

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—

Magmatic hydrothermal system developping just above a cooling magma
 —A case study of Kuju volcano, central Kyushu, Japan—

Abstract

江原幸雄*

*Sachio Ehara**

1993年10月1日受付.

1994年1月6日受理.

* 九州大学工学部資源工学科

Department of Mining, Faculty of Engineering,

* Kyushu University, Fukuoka 812, Japan

Kuju volcano is situated in the Beppu-Shimabara volcanic graben in central Kyushu, Japan. It is one of the typical andesitic island arc volcano. The volcanic activity started about 0.3 Ma and in historic times, only phreatic explosions were recorded several times. An active solfatara field called Kuju-Iwoyama in an explosive crater shows the most intense geothermal activity in central Kyushu. The natural heat discharge is estimated at about 100 MW, most of it from steaming ground and fumaroles. Temperatures of fumaroles generally exceed 200°C and the maximum observed temperature was 508°C (Mizutani et al., 1986). The high heat flows ranging from 100 mW/m² to 250 mW/m² were observed around Kuju volcano. The high heat flows are interpreted in terms of conductive cooling of the magma beneath Kuju volcano. The magma began to cool about 0.05 Ma. Most of the magma is not molten at present but maintains temperatures of 400-700°C at 5 km depth. The Kuju-Iwoyama solfatara field exists just above the hottest part of the magma. The degassing magmatic fluids mix with the downgoing meteoric water at 2 km depth. Then the two-phase reservoir is formed between 2 km depth and the earth's surface. The following parameters provide a good fit thermal model beneath the solfatara field; magmatic fluid (30 kg/sec) is supplied from below, mixes with the downgoing meteoric water (10 kg/sec) and steam (35.8 kg/sec) and hot water (4.3 kg/sec) discharge at the earth's surface. The calculated heat discharge is 104.4 MW. The central, high permeability zone contains two-phase fluids to 2 km depth where the temperature exceeds 340°C.

Key words: volcano, thermal structure, magmatic hydrothermal system, heat flow, thermal modelling, magma

1. はじめに

火山下の熱的構造の解明は火山現象の理解という地球科学的側面からも、また火山エネルギー利用という地球工学的な側面からも重要な課題である。しかしながら、従来地質学的あるいは地球化学的モデルが提出されたことは多いが（たとえば Gianelli et al., 1988, Traineau et al., 1989）、特定の火山の熱的構造が定量的に明らかにされた例は少ない（たとえば Sammel et al., 1988）。本論文では大分県中部地域にある活火山九重火山を例に取り、その熱的構造モデルを提出する。特に、深部に存在するであろうマグマと火山体の浅層に発達する高温のマグマ性地熱系との関係に議論を集中する。

2. 九重火山

九重火山は大分県中部地域に位置しており、九州中部地域

を横断する火山性地溝である別府-島原地溝（松本, 1979）内に発達した島弧の典型的な安山岩質火山の1つである（Fig. 1）。この九重火山は、東西約 22 km、南北約 24 km に広がっている約 20 個のドーム状火山体から構成され、九重火山群とも呼ばれる。今からおおよそ 30 万年前から火山活動を開始し、その主要な噴出活動は今から数万年前には終了したとされている（Watanabe et al., 1987, Hayashi, 1988）。17 世紀半ばより、数 10 年から 100 年程度の間隔で火山活動の異常が生じていることが知られているがその多くは水蒸気爆発あるいは噴煙活動の活発化と推定される（気象庁, 1984）。1662 年の活動に関しては鎌田（1991）により、マグマ噴火ではないかとの指摘があるが、この活動も大規模なものではない。このように、九重火山は最近の数万年以降大規模なマグマ噴出活動をしていない火山と推定される。九重火山はこのような歴史的背景を持っているが、九重火山の西部および南部に

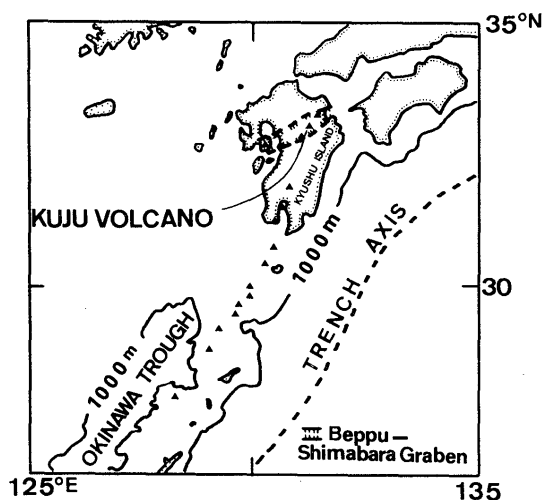


Fig. 1. Index map of Kuju volcano. Solid triangles show active volcanoes.

は多くの地熱地域が発達しているとともに、大岳・八丁原両地熱発電所（発電出力合計 12 万 2500 kW）が稼働している。そして、火山群の中心部にある火山体である星生山の北東山腹には、現在わが国でも最も活動的な噴気地域の 1 つといえる九重硫黄山噴気地域が存在している (Fig. 2)。この噴気地域は直径約 500 m の範囲に広がっており、1992 年 11 月現在噴気温度の最高は 402°C を越えており、200°C 以上の噴気孔が多数存在している（なお、1960 年代初期には噴気最高温度 508°C が観測されている。Mizutani et al., 1986）。この噴気地域から放出される自然放熱量は約 100 MW であり、その 95% 以上は噴気によって放出されている（江原ほか, 1981）。噴気凝縮水の酸素・水素同位体比の研究からは水の起源として安山岩質火山に特有な高温火山ガスと天水との混合が推定されている（松葉谷ほか, 1975, Mizutani et al., 1986）。

