

## 2. 調査方法

### 2.1. 計画準備

既存資料の収集整理及び分析を行った。また、業務の実施に先立ち、業務方針を定め業務計画および作業スケジュールを作成した。

既存資料の収集整理および分析を行い、別途調査が必要と判断された場合には、調査および試験の追加を提案した。一部提案内容は「創意工夫」とした。

### 2.2. 既存資料の収集

調査地周辺の地質構造及び周辺の源泉について文献資料等を収集・整理した。

### 2.3. 物理探査

地下深層部までの比抵抗分布を求め、特に浅い深度から深い深度（1,200m 付近）までの地質構造を把握する。断層の位置、地層の傾き、地層の透水性などについて検討し、温泉賦存量の分布状況を推定する。対象地内と周辺に適切な間隔で配置し、6点を測定した。

#### (1) 概要

CSAMT(Controlled-Source Audio-frequency Magneto-telluric)探査法とは、人工信号源を用いた電磁探査法である。電磁探査法とは電磁誘導現象を利用して地下を探査する方法であり、従来は電離層に流れる電流や雷の放電が作る磁場を利用していた。だが、自然電磁場の変動は不安定でかつ弱い場合があるために、人工信号源を用いて高精度で簡便かつ効率的な測定をしようとする CSAMT 法が考案され、現在では地質調査の一手法として確立されている。

地表の2点で接地した電線に交流電流を流すと電線の周囲から電磁波が放射され、4～7km 程度離れた地点では平面波の電磁波として近似される。このような電磁波が大地に透入する深度は電磁波の周波数と大地の比抵抗値によって決まる。これにより、地下深部までの比抵抗分布を求めることができ、地質構造や断層・変質帯及び地層の透水性を評価することが可能である。

#### (2) 測定方法

大地に流した電流から発生した電場と磁場は、大地の比抵抗値で変化する。信号源から充分離れた地点での電場と磁場は直交し、その比をとると次の(1)式にから大地の見掛け比抵抗値( $\rho_a$ )を求める事ができる。

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $E$  : 電場の強度(単位 : V/m),  $H$  : 磁場の強度(単位 : A/m)

$f$  : 電波の周波数(Hz),  $\mu$  : 真空の透磁率(henry/m)である。

地中に透入する電波は、その周波数ごとに到達深度が異なってくる。周波数が高い場合では浅く、周波数が低くなるにしたがって地下深部まで到達するようになる。CSAMT 探査法では、送信する電波の周波数を変える事で深度の異なる地層の見掛け比抵抗値を測定する事ができる。

概略の探査深度は次の(2)式で求められるが、ここでの探査深度とは地中に透入する電磁波の振幅が  $exp(-1)$  倍に減衰する深度に相当し、一般に表皮深度と呼ぶ。

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\delta$  : 表皮深度(m),  $\rho$  : 比抵抗値( $\Omega \cdot m$ ),  $f$  : 電波の周波数(Hz)である。

実際の測定は送信側と受信側に分かれて作業を行い、このうちの受信側が調査地点(測点)となる。具体的な調査手順を以下に説明する。

**【送信側】**

地表に約 1~2km 程度の長さのケーブルを設置し、両端を大地に接地する。接地抵抗を数 k $\Omega$  以下に低減させるために複数の電極で接地する。送信側と受信側との距離は、信号の電磁波が平面波で近似できるように 4~7km 程度離して設定する。

送信する電波の周波数は 0.625~5,120Hz の 14 波(binary step)であり、定められたタイムテーブルに基づいて周波数を変更し、電磁波を送信する。なお、送信する電波の波形は矩形波である。

**【受信側】**

調査地点(測点)に電場センサ(電極)と磁場センサーを設置する。電場センサーは送信源のアンテナの方向と一致するように、15~30m の電線を張り両端を電極で接地して受信アンテナを形成する。このアンテナはプリアンプを介して受信装置に接続する。磁場センサーは円筒状のコイルであり電場センサーと直交する方向に、かつできるだけ水平を保つように地面に密着させて設置する。

