# 田下凝灰岩を用いた大気圧に対する 岩石内間隙空気圧の応答実験

五嶋 壮太1\*・長田 昌彦1・富樫 陽太1・竹内 希海2

<sup>1</sup>埼玉大学大学院理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
<sup>2</sup>埼玉大学工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
\*E-mail: s.goshima.801@ms.saitama-u.ac.jp

岩石内の間隙空気圧は、大気圧変動に対して位相のずれと振幅の減衰を伴って変動する. 我々はこれまでに、固有透過度が10e-19[m<sup>2</sup>]オーダーのオパリナスクレイの岩盤において間隙空気圧の計測を行い、これを確認した. 位相のずれと振幅の減衰の大きさは岩石の固有透過度によるため、これらを観測できれば固有透過度を推定することが可能である. その第一段階として、固有透過度が10e-17[m<sup>2</sup>]オーダーである田下凝灰岩のブロックを使用して、岩石ブロック内部の温度・相対湿度・気圧を計測する室内実験を行った. その結果、間隙空気圧は大気圧変動に対して位相が遅れ、振幅も減衰して観測されることを確認した.本稿では、これまでの観測結果を整理したものを報告する.

## *Key Words :* pore air pressure, intrinsic permeability, air saturation, phase lag, amplitude attenuation

## 1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、放射性物質が地下水に 溶けて移動することが懸念されているため、岩盤の透水 特性、特に掘削影響領域(EDZ)における透水特性とそ の時間に伴う変化傾向を評価することは非常に重要であ る.

水を用いた透水試験が可能な岩盤ならば,現場透水試 験などにより透水特性を評価しうるが,粘土岩のように, 膨潤特性を合わせもつような岩盤には,これを直接適用 することができない.例えば,スイス・モンテリ地下研 究所に分布するオパリナスクレイはこのような性質をも っため,水を用いた透水試験の実施が困難である.

そこで我々は、オパリナスクレイに対して、大気圧変 動に対する間隙空気圧応答を長期計測することで、岩盤 の透水(透気)特性を評価する方法を提案し、これを原 位置にて実施している<sup>1,2</sup>.これまでの計測によれば、 大気圧変動に対して飽和度の変化により間隙空気圧が位 相のずれと振幅の減衰を獲得する過渡的な変化を捉えて いる.しかしながら、原位置の計測では岩盤の飽和度を 制御することができないため、現象を正しく評価するた めには室内実験による検討が必要である.

そこで室内実験として、オパリナスクレイよりも透水 性が高い田下凝灰岩を用いて、大気圧変動に対する間隙 空気圧の応答を計測することとした. なおオパリナスク レイの固有透過度は10e-19[m<sup>2</sup>]オーダー,田下凝灰岩の 固有透過度は10e-17[m<sup>2</sup>]オーダーであり,その差は100 倍程度である.初めに自然乾燥状態の試料を用いて計測 を行い,その次の段階で湿潤状態から自然乾燥状態への 過渡的な変化を捉えること,さらに原位置と同じオパリ ナスクレイ試料を用いて,同様の計測を行うことを考え ている.また最終的には,これまでの調査から明らかに なっているオパリナスクレイの固有透過度と比較をして, この方法の有用性について言及したい.

本稿では、第1段階として行った、自然乾燥状態の試 料を相対湿度が変化する実験室環境においた室内実験に ついて、計測結果から浸透特性を求める方法論と、これ までの観測結果を整理したものを報告する.

## 2. 理論的背景

大気圧をP[Pa]として、岩石ブロックの側面から、岩石内部の空間の深さ方向にx方向をとる.等温過程を仮定すると、空気に関する連続式に、ダルシー則を組み合わせることにより、不飽和領域における空気の流れを支配する式は次のように書ける<sup>3</sup>.



$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{KP}{\mu\phi} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{1}$$

ここに $p = P^2$ , K: 固有透過度  $[m^2]$ ,  $\mu$ : 粘性係数  $[Pa \cdot s]$ ,  $\phi$ : 間隙率 [-]である. 係数に含まれるPは, データの平均値 $P_{avr}$ で置き換えられることもある<sup>4</sup>. ここで,  $\phi$ は間隙の水分状態(飽和度)に依存することに注意する必要がある.