3. 冷却しつつあるマグマと火山体下の温度分布

3.1 九重火山周辺の熱流量分布

九州周辺の地殻熱流量分布を Fig. 3 に示す。これによれば九州南東岸の太平洋側 (50 mW/m^2) から九州北西岸の日本海側 (100 mW/m^2) にかけて、規則的に熱流量が高くなっている。このような一般的な傾向の中で九州中部地域と南部地域に 100 mW/m^2 以上の高熱流量地域が存在している。これらの高熱流量地域とキューリー等温面深度 (Okubo et al., 1985) の浅い部分は空間的によく一致しており、これらの地域で広範囲にわたって、地殻上部が高温であることを強く証拠立てている。

九州南部の高熱流量地域は活火山である霧島火山・桜島火山・開聞岳火山を囲んでおり、これらの火山のマグマと関連していると考えられる。しかしながら、熱流量観測点密度は十分でなく、個々の火山のマグマとの関連は明確ではない。一方、九州中部地域の高熱流量はほぼ九重火山群を囲むように分布しており、九重火山下のマグマを反映したものと推定される。九重火山周辺の熱流量分布を Fig. 4 に示した。こ

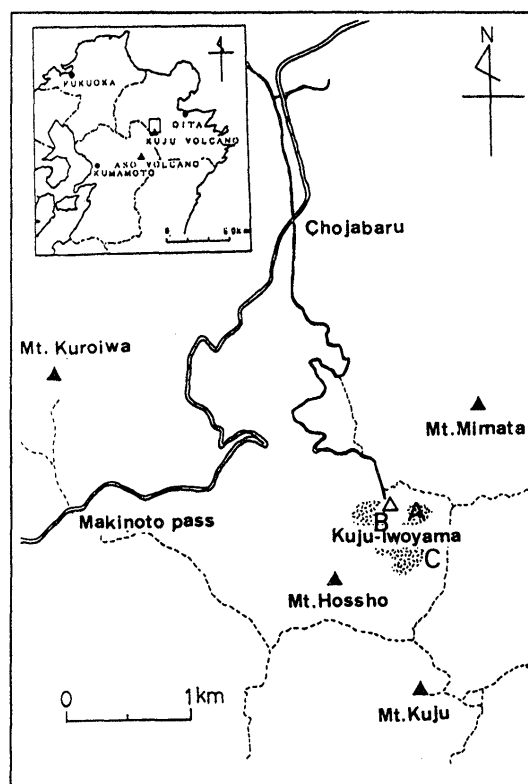


Fig. 2. Location map of Kuju-Iwoyama, central Kyushu. Dotted parts show solfatar fields. Open triangles show some peaks of the Kuju volcanic group.

の高熱流量は九重火山周辺部では 100 mW/m^2 、中心部では 250 mW/m^2 程度に達している。この広域的に（東西約 30 km, 南北約 50 km）発達する高熱流量地域内には熱水対流によって生じている局所的な地殻浅部高温地域が数カ所知られている。その例として A（熊本県小国地域）および B（大分県大岳・八丁原地域）を Fig. 4 に示した。図に示されているように、熱水対流系の発達によって形成される局所的な高温部の水平的スケールは高々 5 km 程度であり、高熱流量の広がりとはそれよりも 1 ケタ程度大きい。このようなことから、局地的な個々の熱水対流系の発達とは分離して、広域的な背景の熱伝導的構造を取り扱えるものと考えことにする。

3.2 熱流量から推定される九重火山下のマグマ

九重火山周辺の高熱流量地域はすでに述べたようにその分布形状から九重火山下に存在するマグマを反映したものと理解される。そこで Fig. 4 に示すプロファイル B-B' に沿う 2 次元断面の有限要素法による熱構造解析が行われた（江原・橋本, 1992）。計算に使用した地質構造モデルは Fig. 5 に示すようなもので、南北方向 50 km, 深さ方向は海面下 10 km までである。地層は、4 層に分け、上部より (I) 完新世～上部更新世の九重火山岩類、(II) 中部および下部更新世の豊肥火山岩類、(III) 鮮新世の火山岩類および、(IV) 白亜紀の深成岩類・変成岩類となっている。各層には異なった地層物性（熱伝導率、比熱、密度、放射性発熱量）が与えられている。

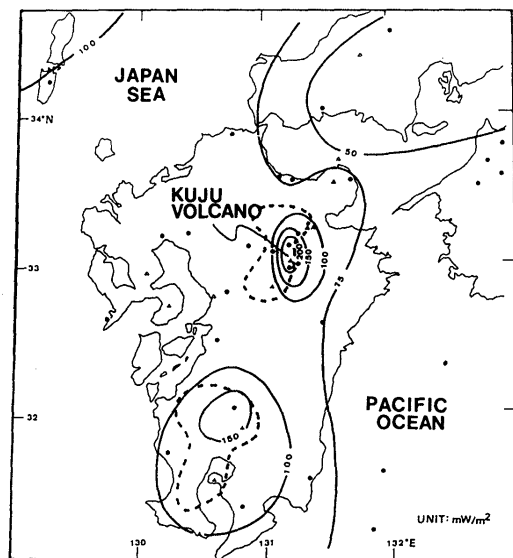


Fig. 3. Distribution of heat flow and Curie point depth in and around Kyushu. Solid circles show heat flow stations and Curie point depths, 7 km and 8 km, are also shown in central and south Kyushu, respectively. Solid triangles show active volcanoes and open triangles show other Quaternary volcanoes (Ehara, 1992).

