

第2章 ノイズ除去手法の開発

2.1 ノイズの特徴

2.1.1 時間変化の特徴

一般に数km程度の基線長で測定された地電位差変動の主な原因は、外部磁場変動による電磁誘導、地球磁場中の海水運動による発電と考えられている(例えば、Mori, 1987)。これらに加えて、近年は直流電車で代表される都市の人工ノイズも地電位差変動発生源として多く報告されるようになった(例えば、Linington, 1974; Fraser-Smith and Coates, 1978; Szarca, 1988; Mackie and Madden, 1992; 三品, 1995)。

本研究の目的は、淡路島北中部で測定された地電位差変動の5年分のデータを調べて地殻活動に伴う電場変動を検出する手法を開発することである。しかし、その他の原因による変動に比べて、目的とする変動は時間的に局在しており多くの場合振幅も小さいことが予想される(Johnston, 1987, 1997; Park *et al.*, 1993)。このような事情が、多くの報告された地殻活動に伴う電場変動の真偽を巡る論争の一因となっていること(例えば、Varotsos and Alexopoulos, 1984a, b; 上田, 1985, 1991; 小嶋, 1991, 1992; Mulargia and Gasperini, 1992; Takayama, 1993)を考えると、目的以外の変動を同定し正しく除去することが不可欠であることがわかる。

上記の目的達成のための第一段階として、本節では淡路島の電磁場変動の特徴を周波数特性を中心に調べることにする。淡路島北中部の電磁場変動の最大の特徴は、第1章に見られるように非常に大きな人工ノイズが含まれていることで、周期帯・時間帯によっては他の原因による変動を凌駕するほどである。徳本他(1998, 1999)、山田他(1998)は淡路島の電磁場変動について調べ、以下のように報告し

ている。

- (1) 大谷を基準にした電位差、大谷の磁場ともに深夜1~5時を除いて振幅の大きい短周期(<1000秒)の変動がある。深夜と昼間の変動の振幅差は約10倍ある。
- (2) 深夜には、長周期(~数時間)の変動がある。
- (3) 大谷を基準にした電位差の20測線では、基線が短い(一方の電極が大谷に近い)ほうが変動の振幅が小さく、距離の近い測線同士は互いに良く似た変動をする。
- (4) 大谷を基準にした電位差の周期100秒以下の変動について時間領域の主成分解析を行うと、第一主成分と第二主成分が変動全体の90%を説明し、それぞれほぼ南北、東西に卓越方向を持つ。第一主成分は大谷の磁場の鉛直成分、南北成分と高い相関を示し、位相差はない。

さらに、淡路島の南部で観測したデータを用いた研究(村上, 2000)から次の2点を付け加える。

- (5) 現地時間の平日の午前中に現れる長周期変動がある。
- (6) 少なくとも島の南部の電位差測線では、夜間のデータを使って周期40秒以上で柿岡の磁場とのMTインピーダンス Z が計算できる。島の北部の測線と柿岡の磁場から求めた Z は物理的におかしい。

これらから淡路島の電磁場変動には周期依存性と現地時間依存性があり、さらに地域依存性も存在する可能性があることがわかる。これらの特徴をより定量的に調べるといふ観点から解析をすすめることにする。

2.1.1.1 周波数特性と現地時間依存性

電磁場変動の周波数特性と現地時間(LT)依存性を調べるため、昼間、夜間のそれぞれについて、淡路島の4測線の電位差、大谷の磁場水平2成分、柿

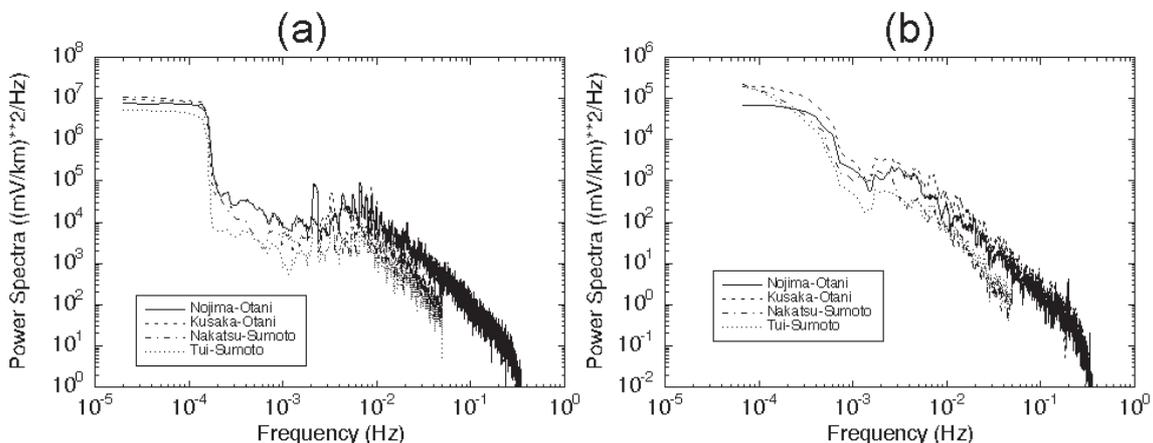


図2.1.1 野島一大谷、草香一大谷、中津一洲本、都井一洲本測線の地電位差のパワースペクトル。1998年1月15日の (a) 昼間 (0:00-7:00UT) と (b) 夜間 (17:00-19:00UT)

岡の磁場2成分を簡単に比較した。図2.1.1は、野島一大谷、草香一大谷、中津-洲本、都井-洲本の4測線で1998年1月15日(UT)に観測された地電位差変動から計算したパワースペクトルである。現地時間依存性を見るため、(a) 昼間9:00-16:00LT(0:00-7:00UT)、(b) 深夜2:00-4:00LT(17:00-19:00UT)、の2種類の計算を行った。計算には隣接周期へのパワーのもれだしを最小限に抑えるように 4π prolate windowを0~8次まで使った多重ウィンドウ法(Thomson, 1982)を適用し、周波数方向の解像度は中心周波数から $\pm 1.6 \times 10^4$ Hzである。野島一大谷、草香一大谷の2測線は島内の北中部にあり、それぞれほぼ南北、東西の走行をもつ(図1.4.1)。島の南部に位置する中津-洲本、都井-洲本の2測線も同様にほぼ南北、東西の走行を持っており、ネットワークMTグループによって観測が行われた(図2.1.2)。データのサンプリングレートは、大谷基準測線が1秒、洲本基準測線が10秒である。大谷基準の観測ではカットオフ周期3秒程度のフィルターが使われているが、その機器補正はされていない。そのため、この結果には3秒以下の変動は含まれておらず、周期100秒程度まで振幅、位相ともなんらかの影響を受けている。

図2.1.1から、昼間と深夜でパワースペクトルの大きさにおよそ100倍の差があること、測線間で周波数特性に差があまりないこと、がわかる。昼間のパワースペクトルは 1×10^2 Hz付近で低周波に向かって単調に増加する傾向が終わり、 5×10^3 Hz付近から低周波側にパワーが増加している。中間の $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^2$ Hzではホワイトな連続スペクトルの上にラインスペクトルピークが現れているが、その周期はおおよそ450秒、300秒、225秒、180秒、…であり、

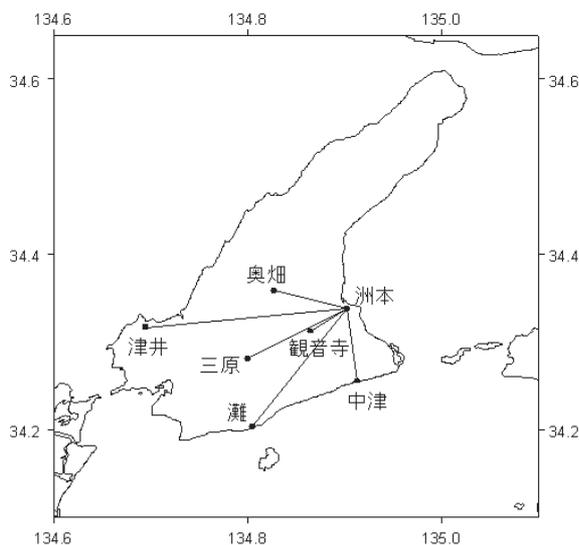


図2.1.2 ネットワークMTグループによる地電流測線配置

900秒波の高調波の1~10次程度までと説明できる。外部磁場変動でこれらのピークは知られておらず、また、この日の地磁気活動度が低い(柿岡でK指数の総和=1)ことも考えあわせると、人工ノイズによるピークである可能性が高い。4測線共に見られることから、島全体でどの方向でも観測できると考えられる。徳本他(1998)が計算したパワースペクトルでは滑らかな周波数特性が得られていたが、これは平滑化の影響かデータの期間が短すぎたのかもしれない。例えば2時間のデータでパワースペクトルを計算すると、ラインスペクトルは図2.1.1ほどには顕著ではない。

大谷の地球磁場水平2成分の1秒値についても、比較のため図2.1.1と同じ日時のパワースペクトルを計算し比較した(図2.1.3)。昼間の(a)北向き(X)成分と(b)東向き(Y)成分、深夜の(c)X成分と(d)Y成分についての結果を示す。ノイズのないデータとして、柿岡の地球磁場水平2成分の結果も一緒に示してある。データについて注意すべきことは、柿岡は地理的な北向き成分だが、大谷のX成分はフラックスゲートの主軸方向であり地理的な北から数度程度ずれている可能性があること、大谷の磁場には機器補正がなされていないこと、の2点である。図2.1.3を見ると、大谷の磁場には昼夜でパワースペクトルのレベル差が10倍程度あり、昼間のパワースペクトルの特性も周期500秒以下で電位差のものとよく似ていることがわかる。また、柿岡の磁場との比較から、周期500秒以上で大谷の磁場のパワースペクトルは柿岡と同程度であるのに対し、周期500秒以下では昼間は柿岡より100-10倍大きく、夜はやや大きい。これらから、人工ノイズは電場・磁場の両方に見られ、昼間の人工ノイズの大部分は数百秒以下の周期を持つこと、夜間にも弱い短周期ノイズがあること、が推測される。

次に、外部磁場変動による成分の人工ノイズに対する比を推測するため、図2.1.3のデータを使って、大谷のX、Y成分それぞれと柿岡の水平2成分との多重コヒーレンス(実線)を計算した(図2.1.4)。比較のため、大谷のデータを同時刻の鹿屋のデータにした場合の多重コヒーレンス(点線)も示してある。いずれのコヒーレンスも周期約40秒以下では有意な値を示しておらず、統計的な意味では相関がないことがわかる。大谷-柿岡間だけでなく鹿屋-柿岡間でも相関が低いことから、大谷の人工ノイズのためばかりでなく、この周期帯の変動を比べるには2点間の距離が離れ過ぎて相関が見られない可能性が高い。しかしながら、周期40秒以上ではコヒーレンスが増加し統計的な有意レベルを安定して越えるよう

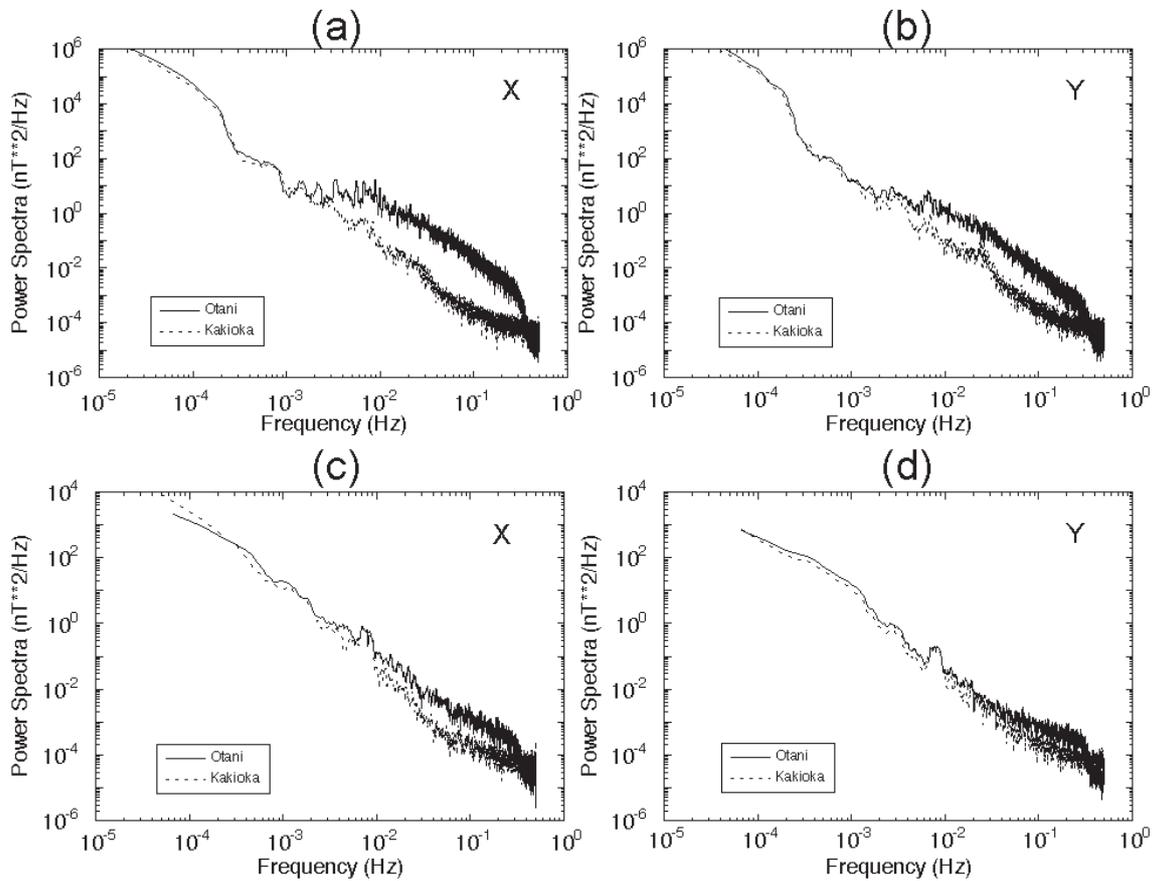


図2.1.3 1998年1月15日の大谷（実線），柿岡（点線）の磁場のパワースペクトル．昼間の（a）X成分，（b）Y成分，深夜の（c）X成分と（d）Y成分の結果

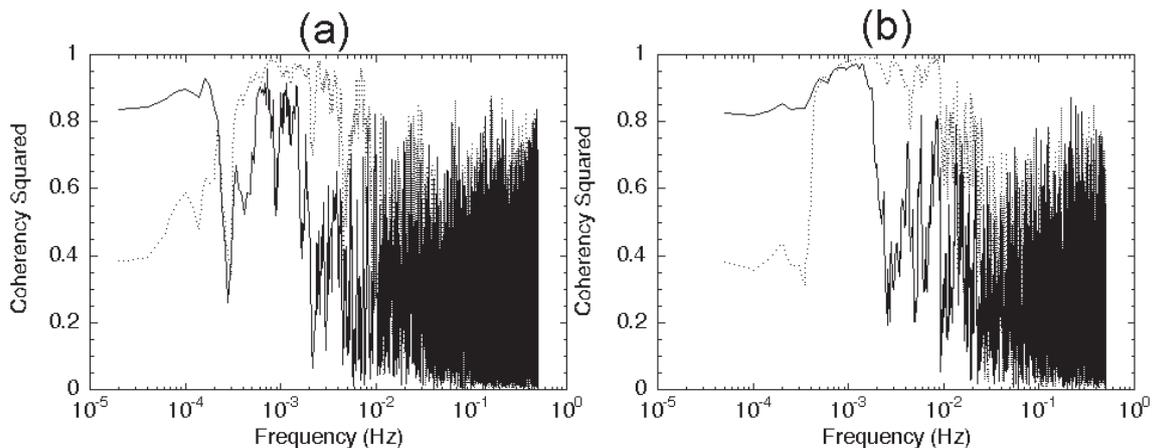


図2.1.4 大谷（実線）と鹿屋（点線）の磁場と柿岡磁場X, Y成分との多重コヒーレンス．1998年1月15日の（a）X成分と（b）Y成分の結果．

になる．これは，外部変動として鹿屋－柿岡間の距離を越えて相関する成分があること，大谷の磁場では人工ノイズが卓越しているとしても外部磁場変動による成分が相対的に検出可能な大きさを持っていること，を示している．周期およそ40－500秒では昼夜共に大谷－柿岡間のコヒーレンスが鹿屋－柿岡間のコヒーレンスを下回るが，これは大谷－柿岡間に外部変動以外の成分が存在するためコヒーレンスが上がらないことを示しており，大谷観測点で数百

秒以下の周波数帯に人工ノイズがあることが改めて示唆された．

図2.1.1，図2.1.3－4では地磁気活動度が低い日の例を示したが，地磁気活動度が高い日の場合でも，外部磁場の影響周波数範囲がやや広がるけれどもおおまかな傾向に大差はなかった．また，図2.1.1，図2.1.3－4で示された電磁場変動の特徴は，村上（2000）に示された淡路島南部のデータの特徴とおおよそ一致することから，淡路島全域にわたるもの

と考えてよいようである。

2. 1. 1. 2 連続スペクトル部分の特性

前節で示された数百秒以下で卓越する人工ノイズの連続スペクトル部分について特徴を概観する。

地電位差と磁場の関係を調べるため、地磁気活動度の低い1998年11月11日の毎秒値データから、ほぼ東西方向の7測線、ほぼ南北方向の8測線を選び、各測線間の地電位差と大谷の磁場水平2成分との変換関数（あるいはインピーダンス）を計算した。計算にはロバスト手法を取り入れた変換関数演算プログラム（Chave and Thomson, 1989）を使用し、淡路島内での電磁場の関係をまずはできるだけ単純な形で捕らえるためリモートレファレンスなしで π prolate windowを適用した。エラーは計算値の分布に影響を受けないようにジャックナイフ法を用いた。地電位差、磁場2成分データ共に機器補正は施されていないが、同じADコンバーターを使っており、チャンネル間のフィルター応答差はそれほど大きくないと想定すれば機器補正の影響はそれほど深刻ではないと思われる。磁場のZ成分を加えると、コヒーレンスは若干良くなる場合もあるが顕著ではなく、かつ、磁場水平成分とZ成分の相関が高いた

め入力間相関が高いインピーダンス計算を行うことになりインピーダンスの計算値が不安定になるので、ここでは考慮しないことにする。

昼間のデータを使ったときのインピーダンスを図2.1.5（東西測線）、図2.1.6（南北測線）に示す。大谷の磁場のX成分に対するインピーダンスの（a）実部と（b）虚部、Y成分に対するインピーダンスの（c）実部と（d）虚部がそれぞれ示されている。図2.1.5-6とも、気象庁観測網の北部、中部、南部からそれぞれ島の東側、中央、西側に分布するように2-3測線を選んだ。東西方向の測線では、北部の西から東に城ノ瀬-野島、岩屋-城ノ瀬、中部の西から東に生田-尾崎、興隆寺-生田、釜口-興隆寺、南部の西から東に奥畑-鳥飼浦、中川原-奥畑の地電位差測線が選ばれ、いずれも東側の電極が基準である。南北方向の測線からは、北部の西から東に野島-浅野、城ノ瀬-仁井、岩屋-久留麻、中部の西から東に尾崎-北山、興隆寺-大谷、南部の西から東に別所-鳥飼浦、木曾上畑-奥畑、大谷-中川原が選ばれて、南側の電極を基準とした電位差データに変換された。

図2.1.5-6から、インピーダンスは3つの周波数帯（ 2×10^3 Hz以下、 $2 \times 10^3 \sim 7 \times 10^3$ Hz、 7×10^3 Hz以上）

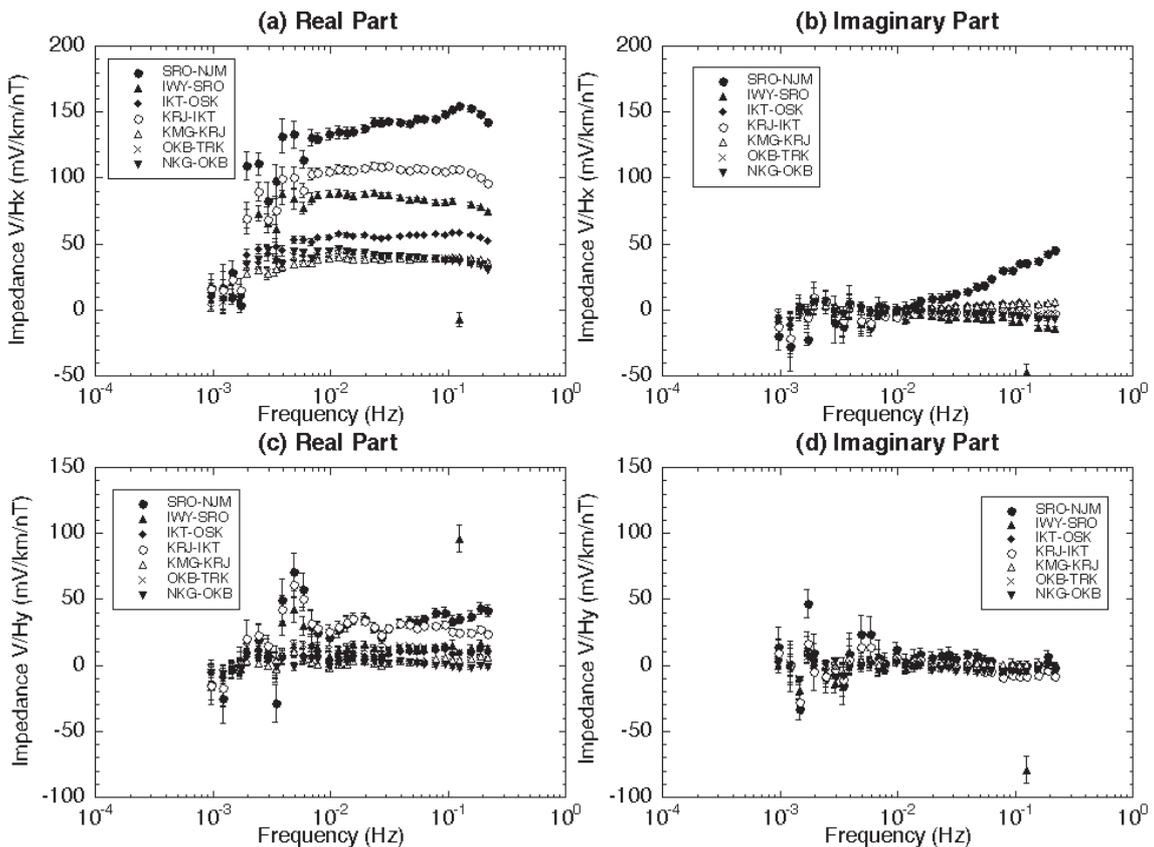


図2.1.5 ほぼ東西方向の7測線の地電位差と大谷の磁場水平2成分との昼間のインピーダンス。磁場X成分に対するインピーダンスの（a）実部、（b）虚部、Y成分に対するインピーダンスの（c）実部、（d）虚部。

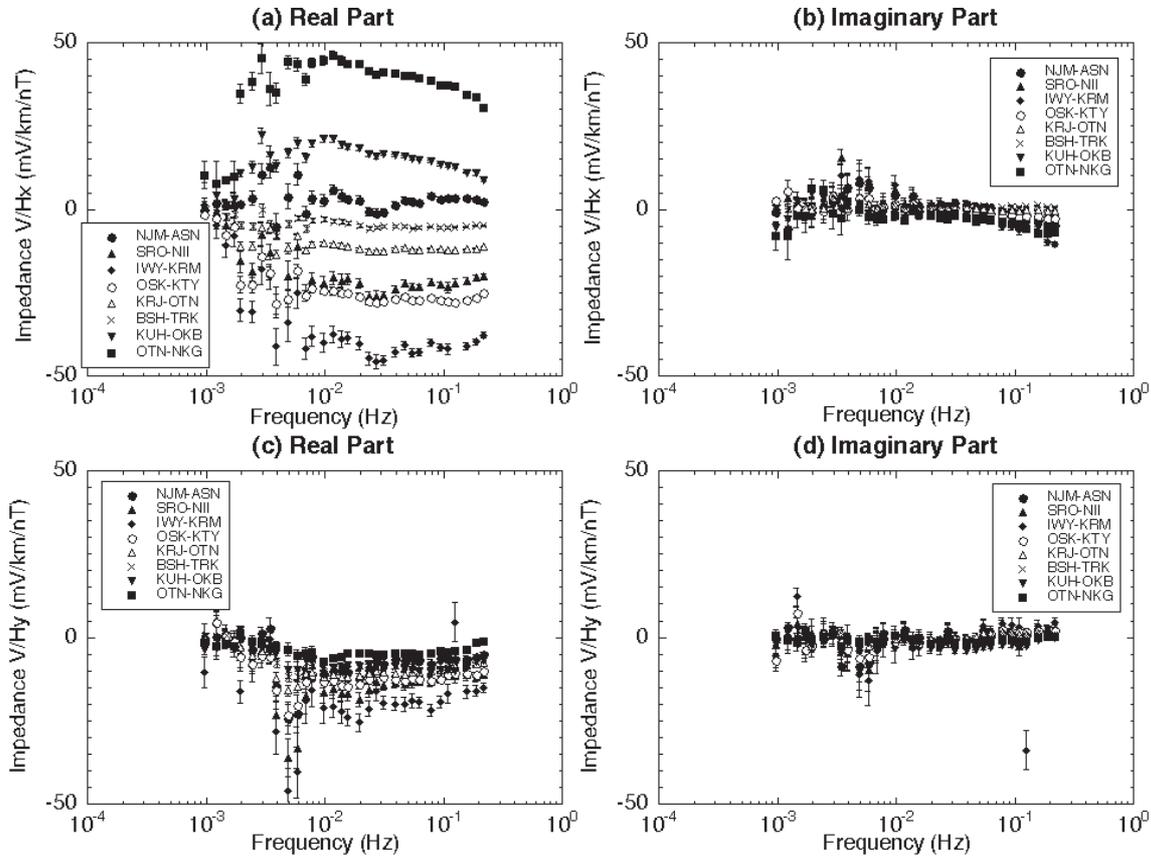


図2.1.6 ほぼ南北方向の8測線の地電位差と大谷の磁場水平2成分との昼間のインピーダンス。磁場X成分に対するインピーダンスの (a) 実部, (b) 虚部, Y成分に対するインピーダンスの (c) 実部, (d) 虚部。

に分けられることがわかる。前節の結果を参照すると、これらはそれぞれ、人工ノイズが弱まり外部磁場変動による誘導現象が卓越する周期帯、ラインスペクトル的な人工ノイズが卓越し外部磁場による誘導も相対的に無視できない周期帯、連続スペクトル的な人工ノイズが卓越し外部磁場による誘導がほとんどわからない周期帯、に対応している。

