

分割導体ケーブルの実効抵抗

加 子 泰 彦*

Effective Resistance of Segmental Conductor Cables

By Yasuhiko Kako

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

Present tendency favors the use of low skin effect segmental conductor cables as large current volume conductors for power station main cables, with the aim of decreasing their effective resistance. To date, no conclusive reports have been published on why the skin effect decreases in the segmental conductor cables, all previous reports being limited to discussions based on suppositions. Improvements were made on measurement methods, and through actual measurements made on the effective resistance of specially constructed segmental conductor cables, the reasons why the skin effect decreases in segmental conductor cables were ascertained.

〔I〕 緒 言

商用周波数で用いられる電力ケーブルにおいても導体寸法の大きなものでは表皮効果はかなり顕著に表われるので、ケーブルの温度上昇の点から、表皮効果の低減をはかることは重要な問題である。

我国においては、発電所の発電機と変圧器を結ぶ主幹ケーブルの経済的布設ということに、この問題が関連している。すなわち主幹ケーブルにおいては、多条布設の場合は、配列方法を適当に選んで、各ケーブルに均等に電流が流れるようにし、またケーブル自体には、分割導体ケーブルのようなものを選んで、交流抵抗の減少をはかることが、経済的建設の第一条件である。分割導体ケーブルが、表皮効果の低減に有効であることは、米国においては、かなり前から認められて広く使用されており、我国においても、最近主幹ケーブルには一般にこれが使用されるようになった。ところが分割導体ケーブルにおいて、表皮効果が減少する理由については、その機構が複雑で、数学的な取扱いが困難なために、それらの表現は、未だ実験式の域をでていない現状である。またその測定法においても、被測定抵抗があまりにも小さいために、精度の点で問題があり、表皮効果低減の種々の理由を分析するには不十分の憾があつた。特に異つた装置を用い異つた実験者が行つた測定結果を比較する場合にはこの感を深くする。

*日立製作所日立研究所

今回筆者はこの問題を取り上げ、測定法について種々検討を加え、誤差の生ずる原因をできるだけ取除き、ほぼ満足できる測定法をもつて、数種の特殊導体構成の分割導体ケーブルの試作品について、その交流抵抗の測定を行つた。これらの結果を比較検討することによつて、定性的ではあるが、分割導体ケーブルの交流抵抗について理論的究明をすることができたので、ここに測定法と分割導体ケーブルの、表皮効果低減の機構についての考察結果を報告する次第である。

〔II〕 測 定 法

(1) 従来発表された方法

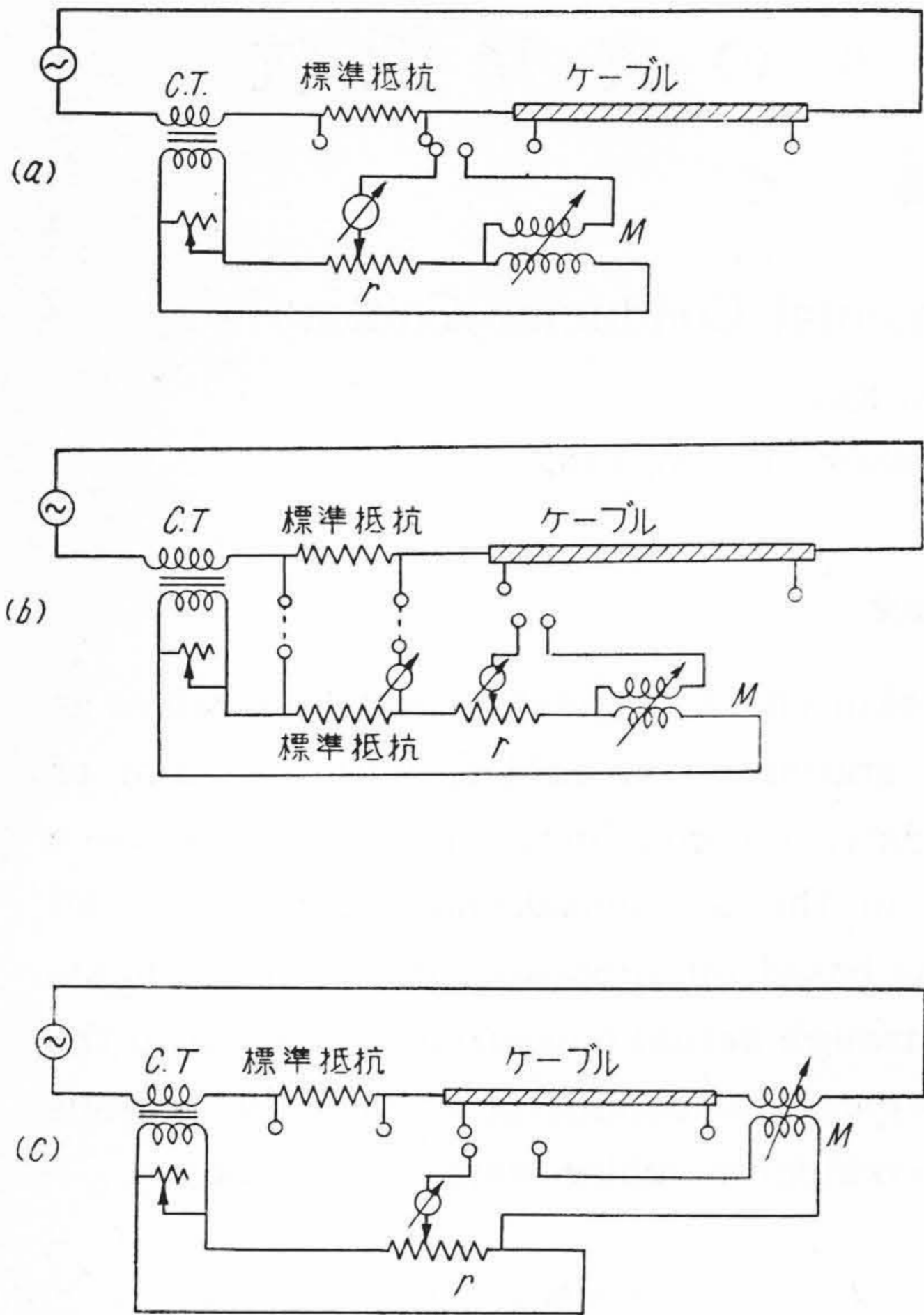
大電流容量ケーブルのような微小抵抗の、交流による測定法については、従来諸種の発表がある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。そのおもなものとして、交流電位差計を用いる方法がある。これは直流の場合と同様な原理で、電位差計としては、直角座標式、極座標式のものなどが使用される。つぎに第1図(a)(b)(c)(次頁参照)に示すように、標準CTを用いて、一種の電位差計を構成する方法である。

