

山崎断層周辺の温鉱泉について

小泉 尚嗣・吉岡 龍馬・赤松 信
西村 進・岸本 兆方

ON HOT AND MINERAL SPRINGS NEAR THE YAMASAKI FAULT

By Naoji KOIZUMI, Ryuma YOSHIOKA, Shin AKAMATSU,
Susumu NISHIMURA and Yoshimichi KISHIMOTO

Synopsis

The authors investigated some hot and mineral springs near the Yamasaki fault, to see general relations between hot and mineral springs and tectonics, and to see what is the particular condition of Shiota mineral spring, whose water chemistry is sensitive to its surrounding seismicity. The distribution of the hot and mineral springs are related to geology, active faults, and microearthquake distribution. There are many Na-Cl type mineral springs near the Yamasaki fault (Shiota mineral spring is one of them). Though some of them, for example Arima hot spring, have much contribution from materials in such deep places as upper mantle, Shiota mineral spring has little.

1. はじめに

山崎断層は中国山地東端部の南麓に位置し、ほぼ北西—南東方向に約 80 km の長さを持つ左横ずれの活断層である。この断層は1978年度から地震予知テストフィールドとして選ばれ、地震予知を目的とした総合的（地球物理学的・地球化学的）な観測が行なわれている（Fig. 1）^{1), 2)}。筆者らは、地球化学的手法による地震予知研究のために、山崎断層沿いにある塩田鉱泉において、1977年3月から知新荘、同年4月から上山旅館の2ヶ所の観測井を選び、水質の定期観測を行なっている。約10年に及ぶ塩田鉱泉での水質の連続観測の結果、塩田鉱泉は、山崎断層の地震活動に対して鋭敏に対応し、水質・水温等を変化させることが分かってきた^{3), 4), 5)}。また、断層の存在が、塩田鉱泉周辺の（不圧）地下水にも大きな影響を与えることが分かってきた⁶⁾。

さて、山崎断層周辺には、塩田鉱泉も含めて多くの温鉱泉群が存在している。それらの温鉱泉群が、山崎断層や他の断層あるいは地形・地質とどのような関係を持つのかを調査研究することが本論の目的である。個々の地震との対応をみるのではなく、より一般的にこの地域のテクトニクスと温鉱泉群との関係を調べようというわけである。それは、断層（運動）が、地下からの水による物質輸送・熱輸送にどのような役割を果たしているかを示してくれるであろう。また、その様な研究を進める中で、周辺の地震活動に対して敏感な塩田鉱泉の特殊性が明らかになるかもしれない。

2. 調査地域の概要

調査地域は、およそ 34°40′—35°20′N, 134°00′—135°30′E の地域である（Fig. 1）。北端は兵庫県大屋町、南端は兵庫県神戸市須磨区、東端は大阪府箕面市、そして西端は岡山県美作町にわたっている（ただし、兵庫県外では、大阪府箕面市・岡山県美作町・同県西粟倉村の3温鉱泉を調査したにすぎない）。この地域

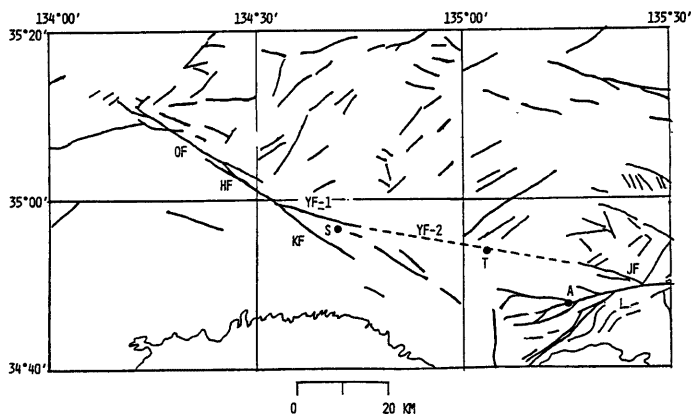


Fig. 1 Location of studied area. Solid and broken lines represent active faults.

