
総 説

近畿地方の高温泉とその地質構造

西 村 進¹⁾

(平成 22 年 10 月 6 日, 平成 23 年 2 月 10 日受理)

High Temperature Hot Springs and Their Geological Structures of Kinki District, Japan

Susumu NISHIMURA¹⁾

Abstract

There are high temperature hot-springs, such as Yumura and Kinosaki Hot-Springs, in the northern part of Kinki District. These springs are related to Quaternary volcanism. Some minerals in the dragged hydrated peridotite layer of the Pacific Plate release H₂O at some depths beneath the backarc side of volcanic arc. Partial melting takes place to produce initial magmas.

On the other hand, there are some hot-springs having high temperature and high concentration of chemical components in the middle and southern part of Kinki District, but these are not related to any Quaternary volcanism. It is pointed out that these hot spring waters have partly some dehydrated water (super-critical fluid), from subducted slab at the depth between 30-60 km of Philippine Sea Plate, with some elements belonging to upper mantle. Nanki-Shirahama and Arima hot springs are belong to these hot springs. The geological structures of Nanki-Shirahama and Arima hot-springs are already discussed, using the results of geological and geophysical surveys. It has been cleared that the evidences of hot-springs are found along the active faults through the around the necks of acidic igneous intrusions, of which ages are estimated 12-14 Ma. Some hot-springs in the outer-arc of Kii peninsula are found along the active faults through the around the acidic igneous intrusions.

Key words : Hot springs in Kinki District, Geological survey, Geophysical survey, Super-critical fluid, Dehydration from subducted slab, Intrusion of acidic rocks

要 旨

我が国の高温の温泉は、火山フロントより内陸側で、数万年より若い火山活動の近辺で見ら

¹⁾ 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. ¹⁾ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kinki-chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyo-ku, Kyoto 606-8305, Japan.

れるものが多い。この火山活動は沈み込むスラブを構成している含水鉱物からの脱水によりマントルが部分溶融してマグマが出来た結果と理解されている。

近畿地方北部には、第四紀の火山活動が知られている。この火山活動は、東北地方の日本海溝から沈み込んだプレートに成因があるとされる。湯村温泉・城崎温泉などはこの第四紀の火山活動による温泉である。

近畿地方中・南部には、所々に高温で高濃度の化学成分を含有する古くから知られている温泉があるが、その周辺に第四紀の火山活動は見当たらない。温泉はラドン、二酸化炭素を多く含み、また、含有成分はマントルと関わりがある。この温泉の南紀白浜温泉・有馬温泉の成因・湧出機構を知るために、精密な地質調査と物理探査を行った。詳細な探査により、酸性深成岩の最終期貫入の流紋岩質岩頸と活断層を見いだした。フィリピン海プレートのスラブからの脱水は深発地震面の深度30~60 kmで最も多くみられるが、流体の影響によるマントルの溶融は起きていない。しかしスラブより生じた超臨界水流体は上昇する。その上部の島弧の地殻では活断層の存在を示す直下型地震は14~12 kmより浅い。地殻下部は日本海拡大の時再溶融してできた酸性岩が存在する。有馬温泉・白浜温泉では酸性岩の貫入末期の岩頸が見つかり、その周辺のゆるみ域を通りスラブから上昇していると考えられる。実際の温泉は地表の断層や亀裂の破碎部に存在する地下水に薄められながら地表に湧出している。南紀の他にも高温の温泉が所々みられるが、酸性体の周辺か岩脈の周りに湧出している。

キーワード：近畿地方の高温泉、地質調査、物理探査、超臨界流体、スラブからの脱水、酸性貫入岩体

1. はじめに

近畿地方には掘削深度が比較的に浅いのに高温で含有成分の濃度が高い温泉が所々に見られる。その中にマントルに含まれると推定される成分を含んでいる泉源がある。この種の温泉の有馬温泉、白浜温泉で泉源調査を広範囲にわたり精密に行う機会が与えられた。

有馬温泉、白浜温泉についての調査から、フィリピン海プレートの沈み込んだスラブから脱水して生じた超臨界流体が、既存する酸性岩体周辺とくに最後に貫入した流紋岩質岩脈や岩頸の周辺のゆるみ域を上昇し、活断層を経て地殻上部に到達し、地下水に薄められ、地表に湧出している可能性を「近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造 (1)」で報告した(西村ら, 2009)。さらに、その続報で、岩頸の周辺のゆるみ域を伝い上昇した熱水・温湯水が活断層に乗り移り地表に到達する状況を、電磁探査と放射能探査の結果を「近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造 (2)」で報告した(西村ら, 2010)。

今回は前記2論文の概要に加えて湯村温泉、城崎温泉で代表される近畿地方北部の高温の温泉についても、高温・高圧実験の結果を取り入れて検討し、全体として近畿地方での浅い高温の温泉について、その成因・湧出機構をまとめる。

2. 近畿地方の中・南部の高温泉の成因・湧出機構 (地質構造)

