

## 岩石比抵抗の解釈に向けた既存坑井データを用いた分析

#井上 智裕<sup>1)</sup>, 橋本 武志<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>九州大学・理・地震火山センター, <sup>2)</sup>北海道大学・理・地震火山センター

### Analysis of well data for the interpretation of rock resistivity

#Tomohiro Inoue<sup>1)</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, <sup>2)</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Recent studies worldwide have revealed three-dimensional resistivity structures beneath active volcanoes. Many of them have reported low resistivity layers of 1-10  $\Omega$  m in the shallow part of the volcanoes. Such shallow conductive layers are sometimes interpreted as porous layers filled with hydrothermal water. However, they are also often interpreted as impermeable zones rich in highly conductive clay minerals. It is essential to distinguish between aquifers and impermeable layers when considering the hydraulic structure of a volcanic body in relation to evaluating the potential of phreatic eruptions. Meanwhile, they are indistinguishable in principle based on bulk resistivity information of rocks alone. Therefore, we have read and compiled the well data from the published reports by NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) for potential geothermal areas where the subsurface conditions are similar to volcanic areas. However, the quantitative relationship between various physical properties of rock samples and rock resistivity is not yet clear. In this study, the relationship between rock resistivity and other physical properties was examined using the well data that we compiled.

Our study covered 23 areas from a series of NEDO's survey that contained physical logging and core property tests (long-normal electrical logging, temperature logging, density, effective porosity, magnetic susceptibility, seismic velocity, thermal conductivity, and mineral contents). We referred to the resistivity values from the long-normal electrical logging data. The NEDO's survey reports provided the content of mineral species for core samples in five-level qualitative evaluation. In this study, we quantified the evaluation and calculated the weighted sum based on the mineral species to produce the "conductive clay index (CCI)". The weights are 80 for smectite, 13 for sericite, 6 for kaolin minerals, 6 for chlorite, and 0 for other clay minerals, referring to the cation exchange capacity (CEC) of minerals.

We used 4946 samples that had complete sets of physical property test data in this study. First, we examined the relationship between rock resistivity and each property. We found a negative correlation between effective porosity and resistivity. On the other hand, positive correlations were found between density, seismic velocity, and thermal conductivity and rock resistivity. Samples with higher effective porosity tended to have higher CCI. Samples with relatively high density, seismic velocity, and thermal conductivity tended to have low CCI. These results suggest that rocks rich in porosity are more susceptible to hydrothermal alteration due to easy circulation of hydrothermal fluids, while dense rocks are less susceptible to alteration. While there was a correlation between resistivity and other physical properties, there was no clear relationship between resistivity and magnetic susceptibility.

Next, no clear correlation was observed between the amount of chlorite and sericite and the resistivity of each mineral. Conversely, increasing the quantity of montmorillonite and kaolin minerals resulted in decreased resistivity in the samples. Samples with higher montmorillonite content exhibited relatively high porosity, whereas samples with higher kaolin mineral content displayed low porosity. This suggests that kaolin-rich rocks may exhibit cap rock-like properties compared to montmorillonite-rich rocks.

We performed the principal component analysis to determine the degree of physical properties that contribute to rock resistivity. In this study, we classified samples based on rock resistivity, and performed the principal component analysis considering the dimensions of temperature, density, effective porosity, magnetic susceptibility, elastic wave velocity, thermal conductivity, and various mineral contents. First, the cumulative contribution of the first through third principal components is about 80%, suggesting that these three principal components explain about 80% of the variation in the total data. The high total contribution from the first to the third principal components suggests that these principal components related to the rock resistivity. Scatter plots with the first, second and third principal components showed clusters with low resistivity. These clusters indicates that each principal component may be involved in the classification of the rock resistivity.

In this study, we conducted the analysis of rock resistivity and various physical properties using the well data. In the future, we aim to investigate the physical properties and principal components of the clusters that appeared by using statistical methods.

Acknowledgments: This research was supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT) under the subject B in Integrated Program for Next Generation Volcano Research and Human Resource Development. This research used NEDO's Geothermal Development Promotion Study Report, which is available on the JOGMEC website (<https://geothermal.jogmec.go.jp/report/nedo/>).

