

# ULF帯電磁気観測によってえられた 雲仙岳周辺の比抵抗構造

気象庁地磁気観測所 山本哲也  
東京大学地震研究所 鍵山恒臣, 歌田久司  
雲仙MT観測グループ\*

Resistivity Structure around Unzen Volcano by ULF-MT Method

Tetsuya Yamamoto<sup>1</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>2</sup>, Hisashi Utada<sup>2</sup>,  
and Unzen MT Research Group

<sup>1</sup>Kakioka Magnetic Observatory, JMA

<sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

## 1. はじめに

近年、火山の噴火活動の推移を理解し、活動予測を行うには、火山の構造についての十分な知識が重要であることが認識されるようになり、火山の構造調査が積極的に実施されている。そのひとつとして電磁気的な手法、特にMT法が活用されている。MT法では火山活動をひきおこすマグマ、それによって加熱された熱水、また噴火活動に密接に関連すると考えられる帯水層などが低比抵抗層としてとらえられ、火山について多くの情報がえられる。

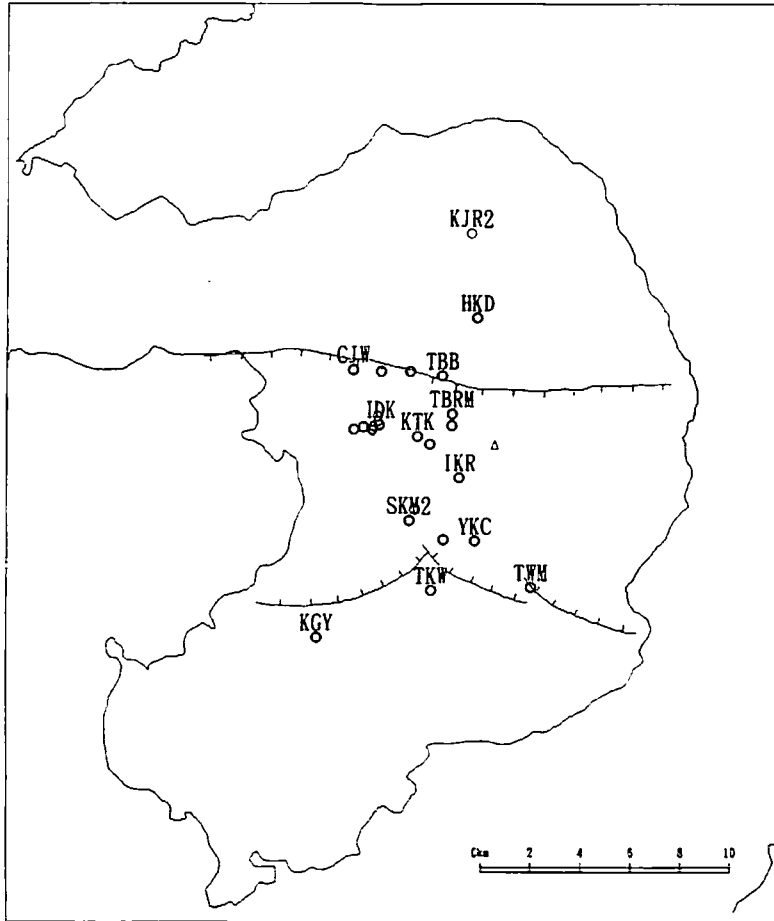
雲仙火山の普賢岳では1990年11月の噴火開始以来、1994年の今日に至るまで、溶岩の噴出と溶岩ドームの形成を主とした噴火活動が続いている。雲仙火山は九州西部の島原半島にあり、半島を東西に横切る雲仙地溝のほぼ中央に位置する。雲仙地溝は、北側は千々石断層を、南側は布津断層（東部）、金浜断層（西部）を境界としている。噴火の初期に雲仙火山の西側では噴火に関連するとみられる興味深い地震活動、地殻変動がみられた。

噴火前から溶岩ドームが出現した時期にかけて活発な地震活動があったのは、雲仙地溝の西部の千々石湾から普賢岳にかけての地域である<sup>1)</sup>。活動は主として数kmまでの深さに分布しており、分布は東側の普賢岳にかけて浅くなっている。

