

平成 18 年 6 月

原 著

有馬温泉の地質構造

¹ NPO シンクタンク京都自然史研究所, ² 大谷大学文学部

西村 進¹, 桂 郁雄¹, 西田潤一²

(平成 18 年 4 月 5 日受付, 平成 18 年 5 月 10 日受理)

Geological Structure of Arima Hot-spring

Susumu NISHIMURA¹, Ikuo KATSURA¹ and Junichi NISHIDA²

¹ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, ² Otani University

Abstract

Arima Spa, situated at the northern part of Kobe City, is one of well-known hot-springs in Japan. There are various kinds of chemical type hot-springs. One of them is well-known as "Arima-type deep thermal water". It has very high Cl concentration and extremely high δD and $\delta^{18}O$ values, and $^3He/^4He$ ratio. Such high values in water isotope composition imply that these saline waters are originated from andesite-magmatic steam or mantle-derived water. Almost all hot and cold spring water at Arima Spa are gradual, mixed with deep originated CO_2 (magmatic or mantle-derived). In this region, there are no volcanic activities, so that the Arima type steam is contained the fluid devolatilized from the subducting slab of oceanic plate as pieced together from the various accounts.

Geological and geophysical surveys evidenced that location of springs and the flow of thermal waters in this area are controlled by the deep developed fault system and related upwelling pipe.

Key words : Arima Spa, Arima-type deep thermal water, isotopic ratio, subducting slab-derived fluid, fault system

キーワード : 有馬温泉, 有馬型熱水, 同位体比, 沈み込みスラブ脱水流体, 断層構造

1. はじめに

有馬温泉は六甲山地北西部の射場山中腹に位置し, わが国有数の古い温泉である。大己貴命・少彦名命の二神の開湯という伝説もある。舒明・孝徳両天皇が有馬温泉に行幸された記録が日本書紀

に残されている。また、僧行基が再興したとの伝えがあるので、7~8世紀から知られていたことは確かである。1192年には大和の国吉野の仁西上人が十二坊舎を建てたといわれ、これが有馬の旅館の坊名の起源となっている。「慶長元年(1596年)の大地震によって、温泉変じて熱湯となり、大きな被害を受けたが、豊臣秀吉が有馬法師に命じて再興させた」と伝える。「有馬の鳴動」も群発地震と見られ、深部から蒸気などが多量に上昇したときに発生したものと見られる。

有馬温泉の発祥の地(現温泉会館の場所)には、かつて温泉が自然湧出をしていたと伝えられる。有馬での掘削第1号は1946年にこの地で施工され、67.4m深度で泉温52°C、塩類濃度が9.2g/lの泉源を得たと伝えるが、1980年代にはCl⁻濃度約1g/l、泉温45~47°Cに低下している(藤田他, 1987)。その後、1955年までに、深度165~285mの12井が掘削され、内6井が孔口で湯の温度が90°C以上であった。高・中温泉は有馬層群流紋岩分布域に限られ、半径約400mに集中しているが、その他、放射能泉、炭酸泉、塩類泉の低温泉・鈹泉が周辺に見られる。Nakamura and Maeda (1961)は「有馬の食塩泉は岩漿水に近い性質を保持し、同時にある種の浅熱水性鈹床の生成に関連ある鈹液の性質を示しているように思われる」と述べている。その後、多くの地球化学的な議論がなされてきた(Okamoto, 1962; 鶴巻, 1964; 松葉谷他, 1974; 酒井・大木, 1978; Masuda and Tsurumaki, 1982; Masuda *et al.*, 1985; 1986; Sano and Wakita, 1983)。

西村・小泉(1986)は「近畿・京阪神地域における地震予知総合研究」で、有明1号の泉源の最初のマチからガスを抜き、原子吸光法、ガスクロマトグラフィによる種々の元素の連続測定、泉温の連続測定を1986~1995年まで実施した。残念なことに予算の関係で、兵庫県南部地震の半年前に撤収した。

このように有名な温泉であるにもかかわらず、有馬温泉地域の地質構造や温泉の湧出構造の地球物理学的研究は上月順治(1962)や西村(2000a; 2001)の簡単に論じているものしかないので、今回論じることとした。一部は第57回温泉科学会で報告したデータを使用した。また、今回新たにいくつかの測定データを取得し、それらを利用して、議論を進める。

2. 有馬温泉周辺の地質

有馬温泉の地質は、市街化区域が殆ど開発されていて、詳細に調査したが、露頭が少なく、従来の地質図を参考にしなければならない。出版されている地質図には、上月(1962)、藤田・笠間(1983)、Masuda *et al.* (1986)があるが、各地質図とも岩体の分布境界や断層は三者三様であり、基本的な地質構成およびその分布は一致するが、断層や湧出構造には探査が不十分で同意できない。今回Masuda *et al.* (1986)の地質図を訂正した(図1)。

有馬温泉の中心地に、この地域で最も古い中生代の流紋岩類(溶結凝灰岩を主体とする)から成る「有馬層群」が分布し、東南部にこの流紋岩に貫入した「六甲花崗岩類」が分布している。有馬市街地の北側には、第三系の砂岩・頁岩から成る「神戸層群」が、これら有馬層群・花崗岩体を被っている。また、市街地の有馬川の谷沿いに最も新しい未固結の段丘堆積物や河床堆積物の「第四系」が分布する。

有馬温泉付近に認められる断層は、南側の流紋岩体の中で破碎帯が明瞭な射場山断層で、この断層に沿って炭酸泉や噴気(虫地獄、栄温泉、地獄谷2号、炭酸公園など)が分布している。六甲花崗岩体と流紋岩体は深部では断層で接していると推定できる。これらの断層の延長は有馬町端宝寺から白水峡、船坂峠、蓬萊峡、西宮市塩瀬町生瀬にかけて走り、この断層に沿って放射能泉が所々で湧出している。有馬温泉地域には、物理探査により東西系と南北系の断層が推定できる(図1)。探査の結果、高温泉の西側に南北性の断層が存在することが分かった(図2)。この断層群が高温泉

