

二酸化炭素地中貯留における 潮汐起源の微小圧力変動の数値解析

赤木 俊文^{*1}・山本 肇^{*1}

Keywords : CCS, ocean tide, earth tide, CO₂ monitoring, hydro-geomechanical coupled analysis

CCS, 海洋潮汐, 地球潮汐, CO₂ モニタリング, 流体-地盤連成解析

1. はじめに

二酸化炭素地中貯留（CCS）において、圧入された CO₂ のモニタリングは、深部地層における CO₂ の安全かつ長期的な封じ込めのために重要である。地下の CO₂ を可視化する手法として弾性波探査が広く利用されているが、高価で年に 1 回程度の計測頻度が通常である。よって、弾性波探査の低頻度の計測を補う安価な CO₂ モニタリング手法を併用することが望ましい。

地下帯水層の間隙水圧が潮汐により微小変動することは従来からよく知られている²⁾。潮汐には太陽や月の引力により地殻が周期的に微小変形する地球潮汐と、海水面が周期的に変動する海洋潮汐がある。海洋潮汐や地球潮汐により帯水層に加わる周期的な荷重を岩石骨格と間隙流体が分担して請け負うことで帯水層の圧力に微小な変動が生じる（図-1）。帯水層への CO₂ 圧入後にこの潮汐に伴う微小な圧力変動に図-1(b)に示すような変化が生じることが確認された。例えば、日本の北海道における苫小牧 CCS 実証プロジェクトでは、CO₂ 圧入井で測定された間隙圧から抽出した海洋潮汐に起因する微小圧力変動の振幅と位相（時間シフト）に、CO₂ 圧入前後で変化が生じることが確認された³⁾。また、オーストラリアの CO2CRC Otway プロジェクトでは観測井で取得された地球潮汐に起因する微小圧力変動の振幅が、CO₂ 圧入後に減少したことが確認された⁴⁾。

この振幅減少は CO₂ プルーム内（圧入した CO₂ が高飽和率で存在している範囲）で最も顕著であり、CO₂ プルームから離れるにつれて徐々に小さくなる。よって、CO₂ プルームの外側に位置する観測井での微小圧力変動の観測から CO₂ プルームの位置に関する情報を

取得できる可能性がある。観測結果から CO₂ プルームの広がりやを推定するためには、CO₂ 圧入時の振幅減少を再現できる数値解析モデルが必要となる。本研究では、帯水層への CO₂ 圧入時における潮汐に起因する微小圧力変動の数値解析事例を紹介する。

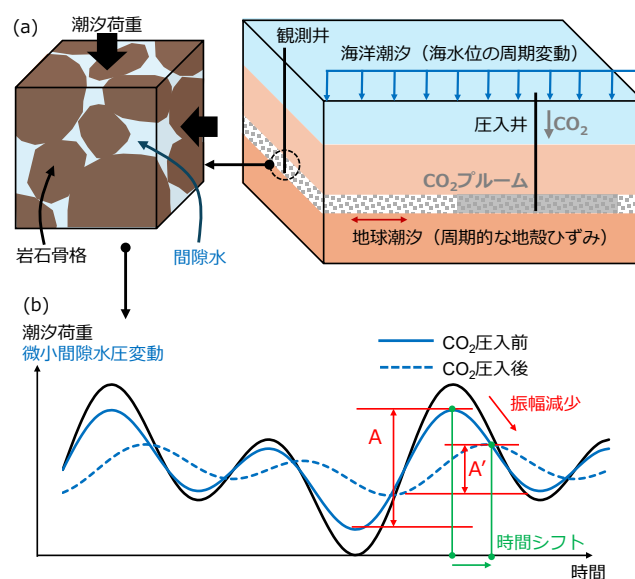


図-1 微小圧力変動の振幅減少と時間シフト

Fig.1 Reduction in amplitude and time-shift of small pressure fluctuation

2. シミュレーション手法

2.1 帯水層の微小圧力変動メカニズム

間隙流体が請け負う潮汐荷重の分担率は、岩石骨格の多孔質弾性パラメータと間隙流体の圧縮率から決定され、粗い近似であるが、凡そ全体の圧縮率（岩石骨格の圧縮率 c_b と間隙流体の圧縮率 c_f の和）に対する岩

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

石骨格の圧縮率 c_b の比 $c_b/(c_b + c_f)$ となる。 CO_2 の圧縮率 c_{CO_2} は岩石骨格や水に比べて非常に大きいので、 CO_2 プルームの内部では $c_b/(c_b + c_f) \approx c_b/(c_b + c_{\text{CO}_2}) \approx 0$ となり、潮汐荷重に対する間隙圧変化が小さくなる。帯水層の間隙圧力は圧力拡散により伝播するため、実際の微小圧力変動は上記の圧縮率に起因する効果と圧力拡散による圧力伝播の複合的な結果として決定される。上記のメカニズムは、理論的には従来より多孔質弾性体と間隙流体の連成モデルとして記述されてきた^{5,6)}。次節では、既往研究の理論的フレームワーク^{7,8)}に従い定式化したモデルについて述べる。

2.2 2 相流-多孔質弾性体連成モデル

多孔質体内の水と CO_2 の質量保存則は次式で与えられる^{4,5)}。

$$\frac{\partial((1-s_n)\phi\rho_w)}{\partial t} + \frac{\partial q_i^w}{\partial x_i}, \frac{\partial(s_n\phi\rho_n)}{\partial t} + \frac{\partial q_i^n}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$q_i^w = -\rho_w \frac{k_r^w k}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial x_i}, q_i^n = -\rho_n \frac{k_r^n k}{\mu_n} \frac{\partial p_n}{\partial x_i} \quad (2)$$

