

地球深部の窓—有馬温泉

益 田 晴 恵¹⁾

(平成 23 年 10 月 24 日受付, 平成 23 年 11 月 25 日受理)

Aima Hot Spring—A Window of the Earth's Deep

Harue MASUDA¹⁾

Abstract

History of the study on Arima Hot Spring is reviewed in this report. The analytical result of hot spring waters held in 1875 was the first scientific report of this area. Arima Hot Spring is located in the center of Kinki area, where no active volcano is present. Boiling water containing high salinity (2 times high as that of seawater), dissolved iron and CO₂ is found in this area. Such high temperature saline water shows oxygen shift (¹⁸O enrichment compared to ¹⁶O) and has of characteristics hydrothermal solution to form epithermal ore deposit. Temperature of spring water rose in association with earthquakes occurred along Arima-Takatsuki Tectonic Line and its associated faults and in Nankai Trough, suggesting that active faults are ascending paths of deep Arima hot spring water. High ³He/⁴He ratio, similar to those of mantle derived gas, has been known in the Arima hot spring water. Recent progress of tomography documents the split of subducting Philippine Sea Plate along the remnant spreading ridge of Shikoku Basin beneath the Kinki district. Heat and volatile components such as helium would ascend along the split of the Philippine Sea Plate. A series of studies is revealing the importance of tectonics as a issuing mechanism of hydrothermal water of Arima Hot Spring.

Key words : Arima type brine, Oxygen isotope shift, Helium isotopes, Plate tectonics

要 旨

古くから塩湯として知られる有馬温泉の研究史を概説した。温泉の研究は、1875年の水質分析に始まった。活火山のない近畿中央部にありながら、海水の2倍以上の食塩と大量の溶存鉄や二酸化炭素を含み沸騰する温泉水は、¹⁸Oを多く含む天水線から離れた酸素同位体比を持

¹⁾大阪市立大学大学院理学研究科生物地球系専攻 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138. ¹⁾Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

ち、浅熱水性鉱床を生成する鉱液のような性質を持つことが知られていた。また、温泉ガス中のヘリウムは高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を持つことから、マントル由来の流体の寄与が推定されてきた。一方、有馬高槻構造線や南海トラフで発生する地震活動と水温の変化が関係していることから、断層が湧出経路として重要な役割を担っていることは明治時代から指摘されていた。最近の地震波トモグラフィーの技術により、近畿地方の下に沈み込むフィリピン海プレートが、四国海盆の拡大軸であった紀南海山列の延長線に沿って断裂していることが明らかになった。この断裂に沿って、マントル由来の流体が上昇しているのが、有馬温泉の熱源であり、ヘリウムなどの揮発性物質の由来であることが推定されている。一連の研究史は、有馬温泉が近畿の特異的なテクトニクス場と関連して湧出することを明らかにしつつある。

キーワード：有馬型塩水、酸素同位体比シフト、ヘリウム同位体、プレートテクトニクス

1. はじめに

有馬温泉は古来より知られる温泉である。神戸市内にあって大阪や京都から近いことから、「関西の奥座敷」と呼ばれることもある。古事記や日本書紀にも名前が挙がっており、豊臣秀吉が何度も訪れるなど、歴史上の人物の来訪も数多く記録されている。

ところで、有馬温泉は自然科学者の目を引きつける魅力も持っている。周辺には活火山がないに

も関わらず (Fig. 1)、沸騰する温泉水が湧出する。また、海水よりも高い食塩を含むことでも知られている。その上、周辺の地震活動と関係して、水温や水質が変化することがある。このような特異的な性質は古くから注目の的であった。そのため、我が国の温泉研究の中でも、長い研究史を有している。本稿では、有馬温泉の研究史を概観し、有馬温泉の成分の由来や湧出機構がどこまで理解されてきたかを紹介したい。

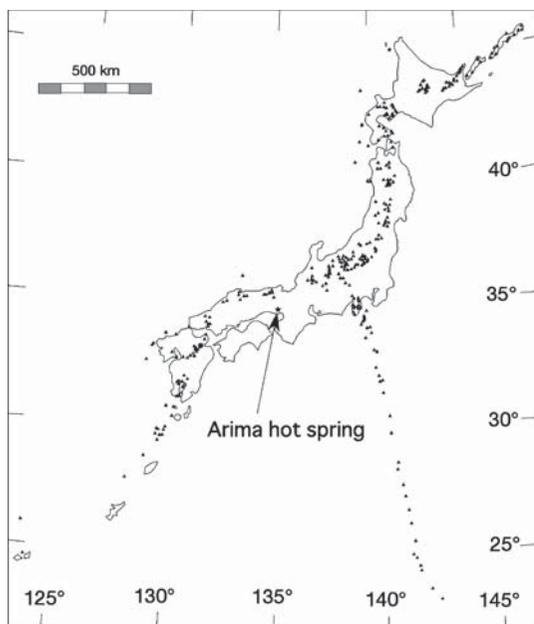


Fig. 1 Distribution of Quaternary volcanoes in Japan and location of Arima hot spring. The map was drawn according to the web-site below. http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/vol_fr.htm.

図 1 日本の第四紀火山の分布と有馬温泉の位置。日本の火山（産業技術総合研究所の研究情報公開データベース、ウェブサイトは下）を参考に作成した。http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/vol_fr.htm.

2. 水質の特異性

有馬温泉は長く塩湯として知られていた。この自然湧出泉は太閤泉と呼ばれており、現在の神戸市営の共同浴場（金の湯）付近にあったものである。水質分析が初めてなされたのは明治8年（1875）のことである。兵庫県庁が採取した試料を内務省大阪試験場に送って分析された。翌年、試験場に勤務していた教師であるベウ・ドワルスが、現地に採水に赴き、行われた水質分析の結果を Table 1 に示す（田中，1895）。この報告が、有馬温泉における最古の科学的報告と言えよう。

古くから、有馬温泉には金泉（高温の含鉄炭酸強食塩泉）と銀泉（透明の湯あるいは低

Table 1 Analytical result of Arima Hot Spring waters in 1896.

表 1 明治 9 年 (1896 年) の有馬温泉分析値.

塩湯 (極楽)	
塩化ナトリウム	14.717 (g/L)
臭素化ナトリウム	0.105
塩化カリウム	1.281
塩化アンモニウム	0.013
塩化リチウム	痕跡
塩化マグネシウム	0.241
塩化カルシウム	2.896
硫酸カルシウム	0.014
塩化アルミニウム	0.029
酸化マンガン・亜酸化マンガン	0.055
酸化鉄	0.246
ケイ酸	0.058
固形分合計	19.655
水温 華氏 101 度 (約 38°C)	
炭酸泉	
炭酸水素ナトリウム	0.1210 (g/L)
塩化ナトリウム	0.0038
塩化カリウム	0.0076
硫酸カルシウム	0.0077
炭酸水素カルシウム	0.0266
炭酸水素マグネシウム	0.0043
ミョウバン	少量
炭酸水素亜酸化鉄	0.0125
炭酸水素亜酸化マンガン	0.0021
ケイ酸と懸濁しているケイ酸塩	0.0065
固形分合計	0.1921

温の鉱泉で、水質は炭酸水素ナトリウム泉 (重曹泉)、炭酸泉、放射能泉などさまざまである) が知られていた。これらの名称は、現在では、有馬温泉旅館協同組合の登録商標となっている。ドワルスは金泉 (当時の極楽湯) と炭酸泉の分析値を与えているが、この分析により、2つの泉質の違いが数量化されたと言える。この時の観察では、冬場には酸化鉄の沈殿が多くなり赤茶けて濁るが、夏場には遊離炭酸を含んで清澄な湯であるとの記載がある。したがって、冬期には高温の温泉水 (金泉) の割合が高い湧出があるが、降水量の多い夏期には、比較的浅部にある炭酸泉 (銀泉) の泉質を持つ地下水が多く混入していたと推定される。このころの水温は比較的一定していたようで、20年後の明治 28 年ごろに、ドワルスの分析値とほぼ同じである華氏 101 度 (約 38°C) の温度の記録がある (田中, 1895)。この当時の源泉の数は正確には記載がないが、有馬温泉を特徴づける温度の高い食塩泉は 1 カ所だけであった。

昭和初期においては、温泉と鉱泉の湧出地点は 21 カ所あり、南部は炭酸泉が、北部は塩類泉 (食塩泉) が分布していると大別された (初田, 1935)。1947 年から行われた神戸市による掘削調査では、井戸から得られた温泉水の水質分析がなされている (上月, 1962)。1955 年に採取、分析された温

泉水の中で、総固形成分濃度が最高値を示した極楽源泉の分析値を Table 2 に示す。文献に残る最高の塩化物イオン濃度は、1954 年に分析された天満宮の湯（天神源泉）の 43.79 g/L である（池田, 1955）。これらの塩化物イオン濃度は海水（19 g/L）の 2 倍以上ある。1964 年の調査（鶴巻, 1964）時には、塩化物イオン濃度の最高値はこれとほぼ等しいが、多くの井戸で塩化物イオン濃度の低下が認められている。

金泉の特徴の 1 つは溶存鉄濃度が高いことであるが、その他のさまざまな化学成分濃度が高いことも報告されてきた。例えば、池田（1955）は、天満宮の湯がリチウム・ストロンチウム・バリウム・バナジウムなど火成岩に多く含まれる陽イオン濃度で、当時の我が国の温泉水の分析値として

Table 2 Analytical result of Gokuraku Hot Spring source water (sampled in July 1955).

