

地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術 —鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用—

浅森浩一^{*1} 梅田浩司^{*1}

火成活動が地層処分システムに及ぼす影響として、マグマの貫入や熱水対流の発生等が考えられる。そのため、対象とする地域の地下深部にマグマや高温流体等が存在する可能性をあらかじめ確認しておくことが不可欠であり、そのための調査技術を整備しておくことが重要となる。本報では、地下深部のマグマ・高温流体等に関する調査技術として核燃料サイクル開発機構が取り組んでいる地震波トモグラフィー法、地磁気地電流法を紹介する。また、鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域における適用事例について述べる。

Key words : 地下深部構造、マグマ、高温流体、地震波トモグラフィー法、地磁気地電流法

The effects of volcanism on the geological environments include a dynamic destruction and subsidence of basement rocks, caused by the intrusion and eruption of magma. To ensure the long-term stability of geological disposal system, a possibility of renewed volcanism at the site might be examined based on the geotectonic data of the deep underground using geophysical and geochemical approaches. This paper describes an overview of geophysical approaches for detecting magmas and/or high temperature fluids related to volcanism within the crust and uppermost mantle. Moreover, we present the images of the seismic velocity and electrical resistivity structure beneath the Onikobe-Narugo volcanic region and the southern Kii Peninsula, carried out in JNC's R&D program.

Key words : deep structure, magma, high temperature fluids, seismic tomography, magneto-telluric method

1 はじめに

わが国の火成活動は、千島・北海道・東北本州を経て伊豆諸島からマリアナ諸島に至る東日本火山帯と山陰から九州を経て南西諸島に至る西日本火山帯で生じている。しかしながら、火山帯の前弧域においても高温の温泉が湧出している地域も存在しており、それらの一部は火成活動に関連している可能性も示唆されている（例えば[1-2]）。

火成活動が地層処分システムに及ぼす影響については、マグマの貫入あるいは噴出による処分施設および廃棄体の直接的な破損のほか、マグマの熱等による地温上昇や熱水対流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等が考えられており、これらの諸現象は、最終処分事業におけるサイト選定や処分システムの設計・施工等に際して十分に留意する必要がある[3-4]。そのため、概要調査地区等の選定に際しては、将来にわたる潜在的なリスクを排除する観点からも、対象とする地域の地下深部において、マグマやその固化に伴って放出される水等の高温流体、あるいは高温岩体の存在をあらかじめ確認しておくことが不可欠であり、そのための調査技術を整備しておくことが重要となる。

本報では、地下深部のマグマや高温流体等に関する調査技術を概観した上で、とくに核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が取り組んでいる自然地震を用いた地震波トモグラフィー法、地磁気地電流（magneto-telluric；以下、MT）法の紹介とその適用事例について述べる。

Geophysical techniques for detecting magmas and high-temperature fluids; their application to the Onikobe-Narugo volcanic region and the southern Kii Peninsula by Koichi Asamori (asamori@tono.jnc.go.jp), Koji Umeda

*1 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute
〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

2 マグマ・高温流体等に関する調査技術

2.1 調査技術の概要

活動的な火山や地熱地帯では、火山防災や地熱資源開発の観点から地下深部構造の推定に関する調査・研究が数多くなされている。とくに桜島、阿蘇山、有珠山、伊豆大島、雲仙岳、三宅島等の活動的な火山に対しては噴火予知に関する総合的な研究が精力的に行われており、マグマや高温流体等を捉えるための地球物理学的な調査技術として、地震、電磁気、重力、測地等を用いた最先端の観測・解析技術に関する研究開発が進められている[5]。

マグマや高温流体等の存在を確認するためには、まずそれに関連する深部物性の2次元あるいは3次元的な空間分布を把握することが肝要である。これまでの研究においては、地殻や上部マントルを対象として、地震波速度構造（例えば[6-7]）、地震波減衰構造（例えば[8]）、比抵抗構造（例えば[9]）等が推定されている。このほか、地温勾配（例えば[10]）、地震発生層の深さ分布（例えば[11]）、S波反射面の分布（例えば[12]）、地震波散乱体分布（例えば[13]）、測地データに基づく火山下の圧力源の位置（例えば[14]）の推定等もマグマや高温流体等の存在についての情報を与えることができる。

しかしながら、これらの情報を得るためのそれぞれの手法は、対象領域のさまざまな条件により適用性が異なることに注意しなければならない。例えば、自然地震に伴う地震波を用いた手法を適用する場合は、一般に、対象とする領域下において微小地震が多数発生し、かつその地表において多くの地震観測点による地震データが豊富に取得できるほど、信頼性の高い解析が可能となる。このため、対象領域が地震観測網の端部となる沿岸地域である場合は、その研究結果の精度は内陸部でのそれに比べて劣る場合もある。このようなことからも、地下深部のマグマや高

温流体等の調査にあたっては、単独の手法による観測結果のみならず、複数かつ互いに独立した観測や解析による地球科学的情報をもとに総合的に考察し、その信頼性を向上させる必要がある。

以下では、深部物性の2次元あるいは3次元な空間分布を推定する手法として、汎用性が比較的高く、地殻深部までの探査が可能な地震波トモグラフィー法およびMT法を取り上げ、それらの概略について紹介する。

