

### 3. 3 地磁気変換関数

地上で観測される数日以下の時間スケールの地磁気変化現象は、概ね磁気圏・電離層中に存在する大規模な電流系の時間・空間変化によって地上に引き起こされる磁場の時間変化であると言える。起源となる電流系の空間構造が非常に大きく、また磁場変化を伝える波動の波長がきわめて大きい場合が多い。

地球が一様な高電気伝導度の球であれば、超高層大気や宇宙空間を起源とする電流系による磁場短周期変化のうち、地表に垂直な方向の成分は地球内部の電磁誘導によりほぼ減衰されてしまい、通常地表面に対する接線方向すなわち水平方向の成分が卓越すると考えられる。しかし実際には地球の電気伝導度、特に地表面陸地から地殻下部までの電気伝導度はそれほど高いとは言えない。また、地表面で海と陸の電気伝導度が大きなコントラストを持つ、深さ方向に電気伝導度は変化する等電気伝導度分布も一様ではない。超高層起源の磁場変化が地球の電気伝導度によって変調を受けることから、地上で観測される磁場変化の鉛直成分や磁場変化で誘導された電場を利用することにより、地下の電気伝導度のさまざまな情報を得ることができる。その性質を利用して、観測された地磁気変化のデータを処理解析することにより地下電気抵抗構造についての情報を得る手法について古くから様々な研究がなされてきた。

観測された地磁気変化の水平方向の成分と、地磁気鉛直成分または地電流の水平方向の成分との相互比較を行うことにより、逆に地下の電気抵抗構造の情報を得る手法がこれまで開発されてきた。地磁気水平成分と鉛直成分との比較から、地下の電気伝導度構造に水平方向の不均質があるかどうか、あるとすればどの程度かを推定することができる。電気伝導度 (Conductivity) の異常 (Anomaly) を推定することから、求められる解析結果は、古くはCA変換関数と呼ばれていたが、最近では地磁気変換関数と呼ばれている。地磁気水平成分と地電流水平成分との比較からは、観測地点付近直下の地下の見かけ電気比抵抗の深さ分布や伝導度の勾配を推定できる。磁場 (Magnetic) および地電流 (Terrestrial current) を用いることから、Magneto-Telluric (MT) 法とよばれる。

両者とも、自然の電磁気的変化をシグナルとして観測し、それを周期毎に分離して処理・解析するものである。自然の電磁気的変化としては周期0.01秒～数時間の地磁気擾乱現象が一般的に用いられてきた。

地磁気変換関数についての研究は、Rikitake

(1959) による中部日本電気伝導度異常の先駆的研究に端を発して、日本の研究者が多くの成果を出してきた (Rikitake and Honkura (1985) 参照)。地磁気変換関数が地下の電気抵抗の水平構造に関する情報を有しているのであれば、その時間変化を見ることにより地殻活動等による地下の電気伝導度構造の状態変化を検出できるという期待が持たれる。Rikitake (1976) は、地震に伴う地下の電気伝導度構造の変化によって引き起こされる地磁気変換関数の変化を理論的に推論した。これまでに、実際の観測された時系列データから地磁気変換関数の時間変化を求めた多くの研究がある (Rikitake, 1969; Yanagihara, 1972; Miyakoshi, 1975; Shiraki and Yanagihara, 1975; Yanagihara and Nagano, 1976; Honkura, 1979; Rikitake, 1979; Sano, 1980; Shiraki, 1980; Sano, 1982; Fujita, 1990; Fujiwara, 1996)。

この中で、地震に伴う地磁気変換関数の顕著な時間変化を示した研究例としては、Yanagihara and Nagano (1976) による、柿岡での長期間の地磁気変換関数の関東大地震前後における変化の報告が注目された。Yanagihara and Nagano (1976) によれば、関東大地震前10数年で地磁気変換関数が約0.15減少し、地震を境に増加に転じ、その後20年で約0.2増加した。このような大きな地磁気変換関数の時間変化を起こす原因は一般的に考えにくい。状況から見て、関東大地震前後の地殻活動と関連していたと考えられるが、震源から約100kmも離れた柿岡で観測された変化を定量的に説明できるモデルはまだ得られていない。今後に研究の余地が残っている。その後、同様の手法を用いて他の地点のデータについての解析がいくつか行われているが (Sano, 1980; Sano, 1982; Fujita, 1990; Fujiwara, 1996) が、地震と対応する地磁気変換関数の時間変化について目立った成果は出されていない。

「活断層における地震予知技術開発のための地電流等の観測」計画においては、淡路島東部の大谷にフラックスゲート磁力計が設置され、地磁気3成分の毎秒値・毎分値が取得されている。この計画では、地磁気3成分データは、地電流データから外部磁場変化による電磁誘導分を除去する目的に使用することが主目的であるが、地殻活動検出手法の調査の一環として、地磁気データのみを用いた地磁気変換関数の導出およびその時間変化を調べることは重要である。ここでは、淡路島における地磁気3成分データを用いて導出された地磁気変換関数について議論する。

地磁気変換関数は、地磁気擾乱時の地磁気3成分データの周波数スペクトルをとり、周期毎に、

$$Z=A \cdot H+B \cdot D$$

という関係式を当てはめ、観測されたH, D, ZからA, Bを求めることで導出される (Everett and Hyndman, 1967). ここに、H, Dはそれぞれ平均的な地磁気の北および東向き成分を、Zは地磁気鉛直成分を表す。A, Bを地磁気変換関数とよぶ。観測データをスペクトル解析して関数を導出するため変換関数は複素数で与えられる。実部は概ね水平方向の地下電気伝導度の勾配と関連性を持ち、虚部は地下電気伝導度の大きさに影響される。周期が長いほどより深い領域の状態を反映している。導出されたA, Bの実部符号を逆にしてH, D平面にベクトル表示すると概ね地下電気伝導度の勾配の方向を指す。このベクトルをインダクションベクトルとよぶ。

今回の解析では特に振幅について制限をもうけずに観測時期に発生した地磁気擾乱全般を抽出し、FFT法により周波数スペクトル推定を行うことにした。まず、時間変化を議論する前の準備として、平均的なインダクションベクトルを見てみる。図3.3.1は毎秒値を用いたインダクションベクトル、図3.3.2は毎分値によるものである。用いたデータは1996年後半から1997年前半にかけての数ヶ月での顕著な地磁気擾乱である。毎秒値については2048秒、毎分値については256秒分のブロックから算出した。COHZは、Zと水平2成分とのコヒーレンスであり、

変換関数推定がどの程度良くできているかの指標となる。

一般に、解析対象とするデータが、FFT法で解析するデータ区間より長い周期の成分を強く持っている場合、FFTで求めるスペクトルの長周期側がその影響を受け、スペクトル推定精度が悪くなる。ここでは特に前処理を行わないので、長周期側の影響を比較的受けない周期帯の結果について主に議論する。毎分値の結果のうち、32分以上の周期についてはCOHZが0.8から0.9と良く求まっているのに対し、16分以下では0.3程度とあまり良い結果ではない。さらに、毎秒値についてはほぼ全て0.1以下と得られた結果は悪い。16分程度の周期帯まではノイズの影響が出ていると考えられる。

柿岡と大谷のX, Y成分データを比較した結果、500秒程度まで人口ノイズの影響が見られている(図2.1.3, 2.1.4)ことを考え合わせると、約1000秒以下の周期ではノイズの影響が存在しているであろう。周期128から256秒における結果にノイズの影響が大きく出ていることを考えると、16分周期における結果ではノイズの影響がやや低減されているようである。これは、毎秒値の平均値である毎分値を用いたためノイズが見かけ上低減して地磁気変換関数決定が比較的良く求まったのであろう。一方、32分以上の周期であればノイズレベルがかなり低減し

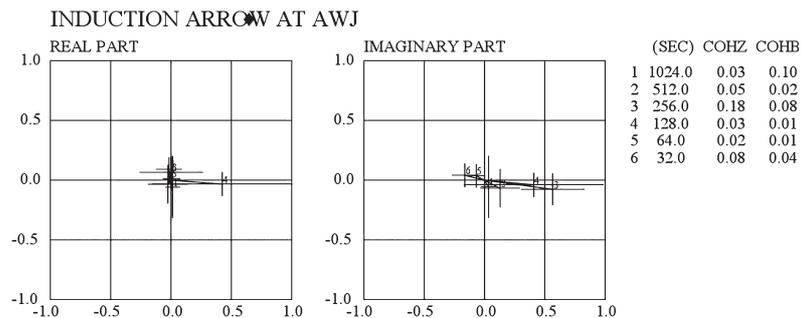


図3.3.1 淡路島における周期1024-32秒のインダクションベクトル (左:実部, 右:虚部)。

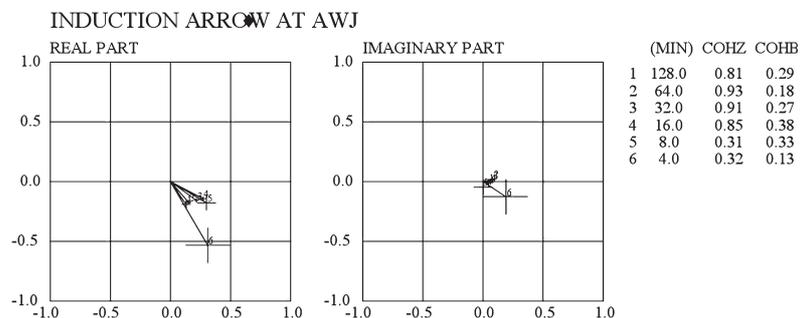


図3.3.2 淡路島における周期128-4分のインダクションベクトル (左:実部, 右:虚部)。

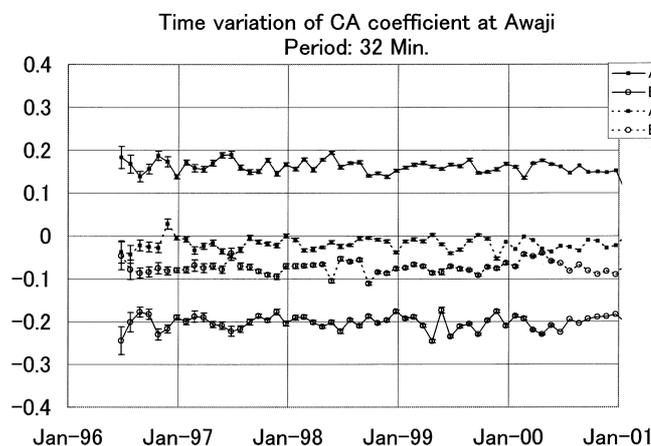
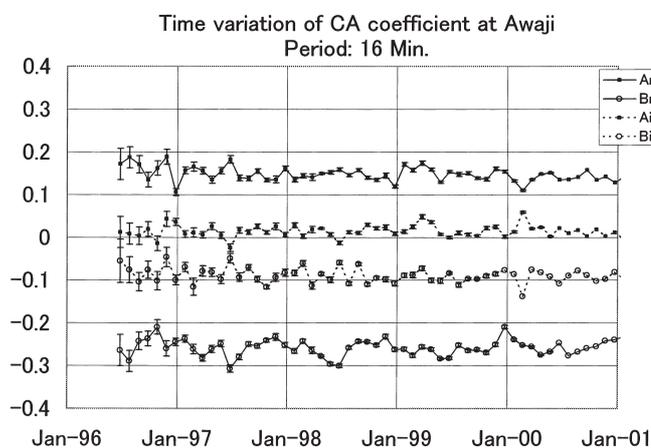
てその影響が避けられていると推定される。以上により、大谷のデータでも32分以上の周期については、時間変化モニターに用いる程度には地磁気変換関数が求まると考えられる。

