

2-2-14に示す。羊八井地域の坑井熱水は貯留層内ではpH6.3~7.0と計算された。本計算結果は地化学解析で使用した。

方解石の飽和度を表2-2-15に示す。飽和度( $\log Q/K$ )は、鉱物の溶解度積( $\log K$ )と流体中の対応する化学種の活動度積( $\log Q$ )を比較したもので、飽和度( $\log Q/K$ )が正であれば流体はその鉱物に対して過飽和であり、負であれば不飽和である。計算の結果、各生産井の深部換算熱水は、流入点における状態において方解石に不飽和で、深部換算熱水が鉱物沈殿を起こさないまま伝導で100℃まで冷却した場合においても方解石に不飽和である。ただし、フラッシュ後の100℃の熱水組成の場合では方解石に過飽和となる。従って、貯留層内流体がフラッシュした場合には、方解石が熱水から沈殿する可能性があり、これは実際に浅部井で坑井内に方解石スケールが沈殿している事実と調和している。

方解石の沈殿は、フラッシュが生じた場合には地層内でも生じる可能性があり、北部地域から南部地域への流体供給が減少した理由の一つに、地層内での方解石の沈殿が関与している可能性もある。

#### (viii) まとめ

地化学調査では、技術指導を行うとともに、採取した試料の分析結果を基に、次の解析結果を得た。

- ① 地化学モニタリングに必要な試料採取方法、分析方法の指導と機材の提供を行った。
- ② 2001年現在、羊八井地域の浅部熱水は、ZK4001周辺の熱水と地表水の混合により生成している。
- ③ 1996年頃まで認められた浅部貯留層における北部地域から南部地域への流体供給は、2001年には非常に少ないもしくは存在しない可能性がある。
- ④ 2001年現在、北部地域の浅部貯留層は、周辺地域から古い流体を引き込んでいる可能性がある。
- ⑤ 羊八井地域では還元井を適切に運用して浅部貯留層の涵養対策を早急を実施する必要がある。

### 2-2-3 電磁探査 (MT法)

#### (i) 調査概要

本調査は、羊八井地域の比抵抗構造を明らかにすることで、深部地熱貯留層に関する知見を得ることを目的とする。調査範囲を図2-2-19に示す。調査の諸元は、以下のとおりである。

- ① 広帯域MT法(リモートレファレンス方式)で4測線、60点で測定。
- ② 測定成分は水平電場2成分( $E_x, E_y$ )、水平磁場2成分( $H_x, H_y$ )。
- ③ 電場ダイポール長は70m、測定周波数は100Hz~1,000秒、測定時間は20時間以上。

#### (ii) 測定方法

##### (1) 電場ダイポールの展開

電場ダイポールは、以下の基準にしたがって設定した。

表 2 - 2 - 1 4 生産井噴出流体の流入点における化学組成計算結果

Well		ZK4001	ZK02	ZK03	ZK04	ZK05	ZK313	ZK329	ZK346
T <sub>Std</sub>	C	249	182	181	176	181	158	174	179
PH	-	6.4	6.3	6.3	6.4	6.5	7.0	6.5	6.5
Cl <sup>-</sup>	mg/L	629	387	399	379	399	390	392	397
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	11	35	36	34	36	29	37	35
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	5579	1225	1162	870	1259	538	1135	1190
HS <sup>-</sup>	mg/L	15.6	5.2	5.0	5.2	6.8	2.5	3.9	5.2
SiO <sub>2</sub>	mg/L	483	213	211	196	211	148	190	207
Al <sup>3+</sup>	mg/L	1.49	0.25	0.17	0.22	0.16	0.12	0.16	0.18
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	1.6	4.4	1.3	2.1	1.6	1.2	1.4	1.7
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	<0.01	0.07	0.03	0.03	0.03	0.10	0.03	0.03
Fe <sup>2+</sup>	mg/L	0.02	0.03	0.03	0.07	0.01	0.02	0.02	0.03
K <sup>+</sup>	mg/L	76	38	41	37	40	42	39	43
Na <sup>+</sup>	mg/L	386	318	326	309	325	378	327	336

表 2 - 2 - 1 5 方解石の飽和度計算結果

Well	ZK4001	ZK02	ZK03	ZK04	ZK05	ZK313	ZK329	ZK346
① Discharge at the feedpoint	-0.12	-0.29	-0.92	-0.58	-0.48	-0.27	-0.60	-0.52
② Case1 fluid	-2.76	-1.78	-2.40	-1.95	-1.93	-1.26	-1.91	-1.93
③ Case2 fluid	0.31	0.79	0.09	0.45	0.62	0.25	0.57	0.36

① フードポイントの状態 Discharge at the feedpoint

② Case1 fluid : ①の流体が100℃まで伝導冷却した状態

State after conductive cooling down to 100℃ from state①

③ Case2 fluid : ①の流体が100℃まで断熱冷却した状態

State after adiabatic cooling down to 101℃ from state①

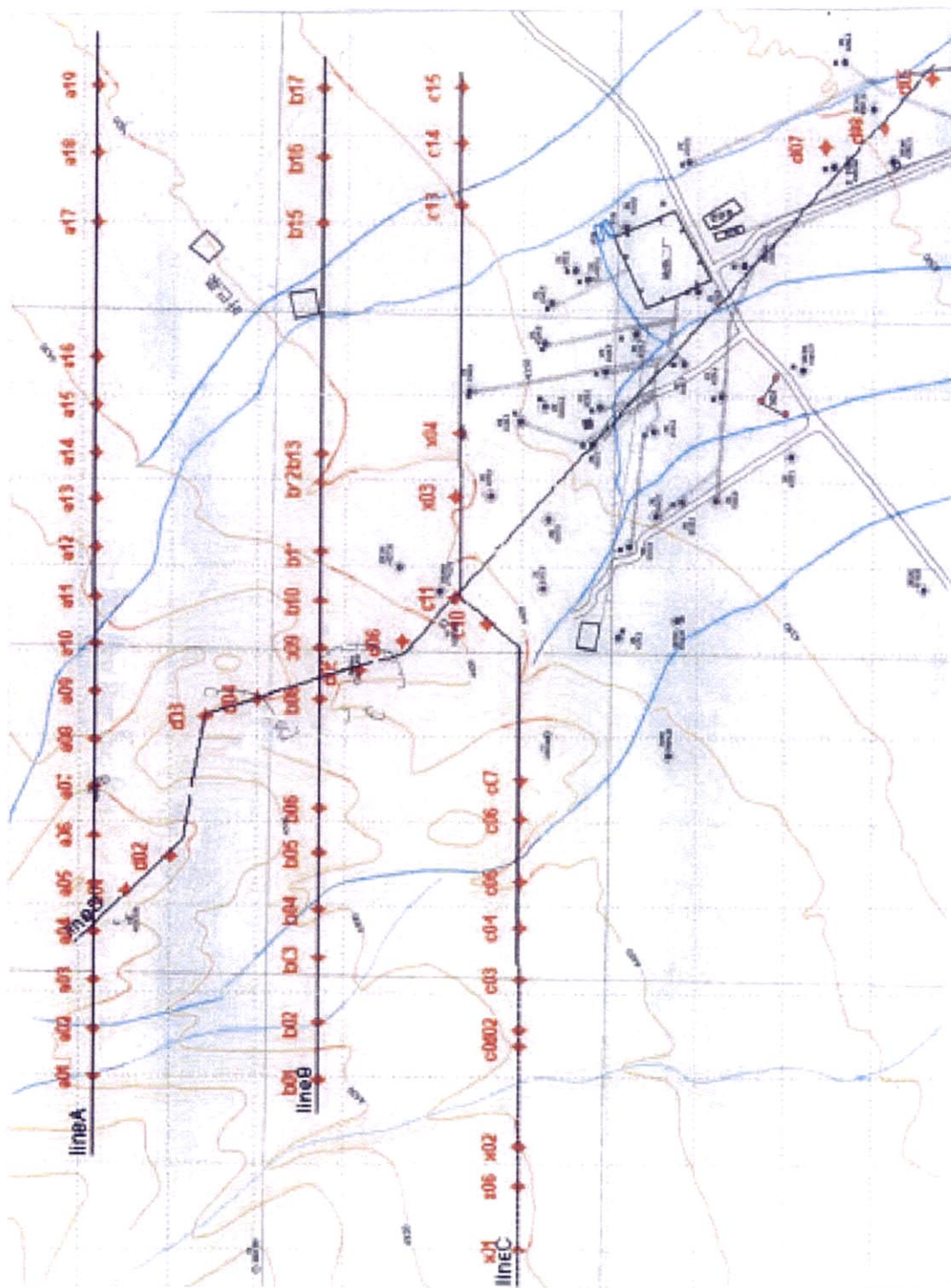


图2-2-19 MT法調査測点位置图

① 電場ダイポール長（電極間隔）は原則として約 70m とし、測量作業はチベット自治区地熱地質大隊によって実施された。

② 電場ダイポールは、基本的に  $E_x$  及び  $E_y$  が L 字型を示すように展開した。

## (2) 磁場用コイルの設定

磁場センサは、インダクション型磁力計を用いた。これを電場測定用測線  $E_x$ ,  $E_y$  に対して直交方向に深さ約 70cm の穴に水平に埋設し、それぞれ  $H_x$ ,  $H_y$  とした。

