

高温下における堆積軟岩の 原位置加熱実験（フェーズⅠ）

池野谷 尚史^{1*}・岡田 哲実²・高倉 望¹・澤田 昌孝²・平野 公平³・谷 和夫⁴

¹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）

²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）

³株式会社セレス（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 （財）電力中央研究所内）

⁴横浜国立大学 大学院 工学研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟）

*E-mail: ikenoya.takafumi@tokyu-cnst.co.jp

透水性の低い堆積軟岩を対象とした放射性廃棄物の地層処分の研究が進められている。しかしながら堆積軟岩は、長期の変形特性が顕著であり、熱や水などの外部環境の変化に影響を受け易い。そこで本研究では、外部環境の変化を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立を目指し、原位置加熱実験でのデータを基に熱-水-応力連成解析コードの検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度50mの地下空間実験場において原位置加熱実験を実施した。

常温で18℃程度の堆積軟岩層を40℃まで加熱した結果、熱源周辺岩盤の温度は加熱開始後40日程度でほぼ全域に亘り定常となり、100～180μmの膨張ひずみが計測された。

Key Words : radioactive waste disposal, thermal characteristics, creep, in-situ test, rock mass, soft rock

1. はじめに

透水性の低い堆積軟岩を対象とした放射性廃棄物の地層処分の研究が進められている。堆積軟岩は、結晶質岩に比べて長期の変形特性（クリープ特性）が顕著であり、また、熱や水など外部環境の変化に影響を受け易い¹⁾ことから、外部環境の変化を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立が望まれている。そこで、本研究では、原位置加熱実験でのデータを基に熱-水-応力連成解析コード²⁾の検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度50mの地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている縦置き方式³⁾の約1/8サイズの空洞を掘削し、原位置加熱実験を実施した。

本論では、平時で18℃程度の堆積軟岩層を40℃まで加熱した段階での熱源周辺岩盤の温度とひずみの影響範囲および経時変化について報告する。

2. 実験概要

(1) 実験サイトの概要

本サイトは、図-1に示すように深さ50mの矩形断面の立坑および延長35mの横坑からなる地下空間実験場であ

る。原位置加熱実験はGL-50mの位置（図中、丸で示した箇所）にある幅1.1～2.0m、奥行き3.65m、高さ1.9mの馬蹄形横坑内で実施した。地下空間実験場周辺の地層構造は、GL-7mまではローム層であり、その下の層厚5mの田名原礫層と層厚9mの座間丘陵礫層およびそれ以上深の上総層群泥岩（堆積軟岩）で構成されている。対象



図-1 地下空間実験場

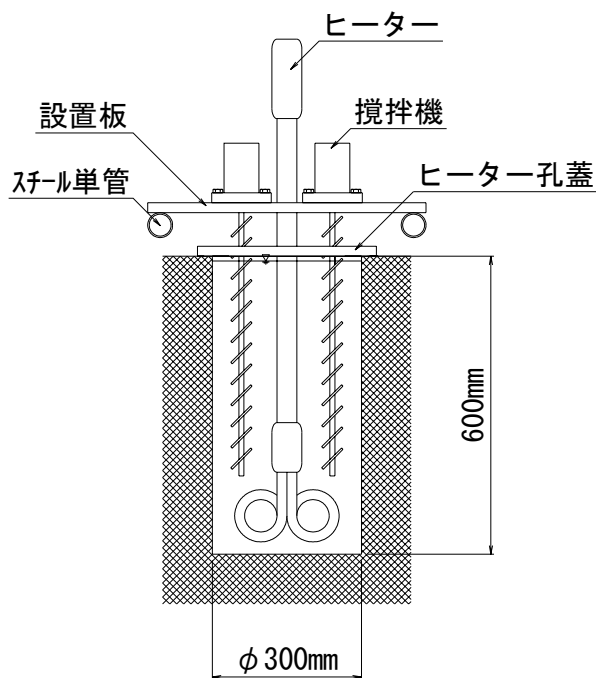


図-2 ヒーター孔の構造

とした地盤は、新第三紀鮮新世末期から更新世前期の上総層群の泥岩である。概ね均質な泥岩を主体としているが、未固結な砂層やスコリア層を幾層も介在している。また、破碎帯がN79W/81SEに確認されている。既に得られている泥岩の力学特性としては、湿潤単位体積重量で約20.0kN/m³、一軸圧縮強さで約5.6MPa、ヤング率(E_{50})は約300MPa、ひずみレベルが0.001%以下のヤング率(E_{max})で約3,200MPaである⁴⁾。

