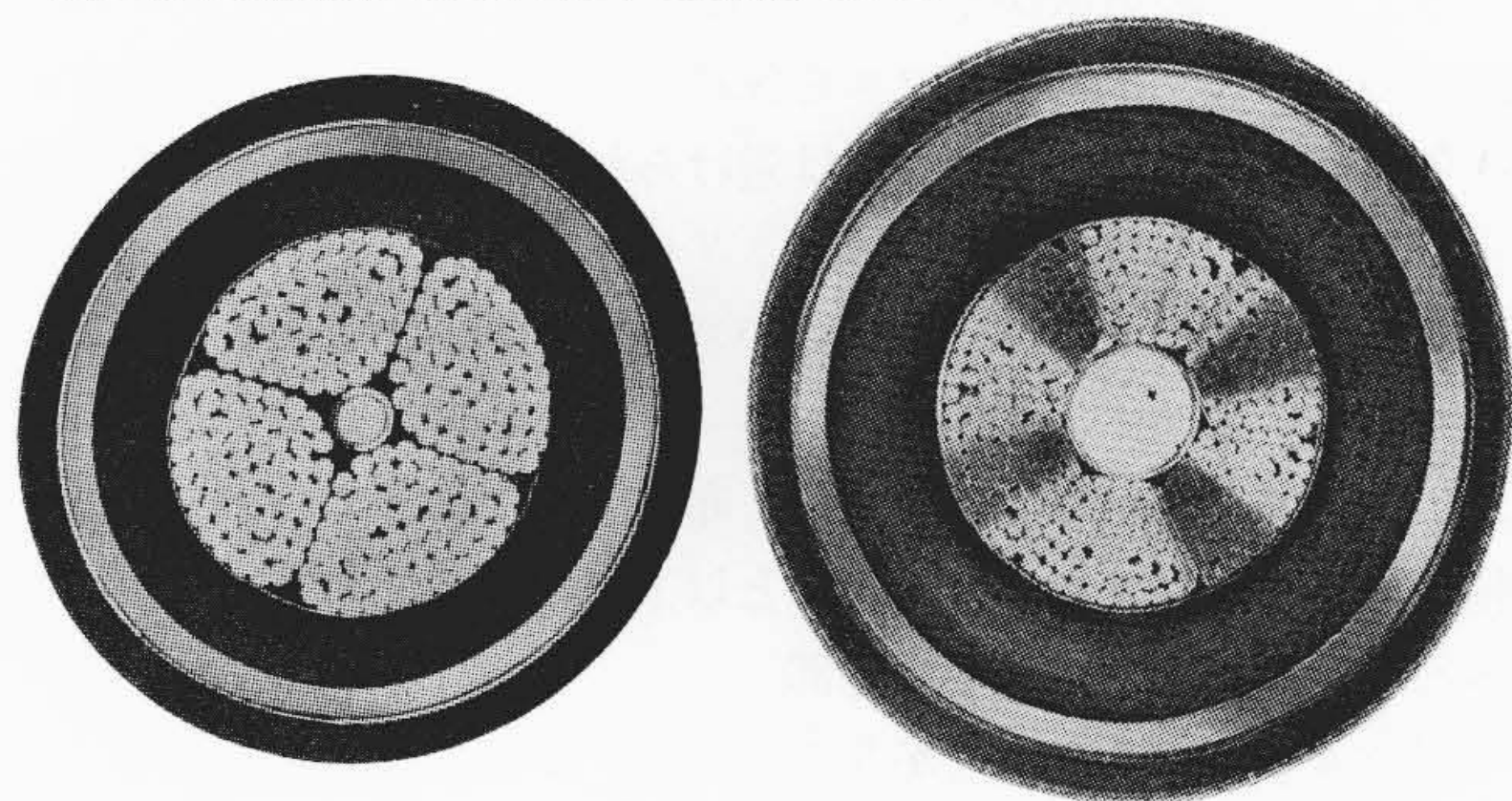
5. ケーブルの具体例

1,000 mm²以上の導体断面積をもつOFケーブルの実施例および主要構造を示すと第2表のとおりであり、断面写真を第11図に示した。ケーブルNo.1およびNo.2では導体は4分割されているのに対し、No.3では6分割されている。導体の成形上の点では4分割より6分割のほうが容易であり、より合わせ時セグメントの肩の部分におけるへこみも少なく良好である。この部分のへこみの大きいことは紙巻時に絶縁紙にへこみ、しわなどを生じ好ましくない。ケーブルNo.2ではセグメントのバインダとして銅テープを使用したのが紙巻時の紙の張力によって銅テープに凹凸を生じ、これが電氣的な弱点となって好ましくなかった。ケーブルNo.3では6分割としてセグメントの肩の曲率を小さくしたため、この部分のへこみは少なく、またバインダとして非磁性の鋼テープを層巻きとしたため表面は非常に平滑で良好な結果がえられた。

第2表 1,000 mm²以上 OF ケーブル

項 目	単 位	No.1	No.2	No.3
定 格 電 圧	kV	30	70	140
公 称 断 面 積	mm ²	1,000	1,200	1,200
油 通 路 内 径	mm	6.0	6.0	14.0
導 体	形 状	—	特殊直角扇形	特殊扇形
	バ イ ン ダ	—	0.1	0.6
外 径	mm	42.2	47.0	48.6
	mm	—	—	—
絶 縁	導 体 遮 へ い	mm	0.3	0.2
	絶 縁 構 成	μ	125	125
	絶 縁 厚 さ	mm	3.9	7.9
	絶 縁 遮 へ い	mm	0.3	0.55
鉛 被 厚 さ	mm	2.8	3.0	3.5
補 強 層	クロロブレン引綿テープ厚さ(約)	mm	0.9	0.5
	黄銅テープ	mm×枚	0.2×2枚	0.2×2枚
防 食 層	クロロブレン厚さ(約)	mm	4.0	3.0
	クロロブレン付帆布厚さ(約)	mm	1.0	1.0
概 算 外 径	mm	71	82	97
概 算 重 量	kg/km	19,300	22,800	29,400
