

高密度電気探査における電極配置

高倉伸一
(地質調査所)

Various electrode arrays in high-density electrical prospecting

Shinichi Takakura
(Geological Survey of Japan)

1. はじめに

土木や遺跡調査など比較的狭いエリアの浅部を対象とした地下構造の調査では、電極を稠密に配置する高密度電気探査が適用される機会が増えている。この理由として、詳細な地下構造を知りたいというニーズが高まったことと、高密度電気探査を効率よく実施する多チャンネル自動電気探査装置が商品化されたことがあげられる。

高密度電気探査は現状では断面構造の把握を目的とした2次元調査がほとんどである。3次元調査は理想であるが、測定や解析に膨大な労力や時間を必要とすることから、現在のハードウェアやソフトウェアでは対応が難しい。また、たとえ3次元構造が得られたとしても、それを立体的に表現あるいは理解することも難しい。現実には同じコストをかけるならば、大まかな立体図を出す3次元調査よりも精密な断面図が得られる2次元調査の利用価値が高いと考えるユーザーが多い。このようなことから、しばらくは2次元調査が主流と考えられる。

2次元の高密度電気探査を適用する場合の問題の一つは、電極配置の選択である。一般に2極法が選択されることが多い。これは、2極法は2つの電極を移動するだけであるので、3つの電極を移動する3極法や4つの電極を移動する4極法より測定の効率性がよく、自動測定にも適しているという理由によるところが大きい。また、2極法は3極法や4極法より探査深度が大きく、3極法や4極法のデータを計算により合成できるということも、その理由としてあげられる。

その一方、2極法は3極法や4極法に比較して、精度と分解能（結果の信頼性と解像度）が劣るという問題が指摘されている（たとえば、佐々木(1996); 羽竜(1997)）。また、2極法から合成された他の電極配置のデータは測定誤差が増幅されるので、一般に精度が悪い（たとえば、佐々木(1996); 高倉・松島(1997)）。しかも、2極法は互いに離れた2つの遠電極を用いることから、その設置に要する労力や時間を考えると、効率性が必ずしも4極法より高いとはいえない。比較的大深度を対象とする場合、限られた敷地内で探査する場合、モニタリングのような長期にわたる測定の場合など、遠電極を用いることが困難と考えられる状況も現実には多い。この問題は1つの遠電極を用いる3極法でも同様に起こる。

どのような電極配置を選択するかは、探査の効率性（経済性）や探査地の状況などに制約されるものの、本体なら目的とする探査に要求される深度や分解能や精度を考えて決められるべきである。そのためにも、各種電極配置の特性を知ることが必要である。そこで、筆者は数値実験を行い、高密度電気探査に適用しやすい2極法、3極

法、ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法の比較した。本論文では、その結果について報告する。なお、野外実験による比較を行ったが、その結果については別の機会に報告するつもりである。

2. 数値実験

2.1 分解能と探査の検討

数値実験では、まず各電極配置による探査の分解能と精度を比較するため、均質媒体中に10m×30mの2次元異常体が水平および垂直に埋設されているという単純なモデルを対象にした。モデルにおける測線長は240mで、電極は5m間隔に49本配置されている。また、水平に置いた異常体までの深度は15mであり、垂直に置いた異常体までの深度は5mである。均質媒体の比抵抗は100Ωmとし、異常体の比抵抗は10Ωmと低比抵抗の場合と、1000Ωmと高比抵抗の場合の2つを考えた。

比較の対象とした電極配置は、2極法、3極法、平均3極法、ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法、エルトラン法配置である。また、ダイポール・ダイポール法とエルトラン法にウェンナー法を組合わせた配置も対象とした。電極間隔は5mと基本とし、電極隔離係数は上述のモデルで実現できる範囲で考え、得られる信号レベルが低いものを排除するため、電極隔離係数は2極法では16まで、3極法では11まで、ダイポール・ダイポール法では6までとした。ダイポール・ダイポール法では探査深度を増やすため、電極間隔をいろいろと変化させた場合も対象とした。ウェンナー法とエルトラン法では電極間隔は5、10、20、40、80mとした。さらに、データ数が解析結果に及ぼす影響を考えるため、2極法配置については電極隔離係数が10までの場合を、ウェンナー法とエルトラン法配置では電極間隔が15mや75mなど実現可能なあらゆる電極組合わせを用いる場合も対象とした。電極間隔、電極隔離係数、データ数を第1表に示す。

