

原 著

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—

西村 進¹⁾, 桂 郁雄¹⁾, 西田潤一¹⁾

(平成 21 年 5 月 27 日受付, 平成 21 年 8 月 19 日受理)

High Temperature Hot Springs and Their Geological Structures of the Central and Southern Part of Kinki District, Japan (1) —From the Results of the Geological and Geophysical Survey around Shirahama and Arima Hot Springs—

Susumu NISHIMURA¹⁾, Ikuo KATSURA¹⁾ and Junichi NISHIDA¹⁾

Abstract

Some hot springs having high temperature and high concentration of chemical components are well known at the middle and southern part of Kinki District, but these are no related to any volcanism. It is discussed partly how to originate these hot springs in Kii Peninsula. The report is divided into three parts that (1) and (2) are discussed on the origin of hot springs at Nanki-Shirahama and Arima, and (3) are getting our idea on the origin of these hot springs along the outer zone of Southwest Japan Arc.

It is assumed that Nanki-Shirahama and Arima hot springs (i) are gushed out mainly with bubble of CO₂, (ii) are contain some elements of mantle, and (iii) rise up along the crushed zone of the active faults through the neck of igneous intrusion. The report (1) is given the gravity survey carried out at these hot springs areas. It has been cleared the evidence of the necks of acidic igneous intrusion.

Key words : Nanki-Shirahama hot spring, Arima hot spring, acidic intrusion, Bouguer anomaly, dehydration of subducted slab.

要 旨

近畿地方中・南部には、所々に高温で高濃度の成分を含有する古くから知られる温泉がある。しかし、完新世の火山活動は見当たらない。これらの温泉の胚胎の仕方については部分的

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.

に議論してきた。なかでも、白浜温泉と有馬温泉については、精度のよい物理探査の結果にてらしての検討がなされていなかった。本論文のシリーズでは(1)、(2)で白浜温泉と有馬温泉の最近の詳細な調査結果をまとめ、(3)で西南日本外帯の高温・高濃度の成分を含む温泉の成因をまとめたい。

南紀白浜や有馬の高温の温泉は以下の3つの特徴をもつ。(i)熱水の上昇が二酸化炭素による、(ii)マントル由来の成分を含むと考えられる。(iii)潜在する岩頸の周辺を上昇し、地表近くで地下水と混合しながら、断層に沿って湧出している。本論文(1)では、潜在する岩頸を見出すために重力探査を行った結果、岩頸の存在と高温で高濃度の泉源との関係が明確に出来たことを主にまとめた。

キーワード：南紀白浜温泉，有馬温泉，酸性貫入岩，ブーゲー異常，沈み込みのスラブからの脱水

1. はじめに

紀伊半島の所々に、沸騰泉に近い高温の温泉が湧出している。含有成分が濃い温泉で、一般に二酸化炭素を多く含み、 ^3He のようなマントルに含まれる成分を含んでいる。これらの温泉は熊野酸性岩や大峰酸性岩の貫入の周辺や、それらに起因する岩脈に沿って湧出していることが多い。深発地震の震源の分布からフィリピン海プレートの沈み込みの深度60~30 kmのスラブの脱水との関係をすでに議論してきた(西村, 2000, 2001)。有馬温泉はスラブ上面の深さがほぼ60 kmの上部に位置し、白浜温泉も30 km程度の上部に位置する。しかし、これらの温泉には、潜在する岩脈や岩頸が示唆されていたが、地表踏査では見つかっておらず、また、精密な物理探査もなされていなかった。ただ、その源泉の含有成分の異常さから化学的な検討は多くなされていた(松葉谷ら, 1974; Nakamura and Maeda, 1961; Sakai and Matsubaya, 1977; Sano and Wakita, 1983)。

