

# 堆積軟岩の原位置加熱実験に伴う 不飽和域可視化の試み

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盤台79-5)

\*E-mail: kubota@criepi.denken.or.jp

廃棄体の発熱による高温状態が、地下水や岩盤の挙動に影響を与えることが予想されている。また、周辺岩盤が不飽和になる可能性があるが、その場合の影響について明らかにされていない。そこで、岩盤の温度を100°C以上に加熱する堆積軟岩の原位置加熱実験を実施し、加熱に伴う温度上昇域や不飽和域の可視化を行う目的で、比抵抗トモグラフィの繰り返し測定を実施した。その結果、温度上昇に伴い比抵抗が低下する領域が見られた。熱電対を用いた岩盤温度と室内試験から予想した比抵抗の低下率と、得られた比抵抗の低下率はほぼ整合することから、比抵抗トモグラフィから温度上昇域を概ね捉えられたと考えられる。また、飽和度の低下とみられる比抵抗の上昇が生じている可能性を示唆する結果が得られた。

**Key Words :** resistivity tomography , sedimentary soft rock, temperature, saturation, heating test

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を処分する方法として、地下深部の地層にガラス固化体として埋設する地層処分が検討されている。処分サイトとして、硬質な岩盤（花崗岩など）が検討されている一方、割れ目が少なく透水性が低い特徴を有する堆積軟岩もまた有望なサイトとして検討されている。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く、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。

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、岩盤の電気比抵抗は低下する<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、温度上昇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、原位置での評価を行うため、堆積軟岩の原位置加熱実験を行い、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>。これまで、90°Cまでの加熱に伴う温度上昇域の可視化、さらには温度分布の把握を行う目的で、加熱実験の際に比抵抗トモグラフィの繰り返し測定を実施してきた<sup>3)</sup>。一方、廃棄体が100°C以上になった場合の周辺岩

盤への影響に関してはまだ明らかにされていない。100°C以上になると不飽和帯が形成される可能性があり、その場合、周辺の透水性が変化するなどの影響が考えられる。比抵抗は、温度だけでなく岩盤の飽和度にも応じて変化することから、不飽和域形成の可否に関する評価をするには、比抵抗の繰り返し測定が有効と考えられる。

そこで、本研究では、堆積軟岩を100°C以上に加熱させた原位置加熱実験<sup>4)</sup>の際に比抵抗トモグラフィの繰り返し測定を実施し、高温域及び不飽和域の進展状況を可視化することを試みた。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験サイト

実験は、90°Cまでの加熱実験<sup>2)</sup>と同箇所である、神奈川県相模原市における実験サイトにおいて行った。サイトには、GL-50m部分に横坑が掘削されており、その側壁の多目的実験室と呼ばれる試験空洞において行った。なお、掘削した空洞は、底盤まで地下水で満たされている。GL-50m部分は、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) 原位置加熱実験の概要

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、孔内に150℃まで加熱可能なヒーターを設置<sup>4)</sup>し、孔の側壁から熱を加えることで、周辺岩盤を加熱させた。なお、加熱しながら孔壁への膨張圧を模擬することができる仕様となっている。また、ヒーター孔内に浸出する地下水を真空ポンプを用いて汲み上げ、ヒーター孔底盤を水位境界に保つことで、ヒーター孔周辺を不飽和とさせるようにした。

加熱時において、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た<sup>4)</sup>。ヒーター及び各センサーの配置を図-1に示す。試験では、ひずみ等のデータが安定してきたことを確認しながら90、120、150℃とヒーターの温度を順次加熱していった。その後、120、90℃と温度を下げていき、最終的にヒーターを停止した。なお、加熱前の周辺岩盤の温度は約17℃であった。図-2に、試験期間中におけるヒーター及び周辺岩盤に設置した温度の経時変化<sup>4)</sup>を示す。横軸は加熱開始からの経過日数であり、それぞれ深度25cmにおける温度を示している。

## (3) 比抵抗トモグラフィの概要

図-1に、電極配置図を示す。地表部は、ステンレス電極（直径0.3cm、長さ5cm）を10cm間隔で計30点（総延長290cm）打ち込んだ。ヒーター孔直上に電極を設置す