ここに q_i^w と q_i^n はダルシー則に基づく水と CO_2 のフラックス、 ϕ は間隙率、 s_n は CO_2 飽和率、 ρ_w は水の密度、 ρ_n は CO_2 密度、 k は絶対浸透率、 k_r^w は水の相対浸透率、 k_r^n は CO_2 の相対浸透率、 μ_w は水の粘性係数、 μ_n は CO_2 の粘性係数である。 t は時間、 x_i は空間座標である。水と CO_2 の圧縮率および粘性係数は定数とする。

帯水層は等方線形多孔質弾性体であると仮定する。

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$d\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + b\{dp_w + s_n dp_c\} \quad (4)$$

$$d\phi = b\varepsilon_{kk} + \frac{1}{N}(dp_w + s_n dp_c), \frac{1}{N} = \frac{b-\phi}{K_s} \quad (5)$$

ここに σ_{ij} は応力、 ε_{ij} はひずみ、 p_w は間隙水圧、 p_c は毛管圧、 E は排水ヤング率、 ν は排水ポアソン比、 b は Biot 定数、 K_s は岩石粒子の体積弾性率である。温度は一定とし、力のつり合い（式(3)-(5)）を有限要素法で、水と CO_2 の流れ（式(1), (2)）を有限体積法で解く。

3. 解析例 1：海洋潮汐を受ける帯水層

3.1 苫小牧 CCS 実証試験における観測例

苫小牧 CCS 実証試験では、北海道の沖合約 3km、海底下約 1.2km に位置する萌別層と呼ばれる砂岩層に CO_2 が圧入された（図-2）。貯留層は海面の周期的な変動である海洋潮汐の影響を受け、圧入井における間隙圧測定データから潮汐による微小圧力変動が明確に検出された。圧力は圧入井内に設置された圧力温度センサーで計測された。図 3 に CO_2 圧入前後における微小圧力変動の振幅比と時間シフトの変化を示す³⁾。振幅比は微小圧力変動の振幅を潮汐荷重（ここでは海水面変動高さ相当の静水圧）の振幅で割ったものである。 CO_2 が圧入されると振幅比の減少と正の時間シフトが観察された。圧入が停止されると振幅比は増加し、時間シフトはごく小さいながら負の値を示した。

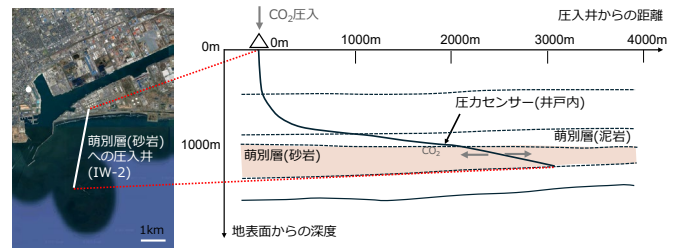


図-2 圧入井の軌道と貯留層深度^{注1)}

Fig.2 Injection well trajectory and depth of reservoir

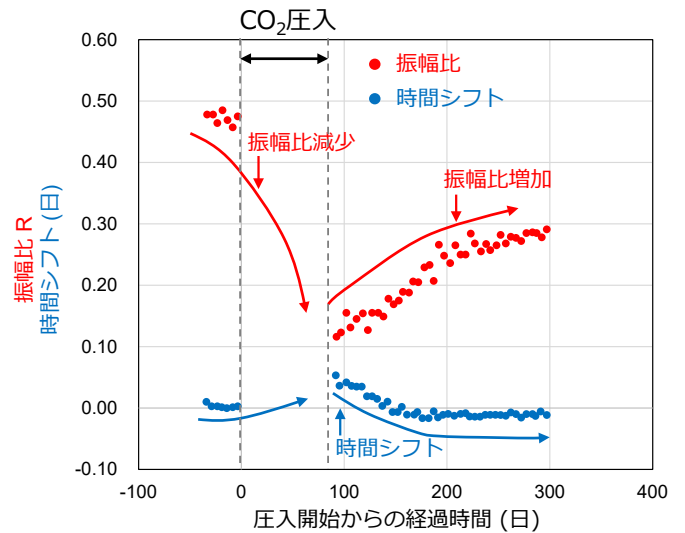


図-3 苫小牧 CCS 実証試験の振幅減少と時間シフト^{注2)}

Fig.3 Reduction in amplitude and time-shift observed in Tomakomai CCS Project

3.2 解析モデル

苫小牧 CCS 実証試験のように貯留層直上から海洋潮汐による変動荷重（潮汐荷重とする）が加わる場合を模擬したモデルを作成し、2.2 節で説明した手法により解析を行った。ただし、潮汐荷重は CO_2 圧入に伴う間

隙圧力の変化に対して極微小であり、地下の CO_2 の動きには影響しないため、ここでの解析は、図-4 に示すようなステップで実施した。すなわち、 CO_2 圧入過程における CO_2 プルームの動きを計算する Step 1 では潮汐荷重を考慮しないこととし、潮汐荷重による微小圧力変動を計算する Step2 では、Step 1 の CO_2 圧入過程の解析からある時点を切り出し、その時点での 10 日間の短期のシミュレーションを行った。

図-5 に解析で使用した有限要素メッシュと境界条件を示す。解析モデルは厚さ 100m の均質な貯留層とした。 CO_2 はモデル中央底部から 10 日間で 25 万トンを押入した。なお、本モデル条件では、圧入した CO_2 は圧入井を中心とした同心円状に広がることから、解析には、モデルの対称性を考慮した 1/4 サイズの扇型モデルを用いた。初期条件として、約 24 MPa の静水圧分布を仮定した。貯留層の温度は 90°C で変化しないこととした。水および CO_2 の圧縮率は、それぞれ $5.9 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ と $3.9 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ である。 CO_2 はこの条件下で超臨界状態にある。Step 1 の CO_2 圧入過程ではモデル中央底部から CO_2 を圧入する。Step 2 ではモデル上面に海洋潮汐を模擬した変動荷重を載荷する。Step 1 の期間は約 30 年、Step 2 の期間は 10 日である。