2.2 地震波トモグラフィー法

地震波トモグラフィー法は、人工地震や自然地震の発生に伴って震源から地表の観測点に伝播する地震波の観測データを多量に用い、多数の3次元ブロックまたは格子点によって表現された解析対象領域内の3次元的な地下構造をインバージョンによって推定する手法である。この手法は、Aki and Lee (1976) [15]によって始められ、その後、手法の改良（例えば[6, 16-17]）や計算機の能力および観測データの質と量の向上がなされたことにより、現在では3次元的な地下構造を推定する標準的手法の1つとなっている。多くの場合、実体波の走時データを用いて地球内部の3次元地震波速度分布（構造）を推定する。

一般に、地震波速度は岩石の種類、流体の飽和度、温度、圧力等によって変化するため（例えば[18]）、地震波トモグラフィー法によって推定される地球内部の3次元地震波速度構造は流体や高温異常の空間分布を把握するための重要な手がかりの1つとなり得る。このことから、地震波トモグラフィー法は火山地域における詳細な3次元地下構造の推定にも適用されている（例えば[19-22]）。例えば、雲仙下の地殻においてはP波、S波速度が3~6%遅い円錐状の地震波低速度体が見出されている。さらに、地殻内の温度構造を反映していると考えられる地震発生層の下限が火口に向かうにつれて浅くなっていること等から、この地震波低速度体の上面とほぼ一致していること等から、この地震波低速度体は火山に供給するマグマの存在を示唆するものであると推測されている[20-21]。

わが国は沈み込み帯に位置しているために地震活動が非常に活発である。さらに近年、日本列島全域に整備された高密度の地震観測網により観測された精度の高い地震データが蓄積されつつあり[23]、地震波トモグラフィー法を用いる際に必要となる多量かつ高精度の地震データを取得することが可能となった。このため、地震波トモグラフィー法は地下深部のマグマや高温流体等を把握するための有用な手段の1つであると考えられる。

2.3 MT法

MT法による自然電磁場変動の観測は、地震波トモグラフィー法と同様に地下構造を推定する上で有効な手法の1つである。地球は導体であるため、外部起源の自然電磁場変動に対応した電流が地下に誘導される。MT法では、

電磁場の観測を行い、磁場変動に対する電場変動の比（インピーダンス）を測定することによって地下の比抵抗分布を推定する。

前項で述べた地震波トモグラフィー法によって捉えられる地下構造は地震波速度の分布（構造）であるが、電磁波で捉えられる地下構造は比抵抗の分布（構造）である。比抵抗は、岩石の状態を反映してオーダーで変化する物性値であり、空隙率が高く、比抵抗の低い流体を含む岩石は低比抵抗を示す。

また、MT法は地殻深部もしくは上部マントルまでの比抵抗構造を推定することが可能であることや、1次元解析をはじめ、2次元、3次元解析手法（例えば[24-25]）が開発されていること等から、石油や地熱等の資源探査や地殻深部を対象とした地殻内物性の不均質に関する研究等に用いられており、これまでの研究において、とくに流体の存在に関わる地殻内物性の不均質を明らかにしてきた（例えば[26]）。また、最近、富士山周辺において行われたMT法による観測では、火山下における深さ50kmまでの2次元比抵抗構造が推定され、マグマの存在を示唆する顕著な低比抵抗体が見出されている[9]。

これらのことから、地震波トモグラフィー法に加え、MT法による比抵抗構造調査もとくに有効であると考えられる。

3 調査事例

3.1 鬼首・鳴子火山地域

東北日本弧の火山フロント（奥羽脊梁山地）に位置する鳴子火山は、わが国有数の地熱地帯である鬼首カルデラの南方に位置する第四紀火山であり、直径約7kmの不鮮明な輪郭を有するカルデラとその中央部の溶岩ドーム群からなる[27]。また、その北西には第四紀火山である向町カルデラが位置し[28]、それぞの第四紀火山の近傍においては泉温90°C以上の高温泉が認められている[29]。また、鬼首および鳴子火山において知られている最新の火山活動は、それぞれ約20万年前および9世紀まで遡る[30]。

3.1.1 地震波速度構造

鬼首・鳴子火山地域およびそれを含む東北日本における3次元地震波速度構造は、これまでのいくつかの地震波トモグラフィー法による研究によって推定されている（例えば[6-7, 31-32]）。このうち、Nakajima et al. (2001) [7]では東北日本弧下の地殻・上部マントルの3次元P波、S波速度（以下、それぞれVp, Vs）およびVp/Vs比構造が推定されており、さらに、Nakajima and Hasegawa (2003) [32]では、鬼首・鳴子地域下の地殻における詳細な3次元Vp, Vs, Vp/Vs比構造が推定されている。

これらの研究によれば、鳴子火山下の上部地殻において鉛直方向に延びる筒状の地震波低速度体が見出されてお

り, それは下部地殻およびマントル最上部に認められる地震波低速度および高 Vp/Vs 比体とつながっている特徴を示す. また, 下部地殻に見出された地震波低速度, 高 Vp/Vs 比体は, 上部地殻において認められる地震波低速度体と比べて水平方向に拡がっているようにイメージされている [32].

3.1.2 比抵抗構造

サイクル機構では 2003 年 10 月に MT 法による 2 次元比抵抗構造の推定を試みた. 測線は, 山形県新庄市から鳴子火山を通り宮城県築館町に至るほぼ東西方向の約 50km の区間であり, 鳴子火山を中心として 1~5km の測点間隔で 19 点の観測点を配置している (Fig. 1). なお, 測定データの解析には, Ogawa and Uchida (1996) [24] によるアルゴリズムを用い, 鳴子火山周辺域における地殻の 2 次元比抵抗構造を推定した. 解析によって推定された 2 次元比抵抗構造 [33] を Fig. 1 に示す.

