

原 著

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の結果から—

西村 進¹⁾, 城森 明²⁾, 川崎逸男³⁾, 西田潤一¹⁾, 桂 郁雄¹⁾

(平成 22 年 4 月 6 日受付, 平成 22 年 8 月 2 日受理)

High Temperature Hot Springs and Their Geological Structures of the Central and Southern Part of Kinki District, Japan (2)

—From the Results of the Electromagnetic Survey around Shirahama and Arima Hot Springs—

Susumu NISHIMURA¹⁾, Akira, JOMORI²⁾, Itsuo KAWASAKI³⁾,
Junichi NISHIDA¹⁾ and Ikuo KATSURA¹⁾

Abstract

There are some hot-springs having high temperature and high concentration of chemical components at the middle and southern part of Kinki District, but these are no related to any volcanism. The first report has been cleared the evidences of the necks of acidic igneous intrusions in Nanki-Shirahama and Arima Hot-springs, using the results of geological study and gravity survey.

This second report is discussed that these springs are rise up along the crushed zone of the active faults through the neck of igneous intrusion, of which ages are estimated 12-14 Ma using the results using the methods of radioactivity and CSA-MT survey (a kind of Magneto-Telluric method).

Key words : Nanki-Shirahama, hot-springs, Arima hot-springs, CSA-MT, Radioactivity method, Neck of intrusion and Super-critical fluid

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, Kinkichiho Hatsume Center, Yoshida kawaramachi 14, Sakyoku, 606-8305. Japan.

²⁾ (有)ネオサイエンス 〒590-0521 泉南市樽井 4-2-30. ²⁾ Neo-Science (Ltd), Tarui 4-2-30, Sennan-shi, 590-0521, Japan.

³⁾ (株)ジェイ・シー・アール 〒578-0106 東大阪市中新開 1-4-13. ³⁾ J-C-R & Co., Ltd. Naka-shinkai 1-4-13, Higashi-Osaka 578-0106, Japan.

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ている温泉があるがその周辺に完新世の火山活動は見当たらない。この温泉の中に南紀白浜温泉と有馬温泉がある。前報で、精密な地質調査と重力測定により、熊野酸性岩の最終期 (12-14 Ma) 貫入した流紋岩質岩頸を見いだした。その岩頸の周辺のゆるみ域から沈み込み帯のスラブから脱水し上昇している流体がこれらの温泉の源泉水の一部であるとの検討をまとめた。しかし、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。今回は岩頸の周りのゆるみ域を上昇してきた熱水が活断層に乗り移る様子を電磁 (MT: Magneto-Telluric) 探査と放射能探査によりそのことを明確にすることができた。

キーワード: 南紀白浜温泉, 有馬温泉, CSA-MT, 放射能探査, 岩頸, 超臨界流体

1. はじめに

南部・中部近畿地方には非常に高温で含有成分が多い温泉が見られ、これらがマントルに含有すると推定される成分を含んでいること、沈み込み帯のフィリピン海スラブから脱水して生じた超臨界流体がかなり以前の時代の酸性岩体の最後の貫入した岩頸周辺のゆるみ域を上昇し、地下水で薄められ、地表に湧出している可能性を前報 (西村ら, 2009) で報告した。今回はその岩頸を伝い上昇した熱水・温水が地表に到達する道筋を電磁探査と放射能探査の結果により検討したので報告する。

2. 放射能探査

わが国で初めて断層探査に放射能探査が用いられ詳細に報告されたのは Hatuda (1944) である。その手法を総括的にまとめたのは Nishimura and Katsura (1990) である。この方法が活断層探査に用いられるようになり、その信頼性について、西村・桂 (1999) が論じている。

放射能探査は、主にポータブル シンチレーション・サーベイメータ “Aloka 製 TSC-NaI (1 インチ) シンチレーション・サーベイメータ” と γ 線シンチレーション検出器と多重波高分析器の組み合わせの “Aloka 製 JSM-102 (3 インチ) シンチレーションスペクトロメータ” を用いて実施した。

地表で見られる岩石は多少ともウラン、トリウム、カリウムの放射性元素を含有している。ウラン、トリウムは Fig. 1 に示すように壊変系列をつくる。地下水や土壌中では、化学的性質と半減期の違い (Fig. 1) により、通常、放射非平衡状態にある。断層粘土などの粘土に地下水中のウラン、トリウム、ラジウムなどのイオンはトラップされ、その後地下水・地中空気にはラドンの同位体 (自然状態で気体) のみが含まれる (Fig. 1)。ラドンは地下水・地中空気とともに、主として断層中を地表へと移動する。地表近くの断層にはこれらラドンの娘元素の測定しやすいエネルギーの特性 γ 線を持つウラン系列の ^{214}Bi 、トリウム系列の ^{208}Tl が濃縮する。そのほか、岩石・土壌中の主成分カリウムの同位体 ^{40}K の γ 線も測定される (Fig. 2)。

温泉調査などの仕様書には、放射能探査、電磁 (MT) 探査または精密水平電気探査が物理探査手法として取り上げられている。一般にはそれにしたがってなされていることが多い。しかし、探査の目的や探査場所の特性により探査法を選択し、組み合わせることが必要である。その例として、南紀白浜温泉、有馬温泉の源泉胚胎の仕方を探査する場合は、重力探査を追加して行った。

放射能探査は、地表に浅く穴を掘り、検出部を鉛直下方に向けて測定するが、検出部へ側面などから入射する γ 線もあるので、周辺の岩石・土壌からの放射能と断層沿いの放射能の異常値の合計を測定するため、活断層の存在を放射能の異常値だけで判定するのでは精度が上がらない。そこで、