送信側と同じタイムテーブルを用いて、送信された周波数の電磁波を受信する。このような測定を全周波数において実施する。

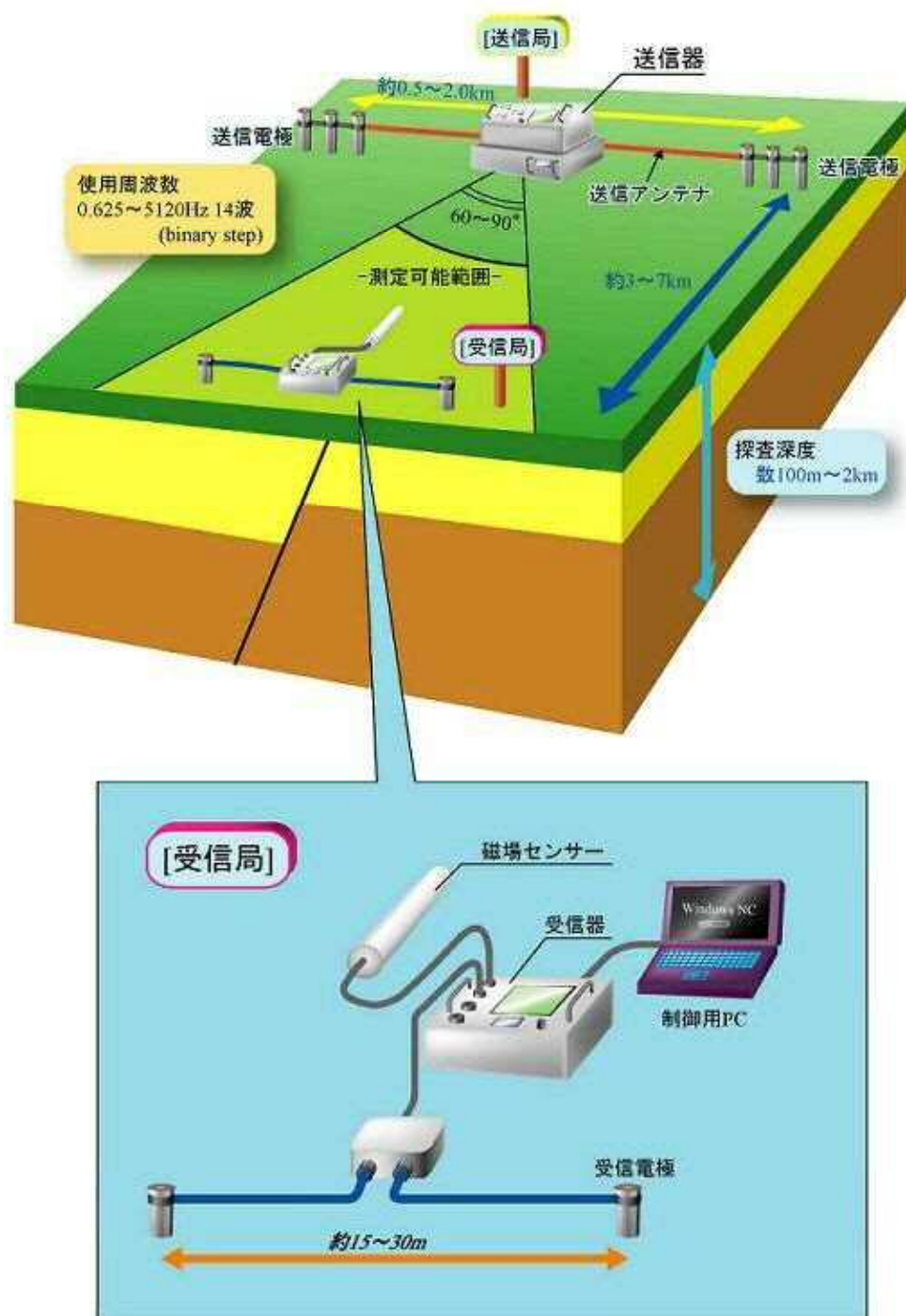


図- 2.3.1 CSAMT 法 電磁探査 測定概念図

### (3) 配置計画

CSAMT 法では、探査深度の 3~4 倍離れた位置(通常は 3~5km)に、固定送信源を設置する。固定送信源は、調査地内の想定される地質構造の延びる方向とほぼ直交する方向に 1~3km の電線を敷設して、その両端に電極を打設する。このため、事前に電線の敷設経路、電極設置位置を計画しておき、用地の立入りの了解を得ることが必要である。電線の敷設経路は、敷設作業を容易にするために道路沿いとすることが多い。また、固定送信源の敷設方向と測線が平行な方が、測定の作業性はよい。

固定送信源を探査深度の 3~4 倍より近くに設置すると、ニアフィールド現象によって解析精度が低下する現象が発生する。