

誘導磁力計による人工電流の測定について

東北大学・理学部 三品正明
京都大学・理学部 竹田雅彦
" " 鈴木亮
地磁気観測所 桑島正幸

1. はじめに

1976年の山崎断層における電磁気総合実験に際して、人工電流による磁場の変動を誘導磁力計を用いて測定する実験を行った。人工的な電流によって誘起される磁場を測定することによって地下構造を調べる方法は、電気探査のうちの流電電磁法に属する手法である。一般に流電電磁法では、給電線を幾何学的に単純な形としておいて、電線のつくる磁場を理論的に計算して実測値と比較するということが行われている。このような観点から、磁場の測定域（探査域）も給電線の近傍で、しかも給電線の長さが無視できる（即ち両端の影響を無視できる）範囲に限られる。

しかるに、今回の我々の行なった実験では、電源はDipole法による深部電気探査のものを使用し、山崎断層という特殊な構造付近の様子を知りたいという制約があったため、測定点は前述のような一般に行われる位置にはなかった。そこで、距離的な影響なども考慮して予測値を求め、観測値と比較することを試みた。量的な議論をするに十分な観測値が得られてないので、ここでは主に定性的な考察結果について述べる。

2. 計 算

前述のように電流電極の間隔、測点までの距離を考慮した予測値を求めるため、次のような過程で計算を行なった。地表面の凹凸は無視して、半無限の均質な媒体を考え、その表面に+、-2つの極をおいた電流Dipoleと仮定する。このDipoleの作る電場のポテンシャル v は

$$v = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

で表わされる。ここで、 R_1 、 R_2 はそれぞれ+極-極からの距離で、 I は供給される電流、 ρ は比抵抗である。

電流はあらゆる方向へ流れるが、後の計算を容易にするためここでは $Z=0$ 、即ち地表面での

電場のみを考える。実際には地表面で測定される磁場へ寄与するのは地表面付近の電流のみであらうことを考えれば、この仮定でも全く無意味な結果とはならないであろう。磁場は電流に比例した強さを持ち、電流は電場に比例するから

$$|\vec{H}| = K \text{ grad } v$$

なる関係が成立つ。更に、 $Z = 0$ の同一平面上に電流と観測点とがあれば、磁場は水平成分が0になってしまい実際の観測値と明らかに矛盾してしまうので、観測点は $Z = 0$ よりは少し上にあるものとする。鉛直成分に関しては同一平面上にあっても支障はなく、その時の磁場の強さは電流密度の水平勾配に比例した大きさになる。

ここでは電場の強さ E (E_x, E_y)及び水平勾配 dE/ds を次のようにして求めた。また、 x 軸はDipoleの2つの電極を結ぶ方向にとっている。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = -\frac{\partial v}{\partial x} \\ E_y = -\frac{\partial v}{\partial y} \\ E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \\ \frac{dE}{ds} = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial y}\right)^2} \end{array} \right.$$

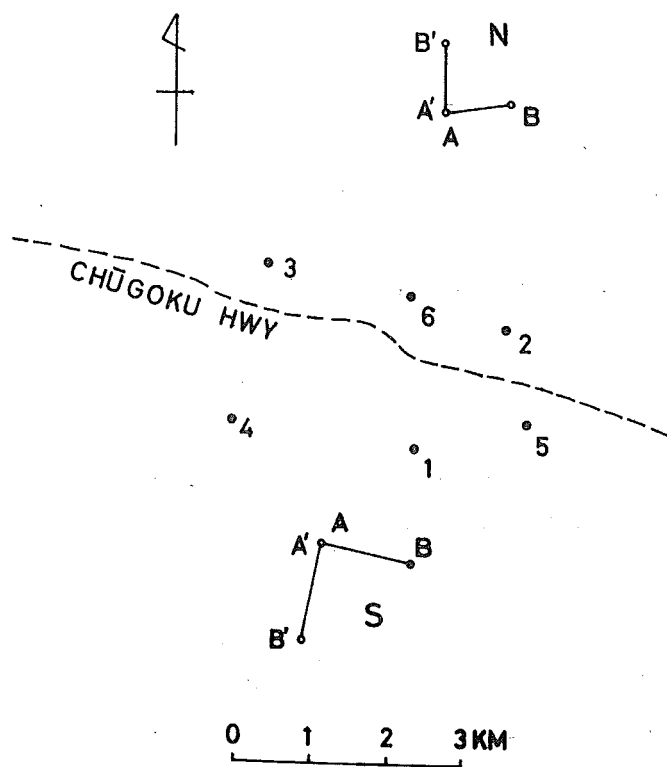
なお、図では I, ρ を含まない部分について、相対的な大きさのみを示している。