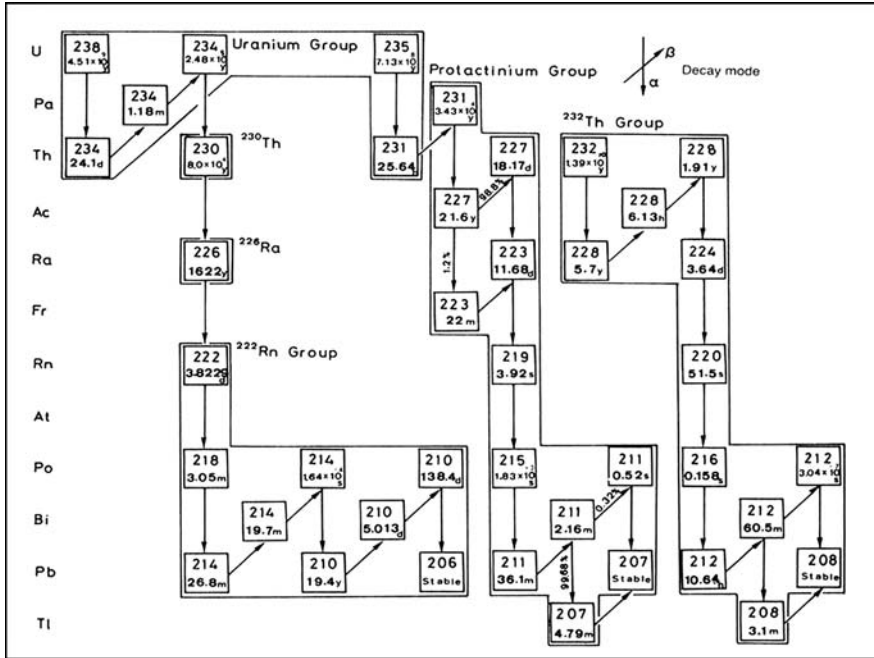


Fig. 1 Classification of ^{232}Th , ^{235}U and ^{238}U decay series nuclides into groups showing mass number, half-life and mode of decay.

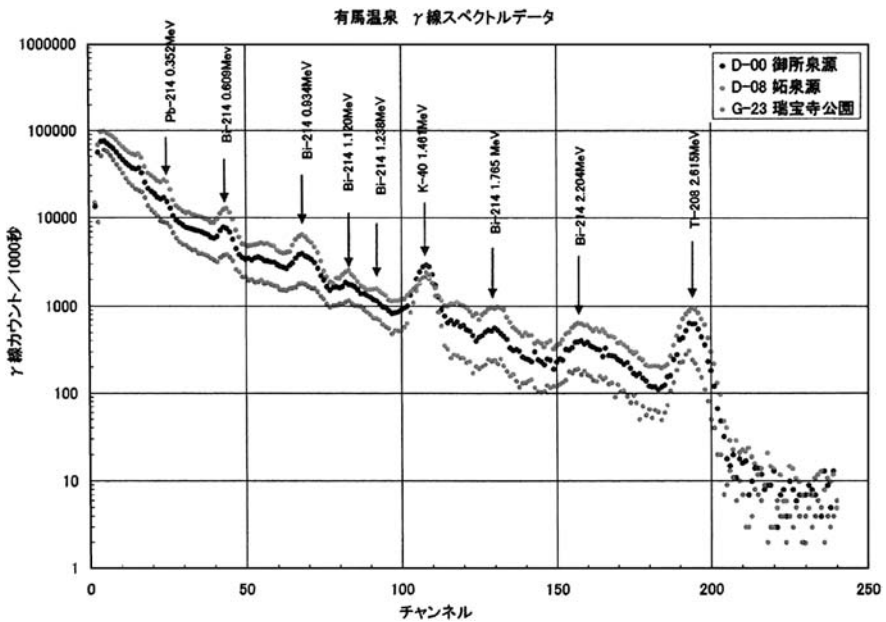


Fig. 2 Gamma-ray spectra of examples of sides of Goshō and Uwanari 'Kin-sen' hot-springs and Zuihoji-koen radioactive spring, using Aloka JSM-102 (240 ch., 3.6 MeV).

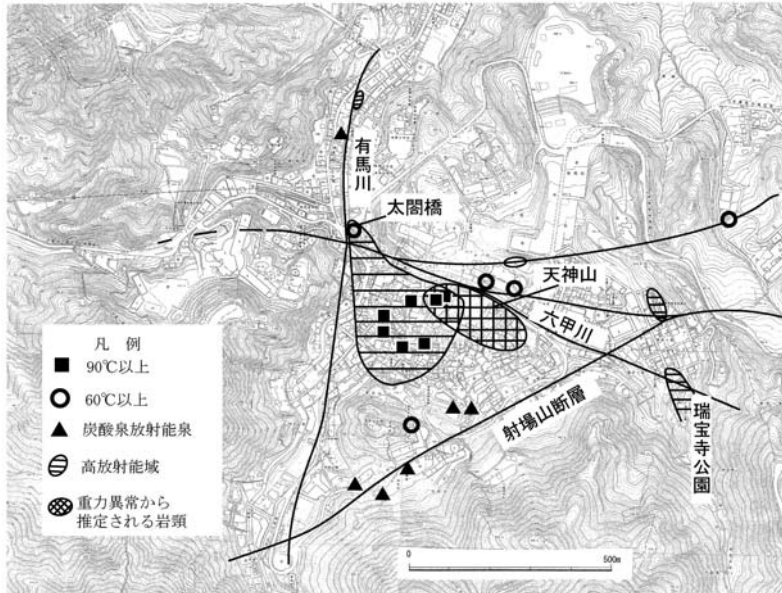


Fig. 3 The distribution of active faults and high radioactive zones (higher than $0.2\mu\text{Sv/h}$) estimated by gamma-ray survey with main hot and radioactive springs in Arima town, Kobe City.

■ : high-temperature (higher than 90°C) hot-spring, ○ : hot spring ($89\sim 60^\circ\text{C}$), ▲ : carburated and/or radioactive spring. / : fault and ⊖ : high radioactivity area in soil-air.

平行した複数の測線を必要に応じて選び、その測線上ではできるだけ細かく（測点間隔を10ないし15m）測定し、測定値の分布パターンを検出し、地表地質調査も参考にして解析する必要がある。また、シンチレーションスペクトルメータを使用するとスペクトルの測定ができ、寄与する放射性元素をホットピークで確認できる利点がある。しかし、この方法ではホットピークのみを積算するために比較的長い測定時間が必要である。一方、全 γ 線強度を測定するサーベイメータでは計数率が高く、検出用クリスタルが小さいので、 γ 線のエネルギーの低いほうの感度がよい利点もあり、断層の探査に向いていることが多い。これらのことを念頭に置き測定法を選択する必要がある。

以上のことから、シンチレーションスペクトロメータは重要点で測定し、どのような特性 γ 線を測定しているのか確認するのに使用した。

これらの結果から γ 線強度、 γ 線強度パターンから断層を引いた図を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。

3. 電磁 (MT) 探査

ELF-MT 探査 (extremely low frequency : $10^0\sim 10^4$ Hz の地上の雑音の電磁波を対象に計測する電磁探査) が地下の比抵抗測定に使われはじめ (半田・住友, 1979), CSA-MT (コントロールされた可聴周波数の電波を地下に流し、その信号を受信する探査法) も 1980 年代にはいり、地熱探査に新しく導入され始めた。ある海外の探査会社により始められたのに立会い、見学したときその解析方法を尋ねたが、結果のみ見せられて、後はすべてブラックボックスであった。そこで、西村・茂木 (1986) は ELF-MT の測定器の日本版の 1 号機、2 号機を試作し、黒部川の高熱隧道の探査 (Nishimura and Mogi, 1986), 桜島火山での観測 (西村・茂木, 1986) 等や方々の活断層探査に利用することを始めた。さらに、我々を含む京都大学、九州大学の地熱の物理探査の研究者を主とす

