



## 有馬温泉の貯留層について

西村 進<sup>1)\*</sup>, 桂 郁雄<sup>1)</sup>, 西田潤一<sup>1)</sup>, 川崎逸男<sup>2)</sup>, 城森信豪<sup>3)</sup>

(平成 27 年 2 月 23 日受付, 平成 27 年 6 月 11 日受理)

### On the Hot Spring Reservoir at Arima Hot Spring field

Susumu NISHIMURA<sup>1)\*</sup>, Ikuo KATSURA<sup>1)</sup>, Junichi NISHIDA<sup>1)</sup>,  
Itsuo KAWASAKI<sup>2)</sup> and Nobuhide JYOMORI<sup>3)</sup>

#### Abstract

In these ten years, some big reconstruction works has been done in the Arima hot spring field. For the protection of influence to hot springs, a committee has been established. The committee asked us to make some additional geological and geophysical surveys. As the results of these surveys, it has obtained more details of pregnant of hot springs.

It has be obtained the structures of the reservoir of hydrothermal system of the Arima “Kin-sen” hot spring.

Key words : Arima hot spring field, geological and geophysical survey, pregnant of hot spring, reservoir of Arima “Kin-sen” hot spring

#### 要 旨

この 10 年の間に、有馬温泉に大型の土木工事がいくつか計画・実行されてきた。それらの工事が既存泉源に影響を与えないように有馬温泉泉源保護協議会を作り、その協議会の要請で、そのたびに詳細な地質調査・物理探査を追加した。有馬温泉の胚胎の仕方がかなり詳細に検討できるようになってきた。今回その特徴をまとめ、金泉の胚胎の仕方が推定できたので、ここに報告する。

キーワード：有馬温泉，地質探査・物理探査，金泉の胚胎の仕方，金泉の貯留層

<sup>1)</sup>特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14 近畿地方発明センター内。 <sup>1)</sup>NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kinki-chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyou-ku, Kyoto 606-8305, Japan. \*Corresponding author : E-mail tkinh-1@isis.ocn.ne.jp, TEL 075-761-2526, FAX 075-761-2544.

<sup>2)</sup>(株)ジェイ・シー・アール 〒590-0106 東大阪市中新開 1-4-13. <sup>2)</sup>J-C-R & Co., (Ltd.) Naka-Shinkai, 1-4-13, Higashi-Osaka 578-0106, Japan.

<sup>3)</sup>(有)ネオサイエンス 〒590-0521 泉南市樽井 4-2-30. <sup>3)</sup>Neo-Science (Ltd.), Tarui, 4-2-30, Sennan-shi, 590-0106, Japan.

## 1. はじめに

有馬温泉の金泉の湧出状況について、地質調査・物理探査の結果はすでに西村ほか(2009;2010)にまとめた。さらに、考えられる有馬温泉の胚胎の仕方などの解釈を試みた(西村ほか, 2006; 西村, 2011)。これまでに、有馬温泉の特異性の調査・研究は断片的に多くなされてきたが、最近、益田(2011)により要領よく詳しく紹介された。

その後、有馬温泉の中心である6金泉(天神, 有明1号, 2号, 妬, 極楽, 御所泉源)の近くで、大規模な土木工事の計画が2ヵ所であり、基礎調査がなされつつある。そのつど、今までと同じ手法で、物理探査(重力測定・放射能測定・電磁(CS-MT)探査, 精密電気探査)の測定を追加することができた。金泉は沸点を越す高温で突沸の危険があることから、温度検層がなされていなかったが、今回の極楽泉源で始めてすることができた。建築のための地質調査の浅いボーリングもなされ、その岩芯観察、湧水・湧ガスなどを詳細に観察することができた。その結果、有馬温泉の金泉などの貯留層などの詳細を推定することが可能になった。

## 2. 重力探査

手法や解析は前報(西村ほか, 2009; 桂・西田, 2011; 西村, 2011)にすでに述べているのでここでは省略するが、有馬温泉の中心と推定した天神山で計画されている大規模旅館の建設の計画地や建築物の建て替地で測点を追加することができた。

その結果、Fig. 1に示すように有馬温泉の重力異常図をほぼ完成することができた。有馬温泉の中心部の非常に狭い範囲に異常な重力異常を示すことが分かった。すなわち、地下深部に比重の異なる酸性岩が貫入して、狭い範囲で急激に重力異常が変化していることが示唆された。

この地域には、愛宕山、天神山、鉄砲山の高まりがあるが、古文書や上月(1962)により、有馬の金泉は愛宕山に深い関わり合いがあるとされてきた。今回測点を増やした結果、前報(西村ほか, 2009)に示した流紋岩質岩頸の位置(Fig. 1の赤い曲線で囲んだ領域)を今回さらに正確にFig. 1の赤色で塗りつぶした域が岩頸であることを示すことができた。

