

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
京都大学 大学院工学研究科	准教授	奈良 禎太

研究テーマ

地球温暖化抑制とエネルギー資源の生産・利用促進を同時に実現できる岩盤強化技術の創出

研究報告

1. 研究の背景と目的

石油やシェールガス等の化石燃料に代表されるエネルギー資源を地下から抽出し利用することは、人類社会の発展のために重要である。一方、化石燃料の利用には、二酸化炭素の大量排出が伴われるため、地球温暖化への影響が懸念される。そのため、二酸化炭素の大規模排出源で分離・回収して地中に貯留することが考えられている。二酸化炭素地中貯留を行う場合、地下の温度・圧力下では二酸化炭素は超臨界状態となり、岩盤中の微細な空隙やき裂にまで浸透可能である (Ishida et al., *Geophys. Res. Lett.*, 2012)。ただし、それにより地下岩盤の破壊を促進し、地震を誘発することが報告されている (Zoback & Gorelick, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2012)。ゆえに、岩盤破壊の促進と地震を誘発しない二酸化炭素の貯留技術が必要である。ただし、注入した二酸化炭素の95%以上が鉱物析出により2年で岩盤に固定されることが報告されている (Matter et al., *Science*, 2016)。また、Jackson et al. (*Am. Mineral.*, 2017) の研究で、古代ローマ時代に作成されたセメント系材料の強度が、材料作成時に使用された海水に由来する鉱物析出によって、未だに増大していることが報告されている。ゆえに、岩盤での鉱物析出を促進することにより、二酸化炭素地中貯留の際に岩盤破壊と地震を誘発しない技術開発が可能であり、地球温暖化抑制にも貢献できるといえる。

上記に挙げた課題を解決するため、二酸化炭素を水に溶解させた状態で地下に貯留し、それを岩盤強度と遮蔽性の向上に生かす方法を考えた。つまり本研究では、炭酸水を岩盤に注入することによって、地下で炭酸塩鉱物 (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 等) の析出が生じやすい条件を作り、二酸化炭素を鉱物析出という形で岩石内に固定する手法の開発を試みた。特に本研究では、砂岩を用いて、カルシウム化合物の沈殿が岩石の空隙を閉塞することによる透水性への影響について調べた。

2. 研究成果および考察

岩石の透水性を評価するために、変水位透水試験を用いた。また本研究では、岩石試料として、スコットランド産のClashach砂岩を用いた。特に本研究では、2種類の供試体を用意し、二酸化炭素が気体として存在する環境と、水に溶解している環境において試験を行った。具体的には、1つ目の供試体はまず Ca^{2+} が豊富に存在する水酸化カルシウム水溶液(Ca^{2+} 濃度約 1600mg/L)中で飽和させる。その後、二酸化炭素濃度を10000ppm程度に調整した容器内に1週間保存した後に、透水試験を行った(供試体CS2018-01)。2つ目の供試体はまず炭酸水(二酸化炭素濃度約1.8g/L, pH=4.0)で飽和させた後に、その供試体を先ほどと同濃度の水酸化カルシウム水溶液中に移し、1週間保存する。その後、変水位法による透水試験を行った(供試体CS2018-02)。以上のような試験をそれぞれの供試体で2回ずつ繰り返した。

供試体CS2018-01での空隙率と透水係数の測定結果は図1に示す通りになった。この図より、空隙率は初期状態に比べて低下しているものの、透水係数にあまり変化は見られなかったことがわかる。供試体CS2018-02での空隙率と透水係数の測定結果を図2に示す。この供試体では、空隙率と透水係数はともに初期状態より低下していることが分かった。また、いずれの岩石供試体でも、表面に鉱物析出が認められた。

どちらの供試体においても、初期状態に比べて乾燥重量が増加し、空隙率の値が低下していることから、カルシウム化合物が供試体に析出していると考えられる。ただし、透水係数の変化には明確な違いが認められた。これは、気体状態の二酸化炭素が水に溶解するまでに時間を要するため、供試体における流体の流路となる連結した空隙を閉塞できなかつた一方で、二酸化炭素を水に溶解させた状態で試験を行うと、反応時間が早く、供試体内の連結した空隙を閉塞できているものと考えられる。

3. 将来展望

カルシウム化合物の析出は、岩石のき裂進展を抑制することがNara et al. (*Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018)により報告されている。岩石でのき裂進展の抑制は岩盤の劣化の抑制に繋がるため、強度の保持や向上に貢献できる。したがって、本研究で認められたカルシウム化合物の析出は、岩盤の遮蔽性能向上と強度の保持・向上に役立つものと考えられる。また、カルシウム化合物の析出には二酸化炭素の利用が有用であることが本研究で示されたことから、本研究で示した手法を原位置岩盤に用いることにより、地球温暖化の抑制と岩盤の力学的安定性確保に貢献できると考えている。

また本研究の結果は、粘土鉱物が岩石のき裂を充填して透水係数の低下をもたらす現象 (Nara et al., *Pure and Applied Geophysics*, 2018) と調和的である。粘土のような細粒な材料は透水性が極めて低い材料であることが先行研究で知られているため (加藤ら, *材料*, 2018; Kato et al., *Mater. Trans.*, 2018), 粘土は岩石内部のき裂や空隙を充填して遮蔽性能を向上させる材料として有用であるといえる。析出したカルシウム化合物自体の透水係数は不明であるため、今後上記の先行研究の方法に従って測定を行い、き裂・空隙の充填によりどこまで遮蔽性能を向上させることができるかを把握することが課題の一つであり、それにより二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物処分のような岩盤を利用する工学プロジェクトへの適用性がより明らかになると考えられる。

