



# 日本列島における温泉・熱水変質帯について

小松 亮 梅田 浩司

東濃地科学センター

資料番号 : 4 - 13

Hot Springs and Hydrothermal Alteration Zones in Japan

Ryo KOMATSU Koji UMEDA

Tono Geoscience Center

東濃地科学センターでは、地質環境の長期的な安定性を評価するため、火山活動や地殻変動が地質環境に及ぼす影響についての調査・研究を実施している。本研究では、日本列島における温泉と熱水変質帯の分布の特徴を明らかにするとともに、火山活動が地質環境に及ぼす影響の範囲と程度についての検討を行った。それによると、温泉の泉温から推定した高温異常域は第四紀火山の分布と整合的であること、酸性温泉は火山から数km～10km以内に分布すること、現在も熱水活動が継続している地熱変質帯は第四紀火山の近傍に生成することが明らかになった。また、火山活動の規模を示す火山周辺の熱流量と酸性温泉が分布する範囲との間、火山の総熱エネルギー放出量と地熱変質帯の面積との間には、それぞれ正の相関が認められる。

The purpose of this study is to understand the characteristics of the distribution of hot springs and hydrothermal alteration zones in Japan. The results obtained are as follows. High temperature anomalies estimated using the water temperature of hot springs are consistent with the distribution of Quaternary volcanoes. Acid hot springs are distributed within several kilometers or 10 km from some Quaternary volcanoes. Hydrothermal rock alteration zones, which are formed by the current flow of hydrothermal solution, are present near Quaternary volcanoes. The heat discharge around the volcanoes and the maximum distance from the volcano to an acid hot spring are correlated. The total of thermal energy discharge from the volcanoes and the area of hydrothermal rock alteration zones are also correlated.

キーワード

火山活動、温泉、熱水変質帯、熱流量

Volcanism, Hot Spring, Hydrothermal Alteration Zone, Heat Discharge

## 1. はじめに

地質環境の長期安定性についての研究は、地層処分の技術的信頼性に深くかかわる重要な課題となっている。我が国は変動帯に位置しており、天然現象のなかで、地震・断層活動、火山活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動が研究課題としてあげられる。

火山及びその周辺地域では、地下に存在するマグマ溜まり（熱源）から放出される熱及び揮発性物質によって、地質環境に熱的、水理学的、地球化学的な影響が及ぶことが想定される。マグマ溜まりの周辺では、マグマから放出された揮発性物質（ $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $H_2S$ 、 $HCl$ 等）が地下水に溶解するとともに、マグマから放出された熱によって地下水が加熱され浮力によって上昇する。こ

の地下水（熱水）は、温泉として地表に湧出するほか、地層中を流動する過程で岩石と化学反応を起こし、粘土鉱物等を主体とする熱水変質帯が形成される。したがって、温泉や熱水変質帯の分布のほか、温泉の湧出温度と化学組成、熱水変質の程度等の情報は、火山活動が地質環境に及ぼす影響の範囲や程度を把握するための重要な指標になると考えられる。

本研究では、日本列島における温泉及び熱水変質帯に関する情報の収集を行い、火山及びその周辺地域におけるこれらの分布やその特徴について取りまとめるとともに、火山活動の熱的ポテンシャルの一つである火山周辺の熱流量に着目した検討を行った。

## 2. 日本列島における温泉の特徴

温泉とは、一般にはその土地の年平均気温より高い水温を持つ湧水と定義される。温泉学の分野では、水温や溶存成分等が普通の水とは異なっている天然の特殊な水が地中から地表に流出する現象を広義の温泉とし、その水を温泉水と定義している。温泉は、前述のような火山活動に起因するもの（火山性温泉）のほか、堆積盆地あるいは平野の深部に貯留されている地下水が地温によって加熱されたもの（深層熱水）に区分される<sup>1)</sup>。さらに、上記2つのタイプと異なり、第三紀火山岩あるいは深成岩地帯から湧出する温泉も存在する。

### 2.1 温泉の分布と泉温

日本列島における温泉データは、「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧」<sup>2)</sup>としてまとめられており、各温泉の位置、名称、泉温（湧出温度）、湧出量、泉質などが記載されている。この中から3,838個のデータを用いて、図1に示す泉温分布図が作成されている<sup>3)</sup>。泉温は、深度情報を欠くものの、地下温度を反映していることから、図1は日本列島の地下温度を定性的に示しているといえる。

図1から高温の領域は、北海道東部（知床、屈斜路・阿寒）、北海道中央部（大雪）、北海道南西部（定山溪、ニセコ、登別、濁川）、東北脊梁山脈部（下北、八甲田、仙岩、栗駒、吾妻・安達太

良、那須、塩原、奥会津、日光白根、草津白根）、北アルプス（焼岳、黒部、妙高）、伊豆（箱根、伊豆半島～伊豆諸島）、紀伊中部（湯の峰）、山陰中部（三朝、皆生）、九州中央部（別府～島原）及び九州南部（霧島、指宿）に、それぞれ分布していることがわかる。この高温の領域は、紀伊中部（湯の峰）と山陰中部（三朝、皆生）を除いて、第四紀火山及びその周辺地域に存在しており、これらの地域に分布する温泉は、火山性温泉に属する。

