

山崎断層における電磁気総合観測

神戸大学理学部	塩崎一郎・岩越 朗
神戸大学自然科学	山口 覚
神戸学院大学	大塚成昭
京都大学教養部	住友則彦
秋田大学鉱山学部	乗富一雄

1. はじめに

地震予知基礎研究「山崎テストフィールド集中観測」は昭和53年度から10カ年計画で開始された。電磁気関係では、フラックスゲート磁力計(昭和53年度)、比抵抗変化計(昭和54年度)、セシウム磁力計(昭和55年度)等を山崎断層安富観測室近傍に設置し観測を続けている。ここでは、比抵抗変化計およびセシウム磁力計による連続観測の結果と、断層周辺での磁気測量による全磁力永年変化観測結果について報告する。

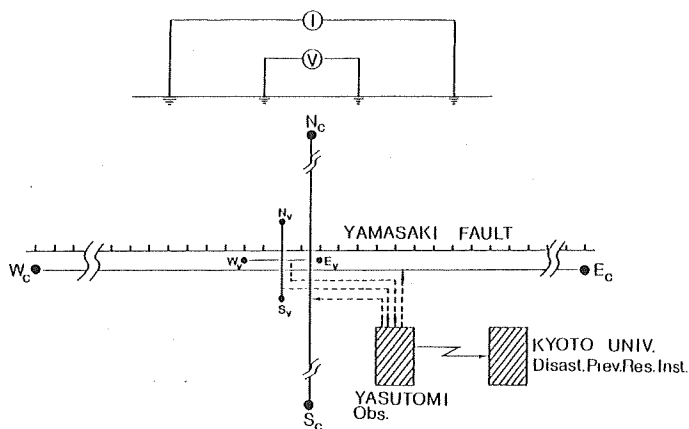
比抵抗変化観測は観測開始以来4カ年を経過しているが、初期の頃は、ケーブル断線、雷活動時の異常電流による計測器の損傷等がたび重なり、長期にわたる安定したデータを得るに至らなかった。しかし、ケーブルの架空配線、計測器の改良等により、現在では、ほぼ定常的なデータを得るに至っている。ここでは、昭和58年6月に計測のシステムを若干変更したので、変更以前および以後の計測結果の比較および、モデル計算による比抵抗変化量の見積りについて述べる。

セシウム磁力計の観測は、断層の南側に、約60mの距離をおいてセンサー2台を設置し、この間の全磁力差を計測している。これは、断層周辺への応力集中による磁場変化の検出を目的としている。現在の配置はセンサー間の距離が近いため、所期の目的には適合しないと思われるので、近々に距離をさらに長くする計画を立てている。ここでは、磁力計の性能やノイズの性質を調べる試験観測の結果と、これより明らかになった誘導磁場の地点差の特異性とこれにより示唆される主断層に斜交する副次的な断層の存在可能性について述べる。

断層周辺の磁気測量は、第1回目が昭和50年で今回は第6回目に当る。測量開始期に設置した20カ所の磁気点の中で、現在まで継続して計測しているのは、約半数で他は人工的擾乱や亡失等で移設・改埋を余儀なくされている。漸次増設したものを含め、今回は24カ所で測定した。昭和56年から約3年間の測量中断があったが、約8年間の全磁力永年変化について報告する。

2. 比抵抗変化観測

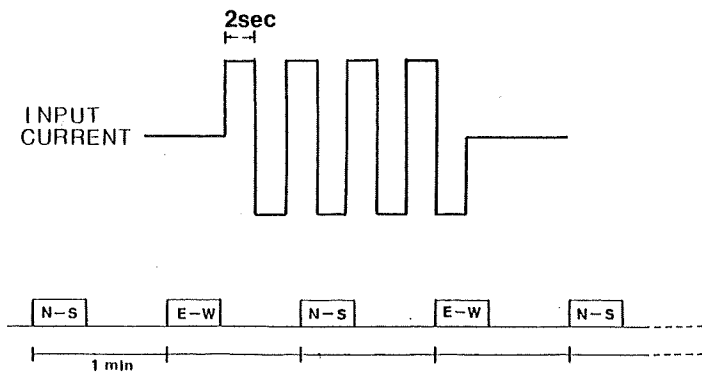
電極配置を第1図に示す。この配置は、シュランペルジャー・タイプであり、電流電極間距離はNS方向(断層に直交方向)550m, EW方向(断層に沿う方向)880m, 電位電極



