

臨潼県驪山華清池における温度検層結果について

竹内篤雄・趙洪濤*・郭 濤*

*中国甘肅省科学院地質自然災害防治研究所

要 旨

中国陝西省臨潼県驪山山麓に位置する不安定斜面において、1992年から1994年の3年間にわたり、多数の温度検層を実施した。その結果次のことが明らかとなった。

- ①1992年10月、1993年10月、および1994年10月にそれぞれ実施された検層結果を対比したところ、それらの曲線はほぼ一致しており、温度検層結果の再現性が確認された。
- ②検層結果を基にして、調査地区の各深度における温度分布状況を検討したところ、平常地温よりもかなり高い温度を示す部分が認められた。その部分は華清池温泉を中心としたものであることが示された。ただ温泉源とされている驪山山麓に位置する断層に沿って高温部が存在しているとは限らないことが示された。
- ③高温地下水が存在する標高440 mを基準とした地温分布図を作成したところ、最高温部は試錐孔 A-16から49付近に存在し、その温度は50℃程度であることが推定された。
- ④現地で採取した岩石、レスの熱的性質を用いて熱流量を計算したところ、試錐孔49からA-16付近を中心として通常の熱流量の15～25倍を示す部分が存在していることが示された。これは温度検層から得られた結果と符合するものであり、華清池温泉の泉源がこの方向にある可能性が高いことを示している。
- ⑤過去3年間の観測結果によると、温泉源の温度が徐々に低下していることが明らかにされた。一方、泉源の西側では温度が上昇する傾向が認められた。

キーワード：地下水、温度検層、温泉源、斜面、中国

1 はじめに

西安市の東、華清池で有名な臨潼県驪山山腹の不安定斜面調査地内に掘削された多数の試錐孔を利用して1992年10月、1993年10月および1994年10月の3回にわたり温度検層を実施したので、この検層結果を用いて華清池温泉の影響範囲および流動地下水の存在位置について検討を行うと共に、1994年7月～1995年3月までの降水状況と孔内水位の変動状況について述べる。

2 原 理

地温は、Fig. 1の実線に示すように、太陽熱によって暖められる地表面付近と、地下深部からの熱によって暖められる部分との合成により形成されている。前者による温度変化の到達する深さ（通常は年変化 ± 0.1

℃をもってその深さとしている）を通常恒温層深度と言っている。この深度は場所によって異なるが、日本では7～16mと言われている。地下に異常熱源が存在しない場合は、通常、Fig. 1に示したような温度変化をするが、流動性地下水や温泉水など温・冷熱源が存在するところでは、熱は伝導によって移動すると共に、その地下水・温泉水の流れによっても転送され再配分される。その結果として、地下水の温度あるいは温泉水の温度と地中温度とが相互に影響しあって、それらの流動状況に応じて複雑な地中温度分布を示し、Fig. 1で点線のように周囲の地中温度とは異なったものとなる場合が多い。したがって、予め平常地温を調査地の岩石・土壌の熱的性質に基づいて推定しておき、これと

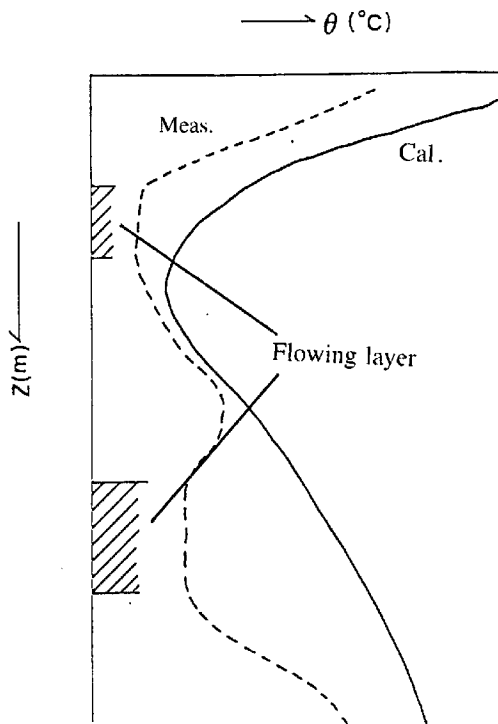


Fig. 1 Disturbance of usual temperature by existing of ground water-flowing layers.

実測値とを対比することにより、地下水あるいは温泉水の流れている深さおよびその厚さに関する情報を得ることができる可能性がある（竹内，1996）。

3 測定方法と測定器具

垂直温度分布を測定するには、試錐掘削後約1ヶ月程度放置された試錐孔で実施するとよいとされている。その理由は、掘削時のビットの回転による熱的影響あ

るいは洗浄水や挿入された保孔管などによる熱的影響が本来の地温・地下水温・温泉水温に及ばないようにする必要があるためである。測定には、防水型の精密温度計を用いる。センサーを予め孔内の2～3mの所に下ろし、十分に周囲の温度に馴染ませてから、通常50cm間隔で孔底まで測定する。測定に要する時間は、孔内水位よりも上では1測点当り1～1.5分、孔内水位以深では15秒程度である。

温度検層は1992年10月に15本、1993年10月に23本、そして1994年10月に23本の試錐孔で実施されている。1992年に実施された試錐孔のすべては1993年と1994年にも検層が実施されているので、それぞれの検層結果を対比することができた。検層はエイワ電子計器製作所製のUV-30型精密温度測定器を使用して実施された。

4 平常地温

垂直温度検層結果を解釈する場合、地質層序・孔内水位との対比はもちろんのこと、試錐日報との対比も重要である。さらにそれに加えて、流動地下水が存在しない場合の地温分布（平常垂直地温分布）との対比も欠くことのできない事項の一つである。

一般に任意の深度・時間における地温は次式で与えられる（竹内，1996）。

i) z が恒温層よりも浅い場合

$$\theta_z = \bar{\theta}_0 + \theta_i \exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi}{m\tau}}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - z\sqrt{\frac{\pi}{m\tau}}\right)$$

ii) z が恒温層よりも深い場合

$$\theta_z = \bar{\theta}_0 + \gamma_z(z - z_i)$$

ここに、 θ_z は深度 z における地温、 $\bar{\theta}_0$ は年平均地温、

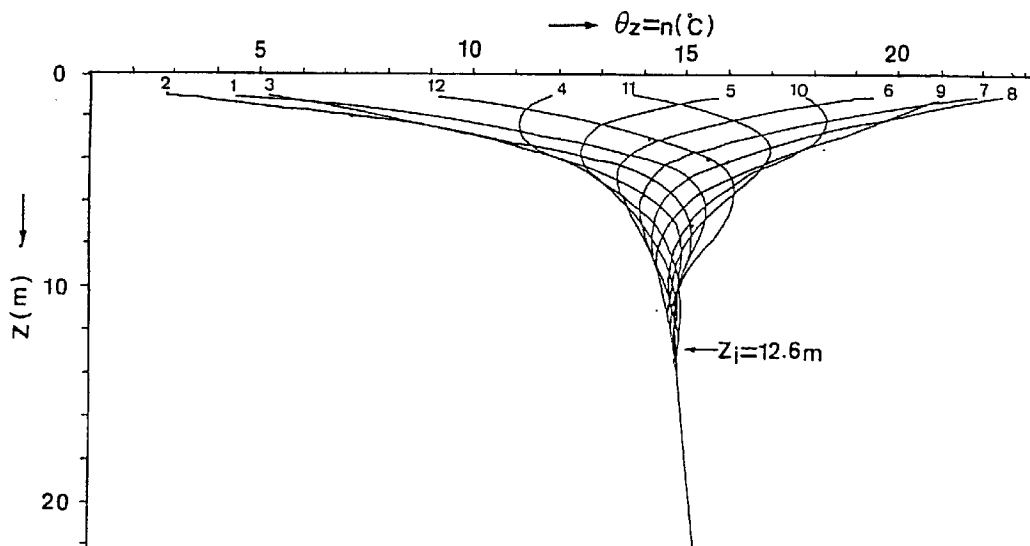


Fig. 2 Annual variation of underground temperature.

θ は年変化の片振幅, z は深さ, π は円周率, m は温度拡散率, γz は地温増温率, z_i は恒温層の深さ, t は時間, τ は周期である。

上記の式を用いて計算された調査地の平常地温曲線をFig. 2に示す。

なお, 調査地の恒温層の深さは12.6mであり, その温度は14.67℃であることが示されている。これまでに集積されたデータから判断すると, 流動性地下水が存在しない場合には, 恒温層以深の温度勾配は0.05℃/m程度で温度が上昇する場合が多いので(地下水ハンドブック編集委員会, 1979), ここではその値を採用して計算した。一方, 流動性地下水が存在する場合は, その地下水の流速によっても異なるが, 多くの場合それらの温度勾配は0.00~0.03℃/mの範囲に存在すること

表において, 掘削深度よりも浅い深度までしか検層1できなかったものが存在するが, この原因は孔底におけるスライムの堆積および何らかの原因による孔詰まりによるものである。

現地で得られた測定結果をFig. 4~25に示す。2ないし3本の曲線が示されているのは1992年10月, 1993年10月および1994年10月に測定されたものを対比したものである。次にこれらの検層結果について標準曲線と比較を行いつつ各試錐孔毎に述べる。

N o . 7 (Fig. 4) : この試錐孔は標高538m付近に掘削されている。孔内水位は孔底付近に僅かに認められる程度である。3回の測定ともほぼ同じような曲線を示している。しかし, 詳細に見ると, '93年10月の測定結果は, 他ものものと比べると, 地表から恒温層付近まで