新第三紀鮮新世以降の若い地層で覆われた堆積盆地（帯広、津軽、新潟、常磐、大阪、熊本など）の深部には比較的高温の温泉資源が賦存しており、深層熱水に相当する。このような地域では、1,000～2,000mの深さまで井戸を掘ることにより高温の温泉が得られる。

第三紀火山岩あるいは深成岩地帯から湧出する温泉の成因（特に熱源）については、十分には明らかにされていない。これらの温泉の地下にマグマが存在するという考え<sup>4)</sup>や、地下深部まで発達した断裂系から熱水が上昇しているとする考え<sup>5)</sup>などが提案されているが、統一的な見解は得られていない。

### 2.2 温泉水の化学組成

温泉水の化学組成は、マグマ性揮発物質（ $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $H_2S$ 、 $HCl$ 等）の寄与、水・岩石反応による $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 等の溶解の程度、起源の異なる水との混合により様々である。

今回、日本列島の第四紀火山周辺に分布する温泉水の化学的特徴を把握するため、北海道、東北、九州の温泉水の化学組成に関するデータを収集した。収集したデータは、公表文献や各県の衛生研究所発行の報告書等に記載されている温泉の化学分析値（ $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 、pH等）で、データ数は2,174個である。

#### pHの分布

東北日本の温泉水のpH分布図を図2に、九州の温泉水のpH分布図を図3に示す。これらによると、pHが4.8未満の酸性温泉（ $HCO_3^-$ が溶液中に存在するpH領域は4.8以上であり、4.8未満は自然界における実質的な酸性領域である<sup>6)</sup>）は主に第四紀火山及びその周辺地域に分布することがわかる。北海道でも同様の傾向を示す。一般に、火山周辺の酸性温泉は、マグマ起源の $H_2S$ あるいは $SO_2$ が水に溶解して生じた $SO_4^{2-}$ に富む。なお、図2において、太平洋沿岸にpHが4.8未満の酸性温泉が存在するが、これは、硫化鉱物の地下水へ