解析では有限要素法により計算される各種電極配置に対する見掛比抵抗値に1%のノイズを加えたものをデータとし、インバージョンを実施した。インバージョンは最大10回の反復を行い、反復数が10回にあるいはデータと計算値との誤差が1%以下になった時点で計算を打ち切った。異常体が低比抵抗の場合のインバージョン結果を第1図に、異常帯が高比抵抗の場合の結果を第2図に示す。

第1図と第2図を比較すると、いずれの電極配置でも第1図の方が鮮明に異常体が再構成されていることがわかる。これは、高密度電気探査ではいずれの電極配置においても、低比抵抗異常体に対する感度の方が高比抵抗異常体に体する感度よりも高いとすることを意味している。

第1図の(2)、(4)、(5)、(7)を比較すると、対象が低比抵抗異常体の場合、2極法、3極法、平均3極法、ダイポール・ダイポール法の解析結果に大きな差異はないことがわかる。得られた異常体の鮮明さを比較すると、2極法は分解能はもっとも低いのが、異常体の周辺に生じる偽像の発生も少なく、もっともなめらかな結果が得られていると判断できる。一方、第2図の(2)、(4)、(5)、(7)を比較すると、対象が高比抵抗異常の場合、2極法や3極法より、平均3極法およびダイポール・ダイポール法の方が異常体が鮮明に再構成されており、分解能が高いと判断できる。

また、第1図および第2図の(3)をみると、データ数の少ない2極法の結果は不鮮明で、高比抵抗の水平異常体が元のモデルより約10mも深めに解析されていることが

わかる。第1図および第2図で(3)と(4)と比較すると、2極法の方が3極法より電極隔離係数は小さいものの、探査深度が深いことがわかる。第1図および第2図の(6)より、 $a = 5\text{ m}$ だけのダイポール・ダイポール法の結果は探査深度の不足が明らかである。以上のことは、2極法の探査深度が大きいこと、2極法はデータ数がダイポール・ダイポール法や3極法と同じ場合は分解能や精度が低いこと、ダイポール・ダイポール法では探査深度を増やすために電極間隔を広げる必要があることがわかる。

ウェンナー法は、低比抵抗の水平異常体に対する分解能が低いことがわかる。菅野・岸田(1996)によれば、ウェンナー法配置では水平方向の低比抵抗異方性構造で高い順感度が現れる。したがって、上述の結果はその感度分布とは矛盾しているようにも考えられるが、分解能と感度分布とは異なるものであると考えれば理解される。おそらく、ウェンナー配置では順感度の現れる範囲が広いため、等価の構造を作りやすく、このモデルのような構造では浅い垂直異常体に対する感度も重なり、水平異常体に対する分解能が低下したと考えられる。一方、エルトラン法については高比抵抗の垂直異常体への分解能がやや低い。ウェンナー法とエルトラン法でも、データ数を増やすことにより分解能は向上するが、本実験で実施したような電極組み合わせを実際に行うのは複雑すぎて現実的ではない。データ数は少ないものの、ウェンナー法とエルトラン法を組み合わせることで、比抵抗構造はよく再構成されるようになる。

2.2 ノイズの影響の検討

探査対象となる地域には、海や川や崖などの天然の障害物や建物や道路やフェンスなどの人工の障害物が存在することが多い。測線はできるだけ障害物から離して設置することが理想であるが、大きな探査深度を得るために障害物のすぐそばまで測線を設置することが実際には行われている。しかし、障害物も構造であり、ノイズとして解析結果に影響を及ぼすので、それを考慮することが必要である。そこで、上述のモデルの一方に層厚が20mで $10\Omega\text{ m}$ の低比抵抗層を加えたモデルを対象に数値実験を行い、測線の外側にある構造の影響が各電極配置にどのような影響を及ぼすかを検討した。比較の対象とした電極配置や数値実験方法は上述と同じである。ただし、データには加えるノイズは3%と上述の例より大きくした。また、解析の対象とする範囲は側方の異常体を含むように広げている。異常体が低比抵抗の場合のインバージョン結果を第3図に、異常帯が高比抵抗の場合の結果を第4図に示す。

