

二酸化炭素マイクロバブル地中貯留における 二酸化炭素の挙動に関する研究

2019年3月修了予定 環境システム学専攻 47-166675 森川慎也

指導教員 愛知正温 講師

キーワード：二酸化炭素地中貯留 レイリー・テイラー不安定性 シミュレーション

1. 緒言

地球温暖化による、生態系や人類の活動への悪影響が指摘され始めて久しい。2014年作成の、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第5次評価報告書は、陸域と海上を合わせた世界平均気温は1880年から2012年の間に0.85°C上昇し、また、地球の表面では最近30年間の各10年はいずれも、1850年以降の各々に先立つどの10年間よりも高温であり続けた¹⁾と指摘している。また、同報告書では、地球温暖化に最も寄与しているのは、1750年以降の大気中の二酸化炭素濃度の増加であるとされており、人類の影響が地球温暖化の支配的な要因である¹⁾と結論付けている。そこで、先進国を中心として、CO₂排出量の削減の為に様々な取り組みがなされてきた。例えば、省エネ製品を普及されることや、再生可能エネルギー利用割合を拡大させることで、従来よりも二酸化炭素の排出量を減らそうとする試みなどが挙げられる。それらの中でも、CO₂削減効果が特に高いと期待されているのが、二酸化炭素地中貯留(CCS)である。CCSとは、大気中に存在するCO₂もしくは火力発電所などの人為的排出源から排出されるCO₂を分離・回収・輸送し、地中や海洋などに長期的に貯蔵し、大気から隔離することでCO₂の排出を抑制しつつ、中・長期的に化石燃料の利用を可能とする技術オプションである²⁾。現在行われているCCSは、CO₂を超臨界状態として地中に圧入する方法がとられており、例えば、ノルウェーにおいて行われたSleipерプロジェクトは、1996年10月に注入作業が開始され、2005年初めまでに7Mt以上のCO₂が約2700t/dayの速度で注入された³⁾。

しかしながら、超臨界状態のCO₂は地下水と比較して密度が小さいため、注入初期段階において貯留の安全性を確保するためには、頁岩や岩塩層などの低浸透率シールが存在することが必要となり、結果としてCCSが可能な地域は限られる。そこで、より広範な地域での実施可能性をもつ、二酸化炭素マイクロバブル地中貯留(CMS)が提唱されている。CMSは、地上または注入井内で地下水中にCO₂マイクロバブルを圧入して溶解水を貯留層に貯留する方法である⁴⁾。CMSは、二酸化炭素を超臨界状態で地中に注入する場合と異なり、注入した二酸化炭素に浮力が働かず、逆に周辺の地下水よりも注入した二酸化炭素溶解水の方が周囲と比較して密度が大きいため、キャップロックの存在しない地域においてもCCSが行えるようになることも期待されている⁴⁾。

CMSを実施するにあたっては、注入後のCO₂溶解水の挙動を正確にシミュレートすることが必要不可欠となる。しかしながら、レイリー・テイラー不安定性によってもたらされる、特徴的な沈降挙動を正確にシミュレートするためには、微細なメッシュを用いなければならないことが知られており、計算負荷の軽減や、シミュレーション結果の評価のためには、不安定性の発現可能性の有無を評価できるような基準が必要となる。そこで本研究では、帯水層を模した水槽を用いた実験により、不安定性の発現の有無を無次元数によって分類することを試みた。