Table 1 Some factors of boreholes carried out temperature logging

No. of borehole	Elevation of the top of borehole(m)	Depth of bore hole (m)	Depth of logging(m)	Grounwater level (m)
N o . 7	538	30.0	29.5	near the bottom
N o . 2 1	579	33.0	29.5	28.0
N o . 2 4	484	30.0	29.0	near the bottom
N o . 3 1	569	32.0	32.0	- - -
N o . 4 2	554	20.0	18.0	- - -
N o . 4 4	485	38.0	33.5	27.0
N o . 4 8	517	15.0	12.0	near the bottom
N o . 4 9	469	34.0	34.0	10.5
A - 4	497	43.0	42.0	- - -
A - 1 0	627	18.0	18.0	11.0
A - 1 3	578	13.0	6.5	- - -
A - 1 6	548	38.7	34.5	19.5
A - 1 8	496	44.0	43.5	38.0
A - 2 5	506	60.0	59.0	46.5
温泉井 1	470	4.5	4.5	2.5
温泉井 2	463	8.0	8.0	6.3
S J 2	501	16.0	16.0	- - -
B Z 1	568	25.5	18.0	- - -
B Z 2	546	37.3	36.5	near the bottom
B Z 3	571	35.5	35.5	- - -
B Z 4	555	38.0	38.0	near the bottom
B Z 5	506	28.0	27.5	- - -
B Z 6	573	31.5	27.5	- - -

が知られている(竹内, 1981)。

5 測定結果

温度検層はTable 1に示す21本の試錐孔と源泉井2箇所を利用して実施された。検層を実施した箇所を, 推定断層の存在位置と共に, Fig. 3に示してある。

やや高くなっている。平常地温曲線(ここでは標準曲線と呼ぶことにする)と比較すると, ほぼこれらの曲線と平行した温度変化を示している。しかし, これらの曲線から, 恒温層以深の温度勾配を計算すると, 0.080℃/mとなっており, 通常のそれと比較するとかな

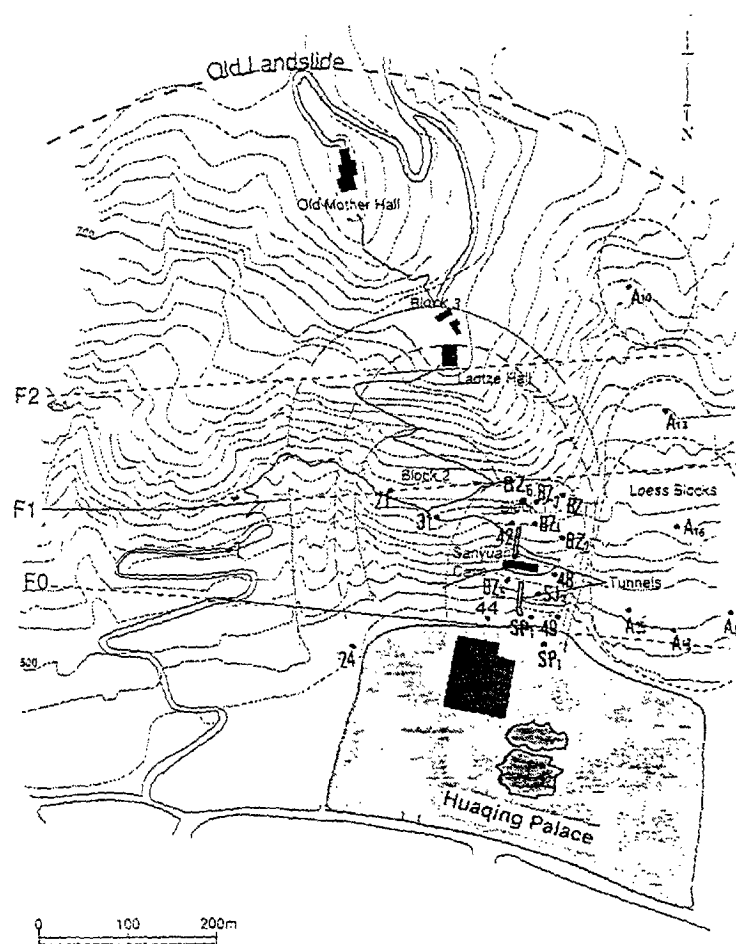


Fig. 3 Location map of boreholes and faults.

り大きなものとなっていることが示されている。この原因は後述するように、断層に沿って上昇していると言われる温泉の影響によるものと推定される。

この試錐孔の地質柱状図を入手することができなかったため、地質状況との対比はできていない。

No. 21 (Fig. 5) : この試錐孔は、標高 579 m 付近に掘削されている。地質柱状図によると、地質状況は上部からレス層—礫混じりレス層—片麻岩層となっていることが示されている。孔内水位は '92年10月では深度27.6m, '93年10月では深度28.5m付近、そして '94年10月では深度28.8m付近でそれぞれ孔底付近に僅かに存在している。

この試錐孔の掘削深度は33mとなっているが、検層深度は3回とも深度29.5mと多少浅くなっている。この原因は前述したように、孔内におけるスライムなどの堆積によるものと推定される。

3回の検層結果を対比して見ると、殆ど同じような

検層曲線となっていることが示されている。ただ '94年は他の2回の検層結果に比べて、深度20m以浅でやや高い温度を示している。これらの曲線を標準曲線と比較すると殆ど同一の形をしている。恒温層以深の温度勾配は $0.069^{\circ}\text{C}/\text{m}$ となっており、通常の温度勾配よりもやや大きくなっている。'92年と'93年の検層曲線を詳細に検討すると、深度23m付近に温度変曲点が認められ、それ以深の温度勾配は $0.050^{\circ}\text{C}/\text{m}$ となって、それ以浅よりもやや小さくなっている。この現象と地質柱状図から推察すると、この深度付近に存在する亀裂から地下水が浸出している可能性のあることが示されている。孔内水位は孔底付近に僅かに認められるだけである。

No. 24 (Fig. 6) : この試錐孔は標高484m付近に掘削されている。孔内水位は、孔底付近に極僅かに存在する程度である。地質柱状図によると、地質状況は全層レスによって構成されていることが示されている。

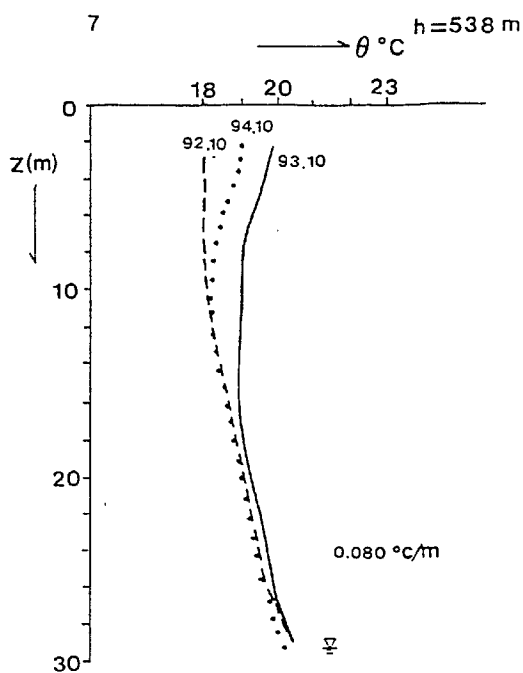


Fig. 4 Temperature logging curves at No. 7 borehole.

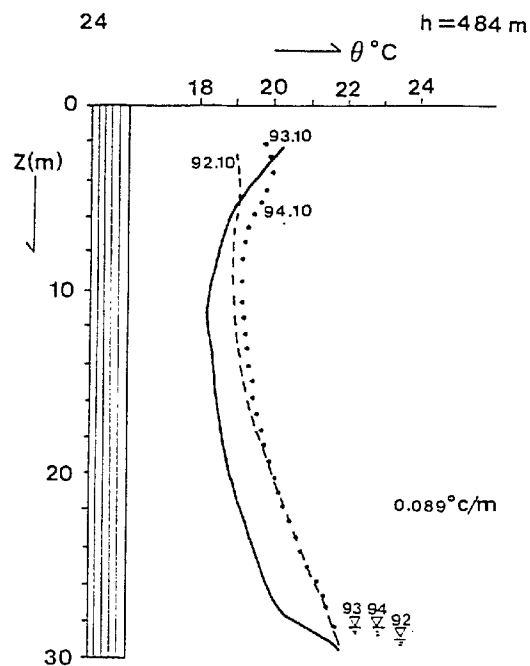


Fig. 6 Temperature logging curves at No. 24 borehole.

この試錐孔で実施された3回の検層結果を対比すると、'93年のみ1.0°C程度他のものに比べて低い温度を示しているが、大局的には、3回ともほぼ同様な検層結果が得られている。これらの曲線を標準曲線と対比する

とほぼ一致している。ただ、恒温層以深の温度勾配は0.089°C/mで、通常の温度勾配よりも大きな値を示している。

'92年と'94年の検層結果を見ると、恒温層深度以深

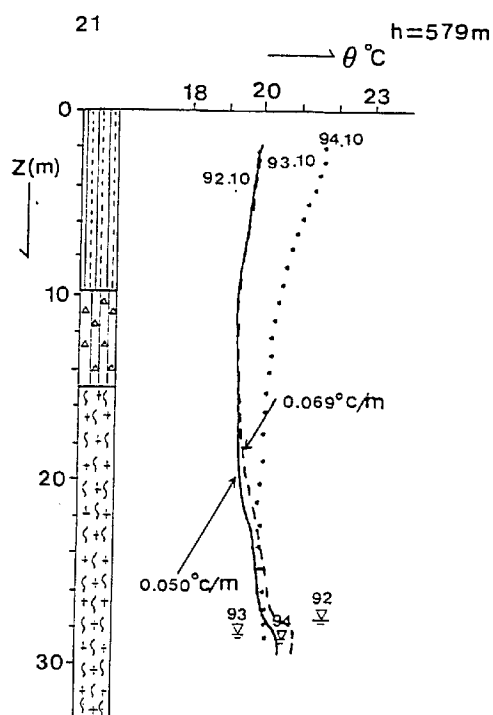


Fig. 5 Temperature logging curves at No. 21 borehole.