最も高周波帯 ($7 \times 10^3 \text{ Hz}$ 以上) では、概ね、実部が周波数によらず一定で虚部がほぼ0という直流的なインピーダンスを示している。これは山田他 (1998, 2000) で示された地電位の主成分分析の結果とも整合的である。前節の結果も参照すると、この直流的なインピーダンスは人工ノイズの特徴を見ているのであろうと推測できる。仮に、外部磁場による誘導現象でこのような状況を説明しようとする、地下が無限大の抵抗を持たねばならず現実的ではない。それでは、どのようなノイズの状況を考えて直流的なインピーダンスが得られるかという、ノイズ信号源がレシーバーの直近にある場合である (Zonge and Hughes, 1991)。淡路島の場合は、京阪神の都市活動 (直流電車など) が最も可能性が高い。インピーダンスの大きさは、信号源からの距離、地下の電気伝導度によって変わる。本調査の場

合は3成分磁場の観測点は一点しかないことから、電場と磁場の測定位置の違いによる寄与も含まれていると考えられる。

直流インピーダンスの振幅に注目すると、方向、測線によって大きな差が見られる。全体的な傾向として、最大なのは北向き磁場に対する東西測線の電場のインピーダンスで、次が北向き磁場に対する南北測線の電場のインピーダンスである。東向き磁場に対するインピーダンスは小さく、2つの方向の測線間で振幅に大差はない。これは、おそらく、淡路島ではほぼ東西方向の電場 (ほぼ南北方向の磁場) に短周期変動が偏向している (徳本他, 1998, 1999, 山田他, 1998, 2000) ためであろう。

直流インピーダンスの振幅の空間分布をみると、東西測線では比較的単純な傾向が見られるのに対し、南北測線の結果は複雑である。北向き磁場に対する東西測線の電場の場合、電位差の極性はどの測線でも同じで、基本的な空間パターンは観測網の北部より南部、西部より東部のほうが振幅が大きいというものだが、それに加えて中部の中央部にピークがあるようである。南北測線の場合は、顕著な空間パターンが見られず、隣り合った測線で大きさや極性が大きく違うケースもある。南北測線の電位差

の場合は、電磁場の偏向方向と測線の方向のわずかな違いが大きく影響すると予想されるので、より慎重な解析が必要と思われる。

中間の周波数帯 ($2 \times 10^3 \sim 7 \times 10^3 \text{Hz}$) では、インピーダンスがばらつきエラーも大きい。ばらつきがおこる周波数から、電磁場に含まれるラインスペクトルの影響であることが示唆される。ここで用いた手法は連続スペクトルの計算に適した方法でラインスペクトルには適用すべきでないため、意味のあるインピーダンスを得るためには、データからあらかじめラインスペクトルを除いたり、スペクトルの周波数分解能の中にラインスペクトルが含まれないようにするなどの前処理が必要であることがわかる。また、この周波数帯では、人工ノイズの振幅が弱まり、相対的に外部磁場変動による成分の寄与が高まっているため、人工ノイズのインピーダンスと外部磁場変動のインピーダンスを区別する必要もあるだろう。これらは、第2.2節で考慮する。

低周波帯 ($2 \times 10^3 \text{Hz}$ 以下) では、前節の結果から外部磁場変動による誘導を反映したインピーダンス (いわゆるMTインピーダンス) に近づくものと期待される。実際に他の周波数帯に比べると値が小さく直流的なインピーダンスからはずれており、ノ

イズの振幅が小さくなっていることが推測される。しかし、インピーダンスの値自体はばらつきが大きく、MTインピーダンスの物理的な範囲にもおさまっていない。やはり、人工ノイズが無視できるほど小さいわけではないことを示していると考えられる。

次に、南北方向、東西方向の測線から一つずつを選び、昼間と夜間のインピーダンスの差を比較した (図2.1.7)。ほぼ南北方向の大谷-中川原測線とほぼ東西方向の中川原-奥畑測線ともに、虚部がほぼ0という直流的な特徴は変わらないが、夜間のインピーダンスのほうが周期によって値が変化したりばらついたりしている。昼間だけでなく、夜間のインピーダンスもMTインピーダンスとは考えづらい特徴を示していることになり、電位差、磁場共に図2.1.7の周期帯では人工ノイズが卓越していると考えられる。インピーダンスの昼夜による差はノイズ信号源からの距離の違いを反映している可能性があり、地域依存性を調べることで詳しい情報が得られるであろう。

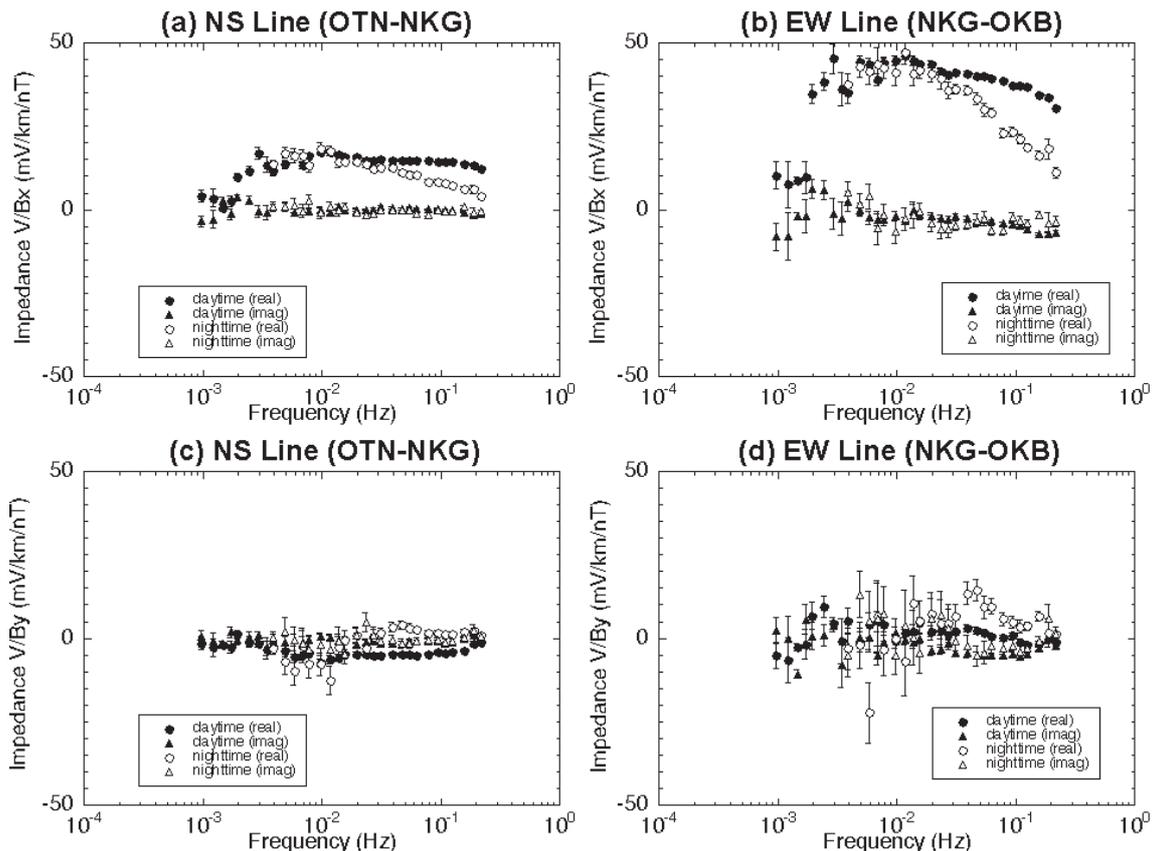


図2.1.7 昼間 (●と▲) と夜間 (○と△) のインピーダンスの比較。大谷-中川原測線 (南北方向) の地電位差と (a) 大谷の磁場のX成分, (c) Y成分とのインピーダンス, 中川原-奥畑測線 (東西方向) の地電位差と (b) 大谷の磁場のX成分, (d) Y成分とのインピーダンス。

2. 1. 1. 3 ラインスペクトル部分の特性
前節で約900-90秒周期に存在することがわかっ

たラインスペクトル群について、この節でより詳しく特徴を調べることにする。

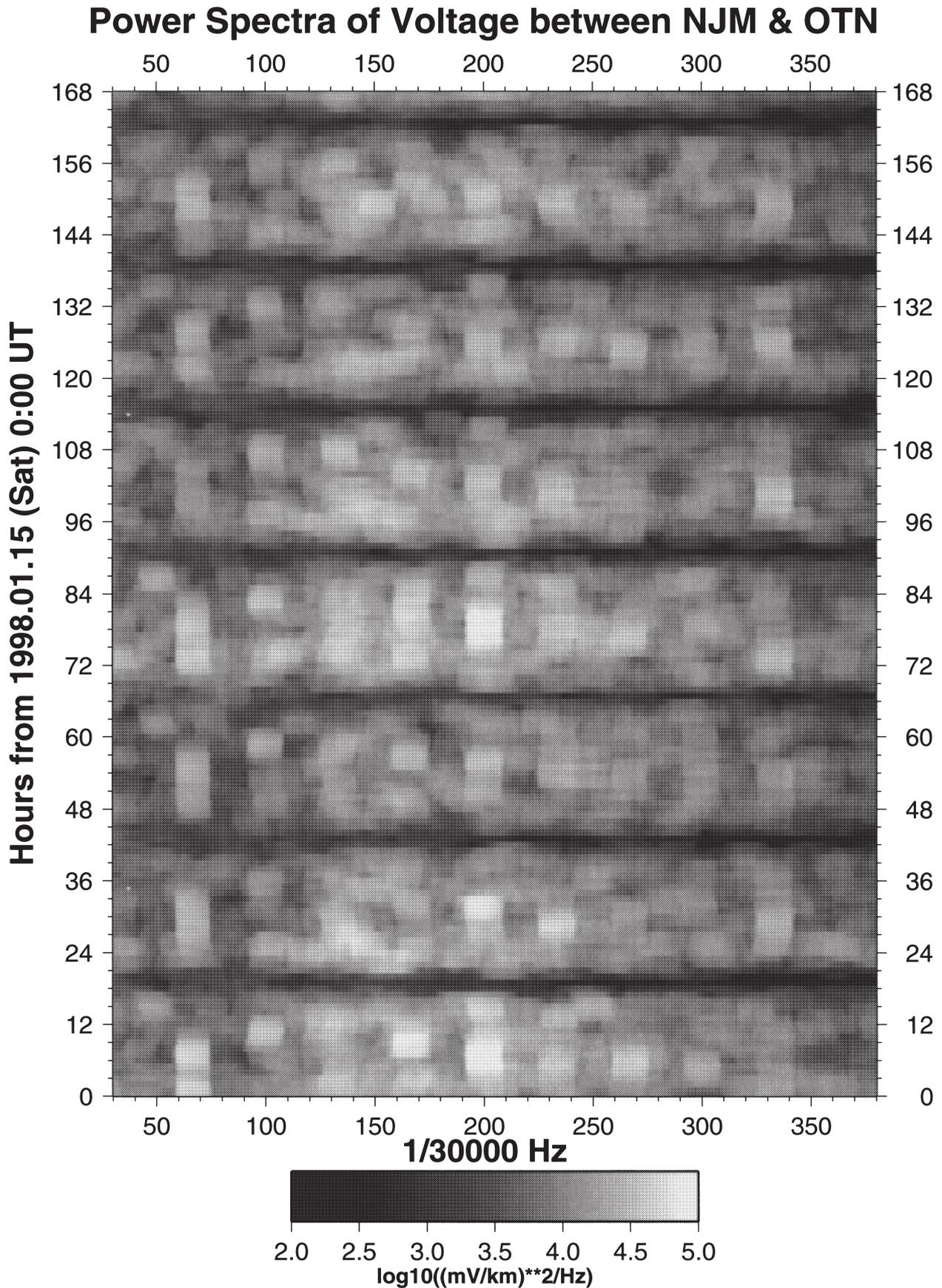


図2.1.8 1998年1月15日の0時 (UT) から22日の23時 (UT) まで1時間ごとの野島-大谷測線の地電位差のパワースペクトル

まず、スペクトルの現地時間依存性を見るため、
ほぼ南北方向の野島-大谷測線とほぼ東西方向の草

香-大谷測線について、1998年1月15日の0時 (UT)
から22日の23時 (UT) まで1時間ごとの電位差のパ

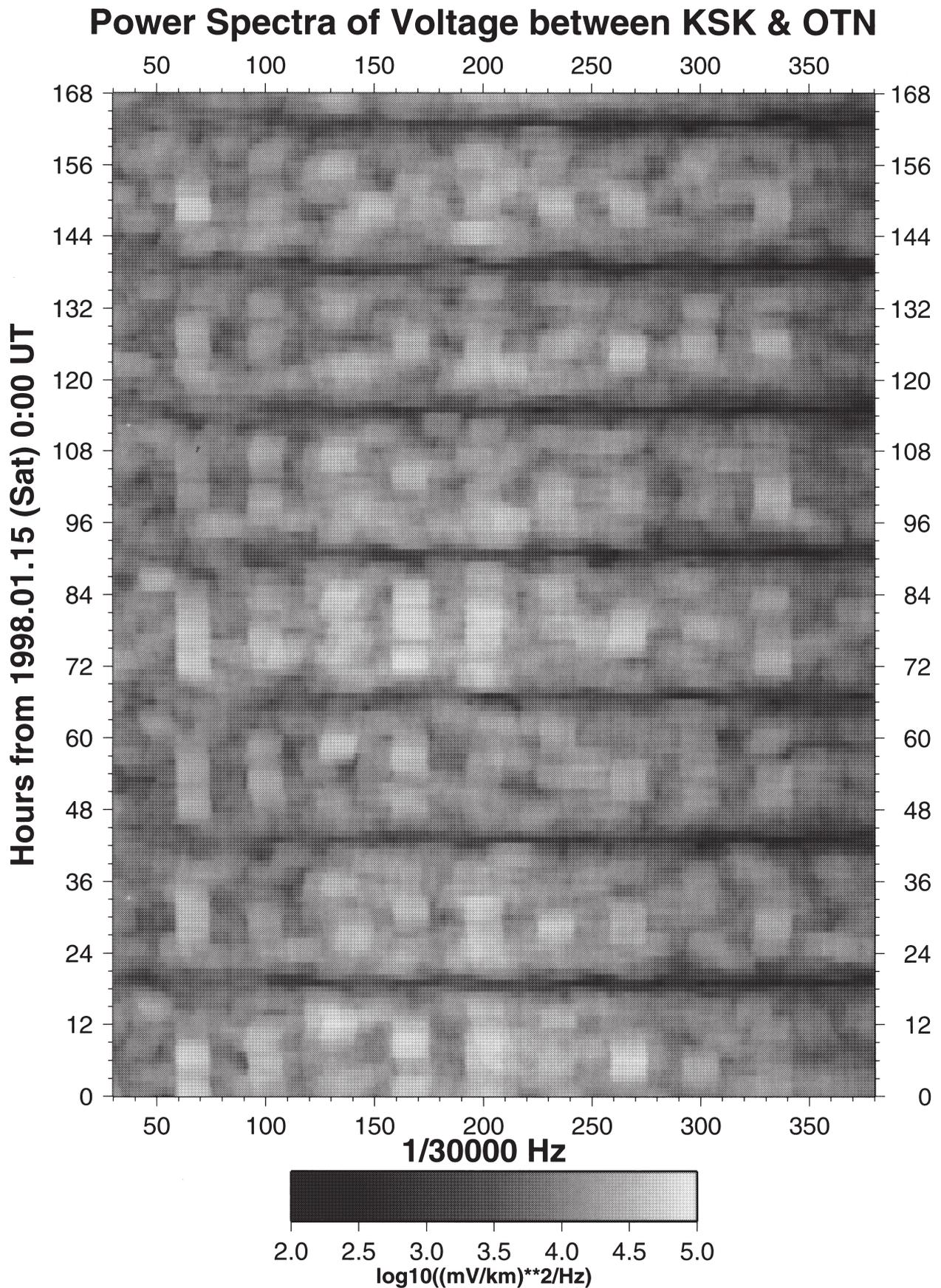


図2.1.9 1998年1月15日の0時 (UT) から22日の23時 (UT) まで1時間ごとの草香-大谷測線の地電位差のパワースペクトル

ワースペクトルを計算した (図2.1.8-9). 正時を中心にした前後2時間ずつ計4時間の1秒サンプリングデータに対し, 4π prolate windowを0~8次まで使った多重ウィンドウを適用したので, 周波数方向の解像度は中心周波数から $\pm 2.8 \times 10^4$ Hzである. 図2.1.8-9を見ると, 曜日, 測線方向に関わらず昼間には900秒の高調波の位置にスペクトルピークが存在することがわかる. 900秒のピークは弱くほとんど見分けがつかないが, 450秒, 180秒, 150秒のピークは比較的強度が大きい. その他の高調波も10次(90秒)くらいまでスペクトルピークとして確認できる. また, 夕方に600秒のピークがあることも見て取れる. 個々のラインスペクトルを見ると, 強さは一定ではなく日や時間によって大きく変化しており, 卓越している高調波の種類が常に同じというわけではないこともわかる. さらに, 225秒のピークのように, 周期が微妙にずれてスペクトルピークが広がっているものもある. つまり, ラインスペクトルは日や時間によって強度や周期が変化するような複雑な性質を持っているということである.

前節の結果から, ラインスペクトルを同定し除去する必要があることがわかっている. 正確な周期やスペクトルの組み合わせを知らねばならないのだが, 図2.1.8-9に示した計算では分解能が足りない. そこで, π prolate windowの0次のみを使う代わりに長期間のデータをスタッキングすることで周波数分解能をあげてパワースペクトルを計算することにする. この計算で示されるのは, ある期間のパワーの平均であり時間的な変化は失われるが, 単発的なシグナルでなくある程度の頻度を持ってあらわれるシグナルならば捉えられる可能性が高い. 図2.1.10に示したのは, 1998年の1月から3月のうちUT0-15時 (LT9-24時) に欠測のない82日分の10秒値を使って計算した, 野島一大谷測線の地電位差 (右) と大谷の磁場3成分 (左) のパワースペクトルである. バックグラウンドスペクトルよりも鋭いピークを示すラインスペクトルが電場, 磁場3成分のすべてに見られる. 900秒のピークは図2.1.8-9では分かりづらかったが, 電場と磁場のZ成分にはかなり明瞭に現れるなど, 周波数構造がより詳しく見てとれることがわかる. 磁場のZ成分は電場に似たスペクトルをしているが, 磁場のX・Y成分では周期200-300秒のノイズレベルの変動が目立たず, ラインスペクトルのいくつかは失われた (例えば900秒). これは, 磁場のX・Y成分では外部磁場変動成分がノイズに比べて無視できない大きさを持っているからと考えられる. 実際に, 大谷の磁場のX・Y成分から柿岡の磁場X・Y成分と相関する成分を取り除

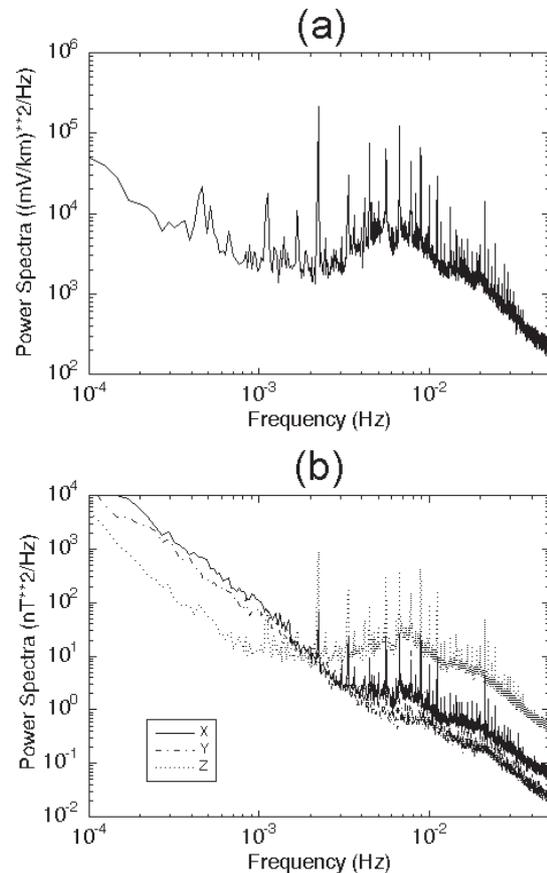


図2.1.10 1998年1月から3月の昼間の (a) 野島一大谷測線の地電位差と (b) 大谷における磁場のX (実線), Y (一点鎖線), Z (点線) 成分のパワースペクトル

いたところ, 残差には900秒の明瞭なラインスペクトルが存在した (第2. 2. 1節参照).

次に, ラインスペクトルには3種類あることが図2.1.10からわかる. (1) 900秒とその高調波が32次 (28. 125秒) まで, (2) 600秒とその高調波が10次 (60秒) まで, (3) その他のピーク (およそ2150秒と1950秒), の3つである. (1) と (2) で共通する周期ではより複雑なスペクトル構造となり, 図2.1.8-9で周期が時間によって微妙にゆらぐように見えた原因となった可能性がある. また, それぞれのラインは一本ではなく複数のラインの集合であり, 拡大してみると中央のラインに対し周波数方向にはほぼ等間隔にラインが並んでいるので, ある周期を持ったずれであることもわかる. これもまた, 図2.1.8-9での周期のゆらぎの原因であろう.

単純なDFTにより, 図2.1.10で示された昼間のラインスペクトルの同定を試みた. まず図2.1.10からラインスペクトルの中心周期のカタログを作成した. 具体的には, 上に述べた (1) - (3) の周期である. 次にカタログの中から, データに含まれる最適な周期の組み合わせを決定した. その際に, カタログの周期は大雑把なものである. 正確な周期

の同定も行う必要がある。そこで、各日のUT0-15時 (LT9-24時) のデータにFFTを適用して計算したスペクトルに対し、カタログ中の各周期について $\pm 2\%$ の範囲で周期をずらしながら、全体のパワースペクトル残差が最も小さくなる周期を探した。一旦周期が決まれば、各日のスペクトルからDFTによりその周期成分を除いた。複合ピークに対応するため、各中心周期で数回計算を繰り返す。このようにして同定した野島-大谷測線の地電位差に含まれるラインスペクトル成分の大きさを図2.1.11に示す。用いたデータは図2.1.10のものと同じである。ここに示したのは周期1000秒以下であるので900秒と600秒シリーズが含まれる。パワースペクトルで示唆されたラインスペクトルとそれぞれの複合ピークの様子が再現されている。同定された周期は、900秒の2次高調波として450.439秒を中心に447.589秒、453.582秒、456.74秒、900秒の3次高調波と600秒の2次高調波として299.374秒を中心に302.797秒、297.711秒、301.073秒、900秒の4次高調波として225.28秒を中心に223.321秒、224.407秒、というよ

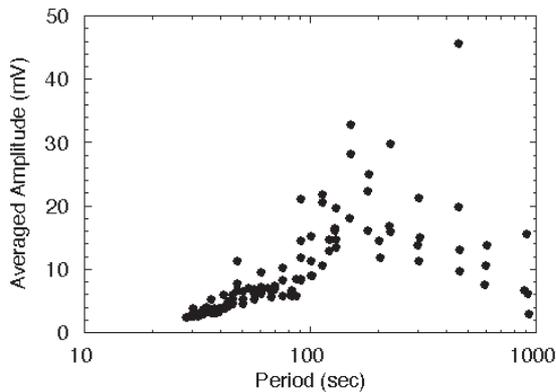


図2.1.11 DFTにより同定された、野島-大谷測線の地電位差に含まれるラインスペクトル成分の振幅

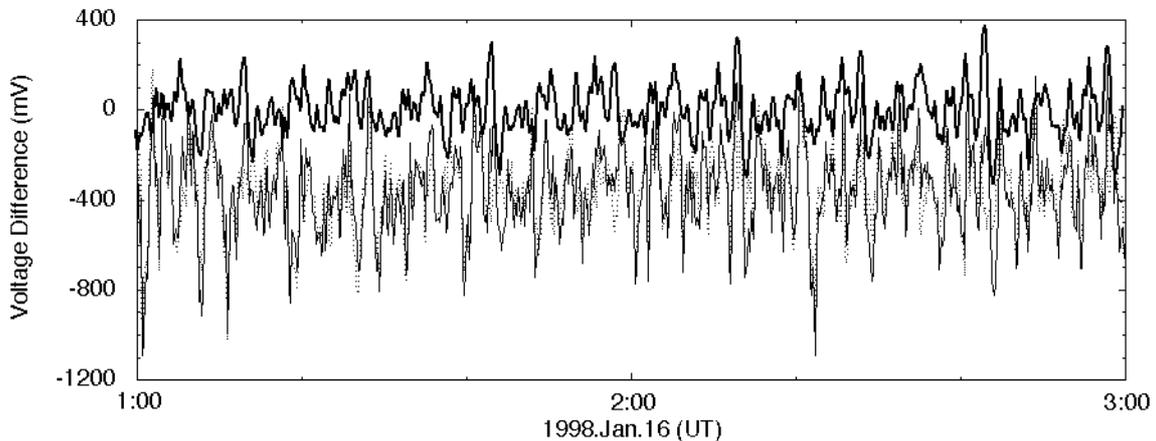


図2.1.12 1998年1月16日1:00-3:00UTの野島-大谷測線の地電位差の観測値(実線)と、ラインスペクトル成分(太い実線)、残差(点線)

うに分布している。複合ピークは中心から14-19時間ずつずれたピークの重なり合わせに分解されたことになる。中心ピークの周期の波の振幅が、14-19時間の周期を持つというように解釈することもできるが、これが何を意味しているのかは未だよくわかっていない。

同様の解析を大谷の磁場3成分に対して行い、同定されたラインスペクトルの周期を比較してみた。その結果、野島-大谷測線の地電位差と大谷の磁場3成分に含まれるラインスペクトルについて、振幅の大小には多少の違いがあるものの、周期の組み合わせはほぼ同じということがわかった。電場と磁場のラインスペクトルが同一の原因から生み出されたものであることを示していると考えられる。

図2.1.11の解析でラインスペクトルのDFT係数が各日ごとに求まっているので、特定周期のsin波の集合体としてラインスペクトル成分の時系列を計算することができる。図2.1.12には、1月16日の1:00-3:00を例にして、観測データ(細い実線)、同定されたラインスペクトル成分(太い実線)、ラインスペクトルデータを除去した残差(点線)を示した。ラインスペクトル成分が無視できない大きさを持つことが示唆される。

