

伊豆大島小清水井周辺の比抵抗構造

高倉伸一* 小川康雄** 曾屋龍典***

中塚 正** 高田 亮***

TAKAKURA Shinichi, OGAWA Yasuo, SOYA Tatsunori, NAKATSUKA Tadashi and TAKADA Akira (1993) Resistivity Structure around Koshimizu well in Izu-Oshima Island. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 44 (1), p. 1-10, 7 fig., 1 tab.

Abstract: We carried out Schlumberger soundings around the Koshimizu well in Izu-Oshima Island, where groundwater temperature went up after the 1986 eruption of Izu-Oshima Volcano. The soundings consisted of two survey lines: a north-south line (NS-line) with six data stations and an east-west line (EW-line) with four data stations, which cross each other near the Koshimizu well. In order to estimate the resistivity structure, we carried out two dimensional analysis.

The derived resistivity structure is basically in harmony with the structure deduced from nearby some wells. High resistive (>1000 ohm-m) layers above sea level correspond to alternating beds of lave and scoria which presumably contain little water. Extremely conductive layers (<10 ohm-m) below sea level correspond to zones which contain saline water.

Middle resistive (about 300 ohm-m) layers which produce a resistivity discontinuity are present at depth of 20 m on the southeast side of the Koshimizu well. We think the layers contain some fresh water which have ascended through underground cracks, which have been probably produced by the activity of Izu-Oshima Volcano.

Below a depth of about 20 m, the resistivities analyzed from NS-line are two or three times as high as those analyzed from EW-line. Resistivity anisotropy like this can be occurred when a direction of current flow is controlled by a strike of underground cracks. Therefore we think many east-west underground cracks are present beneath the Koshimizu well.

要 旨

地下水の温度上昇が観測されている伊豆大島小清水井周辺の地下構造を探るため、シュランベルジャ法調査を実施した。その結果、本地域の比抵抗構造は基本的には成層構造であるが、水平方向の比抵抗不連続と比抵抗異方性の二つの特徴があることが明らかになった。これらの特徴から、小清水井の南西側の地下深部にほぼ東西方向に近い割れ目が存在しており、深度 20 m 程度まで淡水が上昇していると推定された。この特徴は、伊豆大島の火山活動に関連するものと考えられる。

1. はじめに

伊豆大島元町にある小清水井では、1987年6月頃から地下水の温度上昇や成分変化が観測されており、その後、その周辺のいくつかの井戸においても、同じような異常が観測されるようになった(高橋ほか1988)。その異常の原因や広がりには、地下の割れ目の方向や地下水の流れなど、地下構造が大きく関係していると考えられた。ところが、これまで数本の井戸の情報を除けば、この地域の詳しい地下構造はほとんど明らかにされていない

Keywords: Koshimizu well, the 1986 eruption of Izu-Oshima Volcano, Schlumberger sounding, resistivity structure, underground crack, resistivity discontinuity, resistivity anisotropy

* 石油公団石油開発技術センター

** 地殻物理部

*** 環境地質部

い。したがって、この地域の地下構造を調査・解明することが必要とされた。

そこで、我々は本地域においてシュランベルジャ法による調査を実施した。しかし、調査人数や調査日程の制約、植生が多いなどの探査条件の関係から、異常が観測されている全地域を調査するのは不可能であった。そこで、異常が最初に観測され、またこの地域の異常の中心と考えられる小清水井周辺に焦点をあてた。電気探査を行った期間は1988年3月9日から11日の3日間で、調査人数は5人/日であった。本報告では、その結果について述べ、本地域の比抵抗構造の特徴について考察する。

2. 調査概要

2-1 測線と測点位置

調査位置および電流電極を展開する測線と測点位置を第1図に示す。測線は小清水井を中心にほぼ直交する2本であり、その位置は簡易測量により決められた。NS測線は、小清水井の東2mを通り、ほぼ南北に伸びた測線である。EW測線は、小清水井の北3mの位置を通り、ほぼN83°Wの方向に伸びた測線である。地形の起伏や植性のため、測線が一部曲がっているが、その誤差(ある点から測点までの直線上と測線上との距離の差)が探査結果に及ぼす影響については、解析時に補正した。測点は、NS測線上に6点、EW測線上に4点ある。NS20が小清水井のすぐ東にあり、EW20がそこから北2.8m、東11mにある。各測点間の距離は基本的には40mであるが、測定環境が悪い点を避けたため、NS20とNS28の間が80m、EW24とEW30の間が60mとなっている。各測点の電流電極間隔AB/2の最大値は、120~360mである。