(Table 1). なお、計算における実際の要素の大きさは定常熱伝導計算では深さ方向は深部では 400 m, 浅部では 100 m, 水平方向は周辺部で 2.5 km, 中心部で 100 m である。また非定常熱伝導計算では深さ方向 400 m で一定, 水平方向は定常計算と同じである。非定常計算では計算時間節約のため, 深さ方向においてすべて 400 m としている。

3.2.1 2次元定常熱伝導解析

南北両端では定常状態で 100 mW/m^2 を与えるような温度分布に固定し, 下面の温度を変えることによって, 観測された熱流量プロファイルを満たすようなモデルが試行錯誤的に求められた。なお, 下面から供給される熱流量を 70 mW/m^2 で一定とした。これは南北両端の地表において 100 mW/m^2 の地殻熱流量を与えることに対応している。計算の結果, 観測値の精度を考慮して, 十分満足するモデルとして Fig. 6 (上) に示すようなものが得られた。Fig. 6 (下) に熱流量の計算値と観測値との一致の程度を示した。このモデルによると地表下 5 km で 1000°C , 4 km 深で 800°C という高温となっている。このような高温は酸性マグマの熔融温度を越えることになる。すなわち, 定常モデルは九重火山下の地殻浅部に大規模な溶融体の存在を要請する。しかしながら, 九重火山中心部直下を伝播する地震波の中には確かに減衰するものがあり(須藤靖明, 個人談話)局所的な溶融状態の存在は否定できないが, 九重火山下数 km 深を伝わる地震波の伝播あるいは地震波速度分布からは大規模な溶融状態の存在は考えにくい(江原・茂木, 1989, 久保寺ほか, 1982)。

以上のことを考慮すると, 定常状態を仮定して得られた地下温度分布は見かけ上のものである可能性が強い。そこで, 次には非定常状態を仮定した熱伝導解析が行われた。

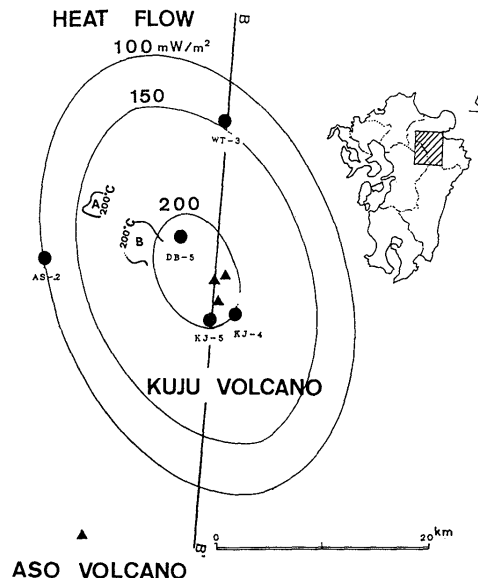


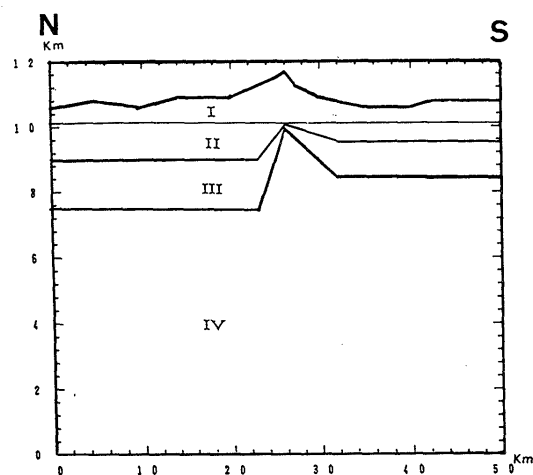
Fig. 4. Heat flow distribution in and around Kuju volcano and local high temperature anomalies (A and B) due to hydrothermal convection systems. The underground temperatures at sites A (Oguni area) and B (Hatchobaru area) are those at 300 m and 500 m below sea level, respectively. Solid circles show locations of the wells where heat flow values were determined. Solid triangles show some peaks of the Kuju volcano group. WT-3, DB-5, KJ-5 and AS-2 show locations of heat flow station (Ehara, 1992).

3.2.2 2次元非定常熱伝導解析

すでに述べたように地質学的には九重火山は数万年前以降大規模な噴出活動をしていないものと考えられている。このことはそれ以降, 九重火山下のマグマが冷却を開始したのではないかと考えることができる。従って九重火山のマグマは今から数万年前(たとえば 5 万年前)から冷却を開始し, 現在に至っていると考えると現在観測される熱流量はマグマ冷却開始後, 5 万年後の熱流量ということができる。このような考えから, 冷却開始時のマグマの大きさ, 深さを仮定し, それに基づいて地殻熱流量の経時変化を計算し, 観測値を説明するようなモデル(初期マグマの大きさ・深さ)を試行錯誤的に求めた。その結果得られたモデルが Fig. 7 (上), (中), (下) に示すものである。Fig. 7 (上) は初期温度分布で冷却開始時の温度を 1000°C としている。これは酸性マグマの固相温度(ほぼ $700\sim 800^\circ\text{C}$)に潜熱分を温度に換算した値を示している(融解潜熱/比熱 = $300\sim 200^\circ\text{C}$ を加えたものに相当している)。したがって, 初期温度分布は冷却開始時のマグマの形状をほぼ反映したものと考えることができる。これによればマグマの上面深度は地表下 4~5 km, 水平的広がりは約 25 km である。この水平的広がりは九重火山群の広がりとはほぼ一致している。Fig. 7 (中) には熱流量の計算値と観測値との一致の程度を示した。Fig. 7 (下) はこのモデルにより推定された現在の九重火山下の温度分布を示している。これによれば九重火山下の温度は地下 5 km で $400\sim 700^\circ\text{C}$ となる。この程度の温度範囲であれば九重火山下に大規模な溶融

Table 1. Physical properties of each layer used for heat conduction simulation (Ehara, 1992).

	Thermal diffusivity ¹ ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	Thermal conductivity ² (W/mK)	Density ² (kg/m^3)	Specific heat ³ (J/kg K)	Radioactive heat production ³ ($10^{-6}\text{W}/\text{m}^3$)
Layer I	0.7	1.3	2350	800	3.0
Layer II	0.8	1.3	2140	800	3.0
Layer III	0.9	1.5	2120	800	3.0
Layer IV	0.9	1.9	2640	800	3.0

¹ calculated parameter (= Thermal conductivity / (Density * Specific heat))² measured values (NEDO, 1988)³ assumed values (Buntebarth, 1984)**Fig. 5.** Simplified two-dimensional crustal model for heat conduction simulation. Layer I = Holocene to upper Pleistocene Kuju volcanic rocks; II = Middle to lower Pleistocene Hohi volcanic rocks; III = Pliocene volcanic rocks; IV = Cretaceous plutonic and metamorphic rocks (Ehara, 1992).

