

VOLCANO LOOP の理論計算

Some theoretical calculations on VOLCANO LOOP

長竹宏之¹・小川康雄²・神田径²

1: 東京工業大学理学部地球惑星科学科

2: 東京工業大学火山流体研究センター

Hiroyuki Nagatake¹・Yasuo Ogawa²・Wataru Kanda²

1: Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of technology

2: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

Abstract:

We are proposing a coincident loop system to monitor the resistivity structure under the active volcanic vent, where we install transmitting and receiving loops around the vent. We can measure the step response of the earth. We call this method as “VOLCANO LOOP”. We plan to install it on one of the craters of Kusatsu-Shirane volcano, which is known for phreatic eruptions. Prior to the installation, we made some numerical modelings. First forward modeling program was developed for layered earth using the Gaver-Stehfest transform for converting responses from frequency domain to time domain. Next, inversion program was developed using Occam algorithm.

1. はじめに

伊豆大島においては、1986年の噴火に先立ち顕著な比抵抗変動が検出され、比抵抗変動とモニタリングの重要性が認知された(Yukutake et al., 1990)。Yukutake et al.(1990)では、伊豆大島三宅島を挟んだ dipole-dipole 配置で、送信する電流と電位の比がモニターされている。Utada et al.(2003)は、1986年の噴火に伴う見掛比抵抗の時間変動を forward 計算によって説明している。直流法を用いる方法では深度方向の情報を得るためには、電極の幾何学的な配置を変える必要があり、多数の電極からなるアレイが必要になる。Utada et al(2007)は、送信側には電流ダイポールを用いてステップ波形の電流を注入し、受信側では磁場の鉛直成分を多地点で計測するシステム (ACTIVE) を構築した。ACTIVE では、電流ダイポールをソースとするために、電流を流すための電極の接地抵抗をなるべく下げ、大出力の送信機を必要とする。また、観測された応答は、送信点と受信点とを含む構造に影響されるので、時間変動が単純に受信点直下の構造変動を意味するとは限らない。そのため、複数の送震源と受信点を用いる必要がある。

一方、本稿で提案する VOLCANO LOOP (第1図) では、送信および受信にループソースを用いるために、ソースを接地する必要がないという利点がある。これによって、高出力の送信機は必要なくなる。また、送信ループと受信ループとを同一地点に置くことから、

側方の構造の影響が少ないと考えられる。また、ループ形状の信号源は、火山の火口縁に配置することも可能であり、活動火口をモニターするには好都合である。

2. 成層構造に対する応答の計算について

まず、送信・受信ループの半径、送信電流の電流値を与え、成層構造に対するステップ応答を計算するプログラムを作成した。VOLCANO-LOOPは、coincident loopにほかならない。成層構造を持つ大地の地表において、半径 a の送信ループに角周波 ω の電流 I を流して、 $t=0$ で電流を遮断する。この信号源に対して受信ループに生ずる受信電圧を時間の関数として求める。

まず、円筒座標系における Maxwell 方程式を作成し、周波数領域の応答を計算する (Morrison et al., 1969)。円筒座標系の電磁誘導計算では、Bessel 関数の積分が不可避で、このために linear filter を用いる (Anderson, 1982)。次いで、各周波数 ω の関数として求められた受信電圧を時間領域に変換する。本研究では、この 2 回の積分変換をひっくりかえして、先に Gaver-Stehfest 法によって時間領域に変換し、次いで Hankel 変換をリニアフィルターによって求めた (Knight & Raiche, 1982)。

なお、ここでは変位電流を考慮しない。変位電流を考慮すると電流遮断後のごく初期に受信電位の符号が反転する現象が現れる。同様の符号の反転は、IP 効果を持つ媒質（複素比抵抗となる）が存在する場合に知られている。複素比抵抗を導入すると、変位電流に相当する項が現れるからである。

