

阿蘇火口周辺の比抵抗構造とその時間変化

佐賀大学教養部 半田 駿、鈴木 亮
京都大学理学部 田中良和

The electrical conductivity structure around the active crater of Aso volcano and its changes associated with the volcanic activity

Shun Handa¹⁾, Yoshikazu Tanaka²⁾ and Akira Suzuki¹⁾

1) College of Liberal Arts, Saga University, Saga, 840.

2) Faculty of Science, Kyoto University, Kumamoto, 869-14.

1、はじめに

阿蘇火山は大規模なカルデラ構造と同時に、中央火口丘群の1つである中岳火口で活発な火山活動が現在も継続していることでよく知られている。我々は、このカルデラの浅部比抵抗構造を明らかにするために、ELF、VLF-MT探査を実施してきた。その結果、中央火口丘についても次のような比抵抗構造の特徴が明かになった¹⁾。

・中央火口丘は、北部が高比抵抗、南部の南郷谷側で低比抵抗で、現在活動中の火口は両者の境界付近に位置する。

・火口周辺は $30\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗である。

しかし、ELF、VLF-MT法では4周波数のみを利用するため、詳細な、特に浅部の比抵抗構造の決定は困難であった。1989年より火山活動が活発化してきた事から、火口周辺のより詳細な比抵抗構造の探査、及びその時間変化のモニターが必要となってきた。そこで、信号の安定性に優れているCSMT法による繰り返し測定を実施することにした。ここでは、ELF、VLF-MTを含めたこれらの探査によって得られた火口周辺での比抵抗構造と、火山活動の推移に伴うと思われる構造の変化について報告する。

