

電力ケーブルの技術計算に対する デジタル計算機の応用例

Some Applications of the Digital Computer to the Technical
Calculations of the Power Cable Engineering

今 井 敏 雄* 林 田 克 哉*
Toshio Imai Katsuya Hayashida

内 容 梗 概

電力ケーブル関係の技術計算に電子計算機を応用した例について述べる。

ケーブルの許容電流の計算として、管路内多条布設の場合は管路内の位置およびケーブル種別を考慮した許容電流を計算することができ、洞道内強制風冷の場合は風速とケーブルサイズとの組み合わせに対してあらゆる場合の許容電流値を求めることができる。また、OFケーブルの給油計算の中で非常に複雑な計算を要するFT-PT給油方式および中間給油方式の解析方法に応用することによって短時間で合理的な給油設計を行なうことができる。また、3心アルミ被OFケーブルの油流抵抗の計算方法と計算機適用の結果ならびに実測値との対比を示した。

これらの適用例において電子計算機の利用によって手計算では不可能に近いような計算をごく短時間で処理することができ、結果の厳密性という点からもその効果を確認することができた。

1. 緒 言

デジタル電子計算機の技術および応用範囲の発展は、最近にいたってとくにめざましいものがあり、ほとんどの産業がその恩恵に浴しているといっても過言ではないであろう。

当日立電線株式会社でも、このほど日立製 HITAC 3010 形電子計算機方式を導入した。この計算機はトランジスタ、ダイオードをエレメントとする汎用デジタル電子計算機で、磁気コア二万けたの記憶容量をもっている。

電力ケーブルの使用上および製造上の問題において、複雑な計算手段によらねばならないこと、またはそのような計算によって実用的により有利な解が得られることなどの例がかなり多い。たとえば最近の都市の地中管路のように条数がきわめて多くなると、管路内の位置によって置かれたケーブルの電流容量が変わってくるが、これを解くのはケーブル条数を元の数とする連立一次方程式となるため、手計算ではほとんど不可能である。そのため従来の許容電流計算⁽¹⁾においては、各ケーブルに発生する熱量が一定であるとして計算を行なっていたが、計算機の使用によってより合理的なサイズの選定が可能となる。

また異種のケーブルを多数条洞道内に布設して、これに通風を行なった場合、各ケーブルのサイズの組み合わせと風量との関係を求めるのは、手計算では非常に手間のかかる問題であるが、電子計算機によれば最も合理的な布設方式を求めることができる。

またOFケーブルの給油計算において、ケーブル給油区間の両端にそれぞれ重力油槽および圧力油槽を置きたいいわゆる FT-PT 給油方式の場合の油圧計算は、近似計算⁽²⁾⁽³⁾または段々法による計算⁽⁴⁾を行なっていたが、非常に手間のかかるもので、これにも電子計算機を使用することによって合理的かつ迅速な計算ができる。また最近油止接続箱を省略し、過渡油圧調整用の圧力油槽を線路の途中に点々とつなぎ込んだ、いわゆる中間給油方式も用いられるがこの油圧計算も、計算機によってきわめて簡単に行なうことができるので、合理的かつ容易に経済的な線路設計が可能となる。

つぎに3心アルミ被OFケーブルの油通路の油流抵抗の計算のように、手計算では不可能な計算も、電子計算機の使用によって可能となる。

この報告においては、以上述べたような各種の計算例における計算方法とその結果について述べ、計算機の適用によって線路設計の合理化ができることを示してご参考にご供したい。

2. 電流容量の計算

(1) 管路内多条布設

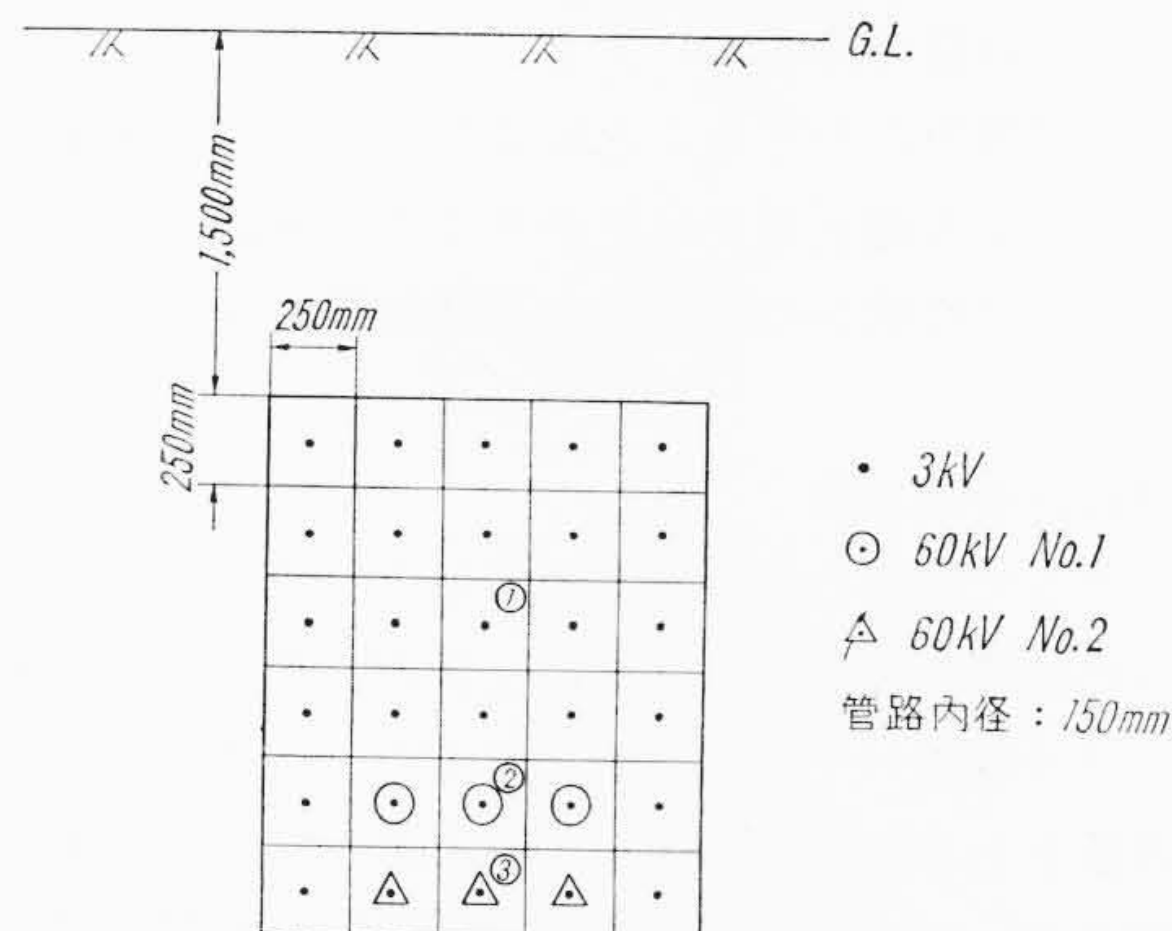
同一管路内に数種類の仕様の異なるケーブルが布設されている場合、通常の計算方式⁽¹⁾では各種ケーブルの発生熱量を等しいものと仮定して計算を行なっている。したがって同一管路に布設されたケーブルの条数が多くなったり、数種の異なった仕様のケーブルが布設されている場合には誤差を生ずることになる。

このような場合には J. H. Neher 氏の方法⁽⁵⁾を用いる必要があるが、多元連立一次方程式の解を求めなければならないので、品種が多くなるときわめて煩雑となる。このような場合に計算機を適用すると、簡単に合理的な線路設計ができる。

一例として3種類の異なった仕様のケーブルを同一管路内に多条布設した場合の計算方法について述べる。

第1図は与えられた管路条件を示す。このような管路において3kVの回路および60kV No.1回路およびNo.2回路に、種々なサイズのケーブルを布設した場合、各ケーブルの送電容量を求めるのが与えられた問題である。

三つの回路の代表位置として3kVでは第1図の①、60kV No.1では②、No.2では③の位置にあるケーブルの電流容量を求めるこ



第1図 管路内ケーブル配置

* 日立電線株式会社日高工場

第 1 表(1) ケーブルの諸定数

ケーブル 項目		単位	サイズ	3 kV 3 心 PLNZ				60 kV 3 心 OFNZ			
				200mm ²	325mm ² *	400mm ² *	500mm ² *	150mm ²	200mm ²	250mm ²	325mm ²
80℃ 導 体 直 流 抵 抗	R_{dc}	Ω/cm		0.111×10^{-5}	0.0688×10^{-5}	0.0551×10^{-5}	0.0453×10^{-5}	0.1495×10^{-5}	0.1120×10^{-5}	0.0905×10^{-5}	0.0695×10^{-5}
絶 縁 体 の 熱 抵 抗	R_i	℃/W/cm		17.85	14.2	11.9	11.5	27.2	25.0	22.4	21.4
防 食 層 の 熱 抵 抗	R_j	℃/W/cm		11.7	11.15	10.25	8.23	9.00	8.75	8.25	7.52
表 面 放 散 熱 抵 抗	R_{sd}	℃/W/cm		55.3	46.4	43.1	40.3	33.9	32.3	30.9	28.8
導 体 抵 抗 の 交 流 に よ る 増 加 分 (比)	Y_c	—		0.052	0.062	0.110	0.119	0	0.01	0.01	0.02
誘 電 体 損 失	W_d	W/cm		0	0	0	0	0.0212	0.0233	0.0261	0.0288

