



CO₂ 地中貯留の鉱物トラップ再現実験による 砂岩の力学・透水特性評価*

安原 英明¹ 柏木 亮太² 木下 尚樹³
Dae Sung LEE⁴ 岸 田 潔⁵

Evaluation of Mechanical and Hydraulic Properties by Laboratory Experiments Simulating Mineral Trapping of CO₂ sequestration

by Hideaki YASUHARA^a, Ryota KASHIWAGI^b, Naoki KINOSHITA^c,
Dae Sung LEE^d and Kiyoshi KISHIDA^e

- a. Associate Professor, Ehime University, Department of Civil and Environmental Engineering
Faculty of Engineering, Ehime University, 3, Bunkyo-cho Matsuyama, 790-8577, JAPAN
(Corresponding author, E-mail: hide@cee.ehime-u.ac.jp)
- b. Toa Corporation
- c. Senior Assistant Professor, Ehime University
- d. Assistant Professor, Dong-A University
- e. Associate Professor, Kyoto University

CCS has been expected as a countermeasure against global warming in recent years. When the injected CO₂ reacts to rock minerals, it may form secondary minerals such as calcite, which is called mineral trapping of CO₂. It is of significant importance to examine how the mineral trapping exerts an influence on the physical properties in the targeted reservoir rocks because the trapped minerals may change the strength, deformability, and permeability of the reservoir rocks, although such works are quite sparse in literature. In this study, the influence of the mineral trapping on the evolution of physical properties has been evaluated by replicating precipitation of calcium carbonate that may occur in the mineral trapping. The results of mechanical and permeability experiments show that the change of the mechanical and hydraulic properties is significant even if the amount of calcite precipitation is relatively small.

KEY WORDS: CO₂ Geo-Sequestration, Mineral Trapping, Berea Sandstone, Mechanical Property, Hydraulic Property

1. 緒 言

地球温暖化対策として CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) についての研究が盛んに行われており、その中でも、CO₂ を分離・回収して、陸域や海域にある砂岩帯水層などに圧入することで半永久的に地下固定する CO₂ 地中貯留が有望視されている。この技術により、全世界で約 6000 G トンの CO₂ が貯留可能との試算がされており、2030 年までの中長期的温室効果ガス排出緩和策として期待されている¹⁾。砂岩帯水層は莫大な貯留ポテンシャルがあり、今後 CO₂ 貯留の主軸を担っていくと予想されている。我が国でも貯留ポテンシャルの推定がされており、構造性帯水層で 1.5 G トン、非構造性帯水層を含めると 90 G トン～146 G トンもの CO₂ を貯留することが可能であると予想されている^{2,3)}。

CO₂ 地中貯留における貯留メカニズムとして、物理トラップ、溶解トラップ、鉱物トラップが挙げられる。砂岩などの深部帯水層に圧入された超臨界状態の CO₂ が水との密度差で浮上し、浸透性の低い泥岩などのキャップロックによって遮断される現象が物理トラップであり、圧入された CO₂ の一部が地層水に溶解する現象が溶解トラップである。そして、貯留層内の岩石および間隙水が溶解した CO₂ と反応し、炭酸カルシウムなどの二次鉱物となって地下固定される現象が鉱物トラップである⁴⁾。鉱物トラップに着目すると、地化学反応において最も反応速度の大きい反応の一つに炭酸カルシウム(カルサイト)の沈殿が挙げられ、その沈殿現象は鉱物トラップにも非常に大きな影響を及ぼすと考えられる⁵⁾。CO₂ 地中貯留の実施に当たっては、深部帯水層の特性を把握する技術だけでなく、実効性を保証するため、CO₂ を貯留したことによる貯留層岩盤の物理特性変化や層内での CO₂ の挙動を正確に予想できる技術が必要である⁶⁾。前述のように、圧入された CO₂ は貯留層内の岩石と反応し、最終的には炭酸カルシウムなどの二次鉱物となって地下固定される。その際、圧入対象となる貯留層岩盤の力学・水理学特性は変化すると考えられるが、それらの影響を定量的に評価した研究はほとんど存在しない。