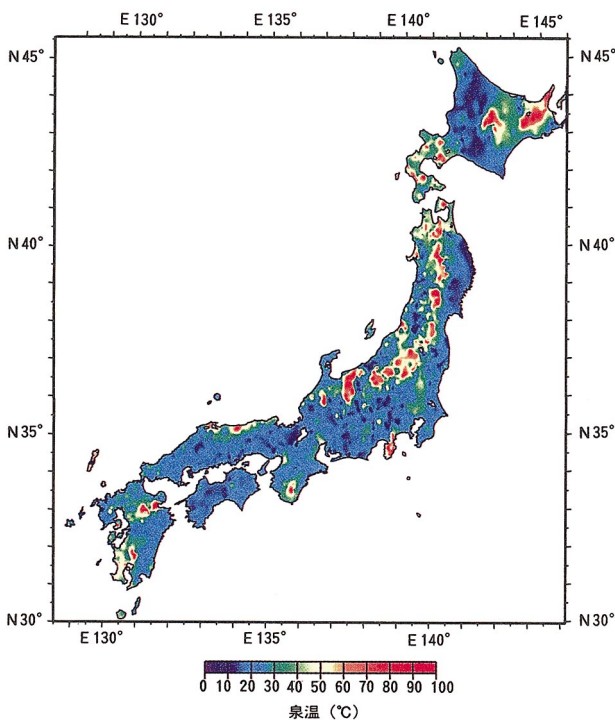


図1 日本列島の泉温分布図<sup>3)</sup>

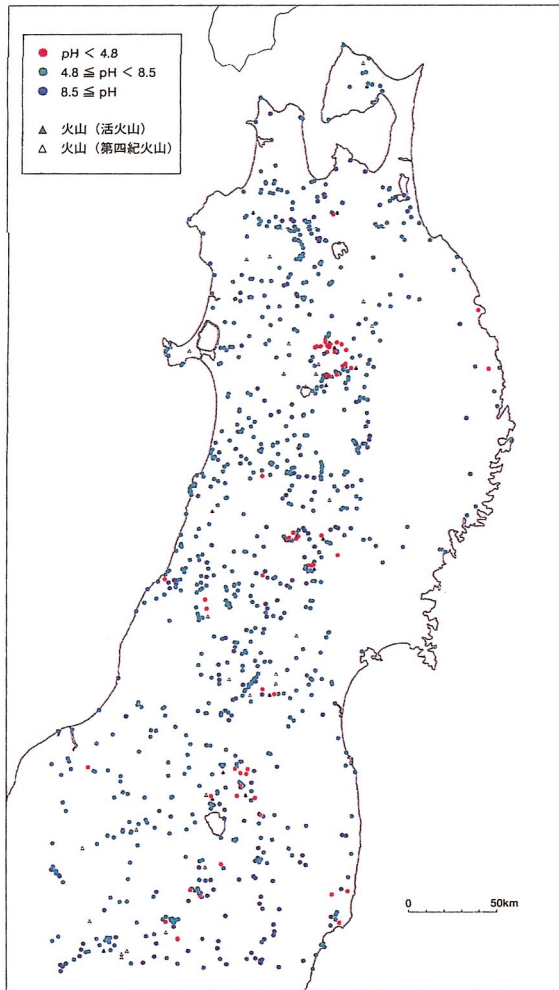


図2 東北日本の温泉水のpH分布図

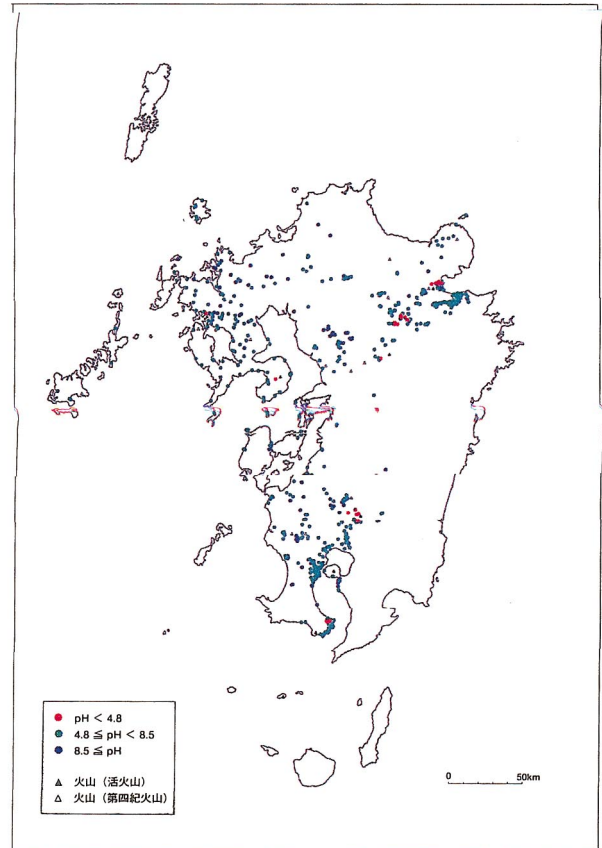


図3 九州の温泉水のpH分布図

の溶解によるものと考えられる。

次に、いくつかの第四紀火山ごとに、火山の噴出中心から温泉までの距離と温泉水のpHとの関係を検討した。阿寒、ニセコ、蔵王、九重、霧島の各火山から周辺温泉までの距離と温泉水のpHとの相関図を図4に示す。いずれの火山も噴出中心から離れるにしたがってpHの値は徐々に大きくなるが、その割合は火山によって異なることがわかる。また、pHが4.8未満の酸性温泉が存在する範囲は、火山の中心から数km～10km程度であり、10kmを超えるとpHは6～10の中性～アルカリ性を示す。

アニオンインデックスの分布

温泉水中の主要陰イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ )濃度から求められるアニオンインデックス(A.I.)は、地熱活動の中心部(自然噴気などが見られる)への近接度を表す指標として有効である<sup>7)</sup>。A.I.は、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ の組成の特徴を0から1までの数値で示したものである。

A.I.の考え方を図5に示す。地下深部まで浸透した天水(降水)は、マグマ溜まりの熱により加熱され、また、水蒸気やガスの供給を受けてNaClに富む熱水へ変化する。熱水貯留層の天井に相当する難透水層中の断裂を通じて、沸騰(気液分離)により生じた高温の水蒸気及びガス成分が地表に到達し、浅層水を加熱して温泉が生成する。このような地熱活動の中心部は、自然噴気地となっていて、昇華硫黄などの見られる酸性変質帯が発達している。地下からもたらされるガスの主成分は $\text{CO}_2$ 、次いで $\text{H}_2\text{S}$ であるが、 $\text{H}_2\text{S}$ の酸化により生じた硫酸のため温泉は酸性となり、 $\text{CO}_2$ は大気に放散する。したがって、温泉水中の陰イオンとしては、 $\text{SO}_4^{2-}$ のみが卓越する。一方、温泉水の組成は活動中心からの距離によって変化する。熱水貯留層中を側方へ流動した $\text{Cl}^-$ に富む熱水は、断裂を通じて湧出するが、活動中心から遠くなるほど、大気中の $\text{CO}_2$ が溶解した $\text{HCO}_3^-$ に富む地下水の混入率が相対的に高くなる。以上を整理すると、地熱活動の中心部から周辺に向かって順に、 $\text{SO}_4$ 型、 $\text{Cl}$ 型、 $\text{HCO}_3$ 型の温泉が湧出する。

