

11. 地殻内比抵抗異常による誘導電流の擾乱とその地震予知への応用

東京大学地震研究所 本 蔵 義 守

1. まえがき

地震前兆現象の一つに比抵抗変化がある。¹⁾Braceらの実験によると、岩石の破壊前にディラタンシーが起り、新しく生じた割れ目に水が浸透して比抵抗に大きな変化が生じることが明らかになっている。²⁾この変化はかなり大きく、花崗岩の場合には1桁近くにもなることが示されている。一方、ソ連のガラム地方、及び米国のサンアンドレアス断層付近では、人工電流を流して比抵抗測定をしたところ、地震前に20~30%にも及ぶ変化があったと報告されている。^{3), 4)}

地震前にディラタンシーが生じるといろんな物理量に変化する。その代表的なものに地震波速度変化がある。しかしディラタンシー異方性により地震波伝播路によっては変化のでないこともある。比抵抗は主に割れ目内の水の量及びその相互結合性に支配されているので、異方性は地震波速度程強くは現われないと思われる。この点は比抵抗変化測定の優れた点である。もう一つの優れた点は、ディラタンシーのドライモデルとウェットモデルを地震波速度変化よりも明瞭に識別することができることである。

ここで比抵抗測定方法に目を転じてみよう。ソ連、米国などでは人工電流を流すことによって比抵抗を測定しているが、日本のような人口密集地で頻繁に大電流を流すことは非常にやりにくい。それに装置が大がかりである点も欠点である。そこで、もっと容易に比抵抗変化を調べるために自然に流れている誘導電流を用いてはどうだろうかという考えが生じてくる。

カナダ地球物理研究所のNiblettらはこの点に着目して、Magnetotelluric法による比抵抗変化観測を考え、一つのプロジェクトを立案した。筆者は幸運にもこのプロジェクトに参加することができたので、次章において観測の概略とその結果を簡単に説明する。第3章では理論的にはどの程度の変化が期待できるかについて議論する。1970年秋田県南東部地震(M=6.2)の際、震央から約13km離れた地点で地磁気、地電流観測を実施中だったので、その時の記録を用いて誘導電流に変化が観測されたかどうかを調べた結果を第4章に示す。最後に、この地震予知にとっての新しい手法の将来の展望をも含めて若干の考察を行なうつもりである。

2. カナダ東部地震活動域における誘導電流を用いた地震予知研究

カナダ、ケベック市の北東約100kmのセントローレンス川中流域に、過去100年に1~2回の割合でM=6~7の地震が起っている。その中心はLa Malbaieという小さな地方都市付近である。この地域でMagnetotelluric法を利用して地殻内比抵抗異常を検出できるかどうかを調べるために、1974年秋より地磁気、地電流の観測を行ない、現在も続行中である。⁵⁾

Magnetotelluric法で地球内部の比抵抗分布を求める時には通常インピーダンステンソルを求める。誘導電流Eはインピーダンステンソルを媒介にして、地磁気変化Hと次のような関係にある。

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

ここでx, yはそれぞれ北向き、及び東向き成分を表わす。このテンソルの各要素は周波数の関数として求められる。これら4つの要素から誘導電流の振幅及び方向を決めることができる。例えば、磁場が北向きに变化した時に誘導される電流の振幅、方向は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \text{振 幅} &= \sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{yx}^2} \\ \text{方 向} &= \arctan \frac{Z_{yx}}{Z_{xx}} \end{aligned}$$

ここで、振幅の単位はmV/(km·r)、角度は北から反時計方向に測られる。磁場が東向きに変化するときにもZ_{xy}, Z_{yy}を用いて同様のことをやればよい。

この振幅、方向の時間変化を調べるわけであるが、2週間を区切りにした。この区間で5~8個のサブストーム時の記録をスペクトル解析してインピーダンステンソルを求める。テンソル要素から周期5, 10, 30, 60, 120分に対する振幅、方向を計算し、平均と標準偏差を各周期に対して求めた。一般に振幅よりも方向の方がばらつきは少ないようである。

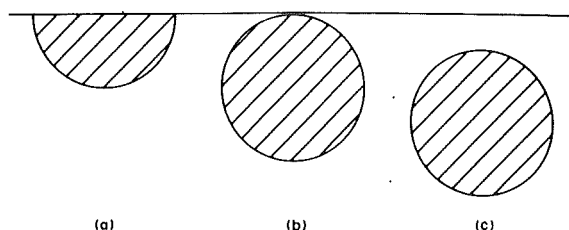
約1年間分の記録を解析した結果、振幅、方向ともに有意な変化を得たが、観測期間中めばしい地震はなかったので、検出された変化は地震とは直接関係ないと思われる。しかし、ここで重要な点が2つ考えられる。1つは振幅、方向というパラメーターの時間変化を調べることは、これらのパラメーターが割合によくきまるといふ点で意味あることであり、第2は、原因はあまりよくわからないが有意な変化が観測されたということである。これらによって、もし地震前に比抵抗変化があり、かつ地磁気、地電流観測点が異常域に十分近ければ、比抵抗変化という前兆は誘導電流の振幅及び方向における変化として検出できる可能性が示唆されていると思われる。

