

柿岡で観測された関東地震に伴う $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化の一解釈

東京大学地震研究所 本 蔵 義 守

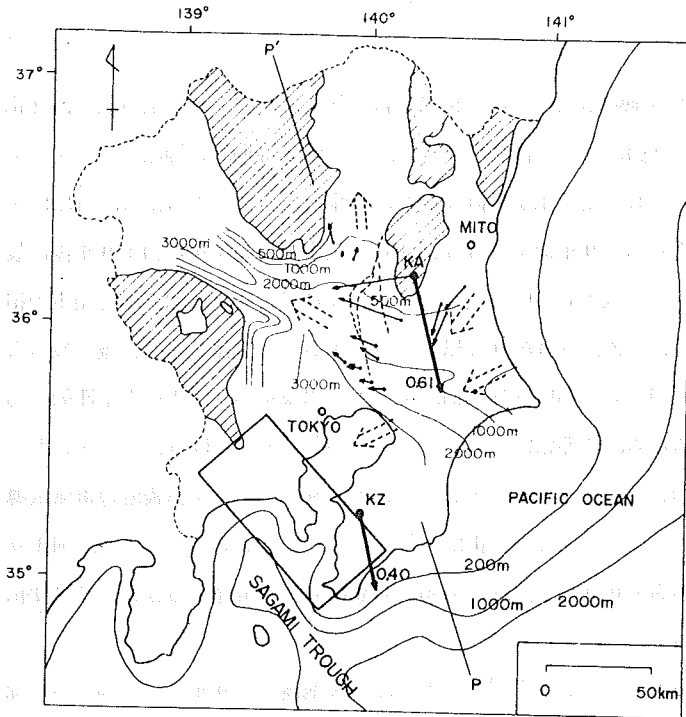
1. ま え が き

地震の前兆現象の一つとしての地殻電気伝導度変化が報告されて以来^{1) 2)}, 電気伝導度変化をC A的に研究する気運が特に我国において高まってきた。こういう時期に, 柳原³⁾ によって報告された柿岡における $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化を見直すことは意味のあることと考える。柳原によれば, 1923年関東地震発生の約20年前から $\Delta Z / \Delta H$ が減少し, 発生から約10年後に最大値をとり, その後再びわずかずつ減少している。この $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化と関東地震発生の相関は単なる偶然かもしれないが, $\Delta Z / \Delta H$ が0.2以上も変化すること自体C Aの常識を破るものであると考えられる。その原因として柳原は地震前に良導層の出現があればよいと定性的に論じているが, 定量的に説明するためには非常に考えにくい現象が起っていなければならず, とても現実的とはいえない。現に力武のモデル計算によると⁴⁾, 震源域において1桁程度の電気伝導度変化があっても地表で観測される磁場成分の変化は一般に小さいことがわかっている。何よりも不可解なことは, 震源域から約100Kmも離れた柿岡で何故にも0.2にも達する $\Delta Z / \Delta H$ 変化が観測されるのかという点にある。

ここで注目すべき興味深い報告がある。茂木⁵⁾ によれば, 大地震の20年くらい前から震源域をとりまく形で地震活動が活発になる場合があるという。また茨城県南西部及び千葉県北部は地震活動の活発なところであることはよく知られている。これらのことから, 関東地震前に柿岡に比較的近い微小地震多発帯で地震活動が極めて盛んになったと考えてはどうであろうか。実際に1921年12月に, 千葉, 茨城県境付近に, 1923年1月には千葉県北西部でそれぞれ $M = 7.1, 6.3$ の地震が起っている。従って, 柿岡で観測された $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化は上記の地域における関東地震前の地震活動と関連あると考えれば, 話は現実味を帯びてくることになる。要するに, 関東地震を単なる震源域内のみの現象として考えるのではなく, もっと広範囲の一連の現象と捉えることによって, 柿岡で観測された $\Delta Z / \Delta H$ 異常と関東地震の関連を考えようとする見方である。このように考えると, $\Delta Z / \Delta H$ 異常と関東地震の関連は, 規模こそ大きく異なるが, 柳原, 永野⁶⁾ によって報告されたような, 柿岡における継続時間の短い $\Delta Z / \Delta H$ 異常と柿岡付近の有感地震とのよい相関と, 本質的には同じ現象であると解釈できそうである。

