

## 霧島火山丸尾温泉の地熱系

### Geothermal system of Maruo Hot Spring in Kirishima Volcano, Kyushu, Japan

田口 幸洋<sup>1\*</sup>, 松川 みのり<sup>1</sup>

TAGUCHI, Sachihoro<sup>1\*</sup>, MATSUKAWA, Minori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 福岡大学

<sup>1</sup>Fukuoka Univ.

丸尾温泉は霧島火山の新燃岳の西南西約6 kmにあり、霧島火山地域で最も大きな温泉地である。また、この温泉のなかの霧島国際ホテルでは100KWの小型地熱発電が1984年より行われている。

この温泉地域から湧出する温泉のほとんどはボーリング坑から得られており、陰イオン組成からCl型、蒸気加熱水(SO<sub>4</sub>型~HCO<sub>3</sub>型)、およびこれらの混合型を示している。Cl型の温泉は丸尾温泉の中央部を北東から南西にかけて分布し、蒸気加熱水はこれらの周辺部に分布している。このうち、SO<sub>4</sub>型の蒸気加熱水は北東部のより高地形部の噴気帯に主に発達している。また、小規模のものは中央部の低地にも認めることができる。混合型のものは中央部のCl型の周辺に発達している。

Na-K-Mg ダイアグラム、Cl-エンタルピー関係、水の同位体比からこの地域の温泉は丸尾温泉の北東部から上昇してきていると考えられ、周辺にむかって地下浅所の蒸気加熱水と混合していることが明らかとなった。これらの上昇通路は本地域に広く発達するNE系の断裂と同じ方向性を持っていると考えられる。

キーワード: 丸尾温泉, 地化学, 霧島火山, 地熱系

Keywords: Maruo hot spring, Geochemistry, Kirishima volcano, Geothermal system

## 霧島火山群周辺の表層電気伝導度分布 - 噴火未遂の視点から Conductivity distribution of the surface layer around Kirishima Volcanic Group - on the aspect of failed eruptions

鍵山 恒臣<sup>1\*</sup>, 吉川 慎<sup>1</sup>, 宇津木 充<sup>1</sup>, 大沢 信二<sup>1</sup>, 三島 壮智<sup>1</sup>, 井上 寛之<sup>1</sup>, 小森 省吾<sup>1</sup>

KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1\*</sup>, Shin Yoshikawa<sup>1</sup>, UTSUGI, Mitsuru<sup>1</sup>, OHSAWA, Shinji<sup>1</sup>, MISHIMA, Taketoshi<sup>1</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>1</sup>, KOMORI, Shogo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大理

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto Univ.

霧島火山群は、新燃岳、御鉢、硫黄山など20数個の火山からなる火山群である。2011年の新燃岳噴火に関連して多くの研究が行われている。とりわけ、新燃岳北西方に見出された圧力変動源で再び進行している増圧が新燃岳の噴火活動とどのように関連するか注目されている。しかしながら、霧島の問題は、新燃岳の今後の噴火だけではなく、圧力変動源が霧島火山群の火山活動とどのように関連しているか、2011年以前に発生していた新燃岳の噴火や群発地震がどのような意味を持つのかも重要な視点である。たとえば、新燃岳直下で発生した群発地震や微噴火の後に周辺の温泉活動や硫黄山の噴気活動が活発化したりしている。こうした観点から、小山他によって広帯域MT調査が行われている。本研究では、この調査を補完するために、霧島火山群周辺において多数点のVLF-MT観測を行って表層の電気伝導度分布を明らかにするとともに、えびの高原等に湧出する温泉水の電気伝導度の繰り返し調査を行っている。以下にその概要を報告する。

### 霧島火山群周辺の表層電気伝導度分布

霧島火山群全体の傾向として、鍵山(1994)が指摘したように、硫黄山周辺、新燃岳から大幡山を経て大幡池に連なる火山群において高電気伝導度域が見られる一方で、南東部の高千穂火山等では御鉢の火口内に高電気伝導度領域が見られるのみで周辺域は低電気伝導度となっている。また、南西山麓の霧島温泉から手洗温泉付近には高電気伝導度域が広がっている。一方、霧島火山群東麓では、皇子原から血捨の木温泉にいたる西北西-東南東方向の領域が高電気伝導度となっている。この一帯は地震の発生域とも一致しており、何らかの構造が存在すると考えられる。この線状異常域とほぼ平行に、宮崎自動車道の霧島サービスエリア付近に高電気伝導度領域が見られ、地震も多発している。これらは、霧島火山群周辺の構造を反映したものと考えられる。

