ガスハイドレートを利用した CO2 地中貯留に関する化学-熱-力学連成解析

1. はじめに

二酸化炭素地中貯留 (CCS) の方法の一つとして, CO₂ をハイドレート化して海底地盤中に貯留する方法が提案 されている.この方法では,ハイドレート安定領域で CO₂ と海水を反応させ,固体のハイドレートとして化学的に 固定するため,超臨界状態や気体の場合より漏洩しにく いことが考えられる.また,遮へい層は必要ではないた め,実用化されれば貯留適地の拡大が期待できる.

本研究では、化学-熱-力学連成数値解析法により、ガス ハイドレートを利用したCO2地中貯留時の地盤変形につ いて、1次元モデルによって検討を行った.

2. 解析の概要

本検討では、Kimoto et al.¹, Akaki et al.²による化学-熱-力学連成解析法を、CO₂ハイドレート生成挙動を取り入 れて拡張した解析手法を用いた.地盤を固相(土骨格、 ハイドレート)と二つの液相(水、CO₂)の多相混合体と して取り扱い、土の変形、水および液体CO₂の流れ、ハ イドレート生成による相変化、熱伝導を考慮している. 支配方程式は、場の方程式として各相の運動量保存則、 質量保存則、エネルギー保存則、また構成関係式として 土骨格の弾粘塑性構成式、Capillary pressure-saturation 関 係式、ハイドレート生成速度式、生成熱式を用いている. 空間離散化は有限要素法、時間離散化は Newmark-β法 を用いる.また有限変形理論に基づき updated-Lagrangian による定式化を行っている.

 CO_2 をハイドレートとして海底地盤中に貯留する場合, ハイドレート平衡曲線より上側(低温・高圧)の安定領 域で CO_2 と海水を反応させハイドレートとして固定する. このとき,液体状態の CO_2 を未固結地盤に圧入すること になるため,圧入時の挙動は砂地盤に対する CO_2 (liquid)/water capillary pressure 曲線によって決まる.本研 究では,Plug and Bruining³による実験データを参考にし, van Genechten 式を用いて図1のような capillary pressure 曲線を用いた.また透水係数の飽和度依存性を考慮して いる. CO_2 ハイドレートの生成速度については、実際の 生成状況に近い条件での実験データは少ない.本研究で 京都大学大学院 正会員 木元 小百合

は、水は十分に供給されるとし、生成速度は CO₂の物質 量に依存すると仮定して以下の生成速度式を仮定した.

$$\frac{dN_{\rm CO_2}}{dt} = K^* N_{\rm CO_2} (P^F - P^{eq}) \tag{1}$$

K*は生成速度係数 (1/(s·kPa)), P^Fは平均間隙圧力 (kPa), P^{eq}は平衡状態の圧力 (kPa)である. 生成速度係数 K*=0.029 (1/(kPa·s))とした.

3. 解析モデル

....

.....

Tohidi et al.⁴によるガラスビーズ(粒径約 0.1 mm)供試体を用いた CO₂ 圧入試験を再現解析の対象とした.図2(a)に解析モデルと境界条件,図2(b)に初期温度分布を示す.解析は軸対称条件で行い,要素数は4×50=200 とした.変位境界条件については底面固定,側面は水平方向固定,鉛直方向自由とした.上面と下面で水圧固定

(6.3MPa),側面は非排水条件とした. CO₂液圧は底面で 0.3kPa/h で初期値(6.3MPa)から10時間かけて3kPa上 昇させ、底面からの圧入を再現した.温度境界は上面と 下面で固定、側面は断熱境界とした.初期温度について は図2(b)に示すように底面で7℃、上面で11℃とし供試 体内部は線形分布を仮定した.なお6.3MPaにおける平 衡温度は9.9℃であり、これより上部がハイドレート安定 領域となる.土骨格の弾粘塑性構成式のパラメータは南 海トラフ海底の表層地盤のパラメータ(Akaki et al.²⁾)を 用いた.解析は1000時間後まで行った.

表1 初期条件

Water pressure (kPa) Effective (skeleton) stress (kPa) Water saturation s _r		6300.0
		2000.0
		0.996
	30	
	25 -	van Genuchten
(kPa)	20	<i>n'=</i> 3.0
uctino P_{o}	15	
S	10	
	0	
	0.0 0.2 0.4 Effective wat	0.6 0.8 1.0 er saturation s_{re}

図1 CO₂ (liquid)/water capillary pressure 曲線

キーワード 二酸化炭素,ハイドレート,地中貯留,数値解析 連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C クラスターC1 棟 581



4. 解析結果

図3より310時間後にモデル下部から135 mmの位置 (安定領域の下端)でハイドレート生成が開始し,1000 時間後にハイドレート飽和率93%まで生成している.ハ イドレート生成された領域とその下部で透水係数は大き く低下するため、生成領域より上部にはCO2が侵入して いない(図4).水圧はハイドレート生成領域の下部で増 加(図5),CO2液圧はハイドレートが生成した領域より 下側で3kPa上昇しており(図6),生成領域の前後で不 連続な分布となっている.体積ひずみはハイドレート生 成領域の下部で膨張ひずみが生じているが,最大で 7.5×10⁵%程度と小さい(図7).

5. 結論

ハイドレート生成時の地盤変形は、相変化による材料 の体積変化と土骨格間にはたらく有効応力の変化によっ て決まると考えられる.今回の解析では、CO2圧入に伴う 間隙圧上昇によって有効応力が低下することにより、体 積膨張が生じた.また、ハイドレート生成により、生成 領域近傍で透水係数が低下することにより生成領域を境 に圧力分布などが不連続となり、圧入側(モデル下部) で CO2液圧が上昇しやすくなった.





参考文献

- Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T. and Fujiwaki, M., A chemo-thermomechanically coupled numerical simulation of the subsurface ground deformations due to methane hydrate dissociation, *Computers and Geotechnics*, Vol.34, pp.216-218, 2007.
- Akaki, T., Kimoto, S. and Oka, F.: Chemo-thermo-mechanically coupled sesmic analysis of methane hydrate-bearing sediments during a predicted Nankai Trough Earthquake, *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.40, pp. 2207-2237, 2016.
- Plug and Bruining, Capillary pressure for the sand–CO₂–water system under various pressure conditions. Application to CO₂ sequestration, *Advances in Water Resources*, Vol.30, pp.2339–2353, 2007.
- Tohidi, B., Yang, J., Salehabadi, M., Anderson, R., Chapoy, A., CO₂ Hydrates Could Provide Secondary Safety Factor in Subsurface Sequestration of CO₂, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.44, pp.1509–1514, 2010.