

図-1 実験1概要図

インキュベータ内に電子天秤と供試体を設置後、インキュベータを気温40℃、相対湿度50%に設定し実験を開始する。ひずみが定常状態に至った後湿度を上下させ、ひずみの変化を観察する。なお実験を通してインキュベータ内の気温は40度の一定に保った。実験ではインキュベータ内の代表点における気温と相対湿度、供試体の質量変化、異なる蒸発面からの距離におけるひずみ、蒸発面付近での2点（蒸発面上1mm, 8mm）における気温と相対湿度（2点センサ）を計測する。この2点センサから以下の式より蒸発速度を算出する。

$$ev_rate = D \frac{e_{1mm} - e_{8mm}}{a}$$

$$e_{\alpha} = \frac{217 \cdot E \cdot RH_{\alpha} / 100}{T_{\alpha} + 273.15}$$

$$E = 6.1078 \cdot 10^{(7.5 \cdot T_{\alpha} / (237.3 + T_{\alpha}))}$$

ここに、

D : 拡散係数($m^2/hour$)

e_{α} : 絶対湿度(g/m^3)

a : センサ間距離(m)

E : 飽和水蒸気圧(Pa)

RH_{α} : 相対湿度($\%$)

T : 気温($^{\circ}C$)

添え字 α は蒸発面上1mm, 8mmを示す。

ひずみについては供試体側面において、蒸発面からの距離2.5cm（ゲージ1）、7.5cm（ゲージ2）、12.5cm（ゲージ3）の3点と、軸を90度ずらした同位置の3点（ゲージ4, 5, 6）にロゼットゲージを貼付し、蒸発面からの距離とひずみについて考察する（図-1参照）。

また供試体の蒸発面の反対面から水が供給されない場合の乾燥実験も行い（実験2）、水供給の有無による乾燥変形挙動の違いについても考察する。

3. 実験結果

(1) 実験1について

乾燥実験1より得られたデータのうち蒸発面付近の相対湿度と蒸発速度を図-2に、ゲージ1～3の各方向ひずみを図-3に示す。ゲージ4～6についても同様な傾向が確認できたため、ここでは割愛する。供試体はまず気温40℃、湿度50%の環境下で乾燥させる（ステップ1）。ひずみが定常状態となった時点で湿度を80%まで上昇させ、実験を進める（ステップ2）。その後同様に湿度を50%に下げ、再び湿度を80%まで上昇させる（ステップ3, 4）。

実験当初に、熱膨張と推測される膨張方向のひずみが観測された。この熱膨張の影響を除去して結果の考察を行うため熱伝導解析を実施し、供試体温度が定常状態となる実験開始4時間後をひずみの基準点とした。

表-1 乾燥試験試料一覧

	Sample name	Initial diameter (cm)	Initial height (cm)	Set T (°C)	Set RH (%)
実験1	SS-B01	4.952	15.002	40	50-80-50-80
実験2	SS-B04	4.950	14.998	40	50-80-50-80

表-2 試料物性値

Sample name	Grain density (g/cm^3)	Porosity (-)	Young's modulus (GPa) Sat, Dry		Poisson ratio (-) Sat, Dry	
SS-B01	2.262	0.116	8.19	14.87	0.35	0.07
SS-B04	2.260	0.119	8.03	14.67	0.34	0.05

