

MT法データのスタティック補正と2次元インバージョン 小川康雄（地質調査所）

Static correction and two-dimensional inversion
of magnetotelluric data
Yasuo Ogawa (Geological Survey of Japan)

1. はじめに

MT(magnetotelluric)法では、最も浅い探査深度よりも浅い構造が、測定する全周波数帯域において、電磁場に擾乱(distortion)を与える。これは、galvanic distortionと呼ばれる。distortionの記述とこの影響を取り扱う方法については、Groom & Bailey(1989)やChave & Smith(1994)で述べられている。

これらの論文は、MT法の4つの複素impedanceの間の位相の混合を解くことを示しているが、impedance tensorの絶対値については、不定性が残されたままである。この不定性は、見掛比抵抗を対数値で周波数の対数値に対してプロットする場合、周波数に依存しないシフトとして認められる。観測される見掛比抵抗 ρ_a^{obs} は、distortionのない見掛比抵抗 ρ_a^{undist} とスタティックシフト g の和として示すことができる。

$$\log_{10}\rho_a^{obs} = \log_{10}\rho_a^{undist} + g \quad (1)$$

ρ_a^{obs} と ρ_a^{undist} とは電磁モード、測定点、周波数の関数であり、 g は電磁モードと測定点との関数である。 g は周波数に依存しない。 g を適切に推定しないと、観測された見掛比抵抗から得られる構造は、比抵抗値および深度ともに誤ったものとなる。

最もよく行われているスタティックシフトの除去の方法は、二つのカテゴリーに分けられる。一つは地下構造に関する他の情報を用いる方法であり、もう一つは、データのみを利用する方法である。前者では浅部のdistortionを受けていない構造に関する情報を用いて、スタティック効果を認識し取り去る。比抵抗が既知の地層をkey layerとして用いる方法（Jones, 1988）や、時間領域電磁探査を用いる方法（例えばSternberg et al., 1988; 光畑・小川, 1994）、空間的に電場を積分する方法（Torres-Verdin and Bostick, 1992）もこれに含まれる。

しかしながら、従来のMT法調査では、これらのような他の情報がないのが普通である。そこで、MTデータのみからスタティックシフトを除去する方法が考案されている。その一つは、純粋な2次元問題では、十分な低周波数においてTEモードの見掛比抵抗が空間的にスムーズに変わることを利用するものである（Jones et al., 1992; Jones and Dumas, 1993）。実際には、ある低周波数において、TEモードの見掛比抵抗値を空間的な位置の関数としてプロットし、これらのプロットを低次の多項式にて回帰し、その回帰曲線をdistortionの無い見掛比抵抗とみなし、各観測点において回帰曲線と観測値との差をスタティックシフトとして認識する方法である。しかしながら、この方法には、あらかじめ回帰曲線の次数や用いる周波数に関して、先見的な知識が要求されてしまう欠点がある。

これに対し、deGroot-Hedlin(1991)は、スタティックシフトを2次元モデルの未知数と考

え、インバージョンによってそれを導いた。構造とスタティックシフトとの間には、不可避なトレードオフが存在しているが、それをコントロールするために、deGroot-Hedlin (1991)は、スタティックシフトの和がゼロになるという強い制約条件を課した。もし、スタティックシフトがランダムで測定点の数が十分に大きければこの仮定は成立するが、そうでない場合にはこの拘束条件は強すぎる。

本研究の方法は、スタティックシフトを2次元モデルの未知数と考えるという点では、deGroot-Hedlin (1991)に類似している。しかしながら、我々の方法はより制約が緩い。我々の仮定は(1)式の g が、統計的にガウス分布に従うということである。この仮定は、Sternberg et al.(1988)やKurtz and Gupta(1992)のフィールドデータから示唆される。我々の方法はより一般的であり、測点数が少ない場合にも機能する。

2. 二つの制約条件の導入

Uchida(1993a)に従って、残差 S_0 を以下のように定義する。

$$S_0(m) = |W d - W F(m)|^2 \quad (2)$$

$$m = \begin{bmatrix} m_p \\ g \end{bmatrix} \quad (3)$$

F はモデルの応答であり、モデルパラメータの関数である。モデルパラメータは、正規化ブロックの比抵抗の対数値 m_p とスタティックシフト g （測定点と電磁モードの関数）からなる。 d は観測データを表わし、 W はデータの標準誤差の逆数からなる重み関数である。MTのインバージョンでは、 d としては見掛比抵抗の対数値、インピーダンスの位相、地磁気変換関数の実部虚部の組み合わせからなる。MT法のインバージョンは非線形なので、問題を線形近似する。

一つ前のiterationのモデルを m_{old} と表わし、次のiterationのモデルを m とする。 m が m_{old} に近いとすれば、 S_0 はヤコビアン行列 A を用いて、 S で近似される。

$$S_0(m) \approx S(m) = |W \hat{d} - W A m|^2 \quad (4)$$

ただし

$$\begin{aligned} \hat{d} &= d - F(m_{old}) + A m_{old} \\ A &= \left[\frac{\partial F}{\partial m} \right]_{m=m_{old}} \end{aligned} \quad (5)$$

