

第 II 部

第Ⅱ部 各 論

第1章 物理探査

1.1 調査概要

1.1.1 調査地区

クリブ・メジェス・エルバブ地域のほぼ中央部に位置するバジナ・ケビラ地区とシリアナ地区で物理探査を実施した。また、本年度のボーリングで鉱化帯を捕捉したラクワット・アルグブ・アダマ地区においても追加の物理探査を実施した。物理探査を適用したバジナ・ケビラ地区とシリアナ地区の位置及び調査範囲を示した調査地域位置図を図6に示す。

(1) バジナ・ケビラ地区 (図7)

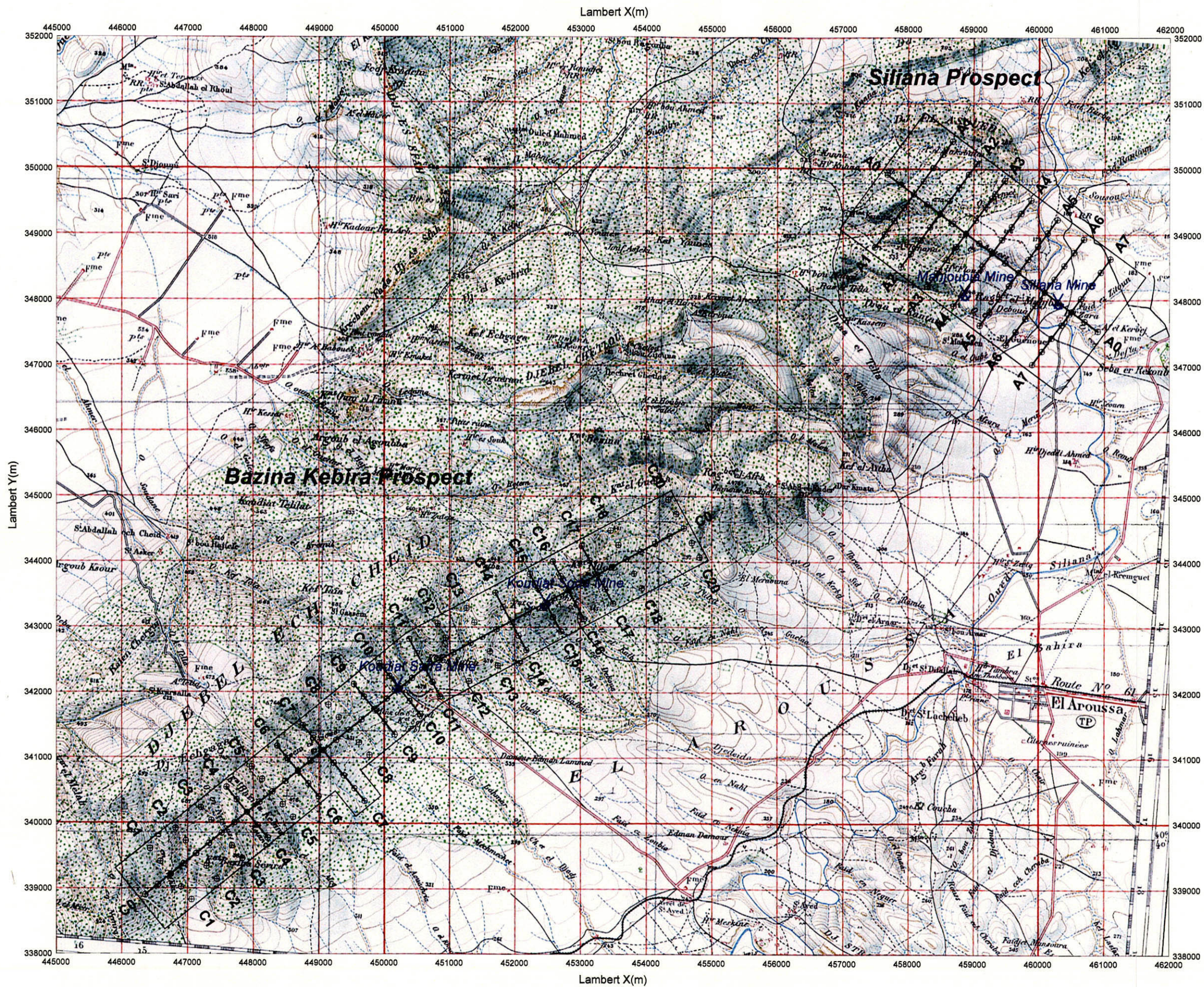
バジナ・ケビラ地区はクリブ・メジェス・エルバブ地域の中央部をNE-SW方向に延びる標高600～800mのJebel Ech Chied丘陵の南東側斜面に位置し、その南東には標高250～300mのEl Aroussa平野が広がっている。調査範囲はSidi Ayed 鉱山跡をほぼ中心としたNE-SW方向に10km、NW-SE方向に1kmの長方形を示す。植生は国家によって管理された針葉樹林が広がり、南西に向かって疎らになる傾向がある。北西側丘陵頂部と南東側山麓部の一部は小麦やオリーブの畑作地となっている。

Jebel Ech Chied 丘陵は三畳系のダイアピルによって形成された丘陵で、調査を実施した南東側は平均斜度約20°の比較的急な斜面となっている。この丘陵からEl Aroussa 平野へ向かって南東方向に河川が流れている。これらの河川は雨期だけに水が流れる涸れ川が多いが、ダイアピルや第四系の表層部は比較的柔らかな岩質であるため、浸食によって狭くて深い沢筋を形成し、両岸が40～90°の崖錐となっている箇所も少なくない。

本調査地区には、三畳系と白亜系又は新第三系の構造に沿って、南西から順にBazina Kebira, H'Zamel Assoued, Kodiat Safra, Kodiat Soda, Kodiat Tilletなどの鉱徴地が点在する。Kodiat Safra, Kodiat Sodaは28,000tを出鉱したSidi Ayed 鉱山の主要鉱床であり、旧坑道や地表採掘跡がいくつも残されている。Kodiat Tilletなどにも小規模な採掘跡が認められる。

(2) シリアナ地区 (図8)

シリアナ地区はバジナ・ケビラ地区の北東約5kmに位置する。調査範囲はWNW-ESE方向に4km、NNE-SSW方向に2kmの長方形である。調査範囲の中央部から北西はJebel Ech Chied 丘陵に連なる標高250～300mの丘陵地帯であり、南東部はEl Aroussa 平野の北端部にあたり、標高150～200mの平野が広がっている。南東部をシリアナ川が南から北へ流れている。シリアナ川はクリブ・メジェス・エルバブ地域周辺の比較的大きな川の一つであり、常時水が流れている。本地区調査中に大雨が降った時には、増水で渡河できなく調査に支障をきたしたこともあった。そのほかの小河川は西北西から東南東のシリアナ川に向かって流れている。植生は川や沢沿いに疎林がある以外は、



LEGEND

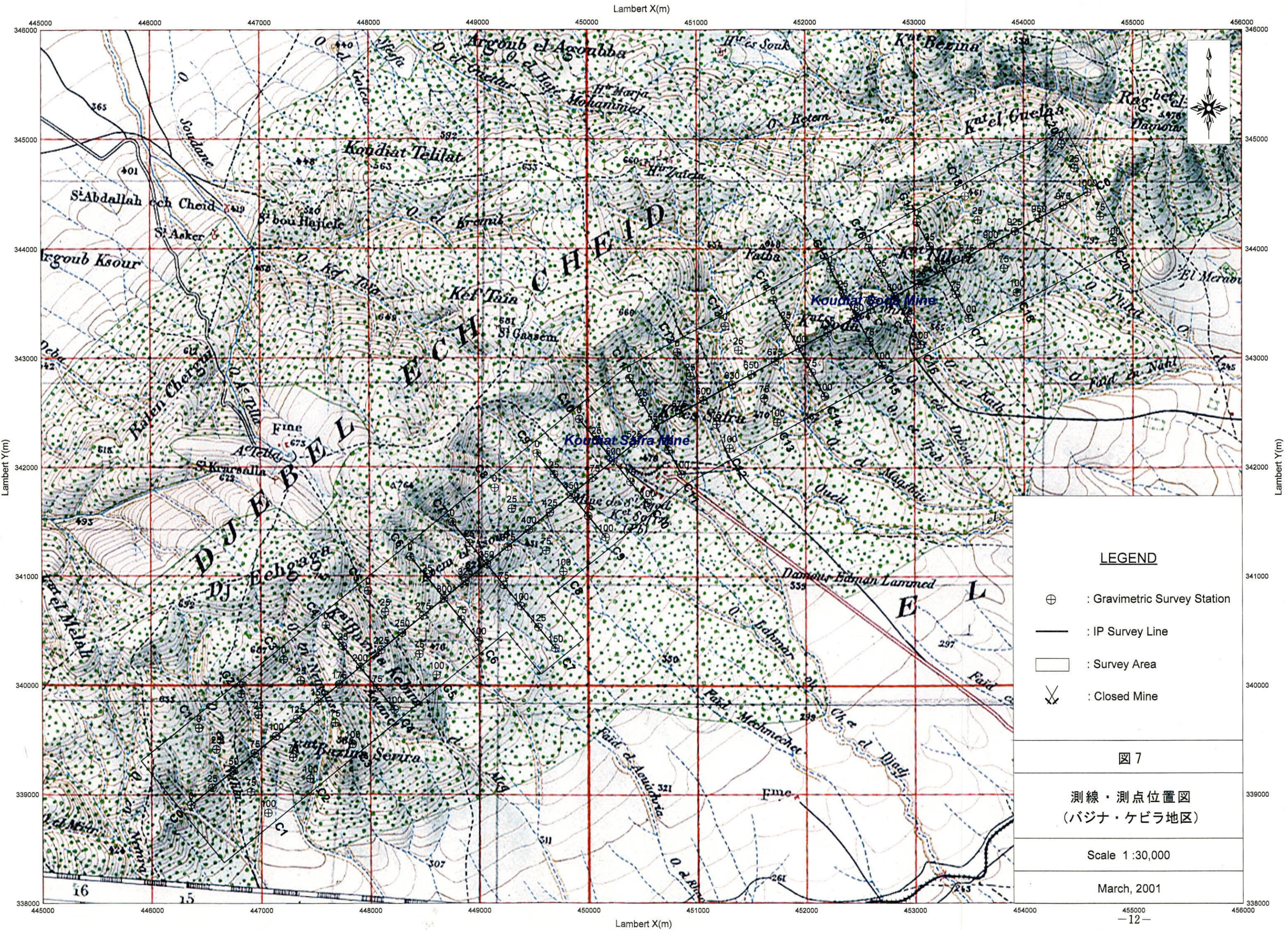
- ⊕ : Gravimetric Survey Station
- : IP Survey Line
- : Survey Area
- ⊗ : Closed Mine

図 6

調査地域位置図 (物理探査)

Scale 1 : 60,000

March, 2001



小麦やオリーブの耕作地が広がっている。地形の起伏はバジナ・ケビラ地区ほど急ではないが、小さな沢では浸食によって崖錐を形成しているところもある。

本地区には中央部の丘陵上に Mahjobia, 南東部の平野に Siliana の2つの鉱徴地が存在する。Mahjobia 鉱徴地には小規模に稼行された跡が残っている。Siliana 鉱徴地はシリアナ川の東岸に位置し、その付近の耕作地には方鉛鉱などを含む鉱石の転石が認められる。

