

# 管路布設ケーブルの強制水冷

Forced Cooling by Water of the Duct Installed Power Cable

沼 尻 文 哉\* 加 藤 勇 次 郎\*  
Fumiya Numajiri Yûjirô Katô

## 内 容 梗 概

管路布設電力ケーブルの間接水冷方式において、1管通水、2管同方向通水および2管循環通水の3種の通水方式を取り上げ、それらの間の優劣を比較検討した。140 kV 1×1,500 mm<sup>2</sup> OF ケーブルによって500 MW を送電する場合を例にとって解析した結果では、循環通水方式が最も有用な通水方式であると結論される。

また、土壌固有熱抵抗が異なる部分を有する場合の間接水冷の所要流量の変化も検討し、設計上の問題点を指摘した。すなわち、冷却の効果は冷却区間終端付近の土壌固有熱抵抗に大きく依存することが明らかである。

## 1. 緒 言

前報<sup>(1)</sup>において、筆者の一人はケーブル管路近傍の土壤中に埋設された一条の冷却水管によって管路布設ケーブルを強制冷却する間接冷却方式の理論を確立し、この理論式の妥当性を実験的に確認した。また、関西電力株式会社堺港火力発電所の出力500 MVAを140 kV 1×1,500 mm<sup>2</sup> OF ケーブル2回線によって送電する場合を検討し、この間接冷却方式は十分その目的に適合することを計算によって確かめることができた。

わが国の超高压地中線路は管路布設が多く、主要幹線における電力ケーブルの強制冷却方式として、管路布設ケーブルに対してはこの間接冷却方式はケーブル導体あるいはシースを直接冷却する方式よりも技術的、経済的に大きな利点を有する。この論文は、間接冷却方式の今後の行き方に対する指針とするため、間接冷却におけるいくつかの通水方法を比較し、その優劣を検討したものである。

間接水冷の通水方法として次の三つが取り上げられた。

- (1) 1管通水方式
- (2) 2管同方向通水方式
- (3) 2管循環通水方式

前報に述べた理論式を拡張してこれら三つの通水方式に対する統一的な式を導き出し、入口水温あるいは土壌熱抵抗の差異による所要流量の変化などを数値的に検討した。数値解析は堺港火力発電所を例にとって140 kV 1×1,500 mm<sup>2</sup> OF ケーブルについて行なわれている。

なお、計算には電子計算機 HITAC 3010 が使用された。

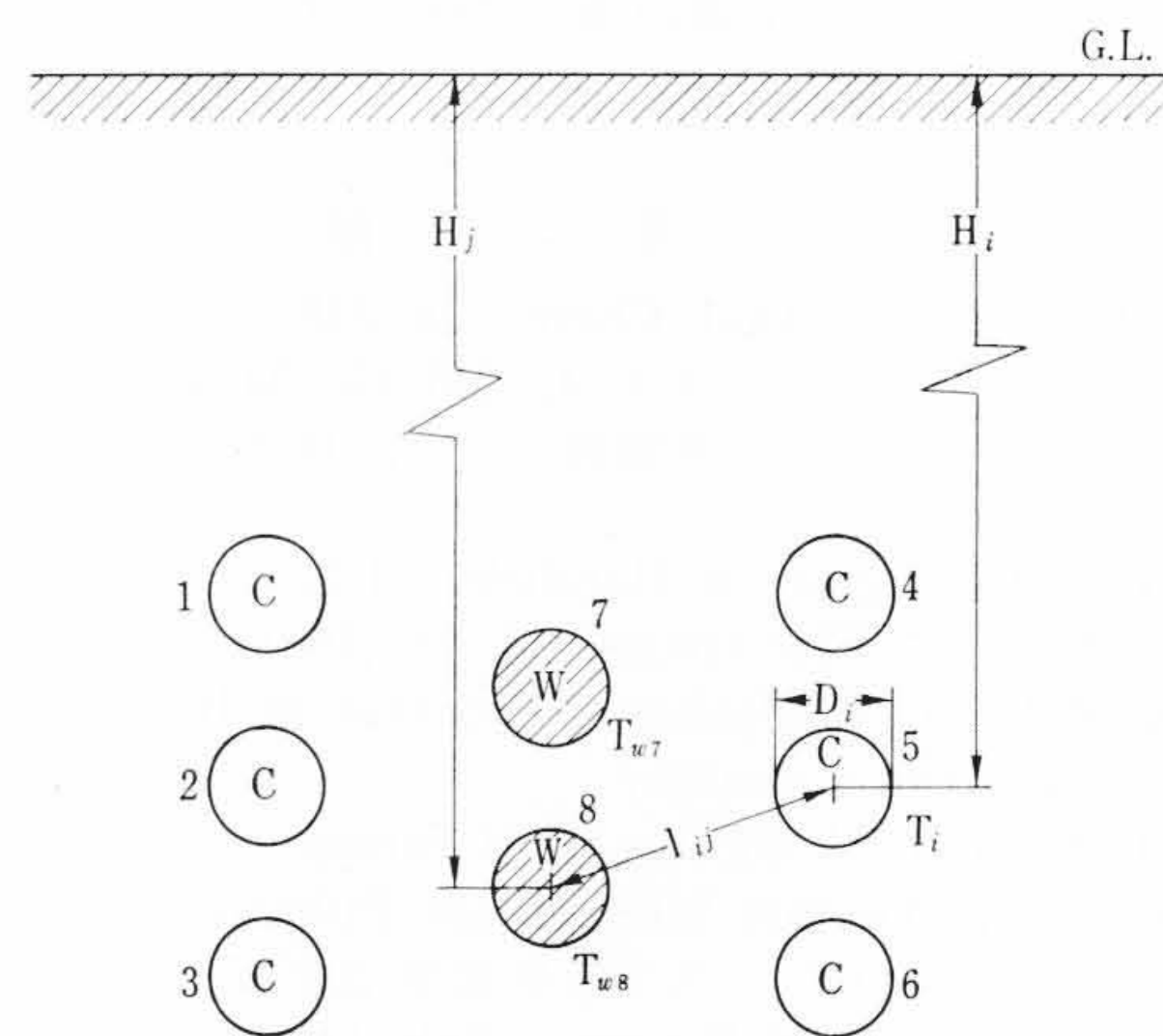
## 2. 強制冷却理論

### 2.1 基 本 式

地中線路は最も一般的な2回線を考え、2回線6条のケーブルを2条の冷却水管で強制冷却する場合を仮定する。これら8条の管路は均質な土壤中に埋設されているものとする。

第1図において、1～6までをケーブル管路、7および8を水管とし、すべてのケーブルが同一の発熱  $W$  (W/cm) を、水管がそれぞれ  $W_7$  および  $W_8$  の発熱(負の発熱と考える)を起こしているものと仮定すれば、熱平衡状態において、冷却水の入口端より  $x$  の距離

$$\begin{bmatrix} T_1 - T_a \\ T_2 - T_a \\ \vdots \\ T_6 - T_a \\ T_7 - T_a \\ T_8 - T_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{16} & R_{17} & R_{18} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{26} & R_{27} & R_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{61} & R_{62} & \cdots & R_{66} & R_{67} & R_{68} \\ R_{71} & R_{72} & \cdots & R_{76} & R_{77} & R_{78} \\ R_{81} & R_{82} & \cdots & R_{86} & R_{87} & R_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ W \\ \vdots \\ W \\ W_7 \\ W_8 \end{bmatrix} \quad \cdots (1)$$



数字は管路番号 (C) ケーブル管路 (W) 水管路

第1図 管路配置

の点において(1)式が成立する。 $W_7$  および  $W_8$  は  $x$  の関数である。

ここで、 $T_i$ : 管路外表面温度 (°C)

$T_a$ : 周囲土壌温度 (°C)

$R_{ii}$  および  $R_{ij}$  は次式で示されるものである。

$$R_{ii} \approx \frac{\rho_e}{2\pi} \log_e \frac{4H_i}{D_i} \quad (^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W})$$

$$R_{ij} \approx \frac{\rho_e}{2\pi} \log_e \frac{\sqrt{l_{ij}^2 + 4H_i H_j}}{l_{ij}}, \quad R_{ij} = R_{ji} \quad (^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W})$$

したがって、 $i$  番目のケーブルの管路外面温度は

$$T_i - T_a = \sum_{k=1}^6 R_{ik} W + R_{i7} W_7 + R_{i8} W_8 \quad \cdots (2)$$

であり、二つの水管の外面温度はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} T_7 - T_a &= \sum_{k=1}^6 R_{7k} W + R_{77} W_7 + R_{78} W_8 \\ T_8 - T_a &= \sum_{k=1}^6 R_{8k} W + R_{87} W_7 + R_{88} W_8 \end{aligned} \right\} \quad \cdots (3)$$

で表わされる。

一方、 $W_7$  および  $W_8$  は水管中を流れる水によって  $x$  点で吸収される熱量で、 $x$  点における水温をそれぞれ  $T_{w7}$  および  $T_{w8}$  とすれば、流量  $Q$  (cm<sup>3</sup>/s) との間に次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} W_7 dx &= -\delta_7 C Q d(T_{w7} - T_a) \\ W_8 dx &= -\delta_8 C Q d(T_{w8} - T_a) \end{aligned} \right\} \quad \cdots (4)$$

ただし、右辺の負号は  $W_7$ ,  $W_8$  が負の発生熱のためであり、 $\delta_7$  および  $\delta_8$  は流水の方向を示す符号で、水の流れが  $x$  の方向と一致するときを正、逆のときを負とする。 $C$  は水の熱容量で  $4.1852 \text{ W}\cdot\text{s}/^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^3$  である。さらに、水と水管外面との間には水管と流水の熱抵抗  $\bar{R}_p$

