# 堆積軟岩を対象としたヒーター試験に伴う 高温域進展状況のモニタリング 比抵抗トモグラフィー法を用いた検討-

窪田 健二<sup>1\*</sup>・鈴木 浩一<sup>1</sup>・池野谷 尚史<sup>2</sup>・高倉 望<sup>2</sup>・谷 和夫<sup>3</sup>

# <sup>1</sup>財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646) <sup>2</sup>東急建設株式会社 技術本部 土木エンジニアリング部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14) <sup>3</sup>国立大学法人 横浜国立大学 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常磐台79-5) \*E-mail: kubota@criepi.denken.or.jp

堆積軟岩中に放射性廃棄物を処分する場合,廃棄体の発熱による高温状態が地下水や軟岩の挙動に影響 を与えることが予測されている.この影響について評価するため,堆積軟岩の原位置ヒーター試験を行っ た.温度変化に伴い,比抵抗は低下することから,高温域を可視化できる可能性がある.そこで,比抵抗 トモグラフィー法を用いて,加熱に伴う堆積軟岩への加温域の進展状況の可視化を試みた. 測定の結果,ヒーター孔部及びその周辺部において,温度上昇による影響とみられる比抵抗の低下域が 見られ,これは温度上昇域が捉えられたものと考えられる.このように,加熱に伴う比抵抗の変化を測定 していくことにより,温度分布の空間的な広がりを推定することが期待できる.

Key Words : resistivity tomography , monitoring, sedimentary soft rock, high temperature, heater test

# 1. はじめに

地下発電所等に代表される大深度地下利用では、地下 の岩盤空洞の長期間の安定性を評価し、設計・施工を行 っている.ただし、従来は硬質な岩盤中に空洞が建設さ れることが多く、長期間の安定性は大きな検討課題にな らなかった.

今後は、透水性が低い堆積軟岩を対象として、放射性 廃棄物の地層処分やエネルギー貯蔵などの新規地下利用 が期待されている.しかし、堆積軟岩は熱や水などの外 部環境の変化に影響を受けやすい.特に、堆積軟岩中に 放射性廃棄物を処分する場合、廃棄体の発熱による高温 状態が地下水や軟岩の挙動に影響を与えることが予測さ れている.

この高温状態の軟岩への影響範囲について把握するためには、温度上昇に伴う影響領域を2次元的に可視化できるモニタリングを行うことが有効と考えられる.温度上昇に伴い、岩石の電気比抵抗は低下することが知られている<sup>1)</sup>ことから、比抵抗の変化をモニタリングすることで、高温域の進展状況を可視化できる可能性がある.

高温状態による地下水や軟岩の挙動について、実フィ ールド規模での評価を行うため、堆積軟岩のヒーター試 験を行い、ひずみや温度などといった物性値の連続測定 を行っている<sup>2</sup>.本研究では、同サイトにおいて比抵抗 トモグラフィー法による比抵抗の繰り返し測定を行い、 ヒーター試験に伴う高温域進展状況の可視化を試みた.

#### 2. 試験の概要

# (1) 実験サイト

実験サイトは、神奈川県相模原市の郊外に位置しており、相模川から北方向へ約500m離れた標高約90mの河岸段丘地である<sup>3</sup>.当サイトには、GL-50m部分に横坑が掘削されており、その側壁を幅110cm~200cm、奥行き365cm、高さ190cmにかけて掘削された空洞において、ヒーター試験が実施された.なお、掘削した空洞は、底盤まで地下水で満たされている.同深度は、上総層群の泥岩層で構成されており、その一部に砂岩の薄層が存在している.

## (2) ヒーター試験の概要

上記の試験空洞において,直径30cm,深さ60cmの調 査孔(以下,ヒーター孔)を削孔し,水温約17℃の地下 水で満たされた状態で, 孔内に設置したヒーターを用い て加熱を行うとともに, 攪拌機を用いて孔内における地 下水の温度が一様となるようにした. 加熱の際に, 温度, 岩盤ひずみ(半径方向, 周方向, 鉛直方向), 間隙水圧, 土圧(半径方向), 底盤変位の連続測定を, 孔内に設置 した多数の測定点において行っている<sup>2)</sup>. 試験では, 孔 内をまず40℃に加熱させ, ひずみ等のデータが安定して きたことが確認された後に60℃に加熱させた. その後, 常温に一度戻し, 再び80℃, 90℃に順次加熱していく. 本稿では, 40℃, 60℃に加熱させた結果について報告す る.