第3図より低比抵抗異常体を対象とする場合、2極法、3極法、ウェンナー法の結果は第1図が示す結果と大きな差はない。また、側方の低比抵抗帯の存在も解析結果から把握することができる。一方、ダイポール・ダイポール法およびエルトラン法の結果は、低比抵抗異常体はよく構成されているものの、側方の低比抵抗帯が求まらず、深部に偽像が現れている。ウェンナー法を組み合わせることにより、偽像の発生を抑え、精度よく比抵抗構造が求まるようになる。

第4図より高比抵抗異常体を対象とする場合は、いずれの結果も第2図が示す結果より不鮮明となり、分解能が低下することがわかる。これは、高比抵抗異常体に対する感度が低比抵抗異常体に比べて低いので、加えたノイズの影響が大きく現れたと考える。また、ダイポール・ダイポール法とエルトラン法の結果は、第3図と同様に側方の低比抵抗帯が求まらず、深部に偽像が現れている。これも、ウェンナー法と組み合わせることにより解消する。

3. おわりに

本論文では、数値実験により高密度電気探査に適用する各種電極配置の特性を比較した。データ数が多い場合は、どの電極配置を選んでも基本的には差が少ないが、データ数を増やすことは探査にかかる労力や時間を上昇させることになる。自動電気探査装置を用いれば2極法や3極法の測定は簡単であるが、遠電極を設置できない場合がある。実際の探査においてはいろいろな条件を考慮しながら、想定される比抵抗構造に対してシミュレーションを実施して電極配置を決めることが重要である。

謝辞

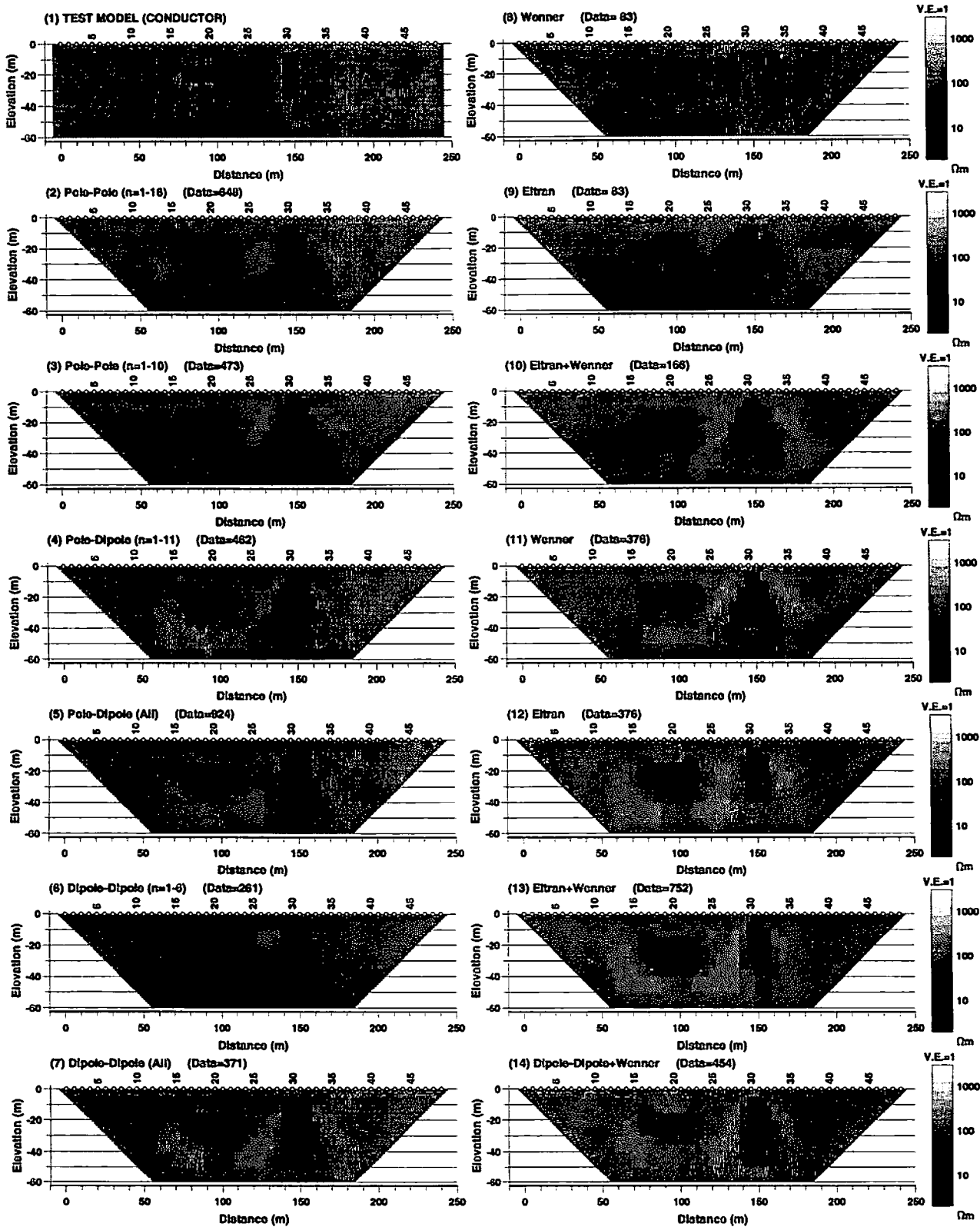
電気探査データの2次元解析では、九州大学の佐々木裕氏および地質調査所の内田利弘氏よりプログラムの提供を受けた。また、計算は工業技術院情報計算センターのCRAY C90で実施した。