このうち測定法としては後者程すぐれ、特に(c)の方法は、測定器の箇々の性能ならびにその組合せが適當である場合には、大変すぐれた方法である。

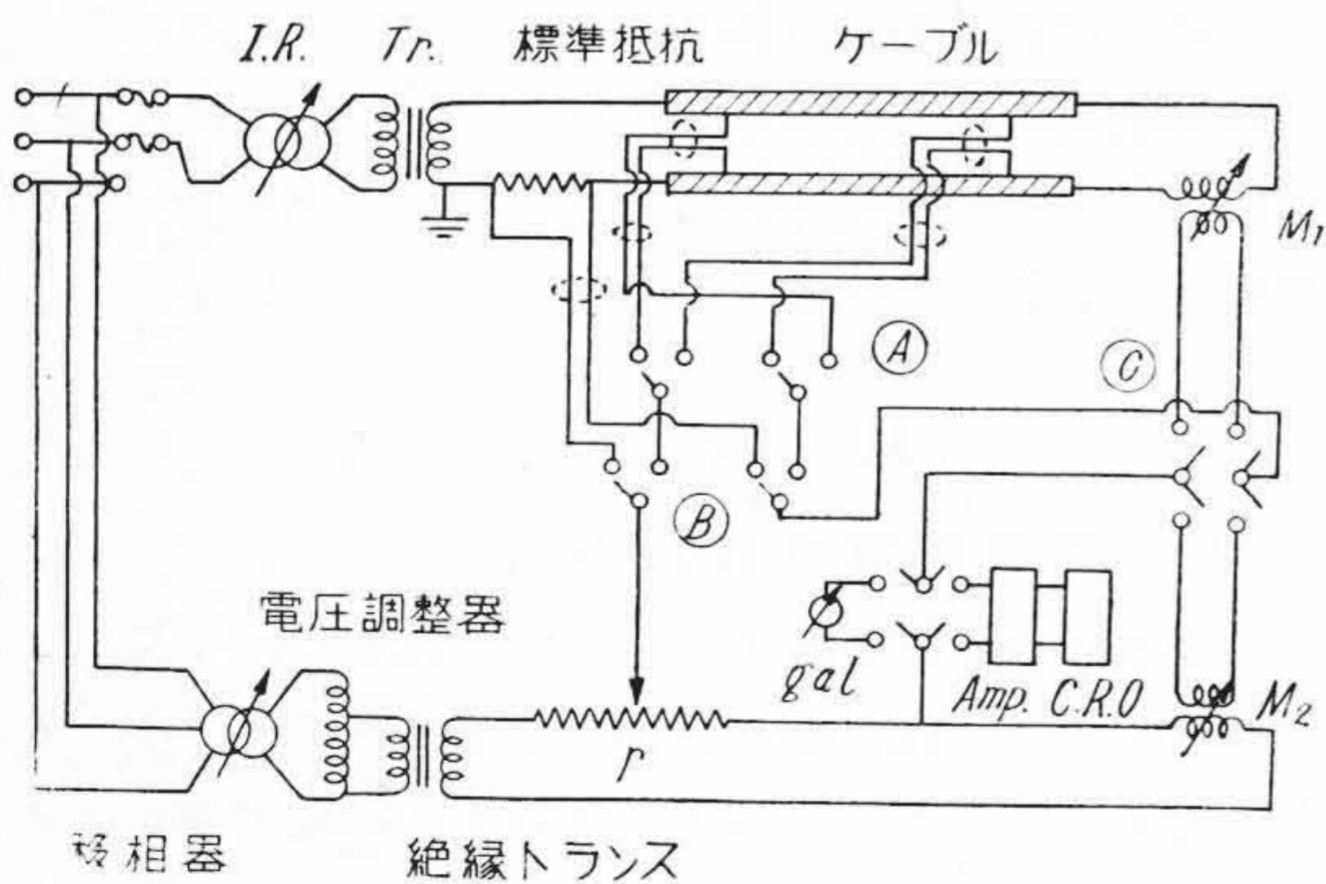
(2) 改良測定法

結線図を第2図(次頁参照)に示し、装置の外観を第3図(次頁参照)に示す。

測定原理は第1図(c)と同様であるが、簡単な測定器の



第1図 標準 C.T. を用いる測定法
Fig.1. Measuring Method with Standard C.T.

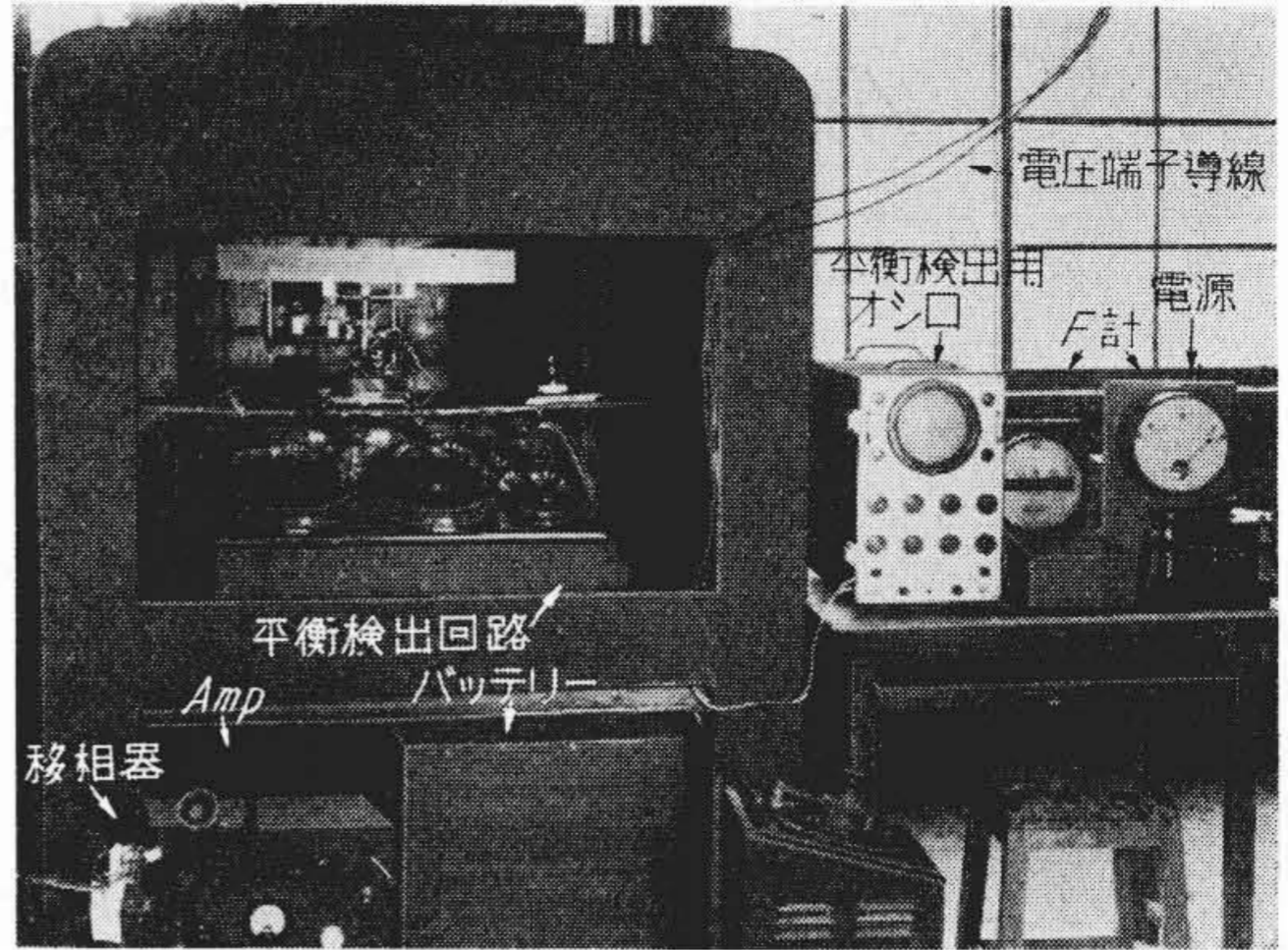


第2図 改良測定法結線図
Fig.2. Connection Diagram of Improved Measuring Method

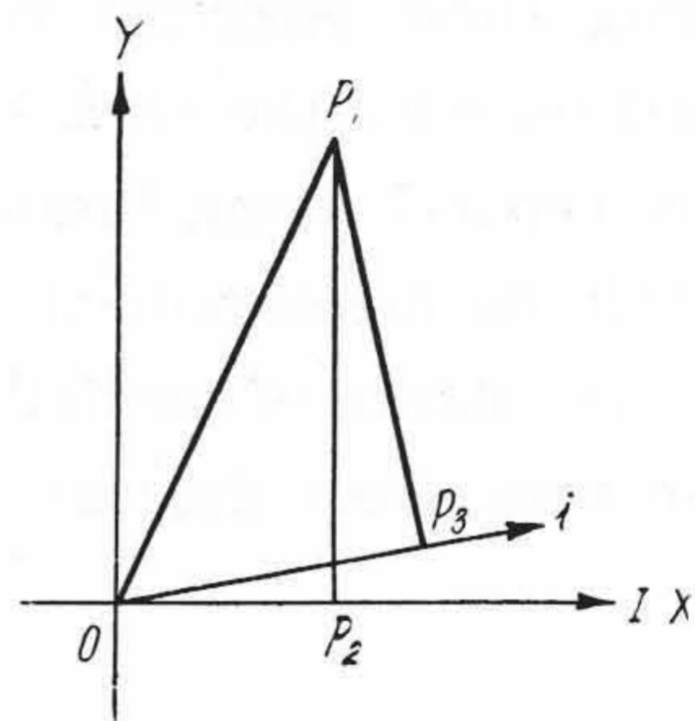
組合せによつて、容易に第1図(c)の理想的な動作状態と同様な性能を期待できるものである。

(i) 測定原理ならびに測定法

第2図において、切換スイッチ©を M_2 側にすれば、第1図(a)の方法と同じ測定原理になり、 M_1 側にすれば第1図(c)と同じ原理になる。すなわち第4図において、電圧 \vec{OP}_1 を測定するのに M_1 側では、 \vec{OP}_2, \vec{P}_2P_1 の成



