

広帯域 MT 観測から推定される阿蘇カルデラの比抵抗構造

京都大学大学院理学研究科 宇津木 充・鍵山 恒臣

小森 省吾・井上 寛之

北海道大学大学院理学研究科

橋本 武志

東京大学地震研究所 小山 崇夫

東京工業大学大学院理学研究科

小川 康雄

京都大学防災研究所 神田 径・山崎 友也

気象庁鹿屋地磁気観測所 長町信吾・石田 憲久

1. はじめに

現在の阿蘇火山では、中央火口丘の西側と東側で活動状況に大きな違いが見られる。中央火口丘西側では、湯の谷温泉、地獄・垂玉温泉などの地熱地帯が見られるのに対し、東側の中岳火口ではストロンボリ式噴火を繰り返し起こしており、活発な噴火活動が見られる。このような活動状況の違いがどのような条件の違いに起因しているのかを明らかにすることが出来れば、火山の活動様式の理解、噴火活動予測を行う上で非常に有用な知見が得られると期待される。

こうした事を背景に我々は、阿蘇カルデラ、特に中央火口丘直下で地下構造の傾向が西から東にかけてどのような変遷をたどるかを明らかにする事を目的に、平成 20 年度集中観測の一環として阿蘇カルデラにおいて広帯域 MT 観測を行った。

2. これまでに行われた電磁気観測

阿蘇カルデラ及び阿蘇火山では、これまでに様々な手法を用いた電磁気調査が行われている。阿蘇中央火口丘・中岳火口周辺では、田中他¹⁴⁾によるシュランベルジャー法探査が行われており、この調査から深度 100m 程度の電気伝導度分布が求められている。また、Handa and Tanaka⁴⁾は、中岳火口を含む中央火口丘西部域において VLF、ELF-MT 法及び CSMT 法による観測を行い、地下数百 m 以浅の比抵抗構造を求めている。これらの調査の結果、中岳火口直下では比抵抗が極めて小さいことが示されている。また、Kanda et al.⁶⁾は、中岳火口周辺で高密度 AMT 観測を行い、その結果火口周辺の地下、海拔下 500m 程度までの比抵抗の詳細な分布

が明らかになった。この調査の結果、中岳火口周辺では表層の数十～100 Ωm の下位に、地下約 300m～海拔 0m 付近まで数 Ωm の低比抵抗層が水平方向に広がっていることが明らかになった。その比抵抗値から、この領域には溶存成分に富んだ熱水が多く分布する事が示唆され、深部から供給される火山性流体が火口地下の帯水層に接触し、低比抵抗層を形成している事が推定されている。また、中岳火口直下に低比抵抗域が局在する事が明らかになった。中岳火口周辺では、1991 年以降、磁場全磁力連続観測が京都大学で行われているが、その結果磁場は数年の時間スケールで増減を繰り返しており、その変動は中岳第一火口直下での温度変化に起因することが明らかになっている。また、火口湖水位・水温の連続観測の結果からも火口湖からの放熱量が時間的に変化しており、磁場変化や火山性微動の振幅変化にも対応していることが明らかになった。こうした事から、地下から供給される火山性流体の一部が火口直下に滞留し熱だまりを形成し、そこで蓄熱・放熱の過程が進行している事が推察されている。

阿蘇カルデラにおける電磁気探査としては、NEDO⁸⁾により行われた阿蘇カルデラ全域での MT 及び AMT 法探査が挙げられる。この調査により、カルデラ内の比抵抗構造の概略が明らかにされている。但し長周期までカバーした観測点が少なく、中央火口丘中央部では深部構造まで求められていない。Handa et al.³⁾ による ELF 及び VLF 周波数帯を用いた MT 探査では、阿蘇カルデラ内外の 200 地点で観測を行い比抵抗構造が推定されている。この調査の結果、阿蘇カルデラの下には高比抵抗の基盤(白亜紀花崗岩類)があること、中岳火口近傍の深さ 1 km 以浅には 10 Ωm 程度の低比抵抗域があること、カルデラ中央部のやや深部(標高-2～-0.5 km 程度)には、50 Ωm 以下の低比抵抗層があることが明らかになった。しかし、探査に用いた電磁波の周波数帯が高いため、中岳火口周辺部では 1 km 以上の探査深度が得られていない。高倉他¹³⁾では、本研究で行われた測線より西側、中央火口丘西部を含み阿蘇カルデラを北北東-南南西方向に横切る 2 本の測線で広帯域 MT 観測が行われている。これによると阿蘇カルデラは、カルデラ堆積物に相当する 1～10 Ωm 前後の上部の低比抵抗層と、100 Ωm 以上の先第三系の基盤岩類に相当する高比抵抗基盤からなる事が示された。特に、カルデラ中央部では海拔面付近に低比抵抗を示す層が分布していることが明らかになった。