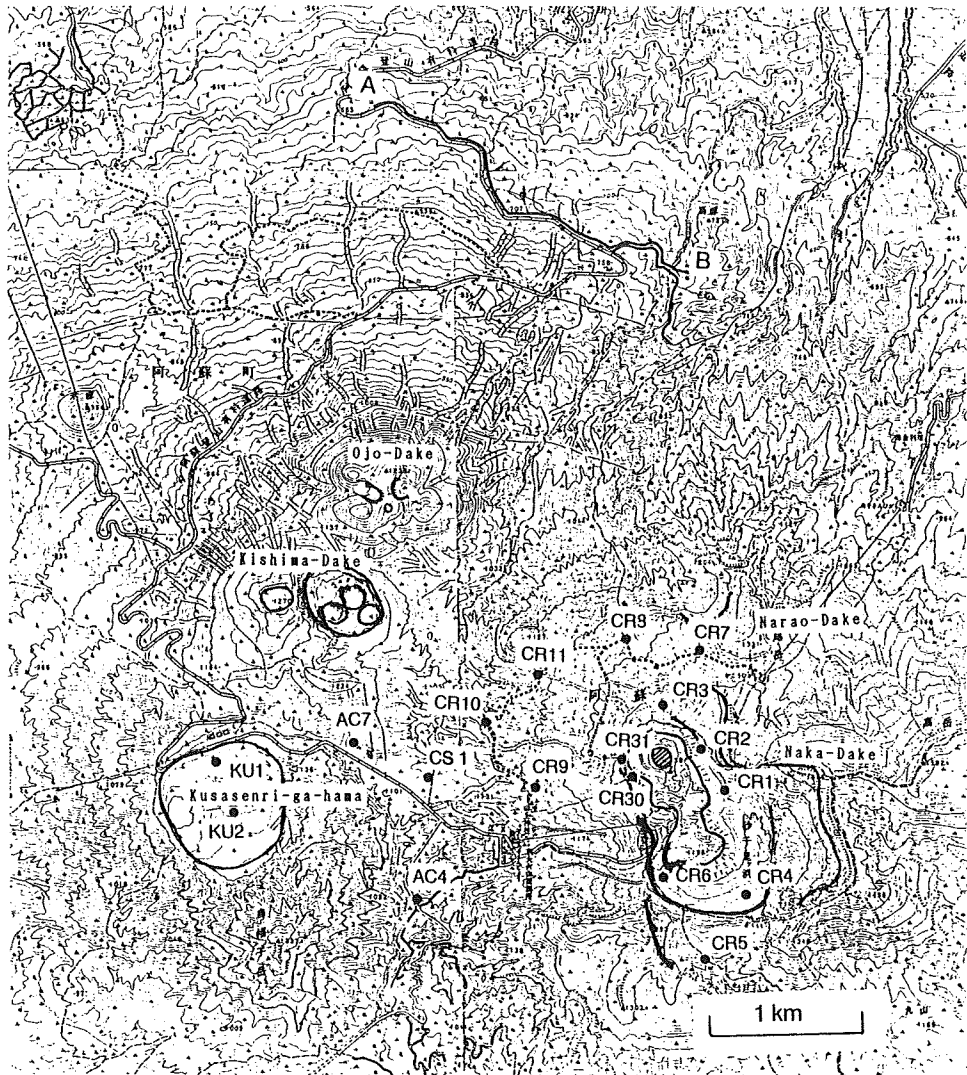
2、観測

ELF-MT

カルデラ内外のELF-MT探査は1983年より始めたが、そのうちの火口周辺域については1987年7月に実施した。測定の詳細は半田 他¹⁾に譲るが、この観測では電場南北成分(磁場東西成分)の見かけの比抵抗が得られている。

CSMT

CSMT観測は1989年8月、1990年10月に実施した。何れも、(株)建設企画コンサルタント製(千葉電子製作)の送受信システムを用いた。このシステムでは、40~5.12kHz間で2倍おきの8周波数、及び20.4、14.1、7.8Hzの計11周波数を用いる。信号源とし



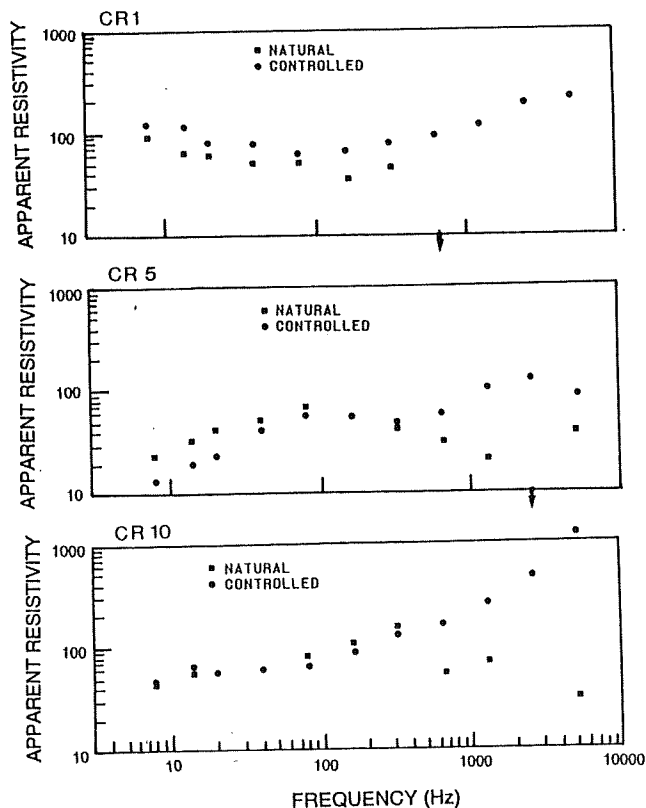
第1図 ELF、VLF-MT及びCSMT観測点分布図。CR2はELF、VLF-MTのみ、CR11、30、31、CS1はCSMTのみ実施。A、BはCSMT送信電極位置を示す。図中の実線は噴火口⁴⁾を示す。

て両端を接地した電流ダイポールを用いたが、その電極位置（A、B）及び受信点を第1図に示す。電極間間隔は直線距離で約2.5kmである。

受信機の磁場センサーは周波数に応じて2個のインダクション・コイルを使い分けている。信号はアナログ的に処理され、磁場、電場成分の振幅がパネルに表示される。位相は表示されないが、今回は受信信号をモニター端子からCMTに録音、持ち帰り、FFT処理により位相データを得た。送信位置が地形上の制約から約N30W方向に設定されているので、受信センサーもそれに合わせて（電場がN30W、磁場N60E）配置した。

