

雲仙火山北東部における浅部低比抵抗域と熱水の関係

小森省吾*・鍵山恒臣*・宇津木 充*・寺田暁彦*・井上寛之*・
スリグトモ・ワヒュー**・田中良和*・星住英夫***

(2008 年 1 月 11 日受付, 2008 年 6 月 12 日受理)

Relation between High Temperature and Low Resistivity in the Shallow Part of
the Northeastern Foot of Unzen VolcanoShogo KOMORI*, Tsuneomi KAGIYAMA*, Mitsuru UTSUGI*, Akihiko TERADA*, Hiroyuki INOUE*,
Wahyu SRIGUTOMO**, Yoshikazu TANAKA*, Hideo HOSHIZUMI***

We conducted AMT, VLF-MT and high resolution electrical resistivity survey in the northeastern foot of the Unzen Volcano in order to compare shallow resistivity structure with temperature profile of the borehole (USDP-1). These surveys revealed that a low resistivity layer ($40 \Omega \cdot \text{m}$) lies at 40–50 m depth and a high resistivity layer ($200 \Omega \cdot \text{m}$) lies below 60 m depth. The low and high resistivity layers correspond to the high temperature zone (37°C , 42 m depth) and temperature-decreasing zone, respectively. To examine the factor which decreases the resistivity and increases temperature at around 40 m depth, we observed the feature of the drillcore samples of USDP-1 precisely. As a result, argillaceous impervious layer was found at 67–100 m depth, just beneath the low resistivity and high temperature zone. This suggests that groundwater is maintained shallower than 67 m depth and that geothermal water decreases the resistivity of this zone.

Key words: Unzen Volcano, resistivity structure, temperature profile, geothermal water, argillaceous impervious layer

1. はじめに

雲仙火山は九州西部の雲仙地溝に位置し、野岳・普賢岳・平成新山などの複数の溶岩円頂丘を持つ複成火山である(渡辺・星住, 1995)。1990年代には火砕流を伴う噴火を起こした(Nakada *et al.*, 1999)。雲仙火山北東部は、普賢岳から垂木台地を経て北東に開かれた扇状地を形成する場所に位置する(Fig. 1)。この地域では、国際共同研究「雲仙科学掘削(USDP)」の一環として、1999年に掘削が行われた(宇都・中田, 2000)。この掘削孔(USDP-1)において池田・他(2000)は温度回復試験を行い、孔井内温度の異常域を発見した。回復試験を開始して2時間おきに記録を取ったところ、温度の擾乱が次第に回復する過程において深度0–40 m付近で温度が上昇し、回復

試験開始12時間後に深度42 mでピーク(37°C)になっていることが報告されている。深度100 m以深の温度がほとんど変化していないことから、この結果は深度40 m付近に短時間に温度を上昇させる原因があることを示唆する。鍵山・他(2002)は、この温度プロファイルの異常を温度の高い地下水(本報告では以後熱水と呼ぶ)の側方流動と考え、USDP-1掘削孔の近辺においてVLF-MTによる浅部比抵抗調査を稠密に行った。その結果、Fig. 2の矢印で示す沢から下流域にかけて低比抵抗の部分が扇状地状に広がって存在していることが明らかにされた。このことは、低比抵抗域が地形に沿って流動・拡散する熱水の存在を示している可能性があることを示唆する。しかしながら、VLF-MTは単一の周波数(22.2 kHz)を

* 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
京都大学院理学研究科地球惑星科学専攻
Earth and Planetary Science, Graduate School of
Science, Kyoto Univ, Kitashirakawaoiwake, Sakyo,
Kyoto 606-8502, Japan

** Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Bandung Institute of Technology, Jl. Ganesha 10
Bandung 40132, Indonesia

*** 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7
産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba Central
7, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8567, Japan