第3図 改良測定法測定器具外観
Fig.3. Outside View of Measuring Instruments



第4図 測定原理を示すベクトル図
Fig.4. Vector Diagram Indicating Measuring Principle

分に分解し、 M_2 側では \vec{OP}_3, \vec{P}_3P_1 と分解して測定する。すなわち M_1 側では

$$\vec{OP}_1 = \vec{OP}_2 + \vec{P}_2P_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

M_2 側では

$$\vec{OP}_1 = \vec{OP}_3 + \vec{P}_3P_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

上記2種の測定法において、 M_1 側では $\vec{P}_1P_2 \perp \vec{OX}$ 、 M_2 側では $\vec{P}_1P_3 \perp \vec{OP}_3$ の関係が常に保たれる。ゆえに $\vec{OP}_2 = \vec{OP}_3$ になるように、移相器で i の位相を変化して行けば I と i は同相にすることができる。電圧平衡の検出にブラウン管を使用すれば、上記操作はきわめて短時間で完了する。

以上の操作が終つた後 © は M_1 側にして測定を行う。

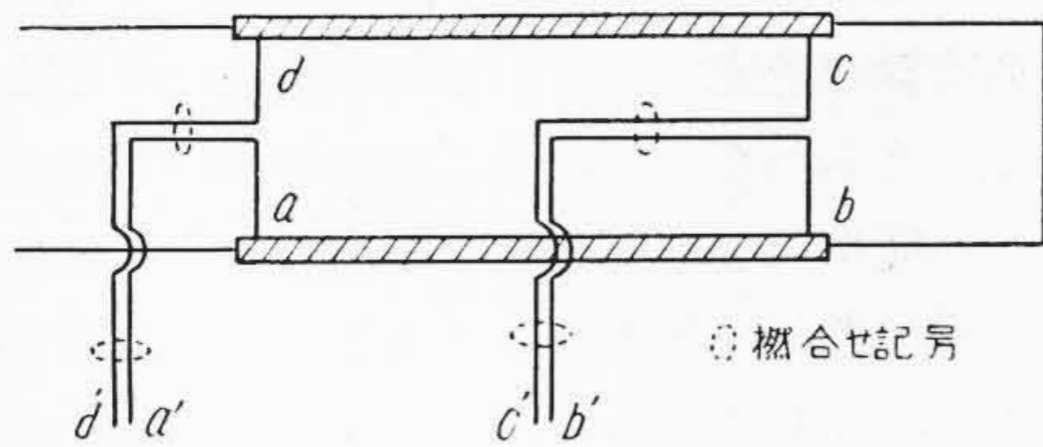
いま標準抵抗を $R + j\omega L$
ケーブルを $R' + j\omega L'$

とすると、それぞれ平衡をとつた場合には、

$$\left. \begin{aligned} I(R + j\omega L - j\omega M) &= ir \\ I(R' + j\omega L' - j\omega M') &= ir' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$R' = R \frac{r'}{r} \dots\dots\dots (4)$$

(4)式よりケーブルの抵抗が求められる。



第5図 電圧リード線のととり方
Fig.5. Method of Potential Lead Arrangement

(ii) 測定技術上の諸問題

実際の測定には種々考慮を要する問題がある⁽⁴⁾。たとえばケーブルの電圧導線の配置であるが、表皮効果が生じているような場合に、電圧導線に誘起する電圧は、複雑で誤差の原因となるので⁽²⁾、今回の実験では第5図に示す方法でその影響を除いた。すなわち同一寸法のケーブル $a-b$, $c-d$ を用い、 $a'-b'$, $c'-d'$ の端子電圧の平均をケーブルの電圧降下とすると、電圧導線に誘起される電圧は除去される。ただしこの場合に、ケーブルは、附近の強磁性体などに鉄損、渦流損などを供給していないことが必要である⁽⁴⁾。今回の実験では、この点は影響がないことが確かめられた。つぎにケーブル端子の接続には十分注意し、各セグメントの電流を均一にする必要がある。今回の実験では、厚さ 25 mm の銅塊を貫通し、銀鑽で接着したものと、実際に使用される端子金具と同一構造のものに、半田で接着したものとを使用した (厚さ 7 mm の銅管)。また電圧端子の位置としては、ケーブル端子より 600 mm の距離をとり、電圧点において、銅線で各セグメントを一括緊縛した。つぎに測定回路の耐地絶縁に留意し、第2図の絶縁変圧器も一次二次巻線間容量 60 pF 程度のもので選んだ。電流導線は平行にして接近させ、磁束の漏洩の減少をはかった。また試料の温度調節は、測定精度向上のため精密調整が望ましく、今回の実験では、かならずしも十分とはいえないが、ケーブルを長い木箱に入れて水を流し、温度の均一をはかる方法と、屋外に有蓋ピットを作り、ケーブルを入れ、日射による温度変化を防止する方法を採用した。

(第6図参照)

(iii) 誤差の検討

本測定法における誤差の原因を列挙するとつぎのようである。

(a) 抵抗分圧器が純抵抗でなくインダクタンス値が比較的大である場合 (第2図 r)

(3) 式において

$$r \rightarrow r(1+j\alpha)$$

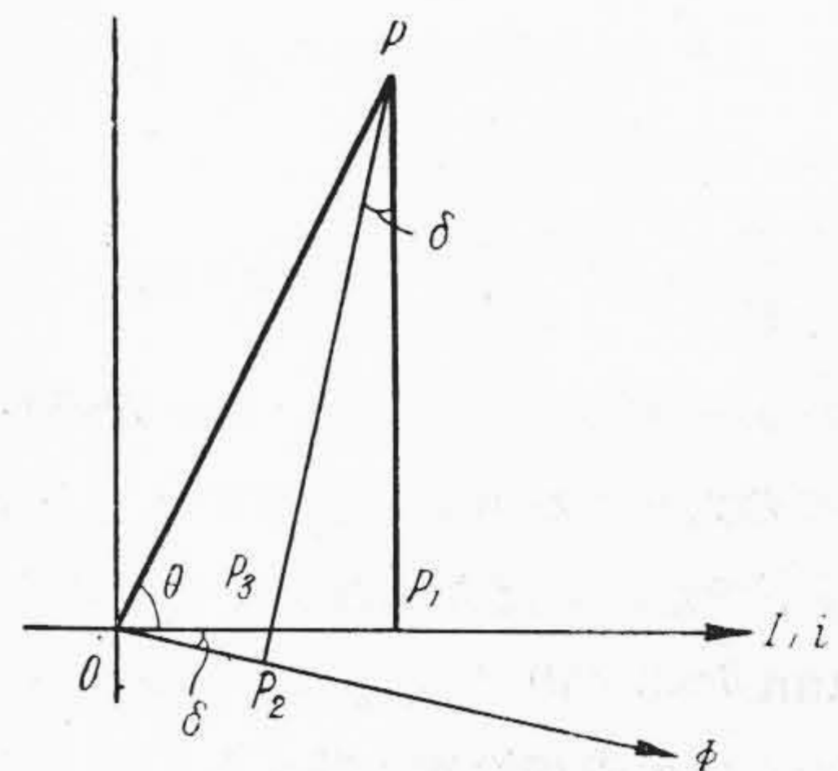
$$r' \rightarrow r'(1+j\beta)$$

ここに α, β はともに 1 に比して十分小さな値とし

$$1 \gg \alpha^2, 1 \gg \beta^2, 1 \gg \alpha\beta$$



第6図 試料の温度調節装置外観
Fig.6. Outside View of the Temperature Control Installation



第7図 磁束の遅れがあつた場合のベクトル図
Fig.7. Vector Diagram When the Flux Lags behind the Current Phase

(3) 式はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} I(R + j\omega L - j\omega M) &= ir(1+j\alpha) \\ I(R' + j\omega L' - j\omega M') &= ir'(1+j\beta) \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

$$R' = \frac{r'}{r} \{ R + (\alpha - \beta)\omega(L - M) \} \dots (6)$$

(6)式に示すように、 $(\alpha - \beta)$ は微小値であるが、もし $\omega(L - M)$ が大であれば誤差となりうる。 $\omega(L - M)$ を小にするには第4図よりわかるように、 I と i を同位相にすればよい。この状態では、 $\omega(L - M)$ は零となり、理論的にこの種の誤差は消失する。実際に I と i の位相を一致させるには、ブラウン管のリサーチ図形で判定する程度で十分である。

