

平成10年12月

日本温泉科学会第51回大会

特別講演

1995年九重火山噴火とその後の経過

九州大学大学院工学研究科地球資源システム工学専攻

江 原 幸 雄

1995 Eruption of Kuju Volcano and its Recent Activities

Sachio EHARA

Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University

Abstract

Kuju volcano in central Kyushu began to erupt on 11 October, 1995 and the volcanic gas discharge rate from new craters is still large (up to several hundreds MW) even about three years after the first eruption, although the proposed shallow new magma body does not appear at the surface. We conducted dense repeat thermal (including infrared) and gravity measurements in and around the new craters in interval of one week to several months. As a result, we detected various temperature changes of new craters and pre-existing fumaroles accompanying with the eruption. We also clarified that the rate of the groundwater vaporized by the uprising hot magmatic gas is becoming to equal to the rate of the supplied groundwater, that is, the volcanic activity is reaching a new stable state. However, since about one year after the eruption, fumarolic activities of new craters are becoming active, which is suggested to relate with the deep origin low frequency seismic activity. Therefore it is important to continue monitoring the volcanic activity.

Key words : Kuju volcano, Eruption, Volcanic activity, Thermal structure

キーワード : 九重火山, 噴火, 火山活動, 熱構造

1. はじめに

大分県南西部にある九重火山は1995年10月11日に火山灰(噴出物量約20000m³, 中田ほか, 1996)を噴出する噴火活動を開始した。その後, 同年12月下旬に2回目の火山灰噴火(噴出量, 約5000m³, 中田ほか, 1996)をした後, 一時的には新火口群からの火山ガス放出が弱まったが, その後回復し, 噴火後2年10ヶ月を経過した現在でも(1998年8月), 新火口域より高温の火山ガス

が多量に放出されている。このような九重火山の噴火現象の進行に伴い、九州大学大学院工学研究科地球資源システム工学専攻地球熱システム学研究室(以下、九大地熱研究室と略記する)では火口周辺地域を中心として種々の地球物理学的観測を継続してきた。特に、噴火に伴う熱や流体の流れに関する観測を集中して行った。その結果、今回の噴火に伴って地殻浅所に貫入したと推定されるマグマにより、地下における新たな熱と水の流れのシステムが形成され、噴火後そのシステムが次第に安定化していく過程を捉えることができた。しかしながら、一方では、噴火後一定期間(約1年間)が経過した後、一度低下傾向となった新火口群からの噴煙活動が次第に活発化する傾向も捉えられた。2回目の噴火後、火山灰噴出等の目立った表面現象の変化は認められていないが、噴煙活動は長期化する傾向が見られる。

2. 九重火山の概要および噴火前に提案されていた熱過程モデル

九重火山は大分県南西部にある活火山であり、20を超えるドーム状火山体から構成される一大火山群を形成しており、東西約22 km、南北約24 kmに広がっている。主要構成岩石は角閃石安山岩であり、島弧の典型的な安山岩質火山の1つである。現在、火山群の中心部にあるドーム状火山体である星生山の北東山腹にわが国でももっとも活動的な噴気地域の1つである九重硫黄山噴気地域が存在している。この噴気地域はおおよそ直径約500mの範囲に広がっており、A、B、C-regionと呼ばれる3つの地域に区別されている(Fig. 1)。自然放熱量は約100MWで、その90%以上は噴気により放出されている。残りのほとんどは温泉湧出によるものであり、pH 1程度の強酸性泉の湧出が認められている(江原ほか, 1981)。噴気温度としては200°C以上のもも多く、1960年頃には最高508°Cという高温が観測されている(Mizutani et al., 1986)。また、噴気地域直下の深さ1.5km深程度までの部分では微小地震活動が活発で(1日10~20個程度、江原ほか, 1990)、その原因はこの領域における高い間隙水圧によるものと理解されている。すなわち、微小地震活動の原因は活発な噴気活動を生じている地下の地熱流体の高い圧力にあるとされた(Ehara, 1992)。

九重火山中心部にはこのような活動的な地熱活動が知られているが、九重火山周辺地域にも多くの地熱地域が存在し、基礎的研究および地熱開発を目指した調査研究も多くなされ、それらの研究をも含め、江原(1994)は九重火山の熱過程としてFig. 2に示すようなやや定量的な熱過程モデルを提出した(江原, 1994)。それによると、九重火山地域では地表からおおよそ2km深程度までは各種の火山岩類が分布している。その下には、基盤とされる白亜紀の花崗岩類および変成岩類が存在している。九重火山中心部地域下4km以深には冷却中のマグマが存在しており、現在でも7km以深では熔融状態が推定されている。この冷却するマグマからはマグマ性流体が分離・放出され、基盤岩内の割れ目を上昇し、九重硫黄山地下2km深程度で、地表から浸透流下してきた降水と混合、

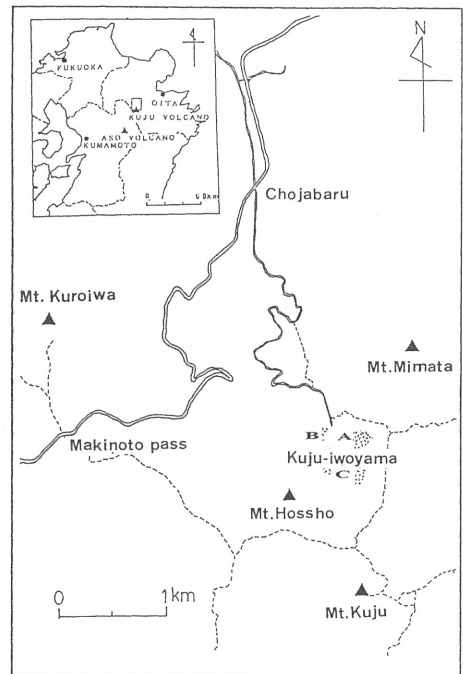


Fig. 1 Location map of Kuju-iwoyama fumarolic field, central Kyushu. A, B and C show the pre-existing main fumarolic regions before the 1995 eruption.

