

# 温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

理 學 士      岡 本 元 治 郎

## 緒      言

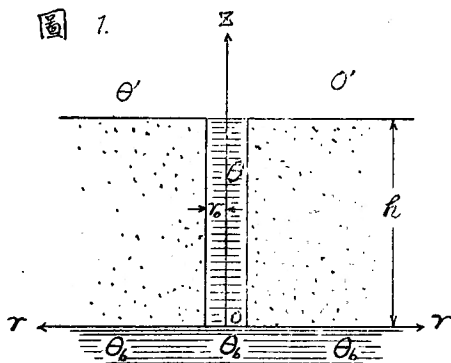
鉛直なる温泉の導管がある場合に其の影響を受けて附近地層での温度分布が如何になるか、又如何なる範囲まで其の影響が及ぶかの問題に就いて論究する。

鉛直なる導管の泉底にある被壓温泉水の層が水平にして、常に一定温度に保たれて居る場合を考へる。又地表では輻射や空氣の傳導があつて、其の爲の冷却熱量は地表の温度と其の附近の気温との差に比例すると假定する。地中では導管と地層との境界面に於て熱の受授があり、其處では兩者の温度が一致して居る。而して導管の影響は非常に遠方までは及ばぬこと勿論である。

斯くの如き場合に地層に於ける温度分布を表はす式を求める。次に之を實際に適用する上に便宜な式に更める。夫れに依つて實例に就いて導管附近の地層での温度分布を計算し、其の影響が地層の如何なる範囲まで及ぶかを検討する。

## 1 基本式及び境界條件

圖 1 に示す如く地表から  $h$  の深さに温泉水の恒温層があつて其の上に半径  $r_0$  なる圓柱



形の鉛直なる導管がある場合に於て、其の附近の地層での温度分布を求める。地層は均一で途中には別に他の熱源はないものとする。

導管の中心軸を上方に  $z$  軸をとり、水平の方向に  $r$  軸をとる。又導管内の温度を  $\theta$  とし、地層での温度を  $T$  とする。さすれば地層に於ける定常状態での熱傳導の式は

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

次に導管と地層との境界面に於ける熱の受授に就いての關係式を求める。

導管内での温泉水は一定の速さ  $v$  にて上昇するものと考へられる。夫がために長さ  $dz$  の部分に  $dt$  秒間に蓄積される熱量  $Q_1$  は

$$\begin{aligned} Q_1 &= \rho \pi r_0^2 v c \left[ \theta - \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial z} dz \right) \right] dt = -\rho \pi r_0^2 v c \frac{\partial \theta}{\partial z} dz dt \\ &= -cq \frac{\partial \theta}{\partial z} dz dt \quad \dots\dots\dots(i) \end{aligned}$$

茲に  $\rho$  は温泉水の密度、 $c$  は其の比熱にして  $q$  は單位時間毎の温泉の湧出量にて  $q = \rho \pi r_0^2 v$  である。

導管内の水中でも熱傳導によつて鉛直方向に多少の熱移動はあるが、水の熱傳導率は甚小であるから  $Q_1$  に比して無視する。又管内温度の水平分布は導管の半径が小であるから大略一樣と考へて、 $\theta$  は  $z$  のみの函數と看做することにする。

導管と地層との境界面に於て管の長さ  $dz$  の壁を通じて  $dt$  秒に與へ得る熱量  $Q_2$  は、地層での熱傳導率を  $k$  とすれば次の如く與へられる。

$$Q_2 = -k \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} 2\pi r_0 dz dt \quad \dots\dots\dots(ii)$$

定常状態に於ては導管内にて蓄積される熱量が全部地層へ與へられると考へるべきである。それ故に式 (i) 及び (ii) から次の關係が成立しなければならぬ。

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{2\pi r_0 k}{cq} \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} \quad \dots\dots\dots(2)$$

泉底 ( $z=0$ ) の温泉水の層での温度は一定値  $\theta_b$  に保たれて居ると考へられるから、次の條件が満足される。

$$\left| T \right|_{z=0} = \theta_b, \quad \left| \theta \right|_{z=0} = \theta_b \quad \dots\dots\dots(3_1), (3_2)$$

地表に於ては熱の輻射傳導があつて、冷却熱量は地表での温度と附近の氣温  $\theta'$  との差に比例すると假定する。即ち

$$\left| \frac{\partial T}{\partial z} + \lambda(T - \theta') \right|_{z=h} = 0, \quad \lambda > 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

