

{ 農工研技報 204 }
 { 281 ~ 286, 2006 }

比抵抗法 2次元探査における新しい3次元地形補正法

中里裕臣*・井上敬資*・中西憲雄*・汪 振洋**

目 次

緒 言	281	結 言	284
2次元解析に対する3次元地形の影響	281	参考文献	284
新しい3次元地形補正法の提案	282	Summary	286

緒 言

近年、電気探査の2次元探査・解析手法は実用段階に達し、建設・土木分野における適用事例が増加している。しかし、探査測線は工事計画に従い、構造物の長軸方向やそれに直交する方向に設定されるため、2次元解析の前提である地形や地下構造の2次元性 - 探査測線及び解析断面に直交する方向には変化しない - は必ずしも保証されておらず、電気探査の適用上の問題点となっている(中里ら, 2003; 今村・福岡, 2004)。このような問題点は3次元探査・解析を行うことによって解決されるが(佐々木ら, 2005), 地表に多量の電線・電極を設置する電気探査による3次元探査には探査労力とコストの面で問題があり、実施例は極めて少ない現状にある。

本研究では、比抵抗法2次元探査の精度向上を目的として、データ取得は2次元探査によって行い、解析結果への影響が明らかな地形の3次元性について3次元モデリングによってその影響を把握し、2次元探査結果を補正する新手法を提案し、従来法との比較によりその特性を明らかにする。

なお、韓国釜慶大学金 喜俊教授には比抵抗法3次元モデリングプログラムを提供いただいた。ここに感謝申し上げます。

2次元解析に対する3次元地形の影響

比抵抗の大地の表面に点電流源Pを置き、電流*i*を流したとき、地表面が平坦な場合のPから距離*r*の点Qの電流密度は*i*/(2 r^2)である。点Pの周辺の地形が凸状であれば電流密度は大きくなることから、点Qにおける電位

*造構部広域防災研究室

**「早稲田大学理工」

平成18年1月18日受理

キーワード：比抵抗法2次元探査, 3次元地形補正, 逆解析, 有限要素法, 偽像

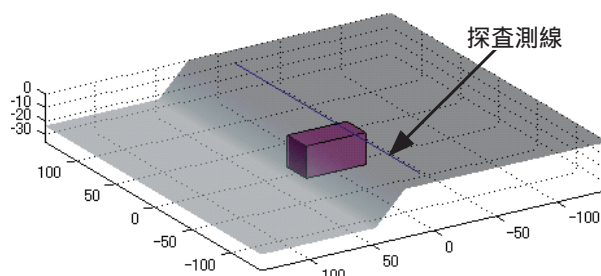


Fig. 1 数値計算地形モデル

3-D topographical model used to generate the synthetic data.

