

ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブル

庄司一男* 佐藤伸雄** 八田 達***

The Polyethylene Insulated Carrier Type Subaqueous Cable

By Kazuo Shoji, Nobuo Sato and Tōru Hatta
Hitachi Electric Wire and Cable Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

When planning the communication lines for a power station, there are occasions where it is advantageous to install a subaqueous cable through the shortest distance of the dam, depending on the conditions at the power plant location.

The subaqueous cable for dam use does not differ basically in design from a submarine cable, therefore it is also possible to utilize such traditionally used cables as paper insulated lead sheathed cables and gutterpercha insulated cables, for this purpose.

However the polyethylene insulated carrier type subaqueous cable which Hitachi has manufactured has the following special characteristics.

- (1) When compared to the G.P. cable, the polyethylene insulated one is superior electrically, mechanically and chemically.
- (2) Being of the polyethylene replete type, it is highly kink-resistant, therefore there is no need for the special reinforcement material used heretofore for the lead sheathed cables.
- (3) The transmission characteristics are excellent, therefore it may also be used for long distance circuits.
- (4) It is light in weight, for no lead is used. This enables easy handling in transportation and installation.

〔I〕 緒 言

水力発電所における電話回線の計画に際し、陸上ケーブルの場合には、布設地の地形による建設費の増加のみならず、送電線事故時に誘導される異常電圧によるケーブル障害を考慮し重遮蔽層を施すため、ケーブル価格の増大が考えられる。このため最短距離のダム底に水底ケーブルを布設し、送電線との離隔距離を大きくして遮蔽層を軽減し、経費の低減をはかる試みが考えられている。

日立製作所においては、この種ダムの水底ケーブルの試作を行い、一応の結果を得たのでここに報告する。

〔II〕 水底ケーブル用絶縁体

水底ケーブルとしては従来ガタパーチャが絶縁体とし

て使用されて来たが、ポリエチレンの発達に伴い、これを絶縁体とする水底ケーブルが実用化されて来た⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

水底ケーブル絶縁体としてのポリエチレンは第1表(次頁参照)ガタパーチャとの特性比較に示されているようにつぎの特長を持っている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

- (1) ポリエチレンは従来のガタパーチャに比較して、電氣的、物理的および化学的特性がすぐれている。
- (2) とくにポリエチレンは吸水性および透水性が僅少で、水中に長期間浸漬しても電氣的および機械的特性はほとんど変化しない。
- (3) ポリエチレンは -50°C ~ $+75^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において電氣的および物理的特性の変化が僅少である。また使用温度における屈曲および耐衝撃性などの機械的特性も良好である。

* ** *** 日立製作所日立電線工場

第1表 ポリエチレンとガタパーチャの性能表
Table 1. Some Physical Constants of Polyethylene and Guttapercha

特性	ポリエチレン	ガタパーチャ
誘電率	2.3	2.5~2.6
誘電体正切	5×10^{-4} 以下	$25 \sim 60 \times 10^{-4}$
体積固有抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)	10^{16} 以上	$1 \sim 2 \times 10^{16}$
吸水量(常温7日後)(%)	0.1 以下	2~5
引張り強さ (kg/mm^2)	1.2	1.2~1.5
伸び (%)	600	300~400
軟化点 ($^{\circ}\text{C}$)	105	47~58
硬度 (ショアー)	90~95	80~90

第2表 クワッド寸法表
Table 2. Dimensions of Star Quad

導体径 (mm)	線心 (mm)		クワッド (mm)	
	ポリエチレン厚	外径	ポリエチレン厚	外径
1.2	1.2	3.6	1.1	10.9
1.4	1.1	3.6	1.1	10.9
1.6	1.0	3.6	1.1	10.9

〔III〕 クワッド構造

ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブルのクワッドは、導体上に絶縁用ポリエチレンを被覆して線心とし、この線心4条を色別したポリエチレン中心介在紐とともに星型に撚合せ、さらにこの上に保護用ポリエチレンを被覆してクワッドとする。

保護用ポリエチレンは厚い程機械的に強いが、水底ケーブル価格の大部分がポリエチレンで占られており、またポリエチレン厚さを増すことによつてケーブル外径も増大し価格も増加するので、価格面と機械的強度の点より、保護用ポリエチレン厚さとしては 1.0~1.1 mm 程度が最適である。

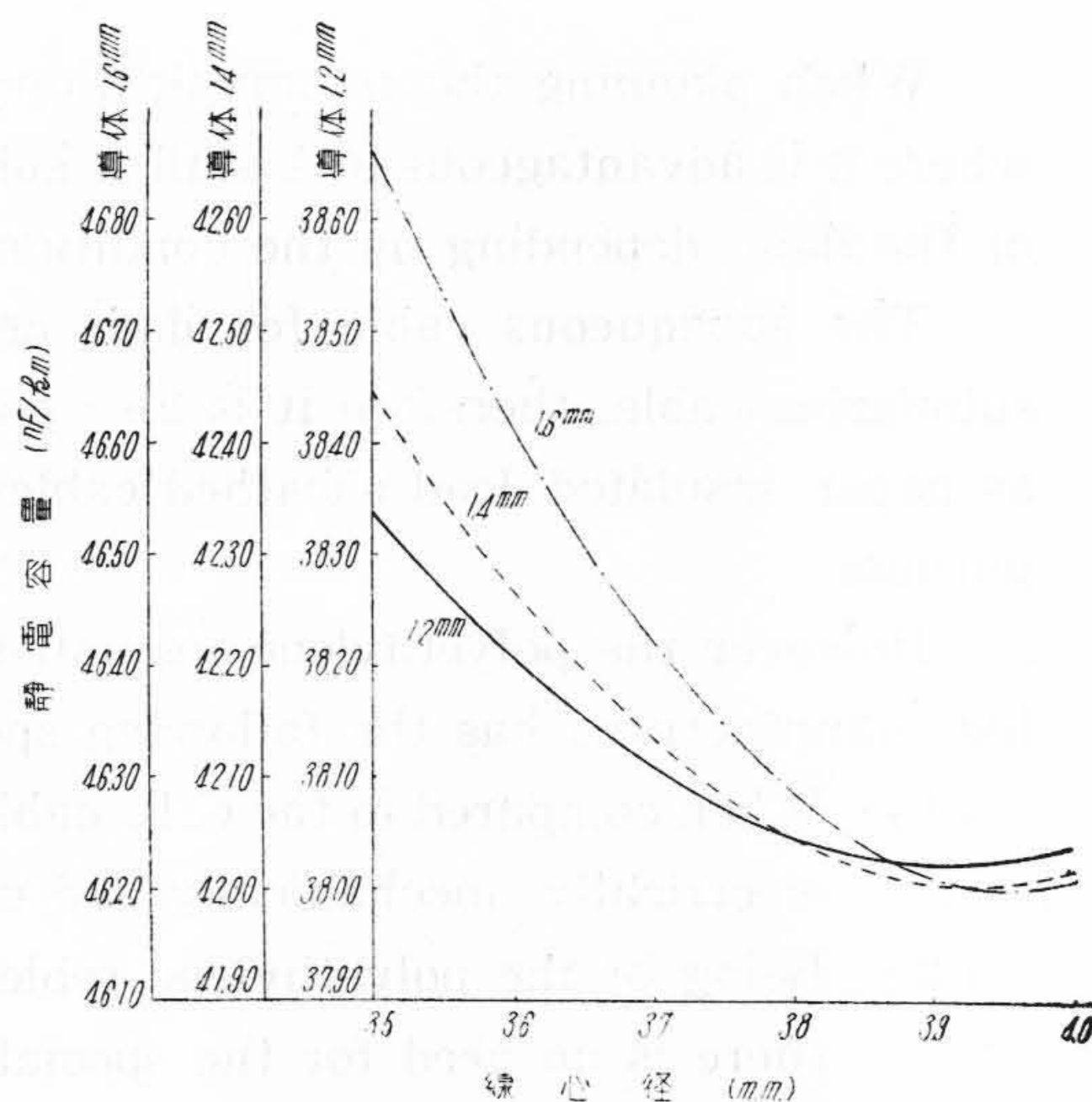
クワッド外径を 10.9 mm として、線心径を変化したときの静電容量の変化を第1図に示す。

この結果から 1.2 mm 導体では線心外径 3.9 mm, 1.4 mm では 3.92 mm, および 1.6 mm では 3.94 mm が最小の静電容量となり、かつ線心径の変動に伴う静電容量の変化も少いことがわかる。ただし 1.2 mm 導体の線心径 3.9 mm は保護用ポリエチレン厚さが 0.75 mm となるため機械的強度に対して不満がある。

