

干渉SARの地表面変位観測によるCO₂地中挙動 モニタリング手法に関する数値解析的検討

山本 肇^{1*}・大沼 巧²・熊谷 司³・Jonny Rutqvist⁴

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

²（株）地球科学総合研究所（〒112-0012 東京都文京区大塚1-5-21 茗溪ビル）

³日揮（株）（〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1）

⁴Lawrence Berkeley National Laboratory (One Cyclotron Road, Berkeley, California, USA)

*E-mail: hajime.yamamoto@sakura.taisei.co.jp

CO₂地中貯留プロジェクトでは地下深部に圧入されたCO₂の地中挙動を把握する安価かつ効果的なモニタリング手法の確立が望まれている。近年発展した人工衛星の合成開口レーダーの差分干渉技術(干渉SAR)は、地表地形の立体的変動を数mm単位で観測でき、観測コストも比較的安価な上、約1ヶ月の頻度での経時的観測が可能である。本研究では、地表面変位分布から貯留層内の流体圧力やCO₂の分布を逆推定する手法の実現性を検討している。今回、アルジェリアのIn Salahプロジェクトを対象に、二相流体-応力連成シミュレーションを実施し、干渉SARによる地表面変形観測データの再現を試みるとともに、CO₂移動フロントや地下流体の圧力変化と地表面変形パターンとの関連性を数値解析的に検討したので報告する。

Key Words : CO₂, CCS, InSAR, surface deformation, coupled fluid-geomechanics simulation

1. はじめに

火力発電所などの大規模な固定排出源からの二酸化炭素排出削減対策である二酸化炭素地中貯留技術の実用化において、CO₂の地中挙動の安価で有効なモニタリング手法の確立は非常に重要な課題となっている。これまでに、地震探査、比抵抗探査、重力探査等、多くの物理探査技術が実証試験などに適用され、CO₂の地中挙動把握への有効性が明らかになりつつある。しかしながら、最も探査精度が高いとされる3次元地震探査は探査コストが非常に高価なため、経時的な変化を捉えることは難しいなど、求められる探査精度とコストを両立するモニタリング手法は未確立である。

近年、衛星からの合成開口レーダー(SAR)を用いた干渉SAR (InSAR) 技術により、地表地形の立体的変動をcm単位で面的に観測できるようになっている。観測コストも比較的安価であり、1ヶ月の頻度での経時的観測が可能である。アルジェリアのIn Salahプロジェクトでは、年間120万トンのCO₂の地中圧入に伴う地表面の変動を極めて鮮明に観測することに成功している¹⁾。この地表面変動は、地下の流体圧力の変化を反映したものであり、地表面変位量の観測結果を逆解析することなどによって、貯留層内のCO₂の地中挙動の把握に役立つ情報が得られる可能性を示している。

今回、アルジェリアのIn Salah Gas プロジェクトのサイ

トで取得された干渉SARによる地表面変形観測データを対象に、二相流体-応力連成シミュレーションを実施し、観測された地表面変動の再現を試みた。また、地表面変形パターンとCO₂の移動フロントや地下流体圧力上昇量の分布との関連性を数値解析的に検討したので、その結果を報告する。

2. In Salah Gas プロジェクト

(1) プロジェクトの概要

アルジェリアのIn Salah Gas プロジェクトは、Sonatrach, BP, Statoil の3社JVにより進められている天然ガス開発プロジェクトであり、地球温暖化ガスの排出削減のために商業規模スケールのCO₂地中貯留が行われている。本地域で産出される天然ガスはCO₂濃度が高く(5~10%)、本プロジェクトでは、天然ガスからCO₂を分離・回収後、地中貯留している。CO₂貯留層として、Krechba フィールドの地下約1.8kmの石炭紀砂岩層(厚さ20m)が選定され、ガス生産井の周辺3ヶ所のCO₂圧入井から、CO₂の圧入がガスの生産と同時に進められている(図-1)。2004年8月から圧入が開始され、約50~100万トン/年のペースで圧入が継続されている。貯留層の浸透率が低いため、圧入には長距離(1~1.5km)の水平坑井を用いている。