る研究者の手により CSA-MT の機器は何回も改造され、普及するようになった (Mogi *et. al.*, 1995). その機器と解析手法の発展の中で、商業ペースで探査法の改良を進めている川崎、城森が、今回それぞれ有馬温泉、南紀白浜温泉の探査に参加した。両者の測定方法はほとんど同じで、川崎が今回用いたのは疑似二次元解析であるのに対し、城森は一次元、二次元解析を行っている。

3.1 電磁 (MT) 探査の原理

電磁探査の原理は物理探査ハンドブック (物理探査学会, 1998) などにまとめられている。岩盤の岩種の違い、岩盤中の断層と岩盤の差、岩盤の温度差、温泉化作用の受け方の差、温泉水・地下水の胚胎の仕方などが地下の比抵抗構造に反映される。有馬温泉の胚胎するのは溶枯凝灰岩中、白浜温泉では白浜層群の砂岩勝ち砂岩・泥岩互層中であるので、両者とも温泉作用を受けた部分は周辺に比べて低比抵抗を示す。これ以外の断層粘土の部分も低比抵抗を示している。

神戸市北区有馬町の有馬温泉、紀南の白浜町の湯崎温泉、白浜温泉 (白浜町では温泉の湧出する地区を大きくこの 2 地区に分けている) は建物が建ちこみ、道路も殆ど舗装されていて、測定は私有地の駐車場やさら地ですることとなり、神戸市、有馬観光協会、白浜町のご助力で各持主の許可をもらって、調査位置を選点した (Fig. 5, Fig. 6)。尚、有馬温泉では何回かの調査を実施したが、採用した仕様はすべて同じ条件であるので、今回はすべての測定値を用いて解析した。送信点はニアフィールドを避けるために、許可を得て有馬地域では約 2.5 km 東方の西宮市山口の船坂谷奥に、白浜地域では約 5.0 km 東方の富田川河畔に設けた。

CSA-MT 探査では、送信源から放射された電磁波の電場と磁場を測定し、これらの測定値から見かけの比抵抗と位相角を求める。均質な 1 m^3 の抵抗値を比抵抗と定義して、幾種類かの比抵抗の物体が混合した状態で示す比抵抗値を見かけの比抵抗と定義する。CSA-MT 探査では解析前の生データから算出される比抵抗値を見かけの比抵抗、解析後得られた各層の値を比抵抗と呼んでいる。測定された電場と磁場との位相のずれを位相角という。電場と磁場は波形で測定され、受信する両者の波形の間には地下構造に由来するずれが生じている。このずれを角度で表したのが位相角で、一般に均質な場合 45° 、ニアフィールド領域では 0° を示す。

地盤に電流を流すと、その電流は電場 (E)、と磁場 (H) を発生する。その磁場 (H) と地盤に誘導された電場 (E) との強度比 (インピーダンス) は、地盤の電気抵抗により変わる。送信源から十分離れた位置での地盤の見かけ比抵抗は、その位置で測定されたインピーダンス ($Z = E/H$) を次式に代入することにより求められる。

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \cdot \left| \frac{E}{H} \right|^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ρ_a は見かけの比抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}$)、H は磁場強度 (A/m)、 μ_0 は真空の透磁率 (H/M) $= 4\pi \cdot 10^{-7}$ 、E は電場の強度 (V/m)、f は周波数 (Hz) である。

スキン深度 δ (m) は 3δ 以上離れた場合、

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで f は周波数 (Hz)、 ρ は地盤の比抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}$) である。一般に CSA-MT 探査は 3δ 以内をニアフィールドといい、 3δ 以遠をファフィールドという。今回のデータは十分 3δ 以上離れた送信源を用いた。

一般に、波の波長が長いと透過がよいのでスキン深度は深く、短いと悪いので浅い。電磁波でも同じことが言え、複数の波長の波で測定することによりある測点でのいろいろな深度までの見かけの比抵抗を求めることができる。各深度までの見かけの比抵抗から、各々の深度での比抵抗を解析

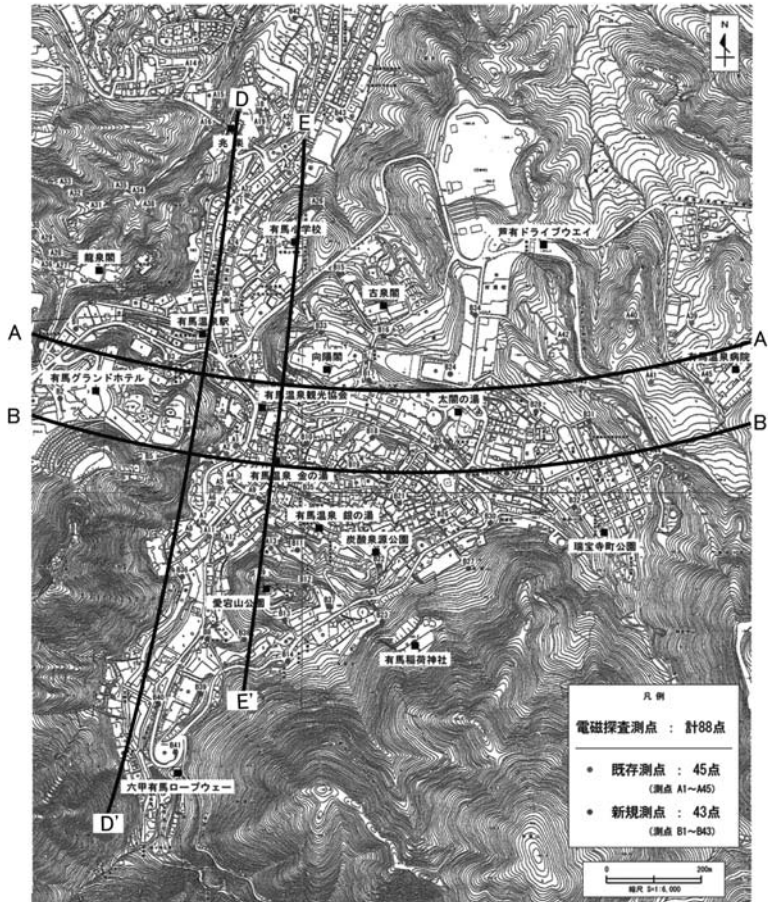


Fig. 5 The distribution of CSA-MT measurement points in Arima area.



