

アレイ式CSMT法システムについて（その2）

田中啓二・内田利弘

1. はじめに

アレイ式CSMT法とは、測線上に連続に電場を測定することにより、従来のCSAMT法よりさらに精度良く高密度に測定のできる電磁探査法である。アレイ式CSMT法探査システムの概要と、探査方法については前号で概説してあるので、ここでは解析方法及び地熱探査における測定例を中心として述べる。

2. 解析方法

人工電流源を用いるCSAMT法には、スタティックシフト及びニアフィールドという2つの問題点がある。

(a) スタティックシフト

スタティックシフトとは電場成分を測定する電磁法に共通する現象であり、測点の近傍に局所的比抵抗異常があった場合に見掛比抵抗が大きくシフトし、浅い部分の異常が深部まで連続して現れる。また地形の起伏が地表付近の電場を歪めるため、尾根部で見掛比抵抗が低く、谷部で高く現われてしまう。

(b) ニアフィールド現象

Cagniardの理論では電磁波が大地に平面波として入射するという仮定の下に成りたっているため、信号源が測点に近い領域ではこの仮定が成り立たない。この信号源に近い領域をニアフィールドと呼び、この領域では信号源と測点の座標を与えて次元解析で数値計算する方法がとられているが、結果の信頼性はかなり低い。

したがって、CSAMT法で深部探査をする場合、測点から十分遠く離れた場所に信号源を設定しなければならないが、遠くなるほど信号強度が小さくなり、実用上は探査深度に限界がある。

アレイ式CSMT法では、測点を測線上に密に設定することにより、局所的な比抵抗異常や地形による影響を解析することができ、スタティックシフトは二次元モデル解析により取り除くことができる。

また本システムでは、MT法データを取得することによりCSAMTでは避けることのできないニアフィールド領域のデータを自然信号で取得することができる。

従って上記のような問題を解決するために、アレイ式CSMT/MT法を併用し、一次元解析及び二次元解析を実施している。

2. 1 一次元解析

ある周波数での見掛比抵抗は、真の比抵抗値を表すものではなく、例えば地下が比抵抗の異なる2つの地層（第1層： $100\Omega \cdot m$ 、第2層： $1\Omega \cdot m$ ）からなる場合、見掛比抵抗は高周波数では $100\Omega \cdot m$ を示すが、周波数が低くなるに従い第2層の影響を受けて徐々に小さくなり、低周波数では $1\Omega \cdot m$ に近づく。つまり、中間の周波数では第1層と第2層の比抵抗の間の値を示す。このように見掛比抵抗は地層の真の比抵抗を示すとは限らない。したがって、真の比抵抗を求めるには見掛比抵抗曲線からこの曲線に最もよく合う比抵抗構造を求める必要がある。一次元解析では測点の地下の比抵抗構造が横方向に無限に連続した水平多層構造を仮定しており、調査地の概略的な比抵抗値を推定する場合、一般によく用いられる解析手法である。

この場合、測点毎の解析になり、隣接した測点のデータは考慮しない。

解析では、見掛比抵抗曲線の変曲点の数から地下の比抵抗層の数を推定し、任意の比抵抗値を初期値として与え、見掛比抵抗曲線に最もよく合う比抵抗値及びその厚さを最小二乗法による逆解析（インバージョン）で算出する。隣接する測点とはほぼ同様な比抵抗構造が得られた場合、測点近傍ではほぼ成層構造であると考えられる。逆に隣接する測点で大きく異なった構造が得られた場合、測点間に比抵抗不連続線が存在することになり、断層などが推定される。

2. 2 二次元解析

二次元解析は、地下を適当な格子に分割し、各格子に一次元解析で得られた比抵抗値などを初期値として与え、有限要素法による反復計算で、観測値（見掛比抵抗曲線）に合致する各格子の比抵抗を求める手法である。二次元解析では、隣接する測点のデータの連続性あるいは変化を考慮しながら地下の比抵抗構造を求めるので、一次元解析より信頼性の高い構造を解明できる。