第 2 図に、草津白根火山での適用を想定して、半径 50m の送信ループにステップ電流 8 A を送信した場合について、同じ場所にある受信ループでの電圧を計算する。地下構造として 100ohmm の均質大地の中に 10ohmm の低比抵抗層が挟まり、その層が厚さを変える場合をモデル化した。検討中の計測システムのサンプリング周波数は 10kHz であるので、時間軸は 0.1ms から 1s までとする。第 3 図に応答を示す。この図から、サンプリングレート 10kHz で入力信号レベルが 1v から 0.1 μ v までをカバーできるデータロガーを用いれば、これらのモデルを分離できることが分かる。

3. 成層構造に対するインバージョンの計算について

観測された受信電位は時間の関数として得られる。対数で等間隔な時刻に対して、受信電圧が測定されたとする。測定された受信電圧の時系列から、水平成層構造を推定するインバージョンプログラムを、Occam インバージョン (Constable et al., 1987) の手順で作成した。

まず水平成層構造を与え、5%のノイズを加えたものを仮想的なデータとする。ついで、初期モデルとして、30層からなる等しい層厚もつ構造を仮定する。データのミスフィットとモデルのラフネスをそれぞれ定義し、トレドオフパラメータを変動させながら、データに適合するモデルのうち、もっともラフネスの少ないモデルを得ることができる。第 4 図に 4

種類の比抵抗モデルに対する数値実験結果を示す。解析された構造は、低比抵抗層の上面深度に敏感であることが分かる。

3. 3次元的な異常体に対する応答についての予備的な考察

火山の監視観測の目的で、**volcano loop** を運用するのであるが、低比抵抗体（マグマや熱水）が火道内を上昇する場合を考える。この応答は厳密には 3 次元モデリングから求めるべきものであるが、概略の応答を把握する目的で、ボルン近似を用いた 2 次場の計算を行った。簡単のため、もともとの構造は半無限一様大地とする。まず、異常体がない場合(1 次場)の Maxwell 方程式をたて、さらに異常体がある場（1 次場+2 次場）の Maxwell 方程式をたて、対応する方程式同士の引き算をすると、2 次場に関する Maxwell 方程式を得る。ここで 2 次場を生成する”電流ダイポールソース”は、過剰電気伝導度と（1 次+2 次）の電場の積になっていることが分かる。ボルン近似では、この”電流ダイポールソース”を過剰電気伝導度と 1 次の電場の積で近似する。こうして 2 次場の電流ダイポールソースが分かると、半無限一様大地に対する Green 関数（Jin, 2002）を用いることによって、3 次元的な異常体に対する 2 次場を求めることができる。

4. まとめ

われわれは、活動火口直下の精密な電磁気モニター観測をするための方法として、火口の周縁に送信および受信ループを設置する **coincident-loop** 方式を提案し、これを **VOLCANO-LOOP** と称している。この方法を、水蒸気爆発で知られる草津白根火山に適用する準備を行っている。本稿では、**coincident loop** 法の理論応答を、水平成層構造について計算するプログラムを作成した。次いで観測データから比抵抗構造を推定するために **Occam** の方法を用いたインバージョンプログラムを開発した。さらに、実際に想定される比抵抗変動源として円柱状の比抵抗異常がある場合については、**Born** 近似を使って応答を検討することができる。

謝辞：本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラム（2009-G-27 **Coincident-loop** 電磁誘導法による活動火口直下の比抵抗モニタリング）の援助をうけました。

参考文献：

Anderson, W.L., Fast evaluation of squared-Hankel transforms of order-1 by linear digital filtering, USUS open file report 82-224, 13pp, 1982.

Constable SC, Parker RL, Constable CG, Occam's Inversion - a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289-300, 1987.

Jin, J., *The finite element method in electromagnetics*, (2nd Ed.), John Wiley & Sons,