#### (3) 比抵抗トモグラフィーの測定方法

図-1 に比抵抗トモグラフィーの電極配置図を示す. 地表部は、ヒーター孔直上を通るようにSUS電極(直径 0.3cm,長さ5cm)を10cm間隔で計30点(総延長290cm) 打ち込んだ.ヒーター孔直上においては、ヒーター孔の 蓋部分に電極をボンドで止めて固定させ、孔内における 地下水と接触させることで、ヒーター孔部分の測定を可 能なものにした.また、ヒーター孔部分及びその周辺の より詳細な比抵抗分布を求めるため、ヒーター孔側面か ら50cmの部分に直径6.6cm、深さ165cmの調査孔(以下、 トモグラフィー孔)を2本削孔し、深度方向にそれぞれ 10cm間隔でSUS電極を15点ずつ設置した.この地表電極, 孔内電極の計60点を用いて、ダイポールーダイポール法 電極配置の測定を行った.

測定には電中研製の比抵抗測定装置を用いた.また, 高温域の進展状況を捉えるには、加熱中できるだけ頻繁 に測定を行うことが必要であることから、FOMA回線を 通じて,電中研我孫子地区と現地に設置しているPCとの間でパケット通信を行い,現地PCの遠隔操作を行うことで,1日から数日に1回の割合で測定を行った.

# 3. 測定結果

図-2 に、測定によって得られた見掛比抵抗値をもと に、2次元解析を行った比抵抗断面図を示す.ここでは、 40℃への加熱前に行ったベースライン測定、40℃に加熱 してから10日後、29日後に行った測定、60℃に加熱して から5日後に測定を行った結果についてそれぞれ示す. 測定域の比抵抗値は10Ωmから30Ωm程度であり、同サ イトで以前に行われた比抵抗検層や泥岩コア試料を用い た測定結果<sup>4</sup>と概ね一致する.ヒーター試験前後におけ る比抵抗断面図を比べると、ヒーター試験開始後は、特 にヒーター孔部分を中心に比抵抗が低下している傾向が 見られる.40℃から60℃に上昇すると、このような比抵 抗低下傾向は、さらに進んでいるようになっている.

ヒーター試験前後で、比抵抗値にどの程度の変化が生 じているかをより詳細に調査するために、ヒーター試験 前の比抵抗値に対する比抵抗変化率を計算した. **図**-3 にヒーター孔周辺部における比抵抗変化率断面図を示す. 比抵抗変化率 R (%) は、測定比抵抗値を $\rho$ , ヒーター 試験前における比抵抗値を $\rho_0$ として、以下の式(1)を用 いて求めた.

$$R = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \times 100 \tag{1}$$



**図-3** では, **図-2** において示した期間における比抵抗断 面図を示している.

図-3 より,加熱に伴い,ヒーター孔部分を中心に, 比抵抗が低下している領域が存在していることが分かる. 40℃への加熱に伴っては,30%程度比抵抗が低下してい た.また,期間が進むにつれて,低比抵抗域が徐々に広 がっているような傾向もみられた.60℃への加熱を行っ



図-2 比抵抗トモグラフィーの2次元解析結果. 図中太線で四角 に囲まれた部分がヒーター孔, 細線で四角に囲まれた部 分がトモグラフィー孔を示している. た際には、比抵抗はさらに低下し、最大約45%程度比抵 抗が低下するとともに、低下域がさらに広がる傾向が捉 えられた.

# 4. 考察

## (1) 岩石の比抵抗と温度との関係

岩石の比抵抗は、間隙率、間隙水の飽和度、間隙水の 比抵抗の関数であるアーチーの式<sup>3</sup>と呼ばれる次の式(2)



図-3 ヒーター試験前の比抵抗値に対する比抵抗変化率断面図. ヒーター孔付近を拡大して示している.

で表すことができる.

$$\rho_R = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \tag{2}$$

ここで、 $\rho_R$ は岩石の比抵抗( $\Omega$ m)、 $\rho_w$ は間隙水の 比抵抗( $\Omega$ m)、 $\varphi$ は間隙率、Sは間隙水の飽和度、a、 m、nは岩石の種類に依存する定数である.

