

### 3.3 物理探査

ブキル地区では、図25に示す3km<sup>2</sup>の調査範囲に全長11.3kmの8測線を設定し、測線上で重力法及びIP法の物理探査を実施した。以下に本地区で実施した物理探査手法及び調査結果を述べる。

#### 3.3.1 調査方法

##### (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、B0～B7の8本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。各測線の仕様を表23に、測線・測点位置を図26に示す。

例) 測点名 B0-125(B0:測線名, 125:始点からの距離1,250m)

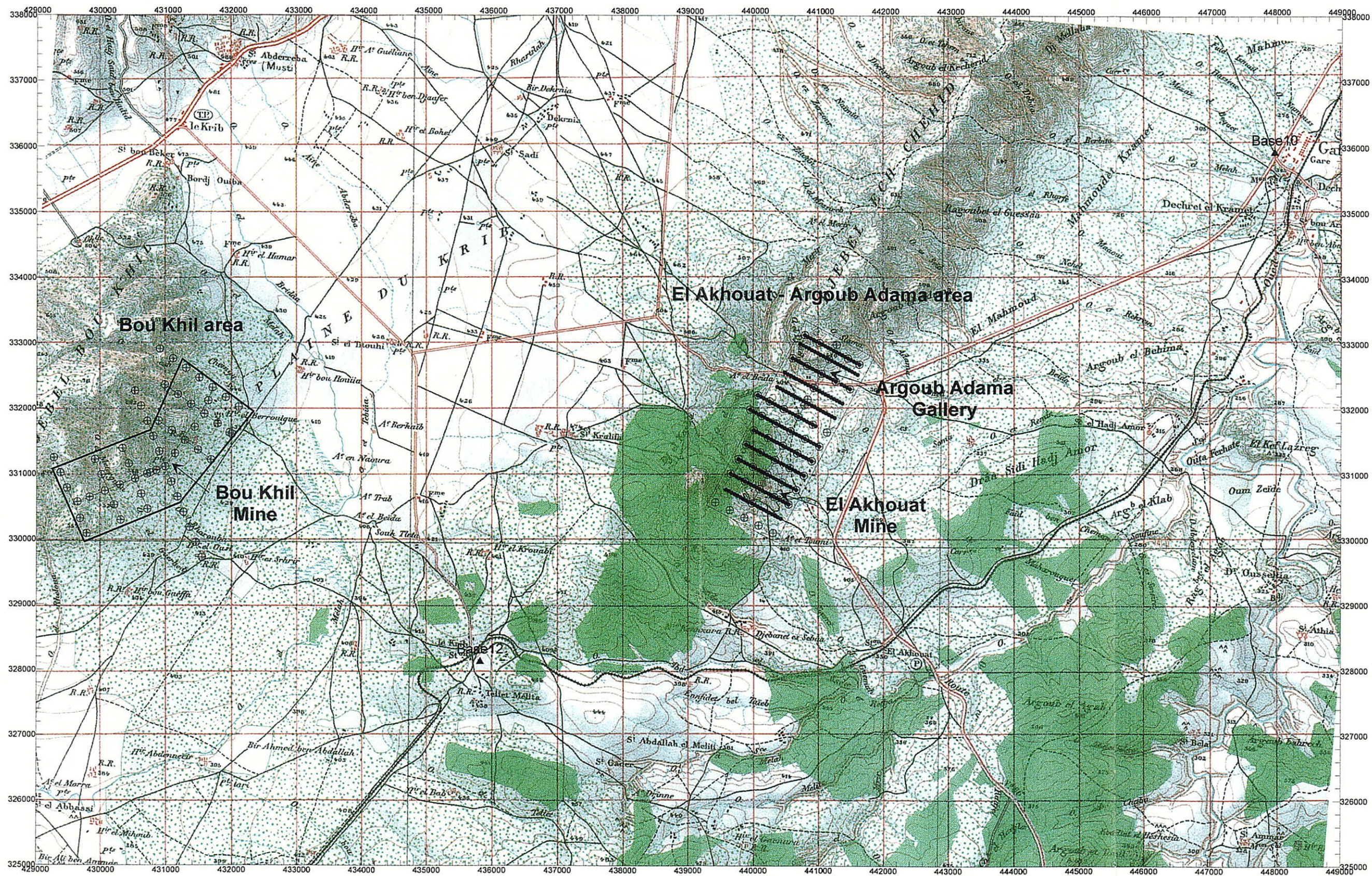
表23 物理探査測線の仕様(ブキル地区)

Line	Stations	Length (km)	Angle	Crossing to B0	x (UTM)	y (UTM)	Applied Survey
B0	61 (0-300)	3	N70° E (0-150)		510421.53	4013933.07	Gravity IP
			N44° E (150-300)		512513.49	4015718.73	
B1	25 (0-125)	1.25	N20° W	B0-0	510612.25 510135.44	4013470.89 4014626.34	Gravity IP
B2	21 (0-100)	1	N20° W	B0-50	51120.61 510739.17	4013680.68 4014605.04	Gravity IP
B3	21 (0-100)	1	N20° W	B0-100	511536.60 511155.15	4013852.33 4014776.68	Gravity IP
B4	28 (-100-175)	2.75	N20° W	B0-150	512380.22 511331.26	4013118.71 4015660.67	Gravity IP
B5	21 (0-100)	1	N54° W	B0-200	512506.23 511696.15	4014617.14 4015203.39	Gravity IP
B6	23 (0-130)	1.3	N54° W	B0-250	512799.36 511746.25	4015022.17 4015784.30	Gravity IP
B7	5 (0-150)	1.5	N54° W	B0-300	510421.53	4015425.60	Gravity
					511703.41	4016304.98	

ブキル鉱山採掘跡を中心に、鉱床が胚胎する三畳系と白亜系の接触部に沿って全長3kmの基線B0をまず設定し、50m間隔で測点を設けた。三畳系と白亜系の接触部は湾曲しているため、基線B0をブキル鉱山採掘跡で屈曲させ、南西側(測点B0-0～B0-150)は方向角N70°E、北東側(測点B0-150～B0-300)は方向角N46°Eとした。南西端を始点として測点名を与えた。

基線B0と直交する測線B1～B7を測線間隔500mで設定した。これらの測線の始点は南東端とし、原則として全長1km、始点から500mで基線B0と交差させた。基線B0の両端部で交差する測線B1、B6、B7は北西の終点側を250～500m延長した。ブキル鉱山採掘跡で基線B0と交差する測線B4は始点側を1km、終点側を750m延長した。

