

柿岡附近の深層比抵抗の推算

柳 原 一 夫

概 要

約10年前柿岡附近を通る国鉄常磐線の電化計画が起きた。それで漏洩電流による擾乱磁場電場を推定するためいろいろの試験が行われた。そのうちの1つとして400~600アンペアの試験電流を接地電極を通じて流し、3~45km離れた幾つかの地点で磁場電場を測定したものがあつた。これを利用してこの地域の地下比抵抗の垂直分布の推算を試みた。地下約30km以深に基盤岩よりも遙かに比抵抗の小さい層の存在が推定され、地磁気垂直成分異常と合せ考えると興味深い。

1. はしがき

地震予知研究やUMP計画と関連して地下深層の比抵抗分布に対する関心は著しく増して来た。地磁気変化の電磁誘導から、またマグネトテリック法から地下の比抵抗分布を推定しようという試みは昔からありまた今後も努力されていくことであろう。しかし比抵抗の値を実測しうるならそれにこしたことはない。またそれらの推定値を実測と比較することによって更に進歩発展が期待される。

比抵抗の実測は地下深層になればなる程困難となり経費もぼう大となる。地下探査として通常実用されるのはせいぜい地下数十米、深い場合でも数軒どまりである。ソ連邦その他において百軒位までの実測が報告されているようであるが、地下深層の比抵抗の場合は、実測といつてもいろいろの電極間隔に対する見掛けの比抵抗から推算するに過ぎない。この意味において必ずしも四極法とか二極法によらなくても適当な人工電流の供給と広域の電位測定があれば深層比抵抗の推算が可能である。

柿岡を含めた関東地方東部の深層比抵抗を考える場合、都合のよいことに国鉄と地磁気観測所が協同して進めた『常磐線電化に伴う地磁気および地電流擾乱試験』が丁度このような資料を供給してくれた。この試験は常磐線が(直流)電化した場合、柿岡の地磁気地電流にどれだけの擾乱を与えるか評価するという目的で、主として1954年に行われた。第一次試験は当時すでに電化されていた金町我孫子間において大電流をレールまたは接地電極に流し、一方附近数ヶ所において地磁気地電流を測定した。また第二次試験は柿岡に近い常磐線上に移動変電所をもって来て第一次と同様の測定を行った。これらのうちレールでなく接地電極を通じて直接大地に大電流を流した試験が深層比抵抗の推算に利用しうるわけである。

なお常磐線はその後取手以北が交流電化されたので、柿岡における通常の地磁気地電流観測には影響を与えていない。

2. 擾乱試験結果とそれを比抵抗推算に応用する

場合の問題点

常磐線電化に伴う地磁気地電流擾乱試験としてはいろいろのことが行われたが、ここでは

第一次試験のうち金町 (S1), 北小金 (S2), 我孫子 (S3) を接地点として S1—S3 間または S2—S3 間に大電流を流した試験を深層比抵抗の推算に利用する。このときの地電流測定点は吉川 (E1)・流山 (E2)・五香 (E3)・白井 (E4)・布施 (E5)・守谷 (E6)・館野 (E7)および柿岡の 8 地点である。(第 1 図)

試験は国鉄我孫子変電所から饋電線を通じて一定電流が送られ金町または北小金で接地された。一方は我孫子変電所において接地された。約 400 アンペアおよび 600 アンペアの二通りの定電流を 30 秒間隔と 1 分間隔とにそれぞれ各 4 回通電した。時刻は深夜国電の休止した 1 時 50 分から 3 時 30 分までの間に行われた。この電流によって生じた地電流記録の例を第 2 図に示す。一見してわかるように地電流記録にはいわゆる分極作用の影響があらわれている。大地の電気的特性が比抵抗という要素をもってのみ代表しうるものならばこの様な現象はあら