次に、ラインスペクトル成分の昼と夜の差を調べるため、1998年の1月から3月のうちUT17-19時 (LT2-4時) に欠測のない88日分を使ってパワースペクトルを計算した(図2.1.13)。いわゆるラインスペクトルといえるような鋭いピークは存在しておらず、周期250-500秒に2こぶの山が見られるのが目立つ程度である。昼間に卓越するのと同じ周期でややパワーが大きくなっているが、明瞭とはいえない。これは、一つには2時間分の連続データしか使っていないため周波数分解能が上がらないためと考えら

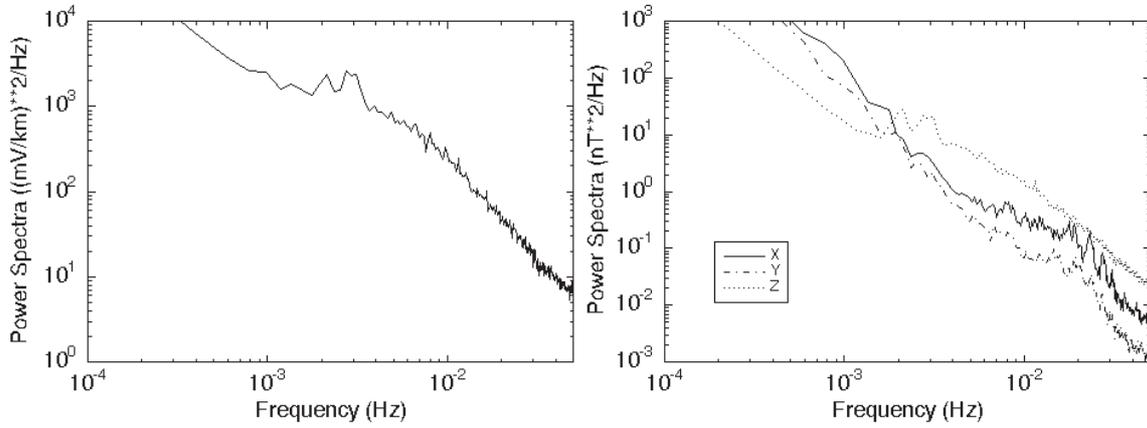


図2.1.13 1998年1月から3月の夜間の (a) 野島一大谷測線の地電位差と (b) 大谷における磁場のX (実線), Y (一点鎖線), Z (点線) 成分のパワースペクトル

れるが、ノイズが少ない時間帯は深夜2時から4時の2時間しかなく改善するのは難しい。夜間のノイズはラインスペクトルの的に扱うことはできないということであろう。

2. 1. 2 空間分布の特徴

淡路島の地電流ノイズは一つの地点の時系列データだけを見ると全く不規則な変化をしているように見えるが、明らかに特定の2地点間の相関は高く(小嶋他, 1996) おおよそ観測域全体で同期して変動しているように見える。もしそうであれば、空間分布の違いを利用してノイズとシグナルとを分離できる可能性がある。ここではノイズの空間的な広がりを把握することを目的とした調査の結果について報告する。

2. 1. 2. 1 地電位差変動の卓越方向の空間分布

一般に地電位差変動には地下の比抵抗構造の不均質性や異方性によって卓越方向を持つ場合が多い。またノイズが混入している場合には、卓越方向からノイズ源の性質を知ることができる可能性がある。そこでここでは淡路島の地電位差変動の卓越方向の特徴について述べる。我々が計測しているのは2点

間の電位差であり、その値を距離で規格化することによって2点間の電場に換算することができる。最低3地点の相互の地電位差測定値があれば電場をベクトルとして求めることができるが、それは3点で囲まれた地域の平均的な電場であると解釈される。図2.1.14はそのような考えから卓越方向とその向きの電場の大きさを求め、それらが長期的にどの程度安定しているのか調べたものである(徳本他, 1999)。これは1997年10月の地電流毎秒値から毎日10時~11時 (UT) の観測域から代表的な3点(育波一鳥飼浦一釜口観測点, 及び中川原一江崎一別所観測点)のデータを用いて電場を計算した結果を4日毎に図示したものである。それぞれのプロットでは、1秒毎に計算した電場を平面上でベクトル表示したときの端点の位置の分布を等高線で表している。どちらの測線の組み合わせでも等高線がおおよそ北西-南東方向に延びていることから、この方向の電場変動が卓越しておりその方向は1ヶ月間でほとんど変わらないことがわかる。また2組の測線間で方向が微妙に異なっていることから、卓越方向は観測域全体で必ずしも一様ではないことも読みとれる。方向とは違って、電場の大きさについては日毎に増減がある。なお第1章でも述べたように、電場の変動は自

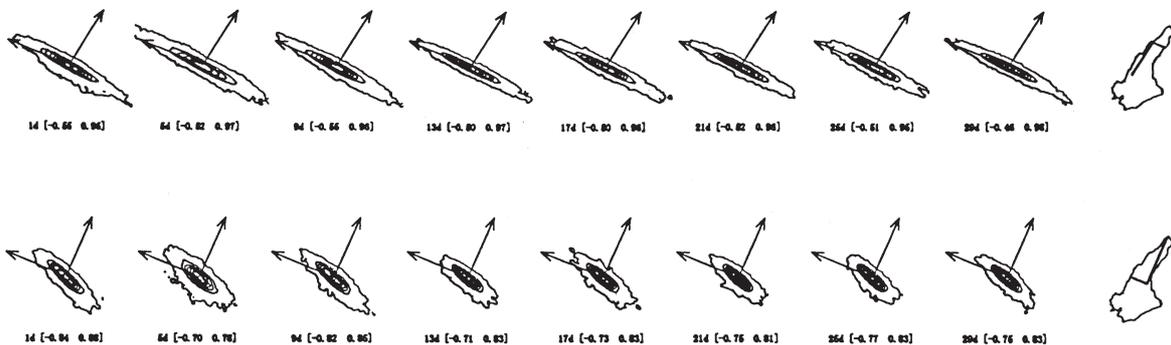


図2.1.14 地電流卓越方向の安定性(徳本他, 1999)。1997年10月0時~11時 (UT) のデータより求めた。上段: 育波一鳥飼浦, 育波一釜口, 下段: 中川原一江崎, 中川原一別所。

然現象として観測される値よりもはるかに大きく、ここでの結果は人工ノイズの性質を表しているといえる。徳本他（1999）は同様の方法によって、卓越方向は1年を通じてほぼ一定であることを示している。

次に卓越方向が観測域の中でどのような空間分布をしているかという点について調べた高山他（2000）の結果について述べたい。彼らの成果については第3章で説明されるのでここではその中で地電位差の長周期変動の卓越方向についての成果について簡単に紹介する。淡路島の21ヶ所の地電位差観測点を使って、図3.1.19のように三角形網をつくり、それぞれの三角形をなす3点の地電位差毎時値からその場所での電場を計算して卓越方向をもとめたものが図3.1.23である（高山他，2000）。ここでは1996年10月の結果を示している。毎秒値に見られるような短周期のノイズは毎時平均するとほとんど見えなくなるのに対して、深夜は長周期のノイズが卓越する（高山他，2000）。従ってここで示した卓越方向の解析結果は主として夜間の性質を表していると考えられる。

図3.1.23によると淡路島の北部では北西－南東方向に、中部では東－西方向に卓越しており海岸線に直交しているように見える。また変化の振幅は北部の方が大きい。観測網付近での淡路島の形状の長い方向である $N40^{\circ}E$ に沿った距離を横軸として卓越方向と振幅を示したのが図3.1.24である。中部ではあまり振幅は変わらず、北部では振幅変化が大きいことがわかる。また、北部と中部での卓越方向の違いも明確にわかる。図3.1.23では、島の西側での振幅が東側よりも大きいという特徴も見られる。図3.1.24の横軸の方向と直交する $N50^{\circ}W$ に沿った距離を横軸として卓越方向と振幅を示したのが図3.1.25である。あまり明確ではないが、西側の振幅が大きい地域があり、卓越方向も西で北西－南東、東で東－西に近くなる傾向が見られる。

1ヶ月毎の卓越方向の変化を図3.1.26に示す。ここでは異常なデータを含むものについては取り除いて示してある。変動幅は北部では10度程度であり、中部では30～40度程度と大きい。これは1ヶ月間のデータから求めた図3.1.23において、直交する2軸の振幅の比が北側は大きく、南側は小さいということと一致しており、長い時間スケールで見てもこの特徴が変わらないことがわかる。地電位差変化の振幅の時間変化を図3.1.27に示す。これは振幅の常用対数を示しており、縦軸は変化の大きさだけを表しており、絶対値は示していない。一部を除いて全ての三角形で同期して変化している。振幅の変動を洲本の

雨量と比較すると両者は相関しているようである。電車のレールと大地との間の抵抗値が降水量に依存することを通じて電車の漏洩電流と降水量と相関することが予想される。断定することは難しいが、この結果は淡路島での地電流のノイズ源が対岸を走る直流電車の漏洩電流であるという考えと矛盾しない（高山他，2000）。

地電流毎時値から求めた卓越方向にはこのように特徴的な空間分布が得られたが、他の時間スケールのノイズについては山田他（2000）が地電流1秒値を用いて調べている。山田他（2000）は高山他（2000）の卓越方向の調査と全く同じ方法を用いて卓越方向を調べた。すなわち21ヶ所の地電位観測点から、図3.1.19と同じ三角形網をつくり、それぞれの三角形をなす3地点間の電位差変動から電場ベクトルを推定した。高山他（2000）は1996年10月1ヶ月間の毎時値を用いて地電流の卓越方向を計算したが、毎時値の場合、変動は主に夜間に見られ昼間の変動からの寄与は小さい。そこで昼・夜の違いについても調べるため、昼間（00:00～11:59UT）と深夜（17:00～18:59UT）のそれぞれのデータに対して、あらかじめ下のような4種類のフィルターを用いて特定の周期成分のみを取り出し、そのおのおのについて卓越方向の分布を求めた。

- ① $T_{HC}=40$ 秒
- ② $T_{HC}=100$ 秒, $T_{LC}=40$ 秒
- ③ $T_{HC}=300$ 秒, $T_{LC}=100$ 秒
- ④ $T_{HC}=1000$ 秒, $T_{LC}=300$ 秒

ここで、 T_{HC} 、 T_{LC} はそれぞれハイパスフィルター、ローパスフィルターの時定数を表す。使用したデータは1996年10月6日の毎秒値である。

図2.1.15、図2.1.16はそれぞれ昼間、深夜のデータの場合の結果である。これを見ると両者ともに淡路島の北部では北西－南東方向、中部では東－西方向が卓越しており、変動の振幅は北部の方が大きい。この分布は高山他（2000）が毎時値について求めたものと非常に似通っている。深夜については明らかに昼間に比べて振幅が小さい（スケールを5倍にして図示している）が、変動の方向や振幅分布の傾向は昼間とほとんど変わらない。

この結果についてもう少し詳細に見てみよう。昼間のデータの場合は振幅分布が周期にあまり依存していない。③の場合が他の周期帯の結果に比べて若干振幅が大きい程度である。それに対して深夜の結果の場合は③、④の周期帯が①、②に比べてかなり大きな振幅を持つ。特に④が相対的に変動が大きいことは、昼間の結果と著しく対照的である。また深夜の①の結果の中で、観測地域の南端での電場の卓

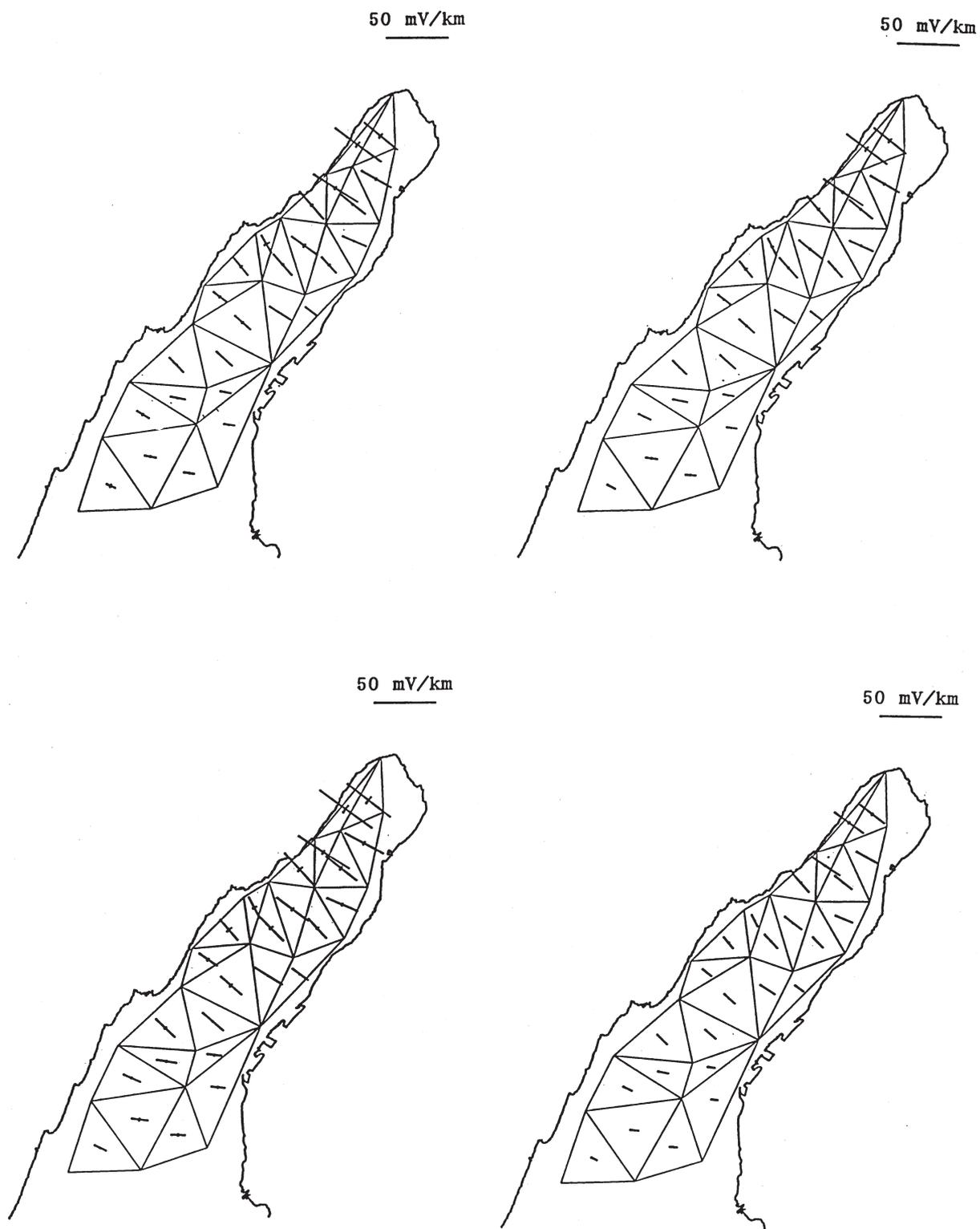


図2.1.15 1996年10月6日00:00~11:59UTの地電流毎秒値データにより求めた卓越方向の分布(山田他, 2000).
 左上, 右上, 左下, 右下にそれぞれフィルター①~④を使用した場合の結果を示している.

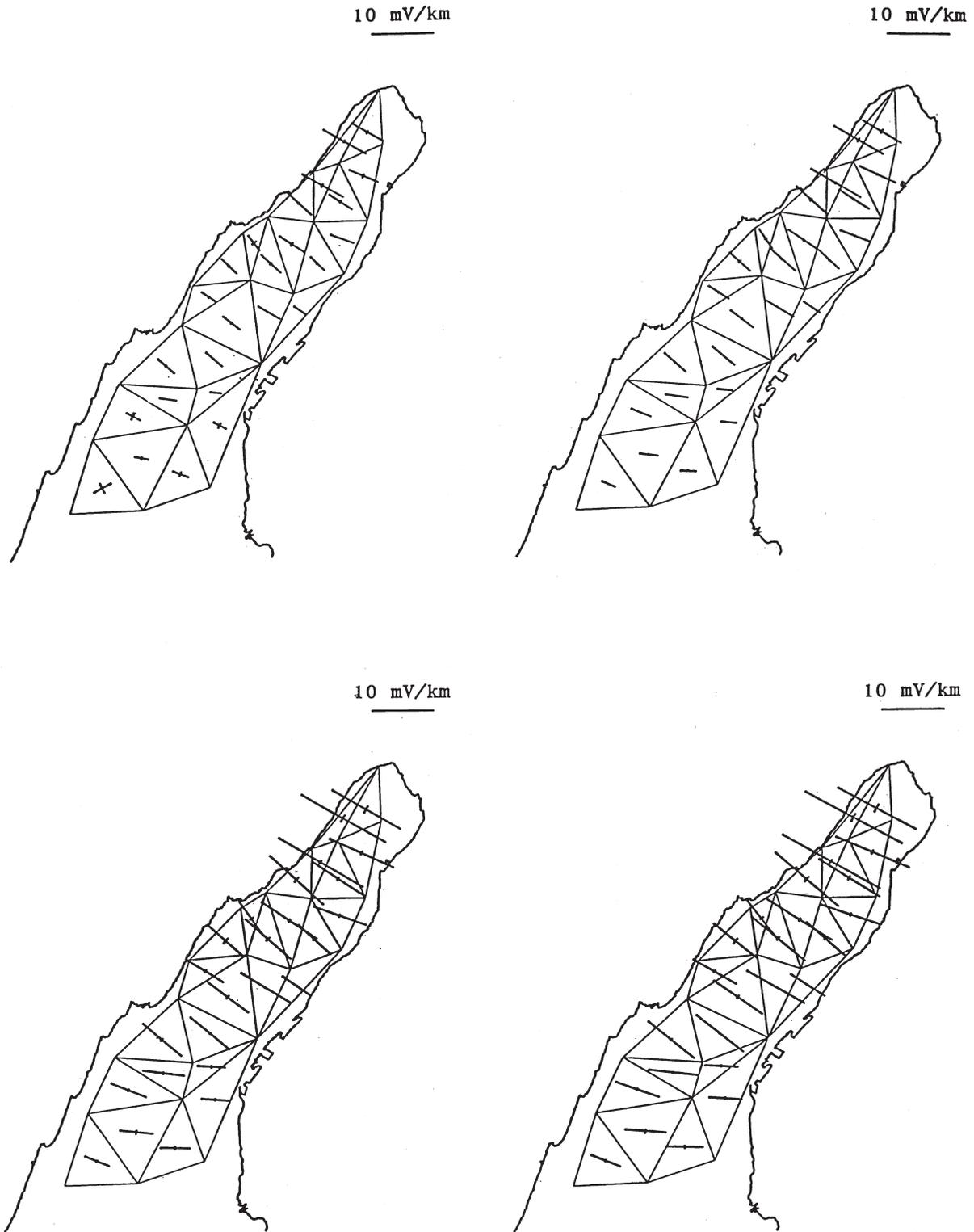


図2.1.16 1996年10月6日17:00~18:59UTの地電流毎秒値データにより求めた卓越方向の分布(山田他, 2000). 左上, 右上, 左下, 右下にそれぞれフィルター①~④を使用した場合の結果を示している.

越方向が、他の周期帯とやや異なっている上、卓越方向と直交する方向の振幅も大きい。このように、卓越方向の分布パターンについては、深夜の短周期帯で若干の違いが見られる他は全般に周期や昼・夜によるパターンの違いは小さい。振幅分布については、昼は深夜に比べて非常に振幅が大きいことに加えて、振幅の周期依存性も昼・夜とで異なっており、深夜は相対的に長周期成分が卓越しているといえる。

2. 1. 2. 2 主成分分析による地電位分布の変動調査

淡路島の地電流データから卓越する空間分布を抽出することを目的として、これまでに主成分分析法が試みられている。徳本他（1998）は20地点の地電流毎秒値の空間分布に対して主成分分析を行い、第1主成分の寄与率が70%を越えており、観測されるノイズ分布のかなりの部分がこの主成分だけで説明できることを示した。山田他（1998）は地電流の短周期変動に対して主成分分析を行って、徳本他（1998）と同様の結果を得るとともに、卓越する地電位ノイズの空間分布を示した。ここでは山田他（1998）が行った解析方法について簡単に説明する。

地電位の空間分布を調べるにあたってまず問題となるのは、電位の基準を何にするかということである。実際に測定している電位は便宜上大谷観測点の電極の電位を基準とした各地点の電位であるが、それが解析する際にも基準としてふさわしいという根拠はもちろん無い。（大谷の周辺の観測点の計測値を見ると大谷も相当ノイズの影響を受けていると考えるのが自然である）。理想的なのは、各地点の電位を絶対的な電位の基準（例えば無限遠点の電位）からの値として扱うことであるが、現実には不可能である。従ってそれに代わるものとして次のような（大谷を含む）全21点の電位の平均値を電位の基準とした。

$$\bar{e}(t) = \frac{1}{21} \sum_{i=0}^{20} e_i(t) = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{20} e_i(t) \quad (2.1.1)$$

ここで、 $e_i(t)$ ($i=0,1,2,\dots,20$)は時刻 t 、地点 i における電位の計測値（大谷($i=0$)を基準にした値）であり、当然 e_0 は常に0である。このようにして決めた基準値からの偏差、

$$\tilde{e}_i(t) = e_i(t) - \bar{e}(t) \quad (i=0,1,2,\dots,20) \quad (2.1.2)$$

が今回解析に用いた値である。このような空間平均からの偏差を用いたということは、電位の空間パ

ーンを広域的なもの（全部の測点の電位がいつせいに増加、減少するような変化）と、観測域内での分布の変動（測点毎に電位が増加したり減少したりするような変化）とに分離し、後者のみを解析対象とすることを意味する。

このようにして決めた21個の平均偏差を $\tilde{e}_i(t)$ を要素とするベクトル、

$$\tilde{\mathbf{e}}(t_n) = (\tilde{e}_0(t_n), \tilde{e}_1(t_n), \dots, \tilde{e}_{20}(t_n))^T \quad (2.1.3)$$

は、時刻 t_n における電位の空間分布を与える（ T は転置行列を表す）。従って空間パターンの時間変化を調べるということは、21次元位相空間内でこのベクトルが指し示す点が時間と共にどのように分布するかを調べることに帰着し、その手法のひとつとしてここでは主成分分析法を用いる。主成分分析法はパターンの分類や認識の手法としてさまざまな分野で利用されている統計解析方法のひとつである。以下に計算手順の概略を記述する。

まずある時間内 t_n , ($n=1,2,\dots,N$)における $\tilde{\mathbf{e}}$ の時間平均を求め、それからの偏差をあらためて $\bar{\tilde{\mathbf{e}}}(t_n)$ とする。この時系列ベクトルの共分散行列 \mathbf{C} は、

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathbf{e}}(t_n) \tilde{\mathbf{e}}(t_n)^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{e}_0(t_n)^2 & \dots & \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{e}_0(t_n) \tilde{e}_{20}(t_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{e}_{20}(t_n) \tilde{e}_0(t_n) & \dots & \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{e}_{20}(t_n)^2 \end{pmatrix} \quad (2.1.4)$$

で与えられる21行×21列の行列である。この行列の固有値を次の方程式から求める。

$$\mathbf{C}\mathbf{b}_k = \lambda_k \mathbf{b}_k \quad (2.1.5)$$

ここで、 \mathbf{b}_k , λ_k はそれぞれ固有ベクトルと固有値であり、 $k=1,2,3,\dots,21$ である。行列 \mathbf{C} は対称行列なので、この固有値は実数でかつ正である。こうして求めた固有ベクトルはそれぞれの空間分布のパターンを表し、位相空間内で互いに直交する。また固有値は対応する固有ベクトルが表す変動の分散（すなわちそのパターンの変動量の大きさ）を表す。固有値、固有ベクトルの組で表現されるパターン変動を順に、第1主成分、第2主成分、... と呼ぶ。なお後で検討する時に便利なように、 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > 0$ と並べ替えることにし、固有ベクトルは、

$$|\mathbf{b}_k|=1 \quad (2.1.6)$$

と、規格化しておく。またこれらの各主成分のパターンの振幅（主成分スコア）は、次式のように固有ベクトルと元データとの内積をとることによって得られる。

$$a_k(t_n) = \tilde{\mathbf{e}}(t_n)^T \mathbf{b}_k \quad (2.1.7)$$

これは第 k 主成分の時刻 t_n における振幅を表している（すべての t_n についての a_k の分散が固有値 λ_k になる）。

以上の方法を用いて山田他（1998）は1998年1月15日0時～24時UTの地電位差データの1日分の1秒値（ $N=86400$ ）を使用して、短周期に着目した解析を行った。この日の地磁気活動は非常に静穏で柿岡の ΣK は1であった。従って自然磁場変動によって誘導される地電位変化は小さいことが期待される。また主成分分析を行う前に、生データに対してまず周期100秒をカットオフとするゆるやかなハイパスフィルターをかけてあらかじめ長周期変動成分を除去した。

表2.1.1は主成分分析の結果をまとめたものである。これによると第1主成分の寄与率は77%に達している。すなわち第1主成分が全体のパターン変動の大半を占めているということになる。第2, 3主成分がこれに続き、結局第1から第3主成分までで累積寄与率は99%以上となっており、上位3つのパターンではほぼすべての空間分布の時間変動が説明できることを意味している。図2.1.17はこれら上位6主成分の固有ベクトルを地図上に円の面積で表現したものである。これを見ると、第1主成分は概ね北西－南東方向の電場の変動（淡路島の東岸が西岸に比べて電位が高い、あるいはその逆）パターンを表していることがわかる。第2主成分は北東－南西方向の電場の変動を表し、第3, 4, ... と徐々に細かな空間構造を表現している。

図2.1.18はこのようにして求めた主成分スコアのうち上位4主成分について1日の間の時間変化を図示したものである。当然のことながら第1主成分の変動幅が最も大きく、以下2, 3, 4主成分の順に小さくなっていくことがわかる。この日は地磁気活動が静穏で誘導成分は小さいと考えられるため、このような短周期の変動はほとんどがノイズであると思われる。またどの成分も昼間に比べて夜間（16時頃～20時頃）は振幅が極端に小さくなっており、これらの成分の変動が人工的な原因によるものであるという考えを支持している。当然ではあるが、前処理としてハイパスフィルターを使用したため、長周期の変動成分は残っていない。

次に、短周期の変化の様子がもっとよくわかるように、この図の中の5分間分を拡大したものが図2.1.19である。これを見るとどの成分も時間変動は非常に複雑である。しかし、例えば第3主成分の細かい変動（10秒以下）をよく見ると比較的規則的に変動していることがわかる。これは特定の卓越周波数成分の存在を示唆しているが、このことは後で詳しく説明する。