設定した測線はブキル鉱山採掘跡周辺にONMが設定した座標既知点と結ぶ測量を行って位置座



**Legend**

- ▲ : Gravimetric Survey Base Station
- ⊕ : Gravimetric Survey Station
- : IP survey Line
- : Magnetic Survey Station
- : Survey Area

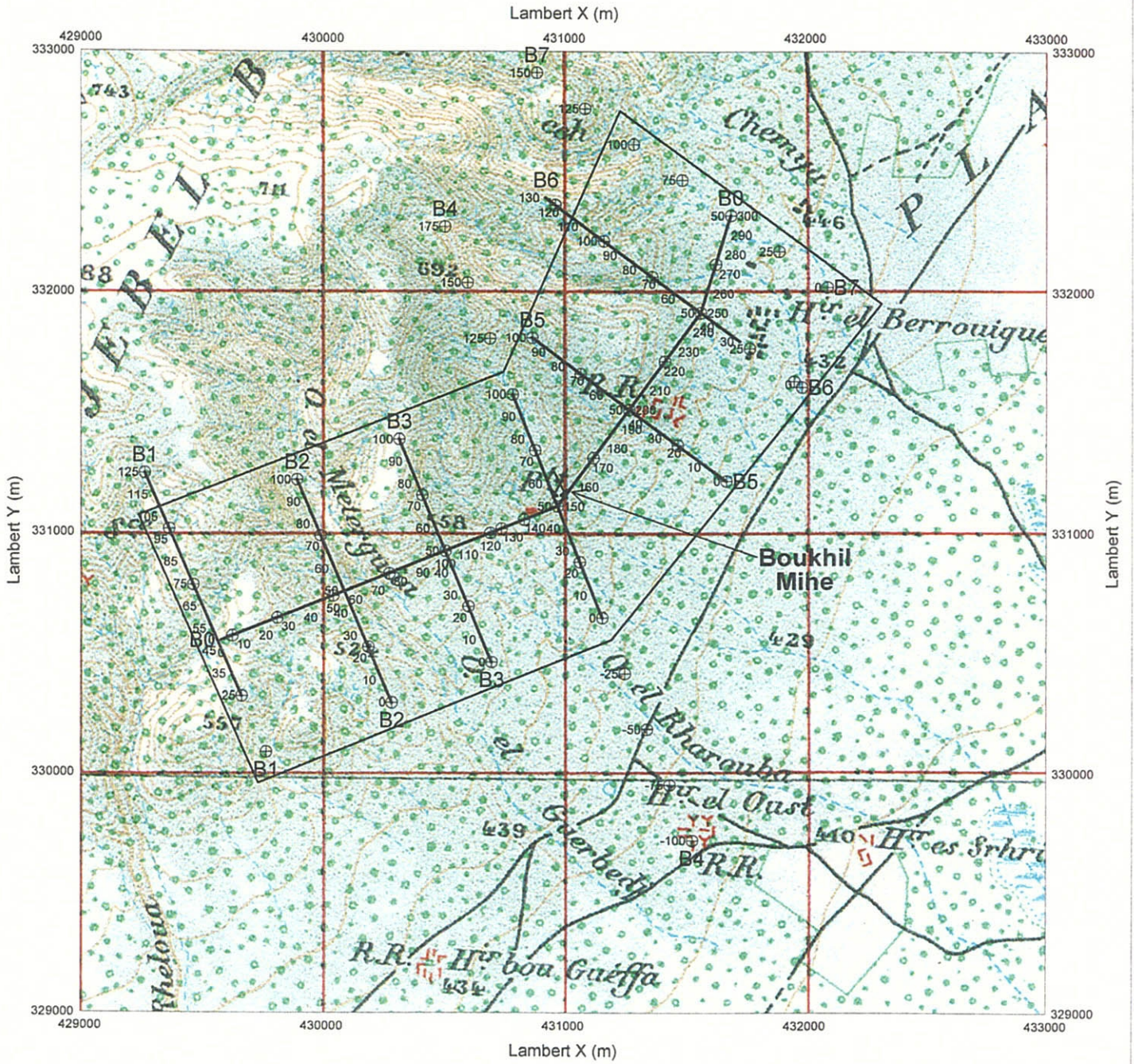


図 25

調査地域位置図(物理探査)

1 : 60,000

March, 2000



Legend

- ⊕ : Gravimetric Survey Station
- : IP survey Line
- : Survey Area
- XX : Closed Mine

図 26

測線・測点位置図(ブキル地区)

1 : 25,000

March, 2000

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チュニジア測量座標系(以下、ランベルト座標系)であるため、ONM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、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。水準測量の基準点には、測線座標と同様にブキル鉱山採掘跡周辺にONMが設定した標高既知点を用いた。

## (2) 重力法

ブキル地区に設定した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、1998年度にONMは重力探査プロジェクトCG-02を実施している。CG-02では約1km<sup>2</sup>に1測点の測点密度で重力探査を実施し、縮尺1:50,000の重力図幅及び縮尺1:200,000のコンパイル図を作成している。本調査地区はGafour重力図幅の西端部にあたる。

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。探査を行う前に、CG-02で設定された重力基点9・10・12の重力値を2度づつ測定することで、使用重力計の読取值-重力値変換係数の検定を行った。検定結果は表24に示すとおりであり、従来から用いていた変換係数を用いることで今回の測定値がCG-02での測定値と整合性が取れることを確認した。

表24 使用重力計の検定結果

Base	UTM Coordinate		Gravity Value(mgal)			Error (mgal)
	x	y	observed	averaged	known	
9	537807.754	4008955.329	979730.81 979730.84	979730.83	979730.69	0.14
10	528783.844	4019481.981	979774.53 979774.53	979774.53	979774.53	0.00
12	516702.659	4004998.969			979741.99	

相対測定の基準となる重力基点として、調査地に近く、振動が少なく安定した測定ができるCG-02の基点12を用いた。測点の測定前後にこの基点12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。

$$ABSG(station) = RG(station) - RG(base) + ABSG(base) \quad (3.3-1)$$

ただし、

$$RG = Reading * Factor + C_{inst} + C_{tidal} + C_{drift} \quad (3.3-2)$$

Reading : 読取值, Factor : 読取值-重力値変換係数

C<sub>inst</sub> : 器械高補正值, C<sub>tidal</sub> : 潮汐補正值, C<sub>drift</sub> : 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A<sub>b</sub>(mgal)を求めた。

$$Ab = ABSG - G_{stand}(\Psi) + C_{atm}(h) + C_{free}(h) + C_b(h, \gamma) + T(h, \gamma) \quad (3.3-3)$$

$\Psi$  : 測点緯度,  $h$  : 測点標高(m),  $\gamma$  : 周辺地盤の密度( $g/cm^3$ )