表 2 極楽源泉の水質分析値（試料採取：1955 年 7 月）。

NH_4^+	0.023 (g/L)
Li^+	0.054
Na^+	18.05
K^+	4.52
Rb^+	0.018
Cs^+	0.005
Ca^{2+}	5.22
Mg^{2+}	0.053
Mn^{2+}	0.052
Fe^{2+}	0.22
Al^{3+}	0.08
Cl^-	41.4
SO_4^{2-}	0
HCO_3^-	0.025
塩化ナトリウム (NaCl)	46.49 (g/L)
塩化カリウム (KCl)	10.12
塩化アンモニウム (NH_4Cl)	0.07
塩化リチウム (LiCl)	0.40
塩化ルビジウム (RbCl)	0.007
塩化セシウム (CsCl)	0.005
塩化マグネシウム (MgCl_2)	0.27
塩化カルシウム (CaCl_2)	10.96
塩化マンガン (MnCl_2)	0.11
塩化鉄 (FeCl_2)	0.45
炭酸水素マンガン ($\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$)	0.33
炭酸アルミニウム ($\text{Al}(\text{CO}_3)_3$)*	0.35
ケイ酸 (H_2SiO_3)	0.22
ホウ酸 (HBO_2)	0.17
二酸化炭素 (CO_2)	0.26
固形分合計	70.21
水温	94°C

*：化学式に間違いがあると思われるが、原典通りに示した。

最高濃度であることを報告した。一方で、ヨウ化物イオン・臭化物イオンの塩化物イオンに対する濃度の割合が海水に近いことも指摘した。

研究初期には、有馬温泉中の食塩は、岩塩に由来すると考える研究者もいた (松平, 1954)。この当時は、有馬温泉の温泉水の水質は高塩濃度・高温の水と炭酸を含む低温の水との 2 水系の混合で説明されることが多かった (三宅ら, 1954)。後者の考え方は、ドワルスの推定とほぼ同じである。また、温度が高いこともあり、当時から岩漿水 (マグマ水) がその起源であるとした説があった (例えば、益富, 1954; 上月, 1962)。この説については、後述する。一方で、鶴巻 (1964) は、有馬温泉に分布する含鉄炭酸強食塩泉は、塩濃度と二酸化炭素濃度の高い低温の地下水であり、何らかの局所的熱源によって加熱されて、高温になっていると考えた。また、彼らは、隣接する宝塚 (笠間・鶴巻, 1978) や大阪府南部の山間にある石仏 (鶴巻ら, 1974) に、有馬に類似した含鉄炭酸強食塩泉の化学的性質を記載している。

1970 年代には、安定同位体比の分析により、日本各地の温泉の起源に関する研究が進められた。中でも、Matsubaya *et al.* (1973) は、有馬・宝塚温泉や大阪府南部の石仏に湧出する低温の含鉄炭酸食塩泉などの水の酸素・水素の同位体比を分析して、その起源に迫った。食塩泉の塩濃度が高いほど、酸素同位体比が高くなり、天水線から離れる傾向が顕著である (Fig. 2; 松葉谷ら, 1974)。彼らは、有馬温泉に特徴的に見られるこのような高濃度塩水を「有馬型塩水」と名付け、世界的にも注目を浴びた (Sakai and Matsubaya, 1976)。水の酸素・水素安定同位体比の関係が天水線から離れて、 ^{18}O を濃縮する方向へ移動する現象は“Oxygen isotope shift” (または単に oxygen shift) と呼ばれている。岩石と水が高温で、あるいは堆積盆のような環境で長時間反応した場合に起こる。有馬温泉の高濃度塩水の同位体比は、高温で反応した結果であると考えられる。有馬温泉の湧出母岩は流紋岩質の火山岩であるが、これらの岩石と水—岩石比の低い (つまり水が比較的少ない) 環境で、高温で反応したとすれば、有馬温泉の水の酸素・水素安定同位体比は説明が可能である。高温泉の水質分析結果に基づいて、アルカリ地質温度計を適用した場合、最高では 280°C で反応した履歴が読み取れる (Masuda *et al.*, 1986)。したがって、有馬温泉に限定すれば、高濃度塩水は、高温の履歴を経て形成されたと言える。辻ら (1998) や寺西ら (2003) は、有馬の高濃度塩水中の希土類元素濃度が高いこと、また、ユーロピウム線の正の異常が見られることから、高濃度塩水は斜長石を含む岩石と高温で反応し、希土類は炭酸塩と錯体を作って溶存していると説明している。

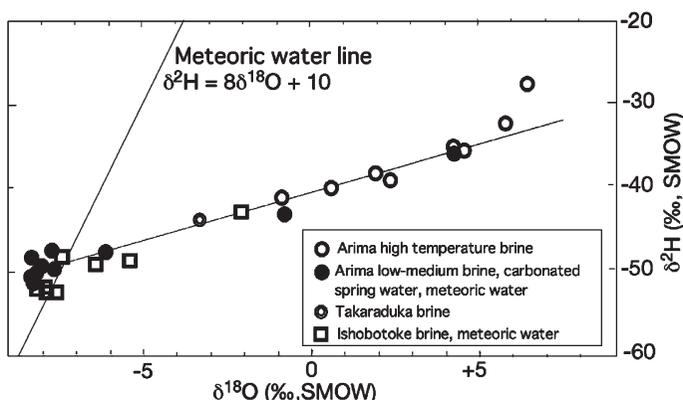


Fig. 2 Relationship between oxygen and hydrogen isotopes of Arima hot spring (referred from Matsubaya *et al.*, 1974).

図 2 有馬温泉の酸素と水素の安定同位体比 (松葉谷ら, 1974 から転載)。

前述のように、有馬温泉の水は、高濃度塩水と炭酸水の2成分混合で説明されてきた。しかし、3種の地下水の混合によって泉質の多様性が生じていることが、さらに詳しい調査から明らかになった (Fig. 3)。高温の高濃度塩水、炭酸水素ナトリウム (重曹) 型の中温泉、浅層地下水である。浅層地下水は、しばしば炭酸泉や放射能泉の泉質を持つ (Masuda *et al.*, 1985)。これら3種の温泉水は、トリチウム年代からも明瞭な区別ができる (Tanaka *et al.*, 1984)。炭酸水素ナトリウム型の温泉水は、おおむね8~12年の滞留時間を持つ。炭酸泉などは数年までの滞留時間である。このことは、中温の炭酸水素ナトリウム型の温泉水は、単純に高濃度塩水と炭酸泉の混合でできたものではなく、比較的滞留時間の長い循環する地下水で、有馬温泉周辺の地熱で岩石とゆっくり反応して水質形成されたものであることを示している。一方、炭酸泉は、浅層を流れる地下水に高濃度塩水から放出された二酸化炭素をガスの形で取り込んだものと言え (Masuda *et al.*, 1985)。高濃度塩水はトリチウムを含まないため、当時は年代測定ができなかった。最近、有馬温泉の高温泉と地殻由来のヘリウムを蓄積を考慮したヘリウム同位体比から、大阪湾岸の神戸市内の1500 mより深い地下水の滞留時間を推定する試みがなされた (Morikawa *et al.*, 2005)。それによると、神戸市内の深層地下水の滞留時間は25,000~230,000年である。有馬温泉の高濃度塩水は、この範囲の中でもっとも古い年代を持つ。

有馬温泉の掘削調査により得られたボーリングコアには、黄鉄鉱や閃亜鉛鉱などの硫化鉱物が見られる。これを最初に記載したのは Nakamura and Maéda (1961) である。彼らは有馬温泉の高温高濃度塩水が浅熱水性鉱床に似た鉱化作用をもたらすマグマ水的な性質を持っていることを指摘した。このような鉱化作用は、有明源泉のボーリングコアに特徴的に見られる (Fig. 4)。黄鉄鉱・