標 準 静 電 容 量	μF/km (20℃)	1.2	0.69	0.48
最 大 導 体 抵 抗	Ω/km (20℃)	0.0181	0.01495	0.0149
充 電 容 量	kVA/km	449	1,400	3,930
許 容 電 流	A	1,370	1,490	1,380
送 電 容 量	kVA	71,100	180,500	335,000
送 電 損 失 / 送 電 容 量	%	1.851	0.75	0.39

ただし、送電損失は10km当たりの全損失である。



第11図 ケーブル断面写真

導体遮へいとしてはいずれもカーボン紙2枚が用いられたが、ケーブルNo.3ではバインダテープの表面は平滑で導体上の凹凸を十分にカバーできているので遮へい効果はかなり良好と考えられる。絶縁厚さについては導体分割による凹凸を考えてNo.2およびNo.3のケーブルでは標準ケーブルよりそれぞれ0.5mm、1mm厚くした。しかしながらNo.3ケーブルでは鋼テープによる遮へいが良好であったので厚くする必要はなかったようである。

絶縁遮へいとしてはNo.1およびNo.2ケーブルでは従来の日本における経験に基づいてカーボン紙2層巻きとしたが、No.3ケーブルではカーボン紙と金属化成紙が使用された。後者のケーブルでは導体上に0.07mmの薄紙を使用して導体上ストレスを高くとしているので、絶縁上ストレスも高くなるためこのような絶縁遮へいとしたものである。そのほか、鉛被、補強層、防食層の構造についてはNo.3ケーブルではE合金が使用されたほか特に差異はない。これらのケーブルの破壊電圧における導体上および絶縁上ストレスを比較して示すと第3表のとおりである。表には比較のため、中空普通導体OFケーブルの結果をも含めている。この結果によると絶縁遮へいがカーボン紙のみのNo.1、No.2、No.4およびNo.5ケーブルでは導体上ストレスが約90kV/mm以下で破壊しているが、このことは破壊はむしろ絶縁上から生じたことを意味すると考えられる。このときの絶縁上ストレスはNo.2ケーブルを除いて51～