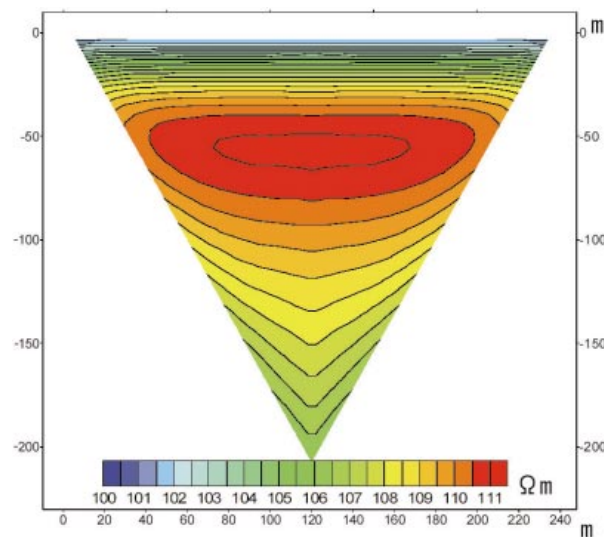


Fig. 2 3次元地形の見かけ比抵抗への影響

Influence of 3-D topography on apparent resistivity

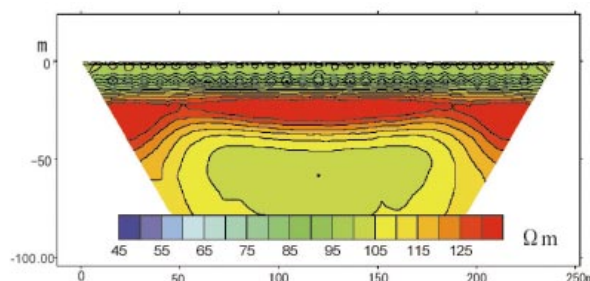


Fig. 3 Fig.2データの2次元逆解析結果

2-D inverted resistivity section with data of Fig.2

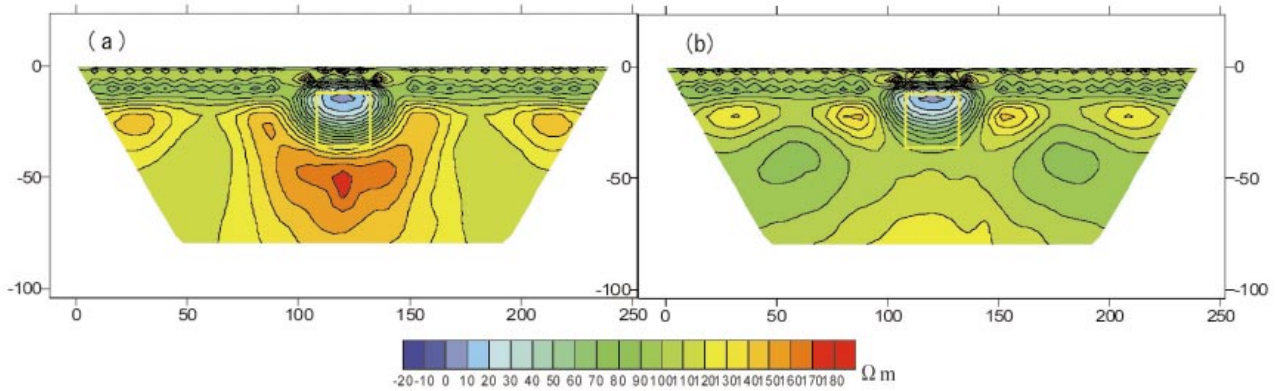


Fig. 4 Fig.1の低比抵抗異常モデルに対する未補正2次元解析結果 (a) と3次元地形補正結果(b)の比較

Comparison between the 2-D inverted section from the low resistivity anomaly model of Fig.1 without topographical correction(a) and that with 3-D topographical correction(b)

は平坦地形より大きくなり、凹状地形の場合はその逆となる。これが電位分布に対する地形の影響であり、地盤の比抵抗が一定であっても電極周辺の地形によって観測される電位差は変化する。したがって、電気探査によって観測された電位差から地下の比抵抗分布を解析するためには、電極周辺の地形による電位分布の変化を考慮する必要がある。

現在普及している比抵抗法2次元探査では、逆解析のフォワード計算において、測線沿いの地形を含む解析断面を小領域に分割し、有限要素法によって電流源毎の電位分布を計算するのが一般的であり、測線沿いの地形の影響が考慮された解析結果が得られる。しかし、この手法では探査測線の側方の地形の影響は考慮されず、その影響は2次元解析結果の比抵抗断面図上の「偽像」として現れる(佐々木, 1993)。

ここではまず2次元探査データに対する3次元地形の影響を評価するため、2次元探査測線に対して3次元的な崖地形を持つ地盤モデルを想定した(Fig.1)。電極間隔は4mであり、電極数61点である。この探査測線について、四面体要素を用いた有限要素法による比抵抗法3次元モデリングプログラム(Pridmore et al., 1981; Sasaki, 1994)を用いて、2極法探査データを計算した。平坦地形で均質地盤モデルにおける本プログラムの計算値の離散化誤差は±3%以内であるが、以下の3次元地形や比抵抗異常を有するモデルの数値シミュレーションでは、均質地盤モデルの計算値を補正係数とした正規化処理(Dey and Morrison, 1979; 佐々木, 1993)を行った。