そこで本研究では、CO₂ 地中貯留に起因する鉱物トラップ(こ

*2015 年 5 月 7 日受付 2015 年 6 月 25 日受理

1. 正会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授

2. 東亜建設工業株式会社

3. 正会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 講師

4. 韓国 Dong-A University 助教

5. 京都大学大学院 工学研究科 准教授

[著者連絡先] TEL&FAX: 089-927-9853 (安原)

E-mail: hide@cee.ehime-u.ac.jp

キーワード : CO₂ 地中貯留, 鉱物トラップ, ベレア砂岩, 力学特性, 透水特性

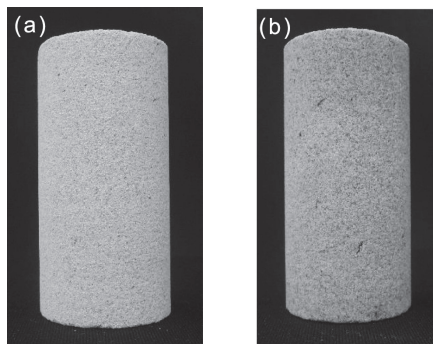


Fig.1 Rock sample (Berea sandstone: $\phi 30 \text{ mm} \times H60 \text{ mm}$)
(a) Before injection, (b) After injection).

ここでは、炭酸カルシウム析出)を実験的に再現し、炭酸カルシウムの析出が対象岩石の強度・変形特性、透水性に及ぼす影響を評価する。具体的には、ベレア砂岩供試体にグラウト材を圧入し、供試体空隙中に炭酸カルシウム結晶を強制的に析出させ、鉱物トラップを模擬する。その後、炭酸カルシウム析出に伴う力学・水理学特性の変化を定量的に評価する。力学特性については、弾性波試験を実施し弾性波速度を測定することで炭酸カルシウム析出による砂岩供試体の変形特性の変化を評価する。また、水理学特性については、透水試験を実施し透過率を測定することで透水特性変化を評価する。

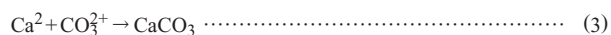
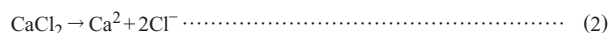
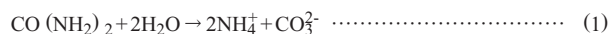
2. 実験方法

2・1 岩石供試体

本研究では、供試体として米国オハイオ州産のベレア砂岩を用いた。ベレア砂岩は、石英分に富んだ粘土鉱物の少ない砂岩である。まず始めにベレア砂岩立方供試体(1辺30cm)に対して弾性波試験を行い、堆積方向を推定した。これは、堆積面と平行にコアリングすることで、長軸方向がより透過率の高い供試体を作製するためである。つぎに、室内用ボーリングマシンで直径30mmの円柱コアを抜き取り、ダイヤモンドカッターで切断後、研磨機で高さ60mmになるように切断・整形した(Fig. 1a)。なお、本研究で使用したベレア砂岩を対象に実施した密度試験の結果、粒子密度は 2.70 g/cm^3 で、初期空隙率は23.0%であった。

2・2 炭酸カルシウム析出・評価方法

本研究では、ウレアーゼ粉末をイオン交換水で溶解させ、ろ過した水溶液(以下、ウレアーゼ水溶液と記述)と、尿素と塩化カルシウムを混合した水溶液(以下、尿素-塩化カルシウム水溶液と記述)を1:1の比で混合した溶液(以下、グラウト材と記述)を供試体上部より圧入することで、岩石空隙内部に炭酸カルシウムを強制的に析出させる^{7,8)}。この手法により、自然界で数10年から数1000年の時間を要するとされる鉱物トラップ⁹⁾を、実験室内で数日間という短時間で再現する。本研究では、所定の濃度(ウレアーゼ水溶液 20.0 g/L 、尿素-塩化カルシウム水溶液 0.9 mol/L)に調整したグラウト材を作製し実験を実施した。炭酸カルシウム析出を表す反応式を以下に示す。



ウレアーゼは、土中微生物体内およびマメ科の植物体内に存在する酵素であり、尿素を加水分解する際に触媒として作用し、分解速度を促進させる。本研究で用いたウレアーゼは、 2950 u/g (至