2. 関東平野における地磁気・地電流変化異常の概観

関東平野は厚い堆積層におおわれていて、しかもその一部は海とつながっているため、CAは当然期待されるはずである。柳原、久保木らによって地磁気・地電流の短周期変化異常は十分に調べられ、堆積層の影響も明らかにされてきた。^{7) 8) 9) 10) 11)} 第1図に関東平野の堆積層の厚さが示されている。柿岡(KA)と鹿野山(KZ)における太い矢印は周期30分の変化に



第 1 図

に対するインダクション・ベクトルである。細い矢印は磁場が北向きに変化したときに流れる誘導電流の方向を示している。矢印の長さは誘導電場の振幅に比例する。東京の南方の長方形は安藤によって提出された関東地震の断層モデル¹²⁾を表わしている。

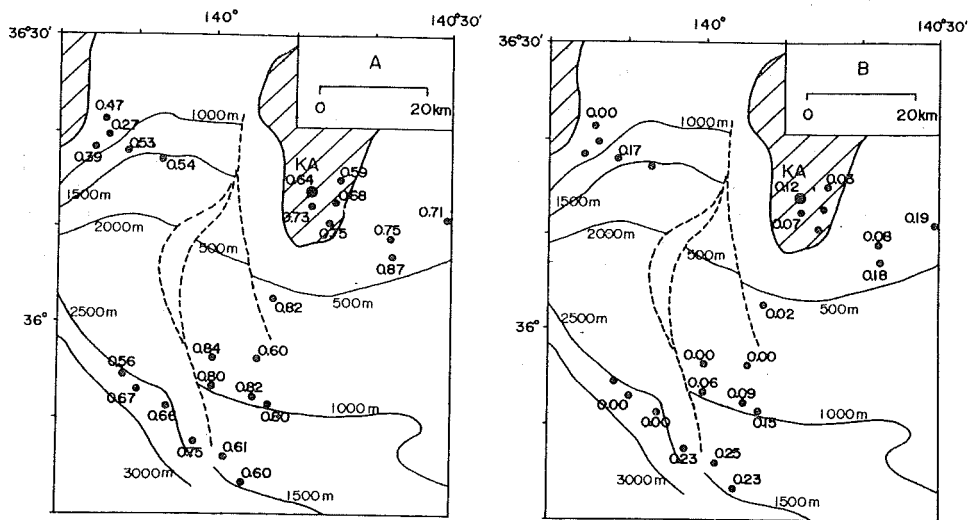
注目すべきことは、柿岡のインダクション・ベクトルは鹿野山のそれよりも大きいことである。海の影響だけを考えるならば鹿野山の方が大きくなるべきところであるが、そうでないのは明らかに、両観測所の間に存在する堆積層の影響を反映していると解すべきである。次に地電流の振舞をみると興味あることに気付く。柿岡の南東部では誘導電流はほぼ南の方向に流れていることがわかる。一方、柿岡西方域では逆に北向きになっており、南方では西向きに流れていることがよくわかる。これらのことから、誘導電流は柿岡付近の基盤岩を避けて流れる様子が明瞭であろう。点線の矢印は北向きの磁場によって誘導された電流の流れる向きを概念的に示したものである。電磁誘導そのものは多分太平洋で起ったものであろうが、誘導電流は堆積層に流れ込み、矢印で示されるような道筋をたどるものと思われる。この誘導電流の振舞から推察されることは、柳原も指摘しているように、柿岡においては単なる堆積層の影響だけではなく、一種の半島効果が期待されるということである。これが柿岡における

