溫泉上昇が附近地溫に及ぼす影響範圍に就て

理學士　岡　本　元　治　郎

緒　　　言

鉛直なる溫泉の導管がある場合に其の影響を受けて附近地層での溫度分布が如何になるか，又如何なる範圍まで其の影響が及ぶかの問題に就いて論究する。

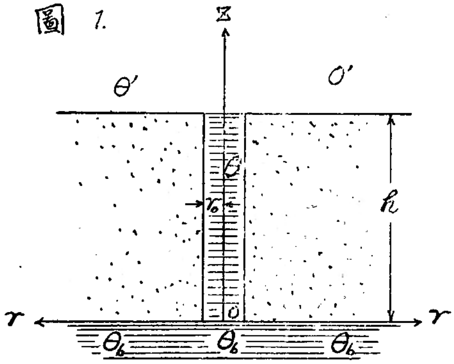
鉛直なる導管の泉底にある被壓溫泉水の層が水平にして，常に一定溫度に保たれて居る場合を考へる。又地表では輻射や空氣の傳導があつて，其の爲の冷却熱量は地表の溫度と其の附近の氣溫との差に比例すると假定する。地中では導管と地層との境界面に於て熱の受授があり，其處では兩者の溫度が一致して居る。而して導管の影響は非常に遠方までは及ばぬこと勿論である。

斯くの如き場合に地層に於ける溫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溫度分布を計算し，其の影響が地層の如何なる範圍まで及ぶかを檢討する。

1　基本式及び境界條件

圖 1 に示す如く地表から h の深さに溫泉水の恒溫層があつて其の上に半徑 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溫度分布を求める。地層は均一で途中には別に他の熱源はないものとする。

圖 1.



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。又導管內の溫度を θ とし，地層での溫度を T とする。さすれば地層に於ける定常狀態での熱傳導の式は

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

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

$$Q_1=\rho\pi r_0^2 vc\left[\theta-\left(\theta+\frac{\partial\theta}{\partial z}dz\right)\right]dt=-\rho\pi r_0^2 vc\frac{\partial\theta}{\partial z}dzdt$$

$$=-cq\frac{\partial\theta}{\partial z}dzdt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{i})$$

茲に ρ 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徑が小であるから大略一様と考へて，θ は z のみの函数と看做すことにする。

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。

$$Q_2=-k\left|\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_0}2\pi r_0\ dzdt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{ii})$$

定常狀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。

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

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

$$|T|_{z=0}=\theta_b, \qquad |\theta|_{z=0}=\theta_b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3_1),\ (3_2)$$

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 θ' との差に比例すると假定する。即ち

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

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

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

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

$$|T|_{r=r_0}=\theta(z) \qquad \cdots\cdots(6)$$

2 解　　　法

地層での溫度 $T(r, z)$ 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〕 溫泉の導管の影響なき場合に於ける地層の溫度を $T'(z)$ とすれば $T'(z)$ が滿足すべき微分方程式及び境界條件は次の如くである。

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

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

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

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

〔II〕 溫泉の導管の影響に依る地層での溫度を $T''(r, z)$ とすれば $T''(r, z)$ が滿足すべき微分方程式及び境界條件は次の如くである。

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

$$|T''|_{z=0}=0 \qquad \cdots\cdots(3_1'')$$

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

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

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，境界條件 (3_1), (4), 及び (5) を滿足することとなる。

〔I〕 から $T'(z)$ を求めれば容易に次の解が得られる。

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

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

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

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

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

然るに境界條件（$4''$）を滿足するから

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

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

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

又同樣にして次の展開が得られる。

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

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

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。

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

此の微分方程式の一般解は

$$\Phi_s(r)=A_sK_0(\beta_s r)+B_sI_0(\beta_s r) \qquad \cdots\cdots(\text{vii})$$

に與へられる。然るに$\left|\frac{\partial T''}{\partial r}\right|_{r=\infty}=0$ なる境界條件が滿足されるから $B_s=0$ である。依つて

$$\Phi_s(r)=A_sK_0(\beta_s r) \qquad \cdots\cdots(\text{viii})$$

從つて境界條件（$3''_1$)，($4''$)，及び（$5''$）を滿足する微分方程式（$1''$）の解は次の如く與へられる。

$$T''(r,\ z)=\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_sA_sK_0(\beta_s r)\sin\beta_s z \qquad \cdots\cdots(7'')$$