Inc., 753pp., 2002

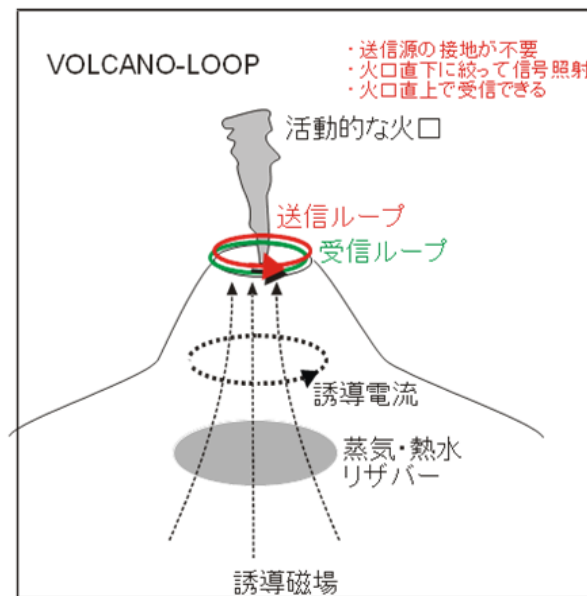
Knight JH, Raiche AP, Transient Electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method, *Geophysics*, 47, 47-50, 1982.

Morrison, H.F., Phillips, RJ, O'Brien, DP, Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space, *Geophysical Prospecting*, 17, 82 – 101, 1969.

Utada H, Takahashi Y., , Morita Y., Koyama T., Kagiya T., ACTIVE system for monitoring volcanic activity: A case study of the Izu-Oshima Volcano, Central Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 164, 217-243, 2007

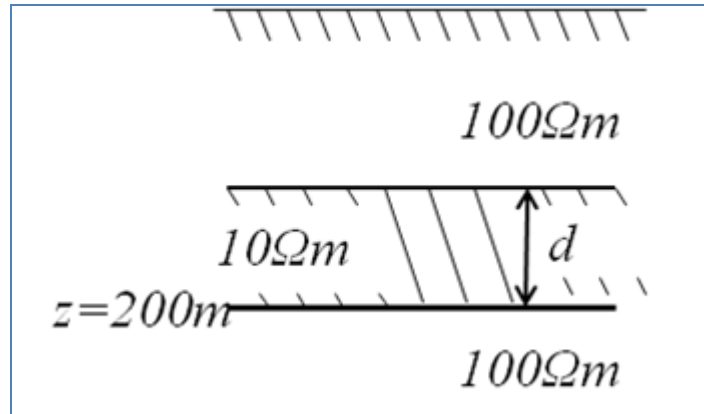
Utada, H., Interpretation of time changes in the apparent resistivity observed prior to the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano, Japan, *J. volcano. J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 126, 97-107, 2003.

Yukutake, T., Yoshino, T., Utada, H., Watanabe, H., Hamano, Y., Shimomura, T., 1990a. Changes in the electrical resistivity of the central cone, Mihara-yama, of Oshima Volcano observed by a direct current method. *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 151-169, 1990.



