

### 3次元比抵抗構造から推定される草津万代鉱周辺の熱水系 Hydrothermal system around the Bandaiko hot spring inferred from a 3-D resistivity structure

神田 径<sup>1\*</sup>; 高倉 伸一<sup>2</sup>; 小山 崇夫<sup>3</sup>; 小川 康雄<sup>1</sup>; 関 香織<sup>1</sup>; 日野 裕太<sup>1</sup>; 長谷 英彰<sup>1</sup>  
KANDA, Wataru<sup>1\*</sup>; TAKAKURA, Shinichi<sup>2</sup>; KOYAMA, Takao<sup>3</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>1</sup>; SEKI, Kaori<sup>1</sup>; HINO, Yuta<sup>1</sup>; HASE, Hideaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

万代鉱は、草津温泉から西に約3 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。1967年に硫黄鉱山の掘削中に湧出したもので、1976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。また、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。

そこで我々は、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。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県境が近いので、60Hzのノイズが広範囲に混入していた。解析は3次元解析を行った。Siripunvaraporn and Egbert (2009)の3次元インバージョンコードにより、インピーダンス4成分の15周波数を使用して比抵抗構造モデルを推定した。これまでのところ、万代鉱の坑口と終端付近で低比抵抗を示すという結果が得られている。発表では、温泉水の電気伝導度の測定値などを考慮して、万代鉱周辺の熱水系について考察する。

謝辞：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。

キーワード: 比抵抗構造, 草津白根火山, 熱水系, 草津温泉, 万代鉱

Keywords: resistivity structure, Kusatsu-Shirane volcano, hydrothermal system, Kusatsu-onsen, Bandaiko

## AMT法による立山地獄谷周辺の比抵抗構造 Resistivity structure around the Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan, inferred from AMT

関 香織<sup>1\*</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 長谷 英彰<sup>2</sup>; 日野 裕太<sup>1</sup>; 小林 知勝<sup>3</sup>; 丹保 俊哉<sup>4</sup>  
SEKI, Kaori<sup>1\*</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; HASE, Hideaki<sup>2</sup>; HINO, Yuta<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Tomokazu<sup>3</sup>; TANBO, Toshiya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 理工学研究科地球惑星専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学 火山流体研究センター, <sup>3</sup> 国土交通省 国土地理院, <sup>4</sup> 立山カルデラ砂防博物館

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Geospatial Information Authority of Japan, <sup>4</sup>Tateyama Caldera and Sabo Museum

北アルプスの弥陀ヶ原(立山)火山には、現在も活発な噴気活動を行っている地獄谷と呼ばれる場所がある。この地獄谷は、過去に繰り返された水蒸気噴火によって形成されたとされ、近年では、硫黄流出をはじめ、噴気ガスの組成変化、沸点を超える高温噴気の出現など、活動の活発化が懸念されている地域である。本研究では、水蒸気噴火の発生場であった立山地獄谷の、熱水流体の分布と噴気孔の位置関係、またガスだまりの有無を調べるために、地獄谷を中心とした東北東-西南西方向の測線にそって8点AMT法(Audio-frequency Magnetotellurics)調査の観測点を設け、地下の比抵抗分布を2次元解析により推定した。その結果、地獄谷の直下には低比抵抗体が広がり、その下500m以深では高比抵抗体が存在することがわかった。また、相対的に低い比抵抗を示す領域が、高比抵抗体を割るように地獄谷浅部へと伸びているような構造も見られた。浅部の低比抵抗体は、より低比抵抗を示す上部と、相対的に比抵抗が高くなっている下部に別れており、地質や岩石学的情報から上部は熱水を含んだ粘土混じりの堆積層であると考えた。また、下部の相対的に高い比抵抗を示す領域は、熱水に高温のマグマ性ガスが入り混じったものではないかと思われる。粘土層は透水性が悪いため、この比抵抗体上部が、下部に存在するマグマ性ガスを留めるキャップの役割を果たしている可能性がある。深部にある高比抵抗体は、地獄谷周辺に広く露出する基盤の花崗岩であり、この基盤岩を割り浅部低比抵抗体へと伸びる相対的に低比抵抗の領域は、マグマ性ガスの供給路である可能性がある。この供給路の直上では、地獄谷で最も活動的な噴気孔が存在している。

## 比抵抗構造で見る台湾北部・大屯火山群の熱水系 Hydrothermal system at Tatun Volcano Group, northern Taiwan, inferred from resistivity structure

小森 省吾<sup>1\*</sup>; 宇津木 充<sup>2</sup>; 鍵山 恒臣<sup>2</sup>; 井上 寛之<sup>2</sup>; 陳 中華<sup>1</sup>; 江 協堂<sup>3</sup>; 吉村 令慧<sup>4</sup>; 神田 径<sup>5</sup>  
KOMORI, Shogo<sup>1\*</sup>; UTSUGI, Mitsuru<sup>2</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>2</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>2</sup>; CHEN, Chang-hwa<sup>1</sup>; CHIANG, Hsieh-tang<sup>3</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>4</sup>; KANDA, Wataru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 中央研究院地球科学研究所 (台湾), <sup>2</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>3</sup> 国立臺灣大学, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Institute for Earth Sciences, Academia Sinica (Taiwan), <sup>2</sup>Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, <sup>3</sup>National Taiwan University, <sup>4</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology

