

1-2-3 測点標高測量

測点高度の決定には、測器舎製B-2型自動レベルを用いて水準測量を実施した。また、測点位置見取図の作成及び周辺地形補正のための断面測量も行い、これらの資料・成果を別冊の「水準測量成果」として添付した。測点高度は「Ap. II-1 測点標高一覧表」に示す。

標高の基準は、調査地域内にあるDivision de la Cartographieによる水準点の標高を用いた。測量路線は、「水準測量成果」の「水準測量網図」に示す。

水準測量は次のような精度で行なった。

$$\varepsilon \leq 20\sqrt{D} \quad \text{ただし、} \varepsilon : \text{許容誤差 (単位cm)}$$
$$D : \text{閉合距離 (単位km)}$$

閉合誤差は水平距離に対して配分し、その結果を別冊の「水準測量成果」の「測量路線閉塞差及び補正量一覧表」に示す。

1-2-4 補正とデータ処理

重力観測値には、時間・位置・標高・相対地形・その他の、各測点に対する不均一な要素が多く影響している。それらの要素を補正して同一条件のもとでの重力値とするために、潮汐・器高・ドリフト・緯度・地形・Free Air・Bouguer・大気などの各補正を施す必要がある。

これらの計算結果は巻末の「Tab. II-3 重力成果一覧表」にまとめられている。

以下におもな補正とデータ処理方法について述べる。

(1) 潮汐補正

潮汐補正は、月・太陽の位置変化が重力測定に及ぼす影響を取り除く補正で、時間及び測点の緯度・高度によって変化する。

月と太陽の時間と位置の関係は、海上保安庁発行の天測略歴より求め、補正値は次式により計算を行っている。

$$\Delta g = -3/2 G M a / r^3 \{ 3 (\sin^2 \delta - 1/3) (\sin^2 \delta - 1/3) + \sin 2\delta \sin 2\phi \cos \theta + \cos^2 \delta \cos^2 \phi \cos 2\theta \} \times 1.2 \text{ (gal)}$$

ただし、

$$G : \text{万有引力定数} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ (m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{e} \cdot \text{c}^2)$$

M : 天体の質量 (月 : 7.348×10^{22} kg、太陽 : 1.9891×10^{30} kg)

a : 地球の中心から測点までの距離

$$= 6378388 (0.99832 + 1.6835 \times 10^{-3} \cos 2\phi - 3.5 \times 10^{-6} \cos 4\phi) + \text{測点標高 (m)}$$

r : 地球の中心から天体までの距離 (月 : 3.844×10^8 m、太陽 : 1.496×10^{11} m)

ϕ : 観測点の緯度

δ : 天体の赤緯 (赤道から南北に計った角度)

θ : 天体の時角 (天体の子午面と測点の子午面との間の角度)

(2) ドリフト補正

スプリング式の重力計では、バネ材のクリープによる読み取り値の時間的变化、即ちドリフトが生ずる。ドリフト補正は、重力計のドリフトは経過時間に比例するものとして補正を行った。別冊の重力計算一覧表に示すように、ドリフト値は 0.2 mgal/day 以下である。

(3) 地形補正

地形補正は、測点の周囲地形の凹凸が重力におよぼす影響を取り除くための補正である。地形図を格子間隔で区分けして、その中心点の標高を読み取り、測点との相対的な起伏を一定の形状に近似させる。それらの補正区画に影響される重力値を合計したものが地形補正值となる。

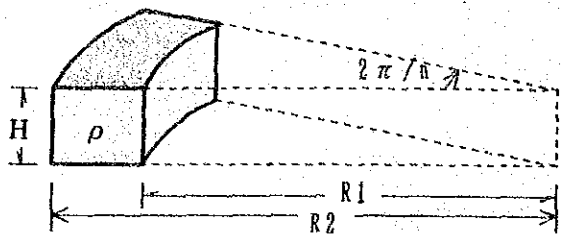
測点に近い範囲では高い精度の地形補正を行い、遠い範囲では粗い補正を行った。それぞれの補正領域に関する概念図、補正の範囲及び格子間隔等は「Fig. II-5 地形補正区画概念図」に示すとおりである。この中で、遠方・中間・近傍に使用する各地形データは、 $1/10,000$ 及び $1/50,000$ 地形図から直接読み取って各補正間隔の地形メッシュデータを作成した。

i) 円盤補正 - 遠方・中間・近傍

遠方・中間・近傍の各補正は、次式に示すHammerの方法を用いて計算を行った。

$$\Delta g = 2\pi G \rho / n \{ R_2 - R_1 + (R_1^2 + H^2)^{1/2} - (R_2^2 + H^2)^{1/2} \}$$

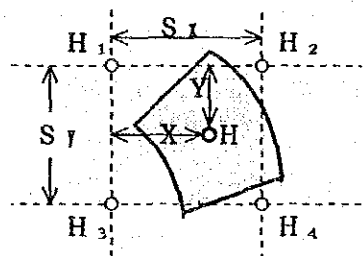
ただし、



- Δg : 地形補正值 (mgal)
- G : 重力定数 (6.67×10^{-8} dyne cm²/g²)
- ρ : 補正密度 (g/cm³)
- R_1 : 同心円柱内径 (m)
- R_2 : 同心円柱外径 (m)
- H : 測点標高 (m)
- n : 補正区画の等分数

補正領域及び区画分割についてはFig. II-5に示す通りである。

また、各補正区画の平均高度は、周囲の四つの地形メッシュ標高を用いて次式により計算される。



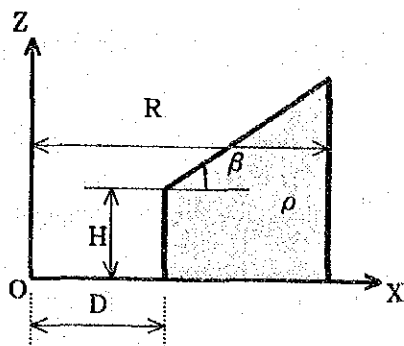
$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \cdot X / S_x + (H_3 - H_1) \cdot Y / S_y + (H_1 + H_4 - H_2 - H_3) \cdot XY / S_x \cdot S_y$$

ii) 周辺補正

周辺補正は、測点より30mまでのスケッチの地形の凹凸を測点から2方向の断面に表示し、広島等(1978)による周辺地形補正の方法を用いた。

この補正の数式と概念図は次のようである。

$$\Delta g = 2 G \rho \int_D^R \left[\tanh^{-1} \sqrt{(R^2 - X^2) / (R^2 + h^2)} - \tanh^{-1} \sqrt{(R^2 - X^2) / \{R^2 + (X \tan \beta + H - h - D \tan \beta)^2\}} \right] dX$$



Δg : 地形補正值 (mgal)

G : 重力定数 (6.67×10^{-8} dyne cm^2/g^2)

ρ : 補正密度 (g/cm^3)

D : 測点から崖までの距離 (m)

H : 崖の高さ (m)

β : 崖の傾斜角 ($^\circ$)

R : 補正範囲 (= 30 m)

h : 重力計の重錘の高さ (= 0.15 m)

なお、今回の調査において、地形補正を行う範囲に水域が入るため、水底標高を地盤として読み取り、水の影響を差し引いた補正を行っている。

(4) 高度補正

この補正には単に高度差に伴う重力値の補正であるフリーエア補正と、地下の岩石の密度が影響するブーゲ補正、及び大気の影響を取除く大気補正が含まれる。

フリーエア補正值 : Δg_1 は地球表面における平均的な重力鉛直勾配を使って次の式で表わされる。

$$\Delta g_1 = g_0 \cdot \left(1 - R^2 / (R+H)^2 \right) = (2 g_0 H R + g_0 H^2) / (R+H)^2$$

$$\approx 0.3086 H \text{ mgal}$$

ただし、 g_0 : 平均海水面重力値、 H : 測点標高 (m)、 R : 地球の平均半径

ブーゲ補正值 : Δg_2 は、厚さ H 、密度 ρ の無限に広い水平板が、地表とジオイドに挟まれているものとして計算され、次式で表わされる。

$$\Delta g_2 = -2 \pi G \rho H = -0.0419 \rho \cdot H \text{ mgal}$$

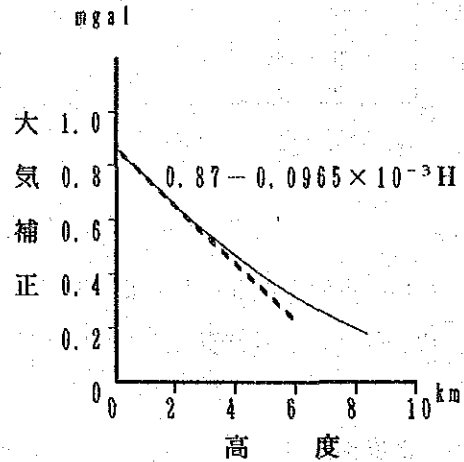
ただし、 G : 重力定数、 H : 測点標高 (m)、 ρ : 密度

大気補正值： Δg_3 は、大気の密度分布として標準大気模型を仮定し、0～50kmの範囲で積分して補正量を算出する。次図に示すように、補正量の変化は標高3 km以下ではほぼ一次関数に近似できるため、次式によって補正を行っている。

$$\Delta g_3 = 0.87 - 0.0965 \times 10^{-3} H \text{ (mgal)}$$

ただし、H：測点標高 (m)

フリーエア補正值、ブーゲ補正值及び大気補正值は共に測点標高の関数であるから、ひとまとめにして高度補正值とよび、次式で計算する。



$$\text{高度補正值：} \Delta g = \Delta g_1 + \Delta g_2 + \Delta g_3$$

$$= (0.3086 - 0.0419 \cdot \rho - 0.0965 \times 10^{-3}) H + 0.87 \text{ (mgal)}$$

(5) 緯度補正

地球は完全な球形ではなく、回転楕円体であることと、自転による遠心力のために地表での重力値は赤道付近で最小、両極で最大となる。そこで、測点の緯度： ϕ の相違による重力差を補正するために、次式に示す正規重力： γ を求め、これを緯度補正とする。

$$\gamma = (a \gamma_E \cos^2 \phi + b \gamma_P \sin^2 \phi) / (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \text{ (mgal)}$$

ただし、a：回転楕円体の赤道半径 (6,378.14km)

b：回転楕円体の極半径 (6,356.18km)

γ_E ：回転楕円体の赤道正規重力 (978.032 gal)

γ_P ：回転楕円体の極正規重力 (983.218 gal)

上式は、1967年 IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics：国際測地学および地球物理学連合) が、測地基準系1967の中で標準的な地球重力を与えるものとして公認しているものである。

重力調査では、実用上便利なように、正規重力式を次の近似式（正規重力の実用式という）に展開して使用している。

$$\gamma = 978,031.85 (1 + 0.005278895 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi) \quad (\text{mgal})$$

(6) 岩石試料の密度測定

重力異常は地下の密度変化の分布を反映している。したがって重力異常から地下構造を解析するためには、調査地域及びその周辺に分布する岩石や地層の密度を知る必要がある。本調査では「Fig. II-4 密度試料採取位置図」に示す33個の岩石試料を採取し密度測定を実施した。採取に際しては、地質図に示された各地層を構成する岩石を採取した。

密度測定は、1昼夜水浸させた後に表面水を拭き取った湿潤状態での測定を行い、次の式を用いて密度を算出した。

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_w} \quad \text{ただし、} \quad \begin{array}{l} \rho : \text{比重 (=密度 とする)} \\ W_a : \text{空中重量} \\ W_w : \text{水中重量} \end{array}$$

33試料の密度測定結果を「Tab. II-2 岩石密度測定結果」に主な地層別の平均密度として表現した。

(7) 補正密度の仮定

重力計算の補正密度の仮定は重力探査の結果に大きな影響を及ぼす。Tab. II-2に示した地表付近の岩石密度は1.86~2.79g/cm³の間に分布しているが、垂直方向に変化する地層の密度を、水平的なデータである地表岩石試料の密度実測値のみから決定することは難しい。

本重力探査では、次の諸項目について検討し補正密度の決定を行った。

- ① 地形補正及びブーゲ補正に必要な補正密度を3種類（ $\rho = 2.2, 2.4, 2.67 \text{g/cm}^3$ ）に変化させた等重力線図を作成し、それぞれの重力分布と、測点標高のみを用いて作成した地形等高線図との相関を検討した結果、次表に示す関係が得られた。Fig. II-24及びFig. II-25にそれぞれ補正密度 $\rho = 2.4 \text{g/cm}^3$ 及び 2.67g/cm^3 の等重力線図を示す。

	補正密度別の地形-重力異常相関頻度		
	$\rho = 2.2$	$\rho = 2.4$	$\rho = 2.67$
高地形と高重力異常、または、 低地形と低重力異常が一致する場合	8	5	2
高地形と低重力異常、または、 低地形と高重力異常が一致する場合	1	7	14

地形標高の変化に対して、重力異常が消滅するか無関係な分布となる場合が最適な補正密度であり、上表の上段及び下段における相関頻度が均衡する $\rho = 2.4\text{g/cm}^3$ が最も適切な補正密度とみなせる。

② Tab. II-2 に示した岩石試料密度から鉱石を除く 25 試料の平均密度は次のように求められた。

計 25 試料の平均密度： $\rho = 2.55\text{g/cm}^3$

③ Fig. II-26 に例を示すように、測点標高：H と、緯度補正済ブーゲー異常値に地形補正及び傾向面補正を考慮した重力値：G との関係から、次の補正密度が計算された。

三次傾向面補正による： $\rho = 2.405\text{g/cm}^3$ (Fig. II-26 参照)

以上を参考にして補正密度 $\rho = 2.4\text{g/cm}^3$ の等重力線図を作成し、これを用いて解析を行うことに決定した。

(8) 等重力線図の作成

本調査の等重力線図は、電子計算機とプロッターを使用し、ランダムに分布する測点の位置とブーゲー異常値から、格子間隔 75 m の格子点変換を行い作図した。直角座標系格子点ブーゲー異常値の計算方法は、「重みつき二次曲面近似法」を採用した。これは、各格子点を中心に格子間隔の 10 倍の「取り込み範囲」を設定し、この範囲内にある測点に対して格子点に近い測点ほど大きい「重み」をつけ、最小 2 乗法によって二次近似曲面を計算して格子点ブ

一ゲ異常値を求める方法である。この方法によると、各測点位置における重力値の再現性がきわめてよい。なお、格子点変換の計算に当っては、格子点を中心とする 200度までの扇形内に6点以上の測点が存在する場合に限って計算を行うこととしている。

1-2-5 解析方法

等重力線図は、広域的な地下構造や地域的で小規模な地下構造を反映して、種々の波長の重力異常が組み合わさっているため、重力探査では目的の地下構造の影響を抽出するためにフィルター処理を施すことが多い。本調査では、等重力線図 ($\rho = 2.4\text{g/cm}^3$) の特性からみて、以下に述べる傾向面解析、スペクトル解析、鉛直二次微分等のフィルター解析を実施し、さらに、角柱モデルによる三次元二層構造解析、多層構造による二次元断面解析等の定量解析を行った。

(1) 傾向面解析

等重力線図には調査地の地下構造を反映する重力異常のみならず、周辺の広域的構造に起因する重力トレンドが含まれる場合が多い。本調査地域の重力分布は、南から北方向へ重力値を増す重力トレンドや、調査地域中央部で等重力線の走向方向の変化（南部でE-W系、北部でNE-SW系）が認められ、大局的に三次曲面を呈していると考えられる。

こうした広域的重力分布を取り除いて、比較的浅部の構造を明らかにするため、三次傾向面解析を実施した。

X-Y座標系に配列された格子点重力値 $G(X, Y)$ を X・Y座標に関する関数とみなし、最小2乗法によって三次近似曲面 $Z(X, Y)$ を求める。各格子点の三次近似重力値を格子点重力値から差し引いたものが残差値となる。その計算式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} Z(X, Y) = & -46.4285 - 0.88397836X + 1.16256697Y + 0.05999708X^2 \\ & + 0.11396378XY - 0.06440390Y^2 + 0.01809535X^3 \\ & + 0.06687063X^2Y + 0.09553135XY^2 + 0.05944291Y^3 \end{aligned}$$

$$\text{残差(Residual Value)} = G(X, Y) - Z(X, Y)$$

これらの計算結果は、「Fig. II-27 三次傾向面図」及び「Fig. II-28 三次残差図」として図化した。

(2) スペクトル解析 (Power Spectrum)

本調査の等重力線図には短波長の重力異常と極めて長波長の重力異常が組み合わさっている。こうした特性を周波数領域において解析することにより、重力異常をもたらす異常源の平均的深度を推定し、さらに任意の平均深度を反映する重力異常を抽出することが可能である (Spector and Grant, 1970)。

「Fig. II-30 エネルギー・スペクトル図」において種々の周波数 f (cycle/km) に対して計算された対数エネルギー・スペクトル (Logarithmic Energy Spectrums) : $\log E$ の分布を見ると、ほぼ2本の直線に近似することができる。この回帰直線の勾配から、本地域の重力異常をもたらす異常源の平均深度 : H が次式によって求められる。

$$H = - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta \log E}{\Delta f}$$

即ち、本調査地内の重力構造は、平均深度 : $H_R = 1,120$ m の Regional 成分と、平均深度 $H_N = 162$ m の Near-Surface 成分とに大別される。

以上、等重力線図に対して行われたスペクトル解析の結果、深部構造と浅部構造とが識別できると判断されたため、深部 (Regional) 成分と浅部 (Near-Surface) 成分を分離してスペクトル解析図を作成した。深部成分 : G_R を求めるためのフィルター演算に必要な変数は、Fig. II-30から求められた二つの平均深度 H_R , H_N と、2本の回帰直線と対数エネルギー・スペクトル軸との交点における差 : K_x (Fig. II-30参照) であり、次式を用いて加重函数と重力データの Convolutionによって行われる。

$$G_R (X, Y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta) \cdot W(X-\xi, Y-\eta) d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\xi, \eta) d\xi d\eta}$$

ここで、加重函数：Wは次式を用いて計算される。

$$W(X, Y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{f \cdot J_0(P \cdot f)}{1 + K_X \cdot e^{(H_R - H_N) \cdot f}} df$$

ただし、 $P^2 = X^2 + Y^2$

J_0 : ベッセル函数

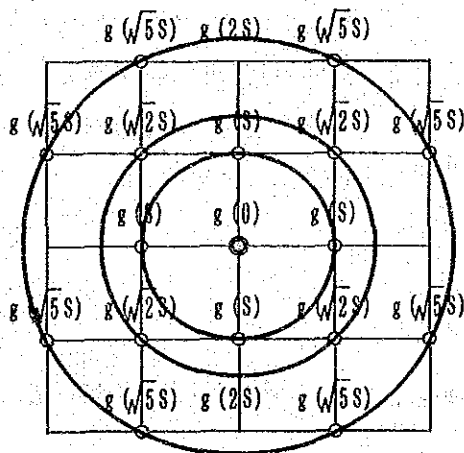
こうして得られた深部構造成分「Fig. II-32 スペクトル解析深部構造図」： $G_R(X, Y)$ を等重力線図 (Fig. II-28) : $G(X, Y)$ から差し引けば、浅部構造 (Near-Surface) 成分「Fig. II-31 スペクトル解析浅部構造図」： $G_N(X, Y)$ が求められる。

$$G_N(X, Y) = G(X, Y) - G_R(X, Y)$$

(3) 鉛直二次微分

等重力線図における重力変化の曲率を表わす方法に鉛直二次微分がある。重力異常の曲率は、密度異常岩体の大きさや深さと関係を持ち、異常岩体の抽出に役立つ。次の式に基づき「Fig. II-29 鉛直二次微分図」の計算を実施した。