(2) 実験方法

馬蹄形横坑の底面にD300mm×H600mmの空洞（ヒーター孔）を掘削した。これは高レベル放射性廃棄物処分で想定されている堅置き方式の約1/8サイズである。孔内に満たした水を、ヒーターによって加熱することで、周辺岩盤に熱を負荷する。また、孔内の水温が均一となるように、攪拌機を設置した。概要を図-2に示す。

また、地表面との境界条件を断熱境界とするため、地表面を厚さ20cmの発泡スチロールで覆った。

加熱は表-1に示すように3つのフェーズに分けて、段階的に行う。本論ではフェーズⅠにおいて40℃の加熱を行った結果について述べる。

表-1 加熱フェーズ

	加熱温度	目的
フェーズⅠ	40℃	余裕深度、TRU想定温度域での現象把握
	60℃	
フェーズⅡ	80℃	高レベル放射性廃棄物想定温度域での現象把握
	90℃	
フェーズⅢ	120℃	想定域外での現象把握
	150℃	

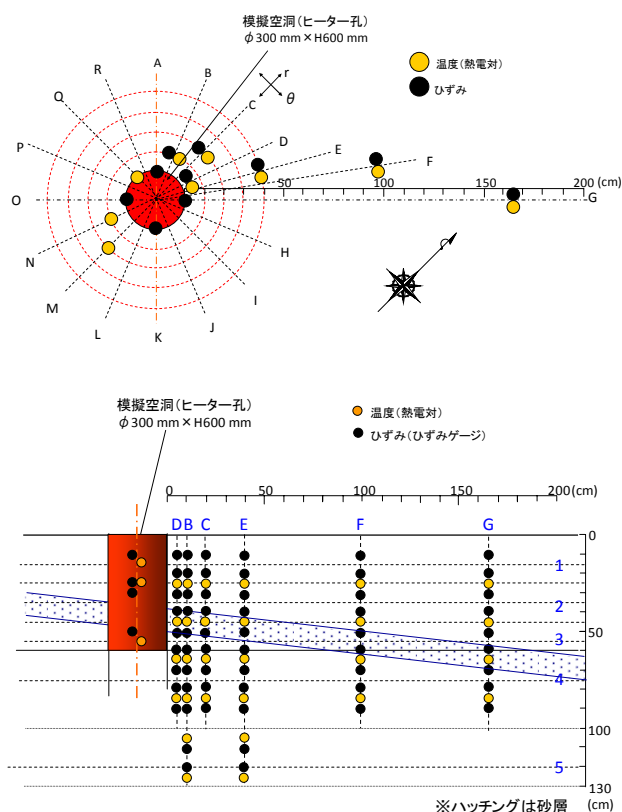


図-3 計測位置 (上: 平面図, 下: 断面図)

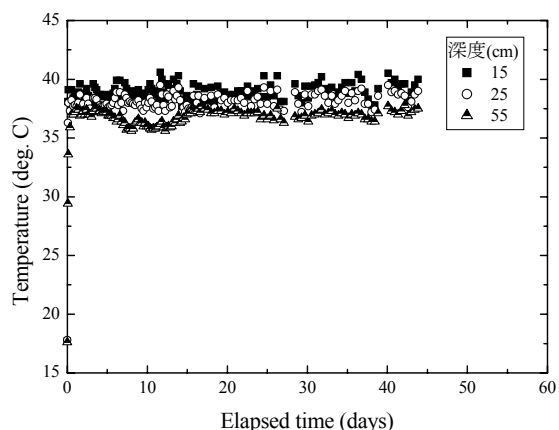


図-4 ヒーター孔内温度の経時変化

(3) 計測方法

岩盤中のひずみと温度は、サンプリングコアにひずみゲージおよび熱電対を貼付し、当該岩盤と同程度のヤング率を有する材料によって一体化したものを埋設して計測した^{5), 6)}。

計測位置は、事前解析から得られた熱の影響範囲を基に定めた⁷⁾。計測位置を図-3に示す。岩盤のひずみは加熱用ヒーター孔を中心に、半径方向、周方向、鉛直方向を計測した。また、温度はひずみと同じ箇所計測した。ヒーター孔の壁面にひずみゲージを貼付し、周方向および鉛直方向のひずみも計測を行った。

