

Network-MT法について

防災科学技術研究所 上嶋 誠
東京大学地震研究所 歌田久司
北海道大学理学部 西田泰典

On the Network-MT method

Makoto Uyeshima¹⁾, Hisashi Utada²⁾ and Yasunori Nishida³⁾

- 1) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention
- 2) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
- 3) Department of Geophysics, Hokkaido University

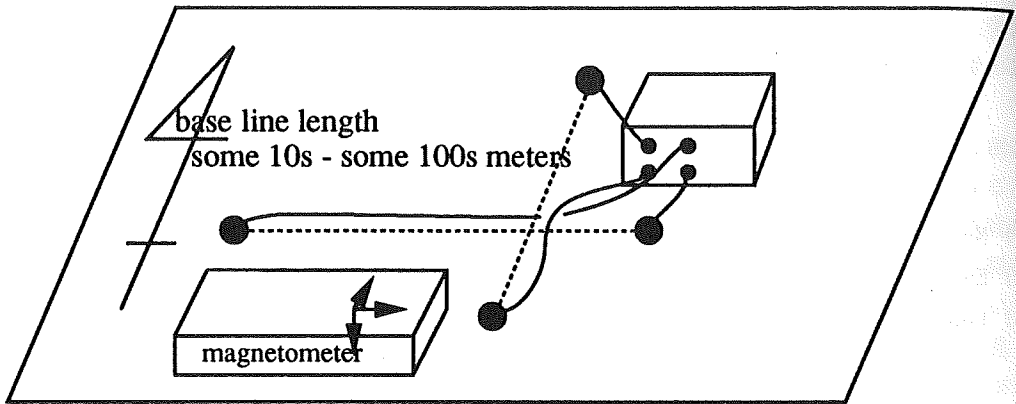
1. はじめに

電気伝導度は、地震波速度等と並び、地下の状態（特に温度構造や水の存在状態等）を知る上で重要な物理量の一つである。地殻下部やマントル等の地下深部電気伝導度構造を求めするため、我々は磁気圏や電離圏起源の地球電磁場変動を用いる。即ち、それらの電磁場変動が地球内部に浸透していく際の減衰の仕方を知ることによって、地下の電気伝導度分布を知るのである。この減衰は、地下で誘導される電流によるジュール発熱によってひきおこされる。実際には、各深度における電磁場の減衰あるいは電流密度を直接測定することは不可能なので、地表で電磁場観測を行い、その周波数特性から上記の地下における減衰特性を推定する。Magnetotelluric (MT) 法は、地表における水平電磁場間の比（複素impedance）の周波数特性を用いる探査法である。

初期のMT法においては、1次元層構造を仮定し垂直伝播する無限水平波長の電磁場を仮定していた。この仮定のために、波数ベクトルはZ成分（減衰のために複素数となる）のみとなり、1点の電磁場観測からその直下の電気伝導度構造が得られ、また、比較的解析も容易であった。ところが2次元以上の構造が存在するときは、電気伝導度構造の水平方向の不均一のために誘導電流のchannelingやdistortionがおり水平方向の波数ベクトル成分はゼロにはならない。また、表層付近の複雑な電気伝導度分布を反映して、異なる電気伝導度間の境界を横切る際に電場が不連続になる効果も現れる（static shift）。これらの効果を正確に見積らなければ正しい電気伝導度構造を得ることはできない。

このために、従来点、あるいは、線の観測から、面的観測を行う必要が生じる。Network-MT法は、その点を解決すべく森（1985）によって開発されたNTT通信網を用いた地電位差観測法を拡張発展させたものであり、電話回線をケーブルとして用いることによって通信用アース間の電位差を測定する（図1、これは、必ずしも通信用アースを用いる必要はなく、自作アースを用いることにより、任意の点間の電位差を測定することが出来る）。

Traditional MT Method



Network MT Method

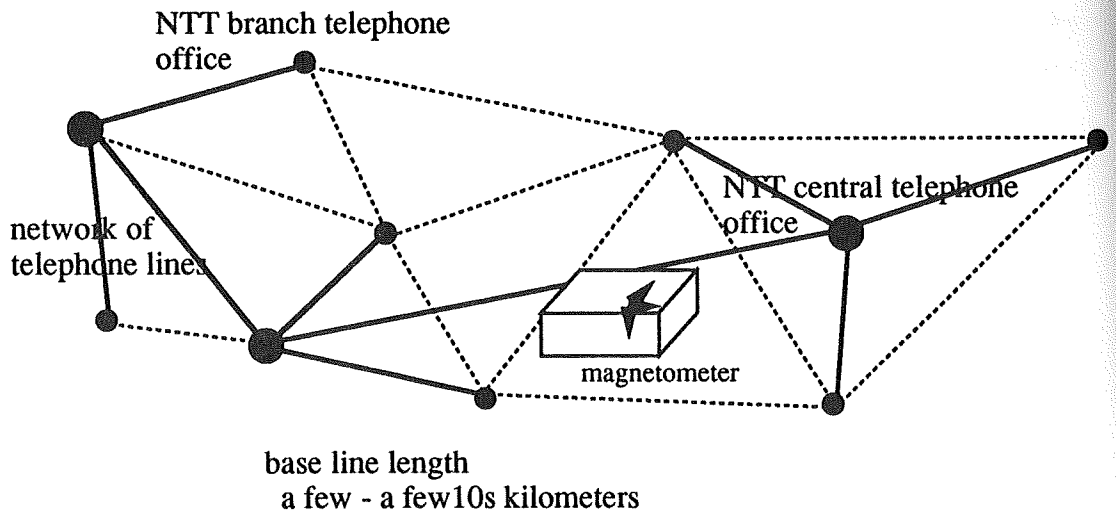


Fig. 1. Comparison between traditional MT measurement and Network MT measurement.