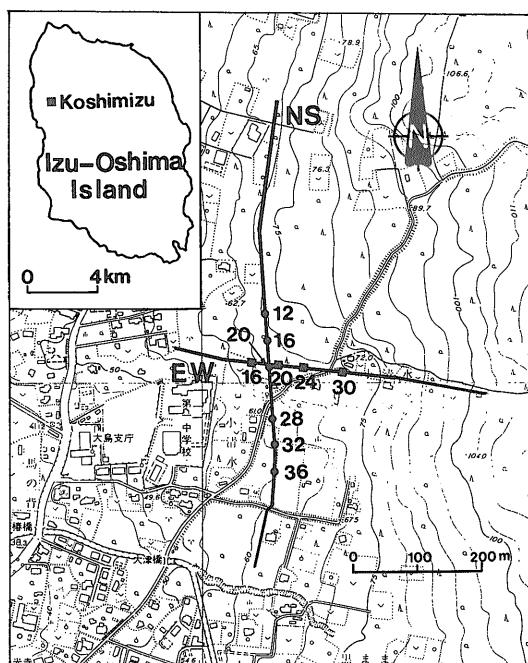
2-2 使用機器

本探査で使用された電気探査装置は、応用地質株式会社製MODEL-2115 McOHMである。この装置の性能・特徴については、村上・武居(1988)に記されている。

電流電極には長さ約1m・直径約2cmのステンレス棒を、電位電極には長さ約30cm・直径約1cmのステンレス棒を使用した。電流および電位電線には、ビニール被膜電線を使用した。

2-3 現地測定の概要

測定は、各測点を中心にその測点のある測線沿いに電流電極および電位電極を展開して行った。シュランベルジャ法の場合、電位電極間隔はふつう固定されるが、電流電極間隔を大きくしたとき測定電位が小さくなるため、電流電極間隔によって電位電極間隔を4回変えた。ただ



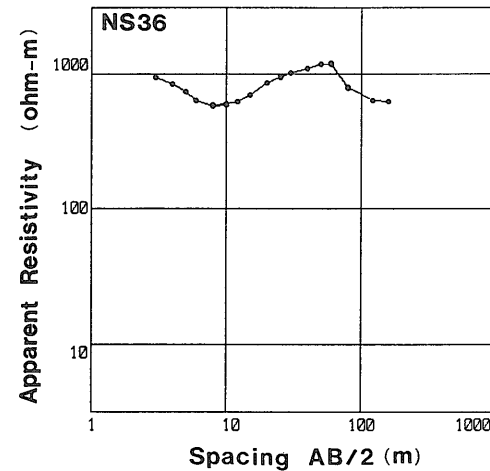
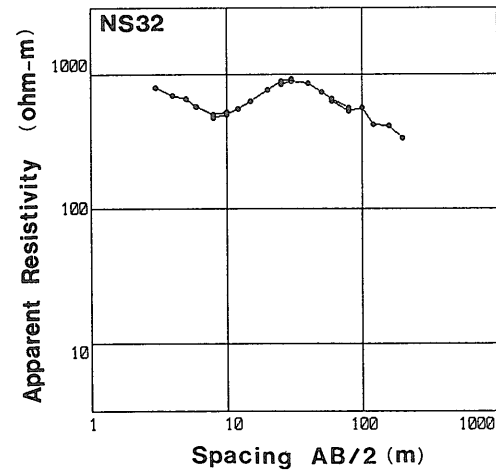
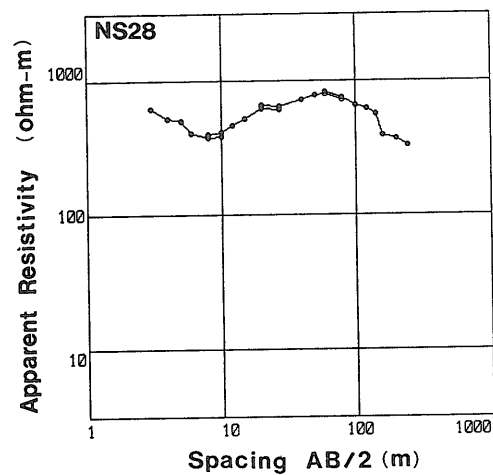
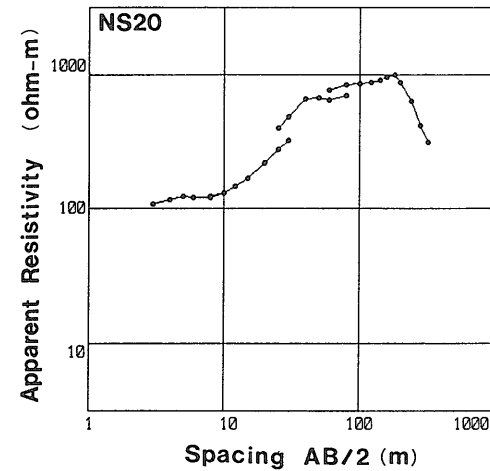
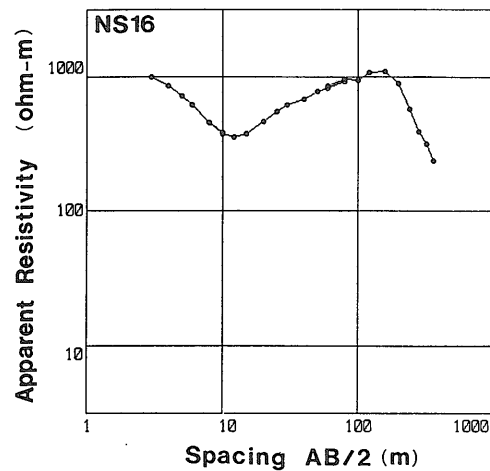
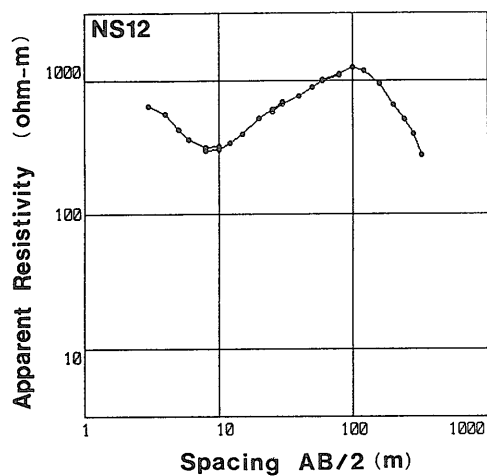
第1図 シュランベルジャ法の測線と測点位置図
基図には、国土地理院発行の国土基本図を使用した。

