

## 中国地方におけるネットワーク MT 法観測

塩崎一郎<sup>1)</sup>・西垣俊宏<sup>1)</sup>・山口高広<sup>1)\*</sup>・村上英記<sup>2)</sup>・大志万直人<sup>3)</sup>・  
上嶋 誠<sup>4)</sup>・山口 覚<sup>5)</sup>・歌田久司<sup>4)</sup>・西田良平<sup>1)</sup>・住友則彦<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>鳥取大学工学部 <sup>2)</sup>高知大学理学部 <sup>3)</sup>京都大学防災研究所  
<sup>4)</sup>東京大学地震研究所 <sup>5)</sup>神戸大学理学部 \*現在日本道路公団

## A Report on Network MT Investigations in the Chugoku District, Southwestern Honshu, Japan

Ichiro SHIOZAKI<sup>1)</sup>, Toshihiro NISHIGAKI<sup>1)</sup>, Takahiro YAMAGUCHI<sup>1)\*</sup>,  
Hideki MURAKAMI<sup>2)</sup>, Naoto OSHIMAN<sup>3)</sup>, Makoto UYESHIMA<sup>4)</sup>,  
Satoru YAMAGUCHI<sup>5)</sup>, Hisashi UTADA<sup>4)</sup>,  
Ryohei NISHIDA<sup>1)</sup>, and Norihiko SUMITOMO<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Faculty of Engineering, Tottori University

<sup>2)</sup> Faculty of Science, Kochi University

<sup>3)</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

<sup>4)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

<sup>5)</sup> Faculty of Science, Kobe University

\* Now at Japan Highway Public Corporation

### Abstract

Network MT (Magneto Telluric) observations were carried out in the Chugoku district in order to study the resistivity structure of the crust and the upper mantle beneath the southwestern Japan arc. The electric field variations were measured using 69 dipoles in total, whose lengths were more than several kilometers. The electric field variation measured at almost all the dipoles showed a good correlation with eastward geomagnetic field variation. Geomagnetic field variation data at the Kakioka Geomagnetic Observatory (Japan Meteorological Agency) were used to obtain MT impedances. MT impedances were calculated at each triangular section formed by two dipoles; these consisted of one central station and two branch stations of NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation). MT impedances, which can be used for model analysis, were determined at 18 triangular sections in the San'in area, the northern part of the Chugoku district, where the effect of artificial noise caused mainly by leakage current from electrical railways can be ignored.

The key features of the MT sounding curves, the spatial distribution of the apparent resistivity and phase values, can be summarized as follows:

(1) As the period increases, the apparent resistivity  $\rho_{axy}$  tends to increase, while the apparent resistivity  $\rho_{ayx}$  tends to decrease. The apparent resistivity  $\rho_{axy}$  is generally higher than  $\rho_{ayx}$ . It is considered to be due to the existence of the Japan Sea at the north side of the surveyed area, whose coastline runs almost in an east-west direction.

(2) The spatial distribution of the apparent resistivity values indicates a clear resistivity boundary along the line of SKN-TTR-GMU. This line coincides with the seismic zone that includes the Yoshioka and Shikano earthquake faults associated with the 1943 Tottori earth-

quake ( $M7.2$ ). Further investigations are needed to clarify the structure of the resistivity boundary and the relationship among this boundary and the seismic faults.

(3) In all cases, the apparent resistivity  $\rho_{ax}$  tends to decrease only once around a period of several hundred seconds. This can be caused by the existence of an electrical conductor in the deep crust and/or mantle beneath this region.

(4) The phase  $\phi_{xy}$  shows a constant value of around 30 degrees for all period ranges. The phase  $\phi_{yx}$  curves can be classified into two groups. At some triangles the phase  $\phi_{yx}$  abruptly increases for a period of more than several hundred seconds; the resistivity structure cannot be simply explained by a two-dimensional structure model. At the other sites the phase  $\phi_{yx}$  does not show any remarkable phase change.

(5) Good quality data could not be acquired in the Sanyo area, at the south side of the Chugoku district, which is an important region for studying the northern leading edge of the subducting Philippine Sea plate. Major research efforts will be needed to overcome the difficulty of analyzing data of the electric field, which is contaminated by artificial noise.

**Key words:** network MT investigation, resistivity structure, clear resistivity boundary, seismic zone, Chugoku district

## 1. はじめに

第7次地震予知計画の一環として、日本列島下の大局的な電気比抵抗構造を決定するために全国規模でのネットワーク MT 法を用いた電磁気観測が1994年に始まった。このネットワーク MT 法は、森 (1985) により開発された NTT 通信回線網を地電位差変化測定に利用する手法を、上嶋・他 (例えば、UYESHIMA, 1990; 上嶋・他, 1992) が MT 観測に応用・発展したものである。UYESHIMA (1990) は、北海道中央部・東部地域の電気比抵抗構造調査においてネットワーク MT 法を適用してその原理の有効性を示し、得られた比抵抗構造と火山・プレートなどとの対応を明らかにした。このネットワーク MT 法の通常の MT 法に対する利点として次の4点を挙げる事ができる: (1) 観測される電場の S/N 比が大きい, (2) 小規模な表層付近の電気比抵抗の不均一を反映したスタティック効果を除去し得る, (3) NTT 通信回線ケーブルは保守・管理が徹底されているため長期間安定した記録を得ることができる, (4) 日本全国を覆うインピーダンスの分布を効率よく得ることができる。このような利点を活かし、あまねく日本列島下の比抵抗構造を解明できれば、現在の島弧の含水率や温度、圧力分布等を推定するための基礎的な情報を得ることができる。

ネットワーク MT 法観測は全国の大学の共同事業として位置付けられ、日本全国の研究グループが、主に北海道・東北・関東・中部を担当する東日本グループと中部・近畿・中国・四国・九州を担当する西日本グループに分かれ、調査研究を行っている (ネットワーク MT 東日本グループ・西日本グループ, 1994)。筆者らが関与する中国・四国地方のネットワーク MT 法観測では、1) フィリピン海プレートの電気比抵抗構造を求めること、2) もし、フィリピン海プレートの電気比抵抗構造が解明されたならその沈み込みの先端部を追跡すること、3) 上部・下部地殻の電気比抵抗構造を推定し、その構造と地震活動・地質構造 (内陸の活断層・第四紀火山・付加体構造) との関連を探ること、などを研究目標とした。

一方、広帯域 MT 観測装置を用いた日本列島下の電気比抵抗構造に関する研究が地殻比抵抗研究グループ (略称 CA グループ) を中心に進められている。塩崎 (1993) は、中国・

四国地方中央部で行われた CA グループによる電磁気共同観測のデータをもとに、西南日本外帯の上部地殻内や三瓶山下には低比抵抗領域が存在するが、地殻は全般的に高比抵抗であるという結論を得た。また、九州地方でもこの地殻の特徴は確認されており (HANDA *et al.*, 1992), 西南日本弧を構成する岩石は全般的に高比抵抗であることが示唆される。この観測事実は東北・中部日本で得られた研究成果 (例えば, UTADA, 1987; OGAWA, 1987) とは異なるものであり、西南日本弧の特異性ならびに海洋プレートが下部地殻に対して果たす役割を考察する上で新しい知見を我々に示している。本研究の対象地域である中国地方における面的な比抵抗構造調査はこれまで行われておらず、ネットワーク MT 法による観測研究により中国地方の大局的とはいえ面的な比抵抗構造が明らかにされれば、西南日本弧と東北日本弧のように活動様式が異なる島弧のテクトニクスの比較に関する重要な情報を得ることが期待される。

1994年12月から1996年3月にかけて西南日本弧を横切る比抵抗断面を得るために中国地方東部地域 (岡山県・鳥取県) においてネットワーク MT 法観測を実施した。ネットワーク MT 法の伝達関数を推定する三角形要素のもとになる測線の最良の組み合わせの選定作業や人工ノイズが混入しているデータについての処理方法など検討すべき課題も多く、まだデータ解析は完了していない。本稿では、中国地方におけるネットワーク MT 法観測の概要を報告するとともに、比較的良好な記録が得られている山陰地方で得られた地電位差記録を例示し、データを解析することが可能である地域については見かけ比抵抗値や位相差に関する解析結果を提出する。

## 2. 中国地方のネットワーク MT 法観測

ネットワーク MT 法観測では、メタリックの NTT 通信回線を地電位差変化の測定用ケーブルとして用いる。上嶋 (1993) によると、NTT 通信回線網は、ローカルには各交換局を中心として交換局エリア内の各点に放射状に広がり (市内線)、また各交換局はその地方の主幹電話局を中心とする放射状の回線 (市外線) で結ばれ、さらにその主幹電話局が主幹回線 (ネットワーク回線) で結ばれるというネットワーク構造を持っているので、このネットワーク構造を利用すれば任意の 2 地点間の地電位差観測が可能になる。

中国地方のネットワーク MT 観測点分布図を Fig. 1 (a) に示し、このうち山陰地方のネットのみを拡大して Fig. 1 (b) に示す。今回の観測では、無線伝送路地域ならびに回線の急速な光ファイバー化を考慮し、それらの地域を除外して、主幹電話局として新見・久世・津山・美作・岡山・根雨・米子・倉吉・鳥取・郡家を選定した。また、主幹電話局間では、鳥取一郡家間、鳥取一倉吉間、倉吉一米子間、津山一美作間が主幹回線で結ばれている。観測では、これら主幹局にデータロガー ((株)アドシステムズ社製 SES 93, 入力チャンネル数 8) を設置し、それぞれの主幹電話局ならびに交換局に敷設されている通信用アースを用い、原則として主幹局から放射状に広がる交換局 (最大 8 局) との間の電位差を記録した。測定間隔は 10 秒に設定し、各ネットでは最低 3 ヶ月間にわたり観測を行った。使用したデータロガーでは、10 秒間隔で記録を取る場合、1 秒毎のサンプルデータ 10 個の加算平均値を記録する。測定データは公衆電話回線を用いて適宜研究室のパソコン端末で収集した。この際、遠隔地のデータロガーの内部時計の設定やその時間のずれの収集も行った。

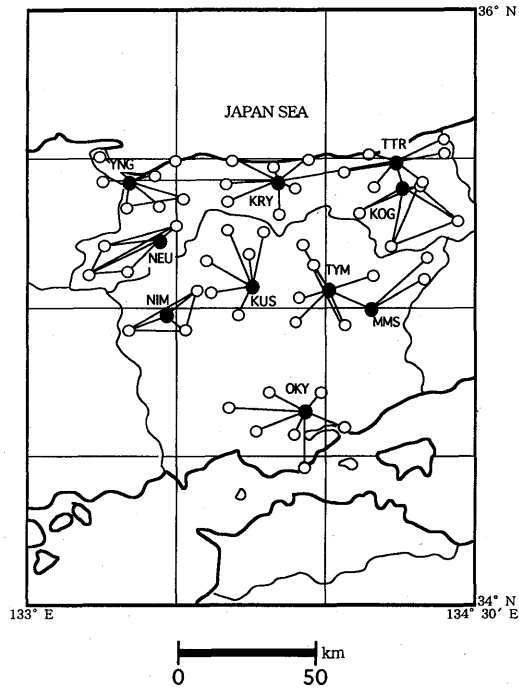


Fig. 1. (a) Location of observation points in the Chugoku district.