有馬温泉では最近東京、名古屋、大阪の大資本による源泉近くでの大規模な開発があり、本論文のまとめ時点では不完全ながら、有馬温泉の湧出構造を明確にして、開発に対する源泉保護のための資料を得るため調査を進めてきた(西村ら, 2006)。一方、白浜温泉でも湯崎港改修に伴う源泉への影響監視のため、白浜温泉の湧出構造を明確にする調査を行った(西村ら, 2008)。これらの源泉には共通した湧出構造が見出されたので順次報告したい。今回は地質調査と重力測定の部分をもとめ、有馬温泉地区では、まだ電磁探査がなされていないので、電磁探査を終えた時点で白浜温泉とともに電磁探査と放射能探査の結果を次回にまとめる。

2. スラブからの脱水による流体の性質

沈み込み帯でのスラブからの脱水は高温・高圧実験から推定されている(Tatsumi, 1989; 巽, 1995; 高橋, 2000)。その結果によると、深度60 km程度までに、海底で加水されたスラブ(主として蛇紋岩)から脱水し、超臨界の水がマントル中を上昇していくが、上昇途中のマントルに1,000°C以上の高温部が無く、マントルは部分溶融はしていない(Fig. 1)。

水はFig. 2に示すように、超臨界流体・亜臨界流体、気体、液体、固体の相を持っている。近年、水の超臨界・亜臨界の性質もかなり研究がすすめられている。

水は374°C、22.1 MPaの臨界点以上が超臨界の状態、水(液体)でも蒸気(気体)でもない超臨界水となる。この超臨界水は何処にでも忍び込む気体の性質(拡散性)と成分を溶かしだす液体の性質(溶解性)を持ち、かつ、その物性は連続にして大幅に変化できる特徴を持つ(碓屋, 2004)。臨界点より温度、圧の低い熱水を亜臨界水といい、優れた成分抽出と激しい加水分解作用がある。また、高温の温泉に多量含まれる二酸化炭素は水より低い31.1°C、7.38 MPaの臨界点を持ち、その

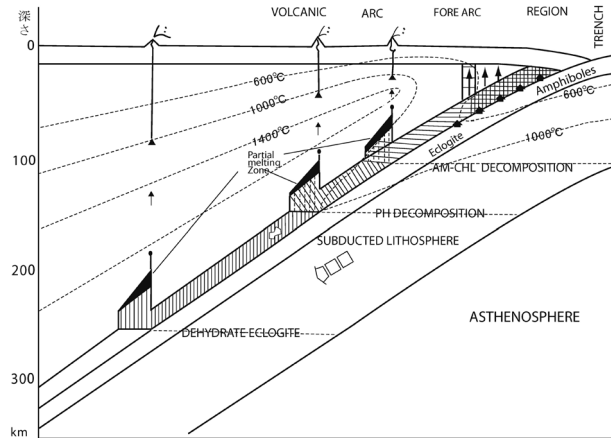


Fig. 1 Schematic diagram of super-critical H₂O derived from subducted slab (solid arrows) beneath the forearc region, that slab should be dragged downward on the slab by the subduction of oceanic lithosphere (Nishimura, 2000). Amphibole (AM) and chlorite (CHL) in the dragged hydrous peridotite layer decompose to release H₂O at around 110 km just beneath a volcanic front in normal, phlogopite (PH) decomposes at around 150 km, and lawsonite Peridotite dehydrated at around 250–300 km beneath the backarc side of volcanic arc, in normal subduction region. When the front of migration of H₂O from the hydrated peridotite reaches the region with the solidus temperature of hydrous peridotite. Partial melting takes place to produce initial magmas. Successive addition of H₂O to the region expands the partially molten zone upwards in which the degree of partial melting increases upwards. From the top of the partially molten zone a mantle diapir starts rising. The mantle diapirs must go through the region with temperatures higher than 1,300°C and stop rising to release primary magmas. It should be stressed that the solidus temperature at hydrous peridotite (1,000°C at depth shallower than 100 km) cannot be attained in normal subduction zone. It follows that no magma can be produced by partial melting of hydrous column beneath the forearc region.

