

2. 中国・近畿・四国における地 磁気永年変化異常について

京都大学教養部

住友則彦

1. はじめに

局地的な地磁気の永年変化異常は、主に火山活動に関連して発見されているが、また、地震発生に関連した異常変化の報告も少なくない。前者は、主として、火口附近のマグマの昇降に伴った温度変化による磁化の変化に起因するとされている。地震の場合は、地殻内応力の集中・解放に伴う磁化の変化 (Piezo magnetic effect) が有力と考えられている。近年、岩石の応力による磁化の変化の研究が進み、これを応用した地殻内応力変化に伴う磁場変化 (tectono magnetism) の研究が盛んになり、地震現象にとどまらず断層クリープに伴う変化や、ダムの水圧変化に伴う磁場変化などにも適用されている。

日本列島はいわゆる“変動帯”に属するので、地殻内応力場は複雑ではあるが、その時間的な変化もまた考えられる。これらの変化が地磁気現象として磁場の変化に現われるか否かは、興味深い問題である。このことを目的として、1971～1973年にかけて、中国・近畿・四国地方の1・2等磁気点(国土地理院埋設)約120カ所で全磁力測定を行なった。この結果と、国土地理院によって、1964～1967年に行なわれた磁気測量成果とを比較した。この結果、西南日本の造構造運動と関連があるように見える、極めて特徴的な永年変化異常分布が得られた。今までに、これを西南日本の応力場と結びつけ、Piezo-magnetic effect による異常変化と解釈した報告を行なった。⁽¹⁾ その後、多くの方々から御意見・御批判をいただいた。これらを参考にして、今一度、前論文と重複するところもあるが、観測結果に解釈を加えてみたい。

2. 資料の吟味

1) 国土地理院磁気測量成果

これは、1・2等に分れる。いずれも、柿岡の1960年に年度化成されている reduced value である。田島によれば、⁽²⁾ これら1・2等磁気測量の reduction 精度は次の様に見積られている。

1等磁気測量		2等磁気測量	
H	± 4 γ	± 7 ~ 8 γ	
Z	± 4 γ	± 7 ~ 8 γ	

全磁力に直すと、1等では5~6γ、2等では9~10γとなる。今回用いた資料の大部分は、2等によるものなので、とくに、これについて検討する。上に求められている値は、1日のうち、任意の1時間内に行なわれた測定の場合の精度で、1964年以降は日変化の小さい16^h~17^hを選んで測定されているからかなり改善されている。さらに、上記の値は全国的な平均値である。地域を限定すれば、平均値より良くなる場合もある。reduction error の大部分は、短周期変化や日変化形態の地域差(CAや緯度に関係する)によるもの、Dst 変化の緯度差によるものなどである。中国・近畿は幸い柿岡とほぼ同緯度にあるので地域差はかなり小さいと思われる。さらに、全磁力の場合は、伏角の差も効いてくるが、これも、ほぼ柿岡と大差はなく、局地的な伏角異常も少ない。事実、中国地方数カ所で行なった1カ月程度の予備観測によると、毎日の16^h - 17^hの1時間のhourly valueと柿岡のhourly valueとの差(2等磁気測量のC₁補正はこの方法を用いている)のばらつきは、表1に示す通り割合に小さかった。これから、中国・近畿地方に関する限り、田島のreduction精度の見積りの約3分の1、±3~4γ程度が期待できる。

表1 hourly value(16^h-17^h)を用いた全磁力差の標準偏差
(単位: γ)

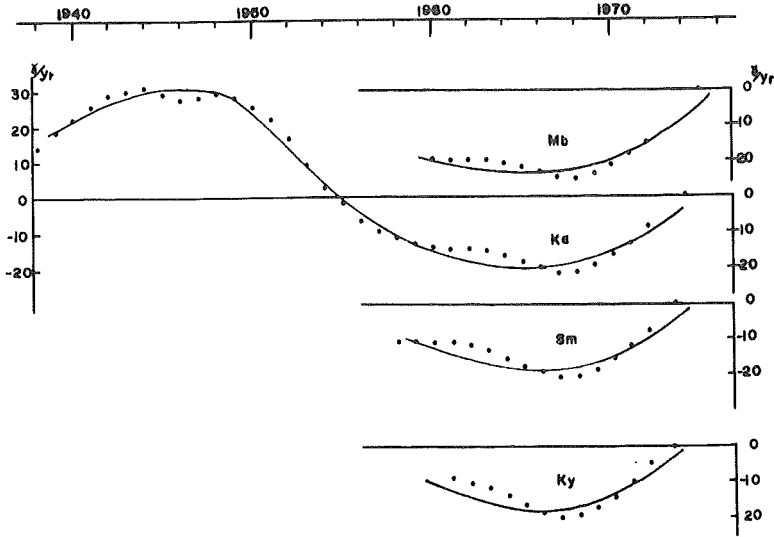
	鳥取	東城	松江	浜田	徳島	上宝	阿蘇
柿 岡	3.3	2.3	3.5	3.0	3.6	3.9	7.6
鳥 取		0.9	1.1	0.9	1.4	4.0	6.8

