

北海道南部の地熱地域における 3次元比抵抗構造推定

Estimating the 3-D resistivity structure of the geothermal area in the southern part of Hokkaido, Japan

早川 美土里, 茂木 透(北海道大学)

Midori Hayakawa, Toru Mogi (Hokkaido University)

Abstract

The geothermal gradient is higher in Oshima Peninsula located in the southern part of Hokkaido. Geothermal gradient specially high, greater than 10 degree per km, in the central part called “Yakumo- Nigorikawa geothermal zone”, even though the recent volcanic activity is not seen. Many geothermal features and hot springs are found in this zone. The geothermal investigations have been performed by various methods. We carried out magnetotelluric survey at 20 stations in Yakumo area and estimated 2D resistivity structure along three sections.

A remarkable low resistivity body (L) inclined to the north was seen and high resistivity body (H) rising from deep area was seen at the south side of L. The fault system of E-W direction inclined to the north was found at the boundary between L and H bodies.

Recently, we performed 3D inversion with ModEM (Egbert and Kelbert, 2012) using the same data of 2D case. The result was not so coincide with the 2D case. To consider the reasons of the differences, we carried out test inversions for buried simple rectangular model. As results, 3D inversion could not reproduce the model due to reasons that the observation station array is too coarse and not equal spacing. Through the study, we recognized that the station array should be equal and appropriate spacing dense to obtain good 3D inversion results.

1. はじめに

北海道南部に位置する渡島半島には、北部に狩場山、南部に北海道駒ヶ岳や恵山といった第四紀火山が存在し、全体的に地温勾配が高い地域である(Fig.1)。一方、半島中央に位置する八雲、熊石地域では、最近の火山活動が見られないにもかかわらず、地温勾配が非常に高く(10°C/100m)、温泉や地熱徴候地が多く見られる。この地域は、東側に位置する濁川では森地熱発電所が稼動しており、“八雲 - 濁川ゾーン”としてこれまでに地熱調査が様々な方法により行われてきている(NEDO, 1990, 1999)。八雲地域で実施されたボーリング調査による温度検層からは、1500mで200°Cを超える記録が得られているが、こ

れまでに有力な熱水貯留層は確認されていない。この地域は、花崗岩を基盤岩とし、砂岩や泥岩などの堆積岩層により構成されており、石英斑岩などの貫入岩が見られる。

このような地域での地熱貯留層の発達の可能性を調べるために、Fig.2 に示す 20 測点において MT 探査が行われた。花崗岩は一般に緻密な岩石であるから、このような地域では貯留層は断層等に伴う断裂系に沿いに発達する。しかし、この地域ではそのような有力な断裂系は知られていなかった。本研究では、最初、測点が直線状に並ぶところで、2次元比抵抗構造を求めるために2次元インバージョンを行った。その結果、東西系の断層に伴う低比抵抗構造が見つけた。地質的にもこの断層の露頭が発見され、地熱貯留層の存在を示唆する結果が得られた。

そこで、同じ測点配列で3次元比抵抗構造が得られないか試してみるようになった。この地域では、測点がやや広い間隔でかつ等間隔の配列をしていない配列であり、そのような場合に対して3次元インバージョンを行った結果について議論を行った。このような結果は、今後3次元インバージョンを正しく行うために役に立つであろう。

2. Magnetotelluric (MT) 観測

本研究では、2015年10月から11月にMT観測を八雲地域の20点で実施した(Fig. 2)。観測に使用した機材は、Phoenix Geophysics社のMTU-5,MTU-5Aを1台ずつ用いた。各測点では原則2晩測定し、320~0.00034Hzのデータを得た。得られた電場と磁場から、インピーダンステンソル Z が得られ、その各成分から見掛比抵抗とインピーダンス位相を求めた。

今回得られた時系列データは、江刺観測所の連続観測データ(国土地理院)を用いてリモートリファレンス(Gamble, 1979)処理を行った。その結果、比較的ノイズが少ない良いデータが得られた。しかし、いくつかの測点では、0.1Hz以下のデータで人工ノイズによるニアフィールド現象や、特殊な比抵抗構造に由来すると思われる異常位相現象が見られた。