Fig. 1 Locations of Schlumberger survey lines and data stations.

第1表 電流電極間隔と電位電極間隔の組合せ

Table 1 Combination of current electrode spacings and potential electrode spacings.

電流電極間隔 AB/2 (m)	電位電極間隔 MN/2 (m)
3, 4, 5, 6, 8, 10	0.5
8, 10, 12, 15, 20, 25, 30	1
25, 30, 40, 50, 60, 80	3
60, 80, 100, 120, ..., 360	10



第2図 NS測線上の測点のVES曲線

Fig. 2 VES curves of data stations on NS-line.

し、この影響をあとで補正するため、2つの電位電極間隔に対し2つの電流電極間隔による測定を重ねて行った。電流および電位電極間隔を第1表に示す。通電電流値は100~200 mAであった。1回の測定におけるスタッキング数は4回であり、測定中に測定電位値の変動やドリフトが認められたときには、再測定を行った。

2-4 VES 曲線

NS 測線上の測点の VES 曲線を第2図に、EW 測線上の測点のそれを第3図に示す。同じ電位電極間隔のデータについて直線で結んだため、1つの測点につき4つのブランチ(枝)がある。

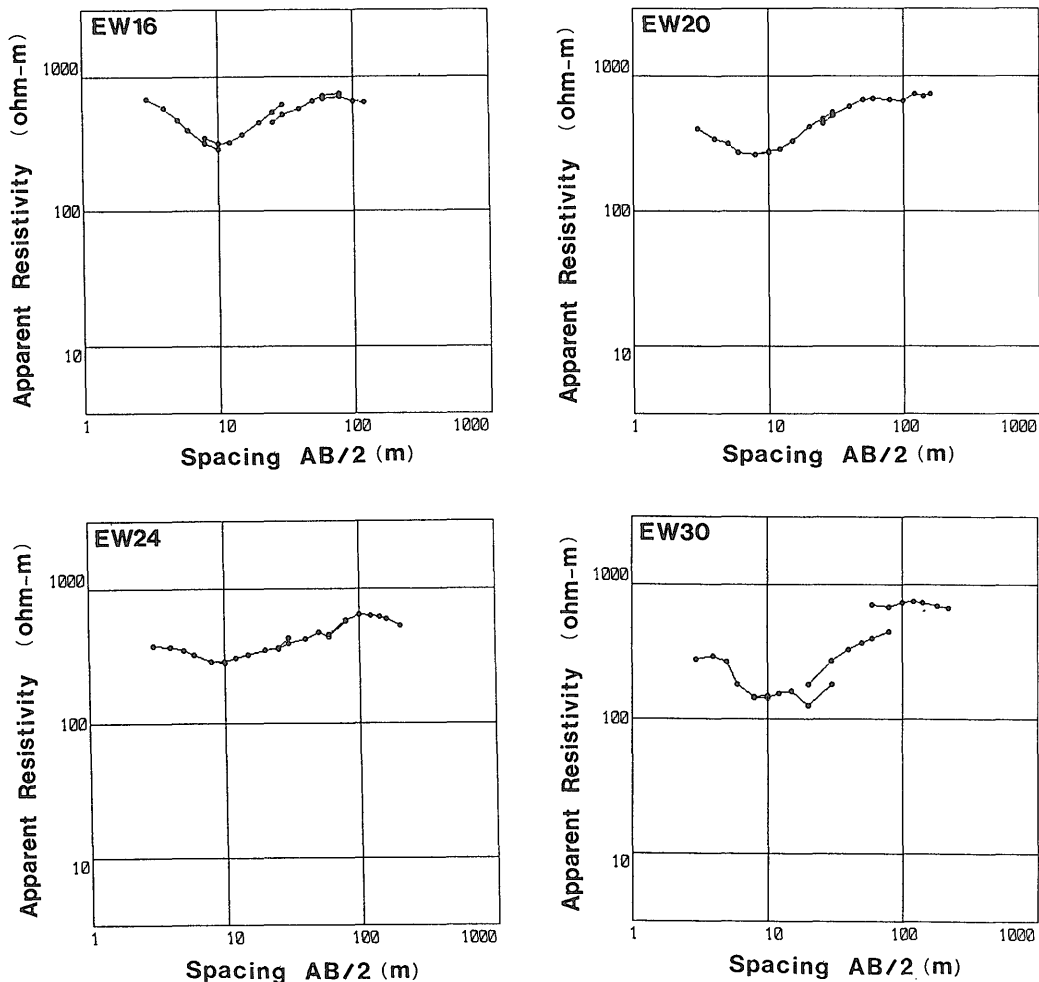
NS 20, EW 16, EW 30 では、隣り合うブランチに大きな不連続が認められる。これは、地形あるいは地表