図2.1.20はハイパスフィルターをかけない生データについて式2.1.2の空間平均偏差をとったものの1日の平均値を図示したものであり、いわば今回の解析の「直流項」に相当する。ここに示した値には電極の埋設状態の違いに起因する各測点に固有の成分（接触電位差等）を持つためこれらの値をそのまま「地電位」と考えることはできないものの、概ね東岸沿いの測点で電位が高く、西岸で電位が低いという傾向が見られ、その電位差は100mVのオーダーであることがわかる。これを図2.1.17の固有ベクトルと比べてみると、第1主成分と同じ様な分布をしている。なおここで述べているのはフィルターによって短周期成分のみを主成分分析した結果であるが、フィルターをかけずに解析しても第1主成分のパターンやその寄与率はほとんど変わらなかった（周期帯毎の主成分分析結果については後述）。すな

主成分 k	1	2	3	4	5	6
固有値 λ_k (mV^2)	35163.3	9517.3	531.8	142.9	54.1	20.7
$\sqrt{\lambda_k}$ (mV)	187.5	97.6	23.1	12.0	7.4	4.5
寄与率 (%)	77.3	20.9	1.2	0.3	0.1	0.0
累積寄与率 (%)	77.3	98.3	99.4	99.7	99.9	99.9

表2.1.1 求めた主成分のうち上位6成分までの固有値とその根号、寄与率、および累計寄与率（山田他，1998）。

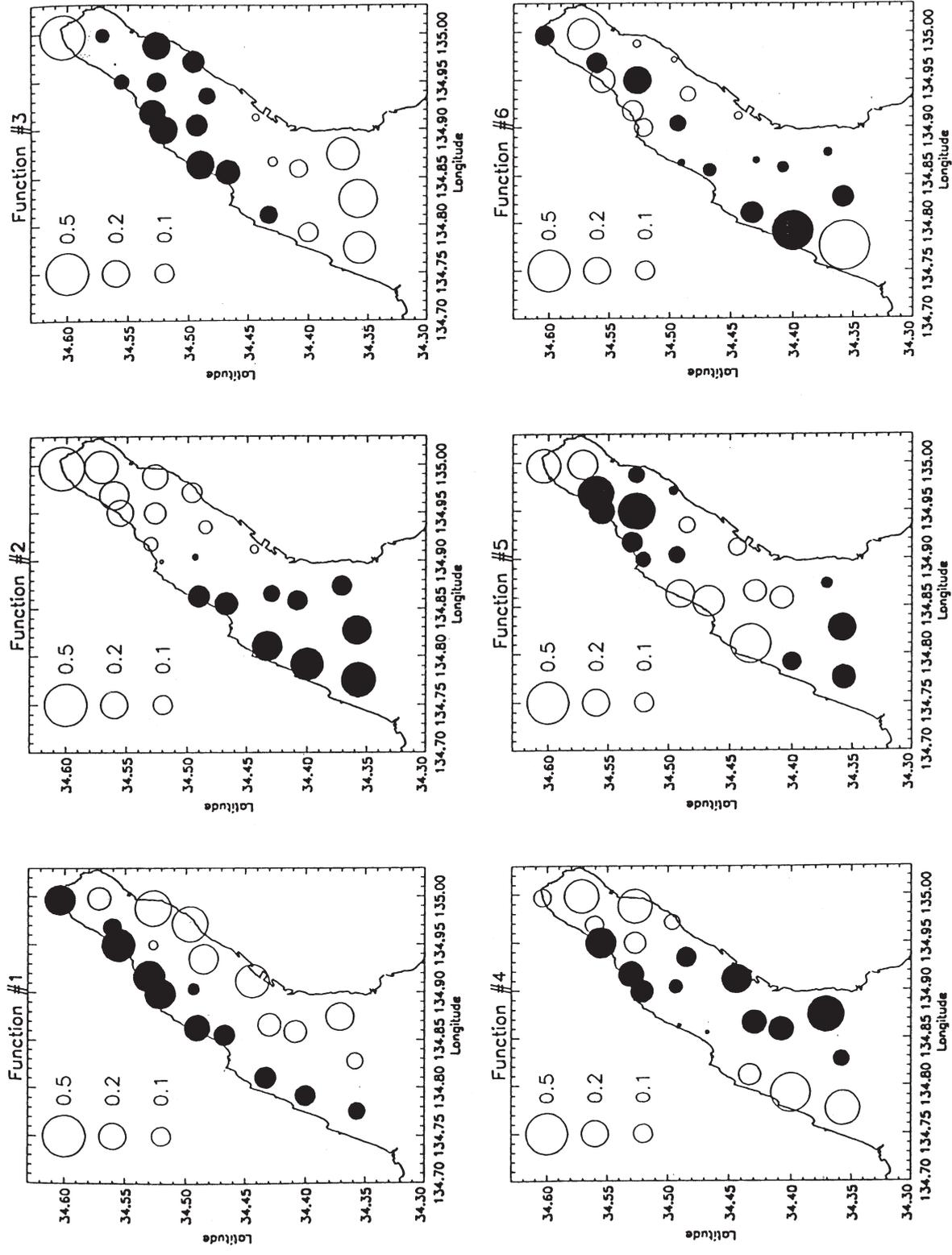


図2.1.17 主成分分析による主成分固有ベクトル (山田他, 1998). 第1主成分 (左上図), 第6主成分 (右下図) までのみを示す。白円, 黒円がそれぞれ正, 負の値であることを, 円の面積でその大きさを表している。

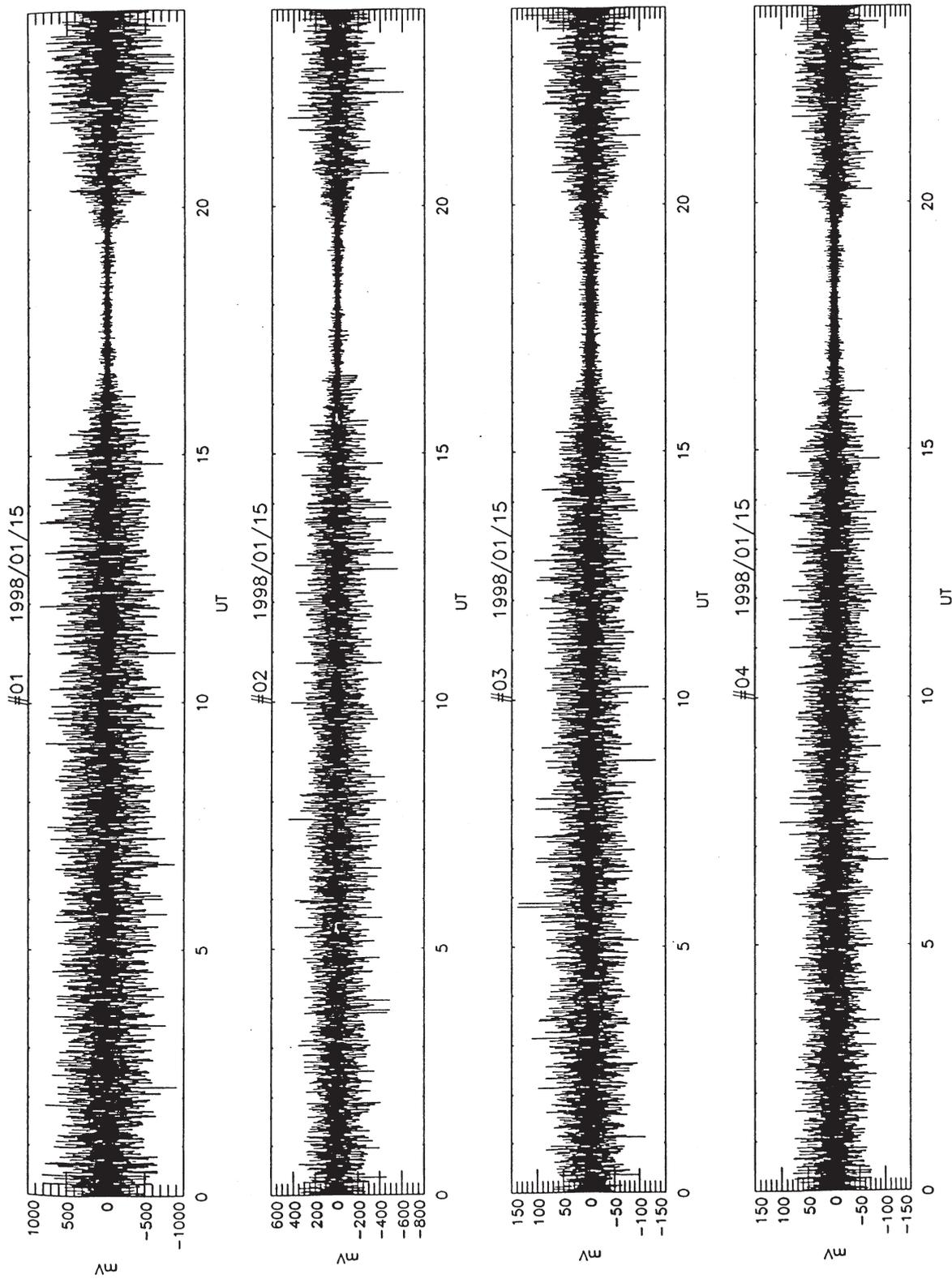


図2.1.18 第1主成分（最上図）から第4主成分（最下図）までの主成分スコアの時間変化（山田他，1998）。横軸は時間で0時から24時（UT）である。縦軸のスケールは成分毎に異なっていることに注意。

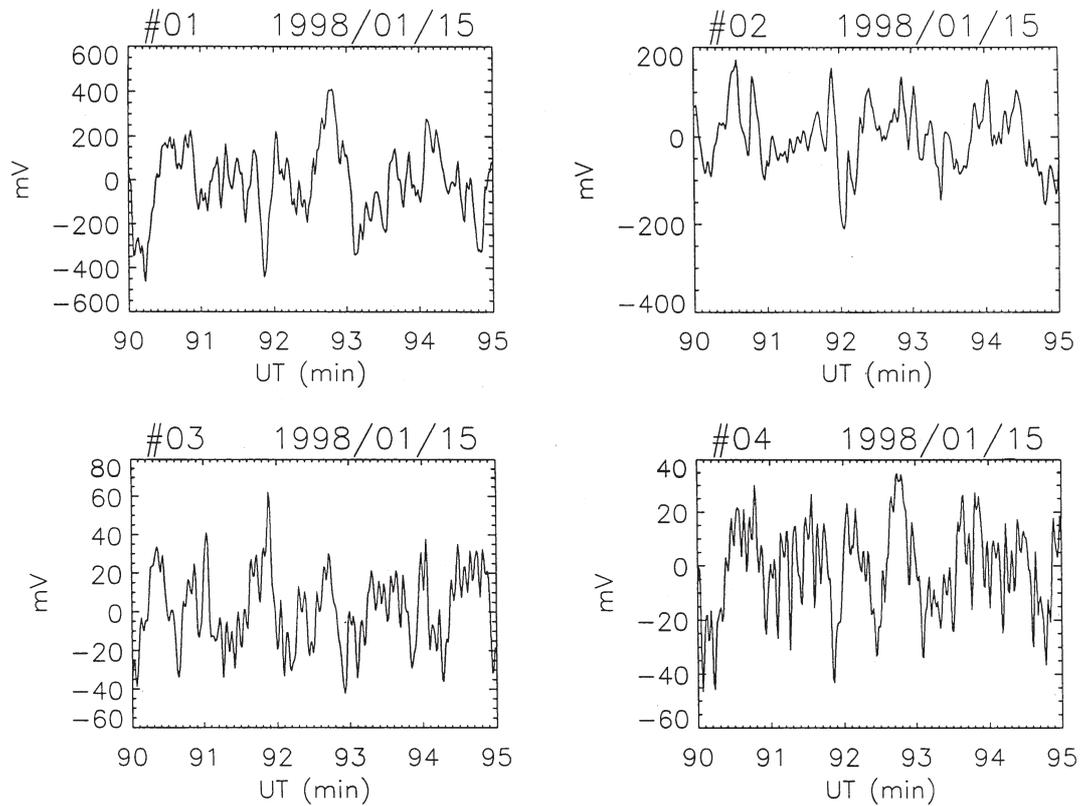


図2.1.19 第1主成分 (左上), 第2主成分 (右上), 第3主成分 (左下), 第4主成分 (右下) の主成分スコアの時間変化 (山田他, 1998). 図2.1.18の時系列の1時30分 (UT) からの5分間分を拡大して表示したもの.

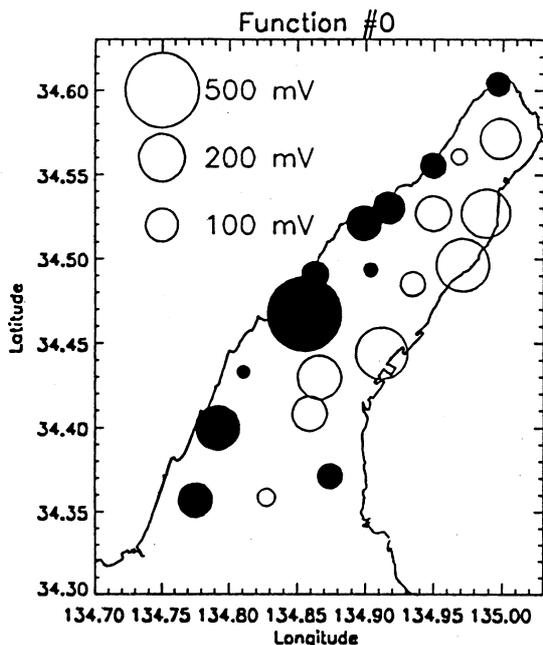


図2.1.20 1998年1月15日の平均の電位分布 (ハイパスフィルターはかけていない) (山田他, 1998). 全観測点の平均値からの偏差で表している. 白円, 黒円がそれぞれ正, 負の値を, 円の面積がその大きさを示している.

わち, 常に北西向きの直流電場が存在しつつそれに短周期の不規則な北西-南東方向電場の変動が重なっている, というのが, 第1近似的な淡路島北部での電場ノイズの状態であるということができよう.

ではその短周期北西-南東電場変動の振幅はどの程度の大きさだろうか. 第1主成分での東岸の代表点として地点6 (久留麻) と西岸の代表点として地点4 (野島) を選ぶと, 図2.1.17によると両者の電位差は 0.68 である (規格化されているので無次元). ところで表2.1.1から第1主成分の固有値 (分散) の根号 (\div 標準偏差) は, 187.5 (mV) であり, また図2.1.18によれば1日の変化の幅はP-Pで ± 800 (mV) 程度である. 従って第1主成分の北西-南東方向の電位差変動の標準偏差は $0.68 \times 187.5 \sim 130$ mV, 変動幅は最大 $0.68 \times \pm 800 \sim \pm 500$ mV程度であるということになる (両地点間の測点の間隔を約5kmとすると電場に換算して $\sim \pm 100$ mV/km).

続いて第2主成分を見てみよう. 第2主成分の固有ベクトル (図2.1.17) は考えている領域の中で北へいくほど電位が高く, 南ほど低い (あるいはその逆) という分布を表している. 従って基本的に北東-南西方向の電場が時間的に変動しているということを示している. 最北端 (地点1 (江崎)) と最南端 (地

点20（鳥飼浦）との間の第2主成分の電位の時間変化の振幅を第1主成分の場合と同様にして概算で求めてみると、表2.1.1や図2.1.18から、標準偏差は88 mV，最大振幅は $\sim \pm 350$ mVとなる。この振幅を両地点間の距離で除して電場に換算すると $\sim \pm 10$

mV/kmとなる。

以上のように、測点を配置している淡路島の北半分には定常的な北西向き電場と、時間変化する最大振幅100mV/km程度の北西-南東方向電場，最大振幅10mV/km程度の北東-南西方向電場が存在して

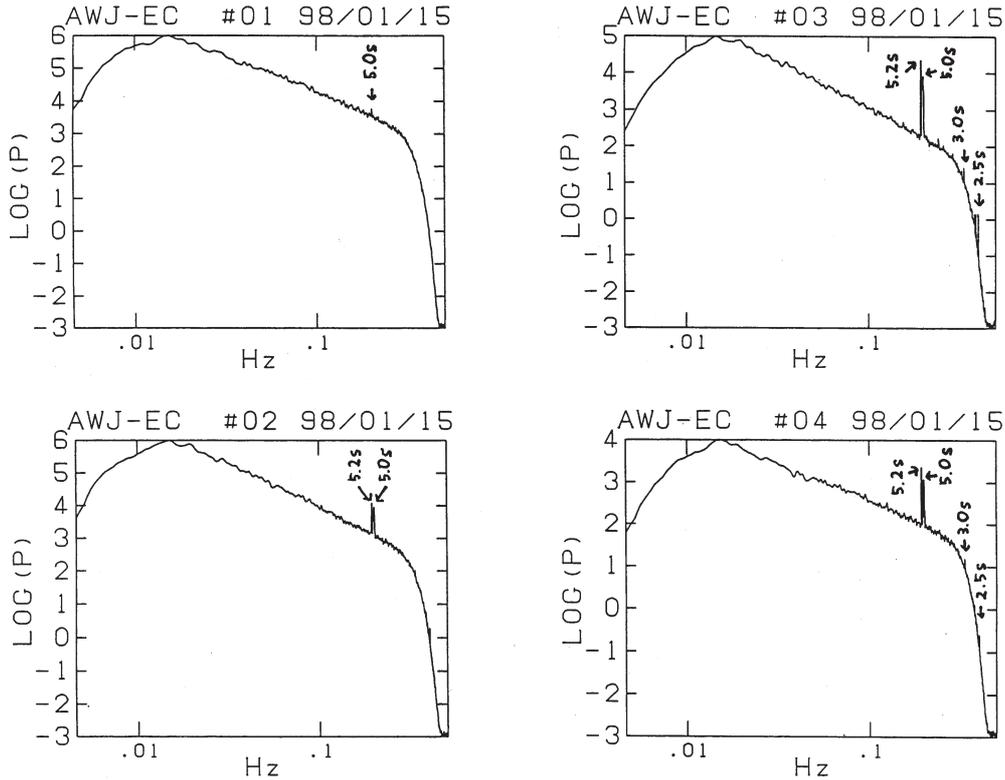


図2.1.21 第1主成分（左上），第2主成分（左下），第3主成分（右上），第4主成分（右下）の主成分スコアのパワースペクトル（山田他，1998）。

主成分\秒	8.0	5.2	5.1	5.0	3.9	3.4	3.1	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4
1				○								
2		○		○								
3		○		○				○			○	
4		○		○				○			○	
5	○	○	○							○	○	
6	○	○		○	○	○	○	○		○		
7	○	○		○				○	○	○	○	○
8		○		○				○			○	
9	○	○		○					○	○	○	
10	○	○		○					○	○	○	

表2.1.2 第10主成分までのスコアに対してスペクトル解析を行った結果，得られた周期変動成分（山田他，1998）。

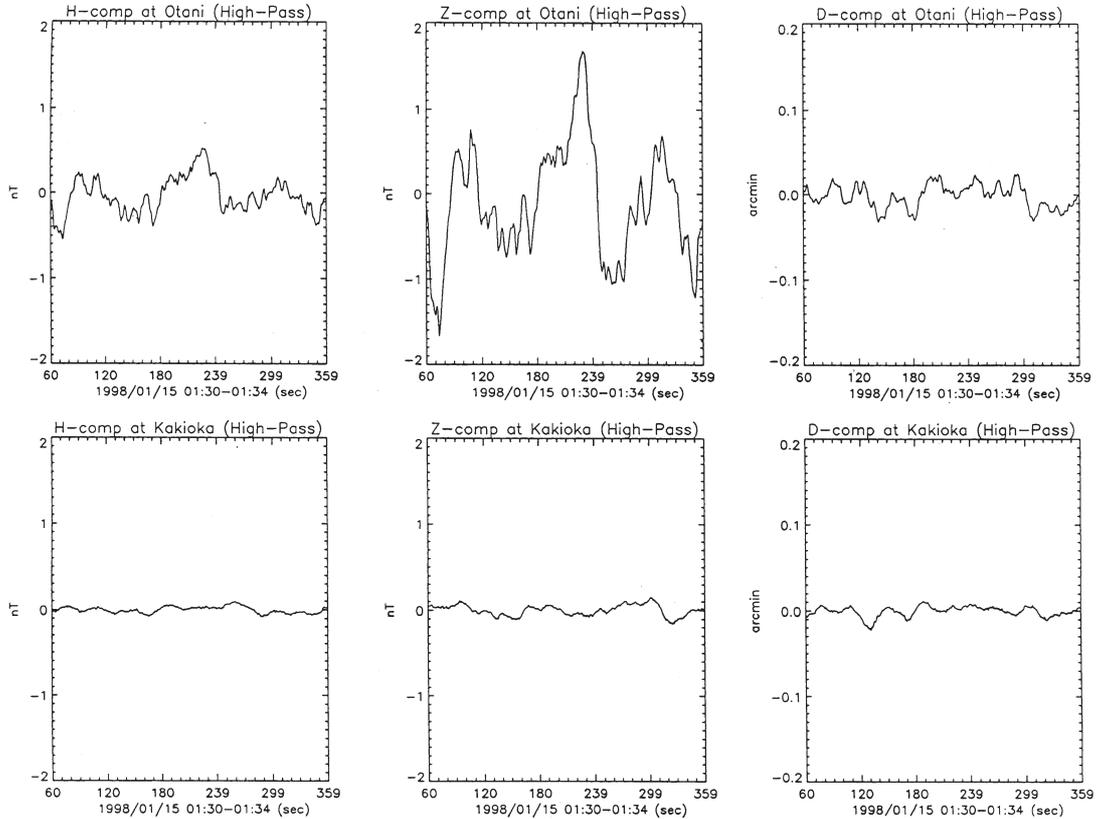


図2.1.22 1998年1月15日1時30分 (UT) から5分間の、大谷 (上段) と柿岡 (下段) の地磁気3成分データ (山田他, 1998)。左からH, Z, D成分で、D成分は偏角に換算している。各データとも周期120秒をカットオフとするハイパスフィルターをかけている。

いる。これらの電場はその大きさから考えて人工的なものであると思われる。また領域内でもっと局所的な分布をする電位変化成分も存在するが、その振幅は上記電場に比べて非常に小さい。このような広域的な変動成分のみを主成分分析によって抽出できたということは、地震予知のためのノイズ除去という面では将来有効である可能性がある。そもそも我々が展開した観測システムによって活断層による地震の前 (あるいは同時) に地電位差変動が捉えられるとしても、それは観測域内の局地的な現象であることが予想される。従ってそのようなシグナルをピックアップするためには、計測値の中から広域的な変動成分を除去し局地的な変化のみを取り出すという作業が不可欠となるからである。

次に図2.1.18や図2.1.19のような主成分スコアの時間変動に周期性はあるのかを調べるために、主成分分析によって得られた1日分の主成分スコアのうち、初めの 65536 秒分 (0時~18時過ぎ頃まで) のデータについて高速フーリエ変換法によってパワースペクトルを求めた。その際に前処理としてトレンドを除去した上で、cosine型データウインドーを使用し、後処理として周波数平滑を行った。そうして求めた第1~第4主成分についての結果が図2.1.21である。

まず第1主成分には、周期5.0秒に小さいながらもピークが現れている。それに対してこの5秒前後のピークは第2主成分以降には明瞭に現れる。第2主成分では5.0秒と5.2秒のピークが、第3, 4主成分ではそれらに加えて3.0秒と2.5秒のピークが見られる。第10主成分までについて得られた周期を表2.1.2にまとめた。各主成分について現れる周期はまったく異なるというわけではなく、主成分間で共通に現れる周期も多い。特に上で述べた、5.2, 5.0, 3.0, 2.5 秒周期は下位の主成分でも多く見られる。

ここまで述べてきたような各主成分が表す空間分布変動が、それぞれどのような物理的な現象によるものなのかを調べるためには、他の物理量と比較することが重要である。ここでは大谷観測点において計測されている地磁気成分観測値の時間変動について解析し、手始めとして第1主成分との比較を試みた。図2.1.22は図2.1.19と同じ時刻の5分間の大谷観測点と柿岡の3成分データ (1秒値) をプロットしたものである (短周期を見やすくするためハイパスフィルターをかけている)。まず大谷と柿岡とを比較してみると各成分とも大谷の方が時間変動が非常に大きく、波形も柿岡とは異なっている。従って大谷の波形はその大部分が自然現象ではなく、ノイズで

あろうと思われる。また大谷と柿岡とを成分毎に比べてみると、大谷については、Z成分の振幅が特に大きくH、D成分の数倍程度になること、HとZの波形が互いに良く似ているということが明らかである。さらにこのH、Zの波形は図2.1.19の第1主成分スコアの波形とも、個々のピークがよく対応しているということがわかる。

これらのことをスペクトル解析によって確認してみた。図2.1.23には大谷の磁場Z成分のスペクトル

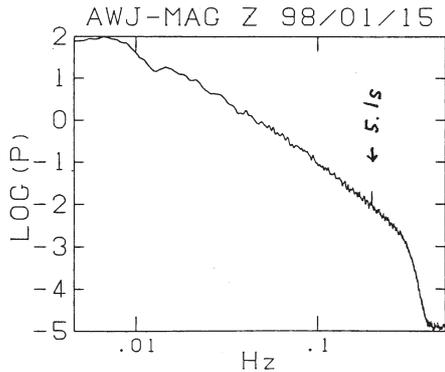


図2.1.23 1998年1月15日の、大谷の地磁気Z成分のパワースペクトル (山田他, 1998)。データ処理方法は図2.1.21と同じだがハイパスフィルターは使っていない。

を示している。データ処理の方法や使用したデータの区間は主成分スコアのスペクトル解析の場合と同じである (ただしフィルターはかけていない)。これによると周期5.1秒のピークが存在することがわかる。この周期成分は、柿岡のZ成分にも見られる (周期5.2秒) が、振幅は大谷に比べてかなり小さく両者のコヒーレンスも低い (図は省略)。従ってこのピークは自然現象ではなく、人工擾乱であると考えられる。また周期が似ていることから大谷と柿岡で同じ様な人工擾乱源があるのかもしれない。また図2.1.24には大谷のHとZ、HとD、ZとDそれぞれの間のコヒーレンスとフェイズを示した。これによるとHとZとは広い周波数域 (周期数秒以上) で高い相関を示し、位相差は 30° 以内である。それに比べてHとD、DとZの間ではコヒーレンスは低い。

図2.1.25は大谷のH、Z、D成分と地電位の第1主成分スコアとの間のコヒーレンス、フェイズを示している。Z成分と地電位とのコヒーレンスを見ると、周期5.1秒のZのスペクトルピークに対応してその周期付近で落ち込んでいるが、それ以外の周波数帯では短周期部分を除けば両者には良い相関があることがわかる。両者の位相差は 30° 以内である。またHと地電位とも高い相関があり、位相差はほとんど無

