

OF ケーブルの給油計算基礎に関する考察

Studies on the Fundamentals of Oil-feed Calculation of Oil Filled Cables

今 井 敏 雄
Toshio Imai

要 旨

OF ケーブルの給油計算のなかで重要となる油流抵抗について、Navier-Stokes の運動方程式に立脚して検討した。ケーブルのオイルデマンドは時間とともに変化するため、油流は定常流ではない。従来の考え方は油流を定常流と見なして、Navier-Stokes の式のなかの慣性項を無視し、粘性項のみによる抵抗を考えていた。筆者は、慣性項の大きさと粘性項の大きさを非定常流に対して比較し、OF ケーブルのオイルデマンド程度の油流変化に対しては、慣性項は無視できることを示した。

また3心アルミ被OF ケーブルの線路における油圧変化の実測結果と計算値とを比較し、粘性項のみとした油流抵抗値を用いた計算値はよく実測値と一致することを示した。

1. 緒 言

OF ケーブルの過渡油圧変化に関する研究は古くから多くの研究者によって行なわれているが、油流抵抗についてはいずれも油流を定常流と見なして粘性項の影響のみを考慮している。しかしOF ケーブルのオイルデマンドは指数関数的に変化する非定常流であるから、厳密な意味で考えると Navier-Stokes の運動方程式に立ちかえて慣性項あるいは反作用項の影響がどの程度のものか、検討しておく必要がある。

そこで筆者は例として 66 kV 3×200 mm² アルミ被 OF ケーブルをとりあげ、Navier-Stokes の運動方程式における慣性項および反作用項と、粘性項との大きさの比較を行なった。この結果慣性項および反作用項は粘性項に比して無視できることがわかった。

つぎに、OF ケーブルの給油計算例として上記ケーブルの線路における過渡油圧計算結果と実測結果との比較を行ない、筆者の考案した計算方法による計算値は実測値とよく適合したので、それらについて述べる。

2. 油流抵抗に関する検討

2.1 基 本 式

図1に示すケーブル線路において、ケーブルに急激に負荷電流が流れた場合、ケーブル内の絶縁油は膨張して給油槽に戻る。

いま、 x 点における油圧を $P(\text{dyne/cm}^2)$

x 点における油流量を $I(\text{cm}^3/\text{s})$

x 点における断面平均流速を $w(\text{cm/s})$

ケーブルの油通路断面積を $A(\text{cm}^2)$

($w=I/A$ が成り立つ)

油の密度を $\rho(\text{g/cm}^3)$

ケーブルのオイルデマンドを $a(\text{cm}^2/\text{s})$

とすれば、Navier-Stokes の運動方程式⁽¹⁾によって、(1)式が成り立つ。ただし粘性項は流速に比例するとし、比例定数を R とする。

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + R \cdot w \quad \dots\dots\dots (1)$$

この式において $I=a(l-x)$ であるから、(2)～(4) が成り立つ。

$$w = (a/A)(l-x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{l-x}{A} \frac{da}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = - \frac{a}{A} \quad \dots\dots\dots (4)$$

