
原 著

有馬温泉炭酸泉の湧出に関わる射場山断層

益子 保¹⁾, 大塚晃弘¹⁾, 高橋孝行¹⁾, 安藤 大²⁾

(平成 23 年 5 月 2 日受付, 平成 23 年 5 月 18 日受理)

Ibayama Fault in Relation to Occurrence of Carbonated Springs in Arima Spa, Hyogo Prefecture

Tamotsu MASHIKO¹⁾, Akihiro OTSUKA¹⁾, Takayuki TAKAHASHI¹⁾ and Dai ANDO²⁾

Abstract

In Arima Spa, Hyogo Prefecture, there are two types of hot springs called Kinsen and Ginsen : the former is characterized by reddish-brown cloudy water with high temperature and high salinity, and the latter is transparent water with low temperature and low salinity. Many of the spring sources in Arima Spa are found in the Upper Cretaceous Arima Group. Among them, carbonated springs, which are categorized as Ginsen, occur together with carbon dioxide natural springs along the Ibayama Fault, which is in the western extension of the Arima-Takatsuki Tectonic Line.

Although the location and characteristics of the Ibayama Fault within the Arima Spa area are not clearly known, various surveys conducted in the central area of Arima Spa for the preservation of spring sources associated with construction of resort facilities yielded the following findings.

1) The Ibayama Fault has formed a clayey zone across a wide area in the Arima Group, which constitutes the studied area.

2) The Ibayama Fault, as indicated by various existing studies, is situated between the southern part of Atagoyama and the northern part of Ibayama. The fault strikes ENE-WSW and reportedly dips south. However, the electrical resistivity exploration conducted in the present study suggests that the fault dips north in appearance.

3) The flow and discharge of carbon dioxide and hot spring water that dissolves carbon dioxide are observed in the fracture zone along the fringe of the Ibayama Fault. The structural control of the fault is evident.

4) Other than the Ibayama Fault, it is estimated that there is an NNW-SSE trending fault that passes the east side of Atagoyama. The main spring sources of Arima Spa (Kinsen) are distributed along the estimated fault. The distribution of these hot springs may also be structurally controlled by the fault.

¹⁾財団法人中央温泉研究所 〒171-0033 東京都豊島区高田 3-42-10. ¹⁾Hot Spring Reserch Center, 3-42-10 Takada, Toshima-ku, Tokyo 171-0033, Japan.

²⁾株式会社日本地下探査 〒533-0001 大阪市東淀川区井高野 4-6-27. ²⁾Nihon Chika Tansa Co, Ltd., 4-6-27 Itakano, Higashiyodogawa-ku, Osaka-shi Osaka 533-0001, Japan.

Key words : Arima-Spa, Ibayama-Fault, Carbon dioxide, Carbonated spring, Structural Control

要 旨

兵庫県有馬温泉には、高温、高塩分濃度で赤褐色に濁る温泉（金泉）と、低温、低濃度で透明な温泉（銀泉）とがある。有馬温泉の源泉の多くは白亜紀末の有馬層群から湧出し、その中でも銀泉に属する炭酸泉は、二酸化炭素の自然湧出泉とともに、有馬-高槻構造線の西方延長の一端をなす射場山断層に沿って湧出する事で知られている。その射場山断層は、有馬温泉地内ではその位置や性状が明らかになっていないが、有馬温泉のほぼ中心部において、リゾート施設建設に伴う源泉保全のための各種調査を行った結果、以下のことが明らかとなった。

1) 射場山断層は、この地域を構成する有馬層群を広い範囲で粘土化させている。

2) 射場山断層の位置は、これまでの各種文献で指摘されている通り、愛宕山南部と射場山北部の間であり、走向はENE-WSW 方向である。傾斜は南傾斜とされているが、今回の電気探査結果からは見かけ上北傾斜に見える。

3) 二酸化炭素もしくは二酸化炭素を溶解する温泉の流動、湧出は射場山断層外縁の破碎帯を通してであり、断層による構造規制が明確である。

4) 射場山断層とは別に、愛宕山の東麓をNNW-SSE 方向に走る断層が推定され、その断層方向に有馬温泉の主要な源泉（金泉）が分布している。これらの温泉の湧出にも断層による構造規制が作用している可能性がある。

キーワード：有馬温泉，射場山断層，二酸化炭素，炭酸泉，構造規制

1. はじめに

兵庫県有馬温泉 (Fig. 1) は、西日本を代表する古い歴史を持った温泉地であり、高温かつ高塩分濃度の温泉が湧出することでよく知られている。ここには、二酸化炭素の自然湧出露頭があり、その二酸化炭素が地下水に溶け込むことで炭酸泉も形成されている。さらに、有馬温泉の後背（南側）山地には御影石の石材名で有名な六甲花崗岩があり、その花崗岩から湧出するラドン泉もある (Fig. 2)。高温・高塩分濃度の温泉には多量の鉄が含まれ、湧出した後の温泉は赤褐色に濁ることから、金泉と呼ばれている。これに対して、成分濃度の低い温泉や炭酸泉、ラドン泉は無色澄明な温泉であることから、銀泉と呼ばれる。有馬温泉は金泉、銀泉の相対する泉質の存在で特徴付けられる。

2006 年秋に、この炭酸泉および二酸化炭素湧出地が分布する地域（有馬温泉のほぼ中心部）においてマンションとリゾートホテルの建設が計画された。この地域内には既存源泉として金泉が存在するほか、炭酸泉も存在する（マンションは Fig. 2 の山内炭酸泉が存在する斜面、リゾートホテルはそれより道路を挟んだ南側で、金泉に属する花の坊源泉が所在する場所）。金泉は数 100m の掘削深度を有し、大規模な建築物であってもその建設による影響が金泉に出現することは考えにくい。炭酸泉の流動域は比較的浅層部にあることが推定され、基礎工事の内容によっては炭酸泉に恒久的な影響が及ぶ可能性があることから、当該施設建設に伴う温泉源への影響について考察するとともに、その影響を回避もしくは軽減するための方策を検討するため、建設地域内の温泉や地下水の流動状況を調査する機会を得た。

本報では上記のマンションおよびリゾートホテル建設に伴う温泉源保全のための調査によって、有馬温泉の炭酸泉と二酸化炭素の湧出に関わる射場山断層の位置や性状、温泉湧出に関わる役割などに関していくつかの知見が得られたので、報告する。

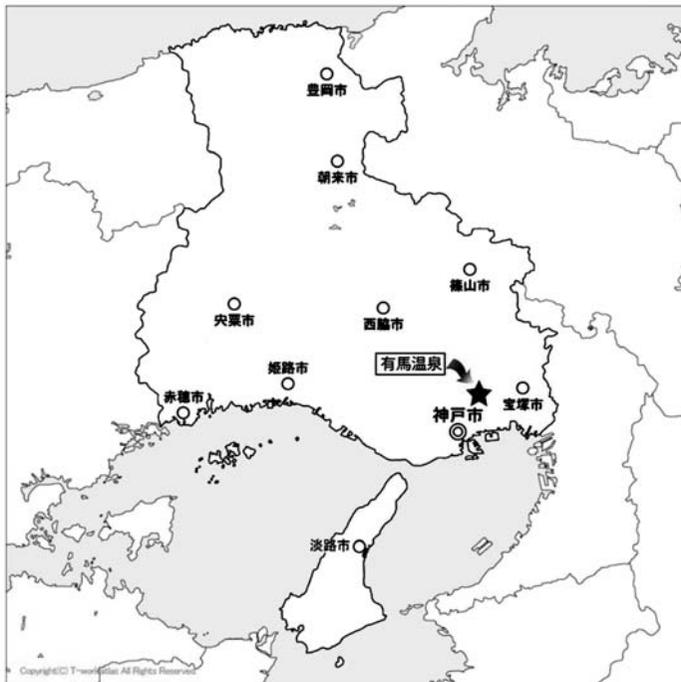


Fig. 1 Location map of Arima Spa, Hyogo Prefecture.

