



| | |
|------------------|---|
| Title | 数値シミュレーションによる薩摩硫黄島硫黄岳の火山熱水系の考察 |
| Author(s) | 松島, 喜雄; MATSUSHIMA, Nobuo |
| Citation | 北海道大学地球物理学研究報告, 70, 95-105 |
| Issue Date | 2007-03-15 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/gbhu.70.95 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/20426 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 70-12_P095-105.pdf |



数値シミュレーションによる薩摩硫黄島硫黄岳の火山熱水系の考察

松島 喜雄

産業技術総合研究所

(2007年1月11日受理)

Mathematical simulation of magma-hydrothermal system in Iwodake volcano

Nobuo MATSUSHIMA

Geological Survey of Japan, AIST

(Received January 11, 2007)

The thermal activity of Iwodake volcano is characterized by the predominant volcanic gas ejection at the summit crater and the heat discharge from high ground temperature area which is distributed widely from the summit crater to hillside of the mountain. The volcanic gas at the summit crater is of magmatic origin and its temperature is observed to be 880°C in maximum. The total amount of the volcanic gas discharged from the summit area is estimated to be 150kg /sec from the SO₂ measurement and the chemical composition of the volcanic gas. The heat discharge rate from the high ground temperature area at the hillside, which is distributed around the fumaroles is estimated to be 50MW from the surface temperature measurement. These thermal activities of Iwodake volcano is thought to be continued for more than 800 years. A plausible model to explain the long degassing of large amount of volcanic gas is magma circulation in a conduit which extended from the deep-seated magma reservoir. The continuous active degassing probably causes the hydrothermal system within the volcano because the volcanic gas ascending the conduit from the top of the magma to the surface is diffused to the surrounding formation. The development of such hydrothermal system is studied using the mathematical simulation. The result shows that the overall thermal activity of Iwodake volcano such as the volcanic gas ejection at the summit crater, widely distributed ground temperature anomaly at hillside and hot springs along the coast can be caused by the degassing activity. The important factors in order to induce the wide-ranging hydrothermal system are permeability of the volcanic edifice and the depth of the degassing. The simulation indicate that the permeability of 10⁻¹³m² and the degassing at sea level are suitable condition for the Iwodake thermal activity.

I. はじめに

活動的な火山では、活発な噴気活動やその周囲に広がる地中温度異常域などの熱的異常が観測される。そのような活動は、地下に貫入したマグマに起因し、活動をもたらす要因として、マグマそのものと周囲の地層や地下水との熱伝達、マグマから脱ガスした火山ガスの流動が挙げられる (Harris and Stevenson, 1997)。時間スケールや空間的スケールから考えて、脱ガスの流動による影響が大きいと予想される。一般に、火山ガスが火道を上昇して大気へ多量に放出されている場合に、その周囲には上昇する火山ガスを熱源とした熱水系が火山体内に形成される (Stevenson, 1993)。本論では、山頂火口にて火山ガスの放出が極めて活発な、薩摩硫黄島硫黄岳を対象として熱水系の数値シミュレーションを実施することにより、脱ガスした火山ガスを主体とした熱水系の形成過程について検討を行うことにする。

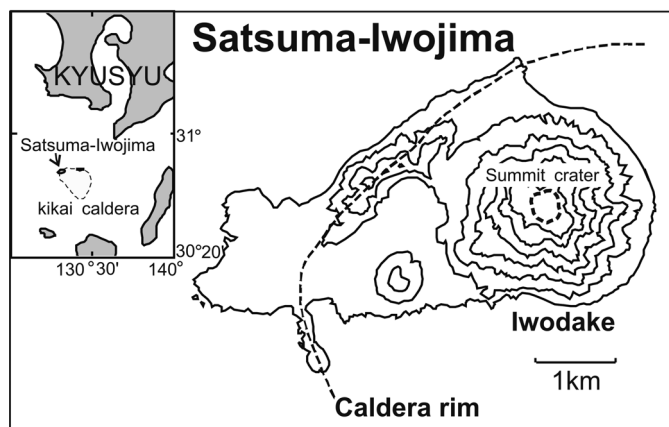


Fig. 1. Topographic map of Satsuma-Iwojima.