ロ) 今回測量の成果

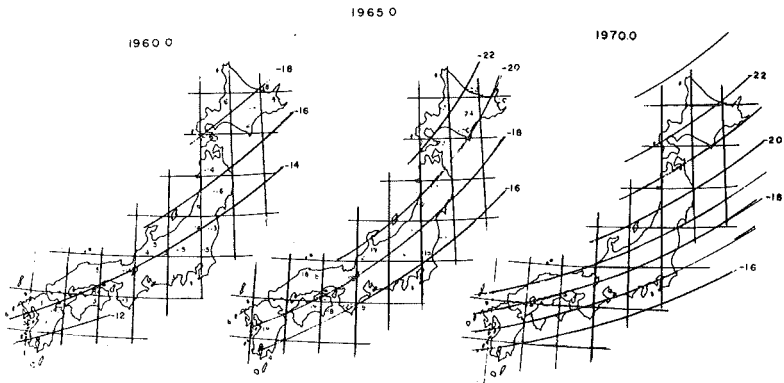
我々は、各磁気点で1分毎、20~30分間の測定を行なった。原則として、15^h~16^h以降に測定時間を選んだ。測定結果の平均値と鳥取における同時観測値の平均値から、まず各点と鳥取との差を求め、これに、鳥取と柿岡間の常時観測値から求めた月平均値差(精度±0.8γ)を加えて柿岡へ化成した(1960.0年へ化成)。この方法では、観測日のDst変化はほとんど除かれる。各点と鳥取との差は、表1から±1γ程度の精度で求められるので、結局、我々の観測の場合、柿岡へのreduction精度は±1.3γ程度と見積られる。

3. 地域的な永年変化分布について

日本の全磁力永年変化磁気図は年々変化している。これは、core - mantle 境界に帰因する長周期変動の他に、太陽活動の11年周期に関連する変動の緯度差による違いが加わっているからである。第1図は、女満別・柿岡・下里・鳥取・鹿屋の永年変化の一次微分(フィルターで短周期変化は落としてある)を示したものである。長周期変動に、11年程度が乗っていることがわかる。

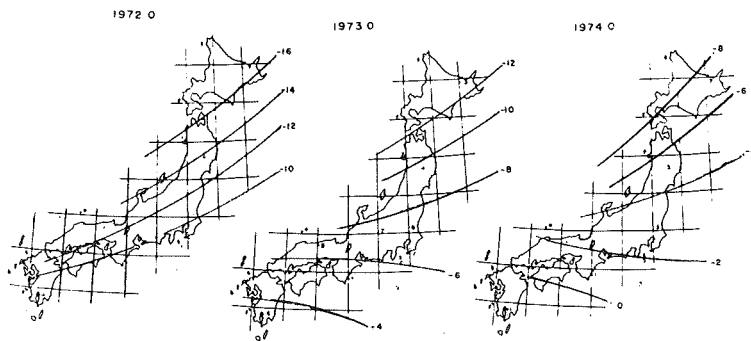


第1図 全磁力永年変化一次微分



第2図 1等磁気測量より求めた全磁力永年変化磁気図(単位: r/yr)

第2図は、国土地理院1等磁気測量の成果から、5カ年平均の年変化量の分布を、1960.0、1965.0、1970.0年の各epochについて示したものである。さらに、第8図は、地震予知研究に基づくプロトン磁力計観測11カ所の資料を用いて、1972.0、1978.0、1974.0年の各epochでの年変化量分布の推移を示したものである。これらの図から、永



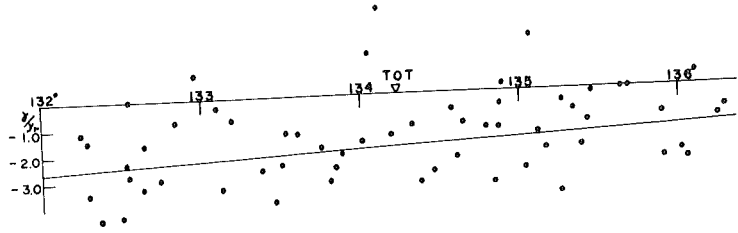
第3図 プロトン磁力計観測より求めた全磁力永年変化磁気図(単位： γ/yr)