## (3) MT 法データ取得システム

本調査では、米国 EMI 社製 MT 法システム (MT-1) を使用し、3 測点同時測定を行った。1 日の測定終了後、取得したデータ（時系列データ、パワースペクトラム、MT パラメータ）を現地宿舎にて CD-R に保存し、各測点毎のデータファイルとして保存した。

## (iii) データ処理システム

各測定点でのリアルタイム処理に加え、更なるデータ品質向上のため、取得された時系列データに対して、カスケード・デシメーションによる周波数解析を実施した。この周波数解析により得られたパワースペクトラムを用いてインピーダンステンソルを求め、周波数毎の各 MT パラメータ（見掛比抵抗及び位相）を算出した。当該データ処理ソフトウェアは、取得データファイルの連続処理とコヒーレンシーチェック等の自動編集によるノイズ除去機能を有し、取得した全時系列データを有効に使用することができる。また、肉眼による時系列データ編集も併用した。

## (iv) データ処理

本調査では羊八井地熱発電所 2 号機の周辺を除いて人工ノイズの少ない良好のデータを採取することができた。各測点で得られたインピーダンステンソルを 360 度回転する過程で、地層の走向方向を推定した。この角度は主方向と呼ばれ、1 次元解析、すなわち水平多層構造モデルを構築する際に使用されるインピーダンス値である。各測線毎に主方向の各測線毎の見掛比抵抗・位相周波数断面図を作成して検討すると、MT 法で問題となる浅部における比抵抗異常の深部域の解析への影響 (static-effect) は、測線 C の測点 C10, X04 付近及び測点 D05, D06, C07 で見られるが、影響の度合いは大きくないことが判明した。

## (v) 1 次元解析

前述のインピーダンス値を用いて、ボスティック・インバージョン (Bostick, 1977) により 1 次元解析を行った。図 2-2-20~23 に各測線ごとの断面図に示す。

測線 A では、深部に高比抵抗基盤層が認められるが、その頂部の形状は浅部の低比抵抗層の層厚に関連しているようであり、1 次元解析では static-effect が除去出来ないことを示す。この高比抵抗層は東に傾斜する。

測線 B では、測点 B13 と B15 の間に高比抵抗層の欠如が認められるが、これはこの区間の表層低比抵抗層の層厚が厚いことによる高比抵抗層のマスキングと考えられる。

測線 C では、表層部が厚い測点 C10 付近で高比抵抗基盤層が認められないが、これも static-effect が原因かと思われる。測線 D では、高比抵抗層が僅かながらも南へ傾斜する傾向が認められる。

## (vi) 2 次元解析

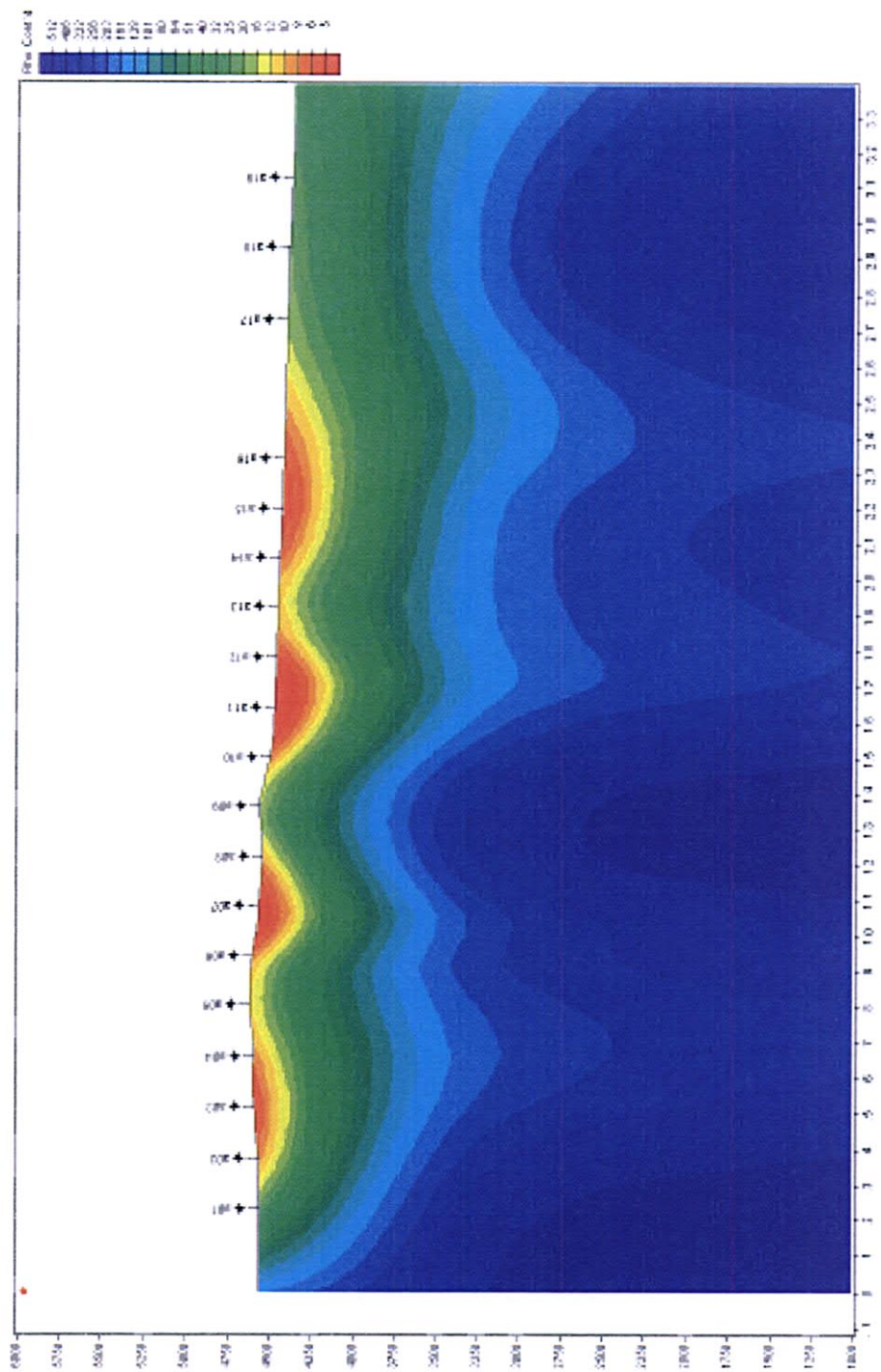


図 2-2-20 1次元解析 (測線 A)