に対するインダクション・ベクトルである。細い矢印は磁場が北向きに変化したときに流れる誘導電流の方向を示している。矢印の長さは誘導電場の振幅に比例する。東京の南方の長方形は安藤によって提出された関東地震の断層モデル¹²⁾を表わしている。

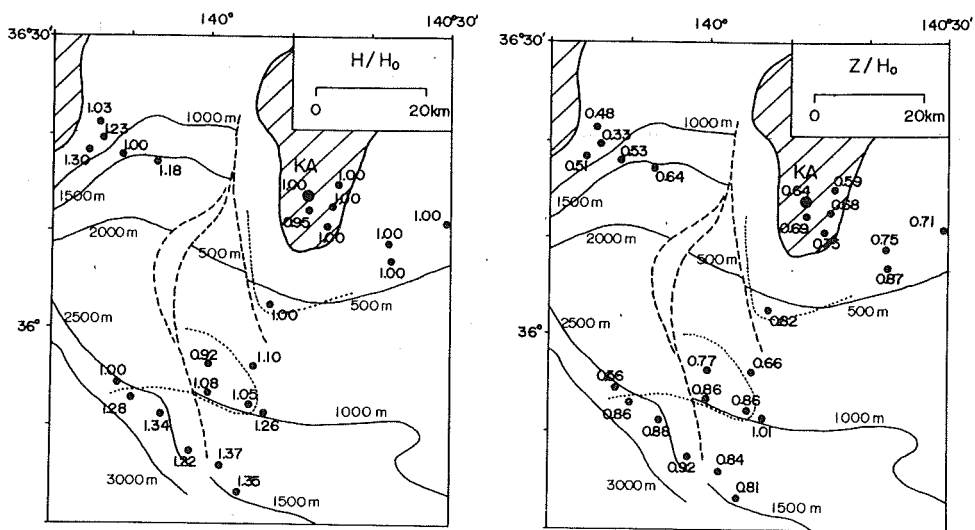
注目すべきことは、柿岡のインダクション・ベクトルは鹿野山のそれよりも大きいことである。海の影響だけを考えるならば鹿野山の方が大きく

0.6にも達する $\Delta Z / \Delta H$ の原因と考えざるを得ない。

そのような目で、久保木によって精力的に調べられた地磁気短周期変化の関東異常を見直してみることとする。第2図は各観測点におけるA、Bの値を示している。Aについてみると柿岡付近では半島効果が明瞭に確認できる。もっと南に下ると複雑になってくる。Bについてみると全般的に値は小さい。東北地方では太平洋の影響をもっと強く受けているのであるが³⁾、それと異なるのは恐らく、点線で示した断層の西側の厚い堆積層が太平洋の影響をある程度打ち消しているものと解釈できる。



第 2 図



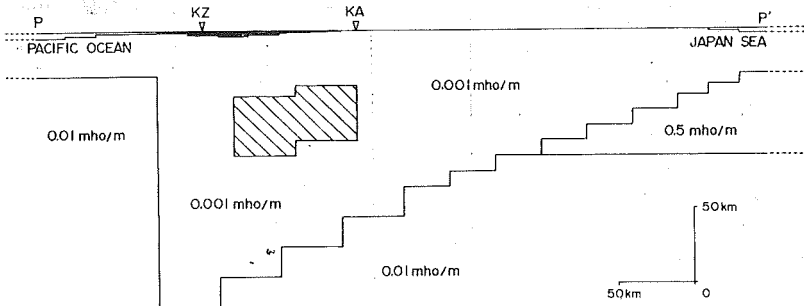
第 3 図

堆積層の上では水平成分も影響を受けるので、H成分は柿岡における H_0 で統一した方がわかり易い。第3図において水平成分をみると、柿岡よりも30%以上も大きい所が3~4点存在する。南方域の複雑な分布は点線の内側の領域を電流が避けて流れていると考えれば説明がつく。そういう目で Z/H_0 分布をみると一見複雑な分布もうまく解釈できそうである。堆積層内にどうしてそのような高抵抗域があるのかわからないが、堆積層内の局所的擾乱には十分注意を払う必要があるといえよう。

