

### 3. 2 全磁力

#### 3. 2. 1 はじめに

地震活動に伴う地磁気の変化が日本で初めて注目されたのは、1891年の濃尾地震 ( $M=8.0$ ) のことである。田中館愛橘 (1856-1952) と長岡半太郎 (1865-1951) によって、濃尾地震に伴うものとして最大902 nTの地磁気変化が認められたことが報告され (力武, 2001), それ以後、地震予知を視野に置いた「地震と地磁気変化の関連の研究」が鋭意進められてきた。その後、日本のみならず諸外国においても、応力変化を反映したピエゾ磁気効果、界面導電現象、地震前の電磁放射、地震時の電離層擾乱、など、様々な周期帯・波長・振幅を持つ変動が報告され (力武, 1986; Johnston, 1997; Park *et al.*, 1993のレビュー参照), 地磁気変化の有用性に対する期待が高まった。そのため、地震予知計画でも重点項目として取り上げられるにいたり、諸機関による観測・研究が続けられている。

しかしながら、観測・研究が進むにつれ問題点も明らかになり、まだ地震予知手法としての技術的基盤を確立するには至っていない。現時点での主な問題点は、磁場変動を引き起こすメカニズムの不確かさと観測の困難さの2点であろう。

報告された磁場変動を見ると、発生タイミングには地震の前・同時・前と同時の両方などの多様性があり、変化の形状もパルス状・階段状・緩やかな連続的变化など多岐にわたっている。また、VAN法 (Varotsos and Alexopoulos, 1984a,b) におけるSESのように電場変動だけで磁場変動を伴わないものもあれば、逆に、磁場変動しか観測されない場合もある。これらの多様なパターンを説明する多くの物理過程が考案され、室内実験や観測によって検証されてきた (例えば長尾, 2001)。その結果、いくつかの事例については室内実験・モデル計算・観測の間に整合性が見られることがわかった。例えば、ラウンダース地震に伴い観測された全磁力変化は、応力変化により岩石に含まれる強磁性鉱物がピエゾ磁気効果をおこしたと説明された (Johnston *et al.*, 1994)。しかし、SESやチリ地震前の電磁放射 (Warwick *et al.*, 1982) など、提唱されたメカニズムに対して異論が根強い例が数多く存在するのが現状である。

さらに、状況を難しくしているのは観測の困難さである。近年、観測機器の精度の向上とともに、地震に伴い期待される地磁気変化の大きさが当初考えられていたよりもかなり小さいことが明らかにされた。Rikitake (1968) と Johnston (1997) によれば、1950年代後半に水素原子核磁気共鳴を用いたプロトン磁力計が実用化された後、報告される地殻活動に

伴う地磁気変化の振幅は急速に減少し、1960年代後半以降は最大でも数nT (地磁気の約1万分の1) 程度となっている。

一方、地磁気は、外核での流体鉄の運動による変動、磁気圏・電離層電流に起因する外部起源変動、人間活動に伴う人工ノイズなどにより、常に変動している。これらの変動はいずれも数nTを上回る振幅を持っており、地震に伴う微小な信号を抽出するためには解析や観測に工夫する必要がある。特に日本においては都市化の進行に伴う人工ノイズが極めて大きくその除去が不可欠となっているが、未だに決め手を欠いている。

さらに、異常な信号が観測されたとしても、その原因を判定するのは容易ではない。複数のセンサーを置いて誤計測の可能性を排除したり、局所的な磁場の影響を受けない参照点を設けたり、独立な物理量を並行観測するなど、注意深い観測を行う必要がある。

#### 3. 2. 2 淡路島における全磁力観測の目的と概要

1995年1月17日の兵庫県南部地震では、島内北部西岸付近の野島断層が活動したことが明らかになり、活断層が大きく注目されることとなった。

このことは、「地震と地磁気変化の関連」を研究する上で、新しい視点を与えることになったと考える。一つは活断層という局所的で活発な活動域に注目し、この領域に密な観測網を敷くことにより、上述のような微小な変動を捉えようとする方法に関連したものである。このような試みはこれまでも度々なされてきたが、予め観測機器を設定した場所で実際に地震が発生する確率は低く、確実な成果を上げるにはいたっていない。兵庫県南部地震は起きてしまったが、この地震は規模が大きかったことから、その後数年間は淡路島周辺の上部地殻で余震活動が続くものと予想され、今回のように本震発生後早い時期に集中観測を行うことにより、比較的浅い震源の余震にともなう地磁気変化を特定する可能性が期待された。

第2には人工ノイズの除去手法に関するものである。直流電車や高圧線など都市化に伴う施設は強力な電磁気ノイズを発生することが知られている。日本のように国土が狭く都市化が進んでいる場合には、地震発生域が人間活動の活発な地域に近いことが多く、極めて大きな人工ノイズが観測の妨げになる。兵庫県南部地震の震源域周辺も大阪・神戸という大都市圏の近傍であり、極めて人工ノイズの大きい場所である。しかし、淡路島に限って考えると、島内には最大の人工ノイズの発生源となる直流電車

がないことが注目される。後に見るように、淡路島の観測では直流電車によると考えられる極めて大きな人工ノイズが観測されるが、これは阪神地区からの外部擾乱であり、ごく近くに発生源がある場合と比べて空間分布などの点で扱いやすい性質を持つ。したがって島内に多点観測網を敷き、外部擾乱を除去するための適当な手法が確立できれば、局所的な地震活動に伴う地磁気変化を検出できる可能性が考えられる。

これらの状況から、淡路島の上部地殻の地震に伴う全磁力変化について観測と解析が進めば、地震に伴う地磁気変化の解明と都市化の進んだ日本における地震予知実現につながる重要な基礎となると期待された。そのような観点に基づき、兵庫県南部地震発生直後より淡路島北中部をテストフィールドとする全磁力集中観測を計画し、1996年4月より観測を開始した（第1章参照）。兵庫県南部地震で野島断層の明瞭な断層面が表層に出現した島内北部地域に岩屋と城ノ瀬、北中部に大谷と草香、中部に奥畑と鳥飼浦の計6点において、0.1nTの分解能を持つプロトン磁力計を用いた毎分観測を実施した（図1.4.1）。いずれの観測点にも地電位差観測の電極が置かれており、さらに、大谷では地磁気3成分観測も行われた。地質構造的には、北部の2点は野島断層の東側に位置する基盤岩（領家帯に属する花崗岩）が露出する地域にあり、他の4点は基盤の花崗岩を大阪層群・沖積層などの堆積層が不整合に覆った地域に位置する（水野他, 1990）。

この観測網の特徴は、数分より長い周期帯の磁場変動を狙った高密度多点観測、電位差観測との連動、の2点に集約することができる。

地震活動によって引き起こされる数分より長い周期帯の磁場変動の発生メカニズムの候補としては、ピエゾ磁気、界面導電現象、の2つが有力と考えられる（Johnston, 1997; Park *et al.*, 1993）。ピエゾ磁気は応力変化によって岩石の磁化が変化する現象（例えばStacey, 1964）であり、界面導電現象はイオンを含んだ水が岩石中を移動するのに伴って電位勾配が発生する現象（Ishido and Mizutani, 1981）である。

ピエゾ磁気効果では、地震前の応力分布の漸進的な変動によって連続的な磁場変化をすることも、地震時の急速な応力変化によって階段状の磁場変化をすることも可能と考えられる。地震前後の磁場変化についてはStacey (1964) 以来、数値的・解析的研究が進められ（Nagata, 1970; Stacey and Johnston, 1972; Sasai, 1980, 1986, 1991; Oshiman *et al.*, 1991; Sakanaka *et al.*, 1997; Utsugi *et al.*, 2000）、断層周辺

での表層の磁場変化などがモデル化された。これらの結果は、伊豆東部地震（Sasai and Ishikawa, 1991）、ノースパームスプリングス地震（Johnston and Mueller, 1987）、ラウンダース地震（Johnston *et al.*, 1994）に伴って観測された全磁力変化を整合的に説明することができる。例えば、1992年に南カルフォルニアで起こったラウンダース地震（Mw7.3）では、震央から17.3、24.2km離れた2点において、全磁力にそれぞれ-1.2、-0.7nTの階段状変化が観測されたが、2A/mの初期磁化を与えた鉛直な断層モデルの計算値では、それぞれ-1.3、-0.7nTとなっている。ピエゾ磁気効果は圧力に敏感な磁化鉱物を多く含む岩石、例えば安山岩や玄武岩質の場合に観測が有利になると考えられ、花崗岩質の淡路島では比較的小振幅の変動を捉える必要があることが予想される。多点観測による注意深いノイズ処理が要請される。

界面導電現象は大きな電場変化を発生できると考えられている効果である。理論的には地震前や地震時に一時的に変化することが予想され、山崎断層に表れた自然電位の変化（宮腰, 1985）などの解釈に使われた。SESの発生メカニズムの有力候補でもある（長尾, 2001）。また、近年、上部地殻の水が断層のアスペリティの変遷等において重要な役割を果たすのではないかと注目されており、内陸地震の発生について重要な情報となる可能性がある。磁場変化は二次的なものでせいぜい数nTと予想されているが（Fenoglio *et al.*, 1995）、まだ不明な点が多い。そのため、全磁力観測と電位差観測を同時に行い電場と磁場の変化を比べることで、信号の発生メカニズムを特定できる可能性がある。

地震活動以外の原因による全磁力変化としては、周期1年以上で緩やかに変動する外核起源変動成分、主に周期数十日以下で変動する磁気圏・電離層など外部起源の成分、人工ノイズが挙げられる。このうち、外核起源変動と外部起源変動のソース波長は、それぞれ数千km以上と数百km以上であり観測網の空間スケールに比べて十分に大きいので、第一次近似的には観測網の中で一様と考えることができる。人工ノイズは島内で一様ではないが（第2章参照）、全磁力観測網はノイズ波長（数十km程度）に対して十分に密な観測点分布をしている。以上により、島外参照点や島内観測点を用いた相互差などの比較的単純な手法で、不要な全磁力変化の大部分が除去できると予想される。

以上により、本研究では、地震活動以外の原因による全磁力変化を除去し、淡路島周辺の上部地殻の地震に伴う微小な全磁力変化を捉えて、そのメカニズムを推定することを目指して、様々な解析を行った。

### 3. 2. 3 観測結果

全磁力観測は1996年4月から2000年3月にわたって行われ、故障等もあったが概ね順調であった。観測の詳細は第1章に述べられている。

柿岡に伝送された6観測点の毎分値データは一日ごとにプロットされ、目視によって異常データが検出され補正処理が施された。異常とされたのは、他の観測点のデータに比べて3nT以上異なっている場合で、矩形状とスパイク状のものがあつた。矩形状のものは、観測点付近での駐車など、磁性体の搬入に対応すると見られ、継続時間は事例によって異なっていた。異常の大きさは継続期間中同じと見なして、下駄のせ処理で補正した。スパイク状の異常は継続時間が1~2分しかないもので、プロトン磁力計の誤動作・雷の影響・車両の通行などとみなして、前後の観測値の平均で補間した。