気液2相の対流ゾーン(以下ではこの部分を火山熱貯留層と呼ぶ。直径500m, 厚さ2kmの円柱状構造)を形成し、最終的には地表から噴気・温泉として放出されている。すなわち、九重硫黄山噴気地域は典型的なマグマ性地熱系と言える。なお、九重火山周辺部に存在する大岳・八丁原等の地熱地域はその熱源は九重火山のマグマに起因するが、マグマ性流体の関与がないか、あってもごくわずかないわゆる熱水卓越型の地熱系と考えられる。

3. 九重火山の活動—地質時代からごく最近まで—

九重火山の活動は今から約30万年前(Watanabe et al., 1987)あるいは14万年前頃(鎌田, 1997)に開始し、今から数万年前には主要な活動は終了した(Watanabe et al., 1987, 鎌田, 1997)と考えられている。また、最近の1万5000年間では、1000年ないし2000年に1度の割合で、ドームを形成する活動を行っており、この間の火山物質噴出率は $0.7\text{km}^3/1000\text{年}$ (鎌田, 1997)であり、この値は最近まで噴火活動を継続していた雲仙火山(中田, 1995)に比べ、1桁程度大きく、比較的最近の地質時代における九重火山の噴火活動のレベルの高さを示している。一方、有史以後の活動に関しては、噴気活動の活発化あるいは水蒸気爆発と見られる活動が17世紀半ば以降、60~100年程度の間隔で生じていることが知られている(江原ほか, 1981)。そして、有史以後のこれまでの活動様式と活動間隔から、次の活動は、水蒸気爆発的なもので、21世紀のはじめ頃であろうとの推測がなされていた(江原ほか, 1981)。

そのような中で、九重硫黄山地域の地熱活動のモニタリングを継続していた九大地熱研究室では1980年代の後半頃から、噴気活動に変化が生じてきていることを認めた。すなわち、1960年頃より経年的に低下傾向にあった噴気温度がこの頃より上昇傾向となり、また通常は白色に見える噴気の中に、青みがかった噴気がしばしば認められるようになってきた(マグマ性の SO_2 ガスの増大によると考えられる)。また、1980年代後半以降、噴気地域地下に発生する微小地震の数が急激に減少してきた。この噴気活動の活発化と微小地震活動の低下は、九重地域を含む九州中部地域に卓越する南北張力場が強まりつつある結果と解釈することが可能で、九重火山の火山活動は新しい活動段階に入ったのではないかと指摘がなされていた(江原・茂木, 1992)。そして、噴火開始約1ヶ月前には、それまで低下していた噴気地域直下の微小地震活動がやや活発化していることが知られていたが(江原・藤光, 1996)、その直後の噴火発生を全く予測することはできなかった。このような中で1995年10月11日、午後6時頃火山灰を放出する噴火が発生した。激烈な火山灰噴出活動は30分間程度の比較的短い時間内で終了した。しかしながら、今回の噴火で新たに開口した火口群は噴火以降、消長は見せながらも活発な噴煙活動を継続することとなった。噴火に伴い、国立大学

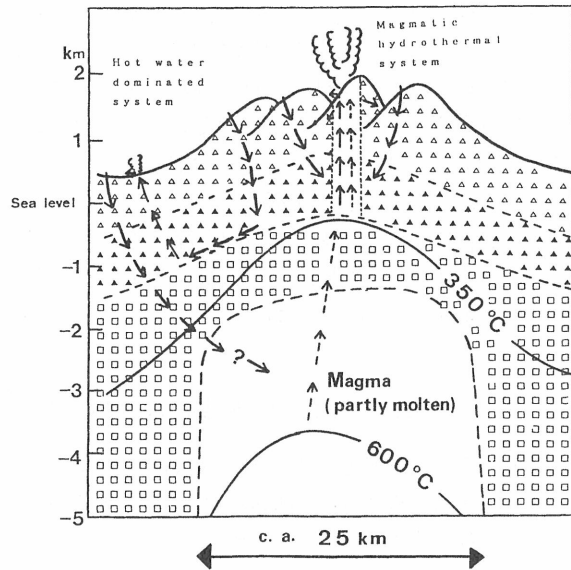


Fig. 2 Thermal model of the Kuju volcano group. Triangles and open rectangles show volcanic rocks and granitic basement rocks, respectively. Solid and broken arrows indicate flow pattern of liquid and vapor water, respectively. Magmatic fluid discharged from the cooling magma body rises upward through the fractures in the basement rocks and mix with the meteoric water at about 2km depth. Two-phase volcanic reservoir is formed between the surface and 2km depth (Ehara, 1994).

合同観測班を中心とする観測が開始された。地震・地殻変動による地球物理学的観測は京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設火山活動研究センターを中心として行われ、観測結果は最近まとめられ、公表された(Sudo et al., 1998)。その結果によると、深部マグマの活動に起因すると推定される低周波地震の発生など多くの興味ある地震現象が見出されているが、今回の噴火開始後、目立った地震活動の増大や火山体の膨張傾向は認められず、噴火後の地震・地殻変動観測結果からは今回の噴火活動に明瞭なマグマの関与は認められていない。一方、2回目の噴火に伴って放出された火山灰からは、発泡を含む新鮮な火山ガラスが検出され、今回の噴火に、微量だが新たなマグマの関与があったことが推定されている(波多江ほか, 1997)。