二次元解析には、内田・小川（1993）に二次元解析プログラムを使用している。本プロ

グラムの特徴として、地形データを入力することにより地形の影響によるスタティックシフトを取り除くことができる。

計算は、TMモードについて行い、見掛比抵抗及び位相の計算値が測定値に近づくように逆解析を行う。

3. 地熱調査地域における探査例

3. 1 調査地域

調査地域は、秋田県鹿角市南端の八幡平山麓に位置する澄川地域である。本地域は数多くの坑井が存在し、比抵抗検層をはじめ各種のデータが蓄積されており、MT法、シュランベルジャー法などの物理探査も広範囲に行われている。

アレイ式CSMT法の測定を実施した平成4～5年は澄川地熱発電所の建設工事が進行中であった。この澄川地熱発電所は平成7年3月に運転が開始されている。

3. 2 測定システム

測定システムは、前号に述べたように新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が「地熱探査技術検証調査 断裂型貯留層探査法」の研究の一環として開発したものであり、適用実験として調査を実施した。

3. 3 測定方法

測点間隔は、CSMT法については50m、MT法については150mの電場を連続して測定するアレイ式配置とし、1アレイについてCSMT15点、MT5点を測定している。1アレイの長さは750mである。またこのほか、本地域では高精度MT法も同時に実施されている。

4. 調査結果

4. 1 CSMTデータの品質

アレイ式CSMT法により観測されたデータは図-2に示すような見掛比抵抗一周波数曲線として表示し、各アレイの中央から片側8点と反対側7点をプロットした。また同時に位相差・電場強度・磁場強度をプロットすることで、ニアフィールド現象の出現する周波数やスタティックシフトの生じている測点などを検出した。

CSMT法では16Hz付近から下の周波数でニアフィールドの影響が認められた。

ニアフィールドは、電場と磁場の位相差が極端に小さくなり、また磁場がある一定値に近づくことから判断することができる。

CSMT法とMT法の見掛比抵抗曲線を同時に画面表示することにより、ニアフィールドが現れる周波数よりも低い周波数帯ではMT法の見掛比抵抗値を採用し、両者の比抵抗値を結合して見掛比抵抗曲線を作成することができる。図-3ではアレイ式CSMTシステムにより得られたCSMTデータを[○]、MTデータを[■]で、高精度MT法データを[-]で表現している。CSMTデータをMTデータの比抵抗の結合にあたっては、MT法に対応する3点分のCSMTデータを平均し、磁場センサーの違いにより見掛比抵抗値にギャップが生じた場合は、データ量の多いCSMT法の曲線にMT法の曲線をシフトさせてスムーズな見掛比抵抗曲線を得ている。

4.2 二次元解析結果

澄川地域のCSMT/MTデータを用いて再解析を試みた。

比抵抗値を算出する有限要素法の格子の厚さは、深度500mまではほぼ50m、深度500mから深度1,000mまでは100mとし、以深は次第に大きくしている。また、水平方向の格子の大きさは50mとした。解析に用いた周波数は0.125Hz～8.192Hz間の16周波数である。

I断面(図-4)は、調査地区を東西方向に切る断面である。また図-5は図-4の各格子の中央にデータを与えて比抵抗変化をコンターで表現し、試錐孔を基に作成された地質断面図を重ね合わせた図である。

5Ω・m以下の低比抵抗層が深度200m付近から500m付近にかけて分布し、新期安山岩類(安山岩溶岩及び同質火砕岩)の一部と湖沼堆積物(シルト岩、砂岩、礫岩及び凝灰岩)に対応している。湖沼堆積物の下位に分布する火砕岩類はほぼ10Ω・m～50Ω・mの比抵抗を示すが、図面中央部の坑井付近では深度1,000m付近に100Ω・m以上の高比抵抗異常が認められ、全体として幅約1.5kmの柱状の高比抵抗分布をなす。この高比抵抗の両端部は断層と一致しており、また澄川地熱発電所の蒸気の大部分はこの高比抵抗の箇所から生産されている。