年変化磁気図は、あるepochで求めても数年以上にわたって使えないことがわかる。ある地域の永年変化異常を求める場合は、各測点での見かけの永年変化量から直接にこの地域の平均の変化量を求めて、それを見かけの変化量から差し引く方法が良いと思う。

4. 永年変化異常の算出

2節に述べたごとく、2組の資料はいずれも1960.0年に化成されているので、両者の差を各磁気点について求め、これを測定間隔で除したものを見かけの永年変化量とした。これらはいずれも柵網に相対的な永年変化量である。ただし、5~7年間の総変化量が $\pm 30 \gamma$ 程度を越えるものは、人工的の擾乱もしくは測定上の誤差と考えて採用しなかった。これらの点を除けば、見かけの永年変化の信頼度は、2節に述べた2組の資料のreductionの精度から $\pm 0.6 \gamma/\text{yr}$ と求められる。ところで、中国・近畿地方全測点(69点)での見かけの永年変化量の平均値は $-1.7 \gamma/\text{yr}$ で標準偏差は $1.6 \gamma/\text{yr}$ 、また、四国地方(42点)については、平均値が $+0.1 \gamma/\text{yr}$ 、標準偏差は $1.3 \gamma/\text{yr}$ となった。それぞれの平均値が地域的平均値を表わしており、これらは第2図の1970.0年に見られる傾向とほぼ一致している。標準偏差には、それぞれの地域における永年変化量の緯度・経度に依存する程度・局地異常およびreductionの誤差などが含まれる。具体的に、局地的異常を求めるため次の方法をと

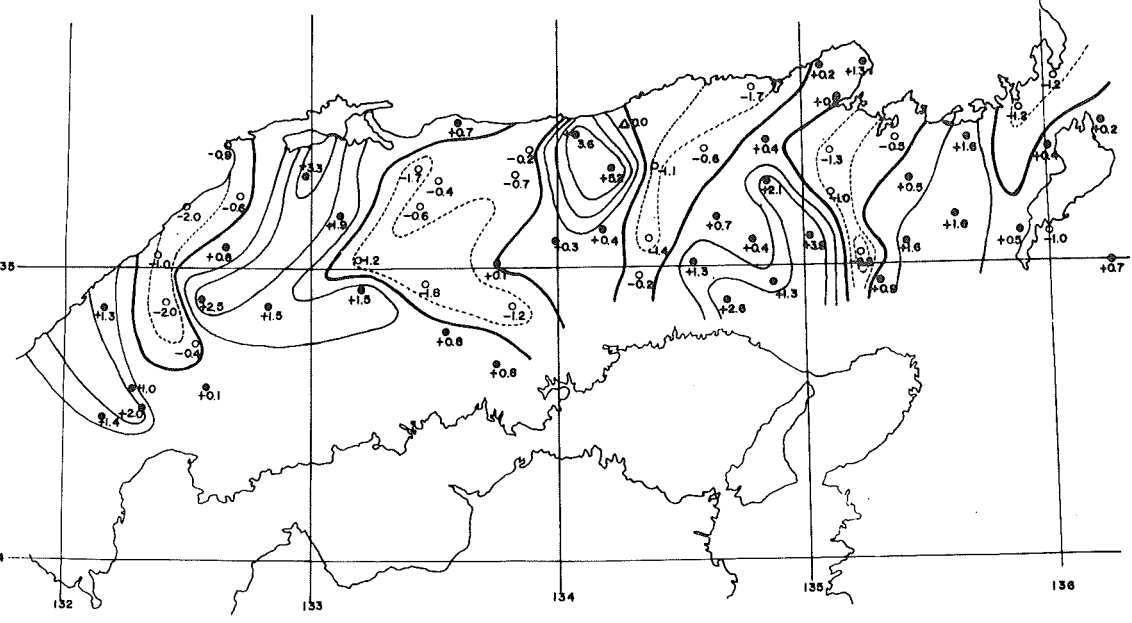
った。例を中国・近畿地方について示す。第4図は見かけの変化量を経度を横軸にしてプロットしたもので、これよりこの地方の永年変化量の trend を求め、見かけの変化量から差引き異常変化量を算出した。なお、第2図の傾向から緯度による変化は小さいとして無視した。



