

# OF ケーブル線路の給油計算に関する一般的方法

Generalized Method of Calculation for Oil Feeding of Oil Filled Cable System

今井敏雄\*  
Toshio Imai

## 要旨

OF ケーブルの給油計算において、重力油槽と圧力油槽とを併用もしくはそのいずれかを用いた線路の場合の一般的な計算方法を案出した。この方法はオイルデマンド、油流抵抗および圧力油槽の非直線性をすべて考慮に入れ、電子計算機を用いて Runge-Kutta 法により計算するものである。

計算値と実測値とを比較した結果両者はよく一致した。

## 1. 緒言

OF ケーブルの温度変化に基づく絶縁油の油量および油圧変化現象については、古く<sup>(1)</sup>から多くの研究者によって研究されており<sup>(2)~(8)</sup>、ケーブル自体の問題としてはほぼ解決していると思われる。

しかし実用上は給油槽を含めた線路としての油圧、油量変化現象が重要であるにもかかわらず、これに関する研究は少なく<sup>(9)(10)</sup>、いまだ十分に解決されているとはいえない。特に重力形給油槽(FTと略称する)と圧力形給油槽(PTと略称する)とを併用した給油系統における油圧変化の問題は、非線形の問題となるため解析的な一般解を得ることが困難である。

筆者は線路において成り立つ一般の連立偏微分方程式を立て、これを数値計算可能な連立常微分方程式に変換した。

この常微分方程式を電子計算機により Runge-Kutta 法を用いて解いた結果は実測値とよく一致し、本方法が線路設計上有効であることを確かめた。

## 2. 給油計算の基本式

OF ケーブルの給油系統において最も一般的なものは一端に FT を置き、途中および他端に PT を設置する方式である。ほかに PT のみによる給油あるいは FT のみによる給油などもあるが、いずれも理論的には、FT-PT-PT 方式の変形として解くことができる。基本式の求め方は FT-PT-PT 方式の場合のみについて述べ、ほかは結果のみ示すこととする。

### 2.1 FT-PT-PT の場合

図1に示すケーブル線路を考える。記号を表1に示すとおりすると、(1)~(4)式が成り立つ。

$$0 \leq x \leq l_1 \text{ にて } \frac{\partial P_1(x, t)}{\partial x} = -b(t) I_1(x, t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial I_1(x, t)}{\partial x} = -a(t)$$

$$\therefore I_1(x, t) = -a(t)x + f_1(t) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$l_1 \leq x \leq l_2 \text{ にて } \frac{\partial P_2(x, t)}{\partial x} = -b(t) I_2(x, t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial I_2(x, t)}{\partial x} = -a(t)$$

$$\therefore I_2(x, t) = -a(t)x + f_2(t) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{初期条件は } P_1(x, 0) = P_2(x, 0) = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

また境界条件は(6)~(9)式にて与えられる。

$$P_1(l_1, t) = P_2(l_1, t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$I_2(l_1, t) = I_1(l_1, t) + dQ_1(t)/dt \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$I_2(l_2, t) = -dQ_2(t)/dt \quad \dots \dots \dots (8)$$

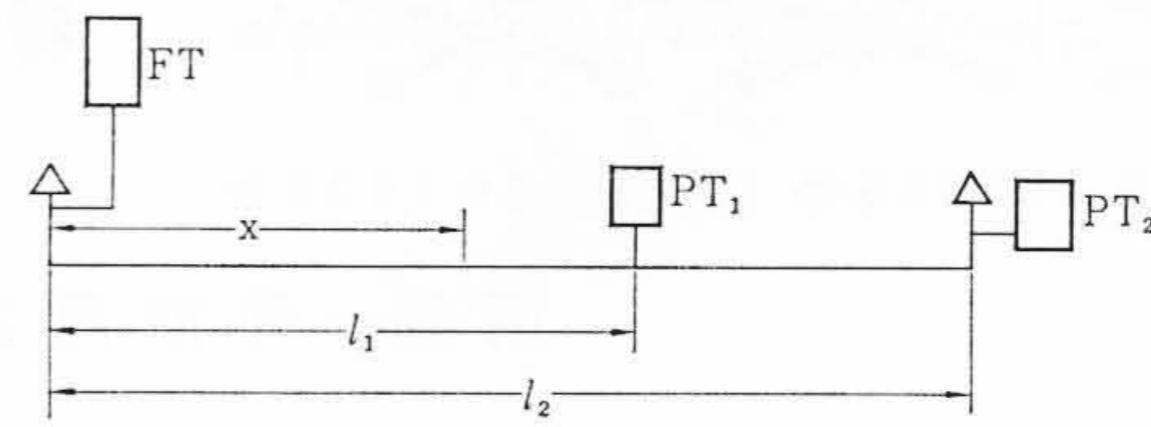


図1 ケーブル線路

表1 記号表

記号	単位	意味	符号
P <sub>1</sub> (x, t)	g/cm <sup>2</sup>	x位置, t時刻における油圧変化(FT-PT <sub>1</sub> 間)	上昇を正
P <sub>2</sub> (x, t)	g/cm <sup>2</sup>	x位置, t時刻における油圧変化(PT <sub>1</sub> -PT <sub>2</sub> 間)	上昇を正
I <sub>1</sub> (x, t)	cm <sup>3</sup> /s	x位置, t時刻における油流量(FT-PT <sub>1</sub> 間)	FT→PT <sub>1</sub> を正
I <sub>2</sub> (x, t)	cm <sup>3</sup> /s	x位置, t時刻における油流量(PT <sub>1</sub> -PT <sub>2</sub> 間)	PT <sub>1</sub> →PT <sub>2</sub> を正
a(t)	cm <sup>3</sup> /s/cm cable	t時刻におけるオイルデマンド	負荷遮断時を正
b(t)	gs/cm <sup>5</sup> /cm cable	t時刻における油流抵抗	常に正
x	cm	FTからの距離	常に正
t	s	時刻	常に正
Q <sub>1</sub> (t)	cm <sup>3</sup> /s	PT <sub>1</sub> からの排油量	排出を正
Q <sub>2</sub> (t)	cm <sup>3</sup> /s	PT <sub>2</sub> からの排油量	排出を正
T <sub>1</sub>	°K	PT <sub>1</sub> の温度	常に正
T <sub>2</sub>	°K	PT <sub>2</sub> の温度	常に正
K <sub>1</sub>	g/cm °K	PT <sub>1</sub> のガス定数	常に正
K <sub>2</sub>	g/cm °K	PT <sub>2</sub> のガス定数	常に正
P <sub>g1</sub>	g/cm <sup>2</sup>	PT <sub>1</sub> の常時油圧(絶対圧)	常に正
P <sub>g2</sub>	g/cm <sup>2</sup>	PT <sub>2</sub> の常時油圧(絶対圧)	常に正
f <sub>1</sub> (t)	(cm <sup>2</sup> /s) cm cable	油圧を計算するための関数	—
f <sub>2</sub> (t)	(cm <sup>2</sup> /s) cm cable	油圧を計算するための関数	—
g <sub>2</sub> (t)	g/cm <sup>2</sup>	油圧を計算するための関数	—

$$P_1(0, t) = 0 \quad \dots \dots \dots (9)$$

これらの式は変数として x および t を含む偏微分方程式の形であり、取り扱いが複雑であるから、付録2に示すとおりの変形を行なって、x を消去し、t のみに関する微分方程式に書き直すと(10)~(13)式のとおりとなる。

$$\frac{dP_1(l_1, t)}{dt} = \frac{\{P_{g1} + P_1(l_1, t)\}^2}{K_1 T_1} \{-f_2(t) + f_1(t)\} \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{dP_2(l_2, t)}{dt} = \frac{\{P_{g2} + P_2(l_2, t)\}^2}{K_2 T_2} \{-a(t)l_2 + f_2(t)\} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$f_1(t) = \frac{(1/2)a(t)b(t)l_1^2 - P_1(l_1, t)}{b(t)l_1} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$f_2(t) = \frac{P_2(l_2, t) - P_1(l_1, t) + 0.5a(t)b(t)(l_1^2 - l_2^2)}{b(t)(l_1 - l_2)} \quad \dots \dots \dots (13)$$

