

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（ウラニン）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合わせて行った。

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日後からウラニ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, ウラニン, 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
Sachihito 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)も同様にしてで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

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 $r=200\text{m}$, $t=130^\circ\text{C}$ とし、線膨張係数は岩石の室内実験を参照して $10^{-5}/^\circ\text{C}$ 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ることが考えられる。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

活火山周辺における表層電気伝導度分布 Conductivity distribution of the surface layer around active volcanoes

鍵山 恒臣^{1*}, 宇津木 充¹, 吉川 慎¹, 小森 省吾²
Tsuneomi Kagiya^{1*}, Mitsuru Utsugi¹, Shin Yoshikawa¹, Shogo Komori²

¹ 京都大学理学研究科, ² 台湾中央研究院

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² Academia Sinica, Taiwan

Kagiya and Morita(2008) は、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ことを示している。また、その視点に立って、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」が発生するという仮説を提唱している。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しだいに高くなるとともに、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、阿蘇カルデラの北部において VLF-MT による電気伝導度調査を実施した。以下にその概要を述べる。

阿蘇カルデラ北部全域の特徴：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は、100 μ 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、阿蘇谷において地下水が豊富であり、過去にカルデラ湖を形成していた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 μ 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 μ 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 μ 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 μ 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。この結果は、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 μ 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。

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: 活火山, 電気伝導度, 地熱活動, 噴火未遂

Keywords: Active volcano, Electrical conductivity, Geothermal activity, Failed eruption

伊豆大島火山における自然電位の経時変化とその意味 Temporal variations of self-potential at summit area of Izu-Oshima volcano

松島 喜雄^{1*}, 西 祐司¹, 鬼澤 真也², 高倉 伸一¹, 長谷 英彰³, 石戸 経士¹
Nobuo Matsushima^{1*}, Yuji Nishi¹, Shin'ya Onizawa², Shinichi Takakura¹, Hideaki Hase³, Tsuneo Ishido¹

¹産総研 地質調査総合センター, ²気象庁 気象研究所, ³東京大学地震研究所

¹Geological Survey of Japan, ²Meteorological Research Institute, JMA, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1) はじめに

2006年から伊豆大島山頂カルデラにて自然電位の連続測定を行っている。測線は三原山下から剣ヶ峰脇を経て、楡形山麓を通りカルデラ南東側の裏砂漠へ向かう11地点(測線長約2km)からなる。各地点の1分毎の電位差を測定しデータロガーで記録するとともに電話回線にて最短で一日一回つくばヘデータを転送している。また、カルデラ内の1地点において気温、気圧、降水量等の接地気象要素を測定しデータロガーで記録している。

2) 測定結果

約1年の欠測(2010年4月~2011年5月)、複数回の2か月程度の欠測、裏砂漠の観測地点においてノイズが激しいことを除いて、おおむね順調にデータを取得している。基準点の取り方によって各地点の変動の様子は変わるが、全地点に共通して年周変動を示し、夏季に値が高く、冬季に低くなる傾向にあり、振幅の最大は100mVに達する。各観測点では、降雨に伴い数日間の短期的な変動を示し、これは1m程度の深さまでの地中の水分量が変化することによって生じ得ることが分かっている(松島他, 2008)。このことから類推して、年周変動もおそらく、土壌水分量が変化することによって現れているものと考えられる。土壌水分の観測結果および、降雨時の比抵抗の観測結果(高倉他, 2011)を参考に、年周変動の原因について考察する。このような年周変動を除くと、各地点とも火山活動に起因するような経年的なトレンドは示していない。

