ブチルゴム電力ケーブルの熱抵抗

Thermal Resistance of Butyl-Rubber Insulated Power Cables

依田文吉*相田和男*吉岡正幸* Bunkichi Yoda Kazuo Aita Masayuki Yoshioka

内 容 梗 概

最近におけるブチルゴム電力ケーブルの需要の増加は著しい。この理由の一つはブチルゴム絶縁体の 耐熱・耐老化性がすぐれているために同一導体サイズの他種ケーブルよりも許容電流を大きくとれるこ とである。

本論文ではこの許容電流計算の際に用いる熱比抵抗の測定結果と3心ケーブルの幾何係数(または形状係数という)の計算方式の妥当性について検討した。

この結果ブチルゴムの熱比抵抗としては 470°C/W/cm³ が適当であり,幾何係数は共通遮蔽方式では Simons の多心ベルトケーブル,各心遮蔽方式では同氏のHケーブルに対する式で計算することが最適 であることがわかった。

なお,水中布設の場合には絶縁体・シースの熱抵抗はほとんど気中の場合と同一であるが,表面放散 熱比抵抗は 0~10°C/W/cm² 程度であり,許容電流を計算する場合には無視してもよいことが再確認さ れた。

1. 緒 言

高電圧送配電線路に用いられるブチルゴム電力ケーブ ルはますますその需要を増加している。この最大の理由 はゴムケーブルであるという利点のほかにブチルゴムが 絶縁体としてすぐれた特性を持っているからである。そ の代表的な一つは耐熱・耐老化性であるが,これは電力 ケーブルの電流容量を決定する重要な因子であり,ケー ブルの運転経済を大きく左右するものである。 設計にあたっては従来の天然ゴムの熱比抵抗 500°C/W/ cm^{3 (9)(10)} をそのまま用いていたが⁽¹¹⁾, その合理性は確 認されていなかった。

そこで、今回は実際のケーブル試料について熱比抵抗 の測定を行ったわけである。実験に際しては、導体サイ ズ・絶縁体厚・線心数およびシースの種類を変えた試料 を対象とし、さらに布設時の周囲条件(エタニットパイ プ内の気中・静水中・流水中など)の影響をも考察した。

一般に電力ケーブルの電流容量は主として, 故障時に 問題となる短時間定格と常時運転中の連続定格の両面か ら考えられる。

筆者らはさきに短時間定格を決定するために多くの実 験を行ったが、^{(1)~(4)} 今回は連続定格(以後これを許容電 流という)を算出するための熱常数の測定,および3心 ケーブルにおける算出方式について検討した。

さて,電力ケーブルの許容電流は電流によって発生し た熱量と,絶縁体およびシースを通して放散される熱量 とが等しくなったときの条件,すなわち平衡状態式から 決定される。したがって,絶縁体およびシースの熱抵抗 およびシースの表面放散熱抵抗は重大な要素となり,こ れが小さいほど許容電流は増加する。

ところが,絶縁材料の熱抵抗の測定には種々の物理的 方法(定常状態法や過渡的方法)が用いられているにもか かわらず,測定が困難でばらつきが多く,測定者によっ て異なった結果が発表されている⁽⁵⁾。

特にブチルゴムの熱抵抗に関する実験データーはほと んど見当らず, Couch 氏らの許容電流表⁽⁶⁾や Carroll 氏 らの負荷電流による熱劣化試験結果などが発表されてい る⁽⁷⁾⁽⁸⁾のみである。このためブチルゴム電力ケーブルの

* 日立電線株式会社電線工場

2. 単心ケーブルの熱抵抗測定

2.1 試料および実験方法

熱抵抗の測定は実際のケーブルで行ってもかなりのば らつきを避けられない。たとえば電力紙ケーブルの熱比 抵抗 700°C/W/cm³ の値は 500~750°C/W/cm³ の範囲の 測定値を平均したものである⁽¹²⁾。したがって, 筆者らも 数種類のブチルゴム電力ケーブルについて測定し,比較 検討することにした。

第1表は測定したケーブル試料の一覧表である。測定 の順序は熱抵抗計算に便利な単心ケーブルから行った が,この際端末部の温度降下の影響を除く目的で比較的 長い試料を用いるようにした。(38mm²では小サイズで あるため 2.5m,そのほかのものでは4~5mとした)。

