



紀伊半島における広域的な電気伝導度分布探査

山口, 覚
上嶋, 誠
石橋, 克彦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 8:335-344

(Issue Date)

2004-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/00422493>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422493>



紀伊半島における広域的な電気伝導度分布探査

Regional distribution of electrical conductivity in the Kii peninsula, Southwest Japan

山口 覚¹⁾

Satoru Yamaguchi

上 嶋 誠²⁾

Makoto Uyeshima

石 橋 克 彦³⁾

Katsuhiko Ishibashi

概要: 西南日本弧外帯に位置する紀伊半島において, 広域的な電気伝導度構造探査を行った. 観測には地磁気地電流法の1つであるネットワークMT法を用いた. 64地点で192基線の電場データを得た. これら電場データと地磁気観測所(柿岡および鹿屋地磁気観測所)の地磁気3成分毎秒値データを用いて, MTインピーダンスを算出した. その際, 2つの磁場観測データのうちどちらを選択するか, またはどのように組み合わせて使用するのが最適であるかを決定するために, 全ての場合についてMTインピーダンスを算出し, それらを比較検討した. 周期128~10240秒のみかけ比抵抗値と位相差の空間分布を求めた. その結果, 地質学的特徴と対応する電気伝導度分布(火山岩類が分布する地域では高いみかけ比抵抗値が示す)が三重県北西部で見出された. 一方, 紀伊半島中央部に, 地質学分布とは対応しない, 非常に小さなみかけ比抵抗値を示す領域を見出した.

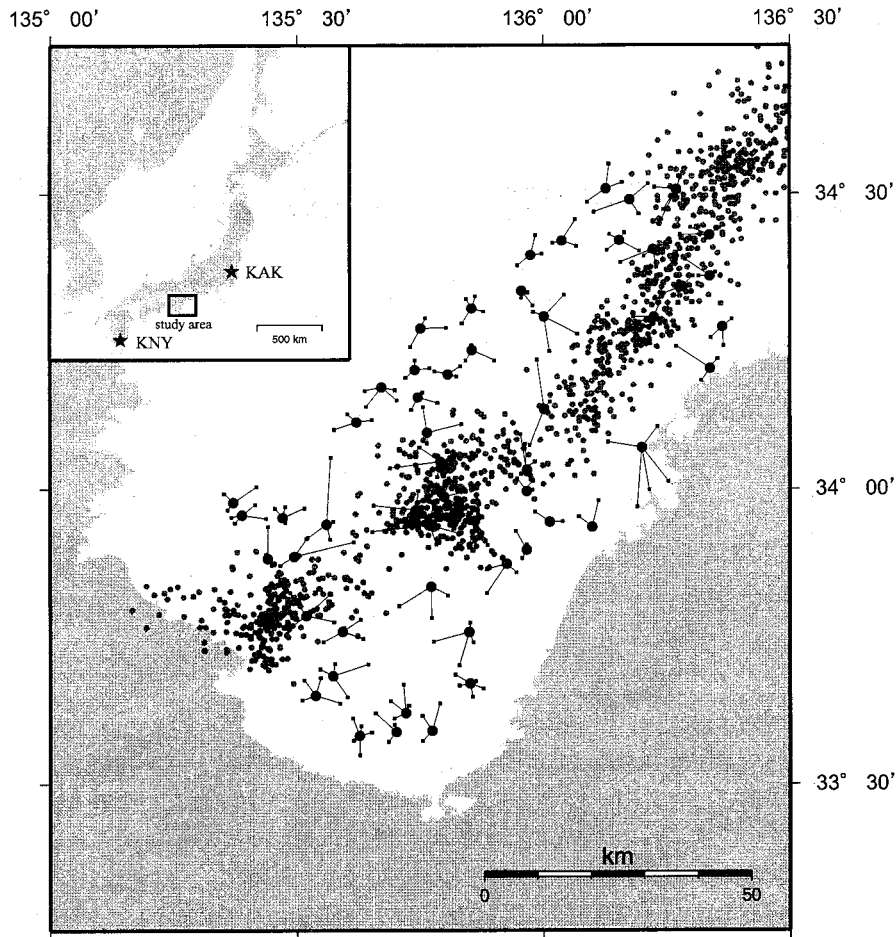
キーワード: ネットワークMT, 紀伊半島, 電気伝導度構造, フィリピン海スラブ, 低周波微動

