

## 葛根田地熱地域の比抵抗構造探査 (1)

小川康雄・内田利弘\*・高倉伸一

地質調査所地殻物理部 (\*現在、新エネルギー・産業技術総合開発機構、NEDO)

Survey on the deep resistivity structure of the Kakkonda geothermal field, NE Japan (1)

Yasuo Ogawa, Toshihiro Uchida\*, and Shinichi Takakura (GSJ, \*now at NEDO)

### 1. はじめに

一般に含水岩石の比抵抗値を決める要因は、岩石のマトリックスの比抵抗ではなく、岩石中の流体や伝導性の固体のつながりにある。それゆえ、岩石のバルクの比抵抗は、岩相、間隙水の比抵抗、間隙率に依存し、そのため温度、圧力、イオン濃度の関数となる。比抵抗は、これら多くの要因によって、数桁も変化するため、地下の流体の探査に適した物理量と考えられてきた経緯がある。

しかし、内田(1990、1994)が多くの坑井データをもとに明らかにしたように、深度 2000m まででは、熱水変質による粘土鉱物の生成が比抵抗に大きな影響を与えることがわかってきた。なかでも注目すべきものはモンモリロナイトである。これは、150℃以下の低温で生成される中性の粘土鉱物で、層状の結晶間に水分子を吸着することによってイオン交換能力が増し、わずか 2.5% を含有するだけで岩石のバルクの比抵抗値を 1 桁も下げる(西川、1992; 高倉、1995)。このモンモリロナイトは、また不透水性であり、熱水系のキャップロックとなる。より高温の深部になると、クロライトやセリサイトといった高温の粘土鉱物が出現するが、これらは岩石の比抵抗を下げる効果が小さい。このため、熱水に富む高温領域は高比抵抗を示し、不透水性のキャップロックは、低比抵抗を示す。秋田焼山周辺の比抵抗探査データ(EMAP 法データ、シュランベルジャー法データ)から導かれた高比抵抗層上面の深度は、温度 200℃の等温面と非常によい対応を示した。このように、モンモリロナイトを鍵層として、地下の現在の温度分布が推定される。

### 2. 葛根田地熱地域の深部探査

これまでの議論は深度 2000m までのデータに基づいたものであるが、より深部 (>3000m) のネオグラニット(新期花崗岩)に関連した地熱資源が近年注目されるようになってきた(玉生、1994)。貫入したネオグラニットが熱源となり、その上部付近に形成される冷却節理が熱水貯流層となると考えられている。日本では岩手県葛根田地熱地帯が、この深部地熱資源の研究フィールドになっている(第1図)。

葛根田地域には 3000m 級の坑井があり、このうちいくつかはネオグラニットまで達している。ネオグラニットまで達していない坑井でも、接触変成岩(パイオタイト)の出現深度から、ネオグラニットの上面深度が推定されている(Kato and Doi, 1993)。第1図の MT 法の調査エリアでは標高-2200m から-1300m に分布する。この地域の深部の破碎帯については、詳細な微小地震の観測によって調べられており、葛根田川沿いに北西-南東方向の地震が集中する。震源の深さはす

べて深度 4km よりも浅いことが知られている(当舎ほか、1996)。地震の下限をプロットすると、ネオグラニットの上面と調和的な分布をし、さらに 350℃等温面とも良い一致を示す(当舎ほか、1995)。これらのことから、貫入したネオグラニットが、温度場を規制し、破壊現象を規制していると解釈されている。

MT 法から解析される深部の比抵抗構造は、独立な情報であり、深部構造を考える上で貴重な情報である。本稿では、NEDO が掘削した深部井(WD-1) 周辺で行った詳細な MT 法探査の結果について述べる。MT 法の解析からは坑井を含む周辺の構造が議論できるが、逆に坑井のデータからは地殻深部の比抵抗値の持つ意味が具体的に検討できる。

### 3. MT 法のデータ取得

MT 法のデータを第 1 図に示す 12 測点(黒丸) で取得した。用いた機器はフェニックス社の V5 システムである。測点間隔は 300m であり、測線方向に 300m の電場ダイポールをそれと直交する方向に 50m の電場ダイポールを用いた。隣り合う測点では、電場ダイポールが連続する。磁場については、インダクションコイルで 3 成分を計測した。また、観測点の電磁場のコーヒレントなノイズを取り除くため、各測点での測定に同期して、レファレンス点(約 40km 南方に設定)でも測定を行い、観測点のデータはレファレンス処理された。データの周波数帯域は 300Hz から 0.0005Hz(2000s) である。西側から第 4 番目および 5 番目の測点の近傍に調査井 WD-1 がある。