Fig.2は、Fig.1のモデルにおいて100 mの均質地盤である場合の見かけ比抵抗擬似断面図である。崖地形のない場合の見かけ比抵抗は全て100 mであるため、見かけ深度50m付近に生じている最大+11%に及ぶ見かけ比抵抗異常が3次元的な崖地形による2次元探査データへの影響となる。このデータを2次元逆解析プログラム

(金ら, 1996)によって逆解析すると、100 mの真値に対して30%以上の高比抵抗部が解析された(Fig.3)。この高比抵抗部は3次元地形の影響による偽像であり、この結果は佐々木(1993)と同様に、2次元探査の探査精度向上には測線周辺の3次元地形の影響の補正が必要であることを示す。

新しい3次元地形補正法の提案

Fox et al.(1980)や島(1992)は、現地で観測される見かけ比抵抗値は地下の比抵抗分布のみによる成分と地形の影響の成分の合成値からなると考え、2次元探査における2次元地形補正法として、地形を有する比抵抗の均質地盤モデルについて、探査データと同じ電極配置の見かけ比抵抗 (i) を有限要素法2次元モデリングプログラムにより計算し、

$$C(i) = \frac{f(i)}{f(i)} \quad (1)$$

を地形補正係数として求める手法を提案した。 (i) に含まれる離散化誤差を正規化する場合は、比抵抗の平坦大地モデルについて見かけ比抵抗 $f(i)$ を計算し、

$$C(i) = \frac{f(i)}{f(i)} \quad (2)$$

となる。さらに見かけ比抵抗 a は次式

$$a = G \times V / I \quad (3)$$

ここにG: 電極配置係数, V: 電位差,

I: 通電電流値

で示されるため、ある測定値に対する地形補正係数は、ある比抵抗の均質2次元地形モデルの計算電位差 $V_{mod2D}(i)$ とある比抵抗の均質平坦モデルの計算電位差 $V_{flat2D}(i)$ を用いて

$$C(i) = V_{flat2D}(i) / V_{mod2D}(i) \quad (4)$$

とかける。したがって、観測電位差 $V_{meas}(i)$ と地形補正結果となる地形によらない電位差成分 $V_{cor2D}(i)$ の関係は以下のように示される。

$$V_{cor2D}(i) = C(i) \times V_{meas}(i) \tag{5}$$

$$= V_{flat2D}(i) / V_{mod2D}(i) \times V_{meas}(i)$$

3次元地形補正法には、Fox et al.(1980)や島(1992)の2次元地形補正法を拡張したHolcombe and Jiracek(1984)、今村・福岡(2004)の方法があり、個々の探査データについて式(6)で示される。

$$V_{cor3D}(i) = V_{flat3D}(i) / V_{mod3D}(i) \times V_{meas}(i) \tag{6}$$

ここに $V_{cor3D}(i)$ ：3次元地形によらない電位差成分
(地形補正值)

$V_{flat3D}(i)$ ：ある比抵抗の3次元平坦均質モデルの計算電位差

$V_{mod3D}(i)$ ：ある比抵抗の3次元地形均質モデルの計算電位差

この補正手法による3次元地形の影響の補正状況を確認するため、Fig.1の地盤モデルに24m×24mの断面と50mの長さを持つ低比抵抗異常(5 m)が測線中央部の深度12m以下に分布する場合の2次元探査データ($V_{meas}(i)$)を3次元モデリングプログラムによって計算した。そして、Fig.2の見かけ比抵抗算出に用いた計算電位差($V_{mod3D}(i) / V_{flat3D}(i)$)の逆数を3次元地形補正值として補正データ($V_{cor3D}(i)$)を作成し、2次元逆解析プログラムで逆解析を行った。3次元地形補正を行わず直接 $V_{meas}(i)$ について2次元逆解析を行ったFig.4(a)では、低比抵抗異常(図中の白四角)は解析されているものの、その下位には崖地形の影響に起因する高比抵抗異常が偽像として解析されている。一方、3次元地形補正を行ったFig.4(b)では大きな高比抵抗異常が無くなり、おおむね測線下の地下構造が解析されている。Fig.4の結果から従来の3次元地形補正法により3次元地形の影響が軽減できることが確認できた。