現在の阿蘇火山では、中央火口丘の西側と東側で活動状況に大きな違いが見られる。中央火口丘西側では、湯の谷温泉、地獄・垂玉温泉などの規模の大きな温泉地帯が見られるのに対し、東側の中岳火口ではストロンボリ式噴火を繰り返し起こしており、活発な噴火活動が見られる。この様な活動状況の違いがどの様な条件の違いに起因しているのかを明らかにすることが出来れば、火山の活動様式の理解、噴火活動予測を行う上で非常に有用な知見が得られ、火山学的に重要な情報を得ることが出来ると期待される。こうした事を背景に我々は、平成 20 年度集中観測の一環として 2008 年 11 月、阿蘇カルデラにおいて広帯域 MT 観測を行った。

3. 観測概要

観測は、カルデラ北東部から中岳火口西側 1km を通りカルデラ南西へ抜ける測線(測線 A)、及びカルデラ北東部から中岳東部、日野尾峠を越えカルデラ南東部へ抜ける測線(測線 B)の 2 測線について行った(図 1)。実施期間は、測線 A が 2008 年 11 月、測線 B が 2006 年 8 月～12

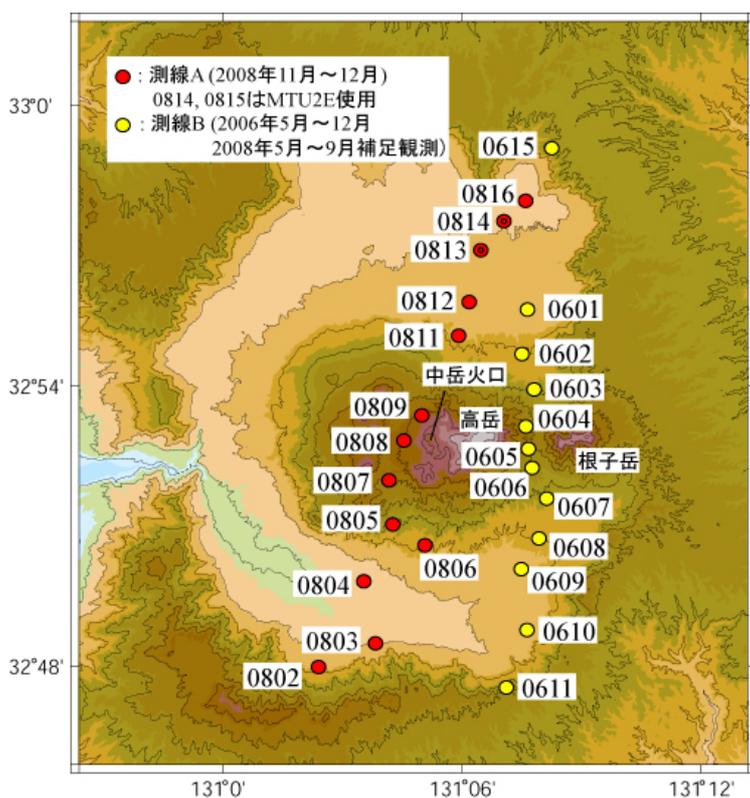


図 1. 阿蘇カルデラにおける広帯域 MT 観測点

月である。また、2008 年 5 月～6 月において、測線 B の補足観測を行った。

使用デバイスは Phoenix 社製の MTU-5、MTU-5A および MTU-2E システムを用いた。測定機器はすべて GPS により時刻同期を行い、一度に 2～4 測点で電場 2 成分と磁場 3 成分あるいは電場 2 成分の時系列データを同時取得した。データ処理では、各測点の電場および磁場成分の時系列データを等間隔に多数のセグメントに分割し、各セグメント毎に周波数解析

を行い、0.001～384Hz の範囲の 30 周波数について、各成分のパワースペクトルデータを求めた。また、日鉄工コンサルタントが宮崎で行っている MTU-5A 連続観測のデータを利用させていただき、リモートリファレンス処理により見掛け比抵抗と位相を求めた。

4. 阿蘇カルデラの地質構造

阿蘇カルデラ内は、深部から大まかに、基盤岩類、先阿蘇火山岩類、それを覆う第四紀以降の堆積物に区分される(小野¹⁾)。基盤岩類は、南部の丘陵地の中・古生層の堆積岩類がみられる。北部～西部の山地域には中・古生代の変成岩類や中生代白亜紀の花崗岩類、南東部には古生代の変成岩類が分布している。これら基盤岩類の上位には、第三紀鮮新世～第四紀更新世に噴出したとされる安山岩類や凝灰角礫岩が分布し、阿蘇外輪山を形成している。これらの

地層は、阿蘇カルデラ形成に関与した火砕流噴出活動に先立つ火山活動によるもので、先阿蘇火山岩類と呼ばれている(年代は 220 万～40 万年前)。これらの基盤岩類や先阿蘇火山岩類を覆って、新生代第四紀の堆積物が台地や低地に広く分布している。この主体をなすのが、約 30 万年前から約 9 万年前までの間に生じた Aso-1～4 の大規模火砕流の堆積物である。また、カルデラ内部にはその上部に中央火口丘形成に伴う噴出物が見られる。