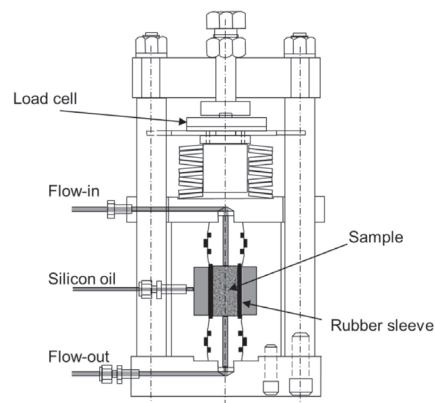
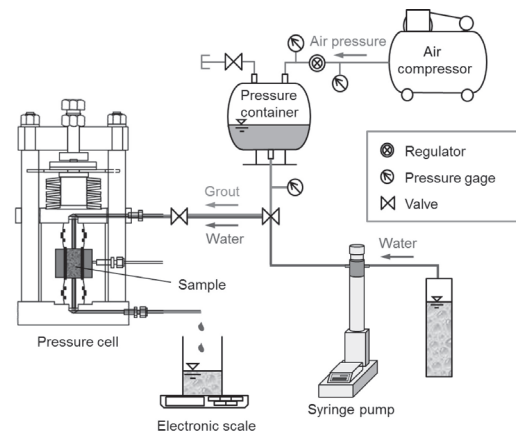


Fig.2 Schematic of experimental apparatus.

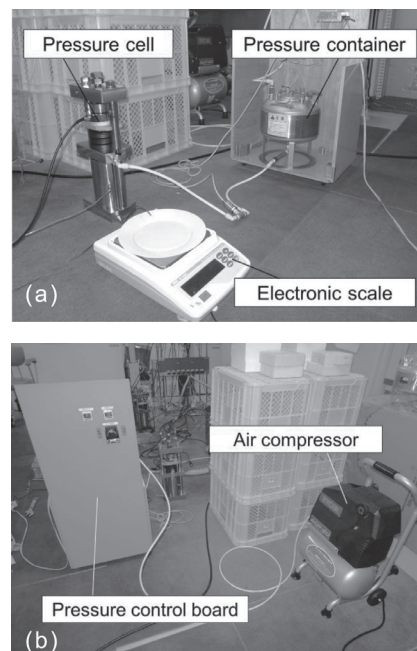


Fig.3 Photograph of grouting system
(a) Pressure cell, Pressure container, and Electronic scale
(b) Air compressor and Pressure control board).

適 pH 中性～弱アルカリ性、 30°C の場合)の活性を持つウレアーゼ(キシダ化学)である。

グラウト材圧入のための試験装置模式図を Fig. 2 に、外観を Fig. 3 に示す。試験では、岩石供試体をゴムスリーブで被覆し、

三軸圧力セルを組み立て、手押しポンプ (ENEPAC 製, P392AL) により側圧を作用させ、セル中央上部のねじを締めることにより軸圧を作用させた (Fig. 2)。本試験では、境界条件として、拘束圧を 3.0 MPa 作用させた。これは、圧入するグラウト材が供試体とゴムスリーブの境界を流れ、供試体を迂回するのを防ぐためである。圧力制御盤で圧力を制御することにより、コンプレッサー (リュービ製, ACP-60) からグラウト材を充填するステンレス加圧容器 (ユニコントロールズ製, TM5B-SR) に透水差圧を作用させ、セル内にセットした供試体にグラウト材を圧入した。温度は、20 °C 条件で実験を実施し、20 °C に管理された恒温実験室内に実験装置を静置し実験を行った。温度環境については、概ね ±3 °C の精度で管理を行うことができた。

