



Title	樽前山における広帯域MT法探査 : 2次元比抵抗解析
Author(s)	山谷, 祐介; YAMAYA, Yusuke; 橋本, 武志 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 127-140
Issue Date	2005-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.68.127
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14365
Type	departmental bulletin paper
File Information	68_p127-140.pdf



樽前山における広帯域 MT 法探査— 2 次元比抵抗解析—

山谷 祐介・橋本 武志・茂木 透・鈴木 敦生

西田 泰典・谷元 健剛・森 濟・寺田 暁彦

北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

三品 正明

東北大学大学院理学研究科噴火予知研究観測センター

長谷 英彰

京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設

(2004 年 12 月 17 日受理)

Wide-band MT Survey on Tarumai Volcano, Hokkaido —2-D Resistivity Analysis—

Yusuke YAMAYA, Takeshi HASHIMOTO, Toru MOGI, Atsuo SUZUKI

Yasunori NISHIDA, Kengo TANIMOTO, Hitoshi MORI, Akihiko TERADA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Masaaki MISHINA

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,

Graduate School of Science, Tohoku University

and

Hideaki HASE

Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

(Received December 17, 2004)

We performed a wide-band MT(Magnetotelluric) survey in and around Tarumai volcano, Hokkaido, Japan. MT survey is useful in clearly defining the resistivity structure related to volcanic regions. The MT data were acquired over a frequency range 5.5×10^{-4} Hz – 320 Hz. Applying the remote reference method and manual editing process, we obtained the data from 14 sites. Groom-Beiley's decomposition analysis was applied to the tensor impedance data to estimate the direction of the electromagnetic strike. Subsequently, apparent resistivity and phase data of TM mode were inverted using a two-dimensional MT inversion. The resulting model coincides with geological layers and reveals a conductor near the sea level below the summit. The position of the conductor is in accord with the hypocenters of low

frequency earthquakes and with the electric current source of self-potential. Therefore, the conductor may suggest the existence of the crustal fluid mainly occupied by hot water. In near future, a denser MT survey in the crater area of Tarumai volcano is required.

I. はじめに

樽前山（標高 1024 m）は、その北西にある恵庭岳および不風死岳とともに、支笏カルデラ形成後に噴出した後カルデラ火山で、カルデラの南東縁に位置している。支笏カルデラ周辺では、第四紀後期のカルデラ形成に伴う溶結凝灰岩が新第三系を覆っており、広大な火砕流大地を形成している。樽前山の山体部の基盤は、西側の一部で新第三系であるが、他の大部分は支笏溶結凝灰岩類であり、その高さは海拔 500 m 前後と推定されている。山体部には溶岩が認められず、溶結した降下堆積物を含む巨大な軽石丘と考えられている（曾屋, 1972）。

樽前山は 1978 年 5 月の噴火を主とした 1978–82 年の活動以降は静穏であったが、1996 年 6 月から地震活動が再び活発化し、ドーム南東亀裂での噴気活動がやや活発となった。さらに、1999 年にはドーム南西火口での噴気活動が活発化した（札幌管区気象台, 1999）。2003 年十勝沖地震（2003 年 9 月 26 日）後には、地殻内流体が関与していると見られる低周波地震が発生した（青山ほか, 2004）ほか、ドーム南西噴気孔群から放出される噴気量が増加し、高感度カメラで明るく見える現象が報告された（寺田ほか, 2004）。これらのことから、樽前山の地下での熱水系の発達や、帯水層などの地殻内流体が存在していることが考えられる。岩石の比抵抗は、温度や水、メルトの存在によって値が大きく変化するので、樽前山の地下に地殻内流体が存在するとすれば、比抵抗構造を探查することによって低比抵抗領域として検出できる可能性がある。近年、多くの火山で Magnetotelluric (MT) 法をはじめとする比抵抗構造探查が実施され、その多くでは浅部に熱や流体の存在と関連すると考えられる低比抵抗領域が存在することが明らかにされている（鍵山ほか, 1996；Fujita et al., 1999 など）。火山における地下水は、マグマ起源の熱と関与して水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発の原因となることもあり、マグマと地下水の位置を知ることが火山学上、重要な要素の一つである。このことから、比抵抗構造探查は火山活動の消長を知る上で、有効なアプローチであると考えられる。

これまでに樽前山で行われた比抵抗構造探查では、火口原内での電気探查（渡辺ほか, 1984；札幌管区気象台, 1999）により、火口原の地下数百 m までの比抵抗構造が得られている。しかし、この深さまでには地殻内流体の存在を示すような低比抵抗領域は検出されていない。宮村ほか（1995）は自然電位の分布から熱水対流の上昇到達点の深さを海拔約 500 m と推定しており、これより深部に低比抵抗領域が検出される可能性がある。そこで、我々は樽前山の地下 10 km 程度までの比抵抗構造を調査し、帯水層および熱水系の発達の有無、また、火山性地震と比抵抗構造との関連を明らかにする目的で、広帯域 MT 法による比抵抗構造探查を実施した。

本報では、2004 年 6～7 月に行われた広帯域 MT 探查について報告し、初期解析として行った 2 次元インバージョンによって得られた比抵抗構造モデルについて予察的な解釈を示す。