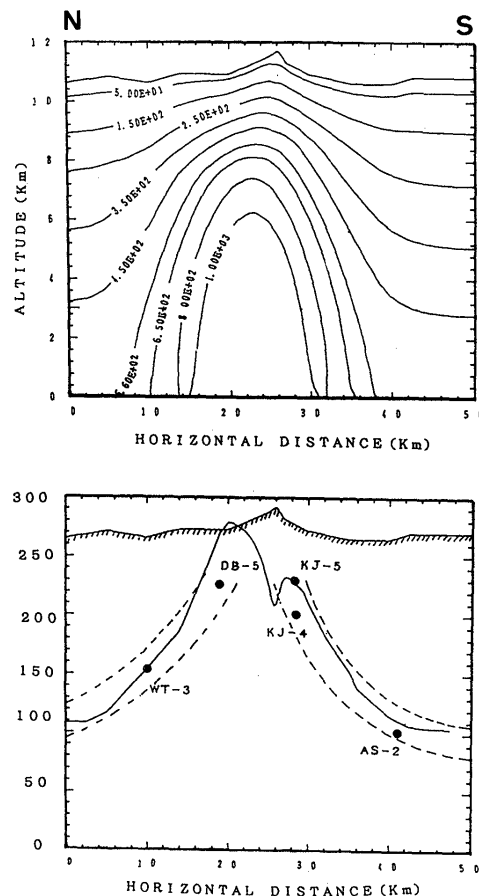
体は存在せず、また局所的な溶融体の存在を許すこともできる。なお、本計算では現在の時点から冷却開始後5万年としたが、観測値の精度、観測点の密度から3~7万年の範囲では変化しうる。しかしながら、10万年より古くなると200 mW/m²を超える熱流量を得ることができない。

Fig. 7 (下) には噴気地域である九重硫黄山の位置 (図中KI) を示しているが、地下温度最高部の直上に活動的な噴気地域である九重硫黄山が存在していることがわかる。九重硫黄山の噴気活動はこのような冷却しつつあるマグマの直上に発達したものと考えられる。

4. マグマ性気液 2 相地熱系の発達

4.1 地熱系の概念モデル

九重硫黄山の噴気活動は噴気凝縮水の酸素・水素同位体比からマグマ性流体の寄与が推定されることはすでに述べた。このマグマ性流体は上述した冷却しつつあるマグマからの脱ガスによるものと考えられる。九重硫黄山の噴気活動は同地域域下から供給されるマグマ性流体と地表水が混合することによって、形成されているものと推定される (松葉谷ほか, 1975, Mizutani et al., 1986)。

**Fig. 6.** Upper: Calculated steady-state temperature distribution beneath Kuju volcano. Unit: °C. Lower: The solid line shows the calculated heat flow profile. The broken lines show ranges of observed heat flows. Solid circles show observed heat flows (Ehara, 1992).

九重硫黄山下の地下構造および熱的状态に関しては微小地震観測 (江原ほか, 1990) および電磁探査の結果 (Mogi and Nakama, 1990) から次のように推定される。噴気地域を取り囲む微小地震観測の結果、噴気地域の微小地震活動はきわめて活発であり (1日10~20個)、噴気地域直下1.5 km深程度にまで集中的に発生している。このように微小地震が多発していることは岩石の破碎が進んでいることを意味しており、地熱流体の通路としては都合よいものである。一方この地震多発ゾーンは1オーム・m程度の低抵抗抵抗ゾーンであるこ

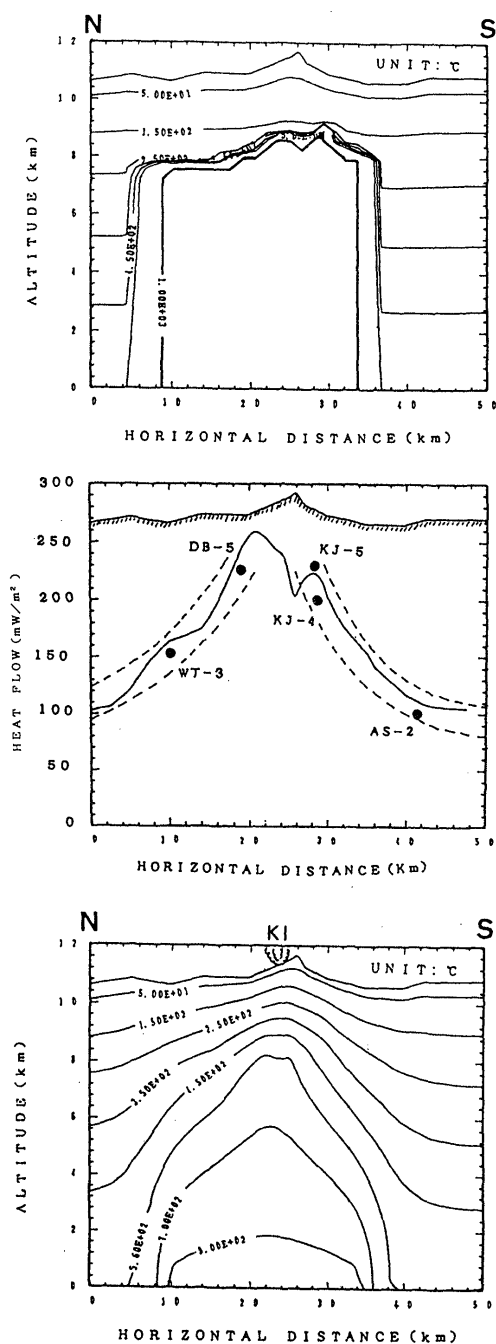


Fig. 7. Upper: Initial temperature distribution beneath Kuju volcano for the transient simulations. The 1000°C isotherm indicates the shape of the magma reservoir beneath Kuju volcano. Middle: The solid line shows the calculated heat flow profile. The broken lines show ranges of observed heat flows at some wells. Solid circles show observed heat flows. Lower: estimated present temperature distribution beneath Kuju volcano based on 0.05 Ma of cooling. KI shows the location of Kuju-Iwoyama (Ehara, 1992).