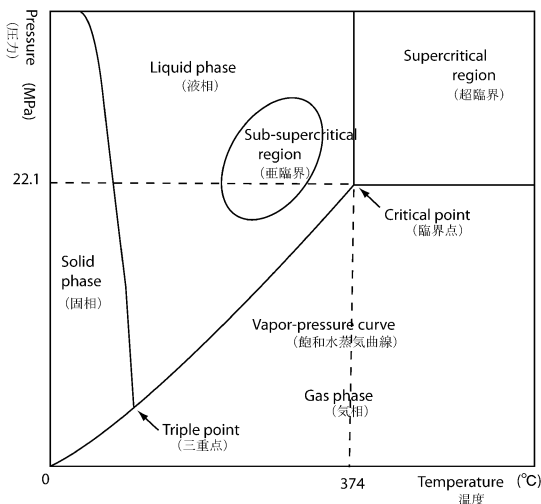


Fig. 2 Constitutional diagram of H₂O. Phase diagram of water

物性については詳細に調べられてきた。

これらの流体がマントルの中を上昇していき、地殻下部に至る。地殻下部には日本海が生成したときに地殻下部を再溶融してできた酸性岩の貫入岩体が存在する。この岩体の周辺には後の構造運動（テクトニクス）の動きによりの亀裂の多いゆるみ域が出来る。そこを流体が上昇し、更に深度ほぼ 14 km 以浅に存在する断層を通じてさらに拡散し、地殻表面に達する。その地殻上部での上昇の間に色々な割合で地下水と混合して、熱水や高温の温泉水が存在する（西村, 2000）。

3. 白浜温泉

3.1 白浜温泉での引張場の存在

白浜温泉の地質構造については佐藤 (1964)

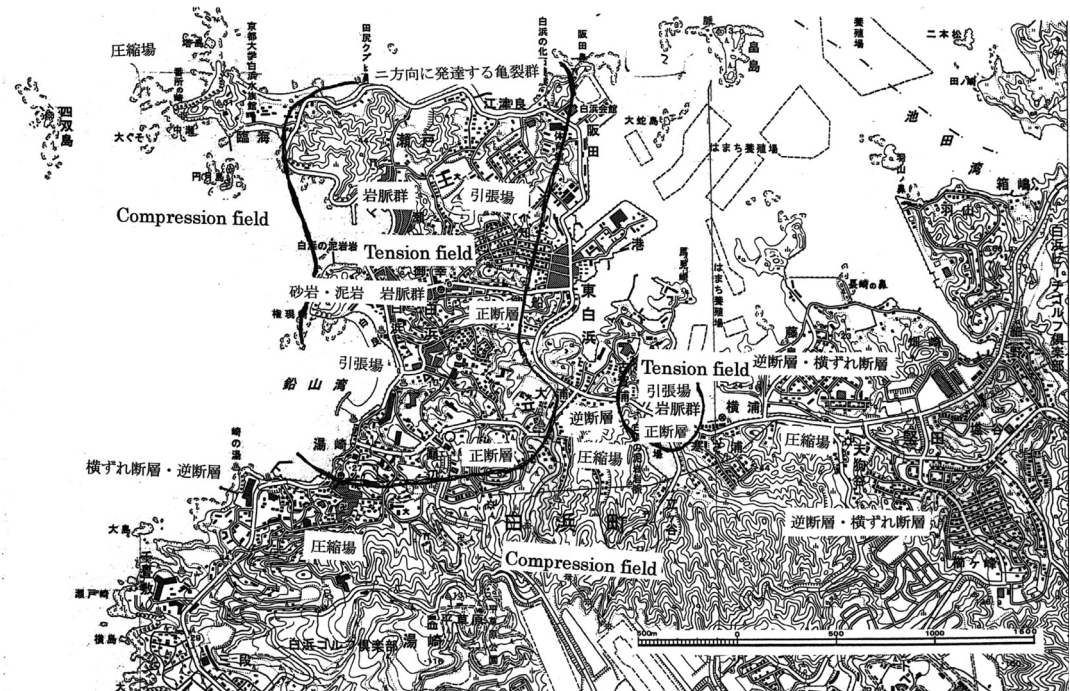


Fig. 3 Tensional and compressional field around Shirahama hot spring on reconsideration upon geological survey.