II. 硫黄岳の熱的活動

硫黄島は東 5.5 km, 南北 4 km の火山島で、鬼界カルデラの北西端に位置する (Fig.1)。島内にはカルデラ壁があり、その内側には、後カルデラ火山の硫黄岳がある。硫黄岳では、直径約 400 m の山頂火口内およびその周辺に数多くの噴気孔が存在し、活発な噴気活動が数百年以上の長期にわたり継続している (篠原他, 1993)。噴気の最高温度は約 850°C と極めて高温である。火山ガスの研究によると (篠原他, 1993; Shinohara et al., 2002)、山頂火口原から放出される火山ガスのほとんどが地下のマグマに由来する。また火山ガスの組成とマグマ中のガス組成を比較することにより、脱ガスの深度は海水準程度とかなり浅いと考えられている (Saito et al., 2002)。

山頂火口原から放出される火山ガスの量として SO₂ の放出量が詳細に観測されている (Kazahaya et al., 2002)。SO₂ 放出量は平均して 500ton/day で、火山ガスの組成を考慮すると、

全体として 150kg/sec の火山ガス放出量に対応する。マグマ中の揮発性成分の濃度 (Saito et al., 2002) を用いて、脱ガスに関与したマグマの体積を見積もることができる。その大きさは、 $10\text{m}^3/\text{sec}$ となり、30 年で海面上の硫黄岳の体積に匹敵する大きさである。このように大量のガスを地下浅部で長期間にわたり生産するためには地下の浅いところに大量のマグマが存在しなければならない。しかしながらそのような観測事実はないので、火道内マグマ対流が考えられている (Kazahaya et al., 1994)。これは、地下深部のマグマ溜まりからのびる火道内を、ガスを含んだ軽いマグマが上昇し、脱ガスして重くなったマグマが下降するような循環をすることによって火山ガスが安定的に供給されるというモデルである (Kazahaya et al., 1994)。ガスを含むマグマと含まないマグマの密度、粘性係数を考慮すると、このような循環によって観測されるような火山ガスが発生するためには、火道の径として 30-70m は必要であるという見積もりが行われている (Kazahaya et al., 2002)。

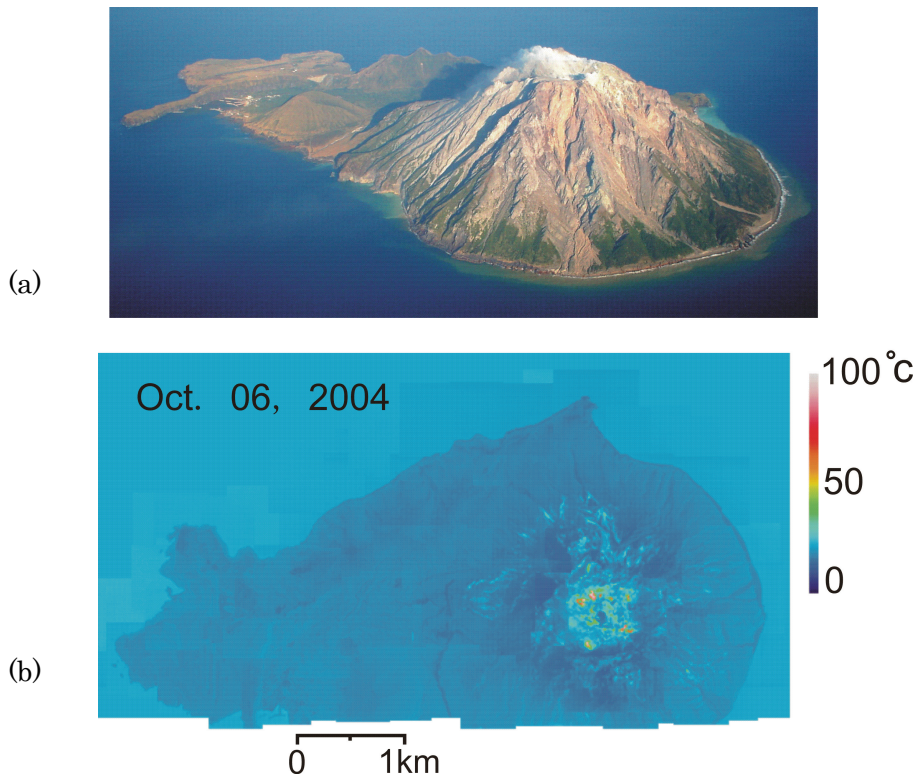


Fig. 2. (a) Photo of Satsuma-iwojima taken from the southeastern direction in the sky. The discoloration area along the coast indicates the thermal water discharged from the hot springs. (b) Surface temperature distribution by the infrared thermal camera taken from the airplane.