—主に、白浜温泉、有馬温泉での研究から何が推論出来たか。

白浜温泉・有馬温泉の調査研究で、明らかになった点と不確かな点を示して、問題点をまとめる。

① 近畿地方中・南部では、火山活動が現在認められない。

紀伊半島の火成活動は日本海拡大の直後12~14 Maに、中央構造線の南側に熊野酸性岩、大峰酸性岩などの貫入があり、中央構造線北側には、二上山で代表される讃岐岩類の活動があり、さらに紀伊半島の所々でこの時期に酸性岩脈や砂岩・泥岩脈が所々に見られる。しかし、この時代より若い火山活動はみられない (Fig. 1)。

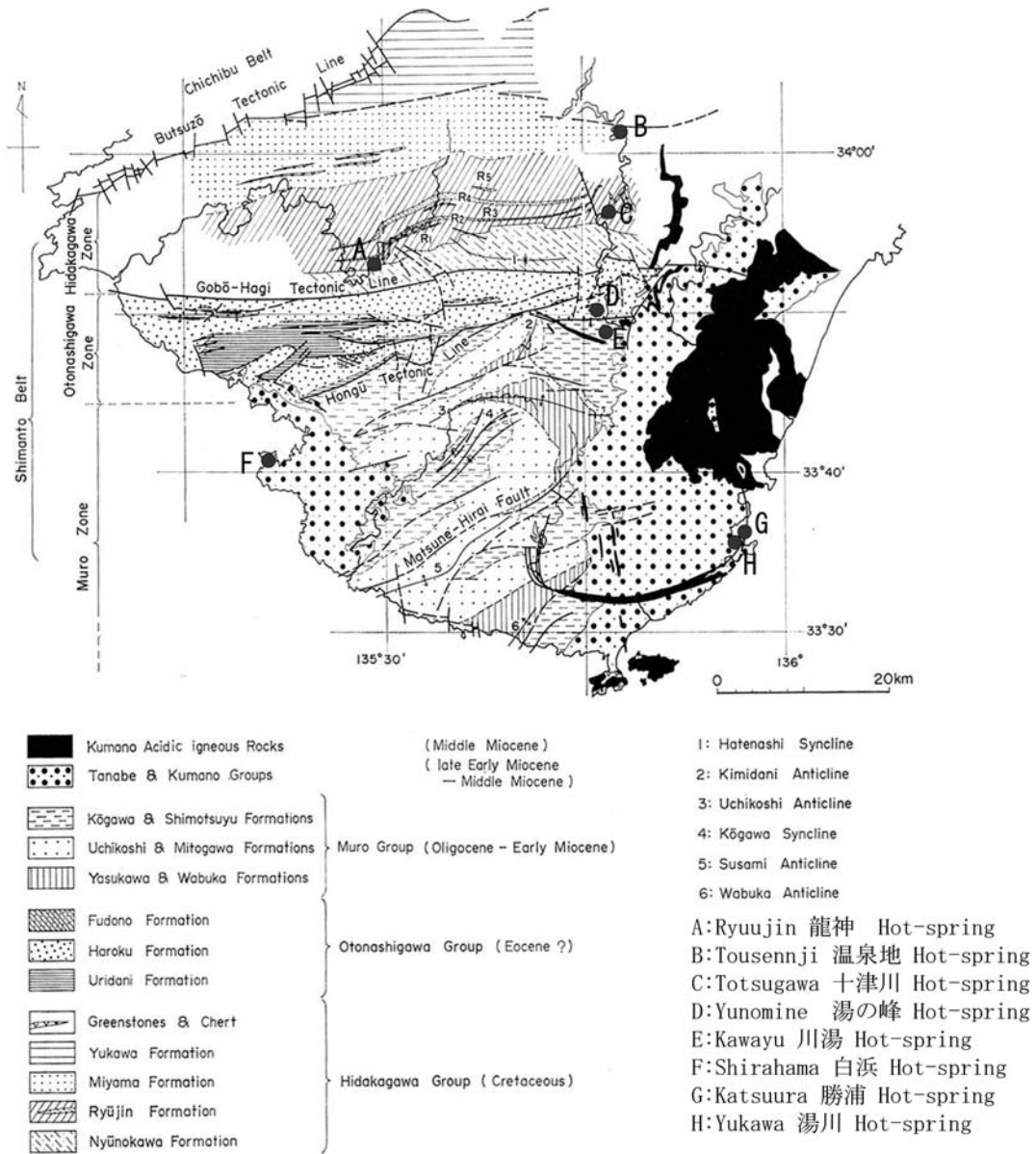


Fig. 1 Tectonic and geological map of the Shimanto Belt and distributions of high-temperature and high chemical content hot-springs (●) in Kii Peninsula (modified from Tokuoka *et al.*, 1981).

図 1 紀伊半島四十万帯の地質構造と高温・高濃度温泉 (●) の分布 (徳岡ら, 1981 に加筆).