解析によって得られた 2 次元比抵抗構造において, 鳴子火山下の地殻に $100 \Omega\text{m}$ 以下の顕著な低比抵抗体が認められる. 上部地殻においてこの低比抵抗体は深くなるにつれて水平方向に拡がっており, その上部は地表付近までつながっているようにイメージされる. このような低比抵抗体分布の特徴は地震波トモグラフィー法によって推定さ

れた地震波低速度体の分布域 [32] と良く一致している. また, 上部地殻において発生している浅発地震の震源のほとんどはこの低比抵抗体の上位に位置している. さらに, 低周波微小地震は, 下部地殻における低比抵抗体の端部に集中して発生している. しかしながら, 地殻最深部からマントル最上部における比抵抗構造と地震波速度構造のイメージは異なっている. この領域における地震波速度構造では, 地震波低速度, 高 Vp/Vs 比体が深くなるにつれて前弧側へシフトしていることに対し, 比抵抗構造ではそれに対応する低比抵抗体は見られない.

3.1.3 議論

東北日本における浅発地震の地震発生層の下限深度は, 地殻内の温度が周辺よりも高い火山地域下において浅くなる傾向がある [34]. 鳴子火山下における地震発生層の下限深度は周囲に比べて浅く (Fig. 1), 地表付近における地温勾配も高い [10]. これらは, 鳴子火山下の地殻内温度が周辺領域に比べて高いことを示唆していると考えられる. また, Nakajima and Hasegawa (2003) [32] によれば, 地震波トモグラフィー法によって推定された地震波速度構造の特徴や, 地震波速度の溶融体や水 (H_2O) に対する依存性 [35] 等から, 鳴子火山下のマントル最上部から下部地殻においては部分溶融域が拡がり, その上部には地表付近に至

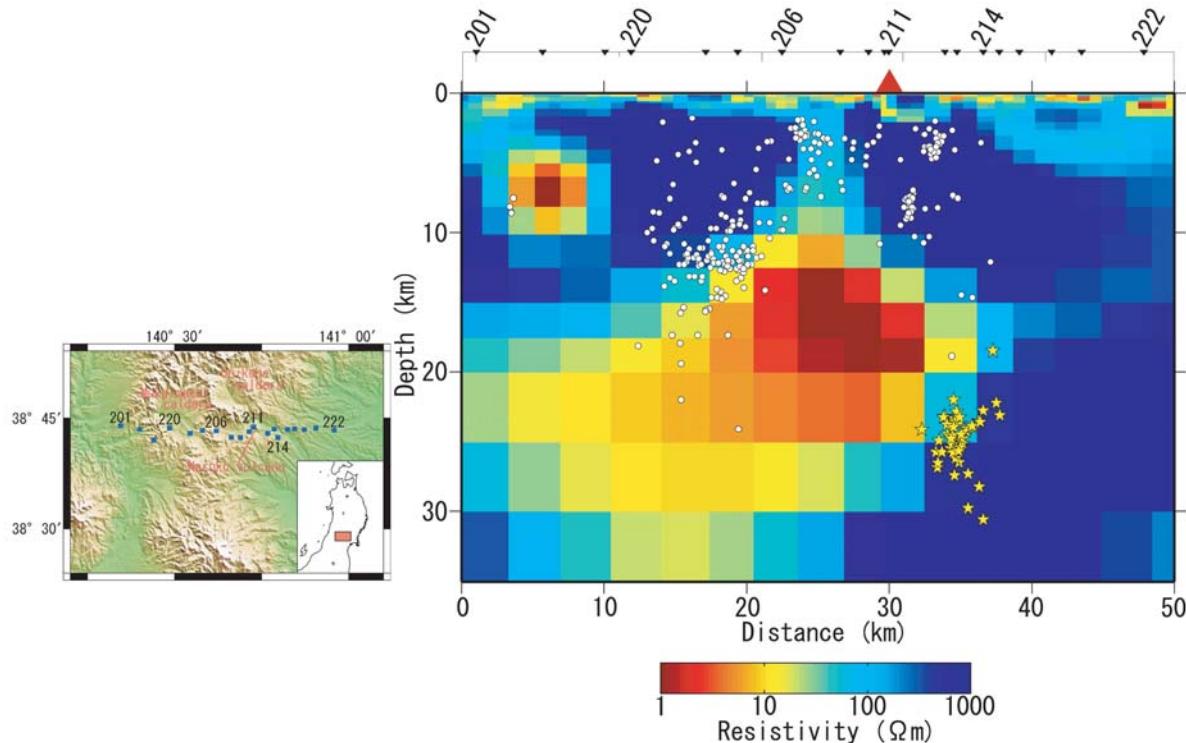


Fig. 1 Two-dimensional resistivity model. Hypocenters of microearthquakes (open circles) and low-frequency microearthquakes (stars) identified by the Japan Meteorological Agency (Jun. 2002 - Jul. 2004) and Japan University Seismic Network (Jul. 1985 – Dec. 1998). Red triangle shows the center of Naruko volcano. Insert map shows the distribution of MT site (blue squares).

