

CSAMT法について

田中 富雄*

加藤 雅胤*

1. はじめに

電磁探査法の一つであるCSAMT (Controlled Source Audio Magneto-Telluric) 法は、1980年代に入って電子技術の発達にともない探査測定装置がZonge社等によって開発された。その後、CSAMT法は、1980年代半ばから金属鉱業事業団および新エネルギー・産業技術総合開発機構、新エネルギー財団等を中心として金属鉱床探査および地熱資源探査に盛んに用いられるようになった。また、ここ数年、市町村から温泉調査の依頼があり、CSAMT法は温泉貯留層の発見にかなりの成果をあげている。

ここでは、CSAMTの簡単な原理、測定方法、測定装置、解析方法などについて概説し、調査例を紹介する。

2. CSAMT法の原理

CSAMT法は、電磁法の一つであり人工信号源を用いたMT (Magneto-Telluric : 地磁気・地電流) 法である。

MT法は、自然界に発生する雷放電や地磁気変動によって生じた電磁波 (自然の信号源) を広い周波数領域で観測し、電場2成分と磁場3成分を測定することにより地下の比抵抗構造を明らかにする方法である。しかし、自然の電磁波はその性質上微弱であり、地域・時間・季節などによってもバラツキがあるため、データ取得に時間がかかることが多い。このため、CSAMT法では、自然界の信号に代わり人工の信号源により安定した任意の周波数の信号を送信する。

探査深度は、大地の比抵抗と周波数の関係であり周波数が低いほど深い。電磁波の強さが地表の値の $1/e$ (約37%) になる深さを表皮深度 (skin depth) と呼び、探査深度の目安にしている。

$$d = 503 \sqrt{\rho / f}$$

ここに、 d : 表皮深度 (m)

ρ : 地下構造の比抵抗 (m)

f : 周波数 (m)

である。

一方、周波数は、可聴周波数帯にあたる1~10,000 Hzを取り扱う。探査深度は、深さ1 km程度までを対象にしている。

* 大手開発株式会社

3. 測定方法

CSAMT法では、互いに直交する水平電場・磁場の2成分を測定し、それらの信号間のインピーダンスから見掛比抵抗を求める。第1図にCSAMT法の典型的な測定配置を示す。

(1) 流電電極の設置

送信には1～3kmの流電電極と1～10,000 Hzの電流を流して信号を発生させる。流電電極は、送信される電磁波が平面波として観測されるように調査地から十分離して設置する。送信・受信点間の距離は、理論的には表皮深度の3倍以上必要とされており、これより近い場合は、磁場の減衰率が電場の減衰率より大きく観測されるニアフィールド（near field）と呼ばれる現象が起こる。また、出来る限り大きな電流（通常8～10アンペア）を流すため電流電極の本数を増やし（群設置：通常数十本）接地抵抗を下げようとする。

(2) 電位電極の設置

受信点では、電場成分を測定するため流電電極の方向と平行に無分極電位電極を設置する。一方、磁場成分を測定するため電位電極の方向と直交する方向にフェライトコイルアンテナを設置する。

(3) 見掛比抵抗の算出

受信点では、測定した電場成分（ E_x ）と磁場成分（ H_y ）から見掛比抵抗を算出する。算出には、次式のCagniardの式を用いる。

$$\rho = \frac{1}{2\pi f \mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$
$$= \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

ここで、 f は周波数（Hz）、 μ は透磁率（ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m）である。

