

比抵抗実験による超臨界CO₂流動挙動の推定

中塚 善博^{1*}・尾西 恭亮¹・山田 泰広¹・薛 自求¹・松岡 俊文¹

¹京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

*E-mail: nakatsuka@earth.kumst.kyoto-u.ac.jp

CO₂地中貯留は、大気中に放出されるCO₂を削減する有効な手段の一つとして注目されている。CO₂地中貯留の実現には、圧入後のCO₂の流動挙動の解明が不可欠である。地中1000m付近の帯水層、枯渇油田、ガス田などに圧入されたCO₂は、超臨界状態となり貯留層中を移動する。圧入する貯留層の特性が異なれば、流動挙動も異なることが予想される。本研究では、ベレア砂岩と多胡砂岩の2種類の砂岩のコア試料を用いて、比抵抗測定による流動挙動の推定を行った。比抵抗は、試料の両端部に印加電極を、側面に測定電極を取り付け計測した。実験結果から、砂岩の種類によらず250%程度上昇しCO₂の流動挙動を推定できることができた。また、流動挙動の差から砂岩ごとの層理面の影響も見ることができた。

Key Words : carbon dioxide(CO₂), CO₂ sequestration, resistivity, monitoring, supercritical

1. はじめに

近年、地球温暖化問題が深刻さを増す中、温暖化の主要因とされる二酸化炭素(CO₂)の排出量削減は国際的な課題となっている。CO₂は他の温室効果ガスに比べ、単位体積あたりの温暖化への影響は小さいが、排出量が大きい。また、大規模排出源が特定しやすく、分離回収が行いやすい。分離回収したCO₂の長期隔離手段として、CO₂の地中貯留は安全性が高く、技術的な課題の少ない実現性の高い手法として考えられている。

CO₂地中貯留は、既存のEOR(Enhanced Oil Recovery)の技術の応用であることから技術的な問題は少ない。しかし、圧入後のCO₂の流動挙動については、未解明な点が多い。これは、目標としている地下1000m付近の帯水層、枯渇油田、ガス田が高温高圧になっており、CO₂が超臨界という状態になるためである。圧入後のCO₂の流動挙動を把握することは、より安全に、かつ経済的に多くのCO₂の圧入を行うためにも非常に重要である。

そこで、本研究ではベレア砂岩および多胡砂岩の2種類の砂岩を用い、特性の異なる岩石中の流動挙動を比抵抗変化を測定することにより推定した。ベレア砂岩は均質な構造であるが、実際の貯留層では、そのような均質な場所は少ない。貯留層の状況により近い条件を実現するため、本実験では不均質な構造を有する多胡砂岩を用いた実験を行い、ベレア砂岩との比較検討を行った。実験結果を用い、異なる砂岩内でのCO₂の流動挙動の違いを推定した。

2. 実験概要

(1) 岩石試料

実験には、ベレア砂岩と多胡砂岩の2種類の岩石を用いた。岩石はそれぞれ直径5cm、長さ12cmのコア試料に加工し実験に用いた。試料の層理面は長さ方向に対し直角方向とした。それぞれの岩石の特徴を見ると、ベレア砂岩は、層理面が多少存在するものの、全体に均一な構造をしている。それに対し、多胡砂岩は層理面の粗密分布がきわめて不規則である。**表-1**の写真からも、層理面の粗密分布の不規則性が見て取れる。間隙率は、ベレア砂岩が約20%、多胡砂岩が約30%となった。