3. $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化を説明する一つのモデル

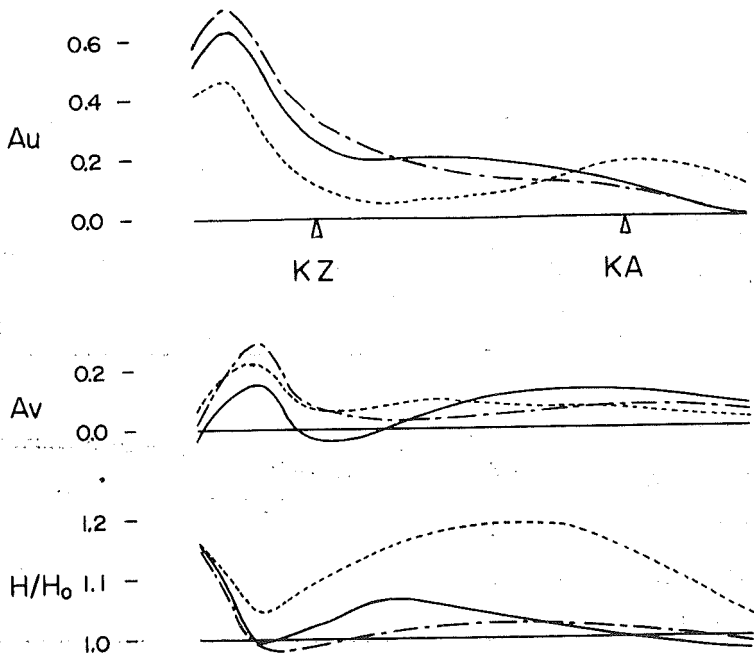
以上の議論から柿岡における $\Delta Z / \Delta H$ は堆積層を流れる電流に大きく左右されることがわかった。そこで $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化の原因を堆積層に流れる電流の強さの変化として考えるのが自然であろう。しかも、半島効果という一種の増幅作用を受けるので、 $\Delta Z / \Delta H$ の大きな変化がうまく説明できるかもしれないことになる。こう考えることによって、ごく一般的な地殻内比抵抗異常モデルでは説明がつかないという難点を克服できるかもしれない。 $\Delta Z / \Delta H$ の減少を説明するためには電流が弱くなればよいが、その原因として二つ考えられる。一つは堆積層の電気伝導度が何らかの原因で小さくなることである。そうすれば太平洋から流れ込む電流は減少するであろうから、結果として、堆積層を流れる電流は弱くなることが考えられる。もう一つは地下の良導層との電磁結合で電流が弱くなるというメカニズムである。この場合、地下の電気伝導度が増加すればよいことになる。

第4図は2次元モデルを示す。堆積層と堆積層下の良導層を除いては、力武のCAモデルを現在の地域にあてはめたモデルである。柿岡付近の地磁気・地電流は海と堆積層の影響に大きく支配され、この全体的な構造にはあまり依存しない。堆積層下の良導層はこの付近の微小地震多発帯と一致するようになってある。その理由については後で議論する。柳原によれば、この地域下の深さ30Km~100Km付近に0.1mho/mの良導層があると報告されているが、図に示した良導層は0.1mho/m層に対応すると考えられるべきものである。堆積層の電気伝導度は電



