比抵抗法および CSAMT 法 2 次元探査の分解能と精度

佐々木 裕*

Resolution and Accuracy of 2-D Resistivity and CSAMT Surveys

Yutaka SASAKI*

Key words : 2 極法配置 pole-pole array, 3 極法配置 pole-dipole array, ダイポール・ダイポール配置 dipole-dipole array, CSAMT 法 CSAMT method

Abstract

In 2-D resistivity surveys, it is important to use the electrode array yielding the highest resolution and accuracy. Although a number of studies have been done to examine the characteristics of various electrode arrays, it is not well known how the electrode array affects the resolution and accuracy of 2-D inversion. In this paper, the relationship between the electrode arrays and the accuracy of 2-D resistivity surveys is analysed through numerical simulation. In addition, the performances of 2-D resistivity and CSAMT methods are compared. It is shown that if the data accuracy is about the same, the dipole-dipole array is superior to the pole-pole and pole-dipole arrays. However, if the signal level is considered, the pole-dipole array gives the best result. It is also shown that the synthesis of pole-dipole data from pole-pole data is effective in improving the accuracy of 2-D inversion if the original pole-pole data have an relative error of about 1 %. Comparison of resistivity and CSAMT methods shows that CSAMT method may be superior to resistivity method in resolving vertically extending structures when the scale of exploration is relatively large. It is also expected that resistivity and CSAMT methods complement each other in defining the structures showing pseudo-anisotropy, such as fractured zones.

1. はじめに

比抵抗法および CSAMT 法 (controlled-source audio-frequency magnetotelluric method) 2 次元探査は、地表の測線上で計測したデータから測線下の比抵抗の 2 次元分布を求める地下探査法である。比抵抗法は直流電流を流して電位を測定するのに対し、CSAMT 法では人工的に発生させた平面波電磁界を測定する。いずれも 1980 年代から普及し始め、現在では金属鉱床、地熱等の資源開発をはじめ、トンネル・ダム・地すべり

・地下水等のさまざまな目的の調査に適用されるようになった^{1),2)}。この背景には、計算機と逆解析 (インバージョン) 手法の急速な発達によって、物性情報をわかりやすいカラー画像として視覚化できるようになり、探査結果の信頼性が向上したことが挙げられる。このように比抵抗法も CSAMT 法も地下の可視化のための有力な一手法として期待されている。しかし、地下の可視化技術として名実ともに発展していくためには、高精度化への要求に応えなければならないであろう。

2 次元探査の高精度化を図るためには、地下からの信号 (情報) をできるだけ多く含んだデータを高密度にサンプリングするとともに、信号を忠実に抽出できる解析

* 九州大学工学部 Faculty of Engineering, Kyushu University

手法を用いることが必要である。したがって、比抵抗法においては最適の電極配置を選ぶことは極めて重要であると考えられる。電極配置は精度の良いデータを効率的に取得する上で重要であるだけではない。逆解析におけるモデルパラメータの独立性¹⁾を改善し、解析結果の信頼性を向上させるという観点からも考慮すべきであろう。これまで個々の電極配置の探査特性については数多くの研究が行われてきた³⁾。しかし、2次元逆解析における電極配置と解析精度との関係が検討されるようになったのは最近のことであり⁴⁾⁵⁾、電極配置の特長や優劣について必ずしも一致した見解が得られているとは言えない。

本論文では、代表的な3種類の電極配置を取り上げ、電極配置が比抵抗法2次元探査の分解能および精度にどのように関係するかを数値実験によって具体的に示すとともに、CSAMT法との比較も併せて行う。

2. 比抵抗法とCSAMT法

比抵抗法により地盤の比抵抗を求めるには、1対の電極間に既知の直流電流を通じ、もう1対の電極間の電位差を測定する。代表的な3つの電極配置を図-1に示す。図中のCは電流供給用電極を、Pは電位差測定用電極を表す。2極法配置ではC₂とP₂は遠方に置く。同様に3極法ではC₂を遠方に置く。ダイポール・ダイポール法では、電極対（ダイポール）の間隔は一般にダイ

図-1 比抵抗法の電極配置

ポール長 d の整数倍であり、整数 n を隔離係数と呼んでいる。C₁とC₂間に流れる電流を I 、P₁とP₂間の電位差を V とすると、不均質な地盤に対する見かけ比抵抗 ρ_a は(1)式により表される。

$$\rho_a = 2\pi K \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここに K は電極配置係数で、

$$K = 1 / \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} \right) \quad (2)$$