表-1 試料概要

外観	岩種	多胡砂岩
	ベレア砂岩 20.16%	29.04%
	水平方向	水平方向

(2) 試料の加工

整形したコア試料には比抵抗測定用の電極を取り付けた。試料端部には平面状の印加電極を取り付け、側面に

は2cm間隔でリング状の計測電極を取り付けた¹⁾。それぞれの電極には銀メッキを施した銅製の網を用いた。試料端部の電極の外側には、CO₂を均等に圧入できるよう加工したエンドピースを取り付けた。試料の側部は肉厚約1.0cmのシリコン樹脂でコーティングすることにより封圧用の油の進入を防止している。さらにシリコン樹脂の接着力により、圧入したCO₂が漏洩したり、試料外周部をCO₂が浸透しないようにしている。また周囲との絶縁を保っている。超臨界CO₂は、高密度でありながら、非常に高い流動性を有しており、ごくわずかな隙間であっても侵入してしまうことから、シリコン樹脂を隙間なく、密に塗布する必要性がある。図-1は試料の加工手順である。

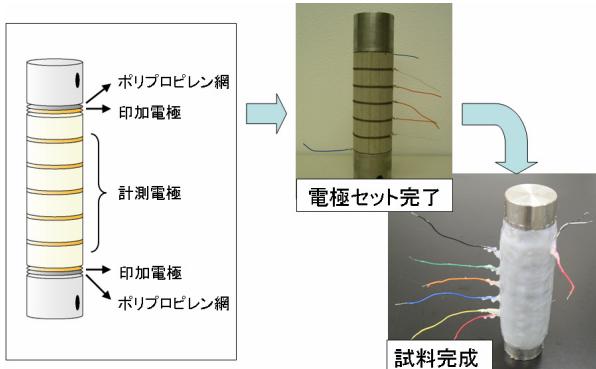


図-1 岩石試料加工手順

(3) 実験方法

CO₂地中貯留のターゲットが地下1000m付近ないしさらに深い部分であることから、地下の高温高圧条件下に近い条件で室内実験を行った。図-2に実験の模式図を示す。地下の高温高圧状態を再現するため、試料を圧力容器にセットし、封圧13MPa、温度40°Cとなるように調整した。また、試料内部は模擬地層水で飽和状態にし、シリジンポンプを用いて常に間隙水圧が10MPaとなるようにした。CO₂圧入は一度シリジンポンプ内にCO₂を取り込み超臨界状態となる40°C、10MPaに調整してから圧入した。図-3に示す相図からも設定した温度圧力条件下では超臨界状態となっていることが分かる。また、配管内でCO₂が温度低下により超臨界以外の相状態に変化することを避けるため、実験装置全体を断熱材により囲まれた温室内に設置し、ヒーターで暖め、約40°Cで一定となるようにした。CO₂の試料への圧入は、試料下方より行い、CO₂により置換された地層水は間隙水側のバッファに貯留される。バッファに貯留された間隙水は、結果において行うCO₂の置換率の確認に用いた。計測以外の実験方法は薛・大隈らによる弾性波計測実験^{2), 3)}に準じて行った。

