

## 阿蘇カルデラ周辺の表層電気伝導度分布

### Conductivity Distribution of the Surface Layer around Aso Caldera

鍵山恒臣<sup>(1)</sup>・吉川慎<sup>(1)</sup>・宇津木充<sup>(1)</sup>

Tsuneomi KAGIYAMA<sup>(1)</sup>, Shin YOSHIKAWA<sup>(1)</sup> and Mitsuru UTSUGI<sup>(1)</sup>

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

#### Synopsis

The authors carried out VLF-MT survey in and around Aso Caldera. Conductivity distribution within the Aso Caldera shows two typical features; caldera floor has almost homogeneous and high conductivity ( $> 100\mu\text{S}/\text{cm}$ ), while the post caldera cones show wide range. Most cones have lower conductivity ( $< 30\mu\text{S}/\text{cm}$ ), except around Naka-dake Craters and western flank of post caldera cones ( $> 300\mu\text{S}/\text{cm}$ ). In the northern caldera floor, extremely high conductivity ( $> 500\mu\text{S}/\text{cm}$ ) was found along the NNW-SSE line from Uchinomaki to Mietsuka. This indicates hydrothermal water is supplied along this line. High conductivity in the caldera floor can be explained by mixture of rain water and hot spring waters. Emission rate of  $\text{SO}_2$  by hot springs is estimated 32,000 t/yr. This value is 18% of the emission rate by fumaroles in the Naka-dake Crater. Most of high conductivity areas around Aso Caldera correspond tectonic fault.

**キーワード:** 阿蘇カルデラ, 電気伝導度分布, 熱水活動

**Keywords:** Aso Caldera, distribution of electrical conductivity, hydrothermal activity

#### 1. はじめに

火山の活動形態が爆発的になるか、非爆発的になるか、あるいは噴火をすることなく地熱活動の活発化のみで終わるかは、マグマ中に含まれる揮発性成分の量比に大きく依存しており、とりわけマグマからの脱ガスが大きく影響していると考えられている。揮発性成分が地下水に溶けるとその電気伝導度は高くなるので、地下の電気伝導度分布を知ることは脱ガスの程度を知るうえで有効な方法と考えられる。阿蘇カルデラは、中岳火口に湯だまりを有し、火山活動の消長に応じてその状態が変化することが知られている。また、火口内における赤熱現象などが起きて、ただちにマグマ噴火につながらないとか、

水蒸気噴火で終わることが多いことも重要な特徴である。こうした特徴は、マグマからの脱ガスを反映したものである可能性が高く、阿蘇火山における揮発性成分の動態に興味を持たれる。また、内牧温泉、湯之谷温泉など、カルデラ内に存在する温泉の熱源と阿蘇の火山活動を維持しているマグマとの関係も興味をもたれる。こうしたことから、阿蘇カルデラおよびその周辺域においてVLF-MTによる表層電気伝導度分布の調査を実施した。以下にその概要を述べる。