3. 測定

給電線に対する観測点の配置は、前述のような制約から必ずしもこの方法に適したものとはいえず、測定すべき磁場も非常に小さいものである。磁場の強さ(H)の測定では S/N が悪く信号を検出することは困難である。そこで、電源電流が交代直流で、その切換は速やかに行なわれていることを利用して、測定量を \dot{H} ($=dH/dt$)にすれば H が小さい場合でも測定が可能となることが期待される。

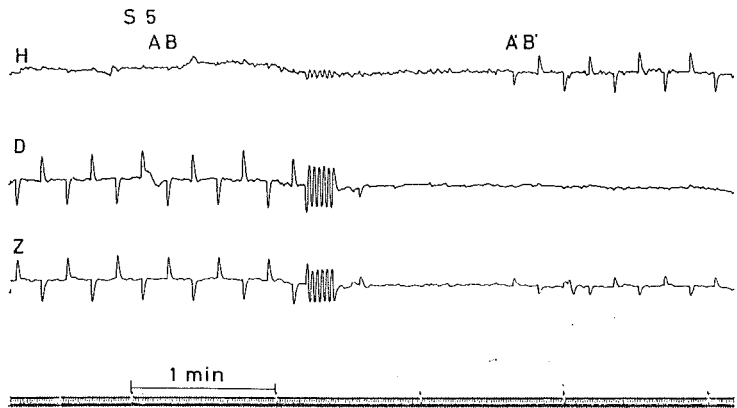
測定にはULF観測用の誘導磁力計を用いた。観測システムがULF用のものであることから、1Hzより高周波の部分では利得がだんだん低下するような周波数特性をもっている。このようなことから、巾の小さいパルス波形となる人工電流の信号を観測した場合に、正しい振巾が得られないのではないか、との懸念が生じる。この点に関しては加藤他(1977)によれば、立上り時間が0.1~0.2秒でもほとんど正しい振巾が得られるという実験結果があり、我々の測

定値を予測値と比較した場合にもそのような特性によると思われる誤差はなかった。よって、ここでは観測された量はすべて \dot{H} の正しい振巾であったとし、さらに信号波形に地域的な差がなく立上り時間が一定であると仮定して、 H は \dot{H} に比例した量であると考えて議論する。



第1図：観測点及び電流電極（N及びS）配置図。

観測点分布を第1図に示す。破線が中国自動車道で、山崎断層はほぼこの破線の位置にある。S（AB, A'B'）及びN（AB, A'B'）がそれぞれ南側、北側の電流電極の位置で、山崎断層を狭んではほぼ対称な位置にとつてある。1～6が観測点でS電極に対しては1～5の5点、N電極に対しては1～6の6点で観測が行なわれた。1～5はS及びNの両電極について全く同一の場所で測定された。測定は磁北を基準にとりNS成分（H）、EW成分（D）、鉛直成分（Z）の3成分について行なわれた。記録計は乾電池で駆動されるF-Mデータレコーダを用いた。増巾器の総合利得は約120 dBで、記録感度は各観測点ごとに磁気テープが飽和しない程度に設定された。設定感度はその都度に乾電池の電圧を減衰器を通して増巾器に入力することによって相対的な校正を行なった。



第2図：記録例。 S電極観測点5。

第2図は記録例で、S電極に電流を通した場合の測点5での記録である。電流は前半（左側）がAB、後半がA'B'に流れていて、水平成分がABとA'B'とではほぼ直角に向きを変えていることがわかる。