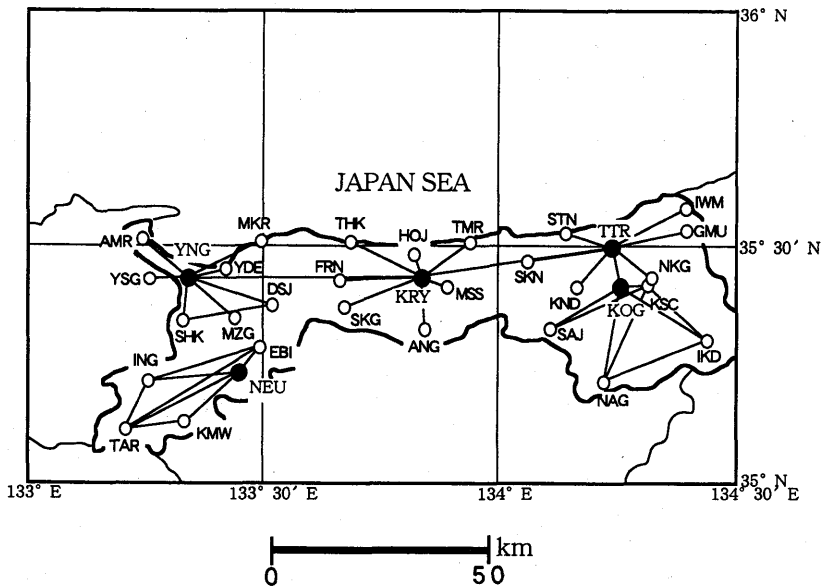


Fig. 1. (b) Location of observation points in the San'in area. Solid circles with abbreviated location names represent the NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) central stations, while open circles represent the NTT branch stations. Lines denote dipoles connecting two of the telephone stations.

各々のネットの観測点の緯度・経度・高度情報と観測期間や解析期間を Table 1 に記す。電位差は合計 69 組のアース極のペアで測定された。新見・久世・津山・美作ネットでは、1994 年 12 月下旬から 1995 年 6 月下旬にかけて、岡山ネットでは 1995 年 7 月上旬から 10 月中旬、鳥取・倉吉・郡家ネットでは 1995 年 12 月上旬から 1996 年 3 月上旬、米子・根雨ネットでは 1995 年 12 月上旬から 1996 年 2 月下旬にかけて測定を行った。一例として鳥取・倉吉・郡家・米子・根雨ネットについての主幹局—交換局および交換局—交換局間の 1996 年 1 月 14 日の電位差変化記録を Fig. 2 に示す。本研究では、参照磁場として気象庁柿岡地磁気観測所のフラックスゲート磁力計による地磁気 3 成分記録 (1 秒値) を用いたので、その地磁気 3 成分記録も合わせて上部に示した。鳥取・倉吉・郡家ネットのデータについては、昼間のノイズレベルでさえ 100 mV 以内に収まっており、夜間には地磁気 3 成分変化記録との対応が時系列上で確認できる良好な記録が得られた。KKY-TTR, KSC-KOG, FRN-KRY 間のようにほぼ東西方向に位置する観測点を結んだ組み合わせで電位差を測定した場合を除けば、東西方向の磁場変化に対応した電場変化が明瞭に記録されている。一方、米子・根雨ネットの記録では、昼夜を問わず人工ノイズの混入がみられ、特に、昼間には数 V (データロガー入力値) におよぶノイズ振幅が記録された。昼間のノイズは直流電化区間である JR 西日本の伯備線や山陰本線 (米子出雲間) を走る電車からの漏洩電流によるものと考えられるが、夜間においてもレベルは低くなるものの人工ノイズの混入がみられた。本紙面上では時系列データを示さないが、新見・久世・津山・美作・岡山ネットにおいても、同様に、昼間のみならず夜間においても途切れることなく人工ノイズが記録された。

なお、新見・久世・津山・美作ネットでは、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震の発震時の約 10 秒後に 10 mV/km の電場変化が記録された。この詳細については、他の研究報告 (大志万, 1995; ELECTROMAGNETIC RESEARCH GROUP FOR THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE, 1997) に詳しいが、地震断層面での破壊現象を理解する上でもネットワーク MT 法観測の記録が重要な研究資料として活用されたことも付記しておきたい。

### 3. データ解析の概要

データ処理の基本的操作は UYESHIMA (1990) に従い、ネットワーク MT 法の伝達関数を推定した。本章ではその概要を簡潔に述べる。ネットワーク MT 法では、次式で定義される地電位差—磁場間の応答関数  $[V_x(f), V_y(f)]$  を各測線に対して求める。

$$V(f) = V_x(f)H(f) + V_y(f)D(f)$$

ここに、 $V(f)$ ,  $H(f)$ ,  $D(f)$  は、それぞれ、各測線 (例えば、主幹局と交換局の 2 地点間) で観測された地電位差変化、定点観測された南北および東西方向の磁場変化のスペクトルであり、 $V_x(f)$ ,  $V_y(f)$  は定点観測点での南北方向および東西方向の磁場変動に対する各測線の電場変化の周波数応答関数である。また  $f$  は変動の周波数を示す。この  $V_x(f)$ ,  $V_y(f)$  は、主幹局や交換局の間にケーブルがつながっている限り、任意の 2 地点間に対して求めることができる。任意の三角形要素内で電場が一様であると仮定し、二辺 (2 測線) に対してこの電場変化の変換関数を求めることができれば、三角形領域内の任意の方向の電場を計算することができる。このようにして、任意の三角形要素に対してネットワーク

塩崎 一郎 他

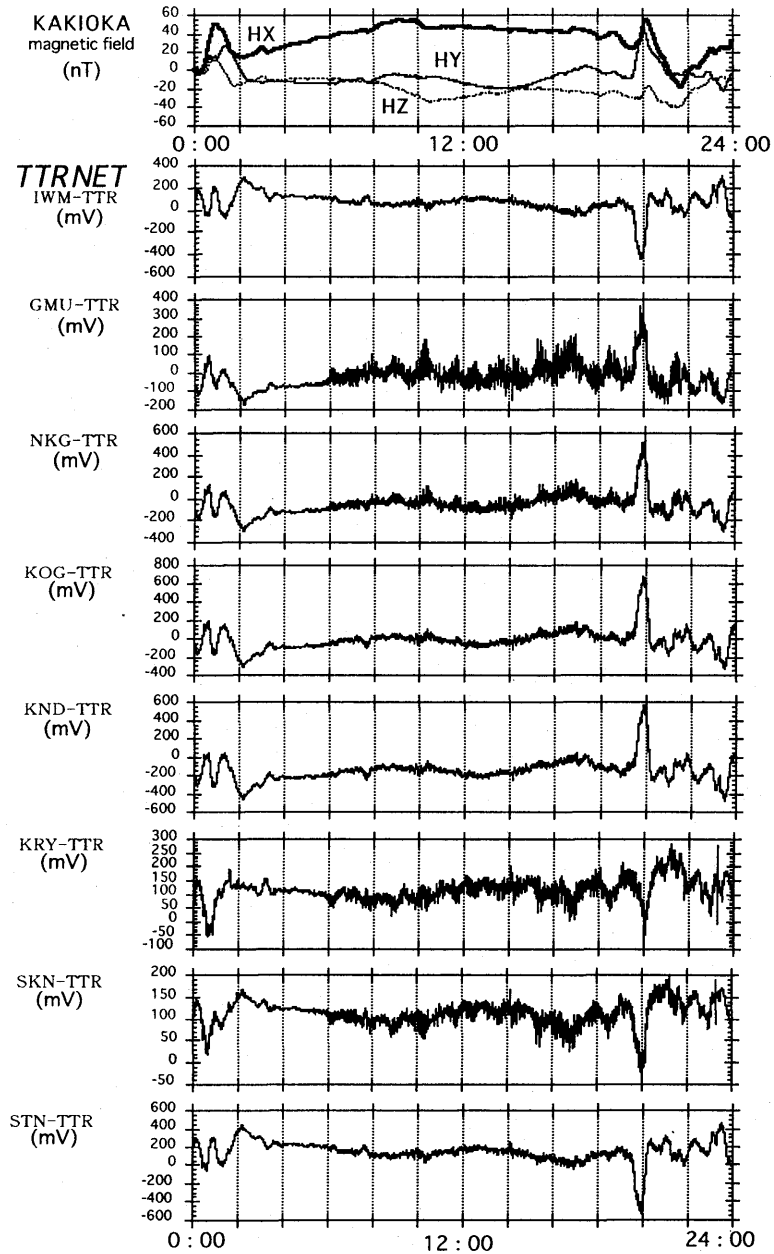
Table 1. List of network MT stations. Station name, code, latitude, longitude, altitude, periods of data acquisition and analysis are shown.

station	code	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Remarks
鳥取 (Tottori)	TTR	35° 29' 39"	134° 14' 13"	4.0	Period of data acquisition 95/12/04~96/03/06 Period of data analysis 95/12/10~96/02/29
岩美 (Iwami)	IWM	35° 34' 21"	134° 20' 08"	11.0	
蒲生 (Gamou)	GMU	35° 31' 44"	134° 23' 35"	85.0	
中河原 (Nakagawara)	NKG	35° 26' 21"	134° 20' 04"	120.0	
郡家 (Koge)	KOG	35° 24' 35"	134° 15' 24"	80.0	
神戸 (Kando)	KND	35° 24' 39"	134° 09' 42"	110.0	
倉吉 (Kurayoshi)	KRY	35° 25' 42"	133° 50' 10"	30.0	
鹿野 (Shikano)	SKN	35° 27' 47"	134° 03' 29"	50.0	
末恒 (Suetsune)	STN	35° 31' 15"	134° 08' 26"	10.0	
郡家 (Koge)	KOG	35° 24' 35"	134° 15' 24"	80.0	Period of data acquisition 95/12/04~96/03/06 Period of data analysis 95/12/10~96/02/29
私都 (Kisaichi)	KSC	35° 24' 51"	134° 19' 02"	250.0	
池田 (Ikeda)	IKD	35° 17' 49"	134° 26' 13"	300.0	
那岐 (Nagi)	NAG	35° 12' 39"	134° 13' 11"	280.0	
佐治 (Saji)	SAJ	35° 19' 30"	134° 06' 21"	220.0	
倉吉 (Kurayoshi)	KRY	35° 25' 42"	133° 50' 10"	20.0	Period of data acquisition 95/12/05~96/03/07 Period of data analysis 95/12/10~96/02/29
泊 (Tomari)	TMR	35° 30' 10"	133° 56' 06"	10.0	
三朝 (Misasa)	MSS	35° 24' 36"	133° 53' 14"	55.0	
穴糟 (Anagamo)	ANG	35° 19' 12"	133° 50' 20"	180.0	
関金 (Sekigane)	SKG	35° 22' 03"	133° 45' 06"	115.0	
古長 (Furunaga)	FRN	35° 25' 17"	133° 39' 42"	230.0	
東伯 (Touhaku)	THK	35° 30' 08"	133° 40' 58"	5.0	
北桑 (Houjou)	HOJ	35° 28' 42"	133° 49' 04"	6.0	
米子 (Yonago)	YNG	35° 25' 39"	133° 20' 16"	5.0	
米子 (Yonago)	YNG	35° 25' 39"	133° 20' 16"	3.0	Period of data acquisition 95/12/06~96/02/22 Period of data analysis 95/12/10~96/02/22
余子 (Amariko)	AMR	35° 30' 36"	133° 14' 26"	2.7	
御来屋 (Mikuriya)	MKR	35° 30' 15"	133° 29' 33"	7.9	
淀江 (Yodoe)	YDE	35° 26' 54"	133° 25' 14"	5.0	
大山寺 (Daisenji)	DSJ	35° 22' 20"	133° 31' 00"	690.0	
溝口 (Mizoguchi)	MZG	35° 20' 39"	133° 26' 14"	70.0	
西伯 (Saihaku)	SHK	35° 20' 29"	133° 19' 42"	30.0	
安来 (Yasugi)	YSG	35° 25' 47"	133° 15' 11"	1.7	