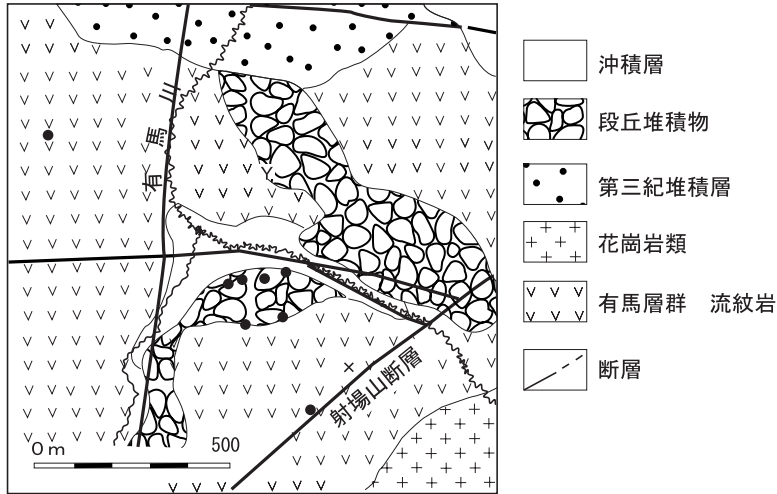


Fig. 1 Geological map around Arima Spa (modified from Masuda *et al.*, 1986).

図 1 有馬温泉周辺の地質概略 (Masuda *et al.*, 1986 を訂正)

● : 主要温泉源

の湧出を規制している可能性が高い。

3. 有馬温泉の現状

有馬温泉の泉質は、炭酸温泉科学研究所 (1954), 上月 (1962), 神戸市経済局 (1983), 神戸市生活文化観光局 (1953-2002) により記載されている。これらの資料によると、有馬温泉は大きく 3 種類の泉質に分類される (表 1)。

① 塩化物泉, ② 炭酸冷泉, ③ 放射能泉である。今回の調査で① 塩化物泉は、①-1 高濃度の鉄を含有する有馬温泉で言われている「金泉」、①-2 高塩分を含有する塩類泉に再分類され、前者は主として東西系の断層に関連し、とくに、東西系・南北系の断層の東南部で愛宕山北部に位置し、①-2 は南北系の断層に関連しているように推定される (図 2)。

有馬温泉の総湧出量は、温泉沈殿物の多いものがあり、常に湧出量の変化する泉源があるので、明確ではないが、約 9,000 l/分でこのうち高塩化物泉は約 10% の約 900 l/分と推定されている。含鉄高塩化物泉や高塩化物泉は高濃度 (NaCl の含有量が海水の約 2 倍) で加水しなければ利用できない温泉である。沸騰泉の主な泉源を表 2 に示す。これら表 2 に示した高温・高塩濃度の温泉源の他に、辻他 (1997) によると、有馬温泉の中心近くで最も深い 500 m の掘削で、簡保泉源と花の坊泉源とで、高温・高塩濃度の源泉が得られ、それぞれ湯の温度が 90.5°C, 94.6°C であった。寺西他 (1988) は、花の坊泉源の湯温が 94.6°C であったと記録している。しかし、2003 年の現地調査では、花の坊の泉源は止まっており、簡保の泉源も泉温が降下していた。また、これら高温・高塩類泉 (金泉) の泉源は一年に 1 回程度沈殿物の掃除をせねば湧出を維持できない。

