



Title	3. 種々の熱源による地中温度分析に対する模型実験 (その1)
Author(s)	和田, 昭夫; WADA, Akio
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 10, 33-41
Issue Date	1963-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.10.33
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13846
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p33-41.pdf



3. 種々の熱源による地中温度分布 に対する模型実験 (その1)

和田 昭 夫

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 37 年 9 月 受 理 —

I. 緒 言

温泉源の様な熱源が地中に存在するいくつかの単純な場合について、地中温度の二次的な分布を、電氣的に、水槽模型実験で求めることを試みた。模型化を試みた境界条件は次の通りである。

1. 一様な地表面温度。
2. 地表面に於ける Newton の冷却。
3. 温泉が上昇している割れ目の壁に於ける条件。

II. 原 理

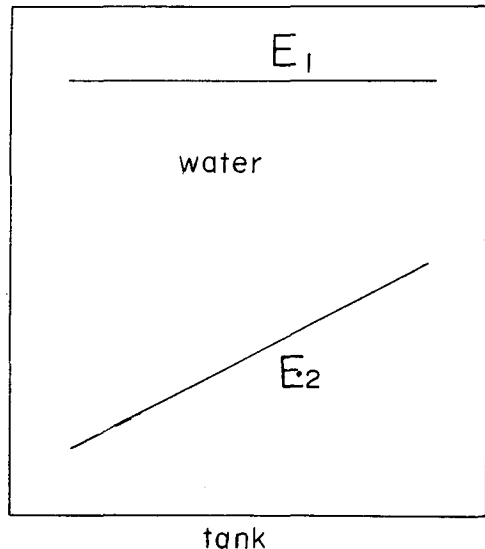
地表面を平面、地層の熱伝導度を一様、気温を 0°C とし、熱源の温度及び地中温度は定常状態にあるとする。又熱源の地表面からの深さは、ある方向 (z 方向) に対して不変とし、熱源はこの方向に熱限の広がりを持って存在するとする。以下、この方向に垂直に切った面を扱う。この面に於いて、地表面上の一点に原点を定め、4. の場合以外は x 軸を地表面に、 y 軸の正の方向を地表面より下方にとる。模型に於いても同様である。

1. 熱源の温度及び地表面温度を、いたるところ一様とみなせる場合

第1図に模型の概略を示す。

E_1 : 地表面温度に対応する電位を有する電極

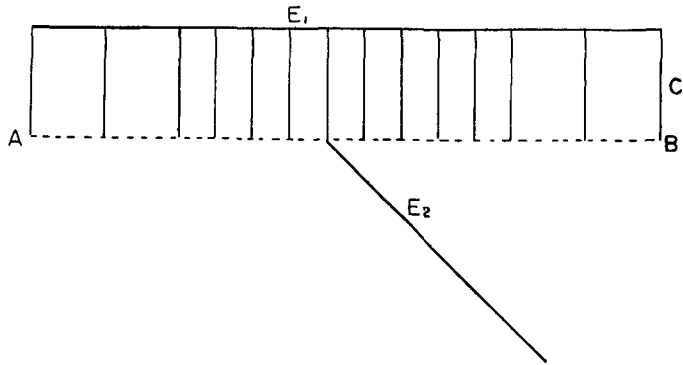
E_2 : 熱源の温度に対応する電位を有する電極



第1図 熱源の温度及び地表面温度をいたるところ一様とみなせる場合に対する模型 (平面図)

Fig. 1. Model in which temperature of underground heat source and that of ground surface are respectively constant.

2. 熱源の温度は一樣で、地表面に於いて Newton の冷却が存在する場合



第 2 図 熱源の温度は一樣で、地表面に於て Newton の冷却が存在する場合に対する模型 (平面図)

Fig. 2 Model in which temperature of underground heat source is constant and Newton's cooling occurs on ground surface.

