

南伊豆温泉地域におけるトレーサー試験 Tracer test at Minami-Izu hot spring area, Shizuoka

柳澤 教雄^{1*}, 松山一夫², 富田 一夫², 武田康人², 阪口 圭一¹, 安川香澄¹

Norio Yanagisawa^{1*}, Kazuo Matsuyama², Kazuo Tomita², Yasuto Takeda², Keiichi Sakaguchi¹, Kasumi Yasukawa¹

¹ 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, ² 東電設計

¹Green-AIST, ²TEPSCO

1. はじめに

静岡県南伊豆地域において、2010年度から環境省による「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」プロジェクトが、産総研や東電設計などにより実施された。南伊豆の温泉地域は、東西約2km、南北1kmで多数の源泉が存在し、特に西部の加納温泉地域では多くが自噴であり、100前後で、Cl濃度10,000ppm前後の高塩濃度の温泉水が150m前後の温泉貯留層から生産される。そして、東部地域にいくにつれ温度が低下し、Cl濃度も減少している。このような地化学調査等から提唱されている温泉水の流動モデルでは、西部の加納地区に熱水の上昇域があり、そこから東方に流動があると考えられた。

そこで、本プロジェクトにおいては、加納地区において、深度600mの観測井、深度150mの涵養井の2本を掘削し、温泉貯留層への涵養試験にあわせて、涵養井にトレーサーを実施した。そして、観測井および4ヶ所の源泉でモニタリングを行うことにより、温泉貯留層内の流動状況を把握する。

2. トレーサー試験の概要

温泉貯留層への涵養は、観測井から温泉水をくみ上げ涵養井に注水する形で、2012年の9月12日から27日まで実施された。そして、9月16日の8:59~9:02にトレーサー（ウラン）500gを500Lの水溶液として温泉貯留層に投入した。そして、涵養井の70m何南西にある大学の湯（K-13）、100m東の共同湯（K-3）、170m東北東の玉川湯（K-11）、250m北東の八重ヶ瀬湯（K-6）において9/16から12月中旬まで定期的に温泉水サンプリング、トレーサー濃度測定を行った。また、K-13、K-3、K-11では光ファイバーシステムによるトレーサー濃度連続測定システムを設置した連続観測を会わせて行った。

3. 結果及び考察

トレーサー投入後、まず9時間後に約70m離れた大学の湯（K-13）から高濃度のトレーサーが出現した。ピークは3日後で濃度は60ppbに達した。また、11月末までの温泉生産量およびトレーサー濃度から算出した回収率は30%以上の高い値を示している。この出現時間、応答曲線、回収率は、高温岩体試験での人工亀裂に類似したものであった。そして、Sameshima and Iwahashi(1970)によると、涵養井および大学の湯付近を通り、NNW-SSE方向にのびる断層が確認されている。以上のことより、涵養井から大学の湯にかけては断層にそって、温泉水の導通が良好であり、トレーサーが早期に高濃度で出現したと考えられる。

また、観測井では投入4日後からウラン濃度が上昇しており、涵養した注水の下方流動があることが示唆された。

一方、水平流動については、最初に、11日後に約150m下流に位置する玉川湯からトレーサーの出現が観測された。さらに共同湯からは19日後、八重ヶ瀬湯からは34日後に検出され、水平流動の存在が示された。また、玉川湯のトレーサーのピーク濃度が他の10倍近くを示し、出現が早かったことから、水平方向の流動は、涵養井から玉川湯の方向であると考えられ、断層に対して直角の方向であることが示された。

キーワード: トレーサー試験, ウラン, 温泉, 光ファイバーシステム, 断層, 水平流動
Keywords: Tracer test, Uranine, Hot spring, Optical fiber system, Fault, Horizontal flow

フィリピン共和国ブルサン火山周辺の温泉の地化学的特徴 Geochemical characteristics of hot springs in Bulusan Volcanic Complex, Southern Luzon, Philippines.