【鉛直二次微分格子データ】



左図に示すように、格子点の中心から任意の円周 (半径 r) 上の平均重力値 $g(r)$ に距離の重みをつけて計算する方法で、本調査では、Rosenbach (1953) による式を用いた。

S は格子点間隔で、普通は抽出したい面的な拡がり、または目的構造の深さの 0.5 ~ 1 倍になるよう選定される。

今回の調査では、 $S = 150$ m を採用して計算を行った。

$$g_z(0) = -\frac{1}{24S^2} \{ 96g(0) - 72g(S) - 32g(\sqrt{2}S) + 8g(\sqrt{5}S) \}$$

(4) 三次元シミュレーション

三次残差図における格子点重力値を用いて、二層構造による三次元シミュレーション (Cordell and Henderson, 1968) を実施した。

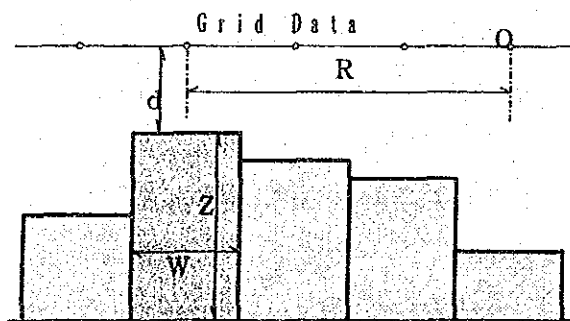
すなわち、地下構造を上部層と下部層の二層構造と仮定し、岩石試料密度分布及び二次元シミュレーションから上部層と下部層の密度差を $\Delta\rho = 0.50\text{g/cm}^3$ に大別して実施している。

計算に際しては、第二層を 400m 平方の角柱に分割して、最小 2 乗法によりそれぞれの角柱の厚さを変化させることによって、格子点重力値に一致させる方法をとった。

この計算式及び概念図は次のとおりである。

次図のように、各格子点の真下に、それぞれ各格子点を中心とする角柱を三次元的に設置した時、斜線部の角柱による格子点 0 における重力値の鉛直成分は次式で表わされる。

$$\Delta g = G\rho W^2 \left[1 / (R^2 + d^2)^{1/2} - 1 / \{ R^2 + (Z + d)^2 \}^{1/2} \right]$$



ここで、

G : 重力定数

R : 角柱の中心までの距離

ρ : 角柱の密度 ($\Delta\rho = 0.50$)

Z : 角柱の基準面からの高さ

W : 角柱の幅 = 格子間隔 (150 m)

d : 地表からの深度

ただし、格子点 0 の直下の角柱のみについては (即ち、 $R = 0$ の時)、次式を用いる。

$$\Delta g_0 = 2 \pi G \rho \left\{ Z - \left((Z+d)^2 + W^2 / \pi \right)^{1/2} + \left(d^2 + W^2 / \pi \right)^{1/2} \right\}$$

全ての角柱による影響の総和が格子点0における重力異常値となり、地表からの深度dを変化させることにより、この値と格子点重力値がほぼ一致するまで計算を繰り返し行った。計算結果は、「Fig. II-35 三次元二層構造図」として第二層の表層部を示す等深度線で表示した。

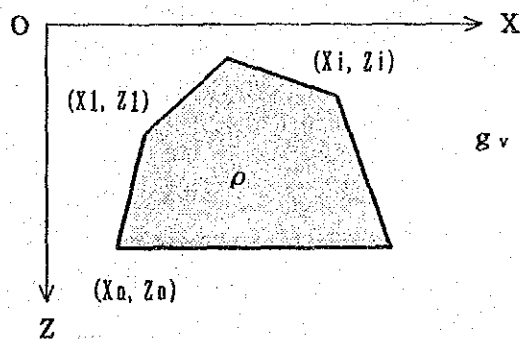
(5) 二次元シミュレーション

地下構造を推定するため、三次残差図で二次元性が明らかな断面について、断面二次元解析を行った。

地下構造を多層構造として密度の異なる多角形で表現し、これに影響される地表での重力値を算出して実測値と比較する。次に、多角形の密度及び多角形を構成する座標を変数とみなし、最小2乗法により実測値と計算値がほぼ一致するまでこれらの変数を変化させて密度構造を算出した。

密度構造モデルに対応する重力値の算出には、Talwani et al. (1959)の方法を変形した次の方法を用いた。次図に示す密度 ρ の多角形（紙面に垂直無限）によって受ける0点（地表上の任意の点）での重力値の垂直成分 g_v は次式で与えられる。

計算に際しては初期モデル構造の設定が重要な要素となるため、二層構造を基本とし地質情報を加味した多層構造を設定した。計算結果は密度構造断面図 (Fig. II-33~Fig. II-34) に表示し、地質構造の解釈を行った。



$$g_v = 2 \rho G \sum_{i=1}^n \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \int_{-\infty}^X \frac{Z}{X^2 + Z^2} dX \cdot dZ$$

ただし、 ρ : 密度
G : 重力定数

第2章 調査結果

2-1 I P 法

2-1-1 見掛比抵抗及び周波数効果の測定結果

本調査において、測定された見掛比抵抗及び周波数効果の値について、各測線のnごとに平均値を求めたものを次表に示す。

LINE	Apparent Resistivity ($\Omega \cdot m$)						標準偏差		
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	AVE	MAX	MIN	σ_n
HJ-1	39.6	40.6	48.6	57.4	67.6	49.9	155.0	19.0	26.9
2	56.7	60.6	68.4	85.2	95.3	72.0	177.0	26.6	37.2
TF-1	35.5	49.6	65.5	75.5	89.5	61.4	228.0	15.4	45.3
2	30.3	44.5	57.4	76.4	93.4	57.5	216.0	20.4	38.4
3	24.0	28.2	36.8	45.4	54.5	36.8	99.0	16.6	15.4
AK-1	59.7	92.0	131.2	158.4	202.2	126.5	963.0	26.0	125.3
2	38.5	46.0	63.7	68.6	80.3	57.5	145.0	21.5	34.8
LM-1	29.5	38.9	49.9	57.7	60.6	45.8	99.0	22.1	18.9
2	39.6	58.1	70.5	87.5	86.1	66.8	264.0	18.7	48.7
3	25.8	34.2	42.5	49.3	56.3	41.0	91.0	14.3	19.1
4	16.5	23.1	31.6	39.7	47.2	30.2	60.8	11.3	13.3
FZ-1	120.5	125.6	108.7	112.9	130.7	119.6	357.0	24.0	73.9
2	193.4	252.7	265.2	286.4	284.8	253.8	976.0	47.6	179.8
AVE	54.6	68.8	80.0	92.3	103.7	78.4			

見掛比抵抗の平均値

LINE	F E (%)								標準偏差 σ_n
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	AVE	MAX	MIN	
HJ-1	2.0	2.0	2.4	2.9	3.4	2.5	6.6	0.6	1.4
2	1.4	1.4	1.4	1.7	1.7	1.5	2.6	0.8	0.3
TF-1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.9	1.5	2.4	0.6	0.4
2	1.1	1.4	1.5	1.6	1.7	1.4	2.8	0.3	0.5
3	1.1	1.3	1.3	1.4	1.8	1.4	2.3	0.6	0.5
AK-1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.7	1.5	3.3	0.0	0.8
2	1.4	1.5	1.6	1.6	1.8	1.5	2.5	0.6	0.5
LM-1	1.7	1.7	2.0	2.2	2.6	2.0	3.4	1.3	0.5
2	1.6	1.7	2.2	2.5	2.4	2.0	4.0	0.9	0.7
3	1.2	1.4	1.5	1.7	2.0	1.5	3.0	0.7	0.5
4	1.0	1.2	1.5	1.6	1.7	1.4	2.3	0.4	0.4
PZ-1	2.7	3.4	3.9	4.4	4.3	3.7	6.0	1.3	1.0
2	2.0	2.2	2.3	2.6	2.9	2.4	5.0	0.8	1.0
AVE	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	1.9			

F E の平均値

表の右側の欄には、各測線での平均値(AVE)、最大値(MAX)、最小値(MIN)及び標準偏差 σ_n が示してある。たとえば、HajarのHJ-1の平均見掛比抵抗は、 $n=1$ の時に39.6 $\Omega \cdot m$ であり、この測線の全平均値は49.9 $\Omega \cdot m$ であり、最大値及び最小値はそれぞれ155 $\Omega \cdot m$ と19 $\Omega \cdot m$ である。

測定結果全体を通して、 n が増加するほど見掛比抵抗は高くなる傾向が見られ、 $n=1$ で54.6 $\Omega \cdot m$ 、 $n=5$ では103.7 $\Omega \cdot m$ となっている。また全測定の平均見掛比抵抗は78.4 $\Omega \cdot m$ である。

測線ごとの平均値を比較すると、最も低い値だったのはLamrahのLM-4で30.2 $\Omega \cdot m$ であり、最も高い値であったのはPrizemのPZ-2の253.8 $\Omega \cdot m$ である。また、平均見掛比抵抗の高かった測線としては、他にAkhlij-OukhribaneのAK-1とFeizemのPZ-2がいずれも100 $\Omega \cdot m$ 以上であった。

標準偏差は、データのばらつきの程度を示す数値で、大きいほどばらつきが大きい。PZ-1、PZ-2とAK-1が特に見掛比抵抗の標準偏差が大きく、ばらつきの大きいことがわかる。さらに

HJ-1, FZ-1 及び FZ-2 では F E 値のばらつきが大きい。また Lamrah の LM-4 は標準偏差が全測線で最も小さく、かつ平均見掛比抵抗も $30.2 \Omega \cdot m$ と最も小さいので、測線全体にわたって見掛比抵抗が低いことがわかる。

F E 値についても、 n が大きくなるほど平均値は大きくなっており、全体の平均は 1.9% である。また、最大で 4% 以上の F E が得られている測線として、HJ-1, LM-2, FZ-1 及び FZ-2 の 4 測線がある。また標準偏差は全体に小さいが、HJ-1, FZ-1, FZ-2 の 3 つの測線で 1 以上になっている。

以下に各地区ごとの測定結果を説明する。

(1) Hajar 付近 (Fig. II-6, II-7 参照)

測線 HJ-1 は、Hajar 鉱山の竖坑から東へ 100m の所を測点 10 とした、南北 2 km の測線である。この測線は既知の Hajar 鉱床の上を通るもので、I P 法の適用性の確認等を主な目的とした。

Fig. II-6 に測定された見掛比抵抗と周波数効果を擬似断面表示したものを示す。Hajar 鉱床の位置がある測点 8 付近に $30 \Omega \cdot m$ 以下の低見掛比抵抗の部分が認められ、その部分は 4~5% という強 I P 異常が得られており、I P 法が有効であることが確認された。

測線の南側の測点 12~18 にかけては $50 \Omega \cdot m$ 以上の見掛比抵抗となっており、深くなるほど高い値になる傾向が見られる。また、この部分の F E 値は 2% 以下と小さくなっている。この原因として、南側では高比抵抗の基盤が浅くなっているためと考えられる。

測線 HJ-2 は HJ-1 の東側 400m に設置した南北 2 km の測線である。測点 4 から 6 付近に $30 \Omega \cdot m$ 程度の低見掛比抵抗が見られるが F E 値は 2% 程度と小さく、HJ-1 にあった低見掛比抵抗・強 I P 異常の部分は認められない。測線の南側で見掛比抵抗が高くなるという傾向は、HJ-1 と同様である。

(2) Tiferouine 付近 (Fig. II-8~II-10 参照)

Tiferouine 地区は、Barrage Cavagnac の東約 5 km 付近に位置する。本地区では、3 本の測線を西から東へ TF-1, TF-2, TF-3 と配置した。

TF-1 は北東~南西の 2 km の測線である。測点 8 から南側では、 $n = 1, 2$ の浅い部分で $30 \Omega \cdot m$ 以下の低見掛比抵抗となっている。これに対し、測線の北側では $50 \sim 200 \Omega \cdot m$ 程度の高い値となっている。また F E 値は、全体的に小さい値になっているが、測点 8 から南の $n = 5$ の深い部分で 2% 程度で、この測線では大きい部分となっている。

TF-2は、TF-1に平行な測線で、300m東側に位置し、測線長は1.5kmである。ここでも、やはり測線の南側の浅い部分で見掛比抵抗は低い値になっているが、これはCSAMT法の結果とよく一致している。IP異常は、測点10付近で見られるが、FE値は2~2.8%であり、Hajar 鉱床のIP異常と比較すると弱く、付近のボーリング結果からも、鉱染帯に対応するものと考えられる。TF-1、TF-2付近は、空中磁気探査で大きな磁気異常が検出され、その結果にもとづいてボーリングが実施されたが、いずれも鉱染帯を認めるのみで鉱床の発見につながっていない。

TF-3は、TF-2と平行に東側800mに位置する測線長2kmの測線である。この測線では北側に空中磁気探査の異常があり、南側の測点12~17付近でもCSAMT法の低比抵抗異常が検出されている。本調査による見掛比抵抗も測点12~15にかけては、約40Ω・m程度の部分が地下深部のn=4~5まで続いている。

測点14付近で、見掛比抵抗が低くかつIP異常が強くなる傾向が見られるが、FE値は2.2%程度であり、鉱床の徴候とは考えにくい。

(3) Akhlilj・Oukhribane付近 (Fig. II-11, II-12 参照)

本地区はTiferouine地区の北西約2kmの所にあり、2測線を配置した。

AK-1はAkhlilj部落の西側を通り北東から南西へ延びる3.6kmの測線である。測点25~35の間では、n=1~3程度の浅い部分で50Ω・m以下の見掛比抵抗になっている。この部分はCSAMT法の低比抵抗異常の部分と一致している。しかしながらこの部分のIP異常は0.5%以下ときわめて弱く、Hajarの鉱床のタイプの鉱脈との結びつきは考えにくい。また、測点16~21、及び24付近では300Ω・m以上の高見掛比抵抗になっている。FE値は全体的に小さいが、測点8~18、22~25付近では2%以上のIP異常となっている。前者は、空中磁気探査の異常と関連があると思われるが、見掛比抵抗が高いため、鉱床との関連は少いと考えられる。

AK-2は、AK-1の900m東側に位置する1.5kmの測線である。測点4~6付近は、浅い部分(n=1)から深い部分(n=5)まで30Ω・m程度の低見掛比抵抗になっている。これはCSAMT法の低比抵抗異常と、また空中磁気探査の磁気異常と一致している。しかしながら、この付近のFE値は2%程度であり、この測線の他の部分よりは大きいながら、鉱床との関連は少いと考えられる。

(4) Lamrah付近 (Fig. II-13 ~II-16 参照)

Lalla Takerkousti部落の北~北西の地区について、4本の測線を配置し、東から西へ

LM-1~LM-4とした。

LM-1は主要国道の東側に位置する南北 1.5kmの測線であり、測点 5~13にかけて、地表付近 ($n = 1$) で $30 \Omega \cdot m$ 以下の低見掛比抵抗となっている。特に測点6付近では深くまで低見掛比抵抗の部分が延びているが、これはCSAMT法の低比抵抗異常の部分と一致している。FE値もこの部分はやや大きく、最高 3.4%となっている。

LM-2は、主要国道の西側をほぼ国道に沿って位置する南北 2 kmの測線である。ここではLM-1で捕足された低見掛比抵抗部が測線の中央から北側でさらに低くなりかつ下方に連続している。またFE値も4%に達する大きい値が得られている。反対に測線の南側では測点13~18にかけて、 $100 \Omega \cdot m$ 以上の高見掛比抵抗となり、FE値も2%以下と小さくなっている。

LM-3はBarrage Cavagnacから流下する N' Fis 川の左岸に位置する南北 3.0kmの測線である。測点 2~15付近と測点21~25付近の浅い部分 ($n = 1 \sim 2$) に低見掛比抵抗が認められた。この測線では、測点10付近にはCSAMT法による低比抵抗異常と磁気異常が見られ、また測点20~25にはCSAMT法による低比抵抗異常が認められており、CSAMT法の結果とよく一致している。測点5~6付近では、 $n = 5$ の深い部分まで低見掛比抵抗が続いている。FE値は、測点 7~12, 測点18~24の深い部分 ($n = 3 \sim 5$) で認められるが、2~2.5%程度とそれほど大きくはなく、対応する見掛比抵抗も概ね高いので、鉱床との関連は薄いと思われる。測点22の $n = 1$ から測点23の $n = 5$ にかけて $20 \sim 40 \Omega \cdot m$ 程度の低見掛比抵抗の部分が地下深部に延びているが、これはLM-1, LM-2の低見掛比抵抗部分の延長と考えられ、CSAMT法の結果による、東西に延びた低比抵抗異常とよく一致している。

LM-4は、LM-3の西方約 3 kmにある、北東~南西の 1.5kmの測線であり、CSAMT法の低比抵抗異常が測点 6~12付近に見られ、また磁気異常が測点 2~4と対応する。見掛比抵抗は地表付近では $20 \Omega \cdot m$ 以下と極めて低い値であるが、深くなるほど高い値になる傾向がある。特に測点 5~8と測点10~12にかけて $n = 4, 5$ に $50 \Omega \cdot m$ 以上と本測線では高い部分が見られる。なお、本測線の平均見掛比抵抗 ($30 \Omega \cdot m$) は今回測定した13測線で最も小さかった。

(5) Frizem付近 (Fig. II-17, II-18 参照)

Frizem地区では、Barrage Cavagnacの西北西約16kmに位置するFrizem部落の南北に2測線を配置した。FZ-1は部落の北を東北東-西南西に横切る 2 kmの測線である。また、FZ-2は、それと平行に、南へ900m離れた同じく 2 kmの測線である。

FZ-1は、見掛比抵抗の変化が激しい測線で、平均値も約 $120 \Omega \cdot m$ と高い。測点7付近では $20 \sim 30 \Omega \cdot m$ の低見掛比抵抗の特徴的な脈状の構造が見られ、FE値も $5 \sim 6 \%$ と大きい。測点8から東側は、全体的に見掛比抵抗が高くなっているが、測点11~12で $n = 4, 5$ の部分では $50 \Omega \cdot m$ 程度とこの測線では低い値で、かつFE値が 5% 弱程度と大きくなっている。

FZ-2は、得られた平均見掛比抵抗が約 $250 \Omega \cdot m$ と、今回調査した全測線のうちで最も高い値が得られている。特に測点10から西側と、測点14~15の $n = 2$ 以下の部分で、 $200 \Omega \cdot m$ 以上の高い見掛比抵抗が得られている。また、測点12~14の浅い部分及び測点16~17にかけて $100 \Omega \cdot m$ 以下とこの測線では低い値の部分が認められる。FE値は、測点2~5にかけての $n = 3$ より深い部分で 4% 以上の比較的大きな値が得られている。