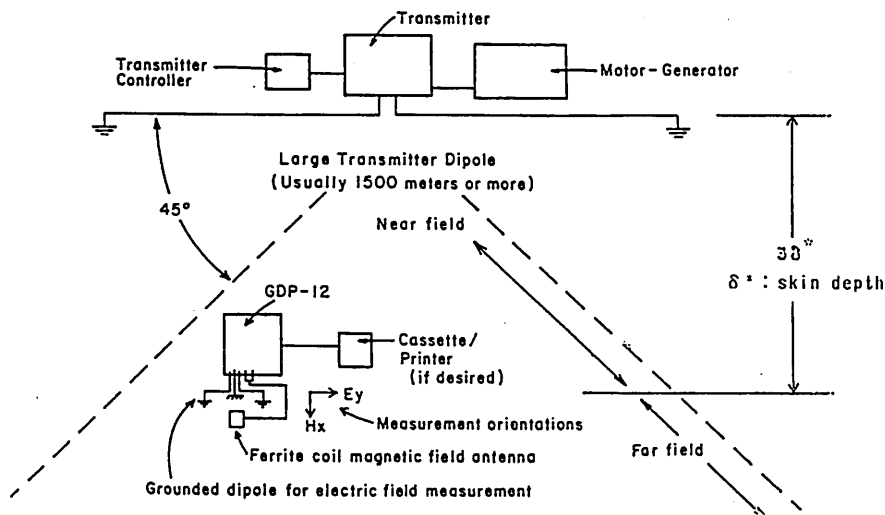
4. 測定装置

CSAMT法調査の内、最も多く使用されているZonge社製測定装置（GDP-12）のシステムを第2図に示す。送信部は、発電機、トランスミッター、トランスミッターコントローラー、電流電極および電流電線からなる。受信部は、受信機、フェライトコイルアンテナおよび電位電極からなる。

各測定機器の名称およびその規格は、第1表に示す。

第1表 CSAMT法測定機器

機器名称	規格
1) 送信部	
* エンジングェネレータ (ZMG-20)	20 KVA, 3200 rpm, 400 Hz
* トランスミッター (GGT-25)	25 KW, 0.2～43 A, 1000 V DC～10 KHz, 120 kg
* トランスミッターコント ローラー (XMT-12)	1/16～2048 Hz