紀伊半島の高温の温泉を Fig. 1 に示したが、これらの温泉は熊野酸性岩および同時期の酸性岩体やその末期の活動である岩脈や岩頸の周辺に見られる。これらの岩頸と高温泉の関係が特に重力測定で推定が出来た (西村ら, 2009)。

② 近畿地方中部の基盤は中・古生層の丹波帯と白亜紀末期の花崗岩類で、この部分での自噴の高温泉は極めてまれであるが、有馬温泉の金泉が見られる (Fig. 2)。有馬温泉についてはすでに詳

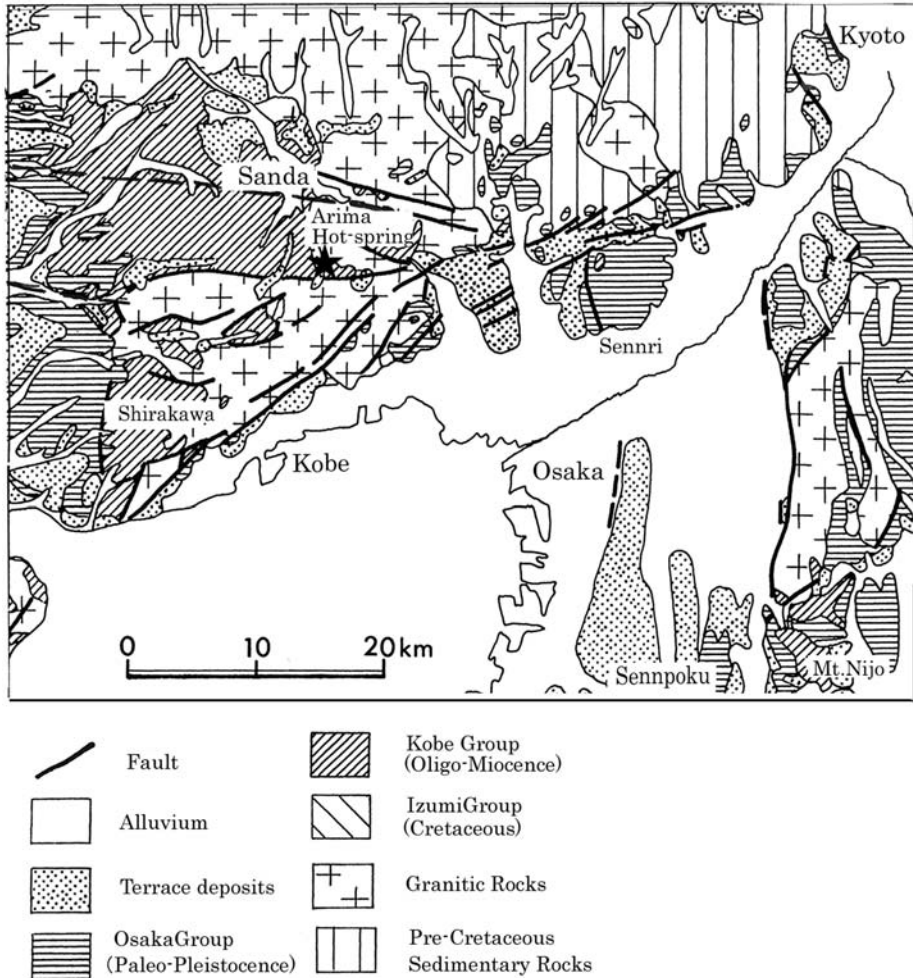


Fig. 2 Tectonic and geological map around Arima hot-spring (modified from Mizuno, *et al.*, 1990).

図 2 有馬温泉近傍の地質構造図 (水野ら, 1990 を参考に作成)。

しく紹介している (西村ら, 2009; 2010)。

丹波帯の岩盤は紀伊半島の四万十帯よりも古く、岩盤密度も高く、スラブの深発地震面の深さも 40~60 km と深いので温泉の湧出するのが難しく、有馬温泉でのみ存在する。

有馬温泉は、Fig. 2 に示すように、六甲花崗岩と有馬層群の間の断層 (射場山断層)、有馬高槻構造線、山崎断層の大きな断層の交わる場所の特異点で湧出している。その泉質はほぼ海水の 2 倍の濃度の塩類泉で、高濃度のラドン、二酸化炭素と共に自噴している。そのため揚湯管などがすぐシンターで閉塞し、メンテナンスが大変である。

有馬層群には多くの溶結凝灰岩が含まれ、六甲花崗岩の貫入があり、その最後に有馬の天神山に末期の比重の比較的低い岩類が貫入し、その周辺に高温泉が湧出しているが、第四紀の火山活動はみられない (西村ら, 2009)。

③ 花崗岩や熊野酸性岩類の貫入の状態は特にその下部の構造に未解明の部分が多いが、下部地殻の再溶融のマグマで出来、その放射年代から日本列島の構造がほぼ完成した時期の産物であるこ

とには間違いはない。底盤の形状は明確ではないが、この時期に出来た岩体や岩脈・岩頸の周辺にゆるみ域ができることは推論できる。このような構造は、その比重差があるので、精密に重力測定をして、重力異常の平面分布からその場所が推定出来る（新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1994; 西村ら, 2009）。