鉄砲山は六甲花崗岩体の西端の丘で、東西系の高角の六甲川に沿う逆断層の上盤として上昇した花崗岩体の一部、また愛宕山も六甲花崗岩の岩脈の一部と重力異常から推定できる。この逆断層は有馬口から太閤橋を経て有馬川沿いに東に伸び、射場山断層と合体して東方に伸びる断層である。

高温の神戸市の金泉(天神, 有明1, 2号, 妬, 極楽, 御所の各泉源)は、1948年から1955年にかけて神戸市の当時の上月順治課長の指導の下、地元の鑿泉会社の手により182~277m深度の掘削がなされ、ほぼ同じ標高で泉脈に到達し成功していた(Table 1)。

これらは愛宕山と天神山の間有馬層群中に掘削されたものである(Fig. 2)。もう少し正確に言えば、これらの金泉は100~150m前後の深度で優勢な泉脈に到達している。その部分是有馬層群の硬い流紋岩質の溶結凝灰岩の中の泉脈で、ほぼ同じ標高に位置し、直径100m以内に分布するのが特徴である。

これらの金泉以外は少し離れ、有馬温泉街を囲む断層に沿い得られ、金泉よりは低温で得られ、深度も深い。これらの源泉是有馬(六甲)川沿いの東西系の断層と愛宕山の西側の南北系の滝川断層に沿い分布している(Fig. 2; Table 1)。これらは高角度の逆断層や横ずれ断層の緩み域に胚胎し、高温の金泉のような限られた深度でなく比較的深い300~600mの掘削で、数本の泉脈から温泉が得られている。そのほかに、炭酸泉・放射能の低温の温泉は最も新しい射場山断層沿いに分布する(Fig. 2)。

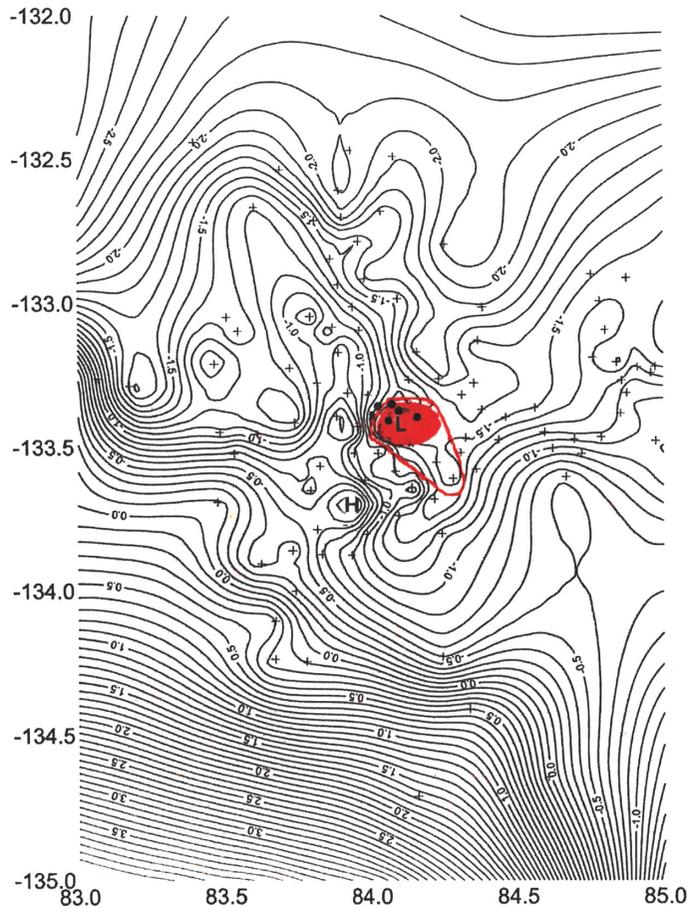


Fig. 1 Bouguer anomaly map in Arima Hot spring field. Numerical value (km) of diagram is ichnography V system. Contour interval is 0.1 mgal.

+ : gravity station ( · : additional station). L : low Bouguer anomaly area and H : high Bouguer anomaly area.

Low-density intrusion is estimated by the red circle (Nishimura *et al.*, 2009) And also red ellipse area is estimated using new additional measurement. This ellipse area is just estimated at Tenjin hill.

図 1 有馬温泉周辺の Bouguer 異常図. 平面直角座標 V 系 (軸の数値は原点北緯 36°00' ; 東経 134°20' からの km を示す). 等重力異常線は 0.1 mgal で示す.

+ : 測点 (ただし · : 今回追加した測点); L : 低異常; H : 高異常. 赤い曲線は西村ほか (2009) が推定した低重力異常 (流紋岩質岩頸) を示す. 今回, 測点を追加することができ, 赤で示した楕円形域 (岩頸域) を正確に示し直した. この領域は天神山にあたる.