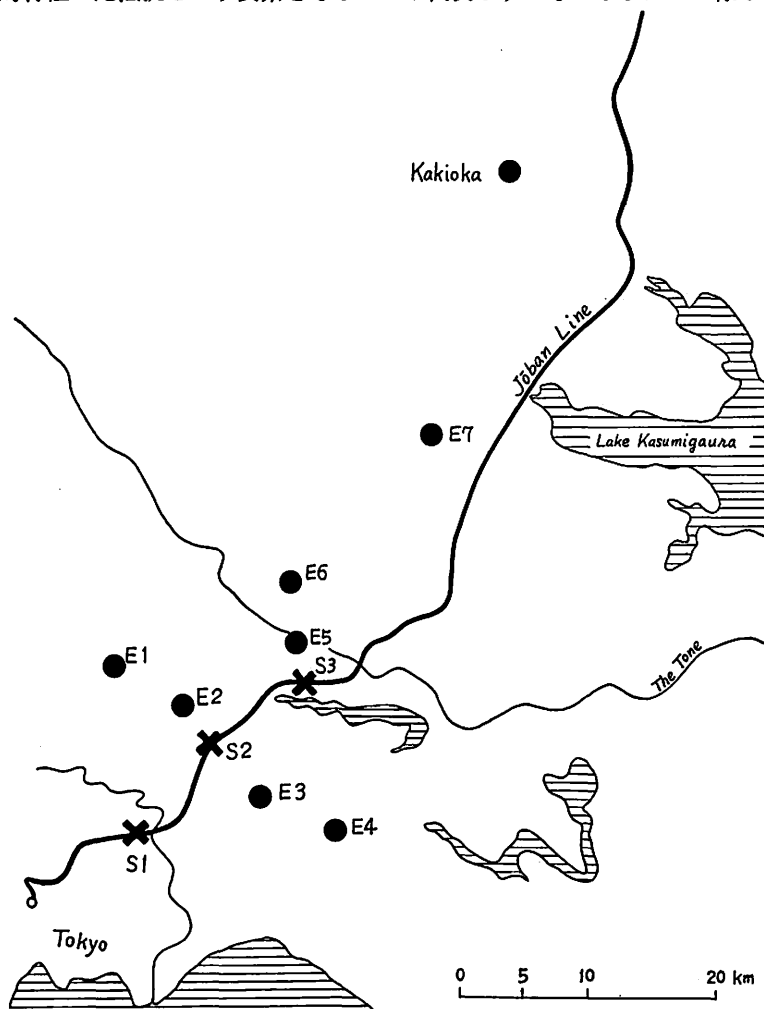


Fig. 1. Distribution of 3 earthing points, S1, S2 and S3 and 7 temporary earth-current stations, E1, E2, E3, E4, E5, E6 and E7 and Kakioka.

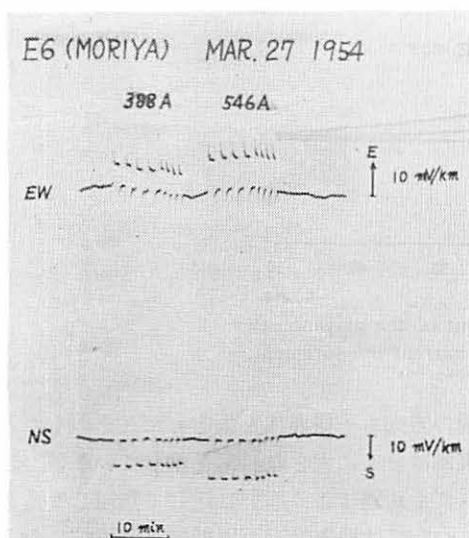


Fig. 2. Example of the change of earth-current potential gradient at E6 due to 388 or 546 amp test currents through S1 and S3.

る。この試験には固有周期約5秒の検流計が地電流電位測定に使われた。真の電位差初期値を V_0 、大地の局所に生じた起電力による電位差を $V_1\{\exp(-t/\tau)-1\}$ とすると記録される見掛けの電位差 $V(t)$ は時間と共に次のように変化する。

$$V(t) = \left(\frac{\alpha\tau}{\alpha\tau-1}\right)^2 V_1 e^{-t/\tau} - \left[V_0 - V_1 + \left(\frac{\alpha\tau}{\alpha\tau-1}\right)^2 V_1 + \alpha\{V_0 - V_1 + \frac{\alpha\tau}{\alpha\tau-1} V_1\}t \right] e^{-\alpha t} + V_0 - V_1,$$

$$\alpha = 2\pi/T_0.$$

ただし T_0 は検流計の固有周期である。 $V_1/V_0=0.5$ で $\tau=20 \cdot 10 \cdot 5$ sec の各場合について $V(t)/V_0$ の値を第3図に示す。 $V_1 > 0$ で τ があまり小さくなければ $V(t)$ は初期に極値 V_m を示す。これが記録上の初期値である。

