

平成30年度
旧国民宿舎施設周辺における泉源開発調査
業務

報 告 書

平成31年3月



株式会社アーステクノ

業務位置図



目次

1. 業務概要	1
1.1. 業務の目的.....	1
1.2. 業務概要.....	1
1.3. 業務フロー.....	3
1.4. 使用する主な図書及び基準.....	4
1.5. 情報流出防止策.....	4
1.6. 安全管理.....	5
1.7. 土地の立ち入り.....	6
2. 調査方法	7
2.1. 計画準備.....	7
2.2. 既存資料の収集.....	7
2.3. 物理探査.....	8
3. 調査結果	19
3.1. 既存資料の収集.....	19
3.2. 地表踏査（調査地の地質構造）.....	20
3.3. 物理探査.....	23
4. 考察	26
4.1. 温泉水の流れ、機構.....	26
4.2. 温泉候補地の比較.....	32
4.3. 掘削仕様の検討.....	33
5. 創意工夫	34
5.1. 自然放射能探査.....	34
5.2. 無人航空機での撮影.....	46

巻末資料

- 地表踏査写真
- 解析結果
- 現場作業記録写真
- 既存資料
- 積算参考資料

図目次

図- 1.3.1	業務フロー	3
図- 1.6.1	安全管理計画、運用状況	5
図- 1.7.1	立ち入り説明のため作成した案内文	6
図- 2.3.1	CSAMT 法 電磁探査 測定概念図	10
図- 2.3.2	CSAMT 法電磁探査 受信側配置計画	12
図- 2.3.3	CSAMT 法 電磁探査 探査深度計画	12
図- 2.3.4	電磁探査 CSAMT 法 解析フローチャート	17
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	18
図- 3.3.1	解析比抵抗断面図	25
図- 4.1.1	解析比抵抗断面図の解釈による断裂系（破線で記入）の推定	26
図- 4.1.2	温泉生成モデル図（阿久根市, 2006 より抜粋）	27
図- 4.1.3	γ 線スペクトル解析結果（Bi/Tl 比）の解釈	28
図- 4.1.4	阿久根温泉の既存泉源分布（鹿児島県・鹿児島温泉研究会, 1969）	28
図- 4.3.1	提案する 2 点のさく井構造図	33
図- 5.1.1	岩石別自然放射能強度	34
図- 5.1.2	γ 線スペクトル図の例	35
図- 5.1.3	自然の主な放射性元素の壊変系列	36
図- 5.1.4	シンチレーションプローブの構造	38
図- 5.1.5	測点位置図	41
図- 5.1.6	強度分布（Bi/K）	42
図- 5.1.7	強度分布（Bi/Tl）	43
図- 5.1.8	核種比の強度分布	44
図- 5.2.1	CSAMT測定位置（M1～4）	46
図- 5.2.2	CSAMT測定位置（M5～6）	47

表目次

表- 1.2.1	調査従事者資格一覧表.....	2
表- 1.4.1	使用する主な図書及び基準.....	4
表- 2.3.1	CSAMT 法 探査測定装置仕様（送信部）	13
表- 2.3.2	CSAMT 法 探査測定装置仕様（受信部）	14
表- 2.3.3	CSAMT 法 HFCSAMT 探査測定装置仕様（送信部）	15
表- 2.3.4	CSAMT 法 HFCSAMT 探査測定装置仕様（受信部）	16
表- 3.1.1	既存資料一覧	19
表- 4.2.1	温泉開発条件を踏まえた開発順位.....	32
表- 5.1.1	γ 線スペクトロメータ 機器仕様.....	39
表- 5.1.2	指標核種における自然放射線強度（測点数 12）	40
表- 5.1.3	測定結果表.....	45

1. 業務概要

1.1. 業務の目的

本業務は、温泉掘削工事に先立ち、温泉源の分布状況について、地表からの探査を実施する業務である。

1.2. 業務概要

- (1) 業務名 旧国民宿舎施設周辺における泉源開発調査業務
- (2) 業務場所 阿久根市鶴見町（市庁舎）及びその周辺
- (3) 工期 （自）平成31年1月28日 ～ （至）平成31年3月22日
- (4) 発注者 阿久根市 財政課
鹿児島県阿久根市鶴見町200番地
- (5) 受注者 株式会社 アーステクノ
鹿児島県鹿児島市新栄町26番6号

次ページに、技術者一覧表を示す。

表- 1.2.1 調査従事者資格一覧表

区分	氏名 (役職)	資格	分担
主任技術者	住吉 武志 (工事部長)	技術士(建設部門 施工計画) RCCM (地質、土質、河川砂防及び海岸・海洋、農業土木) 地質調査技士 (現場管理・技術部門)	管理 とりまとめ
		E-mail : sumiyoshi-t@e-tcn.co.jp	
照査技術者	赤崎 秀敏 (技術部長)	技術士(建設部門 土質及び基礎) RCCM (地質・地質調査技士 (現場管理・技術部門))	照査
		E-mail : akal@e-tcn.co.jp	
主担当 技術者	山下 祐志 (技術部 課長)	地質調査技士 (現場管理・技術部門、土壌・地下水汚染部門)、測量士、農業土木技術管理士	計測・現地管理 報文作成
		E-mail : yamashita.i@e-tcn.co.jp	
担当技術者	吉留 正人 (業務部長)	2級土木施工管理	現地管理
		E-mail : yoshidome@e-tcn.co.jp	
専門技術者	宇都 忠和 (技術部参与; 専務 取締役)	技術士(総合技術監理部門/建設部門 土質及び基礎、応用理学部門 地質) RCCM (農業土木) 地質調査技士 (現場管理・技術部門)	解析とりまとめ
		E-mail : uto.tadakazu@e-tcn.co.jp	
専門技術者	佐藤 喜男 (技術部 専門部長)	理学博士 (地質学)	統括管理・計測
		E-mail : satou@e-tcn.co.jp	
現場 調査員	新塘 一弘 (本店事業部 試験室長)	地質調査技士 (現場管理・技術部門、土壌・地下水汚染部門)	物理探査計測
		E-mail : shindomo.k@e-tcn.co.jp	
現場 調査員	藤園 弘幸 (本店事業部 試験室係長)	地質調査技士 (現場管理・技術部門、土壌・地下水汚染部門)	物理探査計測
		E-mail : fujizono@e-tcn.co.jp	

1.3. 業務フロー

本業務は、**図-1.3.1**に沿って実施した。

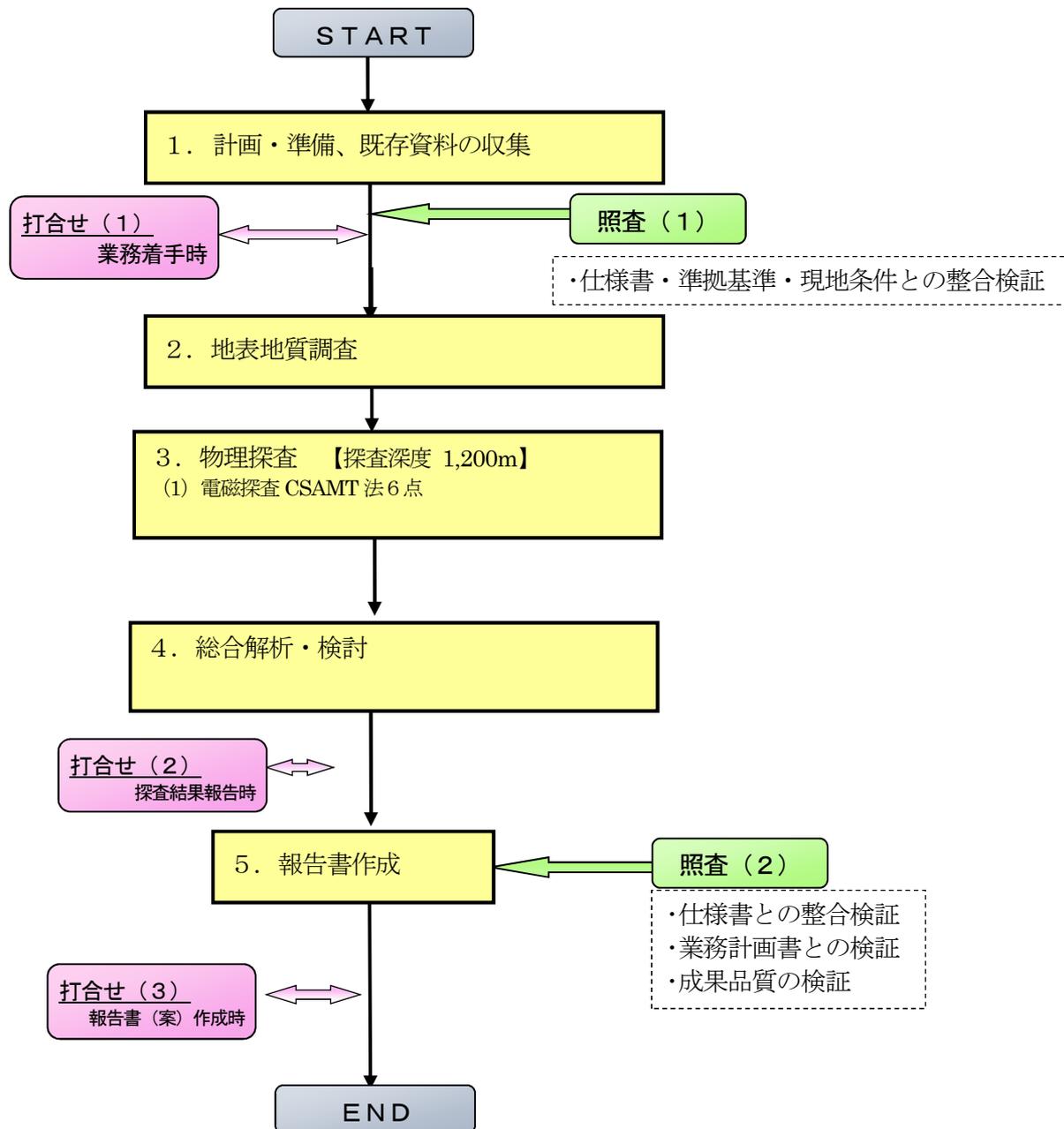


図- 1.3.1 業務フロー

1.4. 使用する主な図書及び基準

本業務は地質調査業務内容書のほか、主に表-1.4.1の基準に基づき実施した。

表- 1.4.1 使用する主な図書及び基準

名 称	編集または発行所名	発行年月
新版 物理探査適用の手引き	物理探査学会	平成 20 年 10 月
図解物理探査	物理探査学会	平成元年 9 月
地盤調査の方法と解説	(公社) 地盤工学会	平成 25 年 3 月

1.5. 情報流出防止策

本業務においては、情報流出防止対策を以下のとおり実施した。

- ・ 関係法令等の遵守
- ・ 情報の目的外使用の禁止
- ・ 社員等に対する指導
- ・ 契約終了時等における情報の返却
- ・ 電子情報の管理体制の確保
- ・ 電子情報の取り扱いに関するセキュリティの確保

情報管理責任者：宇都 忠和

1.6. 安全管理

物理探査は大きな電流を使用するため、安全管理計画について社内で協議した。実施時は事故がないように監視員を配置した。

【主な協議内容】

- ✓ 発信局を据える箇所の地権者確認
- ✓ CSAMT で使用する大きな電圧に対する安全管理
- ✓ 受信局における第三者への対応



図- 1.6.1 安全管理計画、運用状況

1.7. 土地の立ち入り

民地への立ち入りは、「立ち入りお願い」の文章で事前の説明と了解後とした。



平成31年2月20日

泉源調査

株式会社 大和様へ
担当 管理係 福留さま

物理探査の実施にともなう立ち入りのお願い

株式会社 アーステクノ
鹿児島市 新栄町 26-6

この度、阿久根市との業務契約に基づいて、泉源調査(物理探査)を下記のとおり実施することになりました。
そこで、御社敷地内への立ち入りをお願いいたします。

記

調査期間	平成31年2月21日～平成31年2月22日	
作業時間	8:30 ~ 17:30の内、連続した60分間	
調査場所	右図参照	
調査内容	物理探査	
調査会社	(株)アーステクノ 担 当 : 山下	TEL 099-256-5167 (090-4581-8031)

掲示期間 平成30年 5月 下旬



図- 1.7.1 立ち入り説明のため作成した案内文

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、別途調査が必要性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)式から大地の見掛け比抵抗値(ρ_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), μ : 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、 δ : 表皮深度(m), ρ : 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 Ω 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。