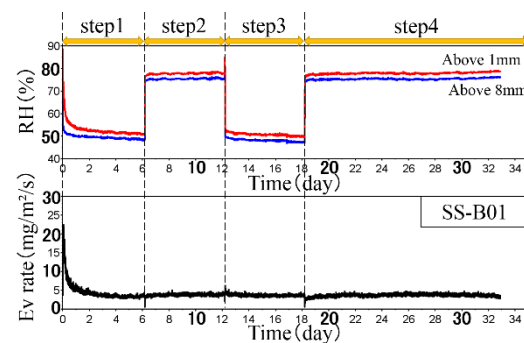


図-2 実験1：相対湿度（2点センサ）と蒸発速度

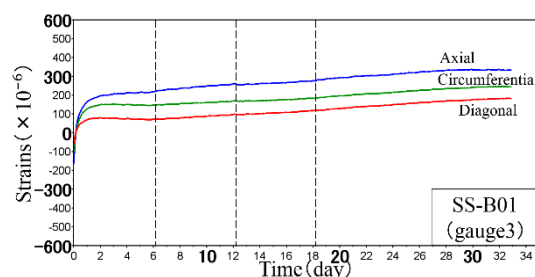
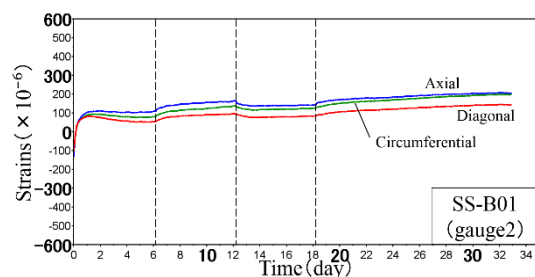
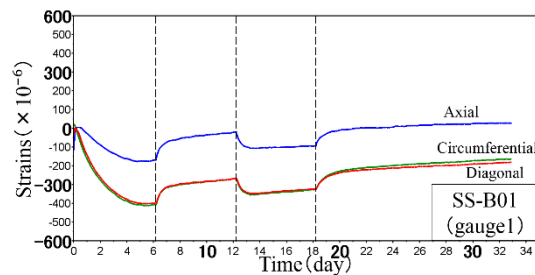


図-3 実験1：ひずみの様子（正が膨張、負が収縮）

a) ステップ1

ゲージ1においては水分量低下による収縮ひずみが観測された。ゲージ2に関しては若干の収縮ひずみが確認できる。ゲージ3については収縮方向に転じる様子は見られず、ほぼ横ばいで推移している。

b) ステップ2

実験開始6日後の段階でひずみが定常状態に達したと判断し、湿度を80%まで上昇させた。直後ゲージ1, 2ではひずみは瞬時に膨張方向に転じ、ゲージ1では最大で約150マイクロ、ゲージ2では最大で約70マイクロのひずみ増加が観測された。ゲージ3では明確なひずみの変化は確認できなかったが、湿度上昇後わずかにひずみ曲線の傾きが増加している。

c) ステップ3

ステップ3に移行し湿度を80%から50%まで下げると、ゲージ1, 2ではひずみが即座に収縮方向に転じている様子が確認できる。ゲージ3では微かではあるがひずみ曲線の傾きが減少している。

d) ステップ4

その後ステップ4へ移行し再度湿度を80%まで上昇させると、ゲージ1, 2ではひずみは再び膨張に転じた。ゲージ3でもわずかにひずみ曲線の傾き増加が確認できる。

全体としては外気の湿度変化により、少なくとも蒸発面から7.5cmの位置でひずみが増加することが確認できた。これは外気の湿度変化により、蒸発面から約7.5cmの範囲の岩盤で水分状態や応力状態が変化し、変形が生じていることが示唆される。

(2) 実験2について

供試体底面から水を供給しない形で行う乾燥実験2について、蒸発面付近の相対湿度と蒸発速度を図-4に示す。またゲージ1~3のひずみの経時変化を図-5に、供試体質量の経時変化を図-6に示す。

まず、初期段階において熱膨張ひずみが観測されたため、この影響を除去するため熱伝導解析を行い、供試体温度が定常となる実験開始2時間後をひずみの初期値とした。

a) ステップ1

供試体ははじめ気温40°C、湿度50%のインキュベータ内で乾燥させる。ゲージ1では即座に収縮ひずみが生じており、ひずみは最大で約2500マイクロ程度まで低下し、定常状態に至る。ゲージ2では約1~2日、ゲージ3では約2~3日の間ほぼ横ばいで推移し、その後収縮ひずみに転じる。これは蒸発面からの距離と関連しているものと考えられる。ひずみの収縮量については最終的にゲージ1と同程度の値まで減少する。