第1図 電極配置図

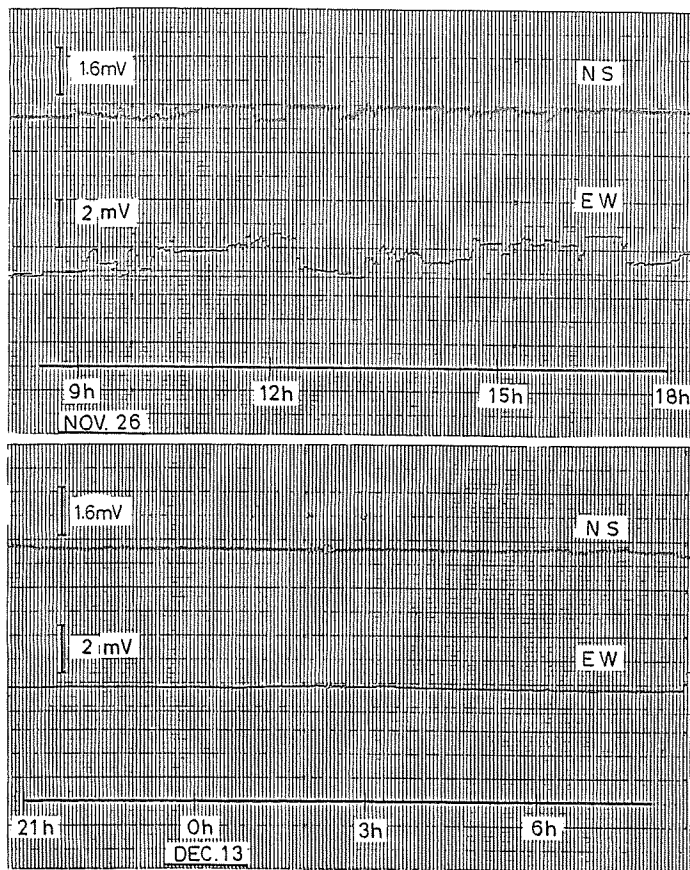
間距離は, NS方向55m, EW方向45mである。また入力直流電流値は, NS方向100mA, EW方向400mAである。観測結果から求めた見かけ比抵抗は, NS方向で, 約540Ωm, EW方向で, 約270Ωmである。

次に, 一部変更したシステムについて概略を述べる。新システムでは, 第2図に見られる信



第2図 新システムの入力記号とタイミング

号を入力している。すなわち, 2秒ごとに極性を変え, 直流電流を16秒間流し(2sec × 8), フィルタリング後, 全波整流, 8回スタッキング, そして約48dB増巾して出力している。この測定をNS, EW両方向について, 1分間隔で交互に行なっている。また, NS方向に比べてS/N比が悪いEW方向の電流電極を, 昭和58年10月に接地抵抗を下げるため, 鉛板電極を炭素電極と並列に接続した。この結果, 入力電流値を300mAから400mAに



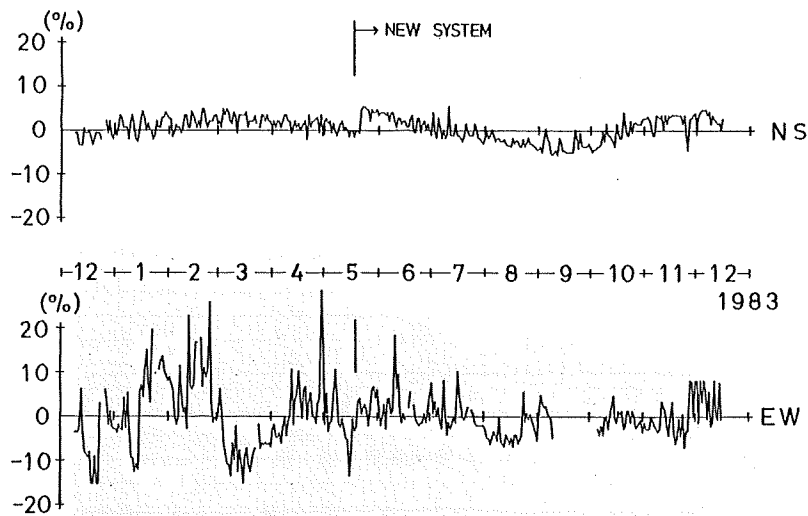
第3図 比抵抗記録例
1983年11月26日(上図); 1983年12月13日(下図)

増すことができた。

このようにして得られた記録例を第3図に示す。昼間は、周期の一定しない数分～数時間のステップ状のノイズが混入し、乱れた記録となるが、夜間は、良好な記録がとれている。山崎断層電磁気研究グループ¹⁾が明らかにしたように、この断層は、幅、深さ共に1 km以上におよぶ低比抵抗帯となっており、特に破碎帯中央部では、 $50 \Omega m$ 以下と推定されている。このため、自然および人工による電流が断層に沿って集中的に流れていることが判明している。この電流が、測定値の昼間の乱れの原因と考えられる。つまり、受信電位差波形(理想的には交番矩形波)に、異常電流の影響が混入しているからである。この影響は夜間より昼間の方が著しいので、国鉄山陽線からの漏えい電流によると考えられる。この影響は、断層に平行なEW成分で特に著しい。

次に、比抵抗値の長期変動を調べる。NS、EW方向の夜間2時～3時の比抵抗の1時間平

均値について、旧・新システムごとにそれぞれの期間平均をとり、それぞれの平均に対する相対変動を示したのが、第4図である。NS方向では、もともとS/N比が良かったため、目立



第4図 比抵抗の長周期変化

ったシステムの変更の効果は、みられないが、EW方向では、システム変更後かなりばらつきが、減っている。システム変更に伴うギャップを補正すると、NS方向できれいな季節変化が、観測されている。EW方向も一部それをとらえている。このような比抵抗の季節変化の原因については、地下水位の変化が有力と考えられている²⁾が、温度変化による比抵抗変化も考えられる。そこで、まず、安富での気温の日変化と比抵抗NS方向の日変化をそれぞれ約半月間、重ね合せると第5図のようになった。両者に負の相関が、明瞭に見られる。すなわち、温度が高くなると比抵抗は減少し、逆に低くなると増加している。ところで、表層付近の地温 t と土地の比抵抗 ρ_t の間に、