式（$7'$）及び（$7''$）から

$$T(r,\ z)=\theta_b-\frac{\lambda h}{1+\lambda h}(\theta_b-\theta')\frac{z}{h}+\frac{2}{h}\sum_{s=1}^{\infty}C_sA_sK_0(\beta_s r)\sin\beta_s z$$

$$\cdots\cdots(7)$$

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。

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

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。

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

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

式 (x) を式 (7) に代入すれば

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

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。

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

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。

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

之を (9_s) に代入して次の式が得られる。

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

此の一群の聯立方程式から $A_s(s=1, 2, 3, \ldots\ldots)$ を決定することが出來る。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。それで茲には導管內の溫度分布に就いての近似式を適用して地層に於ける溫度分布を計算するに便宜な式に更める。

瀨野錦藏氏[1]が得られた近似式は

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

である。之を級數に展開すれば次の如くなる。

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

γ が小であるから γ^2 以上の項を無視すれば

$$\theta(z)\fallingdotseq\alpha+\beta h-\frac{\beta\gamma}{2}z^2 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{a}'')$$

溫泉水の層に於ては次の條件が滿足されて居ると假定することが出來る。

$$|\theta|_{z=0}=\theta_b \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{b}_1)$$

$$\left|\frac{d\theta}{dz}\right|_{z=0}=0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{b}_2)$$

地面に於ては次の條件が滿足される。

$$|\theta|_{z=h}=\theta_u=\theta_b-\frac{\lambda h}{\lambda h+2}(\theta_b-\theta') \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{c}_1)$$

$$\left|\frac{d\theta}{dz}\right|_{z=h}=-\lambda(\theta_u-\theta'),\quad \lambda>0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{c}_2)$$

茲に λ, θ' 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。

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

此の近似式を用ひることにすると，式 (xii) は

$$-\int_0^h[\theta_b-\theta(\xi)]\sin\beta_s\xi d\xi$$
$$=(\theta_b-\theta')\frac{\cos\beta_s h}{\beta_s}+\frac{2(\theta_b-\theta_u)}{h^2}\,\frac{1-\cos\beta_s h}{\beta_s^3} \qquad \cdots\cdots\cdots(\mathrm{xiii})$$

---

1) 瀨野錦藏： 溫泉湧出導管中に於ける溫度垂直分布の近似解，本誌本號 187 頁

となるから式 (9_s) より

$$A_s=\frac{2(\theta_b-\theta_u)}{h^2}\,\frac{1-\cos\beta_s h}{\beta_s^3}\,\frac{1}{K_0(\beta_s r_0)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{xiv})$$

之を式 (7) に代入して次の結果が得られる。

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

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

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

3　地層に於ける溫泉の影響範圍

昭和十一年八月瀨野，[1] 西田兩氏は別府溫泉 No. 434 ノ 1 等に就いて溫泉導管內の溫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。

別府溫泉 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 $\theta_b=48.^\circ5$ である。

表 I （別府溫泉 No. 434 ノ 1）溫泉の導管內の溫度分布

觀測日時	深度／溫度	140m	120m	100m	80m	60m	40m	20m	0m
八月三日 14時07分 ～15時24分	θ	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 14時49分 ～16時0分	θ	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) 瀨野錦藏，西田久雄： 別府溫泉二三の湧出口導管に於ける溫度分布と途中冷却率，本誌第 2 卷第 1 號 32 頁

八月五日 14時43分 〜16時01分	θ	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
干潮時平均	θ	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) 泉底の恒溫層の深さ h と其處での溫度 θ_b: 上の實測値から $\dfrac{d\theta}{dz}=0$ なる條件を滿足する深さ h を推定すれば $h \fallingdotseq 200$m なる結果が得られる。是が吾人の假定せる溫泉水の層の深さである。然るに野滿教授[1]・山下氏の研究に依れば別府溫泉 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。されば吾人が玆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溫層の深さ (h) として 200m をとる。

次に導管内の溫度分布圖を深さ 200m に於て $\dfrac{d\theta}{dz}=0$ なる條件を滿足する様に延長して θ_b を推定すれば $\theta_b \fallingdotseq 48.°5$ となる。

(2) 導管内の溫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溫度分布に就いての近似式

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

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 導管内の溫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。從つて式 (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: 別府舊市内の地中溫度と溫泉脈，本誌第 2 卷第 3 號 233 頁

（3） **地面の冷却係數 λ 及び氣温 θ' の推定：** 氣温 θ' は不幸にして觀測値が發表されて居ない。それで次の如き方法で λ 及び θ' を推定する。