CSMTと自然電磁波を用いたMTの比較

今回用いたシステムは、位相データが得られないこと、波形のスタッキングが出来ないこと等の欠点もあるが、高ゲインアンプ、低周波成分をシューマン共振周波数に合わせていること等から、CSMT受信だけでなく自然電磁波によるMTデータをも得ることが可能である。第2図は1989年8月のCSMT観測時に、同時に受信した自然電磁波から得られた周波数-見かけの比抵抗(■)と、CSMTの結果(●)の比較の1例である。測定時は近雷があり、自然電磁波の信号レベル(CSMTにとってはノイズレベルであるが)は高かった。今回の場合、第2図に示した地点を含む多くの点で、2つの方法から得た結果が、8~160/320Hzの周波数範囲ではかなりよく合っていることが確認された。またほとんどの点で、640Hz以上の見かけの比抵抗が、ほぼ周波数に逆比例して減少し、CSMTの結果とは合わなかった。これは電離層のカットオフ周波数が1~2kHzにあることから、この周波数付近の電波は強い吸収を受けるため、信号レベルの低下によってS/N比が低下し、見かけの比抵抗が低下したものであると思われる。320Hz以下でも両者のMT曲線が平行になって一致しない場合があ



第2図 自然雑音の測定から得られた見かけの比抵抗(■)とCSMT法による見かけの比抵抗(●)の比較。

る。これは統計的誤差、あるいはCSMTでは電波の到来方向が一定であるのに対し、自然電磁波の場合幅があるため、特に2・3次元的構造の卓越する地点では異方性の現れ方が両者で異なることによるのであろう。

これらの結果から、信号強度が強い時（例えば夏期）にはシューマン共振以外の周波数でもMTとして利用できること、しかしその場合、得られた結果の信頼性については、特に高周波成分で、十分な検討が必要であることが分かる。

Near fieldの判定

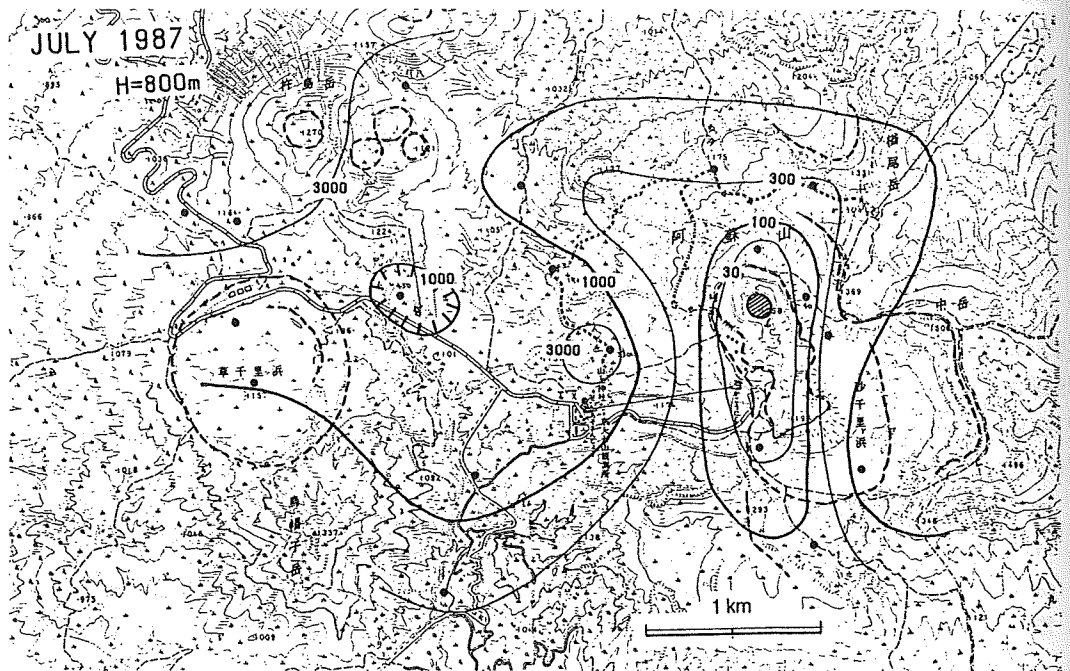
今回の観測では、地形の制約から送-受信点間距離は最小約2.5kmと短くなった。CSMT探査時に常に問題になるのがnear fieldの影響である。これは信号源からの直接波のため、低周波成分の見かけの比抵抗が増加し、位相が減少することで判断できる。第2図のCR10測点は、今回の観測で信号源に最も近いグループに属するが、低周波側でもELF-MT結果と見かけの比抵抗値、傾向共にほぼ同じであり、したがってこの測点ではnear fieldの影響はないと考えてよい。この様にCSMT測定時に、あるいはその前後で自然電磁波を用いたMTを実施しておけば（もっともELF-MT等が実施困難であるからCSMTをという場合が多いが）、near fieldの判定、さらにはもっと積極的にnear fieldの補正まで出来る可能性があることを指摘しておきたい。