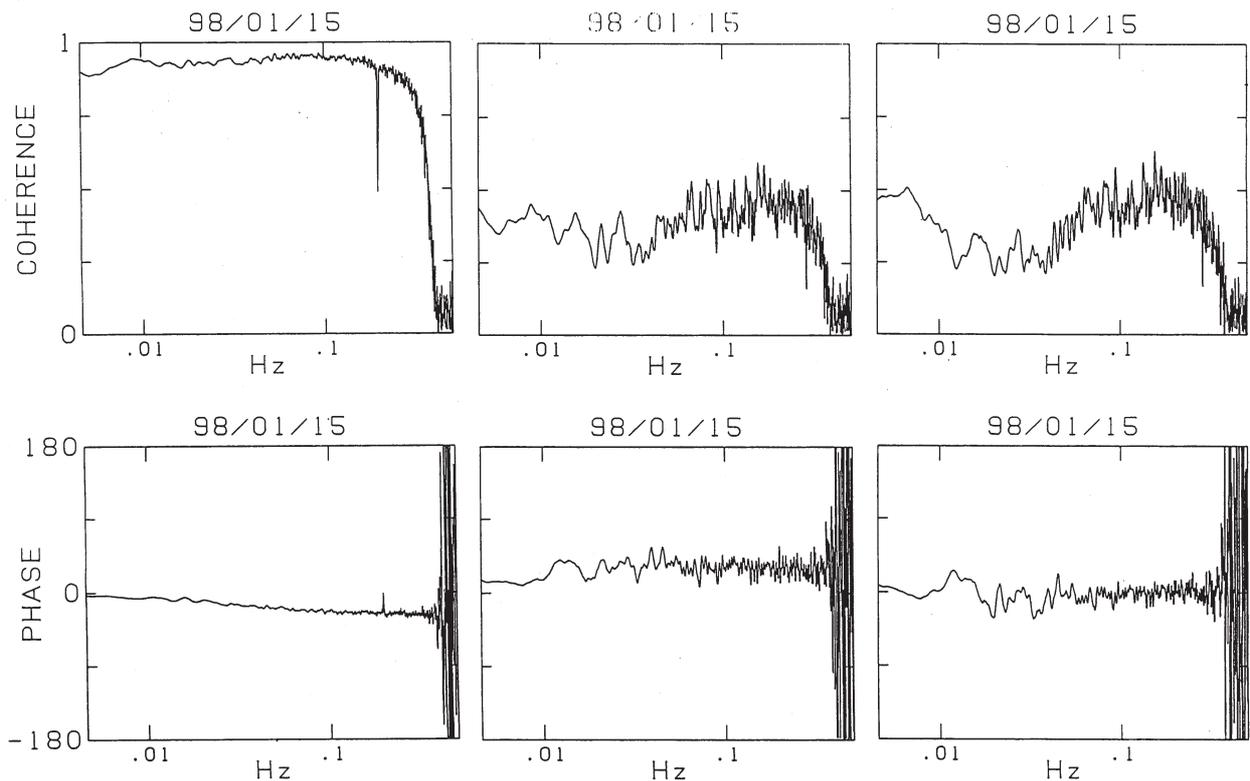


図2.1.24 大谷のHとZ (左)、HとD (中央)、ZとD (右) それぞれの間のコヒーレンス (上段) とフェイズ (下段) (山田他, 1998)。

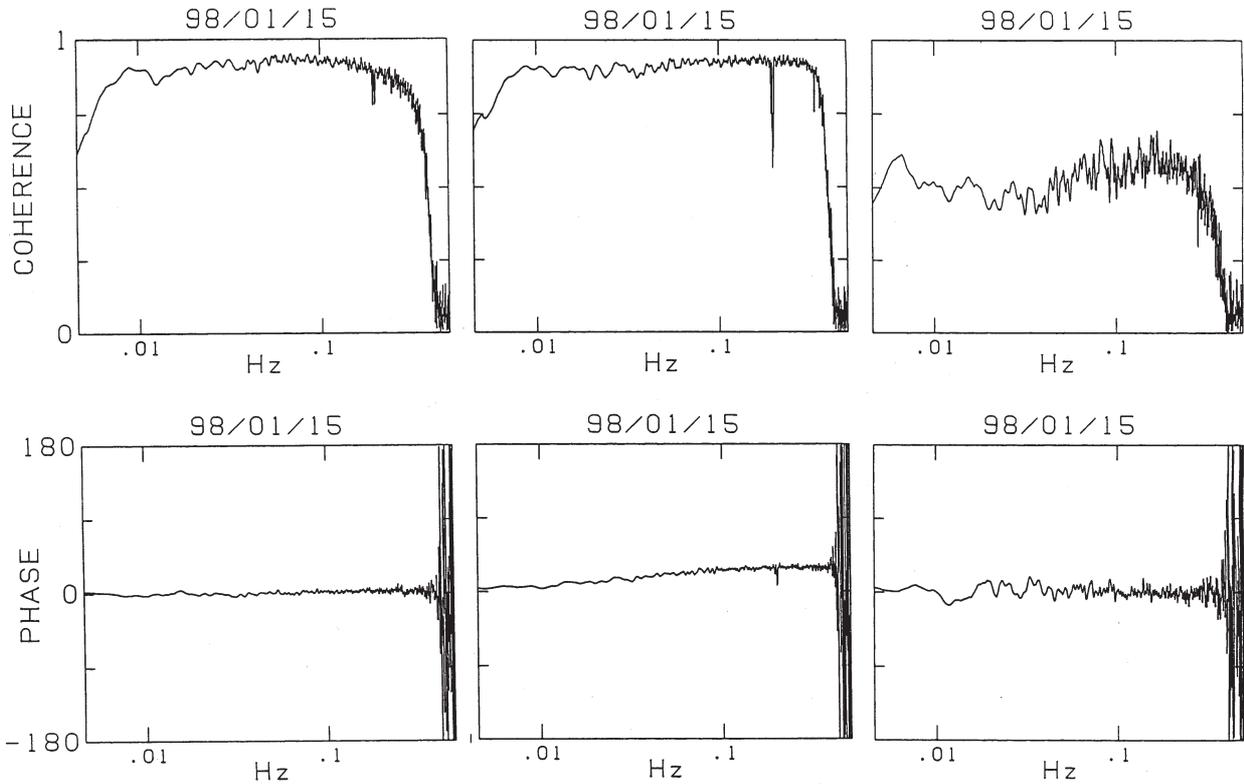


図2.1.25 大谷の H , Z , D と地電位の第1主成分との間のコヒーレンス (上) とフェイズ (下) (山田他, 1998). 左から順

い. H , Z に比べると D 成分はコヒーレンスが低い. なお第2主成分と地磁気変動との間の関係も調べたが, 大谷の H , Z , D 成分ともに第2主成分とのコヒーレンスは低かった.

以上の結果は短周期 (約100秒以下) の時間スケールについて調べられたものであり, しかも昼・夜を区別した解析ではない. そこで山田他 (2000) は山田他 (1998) と同様の解析を, 周期帯別, 昼夜別に行い, 違いを調べた. 次のその解析について説明する.

用いたデータは山田他 (1998) と同じく1998年1月15日の地電流毎秒値である. そのうち, 昼間 (00:00~11:59UT) と深夜 (17:00~18:59UT) のそれぞれのデータに対して, 前節の①~④の4種類のフィルターを用いてあらかじめ特定の周期成分のみを取り出し, 主成分分析法によって地電位ノイズの卓越する空間分布を求めた. 図2.1.26~図2.1.29は昼間のデータによって得られた主成分固有ベクトルのうち, 第1, 2主成分を示したものである. それぞれの図には主成分固有ベクトルだけでなく, それを電場分布にしたものも合わせて表示している. 電位分布から電場分布への変換は, 21点の地電位観測点から前項と同様の三角形網をつくり, 高山他 (2000) の手順に従った. これを見ると周期毎のパターンの

違いは第1, 第2主成分ともに全く見られないことがわかる. また予想されたことではあるが, 得られた第1主成分による電場分布は前節で示した卓越方向の分布と酷似しており, どちらの方法も電場分布の特徴をうまく捉えることができていることがわかる.

同様に深夜のデータによる結果が図2.1.30~図2.1.33である. 深夜についても第1主成分に関しては周期毎の違いは見られない. 唯一の例外は周期帯①の第2主成分についての結果がやや他の周期帯と異なることである. これは電場分布で見るとかなり明瞭であり (図2.1.30右下), 淡路島北部での電場が図2.1.31~図2.1.33と比べてやや小さく, 逆に観測域の南部 (淡路島中部) での電場が比較的強く, またその向きもやや異なる. 深夜の短周期だけに見られるこの特徴は, 前節での卓越方向の解析結果に見られた特徴と対応するものであると考えられる.

このように全体的には周期毎の違いというものほとんど見られないが, 昼・夜の違いはかなり明瞭である. まず第1主成分については, 電位分布で見るとわかる通り, 深夜は淡路島北部の電位変化が昼に比べてかなり小さめとなっている. それを端的に表しているのが, 最北端の点 (江崎観測点) の電位である. それぞれの図でこの点における白丸, 黒丸

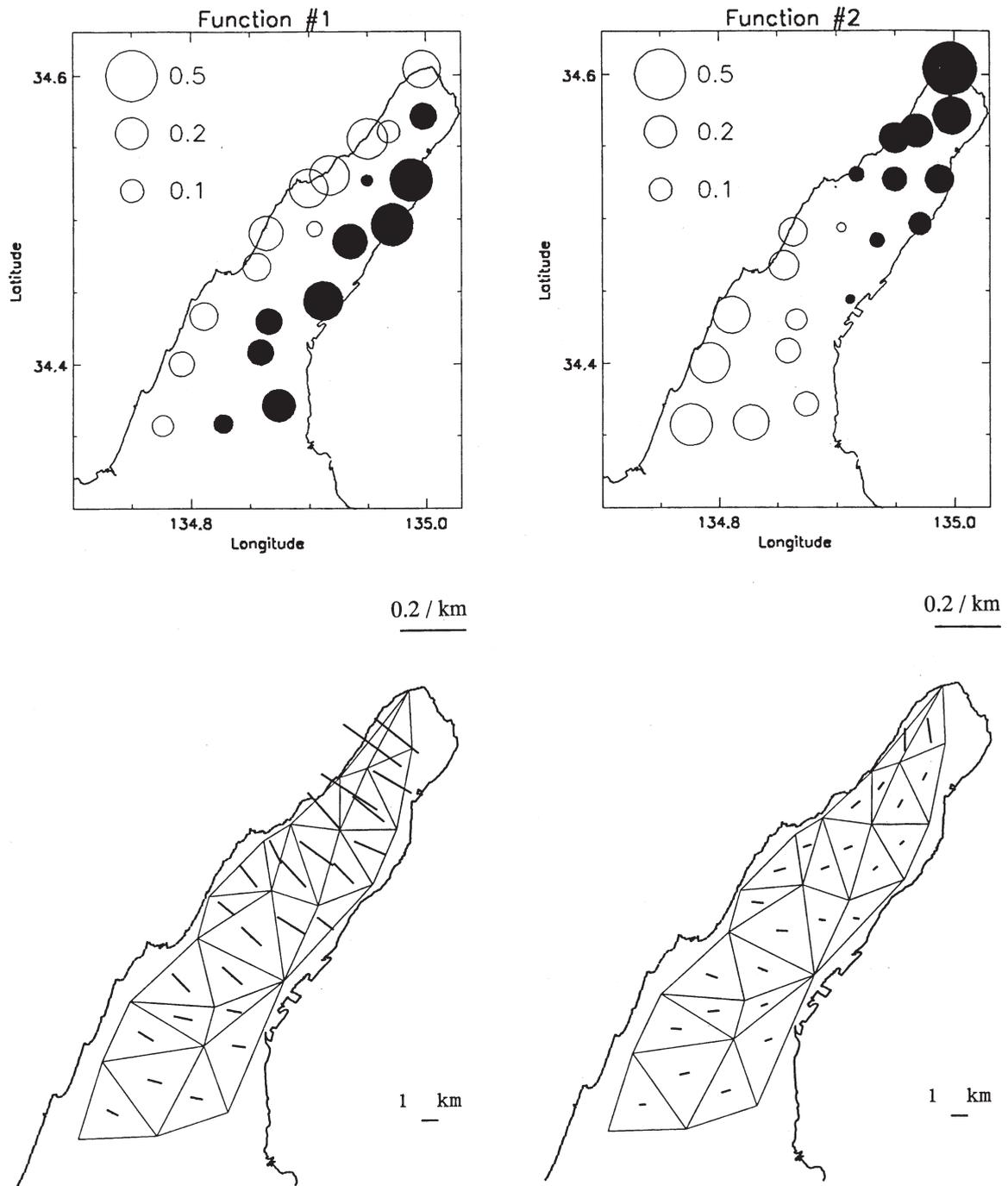


図2.1.26 1998年1月15日00:00~11:59UTの地電流毎秒値により求めた主成分固有ベクトル (山田他, 2000). あらかじめフィルター①を使用している。(左上) 第1主成分。(右上) 第2主成分。(左下) (右下) それぞれ第1, 第2主成分の規格化された電位分布から電場分布を求めたもの。

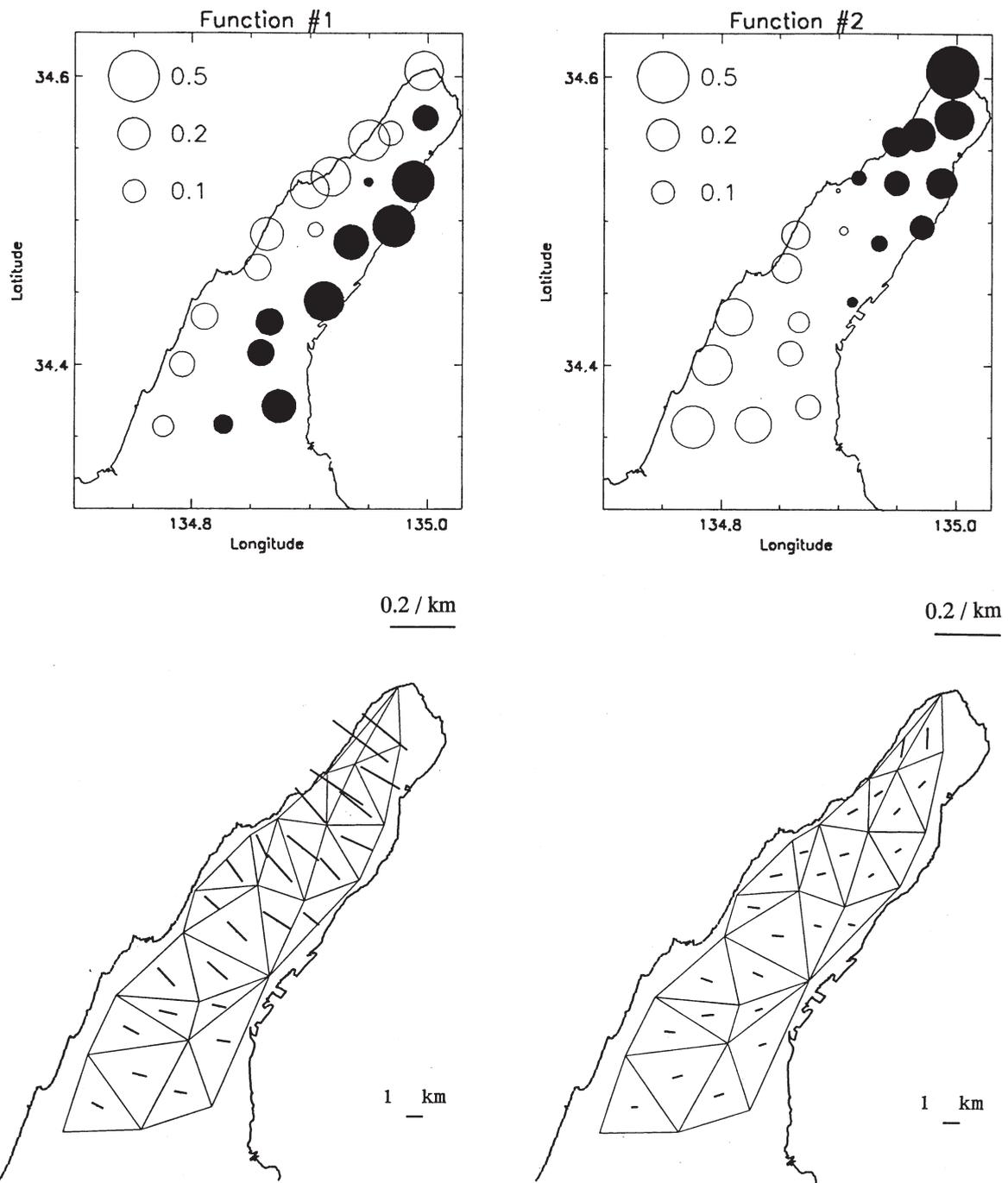


図2.1.27 図2.1.26と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター②を使用している.

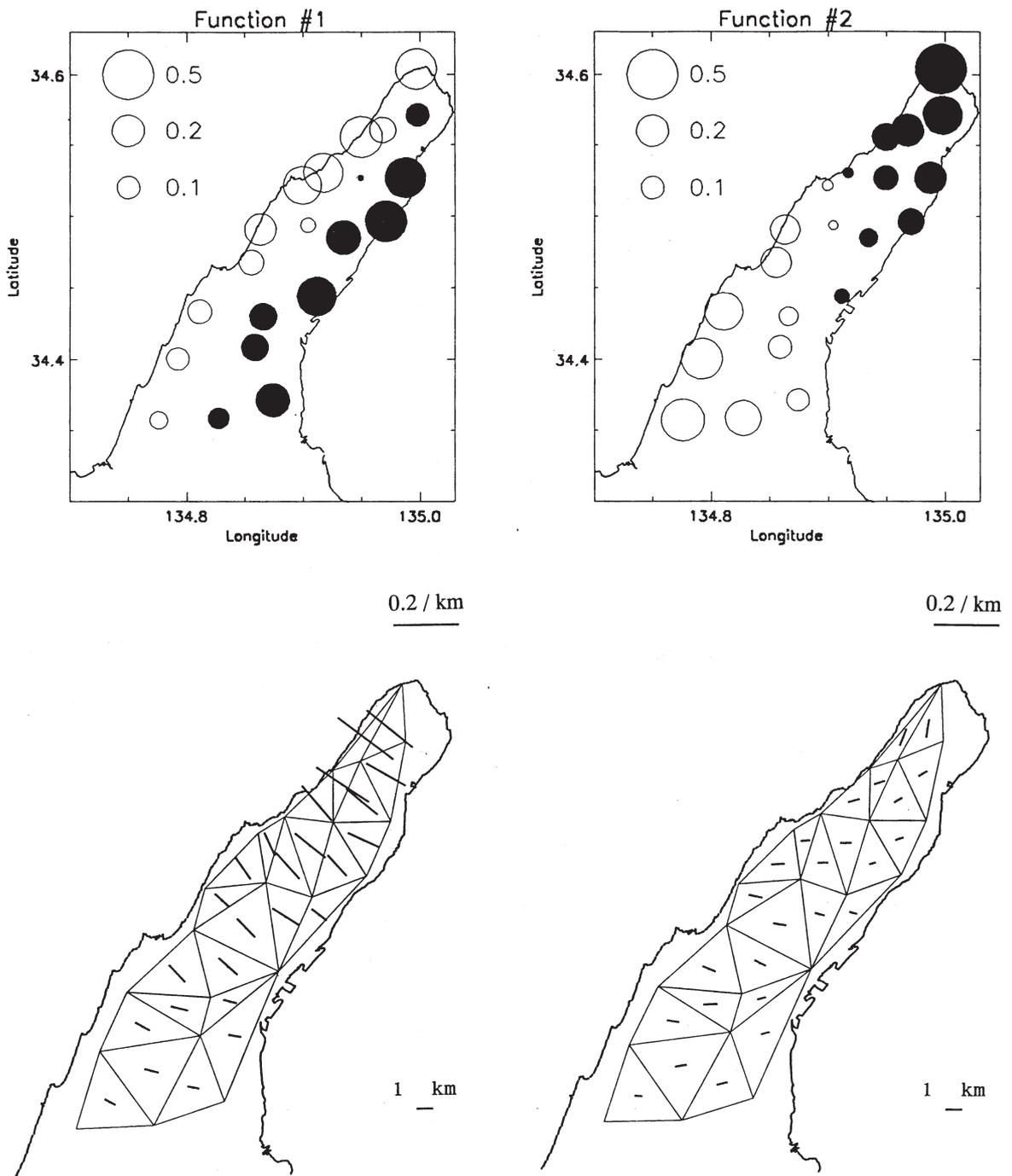


図2.1.28 図2.1.26と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター③を使用している.

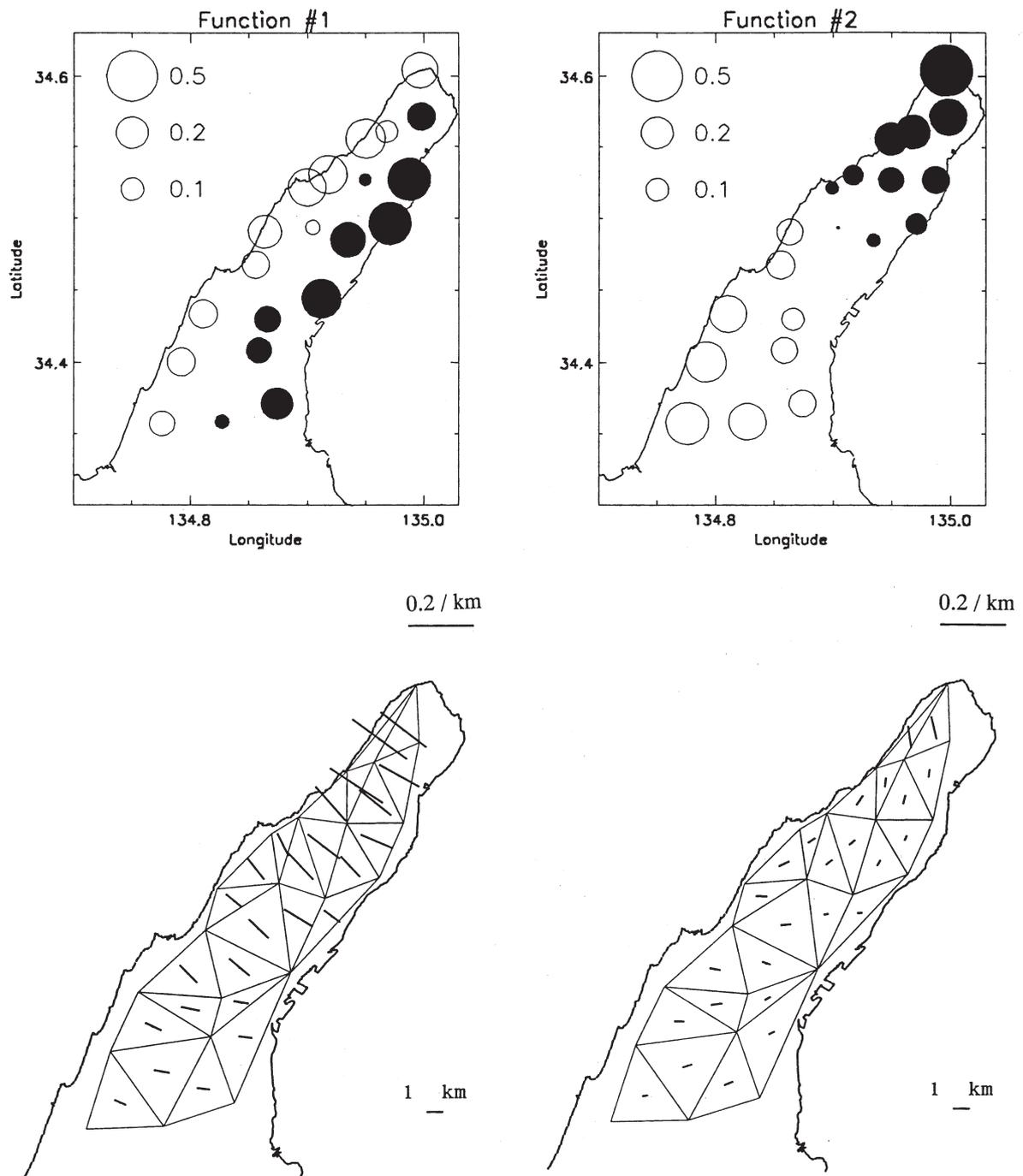


図2.1.29 図2.1.26と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター④を使用している.

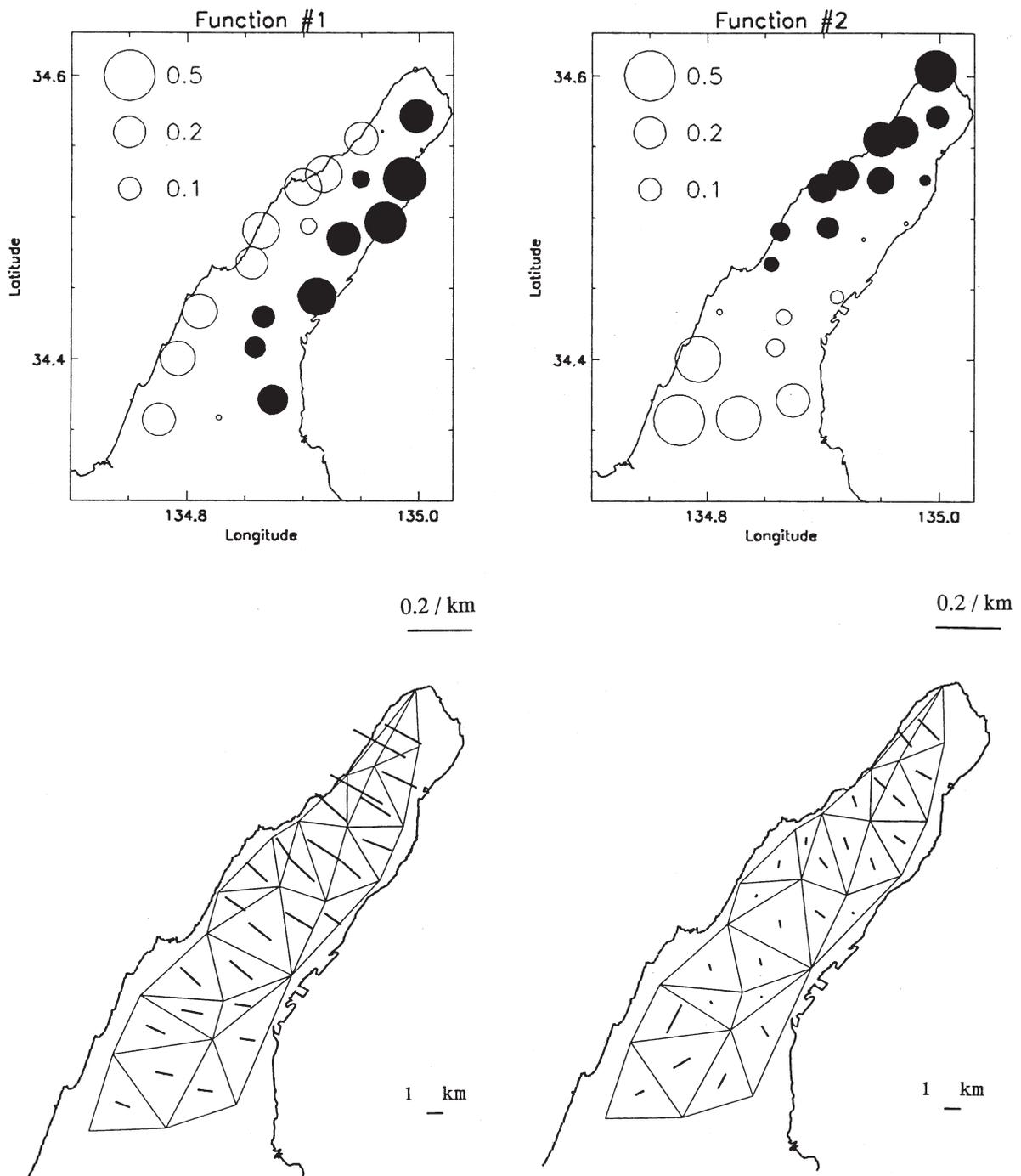


図2.1.30 1998年1月15日17:00~18:59UTの地電流毎秒値により求めた主成分固有ベクトル (山田他, 2000). あらかじめフィルター①を使用している. (左上) 第1主成分. (右上) 第2主成分. (左下) (右下) それぞれ第1, 第2主成分の規格化された電位分布から電場分布を求めたもの.