4. 九大地熱研究室による噴火後の観測

4.1 火口・噴気地域の各種温度測定

九大地熱研究室では1995年10月11日の最初の噴火直後より、各種の温度観測(赤外映像装置による火口・噴気孔の温度観測、赤外線放射温度計による火口・噴気孔の温度観測、データロガーによる噴気孔・地温の連続観測、1m深地温の定期観測、噴気温度・温泉温度の直接測定)を開始した。

各種温度の観測地点をFig. 3に示す。以下では、各種測定結果の概要を記す。詳細については、調査結果の報告(江原・藤光, 1996, 江原ほか, 1997, 江原ほか, 1998)を参照頂きたい。

各種の温度観測結果は2つに大別される。1つは比較的ゆっくりとした変化(上昇傾向や下降傾向を示す)であり、もう1つはパルスの急激な変化である。後者は地震発生と関係があり、地震発生直後に急激な温度低下を示す場合が多い。そして、多くの場合、その後回復する。これは、地震に伴う応力場変化により噴気の通路が一時的に閉じられたことによる短期的な影響を反映するものと理解される。以下ではこのような急激な温度変化ではなく、前者の比較的ゆっくりとした温度変化について述べる。

最初の噴火開始後約2年半の温度変化は次の3つに分類される(Fig. 4。なお、図中噴気孔B2aおよびCは1m程度まで接近し、赤外線放射温度計で測定した値で、dは300m程度離れた位置から赤外線放射温度計で測定した値である)。

- 1) 最初の噴火直後から温度が上昇し、2回目の噴火後、急激に低下、その後比較的安定していたが、ある時期からゆっくりとした上昇傾向を示すもの。
- 2) 最初の噴火以降、温度低下を続けるもの。
- 3) 大きな温度変化を示さないもの。

上記のうち、1)は今回の噴火に伴って新たに生じた新火口群およびそこに近い噴気地域で見られる。



Fig. 3 Observation points of repeat geothermal and gravity measurements in the central part of Kuju volcano after the 1995 eruption.
 ●: fumarolic and ground temperature by continuous recording,
 ●: ground temperature,
 ○: infrared imagery,
 ○: heat discharge rate,
 ●: gravity.

2)は数は少ないが、噴火前、九重火山中心部で最も優勢であった噴気孔があげられる。3)は噴火前から存在していた噴気孔に多く見られる。なお、3)に属する温度変化のパターンをさらに詳しく見ると、最初の噴火後ゆっくりとした温度低下傾向が見られ、そしてある時期からゆっくりとした上昇傾向が見られる。特に最近の変化パターンは1)と類似している。なお、2)および3)で示される傾向は噴火前からのやや長期的な温度変化(Fig. 5)をみるとその傾向がより明確になる。上述したような差異が生じるのは、今回の噴火位置とも関係しているようであり、従って今回の噴火を引き起こした熱源との関わり方の違いを反映していることが考えられる。

4.2 放熱量測定

今回の噴火で新たに形成された火口および噴火前から存在していた噴気地域からの放熱量を最大噴気直径を利用した放熱量測定法(神宮司・江原, 1996)で見積もった。最初の噴火直後は、火山噴気放出量はd火口からのものが圧倒的に大きかったので、d火口からの放熱量を評価した。しかしながら、2回目の噴火以降、新火口群の中(b, c, d, e火口)で、d火口は最大の強度を示しているが、相対的に強度が弱まるとともに、噴火前から存在していた噴気地域(特にA-regionとC-regionとの境界近くの噴気孔群)からの噴気量が増加していることが確認されたので、d火口だけではなく、できるだけ他の火口・噴気地域からの放熱量も測定した。これまでの測定結果をFig. 6に示した。これによると、d火口からの放熱量は最初の噴火以降2回目の噴火まで、2000MWを越える多量の熱を放出し続けたことがわかる。噴火前から存在していた放熱量は約100MW(江原ほか, 1981)と推定されており、その20倍を越える大きな値であることがわかる。2回目(1995

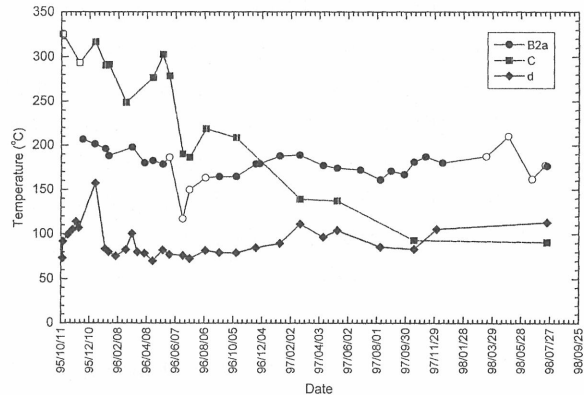


Fig. 4 Representative patterns of fumarolic temperature variation of the new crater(d) and the pre-existing fumarolic area(B2a and C)after the 1995 eruption, observed by the Infrared Radiation Thermometer.

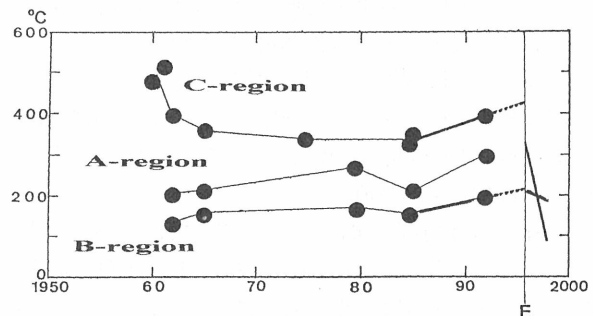


Fig. 5 Temporal variations of maximum fumarolic temperatures at the pre-existing fumarolic region A, B, and C. The temperature at C-region dropped rapidly after the eruption but the temperature at B-region did not change so much after the eruption.