#### 2. 調査の概要

調査は、主として阿蘇カルデラ内を対象とし、必

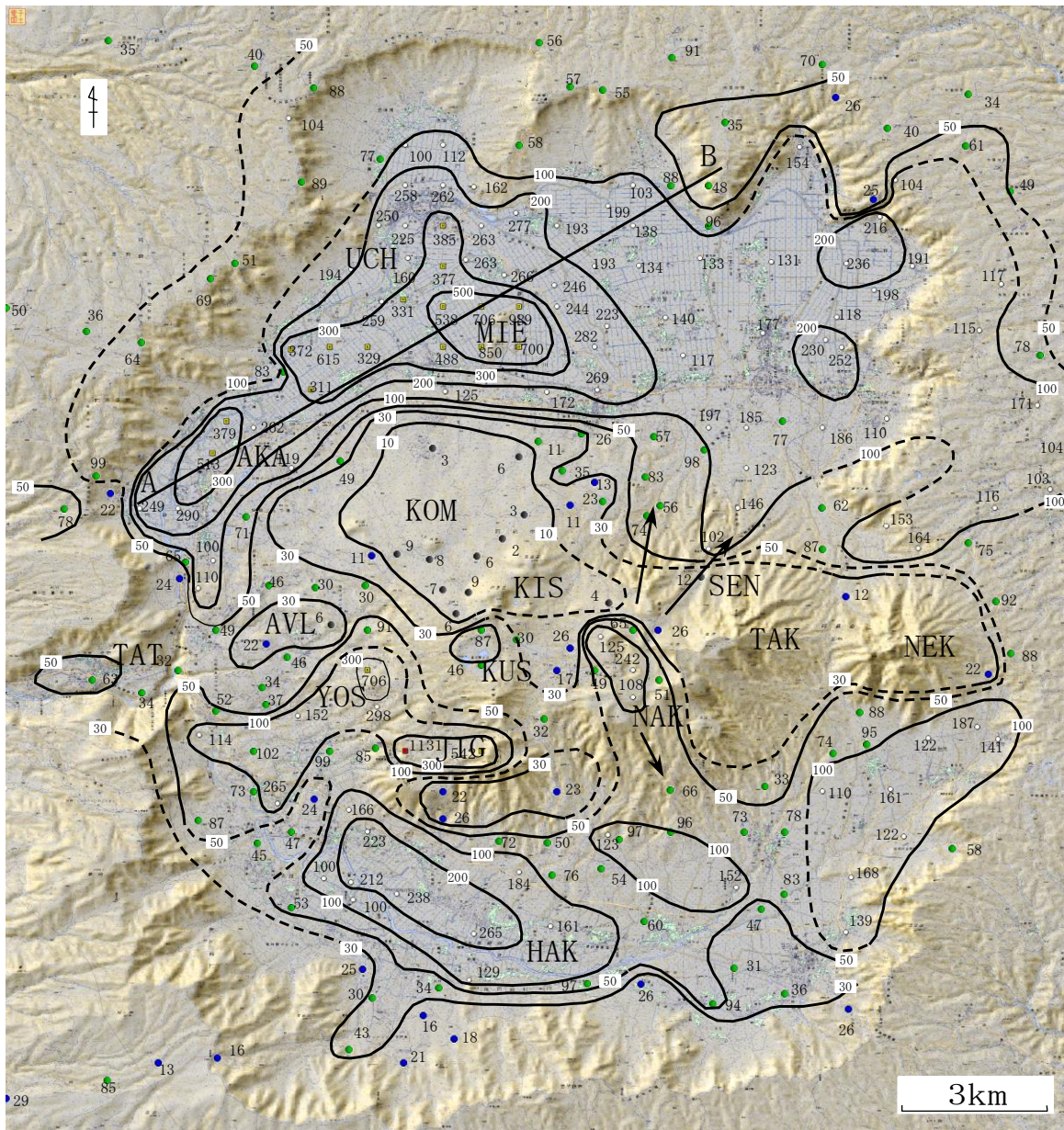


Fig.1 Conductivity distribution in the surface layer of the Aso Caldera by VLF-MT. Unit:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . UCH: Uchinomaki, MIE: Mietsuka, AKA: Alamizu, TAT: Tateno, AVL: Aso Volcanological Laboratoru, YOS: Yoshioka, JIG: Jigoku, KUS: Kusasenri, KOM: Komezuka, KIS: Kishimadake, NAK: Nakadake, SEN: Sensuikyo, TAK: Takadake, NEK: Nekodake, HAK: Hakusui. Arrows indicate hydrothermal flow. AB indicates the line for conductivity profile.

要に応じてカルデラ外についても調査を行った。また、中岳火口、内牧温泉周辺については、より詳細な調査を行った。本論文に表示する電気伝導度分布は、中岳火口および内牧温泉等の狭い領域およびカルデラなどの広域を対象とする図において、必要に応じて緯度経度2秒、10秒、30秒、1分のメッシュ内において計算される平均値を使用している。

VLF-MT調査は主として宮崎県えびの市のVLF送信所から送出される電波(22.2kHz)を利用し、えびの送信所の電波が休止中は、オーストラリアの送信

所の電波(19.8kHz)を利用した。利用する電波の周波数の差異による影響は、本論文の要求している精度の範囲内に収まっている。

### 3. 阿蘇カルデラ内における表層電気伝導度分布

Fig.1に阿蘇カルデラ内における表層電気伝導度分布を示す。緯度、経度、30秒ごとのメッシュ内に複数の測定値がある場合は、その平均値を示している。



阿蘇カルデラ内の表層電気伝導度は大きく2つに大別される。カルデラ床である阿蘇谷・南郷谷では、 $100 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度を示し、かつ比較的均質である。一方、中央火口丘群はそれ以下の低電気伝導度域となっている。この結果は、カルデラ床が過去にカルデラ湖を形成しており、地下水が豊富であることを反映しているのに対して、火口丘群では、緻密な溶岩や空隙の多いスコリアなどで覆われているためと思われる。以下に、それぞれの地域について詳述する。

### 3.1 中央火口丘群の特徴

火口丘群は全般に低電気伝導度であるが、個々の火口丘ごとに異なる特徴を持っている。中岳（火口近傍を除く）や北西に位置する米塚、杵島岳など、東に位置する高岳、根子岳などでは $30 \mu\text{S/cm}$ 以下となっている一方、中岳の西に位置する草千里ヶ浜火山（草千里）では $30 \mu\text{S/cm}$ 以上となっている。また、西部の吉岡や湯之谷、地獄・垂玉などの温泉地周辺では、 $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度域となっている。中岳も次節において詳述するが、周辺部が低電気伝導度であるのに対して、火口のごく近傍では $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度となっている。また、中岳の北側山麓では、仙酔峡から一宮付近にかけて、米塚や杵島岳の北側山麓に比べると相対的に高い電気伝導度となっている。同様の傾向は、中岳から南側の白水方向にかけて見られるほか、湯之谷、地獄・垂玉の温泉地域から南西方向にも高電気伝導度域が伸びている。