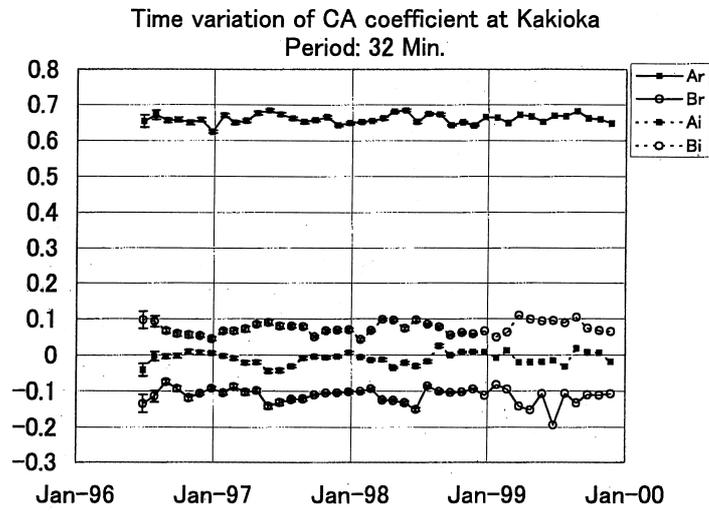
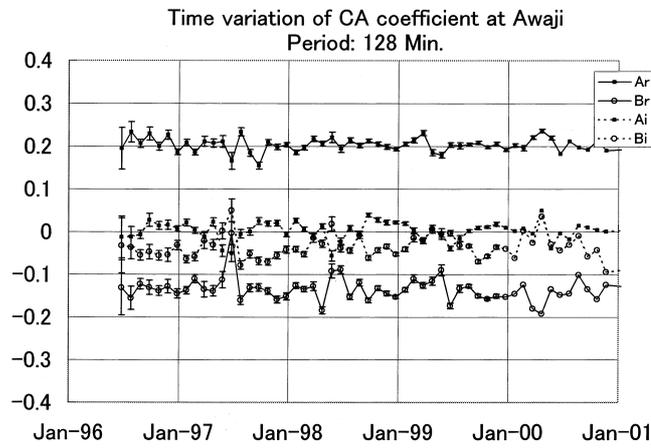
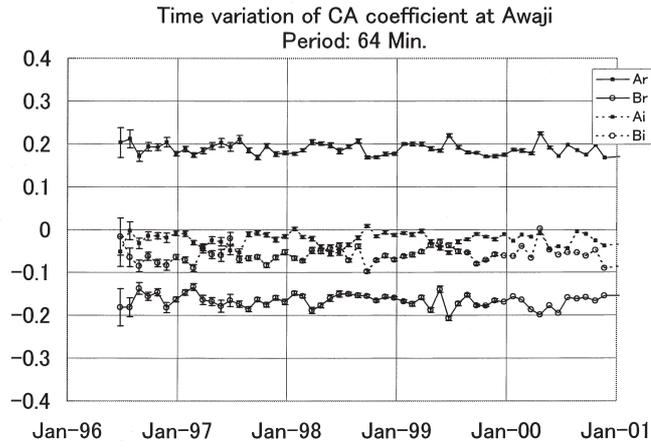
32分の周期について得られた地磁気変換関数の値は、Fujiwara and Toh (1996) が淡路島南西部での観測で求めたものに比べて、若干Brが大きいものの、ほぼ同様であると言える。彼等の解析結果から、この値は概ね太平洋の海洋と陸地部のコントラストの効果が現れたものと思われる。値そのものは淡路島付近の小規模な地下構造を反映していると考えにくい。地震活動に伴って、関東大地震に先立って見られたような時間変化が捉えられる可能性はある。

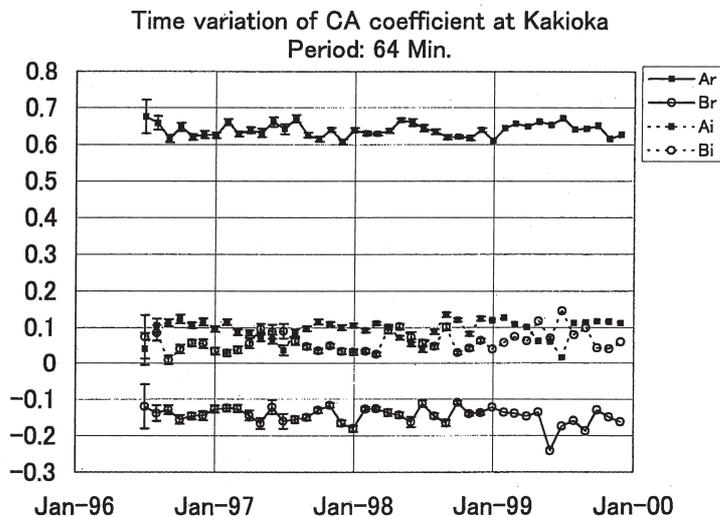
図3.3.3-3.3.6にそれぞれ周期16, 32, 64, 128分の周期について地磁気変換関数の時間変化を示した。16

分のデータは参考のために記した。また、128分はスペクトル推定精度が良くないため他よりばらつきが大きい。

全体を一見して、特に目立ったジャンプや系統的な変化は見られていない。しかしよく見ると、変換関数が1年周期の年周変化を示しているように見える。地磁気変換関数の年周変化については、Shiraki (1980), 堀他 (1995) により同様のことが見られることが示されているが、その原因および他の地点での様子はまだよくわかっていない。地磁気変換関数の時間変化を議論する場合、この年周変化の性質を把握しておくことは重要である。同期間における柿岡における32, 64分の地磁気変換関数の時間変化を図3.3.7, 3.3.8に示す。淡路島・柿岡の地磁気変換関数の比較では、Ai, Biについては概ね淡路島、柿岡ともに同様の年周変化が見られ、Arにつ







Seasonal variation of CA transfer functions (Period:32 min.) Upper:MMB, Middle:KAK, Lower:KNY

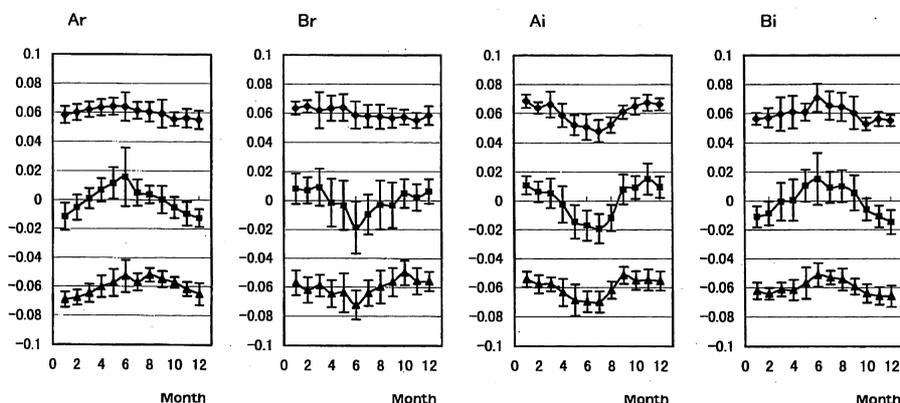


図3.3.9 女満別（上段），柿岡（中段），鹿屋（下段）における地磁気変換関数の平均季節変化。

いては柿岡における年周変化の方が明らかに大きいことがわかる。実部、虚部とで様相が違うこと、場所によって年周変化振幅が違うことは興味深い。

そこで、図3.3.9に1985-99年の毎分値を用いて得られた女満別、柿岡、鹿屋における地磁気変換関数の平均的年周変化を示す。この図から、実部の平均値が大きい場所においては実部・虚部とも変換関数の年周変化振幅が大きいことがわかる。その傾向は実部の方が顕著であり、女満別のAr,Brの年周変化振幅は非常に小さい。虚部についてはどの地点でも明瞭な季節変化を示している。虚部の年周変化振幅が実部平均値（インダクションベクトルの長さ）に依存することは、堀他（1995）でも示されている。

図3.3.10は、地磁気変換関数虚部年平均値の時間変化である。特にAiにおいて11年の太陽活動に伴う時間変化が見受けられる。太陽活動極大年の1,2年

前にあたる1988-89年および1998-99年において全体に関数が+側にシフトしているようである。

これら年周変化、経年変化が何に起因するものかまだ明確ではないが、この周期帯であれば原因を地下に求めるとするとかかなり深部におよび、そこに季節変化を求めることは困難である。むしろ超高層または宇宙空間等外部起源とする方が考えやすい。地球の自転軸および磁軸の太陽に対する相対的な傾きは季節によって変わるため、磁気圏の形状は季節によって変形する。特に磁気圏尾部の地球に対する位置関係は大きく様変わりする。磁気圏内の電流系（尾部電流、沿磁力線電流、磁気圏圏界面電流、赤道環電流）の地球に対する相対的な方向性が変われば、それによる外部磁場自身の持つ水平成分・鉛直成分の比率が変化しそれによって地磁気変換関数の季節変化を生じさせることは考えられる。季節変化