* は日立標準, ほかに東京電力規格

第 1 表(2) 60 kV No.2 と 3 kV の組み合わせ

3 kV	60 kV No.2	150mm ²	200mm ²	250mm ²	325mm ²
200mm ²	(A)	—	—	—	—
325mm ²	—	(B)	—	—	—
400mm ²	—	—	(C)	—	—
500mm ²	—	—	—	(D)	—

とし、3 kV の回路は第 1 表(1) に示したサイズのケーブルを、60 kV No. 1 は 3 心 325 mm² を、また 60 kV No. 2 は第 1 表(1) に示した各サイズのケーブルを入れた場合について、第 1 表(2) のようなサイズの組み合わせ(A), (B), (C), (D) の四つの場合の許容電流を算定する。

計算に使用したケーブルの熱定数は第 1 表(1) に示すとおりであるが、導体最高使用温度は 60 kV OF ケーブルの場合および 3 kV ベルトケーブルの場合とも、いずれも 80℃、基底温度は 35℃、絶縁体の固有熱抵抗は OF ケーブルの場合 550、ベルトケーブルの場合 700、外装の固有熱抵抗 500、表面放散固有熱抵抗 900、土壌の固有熱抵抗 100 (単位はいずれも℃/W/cm)、損失率 0.6 として計算を行なった。

計算のプログラムおよび方法を第 2 表に示す。計算の考え方を略述するとつぎのようになる。各品種別の電流を変数とすると、ケーブルの位置①、②および③について、自己電流による温度上昇と、他ケーブルからの相互加熱の影響による温度上昇との和がケーブルの許容温度上昇に等しいという式をたてると、3 元 1 次連立方程式が得られる。これを解くことにより、各回路①、②および③の電流容量を求めることができる。他ケーブルからの加熱の影響を計算するのは、加熱の原因となるケーブルを正の熱源とし、地表面を対称面とした影像を負の熱源とする熱界において、被加熱ケーブルの熱的ポテンシャルを求める計算方法による。

このような計算方法によって求めた許容電流を第 3 表に示す。

この計算においては方式の要旨を示すことを目的としたので、ケーブル回路の類別品種を 3 種類におさえたが、さらに詳細に求めたい場合は、たとえば 30 種類にでもとって計算すればよい。この場合は電流を定める連立 1 次方程式の元の数が 30 となるだけで、他の計算方法は全く同様である。

このような計算方法をとることにより、多条布設管路において管路の位置の差による適正なケーブルサイズの選定を行なわせることが可能であり、合理的かつ経済的な送電線路の設計をすることができる。

(2) 洞道内多条布設

最近における大都市の地中送電線の単位容量の増大にともない、さきに述べた多条布設管路とともに、洞道を構築しこの中のたなに多数条ケーブルを並べて、内部を通風することによって空気を置換し、送電容量を上げる手段がとられるようになってきた。この場合、数種類のケーブルを使用すれば通風量との相関関係によって、与えられた送電容量を満足するサイズと通風量との関係が数多く存

第 2 表 計算のプログラム

#	プログラム	記号および説明
1	データ読み込み $R_{dc1}, R_{dc2}, R_{dc3}, R_i, R_j, R_{sd}, R_d, L, N_1, N_2, N_3, Y_{c1}, Y_{c2}, Y_{c3}, W_{d1}, W_d$	L : 考えるケーブルの地表よりの深さ(mm) F : 考えるケーブルより同一種ケーブルおよびその影像間の距離の比の積 F_{int} : 同上, 他品種ケーブル間 N : ケーブル条長
2	$R_e = \frac{85}{2\pi} \left(\log_e \frac{D_x}{D_e} + 0.6 \log_e \frac{4L}{D_x} F \right)$ $+ \frac{1}{2\pi} (100 - 85) \cdot N_1 \cdot 0.6 \cdot G_b$	R_e : 管から外側の熱抵抗 D_x : ヒートサイクルの及ぶ仮想径(210mm) D_e : 管路の外径(178mm) G_b : 管路の形状係数(0.78) 0.6 は損失率
3	$R_{int1} = \frac{85}{2\pi} \log_e F_{int1} + \frac{100 - 85}{2\pi} \times N_2 \cdot G_b$ $R_{int2} = \frac{85}{2\pi} \log_e F_{int2} + \frac{100 - 85}{2\pi} \times N_3 \cdot G_b$	R_{int1} : 他品種ケーブルからの加熱の影響による熱抵抗 R_{int2} : 他品種ケーブルからの加熱の影響による熱抵抗 85 はコンクリートの固有熱抵抗 100 は土壌の固有熱抵抗
4	$R_{ca} = R_i + R_j + R_{sd} + R_d + R_e$ $R_{da} = \frac{1}{2} R_i + R_j + R_{sd} + R_d + R_e$	R_{ca} : 導体損に対するケーブルと土壌および管路の熱抵抗 R_{da} : 誘電体損に対する同上値
5	$\Delta T = W_{d1} \cdot R_{da}$ $W_{ci1} = 3 \cdot R_{dc1} \cdot (1 + Y_{c1})$ $W_{ci2} = 3 \cdot R_{dc2} \cdot (1 + Y_{c2})$ $W_{ci3} = 3 \cdot R_{dc3} \cdot (1 + Y_{c3})$	ΔT_d : 誘電体損による温度上昇 W_{ci} : 導体損の係数
6	$T_{int1} = W_{ci2} \cdot 0.6 \cdot R_{int2}$ $T_{int2} = W_{ci3} \cdot 0.6 \cdot R_{int3}$	T_{int1} : # 2 ケーブルグループによる温度上昇 T_{int2} : # 3 ケーブルグループによる温度上昇
7	$R_{ca} \cdot W_{ci1} \cdot I_1^2 = 80 - (25 + \Delta T_d + W_d + W_{d2} \cdot R_{int1} + W_{d3} \cdot R_{int2}) - W_{ci2} \cdot 0.6 \cdot R_{int1} \cdot I_2^2 - W_{ci3} \cdot 0.6 \cdot R_{int2} \cdot I_3^2$	各ケーブルの温度上昇を決める連立方程式(同様な式が 3 個できる) これらを解くことにより I_1, I_2, I_3 が求められる
8	$F = \left(\frac{d_{1i}'}{d_{1i}} \right) \left(\frac{d_{1j}'}{d_{1j}} \right)$	d_{1i} : 考えるケーブルと同一品種のケーブルとの線間距離 d_{1i}' : 同上, 同一品種のケーブルの影像に至る距離
9	$F_{int1} = \left(\frac{d_{1i}'}{d_{1i}} \right) \left(\frac{d_{1j}'}{d_{1j}} \right) \left(\frac{d_{1k}'}{d_{1k}} \right)$	d_{1i} : 同上, 第 2 のケーブルグループに対する距離
10	$F_{int2} = \left(\frac{d_{1i}'}{d_{1i}} \right) \cdots \left(\frac{d_{1q}'}{d_{1q}} \right)$	d_{1i} : 同上, 第 3 のケーブルグループに対する距離

第 3 表 許 容 電 流

		単位: A			
ケーブル	サイズ 組合	(A)	(B)	(C)	(D)
60 kV No.1		221	219	208	206
60 kV No.2		21.4	59.5	75.7	102
3 kV		148	192	222	248

