

## 種々の岩石や粘土の比抵抗

高倉伸一（産業技術総合研究所）

### **Resistivity of various rocks and clays**

Shinichi Takakura (Geological Survey of Japan, AIST)

#### **Abstract**

Electrical and electromagnetic methods that survey subsurface resistivity structure are used in many fields because the range of the resistivity of rocks is considerably wide and difference in the character of rocks is reflected in resistivity. The resistivity of rocks is influenced by water content, temperature, clay minerals. For the interpretation of the resistivity structure, it is necessary to know resistivity of various rocks. In the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), the measurement system of the resistivity of rocks and soils was built. I have measured the resistivity of various rocks for many years. I also carried out the laboratory experiments in which the influences of clay minerals and temperature on resistivity of artificial samples were investigated. This paper describes the knowledge about resistivity of various rocks and clays which are obtained until now.

電気探査や電磁探査を使用する比抵抗構造調査は、地下水・金属・地熱などの資源探査、火山や地震や地すべりなどの防災調査など多くの分野で使用されている。これは、比抵抗は水の存在や温度に敏感な物性であるということがあげられる。岩石を形成する鉱物のほとんどは絶縁体に近いので、岩石の電気伝導は間隙中に存在する水などを媒体としたイオン伝導が卓越する。アーチーの式(Archie, 1942)は岩石の比抵抗を説明する代表的な実験式であり、その比抵抗を間隙率と間隙中に含まれる水の比抵抗で関係づけている。水の比抵抗は塩分濃度と温度に大きく支配されるので、岩石の比抵抗は間隙の大きさとそこに含まれる水の塩分濃度と温度に依存するといえる。

海水程度の塩分濃度までならば、水の電気伝導度（比抵抗の逆数）は塩分濃度に比例する。そのため、海水（0.2~0.3Ωm程度）を含む地層の比抵抗は非常に低く、天水（数10~1,000Ωm程度）を含む地層の比抵抗は高くなる傾向がある。また、岩石の比抵抗は0~200℃前後では1℃について2~4%ずつ低下することが知られている（Arps, 1953; 横山ほか, 1985; Sen and Goode, 1992; Revil et al., 1998; 高倉, 2009）。そのため、地温の高い場所では低比抵抗の構造が解析されることが多い。

粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗は、一般にアーチーの式から推定される値より低くなる（Waxman and Smits, 1968; Park and Dickey, 1989; Worthington, 1993; 高倉, 2003）。これは水化した粘土鉱物ではその表面にイオン密度の高い電気二重層が厚く発達し、それを媒体とするイオン伝導が卓越して、過剰導電性を示すからである。粘土鉱物は乾燥した状態ではほぼ絶縁体とみなせるが、含水した状態では良

導体である。

岩石や土壌の比抵抗を計測すると、緻密に固結した（間隙率が小さい）岩石や乾いた（飽和度の小さい）砂礫や土壌は  $100,000 \Omega \text{m}$  を超える比抵抗を示すものがある。一方、塩水に満たされた間隙の大きな岩石や膨潤性含水粘土を含む岩石は  $1 \Omega \text{m}$  以下のものがある。このように岩石の比抵抗は含まれる水や粘土の影響を大きく受け、種々の岩石が示す比抵抗の範囲は広いことから、比抵抗構造調査は地下構造や地下環境の推定に役立つ。

しかし、このことは地質環境の条件によって比抵抗が大きく変化することを意味し、比抵抗値だけから岩石の識別を困難にしている原因ともなっている。これまで多くの研究者によって岩石の比抵抗が計測されているが、研究者によって測定条件はばらばらで、標準的な測定法は確立していない。また、論文等の文献で発表されているデータは、測定条件は大まかにはわかるものの、他の文献等のデータと厳密に比較することは難しいのが現状である。さらに岩石によって個体差が大きいという問題があり、測定された値がその岩石を代表的するような値であるかを判断するのが難しい。そのため、いろいろな研究結果をコンパイルしただけでは、比抵抗値から岩石を識別するまでの関係性の把握には至らないことが多い。

