

SVC049-01

会場:105

時間:5月23日 16:30-16:45

## 火山ガスブルーム中の水素の水素同位体比を指標に用いた火山噴気の遠隔温度測定法開発

### Remote temperature sensing on volcanic fumaroles from hydrogen isotopic compositions of molecular hydrogen in the plume

角皆 潤<sup>1\*</sup>, 神村 奏恵<sup>1</sup>, 安齊 沙耶<sup>1</sup>, 中川 書子<sup>1</sup>, 小松 大祐<sup>1</sup>

Urumu Tsunogai<sup>1\*</sup>, Kanae Kamimura<sup>1</sup>, Saya Anzai<sup>1</sup>, Fumiko Nakagawa<sup>1</sup>, Daisuke Komatsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup> Faculty of Science, Hokkaido University

#### 【はじめに】

火山の噴気温度は、火山活動の現状や山体内部におけるマグマ脱ガス過程に関する重要な指標のひとつであり、古くから頻りに観測がおこなわれてきた。しかし、活火山の噴気に近づいて直接温度を測定することは多くの場合危険を伴い、また赤外放射を用いた遠隔測定では、観測距離が100メートルを超えると正確な噴気温度を測定することは困難になる。

そこで本研究では、噴気ガス中に含まれている水素分子( $H_2$ )と主成分である水蒸気( $H_2O$ )の水素同位体( $^1H$ および $D$ )交換反応の反応速度が、室温ではほとんど進行しないのに対して400度程度より高温の領域では極めてすみやかに進行して平衡に達し、しかもその際の同位体分別係数が温度とともに大きく変化するという特性に着目し、ブルーム中の $H_2$ の水素同位体比から噴気中の $H_2$ の水素同位体比を推定してこれを温度に換算することで、噴気孔の温度を遠隔から測定する手法(HIReTS: Hydrogen Isotope Remote Temperature Sensing)を考案した。もちろん噴気中の $H_2$ が噴気孔から放出されると、大気中の $H_2$ と混合してその同位体比は変化してしまう。しかし、この変化は濃度の異なる噴気ブルーム試料を複数採取して大気中の $H_2$ との間の混合線を求めることで補正することができる。そもそも $H_2$ は噴気ガスでは主成分の一つであるのに対して、大気中には0.5 ppmv程度と極微量にした含まれないため、大気由来の $H_2$ の補正は容易である。また、噴気中の水蒸気( $H_2O$ )については、高温噴気であればマグマ水の値で代用できる。

#### 【検証実験】

今回この遠隔噴気温度計HIReTSの信頼性を検証するため、噴気ガスに直接アクセス可能な樽前山(北海道)、九重硫黄山(大分県)、恵山(北海道)の三カ所の火山において、噴気ブルーム試料の採取と、その放出源となっている高温噴気地帯における噴気ガス試料の直接採取や噴気温度の直接測定を行った。そして、(1)噴気ブルームから推定される噴気ガス中の $H_2$ の水素同位体比が実測値と一致するか、また(2)噴気ガス中の $H_2$ の水素同位体比から推定される噴気温度が実測温度と一致するか、検証した。

#### 【結果・考察】

噴気ブルーム中の $H_2$ の濃度と水素同位体比の関係は、いずれのブルーム中でも明瞭な二成分混合線を示し、ここから推定した噴気ガス中の $H_2$ の水素同位体比は、各噴気ガスにおいて実測した水素同位体比と誤差内で全て一致した。一方水素同位体比から求めた噴気ガス推定温度は、樽前山(実測温度609度)に対して625度、九重硫黄山(実測温度203度)に対し185度となり、ほぼ一致した。しかし、恵山(実測温度107度)は287度となり、推定温度の方が過大側に大きくずれた。これはMizutani(1983)における噴気ガスの観測でもみられた傾向で、200度未満の噴気では水素同位体比は噴気温度までの温度低下に追従出来ず、山体内の急冷直前の温度付近で交換反応が停止してしまう場合があることを示している。

結論として、水素同位体比を使用して温度を遠隔推定する本手法は、温度が400度以上という条件を満たすのであれば、噴気温度を正確(誤差 $\pm 100$ 度未満)に推定できることが明らかになった。またある程度の誤差(最大で150度)を許容することができるのであれば、200度程度の低温噴気まで適用可能範囲を広げることが出来る。HIReTSは今後多くの火山において最も確度・精度の高い噴気温度の遠隔推定手法として活用出来ると考えられる。また200度を下回る温度の噴気であったとしても、噴気ブルームから推定した水素同位体比は、山体内における急冷直前の温度推定の指標として活用出来る可能性がある。

キーワード: 火山ガス, ブルーム, 水素, 安定同位体, 同位体交換平衡, 遠隔温度測定

Keywords: fumarolic gases, volcanic plume, molecular hydrogen, stable isotopes, isotope exchange equilibrium, remote temperature sensing

SVC049-02

会場:105

時間:5月23日 16:45-17:00

## 有珠火山 2000 年新山における地表面放熱量の時間変化

### Temporal variations of heat discharge rates from the geothermal area formed during the 2000 eruption of Usu volcano

寺田 暁彦<sup>1\*</sup>, 吉川 慎<sup>2</sup>, 大島 弘光<sup>3</sup>, 前川 徳光<sup>3</sup>, 松島 喜雄<sup>4</sup>

Akihiko Terada<sup>1\*</sup>, Shin Yoshikawa<sup>2</sup>, Hiromitsu Oshima<sup>3</sup>, Tokumitsu Maekawa<sup>3</sup>, Nobuo Matsushima<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>AIST

#### 1. はじめに

有珠火山 2000 年噴火では、西側山麓浅所へマグマが貫入したことで顕著な地殻変動が起きた。この結果として形成された潜在溶岩ドームは 2000 年新山と呼ばれ、噴火終息後も活発な噴気活動が継続するとともに、地熱異常領域が徐々に拡大してきた。

同じように潜在溶岩ドームが形成された 1977 年の有珠火山山頂噴火の後にも、熱活動の消長が長期間観察されている。これら活動の熱源は貫入マグマと考えられ、熱活動の推移を定量的に調べることで、貫入マグマの量や、周辺地下水理環境の違いを検討することができる。

我々は、氷を用いた熱流計測 (Terada et al., 2008) や、赤外カメラなどを用いて、2000 年新山における放熱量を繰り返し測定している (寺田・他, 2008)。2010 年 9 月には、2006 年以来となる空中赤外観測を実施した。本発表では、2006 年以降に認識された熱活動の衰退について定量的に議論する。

#### 2. 方法

セスナ機を用いた空中赤外観測を、2010 年 9 月 27 日 8 時 40 分から実施した。使用した赤外カメラは、北海道大学有珠火山観測所が所有する NEC Avio TH9260 で、視野角は 21.7 X 16.4 度、画素数 480 X 640 pixel である。このとき、1 pixel あたりの地表面解像度は 0.8 m<sup>2</sup> 程度である。

得られた赤外画像は、面積あたりの地表面放熱率  $Q$  が地表面温度  $T$  に比例する Sekioka and Yuhara (1974) の方法を用いて解析した。このような  $Q$  と  $T$  の線形関係は、地上における氷を用いた放熱量観測により保障されている。

また、日射などを原因とする見かけ上の地表面温度の変化を検討するために、セスナ機観測に先立つ 23 日にも、同様の空中赤外観測を実施した。

#### 3. 結果

2000 年新山周辺の噴気地は、2000 年から 2006 年にかけて拡大傾向であった。しかし今回得られた空中赤外画像を解析した結果、2010 年 9 月における噴気地放熱率は 5.6 MW であり、2006 年 9 月 (9.2 MW) よりも減少したことが分かった。実際に、本地域では地中温度低下や植生回復が認められている。氷を用いた定点観測でも、同様に熱流量の減少が観測されている。この他、2006 年 9 月に湖面からの異常放熱率が 2 MW と見積もられた KB 火口湖は、2007 年頃にはほぼ消滅した。2006 年 9 月に 8 MW と推定された NB 火口の噴気も、2010 年 9 月には目視できない程度まで衰退していた。