また、噴火の初期に実施された雲仙地溝周辺の水準測量の結果では、地殻の上下変動を説明する点力源が雲仙火山の西側に求められ、その深さは数kmになる<sup>2)</sup>。同様にGPSの観測によってえられる水平変動についてもほぼ同じ場所に点力源がもとめられる。これらの観

---

\*西田泰典（北海道大学理学部）、三品正明（東北大学理学部）、増谷文雄、上嶋誠、長田昇（東京大学地震研究所）、山田巧夫（名古屋大学理学部）、大志万直人（京都大学防災研究所）、田中良和、増田秀晴、橋本武志（京都大学理学部）、村上英記（高知大学理学部）、清水洋、松島健（九州大学理学部）、茂木透（九州大学工学部）、下泉政志（北九州職業訓練短大）



第1図. 観測点の配置.

測データから雲仙火山の西側の深さ数km程度のところに普賢岳が噴出しているマグマを供給するマグマ溜りがあるのではないかとの推定もなされている。

我々は、この雲仙火山周辺で1991年から合計8回にわたってULF-MT観測を行い、比抵抗構造を調査している。調査では、噴火との関連で注目される深さ数kmおよびさらに深い部分の比抵抗構造に特に注目している。以下では、この調査と結果について述べる。

## 2. 観測およびデータ処理

第1図にこれまでに実施したULF-MTの観測点の配置を示す。観測点は主に雲仙地溝の西部に配置している。観測は、数点から多い場合は10点以上の同時観測の形をとっており、各観測点では、U30、U36などのULF電磁場測定器を用いて3日-5日にわたって電磁場の毎秒値を測定している。

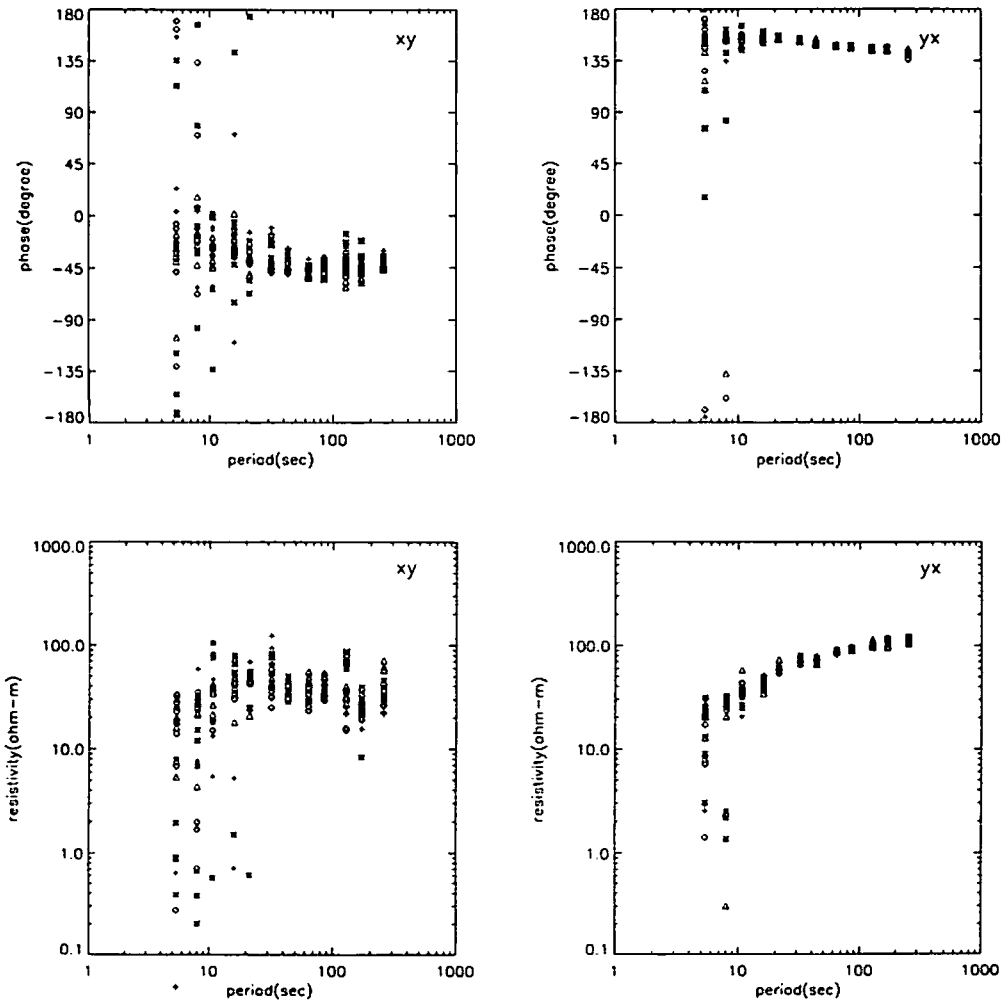
測定データは、スペクトル解析を行い、各周期の電場 ( $E_x, E_y$ )、磁場 ( $B_x, B_y$ ) を求め、