このような背景から、筆者は地下資源や地圏環境などの研究を通して、岩石や粘土の複素比抵抗計測システムを構築し、天然試料や人工試料の複素比抵抗の計測を継続してきた(高倉ほか, 2000; 高倉, 2000; 高倉, 2009; 高倉ほか, 2011; 高倉ほか, 2013; 高倉ほか, 2014)。これらの研究では、対象とする岩石や粘土によって測定条件は変わるが、比抵抗に影響すると思われる条件をできるだけ考慮した計測を行っている。また、検層データを使って地質層序や間隙率や温度や粘土区分などと比抵抗との比較検討を行っている(高倉, 1995; 高倉・小村, 2015)。その結果、現在までに以下の知見が得られた。

- ・一般的な岩石の比抵抗は、間隙水の比抵抗が低い場合や有効間隙率が高い場合は、主として間隙率とそこに含まれる水の比抵抗で決まる。
- ・間隙水の比抵抗が高くなるほど、鉱物の比表面積が大きくなるほど、水と鉱物の界面にできる電気二重層が比抵抗に与える影響が相対的に大きくなる。一般に粒子が細かい粘土鉱物は低比抵抗を示す。特に層間中に交換性陽イオンと水を多量に取り込む膨潤性粘土鉱物の影響は大きく、ナトリウム型スメクタイトが多く含まれる試料の比抵抗は非常に低くなる。
- ・温度が高くなるほど比抵抗が下がる。水の導電性と電気二重層内のイオン移動度とでは温度依存性が異なり、後者の方が大きいので、粘土鉱物が多い試料ほど高温下の比抵抗は低くなる傾向がある。
- ・特定の鉱物が濃集した鉱石や多様な鉱物が含まれる岩石では個体差が大きいので、できるだけ大きな試料を測定する方が望ましく、測定数を増やして統計的に調べる必要がある。
- ・鉱物、水（液体）、ガス（気体）のほとんどは基本的に絶縁体である。岩石の電気伝導を考えるためには、電子やイオンなど電荷を運ぶ物質の種類とその存在量や移動速度を考える必要がある。交流電流による複素比抵抗測定は岩石の電気伝導のメカニズムを明らかにする可能性を有する。

## 参考文献

- Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, 54-62.
- Arps, J. J. (1953): The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions, *Petr. Trans. AIME*, 198, 327-330.
- Park, S. K. and Dickey, S. K. (1989): Accurate estimation of conductivity water from geoelectrical measurements – a new way to correct for clay, *Ground Water*, 27, 786-792.
- Revil, A., Cathles III, L.M., Losh, S, and Nunn, J.A. (1998): Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications, *J. Geophys. Res.*, 103, 23925-23936.
- Sen, P. N., and Goode, P. A. (1992): Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands, *Geophysics*, 57, 89-96.
- 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.
- 高倉伸一(2003): アーチーの式と並列回路モデル, *Conductivity Anomaly 研究会 2003 年論文集*, 127-132.
- 高倉伸一(2009): 粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗—間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響—, *物理探査*, 62, 385-396.
- 高倉伸一・小酒欽弥・西澤修・青木正博 (2000): 粘土鉱物を含む試料の比抵抗測定, *物理探査*, 53, 119-128.
- 高倉伸一・南大樹・伊藤雅和(2011): ベントナイトの比抵抗と物理的・化学的特性との関係, *物理探査*, 64, 359-366.
- 高倉伸一・中田孝二・村上浩康(2013): セリサイトの複素比抵抗測定, *物理探査*, 66, 119-125.
- 高倉伸一・小村健太郎(2015): 関東平野の新第三系堆積層と基盤の比抵抗構造とその特徴, *Conductivity Anomaly 研究会 2015 年論文集*, 29-36.
- 高倉伸一・佐々木裕・高橋武春・松隈勇(2014): 黄鉄鉱粒子と磁鉄鉱粒子を含む人工試料の複素比抵抗測定, *物理探査*, 67, 267-275.
- Waxman, M. H., and Smits, L. J. M. (1968): Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, *Soc. Petr. Eng. J.*, 8, 107-122.
- Worthington, P. F. (1993): The uses and abuses of the Archie equations, 1: The formation factor-porosity relationship, *J. Appl. Geophys.*, 30, 215-228.
- 横山秀吉・中塚勝人・阿部司・渡部賢一(1983): 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について, *日本地熱学会誌*, 5, 103-120.