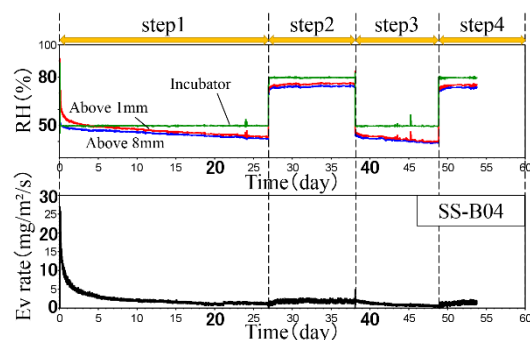


図-4 実験2：相対湿度（2点センサ）と蒸発速度

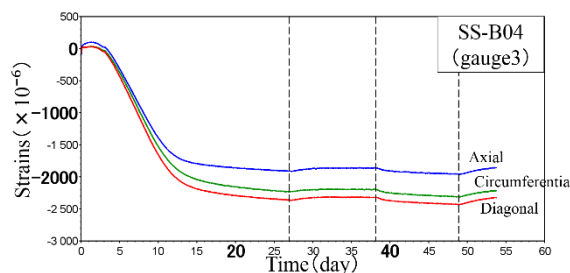
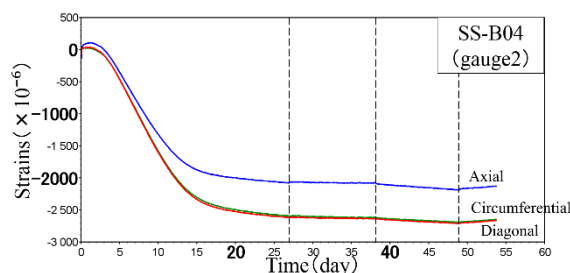
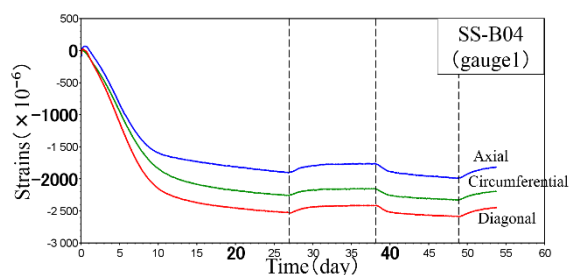


図-5 実験2：ひずみの様子（正が膨張，負が収縮）

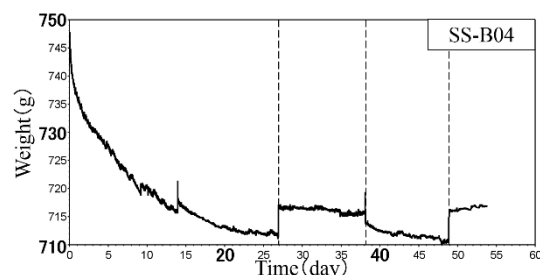


図-6 実験2：供試体質量変化

b) ステップ2

実験開始から27日後の時点で、ひずみは定常状態に達していると判断し、インキュベータ内の湿度を80%まで上昇させた。直後ゲージ1において膨張ひずみに転じている様子が見て取れ、ゲージ3でも僅かながら膨張ひずみに転じていることが確認できた。ゲージ2では明確なひずみ変化は確認できなかった。

c) ステップ3

ステップ2へ移行して11日後、再びインキュベータ内の湿度を50%まで低下させたところ、すべてのゲージでひずみが収縮に転じる様子が確認できた。

d) ステップ4

同様にステップ3開始から11日後、インキュベータの湿度を80%まで上昇させた。直後すべてのゲージでひずみが膨張に転じている。

実験2より得られた結果から、外気湿度を変化させることで蒸発面から12.5cm離れた位置でもひずみが反応することが観測できた。このことから外気湿度変化に対応するひずみ変化が起こる領域は、岩盤内の水分供給の状況に左右される可能性を示している。

(3) 実験1, 2の比較

a) ステップ1

ひずみの収縮量について実験1および実験2のデータを比較すると、実験1のステップ1で明確な乾燥収縮挙動を確認できたのはゲージ1のみであり、ひずみ量も最大で約400マイクロと既往の実験²⁾(各方向約2000マイクロ程度の収縮ひずみ)と比べても小さい値であった。対して、実験2ではすべてのゲージで2000マイクロ程度の収縮ひずみを観測した。

