



近畿地方の高温・高塩分の温泉の研究の進め方

西村 進¹⁾

(平成 30 年 11 月 28 日受付, 平成 30 年 12 月 27 日受理)

Some Implications on the High Temperature and the Principal Components on the Hot Springs in Kinki District

Susumu NISHIMURA¹⁾

要 旨

温泉科学の研究の分野で、現在の間われている課題の一つは地球内部での「水」の大循環の解明である。近畿地方は日本列島の発達時に太平洋プレートとフィリピン海プレートの両者が重なる場所であり、その両スラブの「水」の循環を解明することが必要である。太平洋プレートの火山活動の研究は、スラブからの脱水がその解明に大きく関わった(巽, 1995)。しかし、それだけではなく、地球内部に貯蔵できる「水」の質量は海水の数倍と見積もられる。地球表層に存在する水は岩石と反応して含水鉱物を作る。この含水鉱物はプレートの沈み込みにより、地球深部のマントルへ運ばれる。マントルは高温高压の環境であるので、沈み込みに伴う温度や圧力の上昇によってある深さで含水鉱物が分解・脱水する。もし含水鉱物が分解せずに安定して存在できる温度と圧力条件がわかれば、水が地球内部のどの深さまで運ばれるか理解することができる。この数年、この方面の研究がなされるようになった(笠原ほか編, 2003, Nishi, *et al.*, 2014)。

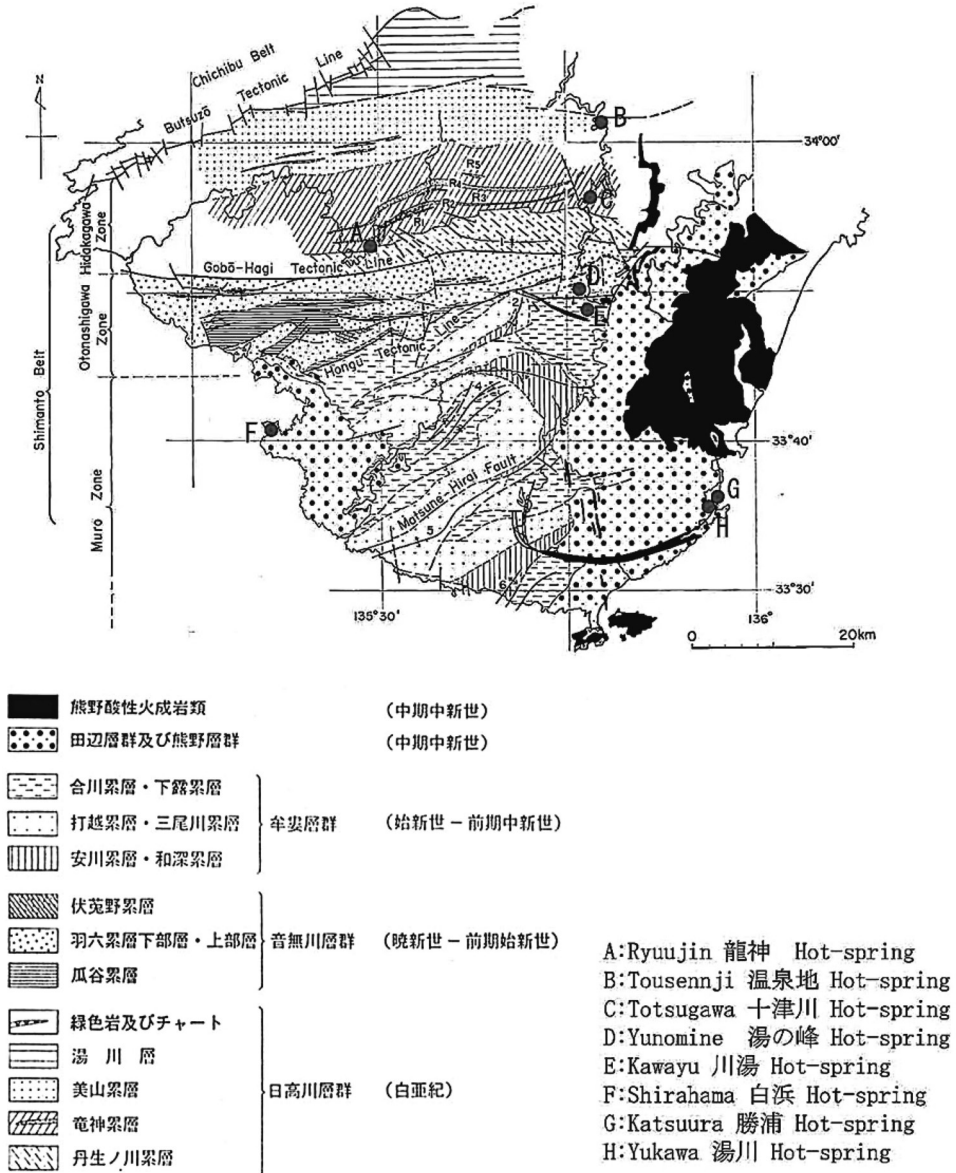
自然界でこのような現象を研究できれば幸運と考え、有馬温泉・南紀白浜湯崎温泉を対象に泉源の地質構造の物理・地質探査をした。また、有馬温泉の金泉の改修工事に携わり、地殻深部や上部マントルでの「水」の流れの解明に励んできた(西村, 2011)。