参考文献

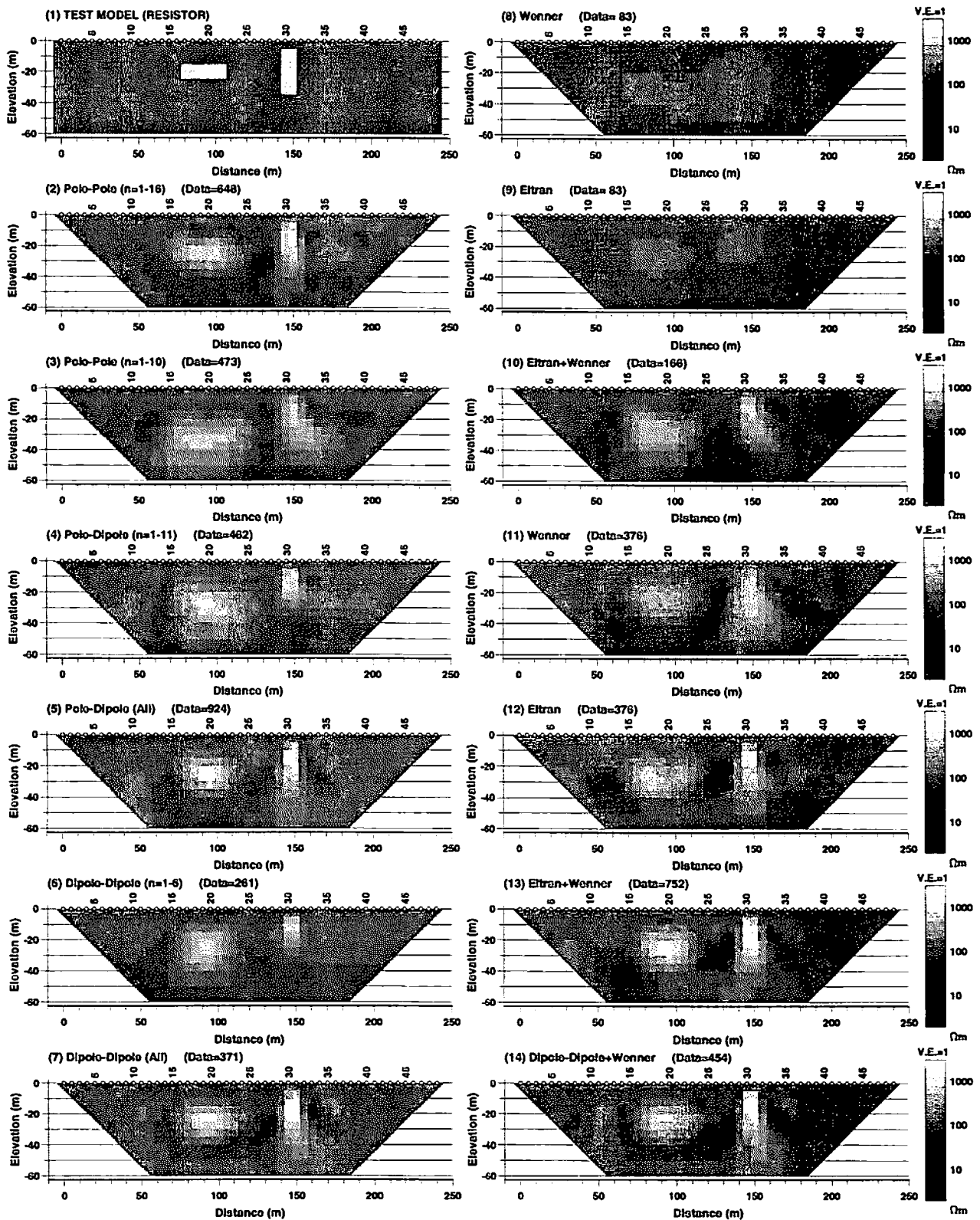
- 羽竜忠男(1997): 比抵抗法の逆解析における拡張ベイズ法の適用とその評価(その3) - 数値実験 -, 物理探査, 50, 423-443.
- 佐々木裕(1886): 佐々木裕(1996): 比抵抗法およびCSAMT法2次元探査の分解能と精度、応用地質、37、19-28.
- 菅野強・岸田隆行(1996): 比抵抗地盤計測結果再構成における電極配列効果の評価、応用地質、36-6、401-413.
- 高倉伸一・松島潤(1996): 電気探査における双方向型多芯ケーブルの利用と各種電極配置の比較、物理探査学会第95回学術講演会論文集、224-227.

