

伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う 全磁力変化（第五報）

—1982-1984 年川奈崎沖群発地震と地殻隆起—

地震研究所 { 笹 井 洋 一
石 井 良 宣

(昭和 60 年 5 月 13 日受理)

要　旨

伊豆半島東部地域の 7 点で、プロトン磁力計による全磁力連続観測を行なった。1980 年 1 月から 1984 年 12 月までの 5 年間の全磁力変化を、柿岡および河津を基準にして調べた。その結果、次のことが分った：(1) 1982 年の 5 月に菅引、9 月に吉田、11 月に初島において、全磁力の急増現象が見られた。これは内陸部の中伊豆町から東海岸の伊東市南部、そして北部へと、中心が移動しつつ進行した、1982 年中の隆起活動と、時間的、空間的に非常に良い一致を示す。(2) ただし隆起そのものは、段差状に急激に生じておらず、上記 3 観測点でもエピソード的な増加以外は、全磁力の減少が卓越する。又、急増現象の見られない新井と浮橋も、隆起域に属し、これらの点では、全磁力の減少が認められた。(3) 前回報告した、1981 年夏期の吉田、初島、浮橋における、全磁力減少と回復は、潮汐磁場を夜間のみサンプリングすることによるエイリアシング現象で、見掛けのものであった。(4) 1980 年中頃から、東伊豆地域の全磁力は、柿岡と相対的に減少傾向にあったが、1983 年から増加に転じた。

関東、東海地域の全磁力観測データによると、房総半島、伊豆大島、伊豆半島東部、同じく西部、駿河湾西岸ではそれぞれ、全磁力の永年変化の傾向が異なり、この 5 年間で複雑な変化をしているようである。又、海洋潮汐や黒潮の流軸変化など、海流のダイナモ作用による磁場の変動が、地震予知のための精密地磁気観測にとって、無視できない擾乱要因であることが、明らかになった。伊豆半島北東部の隆起と全磁力変化をもたらす機構について、予備的考察を行なった。マグマのダイク状貫入に伴って、表層地殻に微小割れ目が多数発生する、というモデルが有望である。

1. は じ め に

我々は 1976 年以来、伊豆半島東部の活発な地殻活動に伴う地磁変化を検出する目的で、プロトン磁力計によるくり返し測量と連続観測を続けて来た (笹井・石川 1977, 1978, 1980, 1982, SASAI and ISHIKAWA 1980)。とりわけ 1980 年 7 月以降は、連続観測に重点を置いて、東伊豆地域で 6 観測点を維持している。1980 年 6 月 29 日伊豆半島東方沖地震以降、1981 年中は地震活動は極めて静穏であったが、伊東市付近では緩慢な隆起が続いていた。1982 年 3 月、5 月、9 月、そして 1983 年 1 月、1984 年 9 月と、伊東市川奈崎から東方の沖合にかけて、群発地震が繰り返し発生した。又、1982 年に入って中伊豆町から伊東市にかけて、顕著な隆起が見出されている。東伊豆地域の多点観測によって、この地殻隆起の推移に対応して、全磁力の急激な増加が検出された。

我々は今回、夜間値だけでなく、全日の毎分値も比較し、1980年から1984年までの全データの再検討を行った。その結果、前回報告した1981年夏期の全磁力減少と回復は、海洋潮汐磁場を夜間のみサンプリングすることで生ずる見掛けの変化（エイリアシング現象：OHSHIMAN 1982）であるらしいことが分った。前報（笹井・石川 1982）で、我々はこの変化を地殻活動に関連した可能性が強いと考えたが、誤りであって訂正する。

第2節では、柿岡と河津を基準として、伊豆東部地域の全磁力変化の、5年間にわたる全般的な傾向を調べると共に、各観測点のノイズの性質などを概観した。第3節において、1981年夏期の夜間平均に表われた異常変化を調べ、エイリアシング現象について、若干の考察を行なった。伊豆の東海岸地域は、電車ノイズの直流バイアス効果（笹井・石川 1980）が卓越していて、通常のフーリエ解析等による、潮汐周期の同定ができなかった。

第4節では、全磁力変化と地殻活動、とりわけ隆起の推移との対応を調べる。第5節では、地震予知研究地磁気グループの公表データを用いて、1980年から1984年までの、関東一東海地域の全磁力変化を求め、東伊豆地域と比較する。最後に、隆起と地磁気変化を統一的に説明し得るモデルについて、現段階での推測を述べる。

地震活動に関連した地磁気変化は、地震予知計画による観測体制の強化によって、日本においても、少しづつではあるが、着実に観測例が増えている：1978年伊豆大島近海地震M7.0に先行した松崎の変化（大地・他 1979）、1978年東伊豆地震 M4.9に先立つ河津の変化（SASAI and ISHIKAWA 1980）、そして最近では、1984年5月山崎断層の地震 M5.6に伴うもの（住友 1984、山崎断層研究グループ 1985）が、顕著な例である。しかしながら、地殻活動を監視する手段としての地磁気観測は、未だ手法として十分確立しているとは云えない。むしろ使い物になるかどうかを、伊豆半島の観測で試されているのが、実情である。

東伊豆地域における我々の観測は、10年目に入ろうとしている。我々の報告では、以前の観測結果の解釈をめぐって、訂正や再検討を行なうのが、毎回の通例のようになってしまい。本報告でも、1981年の異常変化（第四報）についての重大な訂正が含まれる（第3節）。更に1977年前半に菅引で見られた、全磁力急増現象の解釈（第二報）を再検討する必要があることも分った（第6節）。これは、「観測手法の確立」を目指す研究の過渡期においては、止むを得ないことであろう。

2. 全磁力連続観測：1980年—1984年

第1図に伊豆半島東部地域の全磁力観測点分布を示す。図に斜線で示した部分が、主として1982年から1983年初めにかけて発生した微小地震群の震央域である。これ等の群発地震は明瞭な線状配列をなし、1982年の3月、5月、9月、さらに1983年1月と、川奈崎付近の内陸部から、順次東の沖合に発生域を移すという、特徴的な起り方をした。1984年9月の活動域は1983年1月と大体一致しているが、一部はそこから更に南方に広がっている。

伊豆半島では国土地理院によって、精密水準と光波測量が頻繁に行われ、隆起の時空的推移が良く分っている。1982年には急速な隆起が認められ、東海岸付近では水平方向の

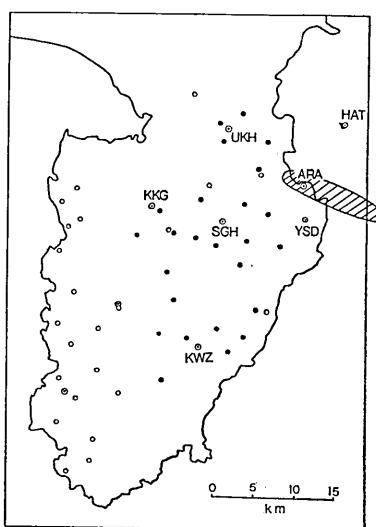


Fig. 1. Locations of temporary magnetic stations (dotted circle) and survey points (solid circle) in the eastern part of the Izu Peninsula. The hatched area indicates the epicentral region of Off-Kawanazaki swarm earthquakes.

1983/5/3



Fig. 2. An example of simultaneous records of total field magnetograms. The vertical spacing corresponds to 100 nT.

伸張が顕著であった。特に注目すべき点として、1982年の隆起は、当初、内陸部の中伊豆町で確認され、その後東海岸付近で検出されるという風に、変動域が移動したことが挙げられる。群発地震と地殻変動の推移については、地磁気変化との対応を見るために、後に詳しく参照する。

前報では夜間の15個データ(0h 40mから3h 00mまで10分おき)の5日平均を用いて、全磁力地点差の変化を調べた。その後プログラムを整備して、現在では観測された全てのデータ(毎分計測値)を処理している。モニター用の標準記録として、従来通り鹿野山の夜間15個データを利用している。今回は柿岡の全磁力毎分値を磁気テープで頂き、1980年1月から1984年12月迄の5年間について、柿岡を基準とした東伊豆地域の全磁力変化を調べた。

ここで、得られている記録の質とデータ処理方式について簡単に紹介する。プロトン磁力計は国際電子社製のPMP 611Gおよび301S, 201S等で、毎分に計測した全磁力値をカセット・テープに記録する。委託観測者から毎週一回、このカセットが郵送される。再生した記録例を第2図に示す。一見して分るように、初島(HAT), 浮橋(UKH), 新井(ARA), 吉田(YSD)の各観測点は、電車ノイズが著しい。プロトン磁力計に特有な、誤計測によるパルス状ノイズも見られる。

このようにノイズの多いデータから、次のような手順で、全磁力差平均値を計算する。

- 1) 比較したい2つの観測点の全磁力地点差の概略値を与えておき、毎分の差がこの概略値から20 nT以内のものだけを残す。これによって大きなスパイク状ノイズを除く。2) 差の平均を算出し、毎分の差がこの平均値から、ある与えられた範囲内のものを選ぶ。これで改めて平均値を計算する。3) この操作をくり返して、平均値が変動しなくなったものを、最終的に与えられた期間における全磁力地点差とし、標準偏差、99%信頼限界などを算出する。

第3(a)図に、吉田と菅引の全磁力地点差の毎時平均値をプロットして示した。エラー・バーは毎時平均値(黒丸)の99%信頼限界、大円が日平均値、小円が夜間平均値を示す。ここで夜間平均値とは0時0分から4時59分までの電車ノイズの無い時間帯における平均を示す。平均値のまわりの許容範囲として、毎時値は10 nT、夜間値5 nT、全日平均で15 nTとした。この許容範囲の値は、何か厳密な基準によって定めたのではなく、時間帯による大体のノイズ・レベルを与えたものである。第3報で報告したように(笹井・石川1980)，電車ノイズは夜間静穏時の地点差平均値のまわりをバラつくのでなく、観測点毎に特定方向に偏って分布する。このため早朝の電車運転の開始(5時前後)と深夜の終了(23時30分頃)に伴って、菅引との地点差に段差が出来る(直流バイアス効果)。

この図から次のことが見てとれる。1) 電車ノイズによるオフセットは22時から23時にかけて明瞭に見られる。その量は日毎に変動が大きい。2) この段差が早朝5時から6時にかけては、必ずしも明瞭でない。これは日変化の開始時刻と重なるためと思われる。3) 日変化の振幅や位相が、両地点で異なり、日中の変動が大きい。この変動の中には潮汐のダイナモ作用による磁場も含まれていると思われる。