(6) 見掛比抵抗平面

測定された見掛比抵抗を平面図としたものを PL. II-3~ PL. II-7に示す。また、同じくFE値を平面図としたものを PL. II-8~ PL. II-12に示す。測線間が離れている部分もあり、コンターを引きにくい所もあるが、一応の目安として平面表示を試みた。

PL. II-3は $n = 1$ の場合の見掛比抵抗の平面図で、まずAK-1の測点20付近からTF-1の測点5にかけて $100 \Omega \cdot m$ 以上の高見掛比抵抗域が見られる。また、AK-1の測点5~12にかけてと、Hajarの測線の南側でも $100 \Omega \cdot m$ 以上の部分が見られる。 $n = 1$ では低見掛比抵抗の部分は少ないが、TF-1の北からTF-3にかけてと、LM-3の北の部分に $20 \Omega \cdot m$ 以下の部分が見られる。

$n = 2$ の場合(PL. II-4)にも、高見掛比抵抗部分の傾向は $n = 1$ の場合と同様だが、LM-2の南側に $100 \Omega \cdot m$ 以上の部分が広がってきている。さらに $n = 3$ (PL. II-5) となると、高見掛比抵抗の部分が多くなる。特にAK-1の測線の中央付近では $200 \Omega \cdot m$ 以上の高見掛比抵抗域が現れる。

$n = 4$ (PL. II-6) の場合には、Hajar や Lamrahにおいて測線の南側が高見掛比抵抗、北側が低見掛比抵抗になる傾向がはっきりしてくる。特にLM-2の南側の高見掛比抵抗が顕著になっている。

$n = 5$ (PL. II-7) は、 $n = 4$ の場合と同傾向だが、高見掛比抵抗の部分がさらに広がっている。 $30 \Omega \cdot m$ 以下になるような低見掛比抵抗の部分は、HJ-1とLM-2に見られるだけである。

Prizem地区については、見掛比抵抗の変化が激しくて平面図として見掛比抵抗を表現

するのはさらに困難である。n = 1 の場合のFZ-1の東側の低見掛比抵抗域は、FZ-2まで南北につながるように見える。FZ-2の西側には高見掛比抵抗域が見られるが、北側のFZ-1につなげるのは困難である。

(7) 周波数効果平面

FE値を平面図としたものを、n = 1 から n = 5 までについてそれぞれ PL. II-8 から PL. II-12 に示す。nが増加するほどFE値は大きくなる傾向がある。n = 1 ではHJ-1にFE値が3%を超えるIP異常が見られ、nが増加するとさらに顕著となる。n = 4 での3%以上のFE値は、Hajar 以外でもLM-2に見られ、n = 5 になると、LM-1, LM-2の測線の北側と、AK-1の測線の北にも3%以上のIP異常が表れている。

Frizen地区はn = 1 では、南に位置するFZ-2の東側がFE値が小さく、これはFZ-1の測点12付近までつながると考えられる。FE値の高い部分はn = 3 ~ 5 において、FZ-1, FZ-2共に西側の部分に見られ、南北につながるように思われるが、特にFZ-1に見られる5%以上のIP異常域の連続性については、2本の測線だけでは十分な検討ができない。FZ-1においては、このIP異常の強い部分は、低見掛比抵抗と対応しているが、FZ-2においては200Ω・m以上の高見掛比抵抗域に対応している。

2-1-2 シミュレーション解析結果

今回のdipole-dipole電極配置による比抵抗及びIP測定の結果、Hajar の測線HJ-1、LamrahのLM-1, LM-2及びFrizenのFZ-1で低見掛比抵抗でかつ高いIPの異常が得られた。これらの測線について計算機による二次元の有限要素法によるシミュレーションを実施した結果をFig. II-19 ~ II-23 及び PL. II-13 ~ II-17 に示し、以下に説明する。

(1) Hajar 地区

既知のHajar 鉱床直上の測線HJ-1においては、測点8付近に顕著な低見掛比抵抗でかつ強いIP異常が見られている。この比抵抗構造を調べるために二次元シミュレーションを実施した。見掛比抵抗の擬似断面を参考にした初期構造からスタートして、試行錯誤で構造を変更して、現地で得られた見掛比抵抗をよく再現する構造を探した。その結果、Fig. II-19 (PL. II-13) に示すような構造が得られた。Hajar 鉱床の低比抵抗異常及びIP異常は、図に示す二次元構造で十分に再現されている。たとえば、二次元解析結果の見掛比抵抗の断面では30Ω・mのコンターは、Fig. II-6に示す現地で測定された30Ω・mのコンターの特徴を良くとらえている。解析構造としては、測点8の深度200m付

近から下で比抵抗 $12\Omega \cdot m$ 、FEが20%の構造が得られており、この構造は北側で深くなる傾向が見られる。また比抵抗 $200\Omega \cdot m$ の高比抵抗の基盤が、測線の南の方では浅く、低比抵抗構造のある測点8付近で深くなる傾向が見られ、それが見掛比抵抗が測線の南で高くなる原因となっている。また測点8と測点12付近の50~100mの深さの部分に、FEは3%だが $15\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗の構造が得られている。

(2) Lamrah地区

Lamrah地域では、測線LM-1及びLM-2において低見掛比抵抗でかつ3~4%のFEが得られている。この付近ではCSAMT法による低比抵抗異常も認められており、比抵抗構造を調べるために二次元解析を行った。その結果をFig. II-20及びFig. II-21(Pl. II-14, II-15)に示し、それぞれLM-1及びLM-2に対応する。LM-1では測点5~6にかけて低見掛比抵抗の部分が $n=1$ から $n=3\sim 4$ まで続いているが(Fig. II-13)、この傾向はシミュレーションによってよく再現されている。解析結果からは、 $20\Omega \cdot m$ の低比抵抗の表土層が深くなっており、さらにその下部に $10\Omega \cdot m$ という低比抵抗の構造が得られている。その $10\Omega \cdot m$ の低比抵抗構造の下部が、深度約200m付近で、20%程度のFEを示すと考えられる。LM-2では、測点5付近で深度が約200mの所に比抵抗 $10\Omega \cdot m$ 、FEが15%の解析構造が得られているが、構造の大きさはLM-1よりも大きくなっている。

(3) Frizem地区

Frizem地域の測線FZ-1においては、低見掛比抵抗でかつFE値が5~6%という高い値を示している。擬似断面表示のコンターの形状は非常に複雑で、解析構造を決めるのは困難であるが、数10回にわたるくり返し計算の結果、Fig. II-22に示す構造が最終構造として得られた。見掛比抵抗の解析結果は、現地で得られた見掛比抵抗曲線の特徴をよくとらえている。しかしIPの解析結果は、測線の西側の強いIP異常の部分で、現地で得られた特徴をとらえているのみで、測線の東側では必ずしも現地の特徴が表現されていない。測点7付近の50~200mぐらいの深度に $20\Omega \cdot m$ の低比抵抗で、FEが3%の構造が、さらにその下に $20\Omega \cdot m$ でFE値が25%の構造が解析されている。しかしながら、その構造の西側に接して比抵抗が $50\Omega \cdot m$ と高いがFEが20%の構造が解析されている。測線FZ-2は、見掛比抵抗の平均値が最も高かった測線であり、解析構造でも最下層が $500\Omega \cdot m$ という極めて高比抵抗に解析されている。測線の西端の深度200m程度の所に比抵抗は $50\Omega \cdot m$ とやや高いがFEが20%の構造が解析されており、この構造はFZ-1の測点2付近の高い比抵抗でかつIP異常も強い構造と対応すると考えられる。

2-2 重力法

本重力探査の解析の結果、次に示す図面を作成した。

- Fig. II-24 等重力線図 ($\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$)
- Fig. II-27 三次傾向面図
- Fig. II-28 三次残差図
- Fig. II-29 鉛直二次微分図
- Fig. II-30 エネルギー・スペクトル図
- Fig. II-31 スペクトル解析浅部構造図
- Fig. II-32 スペクトル解析深部構造図
- Fig. II-33 密度構造断面図 A-A'
- Fig. II-34 密度構造断面図 B-B'
- Fig. II-35 三次元二層構造図

本節ではこれら図面に現れる重力分布について述べる。

2-2-1 等重力線図 ($\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$ 、Fig. II-24)

本地域のブーゲ異常は最高 -37 mgal から最低 -55 mgal の範囲に分布し、その差は 18 mgal に達する。

広域的な重力分布から見ると、ブーゲ異常値は南東部で低く、北西部で高い比較的単調な形状である。コンターの走向は本調査域南部でE-W方向が優勢なのに対し、Barrage Caragnac-Akblig西部を境に西側ではNE-SW系の走向が顕著になる。

ブーゲ異常値は上述のように北高南低の傾向があるため、コンターが北方に凸型に発達している場合は低ブーゲ異常域であることを示し、逆に南方に凸の場合は高ブーゲ異常域である事を示す。

等重力線図 ($\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$) におけるブーゲ異常分布の特徴は次のとおりである。

- ① 本調査地の中南部のTiferouine 周辺ではE-W系の走向コンターが発達し、 4 mgal/km 程度の大きな勾配で北方のOukhribaneに向かってブーゲ異常値が増加する。
- ② Oukhribane南部をNW-SE方向に伸長する帯状の高ブーゲ異常域とその南側を平行に伸長する低ブーゲ異常域の対比が特徴的である。

③ Akhlilj東部ではコンター走向がWNW-ESE方向となり、高ブーゲ異常値を示し、重力傾度も3 mgal/km程度と大きい。

④ AmzourhからLamrahへ北東方向に直線的に伸長するコンターが特徴的であり、2 mgal/km程度の重力傾度を示す。また、このコンターの西側では重力勾配は緩やかになる。

2-2-2 三次残差図 (Fig. II-28)

「Fig. II-24 等重力線図 ($\rho = 2.4\text{g/cm}^3$)」に現れる重力分布は、地下深部の物質の密度変化をも反映している。本調査のように地下数100 mkm以浅の金属鉱床探査を目的とした場合、地下深部の情報を取り除いて、地下浅部のみによる重力分布を抽出することは有効な手段となる。

そこで、Fig. II-24の大局的な重力分布に最もよく合った三次曲面（「Fig. II-27 三次傾向面図」参照）を求め、これが地下深部の密度変化を反映した長波長の重力変化と考え、等重力線図から三次傾向面図を差し引いた「Fig. II-28 三次残差図」を作成した。

三次残差図における重力分布の傾向は、等重力線図 ($\rho = 2.4\text{g/cm}^3$) と比較して大きく変化し、比較的浅部の構造による重力変化を強調して再現され、地表地質分布との対応が容易になっている。

三次残差図に見られる主な高重力異常及び低重力異常は、それぞれその中心付近の地名を付して次のようにまとめられる。

i) Akhlilj高異常

「Akhlilj高異常」はAkhlilj 北部から東南方へ帯状に連なる高重力異常域である。Akhlilj東部では北方へ拡がる傾向がみられるが、調査域北端部に位置するためその形状は明らかでない。本高異常はAkhlilj東部で残差値 1.5 mgal 以上に達し、本地域の最大残差値を示している。

ii) Oukhribane高異常

「Oukhribane高異常」はOukhribane南部をNW-SE方向に帯状に連なる高重力異常域である。本高異常域中央部ではやや塊状を呈する。また本高異常域南部ではその伸長方向を西に変えている。南端の高異常域はIP法の高見掛比抵抗域と一致している。残差値は北部で最大1 mgal以上に達する。

iii) Amzourh高異常

『Amzourh高異常』はAmzourh北部に緩やかに環状に広がる高重力異常域である。残差値0.8 mgal以上の高異常が東部環状域に分布する。

iv) Hajar高異常

『Hajar高異常』はHajar鉞山の南部から南方に伸長する高重力異常である。Hajar鉞山より約1 km南の高異常鞍部を経て、本調査城南東端山岳域の高異常に連なる。残差値は南東端部にて1 mgal以上に達する。

v) Oukhribane西部低異常

『Oukhribane西部低異常』はOukhribane北西部から南方に帯状に連なる低重力異常域である。本低異常域南部から枝状に南南東方向に伸長し、Oukhribane高異常域とほぼ平行の方向性をもつ。所々に残差値-0.7 mgal以下の塊状の低異常が散在する。

vi) Hajar西部低異常

『Hajar西部低異常』はHajar鉞山西部を南北に帯状に連なる低重力異常であり、その南端はTiferouine東部まで達する。低異常の中心はTiferouine東部に存在し、残差値-0.7 mgal以下を示す。

vii) Lamrab東部低異常

『Lamrab東部低異常』はLamrab東部域に塊状に広がる低異常である。本低異常南西部の低異常鞍部を経て、Oukhribane西部低異常域北端部に連なる。本低異常は中心部で残差値-1 mgal以下に達し、本地域の最小残差値を示している。

2-2-3 エネルギー・スペクトル図 (Fig. II-30)

「Fig. II-30 エネルギー・スペクトル図」は、等重力線図に見られる重力異常を周波数領域 (cycle/km) に変換し、各周波数での重力変化の強さを対数エネルギー・スペクトルとして表現したものである。等重力線図の中の重力分布の波長特性は、Fig. II-30に示す二本の回帰直線の勾配から、深部成分 (Regional Component、平均深度1.120 m) 及び浅部成分 (Near-surface Component、平均深度162m) とに大別される。

平均深度とは、地下に複数の台形状構造が存在する場合、実際の地下構造の頂部の深度の平均的な値を示すもので、実際の地下構造の深度はこの平均深度を中心として相当の幅を持

つものである。また、地層の密度分布形態がこの深度に与える影響は大きいものと考えられる。例えば、地表付近に均質一様な薄い層が広い範囲に広がる場合、等重力線は長波長のものとなり、本来の構造は浅いがエネルギー・スペクトル図上では深部構造として抽出される。本地域の地下構造を支配する地層の深度は、概略次のように分類される。

区 分	平均深度	推定該当深度	対応する地層との関係
深部成分 regional component	1,120 m	約 600m ～地下深部	主として地下深部の広域的な地質構造を示す。
浅部成分 near-surface component	162 m	地表付近 ～約 600m	密度変化・同一地層内の岩相の相違を反映するほか、本地域の基盤岩類の起伏を示す。平均深度は、基盤を覆う地層の平均的な層厚を示す。

2-2-4 スペクトル解析浅部構造図 (Fig. II-31)

「Fig. II-31 スペクトル解析浅部構造図」(以下、浅部構造図と呼ぶ)は、等重力線図($\rho = 2.4\text{g/cm}^3$)から長波長成分(深部成分)を除去した残差図に相当し、深度162m付近を中心とした浅部(地表付近～約600m)の構造による重力分布を強調した図である。等重力線図における短波長の重力異常やコンターの歪みであった目立たない重力異常が、浅部構造図では独立した明瞭な異常として現れている。

浅部構造図の重力分布は極小な単位の重力異常に分散し、大局的には正領域と負領域との均衡のとれた分布を示している。こうした重力分布は、地下浅部での地層の相違または同一地層内の密度変化を反映したのと考えられる。

重力異常の方向性を見ると、調査地西半分の地域における重力異常の伸長方向及び配列方向はN-S系が卓越する一方、東半分の地域ではE-W系の方向性が優勢である。

2-2-5 スペクトル解析深部構造図 (Fig. II-32)

「Fig. II-32 スペクトル解析深部構造図」(以下、深部構造図と呼ぶ)は、等重力線図($\rho = 2.4\text{g/cm}^3$)から短波長成分(浅部構造図)を取り除いた図面で、深度1,120m付近を中心とした地下構造を反映している。

深部構造図の重力分布は丸みを帯びた長波長のコンターで表わされている。本地域とその周辺を含めた重力トレンドと、重力基盤の起伏を反映する重力異常とが合成された重力分布を示すと考えられる。

深部構造図の重力勾配・コンター走行・大局的な重力変化等を見ると、「2-2-1 等重力線図 ($\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$)」の項で説明したブーゲ異常分布の大きな特徴がより一層明確に再現されている。

2-2-6 鉛直二次微分図 (Fig. II-29)

「Fig. II-29 鉛直二次微分図」(以下、二次微分図と呼ぶ)は、比較的地下浅部の構造を反映したバンドパスフィルター図である。「1-2-5 解析方法」の項でその計算法を述べたが、本調査で採用した格子点間隔150 mから判断すると、深度数100 m程度の密度構造を反映した図面と考えられる。また、密度構造の境界部を急勾配のコンター走行(または0.0 mgalのコンター)によって強調する特徴がある。

二次微分図における重力分布は、対象深度が同程度の関係から浅部構造図のそれと酷似している。しかし、浅部構造図では地表近くの密度変化を反映したと考えられる短波長異常が多く分布していたが、二次微分図ではこうした短波長異常は平滑化され、コンターの走行方向が鮮明になっている。

二次微分図の重力分布は、ほぼ全域で正領域が負領域を分断して連なり、負領域が正領域の凹部に分布する傾向が認められ、こうした傾向は特に西部地域で著しい。このことは、下位に分布する高密度層(正領域に相当)の窪みを低密度層(負領域に相当)が埋めるような地質分布を想定させる。

浅部構造図の場合と同様に、重力異常の方向性はOukhribane周辺の地域でNW-SE系が優勢である。またAkhlij東部ではN-S系の方向性が捕捉される。

2-2-7 三次元二層構造図 (Fig. II-35)

「Fig. II-35 三次元二層構造図」(以下、二層構造図と呼ぶ)は、三次残差図を基に上部層と比較して 0.5 g/cm^3 高密度な重力基盤がある場合の最適な構造を求めたものである。

この高密度重力基盤は地質調査で捕捉されたOukhribane、Akhlij及びAmzourh付近に露出分布するHajar層準及びその上部層を想定し、その密度差がほとんどないためこの深度を初期値とした。上下二層の密度差 0.5 g/cm^3 は、後述する「Fig. II-33~34 密度構造断面図」の解析結果を参考として設定した。

二層構造図にみられる下部層の分布は、三次残差図で名付けた高重力異常域で盛り上がり、低重力異常域では落ち込んでいる。

二層構造図に表示した下部層表部の主要な凹凸とその深度は、地区別に次のようにまとめられる。

三次残差図 の重力異常	下部層の凸部地区	下部層の凹部地区
	10 m 以浅	60 m 以深
Akhlij 高異常	Akhlij北部~Akhlij東部	—————
Oukhribane 高異常	Oukhribane北西部~ Tiferouine北部	—————
Amzourh 高異常	Lamrah北西部	—————
Hajar 高異常	Hajar 南部	—————
Oukhribane 低異常 西部	—————	Oukhribane南西部~西部
Hajar 西部 低異常	—————	Hajar 南西部 Tiferouine北東部
Lamrah東部 低異常	—————	Lamrah東部
その他	Taguennza 南部	—————

2-2-8 密度構造断面図 (Fig. II-33~Fig. II-34)