A.I.は、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ の組成から以下の



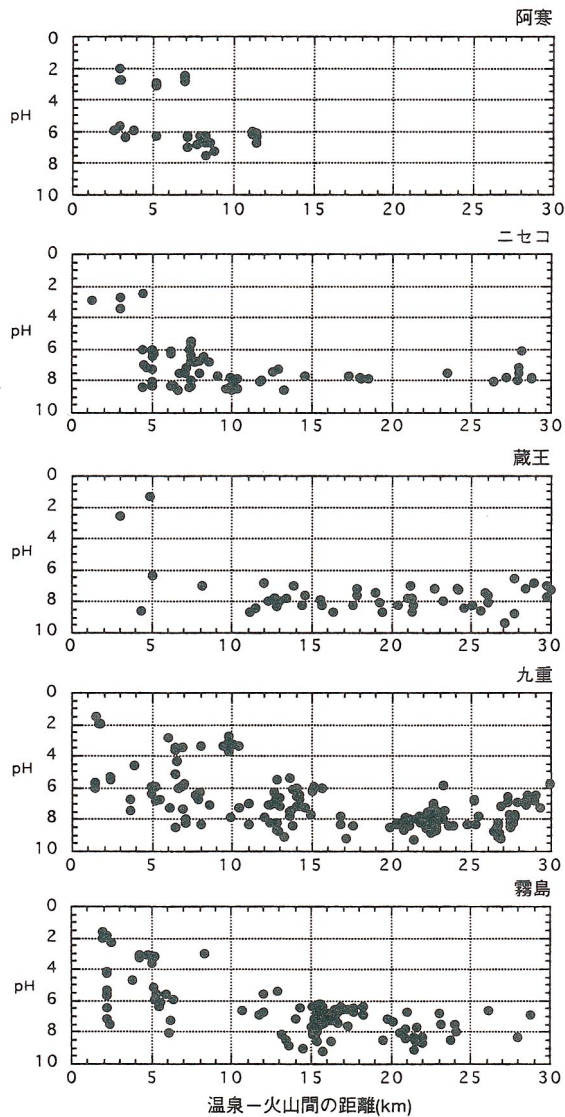


図4 温泉 - 火山間の距離と温泉水のpHとの相関図

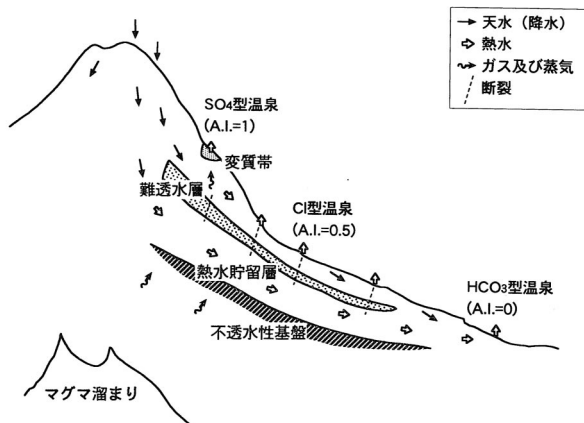


図5 地熱構造の模式図とアニオンインデックス (A.I.)<sup>7)</sup>

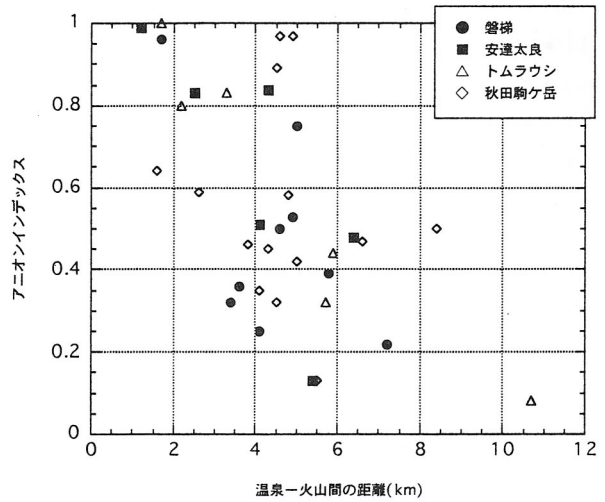


図6 温泉 - 火山間の距離とアニオンインデックスとの相関図

式で定義される。

$$A.I. = 0.5 \times \frac{SO_4^{2-}}{(Cl^- + SO_4^{2-})} + \frac{(Cl^- + SO_4^{2-})}{(Cl^- + SO_4^{2-} + HCO_3^-)}$$

(単位は当量濃度)

地熱活動の活発な噴気地帯では、 $SO_4^{2-}$ 濃度が高く、温泉水のA.I.は1に近いが、そこから遠ざかるにつれ、 $SO_4^{2-}$ 濃度に対して $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 濃度が相対的に高くなり、A.I.は低下して0に近づく。

図6に第四紀火山であるトムラウシ、安達太良、磐梯、秋田駒ヶ岳の周辺温泉のA.I.<sup>8-10)</sup>と火山から温泉までの距離の関係を示す。すべての火山で山頂から離れるにしたがってA.I.が低くなるが、低下する割合は、火山によって異なることがわかる。また、磐梯、安達太良、吾妻の各火山では、A.I.等値線が山頂付近を中心に同心円状に分布する傾向が認められている<sup>9)</sup>。

### 3. 日本列島における熱水変質帯の特徴

熱水変質作用は、地下から地表に熱水が流動する過程で岩石と化学反応を起こし、粘土鉱物や沸石鉱物、シリカ鉱物等を生じる現象である。そのため、熱水変質帯の大きさや変質の程度は、熱水変質作用の履歴を反映しており、過去の熱水活動の化石を見ているともいえる。また、鉱床の母岩では、熱水変質作用で生じたいくつかの変質帯がしばしば累帯分布を示し、中心部には酸性熱水から生成した酸性変質帯が、その周辺部には中性～アルカリ性熱水から生成した中性～アルカリ性変質帯が分布する<sup>11)</sup>。このような累帯分布を呈する理由は、マグマ性揮発物質の溶解した熱水が地表