第3(a)図によれば、この期間については、全日平均の方がほぼ一定値を保っているのに対し、夜間平均はゆっくりした増加傾向を示す。後者は後述する潮汐磁場のエイリアシ

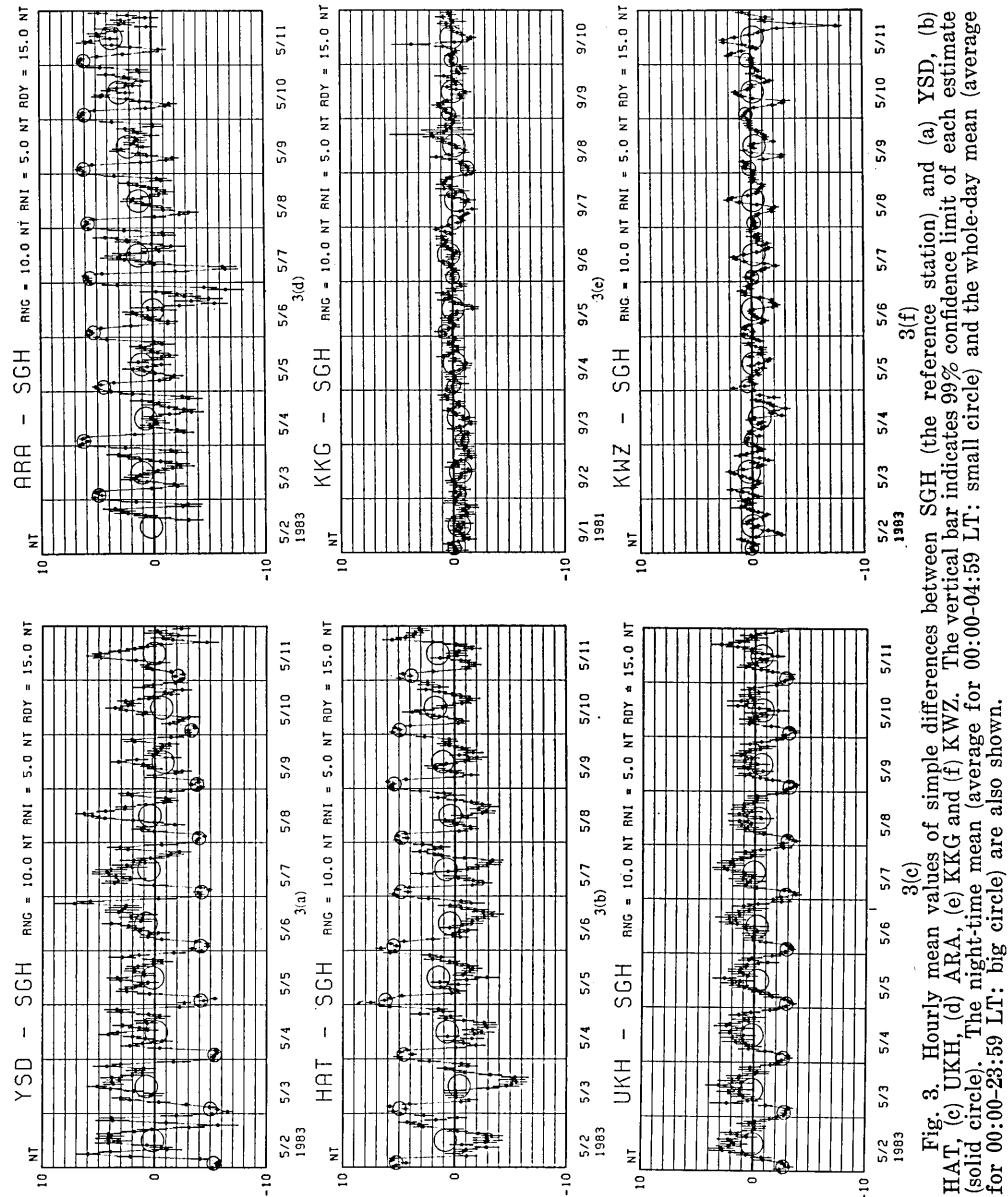
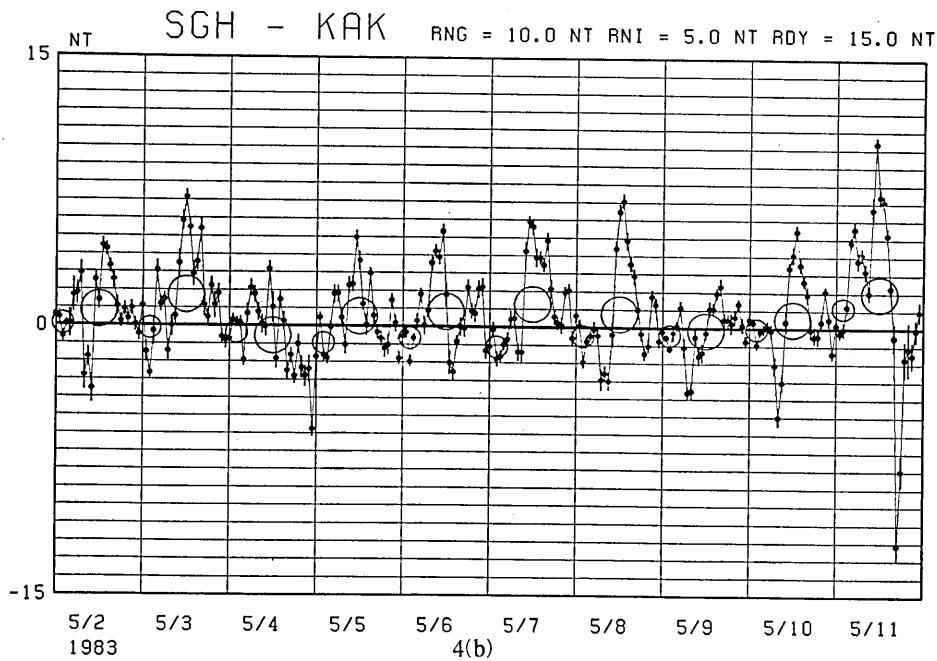
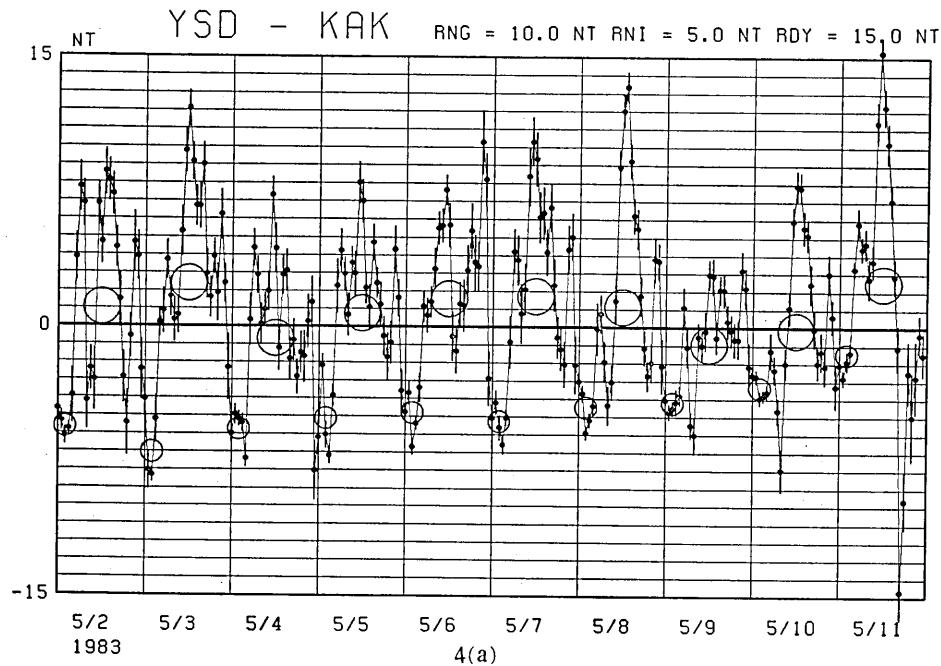


Fig. 3. Hourly mean values of simple differences between SGH (the reference station) and (a) YSD, (b) HAT, (c) UKH, (d) ARA, (e) KKG and (f) KWZ. The vertical bar indicates 99% confidence limit of each estimate (solid circle). The night-time mean (average for 00:00-04:59 LT; small circle) and the whole-day mean (average for 00:00-23:59 LT; big circle) are also shown.



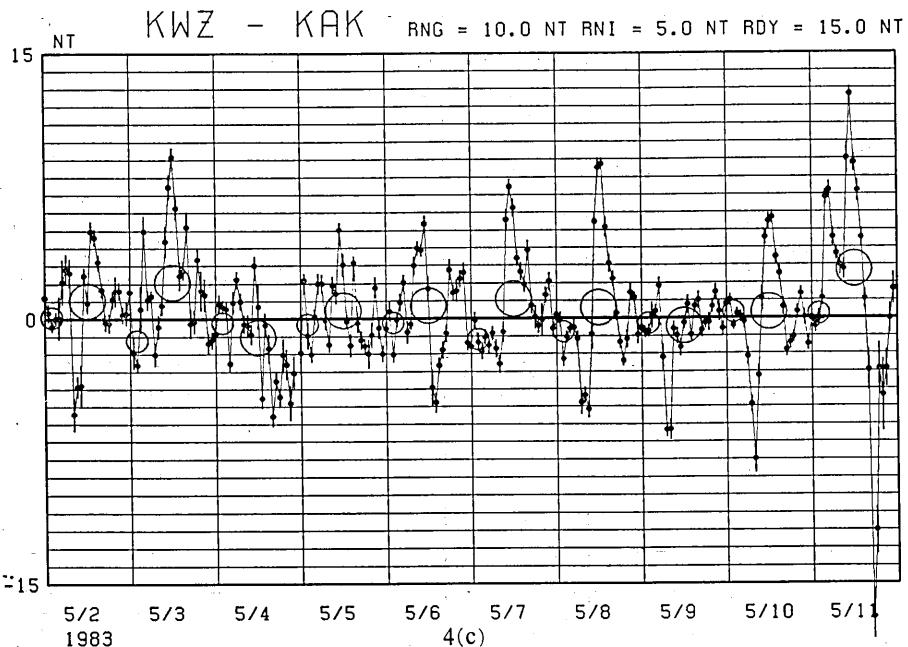


Fig. 4. Hourly mean values of simple differences between KAK (the reference station) and (a) YSD, (b) SGH and (c) KWZ.

ング現象である可能性が強い。この図からは、全磁力地点差の変化を見るには、全日平均の方が望ましいといえる。ところが、全日平均は大きな変動を平均したものなので、一日のうちで部分的に欠測期間を含むと、平均値が大きく変ってしまう。そこで吉田と菅引の全磁力地点差については、夜間0時から5時までの5時間平均値を用いることにする。この時間帯では毎時平均値もほぼ一定なので、部分的な欠測によって、大きな偏りを生ずることは無い。

同様にして、初島、浮橋、新井、柿木、河津について欠測の少ない10日間を選んで、毎時平均をプロットしたものが第3(b)-(f)図である。電車ノイズによる大きなオフセットを生ずるのは、初島、浮橋、新井である。更に初島、新井、および吉田では、日中の変動が大きいのに対し、浮橋は比較的単調なオフセットを示すにとどまる。これは東海岸の観測点が海洋誘導電流の影響を強く受けて、日変化の様相が内陸部と異なることを意味すると思われる。柿木と河津においては、夜間平均と全日平均がほぼ等しい。ここに示された日中の変動の幅が、内陸部で日中に磁気測量を行なう場合の精度を与える。内陸部といえども、日中1時間程度のサンプリングでは、見掛け上大きな変化を生ずる可能性がある。

次に同一の計算手順で、柿岡との全磁力地点差を求めた。ここでは代表例として、吉田、菅引、河津について示す(第4(a)-(c)図)。柿岡は伊豆地方から約180km北東に位置するので、全磁力地点差には日変化電流系に対する相対位置の差が効いてくる。柿岡における全磁力減少は伊豆地方より先に始まるから、この位相差を反映して、第4図の毎時平

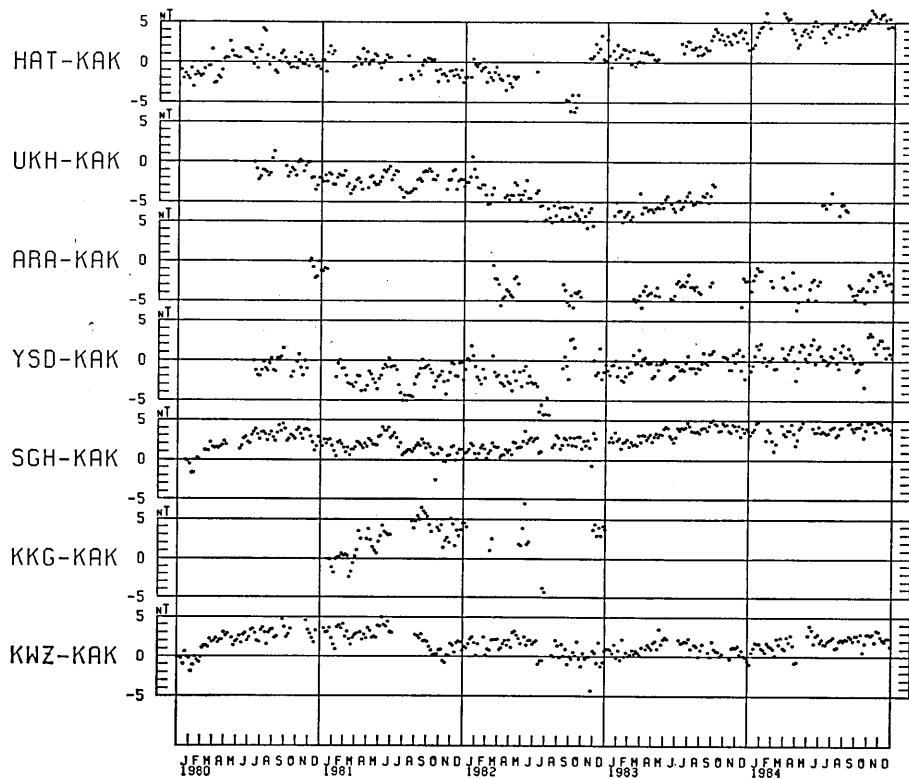


Fig. 5(a). Changes in the total field at eastern Izu stations relative to KAK during the period from 1980 to 1984. 5-day mean values of simple differences of night-time data (00:00-04:59 LT) are plotted.