図 1 調査地域案内図.

2. 有馬温泉の地質と地質構造

Fig. 3 に藤田・笠間 (1982, 1983) からコンパイルした地質図を示す。有馬温泉の主要源泉 (おもに高温・高塩分濃度の金泉) は中生代白亜紀後期の有馬層群中に分布する。有馬温泉の背後 (南側の六甲山地) には有馬層群を貫き、これに熱変成を与えている白亜期末の六甲花崗岩が分布し、有馬温泉の北方には第三紀の神戸層群が、有馬層群を不整合に覆って分布する。また、近畿地方の基盤岩をなす中生代三畳紀からジュラ紀にかけての丹波層群が、先の六甲花崗岩分布域にルーフペンダントとして分布する他、断層に沿って大阪平野とその周縁台地を構成する新しい地層の大阪層群が、様々な高度に分布するのも特徴である。

また、有馬温泉地域は、北方の北摂山地と南方の平野部とを分かち、有馬温泉付近から京都盆地南部にかけて、およそ 70 km にわたって連続する右横ずれ断層の有馬-高槻構造線の西方延長に当たり、多くの断層が発達している。大阪層群が本地域の断層に沿って様々な高度に分布するのも、こうした断層による強い構造形成を受けた結果である。

2.1 地質各説

以下、有馬温泉周辺地域に分布する地層について、藤田・笠間 (1982, 1983) にもとづいて概観する。

2.1.1 丹波層群 (藤田・笠間, 1982)

福井県三方湖付近、兵庫県氷上郡青垣町 (現在は丹波市青垣町)、京都府男山付近を結ぶ三角地帯を構成する地層である。かつては古生層と考えられていたが、コノドント化石の研究から、その

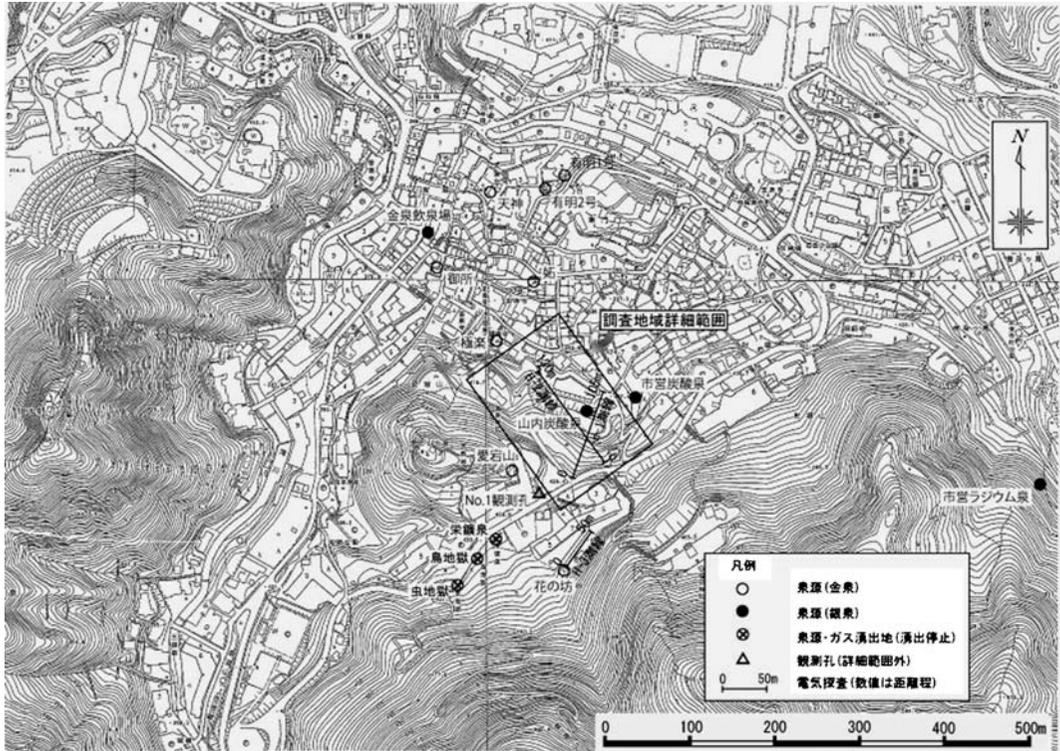


Fig. 2 Location map of Arima Hot or Mineral Spas and the survey area.

図 2 有馬泉源位置と調査地域範囲.

形成時期は中生代三畳紀からジュラ紀にかけてであることが明らかになってきた。六甲山地に分布するものは、砂岩を主とし、砂質頁岩や頁岩と互層するもので、花崗岩の貫入による熱変質によりホルンフェルス化している。

2.1.2 有馬層群 (藤田・笠間, 1983)

有馬層群は、六甲山地以北に分布する凝灰岩、凝灰角礫岩を主体とする流紋岩類の総称である(笠間, 1959)。白亜紀後期の篠山層群を傾斜不整合で覆い、白亜紀末の六甲花崗岩によって貫かれる。有馬温泉付近には主に最下位の玉瀬結晶質凝灰岩層が分布する。基底部に凝灰質泥岩を伴う石英、長石などの結晶に富む流紋岩～デイサイト質凝灰岩である。全層厚は300m以上と推定される。六甲花崗岩の貫入によりホルンフェルス化している。有馬温泉西方の落葉山は、有馬層群に属する金剛童子溶岩からなる。これは基底部に自破砕溶岩を伴う流紋岩質溶岩であり、流理構造や球顆構造が見られる。

2.1.3 六甲花崗岩 (藤田・笠間, 1983)

六甲山地の大部分を構成するもので、御影石として名高い。優白色で黒雲母と淡紅色長石の斑晶が特徴的な花崗岩である。中生代白亜紀後期の形成と考えられる。

2.1.4 岩脈類 (藤田・笠間, 1983)

六甲花崗岩と有馬層群とを貫く花崗斑岩、石英斑岩、ひん岩などがある。後述の神戸層群を貫くものではなく、形成年代は六甲花崗岩貫入後、神戸層群堆積前となり、中生代末～古代三紀と考えられる。