第4図

流が太平洋から流れ込む影響を考慮して少し大き目にとり、 0.5 mho/m とした。このモデルに対する周期30分の計算結果を第5、6図に実線で示した



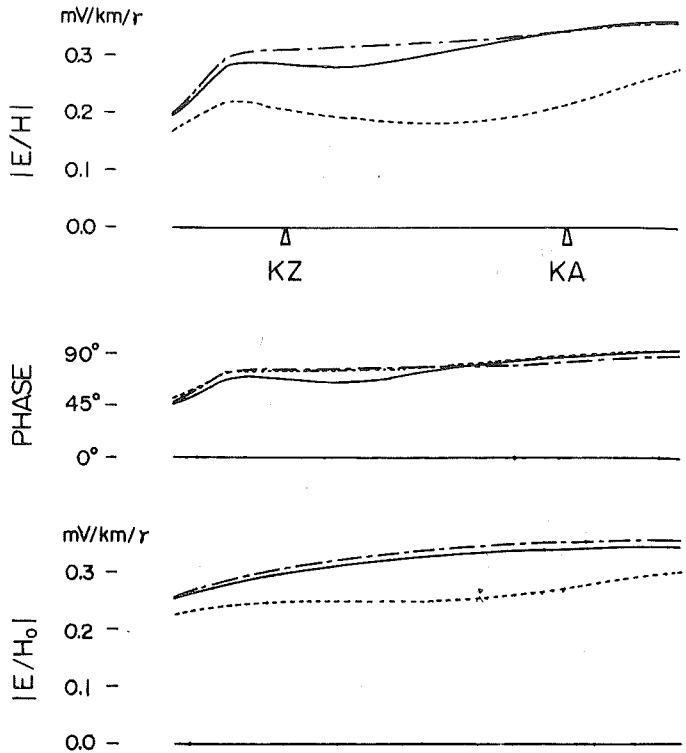
第 5 図

このモデルによると、柿岡ではAの値は 0.2 にもならないことがわかる。実測値は約 0.6 であるので 0.4 程度が半島効果によるものと考えられる。鹿野山のAは 0.3 程度で実測値の 0.4 より少し小さいが、ほぼ説明つくように思える。鹿野山のAは位相の遅れで特徴づけられるが、計算結果もわずかながら位相の遅れを示し、満足しうる結果であるといえよう。また、 E/H も堆積層域で約 $0.3 \text{ mV/km/}\gamma$ という値をとり、実測値に近いことがわかる。以上のことから第4図のモデルの妥当性が確認できると思われる。

次に電気伝導度変化のモデルであるが、まず堆積層の電気伝導度が 0.5 mho/m から 0.1 mho/m に減少したと考えよう。この場合の結果は一点鎖線で示されているが、ほとんどの場合、実線に近いことがわかる。柿岡における $\Delta Z/\Delta H$ 異常変化を説明するための重要な要素となる E/H にはほとんど変化がみられない。このモデルは2次元であるが、実際の3次元の場合には少し異なった結果がでることは十分考えられるので、上記の結果だけから、堆積層の電気伝導度の減少モデルを却下するわけにはいかない。3次元では電流の擾乱という現象が重要になってくるが、このことを考慮に入れると、堆積層の電気伝導度が減少すれば太平洋から流れ込む電流が減

少することは十分ありうる
ことであろう

上部マントルの電気伝導
度が増加するとどうなるで
あろうか。第5.6図の点線
は電気伝導度が 0.1 mho/m
から 1 mho/m に増加しときの
計算結果である。 A_u につ
いてみれば柿岡においては
増加がみられるが、 A_v が
減少するので $|A|$ として
はわずかの増加にしかなら
ない。一方、 E/H は著し
く減少することが第6図か
らわかる。第5図にみられ
るように H もかなり増加す
ることが期待されるので、
誘導電流自体の増減を調べ