1.1.2 調査手法・数量

本調査で実施した物理探査は重力法と IP 法である。各地区での測定量は表4のとおりである。

表4 物理探査測定量

物理探査手法	項 目	バジナ・ケビラ地区	シリアナ地区	計
重力法	測点数	120 点	74 点	194 点
IP法	測線長	20.5 km	18 km	38.5 km
	測定数	805 点	740 点	1,545 点

両手法とも、調査地を縦断する基線及び基線に直交する測線上で実施した。両地区で設定した測線の一覧を表5・6に示す。

表5 バジナ・ケビラ地区物理探査測線仕様一覧

Line	Stations	Length (km)	Angle	Crossing to C0	x(UTM)	y (UTM)	Applied Survey
C0	201 (0~1,000)	10	N50°E (0~550)		527119.84	4022441.49	Gravity IP
			N60.5°E (550~1000)		535289.27	4028128.31	
C1	21 (0~125)	1	N40°W	C0-50	527185.53 527823.86	4023145.52 4022375.8	Gravity
C2	21 (0~100)	1	N40°W	C0-100	527570.89 528208.57	4023463.9 4022694.97	
C3	21 (0~100)	1	N40°W	C0-150	527956.26 528593.28	4023782.27 4023014.13	Gravity
C4	21 (0~100)	1	N40°W	C0-200	528341.62 528977.99	4024100.65 4023333.3	
C5	21 (0~100)	1	N40°W	C0-250	528726.99 529362.7	4024419.02 4023652.46	Gravity
C6	21 (0~130)	1	N40°W	C0-300	529112.35 529747.42	4024737.4 4023971.63	
C7	26 (0~150)	1.5	N40°W	C0-350	529497.72 530449.33	4025055.77 3894721.32	Gravity IP
C8	21 (0~100)	1	N40°W	C0-400	529883.08 530516.84	4025374.15 4024609.96	
C9	21 (0~100)	1	N40°W	C0-450	530268.45 530901.55	4025692.52 4024929.12	Gravity IP
C10	21 (0~100)	1	N40°W	C0-500	530653.81 531286.26	4026010.9 4025248.29	

表5(つづき) バジナ・ケビラ地区物理探査測線仕様一覧

Line	Stations	Length (km)	Angle	Crossing to C0	x(UTM)	y (UTM)	Applied Survey
C11	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-550	531110.12	4026390.08	Gravity IP
					531593.78	4025514.86	
C12	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-600	531547.6	4026631.84	Gravity
					532031.26	4025756.62	
C13	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-650	531985.08	4026873.6	Gravity
					532468.74	4025998.38	
C14	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-700	532422.56	4027115.36	Gravity IP
					532906.22	4026240.14	
C15	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-760	532947.54	4027405.47	Gravity IP
					533431.2	4026530.25	
C16	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-800	533297.53	4027598.88	Gravity IP
					533781.18	4026723.66	
C17	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-850	533735.01	4027840.64	Gravity IP
					534218.66	4026965.42	
C18	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-900	534172.49	4028082.4	Gravity
					534656.14	4027207.18	
C20	21 (0~100)	1	N29.5°W	C0-1000	535047.45	4028565.92	Gravity
					535531.1	4027690.7	

表6 シリアナ地区物理探査測線仕様一覧

Line	Stations	Length (km)	Angle	Crossing to A0	x(UTM)	y (UTM)	Applied Survey
A0	81 (0~400)	4	N54.5°W		538344.16	4033557.9	Gravity IP
					541583.02	4031210.59	
A1	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-50	538162.2	4032454.81	Gravity IP
					539335.79	4034074.18	
A2	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-100	538567.05	4032161.4	Gravity IP
					539740.74	4033780.91	
A3	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-150	538971.89	4031867.99	Gravity IP
					540145.69	4033487.64	
A4	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-200	539376.74	4031574.59	Gravity IP
					540550.64	4033194.37	
A5	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-250	539781.59	4031281.18	Gravity IP
					540955.58	4032901.1	
A6	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-300	540186.43	4030987.77	Gravity IP
					541360.53	4032607.83	
A7	41 (0~200)	2	N35.5°E	A0-350	540591.28	4030694.36	Gravity IP
					541765.48	4032314.56	

物理探査結果の解釈に資するため、両地区内の露頭及び周辺地区のボーリング孔や鉱山内から岩石試料 49 個を採取し、密度測定、比抵抗測定及び分極率測定の室内試験を実施した。

また、第 1 年次に物理探査を行ったラクワット-アルグブ・アダマ地区においては、IP 法の分極率異常に対して実施したボーリングで鉱化帯が捕捉された。その鉱化帯の南西部への広がりを検討するため、第 1 年次には重力法及び IP 法を適用しなかった測線 L1・L2 の 2 測線(各 1km 長)においても物理探査を適用した。

1.2 調査方法

1.2.1 測線設定

光波測距儀又はトランシットコンパスを用いた解放トラバース測量により、バジナ・ケビラ地区 20 測線(C0～C20)、シリアナ地区 8 測線(A0～A7)の物理探査用測線を設定した。測線上には、原則として 50m 間隔に木杭で測点を設けた。例に示したように測線名と始点からの距離の 1/10 の値を組合せて測点名とした。

例) 測点名 C0-125(C0: 測線名, 125: 始点からの距離 1,250m)

バジナ・ケビラ地区では Sidi Ayed 鉱山を中心に、鉱床が胚胎する白亜系と三畳系の接触部に沿って全長 10km の基線 C0 をまず設定し、50m 間隔で測点を設けた。白亜系と三畳系の接触部は湾曲しているため、基線 B0 を Sidi Ayed 鉱山付近で屈曲させ、南西側(測点 C0-0～C0-550)は方向角 N50°E、北東側(測点 C0-550～C0-1000)は方向角 N60.5°E とした。南西端を始点として測点名を与えた。基線 C0 と直交する測線 C1～C20 を原則 500m 間隔で設定した。これらの測線の始点は北西端とし、原則として全長 1km、始点から 500m で基線 C0 と交差させた。H'Zamel Assoued 鉱地を通る測線 C7 は終点側を 500m 延長し、測線 C15 は Kodiat Soda 鉱床の頂上を通るように、基線 C0 に沿って北東方向に 100m 平行移動した。

シリアナ地区ではシリアナ鉱地を通る全長 4km の基線 A0 をまず設定し、50m 間隔で測点を設けた。方向角 N54.5°E とし、北西端を始点として測点名を与えた。基線 A0 と直交する全長 2km の測線 A1～A7 を 500m 間隔で設定した。これらの測線の始点は南西端とし、始点から 500m で基線 C0 と交差させた。

設定した測線は国土地理院の設定した座標既知点と結ぶ測量を行って位置座標を求めた。この測量で求めた位置座標はランベルト投影法による北テュニジア測量座標系(以下、ランベルト座標系)であるため、国土地理院に依頼して緯度経度及び UTM 投影法(Universal Traverse Mercator's projection)による座標系(以下 UTM 座標系)に変換した。

なお、既存の地形図、地質図、広域重力図などはランベルト座標系で作図されているため、物理探査に関連する図面はこれに準じて作成した。

各測点の標高は重力探査で要求される±10cm の精度を満たすため、ソキア社製デジタルオートレベル SDL30-1 を用いた水準測量で決定した。

1.2.2 重力法

本調査で実施した重力法に関する調査の流れを図 9 に示した。

バジナ・ケビラ地区に設定した 21 測線及びシリアナ地区に設定した 8 測線全てを利用して、重力探査を実施した。原則として、250m の間隔で全 54 測点の重力測定を行った。本調査地区周辺で、ONM は 1997 年度に重力探査プロジェクト CG-01 を実施している。CG-01 では約 1km 間隔の格子点周辺に測点を設ける重力探査を実施し、縮尺 1:50,000 の重力図幅を作成している。バジ