二次元断面解析は断面に直角方向の無限に延びた物体を仮定し解析を行なうため、地質構造が二次元に近似できる断面で解析する必要がある。本調査域の地質構造は主にNW-SE方向の走行を持つため、重力断面解析はNE-SW方向の2本の断面について行なった(A-A'・B-B')。重力断面は重力トレンドを除去した三次残差図を用いた。

各密度構造断面図には、上から三次残差図、密度構造図、地質構造図を図示した。

二次元シミュレーションに際しては、本地域の平均的密度層(Hajar層準及びImarine下部層(泥質準片岩)に対応、 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 程度)を基本に、低重力異常または高重力異常に対してそれぞれ上部低密度層または下部高密度層を与え、それらの構造及び密度を変化させる手法を採用した。密度構造図に示した構造による計算重力値を三次残差断面に付記したがいずれも良い収束結果が得られている。

密度構造図の各密度層に対し、 $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ を低密度層、 $\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$ を中密度層、 $\rho = 2.76 \text{ g/cm}^3$ を高密度層と記載する。

以下に各断面について解析結果を述べる。

i) 密度構造断面図A-A' (Fig. II-33)

断面A-A'は、AmzourhからLamrahを経てTaguennza南東部に至るNE-SW方向の断

面である。本断面中北部のLamrah付近にはIP法によって捕捉された低比抵抗・IP異常域が存在する。

三次残差断面は、Amzourh付近の『Amzourh高異常』を横切り、Lamrah付近の緩やかな低重力部を経て、北端部にて小振幅の高異常部に至る。その重力値は比較的長波長・小振幅で変化に乏しい。

解析結果の密度構造図は、下位より高密度層・中密度層・低密度層の三層構造で構成される。

高密度層はAmzourh付近で地表下200m前後まで、またLamrah付近では400～500mまで盛り上がり、他の地区では500m以下に落ち込んでいる。中密度層はAmzourh付近で地表付近まで盛り上がっている。小規模ではあるが、Taguenna南東部にも地表付近までの盛り上がりが見られる。低密度層はLamrah付近で薄く広範囲に分布している。また、断面北端では北方に向かって低密度層の厚さが増加する。

Lamrah付近の低比抵抗・IP異常域は重力変化のむしろ少ない地域に相当する。

ii) 密度構造断面図B-B' (Fig. II-34)

断面B-B'は、Oukhribane南西部からAkhlij北東部に至り、断面A-A'とほぼ平行な断面方向をもつ。

三次残差断面は、断面南部で『Oukhribane西部低異常』を、中央部で『Oukhribane高異常』を横切り、緩やかな低異常を経て『Akhlij高異常』に至る。本地域の中では比較的变化に富んだ重力断面である。

解析結果の密度構造図は、下位より高密度層・中密度層・低密度層からなる二層ないし三層構造で構成される。

重力基盤の高密度層及び中密度層は断面中央部のOukhribane付近で地表部まで盛り上がる。高密度層は断面南部では低密度層下に分布し、二層構造をなす。断面中央部では地表下500m以深まで落ち込んでいる。断面北部では盛り上がりが見られるものの、300～400mとやや深い。中密度層は断面中央部から北部にかけて見られ、この地区では三層構造をなす。低密度層は断面南部では厚く、Akhlij付近ではやや薄く分布する。

本断面中央部の重力基盤の盛り上がり部はHajar層準に相当する。また、北端部の低密度層の欠如する部分はImarine下部層(泥質準片岩)の地表露出部に一致する。

以上2本の断面解析から低密度層は新第三紀～第四紀堆積物に、中密度層は古生代石炭紀～二疊紀基盤岩類に、高密度層は古生代石炭紀～二疊紀基盤岩類最下部層(泥質片岩)に相当するものと考えられる。

第3章 結論及び考察

3-1 調査結果のまとめ

I P法及び重力法の調査結果をまとめると以下のようになる。

- ① Hajar 鉱床地区は二次元解析の結果から、 $10\sim 15\Omega\cdot m$ 程度の低比抵抗でかつ20%程度のFE値を示すI P異常としてとらえられ、I P法が本調査地域において低比抵抗異常の中から硫化鉱体を抽出するのに有効であることが確認された。
- ② Hajar 鉱床地区と同じような傾向の低比抵抗でかつ強いI P異常は、Tiferouine地区やAkhrij-Oukhribane 地区では得られなかった。
- ③ Lamrah地区のLM-1, LM-2の測点5~6付近で低比抵抗・強I P異常の構造が解析された。両者とも比抵抗, I P異常ともにHajar 鉱床ほど強くはないが、前者で3.4%, 後者で4.0%程度のFE値が得られた。
- ④ Frizem地区のFZ-1において強いI P異常を示す低比抵抗構造が得られた。二次元解析の結果は、比抵抗及びFE値はそれぞれ、 $20\Omega\cdot m$ 及び15%程度である。
- ⑤ 重力探査の結果、大きく分類して以下の4つの高重力異常域が認められた。
 - (A) Hajar 高異常域
 - (B) Oukhribane高異常域
 - (C) Akhljij高異常域
 - (D) Amzourh 高異常域

3-2 考 察

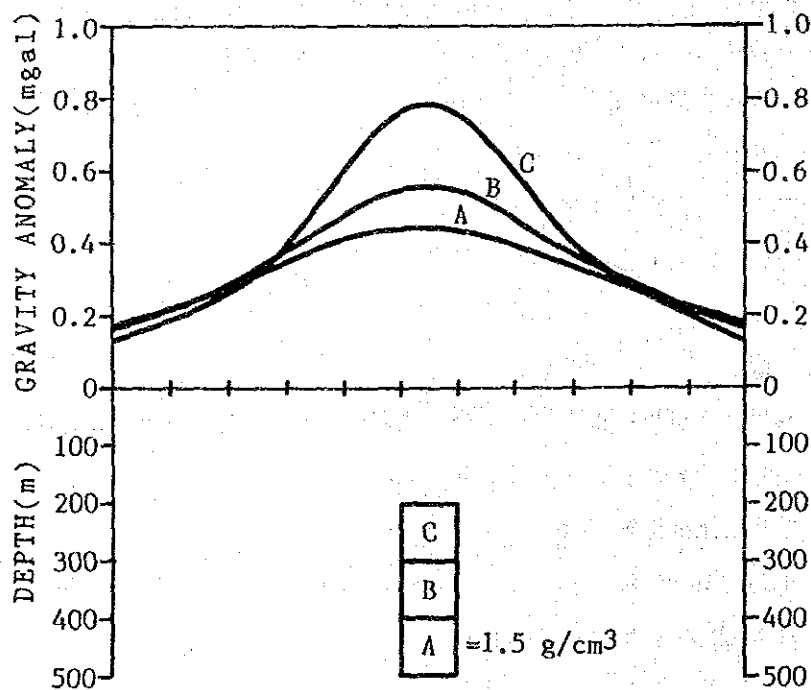
今回実施されたI P法及び重力法の調査結果を総合的に考察するために、以下の項目を一枚の平面図にしたものをFig. II-36(Pl. II-27)に示す。

- (1) 低見掛比抵抗域 ($n = 5$ 、 $35\Omega\cdot m$ 以下)
- (2) I P 異常域 ($n = 5$ 、FE値3%以上)
- (3) 高重力異常域 (0.5 mgal以上)
- (4) 磁気異常域 (10nT以上)
- (5) 低比抵抗域 (CSAMT法)

① Lamrah地区

低比抵抗で強I P異常がLM-1及びLM-2で得られた。この異常域と重なる形でCSAMT法による低比抵抗異常が東西にのび、またすぐ南側には弱いながらも正の磁気異常が見られる。しかしながら、重力探査の結果では、この地区では異常が検出されていない。

I P法の二次元解析結果では、F Eが20%程度の低比抵抗構造が、LM-1及びLM-2でともに約200mの深度に解析されている。どの程度の構造までを重力探査でとらえられるかを調べるために、100m×100mの、周囲に比べて密度が 1.5g/cm^3 高い構造についてのモデル計算を実施した。この密度差は本地域の基盤岩と鉍石の密度差（基盤岩： 2.70g/cm^3 ，鉍石： 4.25g/cm^3 ）を示す。次図で曲線A、B及びCはそれぞれ構造が400m、300m及び200mの深さにある場合である。最も深い400mであっても、密度が 1.5g/cm^3 違えば 0.4mgal 以上の変化があり、今回の重力探査で十分に検出することが可能である。従って、重力探査の結果からは塊状の鉍床を示唆する様な高密度の岩体が400m以浅に存在する可能性は低い。しかしながら、本異常域はAkhlj高重力異常域～Hajar 鉍床へと続く、NW-SE系及びE-W系の連続性を示しており、これはHajar 層準の走向方向とも一致しているため、I P法で捕捉された深度約200mの強I P異常・低比抵抗部は鉍染鉍床の賦存域とも考えられ、さらに調査を進めることが望ましい。



② Frizem地区

本地区ではI P法、CSAMT法及び空中磁気探査法の結果がある。本I P法調査では、測線F2-1の測点7付近で低比抵抗でかつ高いF E値の構造が解析されているが、本地区の平均比抵抗及び平均F E値は共に東部のHajar、TiferouineからLamrahにかけて

の地区に比べると高い。この地区で全体的に比抵抗が高くなった理由としては、まず珪化、変質が進んでいて岩石自身の比抵抗が全体的に高くなっていること、低比抵抗の表土層の厚さが薄いためであることが考えられる。表土層が薄くなって高比抵抗になっていると考えられる地区としては他にH1-1、H1-2の測線の南側とAK-1の測点20付近などがあるがこれらはいずれも重力の高異常が表れている。しかしながら、本地区では重力法のデータがないためその詳細は明らかでない。

本地区のFE値のバックグラウンドは高く、FZ-1のほとんど全測線とFZ-2の測線の西側で3%以上となっている。これはFig. II-36に示すように磁気異常とCSAMT法の低比抵抗異常とよく一致している。CSAMT法の低比抵抗異常はFZ-2の測点0から8付近に位置し、IP法の二次元解析によれば $60\Omega \cdot m$ でFEが10%の構造と対応すると考えられる (Fig. II-23)。本地区においては、H1-1で得られたのと同様の低比抵抗で大きなFE値を示す構造がFZ-1で解析されているが、そのほかに比抵抗が $60\Omega \cdot m$ 前後とやや高いFE値が10~25%という大きな値を示す構造が、FZ-1及びFZ-2の西側の測点で解析されている。この部分は磁気異常の大きい部分とも対応しており、Hajarとは別のタイプの鉱床と対応する可能性もあるので、今後とも検討を続ける必要がある。

③ Oukhribaneの高重力異常域について

重力探査によって、OukhribaneからNW-SEに続く顕著な高重力異常域 (最大1 mgal以上) が確認された。この高重力域は、IP法の測線AK-1の測点20付近、TF-1及びTF-2の測点5付近を通るが、これらはみな高見掛比抵抗域に対応しており、FE値も小さい。Oukhribaneの西側にある高重力異常域周辺には磁気異常も認められず、CSAMT法の低比抵抗異常とも一致しないので、この高重力異常域は基盤が浅くなっている部分 (Hajar層準) に対応すると思われる。しかし、本異常域南東部のTiferouine北部では負の磁気異常域とも一致し (Fig. II-36 参照)、その南部ではボーリングによって鉱染帯も確認されている。したがって、特に本異常域南東部は鉱染帯を捕捉している可能性も考えられる。

④ Akhliljの高重力異常域について

Akhliljの北から南東に続く最大1.5mgal以上の高重力異常域が確認された。本高重力異常域はImarine下部層の地表露出部にも対応し、基盤隆起部の形状を示している。

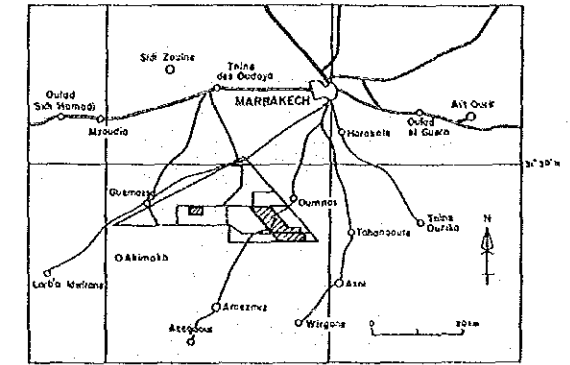
一方IP法からはAK-1の測点3~6付近で、見掛比抵抗は $100\Omega \cdot m$ 以上とやや高いものの、3%程度のFE値が得られている。またAK-2では $30\Omega \cdot m$ 程度の低見掛比抵抗

で、F E 値は 2.5% と周囲より高くなっており、負の磁気異常域が重複している。こうした I P 異常、低比抵抗域はむしろ重力傾斜の大きい部分 (Fig. II-24 参照) に対応し、基盤の急傾斜部 (Fig. II-35 参照) に相当する。上述の磁気異常も高重力異常域の周縁部に位置する。したがって基盤隆起部の周縁部に鉱染帯が分布している可能性も考えられる。しかし、この異常域は本調査地域の端にあっているため、データが不十分であり、今後は I P 法の測定をさらに実施する等の調査を進めていくことが望ましい。



COOPERATIVE MINERAL EXPLORATION
IN
HAOUZ CENTRAL AREA, MOROCCO
(PHASE II)

Fig II-1 Geophysical Survey Area



JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY
METAL MINING AGENCY OF JAPAN
FEBRUARY 1989
Prepared by MINDECO

0 5000m
Scale 1:100,000

LEGEND

- IP Survey Line
- Gravity Survey Area

8° 20' W

230

8° 10' W

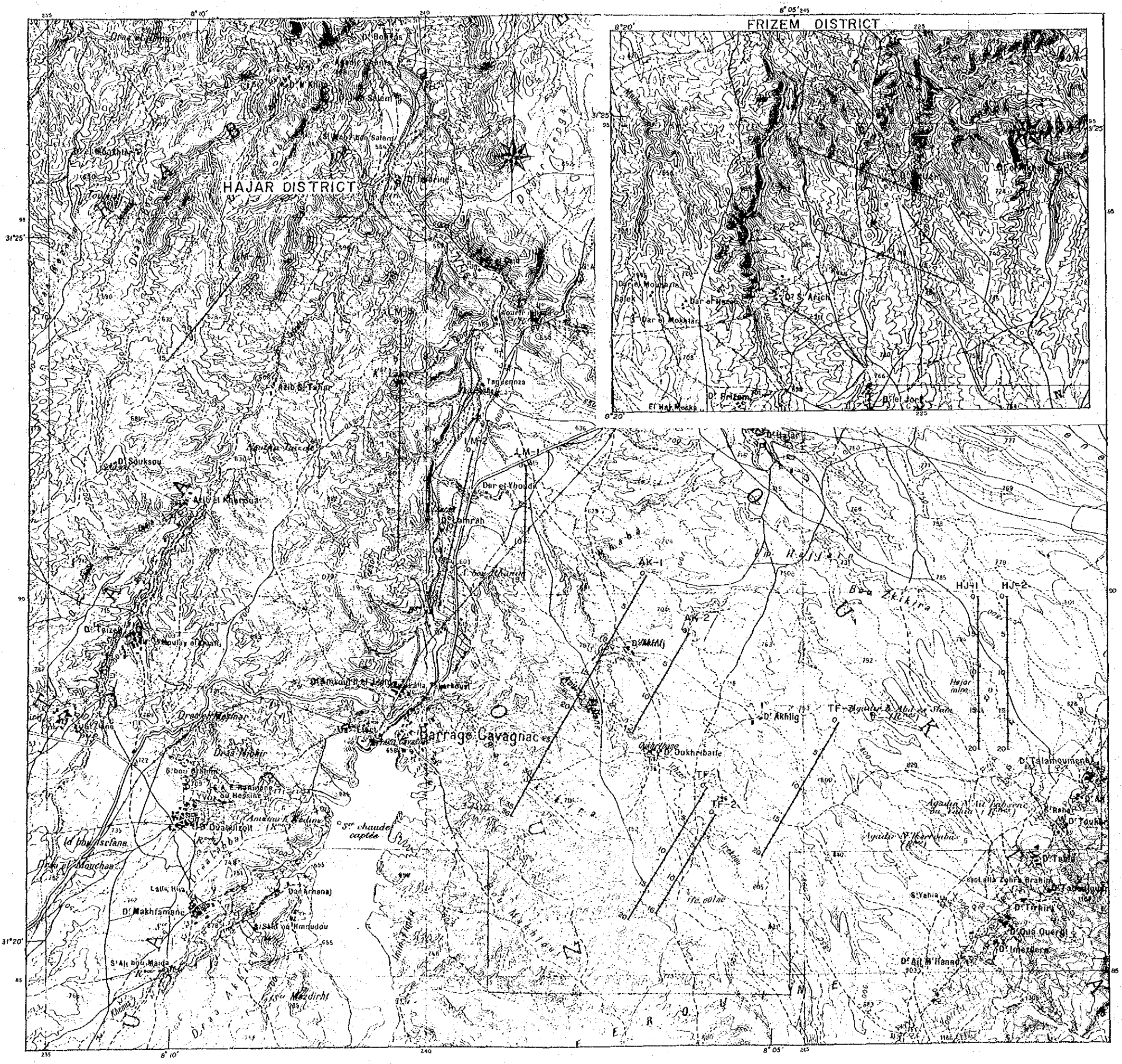
240

80

31° 20' N

90

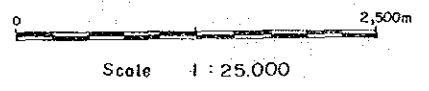
100



COOPERATIVE MINERAL EXPLORATION
IN
HAOUZ CENTRAL AREA MOROCCO
(PHASE II)