グラウト材圧入完了までの手順を以下に示す。

- i) 所定の濃度に調整したウレアーゼ水溶液と尿素-塩化カルシウム水溶液を混合し、グラウト材を作製した後、300 kPa の透水差圧で供試体に 10 mL (岩石供試体の 1 空隙体積分) を注入した。既往研究⁸⁾より、炭酸カルシウムの析出はウレアーゼ水溶液と尿素-塩化カルシウム水溶液混合後 30 分以内で開始することが確認されているため、グラウト材圧入は 15 分以内で完了させた。
- ii) グラウト材圧入後 30 分以内に圧力セルを解体し、供試体を取り出す。その後、グラウト材の反応が概ね終息する 24 時間養生させた。実験装置は、結晶析出により内部で目詰まりが生じている可能性があるため、圧力セル内部や管路を 1 vol.% 塩酸水溶液 (40 mL) で洗浄した。
- iii) 24 時間養生後、供試体内部に副産物として塩化アンモニウムが生成するため、再び圧力セルを組み立て、供試体に 20 mL (2 空隙体積分) のイオン交換水を通水して洗い流した。塩化アンモニウムの溶解度は 37.2 g/100 mL (20 °C)¹⁰⁾である一方、炭酸カルシウムの溶解度は 0.013 g/100 mL (25 °C)¹⁰⁾と非常に小さいため、塩化アンモニウムのみ透過水に溶解し、洗い流すことが可能であることを確認している。ただし、空隙径よりも小さい炭酸カルシウムについては、通水によりある程度は外部に流出されると考えられる。

グラウト材圧入は、15 分以内に 1 空隙体積分のグラウト材が流れなくなるまで、i) ~ iii) の手順を反復して実施した。

炭酸カルシウム析出量はグラウト材圧入前後の供試体乾燥質量の差で算出した。本研究では、炭酸カルシウムの析出量を表す指標として、空隙占有比を用いる。空隙占有比は、析出した炭酸カルシウム体積が供試体の初期空隙体積を占有している割合を表しており、この値が大きいくほど、空隙中に多くの炭酸カルシウムが占有していることを示している。空隙占有比は、各供試体の炭酸カルシウム析出質量を体積に換算し、初期空隙体積で除することによって次式で評価できる。

$$R_p = \frac{V_c}{V_v} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 R_p : 空隙占有比 [-], V_c : 析出した炭酸カルシウムの体積 [cm³], V_v : 初期空隙体積 [cm³] を示す。

2・3 弾性波測定方法

本研究では超音波非破壊試験機 (MARUI 製 MIN-020-1-00) を用いて P 波速度を評価した。両端子を供試体表面に密着させ、測定器を動作させる。さらに、探触子と供試体の接触面には両者間の空隙を除する目的で適量の接触媒質 (ワセリン) を塗布するが、実験結果への影響を排除するため、探触子と供試体の間にラップフィルムを 2 枚挟み、ラップフィルムと探触子の間にワセリンを

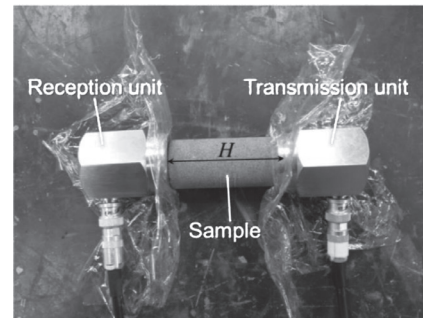


Fig.4 Elastic wave test.

塗布し測定を行った (Fig. 4)。測定対象の供試体は、試験前に 60 °C に設定した乾燥炉内に 8 時間静置し、乾燥状態にした。また、供試体ごとに初期弾性波速度が異なるため、P 波速度を初期値で正規化することで、炭酸カルシウム析出前後の P 波速度の変化を評価した。

2・4 透水試験方法

透水試験では、グラウト材圧入に用いた試験装置をそのまま使用した (Fig. 2)。拘束圧は 3.0 MPa で透水差圧は 100 kPa である。透水試験は、シリンジポンプ (TELEDYNE ISCO 製 500D 型) を用いて透水差圧 100 kPa の条件で、5 秒間隔で流量を計測し、定常状態に落ち着くまで約 15 分間実施した。また透過水はイオン交換水を使用した。本研究では、透過率を用いて透水特性の評価を行った。透過率は、ダルシー則が成り立つと仮定して、以下の式で表すことができる¹¹⁾。

$$K = \frac{\mu Q H}{A \Delta P} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 K : 透過率 [m²], μ : 透過流体の粘性係数 [Pa s], Q : 流量 [m³/s], H : 供試体長さ [m], A : 供試体断面積 [m²], ΔP : 透水差圧 [Pa] を示す。また、供試体によって初期透過率が異なるため、透過率を初期値で正規化することで、透過率の変化を評価した。