これらの地質情報と比抵抗の対応を取るためのデータとしては、NEDO¹⁰⁾の阿蘇山西部地域の孔井検層データ等がある。検層の結果から得られる大まかな特徴としては以下ようになる。数百 m 深さまでの表層部、中央火口丘噴出物及び火砕流堆積物は、噴出物が複雑に層序を成しているためばらつきが大きい、数十～100 Ωm 程度の比抵抗を示している。その下位、先阿蘇火山岩類は 100 Ωm 程度の比抵抗値を示し、表層の中央火口丘噴出物層とはそれほど大きなコントラストを持たない。基盤岩類については、カルデラ周縁部で数百 Ωm 以上の高比抵抗を示すというデータが得られている。

5. 解析結果

5.1 インダクションベクトルの分布

これらの観測点から得られたデータについて、磁場 3 成分測定を行った点について 10 Hz、

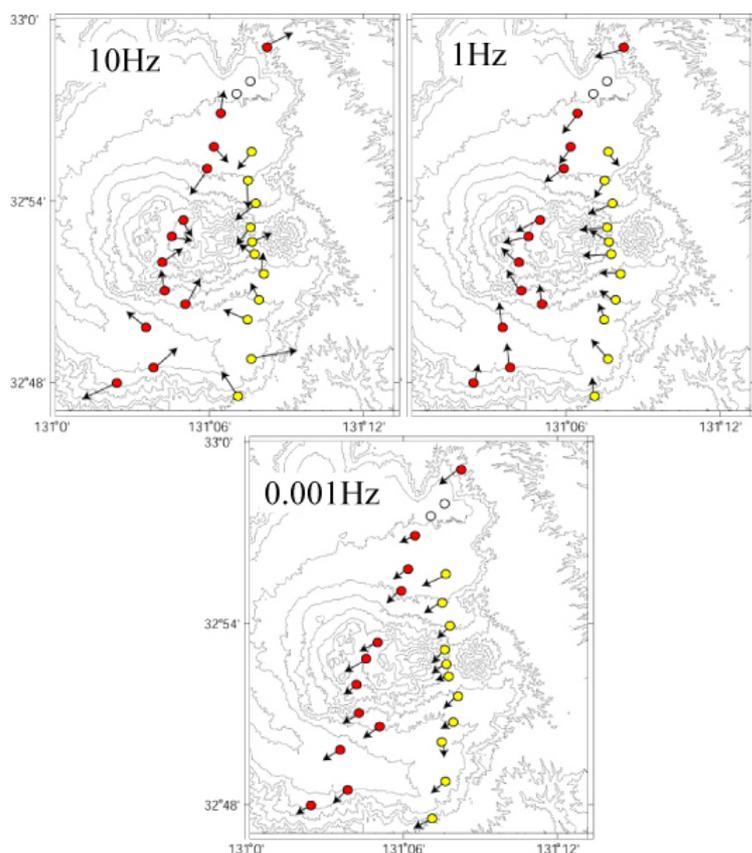


図 2. 10Hz、1Hz 及び 0.001Hz のインダクションベクトル

1 Hz 及び 0.001 Hz で計算されたインダクションベクトルを示す(図2)。

ここで、一般にインダクションベクトルは地中の良導体の方向を向くが、0.001Hz のインダクションベクトルでは殆どの点で西南西方向を向いている。この帯域のインダクションベクトルは広域の地下構造不均質を反映するものであり、この傾向は中部九州に共通する特徴である事が Handa et al.²⁾や Shimoizumi¹¹⁾により示されている。

10Hz のインダクションベクトルは、測線Bにおいては最も標

高の高い日野尾峠付近を指している。また、測線 A においても中央火口丘の北側、南側の観測点では山体中心部を示している。それに対し中岳火口周辺の観測点ではベクトルは中岳火口の方に集中している。ここで、周波数数十～100 Hz 程度(探査深度はおよそ 1km 程度以浅)ではインダクションベクトルは地形的な起伏にも影響されることが知られており、中央火口丘中岳北側、南側の観測点のインダクションベクトルはこの影響を受けている可能性が考えられる。しかし地形の起伏がそれほど顕著でない火口周辺のインダクションベクトルの分布から、火口浅部に周囲より低い領域がある事が示唆される。