第 3 表 破 壊 時 ス ト レ ス

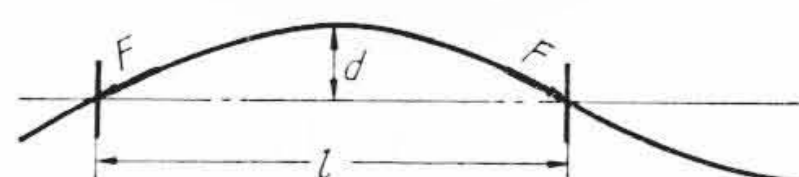
ケ ー ブ ル 種 類	インパルス試験		交流長時間試験	
	$G_{\max}$ (kV/mm)	$G_{\min}$ (kV/mm)	$G_{\max}$ (kV/mm)	$G_{\min}$ (kV/mm)
1. 30 kV 1×1,000 mm ²	68	56	34	29
2. 70 kV 1×1,200 mm ²	91	67	33	25
3. 140 kV 1×1,200 mm ²	96	62	44	29
4. 140 kV 1× 800 mm ²	90	56	41	26
5. 60 kV 1× 800 mm ²	74	51	45	34

56 kV/mm の間にあり低い値となっている。これに対し No. 3 ケーブルではいずれも高い値となっており，金属化成紙による遮へい効果がみとめられる。

6. ケーブルの布設

断面積の大きい単心ケーブルの曲げ剛性は大きいので，通電くり返しによる伸縮が大きい。したがって布設に当たっては伸縮に伴う諸現象について考慮を払う必要がある。ケーブルの布設方法は管路布設，直埋布設および暗渠(あんきょ)内布設に大別される。管路布設では接続用マンホール内でオフセットをとることによってケーブルの伸縮を吸収し，鉛被に与えられるくり返しひずみを許容値内におさえることができる。直埋布設ではケーブルはほとんど伸縮しないので特に問題はない。暗渠内布設ではケーブルは自由にのびうるので，これらの伸びを吸収するたためたるみ部（オフセット）を設けるか，あるいはあらかじめスネーク布設させて伸びが分布的に吸収されるような布設方法が望ましい。従来使用されてきた方法は 1～2m 間隔のクリート上にケーブルを保持する方法であった。この方法では各クリート間のは持力の差は避けられないのと各スパンのケーブルルートが一樣でないために，クリートですべりを生じ数回の伸縮のくり返しによって伸びが特定のスパンに集中する結果となる。したがって，大サイズ導体ケーブルではクリート布設を避けたほうがよいと考えられる。今スネーク布設された場合についてスネーク幅，スネークピッチを検討すると以下のとおりである。スネークの