田口 幸洋^{1*}, Vaquilar, Ramil L.², Laguerta, Eduardo P.², Bornas, Mariton, A.V.², Solidum, Renato, U. Jr.², Reyes, Perla, J.D.², Mirabueno, M. Hannah. T.³, Daag, Arturo S.², Bariso, Ericson B.², 奥野 充¹
Sachihiro Taguchi^{1*}, Ramil Lelay Vaquilar², Laguerta, Eduardo P.², Bornas, Mariton, A.V.², Solidum, Renato, U. Jr.², Reyes, Perla, J.D.², Mirabueno, M. Hannah. T.³, Daag, Arturo S.², Bariso, Ericson B.², Okuno, Mitsuru¹

¹ 福岡大学理学部地球圏科学科, ² フィリピン火山地震研究所, ³ クライストチャーチ市役所

¹Department of Earth System Science, Fukuoka Univ., ²Philippine Institute of Volcanology and Seismology (PHIVOLCS),

³Christchurch City Council

ブルサン火山はルソン島ビコール半島の最南端に位置する活火山である。フィリピンは世界2位の地熱発電国である。地熱発電は全国で7か所で行われており、その設備容量は1900 MWに達し、フィリピンの電力供給の12%を占めている重要なエネルギー源である。ブルサン火山の北方のBac-ManやTiwiではそれぞれ設備容量152MW、234MWの発電所が稼働している。

ブルサン火山周辺には多くの温泉が知られているが、具体的な化学的情報が報告されていないので、地熱資源の評価が困難な地域である。今回の調査で明らかになったことの一つには、この地域に成熟した中性の沸騰泉や深部熱水の上昇部の上位にしばしば発達する加熱蒸気型のSO₄型の酸性泉が認められないことである。イロシンカルデラ内に分布する温泉の温度は高くても45℃程度であり(San Benon)ある。また塩化物イオンも高くても170mg/l (Table1及び3)で、HCO₃型及びHCO₃-SO₄型のほぼ中性の温泉である。これらは、Na-K-Mg比を用いた地下温度推定法では未成熟と判定され水である。イロシンカルデラ外のBulusan火山の東方の海岸沿いに位置するBuhangは塩化物イオンは多いものの(613mg/l)、それらの起源は温泉に含まれるBrや水の同位体比から海水とCO₂に富む水(温泉)の混合により生成した推定され、塩化物イオンもほとんどは海水由来であると考えられる温泉である。また、Bac-Manの海岸近くのホットプール(Naghaso)も同様にできてきたものと考えられる。

イロシンカルデラ内で最もCl濃度が高いSan BenonでClとSO₄にモニタリングを行った。モニタリング期間中のClは81mg/l~168mg/lと倍程度変動し、これに応じてSO₄も増減する。その比はほぼ一定で、これらの変動は浅所地下水の水の混入の増減によっていると考えられ、この温泉は噴火の徴候の観測には不向きな温泉であることが明らかとなった。

キーワード: 温泉, 地熱, ブルサン火山, フィリピン

Keywords: Hot spring, Geothermal, Bulusan Volcanic Complex, Philippine

Implications of a large hydrothermal reservoir beneath Taal Volcano (Philippines) as revealed by magnetotelluric surveys

Paul Karson Alanis^{1*}, Yusuke Yamaya², Akihiro Takeuchi³, Juan Cordon¹, Jesus Puertollano¹, Christian Clarito¹, Takeshi Hashimoto⁴, Toru Mogi⁴, Yoichi Sasai³, Toshiyasu Nagao³

Paul Karson Alanis^{1*}, Yusuke Yamaya², Akihiro Takeuchi³, Juan Cordon¹, Jesus Puertollano¹, Christian Clarito¹, Takeshi Hashimoto⁴, Toru Mogi⁴, Yoichi Sasai³, Toshiyasu Nagao³

¹Philippine Institute of Volcanology and Seismology, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ³Earthquake Prediction Research Center, Tokai University, ⁴Institute of Volcanology and Seismology, Hokkaido University

¹Philippine Institute of Volcanology and Seismology, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ³Earthquake Prediction Research Center, Tokai University, ⁴Institute of Volcanology and Seismology, Hokkaido University

Located in the island of Luzon and 60 km south of the capital city of Manila, Taal Volcano is one of the most active volcanoes in the Philippines. The first recorded eruption was in 1573 and since then it has erupted a total of 33 times, with the last eruption in 1977. These eruptions resulted in thousands of casualties and considerable damage to property. In 1995 it was declared one of the '1990s decade volcano' by IAVCEI. Although the volcano remained fairly quiescent after the 1977 eruption, at the beginning of the 1990s it began to exhibit several phases of abnormal activities, such as episodes of seismic swarms, ground deformation and fissuring, and hydrothermal activities, all of which continues to the present. Examining past eruptions of Taal Volcano however, it has been observed that these can be divided into 2 distinct cycles, depending on the location of the eruption: eruptions centered at the Main Crater (1572-1645 and 1749-1911); and eruptions occurring at the flanks (1707-1731; 1965-1977).