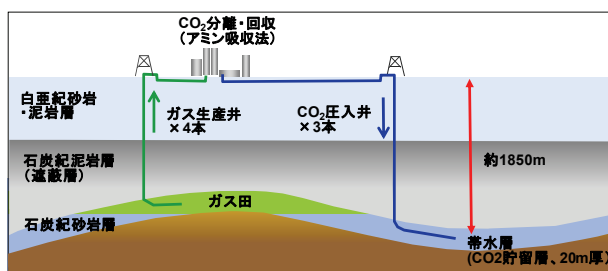
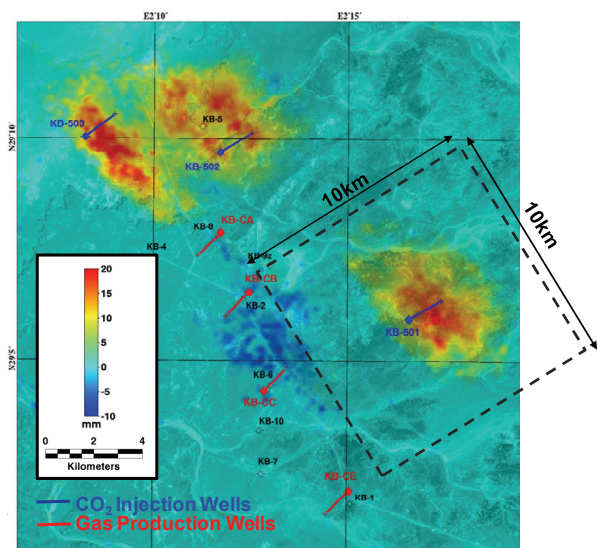
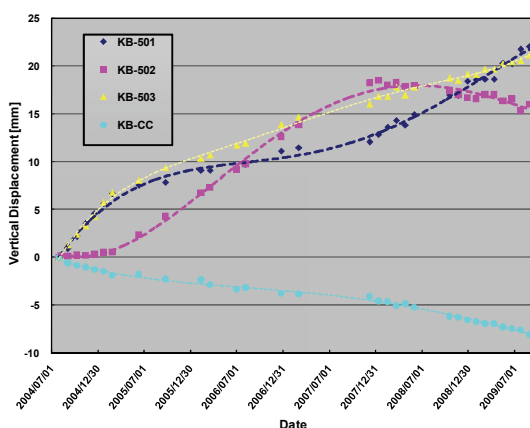


図-1 In Salah Gas Projectの概要



(a) 地表面の鉛直変位量の分布 (2009年8月)



(b) 地表面の鉛直変位量の経時変化

図-2 干渉SARにより観測された地表面変位量¹⁾

(2) 干渉SARによる地表面変位観測

Onumaら¹⁾が干渉SARにより観測した地表面の鉛直変位量の平面分布（圧入開始から約5年後）を図-2aに示す。図中の赤線と青線は、各々、ガス生産井とCO₂圧入井（KB-501, 502, 503の3本）である。この図を見ると、全ての圧入井の周辺で隆起が、生産井周辺では沈下が生じており、変位分布のパターンは井戸毎に異なることが分かる。同図bに示す井戸地点近傍の鉛直変位量の経時変化から、年間数mmの速度で隆起が生じているのが分かる。

3. 解析モデル

(1) 解析の概要

In Salahの地表面隆起に関しては、すでにRutqvistら²⁾やVascoら³⁾による解析事例がある．今回は、Rutqvistらの解析手法とモデルをベースに、変動する実測圧入レートの考慮や解析用格子の詳細化を加え、断層や浸透率の異方性、境界条件などに関する感度解析を実施した．

(2) 数値解析コード

数値解析には、多相流体-応力連成解析コード TOUGH-FLAC⁴⁾を用いた。TOUGH-FLAC は、図-3 に示すように、熱・多相流シミュレータ TOUGH2⁵⁾ (LBNL 開発) と力学シミュレータ FLAC3D (Itasca 社) を交互に実行することで多相流・熱・変形の連成解析を行うものである。今回は、超臨界 CO₂ の流体物性モジュール ECO2N⁶⁾を TOUGH2 とともに用いた。