付近の局所的な比抵抗構造の変化の影響と考えられる。また、NS 28, NS 32, NS 36 の測点において、AB/2 が3番目に大きいところで見掛け比抵抗が急激に低くなる傾向がある。この現象は NS 測線の南端から 80 m にある電流電極を使用したときに認められることから、その電極付近の比抵抗構造に局所的な異常があると考えられる。

3. 構造解析

3-1 解析方法

地下構造を定量的に判断するため、構造解析を行う必要がある。小清水井で観測された異常が周辺に広がっていることを考えると、面的な解析すなわち3次元解析を



第3図 EW 測線上の測点の VES 曲線

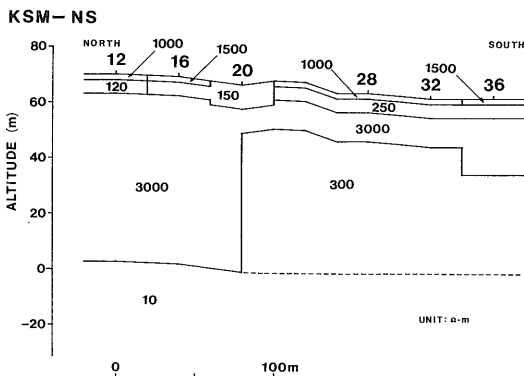
Fig. 3 VES curves of data stations on EW-line.

行うのが適当ではある。しかし、3次元解析の実施に十分なデータ数がなく、また現時点では確立した3次元解析の方法がないので、本報告では各測線に沿っての2次元解析を適用した。シュランベルジャ法では測線に沿って電極展開を行うので、測線下の構造の影響を強く受ける。そこで、同一の測線上で電極展開を行った測点の結果を用いる限り、測線下の構造を近似的に2次元として扱っても問題は少ないと考えられる。また、2次元解析は、地形や2次元効果の影響を考慮するので、1次元解析より現実に近い構造を得ることができる。

解析は、内田ほか (1986) が開発した有限要素法による2次元解析の手法に従った。まず、地形を含め地下構造を適当なメッシュに分け、1次元解析の結果を初期モデルとして与え、2次元計算を行った。次に、モデルからの計算結果と測定結果が一致するようにモデルの修正を試行錯誤に行い、最も良い一致を示したモデルを最終の解析結果とした。なお、解析に用いた地形は、1/5000の地形図の標高値を読み取った。また、本解析法では第2図や第3図で示されているような測定値の不連続を考慮しないため、浅部のデータ (AB/2 の小さい方) のブランチを深部のデータのブランチに合わせるように測定値をシフトした。本研究の目的が浅部より深部の構造を対象としていることや、電位電極間隔が大きいほど電極周辺の比抵抗構造が平均化され、ブランチの不連続の原因と考えられる地形や地表付近の局所的な比抵抗構造の変化の影響が小さくなることから、この補正方法は妥当であると考えた。

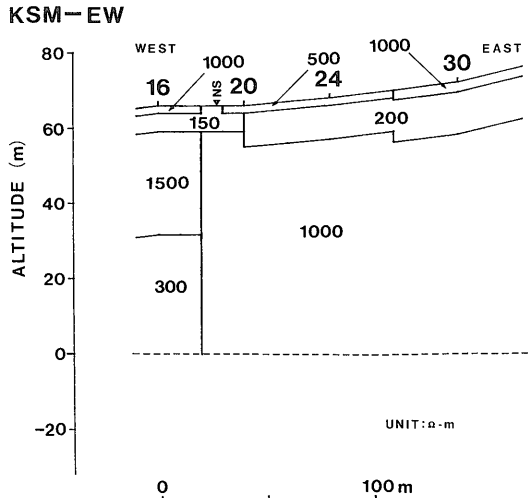
3-2 2次元解析の結果

NS 測線における2次元比抵抗モデルを第4図に、EW 測線における2次元比抵抗モデルを第5図に示す。



第4図 NS 測線における2次元比抵抗モデル

Fig. 4 Two-dimensional resistivity model of NS-line.