\* 日立電線株式会社日高工場

および  $\bar{R}_W$  が存在し<sup>(2)(3)</sup>,

$$\left. \begin{aligned} T_{W7} &= T_7 + (\bar{R}_p + \bar{R}_W) W_7 \\ T_{W8} &= T_8 + (\bar{R}_p + \bar{R}_W) W_8 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

の関係があるから、(3)～(5)式より次の基本的な連立微分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(T_{W7} - T_a)}{dx} + \frac{\partial_8 R_{78}}{\partial_7 \bar{R}_{W7}} \frac{d(T_{W8} - T_a)}{dx} \\ + \frac{T_{W7} - T_a}{\partial_7 CQ \bar{R}_{W7}} = \frac{\bar{R}_X \cdot W}{\partial_7 CQ \bar{R}_{W7}} \\ \frac{d(T_{W8} - T_a)}{dx} + \frac{\partial_7 R_{78}}{\partial_8 \bar{R}_{W8}} \frac{d(T_{W7} - T_a)}{dx} \\ + \frac{T_{W8} - T_a}{\partial_8 CQ \bar{R}_{W8}} = \frac{\bar{R}_Y \cdot W}{\partial_8 CQ \bar{R}_{W8}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{W7} &= R_{77} + R_p + R_W \\ \bar{R}_{W8} &= R_{88} + R_p + R_W \\ \bar{R}_X &= \sum_{k=1}^6 R_{7k} \\ \bar{R}_Y &= \sum_{h=1}^6 R_{8h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

である。すなわち、(6)式の各係数を

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\partial_8 R_{78}}{\partial_7 \bar{R}_{W7}}, \quad a_2 = \frac{\partial_7 R_{78}}{\partial_8 \bar{R}_{W8}} \\ b_1 &= \frac{1}{\partial_7 CQ \bar{R}_{W7}}, \quad b_2 = \frac{1}{\partial_8 CQ \bar{R}_{W8}} \\ c_1 &= \frac{\bar{R}_X W}{\partial_7 CQ \bar{R}_{W7}}, \quad c_2 = \frac{\bar{R}_Y W}{\partial_8 CQ \bar{R}_{W8}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)'$$

とおけば、(6)式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(T_{W7} - T_a)}{dx} + a_1 \frac{d(T_{W8} - T_a)}{dx} + b_1 (T_{W7} - T_a) &= c_1 \\ \frac{d(T_{W8} - T_a)}{dx} + a_2 \frac{d(T_{W7} - T_a)}{dx} + b_2 (T_{W8} - T_a) &= c_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)'$$

であり、この連立微分方程式の解は次の形になる。

$$\left. \begin{aligned} T_{W7} - T_a &= A_1 \varepsilon^{\lambda_1 x} + B_1 \varepsilon^{\lambda_2 x} + \frac{c_1}{b_1} \\ T_{W8} - T_a &= A_2 \varepsilon^{\lambda_1 x} + B_2 \varepsilon^{\lambda_2 x} + \frac{c_2}{b_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \lambda_1, \lambda_2 &= \frac{-(b_1 + b_2) \pm \sqrt{(b_1 + b_2)^2 - 4 b_1 b_2 (1 - a_1 a_2)}}{2(1 - a_1 a_2)} \\ &= \frac{-(\partial_7 \bar{R}_{W7} + \partial_8 \bar{R}_{W8}) \pm \sqrt{(\partial_7 \bar{R}_{W7} + \partial_8 \bar{R}_{W8})^2 - 4 \partial_7 \partial_8 (\bar{R}_{W7} \bar{R}_{W8} - R_{78}^2)}}{2 \partial_7 \partial_8 CQ (\bar{R}_{W7} \bar{R}_{W8} - R_{78}^2)} \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= -\frac{b_1 + \lambda_1}{a_1 \lambda_1} A_1, \quad B_2 = -\frac{b_1 + \lambda_2}{a_1 \lambda_2} B_1 \\ \frac{c_1}{b_1} &= R_X W, \quad \frac{c_2}{b_2} = R_Y W \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

(8)式の初期条件として、入口点  $x=0$  における水温  $T_{W07}$  および  $T_{W08}$  を代入すれば、(8)式の係数  $A_1$  および  $B_1$  は

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{a_1}{b_1} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ &\times \left\{ \frac{b_1 + \lambda_2}{a_1 \lambda_1} (T_{W07} - T_a) + (T_{W08} - T_a) \right. \\ &\left. - \frac{c_1}{b_1} \frac{b_1 + \lambda_2}{a_1 \lambda_2} - \frac{c_2}{b_2} \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -\frac{a_1}{b_1} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ &\times \left\{ \frac{b_1 + \lambda_1}{a_1 \lambda_1} (T_{W07} - T_a) + (T_{W08} - T_a) \right. \\ &\left. - \frac{c_1}{b_1} \frac{b_1 + \lambda_1}{a_1 \lambda_1} - \frac{c_2}{b_2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

となり、水温の関数が決定される。

したがって、 $x$  点におけるケーブル管路外面温度は(2)、(4)および(8)式より

$$\begin{aligned} T_i - T_a &= \bar{R}_A W - \partial_7 CQ R_{i7} \frac{d(T_{W7} - T_a)}{dx} \\ &\quad - \partial_8 CQ R_{i8} \frac{d(T_{W8} - T_a)}{dx} \\ &= \bar{R}_A W - \lambda_1 CQ (\partial_7 A_1 R_{i7} + \partial_8 A_2 R_{i8}) \varepsilon^{\lambda_1 x} \\ &\quad - \lambda_2 CQ (\partial_7 B_1 R_{i7} + \partial_8 B_2 R_{i8}) \varepsilon^{\lambda_2 x} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

として求められる。ここで、

$$\bar{R}_A = \sum_{k=1}^6 R_{ik}$$

である。

いま、ケーブル導体と管路外面間の熱抵抗を  $\bar{R}_{int}$  とすれば、ケーブル導体温度  $T_{ci}$  は

$$T_{ci} - T_a = \bar{R}_{int} W + (T_i - T_a) \dots\dots\dots (13)$$

になることは明らかである。

## 2.2 1 管通水方式

1 管通水方式におけるケーブル導体温度および水温は、基本式において No.8 の水管に関する添字 8 を持つ記号をすべて省略すれば求められる。水の流れの方向は  $x$  と同方向であるから  $\partial_7 = +1$  であり、(3)、(4)、(6)の上式および(12)式より

$$\begin{aligned} T_{ci} - T_a &= W \left[ \bar{R}_{int} + \bar{R}_A \left\{ 1 + \frac{\bar{R}_X}{R_A} \frac{R_{i7}}{\bar{R}_{W7}} \varepsilon^{-\frac{x}{CQ \bar{R}_{W7}}} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_{i7}}{\bar{R}_{W7}} (T_{W07} - T_a) \varepsilon^{-\frac{x}{CQ \bar{R}_{W7}}} \right] \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$$T_{W7} - T_a = R_X W (1 - \varepsilon^{-\frac{x}{CQ \bar{R}_{W7}}}) + (T_{W07} - T_a) \varepsilon^{-\frac{x}{CQ \bar{R}_{W7}}} \dots\dots\dots (15)$$

となる。

上の2式は  $x$  に関して単調増加であるので、導体温度および水温の最高点は冷却の終端にある。したがって、ケーブルの遠端(水の出口点)における導体温度が最高許容温度を越えないように冷却水の流量を調整すれば、入口点における導体温度は許容温度をかなり下回ることになる。

## 2.3 2 管同方向通水方式

2 管に分流して水を流す場合には、二つの水管の水の流れは同一で  $x$  方向と同じである。したがって、(4)式の  $\partial_7$  および  $\partial_8$  はともに 1 であり、二つの水管の  $x$  点における水温は  $\lambda_1, \lambda_2$  を

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{-(\bar{R}_{W7} + \bar{R}_{W8}) \pm \sqrt{(\bar{R}_{W7} + \bar{R}_{W8})^2 - 4 R_{78}^2}}{2 CQ (\bar{R}_{W7} \bar{R}_{W8} - R_{78}^2)} \dots\dots\dots (16)$$

とし、また  $T_{W07} = T_{W08} = T_{W0}$  として、(8)式より求められる。したがって、導体温度は(13)式で求められる。

この場合に導体温度が  $x$  の単調増加関数になるかどうかは(8)式の指数  $\lambda_1, \lambda_2$  および係数  $A_1, B_1$  と  $A_2, B_2$  に関係する。しかし、実用的な条件の範囲内では導体温度はこの場合も出口点で最高になる。

## 2.4 2 管循環通水方式

この場合には二つの水管の水の流れの方向が逆で、しかも冷却水は循環するため、水の温度は遠端(ケーブル冷却の末端)で等しくなければならない。したがって、水の流れを No.7 水管が  $x$  と同方

向, No. 8 水管が  $x$  と逆方向と仮定すれば, (4) 式において  $\delta_7=1$ ,  $\delta_8=-1$  と取ることになり, (9) 式の  $\lambda_1, \lambda_2$  は

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{(\bar{R}_{W7} - \bar{R}_{W8}) \pm \sqrt{(\bar{R}_{W7} + \bar{R}_{W8})^2 - 4 R_{78}^2}}{2 C Q (\bar{R}_{W7} \bar{R}_{W8} - R_{78}^2)} \dots\dots (17)$$

となる。導体温度は前節と同じく (8) 式より水温を求めて (13) 式で求めればよいが, No. 8 の水管の  $x=0$  点での水温  $T_{W08}$  は水の出口水温であり未知である。したがって, (8) 式の境界条件として遠端  $x=L$  で両水管の水温が等しいという条件を入れれば, 条件は

$$\left. \begin{aligned} T_{W7}(x=0) &= T_{W07} \\ T_{W7}(x=L) &= T_{W8}(x=L) \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