またケーブルの導体抵抗はすべてケルビンのダブルブ リッジで測定した。

実験に使用した回路は第1図に示すとおりで、電源と して 75 kVA・1,500 A の大電流変圧器を用い、温度測定 には 0.55mm 銅・コンスタンタン熱電対を使用した。温 度測定箇所は導体・絶縁体表面・シース表面などであ り、熱電対に発生した起電力をミリボルト計で直読した。 なお試料端より約 10cm のところにも熱電対を取り付け 端末効果を検討した。



ブチルゴム電力ケーブルの熱抵抗

試料 No.	ケーブルの 種 類	実験試料	導 体 外 径(mm)	絶 縁 体 厚 さ(mm)	絶 縁 体 外 径(mm)	導体抵抗 (Ω/cm/20℃)	シース種類	ケ – ブ ル 外径(mm)
1	$3 \mathrm{kV}$ $3 \times 38 \mathrm{mm^2}$	線 心 1×38 mm ²	8.0	3.0	14.0	4.58×10-6	未加硫ゴムテープ	21.7
2	$\begin{array}{c} 6 \ \mathrm{kV} \\ 3 \times 200 \ \mathrm{mm^2} \end{array}$	線 心 1×200 mm ²	18.0	5.5	29.0	9.10×10-7	加硫ネオプレンお よびワニスシルク テープ	30.5
3	$\begin{array}{c} 15\mathrm{kV} \\ 1 \times 600\mathrm{mm^2} \end{array}$	完成品 1×600 mm ²	32.5	9.5	51.5	3.11×10-7	クロロプレンシー ス	62.8
4	$\begin{array}{c} 20 \mathrm{kV} \\ 1 \times 600 \mathrm{mm^2} \end{array}$	完成品 1×600 mm ²	32.5	12.0	56.5	3.16×10-7	クロロプレンシー ス	68.2
5	$\begin{array}{c} 20\mathrm{kV} \\ 1 \times 50\mathrm{mm^2} \end{array}$	線 心 1×50 mm ²	9.0	10.0	38.0	3.56×10-6	ワニスシルクテー プ	39.5
6	$3 \mathrm{kV}$ $3 \times 60 \mathrm{mm^2}$	完成品 3×60 mm ²	10.0	3.5	17.0	2.92×10-6	クロロプレンシー ス	47.1
7	$\begin{array}{c} 6 \mathrm{kV} \\ 3 \times 50 \mathrm{mm^2} \end{array}$	完成品 3×50 mm ²	9.0	5.0	19.0	3.63×10-6	クロロプレンシー ス	51.3

第1表 試 料 ケーブルの構造

注: 試料 No.1. 2.5 のシースは手巻である。

第2表 測定結果および熱比抵抗の計算 (単心ケーブル)

試料 No.	電 流 (A)	導体温度 (℃)	絶縁体温度 (℃)	大 気 温 (℃)	シース種類	$G = \log e \frac{D}{d}$	熱比抵抗 (℃/W/cm ³)
	800	85.0	59.7	9.2	加硫ネオプレンゴム	0.450	493
2	1,000	137	96.7	8.0	厚さ3mm	0.450	471
	500	42.6	33.2	19.0	ワニスシルクテープ	0.450	525
2	1,000	142	96.5	22.0	厚さ 0.5	0.450	509
3	875	43.0	35.0	23.5	クロロプレンシース	0.421	472
	813	42.5	34.0	26.0	クロロプレンシース	0.555	428
4	1,000	51.5	38.2	25.0		0.555	425
	240	71.2	49.0	32.5	ワニスシルクテープ	1,435	474
5	280	86.5	53.5	31.2	厚さ 0.5	1,435	427

827



第1図 ケーブルの温度上昇測定用試験回路

2.2 測定結果

最初に測定した単心ケーブルは3kV3×38 mm²を解体して、線心を取り出し、遮蔽体として鉛テープを巻き、その上に絶縁体の熱抵抗と表面熱抵抗を分離するために 未加硫ゴムテープを施した。これに定格電流の1~2倍の 電流を通じ、定常状態になったのちに温度測定を行った。

各試料についての測定結果を第2表に示す。3心ケー ブルから1心だけを取り出して測定したものではシース 材料の影響が懸念されたので,この種類を変えた測定も 行った。第2図は温度上昇一時間特性の一例で,20kV 1×600mm²に対するものである。この場合,通電した電 流は 1,000 A であるが,約5時間で飽和し,定常状態に達 している。