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)

$$G_{stand}(\Psi) = 978031.85(1 + 0.005278895\sin^2\Psi + 0.000023462\sin^4\Psi) \quad (3.3-4)$$

- 大気補正值

$$G_{atm}(h) = 0.87 - 0.000965h \quad (3.3-5)$$

- フリーエア補正值

$$C_{free}(h) - \sigma_g / \sigma_h \cdot h = 0.3086h \quad (3.3-6)$$

- ブーゲ補正值

$$C_b(h, \gamma) = -2\pi G \gamma h = -0.04192 \gamma h \quad (3.3-7)$$

$\pi$  : 円周率,  $G$  : 万有引力定数

- 地形補正值  $T(h, \gamma)$

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。

- ① 岩石試料の密度測定結果
- ② G-H 相関図(図27)の勾配
- 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)

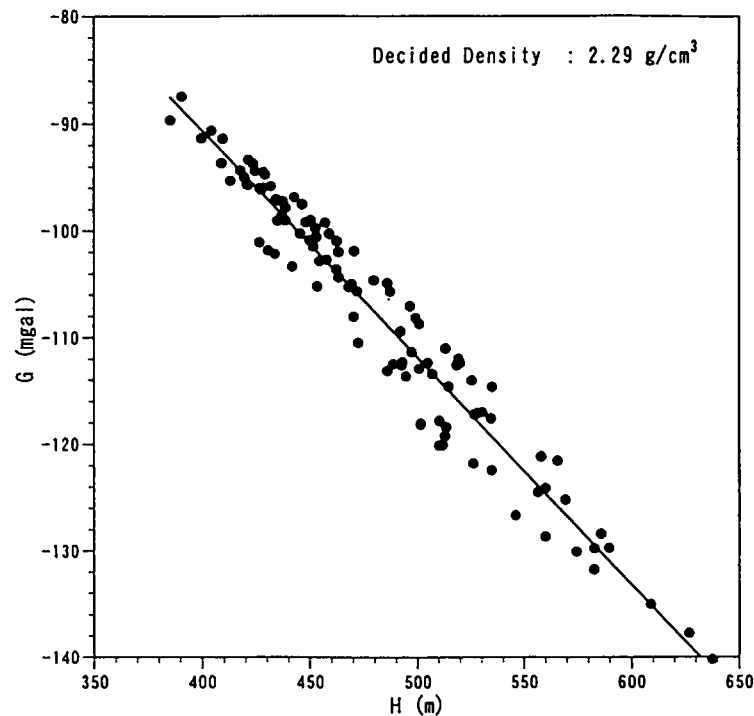


図27 G-H 相関図

ブキル地区及びラクワット地区で採取した岩石試料の平均密度は $2.67\text{g/cm}^3$ であった。平均ブキル地区及びラクワット地区を合わせたG-H相関図からは $2.29\text{g/cm}^3$ が得られた。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。露頭で採取した岩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ためにかなり大きな平均密度になったと考えられる。本調査では、CG-02との整合性を重要視して、CG-02で用いられた補正密度 $2.33\text{g/cm}^3$ を採用することとした。本調査で得られたブキル地区のブーゲ異常の平面分布を表すブーゲ異常図(等重力線図)を図40に示した。

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28)。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。本地区のブーゲ異常分布を2次元フーリエ変換して、横軸に波数(空間周波数)、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29)を分析すると、本地区は927m, 188m, 51m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と考えられる。

