ノート

オマーンオフィオライト陸上掘削試料を用いたハードロック掘削における空隙率測定法の再検討

On porosity determination for hard rock drilling using core samples collected by the Oman Drilling Project

長瀬薫平^{*1} 片山郁夫^{*1} 畠山航平^{*1}
赤松祐哉^{*1} 岡崎啓史^{*2} 阿部なつ江^{*3}
道林克禎^{*4} 横山 正^{*1}

Oman Drilling Project Science Party

*Kumpei Nagase^{*1}, Ikuo Katayama^{*1},
Kohei Hatakeyama^{*1}, Yuya Akamatsu^{*1},
Keishi Okazaki^{*2}, Natsue Abe^{*3},
Katsuyoshi Michibayashi^{*4}, Tadashi Yokoyama^{*1}
and Oman Drilling Science Party*

2020年6月20日受付.

2020年9月20日受理.

^{*1} 広島大学大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering,
Hiroshima University, Hiroshima, 739-8527, Japan

^{*2} 海洋研究開発機構超先鋭研究開発部門高知コア研究所
Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency
for Marine-Earth Science and Technology (X-star, JAM-
STEC), Kochi 783-8502, Japan

^{*3} 海洋研究開発機構研究プラットフォーム運用開発部門マン
トル掘削プロモーション室
Mantle Drilling Promotion Office, MarE3, Japan Agency
for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama 236-
0001, Japan

^{*4} 名古屋大学大学院環境学研究科
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Uni-
versity, Nagoya, 464-8601, Japan

Corresponding author: K. Nagase,
kumpei-nagase@hiroshima-u.ac.jp

Abstract: Porosity is a key physical property of rocks and influences fluid flow and seismic velocity. In this study, we compared the imbibition and impregnation methods for measuring fluid-filled porosity, using mafic and ultramafic core samples collected by the Oman Drilling Project. Our results show impregnation to be faster than imbibition in terms of obtaining water saturation, although ≥ 10 days is still required to achieve saturation in low-porosity core samples.

Keywords: physical property, porosity, impregnation method, Oman ophiolite, hard rock drilling

はじめに

近年の掘削科学の発展により地下深くの岩石を採取することが可能になったため、地震波や電気比抵抗を用いた地球物理学探査から得られた構造と岩石物性の直接測定を対比することが可能となってきた。特に、地震波速度や電気比抵抗のような流体の存在に大きく依存する物性は空隙率と密接な関係にある。そのため、IODPのハードロック掘削によって採取された岩石に対する一次記載の一つとして、船上での空隙率の測定がこれまで行われてきた (Expedition 304/305 Scientists, 2006; Reagan et al., 2015; MacLeod et al., 2017)。これらの一次記載では同一試料を用いて様々な物性を測定するため、試料を破壊することなく空隙率を測定することが求められる。そこで、従来は水に沈めた試料を飽和させた際の質量と乾燥状態の質量の差から空隙率を求める方法が広く用いられてきた。この測定法では試料の飽和時間は経験的に1日とされることが多い (Kelemen et al., 2020) が、花崗岩や堆積岩などを用いた実験では飽和時間が岩石試料によって異なることが指摘されている (林ほか, 2000)。しかしながら、苦鉄質～超苦鉄質岩石など空隙率の比較的低いハードロック試料では、飽和手法や飽和時間についての詳細な検討を行った研究はこれまでのところほとんどない。空隙率の測定において空隙の飽和が不十分である場合、空隙率を過小に評価してしまうことが考えられる。そのため、今後のモホール計画をはじめとするハードロック掘削での一次記載データの質を向上させるためには、掘削試料に対する空隙率の測定手法を改良する必要がある。そこで本研究では、オマーンオフィオライト陸上掘削プロジェクト (Oman DP) で採取された苦鉄質～超苦鉄質岩石の陸上掘削試料に対して、従来の手法による空隙率の測定法と脱気プロセスに改良を加えた含浸法 (Yokoyama and Takeuchi, 2009; Yokoyama, 2013) による空隙率の測定を試料の飽和時間を変化させて行い、試料の飽和方法と飽和時間が空隙率の測定結果に与える影響について検証した。

実験試料

実験試料にはオマーンオフィオライト陸上掘削プロジェクト (Oman DP) で採取された掘削試料を用いた。Oman DPではオマーンオフィオライトにおける輝緑岩からマントルかんらん岩までの苦鉄質～超苦鉄質岩石を計8つの掘削サイトにおいて連続的に掘削を行い、全長3200 mに及ぶ岩石コア試料を採取した (Kelemen et al., 2020)。本研究では、

Fig. 1. Schematic illustration of various methods of porosity measurement. (a) Imbibition method: Samples are placed in a water-filled container and then subjected to vacuum conditions to extract the remaining gas in the pore spaces. (b) Impregnation method: Samples are degassed in a vacuum and then immersed by pouring water into the container while maintaining the vacuum.

