

## 第2章 TDIP法調査

### 2-1 調査の目的

本調査は、オマーン国ヤンキル地域において地質調査で推定された鉱床胚胎層準に対してTDIP法調査を実施し、鉱床賦存の可能性のある鉱化帯を捕捉することを目的とする。

### 2-2 調査位置及び調査量

第1年次の調査地区は、ヤンキル地域内のラカー金鉱床を中心とした東西9km、南北5kmの矩形範囲内で鉱床胚胎層準と推定された約20km<sup>2</sup>の範囲である。調査範囲内には既知鉱床であるハイル・アス・サフィール鉱床、ラカー鉱床及び既知鉱徴地であるタウィ・ラカー地区が含まれる。測線間隔200m、測点間隔100m、電極隔離係数 $N=1\sim 4$ で測定を行った。測線数は44本、測線総延長は95.9km、データ取得点数は3220点である。

第2年次の調査地区は、第1年次の調査でIP異常が捕捉されたタウィ・ラカー地区、ナジャイド地区、クルン・アル・アクバブ地区、ラカー地区およびハイル・アス・サフィール地区の5地区である。より詳細な比抵抗および分極率の分布状況を把握するために測線間隔100m、測点間隔50m、電極隔離係数 $N=1\sim 5$ で測定を行った。測線数は40本、測線総延長は33.1km、データ取得点数は2510点である。

また各年度とも露頭及びボーリングコアから岩石サンプルを採取し、室内実験によって比抵抗及び分極率を測定した。

### 2-3 調査方法

#### 2-3-1 測定方法

測定手法は時間領域強制分極法(TDIP法)を用いた。TDIP法は電気探査法の1つであるが、比抵抗値と同時に分極率も測定するという特徴を持っている。地下に金属鉱物が存在する場合、大地に直流電流を流すと金属鉱物の表面に電荷が蓄えられ、流していた直流電流を遮断すると蓄えられていた電荷が徐々に放出される現象(分極現象)が起こる。比抵抗値と共にこの分極現象を測定することにより、比抵抗の変化のみでは検出できない地下の金属鉱床を探索することができる。

本調査では、直流電流として1/8Hzの休止波形を流し、通電中の1次電位から見掛比抵抗を求め、電流切断後の減衰電位(2次電位)から分極率を測定した。

電極配置は、ダイポール・ダイポール配置を使用した。第1年次は、電極間隔100m、電極隔離係数 $N=1\sim 4$ 、測線間隔200mとした。第2年次は、より詳細な比抵抗および分極率分布を把握するために、電極間隔50m、電極隔離係数 $N=1\sim 5$ 、測線間隔100mとした。ダイポール・ダイポール電極配置及び測定データのプロット概念図をFig. II-2-1に示す。各測点における測定は、原則としてスタッキング回数を10回以上とした。

本調査地域におけるデータの品質は総じて良好であったが、ワジ内の測点の一部や比抵抗の極

端に低い測点において分極率にバラツキが認められたため、必要に応じ再測定を行った。

測定に用いた信号源の出力波形を Fig. II-2-2 に、2 次電位のサンプリング方法を Fig. II-2-3 に示す。

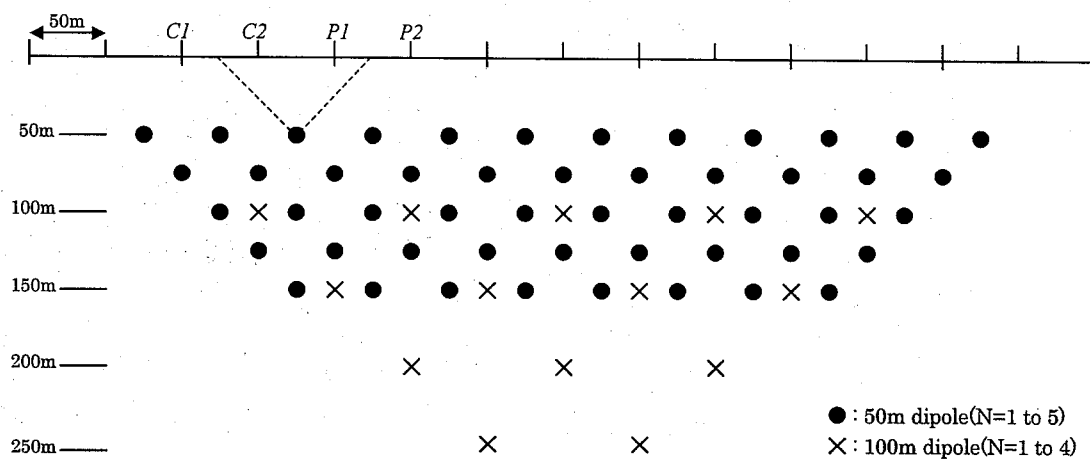


Fig. II-2-1 Dipole-dipole array and plotting procedure

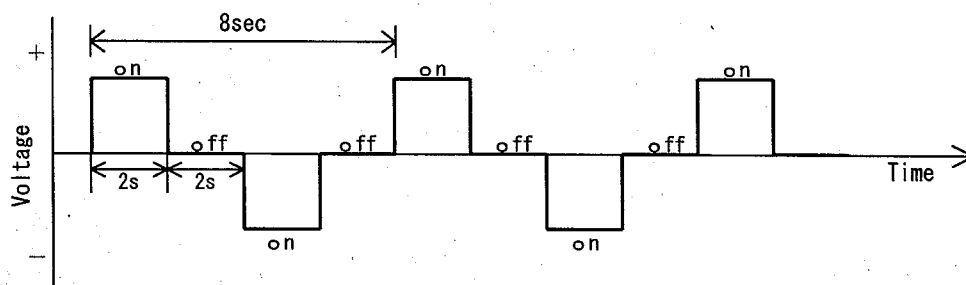


Fig. II-2-2 Waveform produced by the transmitter

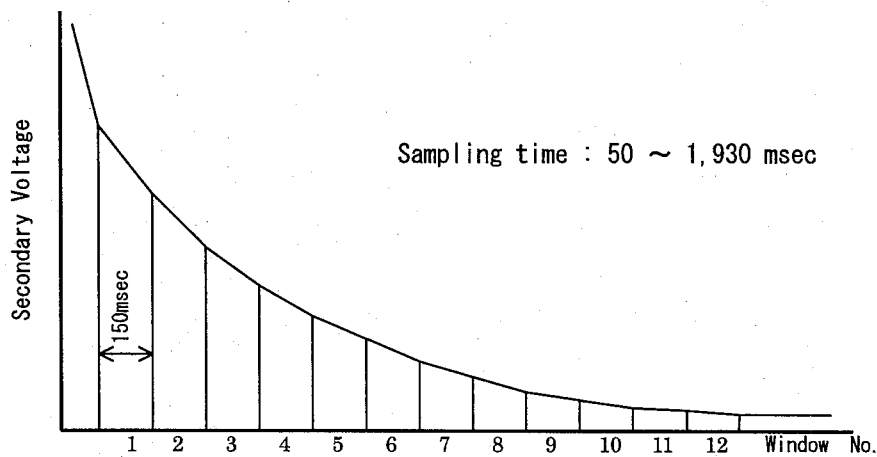


Fig. II-2-3 Sampling interval of the TDIP receiver

## 2-3-2 使用機器

本調査に使用した測定機器は米国の Zonge 社製送受信システムである。機器の仕様一覧を Table II-2-1 に示す。

Table II-2-1 Specifications of TDIP survey instruments

<b>Receiver</b>	<b>Zonge GDP-16</b>
Frequency range	DC to 8KHz
Number of Channels	8
Number of Stacks	8096
Detectable signal	1 $\mu$ V
A/D Conversion	16 bits
Number of Windows	13(from 50 to 1,930ms)
<b>Transmitter</b>	<b>CH-95A</b>
Output Power	2kw,800v,12A
Output Frequency	DC to 10KHz
Frequency control	Automatic
<b>Generator</b>	<b>Geonics GPU2000</b>
Maximum output	2Kw
Output Voltage	200V
Output Frequency	400Hz