3. 実験結果

3・1 グラウト材分布および析出確認試験結果

グラウト材を砂岩供試体に圧入する際、その分布は供試体内部で均質となる必要がある。そこで本研究では、予備試験として蛍光塗料を添加したグラウト材を供試体に圧入し、圧入後のグラウト材分布状況を確認した (以下、蛍光塗料試験と記述)。また、グラウト材圧入後の供試体内部の鉱物析出状況を確認するため、試験前後の試料を用いて光学顕微鏡観察および XRD 分析を実施した。さらに、析出した鉱物の分布状況を確認するため、試験終了後の供試体をダイヤモンドカッターで 3 分割し、上部、中央部、下部に析出している鉱物質量を評価した。

まず、蛍光塗料試験について説明する。本研究では、グラウト材にウラン溶液 (関東化学: フルオレセインナトリウム, C₂₀H₁₀Na₂O₅) を添加した溶液を供試体に圧入した。さらに、試験終了後に供試体を圧裂し、圧裂断面にブラックライトを照射し、グラウト材の浸透状況を確認した。ブラックライトから発せられる紫外線は、ウラン溶液に照射されると黄色い可視光となって反射するため、グラウト材の浸透状況を目視で確認することができる。なお、供試体圧裂の際、供試体を水で濡らすと蛍光塗料が流れてしまう可能性があるため、乾燥状態で圧裂した。また、比較のために蛍光塗料を圧入していない乾燥状態の供試体についても圧裂し、同様に圧裂断面にブラックライトを照射した。

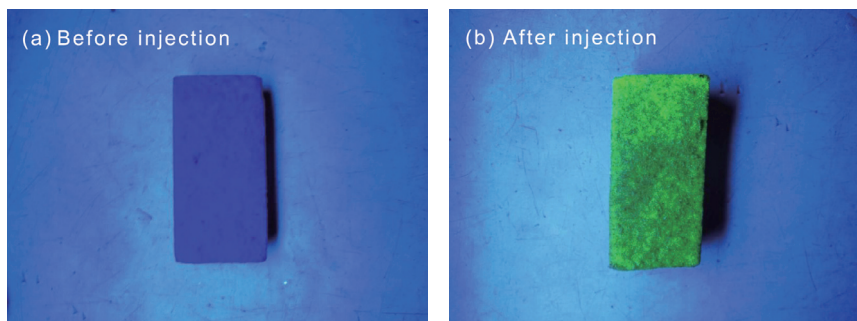


Fig.5 Results of fluorescent paint tests lit with black light
((a) Before injection, (b) After injection).

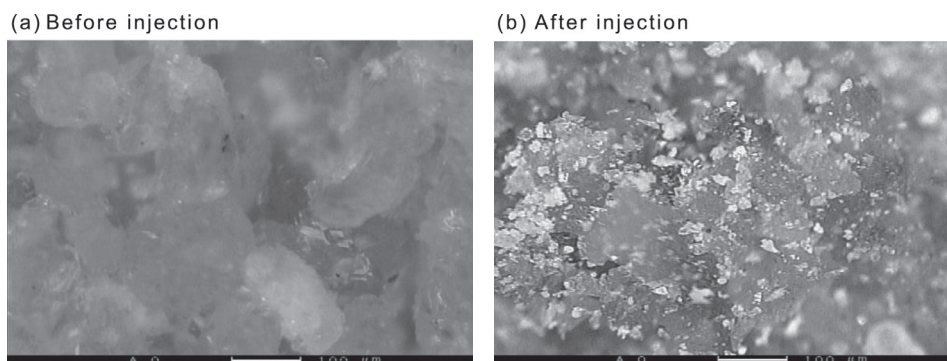


Fig.6 Micrographs observed by optical microscope
((a) Before injection, (b) After injection).