3.3 解析結果

図-6 に Step 1 における CO_2 飽和度の分布を、11 日、115 日、2.5 年、31 年経過時点について 500m 半径内で表示した。圧入された CO_2 は、モデル中心の底部から徐々に広がり、水よりも密度が小さいためやがて浮力によって貯留層の上部へと上昇する。 CO_2 圧入は 1 年後に停止し、モデル上部へ上昇した CO_2 は貯留層の上部に留まる。Step 2 における CO_2 圧入点における潮汐荷重による微小圧力変動成分は、三次スプライン曲線で表した圧力履歴の主要トレンドを、間隙圧力履歴から差し引くことで取得した。11 日経過時点と 926 日経過時点を対象とした Step2 のシミュレーションで取得した間隙圧力履歴と微小圧力変動を図-7 に示す。微小圧力変動の振幅減少および正負の時間シフトが観察できる。潮汐荷重と微小圧力変動の間の振幅比および時間シフトを定量的に算出するために、日周期の山と谷の値を使用した。潮汐荷重と微小圧力変動の振幅は、山と谷のピークの差によって決定され、時間シフトは山と谷のピークにおける潮汐荷重と微小圧力変動の時間差に基づいて計算した。図-8 に解析で得られた振幅比と時間シフトを示す。実線が山谷の組すべての平均、点線は最大値および最小値である。赤い円は、初期値を示

し、水飽和状態の値に相当する。振幅比は、圧入中に CO_2 が広がるにつれて減少し、圧入が停止した後に CO_2 が浮力によって上昇することで圧入点周りの CO_2 飽和率が低下することで増加する。振幅比の最終値は初期値よりも小さい。微小圧力変動の時間シフトは、 CO_2 圧入中に増加して正の値で推移し、その後減少し、最終的に負の値をとる。負の時間シフトは、物理的に潮汐荷重に先んじて圧力が応答するのではなく、 CO_2 の影響の結果生じる見かけのものである¹⁰⁾。これらの挙動は定性的に観測結果（図-4）と一致する。

