

中部地方 新潟-神戸歪み集中帯周辺のネットワーク MT 観測 —石川高松-阿木測線の序報—

最上巴恵・山口覚（神戸大・理），上嶋誠・小河勉・臼井嘉哉（東大・地震研），
村上英記（高知大・理），丹保俊哉（立山カルデラ砂防博物館），藤浩明（京大・理），
大志万直人・吉村令慧（京大・防災研），小山茂・望月裕峰（東大・地震研）

Network-MT survey around the Niigata-Kobe Tectonic Zone in Chubu district: The first report of the Ishikawa_Takamatsu-Agi transect

Tomoe Mogami, Satoru Yamaguchi (Kobe Univ.), Makoto Uyeshima, Tsutomu Ogawa,
Yoshiya Usui (Univ. Tokyo), Hideki Murakami (Kochi Univ.),
Toshiya Tambo (Tateyama Caldera Sabo Museum), Hiroaki Toh (Kyoto Univ.),
Naoto Oshiman, Ryokei Yoshimura (Kyoto Univ.), Shigeru Koyama,
Hiromine Mochizuki (Univ. Tokyo)

Abstract:

In order to reveal the subsurface conductivity structure around the Niigata-Kobe Tectonic Zone in Central Japan, we are promoting the Network-MT surveys in the five prefectures of Toyama, Nagano, Gifu, Ishikawa and Fukui. We present observation system and preliminary MT responses along the transect (Ishikawa_Takamatsu to Agi) in this paper. We obtained stable MT responses at 11 sites from 16 sites along the transect. Voltage difference data at excluded 4 sites, which are located in the southernmost part of the transect were severely contaminated by artificial noise. Another excluded site showed unstable MT responses, probably because of unsuitable arrangement of electrodes. Anomalous large off-diagonal phase exceeding 90° were found at 2 sites in the northern part of the transect. Regional strike of the conductivity structure was estimated to be $N75^\circ E-S75^\circ W$ using the Phase Tensor analysis. Apparent resistivity of TM mode changes markedly between the Fukumitsu and Kamitaira sites, suggesting large change of the conductivity structure here. More precise MT responses will be obtained using the remote-reference analysis based on longer data set.

1. はじめに

中部日本背弧側の新潟から神戸に伸びる帯状の領域は、周囲よりも水平変位速度が大きく、新潟-神戸歪集中帯 (Sagiya et al., 2000) と呼ばれている。また、中部地方中央部に位置する北アルプス下では、地震活動や火山活動の活発な領域が存在することが、中部日本の前弧側では、非火山性の低周波微動が多発している事が報告されている。これらの地殻活動は、水やメルトのような地殻内の流体の存在または運動に関連していると考えられている (上嶋他, 2008)。

岩石の電気比抵抗は、媒質の組成、状態、温度、相によって値が決まる。特に、流体の存在量およびそれら相互の連結状態によって大きく値が変化する (例えば, Archie, G. E., 1942; Kariya and Shankland, 1983; Nesbitt, 1993; Glover et al., 2000)。地震波速度、重力、熱流量とは独立した物理量である電気比抵抗値に基づいた地下構造の像を描くことによって、中部日本の地下で起こっている地殻活動のメカニズムを解明する上で重要な手がかりを得られる事が期待される。

本論文では、2005年から2008年に展開したネットワーク MT 観測のうち、石川県かほく市高松から岐阜県中津川市阿木にいたる測線のデータの予察的な解析結果について述べる。

2. 観測

本研究で用いた観測システムの概要を述べる。各中継局で3ないし4点の電信柱の近傍に自作電極を埋設し、それらの電極と中継局のアースの間、もしくは電極間の電位差を、SES93を用いて測定した。測定されたデータはネットワーク接続装置 (SESNET, これはデータ収録のコントロールも行う) によって逐次取り出され、内蔵されたハードディスクへ保存されるのと同時にサーバーへ転送される。毎日NTPサーバーに接続し、この装置の時刻補正及びSES93の時計との比較を行っている。ネットワーク接続装置とインターネットへの接続はルータ及びADSLモデムを介して行う。観測データの流れと各機器の詳細をFig.1に示す。

