

霧島火山群硫黄山周辺の地熱活動の変化

Variation of Geothermal Activity around Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Group

鍵山恒臣⁽¹⁾・吉川慎⁽¹⁾・大沢信二⁽¹⁾・三島壮智⁽¹⁾・黄有志⁽¹⁾

Tsuneomi KAGIYAMA⁽¹⁾, Shin YOSHIKAWA⁽¹⁾, Shinji OHSAWA⁽¹⁾, Taketomo MISHIMA⁽¹⁾

and Yu-chih HUANG⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

Synopsis

The authors carried out geothermal survey around Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Group. Beneath Iwo-Yama, volcanic tremors were observed since August 2014. These tremors associated deformations indicating the increase of pressure just beneath Iwo-Yama. Fumarolic activity reappeared at the summit in December 2015. We detected anomalous increase of ground temperature related with the geothermal activity. We also detected anomalous increase of electrical conductivity and the change in Cl/SO₄ ratio in hot spring water. This means a supply of volcanic gas beneath Iwo-Yama.

キーワード: 霧島火山群硫黄山, 地熱活動, 微小噴火

Keywords: Iwo-yama Kirishima Volcanic Group, geothermal activity, minor eruption

1. はじめに

霧島火山群・硫黄山は、韓国岳北西に位置し、韓国岳北西の爆裂火口ー硫黄山ー不動池を経て白紫池にいたる南東ー北西方向の火山列中でもっとも新しい火山である。霧島火山群の地質の概略は、井村(1994)によってまとめられており、硫黄山周辺については田島ら(2014)の研究がある。それによると、約9000年前に不動池が噴火によって生成され、約4300年前に韓国岳北西部において山体崩壊が起きている。現在の硫黄山周辺(一般にはえびの高原と呼ばれる)には、この時の堆積物が分布している。その後、約1600年前には不動池において水蒸気噴火が発生し、16～17世紀に硫黄山が生成、1768年には硫黄山において水蒸気噴火が発生している。

硫黄山には古くから活発な噴気地帯が存在し、硫

黄も採掘されていた。1970年代から1980年代にかけての熱的調査では、山頂部に150℃以上の高温の噴気地帯が存在し、西側山麓のえびの高原では、95℃(現地における水の沸点)程度の噴気地帯が点在していた(鍵山ら, 1979)。1990年代半ば以降、地熱活動は徐々に低下し、噴気は消滅したが、30℃程度の湧水は湧出を継続しており、同時に行ったAMTによる比抵抗構造調査では、山頂火口下に低比抵抗域が存在していることが明らかにされている(宇内ら, 2010)。2011年に発生した新燃岳の噴火の際には、硫黄山周辺の地熱活動にどのような影響が出るかが注目され、本研究者らも調査を行ったが、湧水の電気伝導度に変化は見られたが、噴気活動はなく、地中温度にも異常は検知されなかった(鍵山ら, 2012)。しかし、2014年8月および2015年7月から2016年2月にかけて地盤変動を伴う火山性微動が硫黄山地下でしばしば

発生し、2015年12月には噴気活動が復活していることが確認された（気象庁、2017）。この一連の活動に関連して、水準測量および干渉SARにより、硫黄山の隆起も確認されている。また2016年10月ころからは、硫黄山西麓付近において数100ppmから1000ppmを越える高濃度の硫化水素ガスが検知されている。本研究者は、霧島火山群の活動に関連して硫黄山の地熱活動がどのように推移するか注目し、地中温度および温泉・湧水の電気伝導度・化学分析調査を継続してきた。以下に未公表資料も含めて、その結果を報告する。

2. 1970年代から2000年ころまでの硫黄山周辺の地熱活動

硫黄山周辺の熱的活動については、1978年頃の調査結果を鍵山ら（1979）がまとめている。また、1980年代に行われた調査結果については、鍵山ら（1987）、えびの高原自然保護対策協議会（1987）によって報告されている。硫黄山周辺には古くから活発な噴気地帯が存在し、硫黄も採掘されていた。1970年代から1980年代にかけての熱的調査では、Fig.1に示すように、山頂部に150℃以上（最高温度247℃）の高温の噴気地帯が存在し、西側山麓のえびの高原では、95℃

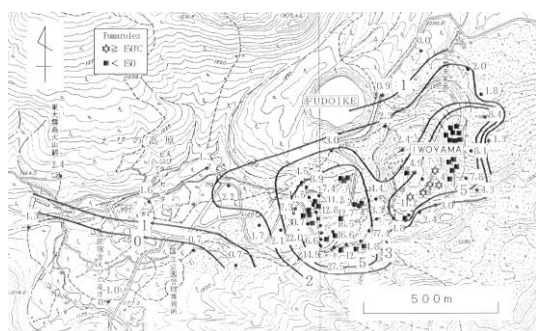


Fig. 1 Distribution of ground temperature anomaly at 1m depth in 1987 (Kagiyama et al., 1994).