## 2-4 解析方法

### 2-4-1 データ処理

電気探査における大地の見掛比抵抗値 ( $\rho$ ) は、

$$\rho = K \frac{V_p}{I}$$

で表される。ここで  $V_p$  は、電流電極 ( $C_1, C_2$ ) 間に直流電流 ( $I$ ) を供給した時に、電位電極 ( $P_1, P_2$ ) 間において測定される 1 次電位である。また、 $K$  は電極配置係数と呼ばれ、一般に次式で表される。

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_2 P_2}}$$

特にダイポール・ダイポール配置で電流電極と電位電極の間隔 (内側の電極どうしの間隔) が電極間隔の  $n$  倍である場合は、

$$K = \pi a n(n+1)(n+2)$$

と表される。ここで  $a$  は電極間隔である。

また、直流電流通電中の 1 次電位と、電流切断後 450msec ( $t_1$ ) から 1100msec ( $t_2$ ) までの電位の過渡現象 (2 次電位: $V_t$ ) の時間積分値の比を IP 効果の大きさの指標 (分極率: $M$ ) として

おり、次式により表される。

$$M = \frac{1.87}{V_p} \int_1^2 V_t dt$$

見掛比抵抗値及び分極率は、測定機に各種測定条件を入力することによりリアルタイムで自動算出される。調査時に、これらデータの品質チェックを行い、測定値がばらつく場合には、再測定を行いデータ品質の向上に努めた。

また、鉱化作用を示す指標であるメタルファクター (MF) は、上記の見掛比抵抗値及び分極率より、次式により算出される。

$$MF = \frac{M}{\rho} \times 100$$

低比抵抗で高分極率の鉱床が存在した場合、メタルファクターは高い値となる。

#### 2-4-2 地形補正

測定により得られた見掛比抵抗値は、各電極を無限平面に配置したものとして電極配置係数を仮定し算出されている。しかし本調査地域内には地形の起伏が激しい部分があり、そのような場所における見掛比抵抗値は地形起伏による影響を受けている。

ダイポール・ダイポール電極配置では、山地形の場所では電流密度が高くなり高比抵抗異常、谷地形の場所では電流密度が疎となり低比抵抗異常が形成される。

そのため、本調査では全測線に対し、2次元有限要素法を用いて地形補正係数を求め、見掛比抵抗値を補正し断面図及び平面図を作成した。

#### 2-4-3 擬似断面図

地形補正後の見掛比抵抗、分極率、メタルファクターを用いて測線毎の擬似断面図および電極隔離係数 N 毎の平面図を作成した。

#### 2-4-4 2次元モデル解析

IP法の解析には、標準モデルによる見掛比抵抗分布や分極率分布を参考にしながら断面図・平面図を定性的に解析する定性解析及び推定地下構造モデルを作成しその理論値を計算する定量解析が用いられている。この定量解析は一般にモデルシミュレーションと呼ばれている。

本調査では、有限要素法によるモデル計算 (Forward modeling) と非線形最小二乗法による自動解析法を組み合わせた2次元インバージョン解析法を使用した。地下構造が測線方向に変化する場合、水平多層構造を仮定した1次元解析では地下比抵抗構造を十分反映した解析が不可能であり、測線方向の比抵抗不連続境界の影響を含めて解析できる2次元解析が必要である。従来は、地下構造を任意の比抵抗ブロックに分割し、この比抵抗ブロックに推定される比抵抗値を当てはめた地下比抵抗モデルを作成し、この地下比抵抗モデルにより計算される理論値と実測値とを比較し、測定値にできるだけ近い応答を示すモデルを試行錯誤で組み立てていくフォワードモデリ

ングが主流であったが、この方法は解析者の恣意が含まれるなどの問題があった。今回解析に使用したインバージョン解析法は、各ブロックに当てはめる比抵抗値を非線形最小二乗法により推定させる自動反復解析法を適用することにより、解析者の恣意に依らない客観的な解析結果を得ることが可能である。モデルでは隣り合った測点の間に比抵抗ブロック境界を設け、さらに各測点下のブロックを深度方向に浅部では薄く、深部では厚くなるように分割した四角形比抵抗ブロックを作成した。これを地表の地形に合わせて変形させ、水平方向には地形と平行な形の比抵抗ブロックとした。これらの比抵抗ブロックに比抵抗値が与えられると、有限要素法によるモデル計算により地下の比抵抗構造に対応する地表での応答として各測点における見掛比抵抗が得られる。これらの地表での応答と測定値の残差が最も小さくなるように比抵抗ブロックの値を最小二乗近似法による自動反復解析により求めた。反復解析を行う第1回目の比抵抗ブロックの値(初期値)は全て同一比抵抗として与え、初期値が解析結果に与える影響を除去した。

## 2-5 調査結果

物理探査調査位置図を Fig. II-2-4 に示す。

第1年次の調査で得られた見掛比抵抗、分極率及びメタルファクターの断面図を Fig. II-2-5～11 に示す。また、平面図を Fig. II-2-12～15 に示す。見掛比抵抗は数 $\Omega\text{m}$ ～1,300 $\Omega\text{m}$  の範囲で分布し、平均値は約 160 $\Omega\text{m}$  である。測線 200W 以東では全体的に高い値を示しており、シート状岩脈群が分布する箇所では 500 $\Omega\text{m}$  以上の高比抵抗となっている。測線 200W 以西では、調査範囲の南部において低比抵抗帯が東西方向に分布している。これは堆積岩によるものと考えられる。分極率は 0～45mV/V の範囲で分布し、平均値は 7.5mV/V である。鉱化作用を示すと考えられる高分極率異常は、既知の鉱床及び鉱徴地を含む以下の 5 箇所で認められる。

- ・ ラカー金鉱山周辺
- ・ 調査地域北東部 (クルン・アル・アクバブ地区)
- ・ タウィ・ラカー鉱徴地
- ・ ハイル・アス・サフィール鉱床周辺
- ・ 測線 1600E, 測点 700N 付近 (ナジャイド地区)

これらの IP 異常地域についてさらに詳細な比抵抗および分極率の分布状況を把握するために第2年次の調査では測点間隔 50m, 測線間隔 100m で測定を実施した。各地区の IP 異常について以下に記述する。

### 2-5-1 ラカー金鉱山地区

ラカー金鉱山の測線位置図を Fig. II-2-16 に示す。本地区では、第2年次に 0.6km の東西測線を 5 本, 0.8km の南北測線を 1 本設定して測定を実施した。TDIP 断面図を Fig. II-2-17 に、TDIP 平面図を Fig. II-2-18 に示す。また、2次元解析断面図及び平面図をそれぞれ Fig. II-2-19, 20 に示す。

本地区の見掛比抵抗は 1.3～464 $\Omega\text{m}$  の範囲にあり、平均値は約 100 $\Omega\text{m}$  である。分極率は 1.7