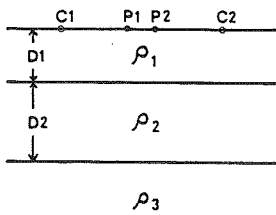
$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_t (t - 18)} \dots\dots\dots(1)$$

の関係式が経験的に知られている。ここで、 ρ_{18} は、 $t = 18^\circ\text{C}$ における比抵抗値で、 α_t は、温度係数で約 $0.025 / ^\circ\text{C}$ と見積られている。地表から深さ 50cm 付近までの地温日変化は、気温の日変化の約 10% になる。これを考慮に入れ、重ね合せた温度変化から、(1)式を用いて予想される比抵抗の日変化は、 2.5% になる。一方、観測値より得られた比抵抗変化は、 2.1

％になり、両者はほぼ同じ値になる。以上のことから、比抵抗の日変化には、地温の日変化が、大きな役割を果していると考えられる。気温の日較差8℃に対して比抵抗変化は約2％であった。気温の年較差は神戸で約24℃である。単純に日変化と同様な扱いをすると、期待される比抵抗の季節変化は、約6％になる。ところが、実測の比抵抗季節変化は、約15％である。季節変化のセンスは、日変化と同じであるから、両者の相違は、気温の年変化の地下におよぶ深さが、日変化にくらべてかなり深い³⁾ことによると考えられる。また、比抵抗変化の位相が、気温変化より1～2か月遅れていることも考え合せると、比抵抗の季節変化は、地中温度の変化による可能性が高いと考えられる。

さて、上に述べた連続観測結果より、現在のシステムでは、NS方向で±3％、EW方向で±5％以上の比抵抗の変化の検出は、可能と思

われる。実際にその程度の見かけ比抵抗の変化が起り得るか、どうかを簡単なモデル計算によって考察する。山崎断層の実際の比抵抗構造は、2次元構造と考えられるが、現在の電極配置は、NS、EW方向とも断層破砕帯にあると思われるので、ここでは、簡単に水平成層構造

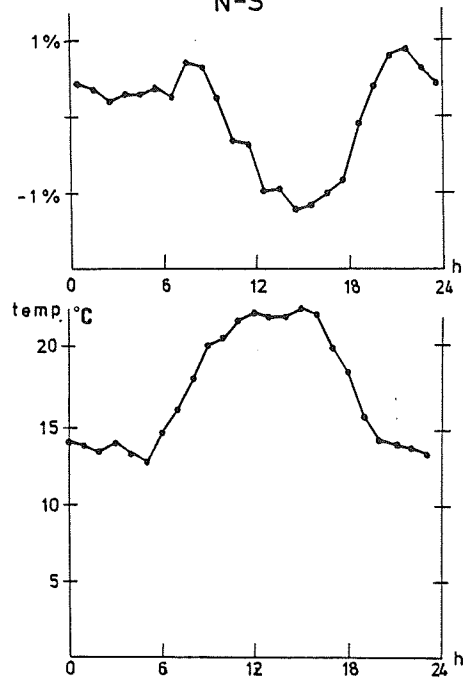


第6図 水平成層構造モデル図

(C₁, C₂: 電流電極)
(P₁, P₂: 電位電極)

1982 June

N-S



第5図 比抵抗の日変化(上図)と気温の日変化(下図)
(1982年6月13日～6月29日)

(3層構造: 第6図)と仮定して以下のモデル計算⁴⁾を行なった。

いま、電流電極を C₁(+I), C₂(-I), 電位電極を P₁, P₂ とすると、P₁, P₂ 間の電位差 V_{p₁ p₂} は、見かけ比抵抗 ρ_a を用いて、

$$V_{P_1 P_2} = \frac{\rho_a I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right) \dots \dots (2)$$

