

MT法による阿蘇カルデラの比抵抗断面

高倉伸一¹・橋本武志²・小池克明³・小川康雄¹

(¹地質調査所,²京都大学,³熊本大学)

Resistivity sections of the Aso caldera, central Kyushu, Japan,
inferred from magnetotelluric soundings

Shinichi Takakura¹, Takeshi Hashimoto², Katsuaki Koike³, and Yasuo Ogawa¹

(¹G.S.J., ²Kyoto Univ., ³Kumamoto Univ.)

1. はじめに

阿蘇カルデラは九州中部に位置する南北約25km、東西約18kmの大規模なカルデラである。カルデラ内には10数個の中央火口丘群が形成されており、その一つの中岳は現在も活動中である。また、阿蘇カルデラとその周辺地域は活発な熱水活動が見られることから、有望な地熱地域として期待されている。そのため、当該地域ではこれまでも多くの学術調査や地熱資源探査が実施され、カルデラ構造の把握が試みられてきた。たとえば、小野・渡辺(1985)は詳細な地質調査を行い、阿蘇火山地質図を作成した。また、Komazawa(1995)は重力データを解析し、カルデラの重力基盤構造を推定した。さらに、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)はカルデラ南西部に7本の1000~1800mの坑井を掘削し、深部の地質層序を明らかにした。

しかし、坑井は局所的な範囲にしかならず、しかもカルデラ壁近傍の坑井を除けば先第三系基盤に達していない。また、地下深部の岩石密度の情報の不足から、解析された重力基盤の深度は確定的なものではない。当該地域では地震探査や電磁探査など深部物理探査も行われてきたが、調査範囲が限られていることや、良好なデータが得られていないことから、広域的な構造解析はほとんど行われていない。このようなことから、阿蘇カルデラ全体の深部地下構造の推定には至っていないのが現状である。

そこで、本研究では、阿蘇カルデラの深部構造の把握を目的に、カルデラを北北東-南南西に横切る2本の測線においてMT法調査を実施した。本論文では、その調査の概要を述べ、2次元解析から得られた阿蘇カルデラの比抵抗断面について解釈する。

2. 調査の概要

測点の位置を第1図に示す。また、測点および測線の位置を地質図とともに第2図に示す。調査は北北東-南南西方向の2本の測線に沿って実施した。測線1は阿蘇カルデラの北側から阿蘇谷、往生岳の西麓、湯の谷温泉、南郷谷を通過してカルデラの南側に抜ける約30kmの測線である。それに沿って測点がカルデラ壁内に12点、カルデラの南壁と北壁の外側にそれぞれ2点ずつの合計16点が配置された。測線2は測線1の東側約2kmの位置にあり、阿蘇谷から往生岳東麓、烏帽子岳西麓、垂玉温泉、南郷谷を通過して、カルデラ南壁まで伸びる約17kmの測線である。測点はカルデラ壁内に17点配置されている。

測線1の測定は1997年にPhoenix社製のV5-16システムを2台用いて実施された。各測点

で電場2成分と磁場3成分の時系列データを取得した。電場センサーは両端を鉛-塩化鉛電極で接地した長さ約40~60mのダイポールであり、磁場センサーはインダクションコイルである。GPS信号を利用して2台の装置を同期し、さらにリモートリファレンスのために鳥取大学が四国西部で実施していたMT法調査の測定装置とも同期し、多測点同時測定を行った。

測線2の測定は1998年にPhoenix社製のV5-16システムを1台、MTU-5を1台、MTU-2Eを2台用いて実施された。V5-16システムおよびMTU-5を用いた測点では電場2成分と磁場3成分の時系列データを取得し、MTU-2Eを用いた測点では電場2成分の時系列データを取得した。GPS信号を利用して各装置を同期し、さらに鳥取大学が鳥取県で実施していたMT法調査の測定装置と同期し、多測点同時測定を行った。

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、各セグメントごとに周波数解析を行い、0.00055~320Hzの範囲の40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。そして、リモートリファレンス処理により電場と磁場の伝達関数であるインピーダンスや水平磁場と垂直磁場の伝達関数であるティッパーを計算し、高品質のインピーダンスが求めたセグメントだけを編集して、見掛比抵抗や位相などのMTパラメータを求めた。なお、MTU-2Eを用いた測点では、磁場が測定されている最も近傍の測点の磁場データを用いてMTパラメータを求めた。