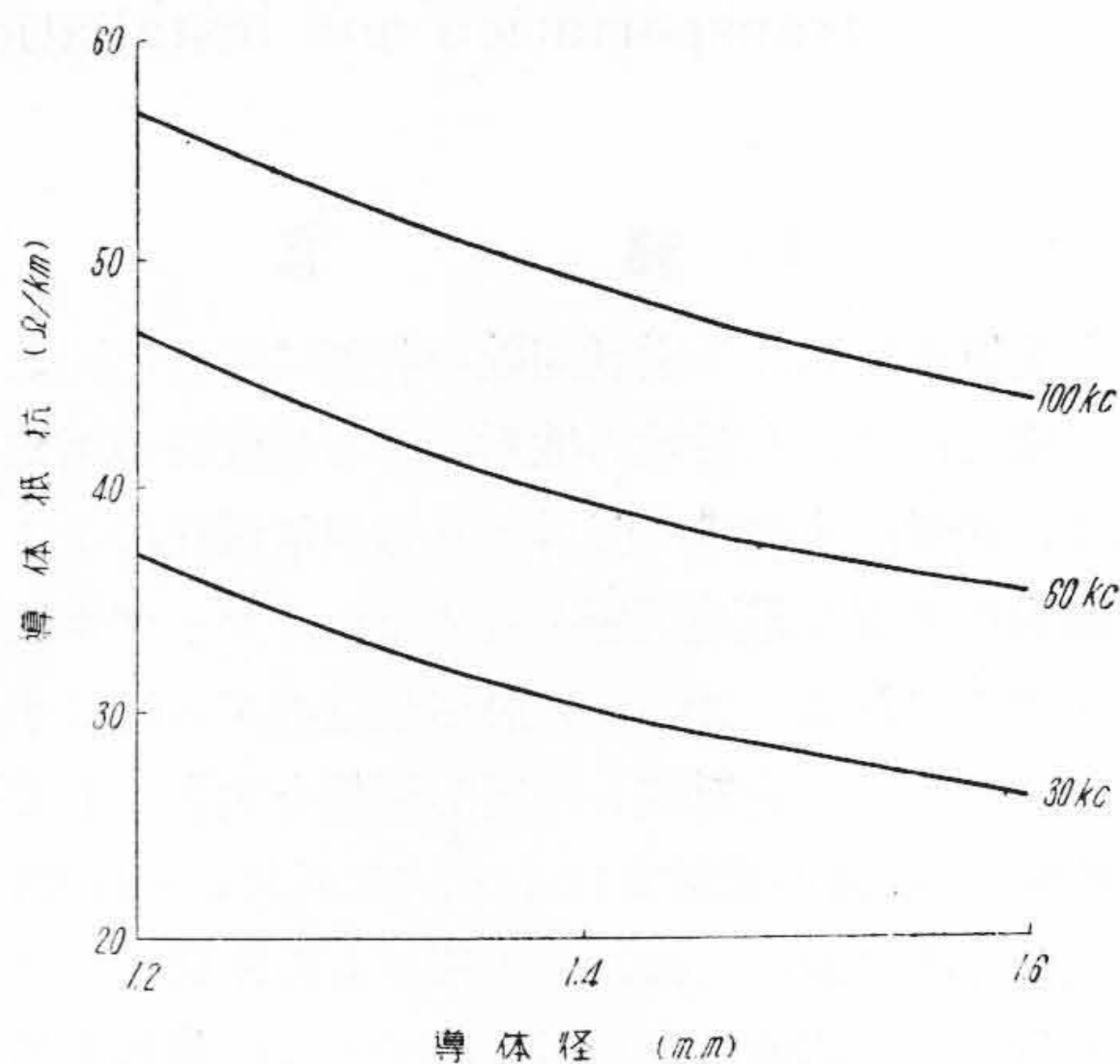
この点クワッド外径を自由に選ぶことによりケーブル特性を選定することはできるが、クワッド外径の増大により重量ならびに価格も必然的に増加する結果となる。

今、クワッド外径を 10.9 mm, 保護用ポリエチレン厚さを 1.1 mm と一定にしたとき、第2表の構造についてケーブル実回線の諸特性を計算⁽⁶⁾した結果を第2図~第6図に示す。なお、この計算に際してはクワッドと銅テープまでの距離が小さい程、銅テープによる渦流に基づく抵抗の増加およびインダクタンスの低下があるので、銅テープはできるだけクワッドより離れた方がよいのであるが、実際ケーブルの構造に合致するよう 2.5 mm として計算した。

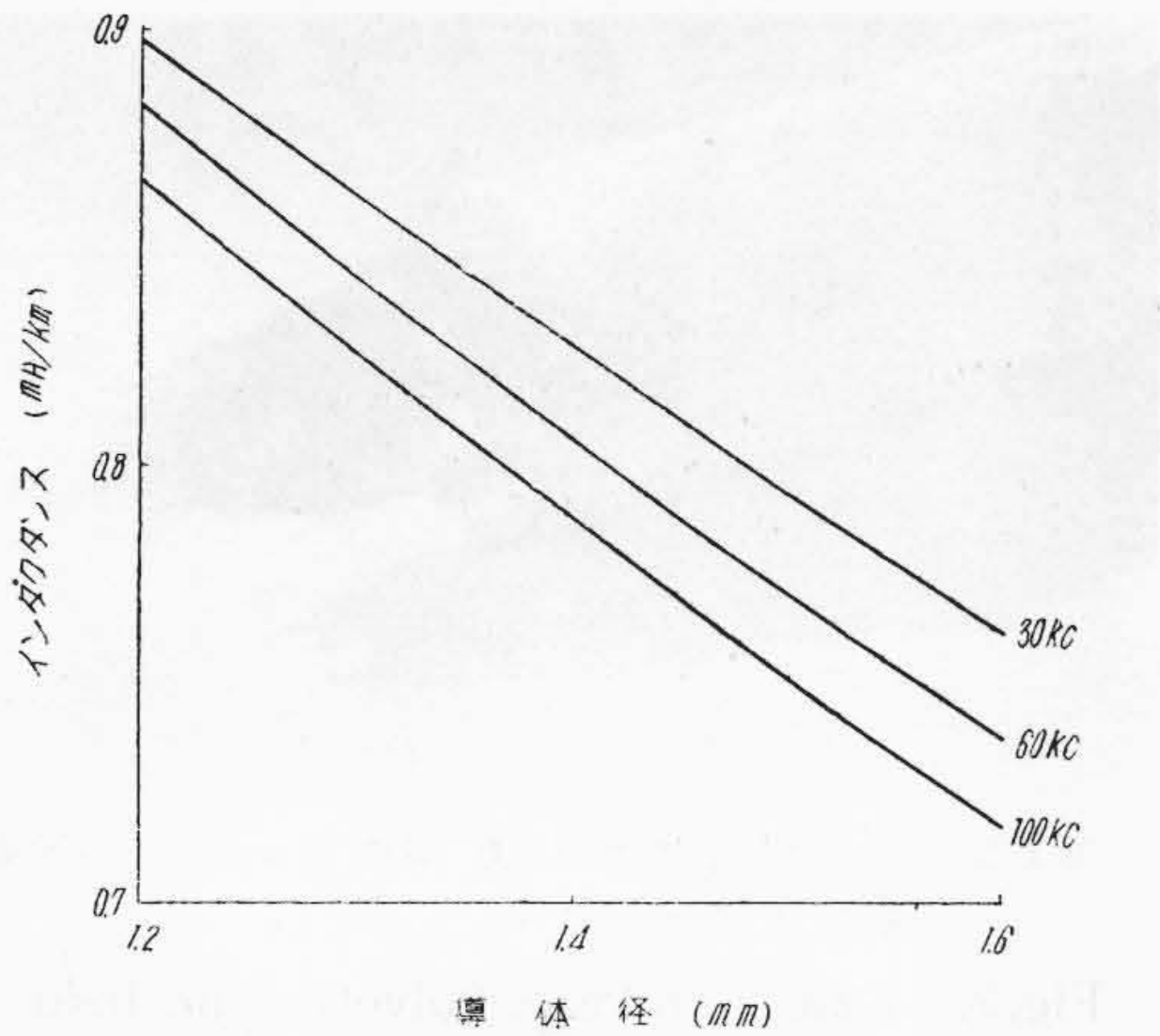
ケーブルの減衰量を少くし漏話を軽減することはケーブル製作上重要な問題である。音声周波ケーブルでは静



第1図 線心径と静電容量の関係
Fig. 1. Relation between Capacity and Diameter of Insulation Core

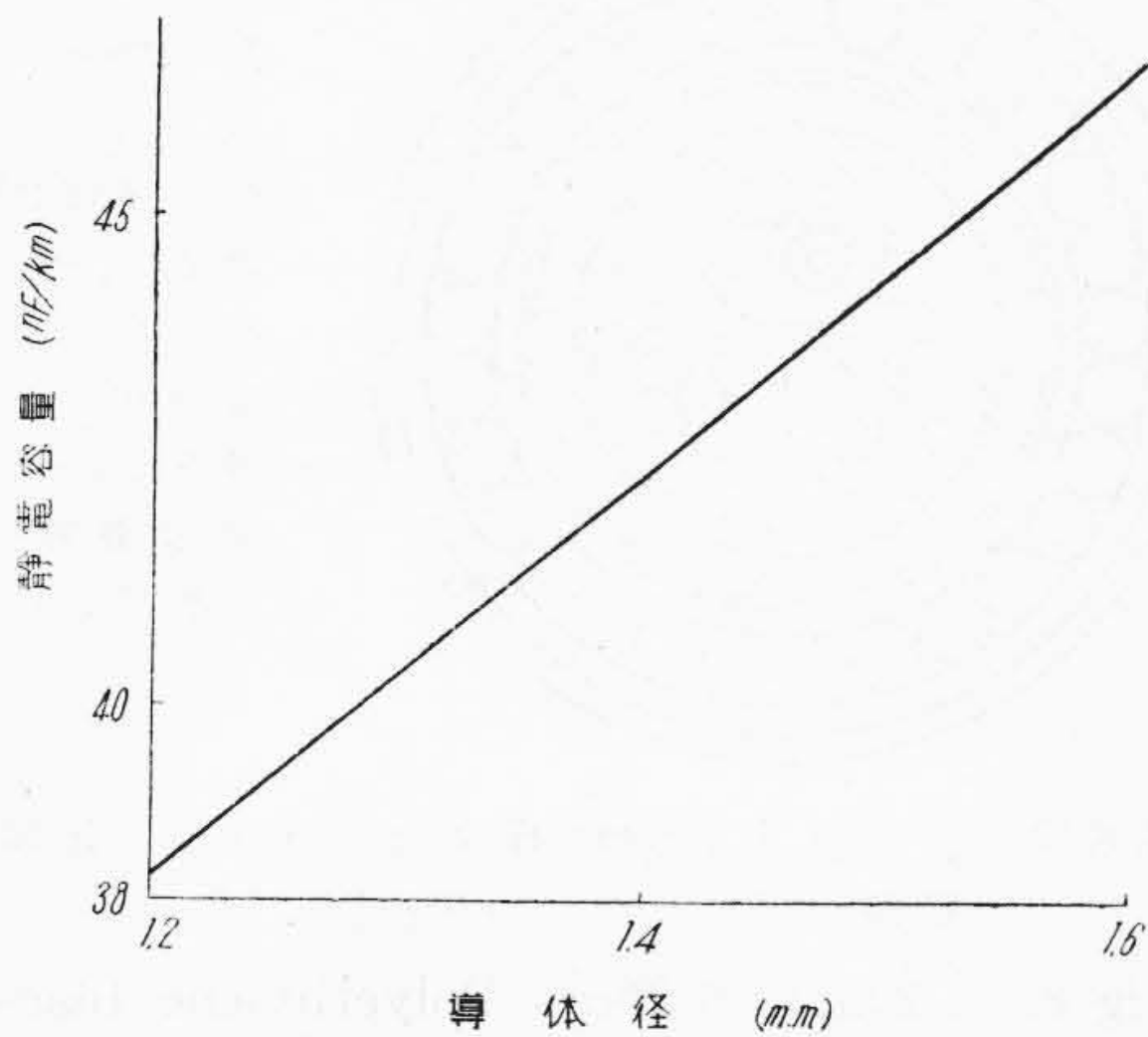


第2図 導体径による導体抵抗と周波数との関係
Fig. 2. Numerical Values of Conductor Resistance as Functions of Conductor Diameter