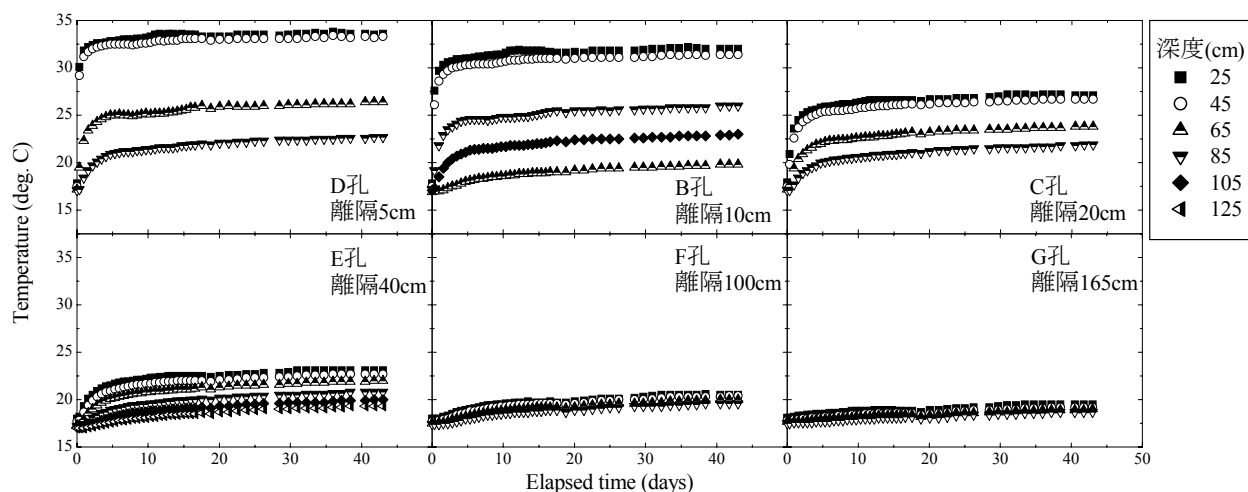


図-5 各計測孔の温度の経時変化

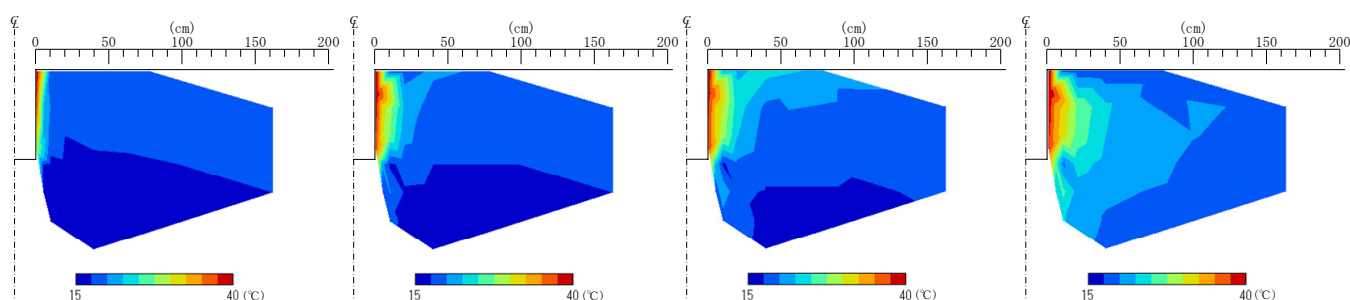


図-6 温度分布の時間変化（左から加熱開始1時間後、12時間後、24時間後、1ヶ月後）

3. 実験結果

(1) 温度

加熱用ヒーター孔内の温度の経時変化を図-4に示す。孔内の温度は、加熱開始後数時間でほぼ定常となった。温度分布は37～40℃で概ね一定であり、孔内の温度調整および攪拌が問題なく行われていることを示している。