一般に固体の熱比抵抗は温度の関数であり⁽¹³⁾,熱の良 導体では温度が高くなるに従って増加し,不良導体では 減少するのが普通である。しかし,電線やケーブルの温 度上昇を計算する場合は簡単のためにこの温度変化をな いものと仮定している。そこで筆者らはこの仮定による 誤差を少なくするためにケーブル導体を最高使用温度 (約80°C)まで上げて実験した。このことはまた熱電対取 付けによる誤差を少なくする効果もある。



論



昭和34年6月

第3図 単心ケーブルの断面図

2.3 熱抵抗計算

熱流を計算する場合の基本原理は絶縁体の熱容量を静 電容量,熱抵抗を電気抵抗に置き換えた電気回路と等価 に考えることである。

実際,ケーブルに電流を通じ,温度が一定値に到達した ときにはケーブル内に発生する損失熱量と放散される熱 量とが等しくちょうど熱平衡状態にあると考えられる。

ここで熱に関するオームの法則を適用すると、温度差 Θ は伝導する熱量Wと熱抵抗 R_t の積に等しいから次の(1)式が成立する。

 $\Theta = W \times R_t \dots (1)$

ここで,発生する熱量は導体に流れる電流で生じるジ

で表わされる。式中 P_b は本論文で求めたい絶縁体の 熱比抵抗であり、1 Watt の熱量の伝導によって 1 cm^3 の 絶縁体の両壁面間に 1° Cの温度差を生じさせる熱抵抗で ある。

(4)式を r から R まで積分して, 熱抵抗 Rt は

$$R_t = \frac{P_b}{2\pi} \log e \frac{R}{r} (^{\circ}C/W/cm) \dots (5)$$

となる。この logeR/r はいわゆる幾何係数で3心ケーブルの場合は複雑な形となるものである。

次に実験から求めた電流,温度上昇を(3)式に代入し て熱抵抗を求め,これと(5)式から熱比抵抗 P_b が計算 されることになる。実際熱抵抗は試料 No.2 で 33.7~ 38.2°C/W/cm No.3 で 31.6, No.4 で 37.8, No.5 では 97.6~108.2°C/W/cm となった。これらの数値を(5)式 に代入して得られた値が第2表に示したものであり, P_b は 425~525°C/W/cm³ となった。これらの結果にはかな りのばらつきがあるが平均すると 470°C/W/cm³ となり, 天然ゴムの熱比抵抗 500°C/W/cm³ より若干小さい値と なった。

第2表に No.1 ケーブルについて求めた数値を記して ないのは次の理由による。すなわち,導体温度が 100℃ 以上になると,シース代用に施した未加硫ゴムテープが

828

ュール熱と絶縁体内で生じる誘電損失と考えて大過ない から⁽¹⁴⁾

 $W = nI^2r + W_d$(2) で表わされる。

ゆえに,電力ケーブルの許容電流(連続定格電流)は (2)式を(1)式に代入して,電流 I について解き(3)式 で表わされる。

ただし、 $n = r - \tau N O 線心数$ $r = 導体の実効抵抗(\Omega/cm)$ $W_d = 誘電体損失(W/cm)$

(1)式の Θ は任意の2点間の温度差, R_t はその2点 間の熱抵抗であるが, (3)式では Θ をケーブルの温度上 昇, R_t は絶縁体・シースの熱抵抗およびシースの表面放 散熱抵抗を含む全熱抵抗と考えている。これからわかる とおり, 熱抵抗は許容電流を計算するためにきわめて重 要な役割をもつものである。

さて、単心ケーブルの熱抵抗を計算してみよう。第3 図に示したように導体半径 r、絶縁体外側半径 Rのケー ブルで、中心軸から xの点で、軸方向 1 cm あたり、動径 方向の厚さ dx 部分の熱抵抗を dR_t とすると、

加硫しそれによって熱が発生すると推定されたからであ る。この熱量がなにほどかは不明であるが,わずかでも 発生すると,絶縁体の熱放散が極度に悪くなり算出結果 に大きな誤差を生じるからである。

3. 3 心ケーブルの熱抵抗測定

3.1 試料および実験方法

3心ケーブルも原理的には単心ケーブルと同様である が,幾何係数(G)が簡単に求まらないために複雑とな る。

従来,電力紙ケーブルについては Simons, Russell, Mie の各氏や山崎氏らが種々の算出式を提案している が,これらの式がただちにゴムケーブルに適用できるか どうかには疑問がある。なぜならばゴムケーブルのよう に介在として乾燥ジュートがはいっているものでは紙ケ ーブルのように油含浸ジュートが介在しているものと温 度分布が違うかもしれないからである。すなわち,紙ケ ーブルでは線心絶縁体から介在ジュートを通して,撚合 せ上まで熱比抵抗の等しい絶縁油が流動して,熱に対し て比較的一様な抵抗体であるのに反し,ゴムケーブルで は熱比抵抗の異なる媒体が存在して,熱流線の屈曲,局 部集中などがあると考えられる。