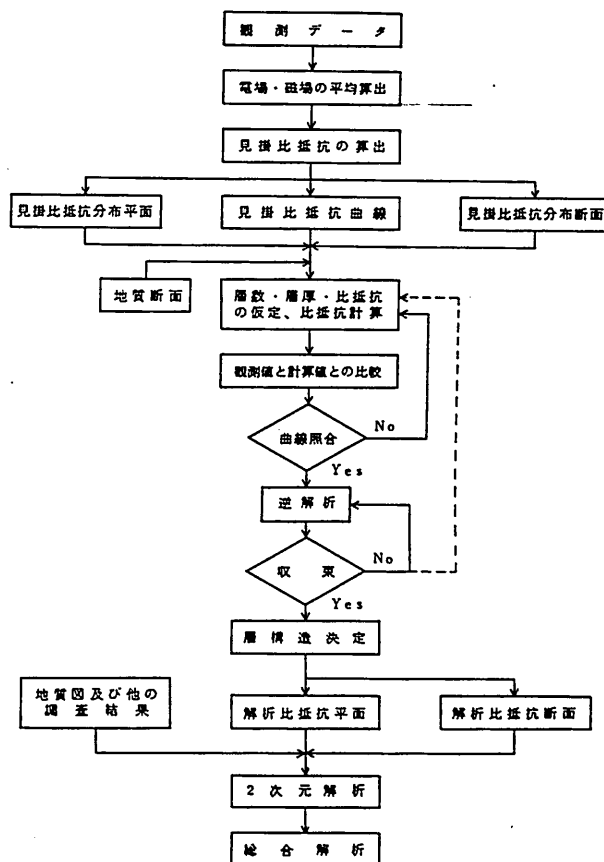


第2図 CSAMT法測定装置

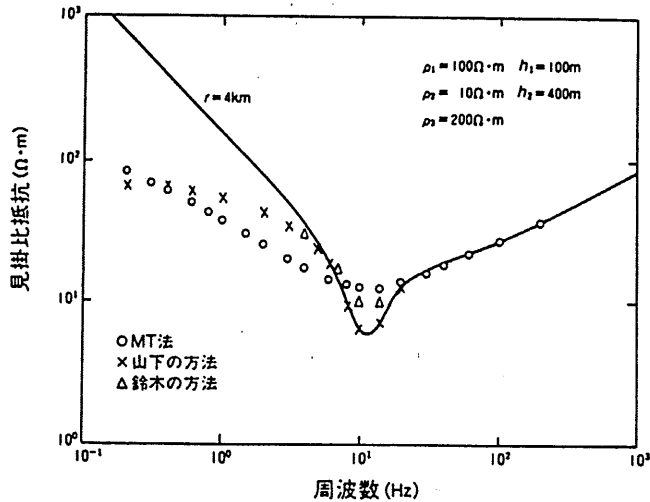
5. 解析方法

解析方法の流れを第3図に示す。

レコーダーに記録されたデータを大型計算機に転送し、CSAMT法解析プログラムにより解析される。取得されたデータをチェックし、見掛比抵抗を算出する。得られた見掛比抵抗から見掛比抵抗分布平・断面図および見掛比抵抗曲線を作成する。このうち各測点の見掛比抵抗曲線に対し、曲線照合法により一次元多層構造解析を行う。ニアフィールドの影響に対して補正（第4図）を行う。解析された各層の比抵抗値から解析比抵抗平面図および断面図を作成する。なお、比抵抗構造が二次元構造と推定される場合、一次元多層構造解析結果をもとに二次元構造解析を行う。



第3図 CSAMT法解析の流れ図



第4図 CSAMT法のニアフィールド現象とその補正

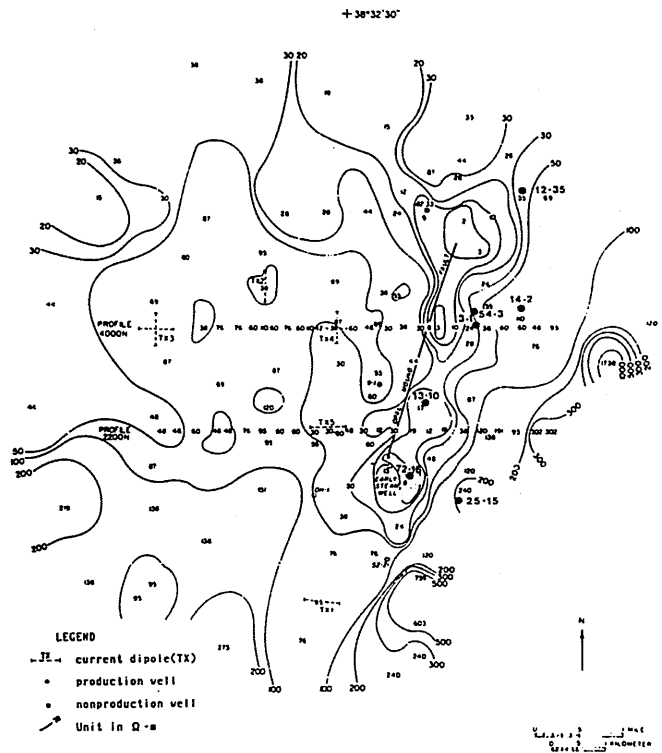
実線で示すCSAMT法探査曲線は○印で示すMT法探査曲線と20Hz以下でずれを示す。山下の方法と鈴木の方法で補正した探査曲線をそれぞれ×印と△印で示す〔佐々木, 1988〕。

6. 調査例

ここでは、海外の文献からの調査例を紹介する。

調査地域は、米国ユタ州にあるRoosevelt Hot Springs地熱地帯である。本地域の地質は、基盤岩類（古生代の変成岩）、第三紀の花崗岩類および鮮新世の火山噴出物からなる。本地域の地熱現象は、花崗岩類の分布する地域中央部に位置するNE-SW方向の断層に規制されており、断層に沿って地熱変質帯および塩水がみられる。この変質帯および塩水は低比抵抗を示すことから、CSAMT法によりこれらの分布を把握するために実施された。