3、火口周辺の比抵抗構造

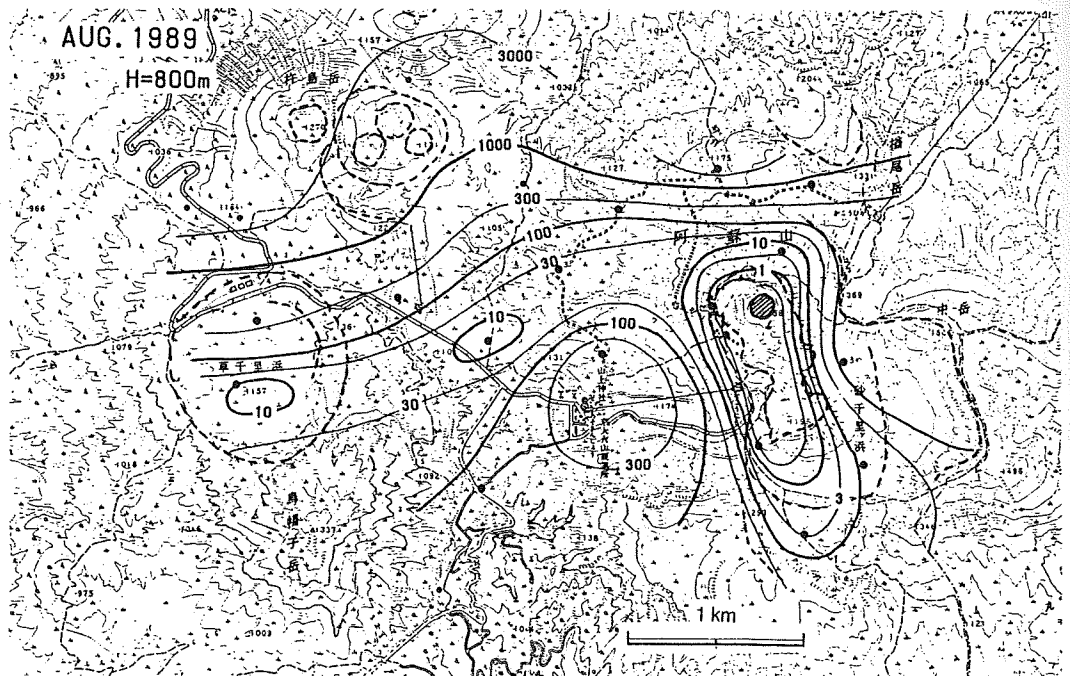
得られたデータから、ELF、VLF-MTでは、見かけの比抵抗を用いて2/3層構造を仮定した1次元モデル計算を、CSMTでは位相データも用いた多層構造モデル計算を行った。

