

地熱貯留層周辺の比抵抗構造

内田 利 弘¹⁾

1. はじめに

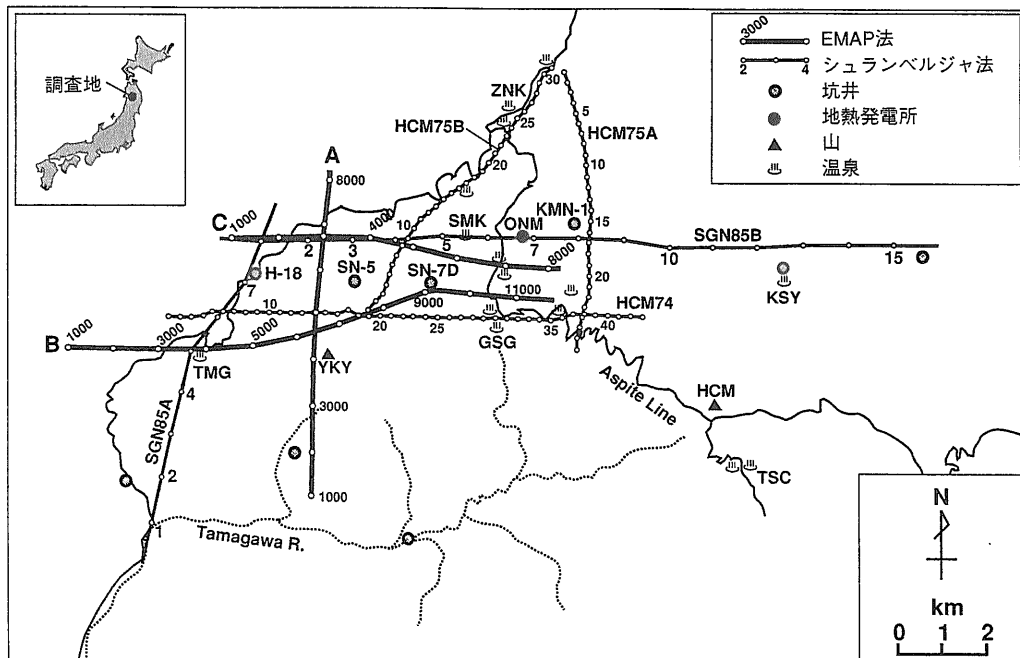
地熱開発において比抵抗構造を求めるための調査は不可欠であるという考えは一般的である。しかし、地熱貯留層が有する比抵抗構造についてのイメージは最近までそれほど確かなものではなかった(内田, 1990)。また、いくつかの地熱地域で深部に新しい貫入岩体が確認され、それが貯留層形成に大きな役割を果たしていると思われる。貫入岩体の存在は地熱地域の比抵抗構造を解釈する上で重要な意味を持つものと思われる。

本報告では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が仙岩澄川地区(秋田県)において実施し

たMT法、シュランベルジャ法等の比抵抗探査で得られたデータ(NEDO, 1985; NEDO, 1989)を解析した結果について、坑井データ等を参照しながら紹介する。

