

別府—九重—阿蘇—熊本—雲仙地域の熱水系  
—(1)火山性温泉・噴気地分布の規則性から推論される熱水系モデル—

茂野 博\* 阿部喜久男\*\*

SHIGENO, H. and ABE, K. (1986) Hydrothermal systems in the Beppu-Kuju-Aso-Kumamoto-Unzen geothermal areas, Central Kyushu, Japan. —(1) Hydrothermal system models induced from specific distribution of volcanic hot springs and fumaroles. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 37(4), p. 159-181.

**Abstract :** Geothermal resources have been vigorously explored and exploited in the Beppu-Kuju-Aso-Kumamoto-Unzen areas located in an enormous graben of E-W trend, where metamorphic and granitic basement rocks are overlain mainly by Neogene to Quaternary volcanic rocks, and where a lot of high-temperature hot springs and fumaroles are distributed on and around late Quaternary andesitic stratovolcanoes or composite volcanoes of lava domes.

In these areas, the volcanoes accompanied with the high-temperature hot springs and fumaroles were classified into two types, namely  $\alpha$  and  $\beta$ . The  $\alpha$  type, which has a fumarolic activity at a summit area of volcano, is divided as follows:  $\alpha_1$  type, i.e. erupted essential materials within the recorded history, comprises Aso and Unzen Volcanoes, and  $\alpha_2$  type, i.e. showed phreatic explosion within the recorded history, comprises Tsurumi-Yufu and Kuju Volcanoes. The  $\beta$  type, which has lacked in the fumarolic activity at a summit area of volcano within the recorded history and is probably older than the  $\alpha$  type, comprises Noine and Waita-Ichimoku Volcanoes.

On and around each of the  $\alpha$  type volcanoes, the distribution of the high-temperature hot springs and fumaroles is restricted to one or two direction(s) of nearly E-W trend stretching from the highest part of the volcano through the fumarole at the summit area to the foot of the volcano. The hot spring waters are characterized by the dominance of acidic  $\text{SO}_4$  and/or acidic Cl types. On the other hand, around each of the  $\beta$  type volcanoes, the high-temperature hot springs and fumaroles are widely distributed to more than two directions from the center of the volcano. The hot spring waters are characterized by the dominance of neutral Na-Cl and/or neutral Na-Cl- $\text{HCO}_3$  types.

Qualitative models for hydrothermal systems were proposed to explain the regularities in the distribution of the hot springs and fumaroles on and around the two types of the volcanoes as follows. For the  $\alpha$  type volcanoes, where high-temperature fluid injection is the main heating system, geothermal fluids produced by the mixing of volatile components released from magmas with underground waters of surface water origin can flow down-and-sideways only to the restricted direction(s) as regulated by the latest regional stress field-fracture system and by a shallow hydrological condition of the volcanoes. On the other hand, for the  $\beta$  type volcanoes, where thermal conduction is the main heating system, geothermal fluids widely produced from underground waters of surface water origin by the thermal conduction through basement rocks can more widely flow up-and-sideways. Exceptional irregularities in the distribution of the hot springs and fumaroles were separately discussed with their controllig factors.

Supplementarily, the models were compared with various kinds of hydrothermal system models already proposed in other reports for these areas. Possibilities were also discussed for the existence of hydrothermal systems which are concealed and/or are in the basement rocks in these areas. Basic frames of the new models for the hydrothermal systems may be applicable to other volcanic areas in Japan and in other countries.

\* 地殻熱部 \*\* 技術部

## 要 旨

主に変成岩類および花崗岩類を基盤として新第三紀以降に生成した大規模なE-W方向の地溝帯にあたる別府一九重一阿蘇一熊本一雲仙地域には、第四紀後期の安山岩質の成層火山あるいは溶岩円頂丘の集合火山の周辺に多数の高温の温泉・噴気地が存在しており、従来より地熱探査・開発が精力的に進められている。

これらの高温温泉・噴気地を伴う火山は、有史時代に噴火あるいは爆発的な噴気活動の記録があり現在山頂部で噴気活動が観察される $\alpha_1$ 型火山(阿蘇, 雲仙)・ $\alpha_2$ 型火山(鶴見・由布, 九重)とそうではないより古いと考えられる $\beta$ 型火山(野稲, 涌蓋・一目)とに分類することが可能である。 $\alpha$ 型火山の近傍では、高温温泉・噴気地の分布は火山体の最も標高が高い地点から山頂部の噴気地を通して山麓部へ至るE-W方向に近い1-2方向に制限されており、温泉水は酸性 $\text{SO}_4$ 型・酸性Cl型が卓越する傾向にある。これに対して $\beta$ 型火山の近傍では、高温温泉・噴気地の分布は火山体の中心部から広く2方向以上に広がっており、温泉水は中性Na-Cl型, 中性Na-Cl- $\text{HCO}_3$ 型が卓越する傾向を示す。

この2種類の火山周辺における温泉・噴気地分布の規則性を説明する定性的な熱水系の生成・分布モデルを作成した。 $\alpha$ 型火山では、熱流体吹き込み型の加熱機構によりマグマ発散物と地表水起源地下水との混合によって生成した地熱流体が、現在の広域応力場一断裂系と火山体の浅層水理に強く規制された方向へ側下方に流動している。これに対して $\beta$ 型火山では、熱伝導型の加熱機構により地表水起源地下水が広く基盤を通じて下方から加熱されて生成した地熱流体が、上方および側方へ広範囲に流動することが可能である。この一般モデルでは説明できない温泉・噴気地分布の地域的な特殊性についても考察を加えた。

以上の結果を本地域における従来の様々な熱水系モデルと比較するとともに、本地域における潜頭性の熱水系や基盤内の熱水系の存在の可能性および本熱水系モデルの他の地域での適用可能性などについても補足的に意見を述べた。

## 1. はじめに

大分県別府市から長崎県小浜町に至る九州中央部を横断する地域は、鶴見・由布, 九重, 阿蘇, 金峰, 雲仙といった第四紀後期の火山がほぼ等間隔に配列する地域となっており(小野ほか, 1981), その地下には日本でも屈指の大規模な地熱資源が存在することが期待されている

(九州・山口経済連合会, 1974)。すでに現在, 大分県大岳地域および八丁原地域では九州電力K.K.によりそれぞれ13 MW, 55 MW (YUHARA *et al.*, 1981), 別府地域では杉乃井ホテルにより3 MW程度(田中, 1984)の出力の地熱発電所が稼働しているほか, 特に1973年の石油危機以降野矢, 滝上, 岳ノ湯, 「豊肥」(涌蓋・一目火山を中心とした大岳・八丁原, 黒川, 岳ノ湯を含む地域)などの地域で, 地熱発電開発のための地表地熱探査および地熱調査井の掘削が精力的に進められている。

この地域の地熱現象の特徴は, 新第三紀以降に形成されたほぼ東西方向に伸びた大規模な地溝帯の中に, 第四紀後期に生成した成層火山あるいは溶岩円頂丘の集合よりなる火山が孤立的に存在しており, それぞれの火山体の中心から見てその周囲の限られた方向にのみ高温の温泉・噴気地が存在している場合が多いことである(角, 1975)。

本研究では, このような温泉・噴気地の分布について地理的および化学的規則性の存在を明らかにするとともに, 既存の地質・地球物理・地球化学データを基礎に定性的に地下に存在する熱水系のマクロなモデル化を行い, この温泉・噴気地分布の規則性の基本的な原因について検討を加えた。さらにその結果を本地域における従来の様々な熱水系モデルと比較するとともに, 予察的に本地域における潜頭性の熱水系や基盤内の熱水系の存在の可能性等の問題についても議論を行った。

本報告は, 1978-1982年度に地殻熱資源の研究として雲仙地域で行われた地熱温泉水理の研究および1978-1979年度に地熱地域の熱水系の研究の一環として別府一九重一阿蘇一熊本地域で行われた化学・同位体化学研究の成果の一部をとりまとめたものである。今後, 上記研究で得られた化学・同位体化学的データを基に, それぞれの地域に分布する熱水系のより精密なモデル化と地域間の熱水系の比較を行っていく予定である。

なお, 本報告の要旨については, 茂野・阿部(1984)が口頭発表を行っている。

**謝辞:** 本報告をとりまとめるにあたり草稿をもとに御討論いただいた地殻熱部の角清愛(現在, 東北工業技術試験所), 金原啓司, 野田徹郎, 笹田政克, 須藤茂, 鎌田浩毅, 地質情報解析室の花岡尚之の各氏に感謝致します。また, 大規模深部地熱発電所環境保全実証調査を通じて現・旧の地殻熱部の方々および電源開発K.K.の深部地熱調査・開発担当の方々に様々な御教示および御討論をいただいたことが本報告のとりまとめに少なからぬ影響を与えていることを明記するとともに, これらの方々に感謝の意を表します。

## 2. 地質概説

### 2.1 ブーゲ重力異常分布と別府—小浜地溝帯

別府—九重—阿蘇—熊本—雲仙を結ぶ地域は、ENE-WSW 方向に伸びる長さ約 150 km、幅約 30 km の大きな負のブーゲ重力異常地域にあっている(久保寺ほか, 1976). この地域は、新第三系および第四系の基盤をなす地層・岩石、すなわち東半部では領家変成岩あるいは三郡変成岩に対比される主に古生代後期—中生代前期の海成堆積岩起源の変成岩類と中生代の花崗岩類(寺岡, 1970; 唐木田ほか, 1969; 諏訪, 1973; 笹田, 1984), 西半部ではこれらの上位に存在する古第三系あるいは一部白亜系が周囲の地域に比較してより深部に分布する所を新第三系および第四系が埋める地溝帯となっている(YAMASAKI and HAYASHI, 1975; 首藤, 1962a, b). この地溝帯を松本(1979)は別府—島原地溝と呼んだが、この報告ではその陸上での両端をより明確にする意味で別府—小浜地溝帯と呼ぶこととする。

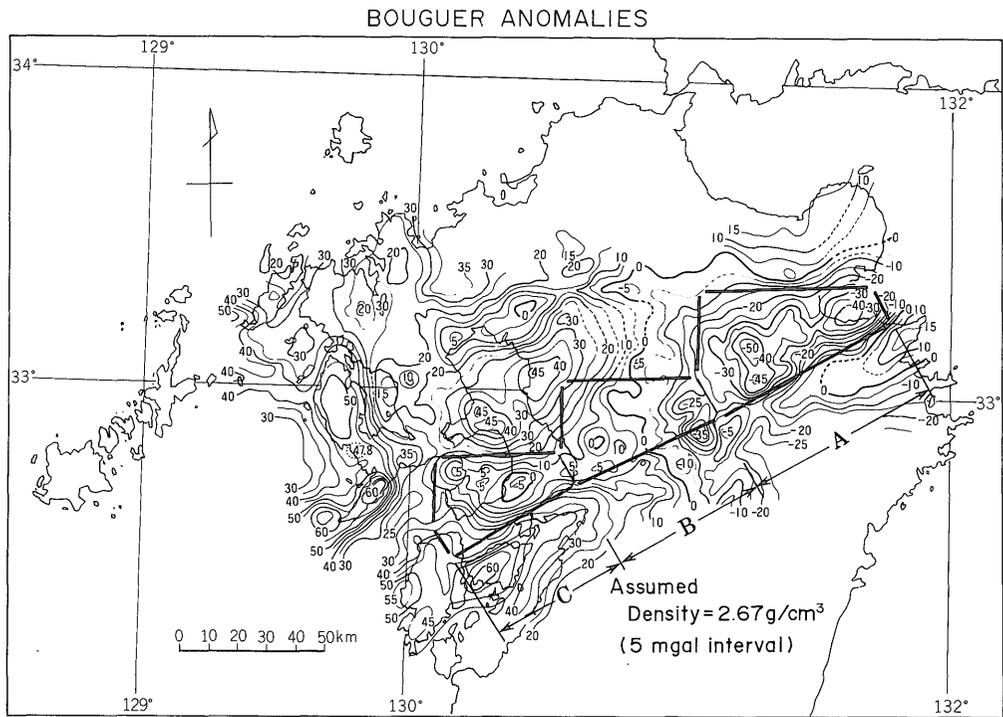
この地溝帯の南縁は ENE-WSW 方向の大分—熊本構造線に対応して直線的であるが、北縁は必ずしも明瞭で

はない。筆者らは、議論の便宜上、負のブーゲ重力異常分布および基盤岩類の分布から、この地溝帯の北縁部は、後述するようにこの地域において最も卓越する E-W 方向および琉球弧の方向にほぼ一致する N-S 方向の 2 方向の断層系によってジグザグ状の形態を示し、これによってこの地溝帯は東部、中部、西部の各地溝帯に大きく 3 分割されると考えてみた(第 1 図, 第 2 図)。なお、この地溝帯を異なった方式で 3 分割するモデルは別に松本(1979)によって提出されている。