本研究で使用した電位差データは、中部日本ネットワーク MT 観測 (以降、中部NMT) のネットのうち、石川高松、津幡、北蟹谷、福光、上平、白川郷鳩ヶ谷、白川郷御母衣、荘川、榎原、飛騨萩原、下呂、飛騨竹原の12点で測定されたデータである。これらのネットの配置をFig.2に示す。また、各ネ

ットの略号，電極の位置および観測期間を Table 1 に示す．電位差データのサンプリング間隔は 0.1 秒である．本研究では 0.1 秒サンプリングのデータから作られる 1 秒間隔のデータセットを使用した．

一方，磁場データは，中部 NMT の磁場観測点（白川，輪島，上宝，大鹿）のうち，本研究で扱ったネットに最も近い白川観測点で測定されたデータを使用した．

磁場の観測には，fluxgate 磁力計を用い，地磁気 3 成分をサンプリング間隔は 0.1 秒で測定した．白川観測点の観測期間は 2007 年 1 月 1 日から 2008 年 7 月 7 日である．本研究では 0.1 秒サンプリングのデータから作られる 1 秒間隔のデータセットを使用した．

3. データ解析

データ解析は以下の手順で行った．

(1) データの点検

得られた電位差データと磁場データを目視によって点検した．磁場データは，観測期間のうち解析に使用した期間はおおむね良好なデータが得られていた．ここで，時刻のずれが大きい（1.0 秒以上）日のデータは本研究では使用しなかった．

電位差データは，16 ある観測点のうち 9 点（北蟹谷，福光，上平，白川郷鳩ヶ谷，白川郷御母衣，荘川，楢原，飛騨萩原，下呂）では良好なデータが得られていた．しかし，石川高松，津幡，飛騨竹原では昼間の人工的ノイズが大きいので，夜間のデータのみ使用することにした．また，加子母以南の 4 点は一日中ノイズが大きいので，今回の解析からは除外して考えた．

(2) MT 応答関数の算出

12 の電位差観測点のデータと白川の磁場データから，各ネットの MT 応答関数を計算した．計算には BIRRP (Chave and Thomson, 2003) を使用した．解析には，各ネットの観測期間のうち， A_p 指数の大きいほうから 32 日分のデータを使用した．石川高松，津幡，飛騨竹原は午前 0～5 時の 5 時間分のデータのみを，それ以外のネットについては 24 時間分のデータをそのまま使用した．21.3 秒～16384.0 秒までの 20 周期で MT 応答関数を求めた．

その結果，11 点で安定した MT 応答関数が得られた．ただし，そのうち津幡，北蟹谷では Z_{yx} から求めた位相が 90° 以上変化する，いわゆる異常位相が認められた．また，白川郷鳩ヶ谷以南の 7 ネットでは， Z_{xy} から求めたみかけ比抵抗が周期 100 秒付近で不連続な変化をしていた．ここで，白川郷御母衣の Z_{xx} , Z_{xy} から求めた MT 応答関数は信頼区間が大きく，位相は 180° 近く変化している．Coherence の値も， E_x については周期 10000 秒付近で最大値 0.8 をとるが， E_y については最大で 0.6 程度である．この原因の 1 つに，白川郷御母衣の電極配置から，電場の Y 成分（東西方向成分）としたデータに対する電場基線が短いことが考えられる．電場の Y 成分が安定して得られないため，算出される MT 応答関数も不安定な値をとっていると考え，これ以降の解析には白川郷御母衣のデータは使用しないことを決めた．よって，これ以降は 11 ネットの解析を進める．

(3) 電磁氣的構造の次元と走向を決定

Caldwell et al.(2004)に基づいた Phase Tensor 法を用いて，電磁氣的構造の次元と走向を決定した． α と β の値は，11 のネットそれぞれにおいて，64 秒から 16384 秒の 17 の周期におけるインピーダンステンソルから算出した．構造の次元を表す β は，津端，北蟹谷の一部の周期帯を除き，全ての観測点・周期帯で $-10^\circ \sim +10^\circ$ の範囲に収まっていた．津幡では周期 85.3 秒，北蟹谷では周期 16384.0 秒で絶対値が 20° を超える値を示している．これら 2 点では上記のような異常位相も観測されており，3 次元性の高い地域であると判断した．よってこれらの観測点を除いた 9 点の β から，構造を 2 次元と判定した．