#### 4. 議論

2006 年 9 月に 20 MW と推定された総放熱率は、2010 年 9 月では 5.6 MW と、4 年間で 1/4 に減少した。このような 2000 年新山の熱活動の衰退は、同規模のマグマが貫入した 1977 年噴火で見られた衰退ペースよりも、明らかに早い。

これまでの熱放出率の変動を時間積分することで得られる冷却マグマの体積は、地殻変動から推定される貫入マグマ量の 1/10 以下である。すなわち、大部分のマグマが、現在も高温状態で地下浅所に存在していることになる。その一方で、2000 年新山の熱活動は終息しつつある。このような熱活動の推移は 1977 年噴火後 (Matsushima, 2003) とは大きく異なる。

この原因は、いくつか考えられる。例えば、西山周辺の地下水理環境の特徴として、媒質の透水係数が小さいこと (大島・松島, 1999) が挙げられる。この場合、熱水循環系が発達しにくく、放熱活動は抑制されるであろう。あるいは、実際の貫入マグマの量が、地殻変動から推定されている量よりも少ない、もしくは、より深い場所に存在する、等の可能性が考えられる。

#### 4. その他

2000 年新山とともに、周辺の活火山についても空中赤外観測を実施した。有珠火山・山頂部の放熱量は 39 MW、昭和

新山では 6.2 MW と見積もられた。この値は、2006 年 9 月の測定結果（松島・他、未公表資料）とほぼ同じで、時間変化は認められない。

登別火山・大正地獄では、2007 年以降、間欠泉に類似した突発的な熱水噴出活動が繰り返されている。また、地獄谷においても、これまで顕著な熱活動の消長が認められている。しかし、今回の観測結果は、2006 年 9 月の結果（松島・他、未公表資料）に比較して有意な変化は認められなかった。

なお、北海道駒ヶ岳火山では雲に阻まれた。観測できた昭和 17 年火口および昭和 17 年大亀裂とその周辺では、従来どおり温度異常領域は認められなかった。

キーワード: 放熱率, 有珠火山, 噴気地, 空中赤外観測, 熱水系

Keywords: heat discharge rate, Usu volcano, steaming ground, airborne IR survey, hydrothermal system

SVC049-03

会場:105

時間:5月23日 17:00-17:15

## 吾妻火山の大穴火口周辺における全磁力・自然電位・VLF-MT探査 Geomagnetic Total Force Observation, Self Potential and VLF-MT Survey around the Oana Crater, Azuma Volcano

山崎 明<sup>1\*</sup>, 大和田 毅<sup>1</sup>, 山 伸行<sup>1</sup>  
Akira Yamazaki<sup>1\*</sup>, Takeshi Owada<sup>1</sup>, Nobuyuki Yamazaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地磁気観測所

<sup>1</sup> Kakioka Magnetic Observatory

吾妻火山の一切経山南東斜面には大穴火口と呼ばれる直径約200mの火口があり、火口内およびその周辺部に噴気・地熱地帯が広がっている。2008年11月にこの火口内で高さ300mの噴気を上げる新たな噴気孔(W-6噴気孔)が出現し、それ以降噴気活動が活発な状態が続いている。また2010年には5年ぶりとなる微動も発生し、火山活動が徐々に活発化しつつあるように見える。

仙台管区気象台火山監視・情報センターおよび地磁気観測所では大穴火口の周囲に12点の全磁力繰り返し観測点を設置し、2003年より年1回ないし2回の観測を実施している。観測の結果、全磁力は大穴火口を中心とする半径500mほどの領域で変化しており、大穴火口の北側では全磁力の増加、南側では減少する典型的な消磁の変化パターンを示していることがわかった。全磁力変化は観測開始年から各観測点ではほぼ一定の変化率で推移してきており、全磁力変化の大きさは大穴火口南側の変化の大きい測点で-20nT以下に達している。噴気活動が盛んな大穴火口の地下で発生していることを考慮すると、この消磁は地下の熱水活動などに伴う熱消磁であろうと解釈できる。さらに、この熱消磁は観測を開始した2003年以前から始まっており、2010年現在までほぼ一定の速度で熱消磁が進行してきたものと推定される。

一方、大穴火口周辺では2~3年の周期で伸びと縮みの地殻変動が観測されており、大穴火口の地下約500mに膨張・収縮源が求められている。これは大穴火口の地下には熱水溜りが存在し、地下深部からの熱水の供給と大穴火口からの放出のバランスによってこの熱水溜りが膨張または収縮しているものと考えられる。また膨張・収縮源と熱消磁の発生位置は概ね一致しており、熱水溜りの周囲で熱消磁が進行しているものと推定される。

この大穴火口の地下に存在すると考えられる熱水溜りからの上昇流に伴う自然電位分布を把握する目的で、2009年に大穴火口周辺部において自然電位観測を実施した。観測の結果、自然電位は非常に平坦な電位分布をしており、熱水上昇流に対応するような電位分布は得られなかった。また、2010年には自然電位の調査地域においてVLF-MT法を用いた浅部比抵抗調査をおこなった。その結果、大穴火口から浄土平にかけての表層の比抵抗は数m~数10mの低比抵抗帯であることがわかった。

キーワード: 吾妻山, 全磁力観測, 熱水活動, 熱消磁, 自然電位, 比抵抗

Keywords: Azuma Volcano, geomagnetic total force, hydrothermal reservoir, thermal demagnetization, self-potential, resistivity

SVC049-04

会場:105

時間:5月23日 17:15-17:30

## 火山体の電気伝導度構造を用いた揮発性物質フラックス推定の試み Approach to evaluating mass flux of volcanic fluids using the electrical conductivity structure of a volcano

小森 省吾<sup>1\*</sup>, 鍵山 恒臣<sup>2</sup>, ジェリー・フェアリー<sup>3</sup>  
Shogo Komori<sup>1\*</sup>, Tsuneomi Kagiyama<sup>2</sup>, Jerry Fairley<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京大・理・地球惑星, <sup>2</sup>京大理, <sup>3</sup>アイダホ大

<sup>1</sup>Earth and Planetary Sci., Kyoto Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto Univ., <sup>3</sup>Idaho Univ.

マグマ中の揮発性物質が効率よく抜けるかどうかは、火山噴火の爆発性・非爆発性や、マグマ噴火卓越型・地熱活動卓越型といった火山活動の多様性を左右する重要な要素の1つである (Eichelberger et al., 1986; 鍵山, 2008)。それゆえ、火山における揮発性物質の放出フラックスを推定することは、上記に制約条件を与えられる可能性があるという点で重要である。

揮発性物質は、一部は火口から直接大気中へ放出され、残りは山体中の帯水層内地下水流動により、山体外部へと輸送されると考えられる。後者は未だ正確に定量化がなされていない。マグマから抜けた揮発性物質は、帯水層内の地下水に溶解することで間隙水の電気伝導度を高める (Keller and Rapolla, 1974) ので、火山の電気伝導度構造から、帯水層内地下水流動による揮発性物質のフラックスを推定することができる可能性がある。

これまでの発表 (小森・鍵山, 2008, 2009; 小森・他, 2010) では、単純な形状・物性の帯水層を仮定し、揮発性物質が帯水層に付加され、地下水流動により山体外部に輸送されるモデルを構築し、数値計算により揮発性物質フラックスと間隙水の電気伝導度の空間分布との定量的関係を検討してきた。その結果、帯水層内の間隙水のコンダクタンス (電気伝導度を深さ方向に積分した値) の火口からの距離に対する減衰が、揮発性物質のフラックスと本質的に対応していることが明らかになった。

本発表では、MT 観測で得られたバルク電気伝導度構造から揮発性物質のフラックスを推定することを試みる。

一般に、火山のバルク電気伝導度は、間隙水の寄与と熱水変質したマトリックスの寄与の両方を含んでいる。バルク電気伝導度に占めるマトリックスの寄与の程度によって間隙水の寄与が変わるため、このことが揮発性物質のフラックスの推定に影響を与える可能性がある。従って、バルク電気伝導度から揮発性物質のフラックスを推定するためには、両者の成分の寄与を考慮に入れた計算が必要になる。間隙水の電気伝導度分布と揮発性物質フラックスとの対応関係は、前述のようにこれまでの発表の中で明らかにされているが、山体中のマトリックスの電気伝導度分布は明らかにはなっていない。そこで本研究では、数値計算によって出された間隙水の温度と溶存成分濃度に着目し、マトリックスの電気伝導度が、温度と間隙水の溶存成分濃度の関数として表されると仮定した。仮定によって導かれたマトリックスの電気伝導度分布は、Revil の式 (Revil et al., 1998, 2002) によって間隙水の電気伝導度分布と結びつけられ、バルク電気伝導度分布に変換される。さらにバルク電気伝導度はコンダクタンスに変換される。これらの方法によって得られるコンダクタンスの分布と揮発性物質フラックスとの対応関係の中に MT 観測で得られたコンダクタンスの分布を当てはめることで、揮発性物質フラックスを推定する。