### 4. 2次元走向の解析

データから、当地域の 2 次元的な走向があるかどうか検討した。各観測点で周波数、測点ごとに、Groom-Bailey(1989) decomposition を行い、推定された 2 次元走向のヒストグラムをとった。第 2 図には、その集計を周波数帯域毎に示した。周波数 10-100Hz, 1-10Hz では、北西向きの走向が卓越する。これはちょうど葛根田川の谷と平行し、浅い構造を反映している。これに対し、周波数が下がると次第に走向は南北性が卓越する。このことは、比較的深い微小地震の震源分布とも調和的である。本稿では、深部構造に注目するため、周波数 1-0.01Hz の帯域に注目し、全測点について最も良く適合する走向として、N18° W を得た。

### 5. 地表付近の構造の影響の除去

地表付近の構造によって、観測される電場はねじ曲げられたり、増幅されたりする。これらは、galvanic distortion と呼ばれ、探査深度よりも小さな構造によっても引き起こされてしまうのが問題である。ここでは、これらに対処するため、Groom-Bailey(1989) decomposition と Ogawa and Uchida(1996)による static 補正を施した。

まず、各測点で、走向を N18° W と固定したうえで、Groom-Bailey 分解を行う。decomposition 後の見掛比抵抗と位相を第 3 図に示す。“+” は TM モード、“x” は TE モードのデータを表わす。分解後の見掛比抵抗には、依然として static effect の影響が入っているので、static shift を未

知数として含めた2次元インバージョン解析によって、構造を解析するとともに、static shiftをも除去してしまいうことが出来る(Ogawa and Uchida, 1996)。Ogawa and Uchida (1996)の方法は、Uchida(1993)にスタティック補正を組み込んで拡張したものである。

## 6. 比抵抗構造

第4図(a)に9回のiterationの後に得られたモデルを示す。このモデルによる理論曲線は第3図に実線(TMモード)、破線(TEモード)で示してある。ここで、理論曲線には、スタティック・シフトが含まれている。

比抵抗モデルの特徴は、以下の3つにまとめられる。

(1)標高0mより浅い部分に $30\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗があり、坑井付近で背斜、東部で向斜構造を示すことである。この構造は $200^{\circ}\text{C}$ のコンターと調和的であり、モンモリロナイトの分布に対応するのであろう。

(2)WD-1井を中心として標高0mから1500mまでに顕著な高比抵抗異常がある。坑井WD-1ではネオグラニットの上面深度が標高-2100m(坑口から2860m)にあり、その周辺ではネオグラニットの上面深度が接触変成岩から推定されている。これらを、第4図(a)に点線にて示した。これからわかるようにネオグラニットに入ると比抵抗は下がる傾向にある。

(3)測線にわたり、標高-2000m以下では低比抵抗を示す傾向がある。これは、大陸性地殻で $400^{\circ}\text{C}$ 等温面に対応する低比抵抗異常に通ずるものかもしれない。地殻深部から累進変成作用によって放出された自由水が地殻中を上昇し、温度 $400^{\circ}\text{C}$ 付近になると後退変成作用によって水を取り込み、かつ空隙を埋める鉱物の生成によって自由水をトラップするモデルが考えられている(Etheridge et al., 1984; Jones, 1987; Hyndman, 1988;)。標高-2000m以下の低比抵抗は、このような原因によるものかもしれない。

## 7. 他のデータとの比較

第4図(b)に比抵抗モデルと震源分布(当舎ほか, 1996)とを重ねたものを示す。この震源は測線に沿って幅1km(南北方向)の範囲の震源を示している。この図から、ネオグラニットに入ると地震はほとんどなくなることがわかる。比抵抗モデルの高比抵抗部に震源が多いことがわかる。このことは、地震の下限、温度構造、そして比抵抗構造が相互に関連していることを示している。