構造の走向を示す α は，周期 1000 秒を越える長周期側で $N75^\circ E - S75^\circ W$ または $N15^\circ W - S15^\circ E$ に，周期 1000 秒未満の短周期側で $N95^\circ E - S95^\circ W$ または $N5^\circ E - S5^\circ W$ の方向に卓越して分布する．本研究ではより深部までの地下構造を求めることを目的とするため，長周期側のデータから算出した α の値を採用することにした．ここで，白川でのインダクションベクトルは $N15^\circ W - S15^\circ E$ に近い方向を指しているのので，最終的に，この地域における構造の走向を $N75^\circ E - S75^\circ W$ と決定した．すなわち， $N75^\circ E - S75^\circ W$ に沿う方向の磁場変動およびそれと直交する $N15^\circ W - S15^\circ E$ 方向の電場変動が TM モード，これと逆の組合せの場合が TE モードに相当する．両モードの MT 応答関数を Fig.3 に示す．

TE モードのみかけ比抵抗は，上平以北のネット（石川高松，津幡，北蟹谷，福光，上平）において周期 1000 秒付近で極大値を示しているのに対し，鳩ヶ谷以南のネット（白川郷鳩ヶ谷，白川郷御母衣，

荘川, 楯原, 飛騨萩原, 下呂, 飛騨竹原) では周期が大きくなるにつれて単調に減少する傾向がみられる。

一方, TM モードのみかけ比抵抗は, 福光以北のネット (石川高松, 津幡, 北蟹谷, 福光) の値に比べて, 上平のネットのそれが 2 桁近く大きくなっているのがわかる。具体的には, 福光以北の値が 10~100[Ωm]であるのに対して, 上平では 3000~30000[Ωm]になっている。上平のすぐ南の観測点である白川郷鳩ヶ谷のネットでは, その値は 1000~10000[Ωm]と少し小さくなり, 白川郷御母衣以南のネット (白川郷御母衣, 荘川, 楯原, 飛騨萩原, 下呂, 飛騨竹原) においては 10~1000[Ωm]で観測点による差は小さい。また, 鳩ヶ谷以南のネット (白川郷鳩ヶ谷, 白川郷御母衣, 荘川, 楯原, 飛騨萩原, 下呂, 飛騨竹原) では, みかけ比抵抗が周期 100 秒付近で不連続に変化している。

4. 考察

鳩ヶ谷から竹原までの 7 ネットでは, みかけ比抵抗の値が不連続になっている周期帯がある。これは, 数ネットに共通する傾向であるため, 局所的な原因は考えにくい。むしろ, 応答関数の算出に用いた磁場データに自然でないデータが混入していたことに起因すると考えられる。今後の解析では, リモートリファレンス法 (Gamble et al., 1979a,b) を用いることによって改善されると予想される。

楯原から飛騨竹原の MT 応答関数は, 他のネットのそれと比較して信頼区間が大きい。これは, 解析に使用したデータの日数が不十分であったためであると考えた。本研究で用いたデータは, 1 日 (86400 秒) ごとに 1 つのデータファイルに収まっているものを用いた。そのため, 解析に使用するデータの年月日を指定して計算を進めた。この使用するデータの日数は, 福光のデータを基準にして考え, 32 日と決定した。ただし, 福光のデータは比較的ノイズが小さいため, 福光のデータ解析には 32 日が十分な日数であっても, 他のノイズの大きい観測点のデータ解析には 32 日が不十分な日数である可能性がある。今後これらの観測点のデータ解析においては, 日数を増やして進める必要があることがわかった。

TM モードのみかけ比抵抗値が福光と上平の間で大きく変化することは, これら観測点の間で比抵抗構造が大きく異なっている事を示唆している。このことは福光以北の観測点が日本海沿岸の堆積平野に位置している事と整合的である。予察的な解析で明らかになった点を改善し, より高精度の MT 応答関数を求めた後に, モデル解析を進める予定である。