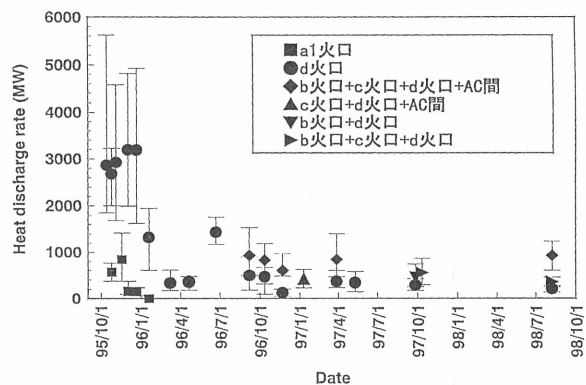


Fig. 6 Temporal variations of heat discharge rates from new craters and pre-existing fumarolic areas.

■ : a1 crater, ● : d crater, ◆ : b, c, d craters and pre-existing fumarolic area, ▲ : c, d craters and pre-existing fumarolic area, ▼ : b, d craters, ► : b, c, d craters.

年12月末)の噴火後は噴気量は急激に低下した。その後、1996年5~6月以降、増加に転じた。しかし、その後再び低下し、以後比較的一定した放熱量(300~400MW程度)を示している。一方、d火口からの放熱量の減少に対し、噴火前から存在していた噴気地域、特にA-regionとC-regionとの境界の尾根付近の噴気量が增大した。これらをも含めた総放熱量は600~800MW程度で比較的安定している。すなわち、九重火山中心部(火口および噴気地域)からの放熱量は、噴火前100MW程度であったのに対し、噴火直後にはその20倍以上に達した。しかし、その後減少し、一時500MW程度まで減少した。その後、一時1000MW程度まで回復したが、その後600~800MW程度で比較的安定しているといえる。

上の放熱量推定時には同時に水蒸気放出量も見積もられる。これを用いて、放出される水が新たなマグマから脱ガスしたと仮定した場合、どの程度の規模のマグマが関与したのかを以下のように見積もった。火口から放出される水蒸気量のうち、約30%はマグマ起源と推定されており(平林ほか, 1996), 一方, 安山岩質マグマおよび流紋岩質マグマに含まれるマグマ水はそれぞれ、1~3%, 1~6%と言われる(風早・篠原, 1994)。これらを考慮し、すでに放出されたマグマ水が新たなマグマから分離放出されたとすると、そのマグマの大きさは球に換算すると直径約500mになる。このことは噴火後の地震活動や地殻変動からは今回の噴火に積極的に新たなマグマが関与したと考える必要はないようであるが(須藤ほか, 1996, 西ほか, 1996, Sudo et al., 1998), 熱学的には、今回の噴火に新たなマグマが関与した可能性が考えられる。

4.3 火口周辺地域の重力変動観測

噴火活動に伴う重力変動を検出するために、火口を中心として測定点を配置した(Fig. 3)。重力変動を評価するための基準点を山腹の独標(1283m)に置き、往復測定法で測定を行い、この基準点との重力差の経時変化を追跡した。測定に使用した重力計はカナダ・シントレックス社製CG3およびCG3-M型自動重力計であり、それぞれ公称精度は10マイクロガルおよび1マイクロガルである。往復測定による測定誤差は前者で一般に20マイクロガル程度、後者で10マイクロガル程度である。測定環境の良い時は後者では数マイクロガル以内となる。測定結果の例をFig. 7に示した。なお、観測された重力値には標高の変動による影響も含まれているが、これについては補正されている。これらを見ると、以下のような特徴的な変化が見られる。噴火直後、火口周辺の重力は一時的に上昇し、その後比較的急激に低下傾向となる。そして、次第に低下傾向は鈍化し安定的に推移する。そして、このような中でいずれの年においても10月頃に一時的な上昇傾向が見られる。このような変化傾向を時期的に区分し、空間的重力変動パターン

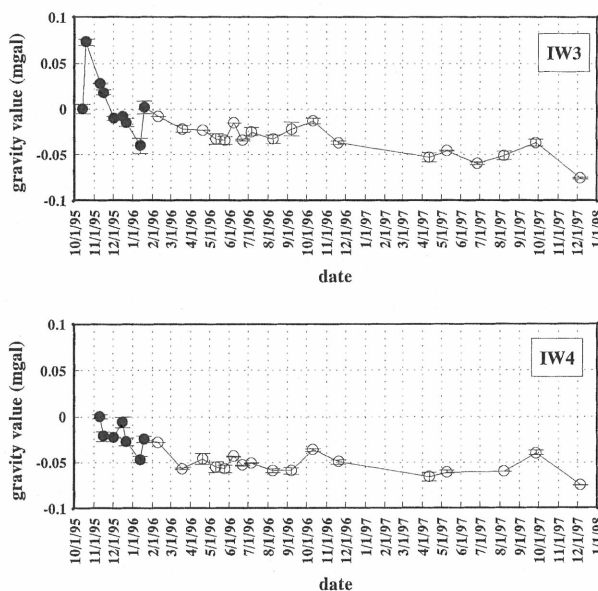


Fig. 7 Two examples of gravity changes near the new crater zone. Gravity changes originated in height change are corrected. The solid and open circles show the observed values by Scintrex CG-3 and Scintrex CG-3M gravimeters, respectively.