硫黄岳では、山頂火口原および山腹に火山ガスを放出する噴気孔が分布する。どちらもマグマ起源の火山ガスよりなる噴気孔である。しかしながら、最高温度が $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達するような加熱し

た水蒸気を主体とした高温噴気孔は山頂火口原内に限られ、沸点温度を示す飽和水蒸気を主体とした低温噴気孔が山頂および山腹に分布している (Matsushima et al., 2003). このような火山ガスを放出する噴気孔が多数存在するが、その周囲には異常な地表面温度を示すいわゆる噴気地が広がっている (横山他, 1966). 硫黄岳の特徴として、噴気孔や噴気地が山頂火口原のみならず、山腹のかなり広い領域にわたり広がっていることをあげることができる. Fig. 2b に示したのは 2004 年 10 月 6 日に硫黄岳の上空から赤外熱映像装置を用いて測定した硫黄岳の地表面温度分布図である. 100°C に達するような温度異常は山頂火口原に集中しているが、数十度程度の比較的低温の低い異常域は、山腹のかなり標高の低いところまで広がっている様子が分かる. その範囲は山頂火口の中心から約 1km の範囲内である. 硫黄島の海岸線に沿ってはかなりの場所で変色海域が広がっている (Fig. 2a). これは、海岸で温泉が流出しているためである (地質調査所, 1976). この温泉の成分には、マグマに起因するものを含む場合と含まない場合があるが、硫黄岳の麓で流出している温泉についてはマグマティックな成分を含んでいる (風早).

地表面温度分布 (Fig. 2b) のデータを用いて、Sekioka and Yuhara (1976) の方法によって噴気地からの放熱量を求めた. この方法は、温度異常を示す領域を代表する温度とその領域の体積を掛け合わせることで放熱量を求める. その際に必要となる係数は Sekioka (1983) になり $35 \text{ (W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C)}$ とした. 地表面温度分布から求めた温度値ごとの面積の分布を Fig. 3 に示す. ここでは、全域および山頂域からの分布をそれぞれ示す. これに対応する放熱量は、それぞれ、176, 115MW と計算される. この場合、山腹からは 61MW の放熱量と見積もられる.

一般的に、火山の熱水系について次のように考えられる. マグマから脱ガスした火山ガスは火道を通して、山頂火口の高温噴気孔から放出される. しかし、そのすべてが放出されるわけではなく、一部は周囲へ散逸する. そのような散逸した火山ガスや、それが地下水と混合して凝縮した噴気凝縮水が、山頂や山腹の低温噴気孔、噴気孔の周囲に広がる噴気地、海岸で流出する温泉を形成している. このような定性的なモデルが物理的に矛盾のないものであるかどうかの検討は今までに行われていない. 本研究は、硫黄岳をモデルフィールドとして、熱水系の数値シミュレーションを適用することにより、火山熱水系のモデルが妥当であるか否かの検討を行った.

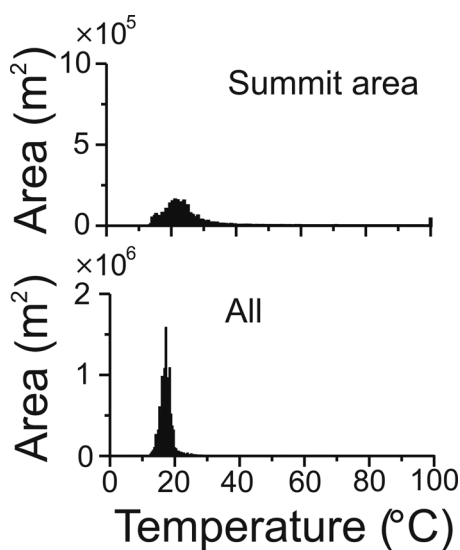


Fig. 3. The relationship between the surface temperature anomaly and its areas.

Ⅲ. 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、多孔質媒質中の水蒸気、熱水、火山ガスの流動とそれに伴う熱伝達を計算する (Matsushima, 2003). 基礎方程式は、ダルシー流による質量の保存、ダルシー流と熱伝導からなる熱の保存からなる。適切な、初期、境界条件のもとそれらを解くことによって変数である圧力、温度、液相飽和度の空間分布とその時間発展を求めることができる。その際必要となる、水やガスの物性は温度圧力の関数として与え、透水係数、空隙率や熱伝導率等、地層の水理特性はあらかじめ与える。水理特性のうち、特に重要なのは地層の透水係数である。Fig.4に計算領域とグリッド分割を示す。計算は円筒座標2次元で行い、地形を近似して地表を与えた。境界条件は、上側で気温と気圧を、右側で標準的な地下温度と静水圧を与え、下側は断熱、不透水境界とした。ソースとして、上側に降雨に対応した水の流入を、下側に地殻熱流量に対応した熱を流入させた。計算領域は、マグマ、火道、周囲の地層からなり、マグマは一定温度 (300°C) で不透水とし、マグマの直上のグリッドに脱ガスに相当する量をガスのソースとして与えた。火道の半径 100m は、火道内マグマ対流が形成されるための条件として見積もられる大きさ (Kazahaya et al.,2002) を参考にして与えた。