2. Network-MT法の特長

(1) NTT通信網が十分密に分布しているために、図3-1から図3-4で示されるような地域を面的におおうimpedanceの分布を、通常では得ることが困難な山間部も含めて、非常に効率よく得ることが可能である。特に、定点地球磁場観測点(例えばJMAの各地磁気観測所)のデータをreferenceとして用いることにより、探査領域の拡張を容易に行える。

これは、Network-MTの解析法に密接に関連している。即ち、まず定点観測点の磁場変動に対する各測線の応答関数、 V_H 、 V_D を各データのフーリエ変換を行い、ロバストスタッキング(上嶋、1990)を行う事によって求める。ここで、 V_H 、 V_D は

$$V = V_H \cdot H + V_D \cdot D \quad (1)$$

(V 、 H 、 D は、それぞれ、各測線の電位差変化、南北、東西方向の磁場変動のスペクトル)で表される。 V_H や V_D は、定点観測点でそれぞれ南北、東西の単位磁場変動があったときの各測線の電位変動を表しているから、それらの加減を行うことによって(測線分布の許す限り)任意の2点間の V_H 、 V_D を求めることが出来る。従って、観測領域を3つの電極ポイントから成る小三角領域に分割したとして、定点観測点で南北、東西の単位磁場変動があった時の各小三角領域内の電場は簡単な算術によって求める事が出来、それは、各領域についての定点観測点の磁場変動に対するimpedance tensor: Z を求めた事に他ならない。こうした解析を行うことにより、例えば図2-1の様な場合、新たに1測線(太線)の観測を追加するだけで、斜線の領域について観測域を飛躍的に増大させることが出来る。ただし、ここで V_H や V_D が時間的に変動しないことを仮定している。

しかし、こうしてimpedance tensorを求めることによって生じる問題点もあり、ここで述べて置く。1つは、誤差の評価についてである。impedance tensorの誤差を求める際、 F 分布を用いて求められる各 V_H 、 V_D の誤差から線形演算を行うことによる誤差伝播を考慮して Z の誤差を求めざるを得ないが、こうして求められる誤差は誤差の上限とも言えるもので、各応答関数の誤差が累積して非常に大きなものとなる。もう1つは、2点間の V_H 、 V_D を求めるときに、必ずしも電位測線が直線で結ばれていないことによって生じる問題である(Swift, 1967)。即ち図2-2に示されるように磁場の鉛直成分 H_z が存在するとき、2点a b間の電位差は、測定するケーブルの経路によって異なってしまふ。図のような場合、曲線と直線abで測られる電位差 V_{ab}^c 、 V_{ab}^d より求められる電場の差は、

$$\frac{|E_{ab}^c - E_{ab}^d|}{|E_{ab}^c|} = \sqrt{\frac{0.2\sigma}{t}} \cdot |T_{zh}| \cdot \Delta r \cdot 2\pi \quad (2)$$

で表される。ここで σ 、 t 、 T_{zh} 、 Δr はそれぞれ電気伝導度[S/m]、周期[秒]、磁場変換関数(H_z/H_h (水平成分))、 $\Delta S/\Delta l$ [km]である。周期が短く、電気伝導度が大きく、磁場変換関数が大きく、 Δr が大きいほどこの影響が大きくなることがわかる。

(2) 長基線電場観測(基線長~10km)が可能であるため、S/N比が著しく改善され、また、小スケールのstatic shiftを除去できる。

図2-3に、基線長を長くとることによってstatic shiftが除去される様子を簡単な2次元モデルで示してある。モデルは、大局的な1次元3層構造(上から0.0005, 0.01, 0.1[S/m])の中に幅600mの0.1[S/m]の良導異常を置いている(上段)。逆三角と影線で示されて

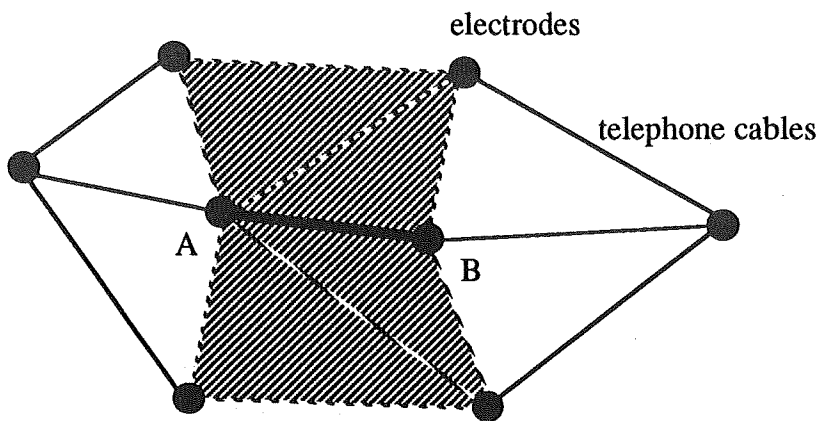


Fig. 2-1. Schematic diagram showing the efficiency of Network-MT. If additional measurement is conducted on baseline A-B, impedance tensors at shaded area can be estimated.