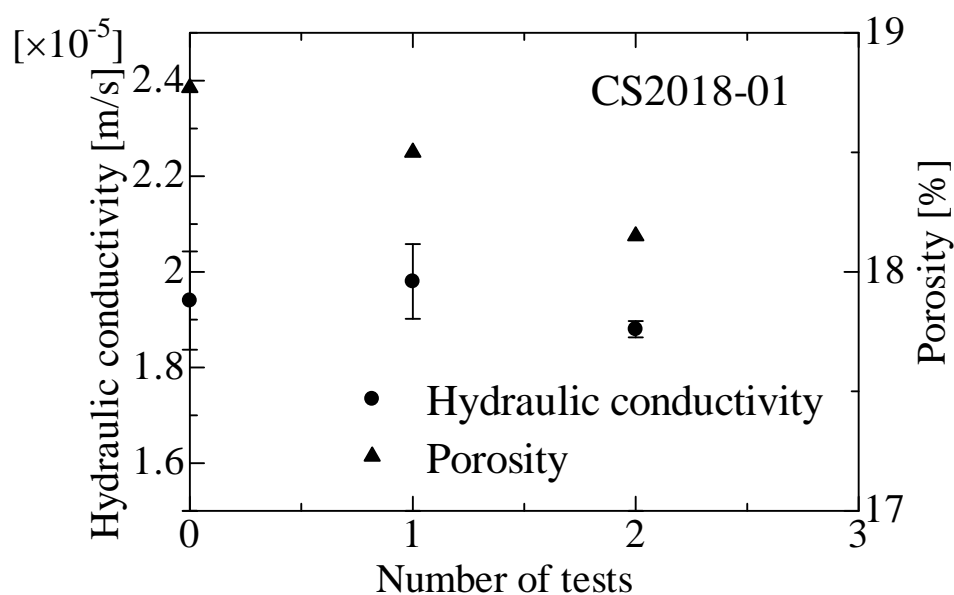


図1 透水係数と空隙率の変化 (供試体CS2018-01)

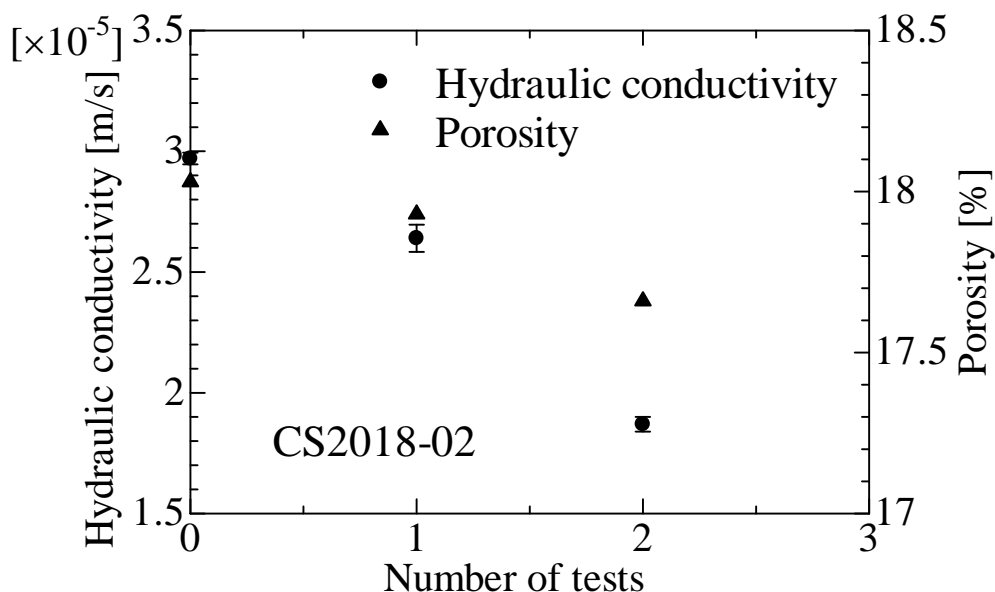


図2 透水係数と空隙率の変化 (供試体CS2018-02)

4. 研究発表

- 1) Y. Nara, K. Kashiwaya, A. Nakao, H. Uchida, Y. Hamada and K. Shibuya (2018): Precipitation of calcium compounds onto rock surfaces in water with cementitious material, Carbonates and Evaporites, accepted.
- 2) M. Nishiguchi, Y. Nara and K. Kashiwaya (2018). Influence of calcium compound precipitation on permeability in sandstone, Proc. 15th International Symposium on Mineral Exploration, pp.97.
- 3) 西口正剛, 奈良禎太, 柏谷公希 (2018). 砂岩の透水性に及ぼすカルシウム化合物沈殿の影響, 日本材料学会第67期学術講演会, 講演番号103.
- 4) 西口正剛, 奈良禎太, 柏谷公希 (2018). 砂岩におけるカルシウム化合物沈殿の透水性への影響, 資源・素材学会関西支部平成30年度第15回「若手研究者・学生のための研究発表会」, 講演番号6.
- 5) M. Nishiguchi, Y. Nara and K. Kashiwaya (2019). Influence of pore sealing by calcium compounds on permeability in sandstone. The 5th Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics, Abstract accepted.