局所的に生じた起電力による分の V_1 があまり大きくなければ、見掛け上の初期値は真の初期値 V_0 にほとんど等しく補正を必要としない。比抵抗推算には次章で述べるように電位差が接地点からの距離によってどのように変るかということを使っている。この変化が非常に大きいので、補正量が5%以下と思われるものは補正しなかった。補正を必要としたのは見掛けの初期値と定常値の比 $V_m/(V_0 - V_1)$ が水平面内合成ベクトルについて1.7および1.3に達した E2 および E3 における測定値のみである。この場合は $t \gg T_0$ の測定値から τ を求め、 V_m および $V_0 - V_1$ と合わせて V_0 を求めた。

次の問題は電位差を測る電極間距離が電流源からの距離に比して小さいことである。換言すれば電場の測定から比抵抗を推算することになる。この場合は四極法二極法などの通常地下探査に用いられる方法にくらべて精度が悪い。この点は当初の目的が比抵抗の推算にはなかったから止むをえない。さらに電場測定の不利な点は局所局所の比抵抗の違いなどによって電場に局所性の生じることである。しかし測定結果からみると(第4図)電場の分布は、

われない筈である。実際の大地は抵抗体としてのみでなく、他の何等かの作用が働いている筈で、比抵抗を推算するにはこの余分の作用の影響をとり除かねばならない。

この分極作用が複合誘電体の理論で説明されるようなものでなく、何等かのイオンの介在する現象であることはすでに述べた(柳原, 1959)。現象論的にみれば電流が流れたために大地の一部に起電力が形成されるとして説明される。抵抗体としての大地はしたがって初期値によって代表されることになる。すなわち地下比抵抗の推算に使うべき値は数十秒後の定常値でなく初期値である。

実際の記録上の初期値は必ずしも真の初期値を示すとは限らない。それは計測器の時定数を無視することが出来ないからである。

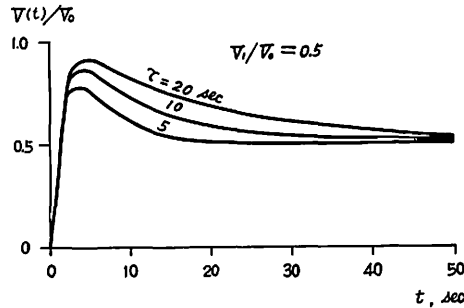


Fig. 3. Apparent movement of the galvanometer used in the earth-current measurement.

距離に対して相当規則正しく配列されており電場の方向も一樣導体を仮定したときのものと同じく大きな喰い違いはない。また地表附近の比抵抗実測はとくに大きな異常を示していない。したがって以下は電場に局所性がないかまたはあっても距離による違いに比して無視しうるものとして比抵抗の推算を試みる。ただし E1 点については地表附近の比抵抗測定値がやや小さく、また電位差測定値も他のものに比して全体的に小さいので数量的取扱いの際には除外する。距離に対する依存性は他の地点と同様であるので、深層比抵抗の電場に与える影響は他地点と同様であるが、局所的に地表近くの比抵抗が小さいため測定電場が一樣に小さいものと解釈される。

第 4 図に測定結果を示す。距離 3 km 以上に対するものは電場測定値から一樣半無限大地を仮定した場合の見掛け比抵抗 ρ_a を算出したものを示す。すなわち

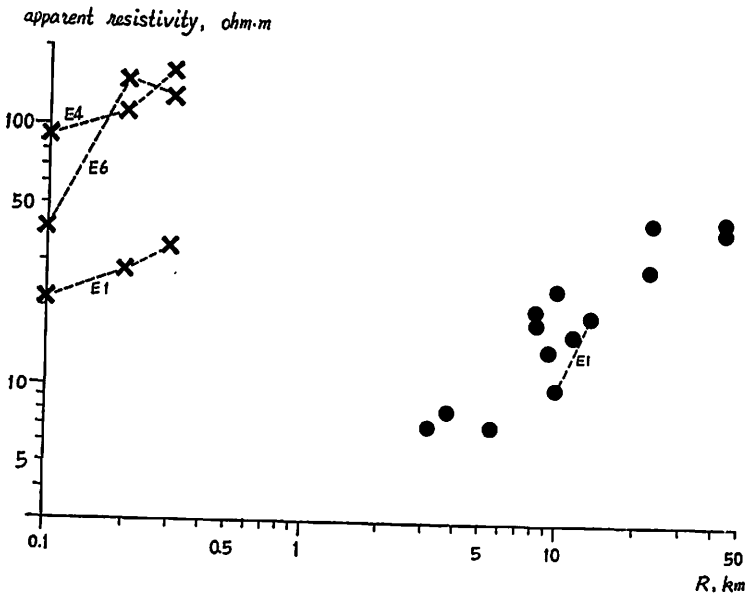


Fig. 4. Observed apparent resistivity.