である。

CSAMT法では図-2に示すように、両端接地型の線電流アンテナ（電気ダイポール）から周波数 f の電磁波を発信し、そこから数km離れた測線上において、直交する電場 E と磁場 H を測定する。受信された電磁界が平面波であるとする、地盤の見かけ比抵抗は(3)式で表される。

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu} \frac{|E|^2}{|H|^2} \quad (3)$$

ここに μ は透磁率である。周波数をいろいろ変えることにより、広範囲の探査深度が得られる。電磁波の透入深度の目安として、(4)式で与えられる δ が用いられる。

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (4)$$

この δ は表皮深度と呼ばれ、電場の強さが $1/e$ になる深度である。平面電磁波の条件を満足するためには、アンテナは測線から 3δ 以上離して置く必要がある。

3. 逆解析

2次元逆解析では、地盤断面を多数の矩形セルに分割

図-2 CSAMT法の測定概念図

した離散化モデルを設定し、初期推定モデル $m^{(0)}$ から出発して(5)式を最小にするモデルを反復改良により探索する。

$$U = \|(\Delta d + A m^{(r)}) - A m^{(r+1)}\|^2 + \lambda \|C m^{(r+1)}\|^2 \quad (5)$$

ただし、 A : ヤコビアン行列

C : ラプラシアン行列

Δd : 測定値と計算値の残差ベクトル

$m^{(r)}$: 反復 r 回目のモデルパラメータ

$m^{(r+1)}$: 反復 $(r+1)$ 回目のモデルパラメータ

$\|\cdot\|^2$: 二乗和 (L_2 ノルム)

(5)式の第1項は残差二乗和であり、第2項は比抵抗構造の滑らかさを与える制約条件である。 λ は両者の比率を定める重み(平滑化係数)である。データへのあてはめの度合いは、(6)式のRMS平均残差で評価する。

$$R = \left\{ \sum_{i=1}^N (\ln \rho_{a_i}^t - \ln \rho_{a_i}^c)^2 / N \right\}^{1/2} \quad (6)$$

ただし、 $\rho_{a_i}^t$: 測定見かけ比抵抗値

$\rho_{a_i}^c$: 計算見かけ比抵抗値

N : 全データ数

4. 2次元モデルによる数値実験

4.1 比抵抗法

実験で用いた2次元モデルを図-3に示す。比抵抗100 Ωm の地盤中に10 Ωm の低比抵抗脈が縦方向に多数(7本)発達し、その上部を200 Ωm の表土層が覆っている。地表の $0 \leq X \leq 50$ の区間に51点の電極が配列されている。図のスケールは最小電極間隔を単位長として表示している。比較した電極配置は図-1に示した2極法、3極法、ダイポール・ダイポール配置である。

各配置に対する見かけ比抵抗データの計算は有限要素法により行い、計算値には標準偏差5%の正規乱数(ノイズ)を人為的に加えた。2極法配置では最大の電極間隔は $a=24$ とし、データ総数は924である。3極法ではダイポール長は $d=1$ と $d=2$ の2通りとし、隔離係数の最大値は $n=11$ 、データ数は891である。ダイポール・ダイポール配置ではダイポール長は $d=1$ と $d=2$ 、最大隔離係数は $n=10$ であり、データ数は620である。

逆解析では $-23 \leq X \leq 73$, $0 \leq Z \leq 36$ の範囲を395個の矩形セルに分割した。この外周領域は均質地盤と仮定し、その比抵抗(以下、バックグラウンド比抵抗と呼ぶ)を30 Ωm に固定した。いずれの電極配置に対しても、セル比抵抗の初期値は80 Ωm とした。反復回数は5回

図-3 2次元モデル

であり、各反復毎に用いた平滑化係数 λ は4.0, 1.0, 0.3, 0.2, 0.1である。2極法、3極法、ダイポール・ダイポール法の解析結果を図-4に示す。図-3と図-4を比較するとモデルの再現性はダイポール・ダイポール法が最も良く、続いて3極法、2極法の順である。ダイポール・ダイポール法と3極法の解析結果は類似しており、いずれも深度8ユニットあたりまで低比抵抗脈が分離されている。一方2極法では、測線中央部以外では低比抵抗脈が明瞭に現れておらず、測線の両端周辺の精度の低下が著しい。