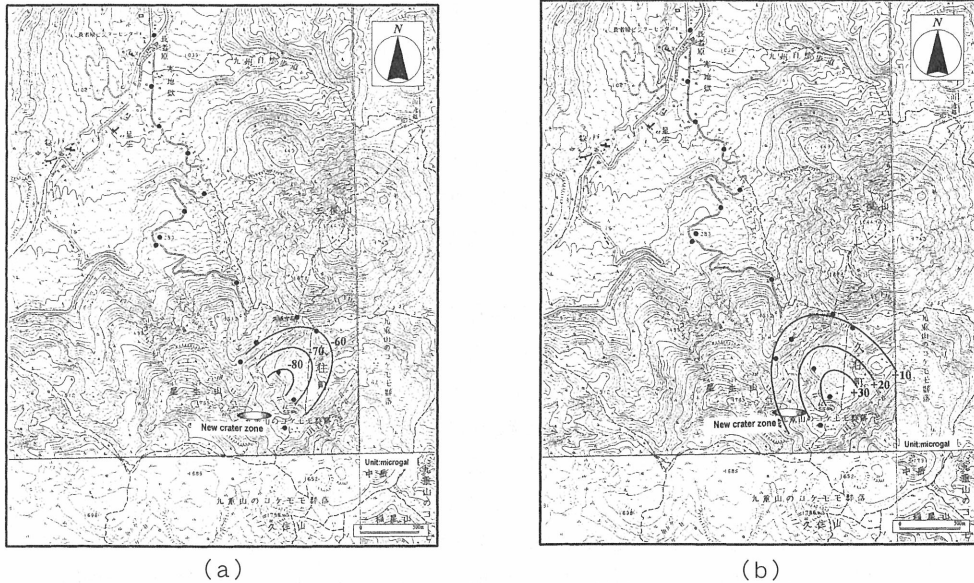


Fig. 8 Contour map of gravity changes in the central part of Kuju volcano.
 (a) from the middle of October, 1995 to January, 1996.
 (b) from June, 1996 to October, 1996. Unit: microgal.

ン図として表したものの例を示したのがFig. 8(a)および(b)である。(a)の時期は噴火後の比較急激な重力減少期で、重力減少の中心は火口周辺となっている。また、Fig. 8(b)は重力安定期中の一時的な重力増加であるが、この重力増加の中心は火口周辺になく、北千里浜という地形的凹地にあるように見える。以上のような、重力の経時変化および重力変動の空間的パターンの変化から、観測された重力変動は以下のようなことを示しているのではないかと考えられる。すなわち、噴火の発生に伴って、一時的に大量の地下流体が大気中に放出される。従って火口周辺は一時的に質量が欠損し、重力は減少すると考えられる(しかしながら、噴火直後の重力減少は噴火直後の短時間内に発生するものであり、今回は観測が行われなかったため、とらえることができなかった)。その後、急激な質量欠損を補うように火口の周囲から地下水が補給される。この噴火直後の地下水の供給過程が、噴火直後の重力増加としてとらえられたものと考えられる。噴火後、火口周辺の地下水が火口方向へ補給されるが、一方、地下からは多量の高温火山ガスが供給され続ける。この高温火山ガスによる地下水の加熱・蒸気化が進行し、火口周囲から補給される地下水量は蒸気化される地下水量に追いつかず、重力減少が継続した。しかし、やがて地下からの火山ガス供給量の減少と火口周辺からの引き続く地下水の補給により、蒸気化される地下水量と補給される地下水量とが次第にバランスしてくる。これに対応し、重力減少の傾向は次第に鈍化してやがては変化が見られなくなる。しかしながら、このような安定的な状態になっても、夏季には降水量が増加し、ある程度の時間遅れをもって、地下帯水層に補給される。従って、降水の時期からある時間を経てから、帯水層の質量が増加する、すなわち、重力が増加する。しかしながら、一時的に増加した地下水は再び周辺に拡散され、今度は重力減少が観測される。これらの重力増加および減少の中心が、火口周辺ではなく、降水の集水域と考えられる地形的凹地にあることもこのような推論を裏付けているものと考えられる。以上のような推論を数値的に検証するために、重力変動パターンにガウスの定理を適用して、質量変化を求めるとともに、前節で推定された火口から放出される水蒸気量、さらに放出される火山ガスのうち約30%がマグマ水起源であること(平林ほか, 1996)を考慮すると、

火山体内部の水収支を求めることができる。4つの時期にわけて水収支を示したのがFig. 9である。時間の進行とともに、地下からのマグマ水(火山性ガス)の供給が減少するとともに、火口周辺からの地下水の補給が増加し、高温火山ガスにより加熱・蒸気化される地下水量と火口周囲から補給される地下水量とが次第にバランスしていく過程が理解される。なお、Fig. 9における水収支の数値評価には、若干の不確定が残されており、今後、関連するデータの入手により、より正確な数値の算出に務めたい。

5. 熱と水の流れに関する観測結果から推定される噴火後の地下過程

上述したように、九重火山の噴火活動に伴う熱と流体に関する観測から、噴火に伴う新たな熱源(マグマから脱ガスした高温火山性ガス)の供給により、地下における新たな熱と流体の流動系が生じ、それがやがて新しい平衡状態に向かう過程が実証的にとらえられたものと考えられる。噴火に伴う火口周辺の質量欠損は火口周囲からの新たな地下水の補給を促した。噴火に伴って増加した地下から供給されるマグマ性ガスは周囲の地下水を加熱・蒸気化し、火口から大量の熱と水を放出する新たな地熱活動を出現させた。当初は、補給される地下水量が不足したため、噴出される火山ガス温度は上昇した。しかし、2回目の噴火後、地下からの火山ガス供給量が減少したため、温度は急激に低下した。しかしながら、地下から供給される火山ガス量はある一定の量を保持し、それにより加熱・蒸気化される地下水量もほぼ一定となった。すなわち、質量的にはほぼバランスする状態になった。このような過程の中で深部の熱源は新たな補給がない限り、次第に冷却するが、一方、上昇する火山ガスは次第に火山ガス通路周辺を加熱し、高温化させるので、上昇する火山ガスの温度低下は少なくなってくると考えられる。火口周辺の地磁気の観測からも火口周辺は帯磁傾向にあり、火山体やや深部(地表下500~1000m深)は冷却傾向にあると考えられている(田中ほか, 1998)。すなわち、噴火に関連した本質的熱源そのもの(地下浅所に貫入したマグマ)あるいはそれに加熱された岩体と分離放出されるマグマ性ガスは冷却しつつあるが、火山体表面近くは火山ガスによる熱放散により、高温化しつつあるものと考えられる。火口から放出される噴気温度だけでなく、火口周辺の温度が最近になって(1996年9月頃以降)上昇していることが赤外熱映像装置による火口周辺表面温度の高温地域の拡大でも確認され、また肉眼的にも噴気地の拡大として裏付けられている。すなわち、熱源からの熱及び物質の放出に伴い、新火口周辺地域が次第に加熱されている。

