

伊豆半島東部地域の全磁力観測 (1976 - 2000 年) — 四半世紀を振り返る —

笹井洋一 (1)・大志万直人 (2)・本蔵義守 (3)・
石川良宣 (1)・小山茂 (1)・上嶋誠 (1)

(1) 東京大学・地震研究所 (2) 京都大学・防災研究所
(3) 東京工業大学・理学部

Tectonomagnetic Observations in the Eastern Part of Izu Peninsula (1976-2000): Looking Back upon the Past Quarter Century

SASAI Y. (1), N. OSHIMAN (2), Y. HONKURA (3),

Y. ISHIKAWA (1), S. KOYAMA (1) and M. UYESHIMA (1)

(1) ERI, Univ. Tokyo, (2) DPRI, Kyoto Univ., (3) Fac. Sci., TIT

1 はじめに

2001 年 CA 研究会は伊東市富戸で行われて、伊豆半島で 1974 年以来続いている地殻活動を対象とした電磁気現象が主要なテーマのひとつとなった。笹井・他は「伊豆半島東部地域の全磁力観測：1976-2000 年」と題して、発表を行った。しかし内容に最近の観測成果 (大志万・他参照) を盛り込むことはせず、また例えば 25 年間を通して見た全磁力変化を紹介すること等もできなかった。後者の作業は現在進行中であるが、別途発表することにする。ここでは四半世紀に及ぶ観測の足取りを、地震研グループの観測を中心にまとめてみたい (文中敬称略)。1989 年手石海丘噴火以降は大志万直人 (京大防災研)、本蔵義守 (東工大)、田中良和 (京大理) の皆さんと共同観測を行っている。本稿でもこの時期の観測に触れるが、御石ヶ沢を中心とする異常変化は現在進行中であり、近い将来に大志万等によって総括されると期待する。

それら地学的事件の発生機構を解明し、活動の監視や予測に役立てる、という研究分野を、「地殻活動電磁気学」(Tectono-ElectroMagnetics) と呼ぶ。この呼称は地磁気観測を手段とすることを想定して、Nagata (1969) が Tectonomagnetism という分野名を提唱したものを、地磁気・比抵抗・自然電位・電磁放射など様々な電磁気現象を観測手段とするものへと拡張した呼び名である。日本では地球電磁気学会 (現：地球電磁気地球惑星圏学会 SGEPPS) のプログラム分野名として、1980 年代中頃に提案されて (提案者は住友則彦と笹井) 定着した。国際的には 1988 年バンクーバー IUGG で、IAGA・IASPEI の共通セッションとして Seismo-ElectroMagnetics (Convener: Johnston & Gokhberg) という名称が使われたのが最初と思われる。伊豆半島における 25 年間の電磁気観測は、地殻活動電磁気学を観測と理論の両面から確立しようとする道程であった。

伊豆半島では 1930 年に伊東群発地震と 11 月 26 日北伊豆地震 M7.3 という大事件が起こり、

1935年まで半島中部あたりで被害地震が発生していたが、その後全く地震活動が止んでいた。ちなみに北伊豆地震に際しては、箱根で「夜中なのに避難に不自由しない位明るい」発光現象が発生した。伊東市付近では群発地震に関係して、30cmに達する異常隆起が検出されている。

40年間におよぶ伊豆半島の静穏期は、1974年伊豆半島沖地震M6.9によって破られた。伊豆半島の地殻活動を概観するには、茂木(1982)、茂木(1990)、岡田・石井(2000)などがある。1974年以來の主要な出来事を挙げて見る。

- (1) 伊豆半島南東部の被害地震発生期(1974 - 1978年)
- (2) 第一次冷川隆起(1975 - 1982年)、富戸隆起(1978 - 1989年)
- (3) 川奈崎沖群発地震から手石海丘噴火(1978 - 1989年)
- (4) 第二次冷川隆起(1993年)と伊東沖群発地震(1993 - 1998年)

地震研究所では1976年3月から伊豆半島の全磁力観測に乗り出した。この年は東海地震=駿河湾発生説(石橋, 1976b)が提案された年であり、本蔵・小山(地震研)と田中秀文(東工大)によって西伊豆の磁気測量も開始された。大志万が東工科大学院生として伊豆のTectonomagnetismをメイン・テーマに研究を始め(1978年)、本蔵が東工大に移り(1980年)、地震研と東工大理学部が共同して観測する体制が整った。

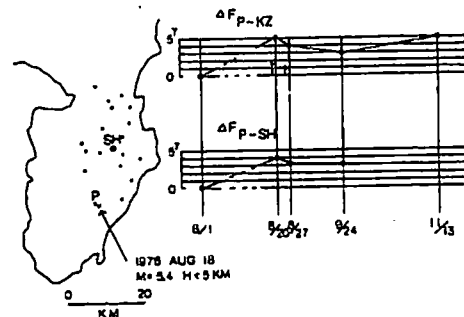
2 初心者の幸運：最初の1年(1976年)

我々は1976年3月から天城湯ヶ島町月ヶ瀬という所で、地電位とプロトン磁力計のテスト観測を行った。ここは北伊豆地震を起こした丹那断層を始めとする北伊豆断層系の南方延長にあたる。しかし同年3月に冷川峠を中心に直径20km以上の地域が、中心部で最大15cmに及ぶ隆起をしていることが判明した。そこでより