前節に於て地表での條件を

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

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

と假定した。

今 $\theta_u=37.^\circ5$, (A) $\lambda h=5$, (B) $\lambda h=10$ として式 (c_1) から θ' を求むれば次の結果が得られる。

$$\left.\begin{array}{lll}\text{(A)} & \lambda h=5 \text{ の場合} & \theta'=33.^\circ1 \\ \text{(B)} & \lambda h=10 \text{ の場合} & \theta'=35.^\circ3\end{array}\right\}$$

$\left|\frac{d\theta}{dz}\right|_{z=h}$ の實測値を式 (c_2) に代入して θ' 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氣温 θ' は $33.^\circ1$ 乃至 $35.^\circ3$ 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狀態も (A), (B) の二つの場合に近似せりと推定される。依つて玆には (A) $\lambda h=5$, $\theta'=33.^\circ1$ 及び (B) $\lambda h=10$, $\theta'=35.^\circ3$ の二つの場合に就いて地層の溫度分布を計算する。又導管の半徑は $r_0=2.15\text{cm}$ である。

（4） **地層での溫度分布と影響範圍の推定：** θ_b, θ_u, θ', h, r_0, λh が與へられたのであるから，式 (11′) を適用して $T'(z)$ 及び $T''(r, z)$ 從つて $T(r, z)$ を計算することが出來る。深さ 0, 20m, 40m, 80m, 100m, 120m, 140m 卽ち $z/h=1, \frac{9}{10}, \frac{8}{10}, \frac{7}{10}, \frac{6}{10}, \frac{5}{10}, \frac{4}{10}, \frac{3}{10}$ 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。從つて (A), (B) の二つの場合に就いて地層に於ける各點での溫度 $T(r, z)$ 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。

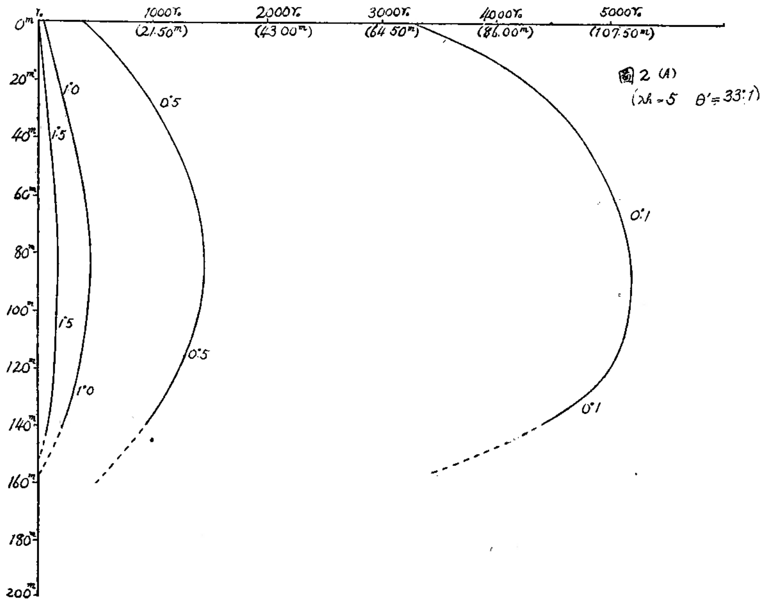
表 III (A) 地層に於ける温度分布 ($\lambda h=5,\ \theta'=33.°1$) ($r_0=2.15$cm)