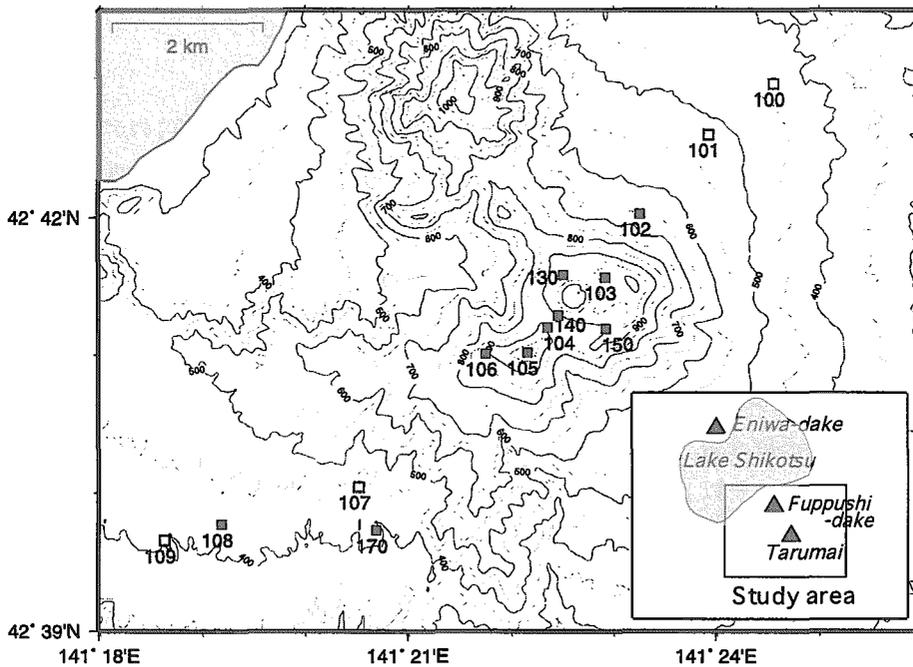


Fig. 1. Sites of the MT surveys on Tarumai Volcano. Solid squares indicate sites observing only electric field and blank squares indicate sites where both electric and magnetic fields were observed.

II. 観測の概要

樽前山における広帯域 MT 法観測を 2004 年 6 月 26 日から 7 月 9 日までの 14 日間にわたって実施した。支笏カルデラをまたぐ樽前山—風不死岳—恵庭岳のラインに直交する測線を設定し、樽前山頂を横切る北東—南西の延長約 10 km の測線上に 14 点の測点を配置した。測点図を Fig. 1 に示す。

測定は GPS で同期された Phoenix Geophysics 社製の MTU-5 を 8 台、Pb-PbCl₂電極、インダクションコイルを使用し、320–0.00055 Hz 間の 40 周波数について電場 2 成分、磁場 3 成分変動の測定を行った。ここで、Sites 100, 101, 107, 109 の 4 つの観測点では電場・磁場 5 成分の測定を行ったが、その他の測点では電場 2 成分のみを測定し、磁場については上記 4 測点のうち 1 点のデータで代表させた。ただし、Site 107 については高圧送電線の近くにあることが原因と考えられるノイズが多く、磁場を代表する観測点には相応しくないことが、時系列解析から明らかになった。測定は 18:00 (JST) に開始し、翌日あるいは翌々日の 9:00 から 12:00 の間に終了した。解析時にノイズが少ないと考えられる夜間のデータのみを使用することを考慮し、1 日間から 7 日間にわたって測定を繰り返した。なお、4 点の磁場観測点においては観測期間全日について測定を行った。

III. 2次元構造解析

1. データ処理

各測点で得られたデータは、ノイズが少ない夜間(18:00-翌9:00, JST)のデータのみを解析に使用することとした。磁場データは4つの観測点のうち Site 109 のデータが良好であることから、電場のみの観測点の解析には Site 109 の磁場データを使用することにした。さらに、観測点固有の磁場ノイズを除去するために、国土地理院水沢測地観測所が測定している江刺観測場の磁場データを利用してリモートリファレンス処理をした。ここでのリモートリファレンス処理とは、2つの観測点における磁場水平成分の変動は同一であるという仮定のもとに、磁場データ間での相関を求め、コヒーレントなデータのみをシグナルとみなしてインピーダンスを計算するという手法である (Gamble et al., 1978)。また、データを編集し、ノイズの多い時間帯のデータを使用しないこととした。1日以上測定を行った測点については、スペクトルのスタッキングを行い、データの質の向上を図った。

MT法では、地表の電場と磁場の間に、

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

という線形関係があることを利用している。ここで、 E および H は、それぞれ電場および磁場を表し、 x は北向き成分、 y は東向き成分を表す。また、 Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} はインピーダンステンソルと呼ばれる。各測点でのインピーダンスを求め、

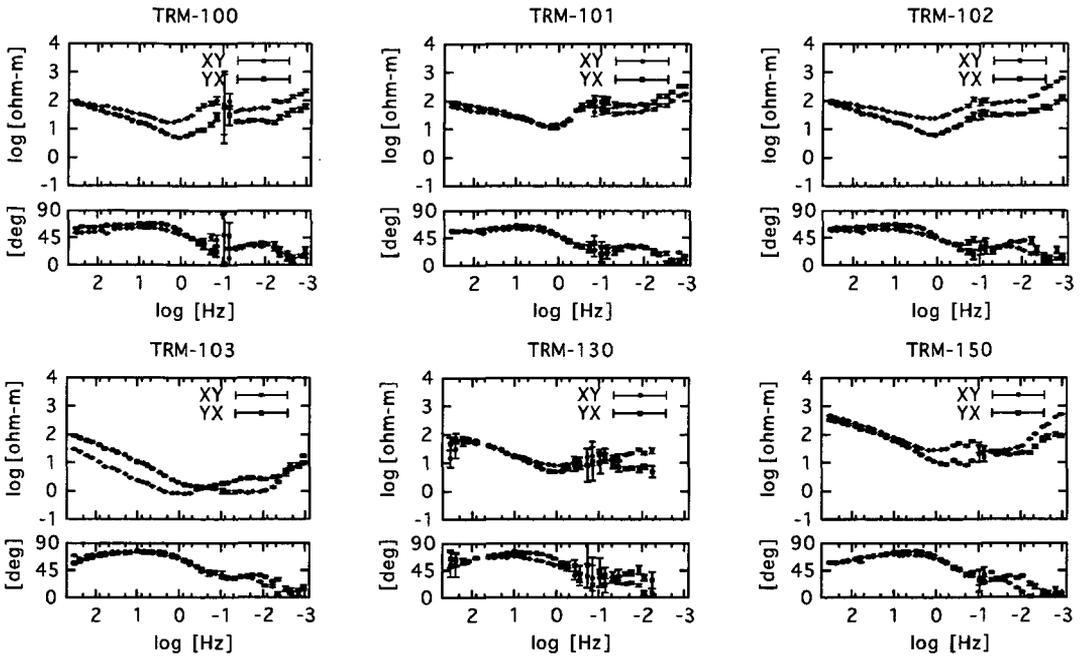
$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2, \quad \rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 \quad (2)$$