中国地方におけるネットワーク MT 法観測

Table 1. List of network MT stations (continued).

station	code	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Remarks
根雨 (Neu)	NEU	35° 13' 55"	133° 26' 40"	270.0	Period of data aquisition 95/12/05~96/02/22 Period of data analysis 95/12/10~96/02/22
江尾 (Ebi)	EBI	35° 16' 52"	133° 29' 30"	150.0	
印賀 (Inga)	ING	35° 12' 52"	133° 15' 06"	530.0	
多里 (Tari)	TAR	35° 06' 52"	133° 12' 18"	450.0	
上石見 (Kamiiwami)	KMW	35° 07' 45"	133° 19' 42"	370.0	
新見 (Niimi)	NIM	34° 59' 08"	133° 27' 48"	190.0	Period of data aquisition 94/12/20~95/06/28
大佐 (Oosa)	OSA	35° 03' 58"	133° 33' 44"	350.0	
井倉 (Ikura)	IKR	34° 55' 41"	133° 31' 26"	150.0	
哲西 (Tessei)	TES	34° 54' 54"	133° 19' 34"	380.0	
久世 (Kuse)	KUS	35° 04' 29"	133° 44' 58"	155.0	Period of data aquisition 94/12/20~95/06/28
美川 (Mikawa)	MKW	34° 58' 58"	133° 42' 16"	140.0	
中和 (Chuuka)	CHK	35° 15' 51"	133° 46' 56"	490.0	
若代 (Wakashiro)	WKS	35° 03' 25"	133° 36' 40"	290.0	
森山 (Hiruzen)	HRZ	35° 16' 35"	133° 40' 06"	450.0	
湯原 (Yubara)	YBR	35° 11' 06"	133° 44' 10"	330.0	
美新 (Bishin)	BSN	35° 09' 38"	133° 35' 56"	435.0	
津山 (Tsuyama)	TYM	35° 04' 02"	134° 00' 44"	100.0	Period of data aquisition 94/12/20~94/06/28
美作 (Mimasaka)	MMS	35° 00' 18"	134° 09' 01"	85.0	
日本原 (Nihonbara)	NHB	35° 06' 50"	134° 09' 20"	225.0	
奥津 (Okutsu)	OKT	35° 13' 04"	133° 55' 20"	350.0	
久米 (Kume)	KUM	35° 02' 32"	133° 54' 25"	150.0	
大掛和 (Oohaga)	OHG	34° 57' 30"	133° 53' 44"	370.0	
福原 (Yanahara)	YNH	34° 56' 50"	134° 03' 33"	70.0	
香々美 (Kagami)	KGM	35° 09' 03"	133° 57' 22"	230.0	
美作 (Mimasaka)	MMS	35° 00' 18"	134° 09' 01"	85.0	Period of data aquisition 94/12/20~95/06/28
大原 (Oohara)	OHR	35° 05' 56"	134° 19' 38"	210.0	
影石 (Kageishi)	KGI	35° 10' 35"	134° 20' 20"	340.0	
岡山 (Okayama)	OKY	34° 39' 38"	133° 55' 46"	5.0	Period of data aquisition 95/07/05~95/10/13
足守 (Ashimori)	ASM	34° 43' 26"	133° 48' 33"	20.0	
倉敷 (Kurashiki)	KRS	34° 35' 28"	133° 45' 37"	3.0	
西大寺神崎 (Saidajikanzaki)	KNZ	34° 36' 23"	134° 03' 32"	5.0	
総社新本 (Soujashinpon)	SNP	34° 40' 12"	133° 40' 20"	30.0	
藤田 (Fujita)	FJT	34° 34' 45"	133° 53' 30"	2.0	
玉野 (Tamano)	TMN	34° 27' 25"	133° 55' 39"	3.0	
牟佐 (Musa)	MUS	34° 43' 15"	133° 58' 56"	15.0	

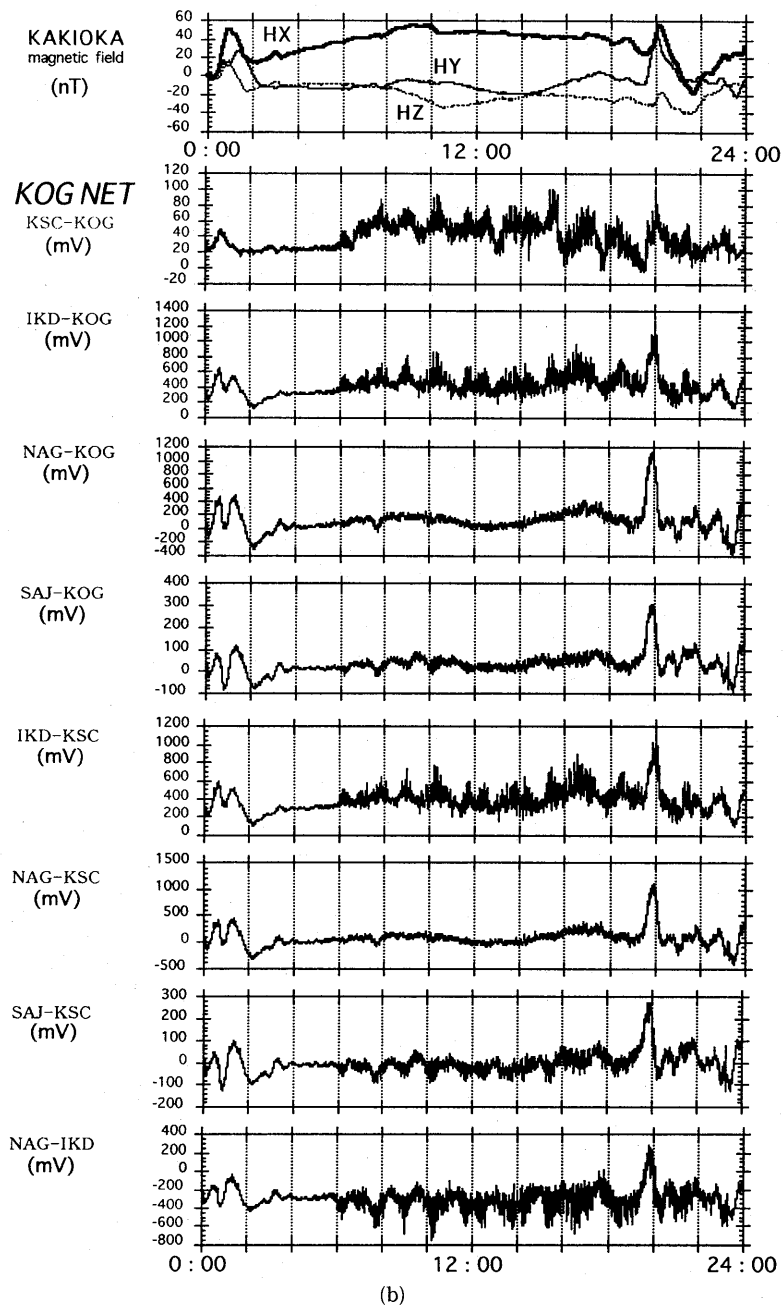


(a)

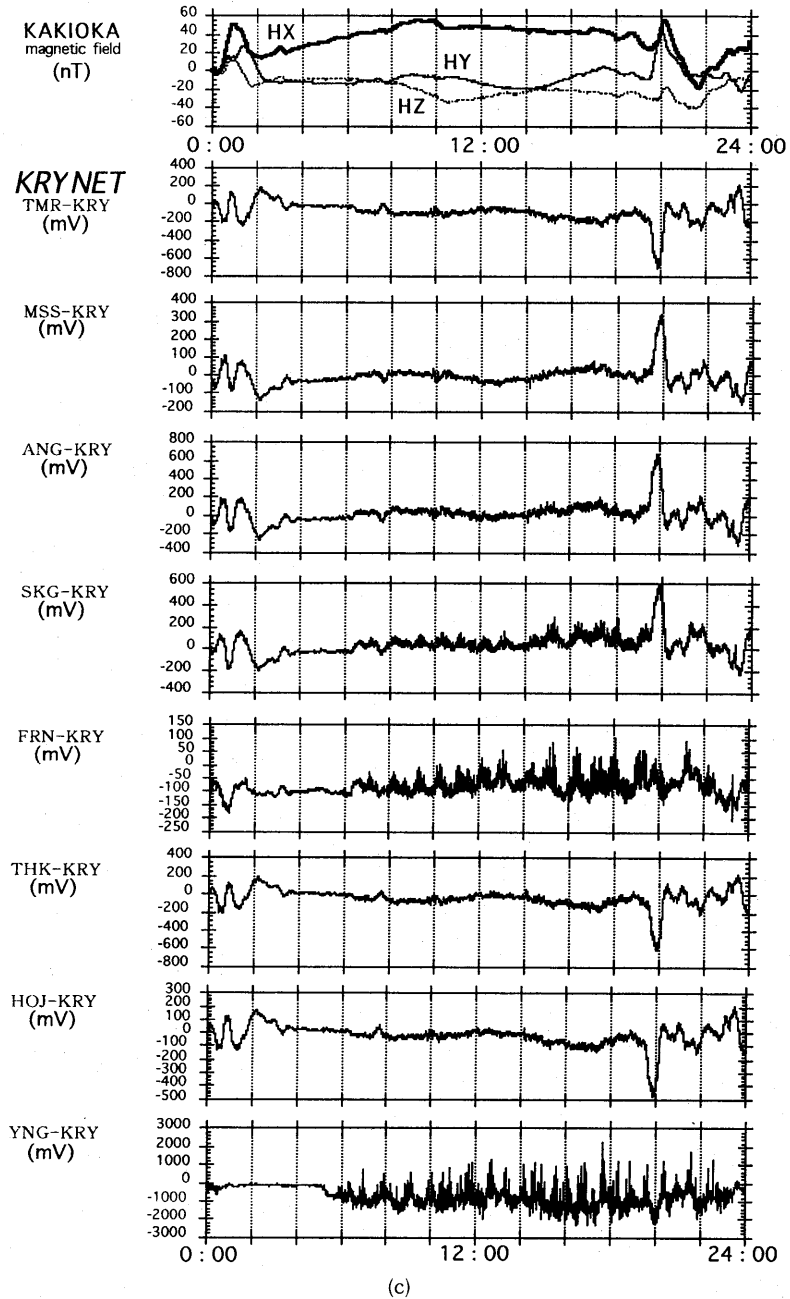
Fig. 2. Records of geomagnetic and electric field variations on Jan. 14, 1996 (in JST=UT +9hours). The uppermost figure shows Hx (northward), Hy (eastward) and Hz (downward) geomagnetic components at the Kakioka Geomagnetic Observatory, Japan Meteorological Agency. The lower eight records show electric field variations at each dipole in the (a) Tottori area, (b) Koge area, (c) Kurayoshi area, (d) Yonago area, and (e) Neu area.