る水 (H_2O) の通り道が存在すると指摘されている[32]。

鳴子火山下の地殻上部から中部に認められる低比抵抗体の分布域は、地震波トモグラフィーによって見出された地震波低速度体[32]の分布域と整合的であり、地殻深部に存在する流体の移動に伴って発生すると考えられている低周波微小地震[36]の震源は低比抵抗体の周縁部に集中している (Fig. 1)。また、比抵抗および地震波速度は、高温異常や流体の存在によってその値が低下する物性値であることから、両者は同一の構造を捉えている可能性が高く、この低比抵抗体はマグマやその固化に伴って放出された高温流体の存在を示唆していると考えられる[33]。

このように、互いに独立した物性値を推定した結果が整合的であることは、両者の観測および解析結果の信頼性が高いことを示しているとともに、それまでに推定されていた物性値とは異なる比抵抗構造を推定することによって、

マグマおよび高温流体等の存在に関するより高い信頼性を与えることができたと考えられる。しかしながら、必ずしも低比抵抗体および低速度体の分布域が一致するとは限らず、本解析結果においても地殻最深部からマントル最上部における比抵抗構造と地震波速度構造のイメージは異なっている。これらは、両者が異なった物性値であることに起因することも考えられるが、両者の解析における部分的な精度の低下や分解能の差等の観測・解析に関する不確実性に起因するとも考えられる。したがって、このような解析を行なう場合には、各解析結果の信頼性を吟味することも重要となる。

3.2 紀伊半島南部地域

紀伊半島は西南日本弧の前弧域に位置しており、その南部に存在する南海トラフからフィリピン海スラブが北

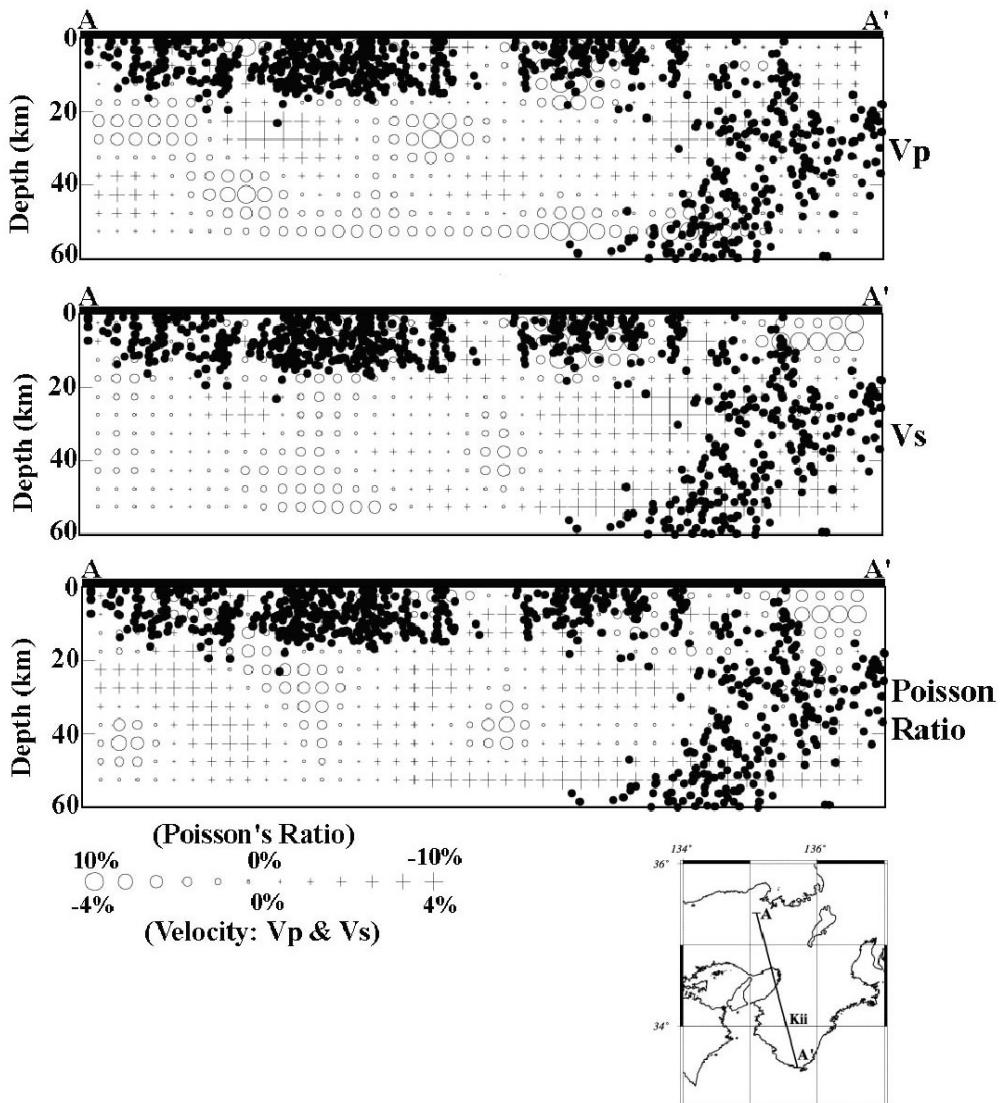


Fig. 2 Vertical cross sections of P-wave, S-wave velocity and Poisson's ratio along line AA' (insert map) [47]. The perturbation scale is shown at the bottom. Solid circles show seismicity in 20-km wide zone along the profile.

