

3次元電気比抵抗構造モデルから診た阿蘇カルデラ周辺の
火山活動と地震活動

**3-D Electrical Resistivity Model beneath Aso Caldera:
Magma Reservoirs and Hypocenter Distribution**

畑 真紀 (産業技術総合研究所)

Maki HATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Abstract

Aso caldera, on the island of Kyushu in the Southwest Japan Arc, is one of the world's largest calderas with a diameter of up to 25 km. The caldera was formed during 270–90 ka by four huge eruptions that produced hundreds of cubic kilometers of pyroclastic deposits. Naka-dake, which is one of postcaldera cones/volcanoes in the central part of the caldera, has cyclically erupted since the sixth century. A recent magmatic eruption occurred in November 2014 after 22 years of quiescence, a phreatomagmatic eruption (the first in 21 years) occurred in September 2015, and an explosive eruption (the first in 27 years) occurred in October 2016 with spewing volcanic ash 11,000m into the air. In November–December 2015, we conducted magnetotelluric measurements around the caldera and obtained a three-dimensional model of electrical resistivity. Our electrical resistivity model show a magma pathway from a series of northward dipping conductive anomalies in the upper crust beneath the caldera. The center of the conductive anomalies shifts from the north of Naka-dake at depths >10 km toward Naka-dake, along with a decrease in anomaly depths. The melt fraction is estimated at 13–14% at ~2 km depth. Moreover, these anomalies are spatially correlated with the locations of earthquake clusters, which are distributed within resistive blocks on the conductive anomalies in the northwest of Naka-dake but distributed at the resistive sides of resistivity boundaries in the northeast.

1. はじめに

阿蘇カルデラは、270–90 ka に起こった Aso1–4 の大規模な火砕流噴火によって形成された南北 25km、東西 18km のカルデラである (第 1 図)。カルデラ中央部には、カルデラ形成後の活動によって生じた火口丘群が点在するが、1933 年以降の噴火活動は、全て中岳第一火口で発生している。最近の噴火活動としては、2014 年と 2015 年のストロンボリ式マグマ噴火、2016 年の 11000m にまで達する噴煙をともなった爆発的噴火が挙げられる。また、これらの噴火に先立った約 20 年間の中岳第一火口での活動は、2000 年の火口南壁での赤熱現象、2003–2004 年の大規模な土砂噴出、2011 年以降の小規模噴火 (微量な火山灰放出) が挙げられるように、活動的な状態で推移していたと考えられる。

阿蘇山中岳火口における活動の駆動源となっているマグマ溜まり、さらに、カルデラ噴火に至るまでのマグマ溜まりの存在を電磁気学的手法の観点から検討することは、地球物理学の観点のみならず火山防災の観点からも重要かつ必要なことと考えられる。そこで、本稿では、阿蘇カルデラを覆う領域で 2015 年 11–12 月の期間に実施した Magnetotelluric (MT) 法観測データを用いて求めた 3 次元比抵抗構造モデルの特徴から検討した、阿蘇カルデラ周辺の火山活動 (マグマ溜まり) と地震活動との相互関係について報告する。

2. MT 観測と解析の概要

MT 法を含めた電磁探査法は、マグマを構成するメルトを含めた流体の存在を知るのに最適の方法といえる。本研究で使用した 55 点の観測データは、阿蘇カルデラの中央火口丘を中心に東西方向約 20km、南北方向約 30km の矩形領域で取得された (第 1 図)。観測には全点で、Phoenix Geophysics 社製の MTU-5A システムを用い、地磁気 3 成分–地電位差 2 成分を測定した。また、データ収録は、夜間の 14 時間 (6 p.m. –8 a.m) に、サンプリング間隔 15 Hz or 2,400 Hz (0.067 s or 0.00042 s) で実施した。

時系列データから、3 次元インバージョン解析に使用する応答関数 (インピーダンステンソル 4 成分 : 水平電場–水平磁場間、ティッパー 2 成分 : 垂直磁場–水平磁場間) データを求める際には、阿蘇カルデラから約 100km 離れた磁場参照点で観測された地磁気 3 成分値を用いて Remote reference 処理[2]を行うことで、ノイズ軽減を図った。そして、求めた応答関数から 16 周期 (0.005–2380 s) を選び出し、MT 応答関数 6 成分を入力とした 3 次元インバージョン解析[3]を実施した。最適モデルは、地形・海陸分布を考慮した南北 1,400 km・東西 1,400 km・鉛直 1001.79 km の領域に、陸地 80 Ωm ・海水 0.33 Ωm ・空気 108 Ωm の比抵抗値を与えた初期構造から、陸地の比抵抗値のみを変化させ求めた。

