

第Ⅲ部門

ガスハイドレートを利用した CO₂地中貯留の海底地盤モデル解析

京都大学大学院 学生会員 ○上平 健登

京都大学大学院 正会員 木元小百合

1. はじめに

近年、CO₂ ハイドレートを利用した二酸化炭素の地中貯留技術が注目されている。従来の地中貯留とは異なりハイドレート自体がキャップロックの役割を果たすため遮蔽層が不要で、温度・圧力条件を満たせば貯留できる可能性があり候補地の拡大が期待される。CO₂ ハイドレートを利用した研究事例は少なく、地中貯留時の地盤変形挙動についてはよく分かっていない。そこで本研究では化学-熱-力学連成解析法^{1),2)}を用いて海底地盤モデルに対し、CO₂ 貯留のシミュレーションを行った。

2. 解析条件

図1 に有限要素メッシュを示す。Akaki (2017)²⁾を参考に水深 1000 m 下の海底地盤を模擬し、深さ方向に 300 m 水平方向に半径 200 m の範囲を解析領域とし、圧入井を中心を軸とした円筒座標系による2次元軸対称モデルを採用した。

海底面から深さ 200m の位置に厚さ 2m のハイドレート層（シール層）が形成されている状態を想定し、その直下 10m 地点で液体 CO₂ を圧入する。なお本解析はCO₂ハイドレート貯留層の力学的安定性の評価を目的として行うため、ハイドレートの生成は考慮せず二相流体（液体 CO₂、水）と固相の浸透-変形連成解析を行った。

海底地盤解析は深度 210 m の左側面を約 10 時間かけて CO₂ 液圧を初期値から 3MPa 加圧させることで CO₂ 圧入を模擬した。初期の CO₂ ハイドレート飽和率は 90% とし、海底面の初期温度は 277 K とし、地温勾配を 0.03 K/m と仮定し、各要素の初期温度を求めた。また海底面の初期水圧を 9.80 MPa とし、静水圧分布を仮定した。

変形に関する境界条件は、解析領域の下端右端を鉛直および水平方向固定端、左端を水平方向固定端とし、熱移動と流体移動に関する境界条件は上下右端を定温・定圧境界とした。貯留層モデルに関しては南海トラフの海底地盤を参考にし、砂泥互層の地

盤を 6 層（L1-L6）に分割した。L1, L2 層は過圧密粘土層、L3 層はタービダイト層、L4, L6 層は泥層とし、L3 層内に厚さ 2m の CO₂ ハイドレート層である L5 層が存在するとした。各層には弾粘塑性構成式を用い、解析パラメータは Akaki (2017)²⁾ を参考にし決定した。ハイドレート層（L5）の透水係数 k_r^w 、 k_r^L は L3 と同じ値とした。ハイドレート飽和率依存性を考慮することにより、初期の透水係数は L3 層より小さくなっている。解析は 10000 時間後（約 417 日後）まで行った。透水と水分特性に関するパラメータを表1に示す。

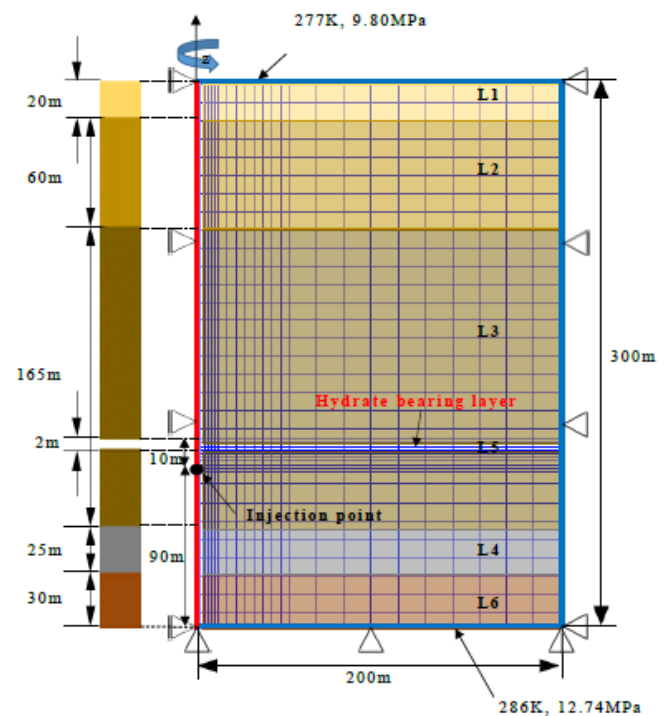


図1 有限要素メッシュ

3. 解析結果

CO₂ 液圧について、図2 より 10 時間後は圧入位置付近、10000 時間後にはハイドレート層の下でも最大 3000kPa の増加が確認された。

体積ひずみについて、図3 より 10 時間後は圧入位置にあたる高さでは膨張ひずみ、そのまわりで圧縮ひずみが確認され、10000 時間後ではハイドレー

ト層の上では圧縮ひずみが確認される。CO₂の貯留によってハイドレート層上部は圧縮されていることが確認された。

図4にモデル全体のCO₂圧入量の時刻歴を示す。CO₂の圧入が10000時間後でも続いている。図2よりCO₂がより上部へ漏れだすことなく、ハイドレート層の下部に圧入地点から半径方向に向かってCO₂が貯留されていることが分かる。

平均骨格応力について、図5より10000時間後にはハイドレート層のすぐ下（ハイドレート層直下）で1000kPaの減少が確認され、圧入位置付近でも700kPaの減少が確認された。一方でハイドレート層の直上では100kPaの増加が確認された。

4. 結論

ハイドレート層の下に貯留された液体CO₂の液圧によって、ハイドレート層直下で骨格応力が低下するが、今回の条件では大きな変形は生じずハイドレート層下部の地盤中にCO₂が安定して貯留された。

本研究ではCO₂貯留後の挙動を目的としてハイドレートがすでに生成されている条件で解析を行ったが、今後ハイドレート生成過程も考慮した解析に取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 木元小百合：ガスハイドレートを利用したCO₂地中貯留に関する地層変形解析，令和2年度土木学会全国大会第75回次学術講演会，2020。
- 2) Akaki, T., Numerical analysis of earthquakes and internal erosion during gas production from hydrate-bearing sediments, Doctoral Thesis of Kyoto University, 2017.