$$\phi_{xy} = \arg(Z_{xy}), \quad \phi_{yx} = \arg(Z_{yx}) \quad (3)$$

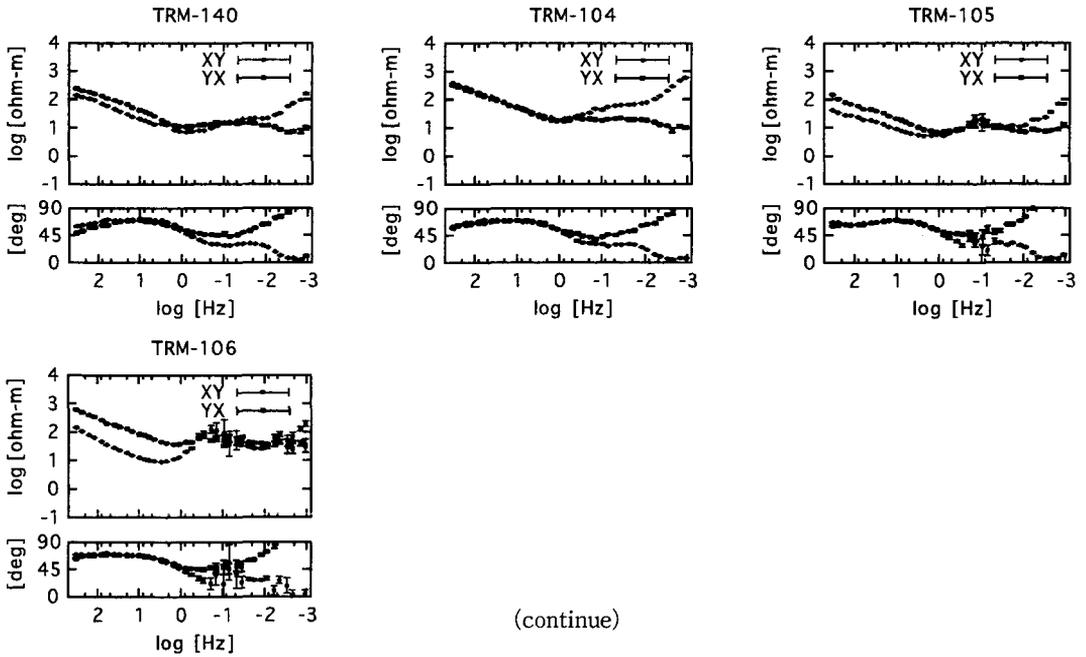
の関係式から各測点の見かけ比抵抗 ρ_{xy} , ρ_{yx} および電場・磁場の位相差 ϕ_{xy} , ϕ_{yx} の周波数特性を求めた (Fig. 2)。ここで、 f は周波数である。

Fig. 2 に示した探査曲線の特徴は、全測点で類似しており、見かけ比抵抗の1 Hz 以上では減少し、1 Hz 以下になると多少の起伏はあるが、増加に転じている。位相は1 Hz 以上ではほぼ45°を保っているが1 Hz 以下では急激に変化している。一方、 xy および yx の成分に注目してみると、大まかに北東部(a)、山頂西部(b)、南西部(c)の3つのパターンに分類することが出来る。北東部(a)では、見かけ比抵抗および位相の xy , yx の両成分が全周波数にわたってほぼ一致しているのに対し、山頂西部(b)では0.1 Hz 以下の低周波数側で両成分がしだいにスプリットする傾向が見られ、位相は4点ともほぼ同じ形状をしている。見かけ比抵抗は特に Sites 104, 140 でスプリットの程度が大きい。また南西部(c)では、周波数10 Hz 以下で両成分の振幅が異なっている。探査曲線のこれらの特徴から、樽前山周辺の地下比抵抗構造は浅部では1次元構造とみなせるが、山頂西部および南西部の深部では2次元ないし3次元の構造を持っていると考えられる。

(a)



(b)



(continue)

(c)

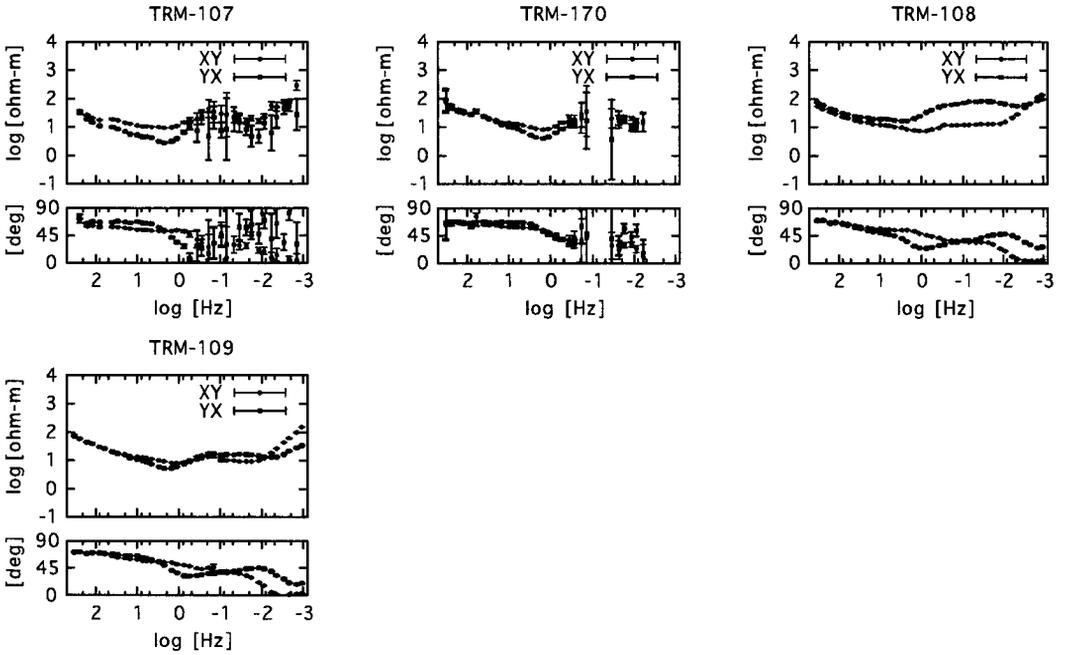


Fig. 2. Sounding curves of apparent resistivity(upper) and phase(lower) at all sites. Circles indicate the component of xy while squares indicate yx . (a), (b), (c) show northeastern, west of summit and southwestern area, respectively.