Fig. 6 The distribution of CSA-MT measurement points in Nanki-Shirahama area.

Table 1 The specification of CSA-MT measurement

使用場所		有馬温泉	南紀白浜温泉
名 称		LOTM T-2000 CH-20T・P JCR 製	Geo SEM ネオサイエンス社製
送信機 (トランス ミッター)	最大出力	4.5 kW	5 kW
	最大電圧	900 V	1000 V
	最大電流	15 A	10 A
	コントロール	タイムスケジュール自動制御	GPS と高精度時計による同期
	送信周波数 (Hz)	2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 5120, 2560, 1280, 640, 320, 160, 80, 40, 20
発電機	最大出力	4.5 kVA	6 kVA
	電圧	200 V	200 V
	周波数 (Hz)	60 Hz	60 Hz
受信機	受信周波数	送信周波数に同じ	送信周波数に同じ
	波形処理	コサイン-サイン変換	フーリエ変換
	測定値	見かけ比抵抗, 位相角	見かけ比抵抗, 位相角

する。実際には波長を変える代わりに波の周波数を変えて測定する。探査深度の目安として地表で 1 の電磁波強度がある均質地盤の中で $1/e$ まで減衰する深度を一つの便宜上の目安として (2) 式が与えられる。ここで δ は一般に表皮深度 (スキンドープ) と呼ばれている。ただし、実際の探査深度は次元逆解析で求められる。測定器仕様は Table 1 に示す。

3.2 有馬温泉での CSA-MT 結果

有馬温泉では同じ仕様で、「有馬温泉楽山・兆楽泉源調査」(特定非営利活動法人シンクタンクタンク京都自然史研究所, 2007), 「リゾートトラストエクスプロ有馬建設における環境保全についての基盤の安定性と既存泉源への影響調査」(特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所, 2007), 「有馬住吉線バイパス整備事業に伴う既存泉源への影響調査」((株)ダイヤコンサルタント, 2006) ですでに CSA-MT 探査を実施している (Fig. 5 測点 A1~A45) ので、今回それに加えて探査 (Fig. 5 測点 B1~B43) を実施したので、すべてのデータを用いて、Fig. 7 のフローに従い解析をおこなった。

測定範囲の地形の変動が大きいので、海拔高 (標高) 300, 200, 100 m での比抵抗分布図をここでは示す (Fig. 8)。さらに Fig. 5 に示す断面のうち主要な比抵抗断面を Fig. 9 に示す。

・各海拔面での比抵抗分布から、次のことが推察される。

- ① 重力測定で示された (前報, 西村ら, 2009) 天神山の岩頸の場所には、どの標高の比抵抗分布でも、ほぼ同じ場所・区域に低比抵抗域がみられる。また、低比抵抗域が南北、東西の断層の交差点 (太古 (太閤) 橋付近) にも低比抵抗域がひろがっている。天神山の花崗岩の岩頸の部分にわずかの低比抵抗が見られるが、狭い範囲であり、段丘層の粘土混じり礫層の存在を示しているものと推定できる。
- ② 地表近くの比抵抗分布面では射場山断層沿いで風化の進んでいる部分で比較的比抵抗の部分が

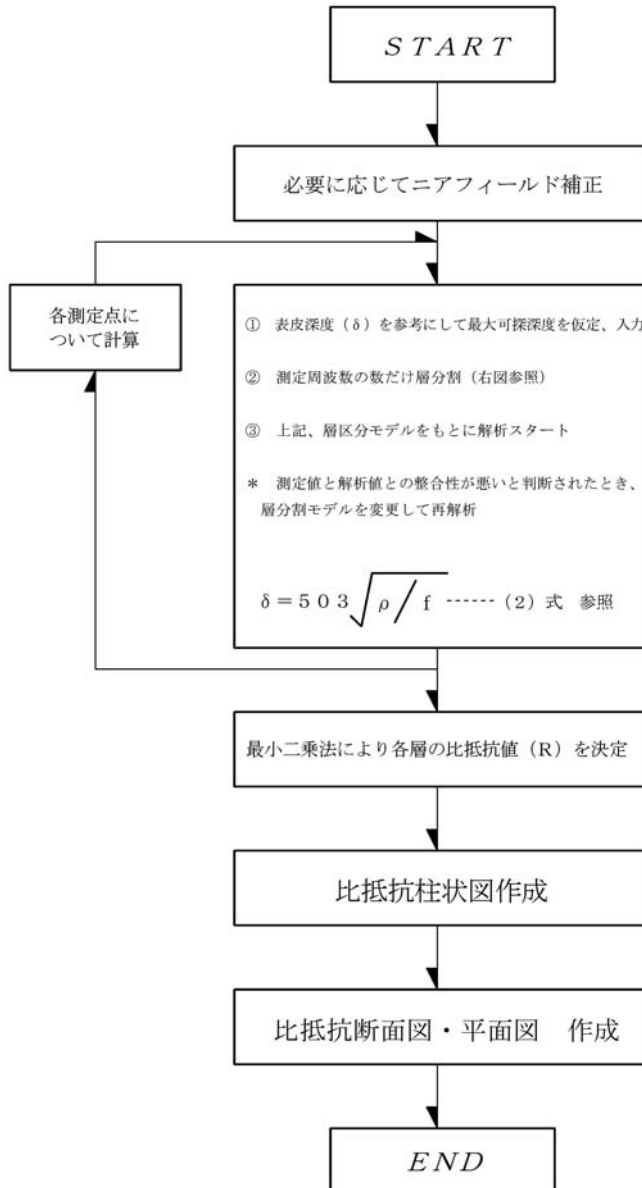


Fig. 7 The flow chart of the one dimensional analysis of CSA-MT method (JCR).