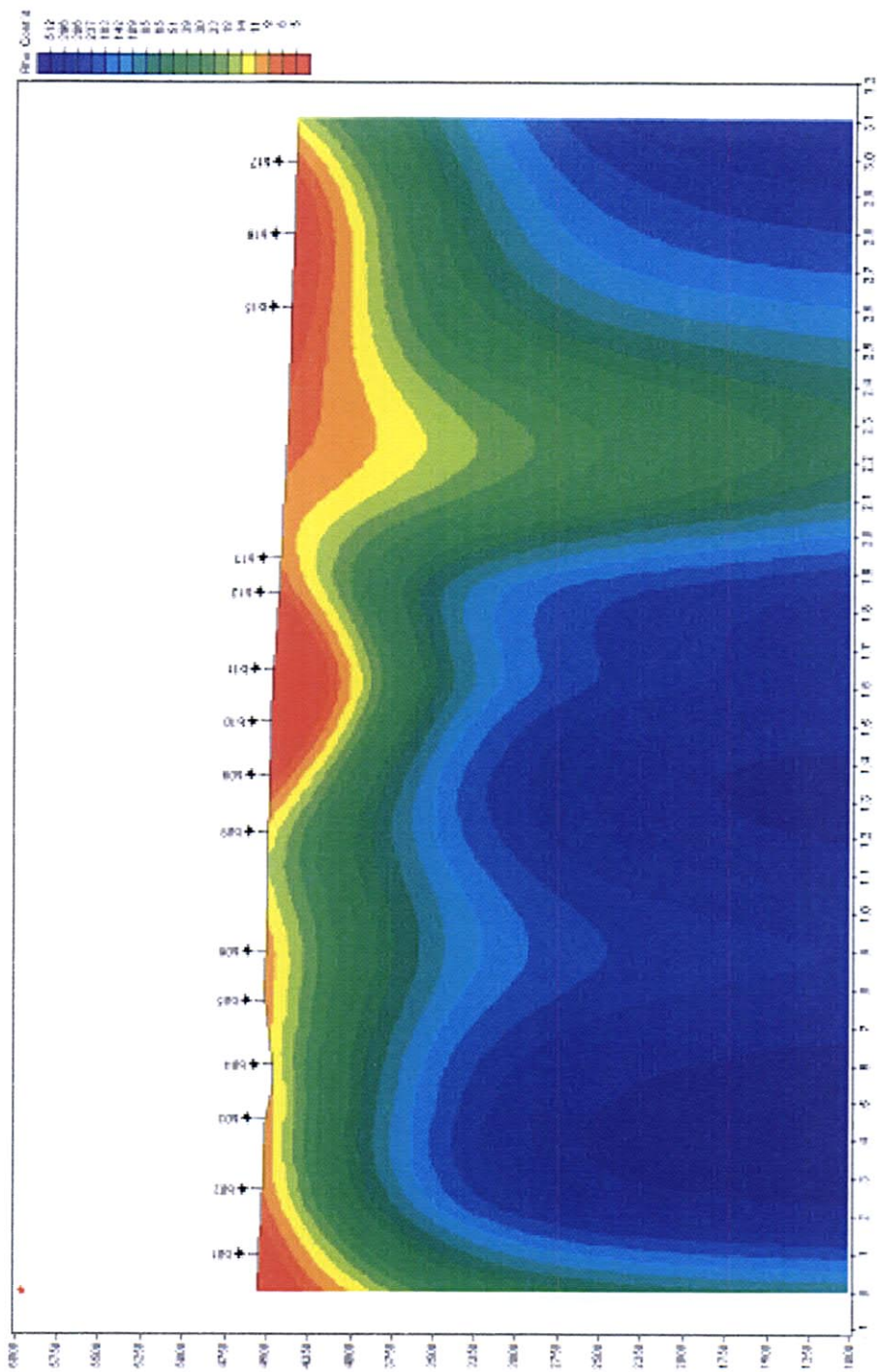


图 2-2-21 1次元解析 (測線B)

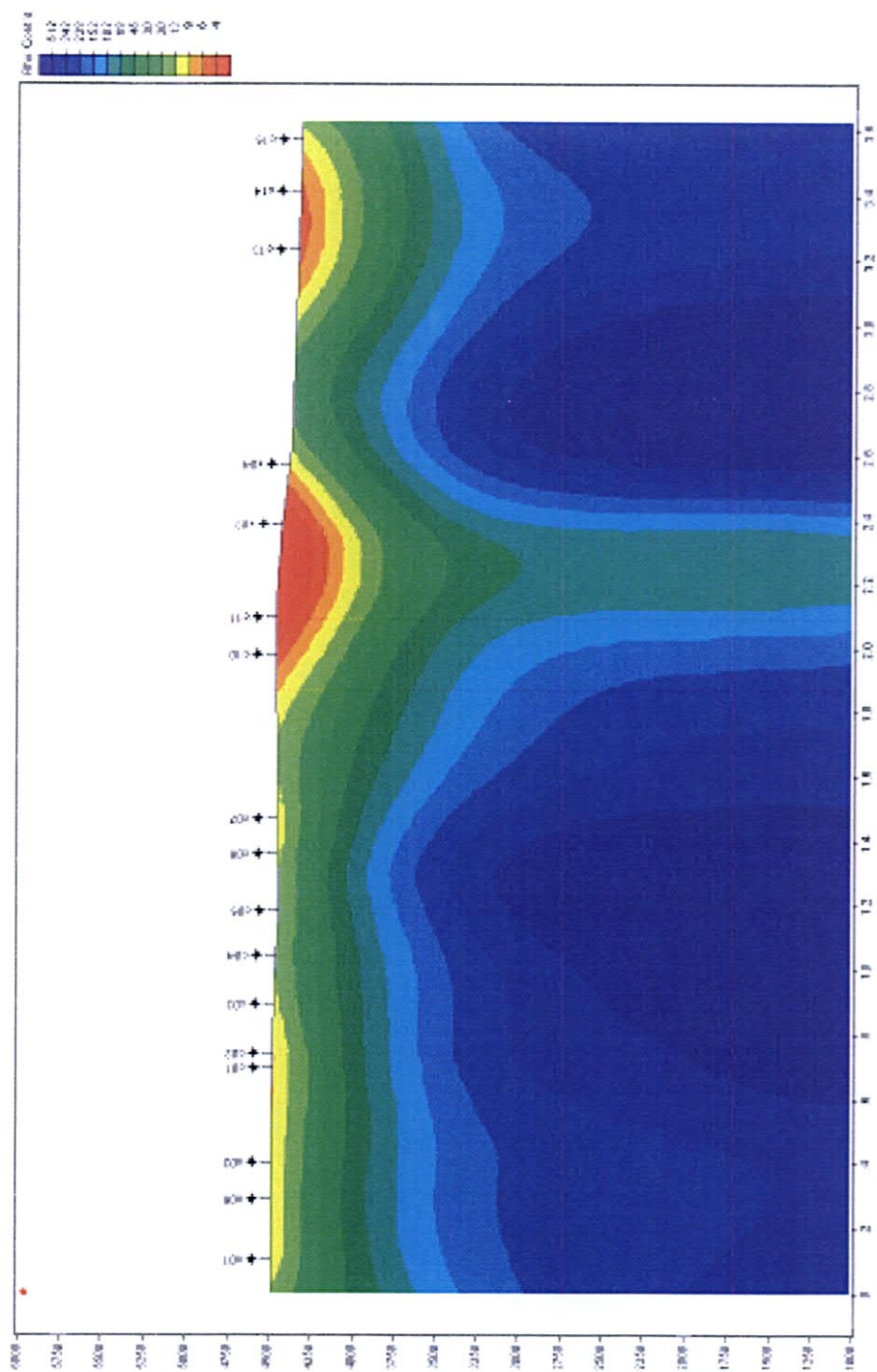


图 2-2-2 2 1 次元解析結果 (測線 C)

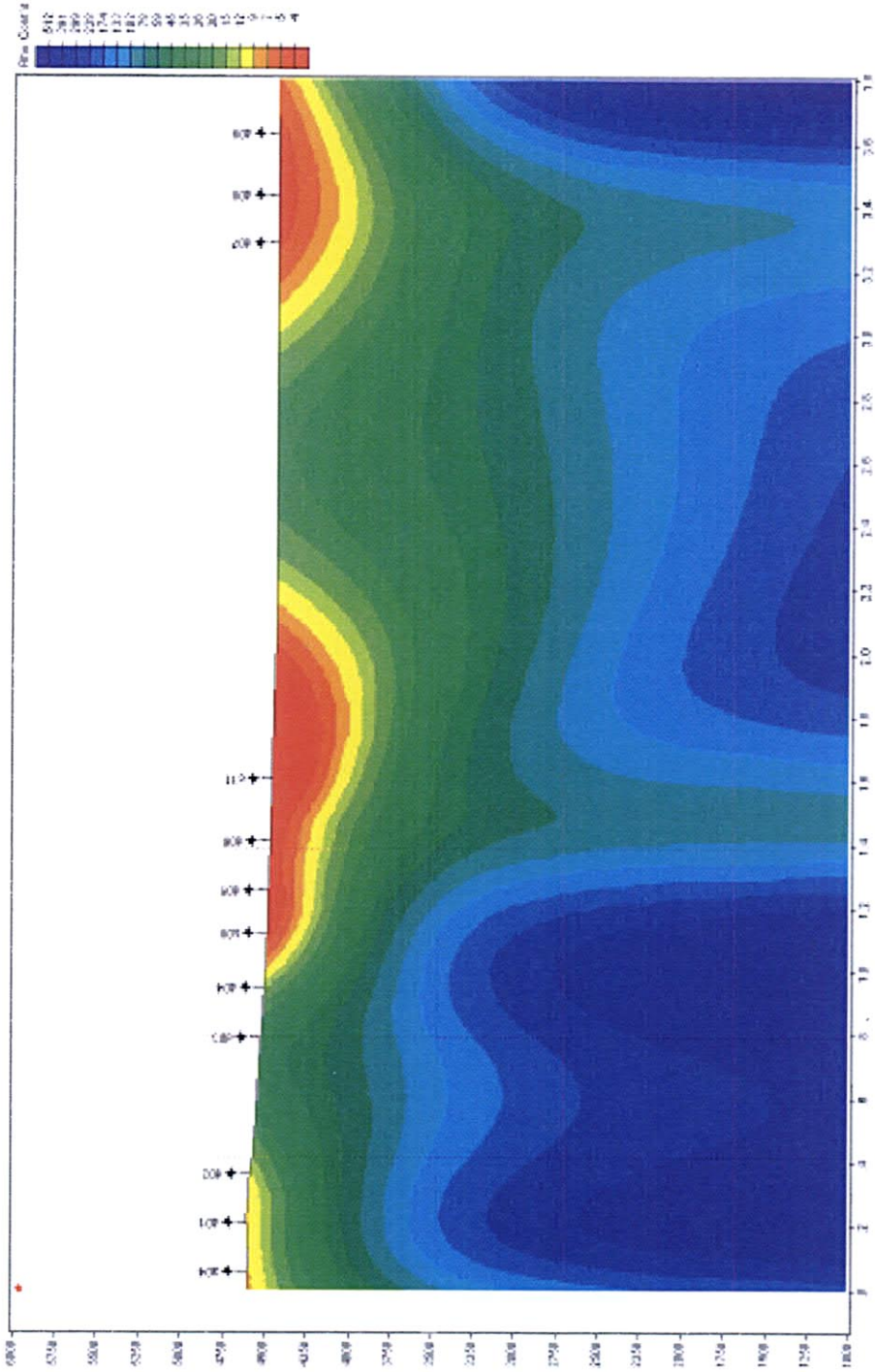


図2-2-23 1次元解析結果（測線D）



2次元解析は,Smith and Booker (1991)の RRI 法による2次元インバージョンにより実施した。

2次元解析に用いたインピーダンスは,測線方向の電場とそれに直交する磁場成分から計算した。これはTMモードに相当する。解析深度は測線長とほぼ同じ約3kmとした。図2-2-24~27に各測線ごとの比抵抗断面図を,図2-2-28~33に比抵抗平面図をそれぞれ示す。