紀伊半島には高温・高塩分の温泉が分布しており(第 1 図参照)、基盤岩である花崗岩・熊野酸性岩類や関連する岩脈・岩頸との関係などの研究を再度進めたい。さらに下部地殻・マントルの中には超臨界の炭酸ガスが多く存在する可能性が示唆されている。「炭酸ガス」と非常に臨界温度・臨界圧力が似ている「ラドン」も存在する。このことから研究の手段としては放射能探査が非常に有効と考える(Nishimura, *et al.*, 1968; 碓屋, 2004)。

次に、2018 年 6 月 18 日に発生した「大阪府北部地震 (Mjma6.1/Mw5.5)」によって、この十数年、金泉保護のため観測を続けている有馬温泉で興味深い観測結果を得たので、ここで紹介したい。

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. ¹⁾ NPO Think-Tank Kyoto Institute of Natural History, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyou-ku, 606-8305, Japan.

キーワード：水の大循環，超臨界，有馬温泉天神山，大阪府北部地震



第1図 紀伊半島四十万帯の地質構造(徳岡ら, 1981に加筆)と高温・高塩分濃度の温泉(●)の分布。

温泉名	泉質	湯温	湧出量	pH
龍神温泉	炭酸水素塩泉	48℃	約 103ℓ/分	7.8
温泉地温泉	単純硫黄泉	60℃		
十津川温泉	Na 炭酸水素塩泉	78℃		
湯の峰温泉	含硫黄炭酸水素泉	92℃	約 30ℓ/分	
川湯温泉	単純泉	73℃		

1. はじめに

日本温泉科学第 71 回大会において「日本温泉科学会特別賞」を授与していただき身に余る光栄です。温泉科学に寄与する研究は主として故初田甚一郎先生のご指導の物理探査の多くの手法を基にして、学内外の研究者グループで常に手法の開発・改良を試み、できる限り新しい解を総合的に議論してまとめてきたものである。特にこの 25 年ほどは近畿地方の高温・高塩分の城崎温泉、南紀白浜湯崎温泉、有馬温泉の調査を集中的に行った。これらの温泉は非常に古くから開湯されてきて、多くの温泉地の熱源の研究成果は「地球の水の大循環」の研究に役立つものであると考えている。

2. 近畿地方の温泉による研究

日本列島の中で系統的に研究することができたのは、城崎温泉を中心とする火山活動に伴う温泉から始まる。次に南下して、紀伊半島に散在する温泉が研究の対象となる。(第 1 図)。これらの温泉は古くから開発されており、街の中心部に探査の測点を追加して置きにくく、機会があれば 1 点でも補測することにした。

