



Title	十勝岳62-II 火口周辺の3次元比抵抗構造
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, 73, 281-294
Issue Date	2010-03-19
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.73.281">https://doi.org/10.14943/gbhu.73.281</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/44482">https://hdl.handle.net/2115/44482</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_25_p281-294.pdf



## 十勝岳 62-II 火口周辺の 3 次元比抵抗構造

山谷 祐介・橋本 武志・茂木 透・村上 亮

北海道大学大学院理学研究院

岡崎 紀俊

北海道立地質研究所

吉本 充宏

北海道大学大学院理学研究院

伏谷 祐二・橋本 政樹・山本 輝明

気象庁札幌管区气象台

西村 三治・有田 真

気象庁地磁気観測所女満別出張所

的場 敦史・土屋 遼平

北海道大学大学院理学院

(2010 年 1 月 8 日受理)

## Three-dimensional resistivity structure around the 62-II crater at Tokachidake volcano

Yusuke YAMAYA, Takeshi HASHIMOTO, Toru MOGI, Makoto MURAKAMI

Faculty of Science, Hokkaido University

Noritoshi OKAZAKI

Geological Survey Hokkaido

Mitsuhiro YOSHIMOTO

Faculty of Science, Hokkaido University

Yuji FUSHIYA, Masaki HASHIMOTO, Teruaki YAMAMOTO

Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency

Mitsuharu NISHIMURA, Makoto ARITA

Memambetsu Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

Atsushi MATOBA and Ryohei TSUCHIYA

Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 8, 2010)

Tokachidake Volcano is an active volcano, situated at the SW end of the Daisetsu-Tokachi volcanic chain in the central Hokkaido, Japan. We performed the AMT resistivity survey around the 62-II crater at the volcano in order to realize the hydrothermal zone, focusing on the recent activity of the crustal inflation and demagnetization beneath the crater. The measured AMT data suggested the three-dimensional structure beneath the study area. Prior to the resistivity modeling, we estimated an effect due to a steep topography in the study area. This estimation clearly showed a strong effect to the apparent resistivity, impedance phase and induction vector. Therefore, the simplified topography was included to the three-dimensional model. The resistivity model supposed by a forward modeling was characterized by a conductor ( $0.5 \Omega \text{ m}$ ) beneath the 62-II crater. We investigated a physical condition which could bring the resistivity of  $0.5 \Omega \text{ m}$ , and then estimated that high porosity (0.3) rocks were saturated with hot ( $\sim 200^\circ \text{C}$ ) pore water including dissolved components. Although the origin of hydrothermal water has been unresolved, this result suggests that a hydrothermal zone is developed beneath the 62-II crater.

## I. はじめに

十勝岳火山は北海道中央部の大雪—十勝火山列の南西部に位置する活火山である。有史以降のマグマ性の噴火は、30-40年間隔で起こっており、最近の噴火は、1988~89年に起こった62-II火口での水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発であった(Katsui et al., 1990)。また、2004年にはごく小規模の噴火を起こし、有色噴煙が観測されたが、2006年以降は目立った地震活動、噴気活動などは無く、低調に推移している(気象庁, 2009b)。しかしながら、気象庁によるGPS連続観測、および繰り返し観測の結果からは、2007年以降62-II火口付近浅部の膨張を示す傾向が見られている(気象庁, 2009a, b)。また、2008~2009年に行われた全磁力繰り返し測定の結果、62-II火口の直下に温度の上昇を示す消磁源が推定された(橋本ほか, 2010)。これらの結果は、2007年以降にそれまでは無かった何らかの活動が、62-II火口の直下で開始し、継続している事を示唆している。しかし、地下でどのような活動が起こっているのかは、これらの観測だけでは明らかにすることは困難で、例えば、温度の上昇をもたらしている原因が、蒸気によるものか熱水だまりの形成によるものか判断する事は容易ではない。したがって、他の地球科学的情報を得て、地下で起きている現象の解釈に充てる事が肝要であるが、その一つとして、地下の比抵抗構造の探査を計画した。比抵抗は、岩石中の間隙水の存在や温度などに敏感であり、火山や地熱帯の調査に有用なパラメータの一つである。著者らは、主として62-II火口周辺の熱水域の分布を把握する目的で、AMT(Audio-Magnetotelluric)法を使用した浅部比抵抗構造探査を行った。AMT法を含むMT法の構造解析として、従来は1次元ないし2次元の構造を仮定した解析が行われてきたが、最近では3次元計算コードの開発が進み、実用に供されてきている。火山においては、MT法で観測されるデータには3次元的地形が及ぼす影響が含まれる可能性があり、3次元解析において実際の地形に基づくモデルを作れる事は、非常に有用性が高い。本研究では、十勝岳においてAMT法で得られたデータを使い、地形を含めた3次元解析を試みた。これまでに、十分に観測データを説明する比抵抗構造モデルが得られたので、その結果について報告する。

また、得られたモデルにおいて見つかった、特徴的な低比抵抗構造について簡単な考察を行う。

## II. 観測およびデータ

十勝岳火口域の比抵抗構造を把握するために、Fig. 1 に示す 5 つの観測点で 2009 年 9 月 7~11 日に AMT 法比抵抗探査を行った。収録器は Phoenix Geophysics 社製 MTU-5 A で、電場は水平 2 成分、磁場は鉛直も含めた 3 成分の時系列を測定した。電場の測定には Pb-PbCl<sub>2</sub> 電極、磁場の測定にはインダクションコイル (MTC-30) を使用した。得られた電磁場の時系列データは、火口域から北北西に約 8 km 離れた場所に設置した参照点 (Fig. 1; A 点) の磁場データを用いてリモートリファレンス処理を行い、10,400-0.35 Hz 間の 60 周波数についてインピーダンステンソルおよびインダクションベクトルが計算された。