その比例係数すなわちインピーダンス・テンソル ( $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ ) を最少自乗法で求めている。これらには次の関係がある。

$$E_x = Z_{xx}B_x + Z_{xy}B_y$$

$$E_y = Z_{yx}B_x + Z_{yy}B_y$$

解析にはU L F帯の数秒から数100秒の周期を用いているが、30秒以下の短周期では、現象の振幅が小さく良質なデータを与えることがむずかしい。特に最も注目している数秒から20秒程度の周期ではソースとなる地磁気擾乱の振幅がローカルなノイズに比べて小さいこ



第2図. 観測点IDKについてえられたインピーダンス・テンソル(みかけ比抵抗と位相差).  $E_x - B_y$ の位相差(左上),  $E_x - B_y$ のみかけ比抵抗(左下),  $E_y - B_x$ の位相差(右上),  $E_y - B_x$ のみかけ比抵抗(右下).

ともよくある。このようなデータのスペクトル解析では自己スペクトルの推定値が真の値よりも必ず大きくなるため、えられる結果が1方向にバイアスをうける。

これを防ぐために、われわれの調査ではリモート・リファレンスの手法<sup>2)</sup>を採用している。リモート・リファレンスでは、参照点のデータを用いることで、各成分のクロス・スペクトルのみからインピーダンス・テンソルを求めるので、原理的にはバイアスをうけない。同時観測を行っている観測点はどの点でも参照点とできる。解析では、顕著なノイズがないかぎり利用しうるすべての観測点をリモート・リファレンスの参照点として用いている。

観測は数日にわたって実施しているが、1日分のデータから、それぞれインピーダンス・テンソルの推定値を求めている。

当然、ノイズの大きい区間のデータは解析に用いないほうが良い結果がえられるので、通常の方法では人間がデータの質を判断し解析に用いる区間を決めている。しかし、同一区間のデータでも周期によってSN比は大きく異なる場合も多く、また短周期については現象そのものが小さいためノイズの大小を判断するのが大変である。選別作業をすべての観測点のさまざまな周期について行うのはかなりの労力を要する。データ量が多いこともあり、われわれの解析では解析区間の選別のに上嶋<sup>4)</sup>のローバスト・スタッキングの手法を一部変更して利用し、大幅に自動化を図っている。

第2図に観測点IDKのインピーダンス・テンソルの推定値を示す。観測日数と参照点の数だけ推定値がえられるので、ひとつの周期について30個以上の点が表示してある。点が集中する付近に真の値があると考えられる。分布から推定値の信頼度について見当をつけることができる。IDKの場合  $Z_{yy}$  はおおむねよく決まっています、信頼度は高いといえる。ただし、周期10秒以下についてはばらつきが少し大きくなる。それに対して  $Z_{xy}$  は全体としてばらつきが大きく特に周期20秒以下で顕著である。このような推定値をそれぞれ平均すると多くの参照点とリモート・リファレンスをとったのと同様の効果があると考えられる。例示した推定値について、平均した結果を第3図に示す。絶対値の大きな  $Z_{xx}$ ,  $Z_{yy}$  は当然よい値がえられるとして、 $Z_{xy}$  のように絶対値の小さい成分（みかけ比抵抗であらわしたとき約  $1 \Omega m$ ）でも、周期の変化にともなうばらつきは小さく、信頼度が高いことをうかがわせる。