異常値補正を施した後の全磁力観測結果の例を図3.2.1~3に示す。

図3.2.1は、1999年12月の1ヶ月分の淡路島6観測点と柿岡、鹿屋の全磁力毎分値の変化分である。全磁力が長期的・短期的に複雑に変化していることが見て取れる。地磁気永年変化は1ヶ月程度の時間スケールでは一定と見なしてよいので平均値として除去されており、また、全観測点で変化に相関があることから、これらは主に磁気圏・電離層の電流変化による外部起源変動と考えられる。図3.2.1で最も顕著な変動は、12日のデータに見られるように平均して月1回程度発生する磁気嵐（振幅100nTのオーダー）と、毎日観測される日変化（振幅10nTのオーダー）であるが、外部起源変動はこの他にも数日以下の周期帯に連続的に存在している。

より短周期の変動を見るため、図3.2.2~3に1日分

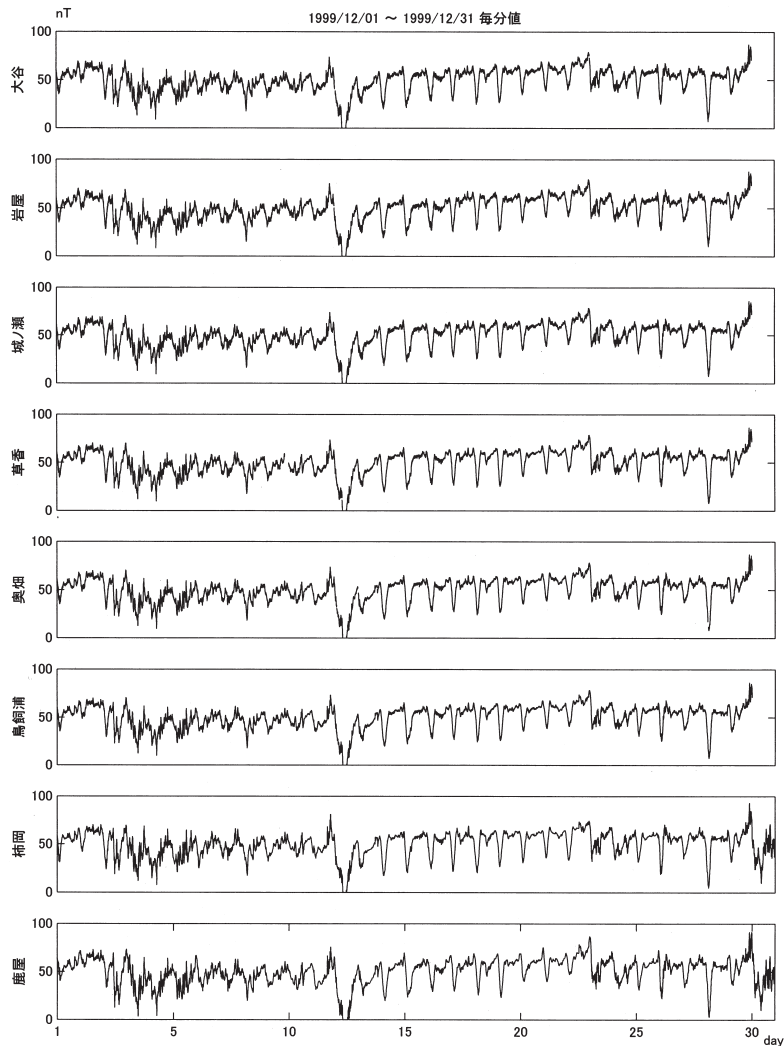


図3.2.1 全磁力値の変動の例（1999年12月）。上から順に6本のプロットが淡路島の観測点のデータで、下2本は柿岡と鹿屋での観測値。縦軸は全磁力（単位 nT）、横軸は時間（日）である。



の全磁力毎分値を示す。図3.2.2は、図3.2.1の期間の中で特に磁気嵐の顕著であった12月12日、一方、図3.2.3は、静穏（柿岡、鹿屋のK-indexの日合計値が1と4）であった12月21日の変化である。

図3.2.2～3を見ると、(1) 淡路島・柿岡・鹿屋で似通った長周期（～数時間）変化があり、地磁気活動度によって形状が変化すること、(2) 淡路島の観測点には共通して地磁気活動度によらない短周期変化が見られるが、柿岡・鹿屋には見られないこと、がわかる。これらは第2章で述べられた大谷の磁場3成分変化の性質と同様であり、淡路島内では全磁力でも500秒以下の周期帯で人工ノイズが卓越し、それより長周期帯では外部起源変動成分が卓越していることが示唆される。

外部起源変動成分について検討するため、特に振幅の大きい日変化に注目する。日変化が明瞭に確認

できる静穏日のデータ（図3.2.3）を見ると、各観測点とも変化が日中の3時（U.T.）前頃には極小となり、また夜間の12～18時（U.T.）頃には殆ど変化が見られないという特徴を示すが、淡路島内と柿岡と鹿屋では、わずかながら位相や振幅に差があるようである。

観測点間での日変化の差を調べるため、静穏日のデータを用いて大谷の全磁力に対する同時刻の他観測点の全磁力を図3.2.4に示した。横軸（x軸）に大谷の全磁力値、縦軸（y軸）に残りの7観測点の全磁力値をそれぞれプロットして、2点の観測点のデータが描く軌跡を直線近似した解も重ねて実線で示した。また、観測値に対する直線近似値 $\hat{y}_i$ の良さを示す相関係数 $R_2$

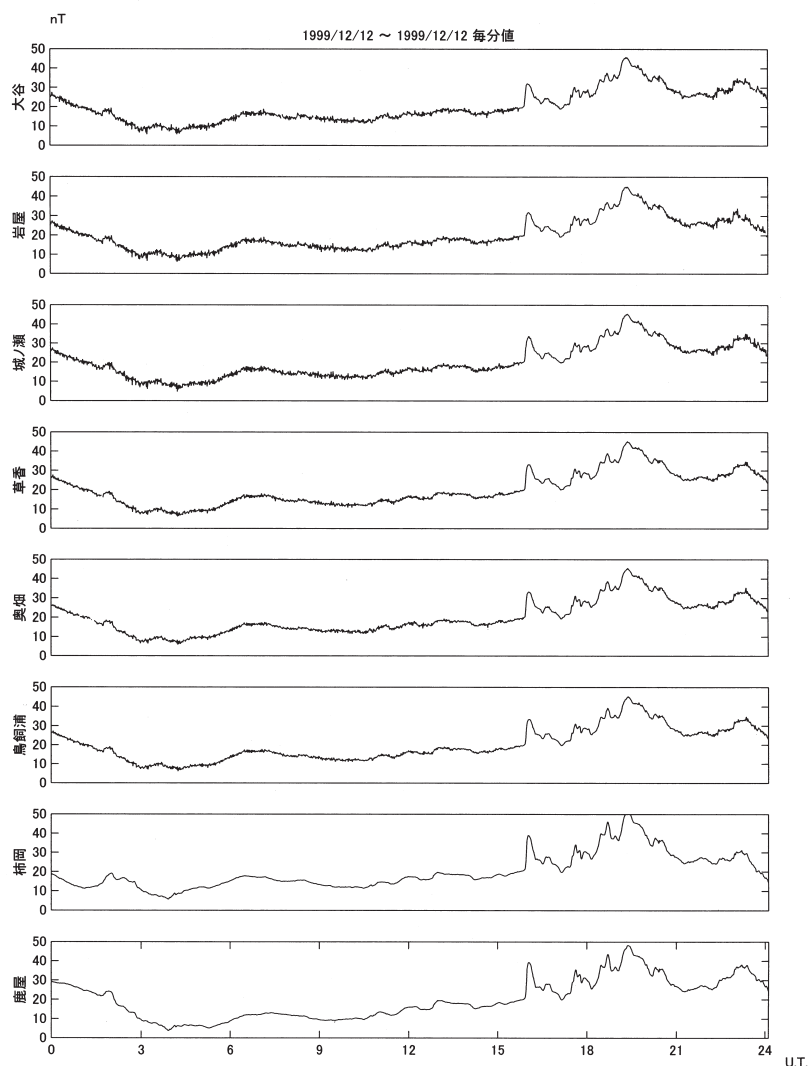


図3.2.2 擾乱日における全磁力値の変動の例（12月12日）。横軸が時間（U.T.）である以外は図3.2.1と同様。

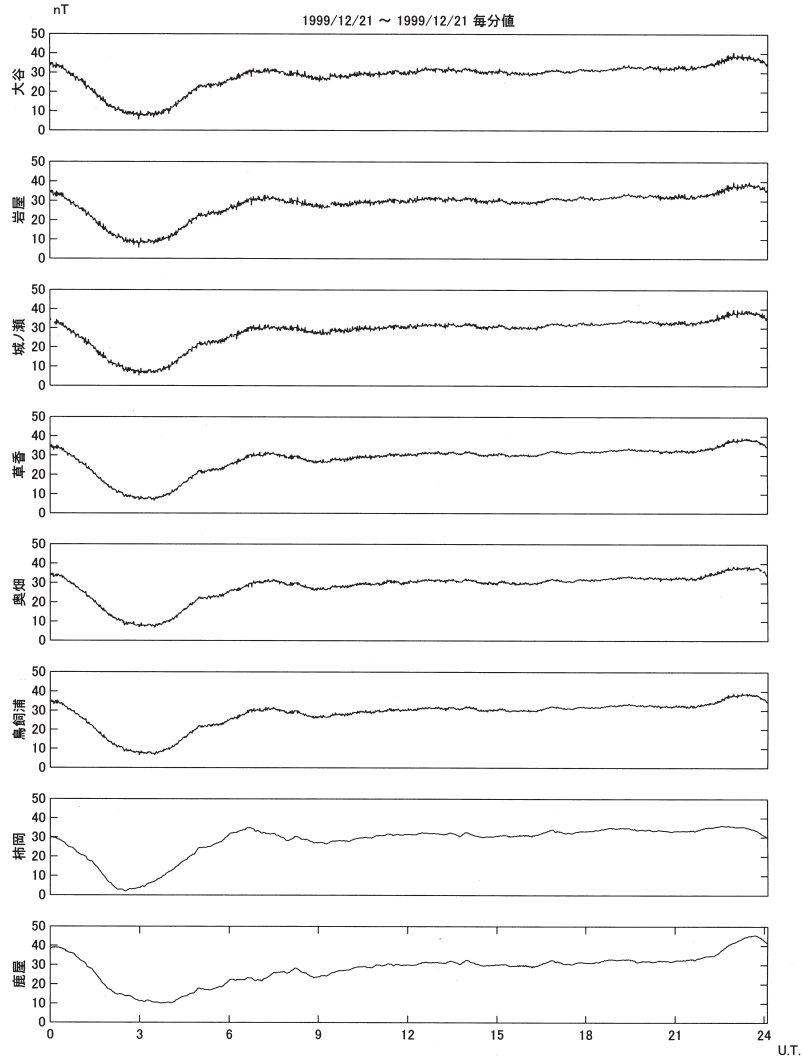


図3.2.3 静穏日における全磁力値の変動の例（12月21日）．縦軸・横軸共に図3.2.2と同様．

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2.1)$$

ただし、

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i / N,$$

も図中に示した．図3.2.3からもわかるように、およそ30nTの変動が日変化であり、それより小振幅の変動は外部起源変動の短周期成分と人工ノイズである．淡路島内の全磁力変化は、日変化および短周期変化を含めてほぼ直線の軌跡を描いており、相関係数も0.99を越え、全観測点で位相差がほぼ0の変化であることがわかる．直線近似式の傾きから大谷の変化に対する各観測点の振幅比をみると、この日は