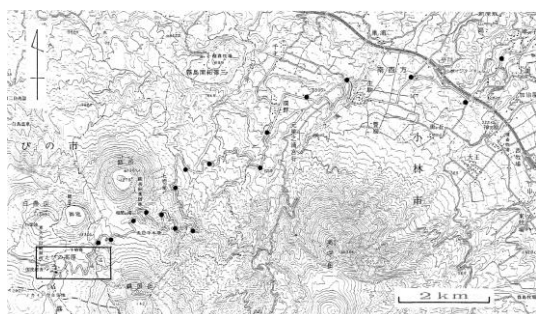


Fig. 2 Measurement points of ground temperature at 1m depth vs. height from the NE foot to Iwo-Yama in 1987. Block area indicates Iwo-Yama.

（現地における水の沸点）程度の噴気地帯が点在していた（鍵山ら、1979；鍵山ら、1987）。また、1m深地中温度分布調査により、Fig.1に示すように、硫黄山山頂部および西側のえびの高原において温度異常が広がっていることが明らかとなっている。温度異常が0℃であると判断する基準点は、図中硫黄山の北側に位置しているが、この点は、Fig.2に示すような霧島火山群の北東麓（標高約200m）から硫黄山周辺（標高約1200m）まで適当な標高差ごとに地中温度を計測し、Fig.3に示すような地中温度と標高との関係を検討したうえで、温度異常がないことを確認したものである。Fig.1を見ると、硫黄山山頂部と西麓に2℃以上の異常域が分布し、さらに西側にわずかな温度異常が延びていることがわかる。

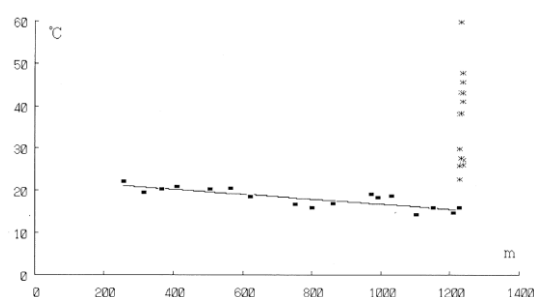


Fig. 3 Ground temperature at 1m depth vs. height in 1987. X marks represent around Iwo-Yama.

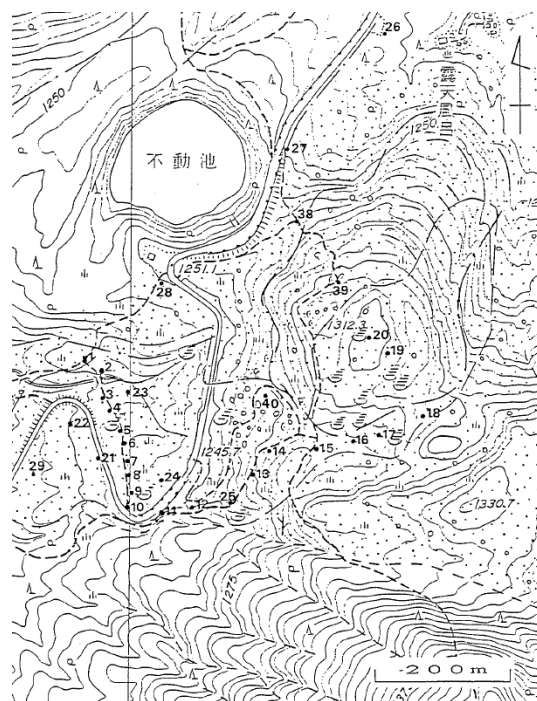


Fig. 4 Measurement points of ground temperature at 1m depth. Temperature profile was measured from Point 1 to Point 10 in 1981 and in 1982.

Fig.4は、硫黄山およびえびの高原における地中温度測定点の分布図の一部である。この図の測点1から測点10までのほぼ南北測線において地中温度を測定した結果、Fig.5に示すように、測点1と測点9および測点10では、ほぼ平常な温度を示しているのに対して、その間の測点には温度異常があることが明らかとなっている。

鍵山ら（1994）は、VLF, ELF-MT観測を行い、硫黄山周辺浅部に熱水を含む帯水層が広く分布していること、硫黄山中心部は高温の噴気の通路となっており熱水は周辺に排除されているため周辺よりもやや抵抗が高くなっていること、硫黄山周辺部では95℃程度の噴気地帯となっているために極めて低い抵抗を示していることなどを明らかにしている（Fig.6）。また、VLF-MTによる表層の比抵抗分布の結果からは、硫黄山およびその西麓・北東麓において比抵抗が100 $\Omega \cdot m$ 以下と低くなっており（Fig.7）、これらの領域は温泉活動域と対応することから、熱水の広がりが見られていると推定されている。