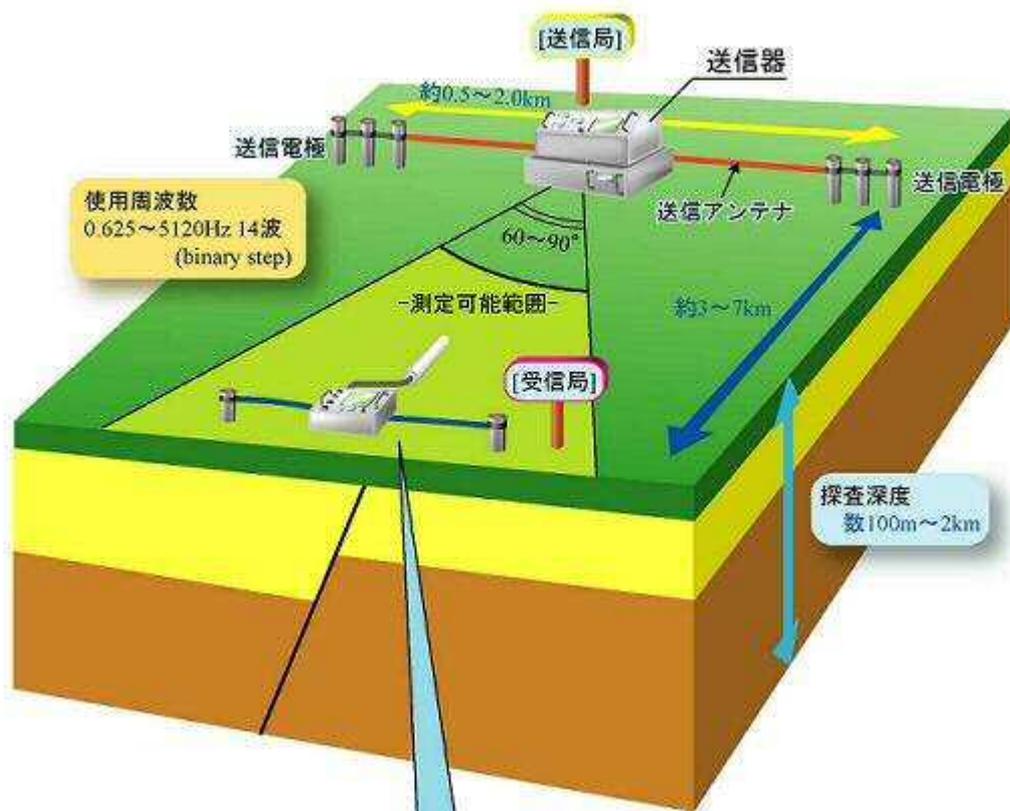


図- 2.3.1 CSAMT 法 電磁探査 測定概念図

(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、測定の実作業性はよい。

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压電線近傍に、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 CSAMT 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。

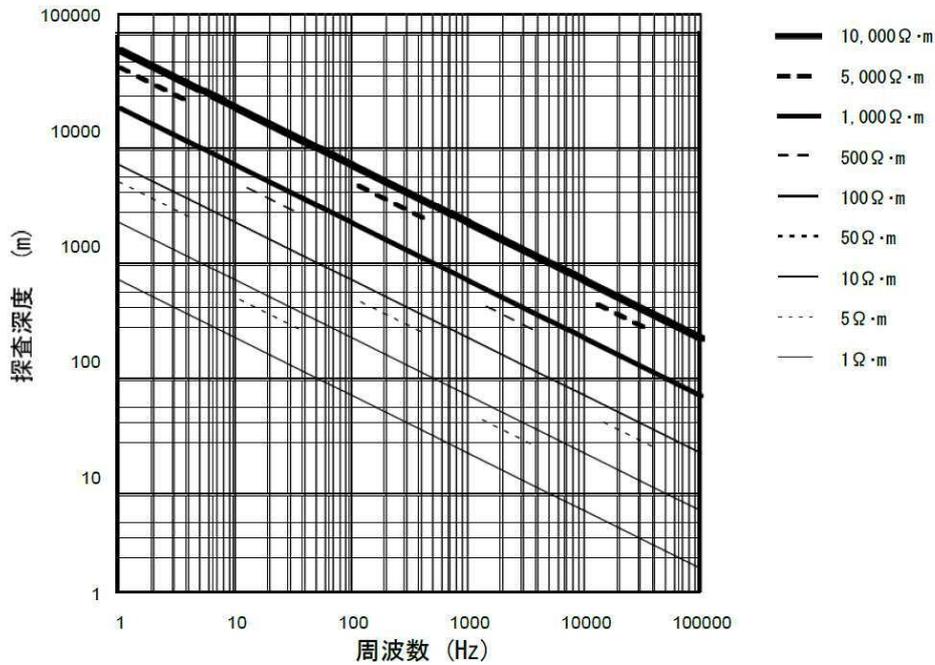


図- 2.3.3 CSAMT 法 電磁探査 探査深度計画

(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 [パワコントローラ]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)
	パワコントローラ-[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 μ 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	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	±12V 7mA (本体から供給)
寸法	1150×75mm ϕ 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 CSAMT 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		千葉電子 研究所
	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	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 CSAMT 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) 111,160,222,320,444,640,888,1280,
	受信周波数		1770,2560,3550,5120,70240, 10240Hz(14周波数)
	入力換算		0.1 μ 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 ϕ 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。

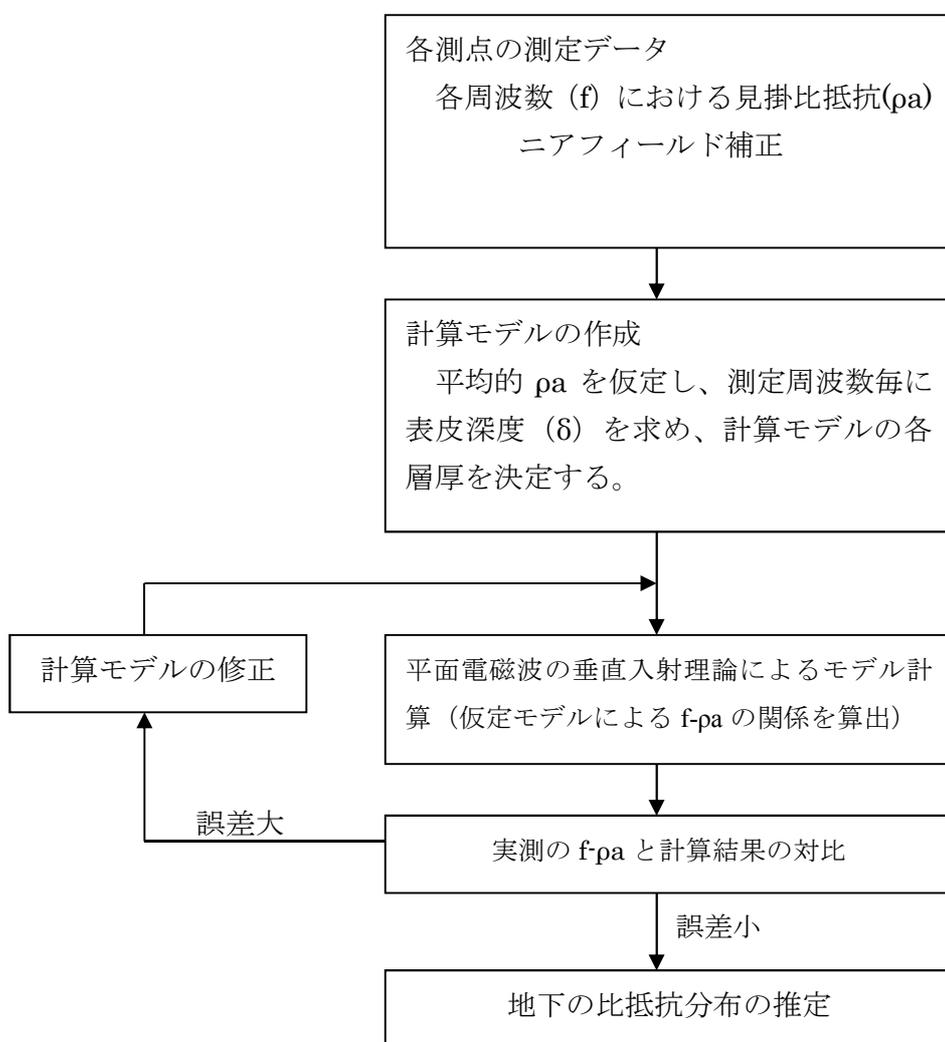


図- 2.3.4 電磁探査 CSAMT 法 解析フローチャート

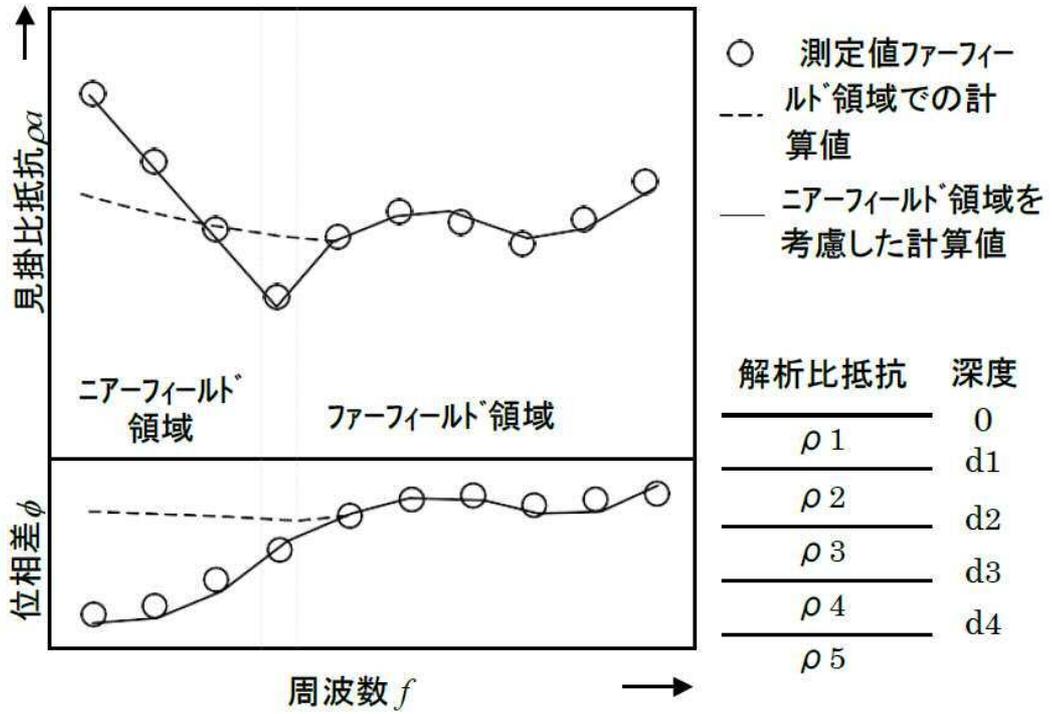


図- 2.3.5 電磁探査 CSAMT 法 のニアフェルフィールド減少とその解析模式図

3. 調査結果

3.1. 既存資料の収集

表-3.1.1は本業務で既存資料の一覧である。この資料から得られた知見に基づいて、調査地の地質構造や温泉水胚胎原理を検討した。

番号2と3、および8の一部は巻末資料とした。

表- 3.1.1 既存資料一覧

番号	著者または編集者	年度	文献名	出典
1	阿久根市	2007	阿久根温泉の現在・過去・未来	
2	福岡晃一郎、藤光康宏、西島潤、江原幸夫、笹木圭子、丸山徹、野田徹朗、島久	2006	鹿児島県阿久根温泉の総合調査	日本地熱学会平成 18 年学術講演会 2006 年 11 月 P16
3	藤光康宏、江原幸夫、福岡晃一郎、西島潤、笹木圭子、丸山徹、野田徹郎	2007	鹿児島県阿久根温泉の湧出機構と温泉利用の将来展開	日本地熱学会平成 19 年学術講演会 2006 年 11 月 B07
4	中江訓	2000	付加複合帯の区分法と付加地質学における構造層序概念の有効性	地質学論集 no.55p.1-15
5	産業技術総合研究所	1997	1/200000 地質図幅「鹿児島」	
6	産業技術総合研究所	2010	/200000 地質図幅「水俣・野母崎の一部」	
7	鹿児島県	1990	1/100,000 鹿児島県地質図	
8	露木利貞	1969	鹿児島県の温泉・北薩地区の諸温泉、宮之城・川内・阿久根・湯川内・その他の温泉	
9	阿久根市	2016	旧国民宿舎周辺地域の地質調査業務委託	
10	勝村敏史、山本啓司	2016	九州南部北薩地方煮染め地域の仏像構造線相当の地体構造境界	地質学雑誌, 122, 1, p.37-42.