次に、地下数 km 程度までの比抵抗構造を示す 1 Hz のインダクションベクトルをみると、中岳

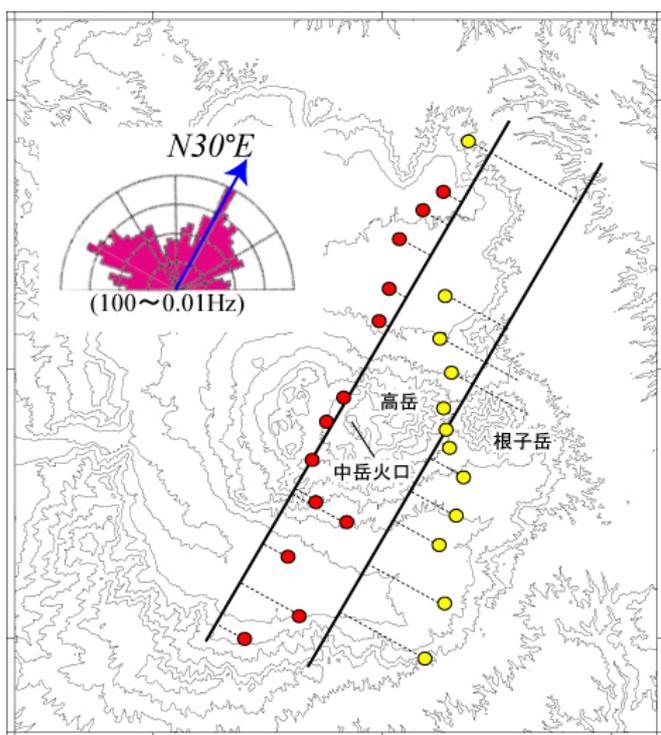


図 3. 2次元性を仮定する比抵抗構造断面の走行

火口より西側、湯の谷温泉地帯に向かい収斂するように見える。この結果は、高倉他¹³⁾、橋本他⁵⁾の結果とも整合的である。

こうして得られたデータから、Groom and Bailey decomposition の解析手法を用いて地下の大局的な構造走行を求めた結果、2次元走行として N30° E が得られた(図 3)。そこでこの方向にインピーダンスを回転して求めた見掛け比抵抗と位相のデータを元に 2次元インバージョンを行い、それぞれの測線下の比抵抗断面を求めた。2次元比抵抗構造を求めるにあたっては、Uchida and Ogawa¹⁸⁾の平滑化

制約付非線形最小二乗法のプログラムを用いた。

5. 2 比抵抗構造の概要とその解釈

測線 A で得られた比抵抗断面を図 4 に、測線 B で得られた比抵抗断面を図 5 に示す。また、計算に用いた見掛け比抵抗、位相の探査曲線と、モデルから計算される理論値を図 6 に示す。また、本研究の測線より西側で行われた高倉他¹³⁾の測線 1997 及び測線 1998 の観測点位置と得られた比抵抗断面を図 7、図 8 に示す。

カルデラ辺縁部では、地表から数十～キロ Ωm オーダーの比抵抗値を示す領域が深部まで分布している。特に、カルデラ北縁では数百～1k Ωm と高抵抗を示し、南縁では数十～数百 Ω