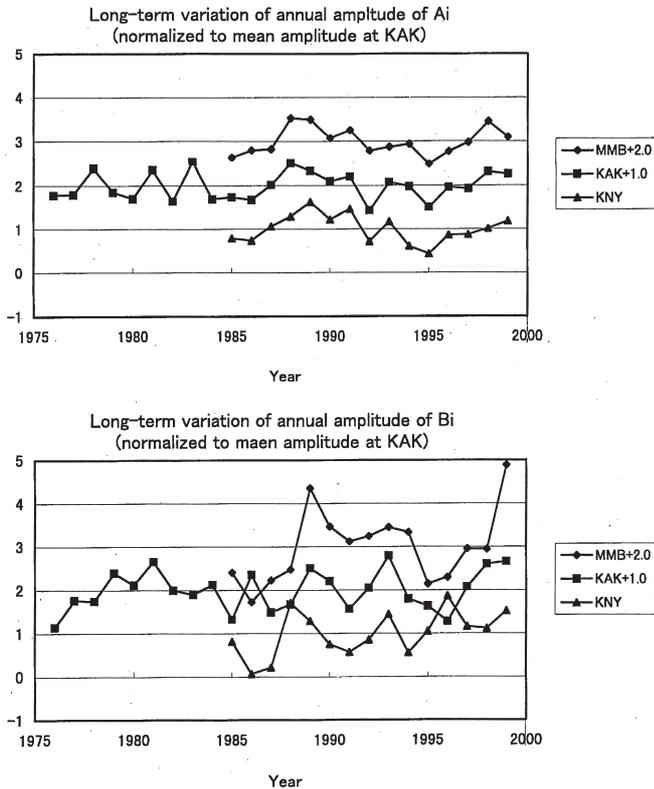


図3.3.10 女満別（上段），柿岡（中段），鹿屋（下段）における地磁気変換関数年平均値の経年変化。

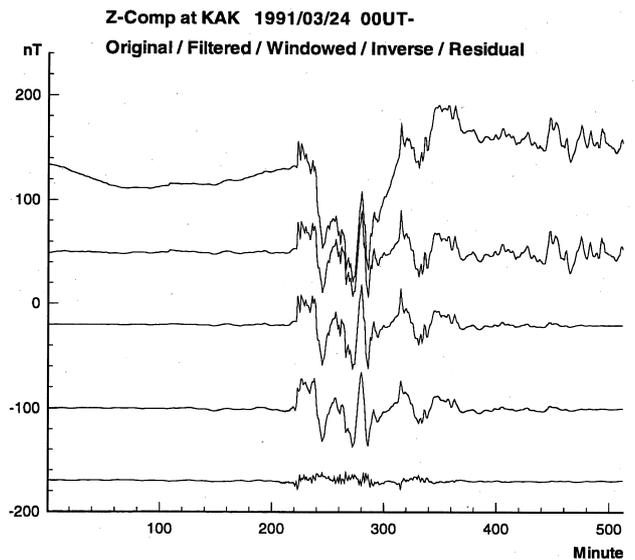


図3.3.12 地磁気変換関数を用いたZ成分推定の例。

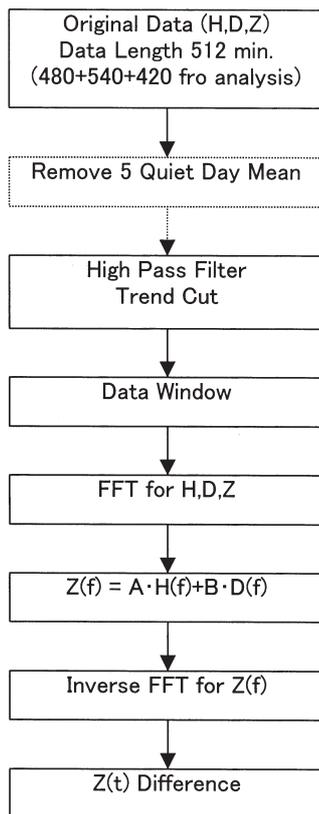


図3.3.11 地磁気変換関数を用いたZ成分推定の流れ。

の原因について堀他（1995）も超高層起源と考え、夜間のデータのみを用いても明確な季節変化が見られることから、超高層起源の現象の中でも地磁気静穏日変化（Sq）ではないと推論した。堀他（1995）はさらにサブストームが主な原因であるとしているが、そこまで絞り込めるかどうかはまだ明確でない。

超高層起源の現象がどのように鉛直成分に影響をおよぼすかのヒントを得るため、実際に適当な現象について当たってみる。地磁気変換関数を求めることは地下の電気伝導度構造推定のためであるが、求められた平均的変換関数を逆に利用して鉛直成分を逆推定することは可能である。図3.3.11は、逆推定のプロセスをブロック図で示したものである。あらかじめ平均的な地磁気変換関数を求めておき、内挿でFFTで解析される周期への値付けをしておく。次に解析しようとする時間帯のH, D成分についてFFTをとり、先に求めておいた地磁気変換関数を乗じてZ成分のフーリエ係数を推定し、それをFFTで逆変換する。図3.3.12は、ある磁気嵐について柿岡における毎分値を元に逆推定を行い、観測された値との差をとった例である。対象とした磁気嵐がきわめて大規模であったため、残差が若干残っているが、か

なりよく逆推定できていることがわかる。

この手法を元に、図3.3.13に、夏季に発生した地磁気擾乱について、女満別・柿岡・鹿屋における逆推定を行い、観測された値との差を示す。観測されたZ成分は地点によって波形がまちまちであるが、残差を見ると、高緯度（女満別）から低緯度（鹿屋）まで、やや位相をずらしながらほぼ同様な波形を示している。図3.3.14は、冬季におけるものである。地磁気擾乱としては、できる限り似たようなものを利用した。この例では高緯度と低緯度とで、残差波形の極性が逆になっている。

このように、同様なイベントを用いても季節によって逆推定の結果が大きく異なっている。これを地下の電気伝導度構造によるものとするのは困難であり、外部磁場擾乱の方向性がこのような季節変化を起こすのだと考えるのが妥当であろう。

よって、年周変化は当該地域付近の固体地球物理的变化を示すものではないと考える。ここでは特に補正はほどこさないが、規則的な年周変化分を度外

視して図3.3.4, 3.3.5を見直してみると、ところどころジャンプ状の変化があるが、同様のジャンプが柿岡（図3.3.7, 3.3.8）にも見られている。これは、地磁気擾乱発生数が不十分であり、個々の擾乱自体の特性が関数決定に作用した可能性がある。

以上により、図で示された時期において特に目立った変化は見られていないものとする。この間大きな地震が発生しなかったため、このように地磁気変換関数の変化が見られなかったのかも知れず結論づけることはできなかった。しかし、地磁気変換関数のモニター手法について考察を深め技術開発発展の素地を形成できたことは重要であるとする。

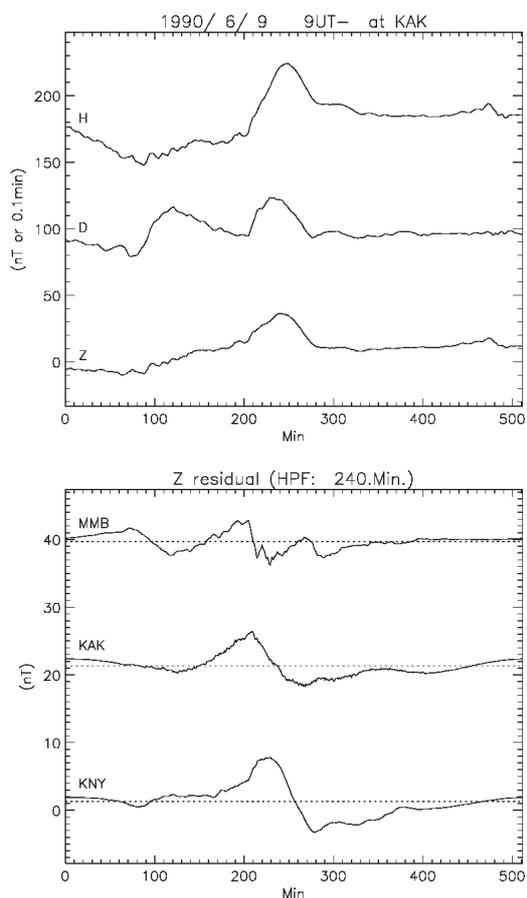


図3.3.13 1990年6月9日の地磁気擾乱について女満別、柿岡、鹿屋におけるZ成分推定残差（下段）。

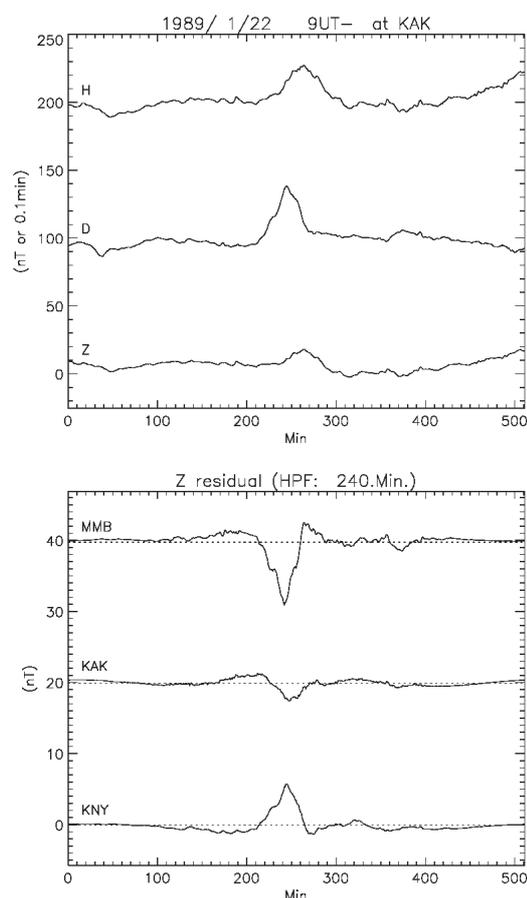


図3.3.14 1989年1月22日の地磁気擾乱について柿岡のH,D,Z（上段）、女満別、柿岡、鹿屋におけるZ成分推定残差（下段）。

### 3. 4 鳥取県西部地震，芸予地震に伴う電磁気変動

淡路島での観測開始以後，島内とその周辺においては特に大きな地震は発生しなかった．しかし西日本全体として見ると，2000年10月6日に鳥取県西部地震が，2001年3月24日に芸予地震が発生し広範囲で被害があった．これらの地震は我々の淡路島での観測の目的である野島断層を始めとする淡路島内の断層の運動に伴うものではないが，遠距離で発生した地震に伴って関連する電磁気変化が捉えられているかを確認した結果について報告する．