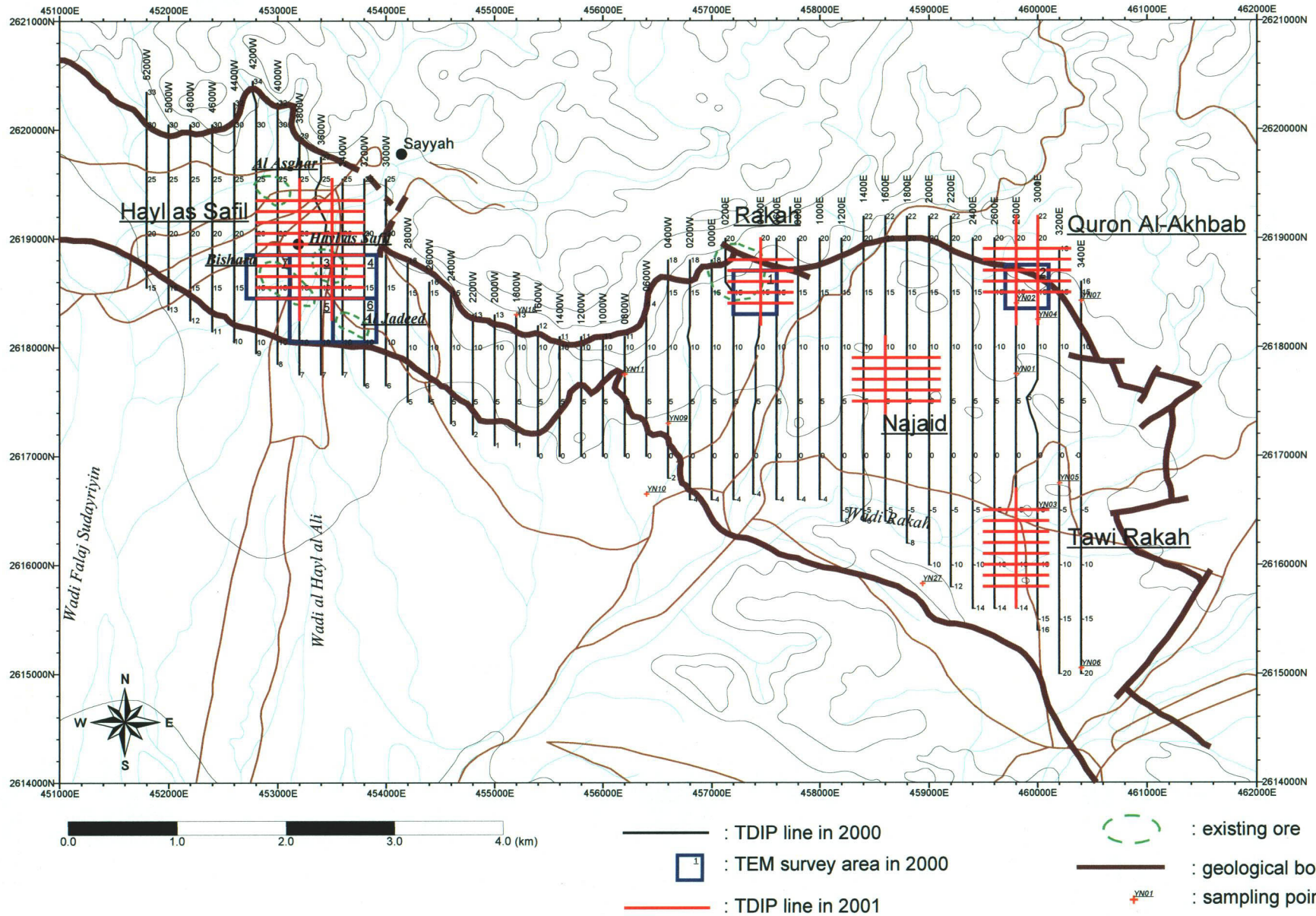


Fig. II-2-4 Geophysical survey location in Yanqul area

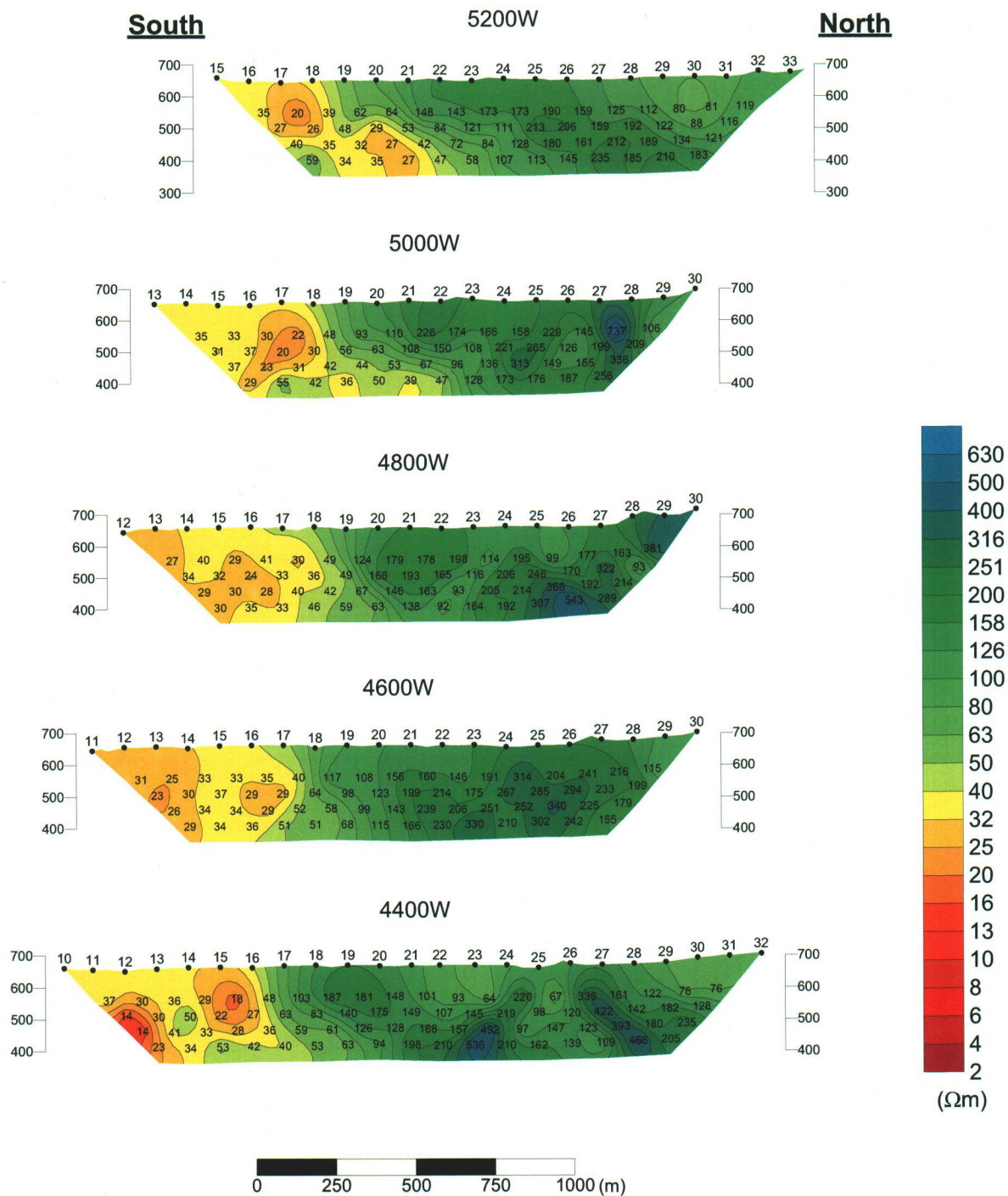


Fig. II -2-5(1) Apparent resistivity pseudo-sections(5200W-4400W)