第5図に、WD-1井の電気検層結果(ロングノルマル1m)を示す(Kato et al., 1996)。深度2660mまでは第三紀の地層であるが、変成作用の見られる深度1400mから比抵抗が1オーダー程度増加し、ネオグラニットに入ると比抵抗がジャンプする(2860m)が、ネオグラニット内では、比抵抗は坑底に向かって減少して行く傾向がある。この図に、井戸の近傍の2測点直下の比抵抗(第4図)を重ねてある。これを見ると、ネオグラニット上面の比抵抗のジャンプはないものの、深度2000m付近から下の構造は電気検層結果に近い。とくに坑底付近で $100\Omega\text{m}$ に比抵抗が下がることも調和的である。これに対し、深度1600mより浅部では、電気検層に比べ、比抵抗モデルは

比抵抗値が overestimate されている。この原因はいくつか考えられるが、今後の検討課題としたい。

#### 8. おわりに

測線西半分の標高 0m から 2000m に高比抵抗異常体が解析され、それが地震の震源の集中する部分に対応し、その底面がネオグラニットの上面、地震の下限と良い相関を示すことがわかった。高比抵抗体とその底をターゲットにすることが、深部地熱資源探査の指針となりうる。今後さらに、引き続き取得した MT 法データを解析し、ネオグラニット、温度場、震源分布との関連を検討したい。

#### 参考文献

- Etheridge, M.A., V.J. Wall, S.F. Cox, and R.H. Vernon(1984), High fluid pressures during regional metamorphism and deformation: Implications for mass transport and deformation mechanism, *J. Geophys. Res.*, 89, 4344-4358.
- 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.
- Hyndman, R.D.(1988), Dipping reflectors, electrically conductive zones and free water beneath a subduction zone, *J.Geophys.Res.*, 93, 13391-13405.
- Ito, K. (1990), Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *J. P. E.*, vol.38, no.3, 223-250.
- Jones, A.G., MT and reflection: an essential combination: *Geophys.J.R.astro.Soc.*, 89, 7-18, 1987.
- Kato, O. and N. Doi, (1993), Neogranitic pluton and later hydrothermal alteration at the Kakkonda geothermal field, Japan, *Proc. 15th NZ Geothermal Workshop*, vol. 15, p.155-161.
- Kato O., N. Doi, K. Ikeuchi, T. Kondo, H. Kamenosono, M. Yagi, and T. Uchida(1996), Characteristics of temperature curves and fracture system in Quaternary granite and Tertiary pyroclastic rocks of NEDO WD-1a in the Kakkonda geothermal field Japan, *Proceedings of VIIIth International Symposium on the observation of the continental crust through drilling*, Tsukuba, 241-246.
- 西川信康(1992)、菱刈鉦山における変質鉦物と物性との関係、平成3年度広域地質構造調査報告書、構造解析総合調査、通商産業省、157-187
- Ogawa, Y. and T. Uchida(1996), A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *G. J. Int.*, 126, 69-76.
- Sasada, M., T. Sawaki, H. Muraoka, K. Ikeuchi, N. Doi, M. Yagi, and M. Sasaki(1996), The highest borehole temperature (449°C) determined by melting of pure metal tellurium; WD-1a, Kakkonda geothermal system, Japan, *Bull. Geol. Surv. Jpn.*, vol. 47, 361-364.
- 高倉伸一 (1995)、新潟および秋田油田地域の第三系岩石の比抵抗、物理探査、第48巻、p.161-175.

玉生志郎(1994)、世界の深部地熱資源開発の事例-特に新期花崗岩に着目して-、地質ニュース、481号、45-52.

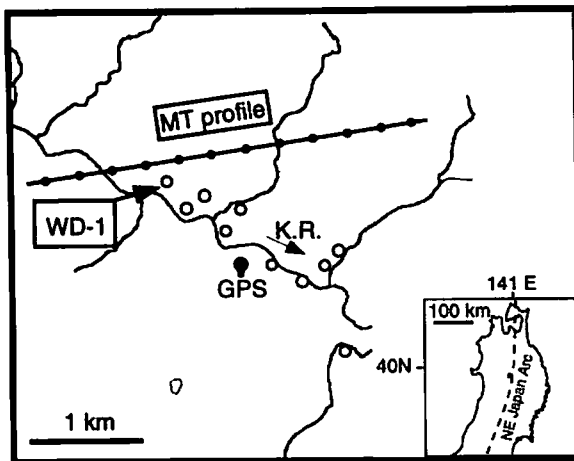
当舎利行、杉原光彦、西祐司(1995)、断裂型地熱貯留層における微小地震探査法、地質調査所報告、第282号、p.255-271.