地層の遠方では温泉の影響がなく水平方向での温度勾配が零であると考へられる。即ち

$$\left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

導管と接する地層での温度は  $\theta(z)$  に一致しなければならぬ。即ち

$$|T|_{r=r_0}=\theta(z) \quad \dots\dots\dots(6)$$

## 2 解 法

地層での温度  $T(r, z)$  を次の如く  $T'(z)$  及び  $T''(r, z)$  に分つて求めることにする。

即ち

〔I〕 温泉の導管の影響なき場合に於ける地層の温度を  $T'(z)$  とすれば  $T'(z)$  が満足すべき微分方程式及び境界条件は次の如くである。

$$\frac{\partial^2 T'}{\partial z^2}=0 \quad \dots\dots\dots(1')$$

$$|T'|_{z=0}=\theta_b \quad \dots\dots\dots(3_1')$$

$$\left| \frac{\partial T'}{\partial z} + \lambda(T' - \theta') \right|_{z=h} = 0 \quad \dots\dots\dots(4')$$

$$\frac{\partial T'}{\partial r}=0 \quad r>r_0 \quad \dots\dots\dots(5')$$

〔II〕 温泉の導管の影響に依る地層での温度を  $T''(r, z)$  とすれば  $T''(r, z)$  が満足すべき微分方程式及び境界条件は次の如くである。

$$\frac{\partial^2 T''}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T''}{\partial r} + \frac{\partial^2 T''}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(1'')$$

$$|T''|_{z=0}=0 \quad \dots\dots\dots(3_1'')$$

$$\left| \frac{\partial T''}{\partial z} + \lambda T'' \right|_{z=h} = 0 \quad \dots\dots\dots(4'')$$

$$\left| \frac{\partial T''}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0. \quad \dots\dots\dots(5'')$$

斯くの如く考へれば  $T(r, z) = T'(z) + T''(r, z)$  は微分方程式 (1) の解にして、境界条件 (3<sub>1</sub>), (4), 及び (5) を満足することとなる。

〔I〕 から  $T'(z)$  を求めれば容易に次の解が得られる。

$$T'(z) = \theta_b - \frac{\lambda h}{1 + \lambda h} (\theta_b - \theta') \frac{z}{h} \quad \dots\dots\dots(7')$$

〔II〕 から  $T''(r, z)$  を求めるために次の正弦級数を考へる。

$$T''(r, z) = \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s \Phi_s(r) \sin \beta_s z \quad \dots\dots\dots(i)$$

茲に  $\beta_s$  は  $\cot \beta_s h = -\frac{\lambda}{\beta_s}$  の  $s$  番目の正根にして,  $C_s$  と  $\Phi_s$  とは

$$C_s = \frac{1}{1 + \frac{\cos^2 \beta_s h}{\lambda h}}, \quad \Phi_s(r) = \int_0^h T'''(\xi, r) \sin \beta_s \xi d\xi \quad \dots\dots(ii)$$

然るに境界条件 (4'') を満足するから

$$\int_0^h \frac{\partial^2 T'''}{\partial \xi^2} \sin \beta_s \xi d\xi = -\beta_s^2 \Phi_s(r) \quad \dots\dots(iii)$$

である。それ故に  $\frac{\partial^2 T''}{\partial z^2}$  は次の如く與へられる。

$$\frac{\partial^2 T''}{\partial z^2} = \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s [-\beta_s^2 \Phi_s(r)] \sin \beta_s z \quad \dots\dots(iv)$$

又同様にして次の展開が得られる。

$$\frac{\partial T''}{\partial r} = \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{d\Phi_s}{dr} \sin \beta_s z, \quad \dots\dots(v)$$

$$\frac{\partial^2 T''}{\partial r^2} = \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{d^2 \Phi_s}{dr^2} \sin \beta_s z. \quad \dots\dots(vi)$$

式 (iv), (v), 及び (vi) を式 (1'') に代入して次の微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 \Phi_s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Phi_s}{dr} - \beta_s^2 \Phi_s(r) = 0 \quad (s=1, 2, 3, \dots\dots) \quad \dots\dots(1_s)$$

此の微分方程式の一般解は

$$\Phi_s(r) = A_s K_0(\beta_s r) + B_s I_0(\beta_s r) \quad \dots\dots(vii)$$

に與へられる。然るに  $\left| \frac{\partial T''}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0$  なる境界条件が満足されるから  $B_s = 0$  である。

依つて

$$\Phi_s(r) = A_s K_0(\beta_s r) \quad \dots\dots(viii)$$

従つて境界条件 (3''<sub>1</sub>), (4''), 及び (5'') を満足する微分方程式 (1'') の解は次の如く與へられる。

$$T'''(r, z) = \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s A_s K_0(\beta_s r) \sin \beta_s z \quad \dots\dots(7'')$$

式 (7') 及び (7'') から

$$T(r, z) = \theta_b - \frac{\lambda h}{1 + \lambda h} (\theta_b - \theta') \frac{z}{h} + \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s A_s K_0(\beta_s r) \sin \beta_s z \quad \dots\dots(7)$$

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

之を式 (2) に代入して兩邊を  $z$  に就いて積分し、 $\theta|_{z=0}=\theta_b$  なる境界條件を滿足する様に積分常數を決定すれば次の結果が得られる。

$$\theta(z)=\theta_b-\frac{2\pi r_0 k}{cq}\cdot\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_s A_s K_1(\beta_s r_0)(1-\cos\beta_s z) \quad \dots\dots\dots(8)$$