とかける。

一方、水平3層構造において、地表の点電流源 C(+I) から距離 r はなれた地表の点 P での電位ポテンシャル V

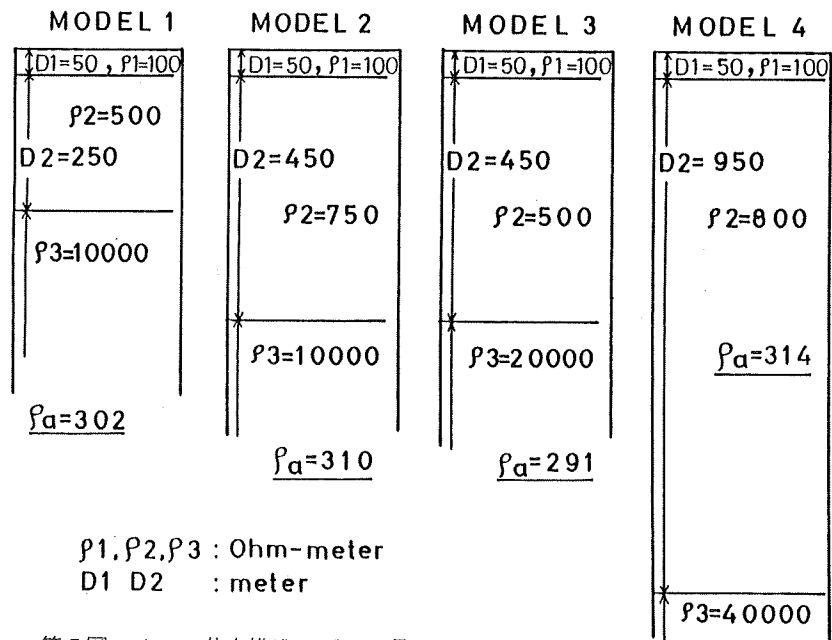
は、第1層、第2層の厚さを D_1, D_2 とし、第1層、第2層、第3層の比抵抗を ρ_1, ρ_2, ρ_3 とすると、

$$V(r) = A \left[\frac{1}{r} + 2 \int_0^{\infty} \frac{K_1 e^{-2\lambda D_1} + K_2 e^{-2\lambda(D_1+D_2)}}{1 - K_1 e^{-2\lambda D_1} - K_2 e^{-2\lambda(D_1+D_2)} + K_1 K_2 e^{-2\lambda D_2}} J_0(\lambda r) d\lambda \right] \dots (3)$$

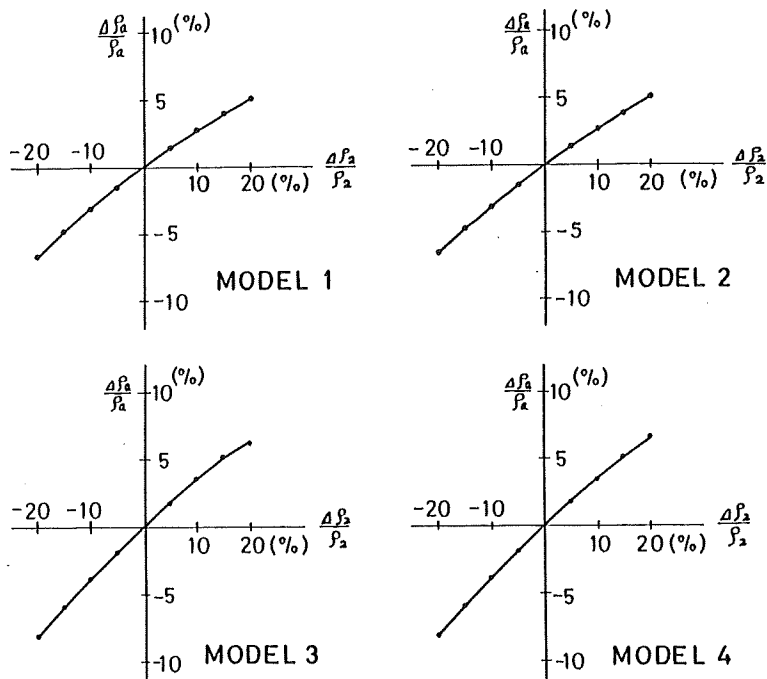
とかける。

$$\begin{aligned} \text{但し, } A &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \\ K_1 &= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \\ K_2 &= \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \end{aligned}$$

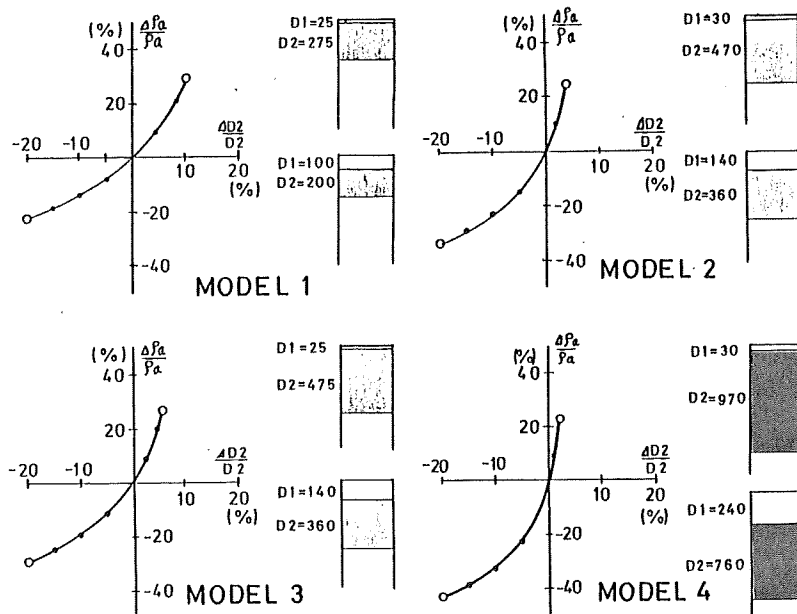
以上の(2), (3)式を用いて、まず、我々が観測から得ている見かけ比抵抗約 $300 \Omega m$ に合う4通りの基本構造モデルを作った。これには、山崎断層電磁気研究グループ研究結果を参照し、モデルに必要なパラメータを見積もった。なお、この際第3層までの深さを $1 km$ と制限した。基本となる4つの構造モデルを第7図に示す。そして試みに、(I)第2層の比抵抗 ρ_2 を変化させる場合、(II)第1層と第2層の境界面を変動させる場合、について見かけ比抵抗 ρ_a の変化をそれぞれのパラメータを変えることにより調べた。(I), (II)の場合について計算結果をそれぞれ第8