### 3.2 中岳周辺における特徴

中岳周辺の調査結果は、Fig. 2に示す。緯度、経度2秒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。中岳には、第1～第4火口が北からほぼ直線的に並び、さらに、第4火口の周囲に、より小さな第5～第7火口が付随している。このうち、第1火口は、現在も活動中であり、湯だまりの消長と噴火を繰り返している。第2～第4火口は、現在は活動していないが、1930年代には、第1火口とともに噴火を行っている。また、第4火口には、多雨季に水たまりが出現する。

第1火口および第2火口は、火口西側のみの測定となったが、火口から離れた地点では広い範囲で $30 \mu\text{S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示し、火口に近づくにつれて電気伝導度が高くなり、 $300 \mu\text{S/cm}$ 以上となっている。第3火口および第4火口でも、火口内において $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度を示し、火口から離れるにつれて低下する傾向がみられた。第4火口の南側では、碎屑丘の部分で、 $30 \mu\text{S/cm}$ 以下の低電気伝導

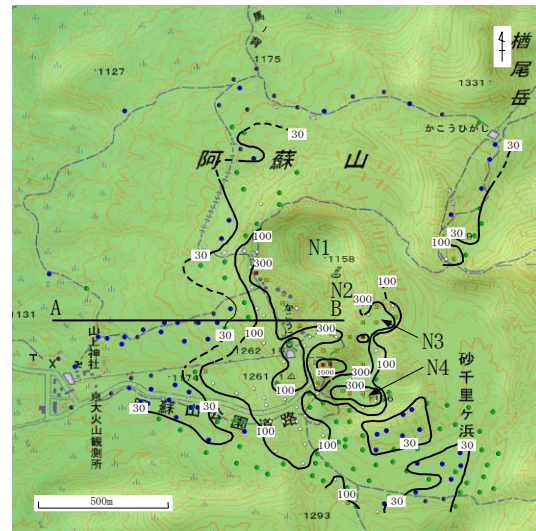


Fig. 2 Conductivity distribution in the surface layer around the Nakadake Craters. N1: 1st Crater, N2: 2nd Crater, N3: 3rd Crater, N4: 4th Crater. AB indicates the line for conductivity profile. Unit:  $\mu\text{S/cm}$

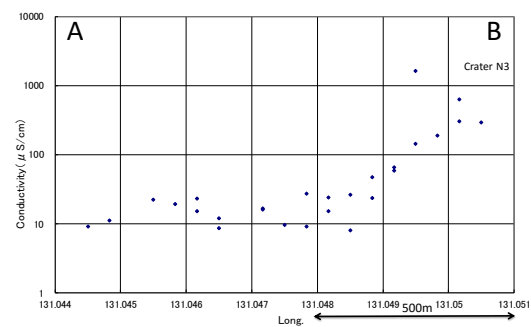


Fig. 3 Conductivity distribution along the line AB in Figure 2. High conductivity is observed within 500 m from the crater center.

度、それ以外の部分では、 $100 \mu\text{S/cm}$ 以下を示している。

以上の分布をまとめて概観すると、以下のような特徴がある。 $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度領域は、第1火口、第4火口ともに、火口の西縁より火口側となっている。これに対して、第3火口では、火口外の西側に高電気伝導度領域が見られる。しかし、この領域は、第1火口と第4火口の西縁を結ぶ線よりも東側に限られている。このことは、第3火口を開ける爆発の規模が小さかったために本来はより大きな第3火口の西部となるべき領域が爆発することなくそのままに残されたと考えると整合的である。実際の火口の地形とは別に、第1火口と第4火口の西縁を結ぶ北北西－東南東の線と、これに平行な火口の東縁を結ぶ線に挟まれた矩形の領域が、火口列を形成していると、電気伝導度分布から解釈される。この領域

は、超長周期微動を発生させていると考えられているクラック状火道と一致している。

この矩形の火口領域周辺の電気伝導度分布には、以下の特徴が見られる。Fig. 3は、火口列を東西に横切る線AB上における電気伝導度のプロファイルを示している。この図を見ると、火口列の中心Bからおよそ500mの範囲で電気伝導度が高くなり、それ以外では、 $10 \mu\text{S/cm}$ 程度の低電気伝導度となっている。火口列の東側については、測定値が不足しているため断言はできないが、ほぼ同じことが言えると考えている。一方、火口列の南北方向に注目すると、北側は、第1火口の火口壁からさらに300m北側で $30 \mu\text{S/cm}$ 以下となっている。この場所は、中岳の現火口列の外側に見られる爆裂火口の外壁に対応している。また、火口列の南側でも、第4火口の火口壁からさらに300m南側で $30 \mu\text{S/cm}$ 以下となっている。この場所も、中岳の現火口列の外側に見られる爆裂火口の外壁に対応している。

こうした事実から、実質的な現火口列を示す矩形領域内において、 $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度、矩形領域の東西100m、南北300m程度外側の領域まで本来の低電気伝導度（ $30 \mu\text{S/cm}$ 以下）よりも高い電気伝導度となっていることがわかる。この領域は、現火口列が生成される以前に存在した爆裂火口の内側に対応しているように思われる。

