

火山碎屑物に覆われる堆積岩地域における直流法の結果について

陶山 淳治* 小野 吉彦* 馬場 健三*

**On the Result of D.C. Geoelectric Measurement in the
Sedimentary Basin Covered with the
Volcanic Detritus**

by

Junji Suyama, Yoshihiko Ono & Kenzō Baba

Abstract

It is not easy to determine the underground structure including the inhomogeneous formation by D.C. geoelectric method. As well known in Japan, much more districts are covered with the volcanic detritus, whose resistivity is generally not uniform. Using this method for the various structural problem, it is necessary to study the effect of this inhomogeneity for the results of the vertical electric sounding.

Experimental survey was conducted in Yuri oil field, where the formation of Tertiary age is widely covered with the volcanic detritus. Until now, much detailed geologic information of this district has been gathered by the systematic survey (i.e. geological survey, gravimetric survey, seismic survey and drill survey). Schematic geologic profile deduced from these geologic information is shown in Fig. 2. Resistivity log in the western part of this district deduced from the electric logging data is also shown in Fig. 3 (i).

Some of VES diagrams obtained would be markedly disturbed by the near-surface inhomogeneity as VES 4, 9 shown in Fig. 5 and VES 1, 2, 3 shown in Fig. 4.

In fact, the result of the horizontal profiling with the electrode span $a = 50$ cm conducted in the vicinity of these VES points also shows the existence of such near-surface inhomogeneity, as conjectured.

In this paper, the method of the interpretation of these disturbed VES diagrams is discussed. Before interpreting quantitatively these VES diagrams, the resistivity value of the upper and the lower layer of the electric key horizon in problem and the extent of the disturbed portion of the VES curve should be deduced by trying every mean available.

Hence, it follows that the accuracy of the finally obtained result depends upon the accuracy of this deduction.

In general, such deduction may be attained by the qualitative interpretation, which is done by comparing each and every VES diagram and by making use of the electric log and of the other resistivity data obtained in surveyed area.

Here, in special, the writers present the method of deducing the upper layer resistivity from the statistical treatment of the horizontal profiling data and the method of spacing the VES point needed for making perfect such statistical treatment.

1. 緒 言

大地の比抵抗は岩層の組成と構造、間隙水の種類とその飽和度等のいかんによつて、 $1 \Omega\text{-m}$ より $10,000 \Omega\text{-m}$ 以上までの種々の値をとり、大地の性質を示す物理量の

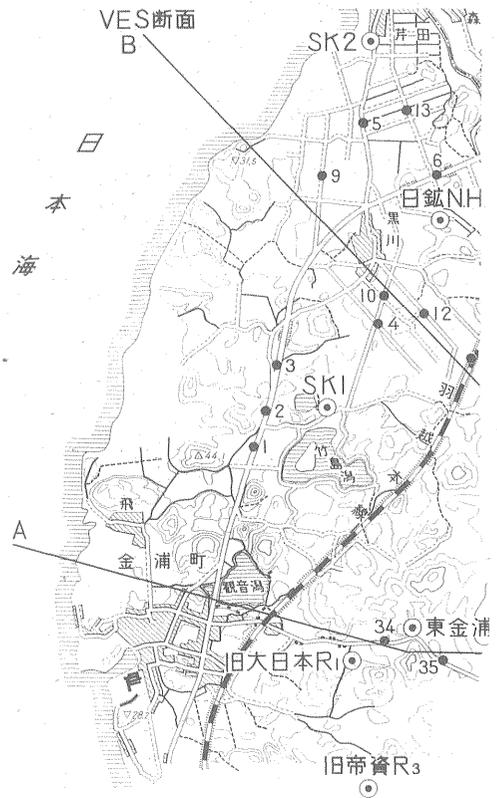
うちでもつとも変動範囲が広い。したがつて、大地の性質を調べるに當つて比抵抗という物理量を利用するならば、性状を異にする岩層の物理量の差異の割合が大きいという点で有利であると考えることができる。このような観点より、電気探査比抵抗は大地の性質をしらべる手段として非常に有効であると考えられてきたし、事実、

* 物理探査部

比抵抗法は電気検層の分野においては充分このような役割を果たしてきた。しかしながら、地表探査の分野において比抵抗法が過去において果たした役割は必ずしも充分なものではなく、定性的対比の手段として利用されるに止った場合が多く、恵まれた条件の下ですら一部層厚の決定に寄与した程度であつた。これまで地表探査において充分な効用をもたらすことができなかった最大の原因は、従来行なわれてきた測定法の探査深度が浅く、おおむね数十m止りであり、好条件の下においてすら100m程度であつたことにある。われわれはこのような考え方から、地表探査においても比抵抗法の効力を充分なものにするためには、まずその探査深度の増大を計る必要があると考え、かねてよりこの問題について技術的検討を加えてきた結果、探査深度の改善に対する見通しをもつことができた。第1回の野外測定は昭和33年、伊豆大島飛行場で行なつた。ここを実験地として選んだのは、測定条件を複雑にするような大地内に寄生する妨害電流はきわめて小さく、かつ比較的単純な電氣的地下構造をもつ場所と考えられたためである。その結果は一応満足すべきものであり、 $AB/2=1,500m$ まで VES 曲線を求めることができた。

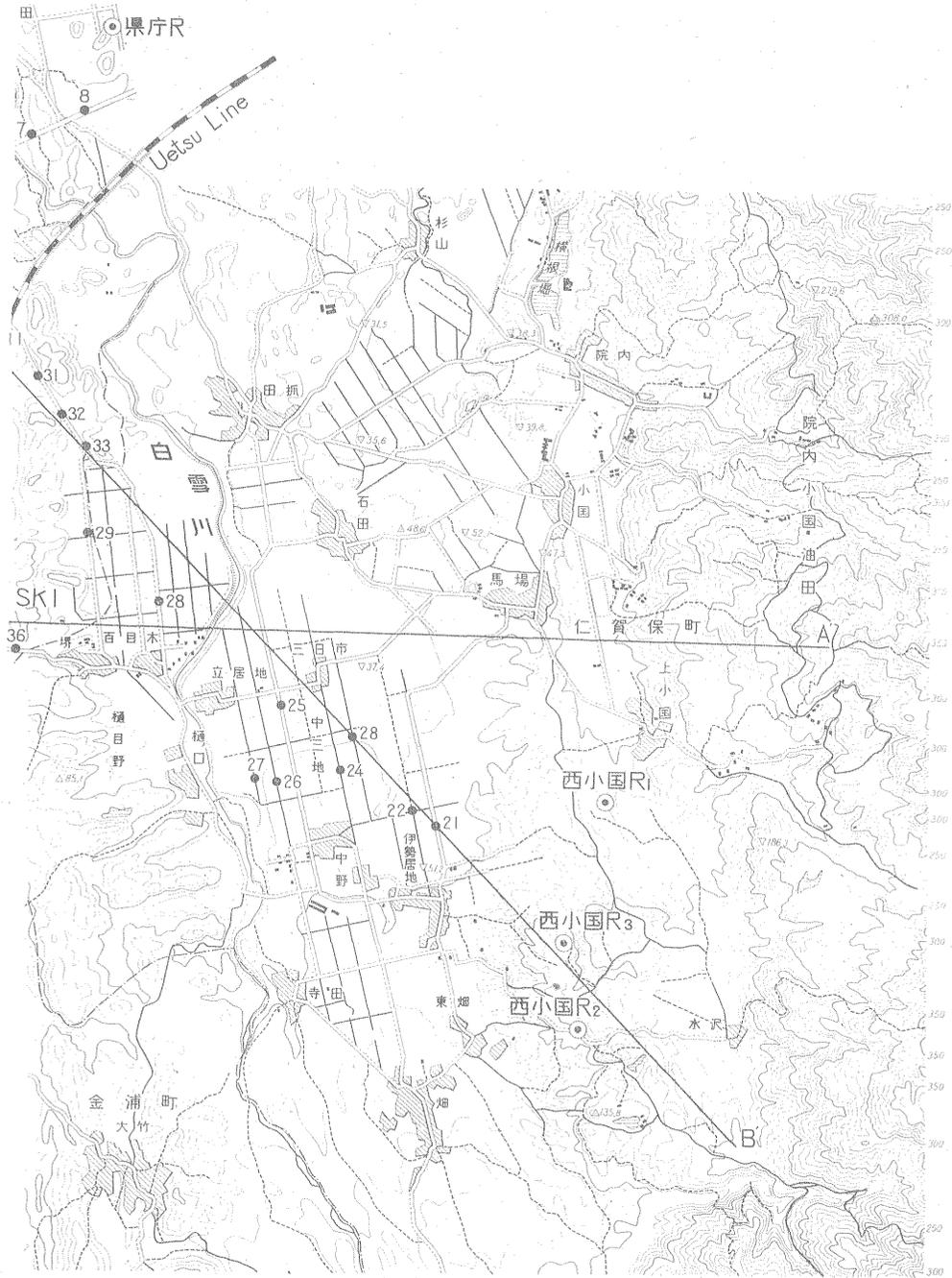
その後引続き行なつたいくつかの実験によつて、直流法の深部構造探査への適応性が確められ、また、解析した結果は水理地質学上の問題の解決に役立つものであることも明らかにされた。¹⁾