各計測孔の温度の経時変化を図-5に示す。孔の位置は図-3を参照されたい。ヒーター孔に最も近接している（孔壁からの離隔5cm）D孔では、深度25cm、45cmの位置の温度が同一孔の中でも高く、33℃程度を示している。定常に達する時間も他に比べて短く、5日間程度である。ヒーター孔底以深の65cm、85cmでは温度はやや低くなり、定常に至るまでにさらに1～2日間程度を要している。また、B孔、C孔とヒーター孔から離れるにつれ温度は低くなり、定常状態へ移行する時間も長くなる。ヒーター孔から最も離れた（孔壁からの離隔165cm）G孔においては40日程度で定常に達し、温度上昇量は1℃程度である。

温度分布の時間変化を図-6に示す。ヒーター孔を中心とした高温の領域が時間の経過に伴って拡大していく様子が分かる。また、地表面付近の温度分布を見ると境界条件は、断熱境界と定温（固定）境界の間で、断熱境界に近いと考えられる。

(2) 半径、周、鉛直方向のひずみ

各計測孔の半径、周、鉛直方向のひずみの経時変化を図-7に示す。圧縮方向を正、引張方向を負としている。ヒーター孔からの離隔5cmのD孔では加熱直後より全ての方向で引張方向のひずみが発生している。加熱による岩盤温度上昇に伴う膨張と考えられ、その大きさは100～180μ程度である。室内試験より得られている当該サイトの泥岩の線膨張係数は10μ/℃程度であり、温度上昇を20℃とした場合に予測されるひずみ量は200μ程度である。予測値と計測結果が同等であることから、計測値は妥当であると判断した。ヒーター孔から離れるにつれて岩盤温度の上昇量も小さくなるため、ひずみ量も小さくなり、最も遠いG孔では数～30μ程度である。定常に達する時間は温度よりもやや長く、D孔において10日程度以上を要している。

ヒーター孔壁において計測した周ひずみ、鉛直ひずみの経時変化を図-8および図-9に示す。加熱開始直後より周方向では圧縮ひずみ、鉛直方向では引張りひずみが発生している。加熱により岩盤が膨張するが、孔壁が押し出してくる挙動を表現しているものと考えられる。鉛直方向は、膨張して上方に伸張するために引張りひずみが計測され、周方向は、孔径が小さくなるために圧縮ひずみが計測された。