一般に、温度の上昇に伴い、イオンの易動度が増大す ることから、水溶液の導電率は増大することが知られて いる<sup>1)</sup>. 比抵抗は導電率の逆数であることから、水溶液 の比抵抗は温度上昇とともに低下する.式(2)において、 岩石の比抵抗は間隙水の比抵抗と比例関係にあることか ら、温度上昇に伴い、岩石の比抵抗は低下することが予 想される.

水溶液の導電率の温度依存性については, Aps などに より議論されており<sup>0,7,8</sup>,式(3)<sup>9</sup>,式(4)<sup>7</sup>に示すような 実験式が提案されている.

$$\sigma_{w2} = \frac{T_2 + 21.5}{T_1 + 21.5} \sigma_{w1} \tag{3}$$

$$T + 273 = \frac{608}{\log G + 2.16} \tag{4}$$

ここで、*T*は水溶液の温度(C)、  $\sigma$ は水溶液の導電率 (S/m)、*G*は測定比抵抗値( $\rho_w$ )と20°Cにおける水溶 液比抵抗値( $\rho_{w20}$ )との比( $G = \rho_w / \rho_{w20}$ )である. これらの式は、溶存するイオンの種類や量が異なる水溶 液から導かれたものではあるが、200°Cまでの範囲であ ればいずれの式もほぼ等しい結果を与えるものとなって いる<sup>5</sup>.

このように、ヒーター孔における加熱に伴い、ヒータ ー孔部分及びその周辺部では比抵抗値に低下が生じるこ とが予想される.

#### (2) 繰り返し測定における比抵抗変化の要因

ヒーター試験前後における比抵抗トモグラフィーの繰 り返し測定の結果,加熱に伴い,ヒーター孔部分及びそ の周辺部で比抵抗の低下が見られた.先に示したように, 岩石の比抵抗は間隙水の比抵抗に比例し,温度上昇に応 じて間隙水比抵抗が低下することから,岩石の比抵抗も この温度変化に伴い低下した可能性が高い.岩石の比抵 抗は,アーチーの式に示されるように,間隙率や間隙水 の飽和度などといった様々な要因で変化する.ただし, 本実験中は地下水が地表測線部まで満たされていること から,間隙水飽和度の変化はごく小さいと考えられるた め,飽和度による影響は考えないこととした.また,掘 削に伴うゆるみ域の広がりに伴い,周辺岩石の間隙率が 変化することで比抵抗に変化が生じる可能性があるが, ヒーター試験を開始したのがヒーター孔掘削から約半年 後であったため、温度変化に伴う変化に対しては小さい と予想し、本論では温度変化による影響のみについて考 えることとした.

ヒーター孔内及びその周辺部においては、熱電対を用 いて多点で温度測定を行っている<sup>9</sup>ことから、水温にど の程度の変化が生じているかが分かれば、式(2)を用い ることで、間隙水伝導度の変化率を見積もることができ る.さらに、岩石の比抵抗は間隙水比抵抗と比例関係に あることから、温度変化の影響による岩石の比抵抗変化 率を見積もることができる。熱電対による温度測定デー タによると、加熱前のヒーター孔内温度は約17℃であっ たのに対し、加熱に伴い、ヒーター孔内の水温はそれぞ れ37℃、56℃程度へと上昇していた。これらの水温変化 をもとに、式(1)、式(2)を用いた岩石比抵抗の変化率は、 それぞれ34%、50%の低下と計算される。

図-4 に、ヒーター孔内及びその周辺部のうちの数点 における比抵抗値の経時変化図を示す.加熱前には20~ 30Ωm程度であった比抵抗値が、40℃(実際は約37℃) への加熱に伴い低下し、60℃(実際は約56℃)への加熱 でさらに低下している様子が分かる.これらの比抵抗変 化の度合いについて調べるため、図-5 に、図-4 の各点 における比抵抗変化率の経時変化をまとめた図を示す. 図より、ヒーター孔内では、40℃への加熱に伴い30~ 35%程度、60℃への加熱に伴い40~45%程度の比抵抗低 下が見られた.これは、計算によって得られた推定値と ほぼ同様の低下率であることから、温度上昇に伴う低下 域が捉えられているものと推定される.また、周辺部で は加熱期間が進むにつれて徐々に比抵抗が低下していく 傾向が見られる.これは、加熱が周辺部へ徐々に広がっ ていることを示しているものと思われる.