愛宕山は比重の高い岩頸で, 六甲花崗岩と比重が同じ花崗岩質 (試料の測定からほぼ 2.6) で, 六甲花崗岩の貫入の末期のものである. それに対して, 天神山は愛宕山より比重が低い岩頸で, 六甲山の花崗岩より後に貫入した珪長質の岩頸 (比重: 約 2.3) の周辺であることがわかった.

Table 1 The principal hot springs around Tenjin hill. (These data are given by Kobe City.)

表 1 図 1 に示した天神山を中心とした主な泉源 (2004 年 3 月神戸市の資料)

泉源分類	泉源番号	泉源名	温度 °C	深度 m	湧出量 L/min	掘削年	泉 質	揚水方法
★ 強塩高温泉	1	妬温泉	94	185	38	1955	含鉄・ナトリウム塩化物	ラッパ管
	2	極楽泉	94	223	14	1953		
	4	天神泉	98	206	38	1948		
	5	御所泉	94	182	38	1951		
	6	有明1号泉	90	277	48.5	1955		
	7	有明2号泉	97	270	63	1953		
	☆ 中温泉	3	銀泉	56	67	13		
10		太閤橋	54	237	94.5		含鉄・ナトリウム塩化物	エアリフト
11		ヘルセンター1号泉	63	220	10		ナトリウム塩化物	ラッパ管
12		ヘルセンター2号泉	30	330	12		ナトリウム塩化物	エアリフト
15		愛宕(簡易保険)	48	300	15		含塩化土類強塩泉	-
● 低温泉	13	月光園2号	37	164	24		含食塩土類炭酸鉄泉	水中ポンプ
	21	リッフライ72号	25	6	-		二酸化炭素ナトリウムカルシウム塩化物泉	くみ上げポンプ
	24	銀水荘	29	300	29		二酸化炭素ナトリウムカルシウム塩化物泉	ラッパ管
▲ 単純炭酸泉	8	関電炭酸泉	15	2	21		単純二酸化炭素泉	自然湧出
	9	地獄谷2号	17	-	-			
	18	栄鉱泉	19	-	-			
	19	泉科学	20	5	89			
	27	炭酸公園	19	16	25			

### 3. 電磁 (CSA-MT) 探査

電磁探査解析の手法は西村ほか (2010) に報告しているのので、ここでは省略する。電磁探査では比較的深い 1,000 m 深度までの比抵抗探査が可能である。一方、地表に近い (30 m 深度まで) 探査は高密度電気探査が精密に比抵抗構造を求めることができる。

電磁 (CSA-MT) 探査 (西村ほか, 2010) に加えて、2014 年 1 月の天神山の 4 測点の追加の結果、さらに、2015 年 1 月の奥ノ坊跡地の 3 測点の追加の結果、西村ほか (2010) の報告と比べ、より細かく解析できた (Fig. 3)。この結果から天神山の珪長質の岩頸の高比抵抗 (>100 Ωm) の周辺に、鉛直に近い低比抵抗の急激な変化が見られ、比抵抗分布からの天神泉源の近辺に地下深部から高温の金泉が上昇していると読み取れる。

高密度電気探査は地表近くの開発時の基礎杭の制限深度や掘削限度を指示するデータを与えてくれる。

### 4. 建築物の精密設計のための地質探査の掘削井の観察

天神山の再開発のための詳細な地質調査が必要とされ、既存泉源に影響を与えないよう筆者らが監視しながら 18 本の浅い掘削がなされた (Fig. 4)。その結果岩芯による柱状図の作成・検討に加わるようになった。

これらの地質柱状図と精密な地質調査から天神山の最上部にはほぼ水平な海岸段丘が認められ、中位段丘であることが判読できていた。

これらの検討で、非常に興味ある以下の結果を得た。孔口が有馬 (六甲) 川沿いの標高が低い 2 本を除き、標高 404~410 m と推定できるところに、中位段丘面を見つめることができた。天神山は結果的に 10 数万年前海岸近くにあった段丘が六甲変動により、ほぼ水平を保ちつつ約 400 m 上昇したことになる。なお、この少し東北に、船坂峠があるが、そこには広いほぼ水平な中位段丘の

