

直流法による観測値の再現性と不均質効果

—深部物理探査研究 第11報—

小野 吉彦* 陶山 淳治* 馬場 健三*

Reliability of Observation by D.C. Method and
the Heterogeneity Effect on VES Diagrams

by

Yoshihiko Ono, Junji Suyama & Kenzō Baba

Abstract

For the purpose of studying the reliability of the data observed by means of D.C. resistivity method and the heterogeneity effect on VES curve, field tests are carried out in Jōban coal field, using potentiometer with S.P. compensator.

The relations between the magnitudes of the observed values (potential differences or apparent resistance) and their variations $\Delta R/R$ are tabulated (Tables 1, 2 and 3), and from these tables, the information for the reliable range of the observed values is obtained. Next, comparing with VES curves obtained at VES points distributed to each other with short interval in this field (Fig. 2), it is expected that in Jōban district the effect due to the ununiformity of surface layer resistivity may be not seriously obstructive to the interpretation of the VES diagram; and then a simple method to discriminate the lateral heterogeneity effect from the actual VES diagram is advocated (Figs. 4, 5 and 6). Lastly, the theoretical curves for the fault-structure model are calculated in regard to the various parameters (Fig. 8).

要 旨

直流法による深部電探研究の一環として、常磐地区において現場実験を行なった。この報告は特に現場における観測値の再現性の問題と不均質効果を考慮に入れたデータの再現性の問題を取り扱ったものである。

その結果、非直流電化かつ堆積岩地域における電位差計型探鉱器による観測可能範囲についての知識が得られた。また、表層部の不均質のVES曲線に対するきき方が例示され、最後にVES曲線に対する断層型構造の影響が理論的に考察された。

1. 緒 言

本所物探部が直流法の研究に着手して以来、各種構造に対する適用の可能性の検討とこの方法の適用に関連した種々の技術的問題の発見ならびにその解決に努めてきた。このような研究過程において、若干の課題について現場実験を実施する計画が立案され、常磐地域をそのた

めの test field に選定することになった。

この報告は同地域で実施された一連のテストの中の一つをまとめたものであって、その要点は電位差計による直流法のデータの再現性の問題、とくに観測値自体の再現性と観測データの信頼性の問題にある。

現場の条件や時間的制約等のために、充分意を尽すまでには至ってはいないけれども、同法に興味をもっておられる方々のために、結果について報告することにした。

なお、この実験には、筆者らのほか高木慎一郎・駒井二郎らが参加した。現場実験は昭和35年11月中旬から12月中旬の約1カ月間、茨城県北茨城市周辺において実施された。

また、この実験を行なうに当たって、種々の便宜を賜った常磐炭硯K.K. 関係者の方々には紙上を借りて謝意を表したい。

2. 現場の概要

この地域は地質や物理探査（主として地震探査）の資

* 物理探査部

料も豊富で、これらの資料から電気的構造についてある程度予見することが可能であったこと、基盤の深さがわれわれにとって適当(数100m)なものであったこと、および直流電化地帯ではないこと等の理由でこの地域を test field にえらんだのであるが、なお、この実験に先立って、同地区内において電気検層が実施された。

この地域の西方には基盤岩である花崗岩類・片岩類が露呈し、それから東方に向かって順次、第三紀盤城夾炭層およびその上部層が地表に露出している。

この地域内いくつかの VES^{注1)}点を設け、また、地電流観測点を若干おいた。これから述べようとする再現性テストの結果はこのような VES データから得られたものである。

3. 観測値の再現性テスト(見掛抵抗の再現性)

3.1 実験の説明

まず、VES 観測値再現性テストの一つとして、観測された見掛抵抗 $R=V/I$ 値の再現性についてしらべてみた。その際、電極は固定したままにして測定を行なった。電極の設置場所は電流用、電位用ともに湿田もしくは乾田内にあるのが多く、したがって、接地抵抗は一般にかなり低かったが、場合によっては、海岸に近い砂浜、第三紀丘陵の風化土、あるいは道路際のあまり好ましくない条件のところ電極を埋めざるを得ないこともあった。

電流電極にはステンレス製打込み電極を使い、電極地点に1~20本の電極を打込んだ。電位電極は銅硫酸銅系焼壺電極(無成極電極)で、1つの電極地点に数個埋めて使った。電線は鋼心入りのポリエチレン・ビニール二重被覆線(電線抵抗が約27 Ω /km および10 Ω /kmの2種類)を用いて、絶縁抵抗を常に1,000M Ω 以上に保持させて漏洩から生じる誤差の防止に努めた。

電源には B1 を多数、直列もしくは並列に接続して使用した。

流電電流、観測電位差とも電位差計によって測定を行なった。電流は標準抵抗を通して生ずる電圧降下を、電位差は自然電位分を分極電位補償器で打消した後の値を測定したものである。この電位差計については陶山が本月報においてすでに説明しているので(地質調査所月報13巻12号、深部物理探査研究 第10報参照)、概要に止めると、動作電流として、5, 1, 0.2 および 0.05mA の4つの値が採用され、4段切換によって最高495mVから最低0.05mVまで測定可能になっている。1mV以上の測定では読み取り誤差は5%以内に収められる。もし検

流計の感度が伴えば少なくとも2.5%以内におさえることは可能である。

このような器械、器具類を使って、実験室とは著しく条件の異なる野外で、電気化学的にもいろいろ複雑な現象を示す大地を対象にした場合、観測精度がどの程度維持するものなのかが知りたかったので、このテストを行なったわけである。

テストは次のようにして行なわれた。電極系の中心Oにも補助の電位電極を設けて、電位差として V_{MN} のほかに V_{MO} および V_{ON} を測定した。

一方、電流が一定であれば、

$$V_{MN} = V_{MO} + V_{ON}$$

であるはずで、もし電流が一定でなければ、

$$R_{MN} = R_{MO} + R_{NO}$$

が成立する。われわれの観測では多少電流の値が変わるので後の式を使って、観測値 R_{MO} , R_{NO} から得られた R_{MN} (R'_{MN} と記す)と直接観測して得た R_{MN} とを比較した。

他の1つの方法は同じ電極間隔で測定を繰り返して行なって得られた R の値のばらつきをしらべることである。

こうして得られたテスト結果は次の項で紹介することにして、その前に想像される測定誤差のおもな要因を列挙しておこう。

3.2 測定誤差の要因

(1) 電流の変動

電池の消耗度、電流電極付近の分極作用の程度によって電流の安定性が支配される。媒質の性質いかんで、かなり大きく変動することがある。また、電流の極性を変えたとき、正負で相当大きな差を生ずることもある。しかし、多くの場合、10~数10秒を経れば、電流値はあまり変化しないようである。電流の値が変化することは単にその読み取りに誤差を生ずるのみならず、電位差の測定に大きく影響するから問題である。