#### (1) 比抵抗断面図

##### ① 測線 A

測線の東側(測点 A13 から A18 付近)の地表下数百 m には  $10\Omega\cdot\text{m}$  以下の低比抵抗層が認められる。また,地表下 1km 以下から 2km にかけて  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上のレンズ状の高比抵抗層が認められる。高比抵抗体の構造は概ね一様である。標高 2km (地表下約 2.5km 下) では,比抵抗値は数十  $\Omega\cdot\text{m}$  以下に減少する。この比抵抗値の減少の原因が,高温下での岩石の部分溶融によるのか,断裂密度が著しく増加して流体を含むためによるのか現在不明である。

##### ② 測線 B

測点 B13 を境に,比抵抗構造に差異が認められる。測点 B13 より西側では地表下数百 m 付近から西傾斜の高比抵抗体が存在する。また,地表付近での  $10\Omega\cdot\text{m}$  程度の低比抵抗層の分布も不規則であり,測点 B6~B8 間及び測点 B11・B12 間に分布が限られている。測点 B13 より東側では,測点 B13~B15 間の地表付近に数  $\Omega\cdot\text{m}$  程度の低比抵抗層が存在し,その東側の測点 B15-B17 では地表付近から  $100\Omega\cdot\text{m}$  程度の高比抵抗層が分布するが,地表下数百 m までに限られ,その下部に  $10\Omega\cdot\text{m}$  程度の薄い低比抵抗が存在する。

##### ③ 測線 C

地表下数百 m 程度までの浅部比抵抗分布は非常に不規則で,低比抵抗及び高比抵抗とも側方への連続性は悪い。 $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗体は,測点 1 付近に頂部を持つドーム状の構造を有し,測線 A, B に連続している。これは花崗岩に対比されると考えられるが,比抵抗値から見る限り内部構造は極めて不均質である。測点 X03~04 に地表付近から比抵抗不連続域が認められるが,この不連続域は地表下約 1.5km (標高約 3km) から不明瞭となる。

##### ④ 測線 D

測線 A, B, C は電場成分が東西方向であったが,測線 D は NW-SE 方向にインピーダンスを回転している。このため測線 A~C と重複する測点においても解析結果は異なるものとなっている。測線の北部に数十  $\Omega\cdot\text{m}$  の領域が認められる。これは測線 A から C の解析で  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗層と解析された領域に相当する。測線の東南方向では低比抵抗層の領域が広がる。ただし,測点 C11 と測点 D07 の間は人工ノイズ(パイプライン, 高圧線)が多く,測点を展開することが出来なかったため解析の信頼度は劣っている。

#### (2) 比抵抗平面図

2次元比抵抗断面図から6レベルの標高の平面図を作成した。平面図の作成には測線 D の解析結果は含めていない。この理由は,測線 D のインピーダンスの回転角

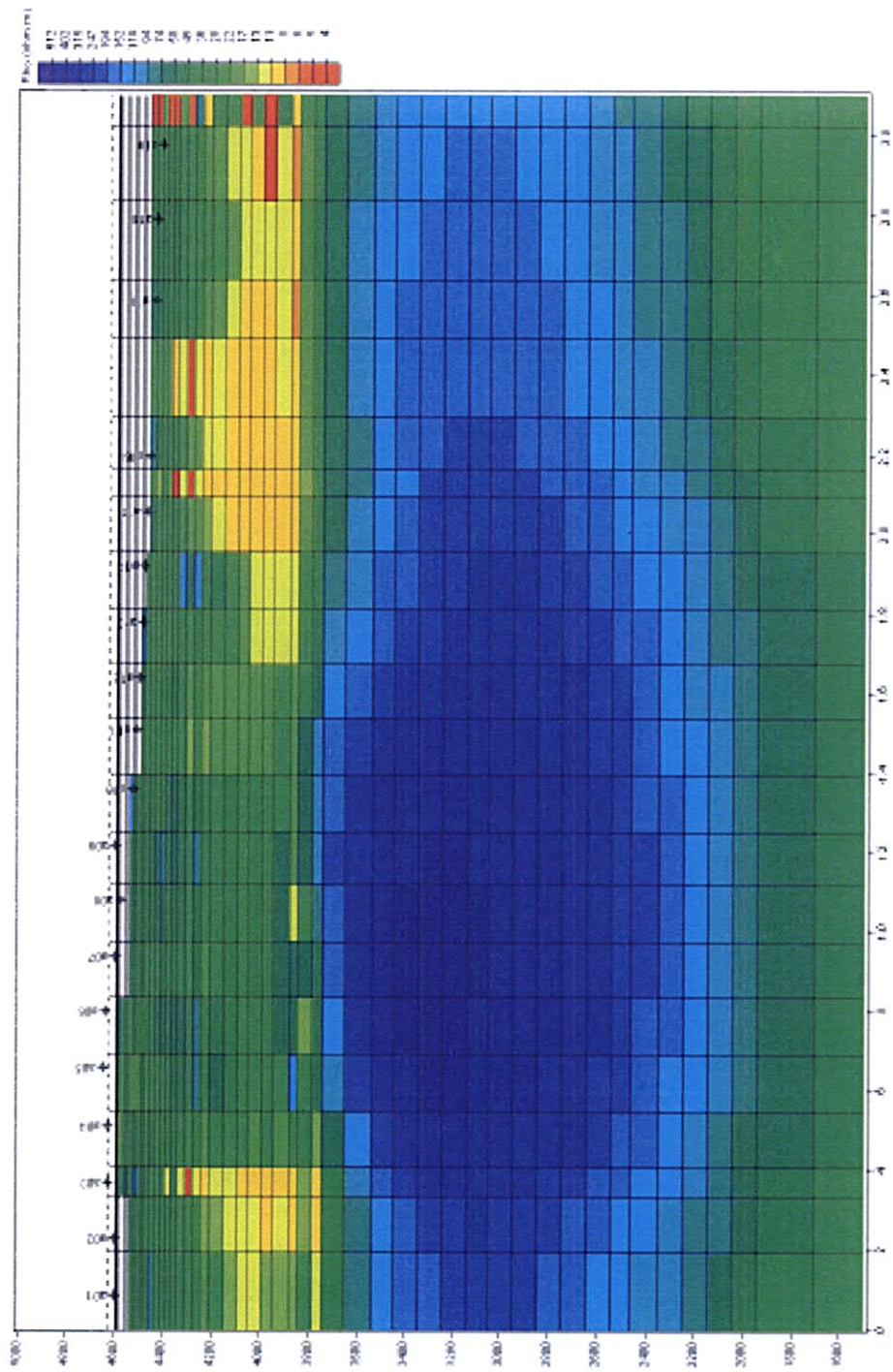


图2-2-24 2次元解析結果(測線A)