図-4に対応する平均残差はそれぞれ0.051, 0.051, 0.050であり、与えたノイズのレベル5%にいずれも収束している。2極法とダイポール・ダイポール法の見かけ比抵抗(水平探索)曲線の一部をそれぞれ図-5と図-6に示す。“測定”値は丸、計算値は実線で示した。ダイポール・ダイポール法では、低比抵抗脈が等間隔で存在することに対応した見かけ比抵抗の周期的な凹凸が比較的是っきりと認められる(特に $n=7, 8, 9$)。一方、2極法ではそれが明瞭ではない。このように目視からも両者の分解能の違いを推測することができる。

電極配置による分解能・精度の違いは各配置の感度分布の特性からも考察できる。ここで感度とは、地下のある部分の比抵抗を変化させたときの測定値(見かけ比抵抗)の変化割合を表し、地下を微小な単位セルに分割して各セルの中心に感度を表示したものが感度分布である。各配置の感度分布を図-7に示す。図では負(逆)感度の領域を(−)で示した。ダイポール・ダイポール法と3極法では感度の高い領域が電極系の下方に比較的限制して分布している。感度が電極系の下方に最も集中しているダイポール・ダイポール法が最も高い分解能を示すと考えられる。一方、2極法では感度分布の拡がり特に大きいことが特徴である。したがって、2極法の測定値は地下のより広い範囲の比抵抗分布を反映していると言える。このことから、2極法に関する次のような特徴を指摘することができる。

(1) 探査深度が最も大きい。

(2) 深度方向ばかりでなく、電極の側方の比抵抗分布の影響も最も大きい。したがって、測線の端

図-4 比抵抗法の逆解析結果

周辺において解析精度が低下する範囲が広い。

- (3) 測定値はより広い範囲にわたって平均化効果を受けているから、逆解析において、モデルパラメータ相互の独立性が他の配置の場合よりも低くなる。

上記の実験では測定電位の大小に関係なく見かけ比抵抗の標準偏差を5%と仮定した。これは、見かけ比抵抗データの測定誤差は一般に見かけ比抵抗値の一定のパーセントで表されるとされている^{6)~8)}ことに基づいている。しかし、測定電位がノイズレベルの近くまで下があれば誤差は増大するから、電位の大きさも考慮しなければなら

ない場合が多い。各電極配置に対する（単位電流当りの）電位の頻度分布を図-8に示す。ただし、電位は単位長を1mとして計算した（単位長が10mの場合は1/10倍になる）。電位は2極法が最も大きく、ダイポール・ダイポール法が最も小さいことがわかる。したがって、ダイポール・ダイポール法では測定器の性能（主に最大送信電流）やノイズ環境、電極の展開法（例えばダイポール長の変更）について特に考慮しなければならず、測定の作業性が低くなるという欠点がある。これに対して、3極法では測定電位は比較的大きく、しかも解析結果はダイポール・ダイポール法のそれに近いことか

図-5 2極法の見かけ比抵抗(水平探査)曲線

図-6 ダイポール・ダイポール法の見かけ比抵抗(水平探査)曲線

図-7 比抵抗法の感度分布

ら、3極法の方が実用性が一般に高いと考えられる。

4.2 CSAMT法

比抵抗法の場合と同じモデルについてCSAMT法の数値実験を行った。ただしモデルの単位長は25mとする。50m間隔で25点の測点が配置されている。送信周波数は16Hzから8192Hzまでの10通り(2^n ; $n=4, 5, \dots, 13$)である。見かけ比抵抗と位相データの計算は平面波を仮定して有限要素法で行い、計算値には標準偏差5%の正規ノイズを加えた。2次元逆解析では、80Ωm

図-8 単位電流当りの測定電位 (mV/mA) の頻度分布

の均質地盤を初期モデルとして、4回の反復で平均残差が0.049に収束した。逆解析の結果を図-9に示す。深度150mあたりまでは低比抵抗脈がかなり明瞭に捉えられている。比抵抗法とCSAMT法とでは、測点密度等のデータ取得条件、セル数等の解析条件が異なるので、この実験結果から分解能・精度に関する優劣を単純には比較できないが、探索スケールが大きければCSAMT法が一般に有利であると考えられる。