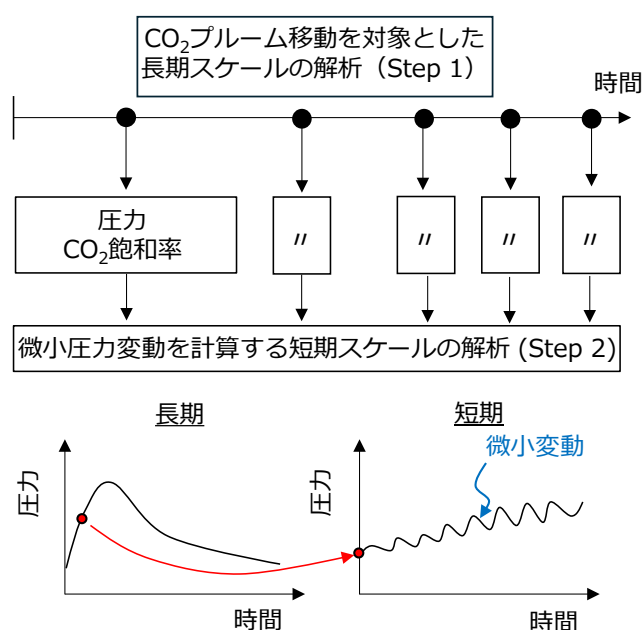


図-4 数値解析のワークフロー
Fig.4 Workflow of numerical simulations

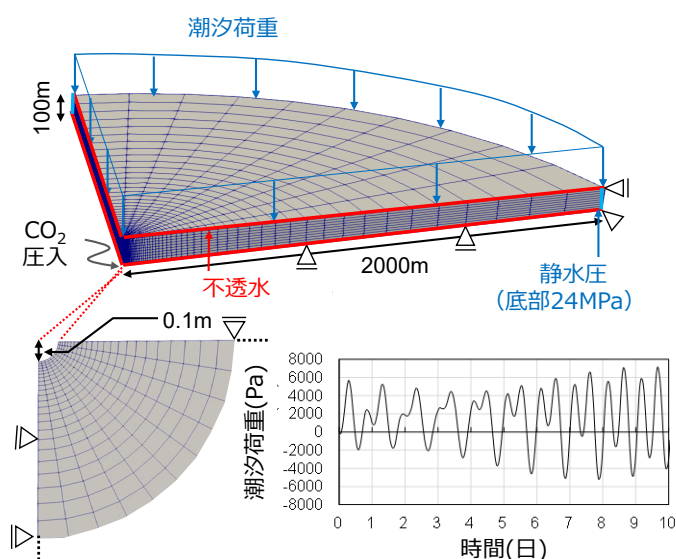


図-5 解析モデル
Fig.5 Numerical model

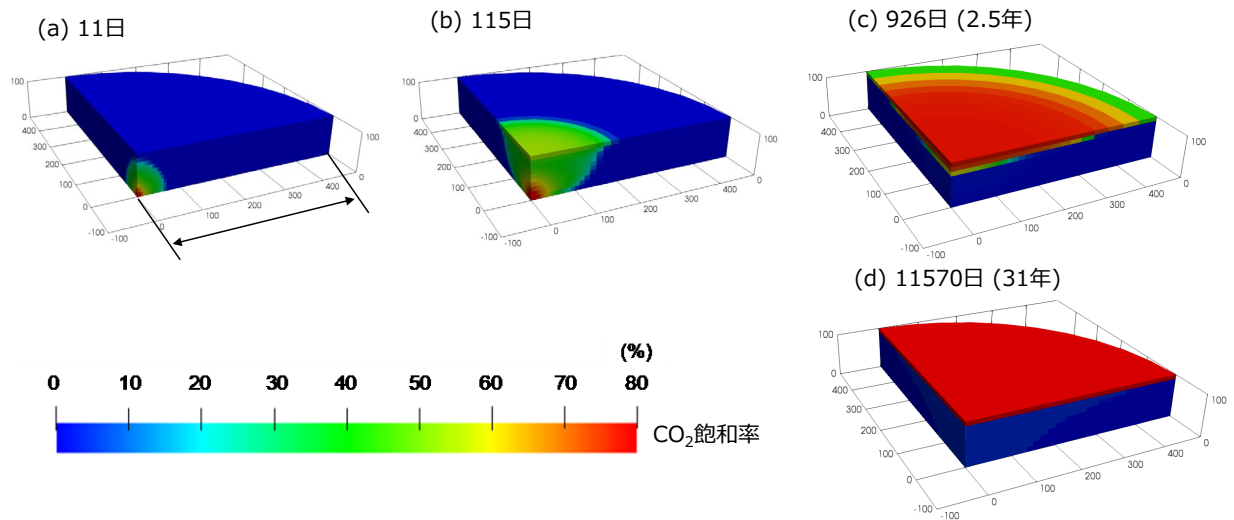


図-6 CO₂ 飽和率分布
Fig.6 Distribution of CO₂ saturation

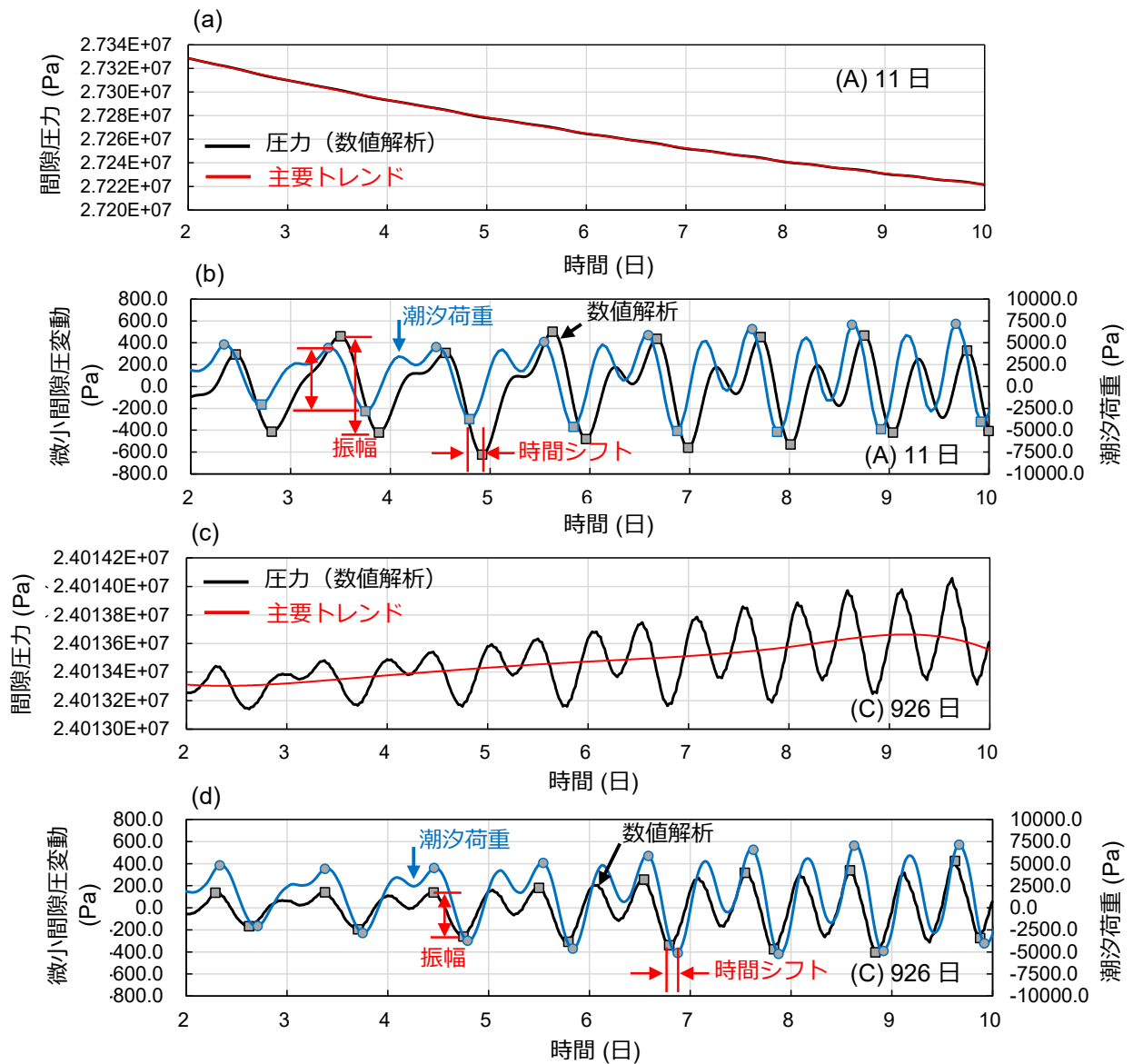


図-7 CO₂ 圧入点における圧力履歴と微小圧力変動
Fig.7 Time profiles for small pressure fluctuations at CO₂ injection point