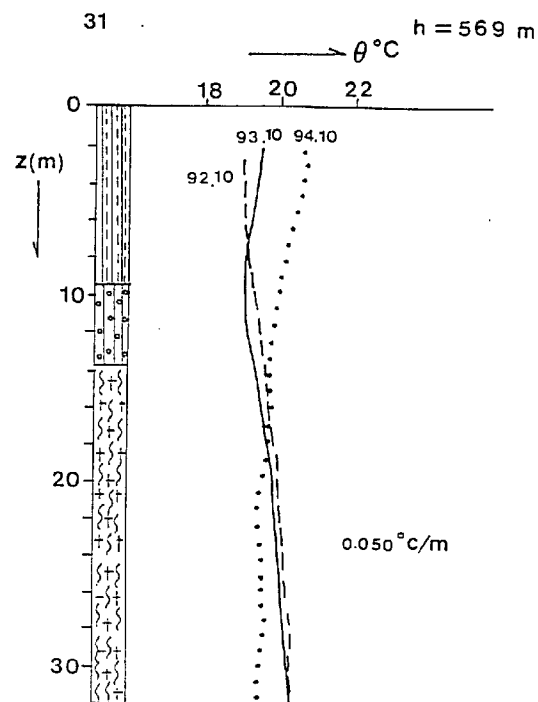


Fig. 7 Temperature logging curves at No. 31 borehole.

は一定勾配で温度が上昇しているのが認められ、地下水の浸出を想定させるような曲線の乱れは認められない。一方、'93年の検層結果は、これらよりも1℃程度温度が低下している。また、'93年の検層曲線を見ると深度13m付近と深度20m付近に温度変曲点が存在している。これらの変曲点付近で地下水が浸出している可能性がある。

No. 31 (Fig. 7) : この試錐孔は標高569m付近に掘削されている。孔内水位は存在していない。地質状況は、レス層—礫混じりレス層—片麻岩層によって構成されている。

'92年と'93年はほぼ同様な検層曲線が得られているが、'94年のみは深度18m以深でこれらの曲線よりも低い温度を示している。標準曲線と対比すると、3本ともほぼ一致している。恒温層以深の温度勾配は'94年を除くと0.050℃/mを示しており、通常の温度勾配と同様な値を示している。この試錐孔では地下水の浸出を想定させるような曲線の乱れは認められない。

No. 42 (Fig. 8) : この試錐孔は標高55

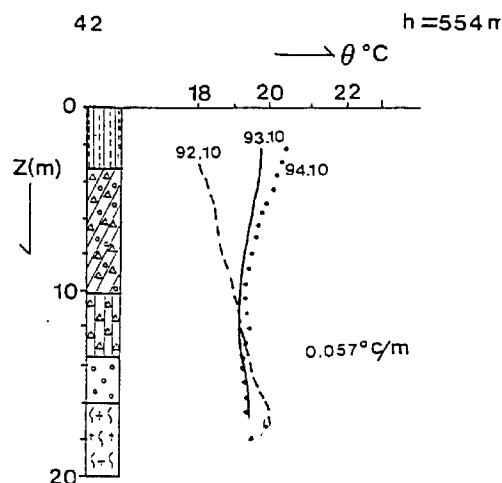


Fig. 8 Temperature logging curves at No. 42 borehole.

4m付近に掘削されている。孔内水位は存在しない。地質状況はレス層—礫混じりレス層—片麻岩層によって構成されている。

'92年の検層結果と'93年のそれとを比較すると、前者は孔口付近から孔底まで温度がほぼ一定勾配で上昇しているのが認められるが、後者はほぼ標準曲線と一致した曲線を示している。'94年の検層曲線はほぼ'93年のそれと一致している。恒温層以深の温度勾配は前者が0.111℃/m、後2者が0.057℃/mとなっており、両者とも通常の温度勾配よりも大きくなっている。

No. 44 (Fig. 9) : この試錐孔は標高485m付近に掘削されている。孔内水位は深度27m近くに存在する。地質状況はレス層—礫混じりレス層—片麻岩層によって構成されている。3回の検層結果を比較すると、ほぼ一致したものとなっている。孔内水位以浅の温度勾配を求めると、'92年10月は深度12.5~18.0mでは0.327℃/m、深度18.0~23.0mまでは0.600℃/m、となっており、孔内水位以深では27.0~33.5mまでが0.178℃/mとなっている。一方、'93年10月のそれは深度14.5~22.0mで0.295℃/mとなっており、孔内水位以深の値は前者と同じである。標準曲線と対比すると、3回ともかなり高目の温度が示されている。温度勾配が大きいこ

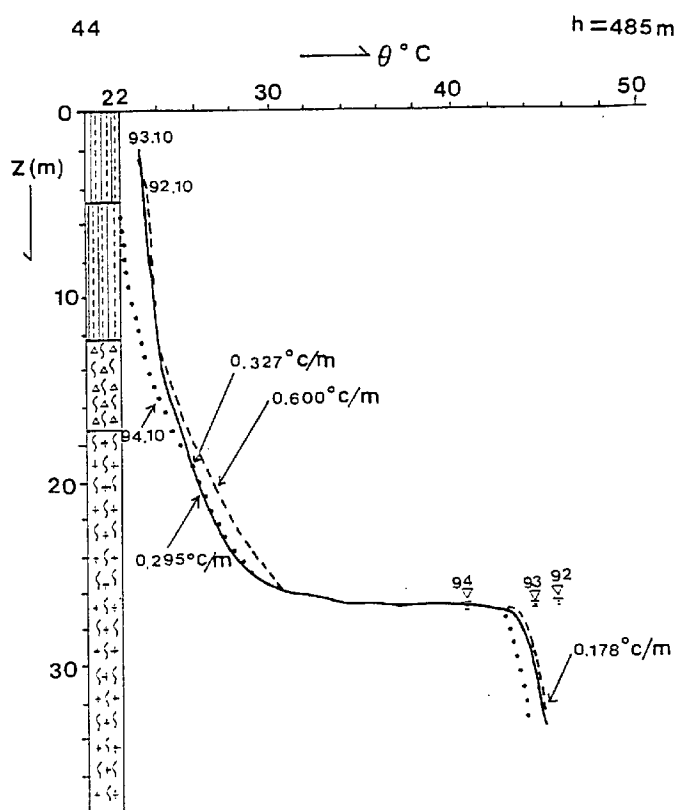


Fig. 9 Temperature logging curves at No. 44 borehole.

とおよび温度が高いことは温泉の影響を受けているためと推察される。

孔内水位以深の温度は孔底で'92年10月の値が45.2℃、'93年10月の値は44.8℃、そして'94年10月の値が44.0℃となっており、徐々に温度が低下していることが示されている。

No. 48 (Fig. 10) : この試錐孔は標高517m付近に掘削されている。孔内水位は孔底付近に極僅かに存在する程度である。地質状況はレス層と礫混じりレス層で構成されている。掘削深度は15.0mであるが、検層は

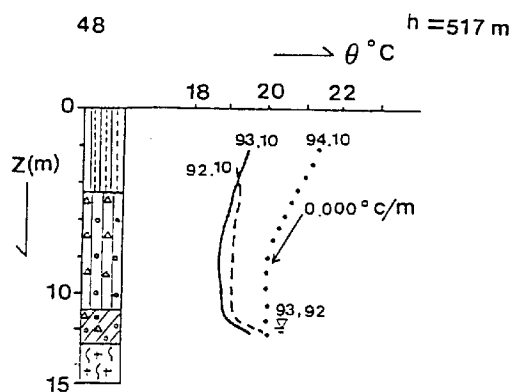


Fig. 10 Temperature logging curves
at No. 48 borehole.

12.0mまでしか実施できなかった。'92年と'93年の両年の検層結果はほぼ一致しているが、'94年はこれらよりも1°C程度高い温度を示している。標準曲線と対比すると、浅部ではほぼそれに合致しているが、詳細に見ると'93年では深度7～9.5m、'92年では深度5.5～11.0m、そして'94年では深度8m以深の区間で温度勾配が0.000 °C/mとなっており、礫混じりレス層で地下水の浸出がある可能性の高いことを示唆している。

No. 49 (Fig. 11) : この試錐孔は標高469m付近に掘削されている。孔内水位は深度10.5m付近に存在する。地質状況はレス層—礫混じりレス層—片麻岩層によって構成されている。3回の検層結果を比較すると、ほぼ同じような曲線を示している。孔内水位以深における温度勾配を求めると、3者共もほぼ同様な値を示しているようで、深度13.0～22.0mでは0.044°C/m、深度22.0～29.5mまでは0.533°C/m、深度29.5～31.5mでは0.044°C/mとなっている。これらの温度勾配から見ると、深度22～30mを境としてその上下で温度の異なった温泉が存在していることを示唆している。標準曲線と対比すると、3回ともかなり高目の温度が示されており、温泉の影響を非常に強く受けていることが示されている。また、この試錐孔においてもNo.44試錐孔と同様にここ3年間で孔内水温が徐々に低下している傾向が認められる。

A-4 (Fig. 12) : この試錐孔は標高497m付近に掘削されている。孔内水位は認められていない。地質状況は地質柱状図が存在しないことから不明である。標準曲線と比較すると、深部に向かうほどその差が大きくなっており、温泉の影響を強く受けていることが示唆されている。'92年10月と'93年10月の検層結果を見ると、前者は深度29m付近までは高い温度を示しているが、それ以深では逆に低くなっている。両者の温度勾配を

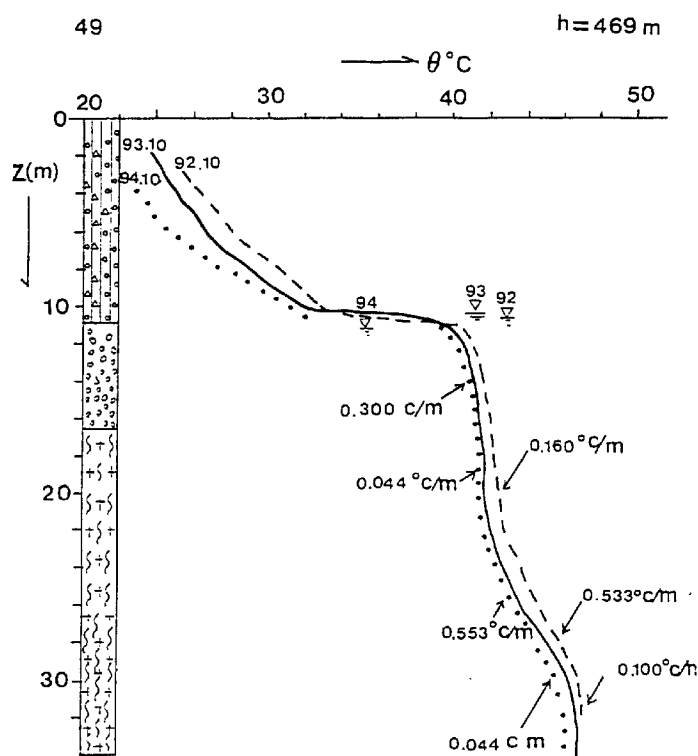


Fig. 11 Temperature logging curves
at No. 49 borehole.