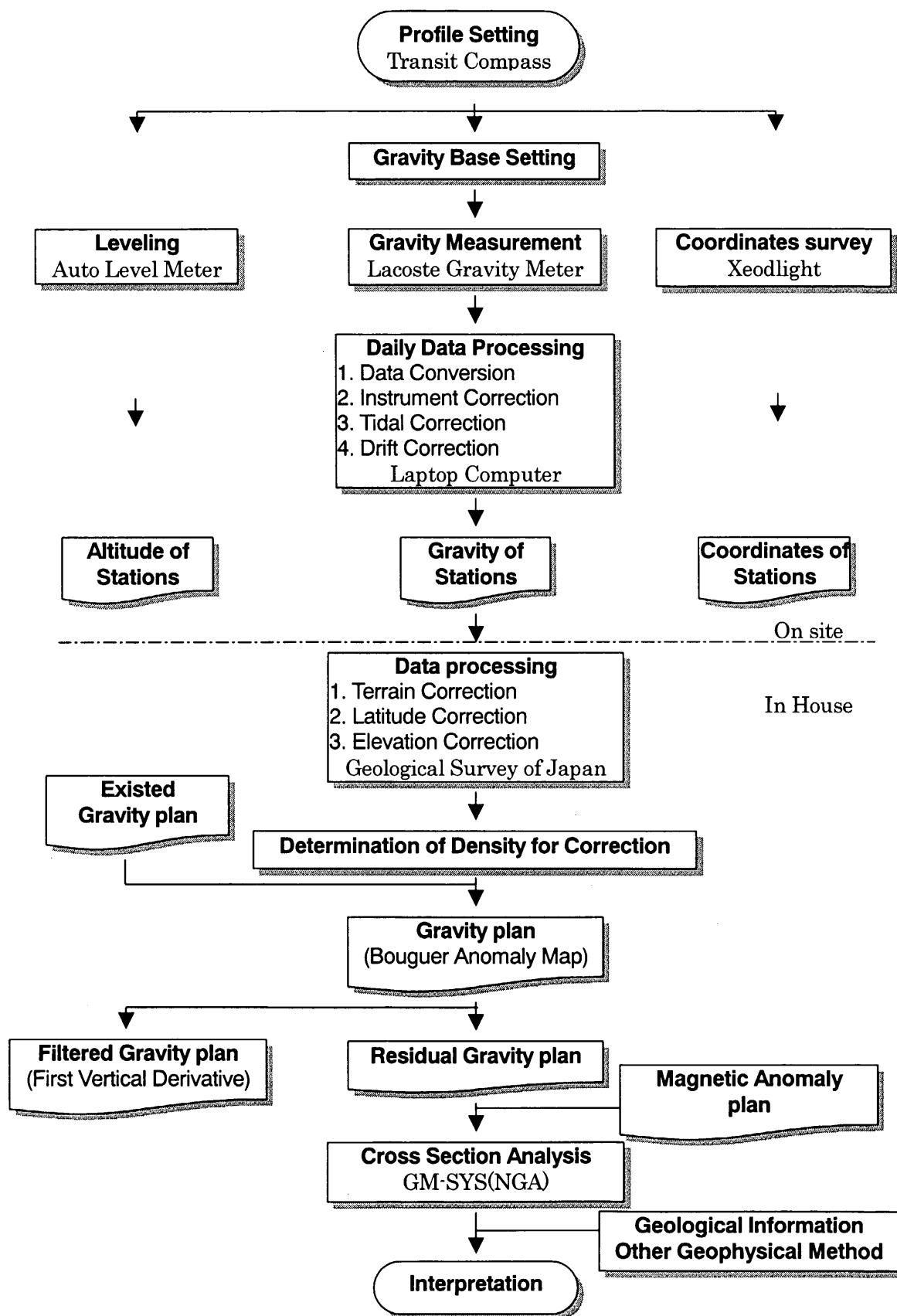


図9 重力法調査フロー図

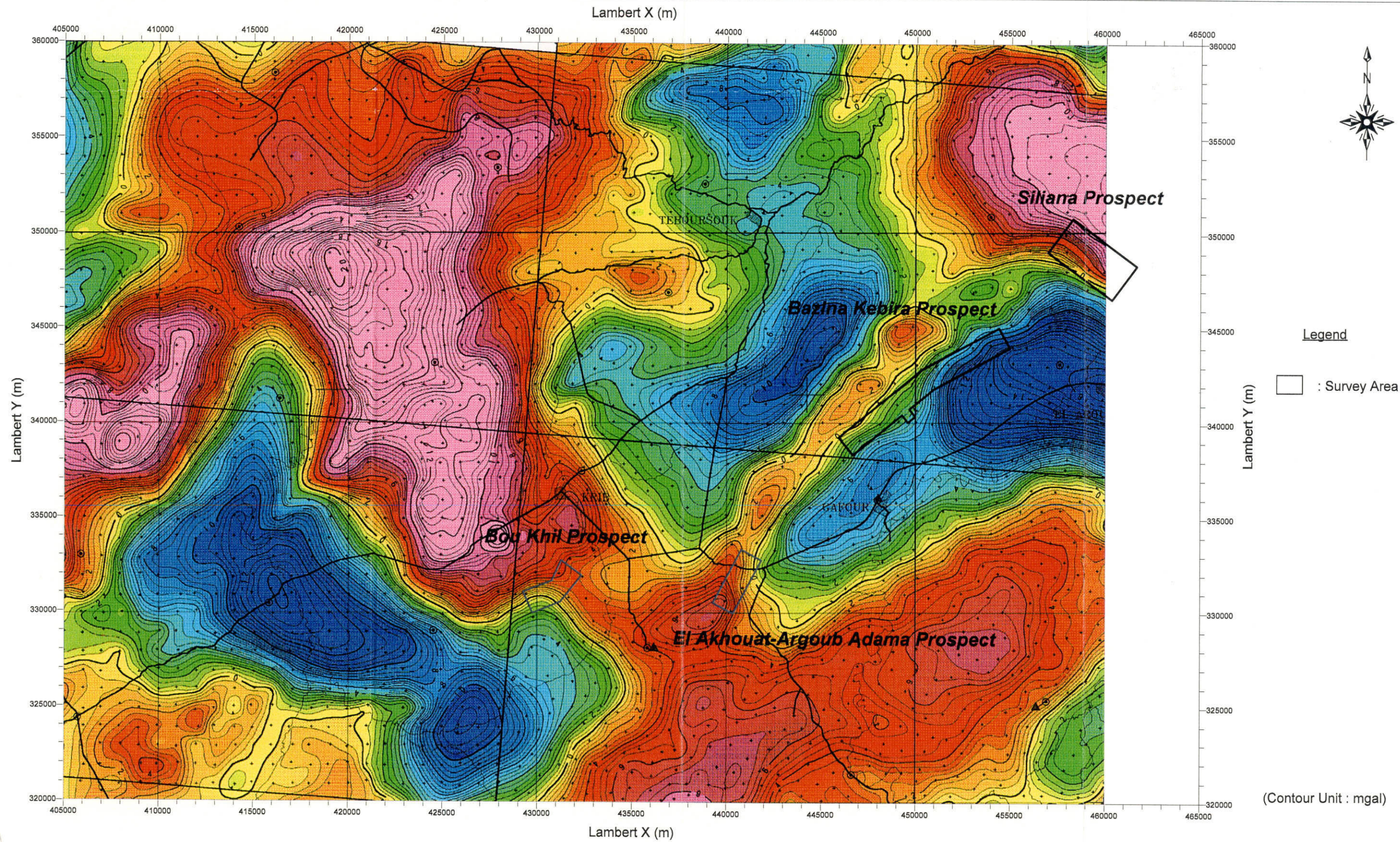


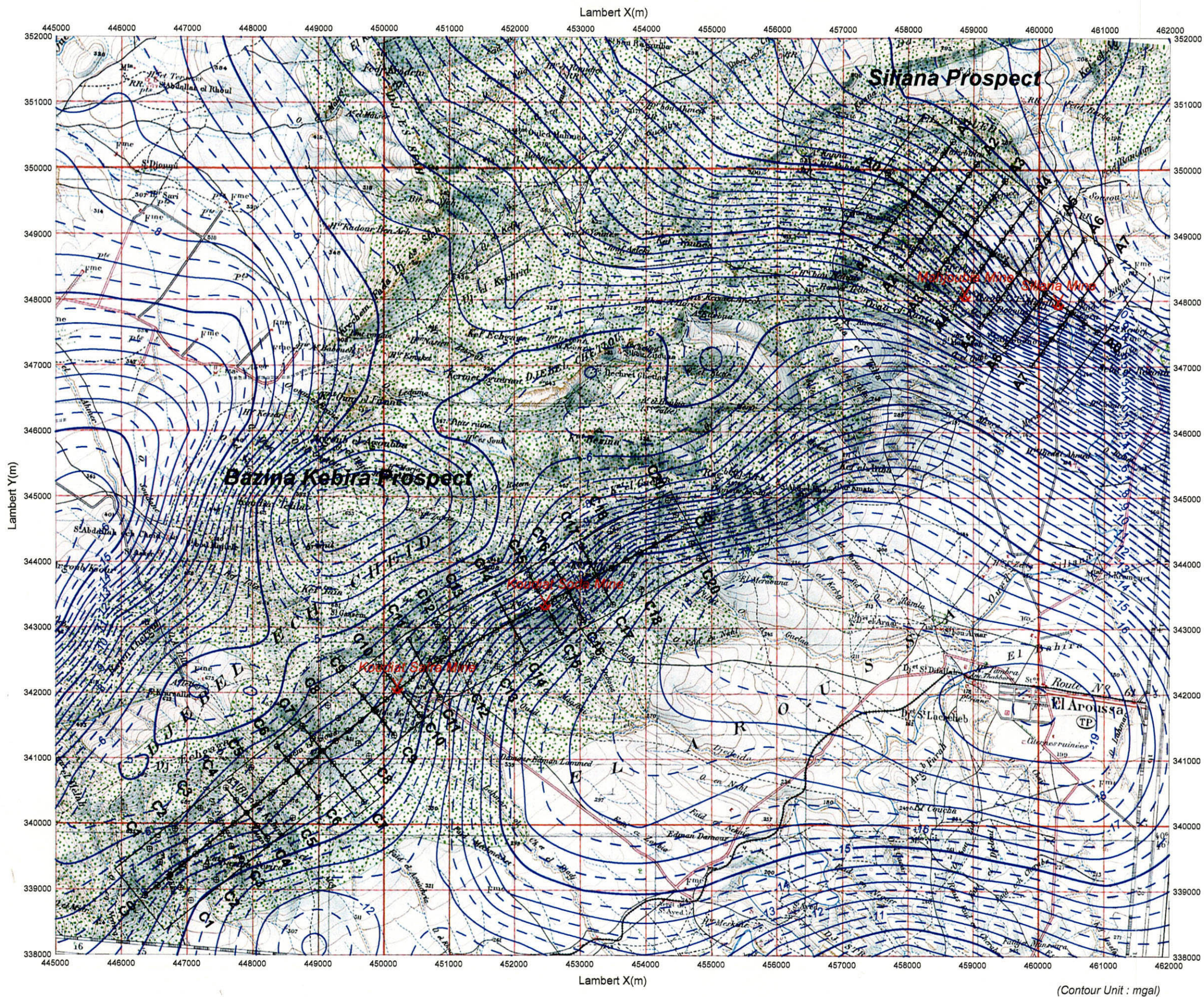
図 10

広域重力分布図(補正密度:2.33g/cm³)

Scale 1 : 200,000

March, 2001

Part of ONM, 1999



LEGEND

- ⊕ : Gravimetric Survey Station
- : IP Survey Line
- : Survey Area
- ✕ : Closed Mine

図 11

広域ブーゲ異常図
(補正密度 : 2.4g/cm³)

Scale 1 : 60,000

March, 2001

ナ・ケビラ地区はCG-01で作成されたTeboursouk重力図幅の中央部に、シリアナ地区は同図幅の東部にそれぞれ位置する。1998年に実施された重力探査プロジェクトCG-02で作成された縮尺1:200,000のコンパイル図から本調査地区周辺を抽出した広域重力分布図を図10に、縮尺1:50,000のTeboursouk重力図幅から抽出した広域ブーゲ異常図を図11に示した。

重力測定は米国LaCoste & Romberg社製D型重力計(読取精度0.1μgal)を利用した既知重力点との相対測定で行った。相対測定の基準とする準基点ST1000を調査地南方のGaafourにあるEmirホテルの中庭に設け、CG-02で設定された重力基点10及び12との2度ずつの相対測定を行って重力値を決定した。測点の測定前後にこの準基点ST1000を測定する閉塞測定を1日1回以上行った。1閉塞あたり最大誤差は最大で0.1mgalであった。

各測点の重力値 $ABSG$ (mgal)は、相対重力値 RG と基点重力値 $ABSG(base)$ を使って以下のように求めた。

$$ABSG(station) = RG(station) - RG(base) + ABSG(base) \quad (1)$$

ただし、

$$RG = Reading * Factor + Cinst + Ctidal + Cdrift \quad (2)$$

$Reading$: 読取值, $Factor$: 読取值－重力値変換係数

$Cinst$: 器械高補正值, $Ctidal$: 潮汐補正值, $Cdrift$: ドリフト補正值

さらに、各測点の重力値から次式を使ってブーゲ異常値 Ab (mgal)を求めた。

$$Ab = ABSG - Gstand(\varphi) + Catm(h) + Cfree(h) + Cb(h, \gamma) + T(h, \gamma) \quad (3)$$

φ : 測点緯度, h : 測点標高(m), γ : 周辺地盤の密度(g/cm³)

ただし、右辺各項は以下のとおりである。

・標準重力値(1967年式)

$$Gstand(\varphi) = 978031.85 (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023462 \sin^4 \varphi) \quad (4)$$

