



## 表層電気伝導度分布から見る中部九州の温泉と火山

鍵山恒臣<sup>1)</sup>

(平成 30 年 12 月 10 日受付, 平成 30 年 12 月 21 日受理)

### Hot Springs and Volcanoes in Central Kyushu Suggested from Electrical Conductivity Distribution in the Surface Layer

Tsuneomi KAGIYAMA<sup>1)</sup>

#### Abstract

The authors carried out VLF-MT survey in Central Kyushu, especially around Aso Caldera, to clarify electrical conductivity (EC) distribution in the surface layer. In Aso Caldera, we succeeded to evaluate EC of pore water from the apparent EC in the surface layer. We also succeed to clarify the movement of hydrothermal water including magmatic gas around Aso Caldera. High conductivity in the caldera floor can be explained by mixture of rain water and hot spring waters. Around Beppu, we found close relation between high EC zone and hot spring distribution. VLF-MT survey also found high EC zones related with the active faults in the Central Kyushu; along the Oita-Kumamoto Tectonic Line, along the Yufuin Fault, etc. These evidences indicate high EC represents the zone emitting volatile components; magmatic gas or slab dehydration fluid.

Key words : Hot spring, Volcanic activity, Central Kyushu, Electrical conductivity

#### 要 旨

阿蘇カルデラおよび中部九州において、表層電気伝導度分布調査を行い、火山活動および中部九州の活構造との関係を検討した。阿蘇カルデラにおいては、表層電気伝導度と大地の空隙を占める地下水の電気伝導度との関係を明らかにすること、マグマからの揮発性成分が周囲に拡散している状況を明らかにした。別府温泉周辺では、表層電気伝導度の高い領域が構造線や温泉の分布と密接に関わっていることを明らかにした。中部九州の表層電気伝導度分布からは、活火山の周辺部においてマグマからの揮発性成分の散逸を示唆する高電気伝導度域が明ら

<sup>1)</sup> 阿蘇火山博物館 〒869-2232 熊本県阿蘇市赤水 1930-1. <sup>1)</sup> Aso Volcano Museum, 1930-1, Akamizu, Aso, Kumamoto 869-2232, Japan.

かとなったほか、大分—熊本構造線や断層に沿う領域において高電気伝導度領域が見いだされた。こうした特徴は、表層電位電導度の高い領域がマグマ性のガスやスラブ脱水流体などの揮発性成分の散逸している領域を示していると考えられる。

キーワード：温泉，火山活動，中部九州，電気伝導度

### 1. はじめに一温泉・地熱活動と火山活動との関係

温泉や地熱活動は火山活動と密接な関係があると古くから言われてきた。たとえば福富 (1970) は、当時の資料に基づいて日本の温泉の 86% は火山に関係していると指摘している。一方で、火山近傍であっても温泉が少ない場合もあり、過去には、壮年期の火山は噴火を行い、老衰期の火山は温泉や地熱活動が主となると考える研究者もいた。しかし、近年の火山活動に関する研究の成果では、火山活動には多様性があり、エネルギーをマグマ噴火によって放出する火山、地熱活動によって放出する火山を端成分とするさまざまな活動形態があると考えられるようになってきた (鍵山, 2010)。たとえば Fig. 1 に示すように、国内有数の温泉地である別府温泉の熱放出率は 400 MW 前後と推定されているが、この放熱率は 1000°C の溶融したマグマが 0°C まで完全に冷却したと仮定した場合、毎年 400 万 m<sup>3</sup> のマグマを必要とする量である。この量は、桜島が深部から毎年供給されているおよそ 1000 万 m<sup>3</sup> に匹敵する。この数値を見れば、別府地域は老衰期の火山というよりも、活発に熱エネルギーを放出し続けている火山地域であって、主として噴火によってエネルギーを放出している桜島と主として地熱活動によってエネルギーを放出している別府地域とは、その双璧に位置すると考えるべきであろう。

この熱エネルギーがどのようにまかなわれているかという点においても、過去には数 100 km<sup>3</sup> の巨大なマグマたまりが地下深部にあって徐々に冷却していると考えられていたが、最近の火山活動の研究では、数か月から数年おきに間欠的な深部からのマグマ供給を示唆する GNSS 観測の結果が明らかとなっている。地熱活動が活発な火山においても同じことが起きているとすれば、巨大な

### Diversity of volcanic activity

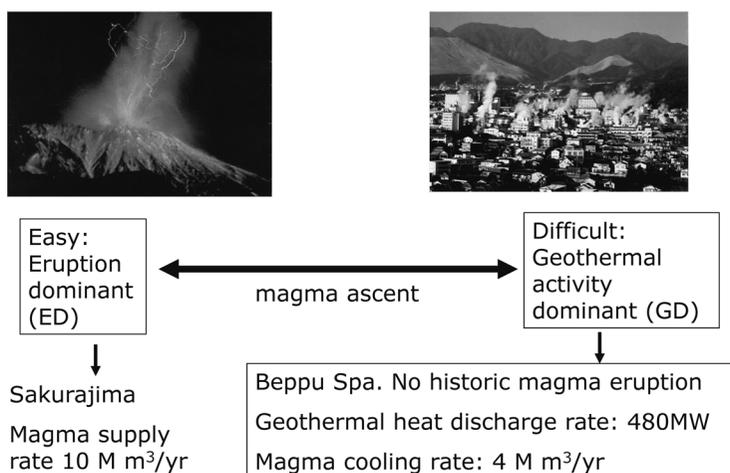


Fig. 1 Diversity of volcanic process related with eruptions and geothermal activities.