すなわち  $P_1(l_1, t)$  および  $P_2(l_2, t)$  と  $t$  に関する 2 階連立 1 次常微分方程式を解けばよいこととなる。

(10)～(13)式が給油計算に関する基本の微分方程式である。

## 2.2 FT-3PT の場合

2.1において述べた方法と全く同様にして FT-3PT の場合の基本式を求めることができる。その結果のみを示すと (14)～(21) 式のとおりである。

$$\frac{dP_1(l_1, t)}{dt} = \frac{\{P_{g1} + P_1(l_1, t)\}^2}{-K_1 T_1} - f_1(t) \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{dP_2(l_2, t)}{dt} = \frac{\{P_{g2} + P_2(l_2, t)\}^2}{-K_2 T_2} - f_2(t) \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$\frac{dP_3(l_3, t)}{dt} = \frac{\{P_{g3} + P_3(l_3, t)\}^2}{-K_3 T_3} - f_3(t) \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$f_1(t) = \{0.5 \cdot a(t) b(t) l_1^2 - P_1(l_1, t)\} / bl_1 \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$f_2(t) = \{0.5 \cdot a(t) b(t) (l_1^2 - l_2^2) - P_1(l_1, t) + P_2(l_2, t)\} / b(l_1 - l_2) \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$f_3(t) = \{0.5 \cdot a(t) b(t) (l_2^2 - l_3^2) - P_2(l_2, t) + P_3(l_3, t)\} / b(l_2 - l_3) \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$g_2(t) = b(t) l_1 \{f_2(t) - f_1(t)\} \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$g_3(t) = b(t) \{l_2 f_3(t) + (l_1 - l_2) \cdot f_2(t) - l_1 f_1(t)\} \quad \dots \dots \dots (21)$$

## 2.3 FT-PT 給油の場合

全く同様にして FT-PT 給油の場合の式を導くことができる。結果のみを示すと (22) および (23) 式のとおりである。

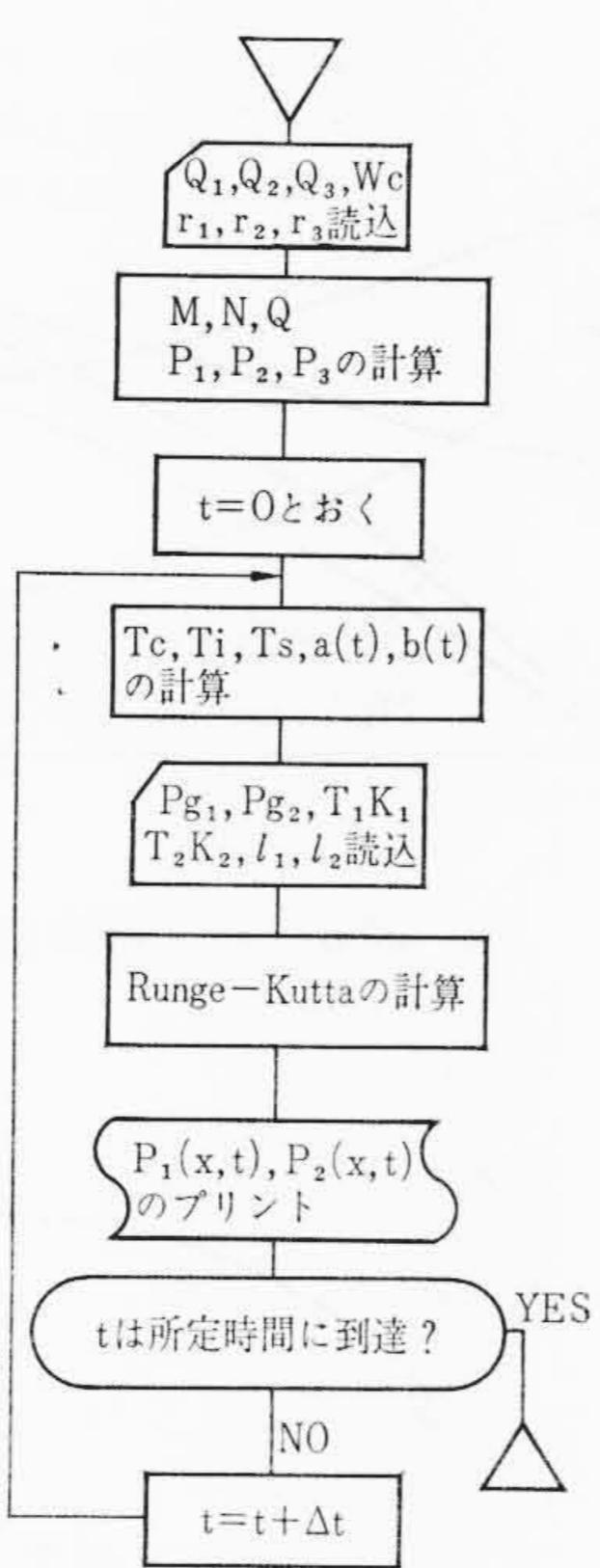


図 2 計算フロー チャート

$$\frac{dP_1(l, t)}{dt} = \frac{\{P_{g1} + P_1(l, t)\}^2}{K_1 T_1} - a(t) l_1 + f_1(t) \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$f_1(t) = \frac{0.5 a(t) b(t) l_1^2 - P_1(l, t)}{b(t) l_1} \quad \dots \dots \dots (23)$$

## 2.4 PT-PT 給油の場合

両端 PT 給油の場合の基本式を示すと、(24) および (25) 式のとおりである。

$$\frac{dP(0, t)}{dt} = -\frac{0.5 a(t) b(t) l^2 + P(0, t) - P(l, t)}{b(t) l} - \frac{\{P_{g1} + P(0, t)\}^2}{K_1 T_1} \quad \dots \dots \dots (24)$$

$$\frac{dP(l, t)}{dt} = \left\{ -a(t) l + \frac{0.5 a(t) b(t) l^2 + P(0, t) - P(l, t)}{b(t) l} \right\} \times \frac{\{P_{g2} + P(l, t)\}^2}{K_2 T_2} \quad \dots \dots \dots (25)$$

## 3. 計算の具体的方法

(10)～(23) 式において  $a(t)$  および  $b(t)$  は非線形関数であるから、(10)～(23) 式の解を解析的に求めることは困難である。そこで数値的に解を求めるため Runge-Kutta 法を用いる。計算のフロー チャートは図 2 に示すとおりである。

$a(t)$  および  $b(t)$  は付録 1 に示す方法によって時間に対する連続関数として計算することができるもので、適当に選定した微小時間間隔  $Δt$  ごとにこれらの計算値を求め、これによってたとえば (10)～(13) 式の  $P_1(l_1, t)$  および  $P_2(l_2, t)$  などを求める。 $P_1(l_1, t)$  および  $P_2(l_2, t)$  が求められれば、ケーブル線路に沿う油圧変化は  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  および  $f_3(t)$  (付録 2 参照) を用いて簡単に計算することができる。

