

二酸化炭素地中貯留を対象とした 海洋潮汐による圧力変動の数値解析

赤木 俊文^{1*}・山本 肇¹・佐藤 光三²

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

²東京大学大学院 工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター
(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

*E-mail: akktsh00@pub.taisei.co.jp

二酸化炭素回収貯留(CCS:Carbon dioxide Capture and Storage)では、地中に圧入したCO₂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。近年、CO₂の高い圧縮率に起因して、CO₂の圧入に伴い海洋潮汐に対する水圧変動振幅が減少することが報告されている。この変化よりCO₂の地中挙動に関する情報を取得できる可能性がある。本研究では、圧力変動が多孔質弾性体の潮汐荷重に対する力のつり合いと間隙流体の流れによって決まると考え、流体-地盤力学連成解析による検討を試みた。解析ではCO₂圧入に伴う圧力変動の減少が表現された。CO₂圧入過程全体では、圧力変動の振幅は、圧入によるCO₂プルームの広がりや浮力による上昇に良く連動して変化した。

Key Words : CCS, ocean tide, CO₂ monitoring, hydro-geomechanical coupled analysis

1. はじめに

(1) 研究の背景

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CO₂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、地下に圧入したCO₂の貯留層内での挙動の監視および漏洩リスクへの備えを目的として、CO₂モニタリングが実施される。CCSにおけるモニタリングでは圧入過程だけでなく圧入後も含めて長期間にわたる実施が求められるため、低コストであることが重要である。そのため費用対効果の大きいモニタリング手法の開発は非常に重要な課題である。

これに対して近年、潮汐に起因する水圧応答のCO₂モニタリングへの応用が提案されている¹⁾²⁾。潮汐は主として太陽と月の引力による地殻の変形である地球潮汐と海面変動である海洋潮汐に分類され、前者は貯留層の変形によって、後者は海水位変動に伴う上載荷重の変化によって貯留層の圧力を変動させる。特に、Sato and Homeは北海道苫小牧市で行われたCCS実証試験において、圧入井で得られた圧力データより、海洋潮汐に起因する

圧力変動成分を抽出・分析した。彼らはCO₂の圧入に伴って潮汐に起因する圧力変動振幅が減少するとともに、海水位変動に対する時間遅れが生じることを示した²⁾。

図-1はSato and Homeで示されているLoading efficiency (LE)および時間遅れの経時変化である。ここでLEは潮汐荷重(ここでは海水位変動 Δh に相当する水圧 $\rho_w g \Delta h$)と潮汐荷重に起因する水圧変動振幅の比であり、時間遅れは潮汐荷重に起因する水圧変動の潮汐荷重に対する応答の遅れである(図-2)。ここで ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 Δh は海水位変動である。この結果を見ると、CO₂圧入前の振幅比は0.47であり、圧入後に0.10程度まで低下し、その後増加している。また、CO₂圧入後に最大0.05日の時間遅れが生じ、その後減少している。

図-3に示すように、貯留層を構成する岩石は連続した間隙を有する多孔質体であり、潮汐による荷重は岩石骨格と間隙中の流体が分担して受け持つ。この分担率は岩石骨格、間隙流体および岩石粒子の圧縮率や間隙率から決定される。ここで、岩石骨格は間隙構造を形成する構造を指し、岩石粒子はそれを構成する鉱物を指す。CO₂の圧縮率は水や岩石骨格に比べて大きいため、間隙流体の平均的な圧縮率の増加により、間隙流体の荷重分担、つまり潮汐荷重による圧力変動が減少する。一方、間隙流体圧は力のつり合いだけでなく、間隙流体の流れに起

因する圧力伝播の影響を受けるため、実際の圧力変動は静的な力のつり合いによる瞬時応答と圧力拡散の重ね合わせとなる。このことを表現したのが図-4 である。青線がCO₂飽和率、赤線が力のつり合いによる瞬時的な圧力変動、赤の点線が圧力拡散後の圧力変動を表す。左側からCO₂プルームが広がる場合を示している。CO₂プルームが小さい間は水飽和域からの圧力伝播の寄与がある。このとき圧力伝播にかかる時間の分時間遅れが生じると考えられる。CO₂プルームが大きくなると、減衰によって水飽和域からの圧力伝播の寄与が小さくなり、水圧変動の振幅はさらに減少する。