図 1 火山活動の多様性—火山噴火と地熱活動との関係。

マグマたまりは必要なくなる。温泉地においても時々地震の群発などが起きており、間欠的なマグマ供給が起きているのではないと思われる。

本稿では、こうした近年の火山活動に関する新しい知見に基づいて、火山と温泉との関係について述べることにする。

## 2. 火山活動の多様性として見る水蒸気噴火・地熱活動

多くの火山において、火山噴火の前に地震が群発したり、微動が発生したり、山体が膨張するなどの異常現象が観測されている。しかしながら、異常が起きているのに大きい噴火をしない火山や、地熱活動の異常で終わる火山など、噴火に至るまでの過程は多様である (Fig. 1)。これらの火山活動は、多くの場合、マグマの上昇が途中で停止して、マグマ中に含まれていた揮発性成分 (火山ガス) が分離上昇してきたために起きている (鍵山, 2010)。火山学は、過去に噴出していた溶岩や軽石などの固形噴出物の分析から始まった経緯があるために、火山学者は、とすれば固形成分を主体に火山活動を考えがちである。しかしながら、マグマは固形成分と揮発性成分が一体となっているものであること、固形成分と揮発性成分は常に一体となって移動するものではないことに注目すべきである。たとえば、Fig. 2 に示すように、1990 年の雲仙火山の噴火では、1990 年 11 月 17 日の噴火に先立ってマグマから分離した火山ガスが 7 月に火山体浅部に上昇して火山性微動を発生させたこと、1991 年 1 月下旬にマグマが火山体浅部に上昇してきて、より大きな水蒸気噴火を発生させ、その後のマグマ噴火につながったと考えられている (Kagiya *et al.*, 1999)。雲仙火山では、1990 年 7 月に、雲仙温泉においてマグマに由来すると思われる噴気ガス異常が検知されており、

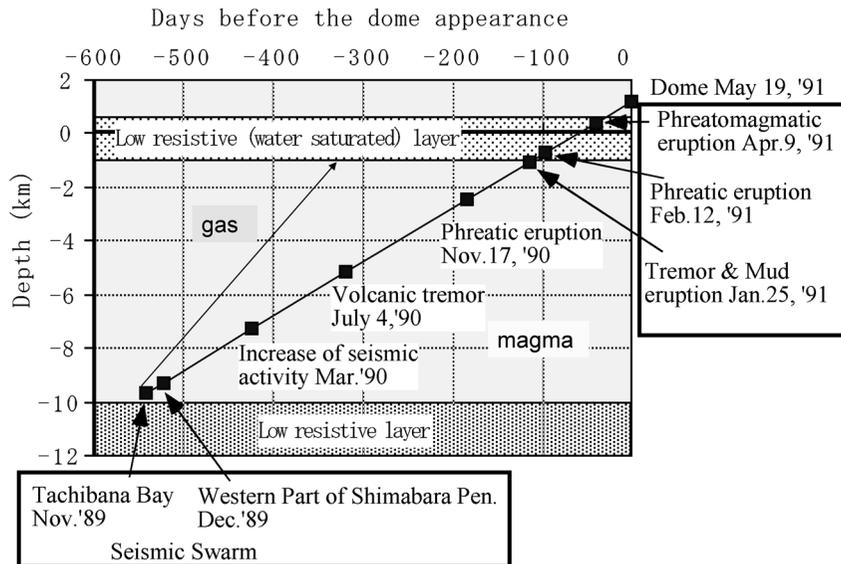


Fig. 2 Detected evidence of degassing from magma in Unzen Volcano. The change of the manor of volcanic activity was closely related with the estimated depth of the top of the magma column. In this figure, degassing from magma is needed to explain the volcanic tremor from July 1989.

図 2 雲仙火山において検知されたマグマからの脱ガスの証拠。

火山活動の様式の変化は、推定されたマグマの頭位の位置と密接に関係していたが、1989 年 7 月からの火山性微動の発生には、マグマからの脱ガスが必要であった。

上記の考え方を支持している。このことは、雲仙火山において固形成分と揮発性成分とが別々に上昇したことを示す事例である。

上記の考えを一般化すると、さまざまな火山噴火や地熱活動を下記のように並べることが可能となる。マグマの固形成分と揮発性成分とが一体となって地表まで上昇することは、マグマ噴火であって、その体積は数 100 倍に膨張する。しかし、マグマの上昇が火山体浅部（帯水層のやや下部付近）で停止し、火山ガスがマグマから分離して上昇した場合、マグマ水蒸気噴火、あるいは水蒸気噴火となる。どちらの噴火が発生したかは、噴出物を検討し、明らかにマグマに由来する新鮮な噴出物がみられる場合は、マグマ水蒸気噴火と判断されるが、そうではない場合は水蒸気噴火と判断される。しかしながら、多くの噴火では噴出した水蒸気にマグマ起源の火山ガスが含まれることが多く、少量の火山ガラスが含まれることも多い。また、マグマが深部で停止して火山ガスが上昇してきた場合には、噴火異常などの地熱活動異常が検知される。温泉活動も、この部類に属すると考えることができる。