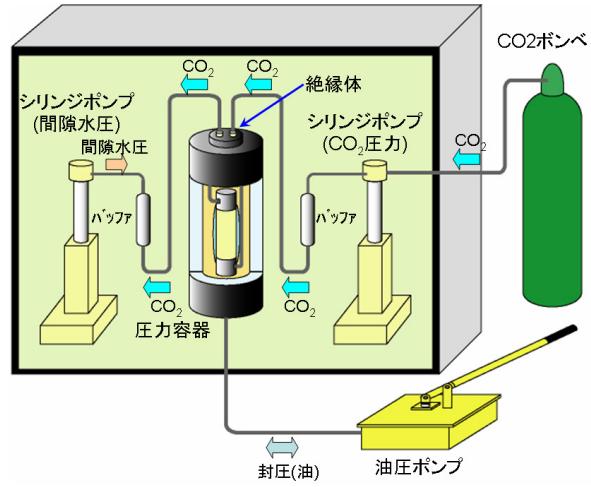


図-2 実験模式図

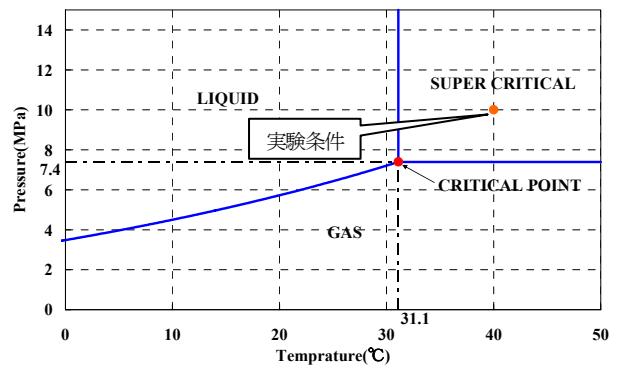


図-3 CO₂相図

(4) 比抵抗測定。

実験では、計測用電極間の電位を計測し、その値を用いて比抵抗を算出した。圧力容器内にセットした岩石試料は初めに模擬地層水であるKCl溶液により飽和している。KCl溶液は、あらかじめ1.0Ω mに調整した。ここに、超臨界状態のCO₂を圧入し、電位の変化から比抵抗の変化を算出した。CO₂は不良導体であり、電気を通しにくいことから、試料内部に存在するCO₂の量が多いほど比抵抗が上昇することがこれまでの実験結果⁴⁾から分かっている。各計測電極間の比抵抗変化、電位変化から、アーチの式⁵⁾を用いCO₂と模擬地層水の置換率を推定し、岩石試料中でのCO₂の分布についても検討を行った。

3. 実験結果および考察

図-5、図-6に実験結果を示す。図-5は比抵抗変化の図である。どちらの試料においても比抵抗が大きく変化していることがわかる。実験開始時の比抵抗を基準とした比抵抗の変化を見ると、実験終了時には約2.5倍になっている。これは、ベレア砂岩多胡砂岩とともに同じであった。

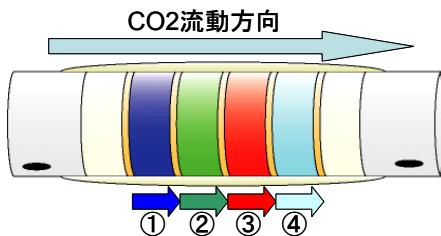


図-4 流動方向と区間

ベレア砂岩では、流入側の比抵抗が変化してから約30分の間に流入側から流出側のすべての区間比抵抗が大きく変化した。比抵抗が大きく変化した後は収束に向かい、3時間ほどで比抵抗はほとんど変化しなくなった。

多胡砂岩でははじめにすべての比抵抗が変化した。この原因は、印加電極部分のCO2飽和率が一時的に急上昇したことなどが考えられる。今後の検討が必要である。その後、比抵抗は低下し、再度上昇を始めた。多胡砂岩では流入側の比抵抗が変化を開始してから流出側の比抵抗が変化するまで約45分から50分程度かかった。比抵抗が大きく変化した後はベレア砂岩と同様に緩やかに収束に向かう。多胡砂岩では、比抵抗が大きく変化してから収束するまでに約4時間半かかった。

図-6は式(1)に示すアーチーの式⁵⁾を用いて地層水とCO2の置換率を求めたものである。

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad (1)$$

ここで、 ρ 、 ρ_w は岩石、地層水の比抵抗、 ϕ は孔隙率、 S は水飽和率を示す。また a 、 m 、 n は岩石の性質に依存する定数であり、 a は迂回係数、 m は膠結係数、 n は飽和係数と呼ばれる。砂岩では $a=0.5\sim2.5$ 、 $m=1.3\sim2.5$ 、 $n=2$ となる。ベレア砂岩では、ほぼ均一に地層水とCO2が約50%置換していることがわかる。これに対し多胡砂岩の置換率の変化を見ると、流入側の区間で約50%置換しているのに対し、流出側の区間では約35%しか置換していない。また、置換率の分布も流入側が最も置換率が高く、流出側になるに従い徐々に置換率が減少する傾向が見られた。また、比抵抗が大きく変化した部分における各岩石試料の置換率の変化を見ると、ベレア砂岩では、すべての区間で約40%置換してから収束に向かっている。多胡砂岩では流入側は約40%まで置換したが、流出側では約25%までしか置換せず、そこから収束に向かっている。