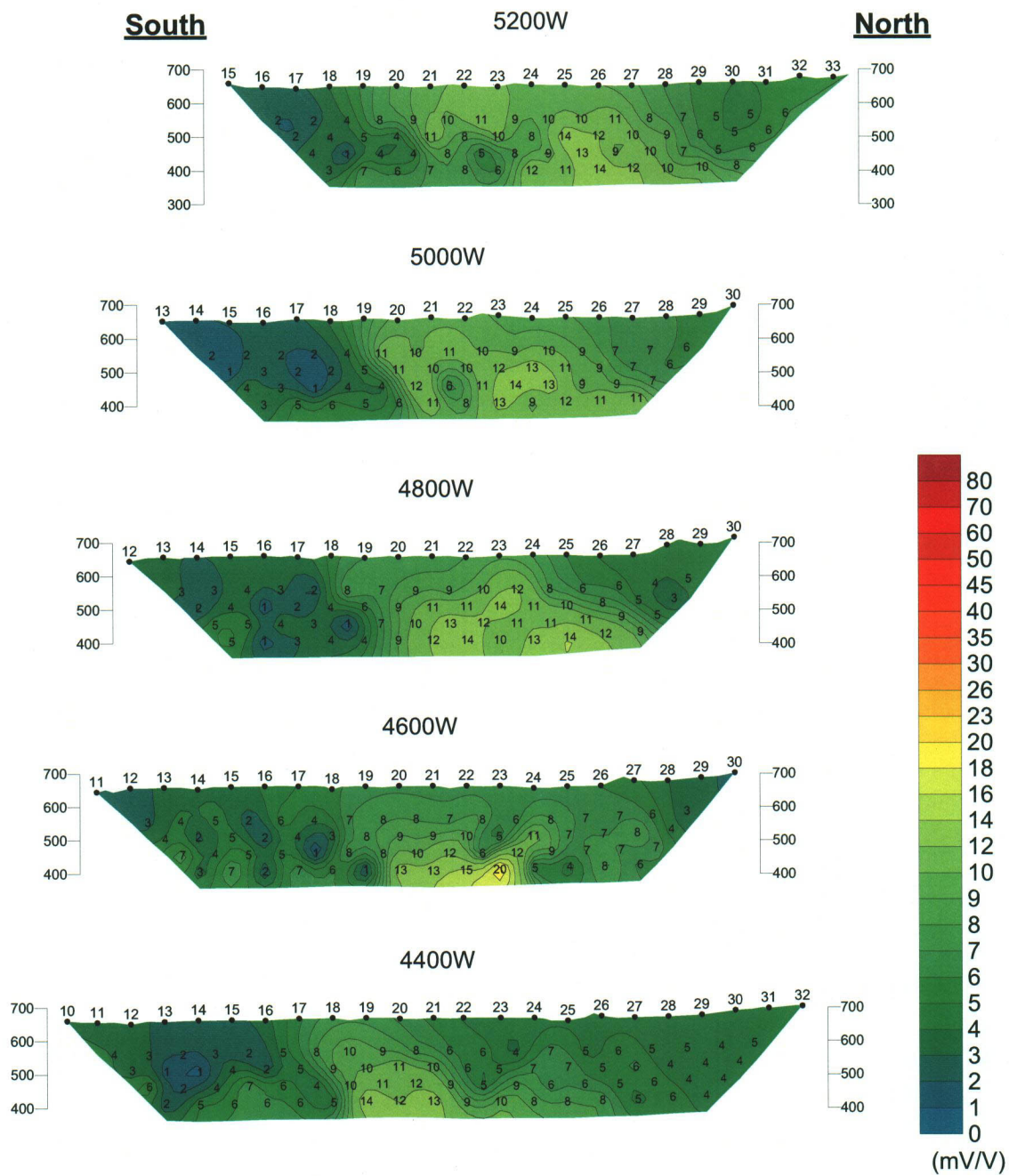


Fig. II -2-5(2) Chargeability pseudo-sections(5200W-4400W)



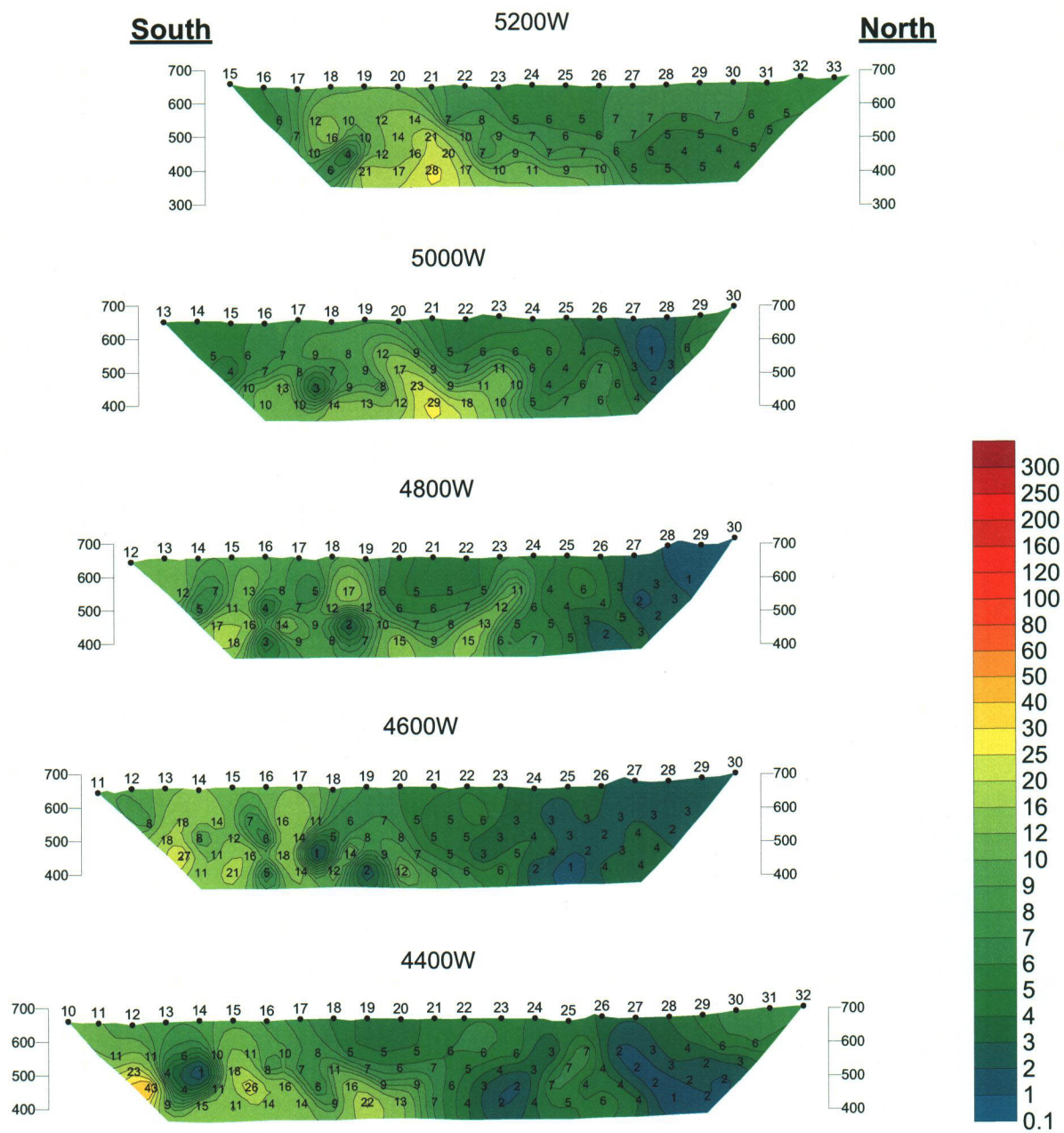


Fig. II -2-5(3) Metal factor pseudo-sections(5200W-4400W)