### 3. 温泉・地熱地域および火山地域における表層電気伝導度

一般に火山周辺の地熱地域では、地下深部から供給される火山ガスが地表に噴出するとともに帯水層に付加されて周辺に拡散していると考えられている。地下水に火山ガスが付加されれば水の電気伝導度は高くなるので、周辺の大地の電気伝導度分布を調査することで熱水の広がりを捉えることが期待される。比較的浅部の大地の電気伝導度は、後述するように、母岩の電気伝導度とその空隙率、空隙を満たす水の電気伝導度によって決まるので、高い電気伝導度が測定される場所では、空隙率が大きいのか、空隙を満たす水の電気伝導度が高いか、母岩が熱変質などによって電気伝導度が高くなっているか、いずれかとなる。このように 3 つの要素による任意性は残ってしまうが、電気伝導度の高い熱水が存在すると母岩も熱変質を受けるので、多くの場合、高い電気伝導度が観測される領域は、熱水の存在を示唆している。本稿で紹介する結果は、VLF-MT 法（周波数 20 kHz 程度の人工的な電波によって誘導される電場の変化を測定することによって地表から数 10 m ～ 数 100 m の深さまでの平均的な電気伝導度を測定する手法）によっている。以下に、阿蘇カルデラおよび別府温泉地域における電気伝導度分布の特徴を紹介した後に、中部九州における電気伝導度分布の特徴を紹介する。

#### 3.1 阿蘇カルデラにおける表層電気伝導度分布

鍵山ら（2016a）は、阿蘇カルデラにおいて VLF-MT による表層電気伝導度分布調査を行い、その結果を公表している（Fig. 3）。この結果を見ると、阿蘇カルデラの電気伝導度は、カルデラ床全域で高電気伝導度（ $>100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）であり、比較的均一の値を示している。これは、カルデラ床が ASO4 のカルデラ噴火以降カルデラ湖となった後に陸地化したために湖底堆積物に覆われていることを反映している。比較的均質な電気伝導度である中で、北部カルデラ床（阿蘇谷）の内牧温泉から三重塚（本塚）にかけての地域とその西側において電気伝導度はきわめて高い値を示している。また、南部カルデラ床（南郷谷）においても阿蘇谷ほどきわだつてはいないが、東側よりも西側で電気伝導度は高くなっている。

これに対して、中央火口丘群は広い範囲で低電気伝導度であり、特に、根子岳から高岳、往生岳、杵島岳、米塚と続く領域で低電気伝導度となる。一方、中岳火口には高電気伝導度域が見られ、ここから阿蘇谷および南郷谷に向かって高電気伝導度域が伸びている。中岳火口付近の電気伝導度を詳細に調査した結果、第 1 火口から第 4 火口にいたる北北西 - 南南東方向の火口軸において最も電

