潮汐による圧力変動の数値解析手法の開発
-二酸化炭素地中貯留における CO_2 モニタリングへの取組み-

大成建設　正会員　○赤木　俊文
大成建設　正会員　山本　肇
東京大学　非会員　佐藤　光三

1．はじめに

二酸化炭素回収貯留(CCS:Carbon dioxide Capture and Storage)は工場や火力発電所などから排出された CO_2 を回収し，地中深くに圧入して長期間にわたって貯留する技術であり，地球温暖化の抑制策の一つとして実用化に向けた動きが世界各国で進められている。CCS では，地中に圧入した CO_2 のモニタリング手法の開発が重要な課題となっており，研究開発が進められている．

図 1 に示すように，貯留層に潮汐(主として太陽と月の引力による地殻の変形(地球潮汐)および海面変動(海洋潮汐))による荷重が加わり（潮汐荷重），地下水圧が変動を受けることは良く知られている．Sato (2006), Sato and Horne (2018)は，新潟県長岡市および北海道苫小牧市で行われた CCS 実証試験で得られた圧力データより，CO_2 の圧入に伴い圧力変動幅が減少することを示した[1,2]．**図 2** は苫小牧の CCS プロジェクトで確認された海洋潮汐による圧力変動幅の低下を示している[2]．圧力変動は海水位の変動δh（振幅 0.4m 程度）によく連動しており，CO_2 圧入後の圧力変動が圧入前より明らかに小さい．この現象は井戸での圧力測定により，CO_2 の地中挙動に関する情報を取得できる可能性を示している[1]．

圧力変動のデータから CO_2 プルーム(**図 1**)の 3 次元的な位置や大きさを推定するためには，潮汐による圧力変動を再現できる手法として数値解析が必要と考えられる．しかし，既往の研究では多孔質弾性論に基づく理論的な分析は行われているものの，数値解析による検討は行われていない．本研究では，流体-地盤力学連成解析による解析を通して，CO_2 プルームの拡大と移動に伴う潮汐による圧力変動の変化を，数値解析により表現し得ることを示す．

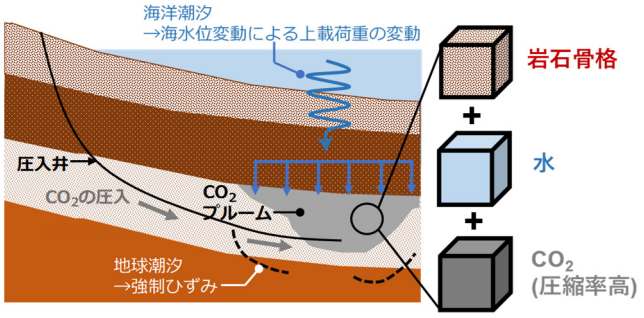

図 1 貯留層に加わる潮汐荷重

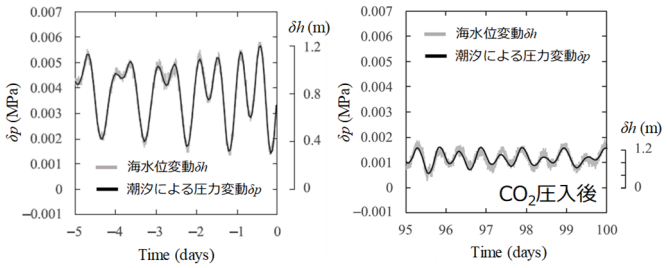

図 2 CO_2 圧入に伴う圧力変動の減少[2]

2．CO_2 圧入に伴う圧力変動幅の減少メカニズム

数値解析に移る前に，CO_2 に伴い潮汐による圧力変動幅が低下する基本的なメカニズムについて説明する．**図 3** はメカニズムの概略を示したものである．CO_2 プルームでは CO_2 の高い圧縮率により間隙流体の圧縮性が大きくなる．岩石骨格と間隙流体は並列的に荷重を支えるため，潮汐荷重に対する間隙流体の分担率が小さくなる．加えて，ある点に生じた圧力変化は圧力拡散により周囲に伝播するが，距離とともに減衰するため，水飽和域(圧力変動が大きい)の圧力が CO_2 プルームに伝わりにくくなる．以上の 2 点の組み合わせにより，潮汐による圧力変動幅の減少が生じる．

