

# CO<sub>2</sub> 注入流量の違いによる CO<sub>2</sub> 飽和度の変化に関する実験的研究

九州大学工学部 学生会員 ○今里 光紀 九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩  
 九州大学大学院 正会員 池見 洋明 九州大学 非会員 北村 圭吾  
 九州大学大学院 学生会員 本田 博之 九州大学大学院 学生会員 高木 進之介

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 地中貯留 (CCS) は, CO<sub>2</sub> 排出量を削減する有効な技術の 1 つとして注目されている。CCS において注入した CO<sub>2</sub> が岩盤内にどのように貯留されるか, さらに, その貯留量の評価を行うことが重要となる<sup>1)</sup>。そのために, CO<sub>2</sub> 注入過程での X 線 CT や弾性波速度, 電気インピーダンスの測定などの方法を用いて様々な研究が進められている。しかしながら, CO<sub>2</sub> がどのように岩盤中に貯留され, 飽和が進行するのかを正確に把握するための方法は, 現状では確立されていない。

そこで本研究では, ベレア砂岩を用いて, CO<sub>2</sub> 注入流量を変化させ, 弾性波速度および電気インピーダンスを同時に計測し, 岩石中の CO<sub>2</sub> 飽和度の変化を推定する。

## 2. 実験システム

試験体は直径 3.5 cm, 高さ 7.0 cm の円柱形に成形したベレア砂岩 (間隙率:18.1%, 単位体積重量:2.55 g/cm<sup>3</sup>) を用いる。試験体には, その中央断面の CO<sub>2</sub> 飽和度を計測するために, インピーダンス測定用の電極, 弾性波速度測定用の端子を Fig. 1 のように取り付ける。

Fig. 2 に実験システムの概要図を示す。実験では, 地下深部 (約 1,000 m) の貯留層と同等の温度・圧力条件 (拘束圧:15 MPa, 温度:38 °C) を再現する。この条件下で CO<sub>2</sub> は超臨界状態となる。また, 試験体は 0.1 wt% - KCl 溶液であらかじめ飽和させる。CO<sub>2</sub> 飽和度は CO<sub>2</sub> 注入流量に影響を受けるため<sup>2)</sup>, CO<sub>2</sub> 注入流量を 7 段階 (0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 mL/min) に変化させ, 試験体の上下端の差圧が定常となった際の弾性波速度およびインピーダンスを測定する。

## 3. 実験結果および考察

CO<sub>2</sub> 注入後, 定常となった際の各 CO<sub>2</sub> 注入流量における差圧を Fig. 3 に示す。図に示すように, CO<sub>2</sub> 注入流量の増加にともない, 差圧は上昇することがわかる。

次に, CO<sub>2</sub> の注入流量と弾性波速度の関係を Fig. 4 に示す。注入流量の増加にともない, 弾性波速度は流量が 2.0 mL/min までは急激な速度低下が見られるが, 2.0 mL/min より大きな流量では, 顕著な速度変化は見られ

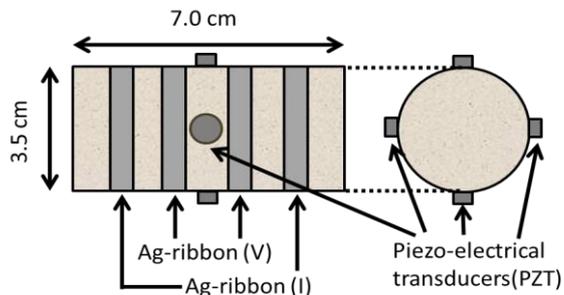


Fig. 1 Arrangement of sensors.

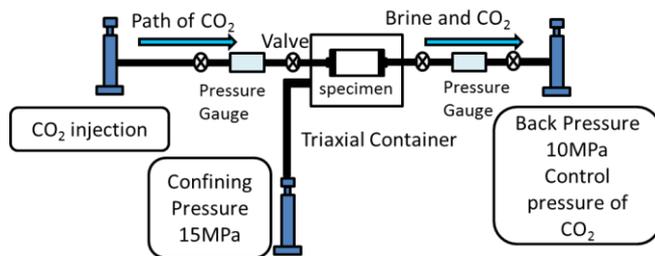


Fig. 2 Schematic diagram of experiment system.