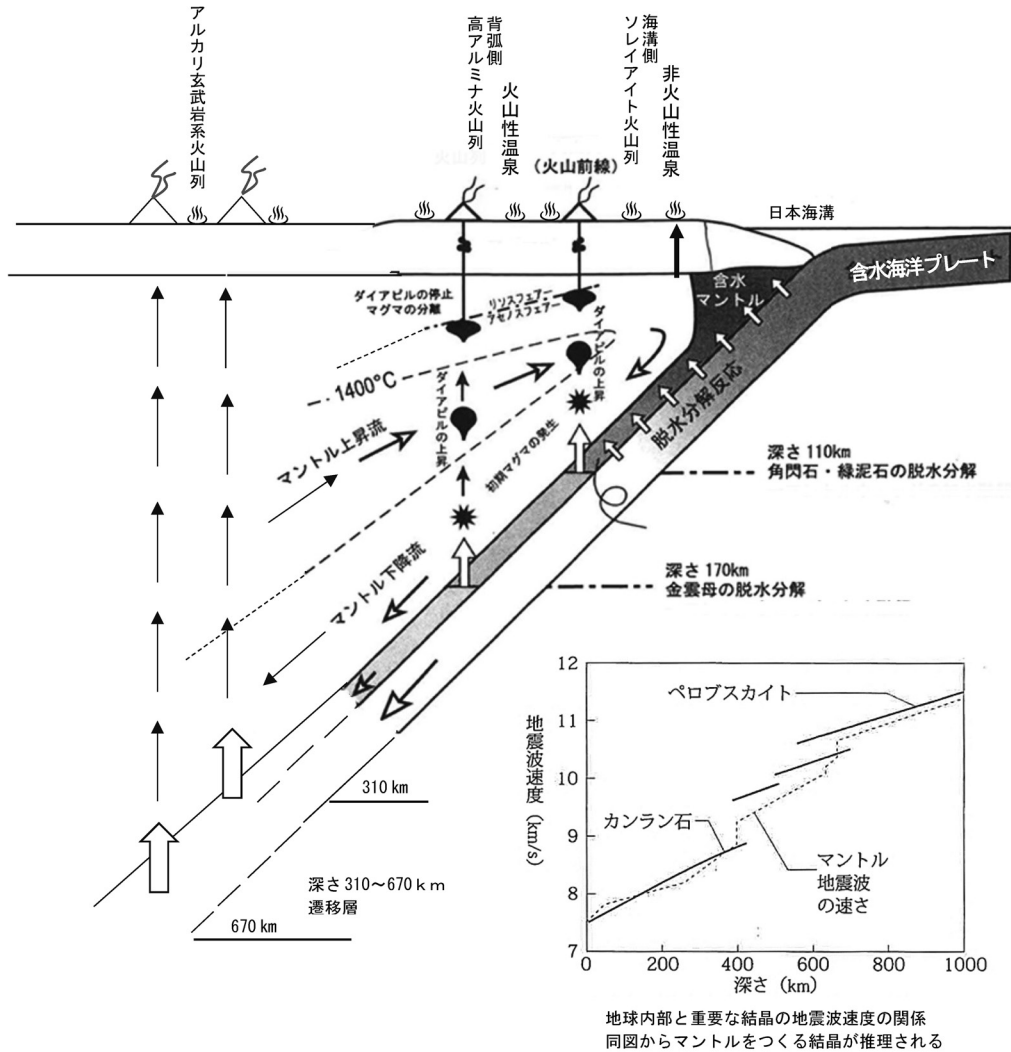
城崎温泉は新生代のアルカリ玄武岩系の火山活動と関係がある。火山活動の研究を重視して考察し、そのマグマは深部でできるものと考え、太平洋プレートの沈み込みのスラブの脱水による融点の低下との関係から考慮して、フィリピン海プレートの沈み込みスラブとは関係がないと推定した(第 2 図)。

南紀白浜湯崎温泉をはじめとする紀伊半島に散在する高塩・高温泉は、第三紀末から新生代初期に地殻下部や上部マントルの部分溶融による酸性岩マグマの貫入後、地殻深部に達する鉛直の断層やそれに付随する緩み域を上昇する砂岩脈や酸性岩の岩脈・岩頸に伴うクラックにより地殻深部から上昇する熱水に伴う高塩・高温泉の泉源が散在していると推測した。探査手法は花崗岩バソリスや、酸性岩脈、岩頸の貫入状態を知る必要があるのでできる限り密に測点を取り、重力測定を試みたい。

有馬温泉の地域には日本列島の成立に関係する有馬・高槻構造線と地殻に深く発達する山崎断層の三木断層の交点にあたり、小地域が急激に上昇する高位段丘面が観測されている。それに伴う緩み域に超臨界の炭酸ガスを伴い突沸する高塩分の有馬温泉の金泉がみられる(第 3 図, 第 1 表)。この地域の探査は地表地質は勿論、重力測定や電磁探査、放射能探査で、細かく測点を置き、今までの温泉掘削のデータなどを検討してまとめ、研究を進めてきた(たとえば第 4 図)。この延長の調査がまだ必要と考える。

3. 大阪府北部地震の発生で有馬温泉金泉の観測点にどのような現象が起こったか

2018 年 9 月 5 日～8 日に別府市公会堂で第 71 回日本温泉科学会が開催され、「近畿地方の高温・高塩分の温泉の研究の進め方」と題して講演することになった。ところがその構想を組んでいる最中の 6 月 18 日 8 時頃に非常に奇異に感じた地震が起こった。この数年は非常に災害が多かったので少し麻痺していたからか、ドンと非常に大きく突き上げる地震を感じたが、あとは何の感じもない非常に奇妙な経験をした。地震後の 7 月 25 日に有馬温泉天神山の 3 地点に置いている観測孔の水位のデータを回収してみると非常に興味のある結果を得た。