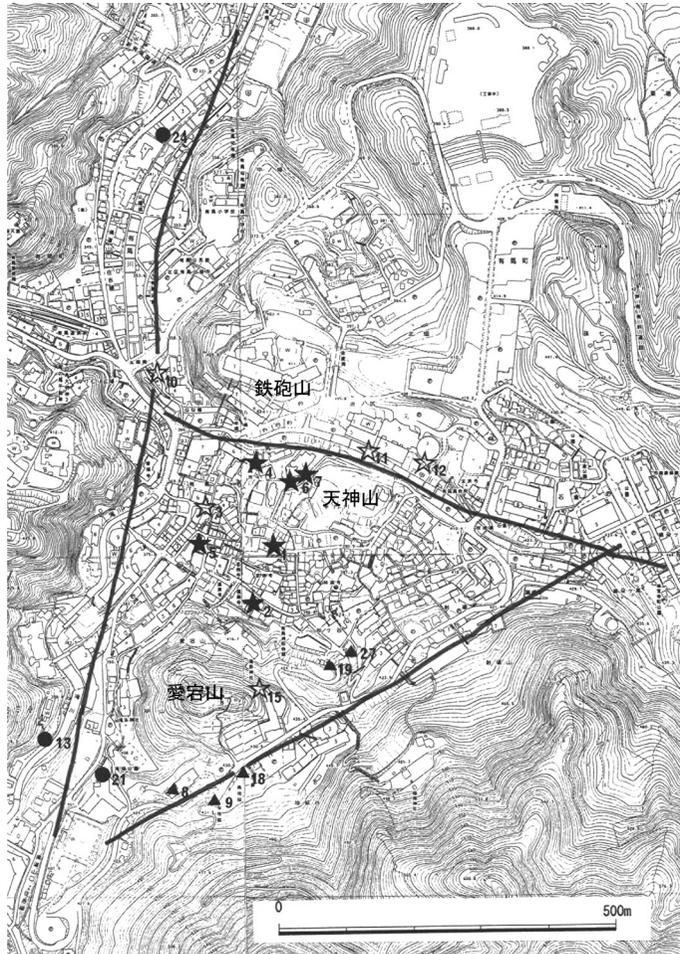


Fig. 2 The distribution of important hot springs in the center area of Arima. The characteristic mark with number are related Table 1. Fault system are estimated by geological and geophysical prospectings.

図 2 有馬温泉中央部における主な温泉の分布. 位置を表している温泉の分類などは表 1 に示す. これらの温泉は地質調査・物理探査で明らかにした断層で囲まれて分布する.

露頭が発達している, ここが六甲山地でもっとも標高が高い中位段丘で, 標高約 420m である (藤田, 1983; 藤田編著, 1984). この段丘面から下部は透水性の極めて悪い硬い流紋岩質の岩石が見られる.

各ボーリング孔は透水性が悪いが, 掘削すると標高が 396~400 m の間で逸水する (Table 2). とくに (A-3 孔) では 0.5 m 以上のほぼ水平に発達する空洞があり, その部分を中心としてクラックが見出された. この空洞は伏流水で非常によく洗われ, 上盤下盤ともきれいな硬い流紋岩質岩石で, その中に黄鉄鉱・閃亜鉛鉱の細粒の結晶も見つかった. ほかの掘削孔もほぼ同じ標高でクラックが多く逸水した. 伏流水の通りが悪いところでは赤色の粘土に酸化鉄の沈殿が存在していた. また A-3 孔だけはさらに深い 11 m 深度以下から暖かい気体の上昇がみられた. 簡易の半定量分析する自作のサンプリング器具で気体の簡易分析をし, 800~1,000 ppm の二酸化炭素が見られた (Table 2).