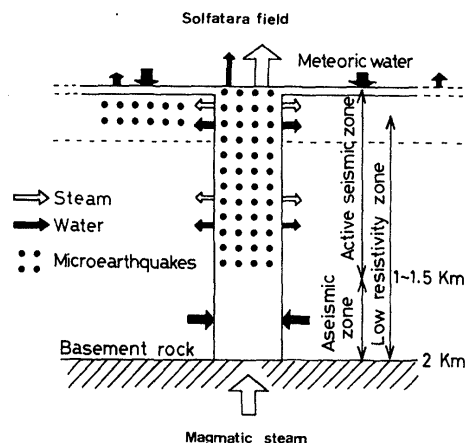


Fig. 8. Conceptual thermal model beneath the Kuju-Iwoyama solfatara field of Kuju volcano (Ehara, 1992).

とが明らかにされており、地震多発ゾーンには高温あるいは塩分濃度の高い地熱流体が存在することを示している。重力探査結果（駒沢・鎌田，1985）によると本地域の基盤深度（Fig. 4のⅢ層とⅣ層の境界）は2 km程度である。

以上の結果をまとめると、九重硫黄山地域下に発達する地熱系の概念モデルはFig. 8に示すようなものが考えられる。冷却するマグマから分離上昇したマグマ性流体は基盤内の割れ目の中を上昇し、地表下2 km以浅の透水性のよい火山岩類の中で、流下してきた地表水と混合し上昇する。そして、最終的には地表で噴気・温泉として流出しているものと考えられる。

4.2 地熱系の定量的モデル

本節では、前節で提案された地熱系の概念モデルに基づいて、数値シミュレーションによって定量的なモデルを作成した結果を示す。計算領域の形状としては3次元的な地下構造モデルが得られていないことから、簡単のため軸対称円筒型モデルとする。この円筒型モデルの大きさは直径5 km（地形を考慮した集水域の広がりから推定した）、深さを2 kmとした。上面中央に直径500 mの大きさの噴気地域が存在している。噴気地域直下2 km深までの地層は高透水性とした。下面中央からはマグマ性流体が供給され、上面（地表面）から流入した地表水と混合するものとする。下面周辺地域からは熱伝導によってのみ、熱が供給される。最適モデルの選択は下面から供給されるマグマ性流体の流量およびエンタルピーを変化させ、観測されている噴気・温泉の流量および気液比、自然放熱量、噴気温度等を満足するものを試行錯誤的に求めることによって行った。

数値シミュレーションに用いたモデルおよび結果をFig. 9（上）、（下）に示した。Fig. 9（上）は計算に用いたモデルの2次元断面を示したブロックレイアウトである。水平方向には3帯に、垂直方向には250 m間隔で8層に分割した。透水

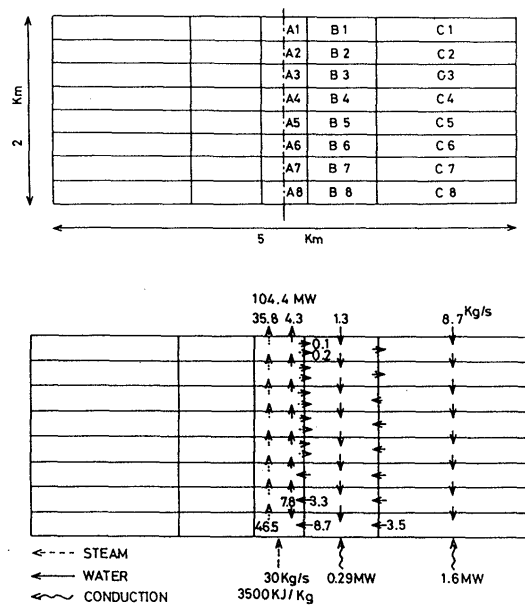


Fig. 9. Quantitative thermal model beneath Kujuiwoyama solfatar field. Upper: Block layout for simulation. Lower: Some parameters for a good fit model (Ehara, 1992).

係数は中心部の A 帯で 50 mDarcy, 周辺の B, C 帯では 1 mDarcy となっている。Fig. 9 (下) は最適モデルにおける流体の流動状況を示している。このモデルによればマグマから供給されたマグマ性流体 (30 kg/sec) は流下してきた地表水 (8.7+1.3=10.0 kg/sec) と再循環水 (熱水: 0.1 kg/sec, 蒸気: 0.2 kg/sec) が 1.5 km~2 km 深で混合し、気液 2 相状態を形成・上昇し、最終的に地表から噴気 (35.8 kg/sec) および温泉 (4.3 kg/sec) として流出しているものと推定される。このモデルにおいて放出される自然放熱量は 104.4 MW である。中心部の気液 2 相流体の温度は 210°C (ブロック A1) ~ 340°C (ブロック A8) である。深部から供給されるマグマ性流体の温度はそのエンタルピーおよび圧力 (ブロック A8 の圧力よりも大きいと考えられる) から純水を仮定すると 580°C 以上と推定される。この温度は従来地表で観測された噴気温度の最高が 508°C であることと矛盾しない。3 章で得られた九重火山下の温度分布からするとマグマ性流体の起源深度は 5 km 以深と推定される。このモデルの大きな特徴の 1 つは地表から流出する水のうちの 75% がマグマ起源という、高いマグマ性流体の寄与率を示していることである。なお、地表では 400°C を越える噴気温度が観測されることは、マグマ性流体の一部は地表水と十分な混合をすることなく、地表から流出しているものと考えられる。また、このモデルによる地下の温度・圧力分布を Fig. 10 に示した。この図によれば、中心部の気液 2 相流体の圧力は周辺部の流体圧力に比べ、地表~1.5 km 深では高くなっている。このことはこの深度間での間隙水圧が周辺に比べて高いことを示しており、