1. はじめに

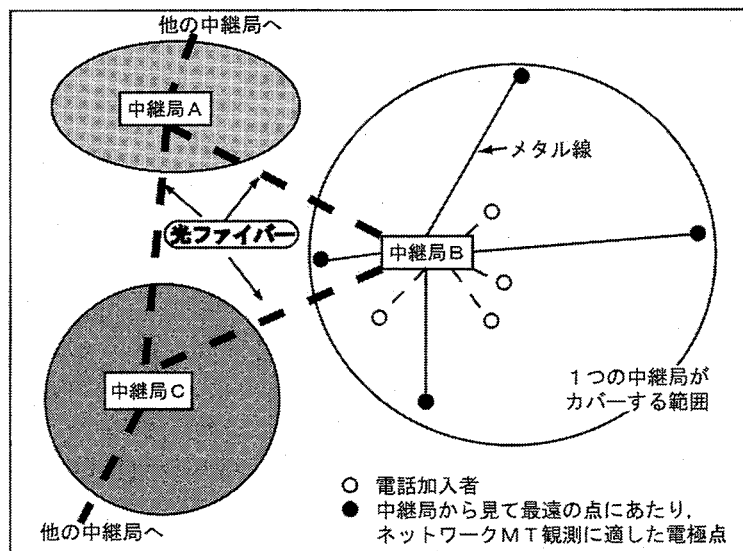
紀伊半島域は, 近い将来発生が予想されている東南海地震の予想震源域の陸側延長に当たり, この付近の地下深部構造の解明は, 東南海地震発生前の構造を把握するという大きな意義を持つ. また, 紀伊半島には, 現在火山活動は認められないにもかかわらず, 日本列島の他の地域では, 火山地帯で特徴的に認められる地球科学現象がいくつか存在する. 例えば, Wakita and Sano (1987)は, 紀伊半島北部を含む地域で³Heと⁴Heの同位体比が, 東北日本弧の火山地域と同じ程度の大きな値を示すことを発見し, 「近畿スポット」と命名した. また, 多くの温泉が分布することも知られている. さらに, 通常の地震よりも長い周期を持つ深部低周波微動が発見されている (Obara, 2002, 小原, 2003) ことも大きな特徴である.

これら諸現象に共通する原因として, 地殻~上部マントルの流体の存在が指摘されている (Obara, 2002, Matsumoto et al., 2003). 電気伝導度は, 地球内部の温度や導電性物質の存在, とくに, 流体の存在に敏感な物理量である. 我々はこの電気伝導度に注目し, 2002年より紀伊半島地域の広域的な地下電気伝導度構造を明らかにする計画を進めてきた. この計画を進めるにあたって三重県北西部が最後まで観測空白域として残っていたが, 2003年度に都市安全研究センター特別プロジェクト研究の助成を受けて, この地域内で4地点の観測を行い, 紀伊半島全域の観測を終えた (第1図).

本報告では, この4観測点を含む紀伊半島全域の電気伝導度分布の予察的な結果を示す. 更に, 電気伝導度を求める際に, 複数ある磁場観測点の中で, どの観測点を採用するか, もしくはどの組み合わせで用いる場合が, 最も望ましいMT応答関数 (電場・磁場間のcoherencyが高く, かつ推定誤差が小さいもの) が得られるかを検討した.



第1図 紀伊半島におけるネットワークMT観測点の分布
 図中の丸印は中継局，四角は電極の位置を示す。灰色の丸は，低周波微動の震央を示す。
 挿入図の★は柿岡地磁気観測所（KAK）及び鹿屋観測所（KNY）を示す。
 四角枠内は研究対象地域を示す。



第2図 公衆電話回線網とネットワークMT観測法の概念図
 1つの中継局が管理する範囲内で，互いに離れた位置にある電柱を選択し，その電柱の近くに埋設した電極と中継局のアースとの間の電位差を，中継局に置いたデータロガーで記録する。

2. 地磁気地電流法及びネットワークMT観測

(1) 地磁気地電流法 (MT法)

地磁気地電流法 (Magnetotelluric 法, MT 法) は, 地表で地球磁場の時間変動およびそれによって地球内部に誘導される地電流の両方を測定し, 両者の振幅比および位相差の周期依存性から地球内部の電気伝導度分布を知る方法である. 両者は, 2入力2出力の線形システムとして次式のように表現される.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

右辺第1項の 2×2 のマトリクスは, インピーダンステンソルと呼ばれ, 各要素は一般に電磁場の振動数に依存する複素量である. これら要素は大きさと位相に分けて表現され, 前者をみかけ比抵抗値 (ρ_a), 後者を位相差 (ϕ) と呼ぶ.

$$\rho_{a(i,j)} = \frac{1}{5f} |Z_{(i,j)}|^2$$

$$\phi_{(i,j)} = \arg(Z_{(i,j)})$$

ここで, $i, j = x, y$

この式では, 電場と磁場の関係を電気伝導度の逆数である比抵抗値で表現している.

電磁波の浸透深さ (δ) は, 地表の電磁波強度の $1/e$ になる深さで定義され, 電磁波の周波数と媒質の比抵抗値によって決まる (次式). 周波数が高い場合には, 浅く狭い範囲だけの情報を, 周波数が低い場合には, 深くそして広い範囲の情報を持つ.