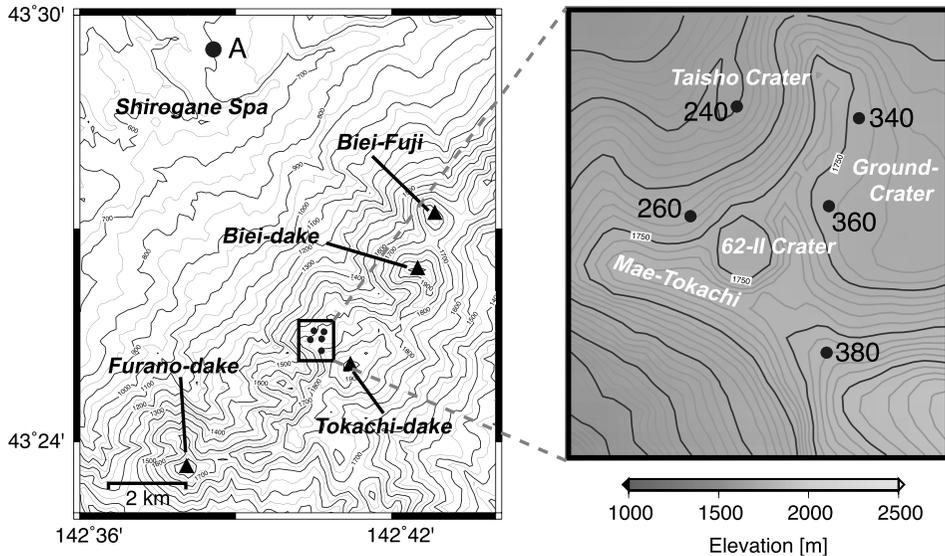


Fig. 1. (Left) Location of the study area. Black rectangle shows the AMT survey area at the crater area of Tokachidake volcano. A circle with the letter “A” indicates the remote reference site. (Right) Detail map of the AMT survey area. Circles indicate the AMT stations with station name.

### 見かけ比抵抗および位相

インピーダンステンソルから算出した見かけ比抵抗および位相の探査曲線を各観測点について Fig. 2 に示す。ここで、XY とは電場が南北で磁場が東西の成分、YX はその逆の成分を示す。電磁場は地面に浸透するとき、周波数が低いほど減衰が遅く、MT 法のレスポンスはより深部までの情報を持つ。Fig. 2 に示す探査曲線は、おおよそ左が浅部、右が深部の構造を反映していると考えられる。見かけ比抵抗は、いずれの観測点でも高周波数から低周波数に向かって高比抵抗から低比抵抗に減少している。このことは、観測地域内の比抵抗構造が、大局的には浅部

が高比抵抗で深部が低比抵抗であるという傾向があることを示している。しかしながら、個々の観測点の探查曲線はそれぞれ凹凸や成分間のスプリットの度合いが異なっており、地下が単純な一次元構造ではないことを示唆している。

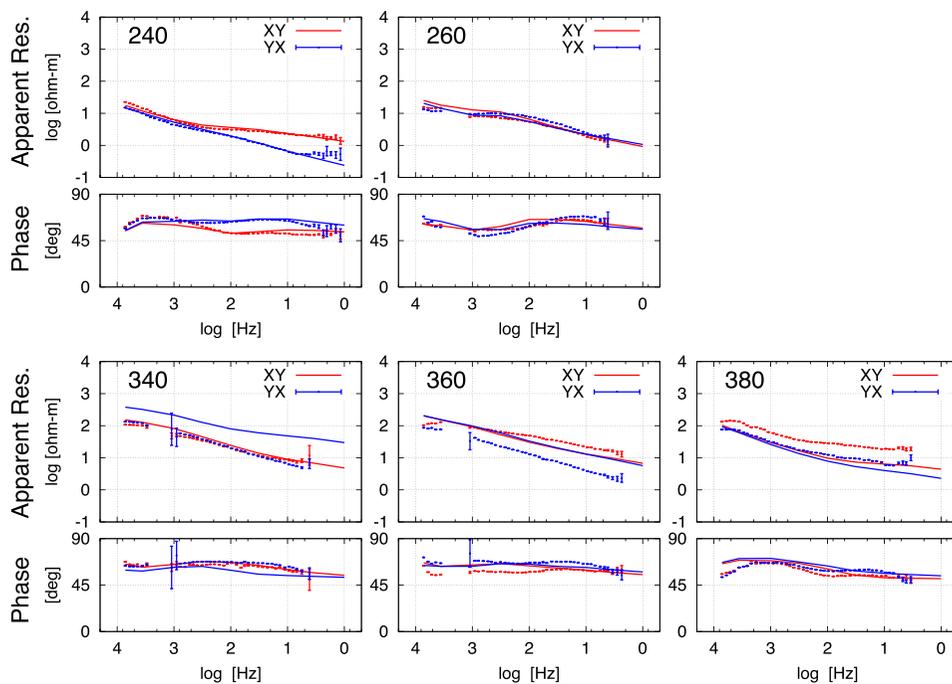


Fig. 2. Apparent resistivity and impedance phase at each AMT station. Red and blue show the components of XY and YX, respectively. Symbols with error bar indicate the measured responses, while solid lines indicate the calculated ones from the final resistivity model (Fig. 9).