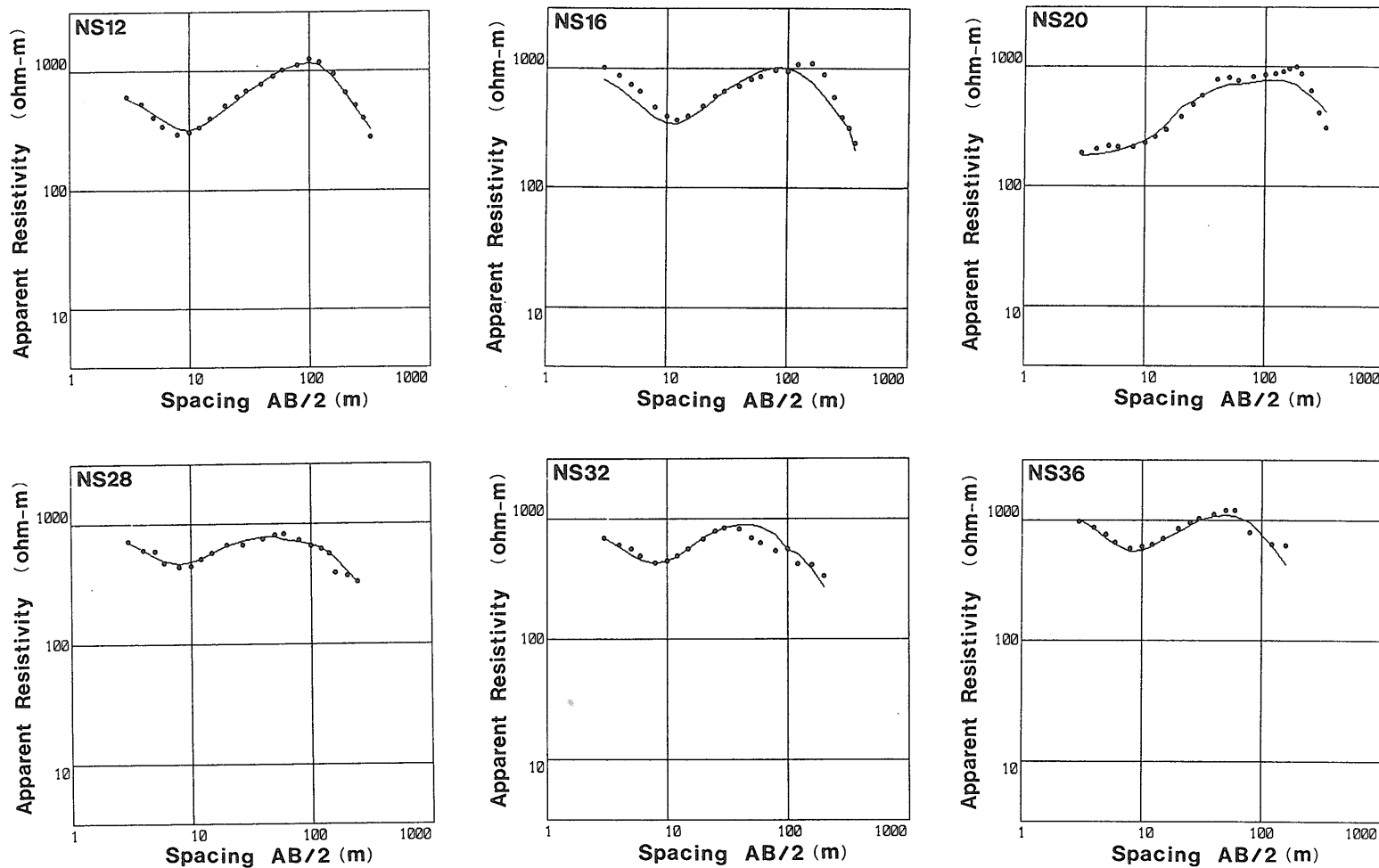
第5図 EW 測線における2次元比抵抗モデル

Fig. 5 Two-dimensional resistivity model of EW-line.

今回の解析では、探査深度の不足により、上層の比抵抗値が比較的高い NS 測線の北側を除き、海水面以下の構造の比抵抗値を決定することができなかった。図中の破線は予想される構造境界を示したものであり、これ以下の構造の比抵抗は数 $10 \Omega \text{m}$ 以下ならば任意の値をとることができる。本報告では、破線下の構造の比抵抗は NS 測線の北側と同じ $10 \Omega \text{m}$ と仮定した。NS 測線の各測点における2次元解析の VES 曲線を第6図に、EW 測線の各測点におけるそれを第7図に示す。図中の黒点は測定値であり、実線は2次元比抵抗モデルから計算される VES 曲線である。

NS 測線では、NS 20 の付近を除き、第1層は $1000 \Omega \text{m}$ 前後の値で約 2m の厚さとなっている。第2層は $120 \sim 250 \Omega \text{m}$ で $5 \sim 10 \text{m}$ の厚さであり、南ほど比抵抗が高くなる傾向にある。NS 20 付近では第1層がなく、第2層が地表に露出している。第3層は $3000 \Omega \text{m}$ の高比抵抗層であるが、その厚さは NS 20 と NS 28 の間を境界として北側と南側で異なる。すなわち、北側では第3層がほぼ海水面に至るまで続いているのに対し、南側では深度約 20m で $300 \Omega \text{m}$ の第4層が現れている。これらの層の下側は、北側ではほぼ海水面以下に $10 \Omega \text{m}$ の層がみえるが、南側では探査深度の限界により不明である。