揮発性物質フラックスの推定にあたり、自身のフィールドである雲仙火山のバルク電気伝導度構造 (小森・他, 2010) への適用を目指す。本発表では、マトリックスの電気伝導度分布の推定に用いる温度・溶存成分濃度の仮定をいくつかの場合について用意し、それぞれの場合について揮発性物質のフラックスを推定する。また、それらの推定結果から得られる知見についても検討を行う。

キーワード: 電気伝導度構造, バルク電気伝導度, 間隙水電気伝導度, マトリックス電気伝導度, 揮発性物質フラックス

Keywords: electrical conductivity structure, bulk conductivity, pore water conductivity, matrix conductivity, mass flux of volcanic fluids

SVC049-05

会場:105

時間:5月23日 17:30-17:45

## 雲仙火山の熱水系概念モデルの再構築と数値モデル作成の試み Conceptual and numerical models of the hydrothermal system at Unzen volcano

江原 幸雄<sup>1\*</sup>, 古賀大晃<sup>1</sup>, 分山達也<sup>1</sup>  
Sachio Ehara<sup>1\*</sup>, Hiroaki Koga<sup>1</sup>, Tatsuya Wakeyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学

<sup>1</sup>Kyushu University

雲仙火山には多くの熱水系が発達している。すなわち、雲仙火山体西側の海岸寄りに小浜温泉（沸騰泉、放熱量約50MW）、その東方山腹部に雲仙温泉（噴気・変質帯、放熱量約21MW）、そして、普賢岳・平成新山を越えて、島原半島東側海岸寄りに島原温泉（放熱量約0.4MW）が存在している。小浜温泉の西側に広がる橘湾には海底からガス噴出が知られている。さらに、普賢岳の西方、雲仙温泉の北北西3kmにある岳地区には変質帯が存在しており、現在地表で地熱活動は見られないが、1000mの深さで240℃を越えていることがボーリング調査から明らかにされている。

雲仙火山の熱水系に関する研究は、いわゆる太田モデル（1972,1973）の提案から始まった。このモデルは、橘湾深部にマグマ溜まりを想定し、そこから斜め上方に供給されるマグマ発散物が、移動の過程で減圧沸騰による気液分離や温度低下による分別溶解、あるいは地下水飽和帯と通気帯を境する自由地下水面を境に気液分離して分化することにより、高温から漸次低温に至る温泉群を生成しているというものである。このモデルは後になって一部改訂された（太田、2006）。その中では、1990-1995年の平成新山噴火に伴う諸研究が活かされ、熱源位置が非常に明瞭になったことが特徴であるが基本的な考えは変わっていない。すなわち、流体流動に関しては、マグマ発散物が島原半島西側から東側に流動するというのが基本的な考えである。

一方、流体地化学的観点（大沢、2006）、あるいは流体流動モデルの構築（藤光ほか、2006）からは、岳地区あるいは雲仙温泉地区深部から上昇した流体が、雲仙火山西山腹を東方から西方に流動するという側方流動が重要であると指摘された。また、藤光ほかのモデルでは、島原温泉は、山頂部近辺から東方地下へ流下する地表水が火山体深部で加熱され、生成された可能性を指摘している。また、マグマ性ガスの寄与から、島原温泉のマグマ起源説も提案されている（野津、1996）。さらに、Saibi and Ehara(2010)は、流体地化学的検討に基づき、いずれの地熱徴候地においても側方流動の寄与を指摘するとともに、小浜温泉地下深部における固有のマグマ性熱源の存在を推定している。

以上のように、雲仙火山の熱水系モデルは多様な考え方が提案されており、多くの研究者が合意できるモデルが未だ構築されていない。このようなことから、新たな熱源モデル・水理学的モデルに基づいて、新たな熱水系モデルの構築を試みた。それにあたって、次の事項を基本的に重要な制限事項とした。

（1）陸域部の重要な熱源は、岳地区地下8km程度に想定するが、それだけでは、雲仙温泉生成は困難で、雲仙温泉地下には、より浅部に小規模の熱源を想定する。

（2）小浜温泉はその東方地域（岳地域および雲仙温泉地域）地下から上昇する地熱流体の側方流動の寄与も想定されるが、同時に直下から供給される深部熱水の寄与が重要であり、また、西方の橘湾からの海水の寄与も想定される。

本研究では、上の基本的枠組みを維持しながら、雲仙火山地域全体の新しい総合的熱水系概念モデルを提案するとともに、数値モデル作成を試み、新たな概念モデルを数値的に裏付けることができた。

キーワード: 雲仙火山, 熱水系, 概念モデル, 数値モデル

Keywords: Unzen volcano, hydrothermal system, conceptual model, numerical model

SVC049-06

会場:105

時間:5月23日 17:45-18:00

## 箱根大涌谷強羅地域下の熱水と地下水の流れ Flow of thermal and groundwaters in the Owakidani and Gora area, Hakone

板寺 一洋<sup>1\*</sup>, 菊川城司<sup>1</sup>, 吉田明夫<sup>1</sup>  
Kazuhiro Itadera<sup>1\*</sup>, Joji Kikugawa<sup>1</sup>, Akio Yoshida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所  
<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute

Oki and Hirano (1970) は、箱根カルデラ内の温泉水の生成及びその流れを、火山の噴気や基盤構造、熱構造と結び付けて説明する総合的なモデルを提案した。その大木・平野モデルは端的な表現として「熱い目玉に冷たいまぶた」と言われることがある。それは、地下深部にマグマ溜りが存在し、そこから今も上昇している火山性の蒸気により形成されている中央火口丘直下の高温域（熱い目玉）を、西側の芦ノ湖の方から層状に流れ下っている地下水（冷たいまぶた）が通過することで温められているという考えを指している。しかし、その後、箱根強羅地区において1960-2000年の期間に得られた地下水位データに基づき、水理水頭分布を詳しく吟味した町田ほか(2007)は、地下水流動は地形傾斜方向の成分も多少持つものの、全体としては下向き成分が卓越しており、地下水は深部へ浸透して見られるとする調査結果を提出している。彼らは、この結果を基に、大木・平野モデルにおいて、箱根強羅地区の温泉の源とされた高温 NaCl 泉が分布する西北西-東南東走向のゾーンは熱水の流動とは関係がなく、そのゾーンはむしろ深部からの熱や NaCl 成分の供給源が地下に分布する区域の拡がりを表しているという考えを提示した。

われわれ(菊川ほか, 2010; 板寺ほか, 2010)は、強羅・底倉地域に湧出する温泉水中の主要溶存イオンの濃度やそれらの間の比、それらと酸素同位体比との関係等を精査して、大木・平野モデルに替わる新しい温泉の分類法を提案した。その新しい分類では、強羅地域に湧出する大木・平野モデルで言うところの硫酸塩炭酸水素塩泉中の炭酸水素イオンは、その場で涵養された地下水に火山性の蒸気が混入することによって生じたものと考えており、中央火口丘の地下で温められた地下水が流下する間に有機物起源の炭酸塩が溶け込んだとする大木・平野モデルとは異なる。また、西北西-東南東走向の帯状に分布する高温 NaCl 泉については、温度や濃度、酸素同位体比に、そのゾーンの走向に沿うような空間的变化が見られないことから、町田・他(2007)と同様、火山性熱水が希釈されていく流れの道筋を現しているのではないと見ている。大木・平野モデルの構築において大きな役割を果たした1967年の昇温現象において、温度上昇が当時推定されたように西から東に時間の経過とともに移ってきたのではなく、もっとも早い温度上昇が東端の底倉地区で生じていることを示した板寺ほか(2010)の解析結果も、そうした見方を強く支持する。なお、われわれの新しい分類でも、底倉地域に湧出する温泉については、高温 NaCl 泉が地下水で希釈されてつくられていると考える。ただし、その高温 NaCl 泉は大木・平野モデルのように、西方の早雲地獄から流れてきたのではなく、その場で地下深部から湧出しているとする。