ところで、探査技術を確立するためには、技術的問題点を明確にしておくべきである。そのうちで、もつとも重要な問題点と思われる測定精度と実測VES曲線に対する垂直構造の反映度とについて、充分な検討と吟味が必要である。反映度を検討するためには、構造に関する地質資料が豊富であるばかりでなく、構造試錐に対して電気検層が行なわれており、電氣的構造も既知な地域について実験を行なう必要があるので、このような条件を充す常磐炭田北茨城市付近を実験地域に選んだ。その結果、野外測定でえられる見掛比抵抗値の精度は、主として自然電位補償の精度によつて左右され、測定地域に存在する漏洩電流等の時間的に変化する寄生地電流の変動の大きさによつて、測定器の使用限界が規定されてしまうけれども、漏洩電流の電流強度が印加電流の強度に較べ遙かに小さい地域においては、電位差計式の補償法によつて $10^{-3}\Omega$ までの大地比抵抗($R=V/I$)は5%以内の誤差で求められることが明らかとなつた²⁾。一方、常磐地域のような地質構造の場合には、構造を構成する地層は比較的均質であるため、特異な箇所を除けば、一般に表層の不均質によつて生じる測定VES曲線の歪みは解析に支障をきたすほど、はなはだしいものではなく、実測VES曲線の垂直構造の反映度はおおむね良好であつた³⁾。



- 坑井位置
- VES 測点

このようにして、境界面の深度が500m以内にある構造の探査に対する直流法による探査技術ができ上つたのであるが、500m以内の構造であれば、どのような構造であつても、またどのような探査目的で行なわれようと、直流法が100%期待に沿うことができる技術となつ



第 1 図

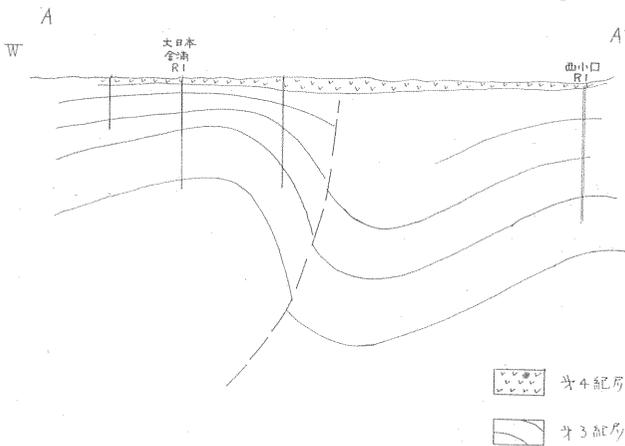
たわけではない。不均質な地層を含む構造探査の扱いは面倒な問題の一つであるが、火山砕屑物でできている地層は本来電氣的に不均質であり、わが国は火山砕屑物に覆われる地域が多いため、火山砕屑物に覆われる構造の探査について検討しておく必要がある。

このような目的で、砂層、泥岩層およびその互層で構成される第三紀鮮新世の地層を火山砕屑物が覆っており、電氣的地下構造についての資料も豊富な秋田県由利郡金浦一仁賀保地域を取り上げ電気探査を行なった。ここに、その結果をえられた実測 VES 曲線の解析について述べ

る。この実験には筆者らのほか、駒井二郎・高木慎一郎・武居由之の各氏が参加した。また石油資源開発株式会社より資料の提供、その他多大の御支援を頂いた。ここに厚く感謝する。

2. 実験地域について

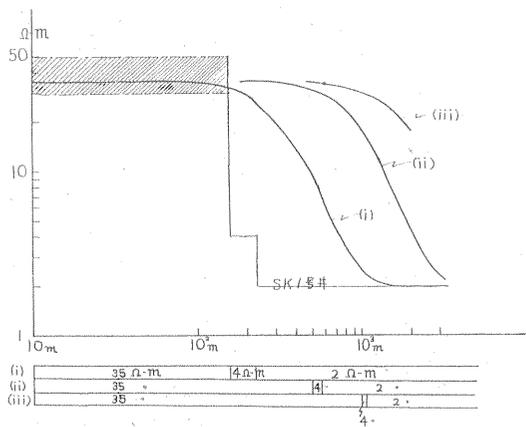
実験地として選んだ秋田県由利郡金浦町・仁賀保町一帯(第1図)は鳥海山の北西約20kmに位置し、火山砕屑物によって広く覆われている。この火山砕屑物の下位には、上より第三紀鮮新世の鮪川層・上部笠岡層・下部笠岡層・天徳寺層・桂根層、中新世の船川層・女川層の順に分布している。第三紀層の構造は地域の西部SK1号井、SK2号井を連ねる付近で金浦背斜構造を、東部西小国R1号井・R2号井・R3号井を連ねる付近で西小国背斜構造を、これら2つの背斜軸に挟まれる立居地・中三地付近で向斜構造をなしており、両者の境界は衝上または小落差の断層を生じているものと考えられている。なお、これらの背斜軸・向斜軸および断層の方向はいずれもほぼ南北である(第2図)。鮪川層は主として砂



第2図 模式地質断面図

層によつて構成されているが、下部においては凝灰質泥岩または砂質泥岩と砂層との互層をなすことが多い。上部笠岡層は砂質泥岩と砂層との互層であり、下部笠岡層は薄砂を挟む泥岩である。天徳寺層は泥岩を主とするが、桂根層は砂層と泥岩の互層をなしている。⁴⁾

SK1号井・SK2号井および西小国R3号井の電気検層図によれば、電気的には第1層は30~50Ω-m、第2層は4Ω-m、第3層は1~2Ω-mを示す3層構造を呈し、第2層の相対層厚は1/4以下である。(第3図、SK1号比抵抗柱状図および(i)参照)。なお、この第1層は第四紀層と第三紀上部層(おそらく鮪川層)とを含むものであるが、西小国R3号井にこの第四紀層の一部に層