第3図(a)に1987年に実施したELF、VLF-MT探査によって得られた中岳火口周辺の比抵抗分布を示す。同図では各測点で得られた1次元モデルを用いて、標高800m面の比抵抗分布を示した。等比抵抗線は第1図に表示した測点以外のデータも用いて描いた。1章で述べたように、火口北端より北側では高比抵抗、火口周辺では低比抵抗域(30Ω・m)が南へ細長く分布する。第3図(b)は1989年8月実施のCSMTの結果である。前記ELF、VLF-MTと定性的には同じ結果が得られているが、特に異なるのは火口周辺が極端な低比抵抗になっていることである。この傾向は1990年10月のCSMT観測でも同じである。1989年では、特に低い値(0.1Ω・m)は、活動中の火口の西側約100mのCR31と南のCR6で見られる。

ところで、1989年に見られる火口周辺の低比抵抗域は、地表から連続して存在するものではない。第4図は1989年のCSMTデータから1次元モデル計算によって得た比抵抗柱状図である。本図は火口を西上方から見た配置で描いている。本図から、火口周辺(CR1, 3~6, 30, 31)の表層は50~300Ω・mとやや高比抵抗で、CR1を除くと第2層目に5~0.1Ω・mの極端な低比抵抗層が現れる。この層の上面の標高は、北部で約1190~1270m、南部では1130~1140mと、北部で高く南部では低くなる。その層厚は活動火口から離れたCR4、5では薄く、せいぜい30mである。これらの測点では、やや比抵抗の高い層を挟んで深度280~320mに



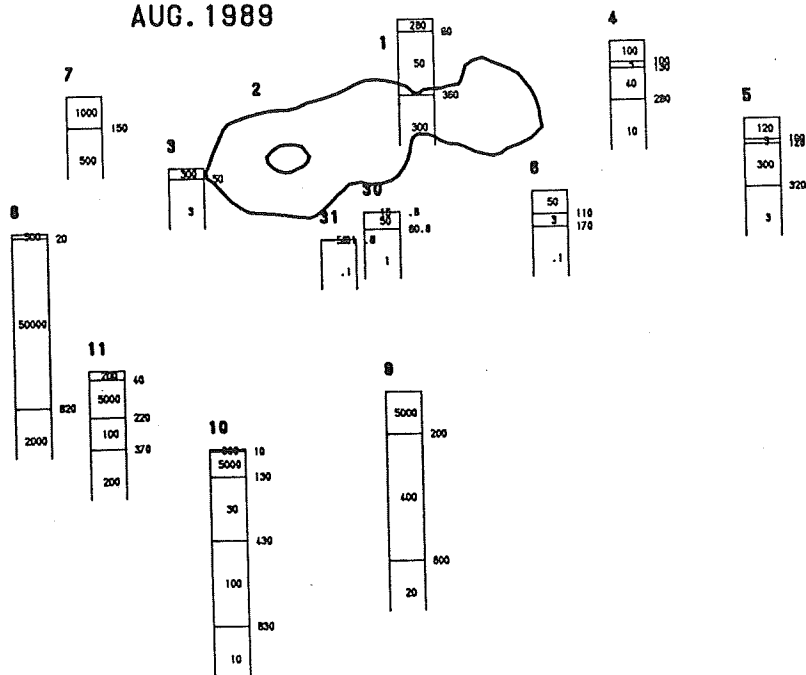
(a)



(b)