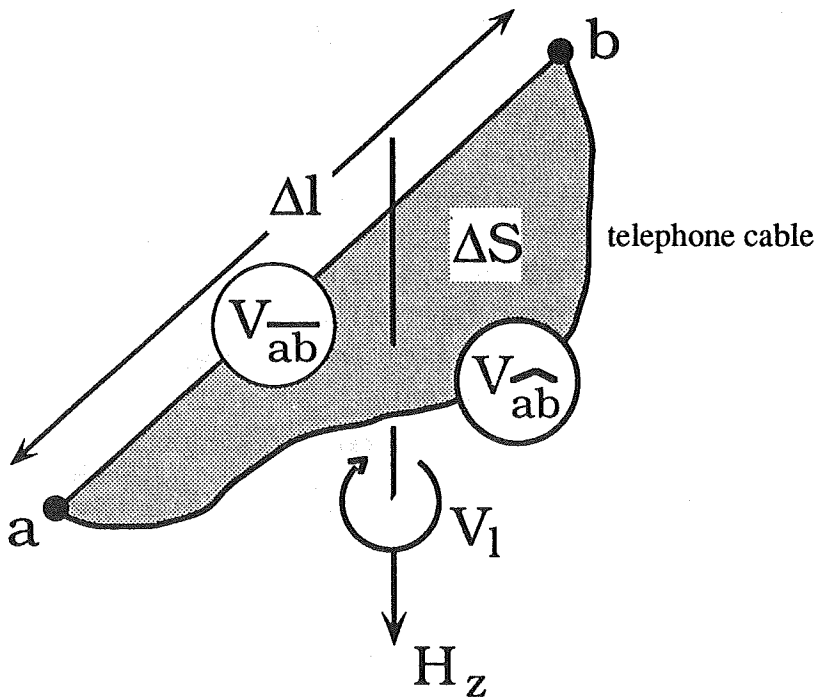


Fig. 2-2. Schematic diagram showing the effect of the baseline curvature.

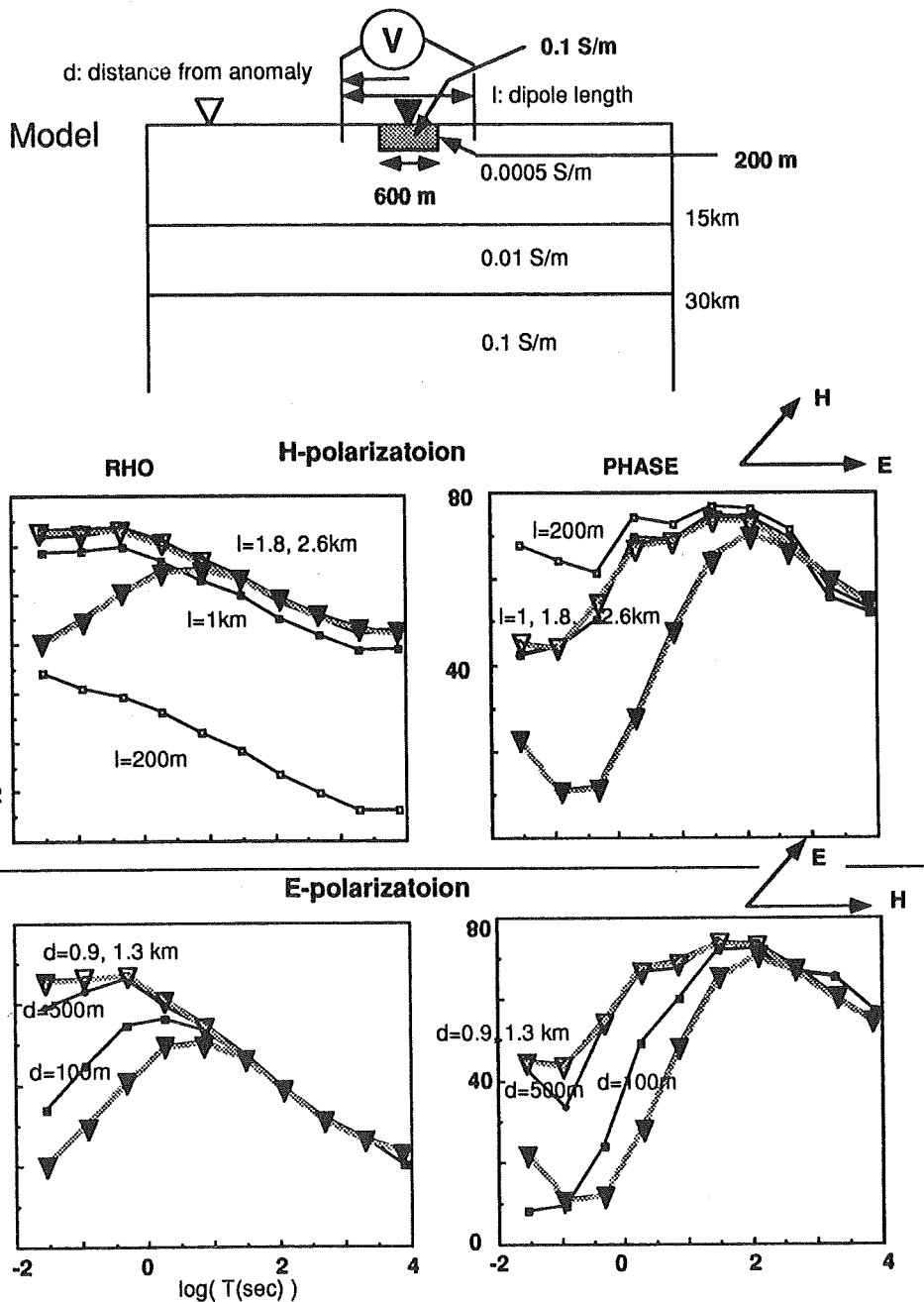


Fig. 2-3. Removal of the static shift. Synthetic impedances for both modes of the model shown above are calculated with various electrode spacing for H-polarization and with various distances from the central anomaly for E-polarization.