### インダクションベクトル

Fig. 3 に代表的な周波数におけるインダクションベクトルを示す。インダクションベクトルは、一般的に比抵抗境界の低比抵抗側を指し、比抵抗のコントラストが大きいほどその大きが大きくなる。十勝岳火口原域のインダクションベクトルは、いずれの周波数においても 62-II 火口のやや北の位置に集中し、この地下に相対的に低比抵抗な領域がある可能性を示唆する。しかしながら、このベクトルが集中する位置は、地形の高まりと一致しているようにも見える。標高が高い部分は、ある水平面上で見たとき、周囲の空気の比抵抗よりも低い有限の比抵抗を持っていると考えることができる。したがって、地下を構成する物質の比抵抗が一様であったとしても、インダクションベクトルは地形の高い部分を指し示すこととなる。本観測地域は、約 700 m 四方内で 300 m 近い急峻な高低差があり、強い地形の影響が考えられる。しかし、ここで得られたインダクションベクトルが地形の影響で全て説明できるのか、あるいは、いずれかの場所に本当に低比抵抗な領域が存在し、そのレスポンスをも含んでいるのかは不明である。これについて

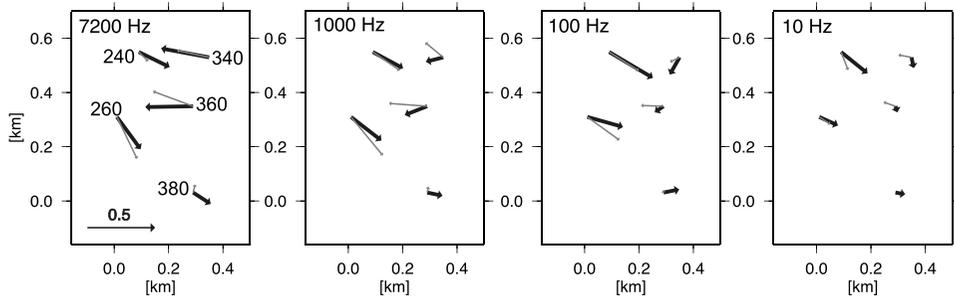


Fig. 3. Induction vectors at represented frequency. Gray and black arrows show the measured response and the calculated one from the final model (Fig. 9), respectively. The arrow with “0.5” indicates half a unit vector.

明らかにするためには、Yamaya et al. (2009) が行ったような地形を含めた 3 次元解析で検討すれば良く、III-2 節でその結果を示す。

### III. 構造解析

#### 1. 1 次元構造解析

比抵抗構造の概略を把握し、3 次元解析の参考とするために、各観測点の AMT データを使用した 1 次元構造解析を行った。通常 MT 法で得られる観測値はインピーダンステンソル ( $Z$ ) と呼ばれる 2 階のテンソル量である。理論上、1 次元構造に対しては  $Z$  の対角成分は 0 となり、非対角成分は等しくなる。よって、構造解析においては非対角成分のインピーダンスを用いれば良いが、実際においては 2 次元ないし 3 次元構造の影響を含み必ずしも理論とは一致しない。ここでは、1 次元構造を仮定するため、 $Z$  の Determinant をとった  $Z_d$  を使用した。 $Z_d$  により算出した見かけ比抵抗および位相を入力として OCCAM 1D インバージョン (Constable et al., 1987) を使用して比抵抗構造を推定した。

Fig. 4 に各観測点での見かけ比抵抗および位相のフィッティングとインバージョンによって推定された比抵抗構造を示す。観測値と計算値はいずれの観測点でもよく一致している。探査曲線から予想される通り、表層で高抵抗、深くなるほど低抵抗の構造が推定された。表層から数十 m の深さの比抵抗はグラウンド火口の外側では数百  $\Omega\text{m}$ 、内側では 1000  $\Omega\text{m}$  を超える高比抵抗層が推定されている。この差異は、等深面比抵抗分布 (Fig. 5) ではっきりとわかり、おそらくグラウンド火口内の堆積物が高比抵抗を示しているものと考えられる。このようなグラウンド火口内外での傾向は深部でも同様で、特に 240、260 で比抵抗が数  $\Omega\text{m}$  以下と極めて低い。240 および 260 の近傍には大正火口および 62-II 火口があり、現在の噴気活動が活発な場所と、低比抵抗な場所とが関連しているように見える。

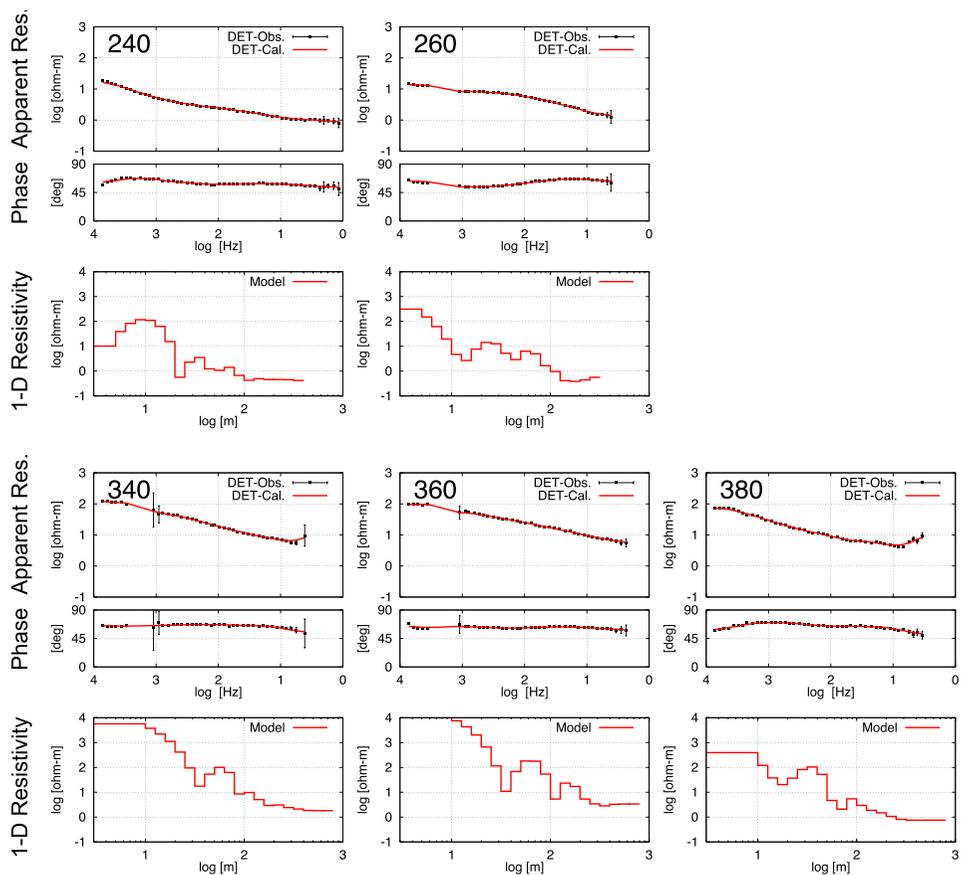


Fig. 4. Result of the 1-D resistivity inversion at each station. Apparent resistivity and impedance phase were calculated from the determinant of the impedance tensor.