2. 次元の検討

インピーダンステンソルの対角成分は1次元構造の場合は $Z_{xx}=Z_{yy}=0$ となり、非対角成分はつねに $Z_{xy}=-Z_{yx}$ となる。一方、2次元や3次元構造の場合はインピーダンスは測定方向によって変化するが、座標系を回転させることによって任意の測定方向におけるインピーダンステンソルを計算できる。2次元構造の場合は、 x または y 軸が電磁氣的走向（以下、走向とする）と一致するとき、 $Z_{xx}=Z_{yy}=0, Z_{xy}=-Z_{yx}$ となる。このとき、電磁場は2つの独立したモードに分離され、電場が走向と一致するモードをTEモードといい、磁場が走向と一致するモードをTMモードという。例えば、2次元構造の走向が y 方向と一致するとき、 Z_{yx} がTEモード、 Z_{xy} がTMモードのインピーダンスとなる。実際の測定ではテンソルの対角成分が完全に0になることはほとんどなく、2次元解析を行う場合においては、対角成分が最小になる方向にテンソルを回転させて解析を行うのが一般的である。本解析ではGroom-Bailey decomposition解析 (Groom and Bailey, 1989)により各周波数、各測点ごとに走向(regional azimuth)の推定を行った。Fig. 3に1 decadeごとの周波数帯について、全測点の regional azimuth を集計したローズ・ダイアグラムを示す。ここでのローズ・ダイアグラムとは、 10° ごとの方位についてのヒストグラムである。ローズ・ダ

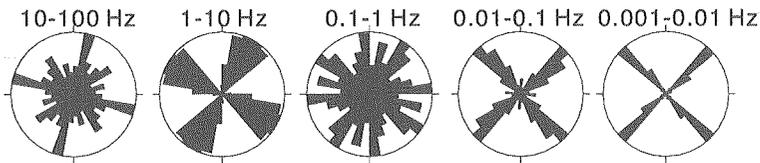


Fig. 3. Rose diagrams of regional strike directions determined from Groom-Beiley's decomposition analysis. The diagrams are grouped in five frequency bands each decade.

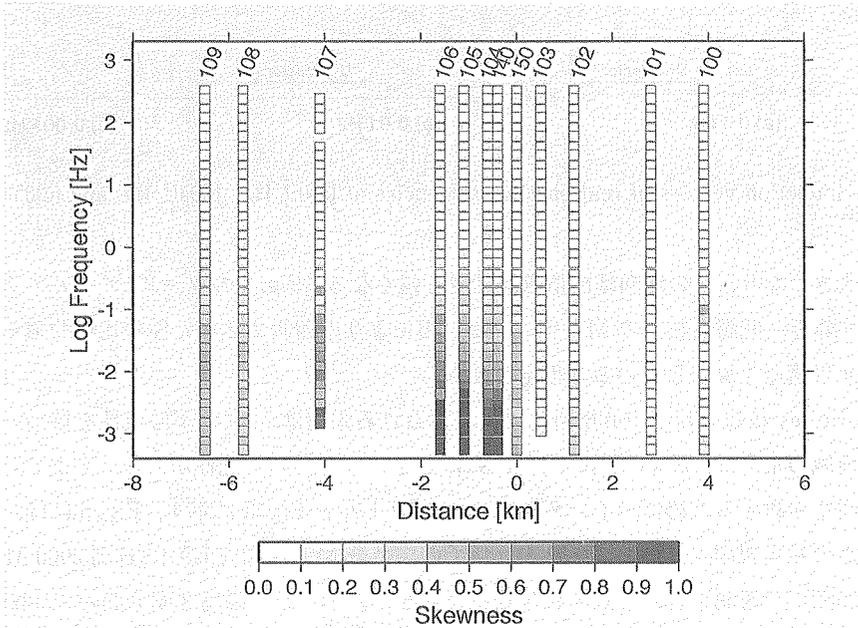


Fig. 4. Skewness section at 12 sites along the sounding profile. Color bar shows the value of skewness.

イヤグラムは、高周波数側では $N 10 \sim 30^\circ W$ の走向が見られるが、ばらつきが大きい。0.1~1 Hz では卓越方向が見られないが、これは S/N 比の悪い周波数帯であるからであろう。0.1 Hz 以下の低周波数側では、ばらつきが小さくなり、 $N 45^\circ W$ に集中する。よって、低周波数帯では 2次元性が強くなっていると考えられる。

MT 法では、次元の指標として skewness という値がしばしば用いられる。skewness(S)は、

$$S = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right| \quad (4)$$

で与えられ、1次元構造では前述の通り $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ から $S = 0$ となり、 S が大きくなるほど 3次元性が強くなると考えられている。本測線上の 12 点について、各周波数ごとに求めた skewness を Fig. 4 に示す。測線全体に渡って、1 Hz 以上の高周波数では skewness はほぼ 0 となっており、構造の 1次元性が高いことが推定される。これに対して、1 Hz 以下の低周波数側では skewness