に湧出する過程で硫酸酸性となるためである。また、累帯分布は温度にも支配されており、中心部に近いほど高温で生成した鉱物が分布する。

### 3.1 日本列島における熱水変質帯の分布

日本列島における鮮新世後期～完新世の熱水変質帯分布は、「日本の熱水変質帯分布図」<sup>12)</sup>として取りまとめられている。これらの分布は、第四紀火山の分布と整合的である。変質帯の大きさ(面積)は、最大で15km<sup>2</sup>程度であるが、多くの場合、1 km<sup>2</sup>以下である。このうち、比較的規模の大きい熱水変質帯は、洞爺、横津、八甲田、秋田焼山、八幡平、荷葉、高松、鳴子、蔵王、吾妻、安達太良、那須、草津白根、志賀、天城、由布・鶴見、九重、霧島などの地域に分布している。また、これらの変質帯には現在でも50 以上の地熱兆候が認められる地域が多く存在する。

### 3.2 東北日本における第四紀火山と熱水変質帯の分布

火山及びその周辺地域における熱水変質帯の分布やその特徴を明らかにするため、東北日本を対象に熱水変質帯の範囲、変質鉱物の種類、変質分帯、変質年代などのデータ収集と整理を行った。

東北日本の熱水変質帯分布図を図7に示す。ここでは熱水変質帯のうち、現在も熱水活動が継続しているものを地熱変質帯、一方、現在では熱水活動が終息しており第三紀の鉱床形成に伴って生成したものを鉱化変質帯として区分した。さらに、地熱変質帯と鉱化変質帯をそれぞれ、酸性変質と中性～アルカリ性変質に区分した。

図7によると、熱水変質帯は現在の火山フロント(日本列島のような島弧に沿う火山分布域の海溝寄りの縁。火山フロントより海溝側には火山が出現しない。)沿い及び西側に分布しており、東側には分布していない。恐山、八甲田、秋田焼山、八幡平、岩手、秋田駒ヶ岳、高松、蔵王、吾妻、安達太良などの第四紀火山及びその周辺には、現在も熱水活動が継続している地熱変質帯(図7の濃緑色及び濃紅色の範囲)が特徴的に分布する。これらの地熱変質帯のうち酸性変質を生じている地域は、中性～アルカリ性変質を生じている地域に取り囲まれるように分布しており、変質帯の中心部を示している。これに対して、鉱化変質帯(図7の淡緑色及び淡紅色の範囲)は新第三紀の火山岩類の分布と整合的であり、第四紀の火山周辺には分布していない。したがって、これらの地域においては、第四紀の火山活動による影響が小

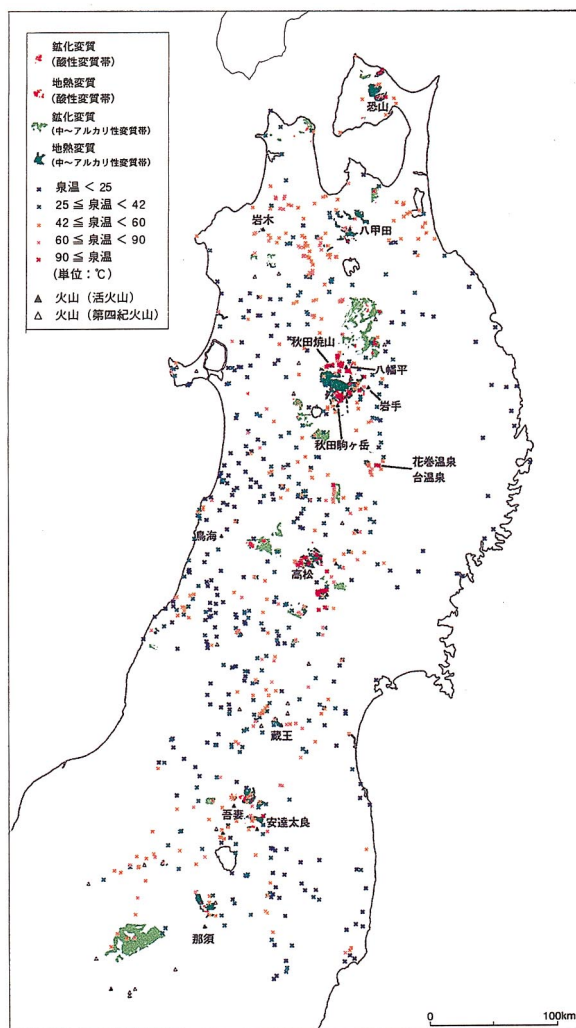


図7 東北日本の熱水変質帯分布図

さかったものと推定できる。また、岩木や鳥海等最近数十万年以降に新たに形成された火山周辺には、顕著な熱水変質帯が生成していない。これらのことから、顕著な熱水変質帯が形成されるためには数十年以上の期間を要する可能性がある。

熱水変質帯の三次元構造の例として、宮城県の細倉鉱床における変質帯断面図を図8に示す<sup>13)</sup>。細倉鉱床は、銀・鉛・亜鉛を産する鉱脈型鉱床(熱水が断層等を流動する際、熱水に溶解していた成分が鉱物として沈殿することにより、断層などを充填して生成した鉱床)で中新世後期(約600万年前)に生成したと考えられている。鉱脈が分布する範囲は、南北4 km、東西5 kmで、確認されている鉱脈は160本を超える。図8は、鉱床中央部の主要鉱脈である富士本脈周辺の熱水変質帯分布を示した断面図である。富士本脈の中心部から強変質帯のSD帯、SS帯、粘土化帯のM帯、弱変質帯のW帯の累帯分布がみられる。これらの