スパンを考え，スネーク中心部の偏位 d とスパン長 l とが与えられた場合，節に生ずる最大反抗力 $F_{\max}$ は下記の式で与えられる。



第 12 図 ケーブルの
スネーク布設

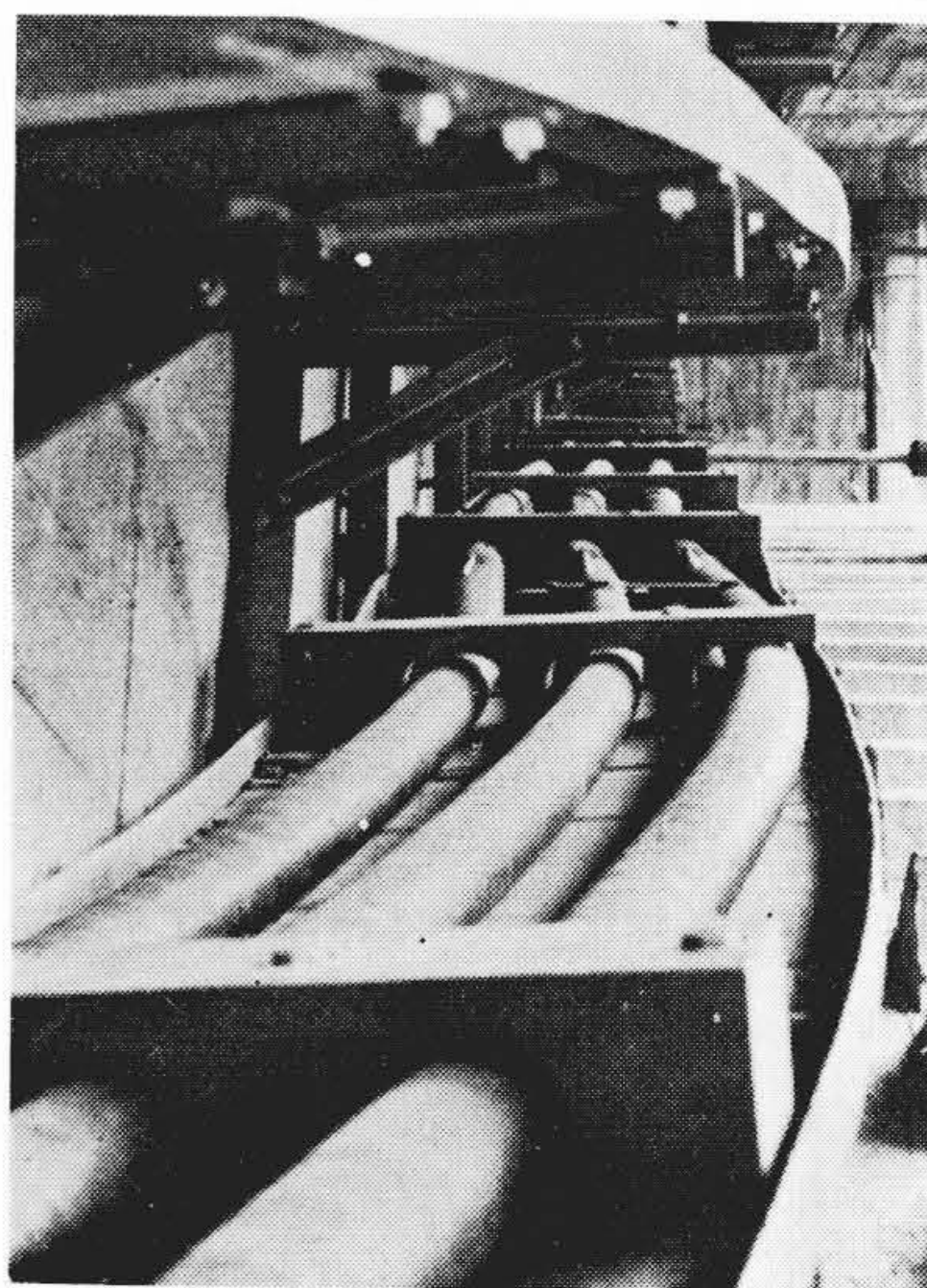
$$F_{\max} = K \frac{\pi^2 EI}{l^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここにおける EI は 3 節で述べたケーブルの剛性であり，同一ケーブルについても屈曲の大きさ，すなわちここでは d によって変化する。また K の値はスネークの節における支持方法によって決まる定数で，完全固定の場合には 4，自由の場合には 1 となる。実際には 2 程度の値となることが経験されている。第 4 表は二，三のケーブルの計算例である。布設状態ではスネーク偏位 d は各スパンについてまったく同一とすることはできないので各スパンについて $F_{\max}$ の値には差異がある。これらの $F_{\max}$ の差がクリートの拘束力よりも大きいときはケーブルは軸方向に移動する。一般にクリートの拘束力はケーブルに無理な変形を与えない程度では精々 600 kg 以下であるのでクリート間にあらかじめスネークを与えて伸縮のときの反抗力がクリートの拘束力よりも常に小さくなる必要がある。第 13 図は柵 (たな) 上に布設された 140 kV 単心 200 mm² OF ケーブルのスネーク布設状況である。また第 14 図は 70 kV 単心 1,200 mm² OF ケーブルのピット内布設方法を示す。前の例ではケーブルは柵上に布設され，固定クリート間隔は 3 m，ガイド用クリートはこの中間におかれている。このガイドクリートは短絡時の電磁力の分散を計ったものである。後の例では各ケーブルがコンクリ