### 3.3 カルデラ床の電気伝導度分布

カルデラ床の電気伝導度分布は、南北でやや異なる特徴を持っている。北側カルデラ床である阿蘇谷では、ほぼ全域で高電気伝導度を示すが、その東部（内牧温泉から三重塚を結ぶ線より東側）では、全域が $100 \mu\text{S/cm} \sim 200 \mu\text{S/cm}$ とほぼ均質な電気伝導度であるのに対して、この線よりも西側では $300 \mu\text{S/cm}$ 以上を示している。特に、内牧-三重塚の領域と赤水温泉周辺では、 $500 \mu\text{S/cm}$ 以上のきわめて高い電気伝導度となっている。阿蘇カルデラの河川水は西側にのみ流出しており、上記の特徴は、カルデラ内に降った雨が、地下浅部において西向きの地下水流動を引き起こしている中で、内牧-三重塚の地下において揮発性成分を放出する線状の供給源が存在していることを示唆している。

一方、南側のカルデラ床である南郷谷については、阿蘇谷ほど明瞭ではないが、東部で $100 \mu\text{S/cm}$ 程度を示し、白水湧水から西側では、 $200 \mu\text{S/cm}$ 以上を示している。このことは、カルデラ南部でも西向きの地下水流動が存在していることが推定される。また、地獄・垂玉温泉および吉岡・湯之谷温泉からカルデラ床に向けて電気伝導度の高い領域が延びていることも明らかとなった。

### 3.4 内牧-三重塚周辺の電気伝導度分布

内牧温泉は、阿蘇カルデラ内において最も大きな放熱率を持つ温泉であり、阿蘇カルデラの北外輪がやや後退した湾入と呼ばれる部分の南端に位置している。Fig. 4に電気伝導度分布を示す。緯度、経度2秒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。カルデラ床は、 $100 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度域となっているが、内牧温泉は $300 \mu\text{S/cm}$ 以上と、特に高い電気伝導度となっている。温泉街の中央部には、東北東-西南西方向に川が流れており、この川に沿う地域において $500 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度となっている。この領域は、特に泉

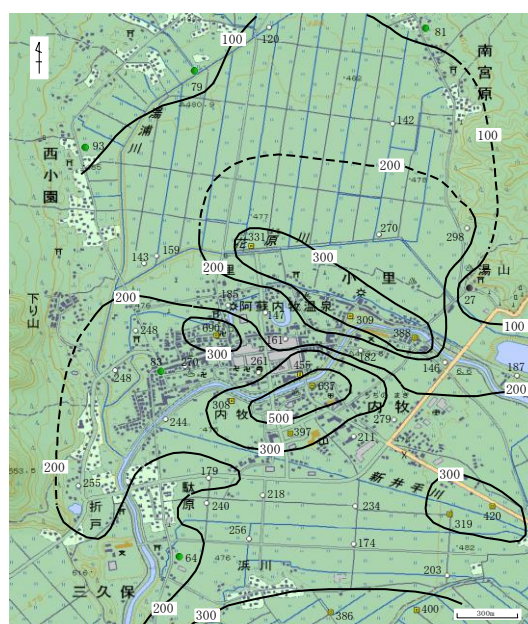


Fig. 4 Conductivity distribution in the surface layer around Uchinomaki Hot Spring. Unit:  $\mu\text{S/cm}$ .

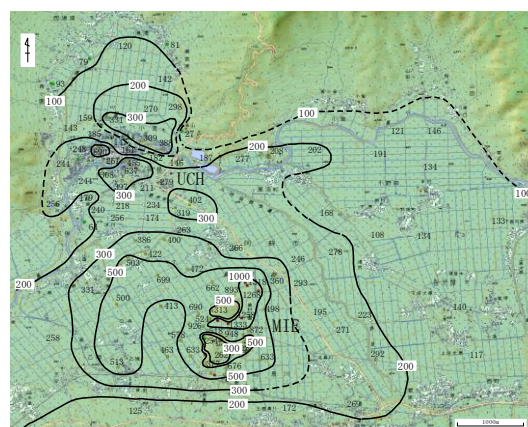


Fig. 5 Conductivity distribution in the surface layer around Uchinomaki-Mietsuka. Unit:  $\mu\text{S/cm}$ .