である。

次に2つのnormを定義する。比抵抗モデルは、長方形のブロックからなるが、その粗さを以下のように R で定義する。

$$R = |C m_p|^2 \quad (6)$$

ここで、 C はroughening matrixと呼ばれるが、 $C m_p$ は一つのブロックとその隣接するブロックの比抵抗（対数）の平均値との差を与える線形結合の形をしている。

もう一つのnorm G は、スタティックシフトに関する L_2 normである。以下に定義を示す。

$$G = \sum |g_{site, mode}|^2 \quad (7)$$

ここで g は測点および、電磁モード（TE/TM）の関数である。

さて、いま残差 S を最小にしたいのであるが、同時に R と G とも最小にしたい。このことは二つのラグランジュ乗数 α^2 と β^2 とを導入して、以下の U を最小化することに帰着する。

$$U = S + \alpha^2 R + \beta^2 G \quad (8)$$

もし、先見的に α^2 と β^2 とが与えられれば、(8)式は m に関して2次式であるため、容易にモデル m を求めることができる (Tarantola and Valette, 1982; Jackson and Matsu'ura, 1985)。問題は、如何にして適切な α^2 と β^2 とを見い出すかということであり、このために、Uchida(1993a,b)と同様にABIC(Akaike, 1980)の最小化によった。Uchida(1993a,b)ではhyperparameterは1つであった(α^2 のみ)が、この場合は2つになる。ABICを最小とする α^2 と β^2 を検索するためには、Murata(1993)と同様にsimplex法を用いた。

この方法の詳細については、Ogawa & Uchida(1996)、実際のデータに適用した例については、Ogawa et al.(1995)およびOgawa(1996)に述べられている。

3. 結論

従来の広域的な(離散的な)MT法探査では、スタティックシフトの補正のための補助データがないのが普通である。その場合、比抵抗モデルとスタティックシフトとを同時に解析することが最も客観的な方法であると思われる。deGroot-Hedlin (1991)の方法は、スタティックシフトの和がゼロになるということを強い拘束条件としている。もし、スタティックシフトがランダムで、測点数が十分に大きければ、deGroot-Hedlinの仮定は適切であろう。われわれは、その仮定を拡張し、スタティックシフトがガウス分布すると仮定した。それゆえ、スタティックシフトの和はゼロになるとは限らない。このアルゴリズムは、測点数が少なくスタティックシフトの和がゼロになることが不自然な状況においても、データに適用することができる。

参考文献

- Akaike, T., 1980. Likelihood and Bayes procedure, in Bayesian Statistics, edited by J. M. Bernardo, M. H. deGroot, D. V. Lindley, and S. F. Smith, pp. 143-166, University press, Valencia, Spain.
- Chave, A. D. and J. T. Smith, 1994. On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions, *J. Geophys. Res.*, 99, 4669-4682.
- deGroot-Hedlin, C., 1991. Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion, *Geophysics*, 56, 2102-2106.
- Groom, R. W. and Bailey, R. C., 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1925.
- Jackson, D. D., and M. Matsu'ura, 1985. Bayesian approach to nonlinear inversion, *J. Geophys. Res.*, 90, 581-591.
- Jones, A. G., D. I. Gough, R. D. Kurtz, J. M. DeLaurier, D. E. Boerner, J. A. Craven, R. G. Ellis, and G. W. McNeice, 1992. Electromagnetic images of regional structure in the southern

- Canadian Cordillera, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 2373-2376.
- Jones, A. G., 1988. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment, *Geophysics*, 53, 967-978.
- Jones, A. G., I. Dumas, 1993. Electrical images of a volcanic zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 81, 289-314.
- Kurtz, R. D., and J. C. Gupta, 1992. Shallow and deep crustal conductivity studies in the Miramichi earthquake zone, New Brunswick, *Can. J. Earth Sci.*, 29, 1549-1564.
- 光畑裕司・小川康雄、1994. 仙岩澄川地域におけるTEM法調査とMT法データのスタティックシフト補正、*物理探査*、47、11-23.
- Murata, Y., 1993. Estimation of optimum average surficial density from gravity data: An objective Bayesian approach, *J. Geophys. Res.*, 98, 12,097-12,109.
- Ogawa, Y., A.G. Jones, M.J. Unsworth, J.R. Booker, X. Lu, J. Craven, B. Roberts, J. Parmelee, and C. Farquharson, 1995, Deep electrical conductivity structures of the Appalachian orogen in the southeastern U.S., *Geophys. Res. Lett.* (in press)
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.* (in press).
- Ogawa Y., 1996, Two-dimensional inversion of Papua New Guinea magnetotelluric dataset assuming static shift as Gaussian distribution, *J.Geomag.Geolectr.* (submitted)
- Sternberg, B. K., J. C. Washburne, and L. Pellerin, 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings, *Geophysics*, 53, 1459-1468.
- Tarantola, A. and B. Valette, 1982. Inverse problem = quest for information, *J. Geophys.*, 50, 159-170.
- Torres-Verdin, C. and F. X. Jr. Bostick, 1992. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: Electromagnetic array profiling (EMAP), *Geophysics*, 57, 603-622.
- Uchida, T., 1993a. Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J.Geomag.Geolectr.*, 45, 841-858.
- Uchida, T., 1993b. Inversion of COPROD2 magnetotelluric data by use of ABIC minimization method, *J.Geomag.Geolectr.*, 45, 1063-1071.