またステップ2~4における外気湿度変化に対応するひずみ変化量を比較するため、ステップ1の終了時点のひずみを0として考察する(図-7)。

b) ステップ2

ゲージ1では実験1, 2ともに同等のひずみ変化量が観測されている(およそ150マイクロの膨張)。しかしゲージ2を見ると、実験1では湿度上昇に対応したひずみの増加傾向が確認できるのに対して、実験2ではひずみは変化しない。逆にゲージ3においては、実験1でひずみに大きな変化は見られないが、実験2では湿度上昇に対応したひずみの増加傾向が確認できる。

c) ステップ3

まずゲージ1について、実験1では約100マイクロの収縮に対し、実験2では約250マイクロのより大きな収縮ひずみが観測された。この原因のひとつとして、ステップ1の乾燥収縮過程が定常に至っていないことが考え

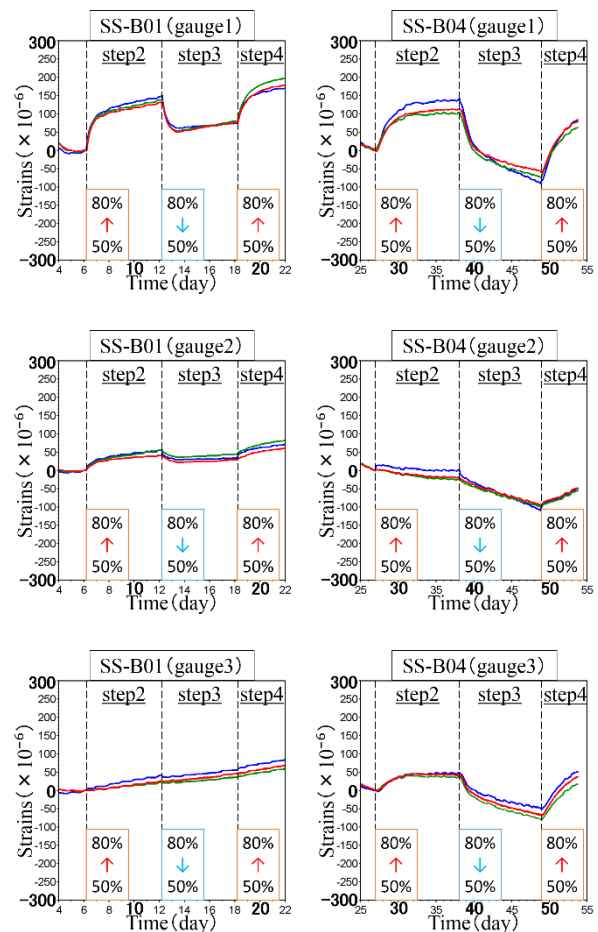


図-7 実験1, 2: 各ゲージにおけるひずみ変化量

られる。ステップ1終了直前のひずみ曲線の傾きから、ステップ1(湿度50%)における乾燥収縮過程が定常に至っていないことが推測され、この影響により収縮ひずみが大きくなったと考える。また、これはゲージ2, 3についても同様のことが言える。

ゲージ2について、実験1では外気の湿度変化に即座に対応し、収縮方向へ変化するが、実験2では一定の傾きで収縮しているように見える。またゲージ3では、サイクル2と同様に実験1では変化が無く、実験2では湿度変化に対応し収縮傾向を見せる。

ゲージ2, 3における変形挙動の違いについては、今後実験を重ね、明らかにしていきたい。

d) ステップ4

実験1において、ゲージ1, 2ではひずみは膨張方向に転じるが、ゲージ3では変化が見られない。実験2では全てのゲージでひずみが膨張方向に変化することが観測された。

またステップ1~4全てにおいて、定常状態に至るまでに要する時間は、実験1に比べ実験2のほうが長いことがわかった。

4. 考察

(1) 実験1について

この変形挙動の原因を考察するために、まず蒸発速度とひずみの関係に注目してみる（図-2, 3）。一連の変形挙動が飽和度変化に伴うサクシジョンの増減によるものと仮定すると、ステップ1の収縮ひずみについては蒸発による岩石内の飽和度低下によるものと考えられる。