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

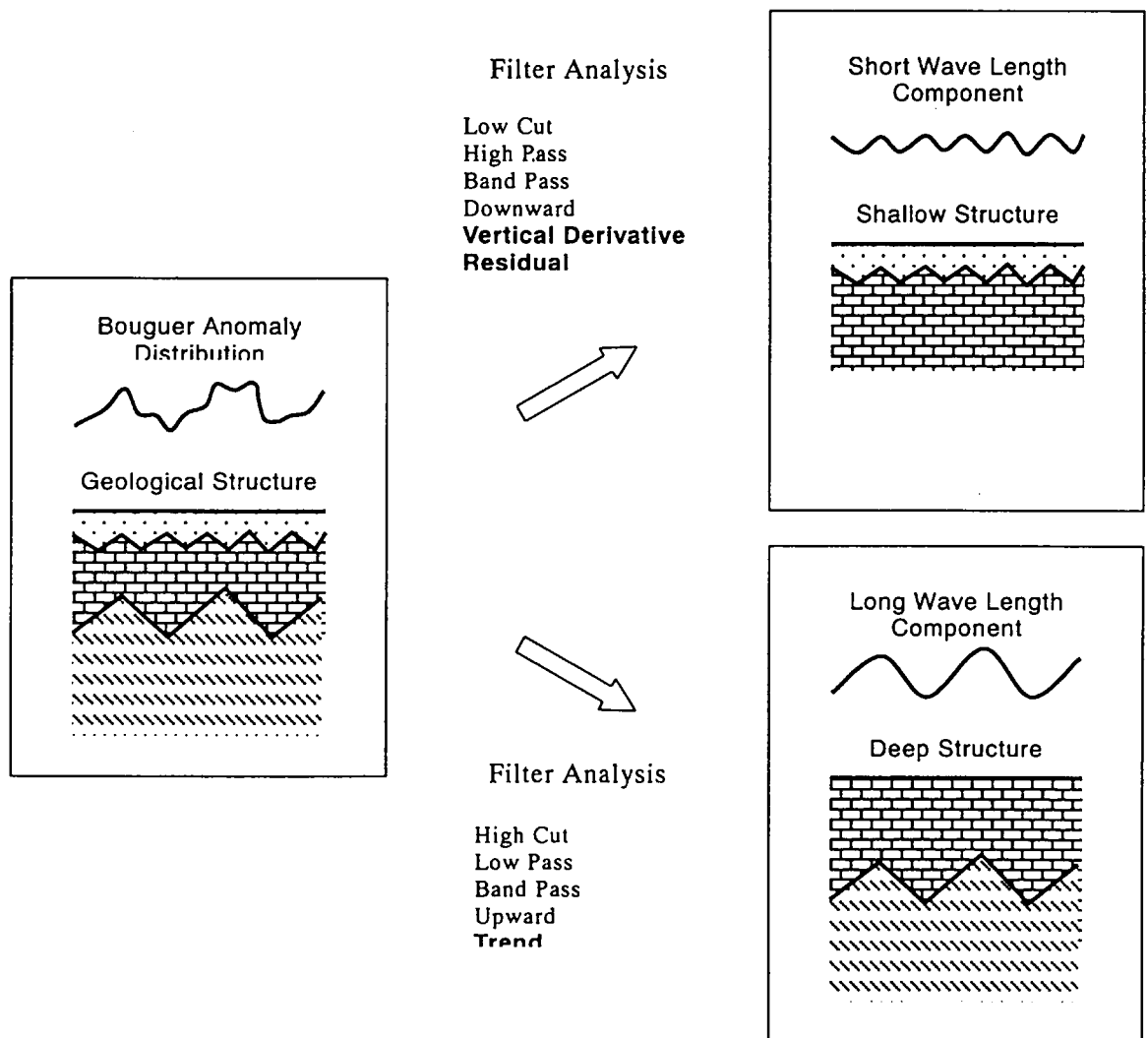


図28 重力法と磁力法のフィルター解析模式図

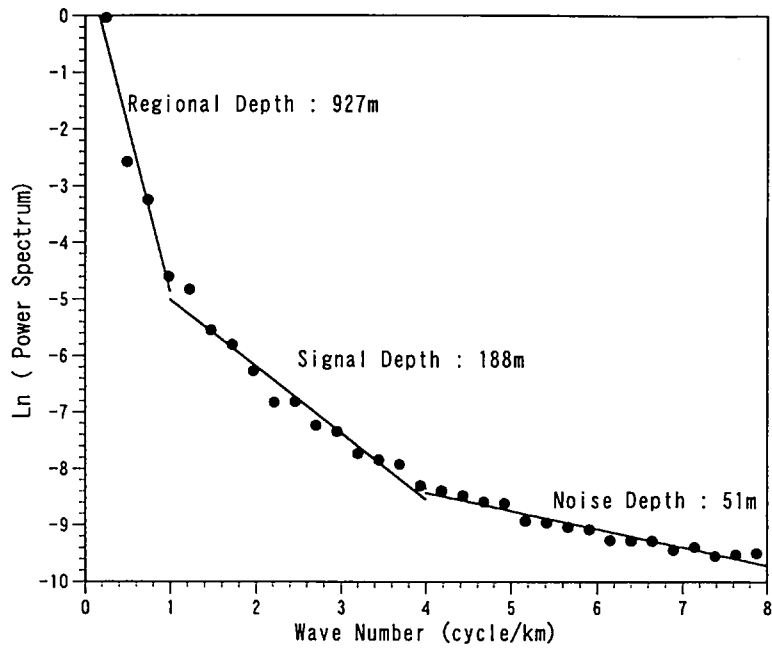


図29 パワースペクトル図

ルター処理を行う方法と、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・フィルターの一種である鉛直1次微分フィルター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・フィルター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-02でのブーゲ異常分布(図39)を傾向面と見なした残差処理を行い、残差重力図として図41に示した。図42に示したフィルター図からは、図30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。

測線B0, B1, B3, B4, B5, B6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

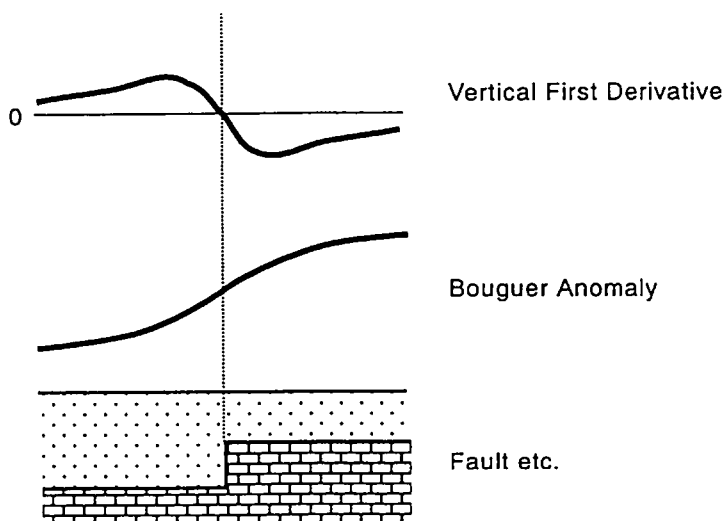


図30 鉛直1次微分フィルター効果模式図

断面解析を実施して図43~48に示した。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に決定した。参照とする残差重力値は残差重力図(図41)から読み取り、地下構造モデルの密度は補正密度 $2.33\text{g/cm}^3$ に対する密度差とした。

(3) IP法

本調査地区の測線B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6の7測線に対し, 下記の仕様によるIP法電気探査を行った。測線B0は全測線3kmを, 他の測線は山側の北西端から1kmを対象とした。

- 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: 千葉電子製CH-400T(最大出力1,000V-10kVA)  
送信コントローラ: 米国Zonge Engineering社製XMT-32  
受信器: 米国Zonge Engineering社製GDP-32(精度1μV)

本調査地区では, 平野側に相当する南東側に送信ダイポールC1-C2を配置し, 山側の北西側にある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31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Vp(単位: V)を用いて3.3-8式から見掛比抵抗ρa(単位: Ωm)を求めた。

$$\rho a = K V_p / I$$

(3.3-8)

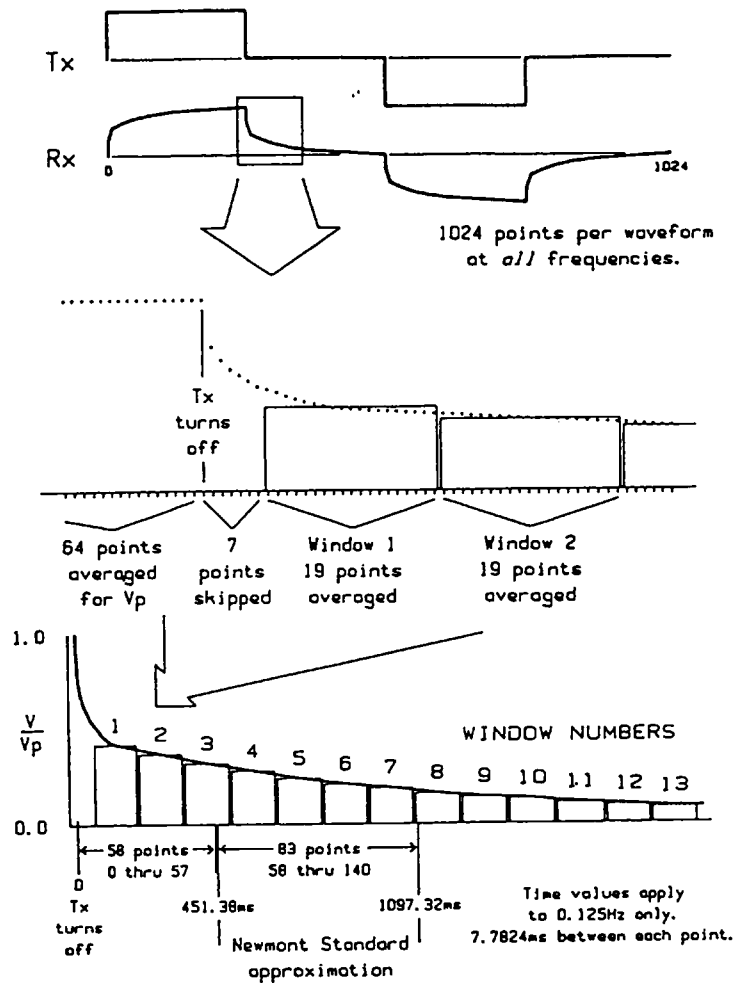


図31 GDP-32による時間領域IP法の測定模式図



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3.3-9式により求められる。

$$K = n(n-1)(n-2)\pi a \quad (3.3-9)$$

a : 電極間隔(m), n : 電極隔離係数,  $\pi$  : 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3.3-10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 $\sim$  $t_2$ :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。