中国地方におけるネットワーク MT 法観測

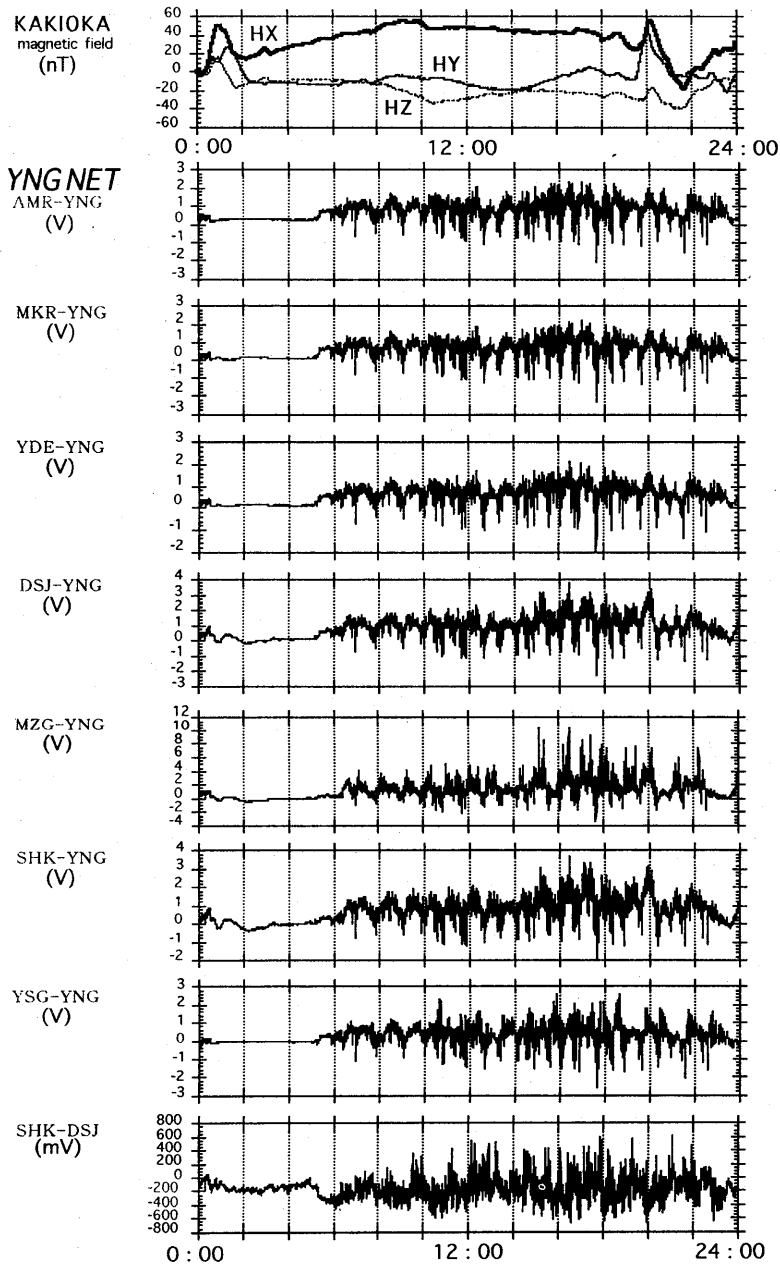


(b)  
Fig. 2. (Continued)



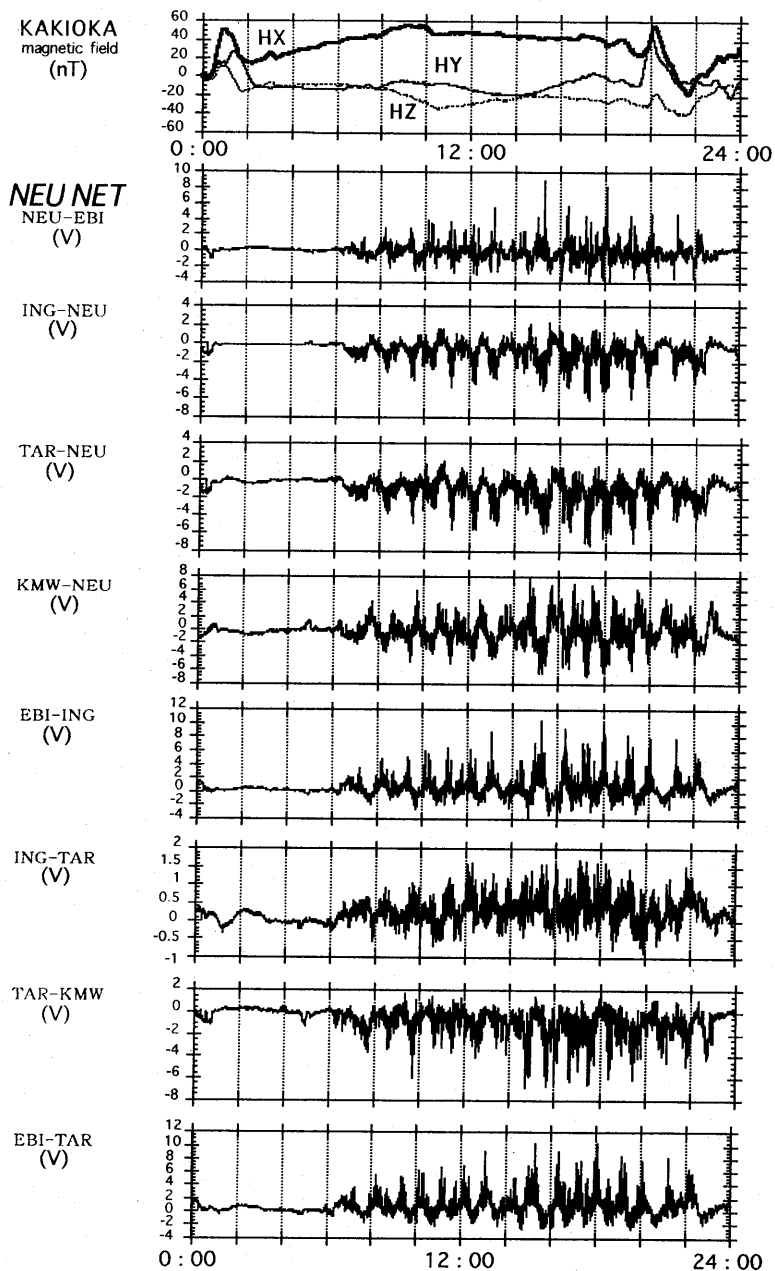
(c)  
Fig. 2. (Continued)

中国地方におけるネットワーク MT 法観測



(d)

Fig. 2. (Continued)



(e)

Fig. 2. (Continued)

MT 法の伝達関数 impedance tensor  $Z$  を求めることができる。

本研究では中国地方のネットワーク MT 法観測のネットの中でも相対的に良好な記録が得られた山陰地方の鳥取・郡家・倉吉・米子・根雨ネットにおいて主幹局を共通局とする三角形要素に対して解析を行った。解析の手順として、まず、各測線で観測された地電位差変化に対して 30 秒から 5120 秒を通すバンドパスフィルター (SAITO, 1978) を適用した。Table 1 に示す期間のデータを選出して、FFT 法 ( $N=512$ ,  $DT=10$  秒) により各成分のフーリエスペクトルを求め、周波数領域でのスペクトルのスタッキングを行い、各測線に対して  $V_x(f)$  と  $V_y(f)$  を求め推定精度を高めた。今回は、スペクトルを求める際に周波数領域での平滑化ならびにロバストスタッキングなどの処理は行わなかった。また、各測線のデータについては人工ノイズの影響を避けるために深夜から早朝にかけての時間帯 (0 時から 5 時) のデータを用いて解析を行った。その結果、表記の期間を用いた解析では、鳥取・郡家・倉吉ネットでは構造解析に使用できる結果が得られたが、残念ながら米子・根雨ネットについては、一つの三角形要素以外は推定誤差が大きく構造解析に使用できる結果を得ることが出来なかった。新見・久世・津山・美作・岡山ネットのデータ解析も含めて、直流電化された軌道鉄道が存在する都市部のネットワーク MT 法観測の記録の解析には課題が残った。

#### 4. 解析結果

データ解析の結果、得られた見かけ比抵抗曲線と位相差曲線を Fig. 3 に示す。白丸は南北方向の電場と東西方向の磁場成分から求めた見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  ならびに位相  $\phi_{xy}$  を示し、黒丸は東西方向の電場と南北方向の磁場成分から求めた見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  ならびに位相  $\phi_{yx}$  を示す。エラーバーはそれぞれのパラメータの標準偏差を示す。さらに、これらのデータをもとに作成された鳥取・倉吉・郡家・米子ネットにおける周期 64・128・640・1280 秒に対する見かけ比抵抗マップを Fig. 4 に示す。各々の三角形要素により多少の差異や例外はあるものの、見かけ比抵抗と位相、および見かけ比抵抗マップに関する全般的な特徴は次のようにまとめられる。

(1) 見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  は、周期数 100 秒から 1000 秒付近で減少傾向がみられるものの、全般的に長周期になるにつれて増加する。この探査曲線の形は、どの三角形要素についても、絶対値は異なるものの、互いに良く似ている。また、それぞれの三角形要素での見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  の値は、本研究の周期帯では一桁以内の範囲に収まっている。

(2) 位相  $\phi_{xy}$  は全解析周期帯にわたり一定の値 (約 30 度) を示す。

(3) 見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  は、1000 秒付近から増加傾向にあるところも鳥取ネットなどにみられるが、全般的に長周期になるにつれて減少する。見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  の場合と同様に、探査曲線の形は似ており、それぞれの三角形要素での値は、今回の周期帯では半桁程度の範囲に収まっている。

(4) 位相  $\phi_{yx}$  は、低周期側から周期数 100 秒にかけては横ばいか減少傾向を示すが、それ以上の長周期側では急増して 90 度を超える値を示す場合と、長周期側でも急増しない場合の二つに大別できる。また、多くの場合、位相  $\phi_{yx}$  は位相  $\phi_{xy}$  より大きな値をとる。

(5) KSC-IKD-KOG ネットを除けば、見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  の方が見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  より大きい値を示す。この特徴は見かけ比抵抗マップにも顕著に現れている。両成分の値には周