Table 1. Lithology and physical properties of experimental samples.

Hole	Northing	Easting	Lithology	*Porosity % (Number of samples)	Grain density g/cm ³
GT3A	23°06.845'	58°12.703'	Diabase	1.68–15.94 (8)	2.76–3.38 (8)
			Gabbro	0.35–0.46 (2)	2.89–2.91 (2)
GT2A	22°51.793'	58°31.198'	Gabbro	0.26–3.25 (10)	2.92–3.08 (10)
CM1A	22°54.435'	58°20.149'	Gabbro	0.28–0.84 (5)	2.94–3.06 (5)
			Peridotite	0.56–4.06 (5)	2.68–3.05 (5)
CM2B	22°54.660'	58°20.149'	Peridotite	0.35–2.72 (10)	2.64–2.78 (10)
BA1B	22°52.874'	58°42.035'	Peridotite	0.44–4.52 (10)	2.60–2.74 (10)
BA3A	22°51.970'	58°42.634'	Peridotite	0.76–1.49 (10)	2.62–2.67 (10)

* Porosity values represent those determined by 30 days saturation using the impregnation method.

輝緑岩とはんれい岩境界に相当する GT3A サイトから輝緑岩とはんれい岩を合わせて 10 試料，層状はんれい岩層に相当する GT2A サイトからはんれい岩を 10 試料，はんれい岩とかんらん岩の境界に相当する CM サイトからはんれい岩とかんらん岩を合わせて 20 試料，マントルかんらん岩層

に相当する BA サイトからはかんらん岩を 20 試料の延べ 60 試料を選定した (Table 1). なお，かんらん岩の多くは蛇紋岩化しており，固相密度から蛇紋岩化率は 70% 以上であると推定される。

各試料は直径が 24.5 mm，長さが 15–25 mm の円筒状

Fig. 2. Results of porosity measurements using the (a) imbibition method and (b) impregnation method. The time to saturation is indicated by depth of color, with darker colors indicating longer saturation times.

にしたものを使用した。試料表面に凹凸があることで実験の測定誤差が大きくなることが考えられるため、試料は円筒研削盤ならびに平面研削盤で整形したものを用いた。

実験手法

空隙率は岩石中に存在する空隙の体積の尺度である。空隙率(ϕ)は次式で定義される。

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{solid} + V_{pore}} \quad (1)$$

ここで、 V_{solid} は岩石中の固相体積、 V_{pore} は空隙の体積を表している。固相体積は、広島大学設置のガスピクノメーター(嶋本ほか, 2006)を用いて測定した。空隙の体積は試料の乾湿の質量差と水の密度から求めることができる。

$$V_{pore} = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{\rho_{water}} \quad (2)$$

ここで、 M_{wet} は試料を水に飽和させた質量、 M_{dry} は乾燥させた質量を表している。また、 ρ_{water} は水の密度である。

ハードロック試料の空隙率測定に関して、従来から用いられてきた空隙の飽和方法(Kelemen et al., 2020)をまず説明する(便宜上、この手法を浸透法(Imbibition method)と呼ぶことにする)。はじめに、試料を真空炉内で100°C、24–48時間保管し十分に乾燥させ、乾燥質量を計測した。その後、試料を大気圧下で蒸留水に沈めたのちデシケーターへ入れ、デシケーター内部の脱気を循環アスピレーターで行

うことで飽和させた(Fig. 1a)。なお、循環アスピレーターを用いることで真空容器内に水が存在しても長時間の脱気が可能となり、比較的高い真空度を得ることができる。今回の測定では、真空下で試料を水に沈めた状態で数日間(1日、3日、10日、30日)保管し、試料を水に飽和させた。あらかじめ設定した時間に達したのち、試料を水中から取り出し水に飽和した質量を計測した。その後、試料をもう一度真空炉内で十分に乾燥させた質量の測定を行い、実験前後で反応や溶脱による岩石の質量変化がないことを確認した。