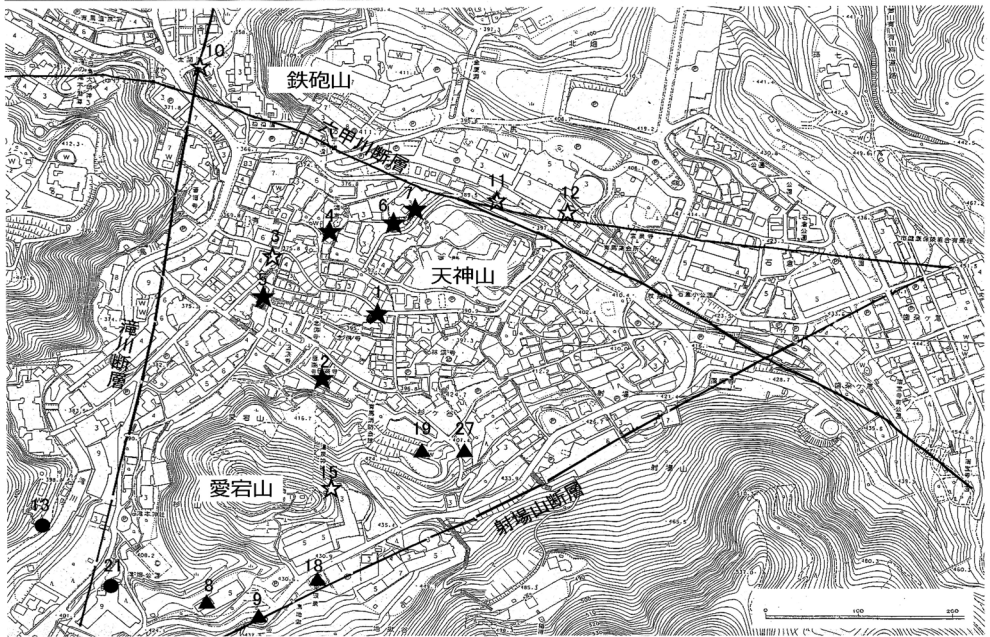
第2図 太平洋プレートの収束帯での H₂O の循環の考え方

マンテルは上部マンテル (深さ 30-310 km), マンテル遷移層 (310-660 km) 下部マンテル (660-2900 km) に区分され高压型含水マグネシウムケイ酸塩鉱物 (DHMS) がマンテルの主要鉱物と考えられる (Nishi, *et al.*, 2014). 以前, 鳥海 (2008) により P 波速度の変化から 310-660 km 深度で含水鉱物の変化がみられることが示された. 巽 (2011) は含水鉱物角閃石や金雲母などの安定性から東北弧などの収束帯の火山活動の構造を示している. 火山性温泉は火山活動に付随するので, それらのモデルを用い示した. その上山陰に東西に並ぶアルカリ玄武岩系の単成火山はマンテル遷移層の上部でみられるので, これらのことを説明するモデルをここに提案する.

3.1 大阪府北部地震

「大阪府北部地震」防災科学技術研究所によると

- 発生 2018年6月18日 7時58分34.1秒 (JST)
- 震央 北緯34度50分36秒 東経135度37分18秒 付近
- 震源の深さ 13km



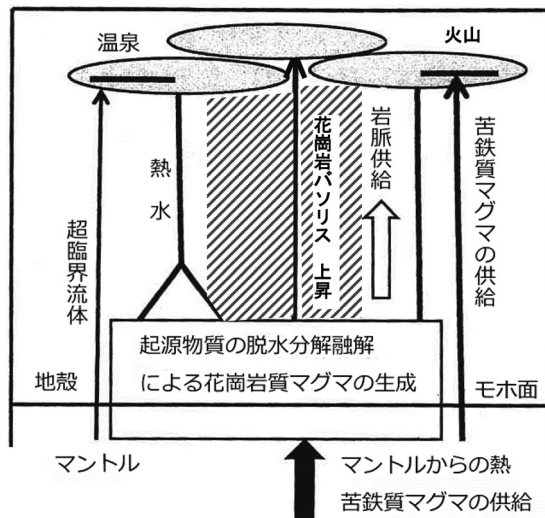
泉源分類	泉源番号	泉源名	温度 °C	深度 m	湧出量 L/min	掘削年	泉質	揚水方法
★ 強塩高温泉	1	妬温泉	94	185	38	1955	含鉄・ナトリウム塩化物	ラッパ管
	2	極楽泉	94	223	14	1953		
	4	天神泉	98	206	38	1948		
	5	御所泉	94	182	38	1951		
	6	有明1号泉	90	277	48.5	1955		
	7	有明2号泉	97	270	63	1953		
	☆ 中温泉	3	銀泉	56	67	13		
10		太閤橋	54	237	94.5		含鉄・ナトリウム塩化物	エアリフト
11		ヘルセンター1号泉	63	220	10		ナトリウム塩化物	ラッパ管
12		ヘルセンター2号泉	30	330	12		ナトリウム塩化物	エアリフト
15		愛宕(簡易保険)	48	300	15		含塩化土類強塩泉	-
● 低温泉	13	月光園2号	37	164	24		含食塩土類炭酸鉄泉	水中ポンプ
	21	リッチライ72号	25	6	-		二酸化炭素ナトリウムカルシウム塩化物泉	くみ上げポンプ
	24	銀水荘	29	300	29		二酸化炭素ナトリウムカルシウム塩化物泉	ラッパ管
▲ 単純炭酸泉	8	関電炭酸泉	15	2	21		単純二酸化炭素泉	自然湧出
	9	地獄谷2号	17	-	-			
	18	栄鉱泉	19	-	-			
	19	泉科学	20	5	89			
	27	炭酸公園	19	16	25			