3.2. 地表踏査（調査地の地質構造）

地質層序は下位からチャートを主体とする秩父帯混在岩層、整然層四万十累層群下部層の砂岩層、砂岩・頁岩互層、北薩火山岩類（火山礫凝灰岩・凝灰角礫岩・溶岩）、阿久根火砕流堆積物、沖積層、海浜砂、人工埋積地に区分される。混在岩層はプレート沈み込み境界に沿った、大規模な断層破碎帯と見なす考え方である。詳細は中江（2000）に解説がある。

秩父帯は、チャートの単一岩相で構成されており、風化に強い。以下、チャート残丘ブロックと呼ぶ。秩父帯と四万十帯の境界は、仏像構造線（BTL）と呼称されている。

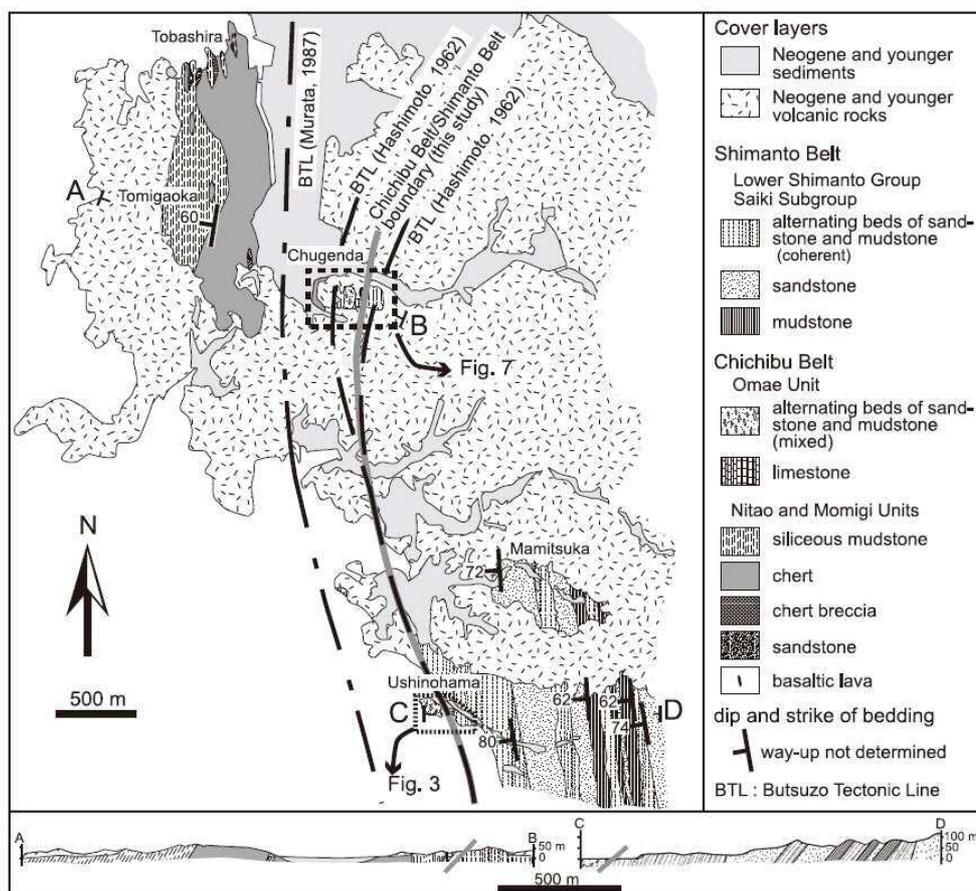


Fig. 2. Geologic map and cross-sections of the Nishime area.

図- 3.2.1 仏像構造線（BTL）の位置（勝村・山本, 2016）

本業務では、Murata（1987）によって、地溝帯の東側との断層は仏像構造線に相当するとしている。ただし、上図のように、「より東方に仏像構造線が分布する」考え方（勝村・山本, 2016 など）も有力である。阿久根市東側の地下深部は四万十累層群下部の整然層（砂岩・砂岩優勢砂岩頁岩互層）から構成されている。

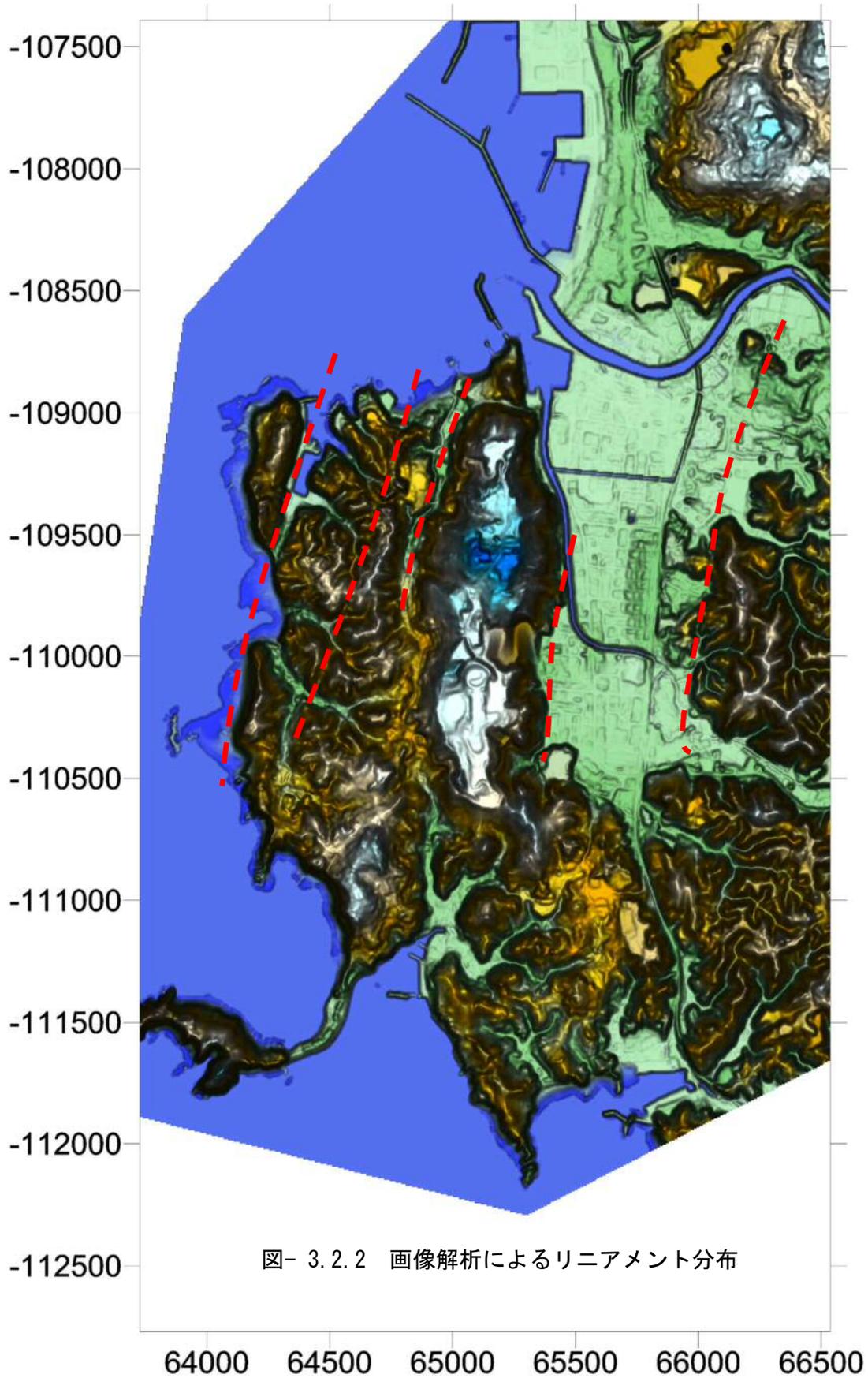




写真-3.1 火山碎屑岩露頭。南落ちの緩傾斜を示す。



写真-3.2 戸柱周辺の海岸沿いの砂岩露頭。
ほぼ垂直で、弱変質を受け脆弱となっている。

火山碎屑岩の露頭は、全般に南落ちの傾斜を示すことから、給源となる火山帯の中心は北方にあったと推定される。

3.3. 物理探査

(1) 調査位置

今回の調査における送信アンテナは、調査対象地の東側に約 6.5km 付近の高松川支流の道路沿いに設定した。図-3.3.3 に調査位置図、図-3.1.4 に測点配置図にそれぞれ示す。



図- 3.3.3 調査位置図 (地理院地図を引用、加工して使用)

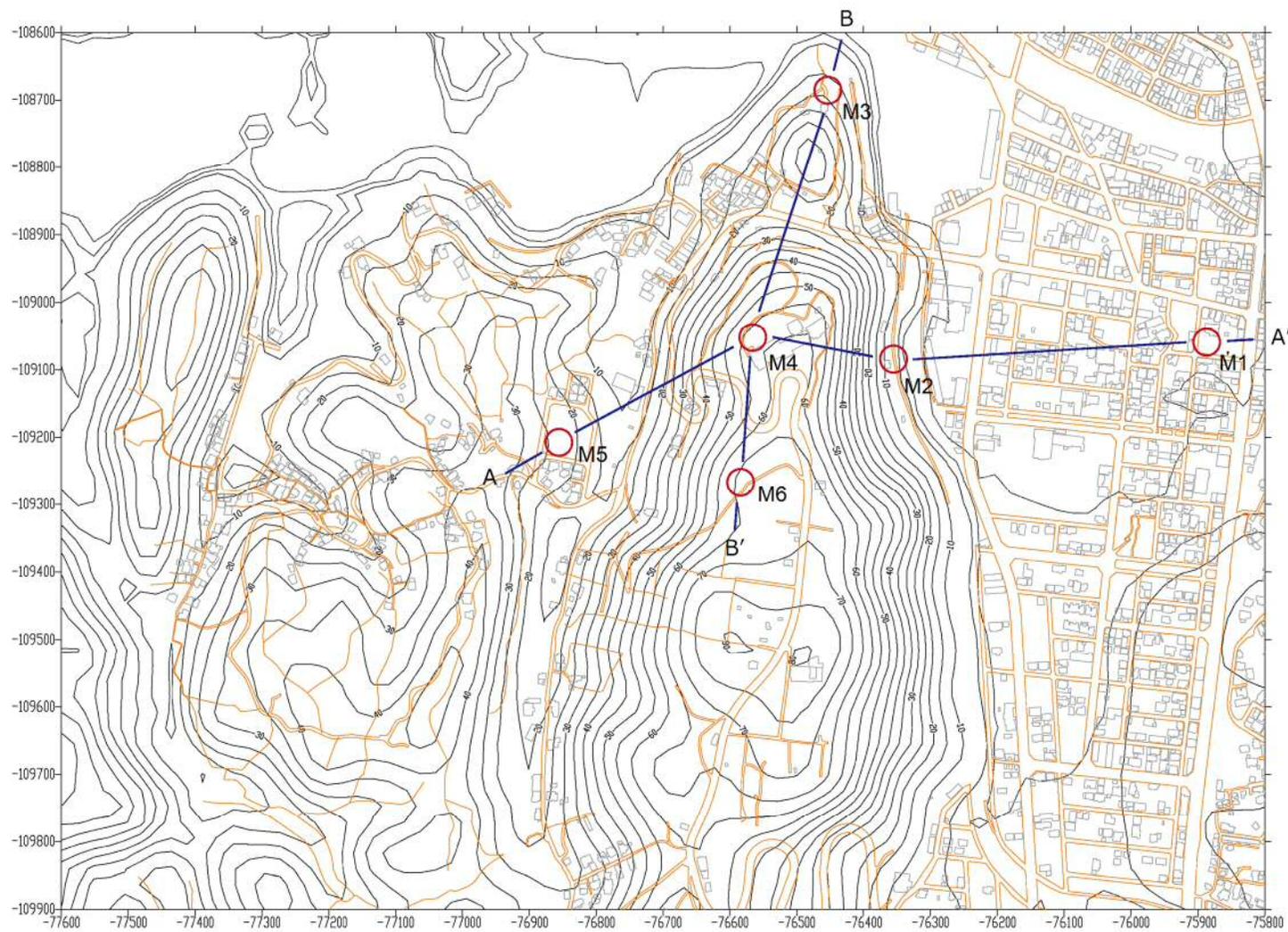


图- 3.3.5 测点位置图

(2) 解析結果

測定により得られた見掛け比抵抗値から、各測点地下の地盤を水平多層構造モデルとして層数・層厚を固定し、各層の比抵抗値を求めた。測定で得られた見掛け比抵抗値から深度1,200mまでを解析深度として、この深度を13層に分割し各層の比抵抗を求めている。

図-3.3.1は解析比抵抗断面図である。A-A'断面では概略西-東方向、B-B'断面では北-南方向の断面を設定し、地下の比抵抗分布状況を把握するようにした。各測点の測定データ及び解析結果図は巻末に示している。

解析された比抵抗値は約 $1.6\Omega\cdot\text{m}$ ～約 $827\Omega\cdot\text{m}$ 程度と、幅広く分布している。比抵抗分布の概略の傾向としては、浅層部分では低い比抵抗値を示し、地下深部に至るにつれて高い比抵抗値を示す傾向が見られる。