温の高い温泉の分布域と一致している。また、この地域の北や南にも $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の電気伝導度域が分布している。東北東-西南西の方向は、1975年に発生した阿蘇北部の群発地震活動の震源域の伸びの方向と一致しており、なんらかの構造線が走っている可能性も考えられる。

Fig. 5は、内牧温泉の南側に位置する三重塚（およそ4万年前に噴火した後カルデラ火山）も含んだより広域における電気伝導度分布を示している。緯度、経度10秒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。この図を見ると、北部カルデラ床東部は、 $100 \mu\text{S/cm} \sim 200 \mu\text{S/cm}$ の比較的均質な高電気伝導度域となっているが、内牧温泉および三重塚を結ぶ線より西側は $300 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度域となっている。特に、内牧および三重塚周辺では $500 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度域となっている。三重塚周辺で揚水される水の電気伝導度は $354 \text{ mS/m}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) であり、内牧温泉の温泉水の電気伝導度 $224 \text{ mS/m}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) よりも高い値であるが、水温が低いため温泉として利用されていない。しかしながら、高い電気伝導度であることから、なんらかの揮発性成分が地下から供給されていると推測される。内牧から三重塚を結ぶ線の延長には中岳が位置しており、なんらかの構造があるのかもしれない。上記の特徴や内牧温泉の高電気伝導度領域の西南

西-東北東方向の伸びが、温泉の並びや阿蘇カルデラ北部の地震活動の並びに一致することなどは、内牧温泉・三重塚の熱水・地下水が構造線に規定されていることを示唆している。

#### 4. 阿蘇カルデラ周辺（中部九州）における電気伝導度分布

上記において阿蘇カルデラ内の電気伝導度分布の特徴を示した。通常、火山周辺には温泉などが分布しているが、火山から離れるにしたがって温泉活動は小さくなっていくように思われる。しかしながら熊本県内には火山とは直接関係のなさそうな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分けて結果を示す。

阿蘇カルデラの西側には、 $100 \mu\text{S/cm}$ 以上の領域が伸びている。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広がりには匹敵しており、この地域の深部から揮発性成分が供給されているか、阿蘇カ

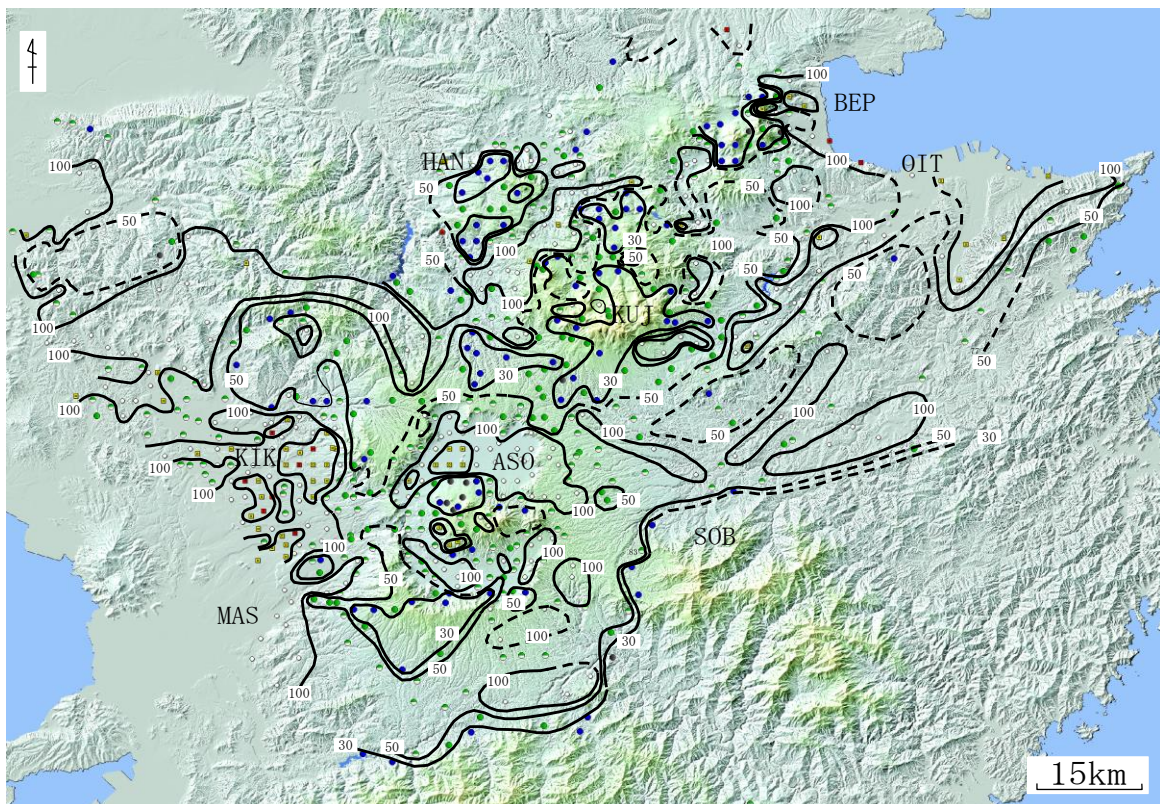


Fig.6 Conductivity distribution in the surface layer in central Kyushu by VLF-MT. Unit:  $\mu\text{S/cm}$ . MAS: Mashiki, KIK: Kikuchi, ASO: Aso Caldera, SOB: Sobo, KJU: Kuju, HAN: Haneyama, BEP: Beppu, OIT: Oita.

