

Fig. II-2-11 E 測線断面图

100 0 100 200 300 400
(metres)

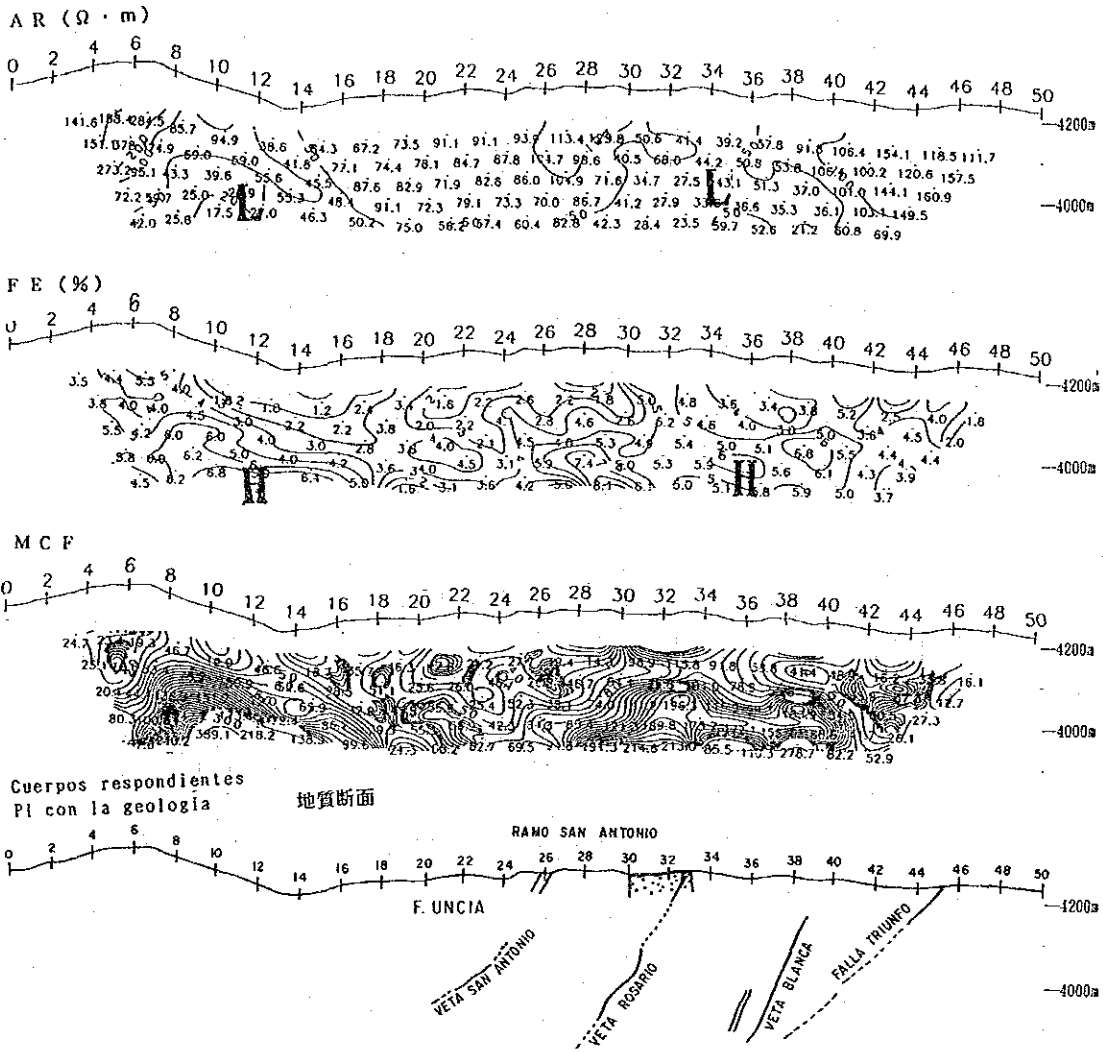


Fig. II-2-12 F 測線断面图

100 0 100 200 300 400
(metres)

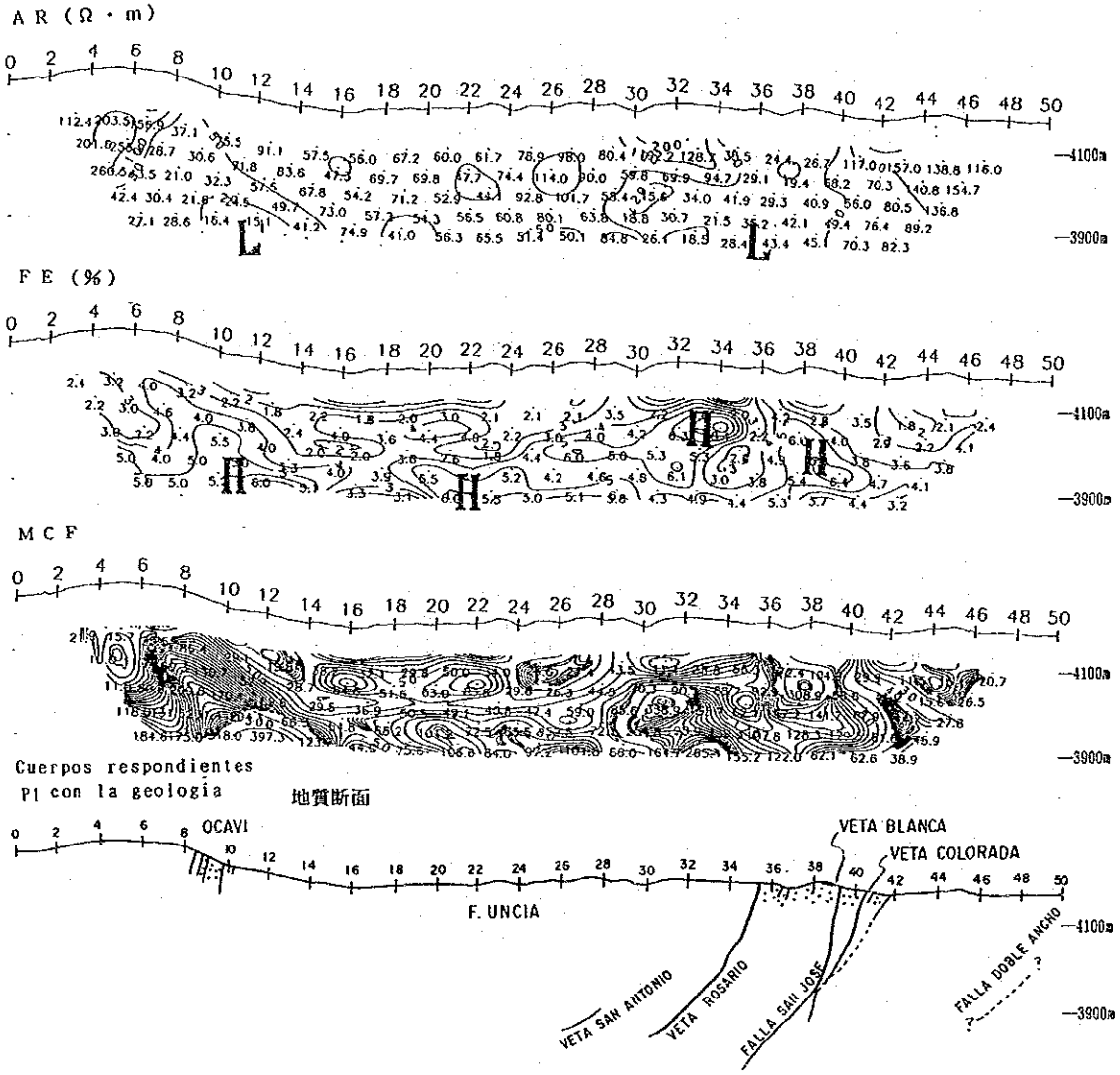
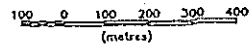


Fig. II-2-13 G測線断面図



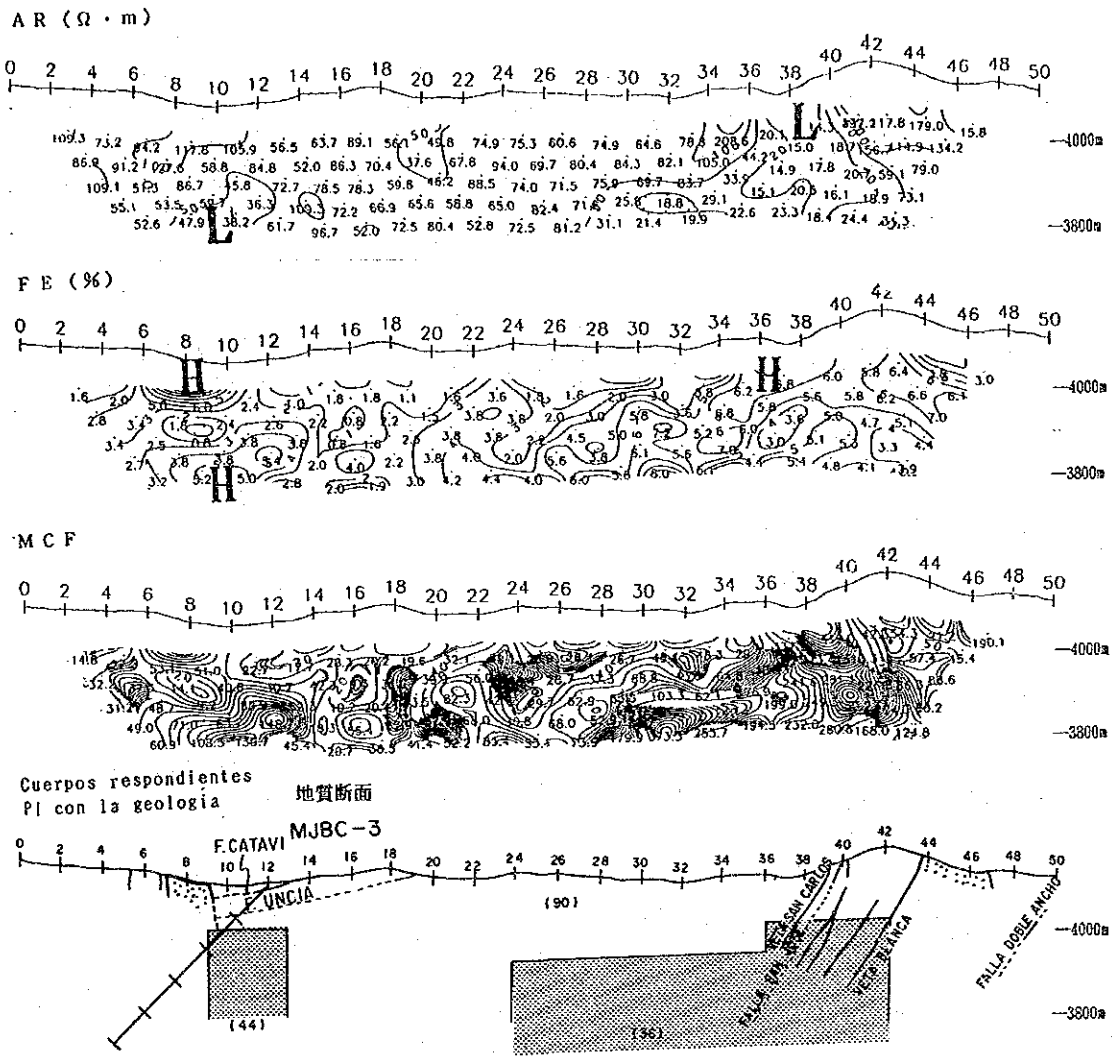


Fig. II-2-14 H測線断面图

100 0 100 200 300 400
(metres)

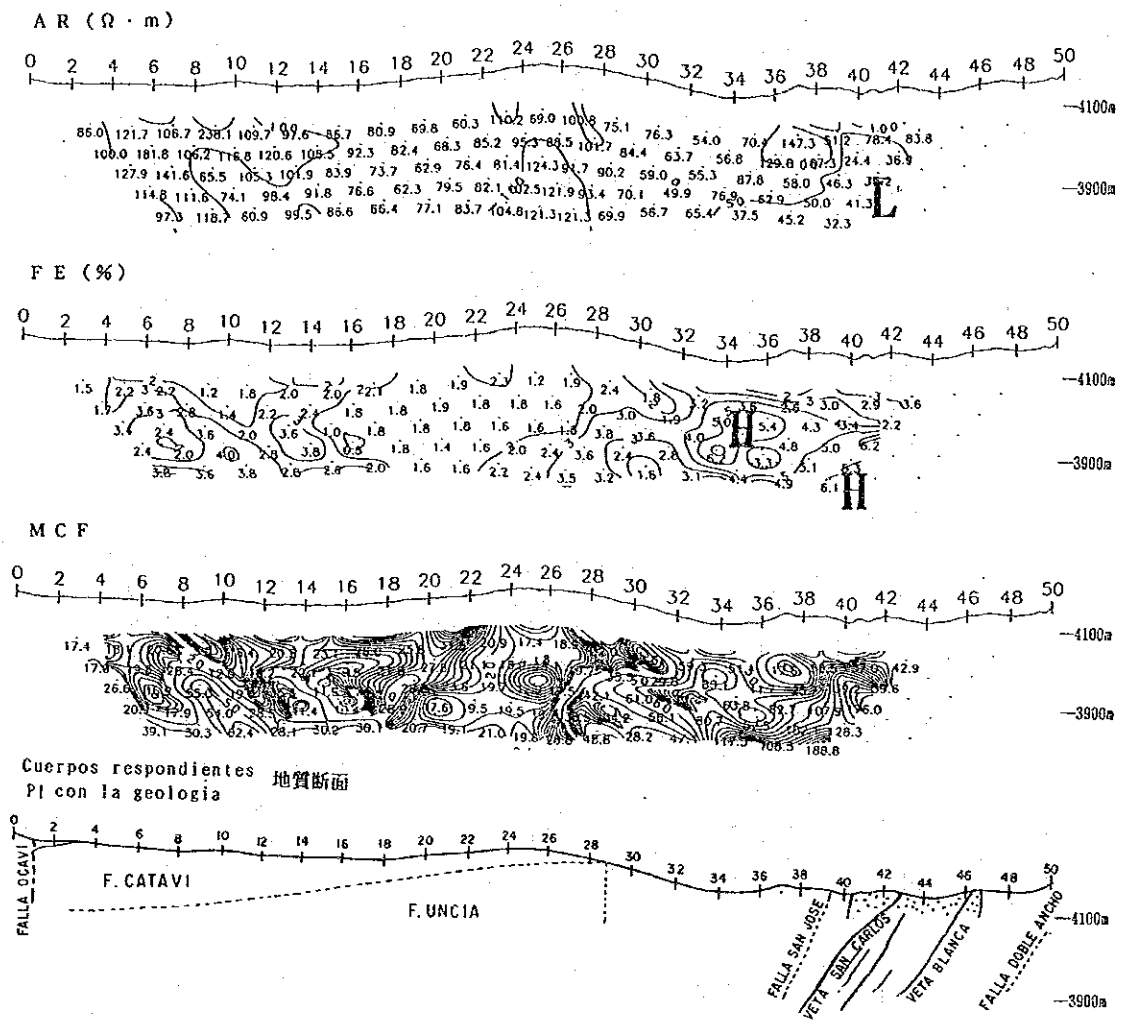


Fig. II-2-15 I 測線断面图

100 0 100 200 300 400
(metres)

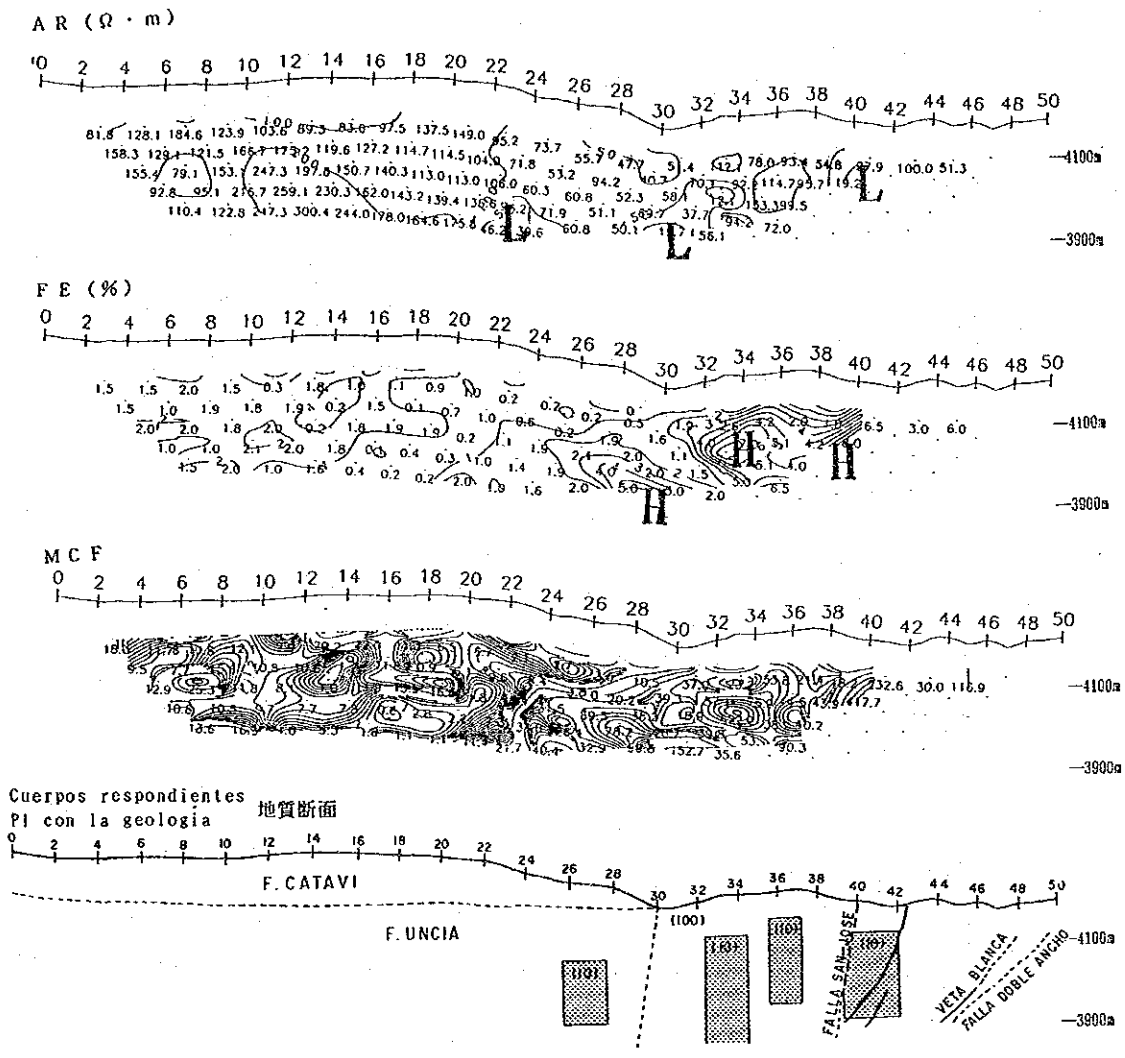
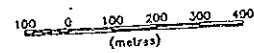


Fig. II-2-16 J測線断面图



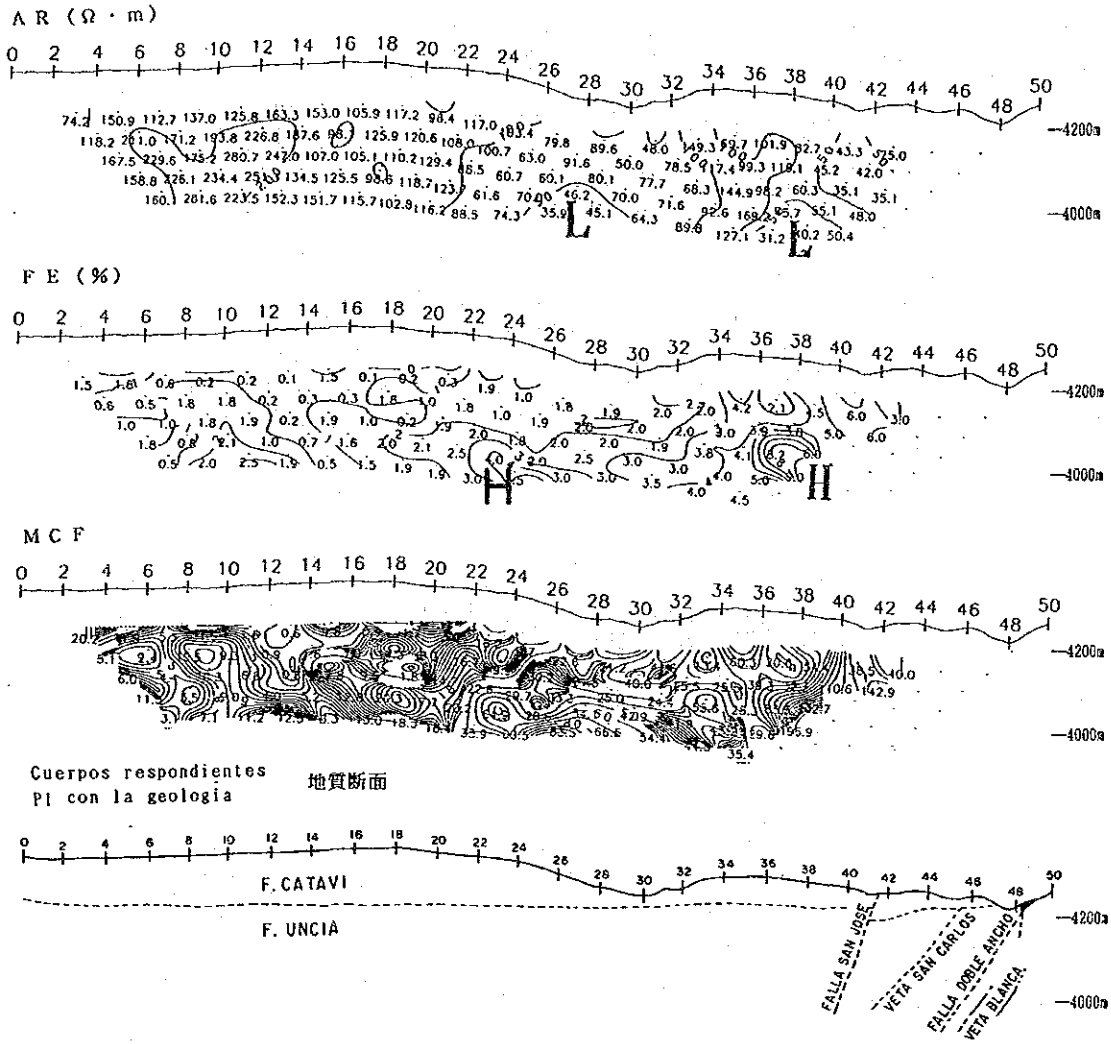


Fig. II-2-17 K測線断面図

100 0 100 200 300 400
(metres)