謝辞

(株)NTT 西日本-東海ならびに(株)NTT 西日本-北陸の方々には, 電極の設置, 機器の設置など多大なご支援, ご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- Archie, G. E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Mining Eng.*, 146, 54-62, 1942
- Caldwell, T. Grant, Hugh M. Bibby and Colin Brown (2004), The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457-469
- Chave, A.D., and D.J. Thomson (2003), A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix, *J.Roy.Stat.Soc., Series C (Appl.Stat.)*, 52, 307-322
- Gamble, T. D., W. M. Goubau, and J. Clarke (1979a), Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68
- Gamble, T. D., W. M. Goubau and J. Clarke (1979b), Error analysis for remote reference magnetotellurics, *Geophysics*, 44, 959-968
- Glover, P. W. J., Hole, P. J., and Pous, J., A modified Archie's law for two conducting phases, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180, 369-383, 2000
- Kariya, K.A. and Shankland, T.J., Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*, 48, 52-61, 1983
- Nesbitt, B. E., Electrical resistivities of crustal fluids, *J. Geophys. Res.*, 98, 4301-4310, 1993
- Parkinson, W.D. (1962), The influence of continents and oceans on geomagnetic variations, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol.6, 441-449
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000), Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure and Applied Geophysics* 157, pp. 2303-2322
- Uyeshima, M. (1990), Application of network MT method to the study of electrical conductivity structure in the eastern part of Hokkaido, PhD thesis, Univ. of Tokyo, 332 pp
- 上嶋誠・小河勉・山口覚・村上英記・藤浩明・吉村令慧・大志万直人・丹保俊哉・小山茂・望月裕峰・丸谷良博・臼井嘉哉・歪集中帯地殻比抵抗研究グループ, 中部地方におけるネットワーク MT 観測 (第 3 報), Conductivity Anomaly 研究会 2008 年論文集, 2008

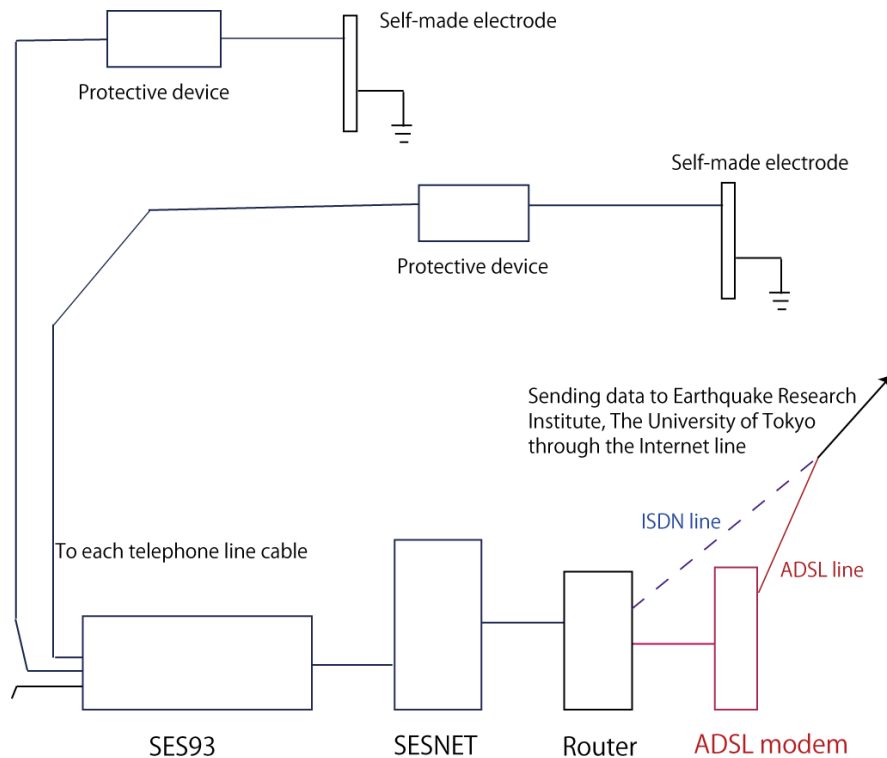


Fig. 1 A schematic diagram of the observation system.