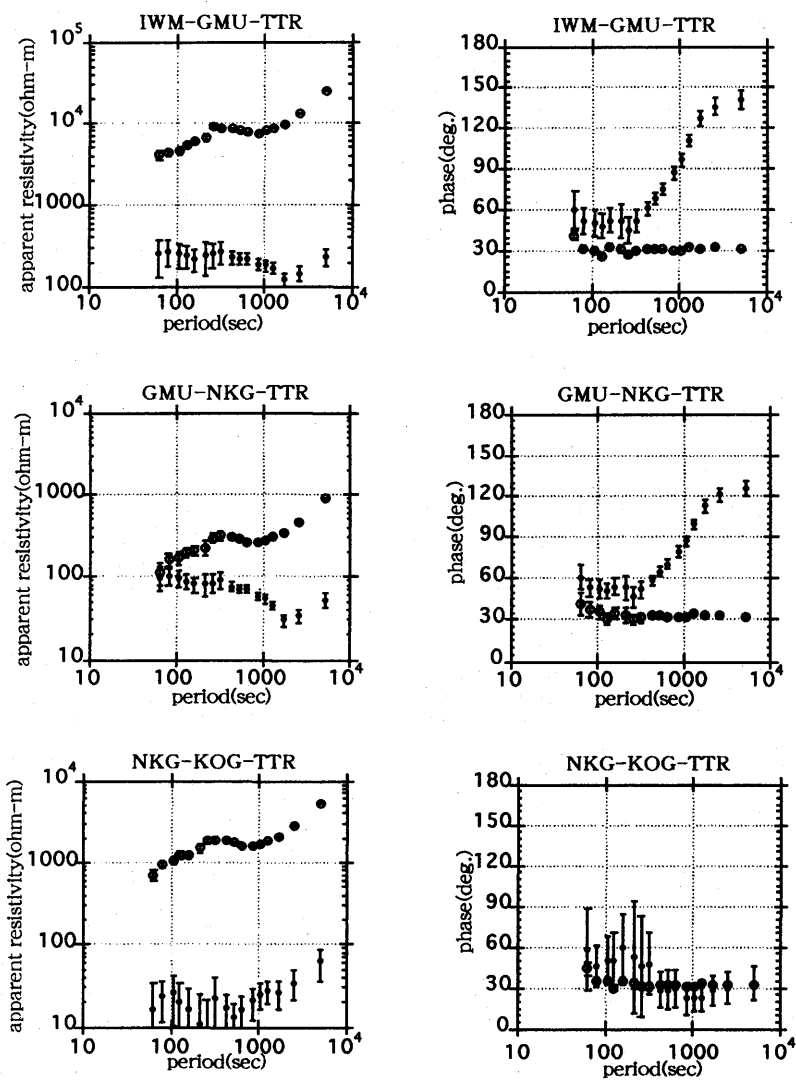


Fig. 3. Apparent resistivity (left) and phase value (right) against the period at each triangular element. Open circles represent apparent resistivity and phase values estimated from the combination of northward electric and eastward magnetic fields. Solid circles represent those estimated from the combination of eastward electric and northward magnetic fields. Error bars indicate standard deviation.

中国地方におけるネットワーク MT 法観測

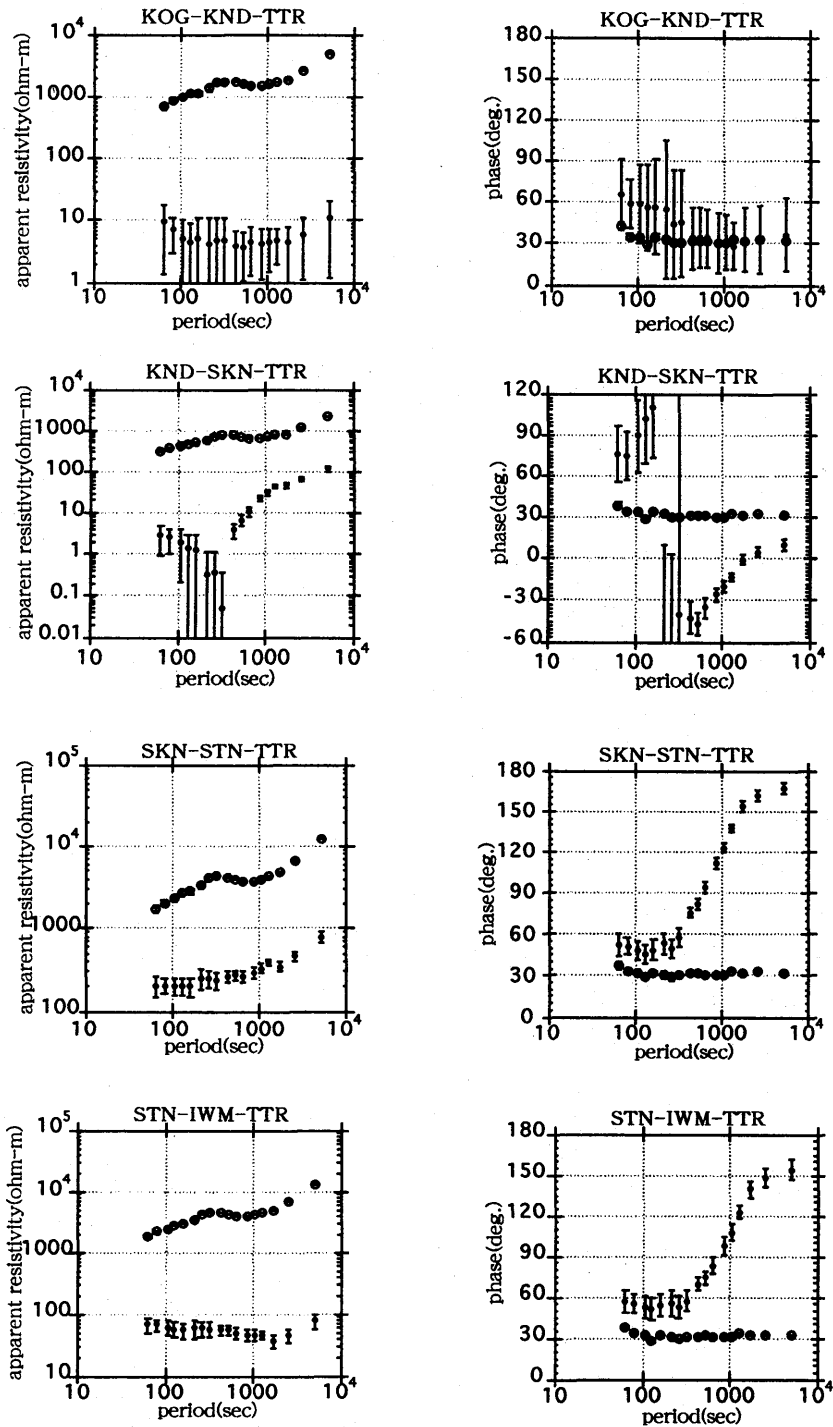


Fig. 3. (Continued)

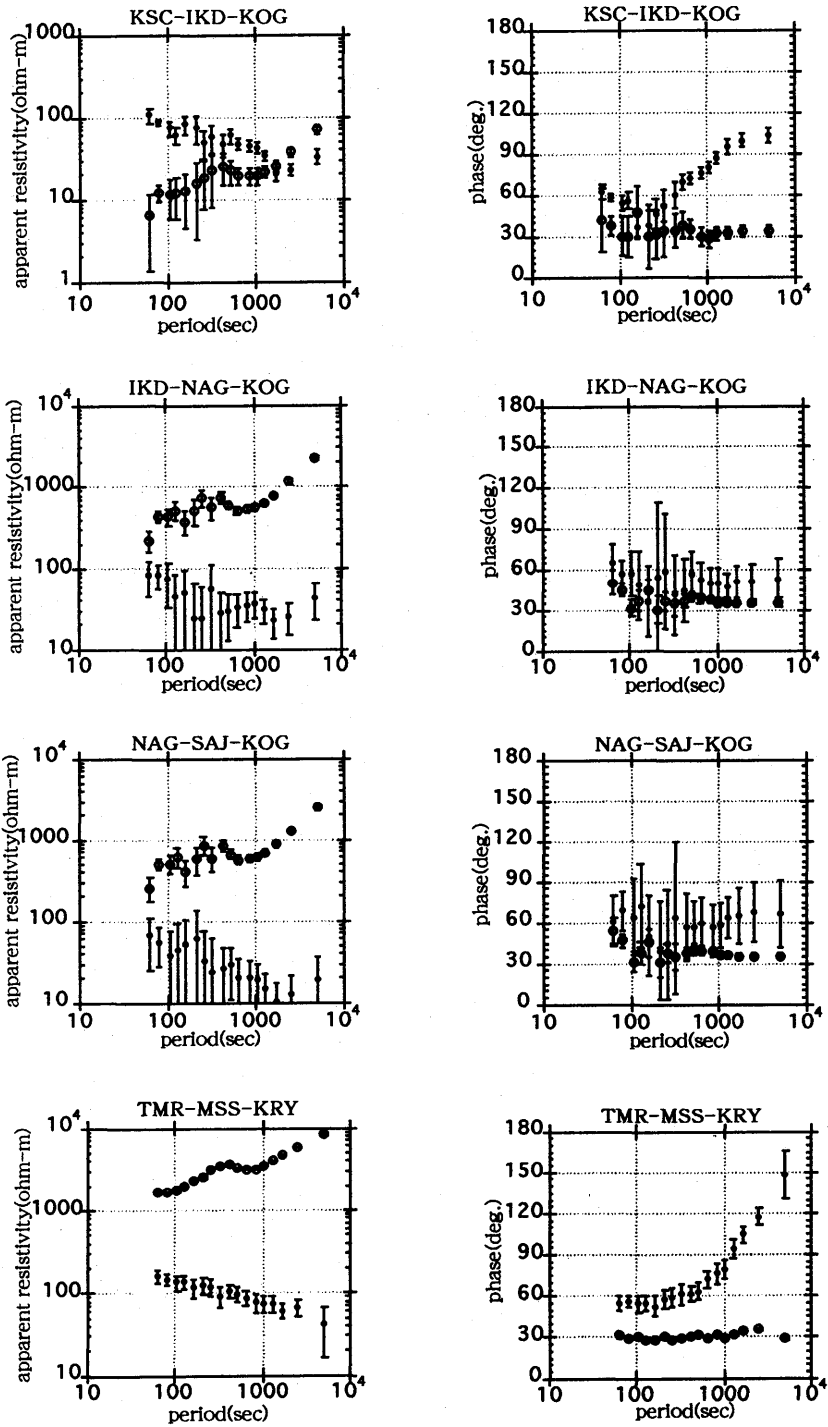


Fig. 3. (Continued)