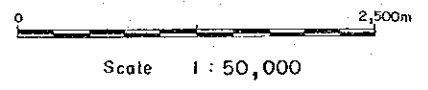
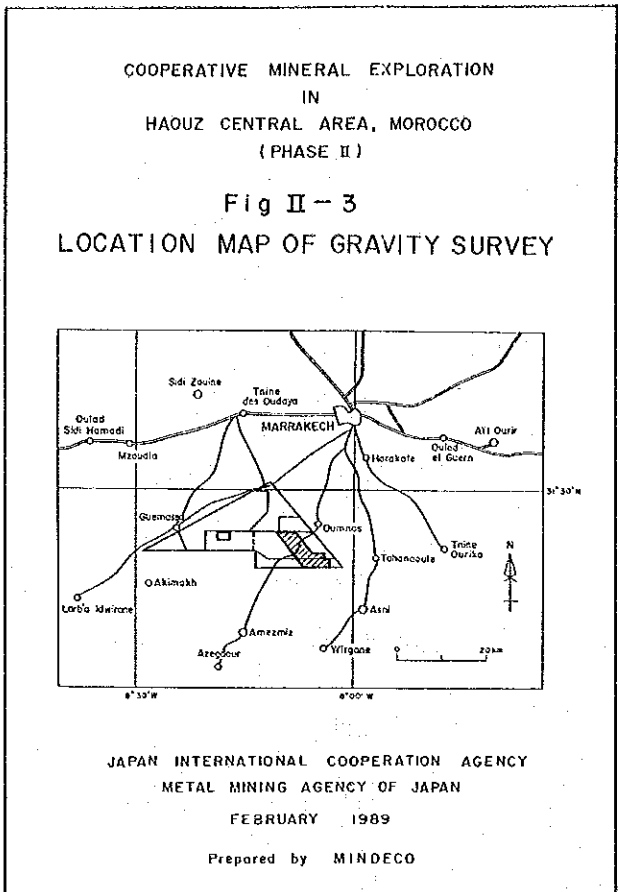
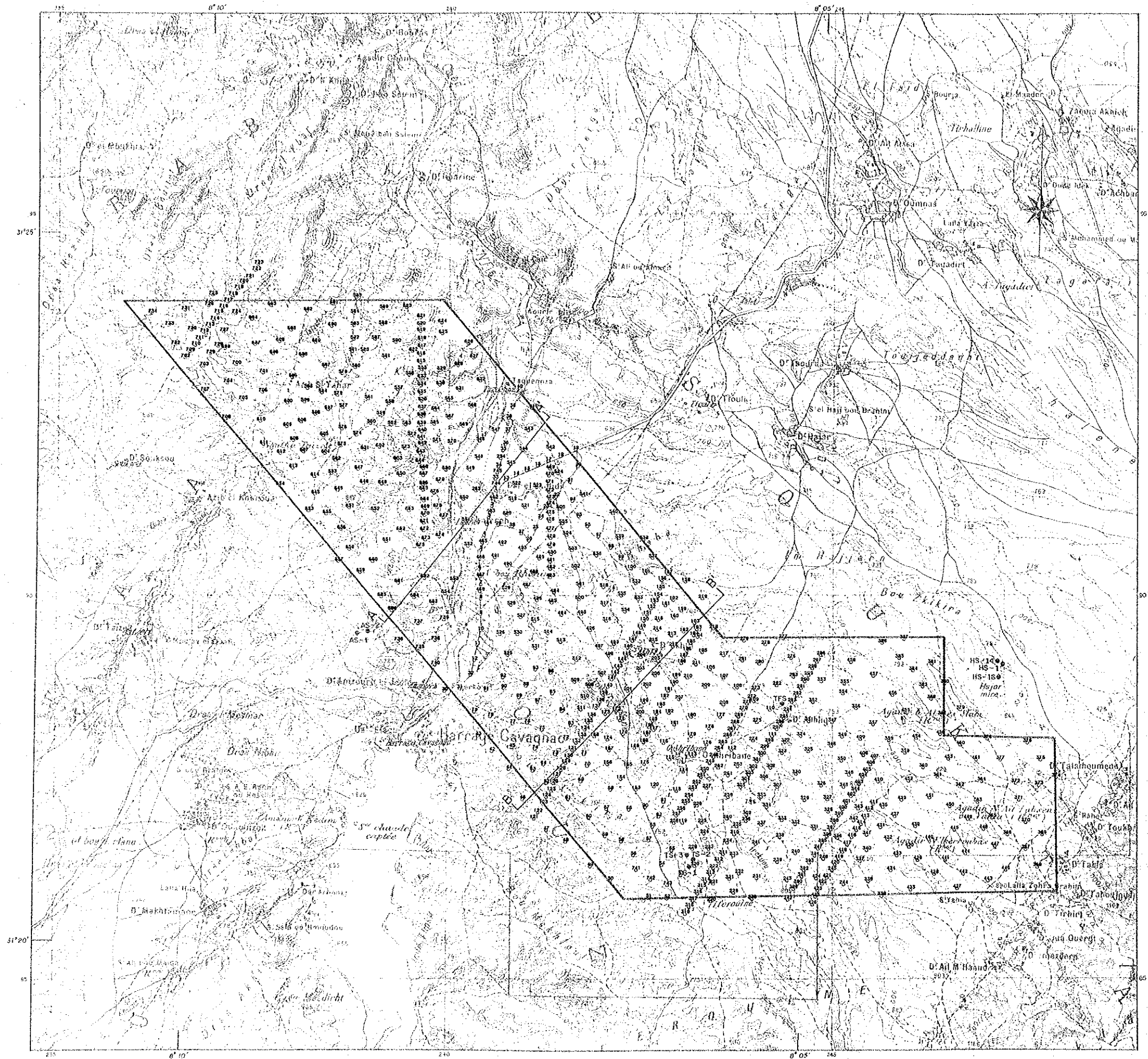
FIG. II-2
IP SURVEY AREA WITH
SURVEY LINES

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY
METAL MINING AGENCY OF JAPAN
FEBRUARY 1969
Prepared by MINDECO



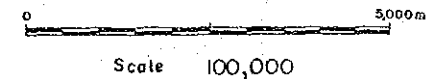
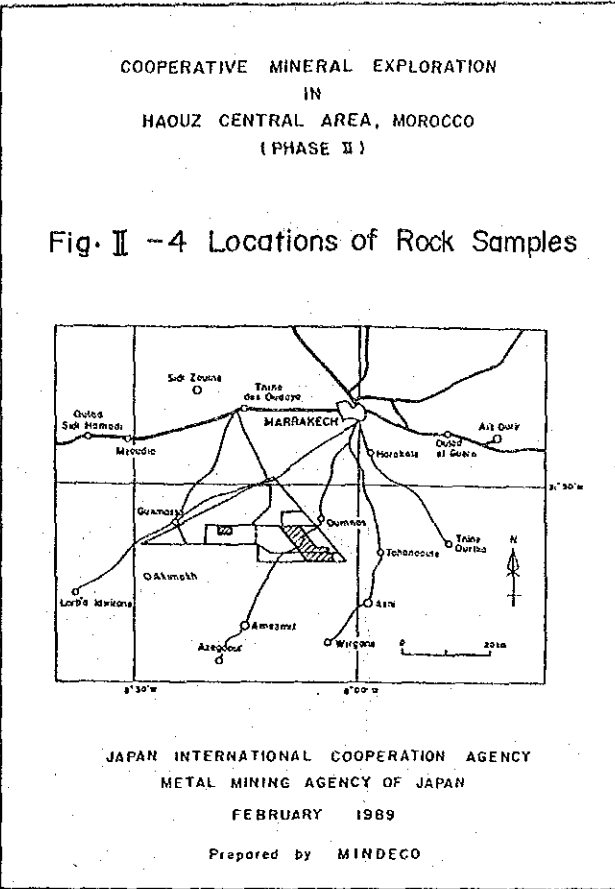
LEGEND

	Station Number
	Survey Line
	Hajar
	Tiferouine
	Akhij-Oukhrisane
	Lamrah
	Frizem

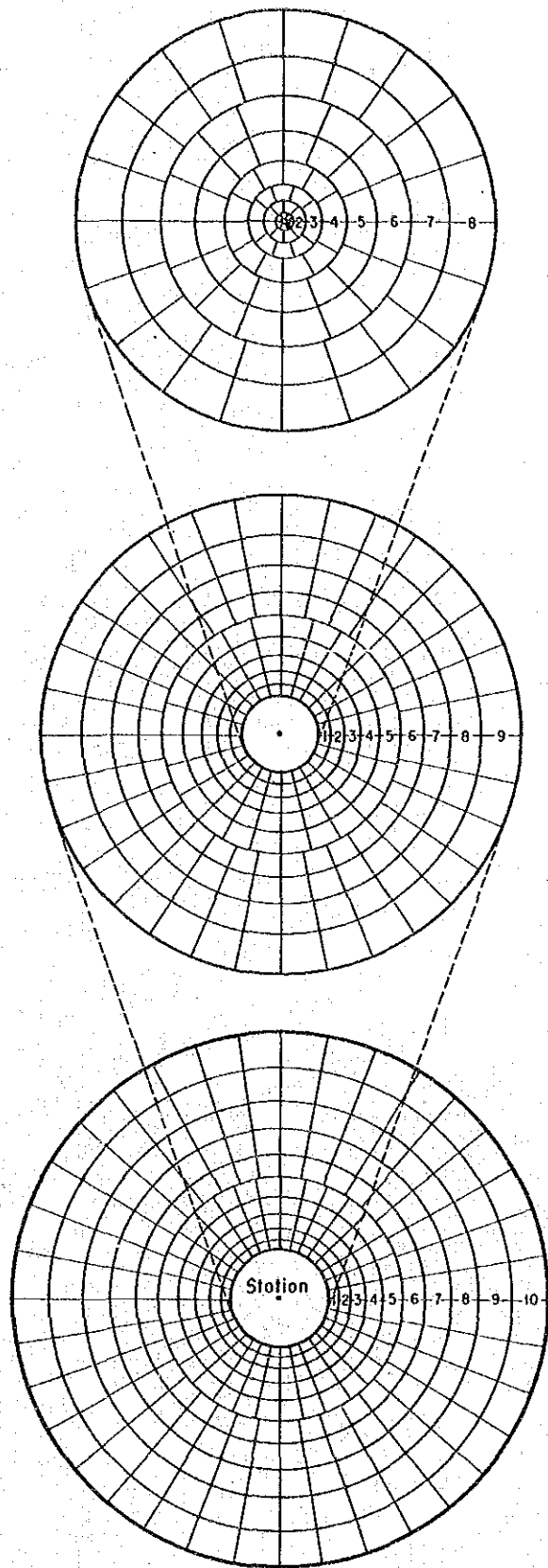


LEGEND

- HS-1 Boring Site
- 315 Station Number
- Gravity Station



- LEGEND
- Location of Sampling
 - IP Survey Line
 - ▭ Gravity Survey Area



[NEAR] Using 150m grid data

No.	R1	~	R2	r ₁
	m		m	
1	30	~	100	6
2	100	~	200	8
3	200	~	350	10
4	350	~	550	12
5	550	~	800	16
6	800	~	1.150	16
7	1.150	~	1.550	20
8	1.550	~	2.000	20

[MIDDLE] 750m grid data

No.	R1	~	R2	r ₁
	m		m	
1	2.000	~	2.500	24
2	2.500	~	3.000	24
3	3.000	~	3.600	24
4	3.600	~	4.300	24
5	4.300	~	5.100	24
6	5.100	~	6.000	32
7	6.000	~	7.100	32
8	7.100	~	8.400	32
9	8.400	~	10.000	32

[FAR] 3.000m grid data

No.	R1	~	R2	r ₁
	m		m	
1	10.000	~	12.000	32
2	12.000	~	14.000	32
3	14.000	~	17.000	32
4	17.000	~	20.000	32
5	20.000	~	24.000	32
6	24.000	~	28.000	36
7	28.000	~	33.000	36
8	33.000	~	38.000	36
9	38.000	~	44.000	36
10	44.000	~	50.000	36

Fig. II-5 Annular Segments for Terrain Correction

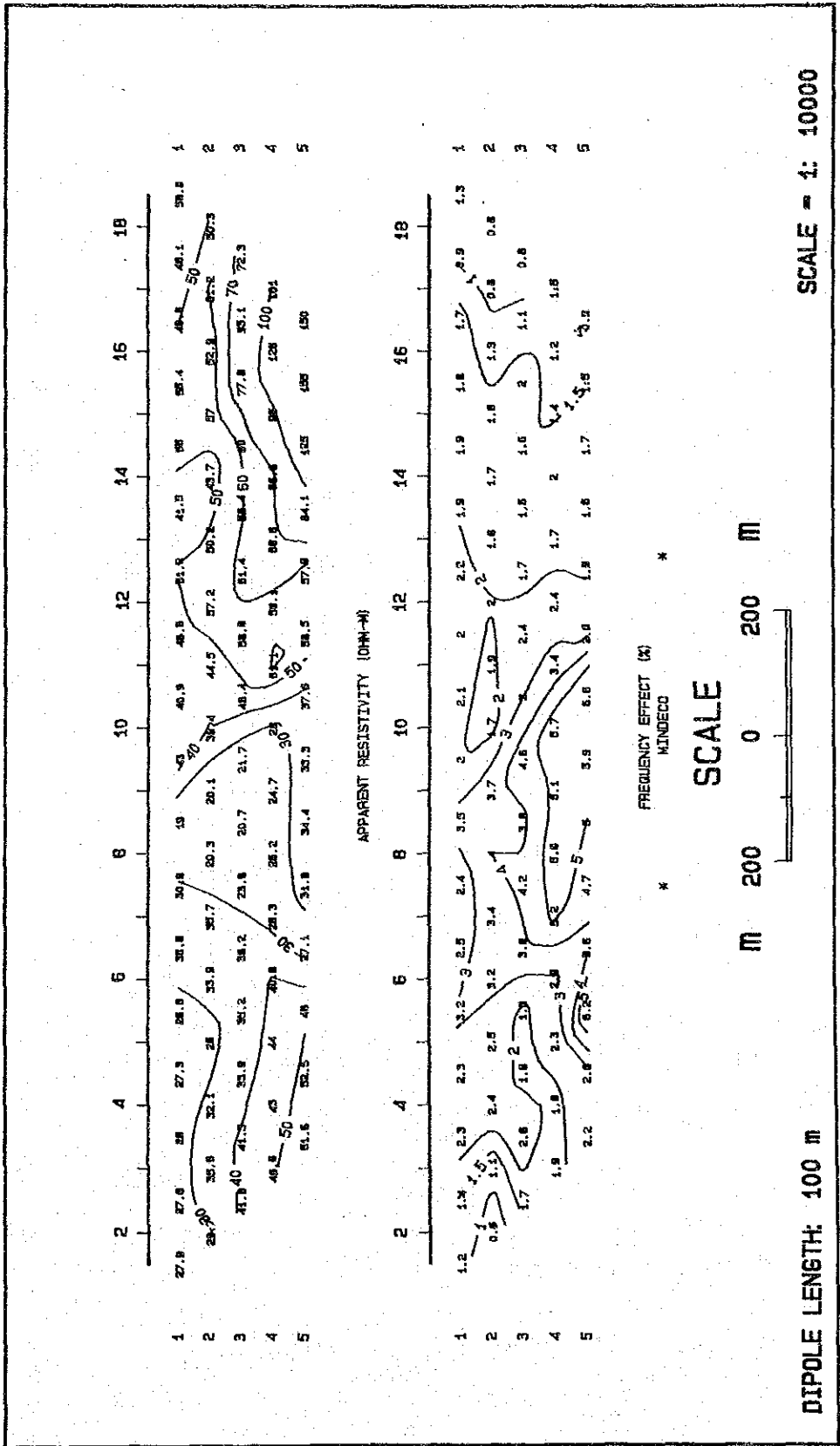
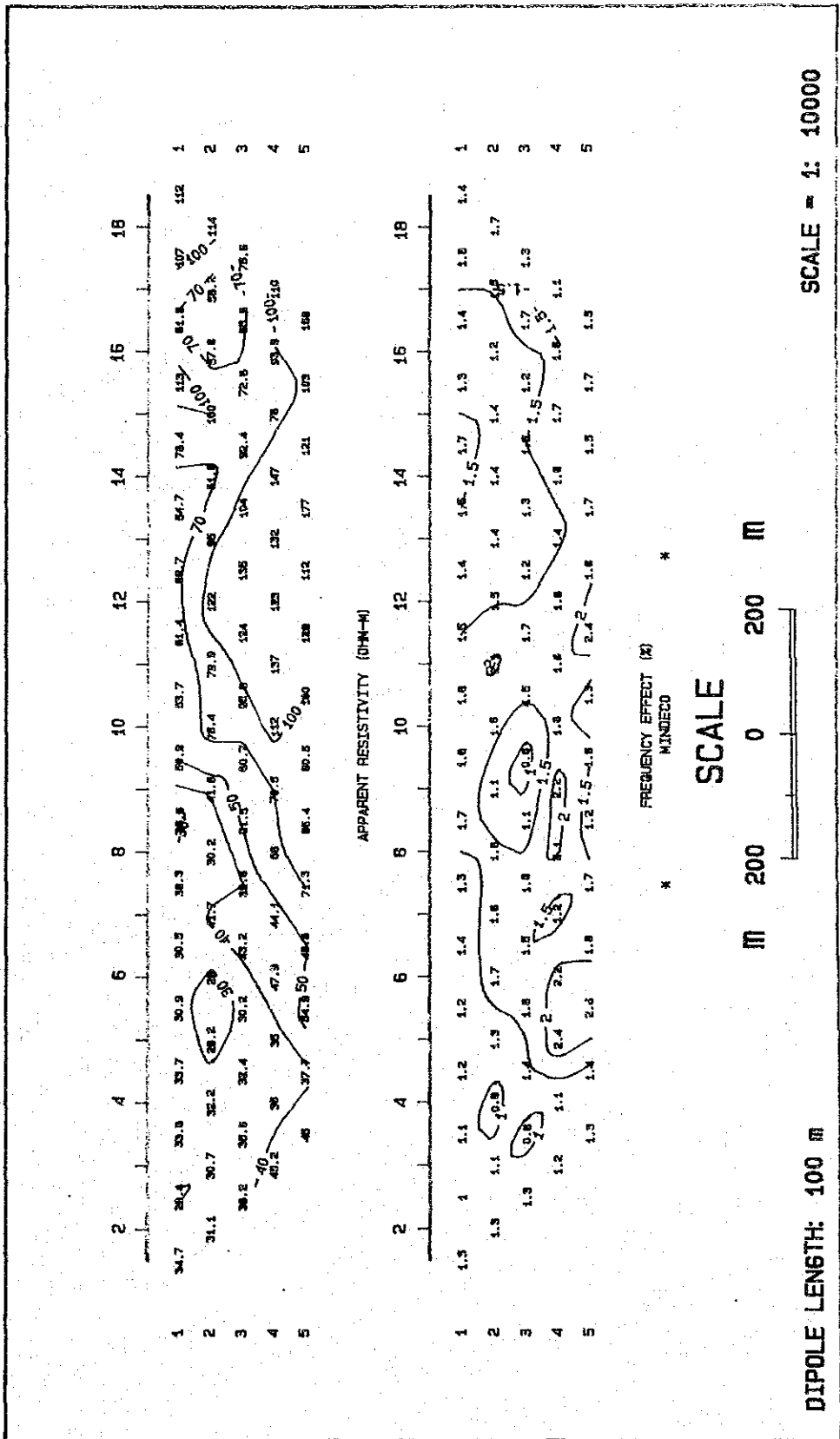


Fig. II-6 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line HJ-1)



SCALE = 1: 10000

DIPOLE LENGTH: 100 m

Fig. II-7 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line HJ-2)