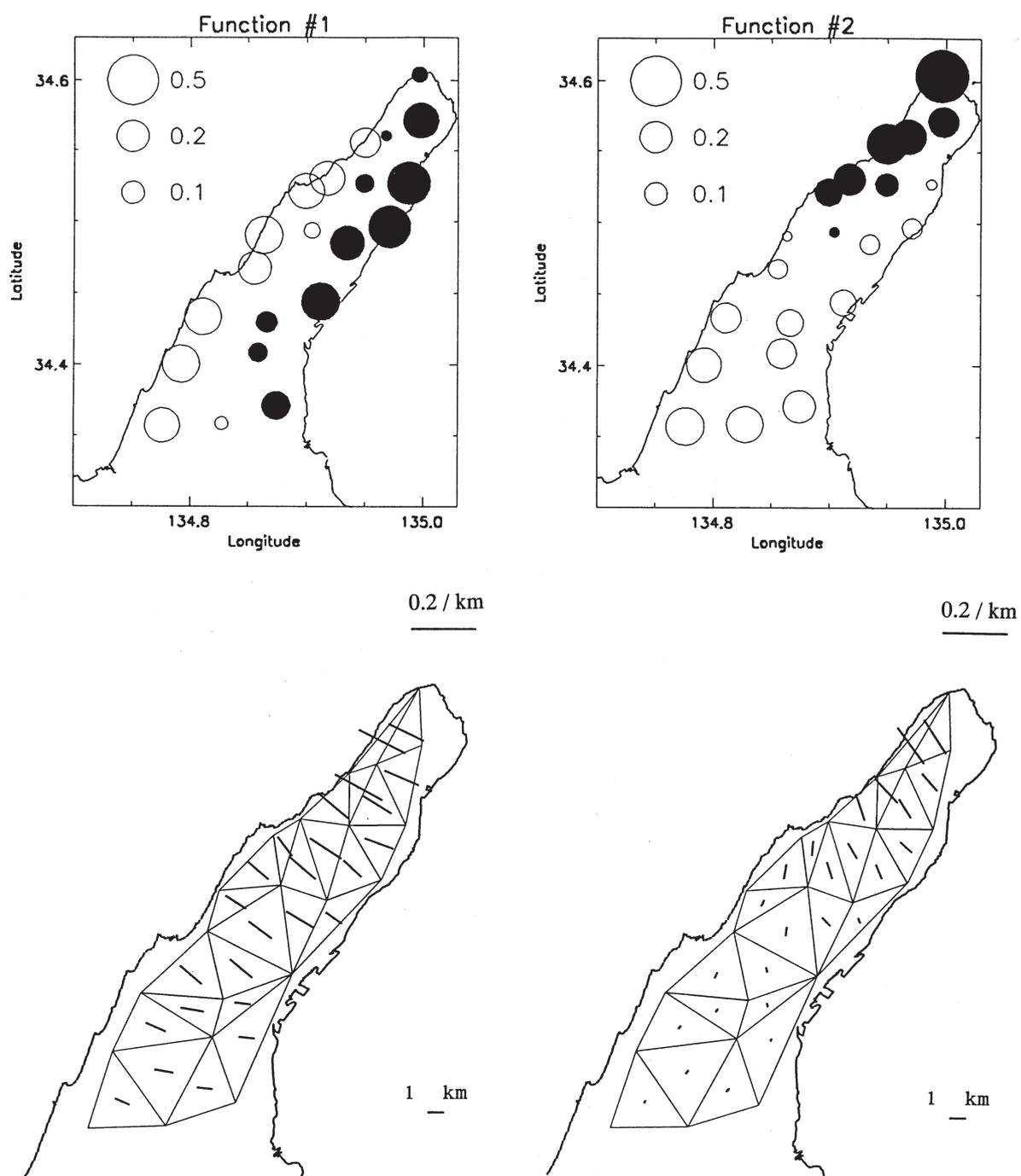


図2.1.31 図2.1.30と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター②を使用している.

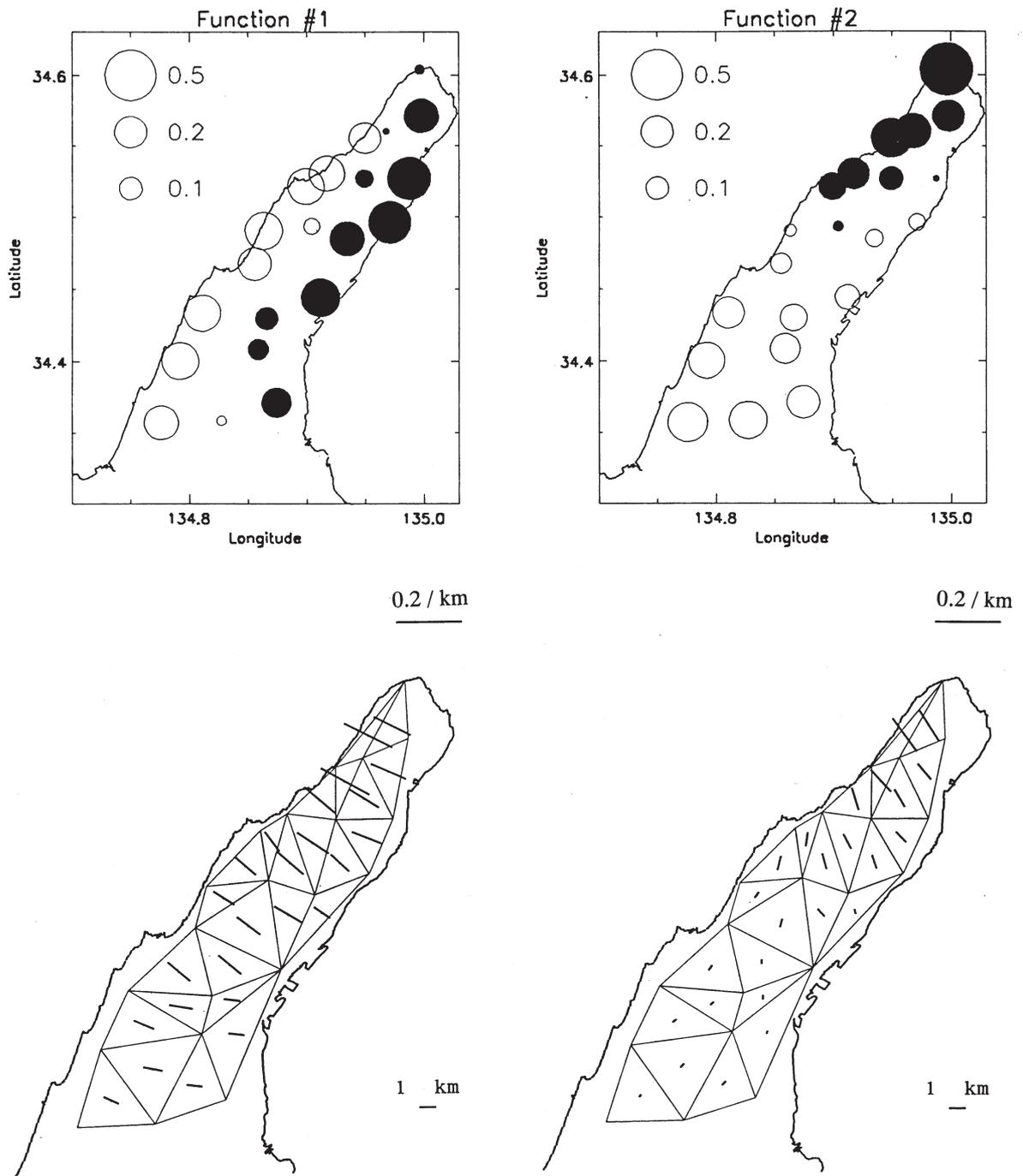


図2.1.32 図2.1.30と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター③を使用している.

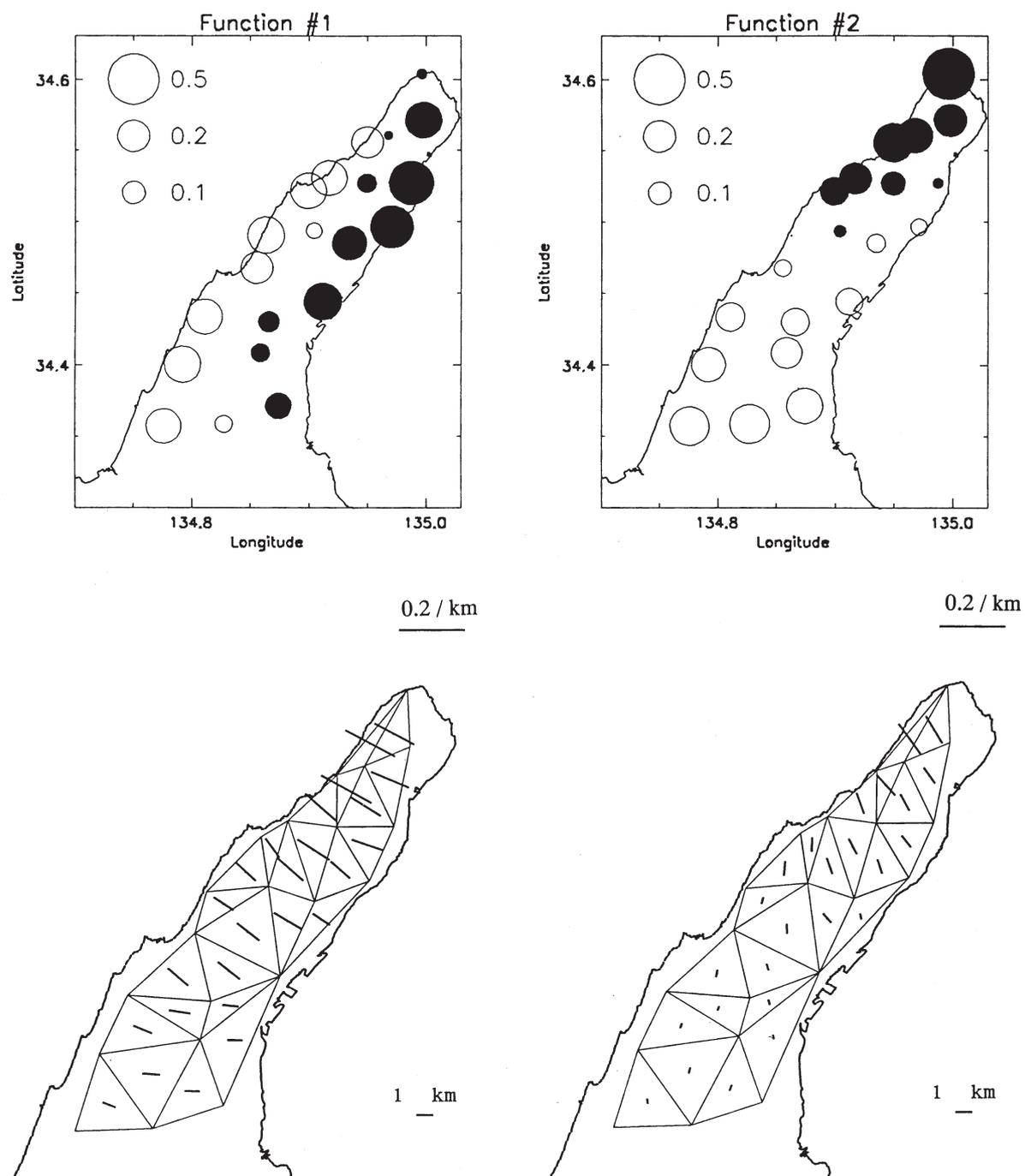


図2.1.33 図2.1.30と同様 (山田他, 2000). ただしフィルター④を使用している.

の大きさが昼と夜とでは著しく異なっていることがわかる。第1主成分は電場パターンでみると北東から南西方向へ徐々に変動量が小さくなっていくが、夜はその傾向が小さくなっていることが、どの周期帯で見ても明瞭である。一方第2主成分についても電場分布が昼と夜とで大きく異なっている。昼の場合は北端部では電場変動はほぼ南北方向であるが、観測域の中部以南では北東-南西方向となっている。それに対して夜の結果は全域にわたって南北方向か北西-南東方向の変動を表している。

図2.1.34はそれぞれの主成分分析結果から第1, 2主成分の固有値とその寄与率を、昼夜別, 周期帯別にまとめたものである。これによると固有値は昼間に比べて深夜は劇的に小さくなるが、両主成分の寄与率はさほど変化がない。ただし $T < 40$ 秒の深夜の結果では第1主成分の寄与率が昼間の場合に比べてかなり小さくなっており、これは主に第3主成分以降の主成分の寄与が増えることによる(第3主成分の寄与率は昼間が1%であるのに対して、深夜は6%)。従って深夜の短周期のノイズの空間分布は概ね昼間と変わらないものの、もっと空間スケールの小さな変動の割合が相対的に大きくなると考えられる。前に述べたように各主成分スコアのパワースペクトルに数種類の卓越周期が存在するが、それによるとそれらの周期は8秒以下であり、しかも主成分

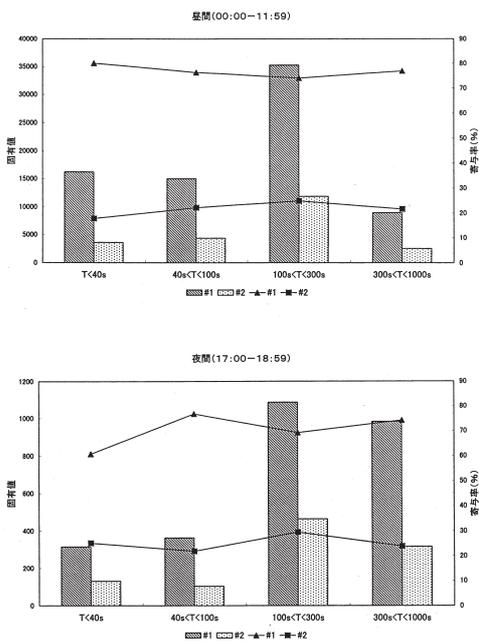


図2.1.34 1998年1月15日の地電流毎秒値によって得られた第1, 第2主成分固有値の大きさ(棒グラフ, 左軸), とそれぞれの寄与率(折れ線グラフ, 右軸)を使用したフィルター毎に表示した。(上) 00:00~11:59UTのデータによる結果。(下) 17:00~18:59UTのデータによる結果。(山田他, 2000)

毎にその周期が異なっている。従って各々の卓越周期の地電位分布は互いに異なっているということであり、今回の短周期についての結果はこれらの卓越周期成分の存在が原因である可能性がある。

最も長周期(300秒 $<T < 1000$ 秒)についての結果を昼・夜で比較すると、昼間は他の周期帯の固有値に比べて小さいのに対して、深夜はこの周期帯の寄与がかなり大きくなっていることがわかる。これはノイズのパワーのうち長周期成分の占める割合が夜間は大きくなるということを示しているが、毎時値の変動が昼間は小さく深夜に大きい(高山他, 2000)ということと符合する結果である。

2. 1. 2. 3 地磁気ノイズの空間分布

地電流ノイズの空間的な分布はこれまでの調査でおおよそその特徴がわかってきているが、その原因をつきとめる上で磁場データとの比較は不可欠である。しかし3成分磁場測定は観測域内では大谷で行われていないため、磁場ノイズの空間分布についてはなかなか知ることができなかった。そこで磁場ノイズの分布に関する情報を得るため、1999年11月17~19日に淡路島の岩屋, 奥畑, 鳥飼浦において、地磁気3成分連続観測(1秒サンプリング)を実施した。観測には1台のフラックスゲート磁力計(EM109)を順次移動させて行ったため、各地点での観測時刻は異なっている。岩屋, 奥畑, 鳥飼浦での測定時間は、それぞれ約17, 5, 6時間であった。この節ではそのデータを用いて磁場ノイズの空間分布について調べた結果を述べる。

まず今回観測した磁場変化と、それと同時刻の大谷観測点における3成分磁場変化とを概観しよう。各観測場所をあらためて図2.1.35に示す。岩屋, 奥畑, 鳥飼浦はいずれも全磁力の連続観測点で、屋外

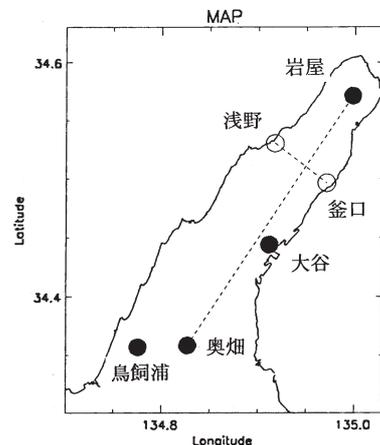


図2.1.35 1999年11月に実施した、淡路島での地磁気3成分ノイズ調査観測を行った場所(黒丸, ただし大谷は除く)(山田他, 2000)。

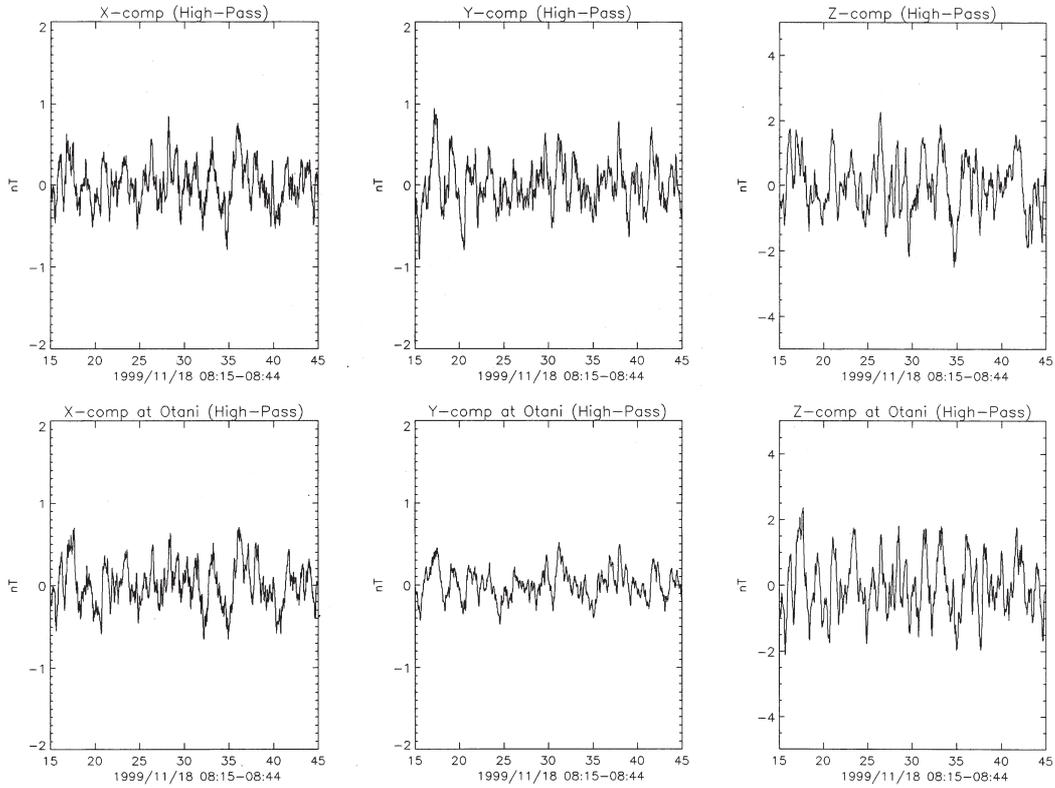


図2.1.36 (上段) 1999年11月18日08:15~08:44UTの岩屋で測定した地磁気3成分毎秒値(左から北向き, 東向き, 下向き成分)(山田他, 2000). (下段) 同時刻の大谷観測点の地磁気3成分毎秒値. いずれも長周期成分を除いている.

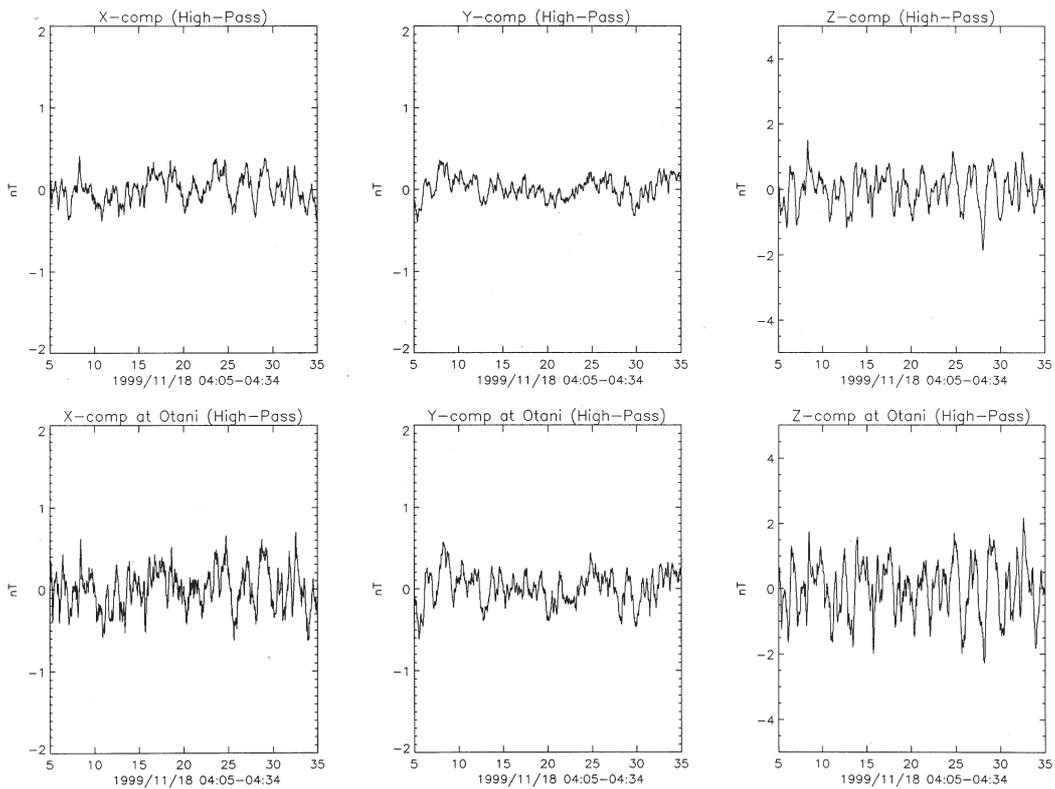


図2.1.37 (上段) 1999年11月18日04:05~04:34UTの奥畑で測定した地磁気3成分毎秒値(左から北向き, 東向き, 下向き成分)(山田他, 2000). (下段) 同時刻の大谷観測点の地磁気3成分毎秒値. いずれも長周期成分を除いている.