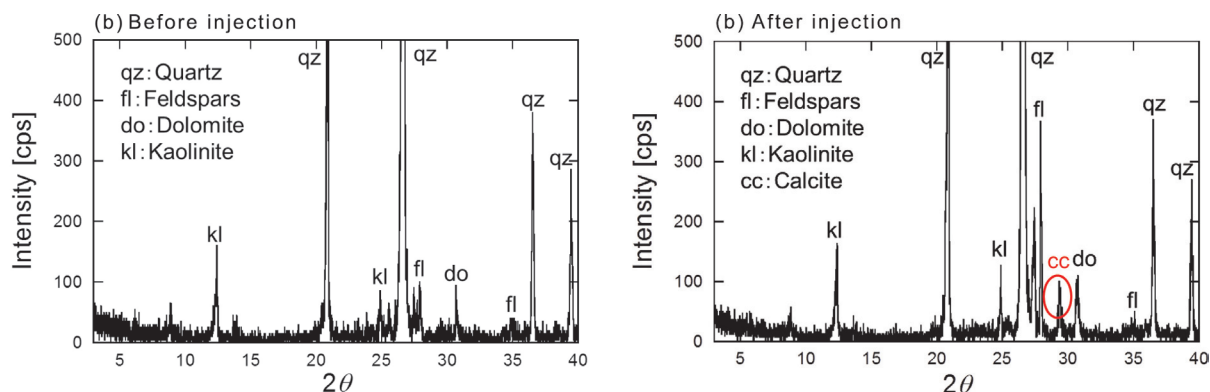


Fig.7 Mineral composition of rock samples determined by XRD
((a) Before injection, (b) After injection).

Fig. 5 にグラウト圧入前後の供試体の圧裂断面を示す。ブラックライトから発せられた紫外線により、初期状態の供試体断面は青紫色に蛍光していることが確認できる (Fig. 5a)。一方、蛍光塗料入りのグラウト材を圧入した供試体の場合、圧裂断面は全体に黄色く蛍光している (Fig. 5b)。供試体断面がほぼ一様に蛍光していることから、グラウト材の分布が概ね均質であることが確認できた。

つぎに、光学顕微鏡を用いて供試体圧裂断面を観察した結果を示す (Fig. 6)。グラウト材未圧入の供試体断面から、ベレア砂岩を構成する主鉱物である石英・長石といった比較的粒子径の大きい粒子が観察され、その直径は $100\mu\text{m}$ 程度であることが確認できる (Fig. 6a)。一方、グラウト材圧入後の供試体断面からは、上記鉱物の他に、比較的粒子径の小さい白色結晶質鉱物が多く観察された (Fig. 6b)。この結晶質鉱物は、グラウト材の反応により析

出した二次鉱物と考えられる。岩石構成粒子と比較して粒子径が小さいのは、二次鉱物が供試体空隙内で析出したためであると考えられる。二次鉱物の粒子径は、 $10\mu\text{m}$ 程度かそれ以下であった。この二次鉱物の鉱物組成を確認するために実施した X 線回折分析結果について説明する。グラウト材圧入前後の供試体を X 線回折分析した結果を Fig. 7 に示す。グラウト材圧入前後の結果を比較すると、 2θ 値が 29.4° (d 値: 3.035) のとき、新しいピークが発生していることが確認できる。このピークは、炭酸カルシウム (カルサイト) を表しており、グラウト材圧入後の供試体がカルサイトを含有していることを示している。それ以外にグラウト材圧入前後で明瞭な違いは確認されなかったことから、光学顕微鏡観察で確認された白色結晶質鉱物はカルサイトであることが確認された。さらに、グラウト材圧入によって岩石空隙内に析出した鉱物は、炭酸カルシウム (カルサイト) のみで、その他の二次鉱

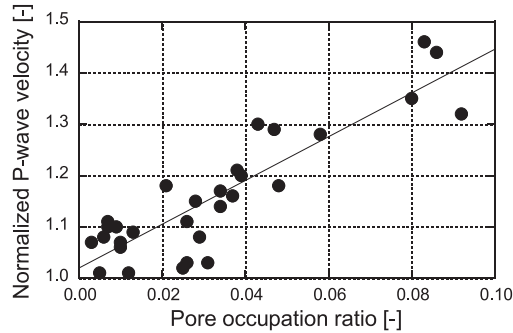


Fig.8 Relation between pore occupation ratio and normalized P-wave velocity.