となり, (8) および (10) 式より

$$\left. \begin{aligned} A_1 + B_1 &= T_{W07} - \frac{c_1}{b_1} \\ A_1 \left( 1 - \frac{b_1 + \lambda_1}{a_1 \lambda_1} \right) \varepsilon^{\lambda_1 L} + B_1 \left( 1 - \frac{b_1 + \lambda_2}{a_1 \lambda_2} \right) \varepsilon^{\lambda_2 L} &= \frac{c_2}{b_2} - \frac{c_1}{b_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (19)$$

の連立一次方程式を導いて係数  $A_1$  および  $B_1$  を決定する。

2 管循環通水の場合には, 入口点よりはいった冷却水が他方の水管を通過して, また, 入口点に戻ってくるので, ケーブル導体温度は冷却区間の遠端 (冷却水折り返し点) で最高となるとは限らず, 中間部分で極値を持つ場合がある。したがって, 循環通水の場合にケーブル導体最高温度は (12) あるいは (13) 式を微分して極値を求めて決定される。

逆に, No. 8 を往路, No. 7 を復路に取っても添字が変わるのみで式は同一である。

### 3. 冷却特性の数値的検討

各通水方式の比較検討のため, 堺港火力発電所の 500 MVA の電力を 140 kV  $1 \times 1,500 \text{ mm}^2$  OF ケーブル 2 回線によって送電する場合を例にとって検討してみよう。計算の条件およびケーブルの配置は付録に示されている。また, 電子計算機による計算のフローチャートの一部を最後の第 12 図に示した。

冷却ケーブル長は 3.1 km で, 通電電流は 1,085 A である。所要流量はケーブル中の最高温度上昇がちょうど  $55^\circ\text{C}$  になるように決定される。

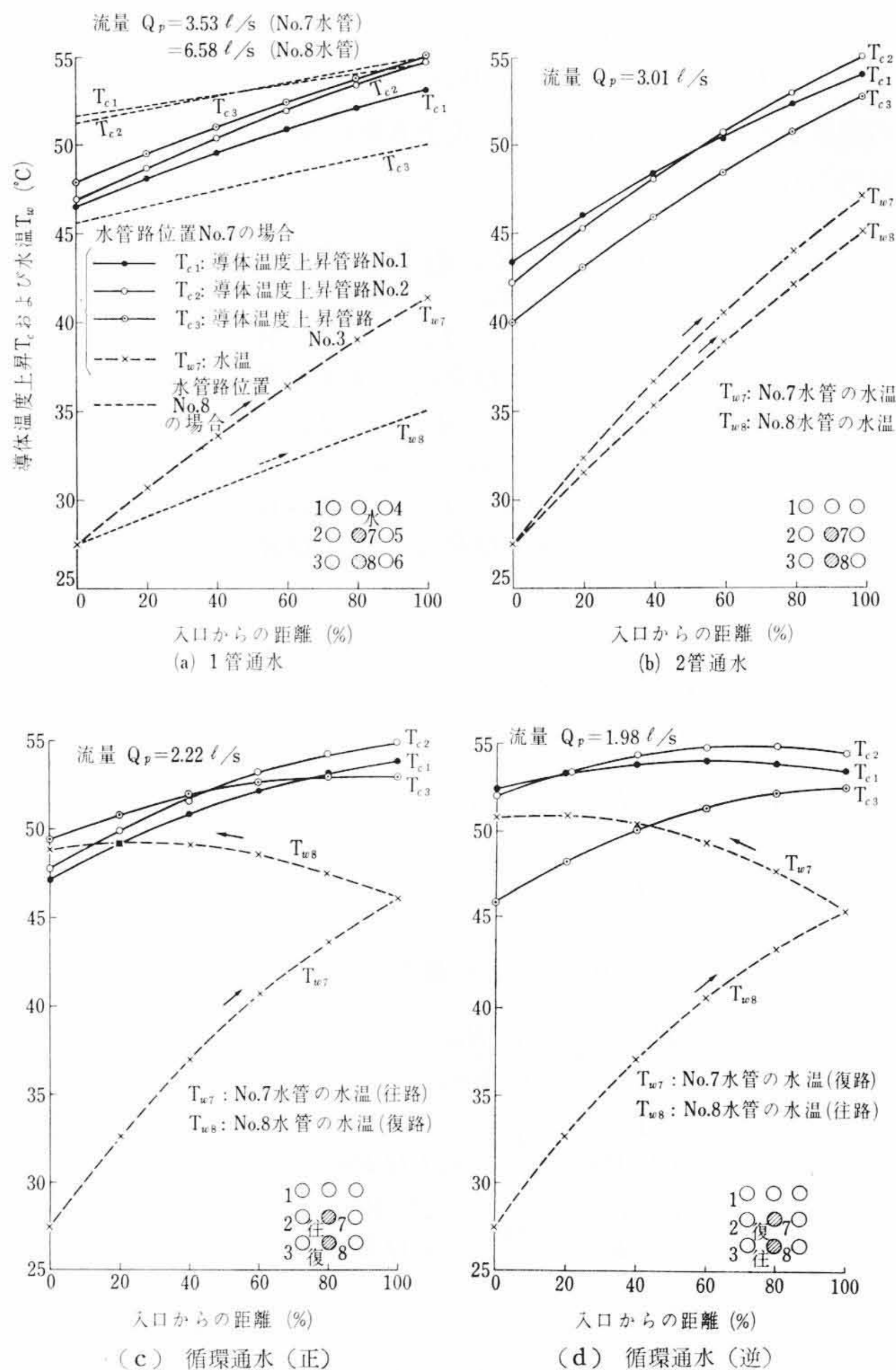
#### 3.1 導体温度および水温の分布

各通水方式の特長を比較する意味で同一外囲条件のもとでケーブル導体温度および水温の長さ方向の分布を求めてみる。

冷却水に工業用水を用いると考えると水温は  $25^\circ\text{C}$  程度であるが, ケーブル冷却口まで導入する間の温度変化を考えて, 入口水温は東京および大阪地区の基準湿球温度  $27.5^\circ\text{C}$  に選ぶ。土壌固有熱抵抗は  $80^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$  均一と考え, ケーブル導体の最高温度上昇が  $55^\circ\text{C}$  になるように流量を決定する。第 2 図はこうして求めた流量における導体温度および水温の分布で, 1 管通水, 2 管 (同方向) 通水および循環通水について示した。1 管通水の場合は水管の位置を中央と下側の 2 箇所を選んだ場合, 循環通水の場合は上下 2 つの水管の流水の方向を正逆 2 通りに取って計算されている。正循環は往路を上管に復路を下管に取った場合をさす。

第 2 図 (a) の 1 管通水において, 水管を下側 (No. 8) に取った場合の流量は中央の場合の約 2 倍になる。冷却しない場合には No. 2 のケーブル温度が最高になるので, 水管はできるだけこのケーブルに近く配置しなければならない。

2 管 (同方向) 通水の場合には 1 管に比べて冷却源の広がりが大きく, それだけ冷却の効率も上昇する。この場合の流量は 2 管を合計したものである。第 2 図 (a) と (b) においては, 流量の差は  $0.5 \text{ l/s}$



第 2 図 導体温度上昇および水温の分布  
(入口水温  $28.5^\circ\text{C}$ , 導体温度上昇  $55^\circ\text{C}$ ,  $\rho_e=80^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ )

であるが, 入口水温が高いとか土壌固有熱抵抗が高いとかの悪い外囲条件になるほどこの差は急激に大きくなることが次節で示される。この場合 1 管通水のほうが 2 管通水よりも出口水温が高い。

循環通水の場合の温度分布は第 2 図 (c), (d) で, 正逆 2 通りの通水のうち逆方向通水時の所要流量のほうが小さい。これは最高温度点が冷却区間の中間に現われているため冷却効率がよくなるためである。