すでに述べたように、噴火前から存在していた噴気地域には噴火前後でほとんど温度変化のない

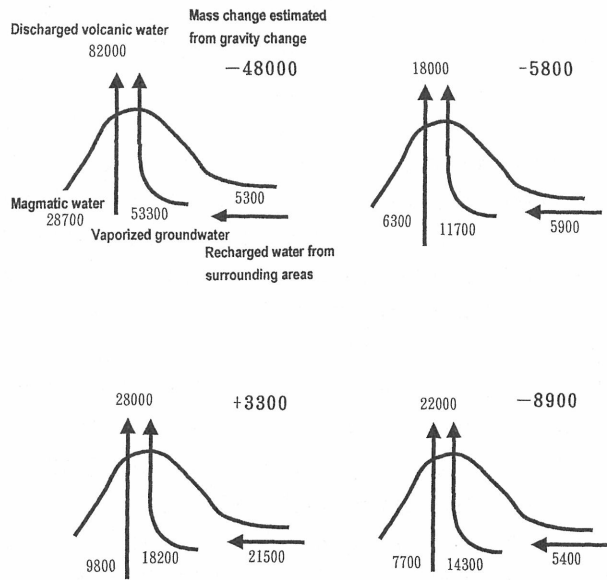


Fig. 9 Changes of hydrological systems after the eruption of Kuju volcano estimated by changes in gravity and volcanic steam discharge rate. Part of groundwater around the new crater zone is heated and evaporated by the rising magmatic water. The rate of the evaporated groundwater is becoming to equal to the rate of the supplied groundwater with time. Upper (right) : from the middle of October, 1995 to January, 1996, Upper (left) : from February, 1996 to May, 1996, Lower (right) : from June, 1996 to October, 1996, Lower (left) : from November, 1996 to May, 1997. Unit : tons/day.

ものが見られる。このことは噴火前に存在していた地下の熱水流動システムは噴火に影響されずに存在し続けているものと考えられる。そして、一方で、今回の噴火に伴って、新たな熱(そのほとんどが流体として供給される)供給が生じ、これに伴って新たな熱水流動システムが生じたものと考えられる(なお、上述したが、2回目の噴火以降、噴火前から存在していた噴気孔の温度が新火口の噴気温度と類似の変化をしていることが認められる。このことは、2回目の噴火以降、新・旧2つの火山ガス流動経路が部分的にもせよ連結したか両者に共通の別の原因が生じた可能性が考えられる)。噴火後マグマの動きを想定させるような事象は、1996年3月下旬にマグニチュード2を越える3個を含む群発地震活動が硫黄山直下やや深部(地表下3km程度)に発生し、その後、火山体の膨張が生じたことが観測されたこと以外、目立った事象は観測されていない(筒井ほか, 1996, 西ほか, 1996, Sudo et al., 1998)。しかしながら、噴出された火山灰の中に発泡を示す新鮮な火山ガラスが見出されており(中田ほか, 1996, 波多江ほか, 1997)、その生成深度が2~3km程度と推定されており(中田ほか, 1996)、今回の噴火に新たなマグマの関与があったことが十分推定される。

ところで、Sudo et al.(1998)によれば1996年末頃から1997年4月頃にかけて、九重火山直下海面下5 km程度で低周波地震が発生したことから、深部マグマの周辺で何らかの地下深部の活動が発生したことが推定される。そして、これに関係するように火口噴気温度上昇、噴煙高度の上昇等一連の火山活動が生じており、浅部のマグマ活動だけでなく、深部のマグマの活動に関連するような現象も観測されている(江原ほか, 1998)。

以上のことは、今回の噴火活動に伴って浅部に貫入しているのではないかと推定されるマグマは冷却の一途をたどっているが、深部のマグマも時折活動し、それが地震活動・地殻変動あるいは噴煙活動等の表面現象に反映されている様子が見られているのではないかと推定される。従って、今後、脱ガスの進んだ浅部マグマが再び活動を開始する可能性は低い(脱ガスが進んだため、マグマが上昇するための十分な浮力を獲得できないが、噴煙活動はまだ継続すると考えられる)、深部マグマの活動に注意を向ける必要があると考えられる。

6. 噴火の熱過程モデル

Fig. 10に基づいて噴火前後における熱過程モデルの変化を検討する。噴火前には地下深部(7km以深)から上昇してきたマグマ性流体は噴気地域浅部で3つに分岐し、それらがそれぞれ噴気地域C, A, Bを形成していた。それぞれの噴気最高温度はCが約400°C, Aが約300°C, Bが約200°Cであり、これらの温度の違いとこれらで観測された噴気温度の時間的変化の順序から、深部から上昇してきたマグマ性ガスが最初に分岐したものがB-regionとなり、次に分岐したのがA-region, そしてより直接的に上昇してきたものがC-regionと推定した。上昇するマグマ性流体は上昇途中で周辺から浸透流下してきた降水と混合し、気液2相ゾーンの対流ゾーン(火山熱貯留層)を形成する。微小地震はこの火山熱貯留層内(2km深以浅)の比較的浅部(1.5m深以浅)で発生していると推定される。