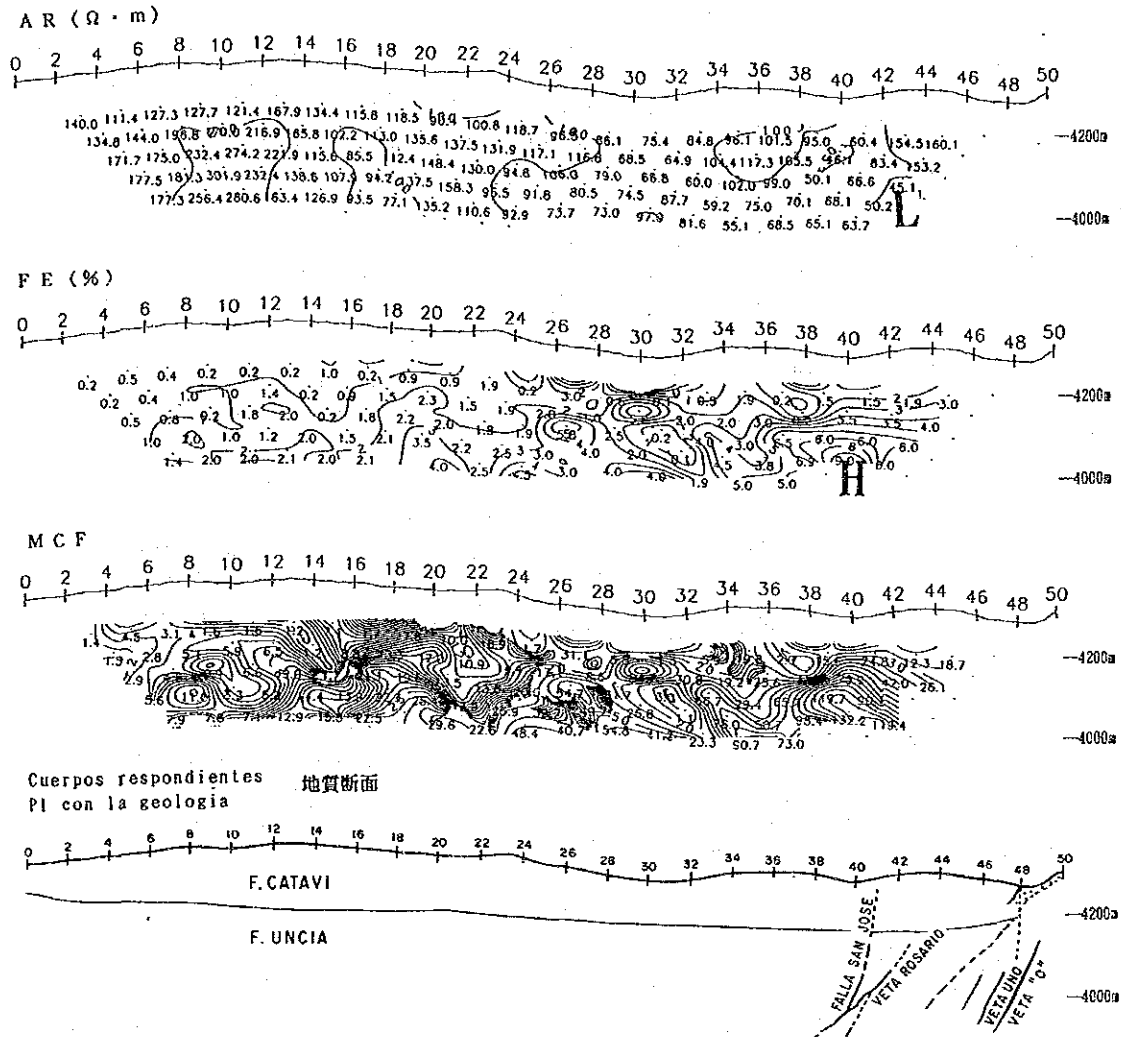


Fig. II-2-18 L 測線断面图

100 0 100 200 300 400
(metres)

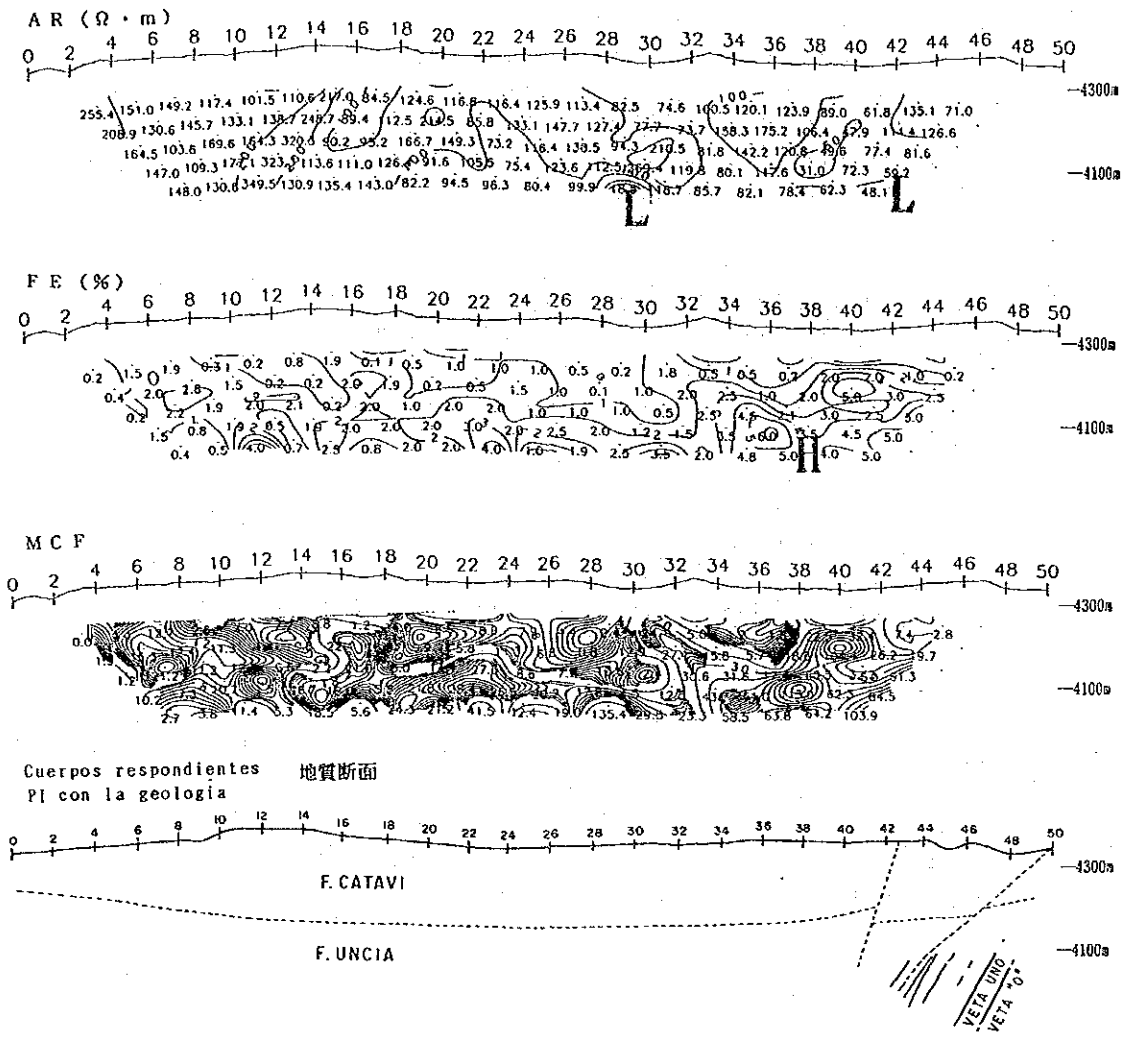


Fig. II-2-19 M測線断面図

100 0 100 200 300 400
(metres)

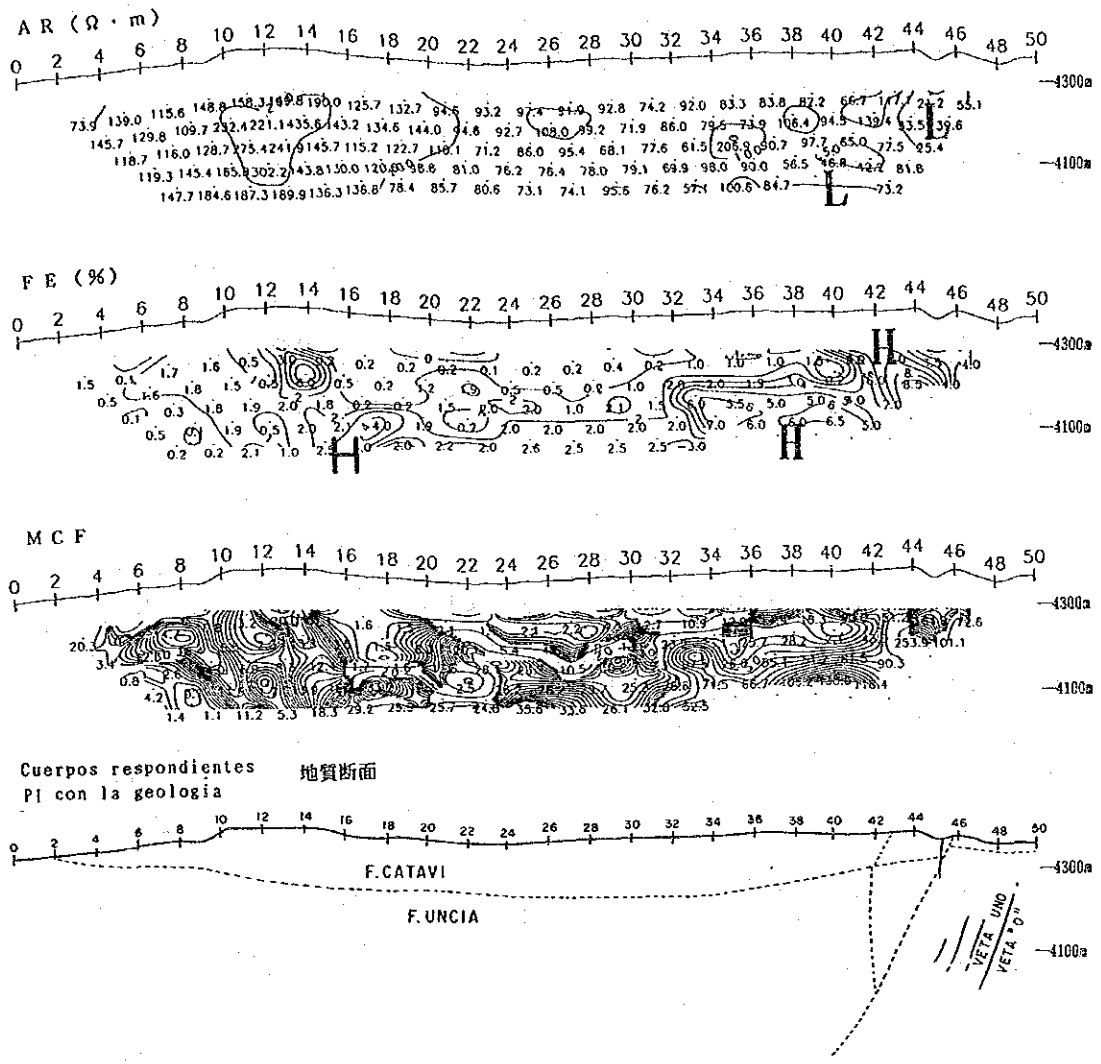
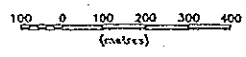


Fig. II-2-20 N測線断面図



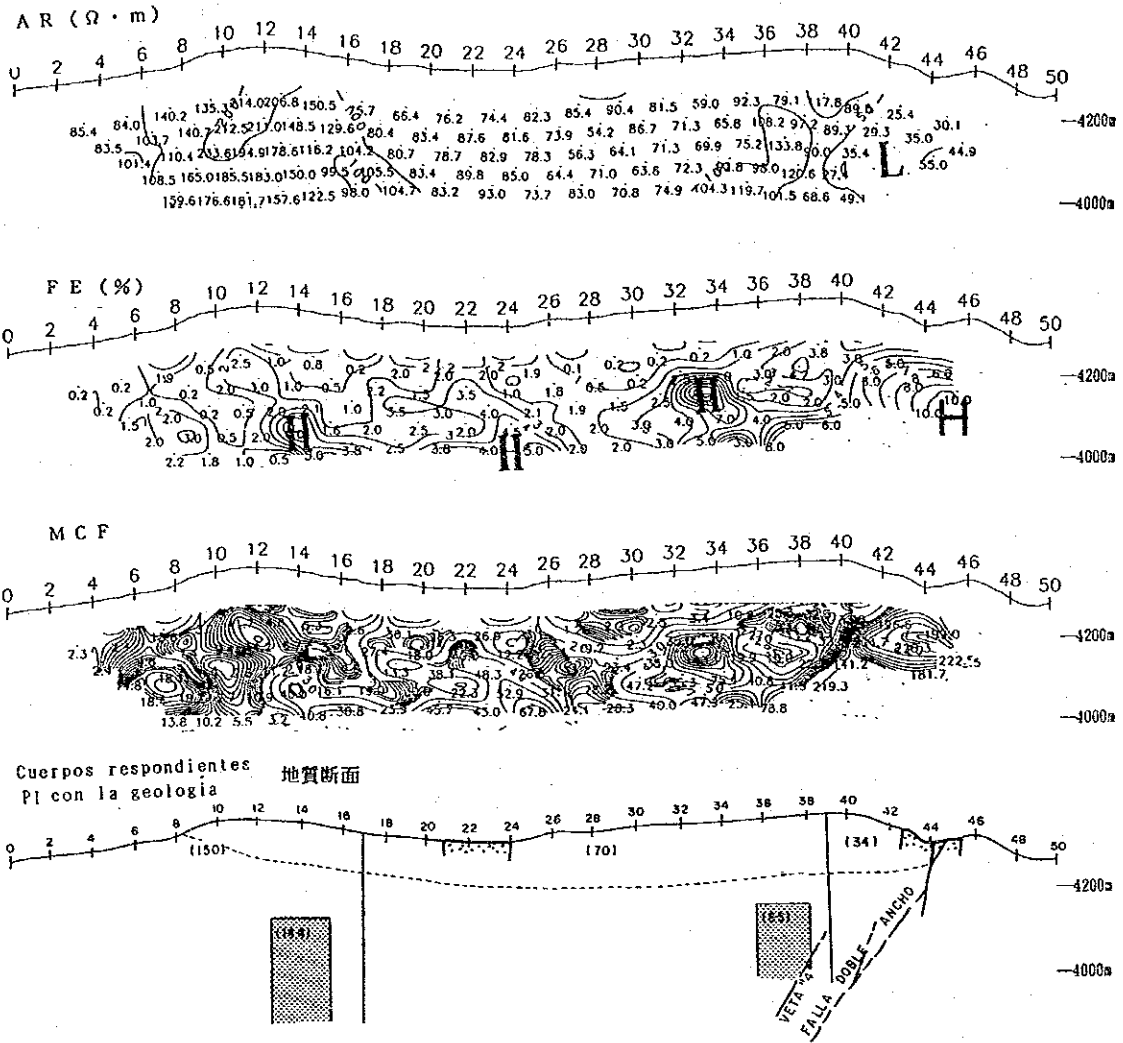


Fig. II-2-21 O 測線断面図

100 0 100 200 300 400
(metres)