### 2.2 東部地溝帯の基盤深度と地質・火山分布

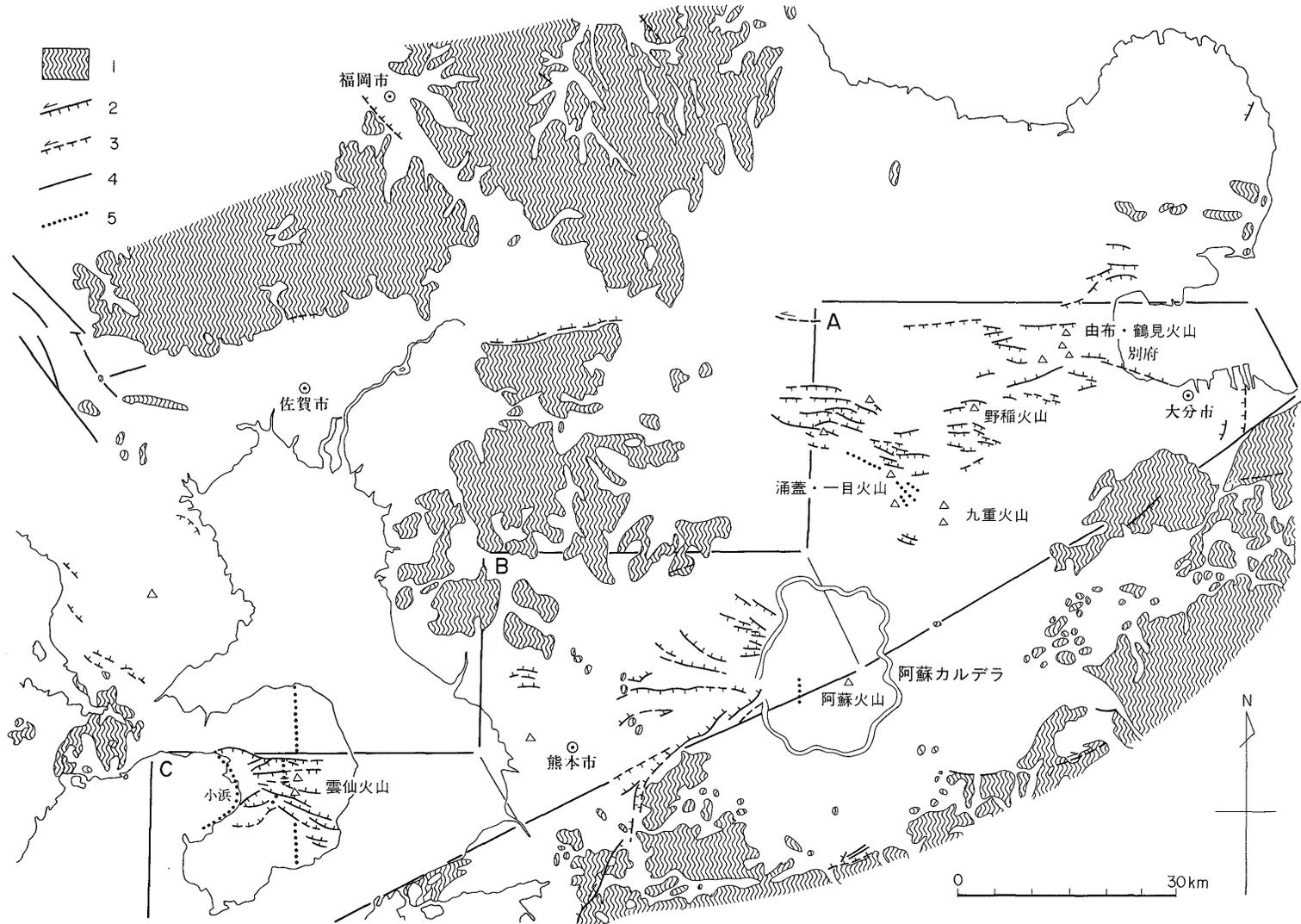
別府—九重地域が位置する東部地溝帯は、負のブーゲ重力異常が最も大きく、重力および人工地震データの解析により基盤深度は深いところで地表から 3-4 km 程度である(久保寺ほか, 1968; 久保寺ほか, 1982; 豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)と考えられる。

精密なブーゲ重力異常図(豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)から判断すると、東部地溝帯の基盤面にはかなり大きな起伏がある。別府湾—由布院—大分川沿い、九重山の N 方向の玖珠川沿いおよび九重山の SE 方向の芹川沿いの 3 つの地形的低所には、相対的に大き



第 1 図 別府—小浜地溝帯周辺のブーゲ重力異常と東部、中部および西部地溝帯の区分

本図は、松本(1979)の中部九州重力異常図(久保寺ら, 1976による)に一部加筆したものである。E-W, N-S および ENE-WSW の 3 方向の境界線によって、別府—小浜地溝帯を、A, 東部; B, 中部; C, 西部の 3 地溝帯に分割した。



第2図 別府—小浜地溝帯周辺における断裂系分布と先新第三紀基盤岩類の分布

本図は、山崎ほか(1984, 1985)の活造構図に加筆したものである。1.先新第三紀の地層・岩石の分布地域, 2.活断層, 3.推定活断層, 4.新第三系及び下部更新統の断層, 5.山崎ほか(1984, 1985)には記載されていないが、本地域における地熱流体の流動に重要であると考えられる断層(太田, 1968; YAMASAKI *et al.*, 1970; 山崎ほか, 1978; 太田, 1973)である。A. 東部, B. 中部, C. 西部の各地溝帯を示す。

な負のブーゲ重力異常を示す基盤深度が深い広い地域が存在しているが、明瞭なカルデラ地形が存在せずまた大規模な火山噴出物の分布の中心とは一致しないため (MATSUMOTO T., 1963; 松本, 1974; 鎌田・三村, 1981), これらの地域をカルデラと考える必然性はない (首藤, 1970; 首藤・日高, 1971) とと思われる。

このように基盤深度の深い東部地溝帯においては、基盤の上位には新第三紀—第四紀の変質安山岩類 (宇佐層群相当層)、火山砕屑岩類に富む主に非海成の堆積岩類 (碩南層群・大分層群相当層) および第四紀の輝石安山岩質溶岩・火山砕屑岩類 (豊肥火山岩類相当層)、デイサイト—流紋岩質溶岩・火山砕屑岩類 (豊後火山岩類相当層)、角閃石安山岩質溶岩・火山砕屑岩類 (九重火山岩類相当層) および阿蘇溶結凝灰岩類といった多様な地層・岩石が分布している (たとえば、首藤, 1953; 松本ほか, 1973; 大分県, 1971, 1972; 広川ほか, 1976; 豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)。

東部地溝帯内には、有史以降噴火あるいは爆発的な噴気活動が記録されており、現在火山の山頂部で噴気活動を行っている第四紀後期の火山として九重火山 (小野, 1963; 松本, 1983a, b) および鶴見・由布火山 (松本, 1918; 笠間, 1953) (ともに主に角閃石安山岩質) があり (気象庁, 1975), 前者は涌蓋・一目火山 (角閃石安山岩質) を含めて尾根状の広い相対的に正のブーゲ重力異常地に位置し、後者は別府湾—由布院—大分川沿いの広い負のブーゲ重力異常中の小規模な正のブーゲ重力異常地に位置している。これらの地域では基盤は相対的に 1 km 程度浅いと考えられる (豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982; 久保寺ほか, 1982)。後の考察で重要な野稲火山 (角閃石安山岩質) 付近でも相対的に正のブーゲ重力異常が認められ、基盤は相対的に浅いと考えられる。

### 2.3 中部地溝帯の基盤深度と地質・火山分布

阿蘇—熊本地域が位置する中部地溝帯では、負のブーゲ重力異常は E→W 方向へ減少し、西半部では別府—小浜地溝帯の中で負のブーゲ重力異常は最も小さくかつ平坦になる。阿蘇カルデラ内でも、中央火口丘が分布しているカルデラの中央部を除けば基盤深度は数 100 m にすぎないことがボーリングにより確認されている (ONO *et al.*, 1981)。

中部地溝帯においては、基盤の上位には新第三紀の玄武岩質溶岩類、第四紀の輝石安山岩質溶岩・火山砕屑岩類、阿蘇溶結凝灰岩類および非海成の堆積岩類などが分布している (たとえば、熊本県, 1963; 今井ほか, 1980)。

中部地溝帯内には、有史時代に数 10 回の噴火活動が記録されており、現在火山山頂部で活発な噴気活動を行っ

ている第四紀後期の火山として阿蘇火山 (主に輝石安山岩質) があり (MATSUMOTO H., 1963; ONO *et al.*, 1981; 小野, 1984; 気象庁, 1975), 中央火口丘が分布している地域は顕著な負のブーゲ重力異常を形成し、クラカトア型あるいはクレーターレイク型カルデラの存在に対応している (小野・渡辺, 1983; KUBOTERA *et al.*, 1969) と考えられるが、基盤深度は明らかではない。中部地溝帯の西端には、有史以降の噴火・噴気活動の記録はないが、第四紀後期に活動したと考えられる金峰火山 (山頂部は角閃石安山岩質) (倉沢・高橋, 1963) が小規模な相対的に正のブーゲ重力異常地に位置しており、ここでは基盤が若干浅いと考えられる。

### 2.4 西部地溝帯の基盤深度と地質・火山分布

雲仙地域が位置する西部地溝帯の東部では、負のブーゲ重力異常は中部地溝帯の西半部よりも大きくなる。変成岩類および花崗岩類より構成される基盤岩類は、この地域の周辺に分布せず、またボーリングによっても確認されていない。一方、古第三系は一部地表にも分布しているが、地溝帯の中心部分では少なくとも地下 800 m の深度までは存在していない (太田, 1973)。

雲仙火山を中心に E-W 方向に有明海から千々石湾へ延びる狭い地域は、西部地溝帯の中で相対的に負のブーゲ重力異常分布の底の部分に位置している (久保寺ほか, 1976)。しかし、この地域の周辺には特にこの地域を噴出中心とする大規模な火山噴出物は存在していない (松本, 1979) ため、この地溝帯の底が位置する地域の全部あるいは一部を特にカルデラと考える必要性はないと思われる。

西部地溝帯においては、基盤の上位には新第三紀—第四紀の玄武岩質溶岩類、第四紀の輝石安山岩—玄武岩質溶岩・火山砕屑岩類を含む海成—淡水成の堆積岩類、角閃石安山岩質溶岩・火山砕屑岩類などが分布している (岡口・大塚, 1980; 太田, 1973; 今井ほか, 1980)。

西部地溝帯内には、有史以降噴火活動の記録がある第四紀後期の火山として雲仙火山 (角閃石安山岩類) がある (倉沢・高橋, 1965; 気象庁, 1975)。雲仙火山は、前述した負のブーゲ重力異常分布の底の部分において、中央の小規模な相対的に正のブーゲ重力異常地に位置しており、ここでは基盤が若干浅いと考えられる。

西部地溝帯の W 方向、西彼杵半島—天草東部の変成岩類が分布している地域 (西彼杵帯) に近づく千々石湾付近からは、負のブーゲ重力異常は NW—NNW 方向および SW 方向の 2 方向に分裂して伸びているように見える。これは、この地域が西南日本弧の内帯と琉球弧とが正に接している地域にあたり、地質構造が大きく変化す

る地域に位置していることの反映であると考えられる。NW-NNW方向に続く相対的に負のブーゲ重力異常の中には、有史以降の噴火・噴気活動の記録はないが第四紀後期に活動したと考えられる多良火山(山頂部は角閃石安山岩質)がある(高橋・倉沢, 1960)。

## 2.5 断層系分布および広域応力場

別府一小浜地溝帯において、主に地形的に観察される長さ数 km 以上の比較的大規模な断層には、ENE-WSW, E-W, N-S および NW-SE の 4 方向がある。これらの断層は大部分が急傾斜を示している(第 2 図)。

1) ENE-WSW 方向の断層系: この方向の断層は右横ずれの傾向を示し、大分市から九重火山にかけての南の地域(小野, 1963; 活断層研究会, 1980; 豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)および阿蘇火山から熊本市にかけての南の地域(渡辺ほか, 1979; 活断層研究会, 1980)などで認められる。この方向はいわゆる大分—熊本構造線の方向および西南日本弧の大局的な分布方向にほぼ一致している。

2) E-W 方向の断層系: しばしば ENE-WSW あるいは WNW-ESE 方向に変化するこの方向の断層は正断層で、地形的に最も鮮明でかつ最も数多く存在し、特に別府—九重地域(村井・金子, 1975; 池田, 1979; 活断層研究会, 1980; 豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)および雲仙地域(金子, 1975; 太田, 1973; 山科・三浪, 1977; 活断層研究会, 1980)で多数認められるほか、阿蘇地域の西側(渡辺ほか, 1979; 活断層研究会, 1980)や金峰火山(活断層研究会, 1980)などでも観察される。東部地溝帯の玖珠金山や鯛生鉱山などの金鉱脈にはこの方向を示すものが多い(宮久, 1960; 伊藤ほか, 1961; 村井・金子, 1975)。この方向は、プレートテクトニクス説で言えば太平洋プレートがこの地域に向って進行する方向にほぼ一致していると考えてよいかもしれない。なお、この方向は前述した別府—小浜地溝帯の北縁を形成すると考えた境界線の方向の 1 つに一致している。

3) N-S 方向の断層系: この方向の断層は、地形的に観察される場合は少ない。島原半島で千々石湾を取り囲むように配列していると考えられている断層系の方向(太田, 1973)は、ほぼこの方向に一致する。阿蘇湯ノ谷周辺では、温泉・噴気地の分布はこの方向に配列する傾向にあり、この方向の断層の存在が推定されている(山崎ほか, 1978)。この方向は小倉—田川断層(石原ほか, 1979; 笹田, 1984)の方向および琉球弧の大局的な分布方向にほぼ一致している。なお、この方向は前述した別府—小浜地溝帯の北縁を形成すると考えた境界線の方向の 1 つに一致している。

4) NW-SE 方向の断層系: この方向の断層は、地形的に観察される場合は少ないが、本地域の中で最も集中的に地熱開発が進められている大岳・八丁原地域と岳ノ湯地域とを結ぶ方向の断層系(YAMASAKI *et al.*, 1970; 太田ほか, 1968)として、および多良火山の周辺において活断層(活断層研究会, 1980)および古第三系中に最も卓越する断層系(長浜・松井, 1982)として認められる。この方向は、博多—二日市構造線や北九州に発達する断層系の方向(活断層研究会, 1980; 広川ほか, 1976)に一致している。また、この方向はプレートテクトニクス説で言えばフィリピン海プレートがこの地域に向って進行する方向にほぼ一致していると考えてよいかもしれない。

別府—阿蘇地域および雲仙地域において浅発地震の初動解析を行った結果(山科・村井, 1975; 山科・三浪, 1977; 気象庁観測部, 1970)では、この地域の現在の広域的な最小圧縮主応力軸( $\sigma_3$ )はほぼ水平 N-S 方向、最大圧縮主応力軸( $\sigma_1$ )はほぼ垂直方向あるいは水平 E-W 方向に一致している。活断層を用いた応力場解析によれば、この広域応力場は別府—九重地域では少なくとも 0.8-0.5 Ma 前より続いており、N-S 方向には伸張性の応力が生じている(池田, 1979)らしい。