—北西方向に沈み込んでいる。紀伊半島中部から南部においては、非火山地域であるにもかかわらず、高い地殻熱流量が観測されているとともに[37]、湯の峰 (92.5°C) や白浜 (78°C) 等の高温泉が認められており[29]、特異な地域として知られている。これまでに行われた研究においては、これらの熱源として、伏在火成岩体[38]、比較的若く温かい四国海盆の沈み込みに伴う熱伝導[39-40]、下部地殻やマントルウェッジにおける部分溶融体の存在[1-2]の可能性が指摘されている。

3.2.1 地震波速度構造

紀伊半島を含む領域においては、これまでにいくつかの研究によって地殻、上部マントルの3次元地震波速度構造が推定されている（例えば[41-43]）。このうち、Salah and Zhao (2003) [43]においては、国立大学観測網[44]および近年整備された Hi-net[23]等によって観測された多量かつ高精度の地震データを用い、紀伊半島下の地殻、上部マントルの3次元 V_p 、 V_s 構造が推定されるとともに、 V_p および V_s からポアソン比等の物性値が求められた。

これによれば、紀伊半島下の地殻およびマントルウェッジにおいて、フィリピン海スラブからの脱水に起因すると考えられる地震波低速度、高ポアソン比体が認められており、紀伊半島北西部の中央構造線沿いやその南側、または淡路島下における地殻およびマントル最上部において

見出されている[43]。このような異常体は紀伊半島南端部下の地表付近においても認められているが、紀伊半島中部から南部における本宮や白浜等の高温異常域直下においては顕著な低速度体は認められていない（Fig. 2）。

3.2.2 比抵抗構造

前項にて述べた地震波速度構造に加えて、サイクル機構では、紀伊半島南部の本宮周辺地域において MT 法による2次元比抵抗構造の推定を行った。測線は、本宮地域を通る東西方向の約 50km の区間であり、5~10km 程度の間隔で合計 9 点の観測点を展開している（Fig. 3）。これらの観測点において取得されたデータを Ogawa and Uchida (1996) [24]によるアルゴリズムを用いて2次元比抵抗構造を推定した。

得られた2次元比抵抗構造（Fig. 3）においては、大峯山脈下における地表付近から深さ約 20km までの領域において $1000 \Omega m$ 以上を示す高比抵抗体が認められる。この高比抵抗体は、以前に行われた比抵抗構造推定に関する研究[45]においても同様の高比抵抗体が見出されており、地表における熊野酸性火成岩類と大峯花崗岩類の分布域[46]と高比抵抗体の東西方向の拡がりが整合的であること等から、この高比抵抗体は伏在した深成岩体に相当するものであると推定されている[47]。

一方で、高温の温泉が確認されている本宮から西側の領

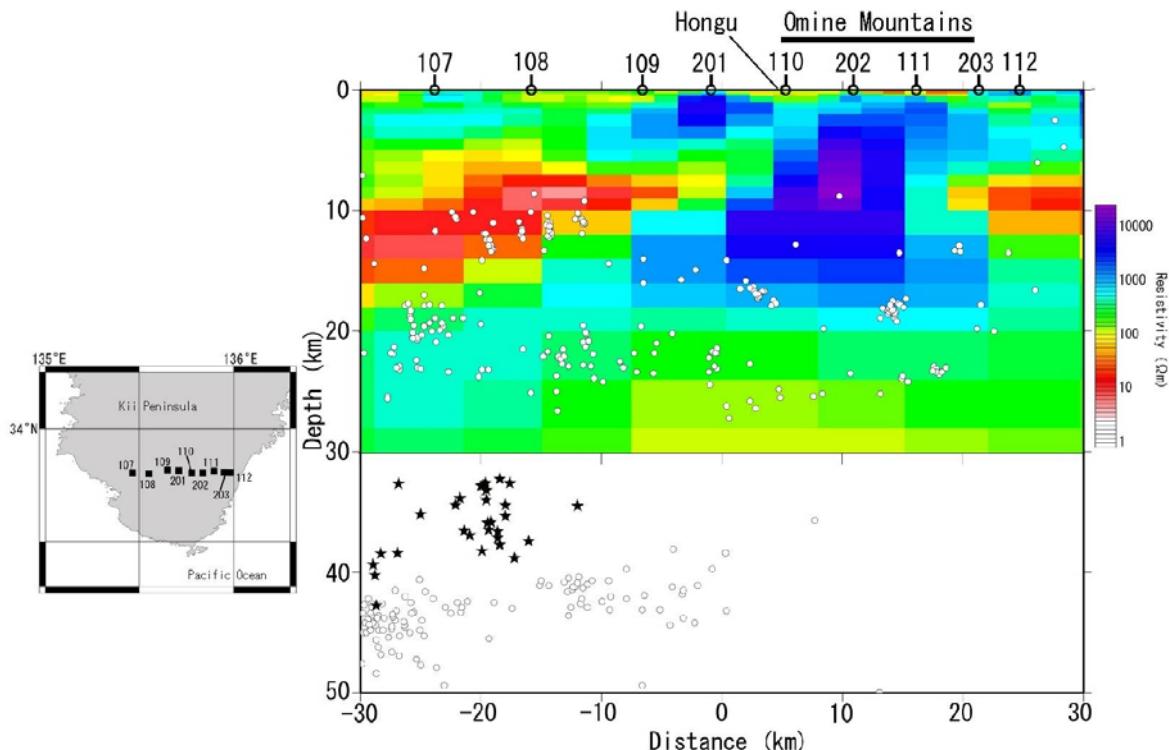


Fig. 3 Two-dimensional resistivity model. Hypocenters of microearthquakes (open circles) and deep long period tremors (stars) identified by the Japan Meteorological Agency (Jun. 2002 – Aug. 2003). Insert map shows the distribution of MT site (solid squares).