4. 有馬温泉の炭酸泉, 放射能泉

有馬温泉の分類の内、② 炭酸泉と③ 放射能泉の湧出機構は、① 塩化物泉とは非常に異なる。①

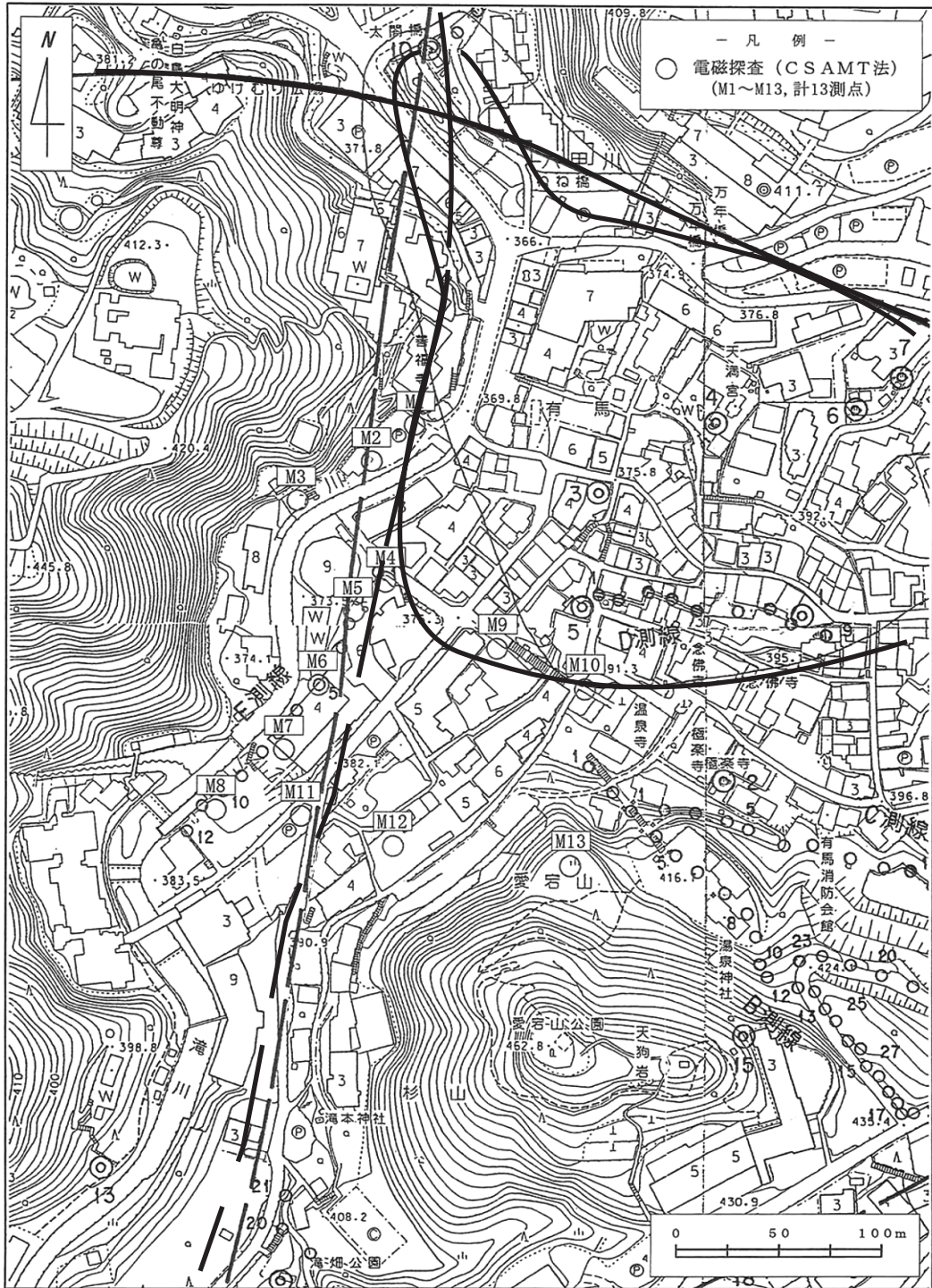


Fig. 2 Distribution of faults and the hot area, estimated by the results of γ -ray survey.

図 2 放射能探査から推定される断層と高温域 (高温泉源の得られる域)

Table 1 Hot- and mineral springs around Arima Spa.

表 1 有馬周辺の温泉・鉱泉の性質

種別	掘削泉源			自然湧出泉源		
	高温泉	中温泉	低温泉	鉱泉		
分布地域	愛宕山北方, 図 2 に示す高 温泉源域	高温泉源域を 囲む	広範囲	広範囲	射場山断層沿 い	六甲花崗岩域
主な泉源名	天神・御所 極楽・妬 有明 1, 2	袂石 ヘルスセンター 1, 2 簡易保険	月光園・蛇谷 グランド 銀水・五社			
泉温 (°C)	90~98	43~33	32~			
Cl ⁻ (g/l)	23.0~43.8	2.3~31.0	1.7~43.5	1.1~4.8	0.01~0.02	
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	60~170	350~500	500~2,400	150~1,000		
遊離炭酸 (mg/l)	少ない	多いものあり	750~1,300	~1,300	300~1,600	
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	nd.-tr.	5~35	nd.-tr.	0~12	0~100	
泉質	強食塩泉	(強) 食塩泉	含炭酸-土類食塩泉	単純炭酸泉	放射能泉	

Table 2 High temperature and NaCl springs in Arima.

表 2 有馬の高温強食塩泉

泉源名	掘削年度	深度 (m)	掘削時の泉温 (°C)	掘削時湧出量 (m ³ /日)
極楽	1953	223	97	20
御所	1951	182	97	50
妬	1955	185	98	60
天神	1948	206	98	40
有明 1	1955	277	91	18
有明 2	1953	270	92	37

塩化物泉は非常に特異な湧出機構を持ち、有馬型熱水として議論されているので、別項で詳細に検討する。②と③は断層と関係があり、②炭酸泉は流紋岩体内部の東北東-西南西の射場山断層沿いに湧出し、その東南部の六甲花崗岩中に③放射能泉が湧出している。

5. 有馬温泉の塩類泉の湧出機構

5.1 今迄の有馬温泉の議論

高・中温泉は高温泉を中心として、400 m の狭い範囲に集中している。掘削記録によれば、湧出母岩は有馬層群の流紋岩であって、ボーリングコアの中に閃亜鉛鉱・方鉛鉱等の金属硫化物が見出されることがある。Nakamura and Maeda (1961) はこの点を重視して、「有馬温泉の食塩泉は岩漿水に近い性質を保持し、同時にある種の浅熱水成鉱床の生成に関連ある鉱液の性質を示しているように思われる」と述べている。Okamoto (1962) は泉温と Cl⁻ 濃度との間に直線関係が認められ

ることに注目し、「高温で高塩分の温泉が低温・低塩分の地下水によって薄められている」と述べ、鶴巻(1964)は鉱泉にも高塩分濃度のものがあること、高・中温泉、鉱泉を問わず Cl^- 濃度と Br 、 B などの微量成分との間に高い正の相関があること、高温泉は HCO_3^- と Mg^{2+} が著しく低濃度であり、多量の CO_2 を伴っていることなどを根拠として、①低温で CO_2 に富む塩水が広範囲に分布している。②局所的に熱源が存在して①が加熱され、 CO_2 を失ったものが高食塩泉として湧出している。③泉源の温度と塩濃度の差は加熱の程度と地下水による希釈の程度の差による。④放出された CO_2 は浅層の地下水に溶解し炭酸泉となって湧出しているとしている。この機構は松葉谷他(1974)による水素・酸素の同位体組成の結果とも矛盾しないとしている。

藤田他(1987)は「有馬温泉の泉質は塩濃度が極めて高く、海水の2倍以上である。その中の Cl^- 濃度 4.38 g/l のものの同位体比を求めると、 $\delta\text{D} = -30 \sim -20\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} = +8\%$ である。これを有馬温泉の源の端成分と考え、種々の温・鉱泉はこの塩水と地表水との混合によって湧出している」と説明できるとしている。Masuda and Tsurumaki (1982); Masuda *et al.* (1985; 1986) は有馬温泉を含めて兵庫県南東部に分布する食塩泉について、化学組成、安定同位体組成、溶存または噴出ガスの組成などを分析するとともに、有馬温泉のコア試料に見られる変質鉱物について鉱物化学ならびに安定同位体科学的な研究をすすめ、有馬温泉の起源の考察を行なっている。