台湾北部には、金山断層・嵌脚断層中に形成された20以上の火山体が存在し、大屯火山群と呼称される。七星山は、大屯火山群の中で現在最も活発な噴気・放熱活動を有している。歴史時代に噴火記録がないこともあり、本火山群の活動は終了したものと考えられていたが、比較的若い噴出物の発見 (Chen and Lin, 2002; Belousov et al., 2010)、高い<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比を持つ噴気 (Yang et al., 1999; Ohba et al., 2010)、高温物質の存在・流体流動を示唆する震源分布・地震波形 (Konstantinou et al., 2007) から、七星山の深部に潜在的な噴火可能性を有するマグマが存在するのではないかとということが最近になって指摘されている。こうした結果に基づき、大屯火山群の将来の噴火可能性や活動様式について、マグマ脱ガスの観点から拘束条件を与えることを目的に、宇津木・他 (2012, JPGU) は AMT 法による浅部比抵抗構造調査を七星山において行った。宇津木らの研究を踏まえ、本研究では、低比抵抗領域がどの程度の広がりを持っているかを明らかにするため、七星山のおよそ2km北東の馬槽・大油坑 (擎天崗) 地域において AMT 法による浅部比抵抗構造調査を行った。

得られた時系列データは FFT により周波数領域に変換され、Gamble et al. (1979) によるリモートリファレンス処理とともに周波数ごとのインピーダンスを求めた。本観測によって良好なデータが得られた周波数領域は1 - 10,400Hzであった。比抵抗構造解析には、本研究で得られた馬槽・大油坑地域の他に、宇津木・他 (2012) で得られた七星山のデータを併せて用いた。本研究では、Caldwell et al. (2004) の手法による impedance phase tensor ellipse の主軸方向の特性などから、本調査地域を1) 七星山周辺、2) 馬槽温泉・大油坑 (擎天崗) 地域の2つに分けて2次元比抵抗構造を推定することを試みた。構造推定には、Ogawa and Uchida (1996) の ABIC 最小化法インバージョンコードを用いた。得られた比抵抗構造と掘削報告書 (MRSO, 1969, 1970, 1971, 1973)、噴気ガス・温泉水の酸素- 水素同位体比・硫黄同位体比 (Ohba et al., 2010; 大沢・他, 2013)、水準測量による浅部圧力源 (村瀬・他, 2013・I A V C E I) とを比較することで、以下に示すような熱水系の存在が推定された。

七星山直下では、深部から高溶存成分濃度 (~100,000ppm NaCl 等価濃度) の2相流体が供給されており、それが柱状の極低比抵抗 ( $\leq 3\Omega\text{m}$ ) 領域を深度2 - 1kmに形成する。また、本領域に対応した減圧源が見られる。流体の浅部への上昇の過程で気相が液相より分離し、蒸気に卓越した、6 - 30 $\Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗- やや低比抵抗の領域が深度1 - 0.5km程度に形成される。この蒸気卓越領域は、上層の3 $\Omega\text{m}$ 以下の不透水層により保持され、蒸気の一部は不透水層の切れ目から外部へ直接放出され、地表に小油坑と呼称される噴気地を形成する。また、上昇した蒸気は地表付近を流れる地下水と混合することで、いわゆる steam heated thermal water を生成する。この熱水は地形に沿って浅部 (0 - 1 km深) を流下し、10 $\Omega\text{m}$ 以下の比抵抗を持つ領域で表される馬槽温泉を形成する。

一方、擎天崗直下では、深部から蒸気に卓越した流体の供給があり、それが深度1km以深に4 - 30 $\Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗- やや低比抵抗領域を形成する。また、本領域に対応する増圧源が見られる。その上層には3 $\Omega\text{m}$ 以下の極低比抵抗領域で表される不透水層が存在し、気相卓越領域が保持されている。蒸気の一部は北向きに上昇し、大油坑と呼称される噴気地を形成する。

本研究により、気相に卓越した領域が七星山から大油坑・擎天崗にかけた領域に広く分布していることが推定された。本地域では、約6千年前に火山灰放出を伴う水蒸気爆発を経験している (Belousov et al., 2010)。このことは、本地域では少なくとも過去数千年にわたり蒸気が維持されており、依然として水蒸気爆発の危険があることが示唆される。

キーワード: 大屯火山群, 熱水系, 2相領域, 蒸気卓越領域, 圧力源

Keywords: Tatun Volcano Group, Hydrothermal system, Two-phase region, Vapor-dominated region, Pressure sources

## 阿蘇カルデラにおける表層電気伝導度分布 Conductivity distribution of the surface layer in Aso Caldera

鍵山 恒臣<sup>1\*</sup>; 吉川 慎<sup>1</sup>; 宇津木 充<sup>1</sup>  
KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1\*</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>1</sup>; UTSUGI, Mitsuru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

火山活動には、マグマが地表に噴出しやすいか地下に留まりやすいかによって「噴火卓越型」から「地熱活動卓越型」まで幅広い多様性がある。異常現象が捉えられても噴火に至らない「噴火未遂事象」やマグマが地下に留まるイベントを繰り返す中で、深部から上昇してきたマグマが滞留しているマグマとぶつかることによって、カルデラ生成噴火などの「低頻度大規模噴火」が発生するとも考えられている。こうした現象は、マグマが地表にまで到達することなく地下に滞留し、マグマに含まれている揮発性成分が地表から噴出することに特徴があると考えられる。したがって、揮発性成分が火山の周辺にどの程度拡散しているか大変興味を持たれる。地熱地域では、地下深部から供給される火山ガスが地表に噴出するとともに帯水層に付加されて周辺に拡散していると考えられる。鍵山(2006)は、霧島火山群において地下浅部の帯水層の比抵抗が火口中心から周辺に向かうにつれて高くなるとともに、通常は高比抵抗であることが一般的な表層の比抵抗も中心部ほど低くなる傾向が見られること、地熱活動の活発な火山ほど低比抵抗域の面積が広くなることを示している。VLF-MT 観測によって得られる電気伝導度は、深さ数 m から 100m 程度までの表層に関する情報であるが、短時間に多数の点で測定が可能であり、比較的電磁気ノイズの大きい場所でも測定が可能であるので、火山・地熱活動の詳細な分布を知ることが可能になる。