第1表 数値実験に用いた電極配置の電極間隔と電極隔離係数とデータ数

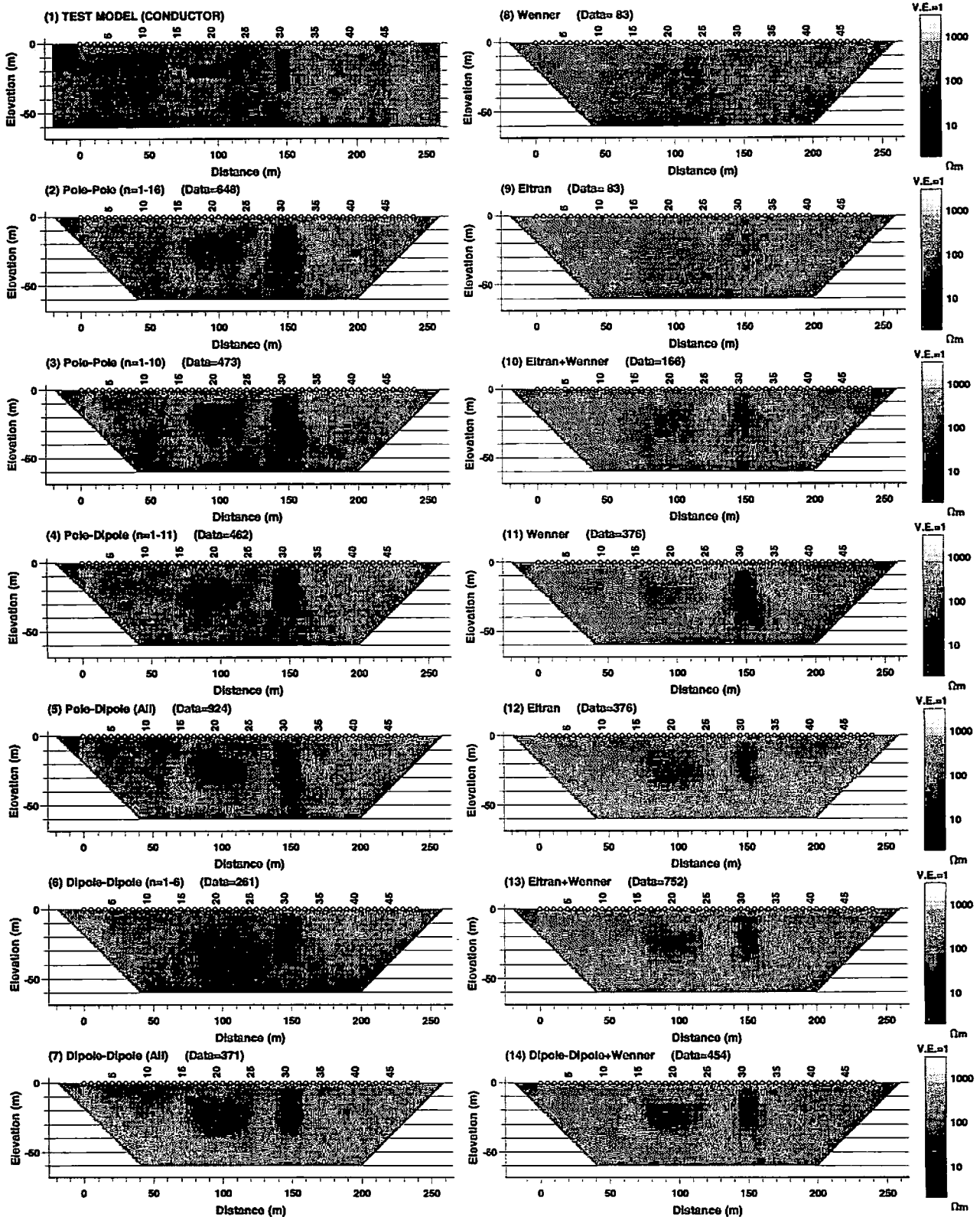
電極配置	電極間隔 (m)	電極隔離係数	データ数
(2) 2極法	5	1~16	648
(3) 2極法	5	1~10	473
(4) 3極法	5	1~11	462
(5) 平均3極法	5	1~11	924
(6) ダイポール・ダイポール法	5	1~6	261
(7) ダイポール・ダイポール法	5, 10, 20, 40, 80	1~5	371
(8) ウェンナー法	5, 10, 20, 40, 80	1	83
(9) エルトラン法	5, 10, 20, 40, 80	1	83
(10) (8)+(9)	5, 10, 20, 40, 80	1	166
(11) ウェンナー法	5, 10, 15, ..., 75, 80	1	376
(12) エルトラン法	5, 10, 15, ..., 75, 80	1	376
(13) (11)+(12)	5, 10, 15, ..., 75, 80	1	752
(14) (5)+(6)	5, 10, 20, 40, 80	1~5	454