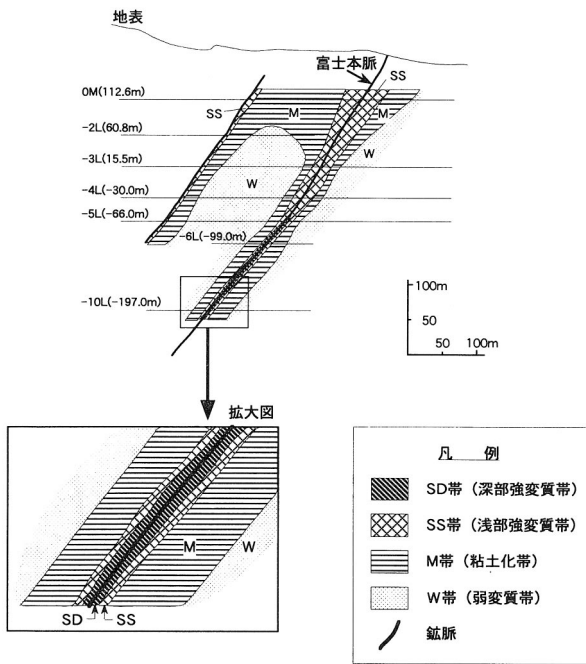


図8 細倉鉦床富士本脈周辺の熱水変質帯分布図<sup>13)</sup>

変質帯は、セリサイト、モンモリロナイト、緑泥石等の中性変質鉱物からなる。図8には示されていないが、カオリナイトで特徴づけられる酸性変質帯も小規模ながら認められる。各変質帯の生成温度は次のように推定されている。すなわち、SD帯は220～230、SS帯は200～220、M帯は170～200、W帯は170以下で、熱水活動の中心部に近いほど高温で生成したことがわかる。

### 3.3 熱水変質帯と温泉

熱水変質帯は過去から現在にかけての熱水活動によって生成したものであるのに対して、温泉の存在は現在における熱水活動を示していると考えられることができる。したがって、熱水変質帯が生成しているものの、高温の温泉が湧出していなければ、火山活動は衰退したといえる。また、熱水変質帯が生成しており、かつ高温の温泉が湧出していれば、火山活動は継続しているといえる。熱水変質帯は生成していないが、高温の温泉が湧出していれば、最近になって火山活動が始まった可能性があるといえる。このように、熱水変質帯と温泉の分布から、火山活動の大まかな変遷をとらえることができる。

図7には、熱水変質帯のほかに温泉の泉温が示されている。泉温が90以上の温泉に着目すると、その多くは現在も熱水活動が継続している地熱変質帯(図7の濃緑色及び濃紅色の部分)に分布して

いる。地熱変質帯及びその近傍に分布する温泉の泉温は90以上を示すことが多いが、鉱化変質帯及びその近傍にはこのような高温の温泉が存在することは少ない。例外的に花巻温泉、台温泉(岩手県)では90以上の高温の温泉水が湧出するが、これらの地下には潜頭性火山等の特殊な熱源が存在する可能性のあることが指摘されている<sup>14)</sup>。

## 4. 考察

2章、3章で述べたように、火山及びその周辺地域には、高温でかつ酸性の温泉や熱水変質帯(特に地熱変質帯)が分布する。これらの分布範囲やその程度はすべての火山で一様ではなく、それぞれの火山によって異なる。これらの違いが生じる原因として、放熱量、地質構造、動水勾配、涵養量等が考えられる。このうち、放熱量は火山の地下に存在するマグマ溜まり(あるいは高温岩体)の大きさや深度によって大きく異なることが考えられる。火山から放出される熱エネルギー(熱流量)は、火山周辺に分布する坑井の温度検層データをもとに推定されている<sup>15)</sup>。今回は、火山活動の熱的ポテンシャルを示す火山周辺の熱流量と酸性温泉の分布範囲及び熱水変質帯の大きさとの関係について検討した。

### 4.1 熱流量と酸性温泉の分布する範囲

図4に示したように、pHが4.8未満の酸性温泉の分布は火山の近くに限定されており、酸性温泉が存在する火山からの最大距離は、数km～10km程度である。火山活動が活発な火山ほど、熱流量が大きく、火山ガスを大量に放出し、酸性温泉が広い範囲に分布することが予想される。

Appendixに示した方法によって火山の「平均的な熱流量」<sup>15)</sup>が算出される。図4に示した火山の「平均的な熱流量」は、0.15～0.40W/m<sup>2</sup>と火山ごとに異なる。

各火山の「平均的な熱流量」と酸性温泉が分布する火山からの最大距離との関係を図9に示す。両者の間には正の相関が認められ、熱流量が大きい火山ほど酸性温泉の分布範囲が広く、地下水への地球化学的影響が大きいことがわかる。

### 4.2 熱流量と熱水変質帯の大きさ

図7に示したように、現在も熱水活動が継続している地熱変質帯(図7の濃緑色及び濃紅色の範囲)は、第四紀の火山活動と密接に関連している。前述のように熱水変質帯は、過去から現在までの熱水変質作用が繰り返されることにより生成したも