Corresponding author: Shogo Komori
e-mail: komori@aso.vgs.kyoto-u.ac.jp

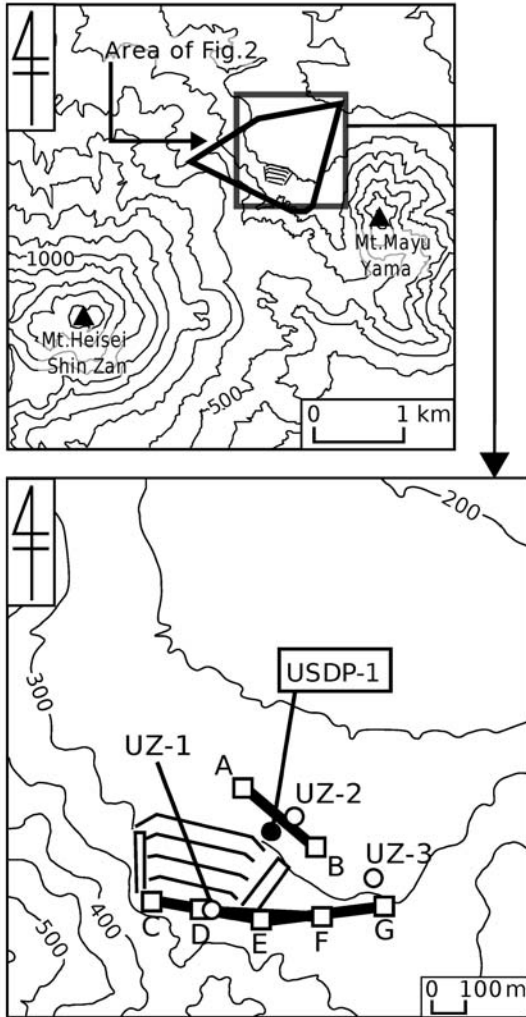


Fig. 1. Observation points for the AMT & VLF-MT survey (UZ-1, UZ-2, UZ-3) and location of survey lines for high resolution electrical resistivity survey (A-B, C-E, D-F, E-G).

用いているため、比抵抗の鉛直構造を精度良く明らかにすることはできず、比抵抗と温度プロファイルとの対応関係は十分に議論されてはいない。本研究ではこうした問題点を克服し、孔井内の温度プロファイルの異常と地層の比抵抗構造との対応関係を明らかにするため、浅部比抵抗構造調査 (AMT, VLF-MT による予備調査および高密度電気探査) を行い、且つ比抵抗構造との参照のために USDP-1 ボーリングコアの性状の観察を行った。

2. AMT・VLF-MT による浅部比抵抗構造予備調査

2-1 概要

本研究は、深度 0 m~100 m における比抵抗構造を調

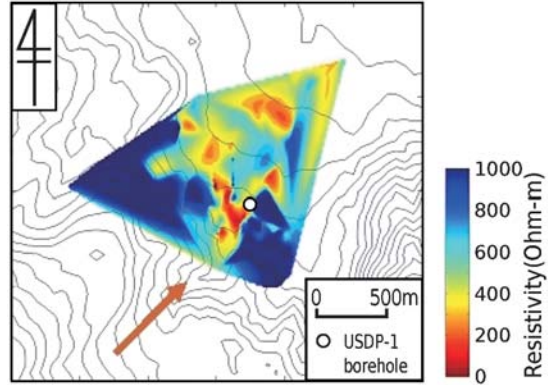


Fig. 2. Resistivity distribution in the northeastern foot of Unzen Volcano by VLF-MT survey (Kagiyama *et al.*, 2002). This survey area is shown in Fig. 1. Low resistivity zone extends from the upper side to the down side along the stream. Arrow indicates the stream.

査することを目的とする。今回使用する AMT 観測機器は、10 kHz より低い周波数を扱うため、より高周波数 (浅部) 側である 22.2 kHz の電磁波を扱う VLF-MT の観測を同時に行い、AMT 観測で得られた見掛比抵抗・位相のデータに VLF-MT で得られた見掛比抵抗・位相のデータを合わせて解析を行った。AMT・VLF-MT による雲仙火山北東部における浅部比抵抗構造の予備調査は、2005 年 12 月に実施した。AMT 観測には、3 台の Phoenix 社製 MTU-5A システムを使用し、VLF-MT 観測には、テラテクニカ社製 VL-101 を使用した。Fig. 1 に観測点配置を示す。図の○印 (UZ-1, UZ-2, UZ-3) が観測点、●印が USDP-1 掘削孔の位置である。1 次元インバージョンには、Adaptive Damping Method に基づく AMTINV program (Oulu 大学・Markku Pirttijärvi 博士作成) を使用し、6 層構造を仮定して解析を行った。解析には、座標系の回転に対して不変であるインピーダンステンソルの行列式から算出した見掛比抵抗と位相を使用した (Ingham, 1988)。