第 3 図 有馬温泉中心部は、色々な調査の結集として、天神山に熱水の上昇の中心があり、滝川断層（主に鉛直の断層で南北に延びている断層）と、六甲川断層（東西方向で急傾斜逆断層）、最も新しい六甲変動でできた西北西-南南東の高角度の逆断層の三角形の中に主な温泉が分布している。

規模 気象庁マグニチュード Mjma 6.1 / モーメントマグニチュード Mw5.5
 余震 余震の回数は震度 1 以上 56 回 (8 月 10 日午前 9 時現在) で最大余震は 6 月 19 日 0 時 31 分 25.0 M4.1 他は M3 以下で非常に単発の大きな地震であった。
 被害 死者 5 名 負傷者 454 名、住居の全壊 16 棟半壊 472 棟程度

第 1 表 天神山で得られた地質調査に関するメモ

ボウリング No.	段丘堆積面の 標高(m)	高角度の断層 (m)	水平で空洞の標高 (m)	
B-1(M-1)	403.5	401~395	396 黄銅鉱・黄鉄鉱	宙水
A-1(M-2)	406.3		369~387 褐色	逸水
A-2	406.1		397 茶暗黄色	
A-3	406.7		398.3~396.5	逸水
A-4	408		398~396	399 逸水
A-5	408.3		395.7	水位
A-6	410		398~396	空洞
A-7	405.9(地表)	高角度の断層中 399 まで 花崗岩を含む断層粘土		
B-2		有馬川沿いの北落しの 断層の上盤(花崗岩)		
B-3	410.4	408~400 急傾斜断層	398.7(水平断層)	逸水
B-4		有馬川沿いの断層の下盤 (流紋岩側)		
B-5	408.5	407, 408~400 急傾斜断層	400 ぐらいで逸水	
B-6	403.8	403.8~404 急傾斜断層	397.5~396.9 空洞	
B-7	406.9		397.3 以深やわらか	
B-8	407.6	402 粘土断層	397.9~397.1 空洞	
B-9(M-3)	403.4		397~395 断層粘土	逸水
B-10	400(地表)		347.8 空洞	
B-11	402.5	394, 390, 394~399 断層		

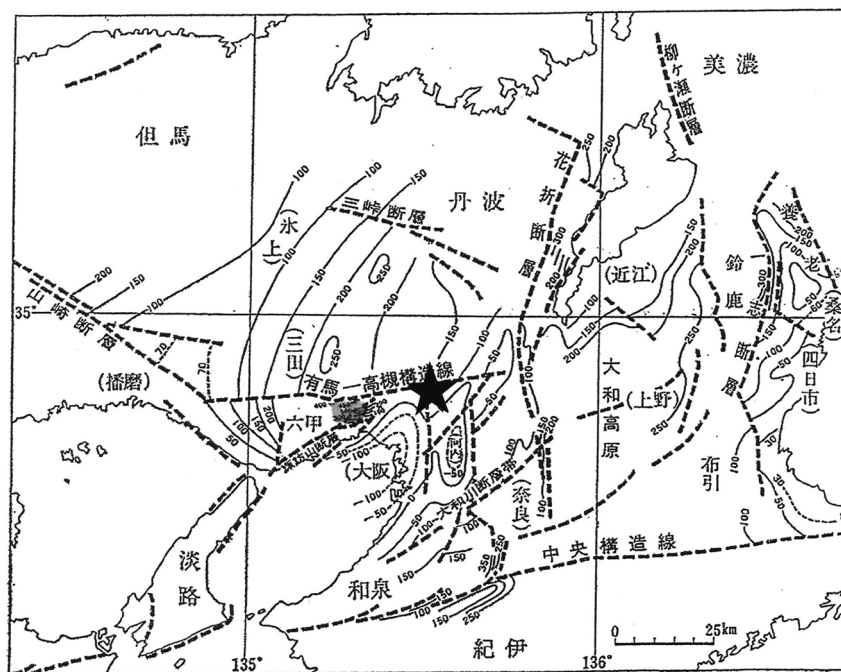


第 4 図 上部マントル，下部地殻（付加体）でのマグマの生成域と超臨界流体域の模式図。花崗岩体（バソリス）は上昇あるので下降しない。付加体と花崗岩は鉛直面で接する。