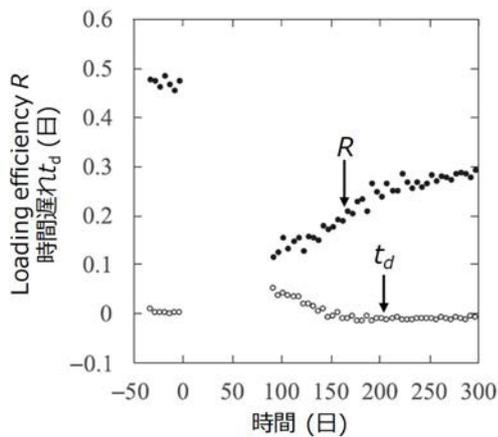


図-1 CO₂圧入過程におけるLEおよび時間遅れの変化(Sato and Home²⁾に追記)

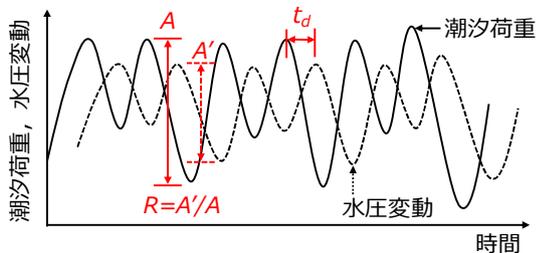


図-2 Loading efficiency と時間遅れ の概念

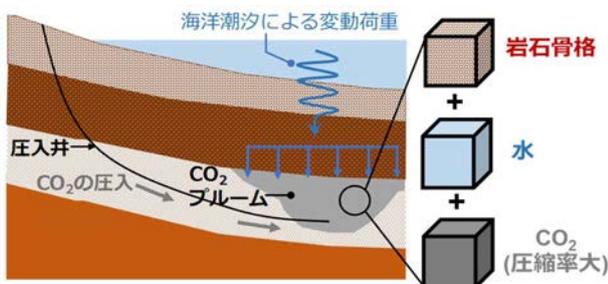


図-3 海洋潮汐荷重が加わる貯留層 (CO₂圧入過程)

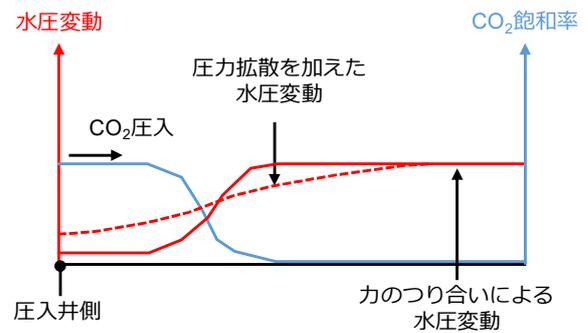


図-4 力のつり合いと圧力拡散による水圧変動の重ね合わせ

CO₂圧入過程はCO₂プルームの拡大と移動を伴う。先に述べたようにLEと時間遅れには経時的な変化が見られるが、これがCO₂プルームの移動と拡大に起因するとすれば、潮汐に起因する水圧変動振幅の変化から圧入後のCO₂プルーム挙動を推定できる可能性がある。特に苫小牧のように海底下の貯留層の場合、海洋潮汐による水圧変動は一般に地球潮汐による水圧変動よりも大きく検知しやすいため、応用上有利である。