OF: Oohara fault KF: Kuresakatōge fault
 HF: Hijima fault YF-1: Yasutomi fault
 YF-2: Yashiro fault JF: Jūmantsuji fault
 S: Shiota mineral spring T: Tōjō mineral spring
 A: Arima hot spring

には、山崎断層系と有馬・高槻構造線という2つの大きな活断層系(いくつかの断層から成り立っているという意味で「系」・「構造線」という言葉を用いる)が存在している。山崎断層系には、大原断層(佐用断層とも呼ぶ)・土万断層・暮坂峠断層(護持断層とも呼ぶ)・安富断層という4つの大きな断層があり^{7), 8), 9)}, この中の安富断層が東方に延長されて、有馬・高槻構造線の十万辻断層につながると近年言われるようになった^{10), 11)}。

調査地域の基盤岩類は主として、

1. 古生代—中生代の堆積岩(頁岩, 砂岩, チャート等),
2. 白亜紀後期—古第三紀の火山岩(流紋岩, 安山岩等),
3. 貫入岩体としての, 白亜紀—古第三紀の花崗岩類

であり, その上を

4. 新第三紀の堆積岩(主に神戸層群(凝灰岩, れき岩, 砂岩及び泥岩等)),
5. 第四紀の堆積物(大阪層群等)

がおおっている。これらの分布を, 地質調査所作成の姫路地区の20万分の1の地質図と経済企画庁作成の兵庫県土地分類図(表層地質図)に基づいて Fig. 3 に示した。

3. 温鉱泉に関する資料と解析手法

解析に用いた資料は主に、兵庫県の温泉台帳(この中には現在は湧出していない温鉱泉も含まれている)と益田(1982)¹²⁾, Masuda et al. (1982)¹³⁾ 及び Masuda et al. (1985)¹⁴⁾ であり, それに我々が測定した結果も加えた。これらの資料に基づいて温鉱泉の分布図を作り(溶成分が温泉法の規定の下限に近いものは黒い三角で示し水質に関する考察は行なわなかった), それと上述の断層や地質との関係を調べた(Figs. 2, 3)。また, 必要に応じて温鉱泉の水質や水温の分布図も作り, 同様の解析を行なった(Figs. 5, 6)。

ここで、温泉の定義についてのべよう。昭和23年の温泉法の制定によって、従来のような温泉・鉱泉・冷泉の区別が無くなり、これら全てが温泉と呼ばれるようになったが、本論では

温泉：溶存物質に関係なく、水温が 25°C 以上のもの、

鉱泉：水温に関係なく、温泉法に定められたある種の溶存物質を規定量以上含むもの、

冷泉：鉱泉であって、水温が 25°C 未満のもの

と定義し、適宜使い分けて行くことにする。また、これらを総称して温鉱泉と呼ぶことにする。

4. 結果と考案

4.1 調査地域のテクトニクスと温鉱泉分布

Fig. 2 から次のような事がわかる。

1. 西北西—東南東および西南—東北の走向をもつ温鉱泉の並びがみられ、この地域の活断層の走向の特長と一致している。その様な傾向は地質区分 (Fig. 3) や微小地震の分布 (Fig. 4) にも認めることが出来る。西北西—東南東の温鉱泉の並びの1つは、(山崎断層系の) 安富断層とその東方への延長部 (社断層—十万辻断層) に沿っていて、その西端付近に塩田鉱泉が、東端付近に有馬温泉がある。

2. 50—60 km の温鉱泉の南北の並びが山崎断層付近で認められる。これはこの付近の地形の特長である南北に伸びる川筋 (谷筋) に沿って温鉱泉が湧出するためである¹⁵⁾。

3. 有馬温泉付近からその北部にかけて温鉱泉の分布密度は非常に高い。これは、この地域に活断層が多いことに対応していると考えられるが、この地域に有馬温泉が有るが故に温鉱泉の調査・掘さくが活発に行なわれたせいかもしれない。

3でも述べたように、温鉱泉の調査・掘さくというものは、地域全体に均一にされるわけではないから、その点には注意を要する。しかし、一般に温鉱泉というものは地質構造上の弱線に湧出 (胚胎) するものであるから¹⁶⁾、1—3で示された温鉱泉の分布の特徴が、この地域のテクトニクスをある程度反映していること