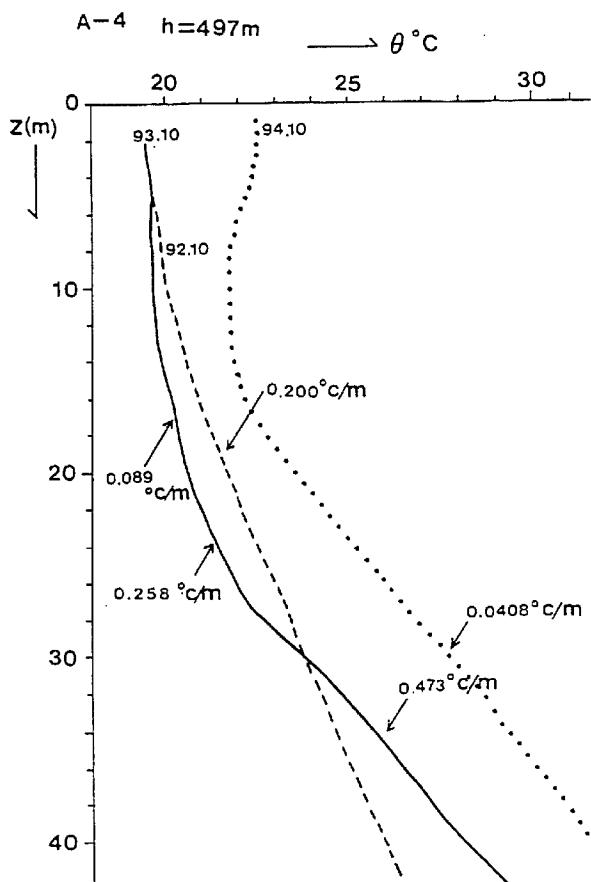


Fig. 12 Temperature logging curves at A-4 borehole.

見ると、前者は深度10.5～孔底までは0.200°C/mとなっており、一方、後者では深度12.5～21.5 mでは0.089°C/m、深度21.5～27.5 mでは0.250°C/m、そして深度27.5～42.5 mまでは0.473°C/mとなっている。特に、

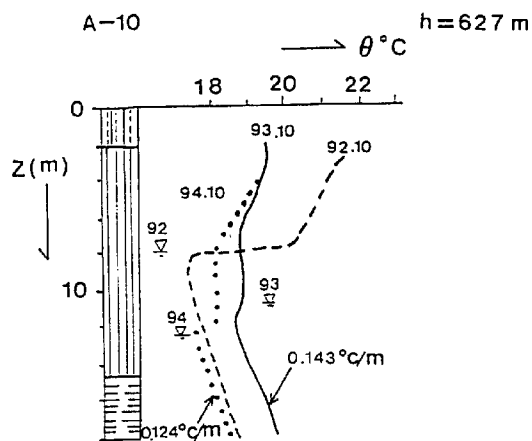


Fig. 13 Temperature logging curves at A-10 borehole.

93年10月の深部における大きな温度勾配が目立つ。一方、'94年の検層結果を見ると、深度15m以深から一定勾配で昇温しており、その温度勾配は0.408°C/mとなっており'93年の深部の温度勾配とほぼ一致している。しかも孔底の温度はこの3年間で徐々に上昇しているようであり、'92年と'94年のそれを比較すると、約5.5°C上昇している。

A-10 (Fig. 13) : この試験孔は標高627m付近に掘

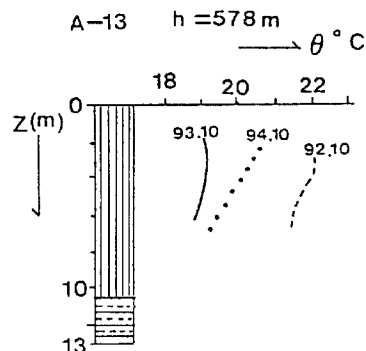


Fig. 14 Temperature logging curves at A-13 borehole.

削されている。地質状況はレス層で構成されている。孔内水位は'92年10月が深度8.0mとなっているが、後

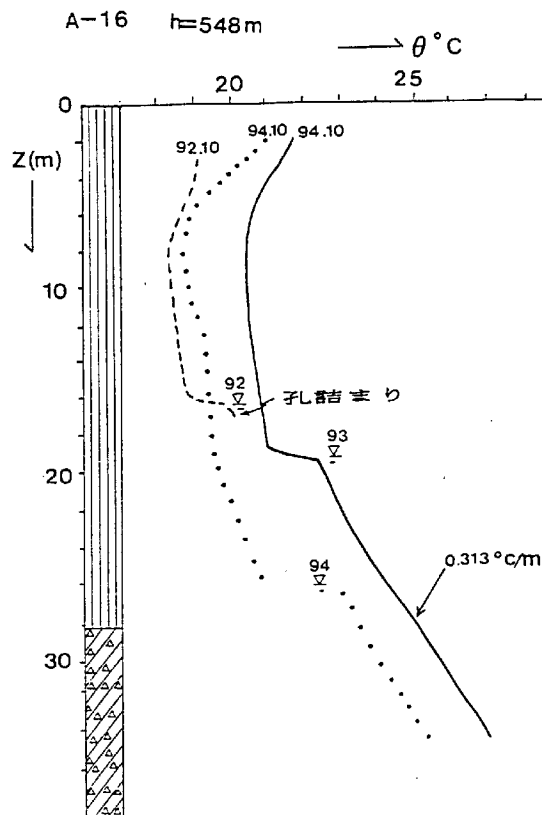


Fig. 15 Temperature logging curves at A-16 borehole.

の2回は深度11.0mと11.5m付近となっている。3回の検層結果を比較すると、ほぼ同様な曲線を示しているが、'92年10月では孔内水位以浅では2℃程度高く、孔内水位以深では'93年0月のみ1℃程度高くなっている。

標準曲線と比較すると、'93.10の恒温層以浅はほぼこの曲線と一致しているが、恒温層以深では0.104~0.143℃/mの大きな温度勾配が示されており、標準曲線よりも高い温度となっている。

A-13 (Fig. 14) : この試錐孔は標高578m付近に掘削されたものである。地質はレス層で構成されている。試錐孔は10m以上の深度まで掘削されているが、孔詰まりのために検層は深度6.5mまでしか実施することができなかった。3回の検層結果を比較すると、地表面付近のためかそれらは大きく異なっている。標準曲線と比較すると、'92年10月のみがかなり高めに測定されていることが示されている。

A-16 (Fig. 15) : この試錐孔は標高548m付近に掘削されている。孔内水位は'92年10月では深度16.5m付近、'93年10月では深度19.5m付近に、そして'94年10月では深度26.2m付近に存在している。地質柱状図による

と、レス層-礫混じりレス層で構成されている。'92年では深度17.0mで孔詰まりとなっていたが、'93年と'94年では深度34.5mまで検層することができた。標準曲線と比較すると、'92年と'94年の検層曲線はほぼこれと一致しているが、'93年10月の検層曲線は全体に2℃程度高くなっている。後者の曲線を用いて、孔内水位以深の温度勾配を求めると、0.313℃/mと大きな値を示している。また検層最終深度における温度は27.0℃となっており、温泉の影響を受けていることが示されている。ただ'94年の測定結果によると、孔内水位以深の温度勾配は前年とほぼ同じであるが、孔底温度はやや低下して25.5℃となっている。

A-18 (Fig. 16) : この試錐孔は標高496m付近に掘削されている。孔内水位は38m付近に存在している。地質は全層レス層となっている。'92年10月の検層曲線と'93年10月に実施された検層曲線とを比較すると、両者はほぼ一致している。'94年の測定結果はこれらの曲線よりも全般に1~2℃高めになっている。これらを標準曲線と比較すると恒温層以浅ではほぼ相似の曲線を示している。それ以深では急激に温度が上昇している。

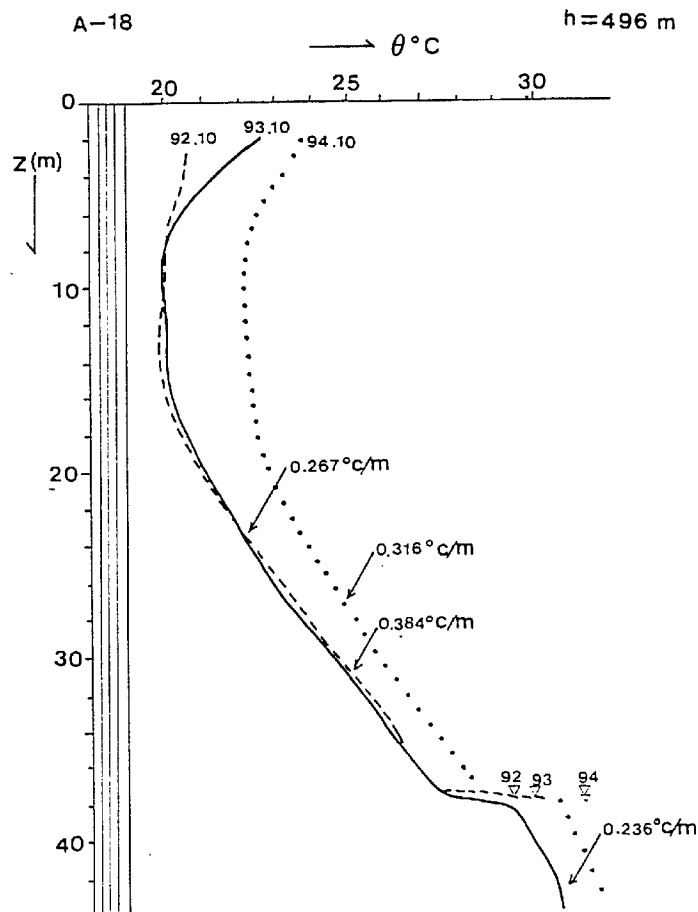


Fig. 16 Temperature logging curves at A-18 borehole.