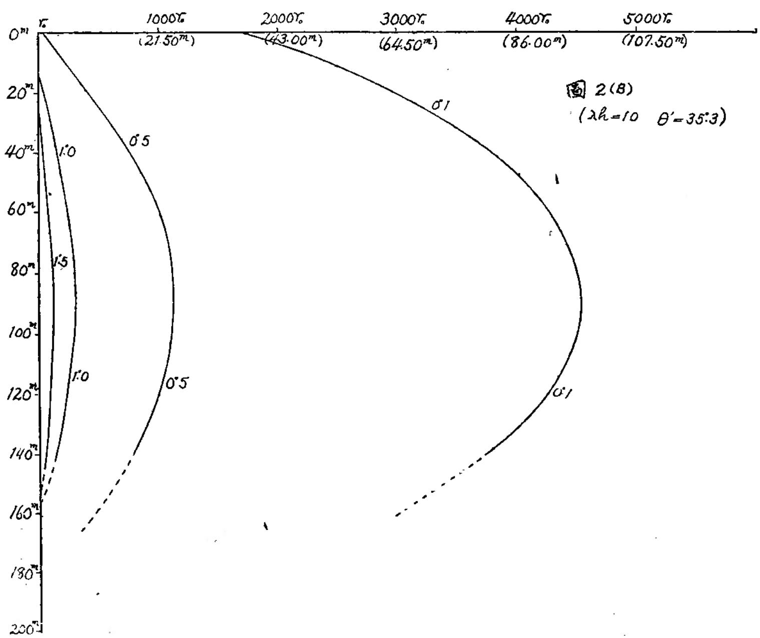
深度	r / 温度	r_0	$200r_0$	$400r_0$	$600r_0$	$800r_0$	$1000r_0$	$1500r_0$	$2000r_0$	$2500r_0$	$3000r_0$	$3500r_0$	$4000r_0$	$4500r_0$	$5000r_0$	$5500r_0$		∞
0m	T''	1.°83	0.°64	0.°50	0.°41	0.°35	0.°31	0.°23	0.°18	0.°14	0.°11	0.°09	0.°0$\bar{8}$	0.°06	0.°05	0.°04		0. 00
	T	37.°50	36.°31	36.°17	36.°08	36.°02	35.°98	35.°90	35.°85	35.°81	35.°78	35.°76	35.°7$\bar{5}$	35.°73	35.°72	35.°71		35.°67
20m	T''	2.°64	0.°93	0.°73	0.°60	0.°5$\bar{2}$	0.°4$\bar{5}$	0.°33	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.°0$\bar{8}$		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.°35	38.°33	38.°3$\bar{2}$		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.°1$\bar{6}$	0.°13	0.°10	0.°0$\bar{9}$		0. 00
	T	43.°11	40.°81	40.°53	40.°35	40.°24	40.°14	39.°98	39.°83	39.°81	39.°75	39.°71	39.°68	39.°65	39.°62	39.°61		39.°52
80m	T''	3.°74	1.°34	1.°05	0.°87	0.°75	0.°65	0.°48	0.°3$\bar{8}$	0.°30	0.°24	0.°20	0.°16	0.°13	0.°11	0.°0$\bar{9}$		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.°93	40.°91	40.°8$\bar{9}$		40.°80
100m	T''	3.°67	1.°31	1.°03	0.°85	0.°73	0.°63	0.°47	0.°3$\bar{7}$	0.°29	0.°23	0.°19	0.°1$\bar{6}$	0.°1$\bar{3}$	0. 1$\bar{1}$	0.°0$\bar{9}$		0. 00
	T	45.°75	43.°39	43.°11	42.°93	42.°81	42.°71	42.°55	42.°45	42.°37	42.°31	42.°27	42.°24	42.°2$\bar{1}$	42.°1$\bar{9}$	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.°1$\bar{0}$	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.°1$\bar{2}$	0.°09	0.°0$\bar{8}$	0.°0$\bar{7}$		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 ($\lambda h=10$, $\theta'=35.°3$) ($r_0=2.15$cm)

深度	温度 \ r	r_0	$200r_0$	$400r_0$	$600r_0$	$800r_0$	$1000r_0$	$1500r_0$	$2000r_0$	$2500r_0$	$3000r_0$	$3500r_0$	$4000r_0$	$4500r_0$	$5000r_0$	$5500r_0$	∞
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.°50	36.°84	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.°59	38.°36	38.°20	38.°11	38.°05	38.°00	37.°92	37.°87	37.°83	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.°93	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

次に溫泉導管の影響範圍を知るために溫度 $T''(r, z)$ の 分布から 0°.1, 0°.5, 1°.0, 1°.5 の等溫線を求めた。其の結果は圖 2 (A) 及び圖 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) 導管の影響範圍は深さ 80m 乃至 100m に於て最大である。即ち導管の全深の略ぼ中央の地層に於て比較的に廣い範圍まで其の影響が及ぶ。例へば 0.°1 程度の影響は導管から 90m 乃至 120m の範圍にまで及び，0.°5 程度の影響は 20m 乃至 30m の範圍まで，1° 程度なら 6～8m の範圍まで及ぶ。

(2) 然し地表面近くでは溫泉管の影響は極めて近距離に限られ，1° 程度の影響は無いか，あつても 1m 以內に限られ，0.°5 の影響でも 1～8m の範圍にすぎぬ。

(3) 氣溫が比較的低く，地表での冷却係數が小なるほど其の影響範圍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樣の方法と手續で計算出來る。第 2 節に於て假定せる泉底の溫泉水の層での境界條件は泉底の恒溫層の深さ及び其處での溫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。

導管內の溫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樣に計算出來る。

要するに本論文に於ては溫泉上昇が導管附近の地溫に及ぼす影響範圍を推定する方法を示し，實例に就いて其の影響範圍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敎授に深く感謝の意を表する。