次に積分常數  $A_s$  を決定せねばならぬ。そのために  $\theta(z)$  及び  $\frac{z}{h}$  を式 (7'') と同様の正弦級數に展開する。

$$\theta(z)=\theta_b-\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_s\left\{\int_0^h[\theta_b-\theta(\xi)]\sin\beta_s\xi d\xi\right\}\sin\beta_s z, \quad \dots\dots\dots(\text{ix})$$

$$-\frac{\lambda h}{\lambda h+1}(\theta_b-\theta')\frac{z}{h}=\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_s\left[(\theta_b-\theta')\frac{\cos\beta_s h}{\beta_s}\right]\sin\beta_s z. \quad \dots\dots\dots(\text{x})$$

式 (x) を式 (7) に代入すれば

$$T(r, z)=\theta_b+\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_s\left[A_s K_0(\beta_s r)+(\theta_b-\theta')\frac{\cos\beta_s h}{\beta_s}\right]\sin\beta_s z \quad \dots\dots\dots(\text{xi})$$

境界條件  $|T(r, z)|_{r=r_0}=\theta(z)$  に式 (ix) 及び (xi) を代入して次の關係式が得られる。

$$A_s K_0(\beta_s r_0)+(\theta_b-\theta')\frac{\cos\beta_s h}{\beta_s}=-\int_0^h[\theta_b-\theta(\xi)]\sin\beta_s\xi d\xi \quad (s=1, 2, 3, \dots\dots\dots)(9_s)$$

此の式の右邊に於ける積分は式 (8) を適用して次の如く得られる。

$$\begin{aligned} & -\int_0^h[\theta_b-\theta(\xi)]\sin\beta_s\xi d\xi \\ & =\frac{2}{h}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2\pi r_0 k}{cq}C_m A_m K_1(\beta_m r_0)\left[\frac{\cos\beta_s h-1}{\beta_s}\right. \\ & \quad \left.+\frac{\beta_s(1-\cos\beta_m h\cos\beta_s h)-\beta_m\sin\beta_m h\sin\beta_s h}{\beta_s^2-\beta_m^2}\right] \quad \dots\dots\dots(\text{xii}) \end{aligned}$$

之を (9<sub>s</sub>) に代入して次の式が得られる。

$$\begin{aligned} & A_s K_0(\beta_s r_0)+(\theta_b-\theta')\frac{\cos\beta_s h}{\beta_s} \\ & =\frac{2}{h}\sum_{m=1}^{\infty}C_m\left(\frac{2\pi r_0 k}{cq}\right)A_m K_1(\beta_m r_0)\left[\frac{\cos\beta_s h-1}{\beta_s}\right. \\ & \quad \left.+\frac{\beta_m(\sin\beta_m h\sin\beta_s h)+\beta_s(\cos\beta_m h\cos\beta_s h-1)}{\beta_m^2-\beta_s^2}\right] \\ & \quad (s=1, 2, 3, \dots\dots\dots)(9'_s) \end{aligned}$$

此の一群の聯立方程式から  $A_s (s=1, 2, 3, \dots)$  を決定することが出来る。而して之等を式 (7) 及び (8) に代入すれば  $T(r, z)$  及び  $\theta(z)$  は完全に求められる。

然れども此等の解は數計算をなすには不便である。それで茲には導管内の温度分布に就いての近似式を適用して地層に於ける温度分布を計算するに便宜な式に更める。

瀬野錦藏<sup>1)</sup>氏が得られた近似式は

$$\theta(z) = \alpha + \beta(h-z) + \frac{\beta}{\gamma} \{1 - e^{-\gamma z}\} \dots\dots\dots (a)$$

である。之を級數に展開すれば次の如くなる。

$$\theta(z) = \alpha + \beta h - \frac{\beta \gamma}{2!} z^2 + \frac{\beta \gamma^2}{3!} z^3 - \frac{\beta \gamma^3}{4!} z^4 + \dots\dots\dots (a')$$

$\gamma$  が小であるから  $\gamma^2$  以上の項を無視すれば

$$\theta(z) \doteq \alpha + \beta h - \frac{\beta \gamma}{2} z^2 \dots\dots\dots (a'')$$

温泉水の層に於ては次の條件が満足されて居ると假定することが出来る。

$$\theta|_{z=0} = \theta_b \dots\dots\dots (b_1)$$

$$\left| \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=0} = 0 \dots\dots\dots (b_2)$$

地面に於ては次の條件が満足される。

$$\theta|_{z=h} = \theta_u = \theta_b - \frac{\lambda h}{\lambda h + 2} (\theta_b - \theta') \dots\dots\dots (c_1)$$

$$\left| \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=h} = -\lambda (\theta_u - \theta'), \quad \lambda > 0 \dots\dots\dots (c_2)$$