2-2 結果

AMT・VLF-MT 観測から得られた探査曲線と理論曲線を Fig. 3 (a) に、得られた比抵抗構造を Fig. 3 (b) に示す。いずれの観測点においても、22.2 kHz での見掛比抵抗値が高く、それより低周波数側では見掛比抵抗値が低い傾向が明らかになった。またこの探査曲線から得られる比抵抗構造では、3 観測点とも深度 100 m 以浅に数 $10 \Omega \cdot m$ の低比抵抗層の存在が推定された。特に USDP-1 掘削孔近傍の UZ-2 観測点では、深度 40~50 m の低比抵抗が温度プロファイルから熱水の存在が示唆される深

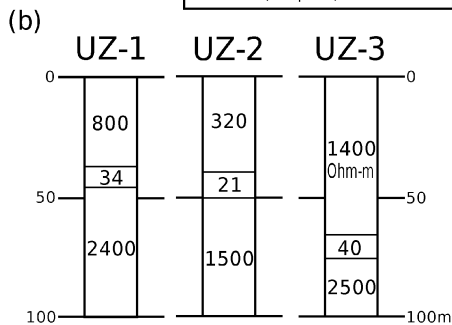
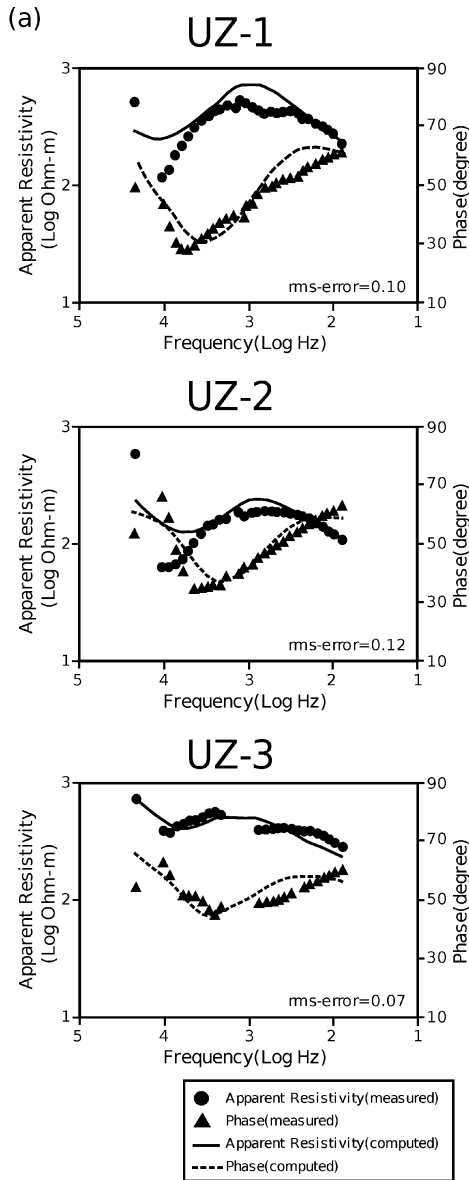


Fig. 3. (a) Sounding curves and (b) resistivity structures obtained by AMT & VLF-MT survey.

度 40 m の高温部と対応している関係が明らかになった。しかしながら、Fig. 3 (a) では、UZ-2 観測点において理論曲線が 1 kHz~22.2 kHz の周波数帯において測定値と著しく乖離しており、100 Hz~1 kHz の周波数帯においても、細かく見ると理論曲線の観測値とのフィットが不十分である。UZ-2 観測点における VLF-MT の観測値と AMT の観測値は、周波数方向のつながりが不連続であることは明らかである。この観測値の不連続性の原因が、本調査地域の局所的で複雑な 3 次元的構造の存在によるものなのか、VLF-MT の観測値・AMT の 1~10 kHz の観測値のどちらか、或いは両方に誤りがあることによるものなのかは不明である。そこで、上記の問題点を解決し USDP-1 掘削孔近傍において鉛直方向の精密な比抵抗構造を求めるため、高密度電気探査を行った。