0.9621～1.04と±4%（およそ±1.3nT）におさまっている．直線近似式の切片は観測点によって異なっており、観測点周辺の局所的な磁化構造や電気伝導度構造の違いが、永年変化などの1日よりはるかに長周期の変化（～スタティックな変化）の差になって表れていると考えられる．以上により、淡路島内では、外部起源変動および人工ノイズがほぼ同時刻に一定の振幅比で出現し、2点間の単純差でも静穏日で1nT程度の差しか生じないことが示唆された．

なお、各地点相互の微妙な差に関し、恐らく局所的な構造が影響しているものと考えて、平面的な位置、海拔高度、海岸線との位置関係等、様々な要因からの寄与について調査を進めたが、系統的な把握には至らなかった．

大谷と柿岡あるいは鹿屋の全磁力の関係を見てみると、日変化は扁平な楕円を描き、楕円軌跡の幅と

大谷観測点との相関(1999/12/21)

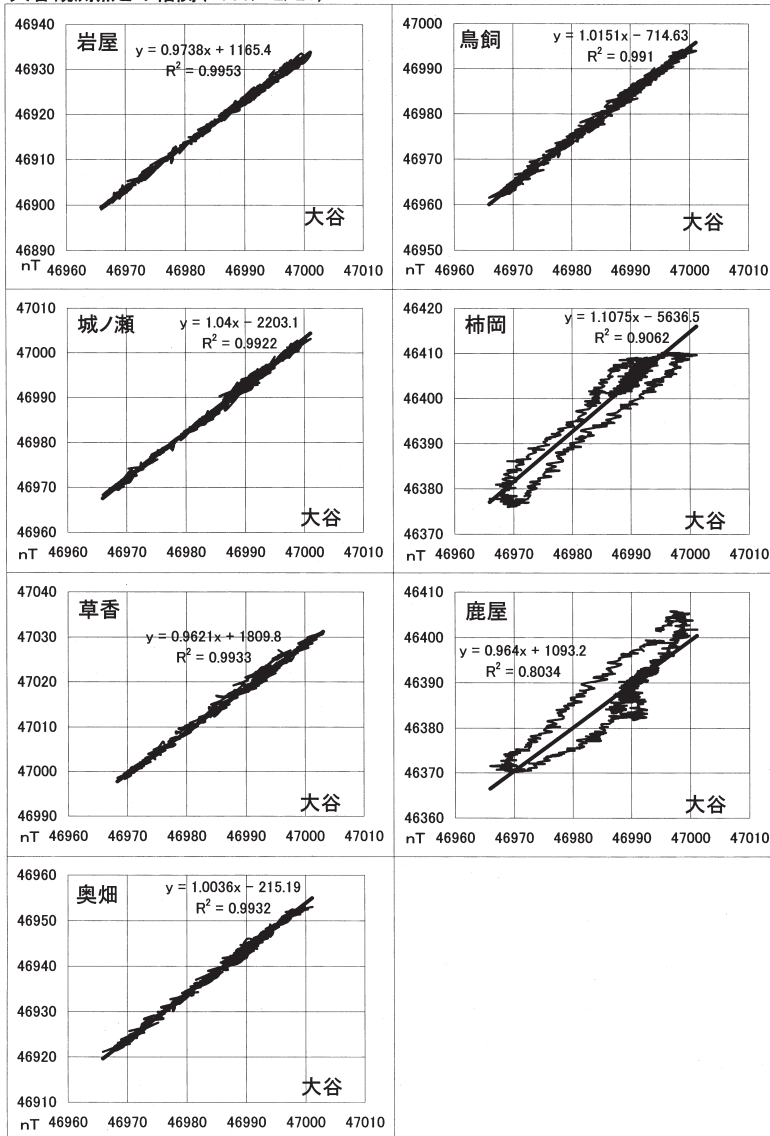


図3.2.4 大谷と島内観測点および柿岡、鹿屋との全磁力変化の関係（1999年12月21日）。縦軸・横軸は各観測点における全磁力（単位nT）である。

なって日中の短周期変化が表れている。夜間の短周期変化は、10nT程度の狭い範囲で直線状あるいはつぶれた楕円の軌跡を描く（図3.2.4）。楕円の軌跡は、2点間の変化に一定の位相差があることを示し、これは日変化のソースとなる電離層電流に経度依存性があるためと考えられる。短周期変化については、日中の大谷には柿岡・鹿屋に比べて振幅の大きい速い変化があり、夜間の大谷には日変化とは異なる振幅比を持ち位相差の小さい変化があることがわかる。

次に、主に日中の500秒以下の短周期帯に存在する人工ノイズの性質を詳しく見ることにする。図3.2.3と同じ静穏日（12月21日）のデータを用い、長

周期の変化を打ち消すため、淡路島内の各観測点の全磁力毎分値について前1分値との差をとり、図3.2.5に示した。図3.2.5に示された変動は静穏日の短周期変動を強調したものであるため、人工ノイズが卓越していると考えられる。ノイズが日中大きく夜間に小さいことは前述の通りで、その振幅は各観測点毎に異なる。この日のノイズの活発だった時間帯の平均的な変動幅を目で読み取ると、表3.2.1の通りである。

日中における短周期ノイズの大きさは岩屋、城ノ瀬観測点で大きく、奥畑、鳥飼浦観測点では小さい。短周期ノイズは島の北部で大きく、南下するに従い

小さくなっていると見る事ができる。この傾向は第2章で明らかにされた淡路島内の電場の人工ノイズと調和的である。

日中の人工ノイズのソースを同定するのに有用な情報が振幅が12月31日深夜から1月1日朝の毎分値前後差に含まれている(図3.2.6)。人工ノイズが、日中に大きく夜間に小さくなる傾向は、12月31日深夜から1月1日朝を除く、全ての日に確認された。これは、大晦日という人間社会の特別な日のために、京

阪地区の電車が一晩中運行されていたためと推測される。図3.2.6は1997年の大晦日の例であるが、他の年も同様である。以上から逆に、上述の日中の人工ノイズが主として京阪地区の直流電車の漏洩電流によるものと見なしても大きな誤りはないものと考えられる。

阪神地区は特に人工ノイズの大きな地域で、確実に人工ノイズがなくなる時間帯を認めることは出来なかった。ノイズの小さい時間帯は、表3.2.1の夜間、

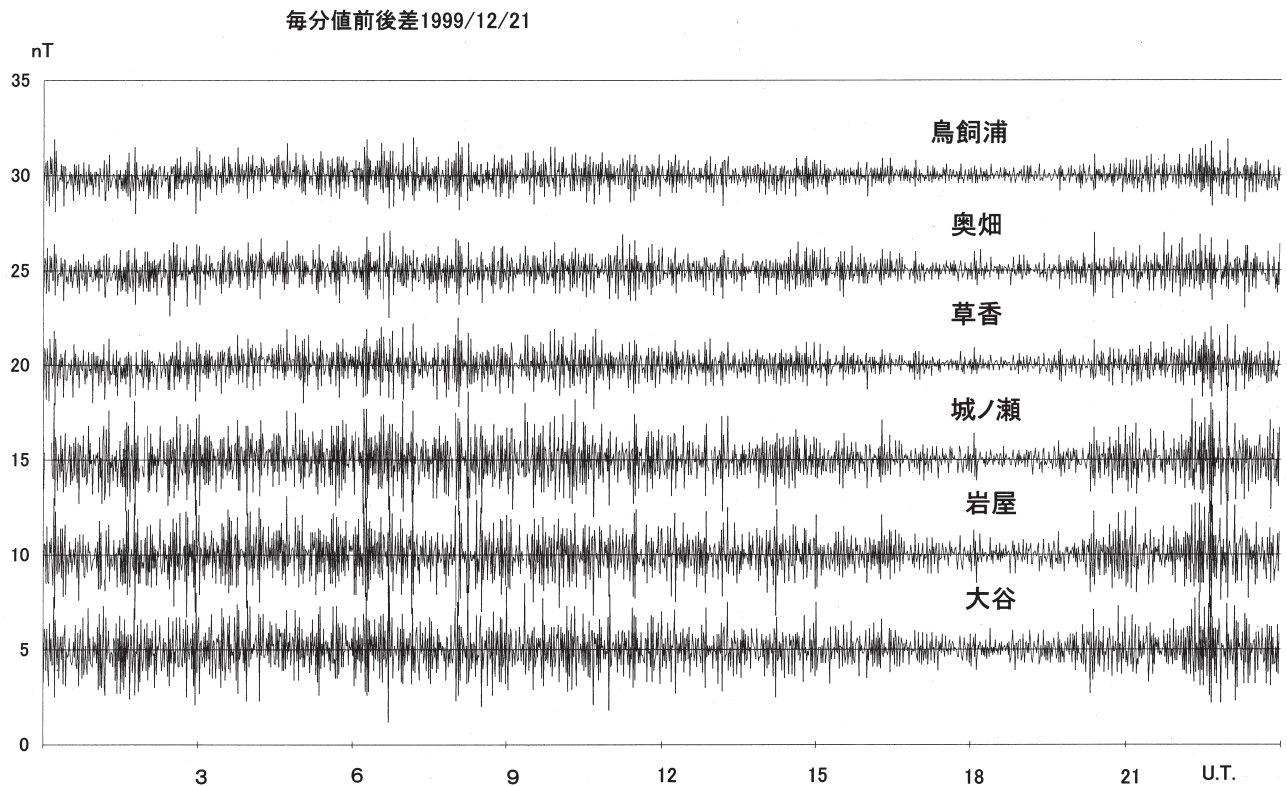


図3.2.5 淡路島の6観測点における毎分値の前後差(1999年12月21日)。縦軸は全磁力毎分値の前後差(単位nT)、横軸は時間(U.T.)。

表3.2.1 短周期ノイズのおおよその振幅(nT)