均値は極めて大きな変動を示す。しかし一日分を平均すると、その地点差は割合安定している。むしろ夜間平均の方に変動が大きい。これは地磁気短周期変化の振幅の違いと、Dst 磁場の地域差の影響と思われる。全日平均の方が長時間にわたって平均するので、短周期変化の影響を受けにくい。このように柿岡を基準に比較する場合には、全日平均の方が望ましい。しかし我々の観測では、様々な要因によって、一日のうちのある時間帯だけ欠測してしまうことがしばしばある。このような場合に、形式的に全日平均を求めるとき、非常に大きくバラついてしまう。

第5(a)図に1980年1月から1984年12月迄の期間について、柿岡を基準とした東伊豆地域の全磁力変化を示す。これは夜間単純差の5日平均である。この期間中、いくつかの観測点が人工的擾乱を受けた。1) 菅引: 1981年5月30日—1981年8月31日。擾乱を受けた日について、他の連続観測点との差をとって確定されたオフセット値で補正した。2) 初島: 1983年5月と7月の間に、センサーの近くに建物を建てられた。たまたまこの期間が欠測なので、初島と変化の様子が最も良く似ている浮橋の変化と平行になるように、補正值を定めた。3) 浮橋: 1984年春頃、センサー付近の墓地が整備された。1983年6月と

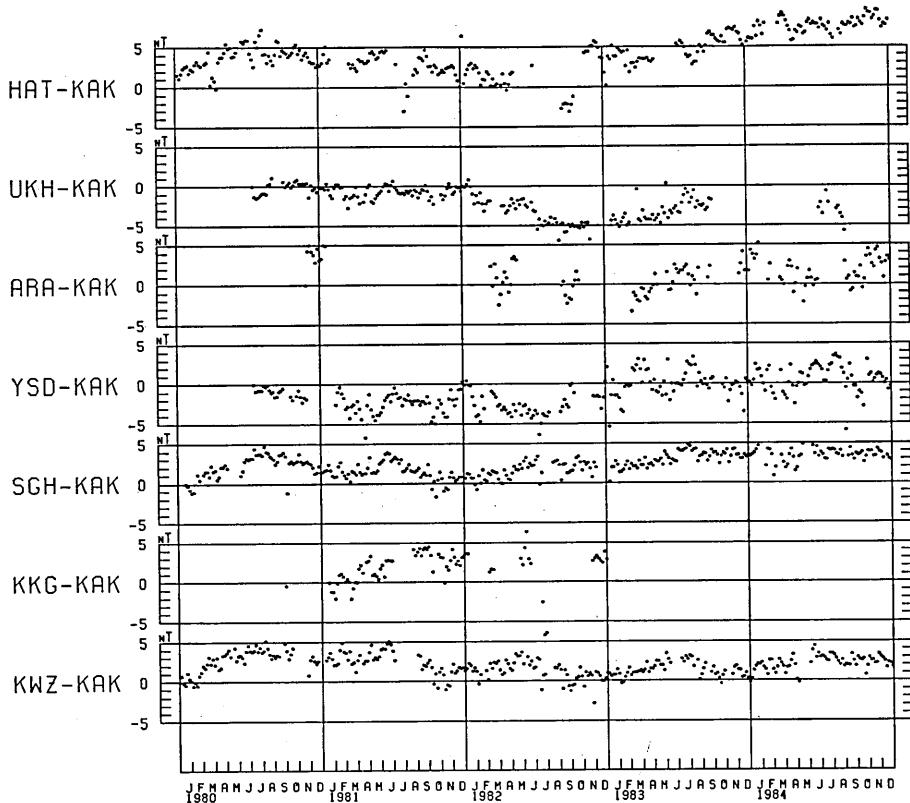
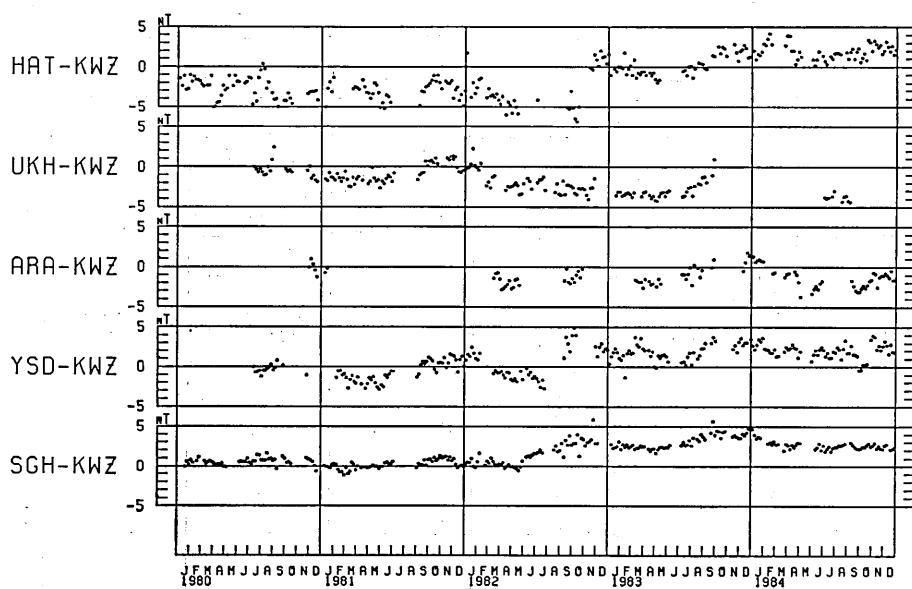


Fig. 5(b). The same as Fig. 5(a), except that whole-day data are used.

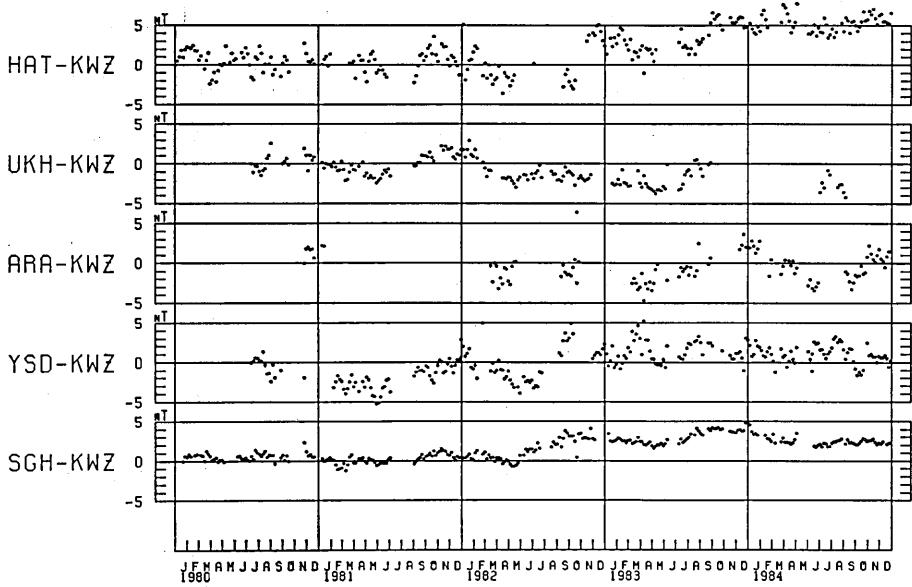
1984年6月に行なったくり返し磁気測量のデータを用いて、浮橋をかこむように分布する4つの測量点（第1図参照）の変化量の平均と一致するように、補正值を定めた。4) 柿木：工事用車両の出入りによって頻繁に擾乱を受けたので、現在の所、補正できていない。新井と柿木は臨時的な連続観測点として、一台のプロトン磁力計を交互に移動して観測してきた。東海岸の地震や隆起が活発化したので、新井の観測に重点を置き、1983年以降、柿木の観測は中断している。第5(a)図では柿木を除いて、上述した補正をおこなっている。これは以下に出てくる全ての全磁力変化図でも同様である。

第5(a)図で最も顕著な変化は、1982年9月頃の吉田と、同年11月頃の初島における全磁力増加であろう。次に1983年あたりを境に、それまで減少していた全磁力値が、柿岡に相対的に増加に転じたことがあげられる。これは程度の差はある、全観測点に共通して認められる。第3にこの5年間を通じて、最も安定して変化が小さい観測点は河津である。従って伊豆半島内での比較の基準として、河津のデータを用いることとする。

1981年7月から9月にかけて、初島、浮橋、および吉田において、明瞭な全磁力の減少と回復が見てとれる。これが前報で報告した異常変化である。この変化は海洋潮汐磁場を、夜間にのみサンプリングすることによる、見掛け変化である可能性が、OHSHIMAN (1982) によって指摘された。エイリアシングであるかどうかを判定するには、24時間の



6(a)



6(b)

Fig. 6(a). Local changes in the total field at the northeastern part of the Izu Peninsula relative to KWZ during the period from 1980 to 1984. 5-day mean of simple differences of night-time data are plotted.

Fig. 6(b). The same as Fig. 6(a), except that whole-day data are used.

毎分値を用いた平均を作つてやればよい。第5(b)図に同じく柿岡を基準として、全日データを用いた5日平均を示した。この図からは、5(a)図に見られた1981年夏の変化が消失してしまう。すなわち、1981年の変化は全く見掛けのもので、OHSHIMAN(1982)の指摘が正しかったことになる。これは興味深い現象なので、次節でこの期間の記録をやや詳しく調べることにする。

柿岡を基準とした単純差平均はバラつきが大きい。そこで河津を基準として、伊豆半島北東部の全磁力変化を見てみる。第6(a), 6(b)図に夜間および全日データを用いた、単純差の5日平均を示した。なお、柿木については人為的擾乱の補正が済んでいないので、図から除外してある。1982年から1983年にかけて、全磁力の減少から増大へと、はっきりしたトレンドの変化が見られる。1982年には、第5図で認められた吉田と初島の全磁力急増に加えて、菅引においても、変化量は小さいものの、段差状の急増現象が明瞭に見てとれる。この急増現象は、上記3観測点において、5月、9月、11月と、内陸から北東海岸方向へ、時期をずらしながら発生した。後述するが、この現象は隆起活動の推移と非常に良い対応を持つことが判明した。

浮橋と新井には、はっきりした全磁力急増は見られない。しかし長期間の変化の様子は初島、吉田と非常に良く似ており、変化量も半年から1年位の間に5nTに達する場合がある。第4節でこれ等の全磁力変化と隆起活動との対応を調べることにする。

3. 潮流のダイナモ作用による磁場

本藏・大志万(「海洋大陸遷移地域における地球電磁気現象に関するシンポジウム」講演1981)は西伊豆地域の全磁力観測にもとづいて、海岸付近の観測点で潮汐によって誘導されたと思われる磁場変化の存在を指摘した。我々は1981年夏の変化が、潮汐磁場のエイリアシングである可能性を疑いはしたが、いくつかの理由でこれをしりぞけ、地殻活動に起因する可能性が強いとした(笹井・石川1982)。その後OHSHIMAN(1982)は地震予知研究地磁気グループの公表データを用いて、初島の変化がエイリアシングで説明可能であるとした。一方、原田・他(1984)は松崎の3年分の全磁力データをスペクトル解析し、 M_2 , O_1 等の潮汐周期に対する有意なスペクトル・ピークが検出されないことを示した。このように潮汐磁場の存在は、伊豆地方で地磁気観測にたずさわっている研究者の間で、論争の種になっていた。

ここで潮汐周期の、磁場の夜間サンプリングで生ずる、エイリアシングについて簡単にまとめておく(aliasing: 別名現象とか周波数折り返しと訳されているが、意味がとりにくいので、原語を用いる)。以下の議論はOHSHIMAN(1982)を参考にした。エイリアシングとは、連続な時系列を一定の時間間隔で標本化する時、標本間隔の2倍より短い周期の波が含まれていると、見掛け上ゆっくりした波が標本化時系列に現れる現象を指す。ストロボスコープの原理として知られている。我々はいくつかの理由から、夜間のある時間帯だけ全磁力地点差をもとめ、平均値を毎日プロットすることが多い。これは24時間の間隔で、本来は連続な全磁力変化を離散的に標本化したことになる。従って48時間より短い周期の波が含まれていれば、エイリアシングを起す。ただし48時間の整数分の1の

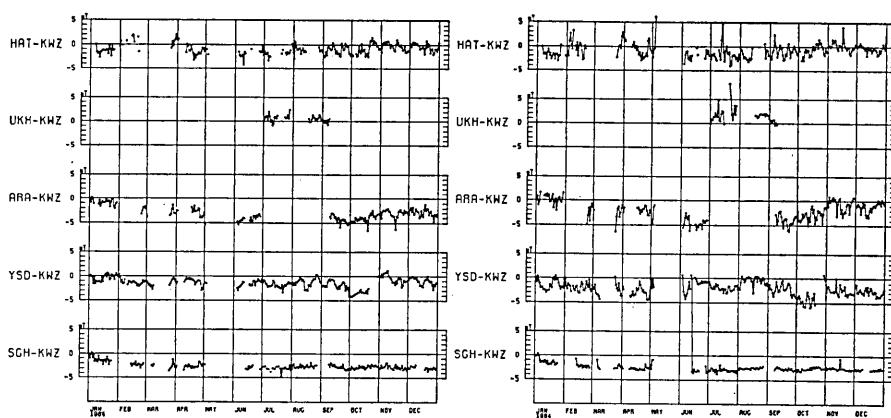


Fig. 7(a). Daily plot of the simple differences of night-time data between eastern Izu stations and KWZ in 1984.

Fig. 7(b). Daily plot of the simple differences of whole-day data between eastern Izu stations and KWZ in 1984.