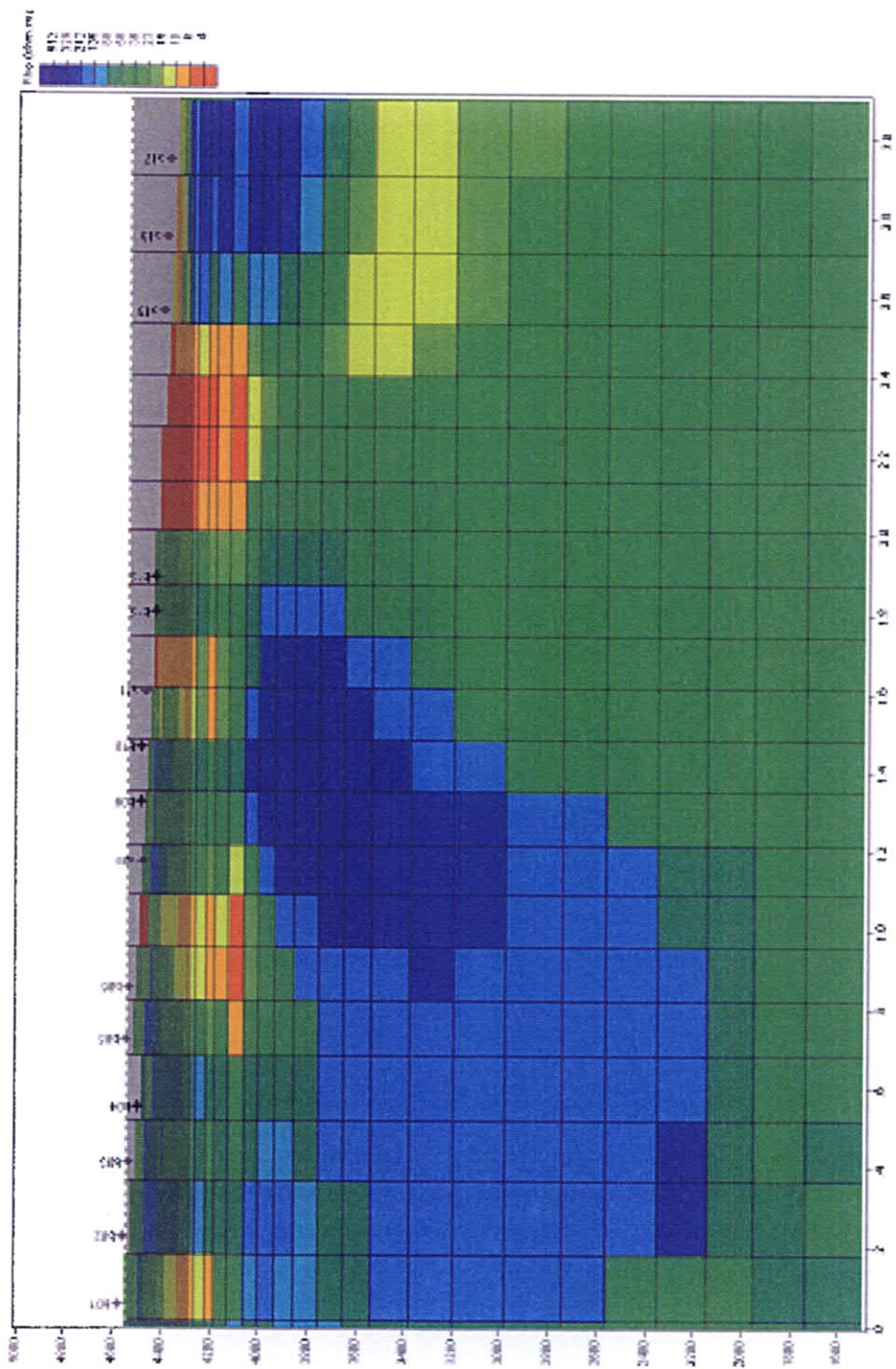


图 2-2-25 2次元解析結果 (測線 B)



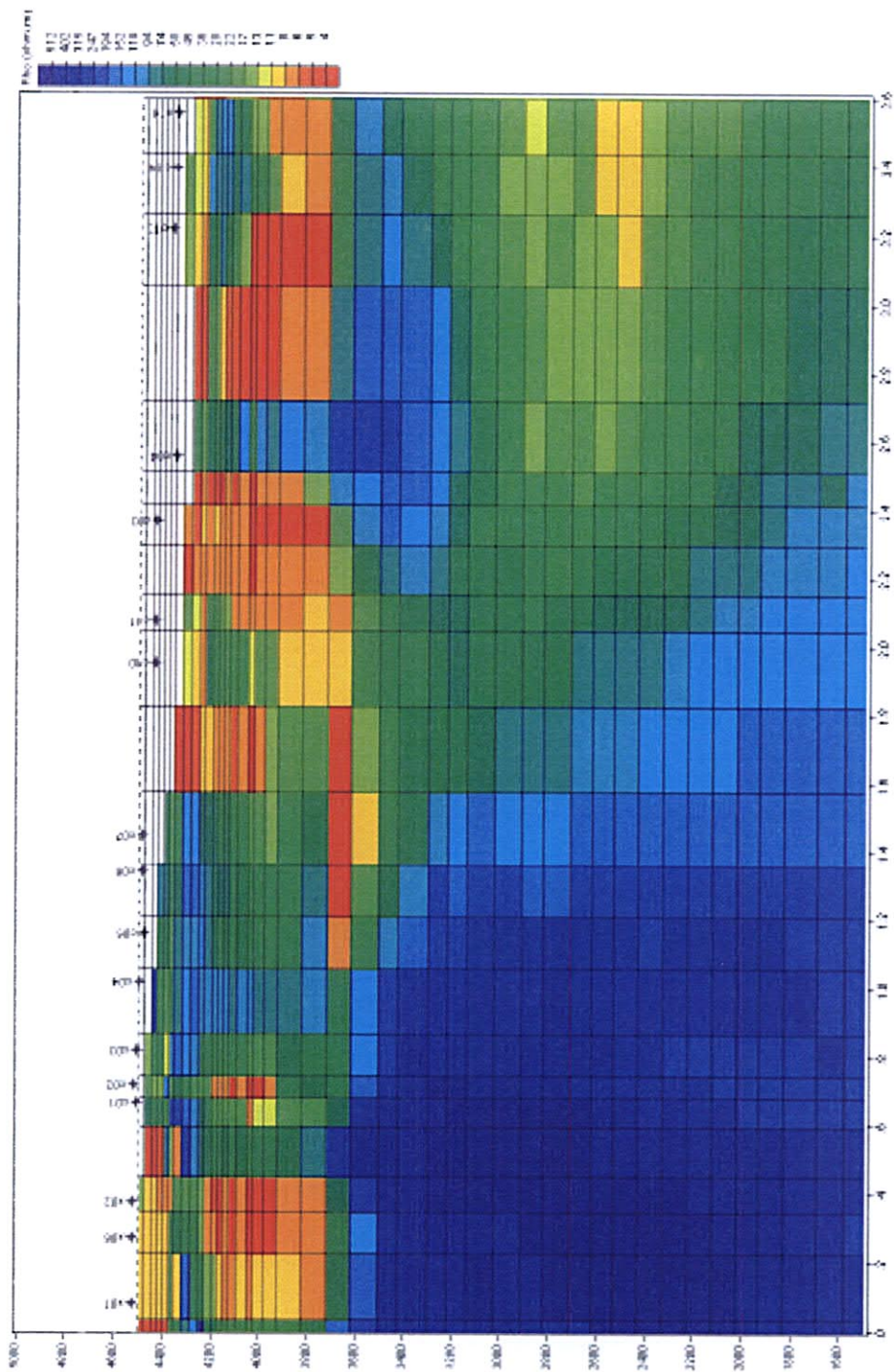


図2-2-26 2次元解析結果(測線C)



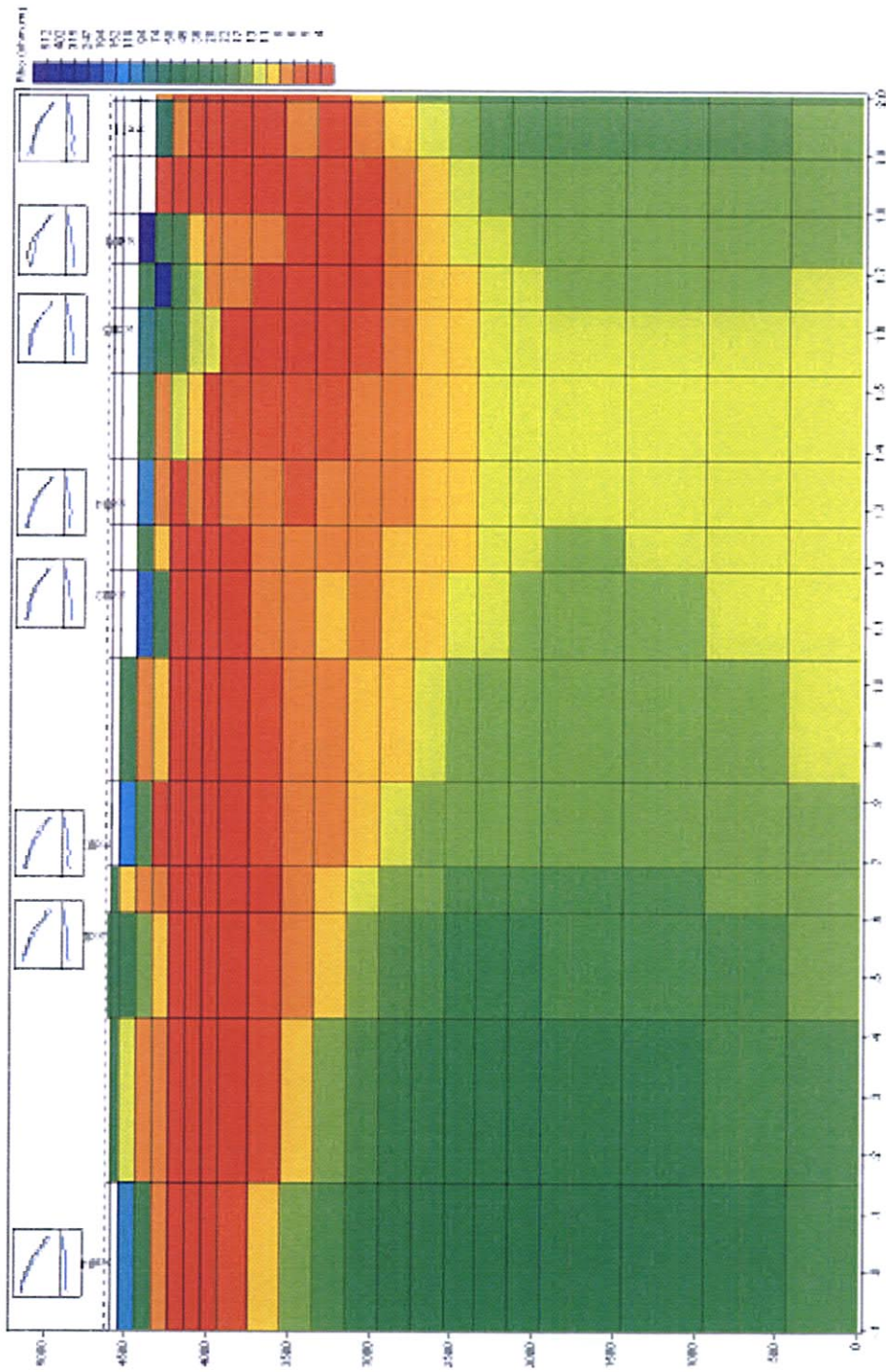


图2-2-27 2次元解析結果(測線D)