3. インダクションベクトル

インダクションベクトルは、ティッパーの大きさと位相から定義されるベクトルであり、その実数成分は低比抵抗帯に向き、比抵抗変化が急激なところで大きくなるという性質をもつ。電磁場5成分を測定した測点の周波数が100Hz、10Hz、1Hz、0.1Hz、0.01Hz、0.001Hzのインダクションベクトルの実数成分を第3図に示す。ただし、データの品質が悪く、インダクションベクトルの計算ができなかった測点のデータは除外してある。

1Hz以上の高周波のインダクションベクトルを見ると、測線中央部で中岳西部および烏帽子岳北部から湯の谷温泉にかけての地域を指す傾向があり、この傾向は周波数が低くなるとカルデラ壁に近い測点にも及ぶようになることがわかる。また、周波数が低くなるにつれてインダクションベクトルが大きくなる傾向がある。このことは、この地域の比較的浅部に低比抵抗帯が存在することを示唆している。この地域には温泉が点在し、熱水変質帯が広く分布していることより、低比抵抗は熱水や粘土鉱物によるものと推測される。

測線南部の測点の1Hz以上のインダクションベクトルは南西に向く傾向がある。また、カルデラ壁北側の測点のインダクションベクトルは1Hzで北もしくは北北東に向く傾向がある。これより、カルデラ内の比抵抗構造がカルデラより外側にある測点のインダクションベクトルに及ぼす影響は小さいと判断できる。

0.1Hzのインダクションベクトルは全測点で大きく、各測点で方向もまちまちである。データの品質が悪く、インダクションベクトルが計算できない測点も多いことから、当該地域ではこの周波数帯のノイズが大きいと推定される。

0.01Hzのインダクションベクトルは非常に小さく、高周波のベクトルのように中岳西部および烏帽子岳北部から湯の谷温泉にかけての地域を指す傾向は見られない。0.001Hzになると、全測点にわたりインダクションベクトルは西南側に向くようになる。この方向は、半田ほか(1990)が示した九州中部の長周期のインダクションベクトルの方向と一致する。このことから、周波数が0.01Hz以下のインダクションベクトルには阿蘇カルデラの構造よ

りさらに広域的な構造の影響が反映されているものと考えられる。

4. 2次元解析

九州中部の大局的な地質構造の走向は北東-南西と考えられる。しかし、インダクションベクトルの方向を見る限り、比抵抗構造の平均的な走向は北西-南東方向と考えられ、測線はその走向にほぼ直交していると判断できる。そこで、方向がN34° Eの測線が大局的な比抵抗構造と直交すると仮定し、各測点で得られたインピーダンスをその方向に回転させ、電場が測線の方向になるデータをTMモード、測線と直交する方向になるデータをTEモードと定義した。ここでは示していないが、両モードともに見掛比抵抗にはスタティックシフトの影響が現れている。MT法の2次元モデリングでは、TEモードの見掛比抵抗に現れるスタティックシフトの影響を取り扱うことができない。そこで、今回はTEモードの見掛比抵抗を使用せずに、TMモードの見掛比抵抗および位相だけを使用した場合の解析と、TMモードの見掛比抵抗および位相にTEモードの位相を併せて使用した場合の解析とを実施した。

解析には、Uchida and Ogawa(1993)による平滑化制約付きMT法2次元インバージョンプログラムを使用した。計算機容量と計算精度の制約を考慮して、解析には0.01~100Hzの範囲の比較的品质の高いデータだけを用いた。地形は測点および測点近傍の標高を測線に投影し、地下構造断面モデルに含めた。初期モデルは100Ω m均質として、8回の反復計算を実施した。

5. 比抵抗断面の検討

測線1の比抵抗断面を第4図に、測線2の比抵抗断面を第5図に示す。いずれの図においても、上がTMモードの見掛比抵抗および位相だけを使用した場合の解析結果を示し、下がTMモードの見掛比抵抗および位相にTEモードの位相を併せて使用した場合の解析結果を示す。ここで、図中の実線はKomazawa(1995)が3次元重力解析で求めた重力基盤の上面を示している。