①SES93 (地電位差測定転送装置)

主な機能は、外部のセンサーなどで測定された電圧 (アナログ) を AD (Analog Digital) 変換して記録し、ホストコンピュータからのセンターポーリングによりモデム装置を介して記録データを送信することである。この装置の特徴は、異常電圧保護・平衡入力の高精度アナログ / デジタル変換回路、超高精度の時計、大容量のメモリ、高速通信能力などにある。

②SESNET (ネットワーク接続装置)

この装置は一種の Linux を OS とするコンピュータである。OS には Red Hat 系 Linux の Fedora Core1 の FTP 版を採用している。使用言語環境は US-English で、日本語環境は使用していない。また、各種設定の便宜のため X-Window システムをインストールしている。データエリアとして使用可能なハードディスク容量は、約 15G バイトである。

この装置の機能は、以下の通りである。(i) SES93 に接続し、自動的に SES93 の蓄積データを取り出し、ネットワーク経由でセンターの FTP サーバに送信する装置である。(ii) 毎日定時に SES93 を制御し、1 日分の測定データをこの装置のハードディスクに書き込む。続いて LAN で接続されたルータによってセンターのサーバに自動的にアクセスし、測定データファイルを転送する。(iii) 毎日 NTP サーバにアクセスしてこの装置の時計を校正した後、SES93 の時刻と比較し、時刻差を記録する。(iv) SES93 から毎秒出力されるモニターデータを、ハードディスク上に連続的にファイルとして記録する。

③ルータ (ネットワーク上を流れるデータを他のネットワークに中継する機器)

今回使用したのは、YAMAHA 製ルータ ネットボランチ RT57i である。これは、ブロードバンドルータ、ダイヤルアップルータ、TEL ポート、DSU の機能をすべて内蔵した、多機能ルータである。ISDN のダイヤルアップ接続から CATV / ADSL 接続、専用線接続まで、さまざまなインターネット接続方法に対応できる。

今回の観測では、ADSL 回線の中継局では ADSL モデムを介して NTT からの回線端子と接続し、ISDN 回線の中継局では直接 NTT からの回線端子と接続する。

④ADSL モデム (コンピュータを ADSL 回線に接続する際に必要になる信号変換機)

公衆回線網を通じて送られてくる ADSL 信号を Ethernet (10BASE-T) の信号に変換する、またはその逆を行う。ADSL モデムとコンピュータとの間は Ethernet LAN でつながれる。