次に圧入したCO2が各計測区間を通過するのに要した時間を比較する。これは、各計測区間における比抵抗変化が始まってから、次の区間の比抵抗変化が始まるまでの時間を比較することにより行った。表-2にCO2が各計測区間を透過するのに要した所要時間を示す。

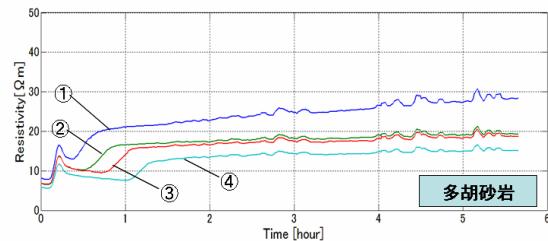
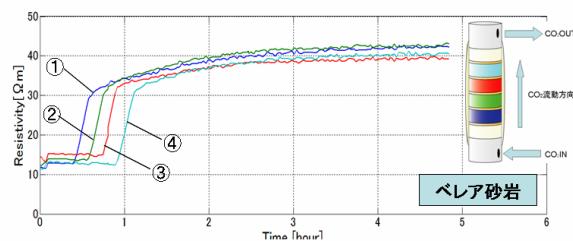


図-5 比抵抗変化

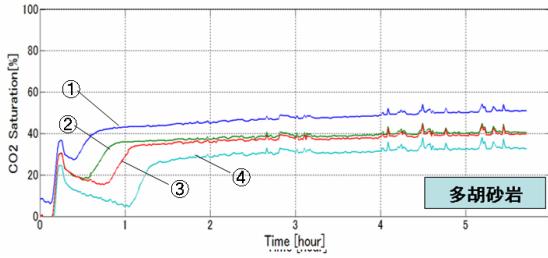
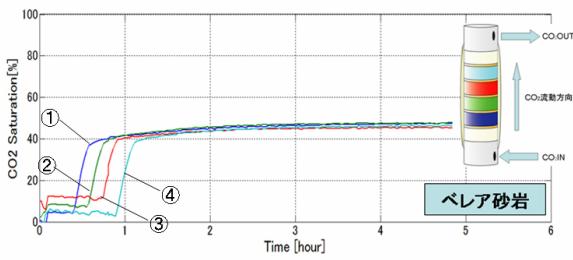


図-6 CO2置換率

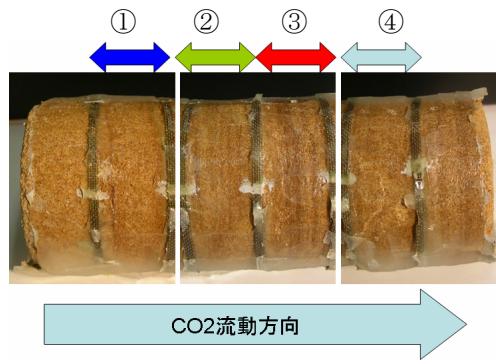


図-7 多胡砂岩試料側面写真

表-2 CO2流動所要時間

区間	①⇒②	②⇒③	③⇒④
ベレア砂岩	10	11	11
多胡砂岩	8	14	16

(単位:min)

ベレア砂岩では、各区間を通過するのに要した時間がほぼ同じであるのに対し、多胡砂岩では、最初の計測区間はベレア砂岩とほぼ同じ程度の時間で通過したが、2番目、3番目の区間では2倍近い時間を要している。図-7に実験後の多胡砂岩試料を示す。①の区間に比べ②、③番目の区間では層理面の数が多いことが分かる。また、②の区間では、均等に層理面が存在しているが、③の区間では層理面が一部分に集中している。層理面の数も③の区間のほうが、②の区間よりも若干多くなっている。CO₂の岩石内における流動挙動は、多胡砂岩のような層理面の影響の大きい砂岩では影響を受け、流動が抑制されていると考えられる。