中国地方におけるネットワーク MT 法観測

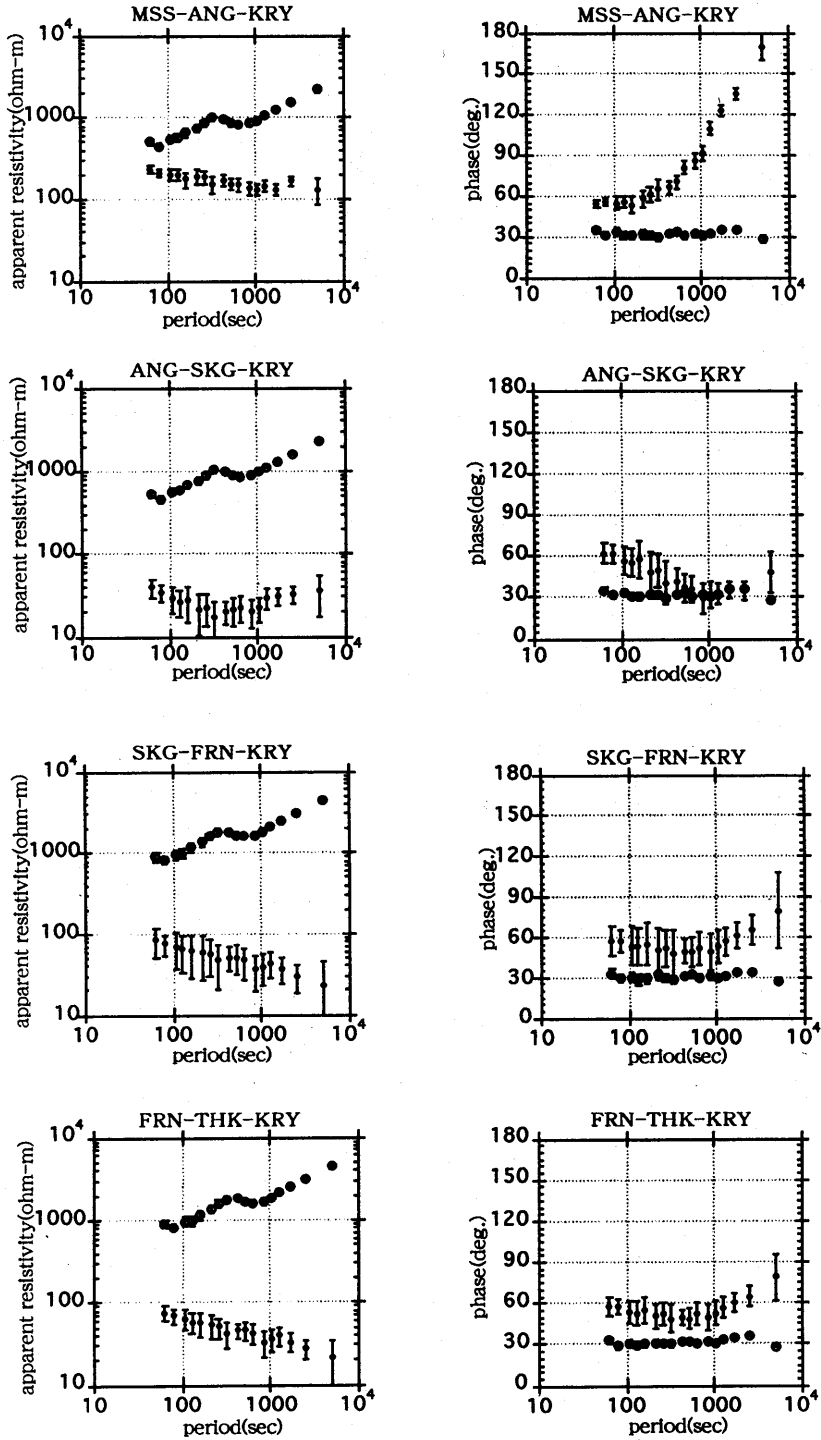


Fig. 3. (Continued)

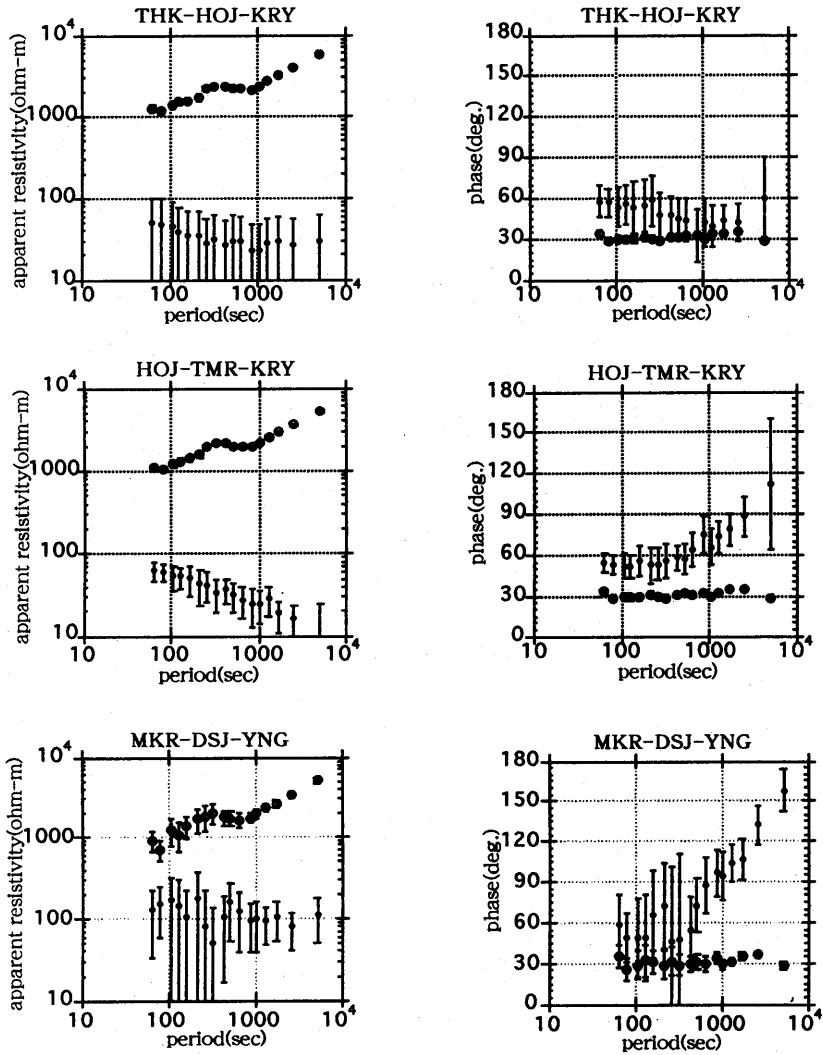


Fig. 3. (Continued)

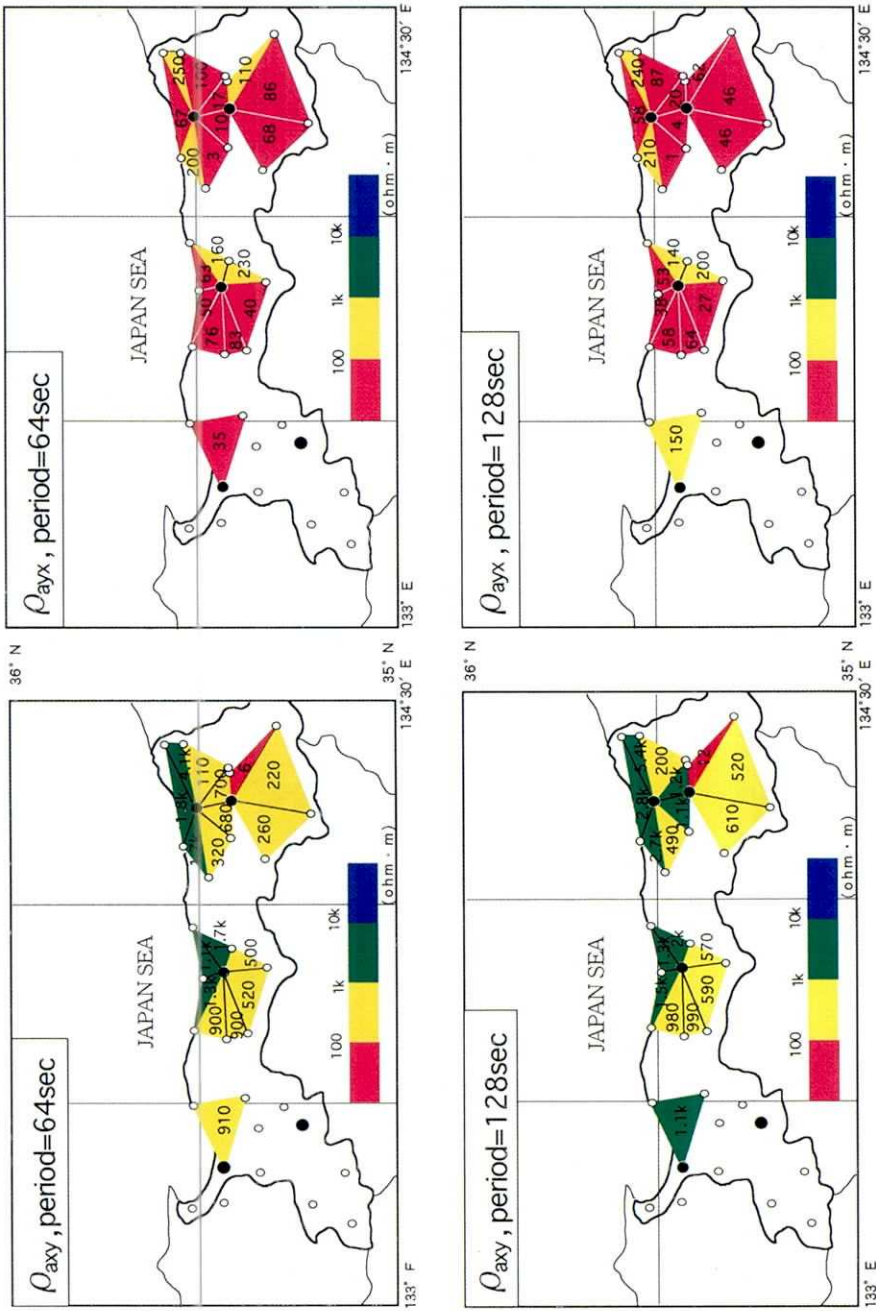


Fig. 4. Spatial distribution of the apparent resistivity  $\rho_{axy}$  and the apparent resistivity  $\rho_{ayx}$  for the periods of 64, 128, 640, and 1280 seconds. Numerals indicate resistivity in unit of ohm-m.