・大気補正值

$$Gatm(h) = 0.87 - 0.000965h \quad (5)$$

・フリーエア補正值

$$Cfree(h) = \partial g / \partial h \cdot h = 0.3086h \quad (6)$$

・ブーゲ補正值

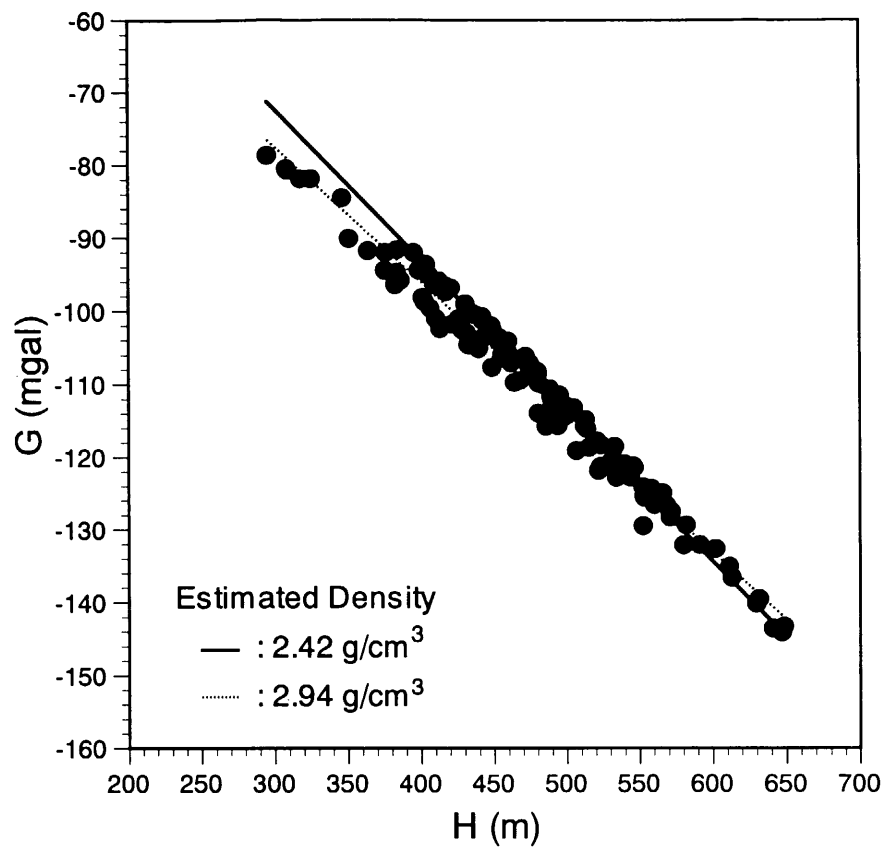
$$Cb(h, \gamma) = -2\pi G \gamma h = -0.04192\gamma h \quad (7)$$

π : 円周率, G : 万有引力定数

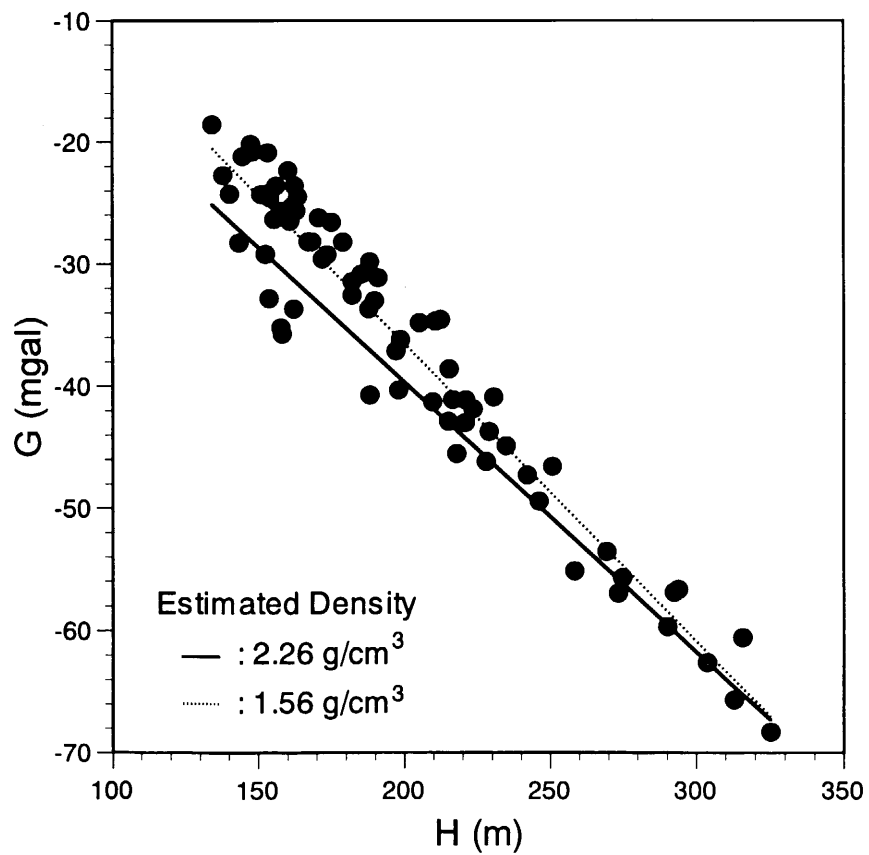
・地形補正值 $T(h, \gamma)$

GSJ(Geological Survey of Japan:地質調査所)地形補正方式(地質調査所重力探査研究グループ, 1989)を採用。

ブーゲ補正值や地形補正值に用いる周辺地盤の密度は、通常、下記の各手法から推定される適正密度を総合的に判断して決定する。



(a) バジナ・ケビラ地区



(b) シリアナ地区

図12 G-H関係図

① 岩石試料の密度測定結果

② G-H 相関図の勾配

G-H 相関図：縦軸に測定重力値と標準重力値の差，横軸に標高を採り，測定結果をプロットした相関図(図 12)

③ 数種類の仮定密度によるブーゲ異常図と地形図の比較(相関の最も少ない密度)

バジナ・ケビラ地区，シリアナ地区及び調査地周辺の鉍徴地で採取した岩石・鉍石試料の平均密度は $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ となった。バジナ・ケビラ地区の G-H 相関図では $2.42\text{g}/\text{cm}^3$ が妥当な密度と判断し，シリアナ地区の G-H 相関図では $2.26\text{g}/\text{cm}^3$ が妥当な密度と判断した。また，補正密度 2.3 と 2.4 のブーゲ異常図が比較的地形との相関が少ないと判断した。密度測定を行った岩石・鉍石試料は間隙率が大きく，低密度と予想される三畳系や第三系の試料が少ないうえ，偏在する鉍石が多かったので，かなり大きな平均密度になったと考えられる。バジナ・ケビラ地区では補正密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，シリアナ地区では補正密度 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ を採用して，ブーゲ異常の平面分布を表すブーゲ異常図(等重力線図)を作成した。

浅部の地下構造は短波長の重力異常を生じ，深部の地下構造は長波長の重力異常を生じる(図 13)。

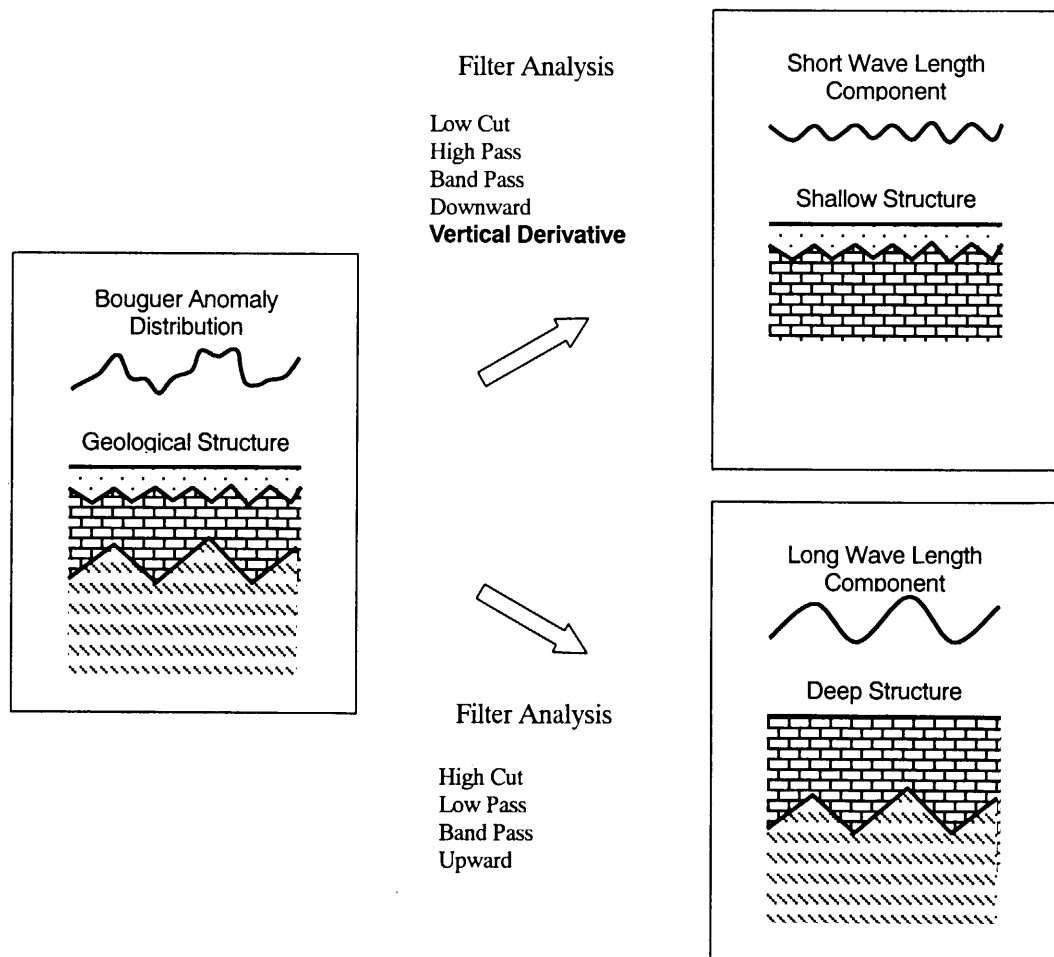
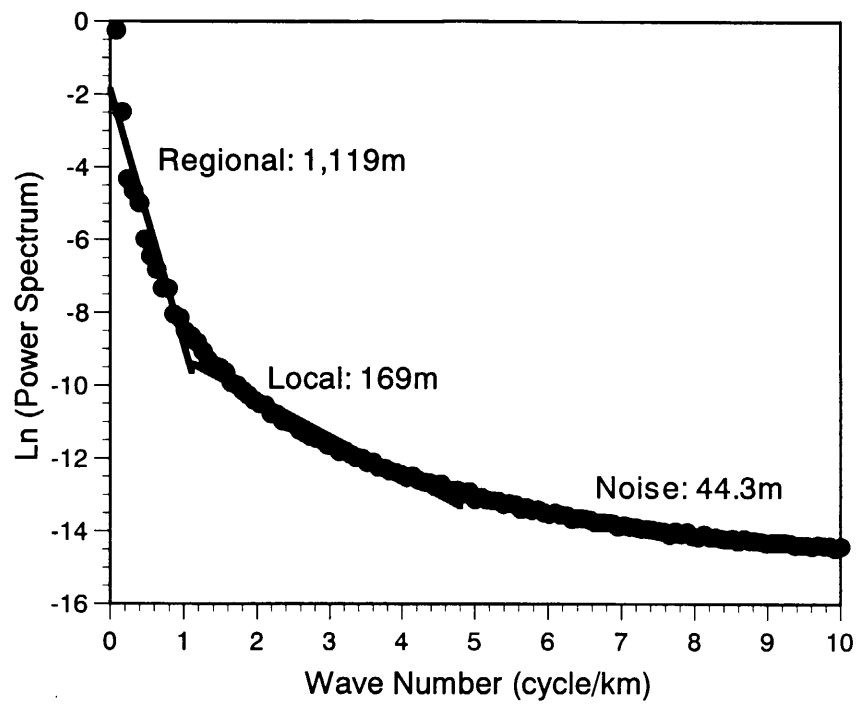
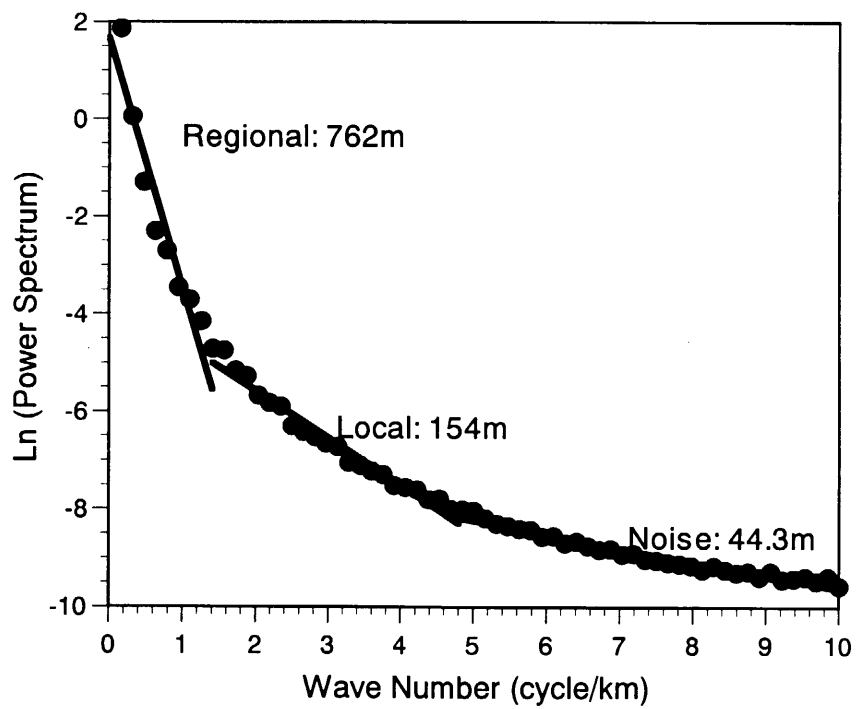