そこで、筆者らは単心ケーブルと3心ケーブルでブチ ルゴム絶縁体の熱比抵抗は変化しないと仮定し、3心ケ ーブルの実測値から各種の幾何係数を用いて熱比抵抗を



---- 84 -----

ブチルゴム電力ケーブルの熱抵抗

試 料	括 超	電流	導体温度	ケーブル	絶縁体温度	ジュート	大気温	熱比抵抗 (℃/W/cm ³)			
No.	裡 稅	(A)	(°C)	(°C)	(°C)	۳ ،۲ (°C)	(°C)	1	(2)	(3)	4
	3 kV	170	45.8	45.5	38.2	40.8	22.0	874	408	1,180	818
6	$3 \times 60 \text{ mm}^2$	200	62.6	61.5	51.5	55.0	22.0	883	412	1,210	825
	共 通 遮 蔽	250	87.0	86.5	68.0	75.0	26.0	915	427	1,250	856
	3 kV	170	46.5	42.5	41.0	37.5	19.2	637	298	870	595
6	$3 \times 60 \text{ mm}^2$	200	57.5	52,5	51.0	45.5	15.3	526	246	720	491
	各 心 遮 蔽	250	86.5	78.7	76.0	67.0	16.0	508	236	694	473
7	6 kV 3×50 mm ² 各心遮蔽	135	43.5	_	39.5	-	22.5	465	218	631	436

第3表 測定結果および熱比抵抗の計算(3心ケーブル)

注: ① は SL ケーブルの熱抵抗計算式で行った場合
 ② は Simons 氏の多心ベルトケーブルの計算式で行った場合

③ は山崎氏の H ケーブルの計算式で行った場合

④ は Simons 氏の H ケーブルの計算式で行った場合



きわめて良いためである。したがって,絶縁体中の温度 分布も均一であると推定される。

3.3 熱抵抗計算

3心ケーブルの熱抵抗を求めるには幾何係数が問題に なるが、これに関しては多くの人々によって考察が行わ れてきた。Simons 氏は円形導体のベルトケーブルに対 して、

829

第4図 3心ケーブルの断面図

求め,単心ケーブルで得た値と比較することによって, 算出式の妥当性を検討した。

実験試料は第1表の No.6 および No.7 である。第 4 図 は試料 No.6 の 3 kV 3×60 mm²(共通遮蔽) に熱電 対を挿入した状態を示したものである。

次に各相の電流不平衡をなくすために3心を直列に接続して170~250Aを通電した。

また,各心遮蔽と共通遮蔽を比較するために,同一ケ ーブル試料 No.6 を解体して,各絶縁線心上に銅テープ を巻き,元通りにシースを被せたものについても上記の 電流を流して測定した(試料 No.7 は各心遮蔽である)。

3.2 測定結果

各部の温度測定結果を第3表に示す。これからわかる とおり、共通遮蔽の場合には導体・ケーブル中心・ジュ ート中心・絶縁体の順に温度が降下する。そして導体と ケーブル中心はほとんど同一温度であること(その差は 1%以内)からケーブル中心から各線心導体外径までの 間は等温面として取り扱われることがわかった。

一方,各心遮蔽では導体・ケーブル中心・絶縁体・ジ ュート中心の順であり,前者とは異なる。この場合導体 とケーブル中心との間の温度差は約9%程度あるので同 一温度とは考えられない。この原因は遮蔽体の熱伝導が $G = (0.85 + 0.2 \beta) \log e[(8.3 - 2.2 \beta)\alpha + 1]...(6)$

ただし, $\alpha = T + t/d$, $\beta = t/T$

t = ベルト絶縁厚(cm)

T =絶縁体厚(cm)

d=導体の直径(cm)

を算出しており, n 心ケーブルに対しては次の簡略式 を与えている⁽¹⁵⁾。

$$G = \log e \left(\frac{n(8T+t)(T+t)}{4dT} + 1 \right) \dots (7)$$

また Russell 氏は同じ円形導体に対して,

$$G = \log e\left(\frac{R^6 - a^6}{3R^3a^2r}\right) \dots (8)$$

ここで、a=3心の各導体中心を通る円の半径(cm)

r= 導体半径(cm)

R=絶縁体外半径(cm)

