

3次元比抵抗構造から見た倶多楽火山の熱水系

○ 早川 美土里 (北海道大学大学院理学院), 茂木 透 (北海道大学大学院工学研究院), 橋本 武志 (北海道大学大学院理学研究院)

はじめに

火山の噴火予知や、熱エネルギー利用を考える際に、火山の熱水系を知ることは一つの鍵となるが、その方法として、水の存在に感度がある電磁気的手法が挙げられる。本研究で対象とする倶多楽火山は、約8万年-4万5000年前に複数の火口から繰り返し噴火し形成された、玄武岩-安山岩質の複成火山である。火山周辺には、過去に噴出した溶岩や、火砕堆積物が分布しており、山頂には約4万年前の大規模噴火により形成された円形のカルデラ湖(クッタラ湖)がある。西麓には、現在も活発な地熱候が見られる登別温泉や、日和山(潜在ドーム)、地獄谷・大湯沼(爆裂火口)があり、さらに北西にはカルルス温泉が存在する。

水素-酸素同位体比、化学成分の解析記録から、登別温泉は深部熱水起源、カルルス温泉は涵養した地表水が起源であると推定されている(NEDO, 1991)。これまでに倶多楽火山-登別温泉では、CSAMT法による浅部の2次元比抵抗構造が推定されている(Goto and Johmori, 2011; 2013; 2015)が、周辺を含めた地域で深部までの比抵抗構造を求めるために新たにMT観測を実施した。火山周辺の比抵抗構造は複雑であるため、得られたデータを用いて3次元比抵抗構造を推定し、得られた3次元モデルと、他の調査記録から、倶多楽火山周辺の熱水系を考察した。



Fig.1 倶多楽火山周辺の地質図。黒点線は、今回の調査範囲(産総研、シームレス地質図より)

3次元インバージョン

3次元インバージョンには、ModEM (Egbert and Kelbert, 2012; Kelbert et al., 2014) を用いた。このコードは、有限差分法によりグリッドの辺及び面でMaxwell方程式を解き、評価関数

$$\Psi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) + \nu (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

が最小になるように反復計算を行う。計算ごとに得られるモデルのRMSが十分小さくなった、又はRMS変化が収束したときのモデルを最適モデルと判断した。

$$RMS = \sqrt{\frac{(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))}{N_{data}}}$$

M: モデルパラメータベクトル(m₀)は初期、又は前回のモデル
 d: 入力データベクトル
 f(m): モデルから計算した応答関数
 C_d: 観測誤差行列
 C_m: モデルの共分散行列
 ν: ダンピングパラメータ
 N_{data}: 入力データ数

今回、海底地形および陸上地形をモデルに組み込むために、海底地形は海上保安庁が公開している海底地形500mメッシュ水深データ、陸の地形は国土院が公開している10mメッシュ標高データを用いた。100Ωm-様の陸上・海底地形を入れたモデルのフォワード計算結果

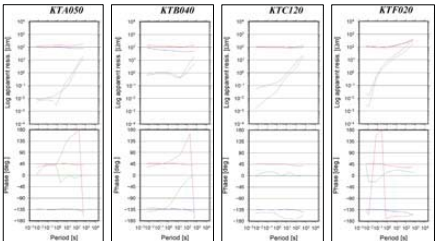


Fig.2 陸上地形と海底地形を入れた、100Ωm-様のモデルのフォワード計算結果。赤Z_{xx}、青Z_{yy}、緑Z_{xy}、ピンクZ_{yx}

によると、海に近い測点(KTF020)では長周期で見掛比抵抗が大きく上昇し、平坦で海から遠い測点(KTC120)では100Ωmを返した。海から遠い測点の中でも、100Ωmから大きくずれる値が得られた測点(KTA050, KTB040)もあり、このような比抵抗の変動は、谷や尾根のような地形の変化がある場所に見られたため、地形による影響が考えられる。