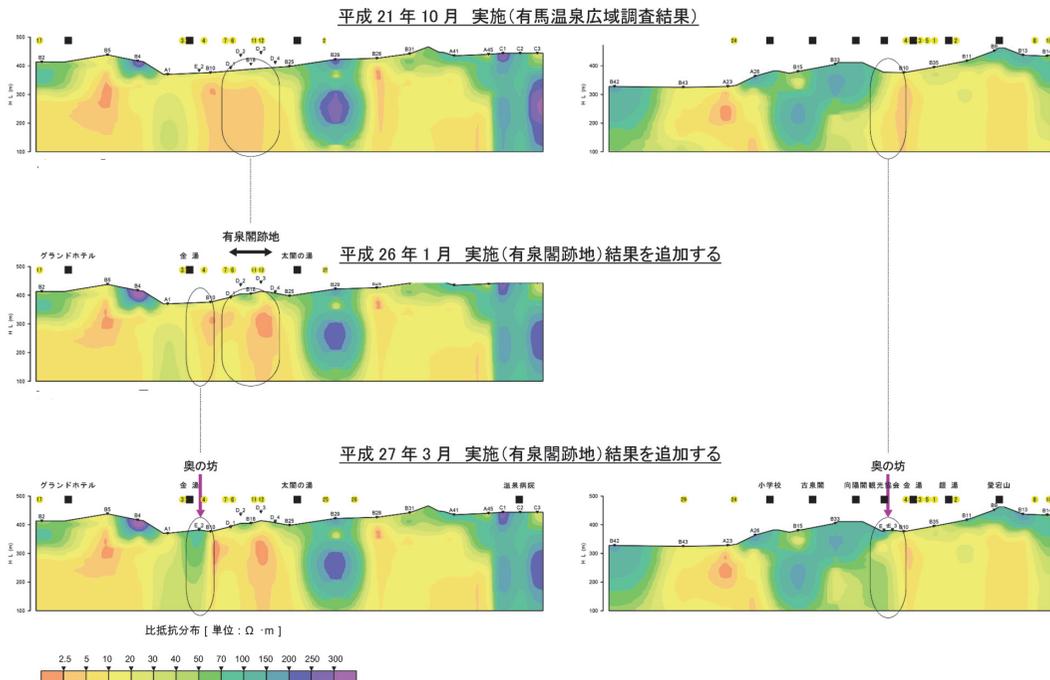


Fig. 3 The resistivity sections obtained by the first survey at Oct. 2010 (Nishimura, *et al.*, 2010), the second at Jan. 2014 and the third at Jan. 2015. These methods are just the same. The results shows the horizontal and vertical resistivity structure. The area of “有泉閣跡地” is covered the Tenjin hill.

図 3 必要ごとに測点を増やし得られた有馬温泉の比抵抗構造。CSA-MT 探査の測定方法は全く同条件である。点数を増やすに従い構造を詳細に示されている。有馬温泉の比抵抗構造は水平構造（有馬層群の堆積構造）と鉛直構造（温泉の上昇による構造）を示している。図中有泉閣跡地が天神山を指す。

これらのことは、有馬温泉の金泉は、昔には非常に深部から上昇し、地表近くでほぼ水平に流れ断層に至り下降していく非常に大きな循環の一部があることが推定できた。段丘とその天神山の温泉水の滞留層が同じように水平に存在していたことから、このクラックは非常に古くから保存されていることが推定できる。

その後、周辺が六甲変動で上昇したためか、または湯を得るために掘削されるようになったためか深い水平のクラックに胚胎する熱水を汲むようになったことを示している。

### 5. 古文書などから推定できる金泉の湧出深度

有馬温泉に関する古文書や古い写真が残っている。これらからその当時の有馬温泉の泉源の状況を推定できる。その主なものは神戸市立博物館（1998）と有馬温泉観光協会（1999）に集約されている。その中で大事なことを挙げる。

#### ①有馬極楽寺遺跡（豊臣秀吉 有馬湯山御殿跡）

平成 8 年（1996）年度の発掘調査の結果、豊臣秀吉の有馬湯殿跡と伝えられた石組みの遺構自体は江戸時代のものと判明した。しかし、その石組みの下から安土・桃山時代の湯殿に関する遺跡が確認された。当時は流紋岩質溶結凝灰岩の露頭の亀裂から湯が湧き、湯船に流れ込んでいたことを

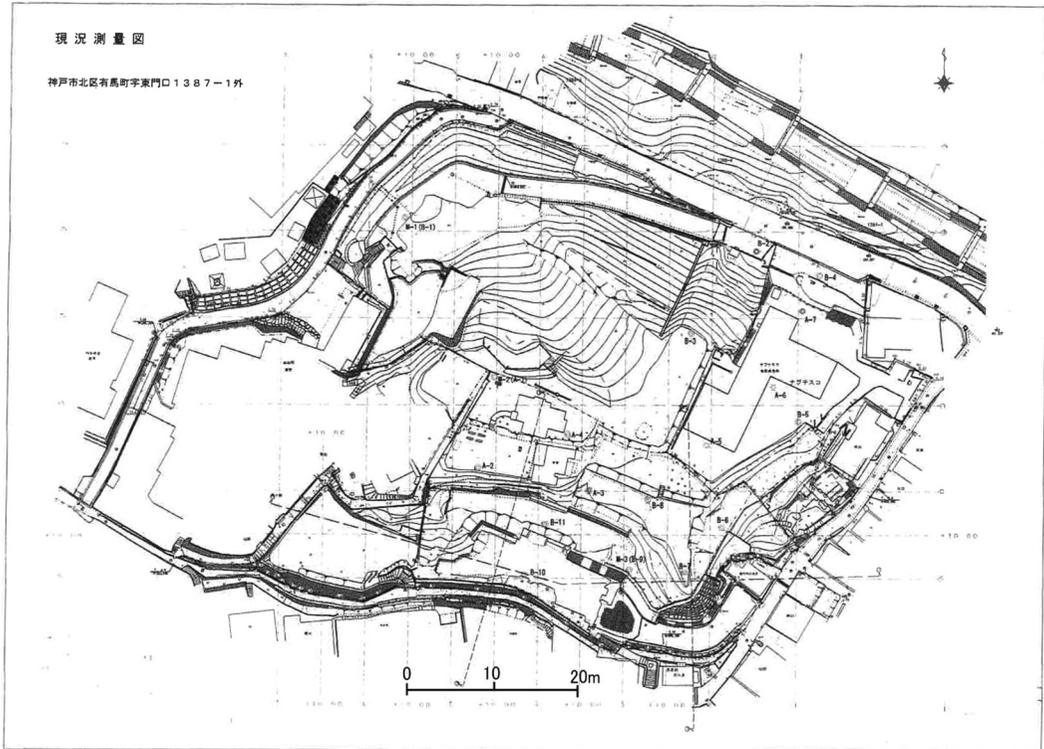


Fig. 4 The distribution of geological logging points. The characteristic remarks are shown in Table 2.  
 図 4 天神山における地質調査の掘削場所. 表2に各ボーリング孔の温泉の湧出構造と関係のある特徴を示す.