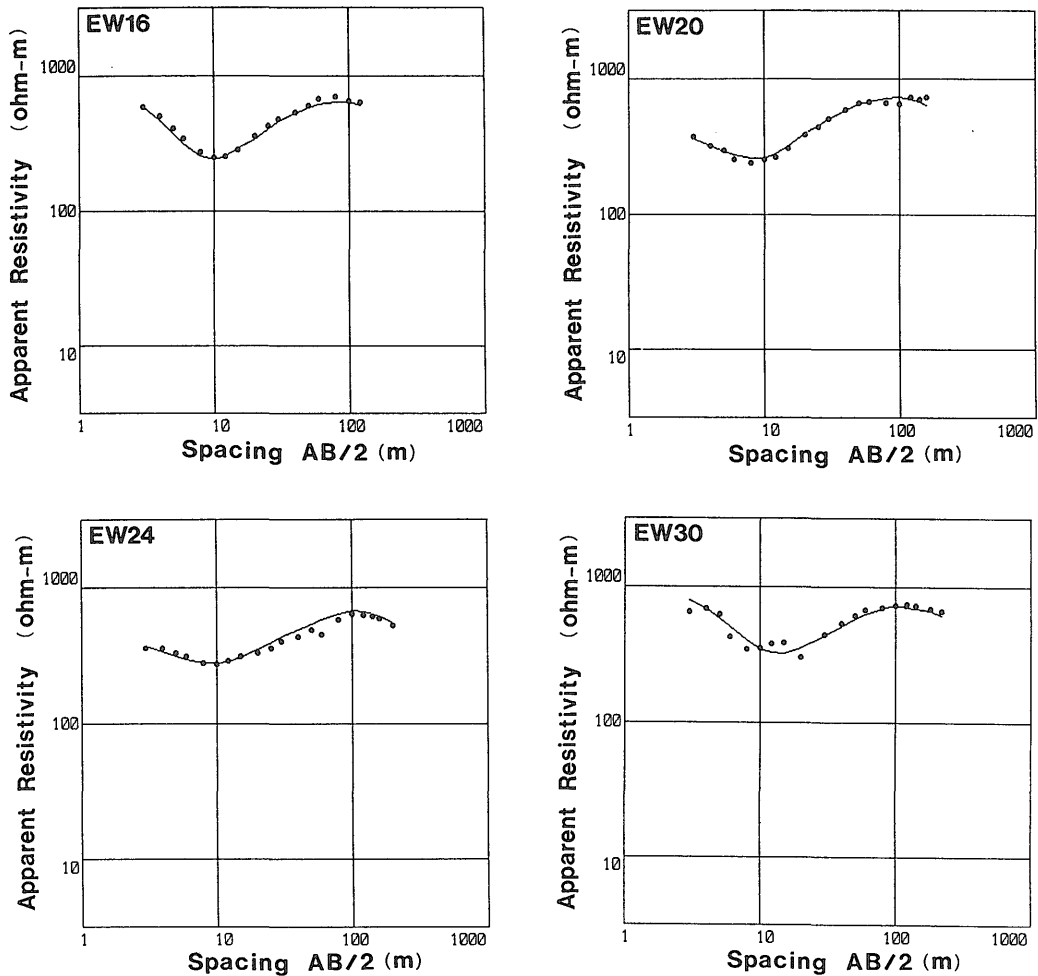
EW 測線では、EW 16 と EW 20 の間の一部を除き、第1層は $500 \sim 1000 \Omega \text{m}$ で約 2m の厚さとなっている。第2層は $150 \sim 200 \Omega \text{m}$ であり、西側では約 6m 、東側



第6図 第4図の2次元比抵抗モデルによる VES 曲線

図中の黒丸は実測値で、実線は2次元モデルからの計算値である。

Fig. 6 VES curves of the two-dimensional resistivity model illustrated in Fig. 4. Solid circles are observed data and solid lines are calculated curves based on two-dimensional model.



第7図 第5図の2次元比抵抗モデルによる VES 曲線
図中の黒丸は実測値で、実線は2次元モデルからの計算値である。

Fig. 7 VES curves of the two-dimensional resistivity model illustrated in Fig. 5. Solid circles are observed data and solid lines are calculated curves based on two-dimensional model.

では約 10 m の厚さになっている。第3層は、EW 16 と EW 20 の間を境界として、その西側では 1500 Ω m、東側では 1000 Ω m である。この測線においても NS 測線と同様に第3層の厚さは異なっている。すなわち、西側では深度約 30 m から 300 Ω m の第4層が現れているのに対し、東側では第3層が下方まで続いている。それらの層の下面の比抵抗構造は探査深度の限界で不明である。

2つの測線における比抵抗モデルは、NS 測線の北側と EW 測線の東側とが、NS 測線の南側と EW 測線の西側とが、それぞれよく対応している。したがって、こ

の地域の比抵抗構造としては、北西-南東方向の走向をもつ2次元構造を考えることができる。

4. 議 論

4-1 比抵抗構造と地質構造の対比

小清水井周辺の比抵抗構造は、北東側と南西側で違いがあるものの、基本的には成層構造を示している。以上の結果を地質図 (一色 1984) や周辺の井戸の柱状図 (関東農政局計画部 1980) などの地質データに対比させ、さらに伊豆大島内で過去に行われた電気探査の結果 (小野ほか 1961, 関東農政局計画部 1980) などを参考にし

て、この比抵抗構造の解釈を行うと、次のように述べることができる。

第1層の厚さ約2mの高比抵抗層は、この付近一帯を覆っている火山灰の層に対応する。第2層は火山礫や火山灰堆積物層に対応する。その比抵抗値を考えると多少の水分を含んでいると考えられる。第3層以下は、溶岩やスコリアなどの互層を主体とする構造に対応すると考えられる。ところが、解析された比抵抗構造では、その互層中の細かい各層までは区別できない。これは電気探査にそれらを判別するまでの分解能がないことに起因する。