いるのは、ホストの3層（開いた三角）、異常を含めた4層（閉じた三角）についての1次元モデルに対する見かけ比抵抗（左）及び位相（右）曲線である。これに対し、実線で示されているのは、H-polarizationの場合（中段）異常の中心を跨いで基線長（ l ）を変化させたときの両曲線、E-polarizationの場合（下段）異常の中心からの距離（ d ）を変化させたときの両曲線を示している。H-polarizationの場合で短基線の観測を行ったとき、見かけ比抵抗曲線は長周期側でホストの1次元構造の曲線から定倍シフトし、位相曲線はホスト1次元構造と一致している。これがstatic shiftであるが、基線長を長くすることにより、それが改善されている。E-polarizationの場合は、異常境界面に平行な電場が連続であるためにstatic shiftは現れず、異常の中心付近と異常から遠く離れた所での両曲線は、それぞれ、4層及び3層の1次元モデル曲線と良い一致を示す。このため、E-polarizationさえ用いればstatic shiftなど考慮する必要がないように思われるかもしれないが、表面の異常は、例えば河床や池、湖など3次元的に分布しており、そもそもE、H-polarizationの分離は不可能なのである。

ここで少し注意を喚起しておきたいのは、例えば、空間スケールを10倍にし、時間スケールを100倍にするスケール変換を行っても諸曲線は全く同じ形に保たれるが、この場合の2km x 6kmというやや大規模な表面の異常に対しては、基線長が2kmであってもstatic shiftが現れるという事実である。即ち、基線長を長くとっても、それに見合ったスケールの異常によるstatic shiftは考慮にいけないといけないうことになる。しかしながら、先にも述べたような表面付近の主として水の分布に起因した複雑な構造を考慮する必要はなく、また、 S/N 比が向上するのであるから、より地下深部の大局的な構造を議論する際には長基線の方が有利である。

(3) NTTの回線や通信用アースは、電話会社にとっての生命線であり、非常によく設置、保守されているためにケーブル切断などの事故が少なく、雨などによるドリフトが小さい。

3. 北海道中東部における観測及び解析

2. (1) で述べた方法によって求められた、女満別の磁場をreferenceとする impedance tensorをもとに、各周期における単位偏向磁場変動に対する電場の変化楕円の分布、 $0.2T|d \text{ et}(Z)|$ (T は周期) で表される平均的見かけ比抵抗の分布、impedance tensorの主軸方向と主軸 impedance の絶対値の分布、同位相差の空間分布図を作成した。図3-1に周期64分の東西偏向磁場変動に対する電場の変化楕円を示す（長さは $[\text{mV/km/nT}]$ に比例）。電気伝導度分布の不均一性のために電場変動は単純に南北方向とはならない。網走 (ABA) から本別 (HNB) を通り池田 (IKD) に抜ける西に屈曲した線上に電流の集中帯が認められる。また、同周期の平均的見かけ比抵抗のコンター（単位は $\log [\Omega \text{m}]$ ）を図3-2に示す。図3-2において、見かけ比抵抗の高い領域に斜線を施してある。北海道東部において南から北にかけて、高一低-高一低比抵抗の縞模様が認められ、西の方へ行くにつれその高比抵抗帯が互いにつながって横倒しの右に開いたU字状構造をしていること、その西にはまた低比抵抗帯があり、先に述べた電流集中帯と対応している事等が認められる。図3-3に impedance tensorの主軸方向（対角成分を最小にする方向）の分布とその方向に座標軸を回転した時の impedance

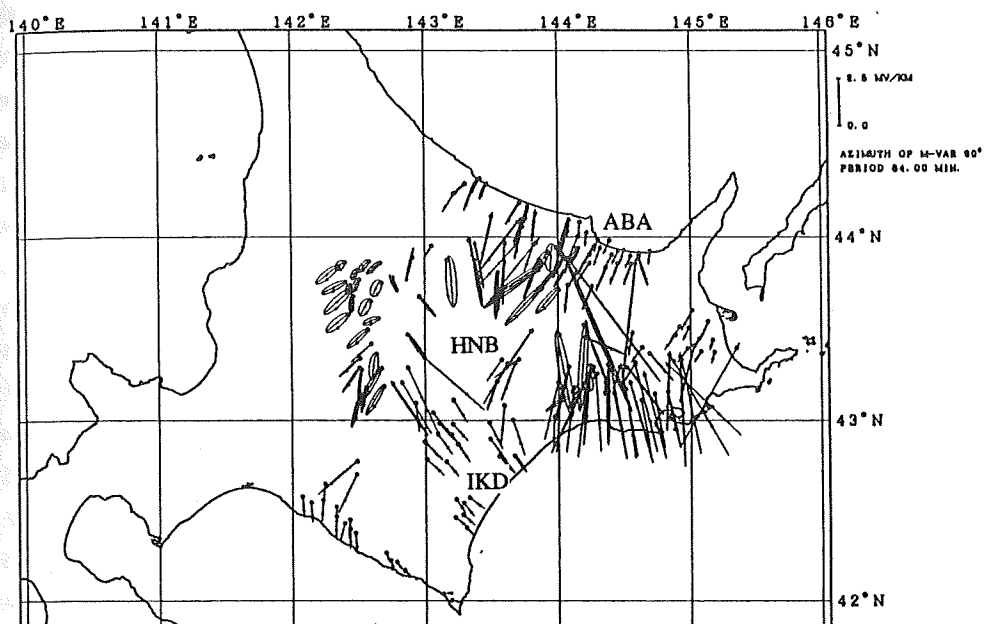


Fig. 3-1. Spatial distribution of the electric field induced by the polarized unit sinusoidal variation of the magnetic field at Memanbetsu. Azimuth of magnetic variation is EW and period is 64 minutes.