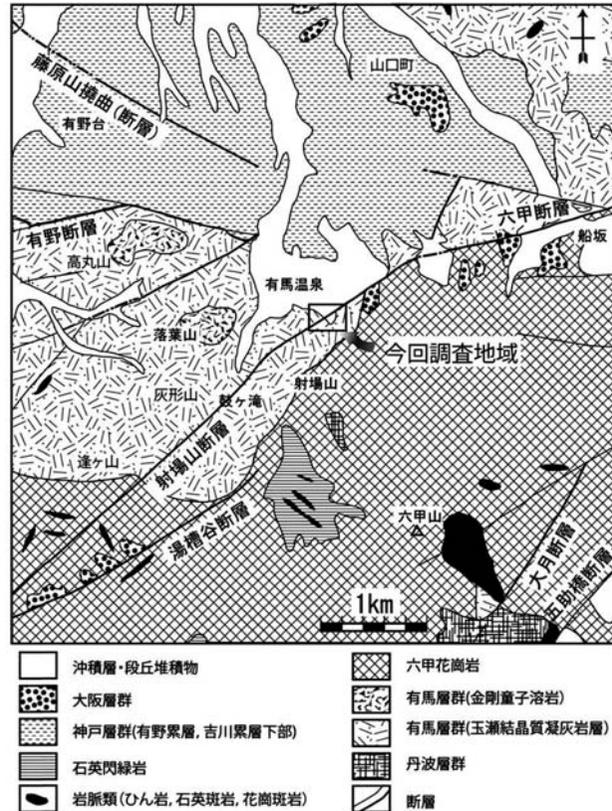


Fig. 3 Geological map of Arima Spa and its surrounding area. (Huzita and Kasama, 1982, 1983).

図 3 有馬温泉とその周辺地域の地質図 (藤田・笠間; 1982, 1983).

2.1.5 神戸層群 (藤田・笠間, 1983)

明石海峡付近に発達する第三紀層に対して、鹿間 (1938) が提唱した名称である。有馬地域では、こぶし大の角礫ないし亜角礫からなる淘汰不良の礫岩である有野累層と、下部は淘汰の良い無層理の砂岩を主とし、上部層は全般に凝灰質で、著しく厚い 2 枚の凝灰岩を挟む吉川累層とからなる。

2.1.6 大阪層群 (藤田・笠間, 1982)

有馬温泉周辺には、強い断層支配を受けて、様々な高度に海成粘土層を多数挟み、植物遺体を豊富に含有する大阪層群が断片的に分布する。大阪層群は、新第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけての海成堆積物であり、大阪平野地下および周辺丘陵部を構成する。

2.2 地質構造

Fig. 4 に六甲山地周縁の断層系を示す (藤田・笠間, 1983)。この中で、有馬温泉の温泉湧出構造に最も関わりの深いものは射場山断層である。

Nakamura and Maeda (1961) には射場山断層の記載はなく、その南を NE-SW 方向に走る断層 (Fig. 4 の湯槽谷断層に相当か) のみが記載されている。しかし、射場山断層が通過する付近に N10°E 方向に伸びる変質帯を 2 地帯に分けて認め、その変質帯は酸性条件下で生成される quartz

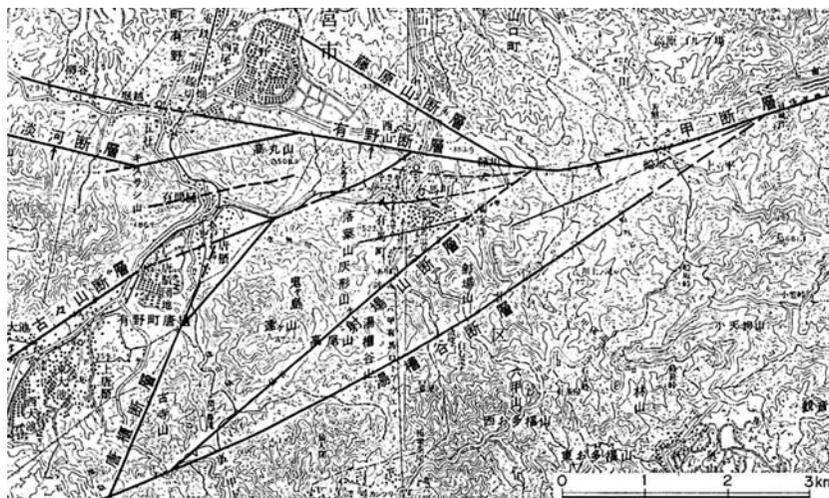


Fig. 4 Distribution map of active faults in around Arima Spa (Huzita and Kasama, 1983).

図 4 有馬温泉周辺における活断層の分布 (藤田・笠間, 1983)。

と alunite とから構成され、扇状地堆積物にまで及んでいることが記載されていることから、やはり温泉湧出との関わりが強く示唆される。

松葉谷ら (1974) による射場山断層の記載は、流紋岩類と六甲花崗岩とを境する断層で、この断層に沿って炭酸泉が自然湧出する。高塩分濃度の温泉は射場山断層の北側にあって、深さ 100~300 m で流紋岩類を湧出母岩とする、となっている。

藤田・笠間 (1983) は、この断層について次のように記載している。『芦有道路有馬ゲート南で流紋岩に幅 30m に達する破碎帯を作り、射場山北麓を通過して、鼓滝北側に向かう NE-SW 方向の断層である。炭酸地獄、虫地獄、鳥地獄など炭酸泉の自然湧出の通路となっている。有馬温泉付近では有馬層群の流紋岩類の中を走るが、以西では六甲花崗岩中を走る。流紋岩中では破断面の方向などは確認しがたいが、花崗岩中では明瞭な断層粘土を挟み、追跡が容易である。花崗岩中のひとつの露頭で、走向 N60°E・80°S の走向・傾斜を確認できる。』

活断層研究会 (1991) は、射場山断層を NE-SW 走向、3km の長さで、確実度Ⅱ、活動度 C に区分している。ここで、確実度Ⅱとは「活断層であると推定されるもので、断層の位置、変位の向きは推定できるが、確実度Ⅰと判断できる決定的な資料に欠けるもの」とされ、活動度は松田 (1975) の分類にしたがっており、断層の平均変位速度 S (認定に用いた第四紀の基準地形や第四紀層の変位量をその形成時から現在までの年数で割った値、m/1000 年) が、 $1 > S \geq 0.1$ に該当するものである。なお、活断層は「最近の地質時代にくりかえし活動し、将来も活動することが推定される断層」であり、「いつか再び動くであろうと判断されるもの」であって、現実に活動しつつあるわけではないが、活断層研究会編 (1991) が抽出した活断層は、第四紀以降に活動したことのあるものである。

西村ほか (2006) による射場山断層に関する記載は、『射場山断層 (有馬高槻構造線の西部) 沿いには、高二酸化炭素、高放射能を示す湧水が多い。このことは、この断層は構造線と言われるほど大きく、深い破碎部を有するものと推定できる。2003 年の放射能探査 (筆者注: 神戸市生活文化観光局, 2004) では、①高温の金泉の湧出場所は極めて高い放射能線を示し、非常に深いところから、速い速度で蒸気が上昇していることを示している。②放射能分布から南北系と東西系の断層

が、地質構造などから射場山断層の存在が推定できる。2005 年の放射能探査および CSA-MT 探査から、高温の蒸気の上昇域は南北系と東西系の断層の交点近くの愛宕山北部である。』

このように、射場山断層は有馬温泉の温泉、特に炭酸泉の湧出に深く関わっている断層であるが、藤田・笠間 (1983) も指摘しているように、有馬層群中では破断面の方向などは確認しがたく、特に有馬温泉地域での断層位置は未確定の点も多い。

3. 調査結果

3.1 電気探査による射場山断層

3.1.1 電気探査 (比抵抗二次元法)