物は沈殿していないことも判明した。

最後に、試験終了後に、上部、中央部、下部に3分割した試料中に析出している鉱物質量の評価した結果を説明する。3分割した試料は、60℃で24時間炉乾燥し、室温条件に戻した後、その体積と乾燥質量を計測した。実験前に獲得した粒子密度 (2.70 g/cm³)、初期空隙率 (23%) を用いて析出した鉱物質量を算出した。得られた二次鉱物の質量から式 (4) を用いて評価した空隙占有比は、上部、中央部、下部それぞれ、0.0198, 0.0172, 0.0210 であった。このことから、炭酸カルシウムは供試体内部に概ね均等に析出しており、本研究で適用したグラウト圧入方法の有用性を示すことができた。次節より、本手法を用いて得られた力学・水理学特性と炭酸カルシウム析出量の関係について詳述する。

3・2 弾性波測定結果

弾性波試験は炭酸カルシウム析出前後の供試体を対象に実施し、前後の測定値を比較することにより、炭酸カルシウムの析出が岩盤の変形特性に与える影響を評価する。実験前の供試体 30 本 (BS-1 ~ BS-30) の初期弾性波速度の平均値 ± 標準偏差は、2.36 ± 0.0645 km/s であった。なお、グラウト圧入後の供試体は、圧入前と比較して見た目に大きな変化は生じないことを明示しておく (Fig. 1 参照)。弾性波試験より得られた空隙占有比と正規化弾性波速度の関係を Fig. 8 に示す。図中の直線は、実験結果を最小二乗法で直線回帰した近似線を表しており、炭酸カルシウム未析出の点 (空隙占有比 0.00, 正規化 P 波速度 1.0) を強制的に通過させている。実験結果より、空隙の約 10% を炭酸カルシウムが占有すると (空隙占有比 0.10 のとき)、P 波速度は最大約 40% 増加していることが確認できる。以上より、岩石内の空隙を炭酸カルシウムが占有することで、岩石自体の変形係数は増加することを定量的に示すことができた。

3・3 透水試験結果

透水試験は炭酸カルシウム析出前後の供試体を対象に実施し、前後の測定値を比較することにより、炭酸カルシウムの析出が岩盤の透水特性に与える影響を評価した。透水試験における境界条件は、前述の通り拘束圧 3.0 MPa、透水差圧 100 kPa である。また、実験前の供試体 6 本 (BS-31 ~ BS-36) の初期透過率の平均値 ± 標準偏差は、 $8.88 \pm 4.82 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ であった。

透水試験より得られた空隙占有比と正規化透過率の関係を Fig. 9 に示す。図より、空隙占有比の増加に伴い透過率は徐々に低下している。特に空隙占有比が 0.05 を超える付近からその減少量は増加していることが確認できる。空隙の約 10% を炭酸カルシウムが占有すると (空隙占有比 0.10 のとき)、透過率は 1 オーダー程度減少する結果が得られた。

つぎに、実験結果の妥当性を検証するため、次式に示す Kozeny-Carman 式¹²⁾を用いて実験結果との比較を行った。

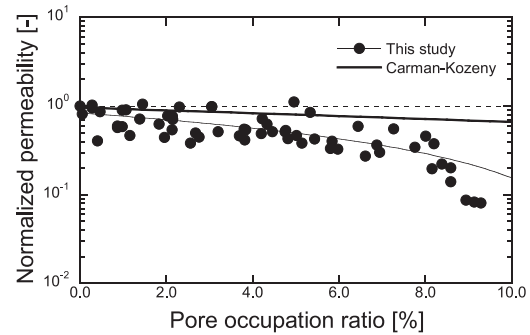


Fig.9 Relation between pore occupation ratio and normalized permeability.

$$\frac{K}{K_i} = \frac{(1-\phi_i)^2}{(1-\phi)^2} \left(\frac{\phi}{\phi_i} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K_i : 初期透過率 [m²]、 ϕ : 空隙率 [-]、 ϕ_i : 初期空隙率 [-] である。実験結果と Kozeny-Carman 式による予測結果を比較すると、予測値は概ね実験値を再現できているが、空隙占有比が増加するにしたがって実験値から乖離していくことが確認できる (Fig. 9)。空隙占有比の増加に伴い岩石構成粒子の比表面積や屈曲度も変化することが想定される。しかし、正規化した Kozeny-Carman 式では、それらの変化を陽な形式で考慮することができず、そのことが実験結果を再現できなかった要因の可能性がある。今後、実験結果を蓄積し再現性の高い予測式を構築することが課題である。