	日中	夜間	大谷との比
大谷	3.8	1.6	1.00
岩屋	4.8	1.5	1.26
城ノ瀬	4.6	1.1	1.21
草香	3.8	0.9	1.00
奥畑	3.5	1.6	0.92
鳥飼浦	3.5	0.9	0.92

毎分値前後差1997/12/31

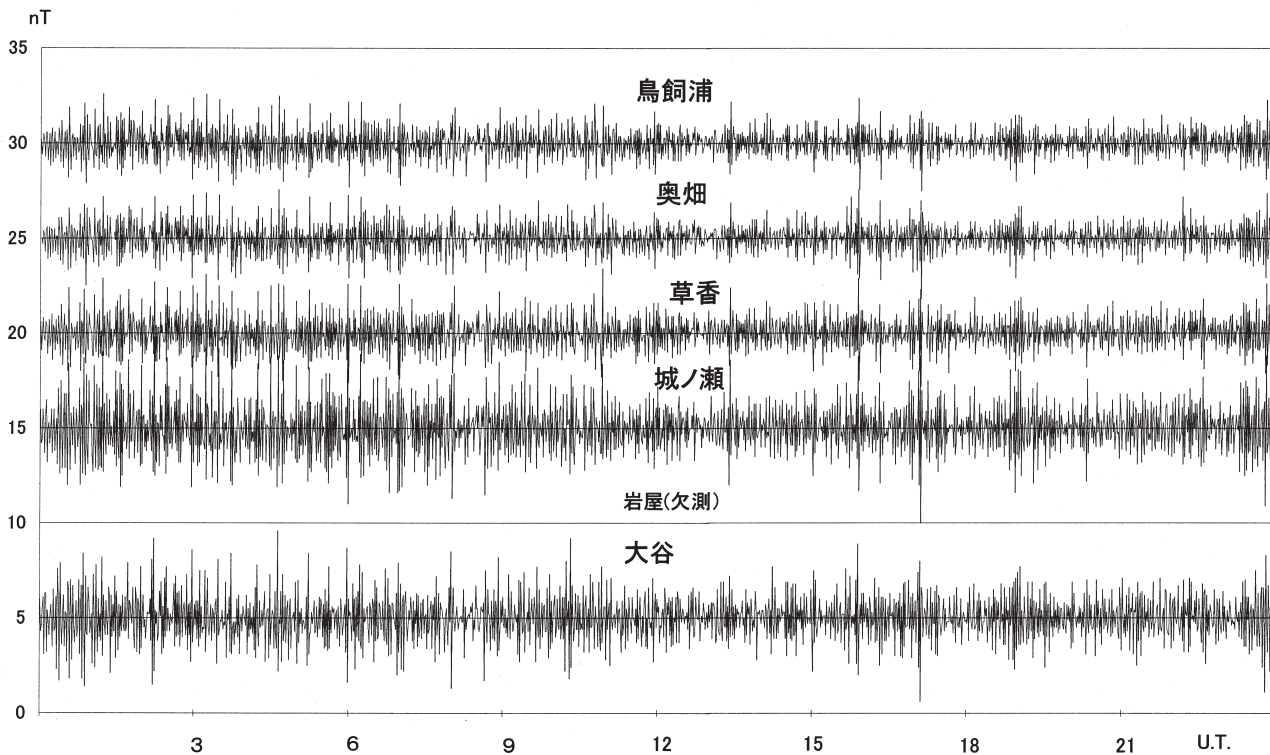


図3.2.6 1997年12月31日の前後値差. 縦軸・横軸共に図3.2.5と同様. ただし, 岩屋観測点は欠測.

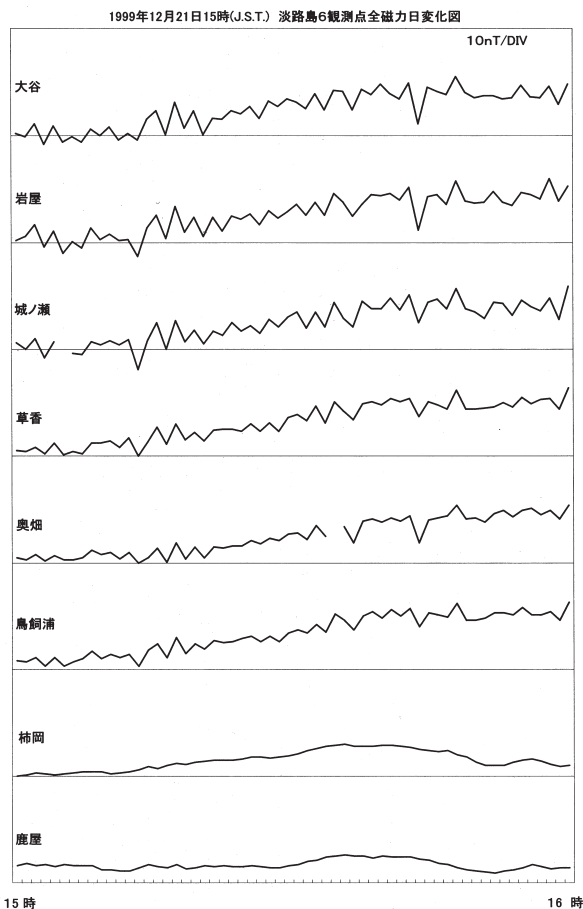


図3.2.7 淡路島内観測点および柿岡・鹿屋の全磁力変化 (1999年12月21日15時L.T.). 縦軸は全磁力 (単位10nT/div), 横軸は時間 (L.T.).



つまり、日本時間の2時から5時まで（17h～20hUT）である。中でも4時前後がノイズが最も小さくなる。表によれば、島内の夜間の人工ノイズの振幅は0.9～1.6nTであるが、目の子で読み取った数値であり誤差も大きい。全地点とも概ね1nTの大きさとするのが妥当である。これにより、日中のノイズに認められた観測点が南下するほど振幅が小さくなる傾向は夜間のノイズには認められないことになり、夜間のノイズ源は日中とは別なものであることを窺わせる。特定はできないが、波長が日中より長いことから、神戸市辺りより更に遠方に根源を持つのではなからうか。

人工ノイズの島内での分布をさらに詳しく見るため、図3.2.3のデータのうち、日中ノイズの大きい時

間帯である15時台（L.T.）1時間分を拡大してプロットした例を図3.2.7に示す。淡路島内の各観測点値には緩やかなトレンド上に2nT程度の短周期の変動が重なっているのが認められるが、鹿屋及び柿岡には同様の短周期変動が見えないので、人工ノイズと推測できる。島内各観測点のノイズの形は似通っているが、振幅や位相が異なっているのがわかる。

図3.2.7のデータを用いて、大谷に対する島内5観測点と柿岡および鹿屋、草香に対する鳥飼浦について、図3.2.4と同様に同時刻の全磁力値をプロットすると、図3.2.8のようになる。

島内の観測点の組み合わせでは、データに外部起源変動成分と思われる1時間に数nT程度変化する緩やかなトレンドがあるため、2観測点間の軌跡が時

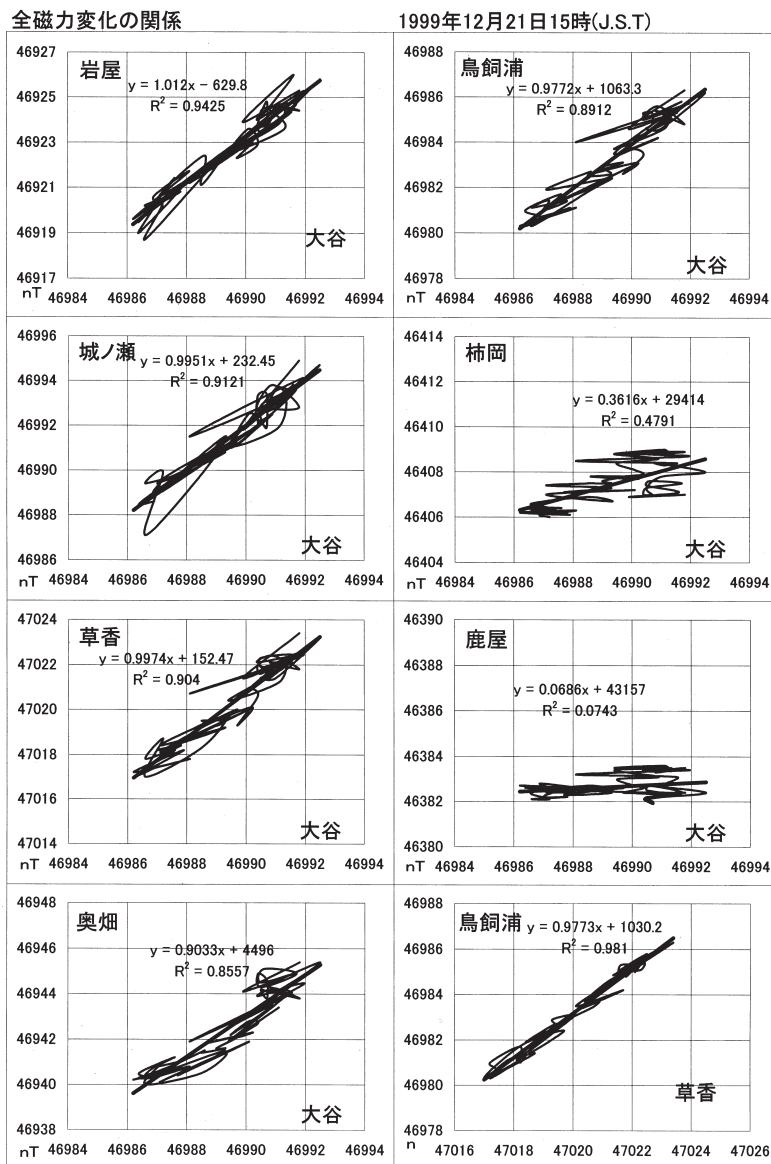


図3.2.8 大谷と島内観測点および柿岡、鹿屋との全磁力変化の関係（1999年12月21日15時 L.T.）。縦軸・横軸は各観測点における全磁力（単位nT）。

間と共に右上方へ移っていく形となっている。しかし、短周期変動に関しては、外部起源変動成分が小さい静穏日のデータであることから、ほぼ人工ノイズとみなすことができ、それら短周期の軌跡もトレンドの軌跡にほぼ沿うように直線上に並んでいることが見て取れる。結果として、島内の2観測点の全磁力変化の軌跡は一本の直線でよく近似できることになり、第1次近似的には、淡路島内で外部起源変動成分と人工ノイズは全観測点に同時刻に表れると考えてよいことがわかる。この結果は、第2章で論じられた淡路島島内で日中の人工ノイズに位相差がないことと調和的であり、外部起源変動に位相差がないことについても、外部起源変動のソース波長に比べて観測網の空間スケールが十分小さいことで説明できる。