第3図 SK-1 電気的柱状図および予想される電気的柱状と対応するVES曲線

厚15m内外にわたつて120Ω-m程度の高比抵抗部が認められる。向斜部における第1層と第2層の境界面の深度は確認されてはいないが、おそらく数百m以上に達するものと予想されていた。いま、第2層の層厚が背斜部・向斜部ともにほぼ同じであると考えられるならば、向斜部の電気的柱状は第3図(ii)のようになる。以上述べたような電気的構造をもつ地域で得られるVES曲線は各層が均質であるならば第3図のようになり、電気探査によつて電気的構造を求めることができるはずである。問題は実測されるVES曲線より、このような電気的構造がどの程度推定可能であるかということであるので、次のような方法でまず実験を行なつた。

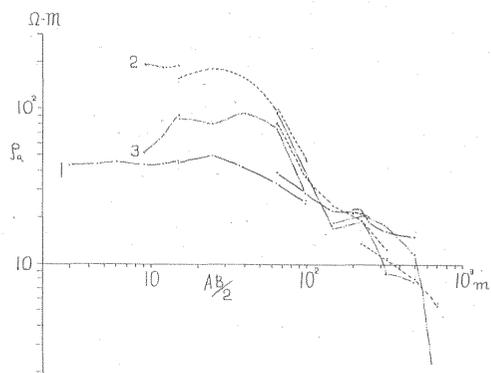
3. 実験方法について

2.に述べたような褶曲構造を求めるためには、褶曲軸に直交する数本の測線を設け、各測線上に等間隔に配置された測点を中心として褶曲軸に並行、すなわち測線に直交する方向に電極を展開して調査することが望ましい。しかしながら、調査地域はほとんど水田で覆われており、これらはすべて農耕に使用されているために、農作物の損傷をできる限り避ける必要上、第1図のように測点を配置し電極を展開し、これらの測点でえられたVES曲線の解析結果をBB'線に、南または北方向に投影して構造を求めることとした。測定はすでに別報でしばしば説明した方法と同じであり、ここで詳細に述べることは省く。測点の総数は23点で、各測点における最大電流電極間隔は第1表の通りである。これら測点のうちには、地上の障害物のため電極間隔を充分拡げることが不可能で、必要最小限の間隔に止めたものが2, 3ある。

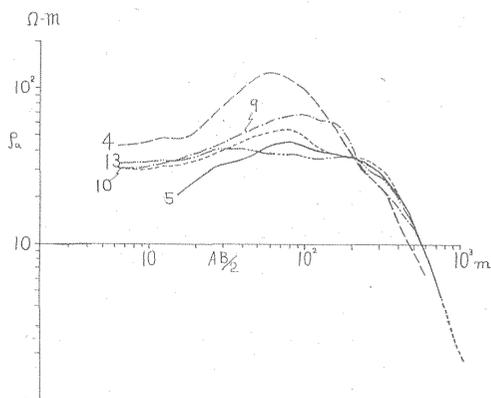
VES 4, 5, 9, 10, 11, 12および13の測点でえられたVES曲線の曲点付近における見掛比抵抗の水平方向

第 1 表

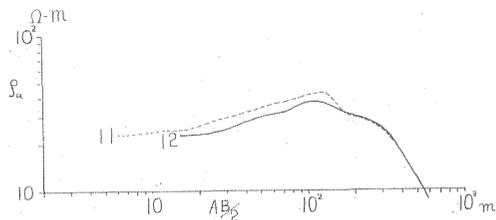
V E S 番号	標 高 (m)	最大電極間隔 (A B) (m)
1	11.23	1,000
2	16.65	1,400
3	13.22	1,300
5	8.32	1,500
9	8.21	1,000
13	5.85	1,400
4	9.46	1,200
10	9.21	2,500
11	16.61	1,200
12	14.80	700
31	27.31	2,000
34	20.42	1,200
35	24.75	1,900
36	40.27	1,700
29	28.14	1,700
28	29.64	2,000
21	47.90	2,000
22	46.02	2,000
23	39.34	1,500
24	41.87	4,000
25	35.96	2,000
26	40.32	4,000
27	39.44	1,700



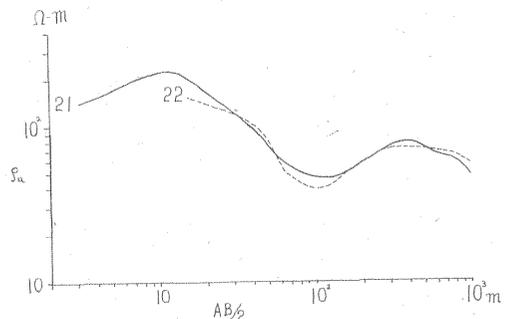
第 4 図



第 5 図



第 6 図

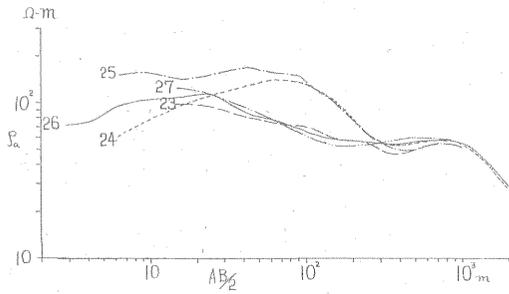


第 7 図

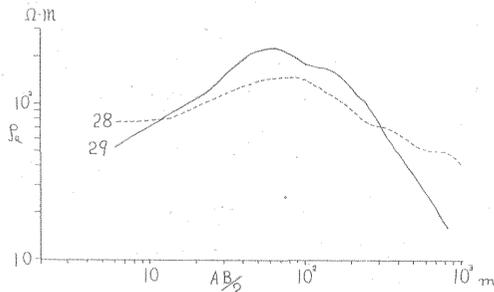
の変動状況をしらべるため、水平探査を各 VES 測点付近で電極の展開方向に沿って行なつた。実際の探査は作業上の便宜から Wenner の 4 極法で実施した。これらの VES 曲線はいずれも第 3 図 (i) の型に属するので、水平探査の電極間隔は $AB/2=75m$ とすることが適当と考えられた。したがつて、 $AB/2=75m$ に対応する Wenner 配置の電極間隔 $a=50m$ を採用した。このほか、地質構造に関する資料から予想され、かつ VES 曲線の解釈からも想定される断層構造を確認するため、Potential Profiling Method による水平探査も行なつた。測線は予想される断層面に直交するように選び (第 1 図参照)、電流電極間隔 $A_1B_1=1,500m$ 、電位電極間隔 $M_1N_1=150m$ 、電流電極間隔 $A_2B_2=300m$ 、電位電極間隔 $M_2N_2=10m$ の 2 種類の電極間隔について探査を実施した。Potential Profiling Method については筆者らが行なつた人形峠夜次地域の探査に関する報告⁵⁾で紹介してある。それを参照して頂きたい。