第7図 4つの基本構造モデルと見かけ比抵抗 ρ_a



第 8 図 第 2 層の比抵抗の変化に対する見かけ比抵抗の変化



第 9 図 第 1 層と第 2 層の境界面の変動に対する見かけ比抵抗の変化

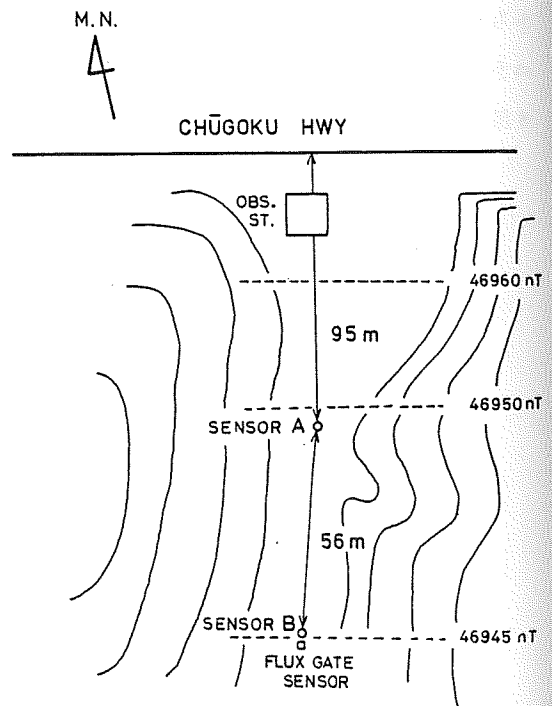
図, 第9図に示す。なお, 第9図では横軸に便宜上 $\Delta D_2/D_2$ をとり, グラフ上の白丸は, それぞれ横の柱状図に示される構造に対応する値を表わす。(I)の場合, ρ_2 が $\pm 10\%$ 変化すると ρ_a は \pm 数%変化する。(II)の場合, D_2 が \pm 数%変化すると ρ_a は $\pm 10\%$ 程度変化する。以上より第2層の比抵抗の変化より, 第1層と第2層の境界面の変動の方が, 見かけ比抵抗の変化に強い影響を与えていることがわかる。

上記のモデル計算では, 水平成層構造を仮定したが, 実際の断層破碎帯では, 電流集中が起こる可能性もあるので, 現在の観測システムでも地震に関連した比抵抗変化を検出し得るのではないかと考えている。

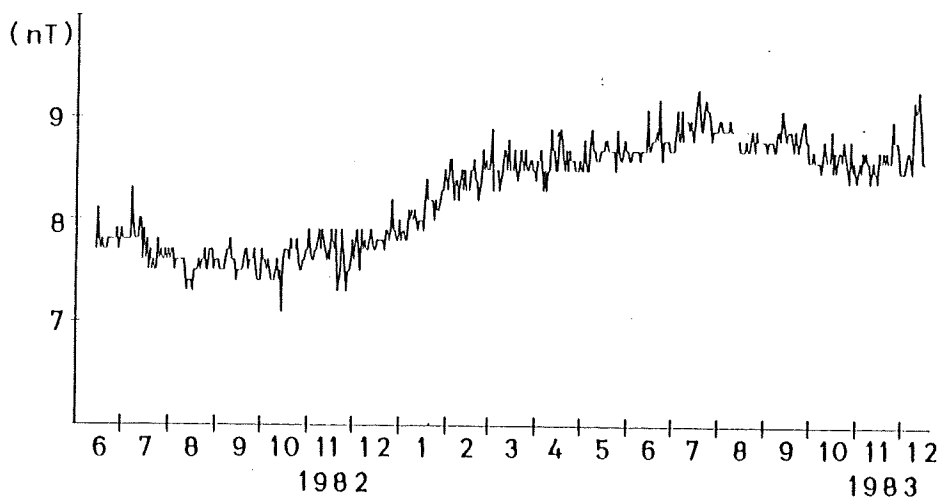
3. 全磁力差変化観測

第10図に観測機器の配置を示す。セシウム磁力計のセンサーの1つ(センサーA)を, 中国自動車道から95mのところ, またもう1つのセンサー(センサーB)を56m離れたところに配置している。センサーBのすぐ近くには, フラックスゲート磁力計も設置してある。セシウム磁力計を用いることによって, 高精度(0.1nT)で安定した観測が可能となっている。センサーBの全磁力の値, センサーAとBの全磁力の差およびフラックスゲート磁力計による地磁気3成分の値が観測室で記録されている。地磁気3成分の1分毎の観測値はテレメータによって京都大学防災研究所に送られている。