これらは、温泉成分の化学的考察のみから有馬温泉の湧出機構を議論されていて、地質構造、地球物理学的検討は充分なされていない。島弧のプレートテクトニクスと地熱・火山活動の研究は Nishimura (1998) などにより、火山フロントより海溝よりで、火山活動のないところに地熱活動や温泉活動のあることがあることが指摘された。Sano and Wakita (1983) は近畿地方の外帯や有馬の温泉水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が高いことを見出し、何らかのマントルが関連している可能性を指摘した。Tatsumi (1989) は、島弧のマグマの発生と沈み込むスラブの脱水の関係を論じ、沈み込み帯の上面近くの脱水が圧力増加により、60 km の深さより浅部では蛇紋岩が脱水し、100 km では角閃石・緑泥石が分解脱水して、150 km 深度では白雲母が分解脱水し、その水はマントルを上昇する。マントルの温度が $1,300^\circ\text{C}$ 以上あればマントルが部分熔融して、マグマが出来ることを指摘している。60 km 以浅ではプレートスラブの上部のマントルに部分熔融するような高温の部分がなく、蒸気が上昇するだけであることを示した(図3)。この蒸気が貫入岩体の境や非常に深い断層を通じて上昇し、地下水と混合して、高温の組成の特殊な沸騰泉や高温泉が見られることを指摘した(西村, 2000 a; 2000 b; 2001)。その一つの例として、有馬温泉があげられる。風早(2004)は産業技術総合研究所深部地質環境研究センターのホームページ「深部流体の起源」で「有馬型温泉水はマグマ起源と同位体組成が酷似していることで知られており、地下に存在するマグマ起源としている可能性が指摘されている。しかしながら、最近の火山学の示すところによれば、この地域にマグマの存在している可能性は殆どない。我々はこの温泉水のもとになる水を有馬型深部上昇水と呼んでいる。有馬型深部上昇水の混入を示唆する温泉水は、最近では近畿地方にとどまらず、中部・東海・関東地方の一部にも確認されている。日本列島では、マグマは沈み込んだ海洋プレートが地下100 km において脱水し、その水によってマントルが部分熔融して生じる。地下100 km より浅いところで脱水した場合は、マグマは発生せず、脱水により生成した水は、数10 km の地下から熱水としてそのまま上昇してくるのではないかと考えられる。」と述べている。このように現在では、沈み込む海洋プレートの60 km より浅部での脱水した蒸気がマントル中を上昇し、地殻深部まで達する割れ目を通じて上昇し、途中地下水に薄められながら高温の温泉水として湧出することがあると考えている。

有馬温泉の含鉄・Na 塩化物高温泉位置のフィリピン海洋底プレートの沈み込みの深さはほぼ50 km 深度である。そこで、そのような地質構造が存在するかを検証する探査が必要である。

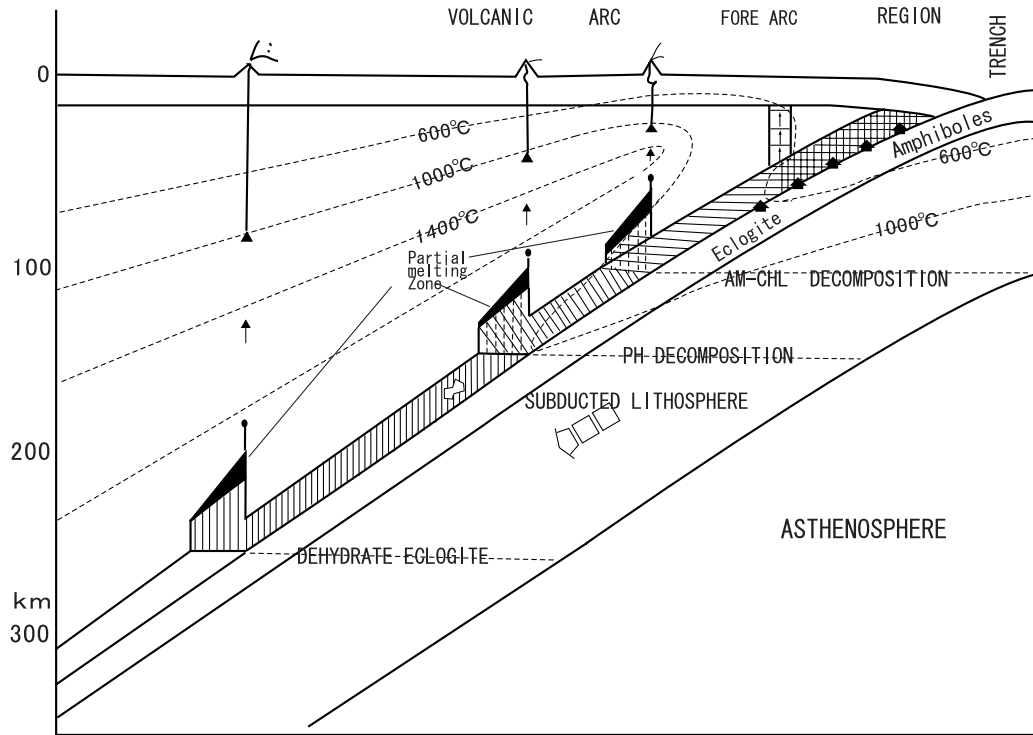


Fig. 3 The hydrated peridotite is formed by addition of slab-derived H₂O (solid arrows) beneath the forearc region and should be dragged on the slab by the subduction of oceanic lithosphere (Nishimura, 1998).

AM-CHL : Amphibole and chlorite.

PH : Phillogopite.