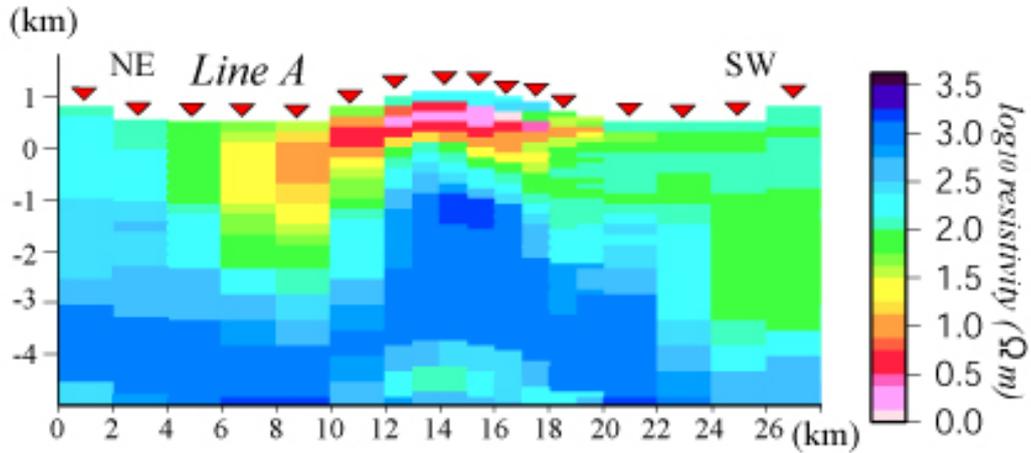


図 4. 測線 A の 2 次元比抵抗断面

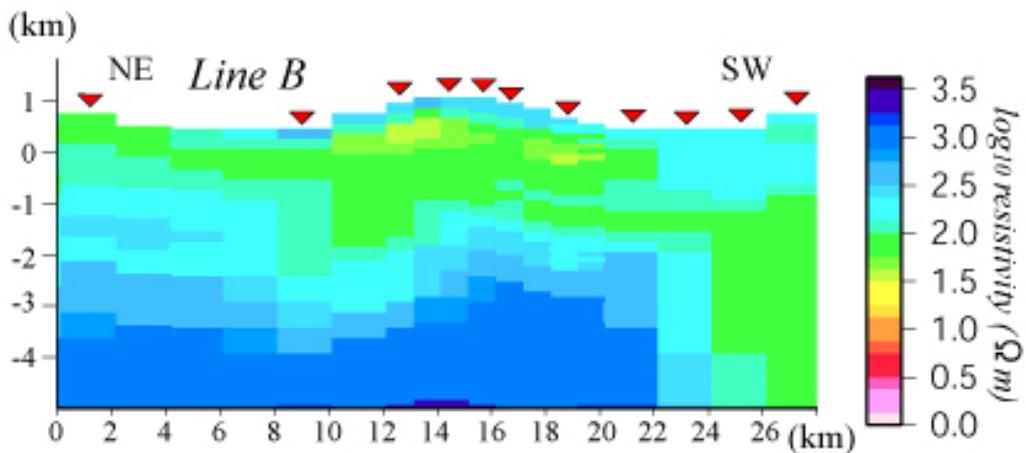


図 5. 測線 B の 2 次元比抵抗断面

m と北部に比べ低い抵抗値を示す特徴が見られる。Nedo⁹⁾ により推定された阿蘇カルデラの地質断面によると、カルデラ基盤の岩質は北部、南部で異なっており、北部は白亜紀の花崗岩類、南部は古生代の付加堆積層(秩父帯)から成るとされている。一般に緻密な岩石では抵抗値は高く、対して堆積層ではその中に含まれる水の影響で比較的低い抵抗値を示す傾向がある。この事から、カルデラ北側では基盤が緻密な岩質から成り抵抗値が高く、南部では古い堆積層からなる為北側に比べ比較的低い抵抗値を示していると考えられる。

また、中央火口丘直下では、高倉他¹³⁾や橋本他⁵⁾の結果と同様、浅部から中一低一高比抵抗の 3 層構造が見られる。この内、第一層(数十～百 Ωm)については、その比抵抗値から中央火口丘の形成に伴う火山性堆積物の層に相当すると推察される。

また、中岳火口の西側を横切る測線 A では、第 3 層の高抵抗層は中央火口丘中心部で盛り上がり、浅部まで達しているのが分かる。この傾向は、高倉他¹³⁾の測線 1998 でも同様に見られる。但し、測線 1998 の結果と比較すると、下層・高抵抗層の上端深度はより浅く、海拔下 1.5km 程度にまで達している。それに対し中岳の東を通る測線 B 及び西側斜面を通る測線 1997 では、こう