4. VES 曲線について

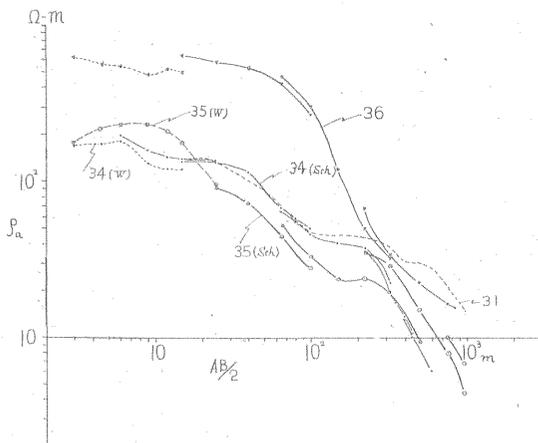
得られた VES 曲線は第 4 図から第 10 図にわたつて掲



第8図



第9図



第10図

げた。これらのうちで浅部比抵抗の不均質がはなはだしいと思われる地域、すなわち、国道に沿う測点 (VES 1~3) および金浦町より立居地・中三地に通じる道路に沿う測点 (VES 34~36) で得られた結果は実測原曲線を、その他のものは実測原曲線を電位電極間隔が無限小に固定された場合に補正した曲線を示した。これらのVES曲線のうちには、(i) 表層の不均質によって起るVES曲線の歪みがはなはだしく、構造の垂直断面の解析に耐えられぬもの(例VES 3)、(ii) 電極の展開方向に対して界面上層の比抵抗および層厚に不均質が存在するため、VES曲線上に明瞭な歪みが認められるので、こ

の点を考慮して解析を行なわないと誤差が著しくなるもの (VES 4, 9等および VES 31, 36)、(iii) 電極展開方向に直角な方向に、界面および界面上層の比抵抗分布の不規則が存在し(すなわち、側方効果)、VES曲線が歪んでおり、この歪みによつて起る解析誤差を充分考慮に入れる必要があるもの(例、VES 29)等がある。なお、(ii)、(iii)のうちにはVES 4, 9のような局部異常によるものとVES 29, 31, 36のような断層構造によるものがある。これらの点を考慮に入れて、VES曲線を解析した結果が第11図である。垂直探査の解析結果に客観性をもたせるためには精度に関する表示を添えておく必要がある。第11図に示した例においては(ii)、(iii)およびその他のVES曲線が含まれるが、その解析結果はそれぞれ質的に異なるもので、すべての場合に共通するような数量的表示(例えば、相対誤差という形)によつて、解析精度を表わすことはできない。そこで、ここでは定性的表示として、VES曲線上に、(I) 彎曲点の左右の分枝が明確に認められるもの、(II) 彎曲点の右分枝がやや明確さを欠くもの、(III) 彎曲点の左右の分枝が地表の不均質、横効果によつて著しく乱れているものに分けて推定界面を記入した。なお、第11図の結果は、浅部の30~50Ω-mの互層を等価単一層、第2・第3層を等価単一層に置き換えて2層構造として解析したものである。探査地域の電気的構造は実際には3層以上の多層構造であつて、30~50Ω-mの層の互層である第1層を等価単一層に置き換えても、底盤となつている第3層(2Ω-m)を含め3層構造をなしているが、第2層すなわち中間層の相対層厚は1/2以下、第1層と第2層の比抵抗比すなわち第2層の相対比抵抗は約1/10、第3層の第1層に対する相対比抵抗は約1/20であり、中間層のVES曲線に対する反映度はきわめて悪く、中間層の検出が理論的に困難な型の構造に属する。加えて、実測VES曲線の作成に當つて5%程度の測定誤差の影響と不均質等の構造ノイズによる歪みの影響とを受けるため、実測によつてえられたVES曲線は3層構造に対応するものか、2層構造に対応するものかを判別し難いものとなる。つまり、実測VES曲線に等価的に対応する2層構造が存在しうるのである。このようなVES曲線の等価性は“削減性の原理”(Principle of suppression)として知られている事実⁽⁷⁾である。この場合、2層構造の界面の深度は3層構造の第1層と第2層との界面の深度よりやや大きくなる。例えば第3図(i)のような柱状をもつ均質等方性の3層から成り立つ構造に対する理論VES曲線を2層構造として解析するならば、2層の界面の深度は約180mとなり、3層構造の第1層と第2層の界面の深度160mより深く、第2層と第3層の界面の深度230mより浅くなる。第11図の結果は2層構造として解析したものであるから、削

減性の原理に従って、第1層底面の推定深度は実際の構造の第1層底面の深度よりやや深目になる。さらに、実際には互層であるものを等価単一層に置き換えた第1層は擬異方性を示すことを考慮に入れると、均質等方性の層として扱った第1層の底面の深度は実際の深度よりも深く解析されていると考えるべきであろう。しかし、探査地域内においては、互層を構成する各層の間の比抵抗の差異は余り著しいものでなく、擬異方性係数は著しく1に近い値をもつものと考えられるので、この擬異方性効果が解析深度に与える影響の程度は「削減性」に較べて小さいものと思う。第1層の擬異方性効果のほかに、SK2号井の電気検層図に見られるように、第1層と第2層との間に時たま5~10Ω-mの中間層が挟在することがあり、この挟在層のため第1層の底面が見掛上深めに判定されることもありうるであろう。地域東部の金浦背斜部において、2層構造の境界面、すなわち第1層の底面の解析によつて推定された深度が、170~200mであり、SK1および2号井の電気検層図から知られている第1層の底面の深度よりも僅かに深くなっている。このような現象は先に述べた削減性の問題、第1層の擬異方性の問題、夾在層の有無の問題等が影響して起つたものと考えられるが、今回構造特性を解明する目的で取り上げた地域においては、構造の特性を反映する境界面、すなわち、電気的鍵面の予想深度は背斜部で160~180m、向斜部では数百mを越すものと思われているので、上記の程度の深度の食い違いは目的とする構造特性の解明に支障をきたすものとは考えられない。

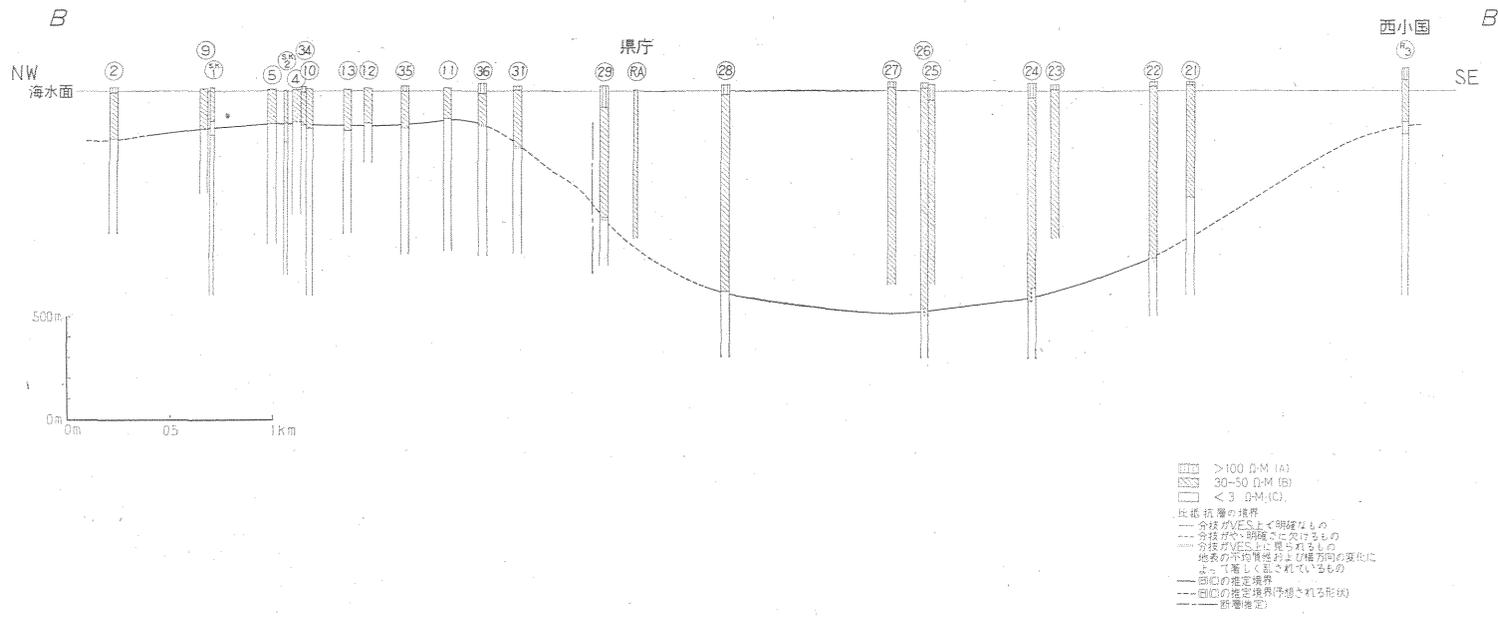
第11図はまた各測点をBB'線に南または北方向に投影した点に解析結果を記入したものであるが、調査地域の構造軸は南北方向に走り、その軸と水平面とのなす角は無視できるほど小さいことを考えれば、第11図の結果は地域の構造特性を表現しているとみなして差支えないであろう。なお、参考までに、電気探査によつて推定される境界面を図中に記入した。