図 13 重力法フィルタ解析模式図



(a) バジナ・ケビラ地区



(b) シリアナ地区

図14 パワースペクトル図

観測されるブーゲ異常分布は短波長と長波長の重力異常の合成されたものである。ブーゲ異常分布を 2 次元フーリエ変換して、横軸に波数(空間周波数)を、縦軸にパワースペクトルの自然対数をとったパワースペクトル図(図 14)を分析すると、バジナ・ケピラ地区は 1,119m, 169m, 44m, シリアナ地区は 762m, 154m, 44m をそれぞれ平均深度とする地下構造による重力異常成分に分けられる。本調査は鉱床胚胎に関連する数 km 以浅の地下構造を対象としているので、ブーゲ異常分布から短波長成分を抽出する処理を行った。短波長成分の抽出には、ローカット又はバンドパス・フィルタ処理を行う方法と、長波長成分に相当する傾向面を差し引いた残差分布を求める方法がある。本調査ではローカット・フィルタの一種である鉛直 1 次微分フィルタ処理と傾向面残差処理の 2 種類の方法で短波長成分を抽出した。通常、傾向面は n 次多項式で表現されるような数学的曲面で近似したり、Upward(上方接続)のようなローパス・フィルタ処理で抽出したりする。粗い測点密度によるブーゲ異常図も短波長成分を表現できないので、本調査では測点密度 1/4 以下の CG-01 でのブーゲ異常分布を傾向面と見なした残差処理を行い、残差重力図を作成した。鉛直 1 次微分図からは、図 15 に示したように、正負のピークの間にある 0 の位置から断層や接触帯のような横方向の密度変化部を抽出することができる。

バジナ・ケピラ地区の 11 測線及びシリアナ地区の 8 測線について、残差重力に合うような測線下の地下構造を推定する断面解析を実施した。断面解析には米国 Northwest Geophysical Associates 社の重磁力断面解析ソフト GM-SYS(Version 3.6)を使用し、部分的にインバージョンを併用しながら地下構造モデルの形状と密度を会話型で決定した。参照とする残差重力値は残差重力図から読み取り、地下構造モデルの密度は各地区の補正密度に対する密度差とした。

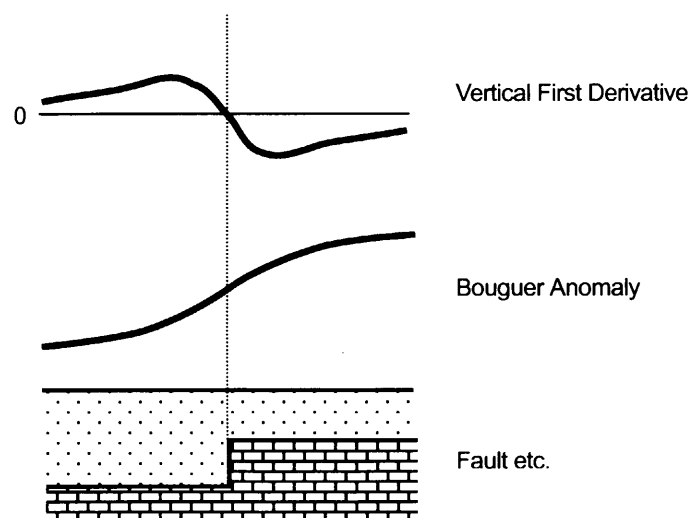


図 15 鉛直 1 次微分フィルタ効果模式図

1.2.3 IP 法

バジナ・ケピラ地区の 11 測線及びシリアナ地区の 8 測線について、下記の仕様による IP 法電気探査を図 16 に示す流れに沿って実施した。

- ・電極配置 ダイポール・ダイポール配置
- ・電極間隔 100m
- ・電極隔離係数 1～5
- ・送信電流 周波数 0.125Hz, Duty Cycle 50% の矩形波電流
- ・IP 測定法 時間領域法
- ・探査装置 発電機：Honda 社製 ET4500(最大出力 4.5kVA, 三相交流 200V)
 送信機：カナダ Phoenix 製 IPT-3(最大出力 800V-3.5kVA)
 受信器：カナダ Scintrex 社製 IPR-12(精度 1μV)

送信ダイポール C1-C2 に対して、6 測点を利用した 5 つの受信ダイポール P1-P2, P2-P3, P3-P4, P4-P5, P5-P6 で同時に測定を行った。各受信ダイポールでは、図 17 のような電位変化が観測される。電流 I (A) が送信されて観測電位が一定値に安定した時の 1 次電位 V_p (単位：V) を用いて 8 式から見掛比抵抗 ρ_a (単位：Ωm) を求めた。

$$\rho_a = K V_p / I \quad (8)$$

ここで、 K は電極配置係数であり、本調査で用いたダイポール・ダイポール配置では 9 式により求められる。

$$K = n(n-1)(n-2) \pi a \quad (9)$$

a ：電極間隔(m), n ：電極隔離係数, π ：円周率

送信電流が切断されて観測される 2 次電位 $V_s(t)$ (単位：mV) の減衰を用いて 10 式から分極率 M (単位：mV/V 又は%) を求めた。分極率の積分範囲(t_1 ：450msec～ t_2 ：1,100msec) は時間領域法で標準的に用いられている Newmont 標準の積分範囲に相当する。

$$M = \frac{1}{V_p(t_1 - t_2)} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (10)$$

1 回の測定で 10 波形以上のデータを取得し、重ね合わせて S/N 比を向上させた。しかしながら、平均 3A の大電流を流したにも係わらず、比抵抗が低いため、観測された 1 次電位 V_p が 1mV 以下になる場合が多かった。このように V_p が小さい場合には、見掛比抵抗の再現性は良かったが、滑らかな減衰曲線を得ることは困難であった。したがって、各測点で 2～3 回の測定を行い、比較的滑らかな減衰曲線を得られた回のデータを選んで測定値とした。なお、両地区とも NW-SE 方向の測線に比べ、NE-SW 方向の測線の方がノイズの影響を強く受けた。

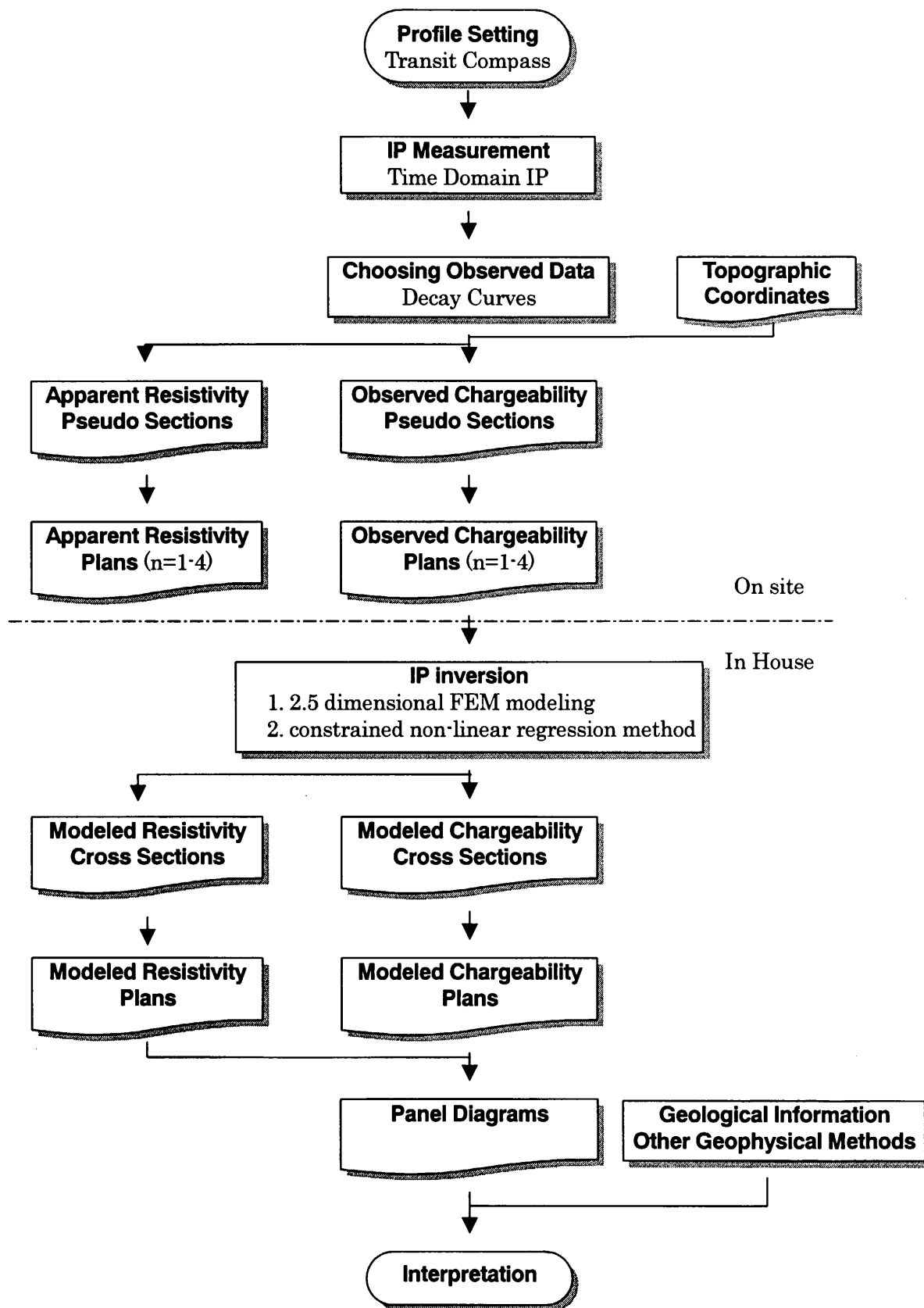
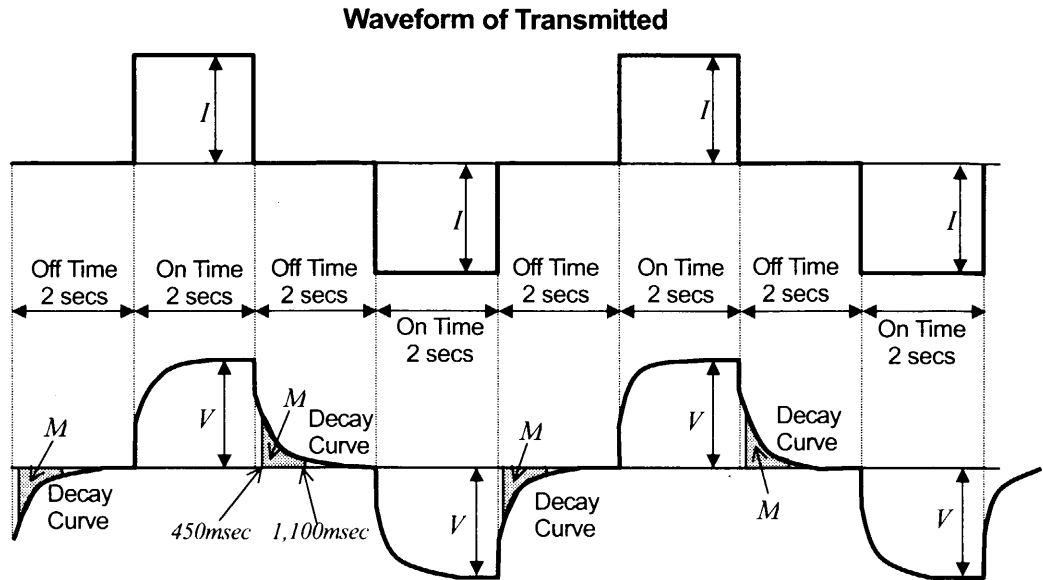