箱根カルデラ内で高温 NaCl 泉は強羅地域にのみ存在する。また、それが地下水によって希釈を受けていると見られる温泉が、高温 NaCl 泉の分布するゾーンの東端に現われている。さらに、箱根の基盤岩中に湧出している温泉はカルデラの東側の早川・須雲川沿いにのみ見られる。箱根の温泉はその大半が中央火口丘の東側に分布しており、その分布域とカルデラ内の群発地震の発生域とは互いに重ならない傾向を示す(吉田, 2010)。われわれは箱根カルデラ内の温泉の空間分布のこのような特徴は、箱根火山を南北に縦断する丹那・平山断層系の存在と密接に関係しているのではないかと考えている。

キーワード: 箱根火山, 熱水, 地下水

Keywords: Hakone volcano, thermal water, groundwater

SVC049-07

会場:105

時間:5月23日 18:00-18:15

## 台湾・大屯火山群における地熱活動卓越性 Geothermal activity dominance in Tatun Volcanic Group, Taiwan

鍵山 恒臣<sup>1\*</sup>, 宇津木 充<sup>1</sup>, 陳 中華<sup>2</sup>

Tsuneomi Kagiya<sup>1\*</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>1</sup>, Chang-Hwa Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京大理, <sup>2</sup> 台湾中央研究院

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto Univ., <sup>2</sup> Academia Sinica, Taiwan

大屯火山群は台湾北部に位置し、北側の金山断層と南側の?脚断層に挟まれた地域周辺に生成された 20 以上の火山からなる。火山群の活発な活動は 30 万年前ころまで続き、その後の活動は低調とされている (Wang and Chen, 1990)。しかし一方で、この地域には優勢な地熱・温泉活動があり、噴気ガスにはマグマに起因する成分も含まれていることが報告されており、地下のマグマ活動は衰えていないと考える研究者もいる (Yang et al., 1999)。こうした考えに基づく最近の調査によって、1 万 8 千年前 (Chen and Lin, 2002) および 6000 年前 (Belousov et al., 2010) の噴出物が確認されている。しかしながら総体的には、大屯火山群の最近の活動はマグマ噴火を起こすことはまれであり、地熱活動が活発な火山という特徴を持つ。鍵山 (2008) は、火山活動を噴火活動卓越型と地熱活動卓越型に大別することで火山活動の多様性を系統的に理解することを提案している。その意味では、大屯火山群は、地熱活動卓越型に属すると考えられ、日本の別府や箱根などと比較することで、その特性を明らかにできると期待される。

地熱活動卓越型火山の活動は、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。こうした観点から、大屯火山群の構造と熱放出系を明らかにする研究を開始した。昨年の VLF-MT による表層の電気伝導度分布調査 (鍵山・他, 2010) によれば、大屯火山群の中でも特に七星山の深部から火山性の流体が上昇し、構造に支配されつつ南西側の硫黄谷・北投温泉、および北東側の大油坑に広がっているように見える。また、九州の伽藍岳周辺の表層電気伝導度調査と比較すると、七星山周辺の 30mS/m 以上の高電気伝導度領域の面積は 4 平方 km 程度であり、七星山の深部から供給されている火山性流体の量もそれに匹敵するのではないかと考えられる。大屯火山群を構成する火山の多くはドーム状の形態を見せているが、岩石の SiO<sub>2</sub> 成分は 57% 程度の安山岩となっている。溶岩流の形態から推定される粘性率は 10<sup>10</sup>Pa-s 程度を示し (Belousov et al., 2010)、SiO<sub>2</sub> 成分比から期待されるよりも大きい。

こうした事実は、大屯火山群では噴出するマグマの温度が低下した段階で噴出したか、揮発性成分 (水) を失った状態で噴火していることを示唆している。このことが、同火山群の地熱活動卓越性をもたらしているのかもしれない。

キーワード: 台湾・大屯火山, 地熱活動, 噴火

Keywords: Tatun Volcanic Group, Geothermal activity, Eruption



SVC049-08

会場:105

時間:5月23日 18:15-18:30

## DEVELOPMENT OF A NEW SIMPLE HYDROSTATIC EQUILIBRIUM MODEL FOR SUSTAINABLE EVALUATION IN GEOTHERMAL LIMITED RECHARGE DEVELOPMENT OF A NEW SIMPLE HYDROSTATIC EQUILIBRIUM MODEL FOR SUSTAINABLE EVALUATION IN GEOTHERMAL LIMITED RECHARGE

yayan sofyan<sup>1\*</sup>

yayan sofyan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Aso Volcanological Laboratory, <sup>2</sup>University of Indonesia

<sup>1</sup>Aso Volcanological Laboratory, <sup>2</sup>University of Indonesia

Geothermal energy is a renewable energy, that is, the energy removed from the geothermal reservoir is continuously replaced on time scales similar to those required for energy removal. Supplied energy to the geothermal reservoir comes from natural recharge and injection. Sustainable production in the geothermal energy development is the ability of the production system applied to sustain the stable production level over long times. It is very important to manage the mass balance between production, injection and natural recharge in the geothermal reservoir during exploitation. A new simple hydrostatic equilibrium model is developed by this mass balance model of geothermal reservoir.

New simple hydrostatic equilibrium model in this paper is built to estimate hydrostatic connection between recharged reservoir and discharged reservoir. Principle of transmission of fluid-pressure in the physical sciences states that pressure exerted anywhere in a confined incompressible fluid is transmitted equally in all directions throughout the fluid such that the pressure ratio remains same. Hydrostatic equilibrium occurs when compression due to gravity is balanced by a pressure gradient force in the opposite direction. Mass changes data in this hydrostatic equilibrium model is estimated by gravity changes from repeat gravity measurement method. The equation result between these parameters estimates recharge factor from discharged reservoir. This model also assumed a relatively constant of entered fluid flow rate from the surface that continues working during the production and injection well activity. This new simple hydrostatic equilibrium model is applied for sustainable evaluation in the geothermal field with limited natural recharge.

キーワード: Hydrostatic equilibrium model, Recharge factor, Geothermal reservoir with limited recharge, Sustainable evaluation  
Keywords: Hydrostatic equilibrium model, Recharge factor, Geothermal reservoir with limited recharge, Sustainable evaluation

SVC049-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 富士山の帯水層に含まれる揮発性成分と地下水流動 Volatiles and resistivity structure around the aquifer of Mt. Fuji

相澤 広記<sup>1\*</sup>, 角野 浩史<sup>2</sup>, 大野 正夫<sup>3</sup>, 小川 康雄<sup>4</sup>, 高橋 正明<sup>5</sup>

Koki Aizawa<sup>1\*</sup>, Hirochika Sumino<sup>2</sup>, Masao Ohno<sup>3</sup>, Yasuo Ogawa<sup>4</sup>, Masaaki Takahashi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京大学地殻化学実験施設, <sup>3</sup> 九州大学比較社会文化研究院環境変動部門, <sup>4</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>GRC, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Kyushu University, <sup>4</sup>KSVO, Tokyo Institute of Technology, <sup>5</sup>AIST

### はじめに

マグマから脱ガスした揮発性成分は軽く、低粘性なためマグマに比べ容易に火山浅部に到達する。大量のマグマがゆっくりと上昇を開始した場合、減圧によって脱ガスした揮発性成分はマグマ上昇に先行し浅部に到達するかもしれない。そうであるならば揮発性成分が上昇しやすい場所をあらかじめ把握しておくことは火山活動予測にとって重要である。さらに揮発性成分が上昇しやすい場所は低浸透率と考えられ、将来のマグマ噴出口になる可能性が高いかもしれない。

本発表では富士山周辺の深部掘削温泉を対象としたヘリウム同位体比、水/酸素同位体比、化学組成分析の結果を示す。さらに、掘削温泉の位置が山麓部に限られる点を補うため、AMT 調査により推定した深さ 2km までの電気比抵抗の結果も合わせて示す。