CO₂圧入過程は水-CO₂の2二相系が対象であるため、解くべき方程式が非線形方程式となることに加えて、流体-地盤力学連成問題、貯留層内におけるCO₂プルームの3次元挙動が対象となる。そのため、CO₂プルームの運動と潮汐による水圧変動との関係を見出すために解析解を得ることは困難であり、数値解析による予測が必要となる。これまでCO₂圧入過程における潮汐による水圧変動をシミュレーションした例は無く、従ってCO₂圧入に伴う潮汐による水圧変動の経時変化とCO₂プルームの移動・拡大との関係を検討した既往研究は無い。そこで、本研究では海洋潮汐に起因する水圧変動が、地盤-水-CO₂系の力のつり合いと、水およびCO₂の流れにより決定されるとの仮定の下、二相流存在下における多孔質弾性論に基づく流体-地盤力学連成解析プログラム(SWN3D)を作成し、CO₂圧入に伴う海洋潮汐に起因する水圧変動のシミュレーションを試みた。本報では時間遅れは主題とせず、CO₂圧入過程における水圧変動の振幅の変化に着目する。

2. 計算手法

(1) 流体-地盤連成解析プログラムの概要

本研究では、海洋潮汐に起因する圧力応答について、先に述べたメカニズムを表現するために2相流体存在下における多孔質弾性論³⁾に基づく流体-地盤力学連成解析プログラム(SWN3D)を作成した。支配方程式は力のつり合い、濡れ相および非濡れ相の質量保存則、濡れ相および非濡れ相のダルシー則、多孔質等方線形弾性体の応力

ひずみ関係、水・CO₂密度と圧力の関係、相対浸透率および毛管力と水飽和度の関係である。力のつり合いを Gelerkin 法で離散化し、濡れ相および非濡れ相の質量保存則を Cell centered 有限体積法により離散化した。有限要素は1次のアイソパラメトリック要素である。未知数は変位、濡れ相圧および濡れ相飽和度である。ここでは濡れ相を水、非濡れ相をCO₂として記述する。

(2) 多孔質弾性論に基づく支配方程式

a) 質量保存則

水・CO₂の質量保存則は次式で与えられる。

$$\frac{\partial(s_r \phi \rho_w)}{\partial t} + \frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial((1-s_r)\phi\rho_n)}{\partial t} + \frac{\partial q_i^n}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに、 ϕ は間隙率、 s_r は水飽和度、 ρ_w は水密度、 ρ_n はCO₂密度、 q_i^w は水のフラックス、 q_i^n はCO₂のフラックスである。水およびCO₂のフラックスは2相流れの Darcy 則で与える。

$$q_i^w = -\rho_w \frac{k_r^w k}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$q_i^n = -\rho_n \frac{k_r^n k}{\mu_n} \frac{\partial p_n}{\partial x_i} \quad (4)$$

ここで、 p_w は水の圧力、 p_n はCO₂の圧力、 k は絶対浸透率、 k_r^w は水の相対浸透率、 k_r^n はCO₂の相対浸透率、 μ_w は水の粘性、 μ_n はCO₂の粘性である。水およびCO₂の密度は各相の圧力に依存するとして次式で与える。

$$\rho_w = \rho_{wr} \exp(c_w(p_w - p_{wr})) \quad (5)$$

$$\rho_n = \rho_{nr} \exp(c_n(p_n - p_{nr})) \quad (6)$$

ここで、 p_{wr} と p_{nr} は水とCO₂の基準圧力、 ρ_{wr} と ρ_{nr} は水とCO₂の基準圧力下における密度。 c_w と c_n は水とCO₂の圧縮率である。

b) 混合体の力のつり合い式

岩石骨格と間隙流体の混合体の力のつり合いを考える。

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

ここに、 σ_{ij} は全応力テンソルである。物体力の影響は無視する。

c) 構成式

全応力は微小ひずみ、水圧、CO₂圧力と次式で関係づけられる³⁾。

$$\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + b\{s_r p_w + (1-s_r)p_n\} \quad (8)$$

ここで、 p_w は水圧、 p_n はCO₂圧力、 ε_{ij} は微小ひずみテンソル、 b はBito定数、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。一般には水圧およびCO₂圧力の係数は水飽和度の関数であるが、ここでは最も単純な形を採用した。