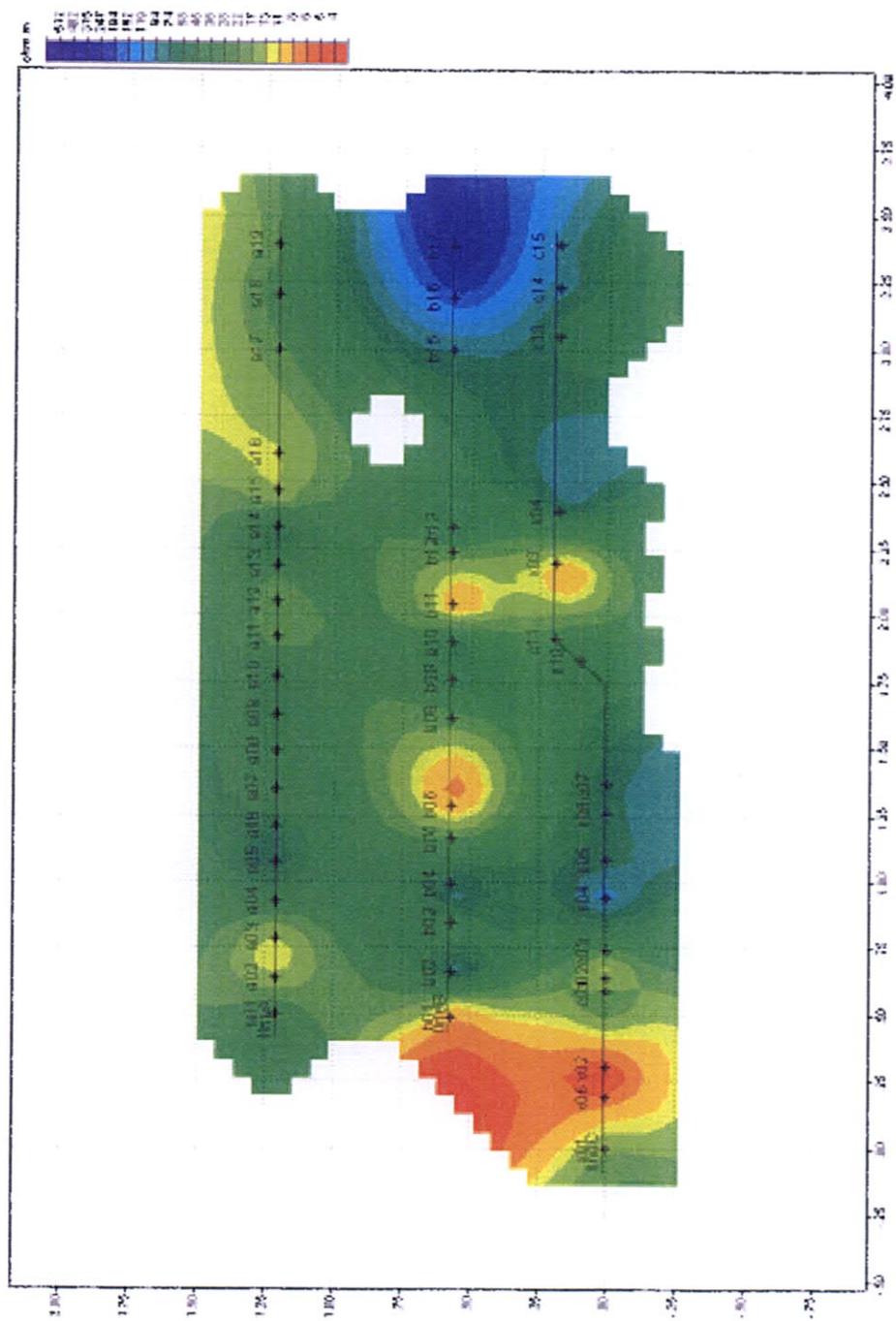


图 2-2-28 比抵抗平面图 (标高 4, 200m)

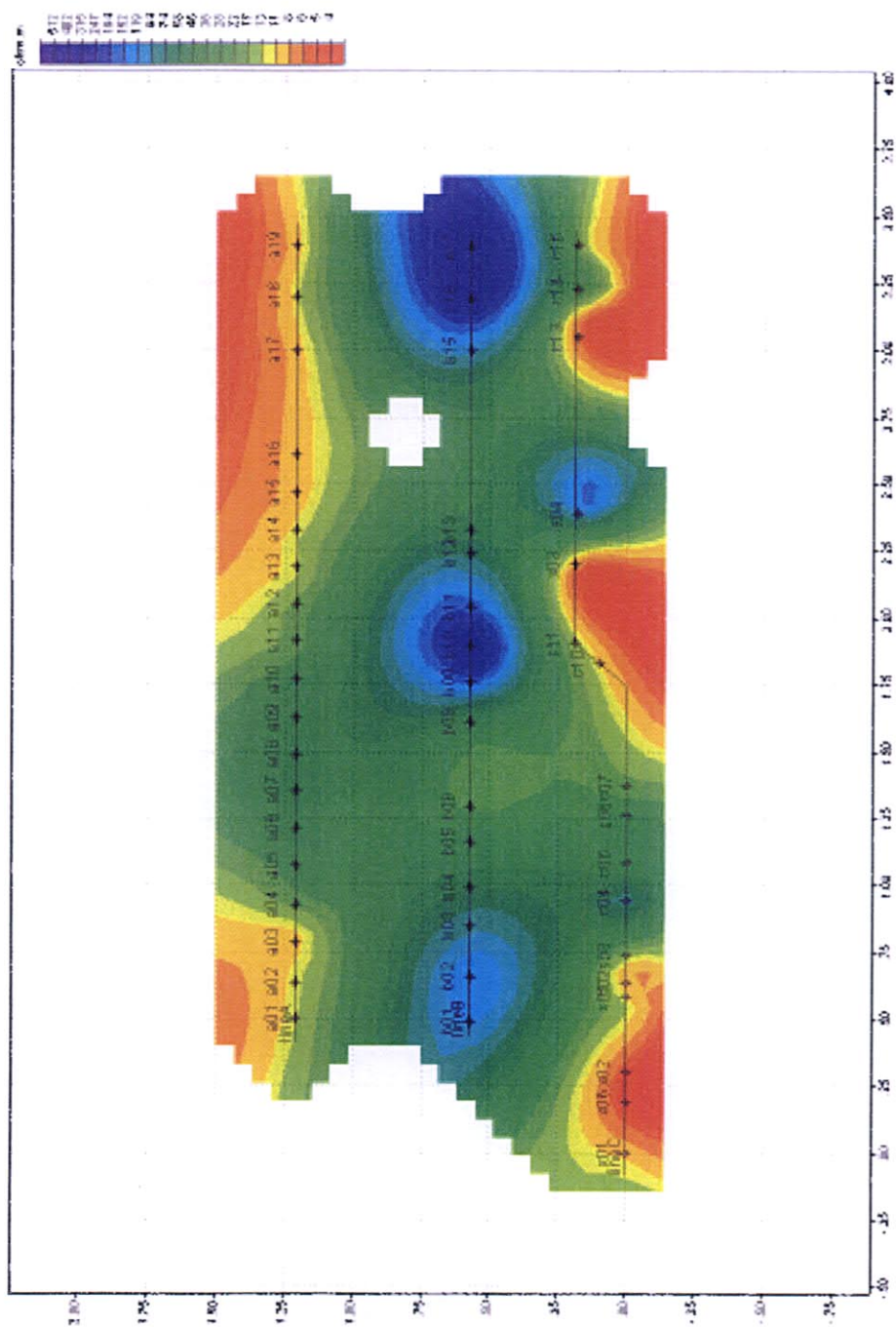


图 2-2-29 比抵抗平面图 (标高 4, 000m)