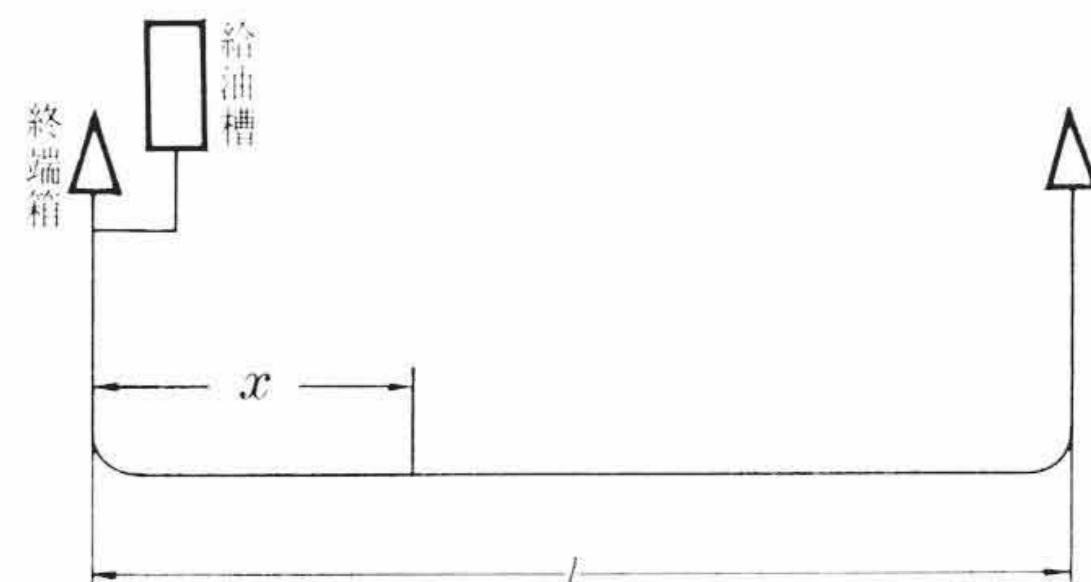


図1 ケーブル線路

したがって(5)式が得られる。

$$\rho \left\{ \frac{l-x}{A} \frac{da}{dt} + \frac{a}{A} (l-x) \left(- \frac{a}{A} \right) \right\} = - \frac{\partial P}{\partial x} + R \cdot \frac{a}{A} (l-x) \quad \dots\dots\dots (5)$$

書き直して(6)および(7)を得る。

$$\frac{\partial P}{\partial x} = (l-x) \left\{ - R \cdot \frac{a}{A} - \frac{\rho}{A} \frac{da}{dt} + \frac{a^2}{A^2} \rho \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P = \left(lx - \frac{1}{2} x^2 \right) \cdot a \cdot \left\{ - \frac{R}{A} + \frac{a}{A^2} \rho - \frac{\rho}{A} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{da}{dt} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(7)式において、

$$b' = - \frac{R}{A} + \frac{a}{A^2} \rho - \frac{\rho}{A} \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と置けば、 b' は等価油流抵抗である。(8)式の右辺の第1項は定常流に対する油流抵抗値であり、第2項が反作用項、第3項が慣性項である。そこでこれらをそれぞれ b , b'' , b''' と置く。すなわち

$$\left. \begin{aligned} b &= - \frac{R}{A} \\ b'' &= \frac{a}{A^2} \rho \\ b''' &= - \frac{\rho}{A} \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式の b , b'' および b''' がどのような値となるかについて検討するためには、 a を求めなければならない。このため最も粘性項の影響が小さくなると考えられる3心アルミ被OF ケーブルについて数値的に検討してみる。

2.2 数 値 的 検 討

検討の対象とするケーブルの構造を表1に示す。このケーブルの熱抵抗および熱容量の計算結果を表に併記した。この数値を用いて

* 日立電線株式会社日高工場

表1 66 kV 3×200 mm² アルミ被OFケーブル構造

項 目	単 位	数 値	項 目	単 位	数 値
導体公称断面積	mm ²	200	シース山外径	mm	88.3
線心外径	mm	31.5	ポリエチレン厚さ	mm	3.8
シース谷内径	mm	69.1	絶縁体の熱抵抗	℃/W/cm	22.1
シース山内径	mm	83.5	防食層の熱抵抗	℃/W/cm	5.6
シース厚さ	mm	2.4	表面放散熱抵抗	℃/W/cm	30.7