地下探査法には種々あるが、地下地質構造、特に温泉や断層の所在を検討することを目的とした探査で良く用いられるのは電気探査や電磁探査である。その中でも、比較的地下浅部の構造を調べるには電気探査水平法が適している。

電気探査によって求められる地層の電気比抵抗は、地層を構成する粒子の種類や間隙率、水分含有量 (飽和度)、地下水、温度といった多くの因子に左右される。新しい地質年代に形成された未固結の地層では、シルト層や泥層のような粒度の細かい地層ほど間隙率が大きく、含水量も多くなるため、地層の比抵抗は低くなる。固結した地層の比抵抗は一般的に高いが、断層等により破碎された場合、風化・変質作用により粘土化した場合、鉍化作用をうけた場合などでは比抵抗が低下する。また、地層中に含まれる水の性質 (水温、成分濃度など) も、地層全体の比抵抗に大きく影響する。水の成分含有量が多いほど、水の温度が高いほど、水そのものの比抵抗は低下するので、成分含有量の低い地下水よりも含有量の高い温泉や海水が含まれると、地層の比抵抗を低下させる役割を担う。したがって、地層の比抵抗を測定することにより、地下の地質状況や地下水、温泉の賦存状況を推定することがある程度可能となる。

比抵抗法電気探査は、地質ごとに特有な電氣的性質である比抵抗分布に基づき、地下地質構造を推定する探査手法である (物理探査学会, 1998, 2008)。ある電極配置のもとで、電流 I を流して電位差 V を測定した場合、地層が均質でない場合でも、一般に下記の式を適用し、見掛比抵抗 (apparent resistivity) ρ_a を定義している (γ は電極配置に関わる実効的距離)。

$$\rho_a = 2\pi\gamma \left(\frac{V}{I} \right)$$

電気探査水平法で測定される比抵抗は、電極間隔に相当する深度までの全体の比抵抗、すなわち見掛比抵抗であるが、電極間隔を大きくすることにより深層部の見掛比抵抗を、電極系を地表面に沿って一定間隔で移動することにより水平方向の見掛比抵抗分布を求める。二次元探査では、この見掛比抵抗分布から有限要素法を用いた逆解析により、最適な比抵抗構造を求める。見掛比抵抗値 (ρ_a) は、各電極間隔 (a) に対応する深度までの比抵抗値の平均を示している。そこで、測定データから有限要素法を用いて比抵抗分布の初期モデルに相当する仮定の測定値を理論計算する。この理論値と測定値との差を用いて初期モデルを修正し、同様の計算を理論値と測定値との差が小さくなるまで繰り返し行う。

今回の調査の電極配置は 2 極法を採用し、測定には OYO 社製のマックオームを使用した。測線位置図は後述するボーリング孔などの位置とともに Fig. 5 (H-3 測線のみ Fig. 2) に示す。実施数量は以下の通りであり、電極間隔は各測線とも 2.5m である。Fig. 6 に解析断面図を示す。

H-1 測線：測線長 105m, 最大探査深度 37.5m

H-2 測線：測線長 130m, 最大探査深度 37.5m

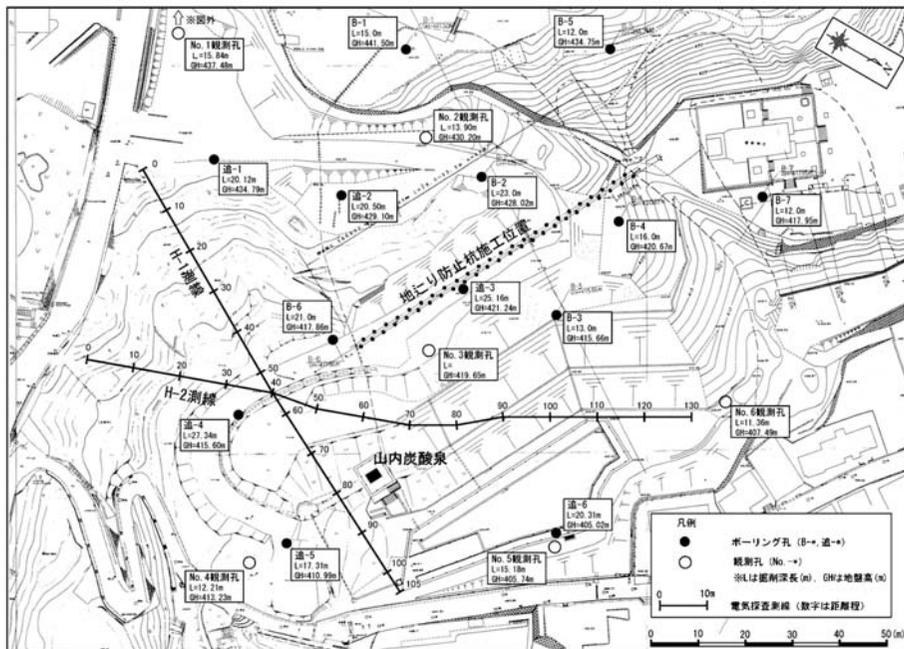


Fig. 5 Detailed map of various investigation site.

図 5 各種調査位置詳細図。

H-3 測線：測線長 50m, 最大探查深度 25m

なお、調査地域内のほぼ中央の斜面には、地すべり防止杭（φ508mm, L=23.0m, 1.4m 間隔で 49 本）が設置されている。

3.1.2 比抵抗断面図 (Fig. 6)

H-1 および H-2 測線では、地表面に沿って崖錐堆積物や風化岩に相当する高比抵抗層が存在し、地下水以浅の部分にあたると思われる。それより深部の比抵抗値は、5~50Ω・m 程度の低比抵抗部と 100~300Ω・m 程度の高比抵抗部に分かれる。H-1 測線では、中央から始点側の深部で 40Ω・m 以下と比抵抗値が低く、炭酸泉のある深部で 50Ω・m 前後とやや比抵抗値が高くなる。H-2 測線では、距離程 45m 付近を境として、始点側で 30Ω・m 以下の低比抵抗部、終点側で 80~300Ω・m の高比抵抗部がそれぞれ広がる。低比抵抗層の生成要因は、炭酸泉の存在によることも考えられるが、炭酸泉そのものは温度が低く、成分濃度も薄いので、射場山断層による断層破碎帯もしくは粘土化帯に対応する可能性が高い。

H-1 測線では距離程 20~30m 区間に、H-2 測線では距離程 10~25m と 40~90m 区間に、それぞれすべり面の存在が伺える。H-1 測線の距離程 80m 付近に位置する山内炭酸泉は、すべり面末端部からの湧出によるものと考えられる。

炭酸泉の供給源については、H-2 測線の始点側にみられる低比抵抗部からの供給と、すべり面を伏流する地下水からの供給の 2 通りが考えられる。ともに、降雨による影響を受けると予想されるが、降雨時に多くの湧出をみる場合には、すべり面を伏流する地下水の比率が高いと考えられる。

H-3 測線には、地表面から 3~5m 程度の厚さまで 80Ω・m 以上の高比抵抗層が分布する。地下水以浅であって、基本的には崖錐堆積物に相当すると思われる。それ以深では 10~40Ω・m と低い比抵抗値を示し、射場山断層による影響を受けていると考えられる。