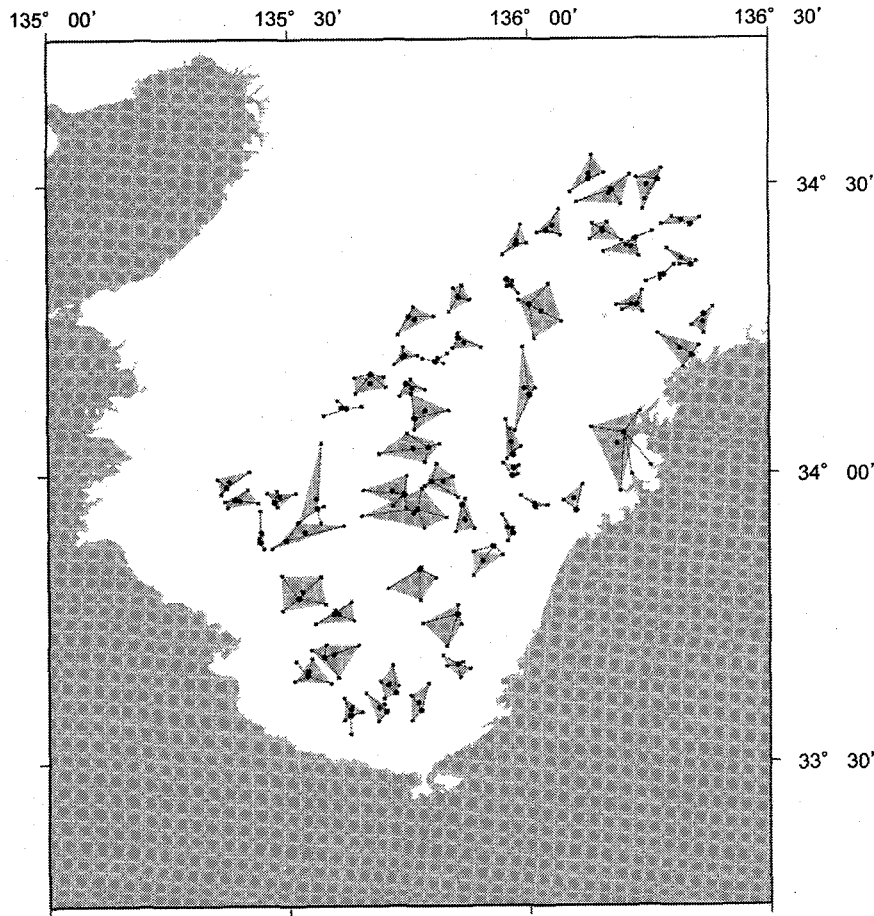
$$\delta \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

ここで, δ [m] はスキンドープスと呼ばれ探査深度の目安となる. ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] は媒質の比抵抗値を, f [Hz] は電磁波の周波数を示す. ある1地点でみかけ比抵抗値と位相差を幅広い周波数帯で決定することによって, 比抵抗値の深さ分布を知ることができ, 多くの地点でこの量を決定することによって広域的な地下比抵抗構造を推定することが可能となる.

(2) ネットワークMT法

ネットワークMT法は, 地磁気地電流法の1つで電場測定にNTT専用回線を使用することが特徴である (Uyeshima et al., 2001). これによって, 超長基線 (数km) で, かつ長期間にわたる電場測定が可能となった. 更に, 広い範囲を効率的にカバーでき, 局所的な電気伝導度異常の影響を低減できるといった利点もある. 第2図にNTTの通信回線ネットワークの概念図を示す. NTTの通信回線網は, 各市町村に1つ又は複数の中継局があり, その中継局から末端加入者まで通信回線が敷設されている. この回線はメタル線であり, 電位差の測定に用いることができる. 1つの中継局がカバーする範囲内の3~4方向 (例えば東, 西, 南, 北) に, 互いに最も離れた電柱を選び, その電柱に保安器をつけ, 柱の近くに鉛-塩化鉛電極を埋設した. これら電極と中継局のアースとの電位差を, 中継局においたデータロガーによって記録する. 記録されたデータは, モデムを介し公衆通信回線を通じて研究室で収録する. 複数の電極, 通信回線メタリック線およびデータ収録装置で構成されるユニットを「ネット」と呼ぶ.

観測は, 2002年1月に開始し, 三重県南東部, 和歌山県北部, 和歌山県南部, 奈良県南部, 奈良県北部, そして三重県中西部の6回に分けて観測を進めた. 各地域とも3~6ヶ月間の長期にわたって測定を行った.



第3図 応答関数を求めたエリアの分布図

ハッチをつけた領域（エリア）内の平均的なみかけ比抵抗値と位相差を算出した。
丸印は中継局，四角は、電極の位置を示す

3. 解析

(1) 応答関数の算出

1つのネット内で、面積ができるだけ大きくなるようにエリア（4～3個の電極で構成される四角形または三角形の領域）をつくり、その範囲を平均化した応答関数を求めた（第3図）。一般に、地磁気の擾乱が大きい日の方が、精度の良い応答関数を決定できる。そのため数ヶ月間の観測期間のうち、Kpインデックス（地磁気の擾乱の程度を示す指数）が大きい方から30日間を選んだ。昼間に人工的な電磁気雑音が多く、深夜のデータしか解析できない場合には40日間を選んだ。

応答関数の算出には、Robust Remote Reference MagnetoTelluric Data Processing (RRRMT ver.8, Chave and Tomson, 1989)を用いた。また、表層付近の局地的な電気伝導度異常による電場のゆがみ(galvanic distortion)を取り除き、かつ広域的な電気伝導度構造の走向を求めるために、Groom-Bailey decomposition (Groom and Bailey, 1989)を行った。