このように、比抵抗トモグラフィーの繰り返し測定に よって、ヒーター試験に伴う高温域の進展状況を捉える ことができた.

# 5. まとめと今後の課題

本研究では、高温状態による地下水や軟岩の挙動を比 抵抗トモグラフィー法により把握することを目指して、 堆積軟岩のヒーター試験の際における比抵抗トモグラフ ィーの繰り返し測定を行った.その結果、温度上昇の影 響とみられる比抵抗低下域の広がりを捉えることに成功 した.これにより、加熱前の周辺地盤の温度が既知であ れば、加熱に伴う比抵抗の変化を測定していくことによ り、温度分布の2次元的な広がりを推定することができ るものと考えられる.

ただし、今回は間隙水の温度をもとに岩石の比抵抗変 化を見積もっており、例えば横山ほか<sup>7</sup>のように、温度



図-4 ヒーター孔及び周辺部における比抵抗値の経時変化. プ ロット位置はそれぞれ1番電極からの水平位置, 深度を 示している.



図-5 ヒーター孔及び周辺部における比抵抗変化率の経時変化. プロット位置は図-4 と同様である.

と岩石自体の比抵抗値を直接比較していない.また,今 回用いた公式は岩種や溶存するイオンの種類や数によっ ても異なるものであるため,現地のコア試料や地下水を 用いた分析を行う必要がある.そこで,現地のコア試料 や地下水を用いて温度変化に伴う岩石比抵抗の変化を測 定し,岩石比抵抗と温度との関係について定量的に考察 を行いたい.

今回生じた比抵抗変化の要因は、温度変化によるもの だけではなく、ゆるみ域の広がりに伴う間隙率の変化な どといった要因によるものも十分に考えられるので、こ れらの影響についてもより詳細に検討し、温度変化に伴 う比抵抗変化についてより正確に求めていきたい.

謝辞:トモグラフィー用電極及び測定ケーブルの製作に あたり,(有)アスクシステムの水津彰氏にご協力いただ きました.また,電極の設置作業や繰り返し測定におけ るメンテナンス作業にあたり,株式会社セレスの平野公 平氏にご協力いただきました.ここに記して感謝の意を 表します.

## 参考文献

- 高倉伸一: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, pp.161-175,1995.
- 2)池野谷尚史,谷和夫,岡田哲実,高倉望,澤田昌孝, 平野公平:高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験 (フェーズI),第37回岩盤力学に関するシンポジ ウム講演論文集,2007.
- 3) 高倉望,岡田哲実,谷和夫,吉川和夫,澤田昌孝,竹田佳代:高温下における堆積軟岩の原位置クリープ試験計画,第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.263-266,2006.
- 4) 吉川和夫, 宇野晴彦, 伊藤晋, 高倉望: 堆積軟岩中に掘 削して 13 年経過した地下空洞周辺のゆるみ・風化領 域調査, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 9, pp.221-226, 2004.
- Archie, G. E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME.*, 146, pp.54-62, 1942.
- Arps, J. J. : The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions, *Petr. Trans, AIME*, 198, pp.327-330, 1953.
- 7) 横山秀吉, 中塚勝人, 阿部司, 渡部賢一: 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, pp.103-120, 1983.
- Sen, P. N. and Goode, P. A. : Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands, *Geophysics*, 57, pp.89-96, 1992.

# MONITORING OF HIGH TEMPERATURE ZONE BY RESISTIVITY TOMO-GRAPHY DURING IN-SITU HEATER TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCKS

# Kenji KUBOTA, Koichi SUZUKI, Takafumi IKENOYA, Nozomu TAKAKURA and Kazuo TANI

In-situ heater test has been conducted to evaluate the influence of high temperature in an underground facility at a depth of 50m. Resistivity monitoring is thought to be effective to map the extent of the high temperature zone. So we have conducted resistivity tomography during the heater test.

As a result, low resistivity zone was appeared near the heated area as starting the heating, and the zone was expanded. Resistivity of rock is proportional to resistivity of pore water. It is known that pore water resistivity decreases as the temperature rise. This suggests that high temperature zone is detected and spatial distribution of temperature can be mapped by resistivity tomography.