

CO₂ 地下貯留時の地表変位測定によるモニタリング可能性の検討

(株)ハザマ 正会員 ○山下 亮, 正会員 斎藤 栄一

1. 背景と目的

二酸化炭素の排出による地球温暖化を抑制する方策の1つとして、CO₂を地下深部に注入して長期間閉じ込めておく CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)が有効であると考えられており、これまでに実証実験の実施や候補地の検討がなされている。CCS の本格実施に際しての課題の1つとして、CO₂が予想通りに注入されているか、また CO₂が地表面・海底面に漏洩しないか、を適切にモニタリング(監視)することがあげられる。国内での CCS の実証試験として、長岡市において CO₂の注入実験が実施されている。その際、CO₂が地中にどのように広がっているかについては孔間弾性波トモグラフィにより調査され、注入前後における弾性波速度分布の変化から CO₂の注入範囲が推定されている¹⁾。また、Onuma らは、アルジェリア In Salah プロジェクトにおける CO₂注入時の地表面の隆起速度を合成開口レーダーのデータ解析から求めている。その結果、CO₂注入井戸付近では 7mm/year 以上の速度の地盤の隆起が生じていることが確認された²⁾。これらの既往の検討を踏まえ、本研究では CO₂注入に伴う地層の変形に着目し、数値解析により地表面の変形の観測から注入の監視がどの程度可能かについて検討を行った。

2. 解析方法の検討

本研究では、CO₂の注入予測解析手法を用いて地表面の変形状況から注入状況の推定が可能かどうか、特に、帯水層からの漏洩が発生した場合の検知が可能かどうかに着目した。CO₂の予測手法としては TOUGH2 コードの ECO2N モジュールを用いた³⁾。TOUGH2 では、水と空気と CO₂の混合流体の2相状態(液相と気相)を扱うことができ、CO₂分布を予測することが可能である。しかし、TOUGH2 自体は地盤の変形を扱うことができないため、別の力学解析プログラムを用いる必要がある。Rutqvist らは FLAC と TOUGH2 を組み合わせにより注入時のキャップロックの健全性の評価を試みている⁴⁾。本研究では、簡便な方法として、TOUGH2 の解析結果を荷重条件に変換して、2次元の FEM 力学解析コードに入力し、弾性解析により変形を予測した。基本的な考え方としては、有効応力 σ_{ij} の釣り合い式 $\sigma_{ij,j} + p_{,j} + f_i = 0$ を考え、左辺第2項の圧力勾配を TOUGH2 の解析結果から評価して、荷重条件として力学コードに入力した。なお、 p は間隙水圧、 f_i は重力項である。なお、TOUGH2 は差分法によるコードであり圧力値は要素中心で出力されるため、これを補間により FEM メッシュの節点値に置き換えて圧力勾配(荷重項)を算定した。

3. 解析による検討

検討に用いたモデルは、CO₂の注入対象となる層が深度 1000m にあり、断層等の漏洩経路の可能性のある構造を注入点から 200m 程度離れた位置に想定した(図-1 参照)。解析に用いた物性を表-1 に示す。流動解析で用いられる比貯留係数については、ヤング率とポアソン比から換算して設定した。また、不飽和特性については van Genuchten の関数式を用いて設定した。解析ケースを表-2 に示す。CO₂は一定の速度(=0.1kg/sec)で図-1 に示す地点から注入される条件としている。Case1 と Case3 の初期状態からの圧力の変化、CO₂の液相中の質量割合の分布を図-2～図-5 に示す。断層の有無で高圧領域の広がり異なるが、CO₂の侵入状況ほど違いが顕著ではない。次に、CO₂注入による圧力変化で生じる地表面への影響として、地表面の傾きの変化を整理した結果を図-6,7 に示す。断層の変形係数を他に比べて小さくした場合、そこでは傾斜の傾向が不連続に変化する。また、傾斜の変化に着目すると、その絶対値が極大となる点は、注入の進展とともに注入点から外側へと移動する。ただし、断層の透水性が大きい Case3 と Case4 では、ある期間を過ぎると極大点が再び注入点側へと移動している。これは、断層部分への流体の浸透による圧力増大の影響と考えられる。これらから、地表面の傾斜の観測から地下深部の圧力分布や CO₂の浸透状況、特に断層を通じた漏洩の監視などに使える可能性

キーワード CO₂ 地下貯留, CCS, 地球温暖化, 地質構造, モニタリング, 漏洩, 数値解析

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 (株)ハザマ TEL 029-858-8810

があると考えられる。なお、地盤の傾斜の測定については、極めて高い分解能の傾斜計(Pinnacle 社 Tiltmeter)が開発されており、CO₂注入による変形を検出することは十分可能であると考えられる。

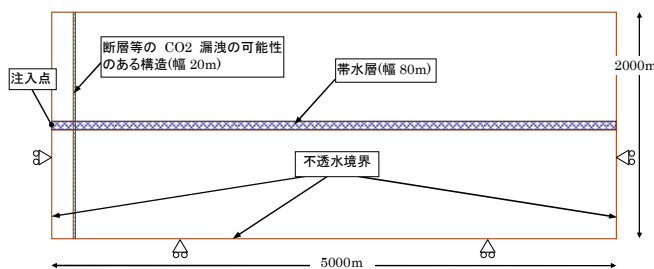


図-1 検討モデルと境界条件

表-1 解析物性

	岩盤一般部	帯水層	断層
固有透過度(m ²)	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³
間隙率(-)	0.12	0.3	0.3
λ (van Genuchten)	0.457	0.457	0.457
p_0 (van Genuchten)	2E+4	2E+4	2E+4
ヤング率(GPa)	0.90	0.90	0.45
ポアソン比	0.30	0.30	0.30