図 3 火山フロントならびに海洋底スラブの沈み込み帯の蛇紋岩化した橄欖岩からの H₂O (↑表示)

AM-CHL : 角閃石-緑泥石

PH : 金雲母

5.2 土壤中の放射能分布

有馬温泉の湧出構造を解明するために、全登録されている泉源の調査、地質概査のほかに、物理探査をすることにした。しかし、温泉地の部分は建物が建てこんでいて、可能な物理探査として、CSA-MT 探査と放射能探査を採用する提案した。2003 年には、放射能探査を全面的測定可能なところの殆どで実施した。2006 年に、他の目的もあり、高温泉の南部・西部に一部放射能探査と CSA-MT 探査を実施した。放射能探査の詳細は既に報告している (Nishimura and Katsura, 1990 ; 西村・桂, 1999) のでここでは省略するが、①流体が胚胎したり、移動したりする断層・亀裂の存在の探査、②地下深部からの流体の上昇部分の探査をすることが可能である。

測定器は、Aloka 製 NaI (Tl) シンチレーションサーベイメータと高放射能の測点では Aloka 製 γ 線ポータブルスペクトロメータを用いた。

5.2.1 シンチレーションサーベイメータによる測定

シンチレーションサーベイメータは 1×1.5 インチの NaI (Tl) の検出器を備えたもので、全 γ 線を測定している。測線に沿い 15 m おきに地表をすこし削り、検出部を下部に向けて 5 秒ごとの 12 回の読み取りから、最大・最小の 2 計測値を除き、10 回の読みを平均した値を測定値とした。(これ

は、放射能値の分布はポアソン分布をするので、正規分布に近づけるためである。)「金泉」の高温の泉源を中心とした地域の結果を図4に示す。

- ① 高放射能域を除いた測定値は通常の花崗岩の高放射能の値を示している。
- ② 含鉄・高塩類高温泉の近辺は他の地域の放射能の約20倍以上の値で、いままでに経験したどこの放射能探査の値よりも高い。「妬」泉源を最高値として「御所」「太閤橋」「銀水荘」「有明」「天神」が囲むような高放射能域が見られる。しかし、「極楽」泉源は掘削深度が金泉の中では深く(223m)、掃除前で自噴が停止していたためか、高放射能の値を示さなかった。500mの掘削で90.5℃、94.6℃が得られた簡保泉源と花の坊泉源の近くでも、2003年の測定では高放射能値を示していない。
- ③ 平面の放射能分布、測線ごとの放射能分布パターンから南北系、東西系の断層の存在を推定した。

5.2.2 γ 線ポータブルスペクトロメータの測定

γ 線スペクトルの測定は主要泉源の箇所を選んで11測点で測定した。ゲインを3.6 MeVとし、240チャンネルで1,000秒(ライブタイム)間測定した。チャンネルと γ 線エネルギーとは良い相関を示している。測定結果を図5に示す。その結果次のことが言える。

- ① 非常に放射能が強く、非常に良いスペクトラムが取れている。
- ② 高温の鉄を多く含む高塩類泉の泉源近くでは、ウラニウム系列の ^{214}Bi 、トリウム系列の ^{208}Tl の光ピークが明瞭である。通常の場合の観測結果に比べて $^{208}\text{Tl}/^{214}\text{Bi}$ 比が高い。 ^{214}Bi は ^{222}Rn (半減期3.8229日)と放射平衡状態にあり、 ^{208}Tl は ^{220}Rn (半減期51.5秒)と放射平衡の状態にあるものと見られるので、Rnを含む気体が非常に深いところから急速に上昇していることが推定できる。しかし、何らかの事情で、湧出が停止すると、ラドンの上昇も止まるのか、泉源が少し深くとラドンの上昇がなくなるのかのいずれかであろう。
- ③ 花崗岩中の高放射能測点の端宝寺公園のスペクトラムは高鉄含有高塩類泉の近くの測点に比べて、 ^{40}K の光ピークが高く、通常の花崗岩地帯のスペクトラムを示している。これに対し、高鉄含有の高塩類泉の近傍ではラドンの含有量が非常に高いことを示している。

5.3 高温域の東南境界での比抵抗構造

高温域の境界の構造を知るために、比抵抗構造の探査としてCSA-MTを実施した。測点分布を図2に示す。岩石が同じであれば、温度が高いと低比抵抗構造を示す。また、断層や破砕帯で、地下水を多く含む場合も低比抵抗構造を示す。しかし、断層や破砕帯は近畿地方のこの地域では、非常に鉛直に近い平面の構造を示すが、金泉のような高温の流体が移動する場合は、低比抵抗域を示す(Mogi *et al.*, 1991)。

CSA-MT探査の測点を図2および6に示す。送信アンテナの位置は、ニアフィールドの影響を避けるため、測定点から充分離れたところにする必要がある。今回は、測点群からSE10°方向に約3.5kmの位置にNE10°約1kmの間隔に電極を設置した。送信局からは、5120, 2560, 1280, 640, 320, 160, 80, 40, 20, 10, 5, 2.5Hzの周波数の電流を地盤に流し、生じた電磁波を、電場測定用の2組の電極を送信アンテナの方向に平行に15~20mの間隔で設置し、これと直交する方向に磁場センサーのコイルを設置して測定した。測定値は十分にスタッキングして求める。12種の周波数により得られた見かけ比抵抗値から、地盤を水平多層構造モデルとして各深度の比抵抗値を求める。結果をもとに、比抵抗断面図を得る(図5)。測定値の誤差、位相差から、今回の各データの精度は充分にあがっていることを確かめた。