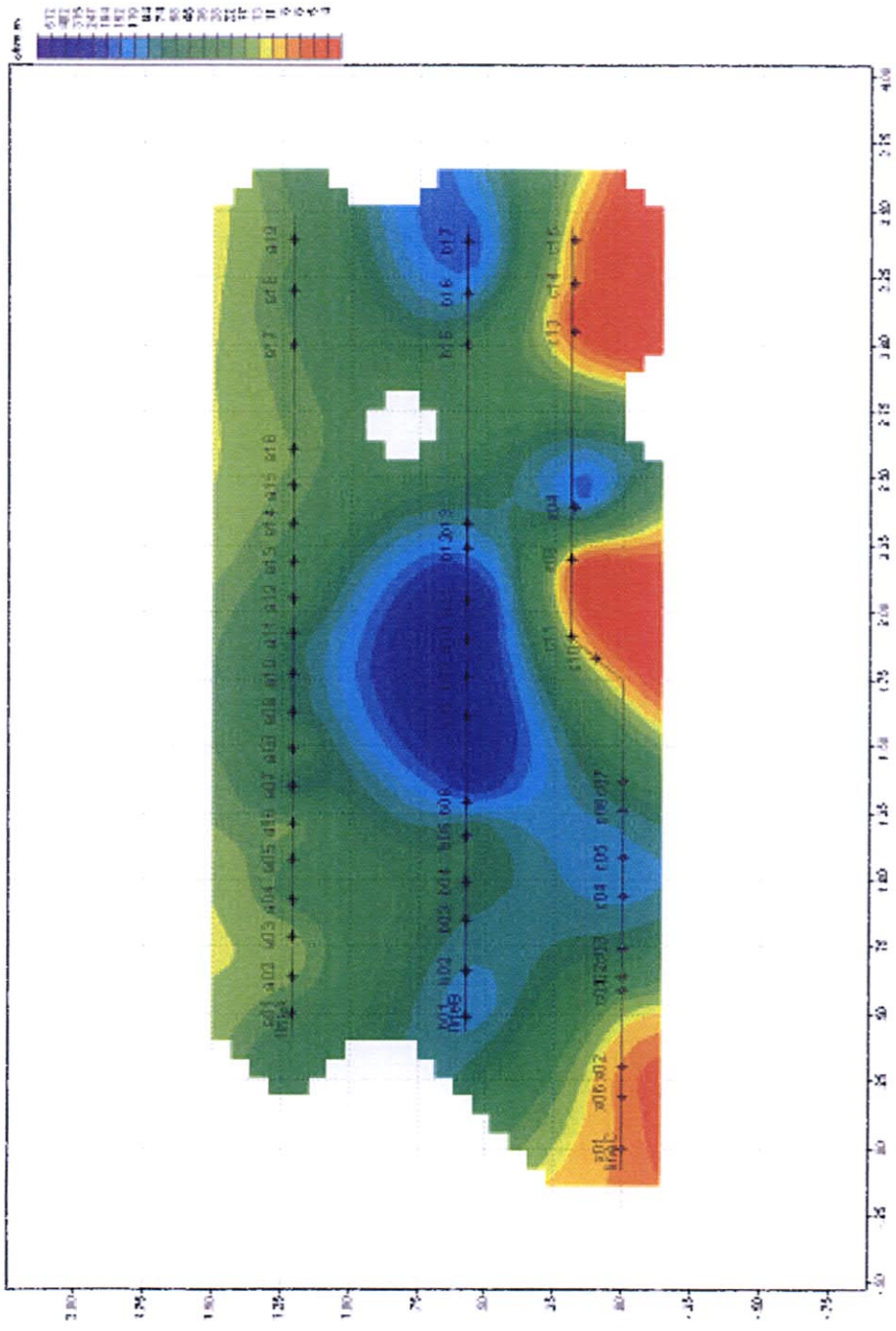


图 2-2-30 比抵抗平面图 (标高 3, 800m)



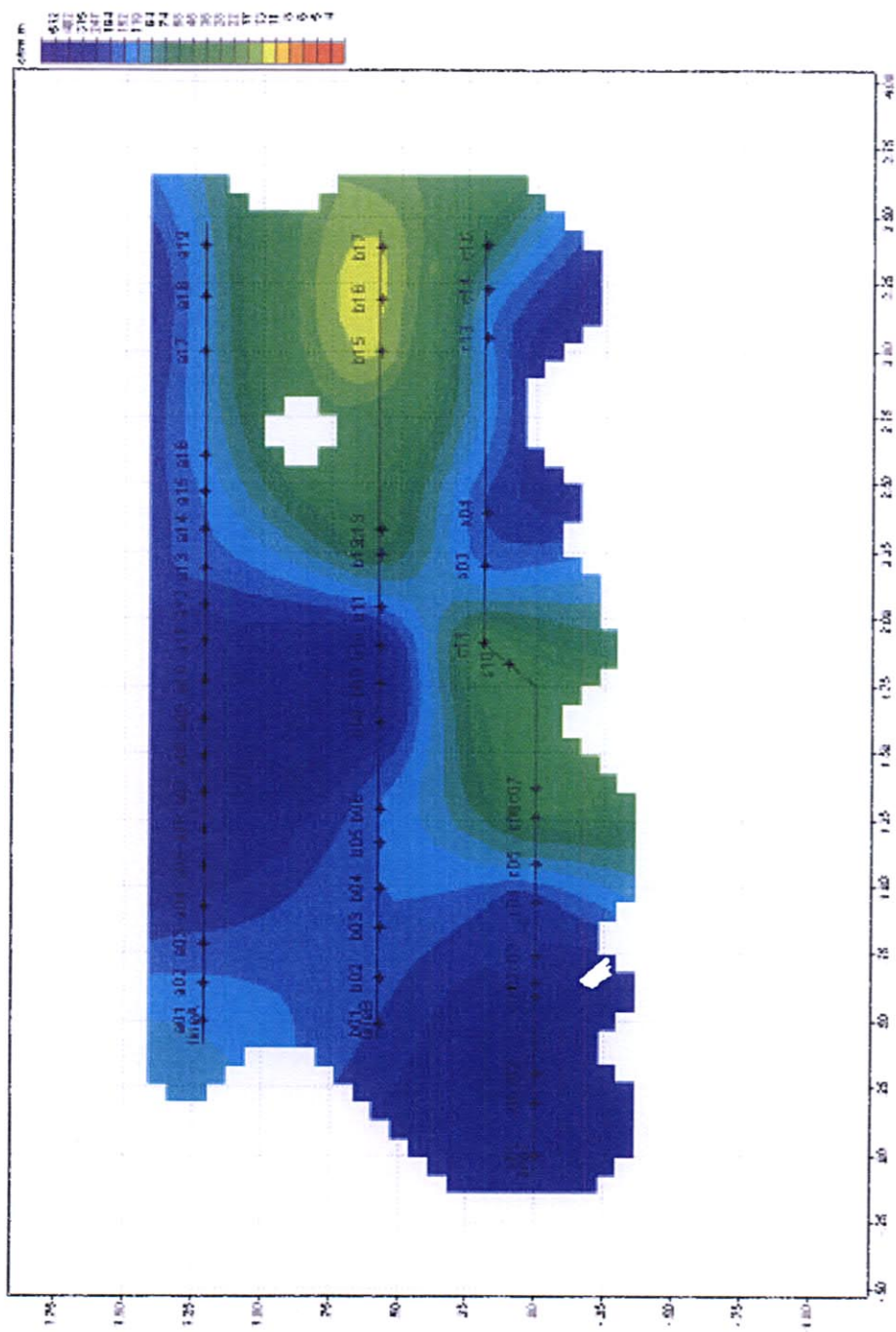


图 2-2-3 1 比抵抗平面图 (标高 3, 500m)