3.2 土壌ガス探査 (主に二酸化炭素) による射場山断層

調査地域内には山内炭酸泉が存在するほか、東方直近には神戸市営炭酸泉が存在する。さらに、調査地域の山側でENE~WSW方向に走る道路沿いには、昔からの炭酸泉湧出地(虫地獄、鳥地獄などと呼ばれるガス徴候地だが、今は湧出停止)が存在することから、調査地域内で土壌ガス中の特に二酸化炭素濃度をしらべ、温泉の流動範囲もしくは温泉の影響範囲を推定した。調査は、地面に直径1cmほどの鉄棒を1m程度差し込み、鉄棒を引き抜いた後、直ちに北川式ガス検知管を孔内に挿入、吸引することで現地計測した。その結果をFig. 7に示す。同図には二酸化炭素の濃度に応じて、濃度の高い順に★(3%以上)→●(1%以上, 3%未満)→○(1%未満)で区分して示した。その結果、

- ①二酸化炭素濃度は、山内炭酸泉の西側 (Fig. 7のほぼ中央部) で3~100%の著しく高い値を示す。
- ②湯泉神社側 (Fig. 7の右上端側)、炭酸坂 (Fig. 7の左下側) 付近でも1~3%程度の高い二酸化炭素濃度が確認される。
- ③全域において二酸化炭素濃度は高めで、二酸化炭素を含む地下水が流動しており、調整池 (Fig. 7の下端側) からその上の斜面に炭酸泉の溜まりを形成している。

といったことが判明し、建設予定地には広く炭酸泉が流動していることが明らかとなった。①については、地表面が崩落防止のためのコンクリートで覆われており、斜面に蓋をした格好となっているので、二酸化炭素が開放されず、滞留しやすい状況にある。こういったことも特別

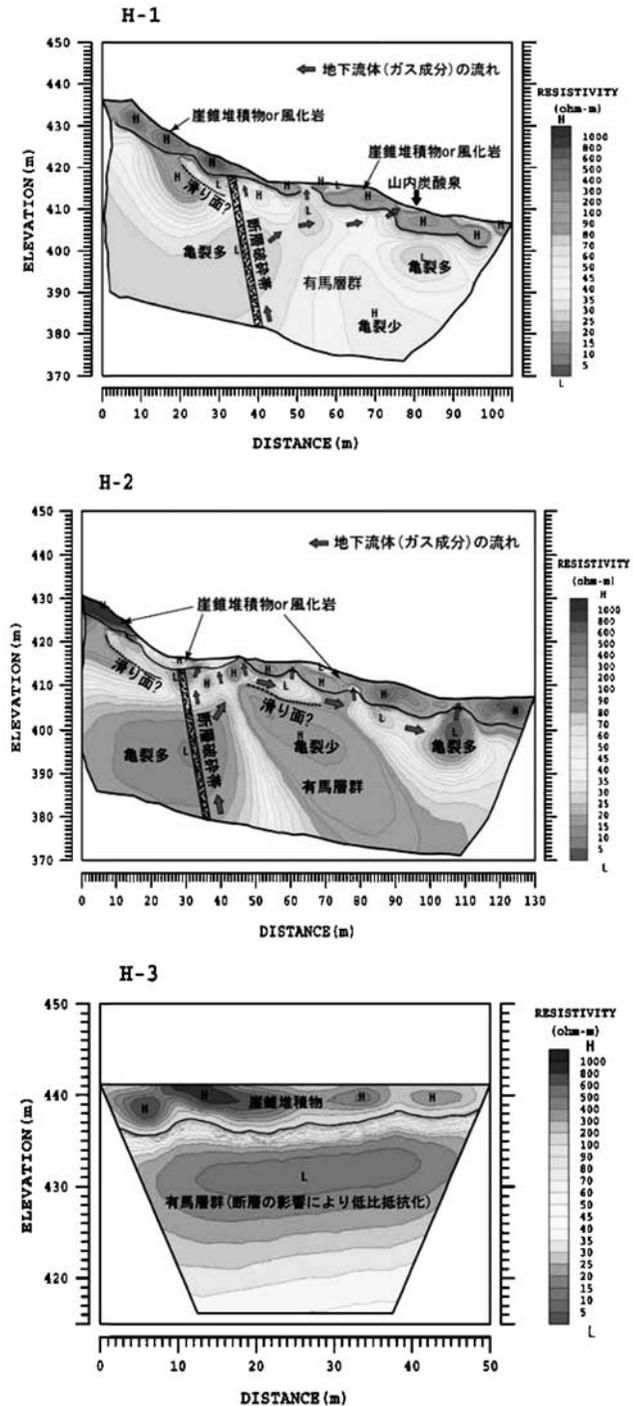


Fig. 6 Results of resistivity exploration and its interpretation.

図 6 電気探査の結果と解釈図。

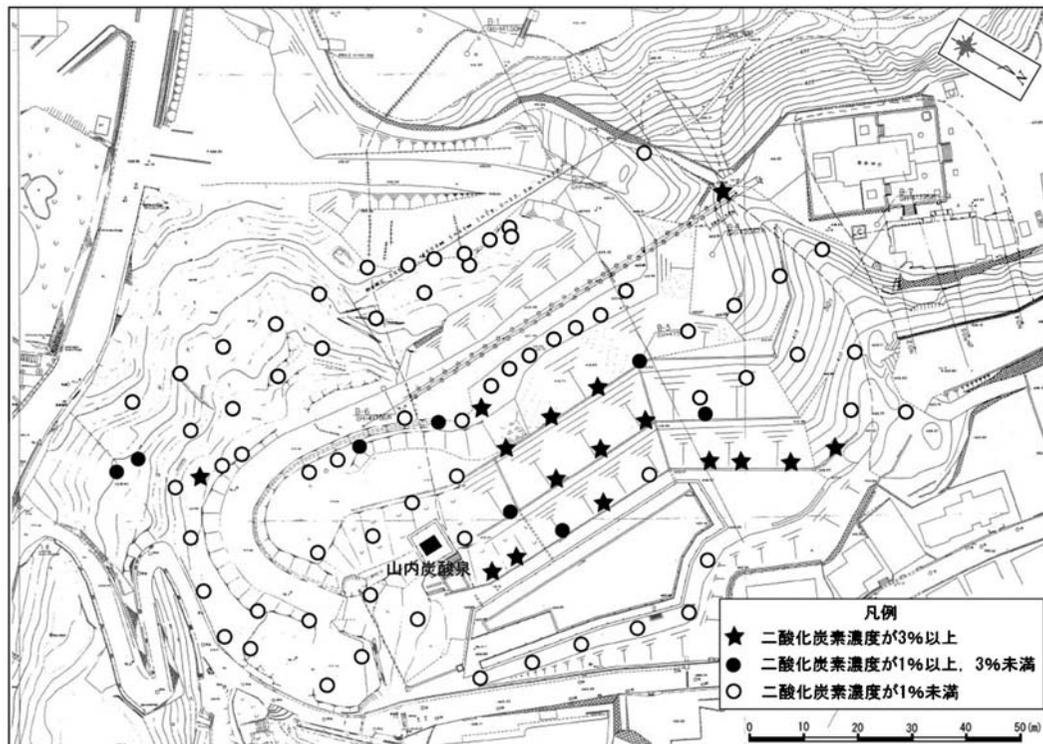


Fig. 7 Distribution map of carbon dioxide content in soil air.
 図 7 土壤ガス中の二酸化炭素濃度の分布状況図.