3) 火山活動の活発化に伴い予想される変化

火山活動が活発化してマグマが上昇した場合に予想される自然電位の変動を求めてみた。多孔質媒質中の熱水系のシミュレーションを行い、熱水の流れに伴う携帯電流を電流源とした電位分布を専用のシミュレーターであるSTARで計算した。現状の自然電位分布を説明する地下水系(Onizawa et al., 2009)に対して、マグマの頭位が火口直下の海水準にある場合(Case1)、さらにそこから8kg/sの量で水蒸気が脱ガスしている場合(Case2)、8kg/sで脱ガスしマグマ直上から地表へ至る領域の鉛直方向透水係数を2桁大きくした場合(Case3)、80kg/sで脱ガスしCase3と同様に鉛直方向の透水係数を2桁大きくした場合(Case4)について計算を行った。80kg/sの値は、前回の噴火活動期における地表からの最大の水蒸気放出量の半分に相当する。計算に際しては、地層の比抵抗を固体の比抵抗と空隙の比抵抗の並列回路とし、固体の比抵抗の温度依存性、空隙の比抵抗の含水量とその成分の依存性を考慮した。ここで脱ガスの凝縮相は $1\Omega\cdot m$ 程度の極めて低い比抵抗を示す。計算を行ったのはマグマの定置と脱ガス開始から約10年間で、その期間に脱ガスが地表へ達したのはCase3、4の場合で、いずれも地表での顕著な自然電位変動が現れた。基準点を楡形山麓の点とした場合の各地点(火口中心からの距離で示す)の10年後の電位を下に示す。計算結果は、最大で約200mV程度の正異常となることを示している。脱ガスの上昇に伴い、地表近くでは、ガス相の上昇と、凝縮相の下降のカウンターフローとなっている。携帯電流をもたらすのは下降する凝縮相のみなので、その直上では自然電位の負異常をもたらす。しかし脱ガスの凝縮相が比抵抗に及ぼす影響のほうが勝り、結果的には地層の比抵抗の低下に伴って自然電位は正異常となっている。Case4の場合、脱ガス開始から約1年後、まだ脱ガスは地表に到達していない時点でも、三原山近傍の地点での自然電位は約100mVの正異常となることが確認された。

キーワード: 伊豆大島火山, 自然電位, 熱水系, 数値シミュレーション

Keywords: Izu-Oshima volcano, Self-potential, Hydrothermal system, Numerical simulation

AMT法による台湾北部、七星山・馬槽・大油坑地域における比抵抗構造調査 Resistivity structure around Chishinshan, Matsao, and Tayukeng areas, Taiwan, revealed by audio-magnetotellurics

小森 省吾^{1*}, 宇津木 充², 鍵山 恒臣², 井上寛之², 陳中華¹, 江協堂³

Shogo Komori^{1*}, Mitsuru Utsugi², Tsuneomi Kagiya², Hiroyuki Inoue², Chang Hwa Chen¹, Hsieh Tang Chiang³

¹ 中央研究院地球科学研究所, ² 京都大学火山研究センター, ³ 國立臺灣大學海洋研究所

¹Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, ²Aso Volcanological Laboratory, Kyoto Univ., ³Institute of Oceanography, National Taiwan University

放熱活動の活発な火山における電磁気観測では、比抵抗の低い領域が浅部にしばしば見出される。これは、マグマから放出された高温・高塩濃度の揮発性物質が帯水層に付加することで高導電性の熱水が生じること、熱水変質により母岩の導電性が高まることによる。低比抵抗域の空間分布を明らかにすることで、地下水流動による揮発性物質の輸送量を推定する上で強い拘束条件を与えることができることが期待される。

台湾北部には、金山断層・嵌脚断層中に発達した地溝中に形成された20以上の火山体が存在し、大屯火山群と称される。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³He/⁴He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, WS at TVO)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。その結果、七星山の下1~2 kmの深さに比抵抗の低い領域の存在を示唆するpreliminaryな構造が得られている。

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2 km北東の馬槽・大油坑地域においてAMT法による浅部比抵抗構造調査を行った。両地域では、浅部に活発な温泉・噴気活動が見られており、七星山下のマグマ中の揮発性物質の放出と関連があると見られている。観測は2台のPhoenix MTU5A systemを用い、2012年12月9日~16日にかけて行われた。両地域をまたぐよう合計10地点について、日中4時間の観測を1日2点行った。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1~10400 Hz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。

まず最初に、七星山・馬槽・大油坑の3地域にまたがる構造の大局的な特徴を把握するため、インピーダンスの回転不変量を用い、各周波数ごとの見掛け比抵抗分布について検討を行った。その結果、以下のような特徴が見出された。数kHzの高周波数では、10~30 Ωmの見掛け比抵抗の低い領域が、冷水坑・馬槽・大油坑の各地域にスポット状に見られる。周波数の減少とともに、この領域は徐々に拡大する。数10 Hzでスポット状に見られていた低比抵抗領域が1つにつながるようになり、30 Ωm以下の領域が七星山の中心付近に出現する。これらの特徴は、七星山中心に存在する熱水が帯水層中を流動し、浅部に向かう流れの中で冷水坑・馬槽・大油坑の各地域へ分かれ、地上で放出されているということが示唆される。