表-2 解析ケース

	断層透水性	変形係数
Case1	断層考慮せず	均質
Case2	断層考慮せず	断層の変形係数を他の1/2に設定
Case3	断層の透水性：大	均質
Case4	断層の透水性：大	断層の変形係数を他の1/2に設定

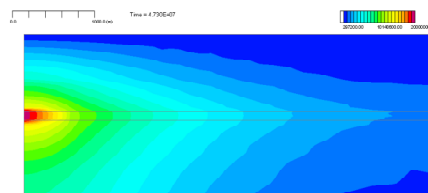


図-2 Case1の圧力増分の分布(1.5年後)

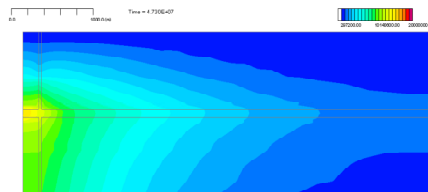


図-3 Case3の圧力増分の分布(1.5年後)



図-4 Case1の液相中のCO₂の分布(1.5年後)

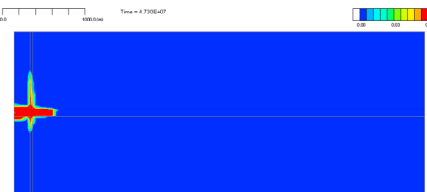


図-5 Case3の液相中のCO₂の分布(1.5年後)

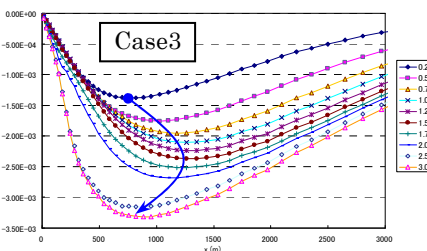
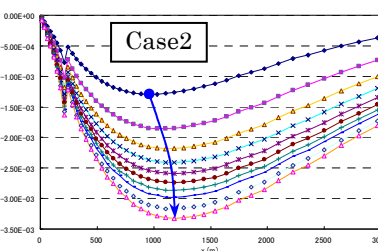
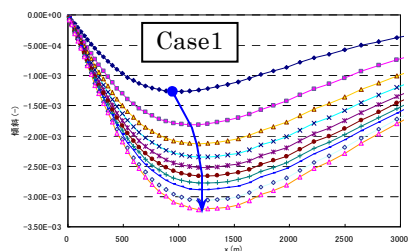


図-6 解析結果：地表面の傾斜(Case1～Case3)

4. おわりに

地表(海底面)の変形の観測からCO₂注入時の内部状況を推定できる可能性を示した。モニタリングのための手順としては次のように考えている。弾性波探査等の結果から地質構造、各地層の剛性を推定して、モデルを作成する。ボーリング孔での調査データ等を用いて透水係数等のデータを設定し、CO₂注入時の予測解析を実施する。間隙圧力の変化による地表面傾斜量を力学解析により求めて実測データとの比較を行い、逆解析的な方法を用いてモデルの修正を繰り返す。実測データを再現した解析モデルを構築し、内部の状況や漏洩の可能性を評価する。ただし、漏洩の状況によっては地表面変形パターンの変化を検出できる可能性があるが、圧力変化による地層変形の感度は必ずしも大きくないことも考えられる。今後の課題として、こうした手順によるモニタリング/注入管理を実用化するために、物理探査結果やその他の情報を統合することにより、推定の信頼性を向上させる必要がある。

参考文献

- 1) 薛, 松岡: 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素 地中貯留技術の現状と課題, 地学雑誌, Vol.117, No.4, pp.734-752, 2008.
- 2) Onumaa and Ohkawa: Detection of surface deformation related with CO₂ injection by DInSAR at In Salah, Algeria, Proc. of GHGT9, pp.2177-2184, 2009.
- 3) Pruess: TOUGH2 - A general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Rep. LBL-29400. LBNL, 1991.
- 4) Rutqvist and Tsang: TOUGH-FLAC: A NUMERICAL SIMULATOR FOR ANALYSIS OF COUPLED THERMAL-HYDROLOGIC-MECHANICAL PROCESSES IN FRACTURED AND POROUS GEOLOGICAL MEDIA UNDER MULTI-PHASE FLOW CONDITIONS, Proc. of TOUGH Symposium, 2003.

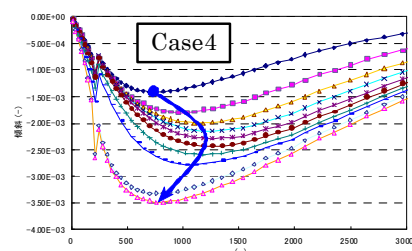


図-7 解析結果：地表面の傾斜(Case4)