#### 3. 4. 1 鳥取県西部地震

2000年10月6日，13:30JST (04:30UT)，鳥取県西部 (北緯 $35^{\circ} 16.5'$ ，東経 $133^{\circ} 20.9'$ ) の深さ11 kmでマグニチュード7.3の地震が発生した (気象庁，2000a)．震源付近の鳥取県境港市，日野町では震度6強を観測し，震源から160 km以上離れている淡路島においても場所によっては震度5弱に達した (気象庁，2000b)．この地震により中国地方をはじめ，

近畿，四国の広い範囲で被害が発生している．この地震に伴う淡路島内の電場変動について，まず主成分分析法を利用して調べてみた．図3.4.1は第2. 1. 2節で求めた，1998年1月15日の電位分布の主成分固有ベクトルを用いて，2000年10月6日の0時～24時UTの第1～4主成分スコアの時間変化を表示したものである．また図3.4.2，図3.4.3は同様の主成分スコア (第1～16主成分) の地震発生時刻を含む3時間分を拡大して表示したものである．第2. 1. 2節で説明したように各地点の電位変動データについてあらかじめ時定数100秒のハイパスフィルターをかけている．これによると04:30UT頃にほとんどの主成分の時間変化について鋭いパルス状の変化が現れている．後で見るとこの変化の開始時刻は地震波の到達時刻とほぼ一致しており，地震と関連した変化であると考えられる．また第1～5主成分については，04:30頃から15分間程度の間，短周期変動 (大部分は人工ノイズ) の振幅がやや小さくなっていることがわかる．これは本州側のJR在来線が地震の影響で20分間程度運行を停止したことによると推定され

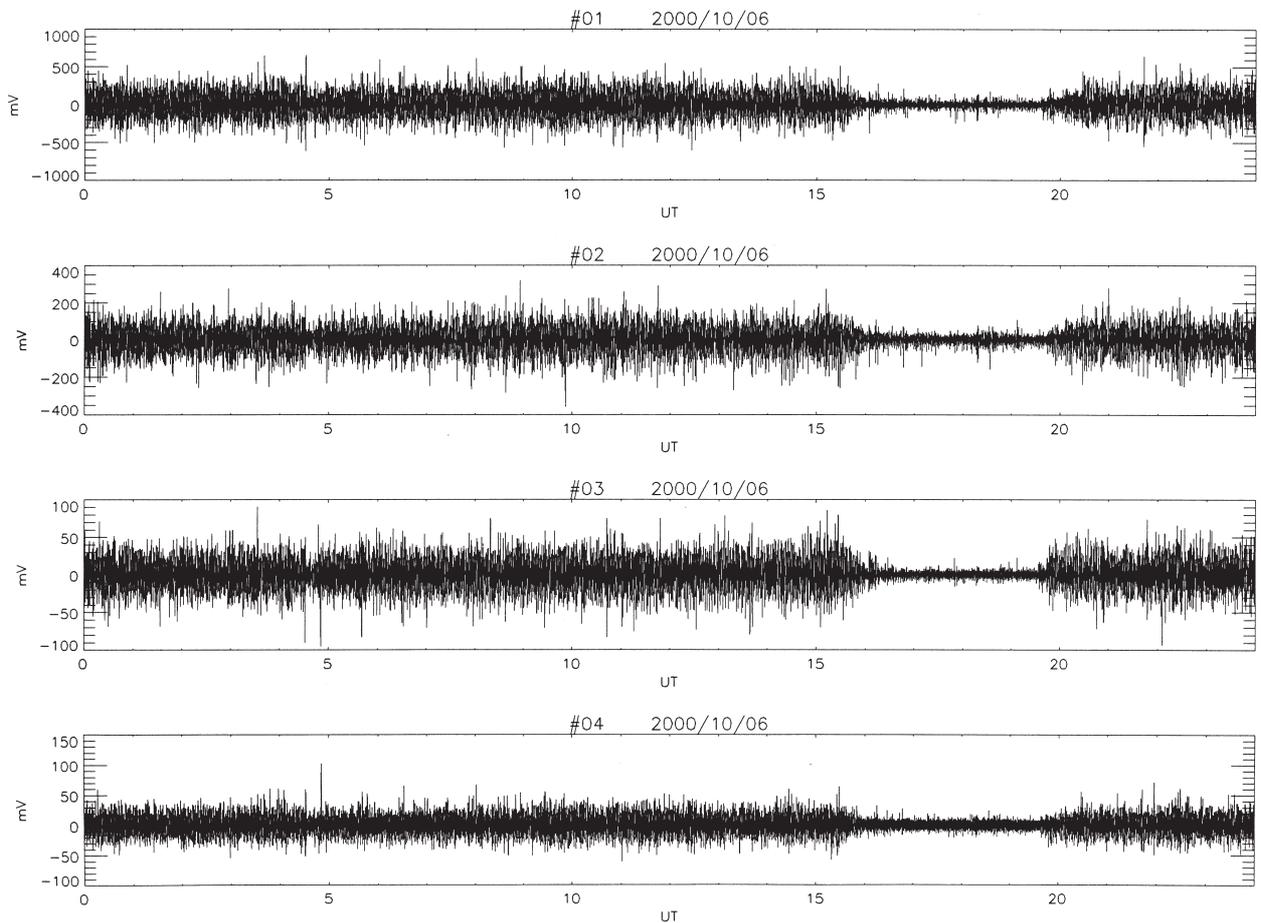


図3.4.1 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた，2000年10月6日の主成分スコアの時間変化 (第1～4主成分)．

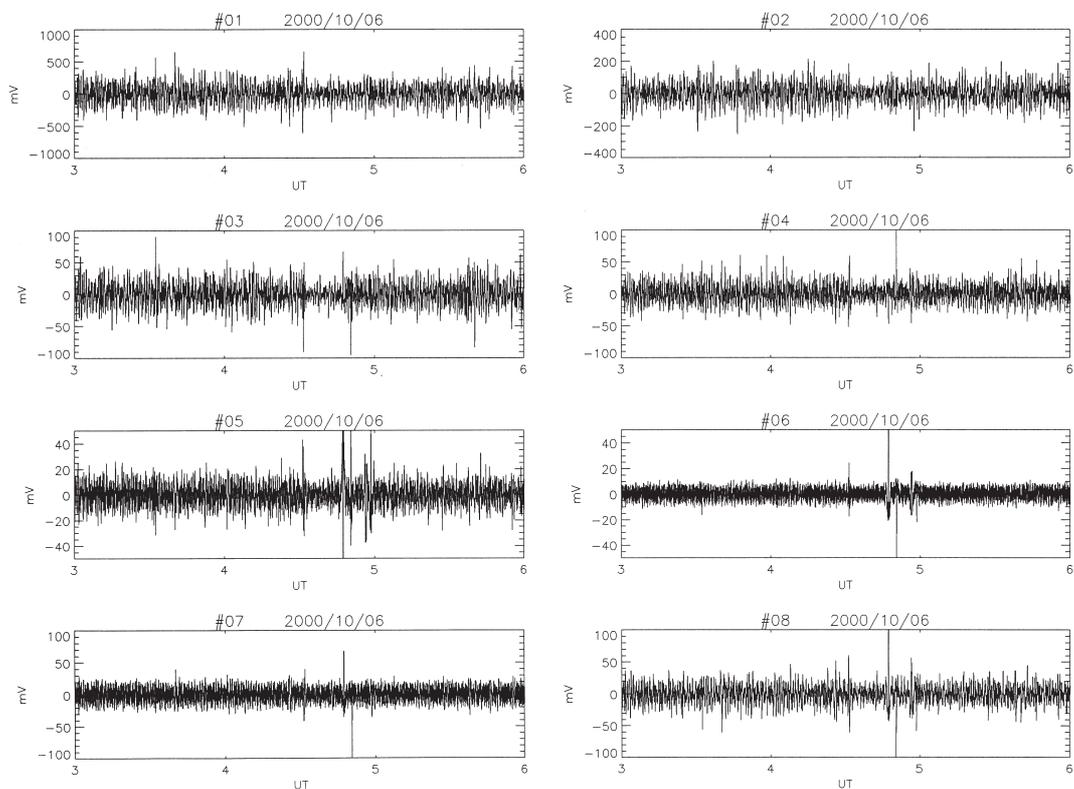


図3.4.2 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた、鳥取県西部地震発生時刻を含む3時間の主成分スコアの時間変化（第1～8主成分）。