阿蘇カルデラは、中岳火口に湯だまりを有し、その熱水が周辺に拡散しているか大変興味をもたれる。また、内牧温泉など、カルデラ内に存在する温泉の熱源と中岳の火山活動との関係も興味をもたれる。こうしたことから、阿蘇カルデラ北部に続き、南部においても VLF-MT による電気伝導度調査を実施し、阿蘇カルデラ全体の電気伝導度分布を明らかにした。以下にその概要を述べる。

**阿蘇カルデラ全域の特徴:** 阿蘇カルデラの表層電気伝導度は大きく 2 つに大別される。カルデラ床である阿蘇谷・南郷谷は、 $100 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度を示し、かつ比較的均質である。一方、中央火口丘群はそれ以下の低電気伝導度域となっている。この結果は、カルデラ床が過去にカルデラ湖を形成しており、地下水が豊富であることを反映しているのに対して、火口丘群では、緻密な溶岩や空隙の多いスコリアなどで覆われているためと思われる。

**中央火口丘群の特徴:** 火口丘群は全般に低電気伝導度であるが、個々の火口丘ごとに異なる特徴を持っている。中岳(火口近傍を除く)や北西に位置する米塚、杵島岳などでは  $30 \mu\text{ S/cm}$  以下となっている一方、中岳の西に位置する草千里では  $30 \mu\text{ S/cm}$  以上となっている。また、西部の吉岡や湯之谷、地獄、垂玉などの温泉地周辺では、 $300 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度域となっている。中岳の周辺部は低電気伝導度であるが、火口のごく近傍では  $300 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度となっている。また、中岳の北側山麓の仙酔峡から一宮付近では、米塚や杵島岳の北側山麓が低電気伝導度であるのに対して高電気伝導度となっている。また、中岳から南側の白川方向に電気伝導度の高い領域が伸びており、湯之谷、地獄・垂玉から南西方向にも高電気伝導度域が伸びている。これらの結果は、中岳の湯だまりから熱水が流出していることを示唆している。

**阿蘇谷の電気伝導度分布:** 阿蘇谷はほぼ全域で高電気伝導度を示すが、内牧温泉から三重塚にかけての領域および赤水温泉周辺において  $300 \mu\text{ S/cm}$  以上を示している。内牧-三重塚の延長には中岳が位置しており、なんらかの構造があるのかもしれない。また、内牧温泉の高電気伝導度領域は西南西-東北東方向に伸びる傾向があり、この線は温泉の並びや阿蘇カルデラ北部の地震活動の並びに一致する。これらの特徴は内牧温泉の熱水が構造線に規定されていることを示唆している。

**南郷谷の電気伝導度分布:** 南郷谷の電気伝導度も阿蘇谷と同様に高い値を示すが、三重塚周辺のような特に高い値は示していない。

こうした結果は、阿蘇カルデラにおいて、マグマから火山ガスがなんらかの構造線に支配されつつ発散されており、その脱ガス量が高電気伝導度領域の広さからかなり大きいことを示している。このことは、阿蘇火山においてしばしば噴火未遂が起きていること(地熱活動卓越型となっていること)と矛盾しない。

キーワード: 電気伝導度, 地熱活動, 噴火未遂, 阿蘇カルデラ

Keywords: Electrical conductivity, Geothermal activity, Failed eruption, Aso Caldera

## 火山性地盤変動における熱膨張モデルと茂木モデル The thermal expansion model and the Mogi model for volcanic ground deformation

狐崎 長琅<sup>1\*</sup>  
KITSUNEZAKI, Choro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>なし

<sup>1</sup>none

(1) 昨年本学会で提案した熱膨張モデル(狐崎・村岡,2013)について,その基礎面を茂木モデル(Mogi,1958)との関連において再構成した.茂木モデルでは,大地を半無限等方均質弾性体とし,地表を自由平面とする.地下に球状の圧力源を設定し,それによる地表の変位を求める.その際の地表の重力変化については,萩原(1977)が考察した.このモデルにおいては,球域内は基本的には空洞(あるいは異質物質)とされる.その特例として球域内が外部と同一物質で,域内の温度のみが上昇するとする.この場合,熱膨張が圧力源となり,茂木モデルは球状熱膨張モデル(STモデル)に転化する.この場合球域内では質量変化はなく,地表での重力変化も地表隆起によるフリーエア効果(FE)によってのみ生じる.

(2) 上記のSTモデルは,熱域が任意形状の場合にも拡張できる.熱域を微小な格子に分割するとする.各格子要素(立方体)は実効的には球状熱域要素として機能するので,それらによる出力(地表の変位,重力変化等)はSTモデルで与えられる.熱域全体による出力は各要素の出力の和となる.従って,任意形状の熱域においても,地表の垂直変位によるフリーエア効果(FE)のみが重力変化に寄与する\*.

\*[注] 狐崎・村岡(2013)における関連記述がここでは訂正されている.

(3) 実際の火山体浅部は概ね多孔質媒質とみなせる.間隙は水で飽和しており,流通状態にあるとする.(1)(2)の熱膨張モデルにおいて,媒質をこのような水飽和多孔質に置き換える.この場合間隙水に圧力変化はなく,固体部(骨格)は間隙水とは独立に挙動する.固体部の熱膨張は,(2)で述べたように地表変位とFEによる重力変化を生む.一方,熱域内の間隙水は温度上昇(沸点以下)に対応して,自由に膨張し,その密度も低下する.(水の熱膨張率は固体(岩石)よりも10倍以上大きい.)これによる重力変化がFEに加算され,総合的には重力変化は若干増幅される.このことを秋田駒ヶ岳に関わる数値例で示す.