温度勾配を求めると、平均的には $0.322^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、そして孔内水位以深では深度38.0~43.5mまでは $0.236^{\circ}\text{C}/\text{m}$ のそれぞれ大きな値を示している。また、孔底温度は 32°C 近くを示していることを考えると、温泉の影響を大きく受けていると推察される。

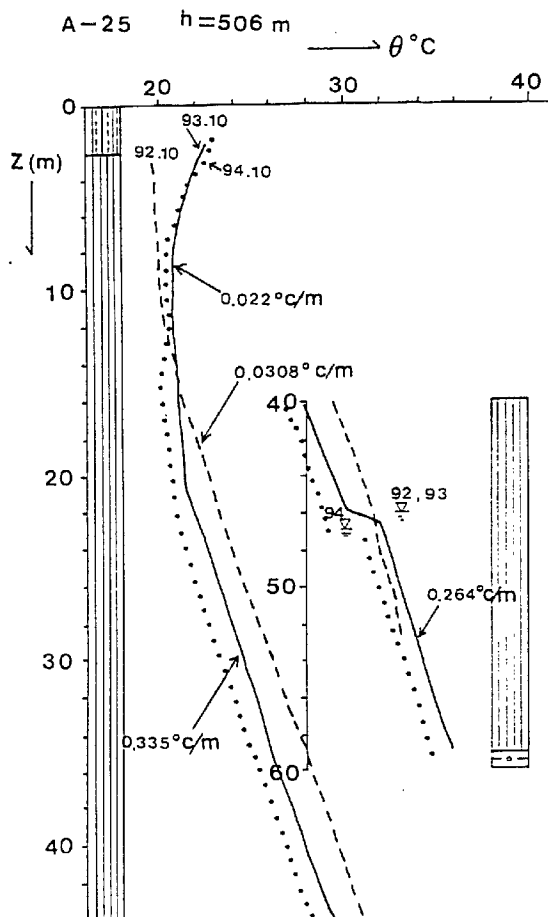


Fig. 17 Temperature logging curves at A-25 borehole.

A-25 (Fig. 17) : この試錐孔は深度506m付近に掘削されている。孔内水位は深度46.5m付近に存在している。地質は全層レス層となっている。3回の検層結果を比較すると、ほぼ一致しているようである。標準曲線と比較すると、恒温層で浅では約 2°C 程度実測曲線の方が高くなっているが、その形は相似している。恒温層以深では $0.308\sim 0.335^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の大きな温度勾配を示している。また孔内水位以深では $0.264^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の値を示している。そのために孔底温度は 35°C と高いものとなっている。したがって、この試錐孔も温泉の影響を受けていると推定される。

源泉井 1, 2 (Fig. 18) : 源泉は2箇所認められ、1は標高470m付近に位置し、2は標高463m付近に位置している。これらの源泉は相互に連結されている可能性もあるが、これらの温度を見ると、それぞれ $45.5\sim 46.$

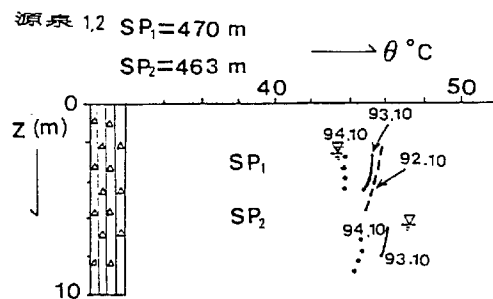


Fig. 18 Temperature logging curves at Sp. 1 and Sp. 2.

0°C の値を示している。3回の測定結果から見ると、この3年間の間の温度は 1°C 程度低下している現象が認められるようである。この現象は試錐孔49においても認められている。源泉井の温度は試錐孔49の孔底温度よりも 2°C 程度低くなっていることから、試錐孔49付近から引水されている可能性が高い。

S J 2 (Fig. 19) : この試錐孔は標高501m付近に掘削さ

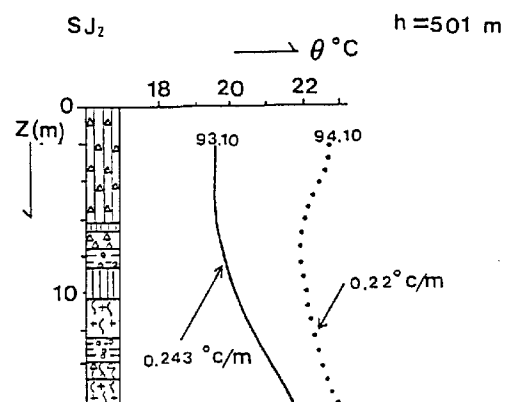


Fig. 19 Temperature logging curves at SJ2 borehole.

れている。孔内水位は認められていない。地質的には礫混じりレス層と片麻岩層から構成されている。'93年と'94年の検層結果を対比すると、後者の方が全般的に $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高くなっている。標準曲線と対比すると、両者共全般的に高い温度を示している。温度勾配は $0.22^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度の大きな値を示している。

B Z 1 (Fig. 20) : この試錐孔は標高568m付近に掘削されている。孔内水位は認められない。地質的にはレス層と片麻岩層から構成されている。'93年と'94年の測定結果を対比すると、後者の方が 1°C 程度低い値を示している。標準曲線と対比すると、'93年の方は全体的に約 1°C 高い温度を示しているが、'94年の方はほぼ一致

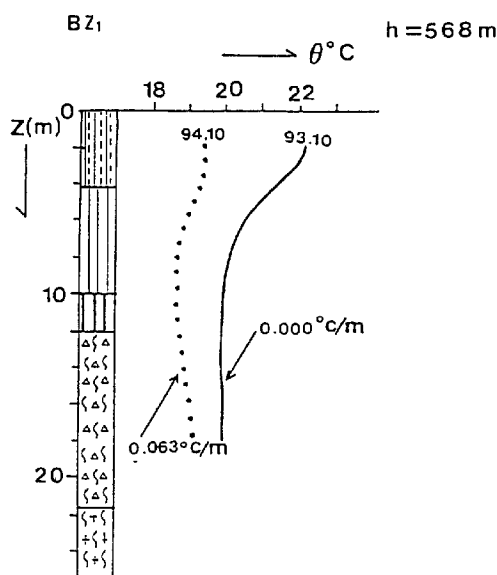


Fig. 20 Temperature logging curves at BZ1 borehole.

しているようである。深度9.5mから最終検層深度までの温度勾配は0.000~0.063°C/mと低い値を示している。

B Z2 (Fig. 21) : この試錐孔は標高546m付近に掘削さ

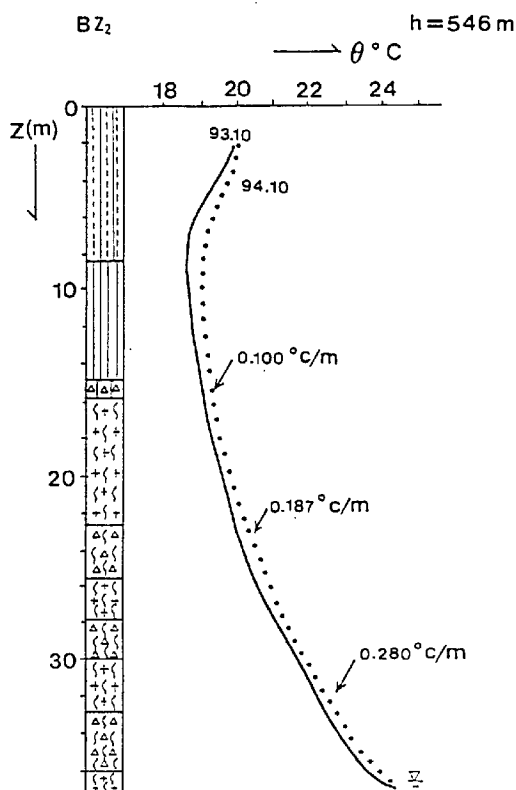


Fig. 21 Temperature logging curves at BZ2 borehole.

れている。孔内水位は孔底付近に極僅かに認められる程度である。地質的にはレス層と片麻岩層で構成されている。'93年と'94年の検層結果を比較すると、ほぼ同じような測定曲線が得られている。ただ後者の方が全体的に0.5°C程度高くなっているようである。標準曲線と対比すると、恒温層付近まではほぼ一致しているが、それ以深では高めの温度を示している。恒温層以深の温度勾配を求めると、深度11.0~18.5mまでは0.100°C/m、深度18.5~26.0mまでは0.187°C/m、そして深度26.0mから孔底までは0.280°C/mと深度が増す毎に大きな値を示している。これは温泉の影響を受けている可能性がある。

B Z3 (Fig. 22) : この試錐孔は標高571m付近に掘削されている。孔内水位は認められていない。地質的には

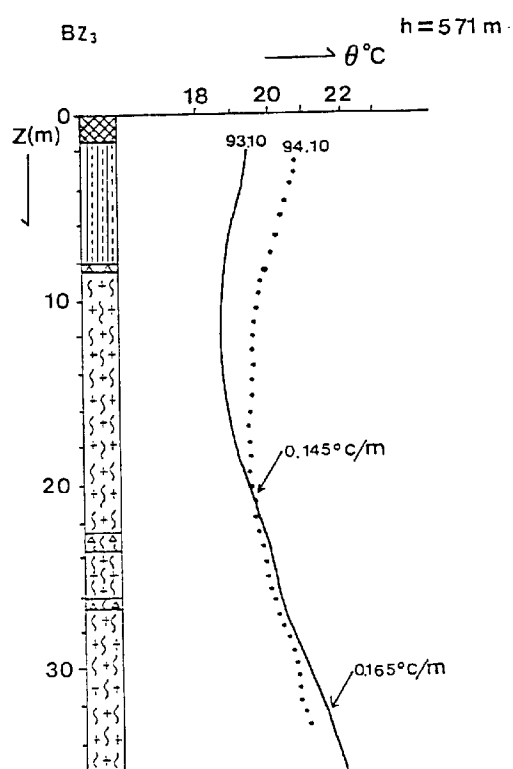


Fig. 22 Temperature logging curves at BZ3 borehole.