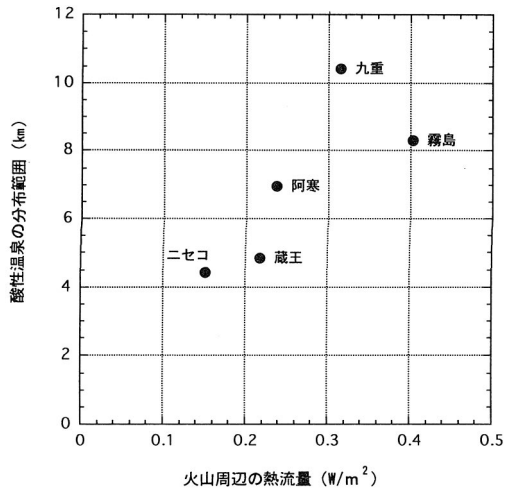


図9 火山周辺の熱流量と酸性温泉の分布範囲との関係図

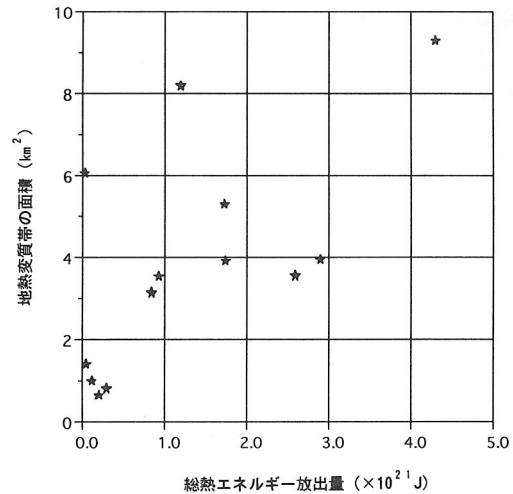


図11 総熱エネルギー放出量と地熱変質帯の面積との関係図

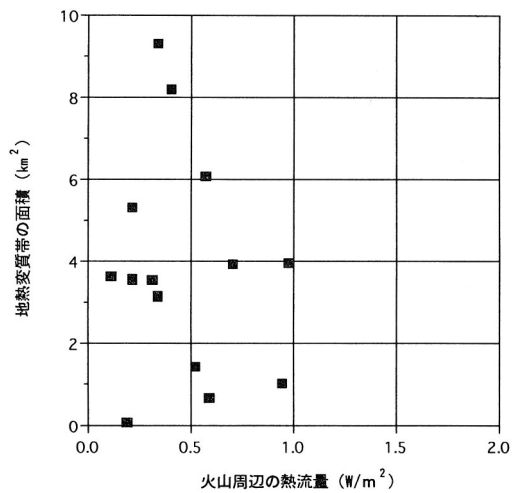


図10 火山周辺の熱流量と地熱変質帯の面積との関係図

「平均的な熱流量」算出の際の対象範囲（火山の噴出中心から半径10kmの円内）の積を総熱エネルギー放出量とした。この値と地熱変質帯の面積の関係を図11に示す。対象とした火山は図10と同様である。総熱エネルギー放出量と地熱変質帯の面積との間には正の相関が認められることから、地熱変質帯の面積は、熱流量のほか、熱水変質作用を受けていた期間が関係していることがわかる。

### 5. おわりに

日本列島における温泉及び熱水変質帯に関する情報の収集を行い、火山及びその周辺地域におけるこれらの分布やその特徴について取りまとめるとともに、火山周辺の放熱量との関係について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

のである。このことから、比較的規模の大きい変質帯は、地下からの熱流量が大きいことに加えて長期間にわたって熱水変質作用を受けていた可能性がある。

図10には、北海道、東北、九州の火山周辺に分布する地熱変質帯の面積と各火山の「平均的な熱流量」との関係を示す。地熱変質帯の面積は、地質調査所報告第270号<sup>16)</sup>をもとに求めた。各火山の「平均的な熱流量」は、梅田<sup>15)</sup>の方法によって今回計算したものである。これによると、両者の間には弱いながらも正の相関が認められる。

次に、熱水変質作用が生じていた期間内に火山から放出された熱エネルギーを求めるために、各火山の活動期間、現在の「平均的な熱流量」及び

- 1) 温泉の泉温から推定した高温異常域は、第四紀火山の分布と整合的である。
- 2) 第四紀火山の周辺に分布する温泉水のpHは噴出中心に近いほど小さく、離れるにしたがって大きくなる。また、pHが4.8未満の酸性温泉が存在する範囲は、噴出中心から数km～10km程度である。
- 3) 熱水変質帯のうち、地熱変質帯は第四紀火山の近傍に形成されるのに対して、鉱化変質帯は、第四紀火山の分布とは整合しない。また、地熱変質帯及びその近傍には90℃以上の高温の温泉が分布するが、鉱化変質帯には高温の温泉が認められない。
- 4) 火山活動の熱的ポテンシャルの指標である熱

流量と酸性温泉の分布範囲との間には正の相関が認められる。熱流量と熱水変質作用の期間を考慮した総熱エネルギー放出量及び地熱変質帯の面積との間にも正の相関が認められる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、九州大学大学院工学研究科の江原幸雄、秋田大学工学資源学部の高島 勲、東京大学地震研究所の鍵山恒臣、山野 誠、工業技術院地質調査所の松林 修、丸茂克美、矢野雄策、高橋正明の諸氏には、多数の貴重なご教示を賜った。以上の方々に深く感謝申し上げます。