茲に  $\lambda, \theta'$  は何れも式 (3) に於けるものと同一の値をとると假定する。

斯くの如く假定すれば式 (a'') は次の如くなる。

$$\theta(z) = \theta_b - \frac{\lambda h}{\lambda h + 2} (\theta_b - \theta') \left( \frac{z}{h} \right)^2 = \theta_b - (\theta_b - \theta_u) \left( \frac{z}{h} \right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

此の近似式を用ひることにすると、式 (xii) は

$$\begin{aligned} & - \int_0^h [\theta_b - \theta(\xi)] \sin \beta_s \xi d\xi \\ & = (\theta_b - \theta') \frac{\cos \beta_s h}{\beta_s} + \frac{2(\theta_b - \theta_u)}{\beta_s^2} \frac{1 - \cos \beta_s h}{\beta_s^2} \dots\dots\dots (xiii) \end{aligned}$$

1) 瀬野錦藏：温泉湧出導管中に於ける温度垂直分布の近似解，本誌本號 187 頁

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

となるから式 (9<sub>s</sub>) より

$$A_s = \frac{2(\theta_b - \theta_u)}{h^2} \cdot \frac{1 - \cos \beta_s h}{\beta_s^3} \cdot \frac{1}{K_0(\beta_s r_0)} \dots\dots\dots (xiv)$$

之を式 (7) に代入して次の結果が得られる。

$$T(r, z) = \theta_b - \frac{\lambda h}{1 + \lambda h} (\theta_b - \theta') - \frac{z}{h} \\ + \frac{2}{h} \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{2(\theta_b - \theta_u)}{h^2} \cdot \frac{(1 - \cos \beta_s h)}{\beta_s^3} \cdot \frac{K_1(\beta_s r)}{K_0(\beta_s r_0)} \sin \beta_s z \dots\dots\dots (11)$$

今  $\beta_s h \equiv \alpha_s$  即ち  $\alpha_s$  を  $\cot \alpha_s = -\frac{\lambda h}{\alpha_s}$  の  $s$  番目の正根とすれば  $C_s = \frac{1}{1 + \frac{\cos^2 \alpha_s}{\lambda h}}$  となり、而して  $T(r, z)$  は次の如くなる。

$$T(r, z) = \theta_b - \frac{\lambda h}{1 + \lambda h} (\theta_b - \theta') - \frac{z}{h} \\ + 4(\theta_b - \theta_u) \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{1 - \cos \alpha_s}{\alpha_s^3} \cdot \frac{K_1\left(\alpha_s \frac{r}{h}\right)}{K_0\left(\alpha_s \frac{r_0}{h}\right)} \sin \alpha_s \left(\frac{z}{h}\right) \dots\dots\dots (11')$$

### 3 地層に於ける温泉の影響範囲

昭和十一年八月瀬野<sup>1)</sup>、西田兩氏は別府温泉 No. 434 ノ 1 等に就いて温泉導管内の温度分布を實測された。その結果の一部を拜借して數計算をなさん。

別府温泉 No. 434 ノ 1 に就いて、干潮時に於ける實測の結果は次の表の通りである。但し  $\theta_b = 48.5$  である。

表 I (別府温泉 No. 434 ノ 1) 温泉の導管内の温度分布

| 観測日時                      | 深度                  | 140m | 120m | 100m | 80m  | 60m  | 40m  | 20m  | 0m   |
|---------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 温度                  |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 八月三日<br>14時07分<br>～15時24分 | $\theta$            | 47.5 | 46.8 | 45.8 | 44.5 | 42.5 | 40.5 | 39.1 | 38.0 |
|                           | $\theta_b - \theta$ | 1.0  | 1.7  | 2.7  | 4.0  | 6.0  | 8.0  | 9.4  | 10.5 |
| 八月四日<br>14時49分<br>～16時0分  | $\theta$            | 47.5 | 47.0 | 46.0 | 44.5 | 43.0 | 40.5 | 39.0 | 37.0 |
|                           | $\theta_b - \theta$ | 1.0  | 1.5  | 2.5  | 4.0  | 5.5  | 8.0  | 9.5  | 11.5 |

1) 瀬野錦藏, 西田久雄: 別府温泉二三の湧出口導管に於ける温度分布と途中冷却率, 本誌第 2 卷第 1 號 82 頁

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

|                           |                     |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 八月五日<br>14時43分<br>～16時01分 | $\theta$            | 47.°4  | 47.°0  | 46.°0  | 44.°7  | 43.°0  | 41.°0  | 39.°5  | 37.°5  |
|                           | $\theta_b - \theta$ | 1.°1   | 1.°5   | 2.°5   | 3.°8   | 5.°5   | 7.°5   | 9.°0   | 11.°0  |
| 干 潮 時<br>平 均              | $\theta$            | 47.°47 | 46.°93 | 45.°93 | 44.°57 | 42.°83 | 40.°67 | 39.°20 | 37.°50 |
|                           | $\theta_b - \theta$ | 1.°03  | 1.°57  | 2.°57  | 3.°93  | 5.°67  | 7.°83  | 9.°30  | 11.°00 |