第3図 導体径によるインダクタンスと周波数との関係

Fig. 3. Numerical Values of Inductance as Functions of Conductor Diameter



第4図 導体径による静電容量と周波数との関係

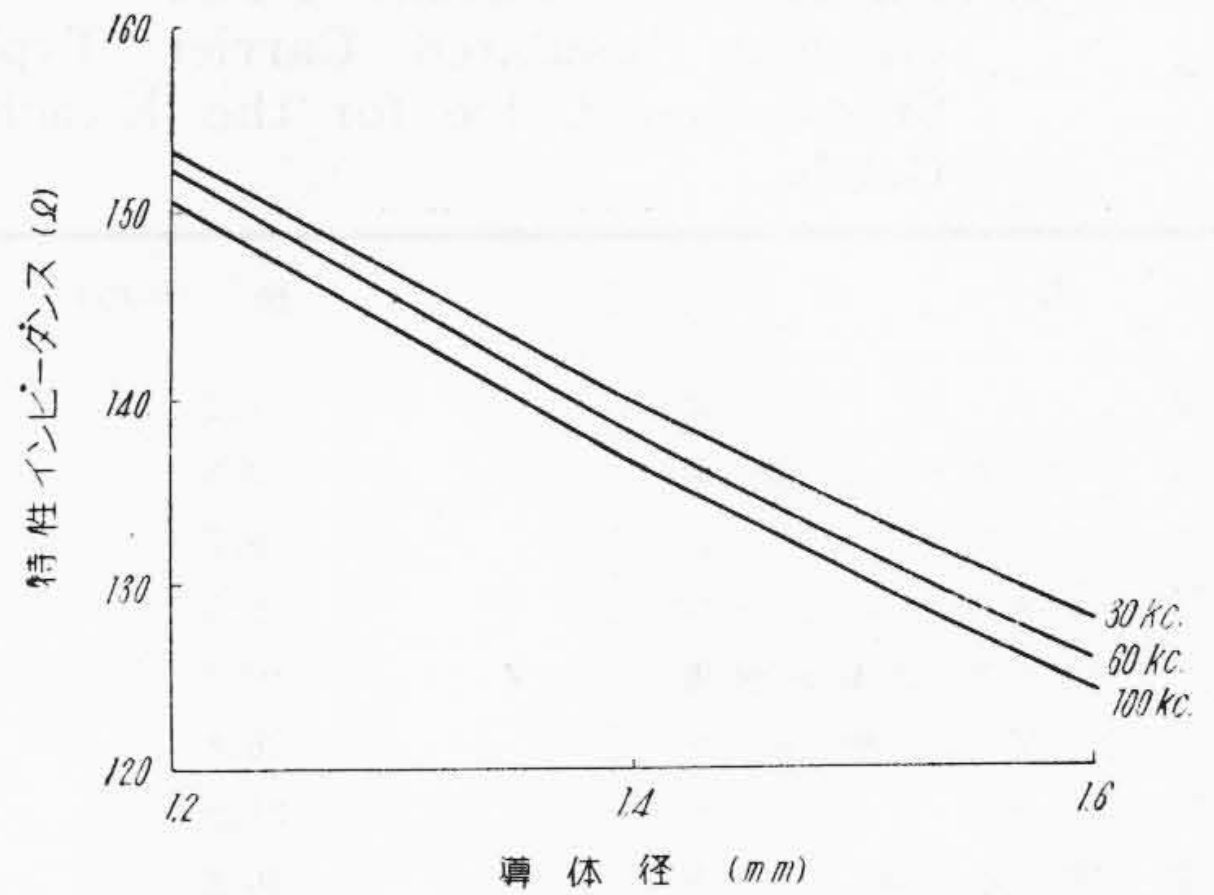
Fig. 4. Numerical Values of Capacity as Functions of Conductor Diameter

電容量を小さくすることによつて減衰量を少なくすることができるが、搬送ケーブルのように使用周波数が高くなつて来ると複雑になる。

第2図～第6図からもわかるように、水底ケーブルの減衰量を決定するためには静電容量と実効抵抗の値が大きな問題である。静電容量は、ポリエチレンクワッドの外側が水で充満されているから、クワッド内の寸法によつて決定されてしまう。またインダクタンスはケーブル構造により相当複雑な様相を生ずるが、実効抵抗の変化程減衰量におよぼす影響は著しくない。

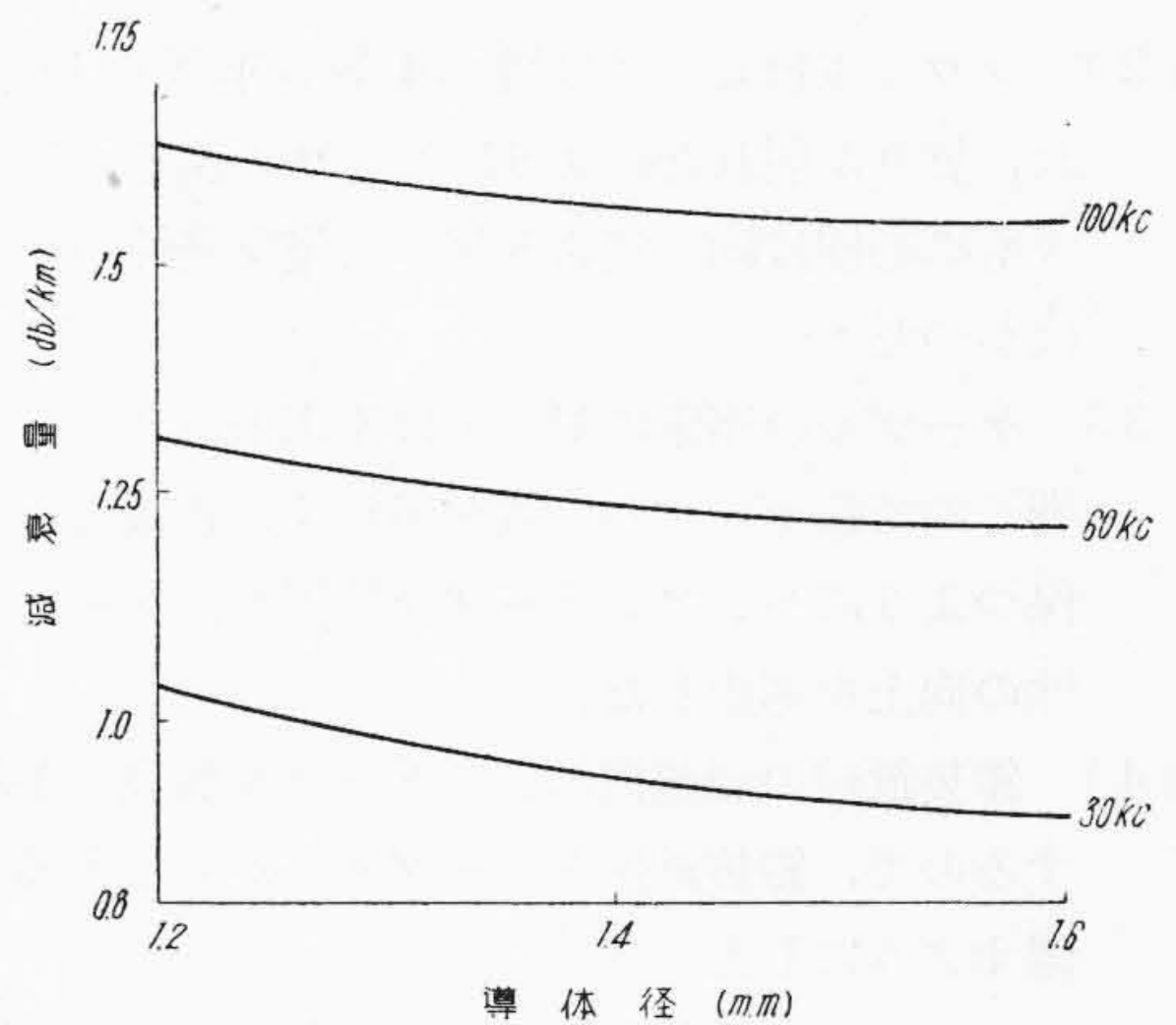
実効抵抗と導体直径との関係は、周波数および導体直径が大きくなる程表皮作用、近接効果および渦流の影響が大きく、導体直径を太くする割合に較べて実効抵抗の減少は緩慢である。

これらの点より、使用周波数により導体直径をどれく



第5図 導体径による特性インピーダンスと周波数との関係

Fig. 5. Numerical Values of Impedance as Functions of Conductor Diameter



第6図 導体径による減衰量と周波数との関係

Fig. 6. Numerical Values of Attenuation as Function of Conductor Diameter

らに選ぶかということは、伝送特性とケーブル価格の点より設計上重要な問題である。

〔IV〕 水底ケーブルの構造および特性

日立製作所の水底ケーブル試作品の構造は第3表、第7図および第8図（次頁参照）に示すように、3条のポリエチレンクワッドをジュートの撚添えとともに撚合せてケーブル心とし、その上にヘシアンテープ、銅テープおよびジュートを巻き、鎧装鉄線を施し、さらにジュートを施して仕上げたものである。