考察① クッタラカルデラ周辺の比抵抗構造

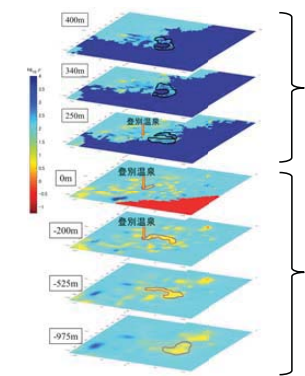


Fig.4 インバージョンによって得られた3次元比抵抗モデルの各海拔における水平断面。

クッタラカルデラの外輪山及び北西、登別温泉の西側に見られる高比抵抗域(-1000Ωm)は、地表の玄武岩類-安山岩類溶岩-火砕堆積物の分布とほぼ一致している。

⇒クッタラ湖を横断する測線の2Dインバージョン結果(Goto and Johmori, 2015)とも矛盾しない。

- ◆ 登別温泉の地下に見られる低比抵抗域(3~30Ωm)が、クッタラカルデラの北側から東側へ回り込むように深部へと伸びているように見える(?)

- ◆ 登別温泉の起源は深部熱水(NEDO, 1991)

- ◆ 震央が日和山を中心とした半径約3-4kmの四分円状に分布。モデルでは高比抵抗域と低比抵抗域の境界部分

- ◆ 活火山浅部の低比抵抗域には、熱水変質した粘土鉱物だけではなく、熱水が存在する可能性が示唆されている。[相澤(2010)]

カルデラを囲むように伸びる低比抵抗域は登別温泉への熱水上昇経路の可能性

- 上昇する熱水
- 熱水的作用を受けた変質帯

Fig.5 海拔-525mでのモデル水平断面(右図)と、倶多楽火山周辺の1998-2012年に観測された地震の震央分布(左上図)と地震の深さ(左下図)[気象庁火山総覧より引用、加筆]。赤線で囲まれた領域は、Fig.3内に示した低比抵抗域と同じ。

インバージョン結果

表1. インバージョンデータセット

グリッド数	84 × 84 × 93 (南北 × 東西 × 鉛直)
メッシュ幅 (水平方向)	中心付近は250~500m 外側は1.4倍ずつ大きくして13層
(鉛直方向)	陸上地形は15~50m 海拔0m以下は指数関数的に増加
モデルサイズ	674.2km × 674.2km × 244.4km (南北 × 東西 × 鉛直)
初期比抵抗値	大地: 100Ωm 海: 0.3Ωm (固定) 空気: 10 ⁻⁶ Ωm (固定)
入力データ	Z _{xx} , Z _{yy} , Z _{xy} , Z _{yx}
入力周期	12周期 (0.00521~512s)
測点数	49点

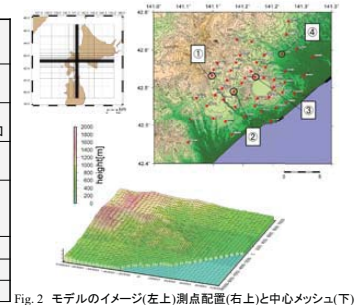


Fig.2 モデルのイメージ(左上)測点配置(右上)と中心メッシュ(下)

インバージョンの結果、反復計算回数は261回、RMSは404.791588から18.484217へ減少した。モデルからの計算値は、周期1s以上では観測値を概ね説明できていたため、**周期1s (100Ωmでのskin depth = 約5km) より浅い領域について考察した。**