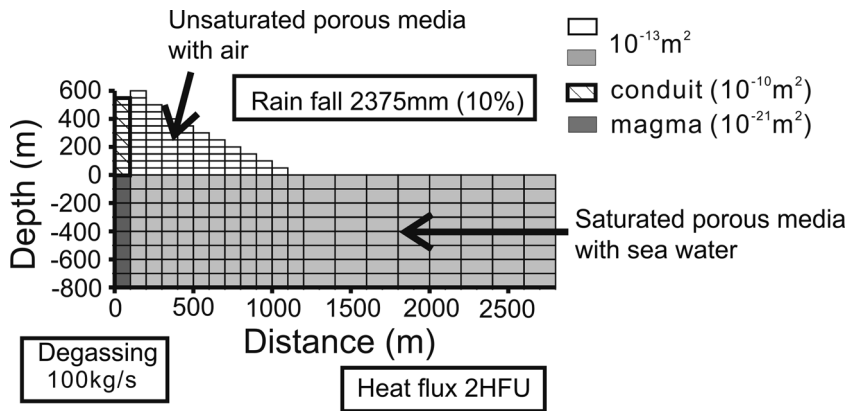


Fig. 4. Grid configuration and source conditions of the mathematical simulation.

実際に計算を行うと、このガスの流入によって火道の間隙圧は上昇する。このとき圧力が岩石の破壊強度を超えないようにするためには火道の透水係数を十分に大きくする必要がある。ここでは異常な圧力上昇を抑えるために $10^{-10}m^2$ とした。計算に当たって、地下水面より上部では、空隙が空気で満たされた不飽和層、下部を水または塩水で満たされた飽和層と見なしている。これは、硫黄島島内の観測井における水位観測の結果に基づいている (Fig.5)。島内の地下水位は若干の変化はあるもののほぼ海水面に等しく、標高 50m 以下である。マグマやガスのソースなどを考えないで、自然状態のシミュレーションを実施すると、上面から流入した雨水は、まず地下を深度方向へ浸透し、やがて側面から流出する。定常状態に達したときの地下水位は、降水量に

対して地層の透水係数が小さい場合には高くなり、透水係数が大きい場合にはその逆となる。さまざまな透水係数についてシミュレーションを実施し地下水位を調べてみたところ、透水係数が 10^{-13}m^2 より大きければ、地下水位はおおよそ海水面に一致することが分かった。多くの地熱地域での井戸を用いた透水係数の直接的な測定結果によれば、その値は上限値に近い。そこで、以降のシミュレーションでは、地層の透水係数を 10^{-13}m^2 とした。なお、このような自然状態のシミュレーションにおける定常状態の温度、圧力分布を、次に述べるマグマ-熱水系のシミュレーション

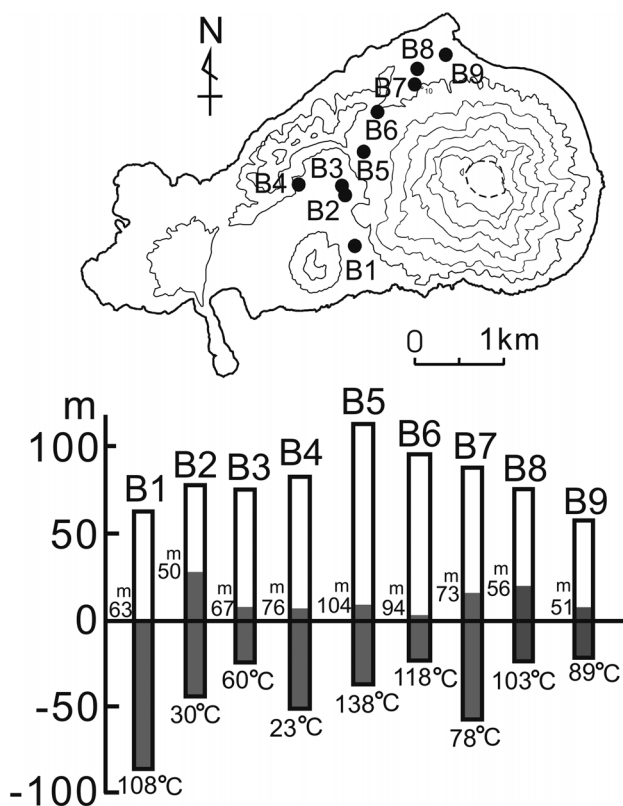


Fig. 5. (a) Location of the observation wells. (b) Water level and base temperature of the wells.