次に、電極間隔2m、電極数31点の測線沿いに起伏のある3次元地形モデル (Fig.5) について同様の検討を

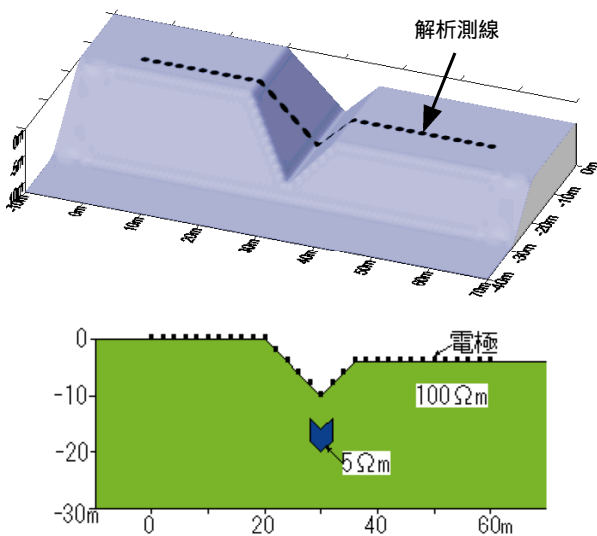


Fig. 5 数値計算地形モデル

上:地形鳥瞰図, 下: 解析測線断面の比抵抗モデル

3-D topographical model used to generate the synthetic data.

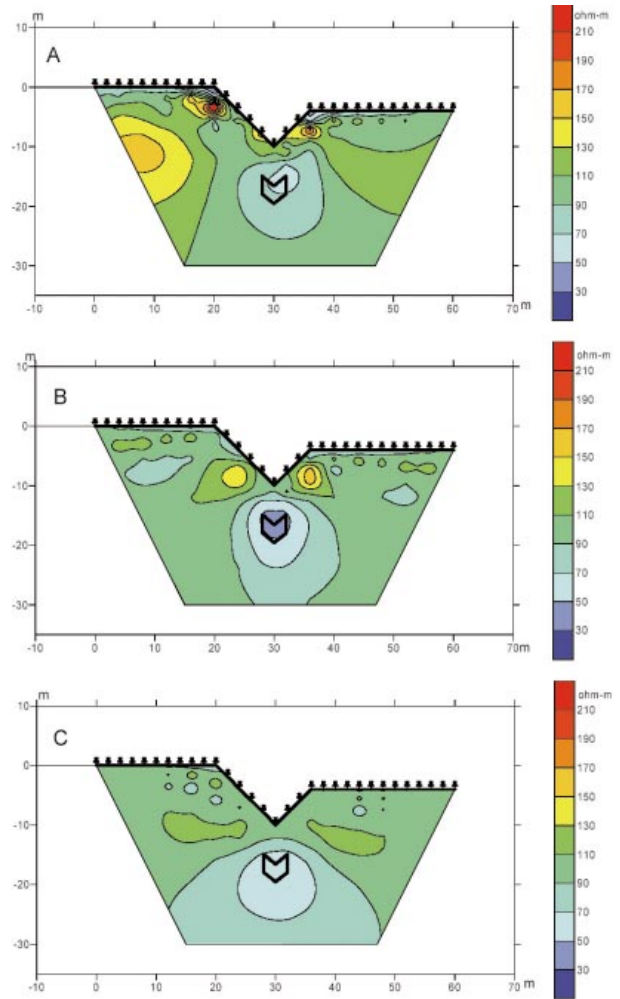


Fig. 6 3次元地形モデルに低比抵抗異常がある場合の2次元解析結果の比較, A: 3次元地形未補正, B: Holcombe and Jiracek(1984)による補正法, C:本研究による補正法