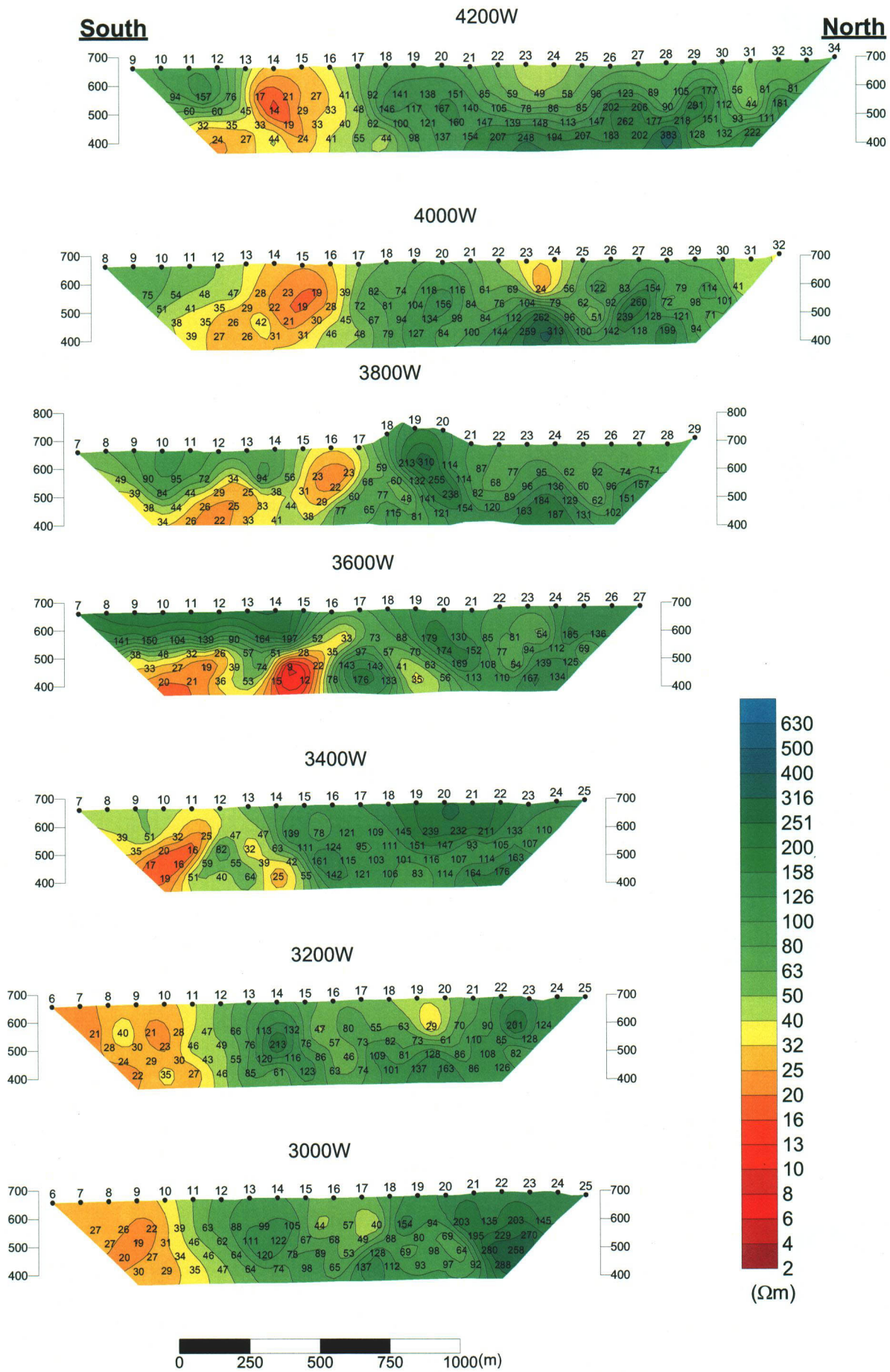


Fig. II-2-6(1) Apparent resistivity pseudo-sections(4200W-3000W)

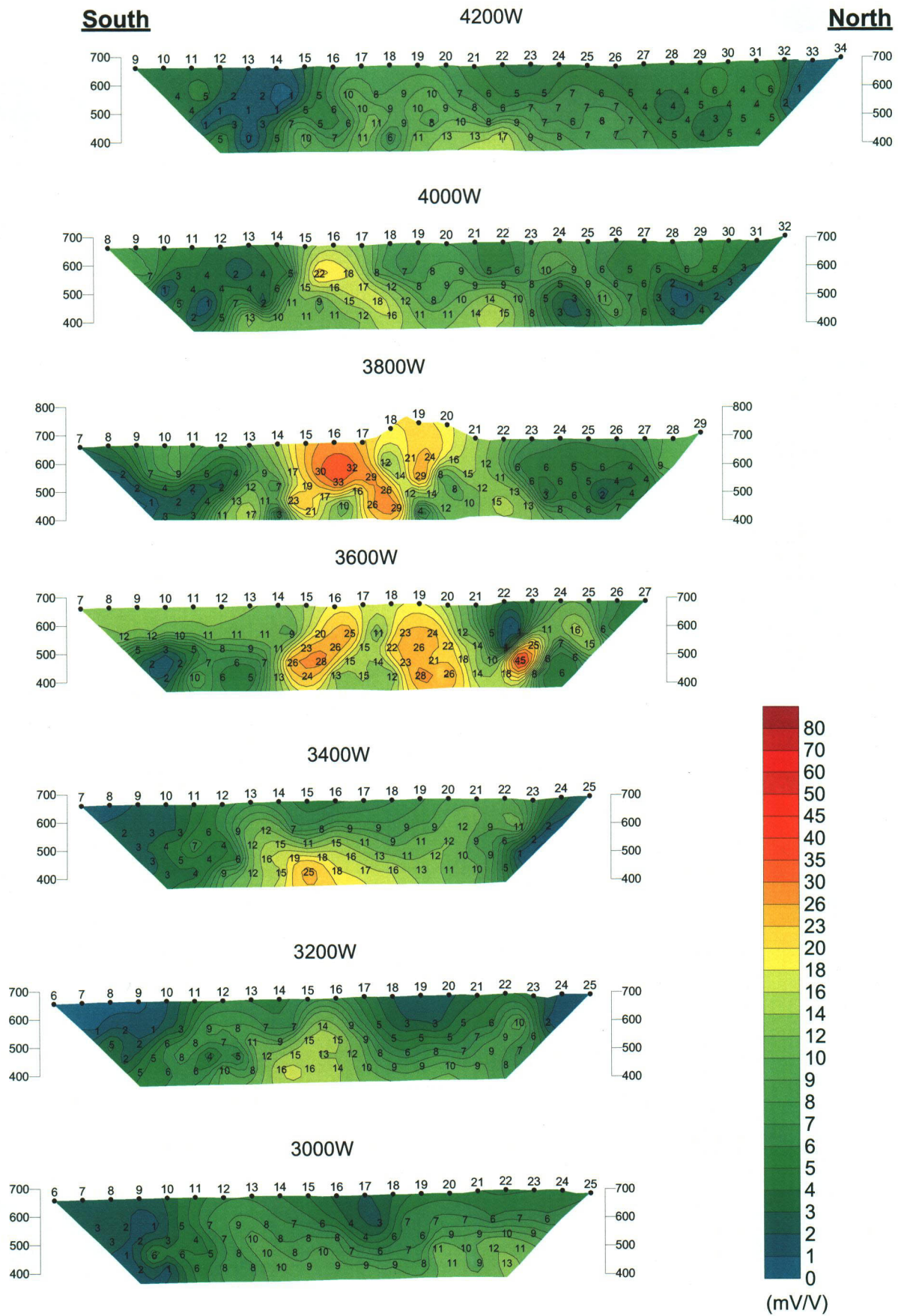


Fig. II -2-6(2) Chargeability pseudo-sections(4200W-3000W)