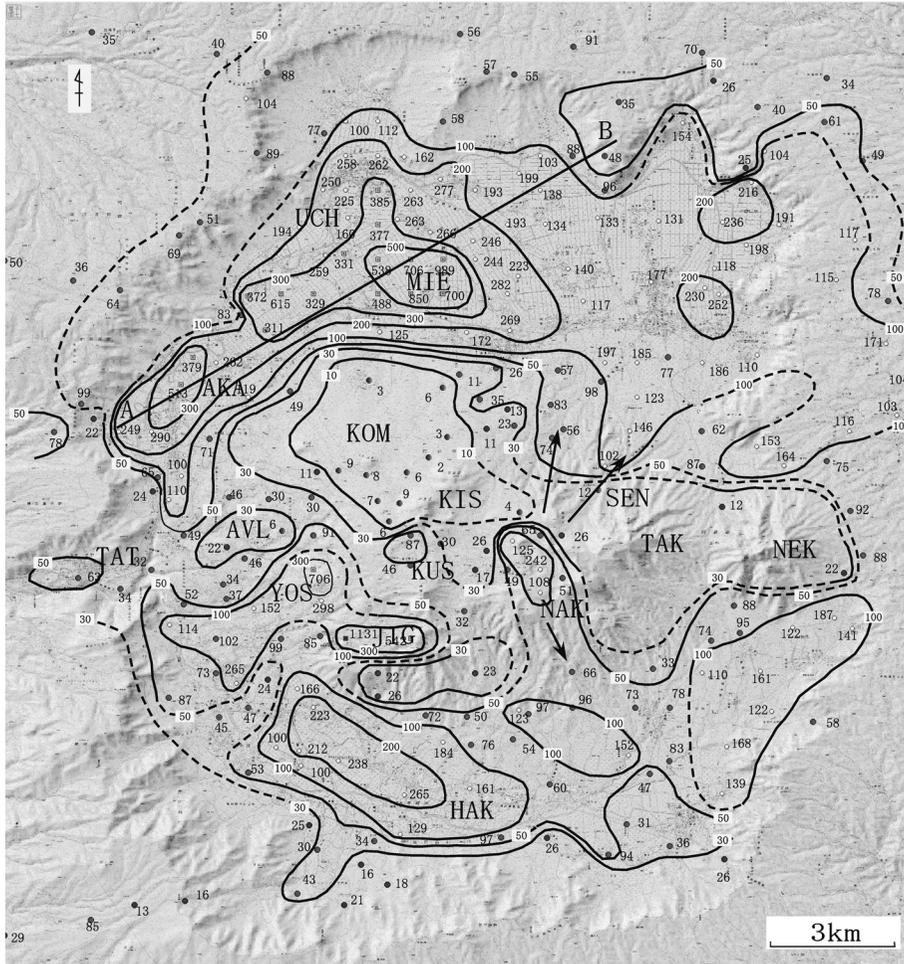


Fig. 3 Conductivity distribution in the surface layer of the Aso Caldera by VLF-MT. Unit:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . UCH : Uchinomaki, MIE : Miezuca (Honzuka), AKA : Akamizu, TAT : Tateno, AVL : Aso Volcanological Laboratory, YOS : Yoshioka, JIG : Jigoku, KUS : Kusasenri, KOM : Komezuka, KIS : Kishimadake, NAK : Nakadake, SEN : Sensuikyo, TAK : Takadake, NEK : Nekodake, HAK : Hakusui. Arrows indicate hydrothermal flow.

図 3 阿蘇カルデラにおける表層電気伝導度分布。  
単位は  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。地図はウォォ地図を使用し、カシミールで表示している。

気伝導度が高く軸から 300m 程度離れると周辺の電気伝導度にまで低下する結果が得られており、火口軸直下から供給される火山ガス成分が地下水に混入して周辺に広がっていることを示唆している(鍵山ら, 2016a)。こうしたことから、阿蘇谷および南郷谷方向に高電気伝導度域が伸びていることは、中岳火口に供給された揮発性成分が地下水として流下していることを示唆している。このほかに、草千里ヶ浜火山、地獄・垂玉温泉、湯之谷温泉・吉岡周辺において高電気伝導度域が分布している。

### 3.2 阿蘇カルデラにおける湧水の電気伝導度

カルデラ周辺に湧出する湧水および温泉水の電気伝導度を調査した結果、Table 1 に示す結果を

Table 1 Electrical conductivity of spring water in and around Aso Caldera

表 1 阿蘇カルデラにおける湧水の電気伝導度

Category	Spring Point	Electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 25°C
Spring from Caldera Rim	Gyuo	65.2
	Chino	90.0
	Ikeyama	83.9
	Kiyomizu Temple	71.1
Spring from Central Cones	Ichinomiya	299
	Yakuinbaru	307
	Shirakawa	242
Honzuka Well	Southern Part	647
	Central Part 1	3,540
	Central Part 2	2,170
Hot Spring	Uchinomaki Area	2,240
	Bochu Area	2,410
	Akamizu Area	4,050
	Choyo Area 1	2,140
	Choyo Area 2	1,050
	Choyo Area3	911
	Kugino Area 1	1,600
	Kugino Area 2	1,520
	Hakusui Area	1,570
Crater	Nakadake 1st Crater	180,000
Rain water		15.1

得た。水の電気伝導度は水温によって変化するので、25°Cにおける電気伝導度を測定している。表に示すように、カルデラ壁付近の湧水の電気伝導度は、北外輪および南外輪いずれにおいても、 $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であるのに対して、中央火口丘から流下している湧水の電気伝導度は、阿蘇谷および南郷谷いずれにおいても、 $300\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であって、かつ相対的に高い。また、カルデラ内の温泉水は、 $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ から $4000\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度となっている。こうしたことから、阿蘇カルデラにおける湧水および温泉水は、Fig. 4に示すような特徴を持っていると考えられる。この地域におよそ $15\mu\text{S}/\text{cm}$ の雨が降り、その一部は地層中を流下し湧水となる。この時、外輪山の地層中を流下する水は $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下、中央火口丘の地層中を流下する湧水は、火山ガス成分がより多く付加されるためにより高い $300\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度となると思われる。温泉水は、より深部からより多くの火山ガス成分が付加されているために高い電気伝導度になると思われる。また、本塚火山（三重塚）周辺でくみ上げられる水は、湧水温度は低いが温泉と同じ程度の高い電気伝導度を示している。特に、本塚中心部で湧出する水は、中心部から離れた場所の水よりも高い電気伝導度を示していることから、本塚火山下部から供給されていると考えられる。

なお、中岳第1火口の湯だまりについては、過去に採水して測定した結果では、 $18\text{S}/\text{m}$  ( $180,000\mu\text{S}/\text{cm}$ )を記録しており、山麓の温泉に比べて100倍程度の濃度を持っていると考えられる。