レス層と断層破碎帯を挟む片麻岩層からなっている。'93年と'94年の検層結果を比較すると、浅層部では'94年の方が1.5°C程度高い温度を示しているが、深部では逆に'93年の方が多少高い温度を示している。これらの検層曲線を標準曲線と対比すると、恒温層までは殆ど同じ温度を示している。それ以深は標準温度よりも高めの値を示している。温度勾配を求めると、0.165°C/m程度の値を示す。この値は通常温度勾配よりもかなり大きなものとなっているので、地下の熱源の影響

を強く受けていることを示唆している。

BZ4 (Fig. 23) : この試錐孔名標高555m付近に掘削されている。孔内水位は孔底付近に極僅かに認められる

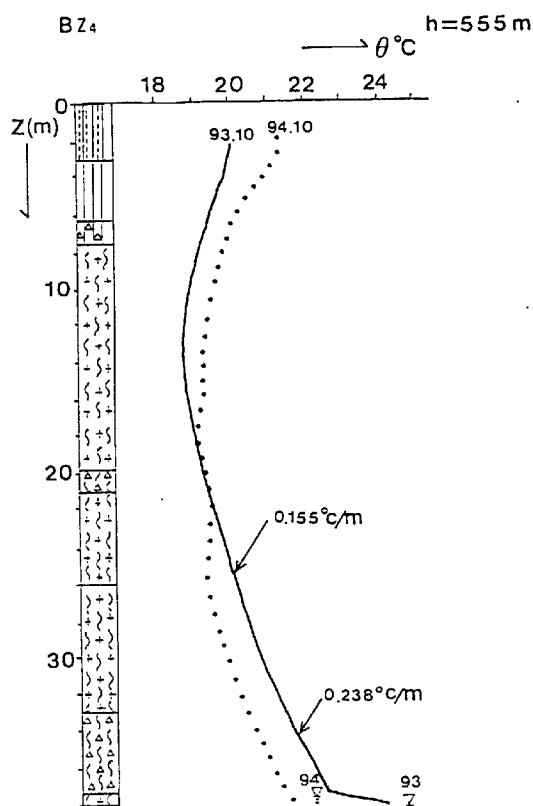


Fig. 23 Temperature logging curves at BZ4 borehole.

程度である。地質的にはレス層—礫混じりレス層—断層破碎帯を挟む片麻岩で構成されている。'93年と'94年の検層結果を対比すると、BZ3と同様な傾向を示している。これらの曲線を標準曲線と対比すると、深度18m付近まではほぼ同じような値を示している。それ以降ではそれよりも高い温度を示している。平均温度勾配を求めると、 $0.20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度の大きな値となっている。これは明らかに温泉の影響を受けたものと推察される。
BZ5 (Fig. 24) : この試錐孔は標高506m付近に掘削されている。孔内水位は存在していない。地質的にはレス層と断層破碎帯を含む片麻岩で構成されている。'93年と'94年の検層結果を対比すると、後者の方が全体的に 0.5°C 程度高い温度を示しているが、曲線の形はほぼ一致している。これらの検層曲線を標準曲線と対比すると、深度18.0m付近までは実測曲線の方が約 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度高い温度を示している。しかしそれ以降では検層曲線の方がかなり高い温度となっている。温度勾配を求めると、恒温層から深度18.0mまでは $0.050^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と通常の値を示しているが、深度18.0mから孔底までは $0.211^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と大きな値となっている。

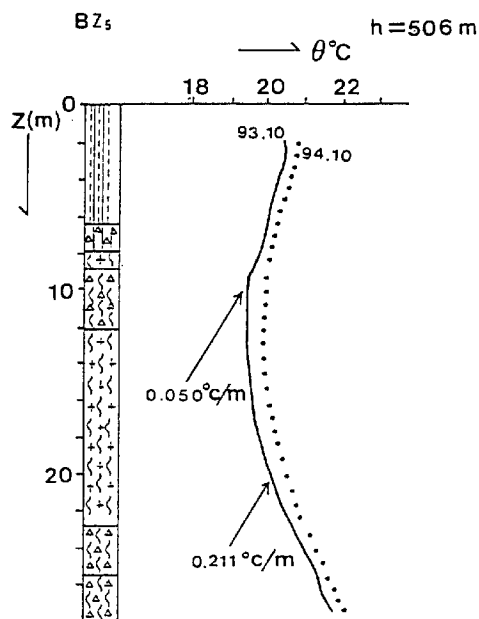


Fig. 24 Temperature logging curves at BZ5 borehole.

BZ6 (Fig. 25) : この試錐孔は標高573m付近に掘削されている。孔内水位は認められていない。地質的にはレス層と断層破碎帯を挟んだ片麻岩層で構成されている。'93年と'94年の検層結果を対比すると、ほぼ同じような曲線となっている。これらの曲線を標準曲線と対比すると、全体的にほぼ同じような値を示している

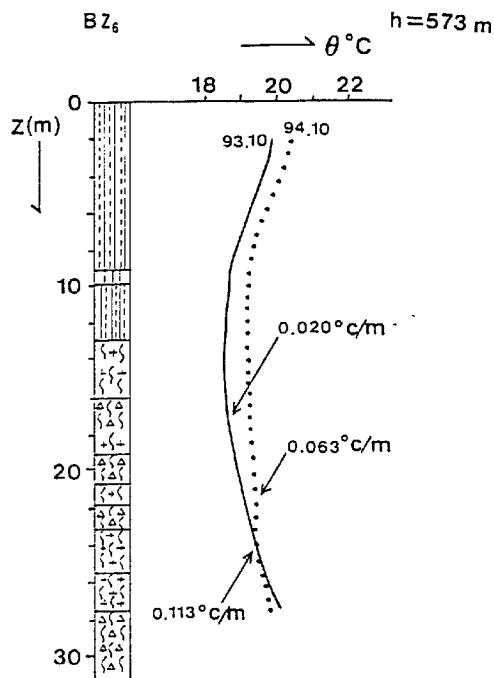


Fig. 25 Temperature logging curves at BZ6 borehole.

が、細かく見ると、'93年の深度11.0~16.0mと'94年の深度10.0~15.0mまでは $0.020^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と通常の温度勾配よりは小さな値を示し、深度16.0~27.5mまでは $0.063\sim 0.113^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と大きな値となっている。

6 測定結果に対する検討

6-1 孔内水位

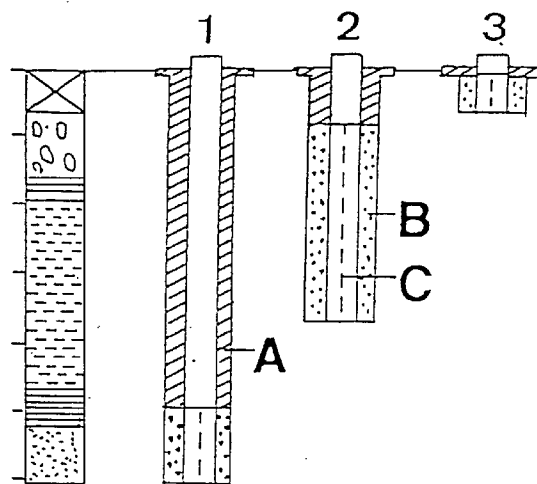


Fig. 26 Structure of boreholes for each groundwater-flowing layer.

を明確に分離して測定できるような水位観測孔を設ける必要がある。その観測孔の構造は、Fig. 26に示すように、いわゆる「層別地下水観測孔」仕上げとする（竹内篤雄他、1990a, b; 1992a, b; 1995; 1997）。

6-2 温泉（断層位置）との関係

今回23本の試錐孔および泉源で温度検層を実施することができた。ここではその結果を踏まえて、活断層にその熱源があるとされている華清池温泉との関係について検討してみる。

今回実施されて温度検層結果を見ると、当然のことながら、温泉源に近い試錐孔ほど温泉の影響を強く受けた高い温度が検出され、それから離れた試錐孔ほどその影響が小さくなっていることが示された。そこでこの点を確認する意味も含めて、各試錐孔の孔底温度の分布図と深度10m, 20m, および30mの温度分布図を描き、温泉源あるいは断層位置との関係を検討してみた。なお、これらの分布図を描くに当たっては、3回ないし2回の測定結果の値を平均した値を用いた。

孔底温度分布図（Fig. 27）：この分布図を見ると、温泉源および試錐孔49と44を中心として 45°C 以上の高温を示す部分が認められる。この東西に延びる高温部にほぼ一致する形で驪山山麓に位置する断層が存在している。またこの高温部は試錐孔A-16方向へ延びてい

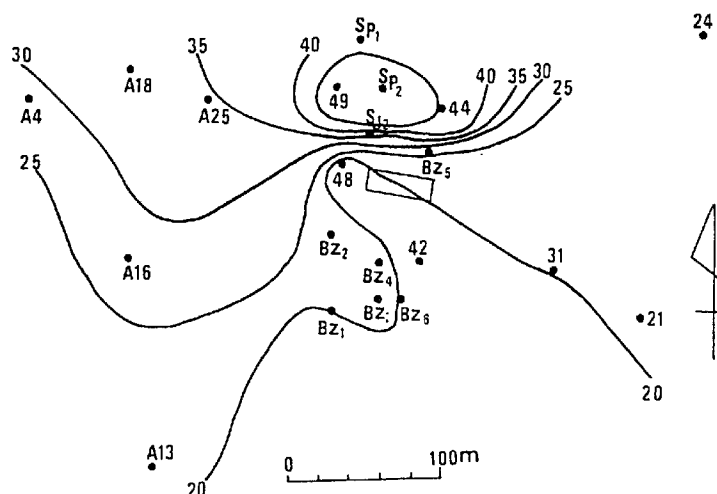


Fig. 27 Temperature distributing map at the bottom of each borehole.