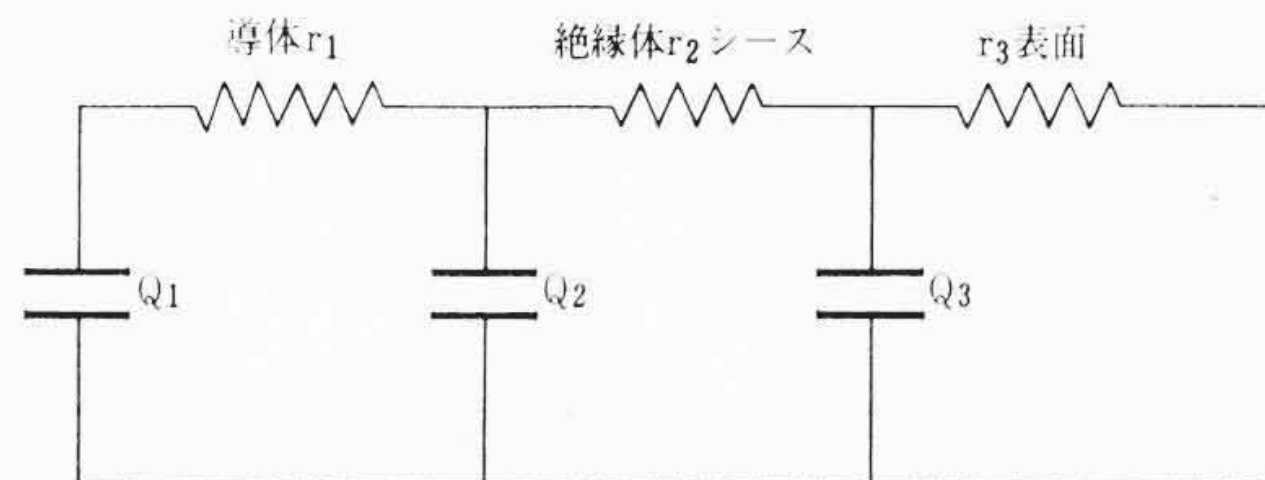


図2 放熱等価回路

Wollaston 氏の方法⁽²⁾によって等価単心ケーブルに変換する。この具体的手順はつぎのとおりである。

まず3心ケーブルとしての絶縁体の熱抵抗を求める。この値を R_1 とする。つぎに R_1 と等しい熱抵抗値を与える等価単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のちの温度が、等価単心ケーブルと実際の3心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としては3心ケーブルのそれをとる。

つぎに、導体はすべて等価単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。すなわち等価単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。等価単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とによって構成される。

以上の仮定によってつぎの順序により各熱定数を計算する。

- (i) 等価単心導体径
- (ii) ケーブル表面放熱抵抗
- (iii) シースの熱容量
- (iv) シース内部の容積
- (v) 等価単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) 等価絶縁体内の含浸油浸紙の体積 ((vi) から (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) とを加える)
- (xii) 等価絶縁体の平均の体積熱容量率 ((xi) を (vi) で割る)
- (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 (xiii) を引く)
- (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) とを加える)

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容量率を用い、さらに Wormer 氏⁽³⁾の方法により π 形等価回路に変換する。この方法は図2の記号を用いて (10) ~ (16) 式により与えられる。

$$Q_1 = Q_{cu} + Q_{oil} + \delta q_2 V_2' \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$Q_2 = (1 - \delta) q_2 V_2' + \delta q_2 V_2'' \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_3 = Q_{sh} + (1 - \delta) q_2 V_2'' + Q_s \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$V_2' = \pi (R_i r - r^2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$V_2'' = \pi (R_i^2 - R r) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$r_1 = r_2 = (1/2) R_1 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$r_3 = R_0 + R_3 \quad \dots\dots\dots (16)$$