3. 高密度電気探査による浅部比抵抗構造調査

3-1 概要

AMT・VLF-MT 観測の結果を踏まえ、鉛直方向により精密な比抵抗構造と温度プロファイルとの比較を行うことを目的として、2006 年 4 月に高密度電気探査を行った。Fig. 1 に観測点配置を示す (A-B, C-G)。測線は、扇状地状の地形を横切るように配置された。観測には、ネオサイエンス社製 CH-601 (北海道大学所有) を使用し、ウェンナ配置を電極配置として採用した。いずれの測線においても、60 本の電極を使用した。第 1 測線 (A-B) では電極間隔を 4 m (測線長 240 m)、第 2~4 測線 (C-G) では電極間隔を 5 m (各測線長 300 m) とした。ちなみに第 2 測線は C-E、第 3 測線は D-F、第 4 測線は E-G である (Fig. 1)。また、第 1 測線は USDP-1 掘削孔近傍、第 2~4 測線は第 1 測線より山側 (沢の上流側) に位置している。解析には測定誤差が 10% 未満の見掛け比抵抗のデータを用い、インバージョン法には内田 (1993) の方法を用いた。

3-2 結果

Fig. 4 に、高密度電気探査によって得られた比抵抗構造の結果を示す。USDP-1 近傍に配置した第 1 測線では、大局的には上部が高比抵抗域、下部が低比抵抗域に分けられる。USDP-1 掘削孔は Fig. 4 (a) に示す矢印 X に位置し、この矢印直下の比抵抗構造はケーシングや掘削泥水の影響を受けているものと考えられる。掘削の影響を受けていないと思われる、周辺の比較的均質な部分として矢印 Y で示される地点直下の比抵抗の鉛直構造を調べると、深度 20~30 m から比抵抗の低下が見られ、深度 40~50 m で数 $10 \Omega \cdot m$ まで低下していることが分かる。この特徴は、池田・他 (2000) で得られている温度プロファイルの特徴と極めてよい一致を示している。ま

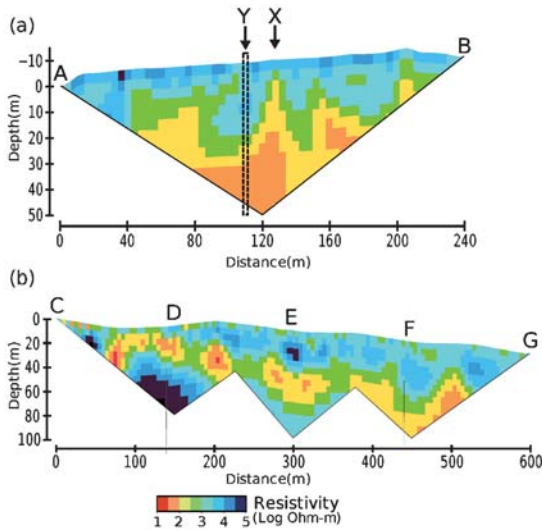


Fig. 4. 2-D resistivity structure by high resolution electrical resistivity survey. (a) A-B line. The arrow X indicates the position of the USDP-1 and the arrow Y indicates the position used for resistivity structure analysis. (b) C-G line. The depth is measured from the ground surface of the left side of the survey line.

た、Fig. 4 (b) の第2～4測線においても、大局的には第1測線とほぼ同様の傾向が得られ、低比抵抗域がUSDP-1掘削孔近傍に限られた局所的なものではなく、少なくとも本調査地域全体に及ぶほどの広がりを持つと考えられる。

4. USDP-1掘削孔近傍における比抵抗構造の推定

今回の観測で得られた比抵抗のデータを用い、以下のようにUSDP-1掘削孔近傍の比抵抗構造を推定した。深度0～50mについては、高密度電気探査により精密な比抵抗構造が求められている。深度50m以深に関しては、高密度電気探査の探査能力が不足していたため、AMT観測の結果を使用する。2-2で指摘していたVLF-MTとAMTの観測値の不連続性についてであるが、高密度電気探査からは、本調査地域の比抵抗構造は調査地域全体に及ぶほどの広がりを持っていると推定されており、VLF-MTとAMTの観測値の不連続性が、3次元的な複雑な比抵抗構造に由来するものであるとは考えにくい。従って、観測値の不連続性は、VLF-MTの観測値に誤りがあるか、AMTの高周波数側の観測値に誤りがあるか、あるいは両方の可能性が考えられる。ちなみに、本研究に用いたPhoenix社製MTU-5Aシステムの機器特性と