さて、調査地域の向斜部には試掘孔はなく、そのため向斜部の電気的構造について推定資料のみで既知資料はなく、境界面の深度についても数百mを越す見込みとされていたに過ぎないが、上記の解析結果によれば、等価比抵抗30~50Ω-mの第1層の厚さは予想外に厚く、最深部では1,100m以上に達している。調査地域の北方に位置する県庁R・A孔井はその他の背斜部に位置する孔井とは柱状を異にし、孔底720mまで20~100Ω-mの比抵抗を示し、おもに砂層が分布しており、飲料水を産出している。県庁R・A孔井が向斜部に掘さくされたものと考えれば、向斜部の最も深い部分で30~50Ω-mの等価互層が1,100m以上の厚さで分布することは考えうることである。なお、このような700~1,100m以上の厚さをもつ

30~50Ω-mの等価層は、鳥海山の火山砕屑物下を流れる伏流水が第三紀層内に浸入し、第三紀層の同生水を洗い流し、同生水と置換したために、この部分の第三紀層の間隙水が低塩度となることによつてできたものと考えられる。しかしながら、その等価層が著しく厚いということは、伏流水の浸入領域がはなはだしく広範なものであることを意味しており、そのためには、浸入領域を構成する地層自体も砂に富む地層のような高浸透率をもつものでなければならぬ。つまり、向斜部においても第1層はおもに砂層からできていた互層に変わりなく、向斜部の第1層は背斜部の第1層に対比されるものと思われる。したがつて、電気探査によつてえられた第1層の底面の形状は地域の地質構造断面を反映しているものと考えられる。また、第1層の底面はおそらくは鮪川層の底面に対比されるものと思われるので、第11図に記入した電気的鍵面の深度および形状は鮪川層の底面の深度および形状をほぼ示すものと考えられる。

5. 解析上の問題について

直流法を実用化するためには、あらかじめ定められた解析法に従つて解析を行なつた場合、担当者のいかによつて解析結果が著しく異なるようなことであつてはならない。しかしながら実際の探査結果、例えば第4~10図の結果のうちには、忠実ではあるが機械的に表層よりも順次曲線重合法を適用して解析した場合と、まず実測VES曲線を型別に分類し、不均質によるVES曲線の歪みの部分を明らかにするとともに、地質断面を構成する各層の比抵抗値を推定し、これらの質的解釈⁸⁾によつてえられた結果に基づいて量的解析を進めた場合とで解析結果が著しく異なるようなものがある。一般に、実測VES曲線は表層の不均質によつて多少とも歪みを受けているけれども、界面上層の表層に対する相対層厚が充分大きな構造の場合、A、歪みが余り著しいものでなく、かつ局部的で実測VES曲線より上層の比抵抗値が求められる程度であり、またB、彎曲点付近には歪みが認められず、界面の反射係数の値が曲線重合によつて判定できるような実測VES曲線例えば、VES(3)に対しては、解析手順のいかによらず同じ解析結果が得られる。しかしながら、彎曲点付近にははなはだしい歪みがあり、実測VES曲線より反射係数の値を判定することが困難な曲線、および彎曲点の左分枝が著しく歪んでおり、上層の比抵抗値の決定にははなはだしい誤差を伴うような実測VES曲線に対しては、解析手順のいかによつてはなはだしく異なる解析結果がえられる。例えば、VES4のような実測曲線に表層より順次曲線重合法を機械的に適用して解析すると、得られる結果は地質断面の実体とは全くかけ離れたものとなつてしまう。VES4曲線の量的解



第 11 図

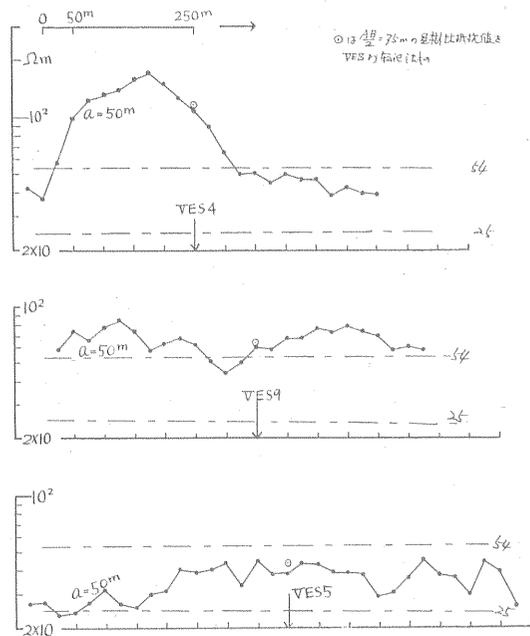
析に入るに先立ち第5図の曲線群を相互に比較するならば、VES 4 曲線の $AB/2=60\text{m}$ 付近の曲線の上昇は水平方向の不均質によって生じたものであることは明らかであり、量的解析に耐え得ない VES 曲線であると判断される。もしも、この曲線の上昇を構造の垂直断面の反映とみなして、量的解析をほどこすならば、得られた構造断面は実体とは全く異なるものとなってしまう。なお第12図の水平探査の結果をみれば、VES 4 曲線の $AB/2=60\text{m}$ 付近の曲線の上昇は非水平構造による曲線の歪みであるとする質的解釈はあやまちでないことが分る。この種の歪みをうけた実測曲線に対して量的解析を行ない界面の深度を求めようとする場合には、曲線群の質的解釈の結果に基づいて上層および下層の比抵抗値を推定し、歪みをうけていないと考えられる曲線部分についてのみ解析を行なうべきであろう。例えば、VES 4 曲線に対しては、質的解釈に基づき、上層を $46\ \Omega\text{-m}$ 内外、下層を $2.6\ \Omega\text{-m}$ 程度に仮定し、曲線の下降部のみの曲線重合によって解析し、おおよその深度の見当を付けるのが妥当であると筆者は考える。なお、VES 4 曲線のように歪みのはなはだしいものを、このような手順で解析して得られた界面の深度は誤差が大きく精度の悪いものであることは避けられない。VES 9 および 10 の曲線についても筆者らは同様な手順を用いて界面のおおよその深度を推定し、参考までに第11図に記入しておいた。ところで、このようにして解析してえられた界面の深度が精度のよいものとなるためには、上・下層の比抵抗値が質的解釈によって正しく求められている必要がある。そのためには、上・下層の比抵抗値が地域内で一定に保たれていることが望ましいことである。もしも、界面上・下層の比抵抗値が地域内で一定であるならば、歪みをうけていない VES 曲線が2層構造として比較的容易に解析されるばかりでなく、例え、VES 曲線が歪みをうけていたとしても、歪みをうけていない部分について解析することによって界面の深度はかなりよい精度で推定されるはずである。もちろん、この場合、歪みをうけていない曲線部分をまず推定する必要があるので、そのような推定の確からしさによって求められた界面の深度の精度は左右され、歪みの程度と位置によって精度が影響される。界面上・下層によってつくられる2層構造を反映する VES 曲線の主要部分に歪みをうけている場合には、推定された深度の誤差はもつとも著しいものとなる。