2. 実験手法

地下における二酸化炭素溶解水の挙動を再現するために用いた実験装置の外観を図1に示す。

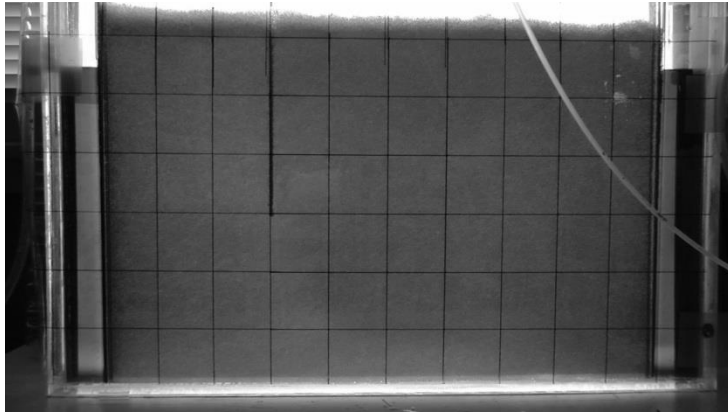


図 1 実験装置

実験装置はアクリル製の水槽 (縦 35 cm, 横 50 cm, 奥行平均 4 cm) の中に直径 1 mm のガラスビーズを詰め、BTB 溶液で満たしたものを使用した。BTB 溶液は、関東化学プロモチモールブルー溶液と純水を 1:100(体積比) で混合したものを使用した。左右は金網で仕切られており、装置の右端と左端には排水用の穴が存在する。右端の穴は、装置底部から 31 cm の位置に

存在し、左端の穴は装置底部から 28 cm の位置に存在する。排水用の穴は左端のほうが低い位置に存在するため、右端から BTB 溶液を送り込むことで、ガラスビーズ内の図中右端から左端へと BTB 溶液の水流を作ることが出来るようになっている。装置右端から BTB 溶液を注入する際は、ペリスタポンプを用いて一定の流量で送り込むようにした。CO₂ 溶解水は、ペリスタポンプを用いて一定の割合で送り出され、ステンレス製の管を通して水槽内に注入される。ステンレス製の管は、実験ごとに任意の位置に移動できるようになっている。CO₂ 溶解水の作成には(有)OK エンジニアリング作成の OKE-MB200mL-PT1/8.MO を用いて行った。地下水流が注入後の CO₂ の挙動に与える影響を調べるために、CO₂ 溶解水の注入実験を行った。具体的な手順は以下のとおりである。

まず、マイクロバブル発生装置を用いて CO₂ 溶解水を作成し、炭酸ガス電極を用いて CO₂ 濃度の測定を行った。その後、作成した CO₂ 溶解水に BTB 溶液を添加し、BTB 溶液の体積割合がガラスビーズ水槽内と同じになるようにした。次に、ペリスタポンプを用いて、ガラスビーズ水槽内に、CO₂ 溶解水の注入を行った。BTB 溶液の水流を作る場合は、CO₂ 溶解水の注入開始と同時に別のペリスタポンプを用いて実験装置右端への BTB 溶液の注入を開始した。CO₂ 溶解水の注入開始と同時に、カメラを用いて水槽内の色の変化の記録を行った。注入開始から 60 分後に、CO₂ 溶解水の注入を停止し、更に 60 分後にカメラによる記録を停止した。実験結果は、地下水中に注入された流体に対して働く垂直方向の力と水平方向の力の比を表す無次元数である π_1 によって分類された。

3. 結果と考察

3.1 実験結果

表 1 CO₂ 挙動観察実験の実験条件

実験番号	透水係数 / 10^{-3} m s^{-1}	CO ₂ 溶解量 / $10^{-4} \text{ kg L}^{-1}$	水平方向流速 / 10^{-6} m s^{-1}	π_1	注入速度 / ml s^{-1}
1	6.83	4.56	6.22	0.500	0.0708
2	8.81	6.44	1.57	3.63	0.0708
3	10.5	6.33	4.51	1.48	0.0708
4	11.4	6.33	3.05	2.37	0.0708
5	11.0	6.67	5.32	1.38	0.0708
6	9.30	5.67	5.25	1.00	0.0708
7	7.88	6.11	5.80	0.830	0.0708
8	7.88	5.56	3.76	1.16	0.0708