ルデラからの流動が起きている可能性がある。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を経て益城町にいたる領域で $100 \mu\text{ S/cm}$ 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、 $100 \sim 50 \mu\text{ S/cm}$ 程度の領域が広がっている。しかし、その南では、 $30 \mu\text{ S/cm}$ 以下となっている。この領域は、白杵―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白杵まで続いている。

阿蘇カルデラの東側では、 $100 \sim 50 \mu\text{ S/cm}$ 程度の領域が広がっているが、一部では、 $100 \mu\text{ S/cm}$ 以上の領域が東北東方向に延びている。この領域は、大分―熊本構造線にほぼ一致している。

阿蘇カルデラの北側では、 $100 \sim 50 \mu\text{ S/cm}$ 程度の領域が広がっているが、小国町の一部では、 $100 \mu\text{ S/cm}$ 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三重塚―内牧温泉方向の高電気伝導度域の延長上となっている。

こうしたことから、阿蘇カルデラ内において見いだされた電気伝導度の高い領域に匹敵する規模の高電気伝導度領域が西側に延びていることが分かった。中部九州全体のスケールで見た場合、電気伝導度分布は、白杵―八代構造線や大分―熊本構造線に規定されている。また、中岳から内牧温泉を経て北北西方向に電気伝導度の高い領域が伸びており、ここになんらかの構造線が存在しているかもしれない。

## 5. 阿蘇カルデラ内における電気伝導度の定性的理解

カルデラ床北部の阿蘇谷においては、比較的高い電気伝導度が測定された。特に、内牧―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おり、何らかの揮発性成分が地下から付加されていると思われる。一般的に観測される大地の電気伝導度 $E_a$ は、岩石の空隙率 $p$ 、岩石の固形部分の電気伝導度 $E_r$ 、空隙を満たす流体の電気伝導度 $E_w$ によって近似される。

$$E_a = E_r(1 - p) + E_w p$$

以下では、第1段階として、観測された表層電気伝導度を説明するには上記の物性がどの程度であるかを議論し、第2段階として、阿蘇カルデラ地域の降水量などを仮定して阿蘇カルデラ内の地下水に揮発性成分がどの程度付加されているか推定を試みる。

Fig. 7は、Fig. 1に示す三重塚を横切る直線ABに沿

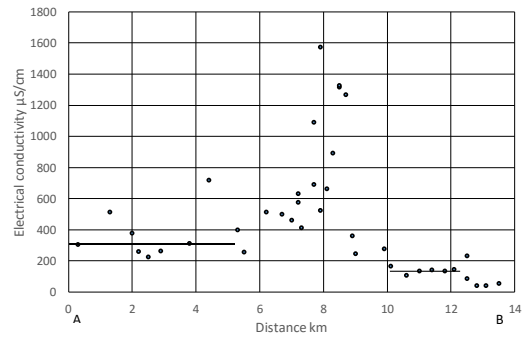


Fig. 7 Conductivity distribution profile across Mietsuka from the west to the east. Mietsuka locates at 8 km.

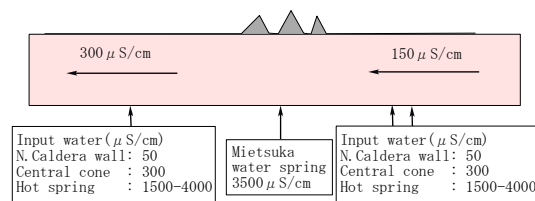


Fig. 8 Water combination model in the northern Aso caldera floor across Mietsuka.

う電気伝導度分布である。三重塚は、A点からおよそ8kmに位置している。この図から、三重塚より東側（阿蘇谷東部）では $150 \mu\text{ S/cm}$ 程度、三重塚付近で高い値を示し、西側（阿蘇谷西部）では $300 \mu\text{ S/cm}$ 程度となっていることがわかる。

この結果をふまえてFig. 8に示すようにそれぞれの地域の地下水等の物性を検討する。カルデラに入る水の電気伝導度に関しては、下記のような観測事実がある。カルデラの外輪付近で見られる湧水は、 $25^\circ\text{C}$ において、北外輪東部の手野で $9\text{ mS/m}$ 、西部の牛王水で $6.5\text{ mS/m}$ 、外輪北方の池山水源で $9\text{ mS/m}$ 程度である。ここでは、仮に $5\text{ mS/m}$  ( $50 \mu\text{ S/cm}$ ) とする。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は、阿蘇神社を中心とする一宮湧水群で $30\text{ mS/m}$ 、白川水源で $24\text{ mS/m}$ 、火山研究センター付近の湧水で $22\text{ mS/m}$ となり、カルデラ外輪起源の水よりも高い電気伝導度を示す。本論では、簡単のため $30\text{ mS/m}$  ( $300 \mu\text{ S/cm}$ ) 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。内牧温泉で $220\text{ mS/m}$ 、赤水地区の温泉で、 $400\text{ mS/m}$ 、白水地区の温泉で $150\text{ mS/m}$ 、久木野地区の温泉で $160\text{ mS/m}$ 、長陽地区の温泉で $210\text{ mS/m}$ 程度となる。本論では、 $150 \sim 400 \text{ mS/m}$  ( $1500 \sim 4000 \mu\text{ S/cm}$ ) と考える。三重塚の湧水の電気伝導度は、 $350\text{ mS/m}$  ( $3500 \mu\text{ S/cm}$ ) である。