著しい高濃度を示した原因となっている可能性があるが、いずれにせよ二酸化炭素濃度が高いことに違いはない。

3.3 調査ボーリングによる射場山断層

調査地域は地すべり地域であり、1995年に地すべり防止対策工法を検討するため、電気探査（すべり面の検出）と地温探査（地下水流動状況の捕捉）を実施しているほか、調査ボーリングを7孔で実施している（兵庫県神戸土木事務所、1995）。また、今回のリゾートホテル建設にあたっては、地盤の性状（地耐力など）を検討するため、やはり6箇所調査ボーリングを実施している（東急不動産株式会社、2006）。

こうした調査ボーリングは、出来るだけ乱さない地質資料（コア）を採取するのと原位置試験（サウンディング）を行うのが目的であり、コアの鑑定は地質技術者が行うので、その地質記載は比較的正确であるが、ボーリング目的や鑑定者が変わることによって、地質記載内容に違いが生じるのはやむを得ない。しかし、地盤の性状をより客観的に判断する材料として、すべてのボーリング孔で標準貫入試験が行われ、N値が求められている。

N値とは、地盤調査で用いられる標準貫入試験（原位置における動的貫入試験の代表的な試験方法）によって求められるもので、JIS A 1216で規定され、地盤工学会（2004）にその解説が掲載されている。それによると、N値とは「質量 $63.5 \pm 0.5 \text{ kg}$ のドライブハンマーを $76 \pm 1 \text{ cm}$ 自由落下させて、ボーリングロッド頭部に取り付けたノッキングブロックを打撃し、ボーリングロッド先端

に取り付けた標準貫入試験用サンプラーを地盤に 30cm 打ち込むのに要する打撃回数」であり、原位置における地盤の硬軟、締まり具合または土層の構成を判定するためのものである。

兵庫県神戸土木事務所 (1995) 及び東急不動産株式会社 (2006) によるボーリング孔の一覧を Fig. 8 に示した。地質記載は二つの文献で違いがあるが、N 値の垂直分布の特徴から、低い N 値が深部まで続くボーリング孔は、断層による破碎や粘土化が著しい場所と判断できる。そうしたボーリング孔は、B-2, 追-1, 追-1, 追-2, 追-3 の 4 孔である。その地域的分布を見ると (後述の Fig. 10)、電気探査で捕捉された低比抵抗層の存在箇所に低い N 値 (= 粘土化の著しい部分) が分布する他、そこから NNW 方向 (湯泉神社方向) に向かう部分にも低い N 値 (同前) が広がる。この NNW 方向に広がる低い N 値の部分は地形的に平坦部をなしている。

3.4 観測孔内の二酸化炭素濃度からみた射場山断層

Fig. 9 は、地下水位観測孔で水位測定と同時に二酸化炭素濃度を計測した結果 (経時変化図) である。ここでは二酸化炭素濃度の経時変化ではなく、高い濃度を示す観測孔に注目すると、前述した断層による影響を強く受けていると考えられる低い N 値のボーリング孔の分布域を取り巻いて、比較的高濃度の二酸化炭素を放散する観測孔 (Nos. 1, 2, 5) が位置している。特に、No. 1 観測孔 (位置は Fig. 2 参照) において高い二酸化炭素濃度が観測されているが、No. 5 観測孔から、No. 1 観測孔の延長上に鳥地獄、虫地獄等が分布している。つまり、射場山断層により粘土化を被った部分の外縁に沿って二酸化炭素が上昇し、より多くの二酸化炭素が地下水中に溶存していることを示している。

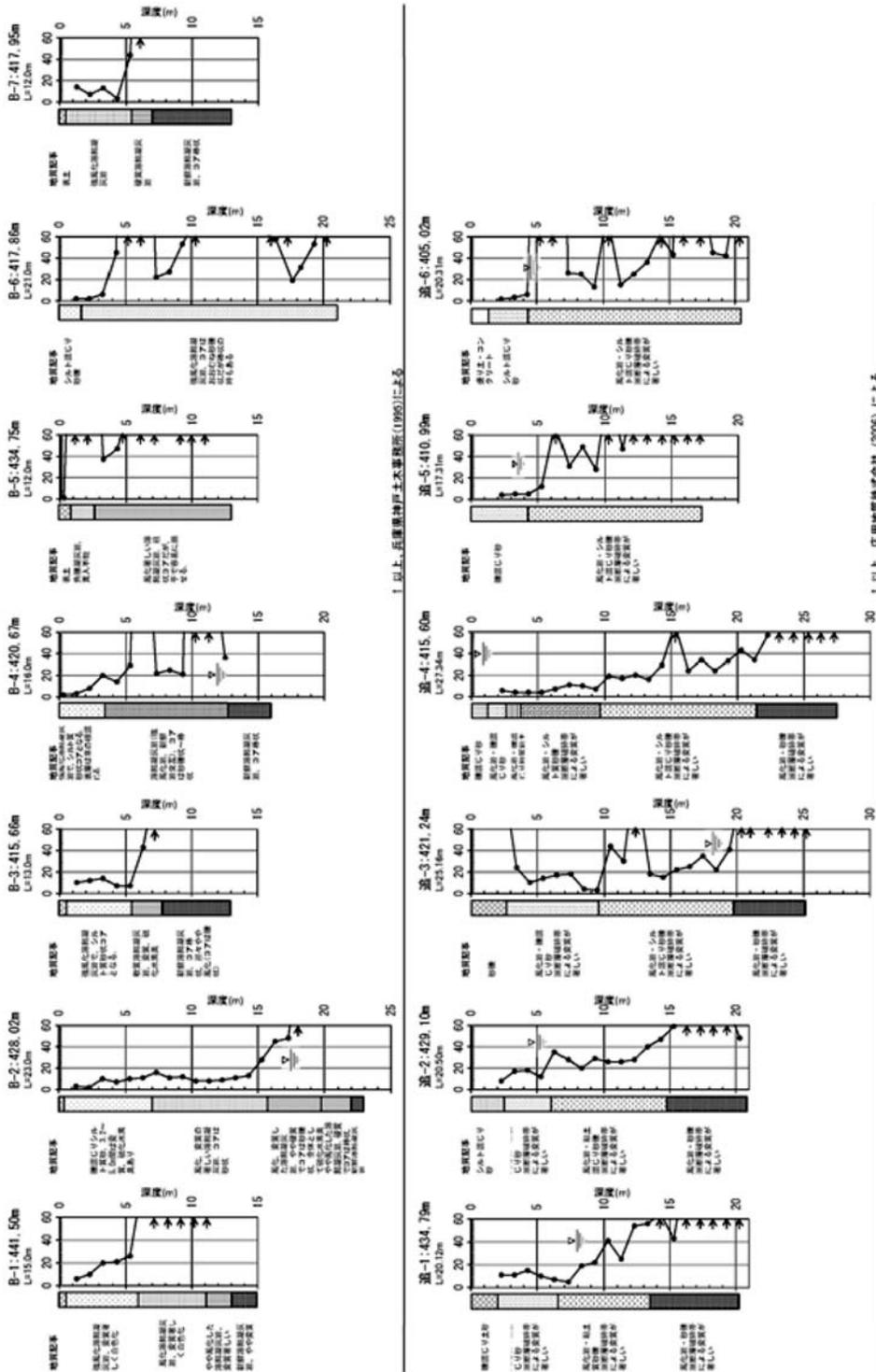
3.5 地下水位分布からみた射場山断層

リゾートホテル建設に伴う周辺温泉源への影響防止のためには、地域内の地下水位になるべく変動を生じさせないことが重要である。このため、建設工事中 (特に基礎工事期間中) の地下水位監視を目的として、地下水位観測孔を 6 孔設けている。それらについては早急な対応を要したことから、コア採取や標準貫入試験は行っておらず、N 値は測定されていない。