して、電位電極の接地抵抗が高いと接地抵抗がローパスフィルターとして機能し、1kHz以上の高周波数側の見掛け比抵抗・位相のデータに誤差が生じることが知られている(高倉伸一、私信)。今回の観測では電位電極の接地抵抗が17kΩと、一般に観測に適するとされる接地抵抗(数kΩ)に比べて高く、高周波数側のデータが適切ではなかった可能性がある。

以上の理由から、深度0～50mの比抵抗構造については、高密度電気探査の結果のうち、前節と同様の理由でFig. 4 (a)の矢印Yで示される地点直下の比抵抗の鉛直構造で固定した。深度50m以深の比抵抗構造については、この固定した比抵抗構造と、1kHz以下のAMT観測データによる見掛け比抵抗・位相を用いて、2-1節で使ったインバージョン法により推定した。ちなみに、22.2kHzのVLF-MT観測の測定値は、その空間安定性などの議論を行うに足るデータ数が得られていなかったため、再解析の際には用いなかった。本研究ではこれをハイブリッド解析と呼ぶ。Fig. 5 (a)にその結果得られた比抵抗構造を、Fig. 5 (b)に探索曲線と理論曲線をそれぞれ示す。100Hz～1kHzの周波数帯域において、Fig. 3 (a)よりもフィッティングが向上した。また深度100m付近の比抵抗値は200Ω・mとなり、USDP-1掘削孔の比抵抗検層(池田・他(2000))で得られているデータと矛盾のない値となった。

5. 考 察

USDP-1掘削孔における比抵抗構造と温度プロファイルとの対応関係を考察するため、池田・他(2000)で得られている温度プロファイルを比抵抗構造とともにFig. 5 (a)に示す。地表から深くなるにつれて、温度が上昇するとともに比抵抗が低下し、高温域の深度40～50m付近で比抵抗が40Ω・mと最も低下していること、温度が低下している深度60～100mで比抵抗は200Ω・mと上層より高くなることが明らかになった。

ここで、深度40～50m付近で地層の比抵抗を下げた原因について考察する。岩石試料・土試料を用いた比抵抗測定実験では、岩石の比抵抗を下げる要因として水飽和度の影響、間隙水の比抵抗の影響、粘土などの導電性鉱物の存在の影響などが挙げられている。これらに関しては朴・他(1999)、高倉(2000)、渡辺(2005)に詳しい。一般に、電磁気探査における低比抵抗層の存在は粘土層であることが多い(例えばCurtis and Kelly, 1990; 高倉, 1995)。本研究地域において粘土層が地層の比抵抗を下げる原因となったのかどうかを検討するため、USDP-1掘削孔で得られたボーリングのコアの性状を実際に観察して粘土の有無を検討した。深度0～67mにおけるボー

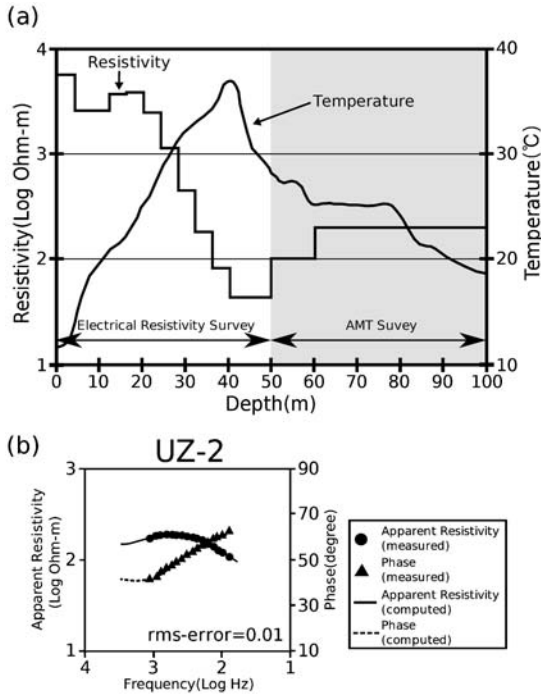


Fig. 5. (a) Relation between the resistivity structure and the temperature profile in USDP-1. Resistivity structure is determined by hybrid analysis of high resolution electrical resistivity survey and AMT. Low resistivity zone in 40–50 m depth corresponds to the high temperature zone. High resistivity zone in 60–100 m depth corresponds to the temperature decreasing zone. (b) Comparison of the sounding curve at UZ-2 estimated by the hybrid analysis with the observation.