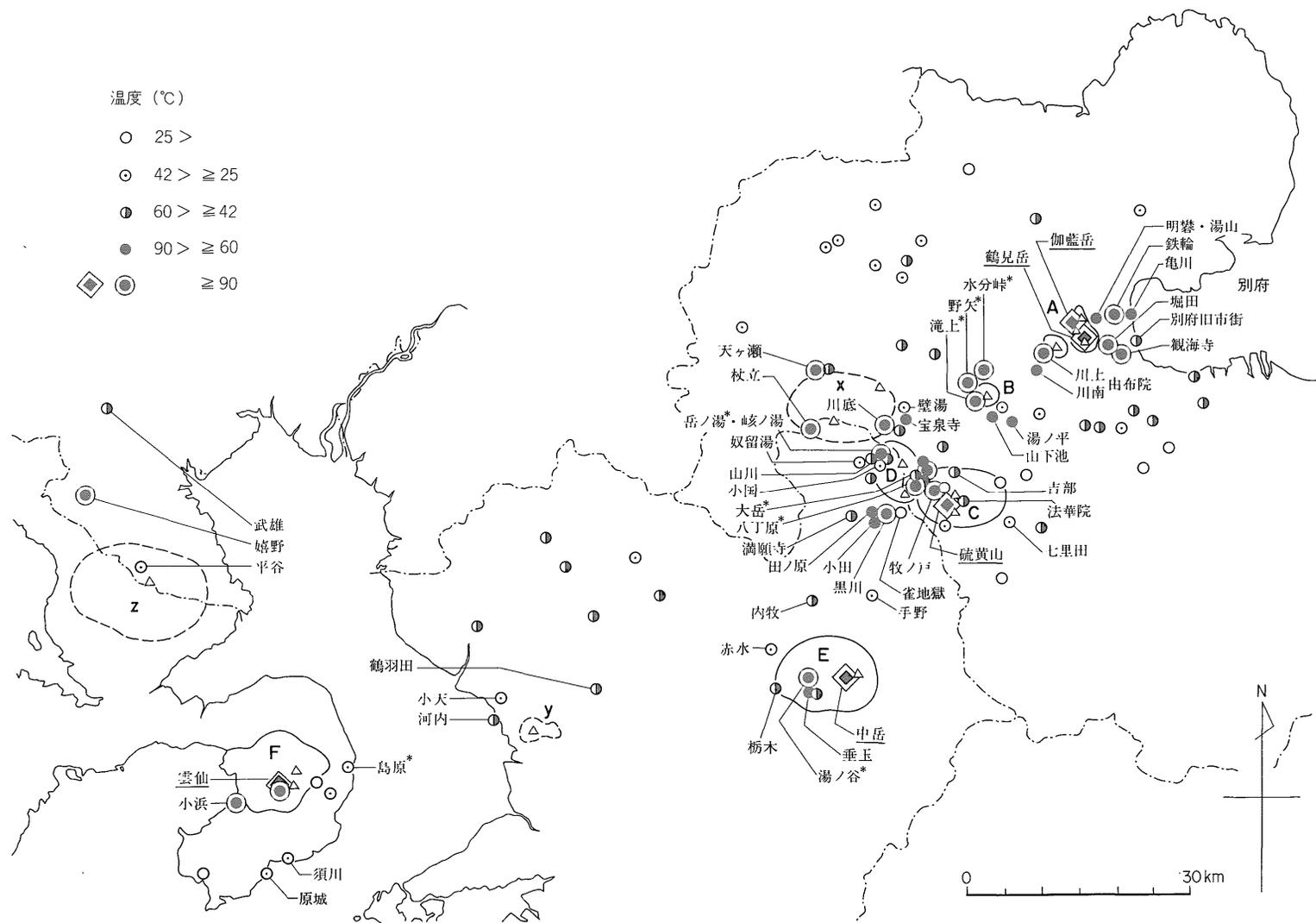
地表における、阿蘇火山および雲仙火山の溶岩円頂丘群の分布は E-W 方向に伸びている傾向があり(金子, 1975; 種子田, 1977)、九重火山および 1 群の火山として見た鶴見・由布火山においても同様の傾向が認められる。このことは、上述した広域応力場に従って、これらの火山のマグマ溜りおよび火山噴出物・発散物の通路が E-W 方向に配列する傾向があることを示しているであろう。

## 3. 火山性温泉・噴気地分布の規則性

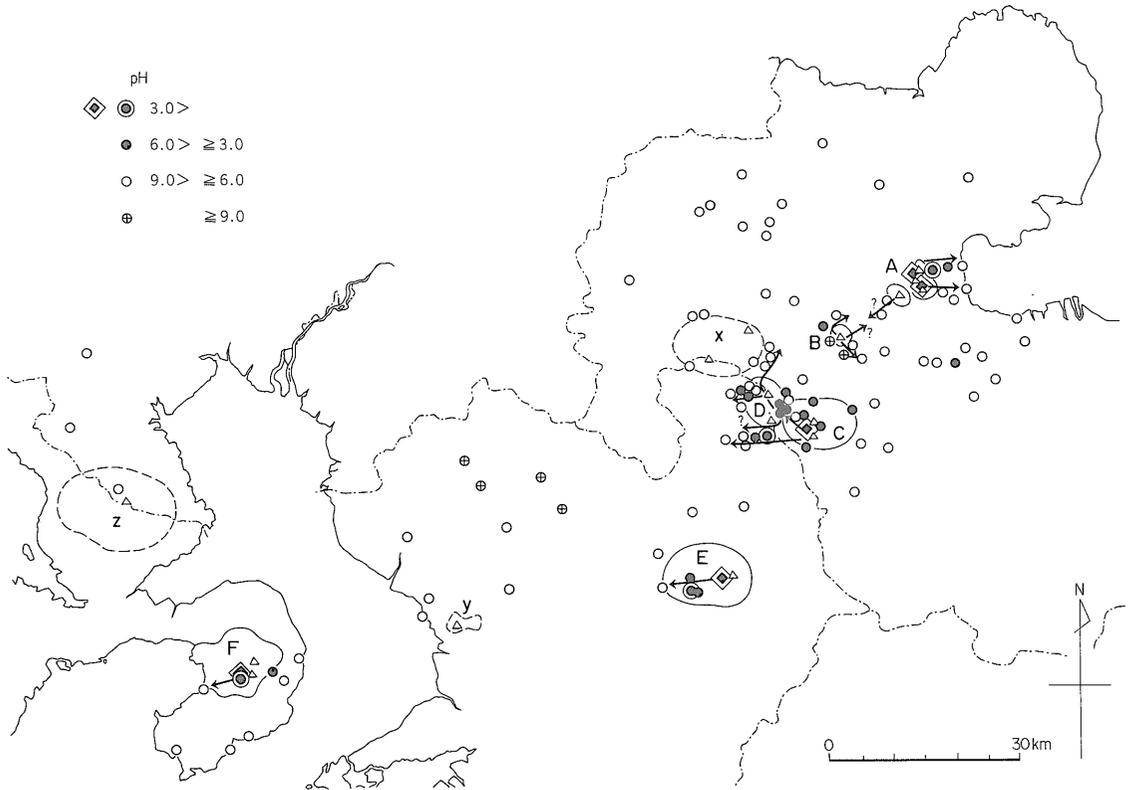
### 3.1 別府—小浜地溝帯における火山性温泉・噴気地の分布

別府—九重—阿蘇—熊本—雲仙地域に分布する各温泉・噴気地における代表的な温泉・噴気孔の温度、温泉水・噴気凝縮水の常温での pH および温泉水に卓越する主要溶存陰イオンの型をそれぞれ分布図にして第 3 図-第 5 図に示す。

これらの温泉・噴気地の分布、温度、溶存化学組成データは、各温泉・噴気地における最も高温と思われる温泉・噴気孔について調査した著者らの未公表データに加えて、大分県厚生部(1970)、熊本県衛生部(1965)、熊本県衛生公害研究所(1978)、豊肥地熱地域地質図編集グループ(1982)、野田(1981)、川野・森山(1974)、吉川ほか(1976)、野田・北岡(1977)、吉川ほか(1978)、志賀・川



第3図 別府—小浜地溝帯に分布する代表的な温泉・噴気孔の温度  
 A. 鶴見・由布, B. 野稻, C. 九重, D. 涌蓋・一目, E. 阿蘇, F. 雲仙, x. 万年・亀石, y. 金峰, z. 多良の各火山において、実線および破線は主に溶岩円頂丘の既略の分布範囲を示す。菱型記号およびアンダーラインは火山山頂部の噴気地を、\*は深度500 m以深の孔井から地熱流体が噴出していることを示す。



第4図 別府—小浜地溝帯に湧出・噴出する代表的な温泉水・噴気凝縮水のpH

A-F, x-z および付随する実線・破線は第3図に同じ。鶴見岳, 中岳の噴気凝縮水のpHは推測による。矢印は, 地下の熱水系における地熱流体の大局的な流動の推定方向を示す。

野(1970)などのデータを含んでいる。なお、これらのデータの中には、大岳・八丁原地熱発電所から採取された熱水の分析データが含まれる。

第3図および豊肥地熱地域地質図編集グループ(1982)に示されるように、第四紀後期に活動した有史時代に噴火あるいは爆発的な噴気活動の記録を持つ鶴見・由布、九重、阿蘇、雲仙の各火山およびこれらの火山より若干古いと考えられる涌蓋・一目および野稲の各火山の輝石一角閃石安山岩よりなる溶岩円頂丘の分布からほぼ5 km 程度離れると、60°C以上の温度を示す温泉地は、後述する天ヶ瀬、杖立温泉を除いて存在しない。

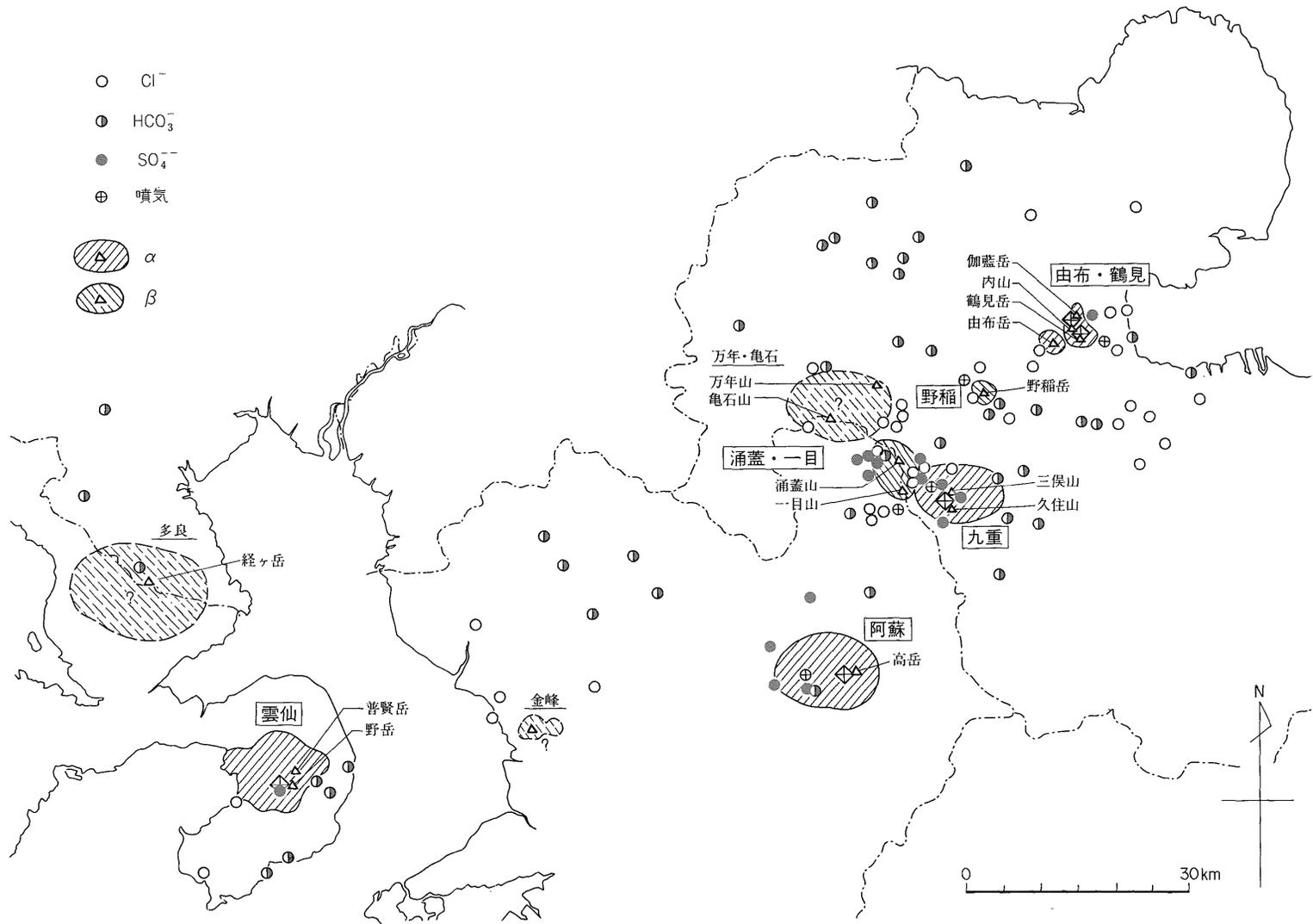
このことから本報告では、これら6群の火山の溶岩円頂丘の分布からほぼ5 km 以内に存在する高温の温泉・噴気地を特に「火山性」、すなわち地球深部からの広域的な熱伝導ではなく、各火山体の地下に存在するマグマあるいはマグマが固結しかけた高温の火成岩体を主要な熱源とするものとみなし、以下に考察を加える。

### 3.2 有史時代の噴火・噴気活動に基づく本地域の火山の分類

上述した60°C以上の温泉が近傍に分布している6つの火山は、有史時代の活動史および現在の活動状況に応じて次の $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ の3つの型に分類できる。

1)  $\alpha_1$ 型火山：有史時代に本質物質を放出する噴火を行った記録がある火山で、阿蘇および雲仙がこれにあたる。阿蘇では中岳の火口で活動の極大時に300°C以上の温度の活発な噴気活動が存在する(中牟田ほか, 1960)。一方、雲仙では雲仙温泉を山頂部の噴気活動と考えることが可能であるが、その温度は最高で120°C程度に過ぎない(松下, 1968)。

2)  $\alpha_2$ 型火山：有史時代に本質物質を放出する噴火ではなく爆発的な噴気活動を行った記録がある火山で、九重および鶴見・由布がこれにあたる。九重では現在山頂部(硫黄山)で温度300°C以上の活発な噴気活動が存在する(江原ほか, 1981)。しかし、鶴見・由布では鶴見岳山頂のNW方向および伽藍岳山頂のSW方向に温度



別府—九重—阿蘇—熊本—雲仙地域の熱水系—(1) (茂野 博・阿部富久男)

第5図 別府—小浜地溝帯に湧出している代表的な温泉水に卓越する主要溶存陰イオン  
凡例中αおよびβは、各α型およびβ型火山における主に溶岩円頂丘の既略の分布範囲を示す。

100°C以下と考えられる若干の噴気活動が存在するだけである(豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)。

3)  $\beta$ 型火山: 有史時代に噴火あるいは爆発的な噴気活動を行った記録がなく, 現在火山体山頂部で噴気活動が確認されない火山で, 涌蓋・一目, 野稻がこれにあたる。これらの火山の原地形は $\alpha_1$ 型および $\alpha_2$ 型火山に比較してかなり開析が進んでいる。

これらの3つの型の火山周辺に存在する温泉・噴気地分布の地理的特徴および湧出・噴出する地熱流体の化学的特徴は, これらの火山の型によって明瞭に区別されるように思われる。以下にこれを要約する。