第5図に測点(比抵抗値の表示位置)、電流電極(TX)、生産井(黒丸)および非生産井(白丸)の位置を示す。測点は、136点であり、この内47点は断面上に設定された。周波数は断面上の測点には9804~32.02 Hzまでの10



第5図 CSAMT見掛比抵抗平面図(周波数: 977 Hz)

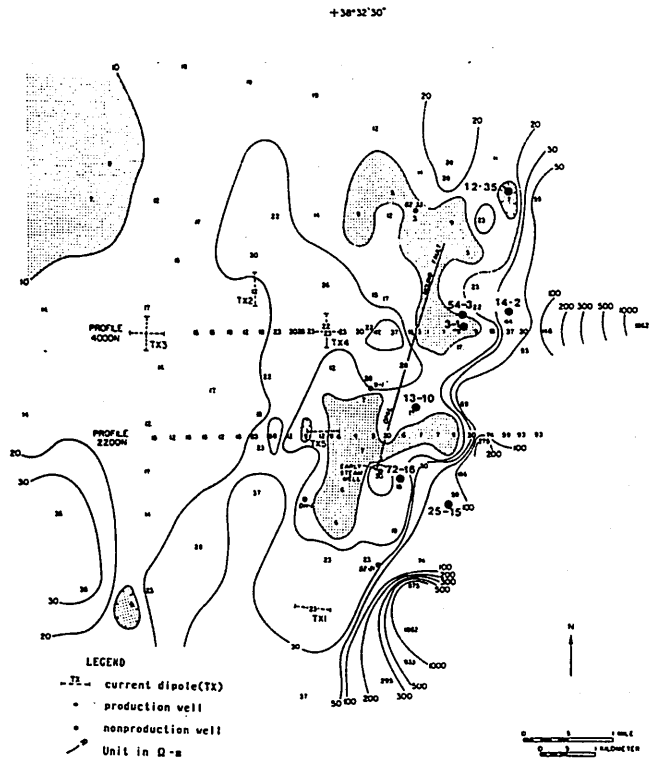
種類, その他の測点では5208, 977, 98
および32Hzの4種類が使用された。ま
た, 電流電極は, 送信・受信点間隔が表
皮深度の3倍以上で, しかも, 全測点を
カバーするように5箇所を設置された。

高周波数の電磁波は, 地下浅部までし
か透入しないので高周波数の見掛比抵抗
は浅部の情報を反映している。逆に, 低
周波数の電磁波は, 深部の比抵抗情報も
含んでいる。2種類の周波数(977およ
び32Hz)の見掛比抵抗分布図を第5図
および第6図に示す。

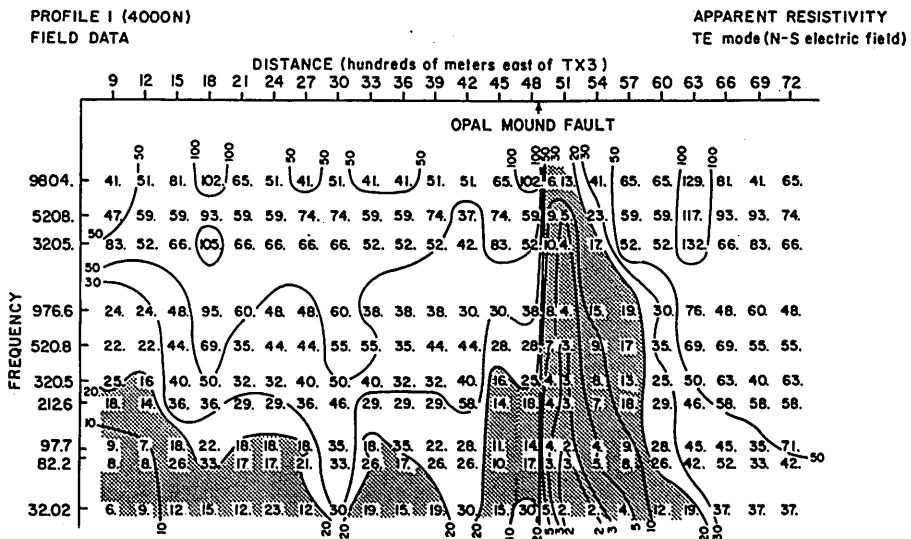
977 Hzの平面図では, $10 \Omega \cdot m$ 以下
の低比抵抗帯は断層の中央部で分断され
ているが, ほぼ断層に沿って分布してい
る。また, 低比抵抗帯は地熱変質帯およ
び塩水の分布と一致している。生産井は
低比抵抗帯内および東側に, 非生産井は
低比抵抗帯の西部および南部にそれぞれ
位置している。