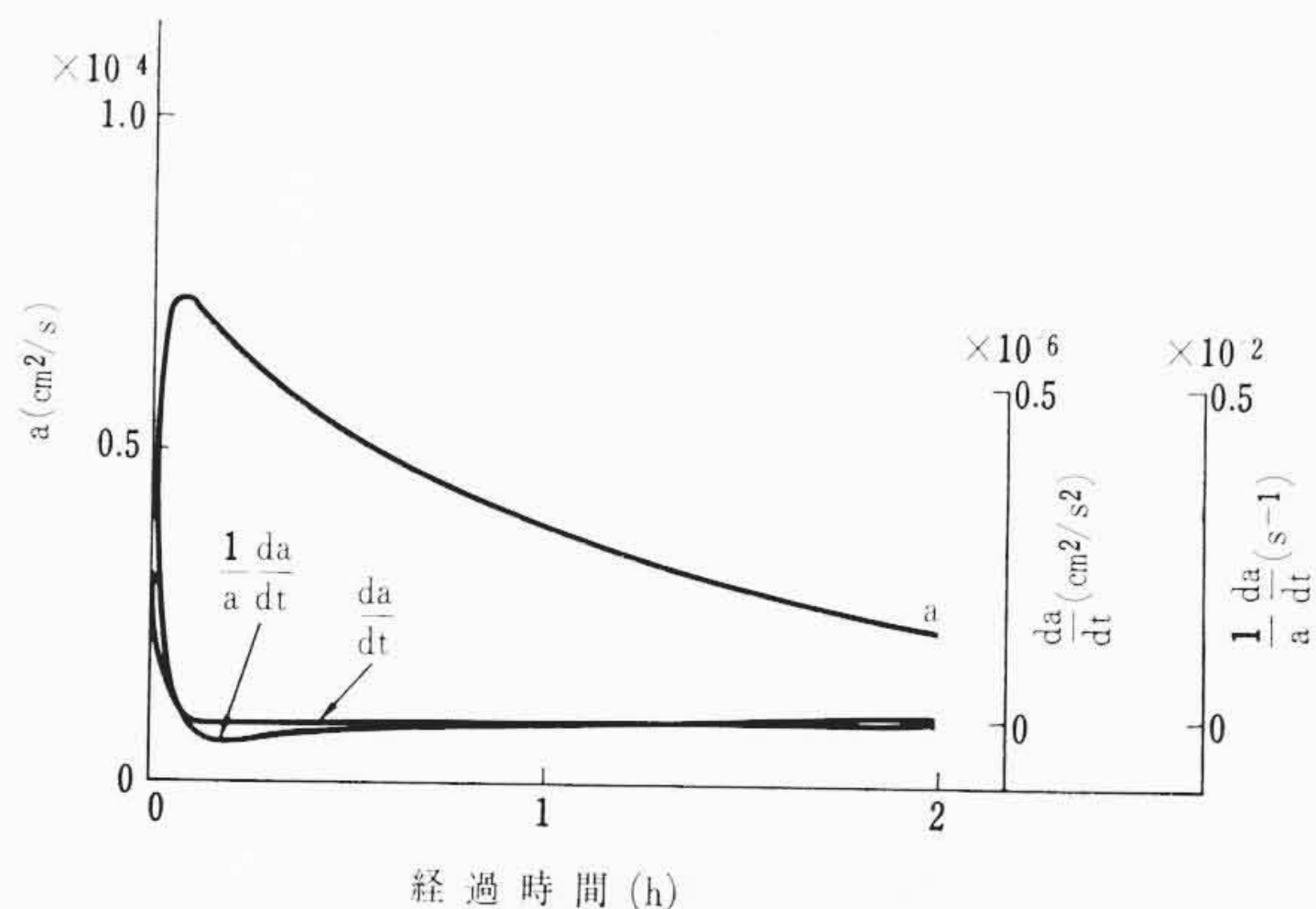
ただし、 R_1 : 絶縁体の熱抵抗 (℃/W/cm)

R_2 : 外装の熱抵抗 (℃/W/cm)

R_3 : 表面放散熱抵抗 (℃/W/cm)

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

q_2 : (xii) で求めた等価絶縁体の平均の体積熱容量率 (J/℃/cm)

図3 a 、 $\frac{da}{dt}$ および $\frac{1}{a} \frac{da}{dt}$ の計算値

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

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 (J/℃/cm)

Q_s : 防食層の熱容量 (J/℃/cm)

このようにして求めた放熱等価回路の熱定数を図2に併記した。放熱等価回路が定まれば次の各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。

$$a = \varepsilon_1 V_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} + \varepsilon_1 V_2 \frac{\partial T_i}{\partial t} + \varepsilon_1 V_3 \frac{\partial T_s}{\partial t} - 2\pi R_i^2 \varepsilon_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \dots (17)$$

ただし、 ε_1 : 油の熱膨張係数 (7.5×10^{-4})

V_1 : 導体内にある油の体積 (cm³/cm)

V_2 : 絶縁体内にある油の体積 (cm³/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 (cm³/cm)