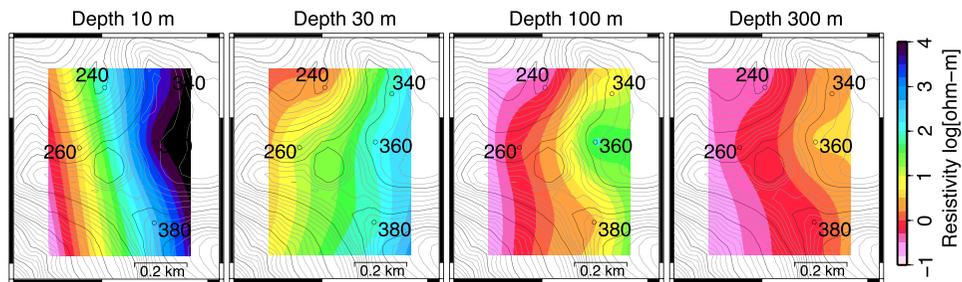


Fig. 5. Distribution of resistivity based on the result of the 1-D inversion.

## 2. 3次元構造解析

### 地形の影響の検討

Ⅱ節で述べた通り、インダクションベクトルには観測点周辺の地形の影響が含まれている可能性がある。地形の影響は、インダクションベクトルのみにとどまらず、インピーダンステンソルにも及ぶことが報告されている（例えば、Nam et al., 2007）。そこで、3次元解析により実際の地形を含めたモデリングを行い、地形の影響が観測値にどの程度含まれるかを検討した。3次元解析には Fomenko and Mogi (2002) による、スタaggerド格子を用いた差分法計算コードを使用した。計算範囲は、水平方向 640 km 四方、深さ方向は海拔下 320 km までである。地形は直方体ブロックで表現されるため、突出した角の影響を避けるために、観測点近傍ではグリッドを細かく (20 m) 分割した。使用したブロック数は、X(北) = 55, Y(東) = 51, Z(鉛直) = 39 で、したがって総数は 109,395 個である。地形は、国土地理院の基盤地図情報 10 m メッシュ (標高) を元に、平均化された標高を入力した (Fig. 6)。全てのブロックの比抵抗を  $100 \Omega\text{m}$  とし、

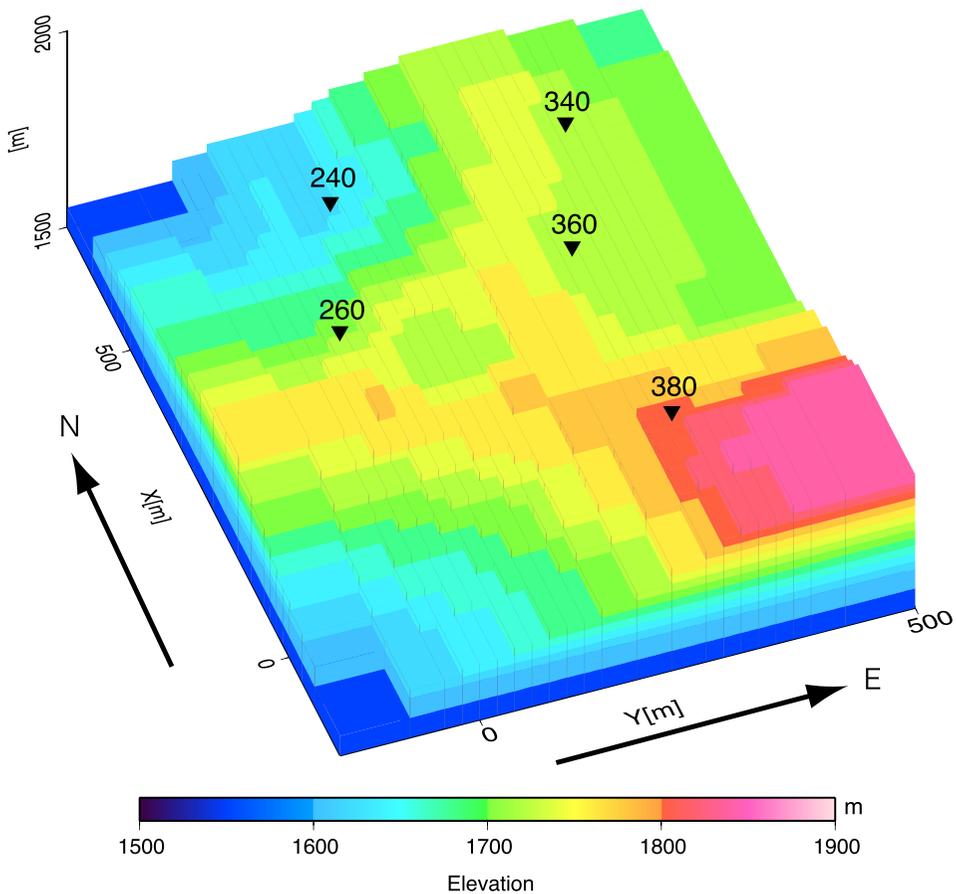


Fig. 6. Simplified topography model assumed in the 3-D modeling. Turned triangle indicates the location of the AMT station.