5. まとめ

アレイ式CSMT法による地熱探査は、測線を設定し50m～100m間隔に連続して測定

することにより地形・地表の影響を除去することができ、浅部のCSMT法と深部のMT法を結合することにより地下2,000mを越える精度の高い比抵抗構造解析が可能となった。

現在土木地質的な分野への適用として探査深度500m～1,000mに達する大深部の土木構造物に対する調査を開始している。おりを見て土木分野への適用例として紹介したい。

最後に資料を利用させていただいた新エネルギー・産業技術総合開発機構に感謝いたします。

(大手開発㈱、新エネルギー・産業技術総合開発機構)

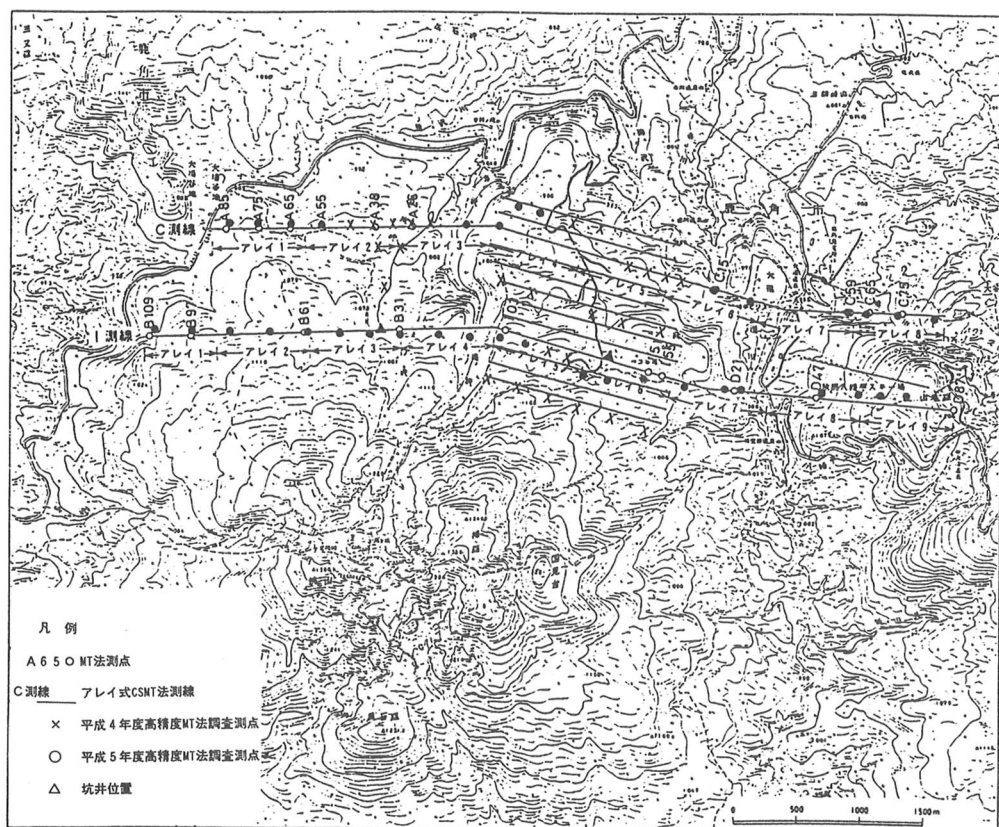


図-1 測線位置図

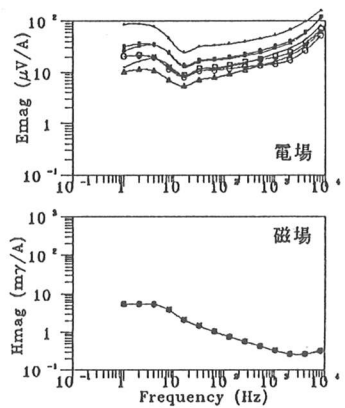
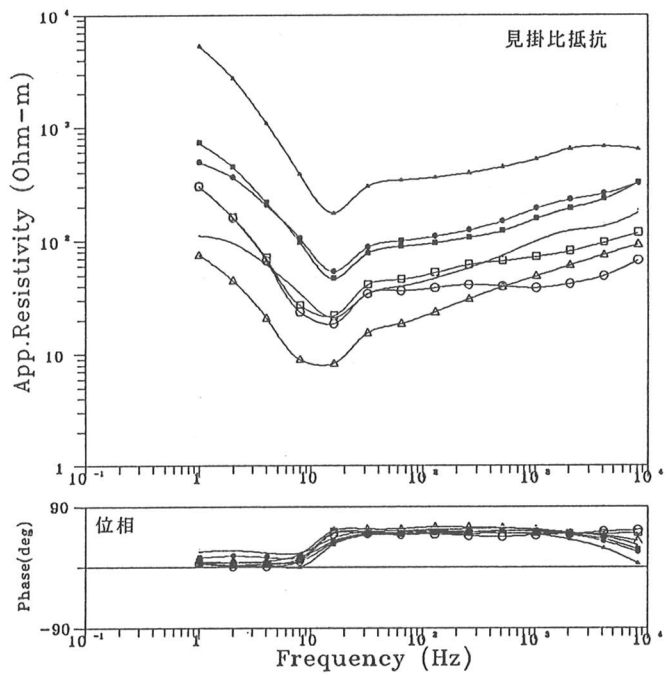
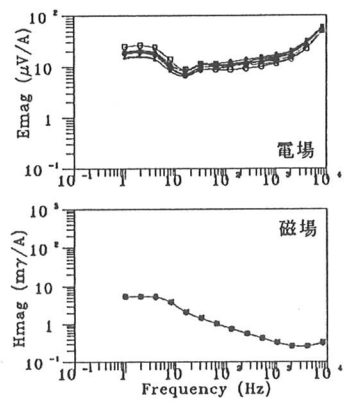
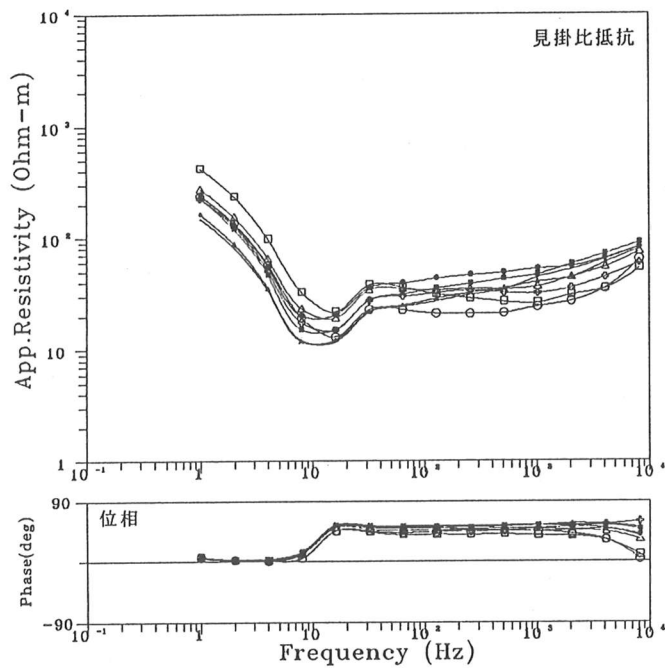