第3図 1987年8月実施のELF、VLF-MT探査結果(a)、及び1989年8月実施のCSMT探査結果(b)から得られた800m標高面での比抵抗分布図。

AUG. 1989



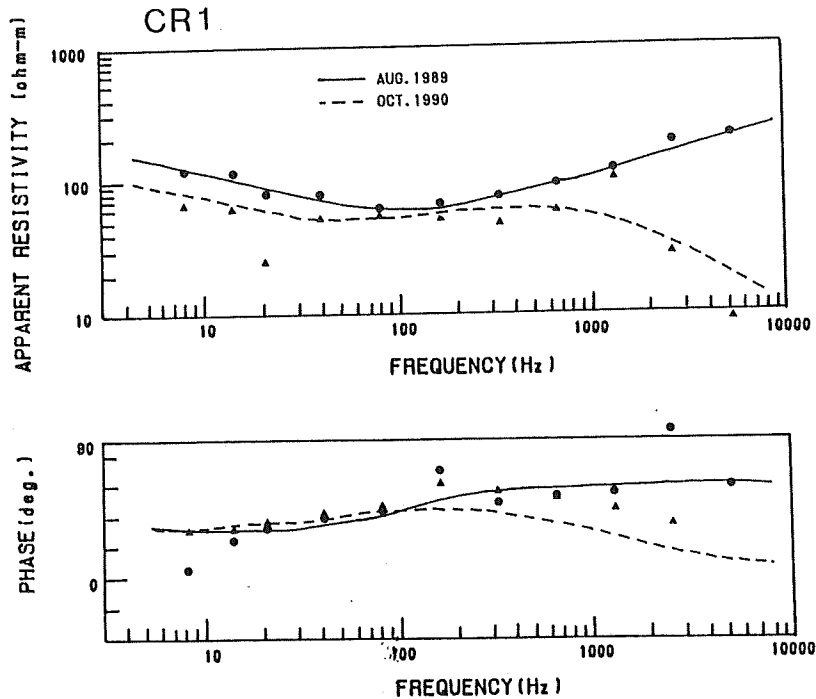
第4図 火口周辺の測点の比抵抗柱状図(1989年8月)。図は火口を西から見たものである。深さの単位はm、比抵抗は $\Omega \cdot m$ 。

再び $10 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層が出現する。

一方、火口北側では、 $500 \Omega \cdot m$ 以上の層がCR7では1.8km、CR8では5km以上続く。高比抵抗と低比抵抗域の境に位置するCR10、11では、表層が高比抵抗であるが、100~200m深度で $200 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗を持つ層が現れる。第3図ではやや高比抵抗となっているCR9も、CR10同様深部(800m)で $20 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗となる。また、この比抵抗ギャップが旧火口である草千里ヶ浜の中央を東西に横切っていることは、草千里ヶ浜火口の成因とも関係して興味深い。

4、比抵抗構造の時間変化

阿蘇火山は1988年春ごろから活動の活発化の兆しが見え始め(湯だまりの減少)、1989年6月からは本格的な噴煙活動に入った³⁾。この噴火活動は1989年10月にピークを迎えるが、第1回のCSMT観測は、火山微動が増加を始める直前の8月に実施された。観測当時火口は激しい噴煙を上げており、若干の火山灰の噴出も見られる状況であった。第



第5図 CR1測点での1989年8月(●)と1990年10月(▲)実施のCSMT応答曲線の比較。実線(1989年)と破線(1990年)は1次元モデリングによる理論曲線。

2回目のCSMT観測は火山活動がやや鎮静化した1990年10月に実施した。ただ、2回目は観測体制の不備から、火口周辺部のCR1, 3~6, 30, 31についてのみ繰り返し測定を実施した。

第5図はCR1測点での1989年、90年の見かけの比抵抗、位相データの比較である。図中の実線、破線は何れも1次元モデルによる応答曲線である。この図から、第2回目の測定時には、表層が極端に低比抵抗となっていることが分かる。この傾向は1990年観測の全ての測点に共通の特徴であった。1次元モデル計算から、この層は比抵抗が $3 \sim 0.1 \Omega \cdot m$ で深さ1m程度のごく表層にのみ分布することが分かった。今回の火山活動では、阿蘇周辺でも火山灰による農作物への被害が出た程大量の火山灰が放出された。1989年8月の観測時火口周辺は少量の積灰しか見られなかったが、1990年10月には水を含んだ多量の積灰が見られた。これらから、この表層の低比抵抗層はこれら水を含んだ火山灰層であると考えてよい。

第5図では低周波側にも見かけの比抵抗の減少が見られる。ただ、このような長周期側での減少が見られるのはこのCR1のみで、他は殆ど変化が無い(CR4, 5, 6, 30)、むしろ増加(CR3, 31)の傾向にある。さらに、CR1も含めて長周期側の位相変化が殆ど見られないことから、深部での大規模な比抵抗構造の変化は、少なくとも1989年8月~90年10月の比較で