岩石の固形部分の比抵抗はおおよそ $1\text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ （電気伝導度は $10 \mu\text{ S/cm}$ ）程度と仮定する。この仮定は、比

抵抗が $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $2\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ となったとしても、後の議論にはほとんど影響しない。また、空隙率は、対象地域がカルデラの湖底堆積物であったことを考慮して20%と仮定する。この仮定も、空隙率が30%に達することはほとんどないと思われる。

阿蘇谷東部では以下のように考えられる。Erは $10\ \mu\text{S/cm}$ 、 $p$ は0.2、Ewを外輪から流入する水 $50\ \mu\text{S/cm}$ とすると、実際に観測されている $150\ \mu\text{S/cm}$ を実現することはできない。Ewを中央火口丘から流入している水 $300\ \mu\text{S/cm}$ とすると、計算される岩石全体の電気伝導度は、 $E_a = 10 \times 0.8 + 300 \times 0.2 = 68$ となり、実際に観測されている $150\ \mu\text{S/cm}$ を実現することはできない。空隙率が0.5であれば、 $E_a=155$ となり、ほぼ一致するが、空隙率が0.5というのは、現実的ではない。このことは、中央火口丘からの湧水だけでは説明できず、温泉水の付加が必要と考えられる。中央火口丘からの湧水と温泉水の混合物の平均電気伝導度が $700\ \mu\text{S/cm}$ の水であれば、 $E_a = 10 \times 0.8 + 700 \times 0.2 = 148$ となり、ほぼ一致する。こうなるためには、温泉水が $1500\ \mu\text{S/cm}$ の場合には、温泉水：中央火口丘湧水の比が1:2、 $4000\ \mu\text{S/cm}$ の場合には1:8である必要がある。

三重塚周辺域では、Erは $10\ \mu\text{S/cm}$ 、 $p$ は0.2、Ewは三重塚の湧水 $3500\ \mu\text{S/cm}$ とすると、計算される岩石全体の電気伝導度は、 $E_a = 10 \times 0.8 + 3500 \times 0.2 = 708$ となり、実際に観測されている電気伝導度が $500\sim 1000\ \mu\text{S/cm}$ 程度であることと整合的である。

阿蘇谷西部では以下のように考えられる。Er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 $300\ \mu\text{S/cm}$ を実現するには、Ewを $1500\ \mu\text{S/cm}$ とすると、計算される岩石全体の電気伝導度は、 $E_a = 10 \times 0.8 + 1500 \times 0.2 = 308$ となり、整合的である。阿蘇谷西部には、上流側の三重塚周辺域から三重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からの湧水が加わっていると思われる。三重塚湧水と温泉水の混合流体の電気伝導度を $3000\ \mu\text{S/cm}$ 程度と考えると、この流体と中央火口丘からの湧水との比は、1:1でほぼ説明することができる。

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 $100\ \mu\text{S/cm}$ 、西部においておよそ $200\ \mu\text{S/cm}$ 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Ewは $500\ \mu\text{S/cm}$ 程度、中央火口丘からの湧水と温泉水との比は、5:1～19:1と計算される。西部についてはEwは $1000\ \mu\text{S/cm}$ 程度、中央火口丘からの湧水と温泉水との比は、0.7:1～4:1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、 $10\ \mu\text{S/cm}$ 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%大きくなる程度であるため、ここの検討結果には大きく影響しない。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。

## 6. 電気伝導度から推定される阿蘇カルデラ内における揮発性成分の供給率の推定

前節において観測される電気伝導度から地下水の電気伝導度を概算した。この結果に基づいて、本節では揮発性成分の供給率の推定を試みる。

阿蘇谷東部において推定された岩石の空隙を満たす地下水の電気伝導度は、 $700\ \mu\text{S/cm}$ であった。KCl  $0.01\ \text{mol/l}$ の溶液の電気伝導度は $1400\ \mu\text{S/cm}$ であり、 $0.005\ \text{mol/l}$ で $700\ \mu\text{S/cm}$ となる。阿蘇カルデラ北東部の年間降水量は、東西7km、南北15kmの領域に $3000\ \text{mm/yr}$ が降るので、 $3 \times 10^8\ \text{t/yr}$ と推定される。このうちの10%が地下水になるとすると、この領域に供給される水は、 $3 \times 10^7\ \text{t/yr}$ となる。この水にKCl相当で $0.005\ \text{mol/l}$ が溶けていると考えられるので、 $1.5 \times 10^8\ \text{mol/yr}$ のKClが供給されていると計算される。SO<sub>2</sub>に換算して重量を計算すると $1.5 \times 10^8 \times 32\ \text{g/yr}$ （ $4800\ \text{t/yr}$ ）が阿蘇谷東部に供給され、内牧～三重塚の線を越えていると推定される。