(2) 自然電位分の補償の過不足

自然電位および電極電位は流電前あらかじめ打消しておかねばならない。観測電位差が充分大きければ、補償の過不足によって生じうる誤差は無視されるかもしれないが、この電位差が小さくなるにつれて重要になってくる。ことに消去されるべきノイズ電位の drift が大きければ観測は困難になる。

(3) 変動地電流の影響

測定時間に比較して充分大きな周期の地電流は測定に影響しない。また、周波数の大きい場合(50サイクル以上)実際上ほとんど影響しないとみてさしつかえがない。迷走電流を含めて地電流によるノイズ電位差が観測電位

注1) Vertical Electrical Sounding の略

差に較べて充分小さければ問題にするには及ばないが、一般に後者が小さくなったとき、ことに直流電化地帯では大きな影響をもつと考えられる。

(4) 誘導分極作用の影響

同一電極間隔で、測定を反復するとき、電流を切った直後、重ねて自然電位補償を点検すると、誘導分極電位による drift が補償操作を誤らせることがある。この影響の大きさは媒質によって異なることはわれわれがしばしば経験したところである。なお、電流電極接地点に電位電極を設置しないのも誘導分極作用による残留効果を避けるためにほかならない。

(5) 漏洩の影響

電位回路内に電流回路からの漏洩電流が僅かにせよ入ってくることは、測定値の信頼性を失わせる原因になるので特に注意せねばならない。今回の実験では電線については前に説明したような高絶縁性のものを使い、また電池からの直接漏洩を防ぐ意味で、器械とともに自動車の中に乗せて測定した。測定器についてもそのような考慮が払われている。

(6) 検流計の特性

検流計の感度、周期等の特性は零点検出の難易に関係し、読み取り精度に影響する。今回使用した検流計は電

流感度が $1\mu A$ full scale のものであったが、周期が長すぎた嫌りがある。

なお、この種のテストは現場の条件や測定者の熟練度のような要素に大きく関係するので、これから示される数的結果は測定データの再現性の目安にはなることは確かではあるが、常に一般性をもつものではないことに留意すべきであろう。

3.3 観測結果

一般に、測定値の再現性は観測電位差あるいは見掛抵抗の大きさによって異なると考えられるので、前にのべた R'_{MN} と R_{MN} との差 ΔR の R_{MN} との比 $\Delta R/R_{MN}$ (添字 MN を省略して $\Delta R/R$ と記す) と R_{MN} との関係を表示し、これを整理して表示したのが第1表である。この表には $|\Delta R/R| \leq 5\%$ および $|\Delta R/R| \leq 2.5\%$ の場合だけが紹介されている。

なお、この結果は1~数回の測定によって得られたそれぞれの R の値の平均値を材料にして作られたものであるが、 R_{MN} は常に2回以上測定され、一方、 R_{MN} , R_{MN} はそれぞれ1回しか測定されていないが多かった。

次に電極を同じ状態にして、反復測定を行なったときの値のバラツキの模様をしらべてみる。そのために、最高の読み取り値 R_{max} と最小の読み取り値 R_{min} の差

第 1 表

$R \Omega$	>10	10~1	1~10 ⁻¹	10 ⁻¹ ~10 ⁻²	10 ⁻² ~10 ⁻³	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴	平均	
総 個 数	4	12	27	42	66	7	158	
$\frac{ \Delta R }{R} < 5\%$	個数	4	12	26	40	56	5	143
	百分比	100	100	96	95	85	71	91
$\frac{ \Delta R }{R} < 2.5\%$	個数	4	11	22	30	38	4	109
	百分比	100	92	82	71	58	57	69

第 2 表

$R \Omega$	>10	10~1	1~10 ⁻¹	10 ⁻¹ ~10 ⁻²	10 ⁻² ~10 ⁻³	10 ⁻³ >	平均	
個 数	6	17	37	51	87	13	211	
$\frac{ \Delta R_1 }{R_{min}} < 10\%$	個数	6	17	36	49	77	9	194
	百分率	100	100	97	96	89	69	92
$\frac{ \Delta R_1 }{R_{min}} < 5\%$	個数	6	17	34	43	58	5	163
	百分率	100	100	92	84	67	38	77
$\frac{ \Delta R_1 }{R_{min}} < 2.5\%$	個数	5	15	27	32	45	4	128
	百分率	83	88	73	63	52	31	61

ΔR_1 と R_{min} との比を考え、これと R の値との間の相関を求めたのが第2表である。この統計には2回以上反復測定したものを包括している。

第2表の R の代りに電位差計の動作電流をあてて、第3表を作る。この場合、観測電位差の読み取りに着目したものであって、電流値の読み取りについては随意となっている。

予測されていたように、観測電位差ないし見掛抵抗が小さくなるにつれて、それらの値の再現性は一般に悪くなるが、観測値の読み取り変動率が10%以内に収める積りであれば、 R の値が $10^{-3}\Omega$ 以上ならば、約90%のものが合格することになる。ところが $10^{-3}\Omega$ 以下では1/3のものが不合格になるという結果が得られた。 $R=10^{-3}\Omega$ は電流値1Aのときの観測電位差が1mVあることに相当するので、いわゆる読み取り精度のうえから考えても、これより低い値については再現性が悪くなるのも当然である。

オツシログラフによる迷走電流の記録をみても、この地域では、0.1mV程度の変化がきけられない点を考慮すると、5%程度の精度で観測を行なうためには、電位差計による測定では1mVが限界であるとみてさしつかえないであろう。

第 3 表

動作電流 (mA)	5	1	0.2	0.05	平均	
個 数	24	40	59	88	211	
$\frac{\Delta R_1}{R_{min}} < 10\%$	個数	24	40	54	76	194
	百分率	100	100	92	86	
$\frac{\Delta R_1}{R_{min}} < 5\%$	個数	24	36	49	54	163
	百分率	100	90	83	61	
$\frac{\Delta R_1}{R_{min}} < 2.5\%$	個数	20	31	37	40	128
	百分率	83	73	64	45	