隆起域の中心に近い中伊豆町菅引にプロトン磁力計を移設し、全磁力の繰り返し測量を行うことにした。

月ヶ瀬の観測から東伊豆地域のうちで、伊豆箱根鉄道修善寺線—東海道線—伊東線—伊豆急行下田線の直流電車路線に囲まれた地域は、深夜電車が止まるまで数—10nT以上の電車ノイズがあることが分かった。そこで電車ノイズが懸念される場所では、深夜に30分の測定を行った。昼間は磁気点探し、夕食後仮眠して22h頃から出かけて明け方に帰る、というかなりハードな観測であった。

1976年8月18日河津地震M5.4が発生した。この地震の震源のほぼ真上にあった磁気点を再測して、5nT位の全磁力増加を見出した(第1図)。松代地震以来10年ぶりの、地震に伴う地磁気変化例である。この場所に磁気点を置いたのは、この付近に微小地震の群発があったからである。ただしM5.4の地震との因果関係は分からない。



第1図：河津地震M5.4に伴う全磁力変化。基準点は鹿野山(KZ)(上図)と菅引(SH)(下図)。

1976年3月に冷川峠の異常隆起が見出されて、8-9月には東伊豆地域全体の水準測量が行われた。その結果、冷川峠の隆起は停滞しているものの隆起域は北西に拡大していることと、それに伴う重力変化も明らかになった(萩原, 1977)。1976年末に繰り返し磁気の再測を行ったところ、第2図のような結果を得た。隆起の西方拡大域で、北に負、南に正という双極子型の異常変化が発見された。また菅引における1年間の全磁力観測結果を鹿野山(国土地理院)と比較すると、菅引が5.2nT/yrという異常な増加をしていることが明らかになった。こ

ル解析手法はどうであったろうか？当時すでに DAVIS (1976) による茂木モデル, JOHNSTON (1978) による長方形の垂直な横ずれ断層に伴うピエゾ磁気変化が計算されていた。我々は彼らの仕事をフォローすることから始めた。これらのモデリングは帯磁地殻を小さなブロックに区切った数値的体積積分に依っている。ブロックサイズを小さくすると、3次元モデルの場合非常に時間がかかる。実際に笹井は茂木モデルの計算をサイズを変えてフォローしていて、1点の磁場を計算するのに30分以上掛ってしまった経験を持つ。当時の大型計算機は、今から10年前のPC9801程度の性能しか無かった。

そんな時に萩原 (1977) の茂木モデルに伴う重力変化の解析解が登場した。彼は力源膨張に伴う密度変化が作る重力場を、ハンケル変換を用いて鮮やかに求めてみせたのである。「これは使える」というのが直感であったが、問題は応力とそれに伴って生じるピエゾ磁化の関係式にあった。STACEY *et al.* (1965) の与えた式は応力の主軸方向と主応力を計算しなくてはならず、両者の関係は複雑を極めていた。SASAI (1979) は軸対称な応力場である茂木モデルについて応力成分と磁化の線形な関係式を導いて、ピエゾ磁気変化の解析解を得た。しかしこの関係式は一般の応力状態には使えない。最終的に $\Delta J = \beta T' J$ (β は磁気応力係数, T' は偏差応力テンソル, J は磁化ベクトル) という簡単な関係式が見つかって、食い違いの弾性論を用いた様々なモデルも扱えるようになった。食い違いモデルのグリーン関数が定式化されて、垂直な長方形の断層の横ずれ、開口運動に伴うピエゾ磁気変化の解析解が得られた (SASAI, 1980)。

ところが物事はそうハッピーには終わらなかった。OHSHIMAN (1980) は傾いた長方形断層の縦ずれ、横ずれ運動に伴うピエゾ磁気変化を、数値的体積積分法で計算するコードを開発した。伊豆大島近海地震の断層はほぼ垂直な横ずれなので、SASAI (1980) と OHSHIMAN (1980) の解が使える。両者の解がかなり異なっていることは、当時から気づかれていた。しか

し実際の観測結果には、断層から遠い地域にも大きな変化が出ていて、当初はこのことが関心を引いた (RIKITAKE *et al.*, 1980)。これは電車ノイズの直流バイアス効果と日変化の地域差によることが数年後に解明されたが、数値解と解析解の食い違いにあまり焦点は当てられなかった。前節で述べた冷川隆起に伴う全磁力変化は隆起域で増加していたのに、茂木モデルについての SASAI (1979) の解では、全磁力の減少が卓越しているのも、気になる点であった。

SUZUKI and OSHIMAN (1990) は茂木モデルについての DAVIS (1976) の解を精度良く計算して、力源を小さくしても SASAI (1979) の点力源解が得られないことを示した。また BANKS *et al.* (1990) は、無限に長い横ずれ断層のピエゾ磁気変化を調べて、体積積分を解析的に実行すると SASAI (1980) のグリーン関数から得られる解とは異なるという結果を得た。これらの矛盾の原因は SASAI (1980) のグリーン関数の定式化に不十分な点があったためである。茂木モデルの点力源や食い違いの歪核のような力学的特異点を含む積分は一様収束しないので、特別な考慮が必要とされる。食い違いモデルに伴う重力変化の問題で、同じ困難に遭遇していた大久保修平との議論が、非常に役に立った (OKUBO, 1991)。原因解明過程の詳細は省略するが、茂木モデルについては SASAI (1991a) を、また断層モデルについては SASAI (1994) を参照されたい。最終的に改訂されたグリーン関数は、数値解との間に極端な差異は生じないものとなった (SASAI, 1991b)。