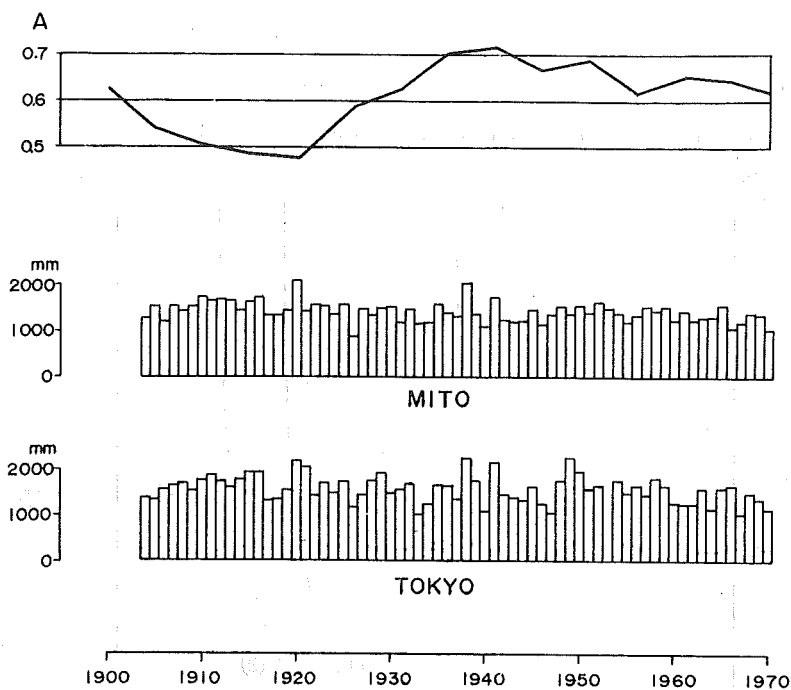


第 6 図

るためには E/H_0 の方が適している。それによると、堆積層全域において、 $20 \sim 30\%$ の減少がみられる。柿岡で観測される $\Delta Z / \Delta H$ のうち約 0.4 は半島効果で説明されるべきであることを第2節で述べてきた。従って、電流が $20 \sim 30\%$ 弱くなれば、 $\Delta Z / \Delta H$ で約 0.1 程度の減少が期待できることになる。これは観測された約 0.2 の減少の半分にしかならないが、一応 $\Delta Z / \Delta H$ の減少の説明にはなり得るであろう。

4. $\Delta Z / \Delta H$ 異常変化を説明しうるモデルの地球物理的解釈

まず堆積層自体の電気伝導度の減少について考察してみる。堆積岩は一般に空隙率が大きく、その電気伝導度は主として空隙に存在する水の電気伝導度に支配される。従って堆積岩の電気伝導度変化を起す原因としては空隙率の変化、空隙に含まれる水の量の変化、及び空隙内の水の電気伝導度変化が考えられる。これらの要因のうちで数 10% の変化を起し得るものとしては、空隙に含まれる水の量の変化が考え易い。降雨量は堆積層内の水の量の増減と関係あるかもしれないので、柿岡付近の降雨量の変化として東京及び水戸の年降雨量変化を調べてみた結果が第7図