次に、今回改良を加えた含浸法(Impregnation method)における空隙の飽和方法を説明する。まず、浸透法と同様に真空炉を用いて、試料を十分に乾燥させ乾燥質量を測定した。次に、乾燥させた試料を蒸留水に沈める前に、デシケーター内部の脱気を循環アスピレーターで十分行ってから真空下で試料を水に沈めた(Fig. 1b)。続いて、真空容器内を大気圧へと開放し試料内の空隙に対して水を押し込むことで試料を飽和させた(Fig. 1b)。その後、大気圧下で試料を水に沈めた状態で数日間保管してから試料を水中から取り出して水に飽和した質量を測定した。また、その後の乾燥質量も上記と同様に測定を行った。

いずれの手法においても試料の質量測定は0.001 gの精度をもつ電子天秤を用いて行った。

Fig. 3. Saturation time for the imbibition method (light gray symbols) and impregnation method (gray symbols). (a) High-porosity rock samples from GT3A and CM1A. (b) Low-porosity rock samples from CM1A and BA3A. Error bars were calculated from the uncertainty of the electrical balance and gas pycnometer measurements.

実験結果および考察

今回の実験を通して得られた空隙率の測定結果を Fig. 2 に示す。

日数の短い場合には、GT3A の輝緑岩の中でも空隙率の比較的高い試料において含浸法の空隙率が浸透法よりも高い傾向を示した。それに対して、他の掘削サイトから採取されたはんれい岩や蛇紋岩化したかんらん岩のような空隙率の低い試料では、輝緑岩で見られたような手法間の顕著な違いは見られなかった。これらのことから、含浸法は浸透法よりも高い空隙率を示す場合があり (Fig. 2)、そのような試料は 10% を超える高い空隙率を持つものに特徴的であるといえる。空隙率の測定手法における違いは、空隙の構造や性質を反映している可能性がある。一般に、岩石中に存在している空隙は試料表面と繋がっている空隙と孤立した空隙に分けることができる (Yokoyama and Takeuchi, 2009)。さらに、繋がっている空隙は外部との流路が一つしか存在しない行き止まり空隙とそうでないものに細分化される。このとき、行き止まり空隙は流路の一つしか持たないため飽和が容易ではないことが予想される。このように、実験結果は空隙の流体に対する特性の違いを反映し、空隙率の高い試料では複雑な空隙のネットワークによって行き止まり空隙が多く存在している可能性が考えられる。

飽和時間を変えた場合の空隙の飽和度を比較すると、空隙率の比較的高い輝緑岩や蛇紋岩化したかんらん岩は、時間の

経過によって含浸法では有意な変化が見られなかったのに対して、浸透法では飽和時間の増加に伴って空隙の飽和度が上昇し、30 日間で含浸法の測定結果と同程度の値になった (Fig. 3a)。一方で、空隙率の比較的低い蛇紋岩化したかんらん岩と斑れい岩の測定ではいずれの手法でも飽和時間の増加に伴って飽和度が上昇する傾向を示し、10 日間で値がほぼ飽和状態になった (Fig. 3b)。このように、空隙率の低いかんらん岩の飽和には輝緑岩に比べ長い飽和時間を必要とすることがわかった。林ほか (2000) は岩石試料の飽和時間と測定された空隙率の関係から、岩石種によって試料の飽和時間が異なることを指摘しており、本実験においても苦鉄質岩や超苦鉄質岩の飽和時間は岩石種などによって異なる傾向が見られた。これらの飽和時間の違いは、岩石の浸透率の違いを反映している可能性が高いといえる。

本研究において十分な飽和時間から得られた空隙率と従来通りの飽和時間 1 日の浸透法から得られた空隙率を比較すると、十分に飽和した空隙率は従来通りの手順から得られた空隙率に比べて 0.5–2% 高い空隙率を示していた (Fig. 2)。このことから、空隙率の比較的低い岩石では空隙の飽和が不十分であるために、従来の方法では空隙率を過小に評価してしまっている可能性が高い。