花崗岩のような高比抵抗を示す地層が広く分布する地域では、ニアフィールド現象の影響を避けるために固定送信源を 10km 以上離れた方が良いが、当調査地は、そのような高比抵抗の地質構造とは考えにくい。固定送信源を遠方に設置することにより受信信号が微弱になってノイズの影響を強く受けて S/N 比が低下する懸念がある。一般に、調査地周辺を通る高圧電線近傍に、固定送信源を設置すべきではない。

位置図 泉源開発調査予定箇所



図- 2.3.2 GSAMT 法電磁探査 受信側配置計画

図-2.3.3 により、探査深度は 1.2km 以上を得ることを目標とする。

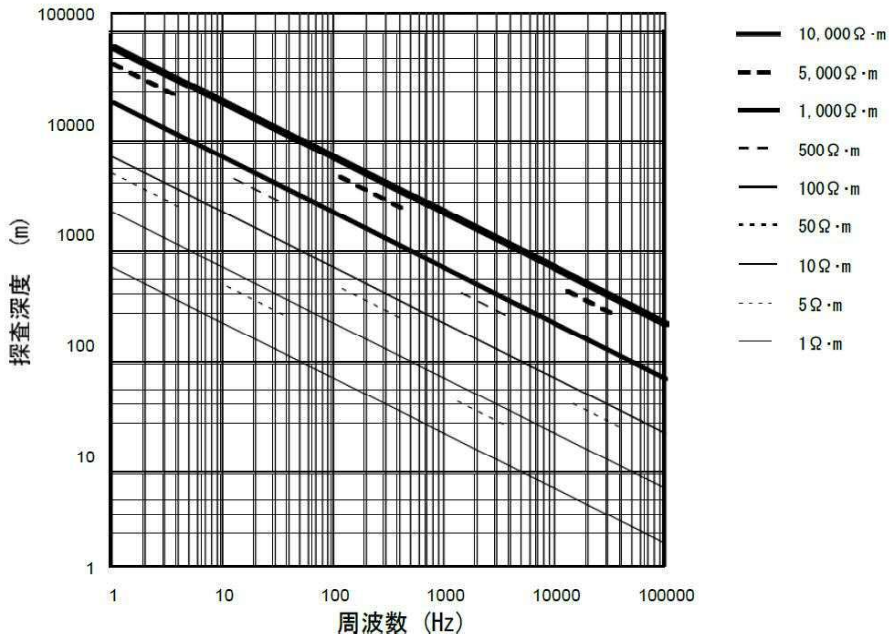


図- 2.3.3 GSAMT 法 電磁探査 探査深度計画

#### (4) 使用機材

CSAMT 探査測定装置は、「送信部」および「受信部」より構成される。  
また、高周波数領域では、HFCSAMT 探査測定装置を用いる。

表- 2.3.1 CSAMT 法 探査測定装置仕様 (送信部)