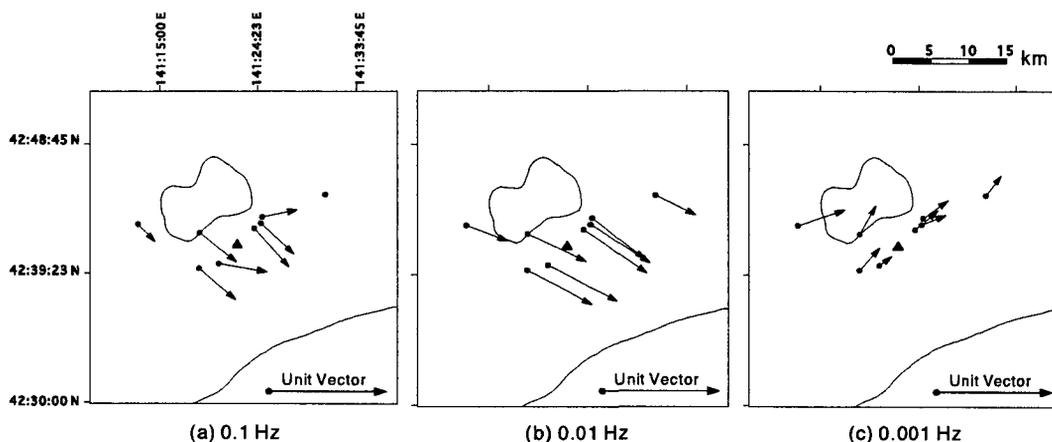


Fig. 5. Induction vectors of real part for frequencies at (a)0.1 Hz, (b)0.01 Hz, and (c)0.001 Hz.

は急激に大きくなり、その傾向は山頂西部で最も強くなる。Fig. 3のローズ・ダイアグラムを合わせて考慮すると、低周波数帯のMTデータは、山頂より南西側で2次元性が比較的強く、局所的には3次元の構造を反映していると推定される。

Groom-Bailey decomposition 解析によって得られる走向は、 90° の不確定性を持つ。したがって本観測地域の走向は、 $N 45^\circ W$ あるいは $N 45^\circ E$ という2つの可能性がある。そこで、磁場から構造の走向を検討するために、インダクション・ベクトルをFig. 5に示す。Fig. 5には、本観測における4点の磁場観測点に加えて、日高地域での広帯域MT法探査(茂木・日高2000 MT探査グループ, 2002)で観測された4点の観測点を合わせて表示した。磁場3成分間の変換関数から求められるインダクション・ベクトルは、一般に良導体が存在する方向を指し、周波数が低くなるほど広域、あるいは深部の構造を反映する。周波数0.1 Hzでは南東および東を指し、太平洋による海岸線効果および表層の低比抵抗分布を反映していると考えられる。0.01 Hzでは南東向き成分が卓越し、海岸線効果が強く効いているものと考えられる。一方、0.001 Hzでは北東向き成分が卓越している。これは、主に太平洋や日本海に誘導された電流が、良質の堆積層で構成される狭い石狩低地帯に集中して流れ込む地峡効果(西田, 1977)によるものと考えられる。

本観測地域は石狩低地帯の西縁部に位置し、広域的な走向は石狩低地帯の走向(およそ $N 20 \sim 30^\circ W$)に沿うものと考えられる。また、樽前山、風不死岳、恵庭岳の第四紀火山を結ぶラインはおよそ $N 45^\circ W$ である。浅部についてはskewnessが示すように1次元的であり、テンソルの回転による影響は受けない。以上のことから、本報では走向を $N 45^\circ W$ と仮定して2次元インバージョン解析をすることにした。ただし、樽前山周辺の重力構造は支笏カルデラ構造を反映して北西側で高重力異常、南東側で低重力異常となるトレンドを示している(広島ほか, 1998)、重力構造からは $N 45^\circ E$ の走向が予想される。走向の決定にはさらに議論が必要であろう。