この構造および製造上には、つぎの諸点に考慮を払っている。

- (1) ポリエチレン押出しに際しては残留歪を最小にし、加熱による容積変化の影響を極力少なくするようにした。

第3表 日立製 1.2mm×6対ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブル寸法表

Table 3. Dimension of 1.2mm×6 Pairs Polyethylene Insulated Carrier Type Subaqueous Cable for the Hitachi Goods

構造	外径 (mm)
導体	1.2
ポリエチレン絶縁	3.6
クラウド撚合	8.7
ポリエチレン中心介在	1.5
クラウドポリエチレン被覆	10.9
ヘシアンテープ	26.8
銅テープ	27.2
座床ジユート	30.2
鎧装鉄線	38.2
外部ジユート	44.5
空中重量	約 4,200 kg/km
水中重量	約 2,900 kg/km

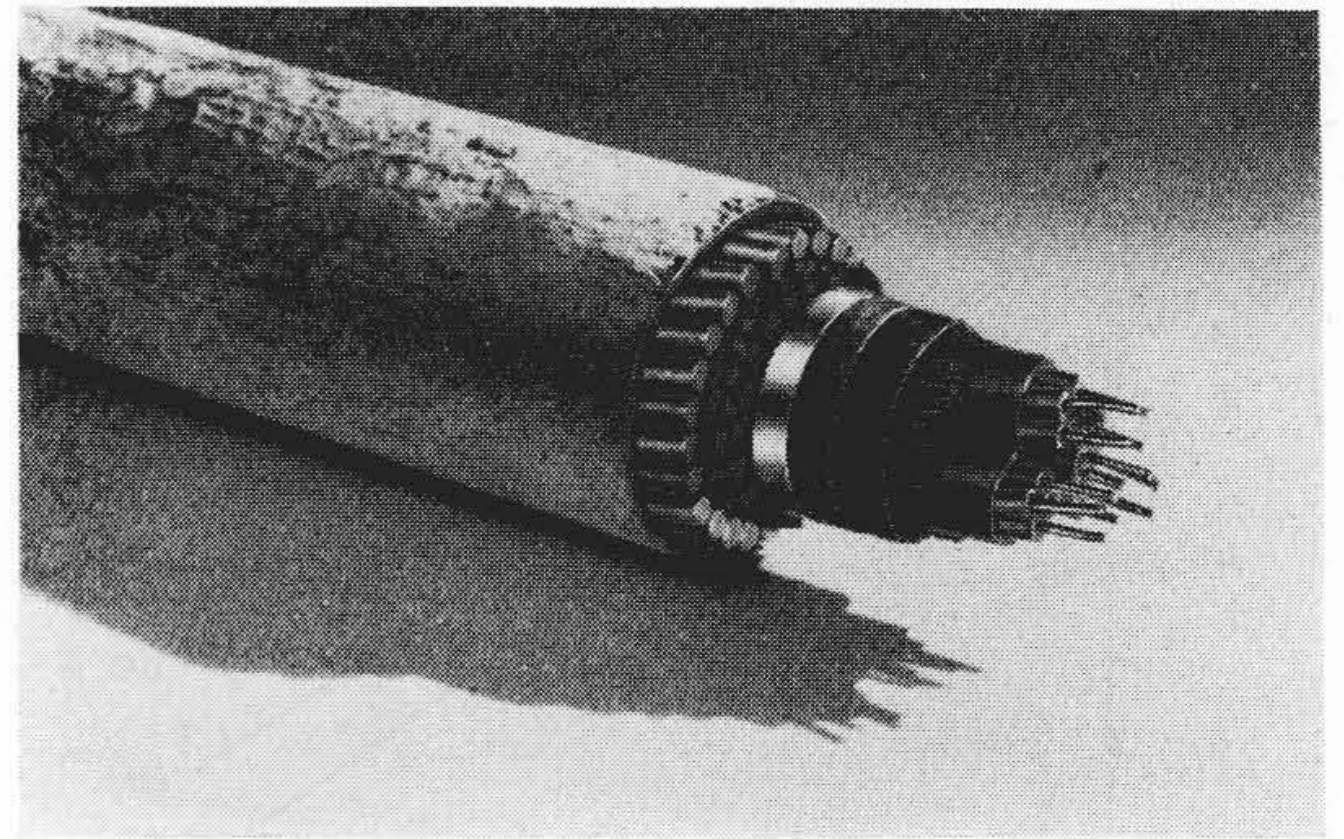
- (2) クラウド撚ピッチは線心4条が平等に撚合され、撚りが崩れないようにピッチの選定を行うとともに心線は同一把より採り、電気特性の安定をはかった。
- (3) ケーブルの座床に対しては座床上に銅テープを巻くので銅テープの位置が崩れず、正確な位置を保つようにヘシアンテープを使用し、ケーブル特性の向上を考慮した。
- (4) 鎧装鉄線の渦流損によりケーブル減衰量が増加するので、鎧装鉄線をケーブル心からできるだけ離すようにした。
- (5) ケーブル心と鎧装鉄線の間銅テープを挿入し、鎧装鉄線の影響を軽減した。なお、銅テープは渦流抵抗を減ずるために、できるだけ幅の広いテープを重りを多くして巻いた。
- (6) 銅テープの巻方向はクラウド撚方向と同一とし、渦流抵抗を軽減するようにした。
- (7) 銅テープの重なり部分が清浄であるように、外装用掛塗料の作業法を考慮した。
- (8) キンクに対して安全なように、鉄線鎧装機には撚返し付きの鎧装機を選び、鉄線の捻り歪みがないようにした。
- (9) 屈曲に際しても、鎧装鉄線に笑いが生じないように鉄線本数および撚ピッチを考慮した。

以上の諸点を考慮して製作した水底ケーブルの伝送特性は第9図の通りである。

〔V〕 水底ケーブルの機械的要求

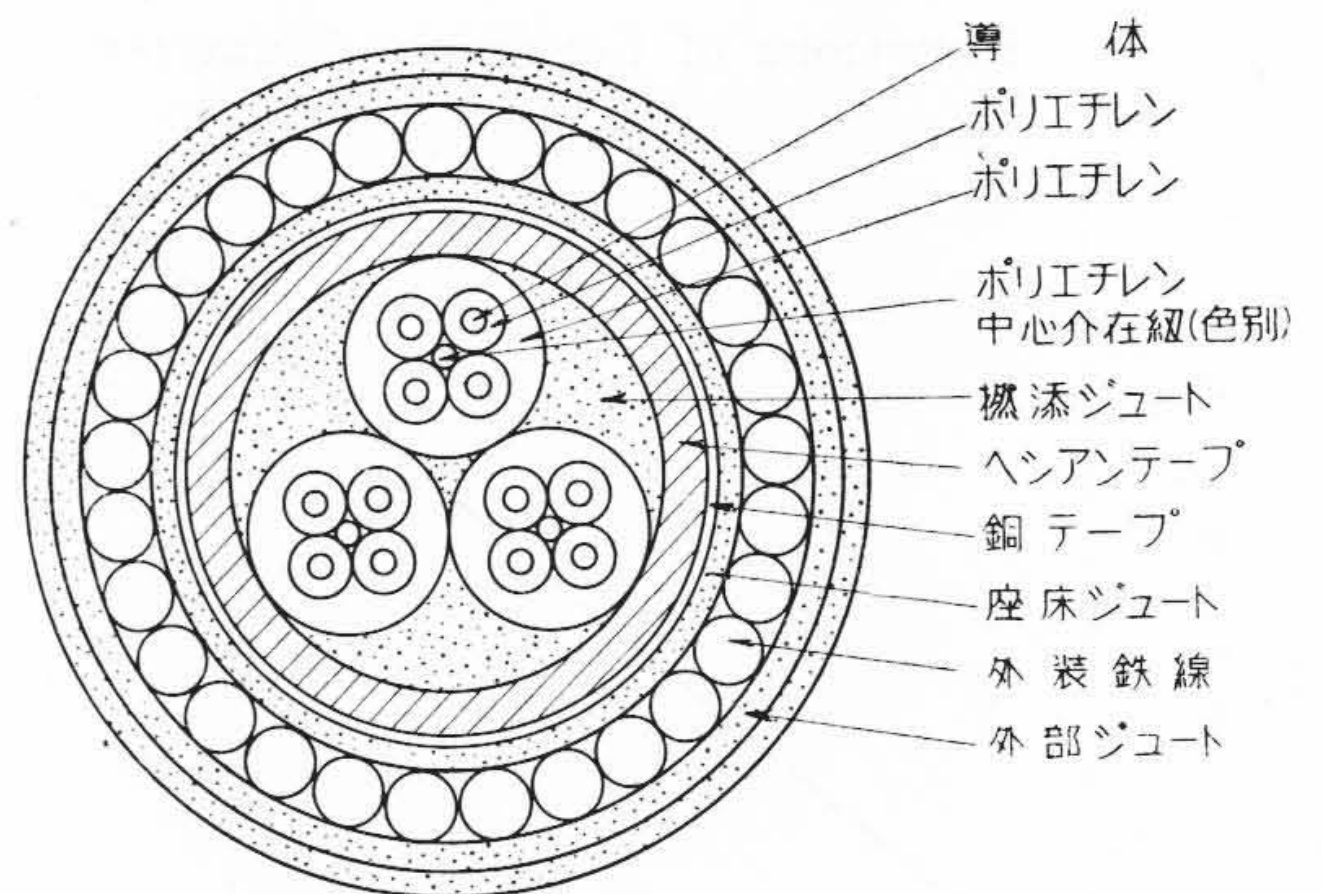
(1) 水底ケーブルの受ける力

水底ケーブルは製造工程中より布設完了まで、さらに



第7図 日立製 1.2mm×6対ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブル

Fig. 7. 1.2mm×6 Pairs Polyethylene Insulated Carrier Type Subaqueous Cable for the Hitachi Goods



第8図 日立製 1.2mm×6対ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブルの構造図

Fig. 8. 1.2mm×6 Pairs Polyethylene Insulated Carrier Type Subaqueous Cable for the Hitachi Goods