CSAMT 探査装置仕様(1)

CSAMT 探査測定機器 (千葉電子研究所社製)	
1. トランスミッター部 [送信機]CH-98T [パワーコントローラー]CH-98P	
最大出力電圧	±900V
出力電流	0~15A
送信電力	最大 4.5kW
電圧切替	60,120,180,250,330,420,520,630,750,880V (10 段階)
発信周波数	0.625,1.25,2.5,5,10,20,40,80,160,320,640,1280,2560,5120Hz(14 周波数)
出力波形	DC~6kHz 連続波(矩形波)
CPU 制御	周波数・出力電圧・通電時間・停止時間
アナログメーター	電源電圧・出力電流・出力電圧
保護装置	1.過電圧(1kV 以上で動作)
	2.過電流(16A 以上で動作)
	3.AC 電源(200V±15%以外で動作)
電源	AC 200V 50/60Hz 3 相 4.5KW
寸法	送信機本体[CH-98T] W610×D415×H260mm 14kg(W/C)
	パワーコントローラー-[CH-98P] W520×D400×H225mm 46kg
付属発電機	ET-4500 4.5KW AC200V 3 相
	W655×D530×H490mm 78kg

表- 2.3.2 CSAMT 法 探査測定装置仕様 (受信部)

CSAMT 探査装置仕様(2)

2. レシーバ部 [受信機]CH-98R	
チャンネル数	4 成分(磁場 1 成分,電場 3 成分)
受信周波数	0.625,1.25,2.5,5,10,20,40,80,160,320,640, 1280,2560, 5120 Hz (14 周波数)
入力換算	0.1 $\mu$ V 以下(ノイズレベル)
増幅度	50~110dB(10dB ステップ)
検波方式	SIN,COS,2 位相検波
信号処理	実効値積分 3.2 秒毎データ更新
データ分解能	16BIT A/D LSB 0.3mV 10VFS
表示内容	NORMAL モード : 周波数、入力電圧(mv)、比抵抗値
	MEMORY モード : 周波数、メモリ残量(%)、各 ch 位相、比抵抗値
信号出力	RS-232C で上記の各信号出力を PC に出力
電源	外部電源 DC12V 1.4A MAX
寸法	W310×D210×H165mm 5.4kg(W/C)
3. 磁場センサー [CH-97]	
検出周波数	0.5~6kHz
検出感度	AMP 25dB + 入力
フィルター	50, 60Hz -60dB ノッチフィルター付
電源	$\pm$ 12V 7mA (本体から供給)
寸法	1150×75mm $\phi$ 6kg
4. その他 [データ収録用ノート PC]	
動作 OS	Windows 98 以上

以下次ページ以降、HFCSAMT 探査機の仕様を記す。



表- 2.3.3 GSAMT 法 HFCSAMT 探査測定装置仕様 (送信部)

項目・形式	仕様	メーカー	
送信機 (CH-06T)  パワーコントローラ (CH-06P)	トランスミッタ部	最大出力電圧 ±900V	千葉電子 研究所
		出力電流 0~15A	
		送信電力 最大4.5kW	
		電圧切替 60,120,180,250,330,420,520,630, 750,880V (10段階)	
		発信周波数 111,160,222,320,444,640,888,1280, 1770,2560,3550,5120,70240, 10240Hz (14周波数)	
		出力波形 DC~6kHz 連続波(矩形波)	
		CPU制御 周波数・出力電圧・通電時間・停止時間	
		アナログメーター 電源電圧・出力電流・出力電圧	
		保護装置 1.過電圧(1kV以上で動作) 2.過電流(16A以上で動作) 3.AC電源(200V±15%以外で動作)	
		電源 AC 200V 50/60Hz 3相 4.5KW	
		寸法 送信機本体[CH-06T] W610×D415×H260mm 14kg(W/C)	
		パワーコントローラ[CH-06P] W520×D400×H225mm 46kg	
		付属発電機 ET-4500 4.5KW AC200V 3相 W655×D530×H490mm 78kg	