図 16 IP 法調査フロー図



Waveform of Received Voltage

図 17 時間領域 IP 法模式概念図

測定した見掛け抵抗と分極率を図 18 に示した方法でプロットしてコンターを描いた見掛け抵抗擬似断面図と分極率擬似断面図を作成した。また、電極隔離係数 $n=1\sim 4$ について、各電極隔離係数の測定値を抽出して、測線位置図上にプロットしてコンターを描いた見掛け抵抗分布平面図と測定分極率平面図を作成した。

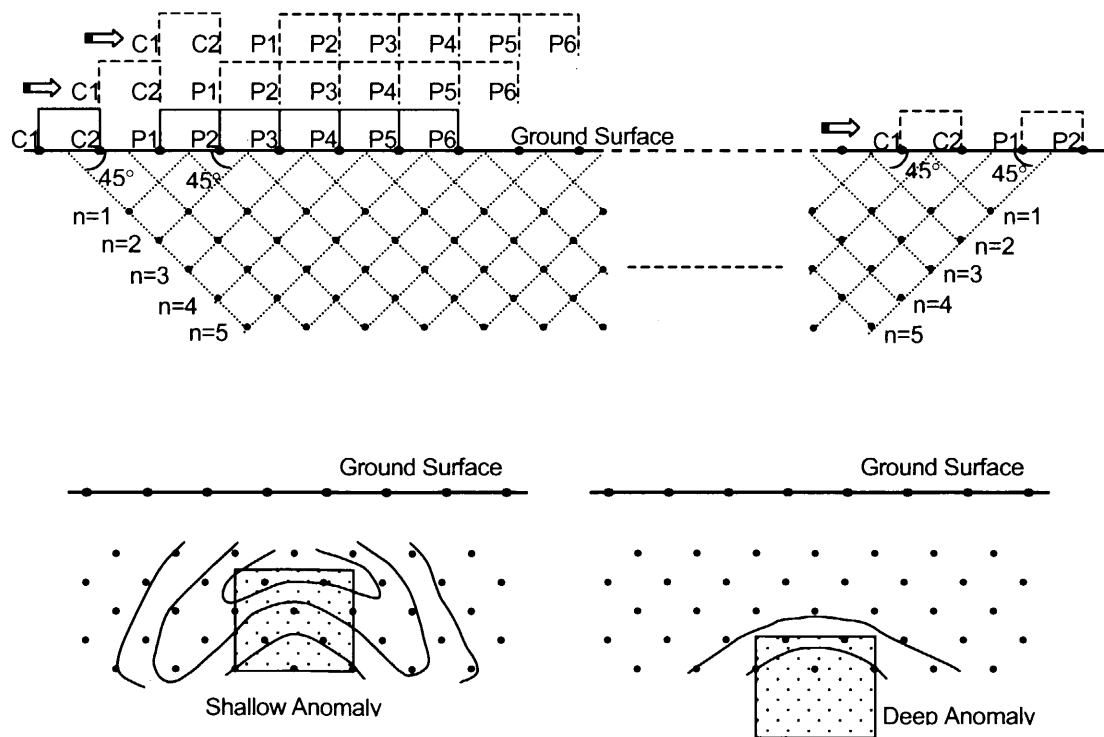


図 18 見掛け抵抗及び分極率の擬似断面表示法と擬似断面上の異常パターン

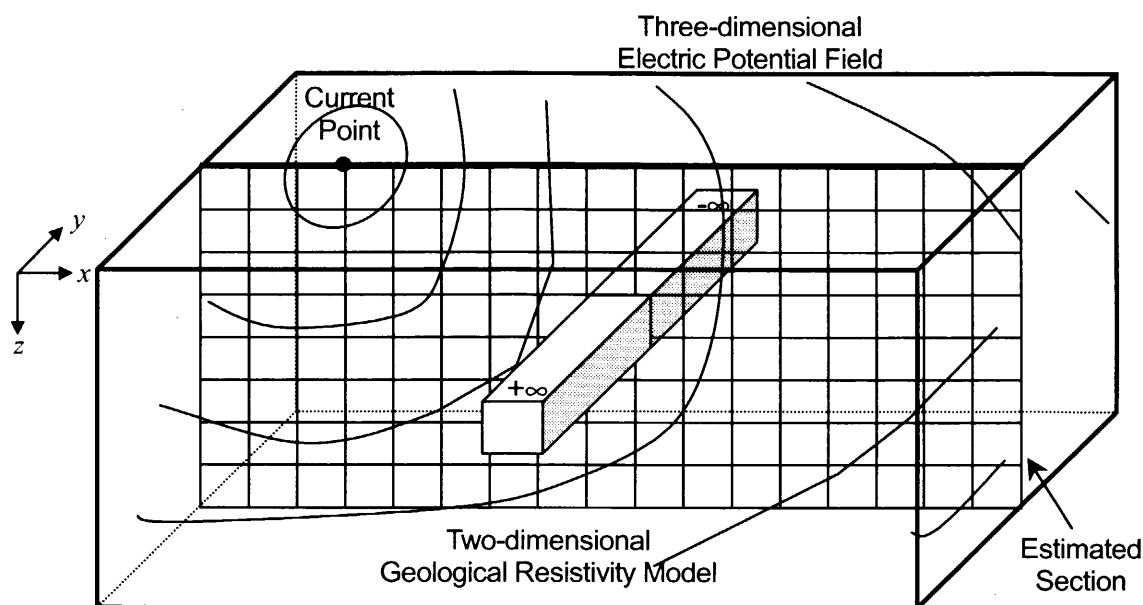


図 19 2.5 次元比抵抗モデル計算模式図

擬似断面図上では、対象とする異常が図 18 のような実際の形状と異なる”ハ”の字型異常として表されるため、実際の異常の形状を捉えるために 2 次元モデル解析を行った。モデル解析は 2.5 次元有限要素法によるモデリングと拘束付非線形最小二乗法によるインバージョンを組合せた Sasaki(1992)の方法で行った。2.5 次元のモデリングは Coggon(1971)が考案した方法で、断面と直交する方向に無限大に延びるモデルいわゆる 2 次元構造モデルを設定したとき、モデルの延長方向にフーリエ変換して計算を行うことで、3 次元の電位分布を求める計算のことである(図 19)。Peltonet al.,(1978)はこのモデリング法をインバージョン解析に組み込み、IP 法の解析方法として実用化した。比抵抗のインバージョンは非線形性が強いいため、解が安定するように Laplacean と呼ばれる拘束条件をつける(Dey et al., 1979)。そのため解析結果として得られる分布の形状は信頼できるが、必ずしも真の比抵抗や分極率の絶対値を表しているとは限らない。断面解析で使用した有限要素法の要素とインバージョン用解析ブロックの解析例を図 20 に示し、インバージョンの解析フローを図 21 に示した。解析した比抵抗や分極率を断面図上にプロットして、コンター表示した解析比抵抗断面図と解析分極率断面図を作成した。平面図上に、これらの断面からバジナ・ケビラ地区では標高 200m, 300m, 400m, シリアナ地区では標高 50m, 50m, 150mの解析比抵抗や分極率を読み取って、平面図上にプロットした解析比抵抗平面図及び解析分極率平面図も作成した。