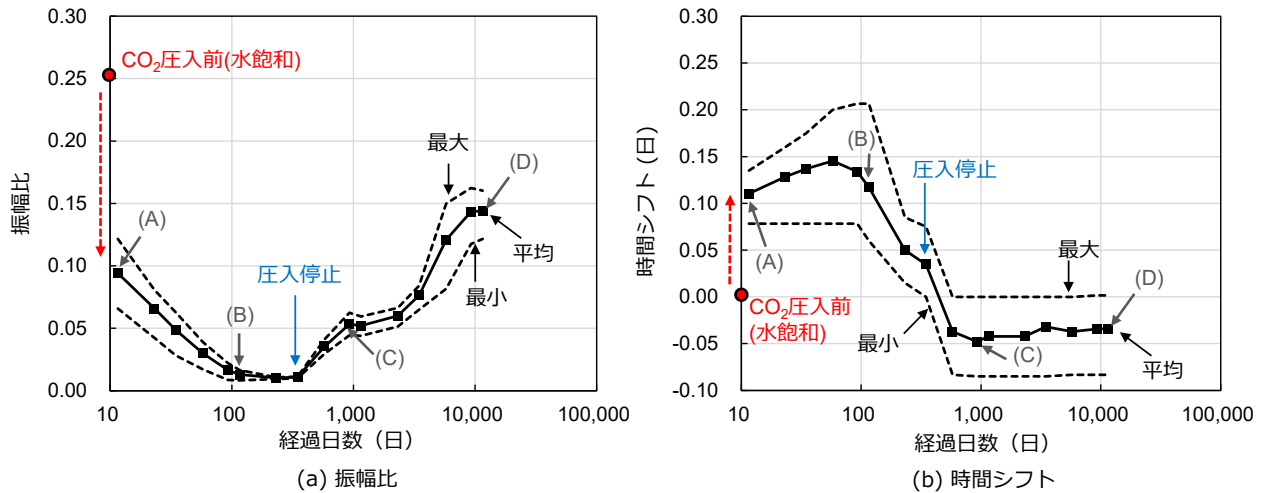


図-8 振幅比および時間シフトの変化
Fig.8 Change in amplitude ratio and time-shift

4. 例 2：地球潮汐を受ける帯水層

4.1 Otway CCS プロジェクトにおける観測例

Otway CCS プロジェクトは、オーストラリアにおける CCS プロジェクトの一つである。図-9 に示す平面図には、本プロジェクトの主要な井戸配置や圧入した CO₂ プルームの分布、ならびに主要な断層の分布を示す。本プロジェクトは 2008 年より開始し、これまで 3 回の CO₂ 圧入を実施した。本研究では 2015 年 12 月 2 日～2016 年 4 月 4 日の CO₂ 圧入（ステージ 2C）に着目した。圧入井（CRC-2）より 125 日間にわたり約 15,000 トンの超臨界 CO₂/CH₄ 混合ガスが圧入された¹⁾。貯留層の深度は約 1500m である。ステージ 2C では、圧入された CO₂ が断層に沿って南東方向に広がるプルームを形成した（図-9）。Jenkins et al. (2022) は、観測井で計測された間隙水圧から地球潮汐に起因する微小変動の 1 日および半日周期成分（潮汐の主要な周期）を得た⁴⁾。彼らの取得した微小圧力変動 $\delta p^{\text{et}}(t)$ は、地球潮汐によ

り生じる体積ひずみを $\varepsilon_v^{\text{et}}$ として次式で表される。

$$\delta p^{\text{et}}(t) = J \varepsilon_v^{\text{et}}(t + t_d) \quad (6)$$

結合係数 J は入力である地球潮汐に対して、応答である微小圧力変動がどの程度大きいかを表す振幅に相当する量である。結合係数は日周期と半日周期成分それぞれ個別に決定される。結合係数はステージ 2C の CO₂ 圧入前における圧入井 CRC-2 の値と、CO₂ 圧入後における観測井 5, 6, 7 の値が報告されている⁴⁾。CO₂ 圧入による結合係数の変化を見るために、CO₂ 圧入前における圧入井 CRC-2 の値を J_{wsat} として、CO₂ 圧入前後の結合係数の比 J/J_{wsat} を整理した結果を図-10 に示す。ステージ 2C で形成された CO₂ プルームの近くに位置する観測井 CRC-6, CRC-7 では結合係数が減少している。一方、CO₂ プルームから距離のある CRC-5 では結合係数の減少が見られない。

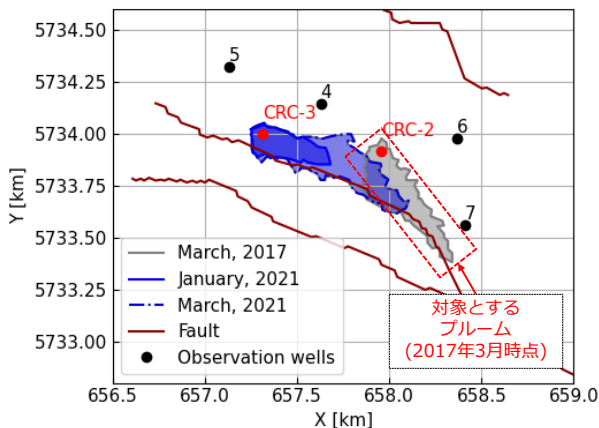


図-9 Stage 2C で形成された CO₂ プルーム^{注 3)}
Fig.9 CO₂ plume formed during Stage 2C

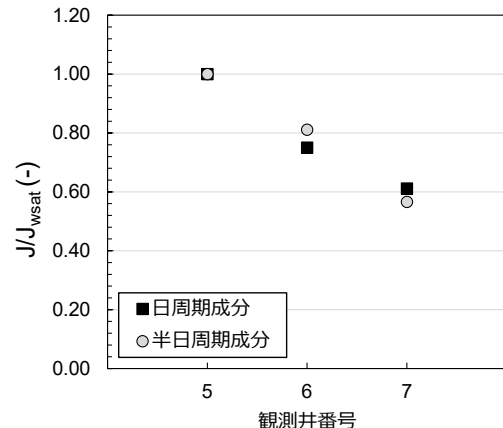


図-10 Stage 2C における結合係数の減少^{注 4)}
Fig.10 Reduction in coupling coefficients during Stage 2C