上:送信機(CH-06T)

下:パワーコントローラ  
(CH-06P)

表- 2.3.4 GSAMT 法 HFCSAMT 探査測定装置仕様 (受信部)

項目・形式	仕様	メーカー	
受信機 (CH-06R)	レシーバ部	千葉電子 研究所	
	チャンネル数		4成分(磁場1成分,電場3成分)
	受信周波数		111,160,222,320,444,640,888,1280, 1770,2560,3550,5120,70240, 10240Hz(14周波数)
	入力換算		0.1 $\mu$ V以下(ノイズレベル)
	増幅度		50~110dB(10dBステップ)
	検波方式		SIN,COS,2位相検波
	信号処理		実効値積分 3.2秒毎データ更新
	データ分解能		16BIT A/D LSB 0.3mV 10VFS
	表示内容		NORMALモード:周波数、入力電圧(mv)、 比抵抗値
			MEMORYモード:周波数、メモリー残量 (%),各ch位相、比抵抗値
信号出力	USBケーブルで上記の各信号出力を PCに出力		
電源	外部電源 DC12V 1.4A MAX		
寸法	W310×D210×H165mm 5.4kg(W/C)		
磁場センサ (CH-06)	磁場センサ		
	検出周波数		0.5~10.24kHz
	検出感度		AMP 25dB + 入力
	フィルター		50, 60Hz -60dB ノッチフィルター付
	電源		$\pm$ 12V 7mA(本体から供給)
寸法	1150×75mm $\phi$ 6kg		
		受信機(CH-06R)	
		磁場センサ(CH-06)	

### (5) 解析方法

一般に電磁波は周波数ごとに大地への透入深度が異なる。したがって、測定された各周波数の見掛比抵抗値は、それぞれの周波数に対応した透入深度以浅の地層の比抵抗値を強く反映していると考えられる。

解析のフローを以下に示す。CSAMT 法では電気探査比抵抗法垂直探査と同じように、電算を利用して測定周波数毎の見掛比抵抗曲線から水平多層構造の地盤を仮定し、測点下の地層の比抵抗を一次元構造解析で求めた。