水・CO₂の相対浸透率、毛管圧 $p_c = p_n - p_w$ は水飽和度の関数として与えられる。

3. 解析条件

図-5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。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。はじめに「CO₂圧入解析」を実施する。圧入期間は約100日であり、3万トンモデル内側底部（圧入部）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15年とした。次にCO₂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（潮汐荷重）を加えた解析（潮汐応答解析）を5日間行った。つまり、CO₂圧入解析の結果は潮汐応答解析の初期条件である。この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（図-6）。本解析では圧力変数として水圧を用いて結果を整理した。潮汐荷重による水圧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。特に断らない場合、「水圧変動」は潮汐荷重による水圧変動を指すものとする。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⁴⁾。CO₂の物性は超臨界CO₂を想定している。

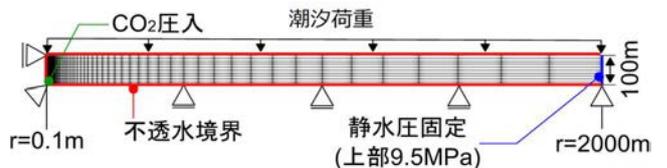


図-5 計算条件(2次元軸対象モデル)

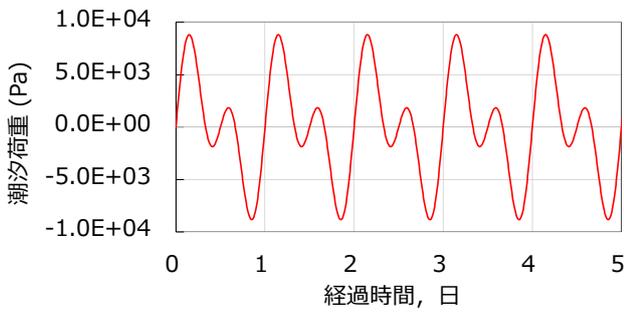


図-6 潮汐荷重

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/-	$1.5 \times 10^{10}, 0.2$
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}	$5.0 \times 10^{-10}, 1.0 \times 10^{-8}$
水・CO ₂ の粘性	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$1.0 \times 10^{-3}, 5.0 \times 10^{-5}$
水・CO ₂ の初期密度	kg m^{-3}	$1.0 \times 10^3, 6.3 \times 10^2$

4. 解析結果

図-7 に CO₂ 圧入解析で得られた、(a)11 日経過時点、(b)100 日経過時点、(c)1 年経過時点、(d)15 年経過時点の CO₂ 飽和率の分布を示す。CO₂ 圧入によって CO₂ プルームが徐々に広がり、その後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-8 に圧入部における水圧変動の時刻歴を示す。それぞれ図-7 の(a), (b), (d)の時刻における潮汐

応答解析の結果である。赤線が各時刻の水圧変動、灰色の線が加えた潮汐荷重、黒線が CO₂ 圧入前（水飽和時）の水圧変動である。11 日と 100 日に着目すると CO₂ プルームの拡大に伴って水圧変動の振幅が減少している。15 年では水圧変動の振幅が 100 日より増加している。また、水飽和時の水圧変動と比べるとやや小さい。

図-9 に圧入部における水圧変動幅の最大値の変化を示す。図-7 の(a)~(d)と対応する時刻に黒丸を記した。CO₂ の圧入に伴い水圧変動幅が減少し、圧入停止後は CO₂ プルームの浮力による上昇に伴って再度上昇した後、CO₂ 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、CO₂ 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 CO₂ 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。

5. 結論と今後の課題

本研究では、CO₂ 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。水圧変動の振幅は、圧入による CO₂ プルームの広がりや浮力による上昇に良く連動して変化した。この結果は、水圧変動振幅の変化より CO₂ プルームの大まかな動きを推定できる可能性を示すものである。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。