域下においては、深さ 5~20km 付近に $100 \Omega \text{m}$ 以下の顕著な低比抵抗体が認められる。この低比抵抗体は、解析領域中央部から西方に向かうにつれ、水平からやや西傾斜を呈しており、厚さ 10km 程度の層状をなしているように見える。さらに、前述した鳴子火山下に見出された低比抵抗体に関連する特徴とは異なり、地殻内で発生している多くの浅発地震は低比抵抗体内部および下位に位置している。また、深さ 40~50km においてはフィリピン海スラブ内において発生していると考えられる稍深発地震が多く認められ、その上部には低周波微動が多数発生している[48-49]。

3.2.3 議論

紀伊半島下における地震活動は、震源分布やその発震機構から、地殻上部、地殻下で発生している地震、およびその中間の深さにおいて発生している地震に区分されている[50]。紀伊半島南部から南西部下で発生している浅発地震の多くは低比抵抗体内部および下位に位置しており (Fig. 3)、前述した鳴子火山下に見出された低比抵抗体に関する特徴とは明らかに異なる (Fig. 1)。浅発地震はマグマのような高温領域内において発生するとは考えにくいため、この低比抵抗体はマグマの存在に起因するものではないと推定される。

最近の研究において、沈み込むフィリピン海スラブの脱水に起因する流体が西南日本前弧域の地下深部においても存在することが指摘されている[51]。また、紀伊半島中部から南部下における深さ 50km 以深に後続波を伴わない稍深発地震の存在が見出されており[52]、含水スラブを構成する海洋地殻あるいはスラブマントルの脱水脆性化がこれらの地震を引き起していることが指摘されている[2]。さらに、西南日本における前弧域の地殻とフィリピン海スラブの境界付近において、多くの低周波微動が発生していることが明らかになっており[48-49]、それはスラブの脱水に伴う流体が、その上部にある地殻に上昇していく過程で発生していると考えられている[53]。

MT 法によって 2 次元比抵抗構造を推定した領域下においては、深さ 30~40km において低周波微動が観測されている (Fig. 3)。また、本解析によって見出された低比抵抗体は、低周波微動の震源が分布する領域の直上に位置している。これらことから、この低比抵抗体は、その下位に位置するフィリピン海スラブからの脱水に伴う流体が地殻内にトラップされた様子を映し出している可能性が考えられる。

さらに、地表での観測事実として、紀伊半島は火山フロントから離れた前弧域であるにもかかわらず、火山地域で認められるような高いヘリウム同位体比 (${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比) が観測されている[54-56]。ヘリウム同位体比は、大気 ($\text{Ra}=1.4 \times 10^{-6}$)・地殻・マントルで大きく値が異なることから、温泉ガスの起源を推定するための重要な手段として用いられており、一般に、火山フロントから背弧側では MORB

の値 ($\sim 8\text{Ra}$) に近く、前弧側では大気や地殻物質の寄与を示すような低い値が報告されている (例えは[57])。前述のように、紀伊半島下ではスラブマントルにおいて脱水脆性化が生じており、それに伴って放出された流体が陸域地殻に上昇していると推定されること、およびスラブマントル起源のヘリウム同位体比は MORB と同程度と考えられていることから[58]、スラブマントル起源のヘリウムおよび地下深部の熱が脱水した流体をキャリアとして地殻内を上昇した結果、紀伊半島南部において高温かつ高ヘリウム同位体比を有する温泉が生じたと考えられる[59-60]。

本解析によって見出された低比抵抗体が高温の流体を映し出しているとすれば、高温異常や流体の存在に伴って地震波速度は低下するため、地震波トモグラフィー法によって推定される 3 次元地震波速度構造においては、同領域において低速度体が検出されるはずである。しかしながら、それに対応する明瞭な地震波低速度体は認められていない[43]。これは、地震波トモグラフィー法や MT 法によって推定された地下構造に対する分解能の問題や、地震波速度と比抵抗の流体や温度に対する感度の違いによると考えられる。このような場合においては、ターゲットとする特定の構造に対する分解能テスト (例えは[61]) を行なうこと等が有効である。

4 まとめ

本報では、地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術として、地震波トモグラフィー法および MT 法について概略を述べるとともに、サイクル機構においてこれまでに実施した鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域における調査事例を紹介した。各調査技術によって得られる情報は誤差等の不確実性を含んでいることや、解析における分解能の制約があり、単独の情報から地下深部のマグマや高温流体等の存在および分布を特定することは困難である。そのため、調査を行なう際には、複数の手法による互いに独立した物性値を取得し、総合的に考察することが必要であると考えられる。例えは、紀伊半島南部の事例において述べた温泉水・ガス等のヘリウム同位体比のように、地下深部から上昇する流体等の存在に起因してその値が空間的に変化するとされる地球化学的指標に関する研究もなされており、ここで紹介した調査手法に限らず、より多くの情報を取得し、調査を行なう必要があると考えられる。

謝辞

本報には、気象庁、防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所地質調査総合研究センター、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市および海洋科学技術センターのデータ