### 測定結果

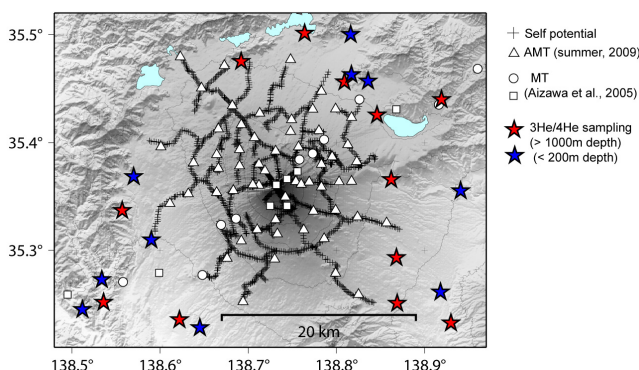
表層(深さ 200m 以下)の地下水中のヘリウム同位体比 ( $3\text{He}/4\text{He}$  比) は大気値とほぼ等しいが、南西部の富士火山噴出物に覆われていない領域のみ 5.6~6.7Ra (大気補正值) と高い値を示した。一方 1000m を超える掘削温泉は概ね 4Ra 以上、最大 7.8Ra (大気補正值) と島弧マグマの上限値に近く、マグマ起源のヘリウムガスの混入が認められた。しかしながら、西部の掘削温泉だけは 1.3Ra と小さい値を示した。

水の酸素 - 酸素同位体は、表層、深部とも富士山周辺の天水ライン (安原他, 2007) に一致し、マグマ起源水の混入は認められなかった。

比抵抗構造は、表層は 1000 (ohm-m) 付近の高比抵抗であるが、山頂部と  $3\text{He}/4\text{He}$  異常が認められた南西部のみ 100(ohm-m) とやや低比抵抗である。深さ 1 km 以深に着目すると、山頂から北と南西に延びる 100(ohm-m) のやや低比抵抗領域が存在する。この低比抵抗の延長部には  $3\text{He}/4\text{He}$  が大気値の 7 倍を超える掘削温泉が存在する。

### 考察

富士山の地下水の起源は天水である。しかしながらマグマ起源のヘリウムガスが深部地下水に認められることから、深部からガスを主成分とする流体が上昇してきており帯水層の深い部分に溶け込んでいることを示唆する。ヘリウム同位体や比抵抗構造が水平方向に大きく変化することから、ガスはマグマから均質に散逸するわけではなく特に、南部と北西部に抜けやすいことを示しているのかもしれない。発表ではさらに解析をすすめ富士山のマグマ起源の揮発性成分の経路および地下水流動系を議論したい。



SVC049-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 箱根及び湯河原火山の基盤岩中に湧出する温泉 Hot spring waters in basement rocks of Hakone and Yugawara volcanoes

菊川 城司<sup>1\*</sup>, 板寺 一洋<sup>1</sup>, 吉田 明夫<sup>1</sup>  
George Kikugawa<sup>1\*</sup>, Kazuhiro Itadera<sup>1</sup>, Akio Yoshida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanaga

箱根火山の大涌谷、姥子、強羅、芦之湯等、中央火口丘近くには、火山性熱水や噴気の影響を直接に、もしくは間接的に受けた温泉が箱根火山の噴出物中から湧出する(例えば菊川, 2009)。箱根では、このほかに箱根湯本や大平台、宮城野、堂ヶ島など早川と須雲川沿いに温泉が分布し、これらは箱根火山の基盤岩である湯ヶ島層群や早川角礫凝灰岩などの亀裂から湧出する。一方、湯河原地区では、海岸沿いに、化石水が起源と推定される非常に塩濃度の高い温泉も分布するが、藤木川、千歳川沿いに湧出するのは、基盤岩の湯ヶ島層群に胚胎されている温泉である。本報告では、箱根、湯河原地域の基盤岩中に湧出する温泉について、それらに溶存する主要イオンの濃度やイオン間の濃度比、それに酸素同位体比を詳細に調査した結果を基に、各地区に湧出する温泉の性質を比較し、また、それらの温泉水の湧出機構を考察する。

箱根湯本と湯河原の基盤岩中に湧出する温泉を比べたときに、共通する特徴は、炭酸水素イオン濃度が低く(ほとんどすべて 100mg/L 以下)、かつ硫酸イオン濃度との間に逆相関関係が認められること、そして硫酸イオン濃度と塩化物イオン濃度との間に正の相関関係が認められることである。ただし、箱根湯本では硫酸イオン濃度と塩素イオン濃度との相関関係は単一ではなく、比例係数の異なる3つのグループが見られる(菊川・板寺, 2008)。また、湯河原では塩化物イオン濃度が低くて硫酸イオン濃度と塩化物イオン濃度との間に相関関係が認められないグループも存在する。炭酸水素イオン濃度と塩化物イオン濃度との関係では、箱根湯本では緩い逆相関関係が見られる。一方、湯河原では同様な逆相関関係が見られるグループに加えて、塩化物イオン濃度が極めて低いために両イオン濃度間の相関が認められないグループが存在する。後者のグループは硫酸イオン濃度と塩化物イオン濃度との間に相関関係が認められないグループに対応する。

強羅地区の温泉には成因を異にすると考えられるいくつかのタイプが存在して(菊川ほか, 2010; 板寺ほか, 2010)、その中には硫酸イオン濃度が塩化物イオン濃度に比例するタイプも見られるが、基盤岩中から湧出する温泉の上述の特徴をすべて持つような温泉は存在しない。酸素同位体比と主要イオン濃度との関係について見ると、塩化物イオン濃度との間の相関関係は強羅地区の温泉と一見似ているように見えるが、硫酸イオン濃度や炭酸水素イオン濃度との関係は明らかに異なっている。これは、基盤岩中の温泉が、強羅地区の温泉と比較して、硫酸イオン濃度が幅広く、酸素同位対比が幅狭いことや、強羅地区の温泉の炭酸水素イオン濃度と酸素同位対比や硫酸イオン濃度との間に相関関係がないことによる。

箱根湯本と湯河原に湧出する温泉では、基盤岩中に湧出する温泉として、上述のように共通する特徴が見られるが、明瞭な差異も存在する。例えば、湯河原の温泉の多くは箱根湯本の温泉に比べて硫酸イオン濃度が顕著に高い。更に、箱根湯本の温泉の中でも、泉質の違いからいくつかのタイプの存在することが指摘されている(菊川・板寺, 2008)。湯河原についても塩化物イオン濃度と硫酸イオン濃度あるいは炭酸水素イオン濃度との関係で明らかに異なるいくつかのタイプの温泉が混在している。このことはそれぞれの地区の中で複数の流動系が存在することを示していると考えられる。

キーワード: 温泉, 基盤岩, 箱根, 湯河原, 溶存成分

Keywords: hot spring, base rock, Hakone, Yugawara, dissolved constituent

SVC049-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 微量成分組成を用いた鹿児島湾若尊熱水循環系の地球化学的特徴 Fluid geochemistry and trace element composition of a marine hydrothermal circulation system at the Wakamiko crater

大野 辰晃<sup>1\*</sup>, 石橋 純一郎<sup>1</sup>, 平尾 真吾<sup>1</sup>, 大嶋 将吾<sup>1</sup>, 西内 隆人<sup>2</sup>, 野口 拓郎<sup>3</sup>, 山中 寿朗<sup>2</sup>  
Tatsuaki Ohno<sup>1\*</sup>, Jun-ichiro Ishibashi<sup>1</sup>, Shingo Hirao<sup>1</sup>, Shogo Oshima<sup>1</sup>, Takahito Nishiuchi<sup>2</sup>, Takuroh Noguchi<sup>3</sup>, Toshiro Yamanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 九大院・理・地球惑星, <sup>2</sup> 岡大院・自然, <sup>3</sup> 高知大・海洋コア総合研究センター

<sup>1</sup>Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ., <sup>2</sup>Fac. Sci., Okayama, <sup>3</sup>Marine Core Research Center, Kochi Univ.