この計算を行なうにあたって問題となるのは、微小時間間隔  $Δt$  をいかにとるかということである。一例として図 3 に示す 77 kV 単心 600 mm<sup>2</sup> OF ケーブル線路<sup>(9)</sup> について  $Δt$  を種々に変えて計算を行ない、 $P_1(l_1, 4 h)$  および  $P_2(l_2, 4 h)$  の値を  $Δt$  に対して示すと、図 4 のようになる。図には電算機 HITAC 3010 による所要計算時間も併記した。

図 4 からわかるとおり時間間隔  $Δt$  を過度に小さくすることは所要計算時間の点から損失となり、結果の精度の点では、利得がないので  $Δt$  としては 60 秒前後とするのが妥当であろう。

## 4. 実測値との比較

計算の妥当性をみるために、実測値との対比を試みた。

表 2 66 kV 3×200 mm<sup>2</sup> アルミ被 OF ケーブル

項	目	単位	数値
導線	公称断面積	mm <sup>2</sup>	200
心	外径	mm	31.5
シース	谷内径	mm	69.1
シース	山内径	mm	83.5
シース	厚さ	mm	2.4
シース	山外径	mm	88.3
ボリエチレン	厚さ	mm	3.8
絶縁体	の熱抵抗	°C/W/cm	22.1
防食層	の熱抵抗	°C/W/cm	5.6
表面放電	熱抵抗	°C/W/cm	30.7