測定結果からみると、①測点M1とM4は高温域の境界に近い。高温域の境界は、上部に広がる

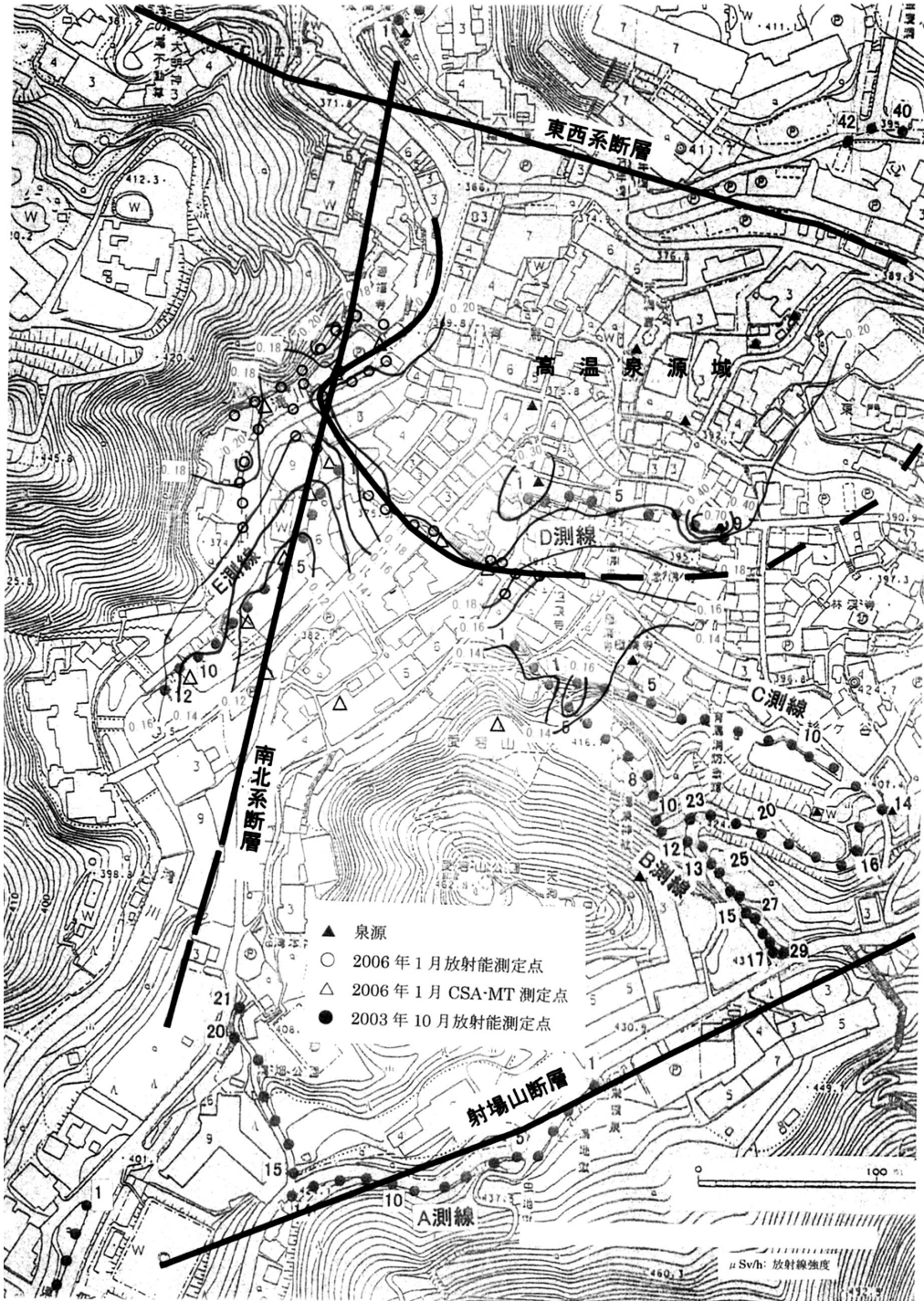


Fig. 4 Distribution of hot-springs and faults and the hot area in the center of Arima Spa., estimated by the results of γ -ray radioactivity and CSA-MT surveys.

図 4 有馬高温泉源の分布と γ 線放射能強度 (μ Sv/h) と CSA-MT 探査結果から推定される断層と高温域の分布

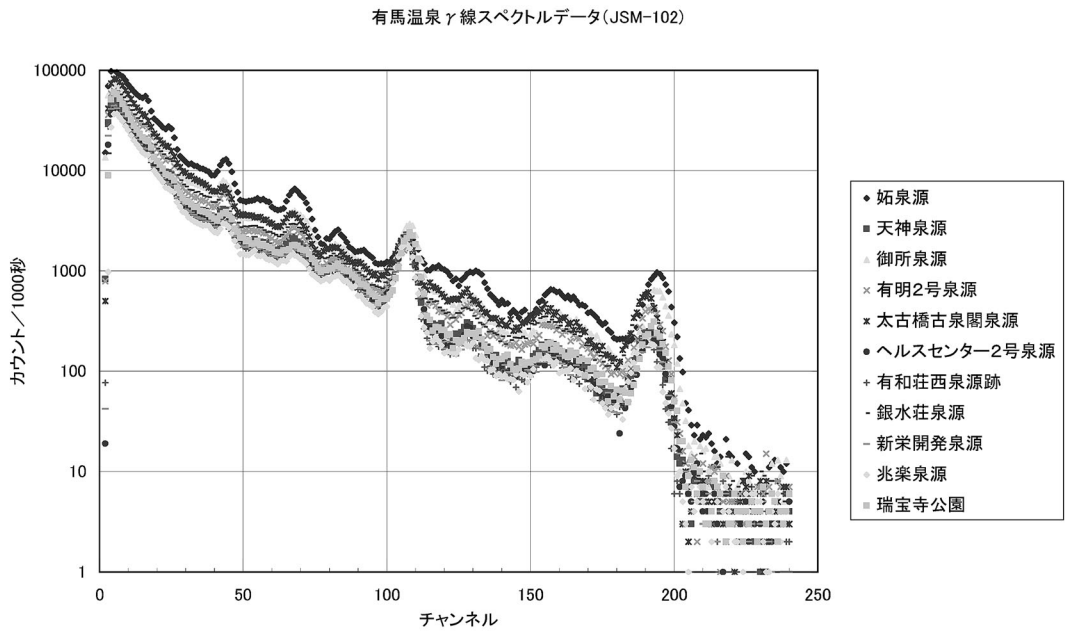
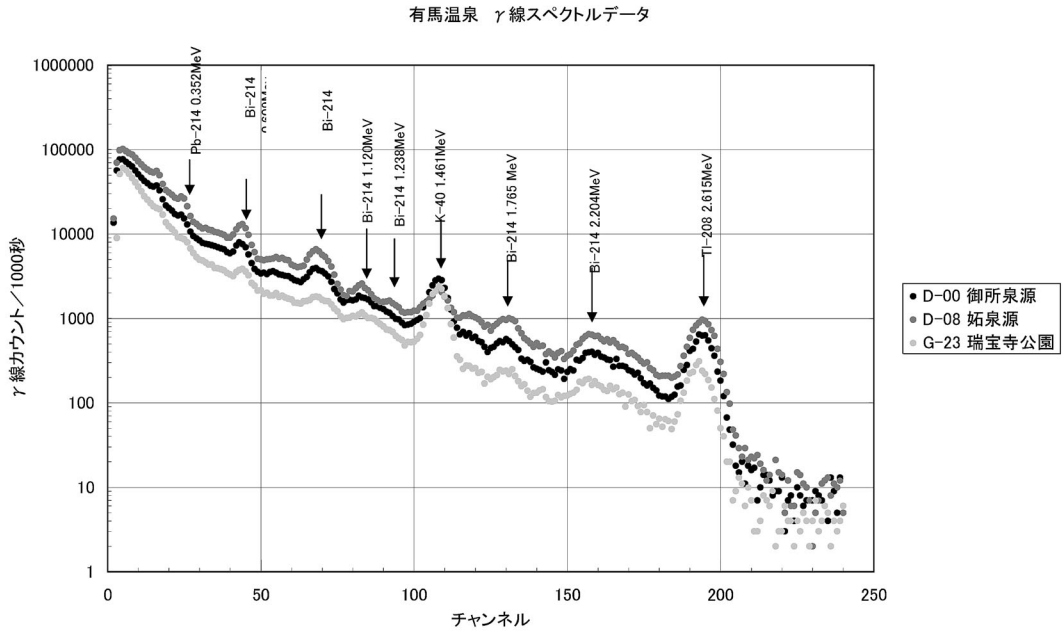