みられるが、射場山断層は南側の花崗岩域の高比抵抗域と有馬層群の比較的低抵抗域の境に存在することを示している。

- ③ 放射能探査で見出された南北、東西の断層の近辺に所々低比抵抗域がみられるが、これは、温泉水などが上昇するところのゆるみ域を示していることが多い。南北系の断層では、一般にさらに低い海拔面での低比抵抗部分が東の方にシフトしているが、これはこの断層が東傾斜であることを示している。
- ④ グランドホテル泉源、龍泉閣泉源付近では浅部ほど低比抵抗分布が広く、深部ほど狭い。この

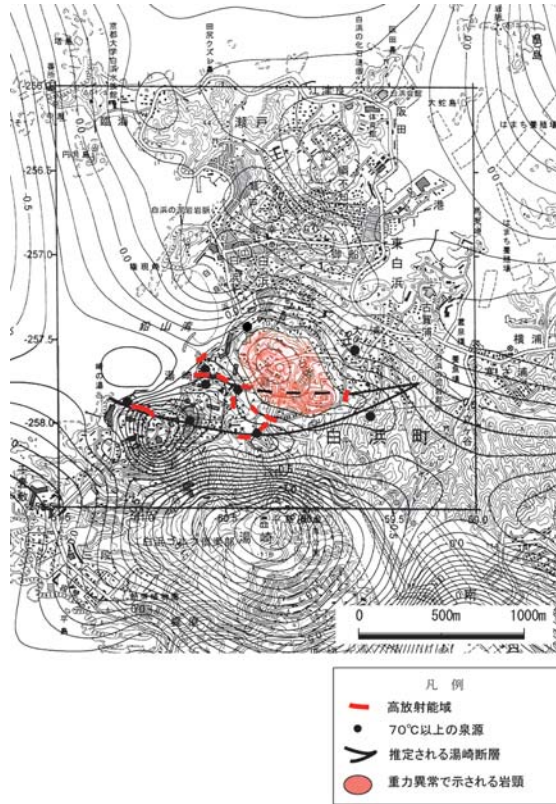


Fig. 4 The distribution of active faults estimated by gamma-ray survey with estimated the neck of acid igneous intrusion using gravity anomaly and distribution higher than 70°C hot-springs (Nihsimura et al., 2009) in Nanki-Shirahama, Wakayama Pref.
 / : active fault with high γ -activity area in soil-gas estimated by gamma-ray survey, net area : neck of acid igneous intrusion, and ● : higher than 70°C hot-spring.

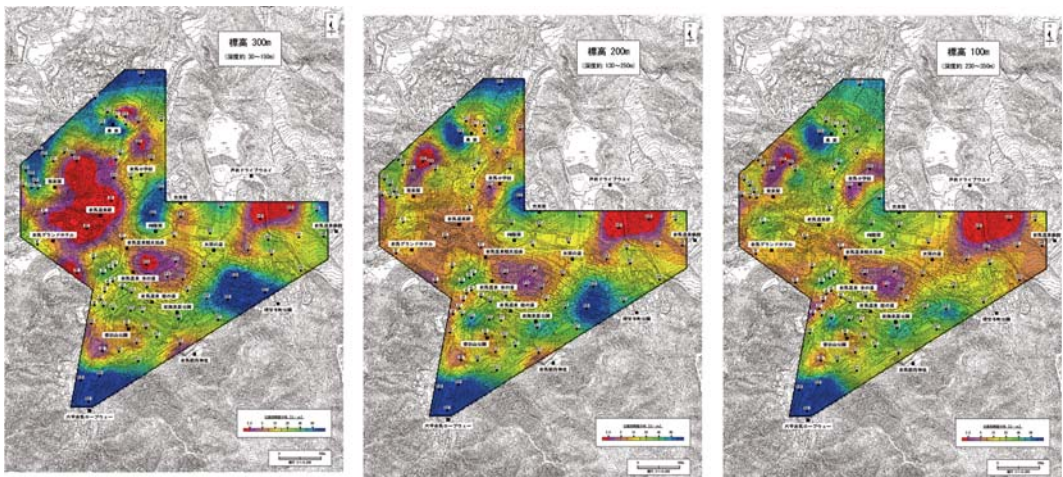


Fig. 8 The resistivity map at the elevations of 300 m, 200 m and 100 m in Arima area.

- ① A-A'断面は、東西断層系にはほぼ沿った断面であり、有馬温泉病院付近の低比抵抗領域に断層沿いに天神山岩頸から上昇してきた温泉源が推定されるが、中心から離れているので、温度も含有成分も低い。一方、太古(太閤)橋へは天神山岩頸から東西断層系に移り上昇している湯道の存在が推定される。
- ② B-B'断面では、射場山断層と東西断層系の交差場所に高放射能域が広がっていて、瑞宝寺公園に放射能泉の存在が示唆される。その西側に天神山の岩頸に沿う温泉の上昇域が推定される。グランドホテルの泉源域にも蛇谷川の断層との交差点付近で温泉の上昇が示唆される。
- ③ D-D'断面を見ると、南の部分で急に高比抵抗の部分に変わるが、ここではほぼ鉛直の射場山断層の存在を示している。その北には天神山岩頸から南に上昇する温泉岩頸から太古(太閤)橋や元銀水荘温泉に上昇する温泉の上昇域や蛇谷川沿いの断層破碎部の存在が示唆される。
- ④ E-E'断面では、愛宕山の南、射場山断層沿いに見られる温泉の上昇の存在、天神山岩頸の西・北の温泉の上昇域、南北断層沿いの小学校付近に上昇する温泉が示唆される。

3.3 南紀白浜温泉での CSA-MT 結果

南紀白浜温泉は大きく分けて湯崎温泉と白浜温泉に分けられるが、ここでは一括して解析する。Fig. 10 に一次元逆解析のフローを Fig. 11 に二次元逆解析のフローを示す。

Fig. 12 に海拔高-100, -200, -300, -400, -600 m での比抵抗分布図を、Fig. 13 に主要な比抵抗断面図を示す。

・各海拔面での比抵抗分布から、次のことが示唆される。

- ① -600 m 標高の面では、重力探査で示された岩頸の西南・西部分に狭い領域に熱水の上昇が低比抵抗域で示される。
- ② -400 m 面では-600 m 面からの温泉の上昇とさらに枝別れして、岩頸の西から東の方へ東西の断層沿いに岩頸の東にかけて熱水の上昇が推定できる。また、-200 m 面で顕著に表れている南側の推定断層に沿って行幸・崎の湯の方向に熱水が流れている様子が推定される。またこの流れは南の方に流下していることが推定される。-400 m 面では、その影響が弱い低比抵抗域の分布としてみられる。
- ③ -100 m 面では上昇した温泉が北の方に流下していて、南北方向の北に流れている谷沿いに低比抵抗域(温泉源域)が広がっていることが推定できる。

各断面での比抵抗分布からは、次のことが推定される。

- ① A-A'断面では、岩頸の南西から上昇してきた熱水が南側の東西断層を西方向に上昇して、行幸の湯のところで最も地表に近く浅く、そこからは風化帯の中を温泉の伏流が南に流下している様子が伺える。
- ② B-B'断面でも A-A'断面とほぼ同じ傾向がみられるが、南側への流下は A-A'断面よりは浅いことが示唆される。
- ③ E-E'断面では、岩頸の西南側に上昇してきた熱水が南側の断層沿いに浅く上昇していることが示唆される。しかし岩頸の中央部には熱水の上昇が見られず、岩頸を乗り越し、または、北側からも一部上昇して、北の方に流下していることが示唆される。
- ④ F-F'断面でも、岩頸の西側を上昇してきた熱水が北方に流下している様子が推定できる。
- ⑤ G-G'断面でも、F-F'断面と同様なことが推定できる。
- ⑥ J-J', K-K'断面では、岩頸の南側を上昇した熱水が南側、北側の二つの断層に乗り換えて上昇する熱水の存在が示唆される。