2. 地質概略

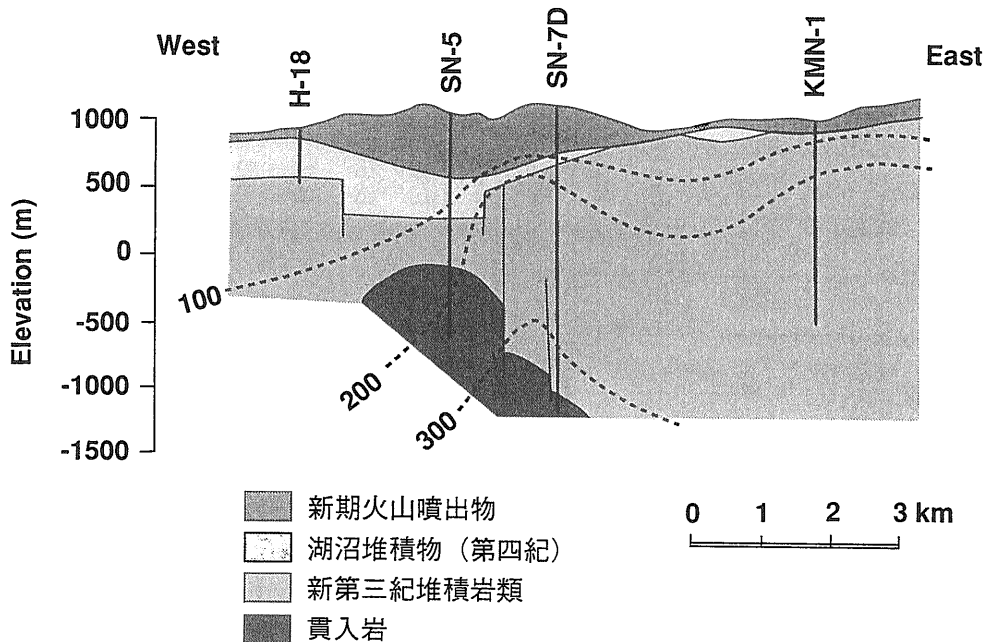
調査地は秋田焼山から八幡平にかけての地熱地域であり、これまでに国および企業によって地質、地化学、物理探査、坑井掘削等の多くの調査が実施されている。解析を行った比抵抗探査の測線、および、NEDO等が掘削した主な坑井の位置を第1図に示す。そのうち、澄川地区を東西に横切る断面につい



第1図 仙岩澄川地域における比抵抗探査の測線。地名の略は以下のとおり。YKY: 秋田焼山, HCM: 八幡平頂上, TMG: 玉川温泉, SMK: 澄川温泉, ONM: 大沼地熱発電所, GSG: 後生掛温泉, KMN: 狐ノ森, ZNK: 銭川温泉, KSY: 草ノ湯温泉。

1) 地質調査所 地殻物理部

キーワード: MT法, EMAP法, シュランベルジャ法, 2次元解析, 地熱貯留層



第2図 坑井調査から推定した地質モデル(NEDO (1988)より作成). 破線は温度分布を示す. 縦軸の強調は約2倍.

て、坑井 H-18, SN-5, SN-7D, および KMN-1 から推定した地質モデルを第2図に示す(NEDO, 1988). 本地区には新第三紀のグリーンタフ層が厚く分布している. その上位に、カルデラを埋める形で堆積した第四紀の湖沼堆積物が西半分に見られ、さらに、焼山や八幡平からの火山噴出物が地区全体を覆っている. また、坑井 SN-5 と SN-7D で深部に新しい貫入岩体を捕えている. 地層の温度分布は断面の東半分で高温の傾向にある.

3. 比抵抗モデル

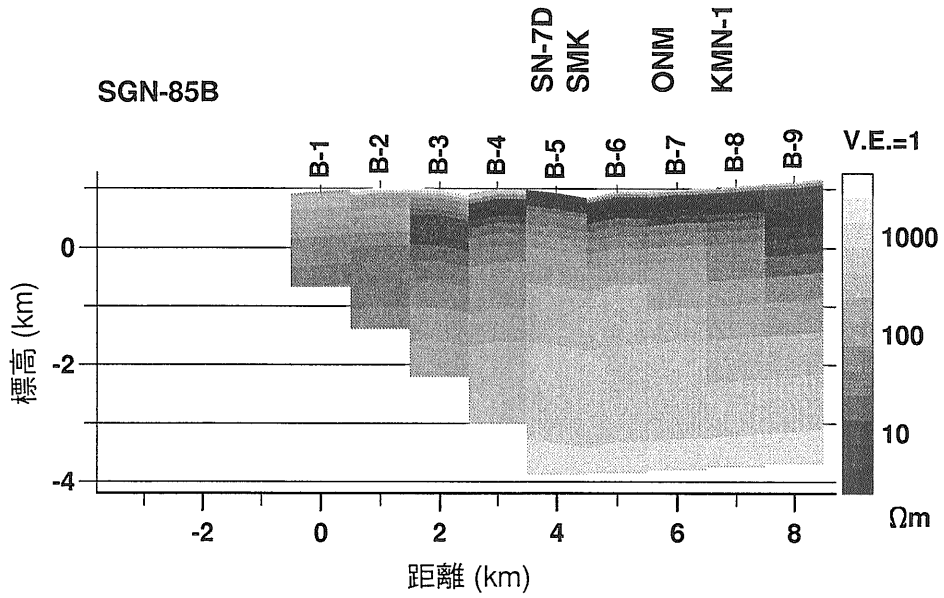
シュランベルジャ法および EMAP 法データの解析を行った. これらの2つの方法は地表に電極や磁力計を置いて測定を行い、地下の比抵抗構造を求める手法である. シュランベルジャ法は人工的に流した直流電流によって形成される電場を測定する手法であり、EMAP 法は自然に存在する電磁場を測定するマグネトテリック(MT)法の1つである. 両者とも、調査地を横切る測線を設定し、それに沿って測点を連続的に配置する.