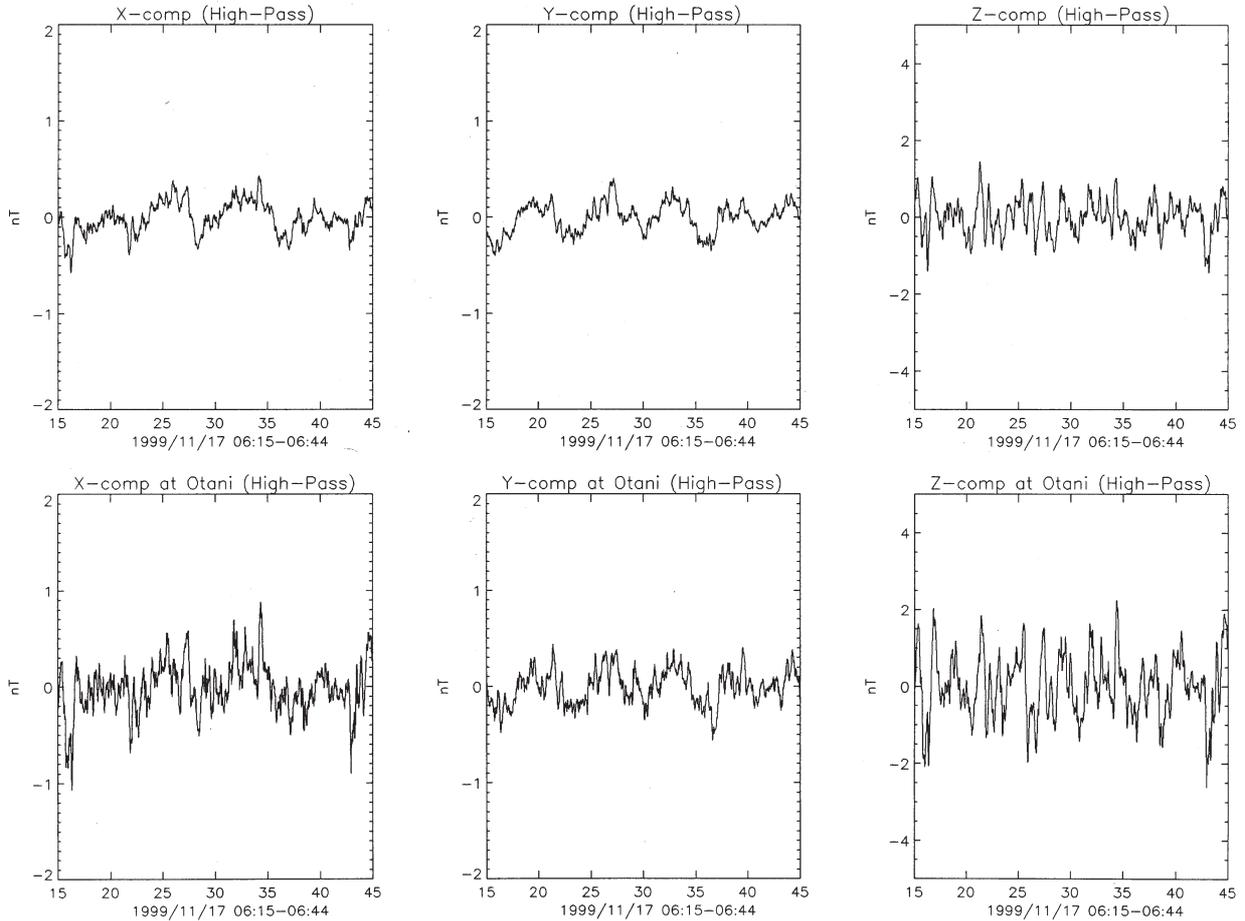


図2.1.38 (上段) 1999年11月17日06:15~06:44UTの鳥飼浦で測定した地磁気3成分毎秒値(左から北向き, 東向き, 下向き成分)(山田他, 2000)。(下段) 同時刻の大谷観測点の地磁気3成分毎秒値。いずれも長周期成分を除いている。

筐体(全磁力測定装置を収納した筐体)を設置している敷地内にフラックスゲート磁力計の検出部を埋設して測定した。図2.1.36~図2.1.38はそれぞれ岩屋, 奥畑, 鳥飼浦での30分間の3成分(北向き: X成分, 東向き: Y成分, 下向き: Z成分)毎秒値の波形をプロットしたものである。また比較のため同時刻の大谷観測点の毎秒値プロットも示した。これらのプロットでは時定数360秒のフィルターで長周期成分を取り除いている。これらの波形には1nT~数nT程度の振幅の不規則な変動が見られるが, 柿岡の毎秒値には対応する変動は無く(図は省略)変動のほとんどが人工擾乱であろうと思われる。なお, ここでいうX, Y成分とは地理上の北を基準とした通常の設定ではなく, 各々の観測点におけるFMを設置するときに決めたおおよその主磁場の水平分力方向とそれに直交する東向き方向である。従って厳密には地点毎に成分の指す方向は異なる。

これらの図を見ると, 振幅の違いはあるものの, どの地点の波形も大谷観測点の波形とよく似てい

る。また山田(1998)が指摘したように, 各地点でX成分とZ成分の波形が似ていることもわかる。また大谷観測点と同様に, 振幅はどの地点もZ成分が最も大きい。このように大まかに言うと大谷で見られる地磁気ノイズは島の北部や中部でも同じように現れているようである。

前節で見たように, 地電位の空間分布の主成分分析から得た第1主成分の振幅変動と大谷の磁場の変動とは非常によく相関している。そこでこの現地観測のデータと, 同期間の大谷の磁場データとを使って, このことについてあらためて調べてみる。まず磁場データと比較するための地電流データから, 広域的な変化だけを主成分分析法によって抽出しておく。図2.1.39は1999年11月18日の00:00~11:59UTのデータを使って, 山田(1998)と同じ方法を用いて求めた第1, 2主成分固有ベクトルである。夜間のデータを使用しなかったのは, 前節で述べたような昼・夜のパターンの違いがあることと, 今回測定場所のうちの2地点は昼間のデータしかなく, 比較を

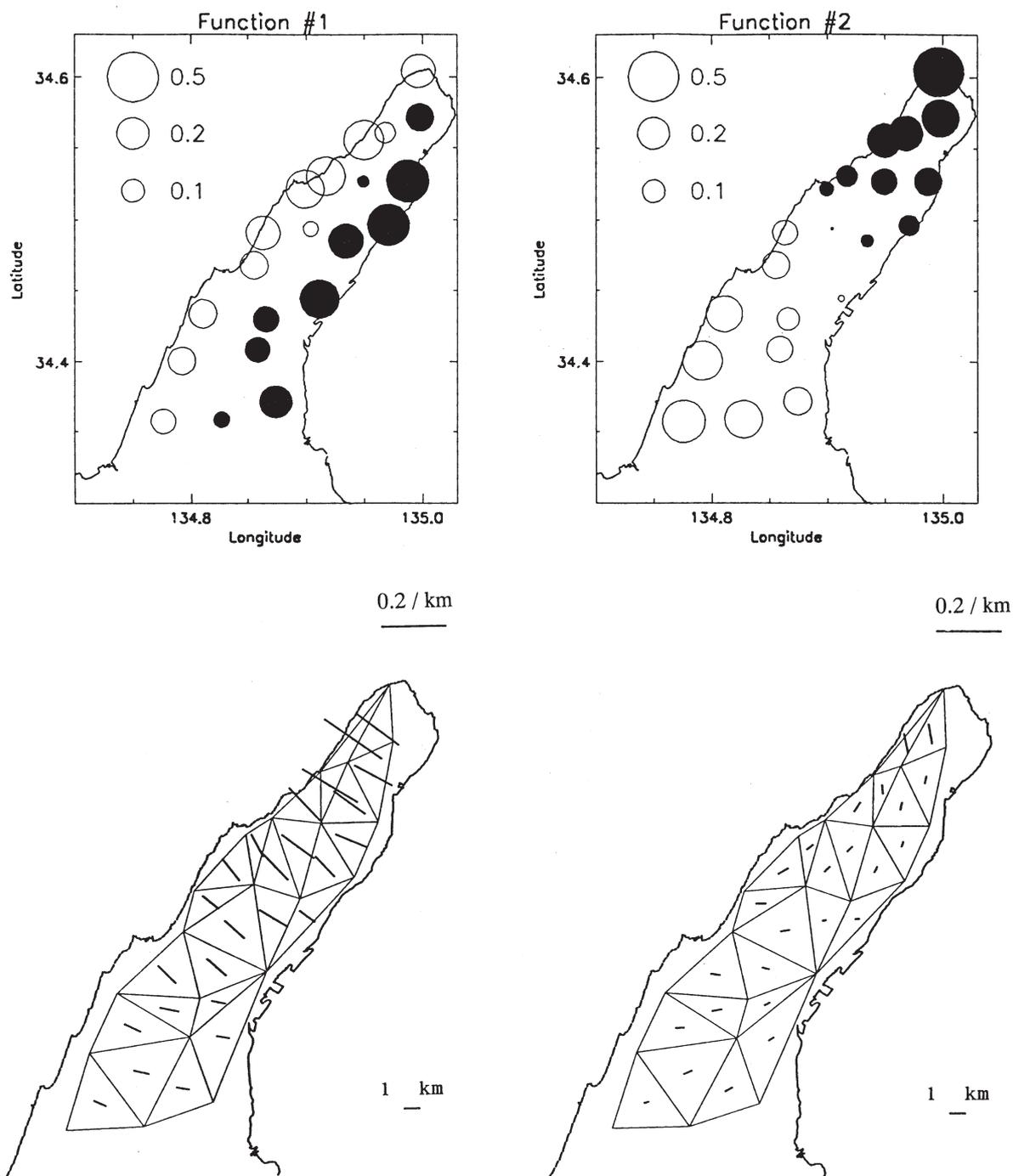


図2.1.39 1999年11月18日00:00~11:59UTの地電流毎秒データを使用して求めた地電位分布の第1主成分（左上）、第2主成分（右上）固有ベクトルと、それぞれを電場に変換したもの（左下、右下）（山田他，2000）。

昼間の条件で行うためである。またここでは長周期側1000秒、短周期側100秒の時定数のバンドパスフ

ィルターによって長周期成分、短周期成分を取り除いた。短周期側を解析から除いたのは、今回使用し

た磁力計と淡路島で常時測定している地電流や地磁気3成分（大谷）との周波数特性が短周期帯で互いに異なるおそれがあること、及び今回の地磁気現地観測の時計精度がよくない（収録用のPCの内蔵時計を利用）ため時刻がずれている可能性があることが理由である。使用したフィルターにはそのような違いがあるものの、図で示した通り固有ベクトルのパターンは山田（1998）で得られたものとほとんど同じである。また主成分寄与率は第1, 2主成分がそれぞれ78%, 20%となり、これについてもほぼ山田（1998）と同じ値となった。

次に、こうして得た主成分固有ベクトルに対して、

11月17日～19日の第1, 2主成分スコアを式2.1.7によって1秒毎に計算した（ここでは便宜上記号を E_1, E_2 とする）。そして大谷, 岩屋, 奥畑, 鳥飼浦の地磁気1秒値 B との回帰係数を成分毎に求めた。すなわち、成分 $i=X', Y', Z$ について、

$$B_i(t_n) = \alpha_{i1}E_1(t_n) + \alpha_{i2}E_2(t_n) + \beta_i B_0(t_n) + \gamma_i \quad (n=0,1,\dots,N) \quad (2.1.8)$$

という関係を仮定し、係数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma$ を求めた。ここで B_0 は自然の磁場変化を取り除くための参

地点	日・時	成分	$\alpha_1(10^{-4})$	$\alpha_2(10^{-4})$	β	$\gamma(10^{-3})$	R	ε
大谷	Nov. 18 08:00-59	X'	-8.33 (0.06)	-6.07 (0.15)	0.892 (0.004)	2.89 (1.01)	0.97	0.060
		Y'	-3.95 (0.08)	2.84 (0.19)	0.938 (0.009)	2.41 (1.30)	0.90	0.078
		Z	-28.35 (0.14)	-17.28 (0.36)	-0.130 (0.014)	-1.78 (2.44)	0.96	0.146
		X'	-7.22 (0.08)	-8.20 (0.19)	0.917 (0.006)	-13.54 (1.30)	0.96	0.078
		Y'	-7.85 (0.08)	7.69 (0.20)	0.900 (0.009)	-12.31 (1.34)	0.94	0.081
		Z	-24.81 (0.37)	-11.51 (0.94)	0.111 (0.037)	-23.50 (6.39)	0.75	0.383
奥畑	Nov. 18 01:45-02:29	X'	-3.84 (0.13)	-0.31 (0.26)	0.973 (0.015)	-0.27 (2.03)	0.88	0.105
		Y'	-3.13 (0.22)	5.30 (0.42)	1.242 (0.023)	-57.22 (3.36)	0.89	0.174
		Z	-16.35 (0.20)	-3.62 (0.38)	0.125 (0.022)	11.45 (3.02)	0.85	0.157
		X'	-2.96 (0.08)	0.49 (0.16)	0.784 (0.007)	68.66 (1.26)	0.89	0.075
		Y'	-1.74 (0.11)	1.14 (0.21)	1.076 (0.009)	-27.32 (1.71)	0.89	0.103
		Z	-18.92 (0.24)	8.93 (0.45)	-0.123 (0.031)	102.01 (3.60)	0.81	0.216
鳥飼浦	Nov. 17 02:00-59	X'	-2.96 (0.08)	0.49 (0.16)	0.784 (0.007)	68.66 (1.26)	0.89	0.075
		Y'	-1.74 (0.11)	1.14 (0.21)	1.076 (0.009)	-27.32 (1.71)	0.89	0.103
		Z	-18.92 (0.24)	8.93 (0.45)	-0.123 (0.031)	102.01 (3.60)	0.81	0.216

表2.1.3 大谷, 岩屋, 奥畑, 鳥飼浦での地磁気3成分を、電位分布の第1主成分、第2主成分のスコアと柿岡の当該成分のデータとを説明変数として回帰計算した結果。 $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ はそれぞれの回帰係数、 γ は定数項、 R, ε は相関係数と残差、また各回帰係数の下の括弧内の数値は、各々の回帰係数についての標準偏差の推定量（山田他, 2000）。

照データで、柿岡の1秒値を用いた。

表2.1.3はこうして得られた係数をまとめたものである。計算では適当な1時間を選んでその間の3600個のデータを使って計算した（ただし奥畑観測点に

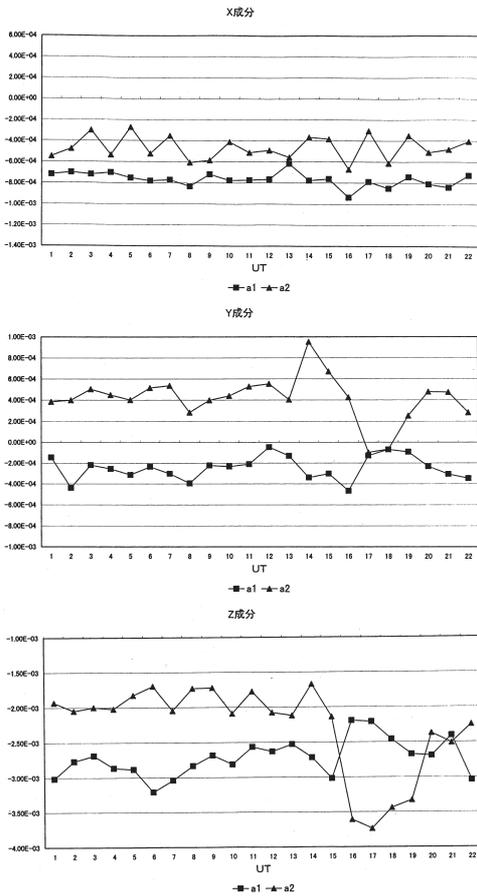


図2.1.40 1999年11月18日の1時～22時まで1時間毎に、大谷の3成分磁場変動と地電位分布の第1, 2主成分スコアとの重回帰係数を求めたもの（山田他, 2000）。上, 中, 下図がそれぞれX', Y', Z成分の結果。

ついては、車輛による人工擾乱のため連続した1時間のデータを使用できなかった)。また各地点の磁場の値についても、地電流データと同様にあらかじめ周期1000秒と100秒を時定数とするフィルターをかけて、長・短周期成分を落としてから回帰係数を計算している。ここでは各地点の磁場の変化と、得られた回帰係数によって得られた近似式2.1.8との間の相関係数 (R : 重相関係数) と、残差 (ϵ) も示している。

こうして得られたそれぞれの回帰係数がどの程度の信頼性があるかを見るため、大谷の3成分について時間毎に独立に係数を求めてみた。図2.1.40には18日の1時～22時まで1時間毎に回帰係数を求めたものを示している。これによるとY', Z成分については夜間14時～19時頃まで係数の変動が大きい。この傾向は特に第2主成分に顕著である。これは前節で見たように第2主成分のパターン自体が昼と夜とで異なることに起因するのではないかと考えられる。

表2.1.3によるとまず第1主成分, 第2主成分ともに、Z成分の変動がX', Y成分に比べてどの地点とも大きいことがわかる。またY成分は第1主成分との回帰係数は小さいが、第2主成分については卓越している。また成分毎の回帰係数の符号は地点が違ってほぼ同じであることから、磁場変化の方向は地点間でだいたい同じであるということがわかる。このような特徴をさらにわかりやすく示したものが図2.1.41である。式2.1.8で得られたのは磁場と地電流主成分スコアとの回帰係数であるが、主成分スコアでは実際にどれくらいの地電位差なのかがわかり難いため、ここでは第1主成分における浅野-釜口間の電位差、第2主成分における奥畑-岩屋間（図

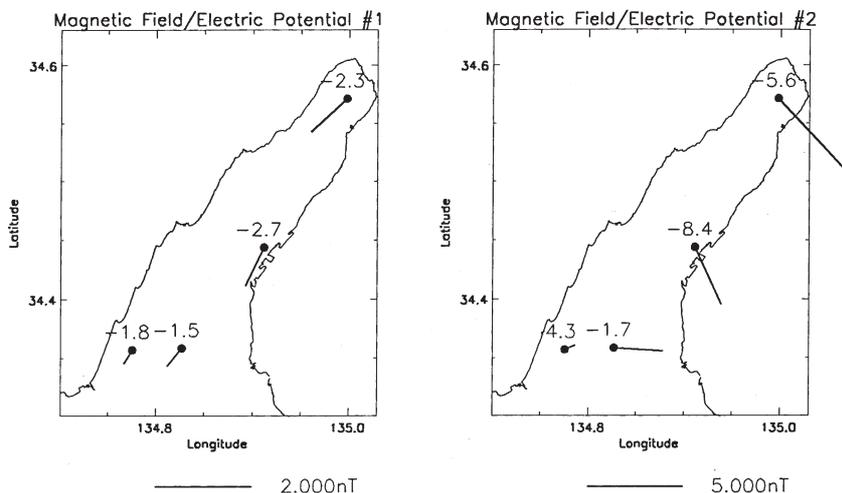


図2.1.41 表2.1.3の回帰係数を電位傾度100 mV/kmあたりに換算して表示したもの（山田他, 2000）。ベクトルは磁場の水平ベクトルを、数値は鉛直成分を表す。左図は第1主成分との回帰係数、右図は第2主成分との回帰係数。

2.1.35参照)の電位差で規格化して、それらの電位差100mV/kmあたりの磁場の変化量に換算して地図上に示したものである。

これによると、まず第1主成分の電場変動に対応する磁場変化は、電場が南東方向の場合には水平磁場は南西方向へ変化する。また鉛直磁場はどの地点も上向き変化であることがわかる。一方第2主成分の電場変動が北東方向の場合には、岩屋、大谷は南東方向の水平磁場変化となり、奥畑はほぼ東向き、鳥飼浦は水平磁場はほとんど0となる。鉛直磁場については岩屋、大谷は上向きに大きな値をとるのに対して奥畑はかなり小さく、鳥飼浦は逆に下向き変化となっている。

もしこの磁場が地中の電場によって流れる電流によって生じているのであれば、上記の結果で求まる電場と磁場の変動量の比を用いて、おおざっぱに電気伝導度を見積もることができる。第1主成分についての結果(水平電場(E)100mV/kmあたり、水平磁場(B)約1nT)を使うと、一様な媒質の場合について、

$$\Sigma = \frac{2B}{\mu E} \approx 16S \quad (2.1.9)$$

となる。ここで Σ は鉛直方向に積分した電気伝導度であり、電流の流れる層の厚みが例えば100m、1000mの場合に電気伝導度はそれぞれ0.16S/m、0.016S/mとなり、不自然な値ではない。地上で観測されている磁場ノイズが伝導電流によって生じると仮定したモデル計算の詳細については次節で述べる。第2主成分については単位電場あたりの磁場の値が第1主成分よりも大きくなっており、第1主成分の結果とは一致していない。また第1主成分と違って磁場の向きがその場所の電場の向きと必ずしも直交しない。このことは第1主成分と第2主成分とで関連する磁場の発生メカニズムが異なることを示唆している。

2. 1. 2. 4 定常電流モデルによる地電位分布シミュレーション

これまでの結果でわかるように、我々が淡路島で観測している地磁気・地電流データのノイズは、そのパワーの大部分が広域的な変動に集中している。従ってノイズ源は島内ではなく島外(対岸の陸域)にあるのではないかと推測される。そのノイズ源についての情報を得ることは効果的にノイズ除去を行う上で重要であるが、特にノイズがどのような経路・メカニズムで淡路島内まで伝搬しているかは興味深い問題であると言える。ここではそれを知る手

がかりとするため、最も単純である定常モデルに基づいた数値計算を行って、観測結果との比較を行った。

まず計算方法について説明する。主成分分析の結果における第1主成分に対応する電場分布(図2.1.26~図2.1.29)でわかるように、淡路島での電場ノイズ分布は第1近似としては、観測領域内ではほぼ一様な北西-南東方向であり、ノイズ源は淡路島外の比較的遠方にあることが推定される。そこで東西方向、あるいは南北方向の一樣電場を仮想的に淡路島の無限遠から与えた場合、淡路島とその周囲の電気伝導度分布によってその一樣電場がどのように変形を受けるか、観測されるノイズ分布の細部がどの程度まで再現されるのかを調べるため、電位分布の数値計算を行った。ここでは与える一樣電場は時間変化しないものとし、計算を簡略化するため水平2次元モデルによって求めた。

定常系であるので、電位分布は電流の保存式、

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.1.10)$$

から求めることができる。ここでオームの式、

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla \Phi \quad (2.1.11)$$

より、

$$\nabla^2 \Phi + \frac{\nabla \sigma}{\sigma} \cdot \nabla \Phi = 0 \quad (2.1.12)$$

が得られる。ここで Φ は電位、 σ は電気伝導度である。2次元モデルの場合は、西向き、北向きをそれぞれ x 、 y として、

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{1}{\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{1}{\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (2.1.13)$$

となる。ただしここでの Σ は鉛直方向に積分した電気伝導度(単位S)である。従って問題は、ある領域において電気伝導度 Σ の分布を与えて、適当な境界条件のもとで式2.1.13を Φ について解くことに帰着する。

計算する領域は淡路島を含む図2.1.42のような長方形領域(南北250km、東西125km)とした。興味のあるのは淡路島とその近傍の地域であり、その地域についての結果が境界条件の影響を受けないように、その周りを広くとっている。計算は東西電場と南北電場の場合の2通りについて行った。すなわち

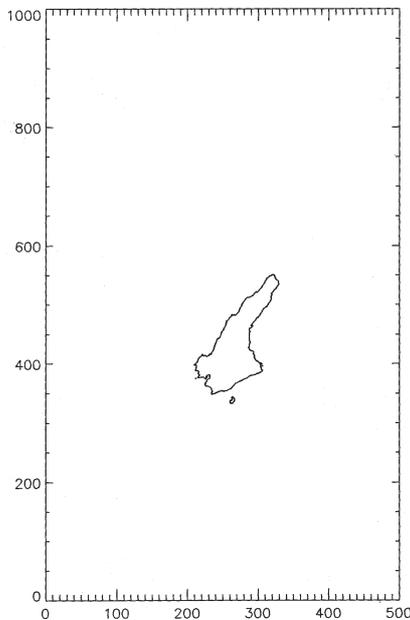


図2.1.42 モデル計算に使用した領域 (山田他, 2000).

それぞれの場合についての境界条件として,

①東向き一様電場の場合

東西両端でそれぞれ電位が一定 (西端+V, 東端-V), 南北両端では電流が流入ししない (南北方向の電位傾度が0)

②北向き一様電場の場合

南北両端でそれぞれ電位が一定 (南端+V, 北端-V), 東西両端では電流が流入ししない (東西方向の電位傾度が0)

とした. ①, ②のいずれの場合も, もし領域内の電気伝導度が一様であれば, 全域に西向き, あるいは北向きに一様電場40mV/kmをつくるような電位差を境界に与えた. 実際の計算においては, 上記の長方形領域に東西, 南北方向に250m間隔の格子点をおき (東西501点, 南北1001点) 電気伝導度の値を各格子点で与え, 式2.1.13を差分方程式に置き換えて, 格子点毎の電位を緩和法によって数値的に求めた. このようにして電位分布が求まるとオームの式2.1.11を用いて鉛直方向に積分した電流密度分布を求めることができる.

次に使用した電気伝導度分布モデルについて説明する. 使用したモデルでは計算領域内には陸地は淡路島しか存在せず, その周りはずべて海と考え, 海域, 陸域の Σ はそれぞれ一様 (それぞれ, 200S,

10S) とした*. ただし実際に電位を計算する上では, このモデルのように伝導度の値がある境界線を境に不連続的にジャンプすると都合が悪い. 電位分布を求める際には, 正確な解を求めるために少しずつ真の値へ近づけていく手法をとったが, その時に伝導度に不連続があると結果が収束するまでに非常に計算時間を要し, 解が求まっても境界付近の電位分布の誤差が大きくなってしまふ. そこで実際の計算では各格子点の Σ について, その点を中心とする7×7点の正方領域での2次元の対数移動平均,

$$\log \tilde{\Sigma}_{ij} = \frac{1}{49} \sum_{k=-3}^3 \sum_{l=-3}^3 \log \Sigma_{i+k, j+l} \quad (2.1.14)$$

を施して, 電気伝導度の跳びをあらかじめ滑らかにしたものを使用した.

図2.1.43に東西電場の場合についての電位分布と, それから計算した電流ベクトル分布の計算結果を示す. 淡路島の遠方から東向き一様電場を与えているため, 淡路島から離れたところでは等電位線は等間隔の南北に平行な線となるが, 島に近づくとつれて海岸線の形状に従って変形し, 沿岸部ではおおよそ海岸線に直交する. 淡路島は海域に比べて低電気伝導度であるため等電位線は淡路島内に集中し, 島の中では海域に比べて電位傾度が非常に大きくなっている. 電流を見ると東向きの電流が淡路島によって遮られることになるので, 島の北端と南端で, 島を迂回するような曲率を持った電流が存在しその領域では電流密度が若干大きくなっている.

このような電流分布が求まると, それから磁場分布を計算することができる. 図2.1.43には東西電場による電流分布から計算した地上磁場分布も示している. ここでの計算はあくまで2次元モデルであり, 求まった電流は鉛直方向に積分したものである. 電流は実際には鉛直方向にある厚みを持って流れているはずであるが, 磁場分布を求める際の計算を簡単にするため, 求めた電流が地表面を無限に薄いシート状に流れているとした. この仮定によって地上の水平磁場ベクトルはその場所の水平電流にのみ依存し, 他の場所の電流からの寄与は無い. 従って図でも明らかなように, 水平磁場ベクトルの方向は水平電流ベクトルを90° 時計回りに回転させたものとなっている. 一方鉛直磁場成分の計算はBiot-Savartの式に従って各地点の電流からの寄与を積分したが, その際の積分は電位を計算した矩形領域内の電流からの寄与についてのみ行い, その領域外の電流

*式2.1.2.13の形からわかるように, 電位分布を求めるためには海, 陸のそれぞれの電気伝導度は必要なく, 両者の比さえ与えればよい. もちろん電位分布から電流を計算するには各領域の電気伝導度の値が必要である.

