

## 深層地下水探査のための 3次元電磁法解析の基礎的検討

## A basic study on the three-dimensional electromagnetic analysis method for deep groundwater exploration

○竹内睦雄\*, 高屋正\*, 今里武彦\*, Kim, H. J. \*\*

TAKEUCHI Mutsuo, TAKAYA Tadashi, IMASATO Takehiko, Kim, H. J.

## 1. はじめに

沿岸域の農業用井戸が津波等で塩水化した場合、より深層の地下水に代替水源を求めるが、深層地下水の賦存量を広域的に把握するには、電気探査や調査ボーリング等を行う必要があり、多大な費用と時間を要し、緊急時の対策が困難であった。本研究では、物理探査法の一つである電磁探査法に着目し、一回の調査で帯水層構造を3次元的に把握する手法を開発し、効率的な地下水探査手法を確立することを目的とする。ここでは基礎的な検討として信号源を持たないMT法(地磁気地電流法)の3次元解析プログラムを開発し、実用的な解析手順を提案する。

## 2. 研究方法

人工信号源を持つ電磁法であるCSMT法の測定結果を3次元解析するプログラムを開発するにあたり、まず基礎的な検討として人工信号源を持たない電磁法であるMT法の3次元解析プログラムを開発した。また、3次元モデルの数値実験により、その開発したプログラムの有効性を検討した。

## 3. 3次元解析法の検討および3次元モデルの数値実験

MT法のデータには、一般にスタティック効果が含まれている。スタティック効果は浅部の小規模な比抵抗異常に起因し、見かけ比抵抗をすべての周波数で同じ量だけシフトさせる。したがってこれを取り除く必要がある。ここでは、スタティック効果を考慮した3次元インバージョン法を開発する。スタティック効果を考慮した非線形インバージョンでは、下記の観測方程式の最小二乗解を求める。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{WA} & \mathbf{WG} \\ \lambda \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \lambda \alpha \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \beta \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{m} \\ \mathbf{s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{W} \Delta \mathbf{d} \\ -\lambda \mathbf{C} \mathbf{m}^{(k)} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $\Delta \mathbf{m}$  と  $\mathbf{s}$  は反復  $k$  回目における未知数ベクトルで、それぞれ比抵抗修正値とスタティックシフトを表す。 $\mathbf{A}$  は感度行列、 $\mathbf{W}$  はデータの重み、 $\Delta \mathbf{d}$  はデータ残差、 $\mathbf{G}$  は  $\mathbf{0}$  または  $\mathbf{1}$  からなる行列、

$\mathbf{C}$  はラプラシアン操作である。最後の行はスタティックシフトが平均零の正規分布であると仮定したことに相当する。 $\lambda$  はラグランジ乗数、 $\alpha$  と  $\beta$  は定数である。

(1)式は修正グラム・シュミット法で解くことができる。

MT法のインバージョンを実用化するうえでもっとも大きな問題は、通常の方法で感度行列  $\mathbf{A}$  を求めると計算時間が膨大なものになることである。このため、必要に応じて近似法を用いる。

初期モデルとして、正規の感度のかわりに均質大地モデルに対する感度を用いる ( $I$ )。その後の反復では Broyden 法により感度を修正する ( $U$ )。途中、必要なだけ

\*株式会社日本地下探査 (Nihon Chikatansa Co.,Ltd.) \*\*Pukyong National University, Korea

キーワード：地下水、水環境、逆解析

正規の感度を計算する( $E$ )。

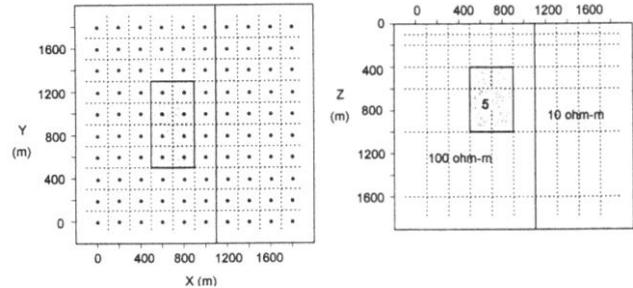
#### 4. 数値実験結果および考察

3次元モデルの数値実験の検討項目は下記の3点である。

- 1) 最適  $\beta$  の選択
- 2) 近似感度を用いるインバージョンの有効性
- 3) 一回だけ正規の感度を

計算するインバージョン

テストモデルとしては図1を使用する。垂直な断層の左側の比抵抗は  $100\Omega\text{m}$  であり、右側の比抵抗は  $10\Omega\text{m}$  である。左側には  $5\Omega\text{m}$  の低比抵抗体が存在する。



平面図 (a)

断面図 (b)

図1 テストモデルの平面図 (a) および断面図 (b)

Fig.1 Plan(a) and cross-sectional(b) views of a test model

+の記号は MT 受信点を示す。実線はフォワードモデリングに使用されたメッシュを、破線はインバージョンのブロックを表す。

地表には  $200\text{m}$  間隔で  $10\times 10$  の測点が配置されている。 $0.1\text{ Hz}$  から  $100\text{ Hz}$  まで7つの周波数について計算する。データは差分法により作成し、インピーダンスに標準偏差が振幅の  $1.5\%$  に相当するノイズを加える。さらに平均零、標準偏差  $0.5$  の乱数により見かけ比抵抗を対数上でシフトさせる(佐々木, 2001)。

1) 反復5回後のスタティックシフトの大きさを  $\beta$  に対して表わすと、 $\beta$  は  $0.2$  が最適であり、スタティックシフトはこれより小さな値では過大評価、大きな値では過小評価されることがわかった。

2) スタティックシフトを含むデータに対して、ここでは4あるいは5回の反復で rms データミスフィットを十分に下げることができた。 $IUUUU$  は  $IIIII$  に比べて特に  $\beta > 0.25$  では最終のデータミスフィットを低下させている。したがって、ここでは  $IUUUU$  を近似インバージョン法とすることにした。

3) 計算時間を合理的な水準にまで下げたため、感度を更新するための効率的な方法として次のような手順を提案する。(1)最初の反復では均質半空間を初期モデルとする感度を用いる( $I$ )。(2)二回目以降の反復では感度を Broyden 法により修正する( $U$ )。(3)反復途中で一回だけ正規の感度を二回目あるいは三回目に用いて計算する( $E$ )。

#### 5. おわりに

基礎的な検討として MT 法の3次元解析プログラムを開発するとともに、実用的な解析手順を提案することができた。なお、本研究は平成24年度農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」によるものである。

#### 【引用文献】

Han, N., Nam, M. J., Kim, H. J., Lee, T. J., Song, Y., and Suh, J. H. (2008) : Efficient three-dimensional inversion of magnetotelluric data using approximate sensitivities, Geophys. J. Int., 175, 477-485.

佐々木裕, 内田利弘 (2001) : スタティック効果を考慮したMT法3次元インバージョンの実例, 物理探査学会第105回学術講演会論文集, 234-237.