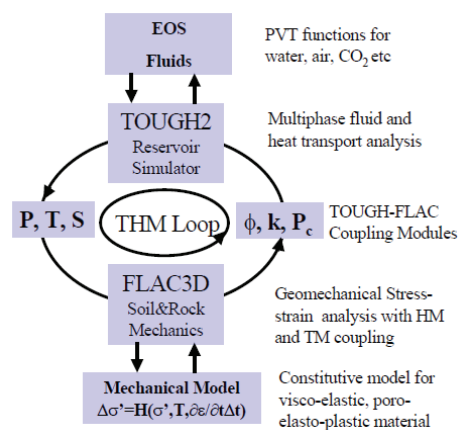
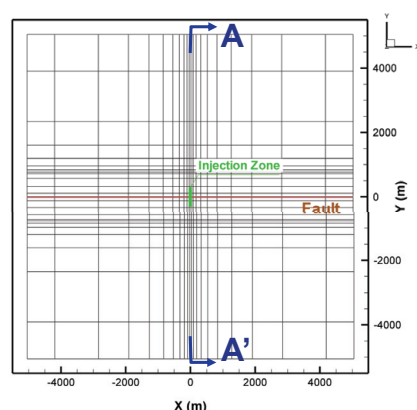
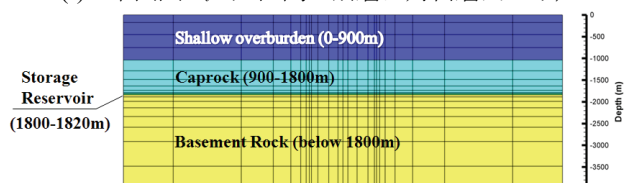


図-3 TOUGH-FLACの概要⁴⁾



(a) 平面図 (圧入区間と断層は貯留層内のみ)



(b) 鉛直断面図 (A-A'断面、色は地層を示す)

图4 解析用格子

(3) 解析用格子

3つの圧入井（KB501, 502, 503）のうち、KB501を検討対象とする。構築した解析用格子を図4に示す。要素数11,000、節点数12,558の直方体格子である。解析領域は、横方向10km×10km、深度方向4kmである。図2中にKB-501を中心とした10km四方の範囲を示した。

(4) 地質モデル

地層モデルを図4b中に示し、それらの物性値の一覧表を表-1に示す。深度1.8kmの貯留層は石炭紀泥岩（キャップロック）で覆われ、その上部に白亜系砂・泥岩が載っている。地層の浸透及び力学物性は、Rutqvistら⁵⁾に基づいて設定した。

貯留層の絶対浸透率 ($1.3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) は圧入井の圧力上昇量、弾性係数などの力学定数は室内試験や音波検層の結果を参考にして各々決定されている。遮蔽層（キャップロック）の浸透率は明らかではないが、一般的な値を参考に設定している。なお、応力条件による空隙率、絶対浸透率、毛管圧力への変化は今回は考慮しない。

表-1 物性値一覧（基本ケース）

Lithology	Depth (m)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν (-)	Effective porosity ϕ (-)	Permeability k (m^2)	Residual gas saturation	Residual liquid saturation	Van Genuchten model parameters	
								P_0 (kPa)	m (-)
Cretaceous sandstones and mudstones	0-900m	1.5	0.2	0.1	1×10^{-17}	0.05	0.3	19.9	0.457
Carboniferous mudstones	900-1800m	20	0.15	0.01	1×10^{-19}	0.05	0.3	621	0.457
Carboniferous sandstone (C10.2)	1800-1820m	6	0.2	0.17	1.3×10^{-14}	0.05	0.3	19.9	0.457
Mudstone (D70)	below 1800m	20	0.15	0.01	1×10^{-19}	0.05	0.3	621	0.457
Fault (Assumed)	1800-1820m	1.5	0.2	0.25	1×10^{-12}	0.05	0.3	19.9	0.457