近年、Magnetotelluric 法 (MT 法) による比抵抗構造探査によって、活動的火山の地下浅部にはしばしば 1-10  $\Omega$  m の低比抵抗な層があることがわかってきた。火山帯や地熱地帯における浅部低比抵抗層は、地下水で満たされた帯水層と解釈されるが、導電性粘土鉱物を豊富に含む難透水層 (粘土キャップ) と解釈するケースもある。火山活動 (e.g. 水蒸気噴火) との関連で火山体の水理構造を考える上では、両者を区別することが重要であるが、岩石のバルク比抵抗の情報のみからでは、それは原理的に困難である。そこで、これまで我々は、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) による地熱開発促進調査報告書から、火山と地下の環境が近い地熱地帯の坑井データの読み取りと整理を行ってきた。しかし、岩石試料の様々な物性値と岩石比抵抗の定量的な関係はまだ明らかでない。本研究では、これまで読み取ってきた坑井データを使用して、岩石比抵抗とその他の物性値の関係を検討した。

本研究は、NEDO による物性試験結果 (ロングノルマル電気検層、温度検層、密度、有効空隙率、帯磁率、弾性波速度、熱伝導率、粘土鉱物の種類と量) が全て揃っている 23 地域を対象にした。NEDO 調査報告書では、鉱物量として X 線分析による 5 段階評価 (多量=4, 中量=3, 少量=2, 微量=1, 無=0) が記載されている。その値に導電性が高い鉱物種ごとの重みをかけた和を、その岩石試料における「導電粘土鉱物指標」とした。ここでは、重みとして、鉱物の陽イオン交換容量 (CEC) を参考に、スメクタイトを 80, セリサイトを 13, カオリン鉱物を 6, 緑泥石を 6, その他の粘土鉱物を 0 とした。

本研究では、物性試験データが全て揃っている試料のみを抽出し、合計 4946 サンプルを使用した。まず、岩石比抵抗と各物性値の関係を調べたところ、有効空隙率と比抵抗の間には負の相関が見られた。一方で、密度、弾性波速度、熱伝導率の各物性値と岩石比抵抗とは正の相関が見られた。また、有効空隙率が高い試料は、導電性粘土鉱物指標が高い傾向であった。密度、弾性波速度、熱伝導率が比較的高い試料は、導電性粘土鉱物が低い傾向であった。これらのことは、空隙に富む岩石では熱水が循環しやすく熱水変質が起こりやすくなり、反対に緻密な岩石は変質度合いが低いことが考えられる。以上のように比抵抗とその他の物性に相関があった一方で、比抵抗と帯磁率の間には、明瞭な関係は読み取れなかった。

次に、個々の鉱物量について注目すると、緑泥石・セリサイトの量と比抵抗の間には明瞭な相関は現れなかった。一方で、モンモリロナイトやカオリン鉱物の量が多いほど低比抵抗を示す試料が多かった。モンモリロナイト量が高い試料は高空隙率を示す試料が多く、カオリン鉱物量が高い試料は低空隙率を示す試料が多い傾向であった。このことから、モンモリロナイトに富む岩石に比べて、カオリン鉱物に富む岩石が粘土キャップのような性質を示す可能性がある。

岩石比抵抗に寄与する物性の程度を把握するために、主成分分析を行った。本研究では、岩石比抵抗値に基づいて試料を分類し、温度、密度、有効空隙率、帯磁率、弾性波速度、熱伝導率、各種鉱物量の次元を考慮して主成分分析を行った。まず、第 1 主成分から第 3 主成分までの累積寄与率は約 80% であり、これらの 3 つの主成分が全データの約 80% の変動を説明している。第 1 主成分から第 3 主成分までの寄与率の合計が高いことから、これらの主成分が岩石比抵抗と関係があると考えられる。また、第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分で散布図を作成したところ、低比抵抗を示す試料のクラスタが見られた。このようなクラスタが現れたことから、それぞれの主成分が岩石の比抵抗の分類に関与している可能性を示す。

本研究では、既存坑井データに見られる岩石比抵抗と他物性間の傾向を明らかにした。今後、統計的手法によって現れたクラスタの物性や主成分の意味を検討し、そのクラスタの定量化及び評価を目指す。

謝辞：本研究は、文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プログラム」課題 B の支援を受けた。また、本研究は NEDO の地熱開発推進調査報告書を利用した。これらの報告書は JOGMEC のウェブサイト (<https://geothermal.jogmec.go.jp/report/nedo/>) で公開されているものを使用した。