### えびの高原周辺の温泉水の電気伝導度の時間変化

えびの高原には、硫黄山の北側および西側に湧水が見られる他、えびの高原ビジターセンター敷地内で掘削された温泉水が足湯として利用されている。これらの水の化学分析を行い、アニオンインデックスを計算すると、硫黄山に近接する西側および北側の湧水ではほぼ1.0となり、足湯では0.92と低下し、小林市内に湧出する温泉では0.35と低い値を示す。この結果は、硫黄山付近に湧出する水にマグマ起源物質が多く含まれていることを示している。これらの水の電気伝導度を繰り返し測定した結果(2008年から2011年12月まで)、足湯では220~230  $\mu$  S/cm程度で変化していないのに対して、硫黄山西側では、2008年9月に900  $\mu$  S/cmと高い値を示した後、2011年3月に400  $\mu$  S/cmに低下し、同年6月に450~480  $\mu$  S/cm、9月に374  $\mu$  S/cm、12月に620  $\mu$  S/cmとふたたび増大している。これらの変化はマグマの動きを反映している可能性もあるが、より詳細な測定が必要である。

キーワード: 霧島火山群, 電気伝導度分布, 火山活動, 噴火未遂

Keywords: Kirishima Volcanic Group, Conductivity distribution, volcanic activity, failed eruption

## 大分県滝上地熱地域における重力変動から見た地熱貯留層評価 Evaluation of Geothermal Reservoir from the Gravity Changes at the Takigami Geothermal Field, Oita Prefecture, Japan

岡大輔<sup>1\*</sup>, 藤光 康宏<sup>2</sup>, 西島 潤<sup>2</sup>, 福田 洋一<sup>3</sup>, 谷口 真人<sup>4</sup>

OKA, Daisuke<sup>1\*</sup>, FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>2</sup>, NISHIJIMA, Jun<sup>2</sup>, FUKUDA, Yoichi<sup>3</sup>, TANIGUCHI, Makoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学府, <sup>2</sup>九州大学大学院工学研究院, <sup>3</sup>京都大学大学院理学研究科, <sup>4</sup>総合地球環境学研究所

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>RIHN

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、エネルギーの安定供給の観点から特定のエネルギーに依存することのリスクが高く、再生可能エネルギーを含めた多様なエネルギーを複合的に使う必要性があるのだと我々は再認識することとなった。地熱エネルギーは再生可能エネルギーの中でも24時間安定して発電が可能であり、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・還元を行うので、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。地熱貯留層の性情を正確に把握するために、種々の地熱貯留層評価手法が考案され適用されているが、その一つに繰り返し重力変動観測がある。地表下における地熱流体の移動は地表面における重力変動として現れるため、地表にて重力を繰り返し観測することによって地熱貯留層における質量収支を評価することが可能である。

九州大学地球熱システム学研究室では、地熱貯留層に最適な規模の地熱流体の生産・還元を行うために、大分県滝上地熱地域において1991年より現在まで重力変動モニタリングを行ってきた。但し、本地域においては重力基準点を使用した相対重力測定のみが行われてきたため、重力基準点の変化についての評価がなされていなかった。そこで2008年2月よりMicro-g LaCoste社製A10絶対重力計を導入し、還元地域1観測点(T26A)、生産地域3観測点(T13B, T22A, T27A)の合計4観測点で絶対重力測定を行ってきた。絶対重力測定では基準点を必要とせず、それぞれの測点における重力値が独立しており、系統誤差が入りにくいという長所がある。A10絶対重力計は、従来広く使われてきたMicro-g LaCoste社製FG-5絶対重力計に比べてコンパクトとなり、バッテリーで駆動可能となっているため滝上地熱地域のような山間部にも搬入することができ、AC電源がとれないような屋外の観測点でも絶対重力測定が可能ではある。しかし一方で、測定時間が1点当たり1時間程度かかることや重力計設置に必要な領域を考えると、観測の条件はまだまだ相対重力計に比べると厳しい。このように絶対重力計と相対重力計のそれぞれが持つ長所及び短所を考慮すると、それぞれの長所を生かした相互補完的な測定が効率の良い測定であると考えられる。そこで従来使用してきたSCINTREX社製CG-3, CG-3M相対重力計とA10絶対重力計を併用したハイブリッド繰り返し重力変動観測を行い地熱流体の挙動を調べた。