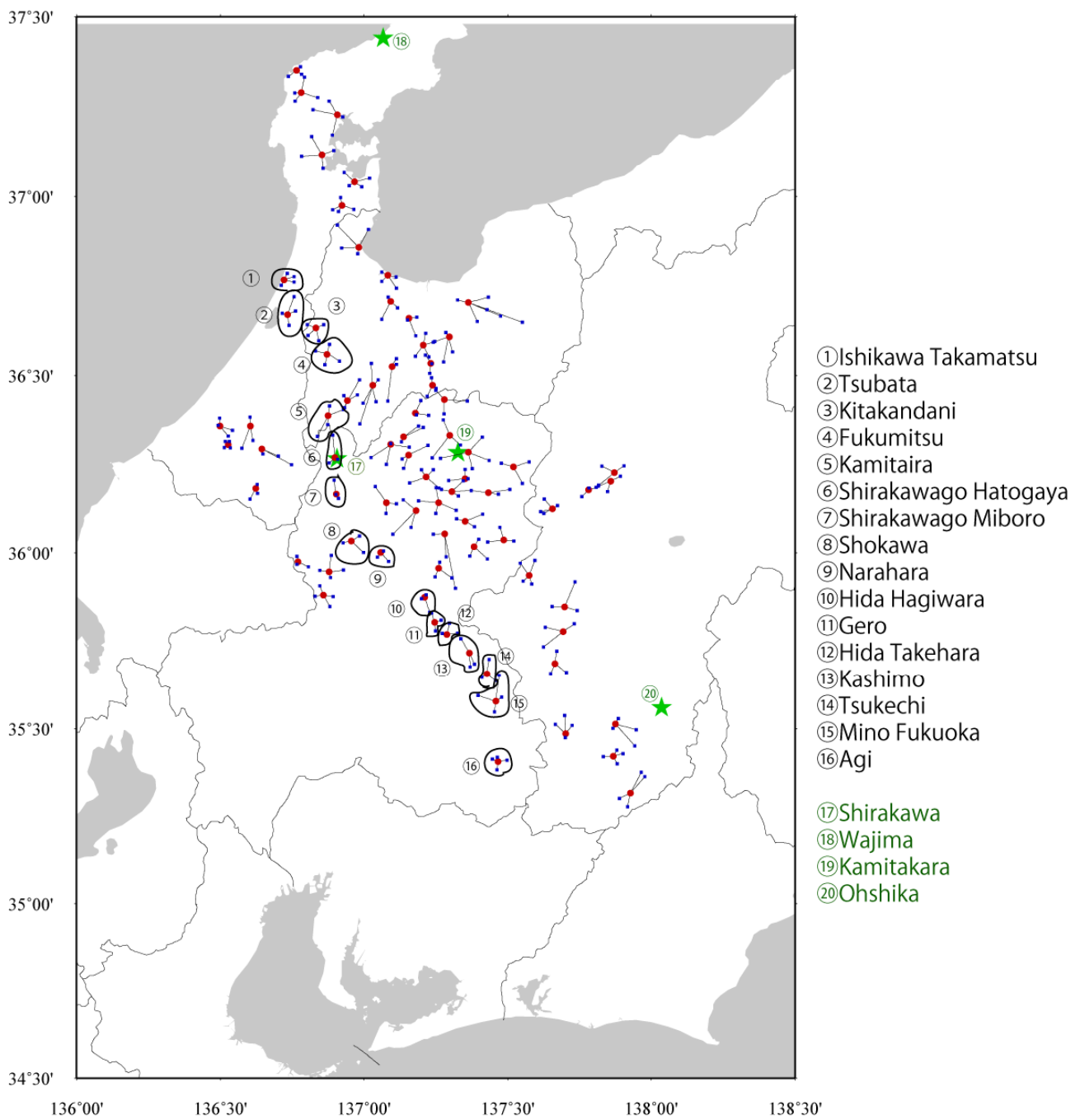


Fig. 2 The site distribution of the Network-MT survey in Chubu district. Red large circles indicate central telephone stations of Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT). Blue small circles indicate electrode points. Black solid lines indicate electric dipoles to measure potential difference by using metallic telephone line cables of NTT. Green stars indicate the points where 3-component magnetic field were measured. The sites used in this study are surrounded by lines.