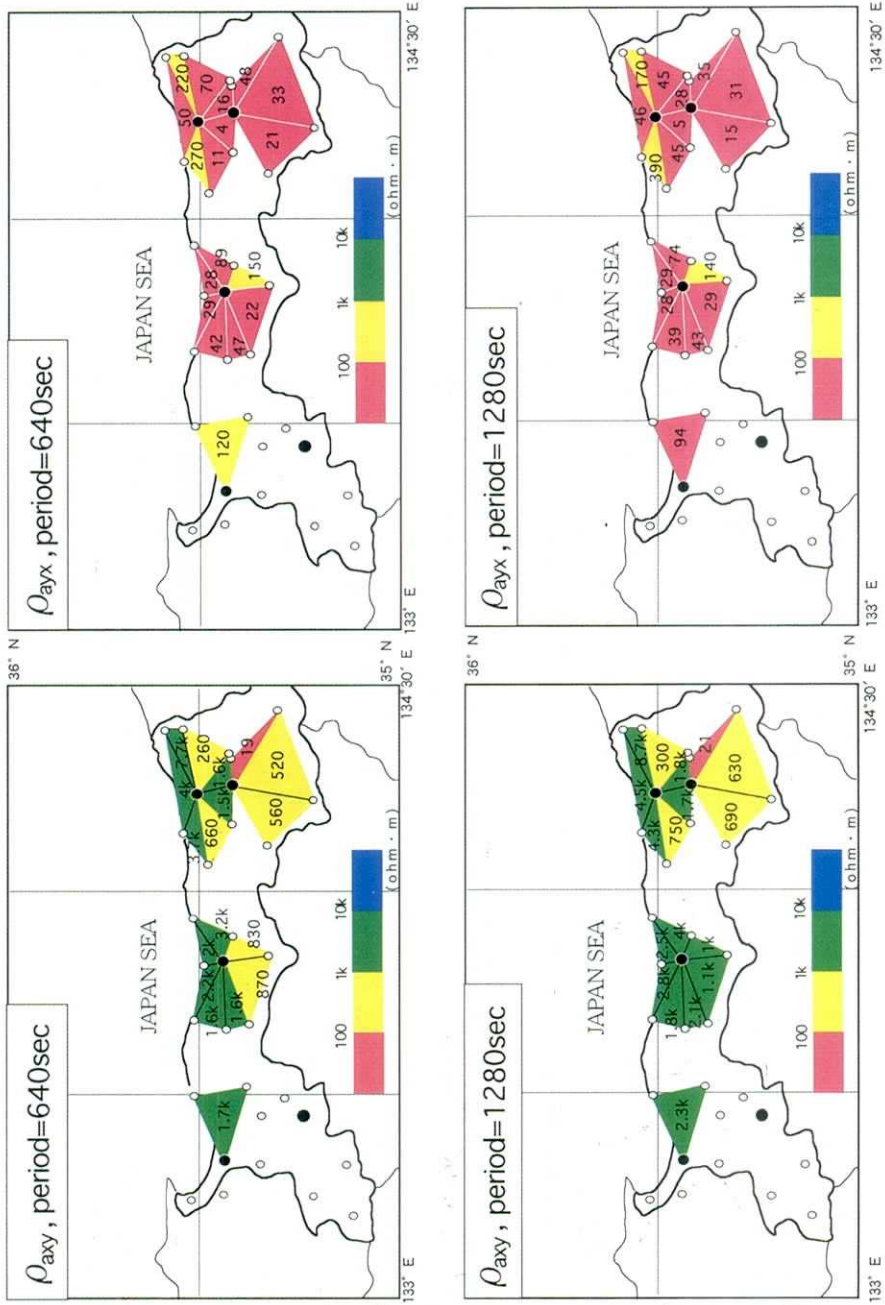


Fig. 4. (Continued)

期依存性があり、長周期になるほどその差は開いてゆく。両成分の値の差は、今回の周期帯では最大 2 桁程度である。

(6) 全ての三角形要素で見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  と位相  $\phi_{xy}$  の推定誤差は小さく、信頼度の高い結果が得られた。

(7) 見かけ比抵抗マップにおいて ( $\rho_{axy}$ ,  $\rho_{ayx}$  いずれの成分についても), SKN (鹿野) — TTR (鳥取) — GMU (蒲生) の線を境として、64 秒から 1280 秒の各周期に対して共通して、北側では高比抵抗、南側では低比抵抗となるコントラストがみられる。

これらの特徴を定量的に説明できるモデルを構築することが次のステップであるが、今回の報告では構造解析までは扱わない。次節ではデータ解析の結果に関して議論を行い、構造解析を行う場合に留意すべき問題点を指摘し、今後の研究の指針としたい。

## 5. 議 論

山陰地方のような海沿いの地域では、電気的良導体である海の影響を考慮することが必要である。ここで得られた見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  が見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  より常に大きくて、しかも長周期になるにつれて差が開くという特徴は、東西方向に陸・海の 2 次元的比抵抗コントラストが存在するモデル解析の結果 (例えば、小川・他, 1985) から定性的に説明できると考えられる。しかし、三角形要素ごとにその探査曲線に違いが見られ、それが海からの距離では単純に説明できないことや、見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  や見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  の探査曲線の形状が全般的によく似ていること、見かけ比抵抗マップでみられる平面的分布の特徴には周期依存性があまりみられないことなどは、長基線 (数 km 以上) 電場観測といえどもその長基線スケールでのスタティックな影響を受けていることが想定される。特に位相  $\phi_{xy}$  成分が地域に関係なく、広い周期にわたり約 30 度の安定した値を示すことは、スタティックシフトの存在を裏付ける。一方、位相  $\phi_{yx}$  成分は短周期側から周期数数百秒にかけては横ばいか減少傾向を示し、それ以上の長周期側では急増して 90 度を越える値を示す場合が多くみられたが、これには東西方向に走向を持つ構造を仮定した 2 次元構造解析では説明できない問題も含まれている。現時点では、このような問題に関して直ちに 3 次元構造解析を行うことは、計算機の性能を考慮すると現実的でない。次のステップとしては、広域的な 2 次元電磁誘導とネットワーク MT 法の長基線電場観測を用いても問題になる局所的な電場の擾乱を分離 (GROOM and BAILEY, 1989) し、3 次元性を示すデータから 2 次元電磁誘導項を取り出し、構造解析を進めることが妥当であろう。

次に、見かけ比抵抗マップ上でみられる比抵抗コントラストが、SKN (鹿野) — TTR (鳥取) — GMU (蒲生) の線を境として存在することに注目する。このことは、見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  ならびに見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  の両モードにおいて、三角形要素 SKN-STN-TTR および IWM-GMU-TTR と、三角形要素 KND-SKN-TTR および GMU-NKG-TTR との間に一桁程度の見かけ比抵抗値のコントラストが存在することで示され、この境界線の地下に電気的な不連続構造が示唆される。特に、SKN (鹿野) — TTR (鳥取) の線は、鳥取地震 (1943 年,  $M$  7.2) の地震断層である吉岡・鹿野断層の位置にほぼ一致することは興味深い。MIYAKOSHI and SUZUKI (1978) は、吉岡・鹿野断層付近で観測した地磁気脈動記録の解析から地磁気変換関数を求め、その変換関数の分布を説明するために、断層下の地殻中に南側へ傾斜したプリズム状の電気的良導体が貫入するモデルを提示した。この研究成果は本

研究の結果と調和的である。しかし、今回得られた比抵抗コントラストはその部分にとどまらずに東側の GMU (蒲生) まで延びており、電気的な不連続構造が既知の活断層の位置に限られないことを示す。中尾・他 (1991) は、中国地方東部から近畿地方北西部までの約 25 年間の地震活動データから、地震活動の活発な地域帯 (活動帯) とその活動帯の中の空白域を示した。鳥取県周辺の地震の震央分布を Fig. 5 に示す。ここでは日本海沿岸に沿って、山陰地方東部をほぼ東北東から西南西に切り裂く地震の活動帯が示される。今回得られた見かけ比抵抗のコントラストの境界は、この大規模な地震の活動帯と関連づけられるものかもしれない。ただし、境界南側の低比抵抗領域は鳥取ネットにとどまらずに郡家ネットまで広がっていることが示唆され、その実態を解明するためにはさらなる調査が必要である。

また、見かけ比抵抗  $\rho_{\text{axy}}$  曲線は、全般的に長周期になるにつれて増加するが、ほぼ全てのネットにおいて周期数 100 秒から 1000 秒付近で減少傾向がみられることも明らかになった。スキンドepsを考慮すれば、おそらくは地殻深部か、上部マントル内の良導層を捉えたものと推測されるが、上述の問題を解決した上での構造解析が待たれる。

本稿では、鳥取主管局の東方約 550 km に位置する気象庁柿岡地磁気観測所の地磁気 3 成分記録を参照磁場として使用した。これは、柿岡地磁気観測所では本研究の全観測期間

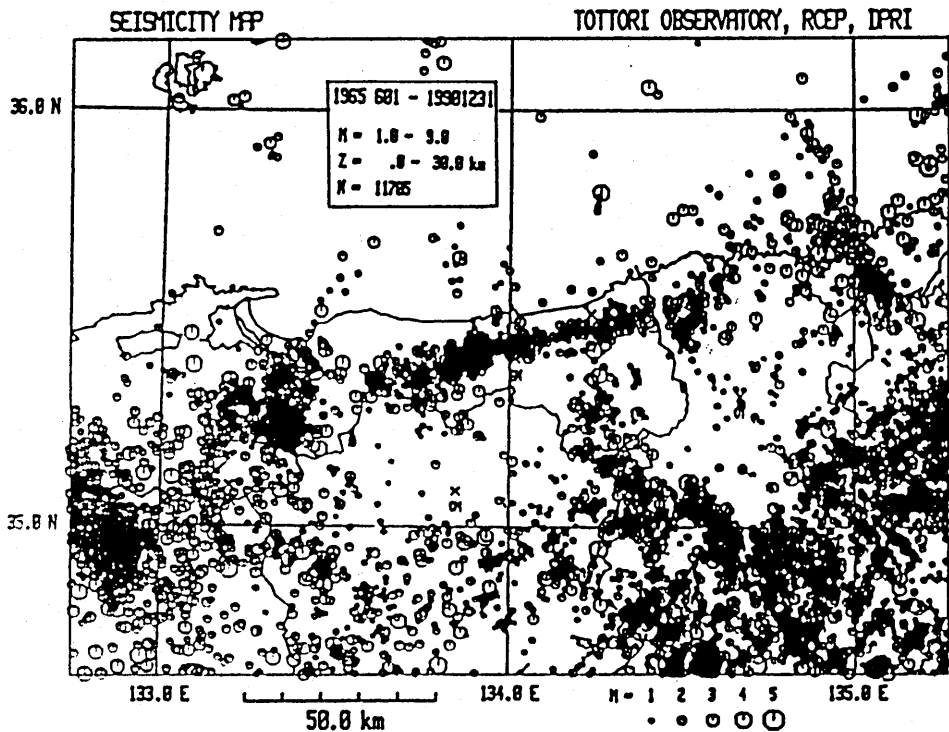


Fig. 5. Shallow seismicity (<30 km) around the study area during the period from June 1965 to December 1990. Crosses show the seismic observation stations. Earthquakes with magnitude greater than 1.0 are plotted. (after NAKAO *et al.*, 1991)