在する。そこでこれらの実用上可能なすべての組み合わせについて送電容量を求めておけば、線路の計画にあたって非常に便利である。

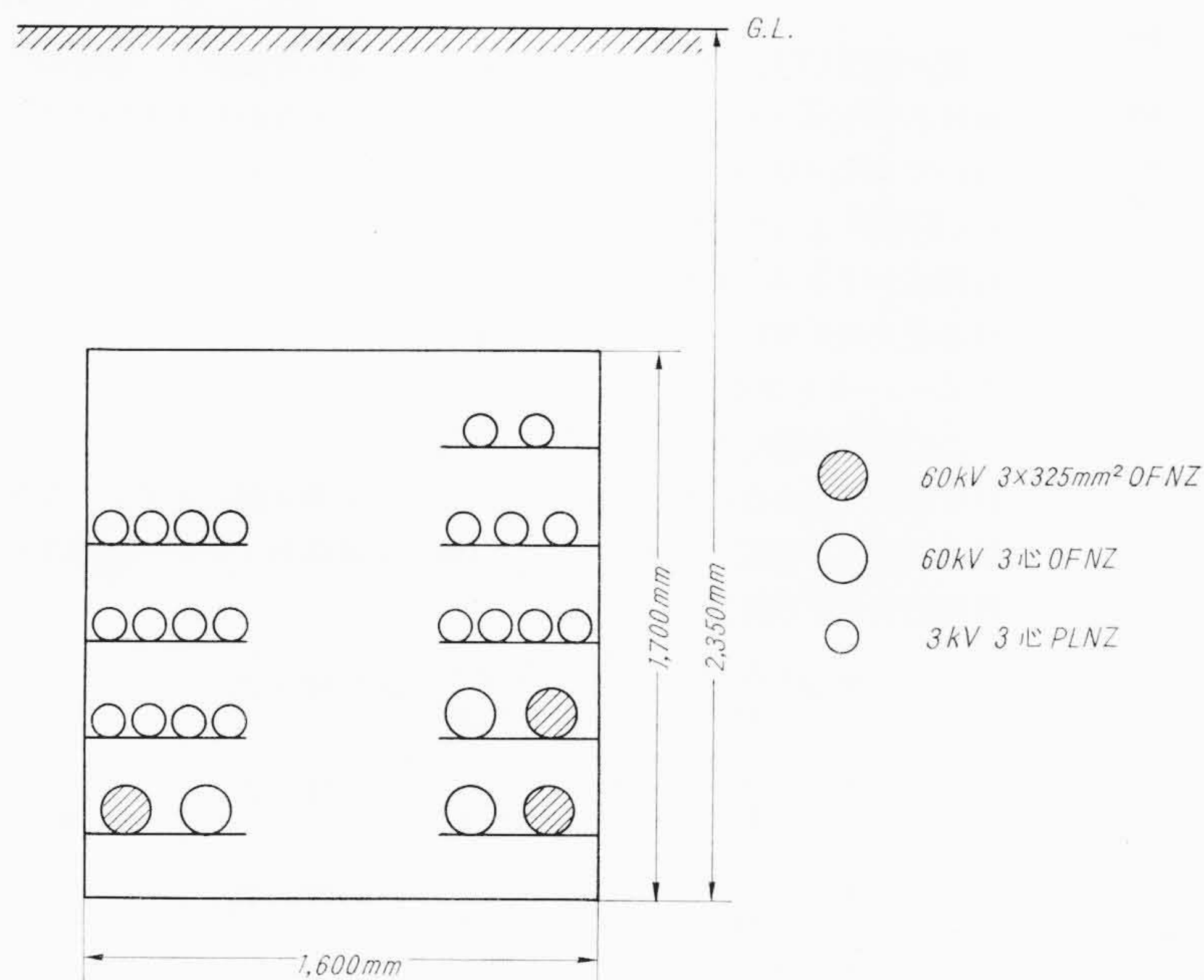
ここでは一例として第 2 図に示すような布設例について、計算の

第4表(1) ケーブルの諸定数

項 目	単 位	20 kV SLNZ					60 kV OF	3 kV PLNZ					60 kV OF				
		250mm ²	200mm ²	150mm ²	100mm ²	60mm ²	1×600mm ²	150mm ²	200mm ²	325mm ²	400mm ²	500mm ²	3×100mm ²	150mm ²	200mm ²	250mm ²	325mm ²
絶縁体熱抵抗 R_i	℃/W/cm	16.9	18.5	20.4	24.1	30.7	29.9	18.4	17.85	14.2	11.9	11.5	30.7	27.2	25.0	22.4	21.4
外層熱抵抗 R_j	℃/W/cm	0.65	0.68	19.1	21.8	22.6	10.7	12.25	11.7	11.15	10.25	9.23	9.92	9.00	8.75	8.25	7.52
表面放散熱抵抗 R_{sd}	℃/W/cm	33.1	34.8	36.8	40.1	42.3	44.9	58.5	55.3	46.4	43.1	40.3	36.6	33.9	32.3	30.9	28.8
全熱抵抗 R_{th}	℃/W/cm	67.3	71.4	76.3	86.0	95.6	85.5	80.15	84.9	71.8	65.3	60.1	77.2	70.1	66.05	61.55	57.72
誘電体損 W_d	W/cm	0.00775	0.00699	0.00638	0.00563	0.00491	0.0438	0	0	0	0	0	—	0.0212	0.0233	0.0261	—
導体抵抗交直の比 Y_s	—	1.08	1.05	1.02	1.01	1.00	1.036	1.012	1.02	1.062	0.110	0.119	—	1	1.01	1.01	1.02
導体の直流抵抗 R_{dc}	Ω/cm	0.0876×10^{-5}	0.1084×10^{-5}	0.1447×10^{-5}	0.2165×10^{-5}	0.3615×10^{-5}	0.0377×10^{-5}	0.147×10^{-5}	0.1115×10^{-5}	0.0688×10^{-5}	0.0551×10^{-5}	0.0453×10^{-5}	0	0.1495×10^{-5}	0.1120×10^{-5}	0.0905×10^{-5}	0.0695×10^{-5}

第4表(2) 60 kV No. 2 および 3 kV のケーブルサイズ

ケーブル	サイズ (mm ²)
60 kV No.2 OFNZ	100, 150, 200, 250, 325
3 kV PLNZ	150, 200, 325, 400, 500



第2図 洞道内多条布設ケーブル配置例

方法と計算例を示すことにする。第2図において60 kV No. 1は $3 \times 325 \text{ mm}^2$ 一定とし、60 kV No. 2 および 3 kV 回路のケーブルサイズを第4表(2)に示すように、前者は $100 \sim 325 \text{ mm}^2$ 、後者は $150 \sim 500 \text{ mm}^2$ の範囲で変え、一方風速は $1 \sim 7 \text{ m/s}$ の範囲で 1 m/s おきに変える。このすべての組み合わせにおける各ケーブルの許容電流および通風口の出口気温を求めることができる。計算の手順はつぎのとおりである。

3種類のケーブルがそれぞれ N_j 本 ($j=1, 2, 3$) ずつ洞道内に布設されている場合を考える。いま

W_j : 各ケーブル1条当たり発熱量 ($j=1, 2, 3$) (W/cm)

R_{thj} : 各ケーブルの熱抵抗 ($j=1, 2, 3$) (℃/W/cm)

R_e : 土壌の熱抵抗 (℃/W/cm)

T_i : 各ケーブル導体の最高使用温度 ($j=1, 2, 3$) (℃)

T_0 : ケーブルの周囲温度 (℃)

T_a : 基底温度 (℃)

l : 洞道の長さ (cm)

C_p : 空気の定圧比熱 (W s/cm³℃)

V : 気体流量 (cm³/s)

とすれば(1)式が成り立つ。

$$W_j R_{thj} = T_j - T_0 \quad (j=1, 2, 3) \quad (1)$$

また洞道内が無風時には熱放散は土壌を通してのみ行なわれるから、(2)式が成り立つ。

$$T_0 = T_a + R_e \sum_{j=1}^3 W_j N_j \quad (j=1, 2, 3) \quad (2)$$

洞道内に強制通風を行なった場合には、1 m 以上の風速になると、通風によって運ばれる熱量に比して土壌を通して放散する熱量は小さくないので、(3)式が成り立つ。

$$T_0 = T_a + \frac{l}{C_p V} \sum_{j=1}^3 W_j N_j \quad (j=1, 2, 3) \quad (3)$$

(2)および(3)式において $X = R_e$ または $X = l/C_p V$ とおけば両式とも一つの式で表現することができ、(4)式となる。

$$T_0 = T_a + X \sum_{j=1}^3 W_j N_j \quad (4)$$

(4)式と(1)式から W_j に関する連立方程式を解くと、(5)式

$$\left. \begin{aligned} W_j &= \frac{T_j - T_a}{R_{thj} (1 + XA)} \quad (j=1, 2, 3) \\ A &= \sum_{j=1}^3 \frac{N_j}{R_{thj}} \\ X &= R_e \quad (\text{無風時}) \\ &= \frac{l}{C_p V} \quad (\text{通風時}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

が得られる。 W_j を用いてケーブルの許容電流 I_j ($j=1, 2, 3$) を求めるには(6)式による。

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{n R_{dcj} K_j} (W_j - W_{dj})} \quad (6)$$

ただし n : ケーブル線心数

R_{dcj} : 導体最高温度における直流抵抗 (Ω/cm)

K_j : 導体抵抗の交直比

W_{dj} : 誘電体損失 (W/cm)

なおケーブルの周囲温度 T_0 は(5)式を(2)式に代入して求めることができる。

ケーブルの各材料の固有熱抵抗基底温度および損失は(1)の管路内多条布設の場合と同様である。

線路の必要送電容量を60 kV No. 1は300 A, No. 2は190 A, 3 kVは275 A とすると、これを満足するサイズの組み合わせの中で、最も小さいサイズの組み合わせと通風速度の関係を求めると第5表(1)のようになる。

つぎに通風速度を1 mにおさえた場合、各サイズの組み合わせと電流容量、出口気温との関係を求めると、第5表(2)のようにな

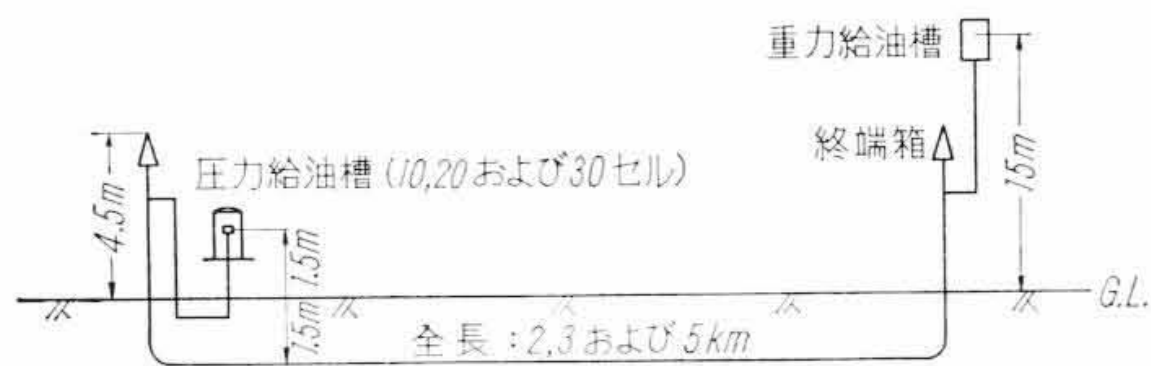
第 5 表 (1) 各風速に対する最小サイズと許容電流

		60 kV No.1		60 kV No.2		3 kV		出口温度 (°C)
		サイズ (mm ²)	電 流 (A)	サイズ (mm ²)	電 流 (A)	サイズ (mm ²)	電 流 (A)	
風 速 (m/s)	0		—	—	—	—	—	—
	1	325 (固定)	347	150	222	325	328	62
	2		439	100	219	200	289	53
	4		472	100	235	150	289	49
必 要 電 流 (A)		300		200		275		—