Table 2 The geological drilling data related to the structure of the Arima hot springs.

表 2 天神山で得られた地質調査の掘削の温泉に関するメモ.

ボーリングNo.	段丘堆積面の標高(m)	高角度の断層(m)	水平で空洞の標高(m)	
B-1(M-1)	403.5	401~395	396	黄銅鉱・黄鉄鉱 宙水
A-1(M-2)	406.3		369~387	褐色 逸水
A-2	406.1		397	茶暗黄色
A-3	406.7		398.3~396.5	逸水
A-4	408		398~396	399 逸水
A-5	408.3		395.7	水位
A-6	410		398~396	空洞
A-7	405.9(地表)	高角度の断層中399まで 花崗岩を含む断層粘土		
B-2		有馬川沿いの北落しの 断層の上盤(花崗岩)		
B-3	410.4	408~400 急傾斜断層	398.7(水平断層)	逸水
B-4		有馬川沿いの断層の下盤 (流紋岩側)		
B-5	408.5	407, 408~400 急傾斜断層	400ぐらいで逸水	
B-6	403.8	403.8~404 急傾斜断層	397.5~396.9	空洞
B-7	406.9		397.3	以深やわらか
B-8	407.6	402 粘土断層	397.9~397.1	空洞
B-9(M-3)	403.4		397~395	断層粘土 逸水
B-10	400(地表)		347.8	空洞
B-11	402.5	394, 390, 394~399 断層		

示す。その遺跡の現在の標高は海拔 388m である。

## ②神戸市立博物館 (1998) の収録の古文書から当時の金泉の湧出状況の推定

西沢一鳳軒 (1850) : 有馬温泉紀行 ; 生白堂行風 (江戸時代) : 迎湯有馬名所鑑 ; 稲野笹有馬小鑑 (1685) : 増補有馬手引草 (1717) ; 大根土成・福留白瑛画 (1827) ; 橘守国画 (1749) ; 有馬景勝図 ; 有馬名所及旅舎一覧表 (1896) ; 有馬町村付近地図 (大正期・昭和初期) 一万分の一から、当時の一の湯、二の湯の湯殿位置が現在の御所の湯の地並である海拔 370m~380m と推定できる。

これらのデータから、安土・桃山時代から昭和初期の金泉の湧出場所の現在の標高がほぼ同じであったことを示唆している。しかし、昭和中期の湯殿周辺の建築ラッシュのためか、金泉の湧出が急激に悪くなり、有馬温泉はラドン泉、炭酸泉が主流になっていた。このため、前述したように現在まで続く 6 本の金泉が神戸市により開発された。

## 6. 極楽泉源の検層

有馬温泉の高温の 6 金泉は、180~280m 前後の深さの掘削がなされている。それらの温泉井では、100~150m 深度でほぼ水平に流れる泉脈に当たる。水平に流れるに従い泉温は下降するので、活断層に至り、断層で熱水がさらに断層のなかの地下水により温度が下がり、下降すると考えられる。

掘削は冷却水で二酸化炭素ガスの乖離を防ぎながらすすめられ、100~150m 深度にて泉脈に当たり、200~300m の掘削をしておけば、揚湯後の沈殿やスライムや沈殿などで孔内が埋まっていても、かなりの間、湯脈を埋まらないように工夫されている。湯は硬い流紋岩質の岩石の亀裂から湧出しているので、これらの金泉の 50m 以深は裸岩でケーシングは必要がないことが経験で知られていたらしい。また沈殿を孔内では作らず、地表に出てから沈殿を作るのに効果的なラップ管が考案されたらしい。

二酸化炭素バブルで 100℃ 前後の熱水が噴き出すが、冷やせば二酸化炭素の乖離を防ぐので、今回極楽泉源で温度検層をすることができた (Fig. 5)。この結果は孔内の温度勾配の深度変化と 1m ごとの温度差が示されている。170~204m 深度に 126℃ の泉脈にあたり、それより深部には孔底付近まで泉脈はない。これは極楽泉源あたりでは熱水の胚胎はこの泉脈しかなく、この近辺の熱水はこの間のクラックに貯留されているが、湧出している間泉温も安定しているので、クラックの中をかなりの速さで流動していることを示している。