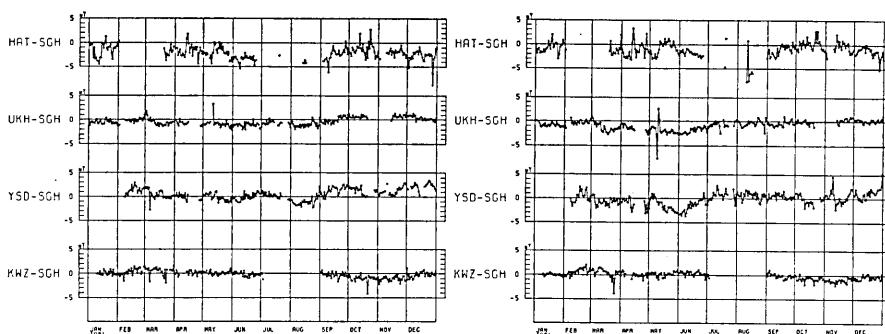


Fig. 8(a). Daily plot of the simple differences of night-time data between eastern Izu stations and SGH in 1981.

Fig. 8(b). Daily plot of the simple differences of whole-day data between eastern Izu stations and SGH in 1981.

場合は、周期無限大の波、すなわち一定のオフセットとなる。

含まれている短周期波の周期が分れば、与えられた標本化間隔に対して、どのような見掛け周期の波を生むかは、簡単に知ることができる。海洋潮汐の分潮周期は確定しているので、24時間の標本化間隔に対して、 M_2 , O_1 , K_1 分潮等が作るエイリアシング周期を、補遺に示した。ある時間帯の平均をつくる場合、エイリアシング波の振幅は、もとの短周期波のそれよりも減衰する。この減衰フィルターは、平均時間幅の関数である。そのフィルター特性も、補遺で求めた。24時間の平均をとれば、実用上は問題にならない程度に、エイリアシング波は減衰することが分る。しかし毎分計測値を夜間5時間にわたって平均する我々の方式でさえ、エイリアシング波の振幅は25%しか減衰しない。従って現行

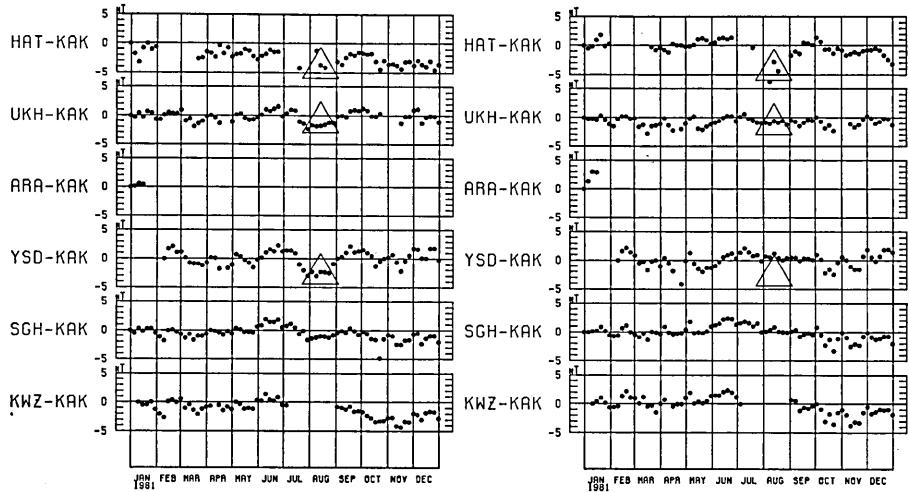


Fig. 9(a). 5-day mean of night-time differences between the eastern Izu stations and KAK in 1981. Triangles indicate the "anomalous events" we reported in the previous paper (SASAI and ISHIKAWA 1982).

Fig. 9(b). The same as Fig. 9(a), except that whole-day data are used. Notice that the "anomalous events" disappear.

の夜間データ処理方式では、数 nT 以上の潮汐周期の変化が含まれていれば、エイリアシングによる見掛け変化の生ずることは避けられない。

潮汐磁場のエイリアシング効果が明瞭に認められる記録を、次に示す。第 7(a) 図は 1984 年 1 年間の、河津を基準とした夜間単純差をプロットしたものである。吉田において、8 月から 12 月にかけ、ほぼ半月周期の変動がくり返されている。補遺で求めたように、 M_2 と O_1 分潮のつくる見掛け周期は、それぞれ 14.8 日および 14.2 日である。1984 年後半は、 M_2 と O_1 の見掛け変化が大体同位相で、半月周期の変動を強めていると思われる。この変動が同年前半ではあまり明瞭でない。この時期には M_2 と O_1 の見掛け変化が逆位相で、互いに打ち消しあうためと理解される。初島においても、同様な変化が見られる。興味深いことに、新井観測点は海岸のごく近くにあるにもかかわらず、半月周期の変化があまり目立たない。

補遺の議論にしたがえば、全日平均ではこのような変動が消えるはずである。第 7(b) 図に同期間の全日平均プロットを示す。確かに初島と吉田において、半月周期の変動は消えてしまう。以上のことから、7(a) 図の吉田と初島に見られる規則正しい振動的変化は、 M_2 と O_1 分潮の作る潮汐磁場のエイリアシング現象である、と判断される。

次に 1981 年夏の夜間平均に現われた変化を調べてみる。この期間中、河津は落雷による集録装置の故障で欠測だったため、菅引を基準として比較する。第 8(a) 図に 1981 年 1 年間の夜間全磁力地点差を示す。第 8(b) 図は同期間の全日平均である。8(a) 図にある 7 月中旬から 9 月初めにかけての吉田の変化が、8(b) 図では消えてしまう。初島では 8(b) 図でも、8 月中に地点差が減少したままである。実は、初島の磁力計がこの時期に不調で、

日中に十分な記録がとれていない。そのため全日平均値が夜間平均値の方にひき寄せられて、このような結果を生じたものである。

前報においては鹿野山を基準として、夜間 15 個データの 5 日平均をプロットし、浮橋においても全磁力減少が見られたことを報告した。8(a) 図によると、菅引を基準とした比較では、浮橋の減少があまり明瞭ではない。第 9(a), 9(b) 図に、柿岡を基準とした、夜間と全日データによる 5 日平均を示す。こちらの方には、浮橋の減少が明瞭に現われる。菅引においても振幅は小さいながら、同位相の潮汐磁場が含まれているのかも知れない。

全日平均をとると消失するから、1981 年夏の夜間平均に現われた変化は、エイリアシングによるものと思われる。潮汐によるものなら、どんな周期の成分がこのような変化を作るのだろうか。 M_2 や O_1 分潮では、約 2 ヶ月ないし 3 ヶ月周期の見掛け変化は生じない。表に示したように、 K_1 分潮は周期 1 年のエイリアシング波を作るので、これが一番疑わしい。ところが、約 2 ヶ月の継続期間をもつ、この特異で顕著な見掛け変化が現われたのは、5 年間でもこの時に限られる。前報において、我々がこの変化をエイリアシングによるものでないと判断したのは、このためであった。

第 8(a) 図と 7(a) 図を比較すると、1981 年は 1984 年ほどには、半月周期の変動が目立たない。相模湾の潮流の強さに、経年的な変化があったのであろうか。電車ノイズのオフセットを除去しないと、1981 年の現象をひき起した特異な潮汐(?) の周期などを、調和解析で決定することができない。今後の課題としたい。

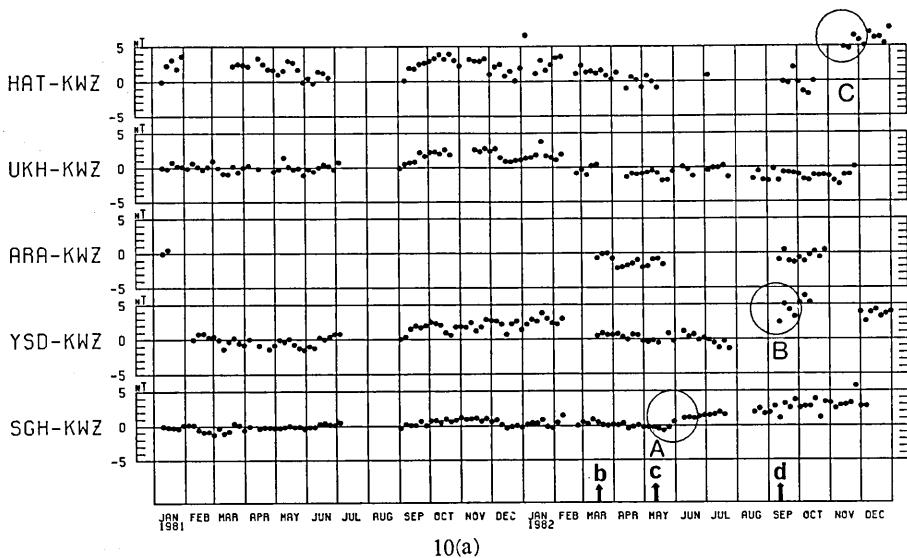
エイリアシングによる見掛け変化を避けるためには、全日平均を用いるのが望ましい。しかし第 8(a) 図と 8(b) 図を見くらべると分るように、電車ノイズ等によって全日平均のバラつきは非常に大きく、全磁力地点差の変化を精度良く追跡するには適さない。OHSHIMAN (1982) は、潮位データを入力とする潮汐磁場の補正法を提案している。先に述べたように、東伊豆地域では、電車ノイズの直流バイアス効果をも考慮しないと、補正係数が正しく求められない。とりあえず本稿では、全日平均でエイリアシングの有無をチェックしながら、夜間単純差で全磁力変化を追うことにしておこう。

4. 地殻活動と全磁力変化の対応

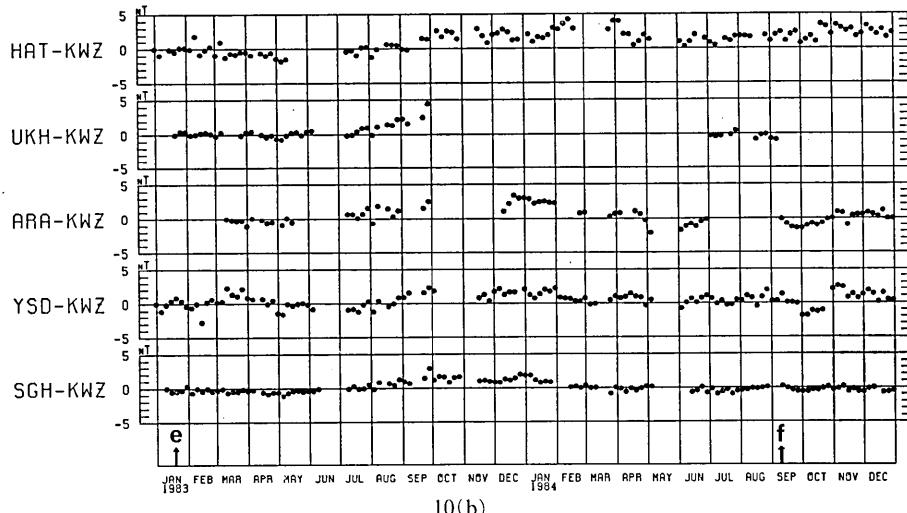
第 2 節で 1982 年に菅引、吉田、初島に全磁力の急増が見られることを指摘した。変化の様子をくわしく見るために、第 10 図に河津を基準とした夜間全磁力差の 5 日平均を、(a) 1981—1982 年、(b) 1983—1984 年の期間について示した。これは時間スケールが異なるだけで、第 6(a) 図と同じものである。図中に、川奈崎付近の群発地震発生時期を、又、注目している菅引、吉田、初島の変化を、A, B, C で示した。このような全磁力の急変化現象を、ここではイベントと呼んでおく。

第 10 図の下段に、川奈崎付近の群発地震活動の発生時期を矢印で示し、b-f の記号を付した。この記号に対応する震央の分布を第 11 図に示す。これは地震移動班・地震活動部門 (例えば 1982) および MATSU'URA (1983), 松浦・他 (1985) によって求められた、正確で均質な震源分布図からまとめたものである。

同図に a' として示された南北走向の震央分布は、1980 年 6 月 29 日伊豆半島東方沖地震



10(a)



10(b)

Fig. 10(a). Geomagnetic total field changes at eastern Izu stations relative to KWZ during 1981 and 1982 (5-day mean of night-time differences). Arrows at the bottom indicate occurrences of swarm earthquakes off Kawanazaki. Tectonomagnetic events at SGH, YSD and HAT are denoted by A, B and C respectively.

Fig. 10(b). Geomagnetic total field variations at eastern Izu stations relative to KWZ during the period from 1983 to 1984 (5-day mean of night-time differences).

M 6.7 の余震で、明らかに川奈崎沖群発地震とは、発生場所が異なる。この地震の前後に活発であった群発活動を a で表わすと、1982 年以降の活動は、a を含み西北西—東南東にのびた線状に配列する。更に M 6.7 の余震系列と一連の群発地震は、深さ分布も異なり、前者が主震断層に対応して 10 km よりも浅いのに対し、後者はやや深く、主断層の下で斜交する分布となっている（例えば MATSU'URA 1983）。1982 年の全磁力変化は個々

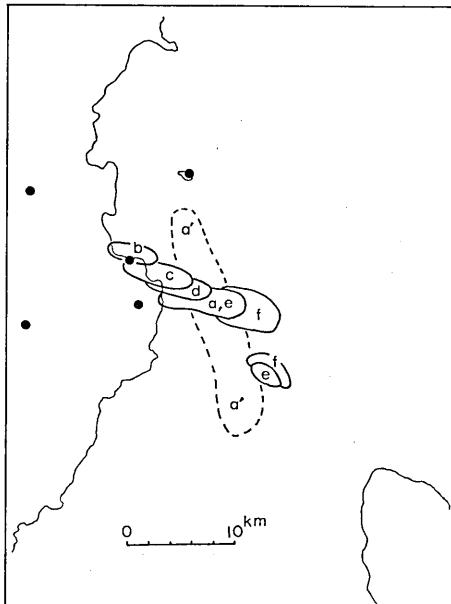


Fig. 11. The epicentral distribution of Kawanazaki swarm earthquakes during the period from 1980 to 1984 (after MATSU'URA *et al.* 1985). The area 'a' trending north-south is the after shock region of the 1980 East-off-Izu Peninsula earthquake of M 6.7.