いずれの測線においても標高-5 kmまでは、二つの場合の解析結果には基本的な差異はないと判断できる。また、両者の測線で求められた比抵抗断面にも大きな差異はない。NEDOが掘削した坑井の比抵抗検層データと比抵抗断面が示す比抵抗変化とを比較すると、両者が示す比抵抗構造は調和的であることがわかり、解析された比抵抗断面は真の比抵抗構造とは大きく掛け離れていないと判断した。

標高-5 km以下では、TEモードの位相を併せた場合の比抵抗断面の方にだけ、側方に低比抵抗体が現れている。一般にTEモードの方が垂直的な低比抵抗構造に対する分解能が高く、また深部構造に対する感度が高い。そのため、測線の側方に深部低比抵抗体が実際にある可能性と、低周波のインダクションベクトルが示す広域的な構造の影響が偽像として現れた可能性が考えられる。現状のデータからはどちらの結果が適当であるかの判断はできない。そこで、本論文では両者の結果にほとんど差異のない標高-5 kmまでの比抵抗構造について解釈を加える。

阿蘇カルデラは基本的に1~10Ω m前後の上部の低比抵抗層と100Ω m以上の高比抵抗基盤からなる。地表地質や坑井データとの比較より、上部の低比抵抗層はカルデラ堆積物に、高比抵抗基盤は先第三系の基盤岩類に相当する。深部ほど比抵抗が高いことから、岩石の孔隙率が高くなっていると予想される。比抵抗断面と重力基盤とを比較すると、カル

デラ中央部を除けば、重力基盤は数10~100Ωm以上となることがわかる。しかし、カルデラ中央部では重力基盤は10Ωm以下となっている。カルデラ壁周辺の先第三系の基盤に達した坑井によると、基盤の比抵抗は100Ωm以上であるので、重力基盤は比抵抗から推定される先第三系基盤より浅いといえる。重力基盤の上部が低比抵抗を示す原因として、カルデラ中央部では活発な熱水活動あるいは火山活動により基盤が破碎され、割れ目中に多量の熱水が存在することが考えられる。おそらく熱水は周辺の岩盤を変質させており、そのことも重力基盤の比抵抗が低くなるのに寄与していると推測される。標高-3km以下には1000Ωmを超える高比抵抗層があり、再生ドームのようにカルデラ中央部で隆起している。隆起の程度は測線2の方が大きい。一般にマグマあるいは溶融体は低比抵抗と考えられるが、MT法の解析結果を見る限り、少なくとも標高-10kmまでの間にはそのような低比抵抗体は検出されていない。