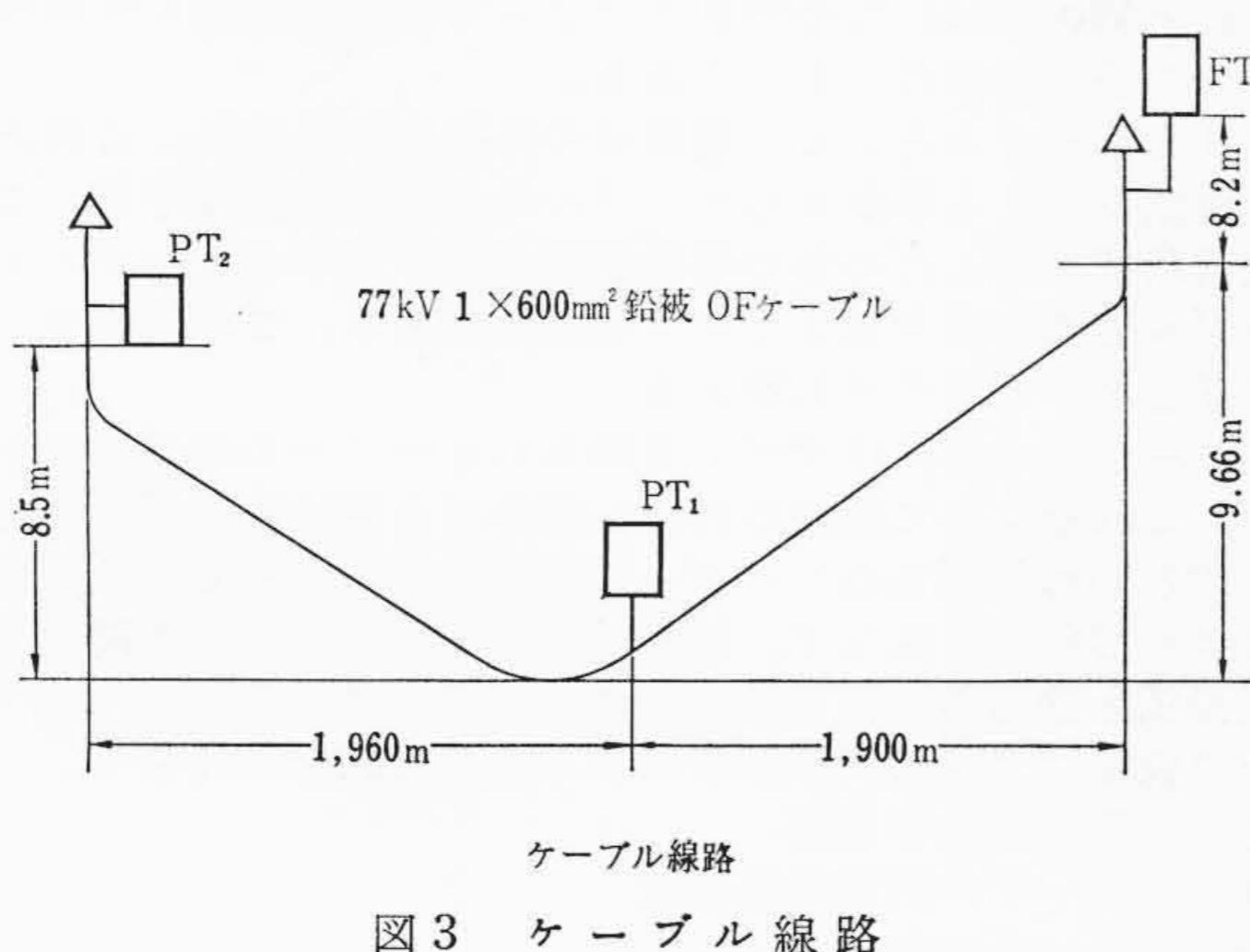


図 3 ケーブル線路

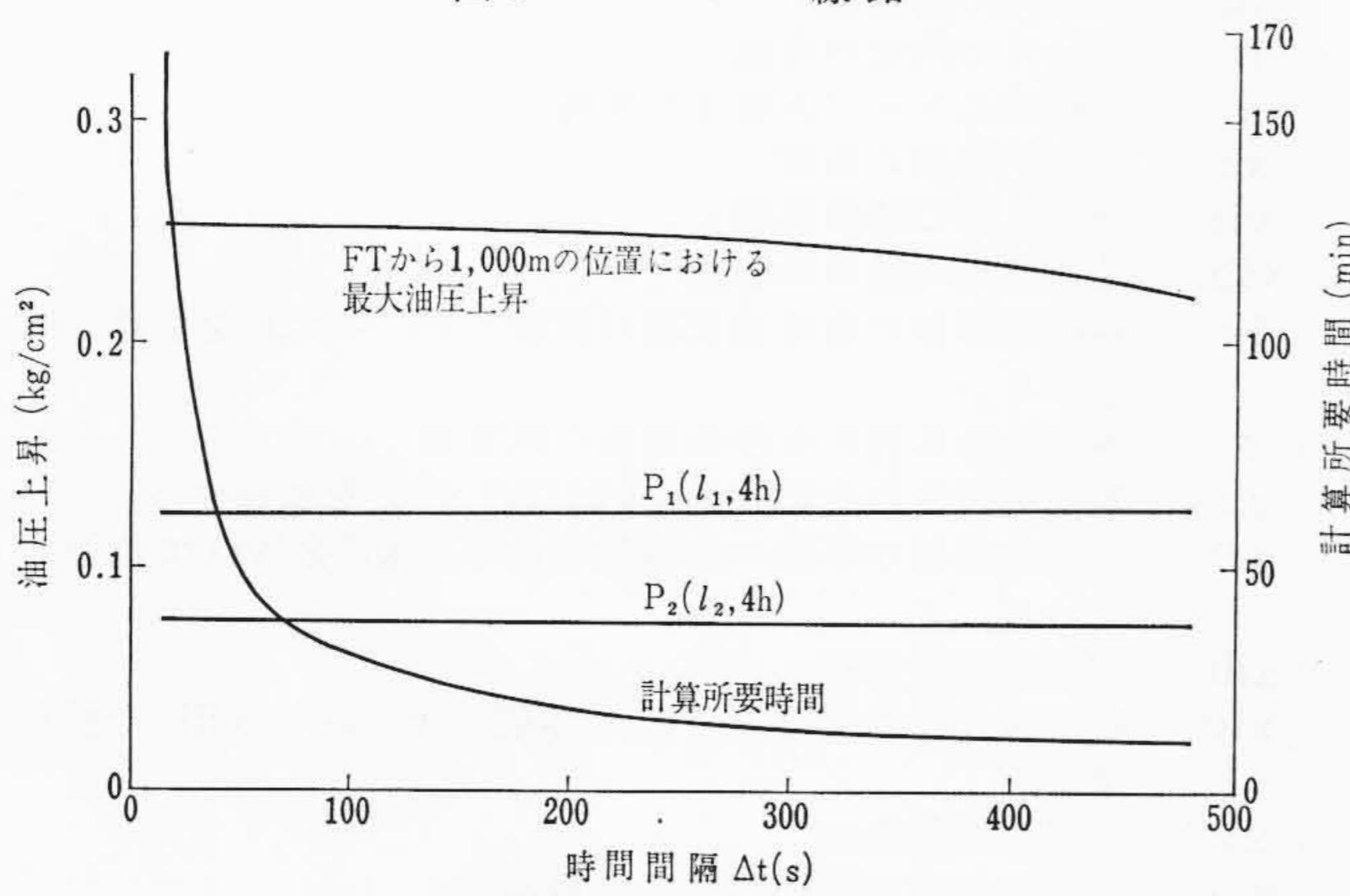


図 4  $Δt$  と計算精度、計算時間の関係

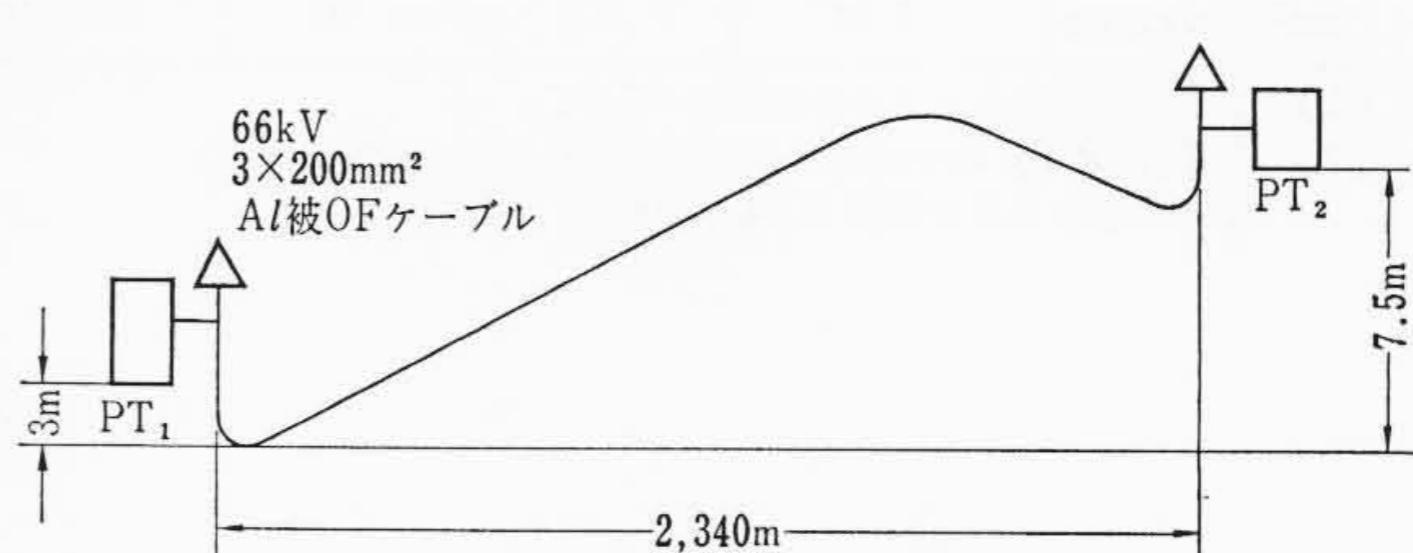


図 5 ケーブル線路

#### 4.1 PT-PT 給油の場合

表 2 のケーブルを図 5 のように布設した場合について実測値と計算値とを比較してみる。ケーブルの油流抵抗には別報<sup>(13)</sup>の表 4 の実測値を使用し、油の粘度特性に対しては付録 3 の方法により計算している。計算機に投入した諸数値をまとめて表 3 に示す。

ケーブル線路の両端における油圧上昇値と、線路の中央部分における油圧上昇値の計算結果を図 6 に示す。図には実測値を併記した。これからわかるように計算値は実測値によく一致している。

#### 4.2 FT-PT-PT 給油の場合

図 3 に示す線路に 77 kV 単心 600 mm<sup>2</sup> OF ケーブルを布設した場合<sup>(9)</sup>について実測値と計算値との比較を行なってみる。計算機に投入した諸数値をまとめて示したのが表 4 である。

計算値と実測値<sup>(9)</sup>とを比較して示すと図 7 および図 8 のようになる。これからわかるように筆者による計算値は実測値とよく一致している。

### 5. 結 言

従来適切な方法がなかった FT, PT 併用 OF ケーブル線路の給油計算に関する基本の微分方程式を導きオイルデマンドおよび PT の非直線性をすべて考慮に入れて計算する方法を確立した。

また油流抵抗値を定常流に対する粘性抵抗のみとすることの妥当性を検討し、3 心アルミ被ケーブルの場合のように粘性抵抗値が小さい場合でもこの仮定は正しいことを確かめた。

終わりに本研究に対しご教示いただいた九州大学動力機械工学科生井教授に深謝し、実測値を参照させていただいた廣瀬氏らにお礼申しあげる。

表 3 66 kV 3×200 mm<sup>2</sup> Al 被 OF ケーブルの投入データ

記号	単位	数値	記号	単位	数値
Q <sub>1</sub>	W/cm cable	74.77	V <sub>1</sub>	cm <sup>3</sup> /cm cable	12.98
Q <sub>2</sub>	W/cm cable	22.65	V <sub>2</sub>	cm <sup>3</sup> /cm cable	23.4
Q <sub>3</sub>	W/cm cable	66.9	D <sub>s</sub>	cm	7.63
r <sub>1</sub>	°C/W/cm cable	11.05	Δt	s	60
r <sub>2</sub>	°C/W/cm cable	11.05	P <sub>g1</sub>	g/cm <sup>2</sup>	2,730
r <sub>3</sub>	°C/W/cm cable	36.3	P <sub>g2</sub>	g/cm <sup>2</sup>	2,260
T <sub>a</sub>	°C/s	0	l	cm	2.34×10 <sup>5</sup>
W <sub>c</sub>	W/cm cable	0.375	T <sub>1K1</sub>	g/cm °K	17×10 <sup>8</sup>
ε	—	7.5×10 <sup>-4</sup>	T <sub>2K2</sub>	g/cm °K	16.8×10 <sup>8</sup>

注 (1) 負荷投入前のケーブル各部温度=15°C。

(2) PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub> のセル数は各 50 セル、温度は 25 および 22°C。