E_1 : 気温 (0°C) に対応する電位を有する電極

E_2 : 1) に於ける E_2 と同じ意味

C: E_1 に対して垂直に配列された絶縁板

x 軸を BA の方向にとる。絶縁板 C によって、 \overline{AB} と E_1 の間に於ける電流の向きは、 E_1 に垂直になる。従って、 \overline{AB} に於いて、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=0} = \frac{V_{y=0} - V_a}{m} \quad (1)$$

但し、 V_a : E_1 の電位

m : E_1 と \overline{AB} との距離 (C の長さ)

一方、Newton の冷却の式は、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = \frac{h}{K}(T_{y=0} - T_a) \quad (2)$$

但し、 T_a : 気温

h : Newton の冷却の常数

K : 地層の熱伝導度

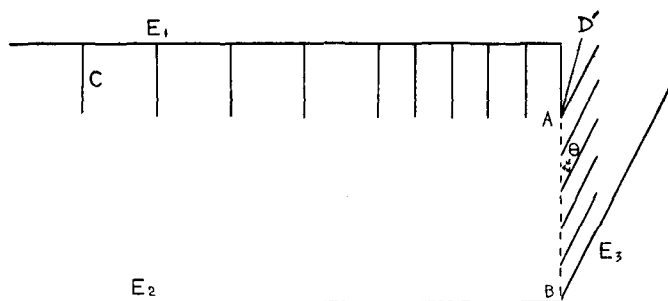
従って、 $\frac{1}{m} = \frac{h}{K}$, $T_a = V_a$, とすれば、 \overline{AB} に於いて Newton の冷却の条件が満足される。実験に於いて、 $\frac{h}{K}$ は $0, 15 \text{ m}^{-1}$ ¹⁾ を採用した。又 m の代りに、それよりもはるかに小さい値 m' を用いた。従って、この模型の距離に関する縮小率は $\frac{m'}{m}$ である。然し説明の便宜上、以下、模型は縮小されていないものとする。

1) 湯原浩三: 地下 1 m 深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する一方法, 物理探鉱, 8 (1955), 27.

3. ある深さに存在する温泉が、地表面に垂直で、 z 方向に無限の広がりをもつた割れ目をつたって上昇する場合

第3図に模型の概略を示す。

座標原点を A 点に、 y 軸を AB の方向にとる。



第3図 ある深さに存在する温泉が、地表面に垂直で z 方向に無限の広がりをもつた割れ目をつたって上昇する場合に対する模型 (平面図)

Fig. 3. Model in which a uniform hot aquifer lies at a certain depth and hot water is ascending from the aquifer to ground surface through a vertical fissure.

E_3 : 境界 \overline{AB} にそって、それに対して θ の角度で並べられた銅板

E_1, E_2 : 2) に於けるものと同じ意味

以下、 E_1, E_2 をこの意味に用いる。

銅板 E_3 を十分密に配列した場合、点線で示した境界 \overline{AB} 上の各点に於いて、等電位線は同一の角度で接している。従って、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_{x=0} = -c' \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{x=0} \quad (1)$$

但し、 $c' = \cot \theta$

一方、実際の場合に於いて、温泉の冷却は地層中への x 方向の熱伝導のみによるものとする。又、割れ目中の温泉の温度の x 方向の変化は、ないものとする。その時、割れ目の壁に於ける境界条件は、次式であらわされる²⁾。

$$2k \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = -q\rho c \frac{dt'}{dy} \quad (2)$$

但し、 q : z 方向に単位長さをもつ、熱源に垂直に立つ割れ目の部分に於ける湧出量 cc/sec

ρ : 温泉の密度

c : 温泉の比熱

t' : 温泉の温度 $^{\circ}C$

2) 須川明; 各主熱源による1m深地温分布(その1), 北大地球物理研究報告, 8 (1961), 37

$\theta' = T_{x=0}$, 故に(2)より,

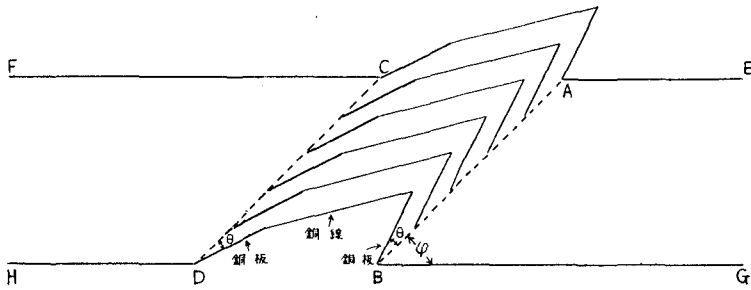
$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = -c'' \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{x=0} \tag{2}$$