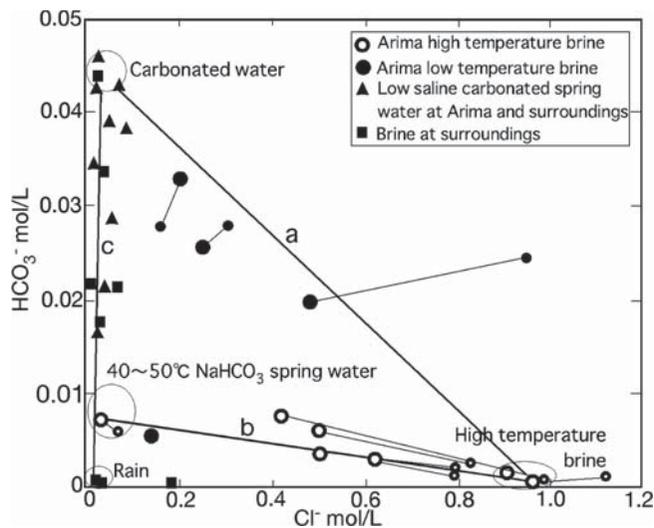


Fig. 3 Relationship between Cl^- concentration and alkalinity (Modified the figure in Masuda *et al.*, 1985).

Groundwater in Arima hot spring area comprises three end members; high temperature brine (gold spring), medium temperature $\text{Na}-\text{HCO}_3$ type spring water, and low temperature carbonated water. The latter two groundwaters and radioactive spring are called silver spring.

図 3 有馬温泉の温泉水の塩化物イオン濃度とアルカリ度の関係 (Masuda *et al.*, 1985 に加筆)。

有馬温泉の水は従来言われていた3つではなく、3つの端成分から成ることを示す。すなわち、高温高濃度泉 (金泉)、周辺地下水が地熱で反応し、炭酸水素ナトリウム型の水質を得たもの、浅層地下水に二酸化炭素が捕獲された炭酸泉。後の3つは放射能泉ともに銀泉と呼ばれる。

閃亜鉛鉱・方鉛鉱の他に、稜鉄鉱（炭酸鉄）が、脈状に晶出している。鉱化作用は有馬温泉の熱分布と同様に狭い地域にしか見られない (Masuda *et al.*, 1986)。

松葉谷ら (1974) は、全炭酸（遊離二酸化炭素 + 溶存炭酸化学種）の炭素同位体比も報告している (Fig. 5)。これによると、天神や有明源泉など、高温で溶存二酸化炭素濃度の低い高濃度塩水の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は $-4 \sim -6\%$ である。温度が低い高濃度塩水では、同位体比は同じかそれより大きい傾向がある。一方、塩分をあまり含まない炭酸泉では、同位体比は軽くなる。松葉谷ら (1974) は、このような同位体比の変化は、二酸化炭素を含む低温の高濃度塩水が加熱されて同位体分別を起こした結果であると説明している。すなわち、加熱によって揮発した軽い同位体を多く

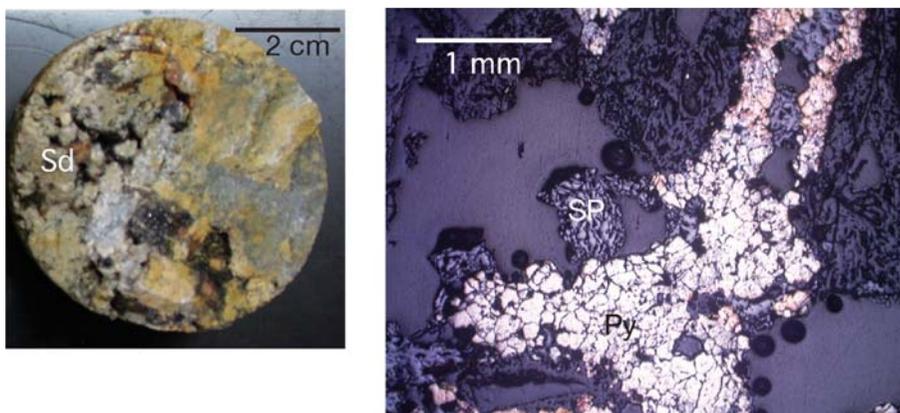


Fig. 4 Ore mineralization occurred in a boring core taken from Ariake spring. Left, Vertical cut of the core ; Right, Optically refractive microscope image of the ore minerals. Sd, siderite (iron carbonate) ; Sp, sphalerite ; Pr, pyrite.

図 4 有明源泉のボーリングコアに見られる鉱化作用。

左はコアの断面、右はそれを薄片にしたものの反射顕微鏡イメージ。
Sd : 菱鉄鉱 (炭酸鉄) ; Sp : 閃亜鉛鉱 ; Py : 黄鉄鉱

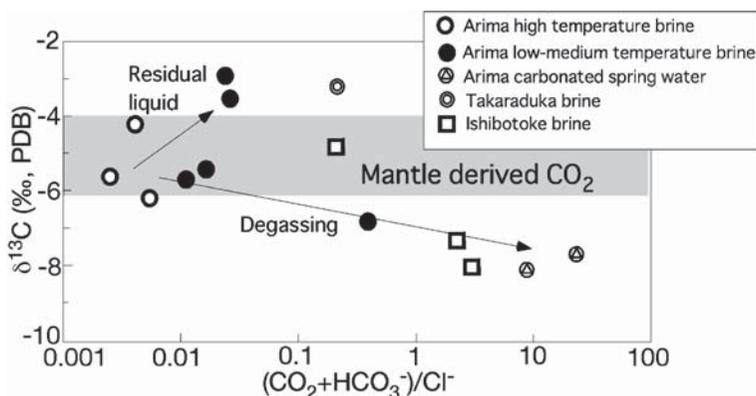


Fig. 5 Relationship between inorganic carbon and Cl^- concentration ratio and carbon isotope ratio of Arima hot spring water.

図 5 有馬温泉の温泉水中二酸化炭素の炭素同位体比 (松葉谷ら, 1974 に加筆)。

高温泉が冷却して低温の高濃度泉になるときは、軽い炭素を多く失って同位体比が高くなる。炭酸泉は、軽い炭素を多く含む二酸化炭素を浅層の地下水が捕獲することで形成される。

含む二酸化炭素が浅層の地下水に溶け込んだものが炭酸泉だという。また、加熱された高温泉には重い炭素が濃縮すると考える。しかし、この説明は、鶴巻 (1964) や松葉谷ら (1974) で提案された、始源的塩水は高塩濃度・高二酸化炭素濃度であり、それが加熱されて有馬温泉の高温泉となったという説明を担保しない。加熱された高温泉には二酸化炭素が含まれなくてもいいはずであるが、二酸化炭素は高温泉に伴うガス中でもっとも高濃度な成分である (Urabe *et al.*, 1985)。もしも、高温で二酸化炭素を多く含む高濃度塩水が始源的であった場合、冷却する過程で重い同位体を濃縮するであろう。有馬や宝塚の低温の高濃度塩水に同位体比が高温泉のものに比べてわずかに大きいものが見られるのは、その影響と言えるかもしれない。

一方で、もっとも高温・高塩濃度である有明・天神源泉の二酸化炭素の同位体比がマントル起源の二酸化炭素同位体比 (-6‰, 例えば, Hoefs, 2009) に近いことは興味深いことである。泥質岩の炭素同位体比は、岩石中に残存する海成炭酸塩と有機物との割合に応じて、-20~+20‰の範囲で変動する (Hoefs, 2009) ため、二酸化炭素の起源が堆積岩にある可能性も捨てきれない。一方で、Urabe *et al.* (1985) は我が国の温泉水では、堆積岩を母岩とする場合には、メタンが優勢な炭素含有ガス成分であり、マグマとの関連が深い火成岩を母岩とする場合には、二酸化炭素が優勢な炭素含有ガス成分となることを示した。この説明が正しければ、有馬温泉の二酸化炭素は、マグマあるいはその起源となるマントルに由来するものであると言える。