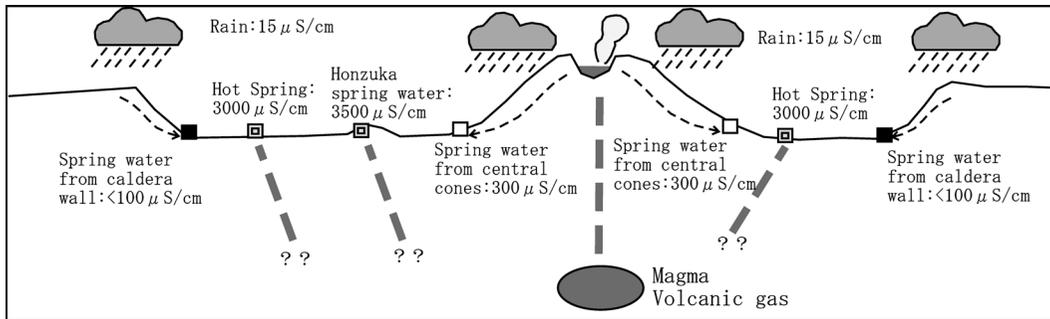


Fig. 4 Schematic model on hot spring & spring water in Aso Caldera estimated from electrical conductivity.

図 4 電気伝導度から推定される阿蘇カルデラにおける温泉水・湧水のモデル。

### 3.3 表層電気伝導度分布が示唆する阿蘇カルデラにおける地下水流動

中岳火口などの中央火口丘からカルデラ床に向けて熱水が流下している可能性があることは、3.1に示した。本節では、カルデラ床における地下水流動を検討する。阿蘇谷では、東部において均質な電気伝導度分布を示しているが、内牧－本塚（三重塚）を結ぶ線よりも西側では、電気伝導度が高くなっている。阿蘇カルデラでは、カルデラに降る雨水はカルデラ西部から外に排出されており、この線の地下深部から多量の揮発性成分が地下水に付加されて西に流動しているように思われる。Fig. 3において本塚を東北東－西南西に横切る直線に沿って表層電気伝導度の変化を調べると、本塚より東側（阿蘇谷東部）ではおよそ  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度となり、本塚付近で異常に高い値を示し、西側（阿蘇谷西部）では  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度となっていることがわかる。類似の傾向は、南郷谷においても認められる。

### 3.4 表層電気伝導度と空隙中を占める地下水の電気伝導度との関係

3.3節で示された表層電気伝導度と3.2節で示された湧水の電気伝導度から大地の空隙を占める地下水の電気伝導度を検討する。岩石の電気伝導度は、一般に以下の式で近似することが可能である。

$$C_a = C_w p + C_r (1-p)$$

ここで、 $p$  は、岩石の空隙率、 $C_a$ ,  $C_w$ ,  $C_r$  は岩石のみかけ電気伝導度、空隙を満たす水の電気伝導度、空隙を除く岩石の電気伝導度である。

上記の式に基づき、表層電気伝導度と地下水の電気伝導度との関係を検討する。阿蘇カルデラのカルデラ床はカルデラ湖の湖底堆積物からなるので、空隙率をやや大きめの20%と仮定する。岩石の電気伝導度は、 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $1 \text{k}\Omega \cdot \text{m}$ ) と仮定する。岩石が熱変質を受けている場合には、この値はもっと大きくなるが、概略の電気伝導度を検討することが目的であるので、議論には大きくは影響しない。本稿では、簡単のために外輪山から入る水の電気伝導度を  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、中央火口丘から流入していると思われる湧水の電気伝導度を、 $300 \mu\text{S}/\text{cm}$  とする。カルデラ内の温泉水の電気伝導度はばらつきが大きいが、特に地域性が認められないので  $1500 \sim 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$  と幅を持たせて考える。本塚の湧水の電気伝導度は、 $350 \text{mS}/\text{m}$  ( $3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) とする。

阿蘇谷東部では以下のような議論が可能である。  $C_a$  として実際に観測されている  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$  を実現するには、 $C_w$  はおよそ  $700 \mu\text{S}/\text{cm}$  である必要がある。この電気伝導度は、外輪から流入する水 ( $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) や中央火口丘起源の水 ( $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) でも実現することはできない。このことは、

中央火口丘起源の水だけではなく、温泉水の付加が必要であることを示している。中央火口丘起源の水と温泉水の混合物の平均電気伝導度が  $700 \mu\text{S}/\text{cm}$  となるためには、温泉水が  $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合には、温泉水：中央火口丘起源水の比が  $1:2$ 、 $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合には  $1:8$  である必要がある。

本塚周辺域では、 $C_r$  を  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $p$  を  $0.2$ 、 $C_w$  を本塚の湧水 ( $3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) とすると、計算されるみかけ電気伝導度は、 $C_a = 10 \times 0.8 + 3500 \times 0.2 = 708$  となり、実際に観測されている表層電気伝導度が  $500 \sim 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度であることを考えると整合的である。

阿蘇谷西部では以下のように考えられる。 $C_r$  および  $p$  は同様の値をとるとして、実際に観測されている  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$  を実現するには、 $C_w$  はおよそ  $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$  となる必要がある。阿蘇谷西部には、上流側の阿蘇谷東部域および本塚周辺域から本塚湧水と温泉水との混合物が流れてきており、この流体に中央火口丘起源の水が加わっていると思われる。本塚湧水と温泉水の混合流体の電気伝導度を  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度と考えると、この流体と中央火口丘起源の水との混合比を  $1:1$  とすれば、 $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$  の空隙水を作ることは可能である。