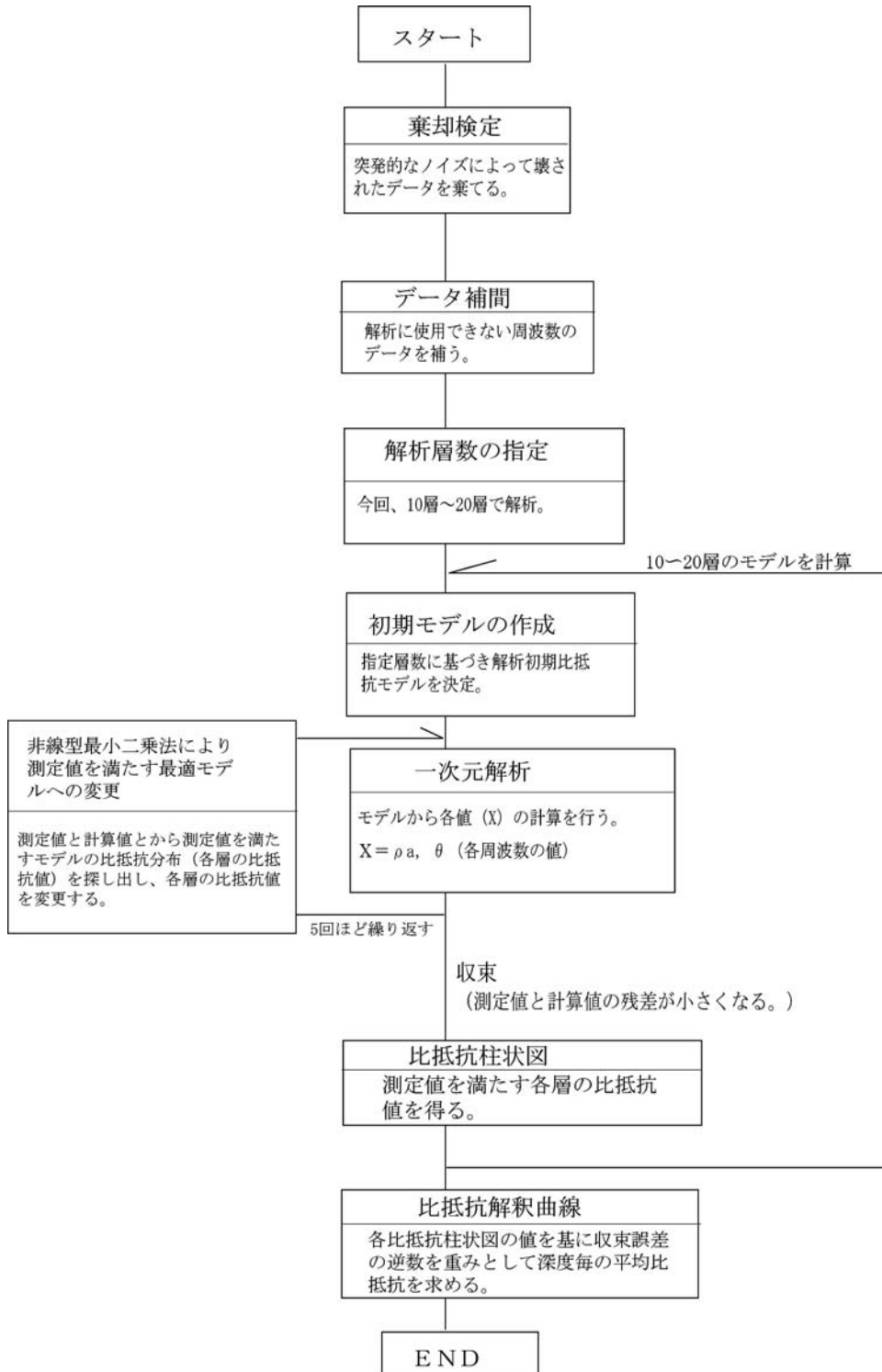


Fig. 10 The flow chart of the one dimensional analysis of CSA-MT method (NeoScience).