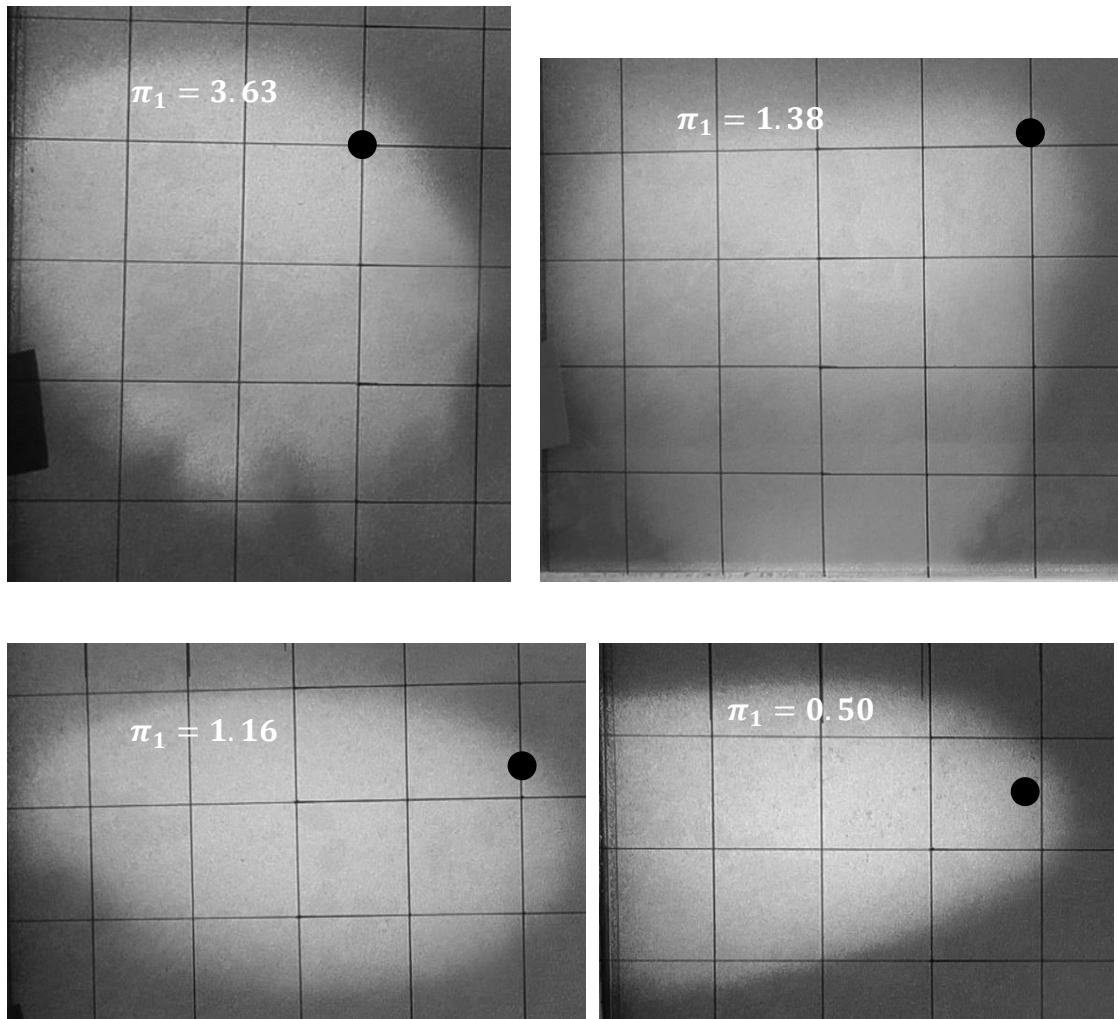


図2 種々の π_1 の値における注入開始105分後の様子(黒丸は注入部分)

3.2 考察

水槽を用いて行われた CO_2 溶解水の挙動観察実験においては、いずれの場合も CO_2 溶解水が重力方向に移動していく様子が観察された。今回の実験群において使用された CO_2 溶解水の濃度は、大気圧下の 20°C における CO_2 飽和溶解量の半分以下であり、実際にCMSを行う際はより密度の高い CO_2 溶解水の注入が行われると考えられることから、沈降を妨げるような移流が存在しないような条件においては、CMSによって少なくとも短期的な CO_2 の貯留が可能であると言える。また、地下に CO_2 溶解水を注入する場合、注入する深度にもよるが、地下は大気圧よりも大きな圧力がかかっているため、大気圧下では不可能なほど高濃度の CO_2 溶解水を注入することが出来ると考えられる。このことも、注入した CO_2 溶解水の沈降を促進すると考えられる要因の一つであり、CMSの実現可能性を支持すると考えられる。