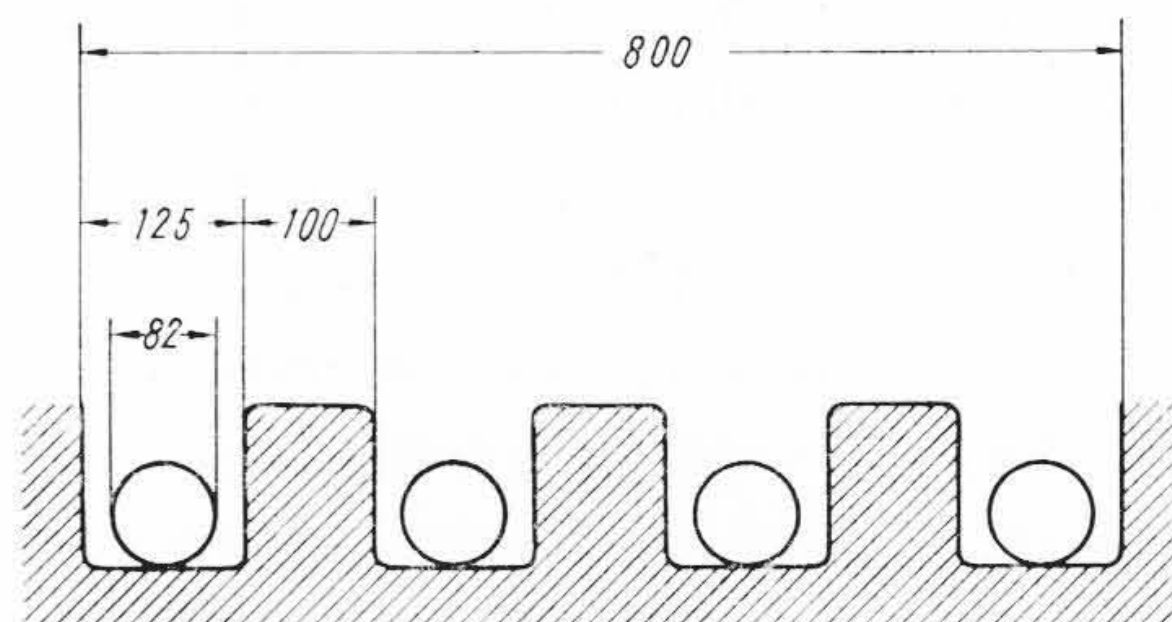
第 4 表 ケーブル固定部に生ずる最大反抗力 ($F_{\max}$)

ケ ー ブ ル 種 類	偏位小さいとき		偏位大きいとき	
	EI (kg-cm ²)	$F_{\max}$ (kg)	EI (kg-cm ²)	$F_{\max}$ (kg)
70 kV 単心 600 mm ²	54.0×10^5	4,740	9.4×10^4	82.2
70 kV 単心 1,200 mm ²	67.5×10^5	5,920	24.2×10^4	212
140 kV 単心 200 mm ²	5.0×10^5	438	1.0×10^4	8.8

条件： ケーブル固定間隔 1.5 m



第 13 図 柵上のスネーク布設例



第 14 図 といの中 の 布 設 例

ートといの中に收容されているため伸び状態でのスネーク幅に制限があって，鉛被ひずみも制約をうけているので自由に布設されている。

7. 結 言

大容量電力を地下ケーブルによって送電する場合に導体断面積をできるだけ大きくし，回線数をへらすことが経済的には有利であり，特に分割導体の採用によってこの傾向は強調される。OF ケーブルのような中空導体でも 1,000 mm² 以上では分割導体とすることは表皮効果の減少による送電容量の増加という利点のほか，曲げ剛性が減少するという特長がある。このことはケーブルの製造，布設を容易にする利点もある。一方，導体断面積の大きいケーブルでは導体上ストレスと絶縁上ストレスの比が小さくなるので特に絶縁遮へいについて考慮する必要があり，インパルス電圧に対する遮へいのためには金属性のテープによる遮へいが有効である。

参 考 文 献

- (1) 田中，石橋，橋本 (博)，橋本 (清)，加子：日立評論，36，1161 (昭 29-7)
- (2) J. H. Neber, M. H. Mcgrath：TAIEE., 76, 752 (Oct. 1957)
- (3) 渡辺，網野，千葉，卜部，遠藤：日立評論別-43，12 (昭 36-6)
- (4) J. C. de Vos, J. Vermeer：CIGRE., No. 226 (1960)
- (5) 佐藤，坂場：電気学会連大会，No. 407 (昭 36-4)
- (6) BICC：BICC Bulletin., No. 24 (May. 1960)
- (7) H. Hasimoto：Hitachi Rev. No. 8 (Jan. 1955)