障害時における引揚げなど各種の力を受ける。これらのいろいろな力を分離するとおおよそつぎのようになる。

- (A) 張力：布設および引揚げの際の張力、ならびに水流によつて受ける張力などがある。
- (B) 圧力：ケーブル巻込みの際の下積みケーブルの受ける圧力および水深により受ける水圧など。
- (C) 摩擦：布設時におけるブレーキとの摩擦および水底における岩石などとの摩擦。
- (D) 衝撃：岩石やイカリによる機械的破壊力および水流による震動など。
- (E) 屈曲：製造工程中より発送まで、および布設中におけるブレーキやローラなどによつて受ける屈曲。
- (F) キンク：屈曲と捻りが1箇所に集中するために受ける力。

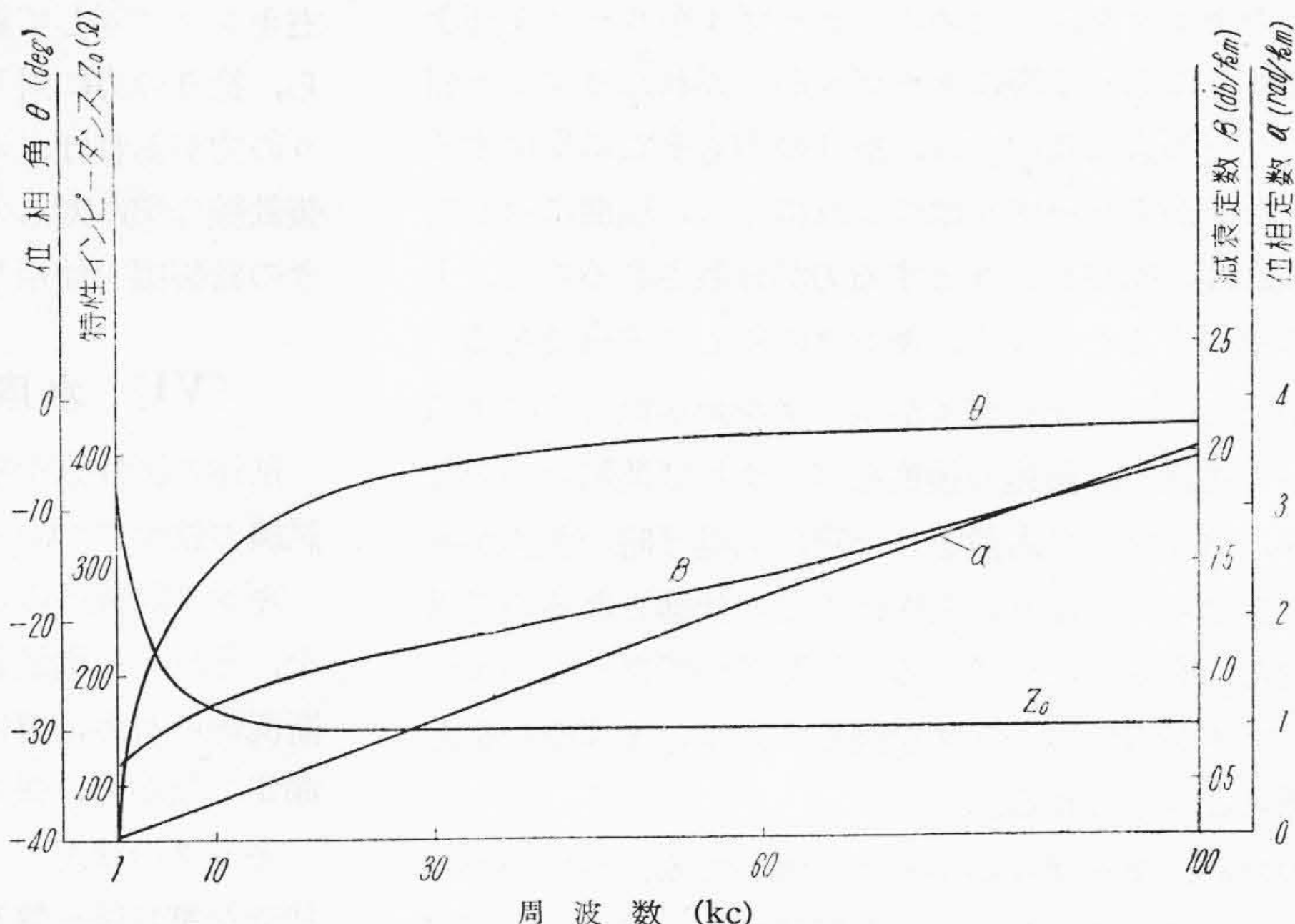
などが挙げられるが、地磁気によつて受ける鎧装鉄線の

第9図

日立製 1.2 mm×6 対ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブルの性能

Fig. 9.

Characteristics of 1.2 mm×6 Pairs Polyethylene Insulated Carrier Type Subaqueous Cable for the Hitachi Goods



電気腐蝕も重大な問題で、ケーブル設計に対して十分考慮しなければならない。

これらの諸問題中、水底ケーブルの重量、キックおよび鎧装鉄線の影響について述べる。

(2) 水底ケーブルの重量

水底ケーブルは海底ケーブルのように大型船の使用は不可能であり、小型船による布設および引揚げを行わなければならない、その能力も限られているので布設地の条件によりケーブル重量もおのずから制限されてくる。

水底ケーブルの重量は、障害修理の際に水面まで小型船によつて引揚げ可能な重量でなければならない。

いま、引揚げに際し引揚げロープに加わる張力を G とし、ケーブルの受ける張力を T とすると⁽⁷⁾

$$G = wh\sqrt{\frac{8}{3d}}(1+d)$$

$$T = wh\left(1 + \frac{1}{3d}\right)$$

ここに w : ケーブル単位長当りの水中重量 (kg/m)

h : 水深 (m)

d : 弛度 (%)

で計算することができる。

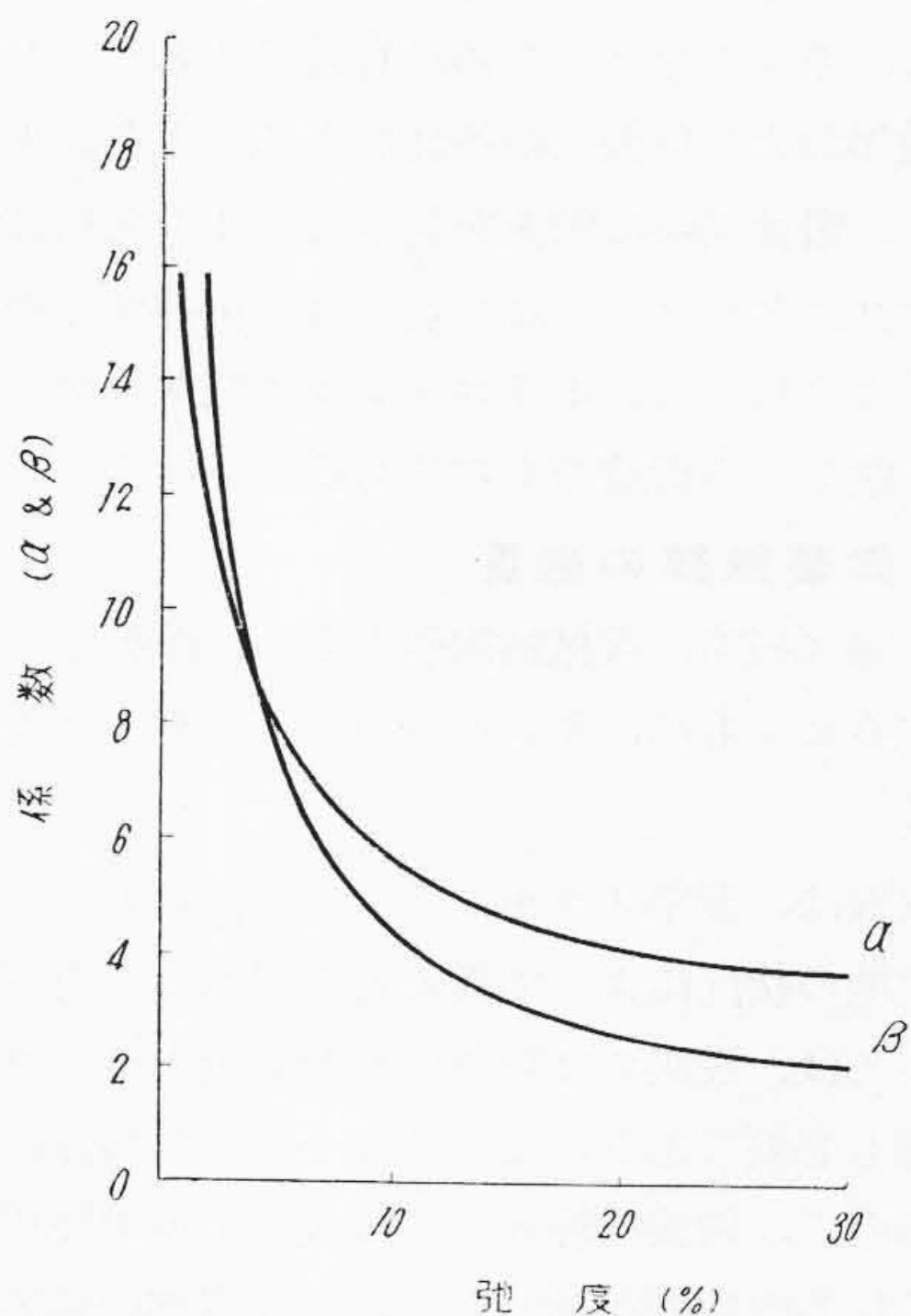
いま $G = wh\alpha$ とし $\alpha = \sqrt{\frac{8}{3d}}(1+d)$

$T = wh\beta$ とし $\beta = \left(1 + \frac{1}{3d}\right)$

として、いろいろな弛度 d について、 α, β を計算した結果を第10図に示す。

第10図よりわかるように、同一の弛度に対してはケーブル重量が重く、水深の深い程 G および T が大きくなる。

しかし、弛度が 10% 以上になつても G および T に対する影響が少い。さらに弛度を大きくすることは布設



第10図 弛度と係数 (α および β) との関係
Fig. 10. Relation between Coefficients (α & β) and Dip

ケーブル条長が長くなり、不経済であるばかりでなく後述のキック障害を起す原因となつて好ましくない。

(3) キック

ケーブル心および鎧装鉄線が撚られているので、ケーブル自体が自然にループを画く傾向にある。このループの径が小さくしぼられ、屈曲と捻りが1箇所集中された状態がキックである。したがつてキックはケーブルの機械的強度の差異により特に屈曲に弱い箇所があると、その点において完全なキックを起すことになる。もしキック点において屈曲および捻りの力がケーブルの抵抗よりも大きい際には、ケーブルが捻切れてしまうことにな