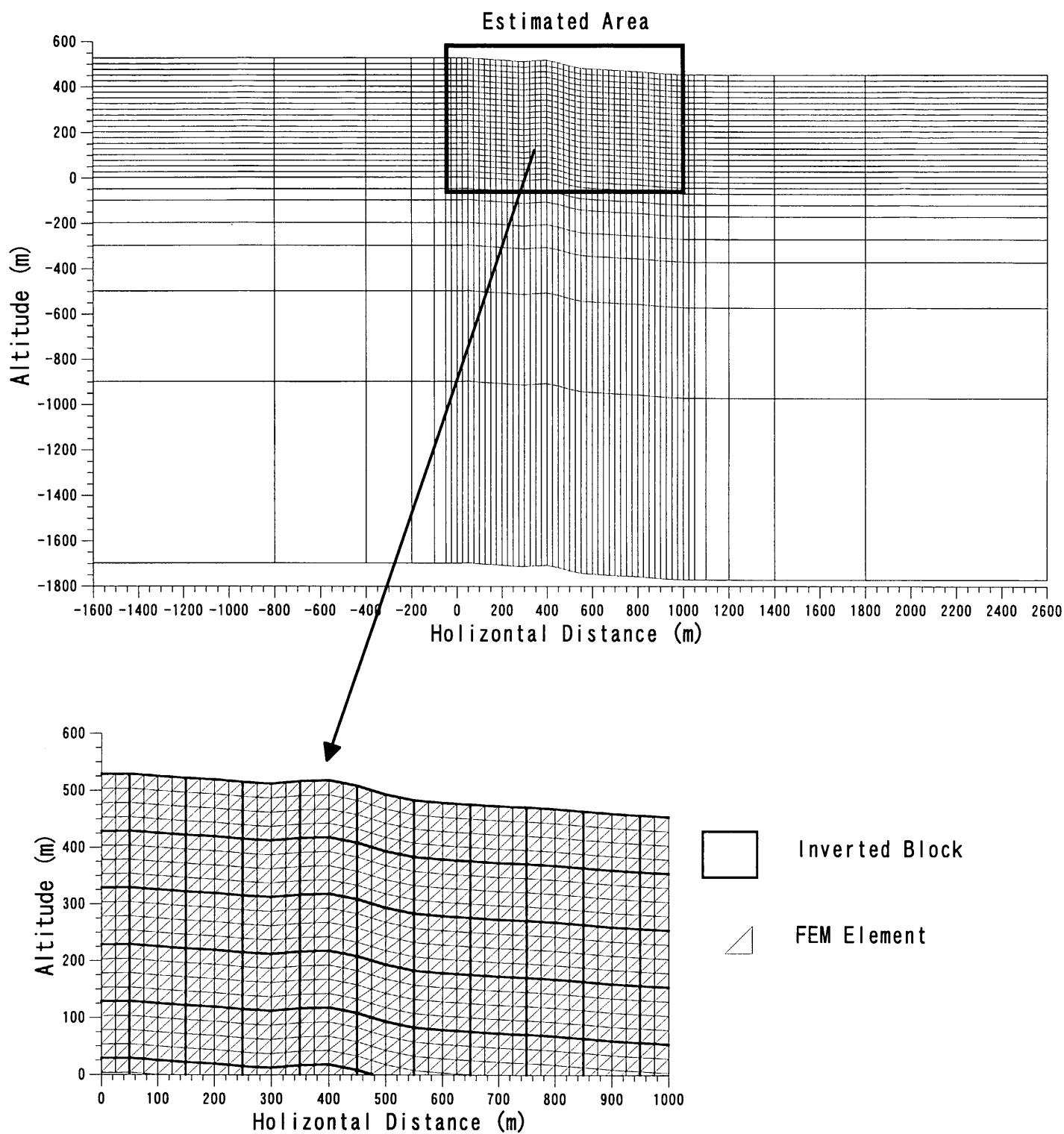


図20 有限要素法要素とインバージョン用解析ブロック

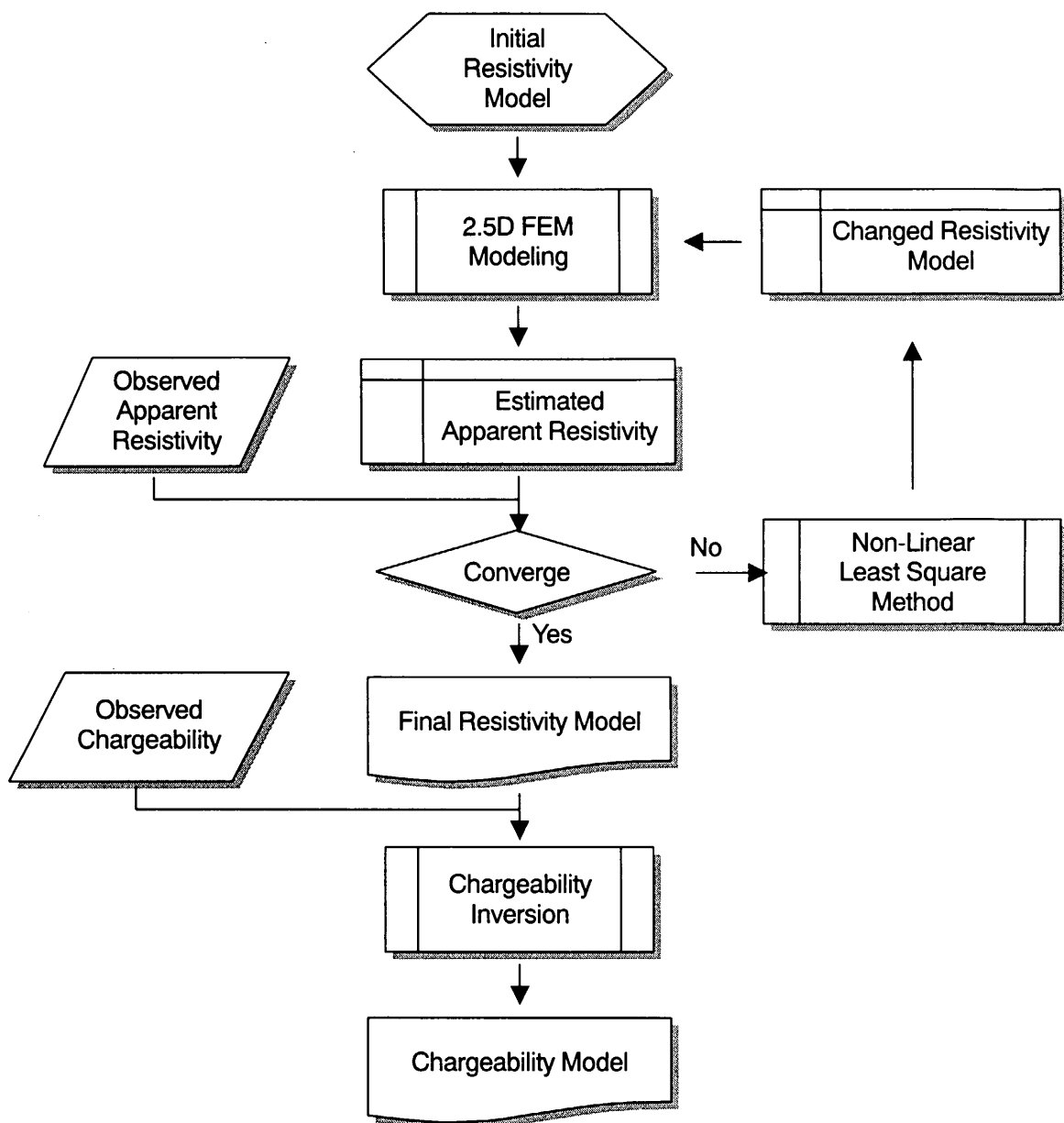


図 21 IP 法インバージョン解析フロー

1.2.4 室内試験

本調査地区内及びその周辺の露頭で採取した 49 個の試料を原則として一辺 4cm, 長さ 8cm の正四角柱又は直径 3.5cm の円筒形に整形して密度, 比抵抗及び分極率を測定した。

整形した試料は自然状態, 48 時間以上浸漬させた強制湿潤状態, 48 時間以上乾燥機で乾燥させた強制乾燥状態で空中重量, 水中重量を測定し, 11~13 式を用いて密度を求めた。

$$\gamma_n = W1/(W2-W3) \quad (11)$$

$$\gamma_w = W2/(W2-W3) \quad (12)$$

$$\gamma_d = W4/(W2-W3) \quad (13)$$

γ_n : 自然乾燥密度, γ_n : 強制湿潤密度, γ_n : 強制乾燥密度

$W1$: 自然状態の空中重量, $W2$: 強制湿潤状態の空中重量

$W3$: 強制湿潤状態の水中重量, $W4$: 強制乾燥状態の空中重量

密度測定結果を表 7 に示した。

さらに, 48 時間以上比抵抗 $NaCl$ 溶液に浸漬させた後, GS 社式サンプルホルダに固定して IP 法と同じカナダ Scintrex 社製 IP 受信器 IPR-12 を使って比抵抗 ρ と分極率 M を測定した(図 22)。送信機は室内試験用の横浜電子研究所製を用いた。試料の比抵抗は 14 式から算出した。

$$\rho = (S/l)(V/I) \quad (14)$$

S : 試料の断面積(単位 m), l : 試料の長さ(単位 m)

V : 受信電位(単位 V), I : 送信電流(単位 A)