ε_s : シースの膨張係数 (0.46×10^{-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、(18) 式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_c &= \left\{ \frac{N(o)}{M(o)} + \sum_{n=1}^3 \frac{N(p_n)}{p_n M'(p_n)} \varepsilon p_n t \right\} W_c + T_a \\ T_i &= \left\{ \frac{Q(o)}{M(o)} + \sum_{n=1}^3 \frac{Q(p_n)}{p_n M'(p_n)} \varepsilon p_n t \right\} W_c + T_a \\ T_s &= \left\{ \frac{r_3}{M(o)} + \sum_{n=1}^3 \frac{r_3}{p_n M'(p_n)} \varepsilon p_n t \right\} W_c + T_a \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

ただし、 T_c : 導体の温度変化 (℃)

T_i : 絶縁体の温度変化 (℃)

T_s : シースの温度変化 (℃)

T_a : 周囲温度変化 (℃)

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

$$N(p)=Q_2Q_3r_1r_2r_3p^2+\{Q_3(r_2r_3+r_1r_3)+Q_2(r_1r_2+r_1r_3)\}p+r_1+r_2+r_3$$

$$Q(p)=Q_3r_2r_3p+r_2+r_3$$

ここに、 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 (W/cm)

(通電電流 350 A の場合 0.375)

このようにして求めた a , da/dt など示したのが、図3である。
図からわかるとおり da/dt および $(1/a)(da/dt)$ とも $t=0$ のときに最も大きく、時間の経過とともに減少するので、粘性項、慣性項および反作用項の大きさを比較する場合、 $t=0$ について行なうことにする。

つぎに油通路の断面積としては等価円形油通路の断面積をとることにすれば

$$A \div 11.6 \text{ (cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (19)$$

となる。

また油の密度は

$$\rho=0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (20)$$

である。

以上の数値を用いて b'' および b''' を計算するとつぎのようになる。

$$b''=\frac{a}{A^2}\rho=\frac{0.488\times10^{-4}\times0.9}{11.6^2}=0.326\times10^{-6} \text{ (dyne/s/cm}^6\text{)} \dots\dots\dots (21)$$

$$b'''=\frac{d}{A}\cdot\frac{1}{a}\cdot\frac{da}{dt}=\frac{0.9}{11.6}\times\frac{1}{0.4888\times10^{-4}}\times0.445\times10^{-2}=0.0706\times10^{-2} \text{ (dyne s/cm}^6\text{)} \dots\dots\dots (22)$$

つぎに粘性項 b については既報⁽⁴⁾ のとおり 20℃ における実測値は (23) 式によって与えられる。

$$b=1.41\times10^{-4} \text{ (gw s/cm}^6\text{)}=0.0138 \text{ (dyne s/cm}^6\text{)} \dots\dots (23)$$

ただし gw は「グラム重」を示す。

(21), (22) および (23) 式を比較してわかるとおり、粘性項に比して慣性項および反作用項ともはるかに小さく、OF ケーブルの給油計算に用いる油流抵抗としては粘性項のみを考えればよいことがわかる。

3. 油圧変化に対する検討

2. にて述べたとおり、油流抵抗としては粘性項のみを考慮の対象とすればよいことがわかったが、実際の線路において過渡油圧変化の実測値と計算値とを比較してみる必要がある。

3.1 対象線路

ケーブルは上述した 66 kV 3×200 mm² アルミ被 OF ケーブルであって、線路は管路布設で長さ 2,340 m、両端外圧形圧力油槽給油方式である。

3.2 過渡油圧変化計算方式

重力油槽、圧力油槽併用の線路における一般的給油計算方法については筆者の考案した方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾ が有効であるが、まったく同様な考え方によって両端圧力油槽の場合に拡張することができる。

図4に示すケーブル線路を考える。記号を表2に示すとおりとする。

線路で成り立つ基本式は (24) 式でありこれを書き直して (24') 式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \partial P(x,t)/\partial x &= -b(t)I(x,t) \\ \partial I(x,t)/\partial x &= -a(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$\left. \begin{aligned} I(x,t) &= -a(t)x+f(t) \\ P(x,t) &= 0.5a(t)b(t)x^2-b(t)f(t)x+g(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24')$$