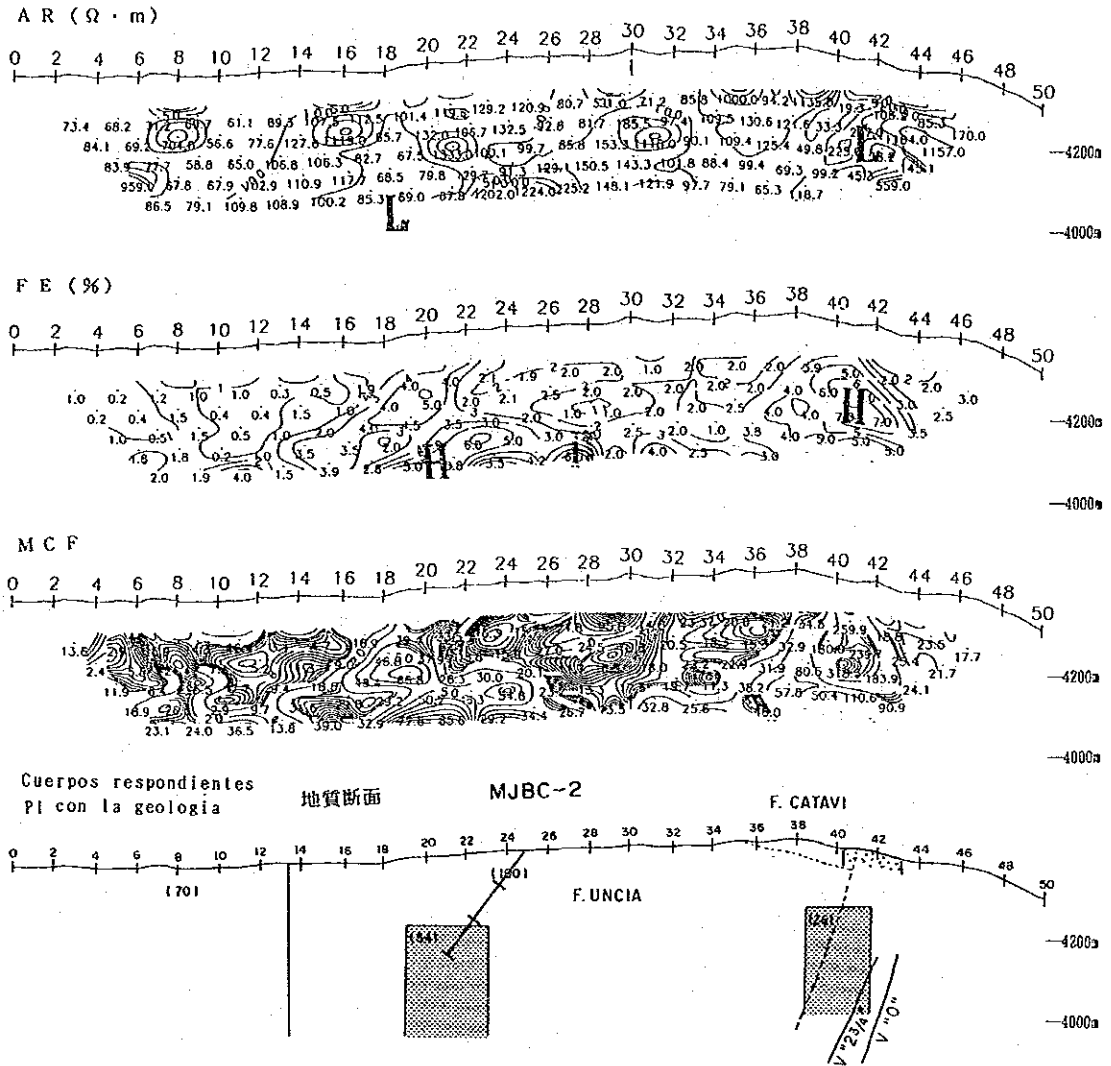


Fig. II-2-23 Q測線断面图

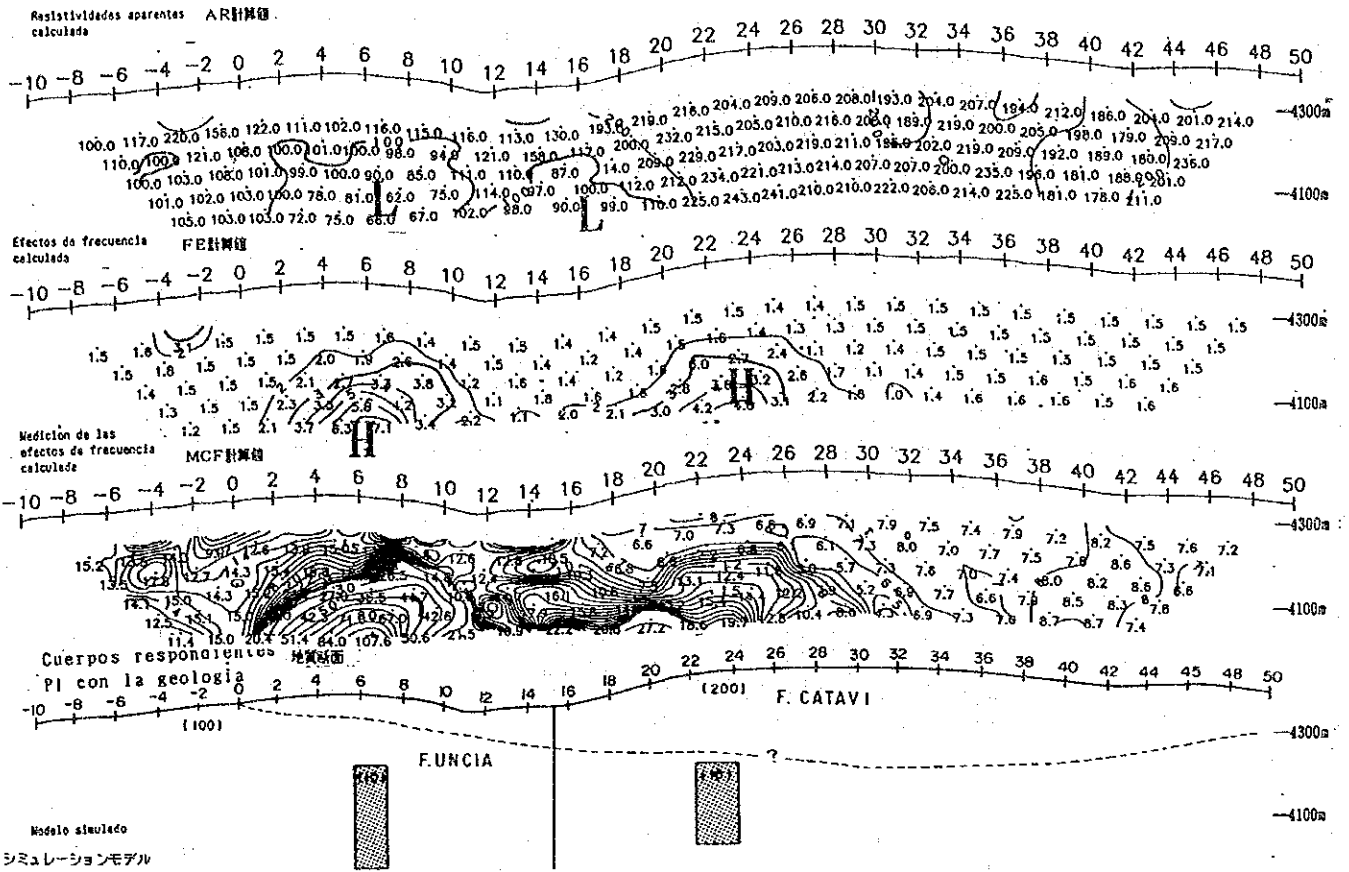


Fig. II-2-25 B測線シミュレーション断面図

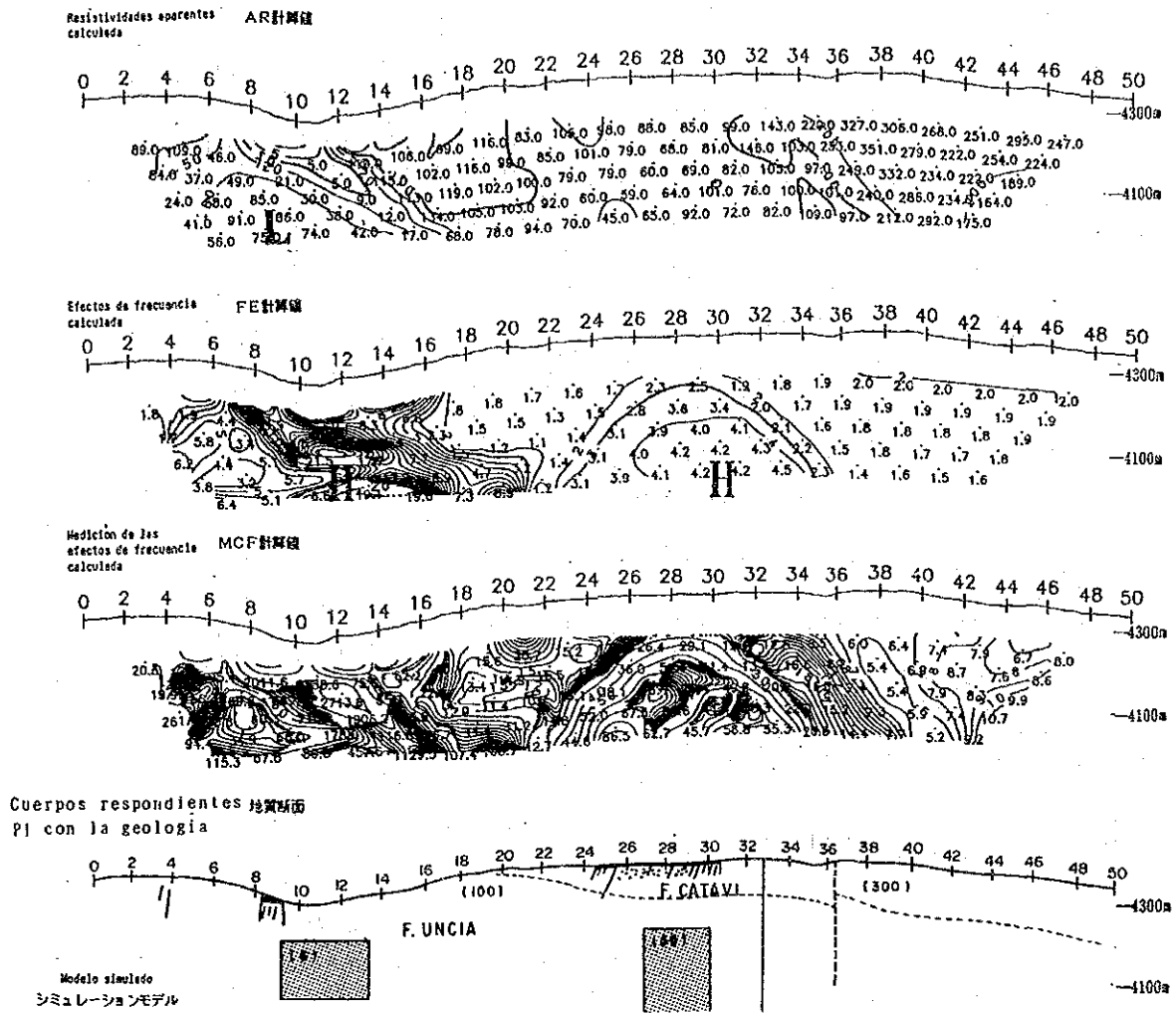


Fig. II-2-26 D測線シミュレーション断面図

100 0 100 200 300 400
(metres)

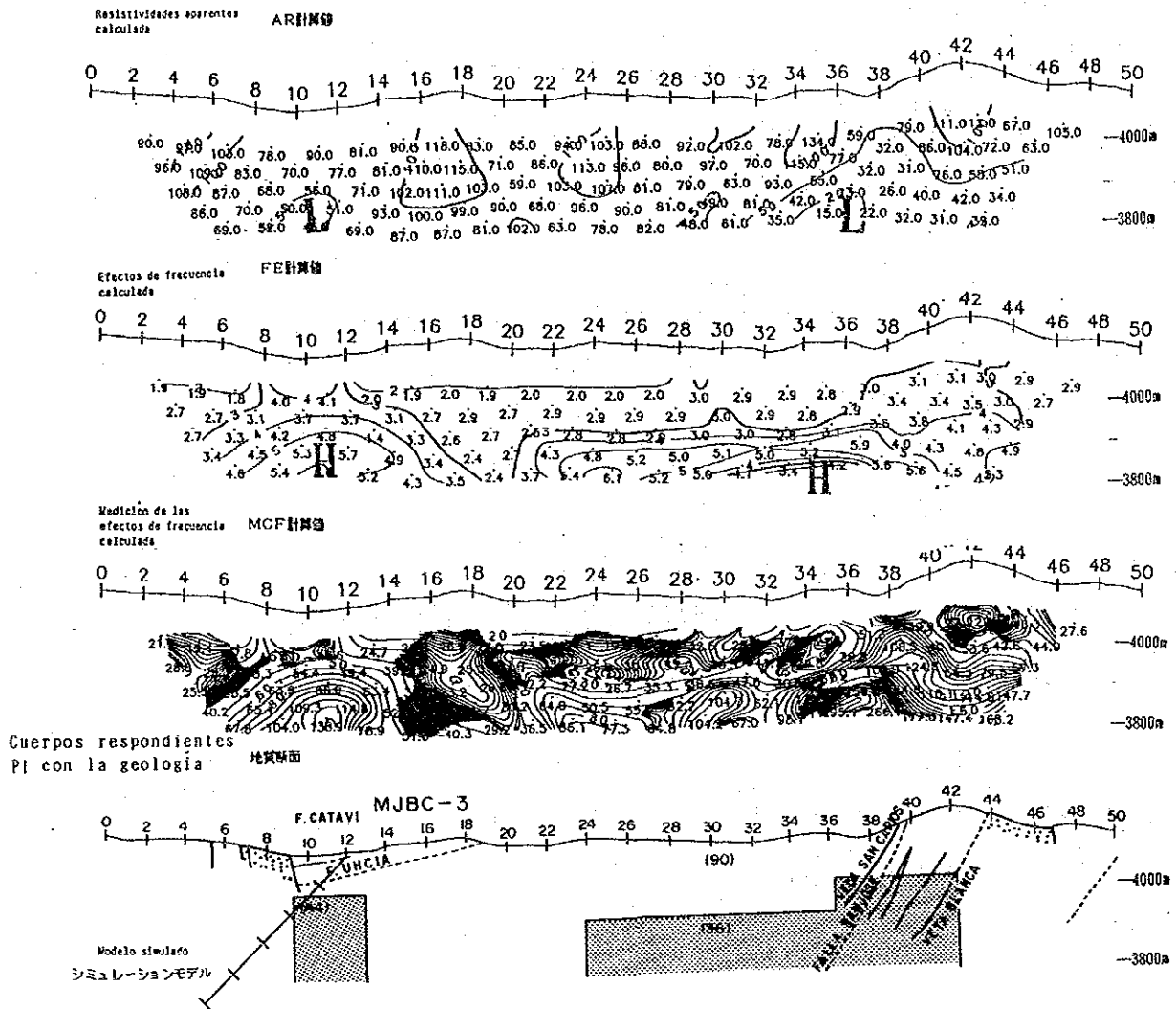


Fig. II-2-27 H測線シミュレーション断面図

100 0 100 200 300 400
(metros)

Resistividades aparentes calculada AR計算値

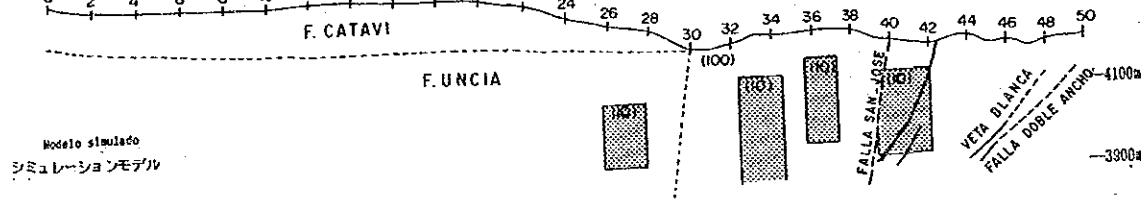
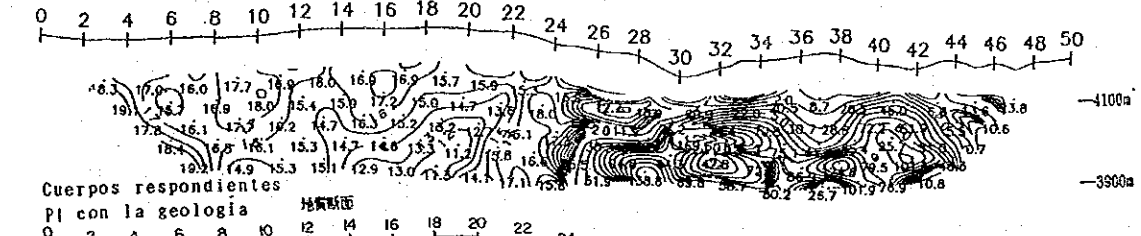
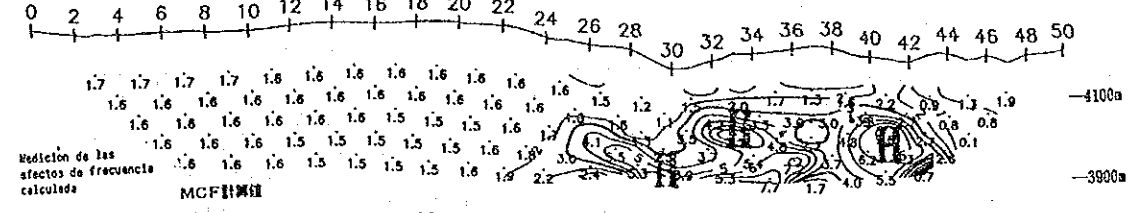
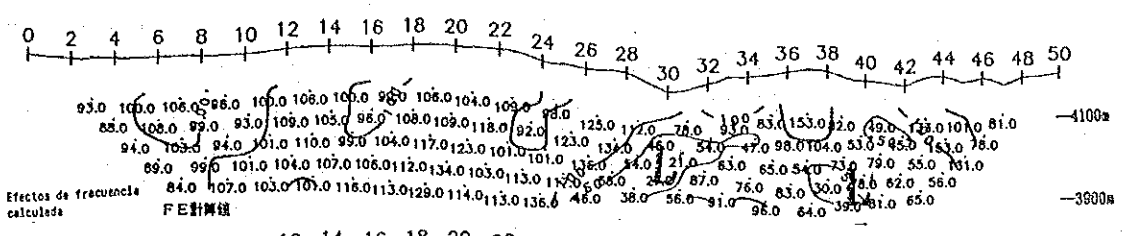


Fig. II-2-28 J測線シミュレーション断面図

100 0 100 200 300 400 (metres)

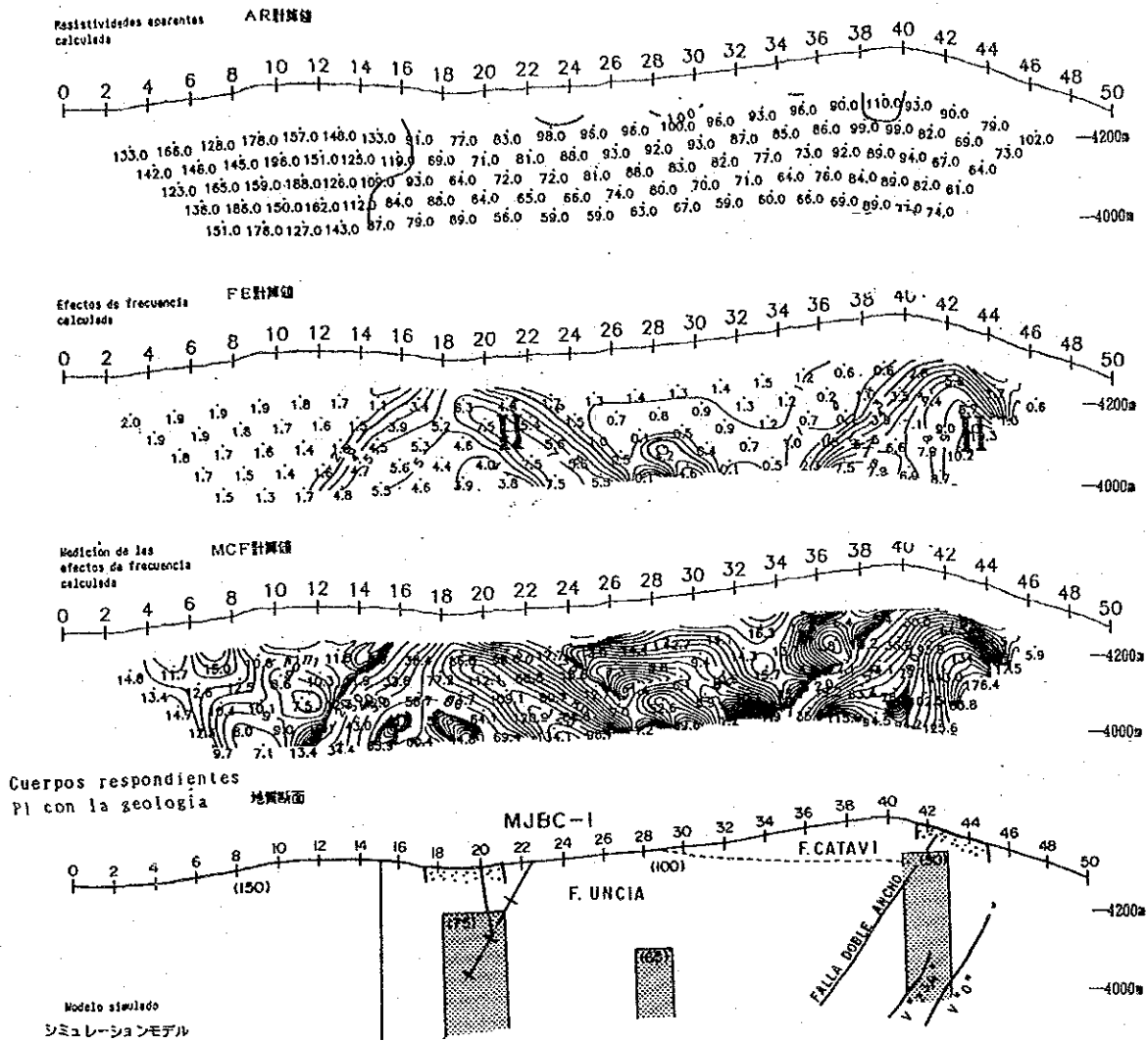


Fig. II-2-30 P測線シミュレーション断面図

100 0 100 200 300 400
(metres)