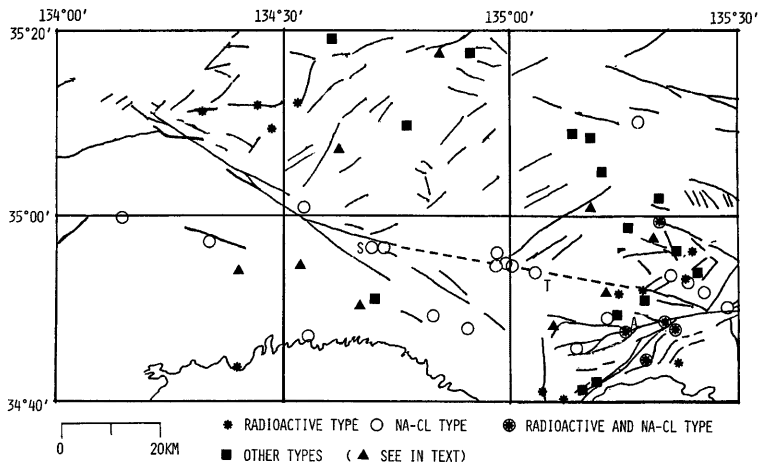


Fig. 2 Location of active faults and distribution of hot and mineral springs. Each symbol indicates the type of mineral spring. Solid triangles show the mineral springs which are not classified because of their low concentrations of chemical species.

S: Shiota mineral spring T: Tōjō mineral spring A: Arima hot spring

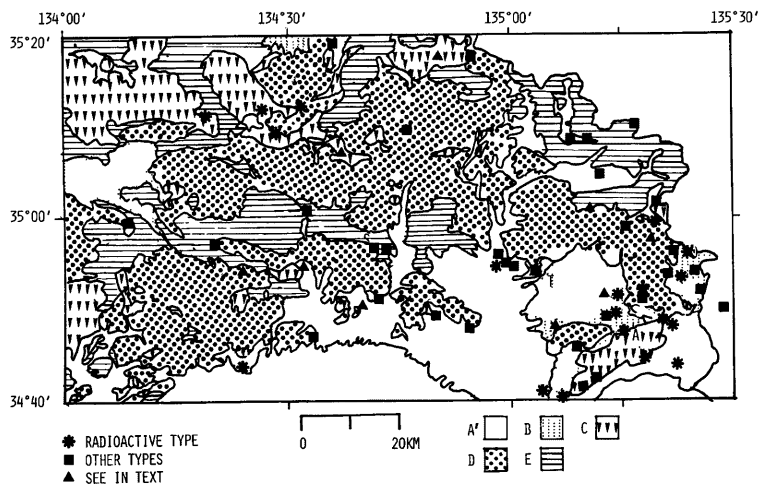


Fig. 3 Map showing the geology and distribution of hot and mineral springs. As to S, T, A, and solid triangles, refer to Figs. 1 and 2.

A': Quaternary sediments and terrace deposits,

B: Tertiary sedimentary rocks,

C: Granitic rocks,

D: Cretaceous to Palaeogene volcanic rocks (dacite and rhyolite),

E: Paleozoic to Mesozoic sedimentary rocks.

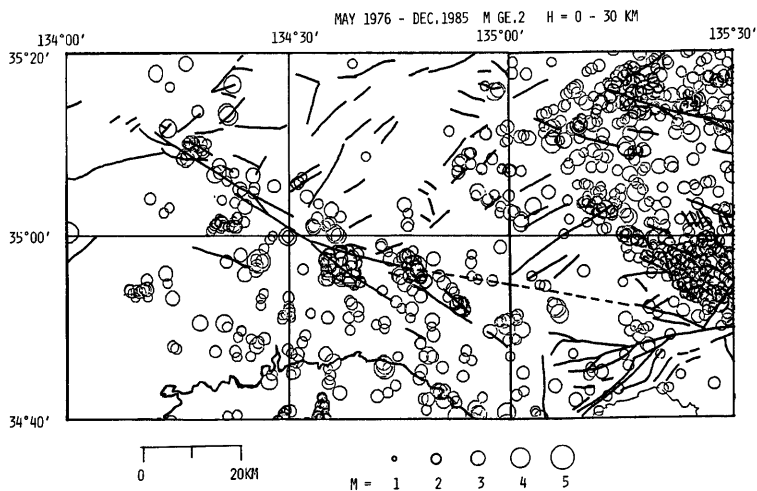


Fig. 4 Location of active faults and distribution of microearthquakes from May 1976 through December 1985. Their magnitudes were 2.0 or greater and their depths shallower than 30 km.