ない。これは試験体中央で CO<sub>2</sub> 注入流量が 2.0 mL/min までは CO<sub>2</sub> が充填しきれていないが, 2.0 mL/min を超えると, 大きな流量では試験体中央断面までは CO<sub>2</sub> がおおそ充填していると推測できる。

さらに, 各 CO<sub>2</sub> 注入流量における Cole-Cole 図を Fig. 5 に示す。インピーダンスの抵抗成分 ( $Z'$ ) を X 軸, キャパシター成分 ( $Z''$ ) を Y 軸に表す。CO<sub>2</sub> 注入流量を 0.1 mL/min に設定し注入を開始すると, インピーダンスの抵抗成分が ( $Z', Z''$ )=(2.2, -0.1) から ( $Z', Z''$ )=(3.0, -0.1) と増加する。また, キャパシター成分も ( $Z', Z''$ )=(1.0, -0.65) から ( $Z', Z''$ )=(1.4, -0.9) と増加している。その後も徐々に 2 つの成分とも増加しており, このことから CO<sub>2</sub> の注入流量の上昇にともない, CO<sub>2</sub> 飽和度が上昇していると考えられる。

これらの実験結果から岩石中の CO<sub>2</sub> 飽和度を求める。CO<sub>2</sub> 飽和度と弾性波速度の関係式は式 (1) に示す Gassmann の式<sup>3)</sup>を用いる。

$$\text{Gassmann の式} : V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{eff}} + \frac{4}{3}G}{\rho_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

ここで,  $V_p$  は弾性波速度,  $K_{\text{eff}}$  は飽和された岩石の体積弾性率,  $G$  は剛性率,  $\rho_{\text{eff}}$  は飽和された岩石の密度であ

る。また、 $K_{\text{eff}}$ は以下の式で表される。

$$K_{\text{eff}} = K_{\text{dry}} + \frac{(1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}})^2}{\frac{\phi}{K_{\text{fl}}} + \frac{1 - \phi}{K_{\text{min}}} + \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}^2}} \quad (2)$$

ここで、 $K_{\text{dry}}$ 、 $K_{\text{min}}$ 、 $K_{\text{fl}}$ はそれぞれ乾燥状態、岩石構成鉱物、間隙流体混合物の体積弾性率を表す。

$\text{CO}_2$ 飽和時の $\rho_{\text{eff}}$ は次式で表される。

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_{\text{dry}} + \phi \{ (1 - S_w) \rho_{\text{CO}_2} + S_w \rho_w \} \quad (3)$$

ここで、 $\phi$ は岩石の空隙率、 $\rho_w$ 、 $\rho_{\text{CO}_2}$ 、 $\rho_{\text{dry}}$ はそれぞれ水の密度、 $\text{CO}_2$ の密度、乾燥状態の岩石の密度である。

$\text{CO}_2$ と水の混合形態には3つの混合形態 (Voight, Reuss, Hill) があり<sup>5)</sup>、それぞれの $K_{\text{fl}}$ を算出する。これらの式は以下に示す通りである。

$$\text{Voight model: } K_{\text{fl}} = K_w \cdot S_w + K_{\text{CO}_2} \cdot (1 - S_w) \quad (4)$$

$$\text{Reuss model: } K_{\text{fl}} = \frac{S_w}{\frac{K_w}{K_w} + \frac{1 - S_w}{K_{\text{CO}_2}}} \quad (5)$$

$$\text{Hill model: } K_{\text{fl}} = \frac{\{K_w \cdot S_w + K_{\text{CO}_2} \cdot (1 - S_w)\} + \frac{S_w}{\frac{K_w}{K_w} + \frac{1 - S_w}{K_{\text{CO}_2}}}}{2} \quad (6)$$

弾性波速度の測定値と式 (1) から式 (6) を用いて、3つの混合形態それぞれの $\text{CO}_2$ 飽和度を求める。

さらに、 $\text{CO}_2$ 飽和度とインピーダンスとの関係については式(7)に示す Archie の式<sup>4)</sup>を用いる。

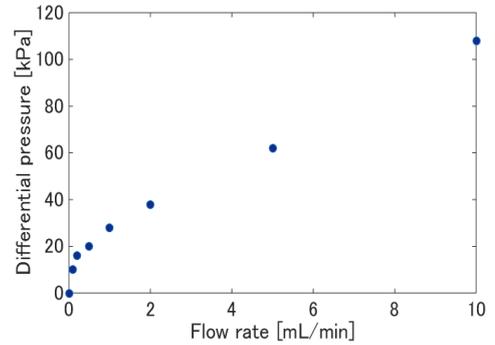
$$\text{Archie の式: } (S_w)^m = \frac{R_t}{R_0} \quad (7)$$