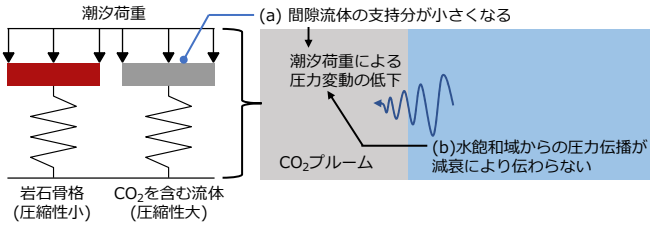

図 3 潮汐による圧力変動低下のメカニズム

3．流体−地盤力学連成解析による解析例

貯留層では CO_2 プルームの拡大に伴い，2.で述べた「潮汐荷重に対する間隙流体の分担率」と「水飽和域からの圧力伝播の減衰」の程度が経時的に変化する．ここでは，流体-地盤力学連成解析が本現象を表現し得ることを示すために，CO_2 プルームの拡大と移動に伴い，潮汐による圧力変動幅の変化が解析結果に確かに表れることを示す．

図 3 に解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す．モデルは 3 次元であるが，計算条件は 2 次元軸対称条件となるよう設定した．貯留層の厚さは 100m，内側境界井戸半径は 0.1m，領域半径は 2000m である．

キーワード　潮汐，二酸化炭素貯留回収，多孔質弾性論，数値解析，不飽和岩
連絡先　〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1; E-mail : akktsh00@pub.taisei.co.jp

© Japan Society of Civil Engineers

外部側面は圧力一定とし，内部側面，上面および底面は不透水とした．変位については，内部および外部側面は水平変位固定とし，上面は変位自由，底面は鉛直変位固定とした．井はじめに CO_2 圧入解析を実施する．圧入期間は約 100 日であり，30 万トンをモデル内側底部の圧入井より圧入した．井戸は剛で，井戸の内外での圧力応答の振幅および位相の変化は考慮しない．計算期間は約 30 年とした．次に CO_2 圧入解析の各段階での水飽和度・水圧を初期条件として，モデル上面に荷重を加えた解析を 5 日間行った．荷重は海洋潮汐による上載荷重の変動を模擬しており，半日・日周期の成分を合わせた荷重を加えた．海洋潮汐による圧力変動は上面に荷重を加えない計算との差分をとることで算出した．**表 1** に解析で用いたパラメータの一覧を示す．岩石の弾性パラメータ，間隙率，絶対浸透率は Berea 砂岩の値を用いた [3]．CO_2 の物性は超臨界 CO_2 を想定している．

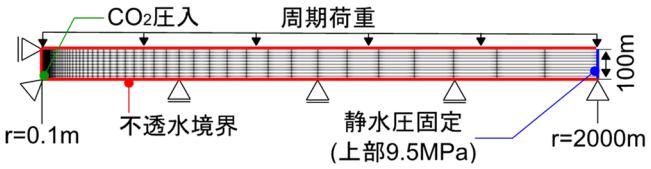

図 4　計算条件(2 次元軸対象モデル)

表 1 岩石骨格および間隙流体物性パラメータ

パラメータ	単位	値
ヤング率/ポアソン比	Pa/-	1.5×10^{10}, 0.2
岩石土粒子の圧縮率	Pa^{-1}	2.8×10^{-11}
間隙率	-	0.2
絶対浸透率	m^2	2.0×10^{-13}
水・CO_2 の圧縮率	Pa^{-1}	5.0×10^{-10}, 1.0×10^{-8}
水・CO_2 の粘性	Pa・s	1.0×10^{-3}, 5.0×10^{-5}
水・CO_2 の初期密度	$kg\ m^{-3}$	1.0×10^{3}, 6.3×10^{2}

図 5 に CO_2 圧入解析で得られた各時刻の CO_2 飽和率の分布を示す．CO_2 プルームが徐々に広がりつつ，浮力により上昇していることが分かる．最終的には半径 250m 程度で貯留層の上部に停留した．**図 6** に**図 5**(a),(b)の時刻における水圧変動の時刻歴を示す．赤線は加えた潮汐荷重である．CO_2 プルームの拡大によって水圧変動幅が減少していることが分かる．**図 7** に井戸(**図 5** 赤丸)における水圧変動振幅の最大値の変化を示す．**図 5** の(a)～(d)と対応する時刻に黒丸を記した．CO_2 の圧入に伴い水圧変動幅が減少し，圧入停止後は CO_2 プルームの浮力による上昇に伴って再度上昇した後，CO_2 プルームが貯留層上部に停留すると水圧変動幅も一定となった．