しかし、ステップ3の収縮ひずみについては蒸発速度の値が小さいことから、蒸発による飽和度低下によるものとは考えにくい。ここで考えられる現象としては、

- ・大気中の水蒸気量の増減に伴い大気圧が変化、毛管現象のように供試体底面から水が与奪され、飽和度が上下している
- ・間隙空気内の水蒸気の吸着および液体水の蒸発により、飽和度が変化している

等の可能性が考えられる。

また飽和度変化以外の原因を考えると、外気の湿度変化により、蒸発面付近において何らかの応力状態の変化が生じ、ひずみが変化している可能性も考えられる。

今後この現象のメカニズムを解明するためには、乾燥実験中において供試体内の局所的な飽和度を測定する手法を模索し、岩石内の水分分布状態を明らかにすることが重要だと考える。

(2) 実験2について

この変形挙動の原因について考察する。今回の実験2では、蒸発面の反対面から水が供給されない形であるにもかかわらず、湿度上昇に伴う膨張ひずみが生じていることから、実験1の考察で述べた、

- ・大気中の水蒸気量の増減に伴い大気圧が変化、供試体内で毛管現象のような水分移動が生じ、飽和度が上下している

という仮定の有意性は低いといえる。

ここで図-6の供試体質量の変化を見ると、湿度を80%に上昇させた27日後付近で、質量が増加している様子が計測されている。これは実験1の考察で述べたもう1つの仮定、間隙空気中の水蒸気の吸着が起こったことを示している可能性がある。この結果飽和度が上昇し、膨張ひずみが生じたのではないかと考えられる。

もしくは外気湿度変化によって蒸発面付近の応力状態が変化、ひずみの膨張につながった可能性も考えられる。

いずれにしてもこの変形挙動について評価するためには、乾燥実験中の水分分布状態を把握しておくことが重要であり、局所的な飽和度の測定手法を確立することが必要である。

(3) 数値解析による飽和度推定

リチャード式と多孔質弾性体の構成則を連成した白浜砂岩の乾燥変形モデル⁹⁾を用いて、本実験1, 2の乾燥過程の第1ステップ期間における飽和度を算出し実験結果を考察する。

まず実験1について解析による飽和度を図-8に示す。ゲージ2, 3の位置では飽和度の低下は確認できず、ゲージ1の位置でも約0.98までの低下にとどまった。実験より得られたひずみデータと同じく、ゲージ1-2間で飽和度の値に開きが見られ、ゲージ2-3間ではほぼ違いが見られないことがわかる。供試体片端面から水が供給される場合、不飽和領域は蒸発面近傍の狭い範囲で形成され、この狭い範囲内でひずみが顕著に変化すると思われる。

次に、実験2についての飽和度の解析結果を図-9に示す。ゲージ1～3各点の飽和度はほぼ同時刻に低下し始め、最終的な飽和度の値はゲージ1の位置で0.32、ゲージ2の位置で0.44、ゲージ3で0.48まで低下した。飽和度の減少量は蒸発面に近い点ほど大きい。飽和度が減少し始める時間は、蒸発面からの距離に関わらずほぼ同時である。実験2のひずみデータ（図-5）ではゲージ1～3で同程度のひずみ値となったが、解析による各ゲージ位置での飽和度推定値の間には多少の開きが見られる。しかし全てのゲージ位置で飽和度の大幅な低下が推定され、大きな収縮ひずみの発生が予想される結果となった。