今回実施された試錐孔は2つの温泉源井を含めて23本あるが、明確に孔内水位が認められたものはTable 1に示すように9本しか存在しない。その他の試錐孔では亀裂の多い片麻岩層で地下水が逸水している場合が多いようである。

この現象から考えると、当調査地の孔内水位に関する正確な情報を得るためには、レス層内、崩積土層内、および片麻岩層内にそれぞれ存在するであろう地下水

るように見える。

深度10mにおける温度分布図（Fig. 28）：この分布図を見ると、孔底温度分布図とはかなり異なっていることが示されている。高温部は温泉源から断層方向に延びているのではなく試錐孔A-16の方向へ、つまり温泉源から南西方向へ高温部が延びている形となっている。

深度20mにおける温度分布図（Fig. 29）：この分布図

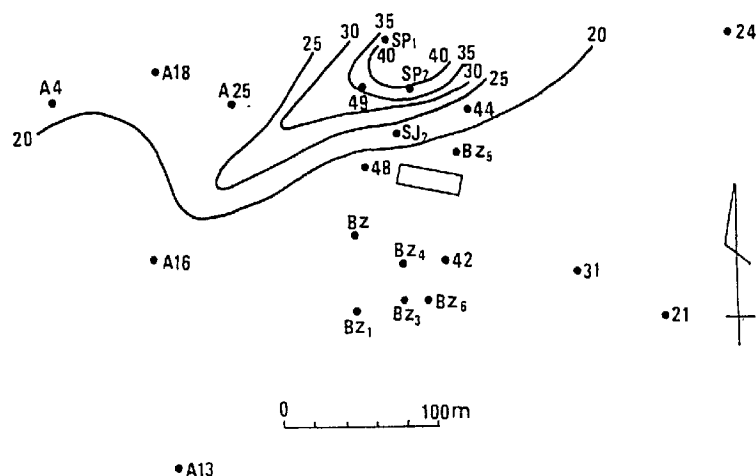


Fig. 28 Temperature distributing map
at the 10 m depth from ground surface

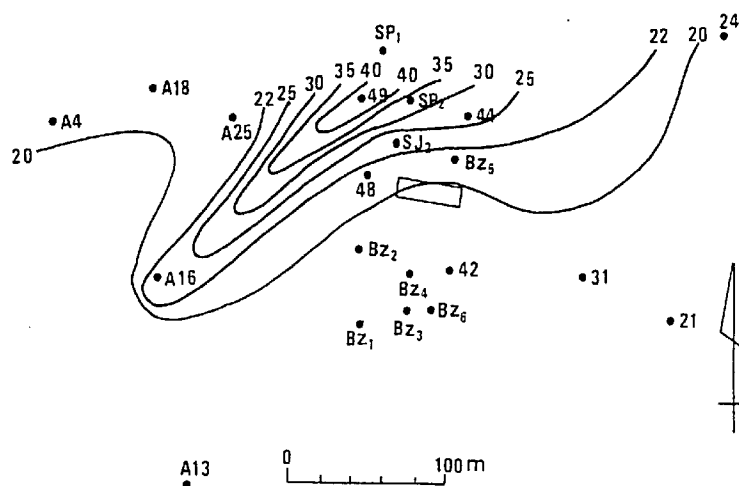


Fig. 29 Temperature distributing map
at the 20 m depth from ground surface

は深度10mの場合よりも試錐孔 A-16への高温部の伸びが顕著になっている。

深度30mにおける温度分布図 (Fig. 30) : この深度においても温泉源から南西方向への高温部の伸びが認められる。

各深度における高温部存在状況を見ると、現在の温泉の供給源は東西に延びる断層沿いに存在しているのではなく、むしろ南西方向に存在し、この方向に有力な温泉供給源が存在している可能性の高いことを示唆している。

これまででは地表面からの等深度における温度分布状況について述べてきた。次に試錐孔49の孔内水位以深で高温地下水の存在する深度440mを基準とした場合の

温度分布について検討する。この場合、各試錐孔の標高440mにおける温度は各試錐孔に認められた温度勾配が、標高440mまでそのまま延長できると仮定して計算した。計算結果を元にして標高440mにおける地温分布を描いたものがFig. 31である。この図を見ると、三元洞の西方試錐孔A-16付近から試錐孔49方向に向けて50℃に近い温度を示す部分が認められる。これが温泉井1, 2に至ると47℃程度の温度になるものと推定される。また、試錐孔BZ2, 3, 4, 6が存在する方向にも35℃以上の温度を示す部分が認められる。

これらの結果から推察すると、華清池の温泉の源は驪山山麓に存在する断層沿いに存在するのではなく、断層から多少南に入ったところに存在すると推察され

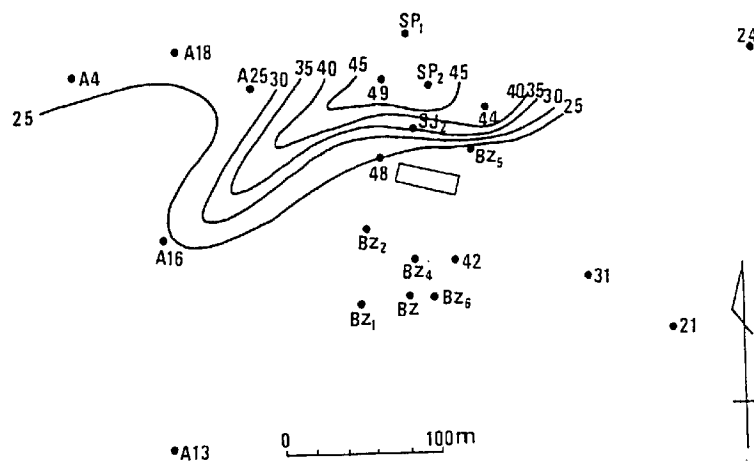


Fig. 30 Temperature distributing map
at the 30 m depth from ground surface.

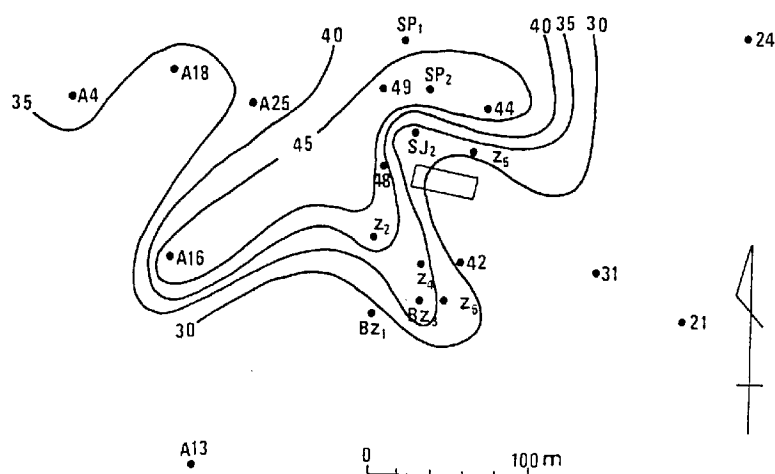


Fig. 31 Temperature distributing map
at the elevation of 440 m height.

る。

6-3 経年的に見た温度変化

1992～1994年の3年間孔内温度検層を実施してきた結果、次のような興味ある現象が認められた。源泉の温度はここ3年間の間に徐々に低下し、約2℃程下がった。この傾向は源泉に近い試錐孔44あるいは49にも認

められる。一方、試錐孔A-4あるいはA-18等では徐々に温度が上昇する傾向を示している。この現象は火山性の温泉による認められる熱源の移動のようにも見える。この現象が何を意味するかに関しては、今後の継続的な観測を待たなくてはならないと考える。

6-4 地下水流動層

Table 2 Boreholes which exist groundwater-flowing layer

No. of borehole	Existing depth of flowing layer(m)	Thickness of the layer(m)
4 8	6.5～ 9.5	3.0
A - 1 8	7.5～15.0	7.5
B Z 1	9.5～18.0	8.5
B Z 2	7.0～11.0	4.0

今回検層した試錐孔の中で認められた地下水流動層の存否について検討する。試錐孔掘削場所あるいはその周辺に地下水流動層が存在する場合は、温度検層においてその温度勾配が $0.00\sim0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度になることが知られている（竹内，1981）。この点を踏まえて、今回の検層結果を見ると、地下水流動層の存在が推定される試錐孔は、Table-2のようになっている。

これらの地下水流動層の存在が推定された地層はレス層が大部分であり、一部は礫混じりレス層あるいは亀裂の多い片麻岩層となっている。今回検出されたこれらの温度勾配を有する部分における地下水の実在性については、雨期に頻度高く温度検層を実施することによって検証できる可能性がある。

7 熱伝導率の測定結果および熱量の計算結果

調査地は大きく見ると、片麻岩を基岩としてその上に礫混じりレス層およびレス層が載っている。そこで、試錐孔掘削によって得た片麻岩の孔芯とレスを採取してその熱的性質を測定した。その結果をTable-3に示

A-10付近はほぼ平常の熱流量と思われるが、それ以外の値はこれよりもかなり大きなものとなっている。そして試錐孔49、A-16、BZ5、BZ4、BZ2、およびSJ2を中心とした範囲内は $20\times10^{-6}\text{ cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ 以上という大きな値を示している。この中でも特に試錐孔49からA-16に懸けては大きな熱流量が示されており、この部分に温泉源が存在していることを示唆している。この結果は標高440mにおける地温分布とも符合するものである。

8 降水量と孔内水位の観測結果

臨潼県驪山地すべり観測所で測定された降水量と孔内水位とを対比してFig. 33に示した。測定データは孔内水位が1994年7月15日から1995年3月20日までである。また、降水量のデータは9月から翌年3月までとなっている。この図を見ると、観測期間内の降水形態には特徴があり、9月から12月まで月に1回集中的な降水を見ている。特に10月の集中降水は日降水量71mmを含み200mmを超える降水量を見ている。一方、孔内水位は観測当初は毎週決まった曜日に測定が成されていたが、8月