此の實例に就いて以下の數計算を進める。

(1) 泉底の恒温層の深さ  $h$  と其處での温度  $\theta_b$ : 上の實測値から  $\frac{d\theta}{dz}=0$  なる條件を満足する深さ  $h$  を推定すれば  $h \approx 200\text{m}$  なる結果が得られる。是が吾人の假定せる温泉水の層の深さである。然るに野滿<sup>1)</sup>教授・山下氏の研究に依れば別府温泉 No. 434 ノ 1 附近での採水層即ち所謂 SG 層の深さは約 180m 乃至 200m である。されば吾人が茲に推定せる深さと大略一致する。依つて以下の計算に於て泉底の恒温層の深さ ( $h$ ) として 200m をとる。

次に導管内の温度分布圖を深さ 200m に於て  $\frac{d\theta}{dz}=0$  なる條件を満足する様に延長して  $\theta_b$  を推定すれば  $\theta_b \approx 48.°5$  となる。

(2) 導管内の温度分布の實測値と其の計算値との比較: 前節に於ける導管内の温度分布に就いての近似式

$$\theta(z) = \theta_b - (\theta_b - \theta_u) \left( \frac{z}{h} \right)^2 = \theta_b - \frac{\lambda h}{\lambda h + 2} (\theta_b - \theta') \left( \frac{z}{h} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

に依る計算値と實測値とを比較すれば次の表の如くなる。

表 II 導管内の温度分布の實測値と計算値との比較

| $\theta(z)$ \ 深度 | 140m   | 120m   | 100m   | 80m    | 60m    | 40m    | 20m    | 0m     |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 實 測 値            | 47.°47 | 46.°93 | 45.°93 | 44.°57 | 42.°83 | 40.°67 | 39.°20 | 37.°50 |
| 計 算 値            | 47.°51 | 46.°74 | 45.°75 | 44.°54 | 43.°11 | 41.°46 | 39.°59 | 37.°50 |
| 差                | -0.°04 | 0.°19  | +0.°18 | +0.°03 | -0.°27 | -0.°79 | -0.°39 |        |

上の表に示せる如く、深さ 40m に於て多少の差異があるが其他の深さに於ては實測値と計算値とが近似して居る。故に近似式 (10) は實際によく適合する。従つて式 (11) 等を實例に適用して差支へないことが知られる。

1) 野滿隆治, 山下馨: 別府舊市内の地中温度と温泉脈, 本誌第 2 卷第 3 號 233 頁

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

(3) 地面の冷却係数  $\lambda$  及び気温  $\theta'$  の推定: 気温  $\theta'$  は不幸にして観測値が發表されて居ない。それで次の如き方法で  $\lambda$  及び  $\theta'$  を推定する。

前節に於て地表での條件を

$$\theta|_{z=h} = \theta_u = \theta_b - \frac{\lambda h}{\lambda h + 2}(\theta_b - \theta'), \quad \dots\dots\dots (c_1)$$

$$\left| \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=h} = -\lambda h(\theta_u - \theta') \quad \dots\dots\dots (c_2)$$

と假定した。

今  $\theta_u = 37.5$ , (A)  $\lambda h = 5$ , (B)  $\lambda h = 10$  として式 (c<sub>1</sub>) から  $\theta'$  を求むれば次の結果が得られる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{(A) } \lambda h = 5 \text{ の場合} & \theta' = 33.1 \\ \text{(B) } \lambda h = 10 \text{ の場合} & \theta' = 35.3 \end{array} \right\}$$

$\left| \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=h}$  の實測値を式 (c<sub>2</sub>) に代入して  $\theta'$  を求むるも亦上と同様の結果が得られる。實測の日時は八月三, 四, 五日の 14 時と 16 時との間であるから気温  $\theta'$  は 33.1 乃至 35.3 程度であつたと想像される。それ故に地表に於ける實際の状態も (A), (B) の二つの場合に近似せりと推定される。依つて茲には (A)  $\lambda h = 5$ ,  $\theta' = 33.1$  及び (B)  $\lambda h = 10$ ,  $\theta' = 35.3$  の二つの場合に就いて地層の温度分布を計算する。又導管の半径は  $r_0 = 2.15\text{cm}$  である。

(4) 地層での温度分布と影響範囲の推定:  $\theta_b$ ,  $\theta_u$ ,  $\theta'$ ,  $h$ ,  $r_0$ ,  $\lambda h$  が與へられたのであるから, 式 (11') を適用して  $T'(z)$  及び  $T''(r, z)$  従つて  $T(r, z)$  を計算することが出来る。深さ 0, 20m, 40m, 80m, 100m, 120m, 140m 即ち  $z/h = 1, \frac{9}{10}, \frac{8}{10}, \frac{7}{10}, \frac{6}{10}, \frac{5}{10}, \frac{4}{10}, \frac{3}{10}$  に於ける  $T'(z)$  を計算し, 各深さに於て  $r = r_0, 200r_0, 400r_0, 600r_0, 800r_0, 1000r_0, 1500r_0, 2000r_0, 2500r_0, 3000r_0, 3500r_0, 4000r_0, 4500r_0, 5000r_0, 5500r_0$  の點での  $T''(r, z)$  を計算した。従つて (A), (B) の二つの場合に就いて地層に於ける各點での温度  $T(r, z)$  が求め得たのである。其の計算の結果は表 III (A) 及び表 III (B) に示す通りである。