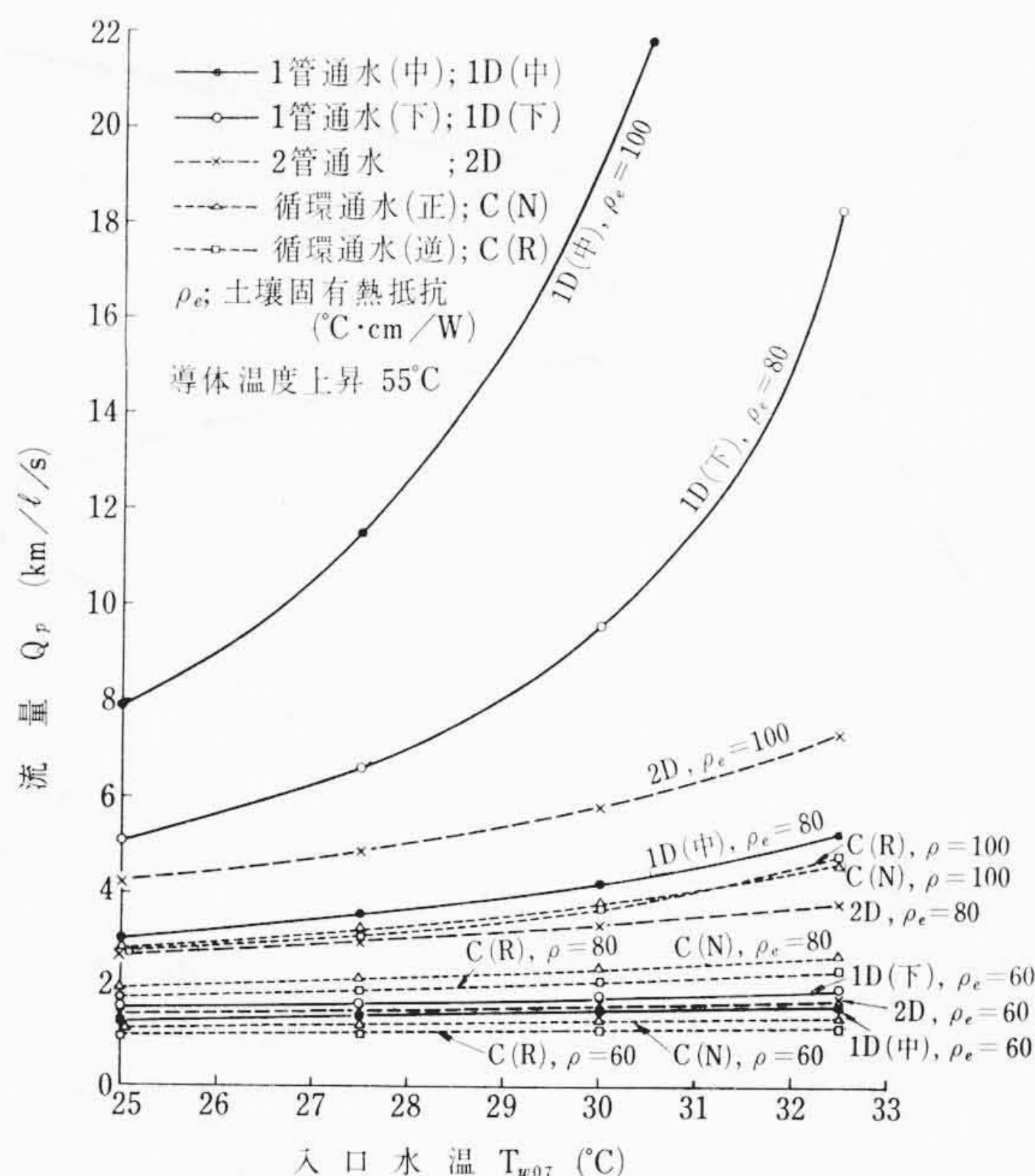
要するに, 水の入口点における導体温度と遠端における導体温度とができるだけ近づくように冷却できることが望ましい。この意味では循環通水方式は理想的である。

第 2 図 (c) で No. 3 のケーブル導体温度は約 85% 距離の点で極大となるが, 同図 (d) では  $T_{c2}$  が約 75% の点に極大を持ち, しかもこれが最大値でもある。水温も復路では中間に極値を持ち, 水の出口近くでわずかに低下することは逆に他の水管により冷却されることを示すものである。

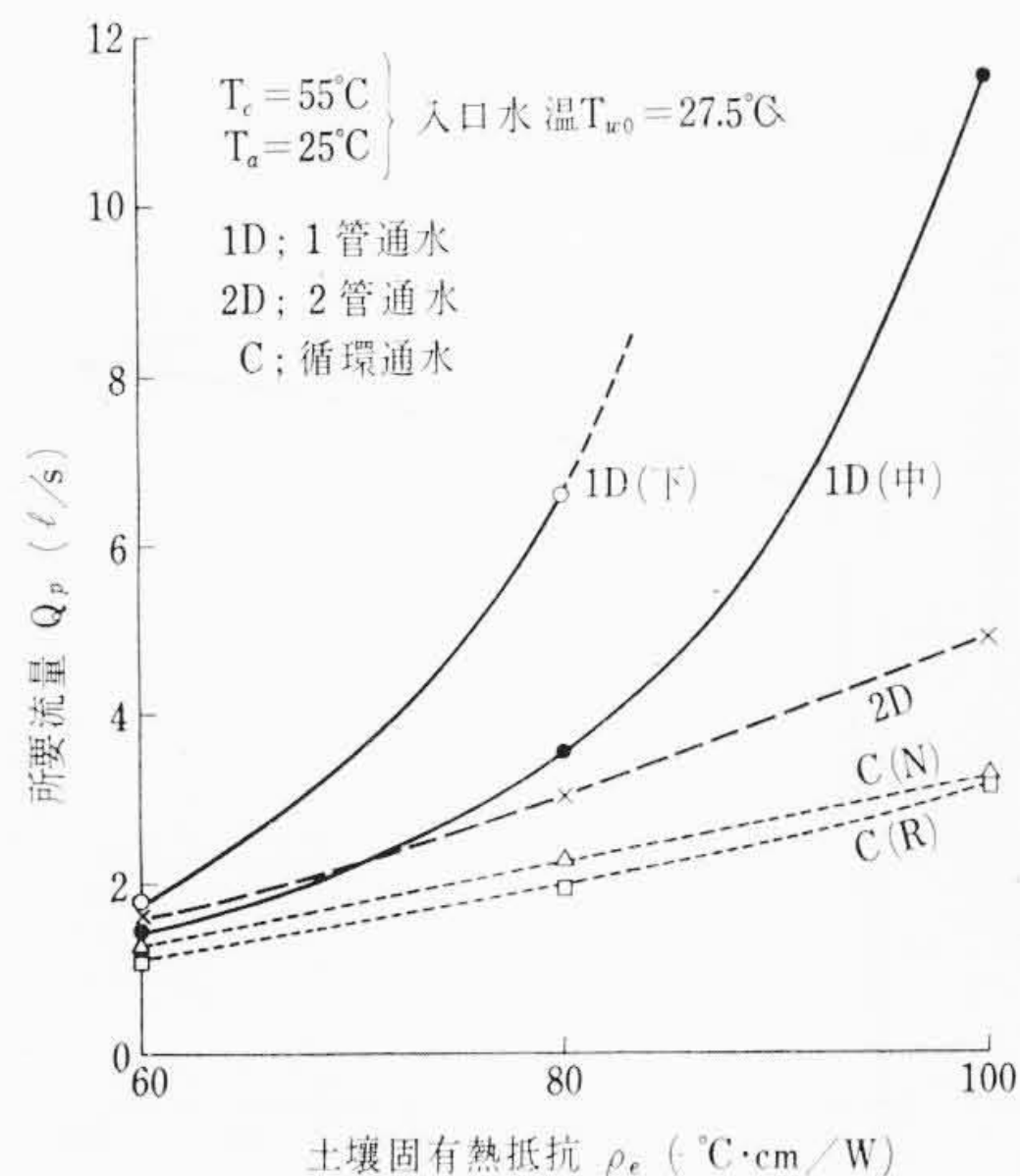
#### 3.2 流量と入口水温の関係

第 2 図に示した各通水方式間の流量の関係は外囲の諸条件によって大きく変わってくる。そこで, 土壌固有熱抵抗をパラメータにして, 入口水温に対する所要流量の関係を調べた。所要流量はケーブル導体温度が最高で  $55^\circ\text{C}$  になるときの流量である。第 3 図にこの関係を示した。1 管通水を 1D, 2 管 (同方向) 通水を 2D, 循環通水を C で示してある。() 内は水管の位置あるいは通水の方

向を示す。土壌熱抵抗  $\rho_e$  は 60, 80 および  $100^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$  の 3 種に選んだ。 $\rho_e$  が 60 のときには, どの通水方式でも所要流量は  $2 \text{ l/s}$  以内であるが,  $\rho_e$  が 80 を越えると 1 管通水方式での所要流量は大幅に増加



第3図 所要流量と入口水温の関係



第4図 冷却方式の比較

する。とくに、1D (下),  $\rho_e=80$  曲線では入口水温  $30^\circ\text{C}$  で流量は  $8\text{ l/s}$  を越え、流量と損失水頭の面から実現は困難になるであろう。1D (中) でも  $\rho_e=100$  では流量は  $8\text{ l/s}$  以下にならない。2管通水の破線になると流量は低下する。しかし、循環通水の場合にはもっと流量は少なく済み、しかも入口水温が  $33^\circ\text{C}$  にまで上昇しても流量の増加は非常に少ない。循環通水のうちでは逆方向通水 C(R) のほうが効率がよい。

### 3.3 冷却方式の比較

第3図の関係から入口水温を  $27.5^\circ\text{C}$  に選んで土壌固有熱抵抗と流量の関係を求めると第4図のとおりになる。三つの通水方式の差が明瞭に表わされている。 $\rho_e=60$  ではどの通水方式を用いても流量に本質的な差はないが、 $\rho_e=80$  では2管通水と循環通水とでは明らかな差を生じ、 $\rho_e=100$  になると1管中央通水は流量が極端に大きくなって、次節第5図に見られるとおり、 $3.1\text{ km}$  における損失水頭は  $20\text{ m}$  を大きく越えるであろう。

第4図の関係から循環通水方式が非常に有望であると結論される。

### 3.4 冷却水管内の圧力降下<sup>(4)</sup>

流量は使用水量に関係し、強制水冷の運転経費に関係するが、技術面では冷却区間における冷却管内の圧力降下に関係し、水の流入

を静水圧で行なわせるとすれば設備の限界からも流量の制限が加わるのである。

水管内の圧力降下は層流と乱流に区別して考えなければならない。レイノルズ数  $N_R$  は

$$N_R = \frac{D_W \rho v}{\mu} = \frac{4 \rho Q}{\pi \mu D_W} \quad (20)$$

で、

$N_R < 2,000$  のとき層流

$N_R > 4,000$  のとき乱流

と考えられている。

ここで、 $D_W$ : 水管の内径 (cm)

$\rho$ : 流体の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$v$ : 冷却水の流速 (cm/s)

$\mu$ : 流体の粘性係数 (poise)