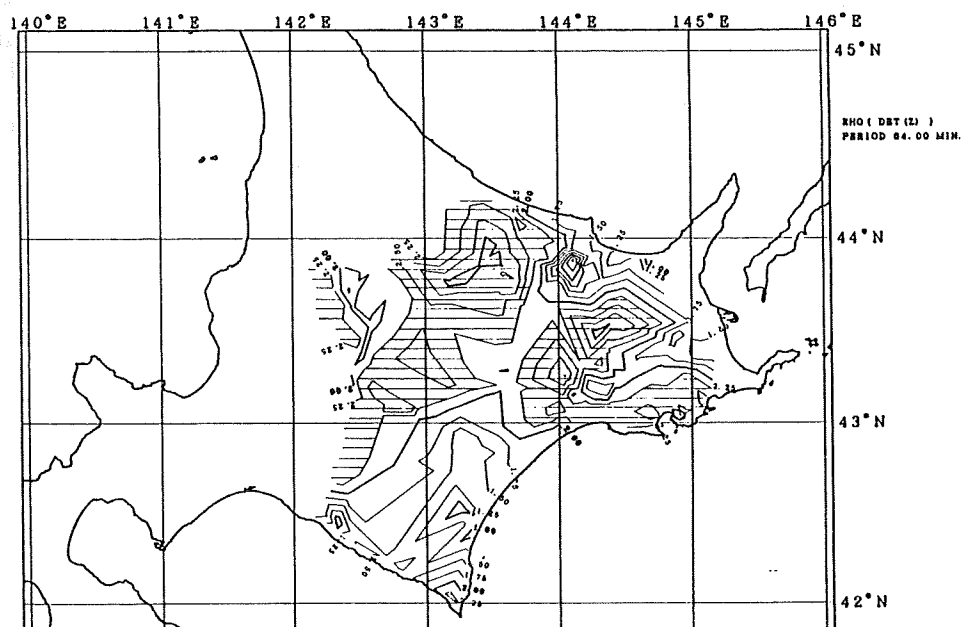


Fig. 3-2. Contour map of the logarithm of averaged apparent resistivity. Contour interval is 0.25. Shaded areas represent the areas of relatively high apparent resistivity (> 2.25). Period is 64 minutes.

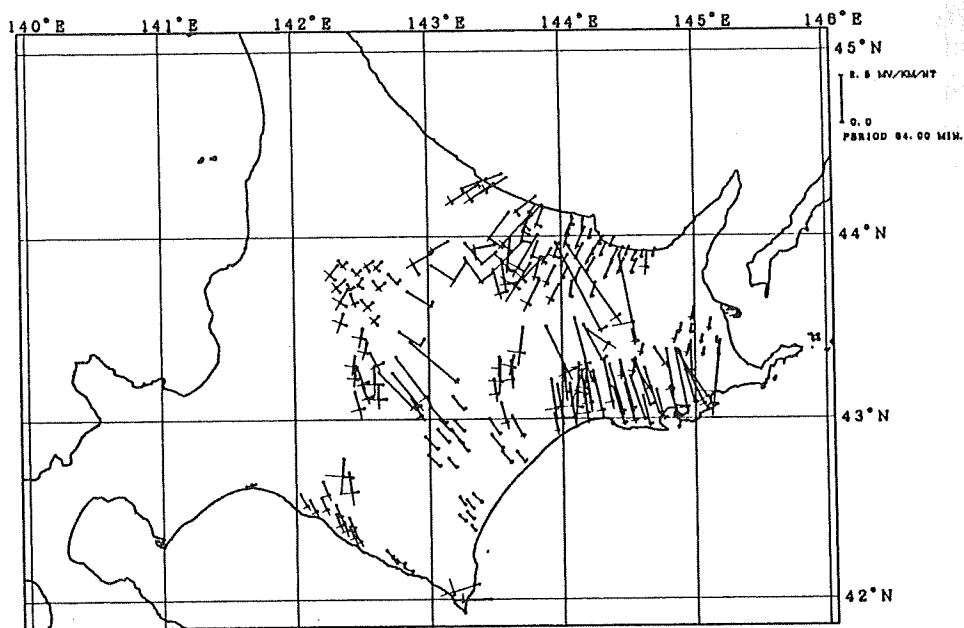


Fig. 3-3. Spatial distribution of the principal direction and the absolute value of the elements of principal impedance tensor. Thick bars with open circles represent off-diagonal impedances and thin bars represent diagonal impedances. Period is 64 minutes.

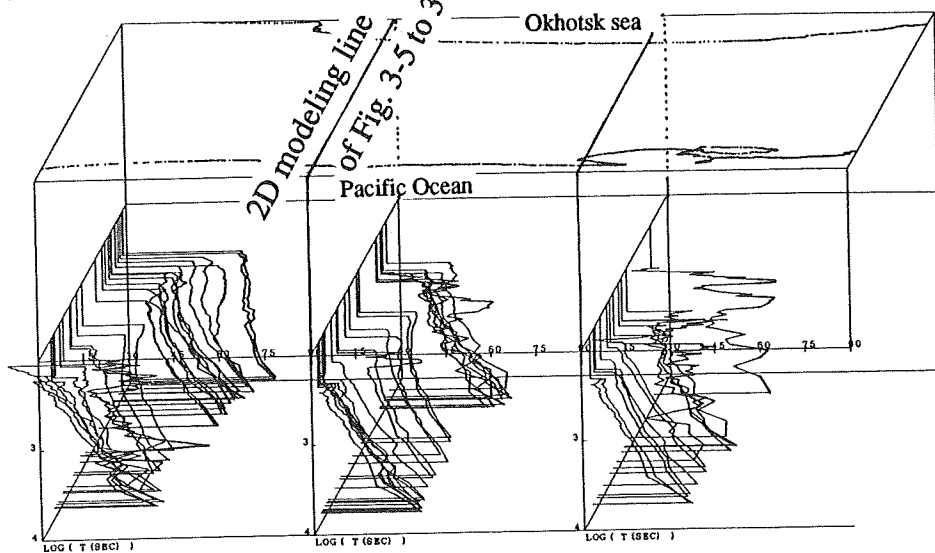


Fig. 3-4. Pseudo cross section of the phase of the principal impedance; Z_{xy} in eastern part of Hokkaido.