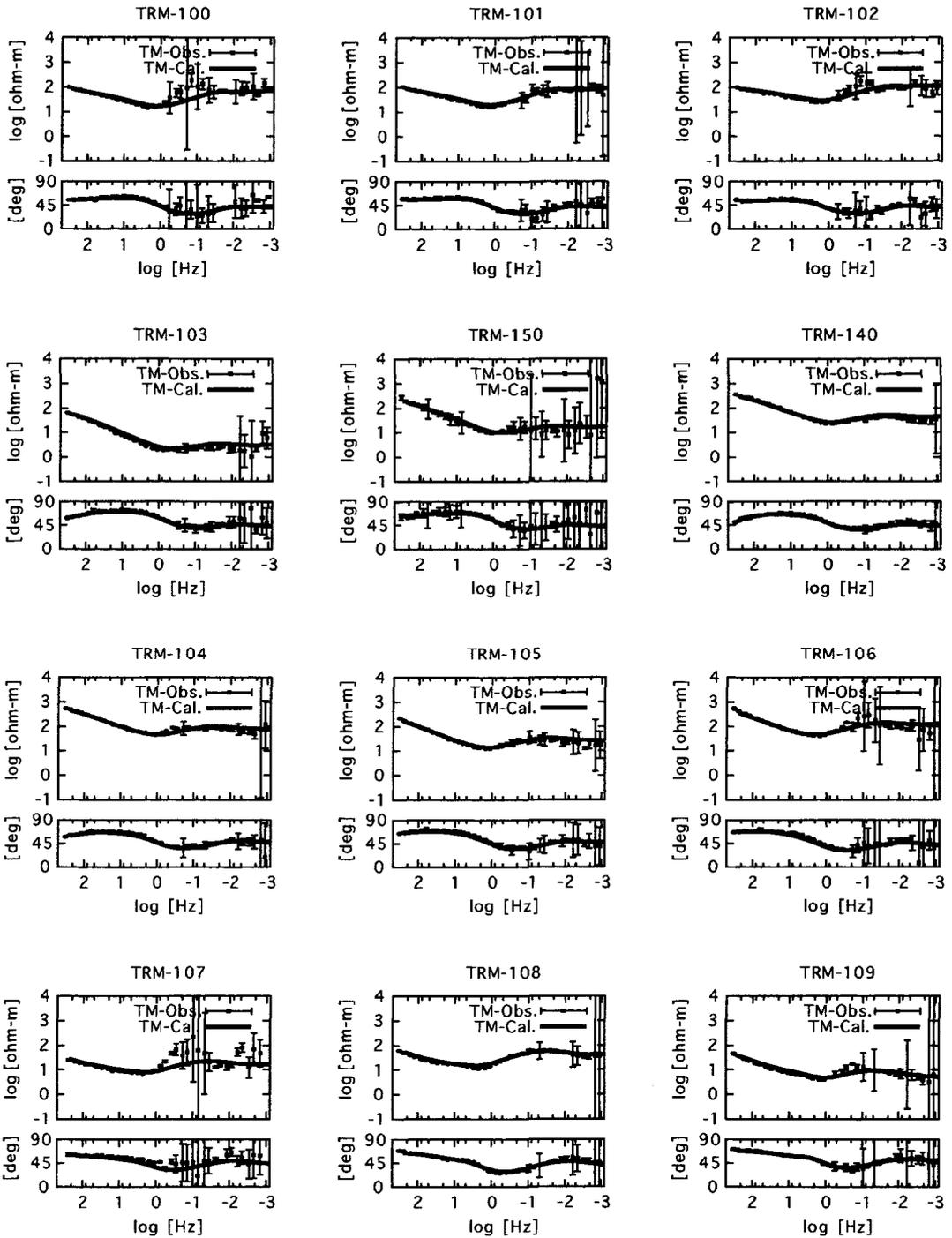


Fig. 6. Sounding curves of apparent resistivity(upper) and phase(lower) at 12 sites used for the inversion (TM mode). Squares indicete observed data and solid lines indicate model responce.

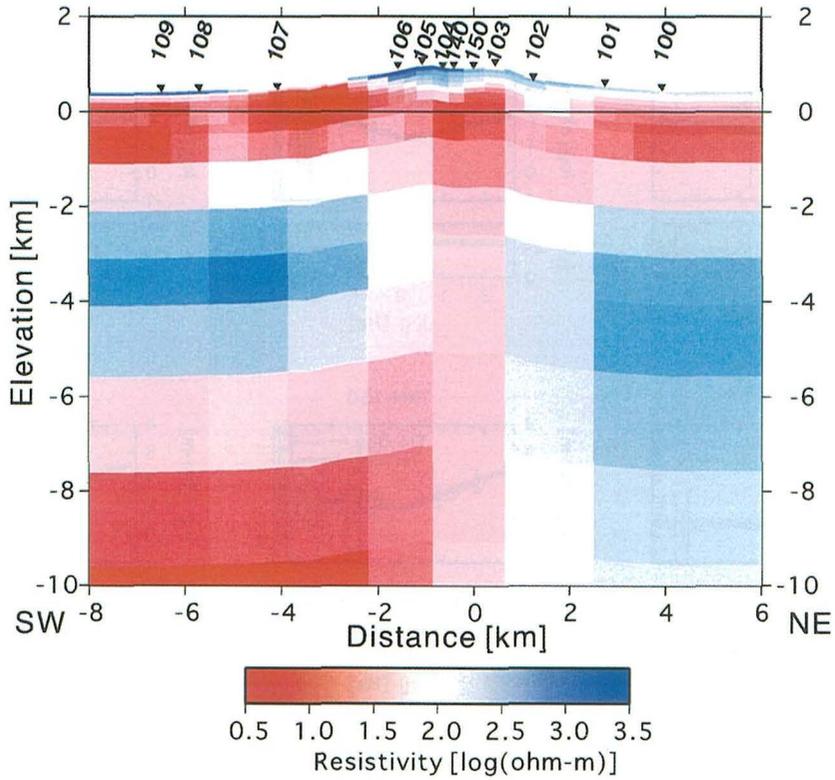


Fig. 7. 2-D inversion resistivity model of Tarumai NE-SW profile.

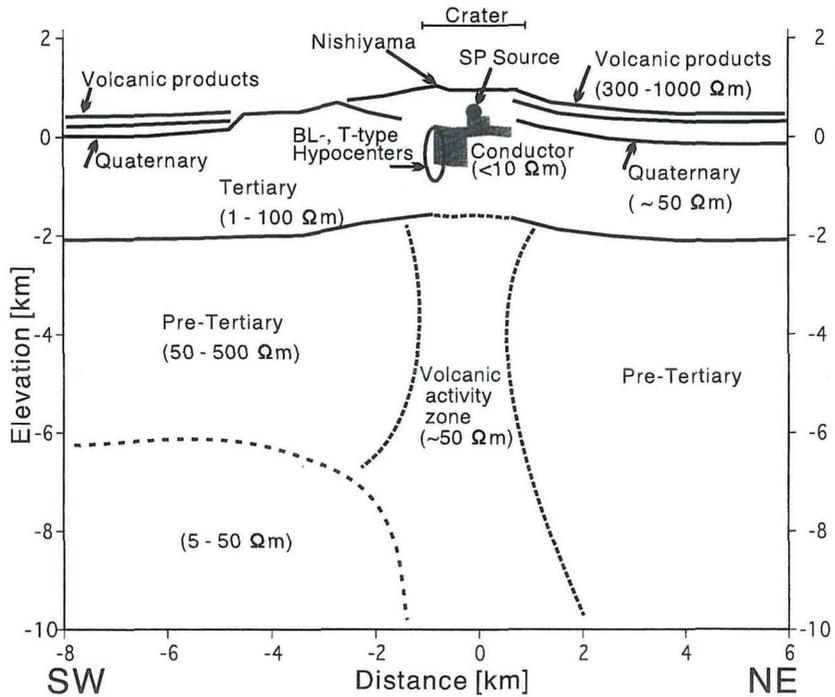


Fig. 8. Interpretation of the resistivity cross section based on geology.