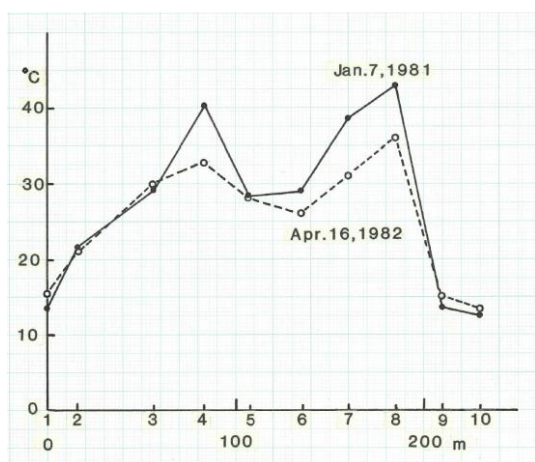


Fig. 5 Temperature profile along the NS line from the point 1 to the point 10 shown in Fig. 4.

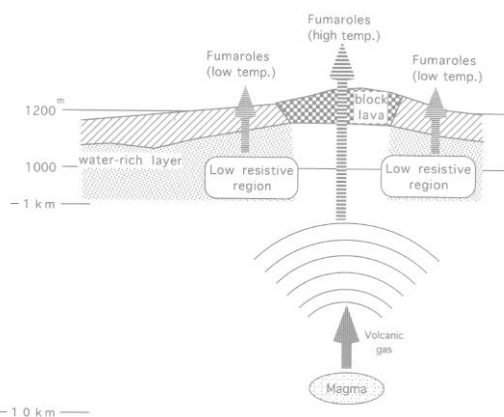


Fig. 6 Schematic structure of Iwo-Yama and the geothermal activity (Kagiyama et al., 1994).

これらの地熱活動は、1990年代半ば以降徐々に低下し、噴気も消滅した。Fig.8を見ると、地熱異常が検知されていたEBI-8における地中温度が1990年代半ば以降に低下したことがわかる。また、特に顕著な異常が検知されていなかったEBI-1, EBI-9, 硫黄山火口内のIWA-Gの地中温度もわずかに低下する傾向が見られる。

2009年～2010年に地熱および比抵抗構造調査を行った結果、噴気は消滅した状態が継続していたが、30℃程度の酸性の湧水は継続しており、同時に行ったAMTによる比抵抗構造調査では、山頂火口下のやや高い抵抗域が低比抵抗域となっていることが明らかにされている（宇内ら, 2010）。この結果は、地下から供給されている流体が高温のガス主体から液体を主とするものに変化したことを意味している。

3. えびの高原における地中温度の変化

硫黄山西麓のえびの高原において実施していた1m深地中温度測定は2000年以降中断していたが、2011年にEBI-1, EBI-8, EBI-9, EBI10において測定を再開した。特に、1980年代まで40℃程度の地中温度

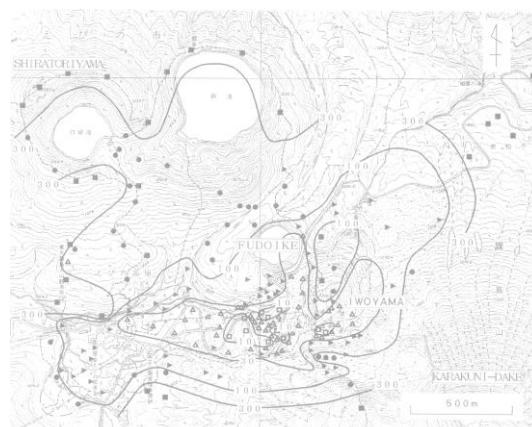


Fig. 7 Distribution of the apparent resistivity around Iwo-Yama by VLF-MT (Kagiyama et al., 1994).

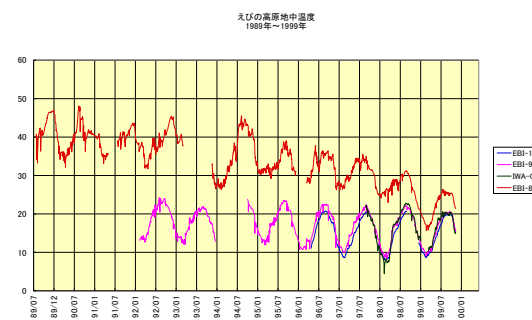


Fig. 8 Change of ground temperature at 1m depth around Iwo-Yama from 1989 to 1999.

が計測されていたEBI-8およびその近傍のEBI-9では2013年6月から連続測定とした。Fig.9に2013年6月以降の1m深地中温度の旬平均の結果を示す。年周変化を大きく上回る温度変化は見られない。しかし、測定前1年間の平均温度の変化を見ると、Fig.10に示すように、2015年10月以降と2016年9月以降に温度が上昇する傾向が現れている。2015年9月以前の温度に異常が現れていないか興味を持たれるが、これ以前に欠測期間があるために確認できない。Fig.11は、前年

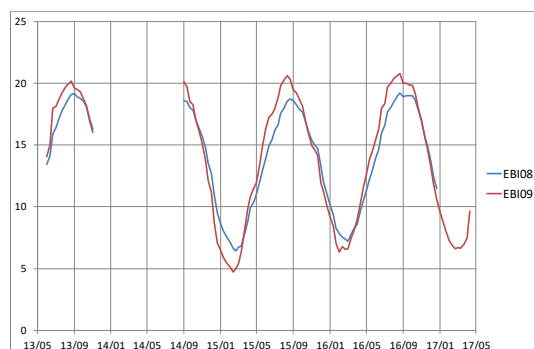


Fig. 9 Variation of ground temperature at 1m depth at EBI-8 and EBI-9 (10 days average).