と原田・中屋（1999）にまとめられている。紀伊半島全体の地質構造は一般に沈み込みの影響による圧縮場である。しかし、部分的には白浜でのように、泥岩脈、正断層などにより、引張場の存在が知られている。今回南紀白浜の湯崎温泉・白浜温泉で引張場の範囲を特定する地質精査を行った（Fig. 3）。さらに湯崎港の東側には岩脈や岩頭の先にできる鉱床の存在が知られていた。この調査の結果、優勢な源泉はこの引張場域かその近傍に発達する断層に沿って湧出することが判った。

3.2 流紋岩質の潜在する岩脈・岩頭の検出

周辺の岩盤より密度が低い潜在する流紋岩質の貫入体を検出する方法を検討した。これは、岩石試料の測定によると周りの田辺層群より比重が0.2程度低い流紋岩が存在することによる。この程度の差があれば重力異常からその規模が推定できることから、重力測定を実施した。そのためには測点の標高が必要で、標高既知点（白浜町2,500分の1地図の多角測量、一部は航空写真測量による標高既知点）で、鉛山湾をとりまく湯崎地区を中心に密に選点した。この地域には重力異常の大局的傾向である和歌山県南部の東西方向に東上がりのブーゲー異常のトレンド（山本・志知, 2004）がある。この傾向を見積もるために粗く測点を配置した（Fig. 4）。各測点の緯度・経度はGPSによる単独測位の100回以上の平均とした。今回の測定では、緯度・経度および解析時に用いる平面直角座標はすべて旧日本測地系の値とした。

使用した重力計はラコスト重力計D-36であり、重力基準点から幾つかの測点を測り再び基準点に戻るループ法による比較測定によった。重力基準点は京都大学理学部地質学鉱物学教室にある国際基準点（重力値979707.27 mgal）とし、白浜町内での測定のため、現地基準点を国土地理院一等水準点9189（測点名BM9189：重力値979681.26 mgal）に置き、この両者の数回の比較測定により

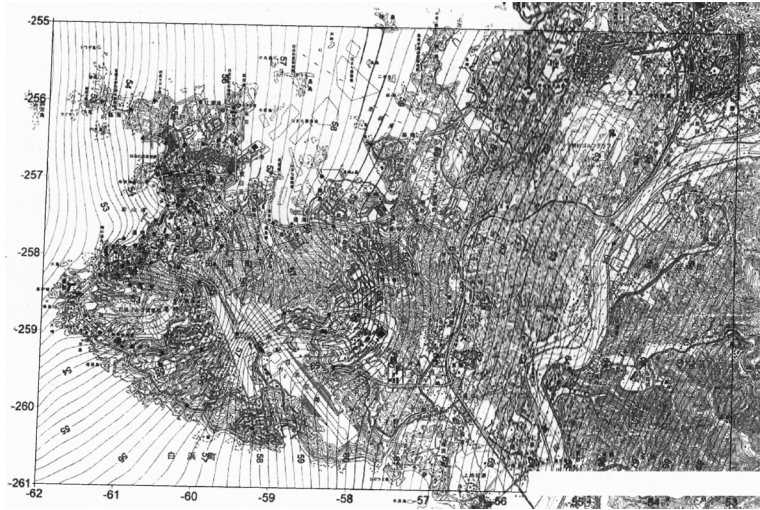


Fig. 4 Bouguer anomaly map around Shirahama town.
 ● : measurement station. line : iso-Bouguer anomaly line, each 0.2 mgal.
 X and Y figures are shown by the plane orthogonal coordinates.

重力値を決定した。

ループ法による比較測定では、ドリフトと潮汐補正を行っている。重力基準点の重力値を基準にループ法によりドリフト補正と潮汐補正を行い各測点の重力値 (g) を得る。地下構造の推定には重力測点の標高の違いや周辺の地形の影響などを除いてブーゲー異常 (BA) を求める。

回転楕円体上の重力である正規重力 (γ_0) は緯度 (ϕ) の関数である。測地基準系 1967 による正規重力式

$$\gamma_0 = 978031.85(1 + 0.005278895 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi) \text{ gal}$$