第 5 表 (2) 各種サイズ組み合わせに対する許容電流
(風速 1 m/s の場合) (単位: A)

3 kV PL	60 kV OF No.2 ケーブル		325mm ²	250mm ²	200mm ²	150mm ²	100mm ²
	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2					
500mm ²	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2	328	329	330	330	332
	60 kV OF No.2	3 kV PL	334	286	249	211	167
	3 kV PL		410	411	412	413	414
400mm ²	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2	336	337	338	338	339
	60 kV OF No.2	3 kV PL	342	293	255	216	171
	3 kV PL		365	366	367	368	369
325mm ²	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2	344	345	346	347	348
	60 kV OF No.2	3 kV PL	350	300	262	222	175
	3 kV PL		326	327	328	328	329
200mm ²	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2	359	360	361	362	363
	60 kV OF No.2	3 kV PL	365	313	273	231	182
	3 kV PL		249	250	251	251	252
150mm ²	60 kV OF No.1	60 kV OF No.2	354	355	356	357	358
	60 kV OF No.2	3 kV PL	360	309	269	228	180
	3 kV PL		221	222	223	223	224

注: 60 kV OF No.1 は 3 心 325 mm² 一定としている。



第 3 図 布設プロフィール

る。

以上のように数多いサイズの組み合わせに対し、すべての場合の許容電流を求めておくことにより、最も経済的な線路設計を目的に応じて行なうことができる。またこれらのサイズに対するケーブル価格、通風速度と通風装置の価格の関係を求めておけば、最も経済的な線路設計を行なうこともきわめて容易である。

3. OF ケーブルの給油計算

(1) FT-PT 給油方式

OF ケーブルの給油計算において、給油区間の一端に重力油槽、他端に圧力油槽を置きたいいわゆる FT-PT 給油方式の油圧変化を計算する給油計算法については、段々法が便利であることをすでに発表したが⁽⁴⁾、この方法はほとんどそのままの形で計算機に移すことができるのできわめて能率的である。また手計算でこれを行なう場合には、計算時間を短くするために、きざみの時間間隔を 5~60 分程度にとらなければならないが、計算機では 1 分間隔にとることができるので、計算の精度を上げることができる。計算の具体的な方法を示すと次のとおりである。

第 3 図に示す給油区間を考える。負荷変化後 t 秒の時刻における PT の給油区間長は (7) 式で与えられる。

$$L-x = \frac{L}{2} - \frac{\Delta P_{gt}}{La_t b_t} \quad \text{..... (7)}$$

ただし L : ケーブル長 (cm)

x : FT からの給油長 (cm)

a_t : 時刻 t におけるオイルデマンド
(cm³/s/cable cm)

b_t : 時刻 t における油流抵抗 (g/cm⁵/s/cable cm)

ΔP_{gt} : 給油によって発生した PT の、時刻 t における常時油圧からの変化分 (g/cm²)

また t 時刻において微小時間 Δt (s) の間に PT から流出する油量 ΔV_{PTt} (cm³) は (8) 式で与えられる。

$$\Delta V_{PTt} = a_t (L-x) \Delta t \quad \text{..... (8)}$$

一方 PT についてはボイルシャルの法則から (9) 式が成り立つ。

$$V_{PTt} = \frac{KT \Delta P_{gt}}{P_0 (P_0 + \Delta P_{gt})} \quad \text{..... (9)}$$

ただし K : 油槽としてのガス定数 (内圧形の場合、1 セル当たり 0.045) (gcm/°K)

T : 油槽の温度 (°K)

P_0 : FT との高低差によって決まる PT の常時油圧
(g/cm²)

段々法は (7)、(8) および (9) 式をくり返し計算して、各時刻における ΔP_g , $L-x$ などを求めるものである。すなわちまず (7) 式において $\Delta P_{g1} = 0$, $L-x = L/2$ として (8) 式から ΔV_{PT1} を求め、つぎに (9) 式によって ΔP_{g2} を求める。これを (7) 式に代入してつぎの時刻における $L-x$ を求める。このようにしてケーブルルートにおける最大油圧変化点が PT 端に到達するまで計算を続ける (すなわち $L-x=0$ となるまで)。

この計算に用いる a , b は時間の関数であるから、あらかじめこれを求めておかなければならない。このため第 4 図に示すような等価放熱回路を想定し、ケーブルの導体、絶縁体およびシース温度の時間的な変化を (10) 式により計算する。

$$\left. \begin{aligned} T_c &= \left[\frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{j=1}^3 \frac{N(p_j)}{p_j M'(p_j)} \varepsilon p_j t \right] W + T_0 \\ T_i &= \left[\frac{Q(0)}{M(0)} + \sum_{j=1}^3 \frac{Q(p_j)}{p_j M'(p_j)} \varepsilon p_j t \right] W + T_0 \\ T_s &= \left[\frac{r_3}{M(0)} + \sum_{j=1}^3 \frac{r_3}{p_j M'(p_j)} \varepsilon p_j t \right] W + T_0 \\ T_0 &= T_a + T_r \end{aligned} \right\} \quad \text{..... (10)}$$

ただし T_c : 導体温度 (°C)

T_i : 絶縁体温度 (°C)

T_s : シース温度 (°C)

$$M(p) = Q_1 Q_2 Q_3 r_1 r_2 r_3 p^3 + (Q_1 Q_2 r_1 r_2 + Q_1 Q_3 r_2 r_3 + Q_1 Q_3 r_1 r_3 + Q_2 Q_3 r_1 r_3 + Q_2 Q_3 r_2 r_3) p^2 + \{Q_1(r_1 + r_2 + r_3) + Q_2(r_2 + r_3) + Q_3 r_3\} p + 1$$

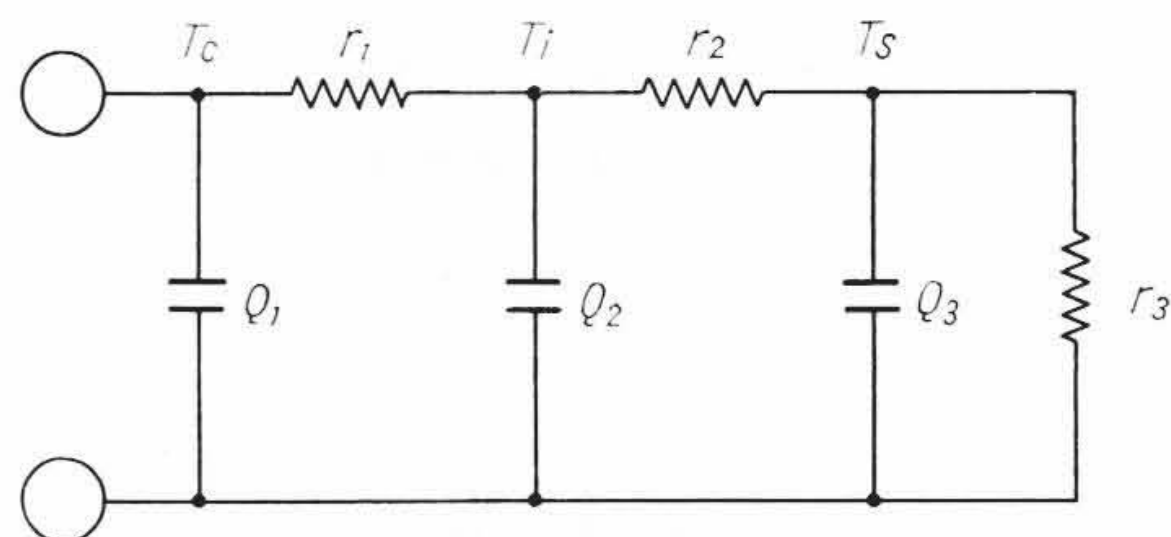
$$N(p) = Q_2 Q_3 r_1 r_2 r_3 p^2 + \{Q_3(r_2 r_3 + r_1 r_3) + Q_2(r_1 r_2 + r_1 r_3)\} p + (r_1 + r_2 + r_3)$$

$$Q(p) = Q_3 r_2 r_3 p + (r_2 + r_3)$$

p_j : $M(p)=0$ の根 ($j=1, 2, 3$)

t : 時間 (s)

W : ケーブルの発生熱量 (W/cm)



第 4 図 ケーブルの等価放熱回路

- T_0 : 周囲温度 (°C)
- T_a : 初期周囲温度 (°C)
- T_r : 周囲温度の時間変化分 (°C)
- $Q_1=Q_{cu}+Q_{oil}$
- $Q_2=Q_{in}$
- $Q_3=Q_{sh}+Q_s$
- $r_1=r_2=\left(\frac{1}{2}\right)R_1$
- $r_3=R_2+R_3$
- Q_{cu} : 銅線の熱容量 (J/°C/cm)
- Q_{oil} : 導体部分の油の熱容量 (J/°C/cm)
- Q_{in} : 絶縁体部分の熱容量 (J/°C/cm)
- Q_{sh} : シースの熱容量 (J/°C/cm)
- Q_s : 防食層, 補強層の熱容量 (J/°C/cm)
- R_1 : 絶縁体の熱抵抗 (°C/W/cm)
- R_2 : 外装の熱抵抗 (°C/W/cm)
- R_3 : 表面放散熱抵抗 (°C/W/cm)
- R_4 : 管路および土壌の熱抵抗 (°C/W/cm)

また油流抵抗 b は (11) 式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{0.815}{\pi r^4} \eta \times 10^{-4} \\ \eta &= \varepsilon \left(\frac{285}{T_{oil} + 97} - 1.037 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