3. 3次元比抵抗構造モデル

3 次元インバージョン解析により得られた比抵抗構造モデルの水平断面を第 2 図に、鉛直断面を第 3 図に示す。第 2 図の水平断面を見ると、阿蘇カルデラ内には、顕著な低比抵抗異常のブロック C1, C2 (1–40 Ωm) が存在することが分かる。そして、低比抵抗異常の

ブロックは、深さ~10 km から地表面に向かうにしたがって、北から南へと移動していることが確認できる。さらに、第3図の鉛直断面 (profile A2) を見ると、低比抵抗異常のブロック C2 は、C1 からの枝分かれであり、中岳へと延びていることが分かる。これらのことから、低比抵抗異常 C1, C2 は、中岳第一火口の噴火活動に関連したマグマに起因した異常であると考えられる。

第3図に示した鉛直断面にプロットされた地震の震源 (2002年6月–2016年4月16日の期間の気象庁一元化震源) は、阿蘇カルデラ北西側では高比抵抗ブロック内に分布するのに対し (profile A1–A3)、北東側では高比抵抗ブロックと低比抵抗ブロックの境界付近の高比抵抗ブロック側に分布する (profile B1–B3)。この高比抵抗ブロック内で起こっている地震の震源分布の東西での差異は、阿蘇カルデラ下の地殻の応力分布にマグマが何らかの影響を及ぼしている可能性を示唆していると考えられる。

マグマ溜まりの存在を検討するため、低比抵抗異常 C1, C2 について、その比抵抗値が示すメルトの割合を計算した。この計算では、まず、2014年11月26–27日に中岳第一火口で噴出したスコリアの化学分析結果 [G. Saito (personal communication), Geological Survey of Japan, 2015] を使用してケイ酸塩メルトの比抵抗値を SIGMELTS[4] で求めた後、Hashin–Shtrikman の式[5]を用いてメルトの割合を計算した。最終的に、低比抵抗異常 C1 では最大で 76–87%、C2 では最大で 13–14% のメルトが存在するという結果が得られた。

4. おわりに

2015年度観測の MT データを使用した3次元インバージョン解析による比抵抗構造モデルから、阿蘇カルデラの地殻内部について、以下の2つの特徴が得られた。

1) 中岳火口北側の約 10km 以深から火口直下まで延びる北下がりの低比抵抗異常のブロックが存在すること。

2) カルデラ北西側の地震の震源は、高比抵抗ブロック内に分布するのに対し、カルデラ北東側の震源は、高比抵抗ブロックと低比抵抗ブロックの境界付近の高比抵抗ブロック側に分布すること。