なお、見掛抵抗の反復測定において、測定値に定向変化(履歴現象)がみられるか否か、極性の反転が測定値に影響を与えるものか否か等についても検討しようとしたのであるが、問題にするほどの現象は統計的処理によってはとらえることができなかった。ただ、極性の反転によって、電流値に著しい差が認められる場合があったが、このような場合でも、観測電位差の値は電流の絶対値に依存するのみで、極性には関係しないようである。したがって、極性の反転は見掛抵抗の値には実際上何らの影響も与えてはいないようである。

理論的観点からすれば MN/AB をできるだけ小さくした方が深部の情報は得やすくなるが、著名な Schlumberger 法の式

$$\Delta V = \frac{\rho l}{\pi} \cdot \frac{\Delta l}{R_2} \quad (\Delta l/R \ll 1)$$

(ここに、 ΔV : 観測電位差、 I : 流電電流、 Δl : MN 、 R : $AB/2$ である。)

から明らかなように、見掛抵抗は AB が大きくなるにつれて急激に小さくなるので、それに応じて測定精度も悪くなる。そこで、ある条件 ($NN/AB \leq 1/5$) の下で MN を大きくすることによって見掛抵抗の減少を防いでいる。しかし、 AB のきき方の方が MN のきき方より大きいので、 AB の大ききがある程度の値に達したとき観測不能となり、別の観測器械に頼らねばならない。

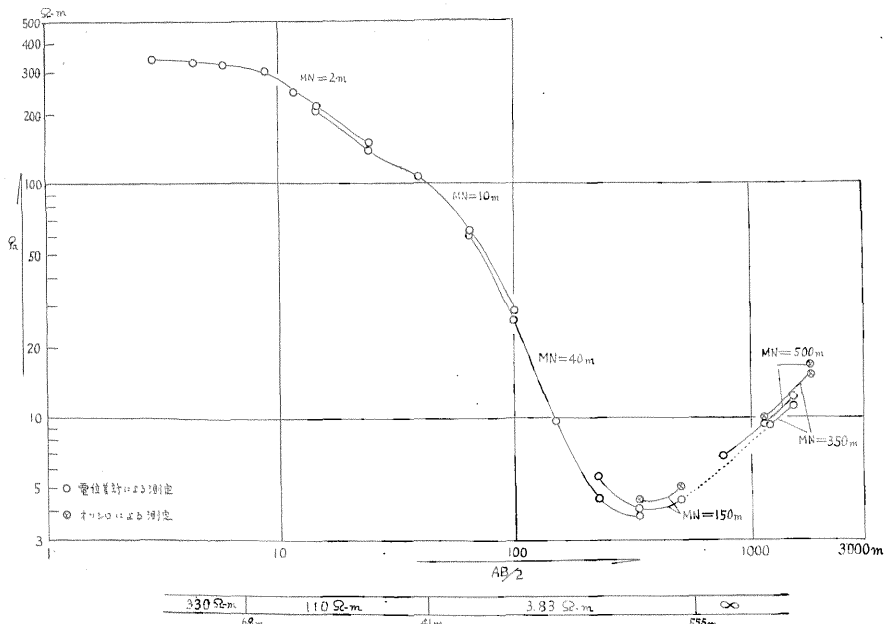
このように観測器の使用限界は AB に大きく支配されるが、電流の流し方、媒質の電気的性質等にも関係すること。ことに迷走電流ノイズの卓越する地域では著しく適用範囲をせばめられる。そこで、この問題に対する資料を得る目的で、同じ地域において迷走電流を観測し、また同時に、オツシログラフによる流電時の記録を得た。この模様については陶山らの報告を参照されたい(陶山等, 1961)。

ここでは AB のやや大きいところでオツシログラフの記録から読み取った値と電位差計によって得た値とを比較してみる。その場合、 MN として、150m、350m および500mの3種をえらんだ。オツシログラフの記録から流電直前直後の値あるいは切断直前直後の値から電流値、電位差がよみとられ、反復測定により平均見掛抵抗が算出され、これから見掛比抵抗が計算された。

第1図にこの結果を示してある。これによるとオツシログラフの観測値の方が常に2割程度大きくでている。数多い観測結果ではないのでその理由を明確に説明しえないが、ある種の系統誤差がいずれかの側にあったのではないかと考えている。そう考えて、その分だけ平行移動してやれば両者はよく一致する。ただ、 $AB/2=1,800$ mでは電位差計によっては全く観測が不可能であった。

いずれにせよ、見掛比抵抗が10cm前後の低い値をとるとき、 $AB/2=1,000$ m以上の測定は電位差計をもってしてはかなり困難であろう。

なお、参考までにVES曲線全体とその解析結果とを同じ図上に示した。



第 1 図 電位差計による測定とオツシログラフによる測定との比較(VES C)

4. 観測値の再現性テスト (VES曲線の再現性)

次に見掛比抵抗値ないし VES 曲線が電極の位置あるいは電極系の中心の位置の違いによってどの程度再現性を示すものなのか検討してみよう。

層状構造から著しく逸脱した場合は別としても、当面しているような堆積岩地帯においてさえ、表層部の比抵抗の水平的変動はまぬがれ難い。そこで、VES 曲線に影響を与えるであろう不均質の程度を知る方法の 1 つは異なる電位電極間隔に対する見掛比抵抗値を比較するものである。層状構造である限り、 MN/AB を小さくしてゆけば、同一電流電極間隔に対する見掛比抵抗値は一定の値に漸近するはずである。しかし、実際には電位電極近傍の不均質のために、上に述べた一定値からずれてくることが多い。通常 VES 曲線のいくつかの分枝 (これは MN の差に対応する) が互いに少しずつずれて、一致していないのはこの理由による。もし、電位電極が不均質部に位置したとき、その分枝だけがより多く不均質の影響を受け、他の分枝はほとんど影響されないから、その分枝だけが、不均質がないとした場合の VES 曲線からずれて観測されることになる。このような単純な場合は比較的補正も行ない易い。また、各分枝が雁行している場合、往々にして表層比抵抗の変動が方向性をもつ場合に相当する。