第4図 中国・近畿地方の全磁力永年変化量(柿岡に相対的)と緯度との関係

5. 中国・近畿地方における永年変化異常

以上の方法で求めた局地的な異常を第5図に示す。異常の分布は極めて特徴的である。



第5図 中国・近畿地方の全磁力永年変化異常分布

1. 磁場が見かけ上、年々増加する地域と、減少する地域があり、その大きさは、各 zone で平均は $\pm 1 \gamma / yr$ 程度である。

ロ. 増加域と減少域がほぼ南北走向で、東西方向に交互に並ぶ、その波長は、約 80 Km で、近畿地方では、やや短くなる。

これらの異常は何によるものであろうか。異常の波長から考えて、core-mantle 境界に原因を有するとは思えない。むしろ、地殻に原因を求める方が自然であろう。この場合、第 1 に考えられるのは、熱的なもの、つまり、キュリー等温線の時間的・空間的ゆらぎである。しかし、地殻の熱伝導率を考えると、異常変化の速度が余りにも早過ぎるし、等温線が空間的に 80 Km 程度の波長をもつとする根拠が見当たらない。この地域の第四紀火山として、三瓶山・大山・須賀ノ山などがあげられるが、いずれも、現在は活動的でない。次に考えられることは、地殻上部を南北に流れる地電流のつくる磁場である。もし、このような電流が山陰側から山陽側へ（この逆も可）向って、例えば谷沿いに集中して流れると仮定し、その電流密度が年々変化するとすれば、永年変化の異常分布は説明できるかも知れない。しかし、現在のところ、これを肯定する電流機構は考えにくい。また、第 6 図は、この地域の地質の概略図である。噴出



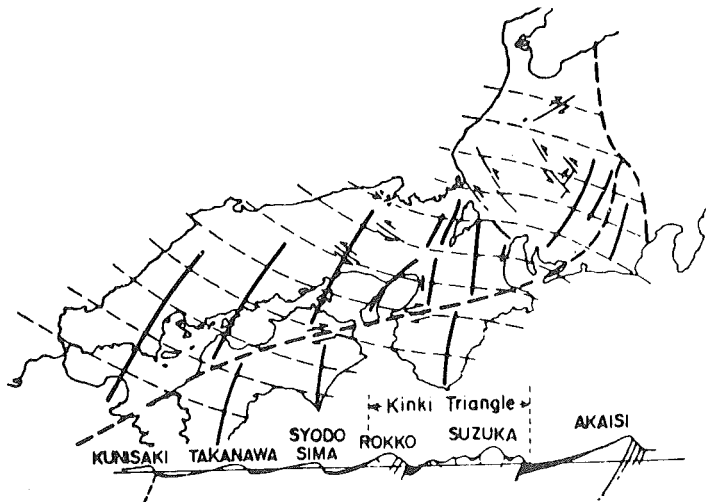
第 6 図 中国・近畿地方の地質図

岩や貫入岩で被われている地帯が多いが、第 5 図の異常分布と関連する地質構造は明瞭ではない。

最後に考えられるのは、地殻内応力変化による piezo magnetic effect の可能性である。以下の議論では、この考え方に基づいて有り得る仮設の一つを述べる。

西南日本の現在の平均的な地殻内応力場は、東西水平圧縮力下にあることは、地震学的にも、

測地的にも大方に認められている。この応力場が、現在のみならず恐らくは過去100万年以上にわたって存続してきたことも、ほぼ、確かであろう。その結果として、基盤褶曲や横づけ断層が形成されたものと考えられている。⁽³⁾ 第7図は、藤田によって明らかにされた、西南

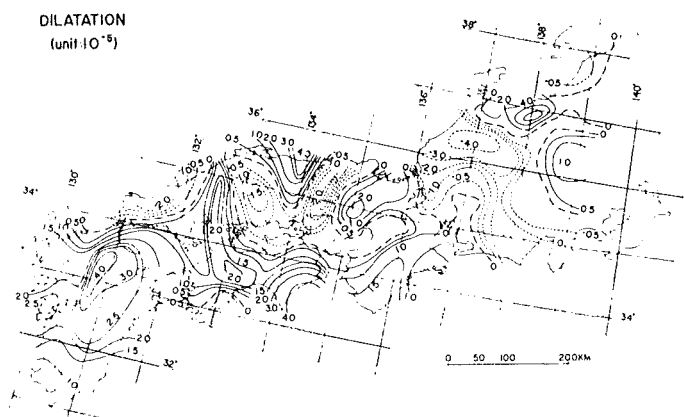


第7図 西南日本における褶曲背斜軸と主応力方向(藤田和夫による)