- ④ 白浜温泉・有馬温泉の温泉水はある端成分と地下水の混合で説明がつく。この端成分にはマン トルが関わっていると考えられる成分が含まれる（例えば、西村ら, 2009）。

海洋底のプレートの沈み込みに伴い、そのスラブの海底に露出する玄武岩質岩石は加水して蛇紋 岩化している。高温・高圧実験によると、この作用は沈み込むスラブの深発地震が約 30 km 深度 まで見られるが、30 km 深度から 60 km 深度の間では、その静水圧で蛇紋岩が不安定となり脱水す る（例えば、西村, 2000a; 西村ら, 2009）。

このスラブからの水は超臨界流体であり、密度も臨界点近くの液相の水より低く、その性質に より、流体が上昇する通路にある種々な成分よく溶かす。

深発地震面の深度 30~60 km のスラブと島弧地殻の間には、上部マントル物質が存在する。こ のような上部マントルは、一部分化はしていると考えられるが地球生成時の未分化な組成が充分含 まれている。

近畿地方の地下では、フィリピン海プレートの沈み込みのスラブは深発地震面 60 km 深度までし かないことを、深発地震の分布やその地震の発震機構の解析から示唆した（Nishimura, 1998）が、 最近まで同意する地震の研究者は少なかった（例えば、Ide *et al.*, 2010）が、最近では同意する研究 者が多くなり、とくに、地震波トモグラフィーからその推論を認める報告がなされてきた（例えば、 中島・長谷川, 2009）。

- ⑤ 有馬温泉、白浜温泉の温泉水には非常に多くの二酸化炭素を含み、そのガスの力により自噴す る。

水と二酸化炭素の臨界の物性を Table 1 に示す。近似的に、水の臨界の深さは静水圧から約 10,000 m、二酸化炭素の臨界の深さは温度から約 1,000 m と見積もられる。深度 10,000 m より深い ところでは水の超臨界流体と二酸化炭素の超臨界流体が混在し、その混在の状態が未解明である。 その流体は周辺より密度が低いので、その密度差で超臨界流体が上昇する。水が臨界点を超え亜臨 界や液相になっても二酸化炭素が超臨界であるので、周辺に対して密度の低い流体は岩石のクラッ ク、クリートを通じて上昇しようとする。狭く上下に延びる通路で、水は超臨界二酸化炭素流体に より浮力がつき、二酸化炭素が臨界状態でなくなると、水の中にマイクロバルブとなり流体全体の 密度がさらに低くする。さらに地表近くでは二酸化炭素ガスが温泉水を噴出するようになる。

- ⑥ 第三紀層の粘弾性体の地層中の流体の浸透の仕方の研究（シンクタンク京都自然史研究所, 2008）から地層内での超臨界二酸化炭素流体が浸透する様子を推定した。この場合地層はほぼ水 平であるが、この類推から、沈み込みのスラブからの脱水に伴う超臨界流体は、低圧の方に移動 するので、浸透の方向が鉛直方向になるので、Fig. 3 に示すようにクラック、クリートを伝い上

Table 1 Critical constants of H₂O and CO₂ (Ikariya, 1998).

表 1 H₂O, CO₂ の臨界点における物性 (碓屋, 1998).

	Critical Temp (°C)	Critical Press (atm)	Critical Density (g/cm ³)
CO ₂	31.0	72.9	0.468
H ₂ O	374.2	218.3	0.323

昇すると推定できる。そのクラックからクラックまたはクリートからクラックへ乗り移るときに微小地震や微動などを起こすと考えられるが、この現象はまだ地震観測の研究からは直接確認出来ていない。しかし、上部マントルの一部には水平面内で方向による地震波速度の異なる区域が見出されている (Smith *et al.*, 2001 ; Karato, 2003 ; 唐戸, 2003), 選択配向したクラックやクリートの存在が示唆される。

- ⑦ 下部地殻ではマントルに比へば流体の鉛直方向の浸透率が低く、流体は上昇しにくいと考えられるが、鉾床の胚胎の仕方から類推すると、酸性岩から中性岩の周辺や岩頸・岩脈の周辺のゆるみ域を通り上昇するとみられる。この現象は松代地震時やジャワ島デイエンの地下水と二酸化炭素の混合の噴出でも見られる (シンクタンク京都自然史研究所, 2000)。

最も南部のリングダイク状にある勝浦温泉, 湯川温泉 (Fig. 1) は, スラブの深発地震面の深さ約 20 km の直上になり, 直下のスラブから静水圧や温度が低く, 脱水しないが, このあたりの地層は付加の年代も若く, 地層面に沿い流体は浸透しやすくなり, もっと北にある深発地震面の深度 30 km 程度から固結が弱い地層面に沿い上昇しているものと考えられる。