$$M = \frac{1}{V_p(t_1-t_2)} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (3.3-10)$$

本調査で使用した米国Zonge Engineering社のGDP-32では、1波形を1,024のデータで表現するので、0.125Hzの場合には約7.7824ms間隔でデータが取得される。1次電位 $V_p$ は電流切断前の64データの平均値として与えられる。減衰曲線は13ウィンドウの電位曲線で表され、各ウィンドウの電位は19データの平均として求められる。GDP-32では測定時に3.3-11式を用いてNewmont標準の分極率 $M_s$ (単位:msec)を求めているので、3.3-12式を使って換算した分極率MをIPの測定値とした。Mは $M_s$ の約90%の値となる。

$$M_s = (T/1024) \times (1.87 \times 19 \times (W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8 + W_9)) \quad (3.3-11)$$

T : 送信周波数の周期(msec),  $W_n$  : n番目のウィンドウの2次電位(mV/V)

$$M = M_s \times 1024 / (T \times 1.87 \times 19 \times 4) \quad (3.3-12)$$

1回の測定で8波形のデータを取得し、重ね合わせてS/N比を向上させた。しかしながら、0.3 $\sim$

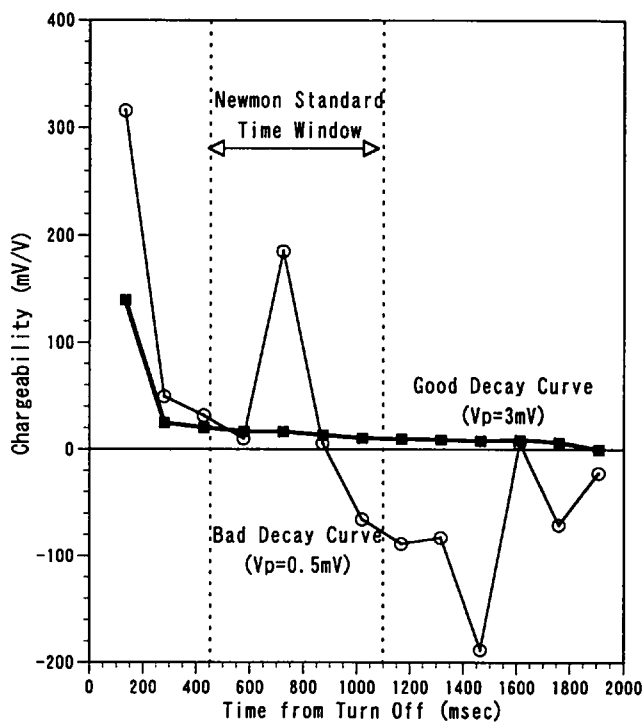


図32 実測減衰曲線例

10A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、見掛比抵抗は再現性のあるデータが得られたが、図32に示したように滑らかな減衰曲線を得ることが難しかった。

したがって、各測点で3 $\sim$ 4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。

測定した見掛比抵抗と分極率を図33に示した方法でプロットしてコンターを描いた見掛比抵抗擬似断面図と分極率擬似断面図を各測線毎にまとめて図50 $\sim$ 56に示した。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比抵抗分布平面図を図57～60に，測定分極率平面図を図61～64に示した。