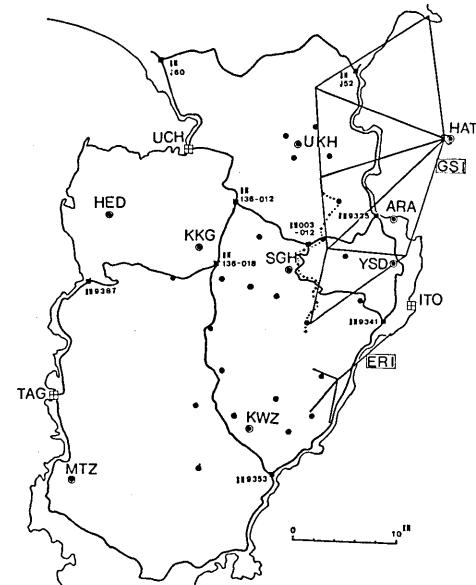


Fig. 12. The distribution of geodetic observation networks in the Izu Peninsula. Levelling routes (GSI) with some important bench marks, triangulation network by GSI and Higashi-Izu geodimeter baselines by ERI are shown. The square with plus is the tide gauge station (GSI, JMA, HGO), while the triangle is the volumetric strainmeter (JMA). Small plus signs connected with a dotted line represent the magnetic survey points established by TIT and ERI (the Izu Skyline "leap frog" survey line: OHSHIMAN *et al.* 1988).

の群発活動と明瞭な相関は持たないよう見える。1984年9月の活動に先だって、新井で全磁力減少、そして吉田で活動終了直後に全磁力急増が認められる。以下で見るように、全磁力変化は地殻変動と良い対応を持つ。

地殻活動の推移を見る上で、諸機関の観測成果を参考するので、主な水準路線、光波測量ネット、検潮場などを、第12図にまとめた。伊東と油壺検潮場の月平均潮位差を第13(a)図に示す(国土地理院 1985)。又、同図の(b)に頻繁に測量されている水準点の、内浦を基準とした高度変化を示した(国土地理院 1985に加筆)。13(a)図によれば、伊東市南部付近は1978年後半の急激な隆起の後にも、ほぼ一定の速度で隆起が続いている。くわしく見ると、隆起速度に緩急が見られる。多田(1883)は、13(a)図の潮位差変化をいくつかの期間に分けて、平均隆起速度を求め、1979年5月から1981年12月までの期間は2mm/月、1982年1月以降は5mm/月としている。国土地理院(1985)によると、伊東と南

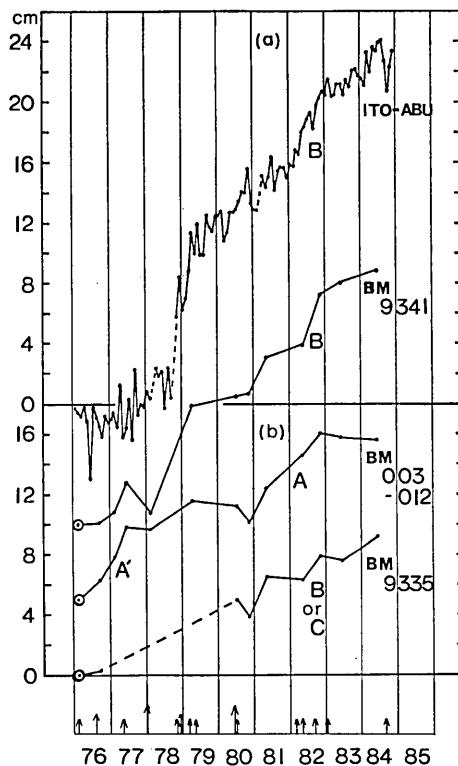


Fig. 13. The crustal uplift in the eastern Izu region for the period from 1976 to 1984 (after GSI); (a) Monthly mean sea level differences between Ito and Aburatsubo tidal station (upward: upheaval at Ito T.S.). (b) Height changes at three bench marks (see Fig. 12) relative to UCH tidal station as revealed by levelling surveys.

伊豆および内浦検潮場との潮位差では、1983年頃から隆起は頭打ちになったように見える。従って13(a)図の潮位差には、三浦半島の地殻変動の影響（油壺の沈降による見掛け上の伊東降起）が含まれている可能性がある。油壺潮位の経年変化は-4.6mm/年(1961—1980年)とされている(国土地理院1983a)。

1982年は内陸部から東海岸にかけて、隆起活動の移動が見られた。第14(a)図に中伊豆町冷川(BM 003-012)と伊東市街(BM 9335)を結ぶ、冷川峠越えの水準路線の、中伊豆側を固定した高度変化を示す(国土地理院1983b)。この図によると、1982年5—6月には中伊豆の方が伊東に比べ、約2cm隆起していたのに対し、同年11—12月には伊東側もほぼ同じ量だけ隆起したことになる。

第14(b)図は、1982年5—7月と1983年6—7月の期間における、内浦を基準とした水準測量結果で、網目平均を行ったものである(国土地理院1984に加筆)。隆起域に2つの中心が認められる。これら隆起中心の近くに、吉田および初島が位置することが注目される。第14(a)図によれば、1982年5—6月以前に中伊豆町冷川付近では、既に隆起が進

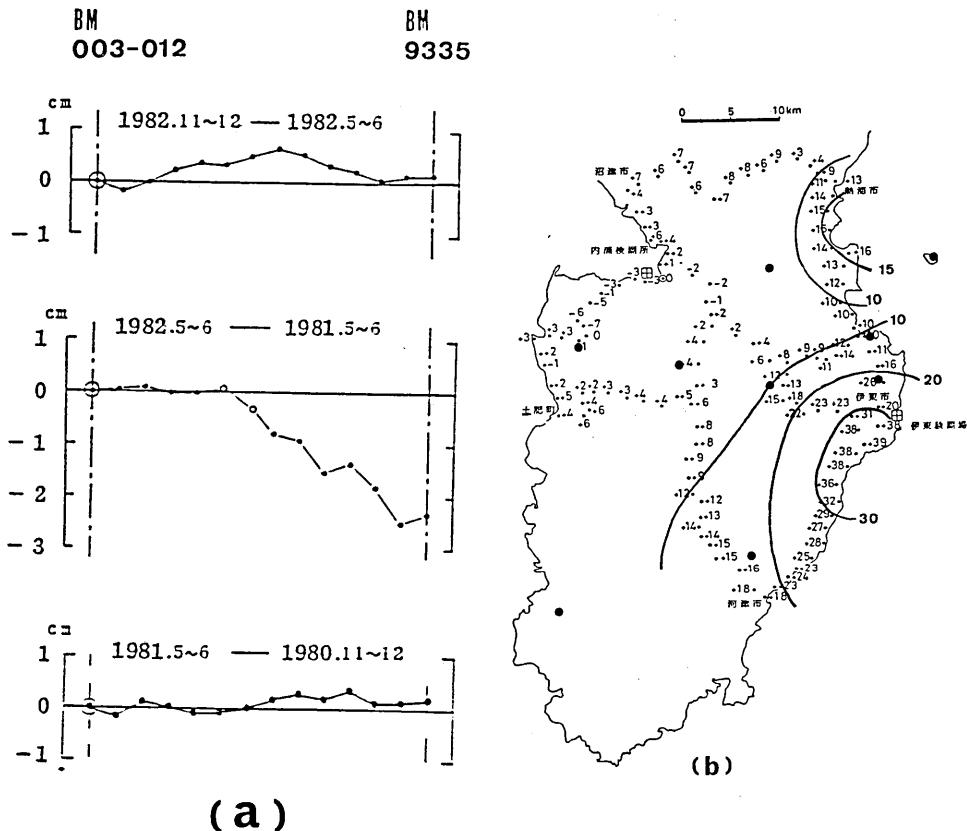


Fig. 14. Migration of crustal uplift occurred in 1982 (GSI 1983b, 1984): (a) Results of repeated levelling surveys along a route between B. M. 003-012 and B. M. 9335 (see Fig. 12). Relative height changes along the route are given, in which the height at B. M. 003-012 is fixed at zero.

(b) Crustal uplift in the Izu Peninsula during the period from May-June, 1982 to May-June, 1983. The datum is UCH tidal station. Unit in mm.

行っていた。14(b) 図はこの時期を基準としているので、中伊豆町付近には顕著な隆起中心が見られない。

なお 14(b) 図によると、河津観測点付近も 1 cm 以上の隆起域に属している。但し河津町から天城峠を越える水準測量結果には、なんらかの系統的な誤差が含まれているかも知れない。1984 年の測量では、この路線に 1 cm 近い沈降が出て、前回の隆起を相殺した。1980 年 6—12 月から 1984 年 5—7 月の累積隆起量は河津付近で ±1 cm 以下にとどまっている（国土地理院 1985）。

第 13(b) 図には第 10 図に示した地磁気イベントの発生時期を記入してある。この図からも、1982 年には中伊豆町の隆起が先行し、全磁力変化のイベント A と対応していることが分る。BM 9335 は初島に最も近い。しかし 14(b) 図によると、この水準点は東海岸

に生じた2つの隆起中心の、谷間に位置するので、この地点の隆起がBとCのいずれに対応するのか不明である。

次に水平変動との対応を調べる。伊豆半島では、第12図に示した三角網で、1978年から毎年11—12月に光波測量が行われている（国土地理院 1985）。1978年から1979年にかけてと、1981年から1982年にかけて、いくつかの測線で顕著な伸びが認められた。これらは急速な隆起が確認された時期と一致する。これらの三角網については、1981年10—11月と1982年11—12月の期間の、歪解析が行われている（国土地理院 1983b）。歪主軸と最大せん断歪および面積変化率を15(a)図に、各辺長の距離変化量と伸び率を15(b)図に示した。初島、新井、吉田を含む南側の三角網において、水平変動が非常に大きい。この地域は、第14(b)図に見られる隆起中心と一致している。

15(a)図では吉田をふくむ三角網で、北東—南西方向の伸びが卓越するのが注目される。一方そのすぐ北側の三角では、北西—南東への伸長が大きい。ただしこの三角形は細長いので、最も短い辺である徳永村一小室山測線の大きな伸びに影響されたものであろう。一番北側の三角でも、北東—南西の伸びが目立つ。ここは第14(b)図で、隆起中心のひとつが存在する所である。このように隆起中心をふくむような三角網で、北東—南西方向の伸びが卓越することは、注目すべきであろう。

ここで次の点に注意したい。半年ないし1年間隔の水準と光波測量では、顕著な隆起お

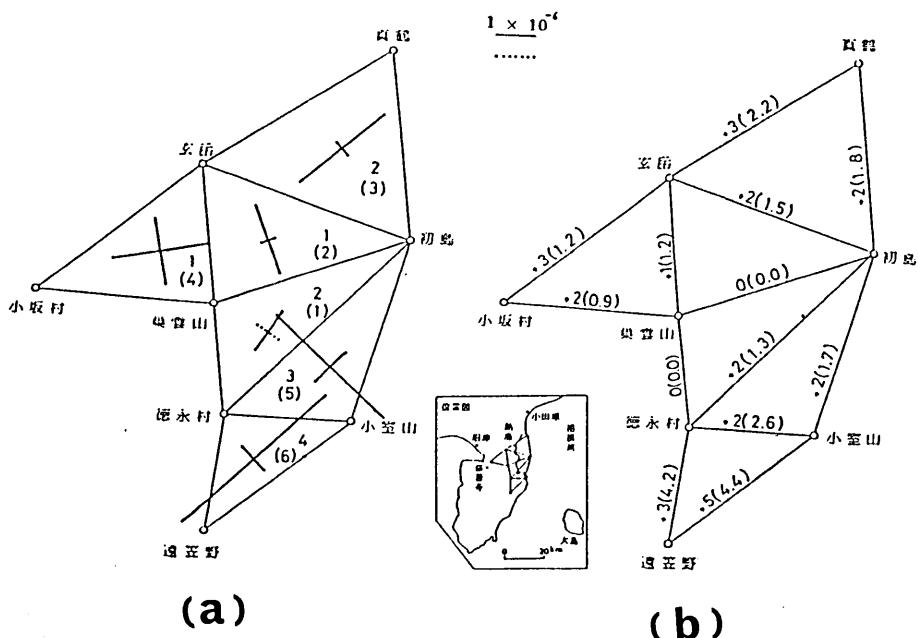


Fig. 15. Results of distance measurements during the period from Oct.-Nov., 1981 to Nov.-Dec., 1982 (GSI 1983b): (a) Principal strain axes, maximum shear strain and relative areal change at each triangle. (b) Changes in the length and simple extension at each side.