で計算した。正規重力に含まれる大気の影響を大気補正 (Atm) といい、

$$\text{Atm} = +0.87 - 0.0000965 H \text{ mgal}$$

で求める。ここに、H は標高 (m) である。

測点の標高の違いを補正することをフリーエア補正 (FA) という。正規重力の鉛直勾配は

$$\delta\gamma/\delta t = -0.3086 \text{ mgal/m}$$

であるので、FA = -0.3086 H mgal となる。

地形による重力への影響を補正するための地形補正值 (TC) を計算する。地形補正は桂ら (1987) の方法に従うが、測点近傍について 50 m メッシュ (国土地理院数値地図 50 m メッシュ標高) の地形データを用いる補正が出来るようにした改訂版プログラム (GKTC9750) を用いた。測点の周辺 50 km までの補正を行った。補正密度は 2.67 g/cm³ とした。

ブーゲー補正は測点の標高とジオイドとの間にある岩盤の質量の影響を補正することで、地形補正済みの無限平板を仮定してブーゲー補正值 (BG) を BG = 2πGρH で計算する。ここに、G は万有引力定数、ρ は岩盤の密度である。補正密度は地形補正と同様に 2.67 g/cm³ とした。これらの補正を行ってブーゲー異常値 (BA) は

$$\text{BA} = g - (\gamma_0 + \text{FA}) + \text{Atm} + \text{TC} - \text{BG}$$

となる。得られたブーゲー異常図を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 にみるブーゲー異常値の分布は、西から東へ値が増大する大局的傾向がある。この傾向を

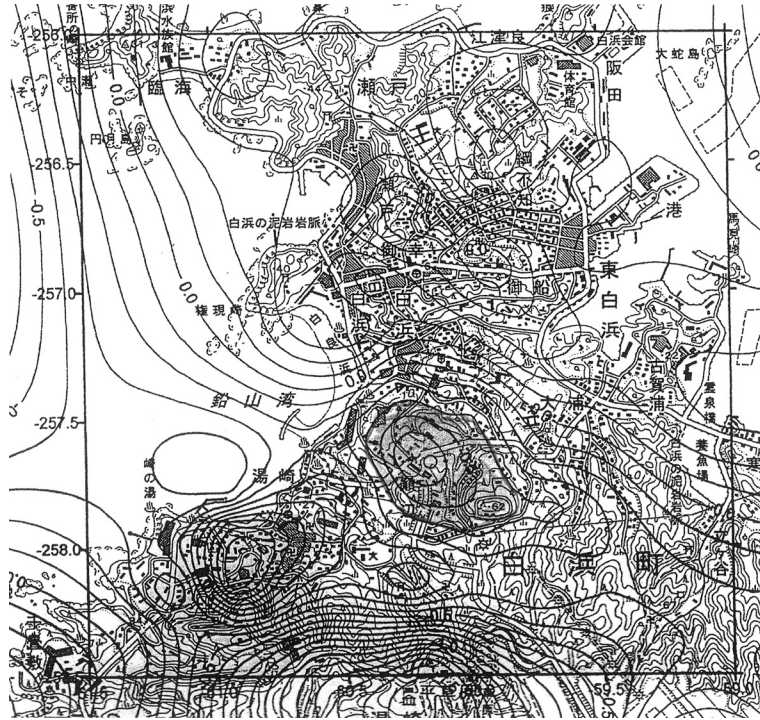


Fig. 5 Residual Bouguer anomaly map around Shirahama hot spring area.
Line : iso-residual Bouguer anomaly line, each 0.1 mgal. A low-density intrusion is shown in mesh area.

測定値から最小二乗法で求めた。この値は既知の値とほぼ一致するので、この傾向を差し引き残渣ブーゲー異常で地下構造を推定することとした。

なお、推定されたブーゲー異常値の傾向は方位角 $+90.586^\circ$ 、増加率は 1.606326 mgal/km であった。

残渣ブーゲー異常の湯崎・白浜地区の部分を拡大して、Fig. 5に示す。このことから、網目で囲まれたところに貫入岩脈が推定できる。70°C以上の高温の源泉がこの推定された貫入岩の周囲を囲むように分布をする(中央温泉研究所, 1995, Fig. 6).