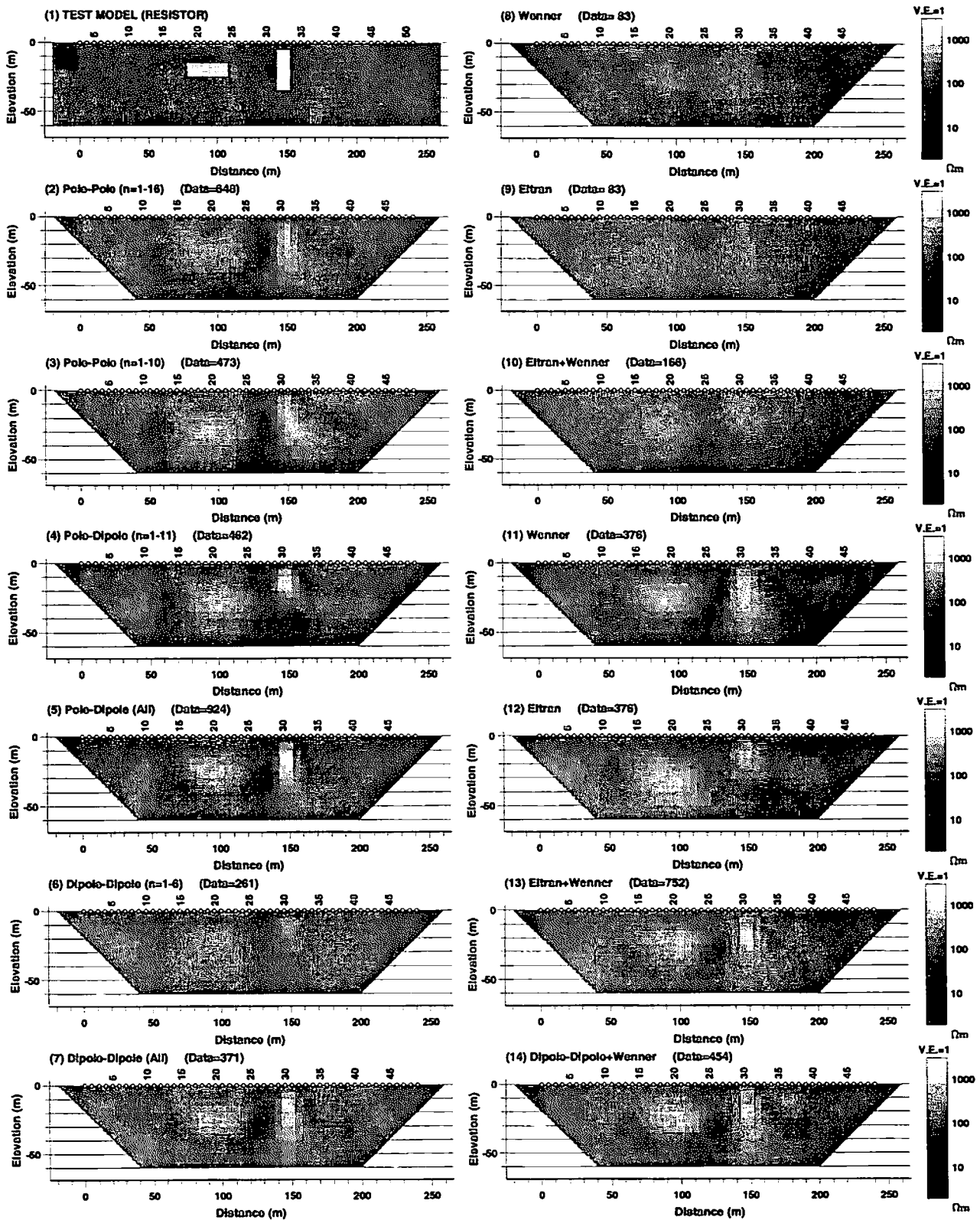
第1図 100Ω mの均質媒体中に10m×30mの10Ω mの2次元低比抵抗異常体が水平および垂直に埋設されているモデルに対する、各種電極配置を用いたインバージョン結果の比較。



第2図 100Ωmの均質媒体中に10m×30mの1000Ωmの2次元高比抵抗異常体が水平および垂直に埋設されているモデルに対する、各種電極配置を用いたインバージョン結果の比較。



第3図 100Ωmの均質媒体中に10m×30mの10Ωmの2次元低比抵抗異常体が水平および垂直に埋設されており、側方に厚さ20mで10Ωmの低比抵抗帯が存在するモデルに対する各種電極配置を用いたインバージョン結果の比較。



第4図 100 Ωm の均質媒体中に10m \times 30mの1000 Ωm の2次元高比抵抗異常体が水平および垂直に埋設されており、側方に厚さ20mで10 Ωm の低比抵抗帯が存在するモデルに対する各種電極配置を用いたインバージョン結果の比較。