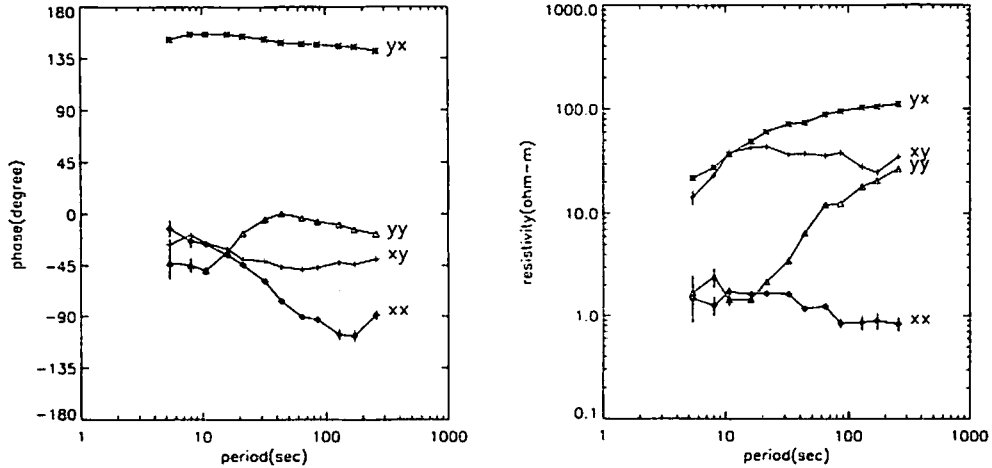
このようにしてえられたインピーダンス・テンソルを、測定座標系によらないスカラー量  $Z$  に変換した。また、これからみかけ比抵抗  $\rho_a$ 、位相差  $\phi$  を計算した。用いる式は次のようになる。

$$Z = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2}$$

$$\rho_a = (\mu T / 2\pi) |Z|^2$$

$$\phi = \arg Z$$

式中、 $\mu$  は透磁率を、 $T$  は周期を表している。



第3図. 観測点IDKについて推定値を平均してえられた各成分の位相差(左)とみかけ比抵抗(右).

### 3. 結果

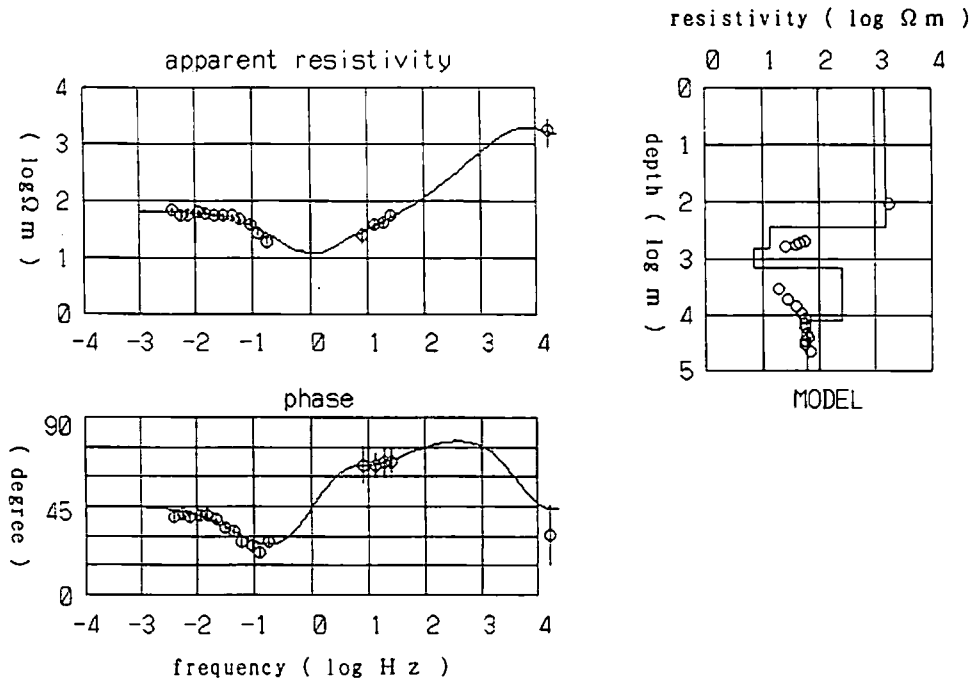
各観測点でえられたみかけ比抵抗, 位相差を用いて地下の1次元構造を求めた. これには, ULF帯の結果のほかに, ELF-MT, VLF-MTの結果も利用している. 5層構造を仮定すると, どの観測点でも観測結果をかなりよく説明できた. 第4図に観測点IDKについて求められた構造と, それによって計算されるみかけ比抵抗, 位相差をしめした. 構造とともにしめした丸印は, ボスティック法 (Bostick inversion) によってえられる値で, 各周期の観測結果がどの程度の深さの比抵抗の情報を示しているかの目安になる. この例ではULF帯のデータが, 深さ数kmから30kmに対応していることになる.