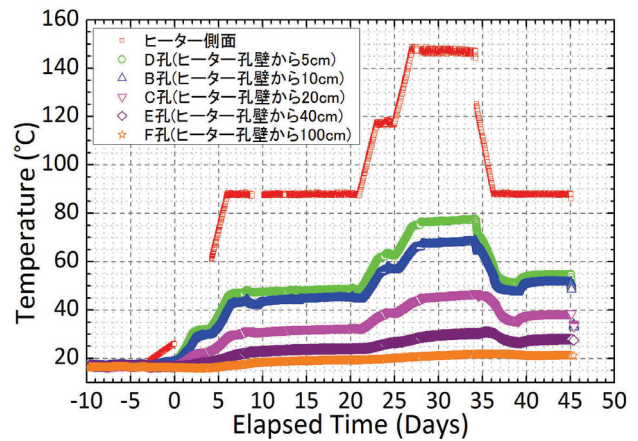


図-2 ヒーター及び周辺岩盤の温度の経時変化<sup>4)</sup>

ることができなかったが、ヒーター孔の孔壁にステンレス電極を10cm間隔で打ち込むことで、ヒーター孔周辺の比抵抗分布の測定を可能とさせた。また、ヒーター孔の孔壁（側面及び底面）から3方向に3cm間隔で10点ステンレス電極を巻き付けたアクリル棒を埋設して、詳細な比抵抗分布の把握を試みた。さらに、ヒーター孔壁からそれぞれ50cm離れた部分に、直径6.6cm、深さ165cmの調査孔（以下、トモグラフィ孔）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、測定に用いた。この計99点を用いて、ダイポール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。温度上