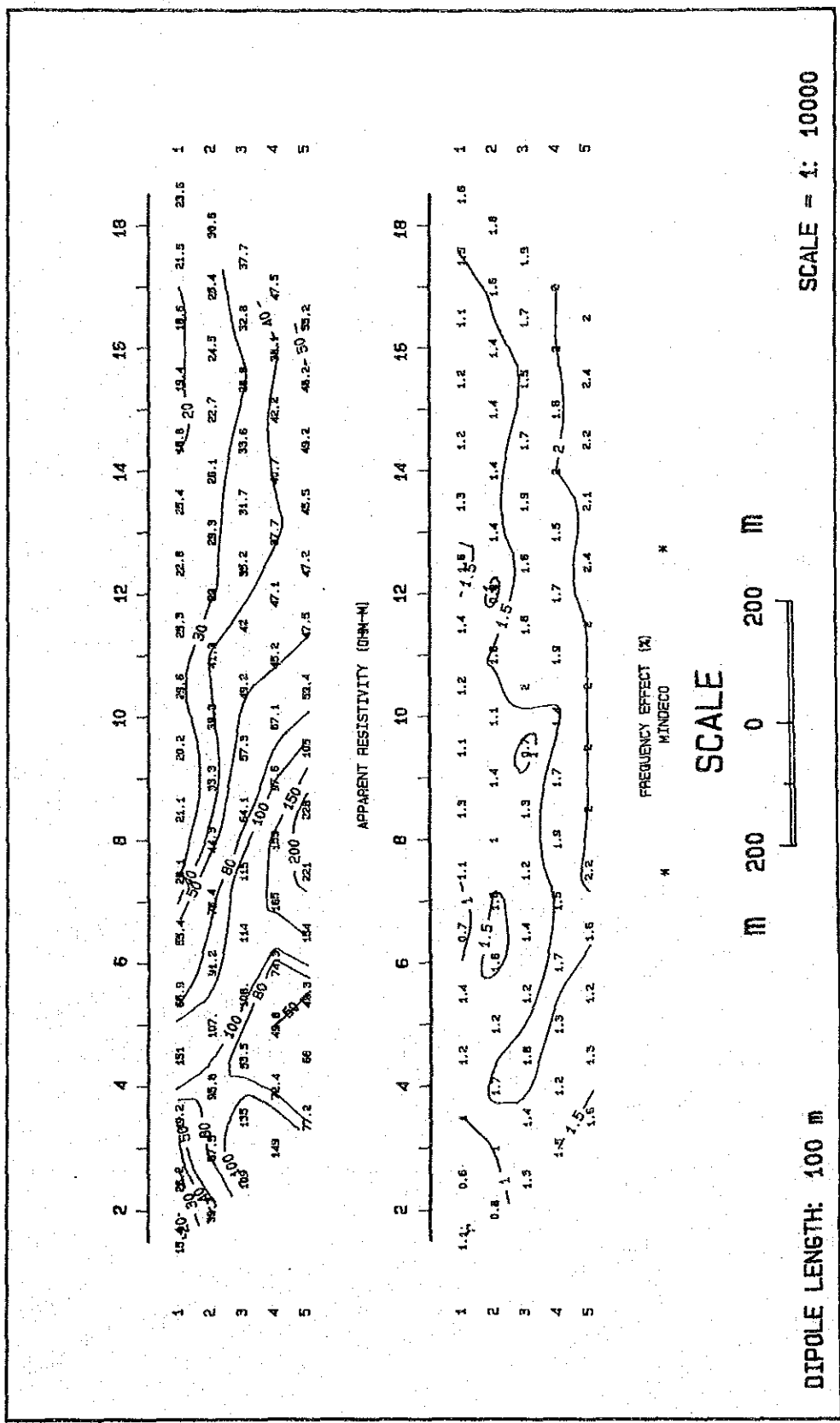


Fig. II-8 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line TF-1)

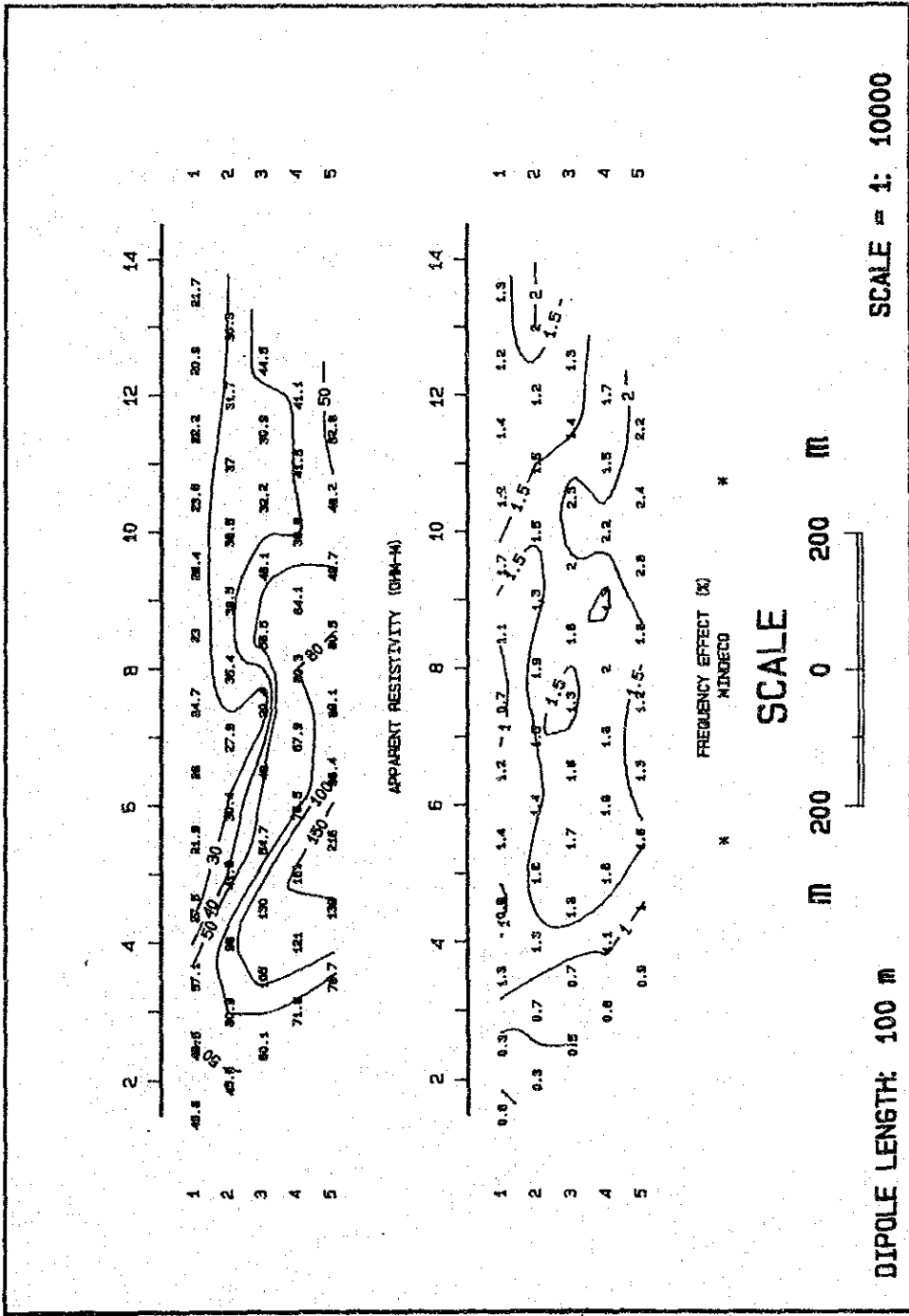


Fig. II-9 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line TF-2)

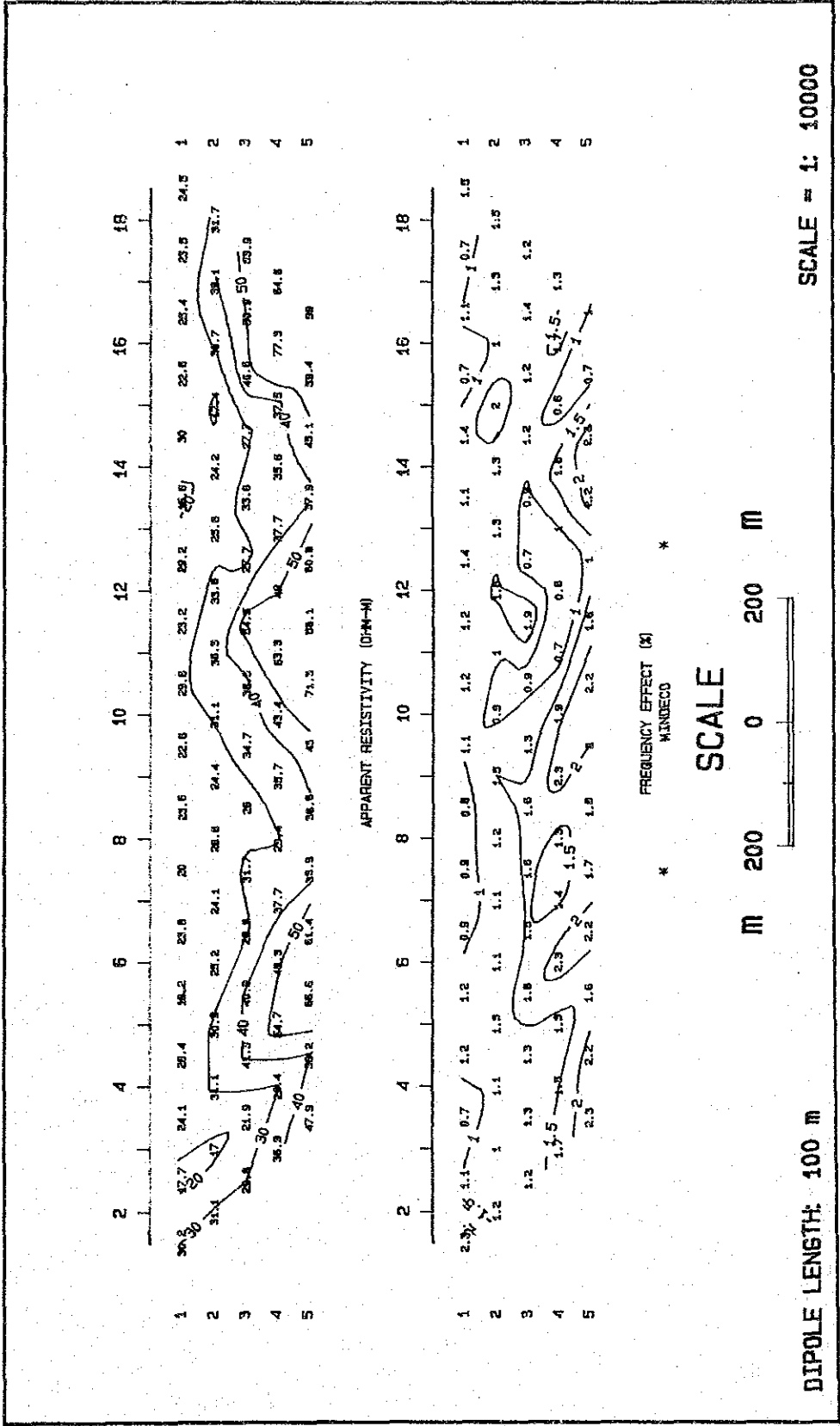


Fig. II-10 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line TF-3)

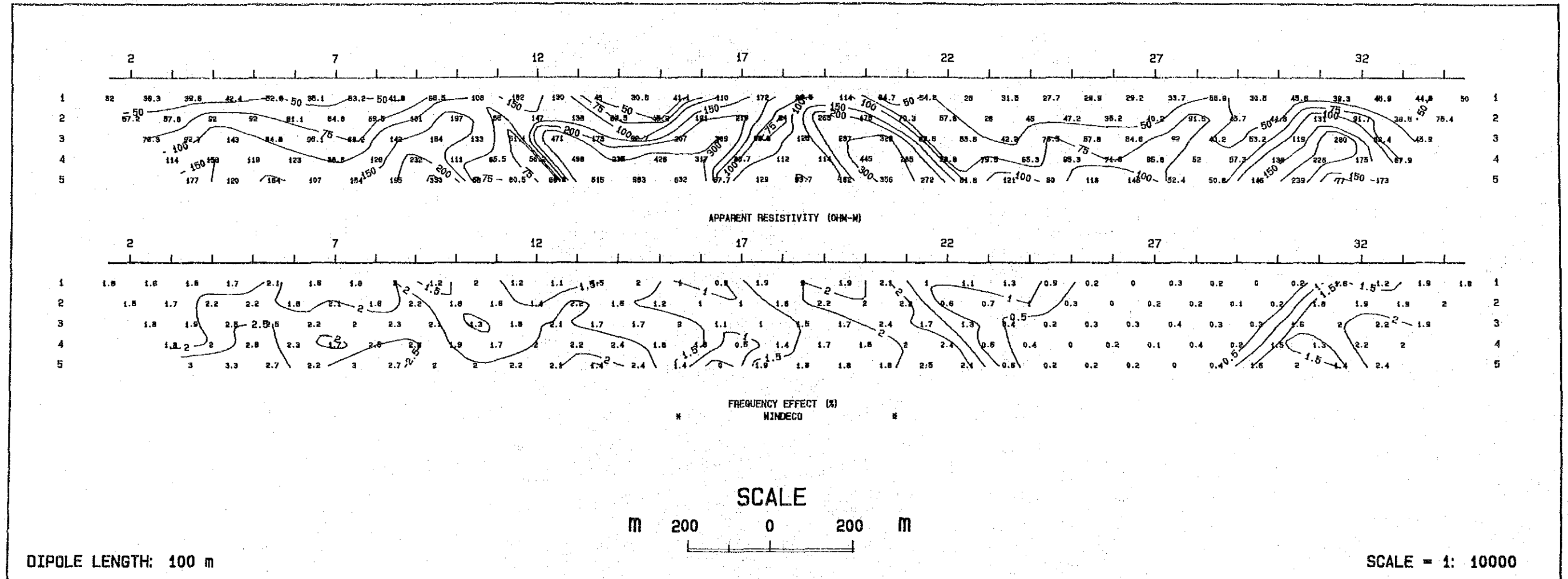


Fig. II-11 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line AK-1)

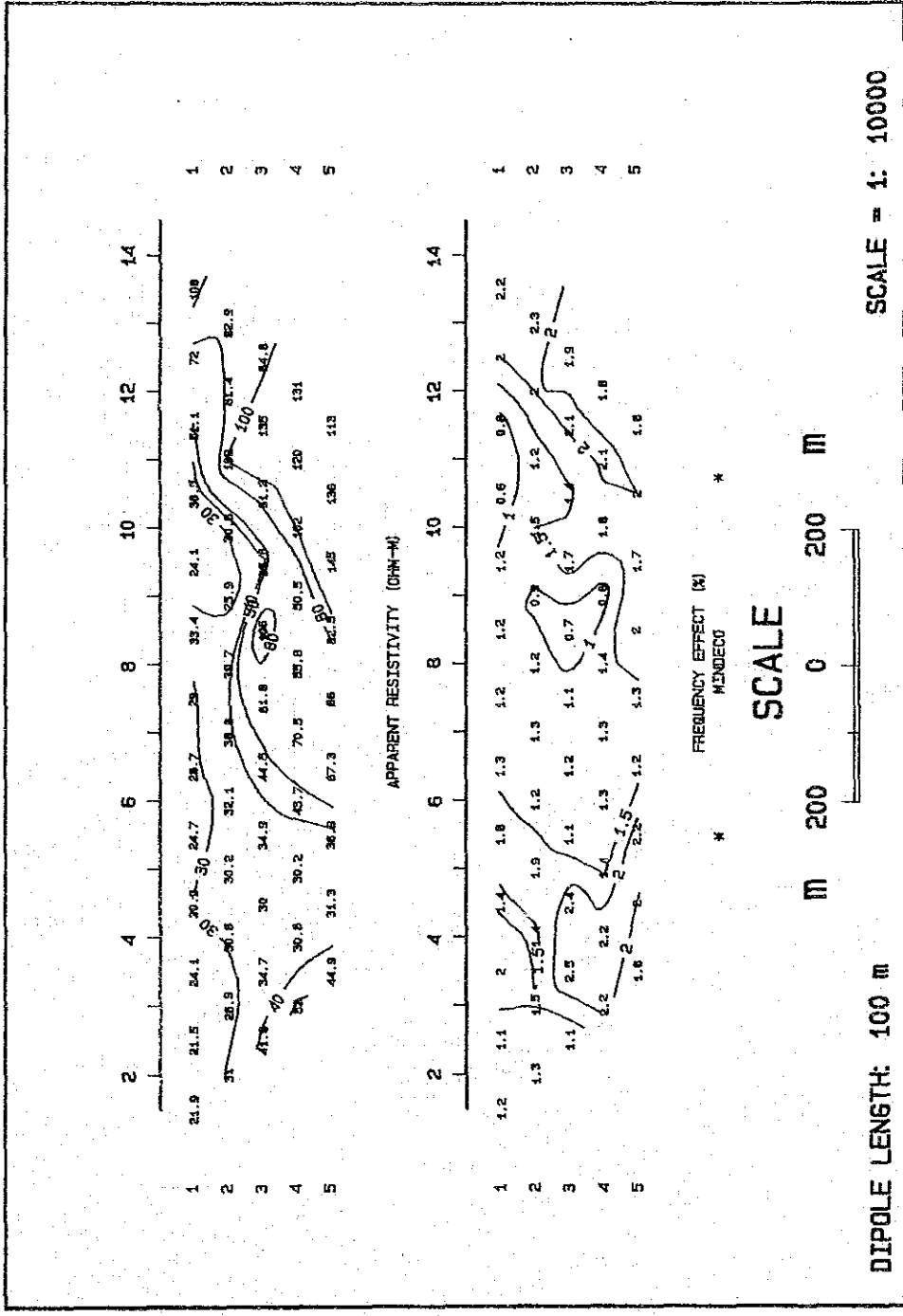


Fig. I-12 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line AK-2)