図-2 アレイ式CSMT法見掛比抵抗曲線図

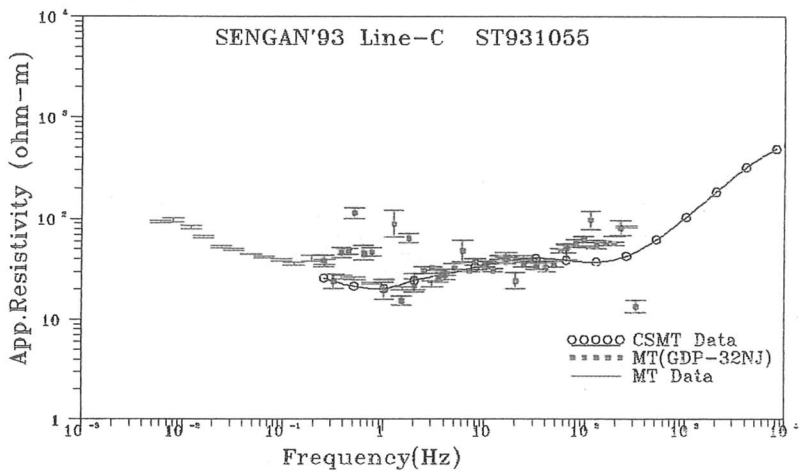
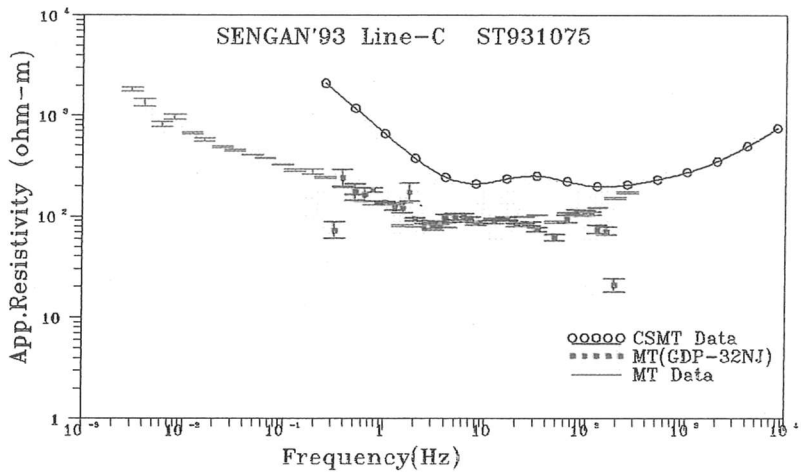
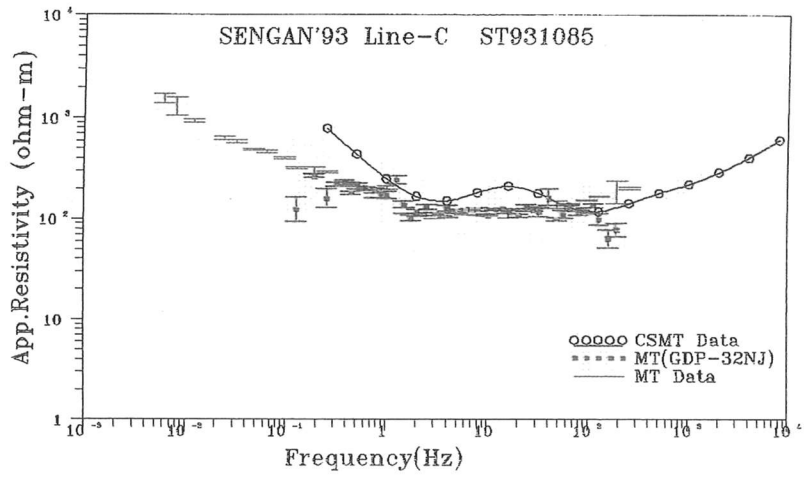