1～7200 Hz 間の 9 つの周波数についてレスポンスを計算した。100  $\Omega\text{m}$  の均質媒質に対しては、全ての周波数について見かけ比抵抗が 100  $\Omega\text{m}$ 、位相は 45° となることが期待される。また、インダクションベクトルは方向が定まらず、大きさが 0 となるはずである。したがって、計算値がこれらの期待される値からはずれた値を示せば、地形の影響が現れていると判断できる。

計算された見かけ比抵抗および位相のうち変化が大きかった観測点 240 と 260 について Fig. 7 に示す。計算値の見かけ比抵抗は、33～176  $\Omega\text{m}$ 、位相は 42～53° の値をとり、これは均質大地に比べて最大 76 % および 17 % の変化である。これらの値は、観測誤差を有意に超え、観測値に含まれる 3 次元的な地形の影響が無視できない事を意味する。一方、インダクションベクトルの計算値 (Fig. 8) は、観測点 240, 260 では観測値と類似した傾向が認められるが、340, 360 では観測値で西～北西を向くベクトルと全く異なる傾向を示している。また、380 のベクトルは観測値では大きさがほとんど 0 に近いが、計算値では大きく、南東側の十勝岳山頂を向いている。これらの傾向は、100  $\Omega\text{m}$  均質と仮定した大地の比抵抗値を変化させても、ベクトルの大きさは変わるが、向きは変わらない。つまり、観測されたインダクションベクトルは地形の効果だけでは説明できず、地下に何らかの比抵抗コントラストが存在しなければならない。

### 3次元構造の推定

観測データには地形の影響が少なからず含まれている事が明らかとなったので、正確な比抵抗構造を推定するためには、この影響を考慮する必要がある。方法としては、地形の影響を観測値から除去し、平坦な水平面上で構造を解析するアプローチも考えられるが、3次元解析では前節のように、実際の地形を含めた構造のレスポンスを計算することができる。火山のような、地形

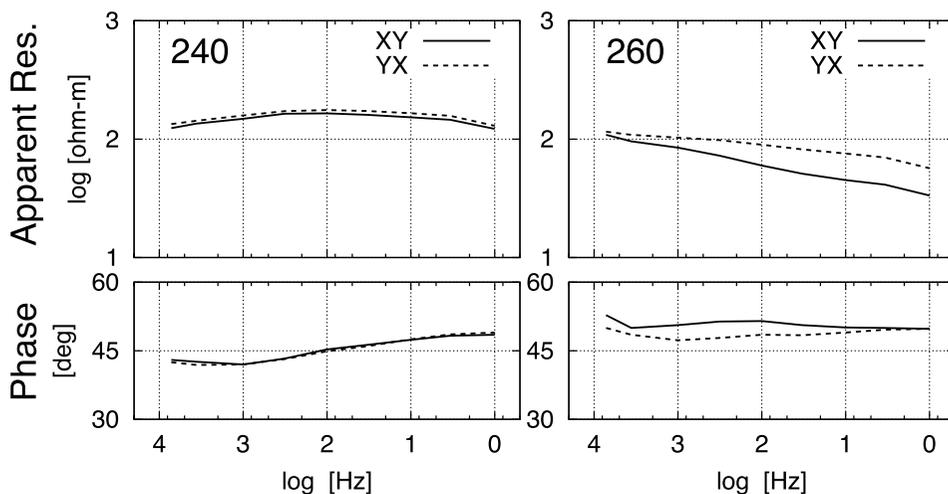


Fig. 7. Calculated apparent resistivity and impedance phase, assuming the 3-D topography (Fig. 6) and homogeneous resistivity (100  $\Omega\text{m}$ ). Solid and dashed lines show the components of XY and YX, respectively

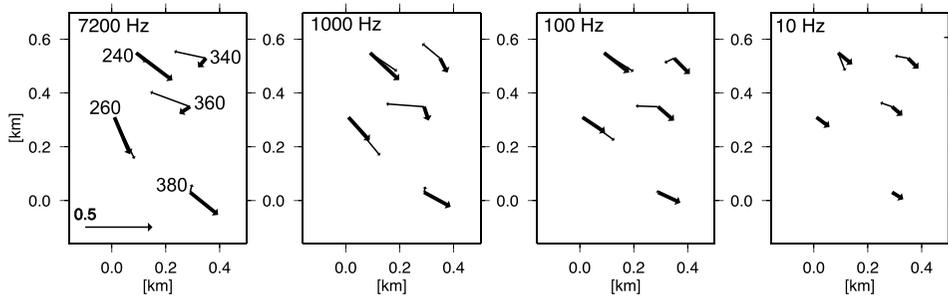


Fig. 8. Calculated induction vector (black arrow), assuming the 3-D topography (Fig. 6) and homogeneous resistivity ( $100\ \Omega\text{m}$ ). Gray arrow shows the measured induction vector. The arrow with “0.5” indicates half a unit vector.

の高まりの内部にも比抵抗異常が想定されるフィールドでは、このアドバンテージは大きい。したがってここでは、前節で使用した 3 次元構造モデルに比抵抗値を分布させ、フォワードモデリングによって 3 次元比抵抗構造を推定するアプローチをとった。フォワードモデリングの初期構造として、III-1 節で求めた 1 次元構造の比抵抗値と深度分布を単純化して与えた。フィッティングには見かけ比抵抗と位相の XY および YX 成分、インダクションベクトルを使用し、観測値を説明できるように試行錯誤的にモデルを構築した。最終的なモデルを Fig. 9 に示す。また、Fig. 2 に見かけ比抵抗と位相、Fig. 3 にインダクションベクトルの観測値と最終モデルの計算値の比較を示す。計算された見かけ比抵抗と位相は、個々の観測点の曲線の特徴的な凹凸や成分間のスプリットが観測値を良く再現している。また、インダクションベクトルは、地形の影響だけでは説明されなかった観測点 340、360 の西～北西向きベクトルが、完全ではないもののその傾向を示している。この西～北西向きベクトルには、グラウンド火口内の表層が高比抵抗である事と、観測点 340 の北西側が地形の高まりを含めて低比抵抗である事が寄与している。