比抵抗法とCSAMT法の解析結果を比べたとき、注目すべき相違点は深部における平均比抵抗値である。比抵抗法で求めた深度8ユニット以深における比抵抗の最小値は14~17Ωmであるが、CSAMT法ではこれよりかなり高く61Ωmとなっている(図-4と図-9とでは比抵抗濃淡スケールが異なる点に注意されたい)。これは、低比抵抗脈が発達した領域が疑似異方性⁹⁾を示すためと考えられる。深度が増すにつれ隣接する低比抵抗脈は地表探査からは分離できなくなり、実質的には一つの均質な領域が存在するのと同等になる。この領域は、

図-9 CSAMT法の逆解析結果

図-10 水平成層モデルに対する比抵抗法の逆解析結果

低比抵抗層と高比抵抗層の互層になっているので、垂直方向と水平方向では比抵抗が異なる。CSAMT法では電流は水平方向が卓越するのにに対し、比抵抗法では水平、垂直方向がともに混在する。したがって実験モデルのような場合は、電流が比抵抗境界面と直交する割合が高いCSAMT法がより高い比抵抗を示す。このような探査特性の違いを利用すれば、2つの手法を併用することで断層破砕帯や亀裂帯等に対する探査能力を向上できる可能性がある。

5. 水平成層モデルに対する電極配置の比較

電極配置による探査能力の違いをさらに確認するため、水平成層モデルについて数値実験を行った。水平成層構造に対しては1次元解析を行うべきであるが、2次元逆解析を行う意義はモデル計算の精度も含めた逆解析の特性を確認できる点にある。成層構造に対する理論見かけ比抵抗値はリニアフィルタ法¹⁰⁾により計算できる。実験で用いた3層モデルの層比抵抗および境界深度は以下の通りである。

$$\rho_1=200\ \Omega\text{m},\ \rho_2=20\ \Omega\text{m},\ \rho_3=200\ \Omega\text{m}$$

$$h_1=2,\ h_2=6$$

電極展開は前節の場合と同じである。2極法、3極法、ダイポール・ダイポール法に対する2次元逆解析の結果を図-10に示す。反復はいずれも4回であり、最終の平均残差はそれぞれ0.010, 0.017, 0.023である。いずれの電極配置でも3層構造は再現されたが、層境界が最もはっきりと現れたのはダイポール・ダイポール配置である。2極法では比抵抗が緩やかに変化している。

図-11は各配置の見かけ比抵抗（垂直探査）曲線であり、図の横軸は電極間隔 a である（図-1参照）。なお3極法の見かけ比抵抗曲線はシュランベルジャ法の曲線とはほぼ一致する。第2層に対応する見かけ比抵抗の極小値はダイポール・ダイポール法が34 Ωm と最も低く、2極法が70 Ωm と最も高い。これは各配置の分解能を示唆しており、逆解析の結果ともよく対応している。

6. 電位合成の精度

2極法の特長の一つは、遠電極を設置してしまえば作業性が良いことである。現在市販されている多点（多成分）測定装置の多くも2極法用で作られている。また、2極法の電位データを組み合わせると他の電極配置のデータを合成できるという利点がある。そこで測定だけは2極法で行い、解析では他の配置の合成データを用いることが考えられる。しかしその場合には、データ

図-11 水平成層モデルに対する見かけ比抵抗（垂直探査）曲線

の合成に伴い測定誤差がどのように波及するかが問題になる。

前述の2次元モデルに対する2極法データ（標準偏差5%）から3極法とダイポール・ダイポール法の見かけ比抵抗データを合成した。その結果、合成データの平均誤差は3極法が46%、ダイポール・ダイポール法が84%に達した。特にダイポール・ダイポール法では全データの14%が負の値を示した。このようなデータを解析しても良い結果は期待できない。

次に、2極法データの標準偏差を1%に低下させて同様の実験を行った。平均誤差は3極法が8%になり、ダイポール・ダイポール法では36%になった。これら2極法データおよび合成データに逆解析を適用した結果を図-12に示す。2極法の解析結果は、ノイズレベルが5%の場合（図-4）と比べてわずかに改善されただけである。反復5回で平均残差が0.020となったが、実際のノイズレベル1%にまで達していない。これは、バックグラウンド領域の比抵抗分布が実際には不均質である（低比抵抗脈と表土層がある）のに、均質なバックグラウンドを仮定したことに起因する。一方、3極法データの解析断面図では低比抵抗脈がほぼ再現された。ダイポール・ダイポール法の解析では、データ合成に伴うノイズの増幅のために、深度6ユニット以深の精度が良くない。