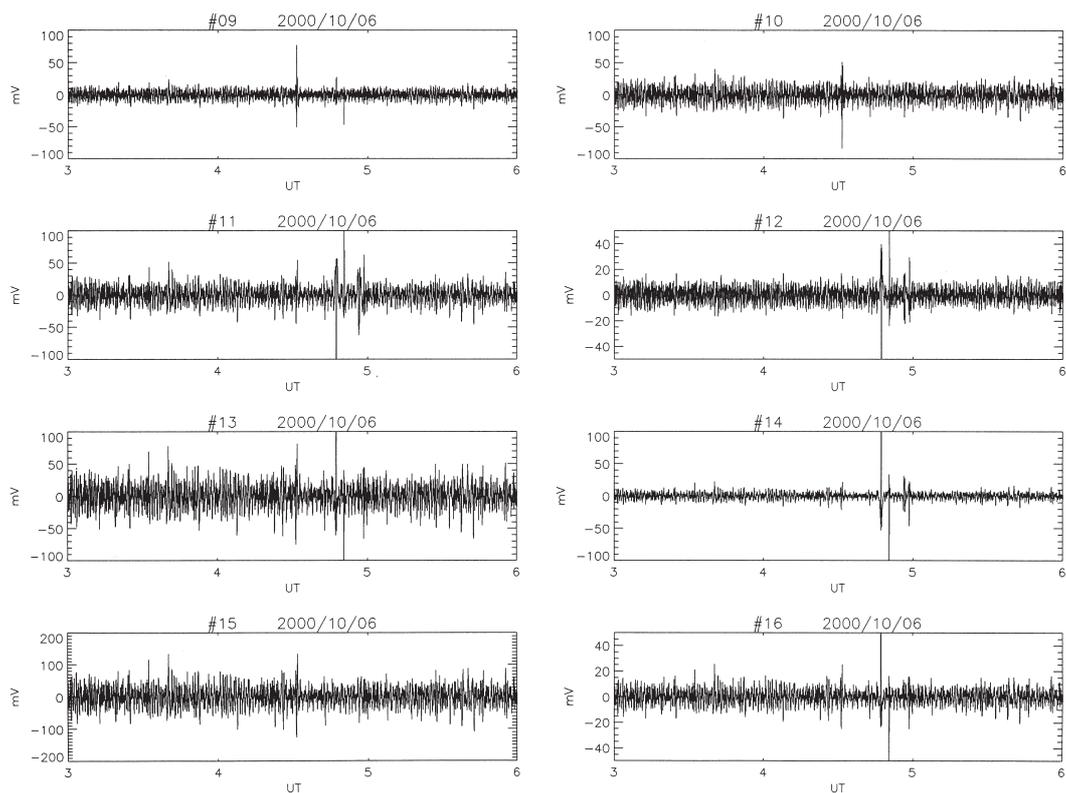


図3.4.3 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた、鳥取県西部地震発生時刻を含む3時間の主成分スコアの時間変化（第9～16主成分）。

る\*. なお04:47から04:59にかけて第3主成分以降の各主成分にパルス状の変動が見られるが、これは元データを調べたところ草香-大谷観測点間のデータのみに見られるパルス状変化が原因である(図は省略)。震源が遠距離にあるにもかかわらず1測線の計測値だけに現れていることから考えて、この変動は地震とは関係のない人工的なノイズであると結論できよう。

地震と対応する上記の変動は、生の時系列データを見ていても気がつかない程度の大きさであり、主成分分析法のような測線間の相対的な変動を調べることによって検出が可能となったことになる。そこ

であらためて、生データを詳しく見てみることにしよう。この04:30前後の地電位差の時間変動を拡大して表示したものが図3.4.4である。ここでは計測された地電位をそのまま表示している。ただし式2.1.2を用いて全地点の平均値からの偏差をプロットしている。なおあらかじめ時定数1000秒のハイパスフィルターによって長周期成分を除去している。この図によれば大きく変化しているのは04:31:5~10あたりである。これは地震発生時刻(04:30:18)よりもかなり遅れている。これは地震波(S波)が淡路島に到達した時刻とほぼ等しい。またこの図には大谷観測点で測定した磁場3成分に同じフィルターをかけ

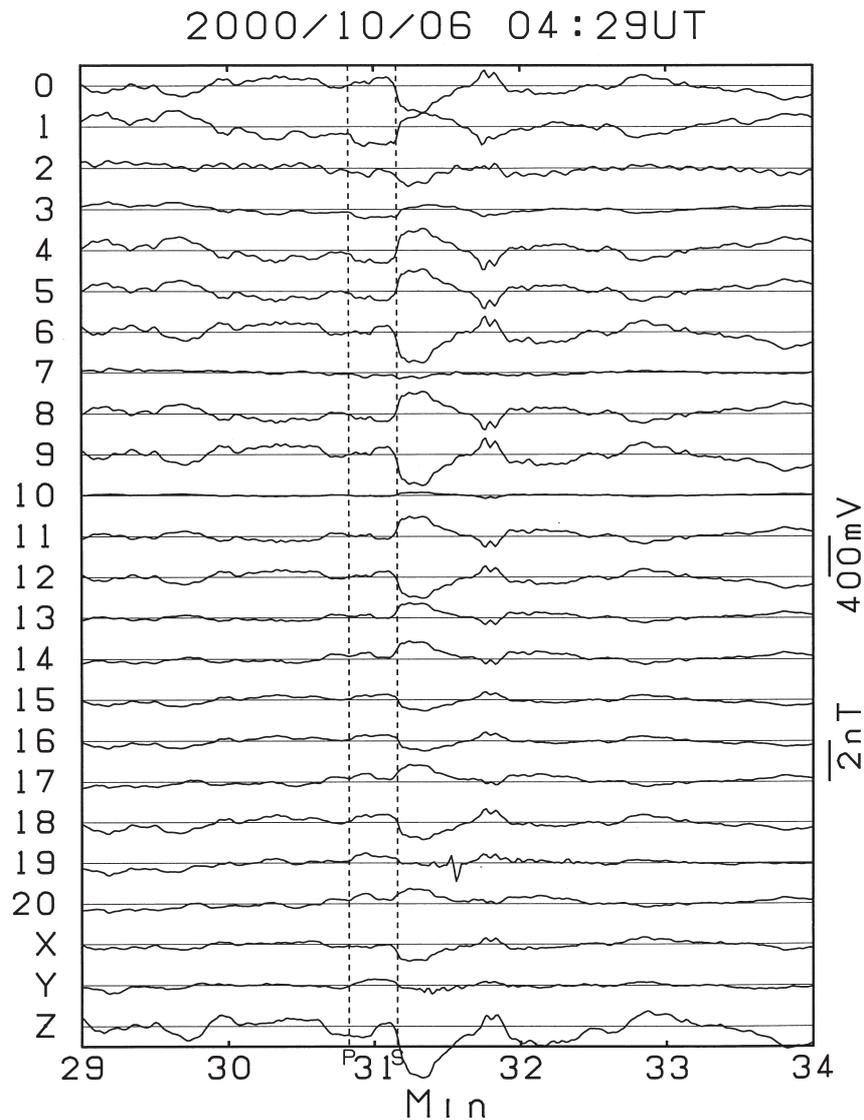


図3.4.4 2000年10月6日04:29~04:34までの各観測点(地点0~20)の電位変化及び大谷観測点の磁場3成分(北向き, 東向き, 下向き)。地点番号については図1.4.1参照。電位変化は21地点の平均偏差。また時定数1000秒のハイパスフィルターをかけている。記号P, Sはそれぞれ淡路島の洲本における地震波形のP波, S波の到達時刻を表す。

\*ちなみにこのとき山陽新幹線は長時間運転を見合わせていた(最後まで運転を見合わせていた広島~岡山間の運転再開は午後5時25分過ぎ)。この時間帯のデータのノイズ幅は通常とあまり変わらないことから、山陽新幹線は普段の地電流ノイズの主たる原因ではないと考えられる。

たものもプロットしている．これを見ると磁場と電場は良く相関していることがわかる．

またこの図によれば変動の波形は正負の違いはあるもののどの地点もほぼ相似であり，観測域全体で同期して電位変動が発生したことを示している．このことを確認するため，図3.4.4の電位変動を観測域の地図上に時刻毎に表示してみたものが図3.4.5，図3.4.6である．これらの図には04:31:00から5秒毎の電位分布を表した．最も変化が大きかった04:31:15～20を始めとして，どの時間をとっても基本的には淡路島西岸，東岸の電位がそれぞれ正，負（あるいはその逆）という，大きな空間スケールの電位分布をしていることがわかる．このパターンは第2. 1. 2節で述べた第1主成分のパターンと類似している．すなわちこの時の変動は通常時の電位分布ノイズの空間分布と同様の分布をしていたということになる．またこれらの図には大谷観測点の磁場ベクトルも表示している．各図の右下のベクトルは水平ベクトルの大きさと方向を，数値は鉛直下向き成分の大きさ（nT）を表している．磁場についても電場と同様に長周期成分を除いている．これを見ると水平

磁場ベクトルは，島の西岸の電位が高い時間については南南西方向を，東岸の電位が高い時間は北北東方向を向いている．また鉛直成分はそれぞれの場合に概ね対応した負，正の変化を示している．

ここで電場と磁場の変化の大きさの関係を定量的に求めてみよう．第2. 1. 2節にならって，浅野一釜口観測点間の電位変動を基準にして考えてみる．図3.4.4のデータから，ほぼ電位変動が最大となる04:31:20の浅野（地点5）－釜口（地点9）間の電位差を両者の距離で規格化すると，（平均）電場は81 mV/kmとなる（電位の基準は釜口）．また同時刻の磁場変化の大きさから大谷観測点の磁場3成分との変化の比率を見積もってみると，浅野－釜口観測点間の電場変動100mV/kmあたり，大谷の北向き，東向き，下向き磁場変化の大きさはそれぞれ-0.99nT, -0.44nT, -3.12nTである．それに対して第2. 1. 2節で求めた第1主成分とそれに相関する磁場の变化の比率の結果（図2.1.41左）を数値で示すと，浅野－釜口間の電位差変動100mV/kmあたり，-0.79nT, -0.37nT, -2.69nTであり，両者の数値は非常によく一致していることがわかる．