島外の観測点との関係では、全磁力の軌跡は直線からはずれており、大谷の変動に対して柿岡・鹿屋には対応する変動がないことを示唆している。

式3.2.1で定義された相関係数 $R^2$ は島内では0.8以上であり、2観測点の変動がよく直線近似されている事を示している。任意の2観測点の組み合わせの中で、鳥飼浦と草香の組み合わせが最も相関が高く、注目される。

### 3. 2. 4 解析

この節での目的は、地震による変動を検出するため、淡路島の全磁力観測値から地震以外の原因の変動を取り除く解析手法を開発することである。これまで見てきたように、地震による変動がたかだか数nTと思われるのに対し、地震以外の原因による変化ははるかに大きく、しかも様々な振幅・周期が混在している。それら地震以外の原因による変動の性質を利用して、数nT以下まで効率よく除去する手法を開発することを目指す。また、除去手法に対する基本姿勢としては、将来の予知への応用を考えて、できるだけ単純な方法を選択することにする。

取り除くべき地磁気変動をまとめると、(1) 永年変化に代表される外核起源の変化（グローバルスケールで1年より長い周期帯）、(2) 磁気圏・電離層の電流変化に起因する外部起源変動（数千～数百kmスケールで数十日以下の周期帯）、(3) 人工ノイズ（数十kmスケールで主に日中に500秒以下の周期帯）、の3つである。

このうち、(1) については、グローバルスケールの標準磁場モデルIGRFが存在する（Barton *et al.*, 1996）。ところが、IGRFには日本の観測値が反映されていないため、日本近辺の磁場変動の再現性が悪いことが知られている（Fujiwara *et al.*, 2001）。

例えば、IGRFを使って1999年12月21日に各観測点で期待される全磁力値を計算すると、次の通りとなる。

大谷；47030nT	岩屋；47093nT
城ノ瀬；47096nT	草香；47052nT
奥畑；47004nT	鳥飼浦；47022nT

これに対して、実測値の日平均は、

大谷；46988nT	岩屋；46921nT
城ノ瀬；46991nT,	草香；47020nT
奥畑；46942nT	鳥飼浦；46983nT

となり、モデルによる計算値とは概ね30～200nTの違いがある。特に、モデルによれば、全磁力値は北に行くほど大きくなり（約6nT/km）、高度が高くなるほど小さくなる（約-2nT/100m）。従って6観測点の中で、北方に位置する岩屋と南方に位置する鳥飼浦の距離は概ね30kmであるから、170nT程度岩屋観測点の全磁力値が小さくなるのが期待される（両観測点の高度差（岩屋；200m、鳥飼浦；60m）による分は、3nT程度で無視できる）。しかし、実測値はこれに反して、緯度効果は殆ど見られない。他の日のデータにも複雑な差が見られ、このモデルを今回の観測結果にあてはめて外核起源変動の影響を除去することはできないと判断した。

外核起源変動の日本付近での短波長構造をよりよく反映させた日本標準磁場モデルの作成も試みられているが（例えば、Fujiwara *et al.*, 2001）、まだ実用の域には達していない。そこで、本研究では外核起源変動が非常に長い周期の変動をするため各観測点間の外核起源変動の差がほぼスタティックであることを利用して、相互差を取ることで、目的のレベルの除去を達成することにした。

(2) については、島内でほぼ一様、柿岡・鹿屋とはソースの空間構造や局所的な地下構造を反映した振幅・位相の差があることが、すでに前節で示されている。また、(3) は島内のデータに限られ、数nT程度の精度で島内で一様である。

これらの性質を鑑みて、島内各観測点の観測値の差を求めることによって、外核起源変動・外部起源変動・人工ノイズを相殺し、局所的な地震活動に伴う信号を抽出して、地震活動の把握における地磁気観測の有効性を立証することを考えた。

図3.2.9に島内各観測点の観測値の相互差を求めた例を示す。用いたデータは、静穏日である1999年12月21日の毎分値である。

図3.2.9から、このような処理により、地震以外の原因による変動の除去がほぼ数nTのレベルまで達成できることが示唆されている。しかし、この値は地震活動に伴って期待される変動の最大値と同レベ

島内各観測点相互の観測値の単純差(1999/12/21)毎分値

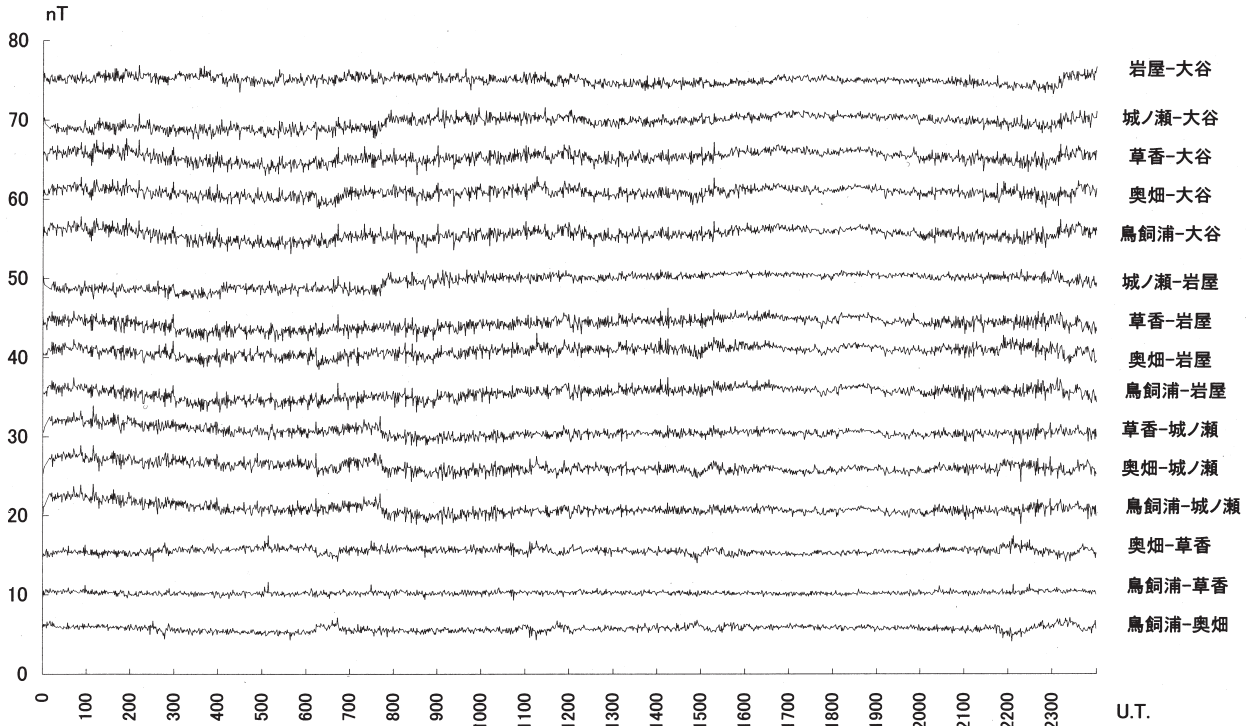


図3.2.9 全磁力毎分値の淡路島内の観測点間の相互差 (1999年12月21日).  
縦軸は観測点間の全磁力差 (単位nT), 横軸は時間 (U.T.).

ルであり、このままでは検出が十分にできない可能性が高い。但し、前述のように鳥飼浦・草香両観測点間は、他の要因に対する応答の相関が極めて高く、相互差は0.5nT程度の幅におさまっている（但し、時折現れるパルス状変化は除く）。もしも地震活動に伴う地磁気変動が、両地点でこれ以上の有意な地点差を出せば検出できる可能性がある。

一方、地震活動に伴う信号が、長期に亘って蓄積された歪が地震によって一気に解放され、地震前後の観測値にギャップを生じるといった長期的な変化をするのであれば、不要な短周期変動はタイムフィルターを使って除去する可能性もある。

1999年12月分の鳥飼浦と大谷観測点の差について、毎分値・毎時平均値・毎日平均値を比較したのが、図3.2.10である。図中のRは、期間中の差の最大較差である。一般に時間平均の間隔を伸ばすことで、差の変動幅が小さくなることが見られる。例えば、毎分値で8nT程度の変動の最大較差が、毎日値では1.4nTになっている。これは、毎分値を1時間分平均して毎時平均値にすることによって、主に周期500秒以下に存在した人工ノイズが除去され、より長周期の外部起源変動が残差に残された不要成分になったこと、さらに1日分平均して毎日平均値にすることで周期1日以下の外部起源変動が除去されたことに対応する。

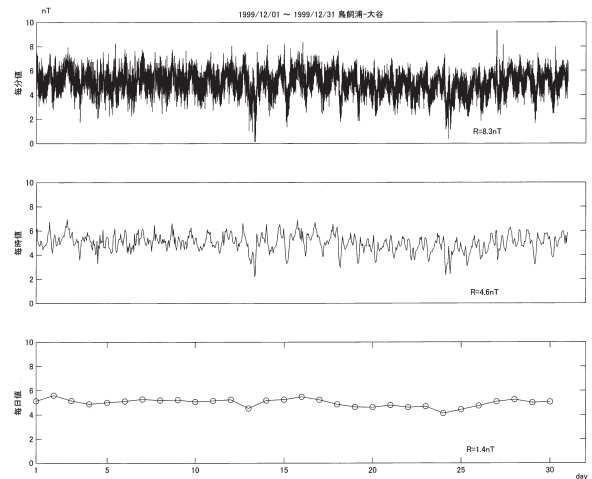


図3.2.10 鳥飼浦一大谷間の全磁力差の毎分値・毎時値・毎日値の比較。上から下へ順に、1999年12月1～31日の毎分値(上)、毎時値(中)、毎日値(下)。縦軸は全磁力差(単位nT)、横軸は時間(日)。

図では、特定の期間、特定の観測点の組について示したが、他の観測点についても傾向は同じである。数nTと予測される地震地磁気効果が長期的な変動あるいはギャップを伴って生じるのであれば、島内6観測点の単純相互差に関し1日分の平均値を用いることで、検出できる可能性が考えられる。