3. 有馬温泉と地質構造

有馬では、古来より薄めたり湧かしたりする必要なく入浴できる 40℃ 程度の食塩泉が自然湧出していた。しかし、有馬温泉の水温は、周辺の地震活動と関係して変化した記録がある。もっとも古い記録は、慶長元年 (文禄 5 年で地震後元号改正, 1596 年 9 月 5 日) の慶長伏見地震 (あるいは京都地震) である。震源は有馬高槻構造線とその派生断層 (Fig. 6) で、京都から淡路島にかけて 80 km が同時に活動した (寒川, 2008)。内陸地震としては最大級の規模である M8 であったと推定されており、京都・大阪・奈良・神戸などの各地で大規模な被害が発生した。この地震により豊臣秀吉の隠居用に落成したばかりの伏見城が倒壊し、石垣の崩壊と合わせて 500 人以上が亡くなった。また、現在の神戸市内にある兵庫では、火災が発生して、市街地が壊滅的な被害を受けている。このときの地震による断層のずれや液状化などは、関西の各地に残されている (寒川, 2008)。この地震直後に、有馬では温泉水の湧出温度が急上昇し、熱湯になったために入浴できなくなったことが伝えられている (例えば, 田中, 1895)。その後も温度は高温を維持し、1615 年の水温は 90℃ 程度であったと推定されている (大森, 1899)。第 2 回目は、有馬鳴動 (または六甲山鳴動) として知られている群発地震である (比企, 1899)。この鳴動は、1899 年 7 月 5 日に始まり、約 1 年間続いた。巨石が天井から降ってくるような音のする大きな揺れが何度もあったという。11 月中旬頃には、普段 37.7℃ で 300 石 (約 54 m³) 程度の湧出量が、1 年後には 10℃ 上昇し 600 石まで増えたという (例えば, 比企, 1902)。震源は、始めは有馬温泉鼓滝の上流あたりで、その後北へ (つまり温泉街に向かって) 移動したとされている。益富 (1954) は有馬温泉の詳細な地質調査に基づいて、温泉脈は南北性が強い複数の断層であると推定した。彼はまた、この断層群は有馬鳴動の震源とも一致することを指摘した。最近の放射能や電磁波による探査では、温泉街の西端となる有馬川に沿うほぼ南北方向の断層が推定されている (西村ら, 2006; 西村ら, 2010)。群発地震とこの断層との関係は不明であるが、鼓滝はこの断層上に位置することから、群発地震はこの断層に沿って起った可能性はある。

近隣の地震による有馬温泉の温度上昇は、前述の 2 例以外にも、しばしば観察されている。

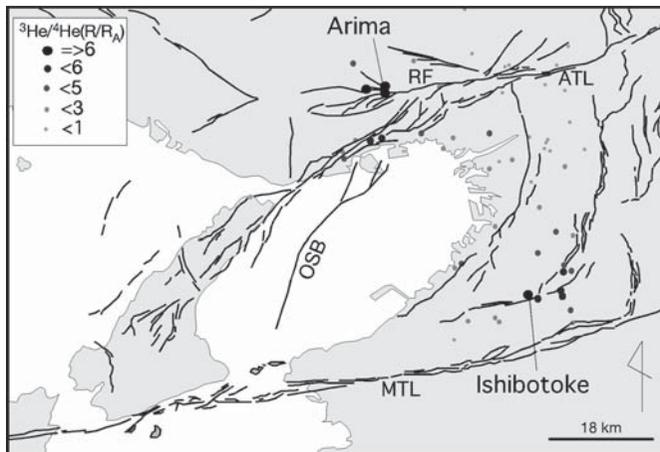


Fig. 6 Distribution of active fault surroundings of Osaka Bay. Drawn based on the database of following web-site.
<http://iggis1.muse.aist.go.jp/ja/gis/viewer.htm>
 ATL, Arima-Takatsuki Tectonic Line ; RF, Rokko Fault (part of ATL) ; MTL, Median Tectonic Line.
 Helium isotope ratios reported by Morikawa *et al.* (2008) are plotted on the map. Read the text about detailed information on the isotope ratios.

図 6 大阪湾周辺の活断層の分布.

産業技術総合研究所公開データベース (以下のホームページ) をもとに作成
<http://iggis1.muse.aist.go.jp/ja/gis/viewer.htm>
 ATL: 有馬高槻構造線 ; RF: 六甲断層 (ATL の一部) ; MTL: 中央構造線.
 Morikawa *et al.* (2008) による温泉水中のヘリウムガスの安定同位体比の分析値も示す。
 これについての説明は 5 章を参照のこと。

1854 年 11 月 5 日の南海道地震では 10℃ 程度, 1916 年 11 月 26 日の淡路島北部を震源とする地震では, 1℃ 程度の温度上昇があったことが記録されている (大森, 1899). 大森はこのような地震による水温上昇を以下のように説明している (Fig. 7). 温泉の熱水溜りから地上への通路の途中で地表からの冷水が混入する. 時間経過とともに, 通路は熱水の沈殿物で狭くなり, 流量が少なくなるが, 冷水の供給量は変わらないために, 水温と湧出量が低下する. 地震が発生すると, 経路に詰まった沈殿物が破碎, 除去 (浚渫) されるために, 通路が広がり, 水温と流量が増加する. これらの観察事実や研究は, 周囲の断層が有馬温泉の湧出経路として重要な役割を果たしていることを指摘しており, 断層運動と熱水活動には関連性があることが示唆される.

有馬高槻構造線は本州の大規模な地質帯である領家帯と丹波帯の境界の一部である. 大阪府域では, 北摂山地と大阪平野の境界であり, 兵庫県南部では, 六甲山塊と三田盆地の境界近くを走る. 六甲山地における構造線の主断層は

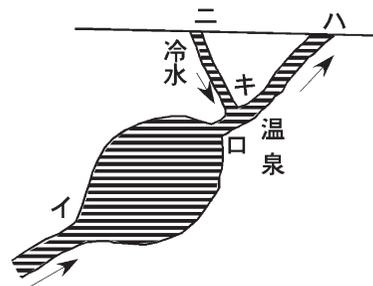


Fig. 7 Issuing mechanism of Arima high temperature brine proposed at very early periods of studying history of Arima hot spring (referred by Omori, 1899). Relationship between the out-flow of hot water and earthquakes is described in the text.

図 7 最初期に提案された有馬温泉の湧出機構 (大森, 1899 から転載). 有馬温泉湧出量と地震との関係については, 本文を参照のこと。

六甲断層と呼ばれている。この断層は、有馬と宝塚を結ぶ裏六甲ドライブウェイに沿って走っている。数百 m の幅を持つ大規模な断層破碎帯では、白水峡や蓬莱峡などの迫力のある風化地形を作っている。有馬温泉はほぼ東西方向に延びる六甲断層の延長線上に位置するが、温泉街周辺から西南方向に延びる湯槽谷断層との交点でもある。これらの複数の大規模断層は、有馬の高温の温泉水の上昇経路として重要な役割を果たしているのであろう。

4. 近畿地方の温泉

通常、高温の温泉は火山地帯と関係して開発されている。近畿地方には日本海側を除いて第四紀火山が分布しないが、火山活動のない地域にも高温泉が出現する。近畿地方では、40℃を超える温泉が湧出する地域は3カ所にまとめられる (Fig. 8, 益田・鶴巻, 2009 による)。そのうち、湯村や城崎などの日本海沿岸の温泉は、第四紀の火山フロントに近い場所にある。この地域の火山活動はすでに休止しており、過去1万年以内には噴火は起こっていない (Fig. 1 と6章を参照のこと)。しかし、第四紀の火山活動の余熱が地下水を加熱していると言われている (例えば、西村, 2011)。紀伊半島南部には70℃を超える高温泉が自然湧出する温泉地が古くから知られていた。これらの温泉地の周辺に見られる火成岩体は熊野酸性岩や大峰酸性岩など第三紀中新世に活動したもので、新しい活動は知られていない。この地域の熱源は長い間謎とされていたが、地震波トモグラフィー

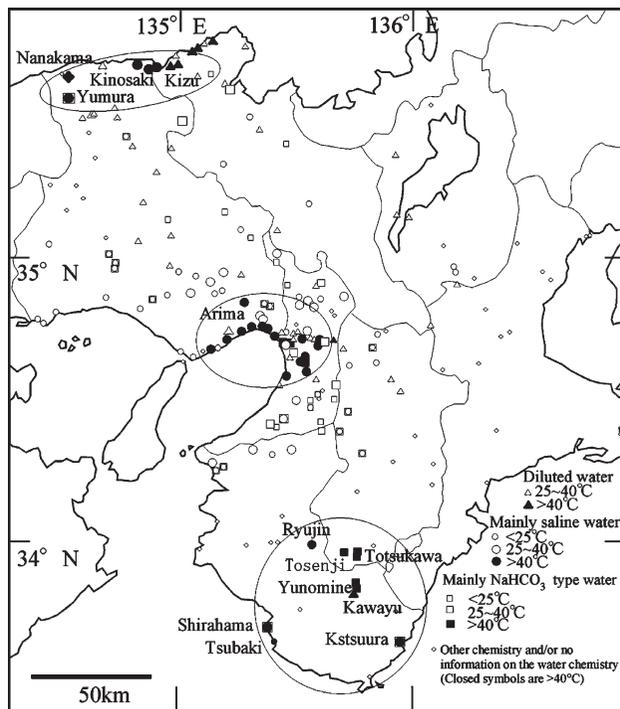


Fig. 8 Distribution of hot springs and the temperature in kinki district (Modified the figure in Masuda and Tsurumaki, 2009).