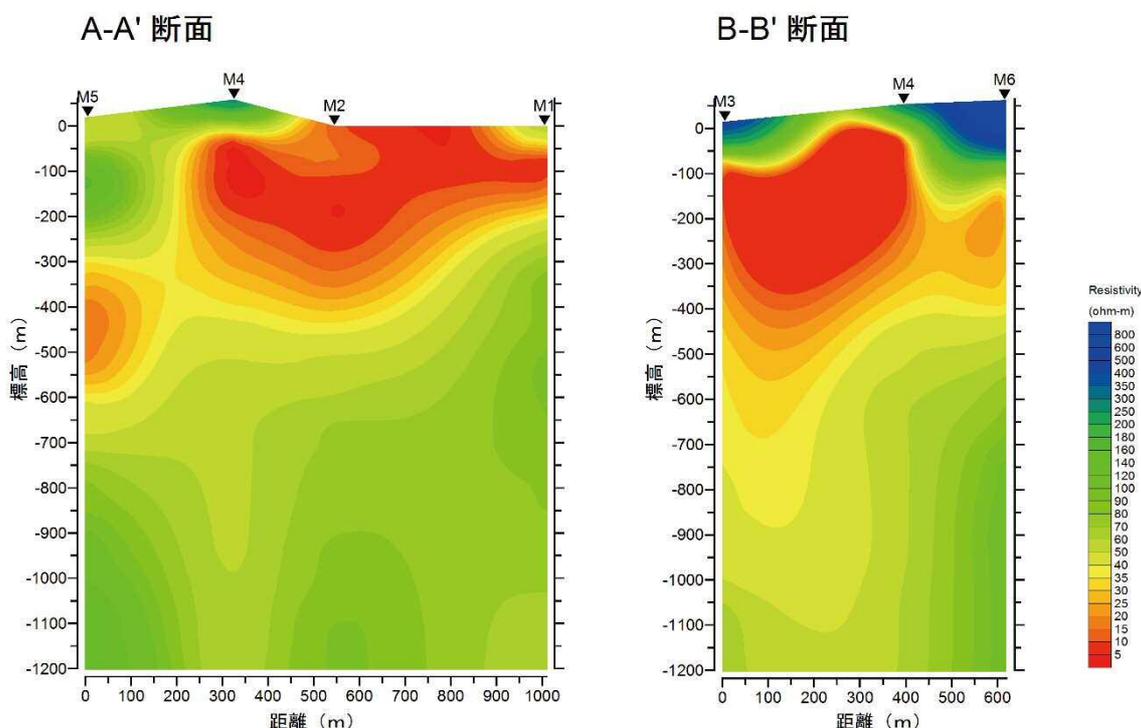


図- 3.3.1 解析比抵抗断面図

比抵抗は、地表付近で、一部を除き、 $200\Omega\cdot\text{m}$ ～ $400\Omega\cdot\text{m}$ を示す。標高-350m～-400m付近にかけて $30\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低い比抵抗値を示す。これ以深では約 $30\Omega\cdot\text{m}$ ～ $300\Omega\cdot\text{m}$ を示す。M1測点及びM2測点付近では地表部付近に低い比抵抗部分が分布している。

4. 考察

4.1. 温泉水の流れ、機構

【CSAMT 法による探査・解析結果】

低比抵抗部分（5～35ohm・m）は残丘ブロックの下の地表部から地下深度 400m の部分に集中する。低比抵抗部分は、一般的には、断層破碎帯等に地下水が豊富であったり、粘土分が多い場合に検出される傾向がある。しかし、本業務地における低比抵抗帯は、非常に低い比抵抗値を示すことと、既存の浅部温泉賦存層と一致していることから推定すると、キレットが発達した基盤岩中に、海水（塩水）の混入してきたことによるものと推定される。

このような塩水の進入は、B-B'断面で見た限りでは、北側の海から入り込み、南側に進入しているものと推定される。

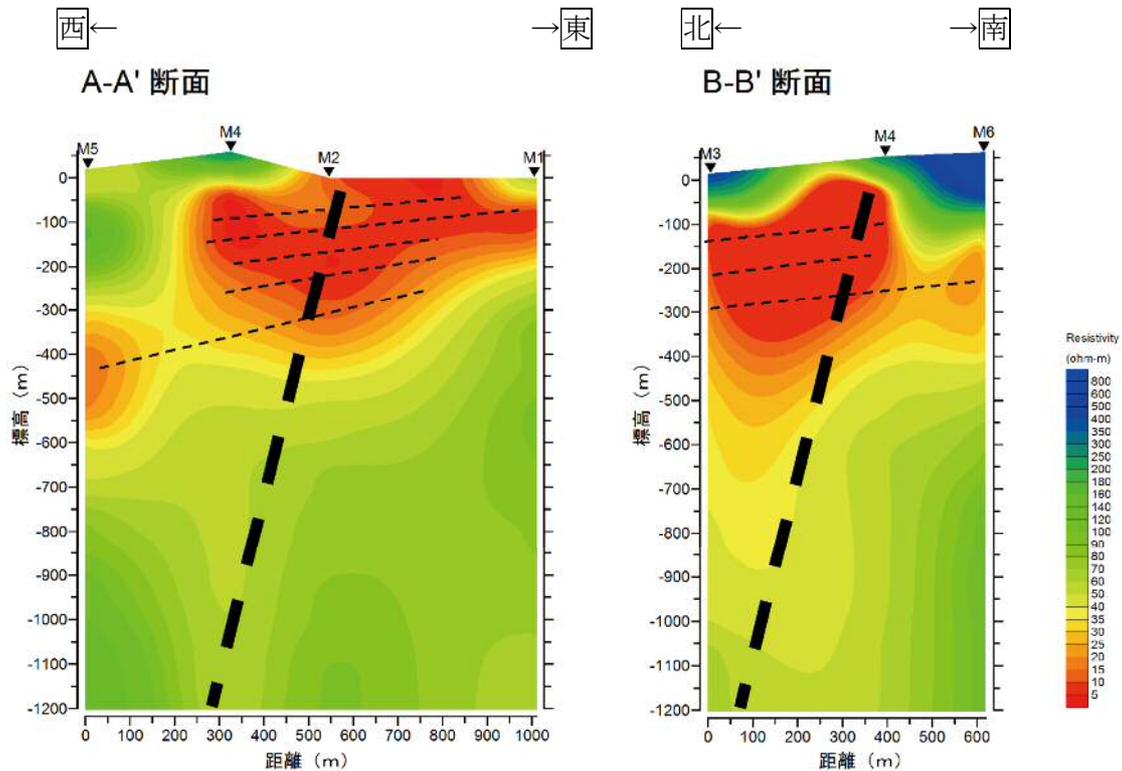


図- 4.1.1 解析比抵抗断面図の解釈による断裂系（破線で記入）の推定

温泉水は地化学探査結果から、かなり深い（3,000m）所に貯留されているとされる。大規模な断層に沿って上昇して、残丘ブロック中の断層群に沿って水平（西側）に移動し、最終的に比抵抗断面図で赤の部分（深度 100～350m）に再貯留されると考えた。

【阿久根温泉の胚胎層準】

阿久根港沖には南北方向、海岸線に平行な断層群が発達している。特に重力異常分布図からは断層（残丘ブロックの東側境界断層と仏像構造線（推定））に挟まれて地溝帯が形成されている。

図-4.1.2 は、阿久根市（2006）よりの抜粋である。ここでは、地溝の東側の断層に沿って、海水の混入した温泉水が上昇すると推定されている。

阿久根温泉(塩湯)の作り方 海側から見た断面

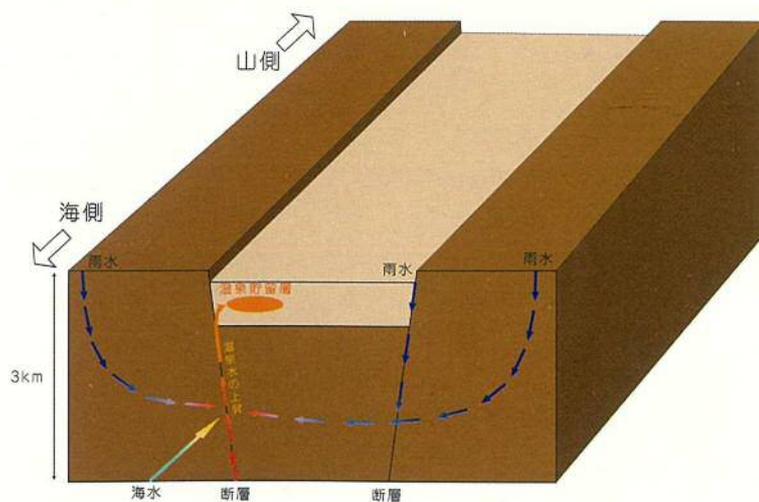


図- 4.1.2 温泉生成モデル図（阿久根市，2006 より抜粋）

この地溝帯は、深いところでは、地下深部数 100m まで到達している可能性があると推定される。さらに、地下 3,000m 付近に熱源としての花崗岩類ブロック、および地下 1,000m に炭酸水素イオンの供給源として、石灰岩ブロックが推定される。

【空气中の γ 線スペクトルによる探査・解析結果】

既存の阿久根温泉泉源は、ラドン・ラジウムが豊富に含まれることが以前より知られている（鹿児島県・鹿児島温泉研究会，1969）。今回の γ 線スペクトルによる探査・解析結果（**図-4.1.3**）と、阿久根温泉の既存泉源の分布（**図-4.1.4**）とを併せて考察すると、地表浅部では、西北西-東北東方向の断裂系に沿って、ラドン・ラジウムが上昇しているのかもしれない。