ここでの比抵抗構造の推定は、インバージョンのような数学的理論に基づく自動的なものではなく、フォワード計算を手動のモデル変更によって行ったため、著者らの主観的情報を完全に排除することは出来ない。また、地形を表現するためにグリッドを細かく設定しているが、それに比して観測点間隔が広いため、水平方向の比抵抗境界の位置についてはかなりの任意性があると考えられる。したがって、このモデルが一意に決まるというわけではなく、異なるモデルでも観測値を説明できる可能性がある事に留意しなければならない。ただし、観測点の直下や近傍では、周囲の構造の影響が最小に抑えられていると考えられる。例えば、比抵抗モデル (Fig. 9) では、62-II 火口周辺の標高 1100～1600 m に  $0.5\ \Omega\text{m}$  のごく低比抵抗な箇所 (Fig. 9 中の C) が推定された。いま仮に、この低比抵抗体が存在しなく、周囲と同じ比抵抗 ( $100\ \Omega\text{m}$ ) である場合を考え、Fig. 10 にその場合に計算される見かけ比抵抗および位相のレスポンスを示す。観測点 260 の計算値は観測値と明らかにかけ離れており、最終モデルにより計算されるレスポンス (Fig. 2) よりもフィッティングが悪い。一方で、260 以外の観測点では最終モデルの計算値と

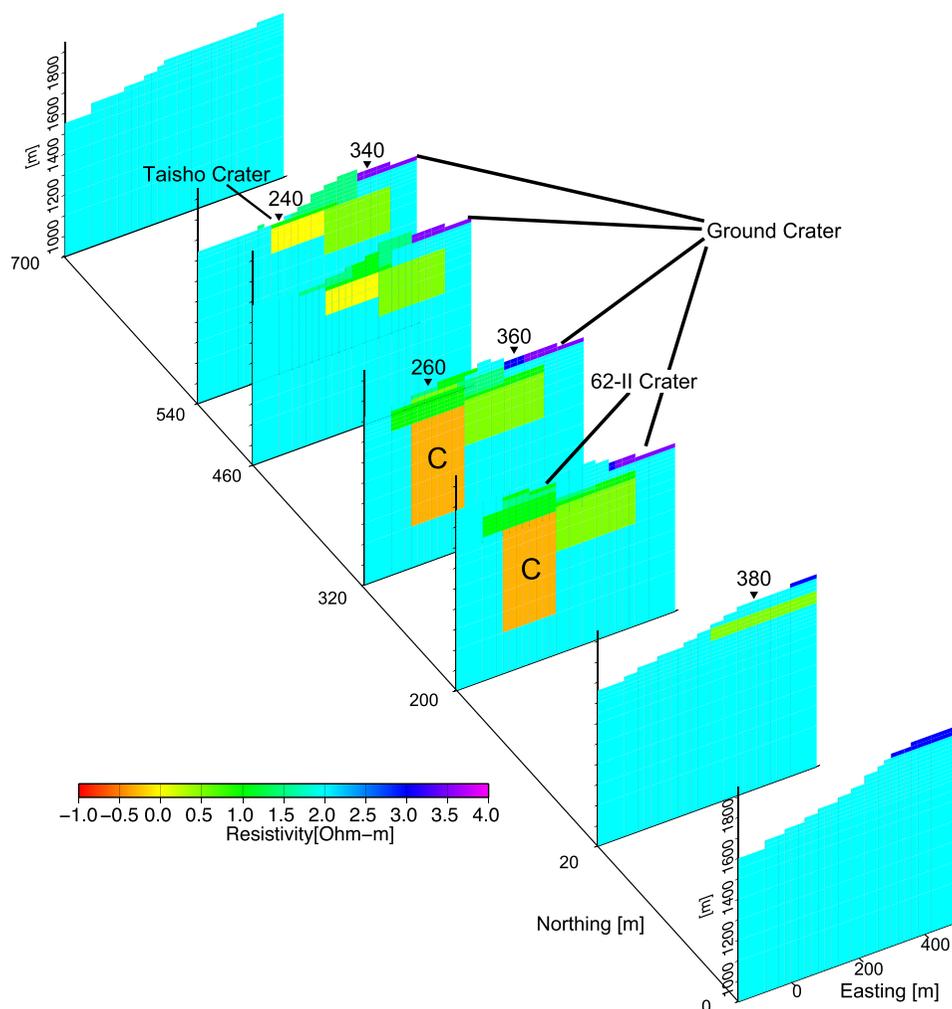


Fig. 9. 3-D resistivity model supposed by forward modeling. Model is depicted by the east-west sections. Turned triangle indicates the location of the AMT station.

ほとんど変わらず，この構造が周囲の観測点でのレスポンスに影響していない事がわかる．なお，インダクションベクトルでは二つのモデルの計算値に有意な差は認められない．したがって，この低比抵抗体は260の見かけ比抵抗と位相によってのみ導かれる構造ともいえるが，低比抵抗な領域を必要以上に大きくしてしまうと，他の観測点にも影響が生じてしまうので，少なくとも，260の直下およびその近傍では真に近い構造が得られていると考えられる．