- ⑧ 直下型地震は近畿地方では 12~14 km より浅部で見られるので岩頸の周辺を上昇してきた流体は浅部では活断層に乗り換えて上昇する。活断層は放射能探査により地表での位置が探査できる。また温泉水が岩石中を通ると温泉化作用を起こし, 活断層による破碎でも低比抵抗であるので, 浅い地殻中の温泉水の挙動は CSA-MT 探査などの比抵抗探査で推定出来る (西村ら, 2010)。この様子を模式的に Fig. 4 に示す。

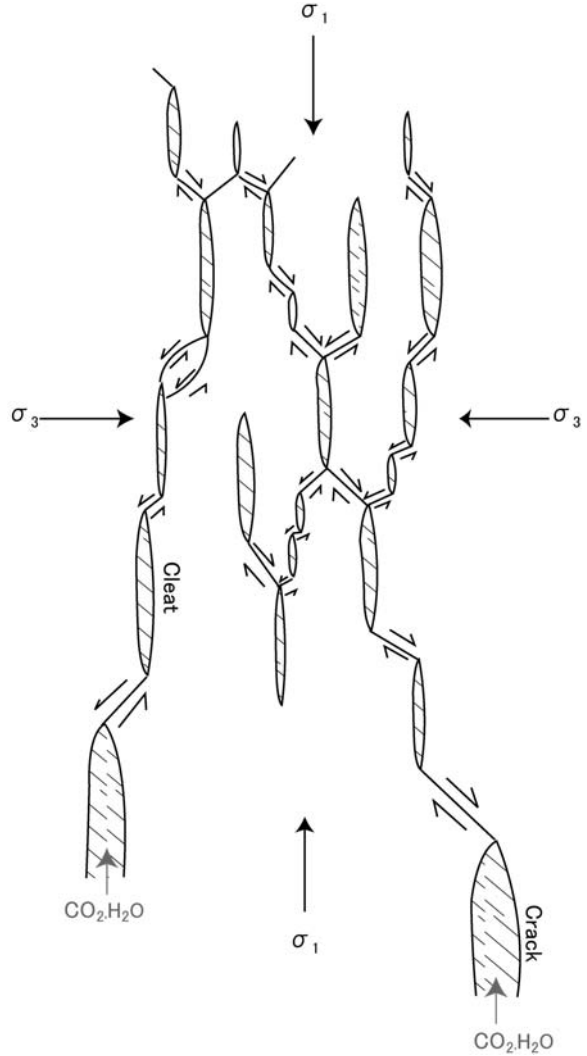


Fig. 3 Schematic diagram of the distribution of cracks and cleats with supercritical fluid in the upper mantle. σ_1 : maximum stress (vertical direction); σ_3 : minimum stress and \rightarrow : small shearing faulting.

図 3 上部マントル内の超臨界流体で充填されたクラックとクリートの分布の概念図。 σ_1 : 最大主応力 (鉛直方向), σ_3 : 最小主応力, \rightarrow : せん断微小断層

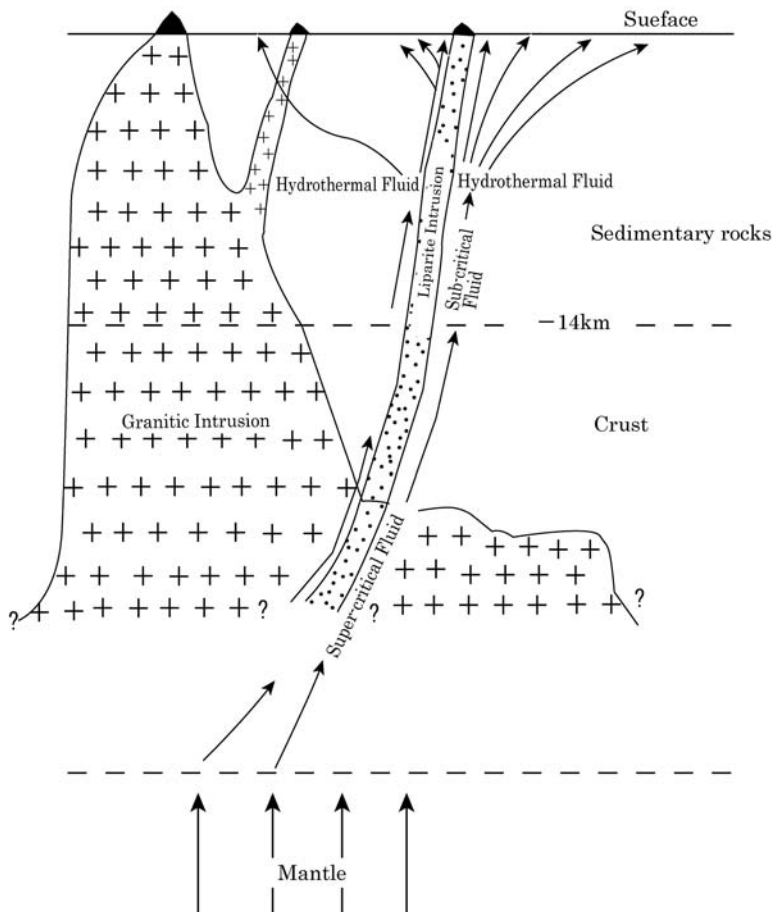


Fig. 4 Schematic cross section parallel to an active fault, showing the pass of the dehydrated fluid from the slabs. The fluid rising through the periphery of the neck of acid intrusion and along an active fault.