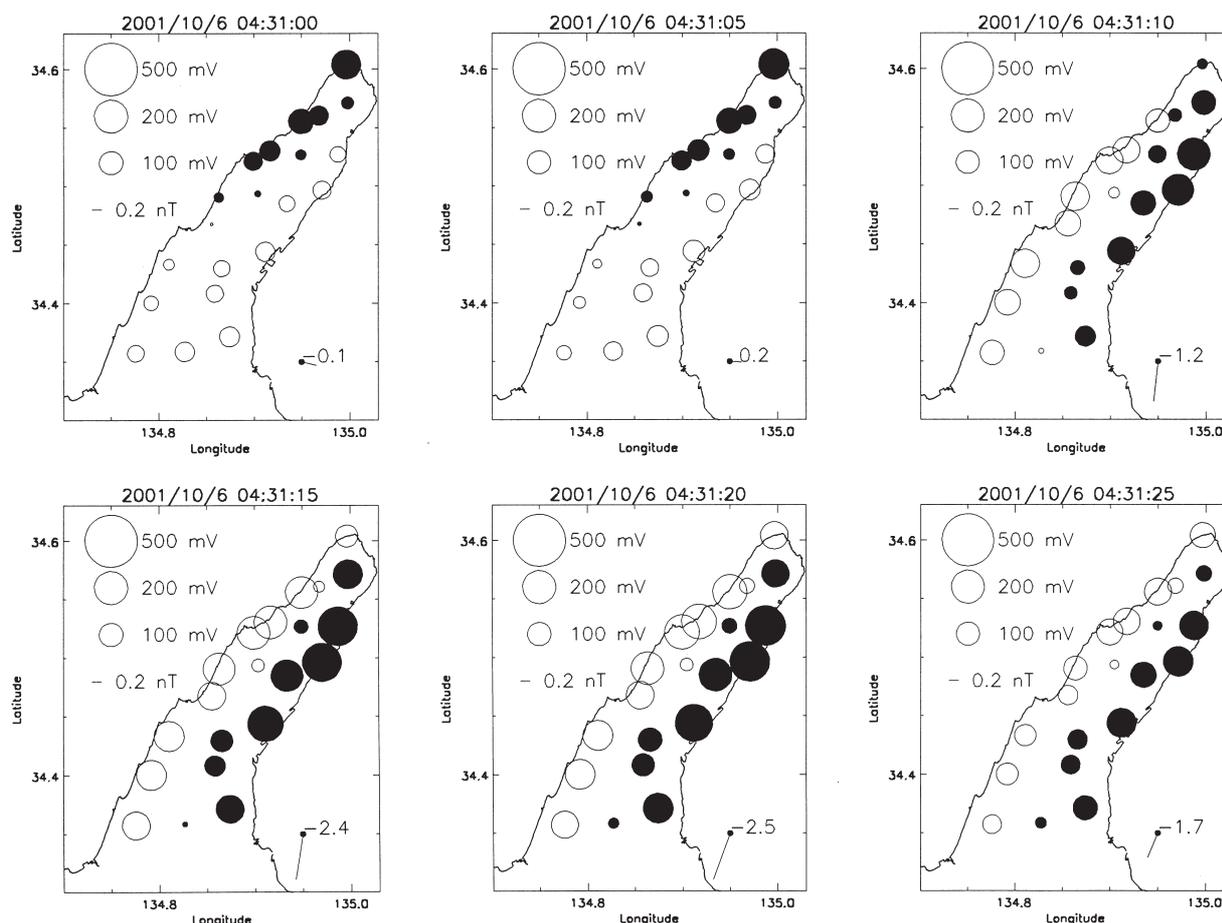


図3.4.5 2000年10月6日04:31:00から04:31:25までの5秒毎の電位分布．各図の右下に大谷観測点の磁場の水平ベクトルと磁場鉛直成分の数値も示している．

以上見たようにこの電磁場変動は第2章で見たようなノイズの持つ特徴と以下のような多くの共通点を持つ。

- (1) 電場は観測域全体で同期して変動する分布が卓越しており、その分布はほぼ東岸と西岸が正、負（またはその逆）のパターンである。
- (2) 磁場と電場の変化は互いに同期して変動しており、変動の比についてもよく一致する。
- (3) 電場分布が東岸が正（負）のパターンの時は、磁場の水平ベクトルは北北東（南南西）向き、鉛直成分は正（負）である。

図3.4.4でわかるように、この時の変動は地震発生時刻から50秒以上遅れて、地震波のS波の到達とともに始まっている。従ってソースが震源域にあるとは考えにくく、むしろ振動によって淡路島（あるいはその近傍）で発生したものと考えべきであろう。しかも上記の様に通常観測されるノイズと似通った特徴を持っているということは、この変化をノイズの時間変化であると解釈すると理解しやすい。

第2. 1. 2節では淡路島で観測される地電流変化の第1主成分は、地磁気ノイズの変動と同期してお

り、その変化の向きは定常電流モデルによっておおよそ説明できることが明らかにできた。そのような場合、観測される地電流、地磁気変動はソース電流の変化を反映していることになる。そして今回観測された地震に伴う変化の特徴もそのような第1主成分が表す地電位差分布及びそれに対応する磁場変化と酷似しているということは、この変動もソース電流が変化したためであると考えるのが自然であろう。鳥取県西部地震の発生直後は各地で停電が発生した他、一部の電車がただちに運行を休止した。ノイズ源の性質や位置がわかっていないためにはっきりしたことは言えないが、淡路島の本州側対岸にあると想像されるノイズのソース電流の大きさが地震波の到達をきっかけに時間変動したとしても不思議ではない。またこのことは次節で説明するように、京阪神地方で大きな地震動が無かった芸予地震の場合には、淡路島で地電流、地磁気変化が検出できなかったこととも符合する。

なおこの地震の主な余震の発生時刻の観測データについても調べてみたが、対応する変化は見られなかった。

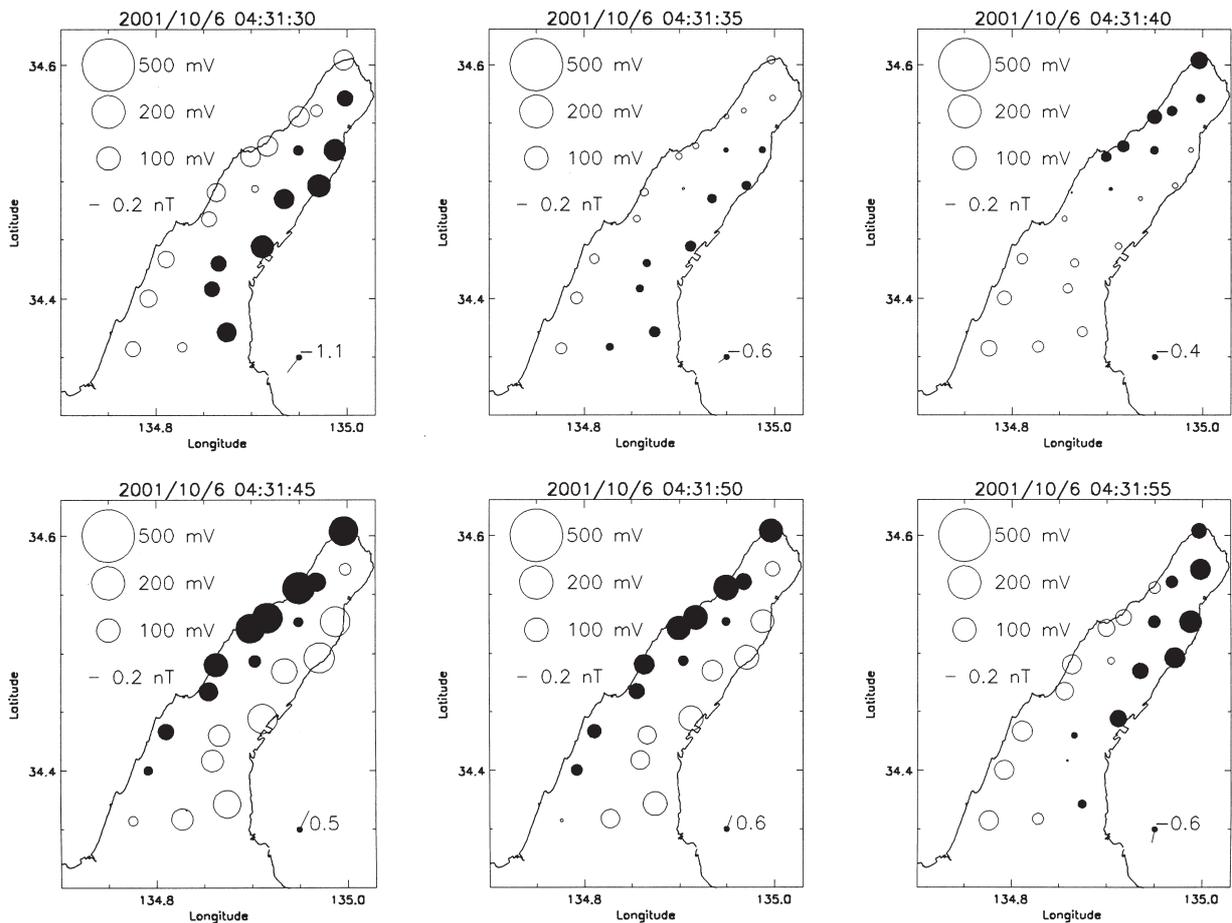


図3.4.6 図3.4.5と同様。時刻04:31:30から04:31:55まで。

### 3. 4. 2 芸予地震

2001年3月24日, 15:27JST (06:27UT), 安芸灘 (北緯 $34^{\circ} 07.2'$ , 東経 $132^{\circ} 42.5'$ ) の深さ51 km でマグニチュード6.7の地震が発生した (気象庁, 2001a). 広島県内では震度6弱を観測した. この地

震により中国, 四国地方を中心に被害が発生している. 淡路島を含む京阪神地域では最大震度は3だった (気象庁, 2001b). この時の各主成分のスコアを図3.4.7~図3.4.9に示す. これによると該当する時刻前後には特異な電場の変動は観測されていない.