ただし、地震保険の支給額は 10 月 11 日時点で 946 億円を超え、東日本大震災、平成 28 年熊本地震に次いで第 3 位。

ブロック塀の倒壊で登校途中の小学生が下敷きになったニュースがあった。木造家屋の倒壊が目立ったが特に瓦屋根の棟の被害が目立った。

本震は西北西・東南東を圧縮面とする逆断層型、その後の余震活動では地震活動域の全域全般で横ずれ断層型北側で逆断層型というように混在した型の地震である。政府の地震調査会によると、発震機構、及び地震活動の分布から震源断層は南北 2 つに分けられ、北側は東傾斜の逆断層、南側は南東傾斜の右横ずれ断層だと推定される。これは有馬高槻構造線と山崎断層群の三木断層の交点で深部まで発達した 13km 深度で起こった地震である。藤田 (1983) が近畿地方の高位段丘面の高度分布をまとめているが、その高度分布でも六甲変動のしわ寄せのところに発生したことがわかる (第 5 図)。



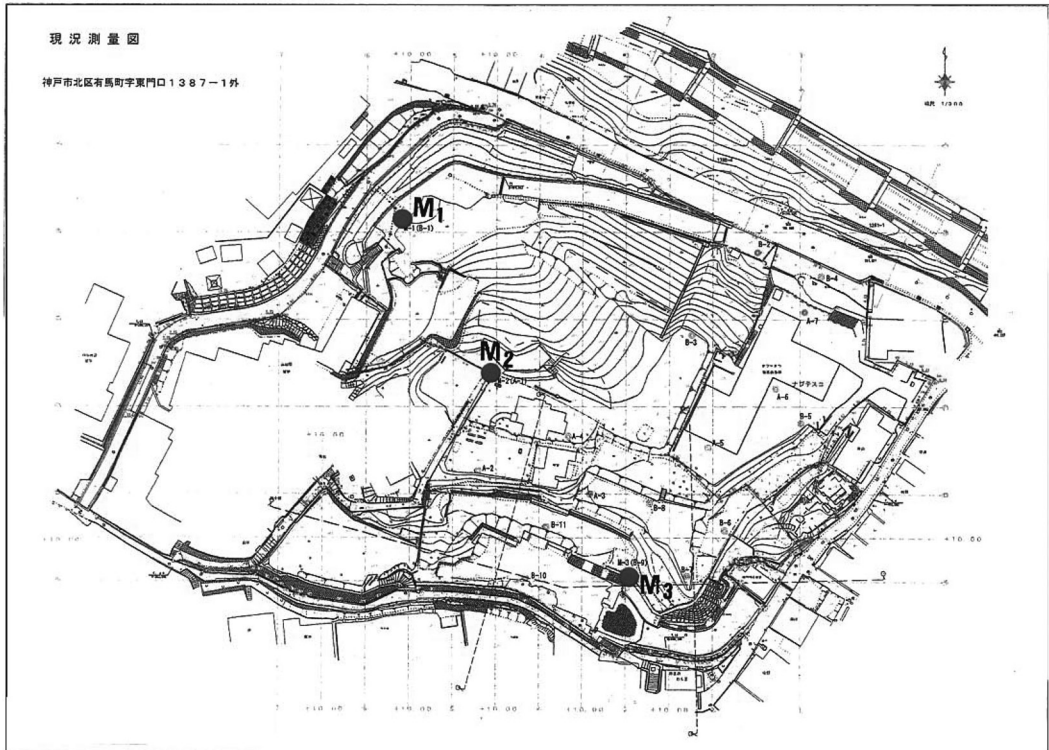
第 5 図 近畿における高位段丘面の高度分布 (藤田, 1983 に加筆。★印: 震源)

3.2 天神山の観測点

第 3 図のほぼ中央にある天神山の部分を拡大した地図を第 6 図に示す。天神山にはこの 6 年ほど前から大規模開発の計画があり、周辺には有馬温泉の主要金泉 6 本が存在し、そのうち敷地に隣接して有明 1 号, 2 号, 天神泉源がある。

開発計画のための地質調査では、深度 15m 程度の 18 本の調査ボーリングがなされた。地質調査の検査にすべて立ち合い詳細に検討し、その要約を第 3 表に示す。

この天神山の地質の特徴は、ほぼすべての地表近く標高 400m に高位段丘面がある。この平面は水平に近いがわずかな南落としての傾斜を持つ。M-1 の観測孔は標高 400m の段丘面は現在