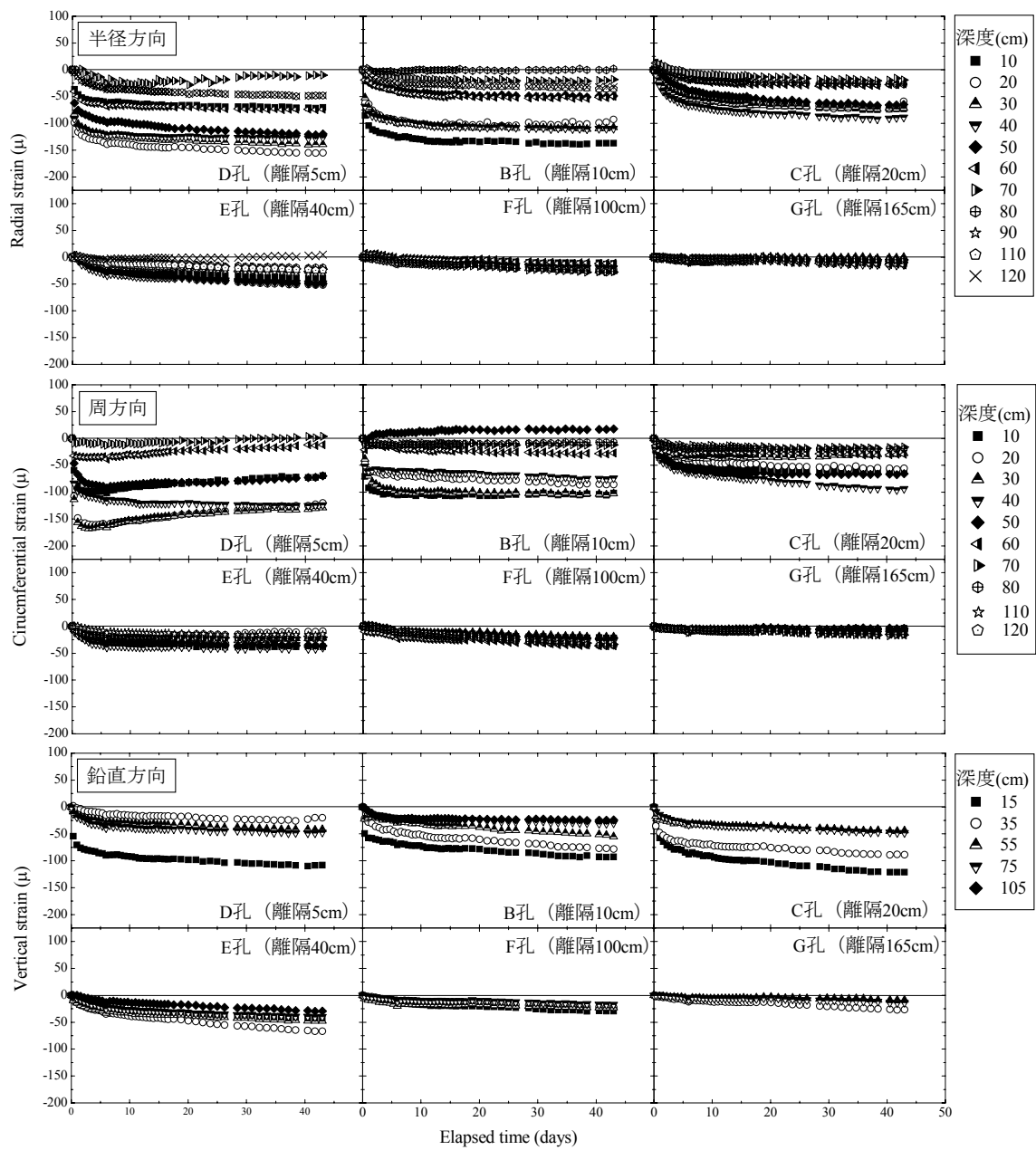


図-7 各計測孔のひずみの経時変化（上：半径方向，中：周方向，下：鉛直方向）

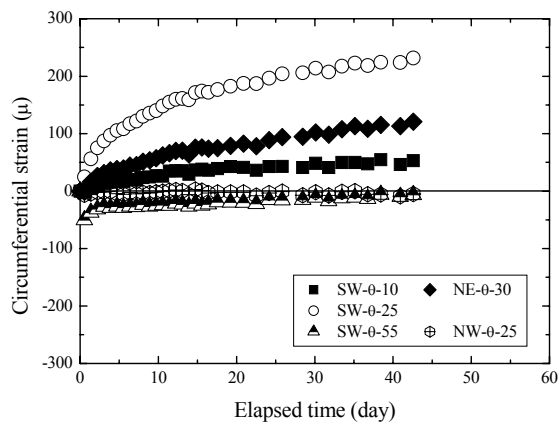


図-8 ヒーター孔壁周方向のひずみの経時変化

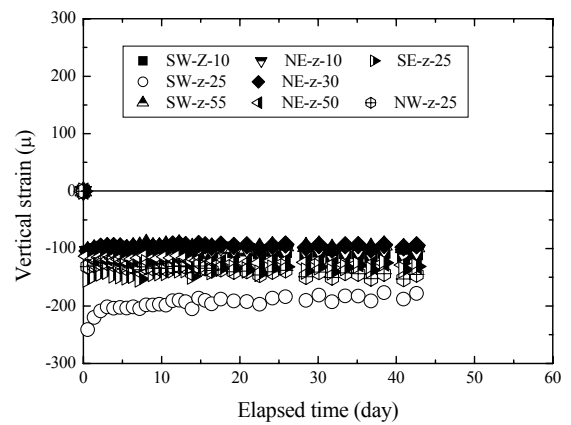


図-9 ヒーター孔壁鉛直方向のひずみの経時変化

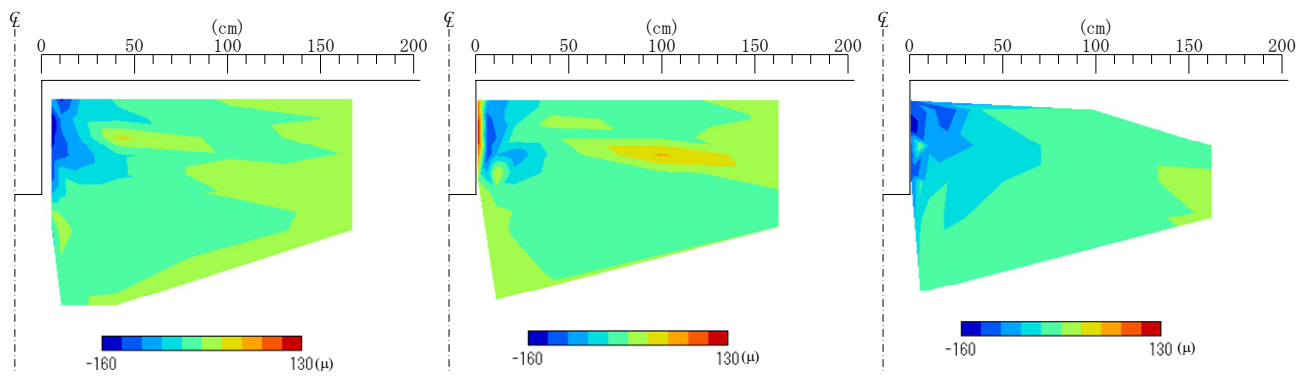


図-10 計測終了時のひずみ分布（上：半径方向，中：周方向，下：鉛直方向）

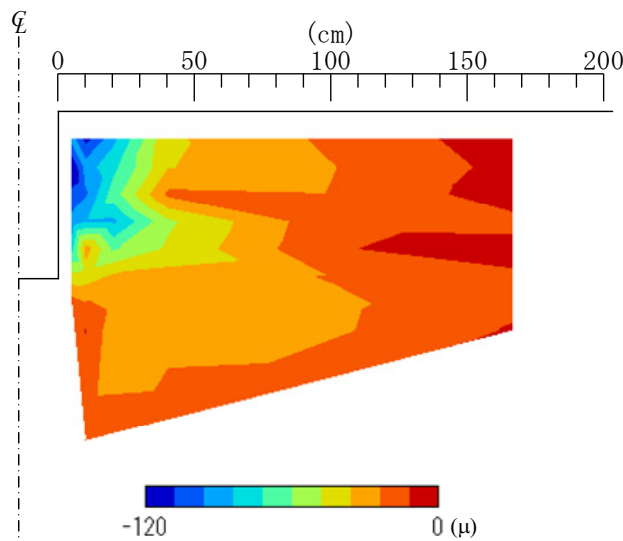


図-11 計測終了時の体積ひずみ分布

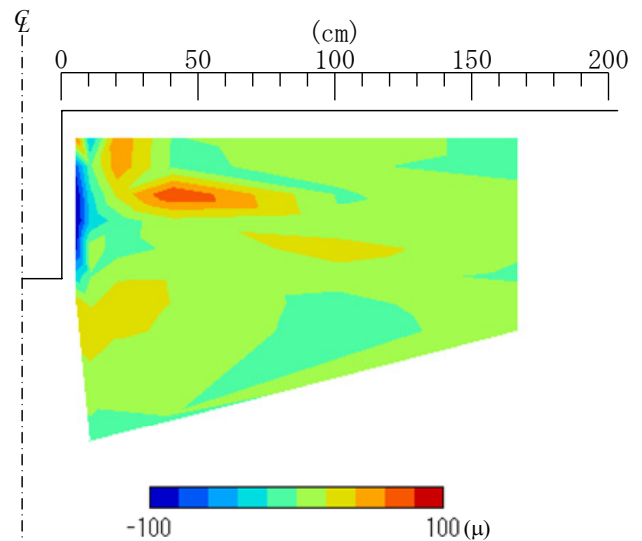


図-12 計測終了時のせん断ひずみ分布

計測終了時（加熱開始から43日後）における半径，周，鉛直方向のひずみ分布を図-10に示す。データ間は線形補間を行った。全ての方向でヒーター孔近傍において最も大きな引張りひずみが発生し，ヒーター孔から離れるにつれひずみは小さくなる傾向が見られる。

周方向については，ヒーター孔壁で圧縮ひずみが発生しているが，岩盤内部に入ると引張りひずみへと変化する。コンタ図から，厚さ数cm程度のリング状の部分が，熱膨張による孔壁の押し出しに対して抵抗しているものと考えられる。

(3) 体積ひずみ

体積ひずみ ε_v を式(1)のように定義した。圧縮方向を正，膨張方向を負としている。計測終了時の体積ひずみの分布を図-11に示す。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z \quad (1)$$