3. 理論的考察

ディラタンシーと割れ目への水の浸透は本質的に3次元であるので、比抵抗異常領域も3次元的構造をもつはずである。Magnetotelluric法は電磁誘導を対象にしているので、3次元構造に対する電磁誘導の式を解かねばならないことになる。しかし、3次元モデルを解析的に取り扱うことは非常に困難であり、また数値計算に頼っても膨大な時間と費用を要し、あまり現実的でない。そこでなんとか適当な近似をして、解き易いモデルが考えられないだろうかということになる。

一般に地殻の比抵抗はかなり大きいのである程度(例えば30分)長周期の変化に対する電磁誘導の場合には、誘導電流は地殻内を一樣に流れると近似的に考えることができる。また異常領域があまり大きくない場合には、比抵抗異常によって生じた擾乱電流が作る磁場による2次的な電磁誘導の影響は近似的に無視できる。そうすれば、一樣な定常電流の比抵抗異常による擾乱の問題として取り扱うことが可能になってくる。

次にいかなるモデルを選ぶかということになるが、ここでは第1図に示されるような3つの代表的なモデルについて考えてみる。(a)は非常に浅い地震に対する異常領域を表わし、地表にまでも比抵抗変化が及んでいる場合である。(b)は浅い地震を表わし、異常域は地表にはでないが地表のすぐ近くにまで及ぶ場合である。(c)は深い地震に伴う異常域を示す。計算の詳細はHonkura(1976)⁶⁾を参照のこととし、ここでは結果だけを示すことにする。



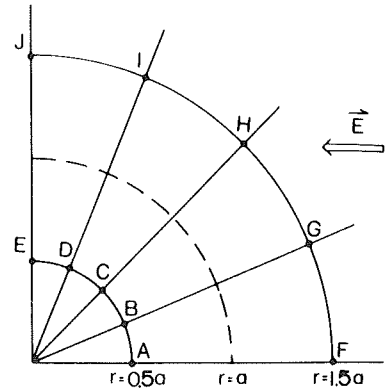
第1図 比抵抗異常のモデル

まず(c)についてであるが、たとえ比抵抗が1桁小さくなくても地表で検出されるべき変化は非常に小さく、振幅では1%以下、方向では 1° 以下である。このような微小変化は観測誤差内に入り、検出不能であると思われる。従って、このモデルに対しては変化はないと考えてよい。このことは、深い地震に対しては地表で観測される誘導電流には何の変化も現われないことを意味する。この事実はいま問題にしている地震予知研究のための新しい研究方法の欠点であろう。

しかし(a)と(b)についてはある程度有望な結果が得られた。第3図は第2図に示してある各点における振幅の変化を比抵抗変化の関数として表わしたものである。当然のことであるが、測点が異常域内にあれば大きな変化が期待できる。異常域外でも変化が見られ、その大きさ及

び増減は場所によることは興味あることである。第4図は各点における方向の変化を示したものである。この場合振幅と違って異常域内の各点においては変化はない。変化は異常域の境界付近でもっとも大きいことがわかる。

これらの結果より、浅い地震に対しては振幅、方向ともに検出可能な変化があることがわかる。更に、振幅、方向における変化の様相は場所によるので、観測網を設ければどこが異常領域かを推定できるところになる。