結 論

オマーンオフィオライト陸上掘削プロジェクト (Oman DP) から採取された苦鉄質～超苦鉄質の岩石について空隙

率の飽和方法と飽和時間の観点から比較実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 空隙率の比較的高い試料では、含浸法の測定結果が浸透法よりも高い傾向を示した。
2. 空隙の飽和時間は岩石種により異なり、空隙率の低い蛇紋岩化かんらん岩の場合は、完全に乾燥した試料の飽和に 10 日程度の時間を要した。

以上のことから、苦鉄質岩～超苦鉄質岩試料の空隙率測定において試料を十分に飽和させるためには、従来の手順よりも長い飽和時間が必要であるといえる。試料の飽和時間は、含浸法を用いた際に空隙水圧をかけることで短縮できる可能性がある。空隙水の加圧は小型の圧力容器によって実現可能なため、モホール計画をはじめとした今後の海洋底ハードロック掘削で採取される空隙率の低い試料の測定ではこれらの改良が必要といえる。

謝 辞

本研究では、現地での掘削ならびに一次記載を行っていた掘削船「ちきゅう」のスタッフ方々大変お世話になった。また、査読者の林 為人氏ならびに担当編集委員の大坪誠氏と編集委員長の大藤 茂氏の丁寧なご指摘により本稿は大いに改善された。以上の方々にこの場を借りて厚く感謝の意を表す。なお、本研究は日本学術振興会科研費 18H01321 と 18H03733 の助成を受けたものである。

文 献

Expedition 304/305 Scientists, 2006, Methods. In Blackman, D. K., Ildefonse, B., John, B. E., Ohara, Y., Miller, D. J., MacLeod, C. J. and the Expedition 304/305 Scientists, *Proc. IODP*, **304/305**, doi: 10.2204/iodp.proc.304305.102.2006.

Kelemen, P., Matter, J., Teagle, D., Coggon, J. and the Oman

Drilling Project Science Team, 2020, *Proceedings of the Oman Drilling Project*. College station, TX (International Ocean Discovery Program Publications), doi: 10.14379/OmanDP.proc.2020.

- 林 為人・西田 薫・杉田信隆・高橋 学, 2000, 岩石の有効空隙率測定における試料の飽和および乾燥方法. 土と基礎, **48**(11), 28–31.
- [Lin, W., Nishida, K., Sugita, N. and Takahashi, M., 2000, Saturating and drying techniques to determine the porosity of rock. *Soil. Mech. Found. Eng.*, **48**(11), 28–31.]
- MacLeod, C. J., Dick, H. J. B., Blum, P., Abe, N., Blackman, D. K., Bowles, J. A., ..., Viegas, L. G. F., 2017, Expedition 360 methods. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, **360**, doi: 10.14379/iodp.proc.360.102.2017.
- Reagan, M. K., Pearce, J. A., Petronotis, K., Almeev, R., Avery, A. A., Carallo, C., ..., Whattam, S. A., 2015, Expedition 352 methods. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, **352**, doi: 10.14379/iodp.proc.352.102.2015.
- 嶋本利彦・堤 昭人・廣瀬丈洋・相澤泰隆・曾根大貴・上原真一..... 溝口一生, 2006, 京都大学の摩擦・変形・透水試験機. 構造地質, **49**, 49–71. [Shimamoto, T., Tsutsumi, A., Hirose, T., Aizawa, Y., Sone, H., Uehara, S., ..., Mizoguchi, K., 2006, Friction, deformation and fluid-flow apparatuses at Kyoto University. Japan. *J. Struct. Geol.* **49**, 49–71.]
- Yokoyama, T., 2013, Characterization of the reaction and transport properties of porous rhyolite and its application to the quantitative understanding of the chemical weathering rate. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **118**, 295–311.
- Yokoyama, T. and Takeuchi, S., 2009, Porosimetry of vesicular volcanic products by a water-expulsion method and the relationship of pore characteristics to permeability. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **114**, B02201, doi: 10.1029/2008JB005758.

(著者貢献)

長瀬薫平 実験手法の構築, 岩石試料の分析, 論文執筆を担当
 片山郁夫 岩石試料の採取, 実験手法の補助
 畠山航平 岩石試料の採取, 議論を担当
 赤松祐哉 岩石試料の採取, 議論を担当
 岡崎啓史 岩石試料の採取, 議論を担当
 阿部なつ江 岩石試料の採取, 議論を担当
 道林克禎 岩石試料の採取, 議論を担当
 横山 正 実験手法の補助, 議論を担当