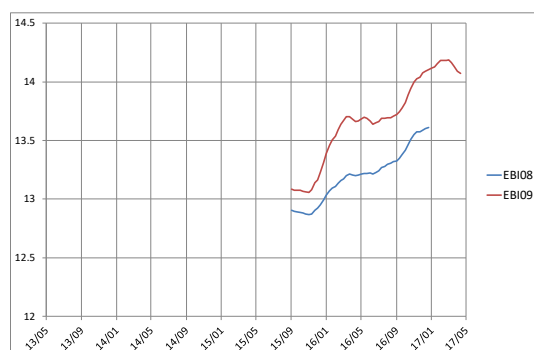


Fig. 10 Variation of ground temperature at 1m depth at EBI-8 and EBI-9 (annual average).

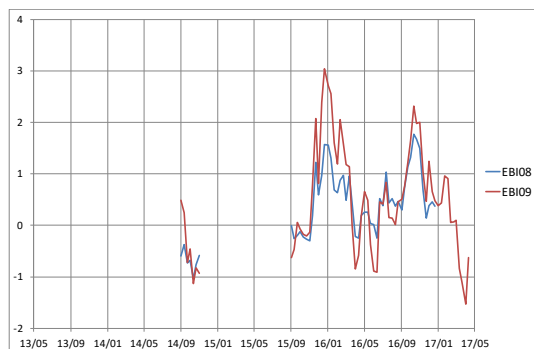


Fig. 11 Variation of ground temperature at 1m depth at EBI-8 and EBI-9 (difference with 1 year before).

同旬の温度との差を計算したものである。この図によれば、2014年9月から11月頃においては有意な温度異常は生じていないことがわかる。また、温度が上昇する異常は、2015年10月から2016年3月頃までと、2016年9月から2017年2月頃までの2回起きているように見える。これらの異常が見られる時期は、2015年12月に硫黄山の山頂南部において噴気活動が確認された時期、および2016年10月以降に硫黄山周辺において高濃度の硫化水素ガスの噴出が確認された時期と符合している。

硫黄山山頂部における噴気は、気象庁が取りまとめた資料によれば、南西部に広がりを見せている(火山噴火予知連資料)。噴気温度は、95°C程度と現地の水の沸点程度の温度となっている。硫黄山周辺において10cm深地中温度分布測定を行った結果、Fig.12に示すように、2016年8月において硫黄山山頂南側から東側において有意な温度異常が確認されていたのに対して、2017年6月の調査では、硫黄山山頂南部の異常域は南部から南西部および北東部に拡大し、硫黄山西斜面や県道付近にも温度異常域が見られるようになっていた。これらの異常域周辺では、高濃度の硫化水素が確認されている。これらの異常域のうち山頂部の異常域は、1970年代に150°C以上の噴気が

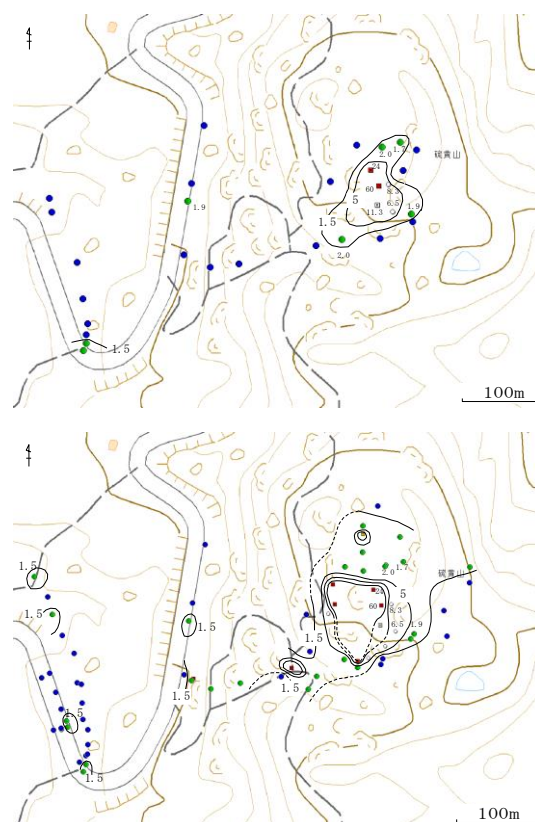


Fig. 12 Distribution of ground temperature anomaly at 10 cm depth. Upper: August 2016, Lower: June 2017.