3. 2次元インバージョン

得られたデータからフェーズテンソル(Caldwell, 2004)を計算し、対象地域における電氣的構造の走向を推定した。100~0.01Hzでのフェーズテンソル楕円の主軸の頻度分布と、インダクションベクトルの方向から、この地域の電氣的構造走向はN45°Wであると推定した。2次元インバージョンは、その走向に対するTMモードの見かけ比抵抗、位相を用いて行った。2次元インバージョンコードは、Ogawa and Uchida(1996)を使用し、異常位相やニアフィールドの影響が見られなかった0.1Hz以上のデータを使用し、2測線において比抵抗構造を求めた(Fig. 2)。

得られた比抵抗構造をFig.3に示す。断面Aでは、モデル中央に北傾斜の顕著な低抵抗構造が示されており、その南側には深部から伸びる高抵抗構造が示されている。この高抵抗構造は、この地域の過去の地質調査から推定される貫入岩の位置と一致し、低抵抗構造と高抵抗構造の境界は、MT探査と同時期に実施された地表調査において新たに推定された東西系の断層の位置と概ね一致している。

4. 3次元インバージョン

もともと、このMT探査は2次元構造を得る目的で実施したものであり、多くの測点は道路沿いに直線状に配列されている。このような偏った測点配列で3次元インバージョンが可能かどうか調べること

にした。3次元インバージョンには、Egbert and Kelbert (2012)により開発された ModEM を使用した。ModEM では、以下の評価式を最小にするように反復計算を行う。最適解として RMS が最小なものを選択した。ModEm では、評価式として

$$\phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) + \lambda(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

を用い、RMS は以下の式で定義する、

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))}{4 \times N_{\text{site}} \times N_{\text{period}}}}$$

ここで、各記号は以下を表す。

d : データベクトル	λ : 減衰率
m : モデルパラメータベクトル	\mathbf{C}_d : データの標準化係数
m₀ : 初期モデル	\mathbf{C}_m : モデルの標準化係数
f(m) : フォワード計算値	

使用したデータは、各測点で取得されたテンソルインピーダンステンソルの4成分と、ティッパ-2成分で、入力した周期は0.003125~90.909sの20周期、エラーフロアを5%とした。計算に用いたグリッドは、X:79×Y:77×Z:63で、そのうち中心付近で比抵抗値を変化させるグリッド数をX:23×Y:21とした。以上のデータを入力データとして計算したところ47回の反復計算で、RMSは62.34から4.96へ減少した。得られた3次元インバージョン結果をFig. 4に示した。地表および深さ約500m、1000m、1500mでの比抵抗構造平面図によると、地表付近は測点の周囲だけ比抵抗の変化が表れているが、500mでは測点が多い中央付近に顕著なほぼ東西および南北方向の低比抵抗構造が見られる。さらに1000mや1500m深では、中央部付近だけにやや低比抵抗な構造が見えるだけになった。また、南北方向の断面図で見ると、顕著な低比抵抗構造が見られるのは深さ500m位までであり、それ以深には見られない。2D断面とほぼ同じ断面(右端の図)を見ると、北向きに沈みこむような低抵抗体が確認できるが、水平位置がやや北側にずれていることが分かる。また、ここでも深部では構造の変化がほとんど見られなくなっている。以上のように見ると、3次元インバージョンの結果では浅いところでは構造の変化がみられるが、やや深いところでは変化があまり見られないようである。その点でも2次元インバージョン結果と異なる。

5. 議論および結論

3次元インバージョンの結果は、2次元インバージョン結果と異なるので、このような測点配列で3次元インバージョンを行った場合に地下構造が再現可能かを調べた。まず、1000Ωm均一媒質に100Ωmの導電性直方体を上面の深さ500mのところ置き、この構造に対する3Dインバージョンを、測点を八雲地域の配置にした場合と、計算領域に対して均一配置した場合とを計算し、結果を比較した(Fig. 5)。二つの結果を比較すると、計算領域に対して測点が均一に配置した場合、直方体構造はほぼ再現できているが、不均一に配置された場合、直方体の構造は歪んで現れてしまうことが示された。基本的に3Dインバージョンでよい結果を得るためには、均一で適当な間隔の測点配置が必要であることが示さ