4.2 解析条件

数値解析ではステージ 2C の CO₂ 圧入中に形成された CO₂ プルームの影響を対象とした。数値解析における有限要素メッシュ、境界条件と CO₂ プルーム形状を図-11 に示す。検討対象エリアは 4km×4km である。CO₂ プルームの形状は 2017 年 3 月の弾性波探査データに基づいて決定した。水理特性および弾性特性については既往文⁴⁾に基づき、間隙率 0.28, 貯留層の浸透率 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, 岩石骨格の排水体積弾性係数 9.0GPa, 排水せん断剛性 7.0GPa, 塩水と水の体積弾性係数 2.3GPa および 0.025GPa, Biot 定数 0.9, 塩水および CO₂ の粘性係数を $450.0 \times 10^{-6} \text{ Pa sec}$ および $5.0 \times 10^{-6} \text{ Pa sec}$ とした。弾性波

探査によれば, CO₂ プルームは西側の断層に沿って移動している。この観測結果は, 断層の浸透率が貯留層の浸透率よりも著しく低いことを示唆している。断層の浸透率として $1.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ を使用した。貯留層の厚さは 12m である。CO₂ 飽和率の分布は報告されていないが, 単純化のため一様とし, CO₂ 質量が圧入質量 15,000 トンに一致するように 8.5% とした。側方の境界は不透水であり, 地球潮汐を模擬した周期変位を受ける。境界変位の振幅 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ に対してモデルの幅が 4000 m であるため, 対応する体積ひずみの振幅は 5.0×10^{-8} である。

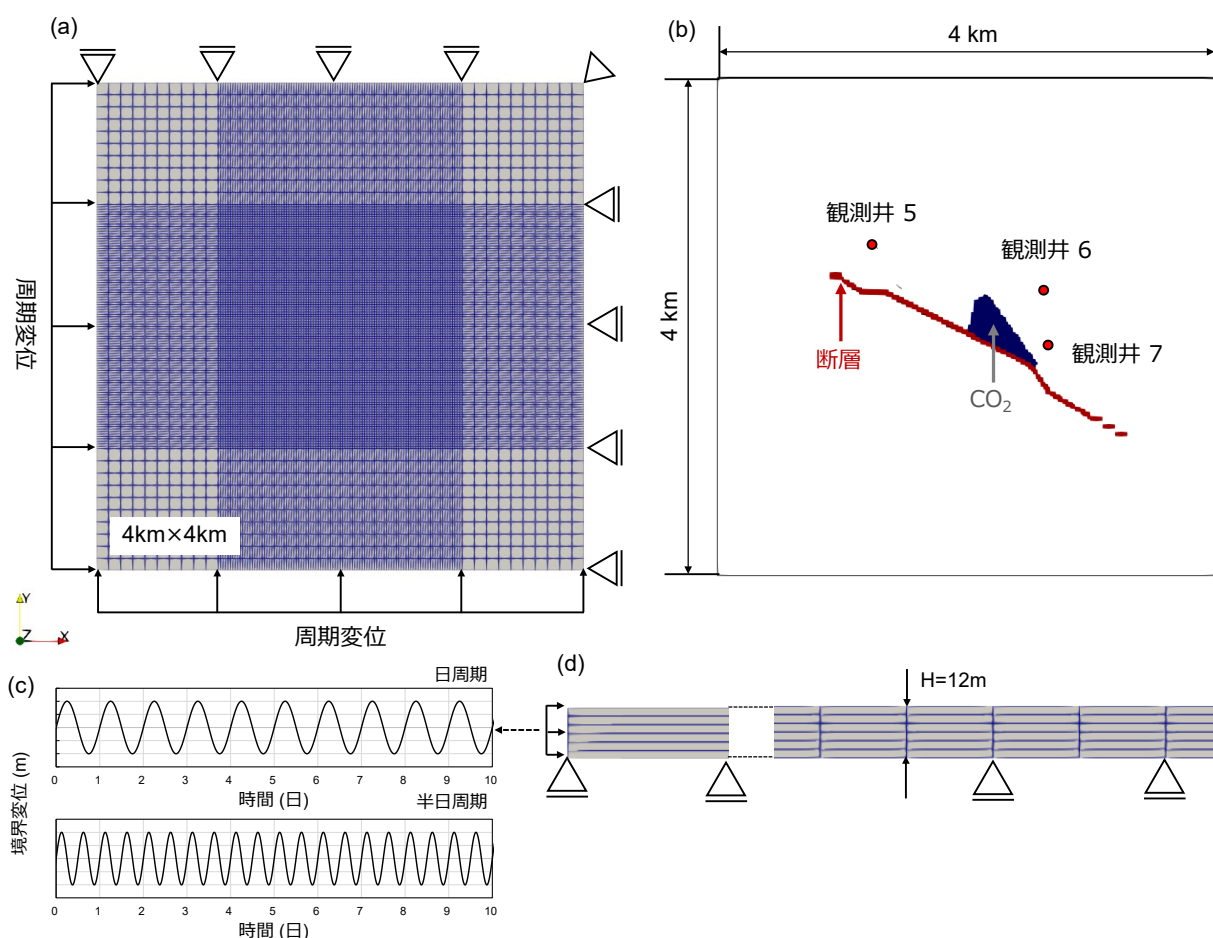


図-11 解析メッシュ, CO₂ 飽和率および境界条件

Fig.11 Numerical mesh, distribution for CO₂ saturation and boundary conditions

4.3 解析結果

数値解析上の微小圧力変動は, 数値解析で得られた間隙圧履歴より Levitan and Phan (2003) の方法に基づき取得した¹²⁾。間隙水圧の主要傾向が三次スプライン曲線で表せると仮定し, 主要傾向成分を差し引いた残差を微小圧力変動成分とする。さらに微小圧力変動成分を正弦波で近似することで結合係数 J を得る。

$$p(t) = p_{\text{cub}}(t) + \delta p(t) \quad (7)$$

$$\delta p(t) \approx J A_T \sin 2\pi \left(\frac{t + t_d}{T} \right) \quad (8)$$

ここで, $p(t)$ はシミュレーションされた間隙水圧, $p_{\text{cub}}(t)$ は三次スプライン曲線で表された主要傾向, T は境界変位の周期, A_T は地球潮汐による体積ひずみ振