We conducted (as part of the PHIVOLCS-JICA-SATREPS Project), magnetotelluric and audio-magnetotelluric surveys on Volcano Island, in March 2011 and March 2012. The objective of this survey was to create a resistivity model of the hydrothermal system beneath the volcano. Initial (2-D) inversion modeling revealed a prominent and large zone of relatively high resistivity between 1 to 4 kilometers beneath the volcano and almost directly beneath the Main Crater and surrounded by zones of relatively low resistivity. The anomalous zone of high resistivity is hypothesized to be a large hydrothermal reservoir filled with volcanic fluids in a gaseous phase. Three-dimensional forward modeling reveals the size of the reservoir to be as large as 3 km in diameter and between 1 km to 4 km in depth. This reservoir appears to be overlain by an impermeable cap, which exhibits a lower resistivity signature compared to the hydrothermal reservoir. Past eruptive activities of Taal Volcano (which are characterized by repeated changes in eruption sites, i.e. alternating between the Main Crater and the flanks and separated by long repose times), could be related to the presence of such a large hydrothermal. During the cycle of Main Crater eruptions, this hydrothermal reservoir is depleted, whereas during a cycle of flank eruptions this reservoir is replenished with hydrothermal fluids. In particular, the 1911 January 30 eruption showed an anomalous feature similar to a gas explosion, which can be attributed to the large hydrothermal reservoir collapsing catastrophically.

キーワード: hydrothermal reservoir, phreatic eruption, magnetotellurics, Taal Volcano

Keywords: hydrothermal reservoir, phreatic eruption, magnetotellurics, Taal Volcano

秋田駒ヶ岳火山における重力変化と熱膨張モデル Gravity variation in Akita-Komagatake volcano and thermal expansion model

狐崎 長琅^{1*}, 村岡 淳²

Choro Kitsunozaki^{1*}, MURAOKA, Atsushi²

¹ なし, ² 総合地質調査株式会社

¹ none, ² Sogo Geophysical Exploration Co.

(1) 秋田駒ヶ岳火山において、我々は地温、全磁力、重力等の反復定点観測により、1970年噴火後の火山状況の推移を追跡してきた。1971年の噴火終了後火口自体は急速に冷却したが、その周辺域が高温化した。その極大期の1977-78年頃以後、地温は低下に転じ、1995-98年頃にはほぼ平常地温まで冷却した。この高温期を噴火後高温期と呼ぶ。地熱活動は2006年頃以降再び復活し、現在高温域は女岳の山頂域から山腹にかけての東半域へと拡大しつつある(現高温期)。全磁力もこれと整合的に変化しているが、ここでは重力変化を取り上げる。地温の低下と共に重力は顕著に増加し、地温上昇と共に重力は減少した。

(2) 噴火後と現の両高温期を通じて、1m深地温は沸点(95℃程度)未満で、火山性ガスを伴わず、新たにマグマが浅部に貫入した気配はない。噴火後高温化は、噴火の際火道やその近傍に貫入した残存マグマが冷却しつつ熱水を介して周辺域を加熱したことによるものとみられる。現高温化は深部から新しく上昇した熱水によるだろう。女岳のように火山砕屑物に富んだ地層は浸透的で、圧力源となるような水蒸気蓄積は起こりにくいように思われる。このような状況では重力の変化に寄与する機構として地層の熱膨張が考えられる。その際の重力変化は地表面(観測点)高度の変化(フリーエア効果)と地層密度の変化によってもたらされるが、前者の効果が大きい。

(3) 当面のモデルとして、半無限等方均質弾性体中に特定の加熱域を想定する。その域内の温度を周辺域に較べて t だけ高める。その加熱域の形態としては、上面を媒質表面(地表面)とする半径 r の半無限鉛直円柱を仮定する(この他に半球域の場合も考えたが、ここでは省略する)。熱膨張は加熱域内の地表を高めると共に、密度変化をもたらし、この問題は次の手順で解ける：