カルデラ床南部 (南郷谷) については、阿蘇谷ほど明瞭ではないが、東部においておよそ  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、西部においておよそ  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$  と見られる。阿蘇谷と同様の検討を行うと、東部については、 $C_w$  は  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度、中央火口丘起源水と温泉水との比は、 $5:1 \sim 19:1$  と計算される。西部については、 $C_w$  は  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度、中央火口丘起源水と温泉水との比は、 $0.7:1 \sim 4:1$  と計算される。

以上の検討結果では、空隙率を  $0.2$  と仮定しており、空隙率が  $0.1$  である場合には、温泉水の比率がより大きくなる可能性がある。一方、岩石の固形部分の電気伝導度は、 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  と仮定しているが、仮に岩石自体が熱変質を受けている場合には、温泉水の比率は小さくなる。また、地下水・温泉水の電気伝導度は、 $25^\circ\text{C}$  における値を使用しており、実際の温度はもう少し高くなると思われる。しかしながら、この地域に湧出する温泉は  $50^\circ\text{C}$  程度であり、基準より  $25^\circ\text{C}$  高い場合の溶液の電気伝導度は、 $50\%$  程度大きくなるだけであるため、ここでの検討結果には大きくは影響しない。ここでの検討は、こうした不確定の部分が残されているが、揮発性成分の寄与の程度をおおよそ示していると考えられる。

#### 4. 別府温泉地域

別府温泉の近くには、鶴見岳、伽藍岳などからなる火山群が存在している。この周辺において、鍵山ら (2008, 2009) が調査を行っている。その結果は、Fig. 5 に示す。顕著な特徴として、以下に示すものがある。第 1 には、伽藍岳の地熱活動中心である塚原から鍋山を経て明礬 (みょうばん) 温泉にいたる地域に  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$  以上の高電気伝導度の領域が東西に延びている。この領域の延長には噴出温度が高温である鉄輪温泉があり、鉄輪断層に対応している。この領域では比較的多数の地震の発生も見られる。また、鶴見岳東麓の朝見川断層付近において高電気伝導度領域が認められる。これらの領域は温泉・地熱活動と断層の関係が考えられる。このほかに、伽藍岳北側の別府北断層付近と鶴見岳南麓の湯布院断層付近、伽藍岳と由布岳にはさまれた地域において、 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$  には至らないが周囲よりもやや高い電気伝導度を示す領域が見られる。これらは、低地を埋積する堆積層中に地下水が多く含まれることを示している。

#### 5. 中部九州における表層電気伝導度分布の特徴

3. および 4. において、阿蘇カルデラや鶴見岳・伽藍岳周辺における表層電気伝導度分布の特徴とその意味を示した。通常、火山周辺には温泉などが分布して高電気伝導度域となっており、火山