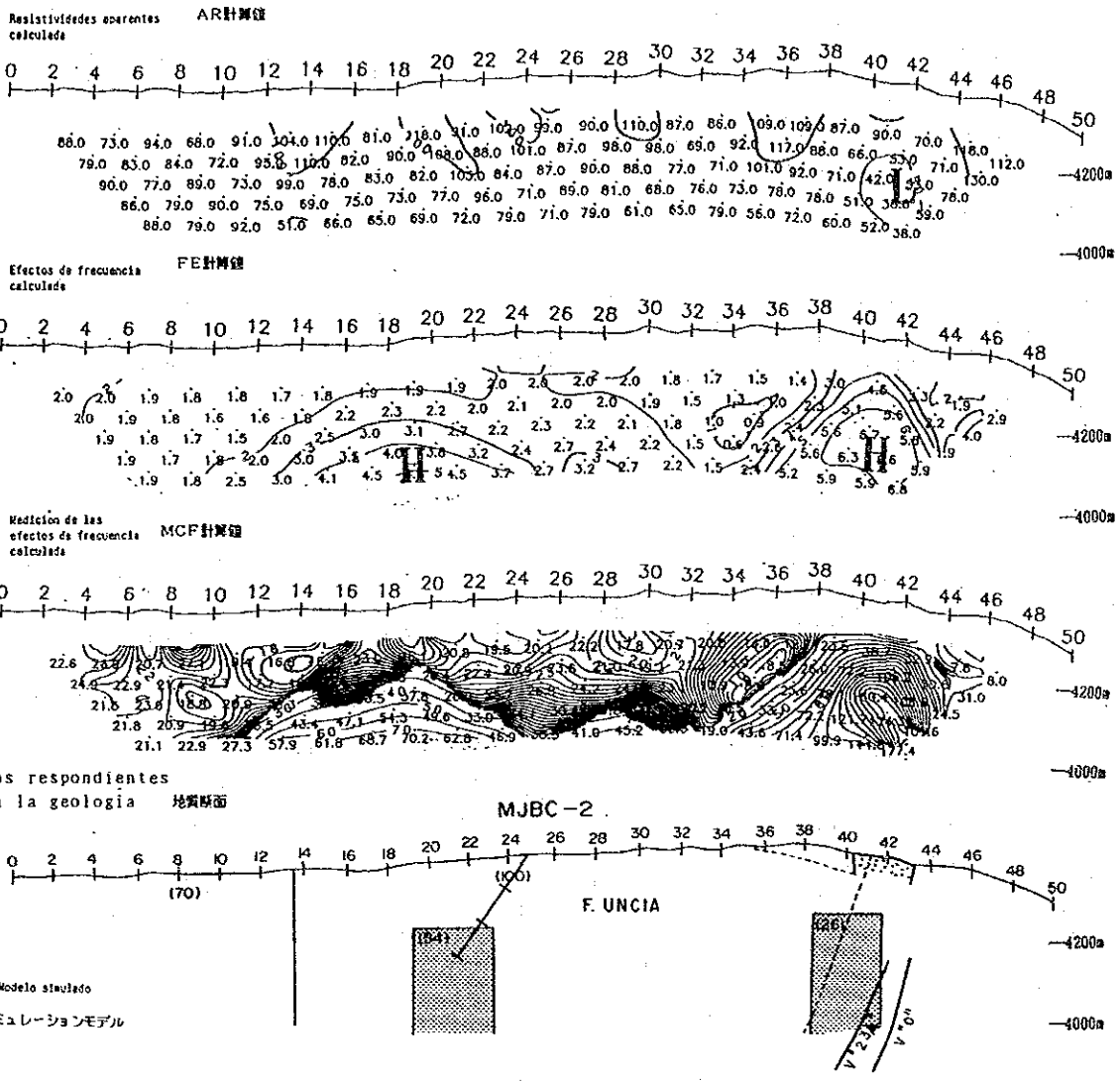


Fig. II-2-31 Q測線シミュレーション断面図

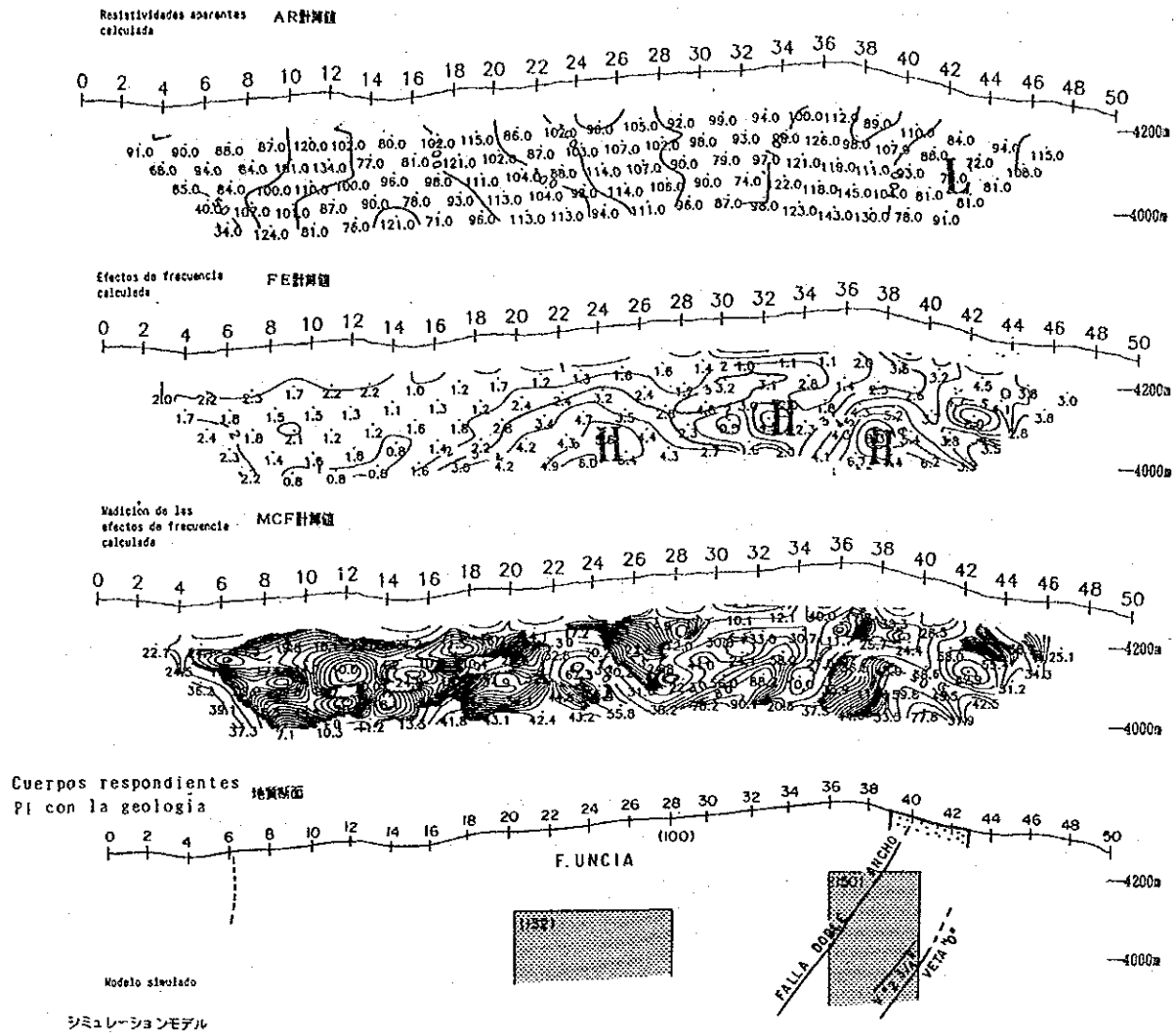


Fig. II-2-32 R測線シミュレーション断面図

100 0 100 200 300 400
(metros)

2-2 CSAMT法

2-2-1 測線設定

流電電極は、調査地区の南西約 6 Kmのタイソナ川の上流に設置した。

電位電極の間隔は 100mとし、その方向は流電電極系と平行とした。電位電極の位置は、IP法の測線上に設けた。

各測線ごとの調査要項は Tabla II-2-4 のとおりである。

Tabla II-2-4 CSAMT法 調査内容

測線名	測定点数	延測定点数	測点間隔
A. B.	42	84	100m
E. F.	49	98	
J.	35	35	
計		217	

流電電極位置及び測定範囲を、Fig. II-2-33 に示す。

測線及び測定点位置を Fig. II-2-34 に示す。

2-2-2 測定方法

CSAMT法は、1.5~2Km長の電流双極子より可聴周波数領域の電流を大地に流し、この電流双極子と平行な電場E及びそれに直交する磁場Hを測定し、地下の比抵抗分布を求める方法である。

CSAMT法の測定方法の概略を Fig. II-2-35 に示す。送信部と受信部の距離は、受信部において平面電磁波の仮定が近似的に成立すると考えられる表皮深度 (δ : skin depth) の3倍 (3δ : 通常4~8 Km) 以上にする必要がある。これより送信部に近い領域は near field と呼ばれ、この領域では平面電磁波の仮定が成立せず、データの解析が困難となる。表皮深度は、

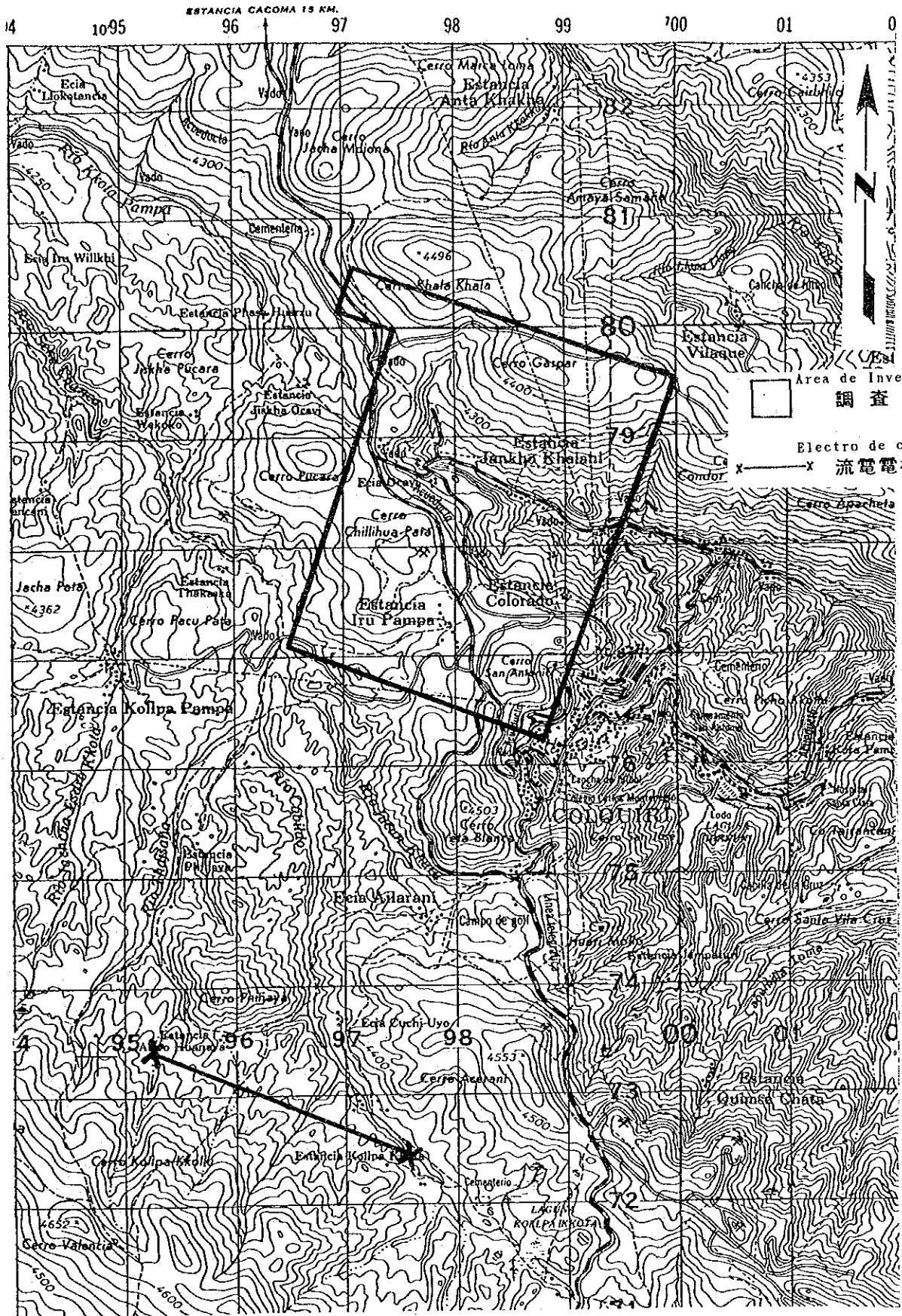


Fig. II-2-33 CSAMT法 調査位置図

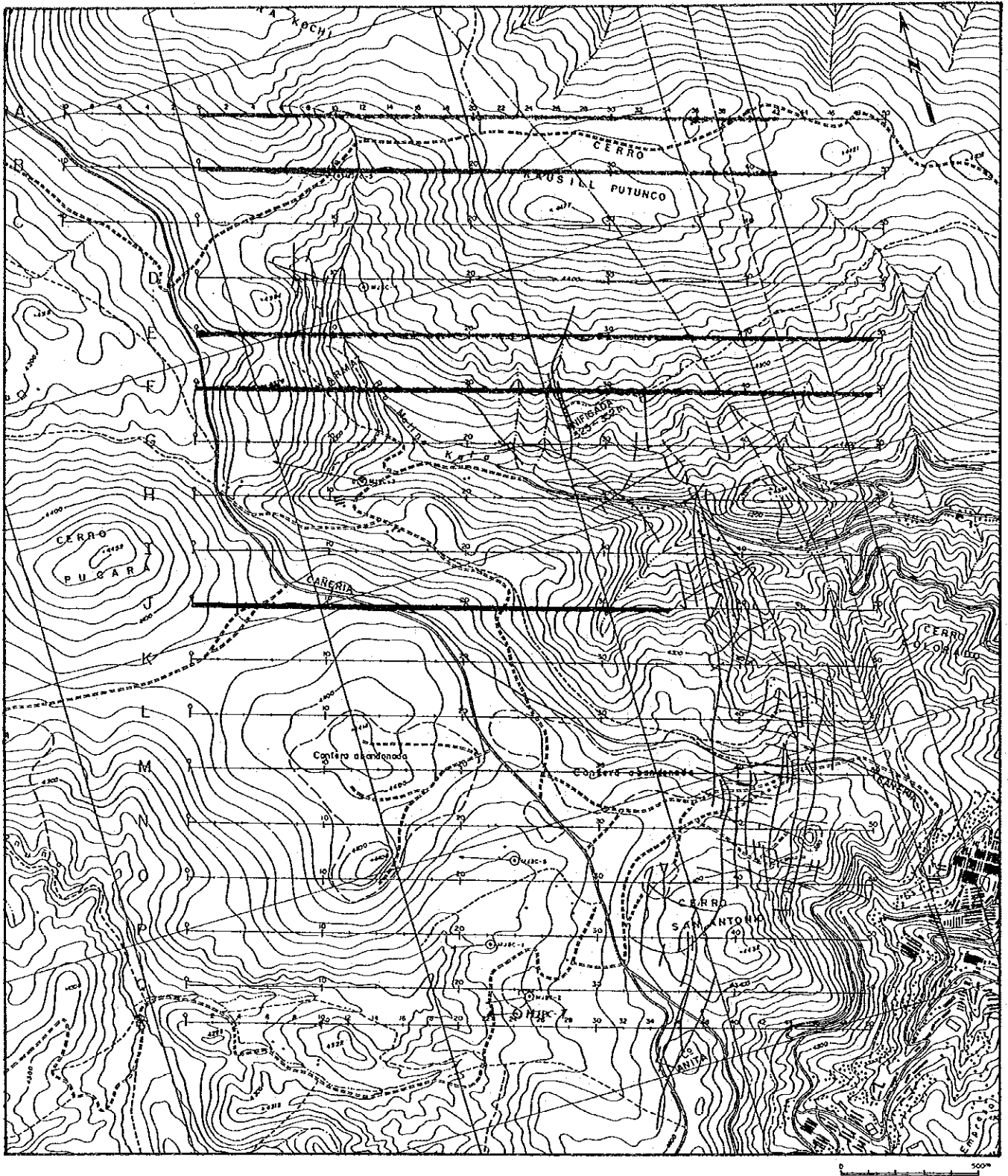


Fig. II-2-34 CSAMT法 測線及び測定点位置図

均質な大地（比抵抗 ρ ）に入射した電磁波が $1/e$ （37%）にまで減衰する深度で、調査深度の目安として利用される。

表皮深度は次の式により与えられる。

$$\delta = 503 \left| \frac{\rho}{f} \right|^{1/2} \quad (1)$$

δ : skin depth

ρ : 均質媒質の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

f : 周波数 (Hz)

(1)式から明らかなように表皮深度は周波数と比抵抗の関数である。(1)式を用いて周波数、比抵抗の変化にともなう表皮深度の変化を Table II-2-5 に示す。高比抵抗地域では near field

の影響を軽減するために、送受信間距離を十分に離すことの必要性が判読される。

流電電極には鉄電極を片側 100本ずつ使用し、接地抵抗の低下に努めた。また、S/N比を上げるため、送信機の最大出力を越えない範囲で各周波数での最大送信電流を設定し、送信した。送信電流の周波数は、2,048, 1,024, 512, 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 及び 2Hzの11周波数である。

電界の測定には、電位電極として素焼のつぼに入れた銅-硫酸銅電極を使用した。また、磁界の測定には誘導コイル磁気アンテナを使用し、電界ダイポールから約10m離し、受信ダイポールと直交する方向に設置した。

電界と磁界の信号はV-5受信機内で処理され、電界強度、電界位相、磁界強度、磁界位相、見掛比抵抗及び位相差が算出される。これらのデータは、V-5のディスプレイに表示され、アンプゲイン、スタッキング回数等の測定条件とともにメモリーに記録される。

本調査では各周波数について3回以上の測定を行い、再現性のあるデータ取得に努めた。

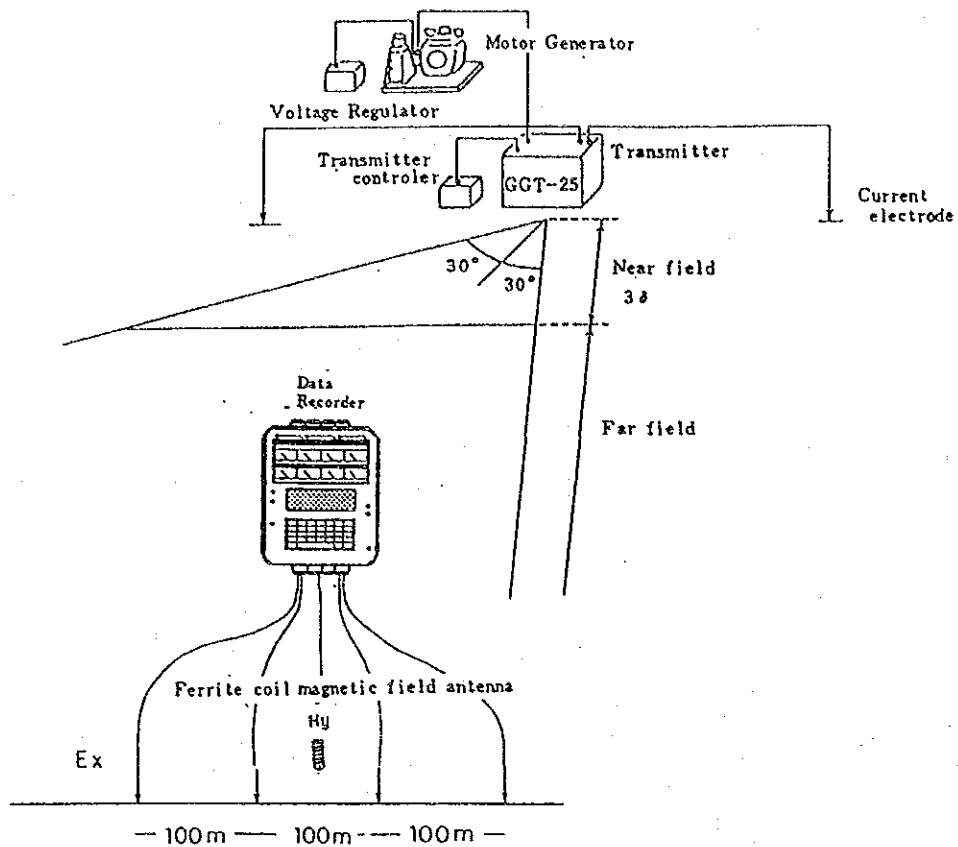


Fig. II-2-35 CSAMT法の概略図

Tabla II-2-5 表皮深度表

SKIN DEPTH (meters)

Note : Skin Depth (m) = $503 \times \sqrt{\rho / f}$

RESISTIVITY IN OHM--METERS

	5	10	20	40	80	160	320	640	1,280	2,560	
<u>f Hz</u>											<u>f Hz</u>
2,048	25	35	50	70	99	141	199	281	398	562	2,048
1,024	35	50	70	99	141	199	281	398	562	795	1,024
512	50	70	99	141	199	281	398	562	795	1,124	512
256	70	99	141	199	281	398	562	795	1,124	1,591	256
128	99	141	199	281	398	562	795	1,124	1,591	2,249	128
64	141	199	281	398	562	795	1,124	1,591	2,249	3,181	64
32	199	281	398	562	795	1,124	1,591	2,249	3,181	4,499	32
16	281	398	562	795	1,124	1,591	2,249	3,181	4,499	6,362	16
8	398	562	795	1,124	1,591	2,249	3,181	4,499	6,362	8,998	8
4	562	795	1,124	1,591	2,249	3,181	4,499	6,362	8,998	12,725	4
2	795	1,124	1,591	2,249	3,181	4,499	6,362	8,998	12,725	17,996	2

2-2-3 測定装置及び機材

測定に使用した装置及び機材を Table II-2-6 に示す。

Table II-2-6 CSAMT法の機器、機材一覧表

種類	名称	仕様	数量
送信機システム	ゾング社製 GGT-20型 トランスミッター	出力電圧：400～800V 出力電流：0.2～25A 出力波形：矩形波 出力周波数：1/1,024～2,048Hz 重 量：113kg	1台
	ゾング社製 XMT-12型 送信制御器	制御周波数：1/1,024～2,048Hz 重 量：5.8kg 電 源：12Vバッテリー	1台
エンジン付 発 動 機	ゾング社製 ZMG-12型 発電機	最大出力：30KW 周 波 数：400Hz 定 格 電 圧：120/208V エ ン ジ ン：4気筒空冷	1台
受信機システム	フェニックス社製 V5型 レシーバー	信号入力：8チャンネル 受信周波数帯域：DC～10KHz 受信電圧感度：10μV CPU:CMOS NS32C0016 メモリー：512K I/O:RS232-C A/D:16bit/125KHz 重 量：14kg 電 源：12V外部バッテリー	1台
	テクトロニクス社製 212型 オシロスコープ	感 度：1mV/div～50V/div 電 源：12Vバッテリー 重 量：1.6Kg	2台
	フェニックス社製 AMTコイル	周波数特性：FC=1.1Hz 全 長：89cm 直 径：90mm 重 量：6.5Kg	2台
電 極	電流電極	鉄 棒：φ16mm,長さ80cm	200本
	電位電極	飽和硫酸銅溶液非分極性電極	10個
電 線	藤倉電線(株) (受信) 京三電線(株) (送信)	V S F ×1.25mm ビニール電線 C V V 1 ×3.5mm ビニール電線	1,000m 6,000m
測量機材	牛方ポケットコンパス 100mエスロン間縄		2台
トランシーバー	ソニー(株)	出 力：500mW	6台

2-2-4 解析方法

本調査で実施したCSAMT法の解析手順を 図Ⅱ-2-36 に示す。

CSAMT法調査において、near fieldの影響を避けるためには送受信間距離を表皮深度の3倍以上離す必要がある。しかし、現実には調査地の平均的な比抵抗を事前に把握するのは困難であり、また S/N比の制約により流電電極をあまり遠くに設定できない。

本調査では、near fieldの影響をできるだけ軽減するために、調査地区中央から約 8.5km離れた場所に流電電極を設置した。

ほとんどの測点においてnear fieldは問題になる程ではないが、V-5受信機内で自動的にnear field補正が実施される。

V-5に記録したデータから、電界、磁界、位相差のそれぞれの平均値及び見掛比抵抗値を計算し、測定値一覧表として出力した。見掛比抵抗値の計算式としては、通常のMT法で用いられる次式を適用した。

$$\rho_a = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2)$$

ρ_a : 大地の見掛比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

f : 流電電極の周波数 (Hz)

E_x : 電界 ($\mu V/m$)

H_y : 磁界 (γ)

この見掛比抵抗値を用いて、各周波数ごとに見掛比抵抗平面図を作成した。

見掛比抵抗断面図は、断面線沿いの測線において見掛比抵抗値を周波数の高い方から順に上から下へ等間隔に記入し、等見掛比抵抗線を描いたもので、縦軸と深度は一対一に対応するものではなく一種の擬似断面図である。

観測された見掛比抵抗値は、表皮深度までの比抵抗情報を含んでいると考えられる。適正な比抵抗モデルを得るために、地下構造を水平多層構造と仮定して1次元解析を実施した。

(1次元多層構造解析)