である。一方、長さ  $L$  (cm) の円形管内を流体が流速  $v$  で流れるに要する圧力差は次の一般式で与えられている。

$$\Delta p = \rho f \left( \frac{L}{D_W} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{8}{\pi^2} \frac{ef}{g} \left( \frac{LQ^2}{D_W^5} \right) \quad (21)$$

ただし、 $g$ : 重力の加速度 ( $\text{g/cm/s}^2$ )

$f$  は次の式で求められるもので、層流と乱流との境界は直線的に内挿(ないそう)した。

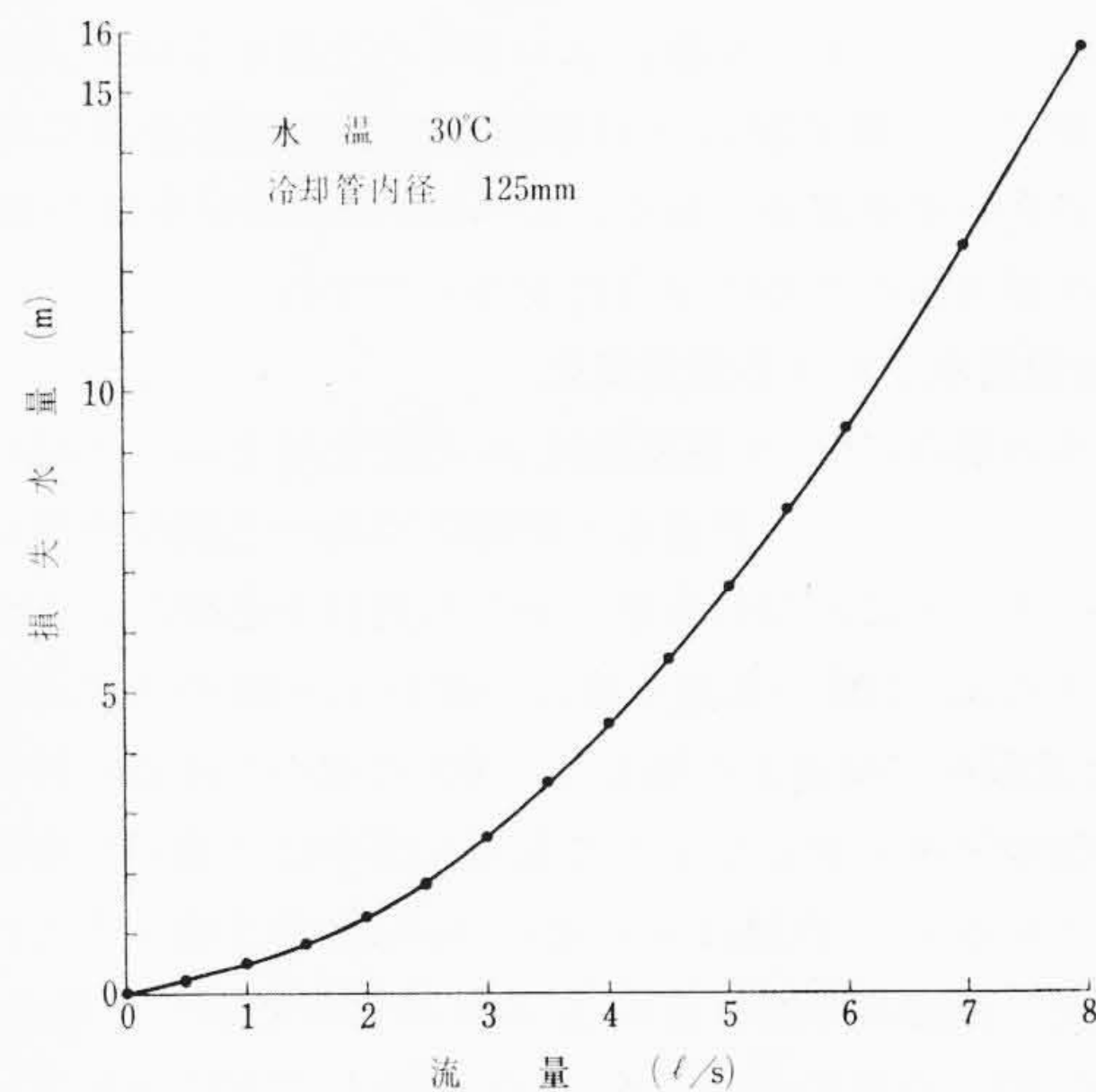
$$\left. \begin{array}{l} \text{層流} \cdots \cdots f = \frac{64}{N_R} \\ \text{乱流} \cdots \cdots \frac{f}{4} \simeq 0.046 (N_R)^{-0.2} \end{array} \right\} \quad (22)$$

(21)式より付録の条件における損失水頭と流量との関係は第5図に示されるとおりである。損失水頭を  $10\text{ m}$  以下とすれば、流量は  $6\text{ l/s}$  以下に保たなければならない。

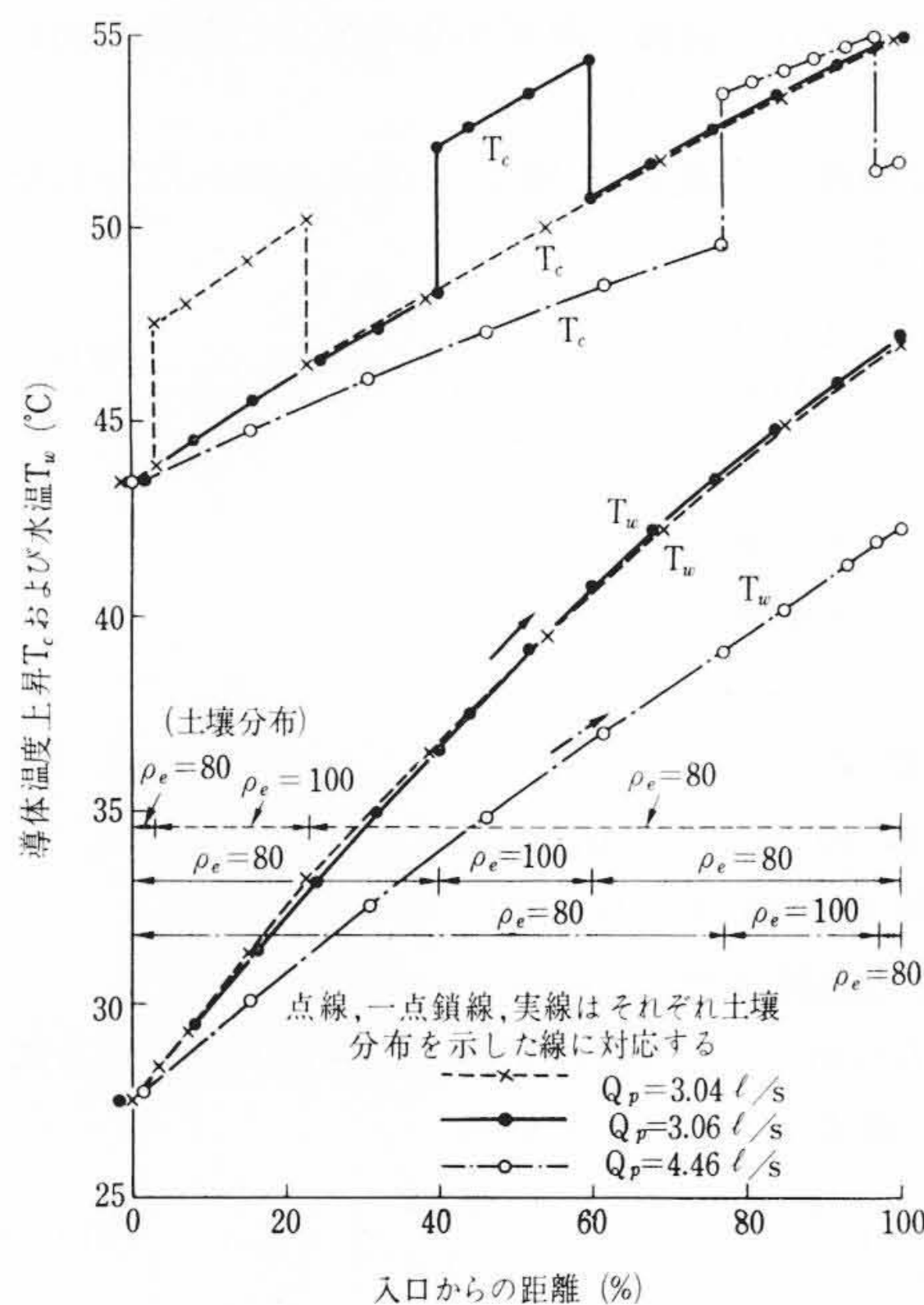
## 4. 不均一土壌における冷却特性

土壌固有熱抵抗は一般に均一ではなく場所によって変化する。土壌が均一でなければ(1)式は成立しないので解析は困難であるが、概略の様子を知るために(1)式の成立範囲内でこの問題を考えてみる。