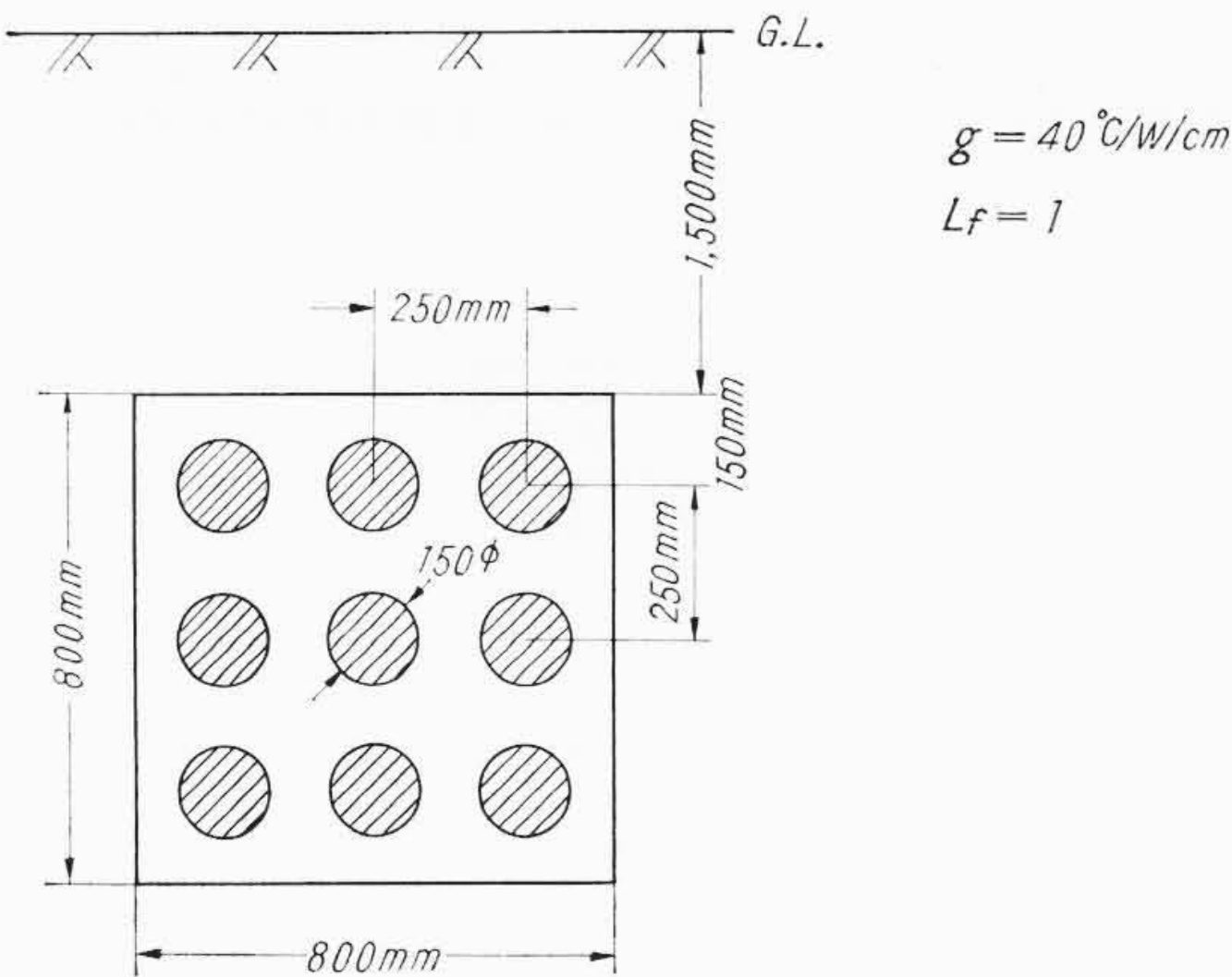
- ただし r : 油通路内半径 (cm)
- T_{oil} : 油通路内の油の温度 (°C)
- η : 油の粘度 (cp)

オイルデマンドは (12) 式より求める。

$$\left. \begin{aligned} a &= a_1 + a_2 \\ a_1 &= e V_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} \\ a_2 &= e V_2 \frac{\partial T_i}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

- ただし a_1 : 導体部分のオイルデマンド (cm³/s/cable cm)
- a_2 : 絶縁体部分のオイルデマンド (cm³/s/cable cm)
- e : 油の熱膨張係数
- V_1 : 導体部分の油の体積 (cm³/cable cm)
- V_2 : 絶縁体部分の油の体積 (cm³/cable cm)

これら一連の計算を一貫して計算機で行なわせると、計算所要時間は、1 分間隔で 1,000 分 (約 17 時間) まで計算させた場合、約 40 分である。これを手計算で行なうとすれば、おそらく 1 個月位を要するであろう。



1孔7条式 (3回線)

第5図 管路寸法

一例として 275 kV 線路において計算した例を示す。ケーブルとして 800 mm², 1,200 mm² および 1,500 mm² をとり、第5図および第6表に示すような条件で計算を行ない、得られた結果を第7表に示す。

(2) 中間給油方式

最近 OF ケーブルの給油系統を設計する場合、長い線路のとき設けられる油止接続箱を省略し、普通接続箱から圧力油槽によって給油するいわゆる中間給油方式が実施された例がある⁽⁶⁾。この方式をとれば高価な油止接続箱を省略できるので、経済的な線路設計が可能となる。

中間給油方式の給油計算も、前述の FT-PT 給油計算の方法を拡張して、容易に計算機によって計算することが可能である。

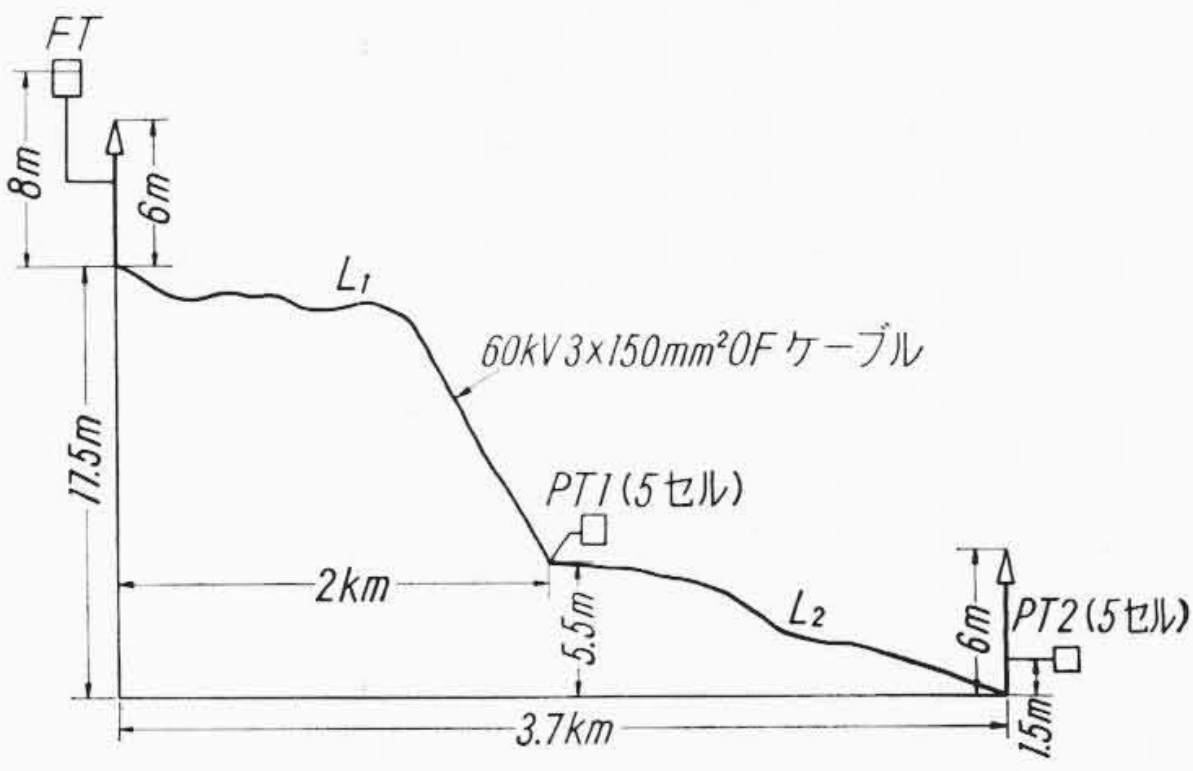
一例として第6図に示すような 60 kV 3 心 150 mm² OF ケーブル

第6表 投入初期条件

項 目	単 位	数 値
絶縁体の熱抵抗	°C/W/cm	51
外装の熱抵抗	°C/W/cm	7.5
表面放散熱抵抗	°C/W/cm	24.7
土壌の熱抵抗	°C/W/cm	83.6
鉛被損/銅損	-	0.05
導体の熱容量	J/°C/cm	51.6
導体内の油の熱容量	J/°C/cm	8.56
絶縁体の熱容量	J/°C/cm	106
鉛被の熱容量	J/°C/cm	17.5
黄銅の熱容量	J/°C/cm	4.26
防食層の熱容量	J/°C/cm	34.6
基底温度	°C	10
遮断損	W/cm	0.307
遮断前導体温度	°C	36
遮断前絶縁体温度	°C	28.2
遮断前鉛被温度	°C	20.4
管路内の空気温度の変化	°C/s	0.17×10 ⁻⁸ (24 時間に 15°C の割合)
P T の 温 度	°K	268
油通路の内径	mm	7.5
絶縁厚	mm	21
鉛被厚	mm	3.9
補強層厚	mm	0.7
防食層厚	mm	5
導体直流抵抗 (20°C)	Ω/km	0.0121
遮断または印加する負荷電流	A	1,173