解析にはnear field補正を施した見掛比抵抗値を用い、明らかにノイズの影響を受けていると考えられるものについては除外した。解析は水平多層構造の層数、層厚及び比抵抗値をパラメーターとし、初期モデルについて後述の(3)式~(8)式に基づいて $\rho_a - f$ 曲線を計算し、観

測値から得た $\rho_a - f$ 曲線に近づくようにパラメーターを修正する対話型シミュレーション手法により行った。

以下に、水平多層構造モデルの場合の CSAMT法の $\rho_a - f$ 曲線の計算法について述べる。

($n + 1$)層水平多層構造(各層の比抵抗値が $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, \rho_{n+1}$, 各層の下底面の深度が z_1, z_2, \dots, z_n に対する表面インピーダンス ($Z(\theta)$) は、次式で表される。

$$Z(\theta) = \frac{E_x}{H_y} \Big|_{z=0} = \frac{i\omega (A_0 + B_0)}{\theta_0 (A_0 + B_0)} \quad \text{----- (3)}$$

ここで

$$\begin{aligned} A_0 + B_0 &= A_1 + B_1 \quad \text{----- (4)} \\ \theta_0 (A_0 - B_0) &= \theta_1 (A_1 + B_1) \\ A_j \exp(-\theta_j z_j) + B_j \exp(\theta_j z_j) \\ &= A_{j+1} \exp(-\theta_{j+1} z_j) + B_{j+1} \exp(\theta_{j+1} z_j) \\ \theta_j [A_j \exp(-\theta_j z_j) - B_j \exp(\theta_j z_j)] \\ &= \theta_{j+1} [A_{j+1} \exp(-\theta_{j+1} z_j) + B_{j+1} \exp(\theta_{j+1} z_j)] \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad \text{----- (5)}$$

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{\theta_{n+1} + \theta_n}{2\theta_n} \exp[-(\theta_{n+1} - \theta_n)z_n] \\ B_n &= \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{2\theta_n} \exp[-(\theta_{n+1} + \theta_n)z_n] \end{aligned} \quad \text{----- (6)}$$

ここでは cgsemu 単位系を用いており、 θ は波数である。

$$\begin{aligned} \theta_j &= \left(\frac{4\pi i\omega}{\rho_j} \right)^{1/2} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \omega &= 2\pi f \end{aligned}$$

一方、 $1\text{mV/Km} = 1\text{emu}$, $1\Omega \cdot \text{m} = 10^{11}\text{emu}$, $1\gamma = 10^{-5}\text{emu}$ なる関係より、(2)式で示した見掛比抵抗計算式を cgsemu 単位系で表現すると次式のようになる。

$$\rho_a = \frac{2}{f} \left| Z(\theta) \right|^2 \quad [\text{e. m. u.}] \quad \text{----- (7)}$$

よって (3)~(6)及び(7)式より、見掛比抵抗 ρ_a が求まる。 ρ_a の単位を $\Omega \cdot m$ とする場合の表現式は次式となる。

$$\rho_a = \frac{2}{f} \left| z(\theta) \right|^2 / 10^{11} \quad [\Omega \cdot m] \quad \text{----- (8)}$$

(2次元構造解析)

1次元解析の結果から解析比抵抗断面を作成し、更にこれを初期値として2次元構造解析を実施した。解析方法の概要を以下に述べる。

MT法 (magnetotelluric method) のように平面波ソースの場合、走向方向に場が変化しない2次元構造を仮定すると、マクスウェルの方程式はTMモードとTEモードの2つに分けられる。今回のCSAMT法の2次元モデル計算においては、JUPP & Vozoff (1977)に基づいて、TMモードに相当する分を分離化し、有限差分法を用いてその近似方程式を解くことを基本としている。

Fig. II-2-37 に2次元構造解析の流れを示す。フォワード計算は、与えられた大地の比抵抗モデル (地下構造及びその比抵抗分布) について、各測点での周波数ごとの見掛比抵抗及び位相差の応答を求めるものである。今回の解析計算においては、比抵抗モデルにおける初期モデルの検討・選別及びインバージョン計算の結果の修正に用いた。インバージョン計算は、逆境界値問題の解法の1種で、実測データを最もうまく説明する地下の比抵抗分布を求めるものである。その場合、実測値と計算値との $\rho_a - f$ 曲線を比較・照合し、後者が前者に近づくように比抵抗分布を修正・変更するのであるが、その手法として、線形回帰式により最小2乗法を反復適用する方法を用いた。

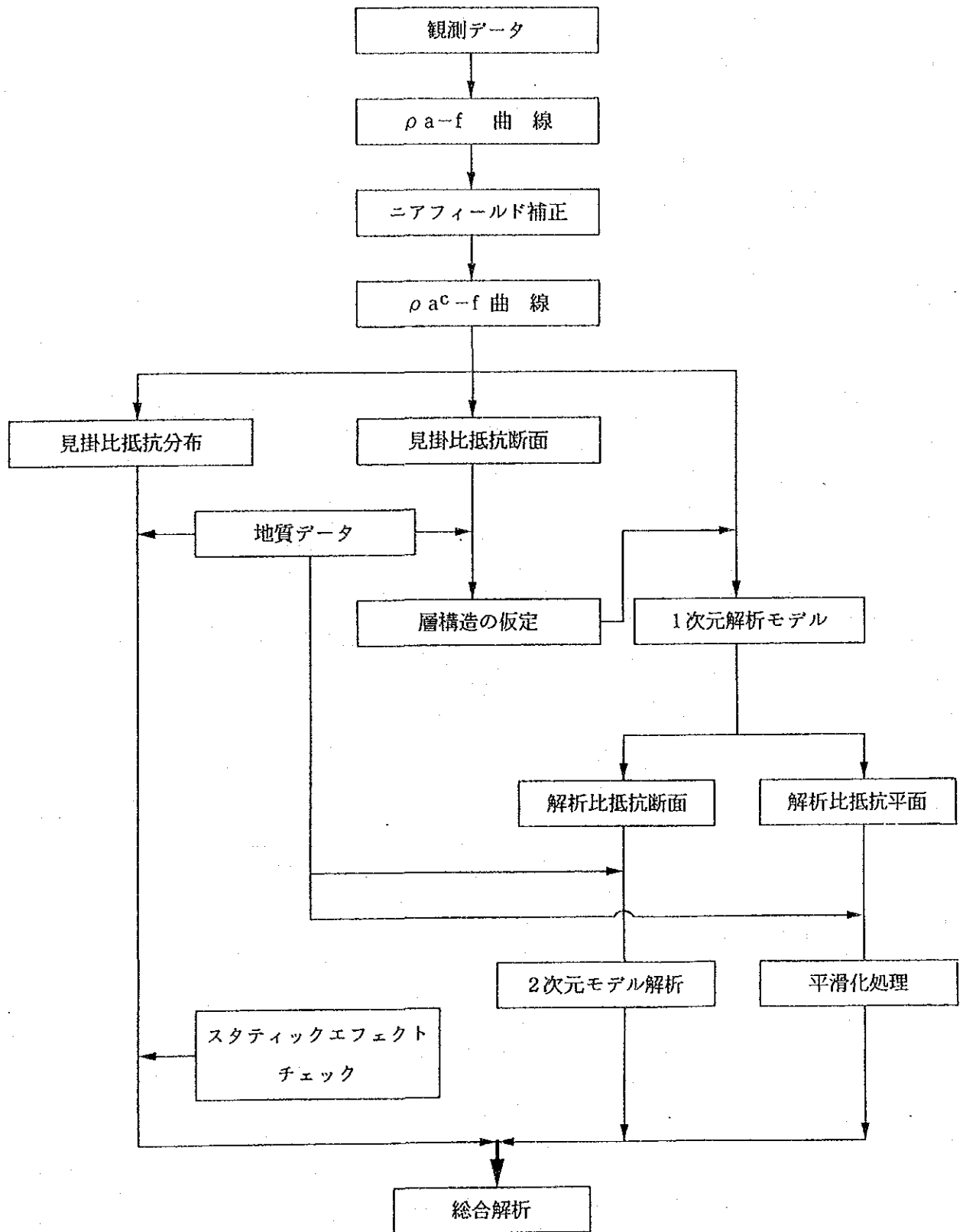


Fig. II-2-36 CSAMT法解析フローチャート

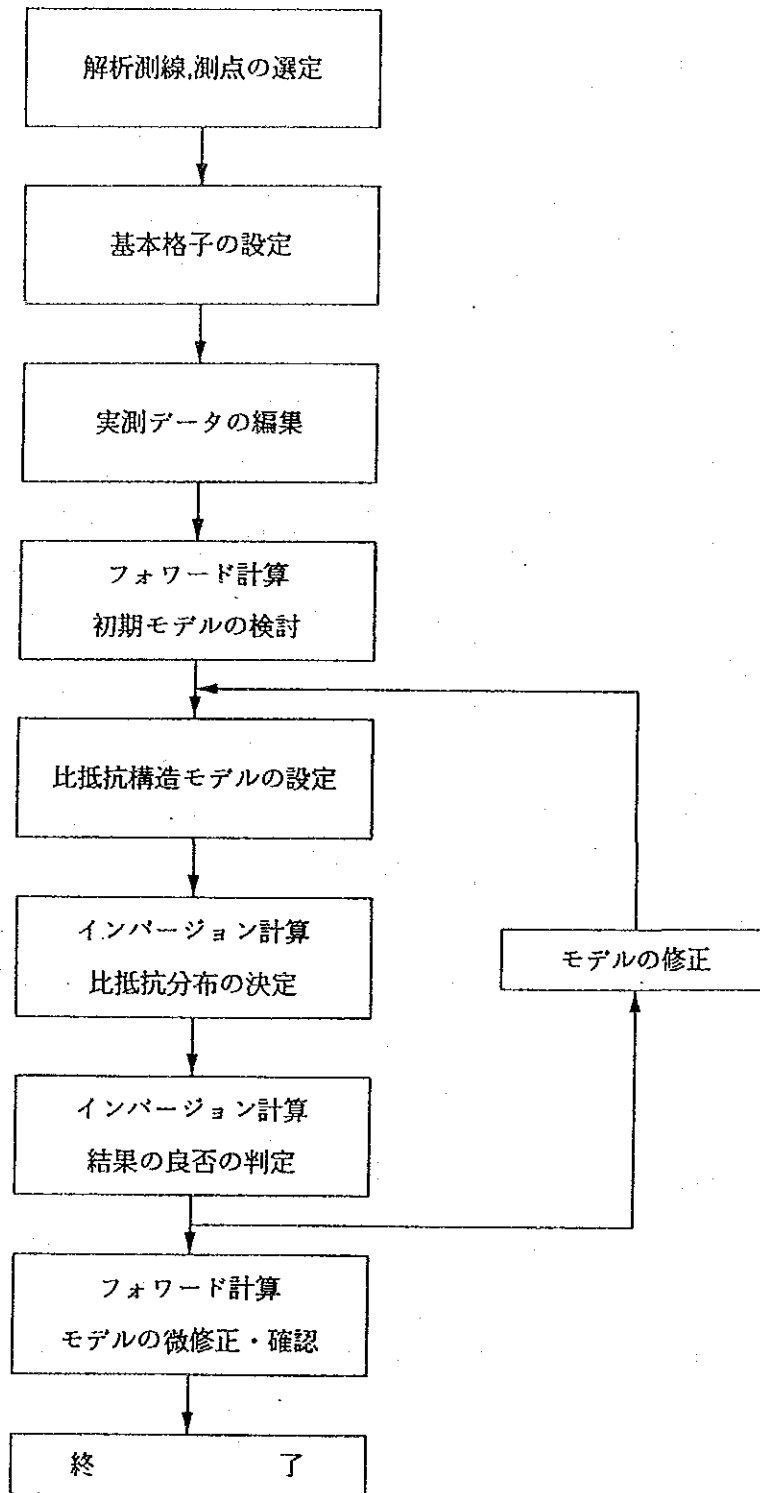


Fig. II-2-37 CSAMT法2次元構造解析フローチャート

2-2-5 解析結果

I P法によって得られた異常帯に対して、更に深部を解明するためにCSAMT法をA、B測線上で各42点、計84点、E、F測線上で各49点、計98点、J測線上で35点、合計217点の測定をした。

2-2-4で述べたように解析のための各種図面を作成した。

見掛比抵抗平面図は、代表的な例として2,048Hz、512Hz、8HzをFig. II-2-38～Fig. II-2-40に示し、比抵抗構造平面図は、代表的な例として標高4,300m、標高4,100m、標高3,900mをFig. II-2-41～Fig. II-2-43に示す。

更にA～J測線の5断面を作成し、Fig. II-2-44～Fig. II-2-48に示す。

見掛比抵抗平面図について述べる。

(2,048Hz)

表層及び浅部の情報を得るために適当であると考えられ、しばしば地表地質との対比に用いられる。

見掛比抵抗分布状態は次のように特徴づけられる。

A、B測線においては、南東部のCERRO KAUSILL PUTUNCOにおいておよそ $100\sim 500\Omega\cdot m$ を示し、やや高比抵抗を示す。カタピ層の主として砂岩層に対比される。

E、F測線においては、測点15～16を中心とする $50\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

J測線は、大部分が $30\sim 100\Omega\cdot m$ の低比抵抗を示す。

これらの低比抵抗帯は表層が変質を受けているものと考えられる。

(512Hz)

A、B測線は、西部の測点0～10を除いて全般的にやや高比抵抗を示す。

E、F測線は、測点10～16にかけて $50\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗を示す。

J測線は、測点23、27、32付近で $50\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗を示す。

(8Hz)

A、B測線の、西部の測点2～10、測点14、及び測点24で $50\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗を示す。

E、F測線は、測点10、測点14～20で $20\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗を示す。

J測線は、測点23において $20\Omega\cdot m$ 以下の低比抵抗を示す。

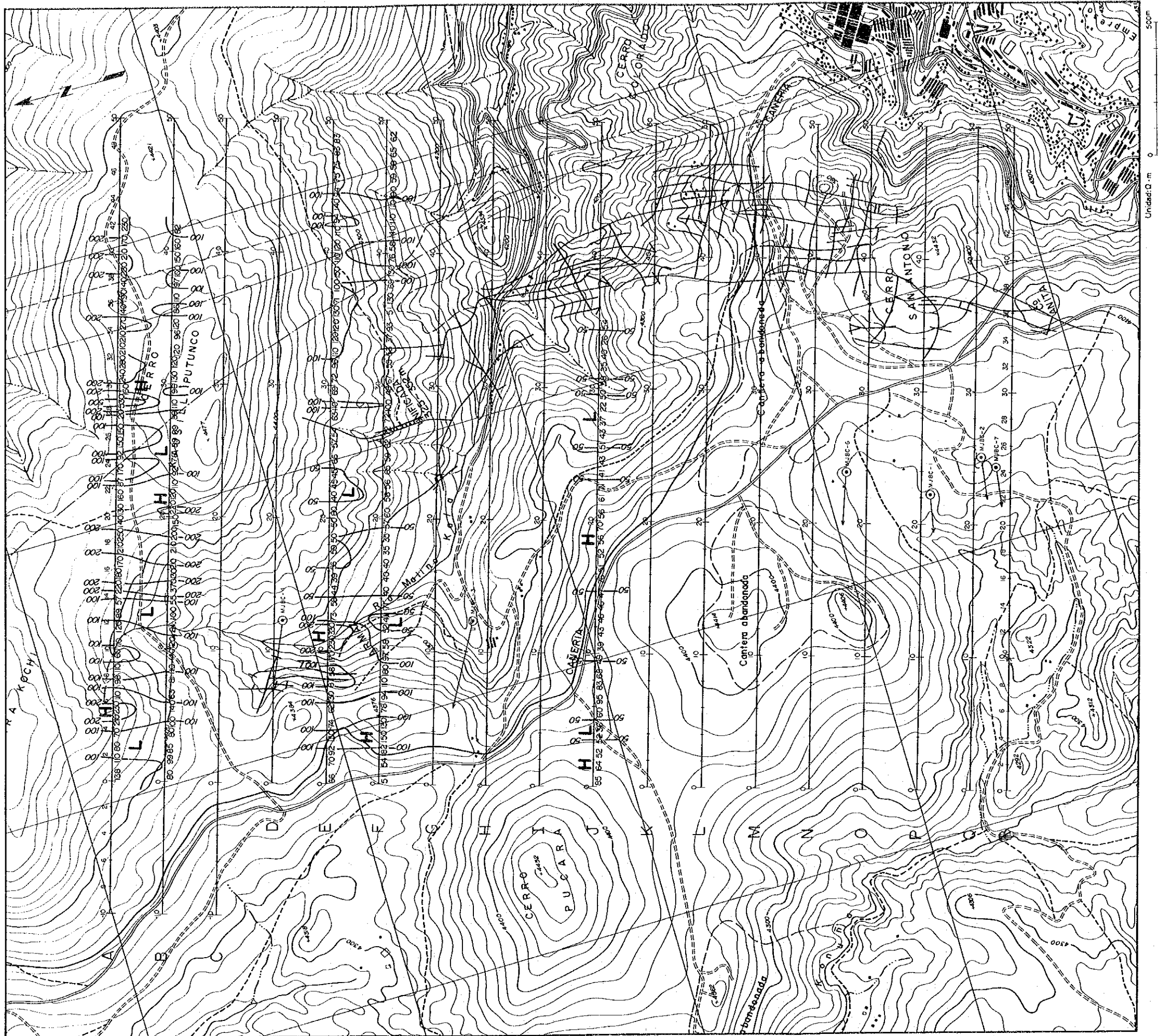


Fig. II-2-38 見掛比抵抗平面図 (2,048 Hz)



Fig. II-2-39 見掛比抵抗平面図 (512 Hz)



Fig. II-2-40 見樹比抵抗平面圖 (8 Hz)

比抵抗構造平面図について述べる。

(標高 4,300m)

A, B 測線は、全般的にやや高比抵抗を示し、カタピ層の主として砂岩層分布に対比される。B 測線 測点 6、E 測線 測点 8~16、測点 22、F 測線 測点 10~18 において $50\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

E, F 測線の低比抵抗帯は、アルマス鉱床及び鉱化帯を反映しているものと考えられる。

(標高 4,100m)

A, B 測線 測点 6~8、測点 13、測点 22~25 において $50\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

E, F 測線 測点 6~8、測点 8~22 において $50\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗帯が広範に分布する。その他、F 測線 測点 24, 26 及び 36 において $50\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗を示す。

J 測線 測点 26~30 において $50\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗を示す。

(標高 3,900m)

A, B 測線 測点 0~14 及び 測点 22~24 において $20\Omega\cdot\text{m}$ 以下の顕著な低比抵抗帯が分布する。

E, F 測線 測点 4~24, 30, 及び 36 において $20\Omega\cdot\text{m}$ 以下の顕著な低比抵抗帯が分布する。

J 測線 測点 22~24 に $20\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

A, B 測線の低比抵抗帯は、断層及びそれに伴う変質帯の存在が推定されるが、鉱床及び鉱化帯も期待される。

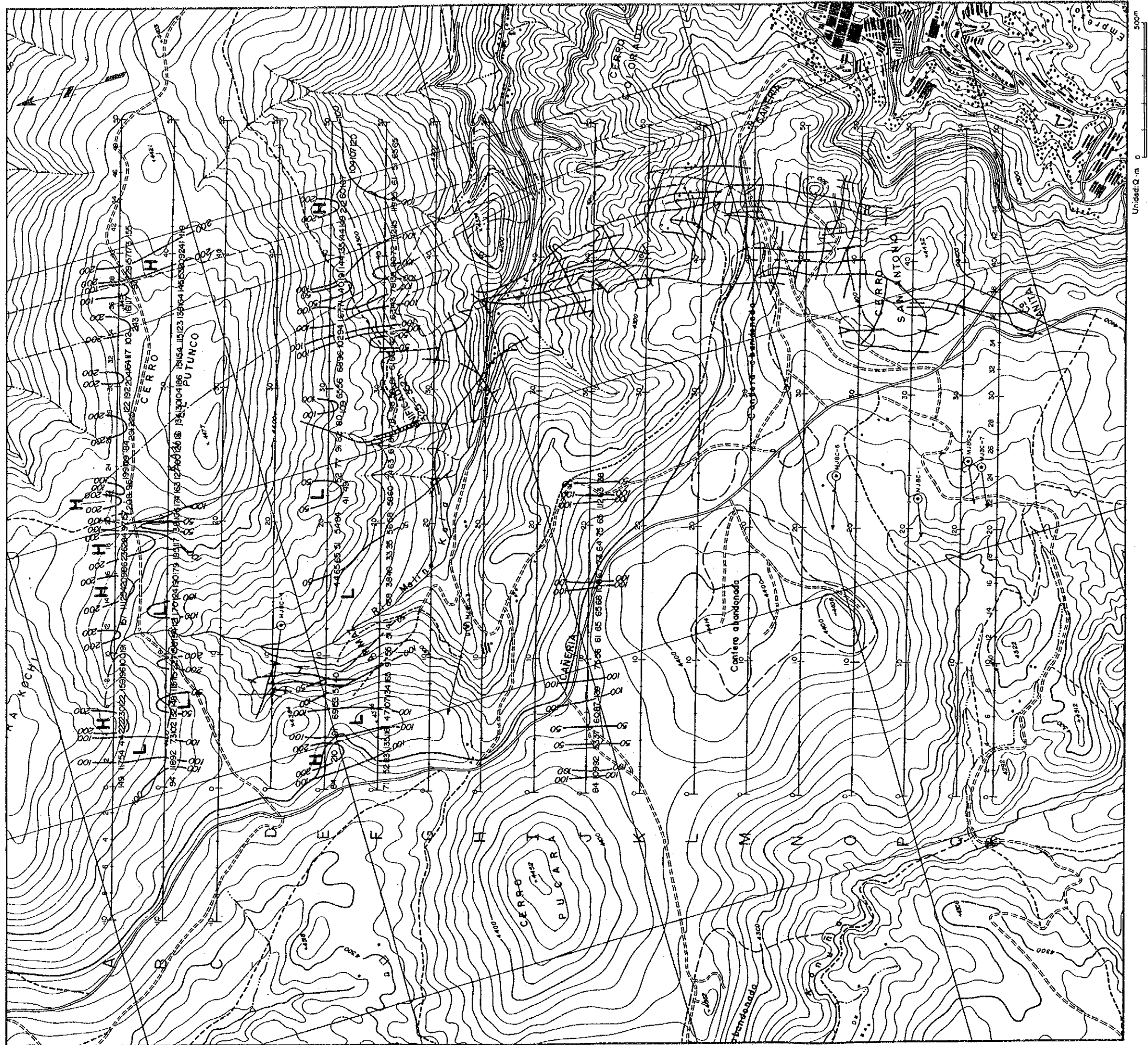


Fig. II-2-41 比抵抗構造平面图 (標高 4,300m)