The place attached name is the area where the hot water >60℃ is flowing out.

図 8 近畿地方の温泉の分布と水温 (益田・鶴巻 (2009) に加筆).
地名を記入してある場所は水温が 60℃ 以上ある温泉地域.

を用いた 2000 年以降の研究により、南海トラフから沈み込むスラブから脱水した流体ではないかと考えられるにいたった (Seno *et al.*, 2001). このことは、有馬温泉の熱源と関係しても重要なので、6 章で詳しく述べる。

近畿地方に残る後 1 カ所の高温泉の分布する地域は、大阪湾周辺部である。この地域は、他の 2 カ所と異なり、昔から自然湧出が知られている高温泉は有馬温泉だけである。他の高温泉は、ほぼ全てが 700m より深く高深度掘削された井戸から得られているものである。

一方、兵庫県南部と大阪府域を中心とした近畿地方中央部には、低温の含鉄炭酸食塩泉も多く分布しており、有馬温泉の起源を考える上で示唆的である。これらの低温の含鉄二酸化炭素高塩濃度泉は、温度は低いが、水質が有馬温泉とよく似ている。Fig. 9 に兵庫県南部から大阪府北部（北摂山地）の鉱泉の分布を示す (Masuda *et al.*, 1985). これらの鉱泉は、遊離二酸化炭素をあまり含まない食塩泉、遊離二酸化炭素のみ多く含む炭酸泉、アルカリ度の高い炭酸水素ナトリウム泉、全炭酸と高濃度の塩分を含む含鉄炭酸食塩泉である。宝塚や東條など、塩化物イオン濃度が 6,000~8,000mg/L 程度の高濃度のものもある。このような、塩濃度が高いものには、水の酸素・水素安定同位体比に有馬温泉と同様の Oxygen shift が見られる。鉱泉の分布は、東西方向の活断層とその延長線の直上かその周辺に見られることが多い。大阪府北部から兵庫県東南部にかけての鉱泉の分布は北西—南東方向の線上に並んで分布する。この場所には、活断層は認定されていないが、猪名川本流に沿った伏在する線構造が推定される。

大阪府には、しばしば塩濃度の高い地下水が出現する。それは上述の北摂山地だけでなく、南部の和泉山地周辺にも点在している (Fig. 10). この中でもっともよく知られているのは河内長野市石仏周辺に湧出するものである (鶴巻ら, 1974). 元々自然湧出していたが、二酸化炭素の採掘のために、花コウ岩中に掘削された井戸が多数あった。この地下水は低温であるが、塩化物イオン濃度は 10,000 mg/L を超えることもあり、酸素・水素安定同位体比は、有馬温泉のものに一致する (松葉谷ら, 1974). また、大阪平野に高深度掘削した井戸で、平野最下部の大阪層群や基盤岩となる

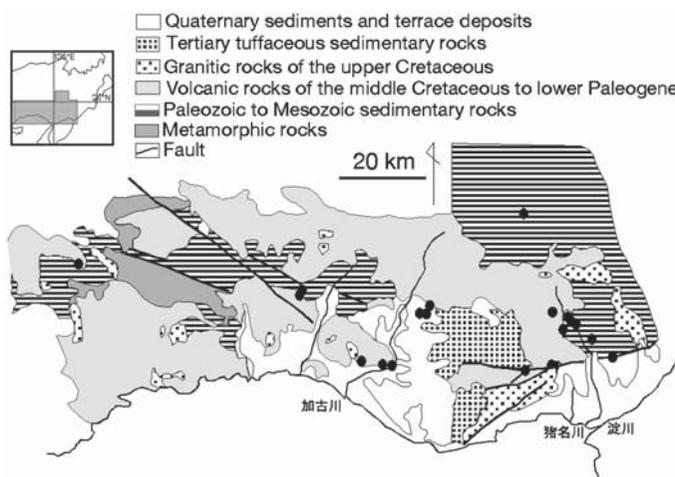


Fig. 9 Geology and distribution of carbonated and/or saline springs in the southern part of Hyogo prefecture and the northern part of Osaka Prefecture (modified the figure in Masuda *et al.*, 1985).

図 9 兵庫県南部と大阪府北部周辺の地質と炭酸泉・食塩泉の分布 (Masuda *et al.*, 1985 を加筆修正).

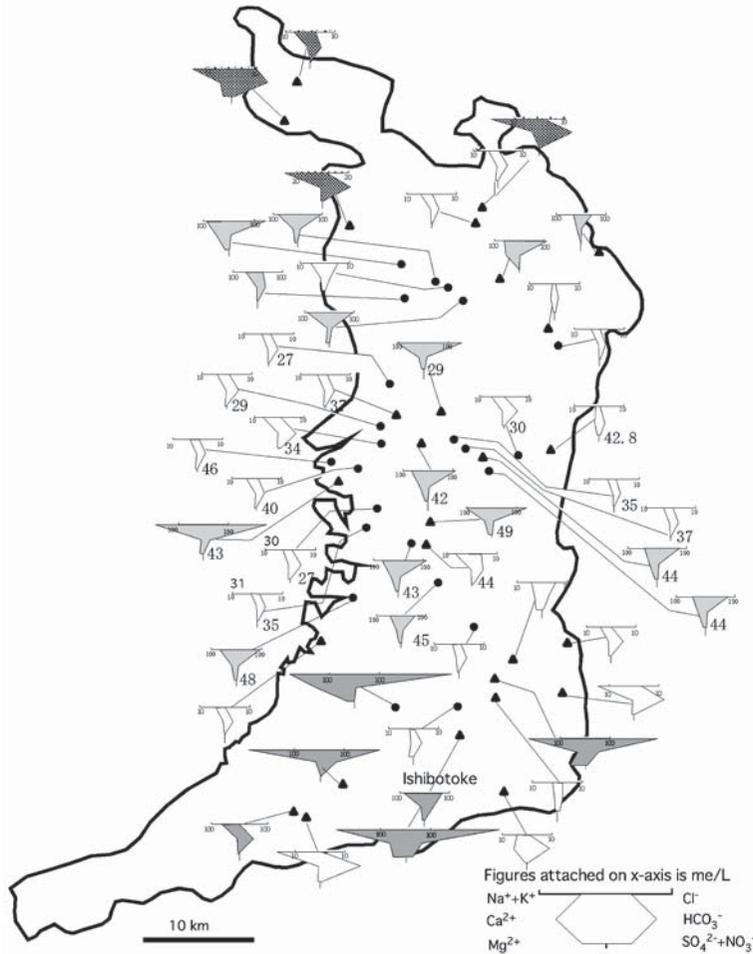


Fig. 10 Hot springs in Osaka Prefecture and the major component composition (Modified the figure in Osaka Prefecture, 2008).

Figure attached on the down-right is the temperature at sampling (°C); ● and ▲ indicate the uptaking aquifers, i.e., the former is in the Osaka Group sedimentary formation and the latter is in the both of basement rocks and the lowermost part of Osaka Group sedimentary formation. Hexa-diagrams painted over grey are comparably highly saline waters, among which those issuing out at Ishibotoke and some in the southern mountainous area occasionally contain CO₂ gas. Hatched hexa-diagrams in the northern part are low saline waters containing CO₂ gas.

図 10 大阪府に分布する温泉とその主成分組成 (大阪府 (2008) に加筆).

右下の数字は採取時の水温 (°C). ●は大阪層群堆積物中の帯水層から, ▲は基盤岩中あるいは大阪層群最下部と基盤岩の両方から採水している.

灰色で塗りつぶされたヘキサダイアグラムで示されたものは比較的高濃度の食塩泉である. このうち, 南部の山間にある石仏とその周辺付近のものにはしばしば遊離二酸化炭素を含む. また, 北部の網かけしたヘキサダイアグラムで示されたものは, 遊離二酸化炭素を含む低濃度の食塩泉である.