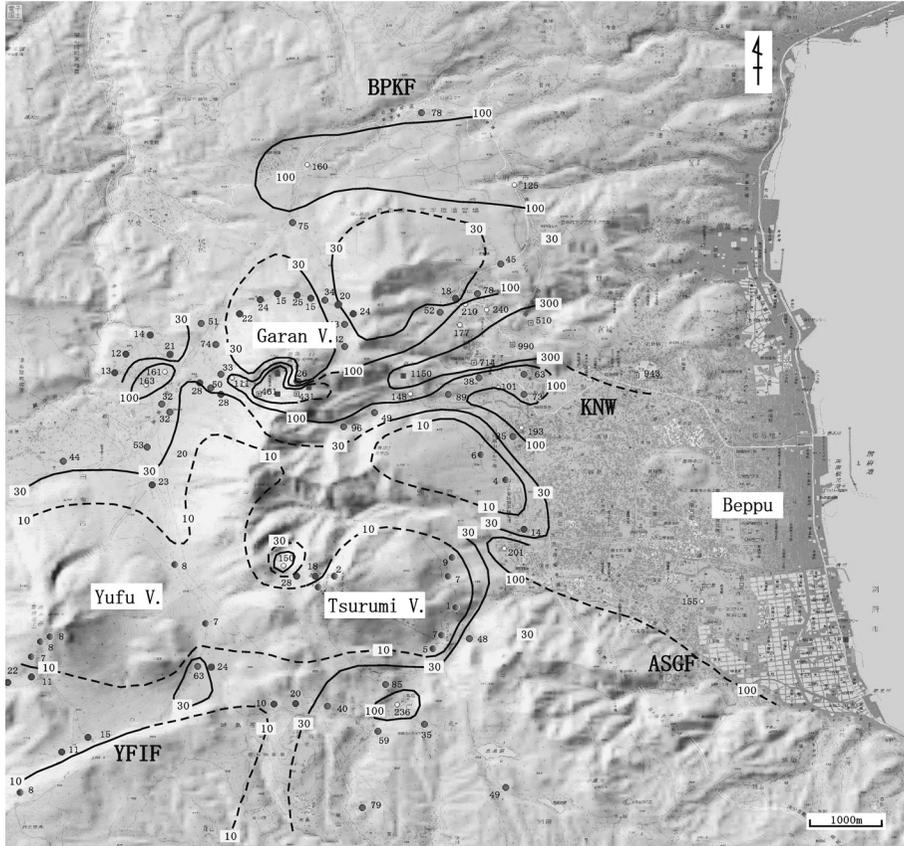


Fig. 5 Conductivity distribution in the surface layer around Tsurumi-dake and Garan-dake Volcanoes by VLF-MT. Unit :  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . BPKF : Beppu Kita Fault, KNW : Kan'nawa, ASGF : Asamigawa Fault, YFIF : Yufuin Fault, Garan V. : Garandakee Volcano, Tsurumi V. : Tsurumidake Volcano, Yufu V. : Yufudake Volcano.

図 5 鶴見岳・伽藍岳周辺の表層電気伝導度分布。  
単位は  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。地図はウォ地図を使用し、カシミールで表示している。

から離れるにしたがって電気伝導度は小さくなっていく。しかしながら熊本県内には火山とは直接関係のない地域においても温泉活動が見られる。こうしたことから、阿蘇カルデラ外の領域において電気伝導度分布がどのようになっているかを調査した。Fig. 6は、その結果を示している。緯度、経度1分ごとのメッシュ内に複数の測定値がある場合には、その平均値を示している。以下にそれぞれの地域について概略の特徴を示す。

阿蘇カルデラ内は、3.に示したように高電気伝導度域となっている。しかし、阿蘇カルデラの西側にも、 $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の領域が広がっている。この領域には活火山はないが、菊池温泉、泗水温泉、植木温泉などの温泉が点在している。高電気伝導度域の広がり、阿蘇カルデラにおける高電気伝導度域の面積に匹敵しており、阿蘇カルデラと同じ程度の高い電気伝導度を持つ地下水が存在していると考えられる。このことを説明するには、当該地域の深部から揮発性成分が供給されているか、阿蘇カルデラからの地下水の流動が起きているか、いずれかである必要がある。しかし、この地域には第四紀火山も存在しないので、阿蘇カルデラから地下水が流動しているように思われる。

また、この地域の南にあたる益城町周辺には、阿蘇カルデラ西部の立野から西南西方向に西原村

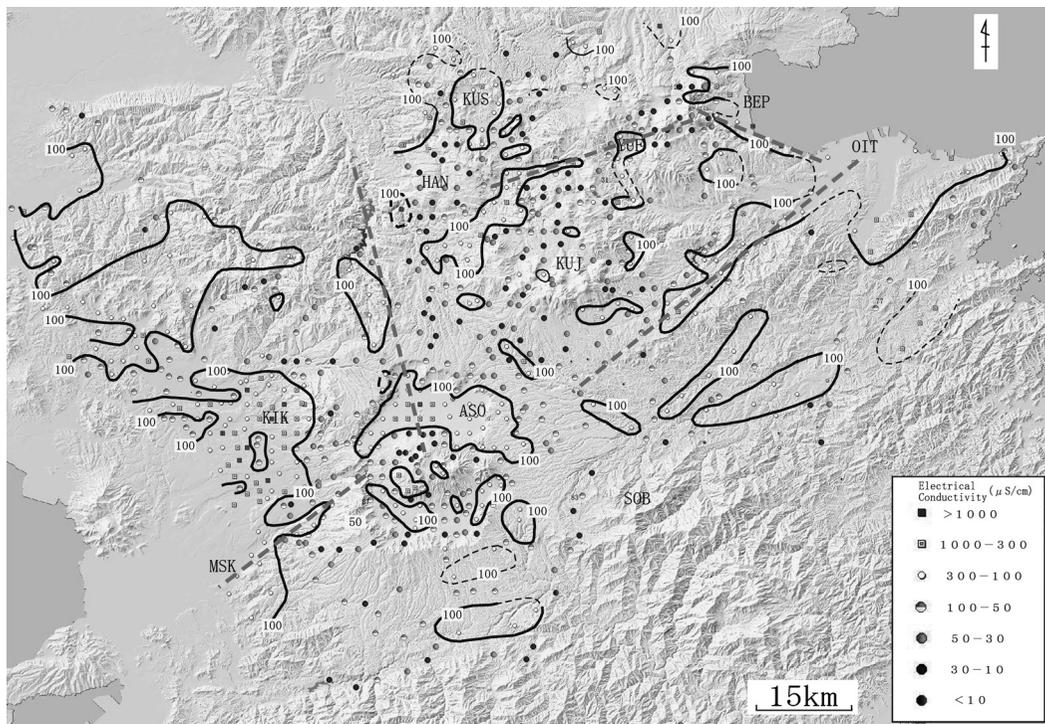


Fig. 6 Conductivity distribution in the surface layer in central Kyushu by VLF-MT. Unit:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . MSK : Mashiki, KIK : Kikuchi, ASO : Aso Caldera, SOB : Sobo, KUJ : Kuju, HAN : Haneyama, KUS : Kusu, YUF : Yufuin, BEP : Beppu, OIT : Oita.