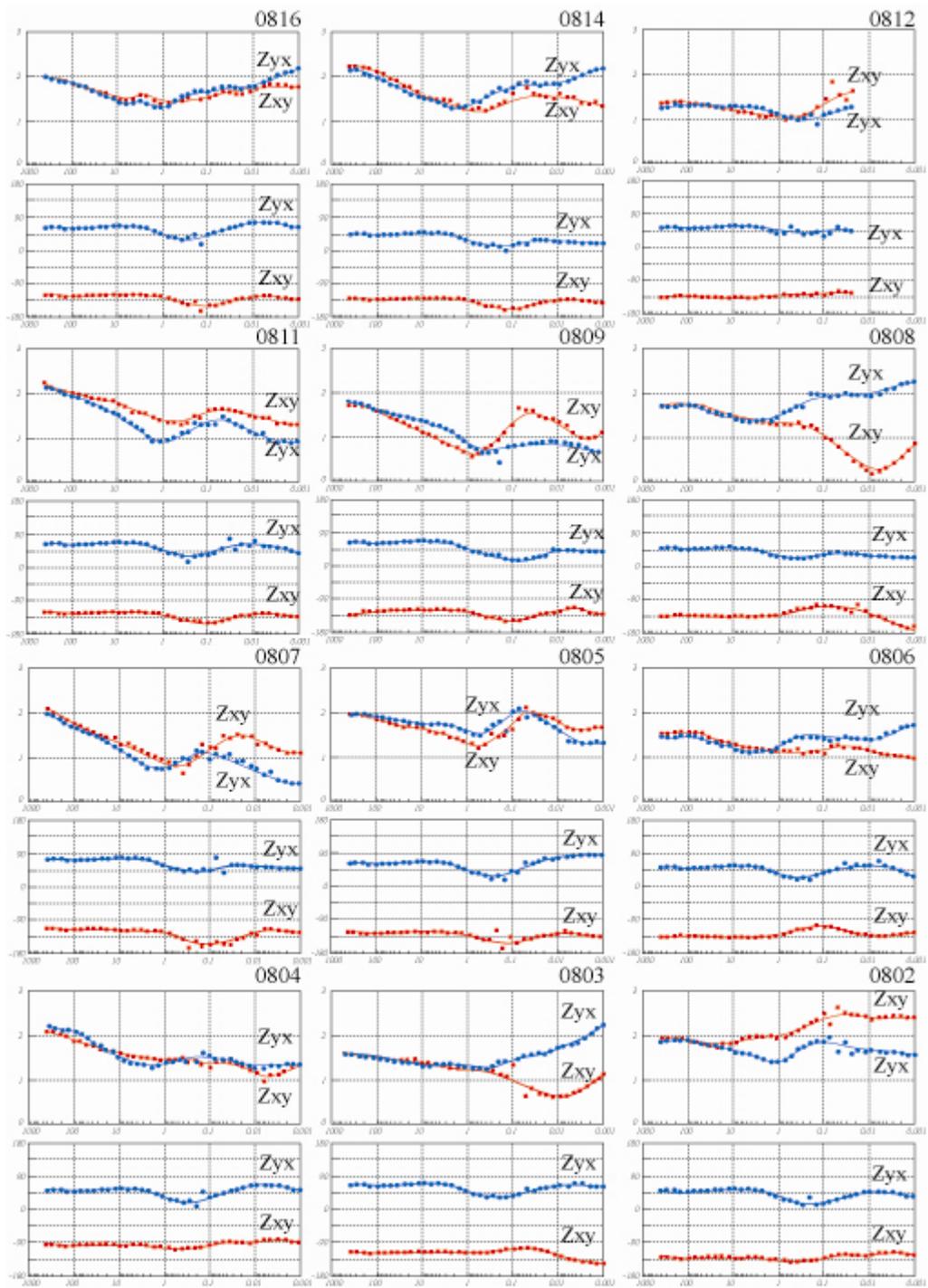


図 6. 観測から得られた探査曲線とモデルから計算される再現値
 上段が見かけ比抵抗、下段が位相を表す。

した高抵抗層のせり上がりは顕著には見られない。筒井他¹⁵⁾により求められた中央火口丘の 3 次元地震波速度構造モデルによると、中岳火口西側から草千里にかけて帯状の高速度域が見られる。また、Nedo⁹⁾により求められた等重力線分布図にもこれに対応する場所に高重力域が見られ、その解析から Komazawa⁷⁾は中央火口丘中央部には浅部まで高密度物質があると解釈している。中央火口丘直下の高抵抗域の盛り上がりの分布、深度は、筒井他が見出した高速度域

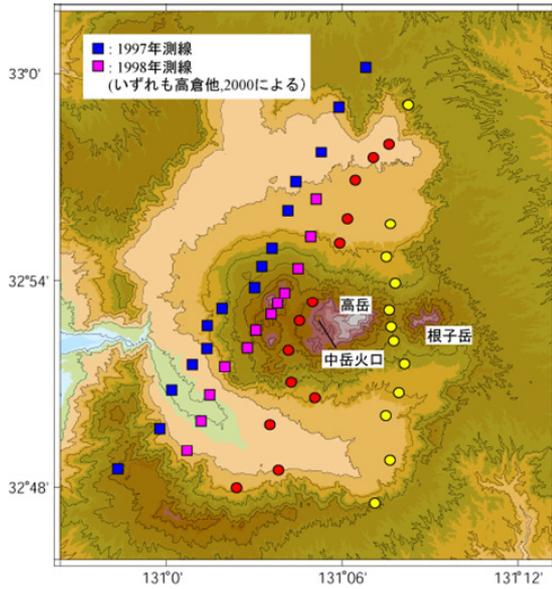


図 7. 高倉他(2000)の MT 測線

と調和的であり、この事からこの領域に高密度・高抵抗な物質が存在していると考えられる。その実態としては、この領域に中央火口丘生成に伴う貫入岩脈の様な、緻密で高密度且つ高抵抗な物質が存在していることが推察される。或いは高倉他¹³⁾や Komazawa⁷⁾が推察する様に、山体形成に伴い基盤が押し上げられた事も考えられる。

測線 A では、第 3 層・高抵抗層のせり上がりに付随し第 2 層の低抵抗層の下端深度も海拔下 0m 付近と浅くなっている。この中岳火口直下の低比抵抗層の分布は、Kanda et al.⁶⁾で得られている結果とも整合的である。但し、測線 1997、測線 1998 と比較すると、測線 A では数 Ωm 程度の極めて低い比抵抗値を示す領域が水平方向に広く分布していることがわかる。これに対し東側の測線 B

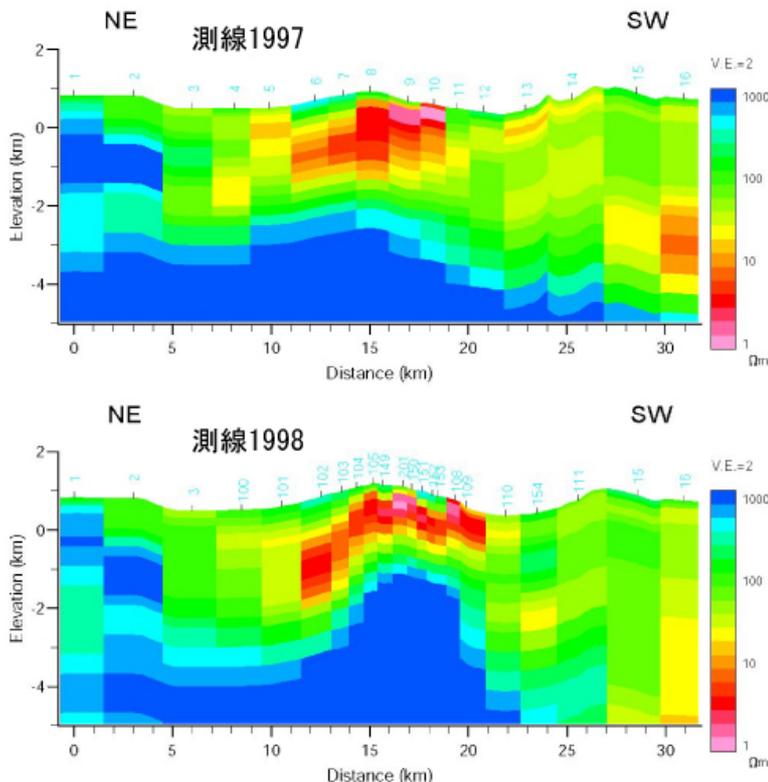


図 8. 測線 1997、1998 の 2 次元比抵抗断面 (高倉他,2000)