その結果相対的に岩石の破壊強度が低下し、岩石の破壊すなわち地震が起こりやすい環境になっていることを示している。このことは微小地震の発生が高温流体存在域全体 (深さ 2 km) ではなく、その上部に限られていること (深さ 1.5 km 程度まで) をよく説明するものである。

5. 九重火山下のマグマ~熱水系

5.1 九重火山下のマグマ性熱系

3 章および 4 章で九重火山下の熱構造・熱過程を議論した。本章ではそれらを総合し、九重火山のマグマ性熱系モデルを提出する。Fig. 11 にこれまでに得られた結果をまとめて示した。九重火山地域では地表からおおよそ 2 km 深程度まで完新世-鮮新世の火山岩類が覆っている。その下に白亜紀の変成岩類・深成岩類 (基盤岩類) が存在している。この基盤岩類中に現在冷却中のマグマが存在している。地表下 5 km 深で 400~700°C 程度である。このマグマは大部分が固化しているが、中心部には熔融部分が残っており、ここから脱ガスが生じている。マグマから分離された流体は基盤岩中の割れ目を通して上昇し、高透水性の火山岩類の中で、地表から流下してきた地表水と混合する。混合の結果形成された気液 2 相の流体は上昇し、最終的に地表の噴気地域で噴気・温泉として流出する。マグマ性流体の一部は地表水と十分な混合をすることなく地表に流出し、400°C 以上の高温噴気として流出する。このように九重火山下の地熱系は典型的なマグマ性熱系ということが出来る (図中 Magmatic hydrothermal system と示した)。なお、九重火山には多くの熱水卓越型地熱系も発達しているが、それらの熱源はやはり九重火山下のマグマにあるがマグマ性流体の寄与はほとんどないか、少ないものと考えられる (図中 Hot water dominated system と示した)。

ところで、マグマからの段階的な脱ガスを考える場合、二酸化炭素は初期の段階にマグマから放出されてしまうことが指摘されている (篠原, 1992)。すなわち、地下にある一定量のマグマから少しずつマグマ性流体が放出されるような場合には、マグマ性流体中の二酸化炭素の濃度は非常に小さいことが期待されている (篠原, 1992)。しかしながら、九重硫黄山から放出されている火山ガス中の平均二酸化炭素量は $\text{H}_2\text{O} : \text{CO}_2 = 5.0 : 0.29$ (重量比, 江原ほか, 1981) で、流紋岩質マグマの初期値 $\text{H}_2\text{O} : \text{CO}_2 = 5.0 \text{ Wt\%} : 0.3 \text{ Wt\%}$ 800°C, 篠原, 1992) とほぼ同じである。このことはたして何を意味しているのであろうか。これはマグマからの二酸化炭素の放出過程が予想されるほど脱ガス初期には行われないこと、あるいは九重火山下でマグマの再補給が行われていることなどが考えられる。上述の熱過程モデルは静的なものであり、動的なモデルを構築する必要があるかも知れない。実際、九重硫黄山噴気地域の噴気温度の変動をみると数 10 年程度の長周期変動をしているとも見られる (Fig. 12)。このような変動が新たなマグマの補給に対応しているとは必ずしも考えられないが (江原, 1984), 長期にわたるダイナミックな熱過程モデルを検討していく必要があることを示している。

5.2 マグマ性流体の起源

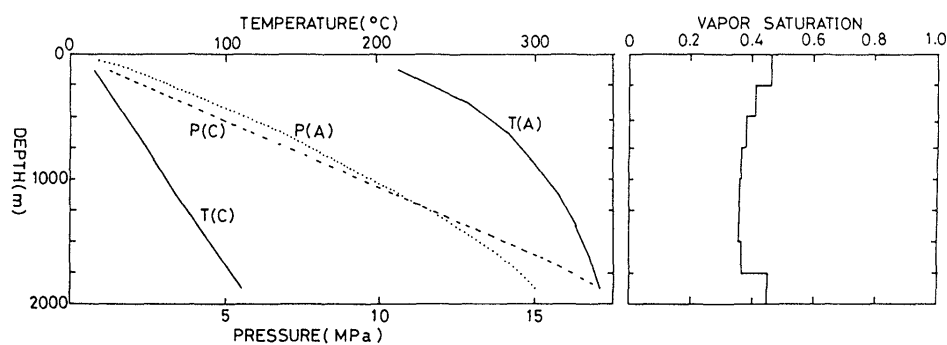


Fig. 10. Vertical distribution of temperature, pressure and vapor saturation in the reservoir. T (A) and T (C) are temperatures in the central permeable zone and outside the central zone, respectively. P (A) and P (C) show pressures in the central permeable zone and outside the central zone, respectively. A and C are column's names of Fig. 9, respectively (Ehara, 1992).