みられた領域に対応している。また、県道付近に2～3℃程度の異常が点在しているが、これらの異常域の近くでは10 ppm以上の硫化水素ガスが検知されている。Fig.13は、1986年に県道付近について測定した10cm深地中温度分布である（えびの高原自然保護対策協議会，1987）。現在検知されている温度異常域は、1986年当時、10℃以上の温度異常が見られた領域にほぼ対応しており、かつて95℃程度の噴気のみられた場所である。こうしたことから、地熱活動の活発化はまだ山頂部だけに限定されているが、今後、深部からのマグマあるいは火山ガスの供給が継続した場合には、噴気活動域が拡大すると思われる。

4. 湧水・温泉水の電気伝導度、化学成分の時間変化

硫黄山では、西側および北東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。これらの水の電気伝導度および化学成分の時間変化を検討した（Fig.14）。検討に先立ち、アニオンインデックスを計算すると、2011年の時点でIWO-WおよびIWO-NEの湧水ではほぼ1.0となり、足湯（ASHIYU）では0.92と低下し、図には示していないが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はマグマ起源物質が多く含まれていることを示している。湧水・温泉水の電気伝導度を繰り返し測定した結果、Fig.15に示すように、足湯では220～230 mS/m程度であり変化していないのに対して、IWO-Wでは、300～600 mS/m、IWO-NEでは、100～200 mS/mの間で大きく変動している。この2点の湧水は降雨の影響を受けている可能性が大きいが、2016年以降の増大は、従来の変動の幅を越



Fig. 14 Measurement points of ground temperature and spring water.



Fig. 13 Distribution of ground temperature at 10cm depth in 1986.

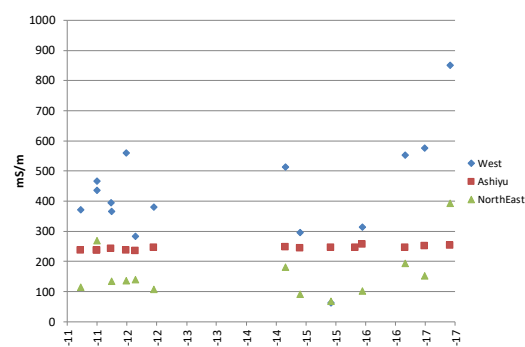


Fig. 15 Variation of electrical conductivity of spring water from 2011 to 2017.

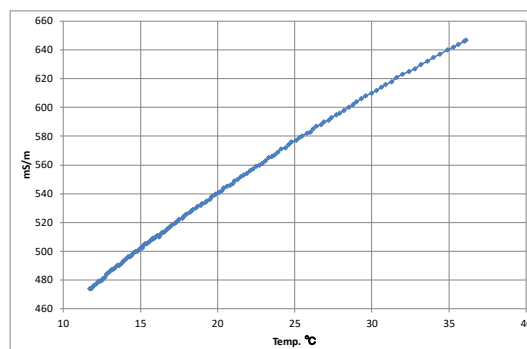


Fig. 16 Electrical conductivity vs. temperature in spring water of IWO-W.

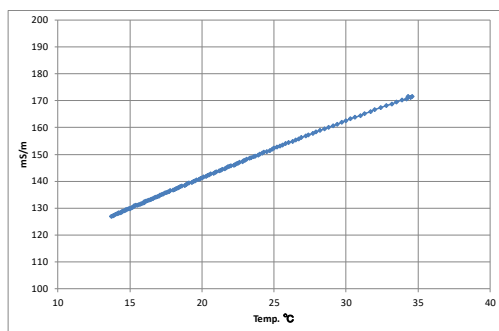


Fig. 17 Electrical conductivity vs. temperature in spring water of IWO-NE.