次に、不要成分除去の精度を上げるため、島内観測点の相互差に残る地震以外の原因の変動について



考えてみる．田中他（1978）は，近接する2観測点の全磁力について，外部擾乱が全く同じであったとしても，外核起源成分が局所的な磁化分布や電気伝導度構造の違いを反映して微妙にずれている場合，単純な相互差では外部擾乱を相殺できないことを指摘した．彼らは，外核起源成分に比べて十分に小さい外部擾乱の2次以上の項を無視すると，2地点間の全磁力単純差  $\Delta F$  は参照点の地磁気3成分の変化分  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  を用いて，

$$\Delta F = aX + bY + cZ + \text{const} \quad (3.2.2)$$

と書けることを示し，係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を最小自乗的に

決定して単純相互差に残る外部擾乱を補正することを提案した．実際には，近接する2地点間であっても，局所的な電気伝導度構造が違えば誘導される磁場が異なるため外部擾乱が等しいとは言えないが，その場合でも式3.2.2は最も主要な項を選んだ形になっており第0次近似的には十分成立していると考えられる．

静穏日の1999年12月21日の毎分値を例として，大谷と当該観測点の毎分値差を  $\Delta F$  とし，大谷で観測された地磁気3成分の変化分を  $X$ （西向き成分）， $Y$ （北向き成分）， $Z$ （下向き成分）とした時，式3.2.2の係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を最小自乗法によって求めたところ，表3.2.2のようになった．図3.2.11の最上段に大谷の

表3.2.2 1999/12/21の毎分値差による計数

	岩屋	城ノ瀬	草香	奥畑	鳥飼浦
a	-0.014	-0.038	-0.055	-0.038	-0.056
b	-0.036	-0.050	-0.015	-0.016	-0.001
c	-0.001	0.105	0.034	0.026	0.032

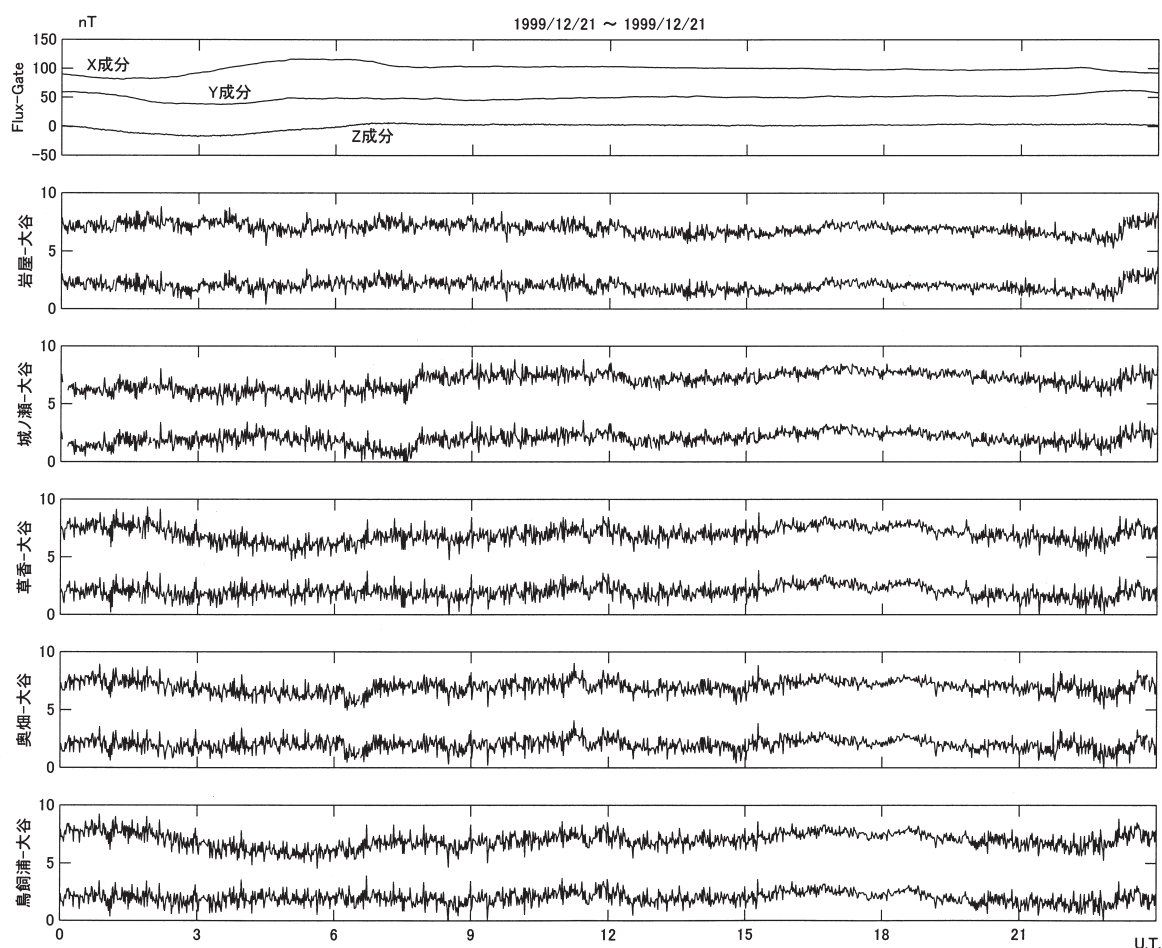


図3.2.11 地磁気3成分による毎分値単純差の補正（1999年12月21日）．最上段は大谷の地磁気3成分（ $X$ :西向き， $Y$ :北向き， $Z$ :下向き），2段目以降は各観測点間の全磁力差（上側:単純差，下側:補正後の残差）．縦軸の単位はnT，横軸は時間（U.T.）．



地磁気3成分, 2段目から順に下へ, 大谷と岩屋, 城ノ瀬, 草香, 奥畑, 鳥飼浦について全磁力の単純差(上)と補正後の残差(下)を示す.

岩屋・城ノ瀬観測点に於いてはaに比べてbが大きく, 大谷観測点との差の変動は北向き成分の変化に支配されていることを示す. これに対して, 草香・奥畑・鳥飼浦の各観測点はaが大きく, 東向き成分に支配されて変動しているように見える. また, 岩屋を除いて鉛直成分の影響は比較的大きい. これらの結果は大谷観測点との相対位置の違いで2つのグループに分かれているようにも解釈でき, 図3.2.11の $\Delta F$ を支配している外部擾乱が人工ノイズであったことが示唆される. 第2章の空間分布解析

により, 人工ノイズはやや北東の方向に強く偏向しており北側ほど振幅が大きいことが明らかにされているからである. 局所的には, 海岸線などのシャープな電気伝導度境界との位置関係や全体としての電気抵抗などによって, ノイズの方向や振幅が微妙に変化しており, その差が表3.2.2の係数の違いに反映されていると思われる.

しかし, 図3.2.11では補正の効果は大きくない. 人工ノイズの微妙な差を補正するには, あまり効率のよくない方法であることが示唆される.

地磁気変動の大きい1996年10月22日のデータ(図3.2.12)によって, 同様の補正を試みた. 求められた係数は表3.2.3にまとめられている. この日は前

表3.2.3 1996/10/22の毎分値差による計数

	岩屋	城ノ瀬	草香	奥畑	鳥飼浦
a	0.001	-0.008	-0.049	-0.035	-0.056
b	-0.016	-0.015	0.016	0.022	0.026
c	0.001	-0.009	-0.019	-0.024	-0.017

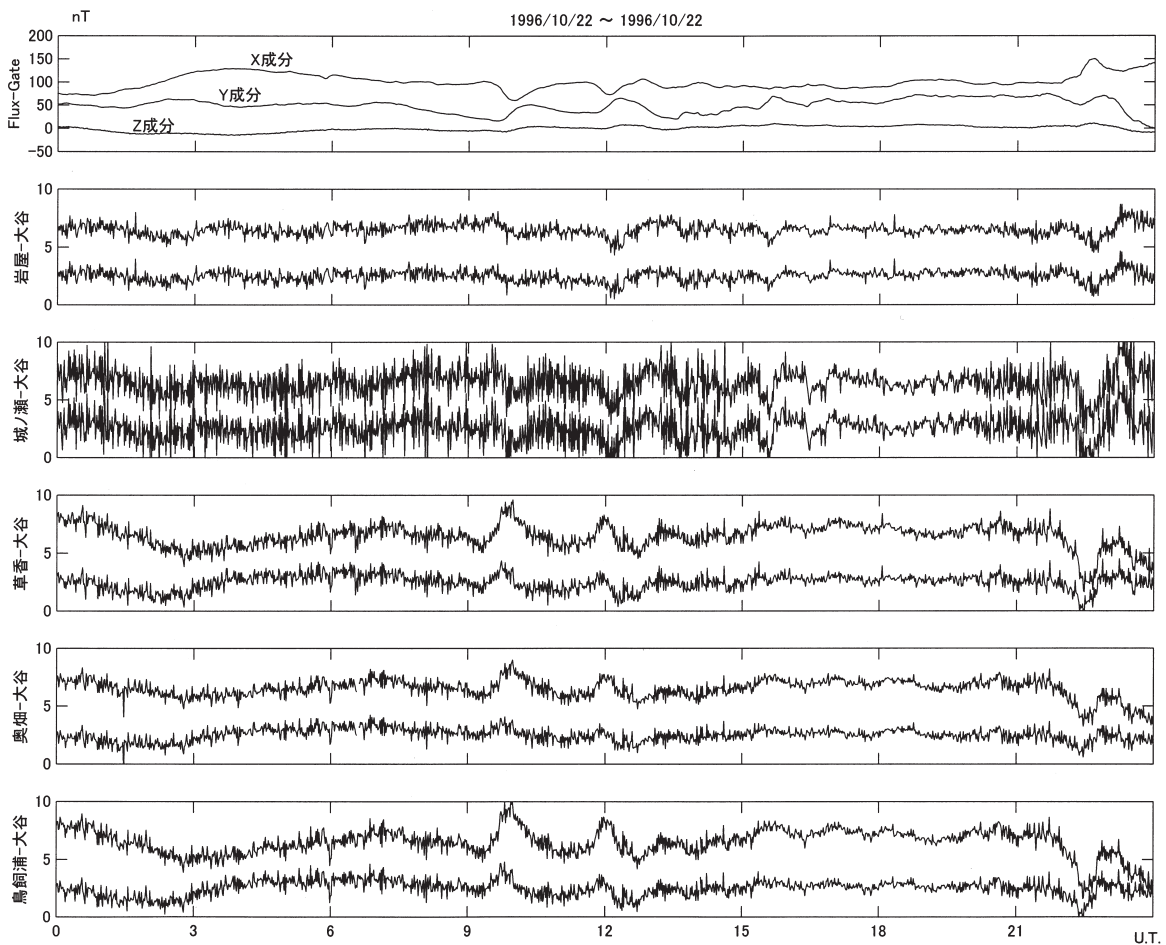


図3.2.12 地磁気3成分による毎分値単純差の補正(1996年10月22日). 図の体裁は図3.2.11と同様.