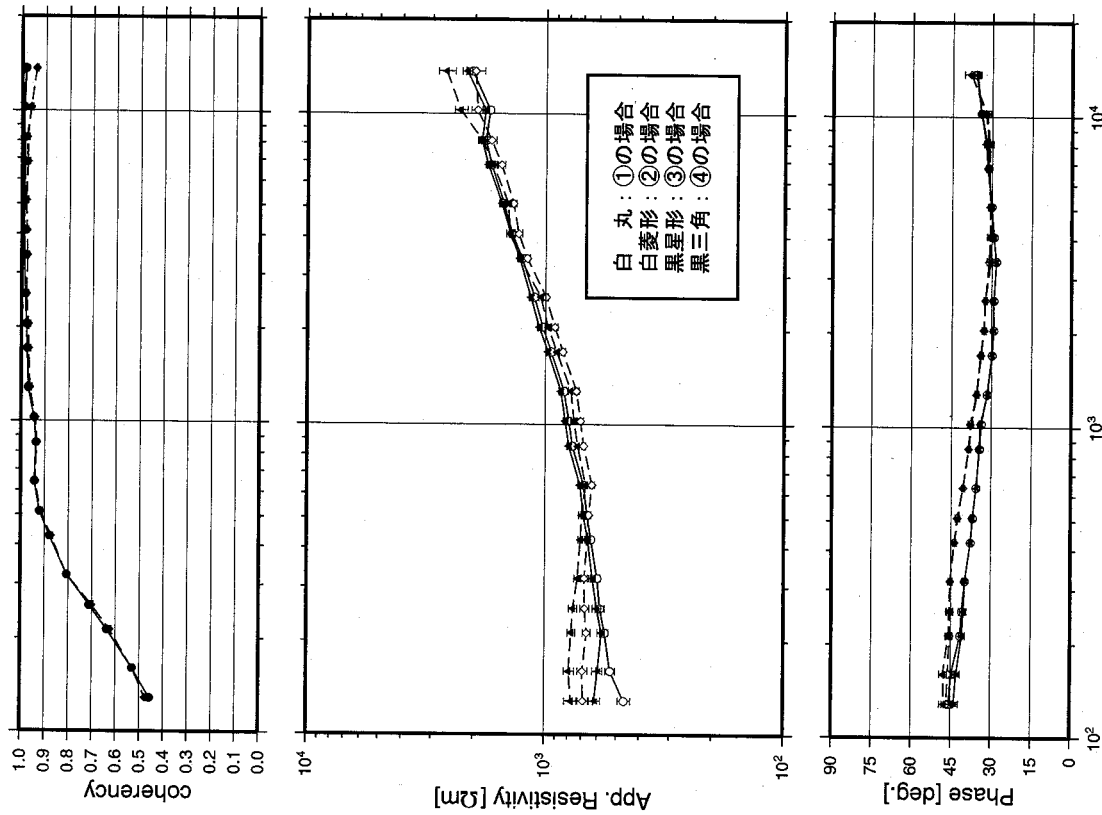
その結果、紀伊半島域の電気伝導度構造の走向はN60° Eが卓越することが分かった。今後この方向と直交するN30° W方向を+X方向、N60° E方向を+Y方向として解析を進めた。

(2) 入力磁場による応答関数の差違

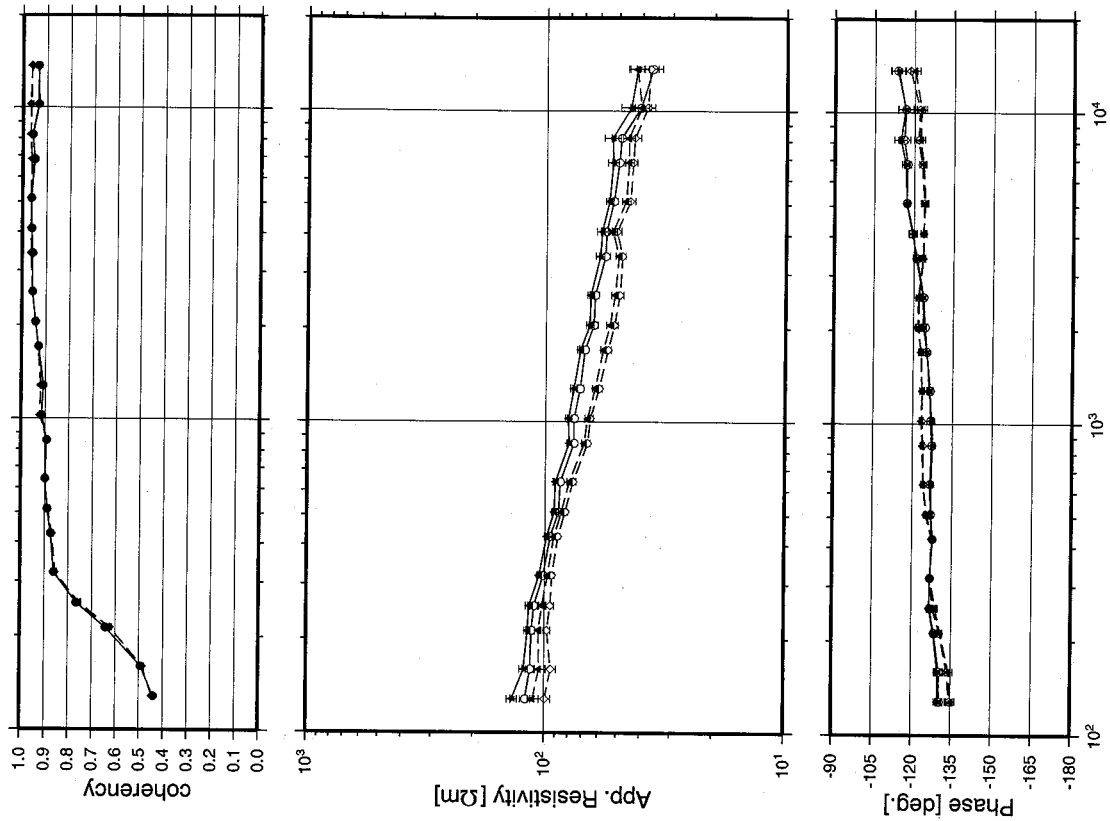
一般のMT観測では電場と磁場（3成分）を同じ場所で測定する。しかし、ネットワークMT法では、磁場変動のデータは、電場観測地点の値ではなく、地磁気観測所の値を用いる。なぜならば、臨時観測点では、数ヶ月間にわたって連続的に高精度の磁場測定をおこなうことが難しいためである。