IDKについて求められた5層構造は大まかに, 表層(1500Ωm), 低比抵抗層(10Ωm), 中間層(200Ωm), 最下層(60Ωm)とみることができる. ほかの観測点でも, ほとんどの点でこの構造に類似したものがみられた. 雲仙地溝付近ではこのような構造が広く分布しているらしい. 観測点によって, 各層の比抵抗, 各層までの深さは少しづつ異なっている.

第5図は低比抵抗層の比抵抗の分布を示した. 図中に三角印で示したのが普賢岳である. 観測点SKM2は雲仙温泉の近くにある. 低比抵抗層の比抵抗はどこでも10Ωm以下となっている. そのなかでも普賢岳の西側に位置するIDK, KTK付近では5Ωmより高くなっている. それに対して雲仙地溝の南部および南側のSKM2, TKW, KGYでは1-3Ωmと低い.

第6図は最下層の比抵抗の分布を示した. IDK, KTK付近では50Ωmを越えているのに対して, SKM2では, 5Ωm以下になっている. SKM2では中間層も比抵抗が低く, 浅部から深部まで低比抵抗な層が続いている.

第7図は低比抵抗層の上面までの深さを示した. SKM2で, 50mより浅くなっているのを除けば, 全体として数100mから1000mくらいになっている. 雲仙地溝の中では北側の干々石断層に近づくほど深くなっている.



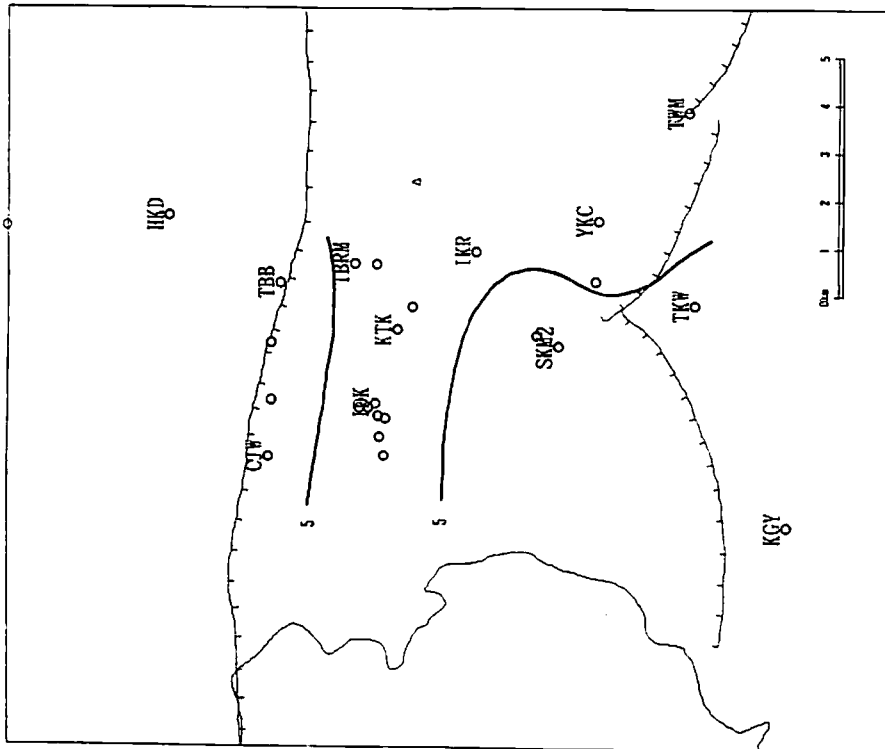
第4図. 観測点1DKのみかけ比抵抗(左上), 位相差(左下)および比抵抗構造(右). 比抵抗構造の図に, 実線で示したのが最小自乗法でえられた5層構造, 丸印はポスティック法の結果. みかけ比抵抗および位相差の図では, 丸印が観測結果を, 実線が5層構造によって計算された値を示す.