を、気象庁・文部科学省が処理した一元化震源および国立大学観測網地震カタログ震源ファイルを使用している。記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Wakita, H., Sano, Y., Mizoue, M.: High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region. *J. Geophys. Res.* **92**, 12,539-12,546 (1987).
- [2] Seno, T., Zhao, D., Kobayashi, Y., Nakamura, M.: Dehydration of serpentized mantle: Seismic evidence from southwest Japan. *Earth Planets, Space* **53**, 861-871 (2001).
- [3] 原子力委員会: 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について. 41p. (1997).
- [4] 原子力安全委員会: 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について. 21p. (2002).
- [5] 科学技術・学術審議会測地学分科会: 第6次火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて(報告). 35p. (2002).
- [6] Zhao, D., Hasegawa, A., Horiuchi, S.: Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* **97**, 19,909-19,928 (1992).
- [7] Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., Zhao, D.: Three-dimensional structure of V_p , V_s , and V_p/V_s beneath the northeastern Japan arc: Implications for arc magmatism and fluids. *J. Geophys. Res.* **106**, 21,843-21,857 (2001).
- [8] Tsumura, N., Matsumoto, S., Horiuchi, S., Hasegawa, A.: Three-dimensional attenuation structure beneath the northeastern Japan arc estimated from spectra of small earthquake. *Tectonophysics* **319**, 241-260 (2000).
- [9] Aizawa, K., Yoshimura, R., Oshiman, N.: Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma chamber beneath Mt. Fuji. *Geophys. Res. Lett.* **31**, 10.1029/2004GL019477 (2004).
- [10] 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司 昇: 300万分の1日本列島地温勾配図. 地質調査所 (1999).
- [11] Ito, K.: Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *J. Phys. Earth* **38**, 223-250 (1990).
- [12] 堀 修一郎, 海野徳仁, 河野俊夫, 長谷川 昭: 東北日本弧の地殻内 S 波反射面の分布. *地震* **56**, 435-446 (2004).
- [13] 浅野陽一, 海野徳仁, 中村綾子, 岡田知己, 堀 修一郎, 河野俊夫, 仁田交市, 佐藤俊也, 長谷川 昭, 小菅正裕, 長谷見晶子: DAT アレイ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺域における地震波散乱体分布の推定. *地震* **52**, 379-394 (1999).
- [14] 西 潔, 石原和弘, 加茂幸介, 小野博尉, 森 済: GPS 測量による雲仙火山のマグマ溜りの推定. *火山* **40**, 43-51 (1995).
- [15] Aki, K., Lee, W. H. K.: Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes 1. A homogeneous initial model. *J. Geophys. Res.* **81**, 4,381-4,399 (1976).
- [16] Thurber, C. H.: Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California. *J. Geophys. Res.* **88**, 8,226-8,236 (1983).
- [17] Um, J., Thurber, C. H.: A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seism. Soc. Am.* **77**, 972-986 (1987).
- [18] O'Connell, R. J., Budiansky, B.: Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.* **79**, 5,412-5,426 (1976).
- [19] Ohmi, S., Lees, J. M.: Three-dimensional P- and S-wave velocity structure below Unzen volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **65**, 1-26 (1995).
- [20] 浅森浩一, 趙 大鵬: 雲仙岳下におけるマグマ溜りの3次元構造. 地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集, Jp033 (2001).
- [21] Zhao, D., Mishra, O. P., Sanda, R.: Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence. *Phys. Earth Planet Int.* **132**, 249-267 (2002).
- [22] 松本 聰, 津村紀子, 岡田知己, 長谷川 昭: 日光周辺域における地震波速度トモグラフィー. *月刊地球* **17**, 81-85 (1995).
- [23] 小原一成: 最近の地震観測網整備について. *自然災害科学* **19**, 397-402 (2001).
- [24] Ogawa, Y., Uchida, T.: A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. *Geophys. J. Int.* **126**, 69-76 (1996).
- [25] Zhdanov, M. S., Fang, S.: Three-dimensional quasi-linear electromagnetic inversion. *Radio Science* **31**, 741-754 (1996).
- [26] Mitsuhashita, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T., Uchida, T.: Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 4371-4374 (2001).
- [27] 土谷信之, 伊藤順一, 関 陽児, 巖谷敏光: 岩ヶ崎地域の地質. 地域地質研究報告, 地質調査所 (1997).
- [28] 第四紀火山カタログ委員会編: 日本の第四紀火山カタログ, 日本国火山学会 (CD-ROM) (1999).
- [29] 金原啓司: 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧. 地質調査所 (1992).
- [30] 村山 磐: 鳴子. 日本の火山(I), 大明堂, 東京, p.239 (1978).