このように実測 VES 曲線が多少なりとも非成層構造(不均質効果)により歪みをうけている場合には実測 VES 曲線上にあらわれた歪みをうけた部分を選び出すことおよび界面上・下層の比抵抗値を推定することという2つの手順を経て量的解釈に移らねばならない。

まず、界面上・下層の比抵抗値の推定の問題について

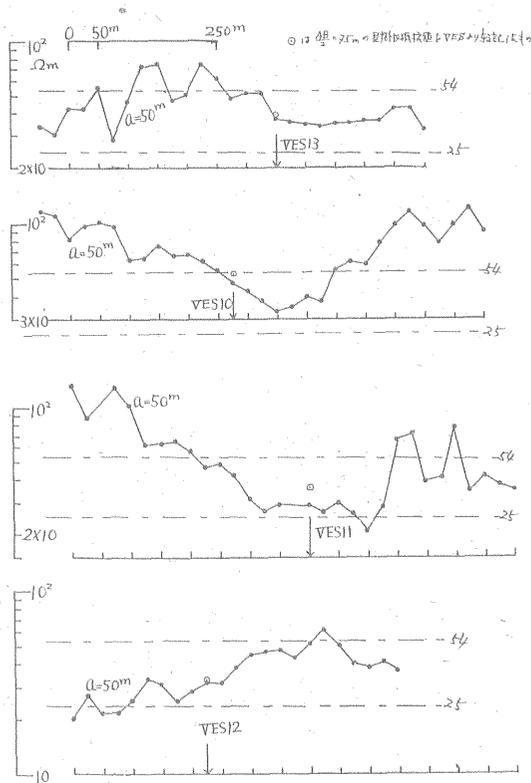
考えてみる。もしも、上・下両層がともに均質でその比抵抗値がかなり広い地域にわたって一定しており、良好な電氣的鍵層となつていならば、電気検層図または実測 VES 曲線よりこの鍵層の比抵抗値はかなりよい精度で求めることができる。すなわち、鍵層が均質ならば、電気検層図より容易に正確な比抵抗値が算定できる。たとえ、電気検層図がなくとも、実測 VES 曲線のうちで歪みの少ないものを用いて統計的に求めても、かなりよい精度で決めることができる。S.K. 1・2 および西小国 R 1・2・3 号井の電気検層図によれば、本地域で構造探査の対象とされた界面上・下層のうちで、下層は比較的電氣的には均質であり、その層厚も充分厚くおおむね良好な電氣的鍵層をなしているとみなすことができるが、上層はこれを構成する各地層の比抵抗値は異なっており電氣的にも互層をなしており、互層を構成する各層の比抵抗値と層厚は孔井ごとにかんがりの相違が認められるので、上層を電氣的に均質で、その比抵抗値が一定な電氣的鍵層とみなすことはできない。下層はこのような電氣的鍵層をなしているのので、その比抵抗値はかなり高い精度で推定される。上層は電氣的にも互層をなす層を等価単一層に置き換えたものであるから、上層を構成する個々の層の比抵抗値と層厚の変化がみられる場合には、等価単一層としての上層の比抵抗値も当然変化するものと考えねばならない。

いま、調査地域内では界面上層の表層に対する相対層厚は充分大きいとみなすことができるので、 $AB/2$ が大きく、かつ彎曲点より左側にある部分、例えば $AB/2=$

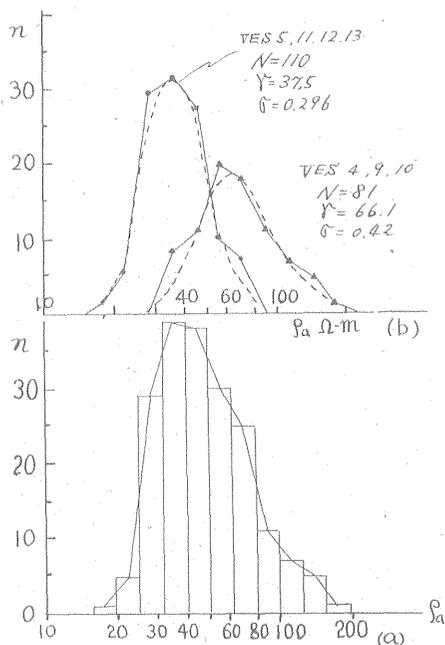


第 12 図

75m付近に対応する見掛比抵抗値は、上層の等価比抵抗値に近似したものになると考える。この場合表層の不均質による歪みがないとすれば、 $AB/2=75m$ に対応する見掛比抵抗値の分散を求めることによって、上層の等価比抵抗値の分散の程度を知ることができる。第12~13図は $AB/2=75m$ として、VES点付近で行なつた水平探査の結果である。水平探査に当つては、便宜上、 $AB/2=75m$ に等しい電流電極間隔をもつ電極間隔 $a=50m$ のWenner配置を採用した。いま、界面の深度が150mの均質な2層からなる構造に対しては、 $AB/2=75m$ のSchlumberger配置の見掛比抵抗値と $a=50m$ のWenner配置の見掛比抵抗値とは一致するけれども実際の大地に対しては両配置の応答は異なり、えられる見掛比抵抗値は厳密な意味では等しくない。しかしながら、VES曲線の見掛比抵抗値と水平探査の見掛比抵抗値とはほぼ等しくなっており(第12~13図)、またここでは半定量的な議論を行なうことが目的であるので、以下に水平探査でえられた値を用いて見掛比抵抗値の頻度分布をしらべてみることにする。その結果は第14図(a)のような分布をとり、単一対数正規母集団より抽出した標本の分布を示すとは考えられない。この分布は少なくとも2つ以上の母集団より抽出された標本を含むものと考えられるので、見掛比抵抗値は上層の等価比抵抗値のほかに表層の不均質効果によつて左右されることを考慮し、便宜的手段として、不均質効果の著しい地域と余りはない地域とに分けて、見掛比抵抗値の頻度分布を求めてみることにする。その結果は、第14図(b)に示したように、実測VES曲線が余り歪みをうけていないVES 5, 11, 12および13測点付近の見掛比抵抗値は標本数110個で、中央値 $\gamma=37.5\Omega\cdot m$ 、標準偏差 $\sigma=0.296$ の対数正規分布を示す母集団の標本分布であり、不均質効果の著しいVES 4, 9および10測点付近の見掛比抵抗値は標本数81個で、中央値 $\gamma=66.1\Omega\cdot m$ 、標準偏差 $\sigma=0.42$ の対数正規分布をとる母集団よりの標本分布であることが5%の危険率で有意性をもつて判断される。後者の場合、中央値は電気検層図より予想される上層の比抵抗値よりかなり大きく、かつ分散もはなはだしい。本地域のように火山砕屑物に覆われる地域では、高比抵抗の不均質物が多く存在するために、上層の比抵抗値よりかなり大きな見掛比抵抗値が多く現われ、不均質が著しい場合には中央値は大きくなり分散もはなはだしくなると考えられる。後者はこのような不均質のはなはだしい区域の特性を反映しているものと思われる。このような場合には、見掛比抵抗値は不均質効果によつてより多く影響されており、見掛比抵抗値の頻度分布中に存在する上層の比抵抗値の分布特性は不均質効果によつて覆い隠されてしまい、見掛比抵抗値の頻度分布より上層の比抵抗値の分散状態を推