大気圧の変化によって不飽和領域中の間隙空気圧が式 (1)に従って変化するならば、岩石内部の孤立させた空 間において温度・湿度・気圧を計測すれば、大気圧との 比較から、位相のずれや振幅の減衰が観測されると考え られる.また、これらの位相のずれや振幅の減衰は、岩 石ブロック側面からの深さが大きくなるほど大きくなる と考えられる.この変化傾向を解析することによって、 不飽和領域における浸透特性(透気特性)を評価するこ とが可能である.概念図を図-1に示す.

## 3. 計測方法

#### (1) 計測装置

温度・湿度・気圧センサには、Boosh社製のBME280を 搭載したセンサモジュールを使用した.測定精度は、温 度±1℃,湿度±3%、気圧±1hPaである.このセンサを Arduinoと呼ばれるマイコンボードを利用して制御し、 SDカードにデータを記録した.

また電子天秤には、A&D社製のGP-32KS(秤量:32kg) を使用した.

記録機器へ 20cm 20cm 20cm 図-2 センサ設置状況の模式図



図-3 計測の様子

#### (2) 設置状況

本研究では岩石内の間隙空気圧の変化を計測するため に、以下のような実験を行った.自然乾燥させた田下凝 灰岩ブロック(一辺が20cmの立方体)の中央に直径 22mm,深さ11cmの穴を開け、その中に温度・湿度・気 圧センサを設置した後、ゴム栓とシリコンを用いて穴を 埋めた.センサ部分には、直径22mm、高さ2cm程度の 円柱状の空間があると思われる.図-2はセンサの設置状 況の模式図である.同様のセンサを用いて大気中の温 度・湿度・気圧を測定し、岩石ブロック内の計測値と比 較する.なお、計測は1秒ごとに行った.計測は実験室 環境下で行い、2019年6月から現在まで連続して実施し ている. また2019年7月以降は、岩石ブロックを電子天秤の上 に載せて質量の変化を計測しており、実験室内の湿度変 化に伴う岩石ブロックの質量変化を観測した. 図-3は計 測の様子である.

### 4. 計測結果

図-4は2019年8月8日から9月30日にかけて、大気圧と 岩石ブロック内の間隙空気圧の計測データをプロットし たものであり、「out」が大気、「in」が岩石ブロック内 のデータを示す.なお、センサモジュールには個体差が あり、その計測値にはばらつきがあった.事前に行った



図-4 大気圧と岩石ブロック内の間隙空気圧の推移(8月8日~9月30日)



(1時間移動平均)

センサのテストでは、計測値に4.30hPaの差があったため、 図-4では「out」のデータから4.30hPaを引いたものをプ ロットしている.この図より、大気圧と岩石ブロック内 の間隙空気圧はほぼ同じように推移しているが、変動の 極大値・極小値付近では、間隙空気圧の振幅は大気圧の 振幅よりも小さくなっていることがわかる.これと同じ 傾向が全期間において観測された.

また図-5は2019年8月8日から9月30日にかけて、大気 の相対湿度と岩石ブロックの質量の計測データをプロッ トしたものである.なお、計測データの変動を小さくす るために、どちらのデータも1時間ごとの移動平均をと ったものをプロットしている.岩石ブロックの質量変化 は岩石ブロック内の水分量の変化によるものであり、こ



の図から岩石ブロック内の水分量が大気の相対湿度の変 化に伴って変化していることがわかる.

図-6,図-7は、2019年8月8日から8月12日にかけて、 大気と岩石ブロック内の、それぞれ温度・絶対湿度の計 測データをプロットしたものである.なお絶対湿度はの データは、計測した温度、相対湿度のデータから算出し たものであり、1時間ごとの移動平均をとったものをプ ロットしている.

図-6の温度の計測データについて、図中に示した破線のとおり大気の温度変化から遅れて岩石ブロック内の温度が変化していることや、岩石内の温度変化には大気の細かな温度変化が反映されていないことがわかる.また図-7の絶対湿度の計測データについて、大気の絶対湿度



の変化と岩石ブロック内の絶対湿度の変化に関連性は見られなかった.