以上の実験結果から、2極法配置により標準偏差1%程度の良質のデータが取得できれば、他の電極配置のデータを合成して解析することは有効であると言える。た

図-12 2極法データと電極合成データの逆解析結果

だし、ダイポール・ダイポール法では電極間隔が大きくなるにつれ測定誤差が相当に増幅するので、合成データの選別が必要である。

上記の実験で3極法データの解析結果が最も良かった理由は、合成した3極法データに最も多くの情報が含まれているからでは無論ない。合成データから得られる情報のすべては2極法配置のデータに含まれている¹⁾。3極法データに変換することにより信号が強調され、さらに測線側方の比抵抗構造やバックグラウンド比抵抗の影響が大幅に低減される。その結果、モデルパラメータの独立性が改善され、逆解析の信頼性が向上したと考えられる。

7. 結論

2次元逆解析の数値実験を通して、2極法、3極法、ダイポール・ダイポール法およびCSAMT法の探査能力を比較し、以下のような結論を得た。

- (1) データの精度が同等であれば、比抵抗法の中ではダイポール・ダイポール法が分解能、精度ともに最も優れ、続いて3極法、2極法の順である。しかし、ダイポール・ダイポール法は最も小さい信号を扱う必要があり、測定の作業性が劣るという欠点がある。3極法はダイポール・ダイポールに近い解析精度が得られ、しかも信号も比較的大きいので、ダイ

ポール・ダイポール法よりも実用性が高い。

- (2) 2極法による測定電位から他の電極配置の見かけ比抵抗データを合成すると測定誤差は相当に増幅される。しかし、2極法データの精度が良好であれば、他の電極配置（特に3極法）のデータを合成して解析を行った結果は、2極法のデータをそのまま解析した場合よりも良好である。
- (3) 比抵抗法とCSAMT法では測定条件が異なるので単純には比較できないが、探査スケールが比較的大きい場合はCSAMT法が優れている場合があると考えられる。また、比抵抗法とCSAMT法とは電流の卓越方向が異なるので、亀裂帯のような広義の異方性領域が存在すると、異なる比抵抗値を示す。したがって、2つの手法を併用することで、一定の方向に発達した亀裂帯や断層破碎帯を把握できる可能性がある。

謝辞 初稿を改善するうえで査読者のご教示、ご意見は大変有益であった。紙面をお借りして厚く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹 (1995) : 建設・防災・環境のための新しい電気探査法—比抵抗映像法, 古今書院, 206p.
- 2) 松井 保 (1993) : 高密度電気探査技術とトンネル地盤調査への適用性, 地下空間利用シンポジウム1993論文集, pp. 37-48.
- 3) WARD, S. H. (1990) : Resistivity and induced polarization methods, in Ward, S. H. ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol. 1, Soc. Expl. Geophys., Tulsa, pp. 147-190.
- 4) SASAKI, Y. (1992) : Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, Geophys. Prosp., Vol. 40, pp. 453-463.
- 5) 鈴木浩一 (1994) : 比抵抗法における効果的な電極配置について, 物理探査学会第90回学術講演論文集, pp. 309-314.
- 6) RIJO, L., PELTON, W. H., FEITOSA, E. C., and WARD, S. H. (1977) : Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brazil, Geophysics, Vol. 42, pp. 811-822.
- 7) TRIPP, A. C., WARD, S. H., SILL, W. R., SWIFT, Jr., C. M., and PETRICK, W. R. (1978) : Electromagnetic and Schlumberger resistivity sounding in the Roosevelt Hot Springs KGRA, Geophysics, Vol. 43, pp. 1450-1469.
- 8) 羽竜忠男・菅 公男 (1991) : 地形に対して柔軟な比抵抗及びリフラクションインバージョン (その2)—最小二乗法による比抵抗インバージョン—, 物理探査学会第84回学術講演会論文集, pp. 241-245.
- 9) 菅野 強 (1992) : 立体電極配列法電気探査の基礎概念 (II)—地下情報計測における予測設計とその評価—, 物理探査, Vol. 45, pp. 421-435.
- 10) O'NEILL, D. J., and MERRICK, N. P. (1984) : A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, Geophys. Prosp., Vol. 32, pp. 105-123.

(1995年8月21日受付, 1995年11月15日受理)