(b) 可変相互誘導器に入る外部磁束の影響

第2図にて M_1 は一次巻線にケーブル全電流を流すので、市販のものではなく自作した。構造は一次巻線と二次巻線の交叉角度を変化するものである。もし M_1 が完全に無定位になつていれば、外部より磁束の影響はなくなるが⁽³⁾、上記構造のため一応外部磁束の影響を除く必要がある。誤差の原因となるのは、一次電流の作る磁束と位相の異なる磁束であり、これの発生源は、電源に使用した変圧器と誘導電圧調整器である。今回は M_1 の位置を変圧器、電圧調整器より遠ざけ (5 m)、かつコイルの空間的方向を適当にして、外部磁束の影響は抵抗測定の誤差 0.2% 以下にすることができた。

(c) 可変相互誘導器の一次電流と磁束の間の位相差の影響

M_1 内の磁束が近傍の鉄を通り、鉄損が生じた場合には、磁束は電流より遅れる(渦流損の場合も同じ)。今回の実験では、一応鉄損は生ずるとは考えられない周囲状況であるが、僅かの磁束の遅れも大きな誤差の原因となるので、考慮する必要がある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。第7図(前頁参照)において、電圧ベクトル \vec{OP} を測定する場合に、 M_1 の磁束 Φ が、 I より δ だけ遅れているものとする。もし遅れがなければ \vec{OP} を $\vec{OP}_1 + \vec{P_1P}$ と分解できるわけであるが、遅れのために $\vec{OP}_3 + \vec{P_3P}$ と分解することになる。したがって \vec{OP} の I 方向の成分は、 \vec{OP}_1 の代りに \vec{OP}_3 がえられる。故に誤差は

$$\frac{P_3P_1}{OP_1} = \frac{P_1P \tan \delta}{OP_1} = \tan \theta \tan \delta \dots\dots (7)$$

850 mm² ケーブルの場合には、 $\tan \theta \cong 11 \sim 12$ となる。ゆえに誤差の大きさを 0.1% 以下にするためには $\tan \delta$ は 10^{-4} 以下でなければならない。ここにもし $\delta = 1'$ とすれば、 $\tan \delta \cong 3 \times 10^{-4}$ となり、誤差は 0.3% となる。この程度の小角の直接検知方法もないが、前に述べた通り、周囲状況によりこの種の誤差は生じないものと思われる。今回行つた室内の実験(1m のところに鉄製構造物あり)と屋外ピット中(周囲に金属構造物はない)の測定値を比較してみると第2表および第3表の示すように、両者の有意差は認められない。したがってこの種の事情が測定確度におよぼす影響は実用的に無視できることが確認された。

(d) 高調波による誤差

今回の実験においては、電源電圧波形は正弦波に近いもで行つたが、第3、第5高調波が 2~3% 含まれている。後述するように、本測定法は高調波の影響の少ない測定法であり、また電圧平衡の最終的検出は、交流検流計で行うので、これが濾波器となり一応高調波は除かれる。

(e) 電源変動による誤差

電源は電圧周波数の自動制御された測定用電源を使用すれば誤差は少くなる。なお後述するように、微小電源変動に対しては、本測定法はきわめて安定である。

(iv) 本測定法の利点

第1表 850 mm² 分割導体ケーブル試料試作条件
Table 1. Condition of Trial Production of 850 mm² Segmental Conductor Cables

No.	試料導体構成と処理	測定有効長 (m)	圧縮率 (%)	直流抵抗 (10 ⁻⁵ Ω/m) 20°C
1	各層同方向燃り, 未含浸 (セグメント間紙絶縁)	5	2.5	2.11 ₀
2	各層交互反対方向燃り, 未含浸 (セグメント間紙絶縁)	6	5.5	2.13 ₀
3	各層同方向燃り, エナメル素線 (セグメント間紙絶縁)	4	2.1	2.29 ₃
4	各層同方向燃り, 油含浸 (セグメント間紙絶縁)	9	6.0	2.03 ₀
5	各層同方向燃り (セグメント間絶縁紙なし)	4	6.0	2.03 ₅
6	非分割単心ケーブル, 油含浸	9	0.0	2.06 ₅

(4) 式に示すように、測定の精度を決定するものは、無誘導抵抗器の精度であり、これは現在の測定器では高度の精度がえられる。この他に本測定法の利点は前述のように操作簡単でしかも特殊な測定器⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を要せず、高度の精度が期待できることである。つぎに測定操作上の利点を一、二あげてみる。

(a) 周波数の微小変動の影響

たとえば第1図(a)に示す方法と比較してみる。測定原理の項でも述べたように、第1図(a)の方法では、第4図において、電圧ベクトル \vec{OP}_1 を測定するのに、 $\vec{OP}_3 + \vec{P_3P_1}$ に分解して測定する。しかして \vec{OP}_1 というベクトルは、力率が非常に小さいので、周波数の微小変動によつては、主としてリアクタンス降下が大きく変動して、 P_1 点は I とはほぼ直角方向に変動する。しかし測定器の方では、 $\vec{P_3P_1}$ の方向に変動する傾向がある。ゆえに僅かの周波数の変動によつても平衡状態が乱される。この欠点を除くためには、 I と i の位相を正確に一致させることである。第1図(b)の方法はその考えに基いたものである。これに反して本方法は、 \vec{OP}_1 を $\vec{OP}_2 + \vec{P_2P_1}$ に分解するので P_2 点は電源周波数の微小変動に対しては安定である。

(b) 高調波の影響

今まで電圧平衡はすべて基本波についてのみ考えてきたが、高調波についても一応考えてみる必要がある。本方法においては、高調波まで同時に平衡がえられる。すなわちケーブルの電圧降下の大部分は、リアクタンス降下であり、このリアクタンス降下に対しては第2図中の M_1 の位置よりあきらかなように、高調波まで平衡がえられる。抵抗分降下に対しては高調波の平衡はえられないが、全体としては僅かであり、平衡検出をリサーチユ図形で行う場合には、平衡状態はほとんど直線となつてえられる。以上の二つの条件は実際操作上に非常に便利であり、かつまた測定の精度向上に大きな役割を果す。

(v) 本測定法の確度

第7表に非分割ケーブルの測定値と計算結果を示す。ここに表われた結果は、主として温度調節による誤差があるだけで、電気回路としての測定の確度は誤差 0.5% 以下であるものと思われる。

(2) 測定結果

〔III〕 測定結果とその検討

(1) 試料

第1表に示すような導体構成および処理の異なる数種の試料を試作し、直交流抵抗の測定を行った。

第2表~第7表(次頁参照)に交流抵抗の測定条件と測定値を示す。これを試料の種類について一覧すると第8図(次頁参照)のようになる(60~の場合も同様な傾向を示す)。

第2表 850 mm² 分割導体ケーブル (各層同方向撚り, 未含浸) の実効抵抗
Table 2. Effective Resistance of 850 mm² Segmental Conductor Cable (Same Direction Strands, Non Impregnated)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-4}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-4}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)				
鉛被なし有効長 5 m 乾燥状態測定室内	60	25	17.5	1.04 ₃	1.10 ₁	1.05 ₃	1.0491, 1.0644
	60	15	17.5	1.04 ₃	1.10 ₀	1.05 ₃	
	60	10	17.5	1.04 ₃	1.10 ₁	1.05 ₃	
	50	25	17.5	1.04 ₃	1.08 ₀	1.03 ₄	1.0349, 1.0453
	50	15	17.5	1.04 ₃	1.08 ₀	1.03 ₄	
	50	10	17.5	1.04 ₃	1.08 ₀	1.03 ₄	
試料状態上と同じ 測定ピット内	60	25	18.0	1.04 ₅	1.09 ₉	1.05 ₂	
	60	15	17.7	1.04 ₄	1.09 ₈	1.05 ₂	
	60	10	17.5	1.04 ₃	1.10 ₀	1.05 ₃	
	50	25	18.0	1.04 ₅	1.08 ₃	1.03 ₆	
	50	15	17.6	1.04 ₄	1.08 ₃	1.03 ₆	
	50	10	17.5	1.04 ₃	1.08 ₃	1.03 ₇	
測定流水中	60	25	17.7	1.04 ₄	1.11 ₆	1.06 ₈	
	60	15	17.7	1.04 ₄	1.11 ₈	1.07 ₀	
	60	10	17.7	1.04 ₄	1.12 ₁	1.07 ₂	
	50	25	17.7	1.04 ₄	1.09 ₈	1.05 ₁	
	50	15	17.7	1.04 ₄	1.09 ₉	1.05 ₂	
	50	10	17.7	1.04 ₄	1.10 ₁	1.05 ₃	