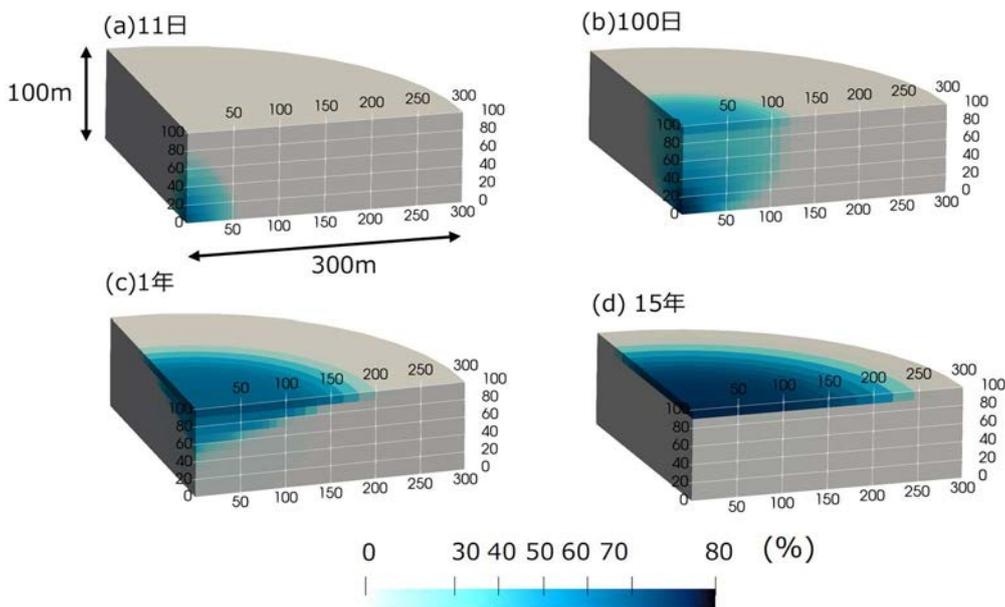


図-7 各時刻における CO₂ 飽和率分布

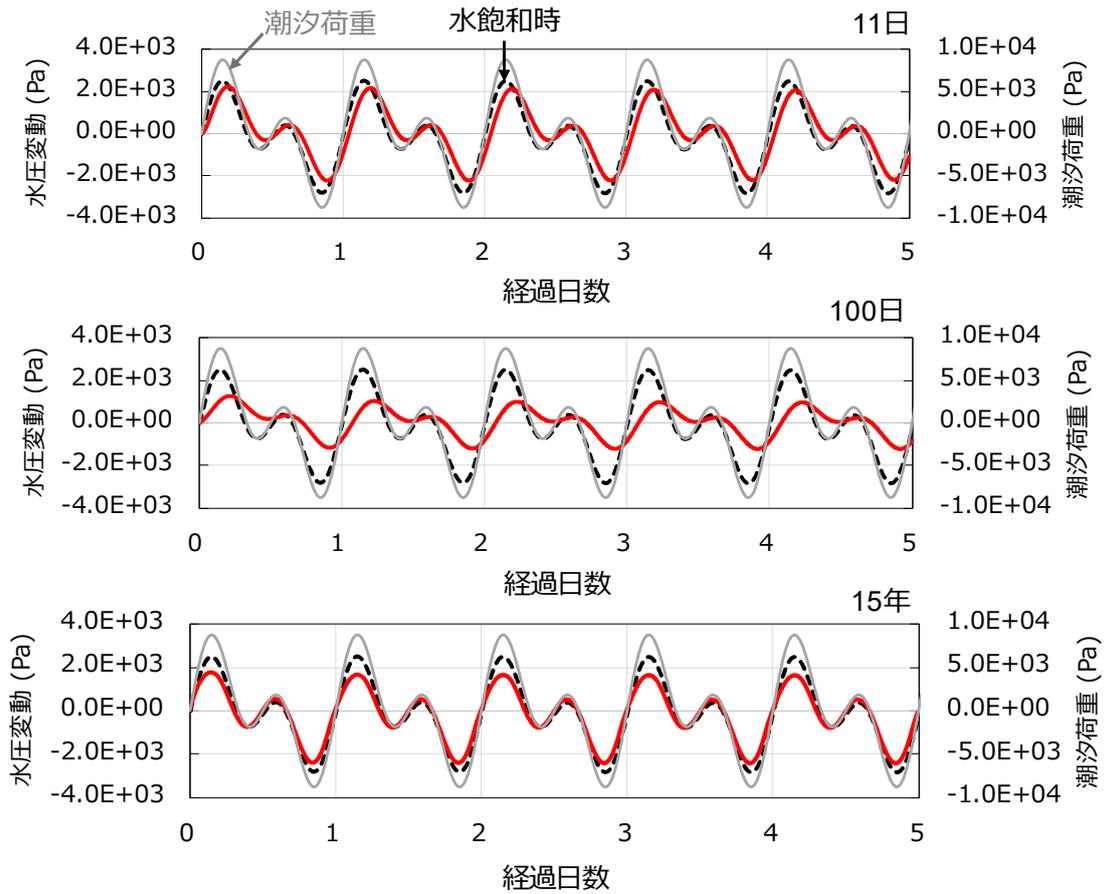


図-8 潮汐による圧力変動の時刻歴

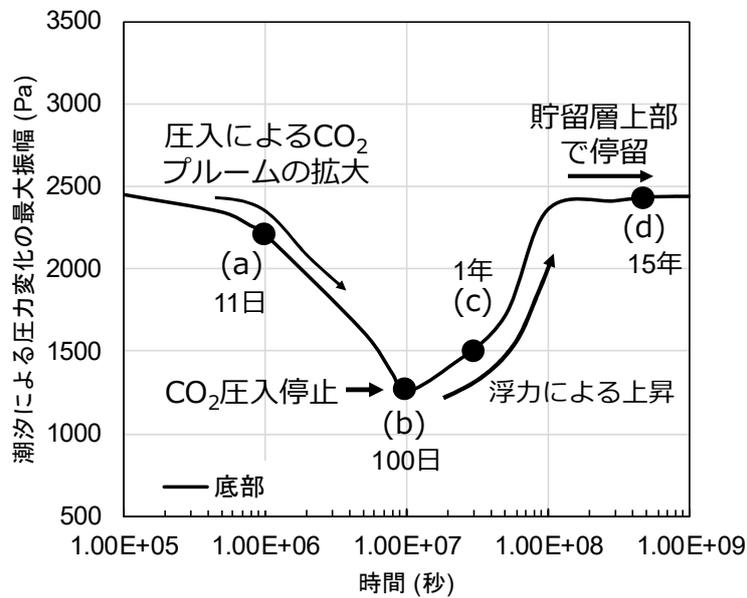


図-9 圧入井における水圧変動幅の変化

参考文献

- 1) Sato, K.: Monitoring the underground migration of sequestered carbon dioxide using Earth tides. *Energy conversion and management*, 47(15-16), pp.2414-2423, 2006.
- 2) Sato, K., and Horne, R. N.: Time-lapse analysis of pressure transients due to ocean tides for estimating CO₂ saturation changes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 78, pp.160-167, 2018.
- 3) Coussy, O.: Revisiting the constitutive equations of unsaturated porous solids using a Lagrangian saturation concept. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(15), pp.1675-1694, 2007.
- 4) Rice, J. R., and Cleary, M. P. Some basic stress diffusion solutions for fluid - saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics*, 14(2), pp.227-241, 1976.

NUMERICAL SIMULATION OF PORE PRESSURE FLUCTUATION INDUCED BY OCEAN TIDAL LOADINGS DURING CARBON DIOXIDE GEOLOGIC STORAGE.

Toshifumi AKAKI, Hajime YAMAMOTO and Kozo SATO

In carbon dioxide capture and storage (CCS), the development of monitoring methods for CO₂ injection become an important issue. Recently, it has been reported that the amplitude of water pressure fluctuations for ocean tides decreases during CO₂ injection due to high compressibility of CO₂. From this change, it is possible to obtain information on the underground behavior of CO₂. In this study, it was considered that the pressure fluctuation was determined by the balance of the mechanical equilibrium of the porous elastic body and the flow of the pore fluid, and an investigation by fluid-geomechanical coupled analysis has been conducted. In the analysis a decrease in pressure fluctuation during CO₂ injection was found.