1 セル当たりのガス定数は 0.114×10<sup>6</sup>。

表 4 投入データ

記号	単位	数値	記号	単位	数値
Q <sub>1</sub>	W/cm cable	27.1	V <sub>2</sub>	cm <sup>3</sup> /cm cable	5.85
Q <sub>2</sub>	W/cm cable	22.37	D <sub>s</sub>	cm	5.04
Q <sub>3</sub>	W/cm cable	30.96	r <sub>0</sub>	cm	0.6
r <sub>1</sub>	°C/W/cm cable	16.6	Δt	s	60
r <sub>2</sub>	°C/W/cm cable	16.6	P <sub>g1</sub>	g/cm <sup>2</sup>	2,700
r <sub>3</sub>	°C/W/cm cable	57.4	P <sub>g2</sub>	g/cm <sup>2</sup>	1,944
T <sub>a</sub>	°C/s	0	l <sub>1</sub>	cm	1.9×10 <sup>5</sup>
W <sub>c</sub>	W/cm cable	0.122	l <sub>2</sub>	cm	3.86×10 <sup>5</sup>
ε	—	7.5×10 <sup>-4</sup>	T <sub>1K1</sub>	g/cm °K	2.54×10 <sup>8</sup>
V <sub>1</sub>	cm <sup>3</sup> /cm cable	3.34	T <sub>2K2</sub>	g/cm °K	3.8×10 <sup>8</sup>

注 (1) 負荷投入前のケーブル各部温度=7.5°C。

(2) PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub> のセル数は 20 および 30 セル。温度は 10°C。