尚、測定データに対しては固定送信源と測点の位置関係を考慮して、ニアフィールド現象にも対応するよう解析を実施した。

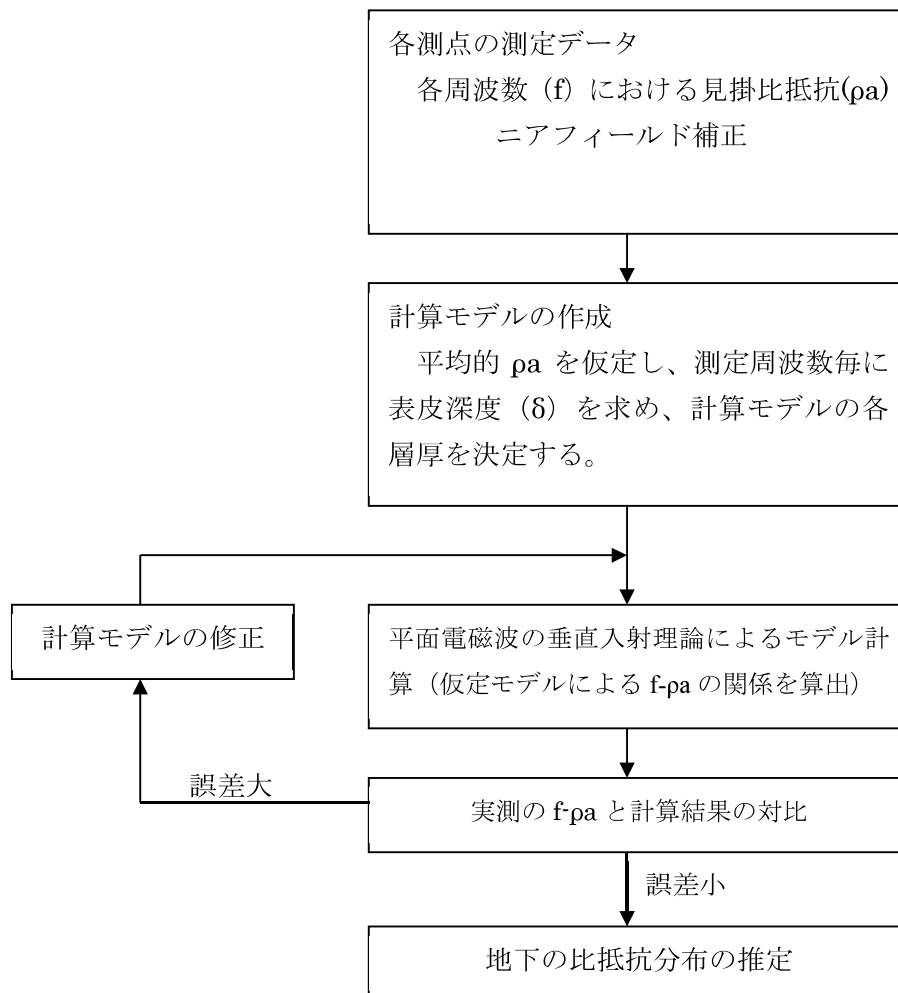


図- 2.3.4 電磁探査 CSAMT 法 解析フローチャート

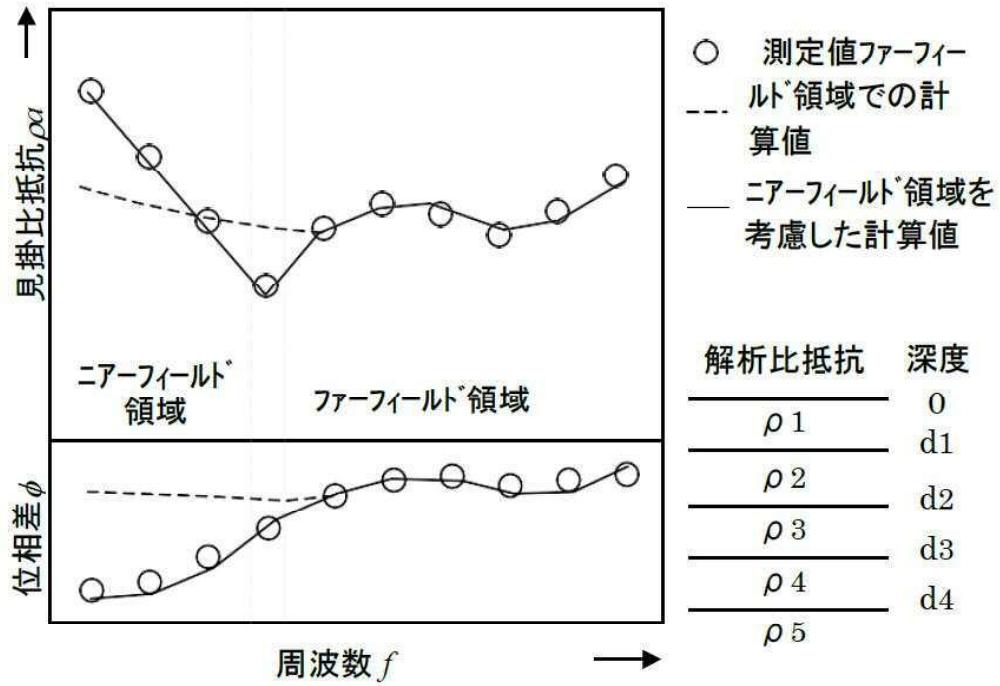


図- 2.3.5 電磁探査 CSAMT 法 のニアフィールド減少とその解析模式図