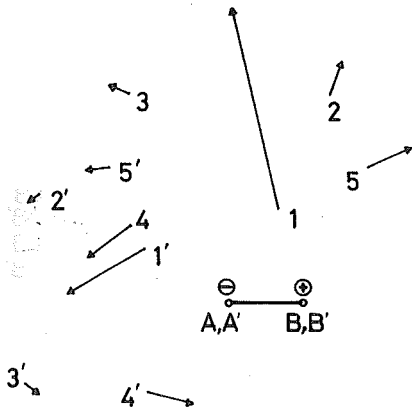
4. 結果

(1) 水平成分の分布

S電極AB, A'B'それぞれの場合を重ね合わせた図を第3図に示した。この図はAあるいはA'が負極となった場合の磁場の分布図である。（前述のように測定量はHであるが、Hと考えて扱う。）1'~5'はA'B'に対する1~5の位置を示している。この図から電流がDipole場を作って流れ、磁場はそれによって誘起されているものと考えて良いことがわかる。

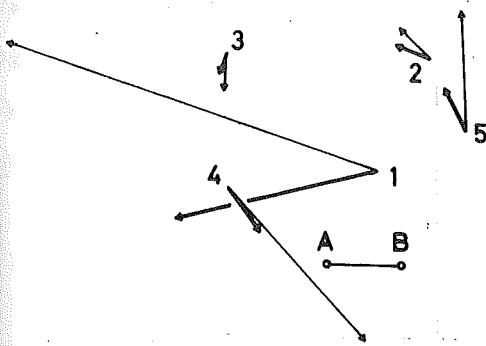
これを計算値と比べた図が第4図(a), (b)である。(a), (b)はそれぞれAB, A'B'に対応する。図には観測値から予想される電流の向きと、計算から予想される電場の向きとを示した。大きさはそれぞれ任意の単位で、相対的な大きさのみが意味をもつ。これをみると、ABの場合には1, 2, 5即ち南北にはしる安富の谷の東側にある観測点で反時計回りに方向が偏っているのに対し、3, 4即ち谷の西側では時計方向に偏った電流が流れていることがわかる。A'B'の場合では逆に西側で反時計、東側で時計方向の偏りを示している。また、山崎断層を境とする南北2つのグループ、即ち(2, 3)と(1, 4, 5)とに分けた場合には系統的な差異はない。従って、この地域では山崎断層よりは、南北にはしる大きな地形の方が構造的には支配的であるといえる。

あろう。時計回り、反時計回りの偏りがどのようなものを反映しているかはこれだけからはわからない。

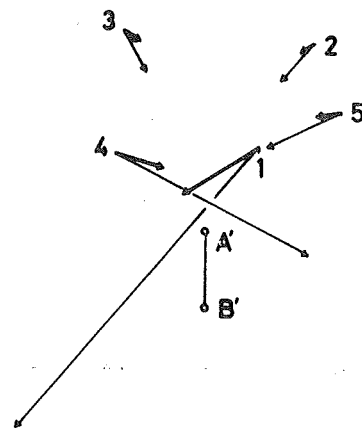


第3図：人工磁場の分布（水平成分）。

矢印の大きさは任意で、相対的な大きさを表わす。A B, A' B'の2つに対する観測値を重ね合わせた。電流はB又はB'が正極となるように流れている。



S-AB



S-A'B'