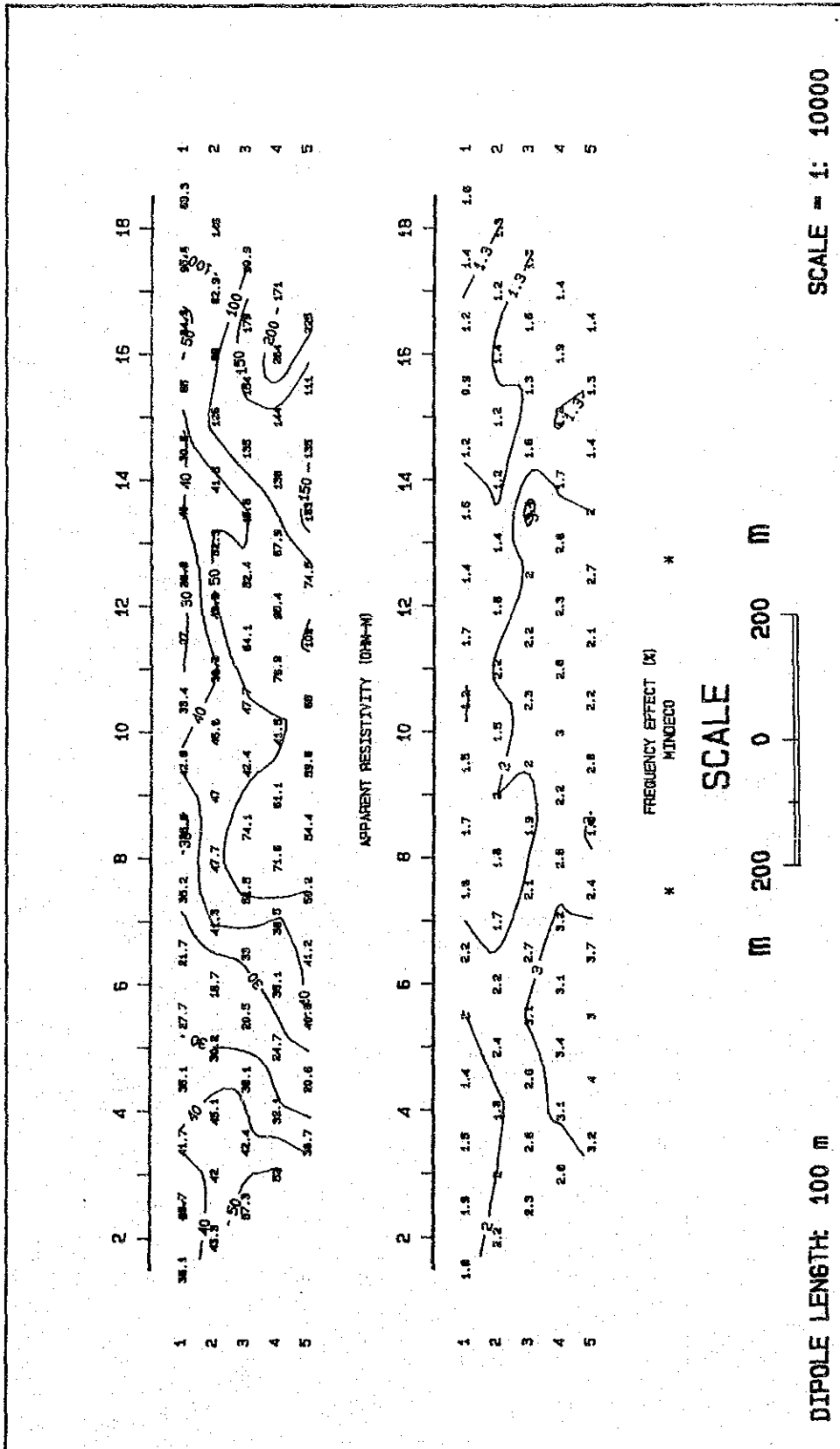


Fig. II-14 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line LM-2)

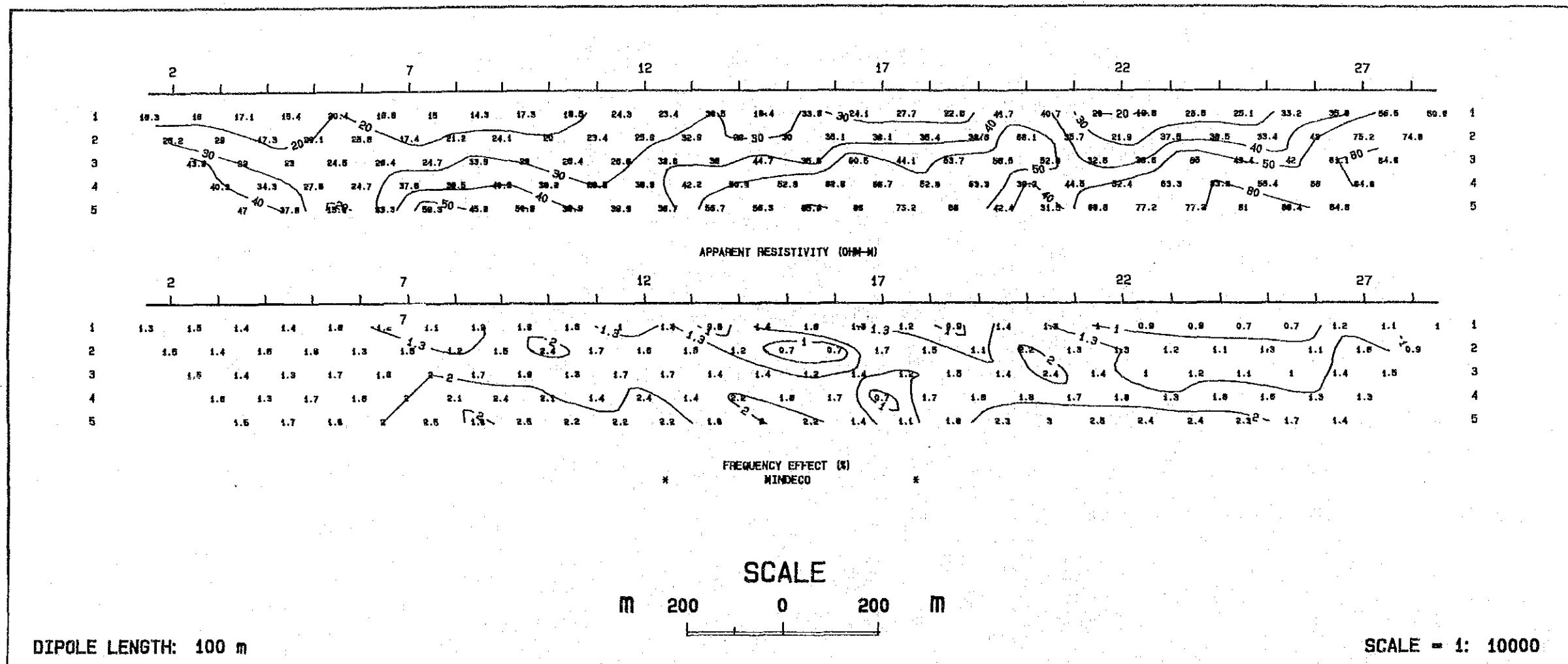


Fig. I-15 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line LM-3)

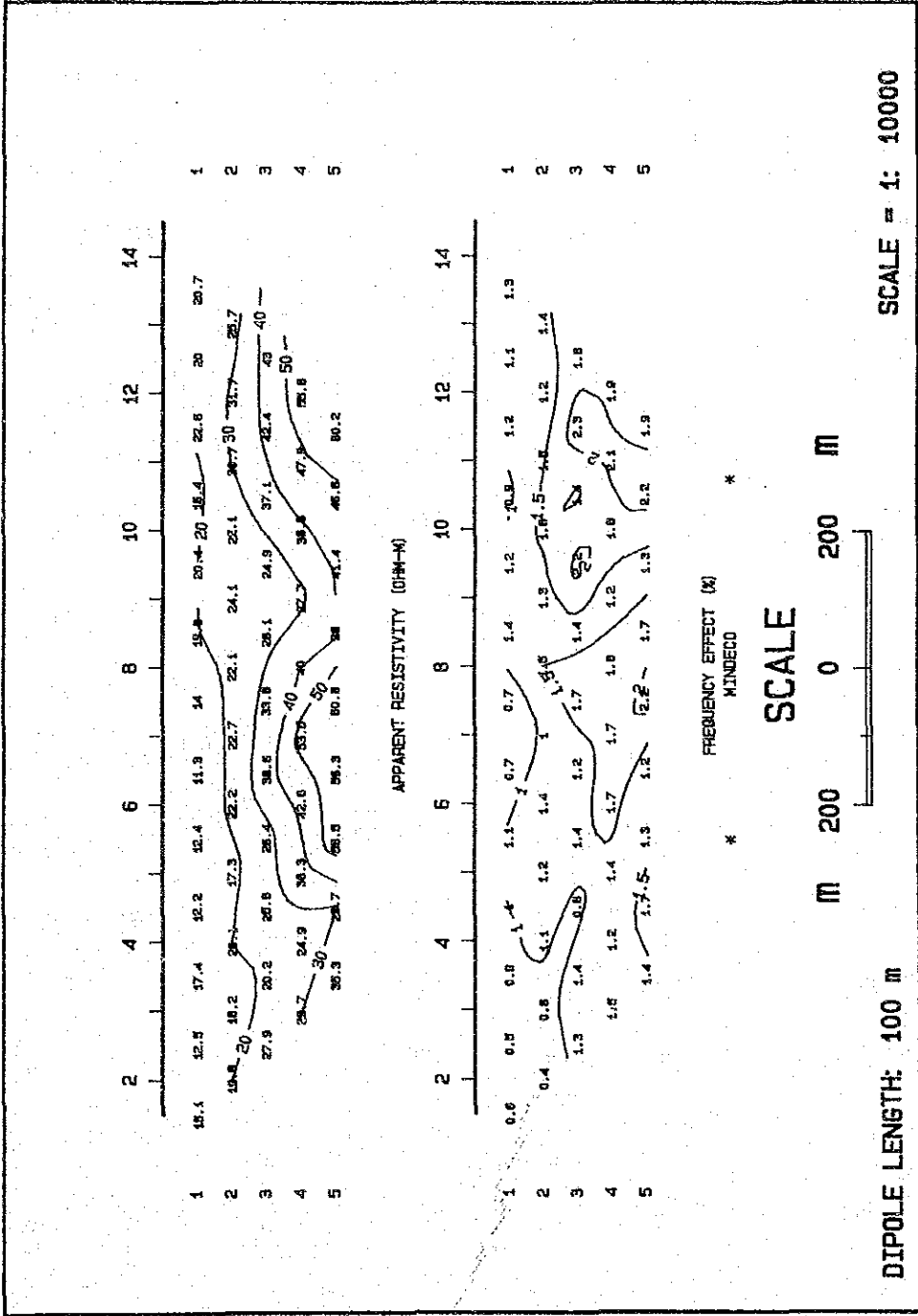
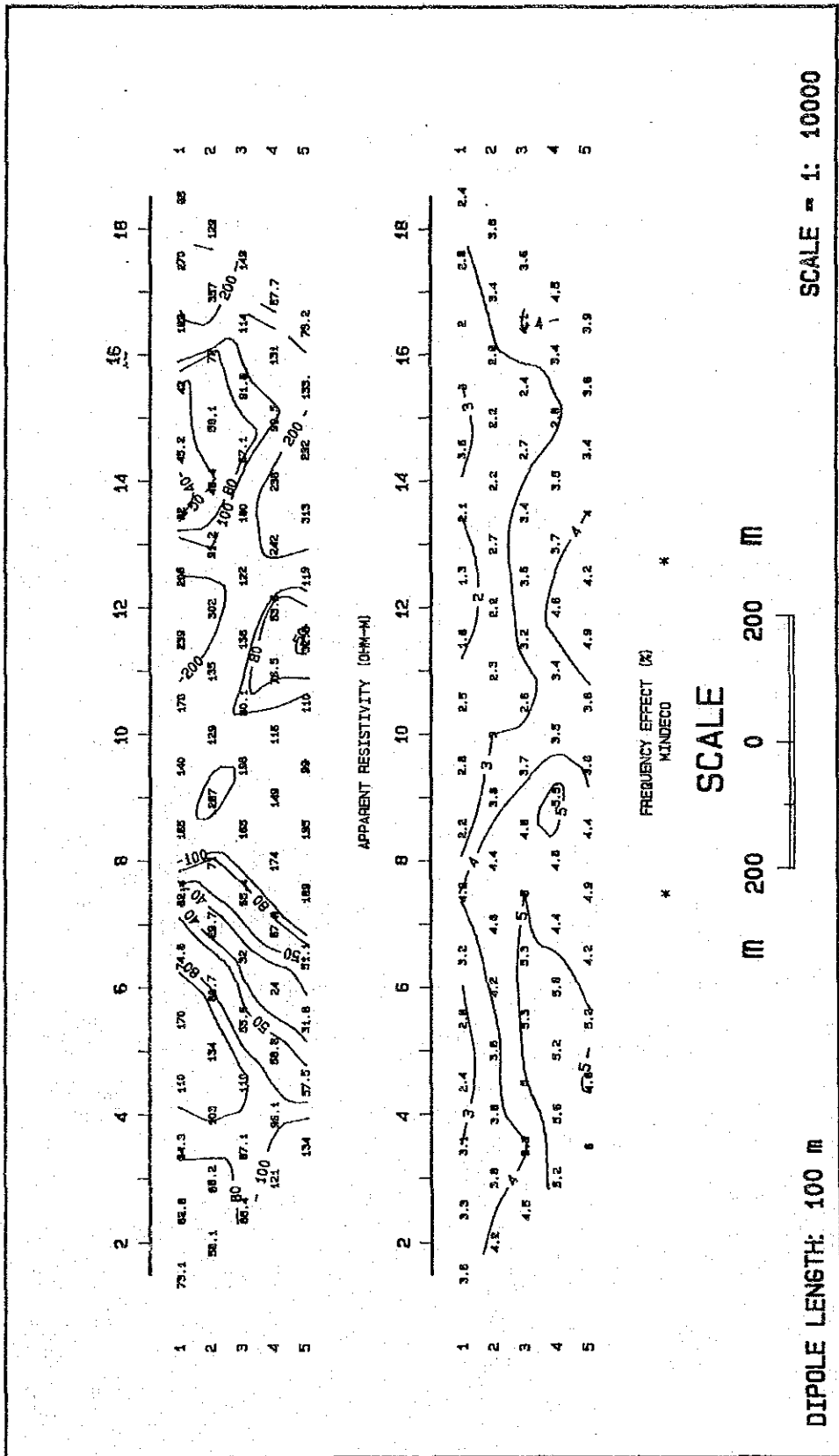


Fig. II -16 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line LM-4)



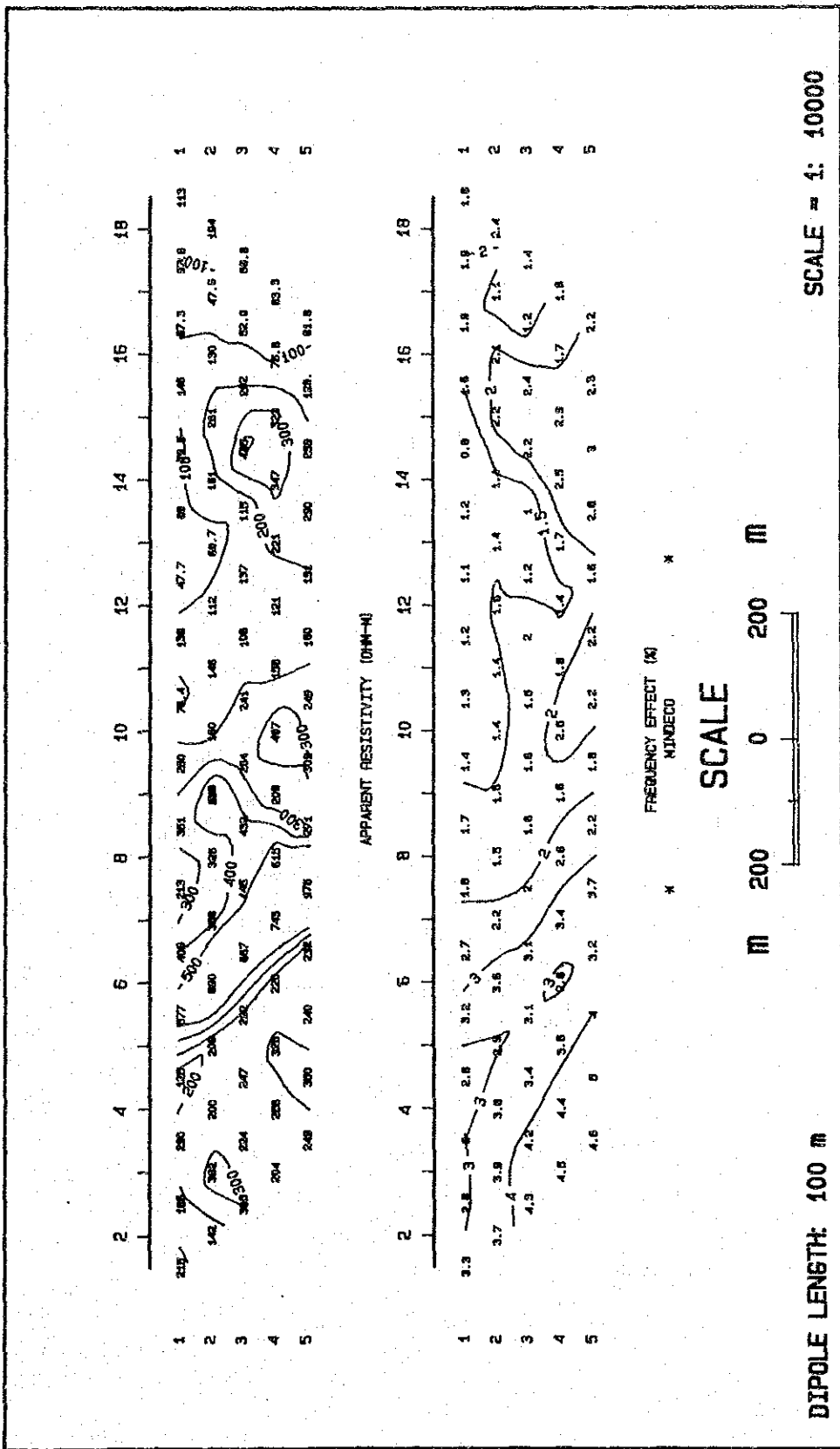
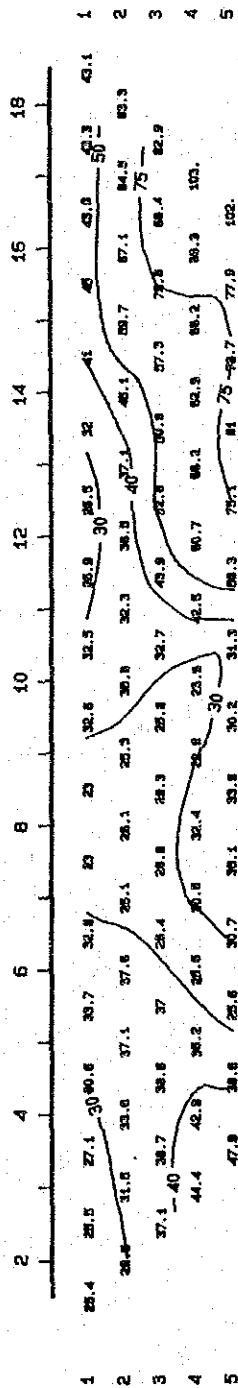
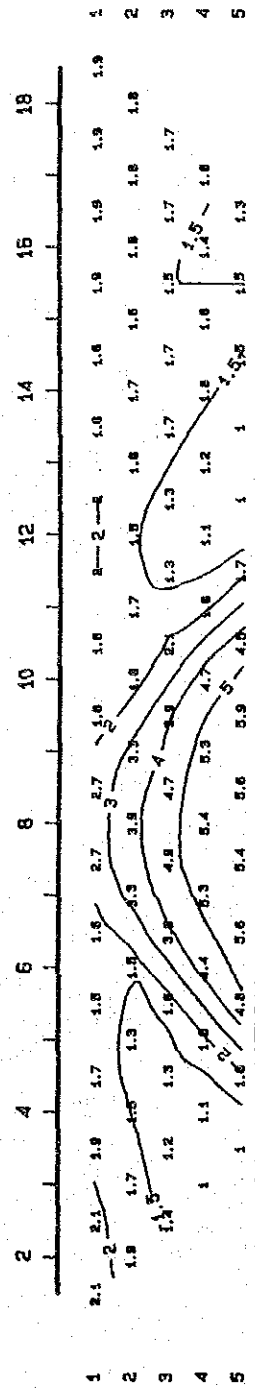