日本における褶曲の背斜軸および主応力軸の方向を示すものである。⁽⁴⁾ これらは、もともと新第三紀頃の西南日本で支配的であった東西走向の構造(中国山脈・瀬戸内海など)の上に、第四紀になって、東西造構力によって新しく重畳されたもので、これは六甲変動と名づけられている。⁽⁴⁾ 見野は、第四紀地形の分析から、南北走向のさらに小波長の褶曲構造が西南日本では卓越していることを明らかにしている(私信)。また、六甲変動に関連して、西南日本では、断層地塊運動も発達しており、山崎断層・三峠断層・集福寺断層などのセン断性の断層系が存在し、これらの断層に沿って微小地震活動が現在も見られる。⁽³⁾

さて、この様に西南日本は広域の東西圧縮場において、地震活動もそれに関連して起るとすれば、地殻内応力場の時間的変化が考えられる。とすれば、これに piezo magnetic effect の考え方を適用すれば、磁化の時間的変化、つまり磁場の局地的永年変化が生じてもおかしくはない。

第5図の永年変化異常分布を説明するモデルとして、ほぼ南北に軸をもつ褶曲構造を考える。この褶曲運動が現在も進行していると仮定すると、褶曲の背斜域では、相対的な東西方向張力場、向斜域では圧縮場をもつことになる。この結果、磁化の方向を現在の地球磁場の方向とすると、応力方向とほぼ直交するので、背斜域では磁場の減少、向斜域では増加が見られることになり、定性的には、観測事実を説明することができる。褶曲の進行を示す資料として、第8図があげられる。これは、笠原・杉村らによって、三角測量の資料から解析された、約60年



第8図 西南日本における Dilatation (笠原・杉村による)

間の dilatation を示すもので、⁽⁵⁾ dilatation が正の地域(隆起部)と負の地域(沈降部)が交互に東西方向に並んでいる。地磁気の永年変化異常の正負領域とは、必ずしも1対1の対応はつかないが、傾向は極めてよく似ている。

また、田島らは、水準測量の結果から、やはり、西南日本には南北方向に軸をもつ隆起帯・沈降帯が波長200Kmで存在することを見出し、⁽⁶⁾ 第四紀地殻変動としての褶曲運動の継続性を指摘している。

7. モデルの定量的な検討

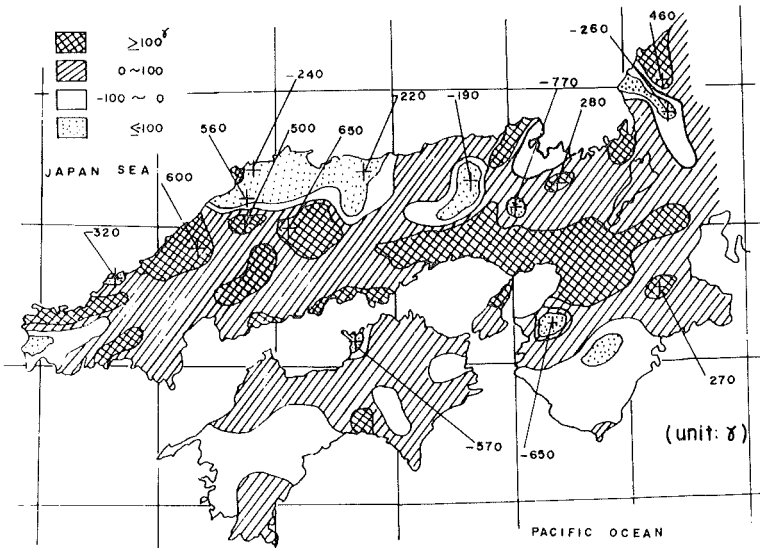
次に、前節で述べたモデルの定量的な検討、つまり、応力変化量の見積を行なう。応力変化と帯磁率や自然残留磁気との変化の関係は、永田によって次式にまとめられている。⁽⁷⁾

$$k = k_0 \left\{ 1 - \sigma \beta (1 + 3 \cos 2\theta) / 4 \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$J_R = J_R^0 \left\{ 1 - \sigma \gamma (1 + 3 \cos 2\theta) / 4 \right\}$$

ここで、 k_0 、 J_R^0 は応力がかからない時の帯磁率と自然残留磁気を表わす。 θ は磁化方向と応力方向とのなす角である。 β 、 γ は常数で、地殻の火成岩では実際により、それぞれ、 $(0.5 - 5.0) \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Kg}$ 、 $(0.3 - 1.2) \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Kg}$ と求められている。 σ は圧縮応力の時は正符号に、引張り応力の時は負符号にとられる。上式によれば、同じ σ に対しても、 k_0 や J_R^0 が大きいほど k や J_R の変化は大きく、従って磁場変化も大きくなる。ところで、西南日本の場合、東北日本にくらべると、一般に磁気異常は小さい。⁽⁸⁾ これは、Mes-

ozoic の貫入岩で被われている地帯が多く、また、強い残留磁気をもつ噴出岩も局在しているに過ぎないからであろう。2等磁気測量の成果をもとに西南日本の磁気異常の概略を求めると、第9図の様になった。これによれば、平均的な異常は±100γ程度である。磁気異常と永年変化異常との相関を調べたが、必ずしも明瞭な相関は無かった。そこで、中国・近畿地方