### [はじめに]

鹿児島湾奥部に位置する始良カルデラ中心部の水深 200m の海底にある若尊(わかみこ)火口では、熱水噴出が集中して見られる地域(site)がいくつか見つかっている。中でも WHV site では最も活発な熱水活動が見られ、最高 200 を記録した高温熱水を噴出する噴出口が集中している。一方、WHV site から 1km ほど南東の SES site では、激しい噴気が見られるものの、熱水の噴出は比較的穏やかで 60 の熱水が海底からしみ出しているのがゆらぎとして確認できる様子である。

また、始良カルデラの外縁部にあたる海岸沿いの陸域には、湧出温度 43-81 の温泉がいくつか存在している。これらはいずれも深度 500-1000m の深層からくみあげられており、塩分が高いことおよび同位体比組成から、海底熱水と帯水層を共通にしていることが提唱されている。

本講演では、若尊海底熱水および陸上温泉水に溶存する主成分元素と微量元素の化学組成に着目し、その化学的特徴について報告する。

### [試料と分析方法]

海底熱水試料については 2010 年 3 月に行われた NT10-05 航海で、無人潜水艇 Hyper-Dolphin (JAMSTEC) を用いて 24 試料を採取した。このうち、WHV site から 12 試料、SES site から 3 試料を得た。陸上温泉試料については 2010 年 7 月に現地調査を行い、温泉水 8 試料を採取した。Cl 濃度はモール滴定法、Na, Ca, Mg 濃度は ICP-AES 法、K 濃度はイオンクロマトグラフィーと原子吸光分析法、Rb, Cs, Li 濃度は、ICP-MS 法で測定した。

### [結果と考察]

若尊火口の 2 つのサイトの熱水の化学組成 (WHV site, SES site) と、陸上温泉水の化学組成に共通する特徴として、Na, Cl 濃度が海水よりも著しく低く、Na/Cl 比は海水とほぼ同じ値をとるという点がある。また水素同位体比はともに著しく負の  $\delta$  値を示した。これらの特徴から、海底熱水と陸上温泉水に共通する帯水層が、海水と陸水がほぼ 1 : 1 の割合で寄与して形成されていると考えられる。

主要陽イオンの化学組成を比較すると、WHV site の熱水は SES site の熱水に比べて Ca, K 濃度が高い特徴がある。帯水層では水 - 岩石反応が平衡状態に達していると仮定して、主要陽イオン組成を用いた地化学温度計により帯水層の温度を推定すると、WHV site で約 250、SES site で約 200 であった。一方、海底面で試料採取の際に行われた熱水の温度測定から海水の混入を補正して推定した熱水温度は、WHV site で約 240、SES site で約 180 であった。地化学温度計の帯水層推定温度と実測された熱水温度が整合的であることから、若尊火口の 2 つのサイトの熱水中の主要陽イオンの組成は、帯水層における水 - 岩石反応が異なる温度条件で化学平衡に達していることで説明できる。なお、陸上温泉水について、主要陽イオン組成を用いた地化学温度計により帯水層の温度を推定すると約 100 であった。

微量成分の組成を比較すると、Li, Rb, Cs の濃度はいずれも WHV site で最も高く、次いで SES site、陸上温泉の順に高いことがわかった。一般にこれらの微量元素は、地下の貯留層において水と岩石が反応する際に溶液側に溶出しやすく、岩石には取り込まれにくいという特徴があることが知られている。海底熱水と陸上温泉水の Li, Rb, Cs 濃度は、帯水層の温度をそのまま反映していると考えられることができる。

## 台湾・亀山島における浅海海底熱水活動の地球化学的研究

### Geochemical studies of a marine-shallow water hydrothermal system in Kueishantao, Taiwan.

大嶋 将吾<sup>1\*</sup>, 石橋 純一郎<sup>1</sup>, 萩原 崇史<sup>2</sup>, 山田 歩<sup>2</sup>, 張 勁<sup>2</sup>

Shogo Oshima<sup>1\*</sup>, Jun-ichiro Ishibashi<sup>1</sup>, Takashi Hagiwara<sup>2</sup>, Ayumu Yamada<sup>2</sup>, Jing Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 理学府, <sup>2</sup>富山大学 理学部

<sup>1</sup>School of Science, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Faculty of Science, Toyama Univ.

亀山島は台湾島の北東部の沖合約 10 km にあり、琉球島弧の西端に位置する火山島である。最後の火山噴火は 7000 年前であり、その際には安山岩質の溶岩を噴出し、現在の標高は 398 m に達している (Chen et al., 2001)。亀山島東部の海岸沿いの水深 10 ~ 30 m の海底に 30 以上の多数の熱水噴出孔が確認されている。これまで調べられている中で熱水の最高温度は水深 13 m にある噴出口で 116 °C を記録している。また、熱水の pH は最も低いもので pH=1.52 であった (Chen et al., 2005)。

本研究では、浅海熱水系がもたらす海洋環境への影響を見積もるために、まず熱水の特徴を議論する。調査は 2010 年 8 月に国立中山大学 (台湾) と合同で行った。試料として、スキューバダイビングによって噴出口周辺から熱水試料を 3 試料採取した。また、船上から採水器を降ろし周辺海水試料を 5 試料採取した。試料は研究室に持ち帰り Mg, Na, Ca を ICP-AES 法で、K を原子吸光光度法で、Rb を ICP-MS 法で、Cl を硝酸銀滴定法で、SO<sub>4</sub> をイオンクロマトグラフ法で、それぞれ分析を行った。

得られた試料の分析値から二成分プロットをとると、どのプロットでも良い直線関係が見られたことから、熱水成分と海水が混合したものを試料として採取したと考えられる。この熱水成分の化学組成は、ほとんどの化学成分で海水より濃度が低いことが特徴であった。そのような熱水の起源として、1) 高温の水岩石反応を経た熱水、2) 海水の沸騰で生じた気相 (水蒸気に富む相)、3) 陸水の三つの可能性を考えて議論する。

まず 1) の場合は、水岩石反応の際に Mg が流体から取り除かれ、陽イオンが供給されるはずである。しかし、本研究で得られた熱水試料は、Ca, K, Rb などの岩石から供給されるであろう化学成分の濃度がいずれも著しく低かった。

次に 2) の場合は、海水の沸騰によって形成される気相と高塩分相では、ともに溶存イオン濃度の比が海水と変わらないはずである。しかし、本研究で得られた熱水試料は、Na/Cl 比が 0.86 ~ 0.79 と広い範囲をとっていた。

最後に 3) の場合を議論するために、亀山島の西部にある亀尾湖 (全周約 1 km) の湖水の化学組成データと比較する。主要陽イオン (Na, K, Mg, Ca) の濃度についてみると、亀尾湖湖水の組成と海水の組成を端成分とした混合直線上に、本研究で得られた熱水試料のデータはすべて入ることがわかった。一方、主要陰イオン (Cl, SO<sub>4</sub>) の濃度については、この二成分混合と得られた熱水試料のデータは大きく異なっていた。しかし、熱水試料の pH が強酸性 (pH=2.6 ~ 2.8) であったことは、火山ガスが熱水に混入していることを示唆しており、その寄与によって陰イオンの濃度が高くなった可能性が高い。今後、水試料の水素・酸素同位体比分析を進め、この可能性について議論を進める予定である。

Chen et al., (2001) A date for volcanic-eruption inferred from a siltstone xenolith. *Quaternary Science Reviews*, 20, 869-873.

Chen et al., (2005) Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan. *Chemical Geology*, 224, 69-81.