初期条件は

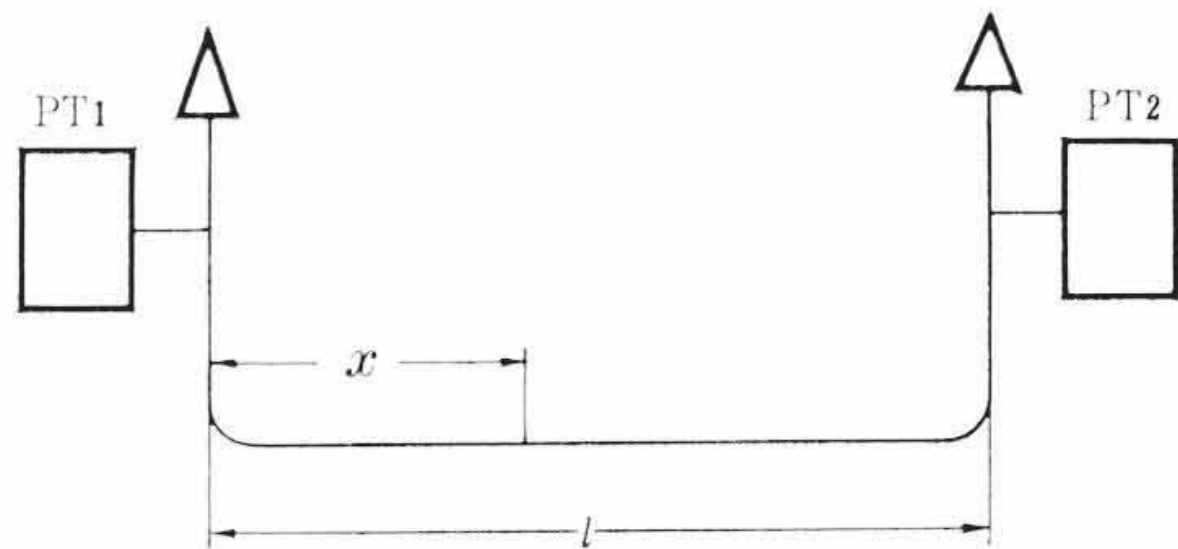


図4 両端圧力油槽給油

表2 記 号

記 号	単 位	意 味	符 号
$P(x, t)$	g/cm ²	x 位置, t 時刻における油圧変化	上昇を正
$I(x, t)$	cm ³ /s	x 位置, t 時刻における油流量	$PT_1 \rightarrow PT_2$ を正
$a(t)$	cm ³ /s/cm cable	t 時刻におけるオイルデマンド	負荷遮断時を正
$b(t)$	g s/cm ⁵ /cm cable	t 時刻における油流抵抗	常に正
x	cm	PT_1 からの距離	常に正
t	s	時 刻	常に正
$Q_1(t)$	cm ³ /s	PT_1 からの排油量	排出を正
$Q_2(t)$	cm ³ /s	PT_2 からの排油量	排出を正
T_1	°K	PT_1 の温度	常に正
T_2	°K	PT_2 の温度	常に正
K_1	g/cm °K	PT_1 のガス定数	常に正
K_2	g/cm °K	PT_2 のガス定数	常に正
PG_1	g/cm ²	PT_1 の常時油圧(絶対圧)	常に正
PG_2	g/cm ²	PT_2 の常時油圧(絶対圧)	常に正
$f(t)$	cm ² /s/cm cable	油圧を計算するための関数	—
$g(t)$	g/cm ²	油圧を計算するための関数	—

$$P(x, 0)=0 \dots\dots\dots (25)$$

境界条件は

$$\left. \begin{aligned} I(0, t) &= dQ_1(t)/dt \\ I(l, t) &= -dQ_2(t)/dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

$$\therefore \left. \begin{aligned} f(t) &= dQ_1(t)/dt \\ -a(t)l+f(t) &= -dQ_2(t)/dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

一方圧力油槽の特性より

$$\left. \begin{aligned} \{PG_1+P(0, t)\} \{Q_{10}+Q_1(t)\} &= K_1 T_1 \\ \{PG_2+P(l, t)\} \{Q_{20}+Q_2(t)\} &= K_2 T_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

(28) 式の両辺を微分することにより (29) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP(0, t)}{dt} \{Q_{10}+Q_1(t)\} + \{PG_1+P(0, t)\} \frac{dQ_1(t)}{dt} &= 0 \\ \frac{dP(l, t)}{dt} \{Q_{20}+Q_2(t)\} + \{PG_2+P(l, t)\} \frac{dQ_2(t)}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (29)$$