- (注) 1. 測定電流は 150A
2. R_{ac}/R_{dc} 計算値は、間隔 25 cm のものは近接効果は問題にならないので表皮効果のみ求めた。計算は G.E. の実験式。すなわち、2,3倍(または安全率をとつて2倍)の直流抵抗を有する銅棒の表皮効果と同じとして計算したものである。円筒導体の表皮効果の計算は次式で示される。

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + y = 1 + \left[\frac{(1/2)x \{ber' x bei' x - bei x ber' x\}}{(ber' x)^2 + (bei' x)^2} \right]$$

ここに $x = \sqrt{8\pi f / (R \times 10^9)}$, f = 周波数, R = 導体 1 cm の直流抵抗

第3表 850 mm² 分割導体ケーブル (各層交互反対方向撚り, 未含浸) の実効抵抗
Table 3. Effective Resistance of 850 mm² Segmental Conductor Cable (Alternate Direction Strands, Non Impregnated)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-4}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-4}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)				
鉛被なし有効長 6 m 乾燥状態測定ピット内	60	25	22.0	1.28 ₈	1.44 ₇	1.12 ₃	
	60	15	21.0	1.28 ₄	1.45 ₁	1.12 ₈	
	60	10	21.0	1.28 ₄	1.46 ₃	1.13 ₈	
	50	25	21.6	1.28 ₆	1.40 ₀	1.08 ₉	
	50	15	21.0	1.28 ₄	1.40 ₂	1.09 ₂	
	50	10	21.0	1.28 ₄	1.41 ₂	1.10 ₀	
試料状態は上と同じ 測定室内	60	25	20.0	1.27 ₉	1.44 ₁	1.12 ₆	1.0475, 1.0619
	60	15	19.0	1.27 ₃	1.44 ₅	1.13 ₄	
	60	10	20.7	1.28 ₃	1.46 ₁	1.13 ₈	
	50	25	20.2	1.28 ₀	1.39 ₆	1.09 ₀	1.0332, 1.0440
	50	15	19.6	1.27 ₇	1.40 ₀	1.09 ₇	
	50	10	20.8	1.28 ₃	1.41 ₃	1.10 ₀	

第4表 850 mm² 分割導体ケーブル (各層同方向撚り, エナメル素線) の実効抵抗
 Table 4. Effective Resistance of 850 mm² Segmental Conductor Cable
 (Same Direction Strands, Enamelled Wires)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-5}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-5}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値	
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)					
鉛被なし有効長 4 m 測定室内	60	25	15.2	9.0 ₁	9.2 ₉	1.03 ₁	1.0429, 1.0558	
	60	15	15.2	9.0 ₁	9.3 ₀	1.03 ₂		
	60	10	15.2	9.0 ₁	9.3 ₄	1.03 ₆		
		50	25	15.2	9.0 ₁	9.1 ₉	1.02 ₀	1.0297, 1.0392
		50	15	15.2	9.0 ₁	9.1 ₉	1.02 ₀	
		50	10	15.2	9.0 ₁	9.2 ₅	1.02 ₅	

第5表 850 mm² 分割導体ケーブル (各層同方向撚り, 絶縁油含浸) の実効抵抗
 Table 5. Effective Resistance of 850 mm² Segmental Conductor Cable
 (Same Direction Strands, Oil Impregnated)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-4}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-4}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値			
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)							
鉛被あり有効長 9 m 製造直後, 測定流水中	60	25	9.5	1.74 ₇	1.84 ₀	1.05 ₃				
	60	15	9.0	1.74 ₄	1.84 ₀	1.05 ₄				
	60	10	9.0	1.74 ₄	1.85 ₁	1.06 ₁				
	50	25	9.5	1.74 ₇	1.81 ₂	1.03 ₇				
	50	15	9.5	1.74 ₇	1.81 ₂	1.03 ₇				
	50	10	9.0	1.74 ₄	1.82 ₇	1.04 ₆				
	鉛被なし, 製造直後 測定流水中	60	25	11.0	1.75 ₆	1.83 ₂		1.04 ₃	1.0563, 1.0731	
		60	15	11.0	1.75 ₆	1.83 ₀		1.04 ₂		
		60	10	11.7	1.76 ₂	1.85 ₀		1.04 ₉		
		50	25	11.0	1.75 ₆	1.81 ₅	1.03 ₃	1.0392, 1.0516		
		50	15	11.0	1.75 ₆	1.81 ₃	1.03 ₂			
		50	10	11.0	1.75 ₆	1.82 ₀	1.03 ₆			
		鉛被なし, 1年間屋外 放置したもの 測定流水中	60	25	17.0	1.80 ₁	1.90 ₃		1.05 ₆	1.0535, 1.0697
			60	15	16.5	1.79 ₉	1.89 ₆		1.05 ₃	
			60	10	16.5	1.79 ₉	1.90 ₆		1.05 ₆	
	50		25	16.7	1.80 ₀	1.87 ₇	1.04 ₂	1.0375, 1.0491		
	50		15	16.7	1.80 ₀	1.87 ₇	1.04 ₂			
	50		10	16.3	1.79 ₈	1.87 ₇	1.04 ₃			

(3) 測定結果の検討

(i) 直流抵抗

一般に非圧縮ケーブルにおいては、電流の大部分は素線に沿って流れることが認められており⁽¹⁰⁾、モデル実験の結果もそれを示す。圧縮ケーブルについては、多少の変化はあることが予想されるが、直流抵抗からみれば影響は少ない。同様に素線の表面状態たとえば含浸の影響などは、直流抵抗にはほとんどその差異が認められない。たゞエナメルを焼付けしたものは当然抵抗増大が表われている。

(ii) 交流抵抗

分割導体ケーブルよりも交流抵抗が小さくなる原因についてはつぎのように考えられる。すなわち前述のよう

に、一般にケーブルにおいては電流の大部分は素線に沿って流れる。圧縮導体ケーブルにおいても、数値的關係は未詳であるが、導体中の電流の大部分は素線に沿って流れるものと考えられる。しかして分割導体ケーブルはその構造上、ケーブルの中央部に位置する素線も表面に出てくることになり、全体としてケーブル断面について比較的均等に電流が流れ、表皮効果は著しく減少される。以下この点に着目して箇々の実験の結果の検討を行い、この考え方の妥当性を確かめて行きたいと思う。

まず圧縮率の影響であるが、圧縮率の異つたものの例として試料(1), (2)についてみる。圧縮率が大きくなれば素線間の接触抵抗は小さくなり、電流の素線に沿う成分は少くなる。したがって電流分布は均等性が失われ、