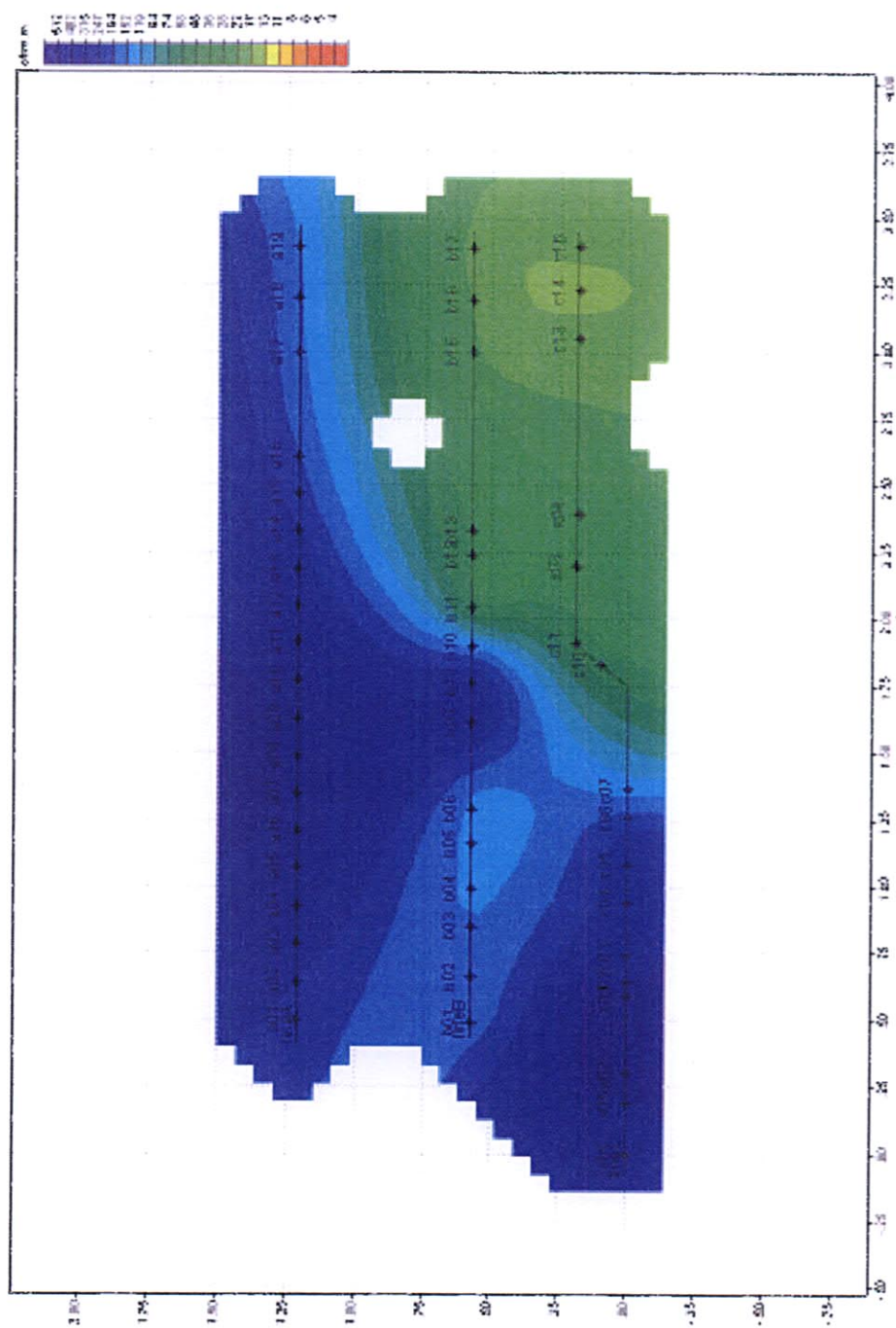


图2-2-32 比抵抗平面图 (标高3,000m)

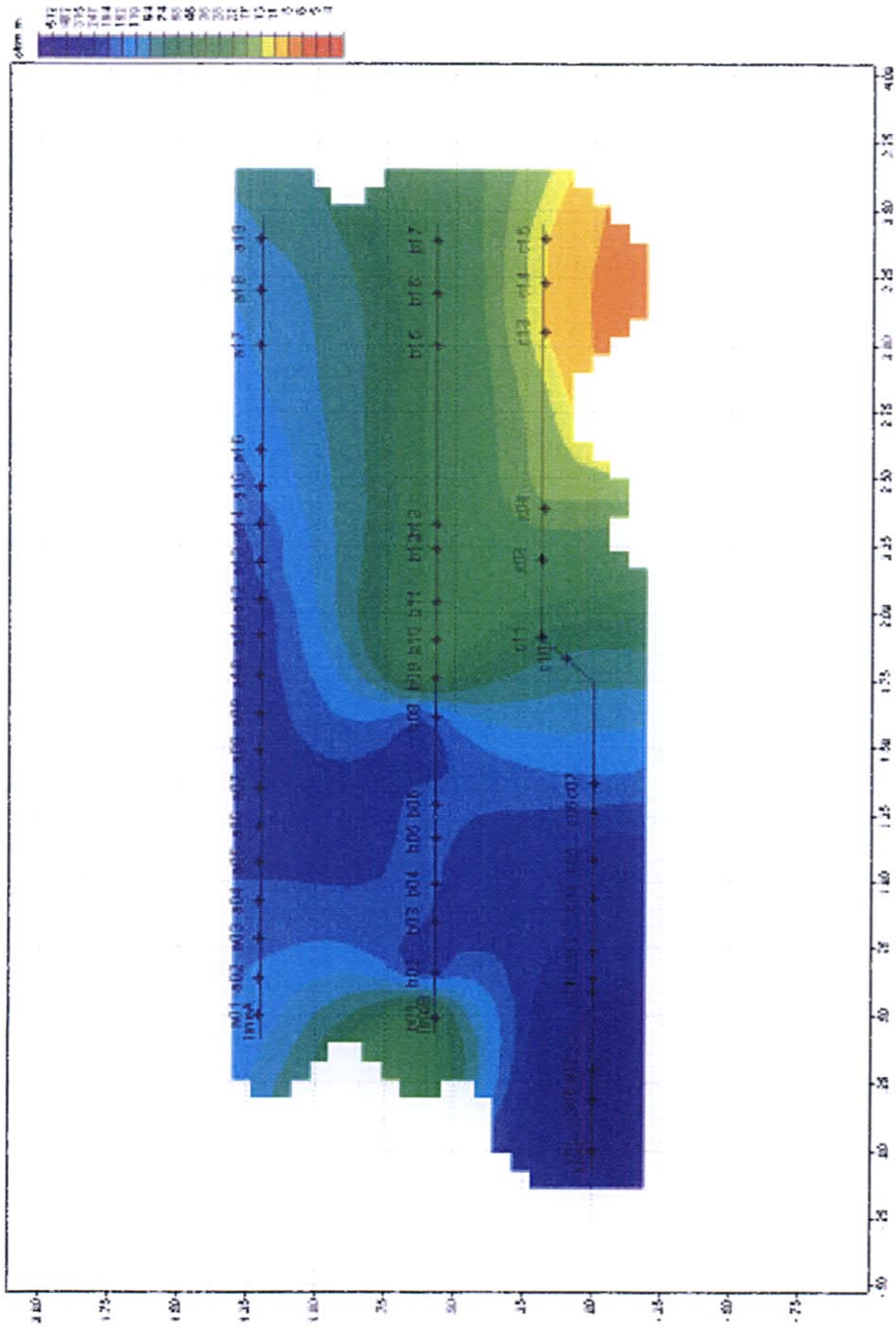


图 2-2-33 比抵抗平面図 (標高2, 500m)

度が他の測線と異なるため、得られた比抵抗プロファイルでの比抵抗値が、測線 D と測線 A, B, C の同一測点でも異なるためである。

① 標高 4,200m での平面図

地表下約 300m に相当する。10 $\Omega\cdot m$  以下の低比抵抗域は測線 B, C の南西部に限られ、100 $\Omega\cdot m$  以上の高比抵抗層は測線 B, C の東端に認められる。

② 標高 4,000m での平面図

地表下約 500m に相当する。10 $\Omega\cdot m$  以下の低比抵抗域は、測線 A, C に限られ、100 $\Omega\cdot m$  以上の高比抵抗層は測線 B にのみ認められる。

③ 標高 3,800m での平面図

地表下約 700m に相当する。数 $\Omega\cdot m$  以下の低比抵抗域が測線 C で認められる。100 $\Omega\cdot m$  以上の高比抵抗域が測線 B の中心部に出現する。

④ 標高 3,500m での平面図

地表下約 1,000m に相当する。測点 A16 と測点 B12 を通る方向と、測点 B06 と測点 C04 を通る方向に、いずれも NE-SW 方向の顕著な比抵抗の不連続が認められる。また、測点 B06~A03 の高比抵抗層中に、それとほぼ直交する NW-SE 方向の弱い不連続性が認められる。

⑤ 標高 3,000m での平面図

地表下約 1,500m に相当する。標高 3,500m で 2 本存在した NE-SW 方向の比抵抗不連続線は、当該深度では 1 本の明瞭な不連続線となる。また、この標高においても測点 B06~A03 に NW-SE 方向の弱い比抵抗不連続域が認められる。

⑥ 標高 2,500m での平面図

地表下約 2,000m に相当する。標高 3,000m まで認められた NE-SW 方向の比抵抗不連続は、測点 B08~C07 を通る NS 方向に変わる。高比抵抗層中の NW-SE 方向の不連続域は不明瞭となる。また、測点 C13~15 付近に 10 $\Omega\cdot m$  以下の低比抵抗域が出現する。

(vii) 3次元解析

(1) データ入力

3次元解析は、Smith and Booker (1991)の RRI 法による 3次元インバージョンにより実施した。

3次元解析で用いた入力データは、各周波数毎のインピーダンステンソルの 4 成分である。計算に用いた周波数は 50Hz から 0.005Hz までの 8 周波数である。2次元解析では 120Hz までのデータを使用した。3次元解析で使用周波数を 50Hz までとしたのは、3次元の有限要素モデリングの精度が実質的には 3 decade 程度であること、探査対象が浅部より深部構造にあることから低周波数データに重点を置いたためである。

計算領域は直方体の 3次元モデルが構築できるように、測線 A, 測線 B, 測点 X01, X06, X02 を除く測線 C のデータを用いた。インバージョン解析では、測線方向(東西方向)に 150m 間隔で 23 個のグリッド、南北方向に約 200m 間隔で 9 個のグリッド、深度方向には深度約 4km の区間を 23 のグリッドを設定した。初期モデルでは 50 $\Omega\cdot m$  の均質大地を仮定した。