当舎利行、杉原光彦、西祐司(1996)、葛根田(滝ノ上)地熱地帯での微小地震データの再解析、地質調査所月報、第46巻、第9号、p.483-495.

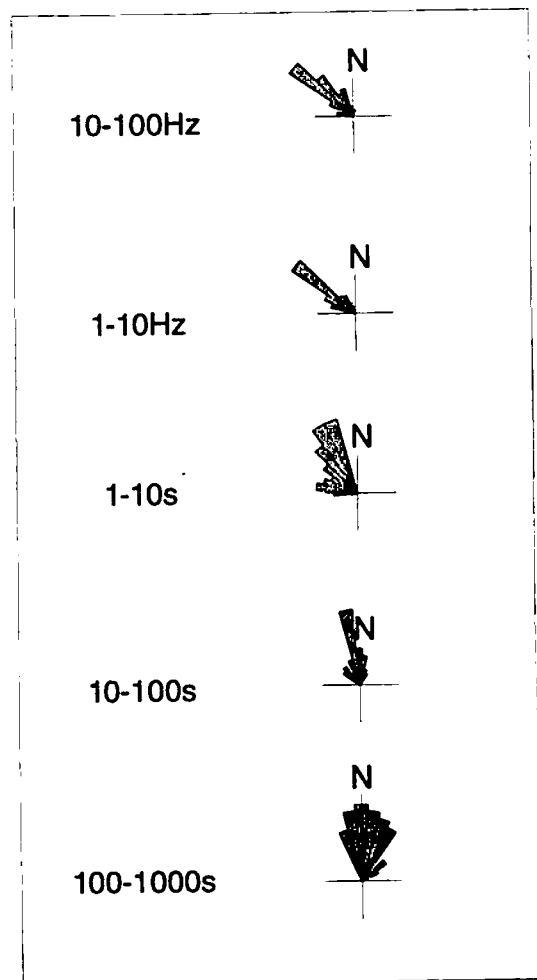
内田利弘(1990)、比抵抗構造から解釈される地熱貯留構造について-仙岩地熱地域を例にして-、日本地熱学会誌、12、1-21.

内田利弘(1994)、地熱貯留層付近の比抵抗構造、地質ニュース、477号、42-46.

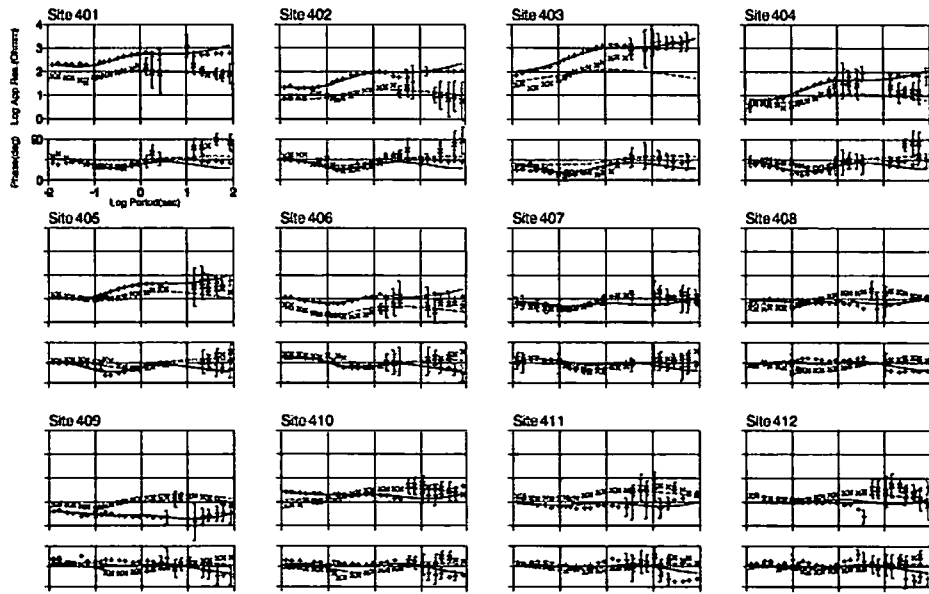
Uchida, T.(1993), Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statictical criterion ABIC, J. Geomag. Geoelectr., 45, 841-858.