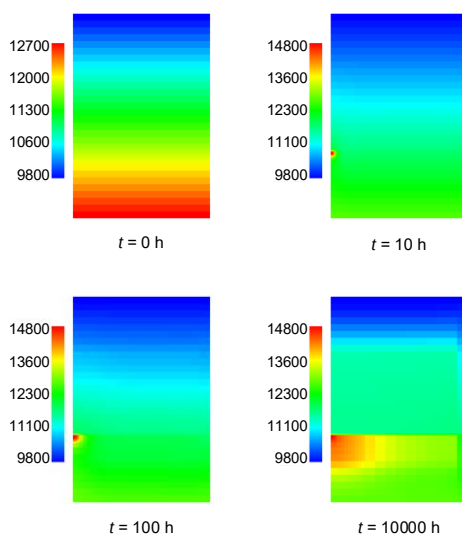


図2 CO₂液圧 (kPa)

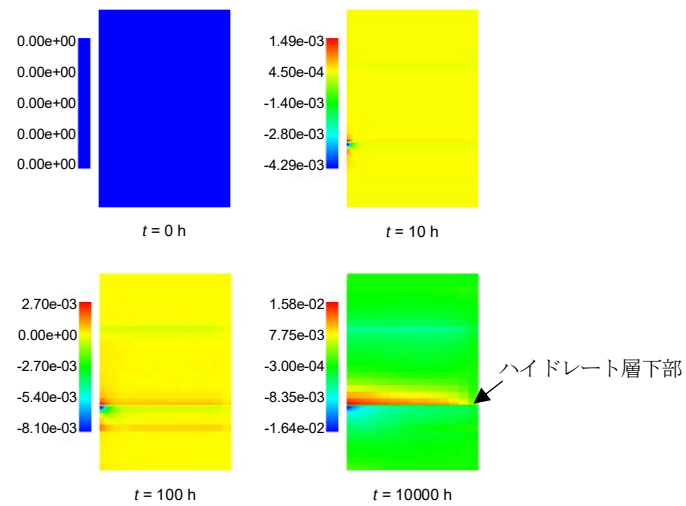


図3 体積ひずみ（圧縮を正とする）

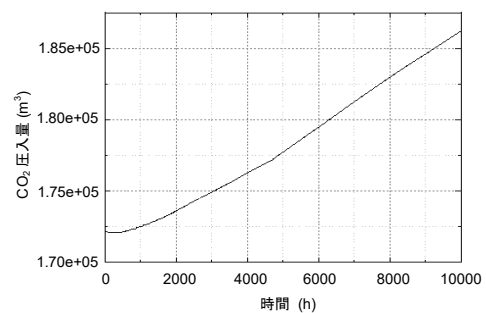


図4 CO₂ 圧入量の時間的変化

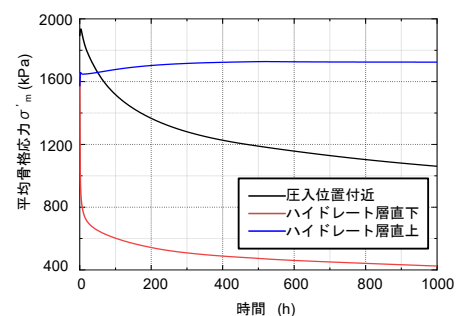


図5 平均有効応力の時間的変化

表1 透水と水分特性に関するパラメータ

	L1	L2
Permeability coefficients for water k_w^0 (m/s)	2.0×10^{-9}	7.5×10^{-10}
Permeability coefficients for CO ₂ k_g^0 (m/s)	2.0×10^{-8}	7.5×10^{-9}
Saturation dependency of water permeability a	3.0	3.0
Saturation dependency of gas permeability b	2.3	2.3
van Genuchten parameter α (1/kPa)	0.40	0.40
van Genuchten parameter n'	3.0	3.0
	L3	L4
Permeability coefficients for water k_w^0 (m/s)	2.0×10^{-8}	3.5×10^{-10}
Permeability coefficients for CO ₂ k_g^0 (m/s)	2.0×10^{-7}	3.5×10^{-9}
Saturation dependency of water permeability a	3.0	3.0
Saturation dependency of gas permeability b	0.5	2.3
van Genuchten parameter α (1/kPa)	0.40	0.40
van Genuchten parameter n'	3.0	3.0
	L5	L6
Permeability coefficients for water k_w^0 (m/s)	2.0×10^{-8}	3.5×10^{-10}
Permeability coefficients for CO ₂ k_g^0 (m/s)	2.0×10^{-7}	3.5×10^{-9}
Saturation dependency of water permeability a	3.0	3.0
Saturation dependency of gas permeability b	2.3	2.3
van Genuchten parameter α (1/kPa)	0.40	0.40
van Genuchten parameter n'	3.0	3.0