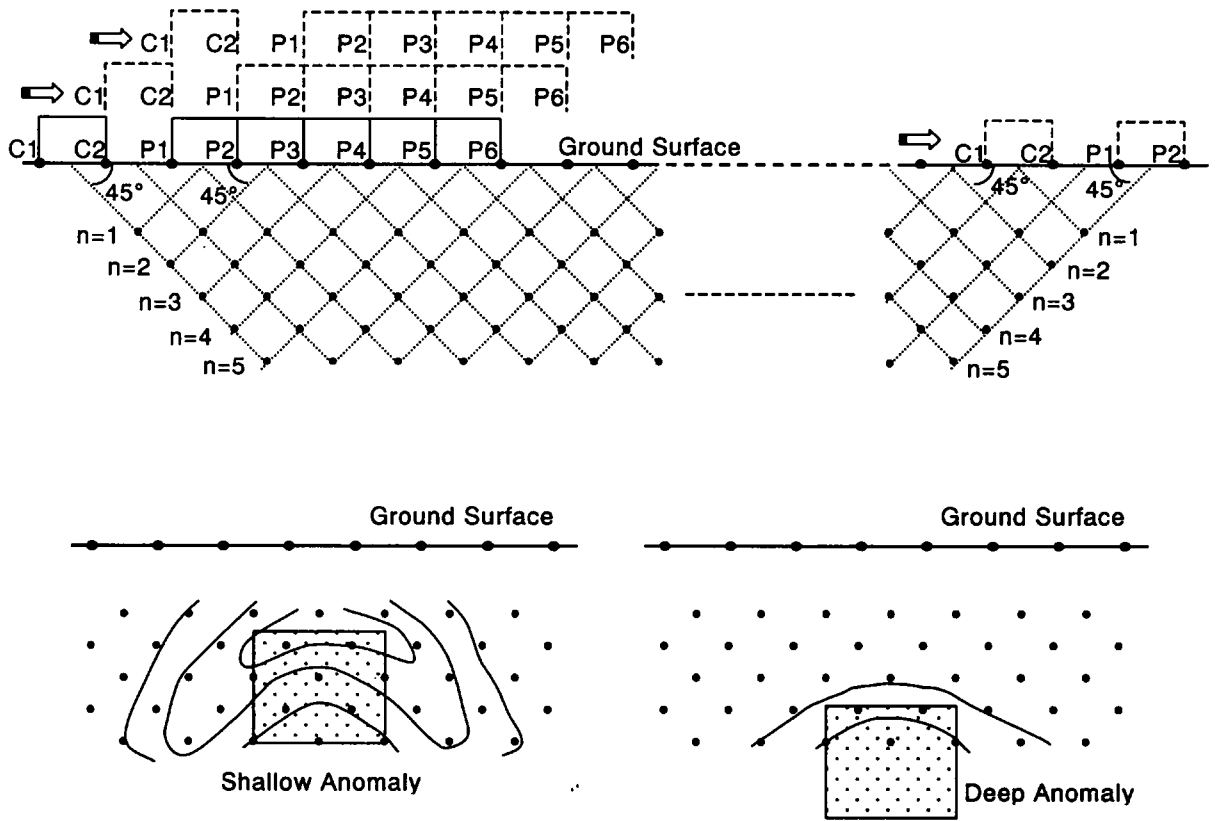


図33 見掛比抵抗及び分極率の擬似断面表示法と擬似断面上の異常パターン

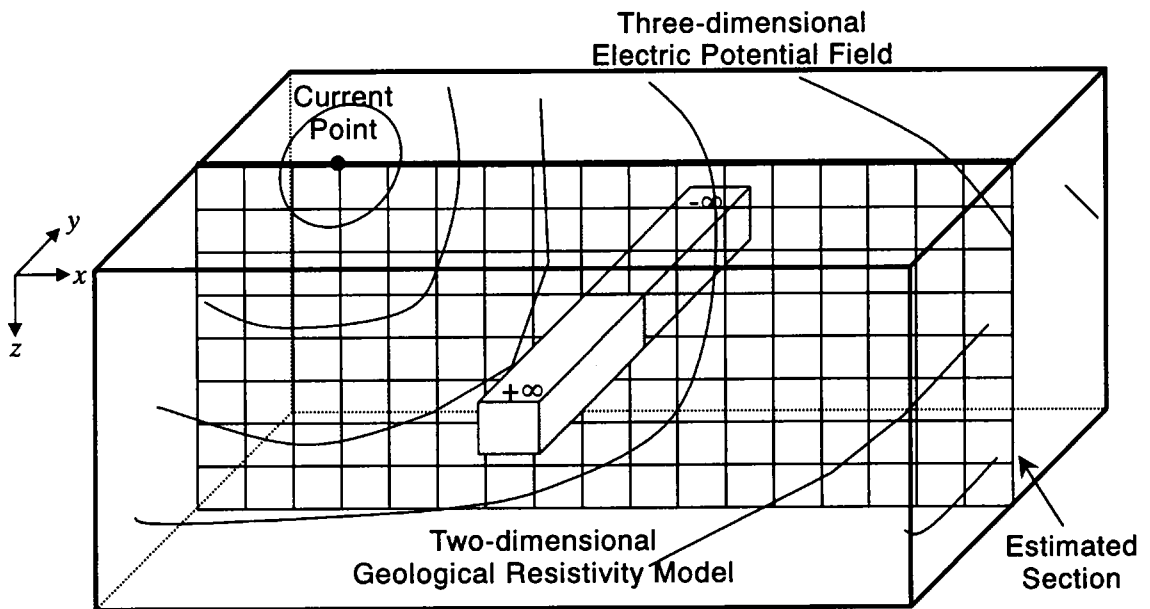


図34 2.5次元比抵抗モデル計算模式図

擬似断面図上では、対象とする異常が図33のような実際の形状と異なる”ハ”の字型異常となるため、2次元の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34)。Pelton他(1978)はこのモデリ

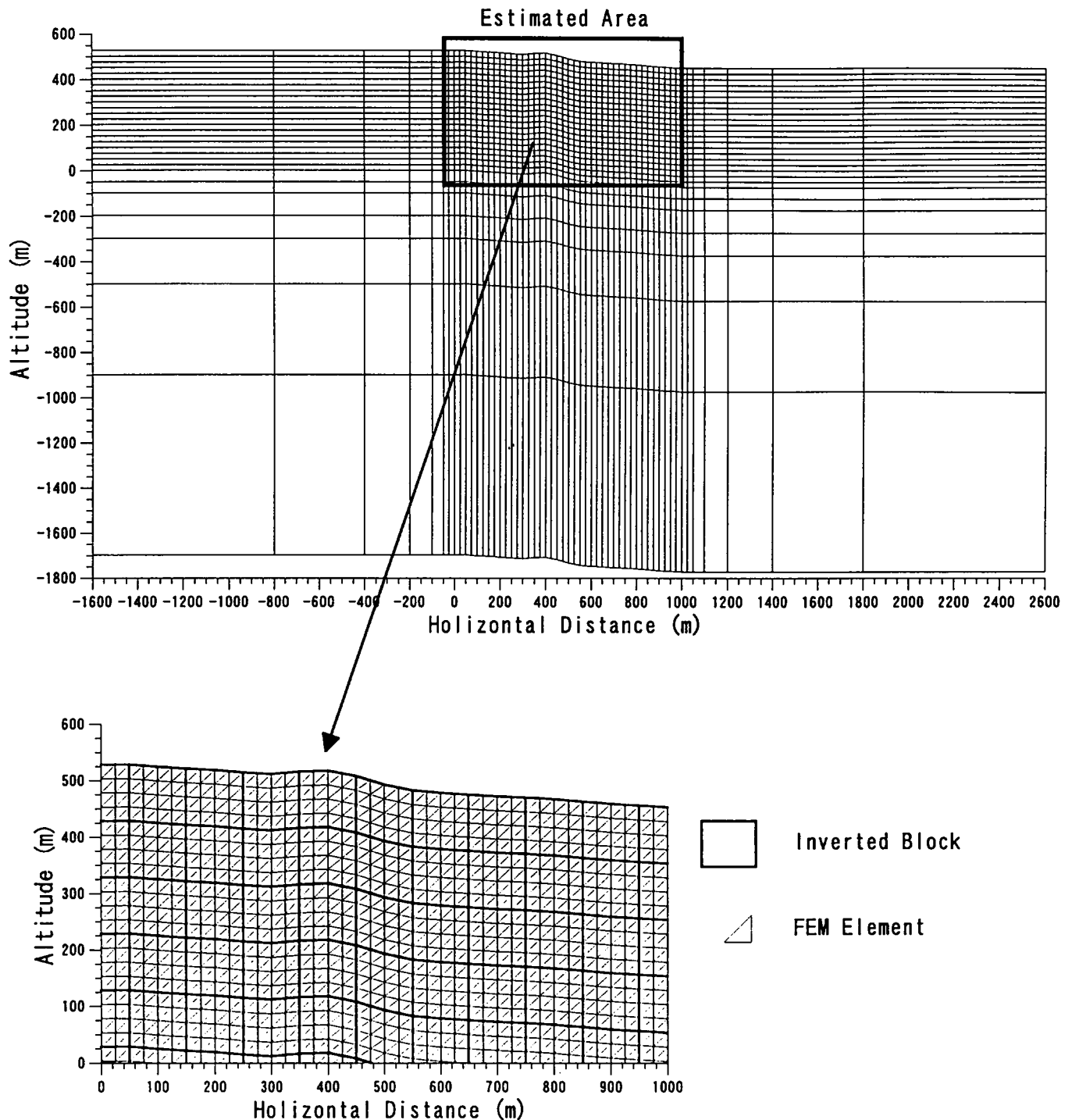


図35 有限要素法要素とインバージョン用解析ブロック

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他, 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例を図35に示し、インバージョンの解析フローを図36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測線毎にまとめて、図65～71に示した。平面図上に、これらの断面から標高200m, 300m, 400mの解析比抵抗や解析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をそれぞれ図72～74, 図75～77に示した。