3. 2次元インバージョン解析

2次元解析には、Ogawa and Uchida (1996)のインバージョンコードを使用した。このコードの特徴は、浅部構造の不均質や急峻な地形の変化によって引き起こされるスタティック・シフトをパラメータとして同時に解析できることである。このコードでは TM モードと TE モードのデータを用いたジョイント・インバージョンが可能であるが、TM モードは TE モードより比抵抗構造の局所的異常に対して敏感な応答を示す (例えば、Jones, 1992) ことから、初期解析として、TM モードの見かけ比抵抗および位相のみを入力として解析した。初期構造は $100 \Omega\text{m}$ の均質大地とし、イタレーションすることにより最適構造を推定した。Fig. 6 に TM モードの見かけ比抵抗および位相の観測値と計算値の比較を示す。観測値と計算値は全観測点でおおむね良く一致している。

Fig. 7 にインバージョン解析によって得られた2次元比抵抗モデルを示す。比抵抗構造は、大局的には4層の水平多層構造であると考えられる。地表から順に、第1層は数十~数百 m 厚の $500\sim 1000 \Omega\text{m}$ 程度の高比抵抗層、第2層は海拔 300 m~海拔下 2 km に位置する $10\sim 100 \Omega\text{m}$ の低比抵抗層である。第3層は海拔下 2~6 km に位置する $50\sim 500 \Omega\text{m}$ の高比抵抗層、最下層の第4層は変則的であるが、南西側に見られる $5\sim 50 \Omega\text{m}$ の低比抵抗層である。このように、樽前山周辺の比抵抗構造はおよそ1次元的な構造をしていると考えられるが、細部を見ると、第2層の山頂 (Sites 105, 104, 140, 150) 直下の海面付近には数 Ωm 程度の極めて比抵抗が低いブロックが存在している。さらに、その下の第3層では周囲の高比抵抗層が不連続となっており、鉛直方向の比抵抗構造のつながりが示されている。一方、構造の特徴として、Site 107 の表層付近では周囲と比較して低比抵抗となっている。しかし、周囲の測点間隔が他に比べて広いこと、また Site 107 のデータクオリティが低いことから、このエリアにおいてはモデルの信頼性は低く、断定的ではない。

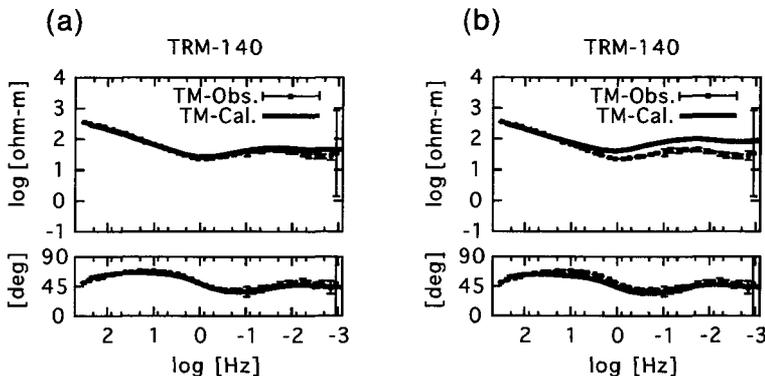


Fig. 9. Comparison of sounding curves of apparent resistivity(upper) and phase(lower) at site 140 by replacing the low resistivity block with $25 \Omega\text{m}$ (TM mode). Squares indicate observed data and solid lines indicate model response.

IV. 議 論

2次元比抵抗モデルと樽前山周辺の深度1000 mを超すいくつかの孔井の地質（北海道立地質研究所，2004；有珠火山観測所，2004）を比較すると，深度についての対応がよく比抵抗構造は地質層序を反映していると考えられる。地質層序をもとにした解釈図をFig. 8に示した。

第1層の高比抵抗層は，樽前山および支笏カルデラの火山噴出物の堆積層に相当し，おもに火砕流堆積物が占めていると考えられる。第2層は，さらに約400 m厚の上部層と約2000 m厚の下部層の2層に分けられ，それぞれ，上部層は第四系に，下部層は新第三系に相当する。樽前山の西部の基盤は新第三系と考えられている（曾屋，1972）が，南西中腹斜面では，第2層の上下層のうちいずれかの層が地表まで盛り上がっている。この周辺は，新第三系が地表に露出している地域であり（石田・曾屋，1980；佐藤ほか，1975），下部層の新第三系が地表まで達していると考えるのが自然である。しかし，既述の通りSite 107周辺でのデータの信頼性の問題から，断定することは出来ない。第3層は，孔井地質において少なくとも1800 m深までは新第三系が続いていることから，その下の先第三系を反映していると考えられる。山頂直下では，柱状の低比抵抗帯が先第三系の高比抵抗層を貫いて海面下10 kmまで達している。これに似た構造は，霧島火山火山群でもみつかっており（鍵山ほか，1996），マグマに関連した層と考えられる。その解釈の一つとして，この領域では火山活動にともなう熱，あるいは熱水によって変質し，比抵抗が周囲よりも下げられていることが挙げられる。第4層は，茂木・日高2000 MT探査グループ（2002）の2次元比抵抗モデルにおいて，支笏カルデラ直下の10～20 km付近に見られる1～10 Ωmの低比抵抗帯の延長であると考えられる。

山頂直下の低比抵抗ブロックの南西境界付近（山頂ドーム西方の海面下0～1 km）では，2003年十勝沖地震後にBL型およびT型の低周波地震が群発し，この活動のおよそ8日後から山頂の噴気活動が活発化した。青山ほか（2004）はこれらの低周波地震の発生に，熱水を主とした地殻内流体が関与し，その後8日間で熱水が移動して噴気活動に至ったという可能性を指摘している。一方，宮村ほか（1995）は自然電位（SP）の分布から点電流源を仮定したモデル計算を行い，SPの正異常の電流源の深さを海拔約500 mと見積もった。その後，SPの繰り返し測定から，電流源の深さに大きな変化は無く，現在も樽前山では海拔数百 m付近まで熱水上昇が生じていると推定している（宮村，2004）。低比抵抗ブロックの上部境界は，海拔約400 mであり，SPから見積もられた熱水上昇域の上限と接近している。これらのことから，比抵抗構造探査で明らかとなった低比抵抗ブロックは，熱水を主とする地殻内流体の存在を表している可能性がある。しかし，この低比抵抗ブロックがMTデータを説明するために必ずしも必要な構造ではないという可能性もある。そこで，低比抵抗ブロックの比抵抗を周囲の比抵抗とほぼ等しい25 Ωmに固定した時に得られるMTレスポンスを計算し，感度チェックを行った。例としてSite 140における探査曲線の比較をFig. 9に示す。低比抵抗ブロックが存在する場合（Fig. 9a）は観測値と計算値が全周波数に渡ってよく一致しているが，低比抵抗ブロックが存在しない場合（Fig. 9b）は見かけ比抵抗の