は間違いない。

4.2 調査地域のテクトニクスと温鉱泉の水質・水温

温鉱泉の水質と地質との一般的な関係を見いだすことは難しい。温鉱泉水の湧出経路が一般に地下深部(本論で温鉱泉に関連して述べる「地下深部」とは、特に断わらないかぎり深さ1-2 km までを想定している)に及ぶと考えられるのに対し、地質の方はごく表層のものしかわからないことが、その大きな原因の一つである。その中で放射能(ラドン)泉の分布は、花崗岩のそれと良い対応を示している。これは、放射性元素であるラドンの半減期が3.825日と短いため、地表にまで花崗岩(放射性鉱物の含有量が多い)が達するような

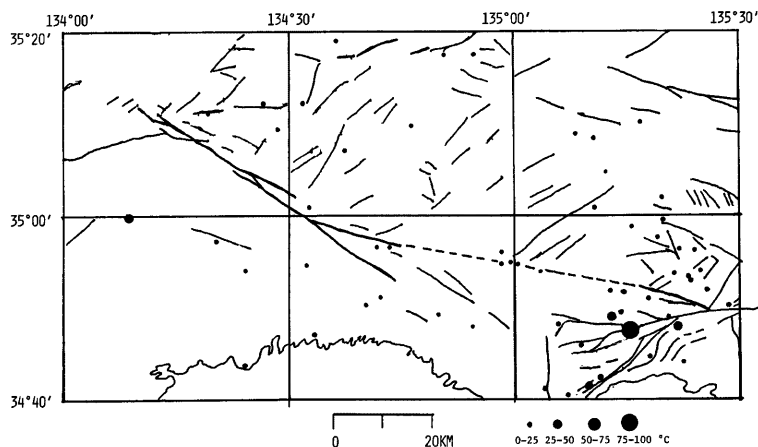


Fig. 5 Distribution of water temperature of hot and mineral springs.

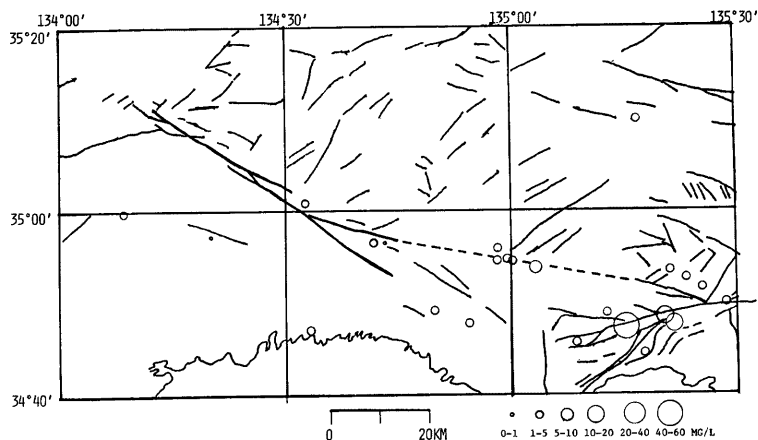


Fig. 6 Distribution of Na-Cl type mineral springs and their concentrations.

地域でないと、高い Rn 濃度 (20 エマン以上が Rn 泉の条件。1 エマン = 1×10^{-10} Ci/l) を保ち得ないためであると考えることができる。

さて、鉱泉であって、その溶存物質の中で NaCl が主成分のものを食塩泉と呼ぶ。上述の、安富断層 (山崎断層系) — 杜断層 — 十万辻断層 (有馬・高機構造線) 付近に並ぶ温鉱泉の多くが食塩泉であるのは注目に値する (Fig. 2)。その西端近くには塩田鉱泉 (冷泉) があり、東端近くには有馬温泉 (温泉かつ鉱泉)¹⁷⁾ がある。有馬温泉の水温は 100°C 近くの高温であるだけでなく (Fig. 5), NaCl の濃度も他を圧している (Fig. 6)。あたかも、周囲の断層系を通路として有馬温泉水が染みだしていったこの地域の食塩泉群を形成したかのような観がある。そこで、塩田鉱泉と有馬温泉の関係を考察してみる。

まず、両温鉱泉水の起源を水の酸素・酸素同位体比から推定する。日本の天水 (降水起源の水) の酸素・酸素同位体比は、ほぼ式(1)と(2)の間に分布する (Fig. 7 の影の部分)¹⁸⁾。

$$\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 26 \quad \dots\dots\dots(2)$$