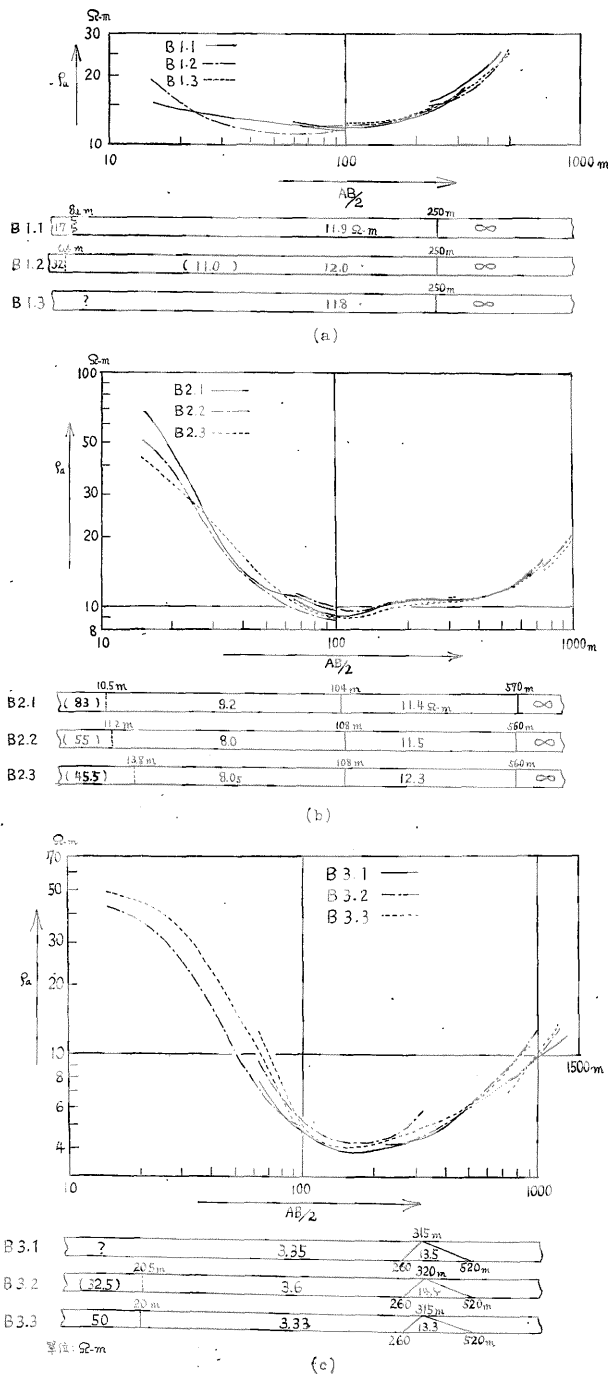
次の方法は電流電極の位置を動かすことである。たと

えば、電極系の方向に垂直な方向に電流電極をずらす。ただし、電流電極と電極系の中心 O とを結ぶ直線と、もとの電極系の方向とのなす角は充分小さくなければならない。表層比抵抗が水平方向に連続的な変化をなす場合、VES 曲線は平滑になり、したがって深部からの情報と誤認する恐れがある。

われわれは電極系の中心を移動して VES 曲線の再現性をしらべてみた。VES の実施には層状構造の成立を前提とする。したがって、ある深度以下の構造を探索しようとするならば、その深度に較べて充分小さい距離だけ中心の位置をずらしたとしても、少なくとも VES 曲線のその深度以深に対応する曲線部分で再現性が保障されていなければならない。

そこで、われわれが現在目標にしている深さを 100m 以深として、それより小さい距離だけ中心をずらして VES 曲線の形状、見掛比抵抗値の差異等をしらべてみた。この距離として 50m がえらばれた。ほぼ東西方向に互いに約 1km はなれた地点に VES 測点群を設け (B1~3) それぞれ約 50m おきに 3 つの VES 点をおいた (例えば B1.1, B1.2, B1.3 のように)。各 VES 曲線の形状を第 2 図(a)(b)および(c)に示す。

これによると、地下浅所の比抵抗が若干変動しているようで、 $AB/2=100m$ までの見掛比抵抗値は同一群に属していても多少の差異を示している。しかし、 $AB/2$ がもっと大きくなれば、 M, N の位置の差に起因した各曲



第2図 直線上でVES点をずらして得られたVES曲線とそれから求められた比抵抗柱状図の例

- (a) 各VES点の間隔: B1.1~B1.2 50m
B1.2~B1.3 70m
- (b) 各VES点の間隔: B2.1~B2.2 } 50m
B2.2~B2.3 }
- (c) 各VES点の間隔: B3.1~B3.2 } 50m
B3.2~B3.3 }

線分枝の差異(平行移動型である)を除いておおむねよく一致している。ただ、東側のB3群に属する曲線の中に部分的によく理解できない点も見受けられるが、一般的には曲線の傾向を変えてしまうほどのものではない。

各VESの見掛け比抵抗の同一測点群の平均見掛け比抵抗に対する変動率をしらべてみると、B1群では $AB/2=15m$ の場合のみ10%をこえるのみで、 $AB/2=40m$ 以上ではほとんど5%以内に収まっている。B2群では変動率が10%をこえるのは $AB/2=40m$ までであり、 $AB/2=100m$ 以上になれば5%以内の偏差に過ぎない。B3群は最も悪いけれども、 $AB/2$ が100m以下および1,000m以上である場合を除いてほしい10%以内に入っている。1,000m以上の値は前節で述べたRの小さい部分に属するのでその影響もきいてきているのではないかと考えられる。

表層部比抵抗に多少の変動が認められたとしても、構造的に大きな規模のものでなければ、着目している曲線部分には大きな影響を与えるものではないように見受けられる。また、深部にこれと幾何学的に同程度の構造的ノイズがあったとしても、いわゆる電極系フィルターの作用によって曲線にその影響が現われてこないこともある。しかし、一方では、われわれの採用している電極系はMN付近の構造ノイズを強調する恐れがある。MN/ABを小さくすればするほど、AB付近の異常物と同じ効果を与えるMN付近の異常物の幾何学的大きさは小さくてよいはずである。それで、異なるMNについて見掛け比抵抗値を測定して表層部の均質の度合を見当づけようとしたのである。

結局、M、Nに起因する構造ノイズについては2種類以上のMNについて見掛け比抵抗値を測定することによって、また、AB付近のもっと大きな規模の不均質については測点間隔の選び方によって吟味を行なうことが実際的な方法であろう。

次に、このようなVES曲線群は解析結果にどんな再現性を示すであろうか。

B1において、10m前後の厚さの表層を無視すると(表層が次層に較べて充分薄いことが曲線の形状から推定されるので)、次層(第1層とする)は11~12Ωmの比抵抗値をもつことになる。2層標準曲線の助けによって、深さ250m以下にきわめて高い比抵抗の第2層が求められる。この群に属するVESデータは互によく一致した解析結果