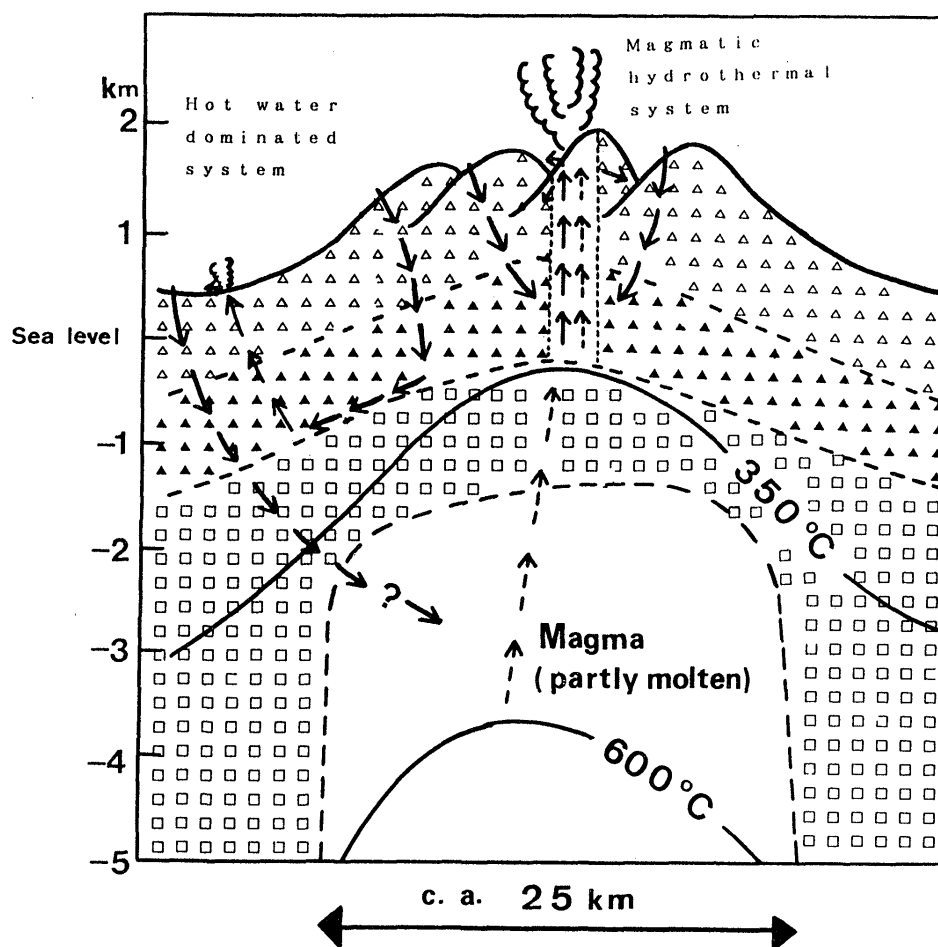


Fig. 11. Thermal model of the Kuju volcano group. Triangles and open rectangles show volcanic rocks and granitic basement rocks, respectively. Solid and broken arrows indicate flow pattern of liquid and vapor water, respectively (Ehara and Hashimoto, 1992).

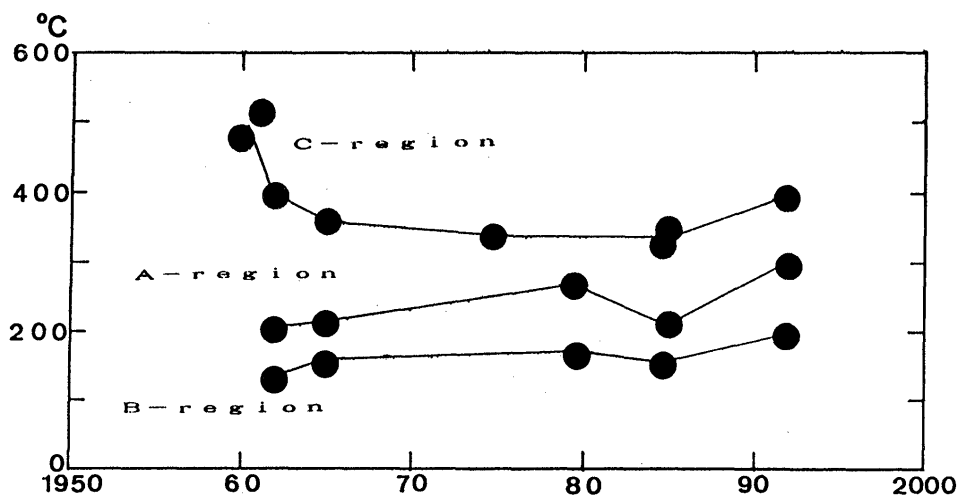


Fig. 12. Temporal variation of maximum fumarolic temperatures in the Kuju-iwayama solfatara field. The solfatara field is composed of three parts (A, B, and C in Fig. 2).

以上までの議論では冷却するマグマから分離上昇するマグマ性流体（大部分は水）の存在を前提として議論を進めてきた。最後に本節で、マグマから放出される水の起源に関する最近の地球化学的議論を紹介することによって本稿を終える。

九重硫黄山噴気地域の高温噴気凝縮水の酸素同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は安山岩質火山に共通的に知られている値に比べて、やや大きな値 (+10.6 パーミル, Mizutani et al., 1986) を示すことが指摘されており、その原因として、マグマから分離したマグマ性流体が上昇する途中、周囲の高い酸素同位体比をもつ基盤岩類と同位体交換反応を生じたことが考えられている (Mizutani et al., 1984)。

一方、ごく最近になって安山岩質火山からの高温噴気凝縮水の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の分布範囲として +7 ~ +13 パーミルという値があげられている (Giggenbach, 1992)。これによれば九重硫黄山高温噴気凝縮水の高い $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ は必ずしも壁岩との同位体交換反応の結果によるものではない可能性もある。このようにマグマ性流体が上昇する過程での反応に関しては未確定の部分もあるが、最近ではこのような島弧の安山岩質火山から噴出する高温噴気の起源水として『沈み込むプレートによってマントル内に運ばれた海水』が考えられており、もともとのマントル起源のマグマ水 (primary magmatic water, Sheppard et al., 1969, Taylor, 1974) に対して “andesitic water” (Taran et al., 1989) あるいは “devolved water” (Giggenbach, 1992) と称されている。このように水の起源の問題はさらに深部のダイナミクスとも関係してくる。

マグマ性流体の起源に関しては、従来同位体化学の分野からのアプローチが中心をなしている。種々の反応がおこる場の構造あるいは状態 (温度・圧力) は個々の火山ごとに異なっているし、また従来明確になっている例が多いとは言えない。本稿で提案した九重火山下の熱構造モデルは物理的立