- [31] 小原一成, 長谷川 昭, 高木章雄: 東北日本弧における地殻・上部マントルの三次元 P 波及び S 波速度構造. 地震 **239**, 201-215 (1986).
- [32] Nakajima, J., Hasegawa, A.: Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution. J. Volcan. Geothem. Res. **127**, 1-18 (2003).
- [33] 浅森浩一, 梅田浩司, 小川康雄, 武田祐啓, 上原大二郎, 鍵山恒臣: 鳴子火山下における深部比抵抗構造. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集, V055-012 (2004).
- [34] Hasegawa, A., Yamamoto, A., Umino, N., Miura, S., Horiuchi, S., Zhao, D., Sato, H.: Seismic activity and deformation process of the crust within the overriding plate in the northeastern Japan subduction zone. Tectonophysics **319**, 225-239 (2000).
- [35] Takei, Y.: Effect of pore geometry on Vp/Vs: From equilibrium geometry to crack. J. Geophys. Res. **107**, 10.1029/2001JB000522 (2002).
- [36] Hasegawa, A., Yamamoto, A.: Deep, low frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan. Tectonophysics **223**, 233-252 (1994).
- [37] 古川善紹, 新正裕尚, 西村 進: 近畿地方のヒートフロー測定: 熱構造から探る付加体テクトニクス. 月刊地球 **19**, 683-689 (1997).
- [38] 中村久由, 前田憲二郎, 鈴木 孝: 紀伊半島中南部地方の温泉群について. 地質調査所月報 **9**, 357-370 (1958).
- [39] 新エネルギー・産業技術開発機構: 地熱開発促進調査報告書 No. 37 本宮地域. 885p. (1993).
- [40] 大石 朗, 村松容一, 吉田 裕, 橋詰良吉: 流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討. 温泉科学 **45**, 63-75 (1995).
- [41] Zhao, D., Hasegawa, A., Kanamori, H.: Deep structure of Japan subduction zones as derived from local, regional and teleseismic events. J. Geophys. Res. **99**, 22,313-22,329 (1994).
- [42] Zhao, D., Ochi, F., Hasegawa, A., Yamamoto, A.: Evidence for the location and cause of large crustal earthquakes in Japan. J. Geophys. Res. **105**, 13,579-13,594 (2000).
- [43] Salah, M. K., Zhao, D.: 3-D seismic structure of Kii Peninsula in southwest Japan: evidence for slab dehydration in the forearc. Tectonophysics **364**, 191-213 (2003).
- [44] 坪井誠司, 紺纈一起, 鷹野 澄, 宮武 隆, 阿部勝征, 萩原幸男: 国立大学観測網地震カタログの震源決定処理. 地震 **42**, 277-284 (1989).
- [45] Fuji-ta, K., Ogawa, Y., Yamaguchi, S., Yasukawa, K.: Magnetotelluric imaging of the SW Japan forearc – a lost paleoland reveal? Phys. Earth Planet. Int. **102**, 231-238 (1997).
- [46] 徳岡隆夫, 原田哲郎, 井内美郎, 石上知良, 木村克己, 公文富士夫, 中條健次, 中屋志津男, 坂本隆彦, 鈴木博之, 谷口純造: 龍神地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 69p. (1981).
- [47] 梅田浩司, 上原大二郎, 小川康雄, 工藤 健, 角田地文: 広帯域 MT 法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造. 火山 **48**, 461-470 (2003).
- [48] Obara, K.: Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. Science **296**, 1,679-1,681 (2002).
- [49] Katsumata, A., Kamaya, N.: Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan. Geophys. Res. Lett. **30**, 1, 10.1029/2002GL015981 (2003).
- [50] Mizoue, M., Nakamura, M., Seto, N., Ishiketa, Y.: Three-layered distribution of microearthquakes in relation to focal mechanism variation in the Kii Peninsula, southwestern Honshu, Japan. Bull. Earthq. Res. Inst. **58**, 287-310 (1983).
- [51] Zhao, D., Asamori, K., Iwamori, H.: Seismic structure and magmatism of young Kyushu subduction zone. Geophys. Res. Lett. **27**, 2,057-2,060 (2000).
- [52] Hori, S., Inoue, H., Fukao, Y., Ukawa, M.: Seismic detection of the untransformed ‘basaltic’ oceanic crust subducting into the mantle. Geophys. J. R. astron. Soc. **83**, 169-197 (1985).
- [53] 鎌谷紀子, 勝間田明男: 火山から離れた地域で発生している深部低周波微動・地震 – その分布と発生原因 –. 地震 **257**, 11-28 (2004).
- [54] Sano, Y., Nakamura, Y., Wakita, H.: Distribution of $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ ratios in the Tohoku distinct, northeastern Japan. Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect. **52**, 1-8 (1985).
- [55] Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K.: $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula. Earth Planet. Sci. Lett. **216**, 221-230 (2003).
- [56] 角田地文, 梅田浩司, 棚瀬充史, 福田大輔: 紀伊半島南部における温泉湧出裂か系と温泉水・温泉ガスの地球化学. 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集, H060-007 (2003).
- [57] Sano, Y., Wakita, H.: Geographical distribution of $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. J. Geophys. Res. **90**, 8,729-8,741 (1985).
- [58] Moreira, M., Kurz, M. D.: Subducted oceanic lithosphere and the origin of the ‘high’ basalt helium isotopic signature. Earth Planet. Sci. Lett. **189**, 49-57 (2001).
- [59] 梅田浩司, 浅森浩一, 及川輝樹, 角田地文, 趙 大鵬, 鎌谷紀子: 前弧域の非火山地帯における高温異常域について – 紀伊半島中~南部の地殻・マントル構造と温泉ガスのヘリウム同位体比 –. 月刊地球 **26**, 407-413 (2004).
- [60] Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K., Oikawa, T.: Aqueous

fluids derived from a subducting slab: observed high ${}^3\text{He}$ emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan. *J. Volcan. Geotherm. Res.* (2004) submitted.

- [61] Zhao, D., Negishi, H.: The 1995 Kobe earthquake: seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation. *J. Geophys. Res.* **103**, 9,967-9,986 (1998).