に導びかれる。

B2もB1と同様、 $AB/2$ の小さい部分についての測定が実施されていないので、表層比抵抗の信頼しうる値は得られていないけれども、 $40\sim 90\Omega\text{m}$ の範囲の値をとるのである。すなわち、この付近では約2倍の変動を示していることがわかる。つづいて、 $8.0\sim 9.2\Omega\text{m}$ の層が $104\sim 108\text{m}$ で下底に達し、その下部の $11.4\sim 12.3\Omega\text{m}$ の層を経て、 $560\sim 570\text{m}$ 以深の高比抵抗底層に続いていると解析された。B2の解析は筆者の提唱した方法(小野, 1959)によって行なわれた。

B3について解析すると表層につづいて $3\sim 4\Omega\text{m}$ の低比抵抗層がくる。B2の場合と同じ解析手続をとるとその下部に $315\sim 320\text{m}$ の深度以下に高比抵抗層が存在することになる。その際、この高比抵抗層を基盤をなす花崗岩もしくは片岩類だと判定すれば、他のデータと比較してあまり浅い嫌いがある。そこでB2にみられる $10\Omega\text{m}$ 台の比抵抗層が高比抵抗層の上部に存在しているのではないかと考えて、3層標準曲線($\rho_2/\rho_1=4, \rho_3/\rho_1=\infty$)を利用して解析すると、その層の絶対厚度は決定されずに存在範囲が示されるに過ぎない。その結果、このような層が存在するとみなせば、その上限は $260\sim 315\text{m}$ (または 320m)で対応する下限は $520\sim 315\text{m}$ (または 320m)となる。これは筆者がかつて紹介した解析の任意性(比抵抗層の削減性)の例として解釈される(小野, 1958)。

上に紹介した例はいずれも同じ手続まで解析して比較したもので、その結果が相互によく一致しているのは興味深い。

一般に堆積岩地帯で常にこのような再現性が保障されるとは限らないし、また地質学的には同一の層であって

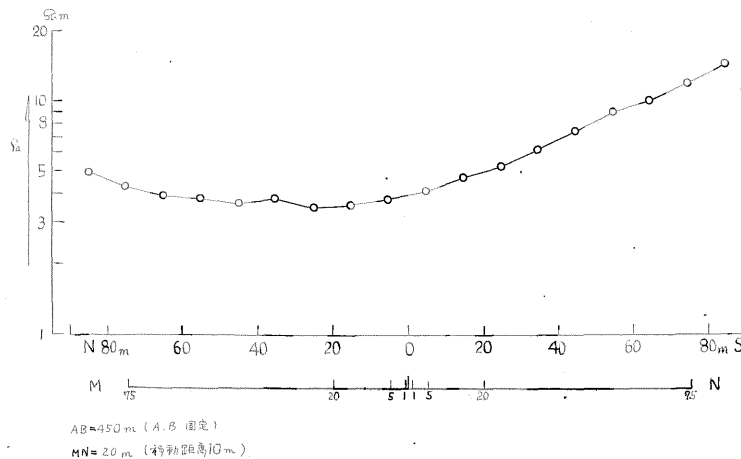
も、比抵抗についてはかなり変動する場合もあるけれども、比抵抗探索によって地下断面図を得ようとするときには、隣接したVES曲線が類似するように測点間隔を選ぶことが望ましい。

5. 表層比抵抗の不均質

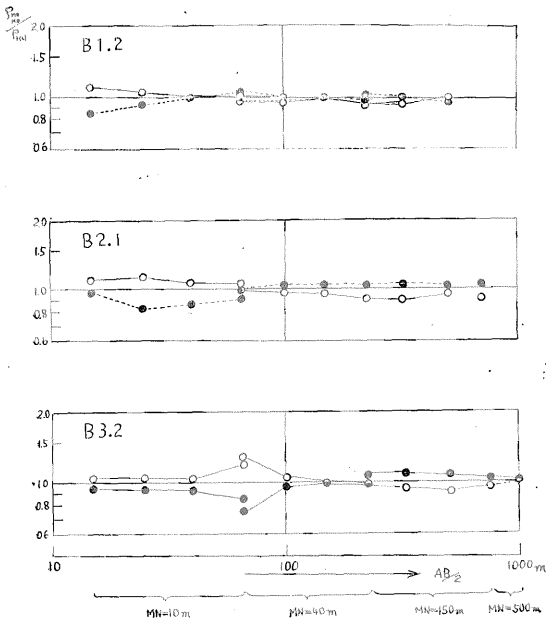
前節で、 MN 側に起因する不均質の影響についてはある程度処置することもできるが、 AB 側に原因を有する場合には明らかな曲線の不連続が認められるときは別として、一般に不均質の影響が、地下深所の情報なのか判断するのが難しいと述べた。

例えば、第1図のVES曲線を解析して比抵抗が $110\Omega\text{m}$ なる層を得ているが、その存在を確認し得たわけではない。もし、その曲線の得られた地点の近傍においてのデータがすべて同様な比抵抗の層の存在を暗示するならばこの層の存在は信頼できるようになるが、単一曲線の結果では正しい結論には至らない。第3図にこのVES点の中心付近を水平探索した結果が示されている。これによれば、中心に対して対称的ではなく、明らかに左方が高比抵抗になっている。この比抵抗断面図は必ずしも地表部だけの比抵抗を反映したものではないとしても、断面図にあらわれた変動が $MN=150\text{m}$ と $MN=40\text{m}$ に対するVES曲線分枝の食い違いとなって現われたものとして解釈される。表層部比抵抗がこの断面図に示されたものよりもっと著しい変化をしているのであれば、前述の比抵抗層の存在は危ぶまれる。こうして、単一のVESによって下の構造を判断することは危険な場合がある。

幸にして、われわれの測定は電場がほぼ一樣な部分について行なっているわけで、その意味においては AB 側



第3図 VES点C付近における水平探索曲線



第 4 図 稜質比抵抗の一様性に関する吟味の測定例

に起因する不均質の度合いがよほど大きなものでない限り MN 付近の不均質の影響と等価にはなりえない。

そこで、電位電極近傍の水平異常のチェックの問題であるが、2種類の MN による測定だけではどちらの電極側に原因を有するかわからないので、これを知りたいときすでに紹介した、RMO, RNO および RMN を比較すると便利なることがある。これは Wenner 法の場合に Lee 法と特に呼ばれているもので、拡張された Lee 法と称することができるであろう。