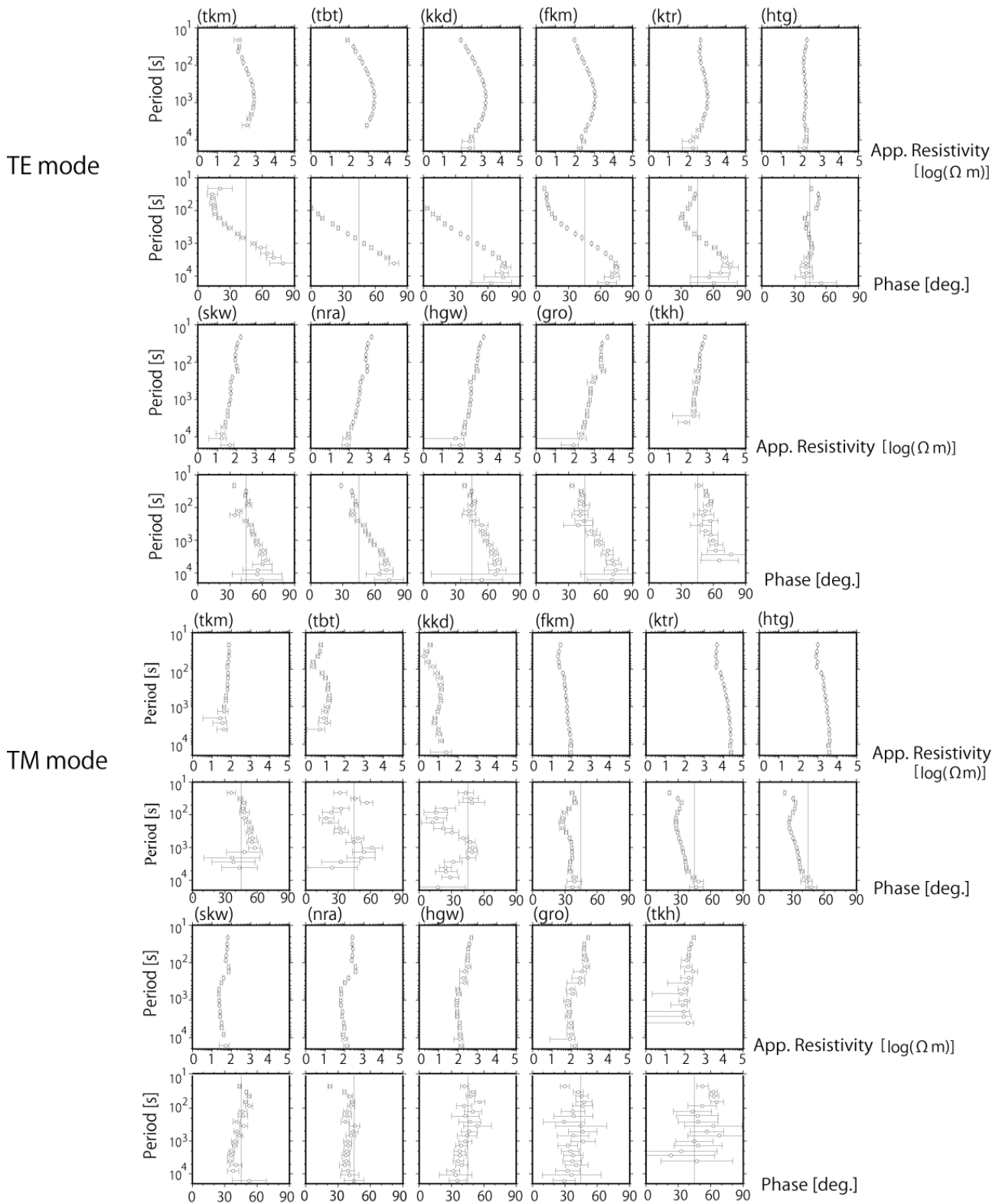


Fig. 3 MT responses at 11 sites along the Ishikawa_Takamatsu-Agi transect. TE-mode apparent resistivity and phase are shown in the upper half, and those of TM-mode are shown in the lower half. Each row shows apparent resistivity(top) and phase(bottom), respectively.

Site Name	Abbreviation	Channel Number	Latitude (ddd° mm' ss.ss"")	Longitude (ddd° mm' ss.ss"")	Period
Ishikawa Takamatsu	tkm	GND Ch1 Ch2 Ch3 Ch4	N36° 46' 03.75" N36° 47' 07.45" N36° 46' 35.09" N36° 45' 39.95" N36° 45' 09.19"	E136° 42' 20.29" E136° 43' 59.02" E136° 45' 26.97" E136° 45' 27.04" E136° 42' 44.07"	2007/08/21 ~2008/06/10
Tsubata	tbt	GND Ch1 Ch2 Ch3 Ch4	N36° 40' 13.37" N36° 43' 13.48" N36° 40' 50.17" N36° 38' 25.02" N36° 40' 28.89"	E136° 44' 02.73" E136° 45' 25.20" E136° 45' 42.16" E136° 44' 22.87" E136° 42' 56.35"	2007/08/21 ~2007/12/31
Kitakandani	kkd	GND Ch1 Ch2 Ch3 Ch4	N36° 37' 59.30" N36° 38' 32.30" N36° 35' 50.50" N36° 36' 42.10" N36° 38' 32.40"	E136° 50' 01.70" E136° 51' 36.60" E136° 50' 36.30" E136° 48' 19.20" E136° 48' 12.40"	2007/08/23 ~2008/05/27
Fukumitsu	fkm	GND Ch1 Ch2 Ch3 Ch4	N36° 33' 40.60" N36° 35' 13.70" N36° 32' 23.70" N36° 31' 46.70" N36° 34' 06.30"	E136° 52' 24.40" E136° 52' 47.50" E136° 54' 55.00" E136° 51' 52.70" E136° 49' 54.40"	2007/08/29 ~2008/05/27
Kamitaira	ktr	GND Ch1 Ch2 Ch3 Ch4	N36° 23' 14.10" N36° 24' 50.80" N36° 24' 13.60" N36° 21' 42.90" N36° 19' 42.00"	E136° 52' 36.20" E136° 52' 49.30" E136° 55' 43.00" E136° 52' 25.20" E136° 50' 14.80"	2007/08/22 ~2007/12/09
Shirakawago Hatogaya	htg	GND Ch1 Ch2 Ch3	N36° 16' 08.70" N36° 19' 55.85" N36° 15' 48.69" N36° 15' 12.47"	E136° 53' 57.40" E136° 53' 30.15" E136° 54' 31.57" E136° 52' 45.57"	2007/08/02 ~2007/12/09 (no data at 2007/08/06, 2007/08/07)
Shirakawago Miboro	mbr	GND Ch1 Ch2 Ch3	N36° 09' 58.70" N36° 12' 17.92" N36° 09' 54.73" N36° 09' 12.81"	E136° 54' 12.30" E136° 53' 45.23" E136° 54' 08.22" E136° 54' 43.25"	2007/08/02 ~2007/12/09
Shokawa	skw	GND Ch1 Ch2 Ch3	N36° 02' 01.80" N36° 04' 28.11" N36° 01' 44.57" N36° 00' 03.57"	E136° 57' 21.20" E137° 00' 34.05" E136° 55' 38.58" E136° 59' 54.49"	2007/08/10 ~2008/06/03
Narahara	nra	GND Ch1 Ch2 Ch3	N36° 00' 05.60" N36° 00' 18.20" N35° 59' 17.40" N35° 58' 34.90"	E137° 03' 30.70" E137° 04' 07.20" E137° 02' 50.90" E137° 05' 08.00"	2007/08/10 ~2008/05/19