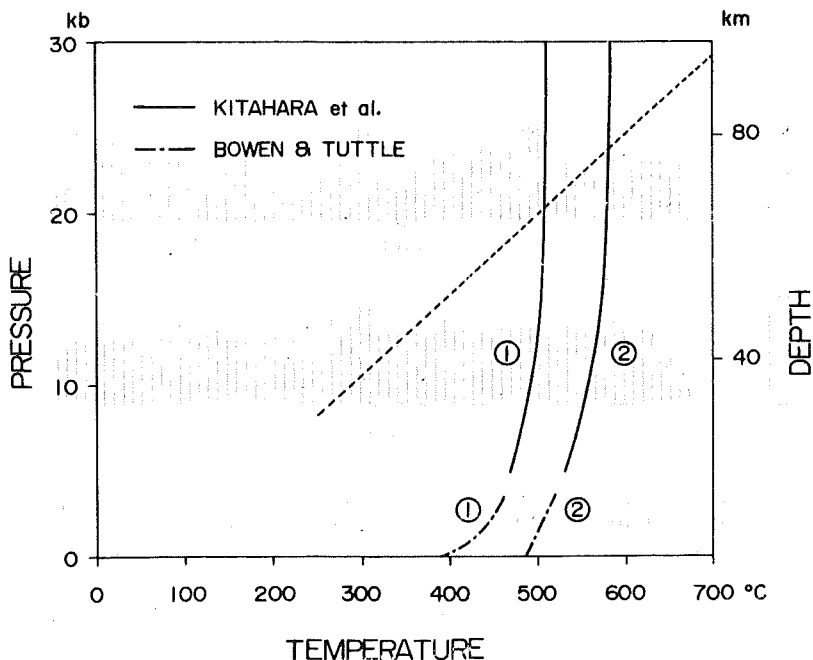
第 7 図

である。東京、水戸いずれの降雨量も柿岡で観測された A ($\Delta Z / \Delta H$) の変化と相関がよいとはいえない。従って目下のところ堆積層の数 10% に及ぶ電気伝導度変化は否定的であるが、何か他の原因で変化した可能性は否定しきれない。

次に上部マントルの良導層の電気伝導度変化であるが、まず、 0.1 mho/m もの高い電気伝導度をもつ異常層自体の解釈が不可欠であろう。前にも述べたように、この層は微小地震多発帯と一致していると考えてよい。一般に、岩石は高い封圧下では脆性を失い、延性的な性質を持つようになる。しかし高い封圧下でも岩石内に存在する水の圧力が高ければ有効封圧は小さくなって、脆性的振舞をするようになる。¹⁴⁾ 水の存在によって電気伝導度も高くなることが期待されるので、水の存在は地震多発帯と良導層との一致をまことにうまく説明することになる。それでは一体そのような水は何から供給されるのであろうか。茨城県南西部、及び千葉県北部の地震多発帯は $40 \sim 80 \text{ km}$ の深さに限られており、この地震帯は沈み込んでいる太平洋プレートの上面近くに位置することが考えられる。¹⁵⁾ 一方、Anderson et al.¹⁶⁾ によれば、プレート上部のペリドタイトはサーペンティン化しており、プレートが沈み込み、ある $P-T$ 条件を満足すると、それが脱水反応を起して水を放出することになる。第 8 図の①、②はそれぞれ次の化学反応に対する $P-T$ 条件を示している。

① Serpentine + Brucite = Forsterite + Water

② Serpentine = Forsterite + Talc + Water



第 8 図

一方、点線は関東平野における温度分布を示している。¹⁸⁾ このことから、深さ40~80 Kmの間でサーペントインの脱水反応が起る条件は満たされていることになる。従って微小地震が多発し、しかも電気伝導度が高い層の原因としてサーペントインの脱水反応によって放出された水の存在が考えられることになる。高温、高圧下での水の状態は臨界点を越すことになるが、電気伝導的にみれば高温時の水の状態と大きく変わらない。¹⁹⁾

ここで問題となるのは、そのような構造において地震に伴って、またそれに前駆して電気伝導度が1桁近くも増加するかどうかということである。これについては二つのメカニズムが考えられるであろう。一つはひずみ変化に対応する電気伝導度変化であろう。山崎は、ひずみと電気伝導度の変化を関係づける量として、岩石の増幅要素というもの考えた。²⁰⁾ 地震の発生は 10^{-4} 程度のひずみ量と関連が深い、 10^{-4} のひずみで電気伝導度が数10%変化するためには、1万倍以上もの増幅度を持たなければならないことになる。これは少し大きすぎるかもしれないが、脱水反応で放出された水の電気伝導度が高温のもとで高くなっていることを考えると不可能であるともいえない。もう一つの可能性としては地震前のディラタンシーが考えられよう。ディラタンシーは一般に高い封圧下では起らないが、水の存在によって有効封圧が低くな

ると不可能ではないかもしれない。いずれにしても、 0.1 mho/m から 1 mho/m への増加は考えにくいことであるが、まったく不可能であるといいきれないかもしれない。