なお, 要約の中で地熱流体の化学的特徴は, 前述した文献などを参考に各温泉・噴気地の中で代表的と考えられる高温の温泉水・噴気を選択し, 記載した。温泉水(一部噴気凝縮水を含む)のpHについては, 3.0未満を酸性, 3.0以上6.0未満を弱酸性, 6.0以上9.0未満を中性, 9.0以上をアルカリ性とし, 泉質型として主要溶存陽イオンについては70%以上を占めるものを, 主要溶存陰イオンについては30%以上を占めるものを多い順に示した。高温の噴気については単に噴気として記載したものもある。温度については, 未公表データを含めて信頼性の高い実測温泉・噴気孔温度記録の中で最高のものを示した。地熱井が掘削されている地域の地下温度には地球化学温度計(Truesdell, 1975)による計算温度を用いた場合がある。

### 3.3 $\alpha_1$ 型火山周辺の温泉・噴気地分布の規則性

有史時代に本質物質を放出する噴火を行った記録があり, 現在地下のマグマ溜りの少なくとも一部にマグマが存在していると考えられる $\alpha_1$ 型の火山の周辺では, 火山体の最も標高が高い地点から山頂部の噴気地を通して引いた1直線上の方向にのみ, 60°C以上の高温の温泉・噴気地が山麓部に存在する。この直線はE-W方向に近い方位を示す。温泉水(・噴気)は化学的には一般に山頂に近い部分では酸性 $\text{SO}_4$ 型であり, 山裾ではほぼ中性でClに富んでくる。

1) 阿蘇火山では, E→W方向へ高岳(最高地点)→中岳噴火口→湯ノ谷・垂玉温泉(地表, 酸性 $\text{SO}_4$ 型, 97°C; 地下, 蒸気卓越系, 約220°C)→栃木温泉(中性 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ 型, 46°C)の1方向の高温の温泉・噴気地の配列が認められる。阿蘇カルデラ地形の北部のカルデラ縁の近くには分散的に赤水(中性 $\text{SO}_4$ 型, 28°C), 内牧(中性 $\text{SO}_4$ 型, 49°C), 手野(中性 $\text{Na-HCO}_3$ 型, 42°C)などの温泉が存在しているが, これらの温泉は深度500m程度までのボーリングにより基盤との境界付近より湧出しているにもかかわらず低温である(山崎ほか,

1978; 太田, 1975; 湯原, 1960)。

2) 雲仙火山では, ほぼENE→SWS方向へ普賢岳=野岳(最高地点と分水嶺)→雲仙温泉(大部分噴気, 酸性 $\text{SO}_4$ 型, 96°C)→小浜温泉(中性 $\text{Na-Cl}$ 型, 96°C)の1方向の高温の温泉・噴気地の配列が認められる。普賢岳=野岳のE方向には島原温泉(中性 $\text{HCO}_3$ 型, 31°C)が存在し, S方向には須川・原城温泉(中性 $\text{HCO}_3$ 型, 35°C)が存在するが, これらの地域では深度200-800mのボーリングにもかかわらず高温の温泉は発見されていない(太田, 1973; 川上ほか, 1956)。

### 3.4 $\alpha_2$ 型火山周辺の温泉・噴気地分布の規則性

有史時代に本質物質を放出する噴火ではなく爆発的な噴気活動を行った記録があり, 現在地下のマグマ溜りの温度が $\alpha_1$ 型とほぼ同じ, あるいは $\alpha_1$ 型と $\beta$ 型の間にあると考えられる $\alpha_2$ 型の火山の周辺の温泉・噴気地の分布は,  $\alpha_1$ 型に類似して火山体の山頂部から山頂部付近の噴気地を通して引いた1-2直線上の方向にのみ, 60°C以上の高温の温泉・噴気地が山麓部に存在する。これらの直線はE-W方向に近い方位を示す。化学的には山頂に近い部分で酸性 $\text{SO}_4$ 型および酸性Cl型であり, 山裾では中性 $\text{Na-Cl}$ 型, 中性 $\text{Na-HCO}_3$ 型などになる。

1) 九重火山では, E→W方向へ久住山=三俣山(最高地点と分水嶺)→硫黄山噴気地→雀地獄(酸性 $\text{SO}_4$ 型, 温度は気温に近い)→黒川温泉(弱酸性 $\text{Na-Cl-SO}_4$ 型, 98°C)→田ノ原・小田温泉(中性 $\text{Cl-HCO}_3$ 型, 63°C)→満願寺温泉(中性 $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ 型, 43°C)と, SE→NW方向へ久住山=三俣山→硫黄山噴気地→牧ノ戸温泉(噴気, 95°C)→大岳・八丁原(地表, 弱酸性 $\text{SO}_4$ 型, 弱酸性 $\text{Na-Cl}$ 型, 弱酸性 $\text{HCO}_3$ 型など, 95°C; 地下, 中性-弱酸性 $\text{Na-Cl}$ 型, 熱水卓越系, 220-280°C)の2方向の高温の温泉・噴気地の配列が認められる。この2方向以外に分散的に分布する法華院(弱酸性 $\text{SO}_4$ 型, 45°C), 吉部(弱酸性 $\text{Cl-SO}_4$ 型, 45°C), 七里田(中性 $\text{HCO}_3$ 型, 39°C)などの温泉は湧出量も少なく低温である(志賀, 1967; 野田・古賀, 1973)。

2) 鶴見・由布火山では事情はやや複雑である。

由布岳を背にして鶴見岳からW→E方向へ鶴見岳=内山(最高地点と分水嶺)→鶴見岳山頂部の噴気(876年?, 1949年および1974年異常活動, 現在の温度および化学的性質不明)→別府南部温泉群〔傾向として, 堀田(噴気, 100°C以上)→観海寺(中性 $\text{Na-Cl}$ 型, 100°C)→別府旧市街(中性 $\text{HCO}_3$ 型, より低温)〕の配列が認められる。一方, 鶴見岳の北の伽藍岳からは同様にW→E方向へ伽藍岳=内山(分水嶺)→別府北部温泉群〔傾向として,

明礬・湯山(酸性  $\text{SO}_4$  型,  $82^\circ\text{C}$ )→鉄輪(噴気,  $100^\circ\text{C}$ 以上および酸性  $\text{Na-Cl}$  型,  $100^\circ\text{C}$ )→亀川(中性  $\text{Na-Cl}$  型, より低温)の配列が認められる。なお、伽藍岳の山頂部 SW 方向の直下には、水分嶺の W 方向に噴気( $96^\circ\text{C}$ )および塚原温泉(酸性  $\text{SO}_4$  型,  $75^\circ\text{C}$ )が存在しており例外となっているが、これより W 方向には特に顕著な温泉・噴気地の存在は認められていない(吉川, 1972; YUHARA *et al.*, 1981; 古賀・野田, 1970; 湯原, 1964; 豊肥地熱地域地質図編集グループ, 1982)。

一方、鶴見岳を背にして由布岳からは NE→SW 方向へ由布岳(最高地点)→由布院川上温泉群(主に中性  $\text{Na-Cl-HCO}_3$  型,  $96^\circ\text{C}$ )→由布院川南温泉群(主に中性  $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$  型,  $97^\circ\text{C}$ )の 1 方向の温泉地の配列が認められる(川村・山下, 1972, 1973)。

### 3.5 $\beta$ 型火山周辺の温泉・噴気地分布の規則性

有史時代に噴火あるいは爆発的な噴気活動を行った記録がなく、現在地下のマグマ溜りの温度がおそらく  $\alpha_1$  型および  $\alpha_2$  型火山よりも低いと考えられる  $\beta$  型火山の周辺の温泉・噴気地の分布は、 $\alpha_1$  型および  $\alpha_2$  型火山と異なり火山体の山頂部から見て大きく異なる数方向へ分散している。化学的には、若干の酸性  $\text{SO}_4$  型も存在するが、多くは中性  $\text{Na-Cl}$  型あるいは  $\text{Na-Cl-HCO}_3$  型を示す。

1) 涌蓋・一目火山では、SE→NW 方向からさらに NE 方向へ涌蓋山(最高地点)→岳ノ湯・岐ノ湯温泉(地表, 噴気,  $97^\circ\text{C}$ ; 地下, 中性  $\text{Na-Cl}$  型, 熱水卓越系,  $230^\circ\text{C}$ )→川底温泉(中性  $\text{Na-Cl}$  型,  $90^\circ\text{C}$ )→宝泉寺温泉(中性  $\text{Na-Cl}$  型,  $98^\circ\text{C}$ )→壁湯温泉(中性  $\text{Na-Cl}$  型,  $41^\circ\text{C}$ ), W→E 方向へ涌蓋山=一目山(最高地点, 水分嶺)→大岳・八丁原(地表, 弱酸性  $\text{SO}_4$  型, 弱酸性  $\text{Na-Cl}$  型, 弱酸性  $\text{HCO}_3$  型など,  $95^\circ\text{C}$ ; 地下, 中性-弱酸性  $\text{Na-Cl}$  型, 熱水卓越系,  $220\text{--}280^\circ\text{C}$ ), NE→SW 方向からさらに W 方向へ一目山→黒川温泉(弱酸性  $\text{Na-Cl-SO}_4$  型,  $98^\circ\text{C}$ )→田ノ原・小田温泉(中性  $\text{Cl-HCO}_3$  型,  $63^\circ\text{C}$ )→満願寺温泉(中性  $\text{HCO}_3\text{-Cl}$  型,  $43^\circ\text{C}$ )および低温の温泉群ではあるが E→W 方向へ涌蓋山→小国鉾山(弱酸性  $\text{SO}_4$  型,  $32^\circ\text{C}$ )→山川温泉(弱酸性  $\text{SO}_4$  型,  $53^\circ\text{C}$ )→奴留湯温泉(中性  $\text{SO}_4$  型,  $37^\circ\text{C}$ )といった 3-5 方向に温泉が分散して配列している(志賀, 1967)。

なお、大岳・八丁原および黒川-満願寺温泉については、九重火山と涌蓋・一目火山の両者の近傍に分布しているため、とりあえず両方に記載しておいた。

2) 野稲火山では、N→W 方向ないし SE→NW 方向からさらに NE 方向へ野稲岳(最高地点)→滝上・野矢・水分峠温泉(地表, 噴気,  $97^\circ\text{C}$ ; 地下, 中性  $\text{Na-Cl}$  型,

熱水卓越系,  $180^\circ\text{C}$ 以上), NW→SE 方向へ野稲岳→山下池温泉(中性  $\text{Na-HCO}_3$  型,  $61^\circ\text{C}$ )→湯ノ平温泉(中性  $\text{Na-Cl-HCO}_3$  型,  $88^\circ\text{C}$ )の 2-3 方向に温泉が分散して配列している。

なお、SW→NE 方向へ野稲岳→由布院温泉(中性  $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$  型,  $97^\circ\text{C}$ )の温泉の配列も考慮に入れる必要があるかもしれない。

## 4. 火山性温泉・噴気地分布の規則性を説明する熱水系モデル

上述した別府—小浜地溝帯内に分布する鶴見・由布、野稲、九重、涌蓋・一目、阿蘇、雲仙の各火山の近傍に認められる高温温泉・噴気地の配列の規則性について、その基本的な原因を次の順序で議論して行く。

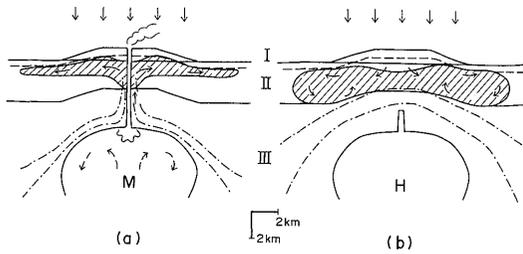
- 1) 熱流体吹き込み型加熱機構と熱伝導型加熱機構
  - 2) 火山活動の発展史と熱水系の生成史
  - 3) 別府—小浜地溝帯における火山性温泉・噴気地分布の規則性を説明する熱水系の一般モデル
  - 4) 各火山周辺における温泉・噴気地分布の特殊性
- その後、次の項目についても議論を行う。
- 5) 別府—小浜地溝帯のその他の火山周辺における温泉地分布
  - 6) 別府—小浜地溝帯における従来の熱水系モデルとの比較

### 4.1 熱流体吹き込み型加熱機構と熱伝導型加熱機構

前述したように 6 群の火山の溶岩円頂丘の分布からほぼ 5 km 以内に分布する温泉・噴気地に高温の熱水や蒸気を供給している地下の熱水系は、地球深部からの広域的な熱伝導によってではなく、基本的にその近傍に位置する火山体の地下に存在するマグマあるいはマグマが固結しかけた高温の火成岩体からの熱によって加熱されていると考えられる。このような火山性の熱水系の基本的な加熱機構には、熱流体吹き込み型、熱伝導型および熱対流型の 3 種類が考えられるが、ここでは前 2 者のみを取りあげ、熱対流型加熱機構についてはおわりに簡単にふれるのみとした。

ここで、地質概説で述べた地質状況をもとに各火山周辺の地下地質構造を共通の単純な 3 層構造モデル(第 6 図)で置きかえ、熱水系の加熱機構と生成する熱水系の分布および地熱流体の化学的性質の間の関係を考察する。

第 6 図において、第 I 層は第四紀後期の輝石一角閃石安山岩質の成層火山ないし溶岩円頂丘の集合火山の火山体で、その平面投影が円形の台地状の地形を示す。第 I 層では火山体の地形面に平行な構造が存在し、構造に平



第6図 熱流体吹き込み型加熱機構によって生成する熱水系(a)と熱伝導型加熱機構によって生成する熱水系(b)のモデル断面図

I-III, MおよびHはそれぞれI-III層, マグマおよび高温火成岩体である。破線は自由地下水面を, 1点鎖線はたとえば600°Cと300°Cの等温線を意味する。斜線部は熱水系の分布を, 矢印は流体の移動方向を示す。詳細は本文参照。なお, 水平・垂直方向のスケールは一応の目安であり, 各火山によって異なる。

行な方向への透水性が相対的に高いと仮定する。第II層は新第三紀—第四紀の溶岩類, 火山砕屑岩類および一部堆積岩類より構成される。第II層は不均質であるが, かなりの部分は相対的に高い透水性を保持し, 主にその中に熱水系が生成すると仮定する。第III層は変成岩類および花崗岩類より構成される結晶質の基盤岩類で, この中に火山体を形成するとともに熱水系の究極的な熱源となるマグマが貫入している。

マグマ溜りは各火山の主に溶岩円頂丘群の分布に対応する平面的な広がりを持っており, その頂部の深度は地下約5-6 km程度であると仮定する。火山体の下では基盤岩類はマグマによって押し上げられており, 相対的な正のブーゲ重力異常の原因になっていると考える。第III層では火道周辺を除いて, 透水性は無視できるほど低いと仮定する。

第5図(a)は熱流体吹き込み型の熱水系の, (b)は熱伝導型の熱水系のマクロなモデルの断面図をそれぞれ示す。第5図(a), (b)において, 破線は自由地下水面を, 1点鎖線は, たとえば600°Cと300°Cの等温線を意味する。各火山の周辺の地下には前述のマグマあるいは高温火成岩体以外の特別な熱源は存在せず, また地形も平坦であるため自由地下水面も平坦であると仮定する。なお, 第5図の熱水系分布および流体の移動方向の書き込みにあたっては, HANAOKA (1980)を参考にした。