日本国内においては、気象庁柿岡地磁気観測所（茨城県）および鹿屋地磁気観測所（鹿児島県）から地磁気3成分毎秒値が提

OSD1234_XY



OSD1234_XY



第4図 入力磁場に違いによるみかけ比抵抗値と位相差の違い (大杉谷OSDの例)

(a)はZxyの場合の、(b)はZyxの場合を示す。入力磁場として①柿岡地磁気観測所のみ、②鹿屋地磁気観測所のみ、③柿岡地磁気観測所を主として、鹿屋地磁気観測所を参照点とした場合の、④鹿屋地磁気観測所を主として、柿岡地磁気観測所を参照点とした場合の4つの場合を比較した。

供されている(第1図)。

紀伊半島は、柿岡地磁気観測所(KAK)及び鹿屋地磁気観測所(KNY)の、東西方向にも南北方向にもほぼ中間的な位置にあり、どちらの磁場データも使用することができる。つまり、柿岡地磁気観測所、鹿屋地磁気観測所のどちらかだけ、または両方の値を組み合わせるという3つの選択肢が考えられる。推定誤差が小さく、かつ電場・磁場間のcoherencyが大きなMT応答関数を求めるためには、どの場合が最も適当かを評価した。

4. 結果

(1) 入力磁場による違い

入力磁場として、1地点の磁場点を用いる場合は①KAKのみ、②KNYのみの2通りがあり、2地点の磁場点を用いる場合は③KAKを主としてKNYを参照とする、④KNYを主としてKAKを参照とする2通りの、計4通りが考えられる。三重県大杉谷ネットの電場データに対して、上記4通りの磁場データを用いた時に、みかけ比抵抗値や位相がどのようになるかを第4図に示す。

全般的な傾向として、まず、位相差は①、③と②、④の2つのグループに分かれ、両者の差は約 5° に達すること、次に、みかけ比抵抗値も①、③と②、④はよく似た値を示すが、両グループの違いは、位相差の場合ほど顕著ではないことが読みとれる。電場(X成分またはY成分)と磁場2成分(X, Y成分)間のmultiple coherencyは、大局的に見ると③、①、②、④の順になる。ただし③、①と②、④の差は小さい。推定誤差の大きさは、 Z_{xy} の場合は③、①、②、④の順になり、 Z_{yx} の場合は④、②、①、③の順になる。ただし、いずれの場合も③と①や②と④の間の差は小さいが、③、①と②、④の間では、約2倍の違いがある。

(2) 電気伝導度分布の特徴

前節(1)の解析から、電場・磁場間のmultiple coherencyが最も大きくなる③(KAKを主としてKNYを参照磁場とする場合)の組み合わせに対する、周期1024秒と10240秒のみかけ比抵抗値と位相差の空間分布を示す(第5図(a)(b))。この図では、各エリアの平均した値を重心位置で代表させている。

周期1024秒

・ Z_{xy}

みかけ比抵抗値(RHO_{xy})の空間分布には次の特徴が認められる。

- ①北東部に $10^4 \Omega \cdot m$ を超える非常に大きなみかけ比抵抗値を示す2地点があり、その北西に位置する3地点も $10^3 \Omega \cdot m$ 以上の大きなみかけ比抵抗値を示す。
- ②奈良県中部に $10^1 \Omega \cdot m$ 以下の非常に小さなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。
- ③②の南側に $10^3 \Omega \cdot m$ 以上の大きなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。

位相差(PHS_{xy})の空間分布には次の特徴が認められる。

- ①大局的には $30 \sim 40^\circ$ の値を示す。
- ②北西部に、 30° 以下の小さい位相差を示す領域が細長く存在する。
- ③奈良県中央部に大きな位相差を示す領域が存在する。これらは非常に小さなみかけ比抵抗値を示す領域と符合する。