第7表 計算結果

負 荷	ルート長 (km)	P T のセル数 (セル)	油圧最低(高)点が P T 端に到達する時間 (分)	P T の最低(高)油圧 (kg/cm²)	ケーブルルート中の最低(高)油圧 (kg/cm²)
遮 断	2	10	220	0.103	0.373
		20	360	0.334	0.604
		30	500	0.794	0.767
印 加	2	10	180	1.89	2.20
		20	220	1.70	1.98
		30	260	1.61	1.88



第6図 布設プロフィール (中間給油方式)

ル線路において、一端FT、他端PTおよび中間にPTをつないだ場合の計算方法および計算結果を示す。

第6図において、負荷変化後 t 秒の時刻における PT_1 および PT_2 の給油区間長は(13)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} L_1-x &= \frac{L_1}{2} - \frac{\Delta P_{g1t}}{L_1 a_t b_t} \\ L_2-y &= \frac{L_2}{2} - \frac{(\Delta P_{g1t} - \Delta P_{g2t})}{L_2 a_t b_t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ただし L_1 : FT- PT_1 間のケーブル長 (cm)
 x : FTからの給油区間長 (cm)
 L_2 : PT_1 - PT_2 間のケーブル長 (cm)
 y : PT_1 - PT_2 区間における PT_1 からの給油区間長 (cm)

ΔP_{g1t} : 給油によって発生した PT_1 の、時刻 t における常時油圧からの変化分 (g/cm²)

また t 時刻において微小時間 Δt (s) の間に PT_1 および PT_2 から流出する油量 ΔV_{PT1t} および ΔV_{PT2t} (いずれも cm³) は(14)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{PT1t} &= a_t (L_1-x) \Delta t + a_t y \Delta t \\ \Delta V_{PT2t} &= a_t (L_2-y) \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

一方 PT_1 および PT_2 についてはボイルシャルルの法則より

$$\left. \begin{aligned} V_{PT1t} &= \frac{K_1 T_1 \Delta_{g1t}}{P_{01} (P_{01} + \Delta P_{g1t})} \\ V_{PT2t} &= \frac{K_2 T_2 \Delta_{g2t}}{P_{02} (P_{02} + \Delta P_{g2t})} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ただし K_1, K_2 : PT_1 および PT_2 のガス定数 (gcm/^oK)
 T_1, T_2 : PT_1 および PT_2 の温度 (^oK)
 P_{01}, P_{02} : FTとの高低差によって決まる PT_1 および PT_2 の常時油圧 (g/cm²)

(13)～(15)式によって段々法の計算を行なわせることができる。

第6図の条件に対する、計算機への投入のための諸数値を第8表に、また計算の結果を第9表に示す。

またこのような計算は、第6図のようにPTの設置場所が2個所の場合のみでなく、3個所以上の場合についても容易に拡張可能であることは(13)、(14)および(15)式の形をみれば明らかである。し

第8表 投 入 初 期 条 件

項 目	単 位	数 値
絶 縁 体 の 熱 抵 抗	℃/W/cm	23.7
外 装 の 熱 抵 抗	℃/W/cm	9.8
土 壌 の 熱 抵 抗	℃/W/cm	35.9
導 体 の 熱 容 量	J/℃/cm	15.7
導 体 内 の 油 の 熱 容 量	J/℃/cm	1.8
絶 縁 体 の 熱 容 量	J/℃/cm	36.8
介 在, 油 通 路 部 の 熱 容 量	J/℃/cm	31.3
鉛 被 の 熱 容 量	J/℃/cm	10.4
外 装 の 熱 容 量	J/℃/cm	28.0
基 底 温 度	℃	0
遮 断 損 失	W/cm	0.248
遮 断 前 導 体 温 度	℃	20.1
遮 断 前 絶 縁 体 温 度	℃	15.2
遮 断 前 鉛 被 温 度	℃	10.4
ケーブル周囲温度の変化	℃/s	0.17×10^{-3} (24 時間に 15℃ の割合)
P T の 温 度	°K	258
油 通 路 の 内 径	mm	13.0
絶 縁 厚	mm	8.0
鉛 被 厚	mm	3.2
補 強 層 厚	mm	0.5
防 食 層 厚	mm	3.5
導 体 直 流 抵 抗 (20℃)	Ω/km	0.121
遮断または印加する負荷電流	A	287

第9表 計 算 結 果

負 荷	対 称 セ ル	最低油圧点が到達する時間 (分)	PTの最低油圧 (ゲージ) (kg/cm ²)	PTの最低油圧が生ずる時間 (分)	PT ₁ -PT ₂ 区間におけるケーブルの最大圧力降下 (ゲージ) (kg/cm ²)
遮断	PT 1	30	0.50	60	1.61
	PT 2	65	0.55	65	

たがってさらに線路が長い場合でも、中間給油方式の設計が可能である。

(3) 3心アルミ被OFケーブルの油流抵抗

3心アルミ被OFケーブルにおいては、シースがかたいため鉛被の場合のように、油通路スパイラルや介在を3線心とシースの間に入れて断面を円形に保持する必要がなく、したがって油通路の形は円形または扇形の3線心とシースとの間で形成される銀杏 (いちょう) の葉の形となる。またケーブルの外径が50mmをこえる場合には、取り扱い上の理由から、シースにコルゲートと称する凹凸をつけるので、ケーブルの軸方向にも油通路断面の形状は変化する。

このように複雑な形状の油通路の油流抵抗を求めるのは手計算では不可能であり、デジタル計算機の助けを必要とする。ここでは計算の基本的な理論を簡単化して2次元問題とし数値計算を行なった結果および実測値との対比について述べることにする。

周知のように流体力学は二つの仮定の上に成り立っている。その一つは物体の壁の上では流体が粘着して流速は零になることであり、第2はニュートンの仮説すなわち接線応力 (摩擦応力) がすべり変形の割合に比例することを仮定したものである。その比例定数が粘度である。

これらの仮定より出発して運動方程式を立てる。運動する流体に働く力は4種⁽⁷⁾あり、それらは

- (1) 流体粒子の質量と加速度の積で表わされる慣性力
- (2) 質 量 力
- (3) 各点における圧力差による力
- (4) 粘性による粘性力

である。

いま第7図に示すような座標系をとり、考える流体の座標 (x, y, z) に関し速度成分を $u(x, t)$, $v(y, t)$ および $w(z, t)$ とする。

単位流体要素を考えると、質量を ρ とすれば、慣性力の x, y, z 成分は

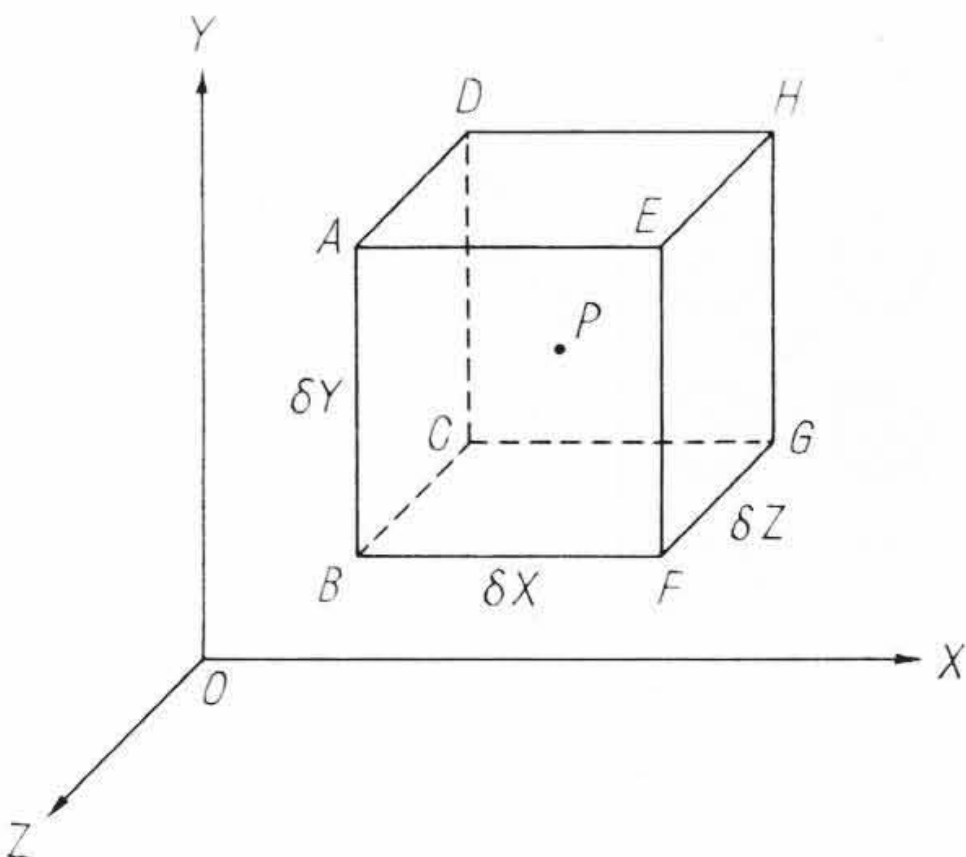
$$\rho \frac{du}{dt}, \quad \rho \frac{dv}{dt}, \quad \rho \frac{dw}{dt}$$