SASAI and ISHIKAWA (1997) は伊豆半島で発生した被害地震に伴うピエゾ磁気変化を再計算して、観測を良く説明できることを示した。とりわけ KWZ TM Event は観測点直下の断層が伊豆大島近海地震に引き続いてズルズル滑ったことによる、と解釈された。ところで第1図に示した河津地震 M5.4 に伴う変化については、単一の横ずれ断層では観測されたような 5nT もの大きな変化量を説明できない。この地震は震源から北西と南東の両方向に破壊が伝播し

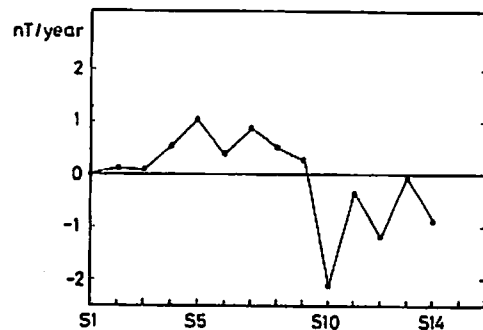
て行ったことが知られている。観測点は震央の近傍にあるので、この付近で断層が折れ曲がっていたとすれば、磁力線が湧き出して大きな変化が生じると期待される。この他に1997年3月の伊東沖群発地震でM5.4が発生した際にも、2nTの全磁力増加が観測されている。この場合は観測点付近の不均質帯磁による増幅効果(OSHIMAN, 1990)があったものと推定される。伊豆半島では伊豆大島近海地震M7.0, 東伊豆地震M4.9およびそれに先行した地殻変動, 伊豆半島東方沖地震M6.7に伴う有意な全磁力変化が観測され、ピエゾ磁気効果で定量的に説明されている。これはアメリカ合衆国カリフォルニア州のサン・アンドレアス断層と並ぶ成果である(cf: JOHNSTON *et al.*, 1994)。

4 異常隆起に伴う全磁力変化—冷川型と富戸型

伊豆の地殻隆起が水準測量によって検出された頃は、ダイラタンシー・水拡散モデル(SCHOLZ, *et al.*, 1973)が全盛の時代だった。この異常隆起は大地震の先行現象である可能性が高いと見なされた。しかし伊豆大島近海地震M7.0の前後で、地震波速度の変化が検出されなかったこと、何よりも隆起が沈降に転ずるところかその後も継続している事実から、ダイラタンシー説は否定された。また隆起の原因として、伊豆東方線からの非地震性もぐりこみ説も提案された(石橋, 1976a)。しかし伊豆大島近海地震は伊豆東方線を横断する横ずれ断層であったことから、この考えも棄却された。萩原(1977)が重力変化から推定した茂木モデル型膨張説が生き残り、手石海丘噴火という決定的なイベントによって、伊豆半島の地殻活動の原因として火山性地殻変動説が定説となっている。

伊豆の隆起の中心は2つあって、1974年末から1982年頃までは内陸にあり、中心の名前を取って冷川隆起と呼ばれる。1982年から83年にかけて伊東市富戸の伊東検潮場あたりを中心

とする隆起に変わり、これは富戸隆起と呼ばれる。1978年から1980年にかけて我々は内陸部の伊豆スカイライン沿いに2kmおき位に磁気点を設置して、カエル跳び方式による繰り返し磁気測量を行った。これは隣接する磁気点相互の地点差を取ることで観測誤差を小さくして、隆起に伴う全磁力変化を精度良く検出しようというものであった。第4図にOSHIMAN *et al.* (1983)による成果を示す。当時はSASAI (1979)の解が正しいと思われていて、全磁力の減少域が隆起の中心に対応すると解釈された。しかしSUZUKI and OSHIMAN (1990)とSASAI (1990)による見直しを経てみると、第4図の南側の全磁力増加域が隆起中心と考えるのが正しいようである。