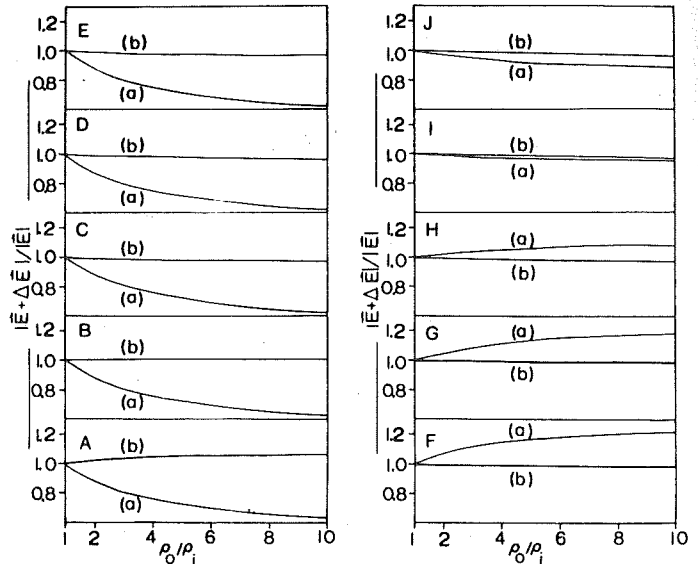


第2図 代表的測点の位置。

矢印は電流の方向を示す。

4. 1970年秋田県南東部地震の場合

1970年10月16日秋田県南東部でM=6.2の地震が起った。この年の9月から11月までの3ヶ月間、たまたま震央より西約13kmの所で地磁気、地電流の観測が実施されていた。この地震に対してはVp/Vs変化という前兆があったとされている⁷⁾ので、比抵抗変化もあったと考えられる。また比較的浅い地震であり、観測点も震源域に非常に近いので、第3章の結



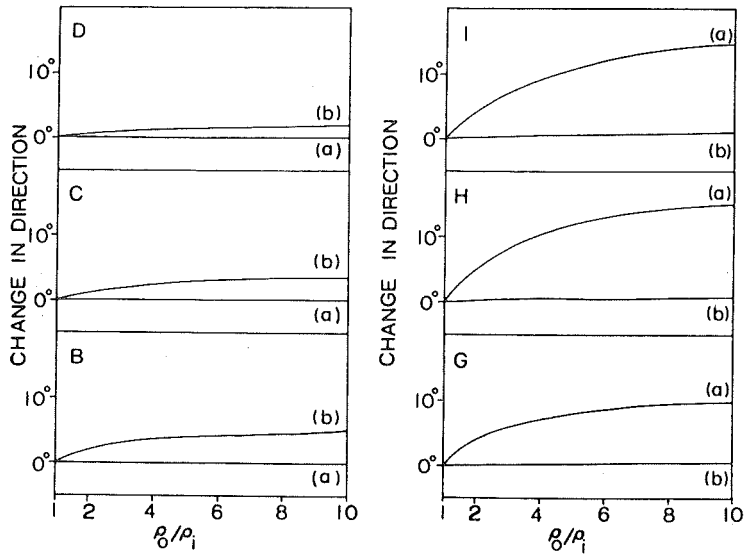
第3図 各測点における振幅の変化。

果より誘導電流の振幅及び方向に変化があったかもしれないと考えられる。

第5図は震央及び観測点の位置を示す。黒丸は余震を示し長方形はこの地震の断層面を表わす。⁸⁾ 矢印は観測点における北向きの磁場変化に対する誘導電流の方向を示す。誘導電流の方向は局地的にかなり違うこともあるが、この方向を現在問題にしている領域内の代表的な方向であると考えことにする。

第2章で示したように得られた記録をスペクトル解析し、インピーダンステンソルを求めて

から振幅, 方向をきめべきであるが, 残念ながら良質の記録が非常に少ないのでスペクトル解析による方法をとれなかった。そこで湾型変化などの独立した変化を数多く選びだし, これらをフーリエ解析した。得られた周期30分の変化に対する4つのテンソル要素

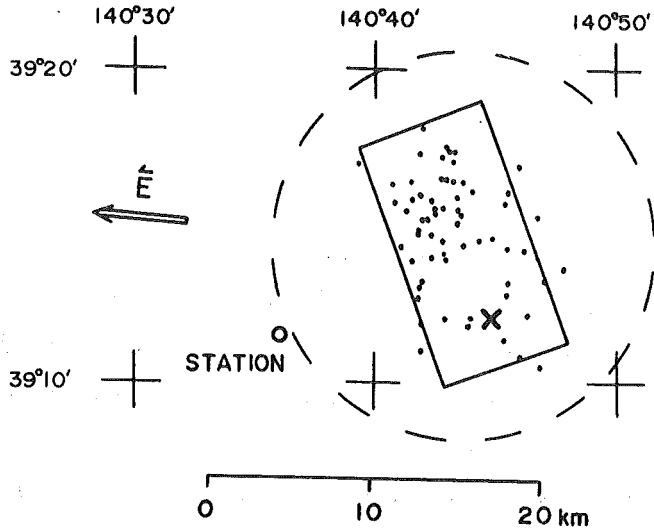


第4図 各測点における方向の変化。

から, 適当な変換をし

て磁場が北向きに変化したときの誘導電流の振幅, 方向を求めることにした。⁹⁾この方法ではこれら2つのパラメータは精度よくきまらないのではあるが, データが少ないのでやむを得ない。