均質等方半無限媒質中に半径 r の無限鉛直円柱域を設定し、域内温度を t だけ高める。域内外の応力や歪は既存式の応用によって求められる。中心 O (円柱軸上の点)を通る水平面(O 面)を設定し、その下半域に着目する。 O 面には鉛直応力 p が作用している。 O 面に更に補償応力 $q(=p)$ を加えることで、 $p+q=0$ とし、 O 面を自由面(地表面)に変換する。 $q(>0)$ (張力)は O 面を引き上げ、 h をもたらし、既存応力式の応用で、 h も重力変化値も求まる。

(4) このモデルが、噴火後高温期極大時(1977)の、沈静期(1998)に対する重力変化に適用された。観測された重力変化は女岳山頂で -0.25mGal であった。これと同等な重力変化値は下記のモデルパラメータを仮定することで、得られた：高温域については $r=200\text{m}$, $t=130$ ℃とし、線膨張係数は岩石の室内実験を参照して $10^{-5}/\text{℃}$ と仮定した。地層については常識的に密度 $=2.5\text{g/cm}^3$, ポアソン比 $=0.25$ とした。このとき、高度変化は $h=0.65\text{m}$ と求められた。仮定値は女岳の状況にほぼ適合している。なお、現高温期については、その主域が重力測点からはずれているため、この方法は直接的には適用し難い。

(5) このモデルでは、重力変化(絶対値)は地表面(観測点)高度の変化(フリーエア成分)だけによるよりも、密度変化の成分も重なるため、若干増加する。(4)の場合、前者の成分は -0.20mGal 、後者の成分は -0.05mGal であった。なお、モデルの検証のためには高度変化データの併用が勿論望ましいが、それは今後の課題である。従来の高度観測は不十分であった。

キーワード: 秋田駒ヶ岳, 火山監視, 地温, 熱膨張, 高度変化, 重力変化

Keywords: Akita-Komagatake, volcanic monitoring, ground temperature, thermal expansion, elevation variation, gravity variation

Repeated gravity measurement for hydrothermal monitoring beneath Aso volcano Repeated gravity measurement for hydrothermal monitoring beneath Aso volcano

yayan sofyan^{1*}, Yasuhiro Fujimitsu¹, Jun Nishijima¹, Shin Yoshikawa², Tsuneomi Kagiya²
yayan sofyan^{1*}, Yasuhiro Fujimitsu¹, Jun Nishijima¹, Shin Yoshikawa², Tsuneomi Kagiya²

¹Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, ²Aso Volcanology Laboratory, Graduate school of Science, Kyoto University

¹Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, ²Aso Volcanology Laboratory, Graduate school of Science, Kyoto University

At the end of 2010, the water level in the Nakadake crater in Aso volcano reduced and then was followed by a small eruption in May 2011. The eruption and water level variation in the crater has strong relation to hydrothermal dynamics beneath volcano. To monitor hydrothermal dynamics, the relative gravity measurements were performed with Scintrex CG-5 (549) and LaCoste Romberg type G-1016 gravimeter at 28 benchmarks before the eruption in April 2011 and some measurements after the eruption in 2011 and 2012. It covered the area more than 60 km² in the west side of Aso caldera. In another measurement, we installed a new microgravity network on May 2010 at seven benchmarks using A10-017 Absolute gravimeter, which we re-occupied in October 2010, and June 2011.

Gravity changes in the monitoring study clarify mass variation in the subsurface. Large residual gravity changes between the surveys are found at benchmarks around Nakadake crater and Ikeno kubo, a southwestern area from Nakadake crater. The changes between April and August 2011 significantly raise about 60 microGal near to Nakadake crater. The next period gravity monitoring from August to November 2011 shows the broad positive anomaly shifted to Ikeno kubo area. The large positive gravity variation in second period is up to 80 microGal. The opposite variation trend of previous period appears in gravity variation between November 2011 and April 2012.

The gravity changes around crater have good validation from water level variation in Nakadake crater. The water level variation of Nakadake crater is supplied from groundwater, high temperature fluid supply from depth, and precipitation. The 3D inversion models of 4-D gravity data deduce density contrast distribution beneath Aso volcano. The model of the microgravity data in short period indicates mass variation or density contrast dynamically occurred at shallow depth beneath Aso volcano. The gravity monitoring can contribute to understanding the process of eruption.