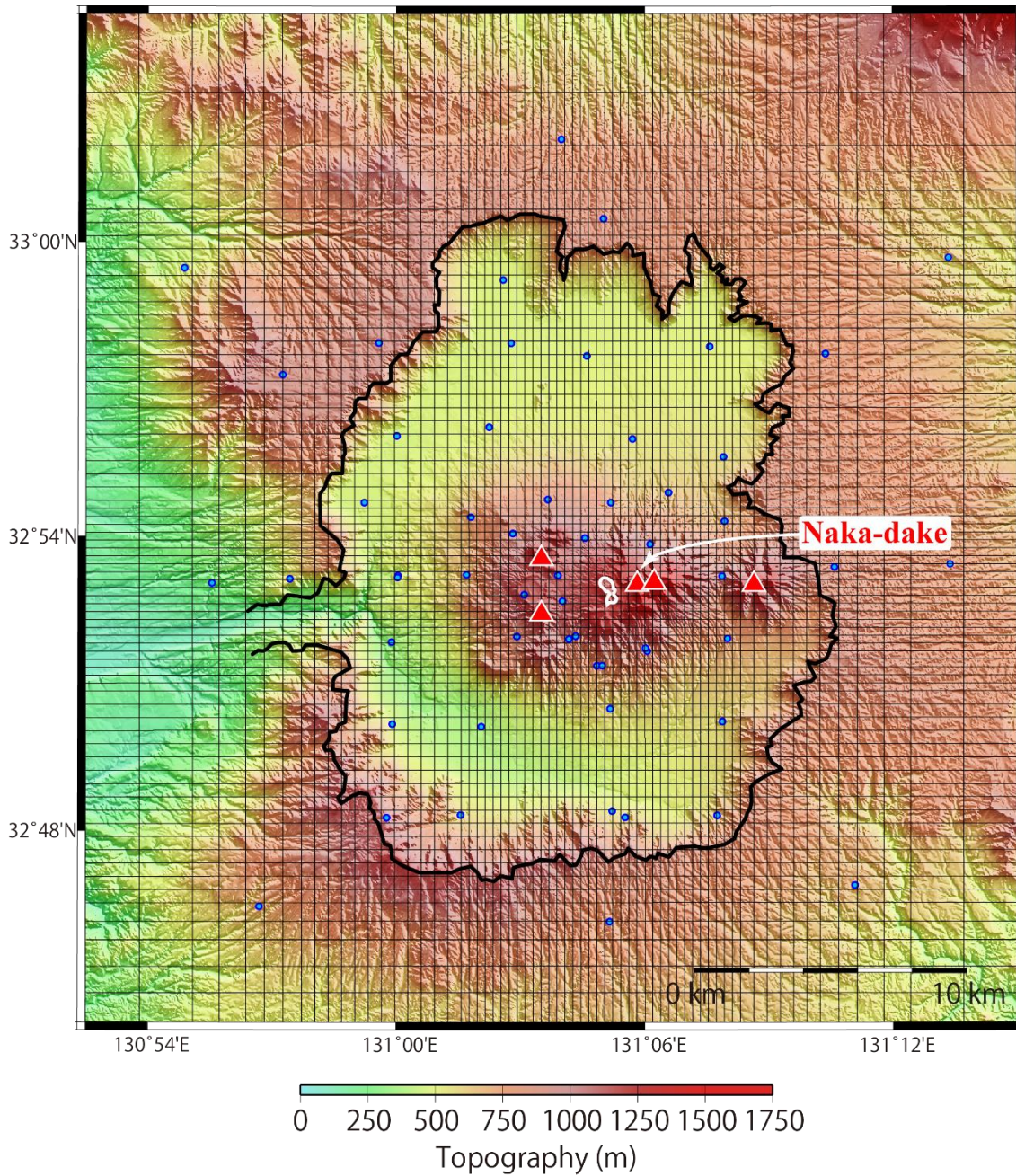
今後は、より深部のマグマ溜まりの存在を検討するため、阿蘇カルデラの外側に展開した 2016年度観測の MT データを追加し、阿蘇カルデラの地殻深部 (~20 km) に至る構造を明らかにすることを目指した3次元インバージョン解析を実施する予定である。

謝辞

本研究は平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）の成果の一部である。本研究に係る観測においては、京都大学火山研究センター（Aso Volcanological Laboratory）の方々に協力を頂いた。