ョンにおける初期状態とした。先に述べたようにマグマの温度を一定としたが、これは、火道対流の循環によって常に高温のマグマが深部より供給されるからである。ただし、計算の都合上、その温度は 300°C としており、実際のマグマの温度 (950°C) よりはかなり低い。脱ガスを想定したガスのソースの温度も 300°C としたが、実際の火山ガスの温度 (最大で 880°C) より低い。1気圧で 300°C の加熱蒸気の比エンタルピーは $3.0 \times 10^6 \text{J/kg}$ で 1000°C の比エンタルピー $4.6 \times 10^6 \text{J/kg}$ のおよそ 65 パーセントである。したがって、計算される山体の温度分布や放熱量については 30 パーセント程度過少に評価されている。

IV. 計算結果

ソースとして上面の雨水と下面の地殻熱流量のみ、それにマグマを設定したもの、マグマに加えて脱ガスをソースとして設定したものをそれぞれ示す (Fig.6). 初期条件から出発して 800 年

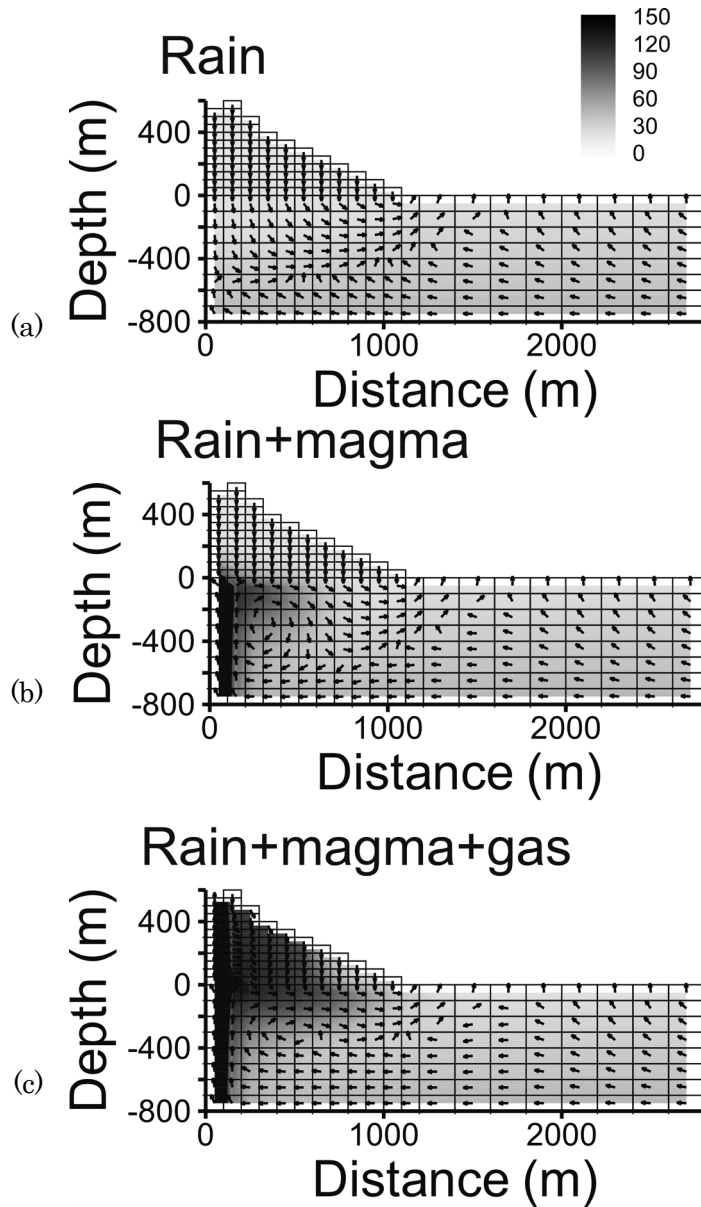


Fig. 6. Simulation results considering the source of (a) rain only, (b) rain and magma, and (c) rain, magma and degassing, respectively. Gray scale indicates the calculated temperature distribution and the uniform arrows indicate mass flow directions.