花コウ岩に到達したものでは, 塩化物泉がしばしば見られる (大阪府, 2008). もともと大阪平野地下の地温勾配は, 通常の堆積盆と比べると高いことが知られていた (Nakagawa and Komatsu, 1979) が, 基盤岩に到達した井戸 (1,000~1,500m) では, 水温が 50°C 程度になることがある (大阪

府, 2008). このような地下水の存在は, 大阪湾周辺の基盤岩の割れ目や基盤岩直上の帯水層には, 有馬温泉とよく似た水質を持つ地下水が存在する場所が多くあることを示している.

さらに広い地域に目を向けると, 有馬型塩水あるいはそれに類似した二酸化炭素を含む食塩泉は, 和歌山県や奈良県, 愛媛県などの中央構造線に沿った地域, 奈良盆地, 近江盆地などの西日本各地で知られている. この中には, すでに枯渇して出なくなったものも多くあり, 化石水的な地下水か, 温泉として継続的に利用するには湧出量がきわめて少ないのかのどちらかであろう. 興味深いことに, このような食塩泉の分布は中央構造線を南限としており, 有馬高槻構造線—山崎断層とその延長線にあたる付近の少し北を北限としている. 二酸化炭素を含む食塩泉の分布は, 大規模な構造線と関係していることを示唆している.

5. 有馬温泉の熱源

前述の大森 (1899) は, 地下に高温の熱湯貯蔵箇所があると説明した. これは高温泉が湧出するメカニズムをもっとも初期に説明した報告であるが, ここでは熱源については触れられていない. 比企 (1899, 1902) は, 明治時代に発生した有馬鳴動に関して地質調査を行っている. この時の調査で, 有馬の温泉が, 六甲花コウ岩と石英斑岩 (有馬層群) の境界にできた弱線を湧出経路としていることを指摘したが, このとき, 高温泉は「きわめて深いところから湧出している」とした.

有馬温泉で掘削による温泉開発が始まったのは第二次世界大戦中の 1942 年であるが, 戦況悪化

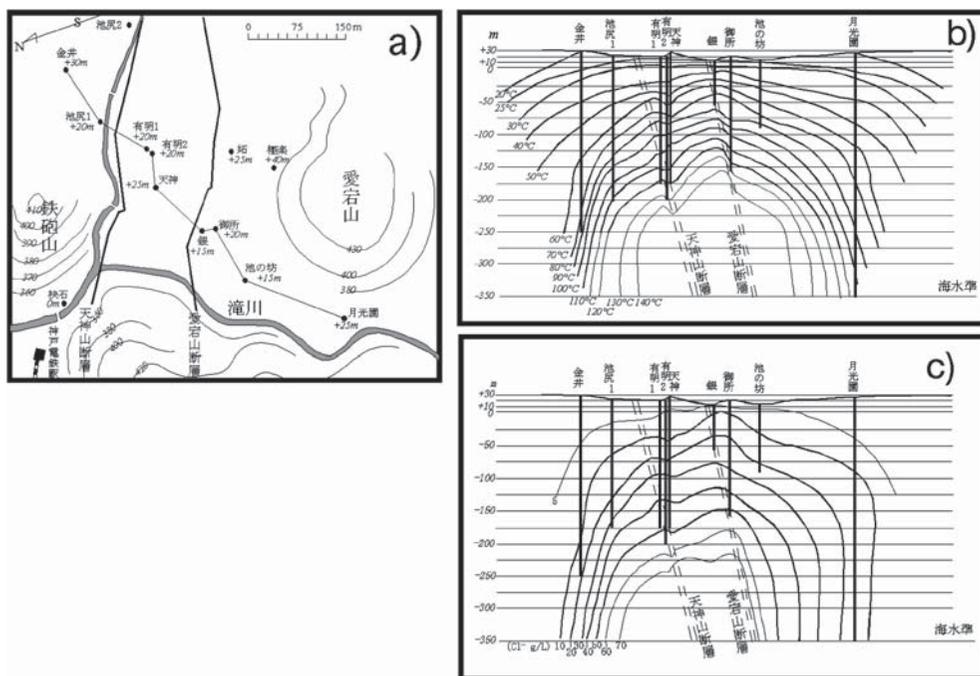


Fig. 11 Vertical profiles of temperature and salinity at Arima hot spring area (Modified the figure in Kozuki, 1962).

a) Measurement line ; b) Isotherm line ; c) Isosalinity line.

図 11 有馬温泉の温度と塩分濃度の断面 (上月, 1962 を一部修正).

a) 側線. b) 等温線図. c) 等塩化物濃度線図.

のために有明1号井の掘削を開始した直後に中止された。1945年から神戸市が主導して、開発調査と掘削が再開された。このときの調査結果は、上治(1958)と上月(1962)に詳しく記録されている。地表の地温・放射能・電磁波などの物理探査や地質調査に基づいて、高温泉開発のための掘削を行っている。Fig. 11に、その調査により得られた温度と温泉水中塩化物濃度の断面を示す。掘削は高温泉が得られる深度で終了しているため、比較的浅い深度での調査結果しか得られていない。この調査では、もっとも高温の有明1号井では、-200mの深度で122℃の泉温を得ている。また、外挿値からは、御所泉源の-180mで140℃の温度を推定している。熱分布は半径500m程度の細長い釣鐘型をしており、高温泉の分布が局所的であることを示している。上治と上月は、この熱源が、六甲山塊を作る花コウ岩に対して、愛宕山直下に貫入した中新世の石英粗面岩岩脈だと考えていた。等塩化物濃度線が、熱分布に似ていることから、高温の塩水が始源的温泉水であると推定した。彼らは、この熱水が岩漿水(マグマ水)であると説明した。

1980年代以降に希ガスの分析が盛んになるにつれ、有馬温泉にマントル起源の揮発性成分の流入が推定されるようになった。ヘリウムには質量数3と4の安定同位体がある。このうち、 ^4He は地殻中の放射性物質(主としてウラン・トリウム)のアルファ壊変によって付加されるが、 ^3He は地球形成時に内部に閉じ込められたものが大部分であり、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比はガスの起源を論じる根拠と

なる(例えば、風早ら, 2007)。有馬温泉のヘリウム同位体比は、日本の温泉ガスの中でもっとも高いグループに属することが知られている(例えば、Nagao *et al.*, 1981; Sano and Wakita, 1985)。Wakita *et al.* (1987)は、ヘリウム同位体比の高い地域が有馬温泉から大阪湾周辺を経て和歌山市にまで延びる楕円状に分布することを指摘し、「近畿スポット」と呼んだ。彼らは、近畿スポットが微小地震の“巣”と一致していることを指摘し、地表に到達しないマグマだまりが地下にあって、マントル起源のヘリウムが上昇してくると説明した。

その後の研究では、近畿地方のヘリウム同位体比が高い温泉ガスの分布は東南—西北のトレンドを持ち(Fig. 12)、低周波地震帯と密接に関係していることが指摘された(Matsumoto *et al.*, 2003; Umeda *et al.*, 2006; 2007aなど)。Seno *et al.* (2001)はこの低速度層はスラブマントルの蛇紋岩化とその後の脱水によって生じたものであろうと推定している。このように低周波地震は流体が移動する際に生じていると考えられることから、Matsumoto *et al.* (2003)など前述の研究では、スラブから脱水した水の移動経路は、マントル起源のガスと熱を移動させる経路としても使われていると説明している。有馬温泉のような最も

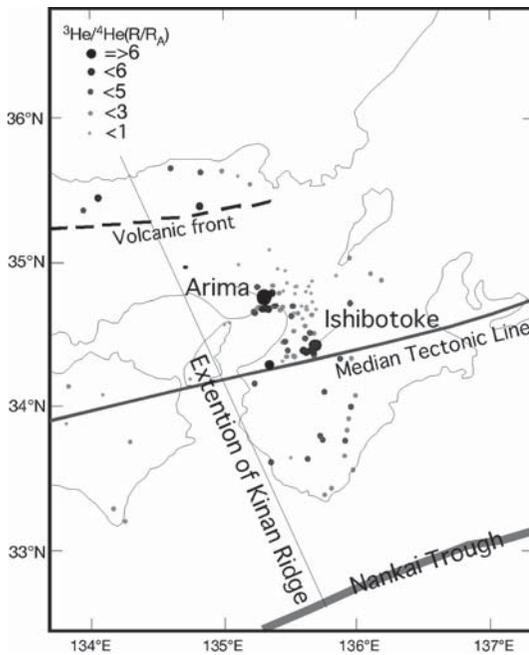


Fig. 12 Helium isotope ratios of hot springs in Kinki district.