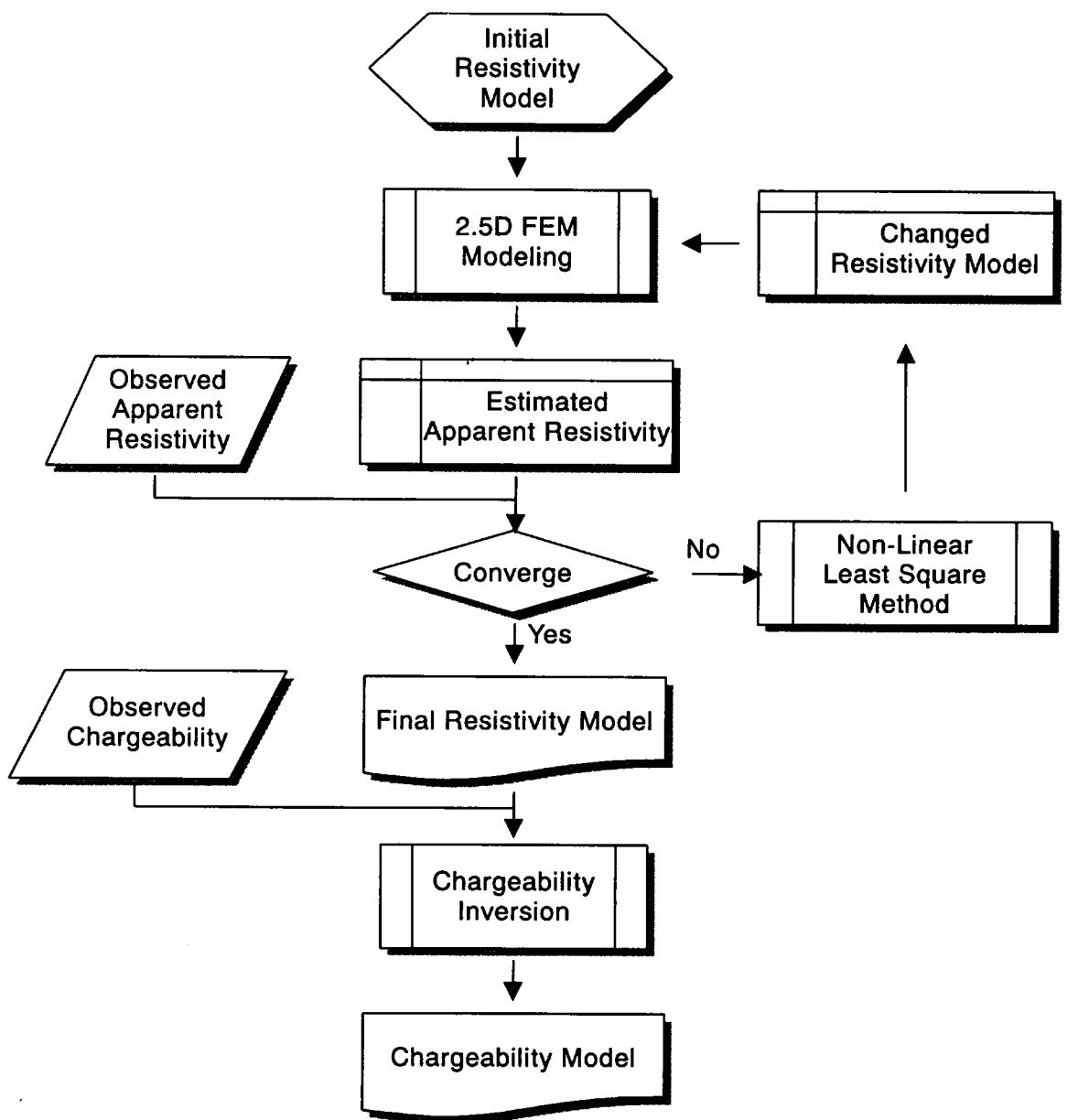


図36 IP法インバージョン解析フロー

(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21個の試料を原則として直径3.5cm, 長さ6.5cm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時間以上水道水に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, 3.3-12~14式を用いて密度を求めた。密度測定結果を表25に示した。

$$\gamma_n = W1 / (W2 - W3) \quad (3.3-12)$$

$$\gamma_w = W2 / (W2 - W3) \quad (3.3-13)$$

$$\gamma_d = W4 / (W2 - W3) \quad (3.3-14)$$

$\gamma_n$ : 自然乾燥密度,  $\gamma_w$ : 強制湿潤密度,  $\gamma_d$ : 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

表25 密度試験結果一覧表(ブキル地区)