但し, $c'' \equiv \frac{q\rho c}{2k}$

従つて, $c' = c''$ とすると, 第3図に於ける境界 \overline{AB} は, 割れ目壁に於ける境界条件を満足する。

4. ある深さに存在する温泉が, 地表面に対して斜向し, z 方向に無限の広がりをもつて上昇する場合

第4図に模型の概略を示す。座標原点を A 点に, y 軸を AB の方向にとる。



第4図 ある深さに存在する温泉が, 地表面に対して斜向し, z 方向に無限の広がりをもつて上昇する場合に対する模型(平面図)

Fig. 4. Model in which a plane heat source exists at a certain depth and hot water of which temperature is the same as the heat source at the lower end is ascending through a fissure inclined to ground surface.

\overline{AE} , \overline{FC} : 地表面に対応する境界

\overline{BG} , \overline{HD} : 熱源の温度に対応する電位を有する電極

E_3 : \overline{AB} 及び \overline{CD} にそつて, それ等に対して θ の角度で並べられた銅板
銅板 E_3 が十分密に配列された場合, \overline{AB} , \overline{CD} に於いて, 次式が成立する。

$0 \leq y_1 \leq D$;

$$\left(\frac{\partial V_1}{\partial x}\right)_{x=0, y=y_1} = c' \left(\frac{\partial V_1}{\partial y}\right)_{x=0, y=y_1} \tag{1}$$

$$\left(\frac{\partial V_2}{\partial x}\right)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} = -c' \left(\frac{\partial V_2}{\partial y}\right)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \tag{2}$$

$$(V_1)_{x=0, y=y_1} = (V_2)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \tag{3}$$

但し, δ : \overline{AB} と \overline{CD} との距離

c' : $\cot \theta$

φ : \overline{AB} と \overline{BG} との間の角度

$\delta \cot \varphi$: C 点の y 座標

D : B 点の y 座標

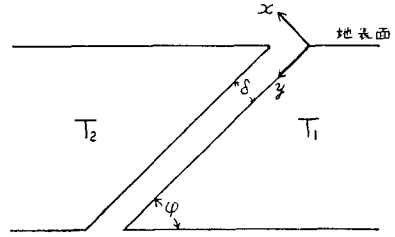
V_1 : \overline{AB} より右側に於ける点の電位

V_2 : \overline{CD} より左側に於ける点の電位

(1), (2), (3) より

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial V_1}{\partial x}\right)_{x=0, y=y_1} - \left(\frac{\partial V_2}{\partial x}\right)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \\ &= c' \left\{ \left(\frac{\partial V_1}{\partial y}\right)_{x=0, y=y_1} + \left(\frac{\partial V_2}{\partial y}\right)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \right\} = 2c' \left(\frac{\partial V_1}{\partial y}\right)_{x=0, y=y_1} \quad (4) \end{aligned}$$

第5図に実際の場合の略図を示す。座標原点を、地表面と割れ目の右の壁との交点に、 y 軸を壁にそって正の方向を下方にとる。 T_1 を右側の壁より右の、 T_2 を左側の壁より左の地層中の温度とする。又割れ目中の温泉の温度は、地表面に対して、水平な方向に、不変とする。



第5図 温泉と地表面に対して傾斜している割れ目

Fig. 5. Uniform layer of heat source and fissure inclined to ground surface.