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。2008年12月以降、A10絶対重力計を導入した絶対重力測定の結果として、還元地域での重力はほぼ安定している一方、生産地域では徐々に重力値が増加する傾向があることが分かった。このように生産地域と還元地域で地熱流体の生産・還元に伴う挙動が異なることが観測された。さらに、相対重力測定の基準点T1における重力変動は10microgal程度と小さいと推定されたため、T1は相対重力測定の基準点として適していると判断された。繰り返し相対重力測定の結果、研究対象地域全体において地熱流体の生産開始直後から2002年にかけて最大約90microgalの重力減少が観測され、その後徐々に重力値が発電開始以前と同等のレベルまで回復しているという観測結果が得られた。

本研究では相対重力測定より得られた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4つのステージに分類されると考えられる。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

## レーザー干渉計型重力勾配計の阿蘇火山における適用試験 Gravity-gradients measurements of Mt Aso using a laser-interferometric gravity-gradiometer

潮見 幸江<sup>1\*</sup>, 黒田和明<sup>2</sup>, 鍵山恒臣<sup>1</sup>, Yayan Sofyan<sup>1</sup>, 吉川慎<sup>1</sup>

SHIOMI, Sachie<sup>1\*</sup>, Kazuaki Kuroda<sup>2</sup>, Tsuneomi Kagiyama<sup>1</sup>, Yayan Sofyan<sup>1</sup>, Shin Yoshikawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>2</sup> 東京大学宇宙線研究所

<sup>1</sup>Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, <sup>2</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

A laser-interferometric gravity-gradiometer has been developed at the Institute for Cosmic Ray Research of Tokyo University for a couple of years and their laboratory test showed that the instrument had a resolution of about 1 microGal/m. As the first practical application of the newly developed instrument, we plan to measure gravity gradients at observation sites near Mt Aso. By carrying out the gravity-gradient measurements, we intend to study possible flows of volcanic fluids beneath the area of Mt Aso. We will report the current status and future prospects of the measurements.

キーワード: 重力勾配測定

Keywords: measurements of gravity-gradients

## 口永良部島火山湯向地区の熱水系の探査

### Investigations for the hydrothermal system of the Yumugi area in the Kuchinoerabujima volcano

藤光 康宏<sup>1\*</sup>, 江原 幸雄<sup>1</sup>, 西島 潤<sup>1</sup>, 北島 丈士<sup>2</sup>, 岡 大輔<sup>3</sup>, 古賀 勝利<sup>3</sup>, 前田 典秀<sup>3</sup>, 甲斐 裕紀<sup>3</sup>, 古城 昌英<sup>3</sup>, 古賀 大晃<sup>3</sup>  
FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1\*</sup>, EHARA, Sachio<sup>1</sup>, NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>, KITAJIMA, Takeshi<sup>2</sup>, OKA, Daisuke<sup>3</sup>, KOGA, Masanori<sup>3</sup>,  
MAEDA, Norihide<sup>3</sup>, KAI, Hiroki<sup>3</sup>, KOJO, Masahide<sup>3</sup>, KOGA, Hiroaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院, <sup>2</sup>九州大学工学部, <sup>3</sup>九州大学大学院工学府

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Kyushu Univ., <sup>2</sup>School of Engineering, Kyushu Univ., <sup>3</sup>Graduate School of Eng., Kyushu Univ.