No.	Location	Geology	Rock	Weight(g)				Density(g/cm <sup>3</sup> )			Porosity (%)
				W1	W2	W3	W4	Natural	Dry	Wet	
1	B1-105	Trias	Limestone	160.05	97.95	158.20	157.95	2.55	2.54	2.58	3.4
2	B1-110	"	Dolomite	172.20	109.85	168.65	167.70	2.70	2.69	2.76	7.2
3	B2-80	"	Dolomite	168.60	105.95	166.05	165.90	2.65	2.65	2.69	4.3
4	B2-90	"	Dolomite	157.75	94.10	149.35	148.45	2.35	2.33	2.48	14.6
5	B4-95	"	Sandstone	148.30	84.40	141.30	140.95	2.21	2.21	2.32	11.5
6	B6-60	"	Mudstone	155.45	98.35	153.30	152.25	2.68	2.67	2.72	5.6
7	B6-80	"	Sandstone	127.55	64.40	121.40	100.40	1.92	1.59	2.02	43.0
8	B3-55	Transition	Limestone	153.85	94.75	151.10	150.45	2.56	2.55	2.60	5.8
9	B3-60	"	Celestite	221.60	159.50	220.00	219.45	3.54	3.53	3.57	3.5
10	B3-60	"	Celestite	257.80	190.25	257.05	256.70	3.81	3.80	3.82	1.6
11	B0-80	"	Contact	137.05	80.15	127.90	126.65	2.25	2.23	2.41	18.3
12	B4-60	Cretaceous	Limestone	178.40	115.05	178.30	178.20	2.81	2.81	2.82	0.3
13	B0-150	"	Limestone	166.70	106.80	165.25	164.20	2.76	2.74	2.78	4.2
14	B3-70	"	Limestone	163.65	100.00	160.10	159.75	2.52	2.51	2.57	6.1
15	B0-200	"	Limestone	180.90	112.50	179.40	179.15	2.62	2.62	2.64	2.6
16	B1-75	"	Limestone	147.40	90.60	146.05	145.70	2.57	2.57	2.60	3.0
17	B4-70	"	Marl	165.85	102.75	164.75	164.10	2.61	2.60	2.63	2.8
18	B2-30	"	Marl	161.90	97.70	158.10	156.80	2.46	2.44	2.52	7.9
19	B1-95	Tertiary	Sandstone	148.35	87.35	146.55	146.35	2.40	2.40	2.43	3.3
20	B1-75	"	Sandstone	106.65	64.50	104.15	103.90	2.47	2.47	2.53	6.5
21	B0-100	"	Sandstone	156.95	95.40	153.80	153.55	2.50	2.49	2.55	5.5

さらに, 48時間以上水道水に浸漬させた後, GS社式サンプルホルダに固定してIP法と同じXMT-32とGDP-32を使って比抵抗 $\rho$ と分極率Mを測定した(図37)。比抵抗は3.3-15式から算出し, 分極率はIP法同様, 受信器の表示値を3.3-11式で換算した値を用いた。

$$\rho = (S/l)(V/I) \quad (3.3-15)$$

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)

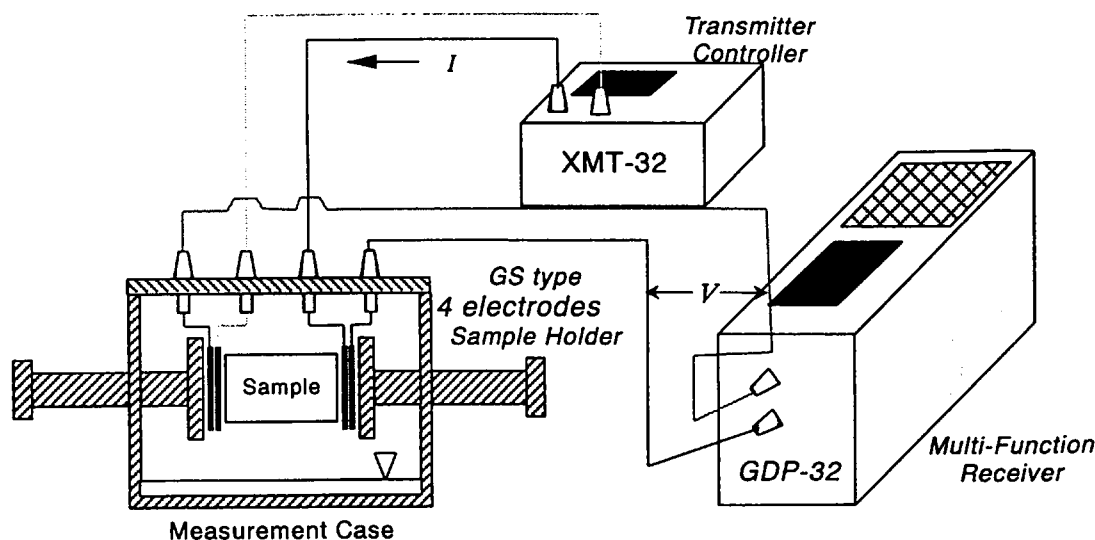


図37 比抵抗及び分極率室内試験測定法

比抵抗測定結果を表24に示した。採取した試料には分極率異常を示す鉱石が含まれていなかったため、ブキル鉱山採掘跡のズリで採取した標本用サンプルについて分極率の測定も行った。なお、測定時における浸漬水の電気伝導度は $708 \mu S/cm$ 、温度は $23^{\circ}C$ であった。この電気伝導度は比抵抗では $14.1 \Omega m$ に相当する。

表26 比抵抗測定及び分極率測定結果一覧表(ブキル地区)

No.	Location	Geology	Rock	Diameter (mm)	Length (mm)	Current ( $\mu A$ )	Voltage (V)	Resistivity ( $\Omega m$ )	Chargeability (mV/V)
1	B1-105	Trias	Limestone	35.35	64.00	5	0.6671	2046	7.32
2	B1-110	"	Dolomite	35.10	65.60	2	0.9702	7155	7.54
3	B2-80	"	Dolomite	35.35	64.55	5	1.0980	3339	1.11
4	B2-90	"	Dolomite	35.50	66.00	5	0.4104	1231	1.43
5	B4-95	"	Sandstone	35.45	65.90	5	0.1737	520	11.73
6	B6-60	"	Mudstone	35.40	58.60	5	0.1465	492	0.14
7	B3-55	Transition	Limestone	35.35	61.10	5	0.4412	1417	3.05
8	B3-60	"	Celestite	35.50	63.80	5	0.7405	2298	3.25
9	B3-60	"	Celestite	35.40	70.00	5	1.9763	5558	1.11
10	B0-80	"	Contact	34.50	60.00	5	0.4028	1255	1.14
11	B4-60	Cretacious	Limestone	35.40	65.70	5	3.4985	10482	8.86
12	B0-150	"	Limestone	35.00	63.00	5	0.1370	419	5.08
13	B3-70	"	Limestone	35.40	65.55	5	0.8620	2589	1.52
14	B0-200	"	Limestone	35.90	69.10	5	1.2497	3661	3.02
15	B1-75	"	Limestone	35.35	58.60	5	1.0920	3658	3.36
16	B4-70	"	Marl	35.60	64.40	5	0.0980	303	2.11
17	B2-30	"	Marl	35.60	65.70	5	0.0275	83	1.75
18	B1-95	Tertiary	Sandstone	35.55	63.30	5	0.7163	2247	3.88
19	B1-75	"	Sandstone	35.20	44.80	5	0.0547	238	12.69
20	B0-100	"	Sandstone	34.85	66.00	5	0.1680	486	5.98
21	B0-140	Ore	Galena	48.00	100.00	5	0.6807	2464	23.27
22	B0-140	"	Galena	—	—	5	0.2505	—	33.72