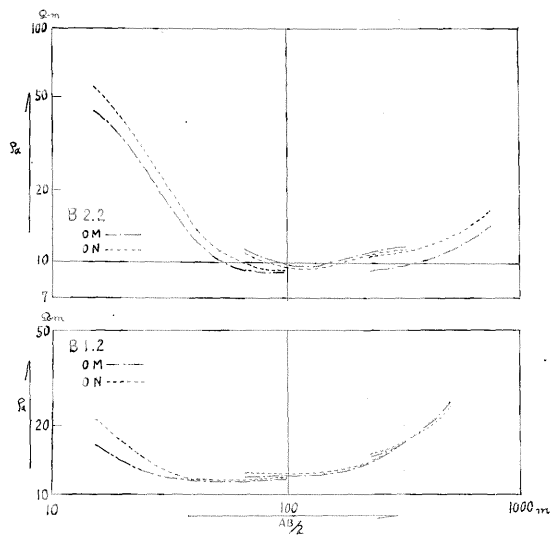
電位電極近傍に不均質があれば一般に $RMO + RNO$ (または $2RMO + RMN$, ただし $RMO + RNO = RMN$) であり、これは電流電極側の不均質の影響をあまり受けない。それぞれの見掛抵抗から対応する見掛比抵抗 ρ_{MO} , ρ_{NO} および ρ_{MN} が得られる。均質であれば無論 $\rho_{MO} = \rho_{NO} = \rho_{MN}$ であるが不均質な物質の存在により一般にこの等式は成立しない。第 4 図では ρ_{MO}/ρ_{MN} および ρ_{NO}/ρ_{MO} を縦軸にとり、 $AB/2$ を横軸にとって ρ_{MO} と ρ_{NO} の差異の横様が示されている。不均質の程度が著しくなれば ρ_{MO}/ρ_{MN} (黒丸で示す) と ρ_{NO}/ρ_{MO} (白丸で示す) は接近した値をとる。

B1.2 の場合、 $AB/2$ の値が小さい部分で両者は開きをみせているが、電流電極間隔の大きいところでは、測定誤差を考慮に入れてもかなり接近している。B2.1 になると上の例より不均質の程度は大きくなっている。特に $MN=10m$ の場合と $MN=40m$ の場合では ρ_{MO} と ρ_{NO} の間の大小関係が逆転していることは注目してよい。B3.2

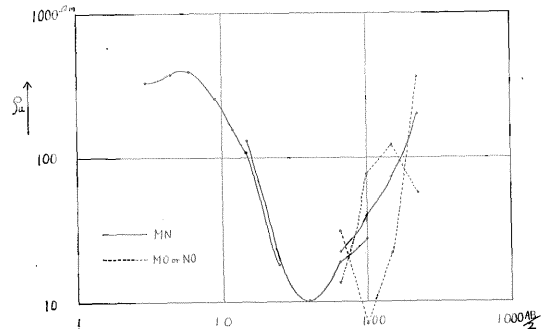
で $AB/2=65m$ で著しい差異がみられているのを MN 側だけの責任にしてよいか疑問である。むしろ、AB 側に局部的な異常があったために、 ρ_{MO}/ρ_{MN} および ρ_{NO}/ρ_{MN} 曲線の平行性が失われたと考える方が $AB/2=100m$ 以降での比較的よい一致を説明するのに都合がよい。

上の 3 例ははじめ両曲線が開いていて後で接近する場合、次にほぼ平行に開いている場合、最後に $AB/2$ のある区間だけ MN の値が異なっても大きな差をもっている場合を示しているが、最初の例は MN の近傍に原因があるが電極がその異常部に属していない場合にみられるのではないかと考えられる。次の例は、異常部に電位電極のどちらかが属している場合に相当するであろう。

次に、このような ρ_{MO} と ρ_{NO} の値を VES 曲線と同じように表現すると第 5 図が得られる。B1.2 では曲線の最初の部分を除き全体的に比較的よく重なっている。B2.2 では $MN=10m$ と $MN=150m$ に対応する曲線分枝で差



第 5 図 拡張された Lee 法による VES 曲線の例



第 6 図 不均質度の著しい場合の例

が大きいが $MN=40\text{m}$ の中間曲線分枝はよく一致している。しかも、 ON に相当する曲線がいずれも接近しているのに MO 曲線の方は各分枝の差が大きい。したがって原因は M 側にあると考えることができる。

上述の例は電気探査のデータとしては比較的不均質の影響を受けていない場合であろう。参考までにきわめて悪い例を紹介しよう。第6図は同じ地域内ではあるが新国道と常磐本線とに挟まれたいわば人工の埋立部内に電極を設けて測定した例である。 ρ_{MN} 曲線 (普通のVES曲線) はとびとびの測定値を結んでできたもので、一見平滑曲線となっている。しかし、明らかに、曲線の右半分は標準曲線にはのらないいわゆる非層状構造曲線である。これについて、対応する ρ_{MO} 曲線と ρ_{NO} 曲線をかけば、何と非常に起伏のはげしい曲線となっている。これが測定の誤りでないことは、 $R_{MO}+R_{NO}=R_{MN}$ の関係を充たすことその他の処置で判明したが、なお中心付近について水平探査を行なったところ ($AB=450\text{m}$ $MN=20\text{m}$, AB 固定, MN 移動), 第3図のような変化の少ない比抵抗曲線とは全く様相を異にした曲線が得られ、ことに部分的に電位の逆転 (負の見掛け比抵抗) が生じた。このようなはげしい変化は人工の埋蔵物中の比抵抗分布のはなはだしい変動によることは明らかである。

この例のように測点の選定は非常に重要であるが、選定が正しかったか否かを簡単なチェックによって知る一つの方法としてこれまで説明してきた拡張された Lee の方法を推奨することができる。

6. 断層型模型のVES曲線

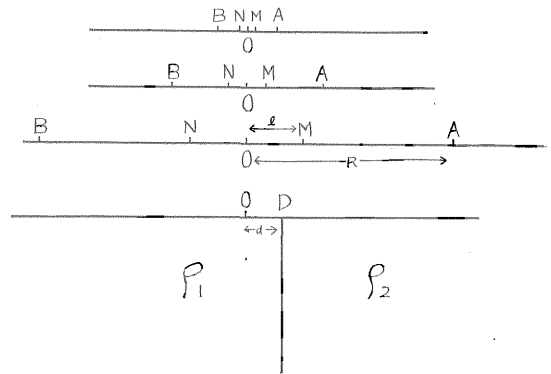
大地が著しく不均質であれば、VES曲線の解釈を困難にしたり、誤った解釈に導いたりすることがある。このような場合、モデル計算によって結果を吟味するのが常道であろうが、不均質大地に対する比抵抗曲線の計算は一般にははなはだ困難で、ごく簡単な幾何学的形状をもつ異常物の存在がVES曲線にどの程度の影響を及ぼすかという計算で満足せざるを得なかった。最近 Alfano (1959, 1960, 1961) の一連の研究成果はこの困難な問題の解決の緒になった。今後、この方面の研究は著しく促進されるものと考えられる。