この観測孔における水位計測値と前述したボーリング孔に記載された水位とから、地域内の地下水位分布を検討した。兵庫県神戸土木事務所 (1995) の記録が 1995 年 3 月、東急不動産株式会社 (2006) の記録が 2006 年 7 月、観測孔の記録が 2007 年 8 月と、時期的に大きな開きがあること、また地すべり防止杭の施行時期との関係では、兵庫県神戸土木事務所 (1995) が施工前、東急不動産株式会社 (2006) と観測孔は施工後ということで、地下水位の分布状況も異なる可能性がある。このような水位データから 1 枚の水位分布図をまとめること自体に無理はあるのだが、対象地は急傾斜地であり、時期的な水位変動があったとしても、全般的な水位分布傾向に大きな影響を及ぼすことはないと考え、水位分布図を作成した。ただし、地すべり防止杭の直下で、同杭施工後の追-3 ボーリング孔と No. 3 観測孔の水位は相対的に低く、地すべり防止杭が地下水流動をせき止めている可能性があることから、水位分布図の作成にあたっては、この二つのデータは除外した。

Fig. 10 には、電気探査の結果から推定された断層位置、低い N 値が相対的に深部まで連続する地域範囲も含めて、地下水位の等高線を表示した。地下水面は基盤の有馬層群中に形成され、地表近くを構成する崖錐堆積物には基本的に地下水層は形成していない (降水時には本層を流下する地下水、伏流水は存在すると思われる)。

等水位線の形状から、地形的下位の No. 5 観測孔付近から、山内炭酸泉を通る方向と、No. 2 観測孔に向かう方向とに不明瞭ながら谷筋が見える。これは現地地形面から見ても谷筋に当たり、地下水面の形状でも谷筋を形成するとみて問題ない。前者については、南側高所に降った雨水や地下水



1以上、兵庫県神戸土木事務所(1998)による

1以上、成田測量株式会社(2006)による

Fig. 8 Vertical distribution of geology and N-value of bore holes for geological survey.

図 8 調査ボーリング孔の柱状図と N 値の縦括図.

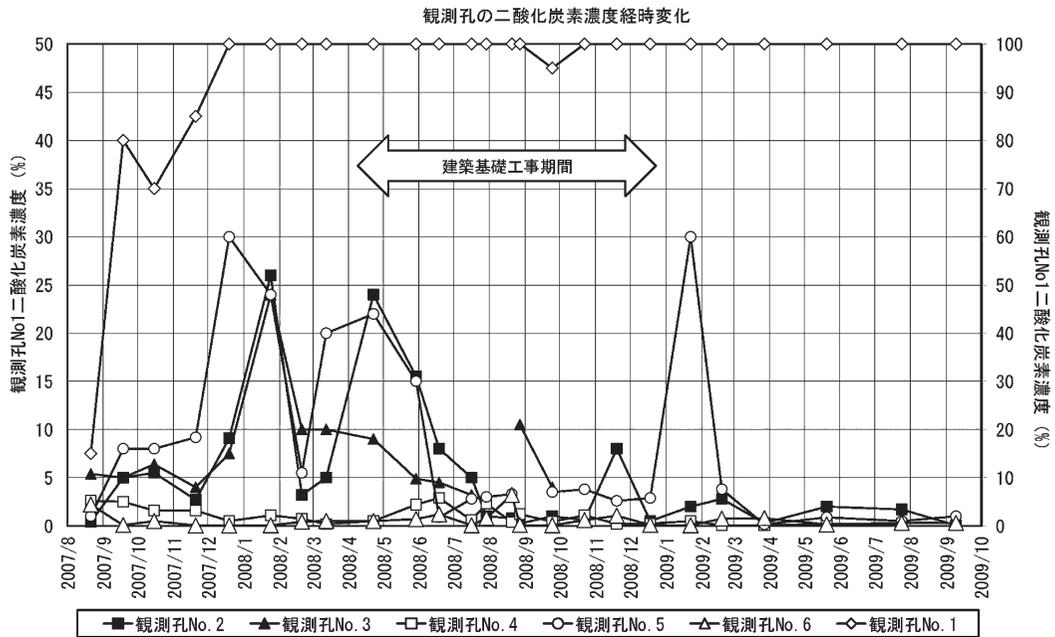


Fig. 9 Change of carbon dioxide content in the observation holes.

図 9 観測孔中の二酸化炭素濃度。

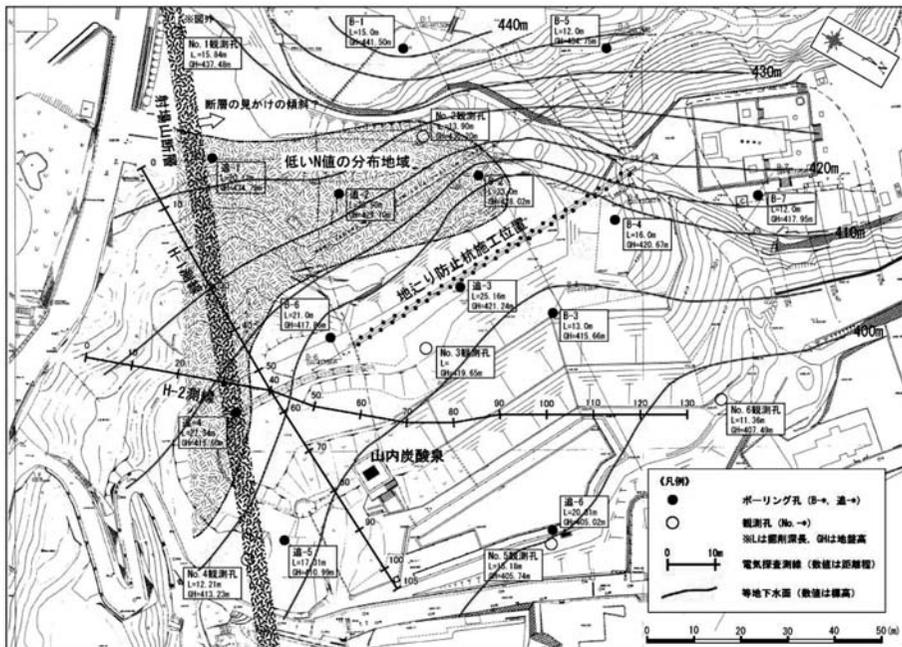


Fig. 10 Summary of various survey results.