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

表 III (A) 地層に於ける温度分布 ( $\lambda k=5$ ,  $\theta=33.1$ ) ( $\tau_0=2.15\text{cm}$ )

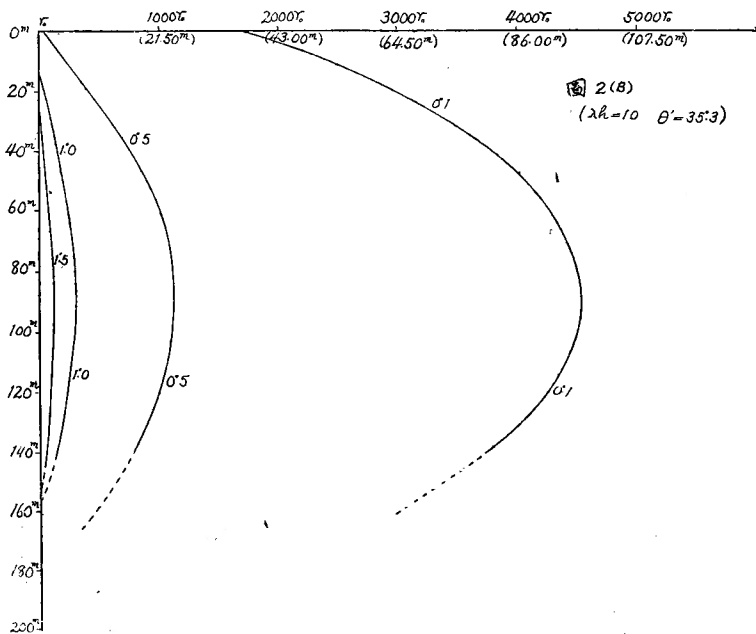
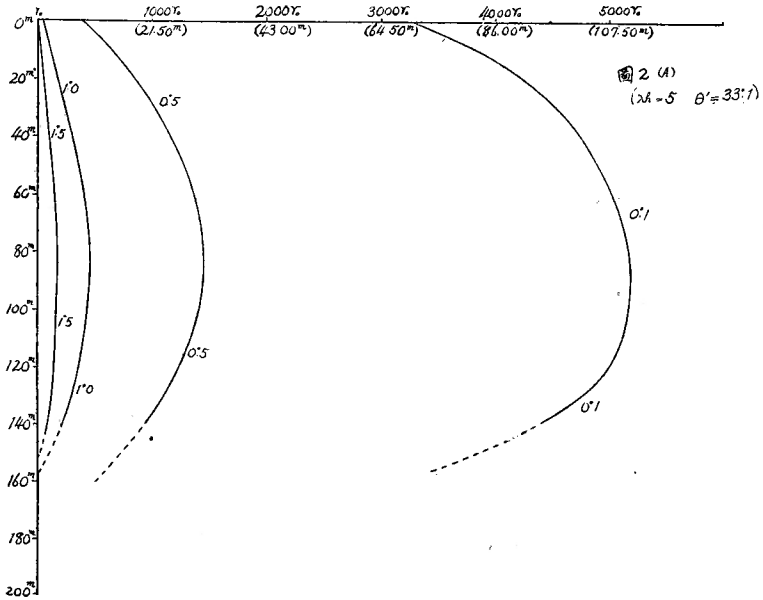
| 深 度  | $\frac{r}{\text{温度}}$ | $\tau_0$ | 200%  | 400%  | 600%  | 800%  | 1000% | 1500% | 2000% | 2500% | 3000% | 3500% | 4000% | 4500% | 5000% | 5500% | $\infty$ |
|------|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0m   | $T''$                 | 1.83     | 0.64  | 0.50  | 0.41  | 0.35  | 0.31  | 0.23  | 0.18  | 0.14  | 0.11  | 0.09  | 0.08  | 0.06  | 0.05  | 0.04  | 0.00     |
|      | $T$                   | 37.50    | 36.31 | 36.17 | 36.08 | 36.02 | 35.98 | 35.90 | 35.85 | 35.81 | 35.78 | 35.76 | 35.75 | 35.73 | 35.72 | 35.71 | 35.67    |
| 20m  | $T''$                 | 2.64     | 0.93  | 0.73  | 0.60  | 0.52  | 0.45  | 0.38  | 0.26  | 0.20  | 0.16  | 0.13  | 0.11  | 0.09  | 0.07  | 0.06  | 0.00     |
|      | $T$                   | 39.59    | 37.88 | 37.68 | 37.55 | 37.47 | 37.40 | 37.28 | 37.21 | 37.15 | 37.11 | 37.08 | 37.06 | 37.04 | 37.02 | 37.01 | 36.95    |
| 40m  | $T''$                 | 3.22     | 1.16  | 0.91  | 0.75  | 0.64  | 0.55  | 0.41  | 0.32  | 0.26  | 0.20  | 0.17  | 0.14  | 0.11  | 0.09  | 0.08  | 0.00     |
|      | $T$                   | 41.46    | 39.40 | 39.15 | 38.99 | 38.88 | 38.79 | 38.65 | 38.56 | 38.50 | 38.44 | 38.41 | 38.38 | 38.36 | 38.33 | 38.32 | 38.24    |
| 60m  | $T''$                 | 3.59     | 1.29  | 1.01  | 0.83  | 0.72  | 0.62  | 0.46  | 0.36  | 0.29  | 0.23  | 0.19  | 0.16  | 0.13  | 0.10  | 0.09  | 0.00     |