中国地方におけるネットワーク MT 法観測

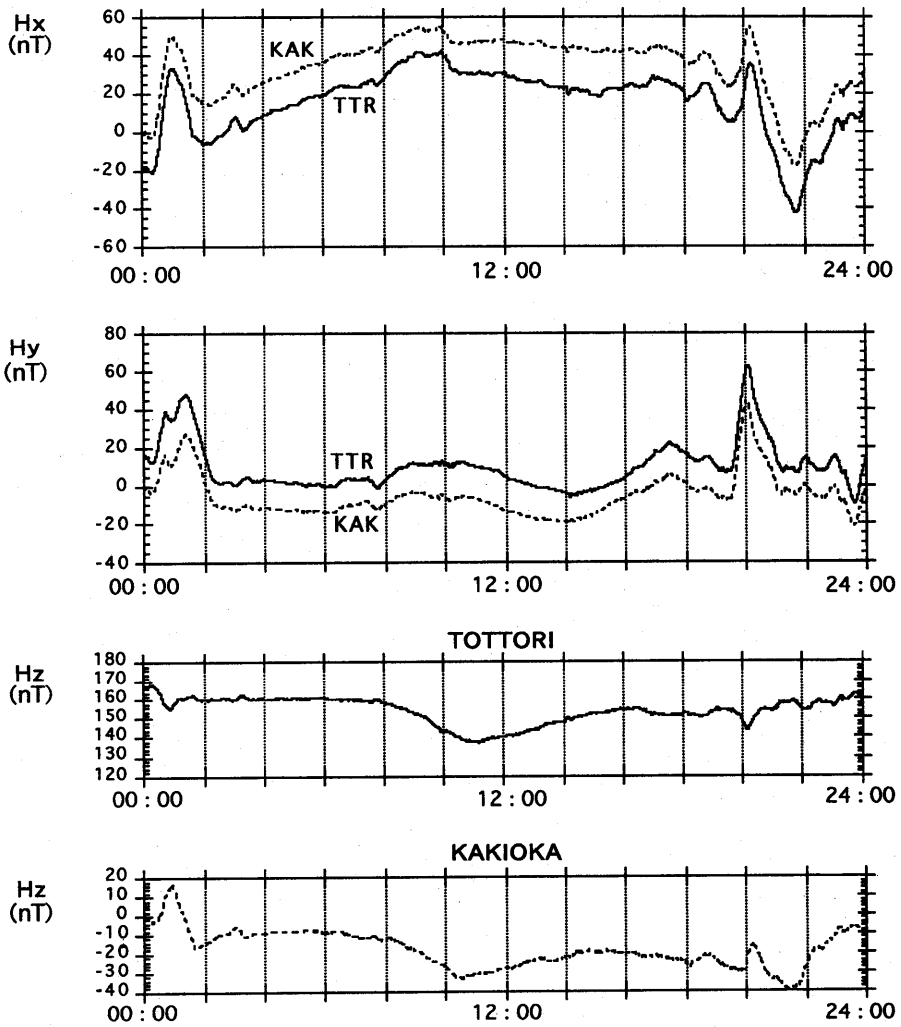


Fig. 6. Comparison of the three component geomagnetic records Hx, Hy and Hz between the Kakioka Geomagnetic Observatory (Japan Meteorological Agency) and the Tottori Observatory (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University) on Jan. 14, 1996. The first and second boxes show Hx and Hy components between the two sites. The third and fourth boxes show Hz component at Tottori and Kakioka Observatory, respectively. Unit of measurement is nT.

を通して、今回の電場計測に用いた 10 秒以上の高速サンプリング計測が実施されていて (1 秒値データが公開されている)、かつ、各種の人工ノイズによる影響もかなり少なく、安定した計測が行なわれているためである。Fig. 6 に柿岡地磁気観測所と京都大学防災研究所地震予知研究センター鳥取観測所の地磁気 3 成分記録を対比して示す。1996 年 1 月 14 日の両観測所の記録例では、地磁気鉛直成分には振幅・位相に差異が読み取れるものの、南北・東西方向の水平成分には顕著な相違は見られない。このことにより、柿岡地磁気観測所の磁場水平成分を参照磁場とする有効性を表すものと判断する。今後の課題として、観測地域内で磁場稠密観測を行い、柿岡の磁場に対する磁場間の伝達関数の空間分布を求め、柿岡地磁気観測所の 3 成分記録を参照して求めたネットワーク MT 法観測の伝達関数の妥当性がどの周期の範囲で成り立つかを定量的に見積もることが必要であろう。

ネットワーク MT 法観測では、NTT 主幹電話局ならびに交換局に敷設されている通信用アースを用い、主幹局と交換局の間の電位差を記録する。しかし、任意の 2 地点間を結ぶケーブルは必ずしも直線で結ばれていないかもしれない。この場合、磁場の鉛直成分が存在する時には、2 地点間の電位差は測定するケーブルの経路により異なる。この電位差の違いについて UYESHIMA (1990) は、SWIFT (1986) の考え方を基に次のように見積もった。すなわち、周期 5 分の鉛直成分と水平成分の比が 0.5 である磁場が比抵抗値 500 ohm-m の大地に対して入射する場合、任意の 2 地点間を結ぶ弧状のケーブルとその 2 地点間を結ぶ直線で囲まれる領域の面積をその直線で除した値が 10 km であると仮定すると、この弧による影響は 3.6% に限られる。ところで、Fig. 6 に示した鳥取観測所の磁場記録から鉛直成分と水平成分の比は 0.2 程度である。今回の場合に同様の考え方を適用すれば、たとえ周期が 64 秒の現象を考えても 2 地点間の電位差測定に 3.0% の程度の影響を与えるにすぎない。加えて、今回は主幹局を共通局とする三角形要素のみに対してネットワーク MT 法の伝達関数を求めており、NTT のアースケーブルが複雑に経由した結果、鉛直磁場変動による効果が無視できないような伝達関数を求めたわけではない。従って、本研究で扱った周期数 10 秒以上のデータに関しては、ケーブルの経路の差による影響は少ないと思われる。それ以下の短周期側のデータは主として地殻浅部の情報に左右されるので、活断層構造との関連を詳細に調べる必要がある場合などでは、他の手法による探査が必要になる。その際、ネットワーク MT 法観測のデータを併せて利用するには、さらに詳しい検討を行う必要がある。

最後に、今回は山陰地方のデータを解析したが、先述のように鳥取・郡家・倉吉ネットを除き、米子・根雨ネットについては一つの三角形要素以外は構造解析に使用することが出来なかった。フィリピン海プレートの沈み込みの北限を議論するときに必要な不可欠と考えられる中国地方の脊梁部・瀬戸内海側のデータに関しては、昼間・夜間を問わず電車の漏洩電流やその他の都市ノイズによる電場の擾乱が著しく、構造解析に使用できるデータは得られていない。これらの地域のネットワーク MT 法観測データの解析には課題が残った。

## 6. まとめ

中国地方のネットワーク MT 法観測ならびに解析の結果、以下の各点が明らかになった。



## 中国地方におけるネットワーク MT 法観測

(1) 見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  ならびに見かけ比抵抗  $\rho_{ayx}$  の探査曲線は、 $\rho_{axy}$  が  $\rho_{ayx}$  より常に大きくて、しかも長周期になるにつれて差が開くという特徴を示すが、これは定性的には山陰地方の海・陸境界の 2 次元的比抵抗コントラストの存在で説明できる。

(2) 見かけ比抵抗マップの比抵抗コントラストが、SKN (鹿野) —TTR (鳥取) —GMU (蒲生) の線を境として存在し、境界の北側では高比抵抗、南側では低比抵抗となっている。その境界線は、吉岡・鹿野断層を含む微小地震帯の位置と一致し、さらに、南側の低比抵抗領域は鳥取ネットにとどまらず、郡家ネットのエリアまで広がっている。

(3) 見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  曲線は、全般的に長周期になるにつれて増加するが、ほぼ全てのネットでも周期数 100 秒から 1000 秒付近で減少傾向がみられる。周期を考慮すれば、おそらくは地殻深部か、マントル上部内の良導層を捉えたものと推測されるが、スタティック効果などの問題を解決した上での構造解析が待たれる。

(4) 見かけ比抵抗の探査曲線の形状や見かけ比抵抗マップの平面的分布の特徴は、長基線スケールでのスタティック効果の影響を受けていることを示す。その影響は見かけ比抵抗  $\rho_{axy}$  や位相  $\phi_{xy}$  に顕著に現れている。

(5) 位相  $\phi_{yx}$  は短周期側から周期数百秒にかけては横ばいか減少傾向を示すが、それ以上の長周期側では急増して 90 度を越える値を示すデータが多くみられる。これは、東西方向に走向を持つ単純な構造を仮定したモデルでは説明できない。

(6) フィリピン海プレートの沈み込みの北限を議論するときに必要不可欠と考えられる中国地方の脊梁部・瀬戸内海側のデータに関しては昼間・夜間を問わず電車の漏洩電流やその他の都市ノイズによる電場の擾乱が著しく、構造解析に使用できるデータは得られなかった。

今後は、これらの特徴に十分留意した解析を進め、西南日本弧の地殻・マントル上部の電気比抵抗構造を解明し、活動様式が異なる島弧のテクトニクスの比較に関する重要な情報を得るとともに、地震予知研究の基礎的資料としても役立てたい。

### 謝 辞

本研究では、気象庁柿岡地磁気観測所の地磁気 3 成分記録を参照磁場として使用させて頂いた。紙面を借りて謝意を表します。なお本稿は、平成 9 年度東京大学地震研究所共同利用・研究会集 (課題番号: 1997-W 2-09) 「フィリピン海プレート: その構造とテクトニクス・火山活動との関係」において発表し、議論された成果の一部をとりまとめたものである。

### 文 献

- GROOM, R.W. and R.C. BAILEY, 1989, Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1913-1925.
- HANDA, S., Y. TANAKA and A. SUZUKI, 1992, The electrical high conductivity layer beneath the northern Okinawa Trough, inferred from geomagnetic depth sounding in northern and central Kyushu, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 505-520.
- MIYAKOSHI, J. and A. SUZUKI, 1978, Geomagnetic induction study of the seismically active fault along the southwestern coast of the Sea of Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **30**, 549-560.
- 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.
- ネットワーク MT 東日本グループ・西日本グループ (上嶋 誠・塩崎一郎), 1994, ネットワーク MT 法観測計画, Conductivity Anomaly 研究会 1994 年論文集, 134-138.

塩崎 一郎 他

- 中尾節郎・渋谷拓郎・西田良平・佃 為成・尾池和夫, 1991, 地震活動帯における空白域と地震発生の関係について, 京都大学防災研究所年報, **34 B-1**, 231-251.
- 小川康雄・佐藤 功・菊地恒夫, 1985, マグネテルリック法 2次元計算カタログ, 地質調査所研究資料集, 通商産業省工業技術院地質調査所, **17**, 448 頁.
- OGAWA, Y., 1987, Two-dimensional resistivity modeling based on regional magnetotelluric survey in the northern Tohoku district, *J. Geomag. and Geoelectr.*, **39**, 349-366.
- 大志万直人, 1995, 1995年兵庫県南部地震に関する電磁気変化, 月刊地球, 号外 **13**, 164-174.
- ELECTROMAGNETIC RESEARCH GROUP FOR THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE, 1997, Tectono-electric signal related with the occurrence of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (*M*7.2) and preliminary results of electromagnetic observation around the focal area, *J. Phys. Earth*, **45**, 91-104.
- SAITO, M., 1978, Automatic design of recursive digital filters, *Geoexploration*, **31**, 240-263.
- 塩崎一郎, 1993, 中国・四国地方の電気比抵抗構造に関する研究, 神戸大学博士論文, 196 頁.
- SWIFT, C. M., 1986, A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, "*Magnetotelluric Methods*", edited by K. VOZOFF, Geophysics reprint series No. 5, Soc. of Explor. Geophys., 156-166 (extracted from Ph. D. Thesis, M.I. T., 1967).
- UTADA, H., 1987, A direct inversion method for 2 dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, D. Sc. Thesis, University of Tokyo, 409 pp.
- UYESHIMA, M., 1990, Application of network MT method to the study of electrical conductivity structure in the central and eastern part of Hokkaido, D. Sc. Thesis, University of Tokyo, 236 pp.
- 上嶋 誠・仲山 洋・西田泰典・歌田久司, 1992, ネットワーク MT 法による地下電気伝導度構造探査, 月刊地球, **14**, 551-558.
- 上嶋 誠・歌田久司, 1993, ネットワーク MT 法観測の概要, Conductivity Anomaly 研究会 1993 年論文集, 15-21.

(Received August 31, 1998)

(Accepted March 17, 1999)