[参考文献]

萩原幸男(1977): 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化, 震研彙報, 52巻, 301-309.

狐崎長琅・村岡淳(2013): 秋田駒ヶ岳火山における重力変化と熱膨張モデル, 地球惑星科学連合, 講演予稿, SVC52-04.

Mogi, K.(1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.36,99-134.

キーワード: 熱膨張モデル, 茂木モデル, 重力変化, 地盤変動, 秋田駒ヶ岳, 多孔質媒質

Keywords: thermal expansion model, Mogi model, gravity change, ground deformation, Akita-Komagatake, porous media

## 2つの周期がある間欠泉:El Cobreloa El Cobreloa: A geyser with two distinct eruption styles

並木 敦子<sup>1\*</sup>; Munoz Carolina<sup>2</sup>; Manga Michael<sup>2</sup>  
NAMIKI, Atsuko<sup>1\*</sup>; MUNOZ, Carolina<sup>2</sup>; MANGA, Michael<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地球惑星, <sup>2</sup> カリフォルニア大学バークレー校  
<sup>1</sup>DEPS, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>UC Berkeley

We performed field measurements at a geyser nicknamed “El Cobreloa”, located in the El Tatio Geyser Field, Northern Andes, Chile. The El Cobreloa geyser has two distinct eruption styles: minor eruptions, and more energetic and long-lived major eruptions. Minor eruptions splash hot water intermittently over an approximately 4 minute time period. A major eruption begins with an eruption style similar to minor eruptions, but then transitions to a voluminous water-dominated eruption, and finally ends with energetic steam discharge that continues for approximately 1 hour. We calculated eruption intervals by visual observations, acoustic measurements, and ground temperature measurements. All measurements consistently show that each eruption style has a regular interval: 4 hours and 40 minutes for major eruptions, and approximately 14 minutes for minor eruptions. We develop a model, in which the geyser reservoir, connected to the surface by a conduit, is recharged by the deep, hot aquifer. More deeply derived magmatic fluids provide the enthalpy to heat the reservoir. Boiling in the reservoir releases steam and hot water to the overlying conduit causing minor eruptions, and heating the water in the conduit. When the conduit becomes warm enough, the water in the conduit is able to boil, leading to a steam-dominated eruption that empties the conduit. The conduit is then recharged by the shallow, colder aquifer, and the eruption cycle begins anew. El Cobreloa provides insight into how small eruptions prepare the geyser system for large eruptions.

キーワード: 間欠泉, チリ, 地熱, 噴火

Keywords: geyser, El Tatio, geothermal systems, eruption

## 箱根山大涌谷火山ガス組成の時間変化 Time variation in the chemical composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Japan

大場 武<sup>1\*</sup>; 久野 友暉<sup>1</sup>; 左合 正和<sup>1</sup>  
OHBA, Takeshi<sup>1\*</sup>; KUNO, Yuki<sup>1</sup>; SAGOU, Masakazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東海大学理学部化学科

<sup>1</sup>Dep. Chem. School Sci. Tokai Univ.

### 序

箱根山は神奈川県西部に位置する活火山で、カルデラ構造を有し、中央火口丘の山腹には地熱地帯が発達している。中央火口丘を形成するマグマ噴火活動は、約五万年前（久野, 1972）に始まり、約三千年前（Kobayashi et al. 1997）まで継続したと考えられているが、最終のマグマ噴火活動から現在に至る期間の長さは、一連の活動継続期間に比べて短く、今後マグマ活動が再開しないとは言えない（町田, 1971）。約三千年前の噴火時には、中央火口丘神山が山体崩壊し発生した岩屑なだれによって、早川が堰き止められ、芦ノ湖が形成された（大木・袴田, 1975）。

箱根山で有史の噴火記録はないが、カルデラ内ではたびたび火山性地震が群発する。特に、2001年6月から10月にかけて発生した地震活動は活発で、中央火口丘の地下で体積膨張が観測され、山体に地殻変動をもたらした。この地殻変動は、深さ7kmの球状圧力源と、大涌谷および駒ヶ岳の浅部における潜在的な開口割れ目により説明された（代田・他, 2009）。2001年7月には大涌谷に掘削されていたボーリング孔の蒸気放出圧力が異常に増大した（辻内ほか, 2003）。

箱根山のカルデラ内には、15000人が居住し、平均して毎日5万人の観光客が訪れている。箱根山における火山災害を防止を目的とし、神奈川県温泉地学研究所は箱根山で、微小地震活動、地殻変動、および地下水位等の多項目の観測を1961年以来、継続している。

火山活動の本質はマグマの脱ガス現象であり、マグマ脱ガスに伴い放出される揮発性成分の一部は、火山ガスの成分を構成する。火山ガスは、火山現象を理解する上で本質的に重要な研究対象と言える。本研究では、大涌谷地熱地帯の火山ガスの繰り返し採取・分析の結果について報告する。

### 火山ガスの採取

大涌谷地熱地帯の自然噴気を2地点において2013年5月から繰り返し採取・分析した。ひとつは、駐車場の南東200mにある噴気で、2001年以来観測を継続している場所であり、定点と呼ぶ。二か所目は、駐車場の北方500mの山麓にある噴気で、近年になり出現した。この噴気を新噴気と呼ぶ。新噴気の周辺では、樹木が枯死している。両者とも、噴気の出口温度は96℃前後であり、水の沸点に近い。定点の噴気は、温泉水の湧出を伴うが、新噴気では、蒸気のみが放出されている。噴気は5MのKOH水溶液を用いたGiggenbachボトルで採取した。