(1) 熱流体吹き込み型加熱機構によって生成する熱水系

熱流体吹き込み型では, 第I層および第II層の加熱は主にマグマから分離した高温のマグマ発散物が垂直方向に伸びた細い火道を通じて上昇し, 比較的地表近くで地表水起源の地下水と混合することにより行われる。マグ

マ発散物が非常に高温高压である場合, 火道を通じて上昇して来るマグマ発散物は火口を通じて大気中に放出されてしまう可能性が高いと考えられるが, マグマ発散物が相対的に低温低圧であれば火口は閉塞し, より効率的な熱水系の加熱が行われる場合が多いであろう。

地表水起源の地下水と混合したマグマ発散物は, 1つには火山体頂上部では周囲よりも自由地下水面が高いために, もう一つには前述した第I層の地質構造により側下方へ流動していくと考えられる。これによって第I層のみならず第II層においても生成する熱流体吹き込み型の熱水系は, 第6図(a)に示すように垂直的に後述する熱伝導型の熱水系に比較して狭い分布を示すとともに, 熱水系内の温度分布は急激な変化を示す傾向を持つと考えられる。

熱流体吹き込み型の熱水系には, マグマから高温の発散物(火山ガス)が大量に供給される。したがってこの型の熱水系では,  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $HF$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ などのほか場合によっては $NaCl$ に富むマグマ発散物と地表水起源地下水の混合したものが第I層および第II層を構成する岩石との間の比較的短時間の非平衡的な化学反応を行うことにより, 酸性 $Cl$ 型, 酸性 $SO_4$ 型, 弱酸性 $HCO_3$ 型, 中性 $Na-Cl$ 型などの酸性となる傾向の強い多様な熱水あるいは蒸気が生成する(WHITE, 1957a, b; 岩崎, 1970)と考えられる。またこれらの熱水が地表へと移動する過程において, さらに気液分離や熱水と地表水起源地下水との間の混合などによって酸性 $SO_4$ 型や中性 $Na-HCO_3$ 型の温泉水あるいは噴気などが生成する場合もある(WHITE, 1957a)と考えられる。

(2) 熱伝導型加熱機構によって生成する熱水系

熱伝導型では, 第I層および第II層の加熱は主にマグマから第III層を通しての下方からの熱伝導により広く行われる。

下方から広範囲に加熱される結果, 第II層を中心に地表水起源地下水の対流によって生成する熱伝導型の熱水系は, 第6図(b)に示すように垂直的に前述した熱流体吹き込み型の熱水系に比較して広い分布を示すとともに, 熱水系内の温度分布は緩やかな変化を示す傾向を持つと考えられる。

熱伝導型の熱水系には, マグマからの発散物は極く少量しか供給されない。したがってこの型の熱水系では, 地表水起源の地下水と第I層および第II層を構成する岩石との間の比較的長時間の平衡的な化学反応により, 単純に中性 $Na-Cl$ 型あるいは中性 $Na-Cl-HCO_3$ 型などの中性となる傾向の強い熱水あるいは蒸気が生成する(ELLIS and MAHON, 1974, 1977)と考えられる。ただし,

これらの熱水が地表へと移動する過程において、気液分離や熱水と地表水起源地下水との間の混合などによって酸性  $\text{SO}_4$  型や中性  $\text{Na-HCO}_3$  型の温泉水あるいは噴気などが生成する場合もある(White, 1957a)と考えられる。

#### 4.2 火山活動の発展史と熱水系の生成史

以上に述べた熱流体吹き込み型加熱機構と熱伝導型加熱機構によって生成する2種類の熱水系は、輝石—角閃石安山岩質の成層火山あるいは溶岩円頂丘の集合火山の生成史の中で同時に発生するものではないであろう。火山活動の様式、規模、継続期間などは変化に富んでいるが、一般に次のように前者の方が後者よりも先に生成すると考えることができる。

1) 火山活動の発生期：マグマが貫入し、火山噴出物の放出が開始されて火山体の形成が始まる。噴出物・発散物の放出が激しいことから、熱流体吹き込み型の安定した熱水系はまだ生成し難い。一方、マグマ周辺の結晶質基盤岩類の熱伝導率が低いために、熱伝導型の熱水系もまだ生成できない。ただし、火山活動の発展期—最盛期を含めて溶岩や火砕流堆積物などの噴出物あるいは岩脈や岩株などの浅所貫入岩を熱源として短期間局地的に熱水系が生成する場合はあると考えられる。

2) 火山活動の発展期—最盛期：火山体の形状が大規模になるとともに安定し、山頂部の噴火口からの噴出物・発散物の放出が繰り返し行われる。発散物の一部は地下で地表水起源の地下水と混合して側方への流動を開始し、熱流体吹き込み型の安定した熱水系が生成し始める。しかし、熱伝導型の熱水系はまだ生成できない。

3) 火山活動の末期：マグマ溜りの温度は低下し始める(たとえば  $1000-700^\circ\text{C}$ )、噴火活動は停止するが、発散物の上昇・噴出はまだ続いている。熱流体吹き込み型の熱水系の活動が最盛期となる。一方、長時間に及ぶ熱伝導加熱により、この型の熱水系の生成が始まる。

4) 火山活動の最末期：マグマ溜りの温度はかなり低下し(たとえば  $700-300^\circ\text{C}$ )、発散物の上昇はほとんど停止する。熱流体吹き込み型の熱水系は消滅して行く。一方、熱伝導型の熱水系の活動が最盛期となる。

5) 火山活動の消滅期：マグマ溜りの温度は低下を続け、周辺の地下深部からの広域的熱伝導による地下温度に一致するようになる。熱伝導型の熱水系の活動も消滅して行く。

FUKUTOMI (1960) および福富(1964)は、地下に水平な円盤状あるいは円筒状の水を含むマグマが存在する場合を考え、その半径、厚さおよび頂部の深度に応じた伝導冷却によるマグマの温度変化から、生成する温泉のタイプと寿命とを検討している。これによれば、第6図のマ

グマ溜りのモデルに近い半径 5 km、厚さ 5-10 km、頂部の深度 5 km の時、熱流体吹き込み型熱水系モデルに対応するマグマ水起源の温泉の寿命は、マグマの貫入からマグマ溜りの温度が  $900^\circ\text{C}$  に冷却する時点までとして約 0.04-0.08 Ma、熱伝導型熱水系モデルに対応する天水起源の温泉の寿命は、その後地下増温率が通常の2倍、すなわち  $60^\circ\text{C}/1,000\text{ m}$  に至るまでとして約 0.7-1.0 Ma と計算された。これらの寿命は、それぞれの型の熱水系の生成期間について、大まかな目安を与えるものと考えられる。

#### 4.3 別府—小浜地溝帯における火山性温泉・噴気地分布の規則性を説明する熱水系の一般モデル

本報告における考察の中心部分として、別府—小浜地溝帯内に分布する各火山近傍における温泉・噴気地分布の規則性の基本的な原因を説明する熱水系の一般モデルを次に記述する。

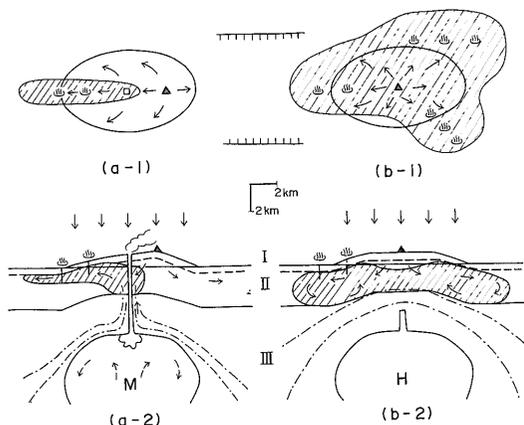
結論として、別府—小浜地溝帯内に分布する  $\alpha_1$  型と  $\alpha_2$  型火山および  $\beta$  型火山の周辺に分布する熱水系の加熱機構は、基本的に前述した熱流体吹き込み型と熱伝導型でそれぞれ説明される。前述した火山の発展史に対応させれば、おそらく  $\alpha_1$  型は2)の火山活動の発展期—最盛期に、 $\alpha_2$  型は2)~3)の発展期—最盛期—末期に、 $\beta$  型は4)の最末期の段階にあたるのであろう。

しかし、問題は  $\alpha_1$  型、 $\alpha_2$  型および  $\beta$  型火山の近傍における温泉・噴気地分布の規則性をいかに説明するかである。そこでこの問題を解決するために、前述した熱流体吹き込み型と熱伝導型の各熱水系モデルに修正を加え、第6図(a)、(b)に対応した  $\alpha_1$  型・ $\alpha_2$  型火山および  $\beta$  型火山周辺の熱水系モデルを第7図の(a)、(b)にそれぞれ示し、これらの火山周辺における温泉・噴気地分布の規則性の原因を考察する。

(1)  $\alpha_1$  型および  $\alpha_2$  型火山周辺の熱水系の一般モデル 第6図(a)から第7図(a)への修正は次の4点である。この4点は、前述したように  $\alpha_1$  型および  $\alpha_2$  型火山にほぼ共通に認められる。

1) 火山体の平面分布は、円形ではなく楕円形である。楕円の長軸の方向は E-W 方向に一致する。2) 火山体の最も標高が高い部分の位置は、この楕円の中心ではなく長軸上の一方向にかなりずれている。3) マグマ発散物を放出している山頂部の噴気孔の位置は、最も標高が高い場所ではなく火山体のほぼ中心部にある。4) 楕円の長軸に平行な方向に急傾斜で開口性の断層系が発達する。

第7図(a)に示すように、 $\alpha_1$  型および  $\alpha_2$  型火山においてマグマからの発散物は火道を通じて上昇し、火山体の頂上部より流下して来る地表水起源の地下水と混合し



第7図  $\alpha_1$ 型・ $\alpha_2$ 型火山(a)および $\beta$ 型火山(b)に生成する熱水系のモデル平面図(1)および断面図(2) I-III, MおよびHはそれぞれI-III層, マグマおよび高温火成岩体である。破線は自由地下水面を, 1点鎖線はたとえば600°Cと300°Cの等温線を意味する。黒い三角は最も標高が高い地点, 白い四角は火口の位置, 楕円の線は急傾斜の開口性の断層系が発達する方向をそれぞれ示す。斜線部は熱水系の分布を, 矢印は流体の移動方向を示す。詳細は本文参照。なお, 水平・垂直方向のスケールは一応の目安であり, 各火山によって異なる。

て地熱流体を形成するが, 1)~4)で述べた条件が規定する水理条件によって, 基本的に火山体の最も標高が高い部分から山頂部の噴気孔に引いた直線の延長方向に近い狭いE-W方向の地域にのみ, 地熱流体は火山体の側下方へ流動するに従って熱水系を形成できる。このことが,  $\alpha_1$ 型および $\alpha_2$ 型火山の周辺において, 山頂部から1方向の狭い地域にのみ温泉・噴気地が配列することの基本的な原因である。これらの温泉・噴気地から噴出する地熱流体が酸性を示す傾向が強い原因は, 前述したようにマグマ発散物の寄与の大きい地熱流体と貯留層を構成するあるいは通路となっている岩石との間の化学反応が十分進行していないことにあると考えられる。

ここで注目する必要がある点は, 前述したようにN-S方向に伸張性の広域応力場の $\sigma_3$ 軸が配置していることから, マグマ発散物が火道を通じて上昇していく途中あるいは地熱流体が側下方へ流動していく途中で, マグマ発散物あるいは地熱流体の圧力によりE-W方向で急傾斜の天然のヒドロフラクチャーが生成し, この方向への地熱流体の選択的な流動が助長されている可能性が存在することである(Truesdell, 1975)。

(2)  $\beta$ 型火山周辺の熱水系の一般モデル

第6図(b)から第7図(b)への修正としては, 次の2点があげられる。この2点は前述したように $\beta$ 型火山に認められる。

1) 火山体の地形は開析が進行することにより, 緩やかなドーム状を示す。2) 1方向に急傾斜で開口性の断層系が発達する。この方向はE-W方向である。

第7図(b)に示すように,  $\beta$ 型火山においては基盤を通じた熱伝導により地表水起源の地下水が下方から広く加熱されることによって地熱流体が生成するため, 側上方へ熱対流により移動する地熱流体は2)の条件にもかかわらず広い地域で熱水系を形成することが可能である。このことが,  $\beta$ 型火山の周辺において, 山頂部から複数方向の広い地域に温泉・噴気地が分布することの基本的な原因である。これらの温泉・噴気地から噴出する地熱流体が主に中性-弱アルカリ性である原因は, 前述したようにマグマ発散物の寄与の小さい地熱流体と貯留層を構成する岩石との間の化学反応が十分に進行していることにあると考えられる。

ここで注目する必要がある点は, 基盤の隆起の傾斜部には隆起の中心に対して同心円状に急傾斜で開口性の断層系が発達する可能性があり(たとえばSANFORD, 1959), 他の断層系との交差点は地熱流体の上昇通路として非常に有効であると考えられることである。このような第II層の下部からの地熱流体の移動は, 第四紀後期に卓越しているE-W方向の急傾斜の断層系ではなく, より古い時期に生成したより大きな断層系によって規制されている可能性がある。

4.4 各火山周辺における温泉・噴気地分布の特殊性

別府-小浜地溝帯内に分布する各火山の周辺において, 温泉・噴気地は上述した熱水系の一般モデルで説明される規則性とは若干異なった分布を示している場合がある。この問題について, 次に1)火山活動の特殊性, 2)地質・断層系分布の特殊性の順序で考察を加えておく。

なお, 前にその熱源となる火山に複数の可能性を残した, 大岳・八丁地域, 黒川-満願寺温泉, 由布院温泉については, これらの議論により, それぞれ九重火山と涌蓋・一目火山の両者, 九重火山, 鶴見・由布火山がその基本的な熱源となっている可能性が高いと思われる。

(1) 火山活動の特殊性

別府-小浜地溝帯のうち東部地溝帯においては, 新第三紀以降様々な岩質の多数の火山が折り重なって活動を行ってきたために, 現在の温泉・噴気地の分布は単純ではない。これに対して, 中部および西部地溝帯では比較的この火山活動の折り重なり程度が低いために, 特に阿蘇および雲仙火山において熱流体吹き込み型加熱機構による $\alpha_1$ 型火山の温泉・噴気地分布の規則性が明瞭になっていると考えられる。