第13図



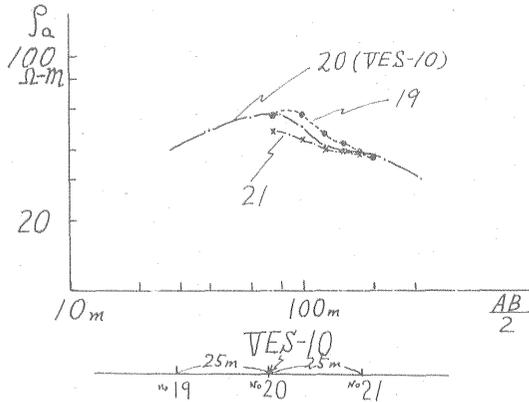
第14図

定することは不可能である。一方、前者の場合には、中央値は電気検層図から予想される上層の比抵抗値と近い値をもち、分散も小さくなっている。分散がこのように小さいことは不均質の影響が少ないことによると考えられるが、同時に上層の比抵抗値も比較的集中性がよいことを意味している。次に、この場合の分散に対し、不均質効果と、上層の比抵抗値の変動とのいずれがより強い影響を与えているかを検討するために、水平探査の結果を吟味してみる。水平探査でえられた比抵抗曲線上に現われる見掛比抵抗値の変化は、浅所にある比抵抗値の変動に起因するものほど、急速な変化を示す性質がある。えられた見掛比抵抗値の水平方向の変化の様相をしらべてみると、見掛比抵抗値の急速な変化は全般的にみて緩慢な変化に較べて分散度が著しくなっており、見掛比抵抗値の分散に対しては不均質効果の方が強く作用しているようにみられる。したがって、上層の比抵抗値の変動幅は見掛比抵抗値の変動の幅より小さいと考えることができる。

いま、見掛比抵抗値の80%は $25\sim 54\Omega\cdot m$ の範囲内にあるので、不均質の著しくない地域の見掛比抵抗、すなわち、深部構造をよく反映する見掛比抵抗値、として信頼できる範囲は $25\sim 54\Omega\cdot m$ であるとみて差支えないであろう。事実、この範囲を水平探査でえた比抵抗曲線図に記入してみると(第12~13図)、VES 測点付近の $AB/2=75m$ の見掛比抵抗値が $25\sim 54\Omega\cdot m$ の範囲内によく収まるものほど、実測曲線上にみられる歪みの程度が少ない。次に、この見掛比抵抗値の水平方向の変動が $25\sim 54\Omega\cdot m$ の範囲内に収まるもの(例えば、VES 5, 12)についても、不均質効果が見掛比抵抗値に対してまだいくばくか影響していることが第12~13図より知られる。したがって、上層の比抵抗値の変動は $25\sim 54\Omega\cdot m$ の範囲より狭いものと考えられる。ところで、不均質効果の見掛比抵抗値に対する寄与は、電極系との相対位置によって大きく左右されるものであるから、 $AB/2=75m$ 以外のいくつかの電極間隔に対する見掛比抵抗値も考慮に入れること、例えば、実測曲線をこのような観点に立つて吟味すること、によって、一層適正な上層の比抵抗値を推定することができよう。なお、ここで記した例のように、見掛比抵抗値の分散に対して不均質効果が著しく影響している場合には、見掛比抵抗値の分布より上層の比抵抗値の変動状態を推定することは困難となり、そのため解析結果にある程度の任意性が入り込むことは避けられないように思われる。今回の例のように、2層構造の問題として取り扱える場合には、 $AB/2 < \frac{1}{2}d$ (ここに、 d は界面の深度)の範囲内のVES曲線のかなりの部分にわたって、不均質効果がない限り、見掛比抵抗値は上層の比抵抗値に等しいものと考えて理論的に差支えを生じな

いのであるが、上層を被覆する層の厚さが少しく増加しても、このように考えうるVES曲線の部分は、かなり縮小されるため、上層の比抵抗値の推定はさらに困難になる。例えば、上層を被覆する層が上層の比抵抗値より大きい値をもつ場合でも、被覆層の厚さが $\frac{1}{25}d$ 以上になると見掛比抵抗値より上層の比抵抗値を直接的に推定することはできなくなる。したがって、実際に探査を行なう場合は、探査区域内のできる限り多くの箇所、しかも被覆層の薄い場所、上層の比抵抗値に関する資料をえ、上層の比抵抗値と考えて妥当な値、または上層の比抵抗値が占めうる範囲、または、上層の比抵抗値と考えることが許される範囲を推定するよう努めなければならない。

次に、実測曲線上にあらわれた歪みを受けた部分を適確に選び出すためには、測定されたVES曲線を互いに比較することが、実際的な方法といえるのであるが、この方法によって適確に歪みを受けた部分が選びだされるためには、同じ種類の構造に対してある程度の数の実測曲線がえられていることが必要である。いま2層構造の界面までの深度を d とする。界面の傾斜が 2° の場合には、相隣る測点の距りが $0.58d$ 以内では界面の深度差は2%以内に収まり、この両測点下の地下構造が同じ種類の構造である限り、両測点でえられた実測VES曲線の相違は測定誤差の範囲に収まり、この2つの測点でえられた実測VES曲線は同じものとみなしうはずである。界面の傾斜が 5° の場合、 $0.21d$ 以内、 10° の場合、 $0.11d$ 以内では同じことがいえる。つまり、この程度の測点間隔で配置された測点では、実測VES曲線は垂直構造に対してはほぼ連続した情報を提供するので、水平方向の不均質物による歪みの部分は実測VES曲線の相互比較によってかなり適確に抽出されることになる。しかしながら、対象とする構造の変化が比較的単純であつて、かつ構造の概要を速やかに知ることが探査の目的である場合には、測点の密度を充分密にすることはあまり得策ではない。このような場合には、1つの測点の両側に上記の間隔(すなわち $0.58d\sim 0.11d$ 以内)を保つ補助測定を設けるならば、測点および2つの補助測点でえられる実測VES曲線は相連続すべきである。したがってこれら3つの実測VES曲線を重ね合せたとき食い違いがみられるとすれば、それは不均質物による歪みによって生じたものと考えて差支えない。ただし、実測VES曲線は両対数目盛を用いて表示されているので、不均質物による歪みの部分を抽出するという目的に対しては、これら3つの測点が余り隣接しすぎる場合には、歪みによる実測曲線の食い違いが確認し難くなるので、 $d/5\sim d/2$ 程度に相互に隔りをもつことが望ましい。このような目的でVES 10 測点の両側に $25m$ の隔りをもつ補助測点19お