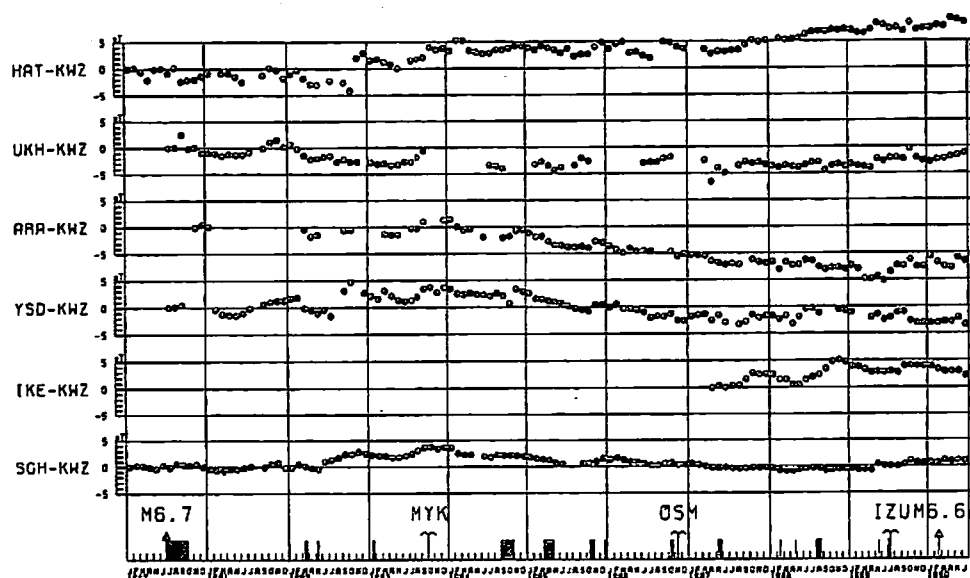
第4図：伊豆スカイライン(S14)ー遠笠山道路(S1)沿いの繰り返し磁気測量点における、S1に相対的な全磁力経年変化量分布。

1993年9月頃から1994年5月頃にかけて、再び内陸部で最大6cmに達する隆起が起こった。これは第2次冷川隆起と呼ばれる。この活動に伴って内陸の隆起域と伊東市北部で、第2図と同じパターンである、南側で増加し北側で減少という全磁力変化が、連続観測によって検出された(OSHIMAN *et al.*, 1997)。この全磁力変化は時間経過がGPS観測による隆起(膨張)と一致するものの、空間的波長は短い。全磁力変化領域に対応して2つの膨張中心があった訳では無い。OSHIMAN *et al.* (1997)は、力源は単一であるが地殻帯磁が不均一であるために、2つの全磁力異常領域が現れた、と推定している。ただし伊豆地域の実際の磁化構造をもとに定量的に観測を説明する作業は、将来の課題と

して残された。

1982年以降はいわゆる富戸隆起が卓越している。これに伴った全磁力変化は、冷川隆起とまったく様子が違う。第5図は1980年代の連続観測点における、KWZ(河津)を基準とした全磁力変化を示す(SASAI and ISHIKAWA, 1990)。まず1982年に内陸の菅引(SGH)から吉田(YSD)、初島(HAT)にかけて、数ヶ月のうちに全磁力の増加が西から東へと移動する現象が見られた。これは隆起中心が冷川峠から富戸に移った時期と一致する。ところが東海岸における隆起はほぼ一定の割合で進行するのに、YSDとARAの全磁力はその後減少に転じた。1986年11月に20km東方の伊豆大島で大規模な噴火が起こった。これと前後してYSDの全磁力減少は横ばいとなったが、ARAの全磁力は減少を続け、更にその北に位置するHATの全磁力が増加を始めた。HATとARAの変化に着目すれば、これは典型的な熱消磁型で、この2地点の間で温度上昇が起こっていると推定された。1989年7月13日の手石海丘噴火はまさにその中間で発生している。この全磁力変化は手石海丘噴火の先行現象と見なされる(SASAI and ISHIKAWA, 1990)。つまり富戸隆起に関しては、応力によるピエゾ磁気効果よりも熱磁気効果の方が卓越しているのである。