まず, 毎日の午前2~3時の1時間平均値を用いて全磁力差の長周期変動を調べた(第11図)。1982年12月から全磁力差は増加しはじめたが, 1983年3月~8月の間は安定しているように見える。9月以降の変動については, 減少傾向を示しているのか安定したままであるかは, 現時点では断定できない。観測期間中この付近の微小地震の活動度に特に変化はなかつ

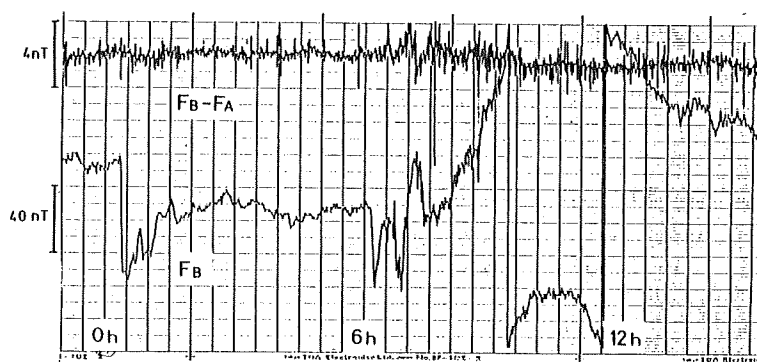


第10図 磁力計のセンサー配置図
○印…セシウム磁力計のセンサー
□印…フラックスゲート磁力計のセンサー



第11図 全磁力地点差の長周期変動
毎日の午前2～3時の1時間平均値を採用

たので、⁵⁾ このような全磁力差の変動が地震活動と直接結びついたものとは考えにくい。しかし、長周期の変動は広範囲の応力分布の空間的、時間的变化を反映している可能性も考えられる。ここで見られる全磁力差の長周期変動は、1～2年周期の周期性変動であるのか、それとも非周期性変動であるのかは興味深い問題であるので今後も注目していきたい。



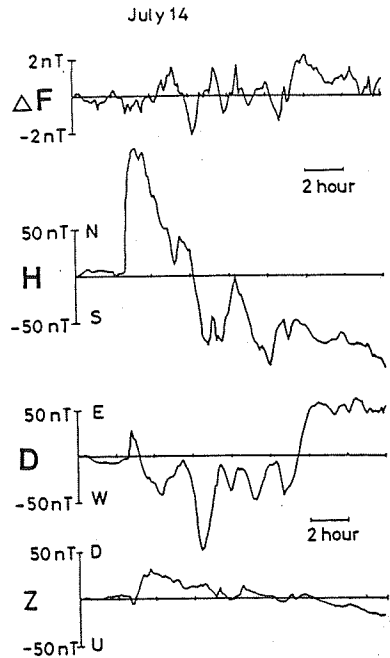
July 17 第12図 磁気嵐に伴う全磁力差と全磁力の変動
1982年7月17日の記録例

ところで、全磁力差の記録には地磁気の擾乱に伴って短周期(数分～1日)の変動がみられる(第12図)。このような変動がみられる時の地磁気3成分の記録を第13, 14図に示

す。第13図の例では、磁気嵐急始部のH成分の鋭い変化に対しては全磁力差に変化がみられず、全般的にD成分と良い対応を示している。第14図の例でも全磁力差とD成分の間には良い対応がみられる。H成分、D成分と全磁力差の関係を定量的に知るために、CA変換関数を求める方法にならって次式のP、Qの各周期に対する値を調べた。

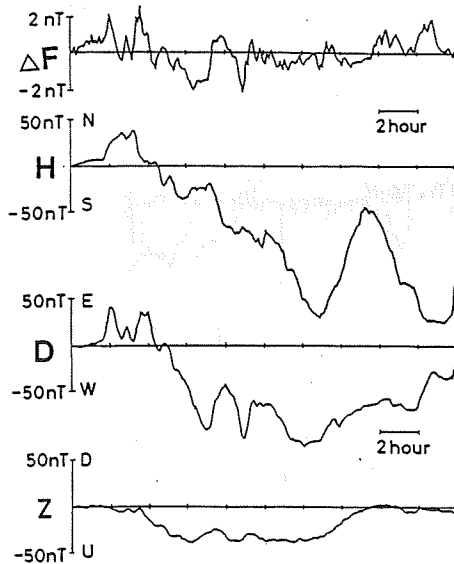
$$\Delta F(\omega) = P \cdot H(\omega) + Q \cdot D(\omega) \dots (4)$$

$\Delta F(\omega)$, $H(\omega)$, $D(\omega)$ はそれぞれ全磁力差、H成分、D成分の変動のフーリエ成分を表わす。また、記録を見る限りH、D成分と全磁力差変動の間には位相差がみられないので、Qを実数と考えた。第15図に解析手順を示