Comparison of 2-D inverted section from 3-D topographical model with a low resistivity anomaly, A: no 3-D topographical correction, B: correction method of Holcombe and Jiracek(1984), C: New correction method of this study

行った。ここでHolcombe and Jiracek(1984)の方法による補正データは平坦地形に対するものとなり、2次元解析結果は平坦地形における比抵抗分布図として得られる。このため、特にトンネル調査などで、ある深度や標高の比抵抗分布を把握する際には地形を含めた比抵抗分布図を作成する工程が生じるとともに、解析比抵抗ブロックのZ座標を地形に応じて比例配分して得られる比抵抗分布図の精度低下が懸念される。

そこで、本研究では有限要素法2次元モデリングプログラム(金ら, 1995)により、個々の探査データについて測線沿いの2次元地形を与えた均質大地の計算電位差 $V_{mod2D}(i)$ を計算し、次の式

$$V_{cor3D2D}(i) = V_{mod2D}(i) / V_{mod3D}(i) \times V_{meas}(i) \tag{7}$$

により測定値から3次元地形の影響のみを除いた純2次

元地形における2次元解析用補正測定値 $V_{cor3D2D(i)}$ を得る手法を提案する。 $V_{cor3D2D(i)}$ データは測線沿いの地形データとともに通常の2次元逆解析を行うため、直接地形を含めた測線沿いの比抵抗断面図を得ることができる。なお、 $V_{mod2D(i)}$ 及び $V_{mod3D(i)}$ は基本的に異なるプログラムにより計算されるため、電位計算の離散化誤差を低減するため、それぞれ平坦地形に対する計算値によって正規化することが望ましい。この場合、(7)式は以下ようになる。

$$V_{cor3D2D(i)} = V_{mod2D(i)} / V_{flat2D(i)} / \quad (8)$$

$$V_{mod3D(i)} \times V_{flat3D(i)} \times V_{meas(i)}$$

Fig.6では、Fig.5の地盤モデルで測線下の $X=30\text{m}$ 、 $Z=-18\text{m}$ を中心に断面積 16m^2 の低比抵抗異常(5 m)が2次元的に分布する不均質モデルについて、3種類の2次元逆解析結果の比較を行った。まず3次元地形補正を行わない2次元逆解析では、3次元地形の影響による偽像が生じており、100 m均質部の解析比抵抗は50~200 mの範囲に及ぶ。さらに、低比抵抗異常の位置は若干ずれて解析されている(Fig.6A)。この結果からも、3次元地形の考慮の必要性が理解される。

Fig.6B,Cの3次元地形補正結果ではFig.6Aに比べ偽像が低減されており、補正の効果が確認できる。Holcombe and Jiracek(1984)の補正法によるFig.6Bでは偽像が残るものの、低比抵抗異常のコントラストが高く、位置は正確に表現されており、図化に伴う精度低下は認められなかった。提案手法の結果であるFig.6Cでは均質場が良く再現され、低比抵抗異常の位置も正確に表現されたが、異常部の比抵抗コントラストはFig.6Bより低かった。提案手法では観測される電位差が2次元地形の影響と3次元地形の影響を独立して受けると仮定しているが、実際にはこれらの相互作用の成分があると考えられる。提案手法では、 $V_{cor3D2D(i)}$ の計算の段階で2次元地形の影響も若干補正されることにより、 $V_{cor3D2D(i)}$ をデータとする2次元解析結果は地形の影響が十分に補正されるとともに、比抵抗異常による電位変化がマスクされたことが推定される。

3次元地形補正法の従来法および提案法については、比抵抗異常部の検出傾向が異なるため、空洞調査や断層調査のような比抵抗異常部の検出に重点のある調査では従来法を用い、地層の分布調査で偽像の発生を抑えたい場合には提案法を用いるなど、探査目的に応じて使い分けることも指摘できる。