第5図：1980年代の伊豆東部の全磁力変化。KWZを基準とした月平均。



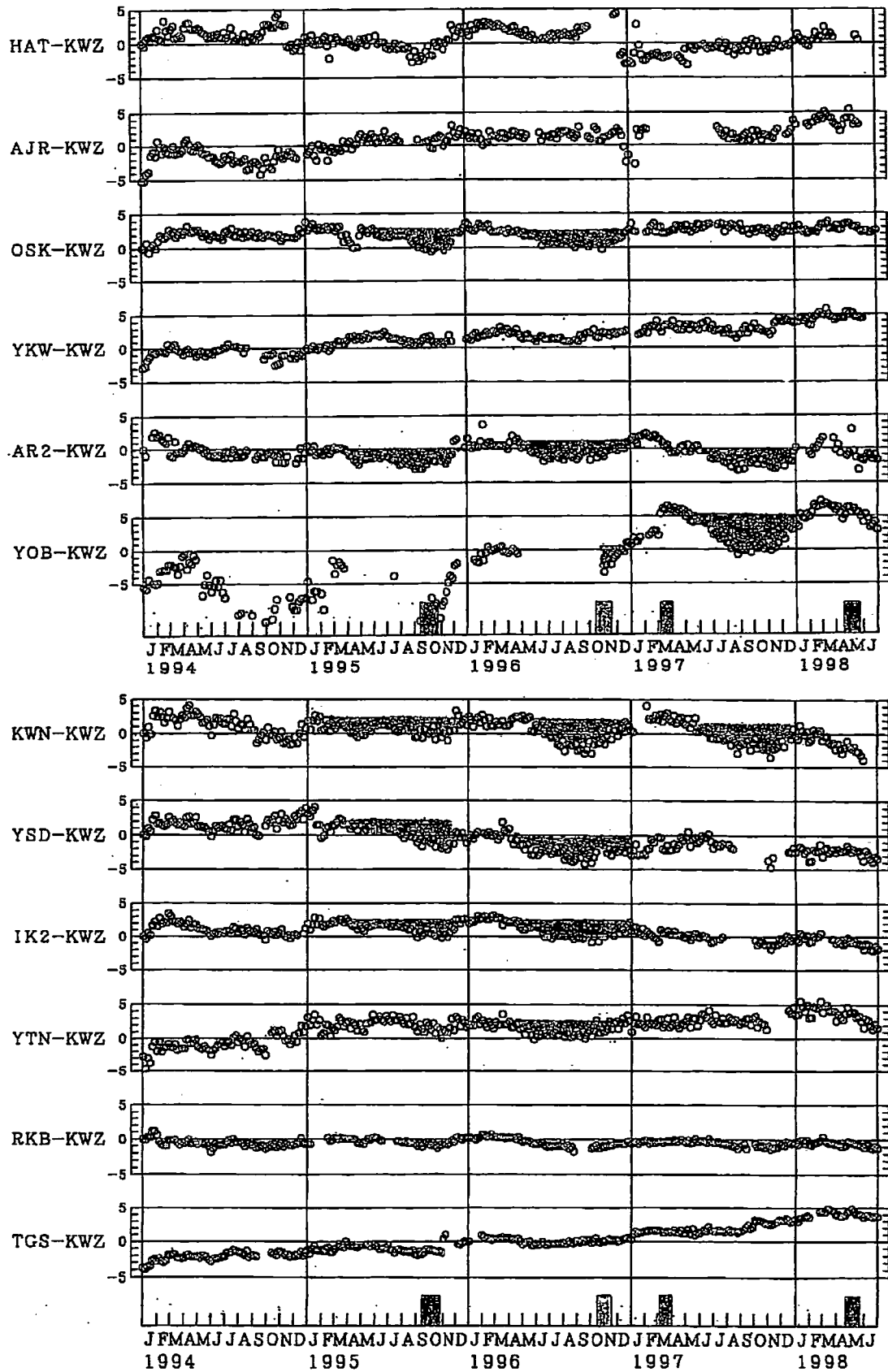
1980年代にはプロトン磁力計の連続観測は6点で行われているに過ぎなかった。観測点の

間隔は5~10kmもあり、熱消磁を原因と考えると、地殻のやや深部(~8km)に磁気源を考えざるを得ない(SASAI and ISHIKAWA, 1990)。1989年手石海丘噴火の直後から、KM62式(田中良和による)とOSMAN式(大志万による)という軽量小型で省電力型のプロトン磁力計および市販の磁力計も投入して、20点以上の全磁力群列観測が伊豆半島東部で展開されるようになった。その結果、群発地震・隆起活動に伴う全磁力変化はまったく新しい様相を見せるようになった。

5 伊豆半島における地殻活動の発生機構—流体駆動モデル

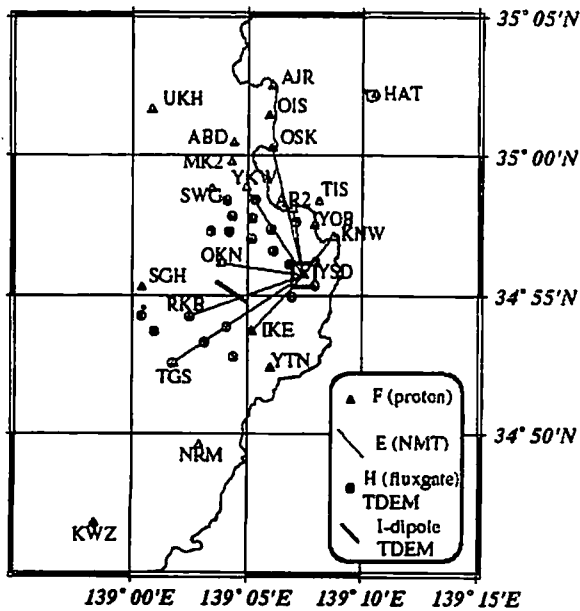
第6図(後出)に1990年代における伊豆半島東部地域のプロトン磁力計分布を示す。高密度の磁力計群列観測を展開する中で、1993年5月、95年9月、96年10月、97年3月、98年5月と5回の群発地震活動が起こった。そのうち93年、95年、96年の群発活動に先行して、震源域に近いいくつかの観測点で、数ヶ月前から全磁力が減少して回復するという変化が見つ