10 Hz 以下から両曲線は分離し、周波数が小さくなるにつれて次第に開きが大きくなっていく。したがって、インバージョンで求められた低比抵抗ブロックは、観測値を説明するために必要な構造であるといえる。この低比抵抗ブロックが地殻内流体であるか否かは、温度や圧力、流体の存在によって幅広く変化する岩石の比抵抗を定量的にモデル化する必要があり、今後、樽前山の火山体構造を議論する上で重要な課題である。

V. ま と め

樽前山周辺において、広帯域 MT 法を用いた比抵抗構造探査を行った。得られた MT データは、高周波数帯で1次元性、および低周波数帯で2、3次元性の特徴を示した。Groom-Bailey decomposition 解析およびインダクション・ベクトルにより、2次元走向を検討し、N 45°W を電磁氣的走向と仮定したが、それを決定的に裏付ける証拠は今のところ無く、さらに議論の必要がある。TM モードの見かけ比抵抗および位相を入力として2次元インバージョン解析を行い、北東—南西断面の比抵抗構造モデルを求めた。地表から海面下 10 km 深までのモデルは、大局的には水平多層構造を示し、地質層序を反映していると考えられる。山頂直下では、柱状の低比抵抗帯が第3層の高比抵抗層を貫いて海面下 10 km まで達しており、火山活動に伴う熱または熱水によって、岩石が変質している領域であることが疑われる。この低比抵抗帯の海水面付近には、さらに比抵抗の低いブロックが認められた。比抵抗モデルの感度チェックの結果、この低比抵抗のブロックは MT データを説明する上で必要な構造であることが明らかとなった。この領域は、低周波地震の震源や自然電位の電流源の位置から、地殻内流体の存在を示している可能性がある。今後、火口原やその周辺で面的に測点を配置した構造探査を行うことで、その存在が明らかになることが期待される。

謝辞 本研究にあたり、東京工業大学および東北大学から観測機器を借用しました。北海道森林管理局石狩森林管理署および同胆振東部森林管理署には国有林への入林許可をいただきました。国土地理院水沢測地観測所からは、MT 連続観測データを提供していただきました。記して深く感謝いたします。また、著者らとともに観測に参加された佐藤 流・高雄文仁・毛利 研（北海道大学理学部地球科学科）の各氏に感謝します。

文 献

- 青山裕, 大島弘光, 鈴木敦生, 前川徳光, 2004. 北海道の活動的火山における最近の地震活動—樽前山—, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 111–129.
- Fuji-ta, K., Y. Ogawa, M. Ichiki, S. Yamaguchi and Y. Makino, 1998. Audio frequency magneto-telluric survey of Norikura Volcano in central Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **90**, 209–217.
- Gamble, T.D., W.M. Goubau and J. Clarke, 1978. Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, **44**, 53–68.
- Groom, R. W. and R. C. Bailey, 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of

- local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1913–1925.
- 広島俊男, 駒沢正夫, 森尻理恵, 牧野雅彦, 村田康章, 1998. 苫小牧地域重力図(ブーゲー異常), 1:200,000 重力報告書, **9**, 地質調査所.
- 北海道立地質研究所, 2004. 北海道市町村の地熱・温泉ボーリングデータ集.
- 石田正夫, 曾屋龍典, 1980. 20万分の1地質図「札幌」. 地質調査所.
- Jones, A.G., 1992. Electrical conductivity of the continental lower crust. In: D.M. Fountain, R.J. Arculus and R.W. Kay (Editors), *Continental Lower Crust*, Elsevier, Amsterdam, pp. 81–143.
- 鍵山恒臣, 歌田久司, 上嶋誠, 増谷文雄, 神田径, 田中良和, 増田秀晴, 村上英記, 塩崎一郎, 市来雅啓, 行武毅, 茂木透, 網田和宏, 大志万直人, 三品正明, 1996. 霧島火山群中南東部の比抵抗構造, *火山*, **41**, 215–224.
- 宮村淳一, 田島義美, 山内義敬, 田村憲次, 1995. 樽前山の自然電位測定, *験震時報*, **58**, 79–90.
- 宮村淳一, 2004. 樽前山における自然電位繰り返し測定, *北海道大学地球物理学研究報告*, **67**, 137–148.
- 茂木透, 日高2000MT探査グループ, 2002. 日高地域での広帯域MT探査, *月刊地球*, **24**, 485–487.
- 西田泰典, 1977. 北海道石狩低地帯周辺の地下電気伝導度異常. *北海道大学地球物理学研究報告*, **36**, 17–28.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996. A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69–76.
- 札幌管区気象台, 1999. 樽前山・恵山・北海道駒ヶ岳・雌阿寒岳, 北海道地域火山機動観測実施報告, **20**, 118 pp.
- 佐藤博之, 山口昇一, 曾屋龍典, 1975. 20万分の1地質図「樽前山」. 地質調査所
- 曾屋龍典, 1972. 樽前火山の形成—とくに Ta-a, Ta-b 期の活動について—, *火山*, **16**, 15–27.
- 寺田暁彦, 中川光弘, 大島弘光, 青山裕, 神山裕幸, 2004. 2003年十勝沖地震 ($M_{jma}8.0$) 発生直後に樽前火山で起きた高感度カメラで明るく見える現象, *東京大学地震研究所彙報*, **79**, 17–26.
- 有珠火山観測所, 2004. 樽前山の浅部水環境—既存資料の整理—, 第98回火山噴火予知連絡会資料.
- 渡辺秀文, 岡田弘, 前川徳光, 鈴木敦生, 1984. 樽前火山山頂部における電気抵抗測定(1983年), 主要活火山の集中総合観測報告, 有珠山・第2回—1982年—, 樽前山・第1回—1983年—, 177–183.