$$\rho_a = \frac{2\pi V}{Il} \left/ \left\{ \left(\frac{1}{R'} \right)^4 + \left(\frac{1}{R''} \right)^4 - 2 \left(\frac{1}{R'} \right)^3 \left(\frac{1}{R''} \right)^3 \bar{R}' \bar{R}'' \right\}^{1/2} \right.$$

ただし V は測定電位差, l は V を測定した電極間距離, I は大地に流した電流, \bar{R}' , \bar{R}'' は電流源から測定点までのベクトル, R' , R'' はその大きさである。図上の距離 R は R' , R'' のうち小さい方にとってある。距離 300m 以下に対するものは四極法で測定した見掛け比抵抗の値である。この場合の距離 R は各電極間距離を意味する。

この第4図からみると距離 300m から 3km の間には測定値がないが急激に減少し, 3 km から 30km 位までは急激に増加している。この減少増加が非常に急激であるので, 多少の点のバラッキや前述のいろいろの不正確さに拘らず, 地下深層比抵抗の変り工合が推算出来ることになる。また距離 30km 辺から再び減少の傾向を示すことは, これと同程度の深さのあたりから再び小さい比抵抗値をもつ層の存在することを示して興味深い。

3. 比抵抗の推算

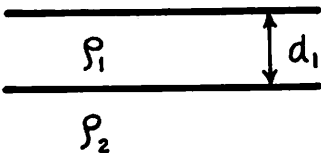
電流源と電場測定点の関係が二次元的に相当らばっているにも拘らず見掛けの比抵抗が距離 R のみの函数として割合よく現わされている。したがって比抵抗に関して層状構造を仮定する。第5図のような基本的二層構造を考え電流源から電場測定点までの距離を R とすると, 電流 I による電場 dV/dr は次式によって与えられる。

$$\frac{dV}{dr} = \frac{\rho_1 I}{2\pi R^2} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} h^n \left\{ 1 + \left(\frac{2nd_1}{R} \right)^2 \right\}^{-3/2} \right],$$

$$h = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1).$$

ここに ρ_1, ρ_2 はそれぞれ上層下層の比抵抗, d_1 は上層の厚さである。

今ある一測定点における電場を考えると, 電流源は流入流出の二点あるからそれぞれの電流源による電場 $dV/dr, dV''/dr$ のベクトル和である。それぞれの電流源からの距離を R' ,



Eig. 5. Supposed 2-layer earth.

R'' とすると, $R' \ll R''$ (または $R' \gg R''$) あるいは $R' \approx R''$ であれば合成電場の向きは, 一様大地の場合に等しくなり Σ の項内の R は R' (または R'') でおきかえても誤差は小さい。この推算の場合大部分はこの条件を満しており, かつ電場の向きが一様大地の場合と大体一致するので, このおきかえをお

こない R としては R', R'' のうち小さい方をとることにする。したがって電場 dV/dr は次式によって近似される。

$$\frac{dV}{dr} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{R'} \right)^4 + \left(\frac{1}{R''} \right)^4 - 2 \left(\frac{1}{R'} \right)^3 \left(\frac{1}{R''} \right)^3 (\bar{R}' \bar{R}'') \right\}^{1/2} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} h^n \left\{ 1 + \left(\frac{2nd_1}{R} \right)^2 \right\}^{-3/2} \right].$$

R', R'' はそれぞれの電流源から電場測定点までのベクトルである。見掛けの比抵抗 ρ_a は

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} h^n \left\{ 1 + \left(\frac{2nd_1}{R} \right)^2 \right\}^{-3/2} \right],$$