割れ目の壁に於ける境界条件は、次式であらわされる。

$$0 \leq y_1 \leq D;$$

$$\begin{aligned} & k \left(\frac{\partial T_1}{\partial x}\right)_{x=0, y=y_1} - k \left(\frac{\partial T_2}{\partial x}\right)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \\ &= q\rho c \frac{dT'}{dy} = q\rho c \left(\frac{\partial T_1}{\partial y}\right)_{x=0, y=y_1} \quad (5) \end{aligned}$$

$$(T_1)_{x=0, y=y_1} = (T_2)_{x=\delta, y=y_1+\delta \cot \varphi} \quad (6)$$

但し、 δ : 割れ目間の距離

φ : 右側の割れ目と熱源とのなす角

D : 右側の割れ目と熱源との交点の y 座標

q, ρ, c, θ', k : 3) に於るものと同様

従って、 $\frac{q\rho c}{k} = 2c'$ とすると模型に於ける \overline{AB} , \overline{CD} は、割れ目の壁に於ける境界条件を満足する。

III. 実験装置

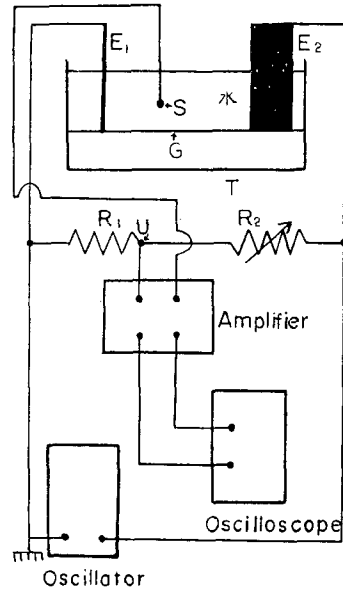
実験装置の概略を第6図に示す。

E : 地表面温度或いは気温に対応する電位を有する電極

E_2 : 熱源の温度に対応する電位を有する電極

S : 地中温度に対応する電位の測定用の端子

T : 水槽



第6図 実験装置

Fig. 6. Schematic diagram of the experimental apparatus.

G: ガラス板

R_1 : 固定抵抗

R_2 : 可変抵抗

電極として厚さが約 0.2 mm の銅板を用いた。電極 E_1 の長さは約 80 cm である。水槽は、コンクリートの台の上に針金で周囲にわくを作り、その中にビニール布を置いたもので、大きさは、たて約 50 cm、横約 130 cm である。その中に更に、底を水平にするために、たて約 30 cm、横約 100 cm のガラス板を置いた。固定抵抗器は、市販の 1,000 Ω 及び 100 Ω を、精密に抵抗値を測定して用いた。可変抵抗器は、ダイヤル式の抵抗測定器を転用した。電位測定用の端子は、針金の先端を残して他を絶縁したものである。

Newton の冷却に対応する絶縁板は、たて約 4 cm、横 0.667 cm 及びたて約 4 cm、横 3.4 cm、厚さ約 0.3 mm のセルロイド板である。前者は、縮小率が 1/1000 の場合、後者は、1/200 の場合に用いた。第 2 図及び第 3 図に於いて、電極 E_1 に並べられた絶縁板は、 E_1 の電極 E_2 に近い部分にそって、約 2 cm に、大体 2 mm の間隔で、それよりも E_2 から遠い部分にそって約 5 cm に、約 4 mm の間隔で配列した。

第 3 図に於ける割れ目の境の境界条件に対応する電極 E_3 は、壁に対応る境界にそって配列された約 4 cm 四方の 15 枚の銅板である。特に銅板が十分密に配列されていない為の誤差を少なくするために、電極 E_2 に最も近い銅板を、約 20 cm の長さにした。同様な意味で電極 E_1 に最も近い銅板と E_2 との間に絶縁板 D' を置いた。

IV. 測定及び測定結果

Oscillator によって、約 1,000 cycle の交流を水槽内に流す。 R_2 の値を適当に変えて S の電位と V の電位が等しくなった時を、Oscilloscope によって知る。この時の R_2 の値を読みとり、これより計算によって S の電位を知る。但し、実際に求めたのは、 E_1 , E_2 間の電圧と、 E_1 , S 間の電圧との比である。電極に与えられる電圧は、約 10 ボルトである。可変抵抗は、大体 3 ケタ迄読むことができた。