ラドン・ラジウムの経路となる浅部断裂系（推定；赤破線）

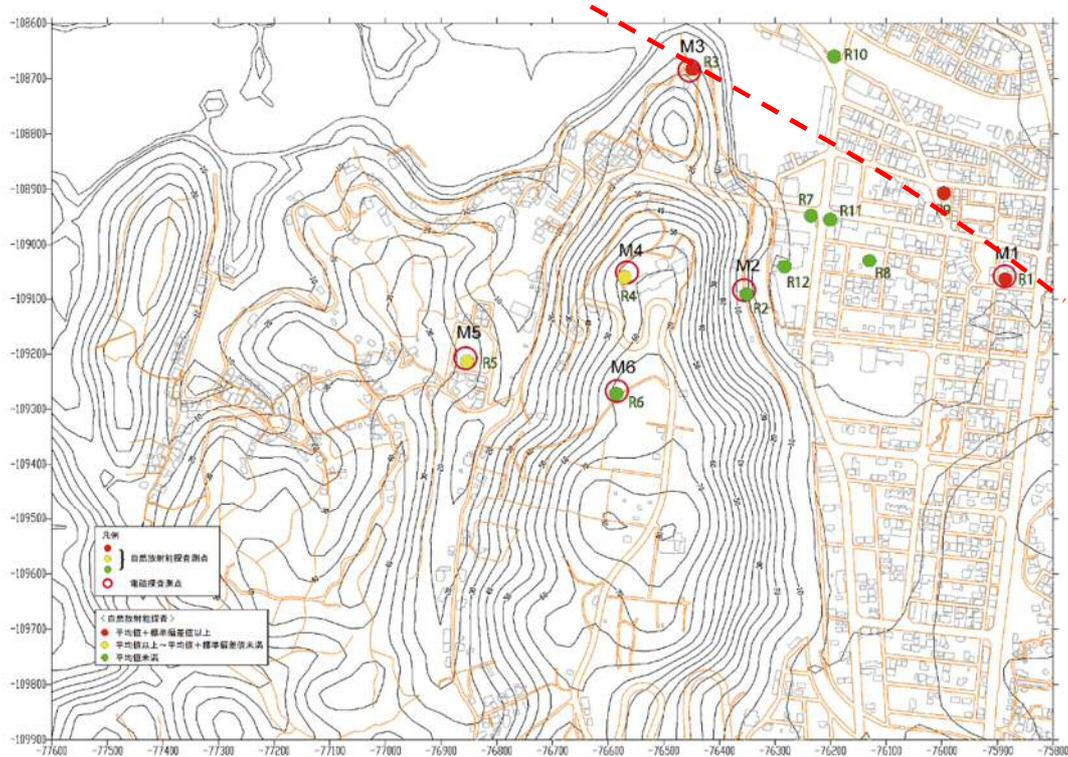


図- 4.1.3 γ 線スペクトル解析結果 (Bi/Tl 比) の解釈

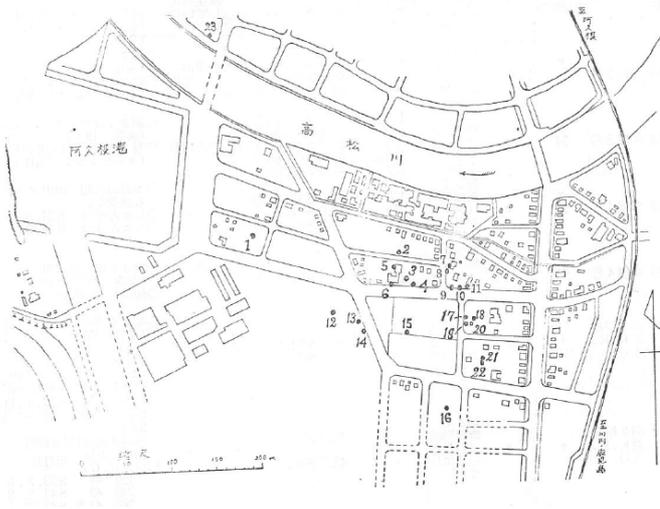
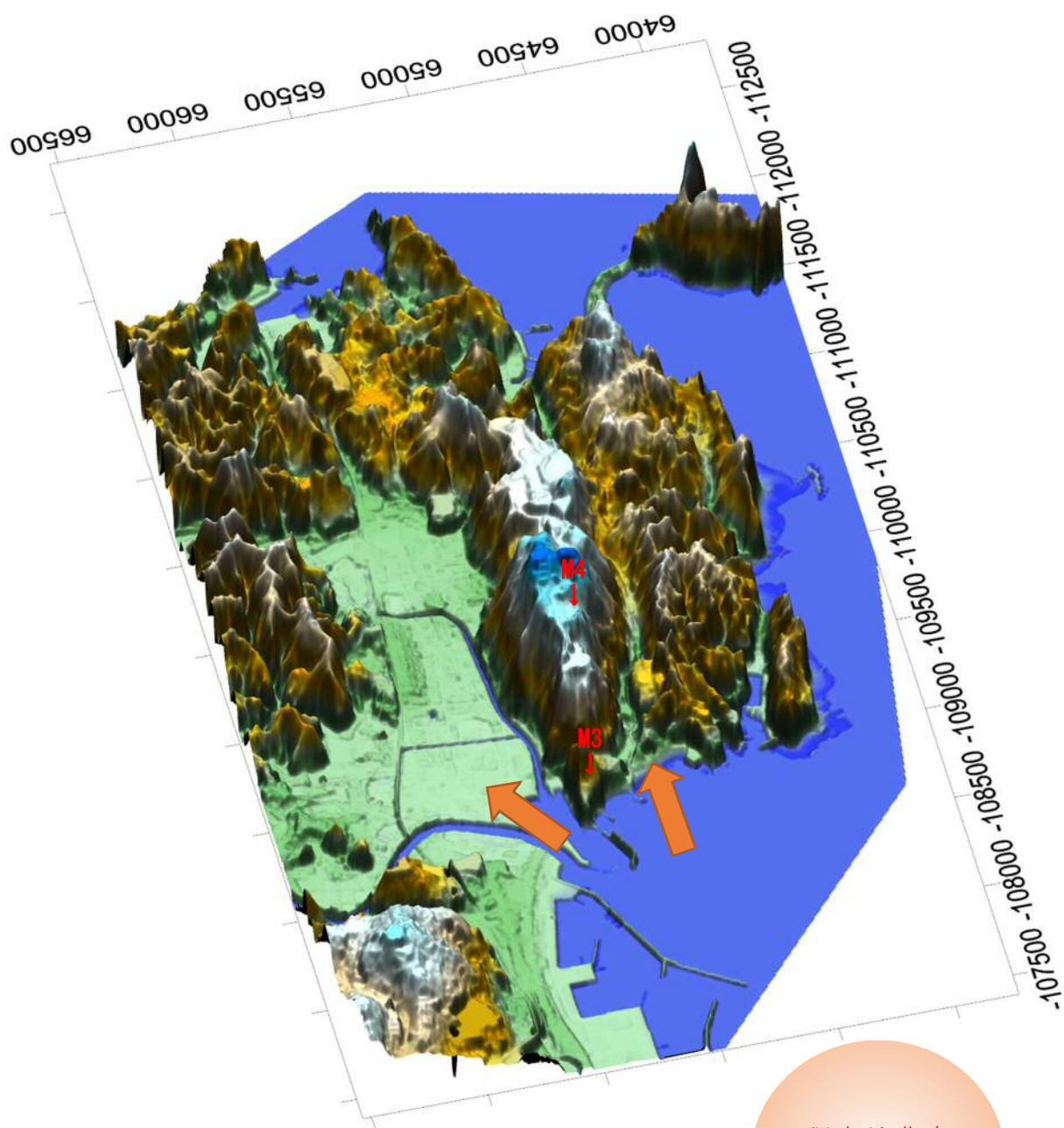


図- 4.1.4 阿久根温泉の既存泉源分布（鹿児島県・鹿児島温泉研究会，1969）

塩水の進入は、既存の阿久根温泉泉源が高濃度の塩泉であることと併せて考察すると、海水からの寄与が大きいが、M3~M4 にかけて断裂系に沿って上昇してきた熱水との混合により、温泉水が形成されていると考えられる。

海水 → **M3** → 混合 → **M4** → **M2** → **M1** (既存の阿久根温泉泉源)
↑
地下熱源からの熱水上昇



調査地北方
の地下熱源

【温泉湧出原理】

温泉水は地下最深部（3,000m）で加熱され、地表部近くの残丘ブロック中に発達する断層地溝帯の続成度の低い堆積物から浸水し、チャート残丘ブロック周りの境界断層中に貯留されるモデルを考えた。この塩湯からの湧出量は 21.4kg/s、温度は 35～44℃で阿久根市全体の温泉湧出量の 78%を占める。温度勾配は、温泉水の地化学分析の結果を踏まえ 130～140℃で深度は 3,000m と推定する。

地温勾配は、温泉水化学成分（海水と天水の混合比、特定元素（ナトリウム・カリウム）の混合比）より、0.04℃/m と推定されている。

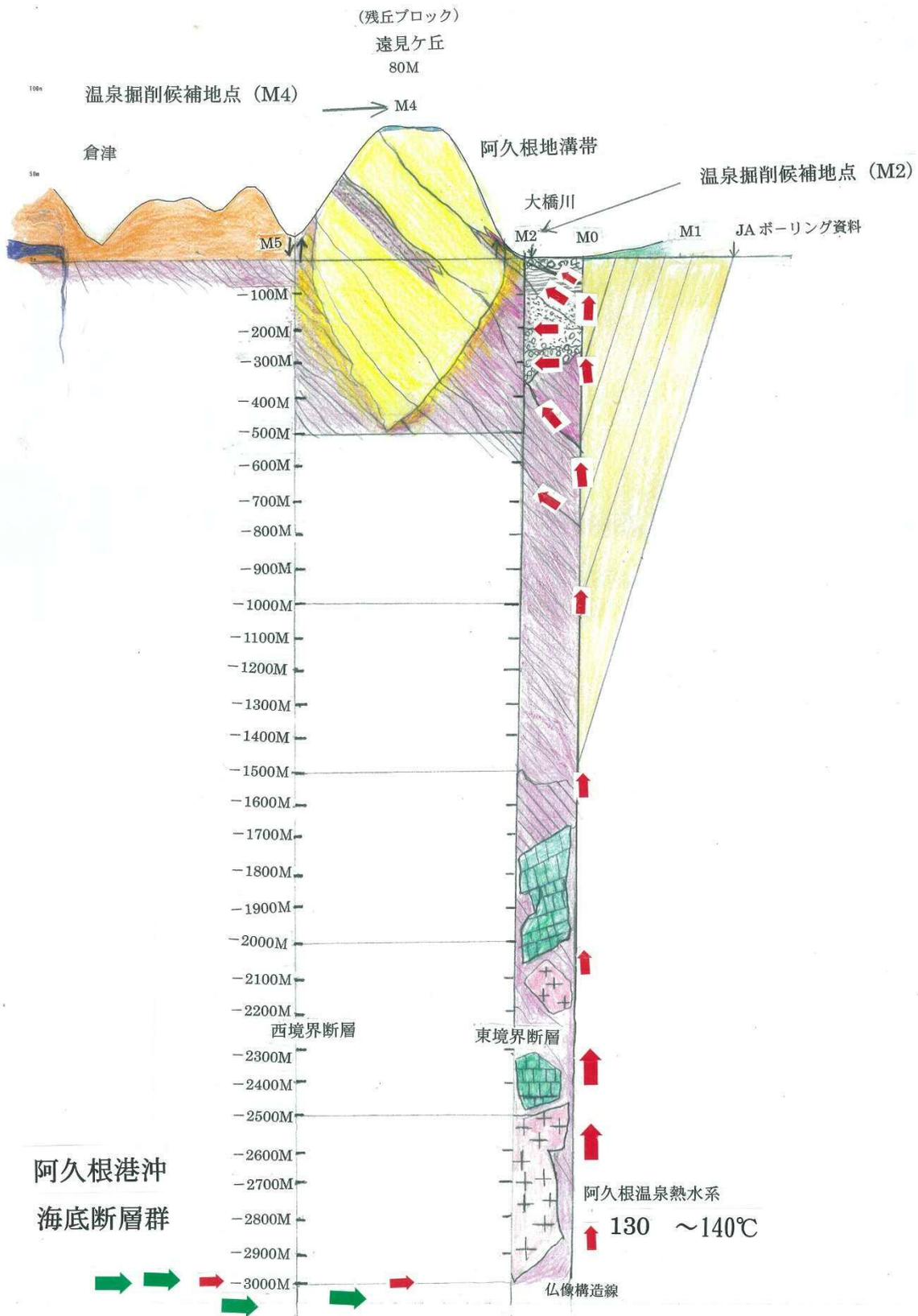


図- 4.1.6 阿久根地溝帯付近地質断面図及び温泉水の流れ

4.2. 温泉候補地の比較

温泉開発に必要な条件、およびこの条件に任意の重み係数をつけて点数で評価した候補地の優先順位が表-4.2.1である。優先順位が最も高いのはM2地点である。また、M1は既存井との距離が近いため開発が難しい。M4を次点として提案する。

表- 4.2.1 温泉開発条件を踏まえた開発順位

温泉掘削候補地点名	M1	M2	M3	M4	M5	M6	重み係数
断層の有無	近くに断層あり。	近くに断層あり。	近くに断層あり。	近くに断層あり。	近くに断層あり。	なし。	3
仏像構造線との関係	交差する。	交差する。	交差する。	交差しない。	交差しない。	交差しない。	2
掘削深度	150～200 m	350 m	100～150 m	50～350 m	450 m	200～400m	3
ボーリング作業の難易度	高い。	高い。	高い。	非常に高い。	高い。	非常に高い。	1
温泉水の化学的成分の特異性	塩化物泉	塩化物泉	塩化物泉	塩化物泉	塩化物泉	塩化物泉	1
泉温	高い。	高い。	高い。	低い。	低い。	低い。	1
温泉水の湧出量	多い。	多い。	多い。	多い。	多い。	少ない。	2
温泉施設建設の難易度	容易である。	容易である。	容易である。	非常に容易である。	容易である。	非常に容易である。	1
既存井との関係	既存井が近い	特になし	文化財が近い	特になし	特になし	特になし	1
候補地の比較点数	9	10	8	9	7	3	
優先順位	2	◎ 1	5	○ 3	4	6	

4.3. 掘削仕様の検討

図-4.3.1は、前節で開発の可能性が高いと評価したM2とM4のさく井構造図である。掘削深度は物理探査結果を踏まえ、低比抵抗帯の底部付近で、海水起源の塩水と、熱水との混合が起きているとするモデルに基づき、400mを計画する。さく井上部は、塩泉と地表水の遮水（フルホールセメンチング）を行う。

工費は、岩質が硬質と予想されることと、塩泉が想定されるため、腐食に強いグラスファイバースケーシング管が適当と考えられることから、温泉ポンプも含め8,000万円超となっている。ただし、400m程度掘削すれば確実性が向上すると考えられるため多めに見積もっているが、低比抵抗帯の中心は、深度150～300m付近にあることから、予算に応じて300m程度の掘削とすることも可能と考えられる。また、経済性向上のため、既存の温泉ポンプが活用可能かどうかの確認が望ましいと考えられる。

2地点の経済性を比較すると、M4では硬質のチャートが想定されるため、主に岩質の差異により、M2が経済性に優れている。一方で、竣工後の維持管理費はM4が低く抑えられる。