しかし、解析された比抵抗構造をみると、第3層以下がその比抵抗値の差によりいくつかの層に分類されることがわかる。同じような結果は、伊豆大島における過去の電気探査の結果にも現れており、小野ほか(1961)はこの原因を構造中に含まれる海水や淡水の影響によるものとしている。伊豆大島では、Ghyben-Herzbergの法則により塩水層の上に淡水層が淡水レンズとして成層していると考えられている(高橋ほか1987)。また、元町付近の深井戸の資料(関東農政局計画部1980)によると、この地域の地下水面はほぼ海水面に一致し、深部にいくほど塩分濃度が上昇する傾向がある。そこで、第3層以下の各層の比抵抗値の差を、そこに含まれる淡水や海水の影響で説明するのは妥当と考えられる。

したがって、第3層以下の比抵抗構造は次のように考えることができる。第3層はその著しく高い比抵抗値より、透水性が高く水分がほとんど存在しない範囲と考えられる。NS測線北部の非常に低比抵抗の第4層は、その深度がほぼ地下水面や海水面にあることから考えて、海水が混入している範囲と考えられる。NS測線南部やEW測線西部の中間の比抵抗をもつ第4層は、その比抵抗値の大きさから考えれば、淡水を帯水している範囲と考えられる。この第4層がどこまで続くかは、探査深度がないため不明であるが、海水面以下ではNS測線の北側と同じように、海水の混入を受け低比抵抗になると予想される。

4-2 水平方向の比抵抗不連続

本地域の比抵抗構造の最も大きな特徴は、小清水井付近を境とした水平方向の比抵抗不連続が認められることである。これは、南西側の第4層と北東側の第3層との比抵抗値が大きく異なることに起因し、前述ではその比抵抗値の差を含水状態の差で説明した。しかし、隣接する二つの層の、しかも地質的にはどちらも同じ溶岩やスコリアを主体とする層の間で含水状態が異なるとは一般に考えにくい。特に、その上面が本地域の一般的な地下

水面より数10mも上部に位置する南西側の第4層に、淡水の存在を単純に仮定することには問題が多いと考えられる。したがって、そのような含水状態の差をもたらす原因やその淡水の起源について考察し、この水平方向の比抵抗不連続について説明する必要がある。

含水状態の差をもたらす原因の一つの可能性として、地下構造中に存在する割れ目の分布の違いをあげることができる。1986年の噴火活動により生じた割れ目については遠藤ほか(1987)に詳しく記されている。これによると、小清水井のすぐ南西側では地表や建造物に割れ目が生じたことが報告されているが、小清水井のすぐ北東側では割れ目等の徴候があったという報告はない。したがって、南西側の地下構造中の方が北東側より数多い割れ目が存在すると考えるのは妥当であり、割れ目の分布の差が含水状態の差となって現れている可能性が予想される。

淡水の起源としては、塩水層の上にある淡水層を考えるのが適当である。高橋ほか(1988)は、地下水水質の定期観測から、1986年の噴火活動が伊豆大島の地下水系・地下水水質に及ぼした影響として、1) マグマの上昇による地下水流路の変化、2) CO₂ などマグマ発散物の地下水層への供給とその結果発生する地下水と周辺岩石との相互反応、3) 亀裂の形成およびマグマの上昇による熱の供給による海水の侵入および地下水の成層状態の乱れなどがあると結論づけている。これにしたがえば、1986年の噴火活動の影響で地下深部の地下水(熱水)の上昇が生じた結果、地下水面近くの地下水圧が上昇し、塩水層の上にある淡水が上昇したと予想することができる。

前述の割れ目を地下水流路として考えれば、水平方向の比抵抗不連続を説明できる。すなわち、小清水の南東側では、割れ目を通して地下深部からの地下水が上昇してきたため地下水圧の増加が起こり、塩水層の上にある淡水が深度20~30mまで上昇し、途中にある溶岩やスコリアの互層中あるいは割れ目中に淡水が帯水するようになったと考えることができる。一方、北東側では、地下水の流路となるような割れ目が形成されなかったため、地下水あるいは淡水の上昇が起きなかったと考えられる。

4-3 第3層の比抵抗異方性

NS測線とEW測線との2次元解析の結果を比較すると、NS測線の第3層の比抵抗値の方がEW測線の第3層の比抵抗値より2~3倍高いことがわかる。すなわち、第3層が比抵抗異方性を示していることがわかる。

両測線における第3層の比抵抗値の差は、解析誤差による可能性も考えられる。しかし、第2図と第3図を、

あるいは第6図と第7図を比較すると、NS 測線の方が AB/2 が 10 m を越える付近からの見掛比抵抗の上がりかたが急激であることがわかり、VES 曲線からその差が示唆される。1次元解析によると、第3層の比抵抗値は、NS 12, 16, 20, 28, 32, 36 がそれぞれ 3000, 2500, 2800, 1500, 2000, 2000 Ωm であるのに対し、EW 16, 20, 24, 30 はそれぞれ 1500, 1200, 800, 1000 Ωm であり、この結果からもその差が有意であることが示される。また、2次元解析においては、両測線の第3層の比抵抗値を近づけた場合の計算も行ったが、第6図や第7図のような計算値と測定値のフィットを得ることはできなかった。そこで、本報告では、第3層の比抵抗の差を解析誤差によるものではなく、比抵抗異方性によるものであるという立場をとる。