ところで、この報告でふれようとしている不均質の影響の問題は、一般的な不均質媒質に関するものではなくわれわれのこれまで遭遇した場合について簡単な定性的考察を行なってみようとするものである。単純構造についての計算で甘んじることにした。

半球状埋没物と電位電極あるいは電流電極との間の相

対的位置関係がVES曲線にどんな影響を与えるかについては、たとえば Deppermann (1954) の研究がある。

筆者は断層型模型について、その境界面と MN または AB の相互的位置関係のVES曲線に及ぼす影響について紹介し、同時に前にのべた拡張された Lee 曲線との比較を試みてわれわれのデータの考察に資することにした。



第7図 断層模型と電極の位置との関係を見わす概念図

第7図で、 $\rho_1=\rho_2$ であれば、VES曲線は横軸に平行な直線となることは自明である。

$$\rho_a = \text{一定} (= \rho_1)$$

$\rho_1 \neq \rho_2$ の場合、明らかに ρ_a は中心 O の位置、 AB , MN の大きさに関係して変化する。理論的 Schlumberger 型電極配置 ($MN/AB \rightarrow 0$) の比抵抗曲線については、たとえば Dakhnov の著書 (1953) に図示されている。ところが、われわれが実際に使っている配置は $AB \gg MN$ ではあるけれども、 MN の大きさは有限である。したがって、 M と N とが互いに異なる媒質内に設定されることがありうるので、このようないわば実用的 Schlumberger 型配置についての特性を知っておくのは結果の吟味に役立つものと思われる。

第8図にその1例が示される。これは $\rho_2/\rho_1=19$, $\rho_2/\rho_1=1/19$ の場合である。縦軸は ρ_a/ρ_1 を、横軸は $AB/2d$ を示す。ここに d は中心 O と境界面までの距離で、以下すべて、測線が境界面に直交している場合である。パラメータとして $MN/2d$ をとり、その値が

$$1/10, 1/3, 1, 2, 5$$

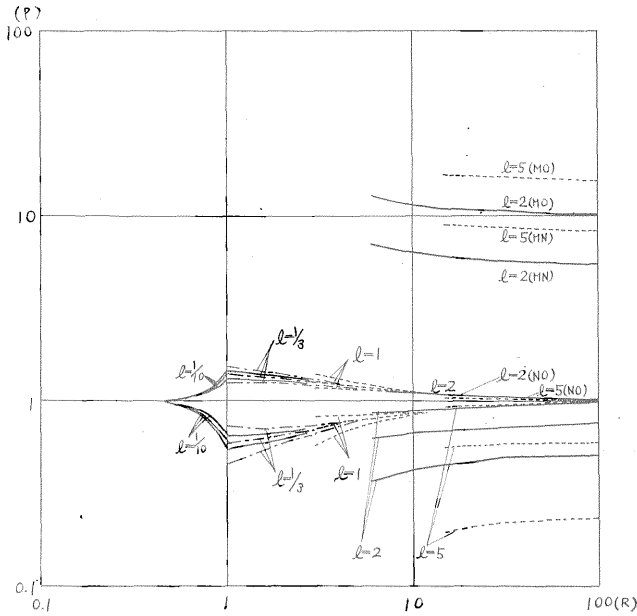
である5つの場合を図示してある。

この曲線の特性は

- (i) $d \geq MN/2$
- (ii) $d < MN/2$

の両者の場合で大きな差が認められる。前の3つの値が

- (i) に相当し、後の2つの値が (ii) に対応する。



第8図 MNが有限値のときの断層模型のVES曲線(それぞれの l に対して $MN \cdot MO \cdot NO$ の3曲線が示されている。ただし $l=1, MN/2=l$)

ρ_{MN} , ρ_{MO} および ρ_{NO} の断層型模型に対する一般的表現を記すことは繁雑でもあり、どの教科書にもその求め方については説明してあるので省略する。ただ、特殊な場合について考察してみよう。

(i) $d \geq MN/2$ の場合

a) $d \gg AB/2$ すなわち電極系全体が一つの媒質内にあるとき、

$$\rho_{MN} = \rho_{MO} = \rho_{NO} = \rho_1 \left\{ 1 + \frac{(R_2 - l_2)R}{4d^3} k \right\}$$

ただし、 $R = AB/2$, $l = MN/2$, $k = \rho_2 - \rho_1 / \rho_2 + \rho_1$ で、特に、 $R \gg 1$ ならば、

$$\rho_{MN} = \rho_1 \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{R}{d} \right)^3 k \right\}$$

b) $AB/2 = d \gg MN/2$, 電流電極が境界線上にあるとき、

$$\rho_{MN} = \rho_{MO} = \rho_{NO} = \rho_1 \left(1 + \frac{4}{9} k \right)$$

c) $AB/2 \gg d \geq MN/2$, 片側の電流電極のみが第2の媒質にあるとき、

$$\rho_{MN} = \rho_{MO} = \rho_{NO} = \rho_1 \left(1 + 2 \frac{d}{R} k \right)$$

R が充分大きくなれば ($d/R \rightarrow 0$), $\rho_{MN} \rightarrow \rho_1$ となる。

なお常に

$$\rho_{MO} > \rho_{MN} > \rho_{NO} \quad (\rho_1 < \rho_2 \text{ のとき})$$

$$\rho_{MO} < \rho_{MN} < \rho_{NO} \quad (\rho_1 > \rho_2 \text{ のとき})$$

特に、 $AB/2 = d \geq 3MN/2$ ならば、

$$\frac{\rho_{MO} - \rho_{MN}}{\rho_{MN}} \doteq \frac{13}{9 + 4k} \frac{l}{3d} k$$