かった(第7図:後出)。しかし97年、98年の群発地震に先行しては、そのような変化は認め



第7図：伊豆半島東部地域の代表的な観測点における全磁力変化。1994年1月－1998年6月。河津 (KWZ) を基準とした夜間単純差の5日平均。単位 nT。

られなかった。

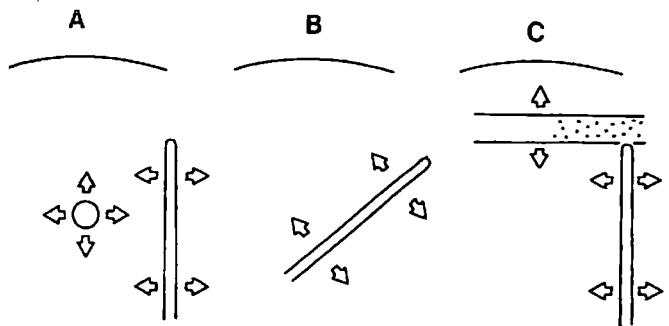


第6図：伊豆半島東部のプロトン磁力計観測網（三角に観測点名つき）

一方、東工大・京大グループはYKWおよびKWN観測点で短基線の地電位観測網を設置し、地震研では9点の全磁力観測点に電極を埋めて、NTT電話回線を利用した長基線自然電位測定を行ってきた。1995年と96年の群発地震に際しては、その約2週間前から震源域に近いOSK, ARA, KWNの点において、自然電位が数10mV上昇するという現象が見られた。全磁力と自然電位の変化は、群発地震の震源域に熱水が上昇してきて、熱消磁や界面動電現象による電磁場を作っていることを強く示唆する。しかし全磁力の場合と同じく、97年と98年の群発の場合は、自然電位の異常変化は見られなかった。

全磁力変化には年周的もしくは季節的な変化が含まれている。特にYOB（与望島）では毎年大きな変化が繰り返されている。ここでは局所的な不均質帯磁が存在していて、地中温度の年周変動によってこのような磁場変化をしている可能性が高い（UTADA *et al.*, 2000）。それ以外の観測点では、季節変化と疑われる変化も毎年規則正しく現れる訳では無い。これらの観測点は海岸に近いものが多く、相模湾の海流変動による誘導電流の影響が疑われる。しかし電磁

場に異常が見られなかった97年と98年の群発地震は、95年と96年の活動域より沖合いに発生している。地下流体の移動に伴う電磁場が、その真上に観測点が無いため観測されていない、という可能性もある。



第8図：水平変位と隆起量を調和させるための3種類の地殻変動モデル

1990年代に入ってGPSの連続観測が実用化され、群発地震と異常隆起の前後関係が明瞭になってきた。地震と地殻変動観測から推定されている「常識的な」伊豆の地殻活動モデルは次のようなものである（第8図参照）。伊東沖群発地震は深さ7-8kmからほぼ垂直な板状に分布しており、この部分にマグマが貫入している。これによって水平方向の開口が起こり、その両側の盛り上がりによって陸地で隆起も生じる。ところが水平変位を合わせると隆起量が不足するので、海岸付近の最大隆起域の直下に茂木モデル型の膨張力源を置く（A）というものである。茂木モデルを仮定した位置にマグマの存在を支持する地震学的な証拠が無いことと、貫入ダイクとマグマ溜りがいつも連動している力学的必然性がないのがこのモデルの弱みである。傾いたダイクで水平変位と隆起を説明する試み（B）もあるが、想定されたダイクの位置と地震活動は全く対応しない。95年、96年の活動域付近で観測された全磁力減少は、地下2km位に厚さ1km位の薄い楕円体状の熱消磁域を置くことで説明できる。（C）のモデルは、この熱消磁域が開口クラックと連動して膨張し、隆起の不足部分を補っているというものである。

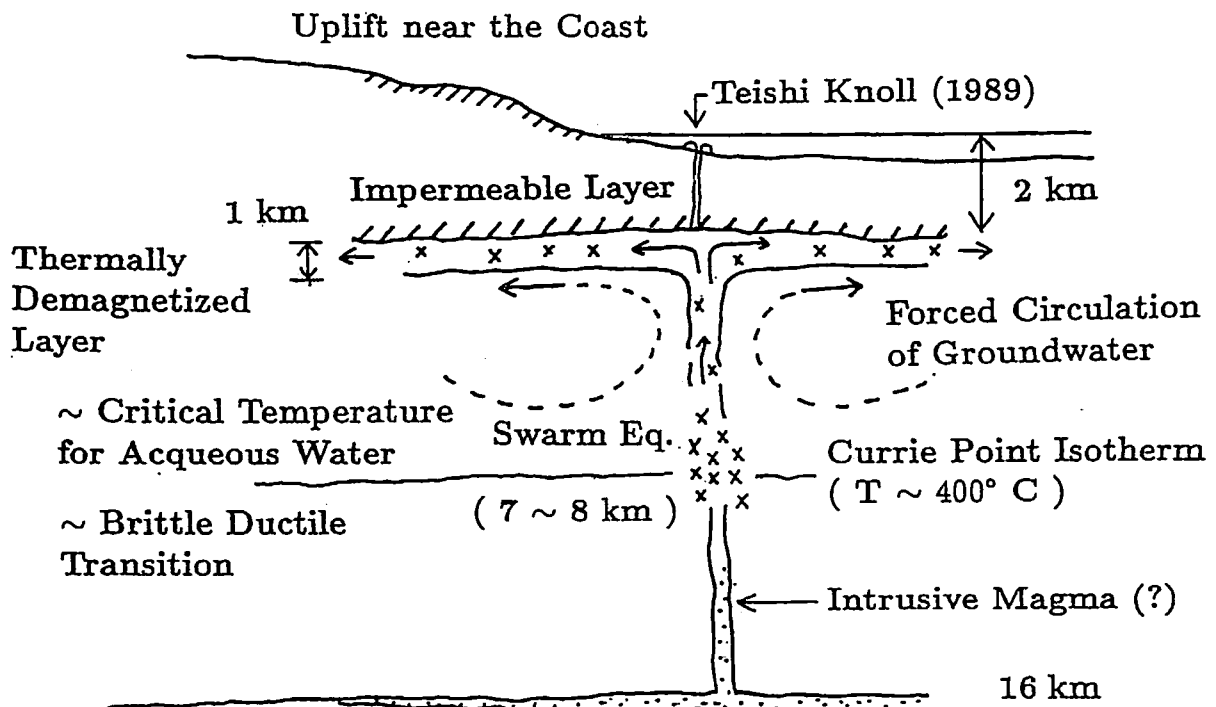
我々は伊豆半島東部の地震・地殻変動は、第9図のような仕組みで発生しているのではない