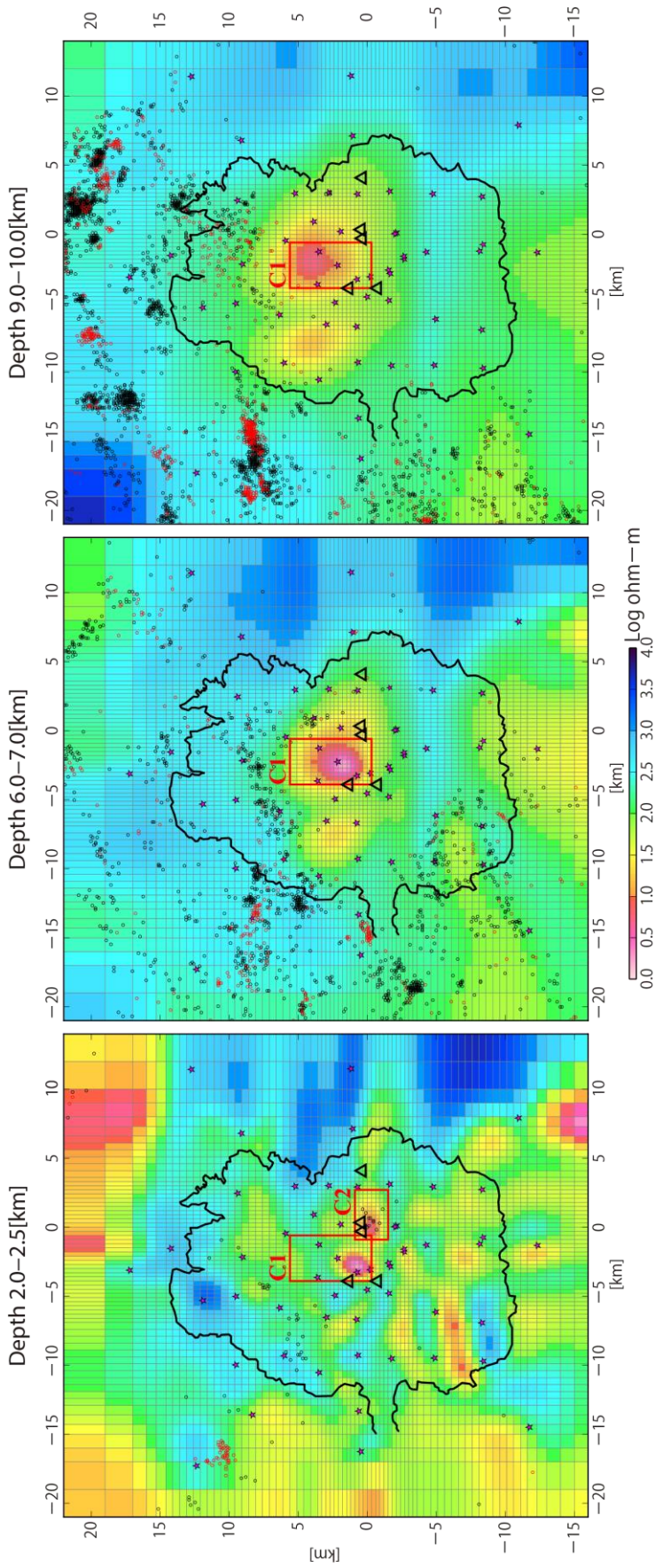
引用文献

- [1] HATA, M., S. Takakura, N. Matsushima, T. Hashimoto, and M. Utsugi (2016), Crustal magma pathway beneath Aso caldera inferred from three-dimensional electrical resistivity structure, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GRL070315, 2016.
- [2] Gamble, T.D., W.M. Goubau, and J. Clarke (1979), Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53–68.
- [3] Siripunvaraporn, W., and G. Egbert (2009), WSINV3DMT: Vertical Magnetic Field Transfer Function Inversion and Parallel Implementation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 173(3-4), 317–329.
- [4] Pommier, A., and E. Le-Trong (2011), “SIGMELTS”: A web portal for electrical conductivity calculations in geosciences, *Computers & Geosciences*, 37, 14501–459.
- [5] Hashin, Z., and S. Shtrikman (1962), A variational approach to the theory of effective magnetic permeability of multiphase materials, *J. Appl. Phys.*, 33, 3125.