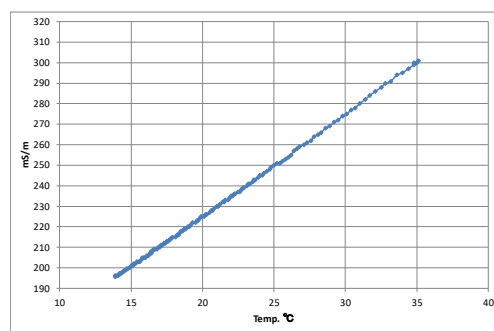
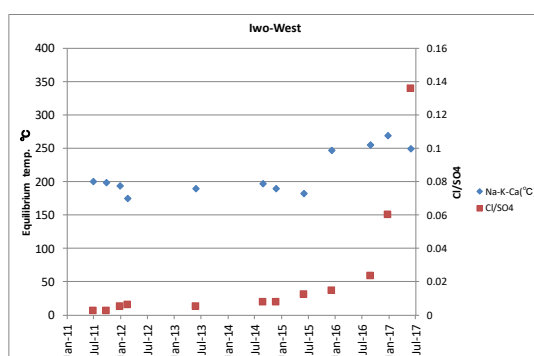
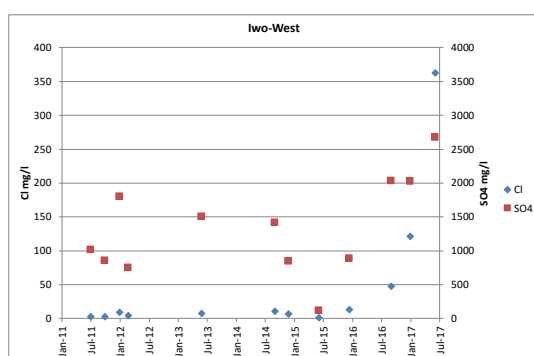
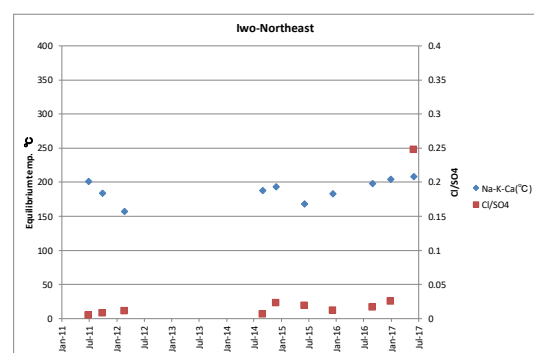
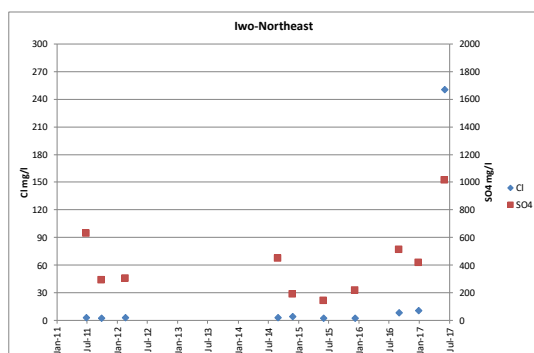


Fig. 18 Electrical conductivity vs. temperature in spring water of ASHIYU.

a: IWO-W



b: IWO-NE



c: ASHIYU

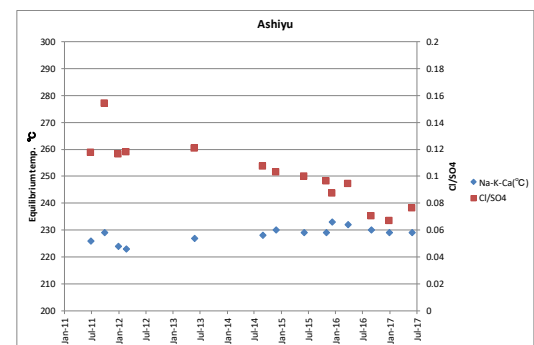
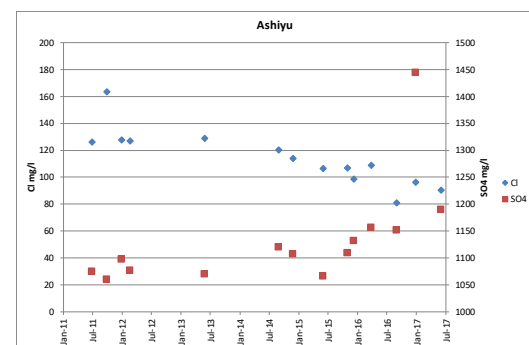


Fig.19 Chemical composition of Cl and SO₄ (Left) and equilibrium temperature estimated by geochemical thermometer and Cl/SO₄ (Right) for each spring water.

える増加となっている．一般に溶液の電気伝導度は、水温によって変化するので、25℃における値を表示する．また、温度による電気伝導度の変化率は1℃あたり2%程度であるが、溶液が強酸性の場合にはより小さくなると言われている．こうした理由から、本研究では、採水した湧水の温度を変化させながら電気伝導度を測定し、20℃から30℃までの電気伝導度の直線性を確認したうえで温度依存率と、25℃における電気伝導度を表示している．たとえば2016年12月の測定では、Fig.16に示すIWO-Wでは、pHが1.98、電気伝導度の変化率は、1.2%、25℃における電気伝導度は、576mS/mである．Fig.17に示すIWO-NEでは、pHが2.58、電気伝導度の変化率は、1.4%、25℃における電気伝導度は、152mS/mである．これに対してFig.18に示すASHIYUでは、pHが6.4、電気伝導度の変化率は、1.9%、25℃における電気伝導度は、250mS/mである．