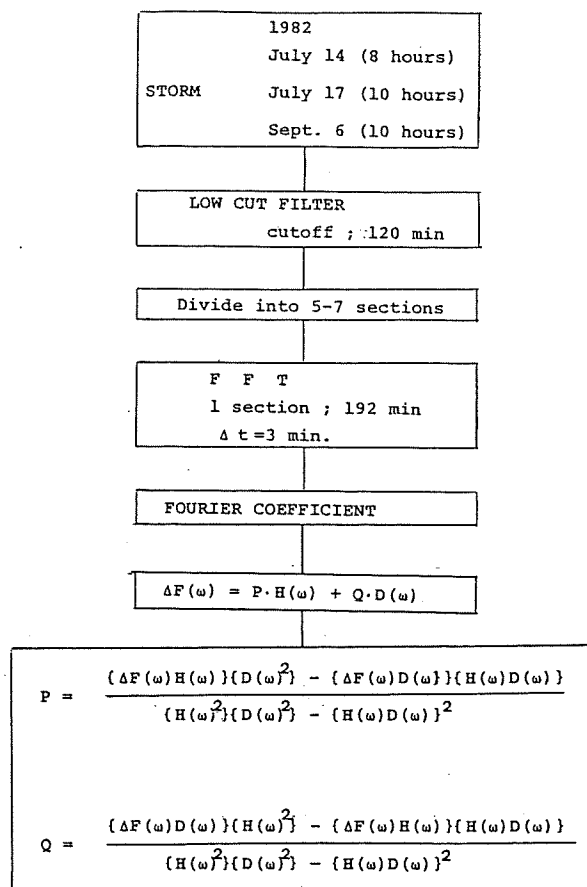
第13図 磁気嵐に伴う全磁力差と地磁気3成分の変動
1982年7月14日の記録例

Sept. 6



第14図 サブ・ストームに伴う全磁力差と地磁気3成分の変動
1982年9月6日の記録例

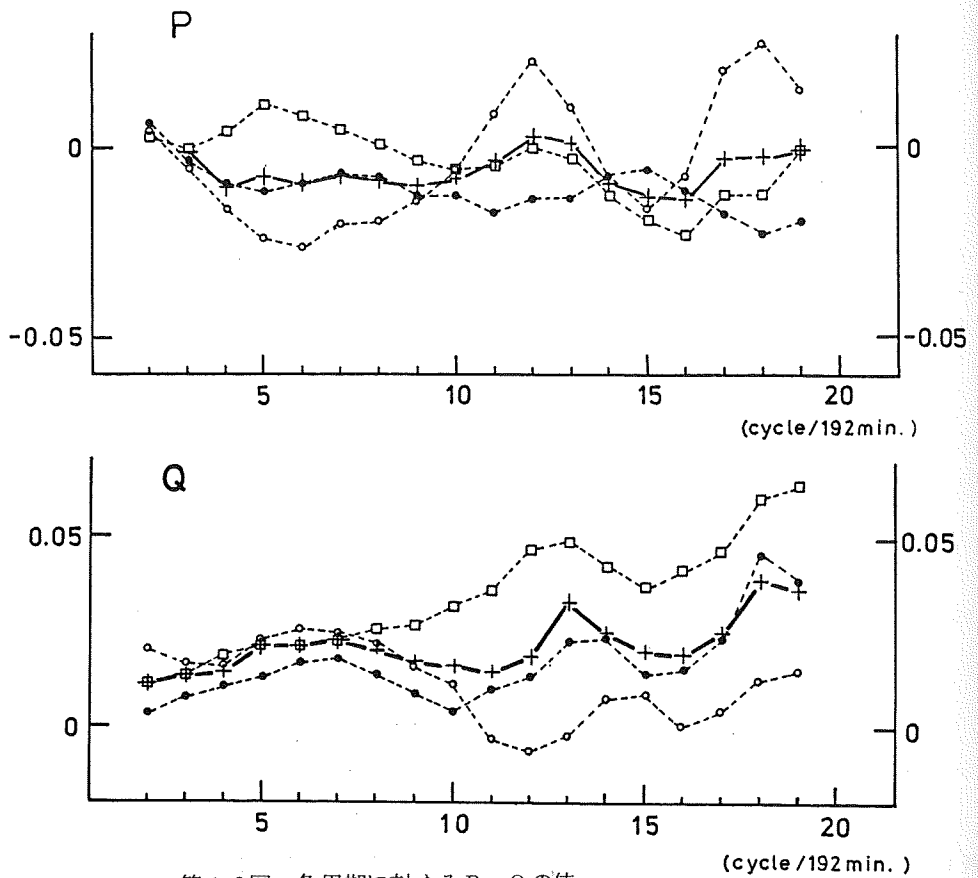
す。今回は3つの磁気嵐(1982年7月14日、17日、9月6日)を解析した。3分値64個(192分間)を1区間とし、区間の先頭を60分ずつずらして各磁気嵐を5~7区間に分けた。FFTを用いて各区分ごとのフーリエ係数を求め、この係数を用いて(4)式のP、Qを最小自乗法で決定した。



第 1 5 図 解析手順

第 1 6 図に各周期に対する P, Q の値を示す。この図をみると、全磁力差変動に対する H 成分の影響を示す P の値は、すべての周期に対して小さな値を示している。しかし、D 成分の影響の大きさを示す Q は、変動の周期が短くなるほど正に大きくなっている。すなわち、磁場が東向きに短い周期で変化するほど 2 地点の全磁力の差は大きくなっている。