によって与えられる。

この式を $R=3\sim 10$ km の急傾斜に対して適用する。この間の見掛けの比抵抗の平均値として $R=6.5$ km において $\rho_a=11.5$ ohm \cdot m という値をとり、この値を満足する見掛け比抵抗の距離に対する曲線を $d_1=1, 2, 3$ km および $h=1.0, 0.95, 0.9, 0.8$ の各場合について第 6 図に示す。実測値の急傾斜を説明するには h は ρ_2 に近くなければならない。 $h=0.95$ でもまだ不十分である。 $h=1$ では $\rho_2 \rightarrow \infty$ であって ρ_2 がどの程度以上なら満足するか正確

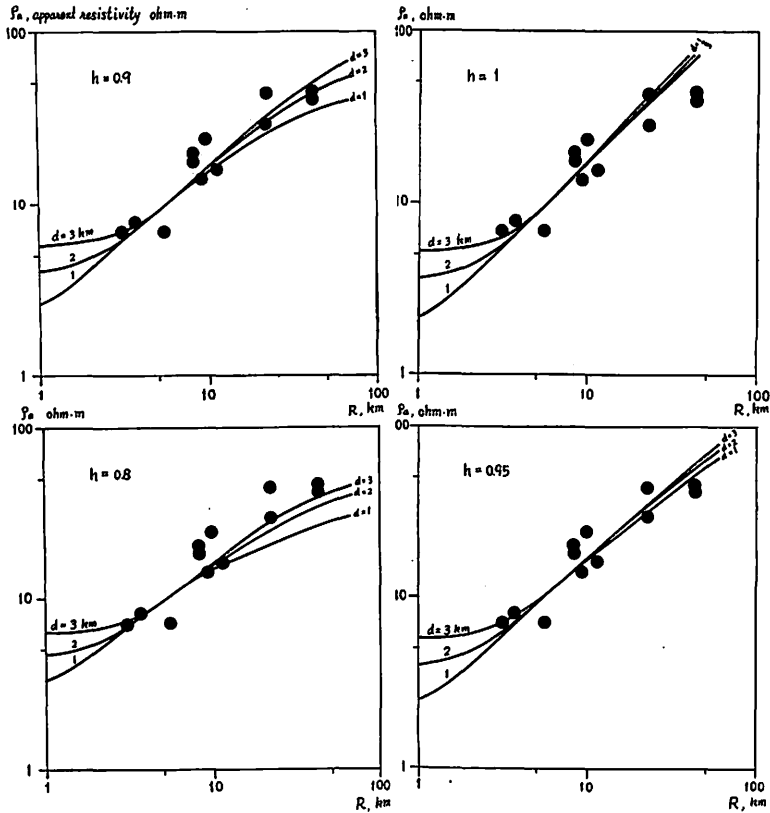


Fig. 6. Calculated apparent resistivity for the supposed 2-layer earth (line) and the observed apparent resistivity (dot).

にはきめ難いが、 $h=0.99$ すなわち $\rho_2 \sim 200\rho_1$ よりも大きければ大体よいと考えられる。

層の厚さについては $d_1=3$ km とすると $R=3$ km 辺ですでに傾斜がゆるやかで都合が悪く、又 $d_1=1$ km とすると地表面近くでの比抵抗測定に対する影響が大きくなる筈であるから、 $d_1=2$ km とするのが最も妥当と思われる。かくして次の値がえられる。

$$d_1=2 \text{ km}, \rho_1=4 \text{ ohm}\cdot\text{m}, \rho_2 \geq 1000 \text{ ohm}\cdot\text{m}.$$

このモデルによる標準曲線と 30 km 以遠での見掛け比抵抗値を比較すると実測の方が相当小さくなっている。測定例が少く大きな不正確さを伴うが前と同様にして標準曲線と比較して次の値がえられる。

$$d_2 \sim 30 \text{ km}, \quad \rho_3 \sim 10 \text{ ohm} \cdot \text{m}.$$

すなわち $\rho_2 \geq 1000 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ の層の下に比抵抗のずっと小さい層が相当厚く続いていると考えられる。 d_2 はその低比抵抗層までの深さ、 ρ_3 はその比抵抗値である(第7図)。