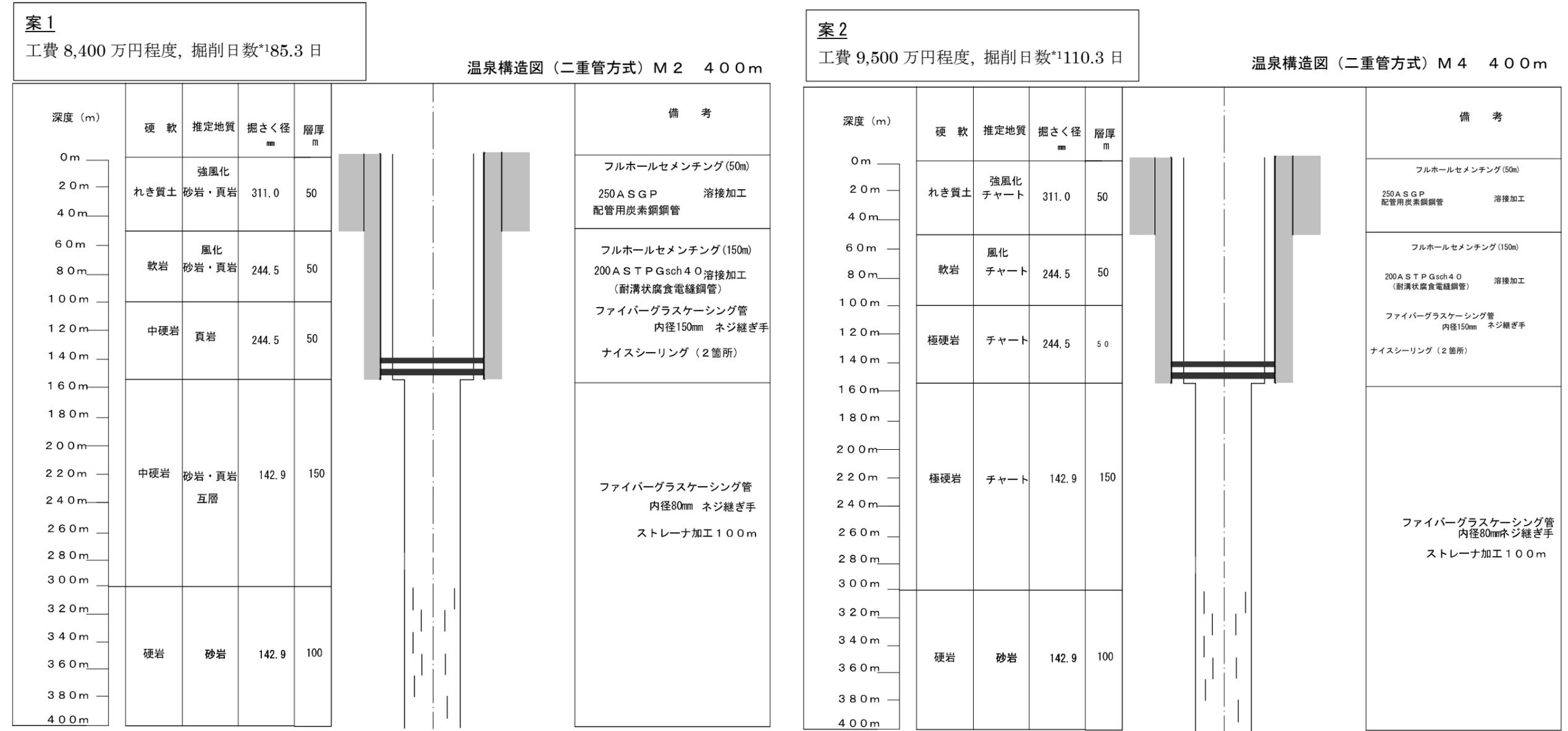


図-4.3.1 提案する2点のさく井構造図

※地すべり等防止法 第18条により、県との協議が必要

*1 掘削日数は積算上の実掘削日数である

5. 創意工夫

5.1. 自然放射能探査

既存資料の収集整理および分析を踏まえた自然放射能探査を、発注者と協議を行い「創意工夫」として行った。

(1) 原理と方法

地殻構成物質である造岩鉱物の中に、ウラン・トリウム・アクチニウム系列に属する全ての元素及び単独に微弱な放射能を示すカリウム・ルビジウム・サマリウム等の放射性同位体が含まれている。従来の放射能探査においては、これらの全放射性元素から放出される γ 線総量を測定していた。

岩石毎の γ 線強度を比較すると図-5.1.1に示す様な傾向を示す。花崗岩などの酸性岩が最も強く塩基性岩は弱い値を示す。堆積岩では頁岩系統が強く砂岩・凝灰岩で弱く、石灰岩では更に弱い値となる。

従って、 γ 線総量の測定によってもある程度の岩種判定、それに伴う断層等の境界線の判定等が可能である。しかし被覆層の性質と厚さ、あるいは含水状況による影響が大きく、 γ 線総量のみでの判定には不確かさが伴う。

γ 線スペクトル法はエネルギーレベルに依存したスペクトル解析を行って、注目する元素ごとの γ 線強度を求め、岩種の区分や断層位置を確認等で利用する方法である。

地層中に含まれていて、 γ 線を放出する核種の代表的なものに ^{40}K (カリウム)、 ^{214}Bi (ビスマス)、 ^{208}Tl (タリウム)が有り、その γ 線エネルギーは、それぞれ1.46MeV(百万電子ボルト)、1.76MeV、2.61MeVと大きい。また互いに近い値なので、線源から検出器までの間で水や土壌によって失われる損失率も近い値になり、ことに $^{214}\text{Bi}/^{40}\text{K}$ 、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ の様に比をとると、途中での損失を殆ど無視出来る様になる。

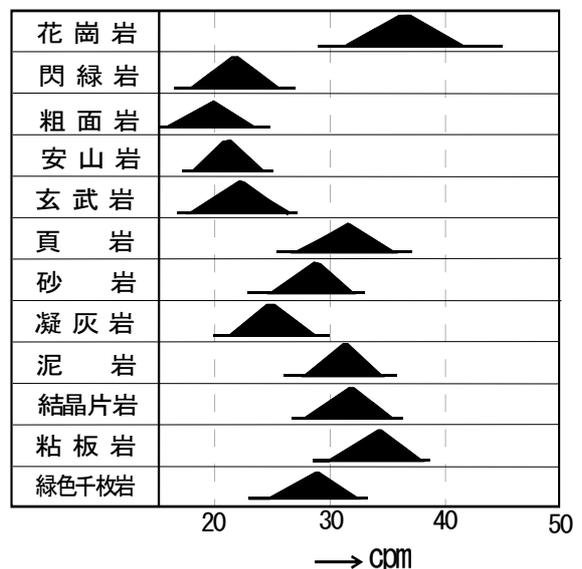
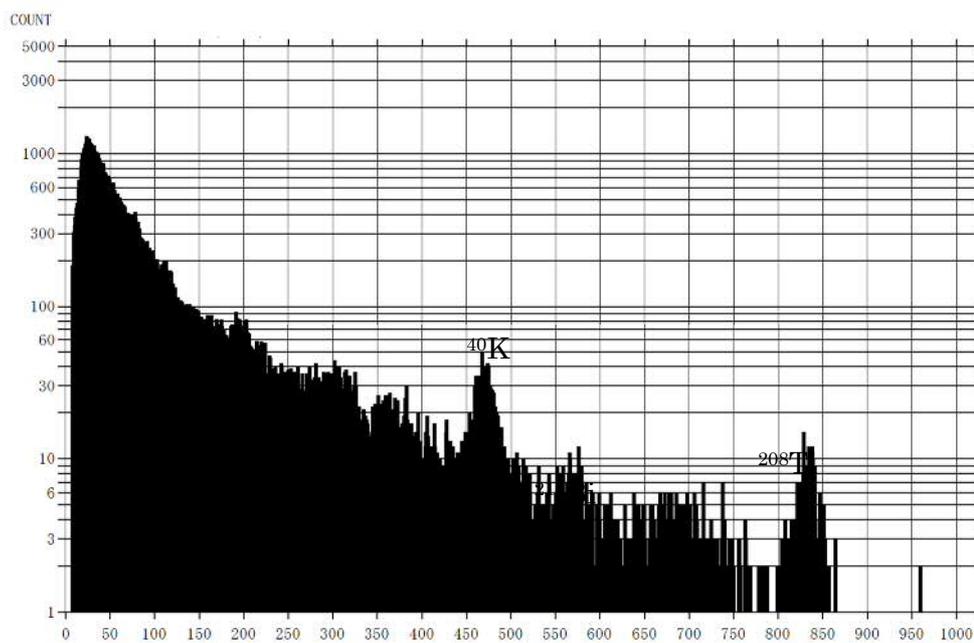


図- 5.1.1 岩石別自然放射能強度

《地盤の γ 線スペクトル》

地表上でNaI（沃化ナトリウム）の結晶を用いた検出器で γ 線を測定すると、各元素のエネルギーレベルに応じたスペクトルが得られる。例として図-5.1.2に γ 線スペクトル図を示す。横軸はエネルギーレベルをチャンネル(ch)表示で示し、縦軸は γ 線カウント数の積算値である。探査上注目する ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl のエネルギーレベルと、それに相当するスペクトルのチャンネル域は以下の通りである。



^{40}K	… 1.46 MeV	… 470 ch 付近
^{214}Bi	… 1.76 MeV	… 564 ch 付近
^{208}Tl	… 2.61 MeV	… 832 ch 付近

図- 5.1.2 γ 線スペクトル図の例

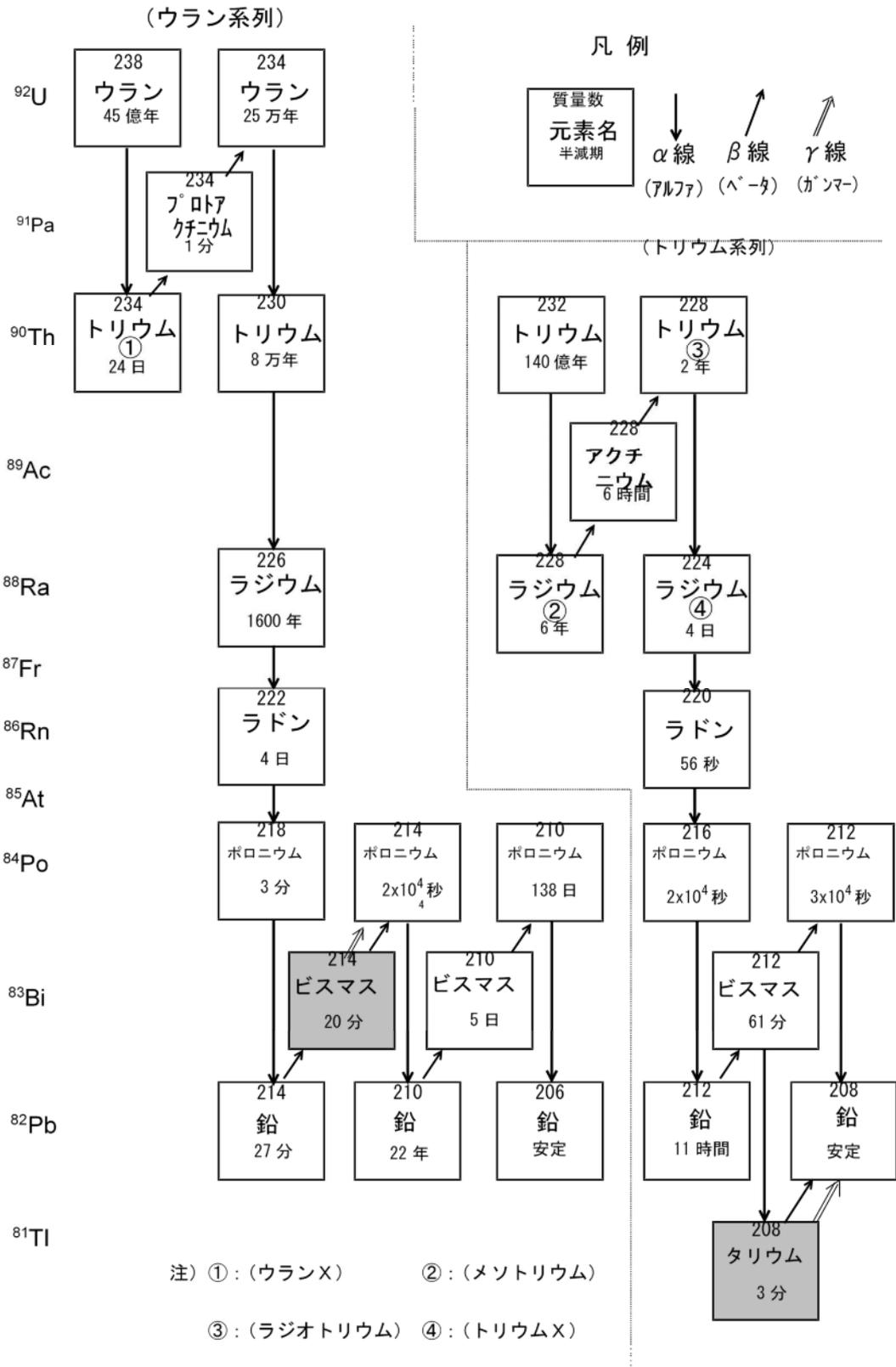


図- 5.1.3 自然の主な放射性元素の壊変系列

[カリウム(^{40}K)]