キーワード: Repeated gravity measurement, Hydrothermal dynamics, Aso volcano

Keywords: Repeated gravity measurement, Hydrothermal dynamics, Aso volcano

大分県滝上地熱地域における重力変動観測から考えられる熱水流動モデリング Modeling of Geothermal System from Gravity Monitoring at the Takigami Geothermal Field, Oita Prefecture, Japan

岡 大輔^{1*}, 藤光 康宏¹, 西島 潤¹, 福田 洋一²
Daisuke Oka^{1*}, Yasuhiro Fujimitsu¹, Jun Nishijima¹, Yoichi Fukuda²

¹九州大学大学院, ²京都大学大学院
¹Kyushu University, ²Kyoto University

再生可能エネルギーの中でも地熱エネルギーは24時間安定して発電が可能な大きな賦存量を持つ有望な国産エネルギー資源であるが、発電に際し地熱貯留層において大量の地熱流体の生産・還元を行うため、地熱貯留層の挙動を見誤ると貯留層の枯渇を招く危険性がある。地熱エネルギー開発における重力変動観測では、地熱流体の生産・還元に伴って生じる流体の質量移動を、地表における重力変動として捉え地熱貯留層の質量変化・状態変化をモニタリングする。地熱貯留層管理のために様々な調査が行われるが、重力変動観測は複数点での観測により、地熱貯留層における密度変化を広範囲で面的に直接得ることができる。

研究対象地域である大分県滝上地熱地域は、大分県南西部に位置し、1979年から出光地熱開発(株)により地熱資源の調査が行われ、1996年11月には出光大分地熱(株)と九州電力(株)により地熱発電所の運転が開始されている。九州大学地球熱システム学研究室では、滝上地熱貯留層における最適な開発規模の推定のために、生産・還元に伴う貯留層内流体の質量移動及び相変化を解明することを目的とし、本地域において1991年より現在まで重力変動モニタリングをカナダ Scintrex 社製の CG-3, CG-3M 及び CG-5 型相対重力計を用いてほぼ1年に1回程度の割合で行っている。

繰り返し相対重力測定により観測された重力値には対象とする深部の地熱貯留層の密度変化のほかに、浅部の地下水流動の影響が含まれているため、地熱貯留層における流体挙動を示す重力変動を観測するためには、この浅部の影響を取り除く必要がある。本研究では、陸水による地下水擾乱を地下水学的な仮定に基づいて経験的に見積もるプログラム G-WATER[E](風間ほか, 2011) を使用し、浅部の地下水流動に対して支配的な降水量の重力値への影響を求め補正した。

また、1998年にはハイブリッド重力測定の野外フィールドへの適用を主要な目的として可搬型絶対重力計 A10(Microg-LaCoste Inc.) が導入された。この A10 により本地域では還元地域の1点(T26A)、生産地域の3点(T13B, T22A, T27A)において絶対重力の野外測定を行っているが、T26Aにおける絶対重力値をもとにした相対重力測定の基準点 T1 の重力変動は約 10 μ gal 程度と見積もられ、T1 は相対重力測定の基準点として適当であると考えられる。

この結果、滝上発電所運転開始直後、生産地域において急激な重力減少が発生し、その後2年ほど安定したのち、対象地域全体で2002年まで緩やかに減少し、2002年以降重力が回復するという傾向が見られ、現在では滝上地熱発電所運転開始以前の程度にまで重力値は回復しているという観測結果が得られた。本研究ではこの相対重力測定より得られた各観測点における重力変動のパターンの違いによって、研究対象地域を西部・南西部・東部の3地域に分類を行った。さらに重力変動から推定される流体流動の経時変化は開発前の自然状態も含めて、5つのステージに分類されたと考えられる。地域分類と経時変化分類をもとに滝上地熱地域における熱水系挙動の概念モデルを導いた。

キーワード: 繰り返し重力観測, 絶対重力計, 相対重力計, 滝上地熱地域

Keywords: Repeat Gravity Measurement, Absolute Gravimeter, Relative Gravimeter, Takigami Geothermal Area