・ Z_{yx}

みかけ比抵抗値(RHO_{yx})の空間分布には次の特徴が認められる。

- ①北東部に $10^3 \Omega \cdot m$ を超える大きなみかけ比抵抗値を示す領域が存在するが、 Z_{xy} で認められた北東部の非常に大きなみかけ比抵抗値を示す地点とは一致しない。
- ②上記の領域を取り囲むように $10^2 \Omega \cdot m$ を超える大きなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。
- ③和歌山県中部に $10^0 \Omega \cdot m$ 以下の非常に小さなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。

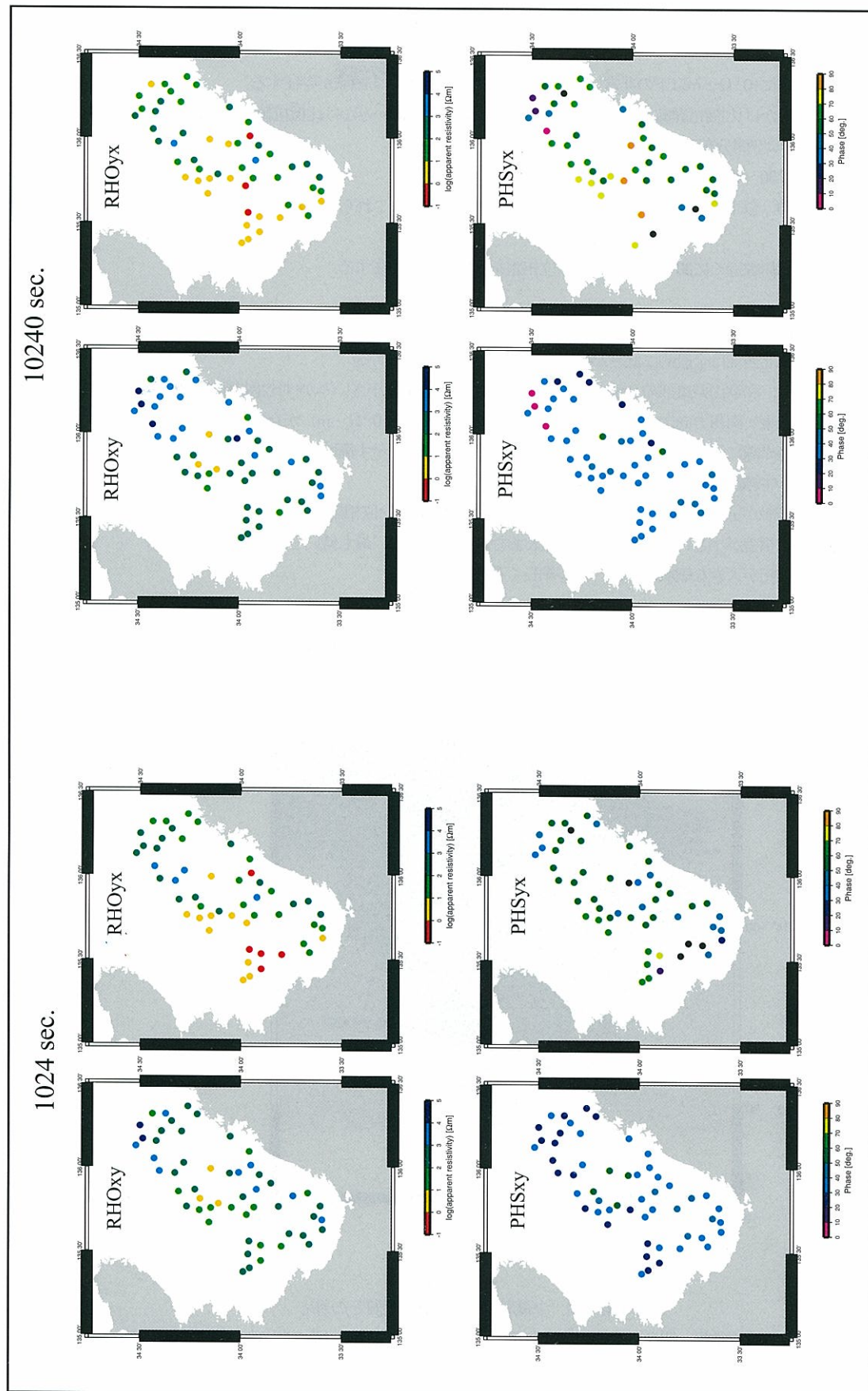
位相差の空間分布には次の特徴が認められる。

- ①大局的には $50 \sim 70^\circ$ の値をしめす。
- ②和歌山県南西部に小さな位相差($< 20^\circ$)の領域が南北に細長く存在する。

周期10240秒

・ Z_{xy}

みかけ比抵抗値(RHO_{xy})の空間分布には次の特徴が認められる。



第5図 みかけ比抵抗値と位相差の空間分布
(a)は周期1024秒の結果を、(b)は周期10240秒の結果を示す。左上はN30W-S30Eの電場とN60E-S60Wの磁場の場合のみかけ比抵抗値を、左下はこの場合の位相差を表す。右上はN60E-S60Wの電場とN30W-S30Eの磁場の場合のみかけ比抵抗値を、右下はこの場合の位相差を示す。