カリウムは岩石中に比較的多量に存在するが、そのうち0.0119%含まれている放射性同位体のカリウム(^{40}K)が外殻電子を捕獲する際に γ 線を放出する。その半減期は 1.28×10^9 年と極めて長い。

[ビスマス(^{214}Bi)]

図-2-2-3に示す様にウラン系列に含まれ、ウラン(^{234}U)が壊変し、ラドン(^{222}Rn)を経て安定な鉛(^{206}Pb)に至るまでの過程の中で、ビスマス(^{214}Bi)がポロニウム(^{214}Po)に壊変する際に γ 線を放出する。ビスマス(^{214}Bi)の半減期は20分である。

ウラン系列の核種のうちラドン(^{222}Rn)～ポロニウム(^{214}Po)は気体として存在し、その前後は固体として存在する。ラドン(^{222}Rn)～ポロニウム(^{214}Po)は気体として、或いは地下水に溶け込んで移動するので、亀裂や断層破碎帯のような気体の通り易い所での濃度が増加する。従ってビスマス(^{214}Bi)の濃度が増加し、 γ 線強度が増大する。

[タリウム(^{208}Tl)]

同じ図に示す様に天然放射性元素の壊変系列のトリウム系列に含まれるもので、トリウム(^{232}Th)が放射壊変し、ラドン(^{220}Rn)を経て安定な鉛(^{208}Pb)に至るまでの過程の中でタリウム(^{208}Tl)が鉛(^{208}Pb)に壊変する際に γ 線を放射する。タリウム(^{208}Tl)の半減期は3分である。この様にトリウム系列の娘核種の半減期は比較的短い。また親核のトリウムは可溶性の塩類を作らず、放射平衡*が崩れ難い。

*：放射平衡

娘核種の半減期が十分に短い場合、親核種から引き離されると娘核種は直ぐ無くなってしまいが、親核種と共に存在すると壊変して新たに出来る核種が加わり、急に数を減ずる事無く両者が同じ割合で減少する。この場合、娘核種と親核種とは過渡平衡の状態にあると言い、ある短い時間をとって考えると親核種および娘核種の原子数は一定であるとみなしても良い。この様な状態を永続平衡といい、過渡平衡と併せて放射平衡と言う。

(2) 自然放射能探査の方法

測定はNaI（ヨウ化ナトリウム）シンチレーションプローブ（検出器）を測点位置の地表面に置いた状態で、300秒間連続的に計測を行った。シンチレーション検出器は図-2-2-4の様な構造をしたもので、 γ 線がシンチレーターに当たると蛍光を発生し、この蛍光を光電子増倍管で増幅し電気信号に変換している。

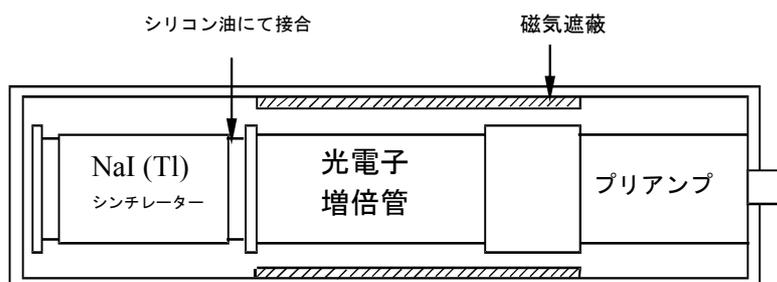


図- 5.1.4 シンチレーションプローブの構造

(3) 解析方法

測定値はエネルギー [MeV] ごとの強度（カウント数）として得られる。各測点でのスペクトル図は巻末に示す。このスペクトル図から、K（カリウム）、Bi（ビスマス）、Tl（タリウム）の強度をそれぞれ抽出した。Kは最も高い強度を示し、亀裂に関係なく存在する。またBiやTlは不活性ガスであるラドン（Rn）の濃度に相関するため開口性の亀裂の存在を反映すると考えられている。このため調査目的を考えるとBiやTlの測定値の高い測点に注目する必要があるが、実際には各測点での地表条件などの違いが影響するため、ここでは比をとる（無次元化する）ことでこの差異を軽減させている。

γ 線異常の判定基準については絶対的なしきい値は設けられておらず、調査地域の地質構成や測定条件等により異なり相対的なものとなる。

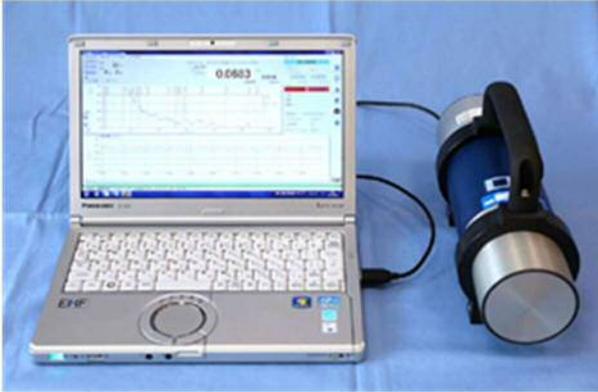
今回は各値を「低強度：平均値未満」「中強度：平均値以上～平均値＋標準偏差値以下」「高強度：平均値＋標準偏差値以上」の3段階に区分し、強度分布を表現する。

(4) 機器仕様

今回の調査で使用する自然放射能探査測定器は「 γ 線スペクトロメータ EMF-211 型：EMFジャパン（株）製」である。下表に主な仕様を示す。

表- 5.1.1 γ 線スペクトロメータ 機器仕様

γ 線スペクトロメータ EMF-211 型 (EMF ジャパン (株) 製)	
・測定放射線	γ 線
・シンチレータ	NaI (Tl) ϕ 3inch \times 3inch
・ γ 線測定エネルギー範囲	0.03 \sim 3 MeV
・チャンネル数	1024ch
・PC インターフェイス	USB
・電源	5V - 0.15A (USB 経由でデータ収録 PC より供給)
・エネルギー分解能	662keV において $6.5 \pm 0.5\%$
・使用温度範囲	-10 \sim +40 $^{\circ}$ C (但し急激な温度変動及び結露が無いこと)
・寸法、質量	ϕ 92mm \times 315mm、約 3.4kg
・付属データ収録 PC	Windows 8



(5) 自然放射能探査の結果

今回の調査では、調査対象地における断裂系の構造の存否についての情報を得る目的で、自然放射能探査を実施した。調査対象地では、可能な限り舗装部分や地下埋設物等を避ける様に測定に際しては十分に注意を払った。測点は図-5.1.5に示すように、電磁探査実施箇所やその周辺域に12点配置した。

測定はNaIシンチレーション検出器を格納したケースを地表においた状態で300秒間の連続測定を行った。核種の ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl を、それぞれ以下ではK（カリウム）、Bi（ビスマス）、Tl（タリウム）と略称する。

測定値及び核種比の統計値をとりまとめ、自然放射能強度統計値として表-5.1.2に示す。また各測点の測定結果表は表-5.1.3に示す。結果図として図-5.1.6～7にBi/KならびにBi/Tlの強度分布図を作成し示している。「平均値未満」：低強度（緑）、「平均値以上～平均値+標準偏差値以下」：中強度（黄）、「平均値+標準偏差値以上」：高強度（赤）の3段階に区分し強度分布を表現した。また図-5.1.8にそれぞれの核種比における強度分布変化のグラフを作成し示している。

調査対象地における強度分布状況を見ると、Bi/KとBi/TlのいずれにおいてもR3（北側神社）、R5（南西側更地）、北東側の既存泉に近いR1（更地）やR9（公園）で比較的高強度部分が見られる。それ以外では、Bi/Kにおいては南側のR6（更地）や東側のR8（公園）、Bi/Tlにおいては旧国民宿舎のR4にやや高強度部分が点在する。概ね北東側の既存泉付近や旧国民宿舎周辺域の標高の高い台地上に比較的高強度部分を見いだすことが出来る。これらの高強度分布箇所については、周辺と比較して岩盤中の亀裂が多い箇所が分布することが考えられる。

表- 5.1.2 指標核種における自然放射線強度（測点数 12）

測点番号	K40	Bi214	Tl208	TOTAL	Bi/K	Tl/K	Bi/Tl
最大値	1641	251	252	120509	0.24107	0.21205	1.26144
最小値	896	119	136	61850	0.10105	0.11003	0.82540
平均値	1339.7	194.5	194.2	88870.3	0.14742	0.14707	1.00651
標準偏差	207.8	37.0	35.5	14007.8	0.03328	0.02924	0.12669
AVE+STD	1547.5	231.5	229.7	102878.1	0.18070	0.17631	1.13320