測定結果の若干及びそのうちの二例について、理論値と実験値との比較を次に示す。尚、理論値は、須川氏によるものである³⁾。

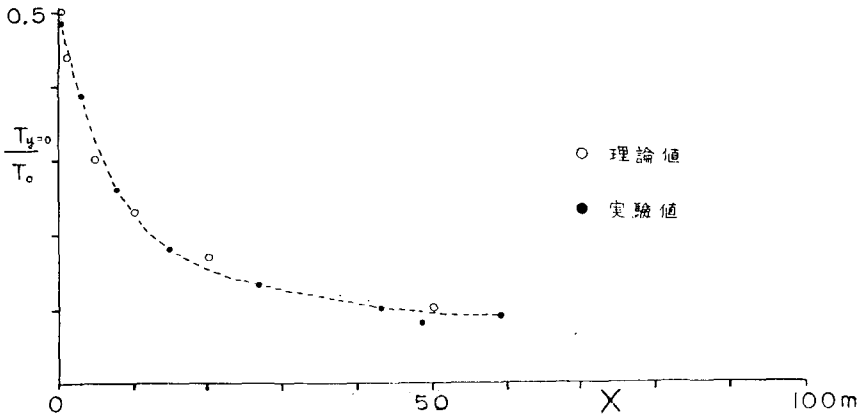
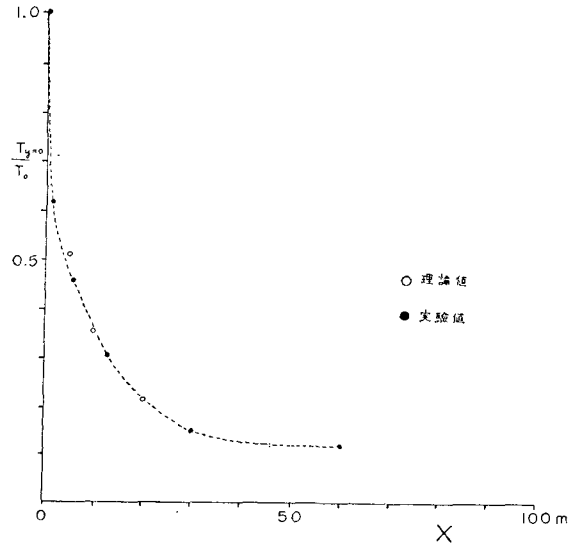
図に於いて用いた記号の意味は、各々次の通りである。

D : 熱源の深さ、 T_0 : 熱源の温度、 X : 湧出口からの距離、 Y : 地表面からの深さ
等温線に附した数字は、地中温度を T_0 で割った値を 10 倍したものである。又 T_a は 0°C とする。第 9, 10, 12 図に於ける点線及び第 11 図に於ける Y 方向の実線は、割れ目の壁をあらわす。第 12 図以外の各々の地表面に於いて、Newton の冷却が存在する。第 11 図に於いて、 $q = \infty$ であるから、割れ目の壁は、等温である。第 12 図に於いて、 $D = \infty$ であるから、地表面

3) 2) に同じ。

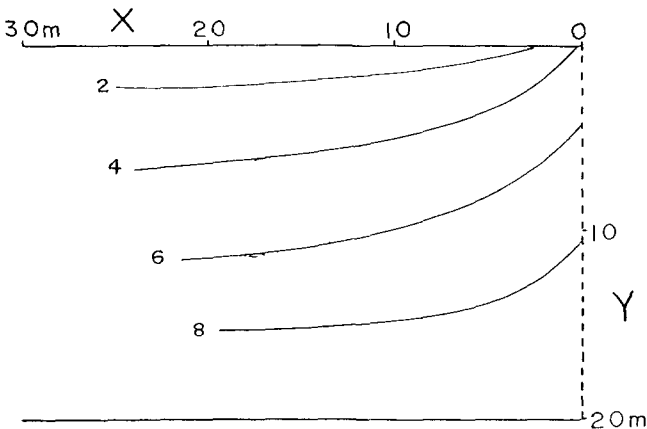
第7図 $D=100\text{ m}$, $q=\infty$ の場合の
 X と $\frac{T_{y=0}}{T_0}$ との関係

Fig. 7. Relation between X and $\frac{T_{y=0}}{T_0}$ for $D=100\text{ m}$, $q=\infty$



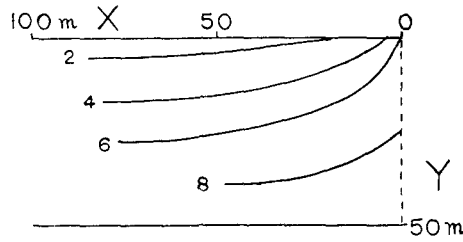
第8図 $D=100\text{ m}$, $q=10^{-2}\text{ cc/sec}$ の場合の X と $\frac{T_{y=0}}{T_0}$ との関係

Fig. 8. Relation between X and $\frac{T_{y=0}}{T_0}$ for $D=100\text{ m}$, $q=10^{-2}\text{ cc/sec}$.

