

草津万代鉱周辺での AMT 調査

神田 径⁽¹⁾・高倉 伸一⁽²⁾・小山 崇夫⁽³⁾・小川 康雄⁽¹⁾・
関 香織⁽⁴⁾・日野 裕太⁽⁴⁾・長谷 英彰^(1,5)

(1)東京工業大学火山流体研究センター, (2)産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門,
(3)東京大学地震研究所, (4) 東京工業大学理学部, (5)現：地熱技術開発(株)

AMT survey around the Kusatsu-Bandaiko hot spring

Wataru Kanda⁽¹⁾, Shinich Takakura⁽²⁾, Takao Koyama⁽³⁾, Yasuo Ogawa⁽¹⁾,
Kaori Seki⁽⁴⁾, Yuta Hino⁽⁴⁾, Hideaki Hase^(1,5)

(1) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, (2) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), (3) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, (4) Faculty of Science, Tokyo Institute of Technology, (5) Now at: Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd.

Abstract

Bandaiko is a hot spring located in the eastern flank of the Kusatsu-Shirane volcano, 2km west from Kusatsu-onsen. It was discovered in 1966 during excavation of a sulfur mine, and has been utilized as one of the sources of Kusatsu-onsen since 1974. A presumed gush zone is located in 505 m west from a tunnel entrance. The ground temperature above the gash exceeds 80 degrees. About 10 to 20 percent of the hot spring water is always discharged as vapor, so that the existence of a two-phase hydrothermal system in a shallow part of tunnel end is reliable. Since the chemical nature of hot spring is well investigated, Bandaiko is a suitable field which clarifies the resistivity image of a hydrothermal system. We investigated the shallow resistivity structure around the Bandaiko hot spring using the AMT (audio-frequency magnetotelluric) method. The measurement was done on Oct.19th through Oct.26th, 2013. Five components of EM fields were measured at 19 sites around the presumed gush zone. A 3-D resistivity structure model was estimated from the inversion code of Siripunvaraporn and Egbert (2009) using 15 frequencies of non-diagonal components of impedance tensors. The inferred model showed low resistivities near the end and the entrance of tunnel.