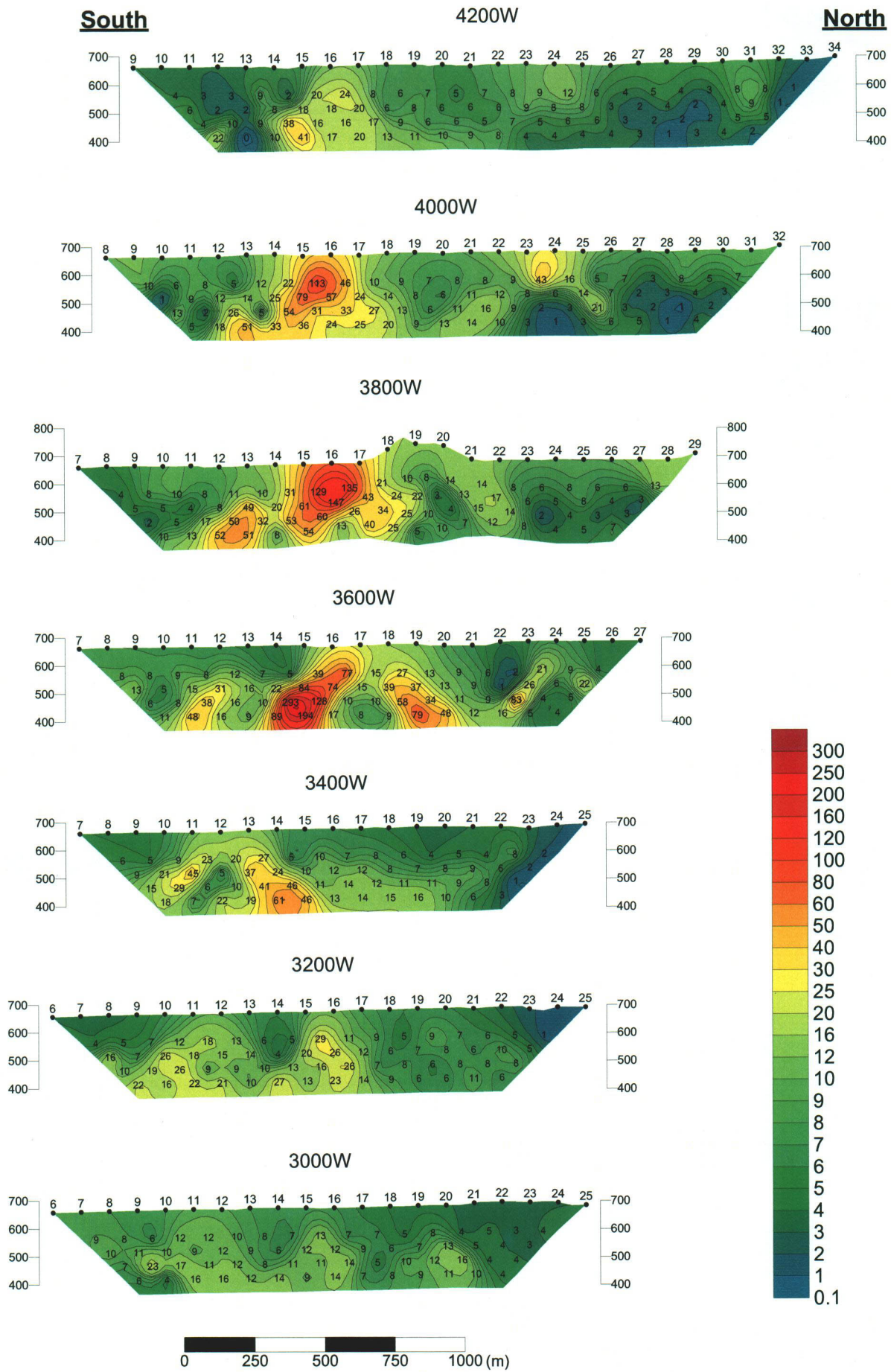


Fig. II -2-6(3) Metal factor pseudo-sections(4200W-3000W)

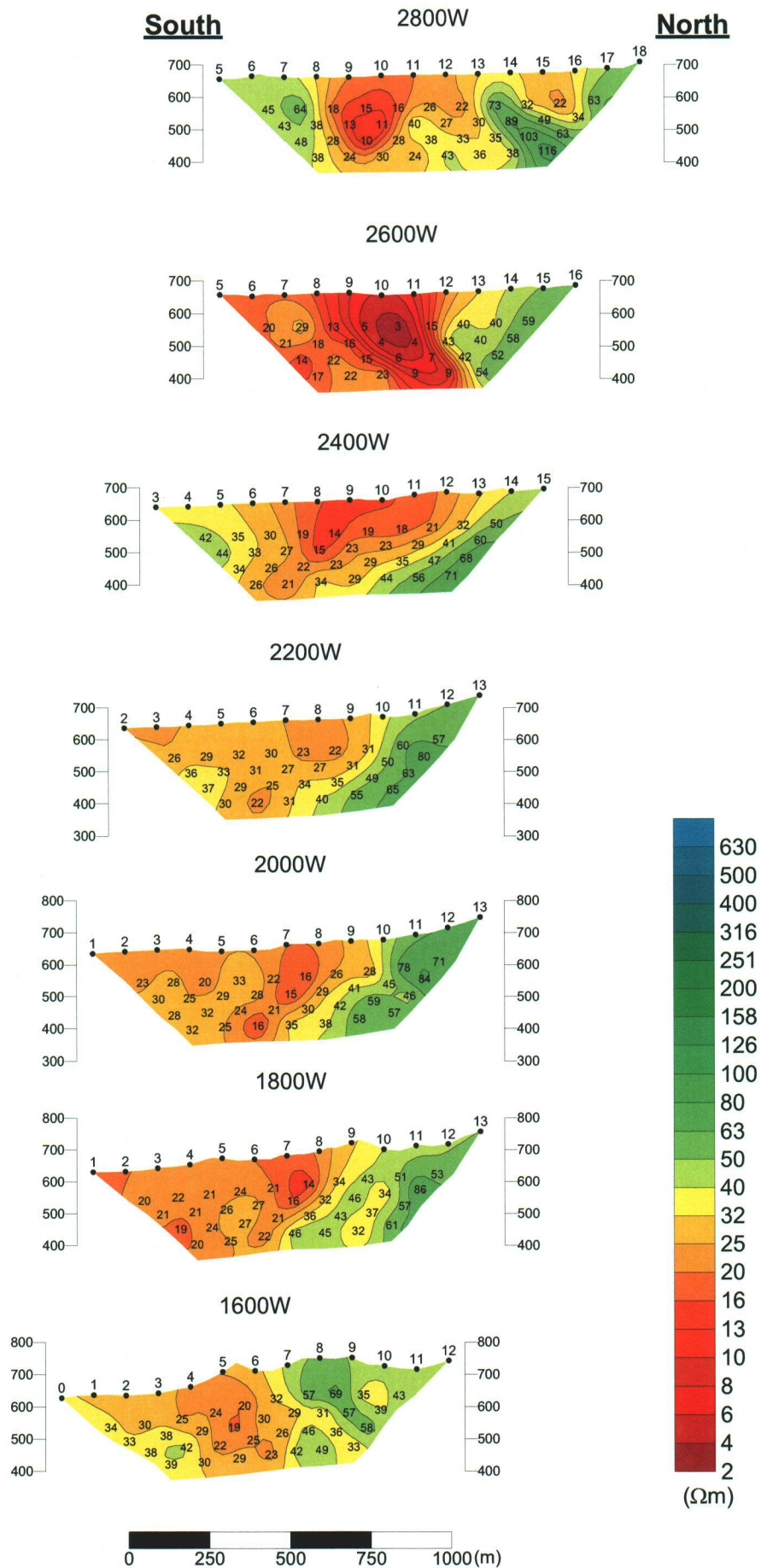


Fig. II -2-7(1) Apparent resistivity pseudo-sections(2800W-1600W)

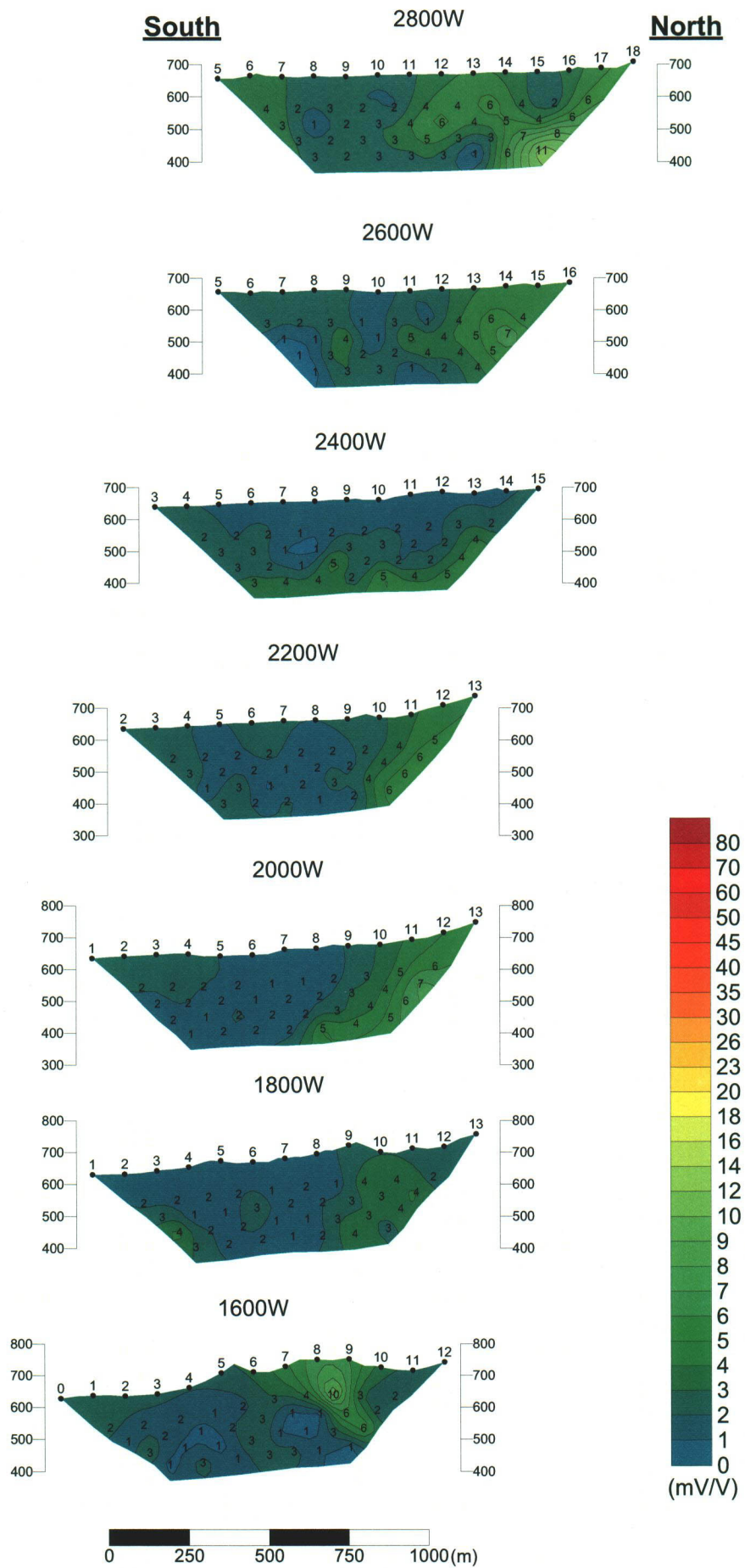


Fig. II -2-7(2) Chargeability pseudo-sections(2800W-1600W)