Data compiled from Sano and Wakita (1985), Wakita *et al.* (1987), Matsumoto *et al.* (2003), Umeda *et al.* (2006), Morikawa *et al.* (2008).

図 12 近畿地方の温泉水中ヘリウム同位体比。

ヘリウム同位体比は Sano and Wakita (1985), Wakita *et al.* (1987), Matsumoto *et al.* (2003), Umeda *et al.* (2006), Morikawa *et al.* (2008) のデータをコンパイルした。

ヘリウム濃度の高いものでは、ヘリウムの 90% 以上がマントル起源であると見積もられている。一方で、水の水素・酸素安定同位体比を始めとした他の成分は地殻内の成分の影響が大きいため、スラブ流体の経路がガスの流動経路となつてはいるが、流体そのものが温泉水中へ混入する割合は一般的には低いと考えている。さらに、Morikawa *et al.* (2008) は大阪湾周辺の地下水のヘリウム同位体比の分析結果から、空気より高いヘリウム同位体比をもつ温泉水は、大阪平野中央部では上町台地より西側の大阪湾岸に集中していることを指摘している (Fig. 6 参照)。ヘリウム同位体比の高い地下水は高濃度塩水であることが多く、この点からも、有馬温泉との類似性が示唆される。

6. 近畿の温泉とプレートテクトニクス

最近の地震波トモグラフィーの技術によって、地下の構造がより正確に理解されるようになってきた。火山のない紀伊半島に湧出する高温泉についても、地下で起こっている現象との関係から考察されている。南海トラフから沈み込むスラブの周辺で起こる地震の震源分布は紀伊半島の下と他の地域では異なっている。紀伊半島の下では、スラブの沈み込みに伴って発生する地震の震源が 80 km の深度にまで達しており、関東・東海や九州地域などに比べて深い (中村ら, 1997)。また、紀伊半島直下には、水平方向に 50~100 km の広がりを持つ地震波低速度層が発見されている (Zhao *et al.*, 2000)。前述のように、Seno *et al.* (2001) はこの低速度層をスラブマントルからの脱水で説明している。この脱水は、火山フロントが発生している九州では 160 km の深度で起きているが、紀伊半島直下に沈み込むフィリピン海プレートの年代は ~20 Ma と若い (Okino *et al.*, 1994) ため、50~80 km で起こっているのだろうと、彼らは推定している。彼らはまた、脱水された水の付加によるマントルの部分溶融が起きているかもしれないが、マグマが発生している証拠はないとしている。また、神戸と大阪湾周辺の地下 25 km までに同様な地震波低速度帯が存在する (Zhao and Negishi, 1998)。Zhao *et al.* (2000) はこの低速度帯が、兵庫県南部地震の震源と近い場所にあり、やはりフィリピン海プレートの沈み込むスラブからの脱水によって生じたもので、地震の発生と何らかの関係があるのではないかと考えている。大阪湾直下の低速度帯の存在は、大阪湾周辺の地下水中の高いヘリウム同位体だけでなく、高塩濃度で大量の二酸化炭素を含む地下水の存在と密接に関係しているのかもしれない。

フィリピン海プレートのスラブが沈み込む深度は近畿地方の下で急激に深くなっていることは以前から知られていたが、スラブの形状についてはよく理解されていなかった。しかし、最近、トモグラフィーにより、沈み込む方向の変化によるスラブの分離の様子が明らかになった (Fig. 13, Ide *et al.*, 2010)。南海トラフから紀伊半島と四国の沖では 30~15 Ma に拡大していた背弧海盆が沈み込んでいる (Okino *et al.*, 1994, 1999)。拡大軸海嶺は紀南海山列と呼ばれるが、これは 15 Ma には北北西方向に沈み込んでいたが (Seno and Maruyama, 1984)、2~4 Ma に N55°W に変化して、現在に至っているのだろうという。沈み込む方向が変化したときに、もともと海洋底の拡大軸であった紀南海山列が弱線として、沈み込むスラブが分裂した。その境目が、現在の紀南海山列の延長線上にあたる紀伊半島先端部と鳥取をつなぐ線となる (Fig. 12)。ヘリウム同位体比が高い地下水が出現する地域は、この線を西端として、東側に広がっている。下位のマントルが分裂したスラブの間に現れているとは言えず、分裂線はマントルに到達する亀裂となっており、より深く沈み込んだ東側のスラブの上面に、亀裂の下のマントルに由来するヘリウムが広がったのであろうと Ide *et al.* (2010) は説明している。

大阪湾は 3.3~3.5 Ma に沈降を始め、2.5~3.0 Ma に淡路島に近い大阪湾西側の大阪湾断層帯の形成が始まっている。大阪湾断層帯東側の基盤岩深度は 3,000 m 以上におよび、基盤岩上面の上下変

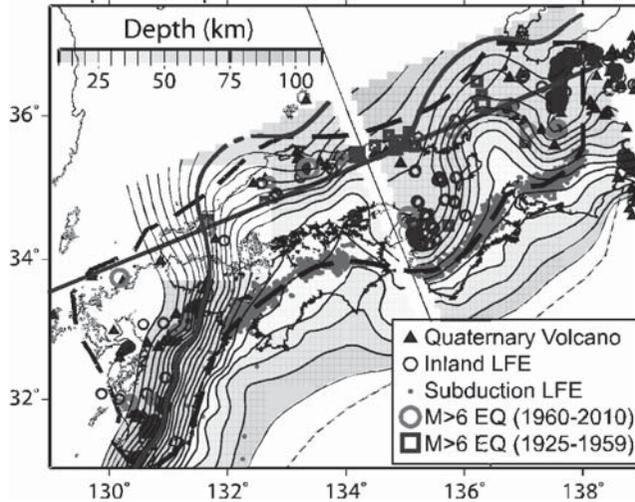


Fig. 13 Split of subducting Philippine Sea plate beneath the southwest Japan (referred from Ide *et al.*, 2010).

図 13 フィリピン海プレートの沈み込みと断裂 (Ide *et al.*, 2010 から転載).

位量も 1,500 m に達する (加藤ら, 2008). 沈降帯である大阪湾と周辺の隆起帯である淡路島や六甲山地の形成に関しては, 西日本全体の広域応力場だけでなく, 中央構造線の活動変化や, それに伴う近畿三角帯内部の構造変化に伴う局地的な応力場の変化など, 複雑な要素が加わっており, 単純ではない (加藤ら, 2008). しかし, 大阪湾の沈降開始時期が, フィリピン海プレートの沈み込み方向が変化した時期と同時期であること, それに伴って形成された断裂線の位置と大阪湾断層帯の位置が (方向は異なるが) おおむね一致していることは偶然ではないであろう.

さらに, Umeda *et al.* (2007b) では, フィッシュントラック法による熱水変質鉱物の年代測定から, 紀伊半島南部の温泉の活動が 2.5 Ma~5 Ma に始まったと推定している. この年代は, フィリピン海プレートの断裂や大阪湾周辺部の沈降開始時期と重なっている. 有馬温泉では, 熱水活動の開始時期に関する研究は行われていないが, 近畿地方における非火山性の高温泉とプレートテクトニクスの関連性に基づいて検討すべき課題であろう.

7. ま と め

有馬温泉の一風変わった特徴は, さまざまに研究者の興味を引きつけてきた. 現在では, その特徴は, フィリピン海プレートの動きと関係していることが明らかになりつつある. ヘリウムガスだけでなく, 二酸化炭素もマントルに起源を持っている可能性は高い. このようなマントル起源物質は, 地殻においては, 大規模な断層を通じて, 地表近くにもたらされたのであろう. 大阪湾断層帯や有馬高槻構造線などの活断層は, マントル起源の流体と熱の上昇経路としての役割を果たしていると考えられる.