表-2 解析ケース一覧表

解析ケース	想定断層	浸透率の異方性	境界条件(側面)	
			流体解析	力学解析
基本ケース	無し	無し	圧力固定(開放境界)	変位固定
断層ケース	有り	無し	圧力固定(開放境界)	変位固定
異方性ケース	無し	有り	圧力固定(開放境界)	変位固定
閉鎖境界ケース	無し	無し	不透水(閉鎖境界)	変位固定
応力固定境界ケース	無し	無し	圧力固定(開放境界)	応力固定

■ : 基本ケースと異なる要因

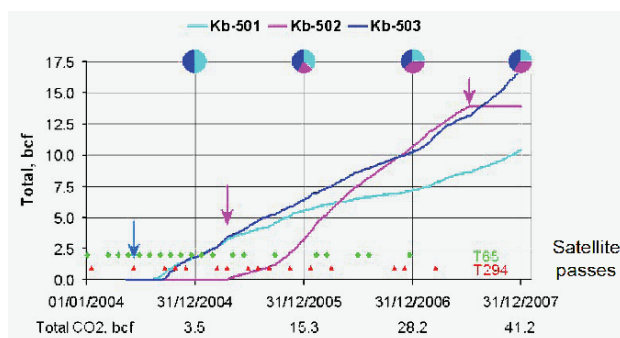


図-5 CO₂圧入レート⁷⁾（累積流量=1 bcf=2.83×10⁷ m³）

(4) 解析条件

貯留層の温度と間隙水圧の初期条件は、現地の調査結果に基づき、90℃、17.8MPaに各々設定した。初期の間隙水圧の分布は地表面を地下水位面に固定した静水圧分布で与えた。初期の地盤は水飽和状態とした。温度は地温勾配3℃/100mに基づいて与えた。今回の解析では熱伝導・対流等による温度変化は解析しないが、流体の物性（密度や粘性など）の設定に温度が必要になる。地盤の初期応力は、土被り圧による深度分布で与えた。

境界条件は、流体モデルと力学モデルについて、各々、底面境界は不透水ならびに鉛直変位固定、側面境界は圧力固定ならびに水平方向変位固定、地表面境界は大気圧固定ならびに自由変位の境界とした。

CO₂圧入量は、図-5に示す変動レートのうち、KB-501のデータを用いた。圧入区間は、図-4a中に示した。

(5) 解析ケース

上記の条件によるケースを「基本ケース」とする。これに加えて、貯留層内の浸透率の不均質性や異方性（断層や割れ目の影響）や、境界条件を変化させた感度解析ケースを設定した。解析ケース一覧を表-2に示す。

In Salah サイトでは、地震波探査や坑井検層によって特定された断層や割れ目の方位は、E-W から NW-SE 方向である⁷⁾。そこで今回のモデルでは、NE 方向（圧入井の水平部と直交する方向）に断層や割れ目を仮定した。断層のモデル（図4）は原点を通り平面的にX軸と平行であり、貯留層内にのみに存在して、上部のキャップロックを切らないものとする。断層部の絶対浸透率は $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (1darcy)とし、貯留層のその他の部分については $1.3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (1.3md, 基本ケースの1/10)に設定した。この断層モデルを用いたケースを「断層ケース」と呼ぶ。次に、「異方性ケース」では割れ目などによる浸透性の異方性の影響を検討した。具体的には、X軸方向の絶対浸透率をY軸方向の10倍に設定した ($k_x=2.53 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, $k_y=2.53 \times 10^{-15} \text{ m}^2$)。なお、上記の断層ケースと異方性ケースの浸透率は、圧入井地点での貯留層圧力の上昇量が基本ケースと同程度になるように設定している。

基本ケースで与える側方境界条件は、水理境界条件が開放境界（圧力固定境界）、力学境界条件が水平変位固定境界である。側方境界条件の不確実性による影響を見るため、水理境界条件を閉鎖境界（不透水境界）とした「閉鎖境界ケース」と、力学境界条件を応力固定境界に変更した「応力固定境界ケース」を解析ケースに加えた。