は無かったと言えよう。

しかし、詳細に比較すると小規模ではあるが興味ある変化が見られる。第6図は火口周辺での3回の測定結果を柱状図にして纏めたものである。この図から、1989年から90年への変化として

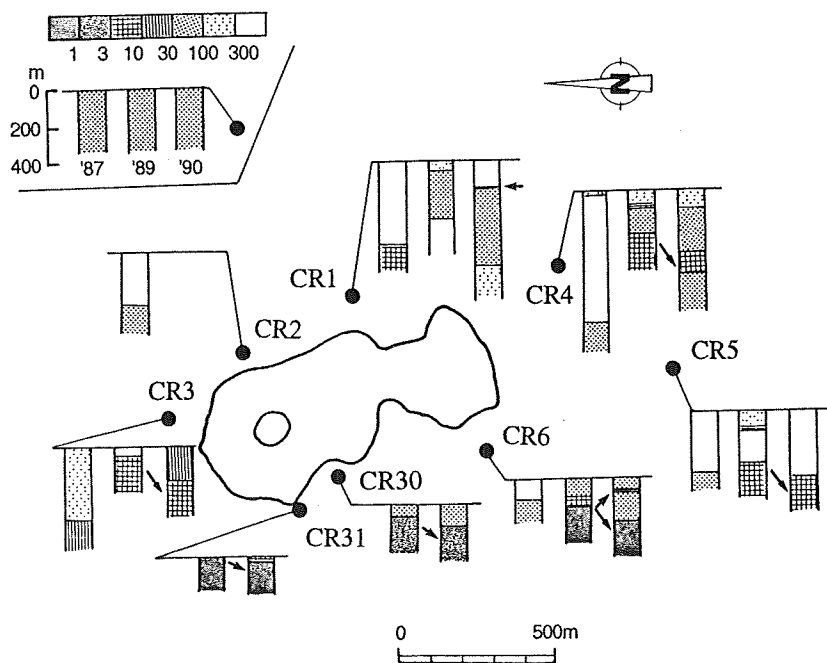
- ・ 深度100~320mの2層の低比抵抗層に消長がみられる。
- ・ 活動している火口の近くでは(CR3, 30, 31)、低比抵抗層の上端が深くなる。
- ・ 浅部で高比抵抗化の傾向がみられる(CR1, 4, 5)。

ことをあげることができる。

5、議論

ここでは、CSMT探査で明らかになった、火口周辺にみられる深度100~320mの2つの低比抵抗層について簡単な検討を行う。

この層が1989年の火山活動が活発になる以前に存在したかどうかは、その性質、成因を考える上で重要な点の1つである。第3図(a)に見られるように、1987年のELF、VLF-MT探査時にも、火口周辺には低比抵抗層が存在していたことは確かである。1987年と1989年以降との測定方法、従って、構造決定精度が異なること、観測回数



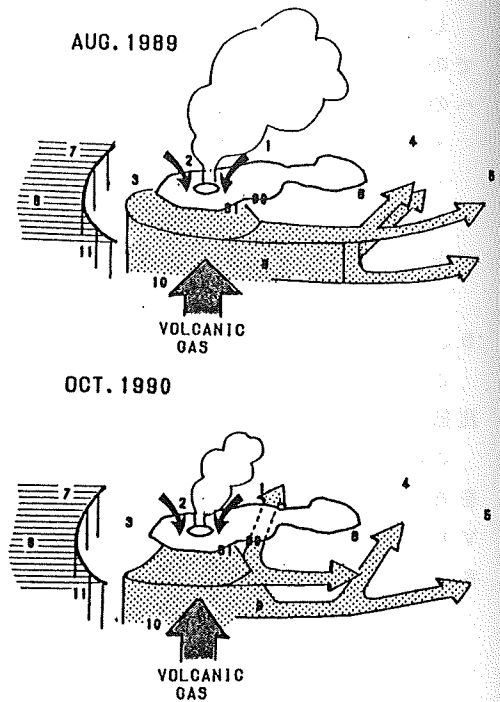
第6図 火口周辺の測点での1987、89、90年の観測から推定した1次元比抵抗構造の時間変化。矢印は $10\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層の変化を示す。