れた。

Uchida et al., (2015) では、計算領域周辺の測点のデータを使用しないインバージョンでは、計算領域の境界付近に偽像が作られるということが報告されている。したがって、境界付近の構造も疑う必要があるだろう。また、Uchida, 2005 では、測点を計算領域に対して密で均一に配置した場合の2次元インバージョンと3次元インバージョンの比較がされており、そのような場合でも2次元に比べ3次元モデルでは深部の感度がなくなるという結果が報告されている。これらの先行研究と、今回行ったテストインバージョンの結果から、今回推定した3次元比抵抗構造は、再現性が高く信頼できるモデルであるとは言えないと考えられる。よい3次元比抵抗構造を得るためには、対象領域内および周辺に均一に測点を配置する必要があるし、深部の構造を得るために測点毎の測定時間を長くして十分長い周期のデータを得ることが望ましい。

参考文献

- Caldwell, T.B., H. M. Bibby and C. Brown: The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457-469, 2004.
- Egbert, G.D. and A. Kelbart, Computational recipes for electromagnetic inverse problems, *Geophys. J. Int.*, 189, 251-267, 2012
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 地熱開発促進調査報告書, No.B-3, 熊石地域, 1999
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 地熱開発促進調査報告書, No.19, 八雲地域, 1990
- Ogawa Y. and Uchida T.: A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 1996, 126, 69-76
- Uchida T.: Three-Dimensional Magnetotelluric Investigation in Geothermal Fields in Japan and Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress, 2005*
- Uchida T., Takakura S., Ueda T., Sato T. and Abe Y.: Three-Dimensional Resistivity Structure of the Yanaizu-Nishiyama Geothermal Reservoir, Northern Japan, *Proceedings World Geothermal Congress, 2015*

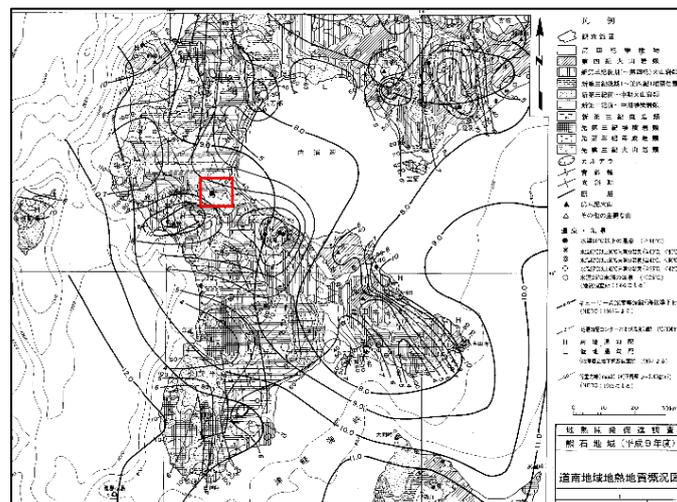


Fig.1 The geological map and heat flow map of Oshima Peninsula [NEDO, 1999]

The red square indicates the MT survey area.

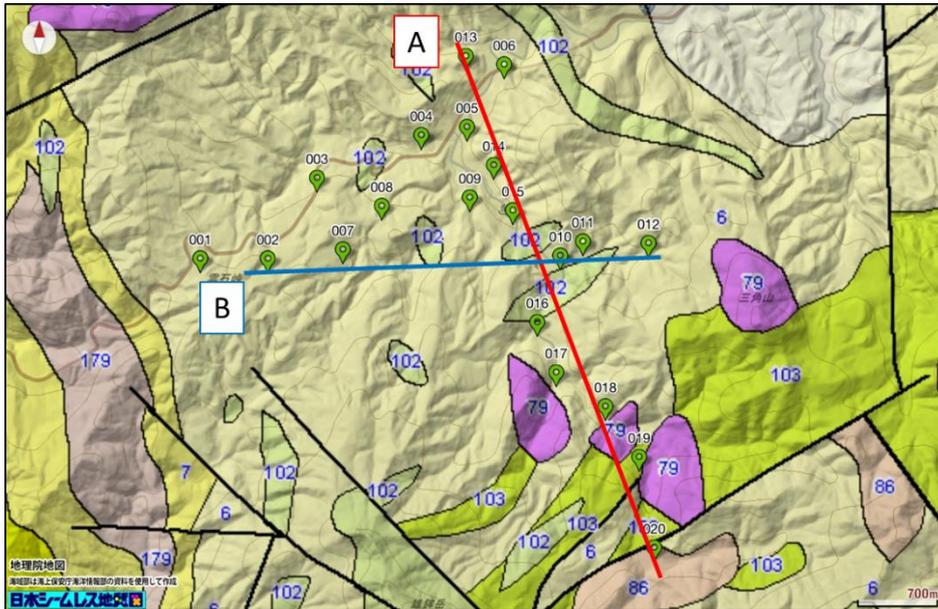


Fig. 2 The map of MT survey area and stations.