では、他の測線と同様、表層から中-低-高の 3 層構造が見られはするが、中層の低比抵抗層の比抵抗値は数十～100 Ωm と高くなっている。この事から、西側の 3 測線で共通に見られる極めて低い比抵抗を示す第 2 層は中央火口丘西側の地熱地帯から中岳火口周辺までの領域まで広がっているが、中岳東側までは至っておらず中岳～高岳の間で消失している事が明らかになった。

中央火口丘西側には、湯の谷温泉、地獄垂玉温泉といった地熱地帯が広がっている。従ってこの地域の地下では、溶存成分に富み比抵抗の低い地下水が多く存在していると考えられる。さらにこの地域の地熱活動で湯の谷温泉地域の地下に低比抵抗の熱水変質帯が形成されていると考えられる。これは 1Hz のインダクションベクトルが、この地域に収斂する事からも伺える。

また中岳火口周辺でも、地下から供給される火山性流体の影響で低い比抵抗値を示している事が考えられる。Yamamoto et al.,¹⁶⁾ Yamamoto¹⁷⁾ の長周期微動の解析では、中岳火口直下に垂直なクラックが存在し、そこを地下から供給される火山性流体が通る事で長周期微動が発生、さらにその上端付近で流体がリリースされることで短周期微動が起こるというモデルが提唱されている。クラックの上端深度は海拔下 0km 付近と求められており、火口直下の低比抵抗層の下端深度ともほぼ一致している。この事から中岳火口直下では、クラックからリリースされた火山ガスとの接触で溶存成分に富む地下水が存在しており、その影響で比抵抗が極めて低い値を示していると考えられる。

これに対し中岳の東側では、中央火口丘西側に見られるような大規模な地熱地帯などの地熱兆候は殆ど見られない。この為高岳東側では、溶存成分を含まない地下水が帯水層を成していることが考えられる。特に測線 A、B の間に位置する中岳、高岳の山体が分水嶺となりその東西で地下水系を分断する事で、中岳火口周辺の溶存成分に富む地下水が東側に流れ込むことが出来ない事が考えられる。また前述の様に、根子岳は中央火口丘より古い山体である事から、その直下及び辺縁部では、中央火口丘形成に伴う地殻浅部破碎の影響が少なく、その結果地下水の存在域が西側より局在化している事も考えられる。この事は、カルデラ中心部に負の重力異常が見られるのに対し、根子岳が中央火口丘を中心とした低重力異常の外側にある事とも調和的であると考えられる。

5.3 中岳火口直下の低比抵抗域について

測線Aのデータから得られた比抵抗断面(図4)を見ると、中岳火口直下、海拔下4~5kmに百Ωmオーダーの、周囲に比べ相対的に低い比抵抗値を示す領域が局在化しているのが見て取れる。Sudo, Y. and L. S. L. Kong¹²⁾の地震波トモグラフィーの結果では、草千里の直下、4~5kmの深さに直径2km程度の低速度域がある事が報告されている。また、阿蘇火山で繰り返し行われている水準測量の結果から、これに相当する位置に地殻変動源がある事が示されており、こうした事からこの位置にマグマだまりが存在する可能性が示唆されている。測線Aの結果から得られた、相対的に低比抵抗を示す領域の位置は、このマグマだまりとされる位置とも整合的である。

マグマの比抵抗値としては、溶融メルトの比抵抗値が室内実験から数~数十Ωm程度と報告

されている。これに対し、今回見出された低比抵抗域ではこれらに比べ高い比抵抗値を示している。しかし、阿蘇カルデラ形成後に再生ドームを形成した活動に寄与したマグマが、冷却中の高温岩体として地下に存在していれば、完全に熔融したメルトに比べずっと高い抵抗値を示すはずである。これを比抵抗で見れば、高抵抗の基盤の中に相対的に比抵抗の低い領域として見えるとも考えられる。しかし、今回の観測から得られたサウンディングカーブでは、この低比抵抗域の深度は検出限界ぎりぎりであり、これが本当に正しい構造を示すものであるかの確証は現時点では得られない。今後、より長期間にわたる観測を行い高品質な長周期データを取得することで、今回見られた高抵抗基盤中の低抵抗域が本当に存在するものであるかを検証する必要がある。