4. 結 言

本研究では、CO₂ 地中貯留における炭酸カルシウム析出 (鉱物トラップ) を実験的に再現し、弾性波試験、透水試験を実施することで、炭酸カルシウム析出が圧入対象岩石の物理特性 (変形特性、透水特性) に与える影響を精査した。

弾性波試験の結果より、炭酸カルシウム析出量 (空隙占有比) に比例して P 波速度は増加する傾向が確認された。特に、空隙占有比 0.10 の場合 (つまり、空隙の 10% を炭酸カルシウムが析出したとき)、P 波速度は約 40% 増加する結果が得られた。また、透水試験結果より、炭酸カルシウム析出量 (空隙占有比) に比例して透過率は減少する傾向が確認された。特に、空隙占有比 0.10 の場合、透過率は 1 オーダー程度減少することが判明した。炭酸カルシウム析出量の増加と共に透過率は徐々に減少し、空隙占有比が 0.05 を超えた付近からその減少量は大きくなった。つまり、空隙占有比が 0.10 を超える供試体の透過率はより顕著に減少することが示唆され、今後はより空隙占有比の高い供試体についての評価が必要である。

以上の結果から、炭酸カルシウム析出がバレー岩石の物理特性 (変形特性、透水特性) に及ぼす影響について定量的に評価することができた。炭酸カルシウムの析出は変形係数を増加させ、透水性を低下させることから、CO₂ 地中貯留における炭酸カルシウムの析出 (鉱物トラップ) は、貯留層岩盤の堅牢性 (強度特性の向上) や、CO₂ トラッピング効果を促進 (透水性の低下) させることが再確認できた。ただし、本報告では、析出した炭酸カルシウムの分布状況を詳細に把握できていないため、弾性波速度および透過率を計測した岩石供試体が均質材料となっていたか判断できない。そのため、今後は X 線 CT 分析等を用いてより細密な計測を実施し、析出した炭酸カルシウムの分布状況を精緻に評価する必要がある。

References

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007 -The Physical Science Basis-, (Cambridge University Press, 2007), 1009pp.
- 2) S. Tanaka, H. Koide, and A. Sasagawa: Energy Convers Mgmt., **36** (1995), 527-530.
- 3) T. Takahashi, T. Ohnishi, K. Nakayama, K. Koide and H. Miida: Energy Procedia, **1** (2009), 2631-2638.
- 4) Y. Okuyama, M. Sasaki, H. Muraoka, N. Kaneko and M. Soya: Journal of Geography, **117** (2008)768-781.
- 5) H. Ohkuma: Journal of MMIJ, **124** (2008), 87-94.
- 6) T. Ishido, T. Tosha, C. Akasaka, Y. Nishi, M. Sugihara, Y. Kano and S. Nakanishi: Energy Procedia, **4** (2011), 3276-3283.
- 7) H. Yasuhara and K. Hayashi: Patent number 5599032.
- 8) H. Yasuhara, D. Neupane, K. Hayashi and M. Okamura: Soils and Foundations, **52** (2012), 539-549.
- 9) S. Benson, P. Cook, J. Anderson, S. Bachu, H. Nimir, B. Basu, J. Bradshaw, G. Deguchi, J. Gale, G. von Goerne, W. Heidug, S. Holloway, R. Kamal, D. Keith, P. Lloyd, P. Rocha, B. Senior, J. Thompson, T. Torp, T. Willdenborg, M. Wilson, F. Zarlenga, D. Zhou, M. Celia, B. Gunter, J. E. King, E. Lindegerg, S. Lombardi, C. Olden-burg, K. Pruess, A. Rigg, S. Stevens, E. Wilson, S. Whittaker: IPCCSpecial Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Chapter 5 – UndergroundGeologic Storage, (Cambridge University Press, 2005).
- 10) National Astronomical Observatory of Japan: Rikanenpyo, (Maruzen, Tokyo, 2009), pp.367-503.
- 11) H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Ohfuji, D. S. Lee, S. Nakashima, and K. Kishida: Applied Geochemistry, **26** (2011), 2074-2088
- 12) J. Bear: Dynamics of Fluid in Porous Media, (Dover Publications Inc., 1972), p. 166.