Red and Blue lines indicate the location of the 2-D model section.

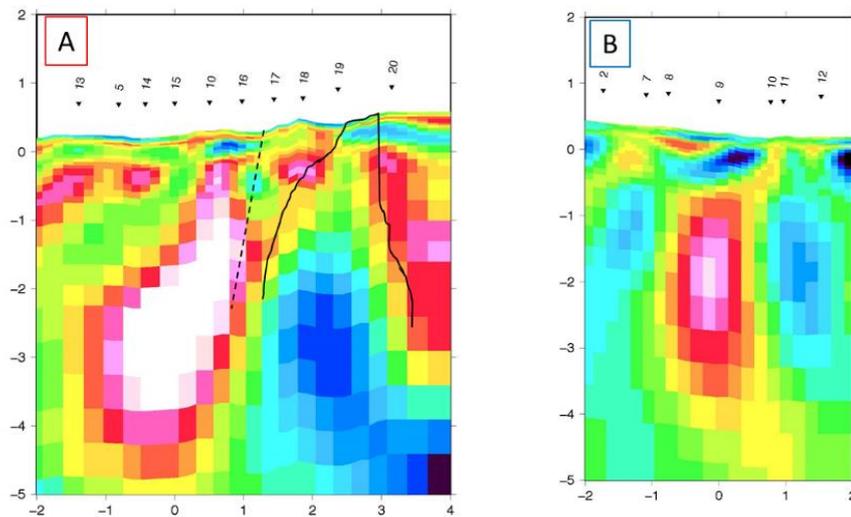


Fig.3 The 2-D inversion models along line A and B in Fig. 2. The dashed line indicates E-W directed fault system, and solid line indicates quartz porphyry intrusive rock.