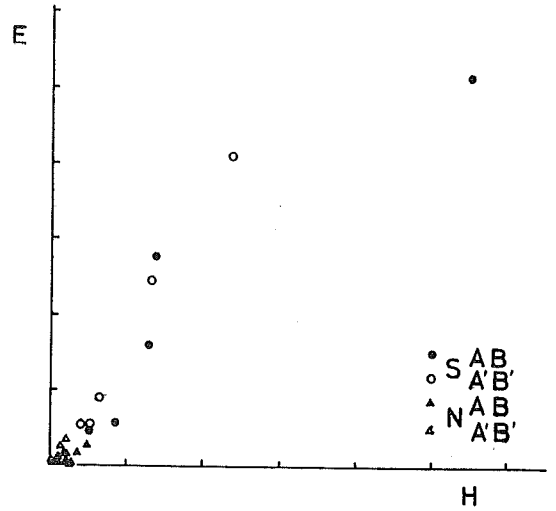
第4図

(a) S電極ABの場合の人工磁場から予想される電流（太矢印）と計算による電流（細矢印）。Bが正極。

(b) S電極A'B'の場合の人工電流と計算された電流。B'が正極。

N電極は電流が小さいため、観測のS/Nが小さく、ベクトルのばらつきが大きくなりこのような議論には耐えられないので省略した。

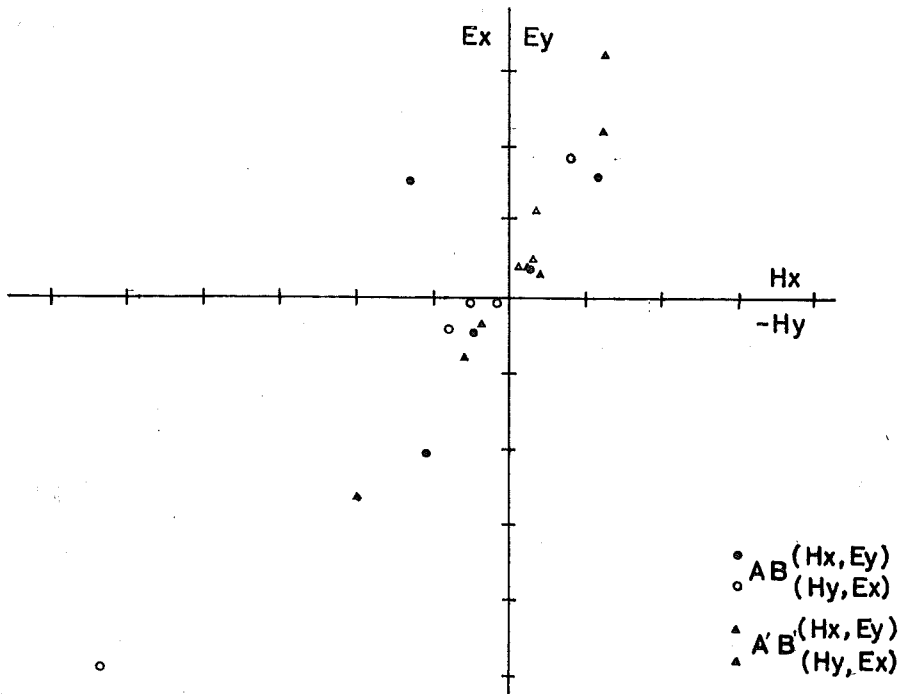
次に、水平成分の大きさを計算から求められる電場の強さと比較して第5図に示した。たて軸は計算された電場の強さで、相対的な大きさを表わしている。横軸は水平2成分（HとD）から合成された大きさを相対的なスケールで示した。この図でS-A Bに属する点が1つ飛び離れているが、他はほぼ直線的な関係があると見て良い。このことから計算値として $Z=0$ の電場だけを考えても、大きな間違いはなかったことを示している。また、1つだけ離れた



第5図：人工磁場の強さHと計算された電場Eとの関係。

た点である1の観測点では、予想よりも大きな電流が流れていたものと考えられる。

更に、これらのことをS電極の場合に限って成分ごとにみたものが第6図である。



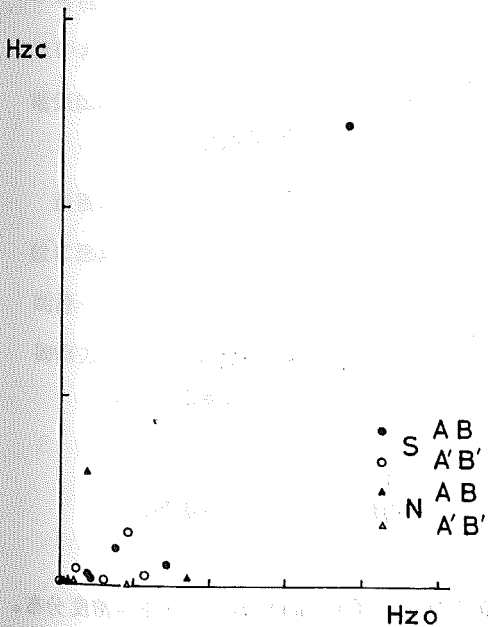
第6図：人工磁場の成分ごとの強さと、計算された電場の成分ごとの強さ。S電極の場合。