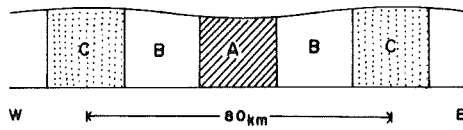
第9図 西南日本の磁気異常図

について、地殻上部20Km位までの一様磁化を仮定した金谷・石原らによれば、⁽⁹⁾ 山陰に見られる花崗岩質岩石の帯磁率はかなり大きく、 1.4×10^{-8} e. m. u./cc にもなると報告されている。また、この地域の航空磁気測量の解析から、井内は、⁽¹⁴⁾ 地下約12Kmに $J = 5 \times 10^{-8}$ e. m. u. の物質の存在を推定している。ここでは、地殻上部は、granodiorite などと占められているとし、一様磁化の大きさとして $k_0 = 5 \times 10^{-8}$ e. m. u./cc を仮定した。残留磁気は考慮していない。一様磁化の場合、当然のことながら地表では磁気異常は観測されない。今、この地殻上部に、東西圧縮応力が作用し、前節で述べたごとく、褶曲にともなう地殻の bending が生じているとすれば地殻内部に応力の不均一場が生じる。この応力場は複雑であるが、最も単純化すると第10図のようなモデルが考えられる。A zone は圧縮場で平均的に $\sigma_0 + d\sigma$ 、B zone は σ_0 、C zone は引張場で $\sigma_0 - d\sigma$ とした。 σ_0 は全体にかかっている圧縮力である。構造は2次元で南北方向には無限に続いているものとする。今A zone について考えると、ここでは東西方向圧縮 $d\sigma$ のため、南北および垂直方向の磁化が、(1)式に従って変化する。この場合、磁化の水平成分の変

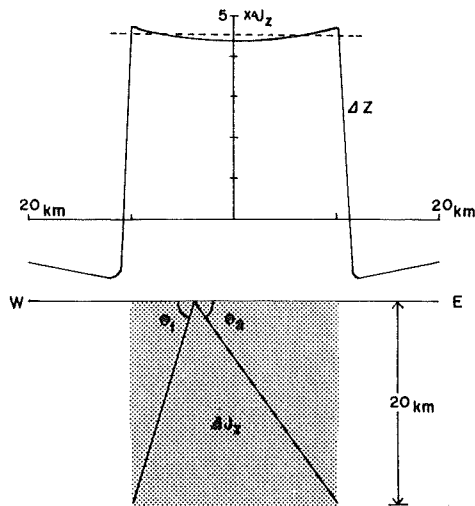
化は、磁場の増減には関係しない。磁化の垂直成分 ΔJ_z のみが、磁場の垂直成分 ΔZ および東西成分 ΔY の変化をもたらす。ところで、偏角が $6^\circ \sim 7^\circ$ と小さいので、 ΔY の全磁力への寄与は少ないと見なし、ここでは ΔZ のみによる全磁力変化を考える。 ΔZ は、第 11 図に示すような構造の場合、次式で表わせる。

$$\Delta Z = 2 \Delta J_z (\theta_1 + \theta_2) \dots\dots\dots (2)$$

また、伏角を I とすれば、全磁力変化 ΔF は、



第 10 図 褶曲のモデル



第 11 図 磁化変化に伴う垂直磁場の変化 (2次元構造モデル)

$$\Delta F = 2 \Delta J z (\theta_1 + \theta_2) \sin I \dots\dots\dots (3)$$

である。一方、 $\Delta J z$ は(1)式を用い、 $\theta = 90^\circ$ とすれば、

$$\begin{aligned} \Delta J z &= \Delta k F \sin I \\ &= k_0 (F \sin I) \beta \Delta \sigma / 2 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。第11図より、 ΔZ の平均値として、 $\Delta Z = 4.6 \Delta J z$ を用い、(3)、(4)より

$$\Delta F = 4.6 k_0 F \sin I \beta \Delta \sigma / 2 \dots\dots\dots (5)$$

を得る。ここで、 ΔF に観測値として、 $1 \gamma / yr$ を代入して、(5)式より $\Delta \sigma$ を求めると、

$$\Delta \sigma = (2.3 k_0 F \sin^2 I \beta)^{-1}$$

が得られる。これに、 $k_0 = 5 \times 10^{-3}$ e. m. u., $F \sin I = 36000 \gamma$, $I = 50^\circ$, $\beta = 5 \times 10^{-4}$ cm²/Kg を代入して、