場からの 1 つの試みであり、今後物理的モデルと化学的モデルを総合したモデル作成を試みたいと考えている。

6. おわりに

九州中部地域にある九重火山の有史以後の活動は主として噴煙活動の活発化あるいは水蒸気爆発ではないかと推定されている。この九重火山の中心部には九重硫黄山と呼ばれる活動的な噴気地域が存在している。この噴気地域の地下 4 km 以深には冷却しつつある、大部分が固化したマグマが存在しており、多量のマグマ性流体が放出され (30 kg/sec)、これと地表から浸透した天水 (10 kg/sec) が 2 km 深程度で混合し、気液 2 相の流体上昇ゾーンを形成し、最終的には地表から噴気・温泉として流出しているものと考えられる。このような地熱系は典型的なマグマ性地熱系の 1 つと考えられる。

謝 辞

本論文を改善するにあたり、編集委員会諸氏および福岡大学の田口幸洋氏からは非常に有益な指摘を頂いた。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

- Buntebarth, G., 1984, Geothermics. Springer-Verlag, Berlin, 1-144.
- 江原幸雄, 1984, 九州中部地域の地熱構造と地震活動の関連, 火山, **29**, 249-265.
- Ehara, S., 1989, Thermal structure and seismic activity in central Kyushu, Japan. *Tectonophysics*, **159**, 269-278.
- , 1992, Thermal structure beneath Kuju volcano, central Kyushu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **54**, 107-116.
- 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**, 263-281.
- ・橋本和幸, 1992, 活動的な噴気地域の背景的熱構造—九重硫黄山の例—. 日本地熱学会誌, **14**, 205-221.
- ・茂木 透, 1989, 九重硫黄山: 火山性高温型地熱系下の深

- 部構造. 陸上学術ボーリング候補地集 (Ⅲ), 1-22.
- . 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**, 35-56.
- Gianelli, G., Puxeddu, M., Batini, F., Bertini, G., Dini, I. Pandeli, E. and Nicolich, R., 1988, Geological model of a young volcano-pulmonic system: The geothermal region of Monte Amiata (Tuscany, Italy). *Geothermics*, **17**, 719-734.
- Giggenbach, W.F., 1992, Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **113**, 495-510.
- Hayashi, M., 1988, Quaternary volcanism as the heat source for some geothermal fields in Kyushu, Japan. *Proc. Int. Symp. on Geothermal Energy, 1988, Kumamoto and Beppu, Japan*, 446.
- 鎌田浩毅, 1991, テフラの 14C 年代により明らかにされた九重火山の噴火史. 日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 71.
- 気象庁, 1984, 日本活火山総覧. 1-482.
- 駒沢正夫・鎌田浩毅, 1985, 豊肥地熱地域の重力基盤構造. 地質調査所報告, 264, 305-333.
- 久保寺章・伊藤 潔・村上寛史・三浪俊夫, 1982, 爆破地震動から求めた九重火山群の深部構造—Time Term 法による—. 火山, **27**, 81-95.
- 松葉谷 治・上田 章・日下部 実・松久幸久・酒井 均・佐々木 昭, 1975, 薩摩硫黄島及び九州の 2, 3 の地域の火山ならびに温泉についての同位体化学的調査報告. 地質調査所報告, **26**, 375-392.
- 松本徭夫, 1979, 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, **16**, 127-139.
- Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugiura, T., 1986, Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from Kuju-iwoyama, Kyushu, Japan. *Geochemical J.*, **20**, 273-285.
- Mogi, T. and Nakama, K., 1990, Three dimensional structure of geothermal system in Kuju volcano and its interpretation. *Geothermal Resources Council Transactions*, **14**, 1513-1516.
- Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K. and Tsu, H., 1985, Curie point depths of the Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, **53**, 481-494.
- Sammel, E.A., Ingebritsen, S.E. and Mariner, R.H., 1988, The hydrothermal system at Newberry volcano, Oregon. *J. Geophys. Res.*, **93**, B9, 10149-10162.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 1988, 地熱開発促進調査中間報告書, 65-120.
- 篠原宏志, 1992, マグマからの揮発性物質の放出. 平成 3・4 年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書. 国土地熱資源評価技術に関する研究, 217-238, 地質調査所.
- Sheppard, R.L., Nielsen, R.L. and Taylor, H.P., 1969, Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits, *Econ. Geol.*, **66**, 515-542.
- Taylor, H.P., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ. Geol.*, **69**, 843-883.
- Traineau, H., Westercamp, D. and Benderritter, Y., 1989, Case study of a volcanic geothermal system, Mount Pelee, Martinique. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **38**, 49-66.
- Watanabe, K., Hayashi, M. and Fujino, T., 1987, Fission track age of volcanoes in the Kuju volcanic region in relation to geothermal activity. *J. Geotherm. Res. Soc. Jpn.*, **9**, 207-217.

(要 旨)

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, **43** 号, 169-177. (Ehara, S., 1994, Magmatic hydrothermal system developping just above a cooling magma—A case study of Kuju volcano, central Kyushu, Japan—. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **43**, 169-177.)

九州中部地域の別府-島原地溝内にある九重火山は島弧の典型的な安山岩質火山の 1 つである。この九重火山の周辺には $100 \sim 250 \text{ mW/m}^2$ の高熱流量地域が存在している。この高熱流量は地表下 4 km 以深に存在する冷却中のマグマの効果として説明される。この冷却しつつあるマグマ (大部分は固化しているが, 中心部は熔融状態と推定される) の直上には, このマグマから分離上昇したマグマ性流体と地表から浸透した天水とが混合して気液 2 相の地熱流体上昇ゾーンが形成され, 最終的には, 高温噴気地域である九重硫黄山の地表において噴気・温泉を噴出する活動的な噴気地域となっている。これはマグマ性流体が主要な熱源および水の起源となっている典型的なマグマ性高温地熱系と考えられる。