6. おわりに

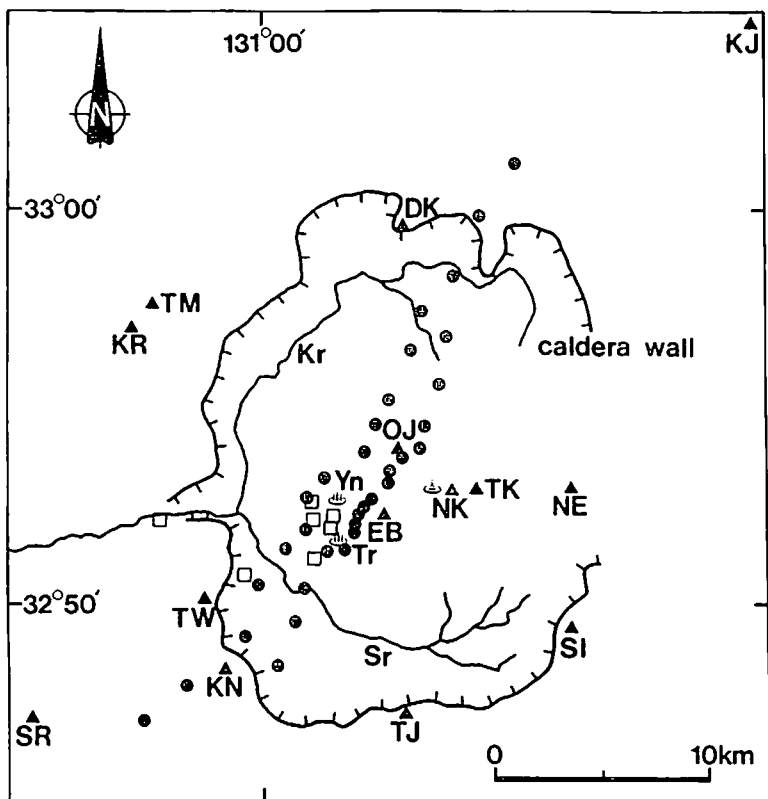
本論文では、阿蘇カルデラを北北東-南南西に横切る2本の測線で実施したMT法調査の解析結果について述べた。その結果、阿蘇カルデラの中央部で高比抵抗基盤が隆起していることがわかった。Komazawa(1995)によると、阿蘇カルデラの中央部には小さな高重力異常域があり、重力基盤の隆起も解析されている。カルデラ中央部では重力基盤と高比抵抗基盤の深度とが異なることや、高比抵抗基盤と地質基盤とが対応するかどうかの検証ができないことから、この隆起が再生ドームであり、阿蘇カルデラがバイアス型のカルデラであるとまでは言えない。しかし、隆起と中央火口丘群の位置とがほぼ重なり、カルデラの中心に近い測線2の方が隆起が大きいので、この隆起が地下深部からの火山活動で生じたと考えることはできる。カルデラ深部にはマグマの存在が予想されるが、MT法の結果では低比抵抗体と予想されるマグマを検出することはできなかった。この原因として、1) マグマの大きさあるいは幅が小さく現在のMT法の精度や分解能では検出ができない、2) 高温のマグマは水が少ないため高比抵抗である、3) 地下には現在マグマがないという可能性が考えられる。現在も火山活動が活発であるので、3)の可能性は考えにくい。1)あるいは2)の可能性を検証するため、今後も詳細な調査研究を続けていく必要がある。

謝辞

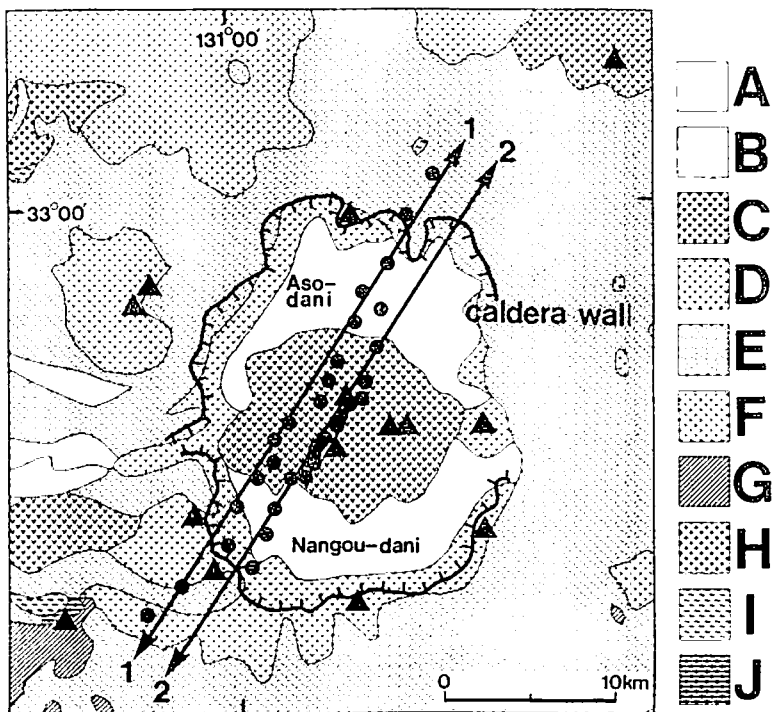
新エネルギー・産業技術総合開発機構には地熱開発促進調査「阿蘇山西部地域」の坑井データを使用させていただいた。また、現地調査ではPhoenix社の山下実氏、京都大学や熊本大学の関係者、および地元関係者からの多大の協力をいただいた。ここに厚く感謝の意を表す。