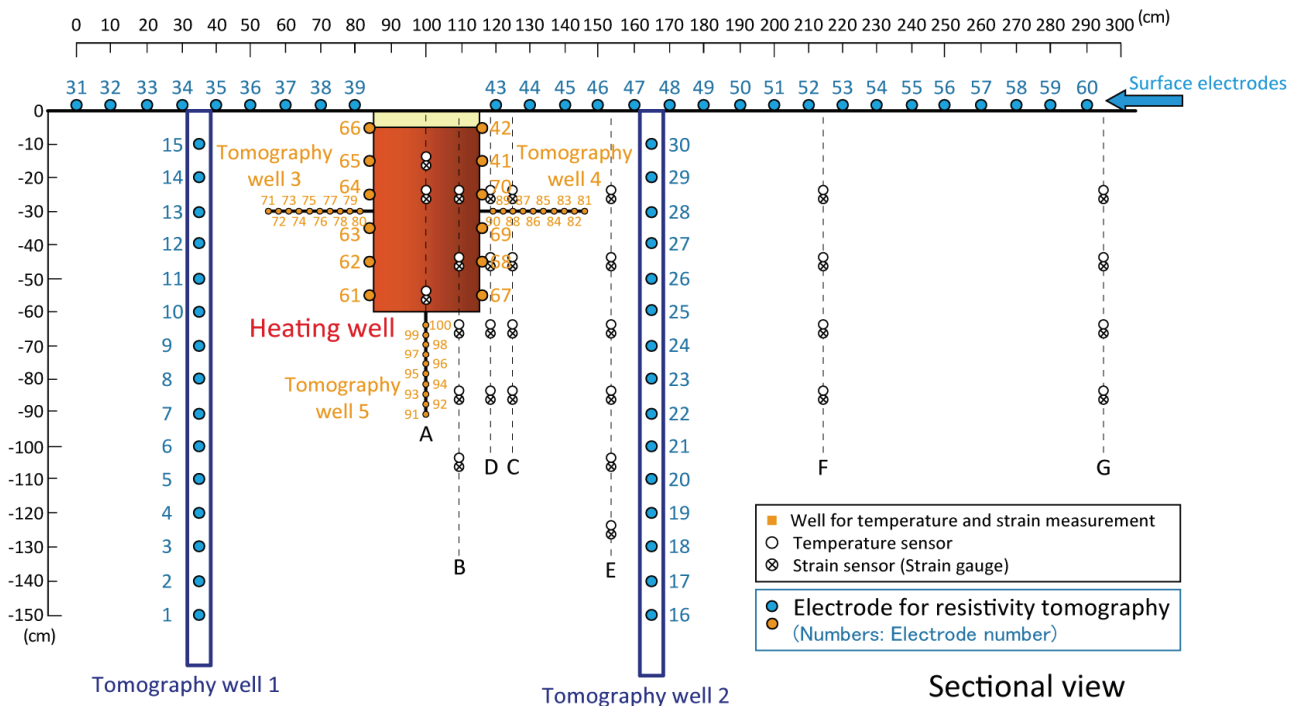


図-1 ヒーター・電極・各種センサーの配置図（断面図）

昇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する必要がある。そこで、電中研我孫子地区のPCと現地に設置した測定用PCとの間で無線パケット通信を行い、現地PCを遠隔操作することで、1日から数日に1回の割合での測定を可能にした。

2次元解析には、ラプラシアンフィルターによる平滑化制約付き非線形最小2乗法<sup>5)</sup>を用いた。なお、ヒーター孔は電気をほとんど通さない部分となるため、高比抵抗(100Ωm)を初期値とおいて解析を実施した。繰り返し測定データの解析には、加熱前の解析断面を用いて正規化データを作成し、そのデータを用いて解析する手法<sup>6)</sup>を用いた。

### 3. 測定結果

図-3に、加熱前における比抵抗断面(2次元解析断面)を示す。図では、加熱前の測定、90、120、150℃への加熱時における比抵抗断面をそれぞれ示す。また、点線で囲んだ領域は、採取コア試料などから予測した砂岩層の位置を示している。加熱前の比抵抗分布(図-3(a))より、測定領域の比抵抗は10~30Ω程度となっており、90℃までの加熱試験時に行った比抵抗トモグラフィ及びサイトの泥岩コア試料を用いた室内試験結果<sup>3)</sup>と概ね一致していた。また、測定領域の深度約30~50cmにかけて見られる砂岩の薄層の部分においては、周辺の泥岩層に対してやや高比抵抗となっていた。この傾向は、これまでの試験結果<sup>3)</sup>と一致していた。加熱開始後、ヒーター孔周辺の比抵抗が低下する傾向が見られ、温度が上昇するに伴い比抵抗はさらに低下していった。

図-4に、加熱前の時点に対する比抵抗変化率断面を示す。図-3で比抵抗断面を示した時点と同時点における変化率を示す。比抵抗変化率 $R$ (%)は、加熱後の比抵抗値を $\rho$ 、加熱前における比抵抗値を $\rho_0$ として、式(1)を用いて求めた。

$$R = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \times 100 \quad (1)$$

図-4より、加熱に伴い、ヒーター孔周辺において比抵抗低下域が生じていることが分かる。比抵抗の最大低下率は、90℃への加熱時では約55%、120℃への加熱時では約65%、150℃への加熱時では約70%であった。なお、ヒーター孔から1m以上離れた領域にも比抵抗が低下する領域が見られるが、測定値(見掛比抵抗値)ではこの領域においてはほとんど比抵抗に変化が見られないことから、2次元解析による影響の可能性が考えられる。