後の状態を示す。マグマの影響によって熱水系が発達し、ほぼ定常状態になるまで数百年を要した。この計算結果はマグマのヘッドを海水面にしている。それは、後で述べるように観測結果と矛盾しない深度である。計算結果の図では、温度を陰影で、流体の流動方向を矢印で示す。ただし、流動方向を見やすくするために矢印の大きさは均一にしてあるので、その大きさに意味はない。雨水と地殻熱流量のみの計算結果に見られるように地表から浸透した雨水が山体を流下し、地下水面に達したところで側方に流動している様子が分かる。次にマグマを設定した場合、熱源が加わったことにより、地下水面で熱水対流が生じていることが分かる。すなわち高温の部分がマグマのヘッドのあたりから地下水面に沿って側方に伸びている様子が分かる。その拡がりには 500m 程度である。注目されるのは、硫黄岳の山体部ではほとんど熱異常が見られないということである。

マグマのヘッドの直上に脱ガスをソースとして加えた場合には山体部分の温度分布が一変する。山体内はガスおよび熱水により温度が上昇し、地表においてその拡がりには火道の中心から 700m 程度になり、地表面温度の観測とよく一致する。噴気地からの放熱量は 20MW と計算され、観測値から得られる 50MW よりは小さいが、ソースとして与えたガスのエンタルピーが実際の 60%程度であることを考慮すれば矛盾していないといえよう。このような温度異常が現れるのは、脱ガスのほとんどが火道を通して大気へ放出されるものの、その一部が火道の上昇過程で周囲の地層へ散逸し、山体内にガスおよび凝縮水からなる熱水系を形成するからである。このように硫黄岳で観測されているような山頂や山腹での熱活動を説明するためには、脱ガスによる効果が不可欠である。火道を上昇する火山ガスの一部が周囲へ拡散することによって山頂および山腹の熱活動が形成され、さらに、それが山麓へ流下し、マグマを熱源とした熱水対流の効果と合わさることによって、熱異常域が地下水位面に沿って舌状に延び、海岸線付近の温泉活動を形成しているとみることができる。

このように脱ガスが火道を上昇中に周囲の地層へ散逸することによって、山体規模での熱水系を形成するためには、二つの効果が大きな影響を及ぼす。ひとつは地層の透水係数であり、もうひとつは脱ガスの深度である。周囲の地層の透水係数が小さくなると山体の熱活動の規模は小さくなり、逆に周囲の地層の透水係数が大きくなると山体の熱活動の規模は大きくなる。透水係数が大きければ周囲へ拡散する火山ガスの量が多くなり、小さければその量が少なくなるからである。ここでは、マグマのヘッドを海水準としたときの、透水係数が及ぼす影響についての計算結果を示す。透水係数が 10^{-14}m^2 の場合、熱異常域の拡がりには火道の近傍に限られ、地表では火道の中心から 300m 程度までである。火山ガスの放出が火道に集中するため、周辺の噴気地からの放熱量は 14MW と小さい。一方、透水係数を 10^{-12}m^2 とした場合、より多くの火山ガスが周辺へ散逸するため、山体の温度異常域はほぼ全域に広がる。地表においても 1000m をこえる範囲まで温度異常が拡がることになり観測事実と矛盾する。より多くの火山ガスが散逸するので噴気地からの放熱量は 64MW となる。

既に述べたように、島内の観測井での地下水位を説明するために地層の透水係数として 10^{-13}m^2 という値が適当であるということが分かった。それは、別の現象からも示唆される。火口のリムの最も標高の高い地点に初期から一年間一定量のトレーサーを流入させ、トレーサーの濃度変化

を海岸線で測定した。その結果、およそ 30 年後に濃度が最大になることが分かった。この期間は地下水のトリチウム濃度を用いて見積もられた地下水の平均滞留時間 (10~29 年) の上限に一致する (風早)。トレーサーの計算では、雨水が浸透してから海岸線で流出するまでの経路として最長のものを対象にしていることを考慮すると、両者の結果は調和的であると考えられる。

山体規模での熱水系形成に大きな影響を及ぼす二つ目の効果として、脱ガスの深度を上げることができる。脱ガスの深度を変えることによって、山体の熱活動の規模が変化することが期待さ