噴火後の熱過程の大きな変化は、新火口域からの大量の火山ガスの放出と、噴火前九重火山中心部で常に最も高温でかつ噴出勢力も最も優勢であったC-regionの噴気孔の急激な衰退である(Fig. 4および5参照)。2回目の噴火では火山灰の中に発泡を含む新鮮な火山ガラスが多く発見されたが、最初の噴火ではほとんどそれは認められないことが報告されている(波多江ほか, 1997)。このことは最初の噴火にはマグマが関与していなかったかあるいはその可能性が弱かったが、最初の噴火以後にマグマの関与が強まった可能性を示している。このことは新火口の温度が最初の噴火直後から2回目の噴火にかけて次第に上昇したことも関係している可能性も考えられる。また、噴火前の

1995年7月頃より、噴気地域周辺に存在した温泉湧出が次第に減少し、やがては停止したことおよび噴気地域からの塩化水素放出率が上昇したことが上げられる(糸井ほか, 1996)。これらは噴火開始数ヶ月前に地下から供給される火山ガス量が増加し、地下が高温化し、周辺の液相が部分的に気相に転じた可能性が考えられる。

以上のことを総合し、噴火直前直後の過程を以下のように推論する。噴火前のある時期に噴火前九重火山中心部で最も優勢であった噴気孔の通路がたとえば局地的な地震によって閉ざされるような事象が生じた。そのため地下から供給された火山ガスは地表から放出されず周辺地下に拡散し、周囲の地下水を加熱し、部分的には気化させた(もちろん、噴気孔の閉塞は今回の噴火に特に関係なく、後述する地下浅部貫入したマグマから脱ガスした火山ガスだけが関与した可能性も否定できない)。これにより地下浅部の圧力は次第に高まって行った。周辺に拡散した火山ガスは構造的に弱い部分(地下の断裂構造等、今回の噴火では火口列にそれが相当する)から噴出し始め、やがて爆発的に噴出した。これが最初の噴火である。従ってこの時は、新たなマグマに関与する噴火ではなかったことになる(ただ、新たなマグマから脱ガスした火山ガスが関与した可能性は否定できない)。この時に、地下に特別な異常が存在していなければ、噴火はこれで終了し、新たなマグマの関与しない単なる水蒸気爆発として今回の噴火活動は急速に衰えたものと考えられる。しかし、この時には、噴火前にすでに地下浅部(2.3km深)に定置されていたと推定されるマグマから脱ガスが進行し、これも地下に蓄積されていた(この火山ガス蓄積領域は噴火前から存在していた噴気地域ではなく、噴火前から存在していた噴気地域と新火口域の間にあったものと推定される)。最初の噴火により地下状態の変化(地下構造の変化あるいは急激な圧力低下)が生じ、新たなマグマから脱ガスしていた火山ガスの蓄積領域と最初の噴火に関与した地下噴気通路が空間的に連結する事象が生じ、これが最初の噴火後多量の噴煙噴出が継続し、かつ噴気温度が上昇したことに反映されたものと考えられる。このように多量の噴気放出が継続されたが、火口周辺は一貫して地盤の収縮状態が継続した(Sudo et al., 1998)。火口周辺地域の地盤の収縮と多量の流体放出の継続が火口周辺の内部圧力の増大を招き、これが2回目の噴火の引き金となったも

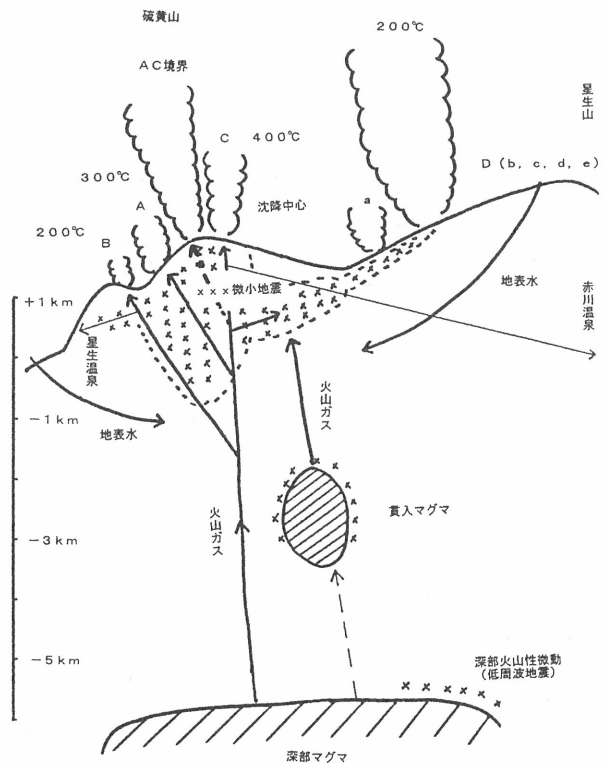


Fig. 10 A model of the volcanic process in the central part of Kuju volcano after the 1995 eruption.

A, B, and C show the pre-existing fumarolic areas. D shows the new crater (a, b, c, d, e) zone. The deep magma exists about 6 to 7 km depth. A small body of magma intruded to the shallow part (about 2 to 3 km depth) before the eruption. Arrows show the flow direction of fluids. Crosses show the location of earthquakes. The first ash eruption was triggered by the accumulation of volcanic steam which was originated in plugging the vent of a very active fumarole in the pre-existing fumarolic area and/or by the accumulation of volcanic steam which was supplied by the intrusive magma.