阿蘇火山においては, 他の $\alpha_1$ 型および $\alpha_2$ 型火山と異

なり現在の中央火口丘群の生成以前に4回の大規模な火砕流の噴出があり、大型のカルデラが生成した(MATSUMOTO, 1943; MATSUMOTO, T., 1963; ONO *et al.*, 1981). 火砕流の絶対年代は、ほぼ0.4–0.08 Maの範囲にある(岡口, 1978; 町田ほか, 1982; 小野, 1984). しかし、このカルデラの存在は、現在の温泉・噴気地の分布に大きな影響を与えていないように見える。

鶴見・由布火山においては、温泉・噴気地の分布の規則性は単純ではない。鶴見岳と由布岳は1つの溶岩円頂丘群と見ることもできるし、それぞれ別個の溶岩円頂丘火山と見ることも可能である。由布岳には有史時代に噴火や爆発的な噴気活動の記録はなく、また現在山頂部付近に噴気も認められないが、地形的には由布岳は鶴見岳と同じ程度の年令の火山と見ることが可能であることから、その地下にはマグマから上昇して来るやや低温の潜頭性の発散物が存在しているのかもしれない。もしそうであると仮定すれば、鶴見岳と由布岳は互に他方の火山体の中に生成する熱流体吹き込み型の熱水系に対して、互に遠ざかる方向の側下方への地熱流体の流動を引き起こす水頭を与えていると考えることができる。一方、由布岳は鶴見岳とは別の $\beta$ 型の火山であると仮定すれば、由布院の温泉活動は由布火山の熱伝導型加熱機構によって生成した熱水系の産物であるということになるであろう。著者らの解釈は、基本的には前者に近い。

涌蓋・一目火山および野稲火山については、この両火山が高温の温泉・噴気地の分布の中心付近に位置していることから、十分な根拠はないが特に $\beta$ 型火山としてこの報告で体系的に考察を加えた。しかし、涌蓋・一目火山および野稲火山には、それぞれの周囲に角閃石安山岩質のかなり開析が進んだ第四紀の火山がいくつか分布しており、同様に熱伝導型の熱水系の熱源になっている可能性がある。これらの火山については、今後年代測定、岩石学的検討などにより涌蓋・一目火山および野稲火山との活動史、活動様式の差異等を明らかにして行く必要がある。なお最近の絶対年代測定によれば、涌蓋・一目火山について0.10–0.26 Ma(林, 1984; 玉生・糟谷, 1983)、野稲火山について0.50 Ma(林, 1984)程度の年齢が得られている。

九重火山と涌蓋・一目火山の境界に分布する大岳・八丁原地域の熱水系は、おそらく両火山によって熱流体吹き込み型および熱伝導型の2種類の機構によって加熱されていると考えられる。このことが大岳・八丁原地域の地下に発電利用に耐える大規模な熱水系が存在することの1つの大きな理由になっているのであろう。さらに、九重火山の西部、黒岩山、獺師山などは、九重火山の中

部および東部に比較して相対的に古いため(松本, 1983a, b; 林, 1984)、大岳・八丁原地域の熱水系に対して熱伝導型の加熱を行っている可能性も高いと思われる。

## (2) 地質・断層系分布の特殊性

前述したように別府—小浜地溝帯内の基盤岩類より上位の地層・岩石に最も卓越する断層系はE-W方向の急傾斜のものであり、これが $\alpha_1$ 型および $\alpha_2$ 型火山周辺に熱水系が発達する方向となっているが、これ以外の方向の断層系も熱水系の分布や温泉・噴気地の分布に影響を与えている場合がある。

阿蘇火山においては、湯ノ谷—垂玉温泉はN-S方向の断層に沿って分布しているらしい(山崎ほか, 1978)。

雲仙火山においても、千々石湾を取り囲むようにN-S方向で急傾斜の断層がいくつか存在し、これとE-W方向で急傾斜を示す断層との交点が雲仙および小浜温泉の分布に大きな影響を与えていると考えられる。

涌蓋・一目火山および九重火山では、岳ノ湯地域と大岳・八丁原地域とを結び、さらに牧ノ戸温泉を通じて硫黄山へ至る可能性の高いNW-SE方向の断層系が、熱水系の分布および温泉・噴気地の分布に非常に大きな影響を与えている(真鍋・江島, 1984)ようである。地熱井から採取されたコア試料についての残留磁気を用いた断層系の方位解析によっても、八丁原地域の貯留層の中でNW-SE方向の断層系が最も発達し、熱水の通路として重要となっていることが認められている(古谷・林, 1982)。

別府—小浜地溝帯内の各火山の周辺に存在する熱水系の貯留層を構成する地層・岩石は、地域によってかなり異なる。ここで400 mよりも深い地熱井が存在し、研究が進んでいる地域について述べれば、別府では主に第I層の角閃石安山岩質火山砕屑岩類および第II層の輝石安山岩質火山砕屑岩類(森山, 1969; 吉川, 1973)、大岳では第II層の輝石安山岩質火山砕屑岩類(YAMASAKI *et al.*, 1970; HAYASHI, 1973)、八丁原では第II層の輝石安山岩質溶岩と変質安山岩類の境界部(HAYASHI *et al.*, 1978)、湯ノ谷では第I層の輝石安山岩質火山砕屑岩類(山崎ほか, 1978)というように変化に富んでいる。しかし、これらの貯留層を構成する地層・岩石の種類の違いは、この報告で述べた熱水系分布および温泉・噴気地分布の規則性の原因よりはより局地的な地質分布の差異と探査・開発深度の差異によって引き起こされていると考えられるため、ここではこの問題について特に考察を加えることはしない。

#### 4.5 別府一小浜地溝帯のその他の火山周辺における温泉地分布

別府一小浜地溝帯内およびその周辺に分布する有史時代の噴火および噴気活動の記録のない第四紀後期の火山の中で、いままで取りあげなかったけれどもこの議論の関連で重要と考えられるものについて、その周辺における温泉地分布の規則性に対して考察を加えておく。

1) 中性 Na-Cl 型を示す天ヶ瀬温泉(99°C)(山下, 1967)および杖立温泉(99°C)(野田ほか, 1975)については、その付近に位置する万年・亀石火山の溶岩のフィッシュン・トラック年代が、0.53 Ma(磯・池田, 1979), 0.37, 0.43, 0.62 Ma(玉生・糟谷, 1983)と比較的若く、また流紋岩—デイサイト質のためにそのマグマ溜りの大きさは噴出物の量に比較して大きいと予想されることから、これらの温泉を涵養している熱水系は、万年・亀石火山を形成した地下のマグマあるいはそれが固結した高温火成岩体からの熱伝導型加熱機構によって生成している可能性があると考えられる。さらに、万年・亀石火山は天ヶ瀬・杖立温泉のほかにこの報告で涌蓋・一目火山を熱源と考えた岳ノ湯・川底・宝泉寺などの温泉に対しても、熱伝導型の熱源としてある程度寄与しているかもしれない。

2) 第四紀後期の火山噴出物の量が少なく地形的に見ても開析が進行している金峰火山には、その周辺に高温の温泉・噴気地は存在していない。しかし、金峰火山のごく近傍に分布する、火山体の山頂部から E→W 方向あるいは SE→NW 方向の河内(中性 Na-Cl 型, 43°C), 小天(中性 Na-Cl 型, 35°C)および SW→NE 方向の鶴羽田(中性 Na-Cl-HCO<sub>3</sub> 型, 53°C)などの温泉は、金峰火山を形成したマグマが固結した後の高温火成岩体を熱伝導型の熱源として生成した比較的低温の熱水系によって涵養されていると考えられる。

3) 多良火山においては、金峰火山と同様に第四紀後期の火山噴出物の量は少なく、地形的に開析が進行しているが、火山体の中心部から SE→NW 方向へ、経ヶ岳(最高地点)→平谷温泉(中性 Na-HCO<sub>3</sub> 型, 28°C)→嬉野温泉(中性 Na-HCO<sub>3</sub>-Cl 型, 94°C)の1方向のみの温泉地の配列が認められる(飯盛, 1966; 飯盛, 1983)。この NW-SE 方向は、前述したようにこの地域の古第三系に最も卓越する断裂系の方向と一致しており、嬉野温泉は古第三系から湧出している。多良火山周辺の温泉の分布はこのように1方向のみであるが、温泉水の化学的性質は熱伝導型の加熱機構が卓越することを示している。なお、さらに嬉野温泉の NNE 方向には古第三系から武雄温泉(中性 Na-HCO<sub>3</sub> 型, 51°C)が湧出しており

(飯盛ほか, 1963)、両者の化学的性質が類似していることから見れば、多良火山とは別の熱伝導型の火山性熱源が付近に存在している可能性を考えるべきかもしれない。

#### 4.6 別府一小浜地溝帯における従来の熱水系モデルとの比較

別府一小浜地溝帯において過去に報告された熱水系モデルは、1 温泉・噴気地あるいは1 火山の周辺のものが多い。このうちこの報告で提示した熱水系モデルと関係が深いと考えられる主なものについて、次に比較を行う。

吉川(1972, 1973)は、別府地域の約700カ所に及ぶ温泉・噴気孔のデータから、北部温泉群と南部温泉群における W→E 方向への温泉の温度および静止・水頭の低下、Cl および HCO<sub>3</sub> 濃度の変化を明らかにし、E-W 方向の断層が地熱流体の通路として支配的であることを推定した。しかし、これらの地熱流体の本質的な熱源としては必ずしも鶴見火山を考える必要はなく、由布院温泉を越えて九重火山の可能性もあるとしたが、具体的な熱水系の加熱機構については述べていない。

野田(1982a, b)は、九重火山を中心に東は大分市から西は満願寺温泉に至る広い地域の熱水系について、その成因と地域的変化を基本的に九重火山の火山体を形成するに至ったマグマ溜りから放出されている発散物の分化(ただし大分川流域では化石海水の寄与が存在する)と地表水起源の地下水の混合・流動によって説明しているが、九重火山の東部に高温の温泉・噴気地が存在していない理由については言及していない。

山崎ほか(1978)は、湯ノ谷地域の地熱井からの噴出物の物理的・化学的性質などからその地域の地下に蒸気卓越系が存在していることを推定し、PARMENTIER and HAYASHI (1981)は朽木温泉に熱水を供給している深部熱水系が湯ノ谷地域の地下の蒸気卓越系に対して断層に沿って蒸気を供給しているという熱水系モデルを考えているが、阿蘇火山におけるより広域的な水理構造、加熱機構などについては議論していない。

太田(1973)は、雲仙地域の温泉・噴気地分布の規則性について、千々石湾をカルデラと推定して、その中心部の地下から斜め上方に上昇して来るマグマ発散物が途中で分化することにより、小浜、雲仙、島原温泉の順に高温中性 Na-Cl 型、高温酸性 SO<sub>4</sub> 型、低温中性 HCO<sub>3</sub> 型の温泉水を生成したというモデルを考えた。しかし、著者らは1)千々石湾をカルデラと考える根拠が乏しいこと、2)マグマ発散物が斜めに上昇して来ることの根拠とされた微小地震の震源分布については、別府一小浜地溝

帯内に多発する直接に火山活動や熱水系の活動とは関係しない微小地震の震源分布(久保寺ほか, 1976; 三浪ほか, 1981; 松尾, 1979)から見て, 明確な証拠とはならないこと, 3)最も新しい1657年および1792年の溶岩流の噴出は雲仙火山の中で最も新しい火山体である普賢岳の周辺地域に限られていること(倉沢・高橋, 1965; 種子田, 1977; 気象庁, 1975)などから, 本報告で考察したようにマグマ溜りが雲仙火山の直下に存在しているとする熱水系モデルの方が現実により近いであろうと判断する。

露木(1960, 1961, 1962)は, 九州地方の温泉を涵養している熱水系の生成機構について様々な角度から複雑な議論を加えており, 本報告の内容に関連する結論として次の様に述べている。1)鶴見・由布, 九重, 阿蘇, 雲仙などの各火山の周辺に分布する温泉は, 第四紀の火山が存在しない地域において先第三系を湧出母岩として湧出する低温のアルカリ性  $\text{Na-HCO}_3$  型の非火山性の温泉とは区別される火山性の温泉である。2)火山性の温泉は, 火山山頂部あるいは中腹部に湧出・噴出する酸性  $\text{SO}_4$  型の活火山性温泉と火山周辺などに分布する中性  $\text{Na-Cl}$  型の火山性温泉などに分類されるが, 両者はともに火山活動によって生じる火山ガスの分化と地下水との混合および岩石との反応などによって生成したもので, 前者は火山活動末期の火山ガスの, 後者は火山活動最盛期の火山ガスの寄与を受けている。3)火山性の温泉は地質構造や地下浅層の水理にしたがって, 阿蘇では垂玉温泉→栃木温泉, 九重では黒川温泉→満願寺温泉などの例に示されるような特定の配列を示す場合がある。4)温泉の加熱機構として熱伝導を考慮に入れると, 火山性温泉と非火山性温泉の分類は便宜的となる。本報告では, 別府一小浜地溝帯内の第四紀後期の火山周辺に認められる温泉・噴気地分布の規則性について, 火山の年齢に応じた2種類の定性的な熱水系モデルに基づいてより体系的かつ簡明に議論を進め, その基本的な原因を明らかにしたつもりである。

最近小川・金原(1983)は, 豊肥地域と呼ばれる大岳・八丁原地域, 黒川温泉, 岳ノ湯温泉を含み涌蓋・一目火山を取り囲む地域の熱水系について, 熱水の側方流動の重要性を強調するとともに, 地質・化学的考察としては九重火山を生成したマグマを主要な熱源とし, 八丁原付近あるいはその東部の地下深部からの高温火山ガスの供給および岳ノ湯付近を中心とする深部熱水対流が加熱機構として重要であると述べる一方, 物理的考察としては九重火山を生成したマグマを主要な熱源とすることに再考の余地を残しつつ, 非透水性の基盤岩類を通じた広域的な伝導型熱輸送に加えて, 八丁原や岳ノ湯においては

基盤内断裂を上昇して来る熱水による対流型熱輸送が加熱機構として重要であると述べている。

筆者らは本報告において, より広域的に別府一小浜地溝帯内に分布する第四紀後期の火山周辺に温泉・噴気地分布の規則性を認め, これを統一的に説明する火山の年齢に応じた2種類の定性的な熱水系モデルを作成する中で, 豊肥地域の熱水系についても議論を行った。しかしその中で述べたように火山活動および地質構造に関して大岳・八丁原地域周辺は別府一小浜地溝帯の中でも特異な地域となっており, 熱水系モデルとして様々なものが考えられる可能性がある。このため, 豊肥地域の熱水系については, 大深度ボーリング調査によるデータ等をも加えて今後別に詳細な議論を行いたい。