#### IV. 考 察

得られたモデルは，グラウンド火口の浅部に  $1000 \Omega \text{m}$  の高比抵抗層が推定された他は，初期

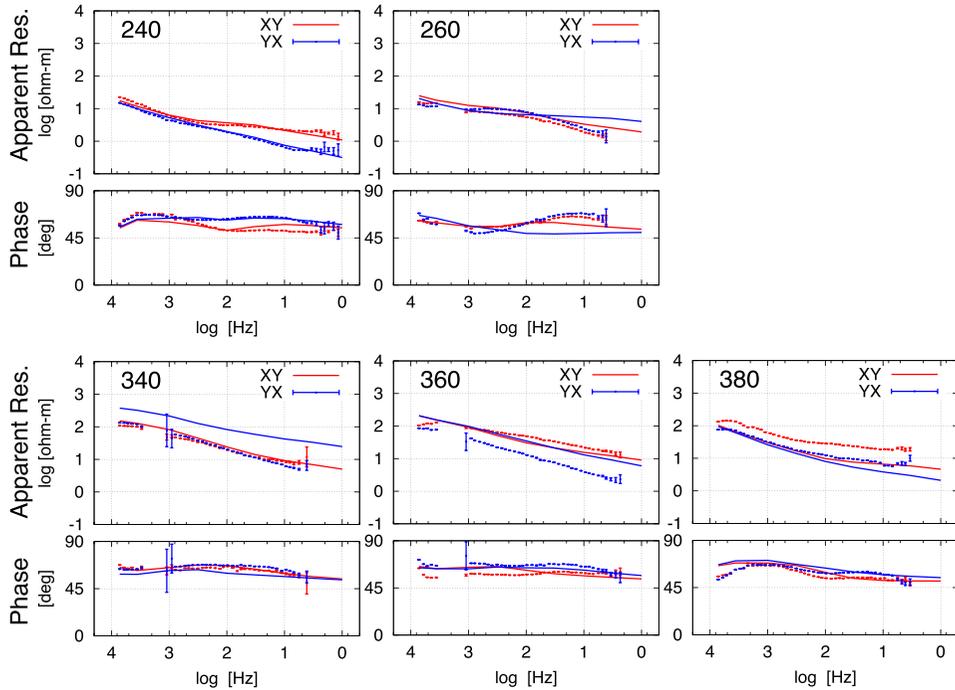


Fig. 10. Calculated apparent resistivity and impedance phase (solid line) from the final model without the conductor C (Fig. 9). Symbols with error bar show the measured responses.

構造として与えた  $100 \Omega\text{m}$  の中に低比抵抗体が分布する構造で構成されている。これらの低比抵抗体は、ほとんどが深さ約  $200 \text{ m}$  までに分布し、その位置は、現在噴気活動が活発な 62-II 火口および大正火口周辺に一致する。噴気活動が活発な場所の地下は、温度が高いことや熱水変質が進んでいることが考えられ、その結果、低比抵抗になっている可能性がある。一方で、本研究で注目する 62-II 火口直下には、 $0.5 \Omega\text{m}$  の低比抵抗体が推定された (Fig. 9 中の C)。この低比抵抗体は、標高  $1100 \sim 1600 \text{ m}$  にあり、南北  $180 \text{ m}$ 、東西  $160 \text{ m}$  の直方体の形状を持つ。低比抵抗体の上限と下限は、地磁気全磁力変化の消磁源 (標高  $1600 \text{ m}$ ; 橋本ほか, 2010) および GPS 観測による地殻変動の膨張源 (深さ  $700 \text{ m}$ ; 気象庁, 2009) とほぼ一致する。これは偶然かもしれないが、最近の火口直下の状態を解明する上で、興味深い位置関係にある。

この低比抵抗体の存在意義を探るための手段の一つとして、 $0.5 \Omega\text{m}$  の比抵抗を実現させる物理条件を簡単に検討する。通常、岩石自体の比抵抗は非常に高く、数千  $\Omega\text{m}$  を超えることも珍しくないが、地下の岩石は一般的には空隙中に水を含んだ湿潤状態で存在し、バルクとしての比抵抗は空隙率や間隙水の比抵抗などによって大きく支配される。間隙水で飽和した岩石の比抵抗 ( $\rho$ ) は、間隙水の比抵抗 ( $\rho_w$ ) との間に Archie の経験式 (Archie, 1942),

$$\rho = a\phi^{-m}\rho_w$$

で表される関係がある。ここで、 $\phi$  は空隙率、 $a$ 、 $m$  はそれぞれ迂回係数、膠結係数と呼ばれ、岩石の性質に依存する定数である。残念ながら、観測地域周辺の地層で空隙率の推定は行われていないので、仮定を導入する必要がある。火道周辺の岩石の空隙率として、例えば雲仙火山の火道掘削では、0.1~0.4の空隙率が得られている（梶原ほか、2005）。十勝岳と雲仙火山では岩質も噴火のタイプも異なるので、同じように扱うことは出来ないが、火道周辺の岩石にあり得る値として、 $\phi = 0.3$  を仮定する。また、 $a$  と  $m$  は一般的によく用いられる値である 1 および 2 を仮定する。以上の条件において Archie を適用して  $\rho = 0.5 \Omega_m$  を得るには、間隙水の比抵抗として  $\rho_w = 0.045 \Omega_m$  が要求される。この間隙水の比抵抗は、海水の比抵抗よりも一桁小さく、相当に高濃度の溶存成分を含んだ流体を考えなければならない。Nesbitt (1993) の実験によれば、この比抵抗は KCl 溶液の濃度で 20 wt % 以上の場合に相当し、現実的とは言い難い。ただし、この濃度は常温での値で、温度が 200°C 程度の条件下では、数 wt % の塩濃度でも同程度の比抵抗に低下する。一方、熱水に晒された岩石は変質し、粘土を形成する可能性があるが、粘土鉱物を含む岩石は多くの場合、比抵抗が低くなることが報告されている。高倉 (2009) によれば、粘土鉱物が岩石の比抵抗に及ぼす影響は間隙水の濃度に大きく左右され、濃度が高い場合 (KCl 0.1 mol/l) は粘土鉱物の含有量によらず比抵抗の変化はほとんどないが、濃度が低い水溶液ほど粘土鉱物の影響が大きいという実験結果が示されている。実験では、KCl 0.001 mol/l 水溶液について、ある種のスメクタイトは数%の含有量で岩石の比抵抗を一桁下げた結果となっている (高倉, 2009)。したがって、十勝岳の場合、粘土鉱物の存在がある場合は、常温下で 0.5  $\Omega_m$  程度、あるいは温度 200°C で比抵抗が低下する場合を考えると数  $\Omega_m$  程度の間隙水を与えれば良く、多少の溶存成分は含むが、必ずしも高塩性流体を考える必要はなくなる。