図 4 スラブからの脱水超臨界流体が地殻内の酸性岩頸を通り紙面を活断層面とする沿い上昇する概念図。

3. 近畿地方北部での高温泉の成因・湧出機構 (地質構造)

—主に、湯村温泉, 城崎温泉の研究

① 近畿地方北部の第四紀の火山活動

山陰地方にアルカリ玄武岩の火山活動が、古地磁気の年代表のブルヌ、松山期の逆転時 (0.78 Ma) より少し若い時まで知られている。その中で一番若いと考えられているのは、神鍋火山体である。その時代は数万年前とされている。山陰での第四紀の溶岩の分布を Fig. 5 に示す (鳥居・古山, 1978; 西村, 2001)。

島弧でのアルカリ玄武岩系の火山岩の分布は太平洋プレートに関するものは東北地方の日本海岸側に見られるがこれは沈み込みのスラブの深度が約 250 km よりも深いところでエクロジャイト (eclogite) の脱水の超臨界流体が上部のマントルの融点を下げて、マグマが生じると推定した (Nishimura, 1998; 西村, 2000b)。そのことからこの火山活動は古いプレートの名残の火山活動で、これから活動するとは考えられていなかった。

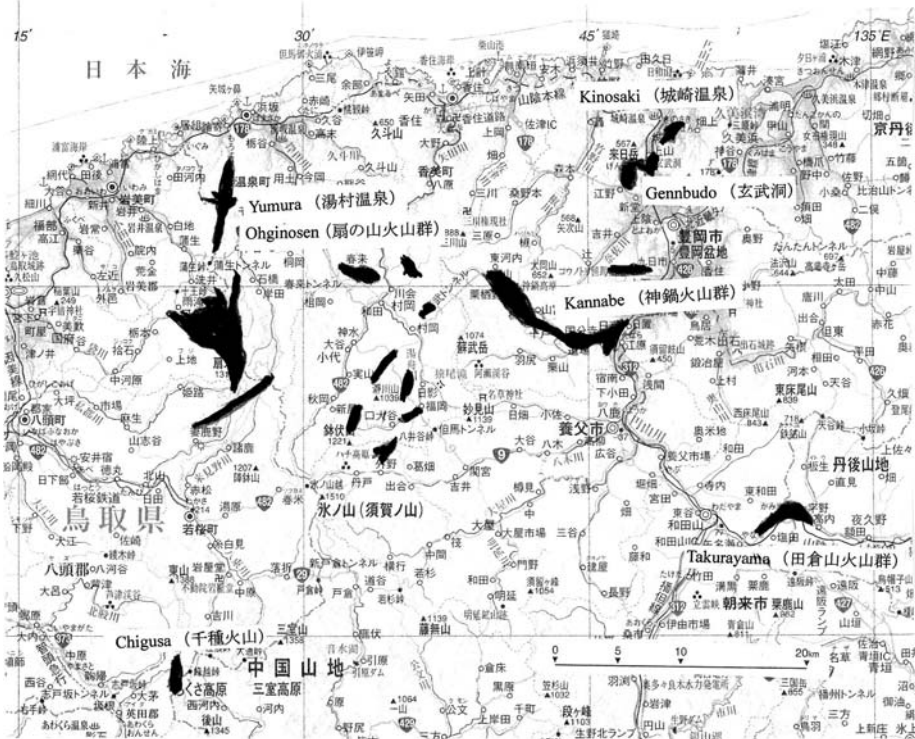


Fig. 5 The distribution of Quaternary alkali basalt eruptions in Sannin, Kinki District. Kinokuniyama hot-spring, Yumura : Yumura hot-spring (Nishimura, 2000b). Black area : alkali basalt lava-flow.

図 5 山陰地方の第四紀アルカリ玄武岩系火山の分布と城崎・湯村温泉 (西村, 2000b)。黒い部分：アルカリ玄武岩分布域。

太平洋プレートの沈み込みの状況を、震源分布 (Fig. 6) をみると、近畿地方北部のアルカリ玄武岩のところは深度 400 km 付近で、第四紀の火山活動域であり、その付近に城崎温泉、湯村温泉の高温泉が見られる。ちなみに、670 km 深度上部には白頭山などのアルカリ玄武岩系の火山活動が見られる (西村, 1999)。

鳥海 (2008) による高温高圧実験での相図を Fig. 7 に示す。この図からはほぼ 400 km 深度で岩相の変化がみられる。この深度でマントル遷移層に代わり、約 650 km 深度程度で下部マントルにかかわることを示した。これらの深度でもザクロ石は存在し、累帯構造をもち、水とナトリウムを含有していて、その相変化の条件で一部脱水し、変成岩の中のザクロ石の累帯構造から推測される脱水の深度は 670 km 下部までも及ぶことを示している。このことはアルカリ玄武岩系の白頭山などの火山活動の存在が太平洋プレートの最深部の上部でも起こる事を示している。日本海、山陰、九州北部、韓国東部、韓半島中部の漢河の中流域には時期の限られたアルカリ玄武岩の溶岩の噴出が見られる。