比抵抗測定結果を表 8 に示した。

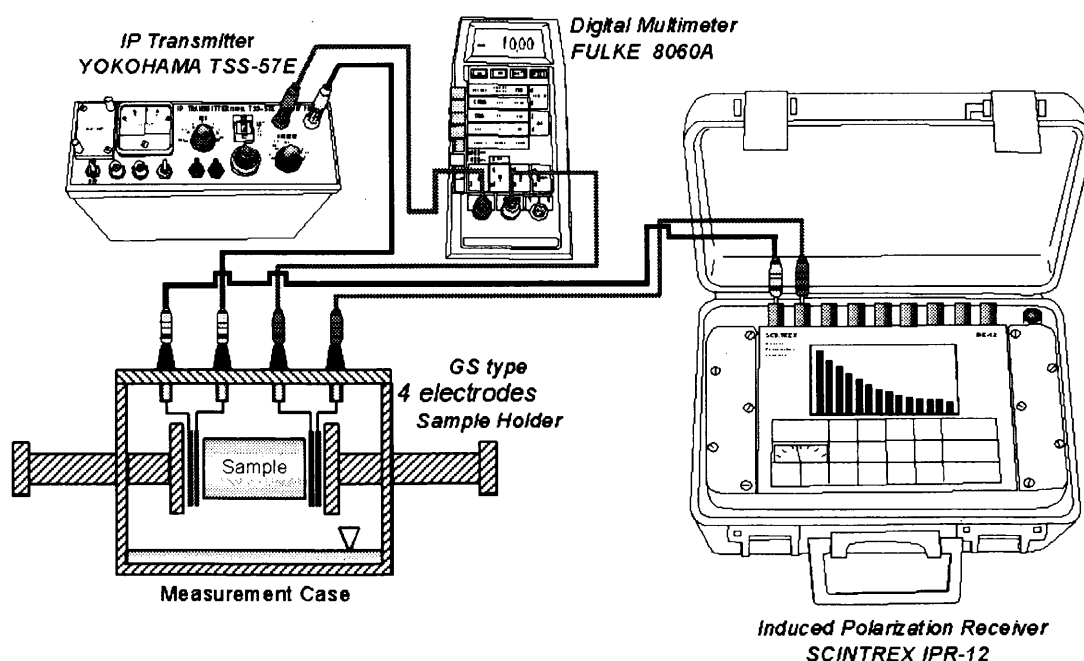


図 22 比抵抗及び分極率室内試験測定法

表 7 密度試驗結果一覽表

No.	Location	Geology	Rock	Weight (g)				Density (g/cm ³)			Porosity (%)
				W1	W2	W3	W4	Natural	Wet	Dry	
1	A4-30	Transition Zone	Mineralized Limestone	138.92	140.01	102.54	138.13	3.707	3.737	3.686	5.02
2	A4-30	"	"	155.04	155.29	113.53	154.37	3.713	3.719	3.697	2.20
3	A4-30	Triassic	Gypsum	113.68	113.91	75.14	100.67	2.932	2.938	2.597	34.15
4	A0-320	Cretaceous (Aptian)	Mineralized Vein	119.47	122.61	89.61	118.38	3.620	3.715	3.587	12.82
5	A6-125	Quaternary (Pliocen)	Polygenetic Breccia	119.94	122.11	74.05	119.07	2.496	2.541	2.478	6.33
6	A0-370	Cretaceous (Aptian)	Weak Argillic Limestone	96.32	96.76	60.71	95.68	2.672	2.684	2.654	3.00
7	A6-170	Cretaceous	"	70.29	71.07	44.22	69.70	2.618	2.647	2.596	5.10
8	A1-135	Cretaceous (Upper)	Massive Limestone	89.70	90.36	56.42	89.36	2.643	2.662	2.633	2.95
9	A1-125	Quaternary (Eocene)	Limestone	154.78	157.38	96.80	153.59	2.555	2.598	2.535	6.26
10	A1-50	"	"	169.34	170.39	106.05	169.00	2.632	2.648	2.627	2.16
11	A2-130	"	"	125.29	125.78	78.80	125.16	2.667	2.677	2.664	1.32
12	A3-180	Cretaceous (Lower)	Argillic Limestone	47.33	47.73	29.75	47.11	2.632	2.655	2.620	3.45
13	A3-85	Triassic	Dolomite	174.17	174.70	112.73	174.03	2.811	2.819	2.808	1.08
14	A3-80	"	Psammite	128.39	133.80	74.86	124.73	2.178	2.270	2.116	15.39
15	A5-50	Cretaceous (Upper)	Limestone	49.04	51.06	30.55	48.77	2.391	2.490	2.378	11.17
16	A6-50	Quaternary (Miocene)	Breccia Sandstone	105.37	106.08	66.14	104.79	2.638	2.656	2.624	3.23
17	A2-140	Triassic	Mica Sandstone	65.00	68.17	39.10	64.58	2.236	2.345	2.222	12.35
18	A4-190	Quaternary (Pliocen)	Limestone Conglomerate	141.61	143.02	88.21	140.90	2.584	2.609	2.571	3.87
19	A3-140	Quaternary	"	42.28	47.40	25.48	41.40	1.929	2.162	1.889	27.37
20	C0-500	Triassic	Gypsum	79.87	82.20	39.01	61.11	1.849	1.903	1.415	48.83
21	L3-90	Transition Zone	Mineralized Breccia	161.91	168.49	100.43	160.46	2.379	2.476	2.358	11.80
22	C10-80	Cretaceous (Aptian)	Mineralized Sandstone	163.80	165.63	103.26	162.66	2.626	2.656	2.608	4.76
23	C10-80	"	"	172.36	176.83	109.41	171.35	2.557	2.623	2.542	8.13
24	C10-80	"	"	76.50	80.81	46.74	75.61	2.245	2.372	2.219	15.26
25	C10-80	"	"	74.65	75.48	47.64	74.19	2.681	2.711	2.665	4.63

表 7(つづき) 密度試験結果一覧表

No.	Location	Geology	Rock	Weight (g)				Density (g/cm ³)			Porosity (%)
				W1	W2	W3	W4	Natural	Wet	Dry	
26	C10-80	"	"	186.60	188.86	119.29	185.59	2.682	2.715	2.668	4.70
27	C10-80	"	"	151.20	151.99	94.50	150.86	2.630	2.644	2.624	1.97
28	C10-80	"	"	140.14	142.29	86.65	139.37	2.519	2.557	2.505	5.25
29	C10-20	Triassic	Carbonated Sandstone	123.13	128.21	74.05	121.66	2.273	2.367	2.246	12.09
30	C12-10	Quaternary	Consolidated Sand	346.15	347.07	223.89	345.86	2.810	2.818	2.808	0.98
31	C0-700	"	"	345.54	353.44	223.40	344.84	2.657	2.718	2.652	6.61
32	C15-40	"	"	398.83	399.81	267.07	397.65	3.005	3.012	2.996	1.63
33	C0-760	"	"	323.89	325.35	202.94	323.25	2.646	2.658	2.641	1.72
34	C0-760	Transition Zone	Sandstone	316.32	325.40	199.74	314.25	2.517	2.590	2.501	8.87
35	C0-760	"	"	446.86	452.40	324.05	445.00	3.482	3.525	3.467	5.77
36	C0-760	Cretaceous	Limestone Breccia	345.36	348.87	217.44	344.03	2.628	2.654	2.618	3.68
37	C0-760	Transition Zone	"	275.85	296.74	174.01	273.50	2.248	2.418	2.228	18.94
38	FD-1	"	Limestone Dolomite	380.84	381.66	248.86	380.06	2.868	2.874	2.862	1.20
39	FD-2	"	"	431.28	438.45	314.11	430.07	3.469	3.526	3.459	6.74
40	MJTK-L2 380m	Cretaceous	Mineralized Limestone Vein	241.54	242.73	167.64	241.37	3.217	3.233	3.214	1.81
41	MJTK-L2 381m	"	Mineralized Limestone	488.13	488.90	380.42	487.91	4.500	4.507	4.498	0.91
42	MJTK-L2 270m	"	Mineralized Argillic Limestone	252.45	257.69	169.44	252.15	2.861	2.920	2.857	6.28
43	MJTK-L1 111m	Triassic	Maar	465.51	483.17	269.68	410.06	2.180	2.263	1.921	34.25
44	MJTK-L1 92m	"	"	313.15	344.04	179.09	274.41	1.898	2.086	1.664	42.21
45	C1-60	"	Limestone	327.80	338.59	207.57	327.35	2.502	2.584	2.498	8.58
46	C2-0	"	Dolomite	377.51	377.79	245.84	377.21	2.861	2.863	2.859	0.44
47	C7-35	"	"	377.36	380.91	244.89	377.08	2.774	2.800	2.772	2.82
48	C7-115	Quaternary	Massive Sandstone	351.11	356.60	223.78	349.82	2.644	2.685	2.634	5.10
49	C0-420	Triassic	Psammite	354.43	360.17	215.89	354.16	2.457	2.496	2.455	4.17

表 8 比抵抗測定及び分極率測定結果一覽表

No.	Location	Geology	Rock	Section (cm ²)	Length (cm)	Current (μ A)	Voltage (mV)	Resistivity (Ω m)	Chargeability (mV/V)
1	A4-30	Transition Zone	Mineralized Limestone	6.67	5.70	100	267.04	31.3	130.19
2	A4-30	"	"	6.67	6.32	5	1511.26	3191.7	3.16
3	A4-30	Triassic	Gypsum	6.67	5.73	100	416.31	48.5	34.61
4	A0-320	Cretaceous (Aptian)	Mineralized Vein	6.67	4.98	100	4576.30	613.9	8.60
5	A6-125	Quaternary (Pliocen)	Polygenetic Breccia	6.70	7.24	50	3361.23	622.2	9.92
6	A0-370	Cretaceous (Aptian)	Weak Argillic Limestone	6.69	5.41	80	3527.76	545.1	1.57
7	A6-170	Cretaceous	"	6.67	4.14	100	2775.65	447.4	8.49
8	A1-135	Cretaceous (Upper)	Massive Limestone	6.68	5.10	90	3403.49	495.5	1.14
9	A1-125	Quaternary (Eocene)	Limestone	9.36	6.53	100	945.33	135.6	2.81
10	A1-50	"	"	9.36	6.90	10	2484.10	3371.3	9.90
11	A2-130	"	"	9.38	5.04	5	2188.63	8142.5	6.64
12	A3-180	Cretaceous (Lower)	Argillic Limestone	6.67	2.70	50	668.86	330.6	1.30
13	A3-85	Triassic	Dolomite	9.38	6.65	5	2237.55	6313.8	0.70
14	A3-80	"	Psammite	9.36	6.35	100	782.47	115.4	2.55
15	A5-50	Cretaceous (Upper)	Limestone	6.67	3.09	100	499.59	107.9	0.93
16	A6-50	Quaternary (Miocene)	Breccia Sandstone	6.67	6.08	100	2363.95	259.5	7.81
17	A2-140	Triassic	Mica Sandstone	4.70	6.27	100	1100.26	82.4	6.74
18	A4-190	Quaternary (Pliocen)	Limestone Conglomerate	9.36	5.90	100	2853.35	452.6	8.20
19	A3-140	Quaternary	"	4.67	4.76	100	475.41	46.7	2.95
20	C0-500	Triassic	Gypsum	9.35	4.72	-	-	-	-
21	L3-90	Transition Zone	Mineralized Breccia	9.36	7.30	100	1823.23	233.9	1.28
22	C10-80	Cretaceous (Aptian)	Mineralized Sandstone	9.36	6.70	100	2666.71	372.5	3.18
23	C10-80	"	"	9.37	7.17	100	1178.63	154.0	42.01
24	C10-80	"	"	6.63	5.17	100	549.52	70.5	0.36
25	C10-80	"	"	6.66	4.23	100	1715.62	270.3	59.63

表 8 (つづき) 比抵抗測定及び分極率測定結果一覧表

No.	Location	Geology	Rock	Section (cm ²)	Length (cm)	Current (μ A)	Voltage (mV)	Resistivity (Ω m)	Chargeability (mV/V)
26	C10-80	"	"	9.36	7.47	100	552.19	69.3	141.25
27	C10-80	"	"	9.38	6.17	30	2389.62	1210.3	6.96
28	C10-80	"	"	9.38	5.99	100	1754.55	274.8	1.43
29	C10-20	Triassic	Carbonated Sandstone	9.36	5.83	100	2352.47	377.9	3.25
30	C12-10	Quaternary	Consolidated Sand	17.15	8.15	3	1046.70	7341.9	0.65
31	C0-700	"	"	16.25	8.12	100	3808.20	761.9	3.62
32	C15-40	"	"	16.49	8.22	100	158.67	31.8	96.58
33	C0-760	"	"	15.75	8.13	50	3291.15	1274.8	13.44
34	C0-760	Transition Zone	Sandstone	15.96	8.10	100	1321.53	260.4	7.09
35	C0-760	"	"	16.13	8.09	100	2107.84	420.3	8.91
36	C0-760	Cretaceous	Limestone Breccia	16.58	8.15	100	3495.55	711.1	13.59
37	C0-760	Transition Zone	"	16.21	8.06	100	935.36	188.1	7.64
38	FD-1	"	Limestone Dolomite	16.71	8.11	100	2111.43	435.0	35.05
39	FD-2	"	"	16.07	8.08	100	452.76	90.0	32.21
40	MJTK-L2 380m	Cretaceous	Mineralized Limestone Vein	8.90	9.00	10	1614.52	1596.6	13.41
41	MJTK-L2 381m	"	Mineralized Limestone	8.90	12.55	100	444.64	31.5	116.54
42	MJTK-L2 270m	"	Mineralized Argillic Limestone	8.90	11.20	100	3688.17	293.1	34.54
43	MJTK-L1 111m	Triassic	Maar	17.89	11.82	100	136.86	20.7	4.43
44	MJTK-L1 92m	"	"	17.72	9.30	100	99.98	19.1	2.85
45	C1-60	"	Limestone	16.36	8.21	100	3015.43	600.7	2.08
46	C2-0	"	Dolomite	16.50	8.17	3	2566.90	17280.2	1.50
47	C7-35	"	"	17.58	8.22	10	1022.92	2187.1	0.57
48	C7-115	Quaternary	Massive Sandstone	16.67	8.11	10	1723.67	3543.0	3.29
49	C0-420	Triassic	Psammite	18.17	8.08	100	3396.63	763.8	9.57