Fig. II-18 Apparent Resistivity and PFE Pseudo Section (Line FZ-2)

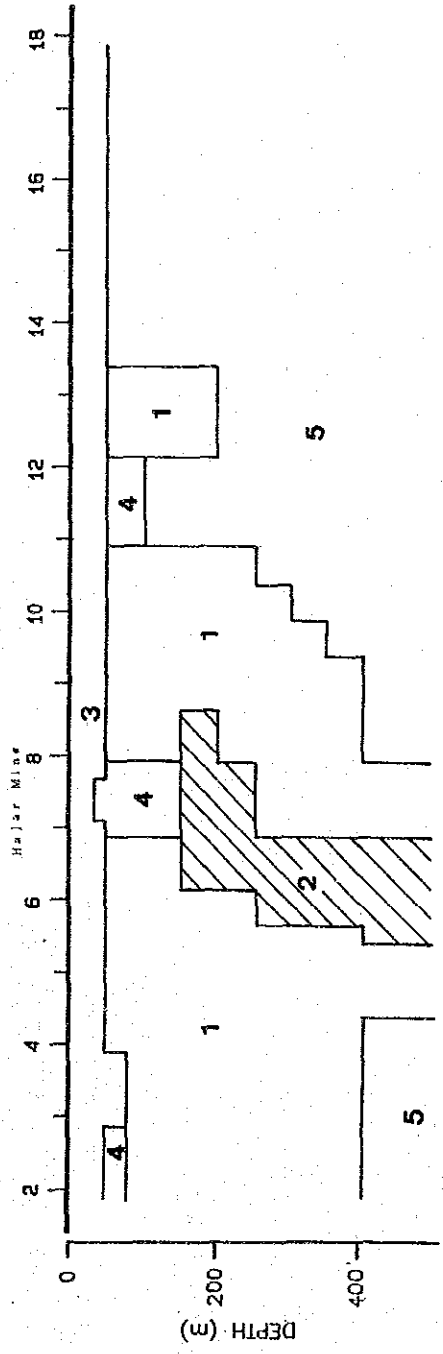
APPARENT RESISTIVITY (ohm-m)



FREQUENCY EFFECT (%)



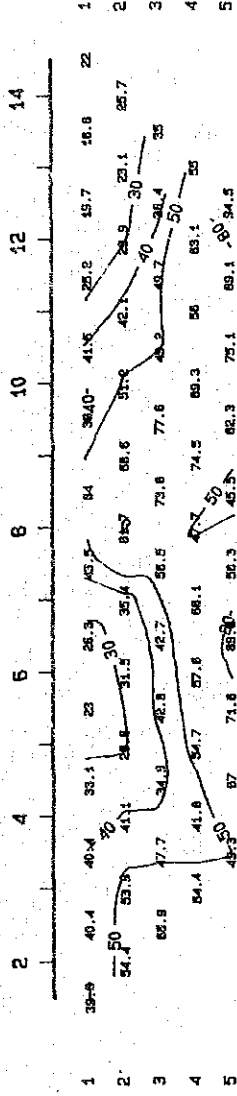
2-D MODEL SECTION



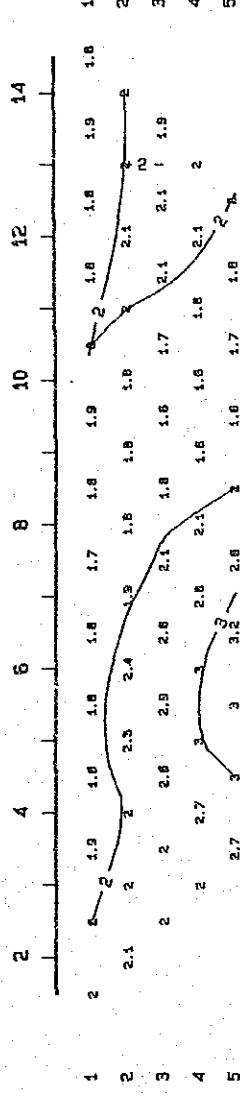
Resistivity (ohm-m)	PFE (%)
1 (White)	1 (White)
2 (Diagonal lines /)	2 (Diagonal lines /)
3 (Diagonal lines \)	3 (Diagonal lines \)
4 (Horizontal lines)	4 (Horizontal lines)
5 (Vertical lines)	5 (Vertical lines)

DIPOLE LENGTH: 100 m Fig. II-19 Results of IP Modeling (Line HJ-1) SCALE = 1: 10000

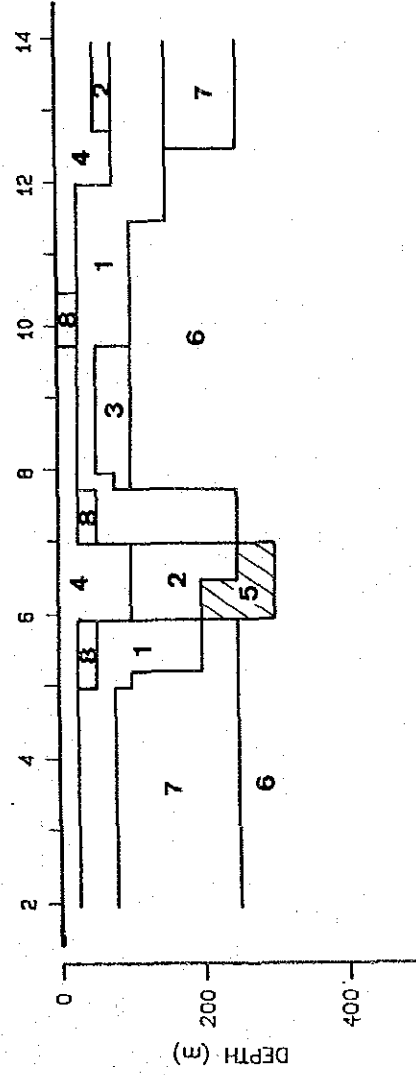
APPARENT RESISTIVITY (ohm-m)



FREQUENCY EFFECT (%)



2-D MODEL SECTION



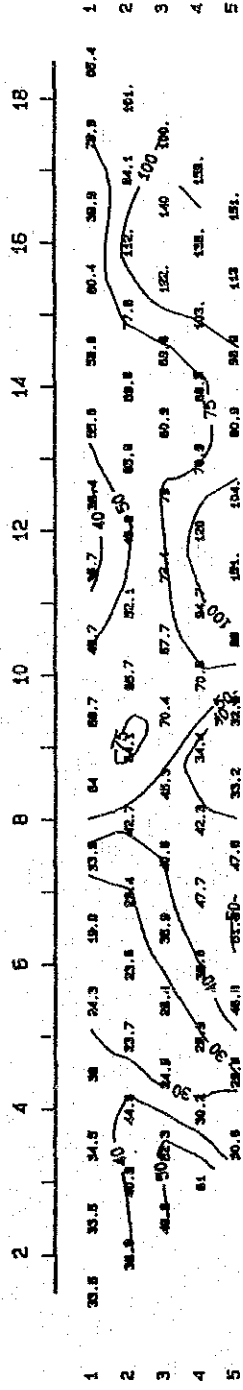
Resistivity (ohm-m)	PFE (%)
1 50	1 2.5
2 10	2 2.5
3 200	3 1.5
4 20	4 1.5
5 10	5 20.0
6 300	6 1.5
7 100	7 2.5
8 40	8 1.5

DIPOLE LENGTH: 100 m

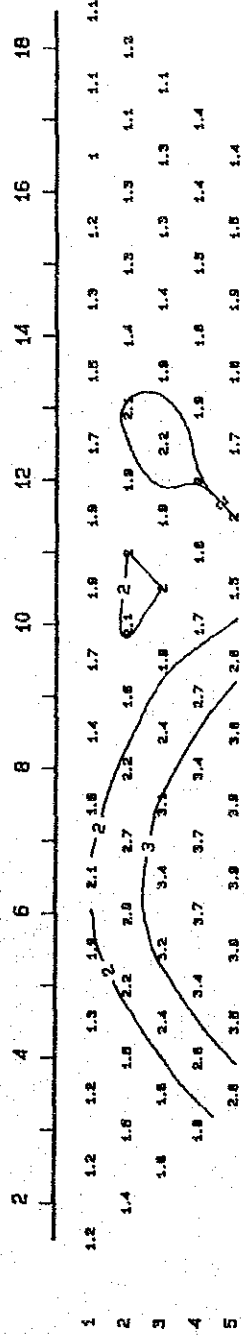
Fig. II -20 Results of IP Modeling (Line LM-1)

SCALE = 1: 10000

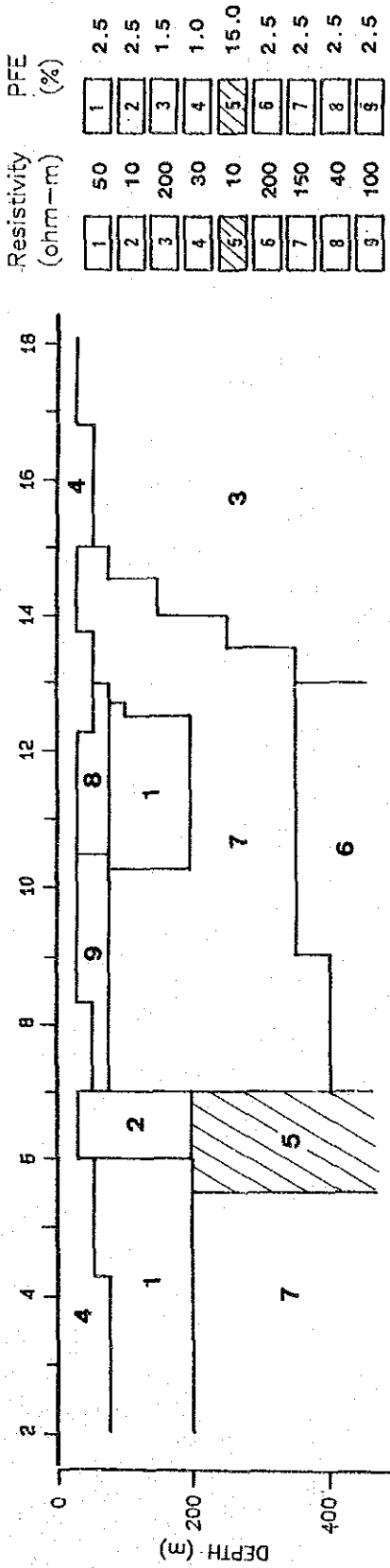
APPARENT RESISTIVITY (ohm-m)



FREQUENCY EFFECT (%)

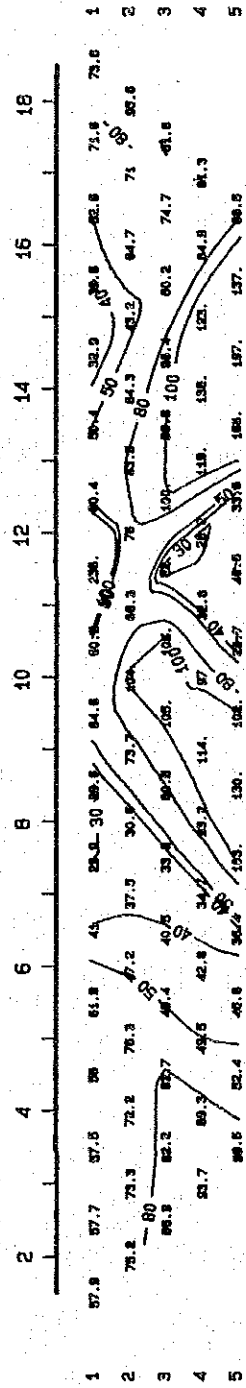


2-D MODEL SECTION

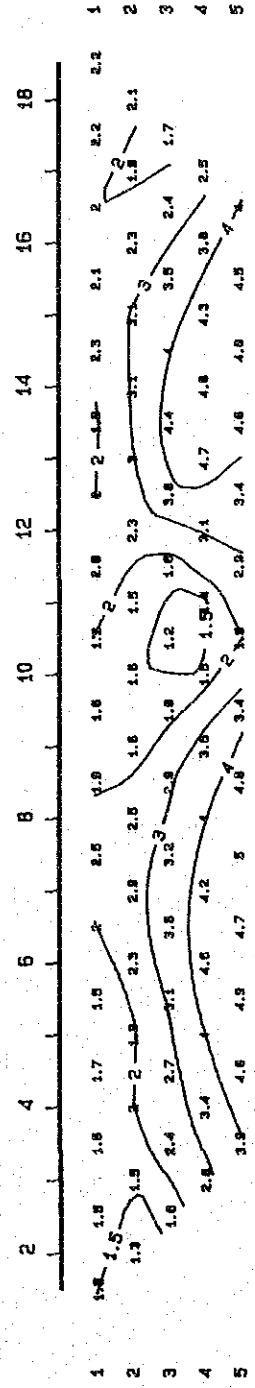


DIPOLE LENGTH: 100 m Fig. II-21 Results of IP Modeling (Line LM-2) SCALE = 1: 10000

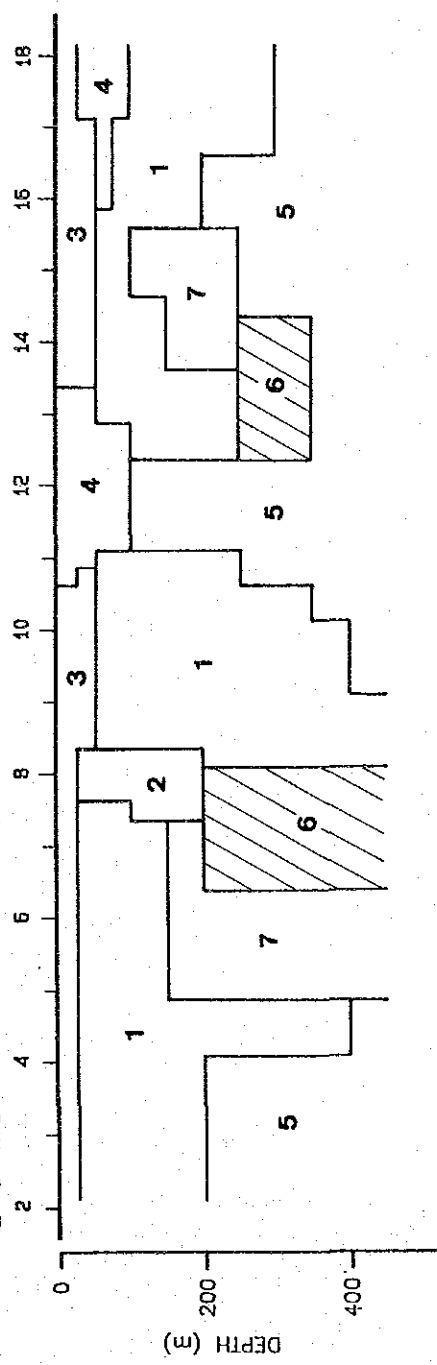
APPARENT RESISTIVITY (ohm-m)



FREQUENCY EFFECT (%)



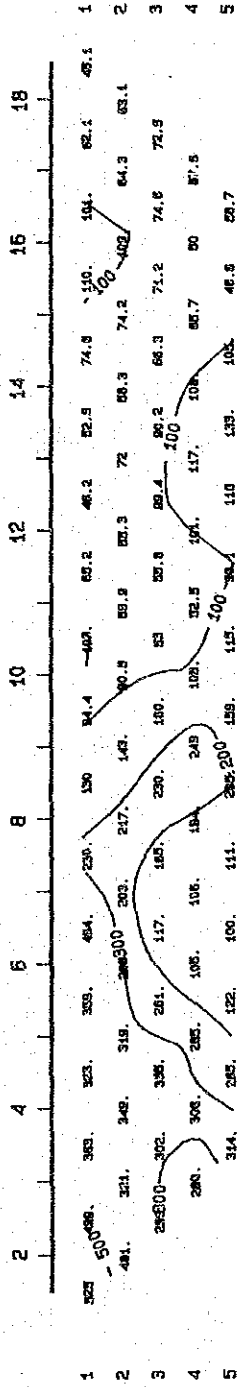
2-D MODEL SECTION



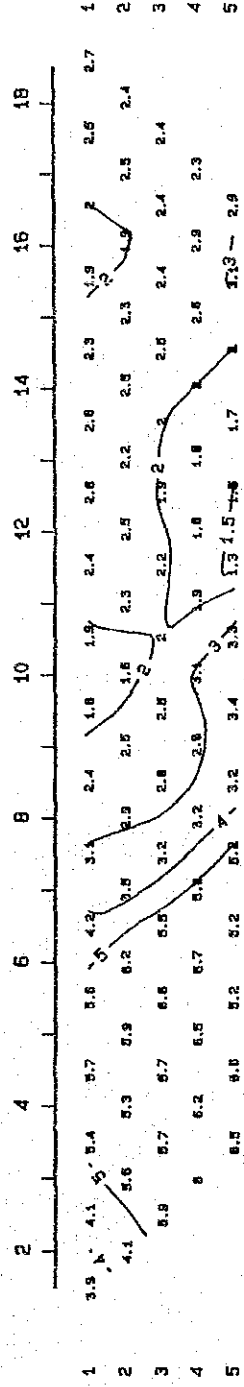
Resistivity (ohm-m)	PFE (%)
1 100	1 1.0
2 20	2 3.0
3 25	3 2.0
4 200	4 3.0
5 500	5 4.0
6 20	6 15.0
7 50	7 25.0

DIPOLE LENGTH: 100 m Fig. II-22 Results of IP Modeling (Line FZ-1) SCALE = 1: 10000

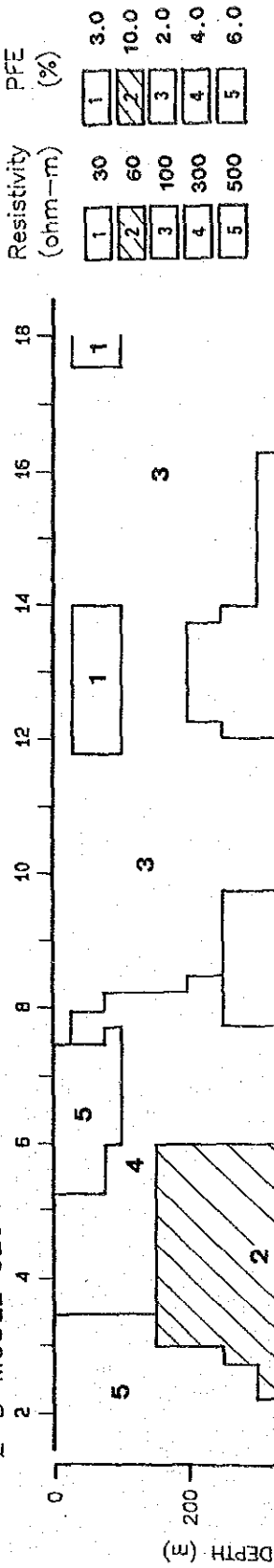
APPARENT RESISTIVITY (ohm-m)



FREQUENCY EFFECT (%)



2-D MODEL SECTION



DIPOLE LENGTH: 100 m Fig. II-23 Results of IP Modeling (Line FZ-2) SCALE = 1: 10000