る。このキックを防ぐためにはケーブルがループを画きその径がしぼられる際にケーブルがつぶれたりすると屈曲の力がその点に集中され、捻りの力もそこに集中することになるからケーブルはつぶれにくく、屈曲に対しても強ければ、屈曲しようとする力が分散されるので、1箇所に集中することなく、キックに対して安全である。

このためには、ケーブルがループを画かぬようにすることが一番良く、前述の弛度を無くすれば問題ないのであるが、弛度なしで布設された際に引揚げ時の張力が非常に大きなものとなり、引揚げ不能の状態となるので弛度は絶対に必要となってくる。したがって撚りのかゝつたケーブルが自然にループを画くことは、まずやむをえない現象と考えられる。

このため、ケーブルがループを画いても、鋭いキックを起さないように、ケーブルの構造を考えて行く必要がある。鎧装鉄線を二重に施し、互に反対方向に巻く構造とすれば、キックを防ぐために有効であるが、ケーブル価格の増加および取扱上の不便がある。さらにキックを起しても、電話回線に障害を起さないような構造が考えられなければならない。この点では、後述するキック試験の結果より見ても、ポリエチレン水底ケーブルは十分キックに耐えうる構造のものであるといえる。

(4) 鎧装鉄線の影響

鎧装鉄線は張力、機械的衝撃ならびに摩擦などに対して保護するとともに、キックに対しても重大な役目をなしている。

鎧装鉄線は、亜鉛メッキしたものを使用し、その太さは、布設地の状況によつて異なるものである。海底ケーブルにおいては、浅海では潮流の影響も大きく、摩擦に対する保護も必要であり、またイカリによる機械的破壊力も加わるので、鎧装鉄線としては太いものを使用し、深海ではこれらの影響が少いので、比較的細い鎧装鉄線が使用されている。

ダム用水底ケーブルにおいては、水流の影響や、機械的破壊力も小さいので、鎧装鉄線も比較的細いもので良いのである。しかし、鎧装鉄線の本数を増加し、かつ巻付け角度が小さい場合には、ケーブル屈曲時において、鎧装鉄線に笑いが生じ、鎧装の目的をはたさぬことになるので、設計上留意しなければならない。しかし、鎧装鉄線の太さと、ケーブル外径との関係については、いまだ定量的な関係がなく、経験によつて設計されている。

鎧装鉄線のキックに対する影響は、屈曲に対して、鋭い曲げの発生を防止し、捻りに対しても抵抗力がある。

特に、ケーブルおよび鎧装鉄線が右撚りの際には、キックは右キックができやすいのであるが、ポリエチレン絶縁ケーブルにおいてはケーブル心がつぶれ難いので、

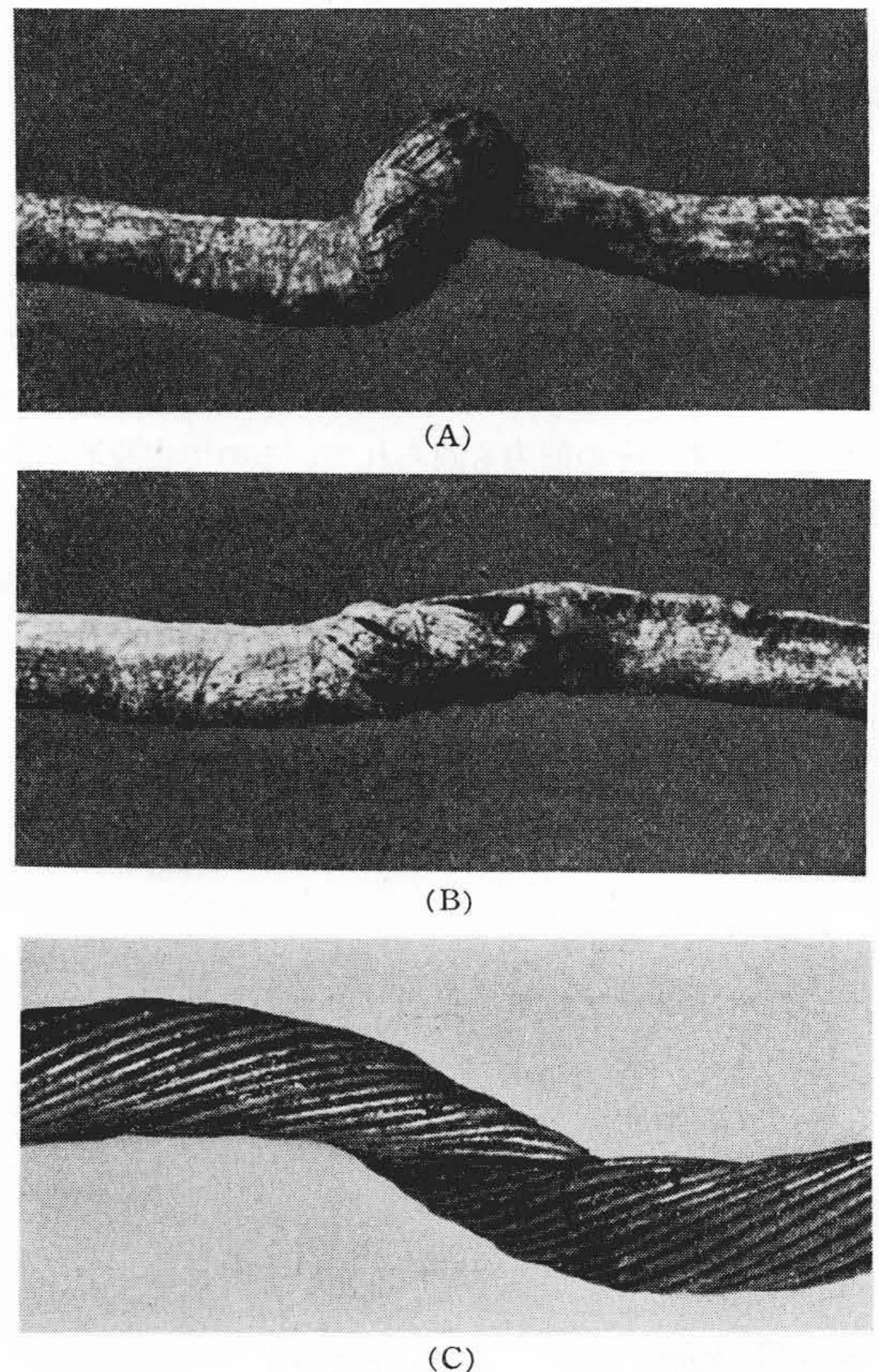
右キックに対して鎧装鉄線が締められる傾向にあるから、捻りの力に対して抵抗力が働く。鎧装鉄線自体に捻りの力があれば、キックを助長する結果となるので、鎧装鉄線作業に対しては捻りの歪が残らぬよう、撚返し付きの鎧装機を使用しなければならない。

[VI] 水底ケーブルのキック試験

前述の諸注意を払つて製作した水底ケーブルのキック試験の結果について述べる。

キック試験⁽⁸⁾は、右キックおよび左キックのケーブルを、それぞれ引張試験機に取付け、ケーブル断面の変形、断混線の有無、導体抵抗の増加および静電容量の変化を測定しながら、張力を増加して行つた。