山陰では太平洋プレートの深度が深発地震面から推定するとほぼ 400 km 深度になる (Fig. 7)。このことから、これらの火山活動は、フィリピン海プレートに関する火山活動ではなく、太平洋プレートに関するものであると解釈できる。

② 湯村温泉、城崎温泉の調査結果などから

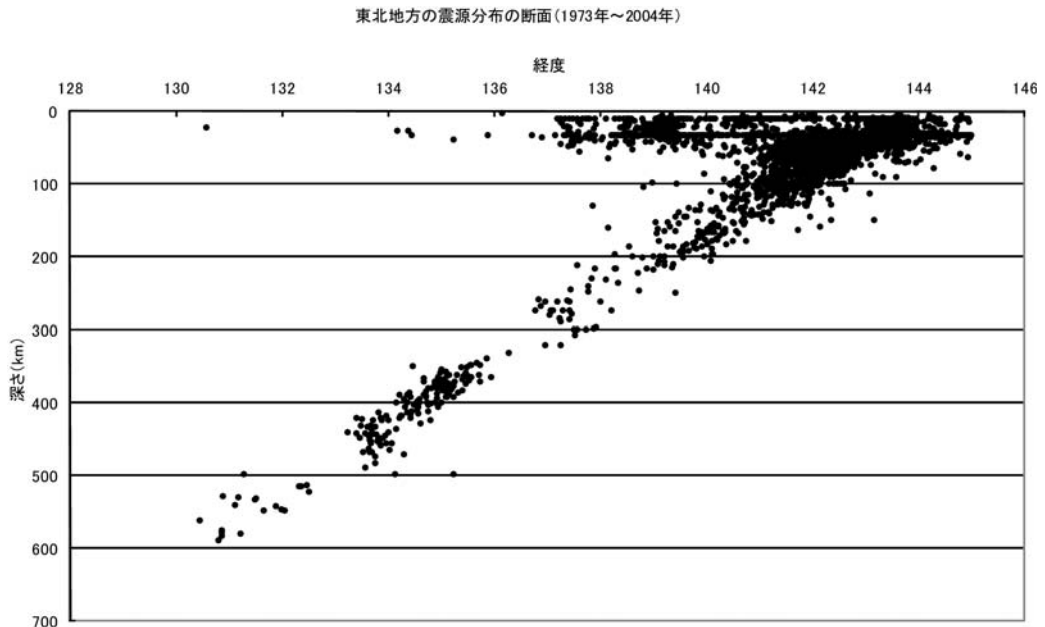


Fig. 6 Cross section of earthquake hypocenter (1973-2004) approximately perpendicular to the trench axis in Tohoku District.

図 6 東北地方における日本海溝に鉛直な 1973-2004 の太平洋プレート震源分布の日本海溝に鉛直な断面。

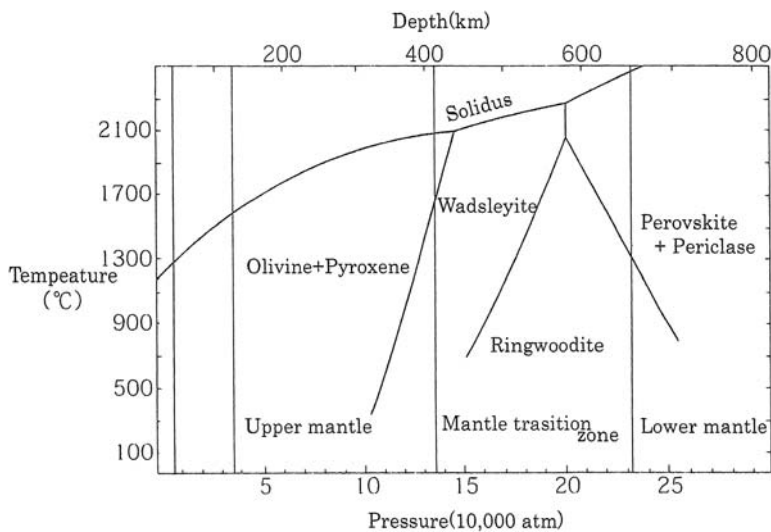


Fig. 7 Phase diagram inside of mantle (Toriumi, 2008)

図 7 マントル内部での岩相変化 (鳥海, 2008).

湯村温泉は東西の湯村断層と短い引張場を示す南北の断層の交点にあり、荒湯の自噴高温泉を中心に周辺では急に温度が下がる。また単純泉で、含有成分の濃度が低い。二酸化炭素やラドンは活断層の平均的な値である。含有する $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は火山ガスの値に近いが含有量は少ない (Sano

and Wakita, 1983; 西田ら, 1985; 西村ら, 1986).