かと考えている。

- (1) この地域には地下約16-20kmに強いS波の反射面があり、薄く水平に広がったマグマの溜りがある(加藤・他, 1992)。この深さから上方へは、地殻の密度がマグマより小さいため、マグマは浮力では上昇できず、開口クラックを作って上昇する。
- (2) 群発地震の発生の様子は、最初深さ7-8kmで起こり始め、1日程度かけて震源が2-3kmまで上昇し、更にこの深さで水平方向に広がる、という特徴がある。地震がマグマの貫入によって起こり、震源域の拡大はマグマの移動を表していると考え、地殻の岩盤圧の下で、非現実的なマグマ柱の圧力増大を仮定しなくてはならない。
- (3) 地震は間隙流体圧の増加によって起こり、地震発生領域は地下水・熱水で満たされていて、水が移動するので無く圧力増加だけが伝播すると考えれば、地震発生領域の上昇と水平方向への拡散を合理的に説明できる。
- (4) 地下水・熱水が水平方向に広がるためには、

地殻最上部の深さ数km位に不透水層が必要である。

- (5) 水平な滞水層の増圧でもたらされる隆起は、滞水層のスケルトン(骨材に相当する岩石部分)が膨潤することで、長期間維持される。
- (6) ダイクの開口はマグマ柱内の発泡による圧力増加で起こると考えるのが、常識的な想定である。この揮発性物質(主として水)が既存の熱水系に供給されて(3)のシナリオが始まる。しかしマグマ中の H_2O が地下7-8kmの岩盤圧の下で発泡できるかという重大な疑問が残る。
- (7) もうひとつの可能性は、マグマはより深部にあり、そこから分離した石英を大量に含む熱水が深さ8kmの位置で気液分離をして、圧力増加が起こることである。石英はクラックの中に取り残されて、開口を維持する(熱水鉱床の成因と同じ)。伊豆東部では安定した火道が形成されておらず、伊豆大島火山のようにマグマがゆっくり上昇できる仕組みが無い、と考えられる。上昇してきているのは熱水だけかも知れない。



(Density : Upper Crust < Magma) Sheet-like Magma (Seismic Reflector)

第9図：伊豆東部の地殻活動の発生機構 (模式図)

第9図のモデルは検証すべき作業仮説に過ぎず、確立されていない部分が多すぎる。我々は電磁気的手法でモデルの一部でも検証したいと考えて、1997年以来TDEM法による比抵抗構造探査に挑戦してきた。最近Takahashi(2001)はこのデータを解析して、伊東市の海岸付近から10km位内陸までは、地表から数kmまでの比抵抗が数 $10\Omega - m$ と非常に低いという結果を得た。これは第9図の不透水層に対応した低比抵抗層である可能性が高い。

最後に内陸部のいわゆる「冷川隆起」については、その原因に謎が多い。この地域では東伊豆単成火山群で最も新しい活動が起こった(約2500年前の石英安山岩質の火山活動)。この付近の地下深部には既に固化したマグマが残存していて、熱水を放出しているのではないかと考える(恒石幸正, 私信)。一方、HONKURA and TAIRA (1983)は、地磁気短周期変化の振幅変化から、内陸の隆起に伴って比抵抗が低下したことを見出しており、ある種のダイラタンシー現象が起こったことを示唆している。第4節で述べた通り、内陸の隆起に伴って、茂木モデル型の全磁力変化が3回にわたって検出されている。推定される力源の周囲の比抵抗構造を調べることが、原因究明の突破口を切り開くかも知れない。

謝辞: 25年の観測を通じて、伊豆の現地で実に多くの方々にお世話になっており、これからもお世話になります。田中良和、歌田久司、西田泰典の皆さんには様々な議論に付き合ってもらいました。心から感謝いたします。

引用文献

BANKS, P. O., W. D. STUART, and S. W. LIU, 1991, Piezomagnetic fields of screw dislocation fault models, *J. Geophys. Res.*, **96**, 21575-21582.
DAVIS, P. M., 1976, The computed piezomagnetic anomaly field for Kilauea Volcano, Hawaii, *J. Geomag. Geoelectr.*, **28**, 113-122.

萩原幸男, 1977, 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化, *震研彙報*, **52**, 301-309.

HONKURA, Y. and S. TAIRA, 1983, Changes in the amplitudes of short-period geomagnetic variations as observed in association with crustal uplift in the Izu Peninsula, Japan, *Earthq. Pred. Res.*, **2**, 115-125.