### 結果と考察

定点と新噴気の組成は両者とも98%程度が水蒸気で占められ、次いでCO<sub>2</sub>が1~2%含まれていた。定点の噴気は、H<sub>2</sub>Sを0.2~0.4%含み、新噴気はその濃度が、0.036~0.050%と約10分の1であった。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比を取ると、定点の噴気については、5月から10月にかけて、単調な減少傾向が見られた。代田（2013）は検知管を用い、新噴気の組成を2012年3月から2013年9月にかけて頻繁に測定し、2013年1月に急激なCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の上昇を見出している。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は4月から9月にかけて単調に減少した。この傾向は本研究で見出した定点のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の傾向と一致している。

神奈川県温泉地学研究所によると、箱根山では2013年1月から2月にかけて地震の発生回数が急激に増加し、その後低下した。本研究で検出した噴気の組成変化は、代田（2013）が新噴気で見出した変化とともに、箱根山の火山活動に対応した変化であると推測される。箱根山において噴気化学組成の変動は、火山活動の良い指標として用いることができると考えられる。

キーワード: 噴気, CO<sub>2</sub>, 火山活動, 熱水系

Keywords: Fumarolic gas, CO<sub>2</sub>, Volcanic activity, Hydrothermal system

## 十勝岳周辺の温泉の地球化学的特徴と火山活動に伴う変化 Geochemical characteristics and changes of thermal waters around Tokachidake volcano, Japan

高橋 良<sup>1\*</sup>; 柴田 智郎<sup>1</sup>; 村山 泰司<sup>1</sup>; 荻野 激<sup>1</sup>; 岡崎 紀俊<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Ryo<sup>1\*</sup>; SHIBATA, Tomo<sup>1</sup>; MURAYAMA, Yasuji<sup>1</sup>; OGINO, Tagiru<sup>1</sup>; OKAZAKI, Noritoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道立総合研究機構 地質研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Hokkaido, HRO

北海道の中央部に位置する十勝岳は、20世紀以降、1926年、1962年、および1988-89年にマグマ噴火を起こしている。2010年以降、十勝岳では山頂火口域での地震活動や熱活動の活発化が認められ、将来のマグマ噴火が懸念されている。地質研究所では、十勝岳の火山活動状況を把握するため、1986年から周辺の温泉の観測を継続している。1988-89年噴火の前後には、温泉成分や泉温が大きく変化したことが観測されている（村山ほか、1991）。したがって、これらの温泉の成因と火山活動との関係を明らかにすることは、今後の噴火活動を予測する上で重要である。

山頂火口群から約2km南西のヌッカクシ火口（安政火口）内と、その下流域の溶岩流の末端には複数の温泉が自然湧出している。これら自然湧出の温泉はpHが低く、3.2以下を示す。1986年の時点では、これらの温泉中の陰イオン成分は、硫酸イオンに富み、塩化物イオンに乏しかった。また、ヌッカクシ火口からの距離が離れるにしたがって、陰イオン濃度が低くなる傾向がある。これらの特徴をもとにすると、ヌッカクシ火口域での噴気・熱水活動を起源とする硫酸イオンに富む熱水（Sタイプ）が、地下浅部を流動する間に周囲の地下水（GWタイプ）と混ざり、溶岩流の末端で温泉として湧出していると考えられる。

一方、本研究で対象とした温泉のうち最下流に位置する吹上温泉地域（標高1,000m）の温泉では、1986年の観測開始直後から塩化物イオンやナトリウムイオンの濃度が急激に上昇した。これらの成分濃度の上昇は、1988-89年噴火を挟んで1992年頃まで続き、それ以降は減少に転じた。成分の変化に伴って、泉温も1988-89年噴火を挟んで20℃以上上昇した。このような成分と泉温の上昇は、火山活動の活発化に伴って、NaCl成分に富む高温の熱水（NaClタイプ）が浅部帯水層に混入したために生じたと考えられる。このような温泉の変化は、吹上温泉地域よりも上流の翁温泉（標高1,060m）では認められないことから、NaClタイプ熱水の混入は翁温泉よりも下流で起こっていると推測できる。

以上のように、この地域の温泉は3つの端成分（Sタイプ、NaClタイプ、GWタイプ）の混合によって形成されている。NaClタイプ熱水の影響は吹上温泉地域でのみ認められ、その混入量は火山活動の変化に伴って変化する。最近では、2010年以降の火山活動の活発化に伴って、2012年頃から吹上温泉地域の温泉で塩化物イオンやナトリウムイオン濃度が再び上昇している。しかし、その濃度は1988-89年噴火前と比較すると低く、酸素・水素同位体比の値にも大きな変化は認められない。したがって、NaClタイプ熱水の混入量はまだ小さいと言えるが、十勝岳の火山活動状況を把握するため、今後も注意深く温泉観測を続ける必要がある。

キーワード: 十勝岳, 温泉, 化学成分, 噴火予測

Keywords: Tokachidake volcano, thermal water, chemical composition, eruption forecasting

## 温泉地域の同位体挙動のケーススタディ Case study of the behavior of isotope in several hot-spring field

柳澤 教雄<sup>1\*</sup>  
YANAGISAWA, Norio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研・地圏資源

<sup>1</sup>AIST

### 1. はじめに

地熱地域の熱水流動を解析するにあたり、熱水中の同位体は、その熱水の起源や流動にともなう水岩石反応を示唆する。また、国内の温泉には様々な起源があり、マグマからの分離、天水の地下での加熱など考えられる。さらに、EGSに代表されるように、地下に水を注入し、熱抽出を早める例もある。