を導いている(16)。

一方, Hケーブルについては Simons 氏が

ただし、
$$\alpha = P_b t_1 / P_m d$$
、 $\beta = 1 + 2T / d$
 $t_1 = H 形 r - \tau n \sigma 金属 r - r p (cm)$
 $P_b = 絶縁体の熱比抵抗(°C/W/cm3)$



----- 85 -----

論



第5図 流水パイプ中に布設した場合の実験装置





試料 No.6 の共通遮蔽の場合には 実測から, $R_t = 27 \sim 29^{\circ} C/W/cm$, 各 心遮蔽の場合には 14~19°C/W/cm となる。この値を用いて,熱比抵抗を 計算すると第3表のようになった。 これから, 共通遮蔽の場合には Simons 氏の(6)式, 各心遮蔽の場合 には同じく Simons 氏の(9)式また は山崎氏の(10)式から計算した結果 が単心ケーブルから得られたものと よく一致することがわかった。

布設条件の差による 検討

4.1 水中布設時の温度分布

以上述べたものはすべて大気中布 設の場合であるが,電力ケーブルは 必ずしも大気中ばかりでなく,むし ろ地中や水中に布設される場合の方 が多い。

 $P_m = 金属テープの熱比抵抗 = 0.266°C/W/cm³$ $\phi = 金属テープの鉛被と接触しない部分によ$

って作られる角の1/2(ラジアン)

(=円形導体の場合は 2.88 ラジアン)

を用いて計算している(17)。

また,山崎氏は簡略式として,

 d_1 = 導体外径(cm)

 $d_2 = 絶縁体外径(cm)$

を提案している(18)。

今, 試料 No.6 に関して, Gを計算してみると, 次のようになる。

(6)式で1.26, (9)式で0.63, (10)式で0.43 となったが、SL 形ケーブルの式を用いると 0.589 となる。

これに関する杉山氏の比較研究によれば, Russel 氏の 式は過大評価となり, Simons 氏の(6)式が最も精度が 高いといわれている。

次にこれらの G を用いて、3 心ケーブルの熱抵抗およ び熱比抵抗を計算する。熱抵抗は(3)式と同様にして、 次式より求まる。

$$R_{t} = \frac{\Theta}{nI^{2}r} \\ = P_{b}/6\pi \cdot G$$
(11)

熱比抵抗は n=3 として,

許容電流を計算するにあたって,これらの周囲条件は 周囲温度と表面放散熱抵抗の2要素だけを考慮している が,熱抵抗の変化がどのようになるかは無視している。

これらの現象を解明する一手段として,次のような実験を行った。すなわち,第5図に示すように内径150mm,長さ4mのエタニットパイプにケーブル試料No.4,20kV 1×600mm²(3.7m)を挿入し,気中(パイプの両端密閉), 静水中および流水中(5.7*l*/min)で各部の温度を測定した。温度測定点は×印で示したように導体・絶縁体・シース表面・パイプ内部・パイプの内外壁面である。

静水の場合にはゴムテープでパイプの水漏れを防ぎ, 流水の場合には水道より鉛管で導入し,バルブで水量を 調整した。

通電電流は 813A(定格電流), 1,000A の2 種類で行っ た。第6図は流水状態で 1,000A を流したときの温度上 昇一時間特性を示したものである。第4表に示したよう にパイプ内空気の場合は導体温度上昇が 34.7℃であるの に対し,静水の場合は 19℃,流水時には 17.2℃に減少し ている。ただし,流水時の温度上昇は水温が,大気温度 とはほとんど無関係なので,導体温度と水温との差とし て計算したものである。

パイプ内静水または流水時にケーブルの表面温度が水 温と同程度あるいはそれ以下になったことは水の対流 によって上部の水が高温になったための誤差と思われ る。

---- 86 -----

試料 No.	条件	電 (A) 流	導体温度 (℃)	絶縁体温度 (℃)	シース表面温度 (℃)	パイプ内温度 (℃)	大 気 温 (℃)	P_b	P_s
	パイプ内	813	46.0	38.0	36.2	35.0	27.0	400	430
	空気	1,000	61.5	49.0	46.5	42.0	26.8	394	550
	パイプ内	813	37.3	30.0	28.0	28.0	27.2	373	0
4	静 水	1,000	46.0	34.5	31.0	31.5	27.0	376	—
	パイプ内	813	27.5	20.5	17.5	17.0	26.2	370	10.3
	流水	1,000	33.2	22.5	17	16.0	32.5	367	13.2