各実験における流動状態を、 π_1 の値を用いて分類したものを図1に示す。

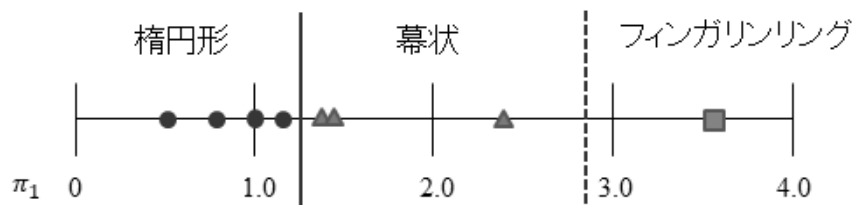


図3 無次元数 π_1 による流動状態の分類

図に示された通り、流動状態の全体的な傾向として、 π_1 が大きい範囲においてはレイリー・テイラー不安定性によるフィンガリングの様子がはっきりと表れた。 π_1 が小さくなるにしたがってフィンガリングの様子が見られにくくなり、移流によって水平方向に CO_2 が移動したのちに幕状に広がっていく様子が観察された。さらに、 $\pi_1 = 1.3$ 以下の領域においては不安定性が見られず、移流と密度差の影響によって楕円形に広がっていく様子が観察された。過去に、透水係数や大きさの異なる複数の実験装置を用いて、高密度流体を地下水中に流入させた場合の挙動について観察した Oostrom らは、いずれの実験装置においても $\pi_1 = 0.3$ において流動状態が不安定な状態から安定な状態に変化した⁵⁾と述べているが、今回の結果はそれと異なるものであった。この差については複数の原因が考えられるが、大きな要因の一つは、今回の実験における注入流体と純水の密度差が Oostrom らの実験と比較して小さかったことが挙げられる。表面張力の影響から、レイリー・テイラー不安定性によって増大される擾乱の波数には上限があり、高密度流体と低密度流体の密度差である $(\rho_2 - \rho_1)$ の値が小さくなればなるほど、増大される擾乱の波数の範囲は小さくなる⁶⁾。そのため、 π_1 の値が比較的大きい範囲においても、不安定性が発現しづらかったと考えられる。従って、より高濃度の CO_2 溶解水については、不安定性発現の境界となる π_1 の値が変化することが予想される。

4. 結言

本研究では、水槽を用いた実験により、CMSにおける地中の CO_2 溶解水の挙動の観察が模擬的に行われた。その結果、無次元数によって不安定性の発現の有無が評価可能であることが分かった。しかしながら先行研究との比較から、より密度の高い溶解水の挙動を評価するには、更なる実験が必要となることが示唆された。

参考文献

- 1)環境省(2014)IPCC 第5次評価報告書の概要-第一作業部会(自然科学的根拠)-
https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf (2019年1月20日閲覧)
- 2)環境省(2006)中央環境審議会地球環境部会気候変動に関する国際戦略専門委員会 CO2回収・貯留技術(CCS)について(審議経過の整理)
<http://www.env.go.jp/council/06earth/r064-03/ccs.pdf> (2019年1月20日閲覧)
- 3)(独)産業技術総合研究所二酸化炭素回収・貯留に関するIPCC特別報告書(日本語版)
<https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/114681/carbon-dioxide-capture-and-storage-report-japanese.pdf> (2019年1月20日閲覧)
- 4)鈴木 et al. (2013), 分散型 CO_2 地中貯留の可能性について, 大林組技術研究所報 No.77
- 5)M.Oostrom et al. (1992), Behavior of Dense Aqueous Phase Leachate Plumes in Homogeneous Porous Media, WATER RESOURCES RESEARCH VOL.28 NO.8, p.2123-2134
- 6)福江純・和田桂一・梅村雅幸(2014), 宇宙流体力学の基礎, 日本評論社, p.248~253