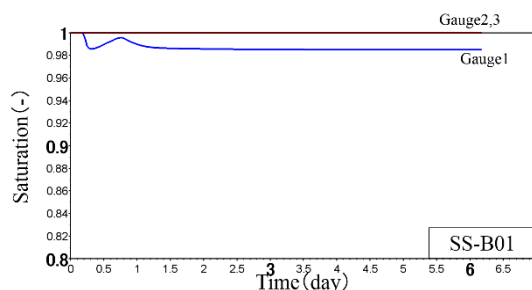


図-8 解析による飽和度推定（実験1）

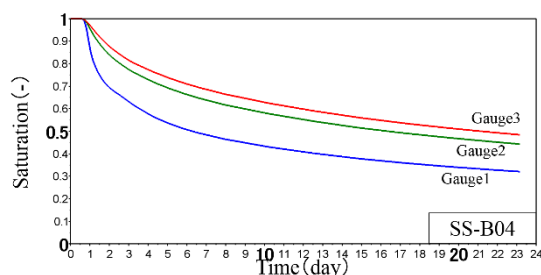


図-9 解析による飽和度推定（実験2）

5. 結論

本研究では、堆積岩内の乾燥過程における水分状態の変化を把握するため、直径5cm・高さ15cmの白浜砂岩供試体を用いた乾燥実験を行った。供試体はトンネル壁面を模擬し片端面を蒸発面、もう片方を水浸させた乾燥実験を行った（実験1）。また蒸発面の反対面を水浸させない乾燥実験も行い（実験2）、2つの結果を比較した。これにより得られた結果を以下に示す。

- ・ 供試体片端面から水が供給される場合、気温40℃、湿度50%で乾燥させることで、蒸発面から7.5cmの位置まで収縮ひずみが発生することが確認できた。
- ・ その後蒸発面近傍の湿度条件を上昇（低下）させることで、少なくとも蒸発面から7.5cm離れた範囲まで瞬時にひずみが膨張（収縮）に転じることが観測できた。
- ・ 供試体片端面から水が供給されない場合、気温40℃、湿度50%で乾燥させることで、蒸発面から12.5cm離れた点でも蒸発面相当の収縮ひずみを生じる。
- ・ その後蒸発面近傍の湿度を80%まで上昇させると、蒸発面から12.5cm離れた位置まで、ひずみが膨張に転じることがわかった。
- ・ この現象の原因としては、蒸発面付近の湿度環境が変化することで、間隙中の水蒸気吸着または液体水の蒸発により飽和度が上下し、ひずみを変化させている可能性が考えられる。

- ・ この現象のメカニズムを明らかにするために、岩石内の局所的な飽和度を測定する方法を模索し、実験中の水分分布状態を把握することが必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号24360187）によって実施した。

参考文献

- 1) 前川恵輔，長田昌彦：珪藻質泥岩の水分量変化に伴う物性変化に関する研究，第41回岩盤力学に関するシンポジウム，2012。
- 2) Aung Ko Ko SOE, Masahiko OSADA, Thandar Thatoe NWE WIN :Evaluating the deformation behavior of Shirahama sandstone in moisture transfer process, International Journal of the JCRM 5, 2009
- 3) 前川恵輔，長田昌彦，多田浩幸，熊坂博夫：堆積岩試料における水分量と物性の変化に関する数値解析的検討，第13回岩の力学国内シンポジウム，2013。
- 4) S. Cariou, F. Skoczylas, L. Dormieux :Experimental measurements and water transfer models for the drying of argillite, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 54, 2012.
- 5) 大竹伸太郎，長田昌彦：乾燥過程における白浜砂岩の挙動についての数値解析的検討，第42回岩盤力学に関するシンポジウム，2014。

BEHAVIOR OF SHIRAHAMA SANDSTONE DURING DRYING UNDER THE CONDITION THAT SIMULATES TUNNEL SURFACE

Shintaro OHTAKE, Masahiko OSADA

Bedrock that has been saturated at first may become unsaturated state by excavation and ventilation near the tunnel wall. In this paper, the behavior of rock during drying was investigated using Shirahama sandstone specimen simulated bedrock near the tunnel wall. The results of the experiments showed that rock contracted under 50% RH at first, but rock started to expand instantly by the changing RH 50% to 80% in the range of 7.5 cm from evaporation surface. This phenomenon means that bedrock near the tunnel wall will contract and expand again and again by the changing RH of ambient in the tunnel, and it is important to comprehend this behavior when discussed long-term safety of tunnel.