城崎温泉は東西の断層とこの断層より短い引張場を示す南北の地震の交点にあり, 薬師公園北東隅の500m深度掘削で82°Cの自噴泉(No. 28)が中心と考えられるが, 食塩泉で濃度は低い. 二酸化炭素やラドンは平均された活断層の値である. これも $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は火山ガスの値に近い(西村, 1993; 西村・瀬川, 2005).

これらのことから, 湯村温泉, 城崎温泉は第四紀アルカリ岩系の火山活動の熱と一部溶岩に含まれる成分をわずかに溶かしている, 火山活動に関連する温泉であると考えられる.

4. おわりに

第四紀の火山活動が見られない近畿地方中・南部では, 六甲花崗岩, 熊野酸性岩, 大峰酸性岩の貫入の場に, 自噴や浅い掘削により高温・高成分の温泉が散在する. その中で, 現状では出来る限りの探査が出来た有馬温泉と白浜温泉で疑問点を明らかにして, 統一した解釈が出来た. また, 山陰では地温勾配が高く, その近辺の地下水の成分に近い高温の温泉の存在が知られるが, そこには第四紀のアルカリ玄武岩系の火山活動がある.

前者はフィリピン海プレートが関係し, 後者は太平洋プレートが関与していると考察できた.

今後, さらに地震波トモグラフィーの詳細な解析がなされるようになり, また, 丹後半島などの詳細な調査がなされると, さらに詳細な解析ができるものとする.

引用文献

- 碓屋隆雄監修 (1998): 超臨界流体反応法の基礎と応用, 256 p., シーエムシー出版, 東京.
- Ide, S., Shiomi, K., Mochizuki, K., Tonegawa, T. and Kimura, G. (2010): Split Phillipine Sea plate beneath Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L21304.
- 唐戸俊一郎 (2003): マントル内部物質の物性に及ぼす水の影響. 笠原順三, 鳥海光弘, 河村雄行編, 地震発生と水—地球と水のダイナミクス, 55-75, 東大出版, 東京.
- Karato, S. (2003): Mapping water content in the upper mantle. *Subduction Factory* (eds. Eiler, J. and Abers, G.), 403-418, *Am. Geophys. Union*.
- 水野清秀, 服部 仁, 寒川 旭, 高橋 浩 (1990): 明石地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 60 p, 東京.
- 中島淳一, 長谷川昭 (2009): 地震波トモグラフィでみたスラブの沈み込みと島弧マグマ活動. *地震*, **2**, 61 (特集号), S177-S186.
- 西田良平, 貞広太郎, 中尾節郎, 見野和夫 (1985): 湯村断層の放射能探査. *京大防災研年報*, **28**, 145-156.
- 西村 進 (1993): 城崎温泉と城崎近辺の温泉. *温泉科学*, **43**, 128-135.
- 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 (1999): 島弧の新生代の火山活動について. *自然と環境*, **2**, 18-23.
- 西村 進 (2000a): 紀伊半島における前弧火成作用と温泉. *温泉科学*, **49**, 207-216.
- 西村 進 (2000b): 近畿地方北部の第四紀単成火山と地質構造. *自然と環境*, **3**, 22-29.
- 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結果から—, *温泉科学*, **59**, 103-111.
- 西村 進, 堀 義直, 楠健一郎, 鈴木浩一, 宮川公雄, 西田潤一, 茂木 透 (1986): 兵庫県北部

- 湯村温泉地域の物理探査. 物理探査, **39**, 265-274.
- 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から一. 温泉科学, **60**, 145-160.
- 西村 進, 瀬川孝光 (2005): 城崎温泉の第 29 号第 30 号新泉源について. 温泉科学, **55**, 78-84.
- 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.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1994): 地熱開発促進調査報告書, No. 37, 本宮地域.
- シンクタンク京都自然史研究所 (2000): インドネシアジャワ・スマトラにおける火山・地震活動の地下水への影響調査と地下水保全に関する活動. 平成 11 年度環境事業団地球環境助成金活動報告書, 157 p., シンクタンク京都自然史研究所, 京都.
- シンクタンク京都自然史研究所 (2008): 特集 二酸化炭素炭層固定化・有効利用技術対策事業「二酸化炭素炭層固定化技術開発・モニタリング技術の検討」. 自然と環境, **10** (Supplement), 115-155, 京都.
- Smith, G.P., Wiens, D.A., Fischer, K.M., Dorman, L.M., Webb, S.C. and Hildbrand, J.A. (2001): A complex pattern of mantle flow in the Lau backarc. Science, **292**, 713-716.
- 徳岡隆夫, 原田哲朗, 井内美郎, 石上知良, 木村克己, 公文富士夫, 中條健次, 中屋志津男, 坂本隆彦, 鈴木博之, 谷口純造 (1981): 龍神地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 69 p., 東京.
- 鳥居雅之, 古山勝彦 (1978): 神鍋火山群の古地磁気, 日本地質学関西支部報, **83**, 2-3.
- 鳥海光弘 (2008): 地球システム学のすすめ. やりなおしサイエンス講座 04, 228 p., NTT 出版, 東京.