一方、阿蘇谷西部では、平均で $1500\ \mu\text{S/cm}$ の水が空隙を満たしていると計算された。上記と同じように、KCl換算で $0.01\ \text{mol/l}$ が溶けている溶液の電気伝導度は $1400\ \mu\text{S/cm}$ と推定されるので、ここでは簡単のため $0.01\ \text{mol/l}$ が溶けていると考える。阿蘇カルデラ北部の年間降水量は、東西14km、南北15kmの領域に $3\text{m/yr}$ の降水があるので、 $6 \times 10^8\ \text{t/yr}$ と計算される。このうちの10%が地下水になるとすると、地下水として供給される水は、 $6 \times 10^7\ \text{t/yr}$ となる。この水には、KCl相当で $0.01\ \text{mol/l}$ が溶けていると考えられるので、 $6 \times 10^8\ \text{mol/yr}$ 、SO<sub>2</sub>換算で $6 \times 10^8 \times 32\ \text{g/yr}$ （ $19,000\ \text{t/yr}$ ）が阿蘇谷全体に供給され、カルデラの西側に流出していると計算される。

南郷谷東部では、平均で $500\ \mu\text{S/cm}$ の水が空隙を満たしていると推定されたので、上記と同様に、KCl換算で $0.004\ \text{mol/l}$ が溶けていると考える。阿蘇カルデラ南東部の年間降水量は、東西7km、南北15kmの領



域に 3m/yrの降水があると、10%が地下水となると仮定して計算すると、 $3 \times 10^7$  t/yrが地下水として供給される。この水には、KCl相当で0.004 mol/l が溶けていると考えられるので、SO<sub>2</sub>換算で 3800 t/yrが南郷谷東部に供給されていると計算される。南郷谷全体では、平均で1000 μ S/cmの水が空隙を満たしていると計算され、KCl換算で 0.007 mol/l が溶けていると考えられる。阿蘇カルデラ南部の年間降水量は、東西14km、南北15kmの領域に 3m/yrの降水があると、10%が地下水となると仮定して計算すると、 $6 \times 10^7$  t/yrが地下水として供給される。この水には、KCl相当で0.007 mol/l が溶けていると考えられるので、SO<sub>2</sub>換算で 13,000 t/yrが南郷谷からカルデラの西側に流出していると計算される。

阿蘇谷、南郷谷の合計では、SO<sub>2</sub>換算で 32,000 t/yrがカルデラ内からカルデラの西側に流出していると計算される。阿蘇中岳第1火口から放出されるSO<sub>2</sub>の量は、300~1000t/day程度である。仮に500t/dayであるとすると、年間では180,000t/yrとなる。この結果は、中岳第1火口から放出されているSO<sub>2</sub>のおよそ18%に相当する。

## 7. まとめ

阿蘇カルデラ内および周辺において表層電気伝導度調査を行った。その結果、カルデラ床においては比較的均質で高い電気伝導度を示し、中央火口丘については火口丘によって大きなばらつきを示すが、比較的低い電気伝導度であった。

多くの中央火口丘では、30 μ S/cm以下の電気伝導度を示すが、草千里ヶ浜火山では50 μ S/cm以上、中岳や火口丘群西部では100 μ S/cm以上の高電気伝導度を示した。これらの火山には熱水の上昇が考えられ、周辺域への熱水の流動を示唆する分布も確認された。

カルデラ床の電気伝導度は、100 μ S/cm以上を示し、比較的均質であるが、内牧-三重塚において500 μ S/cm以上の特に高い電気伝導度を示し、カルデラ内の地下水の流下方向である西側では相対的に高い電気伝導度を示した。それぞれの領域における電気伝導度は、空隙率10%、固形部分の電気伝導度が10 μ S/cm程度の岩石の空隙に300 μ S/cmの中央火口丘から供給される水と1500~4000 μ S/cmの温泉水がある一定の割合で混合した地下水が満たしていると考えられることでは説明が可能である。三重塚付近では、3500 μ S/cmの湧水が空隙を満たしていると考えれば、観測される電気伝導を説明できる。

こうした検討をふまえて、阿蘇カルデラに供給される天水に付加される揮発性成分の量を推定したところ、SO<sub>2</sub>換算で 32,000 t/yrが付加されていると推定された。この量は、中岳第1火口から放出されているSO<sub>2</sub>の放出率180,000 t/yrの18%に相当する。

カルデラの周辺域の電気伝導度分布を調査した結果、阿蘇カルデラの西側にあたる菊池地方において阿蘇カルデラ内の高電気伝導度領域に匹敵するような大きな高電気伝導度域が見いだされた。これは、この領域の地下から揮発性成分を供給するシステムが存在するのか、阿蘇カルデラから流下してきたものを検討する必要がある。このほかに、中岳-三重塚-内牧へと伸びる北北西-南南東方向の高電気伝導度領域は、さらに小国町方向に延びていることがわかった。この領域になんらかの構造線が存在する可能性がある。このほかに、中部九州全体のスケールで見た場合、電気伝導度分布は、臼杵-八代構造線や大分-熊本構造線に規定されており、布田川断層に沿う領域で相対的に高い電気伝導度が見いだされた。

(論文受理日：2016年6月13日)