となる。単位質量に対する質量力の成分を (X, Y, Z) とすれば質量力の成分は

$$\rho X, \quad \rho Y, \quad \rho Z$$

となる。

第7図の直六面体の中心 $P(x, y, z)$ における圧力を P とすれば、



第7図 流 体 内 の 座 標

ABCD面には $\left(\rho - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{1}{2}\right)$ という圧力が働き、EFGH面には $-\left(\rho + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{1}{2}\right)$ が働く。したがって x 方向の圧力による力は $-\frac{\partial P}{\partial x}$ とする。同様に y および z 方向の圧力による力を求めることができ、結局圧力による力の成分は

$$-\frac{\partial P}{\partial x}, -\frac{\partial P}{\partial y}, -\frac{\partial P}{\partial z}$$

となる。粘性力の成分はストークスの応力理論により、

$$\left(\eta \nabla^2 u + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial x}\right), \left(\eta \nabla^2 v + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial y}\right), \left(\eta \nabla^2 w + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial z}\right)$$

となる。ただし η は粘度(C. G. S 単位)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad \theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

である。

ニュートンの運動の第2法則は、

$$(\text{慣性力}) = (\text{質量力}) + (\text{圧力}) + (\text{粘性力})$$

であるから、(16)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho X - \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \nabla^2 u + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho Y - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \nabla^2 v + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho Z - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \nabla^2 w + \frac{\eta}{3} \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

非圧縮性流体と仮定すれば、 $\theta=0$ となり、また流れを緩慢な運動とすれば u, v, w および $\partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \dots$ などは非常に小さいのでこれらの積は $\partial u/\partial t$ などに比して無視することができ、さらに定常流でかつ質量力を無視しうるものとすれば、(17)式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \eta \nabla^2 u \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= \eta \nabla^2 v \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \eta \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

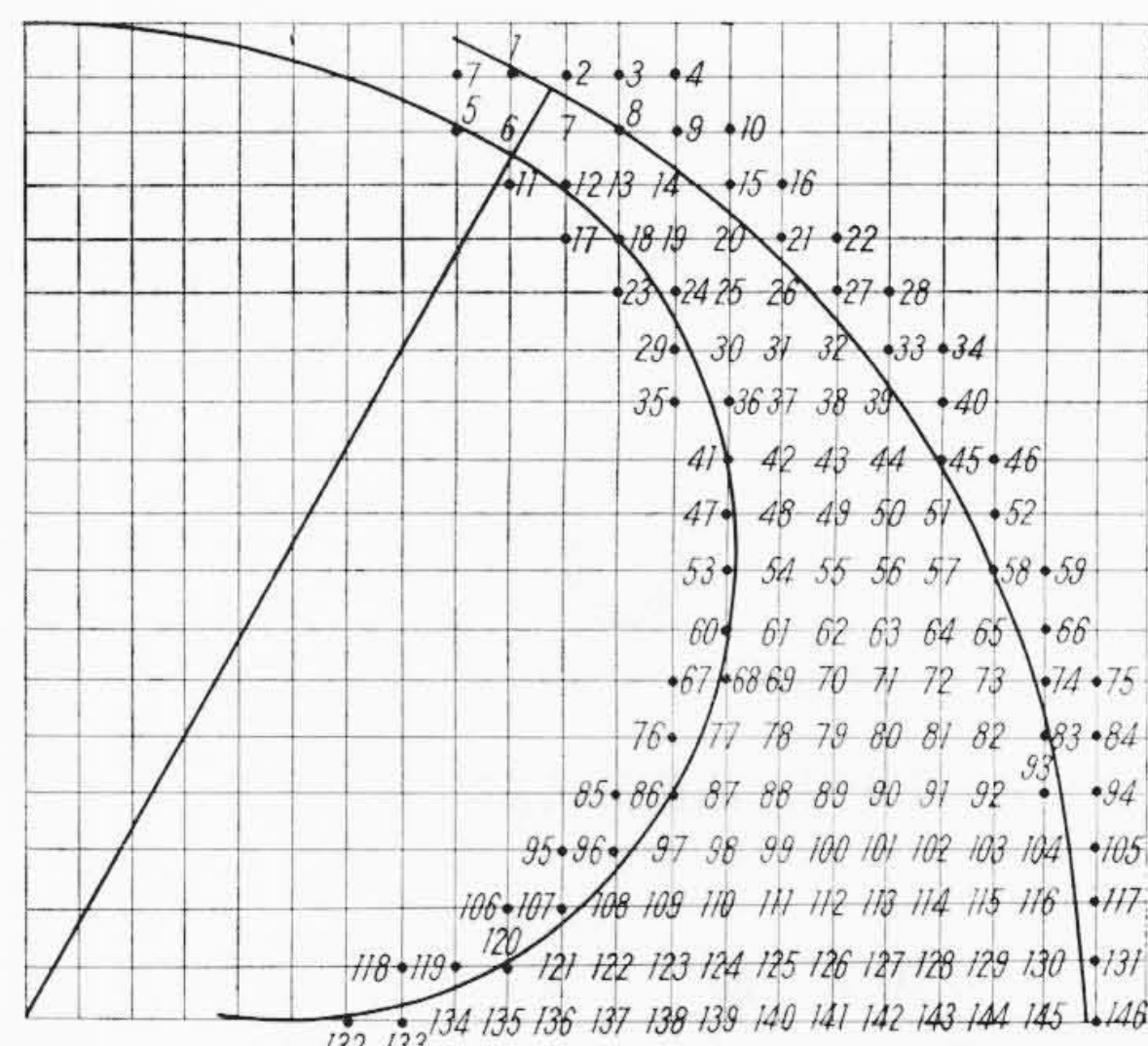
いまケーブルの軸方向を z 軸にとることにし、 z 軸方向の圧力こう配を単位値にとり、かつある断面内の位置の差による圧力差を無視することにすれば、(18)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \eta \nabla^2 u \\ 0 &= \eta \nabla^2 v \\ 1 &= \eta \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

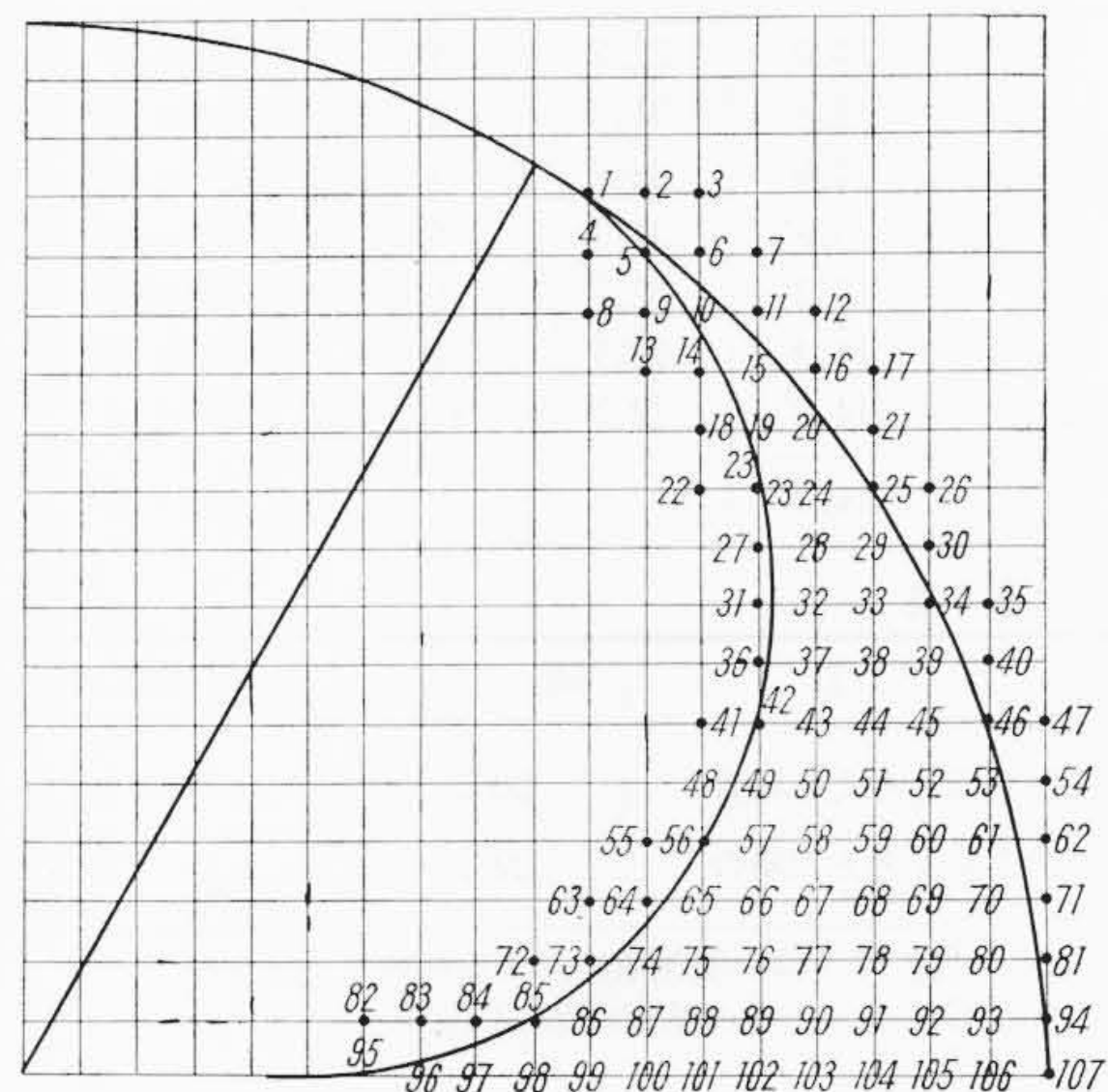
この式を境界条件(シースの直下および線心表面で $u, v, w=0$)の下で解けばよいことになる。この具体的方法は、油通路内を数多くの格子点に分け(18)式をこれら各点における階差方程式の形に変換して、連立多元一次方程式とし、その根を求める問題に帰する。