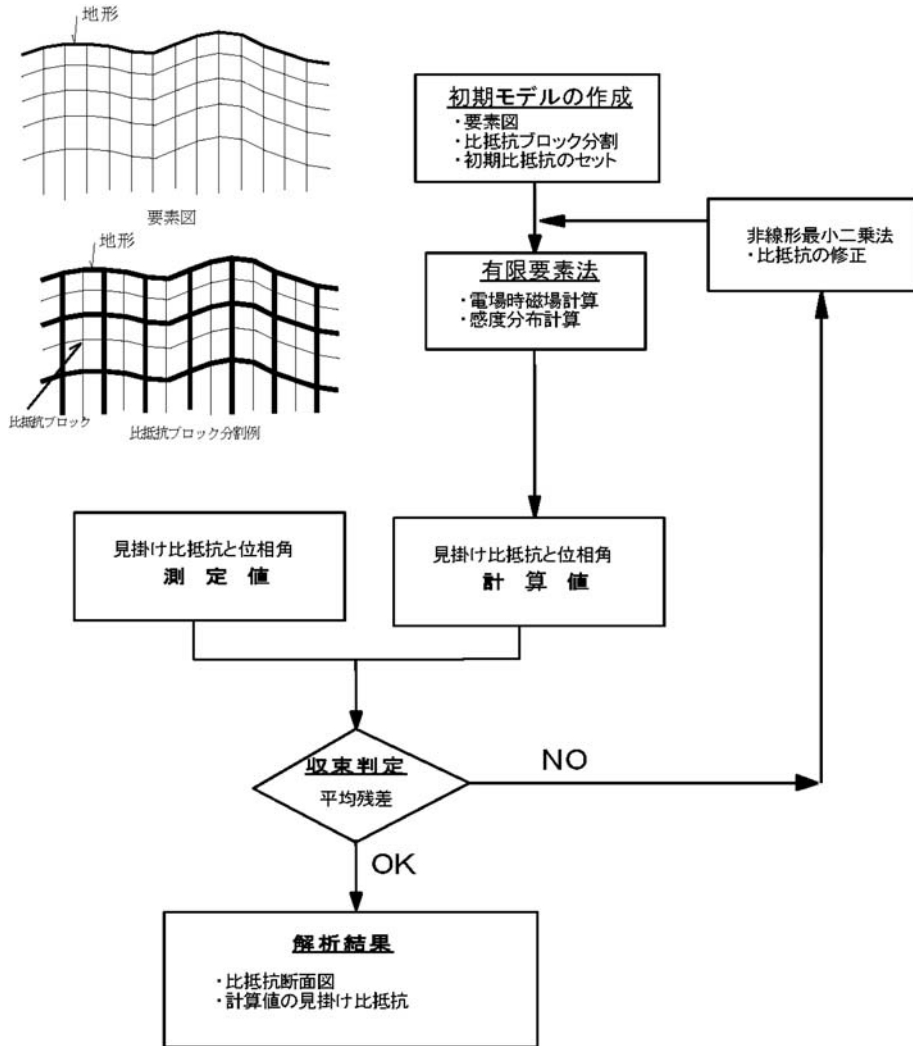


Fig. 11 The flow chart of the two dimensional analysis of CSA-MT method (NeoScience).

4. ま と め

近畿地方での直下型地震は、14 km 以浅にしか発生していない。このことは、震源断層（活断層の震源）の分布深度は 14 km 以浅であることを示している。有馬温泉、南紀白浜温泉での、沈み込みスラブの上面はそれぞれ 60 km、30 km 深度であるので、マントル中を超臨界流体が上昇できても、地殻下部の中の上昇は難しくなる。

両温泉の中の高温泉の分布は重力探査で示された岩頸の周辺のゆるみ域に関係のある断層から湧出している。この岩頸は、六甲花崗岩や熊野酸性岩の最終残液の上昇によるもので、その貫入年代が古い。地震などにより岩頸周辺に比較的流体の移動しやすいゆるみ域が生じ、鉱液の上昇や高濃度熱水の上昇がみられ、地殻浅部の活断層に乗り移り断層に沿って湧出してくると考察される。

有馬温泉では、天神山の岩頸の北西から南西にかけて熱水の上昇がみられ、それが活断層の一部

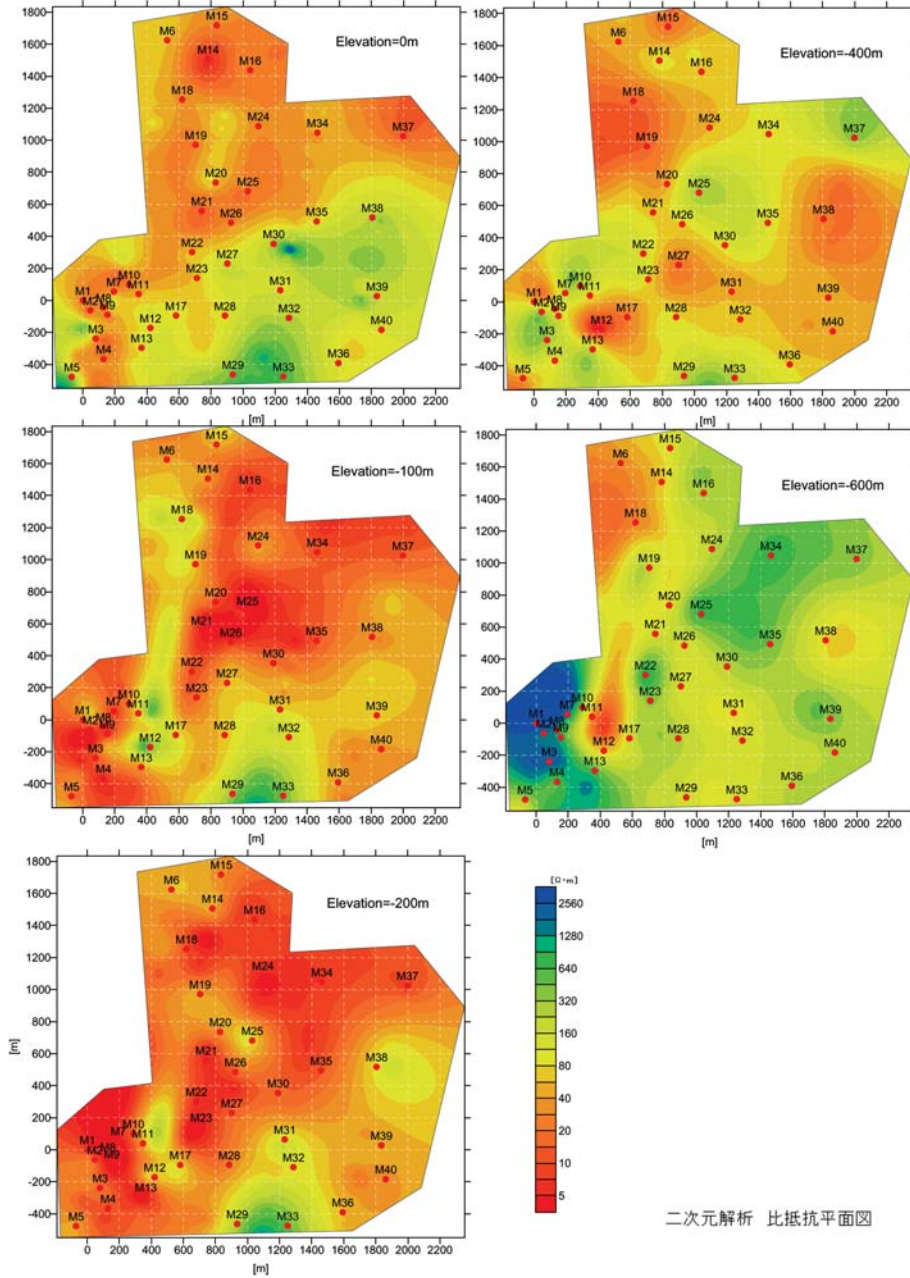


Fig. 12 The resistivity map at the elevations of sea-level, -100 m, -200 m, -400 m and -600 m in Nannki-Shirahama area.