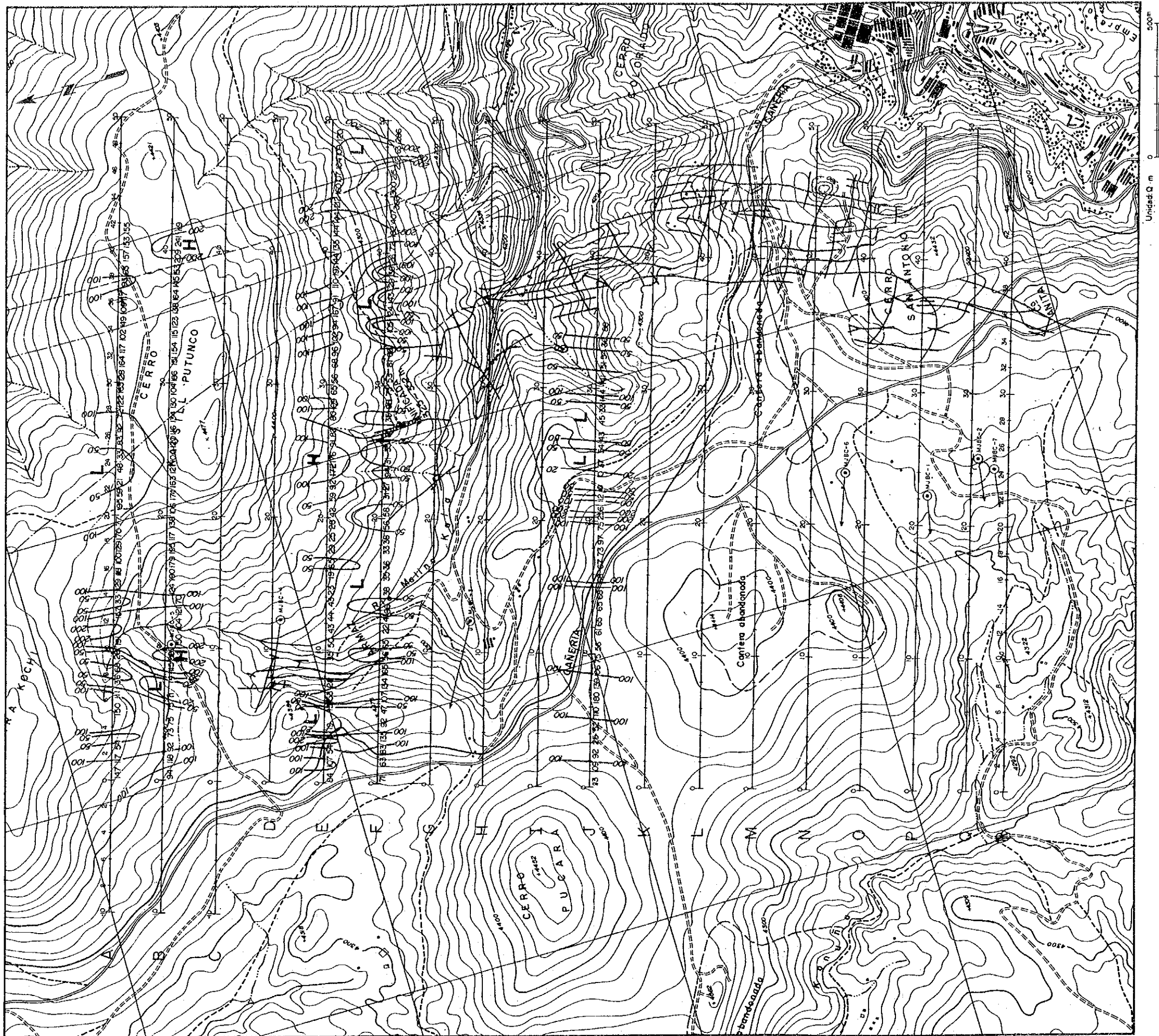


Fig. 11-2-42 比抵抗構造平面图 (標高 4, 100m)

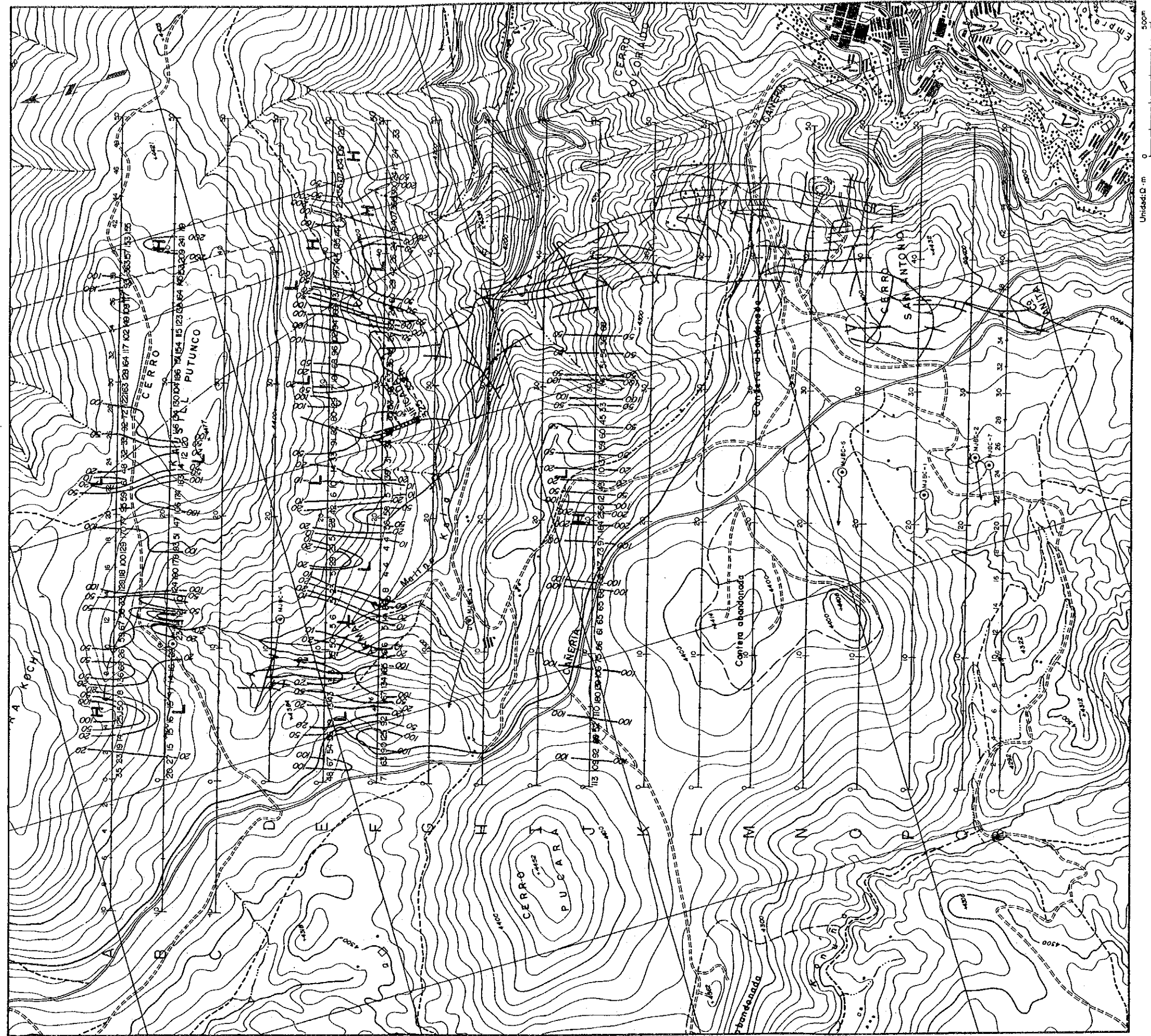


Fig. II-2-43 比抵抗構造平面図 (標高 3,900 m)

A～J 測線断面図について述べる。

(A 測線)

測点 2～4、測点 6～10、測点 12～14、及び 測点 22～25 において、やや浅部から深部にかけて $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

浅部において、測点 4～6、測点 14～36、測点 38～42 にかけて、およそ $200 \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗帯が分布する。

測点 4、14、及び 36 付近に断層破碎帯が推定された。

(B 測線)

測点 6～8 は、やや浅部から $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が、また測点 10～14、測点 18～20、及び測点 23～25 において、深部に $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

浅部において、測点 14～21 に $200 \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗帯が分布する。

測点 6 及び 14 に断層破碎帯が推定された。

(E 測線)

測点 8～23 において浅部から深部にかけて広範に $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。測点 6、8、10、16、23 及び 36 付近に断層破碎帯が推定された。

(F 測線)

測点 5、測点10～13、測点14～19、測点21～28、測点33～34、測点36～41、測点46～50 において浅部から深部にかけて $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

測点 5、10、19、及び 34 に断層破碎帯が推定された。

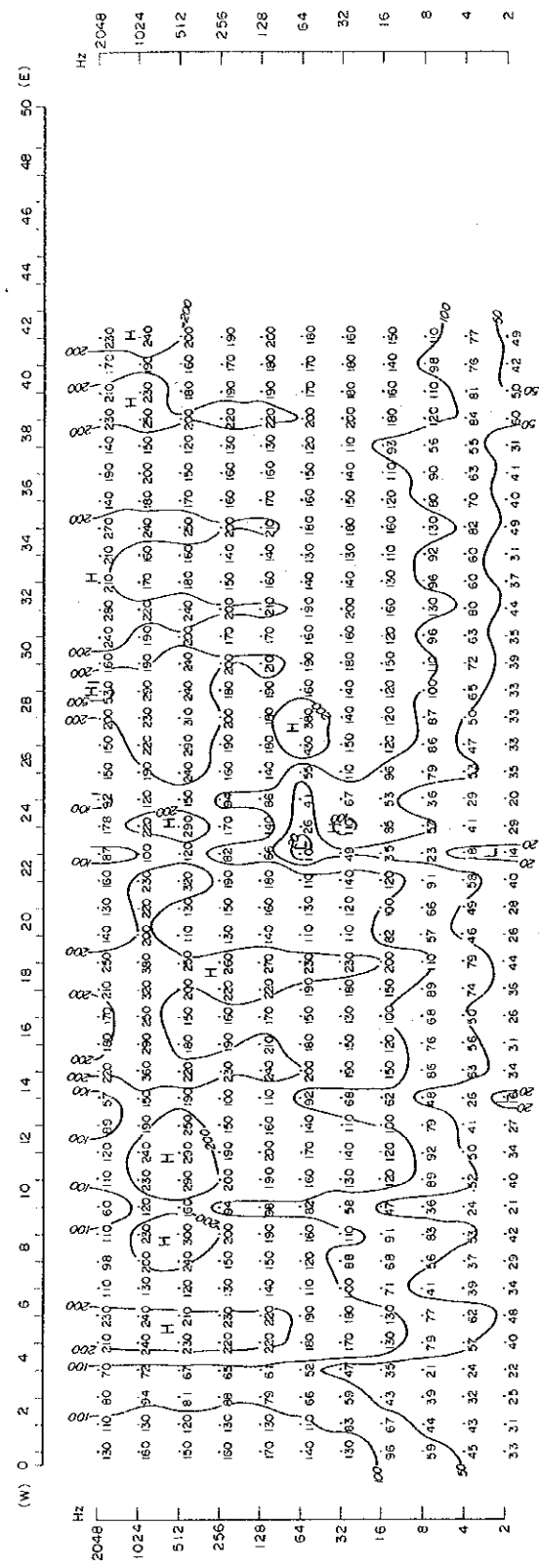
(J 測線)

測点 22～29、及び測点 33 において浅部から深部にかけて $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が分布する。

測点 22、29 及び 34 付近に断層破碎帯が推定された。

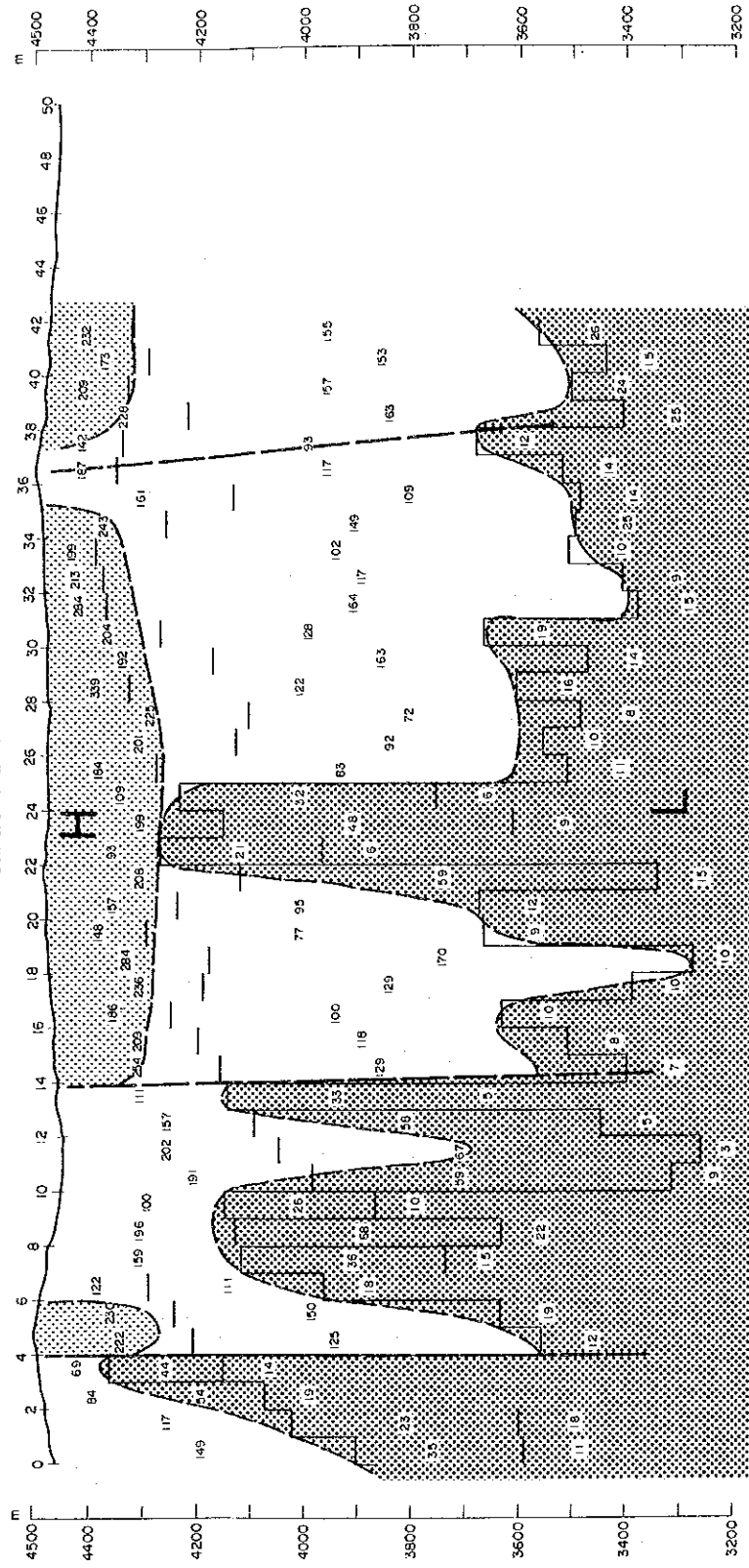
Perfil de la Resistividad Aparente

見掛比抵抗断面



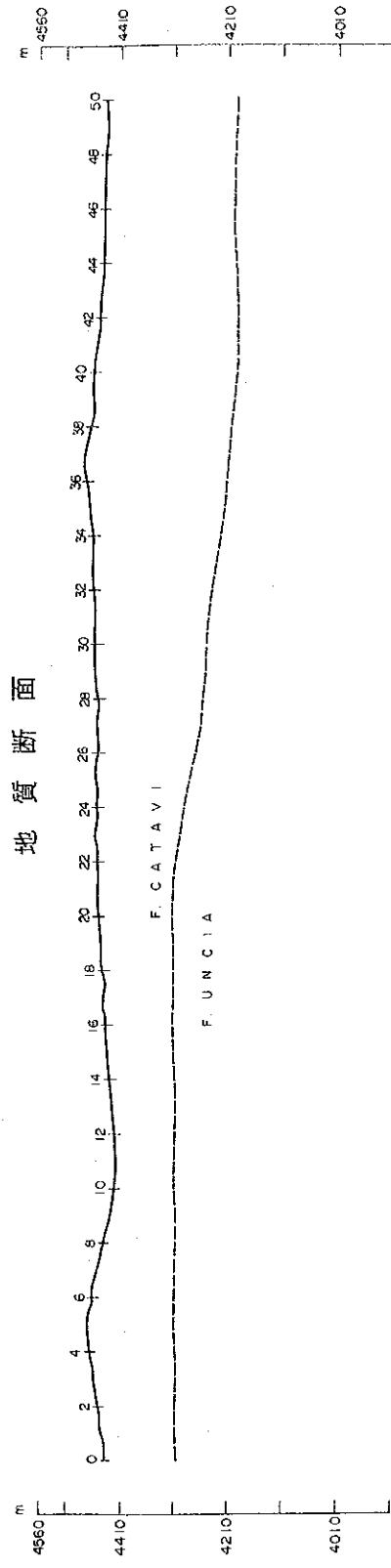
Perfil de la Estructura de Resistividad

比抵抗構造断面



Perfil geologico

地質断面



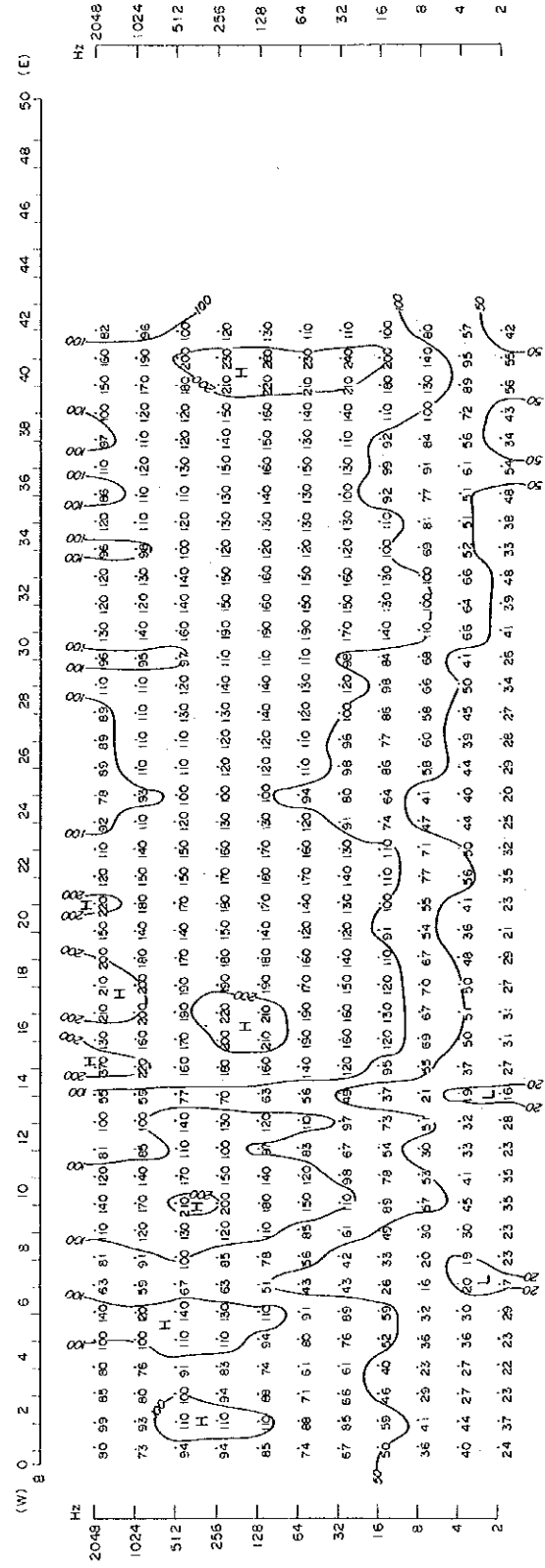
Leyenda 凡例

- Perfil de la Resistividad Aparente
見掛比抵抗断面
- Perfil de la Estructura de Resistividad
比抵抗構造断面
- F - F' Ubicación de Perfil
断面位置
- Punto para la medición de resistividad
測定点番号
- Resistividad aparente
見掛比抵抗値(Ω · m)
- Limite resistividad aparente
見掛比抵抗線
- F. CATAVI: Arenisca y pizarra
- F. UNICIA: Arenisca
- Veta
- Falla
- Zona alterada y mineralizada
- Resistividad
比抵抗値(Ω · m)
- Limite de resistividad
比抵抗線