第6図 天神の丘（有馬層群に属する溶結凝灰岩）での開発予定がありその地質調査のためのボーリング3孔を観測孔として水位・温度を測定している箇所

削られて欠如し、M-2の地質は有馬層群の流紋岩質の溶結凝灰岩が変形や断裂を受けることがなく存在し、この丘のわずかながら一番高地にある、常にその地下水位は地下370mのところ、今回のようにM-1とは異なる水位を示すことがある。M-3では段丘面は浸食され、現在では存在しない。

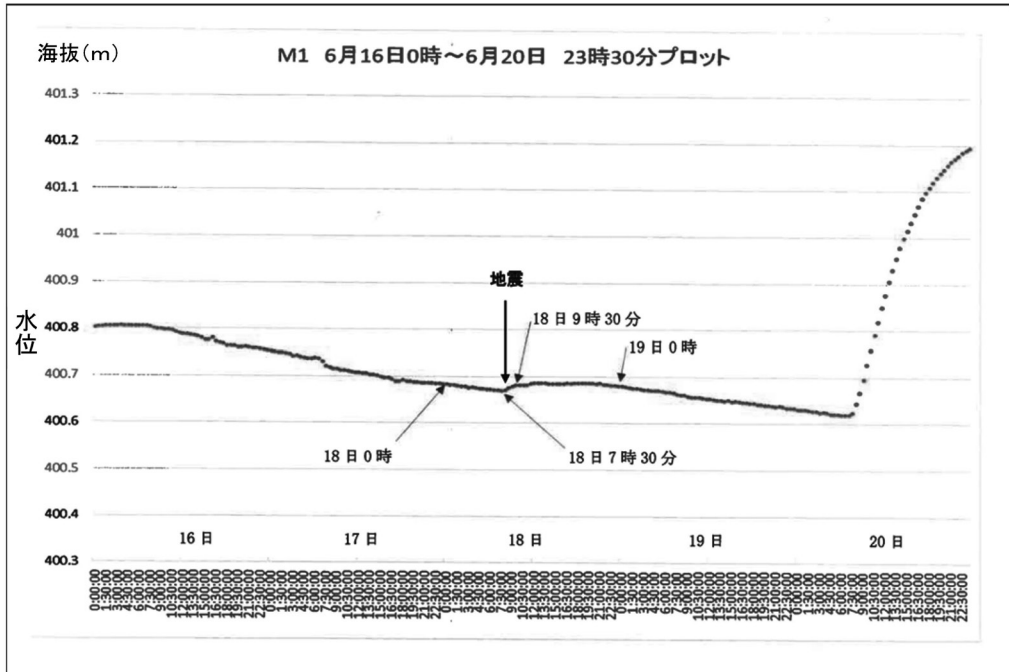
6月16日0時から6月21日までのM-1、M-2、M-3の記録をそれぞれ第7図1、第7図2、第7図3に示す。使用した水位計はS&DL mini model 14800である。第7図の縦軸は水位の記録で、第7図1、第7図2は同じスケールであるが、第7図3の縦軸は同じスケールでなく拡大している。種々なデータを集め、現在解析を進めているが、結論には至らないので、データのみ提出し、今までの種々のデータを重ねて検討し報告したい。

謝 辞

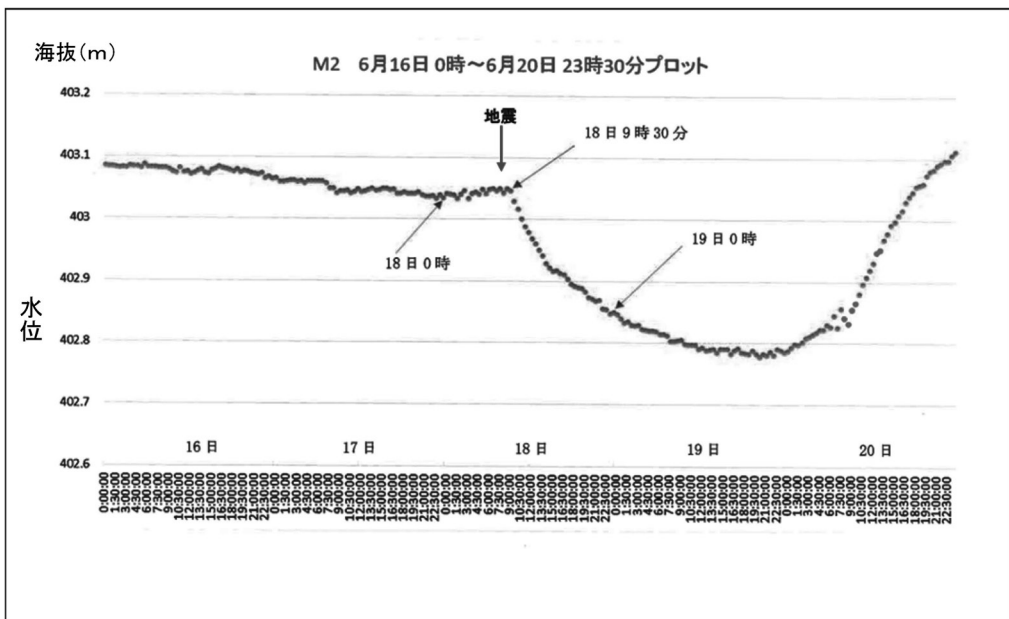
講演内容の大半を当日変更し、申し訳ないがそれほど演者の興味を与えた問題で、ひいては有馬温泉の保持の今後に非常に役立つと考えた結果であり、大会関係者の方々に感謝する。また、急に纏めたもので、温泉科学会編集員の方々にいろいろご迷惑をかけたことにも感謝します。