5. ま と め

0.2にも達する $\Delta Z/\Delta H$ 異常変化はとても常識では考えられない程大きな変化である。最も考え易いことは、関東地震との対応は偶然のことで、何か他の原因で $\Delta Z/\Delta H$ が見かけ上変化したということであろう。しかし、もし本当に関東地震の前兆現象としての変化であれば事は重大である。0.2という変化は、はっきりとしかも容易に検出できる量であり、柿岡において $\Delta Z/\Delta H$ をモニターすることによって、次の関東地震を予知できることになるからである。本稿の目的は $\Delta Z/\Delta H$ 異常変化をある程度現実性のあるモデルで説明することにあり、何とか0.1程度の変化は説明可能であることを示してきた。それでも数多くの仮定をしており、それらの妥当性について具体的な検討が加えられなければならないことはいうまでもない。

第5, 6図に示されているように、上部マントルの電気伝導度が変化すればH及びE/Hにも大きな変化が期待できる。本稿では $\Delta Z/\Delta H$ 異常変化の基本的原因を、堆積層内を流れる誘導電流の半島効果的擾乱に求めるという立場をとってきた。この推定の妥当性は、マグネットテルリク法に基づいたE/H変化を調べることによって、具体的に試されることになるであろう。

参 考 文 献

- 1) O. M. Barsukov, Variations of electric resistivity of mountain rocks connected with tectonic causes, *Tectonophys.*, 14, 273-277, 1972.
- 2) A. Mazzella and H. F. Morrison, Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, *Science*, 185, 855-857, 1974.
- 3) K. Yanagihara, Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the central part of Japan, *Memo. Kakioka Mag. Obs.*, 15, 1-11, 1972.

- 4) T. Rikitake, Crustal dilatancy and geomagnetic variations of short period, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 145-156, 1976.
- 5) K. Mogi, Some features of recent seismic activity in and near Japan (2) : activity before and after great earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 47, 395-417, 1969.
- 6) K. Yanagihara and T. Nagano, Time change of transfer function in the central Japan anomaly of conductivity with special reference to earthquake occurrences, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 157-163, 1976.
- 7) 柳原一夫, 横内恒雄, 地電流の地方異常と大地比抵抗, 地磁気観測所要報, 12, 105-113, 1965.
- 8) 久保木忠夫, 関東地方の地磁気変化ベクトルの異常(関東異常), *Conductivity Anomaly Symposium講演集*, 33-42, 1968.
- 9) 柳原一夫, 関東地方における浅層電流が磁場変化分布におよぼす影響, 地磁気観測所要報, 14, 79-87, 1971.
- 10) 久保木忠夫, 仲谷清, 小池捷春, 中島新三郎, 原田晴男, 地磁気変化ベクトルの関東異常について, 日本におけるCA研究, 33-35, 1973.
- 11) 10)と同じ著者, 関東地方の地電流について, 日本におけるCA研究, 36-39, 1973.
- 12) M. Ando, A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 49, 19-32, 1971.
- 13) Y. Honkura, Electrical conductivity anomalies beneath the Japan arc, *J. Geomag. Geoelectr.*, 26, 147-171, 1974.
- 14) C. B. Raleigh and M. S. Paterson, Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, 70, 3965-3985, 1965.
- 15) 津村建四朗, 関東地方の微小地震活動, 関東大地震50周年論文集, 地震研究所, 67-87, 1973.
- 16) R. N. Anderson, S. Uyeda and A. Miyashiro, Geophysical and geochemical constraints at converging plate boundaries -part I: dehydration in the downgoing slab,

- Geophys. J. R. astr. Soc., 44, 333-357, 1976.
- 17) S. Kitahara, S. Takenouchi and G. C. Kennedy, Phase relations in the system $MgO-SiO_2-H_2O$ at high temperatures and pressures, *Am. J. Sci.*, 264, 223-233, 1966.
- 18) 渡部 暉彦, 私信
- 19) W.F. Brace, Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks, *Pure Appl. Geophys.*, 113, 207-217, 1975.
- 20) Y. Yamazaki; Electrical conductivity of strained rocks (the second paper) : further experiments on sedimentary rocks, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44, 1553-1570, 1966.