以上のように，流体-地盤連成解析により，CO_2 プルームの拡大に伴う水圧変動幅の減少に加え，圧入停止後の浮力による CO_2 プルームの浮上に伴う水圧変動幅の回復といった，水圧変動の経時変化が確かに表現される．

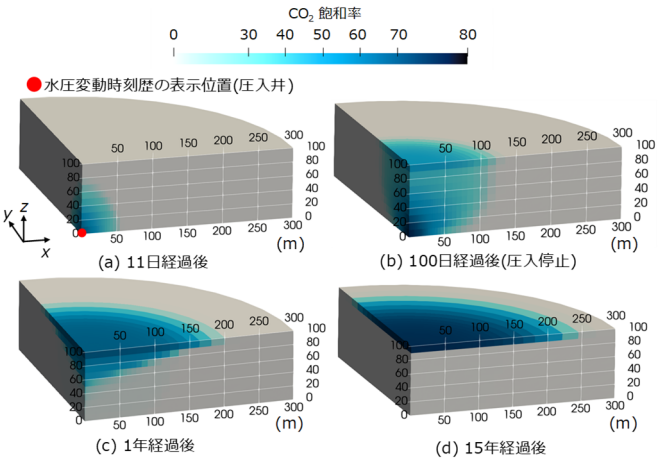

図 5 各時刻における CO_2 飽和率分布

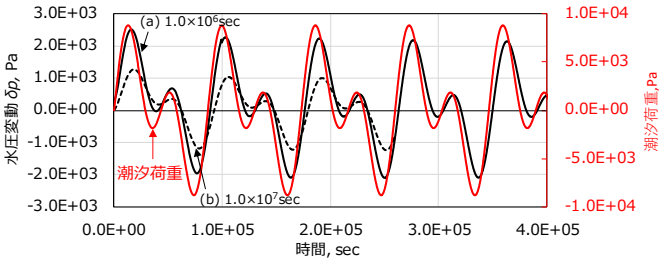

図 6 潮汐による圧力変動の時刻歴

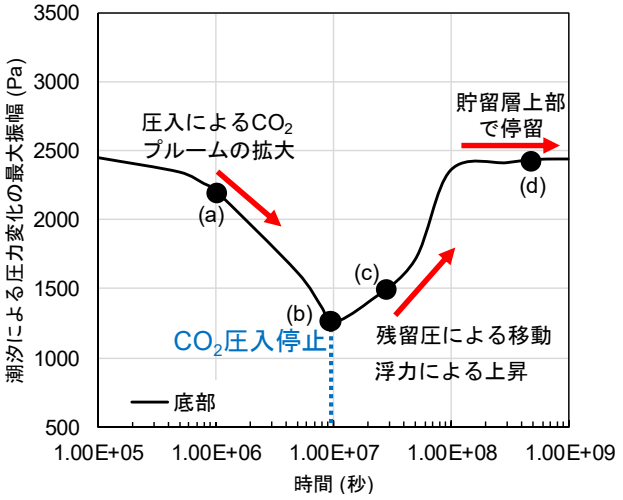

図 7 圧入井における水圧変動幅の変化

4．結論と今後の課題

本研究では，CO_2 プルームの拡大と移動に伴う潮汐による圧力変動の変化を，流体-地盤力学連成解析により表現し得ることを示した．今後は，貯留層の物性や形状による違いの把握を進めるとともに，本手法による観測結果の再現性について検討を進めたい．

参考文献

1) K. Sato, (2006). Energy Conversion and Management, 47, pp.2414–2423.
2) K. Sato., and R.N. Horne, (2018). Internationl Journal of Greenhouse Gas Control, 78, pp.160–167.
3) G. Van der Kamp., and J. E. Gale, (1983). Water Resources Research, 19, 2, pp.538-544.

© Japan Society of Civil Engineers