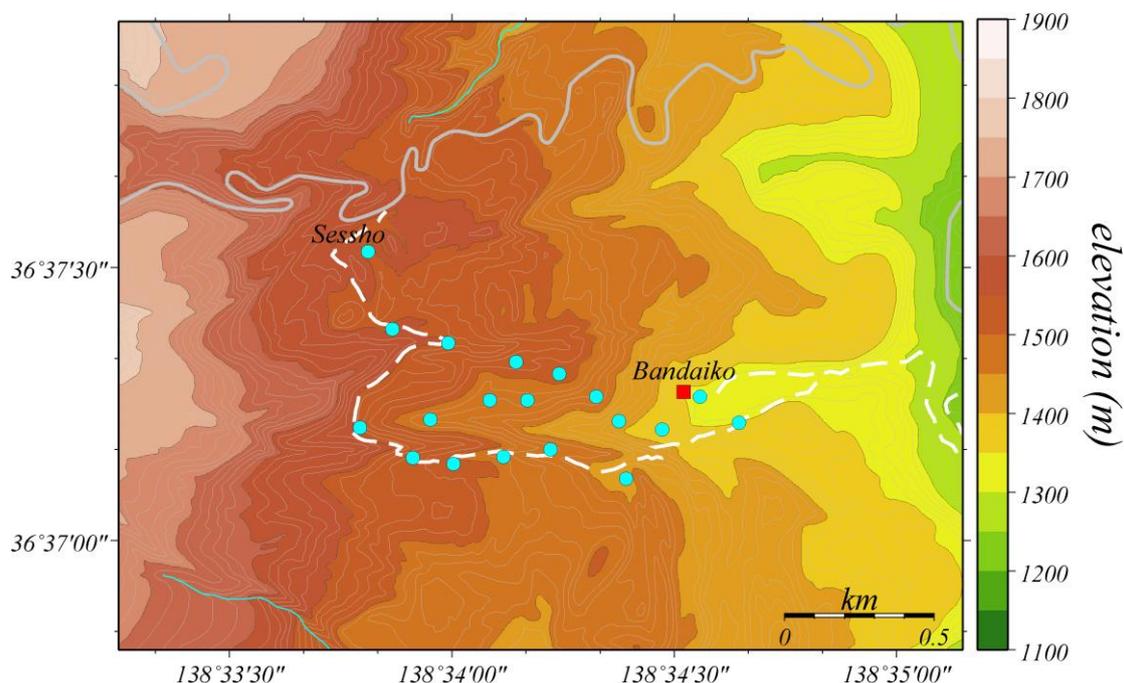
1. はじめに

万代鉱は、草津温泉から西に約 2 km 離れた草津白根火山東山腹に位置する自然湧出の温泉である。1966年に硫黄鉱山の掘削中に湧出したもので、1974年より草津町内へ引湯して温泉利用して

いるほか、熱交換によって温水を作って町内へ供給し、冬期には道路融雪にも利用されている。温泉湧出地点は長い間不明であったが、掘進当時の状況が調査された結果、坑口より 505m 西方地点の発破により多量の高温熱水が噴出するようになったということがわかっている。現在、その真上の地表面は樹木が枯れ、地表付近の地温は 80℃を超えていることから、万代鉱温泉の主要な湧出源があることは間違いないと思われる。万代鉱では、温泉湧出量の 1~2 割程度が噴気として常時噴出しており、坑道奥の地下浅部には気液混合の熱水の存在が確実である。前述のように温泉湧出地点や熱水の化学的性質が既にわかっていることから、熱水系の比抵抗イメージを明らかにする絶好のフィールドである。本研究の結果から、実体のよくわかっていない水蒸気爆発場の比抵抗イメージへの示唆も得られると考える。

2. AMT 法調査

万代鉱は、約 37 万年前の青葉溶岩上に位置しており、3000 年前に本白根山から流出した 2 筋の殺生溶岩が南側と北側で東西に分布している（宇都・他, 1983）。すぐ近くには、殺生河原と呼ばれる地熱地帯も見られる。本研究では、AMT 法（Audio-frequency Magnetotellurics）による比抵抗構造調査を行った。観測は、2013 年 10 月 19 日~26 日に実施した。推定湧出地点の周囲 19ヶ所において電磁場 5 成分の測定を行ったが、うち 15ヶ所では S/N の良い夜間に、4ヶ所では昼間の数時間測定を行った（第 1 図）。リモートリファレンスのためのサイトは設けず、相互リファレンスを行った。観測地域は、50Hz の商用電源が使用されているが、60Hz を使用する長野県との