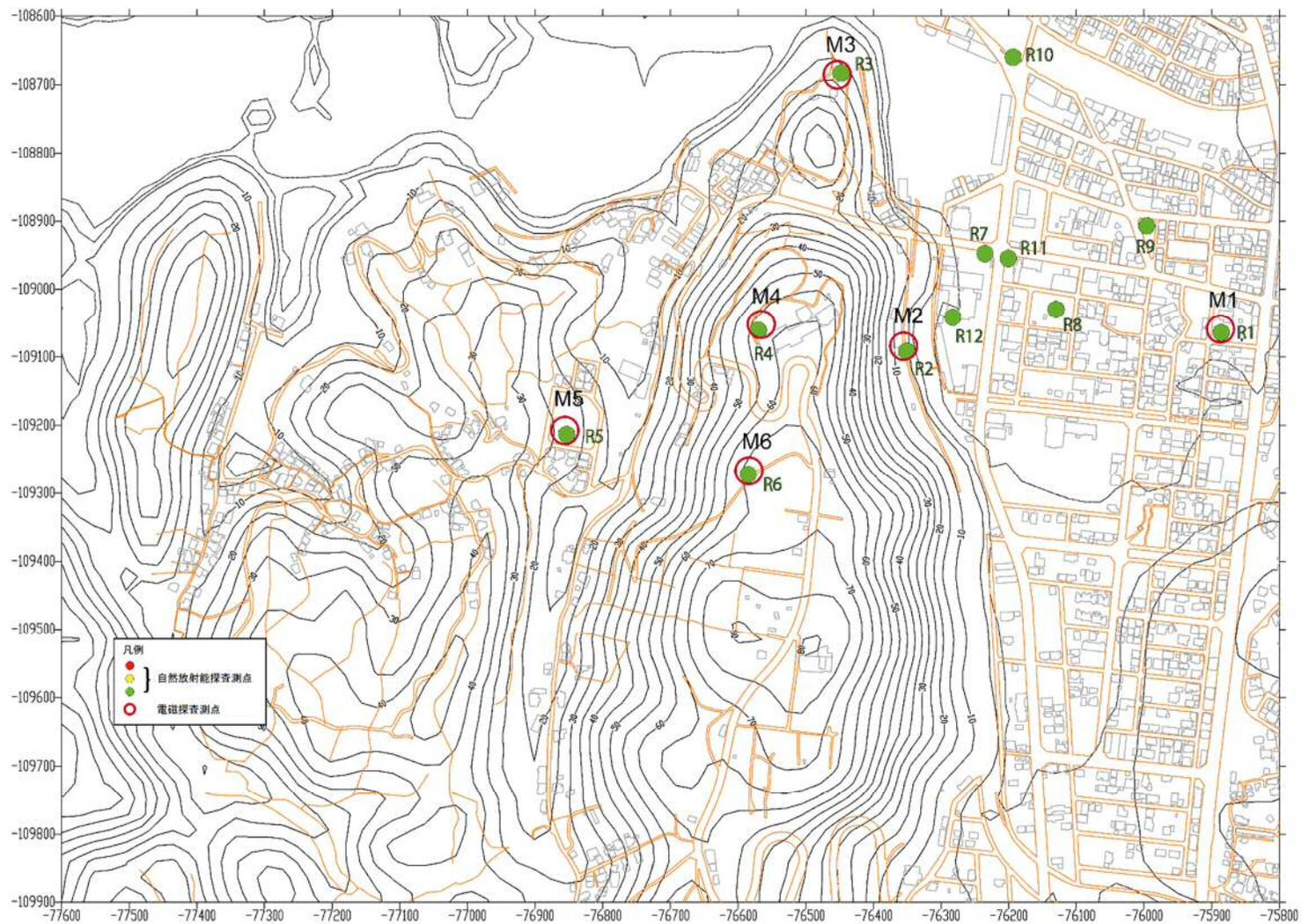


图- 5.1.5 测点位置图

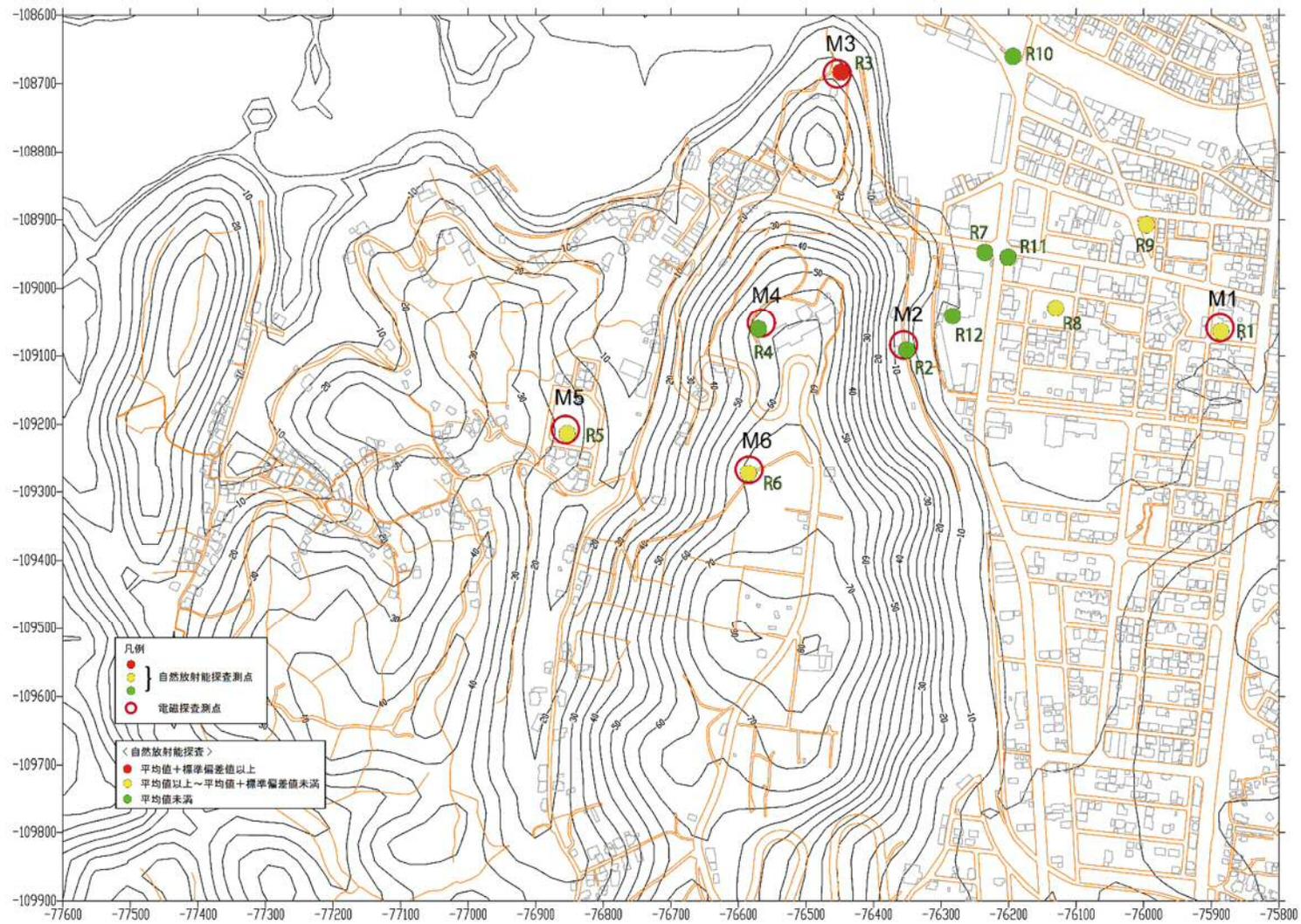


圖- 5.1.6 強度分布 (Bi/K)

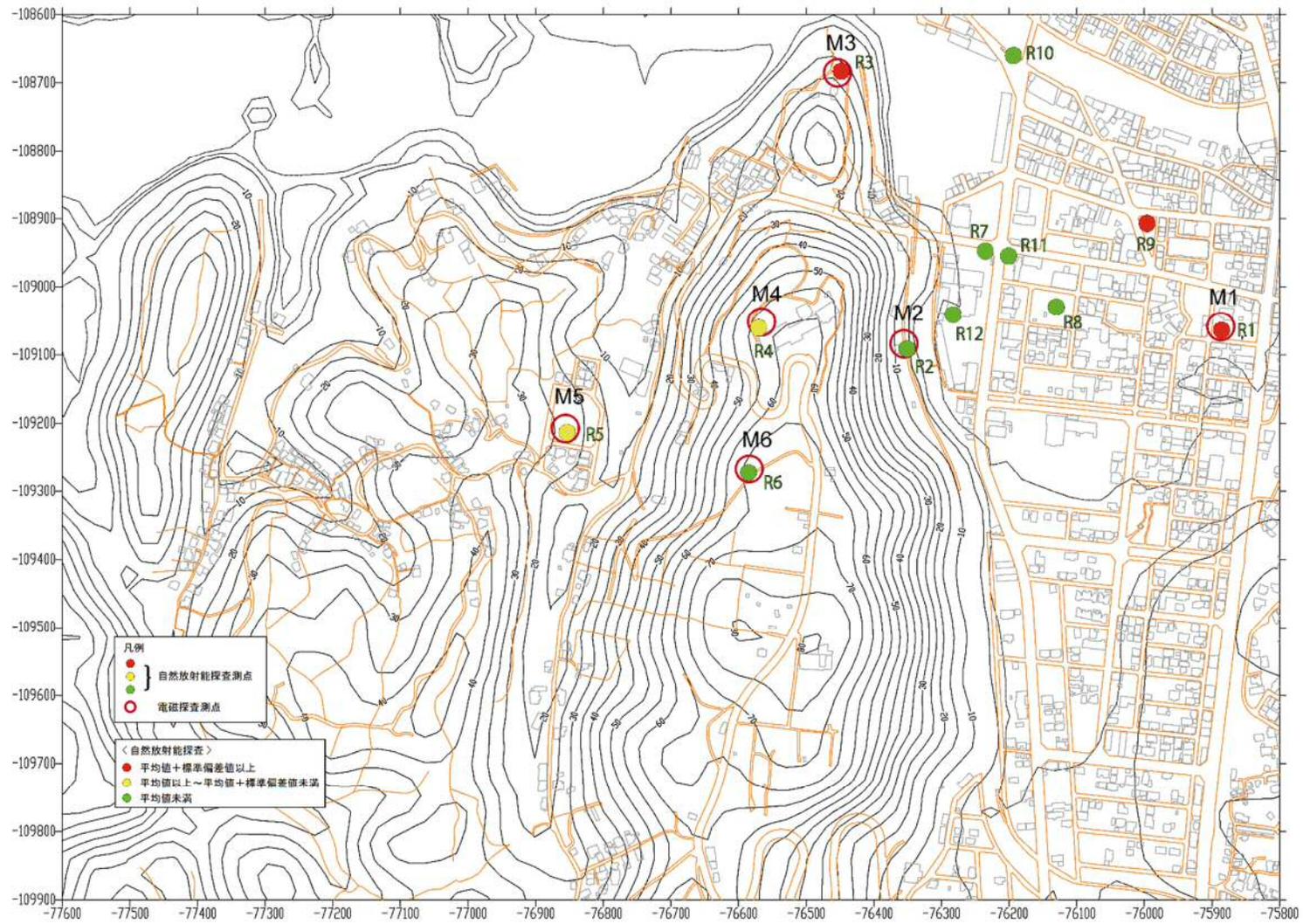


圖- 5.1.7 強度分布 (Bi/Tl)

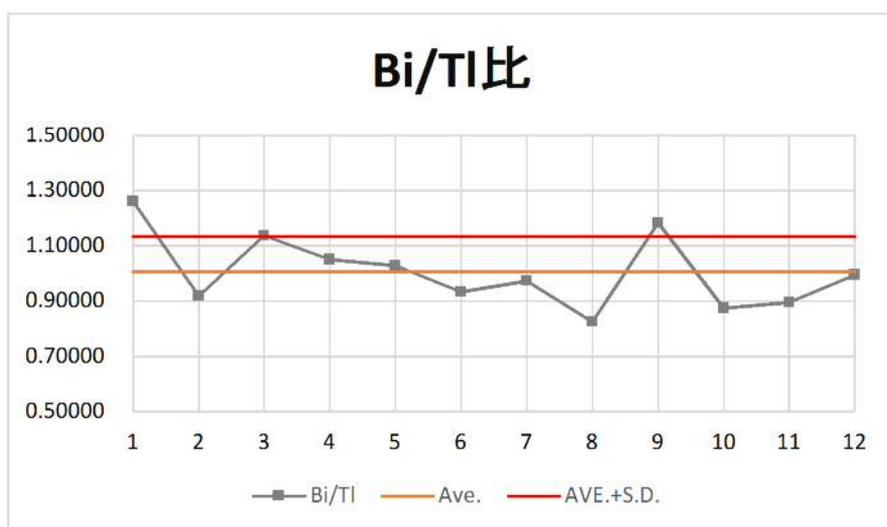
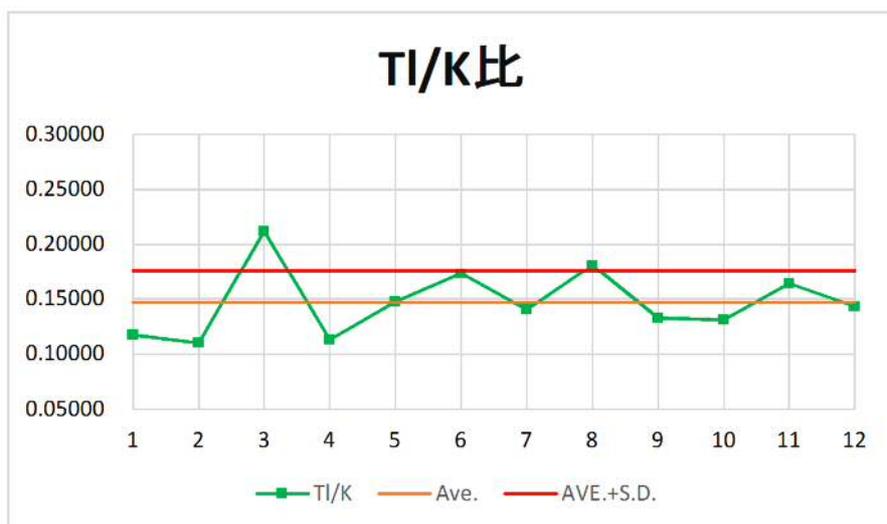
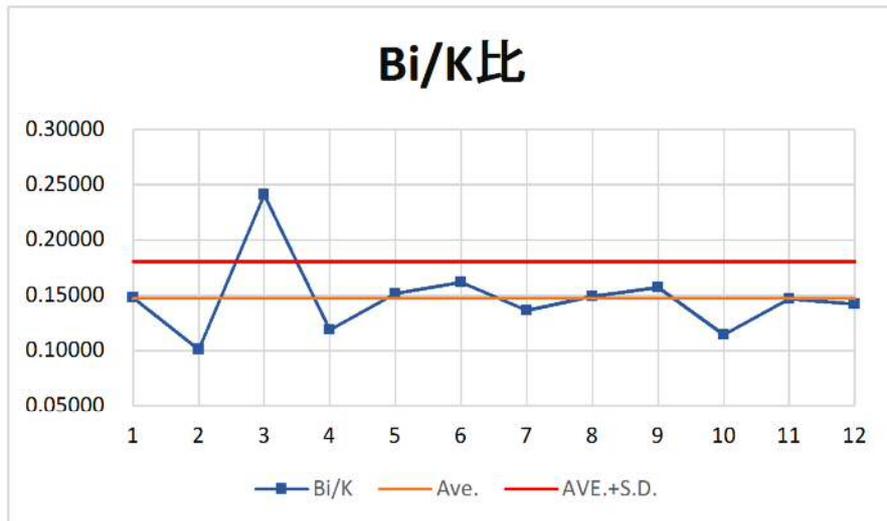


図- 5.1.8 核種比の強度分布

表- 5.1.3 測定結果表

測点番号	K40	Bi214	Tl208	TOTAL	Bi/K	Tl/K	Bi/Tl
1	1305	193	153	83221	0.14789	0.11724	1.26144
2	1336	135	147	82032	0.10105	0.11003	0.91837
3	896	216	190	75122	0.24107	0.21205	1.13684
4	1573	187	178	88628	0.11888	0.11316	1.05056
5	1641	249	242	120509	0.15174	0.14747	1.02893
6	1229	199	213	85539	0.16192	0.17331	0.93427
7	1341	183	188	88871	0.13647	0.14019	0.97340
8	1395	208	252	100007	0.14910	0.18065	0.82540
9	1596	251	212	102427	0.15727	0.13283	1.18396
10	1039	119	136	61850	0.11453	0.13090	0.87500
11	1397	205	229	93404	0.14674	0.16392	0.89520
12	1328	189	190	84834	0.14232	0.14307	0.99474

5.2. 無人航空機での撮影

現場着手時は、測定値の現況を受発注者間で共有することを目的に無人航空機で上空写真の撮影を行った。



図- 5.2.1 CSAMT測定位置 (M1～4)



図- 5.2.2 CSAMT測定位置 (M5~6)

以上