Fig.19に、硫黄山周辺の3ヶ所の湧水・温泉水の化学成分分析の結果を示す．IWO-WとIWO-NEの2点は、電気伝導度と同様に降雨の影響が出ており、従来は塩素イオン濃度や硫酸イオン濃度だけで議論することは難しかったが、最近急激に値が増大しており議論することが可能となった．たとえば、IWO-Wでは、塩素イオン濃度は従来2～8 mg/l程度で変動していたが、2016年8月以降急激に増大している．それに対して、硫酸イオンはばらつきが大きく、2017年6月に有意な増大が見られる程度である．塩素イオンと硫酸イオンの比を見ると、2011年の調査開始の時点から比が少しずつ増大する傾向が見られていたが、2016年6月頃から増大が顕著になっている．また、Na-K-Caイオン濃度から推定される平衡温度を見ると、2015年までは200℃程度であったのが、2016年以降250℃に上昇している．IWO-NEでは、2016年頃まで

値が増大する傾向は見られなかったが、2017年6月には、塩素イオン、硫酸イオンの濃度および濃度比とともに急激に増大している．ただ、平衡温度は200℃にとどまっている．一方足湯では、2014年8月以降塩素イオン濃度が減少する傾向が続いており、それに対して硫酸イオンは増大する傾向が見えている．両イオンの比を見ると、2014年8月以降に減少する傾向が続いている．平衡温度は、230℃でほぼ一定であるがやや上昇している．

以上の結果を見ると、2014年8月の山体の膨張を示す地盤変動を伴う火山性微動の発生以降、硫黄山近傍の湧水やえびの高原の温泉水に異常が生じており、2015年12月の山頂における噴気活動の復活や2016年10月頃に始まる硫化水素ガスの噴出増などによってその変化がしだいに大きくなっていることがわかる．

しかし、硫黄山近傍の湧水と足湯に現れた変化は同じではない．この違いは、Fig.20の略図のように理解できる．地下のやや深部から硫黄山下に高温の熱水が供給され、ある深さよりも浅くなると圧力低下のために熱水の沸騰が生じる．その際に塩素イオンは蒸気側により多く移り、硫酸イオンは液体側により多くとどまる．残された熱水は側方に移動して足湯などの温泉となる．一方、蒸気はより浅部に上昇し、地下水と混合する．この液体は、一部は湧水として硫黄山近傍に湧出し、さらに沸騰したガスは噴気として山頂から噴出する．この概略モデルによれば、塩素イオンと硫酸イオン比が異なる挙動となることが説明可能である．

5. 硫黄山の火山活動に関する熱エネルギー収支からの検討

上記に示した結果では、硫黄山の地熱活動が活発化しており、それを裏付ける調査結果も得られている．これまでに地熱活動が確認されている領域は過去に地熱活動が見られた領域に限られている．また活動の規模も、1970年代の規模には及んでいない．1990年頃までの硫黄山における熱エネルギー放出システムの構造は、Fig.6およびFig.21に示すように、山頂火口下に存在するマグマから供給される流体（液体か気体かは不明）が、山頂火口部を通過する際には高温のガスとして地表に噴出しており、周辺部では地下水と混合して95℃程度の噴気となっていたと考えられる．2000年以降は、高温の流体の供給が減少したために、噴気活動は消滅し、低温の火山ガス成分を含む湧水が湧出するだけとなっていた．この間に、高温のガスの通路であった領域は、地下水が占める領域となっていた．2014年8月の地盤変動を伴う微動の発生のころにマグマからの高温流体の供給

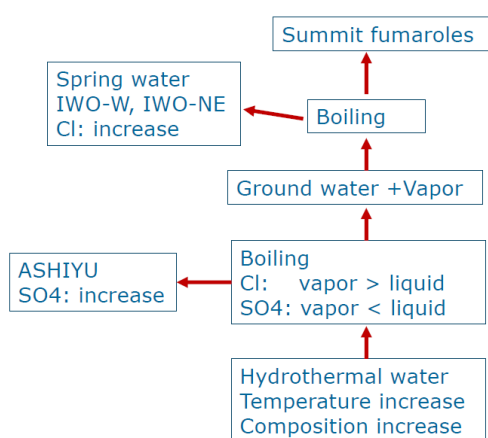


Fig. 20 Schematic model of change in chemical composition of spring/hot spring water.

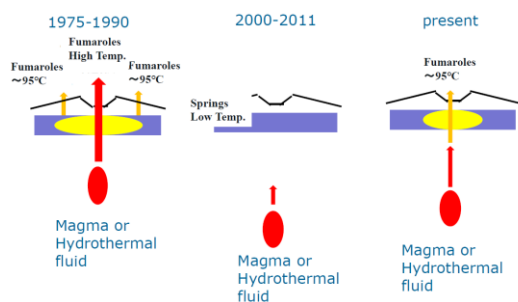


Fig. 21 Schematic model of geothermal system of Iwo-Yama.