データに比べて約2倍ほど外部起源変動が大きく、各観測点の単純差にも明らかに長周期の変動が見られる（例えば、9-12時）。北側の岩屋・城ノ瀬両観測点では人工ノイズの影響が支配的で補正の影響が見られないが、南側の草香・奥畑・鳥飼浦の3観測点では残差中の長周期成分が減少しており、外部起源変動の補正には有効な方法かもしれない。

以上を踏まえて、人工ノイズの影響が通減している毎時平均値、毎日平均値について、外部起源変動を補正する目的で式3.2.2の補正を適用することを検討した。その場合、周期数時間以上の磁気圏・電離層の電流変化に起因する変動ソース成分とそれによって地中に誘導された成分を補正対象としていることになる。地磁気3成分の観測地点が近いことため変動ソース成分はほぼ島内との観測点とも同値であると思われるので、誘導成分の違いの見積もりが主要な補正になると考えられ、地磁気3成分のうち誘導成分を最も反映したZに対する係数が非常に重要な役割を持つことが予想される。ところが、大谷のZ成分のデータを見ると、変動が小さく明らかに異常と思われる値が多く見られるなど質の面で問題があり、そのままでは補正には使えないと判断した。念のため、大谷のX、Y成分のみを用いて補正を行ってみたが、見るべき成果は得られず、毎時平均値、毎日平均値に対する式3.2.2のタイプの補正は断念した。

### 3. 2. 5 地震活動に伴う全磁力変化検出の試み

前節での地震以外の原因による全磁力変化の除去の試みを踏まえ、淡路島内の毎分値の単純相互差と毎日平均値の単純相互差に着目して、淡路島における全磁力観測が開始された1996年4月から観測を終了した2001年3月までの5年間について、異常変化の検出と周辺の地震との関わりを調べてみることにする。毎分値の単純差では地震と同時に起こる異常を、毎日平均値の単純差では長周期異常と階段状異常をターゲットにして、解析を行うことにする。

1996年4月～2001年3月の淡路島内の6観測点の全磁力毎日平均値の単純相互差を図3.2.13に示す。任意の2観測点の組み合わせのうち、単純差の振幅が平均的に小さい7通りを選んで表示している。また、最下段は、この期間に経度134.6°～135.05° E、緯度34.05°～34.65° Nの範囲で起きた有感地震（ $M \geq 3$ ）のマグニチュードである。これらの地震は気象庁の地震火山概況または地震火山月報（防災編）から採取した。いずれも浅い震源（10-17km）を持っており、上部地殻で起こった地震と考えられる（表3.2.4）。震央分布は図3.2.14の通りである。

図3.2.13を見ると、最大2～3nT程度の短周期変動が常時存在し、数nT以上の振幅を持つパルス・階段状変化・連続変化がときどき発生することがわかる。毎分値の段階で人工擾乱に伴う明らかな異常値は補正したが、まだ残っているものと思われる。図3.2.13の大きな変化の中で人工擾乱と確実に言えるのが、1996年12月末の鳥飼浦—奥畑間、奥畑—草香間、奥畑—大谷間の全磁力差に見られる数nTの不連続で、奥畑の測器の修理が原因である。

図3.2.13に見られるその他の振幅の大きな変動は、人工擾乱と自然の信号の可能性をどちらも否定できない。地震とのかかわりで注目されるのが、1997年8月下旬に草香—城ノ瀬間と岩屋—大谷間に現れる数nT程度の急激な変化と、2000年3月ごろ奥畑—大谷間と草香—大谷間の全磁力差に現れる計10nT程度の減少である。1997年8月26日には播磨灘で、2000年3月18日には奥畑と草香の中間付近で地震が起こっており、関連が注目される。しかし、1997年については草香—大谷間に目立った変動がなく震源から遠い岩屋と城ノ瀬に限られた変動とみられ、また、2000年については奥畑—草香間に変動がないことから大谷観測点に限られた変動とみられることから、確実に地震に伴う変動と判断するのは難しい状況である。

次に全磁力毎分値について異常値の検出を試みた。前節で鳥飼浦と草香の全磁力毎分値は非常に相関が高いことがわかったので、ノイズレベルが最小となるであろう鳥飼浦—草香間の相互差を中心に検討することにする。しかし、毎日平均値の相互差でも見たように、人工擾乱などによる大きな変動が散発していて、異常値の原因を特定するのが非常に難しいのが現状である。そこで、毎分値の相互差では、地震と同時に起こる変動に絞って異常な全磁力変化を捉えているかどうかを調査した。対象とした地震は表3.2.4の11個である。

結果は、地震と同時の確実な変化を認めることはできなかった。ただ、毎日平均値で示唆された1997年8月26日と2000年3月18日の地震について、地震発生ほぼ同時に毎分値に振幅の大きな変動が起こっていることは認められた。図3.2.15に1997年8月26日3時13分に播磨灘で起きたM3.6の地震とその前後の全磁力毎分値の相互差を、図3.2.16に2000年3月18日2時8分に草香と奥畑の中間の上部地殻で起きたM4.1の地震前後のものを示す。観測点の組み合わせは欠測を除いて図3.2.13と同様である。地震発生時刻の前後3時間ずつの柿岡でのK-indexはいずれも0であり、外部起源変動は活発ではなかった。

人工ノイズ起源の短周期変動などのノイズレベル

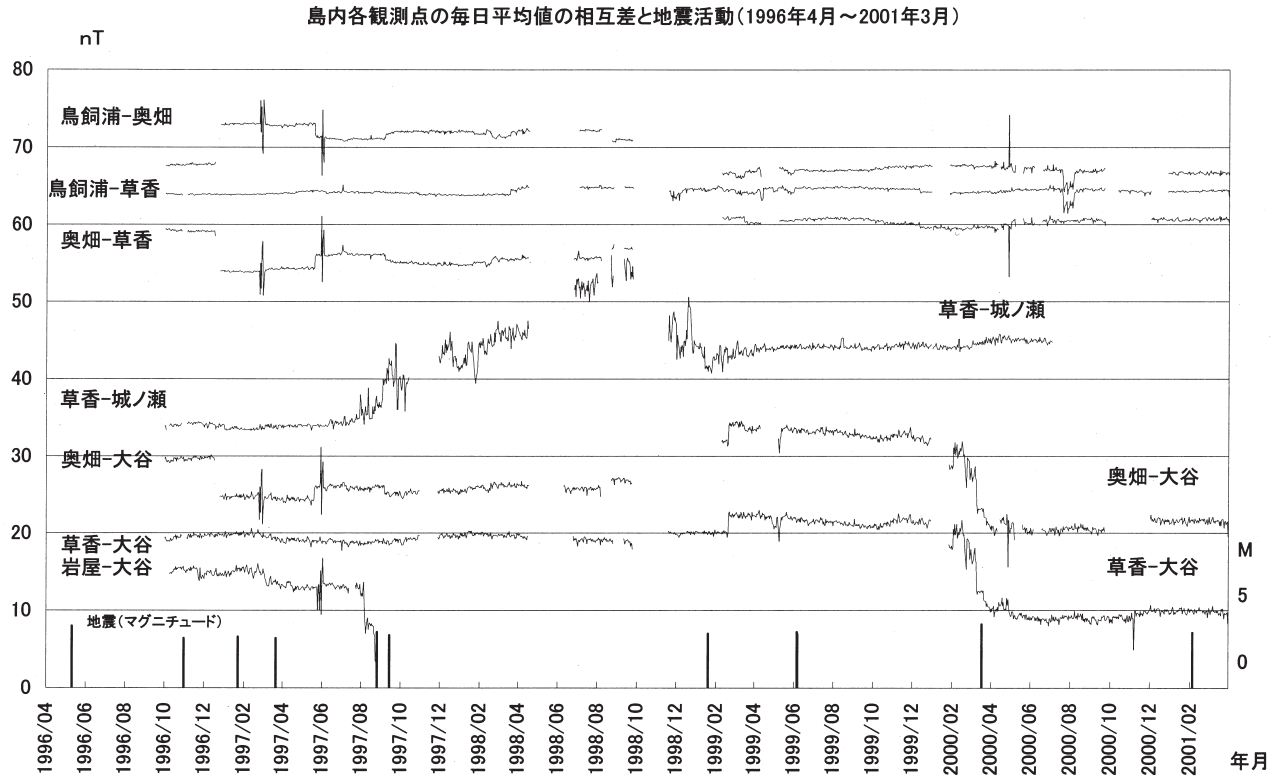


図3.2.13 島内各観測点の毎日平均値の相互差と地震活動（1996年4月～2001年3月）。縦軸は全磁力差（単位 n T），横軸は時間（年月）。

表 3.2.4  
1996年4月～2001年3月に淡路島周辺で起こったM3以上の有感地震

年	月日	時分	経度(°)	緯度(°)	深さ(km)	マグニチュード
1996	511	546	134.97	34.52	10	4.0
1996	1031	252	135.03	34.62	13	3.2
1997	123	733	134.90	34.50	11	3.3
1997	322	303	135.03	34.62	16	3.2
1997	826	313	134.65	34.32	14	3.6
1997	914	1948	134.77	34.52	15	3.4
1999	120	2226	135.03	34.60	17	3.5
1999	606	749	134.75	34.38	16	3.6
1999	607	1406	135.05	34.17	12	3.5
2000	318	208	134.82	34.40	14	4.1
2001	205	146	134.75	34.39	13	3.6

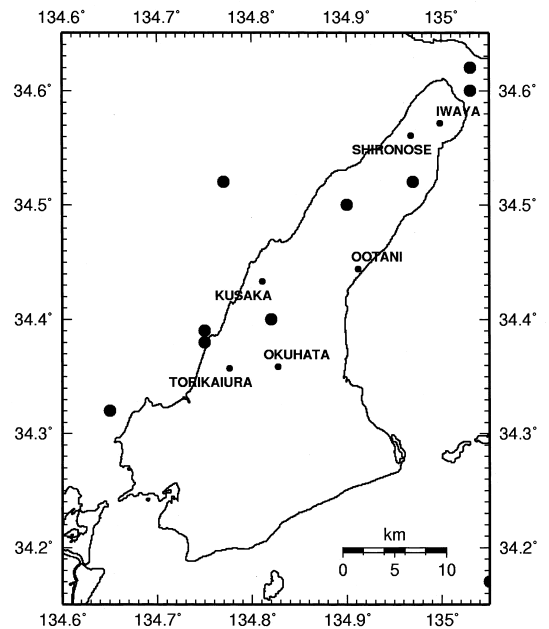


図3.2.14 1996年4月～2001年3月に淡路島周辺で起こったM3以上の有感地震の震央。



は平均的に、鳥飼浦—草香間の相互差で1nT以下、他の組み合わせで1~2nTなので、2点間で数nT程度の変動があれば異常と考えても良いと思われ、図3.2.15では草香—城ノ瀬間の約4nTの矩形形状変化と岩屋—大谷間の約5nTの変化が注目される。草香—城ノ瀬間では、地震発生前後の数時間の短周期変動の振幅もやや大きいようである。しかし、草香—城ノ瀬間では、矩形形状の変化が2日前にも起こっており（図には示さず）、27日の午前0時ごろにも小規模なものがあるなど、矩形変化の発生頻度が比較的高い。また、当時、岩屋観測点付近では水槽工事が行われていて大きな変動が頻発しており、現時点では人工擾乱がたまたま地震と同時に起こった可能性を否定しきれない。