第8図は低比抵抗層の下面までの深さを示した. この深さは1000-2000mに分布している. ほとんどは1250mから1500mである. 千々石断層付近ではやや深く2000mほどになるが, 低比抵抗層の上面までの深さに比べればそれほど大きな違いとはいえない.

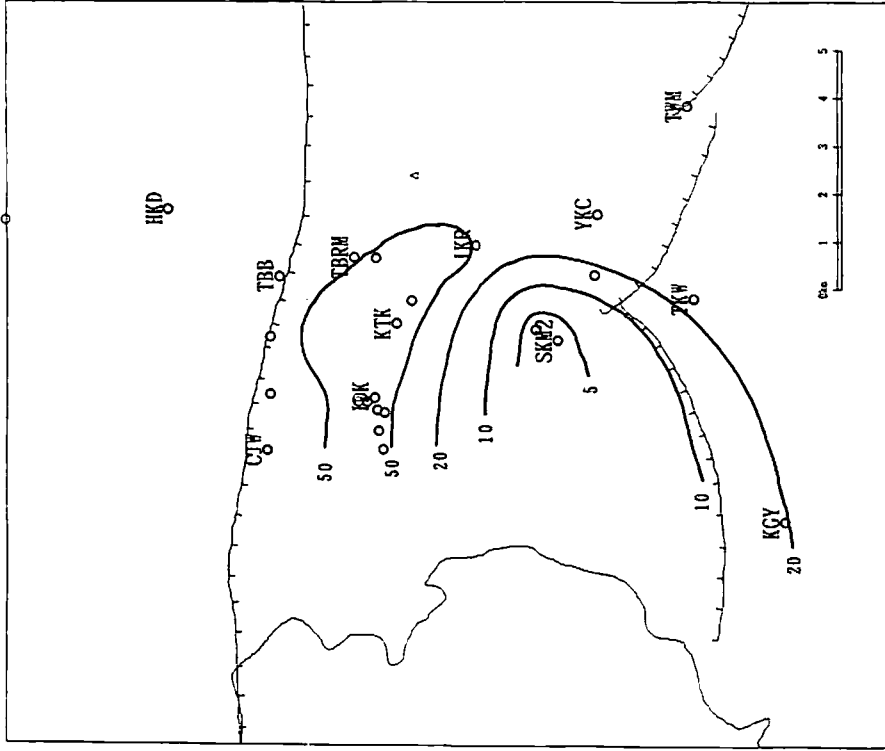
#### 4. まとめ

雲仙地溝付近でえられた地下の比抵抗構造には, 浅いところから表層, 低比抵抗層, 中間層, 最下層の4つの構造がみられる. 表層は100Ωm以上, 場合によっては1000Ωm以上の高比抵抗であるのに対して, 低比抵抗層は10Ωm以下, 最下層は数10Ωm以下となっている. 中間層は, 上下の層よりも高比抵抗となっている. これらの層の比抵抗, 深さは場所によって少しずつ異なっている.