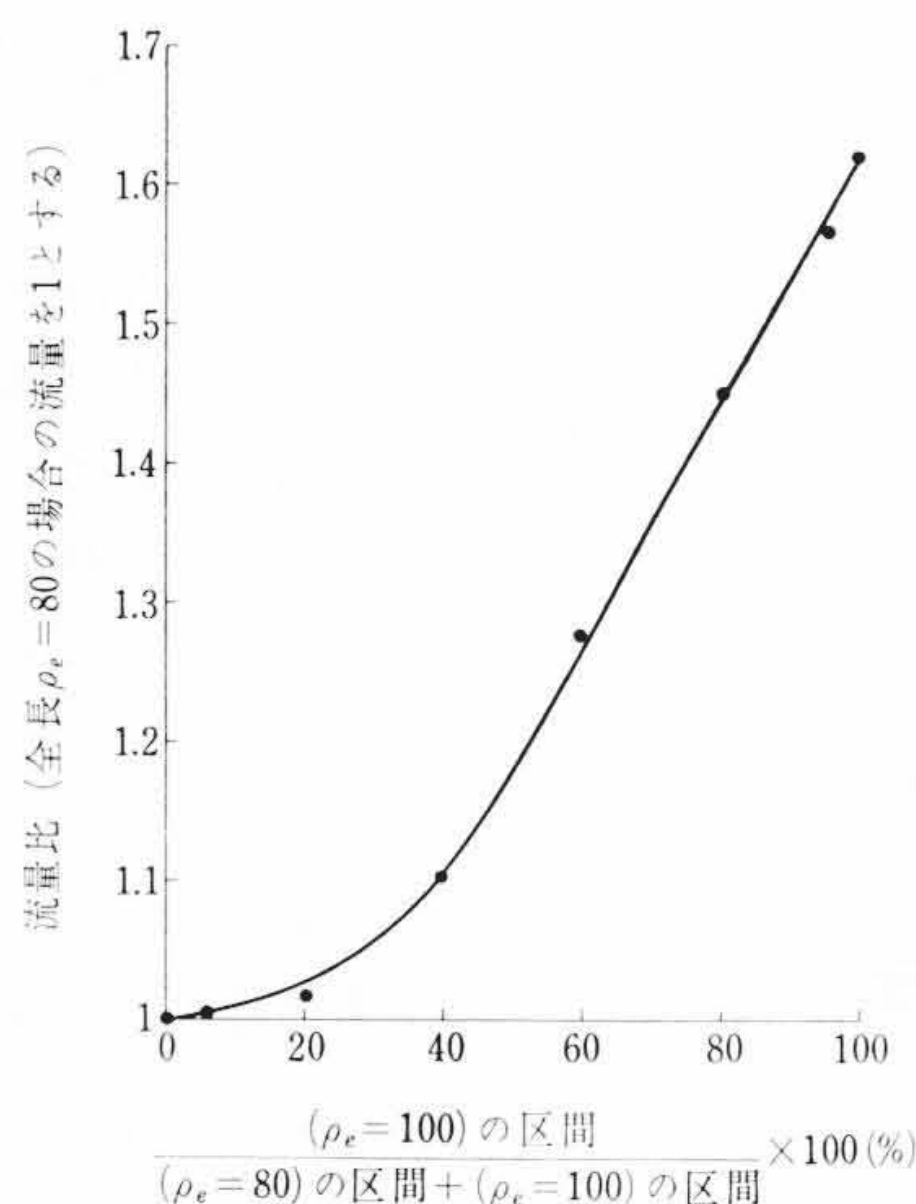
冷却区間に一部分土壌固有熱抵抗が変わる場所を考え、これが温度分布および所要流量にどう影響するかを検討する。この部分が少なくとも数十 m 以上の長さを持つものとすれば、おのおのの部分で(1)式は成立すると考えてよいであろう。水温はどの部分でも連続であると考えれば、前区域での出口水温は次区域における入口水温となる。ケーブル導体温度は不連続になるが、実際には境界付近で



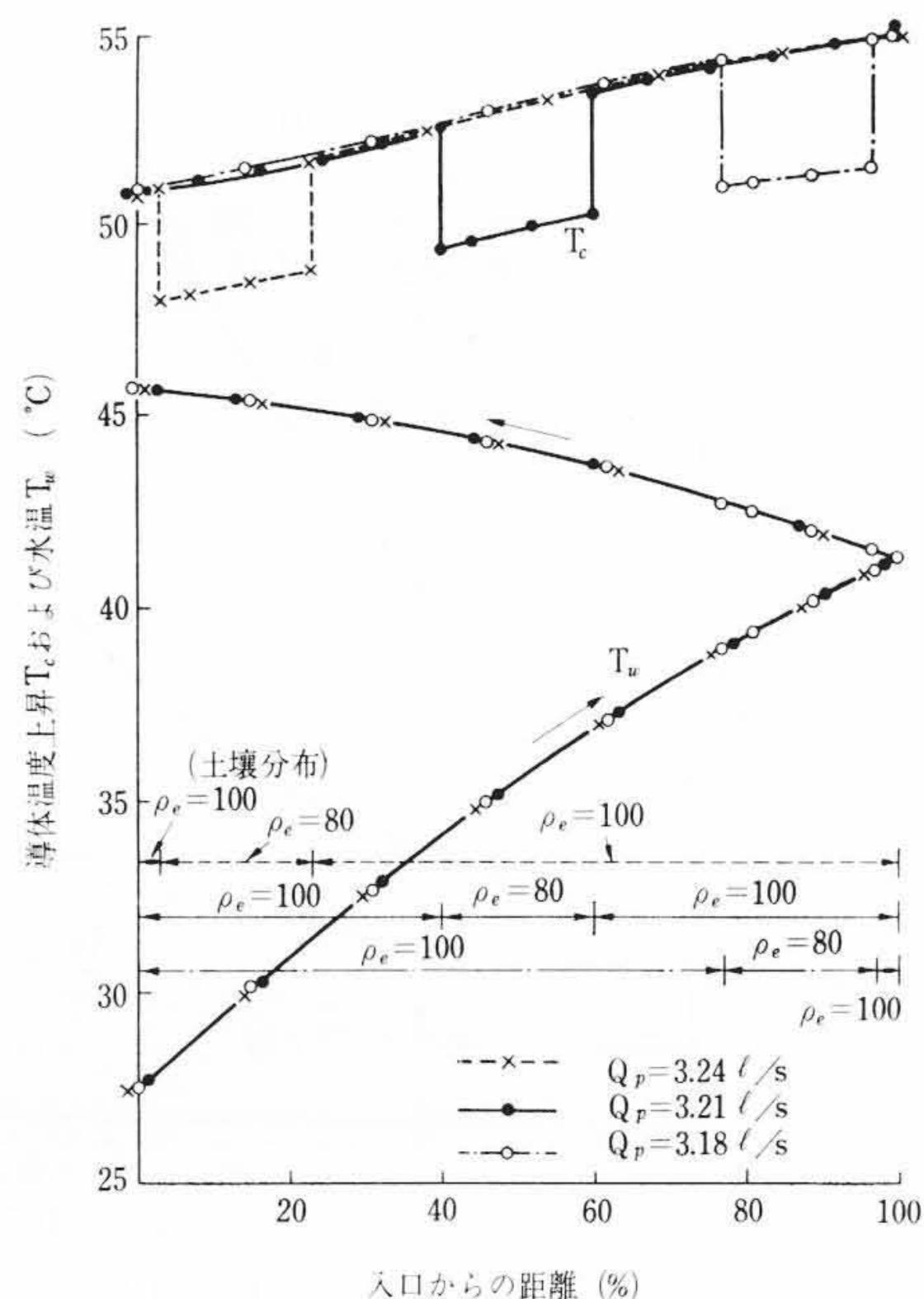
第5図 冷却管内の圧力降下



第6図 不均一土壌における導体温度上昇および水温の分布 (2管通水の場合)



第7図  $\rho_e=100$  の土壌の割合と流量との関係



第8図 不均一土壌における導体温度上昇および水温の分布 (循環の場合)