## Appendix

坑井近傍の地表から放出される熱流量は、温度検層データをもとに、次の方法によって求められる<sup>15)</sup>。

上下境界面の温度がそれぞれ一定で、その間の均質媒体中に浸透流が発生している鉛直1次元の流体流動モデルにおいて、温度分布は次式で表される<sup>17)</sup>。

$$T(z) = T_0 + (T_L - T_0) \frac{\exp(-z/L) - 1}{\exp(-L/L) - 1} \quad \dots\dots\dots$$

$$= c \quad vL / K \quad \dots\dots\dots$$

ただし、

- T(z) : 深度zの温度 [ ]
- T<sub>0</sub> : 上面境界の温度 [ ]
- T<sub>L</sub> : 下面境界の温度 [ ]
- z : 上面境界からの深度 [ m ]
- L : 坑井深度 [ m ]
- c : 水の比熱 [ kJ/kg・K ]
- v : 水の密度 [ kg/m<sup>3</sup> ]
- v : 鉛直方向の流体流動速度 [ m/s ]  
(下向きが正)
- K : 岩石の熱伝導率 [ W/m・K ]

である。式は定常1次元で、伝導熱輸送量と対流熱輸送量の和が各深度で一定の考えに基づいている。深度zをz/Lで、温度T(z)を(T(z)-T<sub>0</sub>)/(T<sub>L</sub>-T<sub>0</sub>)でそれぞれ無次元化した坑井温度プロファイルは によって様々で、タイプカーブとの残差が最も小さくなる場合の をその坑井の 値とした。 が求められると、式からvが求められる。cと には蒸気表<sup>18)</sup>の値を用いた。Kは2.26W/m・Kとした<sup>19)</sup>。

ここで、上面境界(地表)における放出熱量が地下の熱源部を上昇する熱水のもつ熱量に等しい

とすると、z=0の熱流量Qは、

$$Q = K \cdot dT/dz|_{z=0} - c v (T_0 - T_{air}) \quad \dots\dots\dots$$

$$Q : \text{熱流量 [ W/m}^2 \text{ ]}$$

$$T_{air} : \text{気温 [ ]}$$

となり、 ~ 式から、

$$Q = c v ((T_L - T_0) / (\exp(-L/L) - 1) - (T_0 - T_{air})) \quad \dots\dots\dots$$

と表すことができる。

火山の噴出中心から半径10km以内に存在する各坑井の熱流量の平均値が、火山の「平均的な熱流量」として定義される<sup>15)</sup>。

## 参考文献

- 1) 落合敏郎：“温泉開発”，リーベル出版，(1993)。
- 2) 金原啓司：“日本温泉・鉱泉分布図及び一覧”，地質調査所，(1992)。
- 3) 矢野雄策，田中明子 他：“日本列島地温勾配図”，地質調査所，(1999)。
- 4) H. Wakita, Y. Sano, et al.：“High <sup>3</sup>He Emanation and Seismic Swarms Observed in a Nonvolcanic, Forearc Region”，Journal of Geophysical Research, Vol.92, p.12539 (1987)。
- 5) 大石 朗，村松容一 他：“流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討”，温泉科学，Vol.45, p.63 (1995)。
- 6) 野田徹郎，高橋正明：“地熱系に関与する起源水の地球化学的分類とその意義”，地球化学，Vol.26, p.63 (1992)。
- 7) 野田徹郎：“地熱活動の指標としてのアニオンインデックス”，日本地熱学会誌，Vol.9, p.133 (1987)。
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“平成元年度全国地熱資源総合調査(第3次) 広域熱水流動系調査十勝地域 流体地化学調査報告書要旨”，(1990)。
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“平成2年度全国地熱資源総合調査(第3次) 広域熱水流動系調査磐梯地域 流体地化学調査報告書要旨”，(1991)。
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“平成2年度全国地熱資源総合調査(第3次) 広域熱水流動系調査秋田駒地域 流体地化学調査報告書要旨”，(1991)。
- 11) 歌田 実：“鉱床母岩の変質作用”，現代鉱床学の基礎(立見辰雄編)，東京大学出版会，p.145 (1977)。
- 12) 地質調査所：“日本の熱水変質帯分布図1. 鮮新世後期 - 完新世”，1:2,000,000地質編集図19-1，(1979)。
- 13) 高橋 洋：“変質帯キャップロックの形成機構 - 細倉鉱床を事例として - ”，日本地熱学会誌，Vol.17, p.271 (1995)。
- 14) 角 清愛：“日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係”，地質調査所月報，Vol.28, p.277 (1977)。
- 15) 梅田浩司：“火山およびその周辺地域における熱流量と温泉水の化学組成”，1999年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，Sc-005 (1999)。
- 16) 金原啓司，坂口圭一：“日本の主要地熱地域の地質と温泉・変質帯分布”，地質調査所報告，No.270，(1989)。
- 17) J. D. Bredehoeft, I. S. Papadopoulos：“Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile”，Water Resource Research, Vol.1, p.325 (1965)。
- 18) 日本機械学会：“蒸気表”(1980)。
- 19) 矢野雄策，大久保泰邦 他：“坑井データに基づく日本列島の温度勾配分布図”，物理探査学会題91回学術講演会論文集，p.153 (1994)。