本発表では、近年話題となっている温泉発電むけの高温温泉などで酸素および水素の安定同位体分析を行った事例を紹介し、温泉起源の多様性について考察する。

### 2. 測定事例

#### (1) 八丈島

八丈島には現在3,300kWの地熱発電所が稼働している。八丈島の水理系を解明するために、地熱発電所周辺のいくつかの湧水、温泉そして地熱発電所の熱水の酸素・水素同位体比の比較検討を行った。その結果、湧水の $\delta D$ は-35‰であり、酸素・水素同位体ダイヤグラムでは八丈島の降雨の変動範囲内の $d = 20$ 付近に分布した。温泉水では湧水に近い値を示す例と、 $d = 8$ 付近で海水に近い値を示す例があり、島内に天水起源と海水起源の温泉が分布することが示された。また、地熱発電所の熱水の同位体比は、これらの温泉に比べ相対的に $\delta^{18}O$ が高く、マグマ水が関与していると考えられ、また地熱熱水と温泉熱水の起源が異なることを示唆する

#### (2) 新潟県松之山温泉地域

松之山温泉地域では、現在温泉バイナリー発電実証試験が行われている。この地域には100℃近い温度でCl濃度が10,000mg/l前後の高塩濃度の源泉がいくつか存在し、その1つを発電試験に利用している。これらの源泉の $\delta D$ は-25‰付近、 $\delta^{18}O$ は0‰付近であり、同地域の河川水の天水ラインより相対的に $\delta^{18}O$ が高い傾向であった。また、同地域のCl濃度が2,000mg/l程度の松之山4号井では、同位体比は、河川水と高温源泉の直線上に位置した。この地域付近には火山はないがガス田が近く、温泉からメタンガスの発生がありジオプレッシャー型と考えられていることから、高温温泉水の起源は化石海水と考えられ、また松之山4号井では化石海水の源泉と天水の混合が行われていることが示された。

#### (3) 静岡県南伊豆温泉地域

南伊豆温泉地域にも、100℃近い高温でCl濃度が10,000mg/l前後の源泉がいくつか存在する。また、その源泉の東側にも温泉が広がっているが、東に行くほど源泉の温度が低下し、同時にCl濃度が低下している。そこで、いくつかの源泉と湧水の酸素水素同位体比を測定したところ、全ての源泉と湧水は天水起源のライン上に位置した。これより、高温の源泉も天水起源であること、また温泉水が地表付近で東方に流動していく過程で天水により希釈され、温度、Cl濃度が低下することが示唆される。

キーワード: 温泉, 地熱, 同位体, 天水, 化石海水

Keywords: hot spring, geothermal, isotope, meteoric water, fossil salt water

## トカラ列島小宝島の温泉の熱水地球化学 Fluid geochemistry of hot springs at Kotakara-jima, Tokara Islands

堤 彩紀<sup>1\*</sup>; 石橋 純一郎<sup>1</sup>; 今野 祐多<sup>2</sup>; 横瀬 久芳<sup>3</sup>  
TSUTSUMI, Saki<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>1</sup>; KONNO, Uta<sup>2</sup>; YOKOSE, Hisayoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>海洋研究開発機構, <sup>3</sup>熊本大学大学院自然科学研究科  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, 33 Kyushu University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

【はじめに】 カルデラ地形は、熱源・帯水層・不透水層等がそろっており、熱水循環系が発達しやすい地質環境である。横瀬ほか(2010)は、九州の火山フロントの南方延長線上のトカラ列島近傍の海底に、第四紀の火山活動で形成された巨大カルデラが存在することを提唱している。そのうちのひとつである宝島カルデラでは、その外輪山に位置する小宝島で、90℃以上の高温の温泉が海岸沿いに噴出していることが知られている。この小宝島の温泉水を採取・分析した結果を報告し、その熱水形成機構を考察する。

【試料の採取と分析方法】 温泉水試料の採取は、2013年5月に行われた。温泉水の温度・pH・電気伝導度・酸化還元電位を現地で測定した。温泉水試料は、0.45 μm フィルターでろ過してポリびんに入れて持ち帰り、実験室にて主要溶存成分の分析を行った。主要陽イオン濃度はICP - AES法、陰イオン濃度はイオンクロマトグラフィーを用いて分析した。アルカリ度はグラン法に基づく滴定法、ケイ素濃度は比色分析によって定量した。

【結果と考察】 温泉水の化学組成の特徴として、Cl<sup>-</sup>濃度が高いこと、Na/Cl比が0.75と海水とほぼ一致すること、酸素・水素同位体比が海水の値に近いこと、があげられ、熱水が海水を起源としていると考えられる。また、海水に比べてMg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が低く、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>濃度が高かった。これは海水と岩石の熱水反応において見られる特徴と一致している。地化学温度計を適用すると、熱水貯留層内の温度は250℃~300℃とかなりの高い温度であると推定できる。また、これまでに宝島カルデラ周辺で行われた海底ドレッジでは、玄武岩質安山岩、安山岩、デイサイト、流紋岩からなる溶岩片などが多量に採取されており、最近のマグマ活動が示唆される。

これらの結果から、宝島カルデラに規制された熱水循環系があり、その一端が小宝島の海岸で高温の温泉水としてあらわれている可能性が高い。

キーワード: 巨大カルデラ, 熱水循環系, 海水岩石反応

Keywords: Giant caldera, hydrothermal system, seawater-rock interaction

## 比抵抗構造探査によって推定された長野県・白骨温泉の熱水供給系 Hydrothermal system beneath Shirahone hot spring, Nagano, Central Japan, revealed by resistivity survey

山谷 祐介<sup>1\*</sup>; 茂木 透<sup>2</sup>  
YAMAYA, Yusuke<sup>1\*</sup>; MOGI, Toru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター  
<sup>1</sup>GSJ, AIST, <sup>2</sup>ISV, Hokkaido Univ.