以上の結果から岩石内部におけるCO₂の流動挙動を推定すると、図-8に示すような流動挙動になると推定される。ベレア砂岩では、層理面の影響はほとんどなく、図-8の左側に示したように均等に流動する。多胡砂岩では、図の右側のように、層理面以外の部分では、均等に浸透していくが、層理面により流束が一度抑制されてしまうと考えられる。

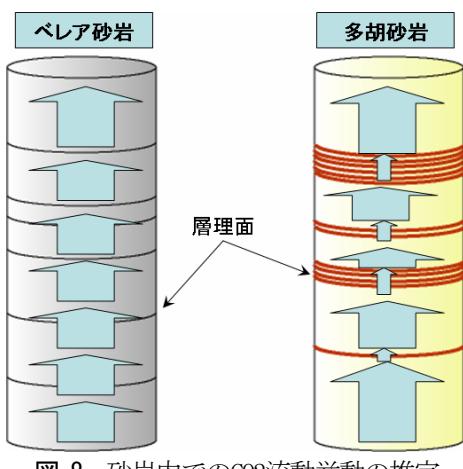


図-8 砂岩内でのCO₂流動挙動の推定

4.まとめ

実験結果より、種類の異なる岩石内ではCO₂の流動挙動は異なることが分かった。ベレア砂岩は均質な構造を有し、層理面は存在するがその影響はほとんどなく均等に浸透した。多胡砂岩では、層理面の影響からCO₂の流動挙動が抑制され、CO₂との置換が平衡状態になるまでに時間を要した。アーチーの式を用いたCO₂の置換率の推定から、ベレア砂岩で全区間で均等に置換したのに対し、多胡砂岩では流入側から流出側へ進むにしたがって置換率は低下しているのが分かった。流入側では、どちらの試料でも50%近い置換率となつたが、流出側では、ベレア砂岩では流入側と同様な50%近い値であったのに対し、多胡砂岩では35%程度という低い値になった。このことからも多胡砂岩では層理面等の影響によりCO₂の流動が遮られていることが考えられ、比抵抗変化の測定により流動挙動の推定が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 千葉昭彦, 熊田政弘, 花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定-間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について-, 物理探査, 47, 3, 61-172, 1994
- 2) 薛自求, 大隅多加志, 帯水貯留層における挙動のモニタリング技術に関する実験的研究, 地下水学会誌, 47, 1, 29-44, 2005
- 3) 薛自求, 大隅多加志, 二酸化炭素注入に伴う多孔質砂岩の透水係数と弾性波速度の測定に関する実験的研究, 資源素材, 120, 91-98, 2004
- 4) 尾西恭亮, 石川慶彦, 山田泰広, 松岡俊文, 気液超臨界三相のCO₂圧入による岩石試料の比抵抗変化, 物理探査学会第114回学術講演会後援論文集, 193-196, 2006
- 5) Archie, G.E., *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, Transaction of the American Inst. Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 146, 54-56, 1942

ESTIMATION OF MIGRATION BEHAVIOR OF SUPERCRITICAL CO₂ USING RESISTIVITY MEASUREMENT

Yoshihiro NAKATSUKA, Kyosuke ONISHI, Yasuhiro YAMADA, Ziqiu XUE and Toshifumi MATSUOKA

In this study, the experiment of resistivity measurement was conducted using Berea and Tako sandstones. To measure the spatial distribution and time variation of bulk resistivity, current electrodes were set on the each end and measurement electrodes were set on the side of the rock core shaped to 5cm diameter and 12cm length. Result of the experiment shows that plane beds obstruct the migration of CO₂ in Tako sandstone. Results of replacement ratio calculated from Archie's Law also show the same effect. From the resistivity the replacement of CO₂ was 45% in injection side and 35% in outflow zone of the Tako sandstone. We detected the flow behavior of the supercritical CO₂ in different sandstones.