Hida Hagiwara	hgw	GND	N35° 52' 29.80"	E137° 12' 39.80"	2007/09/19 ~2008/06/02
		Ch1	N35° 52' 55.15"	E137° 13' 00.33"	
		Ch2	N35° 52' 12.88"	E137° 12' 02.73"	
		Ch3	N35° 49' 56.26"	E137° 13' 45.56"	
Gero	gro	GND	N35° 48' 15.40"	E137° 14' 44.70"	2007/08/09 ~2008/06/02
		Ch2	N35° 49' 48.10"	E137° 14' 18.80"	
		Ch3	N35° 48' 35.48"	E137° 16' 07.64"	
		Ch4	N35° 46' 45.86"	E137° 14' 57.66"	
Hida Takehara	tkh	GND	N35° 46' 08.97"	E137° 17' 17.87"	2007/08/09 ~2008/06/02
		Ch1	N35° 48' 04.80"	E137° 17' 51.50"	
		Ch2	N35° 46' 19.36"	E137° 16' 22.42"	
		Ch3	N35° 46' 24.87"	E137° 19' 32.62"	
Kashimo	ksm	GND	N35° 42' 58.58"	E137° 22' 03.37"	2007/08/23 ~2008/06/02
		Ch1	N35° 45' 25.90"	E137° 20' 15.40"	
		Ch2	N35° 41' 05.30"	E137° 23' 05.20"	
		Ch3	N35° 40' 38.40"	E137° 22' 12.20"	
Tsukechi	tkc	GND	N35° 39' 23.61"	E137° 25' 39.36"	2007/08/23 ~2008/06/02 (no data at 2007/10/31)
		Ch1	N35° 41' 54.30"	E137° 26' 06.70"	
		Ch2	N35° 38' 13.70"	E137° 27' 28.90"	
		Ch3	N35° 38' 47.50"	E137° 24' 38.60"	
Mino Fukuoka	fko	GND	N35° 34' 40.65"	E137° 27' 31.36"	2007/09/20 ~2008/06/02
		Ch1	N35° 39' 10.10"	E137° 28' 14.70"	
		Ch2	E35° 35' 21.70"	E137° 28' 43.10"	
		Ch3	N35° 32' 50.20"	E137° 27' 13.40"	
		Ch4	N35° 35' 40.70"	E137° 23' 50.40"	
Agi	agi	GND	N35° 24' 22.71"	E137° 27' 59.38"	2007/08/24 ~2008/02/07
		Ch1	N35° 25' 04.60"	E137° 27' 52.90"	
		Ch2	N35° 24' 38.20"	E137° 29' 51.60"	
		Ch3	N35° 22' 57.10"	E137° 27' 47.70"	
		Ch4	N35° 24' 47.20"	E137° 26' 50.60"	

Table 1 Site name, abbreviation, channel number, location of electrodes and observation period of each site.

Channel numbers of central telephone stations are represented as GND.