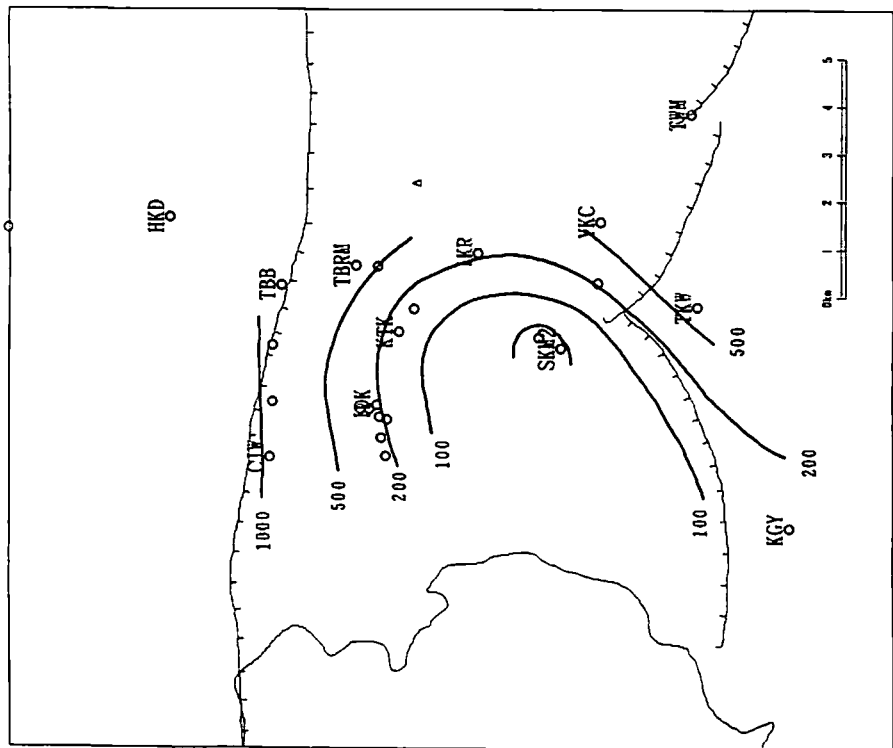
構造の中でも低比抵抗層は特徴的な構造である. 深さ数100mから2kmほどの範囲にかけて存在するこの層は, 帯水層と考えられている<sup>5)</sup>. この層が帯水層になるためには不透



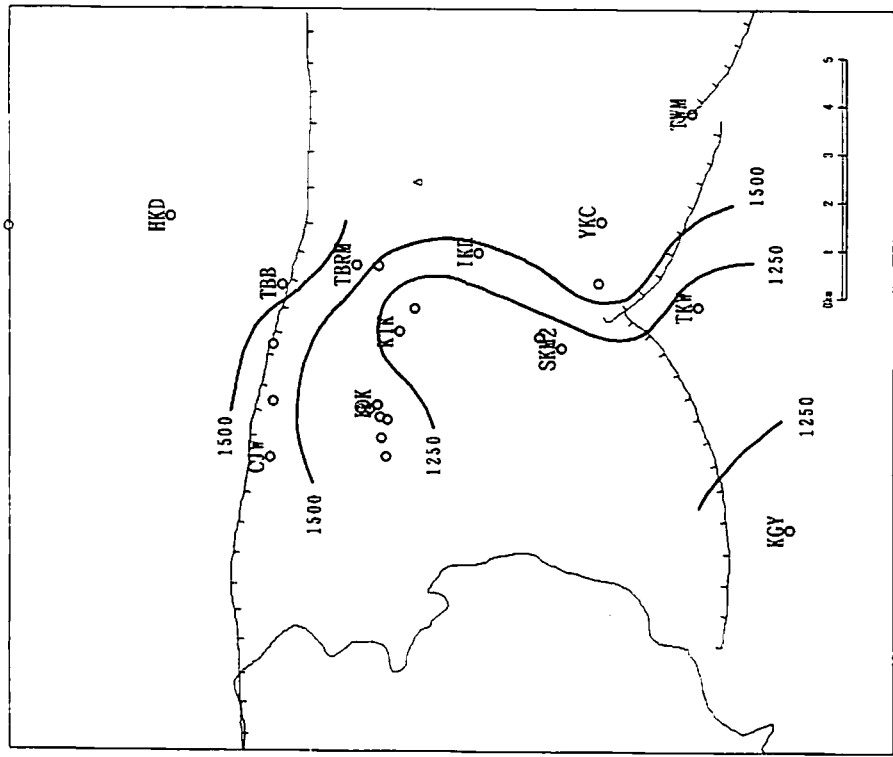
第5図. 低比抵抗層の比抵抗 ( $\Omega m$ ) の分布.