参考文献

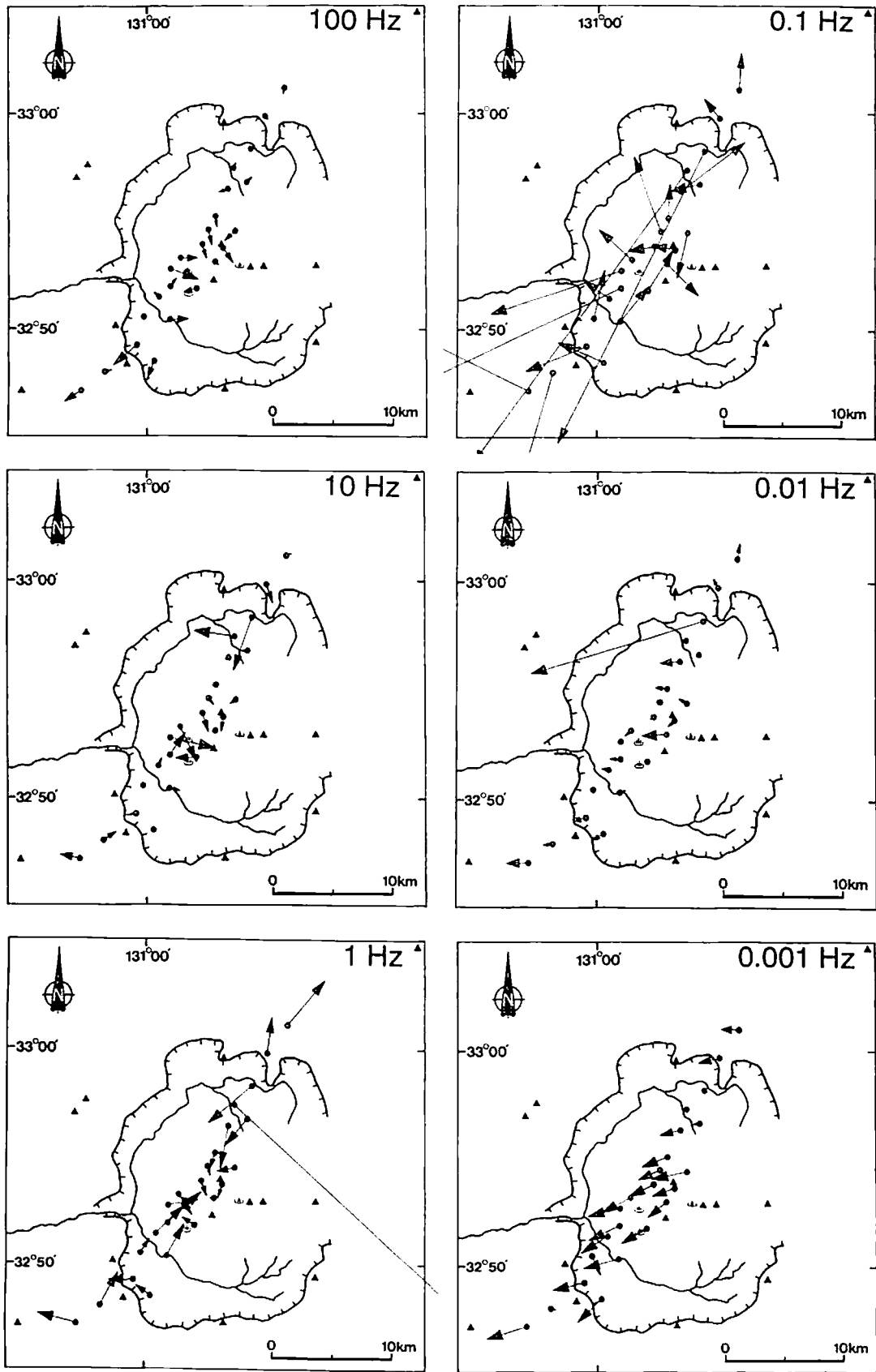
- 小野晃司・渡辺一徳(1985): 阿蘇火山地質図, 火山地質図, no.4, 地質調査所.
Komazawa, M. (1995): Gravimetric analysis of Aso Volcano and its interpretation. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 41, 17-45.
半田駿・田中良和・鈴木亮(1990): 別府-島原地溝帯沿いでのCA(序報), *Conductivity Anomaly研究会1990年論文集*, 219-223.
Uchida, T., and Ogawa, Y. (1993): Development of FORTRAN code for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint. *Open-file Report, Geol. Surv. Japan*, 205, 115p.