のと推定される。これにより火口周辺浅部(2.3km深)の圧力低下が生じ、浅部に貫入していたマグマの圧力低下を引き起こし、マグマ頂部での発泡を促したのではないかと推定される。そして、以上の一連の過程の中で、新たな噴火に伴って形成された地熱流体経路と噴火前から存在していた地熱流体通路が連結する事態が生じた。これが2回目の噴火以後のA-regionとC-region境界部からの活発な噴気の放出あるいは、1996年9月頃以降の、新火口の温度と噴火前から存在していたが2回の噴火に無関係であった噴気温度とが同期して変化するようになったことの原因ではないかと考えられる。噴火過程を明らかにするためには、多くの地下構造に関する情報と火山活動に関する情報を総合化しなければならない。上述したモデルはデータの限られた現時点での可能な1つのシナリオであり、仮説とも言うべきものであり、今後、改善を図っていきたい。

7. おわりに

1995年10月11日噴火活動を開始した九重火山において、熱と流体の流れに関する観測を行った。観測結果に基づいて、噴火過程を議論した。その結果、地下3km深程度に貫入していると推定されるマグマから供給される高温火山ガス量と、それにより加熱・蒸気化される火口周辺地下水量は、噴火当初は不均衡であったが、次第にバランスしつつあることが明らかにされた。このように浅部マグマに関する活動は次第に安定化する傾向にあるが、地下7km以深に存在が推定されている深部マグマの活動も見出され、今後とも火山活動には注意を払っていく必要があると考えられる。

謝 辞

九州大学大学院工学研究科地熱研究室藤光康宏助教授には現地観測・データの解析および結果の解釈全般にわたってご協力を頂いた。また、同地熱研究室所属の大学院生および4年生には現地観測・データの処理に関して、積極的な参加を頂いた。これらの諸氏の協力がなければ、条件の厳しい火山観測の遂行および結果の取りまとめは不可能であった。ここに記し、改めて感謝申し上げたい。また、京都大学大学院の須藤靖明助教授をはじめ国立大学合同観測班の方々には、観測データの提供あるいは火山活動に関する情報提供など多くの点でお世話になった。深く感謝申し上げたい。

文 献

- Ehara, S. (1992) Thermal structure beneath Kuju volcano, central Kyushu, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 54, 107-116.
- 江原幸雄(1994) 冷却するマグマ直上に発達するマグマ性高温地熱系—九重火山におけるケーススタディー, *地質学論集*, 第43号, 169-177.
- 江原幸雄・藤光康宏(1996) 九重火山下の熱過程と1995年噴火過程, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, 15-31.
- 江原幸雄・尾藤晃彰・大井豊樹・笠井弘幸(1990) 活動的な噴気地域下の微小地震活動—九重硫黄山の例—, *日本地熱学会誌*, 12巻3号, 263-281.
- 江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎(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らから推定される熱水系と火山ガスの起源, *火山*, 26巻, 35-56.
- 江原幸雄・藤光康宏・西島 潤・加藤卓朗・小野 暁・中野裕一・横林 努(1997) 九重火山の噴

- 火活動に伴う熱と水の流れに関する観測, 自然災害西部地区部会報・論文集, 第21号, 96-102.
- 江原幸雄・藤光康宏・西島 潤・小野 暁・中野裕一・横林 努(1998) 九重火山の最近の活動について, 自然災害西部地区部会報・論文集, 第22号, 197-201.
- 平林順一・大場 武・野上健治(1996) 九重火山1995年噴火と地球化学的研究, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」63-73.
- 糸井龍一・甲斐辰治・福田道博(1996) 活発な火山性噴気帯からの塩化水素ガス放出速度, 九大地熱研究報告, 第5号, 200-209.
- 神宮司元治・江原幸雄(1997) 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1号, 23-29.
- 鎌田浩毅(1997) 宮原地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 1-127, 地質調査所.
- 風早康平・篠原宏志(1994) マグマの上昇・噴火における揮発性成分の役割, 地質学論集, 第43号, 53-62.
- 中田節也(1995) 雲仙火山のマグマ溜まりについて, 平成6年度科学研究費総合研究成果報告書(研究代表者 太田一也), 93-102.
- 中田節也・渡辺一徳・渡辺公一郎・本村慶信・檀原 徹(1996) 九重火山, 1995年10月~1996年1月噴火: 地質と岩石, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果, 「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査研究(研究代表者 小林芳正)」, 33-40.
- 波多江憲治・渡辺公一郎・渡辺一徳・筒井智樹・本村慶信(1997) 九重火山1995-96年噴火活動に伴う火山灰中の発泡ガラス含有量の時間変化, 火山, 42巻5号, 345-353.
- Mizutani, Y. Hayashi, S. and Sugiura, T. (1986) Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from Kuju-iwoyama, Kyushu, Japan, *Geochemical J.*, Vol. 20, 273-285.
- 西 潔・小野博尉・中坊 真・平林順一(1996) 地殻変動から推定される九重火山の浅部力源, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査研究(研究代表者 小林芳正)」, 105-114.
- 田中良和・橋本武志・茂木 透・江原幸雄(1998) 九重火山の冷却機構, 1998年地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨集, 555.
- 筒井智樹・須藤靖明ほか(1996) 1995年噴火活動以後の九重火山とその周辺における地震活動, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査研究(研究代表者 小林芳正)」, 33-40.
- 須藤靖明(1996) 九重火山の火山活動—これまでの活動経過—, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査研究(研究代表者 小林芳正)」, 1-13.
- Sudo, Y. Ono, H., Hurst, A.W., Tsutsui, T. et al. (1998) Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 81, 245-267.
- Watanabe, K., Hayashi, M. and Fujino, T. (1987) Fission Track Age of Volcanoes in the Kuju Volcanic Region in Relation to Geothermal Activity, *Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan*, Vol. 9, No. 3, 207-217.

(日本温泉科学会第51回大会で発表, 平成10年8月21日)