乗り移り地下水に薄められて乖離した二酸化炭素により噴出している。白浜温泉では、重力探査で示唆された岩頭の南西部のゆるみ域を上昇してきた熱水が、放射能探査で推定された断層（湯崎断層とされた二断層）に乗り換えて、東や西に枝分かれして上昇してきて湧出している。さらに、地表近くから、破碎されていない部分を乗り越し、さらに北方と南方に流下して、泉脈として存在

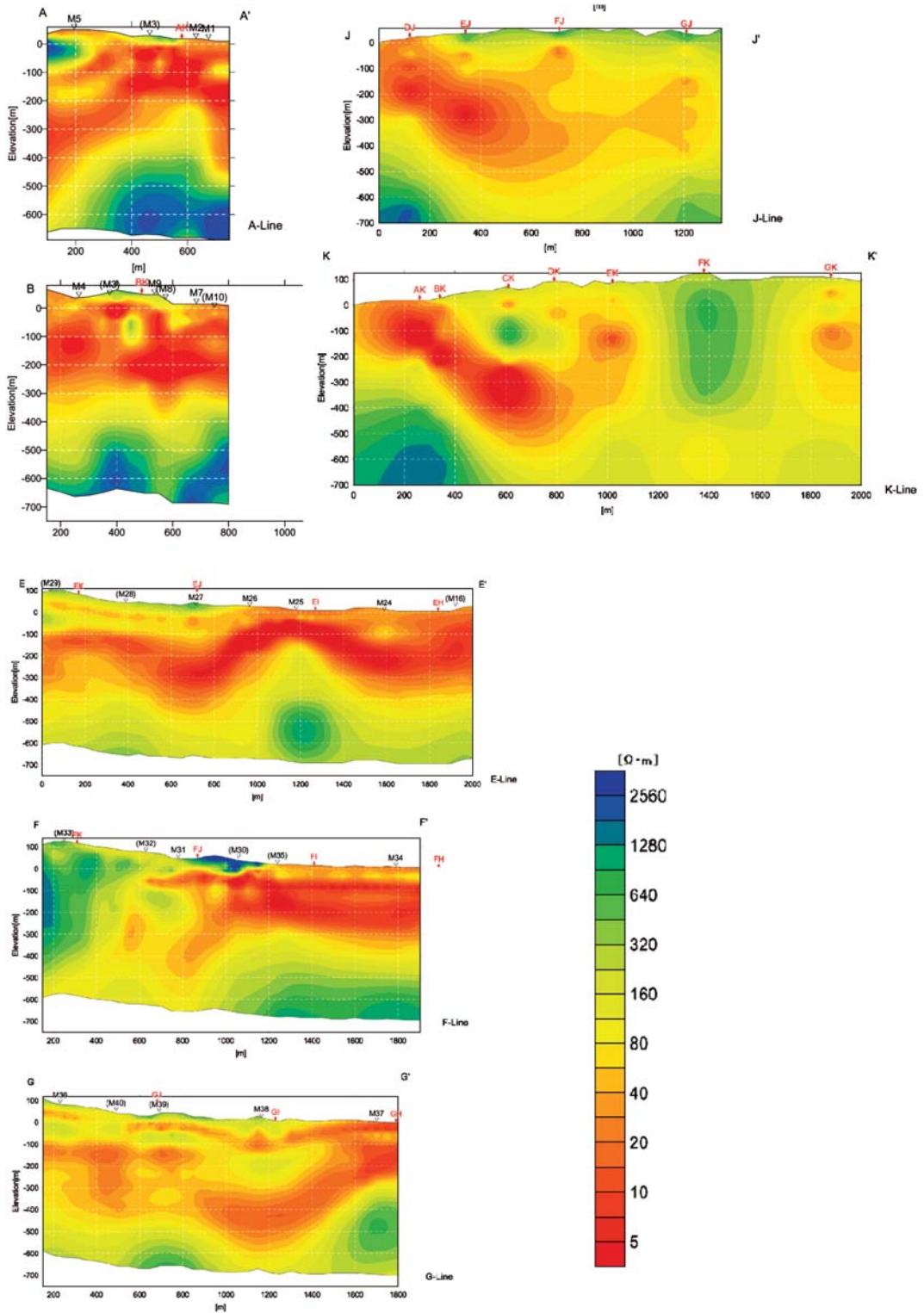


Fig. 13 The resistivity sections along main measurement lines in Nanki-Shirahama area.

していることが示される。これが掘削により、含有する二酸化炭素の乖離により、ガスリフトして温泉として湧出している。

次報で、近畿地方の岩盤中の種々の高温泉の胚胎の状況を総括して、議論する予定である。

謝 辞

雑な原稿を注意深く査読して頂いて、再度見直しまして、良くなりました。査読者の方々、編集委員の方々に感謝いたします。

引用文献

- 物理探査学会 (1998) : CSAMT 法, 物理探査ハンドブック 手法編 第 6 章, 322-326, 東京.
- ダイヤコンサルタント(株) (2006) : 有馬住吉線バイパス整備事業に伴う既存泉源への調査業務報告書, 平成 18 年 3 月.
- Hatuda, Z. (1944) : The reflection of underground structure on the radioactivity of soil air (2nd Report), Sci. Rept. Geol. Min. Inst., Kyoto Univ., **3**, 25-31.
- 半田 駿, 住友則彦 (1979) : ELF 帯雑音を用いた活断層周辺での MT 探査—山崎断層, 九十九地学 (京大教養地学紀要), **14**, 21-31.
- 茂木 透, 西村 進 (1984) : 京都府網野町の砂丘上での電気探査, 九十九地学, **19**, 1-10.
- Mogi, T., Nishimura, S., Katsura, I., Suzuki, K. and Widarto, D.S. (1995) : Geothermal heat source assessment using electro-magnetic prospecting. Proc. World Geotherm. Cong., 1995, **2**, 1131-1136.
- Nishimura, S. and Katsura, I. (1990) : Radon in soil gas : Applications in exploration and earthquake prediction. In Geochemistry of Gaseous Elements and Compounds (eds., Durrance *et al.*), pp. 497-533, THEOPRASTUS Pub. S.A., Athens.
- 西村 進, 桂 郁雄 (1999) : 放射能探査の信頼性について, 自然と環境 (シンクタンク京都自然史研究所紀要), **1**, 1-6.
- Nishimura, S. and Mogi, T. (1986) : The interpretation of discordant ages of some granitic bodies. J. Geotherm. Res., Soc. Jap. **8**, 145-164.
- 西村 進, 茂木 透 (1986) : 桜島火山における ELF-MT 法による比抵抗測定. 京大防災研年報, **29**, 13-21.
- 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構造 (1) —白浜温泉と有馬温泉の探査の結果から—. 温泉科学, **59**, 103-111.
- Steven, C.C. (1987) : Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, **52**, 289-300.
- 特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 (2007) : 有馬温泉楽山・兆楽泉源調査業務報告書, 平成 19 年 3 月, 京都.
- 特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 (2007) : リポートトラストエクスプロ有馬建設における環境保全 (温泉対策) についての基盤の安定性と既存泉源への影響について (報告書), 平成 19 年 3 月, 京都.