インピーダンスフェーズテンソル解析(Caldwell et al., 2004)では、七星山・馬槽・大油坑のそれぞれの地域で主軸の方向に異なる特徴が見られることが分かった。七星山周辺では、フェーズテンソルの主軸は主に金山断層にほぼ直行するものが卓越する。馬槽地域では、金山断層にほぼ直行する方向と、活発な温泉の湧出の見られる、七股山と七星山に挟まれた谷筋の方を向く。大油坑地域では、噴気地の方を向く。これらの特徴をもとに、各地域で卓越する平均的な構造走向を、七星山周辺でN52.5°E、馬槽地域でN70°E、大油坑地域でN90°Eと推定した。本発表では、Ogawa and Uchida(1996)のコードを用い、各地域において2次元比抵抗構造を推定した結果についても扱う予定である。

キーワード: 低比抵抗域, 熱水, 熱水変質, マグマ脱ガス, 大屯火山群, 台湾

Keywords: low resistivity region, hydrothermal fluids, hydrothermal alteration, magma degassing, Tatun Volcano Group, Taiwan

阿蘇中岳第一火口における熱水流入過程 Fluid injection at the 1st crater of Aso volcano

横尾 亮彦^{1*}

Akihiko Yokoo^{1*}

¹ 京都大学火山研究センター

¹ Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University

阿蘇中岳第一火口は湯だまりとも呼ばれ、エメラルドグリーンのお湯で満たされていることが多い。しかし、数年に一度の頻度で、お湯が干上がって、露出した火口底から火山灰を放出することがある。直近では2011年5月～6月にそのような活動があった。湯だまりとして安定した状態にあることと、お湯がなくなり、火口底から物質放出が起こることは、表面現象としては明瞭な違いではあるが、火口下で発生している現象の本質は同じであると考えられている (Terada et al., BV, 2012)。すなわち、噴火現象の有無に関わらず、火口下からは常に火山起源の熱流体の注入があり、火口内がお湯で満たされているときは熱水として流入し、お湯がなくなり火口底が露出している状態では、熱流体は冷却されることなくそのまま破碎物として放出される。本研究ではこのことを地球物理観測の見地から検討する。2011年から2012年にかけての火口東観測点の地震・空振記録を用いた相互相関解析 (Ichihara et al., GRL, 2012) を行ったところ、2011年5月の噴火活動期間中には明瞭な相関縞模様が確認された。その特徴は、空振によって観測点地面が揺らされたことを示すものであり、噴火活動による空振励起があったことを想起させる。一方、湯だまりが回復した噴火終了後の期間であっても相関縞模様が発現した。このときの相関縞模様は、いわゆる噴火期間のような“理想的な”場合の特徴を示さなかったが、バックグラウンドの連続微動 (Takagi et al., JVGR, 2009) の影響下で空振が地面を揺動したとして説明が可能である。空振ネットワーク観測記録によれば、噴火期間、噴火終了後のいずれの場合であっても、その波源は中岳第一火口中央部に求まる。噴火期間後の空振シグナルは、火口底に急激な熱水流入が起きることによってその直上の湯だまり水面が揺らされ、大気を振動させたものと推定される。もし、より急激に、かつ、大量の熱流体の注入が起きれば、2003年、2004年の土砂噴出イベント (宮縁ほか, 火山, 2005) のような現象として認識されるのであろう。上記のような仮説が正しいか否かを検証するためには、湯だまりの温度や水位変化などに加えて、流体移動に伴って発生する微動 (Taisne et al., GRL, 2011) について注意深くモニタリングし、これらの観測結果と相関縞の発現の有無との関係性について検討する必要があると考えている。

北海道東部、川湯温泉における近年の泉温の上昇について

Rising of the temperature of Kawayu hot springs in recent years, eastern Hokkaido, Japan

岡 孝雄^{1*}

Takao Oka^{1*}

¹ アースサイエンス株式会社

¹ Earth Science Co. LTD, Japan

川湯温泉について、弟子屈町の市街計画に関連して現況調査を行った(2011年12月)。その結果、大部分の泉源は65℃~50℃前後で、ほぼ1950年代から1960年代半ばにかけての高い状態に回復していることが分かった。川湯温泉は屈斜路カルデラ内の北東部の湖岸低地にあり、そこでは摩周火山やアトサヌプリ火山群に源のある川がファンデルタ状の扇状地を形成している。従来の地質調査・ボーリング資料の収集に加えて、あらたに30mボーリングが温泉街周辺で行われ、地下100m前後までの地質は下位から、湖沼堆積物、摩周火砕流堆積物 Ma-f および段丘堆積物であることが確認できた。同温泉の温泉学的な調査は、北大地球物理学教室による1952年10月および1955年10月の調査(福富ほか)、同じく1970年12月の調査(浦上ほか)、道立地下資源調査所による1978年、1999年の一斉泉質分析の調査がある。特に、北大の2つの調査では1m深地温調査が実施され、川湯温泉の形成と湧出のメカニズムが「アトサヌプリ火山を源とし、周囲の地下水と混合しながら流下するもの」であることが明らかにされ、福富らの調査から浦上らの調査の15年の経過の間に、流下高温部(1m深地温調査により把握)の面積の減少・湧出温度の低下が明らかになっていた。浦上らから41年後の今回の1m深地温調査では、それがやや拡大していることが分かった。75の泉源・水井戸群の泉温・湧出量・泉質(pH・電気伝導度)なども測定し、泉温的には福富らの1950年代の調査の頃に回復していることが明らかになった。1999年の調査では40℃~55℃未満が大半であるが、今回の調査では55℃以上が半数で、55℃から60℃未満が泉温分布のピークで、明らかにここ10年あまりの間に急激な回復が認められる。