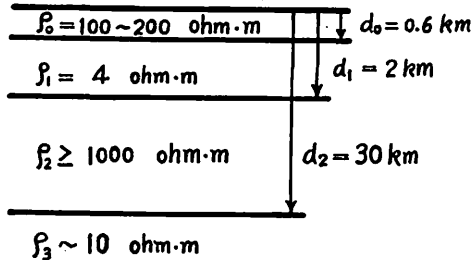


Fig. 7. Determined vertical distribution of resistivity

$R > 40 \text{ km}$ の測定値は柿岡におけるものであるが、柿岡辺は筑波山塊中において地表面にて測定される比抵抗測定値は他の平野部におけるものよりも可成り大きい。地質構造から推定すれば柿岡附近では基盤岩の盛り上がりがあるためその部分の比抵抗が大きいと考えられる。水平成層構造の上にこのような局所的構造を考慮に入れると、柿岡における見掛け比抵抗測定値は単なる水平成層構造の場合よりも

も大きくなっている筈である。それにも拘らず実測値は二層構造の標準曲線よりも小さい。したがって ρ_3 層の存在は増々確実となり、またその値ももっと小さい値であるかもしれない。

深さ 2 km より上については中間の見掛け比抵抗測定値がないので精度よく推定することは困難であるが、 $R = 300 \text{ m} \sim 3 \text{ km}$ で急激に減少するとして、次のように推定される。

$$d_0 \sim 600 \text{ m}, \quad \rho_0 \sim 100 \sim 200 \text{ ohm} \cdot \text{m}$$

これらを総合して第7図のような比抵抗分布がえられる。

4. 地下構造ならびにマグネトテルリックスとの比較

東関東地方の深層比抵抗が粗い推算ながら第7図のように求まった。地表面近くの良電導層の厚さが2kmであることは一般的傾向とよく一致しこれは水成層に相当するものと思われる。関東地方の地震探鉱および深層試錐の結果(福田, 1962)はこの地域で基盤岩の深さが1~3 km であって大体一致している。

数 km 以深については一般的傾向は不電導層が相当深くまで続くのに対し、ここでえられた結果によれば 30km 以深に再び電導層が存在している。地磁気変化の解析によれば平均的に 400km (力武, 1952)、マグネトテルリックスによってもアメリカ、欧州などにおいて 100km以上という電導層までの深さがえられているのに比して、この 30km という値はこの地方の局所異常と考えられる。中央日本における地磁気垂直成分変化の異常はこの電導層の存在と関連するものではなからうか。

マグネトテルリックスによっても深層比抵抗が求められるが、Price (1962) のいうように外部磁場の拡がりの程度によって正確な値を与えない。又柿岡の地電流は大きな異方性を示し、かつ附近に比して異常に大きい値をもつのでマグネトテルリックスをそのまま適用することは妥当でない。柿岡の地磁気・地電流への適用については別論文(柳原, 1965)に述べた。その結果によれば ρ_0 の層を無視して $\rho_1 \cdot \rho_2$ および ρ_3 の三層モデルを仮定したときの Cagniard の見掛け比抵抗 (Cagniard, 1953) と $\rho = 0.2T(E/H)^2$ による実測見掛け比抵抗

を修正したものは可成りよく一致している。すなわちここに求めた比抵抗分布は ρ_3 層の存在も含めて（修正）マグネトテルリックスによつて確かめられた。

謝 辞

困難な条件のもとに擾乱試験を遂行され、ここに使用させていただいた貴重な資料を作られた国鉄および地磁気観測所の関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- Cagniard, L., (1953), *Geophysics*, **18**, 605—635.
福田理, (1962), *地質ニュース*, **100**, 1—16.
Price, A., T., (1964), *J. Geomag. Geoelectr.*, **15**, 241—248.
Rikitake, T., (1952), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **30**, 191.
柳原一夫, (1959), *地磁気観測所要報*, **9**, 65—73.
柳原一夫, (1965), *地磁気観測所要報*, **12**, 105—113.

Estimate of the deep layer resistivity near Kakioka

by

KAZUO YANAGIHARA

There was the electrification scheme of the National Railway, Jōban Line, near Kakioka 10 years ago. Then in order to get some idea of the artificial electric and magnetic field due to leakage currents from the railroad, the distribution of disturbance field was measured supplying test currents of 400–600 amp through earthing electrodes. Electric fields were observed at 7 temporary earth-current stations and Kakioka which were distributed 3 to 45km apart from the earthing points. From these data the vertical distribution of resistivity is estimated down to several ten km depth. The electrification of the railway was realized afterwards using ac currents as the power. Then no effect has been detected in the normal records at Kakioka Magnetic Observatory.