Fig. 7 から塩田鉱泉水の値は、ほぼ天水の範囲に入ることがわかり、その起源は降水であると考え事ができる。それに対して有馬温泉の酸素・酸素同位体比の分布は特異であって、天水のみからなるとは考えられない。有馬温泉の数多くの泉源の水 (Figs. 5, 6 にはその中で最も水温が高く塩濃度も高いものを代表として示した) および宝塚鉱泉水と石仏鉱泉水 (大阪府河内長野市) の酸素・酸素の同位体比を調べた松葉谷他 (1974)¹⁹⁾ は、これら3つの地域の温鉱泉が、地下にある唯一の、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ の一定の組成を持った塩水 (以後、これを有馬型の塩水と呼ぶ) と降水起源の地下水との混合によって生じていると推定した。

このような観点を踏まえて、益田 (1982)²²⁾ は本論の調査地域とほぼ同じ地域の食塩泉を調べ、この地域の鉱泉水の起源は、White (1957)²⁰⁾ の指摘するような CO_2 と NaCl とを多量に含む火山性起源の塩水 (= 有馬型の塩水) であり、水質の地域的な変化は、この起源水が低温で長時間母岩と反応する事によって生じたものであると推定した。しかし、最近の研究では、このような有馬型の塩水の寄与を水

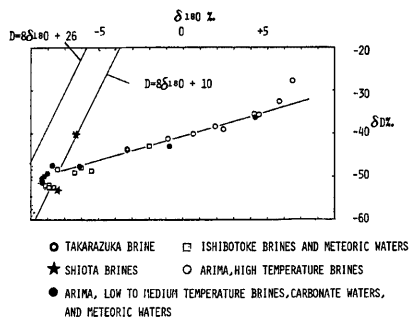


Fig. 7 δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ diagram for thermal and mineral waters in Arima, Takarazuka, Ishibotoke, and Shiota areas, which is modified from Matsubaya et al. (1974)¹⁹⁾.

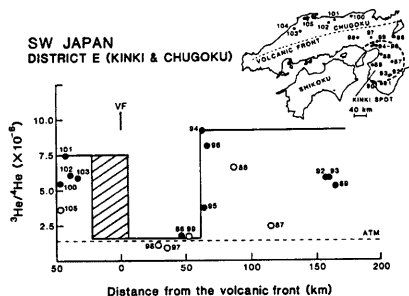


Fig. 8 $^3\text{He}/^4\text{He}$ profile in the Kinki and Chugoku district, showing observed $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio versus geographic distance from sampling site to the present volcanic front and locations of sampling sites. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios are high within a contour line and in the northern region from volcanic front (VF). The dashed line shows the atmospheric ratio.

Solid circles: hot spring gas and hot spring water

Open circles: mineral spring gas and mineral spring water including low-temperature water

No. 88: Ishibotoke mineral spring

No. 94: Arima hot spring

No. 98: Shiota mineral spring

(After Sano et al., 1985)²¹⁾

素・酸素の同位対比等から認めることが出来るのは東条鉱泉までであるとしている (Masuda (1985)¹⁴⁾)。

また、上部マントル起源の物質の寄与を示す $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比も有馬温泉では高いが、塩田鉱泉では低くなる。近畿・中国地方の温鉱泉からでるガスの中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ は、火山フロントの北側および近畿地方の中部から南部にかけての地域 (近畿スポットと Sano et al. (1985)²¹⁾ は命名) で高い値をとる (有馬温泉・石仏鉱泉は近畿スポットにはいる)。そして、有馬温泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は近畿・中国地方での最大値を取るが、塩田鉱泉水の値は低く、両温鉱泉水の間に (近畿スポットの) 境界線が引かれているのである (Fig. 8)。

以上のことから、我々は塩田鉱泉水に対する有馬型の塩水の寄与は (少なくとも現在は) ごく少ないと考える。このように、塩田鉱泉は地震に対して敏感に水質を変化させるが、マントル起源の物質の寄与や、いわゆる処女水の寄与はきわめて少ないことがわかる。

5. 結 論

1. この地域の温鉱泉の分布はテクトニクスをよく反映している。特に、西北西—東南東および南西—北東の方向に温鉱泉が並ぶのが興味深い。

2. 安富断層—社断層—十万辻断層付近に食塩泉が多数分布し、その西端付近に塩田鉱泉が、東端付近に有馬温泉がある。しかし、両温鉱泉の関係は現在は希薄である。そして、塩田鉱泉には、有馬温泉のような地下深部起源の物質の寄与は認められない。