アトサヌプリ火山の活動に直結する川湯温泉であるが、これは温泉街の衰退にともなう温泉水利用量の減少という、社会経済的要因が関係していると思われるが、火山活動との関係も今後、検討されるべきであろう。

キーワード: 川湯温泉, アトサヌプリ火山, 屈斜路カルデラ

Keywords: Kawayu hot springs, Atosanupuri volcano, Kutcharo Caldera

九重火山からの火山性二酸化炭素放出量の推定 Estimation of volcanic carbon dioxide emission rate from Kuju Volcano, Japan

藤光 康宏^{1*}, 前田 典秀², 江原 幸雄³, 野田 徹郎³
Yasuhiro Fujimitsu^{1*}, MAEDA, Norihide², Sachio Ehara³, NODA, Tetsuro³

¹九州大学大学院工学研究院, ²九州大学大学院工学府, ³地熱情報研究所

¹Faculty of Engineering, Kyushu University, ²Graduate School of Engineering, Kyushu University, ³Institute for Geothermal Information

大分県九重火山の熱水系の数値モデル構築のデータとするために、九重火山地域からの火山性二酸化炭素放出量の推定を行った。

まず、二酸化炭素放出の形態として、火山中心部の噴気孔からの噴気によるもの、噴気孔周辺の裸地の土壌ガスによるもの、山腹部の土壌ガスによるもの、山麓の温泉水によるものの4つを考え、それぞれについて過去の研究結果や現地測定結果から具体的な数値を見積もった。噴気孔からの噴気によるものとしては、観測結果より現在の九重火山の活動が1995年水蒸気爆発以前の状態に戻っていると判断し、江原ほか(1981)が示した約166 t/日を採用した。噴気孔周辺の裸地の土壌ガスによるものとしては、糸井(1993)が示した土壌二酸化炭素濃度分布の結果を、九重火山で蘭ほか(2008)により行われた北川式ガス検知管とCO₂流量計による土壌二酸化炭素測定の結果から得られた、二酸化炭素濃度から流量への換算式により換算して、約0.8 t/日と見積もった。山腹部の土壌ガスについては、北川式ガス検知管による60点の土壌二酸化炭素濃度測定と共に、15点の土壌ガスサンプルについて炭素同位体分析を行い二酸化炭素の起源を推定した。その結果、山腹部についてはほぼ全てが有機物起源の二酸化炭素であると考えられ、火山起源の二酸化炭素放出量は0 t/日とした。最後に、山麓の温泉水によるものとしては、岩倉ほか(2000)により火山起源の炭酸泉であると示されている長湯温泉を考え、平均湧出量と平均二酸化炭素濃度より約5.0 t/日という放出量を得た。

以上より、九重火山からの火山性二酸化炭素の放出量は、噴気孔からの噴気と温泉水によるものが卓越していると推定された。

蘭ほか(2008)九重火山における土壌二酸化炭素濃度測定及びインドネシア・メラピ、メルバプ、ウンガラン火山との比較。日本地熱学会平成20年学術講演会講演要旨集, P15.

江原ほか(1981)九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれから推定される熱水系と火山ガスの起源。火山第2集, 26巻1号, pp.35-56.

糸井(1993)土壌ガス探査。火山発電に関する基礎的研究—九重火山・九重硫黄山における熱構造・熱過程・熱抽出に関するケーススタディー, 平成1~4年度科学研究費補助金(一般研究(A))研究成果報告書(課題番号:01420038), pp.104-113.

岩倉ほか(2000)長湯温泉(大分県)から放出される二酸化炭素の起源。温泉科学, 50巻2号, pp.86-93.

キーワード: 九重火山, 二酸化炭素, 放出量

Keywords: Kuju Volcano, carbon dioxide, emission rate