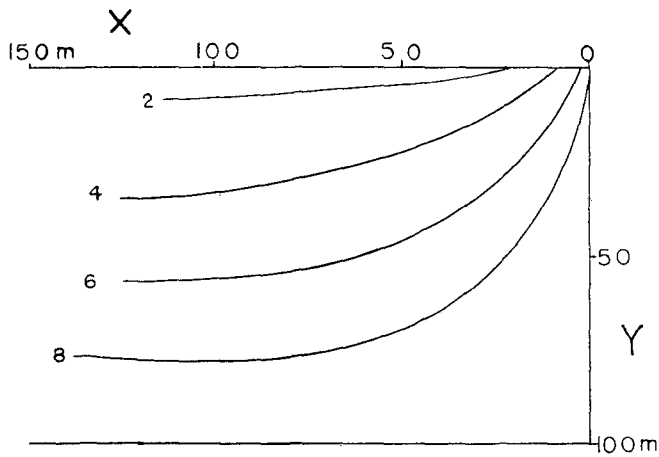


第9図 $D=20\text{ m}$, $q=10^{-2}\text{ cc/sec}$ の場合の地中温度分布

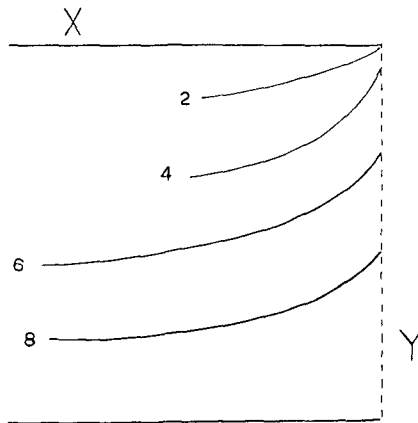
Fig. 9. Underground temperature distribution for $D=20\text{ m}$, $q=10^{-2}\text{ cc/sec}$.



第10図 $D=50\text{ m}, q=10^{-2}\text{ cc/sec}$ の場合の地中温度分布
 Fig. 10. Underground temperature distribution for $D=50\text{ m}, q=10^{-2}\text{ cc/sec}$.



第11図 $D=100\text{ m}, q=\infty$ の場合の地中温度分布
 Fig. 11. Underground temperature distribution for $D=100\text{ m}, q=\infty$.



第12図 $D=\infty, q=10^{-2}\text{ cc/sec}$ の場合の地中温度分布
 Fig. 12. Underground temperature distribution for $D=\infty, q=10^{-2}\text{ cc/sec}$.

温度は 0°C である。

V. 結 語

実験値の誤差は、15% 以内である。誤差の原因は、割れ目の壁に対応する電極 E_3 の銅板及び Newton の冷却に対応する絶縁板の配列が十分密でないこと、等であろうと思われる。

終りにのぞみ、御指導いただいた福富孝治教授、実験装置について種々御助言をいただいた田 望助教授、並びに須川 明助手に、厚く感謝の意を表します。

3. Model Experiment on Underground Temperature Distributions due to Some Different Types of Underground Heat Source. (Part. I)

By Akio WADA

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

The writer tried to investigate the underground temperature distributions caused by some different types of underground heat source by model experiments using an electrical method.

Principle of the method and transformation of the boundary conditions were discussed for the following three cases.

1. Constant temperature on ground surface.
2. Newton's cooling on ground surface.
3. Fissure through which hot water is ascending.

Comparing the experimental values with the theoretical values, it is ascertained that the error is less than 15%. Some results of the experiment were shown in Figs. 9, 10, 11, 12.