キックの状況および張力 5,000 kg を加えた後の解体状態を第11図～第12図に示した。

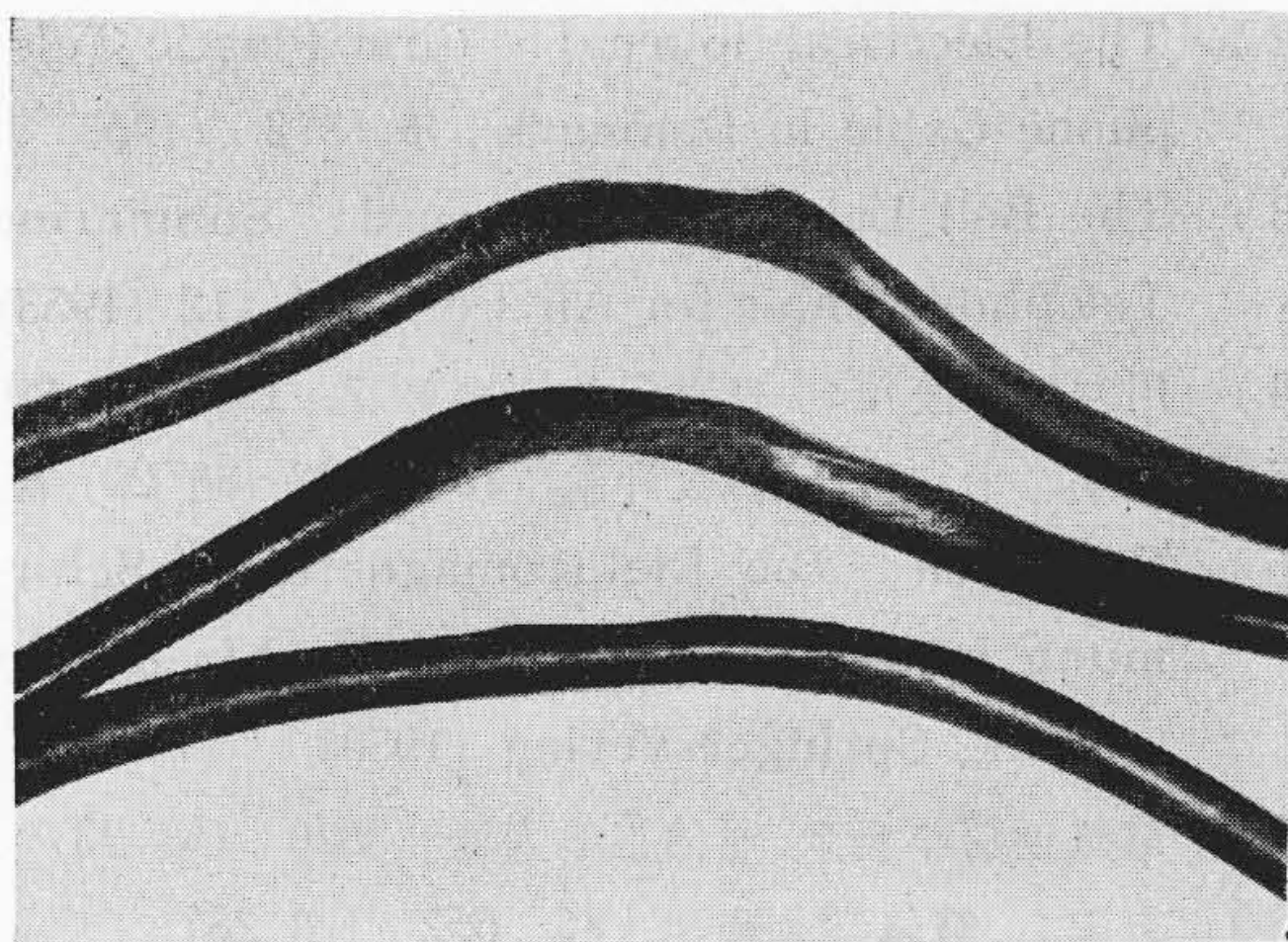


第11図 キックの状態

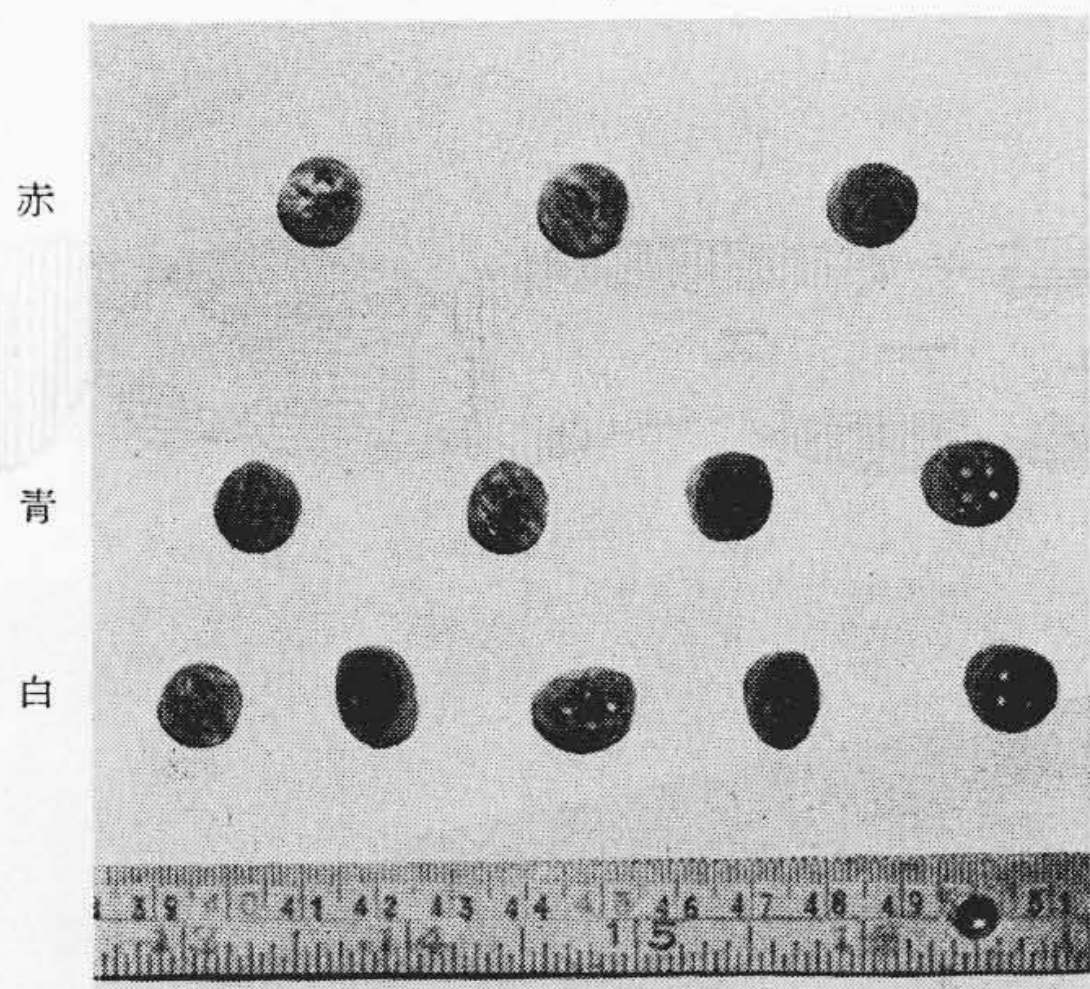
- A. 2t 右キック
- B. 5t 右キック
- C. 5t 右キックの鎧装鉄線

Fig.11. Condition of Kink (1)

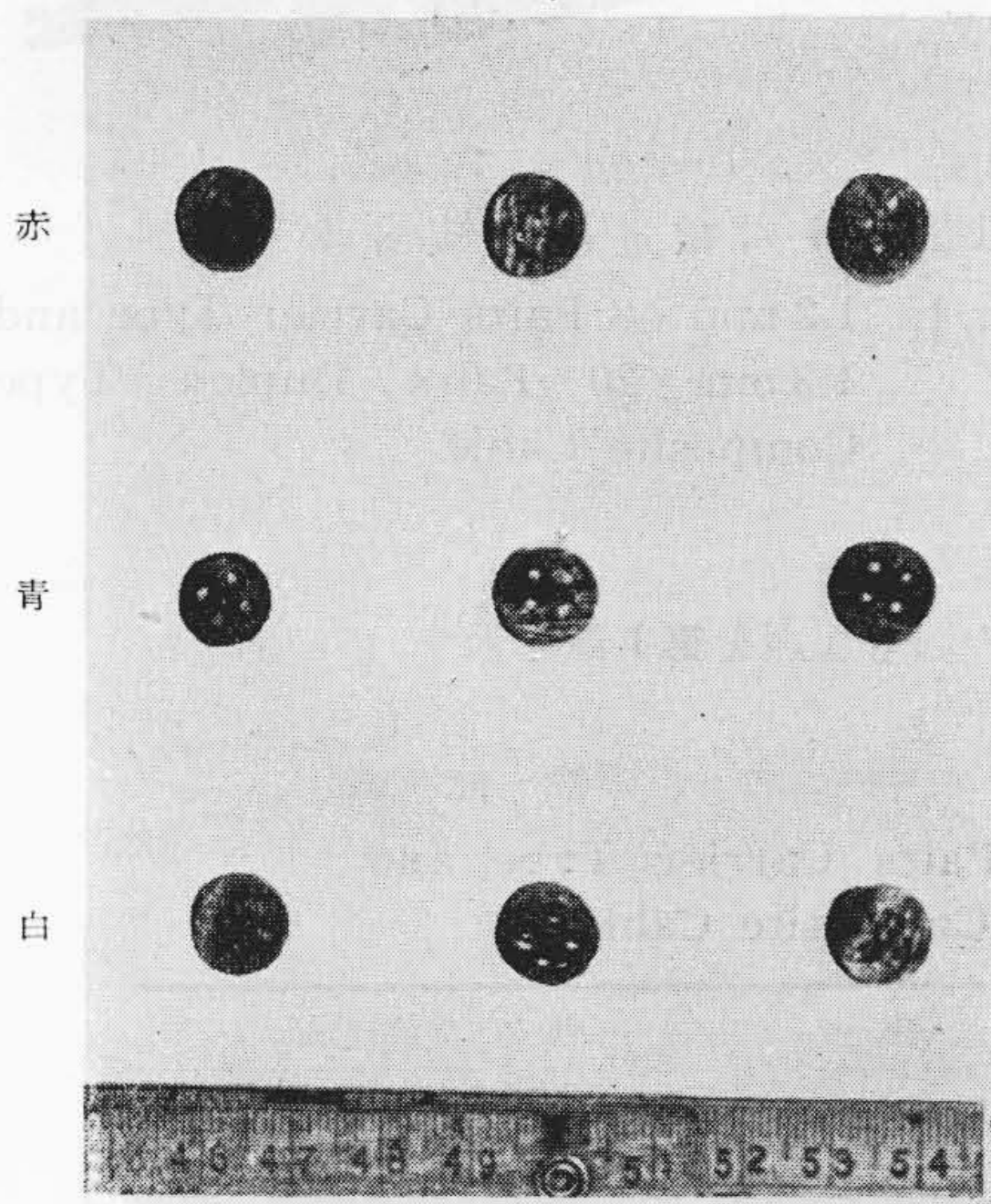
- A. 2 t Right Hand Kink
- B. 5 t Right Hand Kink
- C. Steel Armored of 5 t Right Hand Kink



(A)



(B)



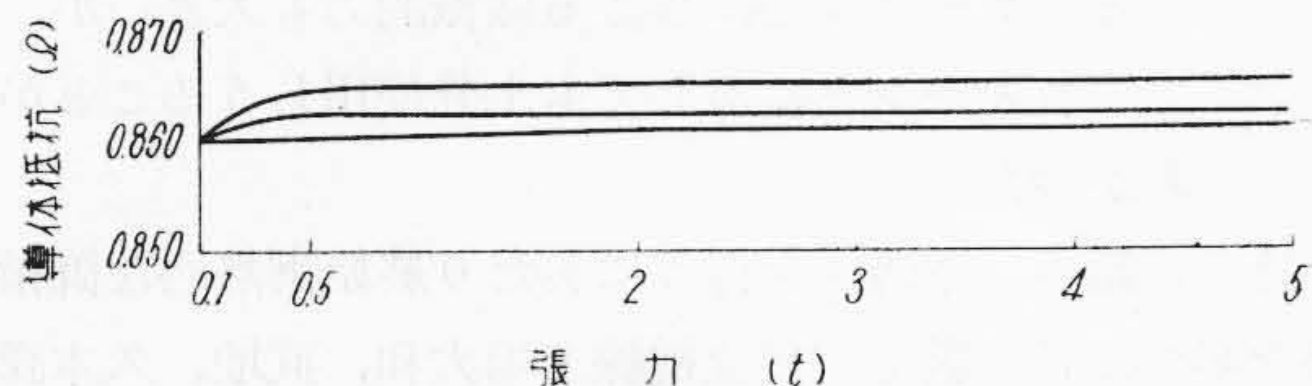
(C)