4. 有馬温泉

4.1 有馬温泉の金泉の分布

有馬温泉の金泉については、松葉谷

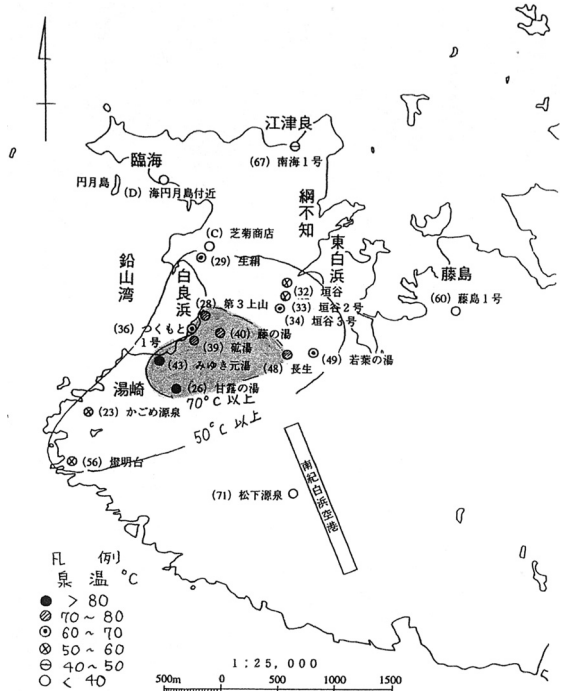


Fig. 6 Iso-temperature map of hot springs at Shirahama. Over 70°C hot springs are surrounding a low-density intrusion.

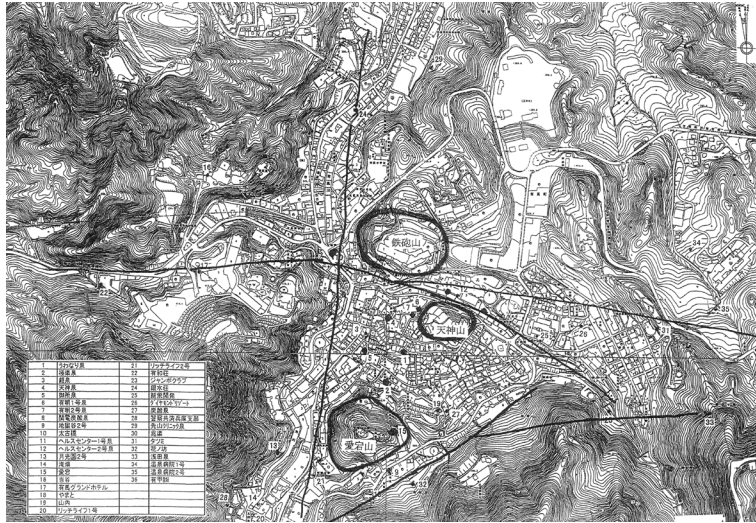


Fig. 7 The distribution of "Kinsen (Golden color hot springs)" at Arima with some igneous stocks of "Atago-yama", "Tenjin-yama" and "Teppo-yama".