1 セル当たりガス定数 0.045×10<sup>6</sup>

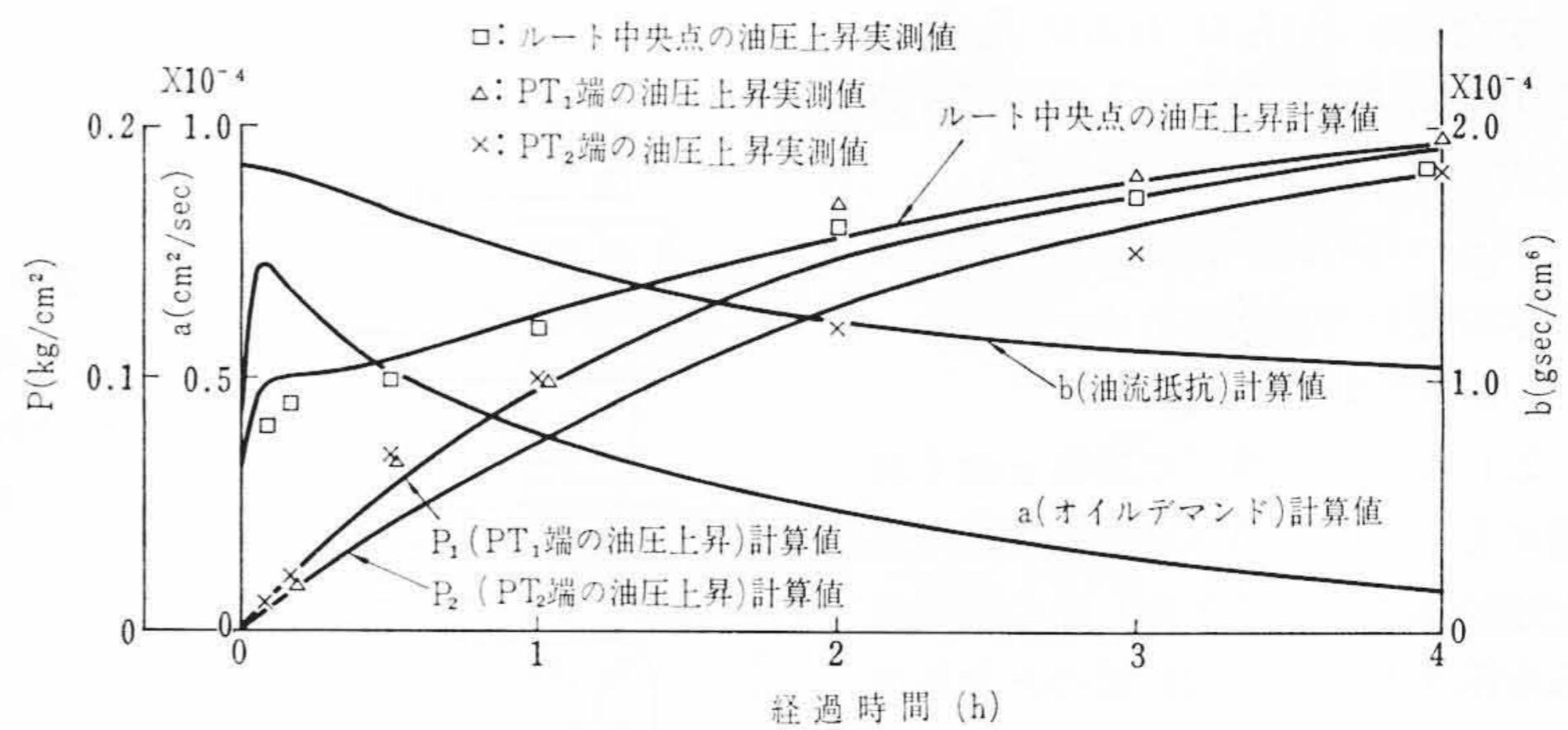


図 6 給油計算結果と実測値との比較

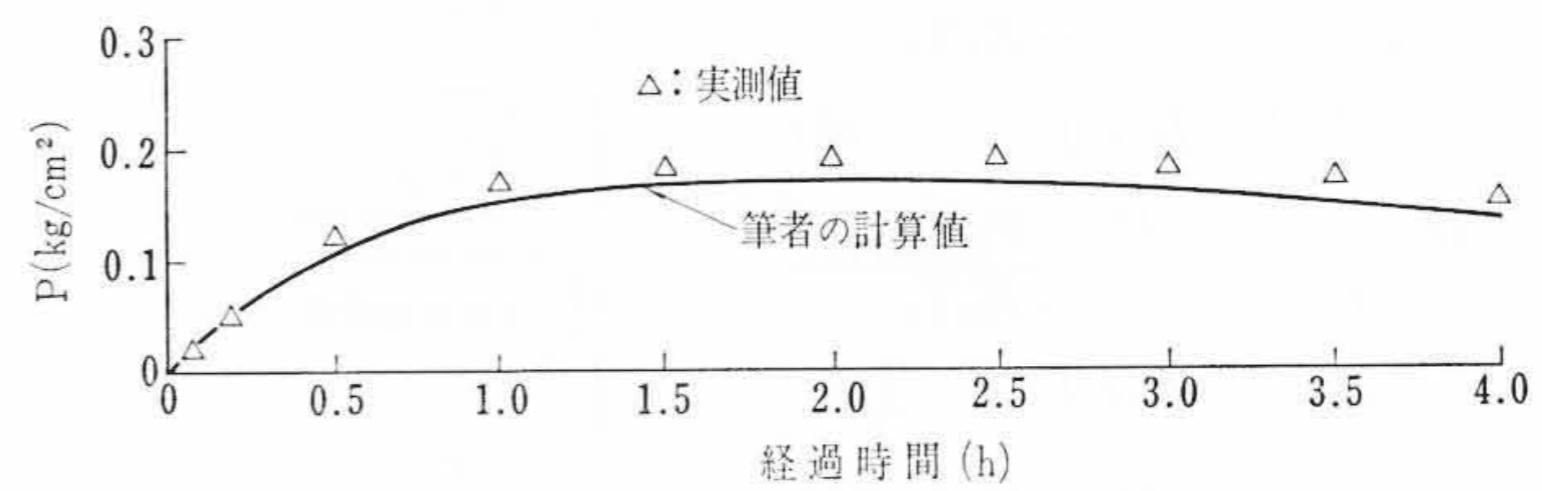


図 7 PT<sub>1</sub> の油圧変化

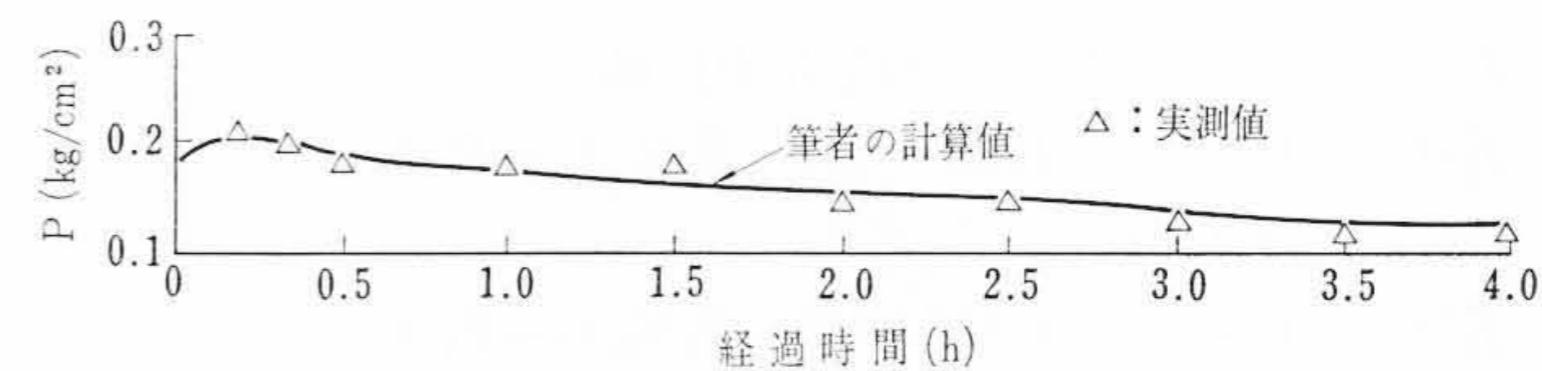


図 8 PT<sub>2</sub> から 1,300 m の位置における油圧変化

### 付 錄

#### 1. オイルデマンドおよび油流抵抗の計算

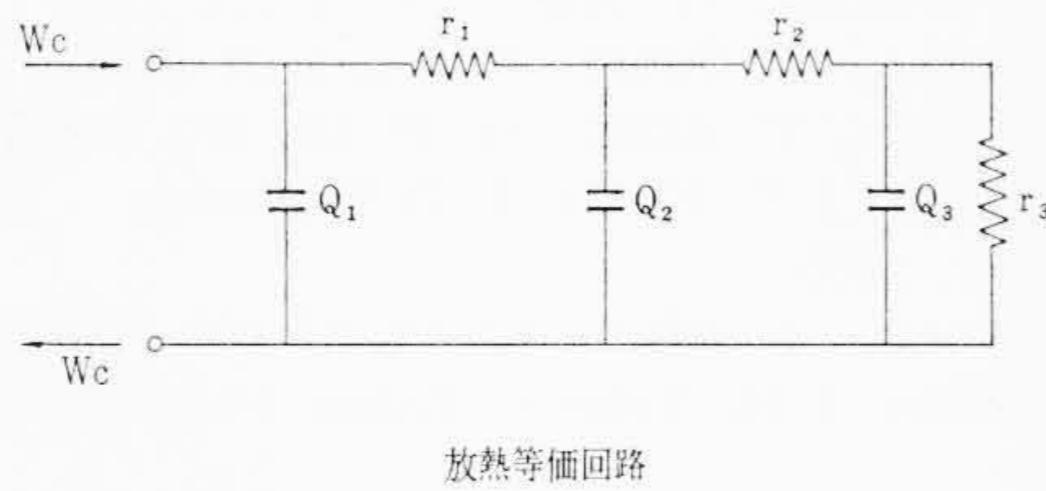
オイルデマンドおよび油流抵抗を計算するためには、まずケーブルの過渡温度上昇を求めなければならない。3 心ケーブルの場合は、これを Wollaston 氏の方法<sup>(8)</sup>によって等価单心ケーブルへ変換する。この手順は次のとおりである。

まず 3 心ケーブルとしての絶縁体の熱抵抗を求める。これと等しい熱抵抗値を与える等価单心ケーブルの導体径を計算する。この意味は定常状態に達したものの導体温度が、等価单心ケーブルと実際のケーブルとで合致するようにするためである。この場合シース内径には 3 心ケーブルのそれをとる。

3 心ケーブルの導体はすべて等価单心ケーブルの導体のなかにあるとし、これをもって満たされない部分は含浸油浸紙があるものとする。すなわち等価单心ケーブルの導体は銅と含浸油浸紙とによって構成されているとみなす。等価单心導体とシースとの間の部分は含浸油浸紙と油通路の流動油によって構成される。

以上の仮定によって次の順序により各熱定数を計算する。

- (i) 等価单心導体径
- (ii) ケーブル表面放熱抵抗
- (iii) シースの熱容量
- (iv) シースの内部の容積
- (v) 等価单心ケーブル導体の体積
- (vi) 等価絶縁体の体積
- (vii) 油通路内の油の体積
- (viii) 油通路内の油の熱容量
- (ix) 等価絶縁体の含浸油浸紙の体積 ((v)～(vii) を引算して求める。)
- (x) 等価絶縁体内の含浸油浸紙の熱容量
- (xi) 等価絶縁体の全熱容量 ((viii) と (x) とを加算する。)
- (xii) 等価絶縁体の平均の体積熱容量率 ((xi) を (vi) で割算する。)
- (xiii) 銅の実際の体積
- (xiv) 等価導体内の含浸油浸紙の体積 ((v) から (viii) を引算する。)
- (xv) 銅導体の熱容量
- (xvi) 等価導体内の含浸油浸紙の熱容量
- (xvii) 等価導体の全熱容量 ((xv) と (xvi) とを加算する。)



付図1 放熱等価回路

このようにして求めた(xvii)の等価導体の全熱容量、(xii)の等価絶縁体の平均の体積熱容量率を用いて、さらに Wormen 氏<sup>(5)</sup>の方法により  $\pi$  形等価回路に変換する。この方法は付図1の記号を用いて(付1)～(付7)式により与えられる。

$$Q_1 = Q_{cu} + Q_{oil} + \delta q_2 V_2' \quad \dots \quad (\text{付 } 1)$$

$$Q_2 = (1-\delta) q_2 V_2' + \delta q_2 V_2'' \quad \dots \quad (\text{付 } 2)$$

$$Q_3 = Q_{sh} + (1-\delta) q_2 V_2'' + Q_s \quad \dots \quad (\text{付 } 3)$$

$$V_2' = \pi(R_i r - r^2) \quad \dots \quad (\text{付 } 4)$$

$$V_2'' = \pi(R_i^2 - Rr) \quad \dots \quad (\text{付 } 5)$$

$$r_1 = r_2 = (1/2)R_i \quad \dots \quad (\text{付 } 6)$$

$$r_3 = R_i + R_r \quad \dots \quad (\text{付 } 7)$$

ただし、 $R_1$ : 縁絶体の熱抵抗 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}$ )

$R_2$ : 外装の熱抵抗 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}$ )

$R_3$ : 表面放散熱抵抗 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}$ )

$Q_{cu} + Q_{oil}$ : (xvii)で求めた等価導体の全熱容量 ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )

$q_2$ : (xii)で求めた等価絶縁体の平均の体積熱容量率 ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{cm}^3$ )

$$\delta = \frac{1}{2 \log \frac{R_i}{r}} - \frac{1}{\frac{R_i^2}{r^2} - 1}$$

$R_i$ : 等価絶縁体外半径 (cm)

$r$ : 等価導体外半径 (cm)

$Q_{sh}$ : シースの熱容量 ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )

$Q_s$ : 防食層の熱容量 ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )

このようにして求めた放熱等価回路の熱定数を付図1に併記した。放熱等価回路が定まれば、(付8)式によってケーブルのオイルデマンドを求めることができる。

$$a = \varepsilon_1 V_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} + \varepsilon_1 V_2 \frac{\partial T_i}{\partial t} + \varepsilon_1 V_3 \frac{\partial T_s}{\partial t} - 2\pi R_i^2 \varepsilon_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \dots \quad (\text{付 } 8)$$

ただし、 $\varepsilon_1$ : 油の熱膨張係数 ( $7.5 \times 10^{-4}$ )

$V_1$ : 導体内にある油の体積 ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ )

$V_2$ : 絶縁体内にある油の体積 ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ )

$V_3$ : 線心とシース間およびコルゲート内にある油の体積 ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ )

$\varepsilon_s$ : シースの膨張係数 ( $0.46 \times 10^{-4}$ )

$T_c, T_i$  および  $T_s$  は導体、絶縁体およびシースの温度変化分であって、(付9)式によって与えられる。

$$\begin{aligned} T_c &= \left\{ \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{n=1}^3 \frac{N(P_n)}{P_n M'(P_n)} \varepsilon^{p_n t} \right\} W_c + T_a \\ T_i &= \left\{ \frac{Q(0)}{M(0)} + \sum_{n=1}^3 \frac{Q(P_n)}{P_n M'(P_n)} \varepsilon^{p_n t} \right\} W_c + T_a \quad \dots \quad (\text{付 } 9) \\ T_s &= \left\{ \frac{r_3}{M(0)} + \sum_{n=1}^3 \frac{r_3}{P_n M'(P_n)} \varepsilon^{p_n t} \right\} W_c + T_a \end{aligned}$$

ただし、 $T_c$ : 導体 温度変化 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_i$ : 絶縁体の温度変化 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_s$ : シースの温度変化 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$ : 周囲 温度変化 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\begin{aligned} M(P) &= Q_1 Q_2 Q_3 r_1 r_2 r_3 P^3 + (Q_1 Q_2 r_1 r_2 + Q_1 Q_3 r_2 r_3 \\ &\quad + Q_1 Q_3 r_1 r_3 + Q_1 Q_2 r_1 r_3 + Q_2 Q_3 r_2 r_3) P^2 \\ &\quad + \{Q_1(r_1 + r_2 + r_3) + Q_2(r_2 + r_3) + Q_3 r_3\} P + 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N(P) &= Q_2 Q_3 r_1 r_2 r_3 P^2 + \{Q_3(r_2 r_2 + r_1 r_3) \\ &\quad + Q_2(r_1 r_2 + r_1 r_3)\} P + r_1 + r_2 + r_3 \end{aligned}$$

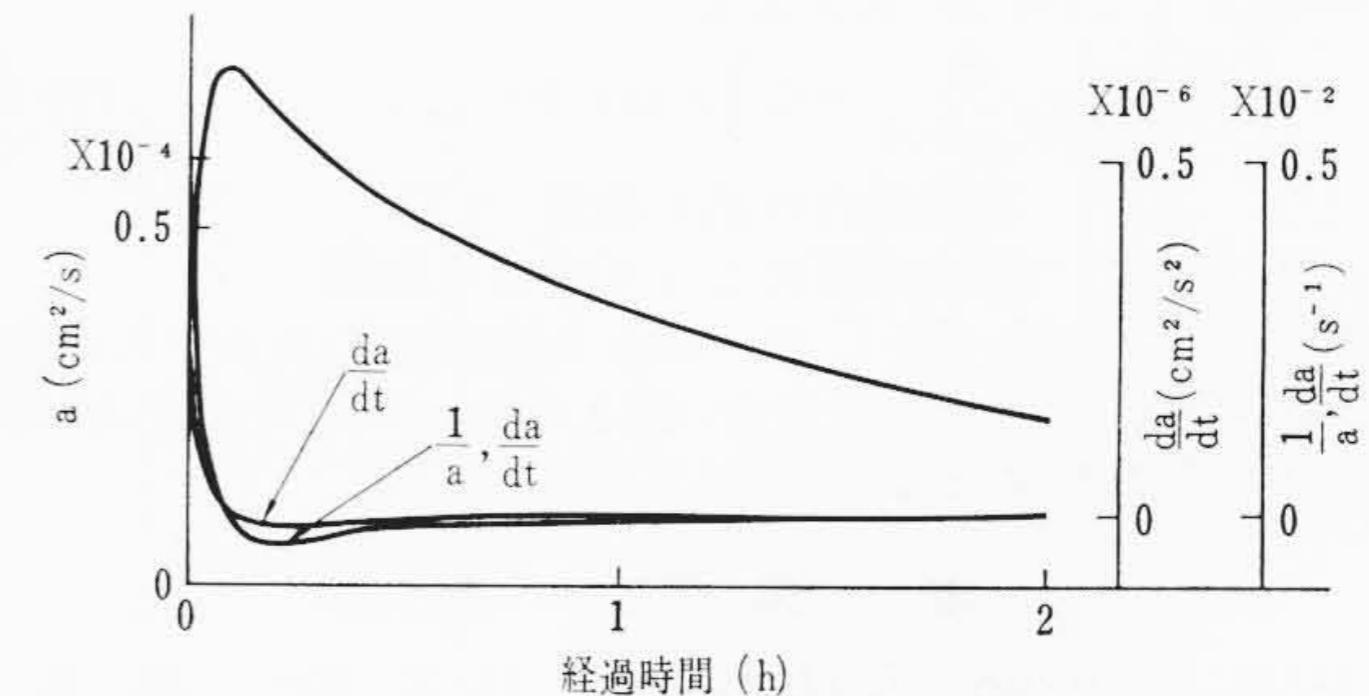
$$Q(P) = Q_3 r_2 r_3 P + r_2 + r_3$$

ただし、 $P_n$ :  $M(P)=0$  の根 ( $n=1, 2, 3$ )

$t$ : 経過時間 (s)

$W_c$ : ケーブル導体の発生熱量 ( $\text{W}/\text{cm}$ )

このようにして求めた  $a, da/dt$  などの一例として、66 kV 3×200 mm<sup>2</sup> アルミ被 OF ケーブルにおける値を示すと付図2のようになる。

付図2  $a, \frac{da}{dt}$  および  $\frac{1}{a} \frac{da}{dt}$ 

## 2. (10)～(13)式の誘導

まず(1), (2)式より、

$$P_1(x, t) = 0.5 \cdot a(t) b(t) x^2 - b(t) f_1(t) x + g_1(t)$$

であるが(9)式より  $g_1(t) \equiv 0$  であるゆえ(付13)式を得る。

$$P_1(x, t) = 0.5 \cdot a(t) b(t) x^2 - b(t) f_1(t) x \quad \dots \quad (\text{付 } 13)$$

次に(3), (4)式より(付14)式を得る。

$$P_2(x, t) = 0.5 \cdot a(t) b(t) x^2 - b(t) f_2(t) x + g_2(t) \quad \dots \quad (\text{付 } 14)$$

また(2), (4)および(7)式より(付15)式を得る。

$$-a(t) l_1 + f_2(t) = -a(t) l_1 + f_1(t) + dQ_1(t)/dt$$

$$\therefore f_2(t) = f_1(t) + \frac{dQ_1(t)}{dt} \quad \dots \quad (\text{付 } 15)$$