Table 3 Heat conductivity and density of samples

Kind of layaer	Density gr/cm^3	Heat conductivity $\times 10^{-6}\text{ cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$
Gneiss	2.649	9.341
Loess(dry)	1.310	0.942
Loess(wet)	1.910	3.360

す。

これらの値と温度検層結果から求められた温度勾配とを用いて、各試錐孔付近における熱流量を求め、その分布状況をFig. 32に示した。一般に地殻からの熱流

26日以降は2カ月間観測が中断しており、降水量が多かった時期の孔内水位の観測データが欠けている。そのために、降水の孔内水位に与える影響を厳密に検討することが不可能であった。10月以降の両者の関係を

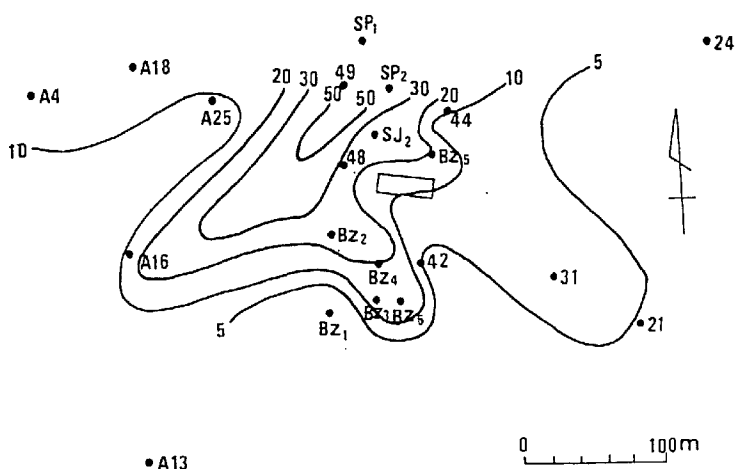


Fig. 32 Distributing map of heat flux in the investigated area
(unit: $\times 10^{-6}\text{ cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$)

量は $1\sim3\times10^{-6}\text{ cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ 程度であるとされている。この値を基準としてこの分布図を見ると、試錐孔24、7、

見ると、降雨に対する孔内水位の変化は殆ど対応してしていようである。殆どの試錐孔で観測開始以来水位

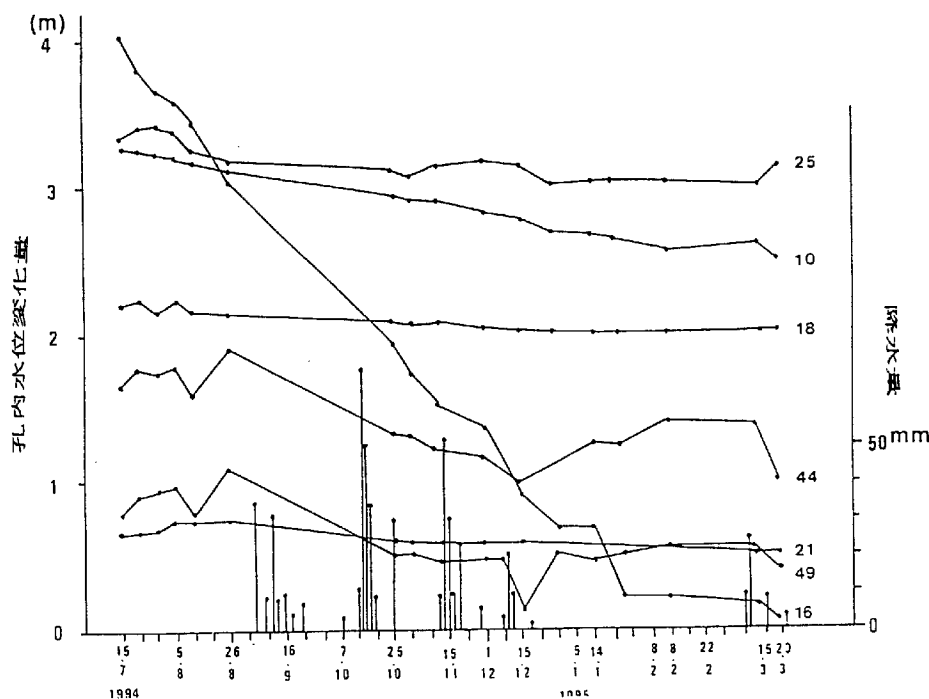


Fig. 33 Time change in the water level
in the boreholes and in the rain fall
according to weekly observation.

の低下が認められ、降雨に伴う水位上昇がある程度認められたのは試錐孔25のみである。

この様に観測開始以来水位の低下傾向が認められる現象は1993年7月から1994年1月までの観測結果においても認められている。この様な現象が生じる原因を解明するためには数年間にわたる定期的な欠測のない孔内水位の観測を実施することが必要である。

9 まとめと今後に残された課題

驪山地区において実施された温度検層によって次のことが示された。

①1992年10月、1993年10月、および1994年10月にそれぞれ実施された検層結果を対比したところ、それらの曲線はほぼ一致しており、温度検層結果の再現性が確認された。

②検層結果を基にして、調査地区の各深度における温度分布状況を検討したところ、平常地温よりもかなり高い温度を示す部分が認められた。その部分は華清池温泉を中心としたものであることが示された。ただ温泉源とされている驪山山麓に位置する断層に沿って高温部が存在しているとは限らないことが示された。

高温地下水が存在する標高440mを基準とした地温分布図を作成したところ、最高温度は試錐孔A-16から49付近に存在し、その温度は50℃程度であることが推定された。

③現地で採取した岩石、レスの熱的性質を用いて熱

流量を計算したところ、試錐孔49からA-16付近を中心として通常の熱流量の15～25倍を示す部分が存在していることが示された。これは温度検層から得られた結果と符合するものであり、華清池温泉の泉源がこの方向にある可能性が高いことを示している。

④過去3年間の観測結果によると、温泉源の温度が徐々に低下していることが明らかにされた。また、泉源の西側では温度が上昇する傾向が認められた。

今後に残された課題としては、次の点が上げられる。

①孔内水位観測の間隔が不均一であるとともに、かなり長い欠測があるので、今後は自記記録などによる連続記録が取れるようにし、降水量との定量的な対比ができるような観測態勢を構築する必要がある。

②レス層、礫混じりレス層、および基岩である片麻岩層にそれぞれ存在する可能性のある地下水を一本の観測孔で水位観測を行っているために、それぞれの地層に存在している真の地下水位に関する情報を得ることができていない。特に降雨期にはレス層中に地下水流動層が生じる可能性が高いことが温度検層によって推定されたが、これを検出できる水位観測孔が設置されていない。この点は6-1で述べたように「層別孔内水位観測孔」を設置することにより解決できると考えられる。

③調査地内に掘削されている試錐孔の分布状況は均一ではないので、もう少し試錐孔の数を増やし均一な

分布状況に置いて温泉の影響範囲を検討する必要がある。

参考文献

地下水ハンドブック編集委員会（1979）：地下水ハンドブック，建設産業調査会，pp. 120-129.

竹内篤雄（1981）：山地浅層地下水の水温と垂直温度勾配について，水温の研究，第25巻第1号，pp. 27-42.

竹内篤雄（1996）：温度測定による流動地下水調査法，古今書院，pp. 250-269.

竹内篤雄・内藤光雄・甲斐淳一（1990a）：「多点温度検層器」による地下水流動層の把握について－1－，多点温度検層の必要性について，第29回地すべり学会研究発表論文集，pp. 202-205.

竹内篤雄・内藤光雄・甲斐淳一（1990b）：「多点温度検層器」による地下水流動層の把握について－2－，北但層群内の地すべり地における測定結果例，第29回地すべり学会研究発表論文集，pp. 205-209.

竹内篤雄・内藤光雄・甲斐淳一（1992a）：地すべり地における多点温度検層の活用について－1－，孔内水位が低い場合の地下水流動層の把握，第31回地すべり学会研究発表論文集，pp. 191-194.

竹内篤雄・内藤光雄・甲斐淳一（1992b）：地すべり地における多点温度検層の活用について－2－，特に，孔内水位が浅いボーリング孔について，第31回地すべり学会研究発表論文集，pp. 195-198.

竹内篤雄・藤原常二・加藤靖郎（1995）：ケーシング孔を用いた多点温度検層による層別地下水判別の有効性について，第34回地すべり学会研究発表論文集，pp.

竹内篤雄・加藤靖郎・毛呂博功（1997）：多点温度検層結果に基づく層別地下水位観測と集水井掘削に伴うその効果判定，第36回地すべり学会研究発表論文集，印刷中

On the Result of Temperature Logging at the Lishan Mountain

Atsuo TAKEUCHI · Hontao ZHAO * · Guo TAO:*

*Geological Hazards Prevention Research Institute,
Gansu Academy of Science

Abstract

Underground Temperature logging was carried out at 23 boreholes dug in the Lishan mountain area. Aprecision thermometer with waterproof was used for measuring underground temperature. The temperature was measured at interval of 50 cm from ground surface to bottom of the borehole. The logging was carried out on October 1992, October 1993, and October 1994.

Following results were obtained from temperature logging carried out in the Lishan area.

1. The reproducibility of temperature logging was recognized from comparing with '92, '93 and '94 curves. Because those curves coincidence nearly equal.
2. There was recognized groundwater-flowing layer at a few boreholes.
3. There was recognized high temperature part near the Huaqing hot-spring area. But, it does not necessarily follow that this high temperature part exist along the active fault conjecturing the source of the hot-spring.
4. Drawing temperature distribution at the elevation of 440m height, the high temperature part distributes in the direction from A-16 borehole to No. 49 borehole existing near the hot-spring. The part exists across the active fault.
5. Calculating heat flux using the heat conductivity, density, and temperature gradient at each borehole, very large heat flux, 15-25 times as large as usual value, was recognized in the direction from A-16 borehole to No. 49 borehole. Considering the distribution of heat flux and that of temperature at elevation of 440m height, it was high possible that the heat source of the Huaqing hot-spring exist in the direction of A-16 borehole.
6. The temperature of hot spring decreased gradually about 2°C between these three years. On the other hand, the temperature of bottom of A-4 borehole increased gradually about 7°C between these three years.