ここで、 $S_w$ は水の飽和度、 $m$ はこう結係数、 $R_t$ 、 $R_0$ は $\text{CO}_2$ 、塩水飽和時の比抵抗である。

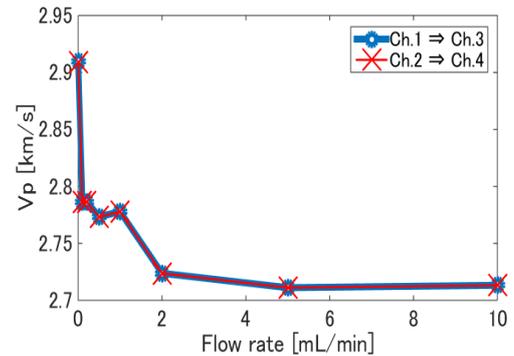
式(1)から求められた3つの混合形態それぞれの $\text{CO}_2$ 飽和度を算出した結果と、式 (7) から求められた $\text{CO}_2$ 飽和度を比較した結果を **Fig. 6** に示す。その結果、インピーダンスの測定結果により求めた $\text{CO}_2$ 飽和度の変化と弾性波速度から求めた $\text{CO}_2$ 飽和度の変化のうち $\text{CO}_2$ が均質に充填されているとされる Reuss model で算出された $\text{CO}_2$ の混合形態が最も近い結果が得られた。インピーダンスから算出した $\text{CO}_2$ 飽和度は約 20 % となり、注入流量を 2.0 mL/min 以上にする事で試験体空隙の約 20 %、試験体全体積の約 4 % が $\text{CO}_2$ に置換されていると考えられる。

#### 4. おわりに

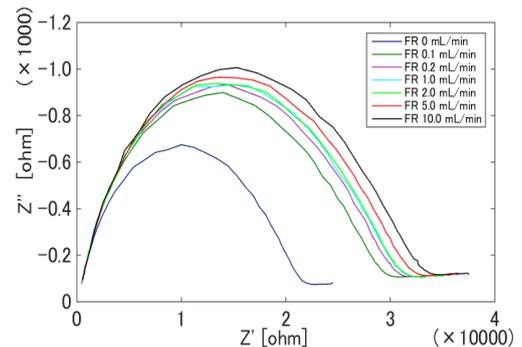
本研究では、弾性波速度および電気インピーダンスを計測し、そこから得られるデータを基に各 $\text{CO}_2$ 注入流量の違いによって飽和度がどのように進展するか検討を行った。その結果、 $\text{CO}_2$ の注入流量 2.0 mL/min を超えると $\text{CO}_2$ による飽和の進行がほぼ完了することが明らかになった。



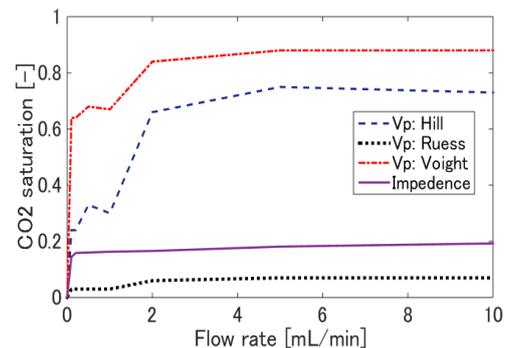
**Fig. 3** Change of measured differential pressure.



**Fig. 4** Change of measured elastic wave velocity.



**Fig. 5** Cole-Cole plots of each flow rate.



**Fig. 6** Change of estimated  $\text{CO}_2$  saturation.

#### 参考文献

- 1) Ziqiu Xue et al., Application of Rock Physics Study to Seismic Monitoring of Injected  $\text{CO}_2$  in Geological Sequestration, *Journal of Geography*, 117, pp734-752, 2008.
- 2) 松岡俊文他, Lessons from the First Japanese Pilot Project on Saline Aquifer  $\text{CO}_2$  Storage, *Journal of Geography*, 117, pp734-752, 2008.
- 3) Gassmann, F., 1951., Über die elastizität poröser medien: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich* 96, pp1-23.
- 4) Shinichi Takakura et al., Archie's formulas and equivalent parallel circuit model for rock resistivity.
- 5) Wood, A.W., 1955, *A Textbook of Sound*. The MacMillan Co., New York.