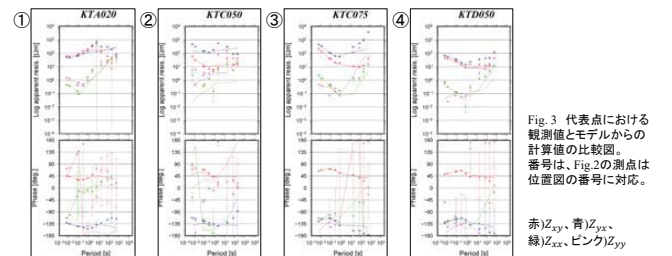


Fig.3 代表点における観測値とモデルからの計算値の比較図。番号は、Fig.2の測点位置図の番号に対応。

赤Z_{xx}、青Z_{yy}、緑Z_{xy}、ピンクZ_{yx}

考察② カルルス温泉と登別温泉

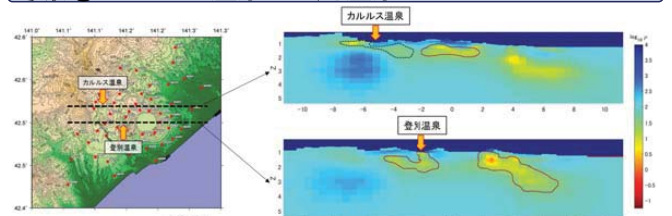


Fig.6 カルルス温泉と登別温泉を通るモデルの東西断面。カルルス温泉の地下に見られる低比抵抗域と、登別温泉の地下に見られる低比抵抗域には、つながりが見られなかった。この二つの温泉は別々の貯留層を持ち、泉質も異なる[NEDO, 1991]。

考察③ カルデラ北東部の低比抵抗体

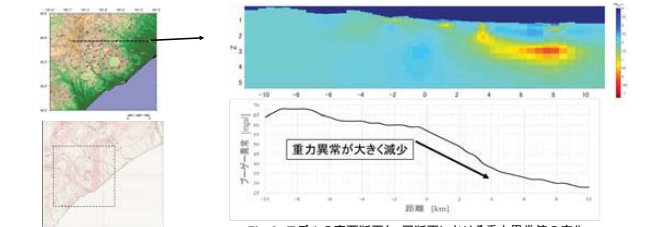


Fig.8 モデルの東西断面と、同断面における重力異常値の変化

Fig.7 ブーゲー重力異常図(産総研, 1997)。点線は観測範囲。

- ◆ 地表の地質分布を反映(火山噴出物 → 河川・海洋の堆積物)
- ◆ 低比抵抗域(1~100Ωm)による低重力異常
⇒ (亀裂+流体) 熱水による変質体)の可能性(?)

参考文献

Aizawa, K. (2010) Groundwater Flow beneath Volcanoes Inferred from Electric Self-Potential and Magnetotellurics. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 55, No. 6, 251-259.
 Egbert, G. D., and Kelbert, A. (2012) Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophys. J. Int., 189(1), 251-267.
 Goto, Y. and Johmori, A. (2011) Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric (CSAMT) and Time Domain Electromagnetic (TDEM) Resistivity Measurements at Noboribetsu Geothermal Field, Kutarra Volcano, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 56, No. 4-5, 153-160.
 Goto, Y. and Johmori, A. (2013) Resistivity Structure of the Hiyoriyama Cryptodome at Kutarra Volcano, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, No. 2, 365-376.
 Goto, Y. and Johmori, A. (2015) Internal Structure of Kutarra Caldera, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 60, No. 1, 35-46.
 Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D. and Tandon, K. (2014) ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. Comput. Geosci., 66, 40-53.
 国土交通省気象庁火山総覧、倶多楽。(2017年12月21日閲覧) http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/14_Kutarra.pdf
 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (1997). Gravity map of Tomakomai district (Bouguer anomalies) 1:200,000. https://gbank.gsj.jp/gravdb/pub_map/Gravity_09/Gravity_09.html
 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 30万分のシームレス地質. <https://gbank.gsj.jp/seamless/seamless2015/2d/>
 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991) 地熱発電促進調査報告書 No. 22 登別地域.
 Morizumi, M. (1998) The Growth History of the Kutarra Volcanic Group, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 43, No. 3, 95-111.

結論

- 北海道西部の倶多楽火山周辺で実施されたMT探査で新たに得られたデータから、3次元比抵抗構造を推定した。
- 地表で見られる、過去の噴火による火砕堆積物や溶岩の分布と、得られたモデルの高比抵抗域の広がりがほぼ一致していた。
- 登別温泉の地下の低比抵抗域は、クッタラカルデラの北から東に回りこむように深部へと繋がっていることが確認でき、これが熱水系路に関与していると考えられる。
- 得られたモデルから、カルルス温泉と登別温泉の熱水起源は異なると考えられ、これは過去に実施された温泉調査の記録と矛盾しない。

謝辞:本研究は、次世代火山プロジェクトの一環で行われた調査のデータを提供して戴いた。ここに感謝の意を表する。