は本論文のような解析が成り立たないためである。しかし、ここではこの端効果はせいぜい数 m の範囲と考えると近似的に解析を進めた。

#### 4.1 2管通水における流量変化

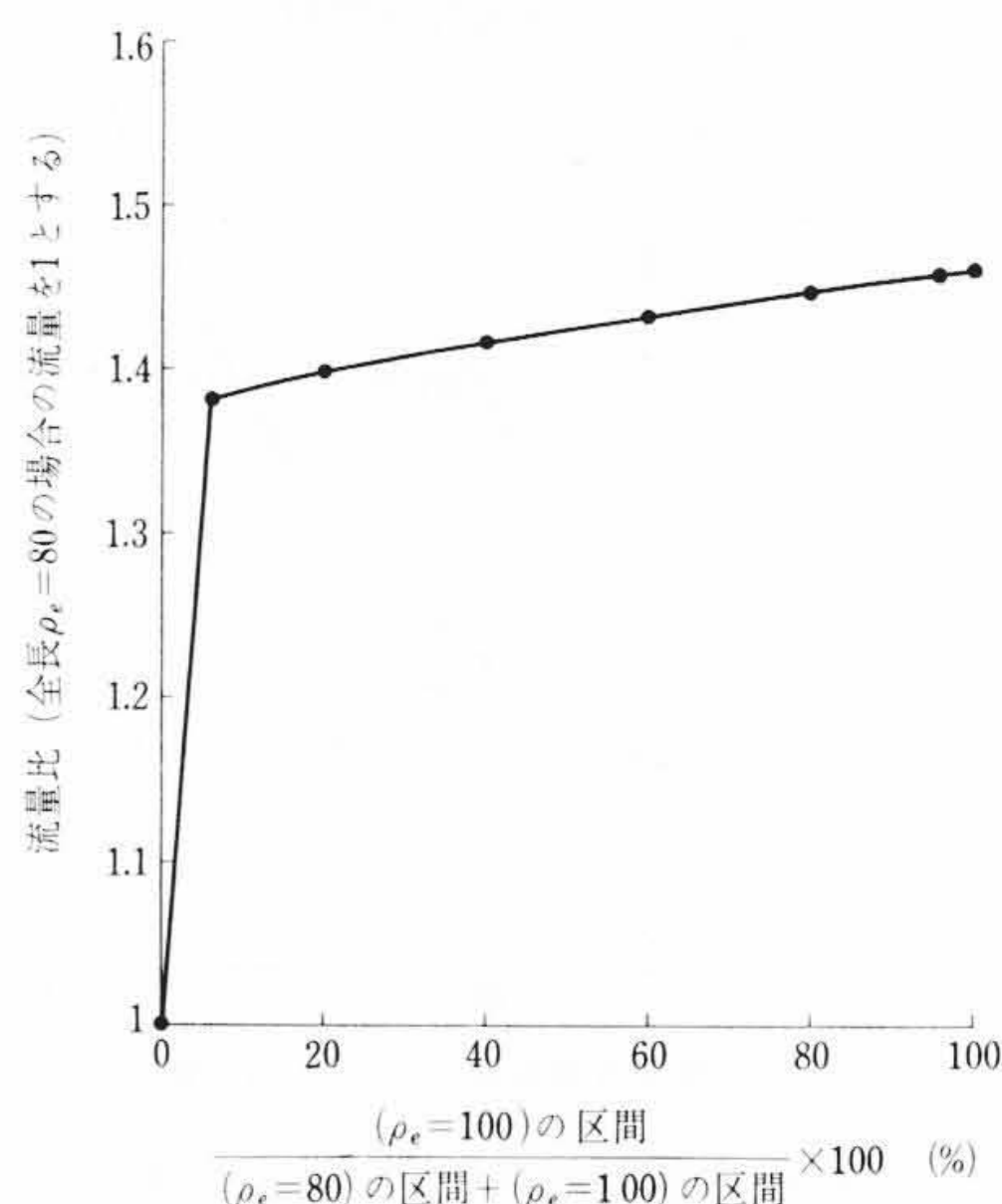
$\rho_e=80$  の土壌中に、ある区間だけ  $\rho_e=100$  の土壌が存在すると考える。いま、 $\rho_e=100$  の土壌部分が全長の 20% だけ存在するものとし、その場合における 2 管通水時の導体温度および水温の分布は第 6 図に示すとおりになる。入口水温は  $27.5^\circ\text{C}$  で導体温度の最高値が  $55^\circ\text{C}$  になるように流量を選んである。 $\rho_e=100$  の部分が冷却区間の入口付近、中央および出口付近の 3 箇所について、それぞれ点線、実線および一点鎖線で示されている。その詳細位置は第 6 図中の (土壌分布) に矢印で示されている。ここで水温および導体温度は最高のもを示した。 $\rho_e=100$  の区間が入口付近 (点線) と中央 (実線) の場合には、 $\rho_e=80$  の部分の導体温度は両者ともほとんど等しく、導体温度最大値の位置は一致している。また、流量も等しい。しかるに、 $\rho_e=100$  の部分が終端付近のときには前 2 者に比べて水温の上昇は小さく、流量は約 50% 増となっている。したがって、間接水冷においては冷却区間終端近くの土壌固有熱抵抗を極力低くするように配慮しなければならない。

$\rho_e=100$  の区間を冷却区間の中央に取って、残りの部分が  $\rho_e=80$  の土壌の場合について、流量と  $\rho_e=100$  の土壌が全体に占める割合の関係を調べた。第 7 図は入口水温  $27.5^\circ\text{C}$  で導体最高温度を  $55^\circ\text{C}$  に押えた場合の所要流量である。 $\rho_e=100$  の区間が全体の 40% 以下ならば、所要流量の増加は割合に少なくて済む。

#### 4.2 循環通水における流量変化

循環通水の場合には、所要流量は  $\rho_e$  の変化によって大幅に変わることはない。しかし、2 管通水と同様に不均一土壌が流量に与える影響を調べることは冷却の裕度の面から設計上必要なことである。

前節と逆に  $\rho_e=100$  の基底土壌に一部分  $\rho_e=80$  の区間を考える。第 8 図は循環正方向通水の場合  $\rho_e=80$  の三つの位置に対する前節と同様な温度分布を示したものである。図中に土壌の分布位置を矢印で示してあるが、点線は入口部に  $\rho_e=80$  の土壌を考えた場合、実線は中央、鎖線は終端付近に  $\rho_e=80$  の部分を取った場合である。 $\rho_e=80$  の区間は全体の 20% で、入口水温は  $27.5^\circ\text{C}$  である。図から明らかなように、導体温度最高点も水温分布も三つの場合とも等し



第9図  $\rho_e=100$  の土壌の割合と流量との関係

く、流量もほとんど一致する。

第 9 図は  $\rho_e=80$  の区間を中央にとって、その割合を変えた場合の所要流量の変化であるが、 $\rho_e=100$  の区間が全体の数 % 存在しても、流量は全区間が  $\rho_e=80$  の場合に比べて非常に大きくなる。このことは第 8 図からもわかるように、正方向循環の場合には冷却区間の終端の導体温度が最高になり、この部分の  $\rho_e$  の値が支配的に作用するからと考えられる。

逆方向通水循環では導体最高温度が中間部分に生ずるので第 9 図とは異なるであろうが、いずれにしても循環通水においては  $\rho_e$  の値を大きく見積って設計することが望ましいといえる。

## 5. 結 言

おもな結論は次のとおりである。

- (1) 間接水冷方式に対する一般理論を確立し、循環通水冷却の計算式を導いた。
- (2) 各種の通水方式を比較検討し、循環通水方式が最も望ましい通水方式であることが示された。
- (3) 循環通水によれば、入口水温が  $30^\circ\text{C}$  を越えても比較的小さい流量で冷却が可能である。したがって、簡単なクーリ

ング・タワーを用いて出口水温の冷却を行なえば、完全に閉回路の循環冷却ができる。

- (4) 不均一土壌における冷却特性を調べた結果、冷却区間の終端部の土壌固有熱抵抗は冷却効率に大きく関係する。

本論文で行なった数値解析はあくまで一例であって、計算条件が変われば各通水方式における冷却特性も変わり、相互の関係も多少変化するであろう。この点に十分留意してこの論文が検討されることを望むものである。

終わりに、多くのご意見、ご指導を賜った関西電力株式会社阪部貞夫氏ならびに日立電線株式会社山本三郎、乗松立木両博士および福永昭造、半沢孝雄両氏に心から感謝する次第である。

### 参 考 文 献

- (1) 沼尻，網野：日立評論 45, 110 (昭 38)
- (2) P. Ralston, G. H. West: CIGRÉ 215 (1960)
- (3) 岡田，広瀬，長浜，目見田，代谷，高田，林，北村：住友電気 79, 23 (昭 37)
- (4) R. L. Murray (杉本訳)：原子核工学 173 (昭 30, 丸善株式会社)

### 付録 I ケーブル中の熱損失と温度上昇

ケーブル中の熱損失を導体での発熱  $W_c$  (W/cm)，誘電体損  $W_d$  およびシースでの発熱  $W_s$  とすれば、導体と管路外面間の温度差は第 10 図の等価回路より

$$\begin{aligned} T_{ci} - T_i &= \frac{\bar{R}_i}{2} W_c + \frac{\bar{R}_i}{2} (W_c + W_d) \\ &\quad + (\bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) (W_c + W_d + W_s) \\ &= (W_c + W_d + W_s) \left\{ \left( \frac{W_c}{W} + \frac{W_d}{2W} \right) \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

である。

ここで、 $\bar{R}_i$ ：ケーブル絶縁体の熱抵抗  
 $\bar{R}_j$ ：ケーブル防食層の熱抵抗  
 $\bar{R}_{sd}$ ：ケーブルの表面放散熱抵抗  
 $\bar{R}_d$ ：管路の熱抵抗

したがって、ケーブルの全発熱量は

$$W = W_c + W_d + W_s \quad (24)$$

であり、導体と管路外面間の熱抵抗は次式になる。

$$\bar{R}_{int} = q_e \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d \quad (25)$$

ただし、

$$q_e = \left( \frac{W_c}{W} \right) + \left( \frac{W_d}{2W} \right)$$

### 付録 II 計 算 条 件

- (1) 送 電 条 件

送 電 容 量 250 MW/1 回線  
 送 電 電 圧 140 kV  
 通 電 電 流 1,085 A  
 負 荷 率 1.0  
 冷 却 区 間 長 3.1 km

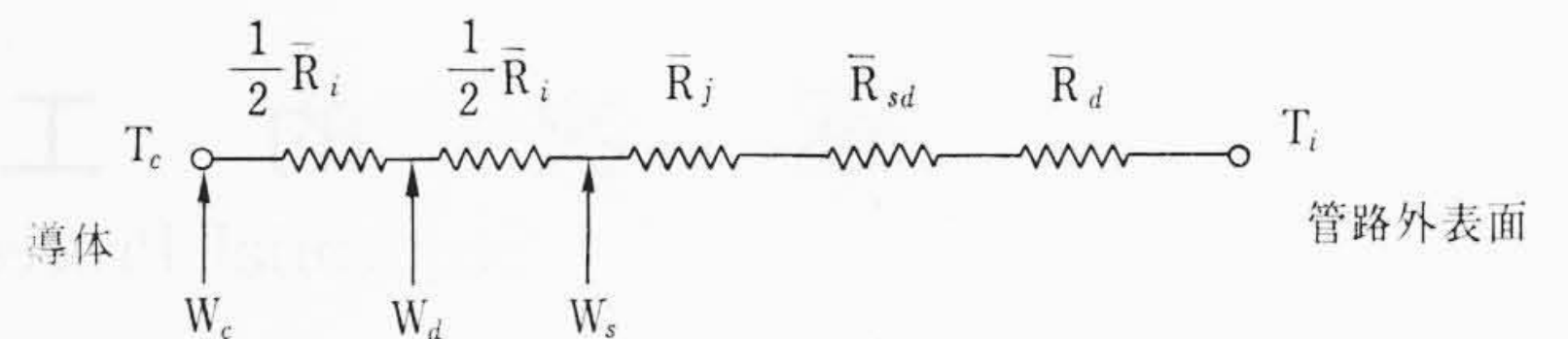
- (2) ケーブル構造および各定数<sup>(3)</sup>

導 体 サ イ ズ 1,500 mm<sup>2</sup> 単心分割導体 OF ケーブル  
 導体抵抗(80°C)  $1.60 \times 10^{-7}$  (Ω/cm)  
 誘 電 正 接 0.005  
 $W = 0.2626$  (W/cm)  
 $\bar{R}_{int} = 90.2$  (°C·cm/W)