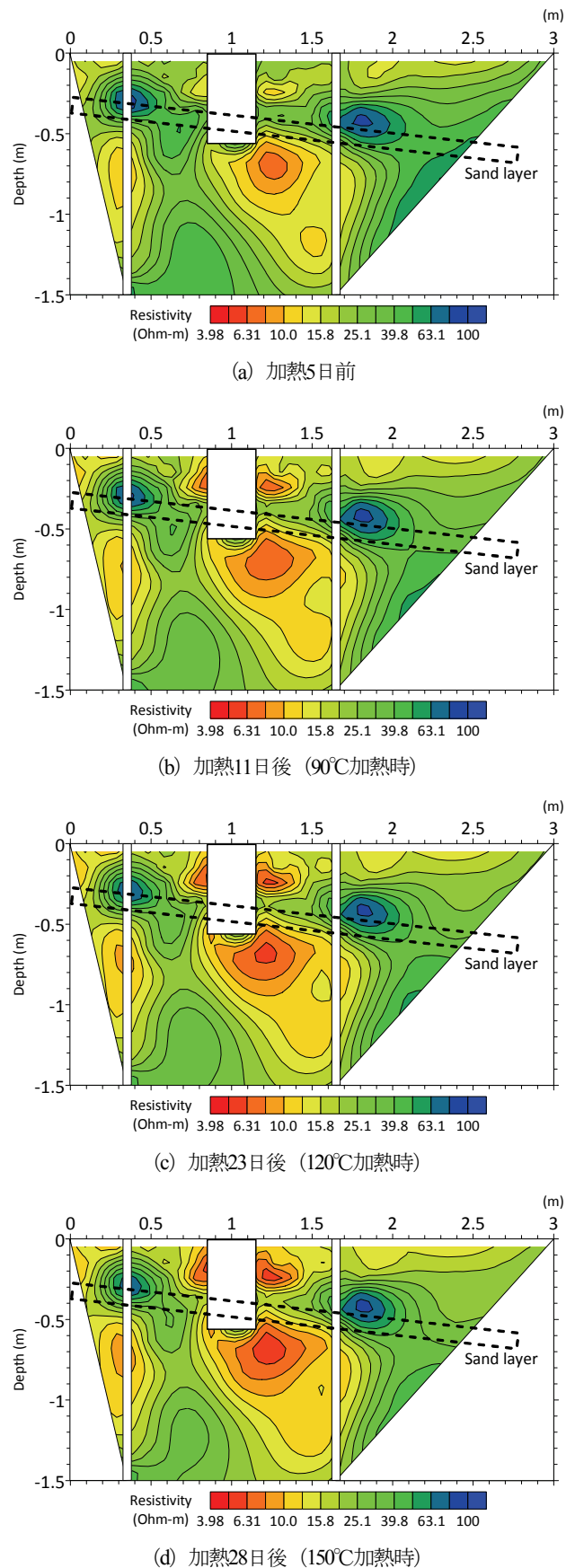
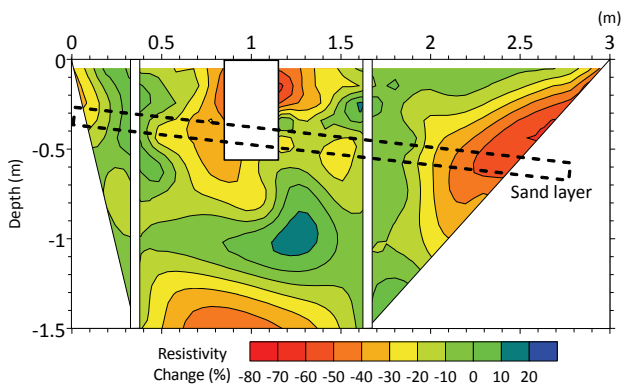
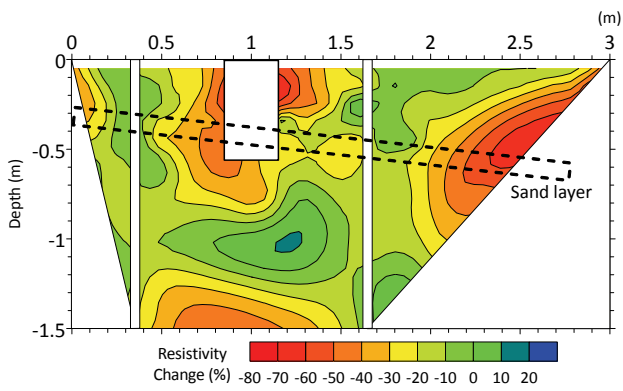


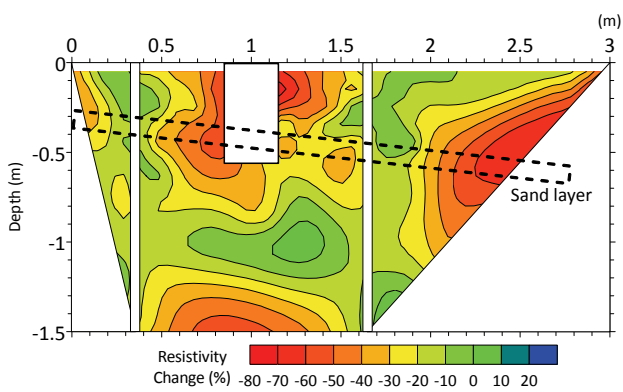
図-3 加熱前後の比抵抗2次元解析断面



(a) 加熱11日後 (90°C加熱時)