が再び増加して、現在は95℃程度の噴気が復活している状態である。静穏な時期に地下水で占められていた領域を再び高温の火山ガスの通路とするまでは、領域内の水や熱変質した固形物を排除する活動が継続すると思われる。

2017年6月の時点では、地熱活動はさらに活発化する傾向を見せているが、この活発化が現在発生している程度の活動にとどまるのか、小規模とはいえ水蒸気爆発程度にまでいたるのかどうかに関心の高い問題となっている。今後の活動の可能性について、熱エネルギーの観点から検討する。

IWO-Wの湧水は2017年6月の段階で46℃、湧出量はおよそ1000 cc/sであった。この地域の1m深地中温度の年平均は15℃であるので、この湧水による放熱率は、130kWと推定される。IWO-NEや他の湧水を考えると、200kW程度と考えられる。これに対して、硫黄山から放出される熱エネルギーは、赤外映像の解析により2017年2月の時点でおおよそ2MWと推定されている（気象庁、2017）。したがって、硫黄山周辺からの放熱は3MW程度と概算される。この熱放出が1年間継続した場合に放出される熱エネルギーは、 9×10^{13} J/yr と計算される。250℃（湧水の化学平衡温度）程度の水蒸気を持つ熱エネルギーは、 3×10^6 J/kg であるので、上記の放熱に必要な水の量は、年間 3×10^7 kg（ 3×10^4 t）と計算される。一方、最近の活動による地盤変動による膨張は、九州大学らによる水準測量によって、 4×10^4 m³と推定されており（九州大学、2017）、仮に水準測量で検知された膨張が熱水によるものとすれば、そのエネルギーはおおよそ1年程度で解消できる規模の供給であると考えられる。この概算には、多くの仮定が含まれているが、硫黄山が過去に有していた放熱システムの能力（数10MW以上）に比べればそれほど大きな熱水の供給ではないと言える。

6. まとめ

霧島火山群・硫黄山周辺において、地中温度および湧水・温泉水の電気伝導度・化学成分調査を継続してきた。2014年8月の山体膨張を伴う微動発生以降、いくつかの注目すべき変化が起きている。えびの高原の温泉水（足湯）では、塩素イオン濃度の減少と硫酸イオン濃度の増加が起き、硫黄山西麓の湧水では塩素イオン濃度の急激な増加と硫酸イオン濃度のわずかな増加が起き、化学平衡温度も上昇している。2015年10月以降には、えびの高原中部において地中温度のわずかな上昇（1℃程度）が起き、2015年12月には山頂南部で噴気活動の再開および拡大、2016年10月以降には高濃度の硫化水素ガスの噴出が硫黄山山頂部および西側山麓部において起きている。これらの異常現象に対して、硫黄山の地下700mにおいて増圧を示す地盤変動が観測されている。

一連の活動には、以下のような解釈が考えられる。マグマ起源の熱水が間欠的に供給され、微動が発生した。熱水の沸騰の際に塩素イオンは蒸気側に選択的に入り、硫酸イオンは熱水に多くがとどまった。熱水は側方移動して温泉として湧出、蒸気は上方に移動して地下水と混合し硫黄山近傍の湧水として湧出する。こうした過程を経て湧水・温泉水の化学成分の変化が起きている。地熱活動の拡大は、過去に活動のあった領域に限られており、マグマからの供給は現地熱系で吸収可能なレベルにとどまっていると考えられる。

謝 辞

本研究を行うに際して、宮崎県の防災関係諸氏ならびにえびの高原の足湯管理関係者にお世話になった。この誌面を借り感謝する。

参考文献

- 井村隆介（1994）：霧島火山の地質，震研彙報，69，pp. 189-209.
- 宇内克成・鍵山恒臣・宇津木 充・神田 径・小森省吾・寺田暁彦・吉川 慎（2009）：霧島火山群・硫黄山周辺における熱的活動の縮退に対応した比抵抗構造の変化，地球惑星科学連合2009年大会V161-P004.
- えびの高原自然保護対策協議会（1987）：環境省委託業務報告書「霧島屋久国立公園えびの高原地区における事故防止対策のための検討調査報告書」
- 鍵山恒臣・宇平幸一・渡部暉彦・増谷文雄・山口 勝（1979）：霧島火山の地熱調査，震研彙報，54，pp. 187-210.

鍵山恒臣・山口 勝・増谷文雄（1987）：霧島火山硫
黄山周辺の熱的調査，日本火山学会講演予稿集，
1987, 2, pp.100.

鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄・歌田久司（1994）：霧
島火山群・硫黄山周辺のV L F, E L F－MT測定，
震研彙報，69, pp. 211-239.

鍵山恒臣・吉川 慎・宇津木 充・大沢信二・三島壮
智・井上寛之（2012）：霧島火山群周辺の表層電気
伝導度分布，日本火山学会講演予稿集，2012,
pp.171.

気象庁（2017）：霧島山，第137回噴火予知連資料，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/>

[kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf).

九州大学（2017）：精密水準測量で検出された霧島・
硫黄山の地盤上下変動，第137回噴火予知連資料，
[http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf)
[kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf).

田島靖久・松尾雄一・庄司達弥・小林哲夫（2014）：
霧島火山，えびの高原周辺における最近15,000年間
の活動史，火山，第59巻，pp. 55-75.

（論文受理日：2017年6月13日）