6. 謝 辞

塩田鉱泉での観測に積極的に協力して下さっている知新荘と上山旅館の方々に深く謝意を表したい。採水調査を快くお許しいただいた温泉旅館関係者の皆様や、何かと便宜を図っていただいた神戸市観光課の皆様にも深く感謝いたします。東大海洋研究所の益田晴恵博士には貴重なデータおよび助言をいただいた。九大工学部の茂木透氏、秋田大鉱山学部の松葉谷治博士、および、京大防災研究所微小地震部門の方々にも多くの有益な助言をいただいた。以上の方々に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岸本兆方：山崎断層テストフィールドにおける地震予知実験，地震予知研究 シンポジウム (1980)，1980，pp. 133-142.
- 2) Kishimoto Y.: On Precursory Phenomena Observed at the Yamasaki Fault, Southwest Japan, as a Test-field for Earthquake Prediction, Earthquake Prediction, American Geophysical Union, 1981, pp. 510-516.
- 3) 吉岡龍馬：山崎断層，塩田温泉の塩素濃度の変化と地震，地震予知研究 シンポジウム (1980)，1980，pp. 159-162.
- 4) Koizumi N., R. Yoshioka, and Y. Kishimoto: Earthquake Prediction by Means of Change of Chemical Composition in Mineral Spring Water, Geophys. Res. Lett., Vol. 12, No. 8, 1985, pp. 510-513.
- 5) 吉岡龍馬・小泉尚嗣：温泉水の水質変化，月刊地球，Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 54-57.
- 6) 小泉尚嗣・吉岡龍馬・見野和夫：山崎断層の塩田鉱泉周辺の地下水について，京大防災研年報，第28号 B-1, 1985, pp. 119-125.
- 7) 藤田和夫：山崎断層系，地震予知研究 シンポジウム (1980)，1980，pp. 143-147.
- 8) 活断層研究会：日本の活断層—分布図と資料，東大出版会，1980，pp. 238-239.
- 9) 福井謙三：山崎断層系の変位地形，地理学評論，Vol. 54-4, 1981, pp. 196-213.
- 10) 茂木透・西村進・見野和夫・貞広太郎：近畿地方北西部地域の活構造(1)—山崎断層東方延長域—，地

- 震2, Vol. 38, 1985, pp. 57-66.
- 11) 西村 進・茂木 透・見野和夫・山田 治: 近畿地方北西部地域の活構造(2)―三田市西部での最終活動―, 地震2, Vol. 38, 1985, pp. 243-249.
 - 12) 益田晴恵: 兵庫県東南部に分布する鉱泉についての地球化学的考察, 大阪市立大学修士論文, 1982.
 - 13) Masuda H. and M. Tsurumaki: Geochemical Study of Mineral Springs in the Southeastern Part of Hyogo Prefecture, Southwest Japan, Jour. of Geosciences, Osaka City University, Vol. 25, Art. 1, 1982, pp. 1-17.
 - 14) Masuda H., H. Sakai, H. Chiba, and M. Tsurumaki: Geochemical Characteristics of Mg-Ca-Cl-HCO₃ Type Waters in Arima and Its Vicinity in the Western Kinki District, Japan, Geochem. Jour., Vol. 19, 1985, pp. 149-162.
 - 15) Mino K.: On a Formation Mechanism of Topography and Its Relation to Earthquake Occurrence in Southwest Japan, Bull. Disas. Prev. Res. Ins., Kyoto Univ., Vol. 34, 1984, pp. 129-167.
 - 16) 杉山隆二: 地球と温泉―温泉の地質構造規制―, 温泉工学会誌, Vol. 14, No. 3, 1980, pp. 98-104.
 - 17) 上月順治: 有馬温泉の研究, 日本書院, 1962.
 - 18) 松葉谷治: 水素および酸素同位体比からみた温泉水の起源, 温泉科学, 第31巻, 1981, pp. 47-56.
 - 19) 松葉谷治・酒井 均・鶴巻道二: 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, 第43号, 1974, pp. 15-28.
 - 20) White D. E.: Thermal Waters of Volcanic Origin, Bull. Geol. Soc. Amer. Vol. 68, 1957, pp. 1637-1658.
 - 21) Sano Y. and H. Wakita: Geographical Distribution of ³He/⁴He Ratios in Japan: Implications for Arc Tectonics and Incipient Magmatism, Jour. Geophys. Res., Vol. 90, No. B10, 1985, pp. 8729-8741.