図3.2.16では、地震発生の直前直後には5nTを越える変化はなかったが、2~3nTの変動がいくつか起こっている。特に、鳥飼浦—奥畑間、奥畑—草香間に地震とほぼ同時に出現している振動変化が注目される。奥畑—大谷間にも出現しているようにも見え、主に奥畑に現れた変化であったことがわかる。しかし、人工擾乱や人工ノイズなどの可能性もあり、さらに慎重な解析が必要であると思われる。

以上のように、本研究では明らかに地震に伴う全

磁力変化と判断できる異常が検出できなかった。この理由としては、観測期間中に淡路島周辺で大きな地震がなかったこと、工事や車の通行などの人工擾乱が完全には補正しきれなかったこと、などが挙げられるだろう。兵庫県南部地震の一週間後から、淡路島北部の野島断層周辺で全磁力集中観測を行った Electromagnetic Research Group for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1997) は、やはり余震活動に伴う全磁力変化を捉えることができなかったが、その理由として、人工ノイズの大きさに加え、花崗岩質のため磁化と磁気異常が小さいことを挙げている。

先行したグループに比べて本研究での観測期間は5年と長期にわたったため、短周期から長周期までの全磁力変化について検討することができ、かつ、地電位差観測による人工ノイズ研究の結果も参考にできた。そのため、データの性質を利用した処理や、観測網で捉えられる可能性のある信号のタイプの絞り込みを効率的に行うことができた。結果として、本研究で採用した手法によって、淡路島のような人工ノイズが激しい所でも、局所的に2~3nTを越えるような地震に伴う全磁力変化があるなら検出できる可能性は示せたと考えられる。

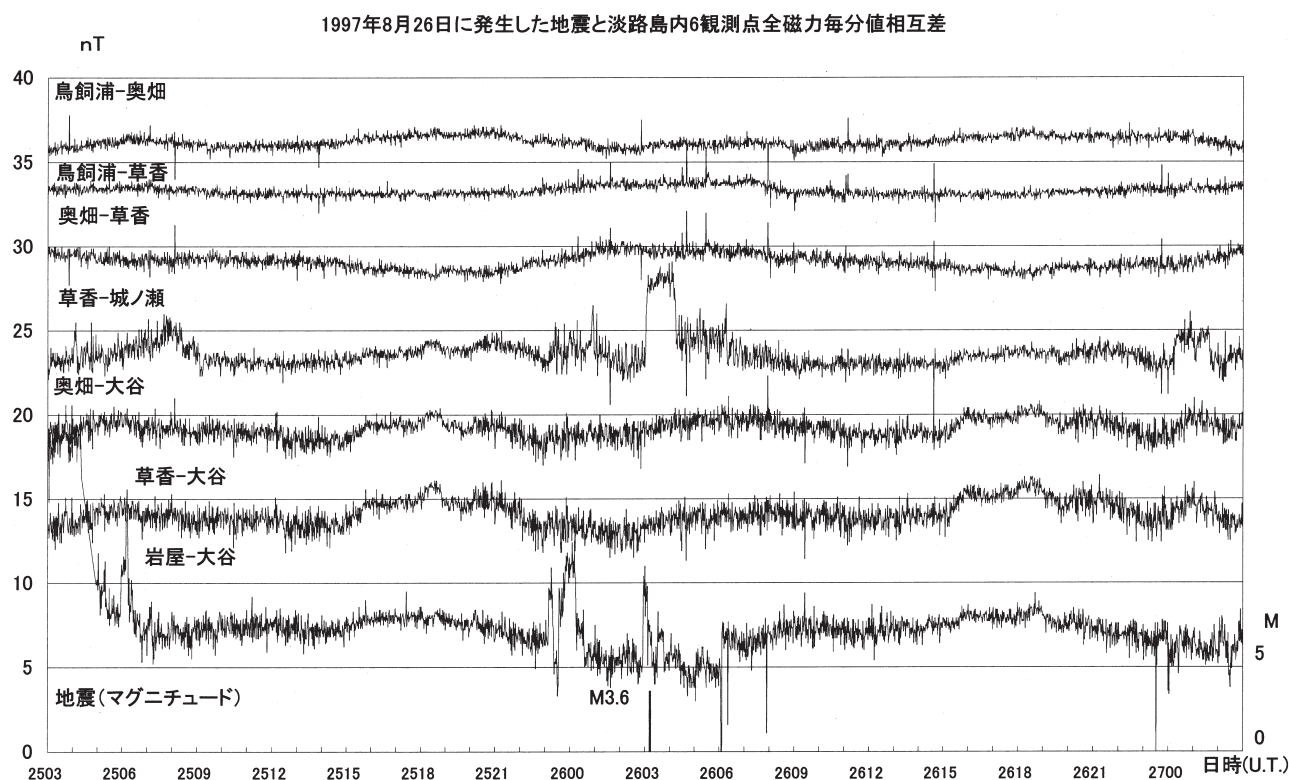


図3.2.15 島内各観測点の毎分値の相互差と地震活動（1997年8月26日の地震前後1日）。



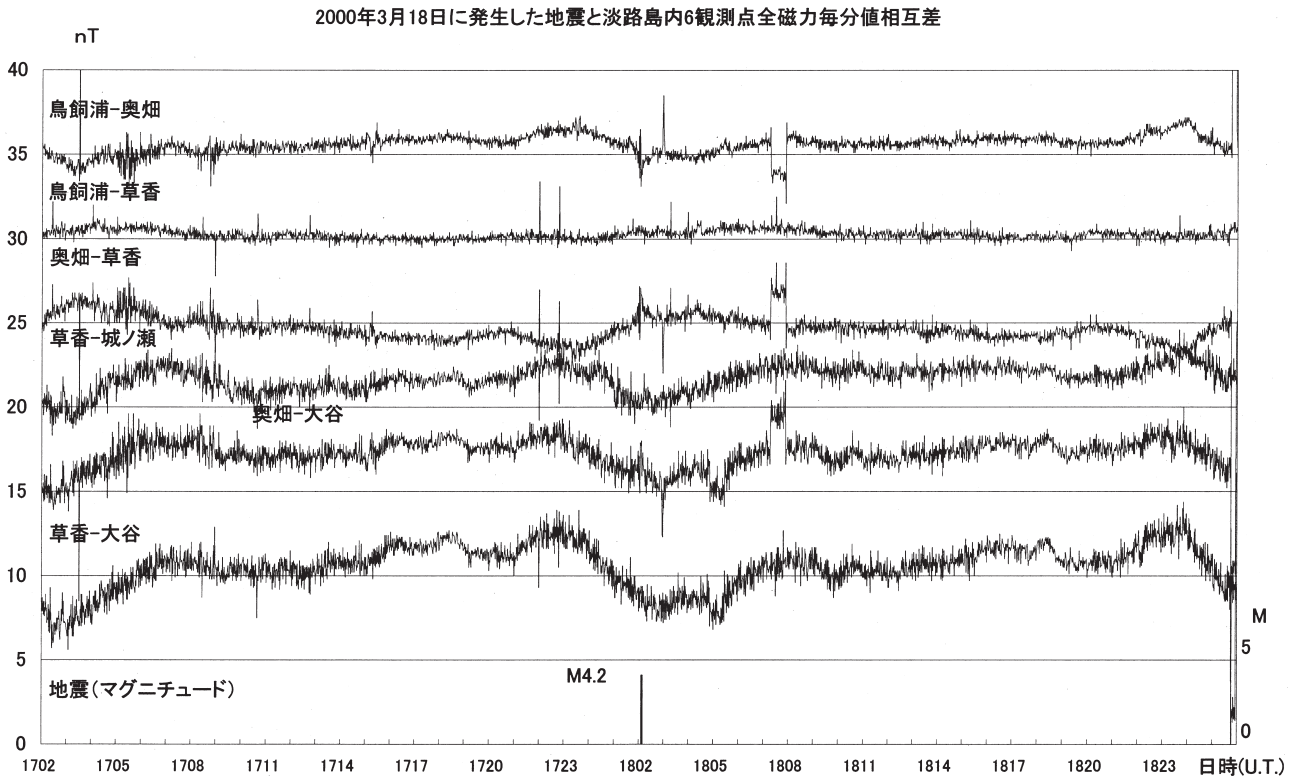


図3.2.16 島内各観測点の毎分値の相互差と地震活動（2000年3月18日の地震前後1日）。

因みに、観測期間中後半には、「鳥取県西部地震（2000年10月6日、マグニチュード7.3）」および「芸予地震（2001年3月24日、マグニチュード6.4）」と呼ばれる大きな地震があったが、両者とも震源域が淡路島から遠く、島内観測点で地域差が出るとは考えられない。毎日平均値の相互差や毎分値の相互差の解析でも、これらに対応すると見られる地磁気全磁力変動は解析されていないが、このことはこの解析の特性から鑑みて当然のことと考える。

### 3. 2. 6 まとめ

兵庫県南部地震で活動した野島断層が地表に表れている淡路島において、1996年4月から2001年3月までの5年間にわたって、地震活動に伴う全磁力変動を検出することを目的に、全磁力の毎分連続観測を行った。島の北中部に分布する6観測点のデータと柿岡・鹿屋の全磁力値から、人工ノイズ・外部起源変動・外核起源磁場などの地震以外の原因による全磁力変化の性質が調べられ、数百nTにも及ぶ磁場変動の中から、たかだか数nTと考えられる地震に関連する信号を抽出するための手法の検討が行われた。その結果、毎分値および毎日平均値について、島内の観測点間で相互差をとることで目標とするノ

イズレベルを達成できることがわかった。その場合、観測網の空間スケール（数十km）より十分広域的な信号は相殺されてしまうので、局所的な信号のみ検出できる可能性がある。観測期間中に淡路島周辺で起こったM3以上の11個の有感地震について、局所的な全磁力異常が見られるかどうか調査したが、明らかに地震に関連していると判断できる変動は検出されなかった。これは、一つには、観測期間中に淡路島周辺で起こった地震は上部地殻内の比較的小さな地震（M3.2～4.1）だけであったためと考えられる。検証することはできなかったが、非常に人工ノイズの大きい淡路島で地震に伴う数nT程度の全磁力変動を検出できる可能性を示せたことは、今後、都市化の進んだ日本で地震と地磁気変動の関係の解明を進めていく上で、重要な基礎となることが期待される。