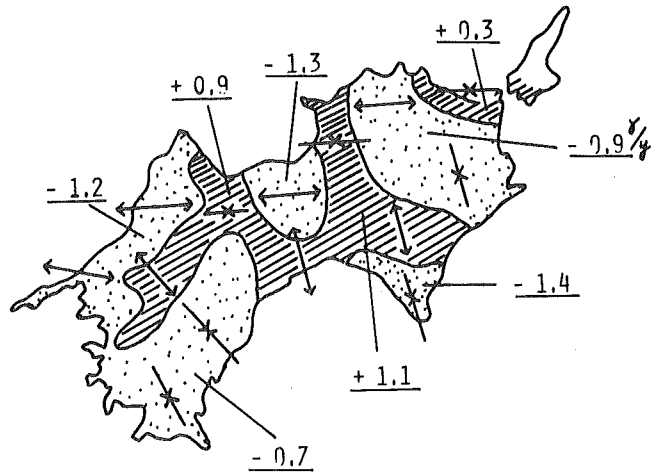
$$\Delta \sigma \doteq 6 \text{ Kg/cm}^2 / \text{yr} (= \text{bar/yr})$$

を得る。 β は静水圧下で増大することを考慮し、実験で得られている最大値を採用した。なお、上の計算では、地殻の横圧だけを考えたが、横圧による変形が直角方向に張力を生じていると見なせる場合は、磁化への応力効果はさらに増大し、観測値を満足させる応力変化は上記の値の半分位、 3 bar/yr にはなると考えられる。

さて、上に得られた応力変化は、測地測量などの資料から推定されるものより、1桁ほど大きい。この割合で、応力変化が50年も続くと、巨大地震の stress-drop $100 \sim 200 \text{ bar}$ に容易に近づくことになる。この難点は今のところ解決がつかない。ところで、F. D. Staceyは、オーストラリアのダムで、水位の変動 120 m に対して、全磁力の変化約 8γ を検出している。⁽¹⁰⁾ また、田中豊は、六甲での地殻変動の永年歪量から応力変化 $1 \sim 2 \text{ bar/yr}$ を試算している。⁽¹¹⁾ これらのことを考慮すると、上に求めた値は、とくに不自然ではないように思われる。しかし、この値を得るについては様々な仮定を用いているので、今後更に詳しい検討が必要であろう。

8. 四国における永年変化異常

近畿・中国地方とほぼ同じ方法で観測、解析を行なった。第12図にその結果を示す。但し、



第12図 四国地方の全磁力永年変化異常と応力方向

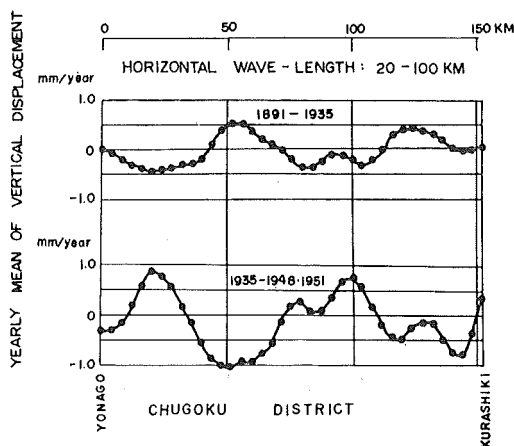
2等磁気測量の同地方の reduction の精度および今回の測定 of reduction の精度 (高知県土佐市にモニター点を設けた) は、近畿・中国にくらべると若干劣ると思われる。それにも拘らず、4節で述べたごとく、四国全域での平均値は、第2図から推定される同地方の平均値は永年変化量とほぼ一致しているので、第12図には、何らかの意味ある情報が含まれていると思われる。中国・近畿地方の様にコンターが描けるほどには明瞭ではないが、やはり全磁力増加域と減少域の区別は出来た。図中の数値は、各 zone 毎の異常変化量の平均値である。矢印は、異常のパターンから応力方向を推定したものである。この図から見る限り、四国南部では南北圧縮、北部では東西圧縮場が卓越しているようにも見える。これは、地震の発震機構から推定される応力場と矛盾しない。