以上のことから全磁力差が短周期変動をする原因は東西に走る山崎断層に誘導される電流の作る磁場であるとは考えにくい。むしろ、山崎断層と直交または大きな角度で斜交する破碎帯が存在して、そこに誘導される電流が作り出す磁場の地点差が原因であろう。山崎断層周辺で精密測地測量を繰り返し行なっている藤森⁶⁾らも、主断層に斜交する副次的断層の存在を指摘していることは興味深い。



第16図 各周期に対するP, Qの値

● : 1983年7月14日 ○ : 1982年7月17日
 □ : 1982年9月 6日 + : 3期間の平均

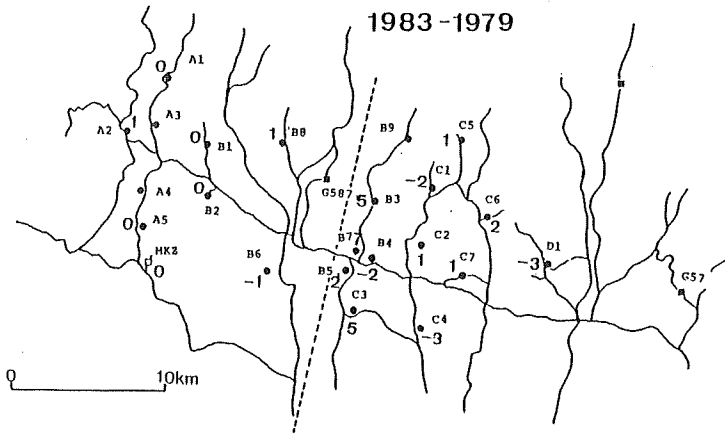
4. 山崎断層周辺の磁気測量

測量方法は前回⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾までとまったく同じで、モニター点を安富観測室の近傍に置き、測定値はすべて鳥取基準点に化成した。第17図に各測定点の前回(1979年)からの変化量を示す。測量地域の東側の各測定点の変化量が西側のそれよりも大きく、その中でもB4, B5, B7, C3などの測量地域中央付近の変化量が大きい。

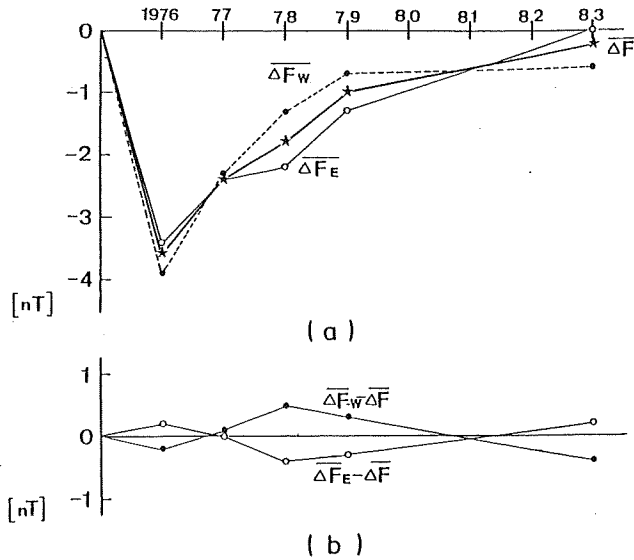
さて、試みに第17図中に示した破線を境に、測量地域を東西2つの地区に分け、それぞれの地区の変化を調べた。各測定点の1975年からの変化量を地区ごとに平均し、その変動を第18図(a)に示す。図中の星印は全測定点の変化量の平均値である。また、両地区の平均と全測定点の平均値との差を第18図(b)に示す。この図をみると、東地区と西地区で相補的な変動を示していることがわかる。このような変動を示すメカニズムは分からないが、今後もこの変動に注目していきたい。

最後に、本論文で用いたデータは、安富町の宇野琢哉氏の献身的な協力がなくては、得られ

ないものであった。この場をかりて厚く御礼申し上げます。



第 17 図 鳥取を基準にした山崎断層周辺の全磁力永年変化量
(単位: nT)



第 18 図 (a) 各測定点の永年変化量の東西両地区の平均
および全測定点の平均の変動
(b) 東西両地区の平均値と全測定値の平均値の
差の変動

参 考 文 献

- 1) 乗富一雄(研究代表者), 地球電磁気学的手法による断層活動度の研究, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究成果, 1981
- 2) 力武常次他, 地震予知 I, 学会誌刊行センター, 1980
- 3) 土壤物理研究会編, 土の物理学, 森北出版, 1979
- 4) 清野武, 電気探鉱学(I)(II)(III), 京都大学工学部鉱山学教室物理探鉱研究室, 1955
- 5) 渡辺邦彦, 私信
- 6) 藤森邦夫, 私信
- 7) 住友則彦, 井内登, 山崎断層周辺における地磁気永年変化観測, 変動電磁界による地下導電率分布の研究, 91-96, 1976
- 8) 田中良和, 住友則彦, 山崎断層周辺における地磁気永年変化観測(II), 地磁気観測所技術報告, 第17巻特別号, 101-104, 1977
- 9) 住友則彦, 山崎断層周辺における地磁気永年変化観測(III), CA研究会論文集, 45-53, 1978
- 10) 住友則彦, 田中良和, 山崎断層周辺における地磁気永年変化観測(IV), CA研究会論文集, 29-33, 1979