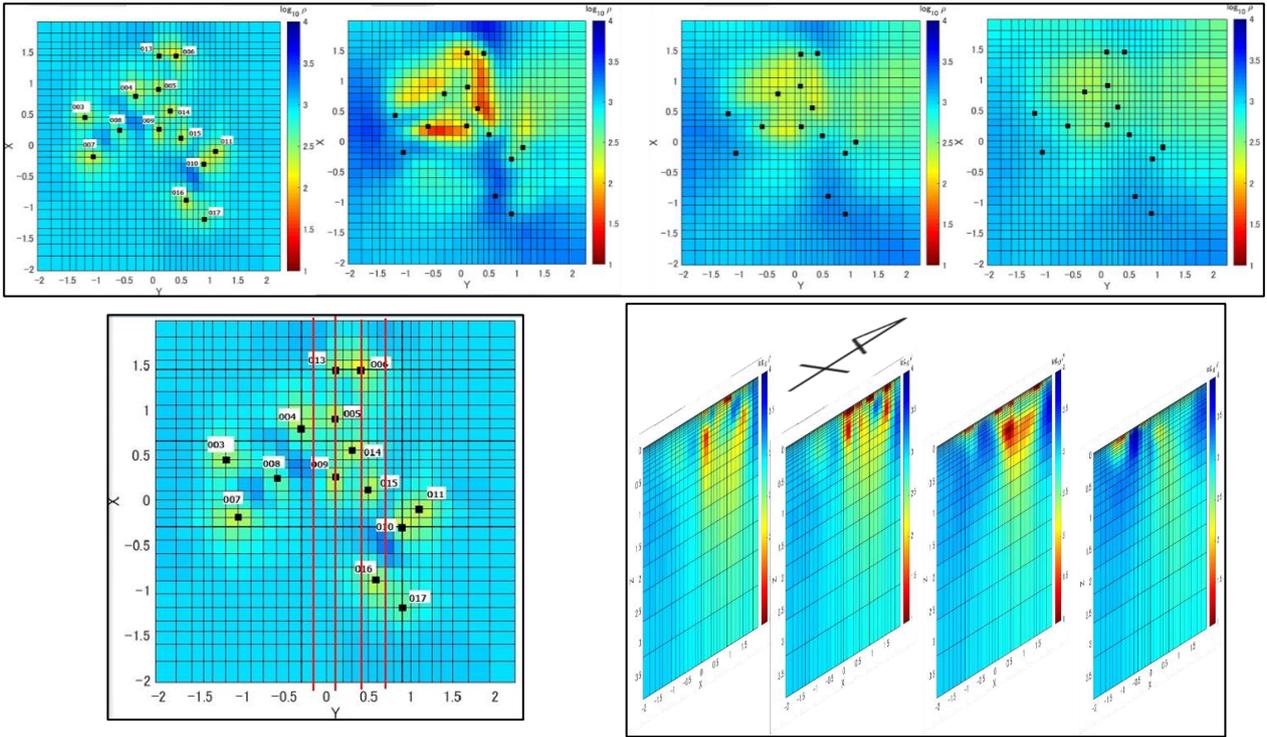


Fig.4 The 3-D resistivity model of Yakumo area. The top panels are the horizontal sections (0m, 583m, 1050m, 1538m), and bottom panels are N-S vertical sections along the red lines in the left panel.

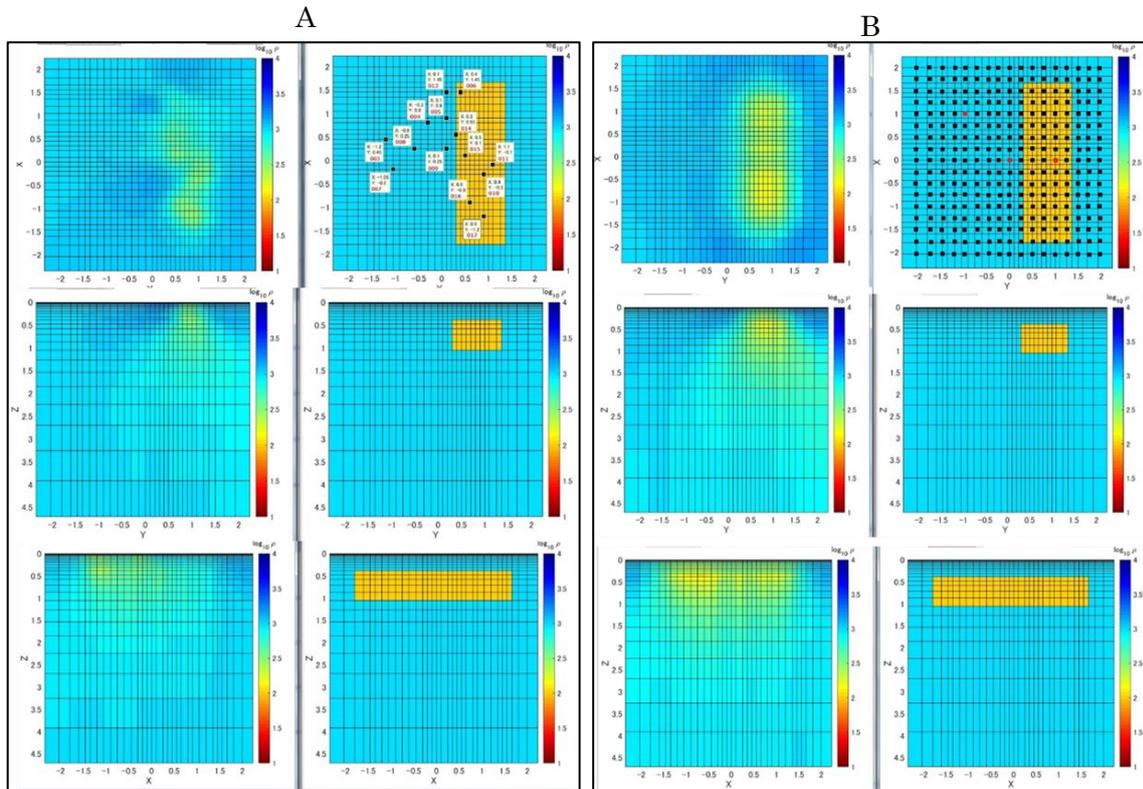


Fig.5 The result of 3D inversion test. A is the result of same locations of stations as Yakumo survey, and B is uniform array case.