## 5. おわりに

本報告では様々な例外を認めながらも, 別府一小浜地溝帯において周辺に高温の温泉・噴気地が存在する第四紀後期の安山岩質の成層火山一溶岩円頂丘の集合火山を, 山頂部の噴気活動の存在の有無によって  $\alpha_1$  型,  $\alpha_2$  型および  $\beta$  型に分類し, 各型の火山の周辺における温泉・噴気地分布の規則性について述べるとともに, その基本的な原因を定性的な熱水系モデルの作成を通じて考察したが, 最後に考察を加えなかつたいくつかの關係の深い重要な問題について補足的に意見を述べる。

### (1) マグマの貫入深度, 化学組成および火山体の型

本報告では, マグマ溜りの頂部の深度を地下約5-6 kmと仮定して議論を進めたが, 現実的には3-10 km, 極端にはさらに大きな幅を考える必要がある。マグマ溜りの頂部の深度が深い場合には, 周囲への熱拡散の影響が大きく, マグマ溜りの上方に熱伝導型の高温の熱水系が大規模に生成する可能性は低いと予想される。一方, マグマ溜りの頂部の深度が浅い場合には, 熱流体吹き込み型と熱伝導型の熱水系が折り重なって生成する場合があると予想される。

本報告では, 安山岩(あるいはデイサイト)質の成層火山あるいは溶岩円頂丘の集合した火山の周辺における温泉・噴気地の分布の規則性について述べた。玄武岩質あるいは流紋岩質の火山などでは, マグマ溜りや火山体の大きさや形状がこの報告で述べたモデルとはかなり異なっており, 別の議論が必要であろう。たとえば玄武岩質の火山については, 一般に地下浅部に大きなマグマ溜りが生成しないために, その周囲には大規模な熱水系は生成できない可能性が高い(SMITH and SHOW, 1975, 1978)と考えられる。

一方, 富士山のように地形的な崩壊が進んでいない単

純な成層構造を持つ新しい火山では、降水起源の地下水が火山体の内部に深く侵入することが困難なために山頂部の噴気活動を除いて熱水系の生成が困難であるとする考え方もある(湯原, 1974, 1982)。

### (2) 潜頭性の熱水系

最近熱水系資源の大規模な開発への期待が増大するにたがって、潜頭性、すなわち温泉・噴気地などの地表微候地を伴わない地下の熱水系が存在し得るか否かが重要な問題となっている。高温の地熱流体は、周辺の低温の地下水に比較して極端にその塩濃度が高くない限りその比重および粘性が小さいため、断層等を通じて地下深部から地表へと上昇する傾向が強い。また、地下浅部の閉塞した熱水系において加熱が進行すれば、その蒸気圧は封圧よりも高くなり貯留構造は破壊されて、必然的に地表に地熱微候地が生成してしまうであろう。このため大規模な潜頭性の熱水系が存在し得る機会は、強靱で容量の大きな貯留層構造が地下に存在し、熱水・蒸気の生産速度が相対的に小さい場合に限られるであろう。このような潜頭性の熱水系が存在する確率は、一般に地質構造が小規模で複雑な日本ではおそらく地表地熱微候地を伴う熱水系が存在する確率よりもかなり小さいであろう。

本報告で述べた熱水系の生成・分布モデルが正しいとすれば、 $\alpha$ 型火山の周辺では高温の温泉・噴気地が分布していない方向の地域において地下に熱水系が存在する可能性は非常に低いと思われる。しかし、 $\beta$ 型火山の周辺では、高温の温泉・噴気地が分布していない方向の地域においても地下に比較的大きな熱水系が存在する場合は少なくないかもしれない。

### (3) 基盤岩類内の熱水系

本報告では、第Ⅲ層すなわち変成岩類あるいは花崗岩類より構成される基盤岩類やマグマが固結した後の高温火成岩体は、火道付近を除いて不透水性であると仮定して議論を進めた。けれども、NORTON and KNIGHT (1977) などがシミュレーション計算を行っているように、岩石の透水率が  $10^{-14}$   $\text{cm}^2$  程度と低い場合でもその中には地熱流体の対流が存在する場合があるかもしれない。斑岩銅鉱床などでは岩石の水素・酸素同位体組成の変化などから、本報告で述べたような基盤岩類および(マグマ)高温火成岩体の中にも地表水起源の地熱流体の循環が存在していたと考えられる(たとえば、TAYLOR, 1974; 石原, 1977)。熱水系の加熱機構が、基本的にこのような地表水起源地下水の深部対流である場合が、考察で触れながらも議論しなかった熱対流型加熱機構である(たとえば、HENLEY and ELLIS, 1983)。

基盤深度が浅い中部地溝帯の菊地、山鹿、玉名などの温泉地では、深度 100-300 m 程度の浅い孔井を通じて変成岩類あるいは花崗岩類中から温泉水が湧出しており、熱水貯留層もこれらの岩石中に存在していると考えられている(露木, 1960)。このことから見て、現在別府一小浜地溝帯内の  $\alpha$  型火山および  $\beta$  型火山周辺の第Ⅲ層中に貯留層が存在する可能性は必ずしも否定できない。

しかし、基盤岩類および(マグマ)マグマが固結した後の高温火成岩体内に大量の地熱流体の速い対流が存在するとすれば、本報告で記載した別府一小浜地溝帯内の  $\alpha$  型・ $\alpha_2$  型火山と  $\beta$  型火山の間に認められる温泉・噴気地分布の規則性の違いはおそらく消滅してしまうであろう。

著者らは、少なくとも基盤深度が深い東部地溝帯では、 $\alpha$  型および  $\beta$  型火山周辺に分布する地熱井および温泉から採取できる熱水・温泉水の B/Cl 原子比が 0.03-0.05 程度と火山岩類を起源とする岩石を貯留層とする熱水卓越系に特有な低い値で一定していることから、これらの地熱井および温泉に熱水を供給している地下の熱水系の分布が現在基盤内の変成岩類および花崗岩類にまで大規模に及んでいるという可能性に対して否定的である(阿部ほか, 1980; SHIGENO and ABE, 1983)。なお、この問題については、今後詳細に検討し報告する予定である。

最近、真鍋・江島(1984)は、八丁原地域において掘削された 3,000 m 深のボーリング(田中・江島, 1982)により基盤岩類中に生成する小規模な貯留層から採取された弱アルカリ性 Na-Cl-HCO<sub>3</sub> 型熱水の B/Cl 原子比が 0.06-0.09 と明瞭に高い値を示すことを報告するとともに、八丁原地域において SE 方向の合頭山へ近づくにしたがって熱水のシリカ温度、Cl 濃度、B/Cl 原子比がともに上昇する傾向が認められることから、地表水起源の地下水が基盤内にまで浸透し、九重火山の後火山作用による伝導熱によって加熱されて NW-SE 方向の断層に沿って上昇することにより、基本的に八丁原地域の熱水系が生成するという熱水系モデルを提示している。

大岳・八丁原地域は前述したように別府一小浜地溝帯の中でも特異な地域となっていることから、あるいは熱対流型加熱機構により基盤岩類内にまで大規模な熱水系が発達する条件が存在するのかもしれない。しかし、1) 合頭山に近い孔井からの熱水の B/Cl 原子比でも 0.05 と基盤岩類内の熱水の値よりも明瞭に低い値であること、2) 基盤岩類内に存在する中性 Cl-HCO<sub>3</sub> 型熱水の Cl 濃度は新第三紀-第四紀の火山岩溶岩・火山砕屑岩中の貯留層内に存在する Cl 型熱水の Cl 濃度よりも低いにも

かわらず、合頭山に近い孔井からの熱水はCl濃度が高くなる傾向を示すこと、3)平均的には八丁原の熱水はやや酸性の傾向を示すことなどから、真鍋・江島(1984)の熱水系生成モデルの妥当性については今後のより詳細な検討を必要としているように思われる。

#### (4) 過去の熱水系

本報告では基本的に $\alpha$ 型火山および $\beta$ 型火山周辺の現在活動を行っている熱水系について議論した。すでに述べたように、現在その周辺に温泉・噴気活動が存在していない火山の大部分は、熱水系を形成するにはおそらく新しすぎるのかあるいは古すぎるのであろう。しかし、古すぎる火山の地下には現在熱水系が存在していないにしても、そこに分布する地熱変質、流体包有物などを研究することは、この報告で述べたような熱水系の生成・分布モデルの妥当性や基盤内の熱水系の存在の可能性などを明らかにする意味で重要である。

#### (5) 定量的なモデル化

本報告では、別府一小浜地溝帯内における第四紀後期に活動した火山周辺の温泉・噴気地分布の規則性の原因を説明するために、既存の文献をもとに本質的と考えられるマクロな熱水系モデルを作成したつもりであるが、議論はあくまでも定性的なものである。今後は大深度孔井調査等のデータを用いて、より詳細にできる限り定量的なモデル化を試みる必要がある。

#### (6) 別府一小浜地溝帯以外での本モデルの適用性

日本の例に限っても、たとえば東北地方の脊梁山地に分布する火山の周辺地域のように、地形、地質構造、広域応力場、水理構造などが別府一小浜地溝帯内とは大きく異なりより複雑な場合には、この報告で述べたかなり単純な熱水系の生成・分布モデルはそのままでは適用できないであろう。しかし、この報告で用いた手法が、このような複雑な地域の火山の周辺における温泉・噴気地分布の規則性の把握を通じて、その基本的な原因を明らかにする熱水系モデルの作成および潜頭性の大規模な熱水系の予測に何らかの指針を与える場合があることを期待したい。

## 文 献

- 阿部喜久男・茂野 博・渡辺修一・千葉 仁(1980) 別府一九重一阿蘇一熊本一雲仙地域における温泉水の溶存化学組成の特徴と貯留岩との関係。日本地球化学会年会講演要旨集, 1980, p. 147-148.
- 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・火山ガスの放出

量とそれから推定される熱水系と火山ガス起源。火山 第2集, vol. 26, p. 35-56.

- ELLIS, A. J. and MAHON, W. A. J. (1964) Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 28, p. 1323-1357.
- and ——— (1977) *Chemistry and geothermal systems*. Academic Press, New York, 392 p.
- FUKUTOMI, T. (1960) On the possibility of volcanic hot springs of meteoric and magmatic origin and their probable life span. *Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, ser. VII, vol. 1, p. 223-266.
- 福富孝治(1964) 地熱エネルギーとその保存性について。地熱, no. 5, p. 15-27.
- 古谷直行・林 正雄(1982) コア中の断裂解析から見出された大岳一八丁原地熱帯の応力場。日本地熱学会昭和57年度学術講演会講演要旨集, p. 34.
- HANAOKA, N. (1980) Numerical model experiment of hydrothermal system, —Topographical effects—. *Bull. Geol. Surv. Jap.*, vol. 31, p. 321-332.
- HAYASHI, M. (1973) Hydrothermal alteration in the Otake geothermal area, Kyushu. *Jour. Japan Geothermal Energy Assoc.*, vol. 10, no. 3, p. 9-46.
- 林 正雄(1984) 九州の基盤構造・火山・地熱, ⑥九州の地熱。Urban Kubota, no. 22, p. 36-41.
- HAYASHI, M., MIMURA, T. and YAMASAKI, T. (1978) Geological setting of reinjection wells in the Otake and Hatchobaru geothermal field, Japan. *Geothermal Resources Council, Transactions*, vol. 2, p. 263-266.
- HENLEY, R. W. and ELLIS, A. J. (1983) Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth-Science Review*, vol. 19, p. 1-50.
- 広川 治・長浜春夫・小野晃司・山田直利・吉田尚・遠田朝子(1976) 50万分の1地質図福岡。地質調査所。
- 豊肥地熱地域地質図編集グループ(1982) 10万分の1豊肥地熱地域地質図および同説明書。特殊地質図(21-1), 地質調査所, 23p.
- 飯盛喜代春(1966) 佐賀県温泉の化学的研究(第4報) 嬉野温泉について。温泉科学, vol.

- 16, p. 119-128.
- (1983) 佐賀県西部温泉群の地球化学的研究. 温泉工学会誌, vol. 18, p. 11-21.
- ・江口欣也・高口克子・甲木和子・師岡勝美・宮原綱子・原 恭子(1963) 佐賀県温泉の化学的研究(第3報)武雄温泉について. 温泉科学, vol. 13, p. 67-75.
- 池田安隆(1979) 大分県中部火山地域の活断層系. 地理学評論, vol. 52, p. 10-29.
- 今井 功・寺岡易司・小野晃司・松井和典・奥村公男(1980) 50万分の1地質図 鹿児島. 地質調査所.
- 石原舜三(1977) 斑岩銅鉱床. 立見辰雄編, 現代鉱床学の基礎. 東大出版会, 東京, p. 203-214.
- ・唐木田芳文・佐藤興平(1979) 北九州—西中国地域の磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系花崗岩類の分布, 一特に小倉—田川断層帯の再評価一. 地質雑, vol. 85, p. 47-50.
- 磯 望・池田安隆(1979) 中部九州万年山周辺の万年山溶岩のフィッション・トラック年代. 第四紀研究, vol. 18, p. 165-168.
- 伊藤虎雄・八辻 昭・植木保吉(1961) 鯛生鉱床の構造規制並びに母岩の変質に就いて. 九州鉱山学会誌, vol. 29, p. 87-91.
- 岩崎岩次(1970) 火山化学. 講談社, 東京, 229p.
- 鎌田浩毅・三村弘二(1981) インプリケーションから推定される九重火山飯田火砕流の流動方向. 火山 第2集, vol. 26, p. 281-292.
- 金子史郎(1975) 火山と広域応力場. 地理, vol. 18, no. 9, p. 95-103.
- 唐木田芳文・山本博達・宮地貞憲・大島恒彦・井上保(1969) 九州の点在変成岩類の特徴と構造地質学的位置. 地質学論集, no. 4, p. 3-21.
- 笠間太郎(1953) 速見火山区の地質, 一新生代火山活動史を中心に一. 地質雑, vol. 59, p. 161-172.
- 活断層研究会編(1980) 日本の活断層, 分布図と資料. 東大出版会, 東京, 363p.
- 川上弘泰・古賀昭人・野崎秀俊(1956) 雲仙温泉の化学的研究(第1報), 雲仙温泉の概観とその化学組成. 日化誌, vol. 77, p. 1773-1776.
- 川村政和・山下幸三郎(1972) 由布院温泉の静止水頭分布. 大分県温泉調査研究会報告, no. 23, p. 30-32.
- ・山下幸三郎(1973) 由布院温泉の化学成分からみた水系とその流界. 大分県温泉調査研究会報告, no. 24, p. 7-21.
- 川野田実夫・森山善蔵(1974) 大分市塚野地区の鉱泉および地質調査報告. 大分県温泉調査研究会報告, no. 25, p. 27-30.
- 気象庁(1975) 日本活火山要覧. 119p.
- 気象庁観測部(1970) 雲仙岳. 火山機動観測実施報告, no. 6, p. 3-28.
- 吉川恭三(1972) 別府温泉の地下構造(1). 大分県温泉調査研究会報告, no. 23, p. 1-10.
- (1973) 別府温泉の地下構造(2). 大分県温泉調査研究会報告, no. 24, p. 1-6.
- ・北岡豪一・野田徹郎(1978) 庄内町の温泉調査. 大分県温泉調査研究会報告, no. 29, p. 1-15.
- ・——・——・大分県環境管理課・大分保健所(1976) 挾間町ならびにその周辺の温泉調査. 大分県温泉調査研究会報告, no. 27, p. 25-33.
- 古賀昭人・野田徹郎(1970) 別府明礬温泉の成因とその特長ある化学成分. 大分県温泉調査研究会報告, no. 21, p. 65-69.
- 久保寺章・伊藤 潔・村上寛史・三浪俊夫(1982) 爆発地震動から求めた九重火山群の深部構造. 火山 第2集, vol. 27, p. 81-95.
- ・三浪俊夫・里村幹夫・井上光吉(1976) 中部九州地区における重力測定値の収集と精密重力異常図の作成. 自然災害資料解析, vol. 3, p. 45-53.
- ・住友則彦・土居 光・田島広一・井筒屋貞勝(1968) 九重火山地域での重力測定結果と九重カルデラについて. 火山 第2集, vol. 13, p. 131-140.
- KUBOTERA, A., TAJIMA, H., SUMITOMO, N., DOI, H. and IZUTUYA, S. (1969) Gravity surveys on Aso and Kuju volcanic region, Kyushu district, Japan. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, vol. 47, p. 215-255.
- 熊本県(1963) 20万分の1熊本県地質図および同説明書. 35p.
- 熊本県衛生部(1965) 熊本県鉱泉誌. 68p.
- 熊本県衛生公害研究所(1978) 熊本県鉱泉誌, 第II巻, 159p.
- 倉沢 一・高橋 清(1963) 熊本県金峯火山岩類の