長野県西部の梓川流域には多数の温泉や噴気地などが存在し、顕著な地熱兆候を示している。そのうちの一つである白骨温泉は全国的にもよく知られた温泉で、その温泉水は複数の入浴施設に利用されている。付近には、温泉成分の炭酸水素塩が沈殿堆積して形成された噴湯丘や球状石灰岩が広く分布しており、古い時代から温泉が自然湧出していた痕跡を残している。

白骨温泉地域では、ボーリング調査や物理探査などはこれまでほとんど行われておらず、温泉水の供給系については明らかにされていなかった。供給源である温泉貯留層とその熱源の規模を把握することは、将来的な温泉の持続性や地熱エネルギー資源の把握のために有用である。このため、白骨温泉周辺の地熱系を議論する目的で、広帯域 MT 法による比抵抗構造探査を行った。測定は、白骨温泉を NNE-SSW 方向に縦断する 3 km の測線に沿う 6 地点で行った。各地点で得られた見かけ比抵抗およびインピーダンス位相を使用し、2 次元構造を仮定したインバージョン解析を行い、地下 3 km までの比抵抗断面を推定した。

比抵抗構造は、おおよそ 1 - 3000  $\Omega\text{m}$  の範囲をとり、鉛直方向、水平方向ともに変化に富んでいる。この地域の普通の比抵抗は数十 - 数百  $\Omega\text{m}$  の範囲にあり、その中に地下水（熱水）が集まっているところに 10  $\Omega\text{m}$  以下の低抵抗域が形成されているとみられる。白骨温泉直下の深さ 400 - 1000 m と 2000 m 以深には顕著な低比抵抗体（3  $\Omega\text{m}$  以下）が見つかった。このうち浅部の低比抵抗体は、白骨温泉の温泉貯留層と考えられ、そこから断裂系に沿って熱水が地表まで上昇していると考えられる。特有の乳白色の温泉水は、表層近くに分布する石灰岩質の層を熱水が通過する過程で、その成分が溶解することが原因の一つと考えられる。一方、深部の低比抵抗体は、温泉の熱源となる高温の領域を示していると見られ、現在に至るまで高温を維持した貫入岩体を示している可能性がある。

比抵抗断面は、この地域を北西 - 南東方向に走る活断層である境峠断層を横切っている。地表断層の直下は、周囲に比べて高比抵抗と推定された。一般的に、断層の周辺は、透水性の高い破碎帯に水が浸入して低比抵抗となることが多い。それに対してここでは高比抵抗であるので、境峠断層の複数の活動セグメントのうち、断層活動後に地下水が衰退し、破碎帯が固着している一部分を見ている可能性がある。

キーワード: 温泉貯留層, 白骨温泉, 比抵抗, マグネトテルリク法, 地熱系

Keywords: hydrothermal reservoir, Shirahone hot spring, resistivity, magnetotellurics, geothermal system

## PS-InSAR 解析によって捉えられたオハアキ地熱開発地域における地表変動 Ground deformation around Ohaaki geothermal field, New Zealand inferred from persistent scatterer SAR interferometry

石塚 師也<sup>1\*</sup>; 辻 健<sup>2</sup>; 松岡 俊文<sup>1</sup>; 藤光 康宏<sup>3</sup>; 西島 潤<sup>3</sup>

ISHITSUKA, Kazuya<sup>1\*</sup>; TSUJI, Takeshi<sup>2</sup>; MATSUOKA, Toshifumi<sup>1</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>3</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科, <sup>2</sup> 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所, <sup>3</sup> 九州大学大学院 工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>2</sup>International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER), Kyushu University, <sup>3</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

ニュージーランド北島の中央部に広がる Taupo Volcanic Zone と呼ばれる火山群は、オハアキやワイラケイ地熱地域が存在する、世界有数の地熱開発地帯として知られている。この地帯に存在する地熱開発地域の中には、地盤沈下が報告されている地域もあり、ワイラケイ地熱地域では、年間約 30-50mm の地盤沈下が推定されている [Allis et al., 2009]。一方で、このように地熱開発に伴う地表変動現象が報告されている例は未だ少なく、今後の研究による地熱開発地域における地表変動現象の理解が求められると考える。

本研究では、Taupo Volcanic Zone の東側に位置するオハアキ地熱開発地域を対象として、persistent scatterer SAR interferometry (PS-InSAR) 解析を行うことにより、オハアキ地域の地表変動の推定を行った。PS-InSAR 解析では、SAR の観測間において、安定したマイクロ波散乱特性を示す散乱体の位相情報のみを用いて地表変動を推定するため、通常の InSAR 解析よりも高精度に地表変動を推定できることが知られている。解析には、2007 年 1 月から 2011 年 1 月間に北行軌道で取得された 21 シーンの ALOS/PALSAR データを用いた。解析の結果、地熱開発地域周辺で年間約 60mm の衛星から遠ざかる向きの変動が発生していると推定され、地盤沈下と考えられる。また、地盤沈下が発生している地域には、明瞭な境界が存在し、断層により地盤沈下域の境界が定まっている可能性がある。

Allis, R., C. Bromley, and S. Currie, Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand, *Geothermics*, vol. 38, pp.169-180, 2009.