キーワード: 浅海海底熱水活動, 亀山島

Keywords: shallow water hydrothermal system, Kueishantao

SVC049-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 台湾・大屯火山群における AMT 観測 Audio-frequency Magneto-Telluric survey on Tatun Volcanic group, Taiwan

宇津木 充<sup>1\*</sup>, 鍵山 恒臣<sup>1</sup>, Chen Chieh-Hung<sup>2</sup>, 神田 径<sup>3</sup>, 吉村 令慧<sup>4</sup>, 小森 省吾<sup>1</sup>, 浅野 剛<sup>1</sup>  
Mitsuru Utsugi<sup>1\*</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>, Chieh-Hung Chen<sup>2</sup>, Wataru Kanda<sup>3</sup>, Ryohei Yoshimura<sup>4</sup>, Shogo Komori<sup>1</sup>, Tsuyoshi Asano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>2</sup> 台湾中央研究院・地球科学研究所, <sup>3</sup> 東京工業大学火山流体センター, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> Aso Vol. Lab., Kyoto Univ., <sup>2</sup> Institute of Sciences, Academia Sinica, <sup>3</sup> Tokyo Inst. Tech. Univ., <sup>4</sup> Disaster Prev. Res. Inst.,

我々は2010年10月に、台湾・陽明山(ようめいさん:ヤンミンシャン)国立公園内に位置する大屯火山群の一つ、七星山及びその周辺域の5観測点において、地下比抵抗構造を求める事を目的にAMT観測を行った。使用したデバイスはPhenix Geophysics社製MTU-5A、2セットを用いた。観測は2班に分かれて行い、昼間2~3時間のAMT観測を2地点で同時に行った。これらのデータのリモートリファレンス処理により地下構造解析を行う。なお、本観測は台湾中央研究院・地球科学研究所の協力の元、文部科学省科学研究費補助金・海外学術調査(B)の資金で行われた。

陽明山国立公園は台湾台北市郊外に位置する。現在は風景区・温泉として観光開発が進められている。陽明山公園内の大屯火山群は、北側の金山断層と南側の脚断層に挟まれた地溝帯の内部およびその周辺に生成された20以上の火山からなり、この周辺で噴気孔などを目にする事ができる。最も規模の大きなもの一つとして七星火山麓の小油坑などが上げられる。他にも国立公園西端の北投から東側の金山にかけてのラインには断層が走り、そこから数多くの温泉が湧いている。火山群の活発な活動は30万年前ころまで続き、その後の活動は低調とされている(Wang and Chen, 1990)。しかし一方で、この地域には優勢な地熱・温泉活動があり、噴気ガスにはマグマに起因する成分も含まれていることが報告されており、地下のマグマ活動は衰えていないと考える研究者もいる(Yang et al., 1999)。こうした考えに基づく最近の調査によって、1万8千年前(Chen and Lin, 2002)および5,500年前の噴出物が確認されている。しかしながら総体的には、大屯火山群の最近の活動はマグマ噴火を起こすことはまれで、日本の九州・別府地域のように地熱活動が活発な火山であるという特徴を持つ。こうした事から、両地域の浅部~深部比抵抗構造を求め地下熱水系分布の特徴を比較研究することで、地下のどのような要因が、噴火を起こさず地熱活動が卓越する活動を支配するかを明らかにすることが出来ると期待される。

本年度は、七星山周辺域の浅部比抵抗構造を求めることを目的に、2010年10月18日から22日の5日間に渡ってAMT観測を行なった。しかしながらこの時期、台湾は極めて規模の大きな台風の直撃を受けており、観測期間中激しい風雨が続き劣悪な観測条件だった。このため、当初七星山周辺の8地点で観測を予定していたが、このうち観測を実施できたのは5点のみであった。またこれらも、激しい風雨のため当初の予定より短い時間での観測に留まった。こうした事から今回の観測では十分なデータを取ることが出来なかった。本発表では、今回の観測概要を示し、今回得られたデータから得られた七星山周辺の浅部比抵抗構造の特徴を示す。

キーワード: 大屯火山群, 地下浅部熱水系

Keywords: Tatun volcanic group

SVC049-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 高温岩体システムにおける岩石と地化学特性 Fluid geochemistry and rock minerals on EGS system

柳澤 教雄<sup>1\*</sup>

Norio Yanagisawa<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を目的とした開発が実施され、その中で、地上から水を入れて、地下の貯留層で加熱後、バイナリーシステムなどで発電を行う高温岩体システム (EGS) の開発がオーストラリアなどで取り組まれている。この手法は、日本でも雄勝や肘折などのカルデラ地域において要素技術の研究が実施されていた。

本発表では、山形県肘折地域とオーストラリアのクーパーベースンにおいて循環試験中の流体化学組成を測定結果から、化学組成の差異が岩石の鉱物組成や循環システムなどに支配されることを示す。

まず、Ca の濃度は、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、初期が約 30ppm と高く、しかも循環中に 200ppm まで上昇する生産性もみられた。また SO<sub>4</sub> 濃度も肘折が初期が約 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、貯留層の岩石の鉱物組成としては、クーパーベースンの岩石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、さらに濃度が増加したと思われる。

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。

また、肘折の長期循環試験の初期の流体濃度は、Cl が約 4,000ppm、Na が約 2,500ppm と Habanero の約半分の値を示しており、Na や Cl は循環にともない低下する傾向が見られた。上の値を示した。このように各地域の地質状況、循環システムなどにより、特徴的な地化学組成を示している。

キーワード: 地熱, 高温岩体システム, 流体化学, 岩石組成

Keywords: geothermal, EGS, fluid chemistry, Rock minerals

## 大分県滝上地熱地域におけるハイブリッド繰り返し重力変動観測による地熱貯留層モニタリング

### Geothermal Reservoir Monitoring by the Hybrid Repeat Gravity Measurement in Takigami Geothermal Field

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>

Daisuke Oka<sup>1\*</sup>, Yasuhiro Fujimitsu<sup>2</sup>, Jun Nishijima<sup>2</sup>, Yoichi Fukuda<sup>3</sup>, Makoto Taniguchi<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

地熱エネルギーは地球温暖化を抑制する低炭素社会を実現するために有望な国産エネルギー資源であると考えられている。地熱資源開発において地熱貯留層の挙動を把握することは、地熱発電に使用される地熱流体を長期間安定して生産するために非常に重要である。さらに、地熱地域では大量の地熱流体の生産と還元が行われるため、生産・還元の周辺環境に対する影響を評価することが必要である。このような地熱貯留層を評価するための手法が考案されており、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、地表面にて重力を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となる。

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た。従来、滝上地熱地域においては種々の観測が行われており、発電所の運転開始前後の地熱貯留層内における質量変化を捉えることを目的として繰り返し相対重力変動観測が1991年以降継続して行われてきた。但し、本地域においては重力基準点を使用した相対重力観測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。そこで本研究では、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た。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が、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面積を考えると、観測の条件はまだまだ相対重力計に比べると厳しい。このような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 および 2009 年度に導入した CG-5 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。繰り返し相対重力測定は発電所の運転開始前後の質量変化を捉えることを目的として1991年以降継続して行われている。その結果、生産地域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、地熱流体の還元地域においては還元開始直後最大約20microgalの急激な重力増加が見られ、その後あまり大きな変化が見られないという観測結果が得られた。2008年12月以降、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2009年6月に最大約50microgalの重力増加が観測された後、2009年10月にはほぼ横ばいになっていることが分かった。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。

2008年4月に滝上地熱発電所において定期メンテナンスが行われ、これに伴い地熱流体の生産・還元を停止していた期間の前後で絶対重力測定を行った結果、還元領域の絶対重力観測点(T26A)において還元停止に伴う還元領域からの質量流出を表わす重力変動を観測することができた。また、相対重力測定に使用していた基準点の重力変動を観測することを目的として実施しようとしたが、相対重力測定に使用していた基準点(T1)においてはA10絶対重力計を設置するための十分な面積を確保できなかったため、還元地域において得られた絶対重力値の変動を元にT1の重力変動を見積もった。その結果、10microgal程度の小さな変化となつたため、T1は繰り返し相対重力変動観測の重力基準点として適していると考えられる。

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



## 火山ガスブルーム中の水素の水素同位体比を指標に用いた阿蘇中岳噴気の遠隔温度推定

### Remote temperature sensing on the fumarolic area in Aso Volcano using hydrogen isotopic compositions of plume H<sub>2</sub>

神村 奏恵<sup>1\*</sup>, 角皆 潤<sup>1</sup>, 安齋 沙耶<sup>1</sup>, 中川 書子<sup>1</sup>, 小松 大祐<sup>1</sup>

Kanae Kamimura<sup>1\*</sup>, Urumu Tsunogai<sup>1</sup>, Saya Anzai<sup>1</sup>, Fumiko Nakagawa<sup>1</sup>, Daisuke Komatsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup> Faculty of Science, Hokkaido University