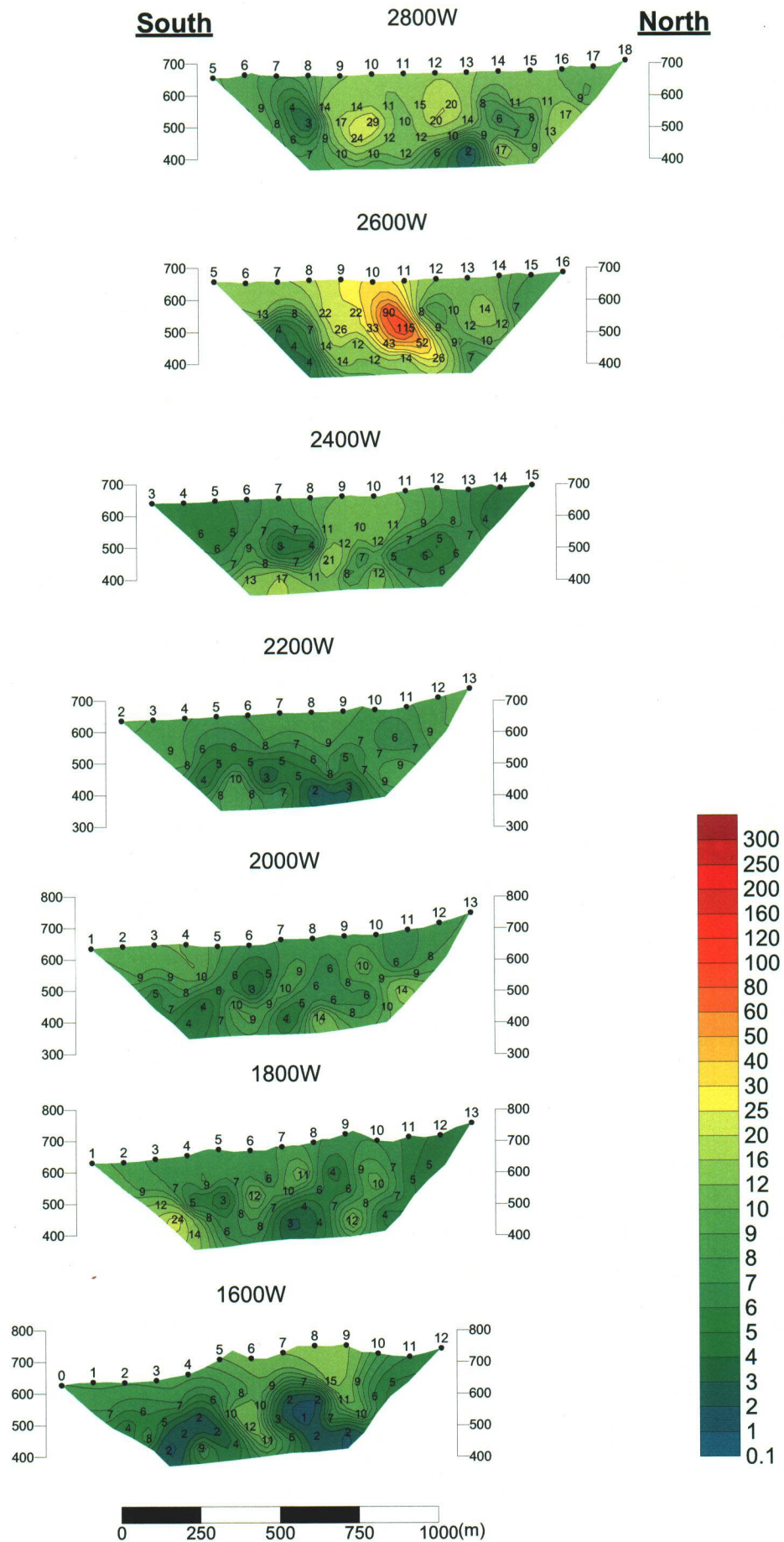


Fig. II -2-7(3) Metal factor pseudo-sections(2800W-1600W)

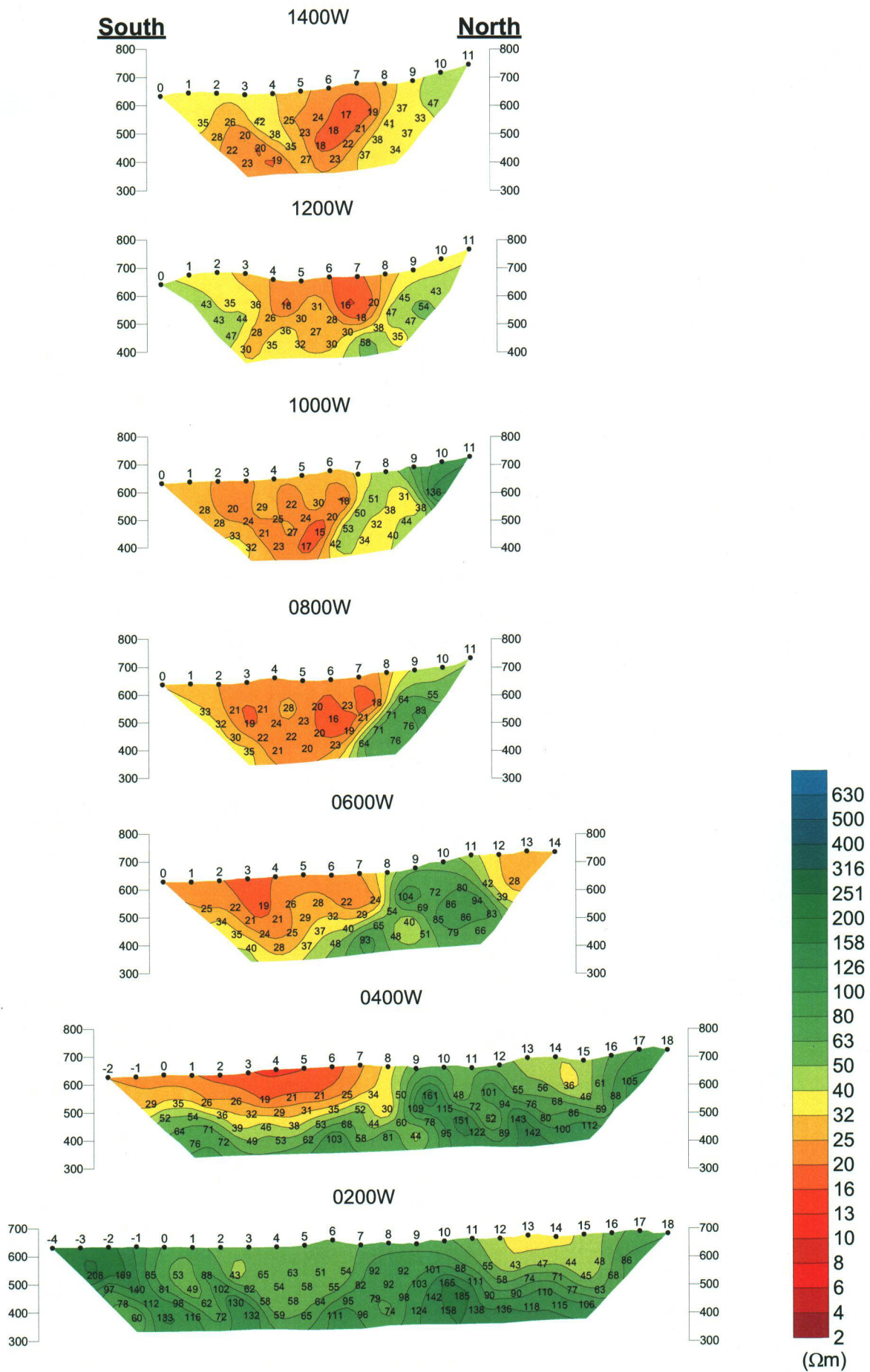


Fig. II-2-8(1) Apparent resistivity pseudo-sections(1400W-0200W)