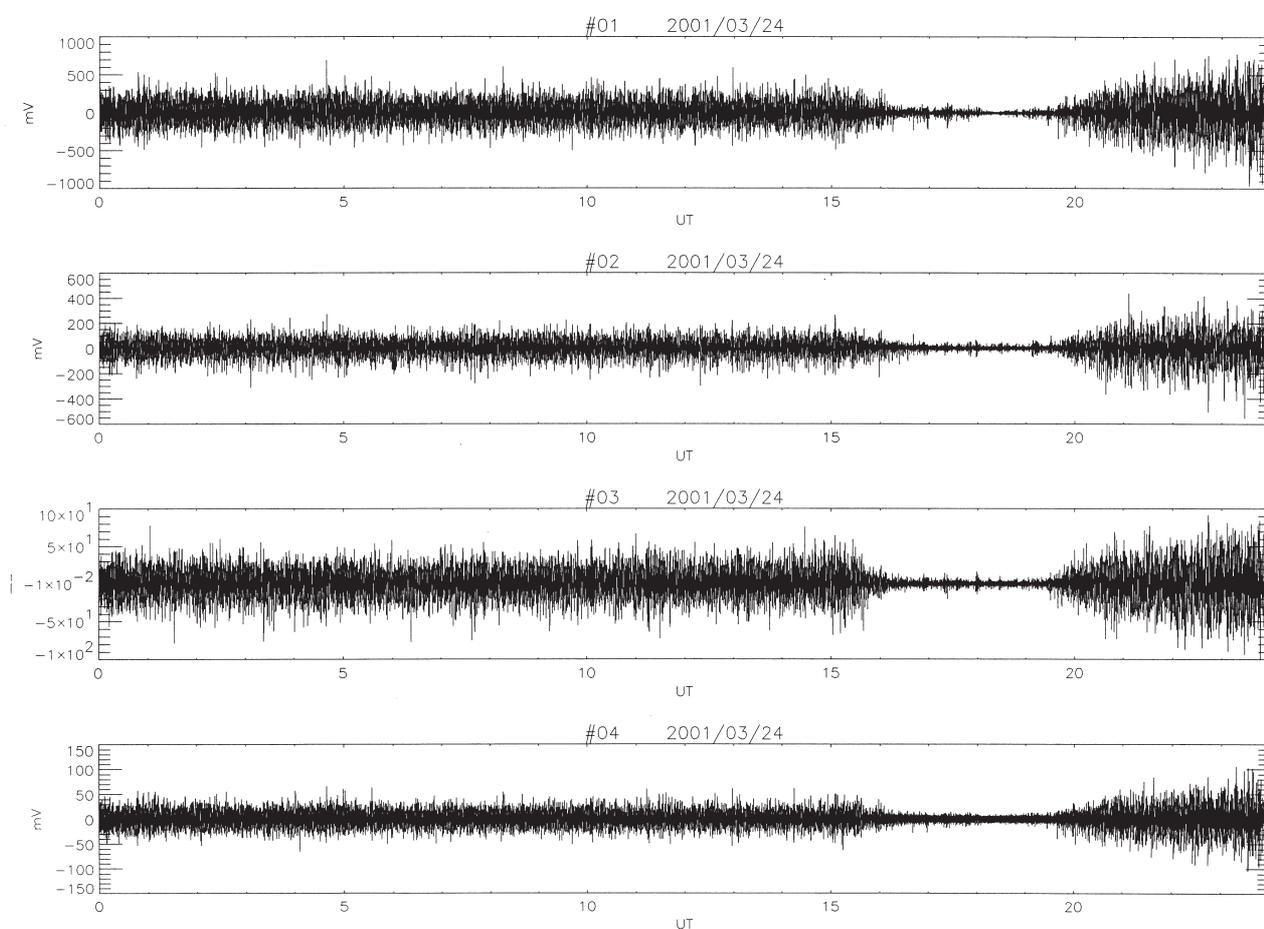


図3.4.7 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた, 2001年3月24日の主成分スコアの時間変化 (第1~4主成分).

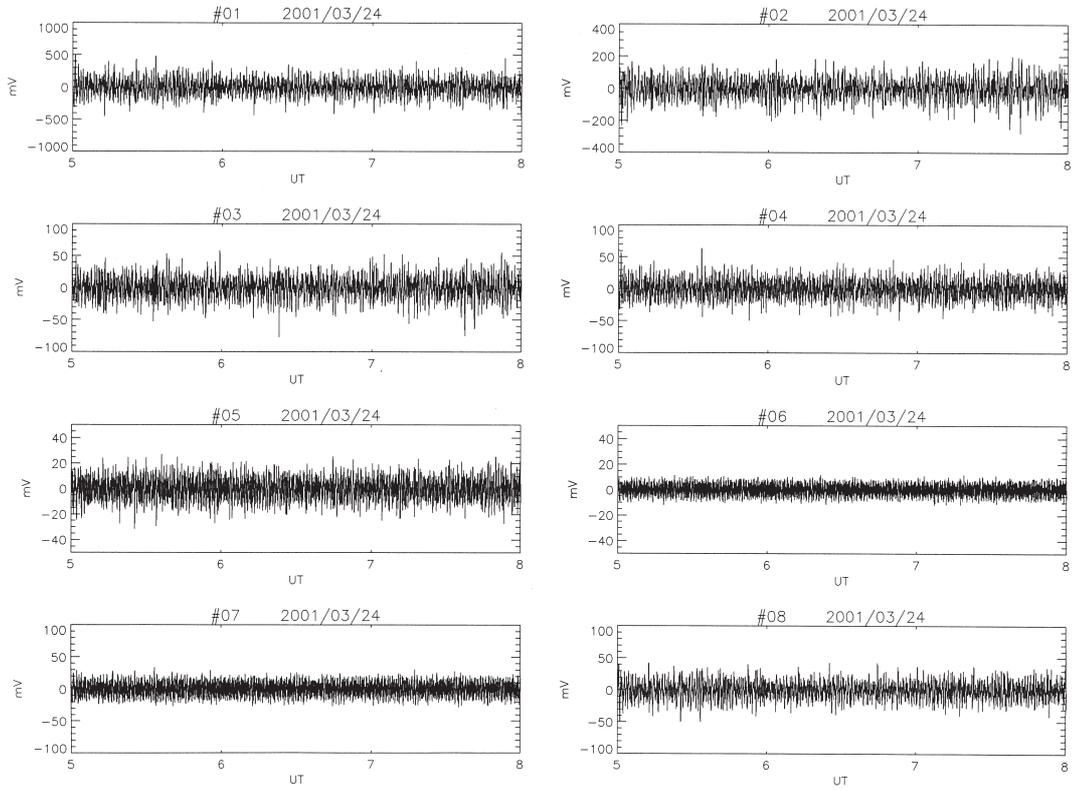


図3.4.8 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた、芸予地震発生時刻を含む3時間の主成分スコアの時間変化（第1～8主成分）。