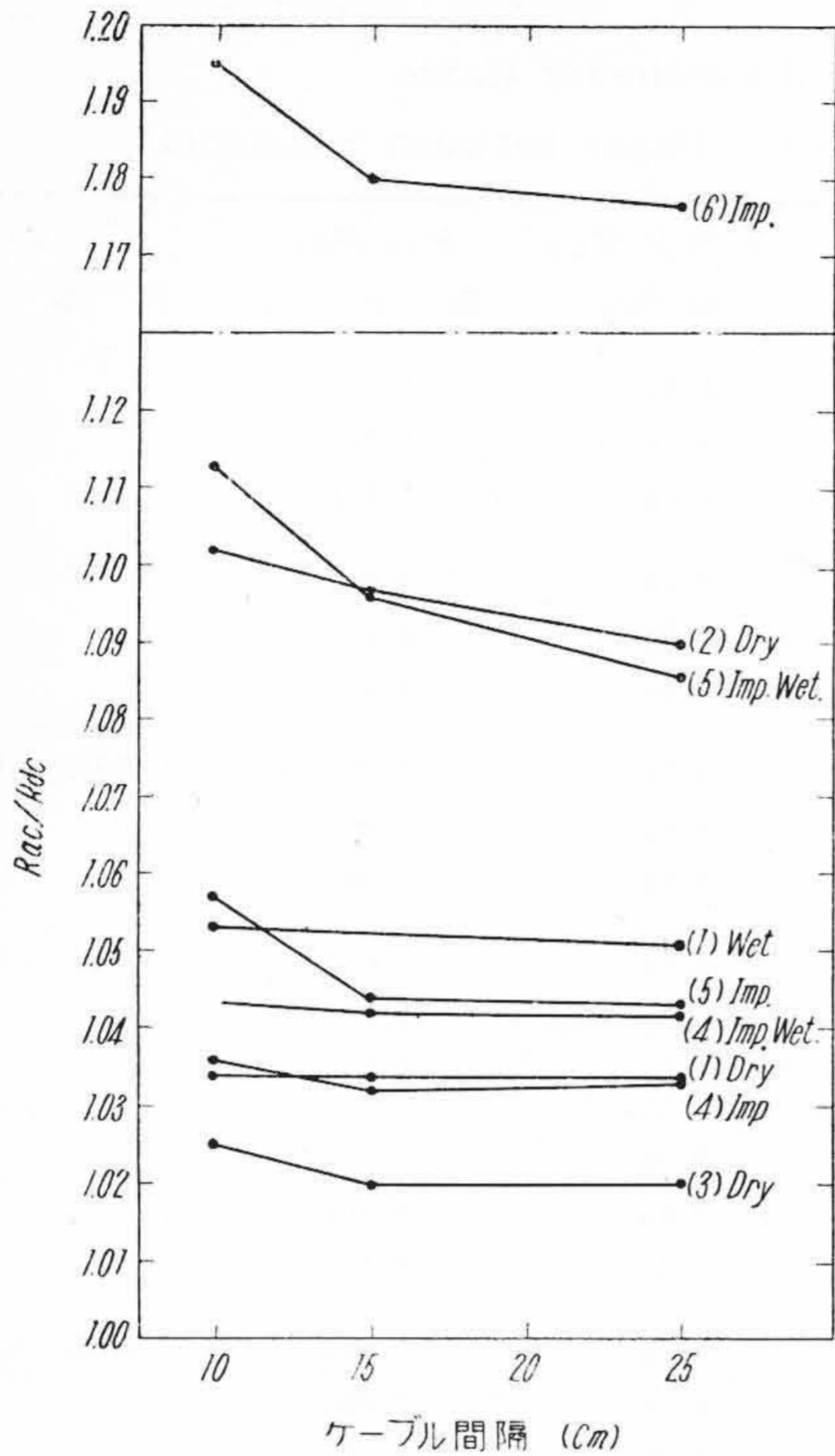
分割導体ケーブルの実効抵抗

第 6 表 850 mm² 分割導体ケーブル (絶縁油含浸セグメント間, 絶縁紙無し) の実効抵抗
 Table 6. Effective Resistance of 850 mm² Segmental Conductor Cable
 (Oil Impregnated, Non Insulating Paper between Segments)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-5}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-5}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)				
鉛被あり有効長 4 m 製造直後測定流水中	60	25	9.2	7.7 ₉	8.3 ₁	1.06 ₆	
	60	15	9.2	7.7 ₉	8.3 ₅	1.07 ₁	
	60	10	9.5	7.8 ₀	8.6 ₃	1.10 ₄	
	50	25	9.2	7.7 ₉	8.1 ₀	1.04 ₀	
	50	15	9.2	7.7 ₉	8.1 ₉	1.05 ₂	
	50	10	9.5	7.8 ₀	8.3 ₆	1.07 ₂	
鉛被なし製造直後 測定流水中	60	25	11.3	7.8 ₄	8.3 ₆	1.06 ₇	1.0558, 1.0724
	60	15	11.7	7.8 ₇	8.4 ₁	1.06 ₈	
	60	10	11.5	7.8 ₆	8.6 ₂	1.09 ₆	
	50	25	11.3	7.8 ₄	8.1 ₈	1.04 ₃	1.0392, 1.0513
	50	15	11.5	7.8 ₆	8.2 ₁	1.04 ₄	
	50	10	11.5	7.8 ₆	8.3 ₁	1.05 ₇	
鉛被なし約1年間屋 外に放置したもの 測定流水中	60	25	17.6	8.0 ₄	9.0 ₉	1.13 ₀	1.0535, 1.0690
	60	15	17.0	8.0 ₃	9.0 ₉	1.31 ₁	
	60	10	16.2	8.0 ₀	9.2 ₁	1.15 ₀	
	50	25	18.6	8.0 ₉	8.7 ₉	1.08 ₆	1.0366, 1.0486
	50	15	16.7	8.0 ₂	8.8 ₀	1.09 ₆	
	50	10	16.6	8.0 ₂	8.9 ₂	1.11 ₃	

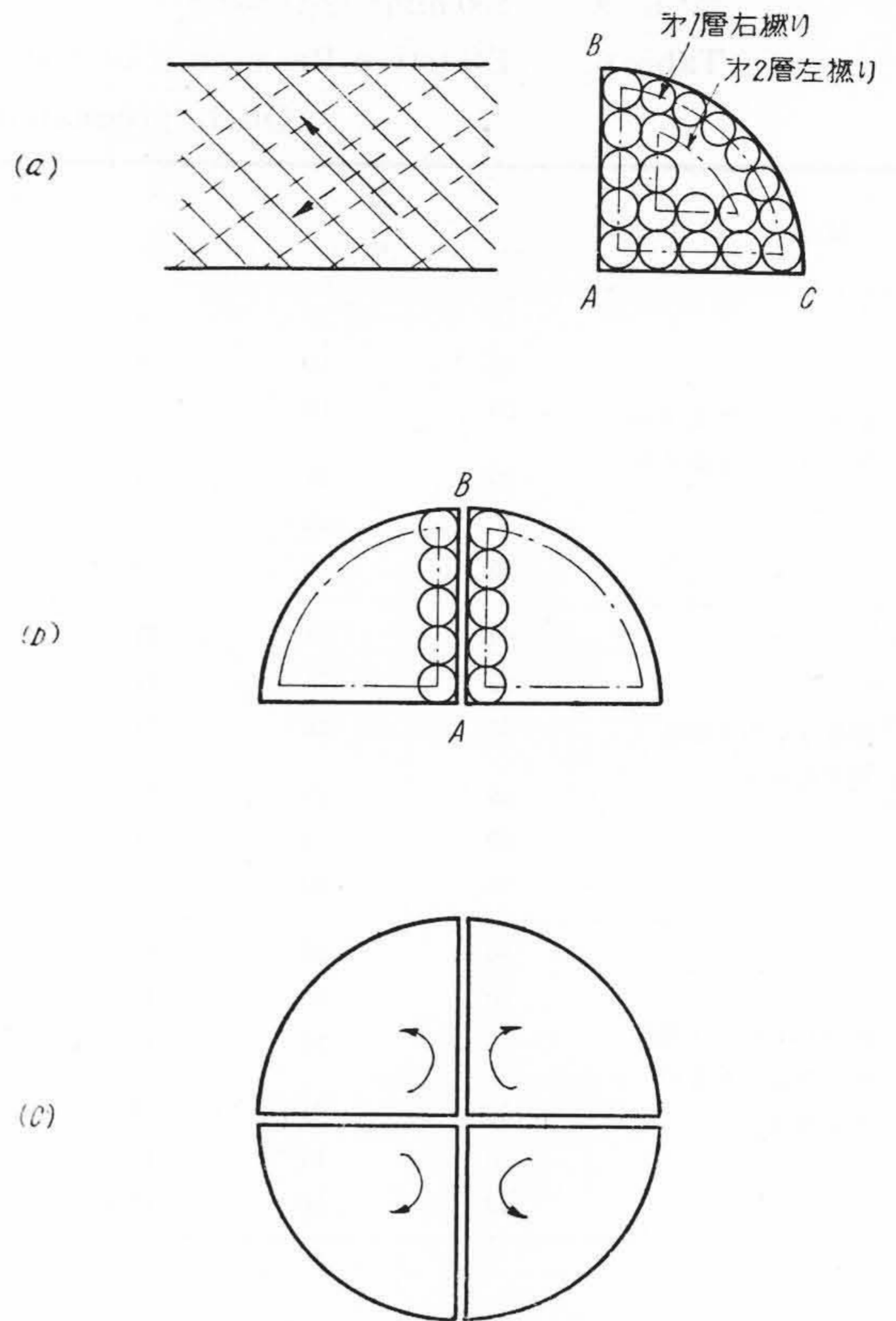
第 7 表 850 mm² 同心撚単心ケーブル (非分割, 絶縁油含浸) の実効抵抗
 Table 7. Effective Resistance of 850 mm² Concentric Stranded Conductor Cable
 (Non Separated Core, Oil Impregnated)