また、四国地方には、磁気異常はほとんど見られない。したがって、第12図の異常を説明するためには、やはり、地殻の一樣磁化を考えざるを得ない。航空磁気測量の四国沖から内陸へのコースに沿った全磁力のプロフィールを見ると、海陸の境界では、ほとんど磁気異常が見出されないことなどから、同地方の地殻上部は、あるいは、海底地殻の帯磁率とそれ程変わらないのではないかと考えられる。この点については、今後詳しく検討したい。

9. おわりに

前節までの議論では、観測された永年変化異常を piezo magnetic effect で説明しうる可能性について論じてきた。もし、この論をすすめる場合には、今一つ克服されねば

ならない難問が残っている。それは、仮に、今までの考え方が正しいとした時、かかる応力場が長期間、例えば、100万年間続いて来たとする、これによってもたらされる磁気異常は極めて大きなものになり、観測事実とは著しく異なる。この矛盾を避けるには、応力の蓄積は決して一方的ではなく、適当な周期で消長を繰り返している必要がある。また、これに伴って磁場も増減を繰り返していることになる。つまり、第四紀の地殻変動は、短期間には弾性的に、長期間には塑性的に進行していると考えられ、弾性的に変形を受けた部分は、地震等のエネルギー（断層の生成・スリップも含む）によって周期的に解放される。塑性的変形は褶曲運動につながるのではなからうか。別な言い方をすれば、塑性的に変形を受けた岩帯が、短期的には弾性的挙動をすると考えるのである。このような地殻の挙動を示す例として、第13図があげられる。これは、中国地方で地殻の垂直変動が1891-1935年の期間と1935-1948, 1951年の期間で反転していることが水準測量で見出されたものである。⁽¹²⁾ また、この期間内に、北丹後地震（1927年、 $M=7.5$ ）や鳥取地震（1948年、 $M=7.4$ ）が発生していることも興味深いことである。地殻変動の連続観測から、地殻の永年変化の傾向が地震活動に伴って変化



第13図 垂直地殻変動のモードの転換例（宮村・溝上による）

することは、田中らによって度々報告されている。⁽¹³⁾ このことは、地殻内に地震発生に関連した広域にわたる応力の消長があることを示している。もし、piezo magnetic effectによる磁化の変化が、地殻上部20 Km程度の深さにまで及んでいるのなら、これに関連した磁場の永年変化が観測可能ではなからうか。とくに、震源近傍で、垂直磁化に変化をもたらすような応力集中がある場合は、充分観測にかかる磁場変化を期待できるのではなからうか。

参 考 文 献

- (1) 住友則彦：西南日本の地殻内応力変化による地磁気永年変化異常，九十九地学，第9号，1974
- (2) TAZIMA, M: Accuracy of recent magnetic survey and a locally anomalous behavior of the geomagnetic secular variation in Japan, Bull. Geogr. Surv. Inst., 13, 1968
- (3) 藤田和夫・岸本兆方：近畿のネオテクトニクスと地震活動，科学，42，1972
- (4) HUZITA, K: Tectonic development of Southwest Japan in the Quaternary Period, Jour. Geosci. Osaka City Univ., 12, 1969
- (5) KASAHARA, K. and A. SUGIMURA: Spatial distribution of horizontal secular strain in Japan, 測地学会誌，第10巻，第3-4号，1964
- (6) 田島 稔・藤田尚美・佐藤 裕：日本における最近の地殻変動の様相，日本列島下の熱的構造シムポジウム講演集，1970
- (7) NAGATA, T.: Application of tectonomagnetism to earthquake phenomena, Tectonophysics, 14, 1972
- (8) HARADA, Y: Geomagnetic survey and the magnetic anomaly distribution in Japan, Bull. Geogr. Surv. Inst., 11, 1964
- (9) 金谷 弘・石原舜三：日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化，岩石鉱物鉱床学会誌，68，1978
- (10) STACEY, F. D. and P. M. DAVIS: Geomagnetic anomalies caused by a man-made lake, Nature, 240, 1972
- (11) 田中 豊・藤田和夫：断層の診断一六甲大月断層の変位連続観測一，科学，43，1978
- (12) MIYAMURA, S. and M. MIZOUE: Secular vertical movements of the Earth's crust in Japan, 測地学会誌，第10巻，第3-4号，1964
- (13) 田中 豊・小泉 誠・加藤正明：地震活動に関連した地殻変動(5A)一近畿地方北西部の地震活動と生野で観測された地殻変動一，京都大学防災研究所年報，13，1970
- (14) 井内 登：山陰地方航空磁気測量結果について，測地学会誌，第17巻，第3号，1971