Fig. 5 γ -ray spectrum at the main hot-springs.

図 5 主な高温泉源での γ -線スペクトラム

傾向を持つが、②測点 M6 から M8, M11 の間にほぼ鉛直で僅かに西傾斜する平面の断層の存在がわかった。

これらの物理探査の結果から高温泉源域の西、南側の状況が示される (図 4)。

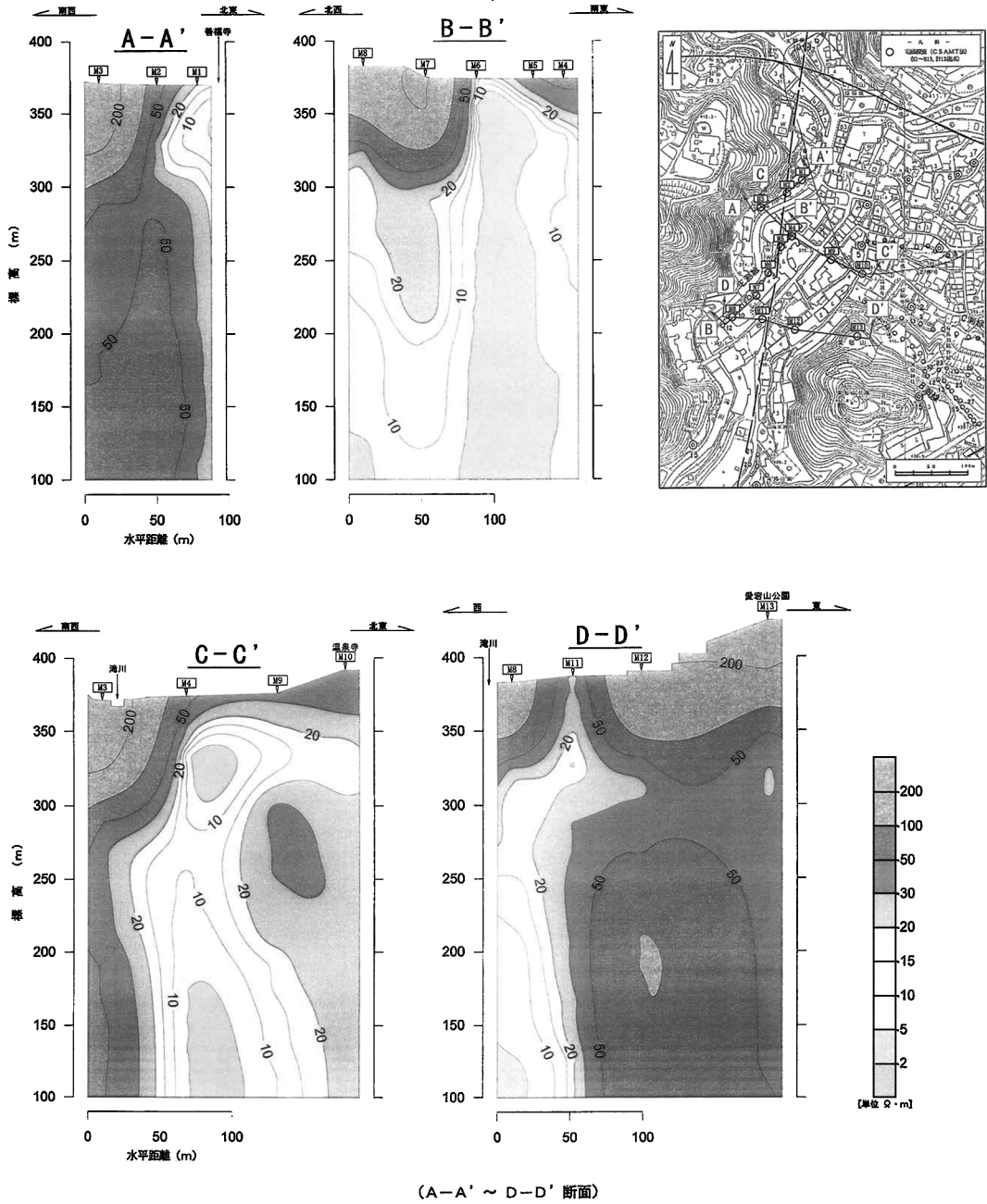


Fig. 6 Cross-sectional resistivity view, around the south-west region of central region of Arima Spa.