①北東部に $10^4 \Omega \cdot m$ を超える非常に大きなみかけ比抵抗値を示す3地点があり、その周囲に $10^3 \Omega \cdot m$ 以上の大きなみかけ比抵抗値を示す領域が広く存在する。

②上記の大きなみかけ比抵抗をしめす領域は、周期1024秒の RHO_{xy} の非常に大きなみかけ比抵抗値を示す領域と符合する。

③奈良県中部に $10^1 \Omega \cdot m$ 以下の非常に小さなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。

④上記の低みかけ比抵抗領域は、周期1024秒の RHO_{xy} の非常に低いみかけ比抵抗値を示す領域と一致する。

位相差 (PHS_{xy}) の空間分布には次の特徴が認められる。

①大局的には $30 \sim 40^\circ$ の値を示す。

②北東部に 10° 以下の非常に小さな位相差を示す3地点がある。これらは非常に高いみかけ比抵抗を示し地点と一致する。

③南東部の海岸線近くに 30° 以下の小さな位相差を示す領域が存在する。

・ Z y x

みかけ比抵抗値(RHO_{yx})の空間分布には次の特徴が認められる。

①観測領域の北西部は全般的に低みかけ比抵抗 ($< 10^1 \Omega \cdot m$) である。

②その中でも、和歌山県東部の2地点は、 $10^0 \Omega \cdot m$ 以下の非常に小さいみかけ比抵抗値を示す。

③北東部に北東—南西方向にのびる大きなみかけ比抵抗領域 ($> 10^2 \Omega \cdot m$) が存在する。

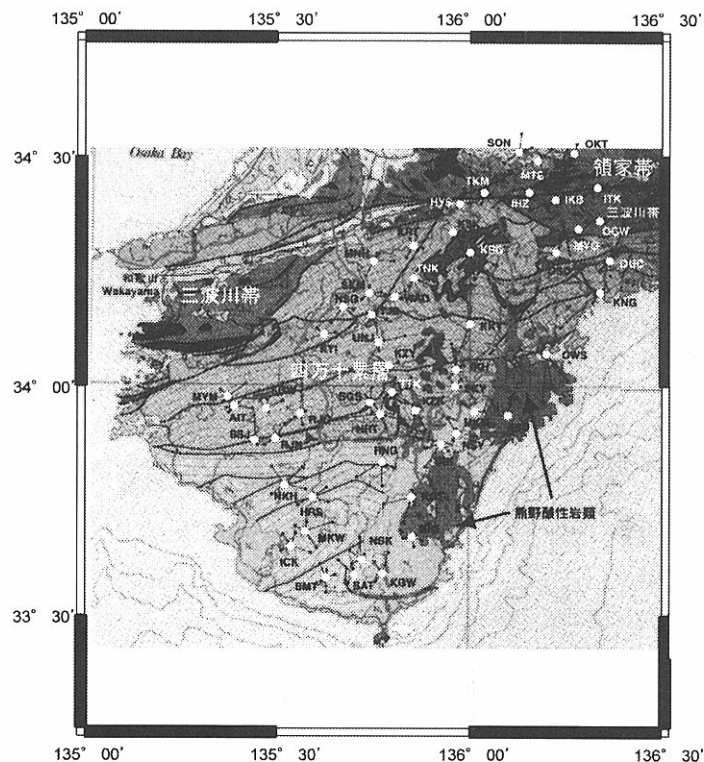
④南東部の海岸線に沿って、 $10^2 \Omega \cdot m$ の大きなみかけ比抵抗値を示す領域が存在する。

位相差 (PHS_{yx}) の空間分布には次の特徴が認められる。

①和歌山県中部から奈良県南部にかけて、北に凸の円弧状に大きな位相差 ($> 80^\circ$) を示す領域が存在する。

②北東部に位相差が小さい領域が存在する (おおむね 30° 以下で、最も低いところでは 10° 以下)

③北西部に位相が大きな領域 ($> 70^\circ$) が細長く存在する。



第6図 中継局・電極位置と地質との対応

白丸は中継局，四角は電極の位置を示す。日本地質アトラス（第2版，1992）に加筆

5. 考 察

(1) 入力磁場に関して

本解析の結果、最適の磁場点組み合わせは、MTインピーダンスを求める時の電場・磁場方向の組み合わせによって異なることが分かった。すなわち、電場が南北に近い方向 (N30W) で、磁場が東西に近い方向 (N60E) の場合は柿岡地磁気観測所を主として鹿屋地磁気観測所の値を参照点とする組み合わせが、電場と磁場が逆の組み合わせの場合は、磁場データも逆の組み合わせの場合が、それぞれ推定誤差が最も小さくなることが分かった。

今回の試行でMT応答関数の位相差は、入力する磁場による系統的な違いがあることが明らかになった。この解決のためには、2地点の磁場データを用いて、一方の磁場を主入力として、他方を参照点とする組み合わせの両方を算出し、両者を平均する操作が必要となろう。より厳密には、電場観測地域内において地磁気3成分観測を一定期間おこない、地磁気観測所と電場観測地域内の観測点との間で水平成分間の変換関数を求め、最も適当な入力磁場を定量的に求めることが必要である。