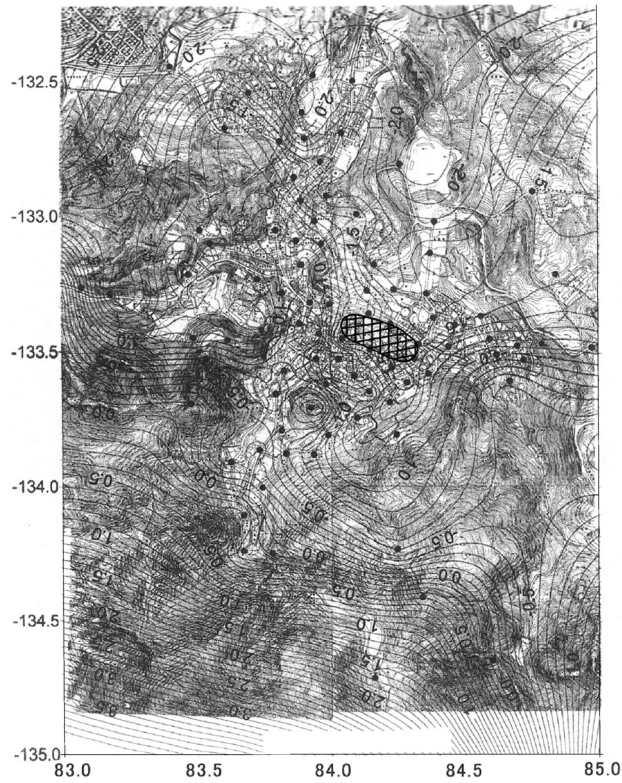


Fig. 8 Bouguer anomaly map in Arima hot springs area.
 ● : measurement station. line : iso-Bouguer anomaly line, each 0.1 mgal.
 A low-density intrusion is shown in mesh area.
 X and Y figures are shown by the plane orthogonal coordinates.

(2009) の論文があるが、我々は有馬温泉の金泉は、強塩類泉で、塩濃度は海水のほぼ 2 倍の含有量、 ^3He の存在、高濃度の二酸化炭素、高濃度の Ra, Rn を含有していることなどから、マントルの成分を溶かしていると考えている。なお、有馬の深部での沈み込みのスラブの表面の深度は約 60 km である (弘瀬ら, 2007)。

愛宕山の周辺に高温の金泉が分布する (Fig. 7) と言われていた。愛宕山は引っ張りの場であり東側には天神山の丘、さらに鉄砲山の丘があり、愛宕山、天神山と鉄砲山の西は引っ張りの場と見られる。この 3 つの丘が貫入岩の岩脈や岩頸である可能性探査するために、白浜温泉同様に重力測定をした。

4.2 重力測定

重力測定は全く白浜温泉と同様におこなった。有馬地区には国土地理院の一等水準点は分布しないので、現地の基準点を温泉寺の駐車場の隅に設けた。測点分布を Fig. 8 に示す。

白浜温泉と同様に各測点のブーゲー異常値を求めた (Fig. 8)。この地域では、南部の六甲花崗岩は比重が大きく、その傾向が見られるが、全体として大局的傾向は認められない。

貫入岩体の存在は、地表地質・地形などからみて、愛宕山、天神山、鉄砲山の 3 つの丘陵地であろうと推定した。また、もっとも大きいゆるみ域 (tension field 引張場であるが、貫入岩体による押し上げの場であるので特にゆるみ域とした) は土壤空気の高放射能、かつ、高温の金泉の分布域であると考えた。ブーゲー異常からみて、局部的比重分布が複雑な地域がこれに当ることがわかった。さらに、鉄砲山は周辺の比重と区別できず、その貫入岩体の存在がみつからなかった。愛宕山は正のブーゲー異常で貫入岩体の存在が明確であるがその比重は六甲花崗岩と同じである。天神山には負のブーゲー異常で比重の低い貫入岩体の存在が Fig. 8 の網目で囲む所に推定できた。その比重は流紋岩質岩の値で、貫入時期が一番遅く、この岩体の周辺にはゆるみ域の存在が示唆される結果になった。高温の金泉の源泉の分布は、天神山の南・西・北側を囲むように存在することから、天神山が高温の金泉の分布と最も深い関係があることが示唆された。

5. 火山フロントの外部に存在する 非火山性の地熱・高温泉

西南日本では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う深発地震の震源の深さは 60 km より浅い (Fig. 9; 弘瀬ら, 2007)。火山フロントの存在が認められない。深発地震面の深度が 60 km 以浅の上部に、紀伊半島、四国では高温の温泉が自噴や浅い掘削で得られてい