また、 $AB/2 \gg d = MN/2$ ならば

$$\frac{\rho_{MO} - \rho_{MN}}{\rho_{MN}} = \frac{3d_2}{R_2} k$$

以上の考察から明らかなように、 M, N ともに同一媒質内にあるときには、電流電極の一方が他の媒質内にあるろうとも、その見掛け比抵抗は、最初の媒質の比抵抗にむしろ近く、最も偏れている場合でも、約4割以内に収まっている((i)の(b)項参照)。これによって、電流電極側の影響は比較的小さいことが想像される。また、 ρ_{MO} , ρ_{NO} の差も小さいが、境界面に電位電極または電流電極が近づくにつれてその差は大きくなり、遠ざかるにつれて小さくなる。

ii) $d \leq MN/2$ の場合、すなわち、片側の電極の組が他の媒質内にあるとき、

特に $AB/2 \gg MN/2 > d$ ならば

$$\rho_{MN} \doteq \rho_1 \left[1 + \frac{k}{1-k} \left(1 - \frac{d}{l} \right) \right]$$

ここで $d/l \rightarrow 1$ ならば、 $\rho_{MN} \rightarrow \rho_1$, また $d/l \rightarrow 0$ ならば、

$$\rho_{MN} \rightarrow \frac{\rho_1}{1-k} = \frac{\rho_2 + \rho_1}{2} \quad \text{すなわち、第一と第二の媒質の}$$

比抵抗の平均値に近づく。

ρ_{MO} についても,

$$\rho_{MO} = \rho_1 \left[1 + \frac{2k}{1-k} \left(1 - \frac{d}{l} \right) \right]$$

$d/l \rightarrow 1$ なら $\rho_{MO} \rightarrow \rho_1$ で, $d/l \rightarrow 0$ ならば $\rho_{MO} \rightarrow \rho_2$ となる。 ρ_{NO} は,

$$\rho_{NO} = \rho_1 \left[1 + \frac{2d}{R-k} \right]$$

から $\rho_{NO} \approx \rho_1$ である。

したがって, 対数方眼紙上では,

$$\begin{aligned} \log \rho_{MO} - \log \rho_{MN} &= \log \rho_2 - \log (\rho_2 + \rho_1)/2 \\ &\rightarrow \log 2 (\rho_2/\rho_1 \gg 1) \end{aligned}$$

もし, M が一樣媒質から不均質部へ移動しても, 最初の見掛け抵抗は ρ_1 に近く, 次の見掛け抵抗は $\rho_2 + \rho_1/2$ に近いので, R が充分大きい部分では平行性が保たれ, また, ρ_2/ρ_1 が大きければ ρ_{MN} 曲線と ρ_{MO} 曲線は $\log 2$ だけの差をもって平行になる。

結局, 電位電極が同一媒質内にあるとき, 拡張された Lee の方法をもってしても不均質のチェックはし難いが境界線上に電流電極がきたとき, わずかな凸部または凹部ができ, これが, 層状構造の VES 曲線上にのってきたとき, この凸部または凹部を下部の影響であると誤認し易くなる。第1図の前に紹介した凹みがこのような効果によって生じたものとも考えられる。

しかし, M 電極が第二媒質に入ったときは著しい差を示す。この場合, ρ_{NO} は当然のことながら, 前の場合の曲線に一致するが ρ_{MO} 曲線は強調される。そこで第5図 B2.2のような中間分枝が他と若干くいちがいがおこるとき差の小さい方 (この場合 ρ_{NO} 曲線) で解析を行なうのがよい。また, 対数方眼紙上で平行性をもっていることから推測しうる。したがって, 多少のずれがある場合, 平行移動で処理するのが実際的方法といえよう。

7. 結 論

常磐地域で電位差計型電探器を使用して直流法による観測を行なった結果, 次のことがわかった。

1) 観測電位差あるいは見掛け抵抗の値の大小と値の変動率ないし再現性との間の関係を求め, 観測値の変動率を10%以内に収めるためには当地区の場合, 見掛け抵抗で $10^{-3}\Omega$, 観測電位差として $1 \sim 2$ mV以上を要求することを知った。それで, 若干の注意を払うことによって, $AB/2=1,000$ mまでは5%以内の誤差でデータを得ることができることがわかった。

2) この結論は大都市周辺部のような電気鉄道発達地帯に適用されるものではないが, 非電化地帯の堆積岩分

布地区ではおおむね適用されるであろう。

3) 不均質効果の再現性に与える影響について若干のテストを試みた結果は表層部の若干の不規則性は別として, 電極間隔の大きいところではかなり良好であった。ただ, 人工的施設物 (舗装道路, 鉄道路線脇等) 付近のデータによれば, はなはだしい不均質効果が現われることがあるので測点選定に注意を要する。

4) また, 簡単な不規則性吟味の方法として拡張された Lee 型配置を提唱し, その実際例を紹介し, 有効な方法であるとの確信を得た。

5) VES曲線に対する不均質効果の特性をしるため簡単な断層模型を使って計算し, 電位電極間隔の有限である場合の曲線分枝間のほぼ平行性をもつくいちがいについて検討し, この結果を使って若干例に説明を与えた。

6) 解析結果の再現性をしらべたところ, 一定手続きによる解析データはきわめて良好であったが, むしろ解釈の任意性の問題を考慮せねばならないことがわかった。

今後もっと探査深度をあげるためにはオツシログラフを利用した探鉱器の製作とノイズの処理, ならびに安定な大電流源を得る問題等を解決しなければならない。

特に直流電化地帯において電気探査を実施するためには, さしずめノイズである迷走電流についての知識を得る必要があると考えられる。

(昭和36年8月記)

文 献

- 1) Alfano, L.: Introduction to the interpretation of resistivity measurements for complicated structural conditions, Geophys. Pros., Vol. 7, No. 3, p. 311~366, 1959
- 2) Alfano, L.: The influence of surface formations on apparent resistivity values in electrical prospecting, Geophys. Pros., Vol. 8, No. 4, p. 576~606, 1960; Vol. 9, No. 2, p. 213~214, 1961
- 3) Дахнов, В.Н.: Электрическая Разведка Нефтяных и Газовых Мест рождения, Госгонтехиздат, 1953
- 4) Deppermann, K.: Die Abhängigkeit des Scheinbaren Widerstandes vom Sondenabstand bei der Vierpunkt-Methode, Geophys. Pros., Vol. 2, No. 4,

p.262~273, 1954

地質調査所月報, Vol.10, No.8, 1959

- 5) 小野吉彦: 垂直探査の解析にあらわれる任意性について, 物探協会秋季講演会, 1958
- 6) 小野吉彦: 垂直探査法の解析法の改良について,

- 7) 陶山淳治・高木慎一郎: 直流を用いる比抵抗法の測定について, 物探協会春季講演会, 1961