(2) みかけ比抵抗値と位相差の空間分布について

みかけ比抵抗値及び位相に共通して認められる特徴のうち、北東部の大きなみかけ比抵抗値及び小さな位相差から、この付近の地下に高比抵抗な領域が存在することが予想される。紀伊半島地域の地質と観測点位置の比較 (第5図) から、観測点のほとんどは、中央構造線より南側の付加帯 (主として四万十帯) に位置すること、しかし、北東部の非常に大きなみかけ比抵抗値を示すネットは、中央構造線より北側の領家花崗岩帯が分布する地域に位置することがわかる。一般に、結晶質の火成岩類は、堆積岩類よりも間隙が少なく電気的に高比抵抗になる。また、表層部付近のみが風化作用のために間隙が増加して低比抵抗になり、深部は新鮮な状態 (すなわち高比抵抗) であることは容易に想像でき、そのような構造から位相差は非常に小さくなると予想される。この予想は観測結果と整合的である。紀伊半島南東部には熊野酸性岩類が分布する。この付近の観測点でも比較的大きなみかけ比抵抗値を示すものが多いが、対応は北東部ほど明確でない。

奈良県中央部に認められた非常に小さなみかけ比抵抗を示す領域は、地質との対応のみでは説明できず、興味深い発見である。

本研究の結果、紀伊半島域における広域的な電気伝導度分布が明らかになった。現時点ではまだ、観測値の空間分布を示している段階である。今後は電気伝導度構造モデル解析を進め、他の地球物理学的及び地質学的データも勘案しながら本地域で見出されている特徴的な地球科学的諸現象の解明から、沈み込み帯で現在進行しているテクトニクスを明らかにしたい。

謝 辞

本研究の一部は2003年度神戸大学都市安全研究センター特別プロジェクト研究助成および東京大学地震研究所特定共同研究 (A) 「ネットワークMT観測」によって行われた。防災科学技術研究所小原一成博士からは、低周波微動の震央データを提供して頂いた。地磁気3成分毎秒値データは、気象庁柿岡地磁気観測所及び鹿屋地磁気観測所で測定され、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターを通じて提供して頂いた。電場データの取得に関しては、NTTおよびNTT Neo-meit関西のスタッフから大きな助力を得た。また、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所、高知大学、鳥取大学のスタッフおよび学生諸氏には、観測に関して多くの助力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Chave, A. D. and Thomson D. J., Some comments on magnetotelluric response function estimation, *J. Geophys. Res.*, 94, 14215-14225, 1989.
- 地質調査所, 日本地質アトラス (第2版), 朝倉書店, pp.18, 1992
- Groom, R. W. and Bailey, R. C., Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortions, *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1925, 1989.
- Matsumoto, T., T. Kawabata, J. Matsuda, $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii peninsula, 216, 221-230, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003.
- Obara K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681, 2002.
- 小原一成, 西南日本沈み込み帯に発生する深部低周波微動, 物理探査, 56, 415-425, 2003.
- Shankland, T., and H. S. Waff, Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle, *Rev. Geophys. Space*

Phys., 19, 394-406, 1977.

Uyeshima, M., H. Utada, Y. Nishida, Network-MT method and its first results in central and eastern Hokkaido, NE Japan, *Geophys. J. Int.*, 146, 1-19, 2001.

Wakita, H., Y. Sano, and M. Mizoue, High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, *J. Geophys. Res.*, 92, 12539-12546, 1987.

筆者: 1) 山口 覚, 神戸大学理学部地球惑星科学科, 講師 ; 2) 上嶋 誠, 東京大学地震研究所, 助教授
3) 石橋 克彦, 都市安全研究センター, 教授

REGIONAL DISTRIBUTION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN THE KII PENINSULA, SOUTHWESTERN JAPAN

Satoru Yamaguchi
Makoto Uyeshima
Katsuhiko Ishibashi

Abstract

Many characteristic phenomena, such as many hot springs, high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio and deep long-period tremors, are recognized in the Kii peninsula, southwestern Japan. It is worth to notice that these phenomena are common in volcanic regions in the Northeastern Japan, even though there is no volcanic activity in the Kii peninsula. The aqueous fluid supplied from the subducting Philippine Sea slab beneath the Kii peninsula is the most plausible candidate for explaining these phenomena. Determination of subsurface conductivity structure is significant to reveal distribution of fluid, since electrical conductivity is sensitive to temperature, bulk composition, and especially to the presence of fluid, melts and their connectivity (e.g., Shankland and Waff, 1977).

We made the Network-MT observations in the Kii Peninsula in order to elucidate subsurface conductivity structure. Voltage differences along 192 dipoles were measured at 53 sites. Magnetotelluric impedances were calculated using these electric data and geomagnetic fluctuation data at the Kakioka Geomagnetic Observatory and the Kanoya Magnetic Observatory. The best choice or best combinations of the magnetic data were assessed to obtain good MT responses with low estimation error and high coherency between electric and magnetic fields before calculating MT impedance.

Spatial distribution of apparent resistivity and phase values between the period of 128 and 10240 seconds were obtained. Large values of apparent resistivity with small phase values were found at the northeastern region of the study area. It may be caused by highly resistive granite. Remarkably conductive region was detected at the central region of our study area. It is interesting that the conductive region is not explained by geological setting.