## 7. ま と め

有馬の温泉は、その湯の成分から、フィリピン海プレートの沈み込みのスラブの蛇紋岩がほぼ 60km の深度で、連続的に超臨界の水を脱水し、上部に上昇し、マンツルの成分を溶かしこみ (超臨界の水は色々な成分を洗い出す性質をもつ)、マンツル内に存在する超臨界の二酸化炭素を多く含み、そのため、比重を下げ、真上に上昇し下部地殻に至りさらにその部分胚胎する地下水を加え、珪長質の岩類の周囲の緩み域を上昇してきていて活断層の存在する 10 数 km 深度に至る。その上部では、亜臨界状態の熱水となり、次第に地下水で薄められて、地表近くに上昇する (Fig. 7)。

1km 深度程度で超臨界二酸化炭素を臨界点より下げて、遊離してさらに上昇し、クラックの多い地層で水平に広がる。その後次第に温度を下げ、近くの断層などに流下していると考えられる。ゆえに断層に掘削すれば、水平の貯留層よりも、温度の比較的低く含有成分も薄い温泉が得られる。

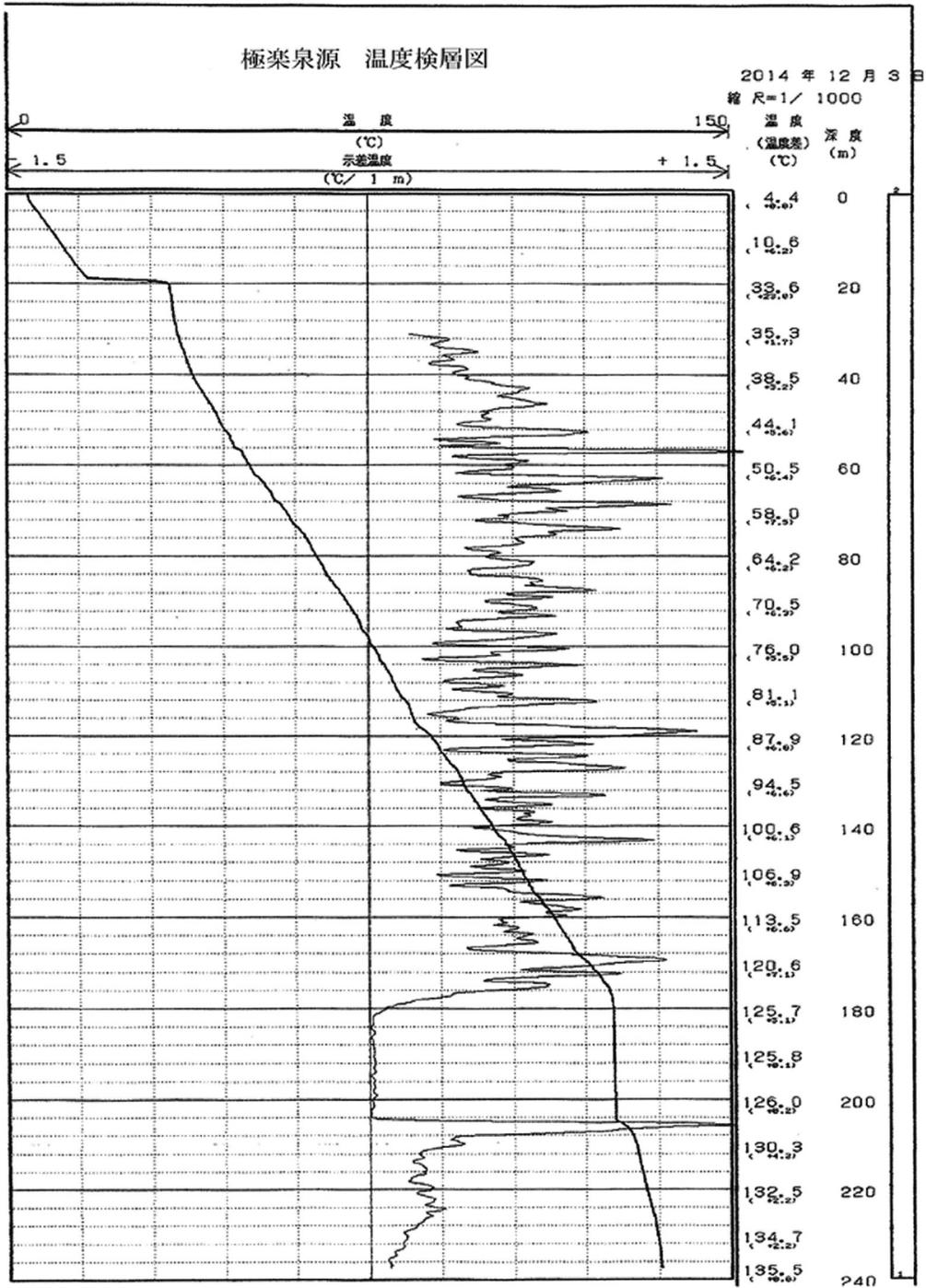


Fig. 5 Temperature logging of Gokuraku hot spring (Dec. 3, 2014).