Fig. II-2-44 A 測線断面図

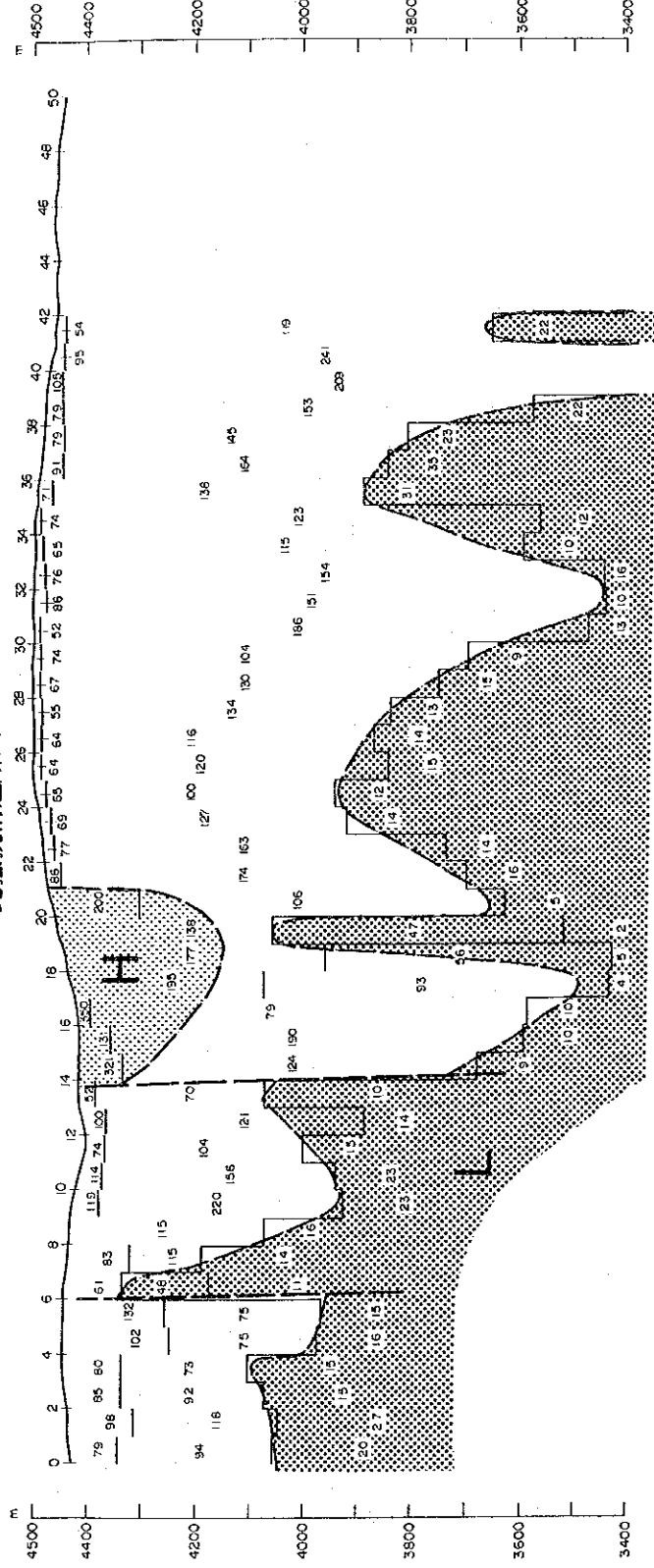
Perfil de la Resistividad Aparente

見掛比抵抗断面



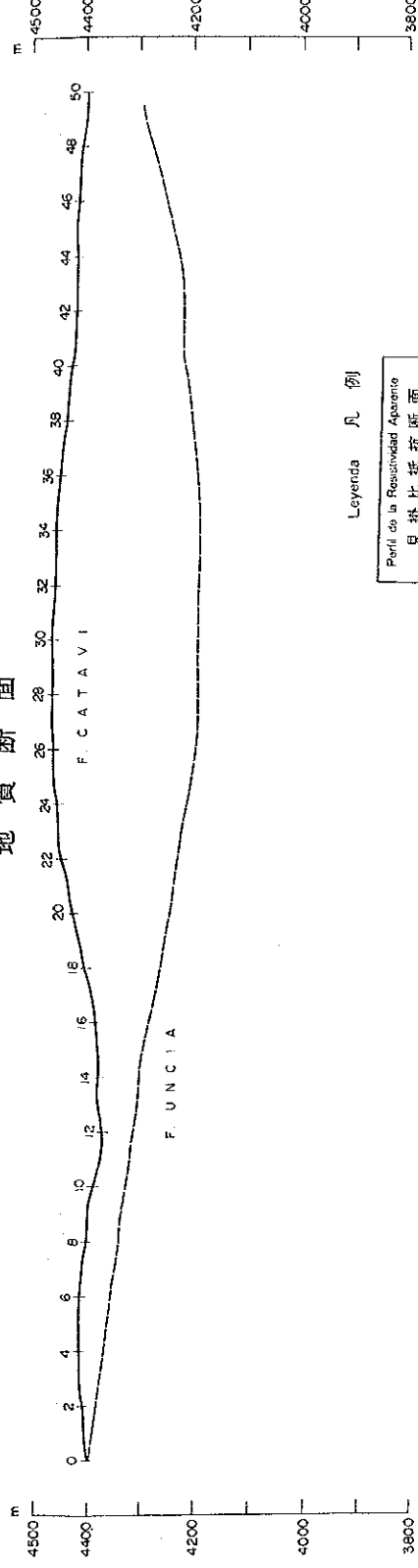
Perfil de la Estructura de Resistividad

比抵抗構造断面



Perfil geologico

地質断面



Leyenda 凡例
 Perfil de la Resistividad Aparente
 見掛比抵抗断面

F - F' ----- Localización de Perfil
 断面位置
 Punto por el cual se midieron
 測定点番号

12 ----- Resistividad aparente
 見掛比抵抗(Ω·m)
 6 ----- Línea resistividad aparente
 見掛比抵抗線

Perfil de la Estructura de Resistividad
 比抵抗構造断面

30 ----- Resistividad
 比抵抗(Ω·m)
 102 ----- Límites de resistividad
 比抵抗限界

F. CATAVI: Arterencia de arenisca y pizarra

F. UNICIA: Arenisca

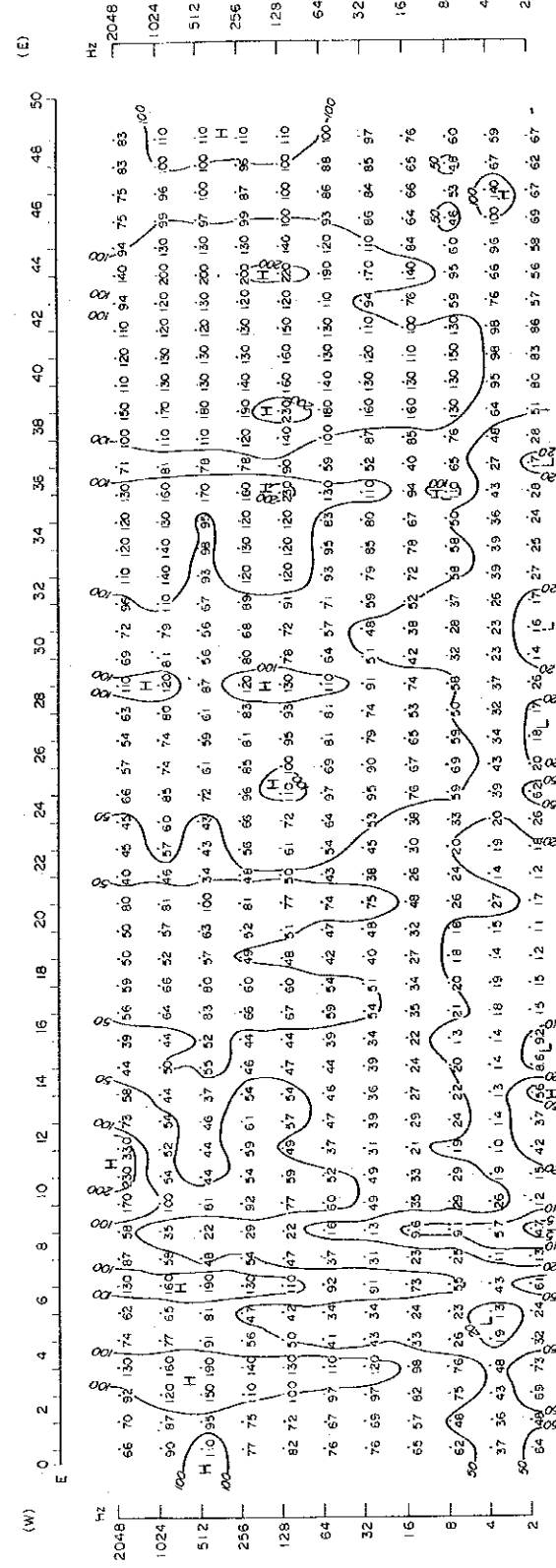
Veta

Folio

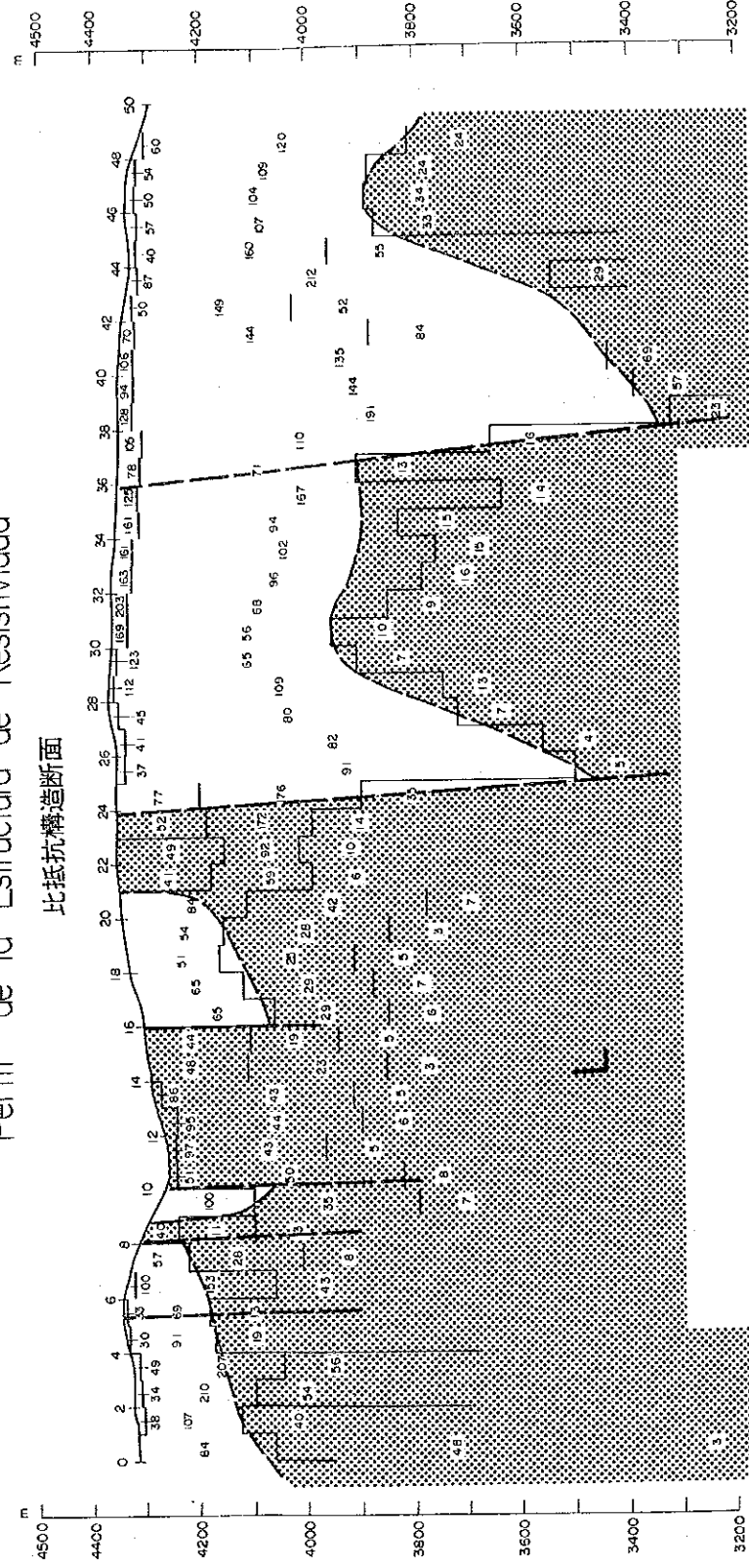
Zona alterada y mineralizada

Fig. II-2-45 B 測線断面図

Perfil de la Resistividad Aparente 見掛比抵抗断面



Perfil de la Estructura de Resistividad 比抵抗構造断面



Perfil geológico 地質断面

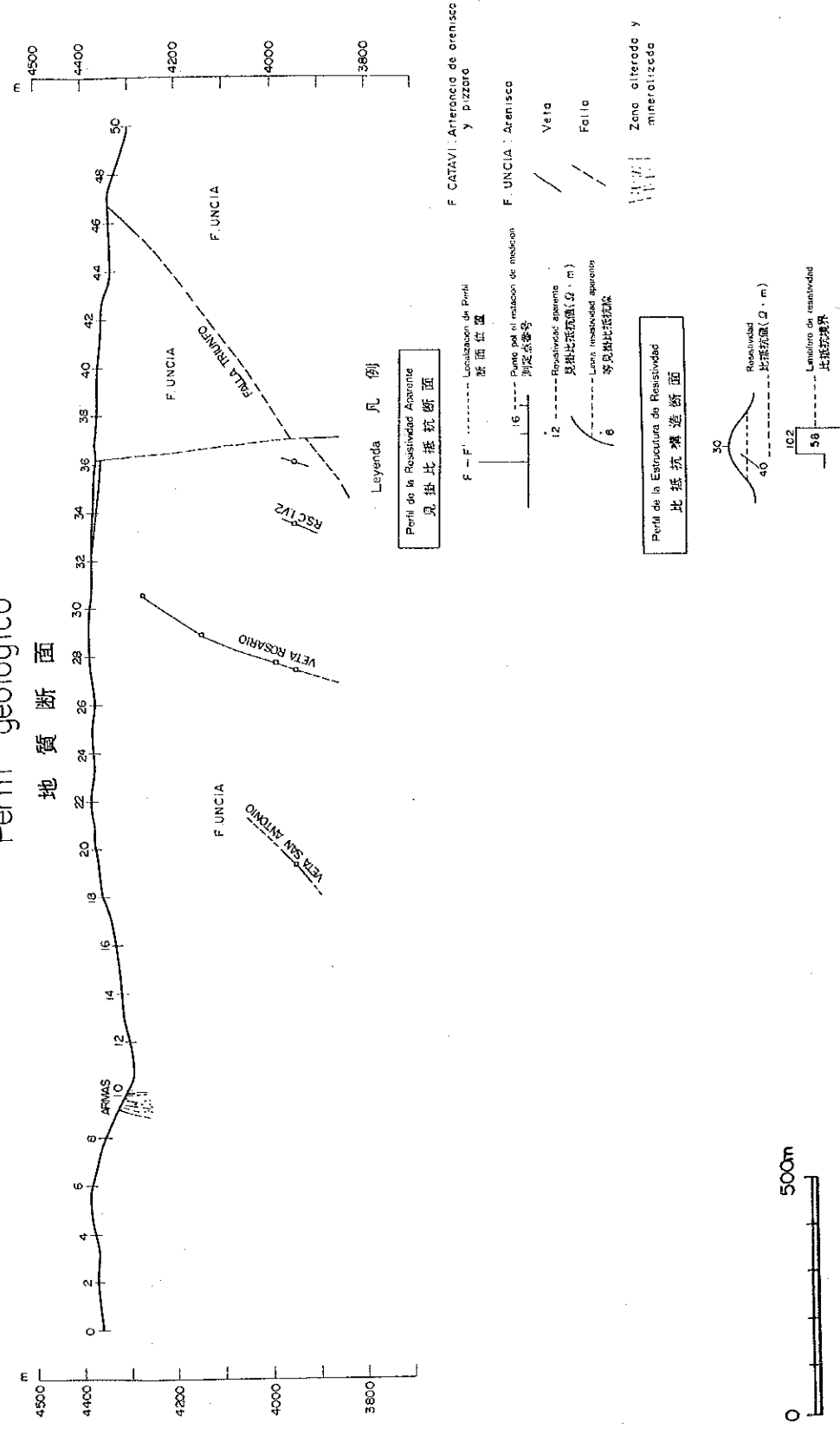
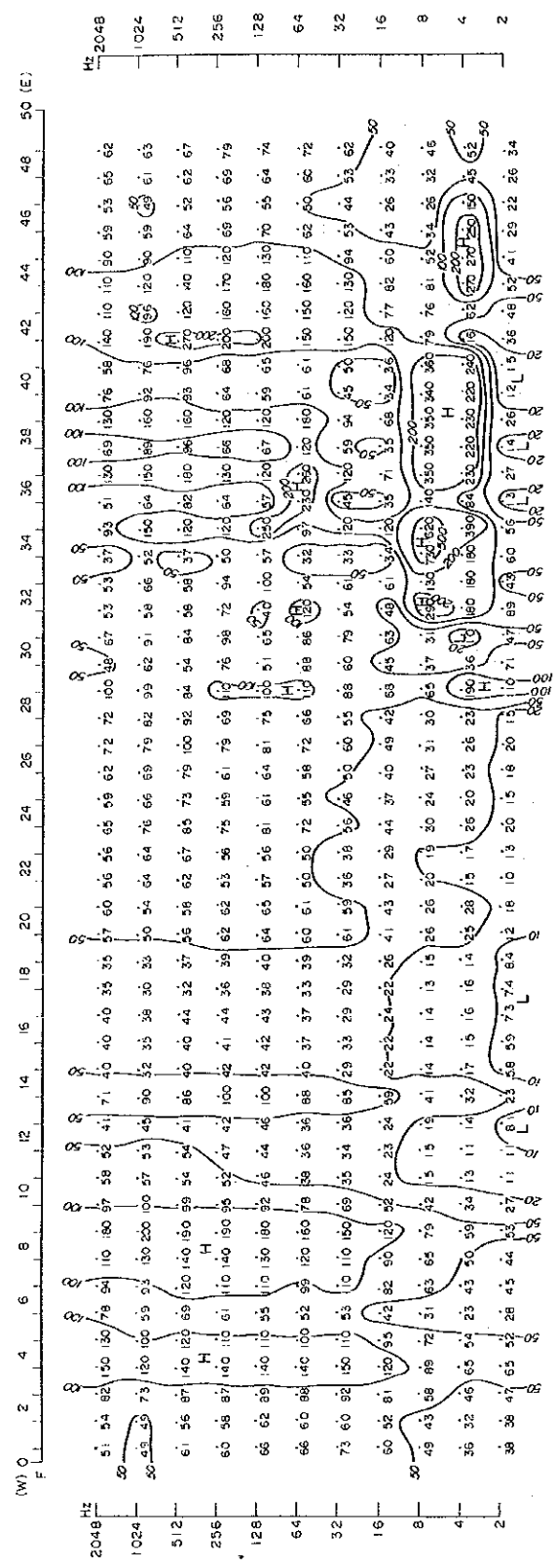