|      | $T$                   | 43.11    | 40.81 | 40.53 | 40.35 | 40.24 | 40.14 | 39.98 | 39.88 | 39.81 | 39.75 | 39.71 | 39.68 | 39.65 | 39.62 | 39.61 | 39.52    |
| 80m  | $T''$                 | 3.74     | 1.34  | 1.06  | 0.87  | 0.75  | 0.65  | 0.48  | 0.38  | 0.30  | 0.24  | 0.20  | 0.16  | 0.13  | 0.11  | 0.09  | 0.00     |
|      | $T$                   | 44.54    | 42.14 | 41.85 | 41.67 | 41.55 | 41.45 | 41.28 | 41.18 | 41.10 | 41.04 | 41.00 | 40.96 | 40.98 | 40.91 | 40.89 | 40.80    |
| 100m | $T''$                 | 3.67     | 1.31  | 1.03  | 0.85  | 0.73  | 0.63  | 0.47  | 0.37  | 0.29  | 0.23  | 0.19  | 0.16  | 0.13  | 0.11  | 0.09  | 0.00     |
|      | $T$                   | 45.75    | 43.39 | 43.11 | 42.93 | 42.81 | 42.71 | 42.56 | 42.45 | 42.37 | 42.31 | 42.27 | 42.24 | 42.21 | 42.19 | 42.17 | 42.08    |
| 120m | $T''$                 | 3.37     | 1.20  | 0.94  | 0.78  | 0.66  | 0.58  | 0.43  | 0.33  | 0.26  | 0.21  | 0.17  | 0.14  | 0.12  | 0.10  | 0.08  | 0.00     |
|      | $T$                   | 46.74    | 44.57 | 44.31 | 44.15 | 44.03 | 43.95 | 43.80 | 43.70 | 43.63 | 43.58 | 43.54 | 43.51 | 43.49 | 43.47 | 43.45 | 43.37    |
| 140m | $T''$                 | 2.86     | 1.02  | 0.79  | 0.65  | 0.56  | 0.48  | 0.36  | 0.27  | 0.21  | 0.17  | 0.14  | 0.12  | 0.09  | 0.08  | 0.07  | 0.00     |
|      | $T$                   | 47.51    | 45.67 | 45.44 | 45.30 | 45.21 | 45.13 | 45.01 | 44.92 | 44.86 | 44.82 | 44.79 | 44.77 | 44.74 | 44.73 | 44.72 | 44.65    |