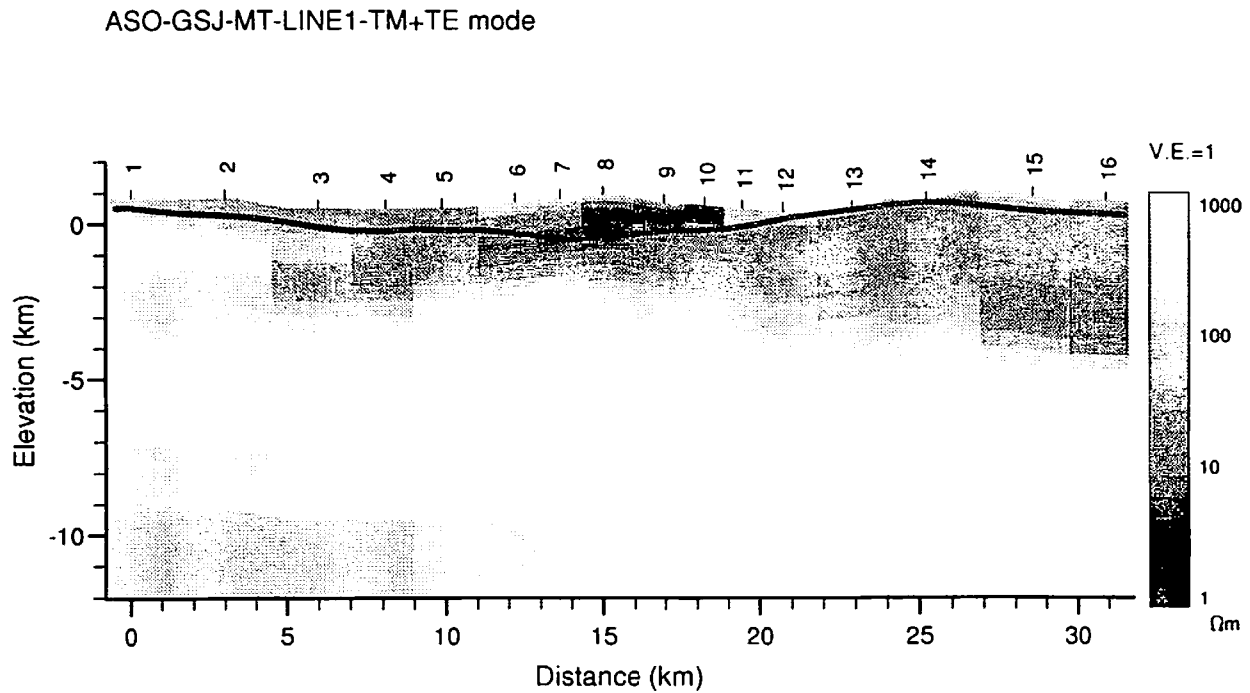
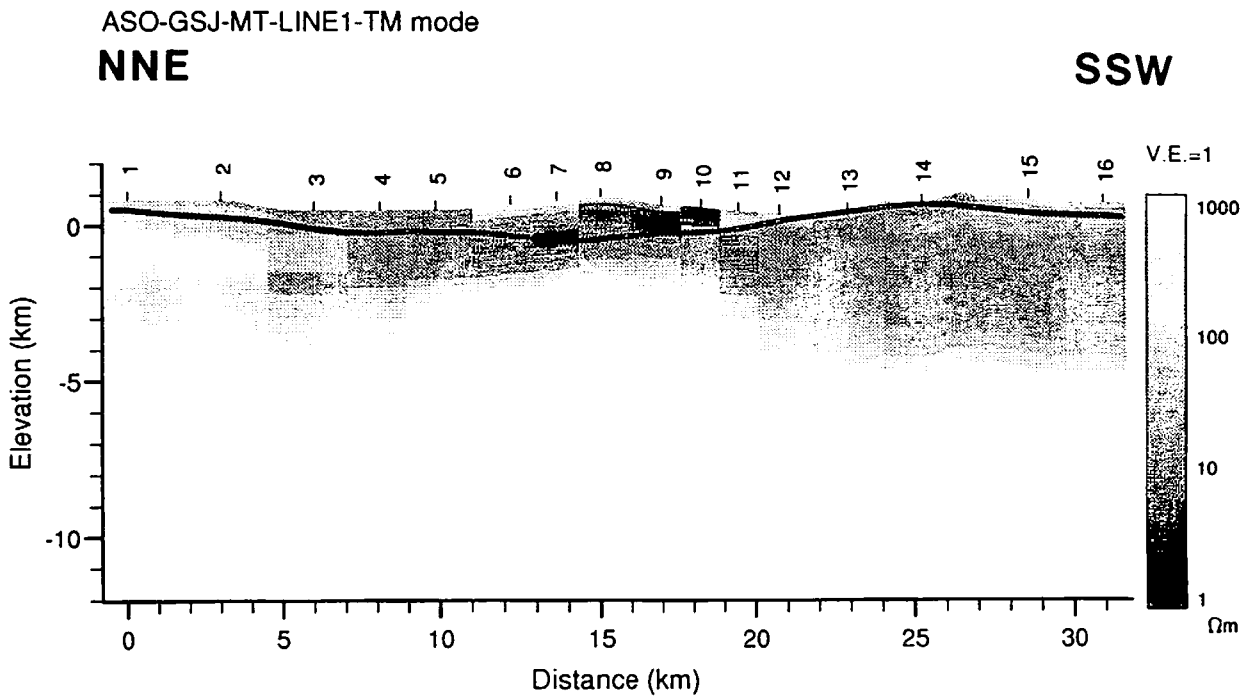
第1図 MT法の測点位置図。
●がMT法の測点を示す。□はNEDOの坑井を示す。▲は主な山を示す；DK:大観峰，ED:烏帽子岳，KJ:九住山，KN:冠ヶ岳，KR:鞍岳，NK:中岳，NE:根子岳，OJ:往生岳，SE:清栄山，SR:城山，TJ:高千穂野，TK:高岳，TM:ツームシ山，TW:俵山。Yn:湯の谷温泉，Tr:垂玉温泉。Kr:黒川，Sr:白川。