4. 解析結果

(1) 間隙圧力、体積ひずみ、変位

図-6に、図4のA-A'断面における間隙圧力、体積ひ

ずみ増加量、間隙圧力（圧入開始から5年後）を基本ケースについて示す。CO₂の圧入による間隙圧力上昇と体積ひずみ増加のほとんどは、貯留層内とその近傍で生じていることが確認される。つまり、地表面変位量は、貯留層内の圧力上昇を主に反映している。図には示していないが、閉鎖境界のケースでは、側面境界から流体が排出されないため、圧入継続すると、貯留層の流体圧力、体積ひずみ、地表面隆起は、ともに増大しつづける。

(2) 地表面隆起量

図-7に、鉛直変位量分布の鳥瞰図を3ケース（基本ケース、断層ケース、異方性ケース）示す。基本ケースの結果を見ると、鉛直変位量は圧入ゾーンの直上で最も大きく、深度が浅くなるに従って同心円上に減少しているのが確認される。断層ケースと異方性ケースでは、与えた断層や高浸透率の方向を反映し、X軸方向に沿って地表面隆起量が大きくなっているのが分かる。なお、CO₂のプルーム（CO₂飽和度1%、灰色の等値面）は、地表面変動範囲に比べて非常に小さいことが分かる。

(3) 干渉SAR観測データとの比較

地表面変位の計算結果を干渉SARによる実測結果と比較した結果を図-8に示す。まず、図-8aに、井戸直上

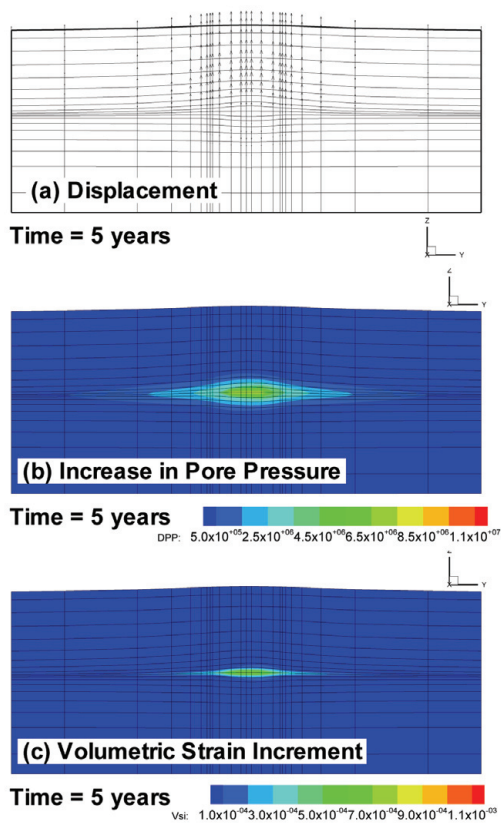
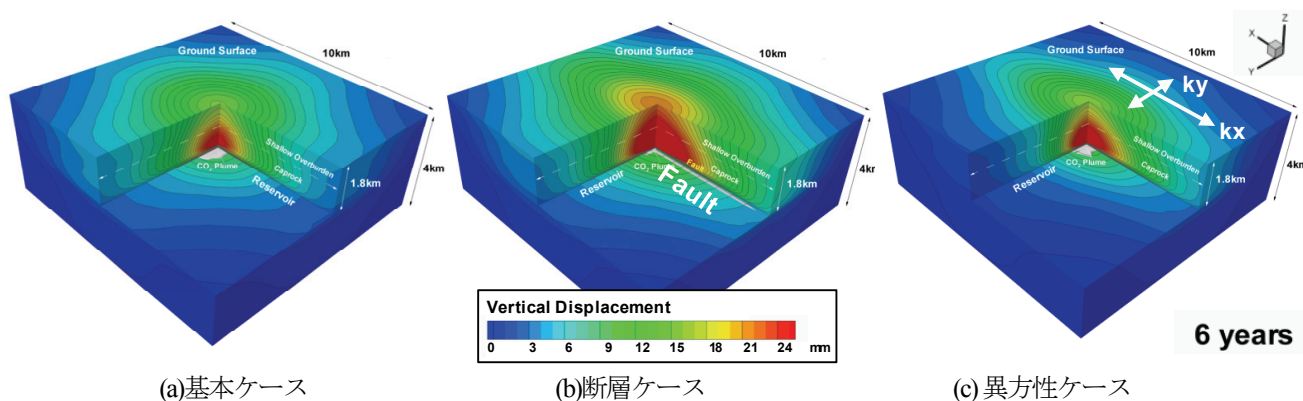