各定数の計算方法は文献(3)参照のこと。

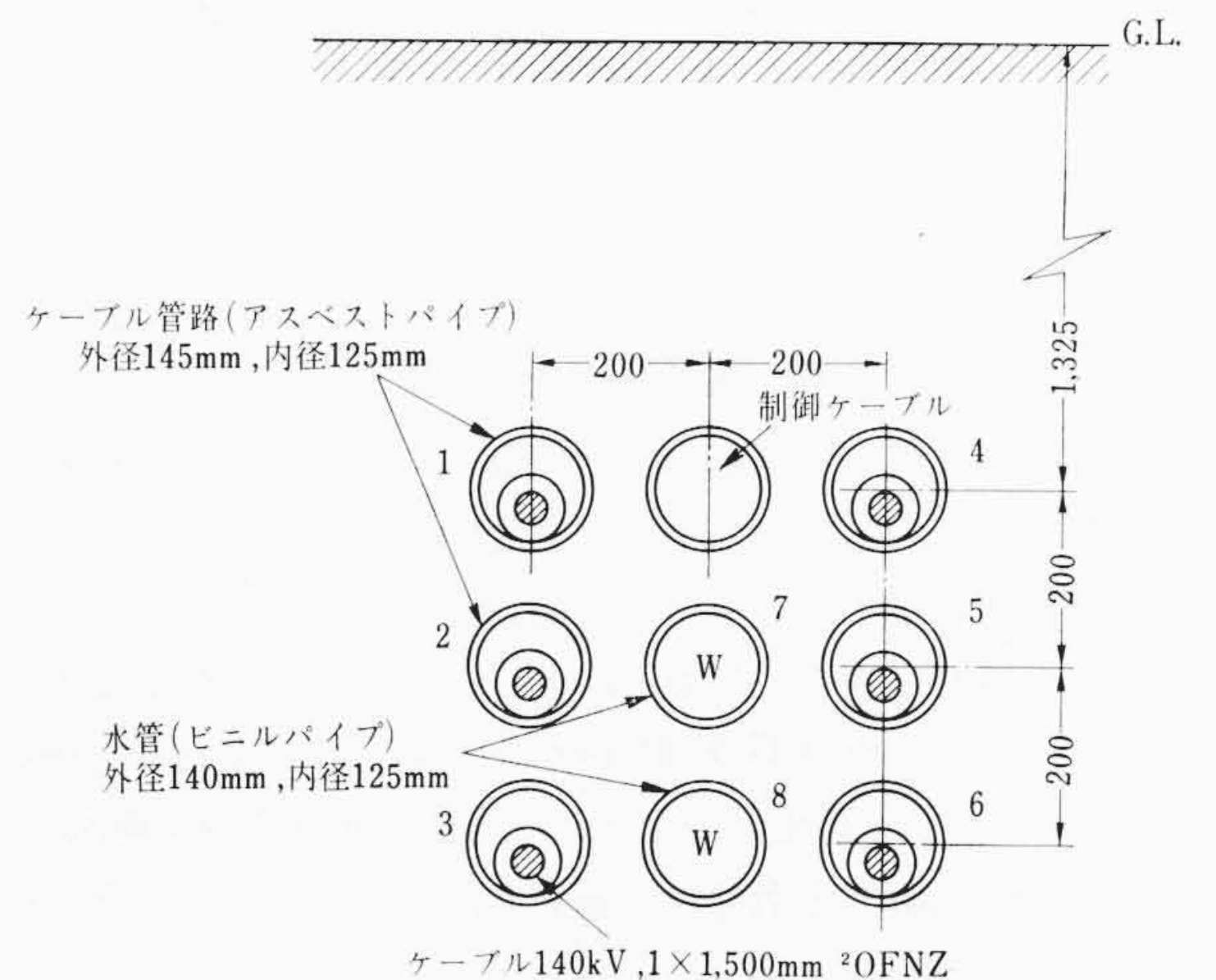
- (3) 管路構造と各定数

ケー ブ ル 管 路 アスベスト管

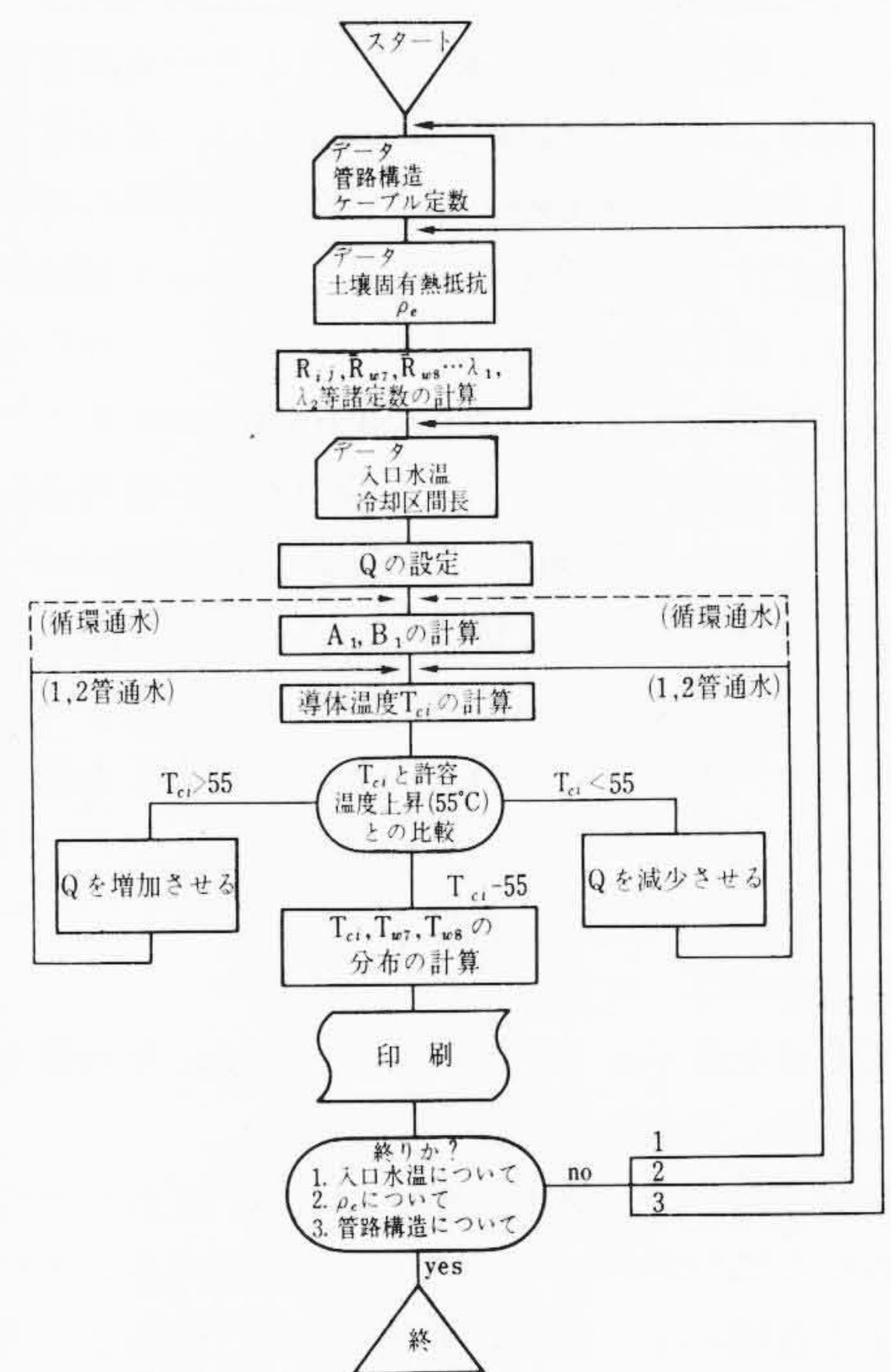


第 10 図  
発熱と管路内部の  
熱抵抗の関係

$$\begin{aligned} W &= W_c + W_d + W_s \\ \bar{R}_{int} &= \frac{T_{ci} - T_i}{W} = q_e \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d \\ q_e &= W_c / W + W_d / 2W \end{aligned}$$



第 11 図 140 kV 系の管路配置図



第 12 図 フローチャート

冷 却 水 管 PVC 管

管路構造は第 11 図に示される。

$$\bar{R}_p = 9.9 \text{ (°C·cm/W)}$$

$$\bar{R}_w = 2.6 \text{ (°C·cm/W) (一定と仮定)}$$

土壌固有熱抵抗  $\rho_e = 60, 80$  および  $100^\circ\text{C·cm/W}$

周囲土壌温度  $T_a = 25^\circ\text{C}$

- (4) 計 算 方 法

数値計算は電子計算機 HITAC 3010 で行ない、そのフローチャートは第 12 図に示される。不均一土壌の計算はこれらの計算を境界条件を満足させながら 3 区間について行なう。