図-3 アレイ式CSMT/MT法見掛比抵抗曲線結合図

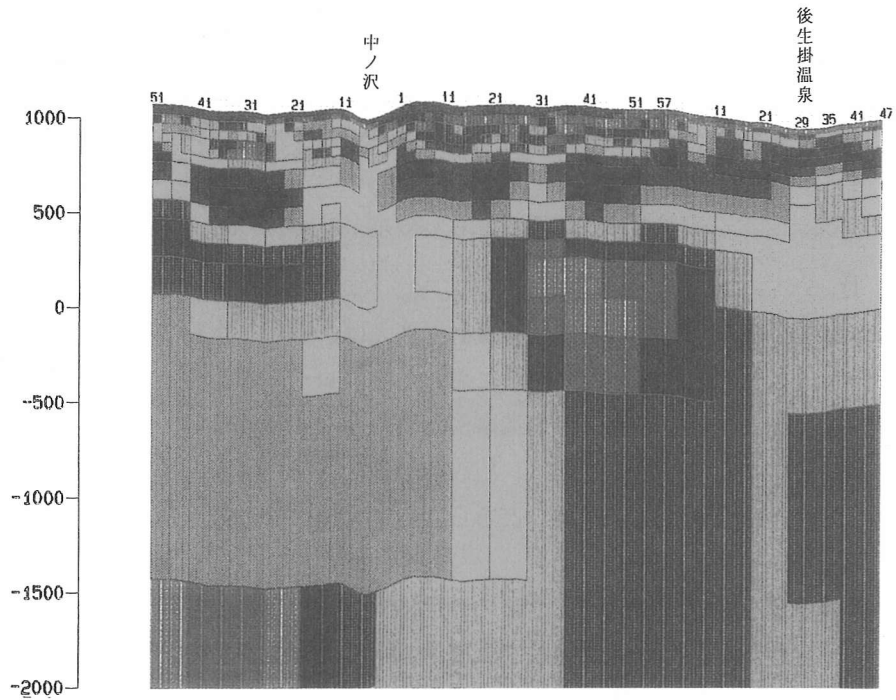


図-4 二次元解析結果図

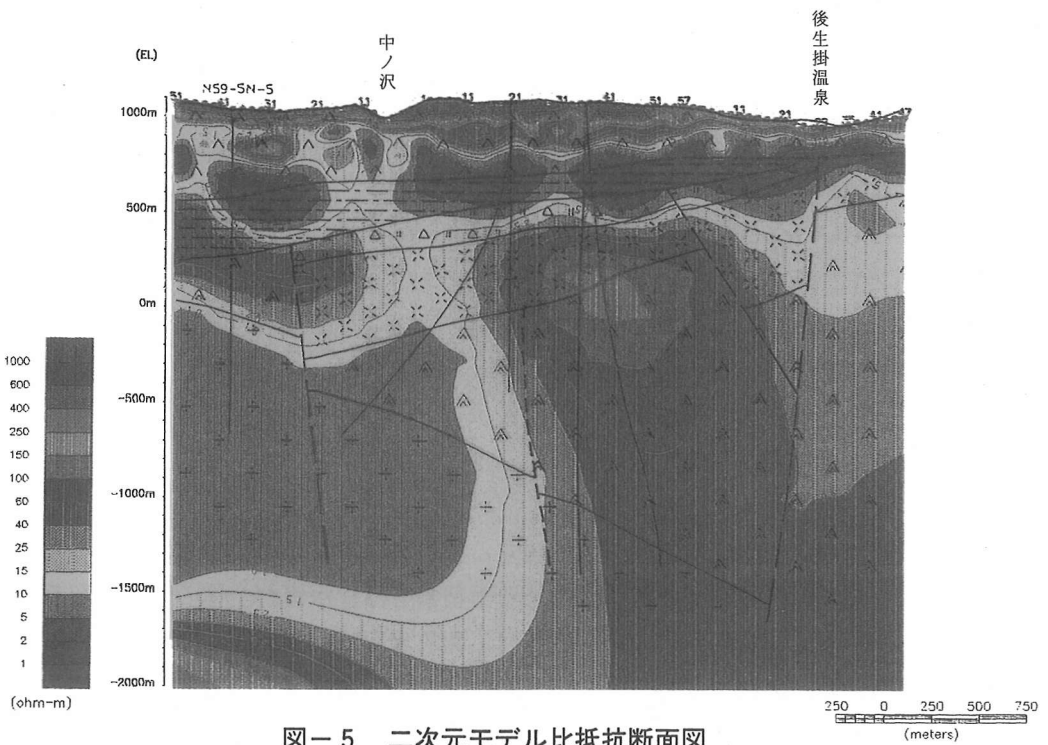


図-5 二次元モデル比抵抗断面図