図 5 極楽泉源の温度検層 (2014年12月3日).

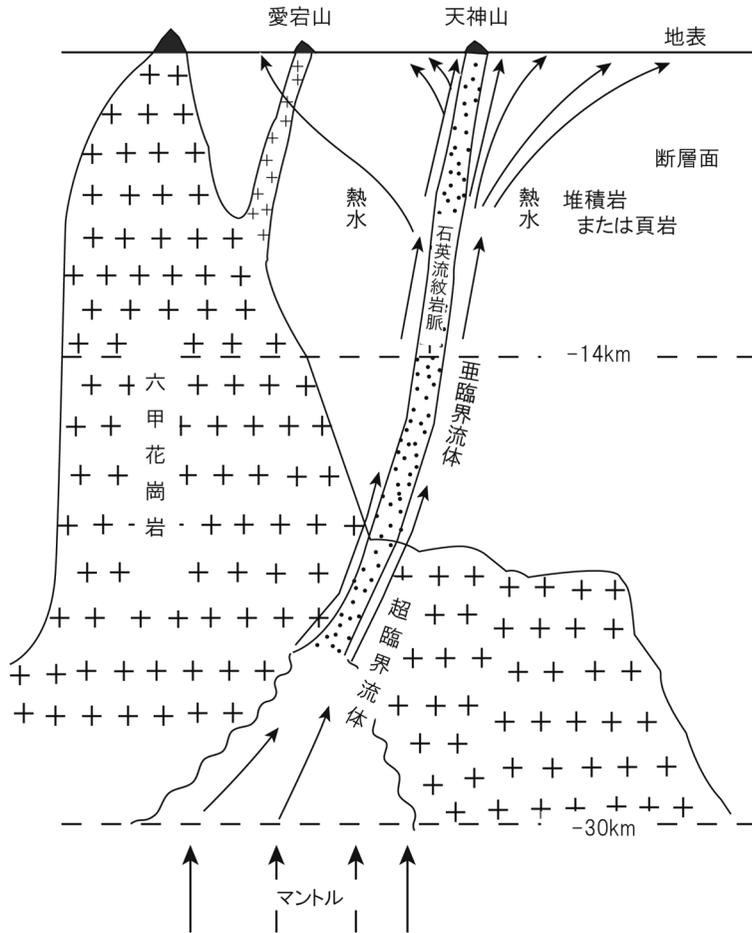


Fig. 6 Schematic cross section parallel to an active faults, showing the pass of the dehydrated fluid from the slabs. Fluid rising through the periphery of the neck of acid intrusion along active fault at Arima hot spring field (modified from Nishimura, 2011).

図 6 ある断層面に投影した有馬温泉の湧出の仕方の概念図。フィリピン海プレートのほぼ 60 km 深度で沈み込みのスラブから脱水した熱水が以前からある六甲花崗岩を貫入してきた流紋岩質の岩頭の緩み域を上昇し地表に湧出している (西村, 2011 を修正)

謝 辞

この報告にまとめるデータは調査にかかわった施主の方々に報告し、有馬温泉泉源保護協議会で報告したものが主であり、公表の機会を与えて頂いたことに感謝します。また 2 名の査読者の方には、種々のご指摘をいただき深く感謝いたします。

引用文献

有馬温泉観光協会 (1999) : しつとりと有馬, 76 頁, 有馬温泉観光協会 50 周年記念誌編集委員会, 神戸.  
 藤田和夫 (1983) : 日本の山地形成論—地質学と地形学の間, 467 頁, 蒼樹書房, 東京.

- 藤田和夫編著 (1984) : アジアの変動帯—ヒマラヤと日本海溝の間, 400 頁, 海文堂, 東京.
- 桂 郁雄・西田潤一 (2011) : 有馬温泉地域の重力探査, 自然と環境, **13**, 40-48.
- 神戸市立博物館 (1998) : 有馬の名宝—蘇生と遊興の文化, 182 頁, 神戸市博物館, 神戸.
- 上月順治 (1962) : 有馬温泉の研究, 118 頁, 日本書院, 東京.
- 益田晴恵 (2011) : 地球深部の窓—有馬温泉, 温泉科学, **61**, 203-226.
- 西村 進 (2011) : 近畿地方の高温泉とその地質構造, 温泉科学, **60**, 481-491.
- 西村 進, 城森 明, 川崎逸男, 西田潤一, 桂 郁雄 (2010) : 近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造 (2) —白浜温泉と有馬温泉の電磁探査の結果から—, 温泉科学, **60**, 145-160.
- 西村 進, 桂 郁雄, 西田潤一 (2006) : 有馬温泉の地質構造, 温泉科学, **56**, 3-15.
- 西村 進, 桂 郁雄, 西田潤一 (2009) : 近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造 (1) —白浜温泉と有馬温泉の探査の結果から—, 温泉科学, **59**, 103-111.