ヒーター孔周辺では120μ程度の膨張を示し，ヒーター孔から離れるにつれてひずみは小さくなる。圧縮ひずみは見られず，全域に亘って加熱により膨張していると考えられる。

また，深さ30～40cmには砂層が確認されているものの，その影響は顕著ではない。

(4) せん断ひずみ

せん断ひずみ γ を式(2)のように定義した。計測終了時の r 面内で定義したせん断ひずみの分布を図-12に示す。

$$\gamma = \varepsilon_r - \varepsilon_z \quad (2)$$

γ はヒーター孔周辺で最も大きく，-100μ程度である。孔壁から離れるにつれて小さくなり，離隔が30cm程度（1D）でほぼ0μとなる。また，体積ひずみ分布と同様に，深さ30～40cm付近に帯状のひずみ分布が確認できる。介在砂層の影響の可能性があるが，今後の詳細な検討が必要である。

ここで，深さ30cm（ヒーター孔深さの中間）程度では，主ひずみの方向が半径方向，鉛直方向とほぼ一致すると考えられるため，式(2)で定義したせん断ひずみ γ は最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ にほぼ等しい。しかし，深さ60cm（ヒーター孔底）程度では，主ひずみの方向が変化するため， γ は $\gamma_{\max}$ に比べて小さい。このことから，せん断ひ

ずみ分布については、解析等と合わせて今後検討を行う必要がある。

4. まとめ

堆積軟岩中に構築した深度50mの地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている縦置き方式の約1/8サイズの空洞を掘削し、原位置加熱実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・加熱開始後40日程度で温度は全域に亘りほぼ定常となった。
- ・加熱によってほぼ全域に亘り岩盤に膨張ひずみが発生した。
- ・孔壁近傍（ヒーター孔壁からの離隔数cm）には周方向に圧縮する部分が形成された。
- ・加熱時の膨張量はヒーター孔壁からの離隔5～10cmの範囲において100～180 μ mで、予測値とほぼ同等であった。

5. 今後の予定

現在、フェーズⅠの後半（加熱温度60℃）を実施中である。フェーズⅠ終了後、一旦常温に戻して、ヒーター

孔壁面の観察やプレッシャーメータ試験による周辺岩盤の強度特性の変化の確認を行い、フェーズⅡを実施する予定である。また、熱-水-応力連成解析結果との比較検討も順次行っていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして，pp.16-35，丸善，2006。
- 2) 澤田昌孝，岡田哲実：地下施設力学的相互作用解析のための軟岩クリープモデルの開発，電力中央研究所報告，N04028，2005。
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート，JNC-TN1400-99-020，ppIV-72，1999。
- 4) 例えば，越智健三，壺内達也，龍岡文夫：立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形特性，土木学会論文集，No.463/III-22，pp.143-152，1993。
- 5) 岡田哲実，澤田昌孝，平賀健史，平野公平，谷和夫：堆積軟岩の埋設型ひずみ計測方法の高度化，土木学会第62回年次学術講演会，pp.395-396，2007。
- 6) 高倉望，池野谷尚史，岡田哲実，澤田昌孝，平賀健史，平野公平，谷和夫：ボーリングコアを用いた岩盤中のひずみ計測方法の適用性について，土木学会第62回年次学術講演会，pp.457-458，2007。
- 7) 澤田昌孝，竹田佳代，谷和夫，岡田哲実，高倉望，池野谷尚史：堆積軟岩を対象とした原位置加熱実験の熱-水-応力連成解析による事前検討，第37回岩盤力学に関するシンポジウム，2008，投稿中。

IN-SITU HEATER TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCKS UNDER HIGH TEMPERATURE (PHASE I)

Takafumi IKENOYA, Tetsuji OKADA, Nozomu TAKAKURA,
Masataka SAWADA, Kouhei HIRANO and Kazuo TANI

Various researches have been conducted on high level radioactive waste geological disposal in sedimentary soft rocks. It's noted that the long-term mechanical behaviors of sedimentary soft rocks can be affected by various environmental factors such as temperatures or hydraulic conditions.

Therefore, in-situ heater test was conducted in an underground cavern at a depth of 50 meters for the purpose of improving thermo-hydro-mechanical coupled analysis code.

This report presents the test result demonstrating the changes of temperature and strain distributions with time at the elevated temperature of the heater up to 40 degrees Celsius.