表 III (B) 地層に於ける温度分布 ( $\lambda k=10, \theta=35.3$ ) ( $r_0=2.15\text{cm}$ )

| 深度   | $\frac{r}{r_0}$ | $r_0$ | 200%  | 400%  | 600%  | 800%  | 1000% | 1500% | 2000% | 2500% | 3000% | 3500% | 4000% | 4500% | 5000% | 5500% | $\infty$ |
|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0m   | $T''$           | 1.00  | 0.34  | 0.26  | 0.21  | 0.18  | 0.16  | 0.12  | 0.08  | 0.07  | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | 0.02  | 0.00     |
|      | $T$             | 37.60 | 36.34 | 36.76 | 36.71 | 36.68 | 36.66 | 36.62 | 36.58 | 36.57 | 36.55 | 36.54 | 36.53 | 36.53 | 36.52 | 36.52 | 36.50    |
| 20m  | $T''$           | 1.89  | 0.66  | 0.50  | 0.41  | 0.35  | 0.30  | 0.22  | 0.17  | 0.13  | 0.10  | 0.08  | 0.07  | 0.05  | 0.05  | 0.04  | 0.00     |
|      | $T$             | 39.89 | 38.56 | 38.20 | 38.11 | 38.05 | 38.00 | 37.92 | 37.87 | 37.88 | 37.80 | 37.78 | 37.77 | 37.75 | 37.75 | 37.74 | 37.70    |
| 40m  | $T''$           | 2.56  | 0.84  | 0.70  | 0.57  | 0.49  | 0.42  | 0.30  | 0.23  | 0.18  | 0.14  | 0.11  | 0.09  | 0.08  | 0.06  | 0.05  | 0.00     |
|      | $T$             | 41.46 | 39.74 | 39.50 | 39.47 | 39.39 | 39.32 | 39.20 | 39.13 | 39.08 | 39.04 | 39.01 | 38.99 | 38.98 | 38.96 | 38.95 | 38.90    |
| 60m  | $T''$           | 3.01  | 1.08  | 0.83  | 0.68  | 0.58  | 0.50  | 0.37  | 0.28  | 0.22  | 0.17  | 0.14  | 0.11  | 0.09  | 0.08  | 0.06  | 0.00     |
|      | $T$             | 43.11 | 41.18 | 40.93 | 40.78 | 40.68 | 40.60 | 40.47 | 40.38 | 40.32 | 40.27 | 40.24 | 40.21 | 40.19 | 40.18 | 40.16 | 40.10    |
| 80m  | $T''$           | 3.24  | 1.16  | 0.89  | 0.73  | 0.62  | 0.54  | 0.40  | 0.31  | 0.24  | 0.19  | 0.15  | 0.12  | 0.10  | 0.08  | 0.07  | 0.00     |
|      | $T$             | 44.54 | 42.46 | 42.19 | 42.03 | 41.92 | 41.84 | 41.70 | 41.61 | 41.54 | 41.49 | 41.45 | 41.42 | 41.40 | 41.38 | 41.37 | 41.30    |
| 100m | $T''$           | 3.25  | 1.16  | 0.89  | 0.73  | 0.63  | 0.55  | 0.41  | 0.31  | 0.24  | 0.19  | 0.15  | 0.12  | 0.10  | 0.08  | 0.07  | 0.00     |
|      | $T$             | 45.75 | 43.66 | 43.39 | 43.23 | 43.13 | 43.05 | 42.91 | 42.81 | 42.74 | 42.69 | 42.65 | 42.62 | 42.60 | 42.58 | 42.57 | 42.50    |
| 120m | $T''$           | 3.04  | 1.08  | 0.83  | 0.68  | 0.58  | 0.51  | 0.38  | 0.28  | 0.22  | 0.18  | 0.14  | 0.11  | 0.09  | 0.08  | 0.06  | 0.00     |
|      | $T$             | 46.74 | 44.78 | 44.53 | 44.38 | 44.28 | 44.21 | 44.08 | 43.98 | 43.92 | 43.88 | 43.84 | 43.81 | 43.79 | 43.78 | 43.76 | 43.70    |
| 140m | $T''$           | 2.61  | 0.98  | 0.71  | 0.58  | 0.49  | 0.43  | 0.31  | 0.24  | 0.18  | 0.15  | 0.12  | 0.09  | 0.08  | 0.06  | 0.05  | 0.00     |
|      | $T$             | 47.51 | 45.83 | 45.61 | 45.48 | 45.39 | 45.33 | 45.21 | 45.14 | 45.08 | 45.05 | 45.02 | 44.99 | 44.98 | 44.96 | 44.95 | 44.90    |

温泉上昇が附近地温に及ぼす影響範囲に就て

次に温泉導管の影響範囲を知るために温度  $T'(r, z)$  の分布から  $0.1, 0.5, 1.0, 1.5$  の等温線を求めた。其の結果は図 2 (A) 及び図 2 (B) に示す通りである。



以上の計算の結果に依つて知り得た主な事項は次の通りである。

(1) 導管の影響範囲は深さ 80m 乃至 100m に於て最大である。即ち導管の全深の略ほ中央の地層に於て比較的に廣い範囲まで其の影響が及ぶ。例へば  $0.1^{\circ}$  程度の影響は導管から 90m 乃至 120m の範囲にまで及び、 $0.5^{\circ}$  程度の影響は 20m 乃至 30m の範囲まで、 $1^{\circ}$  程度なら 6~8m の範囲まで及ぶ。

(2) 然し地表面近くでは温泉管の影響は極めて近距離に限られ、 $1^{\circ}$  程度の影響は無いが、あつても 1m 以内に限られ、 $0.5^{\circ}$  の影響でも 1~8m の範囲にすぎぬ。

(3) 気温が比較的低温、地表での冷却係数が小なるほど其の影響範囲は比較的に廣くなる。

以上の計算は一例に就いてであるが他の例に就いても同様の方法と手續で計算出来る。第2節に於て假定せる泉底の温泉水の層での境界條件は泉底の恒温層の深さ及び其處での温度を推定するためのものであり、又地表での境界條件は冷却係數等を推定するためのものである。

導管内の温度分布に就いては實驗式を用ひた。それで他の例に就いても全く同様に計算出来る。

要するに本論文に於ては温泉上昇が導管附近の地温に及ぼす影響範囲を推定する方法を示し、實例に就いて其の影響範囲を推定したのである。

終に此の問題を與へられ且つ種々御指導を賜つた野滿教授に深く感謝の意を表する。