幅、 t_d は時間シフト、 J は結合係数である。圧力変動を得るためのワークフローを図-12 に示す。

観測井 5, 6, 7 の間隙圧履歴と抽出された微小圧力変動を図-13 に示す。青線は間隙圧履歴および抽出された微小圧力変動、赤線は三次スプライン曲線で仮

定した間隙水圧の主要傾向および正弦波で近似した微小圧力変動、緑線は境界変位である。数値解析と観測結果から求めた結合係数比 J/J_{wsat} の比較を図-14 に示す。数値解析結果は観測結果とよく一致した。

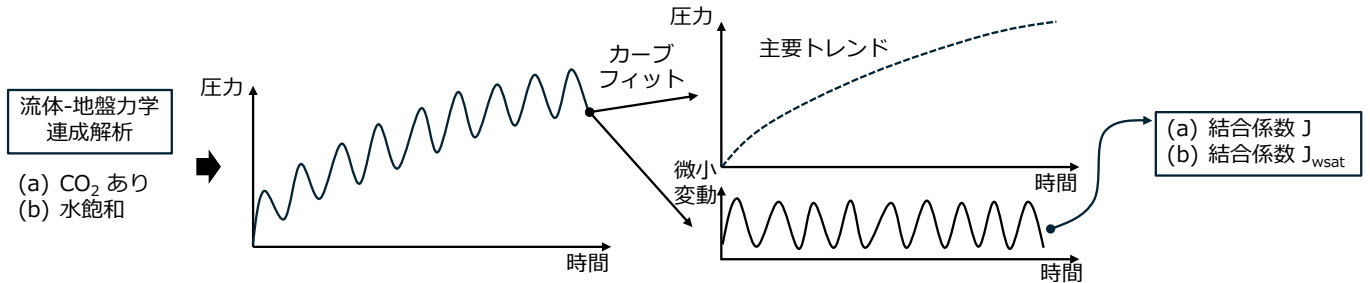


図-12 微小圧力変動の取得手順

Fig.12 Procedure for obtaining small pressure fluctuations

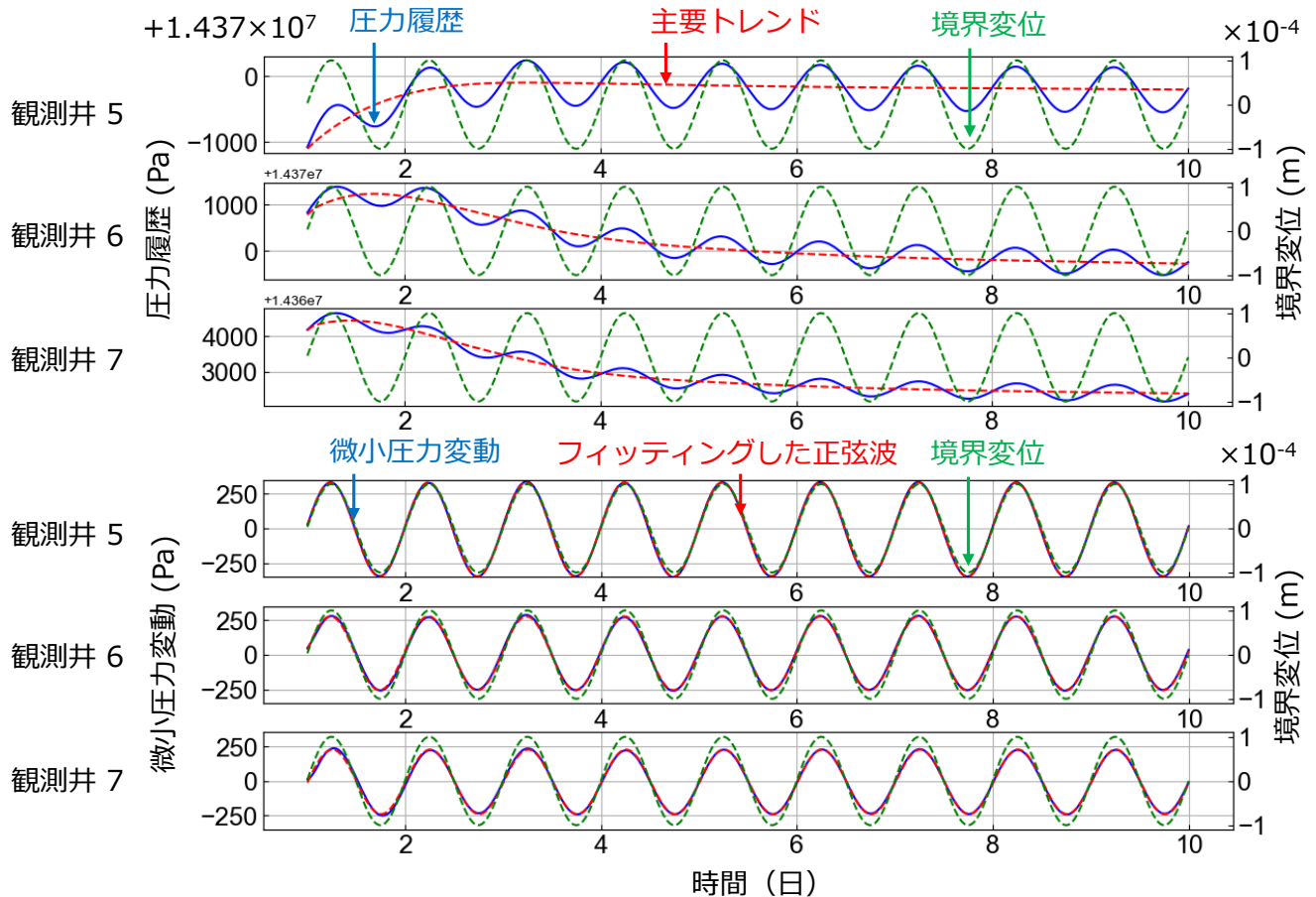


図-13 観測井における圧力履歴と微小圧力変動

Fig.13 Time profiles of pressure and small pressure fluctuation at observation wells