図-6 体積ひずみと変位量の分布（5年間圧入後）

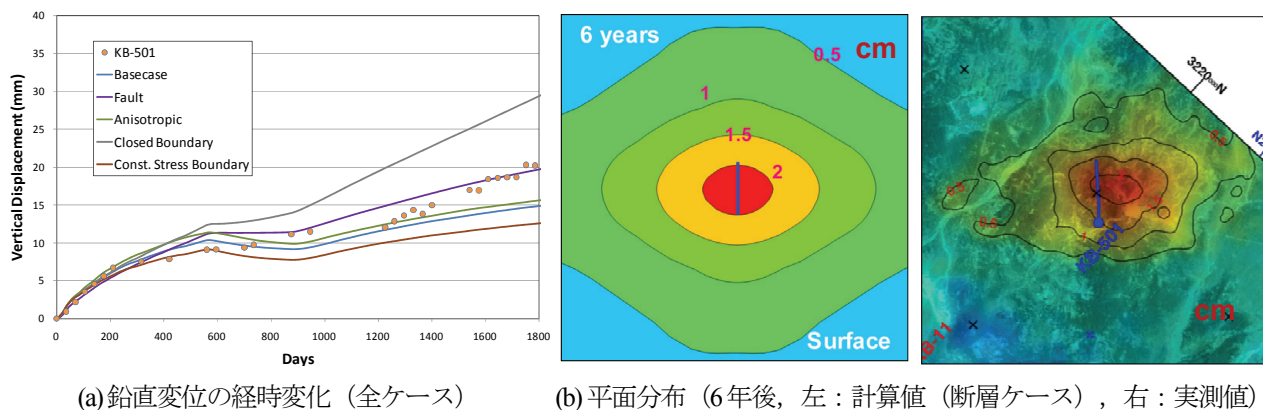


(a)基本ケース

(b)断層ケース

(c)異方性ケース

図-7 鉛直変位量の分布（6年間圧入後、手前1/8ブロックを削って内部を表示）



(a)鉛直変位の経時変化（全ケース）

(b)平面分布（6年後、左：計算値（断層ケース）、右：実測値）

図-8 地表面隆起量の計算値と実測値の比較（KB-501地点）

付近の地表の一点における鉛直変位量（地表面隆起量）の経時変化を示した。今回の単純なモデルにも関わらず、地表面隆起の計算値は干涉 SAR による観測値を定量的なレベルで表現していることが分かる。特に圧入初期の約 200 日までは定量的に良い一致が見られるが、約 300 日以降は 3mm～5mm 程度の乖離がある。途中の圧入レート減少期間（図-5 参照、約 600 日～900 日）では隆起速度が遅くなり、解析結果では若干の沈下が生じるケースも見られている。この原因は貯留層内の圧力低下と考えられるが、井戸圧力データとのマッチングによる検討が今後必要である。断層ケースでは圧入レート低下の影響が比較的小さく、比較的単調に変位量が増加する。異方性ケースの変位が基本ケースよりやや大きいのは、圧力上昇域の局所化による効果である。閉鎖境界ケースでは、側方からの貯留層外への流体の排出が生じないため、貯留層内の圧力が上昇し続け、変位量は単調に増加する。応力固定境界ケースでは、側方境界での変位吸収のため、変位量は小さく計算される。以上のように、地表面変位量は、貯留層内の浸透特性や境界条件の影響を反映している。

図-8b に、圧入開始から約 6 年後における、KB-501 周辺の地表面隆起量の平面コンターを、断層ケースの解析結果と合わせて示す。実測の隆起量コンターの楕円形の