また図-8(a)は、2019年8月9日の大気圧と岩石ブロッ ク内の間隙空気圧の計測データをプロットしたものであ る.この図については、図-4と同様に「out」のデータ から4.30hPaを引いた後、100点ごとの移動平均をとった ものをプロットしている.計測データより振幅を読み取 ると、大気圧と岩石内の間隙空気圧との振幅比は0.92程 度であった.

さらに図-8(b)は2019年8月9日3時から7時(図-8(a)の 赤枠部分)にかけての大気圧と岩石ブロック内の間隙空 気圧の計測データをプロットしたものである.計測デー タより位相差を読み取ると9分44秒であった.

表-1は計測期間中のいくつかの時点において,位相の ずれと振幅比をまとめたものである.表より位相のずれ は3分から10分程度,振幅比は0.87から0.97程度であった.

これまでに実施しているスイス・モンテリ地下研究所 での、オパリナスクレイに対する同様の計測では、大気 圧と岩盤内部の間隙空気圧との位相のずれは2時間から9 時間程度、振幅比は0.56から0.85程度であった<sup>1,2</sup>.オパ リナスクレイの固有透過度は、オーダーで比較すると田 下凝灰岩の100分の1程度であり、位相のずれと振幅比の 結果の違いに表れている.

## 5. まとめ

本実験においては岩石ブロックの質量も計測し,実験 室内の湿度変化に伴う岩石ブロックの質量変化を観測し た.しかしながら,これまでの計測での質量変化では, 大気圧変動に対する間隙空気圧の応答との明確な関連性 は見られなかった.湿度の変化は季節による影響が大き いため,今後の計測結果との比較から相関がみられるこ とに期待する.

日付	位相のずれ	振幅比
7月7日	5:17	0.95
7月24日	3:21	0.88
8月9日	9:44	0.92
8月21日	4:35	0.88
9月6日	4:17	0.91
9月13日	8:22	0.97
9月26日	5:21	0.87

本計測から大気圧変動と間隙空気圧変動の位相のずれ, 振幅の減衰が観測されたが,どちらもばらつきの大きい ものであった.今後も計測を継続して行いデータ数を増 やすとともに,計測結果について,温度・湿度との関連 を含めて精査することが必要である.

#### 参考文献

- 1) 長田昌彦,竹村貴人,富樫陽太,五嶋壮太:スイス・ モンテリ地下研究所での間隙空気圧測定,令和元年度 応用地質学会研究発表会,2019.(発表予定)
- 2) Osada, M., Takemura, T., Togashi, Y. and Goshima, S.: Pore air pressure measurement at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland, YSRM2019, 2019. (発表予定)
- Katz, D. L., Cornel, D., Kobayashi, R., Poettmann, F. H., Vary, J. A., Elenbaas, J. R. and Weinaug, C. F. : *Handbook of natural gas engineering*, pp.403-425, McGraw-Hill Book Company, inc., 1959.
- Rojstaczer, S. and Tunks, J. P.: *Field-based determination of* air diffusivity using soil air and atmospheric pressure time series, Water Resouces Research, vol.31, pp.3337-3343, 1995.

## MEASUREMENT OF RESPONSE OF PORE AIR PRESSURE TO BAROMETRIC FLUCTUATION IN THE BLOCK OF TAGE TUFF

#### Sota GOSHIMA, Masahiko OSADA, Yota TOGASHI and Nozomi TAKEUCHI

Pore air pressure in rock responds to barometric fluctuation. In fact, the phase lag and amplitude attenuation to barometric fluctuation are observed in Opalinus clay with the permeability of  $10^{-19}$  m<sup>2</sup> order. The magnitudes of phase lag and amplitude attenuation are related to intrinsic permeability of rock. In order to estimate in-situ permeability by using these magnitudes, the response in pore air pressure to barometric fluctuation should be examined in laboratory experiment. In this study, temperature, humidity and air pressure inside the block of Tage tuff with the permeability of  $10^{-17}$  m<sup>2</sup> order are monitored for a few months. As a first step, we confirmed that the phase lag and amplitude attenuation occur slightly in Tage tuff.