32 Hzの平面図では, 977 Hzの比抵抗分布と類似するが, $10 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯は西方向へ広が
っている。これは, 地熱系が西方向へ延びる傾向を示している。

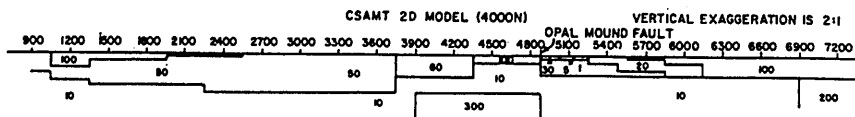
断面4000Nの見掛比抵抗分布断面図を第7図に示す。測点の位置を横軸に, 周波数を縦軸にとっている。
断面図では, 断層付近の測点(51, 54, 57)に深部へ連続する顕著な低比抵抗異常がみられる。また, C



第6図 CSAMT見掛比抵抗平面図(周波数: 32 Hz)



第7図 CSAMT見掛比抵抗断面図(断面4000N)



第8図 CSAMT二次元モデル(断面4000N)

SAMT法の特長である横方向の比抵抗コントラストが明瞭に捕らえられている。この低比抵抗異常は、断層にそった地熱変質帯および塩水を反映している。

第8図に断面4000Nの二次元解析による比抵抗構造モデルを示す。二次元解析では、二次元MT有限要素法解析プログラムによって求めている。本断面において断層付近の測点5100～5400では、 $1\Omega\text{-m}$ の低比抵抗層は東方向に広がっている。これは、変質帯および塩水の東方向への広がりを示している。一方、測点4200～4800の下部にある $300\Omega\text{-m}$ の高比抵抗帯は、未変質の古生代の基盤岩類に対比される。また、測点4800付近で実施したボーリング調査の結果、モデル断面の $100\Omega\text{-m}$ と $10\Omega\text{-m}$ との境界深度は地下水面とほぼ一致している。

本地域において、CSAMT法調査結果は、既存の物理探査結果および地質調査結果と調和的であり、CSAMT法の地熱調査への有効性が実証された。

7. おわりに

CSAMT法は、垂直探査法の中では、シュランベルジャ法に比べると測定作業が容易で水平方向の分解能に優れていること、MT法より安定した信号が得られること等の特徴を持っている。また、限られた範囲内で高精度な探査が要求される調査に有効である。最近では、温泉調査に広く用いられるようになりつつあるが、近い将来CSAMT法の測定精度および解析精度が更に向上すれば、浅部探査が可能となりその他の分野へ広く用いられると思われる。

参考文献

物理探査学会(1989) 図解 物理探査

Sandberg,S.K.and Hohmann,G.W.(1982):Controlled Source audio-magnetotellurics in geothermal exploration. Geophysics,no.47,100-116

内田利弘,高倉伸一(1990):CSAMT法のすすめ。地質ニュース,428号,38-47頁

横川勝美(1984):CSAMT探査法の概要。物理探査,37号,279-286頁