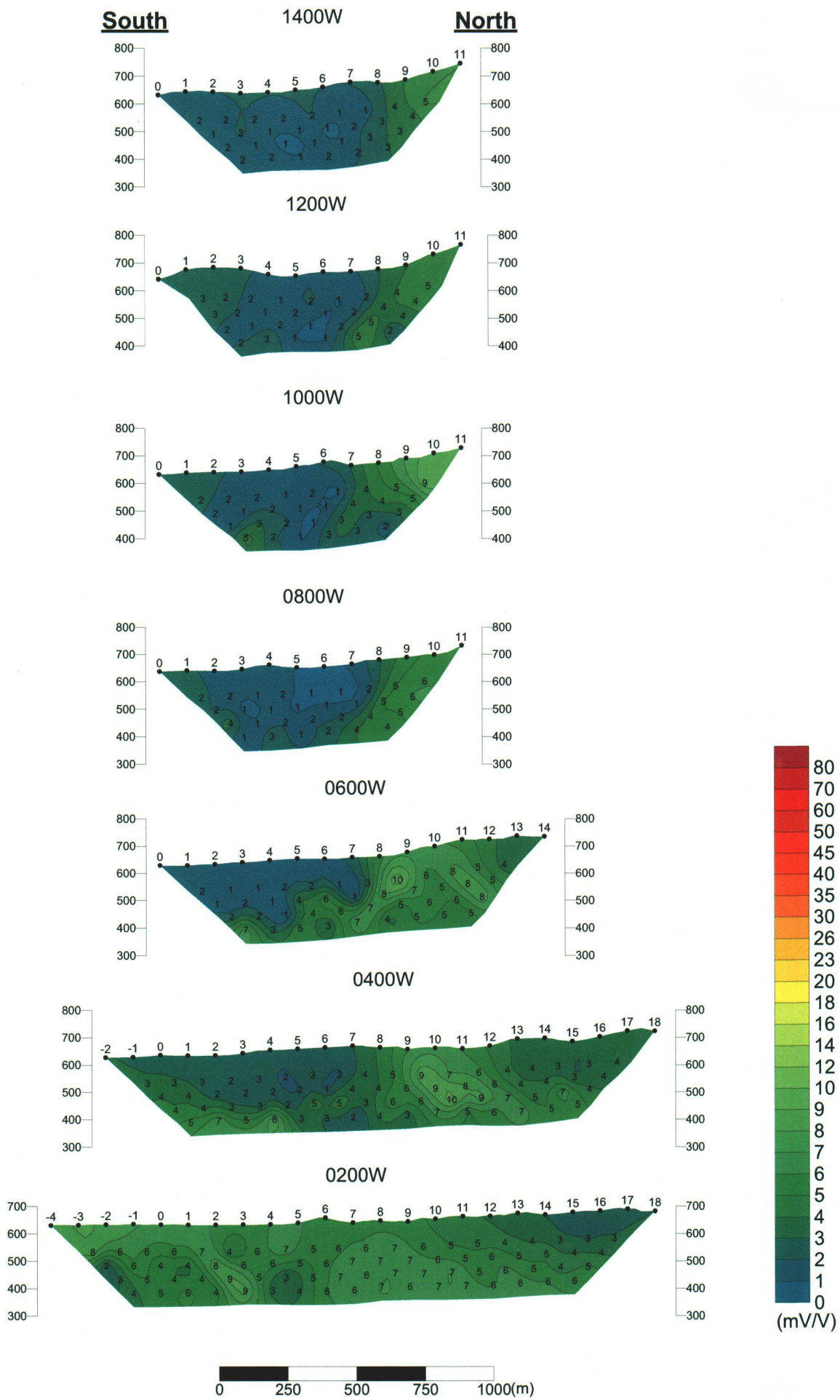


Fig. II -2-8(2) Chargeability pseudo-sections(1400W-0200W)

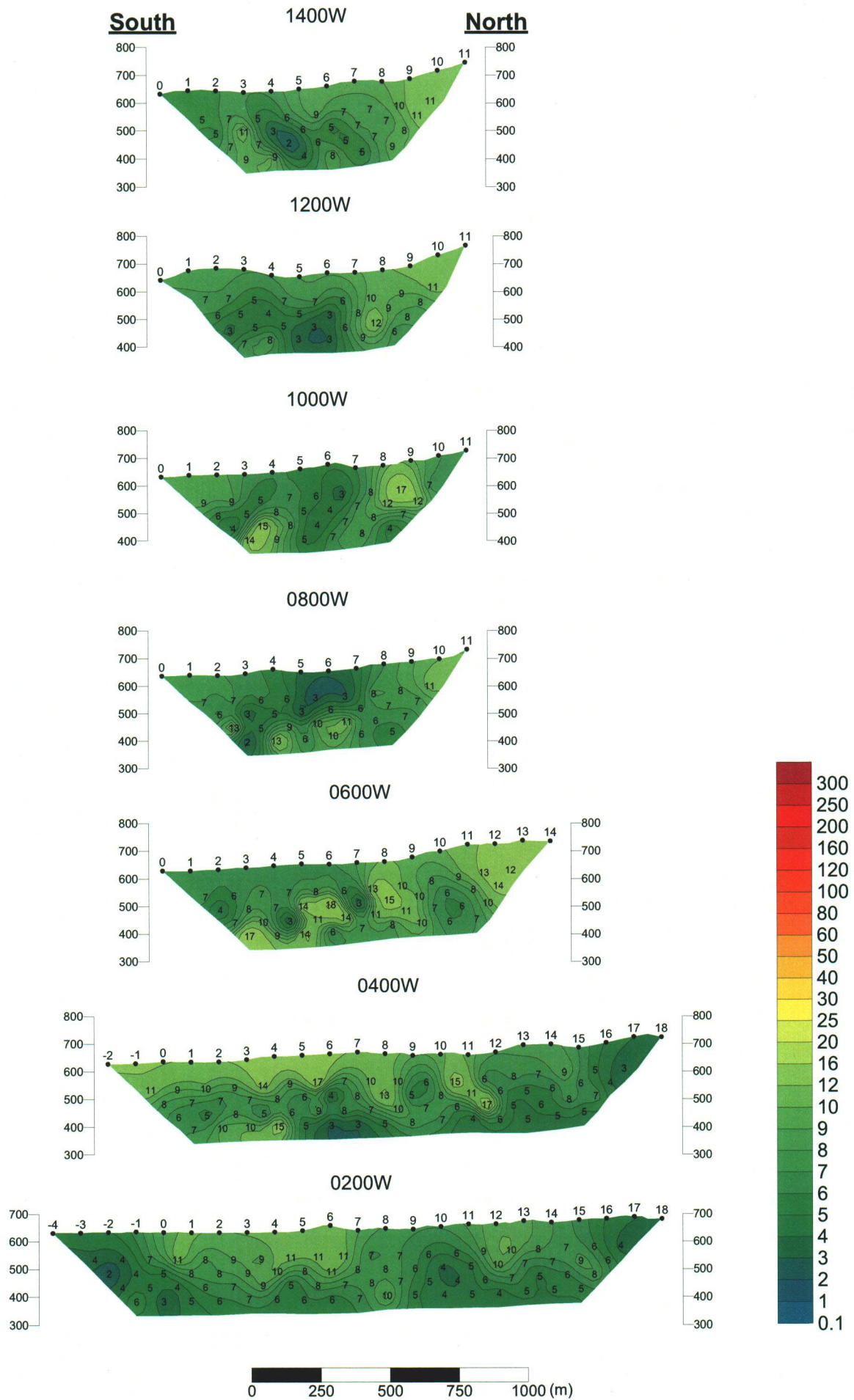


Fig. II -2-8(3) Metal factor pseudo-sections(1400W-0200W)