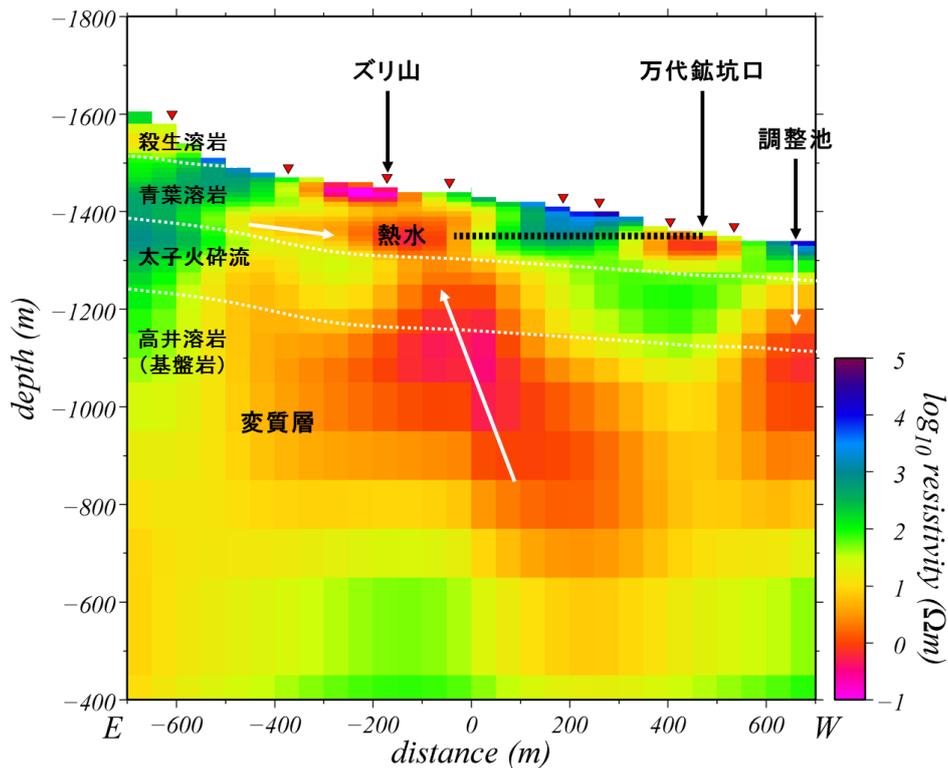
第 1 図：観測点の分布（水色）。万代鉱の坑口を赤四角で示した。灰色の実線は国道を示し、白色の破線は遊歩道を示す。

Fig.1: Location map of the AMT sites (sky blue). Red square shows the tunnel entrance of Bandaiko. Grey solid line and white broken lines indicate a National route and trails, respectively.

県境が近いため、60Hz のノイズが広範に混入していた。インダクションアローやフェーズテンソルの分布からは、地下構造の次元を二次元以下に制約できる情報は得られなかった。

3. 三次元比抵抗構造の推定

三次元比抵抗構造解析は、Siripunvaraporn and Egbert (2009) の三次元インバージョンコードを使用して行なった。インピーダンスの非対角成分のみを用い、2~3000Hz の間の 15 周波数を使用して比抵抗構造モデルを推定した。初期モデルとして、地形を含めた $100\Omega\text{m}$ 一様構造を仮定し、空気に相当する直方体ブロックの比抵抗値を $10^8\Omega\text{m}$ で固定した。地形モデルは、国土地理院の基盤地図情報(10m メッシュ)から作成した。計算メッシュは、万代鉱を中心とする $1.5\text{km}\times 1.5\text{km}$ をコア領域とし、領域内の水平メッシュを均等に 50m とした。コア領域の外側は中心から離れるに従ってメッシュサイズを大きくした。鉛直メッシュは、観測点が分布する標高 1340m~1580m を 10m とし、それより上部はモデル上面である標高 2130m まで最大で 50m、下部では、深くなるにつれてサイズを大きくした。全計算領域は $19.7\text{km}\times 19.7\text{km}\times 38.5\text{km}$ で、 $54\times 54\times 68$ ブロックの比抵抗値を推定した。エラーフロアは一律 5%に設定し、初期モデルに対する RMS 誤差は 55.4 であった。



第 2 図：三次元比抵抗構造モデルの万代鉱坑道を通る東西断面図。黒点線は坑道の推定位置。白点線は比抵抗分布と地質層序から推定される地質境界。白矢印は、推定される熱水の流れ。

Fig.2: An E-W resistivity cross section along the Bandaiko tunnel extracted from the final 3-D model. Black dashed line shows a location of tunnel. White dashed lines are geological boundaries estimated from the resistivity distribution. White arrows are flows of hydrothermal fluids guessed from this study.