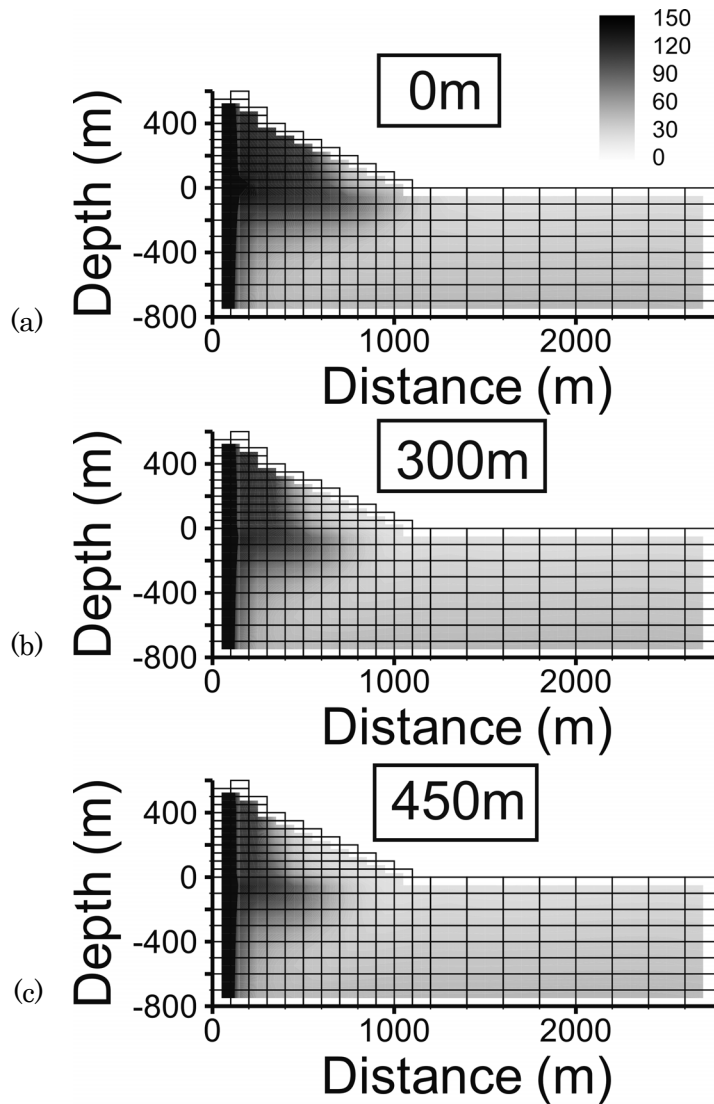


Fig. 7. Simulation results considering the degassing depth of (a) 0m, (b) 300m and (c) 450m above sea level, respectively. Gray scale indicates the calculated temperature distribution.

れる。火道から周囲の地層への脱ガスの拡散は、上昇する経路の長さに依存するからである。その変化の程度をシミュレーションによって調べてみた。周囲の地層の透水係数を 10^{-13}m^2 で一定とした場合に、脱ガスの深度を標高 0m, 300m, 450m とした結果を示す (Fig.7)。深度が標高 300m の場合、地表での熱異常域の拡がりには火道の中心から 500m 程度で、標高 450m になると拡がりには 300m 程度とさらに狭くなる。このことは、上昇する経路が短いほど、周囲に散逸する火山ガスの量が少なくなることによる。このように脱ガスの深度によって山体の熱活動の規模がかなり変わることが確かめられた。硫黄岳の山腹での熱活動の広がり (700m 程度) を考えると、脱ガスの深度は海水準に近いとみなすことができる。ただし、海水準より下になると、水で飽和した地層中で脱ガスすることになり、かなり結果が異なってくるものが予想される。観測されるような火道からの脱ガス量を維持するためには、マグマの周囲が乾燥した状態になる必要があると考えられる。そのような状態の形成メカニズムの検討は今後の課題としたい。

V. ま と め

蒸気および熱水の流動とその熱伝達を計算する数値シミュレーションによって、硫黄岳のマグマ - 熱水系の形成過程について検討した。マグマ - 熱水系の形成に必要な条件は次のようにまとめられる。