第4表 パイプ内配置の場合の各部の温度および熱比抵抗

庄 1: Pb: 絶縁体熱比抵抗 ℃/W/cm³

Ps: 表面放散熱比抵抗 ℃/W/cm²

4.2 熱比抵抗計算

以上の実測値から,各周囲条件を変えた場合の熱比抵 抗を計算した結果を第4表に示す。

絶縁体の熱比抵抗はパイプ内空気,流水,静水とも単心 ケーブルから求めたものとあまり変らない(もちろん, 多少のばらつきはあり,特に周囲温度の低いときは誤差 が大きくなるのはやむを得ない)。

次にクロロプレンシースの熱比抵抗を求めてみると, パイプ内空気の場合はきわめて小さく、静水または流水 中の場合になって初めて450~550°C/W/cm³となった。 これは表面放散熱抵抗が加算されているためと考えられ る。したがって実際,パイプ内にケーブルを布設する場 合には開放大気中に布設した場合と異なるため,単に周 囲温度を変えるばかりでなく,シースの熱抵抗および表 面放散熱抵抗を考慮しなければならない。

Simons 氏の多心ベルトケーブルの式, 各心遮蔽の場 合には同じく, Simons 氏のHケーブルの式が最適で ある。この結果,筆者らの懸念した,ゴムケーブルと 紙ケーブルの差は無視できることが明らかになった。 (3) パイプ内布設の場合にはシースの熱抵抗および 表面放散熱抵抗に変化があるゆえ許容電流計算にあた ってはかなりの注意が必要である。しかし、ブチルゴ ム絶縁体は静水・流水など周囲条件で変化しない。な お水中布設ケーブルにおいては表面放散熱抵抗を零と してよいことが確認された。

最後にクロロプレンシースの表面放散熱比抵抗 Ps を 計算する。計算式は

である。ここで, D=ケーブル外径(cm)

pr-

 $\Theta' = r - \tau \mu o$ 表面温度と周囲温度

との差(°C)

実験で求めた値を代入して得た結果はパイプ内空気の 場合 Ps が 430~550°C/W/cm² となり, 静水および流水 の場合は事実上無視してよい程度である。

言 5. 結

以上の結果を要約すると次のとおりである(19)。

(1) 単心ブチルゴム電力ケーブルの測定結果から, ブチルゴム絶縁体の熱比抵抗は 425~525°C/W/cm³ で ある。したがって,従来通り天然ゴムケーブルの場合 の 500°C/W/cm³ を用いて計算してよいことが確認さ れた。

(2) 3心ケーブルの測定からは幾何係数の計算式 が比較検討された。すなわち, 共通遮蔽の場合には

擱筆にあたり,終始御激励いただいた日立電線株式会 社電線工場久本部長・杉山課長ならびに実験に協力され た本田・塩原両君に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 宮沢·依田·橋本: 日立評論 39,65(昭 32-2)
- (2) 宮沢·依田·橋本·相田: 日立評論 39,81 (昭 32 - 8)
- (3) 宮沢·依田: 電三連大予稿 No. 124(昭 30-10)
- (4) 宮沢·依田: 電三連大予稿 No. 462(昭 31-4)
- (5) P. H. G. Allen: P. I. E. E. Part C. 35(1958)
- (6) W.H. Couch, G.H. Hunt, N.D. Kenney: T.AIEE 75, 1387 (1956)
- (7) J.C. Carroll, A.R. Lee, R.B. Mckinley: T.AIEE 74, 1204(1955)
- J. C. Carroll, A. R. Lee, R. B. Mckinley: Elect. (8)Eng. 75, 146(1956)
- 加藤: OHM 44(4), 31(昭 32-3) (9)
- (10) 杉山: 地中電線路 457(昭 16,修教社)
- (11) 依田: 電力 41, 1678(昭 32-11)
- 杉山: 電力ケーブルの電流容量 13(昭 13, 大日 (12)本印刷)
- 内田·亀井·八田: 化学工学 84(昭 16, 丸善) (13)
- 依田: 電気計算 26, 109(昭 33-10) (14)
- D.M. Simons: T.AIEE 42, 600 (1923) (15)
- A. Russell: The Theory of Alternating Cur-(16)rent 187(1914, C.U.P.)
- (17) D. M. Simons: Elect. J. 29, 336(1932)
- 山崎: 古河電工 9,44(昭 13-5) (18)
- 依田·吉岡·相田: 電気学会,東京支部大会予稿 (19)No. 237(昭 33-11)