第15図

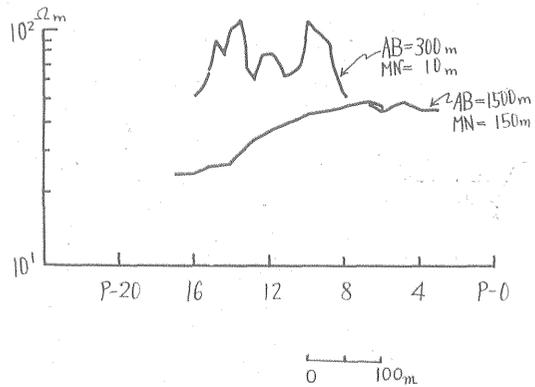
および21測点を測けて測定した補助的実測VES曲線をVES10と比較したものが第15図である。その結果は、不均質による実測VES曲線の彎曲と思われるVES10の $AB/2=80$ m付近の歪みは、補助的実測VES曲線ではそれぞれほぼ25mずつずれて現われることを示しており、またVES10と補助的VES21の左分枝の一致より、上層の比抵抗値を約 $40\Omega\text{-m}$ 程度と考えることが妥当とみられる。

以上述べたように、電気探査比抵抗法の探査結果の精度は地表付近にある不均質物と対象とする界面の上・下層の比抵抗値の一様性によって左右される。このうちで、地表付近の不均質物は実測VES曲線を彎曲せしめ深部構造と類似の作用をなすので、実測VES曲線上にあらわれた見掛比抵抗値の変化が深部構造によるものであるか、または不均質効果によるものであるかを適確に判断することは大切なことである。したがって、量的解析に先立つて、実測VES曲線群を相互に比較しながら質的解釈を行なう過程で、不均質物が実測VES曲線に与える歪みの位置とその程度をできる限り適確に推定するよう努め、必要に応じ、上記のような間隔(0.58d~0.11d以内で、 $d/5\sim d/2$ 程度)に選んだ補助測点でえられた補助的実測VES曲線との比較も行ない、歪みの位置とその程度に対する推定の確からしさを検討するよう心掛けねばならない。

6. その他

実測VES曲線のうちには、先に述べたように側方効果によって歪んだと考えられるものもある。側方効果による歪みは不均質効果によるものに較べて遙かに緩やかな変化を示す。そのため、垂直構造による曲線の変化と側方効果による曲線の歪みとを個々の実測曲線の視察によって識別することはわずかしく、多数の実測曲線の相互比較に基づく質的解釈に頼らねば識別できない。さ

て、質的解釈によつて推定された側方効果については、その原因となる側方に存在する異常物を何らかの手段によつて確認しておかねばならない。われわれはVES29測点の西側にあると予想される断層状構造をPotential Profiling Methodによつて調べた。その結果は第16図に示した。この断層状構造は、先にも述べたように、落差が大きく、界面までの深度は西側では160~180m、東側では数百mを越すものと思われるが、第16図の結果もこの予想を裏付けるように、電流電極間隔 $A_2B_2=300$ mの配置では認められぬ断層状構造を反映する見掛比抵抗値の階段状の変化が、電流電極間隔 $A_1B_1=1,500$ mの配置の場合にはみられる。第16図の結果によれば、第2図



第16図

および第11図に示したような形の断層構造がVES29測点の西50~100m付近に存在し、ほぼ南北の方向に走っていると考えられる。なお、断層の走向は地質調査の結論より推定されたものである。

7. 結 び

これまでの研究によつて、規則正しい成層状態を示す構造に対する探査深度500mの直流法の技術を開発したのであるが、このような技術を構造解明の手段として種々の構造調査に積極的に利用してゆくためには、特に浅所の比抵抗値の不均質性が実測VES曲線の解析に対してどのような影響を及ぼすかについて検討しておく必要がある。

本報では、浅所の比抵抗値が不均質な構造でその例が多い、火山砕屑物に覆われる地域の構造探査を取上げた。

このような構造でえられる実測VES曲線は不均質効果によつて歪んだものとなり、不均質効果による実測VES曲線の分枝の彎曲は垂直構造の反映である彎曲と類似して形であられるので、機械的に上層より順次解析を行なつた場合、実際の構造とは全くかけ離れた構造がえられてしまう。したがって、量的解析に入る前に、質的解釈を行ない、構造の型と各層の比抵抗値の取りう

る範囲、および不均質効果による歪みの VES 曲線上で占める位置と、その程度についての結論をえておく必要がある。

構造を構成する各層の比抵抗値とその地域内における変動状態を知ることが質的解釈の1つの課題である。そのためには地域内に存在する坑井でえられた検層図を利用することはまず第1に考えねばならないが、このほかにも、できうる限り多くの箇所でも適当な電流電極間隔を選び、見掛比抵抗値の測定を行ない、その分布について検討するように心掛けねばならない。本報においてのべたような2層構造として取り扱いうるような比較的単純な型の構造においても、不均質な被覆層に覆われている場合には、見掛比抵抗値より上層の比抵抗値を推定することは容易でない。まして、上層を覆う被覆層の厚さが増し、2層構造として単純に扱えぬ型となつた場合(一般にこうした場合が多いように思われるのであるが)、上層の比抵抗値を見掛比抵抗値の分布から推定することはますます容易でなくなる。したがつて、探査の対象とする界面の上・下両層の比抵抗値が区域内で比較的安定した値をもつ場合にはかなりよい精度で結果を解析することができるが、上・下両層のうち一方が安定した比抵抗値を保つことが保障されていない場合には、上層の比抵抗値のとり方に幾何かの任意性が生じ、そのため解析結果にある程度の任意性が入りこむことは避けられない。探査に携わるものはできうる限り多く上・下両層の比抵抗値に関する資料を収集し、このような任意性の幅を縮小するよう努める必要がある。ここでは検層図の利用と VES 測点付近の水平探査の結果を念頭におき、個々の実測 VES 曲線の吟味によつてこのような任意性の幅を縮小する方法をのべたのであるが、この方法は必ずしも充分なものとはいえず、今後このような問題について研究を進めてゆかねばならないと考えている。次に、不均質な被覆層による実測 VES 曲線の歪みの位置とその程度を知ることが重要な質的解釈の課題であるが、そのためには、得られた実測 VES 曲線の相互比較に基づくべきで

あり、同じ形の垂直断面をもつ範囲内に2つの補助的実測 VES 曲線をえ、これら3つの VES 曲線の重ね合せによつて歪みの位置とその程度を確かめるようにすべきであろう。

このような考え方で実測 VES 曲線を解析した結果は、坑井よりえられた検層図および地震探査の結果とほぼよい一致を示しているが、向斜部には低塩度の間隙水を含む砂質層が深度約1,000m 付近まで厚く分布するという興味ある事象を見出した。火山砕屑物に覆われる地域においては、伏流水の浸入によつて地層の比抵抗値がかなり影響をうける点も注目すべきであろう。

(昭和36年8月～9月調査)

文 献

- 1) 小野吉彦他：伊豆大島における直流法による電気探査について、地質調査所月報，Vol.12，No.11，p.813～830，1961
- 2) 陶山淳治他：直流法を用いた大地比抵抗の測定法について、地質調査所月報，Vol.13，No.12，1962
- 3) 小野吉彦他：直流法による観測値の再現性と不均質効果，地質調査所月報，Vol.14，No.3，1963
- 4) 地質調査所：日本鉱産誌 V—b
- 5) 馬場健三他：人形峠夜次鉱床付近の花崗岩の電氣的性状について、地質調査所月報，Vol.13，No.1，p.17～28，1962
- 6) Maillet, R.: The fundamental equation of electrical prospecting, Geophysics, Vol.12, No.4, p.529～556, 1947
- 7) 小野吉彦他：成層構造の比抵抗探査について、地質調査所月報，Vol.9，No.6，p.391～400，1958
- 8) Якубовский, Ю. В. и П. П. Пяхов : Электроразведка, 1956