- 1) マグマからの定常的な脱ガス。火道を上昇する火山ガスの一部が周囲の地層へ散逸することによって硫黄岳の山体内に熱水系が形成され、地表では温度異常が現れることが確認された。脱ガスがない場合においても、マグマを熱源とした熱水対流が生じるものの、それは地下水位下に限られ、地表で温度異常は現れない。このような熱水系が形成されるためには、数百年のタイムスケールにおける長期間の継続した脱ガス活動が必要である。このことは火道内マグマ対流モデルを支持する。
- 2) 周囲の地層の透水係数が大きいこと。透水係数がある程度大きくないと、形成される熱水系は十分な拡がりを持つことはない。硫黄岳の場合、観測されたような地表面温度異常域の拡がり (700m 程度) を説明するためには周囲の地層の透水係数として 10^{-13}m^2 程度が必要である。透水係数は局所的には不均質であるが、ここで得られた値は山体全体の平均的な値とみなすことができる。この 10^{-13}m^2 という透水係数の値を用いて計算される地下水位およびトレーサーの移動速度は、硫黄島島内の観測井の水位と、トリチウム濃度から推定される地下水の平均滞留時間の観測結果と矛盾しない。
- 3) 脱ガスの深度が浅すぎないこと。火山ガスが上昇する過程で周囲の地層に散逸するため、その量は経路に依存する。そのため、脱ガスの深度が浅すぎると周囲に散逸する量が少なくなり形成される熱水系の規模も小さくなる。硫黄岳の場合、観測されるような地表面温度異常の拡がりを説明するためには、海水準程度の深度で脱ガスする必要がある、それより浅くなると観測事実と矛盾する。ただし、地下水位 (海水面) 以下にマグマのヘッドがくると脱ガスの環境が変わるため、さらに検討が必要である。

本研究における今後の展開としては、1) マグマのヘッドが地下水位下にある場合に形成される熱水系の検討、2) 数値シミュレーションから見積もられる、周囲の地層の透水係数と脱ガスの深度が観測結果に対してどの程度のセンシティブィティーを持つかの検討、3) 本論では火山ガスとして水蒸気のみを考慮したが、 SO_2 , CO_2 , HCl 等の組成も考慮することによってシミュレーションの精度を高めること等があげられる。

謝辞 地表面温度の測定に際しては産業技術総合研究所篠原宏志氏にご協力いただいた。数値シミュレーター (STAR) の実行に際しては同研究所石戸恒雄氏に便宜を図っていただいた。同研究所風早康平氏には薩摩硫黄島の水文について未公表資料を含めてご教示いただいた。記して謝意を表します。

文 献

- Harris, A.J.L. and D. S. Stevenson, 1997. Magma budgets and steady-state activity of Vulcano and Stromboli, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1043-1046.
- Kazahaya, K., H. Shinohara and G. Saito, 1994. Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit, *Bull. Volcanol.*, **56**, 207-216.
- Kazahaya, K., H. Shinohara and G. Saito, 2002. Degassing process of Satsuma-Iwojima volcano, Japan: Supply of volatile components from a deep-magma chamber, *Earth Planet Space*, **54**, 327-336.
- Matsushima, N., 2003. Mathematical simulation of magma-hydrothermal activity associated with the 1977 eruption of Usu volcano, *Earth Planet Space*, **55**, 559-568.
- Mataushima, N., K. Kazahaya, G. Saito and H. Shinohara, 2003. Mass and heat flux of volcanic gas discharging from the summit crater of Iwodake volcano, Satsuma-Iwojima, Japan, during 1996-1999, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **126**, 285-301.
- Saito, G., K. Kazahaya, H. Shinohara, J. Stimac and Y. Kawanabe, 2001. Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **108**, 11-31.
- Sekioka, M., 1983. Proposal of a convenient version of the heat balance technique estimating heat flux on geothermal and volcanic fields by means of infrared remote sensing, *Memoirs of the National Defense Academy Japan*, **23**, 95-103.
- Sekioka, M. and K. Yuhara, 1974. Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, *J. Geophys. Res.*, **79**, 2053-2058.
- 篠原宏志・風早康平・J.W.Hedenquist, 1993. 薩摩硫黄島の火山ガス・温泉・熱水系, 地質ニュース, **472**, 6-12
- Shinohara, H., K. Kazahaya G. Saito, N. Matsushima and Y. Kawanabe, 2002. Degassing activity from Iwodake rhyolitic cone of Satsuma-Iwojima volcano, Japan during 1990-1999: formation of a new degassing vent, *Earth Planet Space*, **54**, 175-186.
- Stevenson, D. S., 1993. Physical models of Fumarolic flow, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **57**, 139-156.
- 地質調査所, 1976. 全国地熱基礎調査報告書, No. 30, 90pp.
- 横山泉・清野政明・本谷義信・飯塚進・牧正・青田昌秋, 1966. 鹿児島県下硫黄島の地球物理学的調査報告, 北海道大学地球物理学研究報告, **16**, 33-50.