第6図は振幅及び方向の時間変化である。矢印は地震発生時を表わす。縦の棒は標準偏差; 横の棒は解析したデータの得られた期間を表わす。



第5図 震源域と観測点の位置。

振幅, 方向ともに標準偏差が

非常に大きい, データの数が少ないこと及び解析方法の不完全さによるものであって, データの質がよければもっときれいにきまるはずである。まず振幅からみると, 地震前に振幅がわずかに減少してきた傾向にあり, 地震後はあまり変化していないように思われる。方向については地震前後で2~4°反時計方向に変化しているようにみえる。いずれもばらつきが大きく有意ではないが, 振幅はわずかに減少, 誘導電流の流れる向きは反時計方向に2~4°変

化したと考えられなくはない。

次にこの結果を第3章に示したモデル計算と比較してみる。観測点は第2図のBとGの中間あたりに位置し、異常域はモデル(b)に近いと考えられる。⁹⁾ そうすると第3図より振幅についてはほとんど変化はないが、第4図

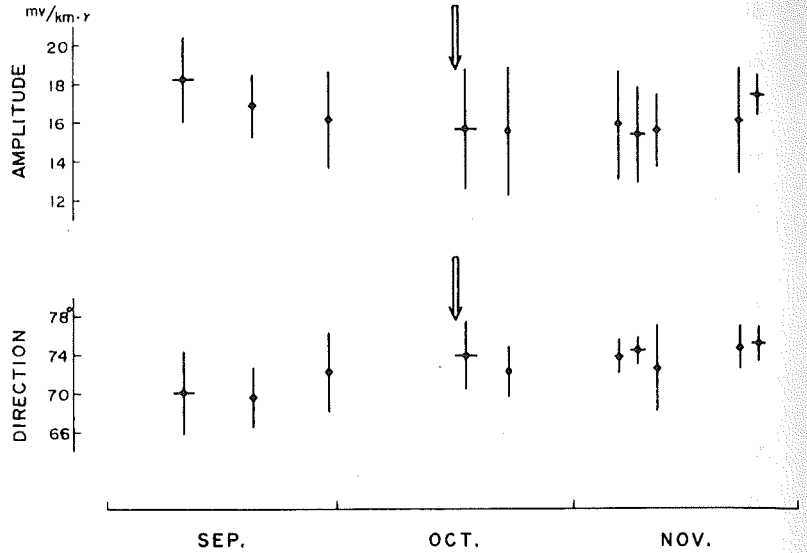
による方向には数度の変化が期待され、向きは反時計方向ということになる。従って観測結果は理論的に予想されるものと矛盾しないことがわかる。

5. ま と め

第2章から第4章まで、比抵抗異常による誘導電流の擾乱という現象の地震予知への応用という問題について観測面、理論面から考察し、また現実の地震発生前後の変化についても調べてきた。その結果いえることは、高精度の観測を震源域近くで行なうならば、ディラタンシーなどによる地震前兆としての比抵抗変化を検出することは不可能ではないということである。さらに、観測点を数点設けて観測を行なうならば、異常域の位置ならびに広がりも推定できるという点は重要であろう。

最後にこの研究方法の問題点について考察する。モデル計算結果より明らかのように、観測点が異常域に入っている場合を除いて期待される変化は非常に小さい。従って非常に高精度の地磁気、地電流観測が要求されてくる。特に地電流については直流電化線などからの迷走電流によるノイズが問題となる。このノイズ対策を考える必要がある。

短周期ノイズを避けて周期30~60分くらいの誘導電流をとり出すことを目的としたバンドパスフィルターを作製し、これを用いた観測を伊豆、東海地方ですで行なっているので、これらの地方でも誘導電流の振幅、方向ともに精度よく求まるかどうかは近日中に解明できる。



第6図 地震前後の振幅，方向の変化。
矢印は地震発生時を示す。

参 考 文 献

- 1) T. Rikitake, Earthquake Prediction, Elsevier, pp. 357, 1976.
- 2) W. F. Brace and A. S. Orange, Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding, *J. Geophys. Res.*, 73, 1433-1445, 1968.
- 3) O. M. Barsukov, Variations of electric resistivity of mountain rocks connected with tectonic causes, *Tectonophys.*, 14, 273-277, 1972.
- 4) A. Mazzella and H. F. Morrison, Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, *Science*, 185, 855-857, 1974.
- 5) Y. Honkura, E. R. Niblett and R. D. Kurtz, Changes in magnetic and telluric fields in a seismically active region of eastern Canada: Preliminary results of earthquake prediction studies, submitted to *Tectonophys.*, 1976.
- 6) Y. Honkura, Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and its application to earthquake prediction, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 47-57, 1976.
- 7) A. Hasegawa, T. Hasegawa and S. Hori, Premonitory variation in seismic velocity related to the southeastern Akita earthquake of 1970, *J. Phys. Earth*, 23, 189-203, 1975.
- 8) 長谷川昭, 笠原敬司, 長谷川武司, 堀修一郎, 1970年秋田県南東部地震の発震機構 (その2), *地震*, 28, 141-151, 1975.
- 9) 準備中