(27), (29) より (30) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP(0, t)}{dt} &= -f(t) \frac{\{PG_1+P(0, t)\}^2}{K_1 T_1} \\ \frac{dP(l, t)}{dt} &= \{-a(t)l+f(t)\} \frac{\{PG_2+P(l, t)\}^2}{K_2 T_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

(24'), (26) および (27) より (31) 式を得る。

$$\left. \begin{aligned} g(t) &= P(0, t) \\ f(t) &= \{0.5a(t)b(t)l^2+P(0, t)-P(l, t)\} / \{b(t)l\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

したがって解くべき微分方程式として (32) 式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP(0, t)}{dt} &= -\frac{0.5a(t)b(t)l^2+P(0, t)-P(l, t)}{b(t)l} \cdot \frac{\{PG_1+P(0, t)\}^2}{K_1 T_1} \\ \frac{dP(l, t)}{dt} &= \left\{ -a(t)l + \frac{0.5a(t)b(t)l^2+P(0, t)-P(l, t)}{b(t)l} \right\} \\ &\quad \times \frac{\{PG_2+P(l, t)\}^2}{K_2 T_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

この連立微分方程式は Runge-Kutta 法により解くことができる。
計算には電子計算機を用いた。計算の詳細については別報⁽⁵⁾を参

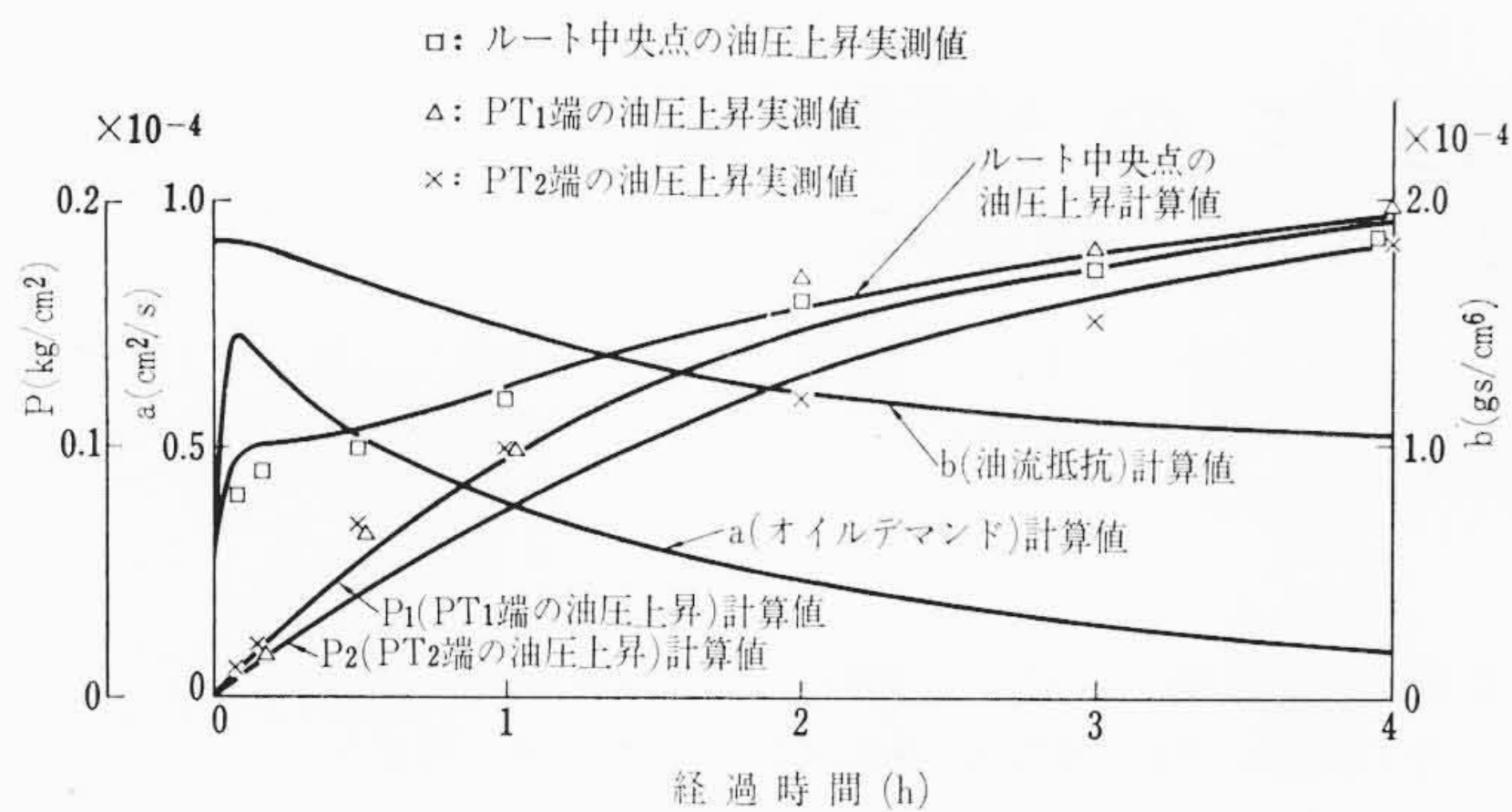


図5 油圧変化計算結果と実測値との比較

照されたい。

計算機に投入した諸数値をまとめて示したのが表3である。なお油流抵抗としては別報の表4の実測値を使用し、油の粘度特性としては別報⁽⁵⁾の方法により計算している。

3.3 計算結果と実測値との比較

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5に示す。図には実測値を併記した。

これからわかるとおり、計算値は実測値によく一致している。したがって油流抵抗を粘性項のみと見なして過渡油圧変化を計算する方法は実用上有効であるといえる。