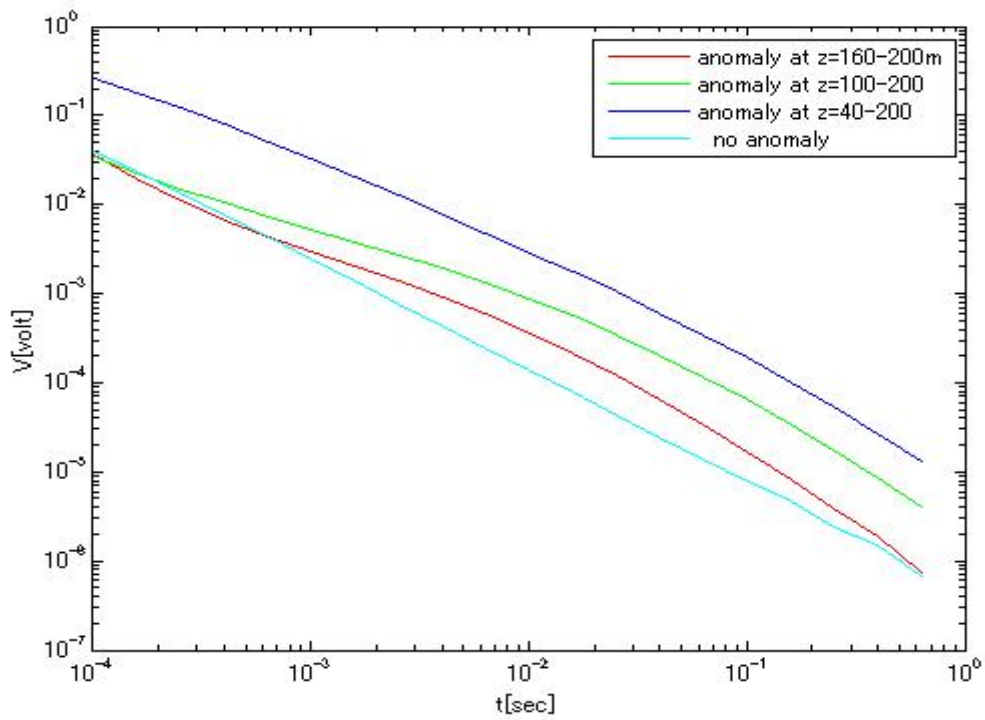
第1図 Volcano-Loop の概念図

Fig.1. Concept of Volcano-Loop



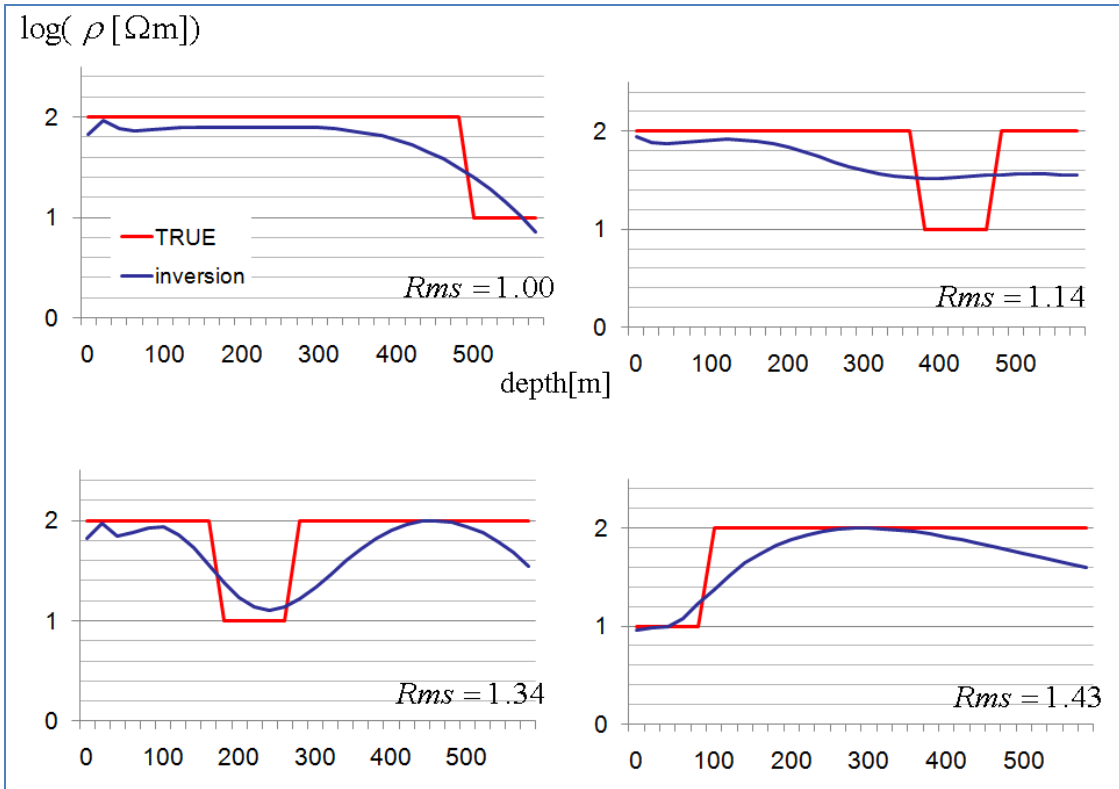
第2図 100ohmm の中に 10ohmm の比抵抗層がある 3層構造モデル。

Fig.2 Three-layer resistivity structures with varying thickness of the conductive layer



第3図 低比抵抗異常の厚さを変えた場合の受信電位の違い

Fig.3 Voltage at the receiver by changing the thickness of the conductive layer



第 4 図 水平成層比抵抗モデルに対する Occam インバージョン結果

Fig. 4. Comparisons between the Occam inversion result and the true model