図 6 中部九州における表層電気伝導度分布。  
単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。地図はカシミールで表示している。

を経て益城町にいたる領域で  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$  以上の高電気伝導度が見いだされている。この領域は、布田川断層にはほぼ対応している。

阿蘇カルデラの南外輪の領域は、 $100 \sim 50 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度の領域が広がっている。しかし、さらにその南では、 $30 \mu\text{S}/\text{cm}$  以下となっている。この領域は、臼杵―八代構造線以南に対応しており、同じ傾向はさらに東側の祖母山から臼杵まで続いている。この結果は、この線以南は緻密な堆積岩であるのに対して、この線以北では多孔質の火山噴出物の層が存在していることを反映しているものと考えられる。

阿蘇カルデラの東側では、 $100 \sim 50 \mu\text{S}/\text{cm}$  程度の領域が広がっているが、一部では、 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$  以上の領域が東北東方向に延びている。この領域には、長湯温泉や大分市の塚原鉱泉などが含まれており、大分―熊本構造線と一致している（鍵山ら, 2011; 鍵山ら, 2014）。大分―熊本構造線は、重力の急こう配部に対応しており、阿蘇の中央火口丘群もこの線上に位置しているので、この線がマグマやスラブ脱水流体の通路となっている可能性がある。また、大分―熊本構造線と臼杵―八代構造線との間の領域は、堆積岩と阿蘇の火砕流堆積物に覆われているが、電気伝導度分布は必ずしも均質ではなく、大野川流域や三重町から臼杵市に抜ける領域の電気伝導度は高くなっている。こうした分布は、四国の中央構造線の西の延長にあたる地域における変動が単一に起きているのではなく、いくつかのブロックに分割されつつ異なる時間的経緯で形成されている可能性を示している。大分―熊本構造線以北の領域においても、別府温泉南部の朝見川断層から由布院断層を経て九

重町の野上川流域—玖珠町—天ヶ瀬温泉に続く領域に高電気伝導度が見られる（鍵山ら，2014；鍵山ら，2016b）。

阿蘇カルデラの北側では，100～50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  程度の領域が広がっているが，小国町の一部では，100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以上の領域が北北西方向に延びている。この領域は，阿蘇カルデラ内に見いだされた本塚—内牧温泉の延長上にあり，豊肥火山地域西縁にも対応しているので，なんらかの構造が存在する可能性がある。

## 6. おわりに

本稿は，著者が京都大学理学研究科地球熱学研究施設在職中に行った調査研究をまとめたものである。表層電気伝導度の調査は，探査深度が数 m から 100 m 程度と浅いが，短時間に多数の点での測定が可能であること，多少の電磁気ノイズであっても測定が可能であることから，基礎調査としての役割は十分に果たせたと思われる。火山体からどの範囲にどれくらいの揮発性成分が散逸しているか，揮発性成分の散逸と活構造とがどのように関わっているかを見ることが可能であることがわかった。こうした調査がより広範囲に行われること，より深部までの構造を明らかにする研究に続くことを期待したい。

## 謝 辞

本稿に関わる調査研究を実施するにあたり，京都大学理学研究科地球熱学研究施設の研究者，職員に多大なご協力をいただいた。大分県温泉調査研究会には，資料の収集および検討において，示唆に富む多くの知見をいただいた。日本温泉科学会において，本稿の公表および講演を行う機会を与えていただいた由佐京都大学名誉教授，学会関係各位に謝意を表します。

## 引用文献

- 福富孝治 (1970) : 本邦における温泉分布から見た温泉の熱の起源，北海道大学地球物理学研究報告，**23**，15-28.
- Kagiya, T., Utada, H. and Yamamoto, T. (1999) : Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 35-42.
- 鍵山恒臣，宇津木 充，吉川 慎，寺田暁彦 (2008) : 伽藍岳・塚原の地熱活動の周辺域への広がりに関する調査，大分県温泉調査研究会報告，**59**，35-39.
- 鍵山恒臣，宇津木 充，吉川 慎，井上寛之 (2009) : 鶴見岳・伽藍岳の噴気活動と表層の電気伝導度分布に関する調査，大分県温泉調査研究会報告，**60**，3-6.
- 鍵山恒臣 (2010) : カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望，地質学雑誌，**116**，463-472.
- 鍵山恒臣，吉川 慎 (2011) : 長湯温泉周辺の表層電気伝導度分布，大分県温泉調査研究会報告，**62**，9-12.
- 鍵山恒臣，宇津木 充，吉川 慎 (2014) : 大分県九重町周辺の表層電気伝導度分布，大分県温泉調査研究会報告，**65**，51-56.
- 鍵山恒臣，吉川 慎，宇津木 充 (2016a) : 阿蘇カルデラ周辺の表層電気伝導度分布，京都大学防災研究所年報，**59B**，84-91.
- 鍵山恒臣，宇津木 充，吉川 慎 (2016b) : 大分県万年山周辺の表層電気伝導度分布，大分県温泉調査研究会報告，**67**，41-46.

(日本温泉科学会 2018 年 9 月 7 日講演)