の絶対値の分布を示す。この主軸方向の分布は、地域の電氣的な構造の走行方向を示す。4個のimpedance tensorの要素の内非対角成分を白丸のついた太線で表示している（長さは $[mV/km/nT]$ に比例）。海岸線効果が顕著であり、北海道中部から東部にかけて全体的に、先に述べた電流集中帯に調和的な西に屈曲したトレンドの存在等が認められる

以上で述べてきた構造は、この地域のブーゲ重力異常分布や表層地質図との相関が極めて良い。北海道中東部において、ブーゲ重力異常が表層付近の堆積層の厚さによって決められていることがいくつかの従来の研究（例えば Mori, 1987）より明らかになってきたが、上述のimpedanceの主軸方向や絶対値の分布も表層の構造との間に密接な関連があることが示唆されたわけである。一方、北海道東部地域における位相の疑似断面図を図3-4に示すが、こちらの方は表層の構造との関連があまり認められない。図3-4には、各非対角主軸impedance; Z_{xy} の位相を周期に対して並列してある。

次に地下深部の電気伝導度構造を明らかにするため、有限要素法を用いた2次元モデリングを行った。この際、最も2次元性がよく成り立っていると思われる図3-4の真中の測線に沿ってモデリングを行った。モデリングの際には、まず、他の地球物理学的データより明らかになった構造を与え、主としてH-polarizationのimpedanceを参照して各構造の電気伝導度を trial & errorで求めて行った。この際、各impedanceが2. (1)のごとく各測線の応答関数の線形結合によって求められていること（特にE-polarizationにおいては各測線の経路）も考慮した。得られた最終モデルを図3-5に示す。図3-5において表層5kmの構造は拡大して描かれている。図3-6、3-7には、それぞれ、H、E-polarizationについて測定量と最終モデルの理論値との比較を示す。求められた構造の特徴を以下に列記すると、

(1) 表層の基盤の深さは、南から北にかけて、浅-深-浅-やや深、なる傾向を示し、その上には電気伝導度の高い堆積層 ($0.5S/m$) が分布する。impedance南北方向のコントラストはほぼこの堆積層の厚さ変化によって決定され、その様子は周期にあまりよらない。

(2) 火山フロント付近から背弧側にかけて、地殻下部 ($15km-30km$) に高電気伝導度帯が認められる。その電気伝導度は火山帯直下付近で非常に高く ($0.5S/m$) 背弧側では $0.02S/m$ 程度である。

(3) 背弧側ウェッジマントル部 $100km$ より深いあたりに高電気伝導度帯が認められる。

(4) 太平洋プレートの電気伝導度は $0.0004S/m$ と非常に低い。

(5) (4)の下の太平洋の上部マントルには、 $0.04S/m$ 程度の高電気伝導度帯が存在する。等となる。

(1)の結果によって、先に述べた地表付近の構造との相関が実際にモデリングを行うことによって確かめられた。(2)から(5)に示される深部構造は、 Z_{xy} の絶対値の周波数特性や、特に位相に良く反映されている。短周期で電磁場間の位相のずれが前弧側から背弧側にかけて小-大と変化すること、全体として長周期に成るにつれて位相は増大して行くこと、最長周期付近で再び背弧側で大きな値を示し、火山フロント付近で値のとびが見られることなどを説明する必要から最終モデルが得られたわけである。図3-6にはそれらの傾向が如実に示されているが、これらの傾向が横方向にも連なっているらしい様子が図3-4から読み取れる。