試料	測定条件			直流抵抗 R_{dc} ($\times 10^{-4}\Omega$)	交流抵抗 R_{ac} ($\times 10^{-4}\Omega$)	R_{ac}/R_{dc} 実測値	R_{ac}/R_{dc} 計算値
	周波数 (Hz)	間隔 (cm)	温度 (°C)				
鉛被あり有効長 9 m 製造直後測定流水中	60	25	8.5	1.77 ₁	2.23 ₅	1.26 ₁	
	60	15	8.3	1.77 ₀	2.24 ₂	1.26 ₆	
	60	10	11.2	1.79 ₀	2.30 ₅	1.28 ₈	
	50	25	8.5	1.77 ₁	2.11 ₀	1.19 ₁	
	50	15	8.0	1.76 ₉	2.11 ₀	1.19 ₃	
	50	10	11.0	1.78 ₈	2.16 ₄	1.21 ₁	
鉛被なし製造直後 測定流水中	60	25	10.5	1.78 ₅	2.23 ₀	1.24 ₈	1.2445
	60	15	10.3	1.78 ₄	2.24 ₆	1.25 ₈	
	60	10	8.9	1.77 ₃	2.28 ₀	1.28 ₄	
	50	25	9.8	1.78 ₀	2.09 ₇	1.18 ₀	1.1803
	50	15	9.8	1.78 ₀	2.11 ₀	1.18 ₅	
	50	10	9.3	1.77 ₇	2.15 ₀	1.21 ₀	
鉛被なし約1年間屋 外に放置したもの 測定流水中	60	25	18.0	1.84 ₀	2.28 ₀	1.23 ₈	1.2317
	60	15	18.0	1.84 ₀	2.29 ₅	1.24 ₆	
	60	10	18.0	1.84 ₀	2.34 ₀	1.27 ₀	
	50	25	18.0	1.84 ₀	2.16 ₅	1.17 ₆	1.1716
	50	15	18.0	1.84 ₀	2.17 ₀	1.18 ₀	
	50	10	18.0	1.84 ₀	2.20 ₀	1.19 ₅	



第8図 各試料の交直流抵抗比 (50~)
Fig. 8. A.C., D.C. Resistance Ratio of the Samples (50~)

表皮効果は増大する。直流抵抗で差違が認められない程のものでも交流の場合は影響が大きく表われる。たゞし(1), (2)を比較した場合に、単に圧縮率だけでなく素線の撚りの方法が異つているための差異も加わつているものと思われる。すなわち(2)においては、各層交互反対方向撚りのためいわゆる撚線効果、すなわちケーブルの長さ方向の磁束による渦流損失を考えた場合には、(1)より交流抵抗は小さくなる筈であるが⁽²⁾、撚線効果による交流抵抗の増加量は一般に少く、つぎに述べる特殊事情が交流抵抗に大きく影響している。すなわち第9図(a)において、各層交互反対方向撚りでは、AB, AC方向に並んでいる素線は、もし第一層が表面から中心に向つているものとすれば、第二層は逆に中心から表面に向つている。ゆえに素線に沿つて流れている電流は、表面から中心に向う際に、隣の層に移動して、再び表面にでる成分が生ずる。特に素線の交叉点では、圧縮のため接触抵抗が低く、この現象が起りやすい。これらの原因のために(2)の表皮効果は大きくなつている。つぎに素線の表面状態による影響であるが、直流抵抗と異り交流抵抗の測定結果にはあきらかにこの差が認められた。すなわち第2表においては、乾燥、水浸の状態での測定結果を比較すると、交流抵抗はかなり相異している。



第9図 分割導体ケーブルの断面図
(a) 各層交互反対方向撚りの場合
(b) セグメント間に絶縁紙のない場合
(c) 相隣るセグメントの撚線方向の変化した場合
Fig. 9. View of the Cross Section of the Segmental Conductor Cables
(a) With Alternate Direction Strand Layers
(b) Without Insulating Papers between the Segments
(c) With Alternate Strand Direction between Adjacent Segments

また第5表に示すように、絶縁油の含浸処理を行つたケーブルが、約1年間屋外に放置され、吸湿した状態にあつては、交流抵抗はかなり大きくなつている。また第2表の乾燥状態の場合と、第5表の含浸状態の場合を比較してみると、前者の方が圧縮率は小さいが、表皮効果は大きい。以上はいずれも油、水などの薄膜が素線表面に存在するため、素線間の接触抵抗が変化したものである。絶縁油含浸が素線間の接触抵抗を大きくするか、あるいは逆に小さくするかについては、従来論が区々であつたが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、最近は一様に抵抗を大きくするものと認められている⁽¹³⁾。今回の筆者らの実験においても、乾燥の状態と油含浸の状態との測定値の差は、同一試料についての測定結果でないで完全ではないが、上記の3種の状態、すなわち油含浸、乾燥、水浸の場合を比較すると、

前者程素線間の抵抗が大きく、表皮効果が小さいことが判明した。なおエナメル素線ケーブルにおいては、完全に素線に沿って電流が流れるので、 R_{ac}/R_{dc} の値はセグメント1本分の値まで減少することが考えられるが、今回の実験では有効長が短く、端子部の素線の乱れの影響のため、完全な値はえられなかつたが、傾向としては素線間の接触抵抗の増大は、表皮効果の低減に有効であるということを示している。

つぎにセグメント間の絶縁紙の有無の影響であるが、分割導体ケーブルでは、一般に各セグメントを1枚ないし2枚の絶縁紙で包み、これらを撚り合わせて製作される。九州電力築上発電所納850mm²および725mm²分割導体ケーブルはこの方式のものである。しかし分割導体ケーブルの表皮効果減少の理由が前記のようなものであるならば、このセグメント間の絶縁紙が省略されても、表皮効果減少の目的に対して、有効性が大して失われなことが予想される。両者の測定値の比較を第5表および第6表に示したが、セグメント間の絶縁紙を省略したものは、省略しないものに比して、交流抵抗が少し大きくなっている。吸湿した状態ではかなり大きい、実際のケーブルではこのようなことは起らない。

これらについて原因を考えてみると、まずセグメントを一つの素線のように考えた場合の撚線効果による交流抵抗増加が考えられるが⁽²⁾、これは大きな影響はないものと思われる。つぎに第9図(b)に示すように、試料(5)の各セグメントの素線は全部同方向に撚り合わせてあるので、相隣るセグメントとの接触面ABにおいては、左右のセグメントの隣接する素線の方向が逆で交叉している。したがって試料(2)について考察した現象がここでも生ずる。すなわち素線に沿って流れる電流が、表面から中心に向うときに、隣のセグメントの素線に移つて、再び表面にでる成分が存在する。この現象は当然素線の表面状態によつて異なり、油浸、吸湿の場合には交流抵抗の大きさが異なる。ここにセグメント間の絶縁紙を省略して、しかも表皮効果の小さいケーブルとしては、第9図(c)に示すようなものが考えられる。すなわち相隣るセグメントの撚線方向を逆にすることである。このようにすれば、試料(2)、(5)について考察した表皮効果増大の現象は起らない。

[IV] 結 言

今回の実験結果を要約し、米国における実験と比較して、分割導体ケーブルの交流抵抗については、つぎのように考えることができる。

(1) 表皮効果の実験式

米国においては、分割導体ケーブル表皮効果を計算に

よつて求めるには、A.H.M. Arnoldが、非分割導体ケーブルについて求めた理論式中の、ベッセル函数の独立変数に補正を加えて、分割導体の場合の計算式としている。すなわち分割導体ケーブルの表皮効果の大きさは、直流抵抗が2.3倍(導電率43.5%)の非分割ケーブルの表皮効果と同じとしている。この等価導電率については、今回の実験でも判明したように、ケーブルの製造条件によつて異なり、一定しないが米国のInsulated Power Cable Engineer's Associationでは、圧縮型分割導体ケーブルについて、44%という値を採用している(1947)⁽⁵⁾。またG.E.社では安全率をとつて、50%を採用している(1948)⁽⁶⁾。今回の実験では実験数が少ないが、普通使用される状態の分割導体ケーブルでは、等価導電率44%として十分安全であることが確かめられた。

(2) 近接効果

近接効果については、分割導体ケーブルは、各セグメントが絶縁され撚り合わせてあるので、当然少いことが考えられる。実験の結果もこのことを示している。日本においては、主として分割導体ケーブルは、発電所の主幹ケーブルに使用されるので、特に近接した場合を考えないが、米国においては主としてパイプ型ケーブルに使用されるので、この点も強調され、種々の実験式が出されている。A.I.E.E.の発表では、A.H.M. Arnoldが非分割ケーブルについて、平衡対称三相回路で対称配置の場合に、表皮効果と近接効果を組合わせて求めた理論式を用い、前と同様に、式中のベッセル函数の独立変数に補正を加えている。すなわち三相回路でケーブルが接近した場合は、直流抵抗が2.5倍の非分割ケーブルの表皮、近接効果と等しいとして計算する⁽¹³⁾。