口永良部火山は、屋久島の西部に位置する鹿児島県口永良部島を形成しており、現在も活動を続ける東部の新岳を中心とする安山岩質火山である。島内には複数の温泉が存在していることから、熱水系が発達していると考えられている。口永良部島では、この熱水を利用したバイナリー発電の計画が進んでおり、これまでの調査研究により島の東部に位置する湯向地区が有望地域と考えられている。それらの調査研究の結果を踏まえ、著者らは2011年8月に湯向地区において、重力探査、土壌二酸化炭素濃度測定、1m深地温測定を、また新岳を対象とした放熱量測定を実施し、同地区を中心とした口永良部島火山の熱水系の概念モデルを作成した。

湯向温泉直下に検出された重力高異常部より貫入岩体あるいは古い火山体の存在を思わせる地下構造が推定された。また1m深地温測定と土壌二酸化炭素濃度測定の結果では、湯向温泉付近だけでなく同温泉の南東～南方向の標高の高い地点においても高い地温や高濃度の土壌二酸化炭素が検出された。これらの結果と湯向温泉周辺の比抵抗構造（鹿児島県屋久島町，2011）が照らし合わされ、湯向地区には湯向温泉から南西方向にかけての地下浅部に流体流動が存在するものと推定された。

新岳を対象とした最大噴気直径法（神宮司・江原，1996）による放熱量測定の結果、新岳火口からの火山噴気による放熱量は約80MWと推定された。

これらの結果とKanda et al.（2010）の口永良部島火山の熱構造モデルを参考に、湯向地区を中心とした口永良部島火山の熱水系の概念モデルが作成された。

神宮司元治・江原幸雄（1996）最大噴気直径を利用した火山噴気放出量及び放熱量測定法．火山，41巻，4号，pp.23-29．

Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T. and Shigeno, N. (2010) A heating process of Kuchinoerabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 189, No. 1-2, pp.158-171.

鹿児島県屋久島町（2011）口永良部島における地熱資源の賦存量・利用可能量等調査報告書

キーワード: 口永良部島, 重力, 土壌二酸化炭素濃度, 地温, 放熱量

Keywords: Kuchinoerabujima, gravity, soil carbon dioxide concentration, ground temperature, heat discharge rate



## 高温岩体システムにおける水岩石反応 Water-rock Interaction of Enhanced Geothermal System

柳澤 教雄<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> AIST

現在、世界各地で地熱発電のための調査・研究が実施されている。地下 5km で 300℃ 以上に達する火山地域やオーストラリアの内陸部などでは、地上から水を入れて、地下の貯留層で加熱後、熱水・蒸気を取り出して発電を行う高温岩体システム (EGS) の研究・開発が行われている。これまでに、日本では肘折などのカルデラ地域、オーストラリアでは内陸のクーパーベースンで調査が行われている。

そして、循環試験中の流体化学組成の測定を行い、その化学組成の変化と岩石の鉱物組成や循環システムの関係を整理し、さらに室内模擬試験との対比を行った。

まず、Ca 濃度は、クーパーベースンでは循環試験中ほぼ一定の約 25ppm であったが、肘折では、200ppm まで上昇する井戸も観察された。SO<sub>4</sub> 濃度は肘折が初期が約 50ppm、最大値が約 600ppm となり、クーパーベースンの約 35ppm を大きく上回った。一方、貯留層を構成する花崗岩の鉱物組成としては、クーパーベースンではほとんど観察されなかった硬石膏が、肘折のトータル岩ではカルデラ形成活動の影響もあって約 5% 認められた。そのため、地上から注入された水に硬石膏が溶解したことにより、Ca と SO<sub>4</sub> の濃度が増加し、さらに肘折の場合は河川水を混合させて注水したので、システム全体の温度がクーパーベースンより低くなり、硬石膏の再沈殿が妨げられたと思われる。

一方、Cl、Na などの濃度は、クーパーベースンでは循環試験中にわずかに上昇しており、Cl 濃度は平均約 8,900ppm であった。事前の生産試験では、2008 年 3 月が約 7,500ppm、7 月が約 8,200ppm であり、Cl 濃度が上昇していることが示された。Na 濃度は 3,800 ~ 5,100ppm、K 濃度が 560 ~ 700ppm で上昇傾向であった。一方、クーパーベースンの岩石を用いて 250℃、40 気圧の環境下で溶解試験を行ったところ、Na/K 比は 6 程度となった。実際の生産流体では 5.7 ~ 7.3 程度であり、室内実験とほぼ対応することが確認された。

キーワード: 地熱, 高温岩体システム, 流体化学, 岩石組成, 水岩石反応

Keywords: geothermal, EGS, Fluid chemistry, Rock minerals, Water rock Interaction