以上をまとめると、空隙率が 0.3 程度の岩石中に多少の溶存成分を含む 200°C 程度の熱水が飽和状態であるとき、0.5  $\Omega_m$  の比抵抗が実現可能である。粘土鉱物の含有量は、溶存成分の濃度とトレードオフであるが、数%のスメクタイトを含有する場合、説明がより容易となる。ただし、この見積りは仮定と曖昧さを多く含み、他の物理状態でも説明出来る可能性があることに留意しなければならない。よって、この位置に熱水が存在する「可能性」はある、という程度に留めておくべきである。

この物理的条件から、低比抵抗体内部の状態を推定するとき、200°C 程度の熱水がどこから供給されたかを考える必要がある。水の供給源としては、天水あるいは深部から上昇する火山ガス中の水蒸気が考えられる。実状はそのどちらか一方、あるいは両方の起源から供給されているのかもしれないが、現段階でそれを断定することは出来ない。深さ 150 m の消磁源の成因としては、地下から上昇した水蒸気が気相のまま蒸気だまりを形成する場合よりも、潜熱を放出して液相に変化する場合のほうが、熱収支上考えやすいとしている (橋本ほか, 2010)。これを考慮すると、深部から上昇してきた水蒸気を多く含む火山ガスは、ある深さで液相に変化し、空隙率の高い火道周辺に流出した結果、低比抵抗ゾーンを形成している事が想像できる。本研究で推定された低比抵抗ゾーンは、ほぼ上端と下端で消磁源 (深さ 150 m) と膨張源 (深さ 700 m) に位置

して二つの場所をつないでおり、この部分が熱水の対流域を示している可能性が示唆される。一方、0.5  $\Omega$  m の低比抵抗体より浅部は、10  $\Omega$  m の層が推定されており、ここではまた異なる物理状態（例えば、空隙率が低い）となっているであろう。この層が、火山ガスや熱水がそれより浅部に上昇するのを妨げるキャップロックとして働いているとすれば、火山構造が熱的活動に制約を与えている可能性がある。今後、地下の活動状態が次の段階へ移行すれば、それに対応してこの比抵抗境界の深さが変化するのかもしれない。ただし、これらの推論は水収支などの根拠に基づくものではなく、もちろん熱水の起源として天水の流入を否定するものではない。今後、比抵抗から推定される物理条件の再検討を含め、慎重に考察を進める必要がある。

## V. ま と め

2009 年 9 月に十勝岳火口域において AMT 法による比抵抗構造探査を行った。その結果、浅部－高比抵抗、深部－低比抵抗の特徴を示すデータが得られたが、1 次元的な層構造ではなく、構造が 3 次元的事が示唆された。周辺の地形を含む 3 次元構造解析をフォワードモデリングによって行い、観測された見かけ比抵抗、位相およびインダクションベクトルを良く説明する比抵抗モデルが推定された。浅部の低比抵抗な領域が、噴気活動が高い位置と一致し、変質や温度の高い状態を示唆する一方で、62-II 火口の直下では標高 1100～1600 m に 0.5  $\Omega$  m のごく低比抵抗な場所が見つかった。この比抵抗値を実現する物理状態を検討し、その結果、空隙率が 0.3 程度で粘土鉱物を数%含有する岩石中に、多少の溶存成分を含む 200  $^{\circ}$ C 程度の熱水が飽和状態で存在している状態が候補の一つとして考えられた。熱水の起源を地下から上昇する水蒸気に求める場合、低比抵抗ゾーンは熱水の対流域を反映し、それより浅部のやや低比抵抗な層は、火山性流体のキャップロックとして働いている状態が想像される。ただし、今回の比抵抗の見積りでは空隙率や間隙水の比抵抗について仮定の部分が多くを占めた。また、熱水の起源については現時点では有力な回答は無く、これらは今後解決すべき課題である。

**謝辞** 磁場参照点の設置にあたって、美瑛町白金模範牧場より用地をご提供いただいた。記して感謝します。

## 文 献

- Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, **146**, 54-62.
- Constable, S. C., R. L. Parker and C. G. Constable, 1987. Occam's inversion—A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Fomenko, E.Y. and T. Mogi, 2002. A new computation method for a staggered grid of 3D EM field conservative modeling, *Earth Planets Space*, **54**, 499-509.
- 橋本武志・西村三治・有田真・山本輝明・小木曾仁・重野伸昭・岡崎紀俊・茂木透, 2010. 十勝岳の全磁力変化と蓄熱仮定 (2008-2009 年), 北海道大学地球物理学研究報告, **73**, 269-280.

- 梶原竜哉・池田隆司・中田節也・宇都浩三・佐久間澄夫, 2005. 雲仙科学掘削: USDP-4 井における検層結果, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集 (CD-ROM), V 072 P-013.
- Katsui, Y., S. Kawachi, Y. Kondo, Y. Ikeda, M. Nakagawa, Y. Gotoh, H. Yamagishi, T. Yamazaki and M. Sumita, 1990. The 1988-1989 Explosive Eruption of Tokachi-dake, Central Hokkaido, Its Sequence and Mode, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **35**, 111-129.
- 気象庁, 2009 a. 第 114 回噴火予知連絡会資料.
- 気象庁, 2009 b. 十勝岳の火山活動解説資料 (平成 21 年 11 月).
- Nam, M. J., H. J. Kim, Y. Song, T. J. Lee, J. S. Son and J. H. Shu, 2007. 3D magnetotelluric modeling including surface topography, *Geophys. Prospect.*, **55**, 277-287.
- Nesbitt, B., 1993. Electrical resistivities of crustal fluids, *J. Geophys. Res.*, **98**, 4301-4310.
- 高倉伸一, 2009. 粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗-間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響-, *物理探査*, **62**, 385-396.
- Yamaya, Y., T. Mogi, T. Hashimoto and H. Ichihara, 2009. Hydrothermal system beneath the crater of Tarumai volcano, Japan: 3-D resistivity structure revealed using audio-magnetotellurics and induction vector, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 193-202.