#### 【はじめに】

阿蘇火山中岳第1火口の南壁噴気地帯では、1993年から気象庁などによる赤外放射温度計を用いた表面温度測定がなされているが、その温度は最高でも500度程度である。また低い時には最高温度が100度を下回るなど、明瞭な時間変化も観測されている。一方、同噴気地帯では、2000年11月から赤熱現象が頻繁に観測されており、噴気温度は赤外放射温度計によって得られた表面温度よりかなり高温となっている可能性が指摘されている。実際一部の高解像度の赤外放射温度計を用いた観測で、最高800度程度の表面温度が観測されたこともあるが(Saito et al., 2005)、そこでもやはり明瞭な時間変化が観測されている(Furukawa, 2010)。他方、噴気ブルームのCO/CO<sub>2</sub>組成やH<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O組成、SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S組成などの遠隔観測から、同噴気ガスは800度前後の平衡温度を持つことが明らかにされており(Mori and Notsu, 2008; Shinohara et al., 2010)。またこの平衡温度には目立った時間変化は認められていない。平衡温度は必ずしも噴気温度と一致するものではないが、一連の結果は相互に矛盾する可能性もあり、正確な噴気温度を求めるとともに、その時間変化の有無を確定する必要がある。そこで本研究グループでは、ブルーム中のH<sub>2</sub>の水素同位体比から噴気中のH<sub>2</sub>の水素同位体比を推定し、これを温度に換算することで噴気温度を遠隔から推定する水素同位体遠隔温度測定法(HIReTS: Hydrogen Isotope Remote Temperature Sensing)を利用して、同噴気地帯の噴気温度の推定を試みたのでその結果を報告する。

#### 【方法】

ブルーム試料の採取は赤熱が頻繁に観測された2010年3月と、赤熱が観測されなかった2010年11月の二回行った。いずれも噴気地帯まで直線で150-300m程度の火口壁の上から、各回10試料程度のブルーム試料を内容積300mLの真空ガラス容器に大気圧まで分取して持ち帰り、北海道大学の実験室で連続フロー型の質量分析システムを用いてH<sub>2</sub>濃度および同位体組成を分析し、噴気ガス中のH<sub>2</sub>の水素同位体比と噴気温度を推定した。天候に恵まれた2010年11月の観測では、なるべく南壁噴気地帯由来のブルームを採取するよう努力した。

#### 【結果・考察】

噴気ブルームは、対流圏H<sub>2</sub>のバックグラウンド濃度に近い0.54ppmvから最高2.3ppmvまで幅広く分布し、平均でも1.2ppmvと高いH<sub>2</sub>濃度を示した。噴気ブルーム中のH<sub>2</sub>濃度と水素同位体比の関係はいずれも明瞭な二成分混合線を示し、ここから推定した噴気ガス中のH<sub>2</sub>の水素同位体比は、二度の観測でほぼ一致した(-172±16 per mil vs. VSMOW)。ここから島弧火山のマグマ水の値(-24±8 per mil vs. VSMOW)を噴気ガス中のH<sub>2</sub>Oの水素同位体組成として用いて推定した噴気温度は866±96度となった。同噴気は、赤外放射温度計を用いた観測表面温度の長期変化や赤熱の有無とは無関係に、噴気ガスの平衡温度に近い高温状態でほぼ一定温度を保っている可能性が高い。

キーワード: 火山ガス, ブルーム, 水素, 安定同位体, 同位体交換平衡, 遠隔温度測定

Keywords: fumarolic gases, volcanic plume, molecular hydrogen, stable isotopes, isotope exchange equilibrium, remote temperature sensing

SVC049-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## ライダーによる火山噴気の水蒸気・水滴量と温度のリモートセンシング Remote sensing of the temperature and the amount of water of volcanic fumarole gas using lidar technique

江尻 省<sup>1\*</sup>, 中村 卓司<sup>1</sup>, 鈴木 秀彦<sup>1</sup>, 阿保 真<sup>2</sup>, 橋本 武志<sup>3</sup>, 寺田 暁彦<sup>4</sup>

Mitsumu Ejiri<sup>1\*</sup>, Takuji Nakamura<sup>1</sup>, Hidehiko Suzuki<sup>1</sup>, Makoto Abo<sup>2</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>3</sup>, Akihiko Terada<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 首都大学東京システムデザイン学部, <sup>3</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター, <sup>4</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University, <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

火山から放出される火山ガスは、噴火の準備過程や活動静穏時にも地表に表れるが、その成分や噴出量・温度等から、地下のマグマの状態を推察することが出来る。従って、これらの変動をモニタリングすることは、火山活動度の推移予測につながる。特に、噴気の水蒸気（噴出後に冷えて水滴になったものを含む）量と温度は、噴気によるエネルギーフラックスを知る上で本質的である。ところが多くの場合、火山ガスは有毒で高温であるため、噴気口から火山ガスを直接採取したり、その温度を直接測定することにはかなりの危険が伴う。本研究では、大気研究の分野で培われてきた Lidar 技術を火山噴気のリモートセンシングに応用することを目的として、水蒸気や水滴によるラマン散乱を利用してこれらの量を測定する小型の水蒸気ラマンライダーとカリウム原子吸収フィルターを用いた温度測定のための屋外でも機能する小型の高スペクトル分解能ライダーを開発している。本講演では、開発中のこれらのライダーを紹介すると共に、2010年10月に草津・万代鉱の噴気を試験的に観測した結果について報告する。

キーワード: 水蒸気, 温度, 火山噴気, リモートセンシング, ライダー

Keywords: water vapor, temperature, volcanic fumarole gas, remote sensing, Lidar

SVC049-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

## 熱収支法の地熱流量係数と各種微気象データとの関係

### Relationship between the coefficient of geothermal flux for the heat balance technique and micrometeorological data

藤光 康宏<sup>1\*</sup>, 西島 潤<sup>1</sup>, 江原 幸雄<sup>1</sup>

Yasuhiro Fujimitsu<sup>1\*</sup>, Jun Nishijima<sup>1</sup>, Sachio Ehara<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 Univ.

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、雲仙地熱地域内の旧八万地獄、大分県小松地獄、熊本県阿蘇火山、福岡県九州大学箱崎キャンパスで微気象の連続観測を行い、地熱流量係数が非常に激しい時間変化を示すことを明らかにした (藤光ほか, 2009)。

2005年に実施した阿蘇火山、及び2005年と2006年に実施した小松地獄での微気象観測では、それぞれ1分、10分、5秒間隔で連続測定を実施し、得られた観測データ及びそれから計算されるパラメータや地熱流量係数は、それぞれ5596セット、534セット、4621セットという、統計処理に供するために十分な量となった。観測された各項目のうち、地上高10, 50, 55, 150 cmの気温、10, 50, 150 cmの相対湿度、100 cmの風速と地熱流量係数との相関係数 (重相関R) を算出すると、気温、風速とは正の相関、相対湿度とは負の相関が見られるものの、最大でも2005年の小松地獄における地上高55 cmの気温との相関係数0.45であり、いずれもそれほど強い相関を示すものではなかった。また、これらの観測値から算出される各微気象パラメータ (水蒸気圧、空気密度、外部拡散係数、Bowen比の逆数) と地熱流量係数とのRを見ると、空気密度とは弱い負の相関を示すものの、水蒸気圧とは明確な相関が見られず、外部拡散係数及びBowen比の逆数とは正の相関を示すがその強弱は様々であった。しかしながら、いずれの観測においても外部拡散係数とBowen比の逆数との積と、地熱流量係数との間に極めて強い正の相関 ( $R=0.97 \sim 0.99$ ) が示されたので、両者の回帰式を求めた。このことは、外部拡散係数とBowen比の逆数を決定するための微気象データを用い、これまでより単純化された手順により地熱流量係数を良い精度で算出できることを示している。

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2年の木戸俊晴氏には、現地観測やデータ解析などで多大な協力を頂いた。本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B) 研究課題番号 15360476 「火山・地熱活動評価のための放熱量測定手法に関する研究」 (研究代表者: 藤光康宏)) により進められた。

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.

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, 連続観測, 放熱量

Keywords: Heat balance technique, coefficient of geothermal flux, micrometeorology, continuous measurement, heat discharge rate