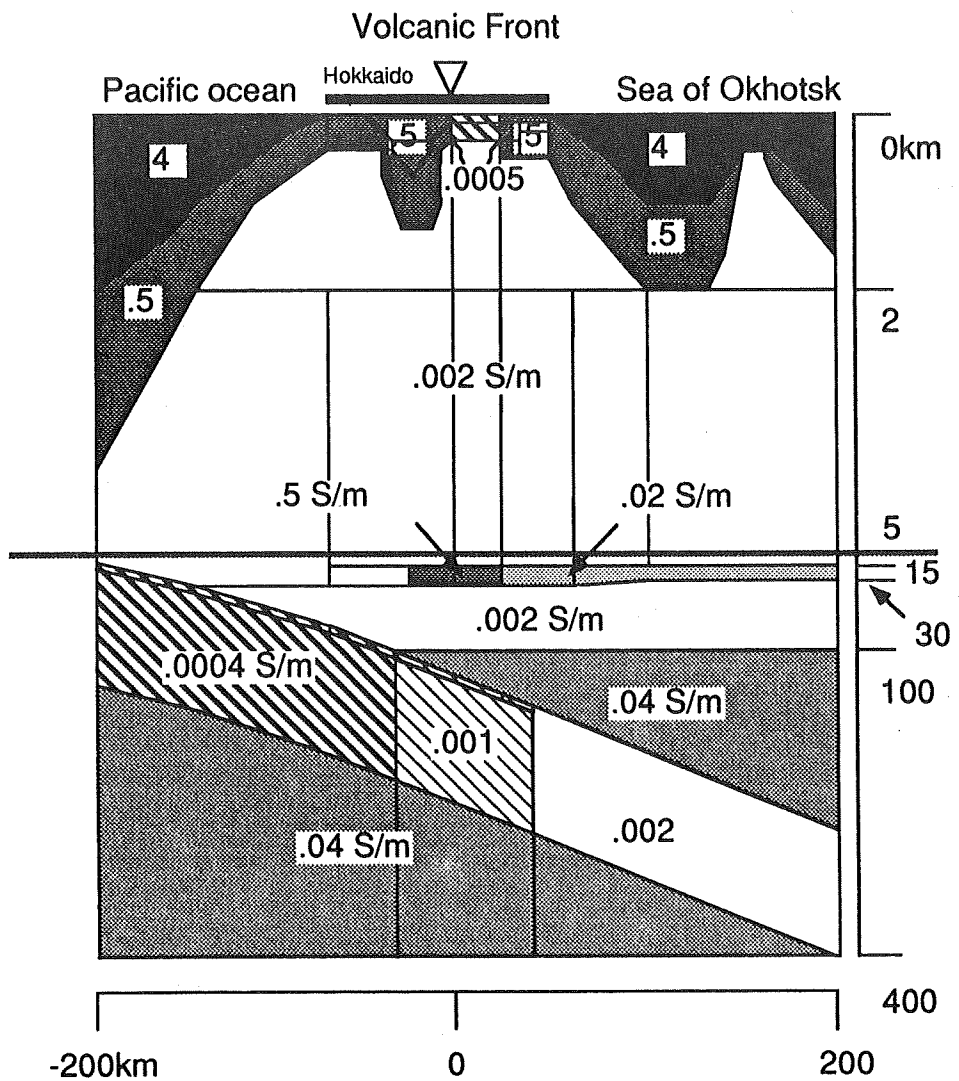


Fig. 3-5. Final model cross section of the eastern part of Hokkaido.

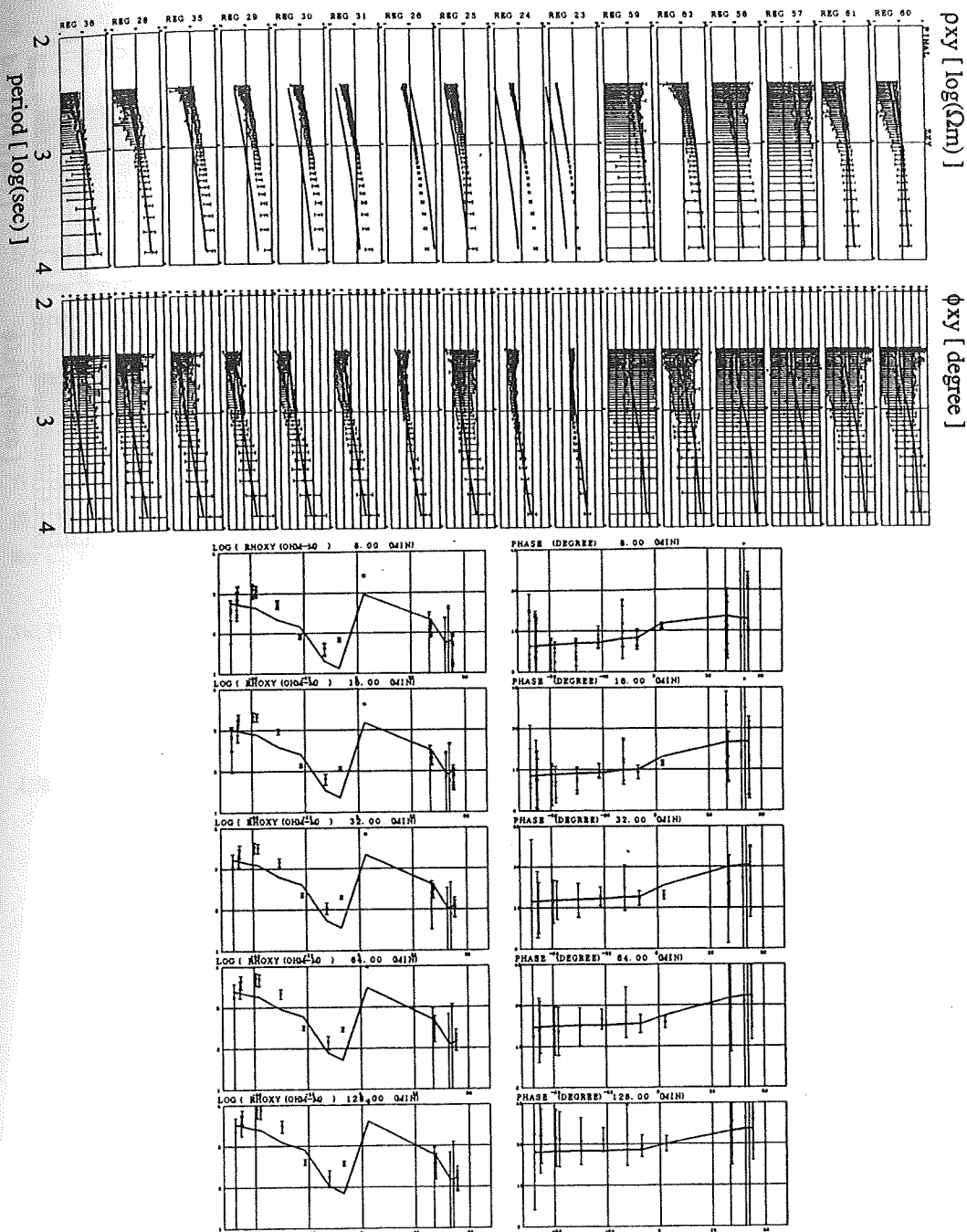


Fig. 3-6. Comparison between observed (triangles with error bar) and synthetic (solid lines) principal impedance for H-polarization mode.
 upper : period dependence of the impedance for each triangular sections along the modeling line (right: Okhotsk side).
 lower : spatial dependence of the impedance along the modeling line at periods, 8, 16, 32, 64 and 128 minutes from top to bottom (right: Okhotsk side).