(3) 表皮効果減少の理論

今回の実験により、分割導体ケーブルの表皮効果が減少する理由は、素線が中央部と表面部に交互に位置し、かつ素線間の接触抵抗のために、電流は大部分素線に沿って流れ、そのためにケーブル内の電流分布が均等になることに起因することがあきらかになつた。米国においてもほぼ同様なことが考えられ、それを確める実験結果が諸所で発表されている。たとえば筆者と同様にエナメルを焼付したものと、鉛合金を素線に被覆して、接触面を広くしたものなどが比較され、前者のすぐれたことを報じ⁽¹³⁾、また分割導体のセグメントのうちの各層間に絶縁紙を入れて、表皮効果の減少することを確めた報告もある⁽³⁾。なお素線間の絶縁を高めるために、素線に被覆する物質については、ケーブルの接続、圧縮後の有効性、高圧絶縁に対する影響などを考慮して、アルミニウム、酸化銅、硫化銅などがあげられている⁽³⁾。

以上を総合して、分割導体ケーブルの表皮効果低減機

構は定性的ではあるがあきらかになつた。今後に残された問題としては、製造条件による表皮効果の大きさのばらつきの程度を統計的に取扱い、素線の表面処理の有効かつ経済的な方法をみいだすこと、また永年使用の場合の性能の変化を確めることなどである。現段階でも、分割導体ケーブルを発電所主幹ケーブルとして使用することは十分有効なことであることを確信する次第である。

終りに測定法の検討ならびに標準抵抗の諸元を測定して頂いた電気試験所標準器部長青木敏夫博士、池田課長その他の方々、試料ケーブルの御配慮を頂いた日立製作所日立電線工場の内藤技術部長ほか関係各位、御指導を頂いた日立研究所橋本主任研究員ほか多くの方々の御厚意を深謝申上げる。また熱心に測定ならびに試料整備に従事された新井卓、石川弘の両君の労を感謝する。

参考文献

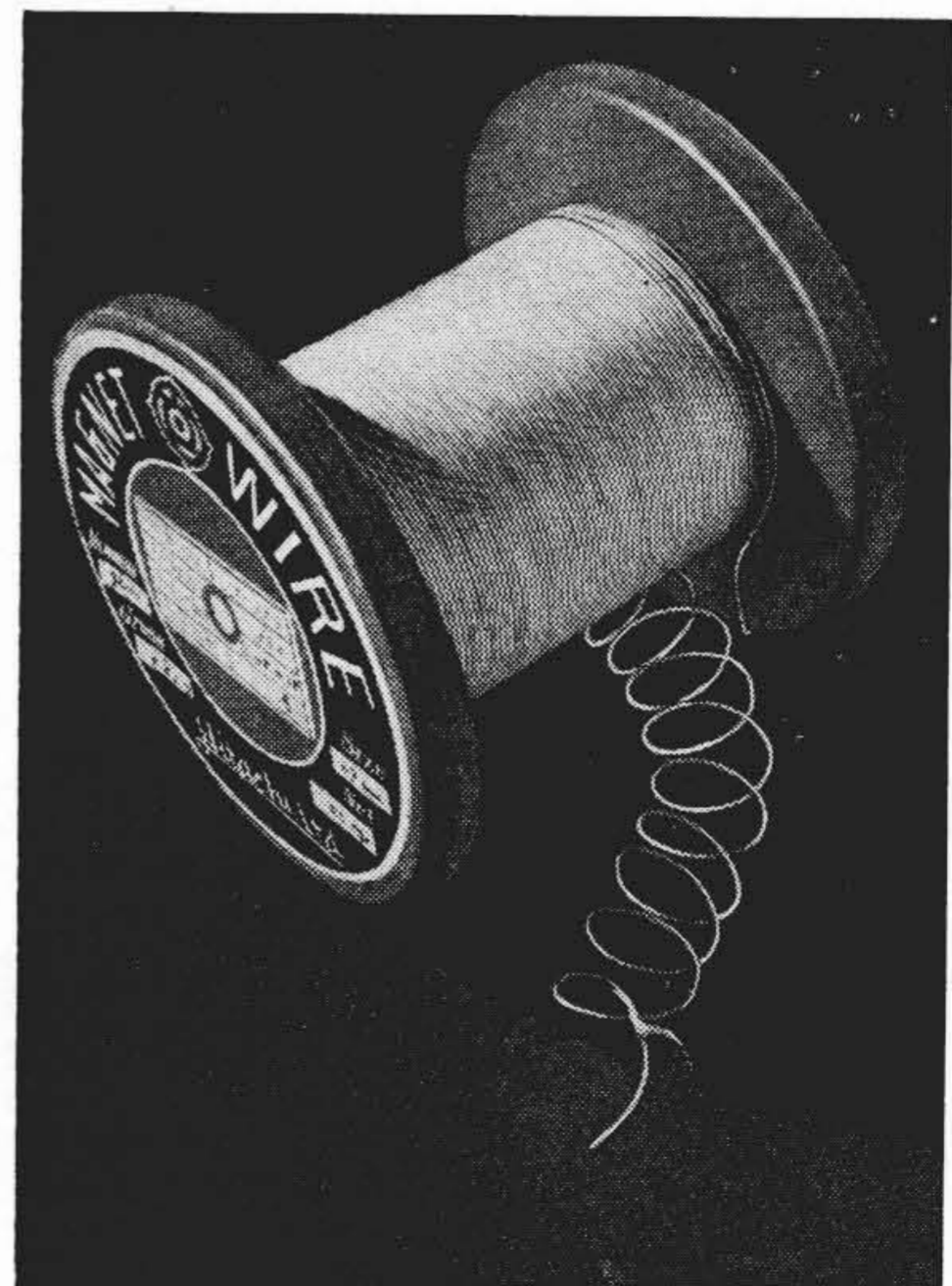
(1) 中村, 西原: 電気学会連合大会予稿 6-28 (昭 27-10)
 (2) E.R.A. Report: I.I.E.E. 76 299 (1935)

(3) L. Meyerhoff and G.S. Eager: Tr. A.I.E.E. 68 II 816 (1949)
 (4) E.H. Salter: Tr. A.I.E.E. 67 II 1390 (1948)
 (5) R.J. Wiseman: Tr. A.I.E.E. 67 II 1745 (1948)
 (6) H.C. Both, E.E. Hutching and S. Whitehead: J.I.E.E. 83 497 (1938)
 (7) A.H.M. Arnold: J.I.E.E. 76 95 (1935)
 (8) R.S. J. Spilsbury and A. H. M. Arnold: J.I.E.E. 68 889 (1930)
 (9) A. H. M. Arnold: Proc. I. E. E. 100 II 319 (1953)
 (10) W.E. Alkins: Proc. Manchester Phil. Soc. 70 37 (1926)
 (11) A.H.M. Arnold: J.I.E.E. 89 II 636 (1942)
 (12) E.H. Salter, G.B. Shanklin and R.J. Wiseman: E.E. 53 1581 (1934)
 (13) A.I.E.E. Committee Report: Tr. A.I.E.E. 71 III 393 (1952)



日立 H 種ガラス巻線へは
 日立処理用シリコンワニス
 Hitachi Silicone Varnish for Coil Treatment
 Is Best for Hitachi Class H Glass
 Covered Copper Wires

シリコン樹脂の出現は、H種絶縁可能範囲の劃期的拡張をもたらしたが、その一例としての日立H種ガラス巻線は日立シリコンワニス「HS 201」を用いて、耐熱性、耐湿性、電気的特性、機械的特性、等々にきわめてすぐれた性能を有している。しかしこのシリコン樹脂はこれらのすぐれた点をもつている反面、B種品とはその取扱いに関する注意事項も異り、殊に耐溶剤性についてはしばしば問題にされているけれども、日立製作所の「HS 201」ではその点についても改良されている。さらにコイル含浸用ワニスとしては日立シリコンワニス「HS 203」を使用することにより、より効果的である。またコイル類の乾燥および熱処理の方法としては、以下の要領によることが望ましい。すなわち、加熱手順は素材の形態、加熱炉の型式などにより種々考慮する必要があるが、原則的には、まず素材の表面を清浄にして、かつ乾燥しついで目的に応じ含浸、刷子塗り、吹付けなどの方法でワニスを塗布し室温で自然乾燥した後、右表のように段階的に加熱する。



第1図 日立 H 種ガラス巻線
 Fig. 1. Grade H Glass Covered Copper Wires

温 度	時 間	備 考
80°C	2 時間	溶 剤 揮 発
150°C	1~2 時間	乾 燥
200°C	3 時間	焼 付