第2図 阿蘇カルデラの地質図とMT法の測点および測線位置。●がMT法の測線を、実線1、2が測線を示す。地質の凡例は、
A:堆積物(完新世)、
B:堆積岩(更新世)、
C:火山岩(完新世)、
D:火山岩(更新世)、
E:火砕流(第四紀)、
F:火山岩(第三紀)、
G:堆積岩(先第三紀)、
H:花崗岩類(先第三紀)、
I:超苦鉄質岩類、
J:変成岩類である。



第3図 インダクションベクトル(実数成分)の分布。図中の距離10kmがベクトルの大きさ1に相当する。

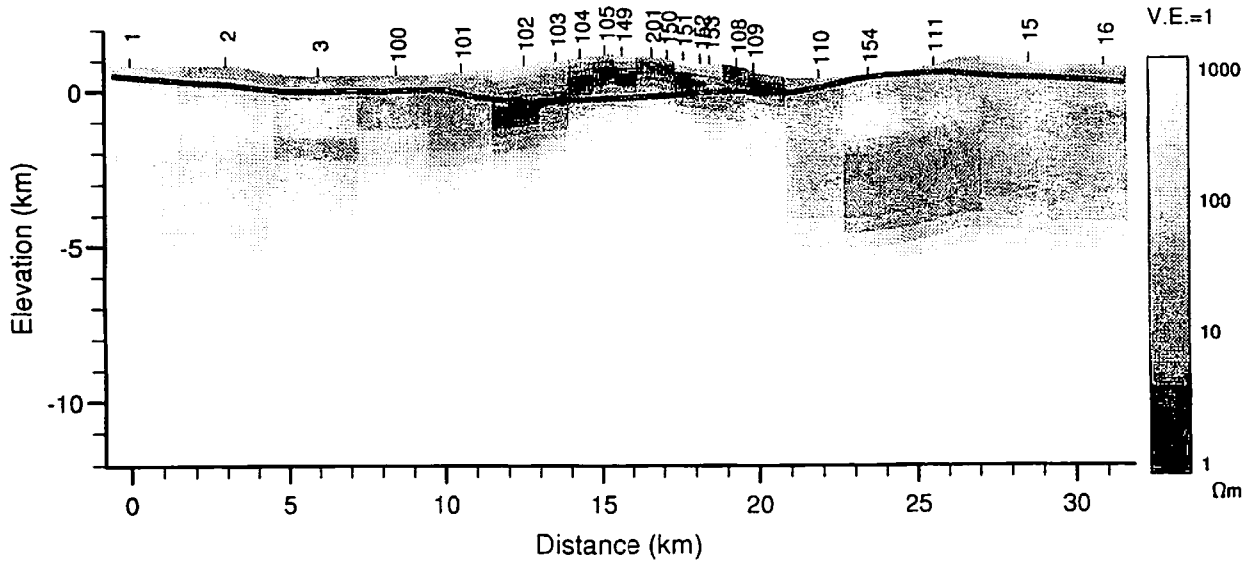


第4図 測線1の解析比抵抗断面。上がTMモードの見掛比抵抗および位相だけを使用した場合の解析結果であり、下がTMモードの見掛比抵抗および位相にTEモードの位相を併せて使用した場合の解析結果である。図中の実線はKomazawa(1995)が3次元重力解析で求めた重力基盤の上面を示す。

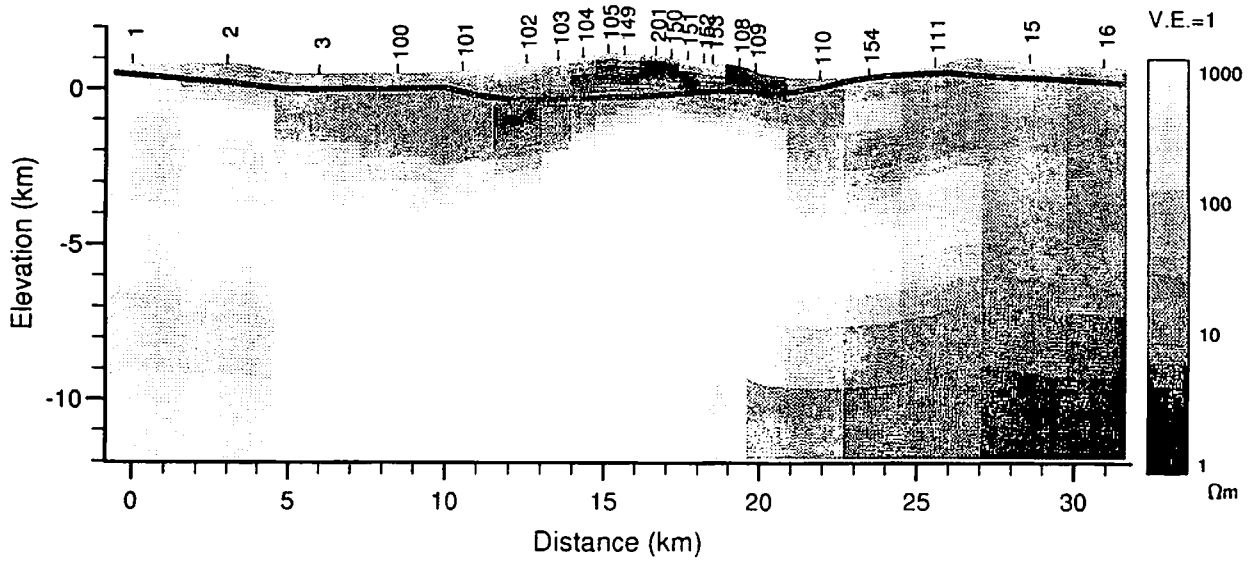
ASO-GSJ-MT-LINE2-TM mode

NNE

SSW



ASO-GSJ-MT-LINE2-TM+TE mode



第5図 測線1の解析比抵抗断面。上がTMモードの見掛け抵抗および位相だけを使用した場合の解析結果であり、下がTMモードの見掛け抵抗および位相にTEモードの位相を併せて使用した場合の解析結果である。図中の実線はKomazawa(1995)が3次元重力解析で求めた重力基盤の上面を示す。