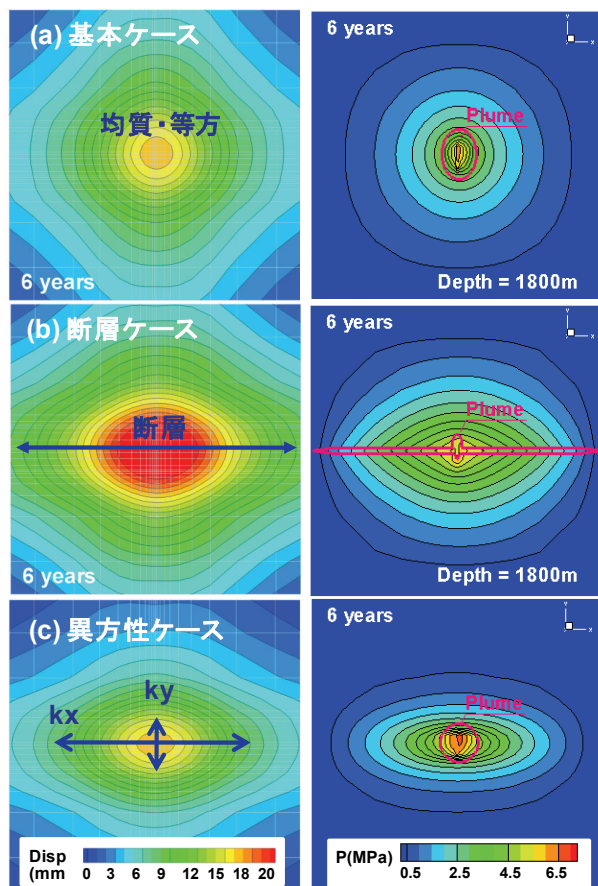


図-9 CO₂プルームと隆起域の形状比較

（左：地表面隆起量の分布、右：貯留層のCO₂プルームと圧力上昇）

長軸方向は、解析結果とも整合的である。これは、前述の通り、当地域の割れ目や断層の卓越方向（EW 方向）であり、貯留層内の圧力挙動における断層系の影響を強く示唆する。隆起した地表面の傾斜は、実測より解析結果の方が緩やかであり、モデル改良の余地を示している。

(4) CO₂プルームと隆起域の形状比較

図-9 に、貯留層内の CO₂ プルーム（図中の赤線、CO₂ 飽和度=1% の等値線）および圧力上昇量の分布と隆起域の形状（6 年後）を示した。基本ケースでは、CO₂ プルームの形状はやや楕円状で、圧力コンター線の形状は円形に近い。断層ケースでは断層（X 軸方向）に沿って線状の CO₂ プルームが形成されるが、圧力コンターは X 方向を長軸とする楕円形に近い。断層ケースと異方性ケースの CO₂ プルーム形状は大きく異なるが、圧力上昇量の分布はいずれも楕円形であり、地表面変形パターンも区別が難しい。以上のように、CO₂ プルームと隆起域の形状は必ずしも対応しない。

5. CO₂ モニタリングにおける地表面変位観測の有用性について

以上で確認した通り、地表面変位観測から得られる隆起パターンは、貯留層内の圧力上昇の分布を反映したものであり、地表面変位量だけから、CO₂ プルームの形状や移動方向、飽和度分布などを直接的に類推するのは困難である。しかし、次のような CO₂ モニタリングに有益な情報が得られる可能性がある。

(1) 貯留層内の圧力上昇量の分布

一般に、圧入井の坑底など一点の圧力を測定できても、圧力上昇量の空間的な変化や伝搬方向を知るのは難しい。地表面の隆起域の形状から貯留層内の圧力上昇量の分布を推定できる可能性がある。

(2) 貯留層の浸透率とその異方性、不均質性

例えば、Vasco ら³⁾は、地表面隆起データから貯留層内の流体圧力の伝搬速度を計算し、これに基づいて浸透率分布を評価する手法を提案している。貯留層内の圧力上昇量分布の経時変化から、浸透率の異方性や不均質性を推定できる可能性がある。

(3) 水理的なコンパートメントの形状と連続性

例えば、平面的にある領域内の圧力のみが上昇する場合には、不透水性の断層などで囲まれた水理的な閉鎖区画（コンパートメント）に CO₂ を圧入している可能性がある。地表面の隆起量分布の観測から、このような水理的なコンパートメントの分布や形状の情報が得られる可能性がある。