より水平方向の伸びと地磁気イベントの発生時期に対応がつけられた。しかし 13(a) 図の伊東一油壺の月平均潮位差からは、伊東検潮場に近い吉田のイベントに対応して、1982年9月頃に急激な隆起を生じている訳ではない。多田(1983)が指摘するように、隆起速度の変化が認められるにすぎない。すなわち地磁気イベントは1ヶ月以内に段差状の変化を示すのに対し、隆起の方は半年ないし1年かけて、じわじわと進行するらしい。更に、地磁気イベントが認められなかった新井や浮橋付近も、隆起域に属している。このような隆起活動の時間的推移を頭に置いて、あらためて第6図および第10図を見直してみると、1980年から1982年にかけて、伊豆半島北東部ではむしろ全磁力の減少が目立つ。特に吉田と初島では、1982年のエピソード的な全磁力急増のあとにも、ゆっくりした減少が起っている。このように地殻隆起と直接対応する全磁力変化は、急増現象ではなく、緩慢な減少の方ではないだろうか。

この見方と調和する観測結果がある。東工大理学部グループと我々は、1978年12月以来、伊豆スカイラインに沿って約1km間隔に14点の磁気点を設け、頻繁に測量をくり返してきた。これは日中に隣接した測点で同時に測定して、日変化の地点差による誤差を避け、かつ効率良く、くり返し測量を行なおうというものである。1978年12月から1982年3月までの結果は、OHSHIMAN *et al.*(1983)によってまとめられた。測量点は第12図に、+印等を点線でつないで示した。特に BM 003—012に近い測点では、-1.2 nT/年に達する全磁力減少が認められた。第13(b)図に見てきた通り、この付近は1978年から1982年前半にかけては、緩慢な隆起が続いてきた地域である。

この観点からすると、第10(b)図で新井に見られる、1984年前半の、半年間で4nTに達する全磁力減少は注目される。川奈崎沖で最も活発な群発活動が起った直後の1984年10月頃、吉田に見られる全磁力の減少と10月末の急増も、1982年のイベントとよく似ている。1983年5—7月と1984年5—7月の間に、東海岸の隆起域がやや北上し、新井付近を中心に約1.5 cmの隆起が確認されている(国土地理院1985)。新井および吉田の変化は、これに関連したものと思われ、1982年と同じ現象が起ったといえる。

全磁力の減少は、1980年から1982年にかけて、伊豆半島東部の一般的傾向である。従って伊豆半島の周囲における地磁気永年変化の様子を知らなければ、地殻隆起と全磁力減少を直ちに結びつける訳にはいかない。そこで次節において、関東一東海地域における全磁力変化を調べることにする。

5. 関東、東海地域の全磁力変化

前報において、地震予知研究地磁気グループによる、全国精密全磁力永年変化観測成果を用いて、関東、東海地域における全磁力変化の一般的傾向を調べた。その後このデータは、地磁気データ・ベースに納められ、利用しやすい形で、提供されている。第16図の二重丸の観測点では、データが公表されている。なお四角は地震研究所八ヶ岳地磁気観測所による連続点で、1982年頃から観測が開始され、近い将来データ・ベースに加えられる予定である。ここでは1980年1月から1984年12月までの5年間について、第16図に示された観測点(二重丸)のうち、初島(HAT)と伊豆大島野増(NOM)を除く8点と、柿岡

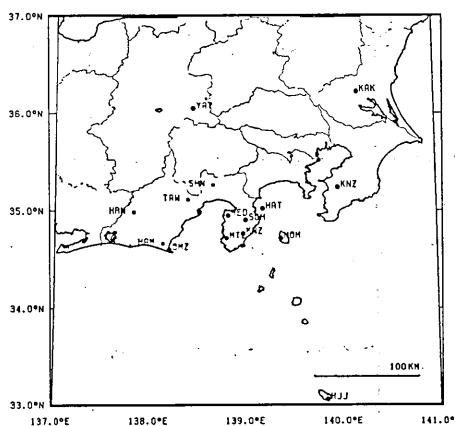


Fig. 16. The distribution of proton magnetometer stations in the Kanto and Tokai districts. Dotted circles: stations offering data to The Geomagnetic Research Group for Earthquake Prediction. Squares: stations newly established by ERI since 1982.

との全磁力単純差の5日平均を作成した。初島と野増については、人工擾乱によるオフセットの補正が済んでいないので、除外した。第17図に、八ヶ岳(YAT), 鹿野山(KNZ), 菅引(SGH), 戸田(HED), 河津(KWZ), 松崎(MTZ), 御前崎(OMZ), 八丈島(HJJ)の変化を示す。変動の大きな観測点があるため、縦軸の縮尺を本稿のこれまでの図より半分に縮め、5年間の大まかな傾向を見ることにした。

八ヶ岳と柿岡の全磁力差には、1981年7月の落雷とそれに続く数ヶ月のドリフトを除いて、ほとんど変化は無い。房総半島の鹿野山では、柿岡に対して定常的に、全磁力の微増が続いている。これは過去の傾向と全く同じである(笹井・石川 1976)。なお、1980年5月頃の段差は、建物工事の影響による。

伊豆大島の全磁力永年変化については、行武・他(1978a)の興味深い研究がある。ここでは、最近の変化を含めての、データ解析成果を引用する。伊豆大島については、1967年以来のデータがあり、1967年から1977年まで10年以上、柿岡に相対的に全磁力の増減がほとんど無かった。行武・他(1978a)は八丈島、鹿野山等との比較から、伊豆大島でも柿岡に対して全磁力が漸増するのが正常な永年変化であり、この期間の伊豆大島の全磁力変化は極めて異常である、と指摘した。その後1980年頃を境に、野増の全磁力値も柿岡に相対的に増加に転じた(地震研究所 1985)。島内数ヶ所に置かれたプロトン磁力計によても、同様の変化傾向が確かめられている。野増における異常な永年変化は、大島の内部の局地的なものではなく、伊豆大島全体の傾向を代表していたようである(行武 私信)。

既に述べてきたように、伊豆半島東部では1981年から1982年まで、柿岡に比べて停滞ないし減少傾向が続き、1983年に増加に転じた。伊豆半島の西海岸では、やや様相を異なる。北西部の戸田では、1981年から1983年末までは、柿岡に対してほとんど変化が無く、1984年に入って増加に転じている。南西部の松崎では、1980年後半から全磁力減少

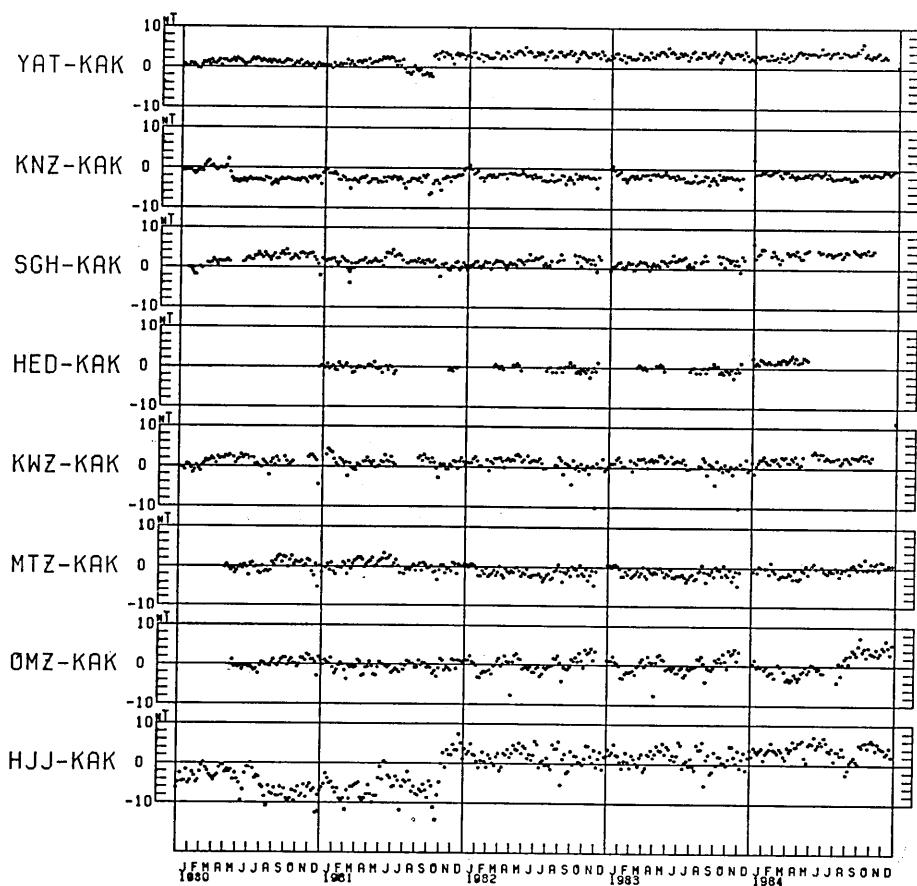


Fig. 17. Changes in the geomagnetic total field relative to KAK during the period from 1980 to 1984. 5-day mean of simple differences of 15 night-time data (i.e. those at 10 minute intervals from 00:40 to 03:00 LT) are plotted.

が続いていたが、1982年前半頃から安定し、1984年に入って増え始めている（地磁気観測所 1985）。このように伊豆半島内部でも、東側と西側では、トレンドの反転に1年位の時間差があるよう見える。この事実は既に、原田・他(1984)によって注目されており、伊豆半島の地殻活動の消長と関連している可能性が指摘されている。

御前崎の全磁力値は、変動が大きい。地磁気観測所(1985)によれば、1) 1983年頃より、振幅が約3—4nTの大体半年周期の変化が現れてきた、2) 1984年8月からの大きな変化は人工擾乱による可能性が大きい、とされている。東海地方では、地震研究所・八ヶ岳地磁気観測所によって、くり返し磁気測量と連続観測が精力的に行われている(HON-KURA et al. 1980, 八ヶ岳地磁気観測所 1985)。特に1982年から富士宮市篠坂(SHN), 静岡市俵峰(TWR), 浜岡町(HAM), 春野町(HRN)でプロトン磁力計の連続観測が開始された(第16図参照)。注目すべきことに、篠坂、俵峰、浜岡において、1982年から1984年にかけては、八ヶ岳に相対的に減少の傾向にあることで、これは1971年から1978年に

かけてくり返し測量で見出された、増加傾向と正反対である(八ヶ岳地磁気観測所 1985)。このように、関東南部と東海地方では、わずか数 10 km しか離れていない地域の間で、全磁力永年変化の様子が違うらしい。これが地殻活動の推移と、どのような対応を持つのか、極めて興味深い。

最後に、第 17 図の八丈島に見られる、1981 年 11 月頃の、10 nT に達する全磁力増加に注目したい。これは前報においても指摘した現象である(笹井・石川 1982)。八丈島の全磁力値に変動が大きいことは、1972 年八丈島近海地震の際における比較調査で分っていた(水路部 1972)。大島章一(私信 1979)は、この変動が黒潮の流軸変動に関連することを指摘している。実は、1981 年 11 月に黒潮の大蛇行が始まったことを、後に知った(海洋速報による、なお小松・石井 1985 を参照)。1983 年 10 月の三宅島噴火に関連して、現在も続けられている全磁力観測によても、黒潮の流路変更に伴うと思われる、著しい変化が見いだされている(中川・他 1985)。植田・他(1985)は、八丈島の地磁気観測成果を整理して、全磁力変化に最も寄与しているのは、鉛直成分であることを明らかにした。

黒潮の流軸変化と地磁気との関係については、水野(1970)の研究を除いて、理論的な考察もなされていないようである。第 3 節で述べた、潮流による磁場も含めて、海流のダイナモ作用による磁場変化の研究は、地震、火山噴火予知のための地磁気観測の精度を向上させる上で、今後の重要な課題のひとつであろう。

6. 考 察

伊豆半島北東部の地殻活動の推移と対応づけられる、地磁気変化が確認された。1982 年の変化は最も顕著であるが、1984 年にも新井で全磁力減少、吉田で短期間の減少の後に急増が見られ、この期間の隆起や群発地震に関連しているように思われる。後者の変化については、潮汐や外部変動磁場の影響を考慮して、見掛けのものではないかどうかを、検討する必要がある。

実は 1977 年前半にも、1982 年とよく似た現象が起っている。第二報で報告した通り、1977 年 2 月末から 3 月にかけて、菅引では鹿野山と比べて、約 4 nT に達する全磁力の急増が生じ、約半年かかってゆっくり減少した(笹井・石川 1978)。1977 年前半に中伊豆町付近で、隆起が進行したことが確認されている。これは第 13(b) 図の、BM 003-012 の水準点高度変化にも、明瞭に表われており、A' で示してある。更に同年 4 月と 5 月に、遠笠山付近の群発地震が活発化した(津村・他 1977)。