(b) 加熱23日後 (120°C加熱時)



(c) 加熱28日後 (150°C加熱時)

図-4 加熱に伴う比抵抗変化率断面

一般に、温度の上昇に伴い、イオンの易動度が增大することから、水溶液の比抵抗は低下する<sup>1)</sup>。式(2)において、岩盤の比抵抗は間隙水の比抵抗と比例関係にあることから、温度上昇に比例して、岩盤の比抵抗は低下する。

また、式(2)より、飽和度の低下に伴い、間隙中の水が電気の不良導体である空気に置換されることから、比抵抗は増大する。種々の岩石試料の飽和度と比抵抗との関係について検討した既存の検討結果<sup>8)</sup>では、飽和状態から飽和度60%程度までの低下で最大1オーダー程度比抵抗が増大し、飽和度40%以下になると急激に比抵抗が増大することを示している。

以上より、温度の上昇に伴い比抵抗が低下する一方、飽和度の低下に伴い比抵抗は増大することから、100°C以上の加熱で不飽和域が生じるような場合、温度上昇と飽和度低下との両方の要因で比抵抗の増減が相殺されることも予想される。

## (2) 測定により生じた比抵抗変化と温度変化との関係

実験サイトの泥岩コア試料を用いて測定した温度と比抵抗との関係<sup>3)</sup>を図-5に示す。コア試料を用いた室内試験結果であり、17°Cにおける比抵抗値に対する各温度の比抵抗変化率を示している。図より、温度の上昇に伴い比抵抗が低下する傾向が見られ、これは先述した既存の理論及び比抵抗トモグラフィの結果と一致する。熱電対を用いた温度測定結果(図-2)より、90°Cへの加熱時において周辺岩盤の温度は最大約45°Cに上昇している。現地泥岩試料を用いた室内試験結果(図-5)では、45°Cへの温度上昇に伴い比抵抗は45%程度低下している。これは、比抵抗トモグラフィによる最大の比抵抗低下である約55%とほぼ調和的である。また、120°Cへの加熱時においては、岩盤の温度と室内試験結果から予想される比抵抗低下(約60%)に対し、加熱実験での比抵抗低下は約65%となっていた。さらに、150°Cへの加熱時にお

## 4. 考察

### (1) 岩盤の比抵抗と温度・飽和度との関係

岩盤の比抵抗は、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>7)</sup>と呼ばれる次の式(2)で表される。

$$\rho_R = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (2)$$

ここで、 $\rho_R$ は岩石の比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )、 $\rho_w$ は間隙水の比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )、 $\phi$ 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。

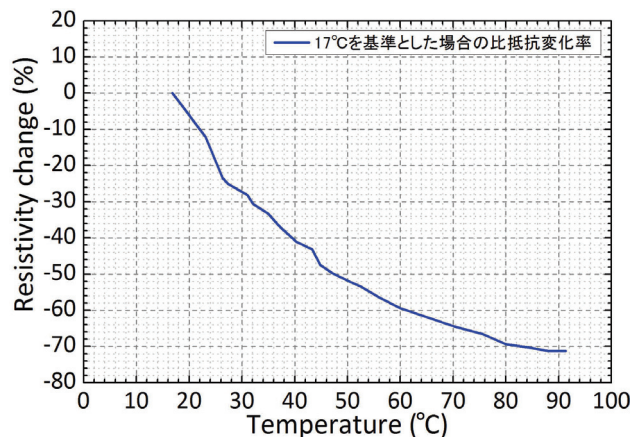


図-5 現地泥岩試料の比抵抗と温度との関係<sup>3)</sup>



いては、予想される比抵抗低下（約70%）に対し、加熱実験での比抵抗低下は約70%と、120°C、150°Cへの加熱時においても、室内試験結果とほぼ調和的となっていた。

岩石の比抵抗は、式(2)に示されるように、間隙率や間隙水の比抵抗などの様々な要因で変化する。例えば、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。しかし、今回の加熱実験はヒーター孔掘削から数年後に実施しているため、間隙率の変化はほとんどないと予想される。また、加熱に伴う水質の変化が生じる可能性もほとんどない。