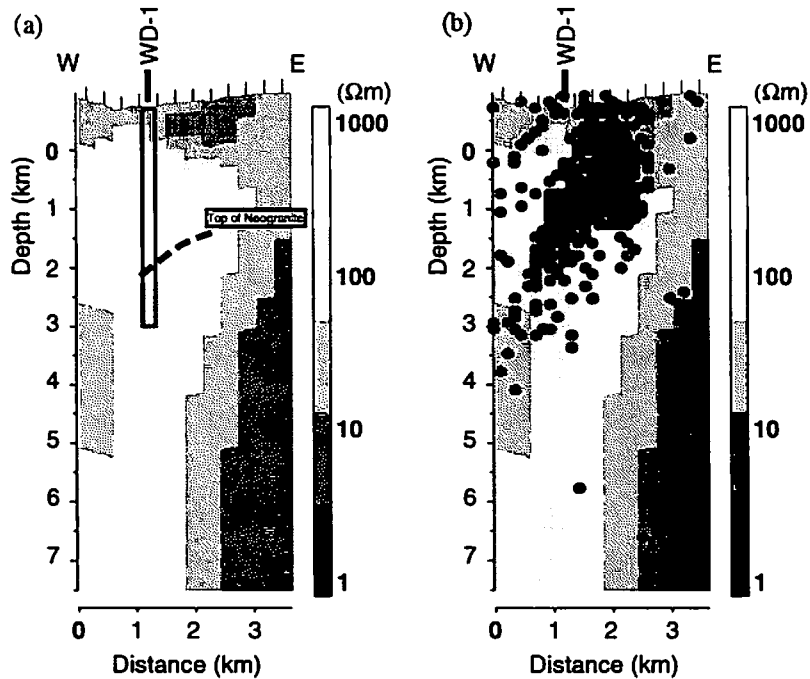
第1図 葛根田地熱地域の位置とMT法測線。  
WD-1は、NEDOによる深部坑井。GPSは、  
葛根田地熱発電所



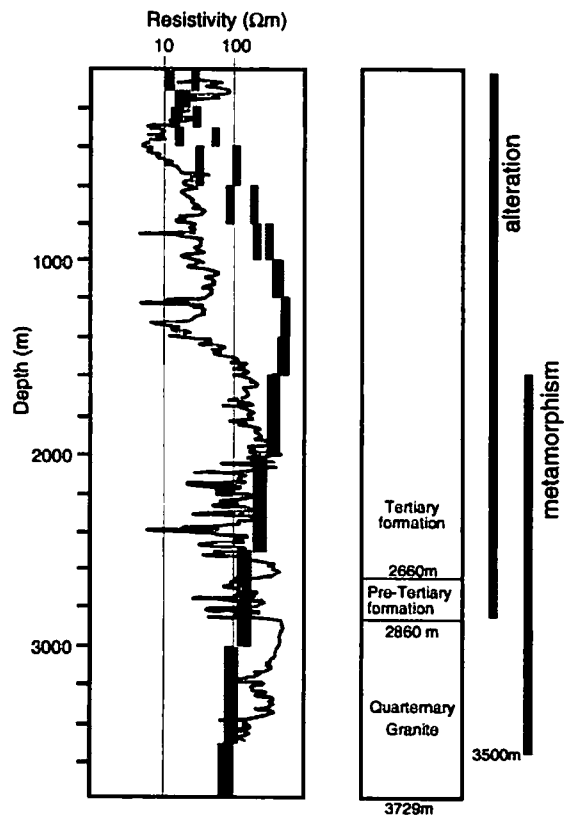
第2図 Groom-Bailey テンソル分解から推定  
した2次元走向のヒストグラムを表わす  
ローズダイアグラム。



第3図 2次元走向をN18° Wとして、Groom-Bailey テンソル分解から得られた見掛け抵抗と位相。測点は西から東に測点番号が増える。“+”はTMモード、“x”はTEモードのデータを表わす。実線および破線は、モデル計算によるTMモード、TEモードの応答である。



第4図 (a)2次元構造解析による比抵抗構造モデル。深部井(WD-1)の位置と、ネオグラニットの上面深度(破線) (Kato and Doi, 1993)を重ねて示した。(b)比抵抗モデルと震源分布(当舎他、1996)。



第5図 坑井データ(Kato et al., 1996)とモデルデータとの比較。