図 10 各種調査結果のまとめ。

は山内炭酸泉に向かって流動することを示し, 山内炭酸泉の湧出に大きな役割を果たしていると思われる。

4. 考察とまとめ

電気探査から推定された断層破碎帯や粘土化帯の位置と, 調査ボーリング孔のN値の垂直分布から見た断層破碎帯や粘土化帯の位置とは良く一致している。射場山断層はENE-WSW方向のトレンドを持っており, No. 4観測孔, 追-5ボーリング孔付近から追-4, 追-1ボーリング孔付近を通して, No. 1観測孔方向に抜けると考えられる。その断層による破碎帯, 粘土化帯の幅は広く, 南側の道路を横切って連続している可能性が高い。射場山断層に接続してNNW方向に伸びる低いN値を示す部分も, 断層粘土化帯の存在を示



Photo 1 Outcrop of Ibayama Fault clay.
写真 1 射場山断層による断層粘土の露頭。

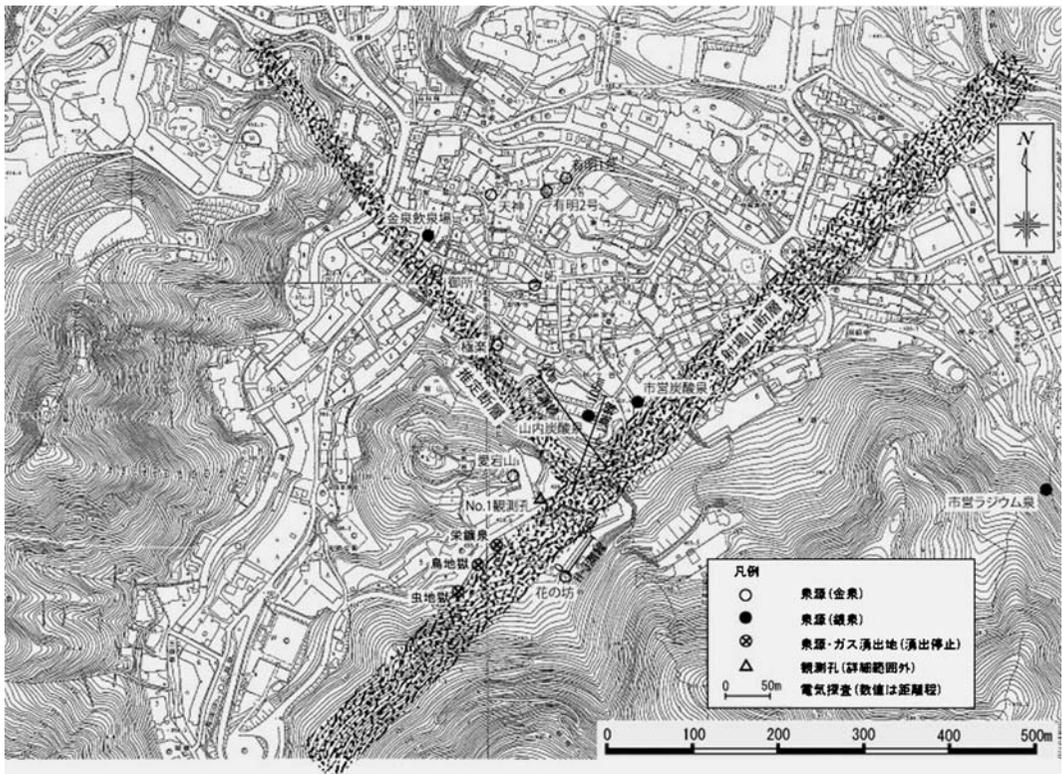


Fig. 11 Distribution map of Arima Hot or Mineral Spas and Ibayama Fault.

図 11 射場山断層および推定断層の位置と泉源の関係。

唆する。

一方、土壌ガス探査で推定される二酸化炭素の濃集域、地下水観測孔内での二酸化炭素の分布状況は、射場山断層 (ENE-WSW 方向) や、それとは別の NNW-SSE 方向の断層による粘土化帯の外縁に分布する。断層本体は粘土化が進行しているために、ガスや温泉といった地下流体の地下深部からの上昇には、断層本体ではなく、その外縁の破碎帯を利用していることを示している。調査地域でその後に行われたリゾート施設建設時の基礎工事中に、射場山断層の断層粘土が露出した。その状況を写真 (Photo 1) に示したが、粘土化が進み、地下流体の流動路としては不適な状態であることが明らかである。

射場山断層に接続して NNW 方向に伸びる推定断層についても、そのさらに北方延長上に優質な金泉 (極楽、御所泉源) が位置することから、射場山断層とは別の断層によって、金泉の湧出が構造規制を受けている可能性がある (Fig. 11)。

現在の山内炭酸泉は、有馬層群からなる基盤岩の風化部などに形成される谷部を流下する地下水が、断層の外縁にそって上昇する二酸化炭素を溶かし込んで、地形的凹地となっている現在の場所で露出し、湧出することを示している。

なお、虫地獄や鳥地獄などでは、現在はほとんど二酸化炭素の湧出を見ていない。これは、有馬温泉における温泉採取がやや過剰となって、温泉水位 (温泉の圧力水頭) が低下していることを示唆している可能性がある。

謝 辞

本研究に使用した多くの資料は、東急不動産株式会社から受注し、調査した結果を引用している。同社からは調査に当たって種々のご便宜とご協力を頂いている。また、今回の調査・解析の段階では、NPO 京都自然史研究所理事長の西村進博士から種々のご指導を賜った。これらの方々に本誌面を借りて改めて御礼申し上げる。

引用文献

- 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック (7 分冊), pp. 241-295, 物理探査学会, 東京.
- 物理探査学会 (2008) : 新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル 2008—, pp. 127~199, 物理探査学会, 東京.
- 藤田和夫, 笠間太郎 (1982) : 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅「大阪西北部地域の地質」. 地質調査所, 112 p. 筑波.
- 藤田和夫, 笠間太郎 (1983) : 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅「神戸地域の地質」. 地質調査所, 115 p. 筑波.
- 兵庫県神戸土木事務所 (1995) : 公共事業平成 6 年度 災害関連緊急地すべり事業 災関緊地-第 6005-0-S01 号 有馬地区地形測量及び地すべり調査業務委託 B ブロック報告書, 本文 111 p. + 巻末参考資料, 明治コンサルタント株式会社, 平成 7 年 9 月, 神戸.
- 神戸市生活文化観光局 (2004) : 有馬地区の温泉開発に関する資源調査業務報告書, 本文 30 p. + 巻末参考資料, 株式会社ダイヤコンサルタント, 平成 16 年 3 月, 神戸.
- 地盤工学会編 (2004) : 地盤調査の方法と解説, pp. 243-273, 地盤工学会, 東京.
- 笠間太郎 (1959) : 西宮の自然の災害. 西宮市史, Vol. 1, pp. 150-173, 西宮.
- 活断層研究会編 (1991) : 新編 日本の活断層分布図と資料 (京都及大阪), pp. 272-277, 東京大学出版会, 東京.
- 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対比について.

岡山大学温研報告, 第 43 号, 15-28.

松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第 2 輯, 第 28 卷, 269-283.

Nakamura, H. and Maeda, K. (1961) : Thermal waters and hydrothermal activities in Arima hot spring area, Hyogo Prefecture. Bulletin of the Geological Survey of Japan, Vol. 12, No. 7, 489-497.

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.

鹿間時夫 (1938) : 神戸層群とその植物群. 地質学雑誌, 45, 621-640.

東急不動産株式会社 (2006) : 有馬東急ハーベストクラブ地盤調査報告書. 本文 45 p. + 巻末参考資料, 平成 18 年 10 月, 応用地質株式会社, 東京.