また(4)および(8)式より(付16)式を得る。

$$-a(t) l_2 + f_2(t) = -\frac{dQ_2(t)}{dt} \quad \dots \quad (\text{付 } 16)$$

次に PT の油圧油量特性はボイルシャールの法則に従うゆえ、 $PT_1$ について(付17)式が成り立つ。

$$\{P_{g1} + P_1(l_1, t)\} \{Q_0 + Q_1(t)\} = K_1 T_1 \quad \dots \quad (\text{付 } 17)$$

ここで  $Q_0$  は、排油量 0 の時のガス容積である。(付17)式を  $t$  で微分することにより、(付18)式を得る。

$$\frac{dP_1(l_1, t)}{dt} \{Q_0 + Q_1(t)\} + \{P_{g1} + P_1(l_1, t)\} \frac{dQ_1(t)}{dt} = 0$$

$$\therefore \frac{dQ_1(t)}{dt} = -\frac{Q_0 + Q_1(t)}{P_{g1} + P_1(l_1, t)} \frac{dP_1(l_1, t)}{dt} = -\frac{K_1 T_1}{\{P_{g1} + P_1(l_1, t)\}^2} \frac{dP_1(l_1, t)}{dt} \quad \dots \quad (\text{付 } 18)$$

同様にして(付19)式を得る。

$$\frac{dQ_2(t)}{dt} = -\frac{K_2 T_2}{\{P_{g2} + P_2(l_2, t)\}^2} \frac{dP_2(l_2, t)}{dt} \quad \dots \quad (\text{付 } 19)$$

(付15), (付16), (付18)および(付19)式より(付20)および(付21)式を得る。

$$\frac{dP_1(l_1, t)}{dt} = \frac{\{P_{g1} + P_1(l_1, t)\}^2}{K_1 T_1} \{-f_2(t) + f_1(t)\} \quad \dots \quad (\text{付 } 20)$$

$$\frac{dP_2(l_2, t)}{dt} = \frac{\{P_{g2} + P_2(l_2, t)\}^2}{K_2 T_2} \{-a(t) l_2 + f_2(t)\} \quad \dots \quad (\text{付 } 21)$$

これらが、すなわち(10)および(11)式である。

次に(12), (13)式を求める。

(付13)式より(付22)式を得る。

$$P_1(l_1, t) = 0.5 \cdot a(t) b(t) l_1^2 - b(t) f_1(t) l_1$$

$$\therefore f_1(t) = \{0.5 \cdot a(t) b(t) l_1^2 - P_1(l_1, t)\} / b(t) l_1 \quad \dots \quad (\text{付 } 22)$$

これが、(12)式である。

次に(付22), (付14)および(6)式より(付23)および(付24)式を得る。

$$P_2(l_2, t) = 0.5 \cdot a(t) b(t) l_2^2 + f_2(t) \{b(t)$$

$$\times l_1 - b(t) l_2\} - b(t) l_1 f_1(t) \quad \dots \quad (\text{付 } 23)$$

$$g_2(t) = b(t) l_1 \{f_2(t) - f_1(t)\} \quad \dots \quad (\text{付 } 24)$$

(付23)および(付24)式より(付25)式を得る。

$$f_2(t) = \frac{P_2(l_2, t) - P_1(l_1, t) + 0.5 a(t) b(t) (l_1^2 - l_2^2)}{b(t) (l_1 - l_2)} \quad \dots \quad (\text{付 } 25)$$

(付25)式が(17)式である。

また(付24)式は、ケーブルの長さ方向圧力分布を求めるために必要となる関数である。

## 3. 油の粘度温度特性

円形油通路の  $b(t)$  を求めるためには(付26)式による。

$$b(t) = \frac{0.815 \eta}{\pi r_0^4} \times 10^{-4} \quad \dots \quad (\text{付 } 26)$$

ただし、 $r_0$ : 油通路内半径 (cm)

$\eta$ : 油の粘度 (cp)

さて(付26)式における  $\eta$  が温度の関数となるが、粘度と温度の実

験式の一例として(付 27)式がある。

$$\eta = \text{Exp} \left( \frac{B}{T_{\text{oil}} + A} - C \right) \times \log_{10} 10 \quad \dots \dots \dots \text{(付 27)}$$

ただし,  $T_{\text{oil}}$ : 油通路内の油の温度 (°C)

$A, B, C$ : 油の種類によって定まる定数

(付 27)式の定数  $A, B, C$  は、たとえば表 2 のケーブルの油では  $A=97, B=285, C=1.037$  であり、図 3 のケーブルの油では  $A=97, B=285, C=1.39$  程度となる。

### 参考文献

- (1) G. B. Shanklin, F. H. Buller: G. E. Rev. 34, 9, 1523 (Sep. 1931)
- (2) K. W. Miller, F. O. Wollaston: T. AIEE 52, 98 (Mar. 1933)

- (3) F. O. Wollaston: T. AIEE 68, Pt. II, 1284 (1949)
- (4) F. H. Buller: T. AIEE 70, Pt. I, 45 (1951)
- (5) V. Wormen: T. AIEE 74, Pt. III, 277 (1955)
- (6) F. H. Buller, J. H. Neher, F. O. Wollaston: T. AIEE 75, 180 (Apr. 1956)
- (7) J. H. Neher: T. AIEE 83, Pt. III 102 (1964)
- (8) F. H. Buller, J. H. Neher: Trans. Paper: 31. TP 65-68 (1968)
- (9) 広瀬ほか: 電学誌 84-7, 910, 105 (1964)
- (10) A. Morello の(6)に対する討論
- (11) 今井: 電東支会 No. 265 (昭 40)
- (12) 岡本: 流体力学 誠文堂新光社 (昭 37)
- (13) 今井: 電学誌 85-5, 920, 100 (1965)

Vol. 29

日立造船技報

No. 1

### 目次

#### ■論文

- LPG および LMG タンクとその支持構造の強度計算法
- スライディングリフターの開発
- チェーン振動の理論的検討
- 片面自動溶接 (RF-1方式) の実用化 (第 1 報)
- 大形うず巻噴射弁の微粒化特性
- 耐風安定性に関する研究
- 既設水圧鉄管の破壊実験

- Al-Zn-Mg 合金溶接部の加工と強さ (第 1 報)
- 一時効硬化性と溶接性
- 鍛鋼品の超音波特性に及ぼす二、三の影響
- 一再加熱とサルファーバンドの影響

#### ■資料

- 人を中心とした生産性チェック・リストについて (その 1)
- チェック・リストと品質・工程管理の問題点の取上げ方—

……本誌に関する照会は下記に願います……

日立造船株式会社技術研究所  
大阪市此花区桜島北之町 60

第 30 卷

日立

第 6 号

### 目次

- 随想……………榎原 仁
- よみがえる都市……………都市
- 霞ヶ関ビル……………星新一・真鍋博
- 未来都市の象徴—祝完成「霞ヶ関超高層ビル」
- 土と構造物の関係を究める一大形振動台—
- 伊勢湾頭の湯けむり—執念が掘りあてた長島温泉—

- 天竜の水を伊良湖へ—豊川用水に活躍する日立ポンプ—
- 話のロビー / 個性ある都市づくりを
- 万博シリーズ / <第 5 回> テーマ展示
- COLOR SPOT / 情報の倉庫
- High Light / ポリビア向輸出車両
- サイエンス・ジャーナル—

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内 1 丁目 4 番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京 71824 番

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地

振替口座 東京 20018 番