解析には比抵抗モデルに平滑化の制約を与える重み付き最小二乗法2次元インバージョンを適用し

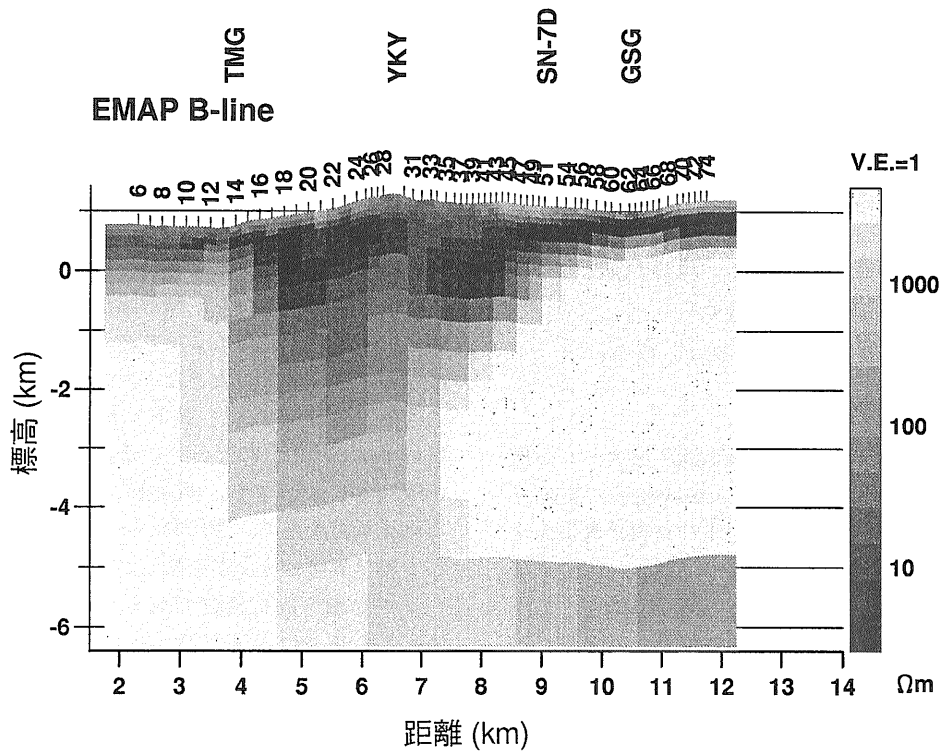
た(Uchida, 1991; Uchida, 1993). シュランベルジャ法測線 SGN-85B, および、EMAP 法 B 測線の比抵抗モデルを第3図および第4図に示す. 測線 SGN-85B については議論の対象とする西側半分のモデルを示してある.

測線 SGN-85B は測点間隔が 1 km で、電流電極間隔 $AB/2$ を最大 6000 m まで広げて測定された. 深度 3-4 km までの比抵抗構造の情報を与えていると考えてよい. しかし、深部構造に対する分解能は悪く、平滑化の操作によってスムーズな比抵抗分布になっているので、大きなトレンドだけを見ることにする. 測点 B-6 から B-9 にかけて浅部は高比抵抗 ($100 \Omega\text{m}$ 以上) になっているが、これは新期の火山噴出物に相当する. 測点 B-1 から B-4 の浅部にも高比抵抗があり、西に向かって厚くなっている. ここでは表層は火山噴出物であるが、その下のグリーンタフ層も高比抵抗であると考えられる. 測点 B-3 から東では顕著な低比抵抗層 ($10 \Omega\text{m}$ 以下) が分布している. これは湖沼堆積物とグリーンタフの上部層に対応している. その下には厚い高比抵抗層 ($100-500 \Omega\text{m}$) が解析され、これもグリーンタフ層に相当する.