6. まとめ

今回の観測から得られたデータを元に行った 2 次元比抵抗構造解析の結果、以下の事が明らかになった。

- 1) 中央火口丘の地下では、表層から中—低—高の三層構造を持つ。
- 2) 中央火口丘中心部では、第 3 層の高抵抗層が浅部まで競りあがる形状を示すのに対し、西側、東側ではそうした形状は見られない。
- 3) 第 2 層の低比抵抗層は、中央火口丘西側～中岳火口地下で 1～数十 Ωm の極めて低い抵抗値を示すのに対し、高岳東側では数十～100 Ωm の抵抗値を示し、西側測線下の比抵抗断面に比べ抵抗値のコントラストは小さい。
- 4) 今回得られた比抵抗構造解析から、中岳火口直下の海拔下 4～5km 付近に、周囲より相対的に低い抵抗値を示す領域が局在することが明らかになった。その深さは、これまでの研究から推察される阿蘇火山のマグマだまりのそれと調和的なものである。但し、この低抵抗域が確実に存在すると主張できるだけのデータクオリティーは現時点では得られておらず、今後より高品質な長周期データを取得するための観測を追加する必要がある。

謝 辞

阿蘇カルデラの電磁気集中総合観測を実施するにあたり、京都大学防災研究所の大志万直人教授、吉村令慧助教から MT 観測装置 MTU5 及び MTU5-2E の機材をお借りいたしました。また、(株)日鉄鉱コンサルタントには、リモートリファレンス処理を行うための参照データを提供していただきました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小野晃司 (1965): 阿蘇カルデラ東部の地質, 地質学雑誌, 71, 541-553.
- 2) Handa, S., Y. Tanaka and A. Suzuki (1992): The electrical high conductivity beneath the northern Okinawa trough, inferred from geomagnetic depth sounding in northern and central Kyushu, Japan, J. Geomag. Geoelectr., 44, 505-520.
- 3) Handa, S., A. Suzuki and Y. Tanaka (1998): The Electrical Resistivity Structure of the Aso Caldera, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 43, 15-23.
- 4) Handa, S. and Y. Tanaka (1999): The Electric Low-resistivity Layer Beneath the Active Crater of Aso Volcano, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 44, 191-200.
- 5) 橋本武志・田中良和・網田和宏・高倉伸一・神田径・坂中伸也・鍵山恒臣 (2002): 電磁気探査から推定される阿蘇火山中央火口丘の浅部構造, 平成9~12年度科学研究費補助金基盤研究(A)研究成果報告書(研究代表者:川勝均), report7.
- 6) Kanda, W., Y. Tanaka, M. Utsugi, S. Takakura, T. Hashimoto, and H. Inoue (2008): A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys, J. Volcanol. Geotherm. Res., 178, 32-45.
- 7) Komazawa, M. (1995): Gravimetric analysis of Aso Volcano and its interpretation. J. Geodetic. Soc. Japan, 41, 17-45.
- 8) NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構) (1990): 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 阿蘇地域 比抵抗(MT, AMT 法)調査報告書.
- 9) NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構) (1991): 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 阿蘇地域 地熱調査成果図集.
- 10) NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構) (1994): 平成4年度地熱開発促進調査データ処理報告書 阿蘇山西部地域(第2次).
- 11) Shimoizumi, M., T. Mogi, M. Nakada, T. Yukutake, S. Handa, Y. Tanaka and H. Utada (1997): Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu, Japan, Geophys. Res. Lett., 24, 1551-1554.
- 12) Sudo, Y. and L. S. L. Kong (2001): Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan, Bull. Volcanol., 63, 326-344.
- 13) 高倉伸一・橋本武志・小池克明・小川康雄 (2000), MT 法による阿蘇カルデラの比抵抗断面, CA 研究会論文集, 23-30.
- 14) 田中良和・江頭庸夫・中村貞美・須藤靖明・増田秀晴 (1981): スタッキング電気探査装置の開発と阿蘇火口周辺における電気探査について, 京都大学防災研究所年報, 24, B-1,

1-8.

- 15) 筒井智樹・須藤靖明・森 健彦・勝俣 啓・田中 聡・及川 純・戸松稔貴・松尾訓道・松島 健・宮町宏樹・西 潔・藤原善明・平松秀行 (2003): 阿蘇火山中央火口丘山体の 3 次元地震波速度構造, 火山, 第 48 卷, 第 3 号, 293-307.
- 16) Yamamoto, M., H. Kawakatsu, S. Kaneshima, T. Iidaka, J. Oikawa, S. Watada, Y. Morita, T. Mori, T. Tsutsui, Y. Sudo, S. Yoshikawa, T. Hashimoto and M. Nakaboh, ASOBOI97 (1999): Aso Seismic Observation with Broadband Instruments in 1997, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 74, 267-285.
- 17) Yamamoto, M. (2005): Volcanic fluid system inferred from broadband seismic signals, Doctor Thesis of Tokyo Univ.
- 18) Uchida T. and Ogawa Y. (1993): Development of Fortran Code for Two-dimensional Magnetotelluric Inversion with Smoothness Constraint, Open-File Report, Geological Survey of Japan, 205,117.