第6図. 最下層の比抵抗 ( $\Omega m$ ) の分布.



第7図. 低抵抗抗層の上面までの深さ (m) の分布.



第8図. 低抵抗抗層の下面までの深さ (m) の分布.



水層が存在するなど地質的な要因があると思われるが、詳しいことはわからない。

各観測点で類似した構造がみられるなかで、雲仙温泉付近には際立った特徴のある構造がみられた。低比抵抗層は50m以浅の非常に浅いところから分布していて、また中間層の比抵抗も低い。雲仙温泉の熱源となるマグマが地下深部にあり、それによって形成された熱水対流が、このように低比抵抗な構造を作り出しているのだろう。雲仙温泉付近の地下深部にマグマが存在するのはかなり確かなことと思われるが、このマグマが雲仙火山の噴火にどのようにかかわっているのかはよくわからない。震源分布や地殻変動の様子からは、噴火との強い関連性はみえてこない。

第5図から第8図に示したコンターは、いずれも雲仙地溝の北部で千々石断層に平行になっ  
ていて、千々石断層が比抵抗構造の特徴を伴っていることがわかる。おそらくは千々石断層には断層活動にともなう基盤の落ち込みがあり、各構造がこの付近で深くなっているのだろう。

それに対して雲仙地溝の南の境界である金浜断層にともなう比抵抗構造は不明瞭である。したがって基盤の落ち込みなどについてもよくわからない。ただし、雲仙温泉などの特異な構造が雲仙地溝の南部にあるため断層にともなう構造がわかりにくくなっているのかもしれない。

雲仙火山の西部には、雲仙温泉付近を除くと顕著な低比抵抗層は見出されない。ここでえられた比抵抗構造は、地震の震源分布や、地殻変動の点力源に対応する位置にマグマ溜りがあるとの推定を支持していない。われわれの観測からわかった構造では、これらの位置に対応するのは、深さ約1kmから10km程度に分布する中間層である。この層のは、上下の層に比べるとむしろ比抵抗が高く、マグマの存在と結びつけるのはむずかしい。逆に、溶岩ドーム出現以前にこの層で地震が発生したことを考えると、広域応力場を最後まで支えていたのがこの中間層であったとすることも可能である。この層の内部で破壊がすすみ応力を支えきれなくなったことで噴火活動が本格化したとの見方である。いずれにせよ、ULF-MT法によってえられた比抵抗構造は、噴火活動のより正確な姿をとらえるための重要な手がかりになると期待される。

#### 参 考 文 献

- 1) 大学合同観測班地球物理班地震、微動観測グループ、雲仙火山1990-1992年噴火における地震観測、科学研究費補助金成果報告書「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」、12-20, 1992.
- 2) 国立大学火山観測機関合同観測班測地グループ、雲仙岳の火山活動に伴う地盤変動、科学研究費補助金成果報告書「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」、29-42, 1992.
- 3) Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J., Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68.
- 4) 上嶋誠, 電磁気観測データの Robust Stacking 法について, *Conductivity Anomaly 研*

研究会1990年論文集, 243-253. 1990.

- 5) 鍵山恒臣・歌田久司・増谷文雄・山本哲也・村上英記・田中良和・増田秀晴・橋本武志・本蔵義守・三品正明・松尾紘道・清水洋, 雲仙火山のMT観測とそれによって推定されマグマの上昇過程, 科学研究費補助金成果報告書「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」, 73-86. 1992.