キーワード: 地表変動, PS-InSAR 解析, オハアキ地熱地域

Keywords: ground deformation, persistent scatterer SAR interferometry, Ohaaki geothermal area

## Gravity Monitoring at Takigami Geothermal Area, Oita Prefecture, Japan Gravity Monitoring at Takigami Geothermal Area, Oita Prefecture, Japan

PRATIWI, Maryati<sup>1\*</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>  
PRATIWI, Maryati<sup>1\*</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kyushu University, Fukuoka, Japan

<sup>1</sup>Kyushu University, Fukuoka, Japan

The gravity monitoring at Takigami geothermal area has been applied since November 1996 (Oka et al., 2011). In this area, the nearest geothermal manifestations are about 1-2 km to north and east of Takigami (Furuya et al., 2000). So, there are no geothermal manifestations at the surface. The geothermal power plant was built at Takigami in August 1991. It was reported that its power plant output was changed from 25,000 kW to 27,500 kW in June 2010 (Kyushu Electric Power Co., Inc., 2010)

We analyzed the gravity data from August 2008 until August 2013. We found that the gravity changes at the northern zone, the western zone, and the southwestern zone of this area are quite stable historically. This result indicates that the recovery state for these zones is almost done. However, the data at the eastern zone shows gravity increasing. It was assumed that the subsurface fluid at Takigami area flows from south, which is the direction Kuju Mountain area. Then, we noted that the fluid from south is filling the faults in eastern area in the beginning before going through to northern area (due to its high permeability (Jalilinasrabad et al., 2011)), thus the recovery state in the eastern zone has not been done.

By using theorem of Gauss, we calculated the mass changes based on the gravity changes from August 2009 to August 2012. This calculation is excluding the northern area as it has different water system, and removed the effects of precipitation and evapotranspiration by Gwater-e program (Kazama, 2011). And, we found that the mass increases as much as 10.12 Mt in the Takigami geothermal area. This mass change is associated with the production and reinjection process of geothermal fluids.

### REFERENCES

- Furuya, S., Aoki, M., Gotoh, H. and Takenaka, T. (2000), " Takigami geothermal system, northeastern Kyushu, Japan, " *Geothermics*, 29. 191-211.
- Jalilinasrabad, S., Itoi, R., Gotoh, H., and Tanaka, T. (2011), " Development of the Optimum Numerical Reservoir Model of the Takigami Geothermal Field, Oita, Japan " *Proc. of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford , California, SGP ? TR ? 191.*
- Kazama, T., K. Yamamoto, and Y. Fukuda (2011), " Hydrological disturbance corrections for relative gravity data observed at Sakurajima Volcano. " *116th Meeting of the Geodetic Society of Japan*, 17 (oral presentation at Gifu).
- Kyushu Electric Power Co., Inc. (2010). " Introduction to Geothermal Power Station of Kyushu Electric Power Co., Inc. " [Company brochure].
- Oka, D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuda, Y. and Taniguchi, M. (2011), " Geothermal Fluid Flow Monitoring by the Repeat Gravity Measurement at the Takigami Geothermal Field, Japan — Application of Hybrid Gravity Measurement by an Absolute Gravimeter (A10) and Relative Gravimeters (CG-3M and CG-5) —" *Proc. of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford , California, SGP ? TR ? 191.*

キーワード: gravity change, gravity monitoring, mass change, Takigami  
Keywords: gravity change, gravity monitoring, mass change, Takigami

## 日射の影響が無視できる条件下における熱収支法 Heat balance technique under the condition that the influence of solar radiation can be negligible

藤光 康宏<sup>1\*</sup>; 西島 潤<sup>1</sup>  
FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1\*</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院  
<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

地熱地域からの放熱量を求める手法の一つである熱収支法 (Sekioka and Yuhara, 1974) では、単位面積当たりの放熱量と地熱異常温度 (地熱異常地域と通常地域の地表面温度差) とを関連づける比例定数として地熱流量係数が用いられる。地熱流量係数は対象地域における微気象観測により決定されるが、著者らはこの地熱流量係数の正確な決定のために微気象連続観測装置を製作して、各地で観測を行い、地熱流量係数に関する幾つかの考察を行ってきた (藤光ほか, 2009; 藤光ほか, 2010; 藤光ほか, 2011)。

熱収支法では、地熱異常が認められない地点の地表面温度を基準温度と設定し、基準温度より高い地表面温度を示す地点はすべて地熱異常地域と考える解析を行うが、研究を進める中で、日射が基準温度の決定に与える影響が、同手法による放熱量推定の精度を左右する大きな要因の一つであることが判明した。そこで、日射の影響が無視できる場合を想定し、夜間における人工発熱体を熱源とした観測実験を実施して、新たな解析手法による熱収支法の高精度化を目指した。

新たな解析手法では、日射がない状態における熱収支を考察すると共に、外部拡散係数の決定にリチャードソン数を導入し、さらに Bowen 比の逆数の決定方法を変更した。その結果、人工発熱体からの実際の発熱量とほぼ同じ値の放熱量が、新たな解析手法により算出された。

本研究を進めるにあたり、当時九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻修士課程の押方彰平氏には、現地観測やデータ解析などで多大な協力を頂いた。

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2009) 熱収支法で用いられる地熱流量係数の時間変化。日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集, V161-P012.

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2010) 熱収支法で用いられる地熱流量係数と地表面温度異常量との関係。日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SVC061-P03.

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2011) 熱収支法の地熱流量係数と各種微気象データとの関係。日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SVC049-P10.

Sekioka, M. and Yuhara, K. (1974) Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, No. 14, 2053-2058.

キーワード: 熱収支法, 地熱流量係数, 微気象, 放熱量, 日射, 基準点温度

Keywords: Heat balance technique, coefficient of geothermal flux, micrometeorology, heat discharge rate, solar radiation, reference temperature