ただしこの時には、松崎において、1977 年 1 月から 2 月にかけ、5 nT におよぶ全磁力減少が見出されている。これは人工擾乱によるものではないことが確認された(森 俊雄: 私信 1978) ものの、田中・他(1978)の磁気測量結果とは一致せず、その原因がつかめないままであった。我々は水路部から、八丈島における夜間 0h から 2h までの全磁力平均値を頂き、鹿野山の対応する時間帯の平均値との単純差を作成してみた。その結果、八丈島でも同じ時期に、松崎と全く同様な全磁力減少が見出された。松崎と八丈島の全磁力値が、海流ダイナモ磁場の影響を受けていることは、既に見てきた通りである。従って 1977 年 1—2 月の松崎の変化は、潮汐磁場のエイリアシングか、海流変動の影響で説明できる

かも知れない。

1977 年当時、伊豆半島における全磁力の連続観測点は、菅引と松崎しか無く、しかも夜間 0h から 2h まで 2 時間しか測定が行われていなかった。現在の我々の知識からすると、これは様々な見掛け変化を補正するのに、十分なデータ量とは言えない。またくり返し測量結果に対する当時の我々の解釈には、磁気傾度が大きい伊豆地方での再設置誤差、電車ノイズによる直流バイアス効果、海岸付近と内陸部の地磁気変化の地域差、そして潮汐磁場のエイリアシングなど、その後明らかになった様々な誤差要因についての、配慮が十分であったとは言えない。我々は第二報において、菅引と松崎だけの連続データと、やや信頼度に欠ける測量結果から、菅引に見られた全磁力急増が伊豆半島全域に生じたとみなして、その原因を考察した。第二報での我々の議論は、根本的に再検討を要する。

1975 年頃から始まった伊豆半島の異常隆起については、その原因をめぐって、様々な考えが提起されている。これらについては島崎 (1980) のまとめがあり、その後も茂木 (1982) による火山性地殻とマグマの移動を重視するものや、多田 (1983) による表層地殻の変形 (ダイラタンシー) をひとつの原因とする説、HONKURA and TAIRA (1983) の電気伝導度変化に基づくダイラタンシー・水浸透説などが提案されている。

本稿においては、いまだ準備不足で、地殻隆起をもたらす様々なモデルが作る地磁気変化を、定量的に吟味することはできなかった。今後の考察のたたき台として、現段階における一応の推測を述べてみたい。第 11 図にまとめられた、特異な地震の線状配列は何を意味するのだろうか。この配列を地震断層の走向だと考えると、伊豆半島東方沖地震の主震断層（地表から 10 km 位の幅を持ち、ほぼ南北走向の左横ずれ）のすぐ下に、その断層と約 60° 位斜交した、別の断層を想定することになる。このような断層配置は不可能では無いにしても、かなり不自然なものに思われる。伊豆半島東方沖地震をひき起した広域応力の主軸は、北東一南西方向の圧縮力と、これに直交する張力と考えられるから、NAKAMURA (1977) の考えに従えば、北東一南西方向に開口する、引張り割れ目を生じやすいはずである。マグマがダイク状に貫入すれば、その周辺で、応力集中による脆性破壊がおこる。すなわち、第 11 図に示された地震の線状配列は、マグマのダイク状貫入の走向を示すものではなかろうか。

1980 年伊豆半島東方沖地震は、主震断層の直下にダイク状に貫入したマグマによって、いわば強制的に動かされて発生した可能性もある。南北走向の断層の下で、N60°W 走向の垂直なダイクの開口が起れば、N30°E 方向の張力が断層面に働くことになるから、左横ずれ運動を誘発しやすい、と云える。勿論、マグマが断層面内に浸透して、破壊強度を低下させたことも考えられる。マグマによって直接、大地震がトリガーされた可能性は、行武・他 (1978a, b) が伊豆大島近海地震について考察している。川奈崎沖群発地震は、潮汐の干満と対応した、バースト的発生をくり返すことが特徴である (MATSU'URA 1983)。これも潮汐荷重によって、マグマに加わる静水圧が変化し、水に過飽和なマグマの、発泡による体積増加などの仕組を考えれば、説明可能かも知れない。三宅島噴火直後の地震活動にも、同様な傾向が知られている (笠原・他 1984)。

第 15 図によれば、隆起中心を含む測線において、北東一南西方向の伸びが卓越する。これらの測線の間に、マグマの薄板状の貫入が起って、測線間隔を押し拡げた、と考える

のがもっともらしい。ただし茂木モデルのような、同心円状の隆起の場合でも、測線のとり方によっては、特定方向が伸びる。伊豆東海岸の隆起中心がどこにあるかは、海域に防げられて、正確には分らない。水平方向の伸縮データは、目下の所、マグマのダイク状貫入と矛盾しない、というに留まる。更に、薄いマグマ・シートの開口によっては、地表隆起はあまり期待できない(MARUYAMA 1964)。広域のドーム状隆起を起す力源は、茂木モデルのように、上下方向の開口成分を持つ必要がある(萩原 1977b)。

茂木モデルに伴うピエゾ磁気変化(SASAI 1979)と、長方形ダイクが垂直に貫入した場合の地磁気変化(笹井 1984b)については、すでに解かれている。期待される地磁気変化は、茂木モデルでは全磁力減少、垂直なダイクの場合は全磁力増加で特徴づけられる。観測事実と対応させると、先ずマグマの薄板状の貫入が起つて、その真上に近い地点に局所的な全磁力増加をもたらし、次いで茂木モデル型の膨張力源によって、より広域のゆるやかな隆起とそれに対応した全磁力減少が起る、という筋書になる。定性的にはもっともらしいのであるが、問題はこの現象の起っている深さにある。このようなマグマの動きが、群発地震の震源に対応して、地下 10 km 付近で起っているとしたら、力源が深すぎて、観測された地磁気変化量を到底説明できそうにない。

観測されたような強さの磁場変化を生ずる機構として、二つのものが考えられる。ひとつは、深部のマグマ貫入で生じた応力場によって、地表近くの帶磁不均質の境界近傍で、大きな磁場変化を生ずる可能性がある。周囲と異なる帶磁を持つ物体の表面は、ピエゾ磁気による磁力線の吸い込み、又は湧出し口になるからである(SASAI 1983)。しかしこの場合、磁場変化は局所的で、一様帶磁地殻で期待される変化と、センスが一致する保証もない。もうひとつは、マグマ貫入による応力場で、地表付近の岩石に微小割れ目が多数発生し、それに伴うピエゾ磁気で、観測し得る磁場変化を生ずる場合である。

そこで、1976 年から 1979 年にかけての隆起活動の詳しい解析(海津・多田 1980)から、あるいは重力(測地移動班 1980)や、電気伝導度変化(HONKURA and TAIRA 1983)から主張されている、ダイラタンシー説を考えてみる。前報において、我々は複合茂木モデル(萩原 1977b)によるピエゾ磁気変化の、近似解を求めた。その後筆者の一人は、モデル・パラメータに何等の制約条件もつけない、複合茂木モデルについての一般式をもとめ、精度良い数値積分で、地表変位や地磁気変化などを計算するやり方を工夫した(笹井 1984a)。

ダイラタンシーを弾性体内部に無数の微小な引張り割れ目が発生した状態と考えて、複合茂木モデルを拡張することができる(SASAI 1985, 準備中)。膨張中心の代りに、張力割れ目に対応する歪核(MARUYAMA 1964)をガウス分布させるのである。地磁気変化については、この歪核の作る磁気ポテンシャル(SASAI 1980)を、ガウス分布の重みをつけて積分してやればよい。割れ目が水平方向に開口する場合には、全磁力増加がおこる。複合茂木モデルは、割れ目の走向があらゆる向きに、万偏無く分布する場合と等価であることが示される。この拡張された複合茂木モデルの有利な点は、地表近くに多くの割れ目が分布する場合には、十分検出可能な地磁気変化が期待できることである。

我々はマグマ貫入を原動力として、表層地殻内に二次的にひきおこされたダイラタンシー状態、というモデルが、伊東隆起とそれに伴う地磁気変化を説明するのに有効ではない

か、と想像している。マグマ貫入、プラス、表層地殻の非弾性的変化（ダイラタンシーをも含む）という考えは、茂木（1982）や、多田（1983）によって主張されてきたものである。マグマ貫入説、ダイラタンシー説の他に、伊豆地域のテクトニクス的考察からクリープ・ディスロケーション説（石橋 1977, 藤井 1977）も提唱されている。

これらの諸説をチェックする上で、本稿で報告した地磁気変化が重要な鍵を握っている、と我々は考えている。ピエゾ磁気効果は、偏差応力によってひき起され、応力場の性質に極めて敏感である。地表変位としては、似たような隆起をもたらすこれらのモデルも、地殻内部の応力分布は、かなり異なるので、地磁気変化の様子で区別できる可能性がある。伊豆半島で現に進行中の、地殻活動の原因を究明する上で、地磁気観測を有効な道具として使うためには、見掛けの変化を除去し、信頼できる変化を確定することが急務である。

謝　　辞

この観測は伊豆地方の多くの方々の御協力を得て、遂行されている。とりわけ連続観測点においては、次の方々に長期にわたって御世話をいただいている：中伊豆町菅引の本成寺宇佐美日淨師および御子息の元成君、河津営林署の相馬充氏、大仁町浮橋の本道寺、内藤歓敬師、熱海市初島の初島バケーションランド、長田文秀氏と日下部誠氏、伊東市吉田の光栄寺、村田政明師、伊東市新井の宝専寺、遠山泰雄師、天城湯ヶ島町柿木の大竜寺、渡部美佐子氏である。

国土地理院鹿野山測地観測所、気象庁地磁気観測所および海上保安庁水路部八丈島水路観測所からは、我々の基準観測値として、貴重なデータを送っていただいた。以上の関係者の皆様方に心から感謝の意を表します。

地震研究所の萩原幸男教授は、我々の観測に終始有益な指導と助言を与えられた。地震研究所、唐鎌郁夫氏、荻野 泉氏、東京大学理学系研究科、松浦律子氏からは、伊豆半島の震源データについて御教示いただいた。日本大学文理学部、大志万直人氏には、エイリアシング現象について色々と教えて頂いた。地震研究所、歌田久司氏には東海地域の全磁力変化について教えて頂き、かつ我々の観測結果について有益な議論をして頂いた。同じく浜野洋三助教授には原稿を読んで、不備な点を指摘して頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

引　用　文　獻

- 地磁気観測所, 1985, 御前崎、松崎における全磁力変化(1980年5月—1984年10月), 地震予知連絡会報, 33, 337-338.
- 藤井陽一郎, 1977, 伊豆半島地殻隆起のクリープモデル, 地震予知連絡会報, 17, 68-70.
- 萩原幸男, 1977a, 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, 301-310.
- 萩原幸男, 1977b, 複合茂木モデルとしての松代地殻隆起, 測地学会誌, 23, 25-35.
- 原田 朗・中島只一・大地 洋・桑島正幸・藤田 茂・角村 哲・徳本哲男・福井史雄・山本哲也, 1984, 伊豆・東海地域の地磁気変化(1980年5月—1983年12月), *Conductivity Anomaly 研究会論文集(1984年)*, 121-128.
- HONKURA, Y., S. KOYAMA and T. YOSHINO, 1980, Surveys of the geomagnetic total intensity in the Tokai district, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo.*, 55, 449-481.