第2図に、インバージョンの結果得られた三次元比抵抗構造モデルから、万代鉱坑道を通る東西断面図を示す。このモデルのRMS誤差は0.95であった。万代鉱の坑口と終端付近で低比抵抗を示しており、より低比抵抗の部分が坑道の終端付近に下部から続いているように見える。地質層序としては、地表に露出している殺生・青葉溶岩の下に、37万年前の太子火砕流堆積物があり、その下には約500万年前の安山岩の基盤である高井溶岩が存在する。この高井溶岩は、本白根南山腹のボーリングによって、スメクタイトを含む変質層であることが知られている（群馬県企業局, 1989）。三次元モデルでは、標高1200m付近より下に数10 Ω m以下の低比抵抗領域が広がっているが、この安山岩の基盤に対応していると思われる。草津白根山を東西に横断した比抵抗構造調査によっても、この低比抵抗帯は東側山麓に広く見つかっており、スメクタイトを含む不透水層であると解釈されている（Nurhasan et al., 2006）。

万代鉱の源泉は約96 $^{\circ}$ C、pH=1.6の高温酸性熱水で、その電気伝導度は25 $^{\circ}$ Cにおける換算値で1.08S/mと極めて低い値を示す（中央温泉研究所, 2006）。96 $^{\circ}$ Cでの値に戻すと2.76S/mとなり、坑道の終端付近の低比抵抗領域が示す0.5~1.5 Ω m（2.0~0.67S/m）の値より大きい。熱水変質により作られる粘土鉱物の表面伝導が寄与していることが考えられるが、万代鉱のような強酸性熱水の通路では、生成される粘土鉱物は、低比抵抗を示さず表面伝導の効果も小さいカオリナイトが卓越すると考えられる（例えば、高倉, 2009）。そこで、表面伝導の効果は考えず、修正アーチーの式（Glover et al., 2000）を用いて湧出源付近の空隙率を推定する。空隙が流体で満たされている流体と岩石の二相系を考え、岩石の比抵抗値を100 Ω m、膠結係数として空隙の大きな火山岩の代表値である1.44（Keller, 1988）を用いると、三次元モデルから推定された比抵抗値を説明するためには、空隙率が37%~80%でなければならない。従って、坑道の終端付近の大部分は熱水で占められていると考えられる。

4. まとめ

高温酸性熱水が湧出している草津万代鉱温泉周辺の計19ヶ所でAMT観測を実施した。地形を含めた三次元インバージョンの結果、熱水の存在域は1 Ω m前後の低比抵抗領域としてイメージングされ、大部分が熱水で占められていると推定された。この低比抵抗は、下部の基盤岩である新第三紀の溶岩層から連続しているように見えることから、下部から熱水が上昇していることが推測されるが、なぜ本白根山腹に熱源が発達しているのか不明であり、さらに広い範囲での深部探査が必要である。

謝 辞

AMT観測を実施するにあたり、林野庁関東森林管理局吾妻森林管理署、環境省万座自然保護官事務所、草津町教育委員会および群馬県教育委員会にご協力をいただきました。また、草津町温泉課には、本調査を行なう機会を与えてくれたことに加え、下見時から全面的にサポートをしていただきました。三次元インバージョンは、東京工業大学学術国際情報センターのTsubame2.5を用いて計算しました。本研究は、東京大学地震研究所の共同研究プログラムの援助を受けました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 中央温泉研究所, 平成 17 年度草津温泉湧出量実態調査業務報告書, pp.118, 2006.
- Glover, P. W. J., Hole, P. J., Pous, J., A modified Archie's law for two conducting phases, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **180**, 369-383, 2000.
- 群馬県企業局, 草津白根山周辺地熱調査報告書, pp.374, 1989.
- Keller, G. V., Rock and Mineral Properties, in Nabighian, M. N. (ed.): *Electromagnetic methods in applied Geophysics, Vol.1, Theory*, Soc. Explor. Geophys., 12-51, 1988.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S. B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T., Makino, M., Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, *Earth Planets Space*, **58**, 1053-1059, 2006.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth. Planet. Interiors*, **173**, 317-329, 2009.
- 高倉伸一, 粘土鉱物を含有する鉱物の比抵抗－間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響－, *物理探査*, **62**, 385-396, 2009.
- 宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予, 草津白根火山地質図 1:25000, 地質調査所, 1983.