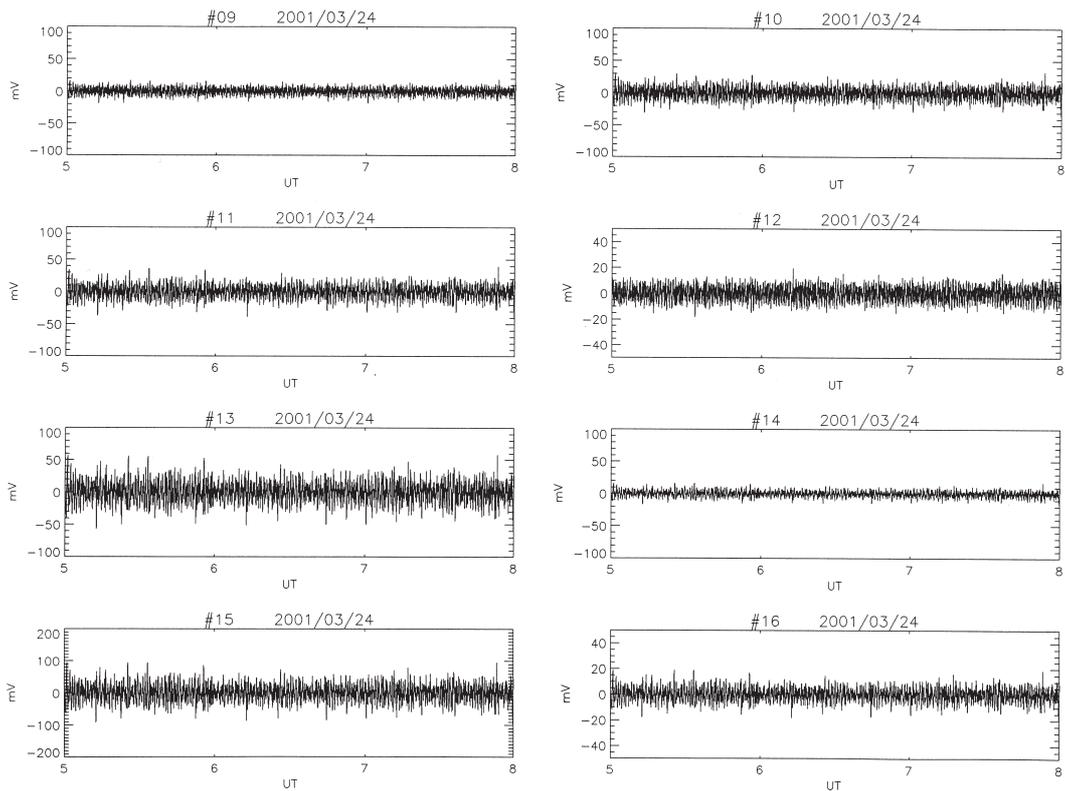


図3.4.9 第2.1.2節で求めた電位分布の主成分固有ベクトルを用いて求めた、芸予地震発生時刻を含む3時間の主成分スコアの時間変化（第9～16主成分）。

## 参考文献 (第3章)

- Barton, C.E., R.T. Baldwin, D.R. Barraclough, S. Bushati, M. Chiappini, Y. Cohen, R. Coleman, G. Hulot, P. Kotze, V.P. Golovkov, A. Jacson, R.A. Langel, F.J. Lower, D.J. Mcknight, S. Macmillan, R. Newittl, N.W. Peddie, J.M. Quinn, and T.J. Sabaka, International geomagnetic reference field, 1995 revision—Presented by IAGA Division V, Working Group 8, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 97, 23-26, 1996.
- Electromagnetic Research Group for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Tectonoelectric signal related with the occurrence of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (M7.2) and preliminary results of electromagnetic observation around the focal area, *J. Phys. Earth*, 45, 91-104, 1997.
- Everett, J.E., R.D. Hyndman, Geomagnetic variations and electrical conductivity structure in southwestern Australia, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1, 24-34, 1967.
- Fenoglio, M. A., M. J. S. Johnston, and J. D. Byerlee, Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zone: Application to the Loma Prieta ULF emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 12951-12958, 1995.
- Fujita, S., Monitoring of time changes of conductivity anomaly transfer functions at Japanese magnetic observatory network, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, 23, 53-87, 1990.
- Fujiwara, S., Temporal changes of geomagnetic transfer functions using data obtained mainly by the Geographical Survey Institute, *Bull. Geograph. Surv. Inst.*, 41, 1-25, 1996.
- Fujiwara, S., T. Nisiki, H. Sirai, H. Hamazaki, and V. P. Golovkov, Modeling the daily mean values of regional geomagnetic total force field changes in Japan, *Earth Planets Space*, 53, 69-73, 2001.
- Fujiwara, S., H. Toh, Geomagnetic transfer functions in Japan obtained by first order geomagnetic survey, *J. Geomag. Geoelectr.*, 48, 1071-1101, 1996.
- Honkura, Y., Observations of short-period geomagnetic variations at Nakaizu (2), Changes in transfer functions associated with the Izu-Oshima-Kinkai earthquakes of 1978, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 54, 477-490, 1979.
- 堀友紀, 住友則彦, 大志万直人, 後藤忠徳, 小泉尚嗣, 地磁気変換関数の時間変化について, CONDUCTIVITY ANOMALY 研究会1995年論文集, 77-84, 1995.
- Ishido, T., and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775, 1981.
- 石黒真木夫, 佐藤忠弘, 田村良明, 大江昌嗣, 地球潮汐データ解析, 統計数理研究所彙報, 第32巻, 第1号, 71-85, 1984.
- Johnston, M. J. S., Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity, *Surveys in Geophysics*, 18, 441-475, 1997.
- Johnston, M. J. S., R. J. Mueller, and Y. Sasai, Magnetic field observation in the near-field of the 28 June 1992 Mw7.3 Landers, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 792-798, 1994.
- Johnston, M. J. S., and R. J. Mueller, Seismomagnetic observation with the July 8, 1986, ML5.9 North Palm Springs earthquake, *Science*, 237, 1201-1203, 1987.
- 気象庁, 平成12年10月 地震・火山月報 (カタログ編), 2000a.
- 気象庁, 平成12年10月 地震・火山月報 (防災編), 2000b.
- 気象庁, 平成13年3月 地震・火山月報 (カタログ編), 2001a.
- 気象庁, 平成13年3月 地震・火山月報 (防災編), 2001b.
- Miyakoshi, J., Secular variation of Parkinson vectors in a seismically active region of Middle Asia, *J. Fac. General Education, Tottori Univ.*, 8, 209-218, 1975.
- 宮腰潤一郎, 山崎断層破碎帯における自然電位の時間的变化, *月刊地球*, 7, 39-42, 1985.
- 水野清秀, 服部仁, 寒川旭, 高橋浩, 明石地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 90pp, 1990.
- 森俊雄, 高山寛美, 小嶋美都子, 通信施設を利用した長基線地電位観測, 第82回地球電磁気・地球惑星圏学会予稿集, 1987.
- 長尾年恭, 地震予知研究の新展開, 近未来社, 東京, 210pp, 2001.
- Nagata, T., Basic magnetic properties of rocks under mechanical stresses, *Tectonophysics*, 9, 167-195, 1970.
- Oshiman, N., M. K. Tuncer, Y. Honkura, S. Baris, O. Yazici, and A. M. Isikara, A strategy of tectonomagnetic observation for monitoring possible precursors to earthquakes in the western part of the North Anatolian Fault Zone, Turkey,

- Tectonophysics, 193, 359-368, 1991.
- Ozima, M., T. Mori, and H. Takayama, Observation of earth-potential using telegraphic facilities and analysis with BAYTAP-G, J. Geomag. Geoelectr., 41, 945-962, 1989.
- 小嶋美都子, 水戸・沼津における長基線地電位差観測とBAYTAP-Gによる解析, 月刊地球, 14, 529-534, 1992.
- Ozima, M., Geoelectric characteristics of Mito, Kakioka, Aizu and Numazu regions revealed by the analysis of the geoelectric field variations with BAYTAP-G - an evaluation of BAYTAP-G as a means of an analysis of the geoelectric field -, Mem. Kakioka Mag. Obs., 26, 25-47, 1998.
- 小嶋美都子, 徳本哲男, 山田雄二, 田中智巳, 地磁気・地電流データによる地殻活動の検出手法についての調査 — BAYTAP-Gを用いた方法 —, 地磁気観測所技術報告, 第37巻, 第3, 4号, 37-57, 1998.
- Park S. K., M. J. S. Johnston, T. R. Madden, F. D. Morgan, and H. F. Morrison, Electromagnetic precursors to earthquakes in the VLF band: A review of observations and mechanisms, Reviews of Geophysics, 31, 117-132, 1993.
- Rikitake, T., Geomagnetism and earthquake prediction, Tectonophysics, 6, 59-68, 1968.
- 力武常次, 地震前兆現象, 東京大学出版会, 東京, 232pp, 1986.
- 力武常次, 地震予知—発展と展望—, 日本専門図書出版, 東京, 170pp, 2001.
- Rikitake, T., The anomalous behaviour of geomagnetic variations of short period in Japan and its relation to the subterranean structure, The 9th report, Bull. Earthq. Res. Inst., 37, 545-570, 1959.
- Rikitake, T., The undulation of an electrically conductive layer beneath the islands of Japan, Tectonophysics, 7, 257-264, 1969.
- Rikitake, T., Crustal dilatancy and geomagnetic variations of short period, J. Geomag. Geoelectr., 28, 145-156, 1976.
- Rikitake, T., Changes in the direction of magnetic vector of short-period geomagnetic variations before the 1972 Sitka, Alaska, earthquake, J. Geomag. Geoelectr., 31, 441-448, 1979.
- Rikitake, T., Y. Honkura, Solid Earth Geomagnetism, 384pp., Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1985.
- Sakanaka, S., N. Oshiman and N. Sumitomo, A hybrid calculation method of tectonomagnetic effect using BEM and the surface integral representation of the piezomagnetic potential - Two dimensional case study -, J. Geomag. Geoelectr., 49, 101-118, 1997.
- Sano, Y., Time changes of transfer functions at Kakioka related to earthquake occurrences ( I ), Mem. Kakioka Mag. Obs., suppl. 8, 1-25, 1980.
- Sano, Y., Time changes of transfer functions at Kakioka related to earthquake occurrences ( II ), Mem. Kakioka Mag. Obs., suppl. 9, 91-110, 1982.
- Sasai, Y., Application of the elasticity theory of dislocations to tectonomagnetic modeling, Bull. Earthq. Res. Inst., 55, 387-447, 1980.
- Sasai, Y., A Green's function for tectonomagnetic problems in an elastic half-space, J. Geomag. Geoelectr., 38, 949-969, 1986.
- Sasai, Y., Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect, Bull. Earthq. Res. Inst., 66, 585-722, 1991.
- Sasai, Y., and Y. Ishikawa, Tectonomagnetic signals related to the seismomagnetic activity in the Izu Peninsula, J. Phys. Earth, 39, 299-319, 1991.
- Shiraki, M. and K. Yanagihara, Transfer functions at Kakioka, Mem. Kakioka Mag. Obs., 16, 143-155, 1975.
- Shiraki, M., Monitoring of the time change in transfer functions in the central Japan conductivity anomaly, J. Geomag. Geoelectr., 32, 637-648, 1980.
- Stacey, F. D., The seismomagnetic effect, Pageoph, 58, 5-22, 1964.
- Stacey, F. D., and M. J. S. Johnston, Theory of the piezomagnetic effect in titanomagnetite-bearing rock, Pageoph., 97, 146-155, 1972.
- 高山寛美, 山田雄二, 田中智巳, 角村悟, 地磁気・地電流データによる地殻活動の検出手法についての調査 — BAYTAP-Gを用いた方法 — (その2), 地磁気観測所技術報告, 第39巻, 第2号, 39-52, 2000.
- 田中良和, 増田秀晴, 河村 , 大地洗, 加藤誼司, 馬場広成, 吉野登志男, 阿蘇火山地域での全磁力測量 (1977), 阿蘇火山の集中総合観測 (第1回1977) 報告, 31-39, 1978.
- 徳本哲男, 高山寛美, 山田雄二, 田中智巳, 地磁気・地電流データのノイズ除去手法の開発 — 重値差・フィルター等を用いた方法 —, 地磁気観測所技術報告, 第38巻, 第1号, 82-95, 1998.
- 徳本哲男, 高山寛美, 山田雄二, 田中智巳, 地磁

- 気・地電流データのノイズ除去手法の開発（その2）— 重値差・フィルター等を用いた方法—, 地磁気観測所技術報告, 第38巻, 第2号, 37-45, 1999.
- Utsugi, M., Y. Nishida, and Y. Sasai, Piezomagnetic potentials due to an inclined rectangular fault in a semi-infinite medium, *Geophys. J. Int.*, 140, 479-493, 2000.
- Varotsos, P., and K. Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 110, 73-98, 1984a.
- Varotsos, P., and K. Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude, *Tectonophysics*, 110, 99-125, 1984b.
- Warwick, J. W., C. Stoker, and T. R. Meyer, Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960, *J. Geophys. Res.*, 87, 2851-2859, 1982.
- Yanagihara, K., Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the central part of Japan, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, 15, 1-11, 1972.
- Yanagihara, K., T. Nagano, Time change of transfer function in the central Japan anomaly of conductivity with special reference to earthquake occurrences, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 157-163, 1976.

## 謝 辞

本調査観測の実施にあたりましては、(株)NTT西日本に回線を利用させていただきました。厚くお礼申し上げます。

また、観測地点の選定に関しましては、兵庫県、洲本市、津名町、淡路町、北淡町、一宮町、五色町、東浦町のご協力を得ました。深く感謝いたします。

観測機器などの設置につきましては、兵庫県、洲本市、淡路町、北淡町、一宮町、五色町、東浦町、NTT西日本神戸支店、関西電力淡路営業所並びに向野下正広様(大谷)、春藤哲良様(興隆寺)、大月典運様(大町畑)、西川 久様(木曾上畑)、釜口 正様(奥畑)、森本栄蔵様(岩屋)、瀬 照男様(草香)、田村行昶様(鳥飼浦)(順不同)に土地等をお借りしました。長期間に亘るご理解と御協力に心からお礼申し上げます。

気象庁 地磁気観測所