第12図 キンクの状態 (2)

- A. 5t 右キンクのクワッド
- B. 5t 右キンクのクワッド断面
- C. 5t 左キンクのクワッド断面

Fig.12. Condition of Kink (2)

- A. Quad of 5t Right Hand Kink
- B. Section of Quad for 5t Right Hand Kink
- C. Section of Quad for 5t Left Hand Kink



第13図 張力と導体抵抗との関係

Fig.13. Relation between Conductor Resistance and Tension of Kink Test

これらの写真よりわかるように、鎧装鉄線が右撚りであるため、右キンクに対して、鎧装鉄線がケーブル心を締付け、喰込む傾向を示しているが、ポリエチレンクワッドが変形した程度で、機械的にも電気的にも十分キンクに耐えうることを示している。さらに、左キンクは鎧装鉄線がゆるみ、右キンクに見るようなクワッドの変形もなく、より安全である。

導体抵抗は各クワッド毎に4心線を直列に接続して測定したが、右キンクの結果を第13図に示す。導体抵抗の増加は500 kg までは認められるが、それ以上の張力ではほとんど現われていない。この傾向は左キンクの場合も同様であつた。

静電結合は、クワッド内およびクワッド間の実回線について測定したが、張力による変化は認められず、キンクの場合でも、小部分の变化形に対しては問題にならないことを裏書きしている。

以上のキンク試験の結果、ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブルはキンクに対して機械的に十分耐えうる構造であると、同時に、電気的特性においてもなんら心配することなく使用しうるものであることがわかつた。

[VII] 結 言

以上、ポリエチレン絶縁搬送水底ケーブルについて総括すると

- (1) ポリエチレンが従来のガタパーチャに比較して電気的、物理的および化学的特性がすぐれており、新材料の出現によつて水底ケーブルの性能を一段と向上させることができる。
- (2) ケーブルの電気特性としては減衰量と結合量を小さくすることが重大であるが、導体径の選定に注意するとともに、特に減衰量に大きく影響する実効抵抗を小さくするために第三金属体の構造については十分な考慮を払わなければならない。
- (3) 水底ケーブルは小型船を使用するので、ケーブル重量と機械的特性について適切な設計を行わなければならない。
- (4) キンクに対しては鎧装鉄線が右撚りであるため右キンクができやすく、同一張力の左キンクに較

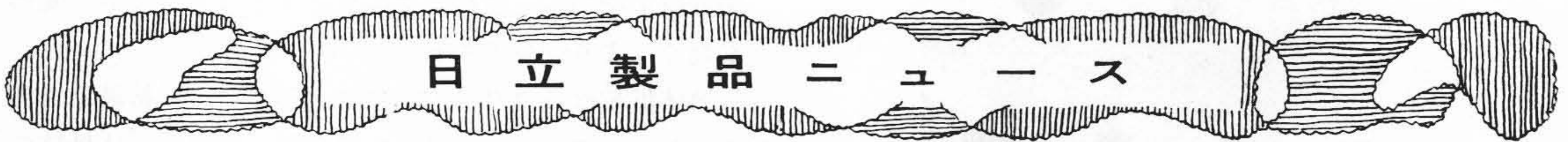
べるとケーブル心に与える機械的力も大きいが、
いづれのキンクに対しても十分使用しうることが
わかった。

終りに臨み、本研究を行うにあたり終始御熱心な御指
導を賜った日立製作所日立電線工場大和、武地、久本課
長ならびに杉山、星岡主任、数値計算および測定に御協
力戴いた岩上、結城、寺門氏始め関係者各位に深く感謝
する。

参考文献

(1) The Bell System Technical Journal: A Sub-
marine Telephone Cable with Submerged
Repeaters., 30, 65 (1951)

(2) The Electrical Journal: First Plastic Tele-
phone Cable in Denmark. 5 372 (1953)
(3) The Bell Laboratories Record: Submarine
Telephone Cable for Air Force 31 112 (1953)
(4) 川和田, 庄司: 日立評論 別冊 7, 151 (昭 29)
(5) 橋本, 川和田: 日立評論 36 1282 (昭 29)
(6) H. Kaden: Die Elektromagnetische Schir-
mung in der Fernmelde-und Hochfrequenz-
technik, Springer-Verlag (1950)
(7) 電気通信学会: 通信工学大鑑 3820 (昭 23)
(8) 吉田: 電気学会雑誌 73 652 (昭 28)



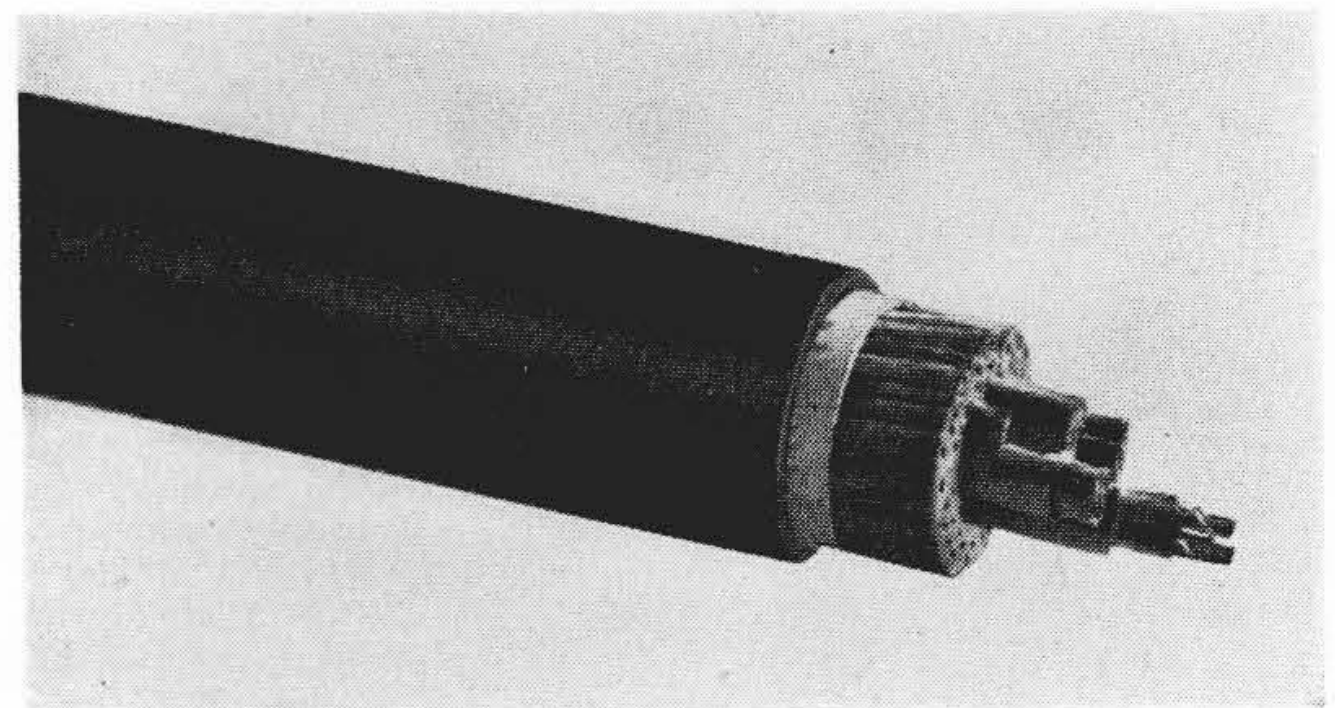
28 対搬送重信複合ケーブル

1.2 mm×8 Pairs Carrier Type and 1.3 mm
×20 Pairs Duplex Type Composite Cable

28 対搬送重信複合ケーブルは 1.2 mm×8 対搬送用星
型クワッドと 1.3 mm×20 対重信用 D.M. 型クワッドを
同一鉛被内に収容した複合ケーブルである。

このケーブルはそのまゝまたは装荷して通信回線を構
成して使用される。なおガス封入を行うので警報回線対
を含んでいる。

日立製作所日立電線工場においては、搬送ケーブルお
よび重信ケーブルの生産に成果を挙げているので、今回
日本国有鉄道より受注したこの種複合ケーブルも好成績



第1図 28 対搬送重信複合ケーブル

Fig. 1. 1.2 mm×8 Pairs Carrier Type and
1.3 mm×20 Pairs Duplex Type
Composite Cable

で納入した。

特性のおもな点を第1表に示す。

第1表 28 対搬送重信複合ケーブル性能表
Table 1. Characteristics of 1.2 mm×8 Pairs Carrier Type and
1.3 mm×20 Pairs Duplex Type Composite Cable

項	目	規 格	性 能	
静電結合	搬送回線	Q 内 S-S	最大 25 PF/250 m	最大 7.7 PF/250 m
		Q 内 P-S	最大 400 PF/250 m	最大 46.2 PF/250 m
		隣 Q S-S	最大 10 PF/250 m	最大 6.2 PF/250 m
静電結合	重信回線	Q 内 S-S	最大 143 PF/250 m	最大 24.7 PF/250 m
		Q 内 P-S	最大 260 PF/250 m	最大 38.5 PF/250 m
		隣 Q P-P	最大 260 PF/250 m	最大 24.7 PF/250 m
静電結合	搬送重信クワッド間	実回線相互間	最大 80 PF/250 m	最大 26.0 PF/250 m
		搬送の実回線と重信の重信回線間	最大 260 PF/250 m	最大 7.7 PF/250 m
電結合	搬送回線	Q 内	最大 60 mμH/250 m	最大 45.0 mμH/250 m
		Q 間	最大 30 mμH/250 m	最大 24.0 mμH/250 m