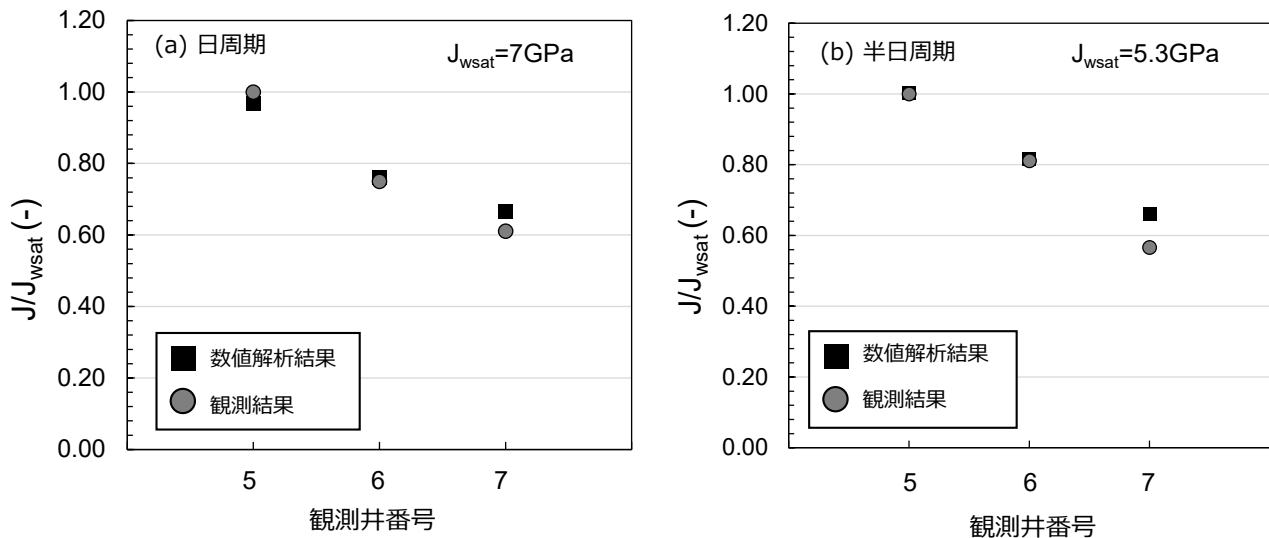


図-14 観測井における結合係数比の計測値との比較

Fig.14 Comparison of coupling coefficients at observation wells with measured data

5. まとめ

本研究では、海洋潮汐および地球潮汐に起因する微小圧力変動の流体地盤力学連成解析法を用いた数値シミュレーション事例を示した。海洋潮汐の影響を考慮した数値解析例では、日本の苫小牧 CCS プロジェクトで観測された圧力変動の振幅と時間シフトの類似した挙動を再現できた。Otway CCS サイトを対象とした地球潮汐の影響に関する解析例では、CO₂ プルームの影響による微小圧力変動振幅の減少をよく再現できた。これにより、潮汐による微小圧力変動へのこれらの数値シミュレーションの適用可能性が示された。この結果は微小圧力変動を利用した CO₂ プルームの位置推定に向けて有益な結果である。

注

- 1) 文献 9)より作成。
- 2) 文献 3)より作成。
- 3) 文献 4)より作成。
- 4) 文献 4)より作成。

参考文献

- 1) Pevzner, R., Isaenkov, R., Yavuz, S., Yurikov, A., Tertyshnikov, K., Shashkin, P., et al. : Seismic monitoring of a small CO₂ injection using a multi-well DAS array: Operations and initial results of Stage 3 of the CO₂CRC Otway project. International Journal of Greenhouse Gas Control, 110, 103437, 2021.
- 2) McMillan, TC., Rau, GC., Timms, WA., Andersen MS. : Utilizing the impact of Earth and atmospheric tides on groundwater systems: A review reveals the future

- potential. Reviews of Geophysics, 57(2), pp.281-315, 2019.
- 3) Sato, K., Horne, RN. : 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.
- 4) Jenkins, C., Ennis-King, J., Green, C., Jackson, S., Gunning, J., Wilkins, A. : Monitoring with earth tides at the CO₂CRC Otway Project. In Proceedings of the 16th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-16), pp.23-24, 2022.
- 5) Van der Kamp, G., Gale, JE. : (1983). Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. Water Resources Research, 19(2), pp.538-544, 1983.
- 6) Gao, X. : Application of Earth Tide Analysis in Subsurface Monitoring. Stanford University, 2021.
- 7) Rice, JR., Cleary, MP. : Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. Reviews of Geophysics, 14(2), pp.227-241, 1976.
- 8) 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.
- 9) Tanaka, Y., Sawada, Y., Tanase, D., Tanaka, J., Shiomi, S., Kasukawa, T. : Tomakomai CCS demonstration project of Japan, CO₂ injection in process, Energy Procedia, 114, pp.5836-5846, 2017.
- 10) 赤木俊文, 山本肇, 佐藤光三 : CO₂ の地中圧入時における海洋潮汐による地層流体の圧力応答の数値解析. 土木学会論文集 C (地圏工学), 76(3), pp.266-276, 2020.
- 11) Watson, M., Pevzner, R., Dance, T., Gurevich, B., Ennis-King, J., Glubokovskikh, S., Urosevic, M., Tertyshnikov, K., La Force, T., Tenthorey, E., Bagheri, M. : The Otway Stage 2C Project—End to end CO₂ storage in a saline formation, comprising characterisation, injection and monitoring. In 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne, pp.21-26, 2018.
- 12) Levitan, MM., Phan, V. : Identification of tidal signal in well test pressure data, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-84376, 2003.