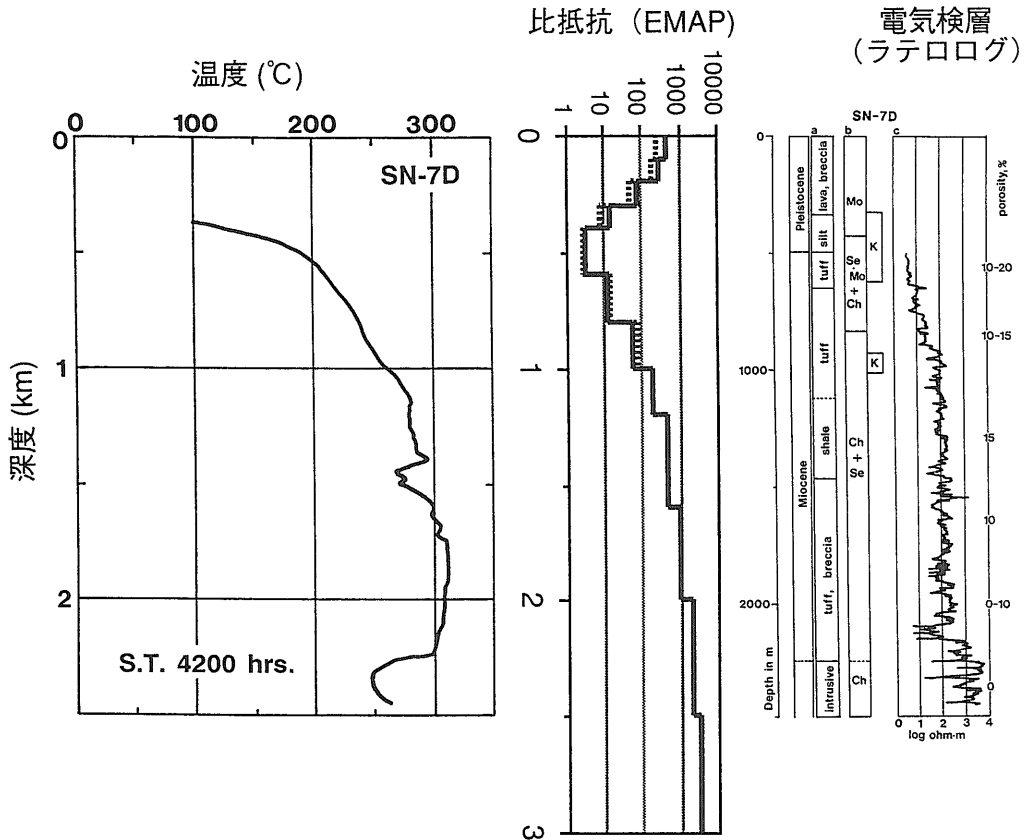
EMAP 法は測点間隔 100-200 m で行われ、電場



第3図 シュランベルジャ法測線 SGN-85B の2次元インバージョン・モデル。



第4図 EMAP法B測線の2次元インバージョン・モデル。横軸のスケールは第3図と同じになるように表示されている。東の大きな高比異常は測定ノイズのため顕著になり過ぎている。



第5図 SN-7D井の温度分布(左), 地質と比抵抗検層(右), および, 第4図のモデルから取り出したSN-7D井近傍の比抵抗プロファイル(中央). 右の図の中で, Moはモンモリロナイト, Seはセリサイト, Chはクロライト, Kはカオリナイトの卓越区間を表す.

は測線に沿って連続して測定された. B測線のうち, 西端の5測点とデータの悪い2測点を除き, 67測点について解析を行った. 用いた周波数は0.0078~91 Hzの10通りである. シュランベルジャ法と同じく, 浅部の火山噴出物に対応して高比抵抗層が存在する. その下に低比抵抗層が測線全体にわたり分布する. 玉川温泉や後生掛温泉の付近では低比抵抗層は地表に露出している. 焼山の下では深部まで低比抵抗である. SN-7Dや後生掛温泉にかけて低比抵抗層は薄い, 比抵抗は1 Ωm近くまで小さくなり, 非常に顕著な低比抵抗異常であることがわかる. 低比抵抗層の下に高比抵抗層が存在し, それは測線の西端と東半分で顕著である. しかし, 東側については, その深度に対応する0.1~1 Hzのデータが系統的なノイズを含んでいるらしく, シュランベルジャ法のモデルと同じ程度の比抵抗であると考えた方がいい. SN-7D付近で, 高比抵抗層の深

度が東に向かって浅くなることはシュランベルジャ法のモデルと共通である. また, これは第2図に示される200°Cの温度コンターが東に向かって浅くなるパターンとよく似ている.