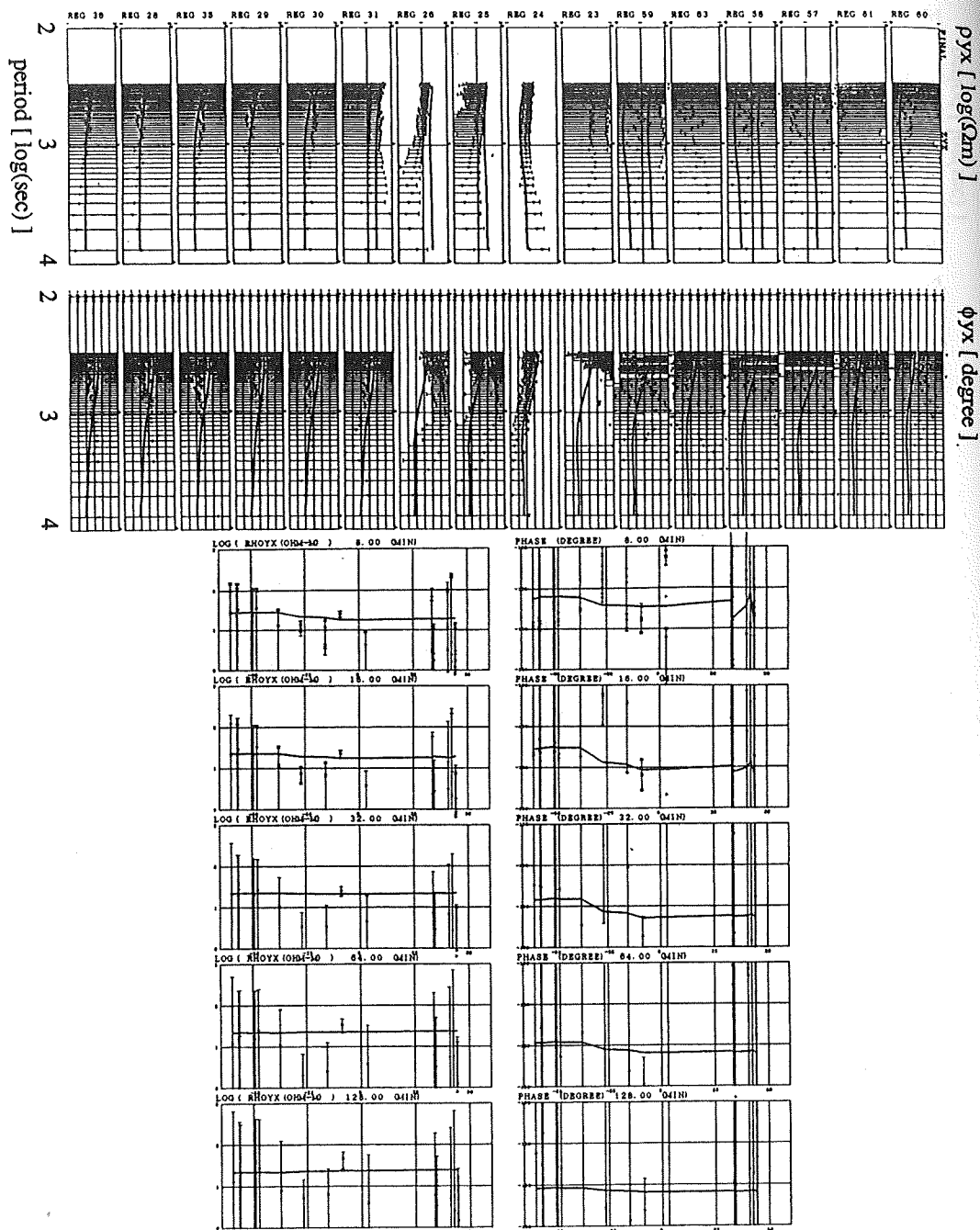


Fig. 3-7. Comparison between observed (triangles with error bar) and synthetic (solid lines) principal impedance for E-polarization mode.
 upper : period dependence of the impedance for each triangular sections along the modeling line (right: Okhotsk side).
 lower : spatial dependence of the impedance along the modeling line at periods, 8, 16, 32, 64 and 128 minutes from top to bottom (right: Okhotsk side).

4. おわりに

以上で述べてきたように、Network-MT法は大局的な地下の構造を把握する上で、強力かつ効率的な観測手段である。さらに観測域を広げると共に、従来のMT法（特に短周期や海）のデータや、鉛直磁場変換関数、HD変換関数等を用い、さらにモデルを精密化、3次元化していく必要があると考えられる。

5. 謝辞

データの取得に関して、NTT関係各位の多大なる御支援を得ました。ここで改めて謝意を表します。また、北海道のフィールドでは、東京大学地震研の川瀬隆治氏、北海道大学理学部の大島弘光氏、清水久芳氏の御協力を得ました。また、気象庁地磁気観測所から、女満別地磁気観測所の磁場毎分データを提供して頂きました。どうもありがとうございました。

6. 参考文献

- 森 俊雄、1985、長基線地電位試験観測、気象研究所研究報告、36:149-155.
- Mori, T., 1987, Variations in the Geoelectric Field with Relation to Crustal Conditions of the Earth, *Geophys. Magz.*, 42:41-104.
- Swift, C.M., 1967, A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, In: K. Vozoff (Editor), *Magnetotelluric Methods*, *Geophys. Reprint Series*, vol. 5, 1986, Soc. of Explor. Geophys., Tulsa, Okla., pp. 156-166.
- 上嶋 誠、1990、電磁気観測データのRobust stacking法について、C A研究会1990年論文集、243-254.