引用文献

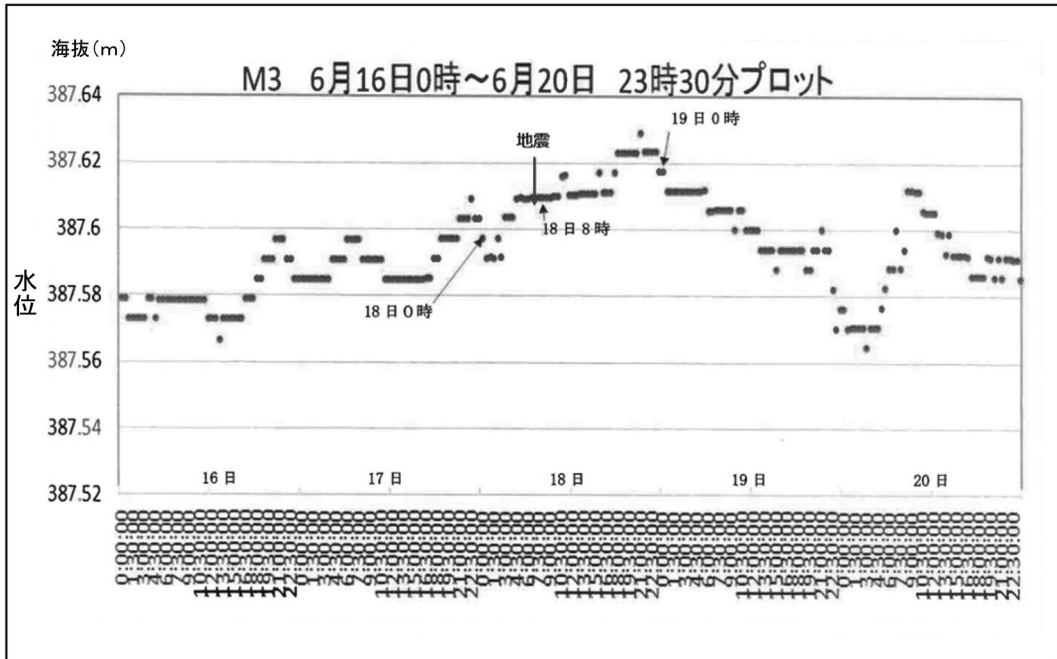
- 藤田和夫（1983）：日本の山地形成論，467頁，蒼樹書房，東京。
 碓屋隆雄監修（2004）：超臨界流体反応法の基礎と応用，258頁，シーエムシー出版，東京。
 笠原順三・鳥海光弘・河村雄行編（2003）：地震発生と水－地球と水のダイナミクス，393頁，東



第 7 図 1 「大阪府北部地震」とその前後の M1 の水位変化



第 7 図 2 「大阪府北部地震」とその前後の M2 の水位変化



第7図3 「大阪府北部地震」とその前後のM3の水位変化

大出版, 東京.

Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., Tange, Y., Nishihara, Y., Fujino, K. and Higo, Y. (2014): Stability of hydrous silicate at high Pressures and water transport to the deep lower mantle, *Nature Geoscience* 7 224-227,

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.

Nishimura, S. Hatuda, Z. and Asayama, T. (1968), A trial method of determining Uranium and Thorium Content in Rocks by the Radioactive Measurements (2), *NSJ-Tr* 103.

巽 好幸 (1955) : 沈み込み帯のマグマ学, 187 頁, 東大出版, 東京.

巽 好幸 (2011) : 地球変動の話, 227 頁, 河出書房.

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・中条健次・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図幅), 69 頁, 地質調査所.

鳥海光弘 (2008) : 地球システム学のすすめ, 230 頁, NTT 出版, 東京.