4. 坑井データ

第5図にSN-7D井における地質, 温度, 比抵抗等の検層データ, および, EMAPの比抵抗モデル(第4図)からSN-7Dに近いブロックの比抵抗を取り出したものを示す. SN-7DはB測線から約100 m北に位置し, ほぼ鉛直に掘られている. 比抵抗検層と2次元モデルの比抵抗は傾向として調和的である. つまり, 深度500 m付近に低比抵抗部(約3 Ωm)があり, 比抵抗はそれ以深で徐々に上昇する. しかし, 検層による値は深度1000~2000 mでは100 Ωm程度にあるのに対し, 2次元モデルでは深

度1500 m で1000 Ω m に近くなってしまい、やや高比抵抗気味である。これは先に述べたように、測定データに含まれるノイズに起因すると思われる。

顕著な低比抵抗を示す深度500 m 付近での温度分布は非常に急勾配で伝導型を示す。1000 m 以深ではほぼ300°Cで安定し対流型であり、それに対応する比抵抗は100 Ω m と高い。これらの特徴は、粘土鉱物の含有量分布で説明することができる。つまり、低比抵抗部には低温中性の粘土鉱物であるモンモリロナイトが多く見られ、不透水性のキャップロックになっていると考えられる。モンモリロナイトは層状の結晶間に水分子を吸収してイオン交換能力を増し、著しく低比抵抗になることが知られている(西川, 1992)。また、高温の粘土鉱物であるクロライトが卓越する800 m 以深は高比抵抗であり、かつ透水性も高く、地熱貯留層を形成している。クロライトやセリサイトは比抵抗を下げる作用は小さい。以上のことから、熱水に富む高温領域は高比抵抗であり、不透水性のキャップロックは低比抵抗であるという結論が導かれる。これは、200°Cの温度分布パターンと高比抵抗層の深度分布が似ていることをよく説明し、高比抵抗層が浅いことが地熱貯留層や温泉として活発であることを示唆する。

EMAP 法 B 測線の焼山近傍には厚い低比抵抗層が存在する。焼山山頂部には今も噴気が見られるので、深部に熱源が存在することは確かである。焼山直下では高温であることが比抵抗を下げる要因になっていると考えられる。しかし、山体の大部分で低比抵抗層が厚いのは、そこが比較的低温であり、低温の粘土鉱物に富んでいるとも考えられる。比抵抗を大きく左右する温度および粘土鉱物という2つの要因について解釈するには、山体内部の熱水流動と温度分布に関する正確なデータが必要である。

5. 深部地熱へ向けて

地表の比抵抗探査データの解析から深さおよそ2000 m までについてかなり信頼性の高い比抵抗モデルを得ることができるようになった。それより深い構造を議論し、深部地熱のモデル作成に寄与するためには、深部に存在する(と推定される)高比抵抗貫入岩体の形状を地表から検出しなければならない。それには、測定データの品質の向上と解析技術の改良が今後さらに要求されるであろう。

参考文献

- 西川信康(1992): 菱刈鉱山地区における変質帯と物性の関係, 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.
- 新エネルギー総合開発機構(1985): 昭和60年度地熱探査技術等検証調査, 仙岩地域シュランベルジャ法調査報告書.
- 新エネルギー総合開発機構(1988): 昭和61年度地熱探査技術等検証調査, 仙岩地域3,000 m 級坑井調査報告書.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1989): 昭和63年度地熱探査技術等検証調査, 断裂型貯留層探査法開発, EMAP 法調査報告書.
- 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.
- Uchida, T. (1991): Two-dimensional resistivity inversion for Schlumberger sounding, *Geophys. Explor. (Butsuri-Tansa)*, 44, 1-17.
- Uchida, T. (1993): Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-858.

UCHIDA Toshihiro (1994): Resistivity structure of geothermal reservoir

<受付: 1993年12月6日>