石橋克彦, 1976a, 「伊豆東方線西相模湾断層」と伊豆異常隆起の解釈—フィリピン海プレート最北境界の二重構造, *地震学会講演予稿集1976 No. 2*, p.29.

石橋克彦, 1976b, 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について, *地震学会講演予稿集1976 No. 2*, p.30-34.

Johnston, M. J. S., 1978, Local magnetic field observations and stress changes near a slip discontinuity on the San Andreas fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, **30**, 511-522.

JOHNSTON, M. J. S., R. J. MUELLER, and Y. SASAI, 1994, Magnetic field observations in the near-field of the 28 June 1992 Mw 7.3 Landers, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 792-798.

加藤孝志・飯高隆・溝上恵, 1992, 伊豆半島東岸の溶融体を伴う地殻深部不連続面, *震研彙報*, **67**, 239-264.

茂木清夫, 1982, 「日本の地震予知」, サイエンス社, 352pp.

茂木清夫, 1990, 伊豆半島東方沖群発地震, 「地震予知連絡会20年のあゆみ」, 地震予知連絡会, 203-217.

NAGATA, T., 1969, Tectonomagnetism, *IAGA Bulletin*, **27**, 12-43.

大地洗・伊知地昇・桑島正幸・河村まさる, 1979, 伊豆大島近海地震に関連する地磁気全磁力変化, *地磁気観測所要報*, **18**, 55-64.

OHSHIMAN, N., 1980, Local geomagnetic changes associated with fault activity, *M. Sc. thesis*, Tokyo Institute of Technology, 178pp.

OHSHIMAN, N., Y. SASAI, Y. ISHIKAWA, Y.

- HONKURA, and H. TANAKA, 1983, Local changes in the geomagnetic total intensity associated with crustal uplift in the Izu Peninsula, Japan, *Earthq. Pred. Res.*, **2**, 209-219.
- 岡田義光・石井紘, 2000, 伊豆半島東部における地殻活動, 「地震予知連絡会 30 年のあゆみ」, 地震予知連絡会, 210-220.
- OKUBO, S., 1991, Potential and gravity changes raised by a point dislocation, *Geophys. J. Int.*, **105**, 573-586.
- OSHIMAN, N., 1990, Enhancement of tectonomagnetic change due to non-uniform magnetization in the Earth's crust - two dimensional case studies, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 607-619.
- OSHIMAN, N., Y. SASAI, Y. HONKURA, Y. ISHIKAWA, and Y. TANAKA, 1997, Geomagnetic changes correlated with crustal movement in the north-eastern part of the Izu Peninsula, Japan, *Annali di Geofisica*, **40**, 479-494.
- RIKITAKE, T., Y. HONKURA, H. TANAKA, N. OSHIMAN, Y. SASAI, Y. ISHIKAWA, S. KOYAMA, M. KAWAMURA, and K. OHCHI, 1980, Changes in the geomagnetic field associated with earthquakes in the Izu Peninsula, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **32**, 721-739.
- SASAI, Y., 1979, Piezomagnetic field associated with the Mogi model, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **54**, 1-29.
- SASAI, Y., 1980, Application of the elasticity theory of dislocations to tectonomagnetic modelling, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **55**, 387-447.
- SASAI, Y., 1991a, Piezomagnetic field associated with the Mogi model revisited: Analytic solution for finite spherical source, *J. Geomag. Geoelectr.*, **43**, 21-64.
- SASAI, Y., 1991b, Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **66**, 585-722.
- SASAI, Y., 1994, Resolution of contradiction between seismomagnetic models, *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 329-340.
- 笹井洋一・石川良宣, 1977, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化 (第一報), *震研彙報*, **52**, 173-190.
- 笹井洋一・石川良宣, 1978, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化 (第二報) - 1978 年伊豆大島近海地震 -, *震研彙報*, **53**, 893-923.
- SASAI, Y., and Y. ISHIKAWA, 1980, Tectonomagnetic event preceding M 5.0 earthquake in the Izu peninsula - Aseismic slip of a buried fault?, *Bull. Earthq. Res. inst., Univ. Tokyo*, **55**, 895-911.
- SASAI, Y. and Y. ISHIKAWA, 1991, Tectonomagnetic signals related to the seismo-volcanic activity in the Izu Peninsula, *J. Phys. Earth*, **39**, 299-319.
- SASAI, Y. and Y. ISHIKAWA, 1997, Seismomagnetic models for earthquakes in the eastern part of Izu Peninsula, central Japan, *Annali di Geofisica*, **40**, 463-478.
- STACEY, F. D., K. G. BARR, and G. R. ROBSON, 1965, The volcanomagnetic effect, *Paggeoph*, **62**, 96-104.
- SUZUKI, Y. and N. OSHIMAN, 1990, A paradox in volcanomagnetism: Disagreement between analytical and numerical estimates of geomagnetic changes due to an underground pressure nucleus, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 1291-1308.
- TAKAHASHI, Y., 2001, A study on the interpretation of data from Time Domain Electro-Magnetic (TDEM) sounding, *M. Sci. thesis*, Univ. Tokyo, 77pp.
- UTADA, H., M. NEKI, and T. KAGIYAMA, 2000, A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth Planets Space*, **52**, 91-103.