一方で, 有馬温泉の高濃度の塩化物イオンについてはまだ説明がされていない. 臭化物イオンと塩化物イオンの比が海水に近い性質を持つこと, また, 高塩濃度のものは大阪湾周辺に集中していることから, 地殻深部に流入した海水が高塩分の起源であることも窺わせる. しかし, 琵琶湖の南の近江平野や奈良盆地など大阪湾から離れた内陸部にも同様な水質を持つ鉱泉が出現すること, 塩

素はマグマにも多量に含まれる物質であることから、少なくとも一部はマントル起源である可能性も捨てきれない。

近畿地方の温泉は、地震の原因となる広域のテクトニクスと深く関連している。地震は大きな災害をもたらすが、温泉のような「地の恵み」をももたらす。有馬温泉は、特に地下深部の物質を濃縮して湧出していることから、地球科学者にとっては、地球内部を覗く「窓」でもある。このような貴重な自然の財産を、乱開発などで失うことがないようにしたいものである。

謝 辞

本稿は、2011年9月に有馬温泉で開催された日本温泉科学会の年会において行った普及講演の内容を中心としてまとめたものである。普及講演に誘ってくださり、本稿執筆の機会を与えてくださった西村 進会長と益子 保大会委員長に感謝いたします。

引用文献

- 初田甚一郎 (1935) : 有馬温泉の湧出量. 地球, **24**, 428-438.
- 比企 忠 (1899) : 摂津國有馬の地鳴. 地質学雑誌, **6**, 333-335.
- 比企 忠 (1902) : 有馬町地鳴地質調査報告. 震災予防調査会報告, **38**, 33-37.
- Hoefs, J. (2009) : Stable isotope geochemistry. 6th ed. p. 285, Springer-Verlag, Berlin.
- Ide, S., Shimoi, K., Mochizuki, K., Tonegawa, T. and Kimura, G. (2010) : Split Philippine Sea plate beneath Japan. Geophys. Res. Lett., **37**, L21304. (DOI : 10.1029/2010GL044585)
- 池田長生 (1955) : 有馬温泉の化学的研究. 日本化学雑誌, **76**, 7, 716-721.
- 笠間太郎, 鶴巻道二 (1978) : 宝塚温泉研究報告. 大阪市立大学表層地質研究会. 宝塚市.
- 加藤茂弘, 岡田篤正, 寒川 旭 (2008) : 大阪湾と六甲山, 淡路島周辺の活断層と第四紀における大阪・播磨灘堆積盆地の形成過程. 第四紀研究, **47**, 233-246.
- 風見康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 戸崎裕貴, 浅井和由 (2007) : 同位体・希ガスレーザーによる地下水研究の現状と新展開. 日本水文科学会誌, **37**, 4, 221-252.
- 上月順治 (1962) : 有馬温泉の研究. p. 118, 日本書院, 東京.
- 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. Geochim. J., **19**, 149-162.
- 益田晴恵, 鶴巻道二 (2009) : 6.2.1 近畿地方の地下水と水質. 日本地質学会編集「日本地方地質誌—近畿地方」, pp. 367-375, 朝倉書店, 東京.
- 益富壽之助 (1954) : 有馬温泉及び炭酸泉について. 有馬温泉の研究. 1-8. 温泉化学研究所.
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Satake, H. (1973) : Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water systems. Geochim. J., **7**, 123-151.
- 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.
- 松平康男 (1954) : 温泉について (有馬温泉). 有馬温泉の研究. 14-19. 温泉化学研究所.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K. (2003) : ³He/⁴He ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan : surface appearance of slab-derived fluids in a

- non-volcanic area in Kii Peninsula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 221-230.
- 三宅泰雄, 北野 康, 猿橋勝子, 多賀光彦, 坪田博行 (1954) : 有馬温泉の化学的研究—第3報 : 溶存成分相互の關係. 有馬温泉の研究. 29-53. 温泉化学研究所.
- Morikawa, N., Kazahaya, K., Yasuhara, M., Inamura, A., Nagao, K., Sumino, H. and Ohwada, M. (2005) : Estimation of groundwater residence time in a geologically active region by coupling ^4He concentration with helium ratios. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02406 (DOI : 10.1029/2004GL021501).
- Morikawa, N., Kazahaya, K., Masuda, H., Ohwada, M., Nakama, A., Nagao, K. and Sumino, H. (2008) : Relationship between geological structure and helium isotopes in deep groundwater from the Osaka Basin : Application to deep groundwater hydrology. *Geochem. J.*, **42**, 61-74.
- 中村正夫, 渡辺 晃, 許斐直, 木村昌三, 三浦勝美 (1997) : 西南日本外帯における地殻下地震の活動特性. 京都大学防災科学研究所年報, 40 B-1, 1-20.
- Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O. (1981) : Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**, 175-188.
- Nakamura, H. and Maéda, K. (1961) : Thermal waters and hydrothermal activities in Arima Hotspring area, Hyogo Prefecture. 地質調査所月報, **12**, 489-497.
- Nakagawa, K. and Komatsu, K. (1979) : Thermal structure under the ground in Osaka Plain, southwest Japan. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, **22**, 6, 151-166.
- 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, 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, 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索の結果から—. 温泉科学, **60**, 145-160.
- Okino, K., Shimakawa, Y. and Nagano, S. (1994) : Evolution of the Shikoku Basin. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **46**, 463-479.
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S. and Kato, Y. (1999) : The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2287-2290 (DOI : 10.1029/1999GL900537).
- 大森房吉 (1899) : 有馬温泉ノ温度変化ニ就キテ. 地学雑誌, **88** 丙, 34-39.
- 大阪府 (2008) : 大阪府温泉資源保護に関する検討委員会報告書. 大阪府.
- Sakai, H. and Matsubaya, O. (1976) : Stable isotopic studies of Japanese geothermal systems. *Geothermics*, **5**, 97-124.
- Sano, Y. and Wakita, H. (1985) : Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan : Implications for arc tectonics and incipient magmatism. *J. Geophys. Res.*, **90**, 8729-8741.
- Seno, T., Zhao, D., Kobayashi, Y. and Nakamura, M. (2001) : Dehydration of serpentinized slab mantle : Seismic evidence from southwest Japan. *Earth Planets and Space*, **53**, 861-871.
- 寒川 旭 (2008) : 地震の日本史 大地は何を語るのか 増補版. 中公新書 1922.
- Seno, Y. and Maruyama, S. (1984) : Palaeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea. *Tectonophysics*, **102**, 53-84 (DOI : 10.1016/0040-1951 (84) 90008-8).
- Tanaka, K., Koizumi, M., Seki, R. and Ikeda, N. (1984) : Geochemical study of Arima hot-spring waters, Hyogo, Japan, by means of tritium and deuterium. *Geochem. J.*, **18**, 173-180.
- 田中芳男 (1895) : 有馬温泉全誌. p. 142, 秀英舎, 東京.
- 寺西 清, 磯村公郎, 矢野美穂, 辻 治雄, 茶山健二, 藤原慎次朗, 八尾和哉, 内田英宏 (2003) : キレート樹脂前濃縮/誘導結合プラズマ質量分析法による有馬温泉水中の希土類元素の分布測

- 定. 分析化学, **52**, 5, 289-296.
- 辻 治雄, 藤原慎次郎, 茶山健二, 寺西 清, 磯村公郎 (1998) : イオン交換分離/誘導結合プラズマ質量分析法による有馬温泉水中の希土類元素群の定量. 分析化学, **47**, 10, 699-705.
- 鶴巻道二 (1964) : 有馬温泉の泉源について. 神戸市有馬温泉に関する地質及び泉源調査報告. 第二部 8-47. 神戸市経済局観光課.
- 鶴巻道二, 林敬次郎, 四方俊郎 (1974) : 大阪府南部の鉱泉について. 応用地学の進歩 (岩津潤教授記念論文集), 91-119.
- 上治寅次郎 (1958) : 有馬温泉地下における泉温分布に関する考察. 地学雑誌, **67**, 31-40.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006) : Aqueous fluids derived from a subducting slab : observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, **149**, 47-61.
- Umeda, K., Sakagawa, Y., Ninomiya, A. and Asamori, K. (2007a) : Relationship between helium isotopes and heat flux hot springs in a non-volcanic region, Kii Peninsula, southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L05310 (DOI : 10.1029/2006GL028975).
- Umeda, K., Hanamuro, T., Yamada, K., Negishi, Y., Iwano, H. and Danhara, T. (2007b) : Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii peninsula, Southwest Japan : Evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids. *Radiation Measurements*, **42**, 1647-1654.
- Urabe, A., Tominaga, T., Nakamura, Y. and Wakita, H. (1985) : Chemical compositions of natural gases in Japan. *Geochem. J.*, **19**, 11-15.
- Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, K. (1987) : High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region. *J. Geophys. Res.*, **92**, 12539-12546.
- Zhao, D.P. and Negishi, H. (1998) : The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **103**, B5, 9967-99867 (DOI : 10.1029/97JB03670).
- Zhao, O., Ochi, F., Hasegawa, A. and Yamamoto, A. (2000) : Evidence for the location and cause of large crustal earthquakes in Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 13579-13594.