以上より、加熱時において生じた比抵抗低下の主要な要因は、温度上昇によるものであることが推定される。

### (3) 測定により生じた比抵抗変化と飽和度との関係

前項において、比抵抗変化の主要な要因として温度変化によるものと推定した。一方、ヒーター孔内に浸出する地下水を真空ポンプを用いて汲み上げることで不飽和域の作成を試みていたことから、飽和度の低下に伴う比抵抗の上昇が、温度上昇に伴う比抵抗低下と同時に生じていた可能性が考えられる。

岩盤の温度と室内試験結果から予想される比抵抗低下（予想値）と、加熱実験により得られた比抵抗低下（測定値）との関係を見ると、90°C加熱時で予想値45%に対して測定値55%と、測定値のほうが大きな比抵抗低下を示していた。一方、120°C加熱時では予想値60%に対して測定値65%、150°C加熱時では予想値70%に対して測定値70%と、加熱が進むにつれて予想値と測定値の差が徐々に小さくなる傾向となっていた。温度上昇に伴い不飽和域が生じて比抵抗が上昇していると仮定した場合、予想値に対して測定値が大きくなることが予想される。従って、周辺岩盤の飽和度が低下していることが、比抵抗の変化から示唆される。ただし、今回はあくまで両者の最大値を見て比較を行っているのみであるため、温度分布と比抵抗の2次元分布との比較を行うことが今後必要である。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、堆積軟岩の原位置加熱実験時における周辺岩盤への温度上昇域、さらには不飽和域を可視化することを目的として、比抵抗トモグラフィの繰り返し測定を実施した。その結果、温度上昇の影響とみられる比抵抗低下域が捉えられた。また、不飽和域の生成を示唆す

る結果が得られた。

不飽和域進展の検討については、今後比抵抗分布と実測温度との比較による検討を行う必要がある。また、2次元解析に関して、電気を通さない部分であるヒーター孔を考慮した解析方法に関する検討が必要と考えられる。さらに、温度と比抵抗、飽和度と比抵抗との相関それぞれに関しては、室内試験等による検討例が存在しているものの、温度と飽和度の両者による変化が同時に生じた場合の比抵抗の変化傾向について検討した例は存在しない。そこで、室内試験や既存の理論を用いた検討と組み合わせることで、不飽和域の生成やその領域の把握を行いたいと考えている。

謝辞：トモグラフィ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

- 1) 高倉伸一：新潟および秋田油田地域の第三系岩石の比抵抗，物理探査，48，pp.161-175，1995.
- 2) 池野谷尚史，岡田哲実，高倉望，澤田昌孝，平野公平，谷和夫：堆積軟岩の原位置加熱実験（フェーズⅡ），第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2011.
- 3) 窪田健二，鈴木浩一，池野谷尚史，高倉望，谷和夫：比抵抗トモグラフィによる堆積軟岩の原位置加熱実験に伴う高温域進展状況のモニタリング，物理探査，62，pp.531-542，2009.
- 4) 高倉望，岡田哲実，池野谷尚史，澤田昌孝，平野公平，谷和夫：高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験計画（フェーズⅢ，Ⅳ），第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2011.
- 5) 鈴木浩一・佐々木裕：比抵抗法 2次元インバージョン解析法の沖積地域調査への適用，物理探査，47，pp.81-95，1992.
- 6) 杉本芳博：比抵抗トモグラフィによる時系列探査の新しい逆解析法，物理探査学会第107回学術講演会論文集，pp.207-210，2002.
- 7) Archie, G. E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME.*, 146, pp.54-62, 1942.
- 8) 伊関伸一：岩石の含水状態と比抵抗との関係について，物理探査学会第91回学術講演会論文集，pp.205-208，1994.

AN EXPLORATION OF UNSATURATED ZONE  
DURING IN-SITU HEATING TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCKS

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

In-situ heating 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 and unsaturated zone. So we have conducted resistivity tomography during the heating test.

As a result, the resistivity of the rock mass around the heating well was decreased and this area was gradually expanded from the heated area during the heating. This suggests that high temperature zone is detected by resistivity tomography. The results also suggested that resistivity was increased by unsaturation of rock mass around the heating well.