結 言

数値モデルの検討結果から、比抵抗法2次元探査における3次元地形補正の必要性を示し、3次元地形補正における新しい手法を提案した。従来の3次元地形補正法では平坦地形として得られた解析結果を地形を含めた比抵抗分布図に変換する必要があるが、提案手法では測線沿

いの2次元地形の影響を残した補正值が得られるため、通常の2次元解析により直接地形を含めた比抵抗分布図を得ることができる。本手法は起伏に富んだ傾斜地はもとより、ため池堤体や堤防などの3次元的な形態を持つ土構造物の調査において比抵抗法2次元探査の探査精度を向上させることが期待できる。今後、他の数値実験ケースにより地形補正法の特性をより詳細に明らかにするとともに、複雑な地形の現場で実施された比抵抗法2次元探査データに対する補正結果により3次元地形補正法の適用性の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Dey, A., and Morrison, H. F.(1979):Resistivity modeling by the finite element method, *Geophysics*, 36, 132-155.
- 2) Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J. and Rijo, L.(1980):Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys, *Geophysics*, 45, 75-83.
- 3) Holcombe, H. T. and Jiracek, G. R. (1984): Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys, *Geophysics*, 49, 439-452.
- 4) 今村杉夫・福岡晃一郎(2004): 二次元比抵抗探査データに対する三次元地形補正の試み, 物理探査学会第110回学術講演会論文集, 67-69.
- 5) 金 喜俊・藤崎 修・竹内睦雄(1995): 比抵抗法における数値モデリングの離散化誤差, 物理探査, 48, 1-6.
- 6) 金 喜俊・藤崎 修・竹内睦雄(1996): ロバスト推定による比抵抗法2次元インバージョン, 物理探査, 49, 110-116.
- 7) 中里裕臣・浅野志穂・汪 振洋・奥山武彦・黒田清一郎・松浦純生・岡本 隆(2003): 山形県銅山川地すべりにおける比抵抗トモグラフィの適用(その2), 第42回日本地すべり学会研究発表会講演要旨, 377-378.
- 8) Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H., and Sill, W. R.(1981):An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimension, *Geophysics*, 46, 1009-1024.
- 9) 佐々木 裕(1992): 比抵抗法とIP法の3次元インバージョン, 物理探査, 45, 3-9.
- 10) 佐々木 裕(1993): 比抵抗法の2次元インバージョンにおけるPitfall - 3次元構造に起因する偽像 -, 物理探査, 46, 367-371.
- 11) Sasaki, Y.(1994):3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, 59, 1839-1848.

- 12) 佐々木 裕・長谷川信介・松岡俊文(2005)：実用的な三次元電気探査に向けて：三次元地形・地質構造が解析に及ぼす影響，物理探査学会第112回学術講演会論文集，207-210.
- 13) 島 裕雅(1992)：二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法，物理探査，45，204-223.

New 3-D terrain correction method for 2-D resistivity survey

NAKAZATO Hiroomi, INOUE Keisuke, NAKANISHI Norio and WANG Zhenyang

Summary

The new correction method for a influence of three-dimensional topography was developed aiming at applicability and the accuracy improvement of the two-dimensional resistivity survey method. The conventional three-dimensional terrain correction method makes the potential response of the homogeneous earth where topographical features was given by the three-dimensional forward calculation a correction coefficient. Because the inverted resistivity section is shown as a flat terrain, it is inconvenient though the resistivity in a certain altitude is requested according to this method. Then, we propose the new method to obtain the resistivity section which include the geographical features along the survey line. In our method, the three-dimensional terrain correction value is regularized by the two-dimensional terrain correction value along the survey line, and the correction data is analyzed in a usual two-dimensional inversion system. It is clarified that the conventional and the proposal method are both effective to the correction of the three-dimensional topography as a result of the numerical analysis. The conventional correction method is suitable for extracting the resistivity anomaly, and the proposal method has a suitable feature for decreasing the false image caused by geographical features around the survey line.

Keywords : 2-D resistivity survey, 3-D terrain correction, inversion, finite element method, false image