- 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, 1977, 伊豆半島異常隆起のクリープモデル—伊豆東方線スラスト深部の非地震性断層運動一, 地震予知連絡会報, 17, 65-67.
- 地震移動班・地震活動研究部門, 1983, 伊豆半島地域の年別震央分布図(1976-1982), 地震予知連絡会報, 30, 126-134.
- 地震研究所, 1985, 伊豆大島における全磁力変化(1968年6月-1984年9月), 火山噴火予知連絡会報, 32, 20-22.
- 笠原順三・南雲昭三郎・是沢定之, 1984, 1983年10月三宅島噴火に伴う地震活動の海底地震観測, 昭和58年10月3日三宅島噴火および災害に関する調査研究(代表者下鶴大輔), 111-128.
- 海津 優・多田 善, 1980, 伊豆半島東部における最近の隆起, 月刊「地球」, 2, 132-136.
- 小杉 英・石井春雄, 1985, 1984年の黒潮流軸変動, 月刊「海洋科学」, 17, 186-197.
- 国土地理院, 1983a, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会報, 29, 147-167.
- 国土地理院, 1983b, 伊豆半島及びその周辺の地殻変動, 地震予知連絡会報, 30, 146-157.
- 国土地理院, 1984, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会報, 31, 229-245.
- 国土地理院, 1985, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会報, 33, 236-257.
- MARUYAMA, T., 1964, Statical elastic dislocations within an infinite and semi-infinite medium, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 42, 289-368.
- MATSU'URA, R. S., 1983, Detailed study of the earthquake sequence in 1980 off the east coast of the Izu Peninsula, Japan, *J. Phys. Earth*, 31, 65-101.
- 松浦律子・唐鎌郁夫・坂上 実・神定健二, 1985, 1984年9月伊豆半島東方沖群発地震活動(強震計等によるM>2.7), 地震学会講演予稿集(1985年春季), 139.
- 水野浩雄, 1970, 地磁気観測に及ぼす海流の影響, 測地学会誌, 15, 112-120.
- 茂木清夫, 1982, 第4章 伊豆, 「日本の地震予知」, サイエンス社, 180-250.
- 中川一郎・笹井洋一・歌田久司・石川良宣・小山 茂, 1985, 黒潮の蛇行に伴った三宅島での全磁力変化, 日本地球電気磁気学会講演予稿集(1985年春季), 149.
- NAKAMURA, K., 1977, Volcanoes as a possible indicator of tectonic stress orientation—Principle and proposal, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 1-16.
- 大地 洋・伊知地昇・桑島正幸・河村 謙, 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., 1982, A study of tectonomagnetism in the Izu region, *Ph. D. Thesis, Tokyo Inst. Tech.*, pp. 78.
- 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.
- SASAI, Y., 1979, The 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., 1983, A surface integral representation of the tectonomagnetic field based on the linear piezomagnetic effect, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 58, 763-785.
- 笹井洋一, 1984a, 地殻の巨視的ダイラタンシー状態に伴う地磁気変化—複合茂木モデル—, Conductivity Anomaly 研究会論文集(1984年), 155-166.
- 笹井洋一, 1984b, 岩脈貫入に伴うピエゾ磁気変化, Conductivity Anomaly 研究会論文集(1984年), 227-241.
- 笹井洋一・石川良宣, 1976, 房総半島における地磁気全磁力くり返し測量: 1968-1976, 震研彙報, 51, 83-113.
- 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一, 震研彙報, 53, 893-923.

- 笹井洋一・石川良宣, 1980, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第三報)—1980年伊豆半島東方沖地震—, 震研集報, 55, 1101-1113.
- 笹井洋一・石川良宣, 1982, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第四報)—1981年伊豆半島北東部の異常変化—, 震研集報, 57, 739-757.
- SASAI, Y. and Y. ISHIKAWA, 1980, Tectonomagnetic event preceding a M 5.0 earthquake in the Izu Peninsula—Aseismic slip of a buried fault?, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 55, 895-911.
- 島崎邦彦, 1980, 伊東隆起と1978年伊豆大島近海地震, 月刊「地球」, 2, 137-145.
- 水路部, 1972, 八丈島東部に起った地震と地磁気変化について, 地震予知連絡会報, 8, 60-61.
- 住友則彦, 1985, 電磁気諸観測(シンポジウム・山崎断層), 月刊「地球」, 7, 32-37.
- 測地移動班, 1980, 伊豆半島の重力変化勾配, 地震予知連絡会報, 24, 113-116.
- 多田 堯, 1983, 伊豆半島の異常地殻活動について(2)一上下変動と水平変動の関係ー, 地震学会講演予稿集(1983年春季), 280.
- 田中秀文・若林哲也・力武常次, 1978, 伊豆半島西部地域における全磁力の変化について, 1968年伊豆大島近海の地震による災害の総合的調査研究報告, 18-19.
- 津村建四郎・唐鍊郁夫・荻野 泉・酒井 要・高橋正義, 1977, 伊豆半島における群発地震の観測(1975-1977), 震研集報, 52, 113-140.
- 植田義夫・東 昇・大久保秀一, 1985, 八丈島の地磁気変化と黒潮流軸との関係について, 日本地球電気磁気学会講演予稿集(1985年春季), 150.
- 山崎断層研究グループ, 1985, 山崎断層の地震(1984年5月30日, M 5.6), 地震予知連絡会報, 33, 355-382.
- 八ヶ岳地磁気観測所, 1985, 東海地方の全磁力変化, 地震予知連絡会報, 33, 329-331.
- 行武 毅・吉野登志男・大谷和美・木本栄次・下村高史, 1978a, 伊豆大島における全磁力永年変化の異常, 震研集報, 53, 881-892.
- 行武 毅・吉野登志男・歌田久司・下村高史, 1978b, 大島火山三原山火口周辺の電気抵抗変化と1978年伊豆大島近海地震, 震研集報, 53, 961-972.

補遺 エイリアシングによる見掛け周期と平均操作による振幅の減衰

サンプリング間隔 T_0 で測定している観測量に T という周期の波が含まれているとする。標本化時点 $t = nT_0$ ($n=1, 2, 3, \dots$) にのみ着目すると,

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{2\pi}{T}nT_0\right) &= \cos\left\{\frac{2\pi m}{T_0}nT_0 + 2\pi\left(\frac{1}{T} - \frac{m}{T_0}\right)nT_0\right\} \\ &= \cos\left\{2\pi\left(\frac{1}{T} - \frac{m}{T_0}\right)nT_0\right\} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot1)$$

即ち、見掛け上次のような周期 \bar{T} を持つ波が現れる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{T} &= \left(\frac{1}{T} - \frac{m}{T_0}\right)^{-1} = \frac{\alpha}{1-m\alpha}T_0 \\ \alpha &= T/T_0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A}\cdot2)$$

見掛け周期の最長のものは、 $|1-m\alpha|$ を最小にするような m によって与えられる。

今、測定間隔を1日(24時間)とし、潮汐の主要分潮 M_2, S_2, O_1 および K_1 に対してこのような \bar{T} を求めてみると、第1表のようになる。 M_2 と O_1 の作るエイリアシング周期は近接しているので、この両者は更に長周期のうねり(ビート)を生ずる。一般に、周期 T_1 と T_2 なる波の作るビートの周期 T' は

Table 1. Apparent period \bar{T} (unit: day) caused by aliasing of tidal constituents for the sampling interval of one solar day. T : the true period in units of hours. m : integer which minimizes $|1 - m\alpha|$ ($\alpha = T/T_0$, $T_0 = 24$ hours).

Tidal constituent	T (hours)	m	\bar{T} (days)
M_2	12.4206	2	14.8
S_2	12.0	2	∞
O_1	25.8193	1	14.2
K_1	23.9344	1	364.9

Table 2. Damping factors of amplitudes of aliasing waves originated from tidal period variations for some combinations of sampling and averaging intervals.

Δt (min.)	M	N	M_2	O_1	K_1
10	15	144	0.9350	0.9847	0.9822
1	300	1440	0.7516	0.9388	0.9290
1	30	1440	0.9971	0.9993	0.9992
1	60	1440	0.9888	0.9974	0.9970
10	144	144	-0.0349	0.0615	-0.0166
1	1440	1440	-0.0348	0.0038	-0.0041

$$T' = \frac{T_1 T_2}{|T_1 - T_2|} \quad (\text{A}\cdot3)$$

で与えられる。従って M_2 と O_1 とのエイリアシング波のビートは 365.4 日となる。

我々は実際には夜間のある時間帯の平均を用いるので、平均操作によってエイリアシング波の振幅は減衰する。この平均フィルターの減衰特性を求める。 $t=nT_0$ を中心に、測定間隔 Δt で M 個のデータの平均をとるものとする。この平均値 $F(t=nT_0)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{1}{M} \sum_k \cos \left\{ \frac{2\pi}{T} (nT_0 + k\Delta t) \right\} \\ &= A(M, N, T) \cos \frac{2\pi}{T} nT_0 \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot4)$$

ただし、 $T_0 = N\Delta t$ とする。 $(\text{A}\cdot4)$ に対して $(\text{A}\cdot1)$ と同じ操作をほどこすと、振幅 $A(M, N, T)$ なるエイリアシング波が得られることが分る。 $A(M, N, T)$ は次式で与えられる。

$$A(M, N, T) = \frac{1}{M} \sum_k \cos \frac{2\pi \Delta t}{T} k$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{M} \left\{ 1 + 2 \cos \left(\frac{M+1}{2N} \frac{\pi}{\alpha} \right) \sin \left(\frac{M-1}{2N} \frac{\pi}{\alpha} \right) \right\} / \sin \left(\frac{1}{N} \frac{\pi}{\alpha} \right) & (M: \text{奇数}) \\ \frac{2}{M} \cos \left(\frac{M+1}{2N} \frac{\pi}{\alpha} \right) \sin \left(\frac{M}{2N} \frac{\pi}{\alpha} \right) / \sin \left(\frac{1}{N} \frac{\pi}{\alpha} \right) & (M: \text{偶数}) \end{cases} \quad (\text{A-5})$$

ここで平均時間 $T_m = M\Delta t$ を一定にして、計測間隔 Δt を短くした極限を考える。これは (A-5) 式で比 $r = T_m/T_0 = M/N$ を一定に保ちつつ、 M, N を無限に増加させることを意味する。その結果は、

$$A(r/\alpha) = \sin(\pi r/\alpha) / (\pi r/\alpha) \quad (\text{A-6})$$

これはよく知られた箱型ウインドウのフィルター特性に他ならない。定義から

$$r/\alpha = T_m/T \quad (\text{A-7})$$

であるから、 $r/\alpha = 0$ は T_0 おきの瞬間値の測定に対応し、 $A(0) = 1$ でエイリアシング波は減衰しない。一方、 $T_m = T(r/\alpha = 1)$ の時は、含まれている波の周期と同じ時間幅を平均することになるから、 $A(1) = 0$ でエイリアシングは生じないという当然の結果を得る。

第2表に、いくつかのサンプリング方式について、 M_2, O_1, K_1 分潮に対する減衰特性を求めた。

*Changes in the Geomagnetic Total Force Intensity Associated with
the Anomalous Crustal Activity in the Eastern Part
of the Izu Peninsula (5)
—1982~1984 Off-Kawanazaki Swarm Earthquakes
and Crustal Uplift—*

Yoichi SASAI and Yoshinobu ISHIKAWA

Earthquake Research Institute

Results of continuous observations of the geomagnetic total field in the eastern part of the Izu Peninsula are summarized for the period from 1980 to 1984. Locations of observation sites are given in Fig. 1. In this paper, we make full use of all minute data, in contrast to the previous analyses in which only a portion of night-time data was utilized. The noise characteristic at each station is briefly investigated in section 2. Magnetic fields at HAT, ARA, YSD and UKH are severely contaminated by electric railway noises. They bring about a steplike offset in the hourly mean values from when the first train starts at around 0500 hours to the last one which stops before midnight (Fig. 3 and 4). In order to diminish the scatter of daily mean difference values, we have to use only night-time data (00:00—04:59 LT) which are free of DC noises. Such a sampling procedure causes, however, the aliasing phenomena of the tide-generated magnetic field as claimed by OHSHIMAN (1982). Actually, regularly oscillating variations over a half month's period appear in the night-time differences at HAT and YSD (Fig. 7(a)), while they disappear in the whole-day differences (Fig. 7(b)). The half month's period variation is due to aliasing of the M_2 and

O_1 constituent of the tidal magnetic field. A remarkable total field change at YSD, HAT and UKH in the 1981 summer season is also found spurious (see, for example, Fig. 9(a)), because it vanishes in the whole-day differences (Fig. 9(b)). This event is nothing but the "anomaly" we reported in the previous paper (SASAI and ISHIKAWA 1982). Our foregoing conclusion is incorrect: i.e. that the anomalous change is presumably of some tectonic origin.

In Fig. 10(a) we can clearly discriminate a rather steep increase in the total field at SGH in May, at YSD in September and at HAT in November, 1982. These stations are located near the three centers of crustal uplift, which took place during a year in 1982 (Fig. 13, 14). No such events are found at ARA and UKH, although these stations are included in the upheaval area. It should also be noticed that the decrease in the total field is dominant even at the three former stations. A gradual uplift was going on since the middle of 1980, the rate of which accelerated in 1982. We can say that the total field decreases simultaneously with the crustal uplift, except for an episodic increase near some local centers of the surface inflation at the onset of the accelerated upheaval.

The total field in the eastern Izu region tended to decrease as compared with KAK since 1980. It started to increase in 1983 (Fig. 5). The secular variation of the geomagnetic total intensity in the Kanto and Tokai district for the period 1980—1984 is investigated on the basis of data published by The Geomagnetic Research Group for Earthquake Prediction. Comparing these data with those at KAK, we can discriminate some blocks having a similar secular change pattern but different from the adjacent areas, namely the Boso Peninsula, Izu-Oshima Island, the eastern and western parts of the Izu Peninsula and the western side of Suruga Bay coastline. This fact seems to have something to do with the present stage of the tectonic activity in this district. Finally, the possible cause of the anomalous crustal uplift and seismicity in the Izu Peninsula is discussed. The lineation pattern of epicenters (Fig. 11) and the horizontal extension dominant in the NE-SW direction (Fig. 15) make us imagine the dyke-like intrusion of magma followed by the inflation of reservoirs. This explains qualitatively the magnetic change, because the total field increases just above a vertically intruded magma sheet and it decreases over an inflating pressure source. Even though such a process does occur at focal depths, 10 km say, it is difficult to produce the observed amount of total field change: the source is located too deep. Some secondary mechanism will be necessary to account for the magnetic change: i.e. dilatancy at a shallower depth. Quantitative examination of such models is our future subject.