図 6 CSA-MT 探査結果による比抵抗断面

5.4 まとめ

有馬温泉の泉源の中で、最も特徴のあるいわゆる「金泉」(含鉄高塩類高温泉)の特徴は、①³He/⁴He比が高く、マントルとかがわりがある (Sano and Wakita, 1982). ②塩濃度が極めて高く、海

水の2倍以上で、マグマ起源と同位体組成が酷似している(風早, 2004). ③有馬温泉の下部では50~60 km 深度に沈み込んでいるフィリピン海プレートの上部であり、沈み込みのプレートの深度40~60 km では蛇紋岩化したプレートが脱水し、上方に移動する部分に当たっている. この上昇する水はマントル中の³Heを含有することになる(西村, 2000 a).

有馬層群の厚い流紋岩類(溶結凝灰岩を主体とする)の下部(600~1,500 m 深度)には古海水が広く閉じ込められ、山崎断層沿い、とくに三木断層の北側では塩類泉が各所で認められている.

蓬萊峡から、射場山断層(有馬高槻構造線の西部)沿いには、高二酸化炭素、高放射能を示す湧水が多い. このことは、この断層は構造線と云われるほど大きく、深い破碎部を有するものと推定できる.

2003年の放射能探査では、①高温の金泉の湧出場所は極めて高い高放射能を示し、非常に深いところから、速い速度で蒸気が上昇していることを示している. ②放射能分布から、南北系と東西系の断層と、地質構造などから、射場山断層の存在が推定できる.

2005年の放射能探査およびCSA-MT探査から、高温の蒸気の上昇域は南北系と東西系の断層の交点近くに断層系の東南部の愛宕山北部である. しかし、もう少し深い部分では射場山断層の北部まで広がっている可能性がある.

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、探査は他の目的で神戸市からの依頼でなされたものを一部使用した. 探査には(株)ダイヤコンサルタントに種々の御世話になった. ここに御礼申し上げる.

参考文献

- 藤田和夫, 笠間太郎(1983): 神戸地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, P. 112.
- 藤田和夫, 鶴巻道二, 西村 進, 平野昌繁(1987): 東六甲周辺と有馬温泉, 日本地質学会第94回学術大会見学旅行案内書, 177-197, 日本地質学会.
- 風早康平(2004): 深部流体の起源, <http://unit.aist.go.jp/deepgeo/introduction/topics/topical/topical.html>
- 神戸経済局(1983): 有馬温泉泉源調査報告書, 神戸市経済局貿易観光課.
- 神戸市生活文化観光局(1953-2002): 有馬温泉温泉分析台帳.
- 上月順治(1962): 有馬温泉の研究, 日本書院.
- Masuda, H., Sakai, H., Chiba, H., Matsuhisa, Y. and Nakamura, T. (1986): Stable isotopic and mineralogical studies of hydrothermal alteration at Arima Spa, Southwest Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 19-28.
- Masuda, H., Sakai, H., Chiba, H. and Tsurumaki, M. (1985): Geochemical characteristics of Na-Ca-Cl-HCO₃ type waters in Arima and its vicinity in the western Kinki district, Japan, *Geochem. Jour.* **19**, 149-162.
- Masuda, H. and Tsurumaki, M. (1982): Geochemical study of mineral springs in southeastern part of Hyogo Prefecture, Southwest Japan, *J. Geosci., Osaka City Univ.*, **25**, 1-17.
- 松葉谷治, 酒井 均, 鶴巻道二(1974): 有馬地域の温泉・鉱泉の水素と酸素の同位体比について, 岡山大学温泉研究所報告, **43**, 15-28.
- Mogi, T., Katsura, I. and Nishimura, S. (1991): Magnetotelluric survey of an active fault system in the northern part of Kinki District, Southwest Japan, *J. Struct. Geol.*, **13**, 235-

240.

- Nakamura, H. and Maeda, K. (1961) : Thermal waters and hydrothermal activities in Arima hotspring area, Hyogo Prefecture, 地質調査所月報, **12**, 489-497.
- Nishimura, S. (1998) : Quaternary arc volcanism of Sunda and Southwest Japan Arcs, Proc. Symp. Japan-Indonesia IDNDR Project, Sept. 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, 25-37.
- 西村 進 (2000 a) : 紀伊半島における前弧化成作用と温泉, 温泉科学, **49**, 207-216.
- 西村 進 (2000 b) : 四国北部の地質構造と温泉, 温泉科学, **50**, 113-119.
- 西村 進 (2001) : 紀伊半島の温泉とその熱源, 温泉科学, **51**, 98-107.
- 西村 進, 小泉尚嗣 (1986) : 有馬・塩田温泉地球化学観測室と三木断層の露頭見学記, 地殻化学実験施設彙集, **4**, 101-108.
- Nishimura, S. and Katsura, I. (1990) : Radon in soil gas : Applications in exploration and earthquake prediction, in Geochemistry of gaseous elements and compounds, edits Durrance *et al.*, 497-533.
- 西村 進, 桂 郁雄 (1999) : 放射能探査の信頼性について, 自然と環境, **1**, 1-6.
- Okamoto, N. (1962) : Research on hotspring group in Arima, Geophys., Magazine, **31**, 275-312.
- Sano, Y. and Wakita, K. (1983) : Geographic distributions of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan : Implications for arc tectonics and incipient magmatism, J. Geophys. Res., **90**, 8729-8741.
- Tatsumi, Y. (1989) : Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas, J. Geophys. Res., **94**, 4697-4707.
- 寺西 清, 磯村公郎, 山本研三 (1988) : 有馬温泉と近隣泉源での塩水-カルサイト相互作用, 温泉科学, **38**, 141-153.
- 辻 治雄, 山崎良行, 栗野則男, 茶山健二, 寺西 清, 磯村公郎, 市橋啓子 (1997) : 有馬温泉に湧出する有馬型温泉水の水質に関する研究, 温泉科学, **47**, 1-13.
- 鶴巻道二 (1964) : 神戸市有馬温泉に関する地質および泉源調査報告書, 第 2 部, 有馬温泉の泉源について, 神戸市経済局, 47 p.