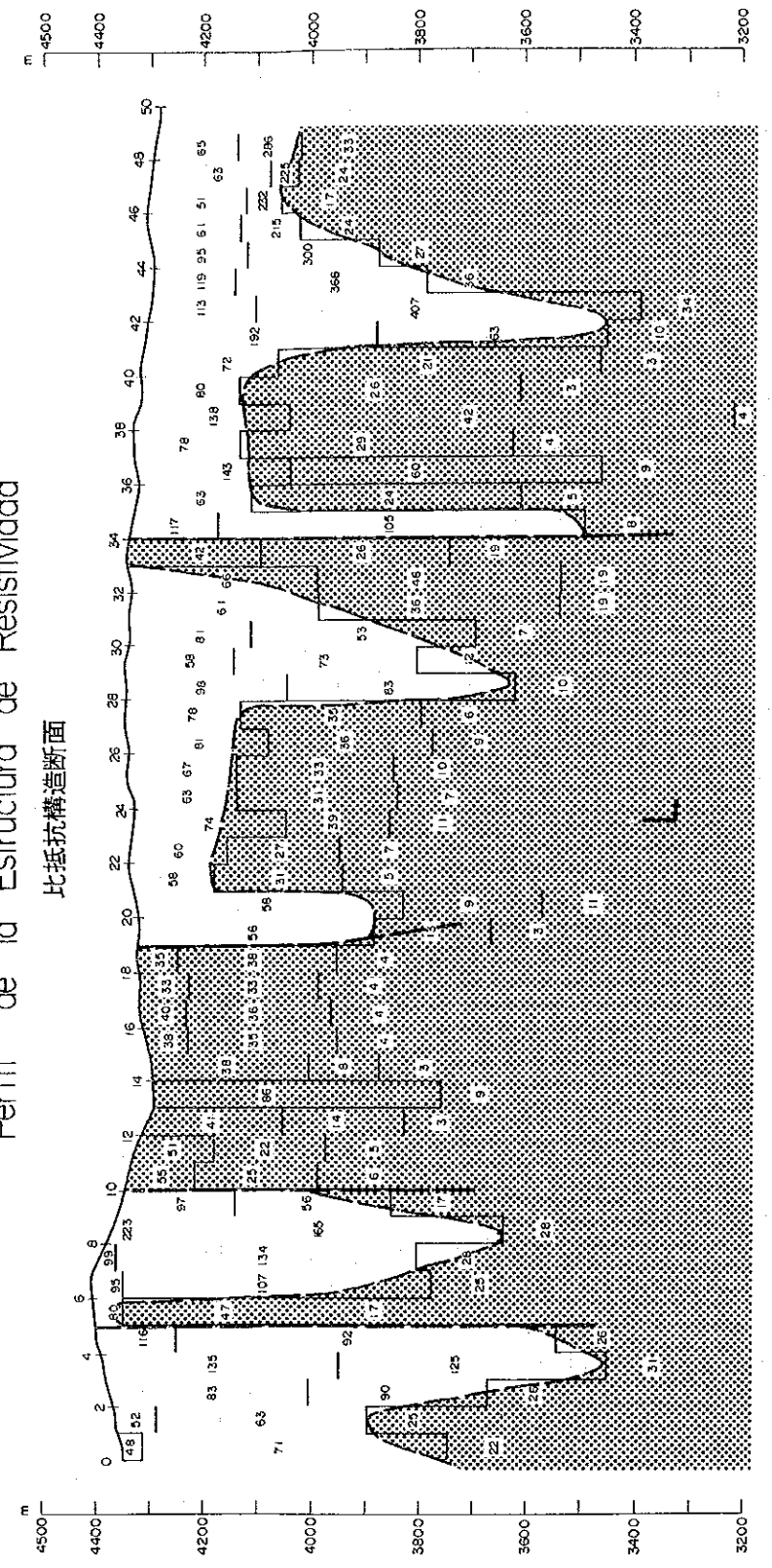
Fig. II-2-46

E 測線断面図

Perfil de la Resistividad Aparente 見掛比抵抗断面



Perfil de la Estructura de Resistividad 比抵抗構造断面



Perfil geologico 地質断面

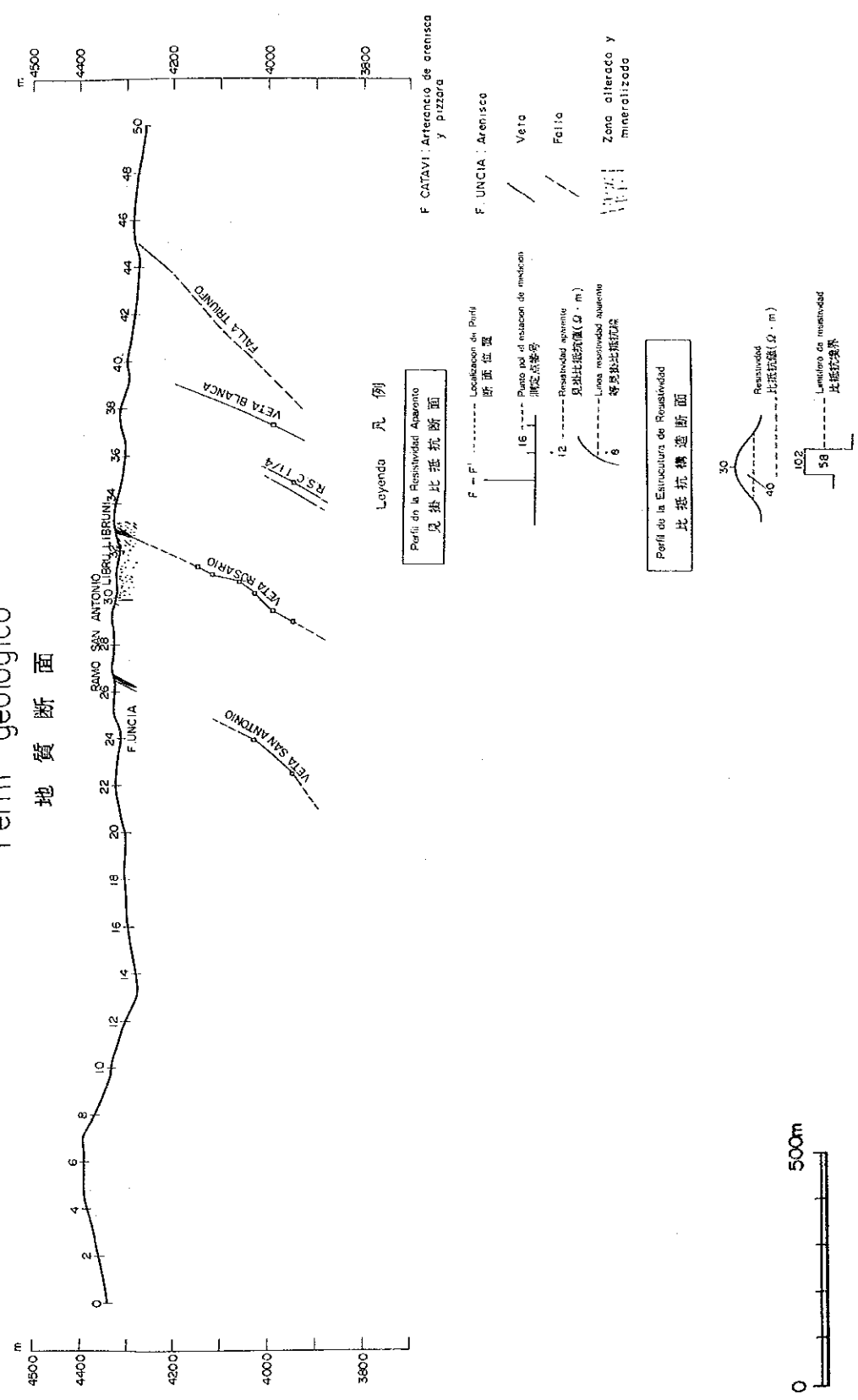
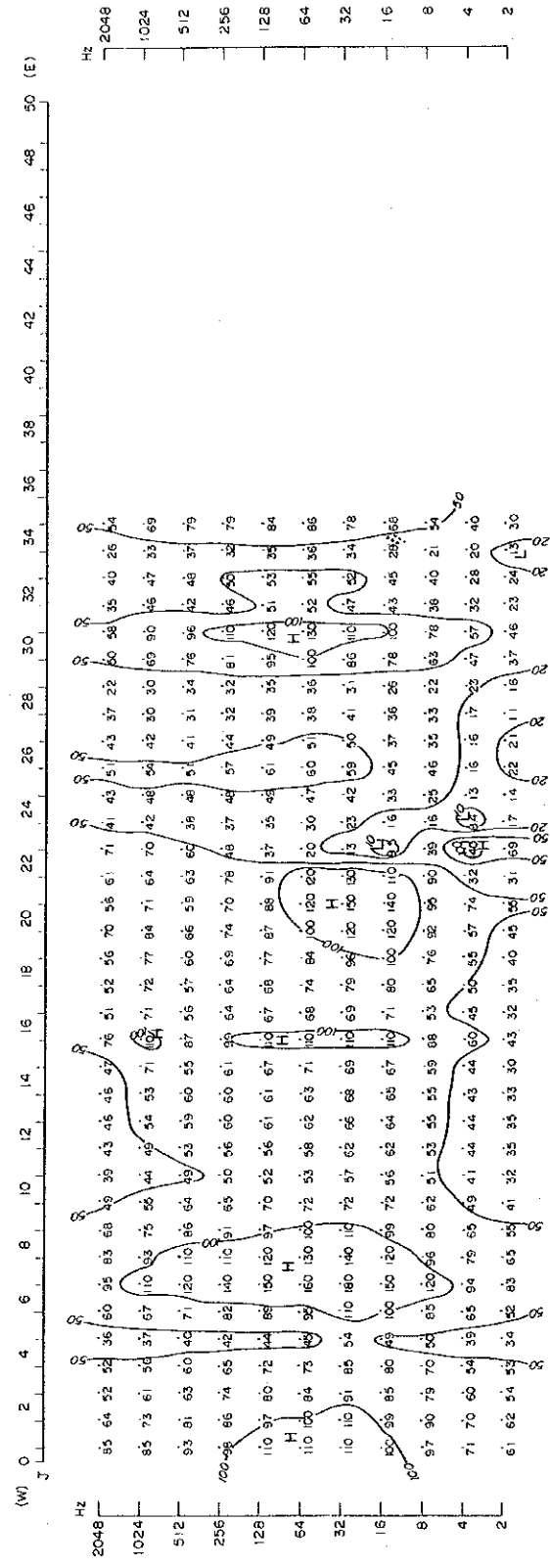
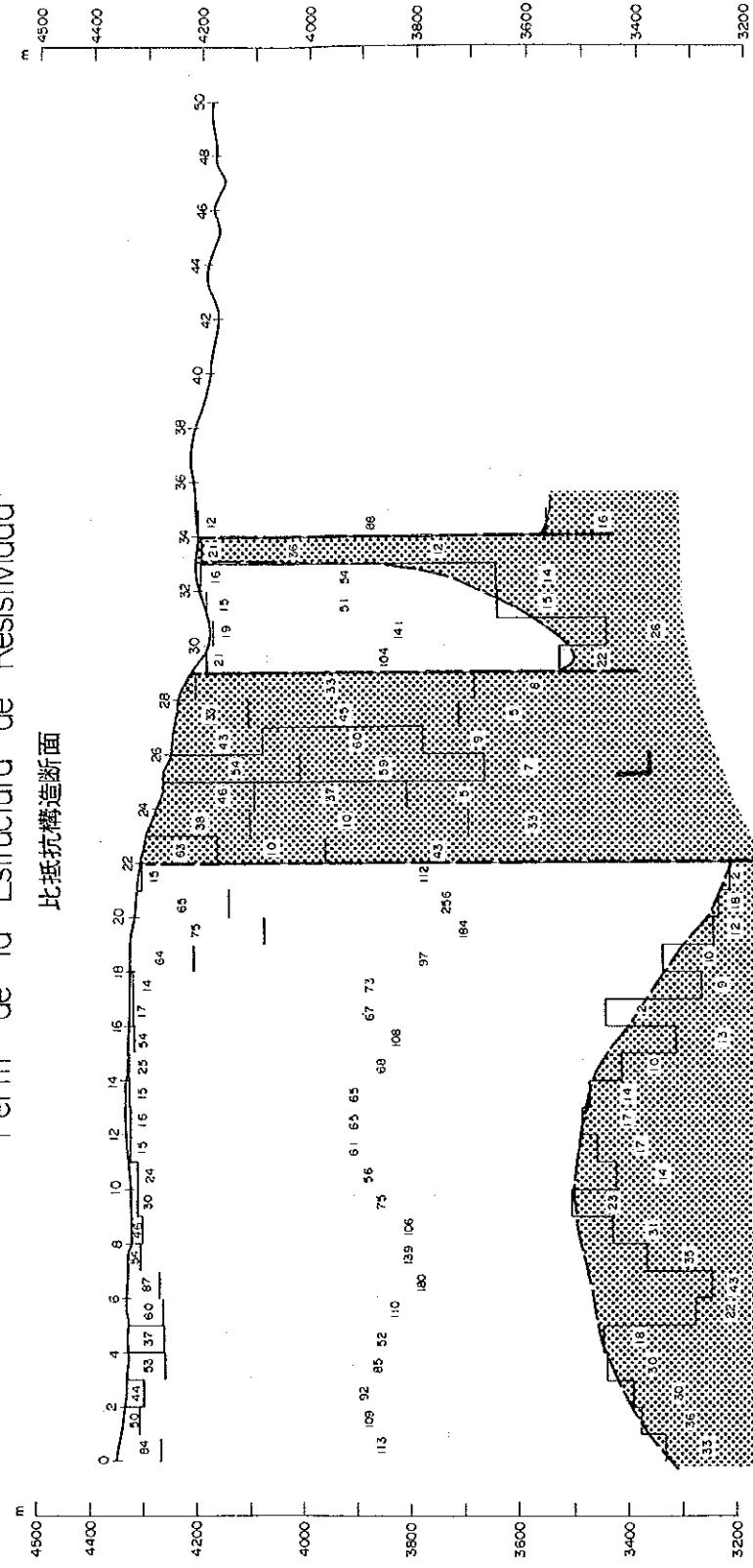


Fig. II-2-47 F 測驗断面图

Perfil de la Resistividad Aparente 見掛比抵抗断面



Perfil de la Estructura de Resistividad 比抵抗構造断面



Perfil geologico 地質断面

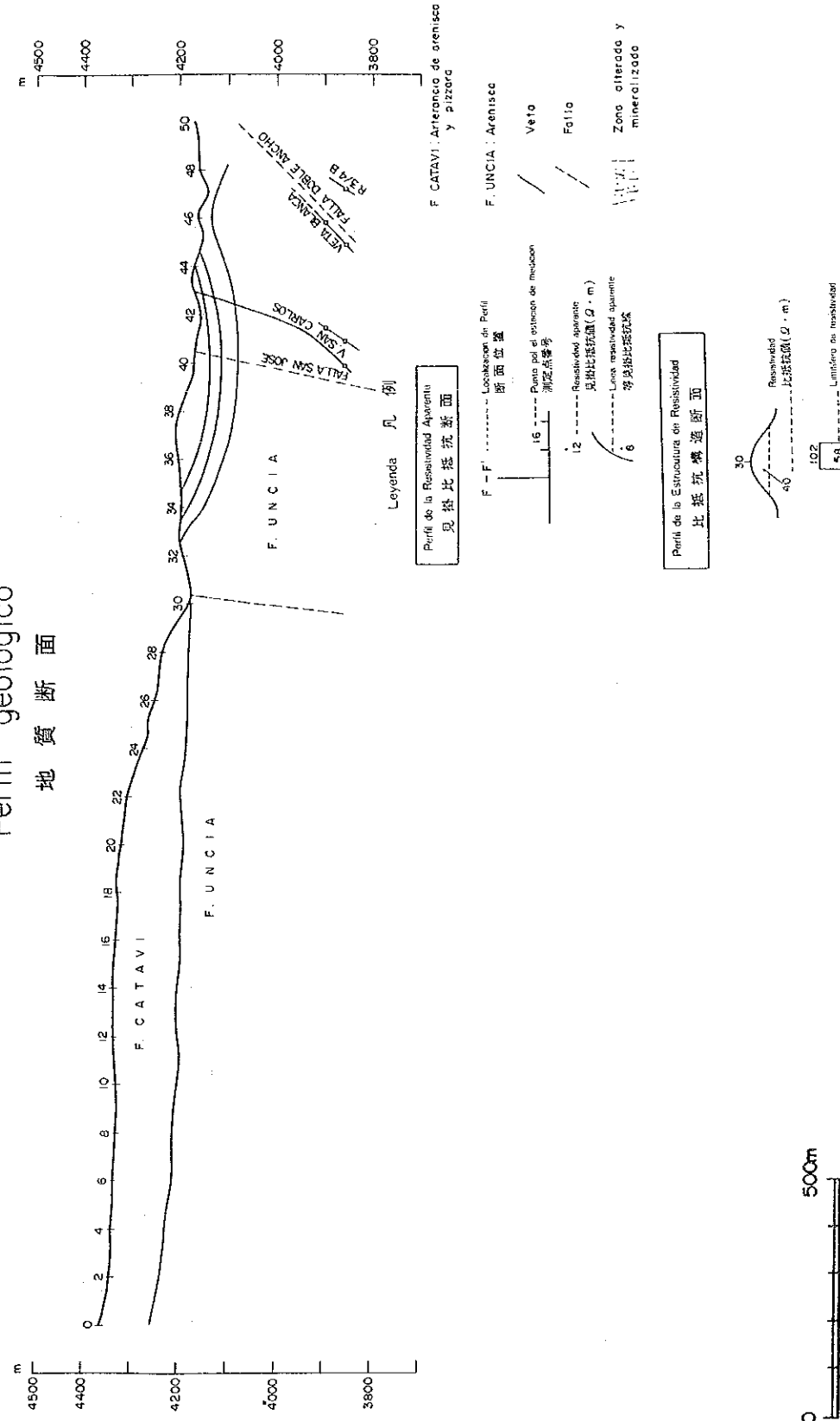


Fig. II-2-48

J 測線断面図

2-3 物性測定

岩石の物性測定については、調査地域の岩石の物理的特性を知ることが目的として行われる。物理探査の結果解析にとって極めて重要である。代表的な岩石及び鉱石について44個の物性測定（AR, FE）を行った。岩石1個については壊れて測定不能となった。

測定結果は Tabla II-2-7 に示す。採取位置は Fig. II-2-50 に示す。

(1) 測定装置

岩石の物性測定で重要なことは、試料を自然の状態に出来るだけ近づけて測定すること、また、測定値の再現性を確保することで、測定にあたってはこれらの点を考慮して実施された。

物性測定系の概略を Fig. II-2-49 に示す。

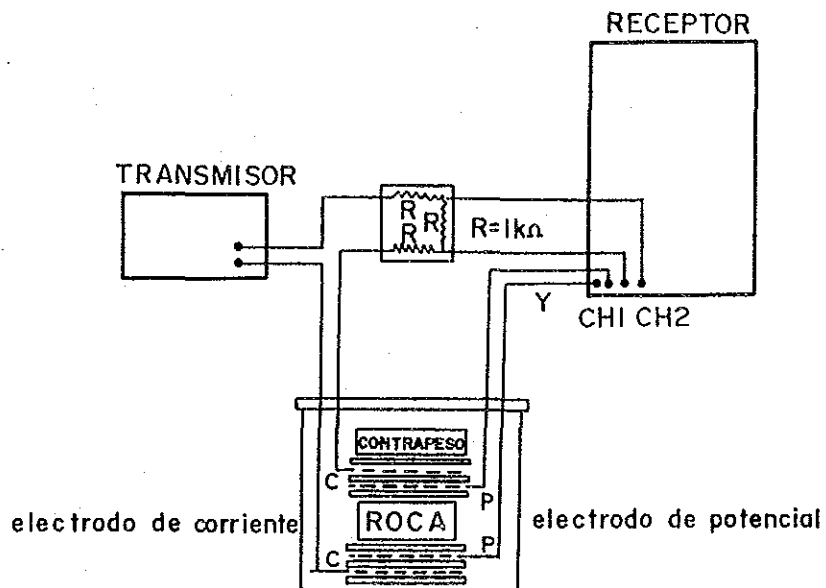


Fig. II-2-49 物性測定系の概略図

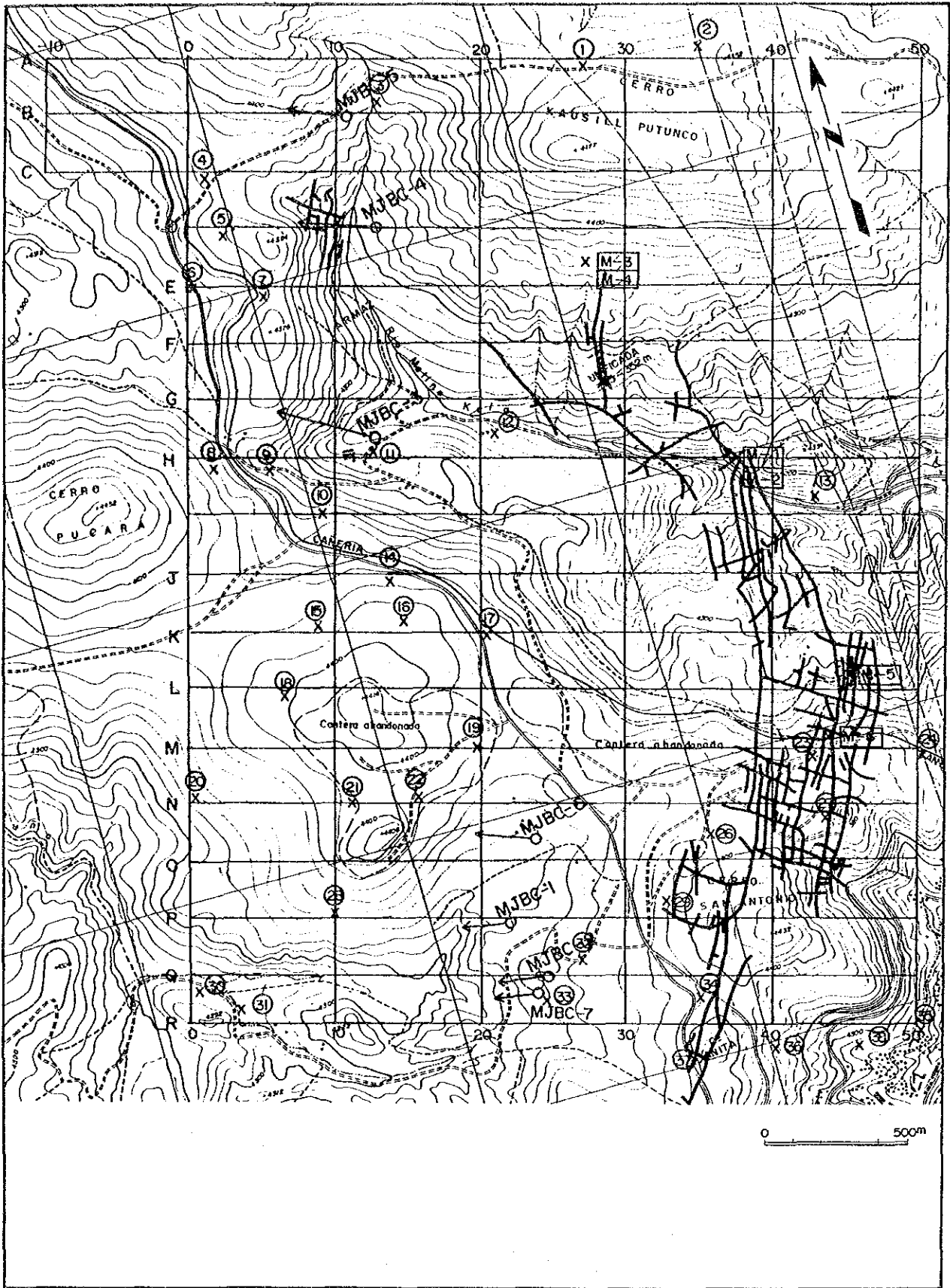


Fig. II-2-50 物性測定試料採取位置圖