ここではたて軸、横軸はそれぞれ $(E_x, -H_y)$, (E_y, H_x) にとってある。磁場は電場と直交する方向にできるから、電場の分布が計算値と同じになっていれば、観測値はこの図の第1, 第3象限に分布するはずである。第2象限にある点が1つ例外となるが、他はほぼ予想通りの分布をしているといえる。第2象限にとび出した点と、第3象限で左下隅に離れている点とは同じ観測点1のもので、この点では前述のような予想よりも大きな電流が、方向も計算値と違って流れていたものと考えられる。A'B'電流の場合にはこのような異常がみられなかったことから、この異常には方向性があるものと推論される。これらのことが、1付近のどのような性質を示すのかはデータが少ないので良くわからない。

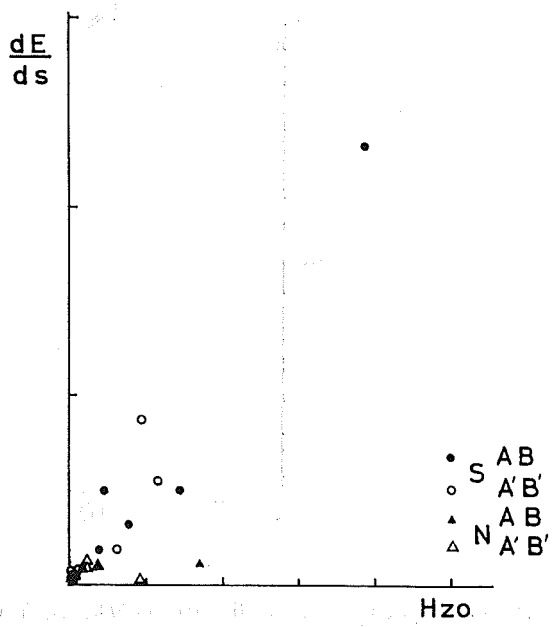
(2) 鉛直成分の分布

鉛直成分をつくる要素は2つ考えられる。1つは給電線を流れる電流であり、もう1つは観測点の下での電流密度の水平勾配である。このどちらが大きく寄与しているかを調べるため2つの計算を試みた。

給電線のつくる磁場は Biot-Savart の法則より導かれる。第7図はたて軸に Biot-Savart の式により求められる磁場のZ成分の相対的な大きさをとり、横軸には観測された磁場のZ成分の大きさをプロットした。この図で計算値と観測値との間には有意な相関が認められない。



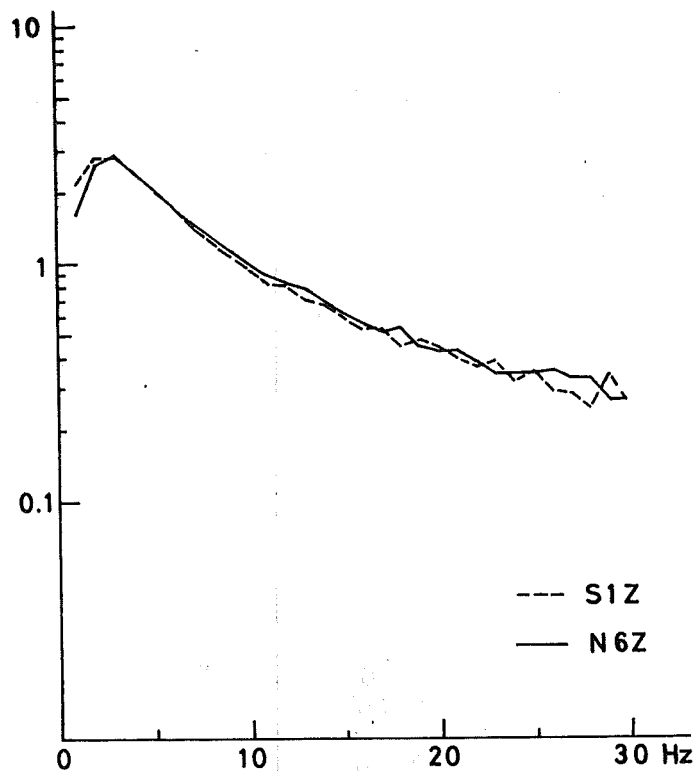
第7図：人工磁場Z成分の観測値 H_{zo} と給電線による磁場 H_{zc} (計算値)。