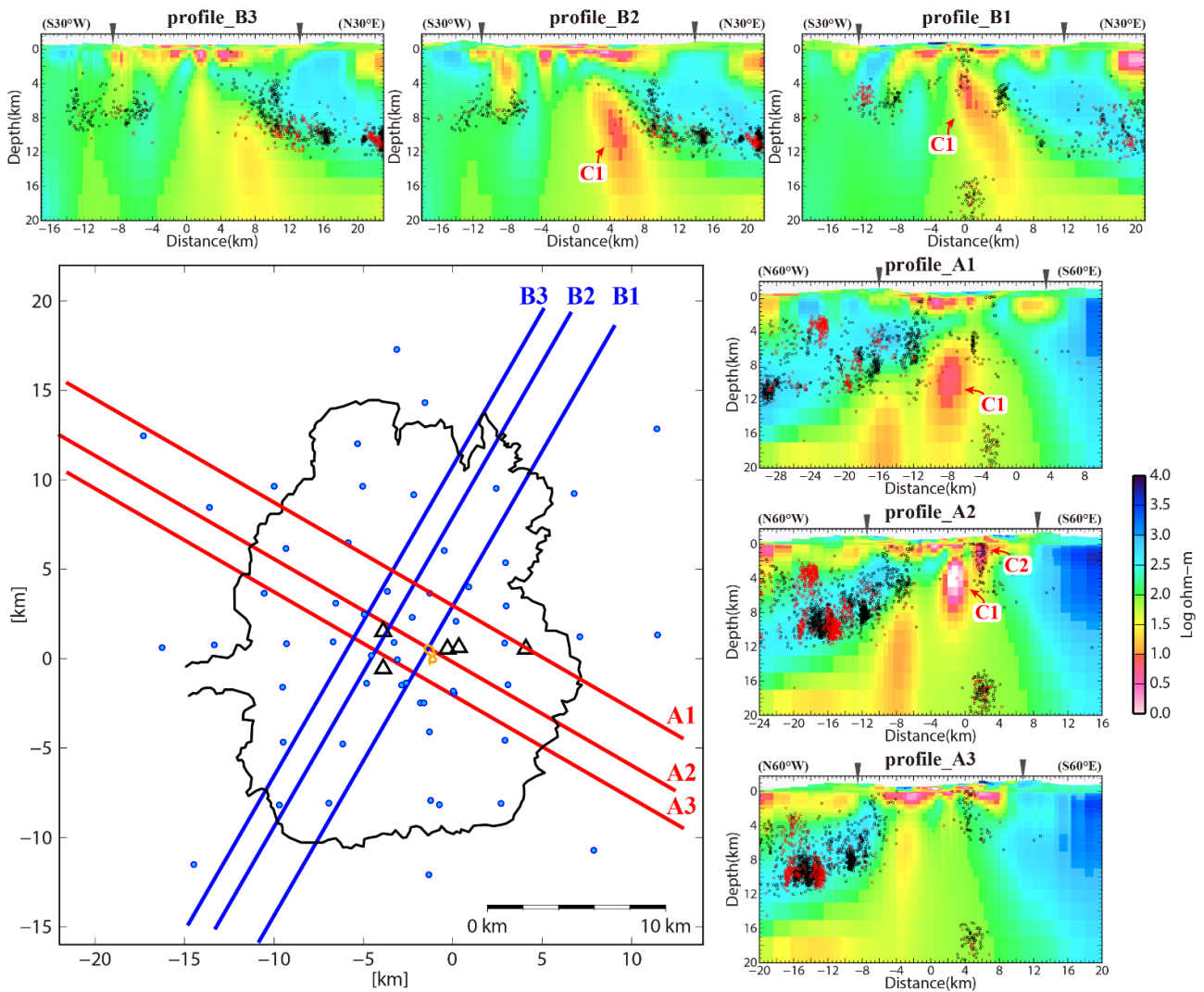
第 1 図. 阿蘇カルデラ周辺の地形図と MT 観測点 (●)。▲は中央火口丘, 白枠は中岳第一火口を表す。([1] より)

Fig. 1. Topographic map around Aso caldera showing 55 magnetotelluric (MT) sites (blue dots). Red triangles, white outline, and black outline indicate the five main postcaldera cones, Naka-dake first crater, and the rim of Aso caldera, respectively.



第 2 図. 3 次元比抵抗構造モデルの阿蘇カルデラ周辺の水平断面。★は MT 観測点, △は中央火口丘, ○と○は震源分布を表す。
([1]より)

Fig. 2. Horizontal cross sections of the electrical resistivity model at depths of 2.0–2.5, 6.0–7.0, and 9.0–10.0 km, with earthquake hypocenters determined by the Japan Meteorological Agency (JMA). Pink stars, black triangles, and black outline indicate MT sites, principal post caldera cones, and the rim of Aso caldera, respectively. Earthquakes that occurred between June 2002 and December 2013 are represented by black dots; earthquakes from January 2014 to April 2016 are represented by red dots.



第 3 図. 3 次元比抵抗構造モデルの阿蘇カルデラを横断するの鉛直断面。断面上の▼はカルデラ壁の位置, ○と○は震源分布を表す。それぞれのカルデラ横断測線は, 地図上の赤線と青線に対応する。●は MT 観測点, ▲は中央火口丘, オレンジ枠は中岳第一火口を表す。
([1]より)

Fig. 3. Cross sections of three-dimensional electrical resistivity along six profiles (A1–3 and B1–3). Blue dots, black triangles, orange outline, and black outline indicate MT sites, the five main postcaldera cones, Naka-dake first crater, and the rim of Aso caldera, respectively. JMA earthquake hypocenters within 2 km of each profile line are indicated on cross sections: black dots correspond to earthquakes between June 2002 and December 2013, and red dots correspond to earthquakes between January 2014 and April 2016. Gray triangles represent locations on the caldera rim.