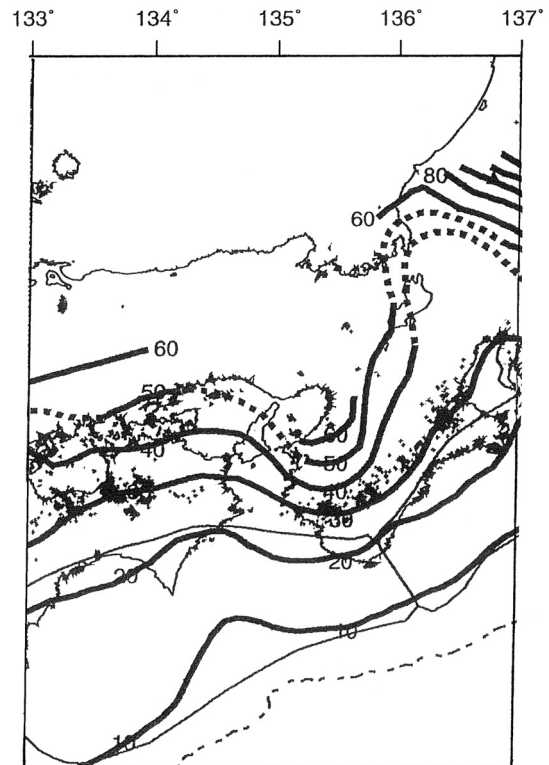


Fig. 9 Depth contour map of the upper boundary of the Philippine Sea Slab with intervals of 10–20 km (modified from Hirose *et al.*, 2007).

る。その温泉の分布に地質構造を重ねると、熊野酸性岩類の本体の周辺や、酸性岩類の岩脈、砂岩脈に付随することが多い。本宮の近くの湯の峰温泉も新エネルギー・産業技術総合開発機構の地熱調査(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1993)によれば、重力測定で潜在する熊野酸性岩の周辺から湧出している。

これらの温泉は、マントル由来の成分を含有している。すなわち、沈み込みのスラブから脱水した超臨界・亜臨界の水が、マントルから幾つかの成分を溶かし出し、上昇して、地殻下部に至り、日本海の生成時に地殻下部を部分溶融したマグマが固結した岩脈などの貫入岩体の周辺に出来たゆるみ域を上昇し、地殻中の直下型地震の活断層(深度 14 km 以浅)の横ずれ断層に乗り換えて、断層に沿って湧出していることが判読できる。

引用文献

- 中央温泉研究所 (1995): 白浜温泉資源調査報告書, 104 p.
- 原田哲朗, 中屋志津男 (1999): 温泉, 紀伊半島の地質と温泉. Urban Kubota, **38**, 42-49.
- 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭 (2007): Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定. 地震 **2**, 60, 1-20.
- 碓屋隆雄 (2004): 超臨界流体反応法の基礎と応用. CMC テクニカルリブラリー 172, 256 p., シーエムシー出版, 東京.
- 桂 郁雄, 西田潤一, 西村 進 (1987): KS-110-1 標高データを用いた重力の地形補正計算プログラム. 物理探査, **40**, 117-119.
- 松葉谷治 (2009): 有馬型温泉とはいかなる定義のものか. 温泉科学, **59**, 24-35.
- 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.
- Nakamura, H. and Maeda, K. (1961): Thermal waters and hydrothermal activities in Arima hot spring area, Hyogo Prefecture. 地質調査所月報, **12**, 489-497.
- 西村 進 (2000): 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 (2001): 紀伊半島の温泉とその熱源. 温泉科学, **51**, 98-107.
- 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, 城森 明 (2008): 南紀白浜温泉の地質構造. 日本温泉科学会第 61 回大会講演要旨.
- Sakai, H. and Matsubaya, O. (1977): Stable isotopic studies of Japanese geothermal systems. Geothermics, **5**, 97-124.
- 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., **94**, 4697-4707.
- 佐藤幸二 (1964): 紀伊白浜温泉の地質と温泉. 地質学雑誌, **70**, 110-126.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1993): 平成 3 年度地熱開発促進調査データ処理報告書, No. 37 本宮地域.
- 高橋正樹 (2000): 島弧・マグマ・テクトニクス, 322 p., 東京大学出版会, 東京.
- Tatsumi, Y. (1989): Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas. J. Geophys. Res., **94**, 4697-4707.
- 巽 好幸 (1995): 沈み込み帯のマグマ学. 186 頁, 東京大学出版会, 東京.
- 山本明彦・志知龍一 (2004): 日本列島重力アトラス—西南日本および中央日本—. 東京大学出版会, 東京.