第8図：人工磁場Z成分の観測値 H_{zo} と電場の水平勾配 dE/ds (計算値)。

次に、Dipole の電場の強さの水平勾配を求めてたて軸にし、横軸には前図と同様に観測値をとってプロットしたのが第8図である。この図で、横軸の近くにある2つの点を除けば、ほぼ直線的な関係になることがわかる。このことから、Z成分はその付近での電流密度の勾配によってできていることがわかる。

ところで、横軸の近くに分布していた△と▲との2つの点は、共に観測点6での値で、N電極のA B, A'Bにそれぞれ対応する。どちらの場合も計算から予想される値よりは大きな鉛直成分が観測されている。この観測点は安志の北東、農業試験場の近くにある。この付近は電位測定の際にも Transient 波形が得られる等特異な地域であった。我々の測定は、 \dot{H} の観測であるから、この点での波形が特殊であるため、みかけ上大きめの値になることも考えられるので波形解析により他の観測点と比較してみた。第9図は信号波形の立上り部分を Fourier 変換して得られたスペクトル密度の分布である。破線はS電極1のZ成分、実線はN電極



第9図：S電極1とN電極6でのZ成分信号波形立上り部分（1秒間）のスペクトル密度分布。

6のZ成分であるが、両者の間にはほとんど差がない。このことは6付近での異常が、立上り時間の差異によるのではなく、電流密度の勾配が大きい、即ち、電流が集中する部分があったことを示唆している。

一方、この付近では電位の測定から得られる見かけの比抵抗も小さくなっていて、比抵抗の分布からも異常な地域とみられている（小野等，1977）。みかけの比抵抗の異常は、比抵抗が異常な場合と、電流が異常分布をしている場合とが考えられるが、電位の分布だけからはどちらであるかは区別できない。このような場合に磁場測定を併用することは、有意義なことと思われる。

5. ま と め

今回の実験結果をまとめると次のようなことがいえる。

- (1) 人工磁場の分布はDipole場の $Z=0$ での電位分布から得られる電流分布を考えればほぼ近似できる。
- (2) 電流の異常分布を知ることもできることから、比抵抗分布の調査に電位分布と併用すれば有力な情報となる。
- (3) 山崎断層周辺では、断層の走向方向よりも南北方向の大きな地形による影響が強く現われた。
- (4) 安志付近では電流分布が異常であることを示していて、電位分布から得られるみかけの比抵抗の分布と調和的である。

今回の実験は装置が機動性に乏しく、また結果に対する先見がなかったために、最良の結果とはいえない。もっと測定点を密にし、異常の地域的分布等詳細な調査を行なうことは、地下の電気伝導度を知るうえで有力な資料を得ることができるものと考えられる。

最後に、この実験に際し種々の御協力・御支援を戴いた研究班（代表者・乗富一雄教授）の各位に感謝致します。特に現地での観測に当っては、東海大学大西信人・山河 仁・京都大学西岡淳一の各氏に絶大な御支援を戴きました。また、整理解析に当っては東北大学増田 徹氏の御協力を戴きました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

加藤愛雄，大西信人，山河 仁（1977）：

誘導磁力計による磁場観測（山崎断層総合観測），CA研究会

小野吉彦，村上 裕，行武 毅（1977）：

山崎断層電気探査，CA研究会