(4) 潜在的な漏洩経路

今回は解析結果を示していないが、キャップロック

などに浸透率の高い箇所が局所的に存在し、貯留層圧力が鉛直方向に伝搬すると、地表に隆起量が大きいアノーマリとして表れる。圧力伝搬はCO₂移行よりはるかに速いため、将来CO₂の漏洩の可能性のある高浸透性の箇所を事前に指摘できる可能性がある。

5. まとめ

以上の結果を要約すると以下の通りである。

- ・ アルジェリアの In Salah の CO₂ 地中貯留プロジェクトを対象に、二相流体一応力連成シミュレーションを実施し、Onuma ら¹⁾が干渉 SAR で観測した地表面隆起挙動の再現を試みた。その結果、比較的単純なモデルにも関わらず、地表面変位の経時変化を定量的なレベルで表現できた。
- ・ 干渉 SAR で観測される地表面変位の分布パターンは、今回の数値解析結果から確認されたように、貯留層内（あるいはその近傍）の圧力上昇量の分布を反映しており、CO₂の空間的な移行を直接的に示すものではない。
- ・ したがって、地表面変位分布の観測は、そのみで直接的にCO₂をモニタリングすることは困難であるが、(1) 貯留層内の圧力上昇量分布、(2) 貯留層内の浸透率分布や(3) 水理コンパートメント、(4) 潜在的な漏洩経路など、有用な情報が得られる可能性があり、他の坑井試験や探査データや数値解析と組み合わせることにより、CO₂ 地中挙動の把握に大きく役立つ可能性がある。

謝辞：本研究の実施にあたって、ご助言いただいた大成建設（株）の青木智幸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Onuma, T., Ohkawa, S., 2008. Detection of surface deformation related with CO₂ injection by DInSAR at In Salah, Algeria. In: Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-9, Washington DC, November 16–20.
- 2) Rutqvist J, Vasco, D.W. and Myer, L. (2010): Coupled reservoirgeomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria. Int. J. Greenhouse Gas Control, Vol. 4, pp. 225-230.
- 3) Vasco, D.W., Ferretti, A., Novali, F., 2008. Reservoir monitoring and characterization using satellite geodetic data: interferometric synthetic aperture radar observations from the Krechba field, Algeria. Geophysics 73 (6), WA113–WA122.
- 4) Rutqvist, J., Tsang, C.-F., 2002. A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂ injection into a brine aquifer. Environ. Geol. 42, 296–305.
- 5) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis. 1999. TOUGH2 user's guide. Version 2.0. Rep. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA
- 6) Pruess, K., 2005. ECO2N: A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO₂, Lawrence Berkeley Nat'l Lab. Report, LBNL-57952.
- 7) Raikes, S., Mathieson, A., Roberts, D., Ringrose, P., 2008. Integration of 3D seismic with satellite imagery at In Salah CO₂ sequestration project, Algeria. In: Society of Exploration Geophysics (SEG) Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, November 9–14, 2008.

NUMERICAL INVESTIGATION OF RELEVANCE BETWEEN PATTERNS OF CO₂ FRONT AND SURFACE DEFORMATION MEASURED BY IN-SAR TECHNOLOGY

Hajime YAMAMOTO, Takumi ONUMA, Tsukasa KUMAGAI and Jonny RUTQVIST

Recently, it is known that In-SAR (interferometric synthetic aperture radar) technology is a powerful tool for measuring spatial surface deformations due to pressurization of the reservoir during CO₂ injection in remarkable detail. In this study, we performed coupled reservoir-geomechanical simulations for an example from In Salah gas project in Algeria, and relevance between the patterns of CO₂ front progression and surface deformation was discussed. The time evolution of surface displacement determined by DInSAR was well quantitatively simulated by the simple model based on Rutqvist et al. (2010). Our sensitivity study suggests that information of CO₂ front is indirectly transferred to the surface displacement through multiple processes of pressure changes and subsequent formation deformations. Therefore, even if the CO₂ flow is highly localized due to reservoir heterogeneity such as faulting, surface deformation will not sharply reflect the flow patterns but smoothened.