リングコアは全体的に粗粒で固結が悪い状態であった。それに対し、深度 67~100 m におけるボーリングコアは上層より細粒で粘土質のものが多く存在した。これらの観察結果より、本研究地域の深度 40 m 付近で比抵抗が低下した原因を粘土層とするのは困難で、地層中に存在する熱水と推定できる。深度 67~100 m における粘土質の地層が不透水層となり、結果的に熱水がその上層に存在したと考えることで、池田・他 (2000) の温度プロファイルを説明することが可能である。

なお、深度 67~100 m の粘土質層の比抵抗は上層に比べ高くなっている。一般に火山・地熱地域における不透水層の比抵抗は、熱水変質作用による粘土鉱物の影響を受けて低くなっていると言われる (例えば茂木, 1992) が、本研究地域では熱水の温度が 37°C 程度と低く、熱水変質を伴う程ではない。このことから、本研究地域の粘土質層は熱水変質を強く受けたものではなく、比抵抗も

低下しなかったのではないかと考えられる。

6. 結 論

本研究によって、雲仙火山北東部の比抵抗構造について次の特徴が明らかとなった。USDP-1 掘削孔近傍においては、AMT・VLF-MT と高密度電気探査により、比抵抗が深度 40~50 m で最も下がり (40 Ω・m)、深度 60~100 m で高くなる (200 Ω・m)。温度回復試験の結果 (池田・他, 2000) と比較すると、温度の高い部分が低比抵抗で、その下は温度が低下し高比抵抗となっている。ボーリングコアの観察では、コアの性状が上記の変化に対応して、深度 67~100 m で粘土質の不透水層に変化している。

本研究は、地層の透水性はボーリングコアの観察により推察したものであるため、今後は、ボーリングコア試料から透水係数を測定し、比抵抗の変化と比較・検討を行い、熱水の流動性・拡散に関する詳細な考察を行う予定である。

謝 辞

高密度電気探査に際して、北海道大学の茂木透教授・橋本武志准教授に観測機材を拝借しました。またデータ解析に際しても御教示頂きました。産業技術総合研究所には、ボーリング・写真・コアの使用を快く認めて頂きました。同研究所の高倉伸一博士には、AMT のデータ解析について重要な知見を頂きました。現地調査に際し、九州大学理学研究院島原地震火山研究センターに協力して頂きました。また、査読者の海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の後藤忠徳博士と 1 名の匿名査読者、および編集担当の秋田大学の筒井智樹准教授には本稿の改善に非常に貴重な御意見を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Curtis, B. and Kelly, W.E. (1990) Resistivity-recharge relationships -field study. *J. Hydrology*, **118**, 39–53.
- 池田隆司・鶴川元雄・小村健太郎・藤田英輔 (2000) 孔内計測による物性・構造解明。雲仙火山: 科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究, 70–77.
- Ingham, M. (1988) The use of invariant impedances in magnetotelluric interpretation. *Geophysical Journal*, **92**, 165–169.
- 鍵山恒臣・橋本武志・Wahyu Srigutomo・神田 径・田中良和・宇津木充 (2002) 電磁気観測から推定される雲仙火山におけるマグマと水の相互作用。月刊地球, **12**, 858–865.
- 茂木 透 (1992) 地熱変質による岩石比抵抗の変化。九

- 大地熱研究報告, 1, 25-29.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1-22.
- 朴 三奎・藤原 寛・朴 美京・松井 保 (1999) 土の比抵抗に関する基礎的研究. 物理探査, **52**, 299-306.
- 高倉伸一 (1995) 新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗. 物理探査, **48**, 161-175.
- 高倉伸一 (2000) 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係. 物理探査, **53**, 415-426.
- 内田利弘 (1993) ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2 次元インバージョン. 物理探査, **46**, 105-119.
- 宇都浩三・中田節也 (2000) 雲仙火山科学掘削プロジェクトの概要. 月刊地球, **22**, 215-218.
- 渡辺一徳・星住英夫 (1995) 火山地質図 NO. 8 「雲仙火山地質図」. 地質調査所
- 渡辺 了 (2005) 岩石の電気物性—レビュー—. 地学雑誌, **114**, 837-861.

(編集担当 筒井智樹)