表3 投入データ

記号	単位	数値	記号	単位	数値
Q_1	Joule/°C/cm	74.77	V_1	cm ³ /cm	12.98
Q_2	Joule/°C/cm	22.65	V_2	cm ³ /cm	2.34
Q_3	Joule/°C/cm	66.9	D_s	cm	7.63
r_1	°C/W/cm	11.05	Δt	s	60
r_2	°C/W/cm	11.05	PG_1	g/cm ²	2730
r_3	°C/W/cm	36.3	PG_2	g/cm ²	2260
T_a	°C/s	0	l	cm	23.4×10^5
W_c	W/cm	0.375	TK_1	g cm · °K	17×10^8
ε_1	—	7.5×10^{-4}	TK_2	g cm · °K	16.8×10^8

注：(1) 負荷投入前のケーブル各部温度：15°C
(2) PT_1 , PT_2 のセル数は各 50 セル、温度は 25 および 22°C、また 1 セル当たりのガス定数は 0.114×10^6 。

4. 結 言

OF ケーブルの給油計算に必要な油流抵抗値としては、粘性項のみ考慮すればよい。この条件を用い筆者の方法で計算した過渡油圧変化の計算値は、実測値によく一致する。

終わりに本研究に対し懇切なご指導、ご助言をいただいた九州大学生井武文教授に対し深く感謝し、またご討論いただいた日立製作所日立研究所栗須博士、片岡氏にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 岡本：流体力学，誠文堂新光社（昭37）
- (2) F. O. Wallaston：T. AIEE, 68, pt II, 1284（1949）
- (3) V. Wormer：T. AIEE, 74, pt III, 277（1955）
- (4) 今井：電学誌, 85-5, No. 920, 100（1965）
- (5) T. Imai：IEEE 1967 Winter Power Meeting, 31 pp. 67-170
- (6) 今井：電東京支大 No. 265（昭40）

Vol. 27

日立造船技報

No. 4

目 次

- ・高級耐塩酸合金「HZ合金CL」の鋳物
- ・発熱自硬性鋳型の開発
- ・両矢羽根木外板の強さ
- ・タンクマウント形うず巻式潤滑油ポンプ
- ・進水時尾道水道対岸付近の潮位変化

- ・平歯車負荷能力についての検討
- ・粉粒体輸送用円筒および円すいスクリーン軸のつくりあい重量
- ・電子計算機による連続トラスの設計

……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