足がこの問題の解決を困難にしているが、しかし、次の点から1989年の低比抵抗層は少なくとも1987年以後に出現したものであると我々は考えている。それは、1989年以降と比較して、1987年の8~20Hzの見かけの比抵抗がCR1を除くといずれも5~10倍大きいことである。MTパラメータが低比抵抗層に強く影響されることを考慮すると、1987年当時、1989年の様な極端な低比抵抗層は無かったと考えるのが自然である。したがって、火口周辺は常時低比抵抗ではあるが、 $10\Omega \cdot m$ 以下、しばしば $0.1\Omega \cdot m$ といった極端な低比抵抗値を示す層は、1989年春からの火山活動の活発化に伴って出現した可能性が高い。

今回の活動では、火口周辺に配置したプロトン磁力計による観測によって、火山活動に伴う全磁力異常の変化が生じた事が明らかになっている²⁾。田中²⁾は、火口直下300mに置かれた半径50mのダイポール部分の帯・消磁でその主要な変化が説明できるとしている。また磁気異常変化の周期から、「地下水の関与した熱輸送」による可能性をも示唆している。

出現深度が深くないこと及び火口周辺に広く分布することを考えると、この1989、90年の低比抵抗層は、マグマの上昇によるものではありえず、地下水、それも $0.1\Omega \cdot m$ という低比抵抗から、イオンを多量に含んだ熱水系と考えるのが自然であろう。つまり、1989、90年のCSMT観測結果から得られた比抵抗構造の変化は、火口周辺での熱水系の変化（おそらく火山活動に伴う）を示しているであろう。そうだとすると、この熱水系のパターン変化は第7図のようになる。図中の薄い網目部分が低比抵抗層（地下水層）で、数字は測点位置とその番号を示す。なお、図は火口西部から見たものである。1989年にCR4、5では2層在った低比抵抗層が1990年には下部の1層だけになっていること、CR6では逆に2層に分かれているが、層厚は薄くなること、CR1で新たに上層に低比抵抗層が出現したこと、CR30、31で低比抵抗層の上端が低下したことを考慮して描いている。これから、

- ・熱水系は火口北側の高比抵抗域（溶岩のような固結した火山噴出物からなると推定される）にブロックされて、主として南側に広がっていること、
 - ・火山活動の鎮静化に伴って熱水域が鉛直、水平方向共に縮小していること、
- が分かる。この熱水系は図にも示したように、火山活動にともなって火道から供給されたものと考えられるが、図の矢印で示したように火口からしみ込んだ雨水の寄与も否定できない。



第7図 CSMT観測から推定される火口周辺の熱水系モデル。

この熱水系の消長が活動のモニターとなり得ることから、火口周辺でのボーリングによる熱水系のモニタリングの重要性を指摘しておきたい。ボーリングの位置決めには、MT測定データが有効であることは言うまでもない。

謝辞

本観測に用いたCSMT装置は(株)建設企画コンサルタントからお借りしたものです。観測には京都大学火山研究施設に便宜を図っていただきました。また、CSMT観測では、増田秀晴(京大理)、小里隆孝(株)建設企画コンサルタント)、板井秀典、柴拓海(株)ニチポー)、爪田正敏、森山孝紀、野中治男(当時佐賀大理工)の皆さんの協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)半田 駿・鈴木 亮・田中良和、阿蘇カルデラ下の比抵抗構造、Conductivity Anomaly研究会1988年論文集、81-96、1988.
- 2)田中良和、地磁気変化から見た1989年の阿蘇火山活動、Conductivity Anomaly研究会1990年論文集、127-132、1990.
- 3)池辺伸一郎・渡辺一徳、阿蘇火山中岳1989年の噴火、火山 第2集、34、389-390、1989.
- 4)小野晃司・渡辺一徳、阿蘇火山地質図、地質調査所、1985.