この比抵抗異方性も、前述した割れ目の存在で説明することができる。遠藤ほか (1987) によれば、伊豆大島の割れ目はいずれも開口性の引張り割れ目であることから、その形状は垂直な細長い板状と想像できる。そこで、地下構造中にこの形状の割れ目が存在するときの比抵抗異方性について考える。まず、この割れ目がイオン水などの導電性の物質で満たされ、低比抵抗となっている場合を想定する。この場合、電流電極からの電流はそこを集中して流れるので、割れ目の走向方向の測線で測定した見掛比抵抗は、それに直交する測線で測定した見掛比抵抗より小さくなるであろう。また逆に、割れ目自体が空隙で絶縁体である、あるいは高比抵抗の物質で満たされている場合も、電流は割れ目の壁に沿って卓越して流れるので、やはり割れ目の走向方向の測線で測定した見掛比抵抗の方が小さくなるであろう。したがって、第3層以下に EW 測線方向に近い走向をもつ割れ目が形成されていると考えれば、この比抵抗異方性を説明することができる。

遠藤ほか (1987) によれば、小清水井の南で観測された割れ目の走向は N 46° W であり、その方向は NS 測線よりも EW 測線の方向に 9 度ほど近い。しかし、両測線で観測された比抵抗値の差の大きさを考えると、小清水井近傍の地下の割れ目の走向はかなり東西方向に近いと考えるのが妥当であろう。

5. おわりに

本地域の比抵抗構造の特徴は、1986 年の噴火活動によって生じた割れ目に関連づけて考えることができる。すなわち、この噴火活動により小清水の南西側の地下構造中にほぼ東西に近い方向の割れ目が形成され、それが地下水上昇の経路になったと考察すれば、本地域の比抵抗

構造の特徴をうまく説明することができる。本地域の周辺で起こっている地下水の異常が 1986 年の噴火活動の後に観測されるようになったことも、この考察と整合性がある。

しかしながら、伊豆大島では過去から多くの噴火活動が繰り返されている。したがって、この比抵抗構造の特徴は、今回の噴火活動の以前に形成されていたという可能性も否定できない。昭和 33 年に今回の調査地域の北側で実施したシュランベルジャ法の結果 (小野ほか 1961) が NS 測線の北側の結果とよく一致しているから、少なくとも小清水井の北側の比抵抗構造が今回の噴火活動で大きな変化を受けなかったことは支持される。しかし、小清水井の南西側ではこれまで信頼できる電気探査が実施されていないため、南西側の比抵抗構造が今回の噴火活動で変化を受けたという考察の検証をすることができない。

今回の探査では、日数の制約や地形の起伏や植生などの条件等により、十分な測定を実施することができなかった。また、探査深度が不十分のため、小清水井で観察される異常の直接の原因を把握するまでには至っていない。しかし、小清水井付近の比抵抗構造の特徴を把握できたことは、本地域の地下構造を解明する指針になると考えられる。

謝辞 本研究は、工業技術院特別研究「活火山の地質及び地質構造に関する研究」により行われた。解析に際し、地殻物理部内田利弘主任研究官には、2次元解析プログラムの提供を含め、多大な協力を頂いた。また、地殻熱部高橋正明技官には、小清水井についての多くの情報・助言を頂いた。ここに、心からの感謝の意を表します。

文 献

- 遠藤秀典・釜井俊孝・角井朝昭 (1987) 伊豆大島火山 1986 年の活動に伴って島内の広範囲に形成された地表割れ目。地調月報, vol. 38, p. 649-658
- 一色直記 (1984) 大島地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 133 p.
- Murakami, Y. (1987) Computer program for processing and interpreting Schlumberger and Wenner resistivity data, Openfile report No. 42 Geological Survey of Japan
- 村上 裕・武居由之 (1988) 電気探査と地下水研修。地質ニュース, 第 408 号, p. 6-13.

農林水産省関東農政局計画部(1980) 農業用地下水
開発調査大島南部地区報告書. 大島南部の
地下水, 167 p.

小野吉彦・陶山淳治・高木慎一郎(1961) 伊豆大島
における直流法による電気探査について
—深部物理探査研究第7報—地調月報,
vol. 12, p. 813-830.

高橋正明・阿部喜久男・野田徹郎・安藤直行(1987)
伊豆大島地域の地下水の地球化学的研究.
地調月報, vol. 38, p. 719-730

—————・—————・—————・—————(1988)
伊豆大島地域の地下水の地球化学的観測.
火山 第2集, 第33巻, 特集号, p. 290-
296

内田利弘・村上 裕・田中信一・小川康雄(1986)
常総台地北部地域におけるシュランベルジ
ャ法と CSAMT 法の2次元解析, 物理探
査, 第39巻, 第4号, p. 243-254.

(受付: 1992年6月23日; 受理: 1992年10月1日)