計算を簡略化するため、2次元の問題に還元する手段として、コルゲートの影響を最も大きく受ける油通路形状と、全然影響を受けない油通路形状とに限り、この代表的断面のそれぞれの場合について油流抵抗を計算した例を示す。この場合(18)の第3式のみを解けばよい。

70 kV 3心250 mm²アルミ被OFケーブル(OKD式コルゲート)をとり、前述の簡略化法にしたがって第8図のように、最も広い油通路と、最も狭い油通路を146個および107個の正方形格子に分ける。



第8図(1) 広い油通路の格子点



第8図(2) 狭い油通路の格子点

(18)の第3式を階差方程式に書き直すと、(19)式となる⁽⁸⁾(簡単のため $\eta=1$ とする)。

$$\begin{aligned} &-20w(x, y) + 4\{w(x+h, y) + w(x-h, y) + w(x, y+h) \\ &\quad + w(x, y-h)\} + w(x+h, y+h) + w(x+h, y-h) \\ &\quad + w(x-h, y+h) + w(x-h, y-h) = 6h^2 \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

ただし h は格子の一辺の長さ(cm)である。第8図においては $h=0.215$ (cm)である。

(19)式は格子の各点に対して成り立つので、第8図の場合にあてはめると146元および107元の連立一次方程式となる。これを解くにはリープマン法による繰返し計算が有効であり、解の収れん性については、連立方程式の対角線上の要素が他の要素(零が多い)に比較して卓越して大きいので問題はない。

実際の計算においては、初期条件を零とし、繰返しの回数を100回とすることにより有効数字8けたまで収れんさせることができた。

このようにして求められた w の値を用いて流量を求めればその逆数が $\eta=1$ の場合の油流抵抗値を与えることになる。

流量を求めるのは(20)式によった。

$$Q = \frac{s}{k} \sum_{j=1}^k w_j \dots\dots\dots (20)$$

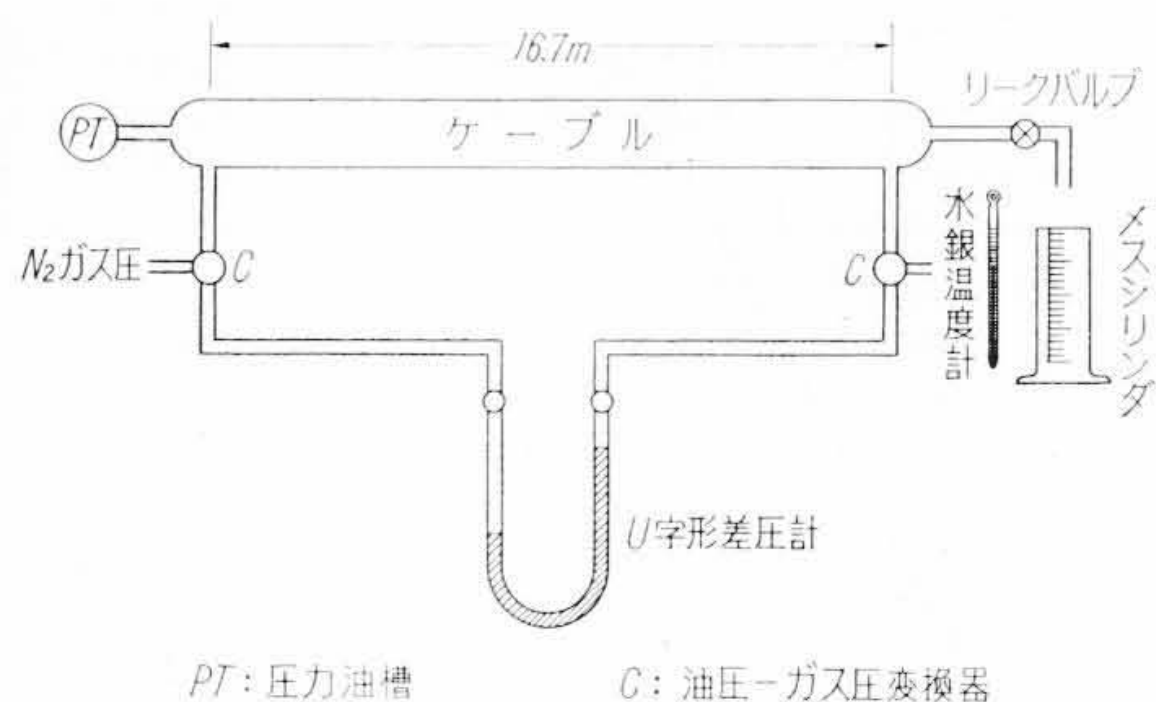
ただし Q : 流量 (cm³/s)

s : 考える油通路の面積 (cm²)

w_j : 各格子点における w の値 (cm/s)

k : 格子点の数

このようにして計算した油流抵抗の値と、実測値とを比較するため、第9図のような装置で実測を行なった。第10表に実測値と計



第9図 油流抵抗測定方法略図

第10表 油 流 抵 抗

(1) 実 測 結 果						
項目 回数	油 流 量 Q (cm^3/s)	油 温 ($^{\circ}\text{C}$)	粘 度 (C.P.)	ケーブル両 端の圧力差 (g/cm^2)	油流抵抗値 R ($\text{g}/\text{cm}^6/\text{s}$)	
					測定温度に おいて	20 $^{\circ}\text{C}$ 換算値
1	6.06	14.0	32.7	1.3	1.283×10^{-4}	0.919×10^{-4}
2	13.15	14.8	31.3	2.7	1.229×10^{-4}	0.916×10^{-4}
3	15.05	14.0	32.7	3.2	1.272×10^{-4}	0.910×10^{-4}
4	31.8	14.8	31.3	6.7	1.261×10^{-4}	0.940×10^{-4}
5	44.7	14.2	32.1	9.5	1.272×10^{-4}	0.925×10^{-4}
6	49.4	14.2	32.1	10.4	1.260×10^{-4}	0.916×10^{-4}
7	53.8	14.2	32.1	11.2	1.247×10^{-4}	0.905×10^{-4}
平 均	—	14.3	—	—	1.261×10^{-4}	0.919×10^{-4} *

(2) 計 算 結 果		
項 目	油 温	油流抵抗値 R ($\text{g}/\text{cm}^6/\text{s}$)
(1) 油通路を広く考えた場合	20 $^{\circ}\text{C}$	0.515×10^{-4} (56%)
(2) 油通路を狭く考えた場合	20 $^{\circ}\text{C}$	1.1×10^{-4} (120%)

注：(1) (%) は * 印の実測値に対する割合を示す。
(2) 20 $^{\circ}\text{C}$ における油の粘度は 23.3 C.P.。

算値をまとめて示す。この表からわかるように油通路を狭く考えた場合の値が実測値に近く、約 20% の誤差で安全側の値を与えてい

ることがわかる。したがって給油計算のためには十分実用可能であるといえよう。

4. 結 言

当工場に設置されたデジタル電子計算機 HITAC 3010 を用いて、地中ケーブル関係の技術計算を行なった例について述べた。結論として、

- (1) 電流容量関係、特に多条布設の場合に適用することによって合理的かつ経済的な線路設計を行なうことができる。
- (2) 給油計算とくに FT-PT 給油の場合に適用することにより、FT 高さ、PT セル数などを経済的に計画することができる。かつ線路が長い場合、中間給油を行なって油止接続箱を省略すれば、さらに経済的となる。
- (3) アルミ被ケーブルの油通路のように複雑な形状をした油通路の油流抵抗も簡単に計算することができる。

このような手段を有効に活用すれば、より経済的な地中送電線路の建設の助けとなるであろう。

終わりに本報告の執筆に対しご指導いただいた日立電線株式会社内藤工場長、水上副工場長および杉山部長に深く感謝の意を表明する。

参 考 文 献

- (1) 電線工業会規格 JCS 168 (案) (1963)
- (2) 飯塚、木村：電力 43, No. 13, p. 53 (昭 34)
- (3) 武藤、津元：藤倉電線抜報 18, p. 27 (昭 34)
- (4) 今井、網野：日立評論別冊第 35 号 (昭 35)
- (5) J. H. Neher, M. H. Mc Grath: TAIEE, 76, pt. III, p. 752 (1957)
- (6) 広瀬、長浜、代谷、高田、林：住友電気 79, p. 37 (昭 37)
- (7) 岡本：応用流体力学 p. 28 (誠文堂新光社) (昭 37)
- (8) 乗松：数値計算法 p. 255 (電気書院) (昭 33)



特許第309441号 (特公昭37-18230)

特 許 の 紹 介



鈴木喜久

後 進 波 管

一般に後進波管においては作動電磁波の波長が短くなると管内回路損失が増大するのでミリ波用としては特に発生電力を有効にとり出すべく高度の設計技術が要せられている。しかし従来の後進波管においては、電子銃側端部から発生電力を取り出すようにしてあるがために、出力を有効にとり出すことができなかった。

この発明は発生電力を取り出すための最適条件について考究した結果得られたもので、発生電力を出力としてとり出す場合、電力発

生各部から出力部までの伝送による各回路損失を考慮に入れた合成電力の最大値が電子銃側端部ではなく、それより中央部に移動した点に発生することを確かめ、この点に出力部を設けるようにしたものである。即ちこの発明の後進波管はその出力部の結合ら旋を電子銃側端部より若干 x だけ中央部に移動した点に付設することによって発生出力を極めて有効にとり出し得るようにしたものである。

(水 本)