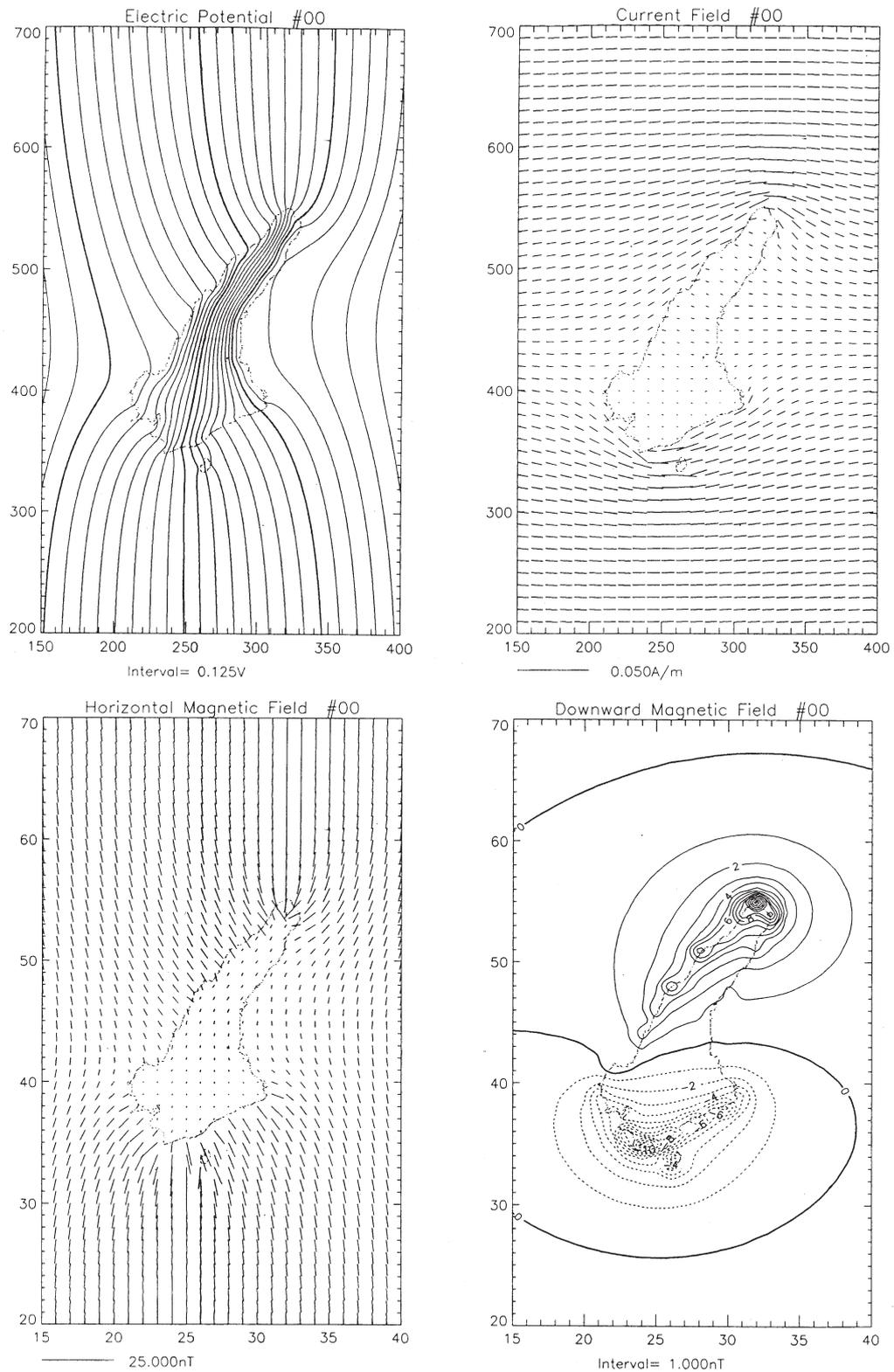


図2.1.43 東西電場を与えたときの計算結果 (山田他, 2000)。(左上) 電位分布。コンターの間隔は0.125 V, 太線は1 V。(右上) 水平電流密度ベクトル分布。(左下) 水平磁場分布。(右下) 鉛直(下向き)磁場分布。実線は正, 波線は負, 太線は0を示す。コンターの間隔は1 nT。

からの寄与は無視した。(これはかなり乱暴な扱いであり、これに伴う誤差が無視できる程度に小さいという保証も無い。ただし領域外の電流は淡路島から見て遠方にあるため、その寄与は島の中の磁場の

分布にはほとんど影響せず島全体の鉛直磁場のオフセットとして現れる。) この図では、鉛直磁場分布は淡路島のほぼ北半分では正、南半分で負となり、しかもその両端で極大となっている。これは上で述

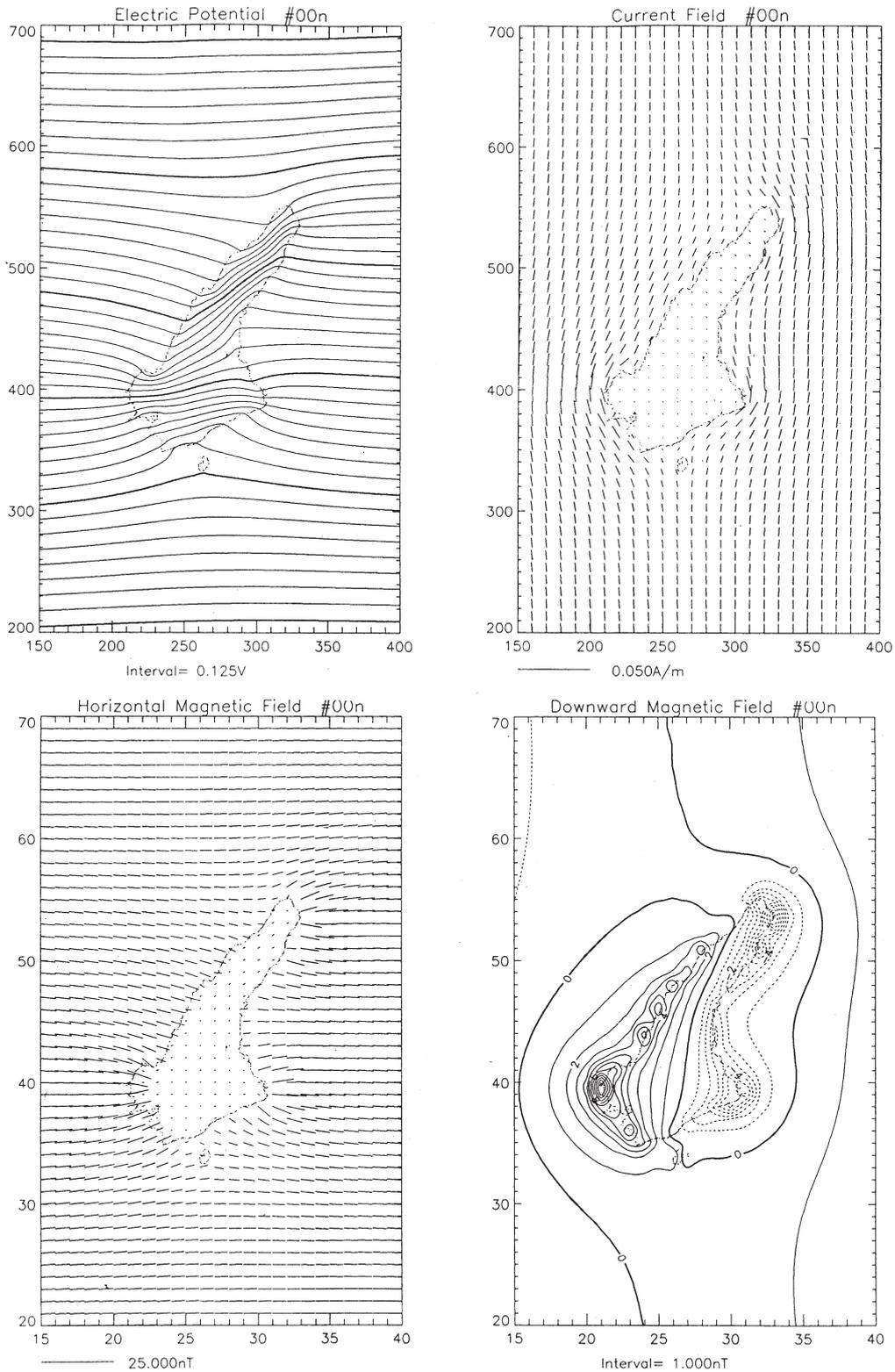


図2.1.44 南北電場を与えたときの計算結果 (山田他, 2000). (左上) 電位分布. コンターの間隔は0.125 V, 太線は1 V. (右上) 水平電流密度ベクトル分布. (左下) 水平磁場分布, (右下) 鉛直 (下向き) 磁場分布. 実線は正, 波線は負, 太線は0を示す. コンターの間隔は1 nT.

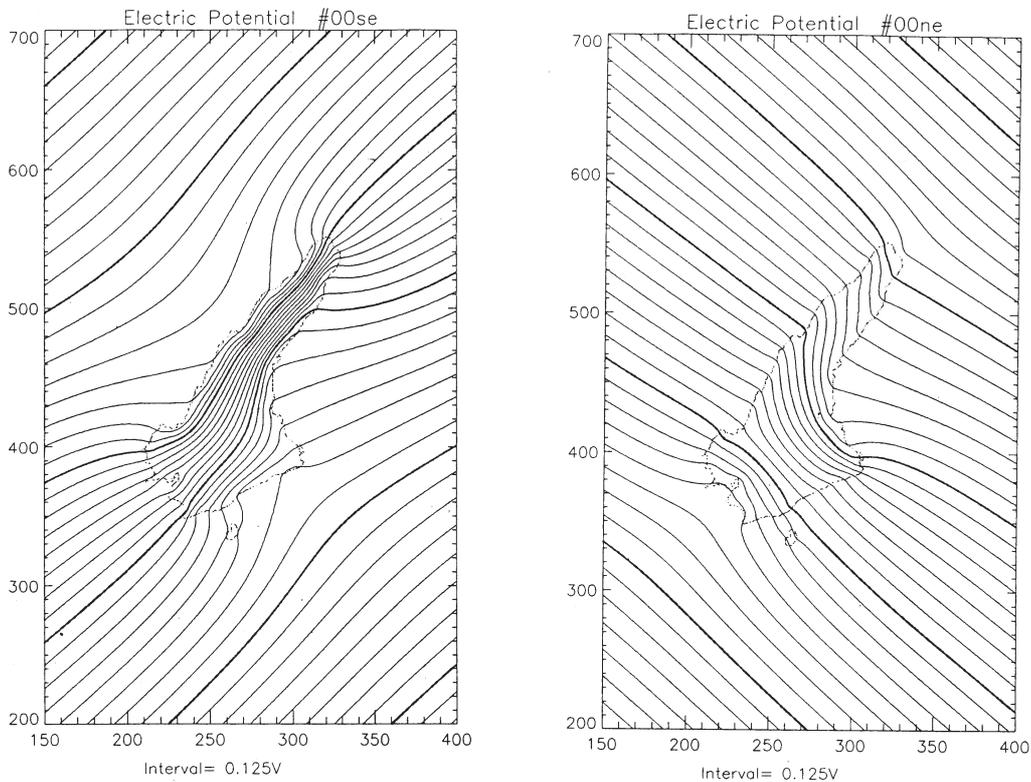


図2.1.45 東西電場と南北電場の計算結果を合成することで求めた、(左)南東方向電場、(右)北東方向電場の場合の電位分布 (山田他, 2000). コンターの間隔は0.125 V, 太線は1 V.

べた島を迂回する電流によって生じていると解釈できる。また淡路島の西岸で小さな正の極値がいくつか見られるが、岬状の地形の所で海岸線に沿って北東方向へ流れる電流が局所的に曲率を持つことによるものである。淡路島内の磁場の大きさを見ると水平磁場ベクトルの大きさは淡路島の北部から南部へ徐々に小さくなっていくが、鉛直成分に比べると場所による違いは大きくない。

次に南北電場を与えた場合の結果を概観しよう。この場合の計算結果が図2.1.44である。与えた電場の大きさは東西電場の計算の場合と同じであるが、淡路島内の電位傾度は東西電場の結果と比べてかなり小さくなっている。また鉛直磁場は島の西海岸沿いの地域で下向き、東海岸沿いの地域で上向きとなっている。これは北向きの電場によって流れる電流が淡路島の東西両側で島を迂回することによって生じる電流の曲率によって説明することができる。

ところで、西向き電場と北向き電場をそれぞれ与えた場合の計算結果が得られたので、両者に適当な重みをつけて加算することによって、任意の方向の一様電場を与えた場合の電位分布を計算することができる。図2.1.45には与える電場が南東方向、北東方向の場合の電位分布を示した。ここでは電場の大きさは西向き、北向きの場合の計算と一致させている。

こうして得られた電位や磁場の分布は、観測とどの程度一致するであろうか。図2.1.46は計算で得られた電位分布から淡路島の観測点の場所での電位を抜き出し、全地点の電位の平均偏差をプロットしたものであり、与える電場の方向が西、北、南東、北東の4つの場合について示している。これらを主成分分析の結果 (図2.1.39) と比較してみると、西、北向き電場の場合の計算結果はうまく観測と一致しないのに対して、南東向きに与えた結果は第1主成分のパターンに、北東向きに与えた結果は第2主成分のパターンに、それぞれよく一致していることがわかる。ただしこの図を高山他 (2000) の用いた三角形網を用いて電場分布に変換して見てみる (図2.1.47) と違いが明瞭となる。第1主成分の電場分布では、淡路島の北端から南西方向に向かって徐々に電場の強さが弱まっていくことが明らかである。それに対して南東電場の計算結果 (図2.1.47左下) でも同様の傾向はあるものの、減衰の程度はかなり小さい。第2主成分については全体の電場の方向、強さの分布がかなり北東向き電場の計算結果とは異なっている。主成分分析による第2主成分の電場分布 (図2.1.39) では島の北端ではほぼ南北方向であり、そこから南西へ向けて徐々に北東-南西方向へ変わっていく。それに対して計算結果 (図2.1.47右下) では、観測域中部以南では電場の方向が観測と比較

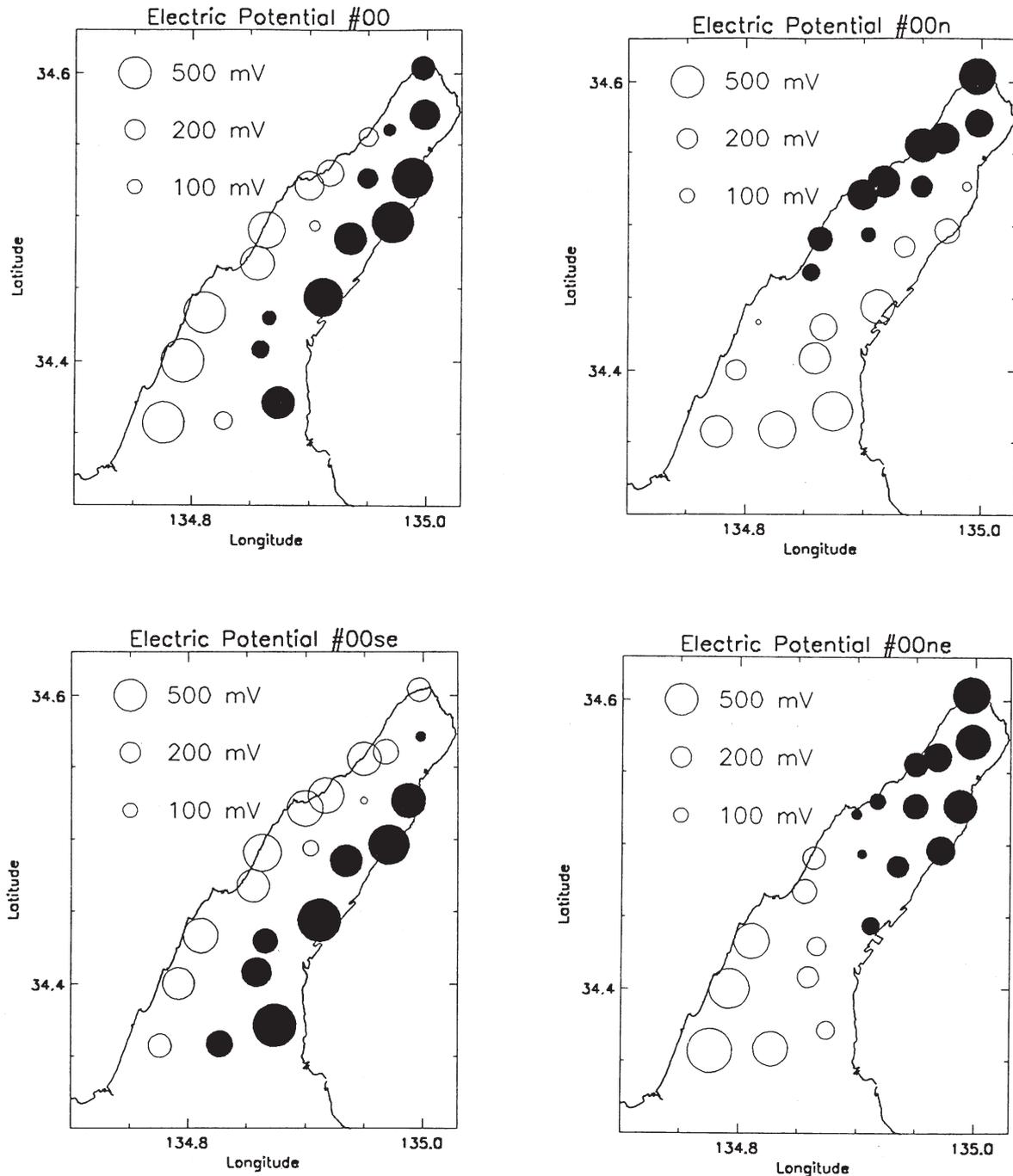


図2.1.46 計算で得た電位分布から淡路島での観測点の値のみをプロットしたもの(山田他, 2000). 全地点(21点)の平均偏差を示している。(左上)東西電場,(右上)南北電場,(左下)南東電場,(右下)北東電場の場合の計算結果.

的によく一致するものの,島の北部の電場の南北成分が小さく,北部から観測域の中部にかけての電場の大きさの変化もほとんど再現されていない.第1主成分,第2主成分ともに南西方向に電場が減衰していくという傾向が計算結果と一致していないという事は,この傾向が淡路島の地形効果(島の東西方向の幅が北部ほど狭くなっていること)では説明が難しく,おそらく計算で与えている電場が一様であるというモデルが正しくないことに起因するという

ことを示している.なおここで示したものは単純に電場が南東方向,北東方向を向いている場合の計算結果である.南東方向の電場モデルについては,その方向を多少変化させても結果はほとんど変わらなかった.北東方向の電場モデルについては,与える電場の方向を変えると島の内部の電場分布はかなり変化する(図は省略).電場を北向きに近づけると島内の電場の向きは南北方向へ変化し,島の北部については観測結果と一致するが,島の中部について

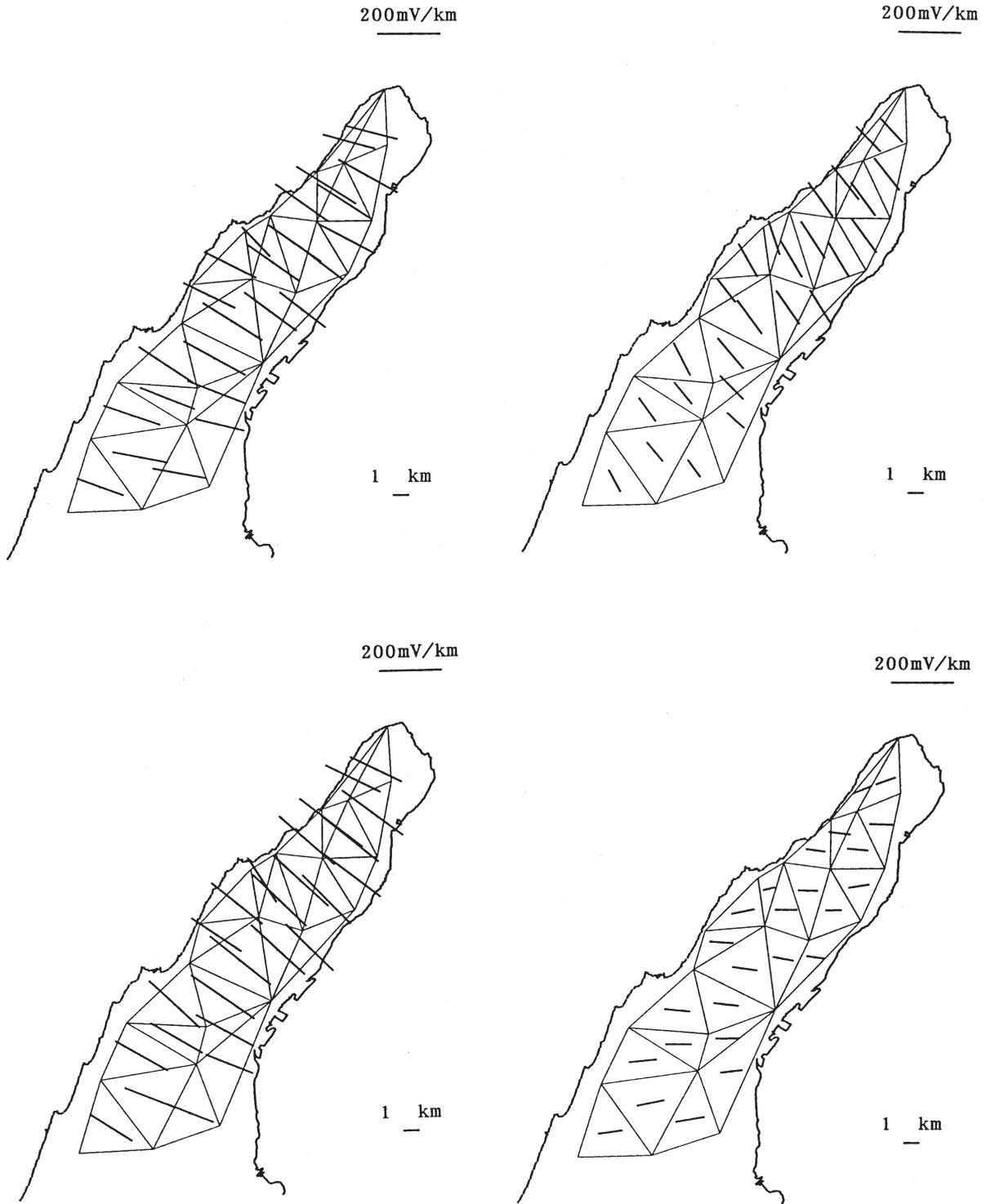


図2.1.47 図2.1.46の電位分布を電場分布にして示したもの(山田他, 2000). (左上) 東西電場, (右上) 南北電場, (左下) 南東電場, (右下) 北東電場の場合の計算結果.

は逆に一致しなくなる. 結局電場の方向を少しずつ変えてみても, 観測域全体の電場分布を観測結果と一致させることはできなかった.

それでは磁場の計算結果は観測値とどの程度一致するだろうか. 上記の南東, 北東電場の場合について, 淡路島内の観測点における磁場を計算したもの

が図2.1.48である. ここでは1999年11月の地磁気成分観測の観測点(岩屋, 大谷, 奥畑, 鳥飼浦)の位置での水平磁場ベクトルと鉛直成分の大きさを示している. また図2.1.41と比較するため, 計算された電位分布を使って図2.1.41の場合と同様に単位電場によって規格化している(南東電場の結果について

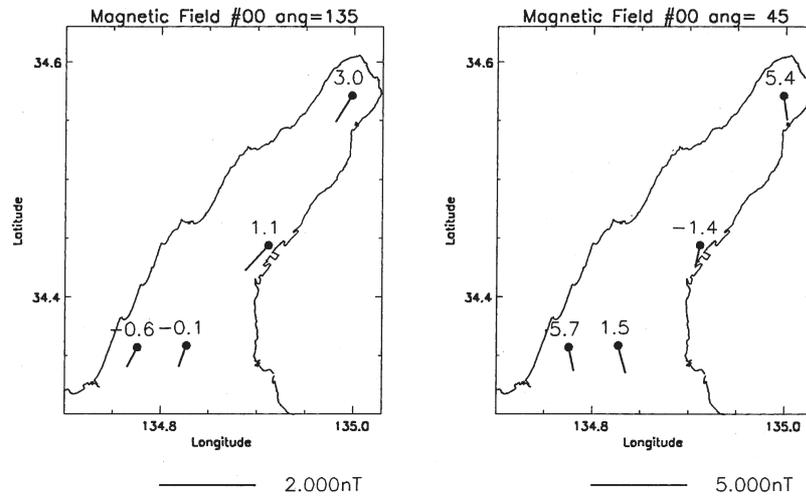


図2.1.48 数値計算による、岩屋、大谷、奥畑、鳥飼浦観測点での磁場の水平ベクトルと鉛直下向き成分（数値；単位nT）（山田他，2000）.（左）南東向き電場の結果．計算で求めた釜口－浅野間の電場100 mV/kmあたりに換算している．（右）北東向き電場の結果．計算で求めた岩屋－奥畑間の電場100 mV/kmあたりに換算している．

は釜口－浅野間が、北東電場の結果については岩屋－奥畑間の電場が100mV/kmとなるような外部電場を与えた場合に相当）。まず南東電場の計算結果では、水平磁場ベクトルとその大きさは図2.1.41における第1主成分に相関する磁場分布と比較的よく一致している。ただし鉛直磁場については大きさが異なる上、岩屋、大谷についてはその変化の方向も逆になっている。一方北東電場による磁場分布は、水平磁場ベクトル、鉛直成分ともに第2主成分と相関する磁場（図2.1.41右図）とかなり異なっている。これは前節で説明したように、第2主成分に対応する磁場が電場の方向と直交しないことから、解析結果を正しいとすればこの磁場が伝導電流によって生じているという仮定がそもそも成り立っていないことから、計算と一致しないことは予想できたことである。

まず電位分布の第1主成分に対応する磁場分布については、水平磁場ベクトルが方向、大きさともある程度の一貫を見たことで、観測された磁場が地面を流れる電流によって生じているという考えを支

持している。鉛直成分については、そもそもここでの計算が計算領域内の電流のみしか考慮していないという矛盾がある。言い換えると、今のモデルでは南東方向に電流が流れており磁場の計算にはその電流寄与は含んでいるが、その電流を供給するための逆向きの電流（ソース電流）が作る磁場については全く考えていないということである。鉛直磁場へのソース電流の寄与はむしろその経路に依存するため、さらに議論を進めるにはノイズ源についてもっと現実的なモデルを使用する必要がある。

また第2主成分については計算結果が観測と一致しないことについては、前節の解析結果で磁場と電場とが直交しないことから考えても、そもそも定常モデルという仮定そのものが成り立っていないことを示すものであろう。大谷の地磁気3成分の変動にお互いに位相差があるということ（山田他，1998）も、誘導電場・磁場の存在を示唆しているといえる。いずれにせよこのことを議論するためには、観測データの解析をさらに精密化する必要がある。