- 化学的性質. 地調月報, vol. 14, p. 364-376.
- ・———(1965) 九州雲仙火山岩の岩石学のおよび化学的性質について—島原半島火山岩類の性質を含めて—. 地調月報, vol. 16, p. 258-274.
- 九州・山口経済連合会(1974) 九州における地熱資源開発, 一九経連・地熱専門部会報告一, 78p.
- 町田 洋・新井房夫・百瀬 貢(1982) 阿蘇4火山灰の分布と層位・年代. 火山 第2集, vol. 27, p. 151-152.
- 真鍋 孝・江島康彦(1984) 八丁原地熱帯における裂か型貯留層の地質構造特性および熱水系. 地熱, vol. 21, p. 101-118.
- MATSUMOTO H. (1963) Petrological study on rocks from Aso Volcano. *Kumamoto Jour. Sci.*, ser. B, sec. 1 Geology, vol. 5, no. 2, p. 1-67.
- 松本幡郎(1974) 九重火山火砕流について. 火山 第2集, vol. 19, p. 111-119.
- 松本徑夫(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, no. 16, p. 127-139.
- (1983a) 九重火山群地質図(1:50,000). 松本徑夫・九州電力K.K.・西日本技術開発K.K.
- (1983b) 九重火山群の火山地質学的研究. 山口大学理学部地質学鉱物科学教室, 91p.
- ・坂田輝行・松尾孝一・林 正雄・山崎達雄(1973) 大分県九重火山北麓の火山地質. 九大生産科学研究報告, no. 57, p. 1-15.
- 松本唯一(1918) 由布鶴見火山群. 地質雑. vol. 25, p. 487-505.
- MATUMOTO, T. (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, vol. 19, sp. no., 57 p.
- (1963) Caldera volcanoes and Pyroclastic flows of Kyusyu. *Bull. Volcanol.*, vol. 26, p. 401-413.
- 松尾綱道(1979) 島原半島およびその周辺における地震活動, —1977年4月—1978年6月—. 九大理学部島原火山観測所報告, no. 12, p. 17-28.
- 松下久道(1968) 昭和38年9月5日の雲仙変災. 九大理学部火山温泉研究所報告, no. 4, p. 9-17.
- 三浪俊夫・久保寺章・表俊一郎・木下保美(1981) 豊肥地熱地域における地震活動. 日本地熱学会誌, vol. 3, p. 43-53.
- 宮久三千年(1960) 九州の新生代金属鉱床生成期試論. 九州鉱山学会誌, vol. 28, p. 127-140.
- 森山善蔵(1969) 別府温泉の貯湯岩層について, 付. 明礬石と沸石の産状. 九大理研報(地質), vol. 9, p. 207-217.
- 村井 勇・金子史郎(1975) 大分県中・西部の構造地形と大分県中部地震. 地震研彙報, vol. 50, p. 329-342.
- 長浜春夫・松井和典(1982) 早岐地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 55p.
- 中牟田修・下鶴大輔・灰瀬徹夫(1960) 阿蘇噴気孔温度の連続観測, 火山 第2集, vol. 4, p. 165.
- 野田徹郎(1981) <大分市内の温泉調査> 大分市内温泉の化学的特性. 大分県温泉調査研究会報告, no. 32, p. 71-77.
- (1982a) 地熱の化学探査の基礎的テクニック. 地熱エネルギー, no. 19, p. 104-119.
- (1982b) 地球化学的に見た豊肥地域の地熱構造. 日本地球化学会年會講演要旨集, 1982, p. 301-302.
- ・北岡豪一(1977) 扶間町ならびにその周辺の温泉調査(その2), 高塩分泉の化学成分. 大分県温泉調査研究会報告, no. 28, p. 31-41.
- ・古賀昭人(1973) 九重・大岳八丁原地区深部熱水の微量成分. 大分県温泉調査研究会報告, no. 24, p. 64-73.
- ・———・樽谷俊和(1975) 熊本県杖立温泉の地球化学的研究. 九大理学部島原火山温泉研究所報告, no. 10, p. 1-8.
- NORTON, D. and KNIGHT, J. (1977) Transport phenomena in hydrothermal systems: Cooling plutons. *Ame. Jour. Sci.*, vol. 277, p. 937-981.
- 小川克郎・金原啓司(1983) 地熱熱水の流動について, —豊肥地熱地域を例として—. 地学雑誌, vol. 92, p. 523-532.
- 大分県(1971) 20万分の1大分県地質図.
- (1972) 大分県の地質, 新版20万分の1大

- 分県地質図説明書, 140p.
- 大分県厚生部(1970) 大分県鉱泉誌, 468p.
- 岡口雅子(1978) 阿蘇火砕流堆積物中の黒曜石のフィッシュン・トラック年代, 火山 第2集, vol. 23, p. 231-240.
- ・大塚裕之(1980) ロノ津層群における凝灰岩層および竜石層中の安山岩のジルコンのフィッシュン・トラック年代, 第四紀研究, vol. 19, p. 75-85.
- 小野晃司(1963) 5万分の1地質図幅および同説明書, 久住, 地質調査所, 106p.
- (1984) 阿蘇火山-1 火砕流堆積物とカルデラ, Urban Kubota, no. 22, p. 42-45.
- ONO, K., KUBOTERA, A. and OTA, K. (1981) Aso Volcano. *Field Excursion Guide to Sakurajima, Kirishima and Aso Volcanoes*. Volc. Soc. Japan, p. 33-52.
- 小野晃司・曾屋龍典・三村弘二編(1981) 200万分の1地質編集図, no. 11, 日本の火山 第2版, 地質調査所.
- ・渡辺一徳(1983) 阿蘇カルデラ, 地球, vol. 5, p. 73-82.
- 太田一也(1973) 島原半島における温泉の地質学的研究, 九大理学部島原火山温泉研究所報告, no. 8, p. 1-33.
- (1975) 1975年阿蘇地方地震前後における阿蘇火山地域温泉群の泉質の比較, 1975年1月阿蘇群発地震の活動と被害に関する調査報告, p. 87-91.
- 太田良平・松野久也・西村嘉四郎(1968) 熊本県岳の湯および大分県大岳付近地質調査報告, 地調月報, vol. 19, p. 481-486.
- PARMENTIER, P. P. and HAYASHI, M. (1981) Geological model of the "Vapor-dominated" reservoir in Yunotani geothermal field, Kyushu, Japan. *Geothermal Resources Council, Transactions*, vol. 5, p. 201-204.
- SANFORD, A. R. (1959) Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, vol. 70, p. 19-51.
- 笹田政克(1984) 豊肥地域の基盤地質構造, 地熱, vol. 21, p. 1-11.
- 志賀史光(1967) くじゅう火山の温泉群, (1)化学組成より見た温泉の類型と特徴, 大分県温泉調査研究会報告, no. 18, p. 37-43.
- ・川野田実夫(1970) くじゅう火山の温泉群, (5)くじゅう北東部の炭酸泉, 大分県温泉調査研究会報告, no. 21, p. 70-77.
- SHIGENO, H. and ABE, K. (1983) B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. *Extended Abstracts of 4th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Misasa 1983*, p. 437-440.
- 茂野 博・阿部喜久男(1984) 別府一小浜地溝帯における火山性噴気・温泉地分布の規則性と熱水系モデル, 日本地熱学会昭和59年度学術講演会講演要旨集, p. 24
- 首藤次男(1953) 豊州累層群の地史学的研究(I, II), 地質雑, vol. 59, p. 225-240, 372-384.
- (1962a) 九州の最新統諸層の対比(九州の最新統の地史学的研究—III), 地質雑, vol. 68, p. 481-486.
- (1962b) 九州の最新統地史の問題点(九州の最新統の地史学的研究—IV), 地質雑, vol. 68, p. 522-536.
- (1970) 九州の下部第四系, とくにその造構造的背景について, 第四紀研究, vol. 9, p. 153-157.
- ・日高 稔(1971) 大分地方の沖積層, とくに別府湾の起源について, 九大理研報(地質), vol. 11, p. 87-104.
- SMITH, R. L. and SHOW, H. R. (1975) Igneous-related geothermal systems. *U.S. Geol. Surv. Circular*, no. 726, p. 58-83.
- and———(1978) Igneousrelated geothermal systems. *U.S. Geol. Surv. Circular*, no. 790, p. 12-17.
- 角 清愛編(1975) 200万分の1地質編集図, no. 8, 日本温泉分布図 第2版, 地質調査所.
- 諏訪兼位(1973) 中央構造線に沿う変成岩類, 一領家及び三波川変成帯一, 杉山隆三編, 中央構造線, 東海大学出版会, p. 221-238.
- 高橋 清・倉沢 一(1960) 九州多良岳火山岩および基盤岩類の岩石学的ならびに化学的性質について, 地調月報, vol. 11, p. 631-651.
- 玉生志郎・糟谷正雄(1983) 豊肥地熱地域のボーリング・コアのフィッシュン・トラック年代(その1), 地調月報, vol. 34, p. 455-469.
- 田中大生(1984) 杉乃井ホテルにおける熱水の多目

- 的利用について. 地熱エネルギー, vol. 9, p. 530-532.
- 田中耕基・江島康彦(1982) 八丁原地区 3,000 m 調査井の掘削について. 地熱エネルギー, no. 19, p. 93-103.
- 種子田定勝(1977) 雲仙火山, II. 火山の構成(地熱地帯検討の基礎). 九大理学部島原火山観測所報告, no. 11, p. 1-12.
- TAYLOR, H. P. JR. (1974) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ. Geol.*, vol. 96, p. 843-883.
- 寺岡易司(1970) 九州大野川盆地付近の白亜紀層. 地調報, no. 237, 84p.
- TRUESDELL, A. H. (1975) Geochemical techniques in exploration, Summary of section III. *Proc. 2nd U.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco* 1975, p. Iiii-Ixxix.
- 露木利貞(1960) 九州地方における温泉の地質学的研究(第1報) 先第三紀岩類を湧出母岩とする温泉. 鹿児島大学理科報告, no. 9, p. 109-121.
- (1961) 九州地方における温泉の地質学的研究(第2報) いわゆる“火山性温泉”. 鹿児島大学理科報告, no. 10, p. 65-84.
- (1962) 九州地方における温泉の地質学的研究(第4報) 火山性温泉と非火山性温泉. 鹿児島大学理科報告, no. 11, p. 59-72.
- 渡辺一徳・靱倉克幹・鶴田孝三(1979) 阿蘇カルデラ西麓の活断層群と側火口の位置. 第四紀研究, vol. 18, p. 89-101.
- WHITE, D. E. (1957a) Thermal waters of volcanic origin. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, vol. 68, p. 1637-1658.
- (1957b) Magmatic, connate, and metamorphic waters. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, vol. 68, p. 1659-1682.
- 山崎晴雄・下川浩一・水野清秀(1985) 50万分の1活構造図. 福岡. 地質調査所.
- ・杉山雄一・佃 栄吉(1984) 50万分の1活構造図. 鹿児島. 地質調査所.
- YAMASAKI, T. and HAYASHI, M. (1975) Geological background of Otake and other geothermal areas in North-Central Kyushu, Southwestern Japan. *Proc. 2nd U.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco* 1975, p. 673-684.
- 山崎達雄・林 正雄・古賀昭人・野田徹郎・福田道博(1978) 阿蘇カルデラ湯の谷地熱地域の蒸気井とその探査. 地熱, vol. 15, p. 205-216.
- YAMASAKI, T., MATSUMOTO, Y. and HAYASHI, M. (1970) The geology and hydrothermal alterations of Otake geothermal area, Kujyu Volcano Group, Kyushu, Japan. *Proof of U.N. Symp. on Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa* 1970, 18 p.
- 山科健一郎・三浪俊夫(1977) 雲仙火山地域の応力場. 火山 第2集, vol. 22, p. 13-25.
- ・村井 勇(1975) 1975年大分県中部地震. 阿蘇北部地震のメカニズムについて, とくに活断層との関係. 地震研彙報, vol. 50, p. 295-302.
- 山下幸三郎(1967) 大分県天ヶ瀬, 湯の釣温泉の水系. 大分県温泉調査研究会報告, no. 18, p. 15-18.
- 湯原浩三(1960) 内牧温泉の現況. 温泉科学, vol. 11, p. 61-71.
- (1964) 別府周辺噴気孔の噴出熱量と熱力学的性質. 大分県温泉調査研究会報告, no. 15, p. 15-25.
- (1974) 地熱地域を持たない火山の地形学的・水文学的特徴と, その潜在熱エネルギーを利用するための人工熱水系. 地熱, vol. 11, no. 3, p. 31-39.
- (1982) 火山エネルギー資源. 湯原浩三編, 地熱開発総合ハンドブック, 1109p., 富士テクノシステム K.K., p. 728-747.
- YUHARA, K., EHARA, S., KOGA, A. and HAYASHI, M. (1981) Geothermal field of Kyushu. *Field Excursion Guide to Geothermal Fields of Tohoku and Kyushu*. Volc. Soc. Japan, p. 43-66.

(受付: 1984年8月28日; 受理: 1985年10月28日)