

Thu. Oct 27, 2022

Room-B

Natural resource exploitation

[1B07-1B10] Natural resource exploitation (1)

Chair:Takaaki Uetani(INPEX Corp.)

1:00 PM - 2:30 PM Room-B (12C Conf. room)

[1B07] [Invited] Scales of time and space in sequence stratigraphy

○Koichi Hoyanagi¹ (1. Shinshu University)

1:00 PM - 1:45 PM

[1B08] Development of induced-seismicity prediction model using joint element - application to carbon dioxide sequestration -

○Koki Katayama¹, Kenji Furui¹, Kimikazu Tsusaka² (1. Waseda University, 2. INPEX Corp.)

1:45 PM - 2:00 PM

[1B09] Evaluation of Permeability for Multi-Component Packed Beds Containing Swellable Polymer Particles

○MIZUHO IDO¹, Furui Kenji¹ (1. WASEDA University)

2:00 PM - 2:15 PM

[1B10] Modeling and flow simulation of a volcanic reservoir: Application of multiple uncertainty analysis for decision making

○Yusuke Takai¹, Shinichi Koshi¹, Takefumi Shibuya¹, Ryo Yuasa¹, Ryo Wakizono¹ (1. Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.)

2:15 PM - 2:30 PM

Natural resource exploitation

[1B11-1B15] Natural resource exploitation (2)

Chair:Hiroyuki Nakagawa(Japan Petroleum Exploation Co., Ltd.)

2:45 PM - 4:00 PM Room-B (12C Conf. room)

[1B11] Evaluation of roughness due to calcite dissolution in crude oil/brine/rock system: Implications for low salinity water flooding

○Yueqi Wang¹, Xingjuan Hao¹, Yogarajah Elakneswaran¹, Takeshi Hasegawa¹ (1. Hokkaido University)

2:45 PM - 3:00 PM

[1B12] Agile uncertainty evaluation for field development with multiple high quality history matched models using cloud computing

○DAIKI WATANABE¹, YUTA TOSUJI¹, HIROTATSU

YAMABE² (1. JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation, 2. Schlumberger)

3:00 PM - 3:15 PM

[1B13] Study on improvement of shale permeability by chemical

○Ryu Okamoto¹, Yuichi Sugai¹, Ronald Nguele¹, Takehiro Esaki¹ (1. Kyushu University)

3:15 PM - 3:30 PM

[1B14] Study on enhanced oil recovery using nano-emulsion

○Masakazu Hayama¹, Ronald Nguele¹, Yuichi Sugai¹, Takehiro Esaki¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 3:45 PM

[1B15] Next generation MEOR (in situ Oil to Gas) Technology

○Haruo Maeda¹, Konomi Suda¹, Masayuki Ikarashi², Hiroki Iwama², Hideyuki Tamaki¹, Susumu Sakata¹, Daisuke Mayumi¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. INPEX Corporation)

3:45 PM - 4:00 PM

Natural resource exploitation

[1B07-1B10] Natural resource exploitation (1)

Chair:Takaaki Uetani(INPEX Corp.)

Thu. Oct 27, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room-B (12C Conf. room)

[1B07] [Invited] Scales of time and space in sequence stratigraphy

○Koichi Hoyanagi¹ (1. Shinshu University)

1:00 PM - 1:45 PM

[1B08] Development of induced-seismicity prediction model using joint element - application to carbon dioxide sequestration -

○Koki Katayama¹, Kenji Furui¹, Kimikazu Tsusaka² (1. Waseda University, 2. INPEX Corp.)

1:45 PM - 2:00 PM

[1B09] Evaluation of Permeability for Multi-Component Packed Beds Containing Swellable Polymer Particles

○MIZUHO IDO¹, Furui Kenji¹ (1. WASEDA University)

2:00 PM - 2:15 PM

[1B10] Modeling and flow simulation of a volcanic reservoir: Application of multiple uncertainty analysis for decision making

○Yusuke Takai¹, Shinichi Koshi¹, Takefumi Shibuya¹, Ryo Yuasa¹, Ryo Wakizono¹ (1. Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.)

2:15 PM - 2:30 PM

シーケンス層序学における時間空間スケール

Scales of time and space in sequence stratigraphy

ほやなぎ こういち
(信州大学) ○保柳康一

はじめに

1970年代から1990年代にかけて、地質学分野の中で堆積物と堆積岩を扱う堆積学、堆積地質学は大きな学問的進展をみた。それは、堆積相解析からシーケンス層序学への歩みである。

地球科学全体では1960年代にプレートテクトニクス理論が成立して、パラダイムの転換を果たしていた。同時期に堆積物の研究では海洋からの情報によって、深海底に堆積する砂層であるタービダイトの運搬・堆積機構が解明され、それが堆積相解析へとつながっていった。これら2つのパラダイム転換の端緒を作ったのは、コロンビア大学ラumont地球観測所の海洋地質学者であるHeezen博士であった。海洋の音波探査などの地球物理的情報と海洋から得られた地層そのものの研究との融合がこのパラダイム転換をつくったといえる。1968年にグローマー・チェレンジャー号によって始まった海洋科学掘削は、プレートテクトニクスを証明し、海洋の連続的な掘削コア採取による年代層序の高精度化など20世紀末から21世紀初頭の地球科学の黄金期を作った。

震探層序学からシーケンス層序学へ

地震波を用いた震探断面は大露頭全体を覆う程度（空間的に約10 m）の解像度であるとされる（例えばMial, 1990）。一方、地層を肉眼で観察する際は、露頭の高さはせいぜい10 m程度であり、掘削によって得られるコアも10 m単位であることが多い。すなわち、震探断面上では露頭全体もしくは掘削されたコア全体の情報が一つの反射面として認識されていることになる。さらに、上下方向の空間的隔離は、地質学では時間となる。海底扇状地など堆積速度の速いところでも

1m/1000年程度なので、震探断面の時間的解像度は数万年程度となる。

シーケンス層序学は、震探断面の反射面を時間面として捉えた1970年代のサイスミック〈震探〉層序学から発展して、1980年代にPeter Vail やHenry Posamentier などによって成立した。1サイクルの相対的海水準変動がつくる海退-海進-海退によって形成された上下2つの不整合面（シーケンス境界）とその間の地層のパッケージを堆積シーケンスとして1つの単位とする。このように層序単位を相対的海水準変動の1サイクルに対応して設定する。一方、相対的海水準変動は、テクトニックな地盤の上下変動とユースタティックな海水準変動との和からなるので、テクトニクスと汎世界的海水準変動を地層から議論することが可能になる。この考え方をを用いて、三畳紀以降の汎世界的海水準変動曲線が1987年に発表されている（Haq et al., 1987）。しかし、この海水準変動曲線が示す海水準変動の1サイクルは50万年から数百万年で、私たちが知る氷河性海水準変動曲線（例えば、Lisiecki and Raymo, 2005）が示す数万年から10万年周期とは異なるものである。

海水準変動の階層性と堆積シーケンスの特徴

Vail (1991) は海水準変動には6の異なる周期からなるオーダーが存在するとした（表）。

表 ユースタシーのオーダーとその周期とその主な成因（保柳ほか, 2006）

オーダー		周期	原因
↑ ↓ 高次	第1次	50 m.y. 以上	大陸の分裂・収束による海洋容積変化
	第2次	3 - 50 m.y.	プレート運動速度変化による海洋容積変化
	第3次	0.5 - 3 my.	気候変動による海水量の変化？ 詳細不明
	第4次	50 ky. - 0.5 my.	ミランコヴィッチ・サイクルによる気候変動にともなう海水量の変動
	第5次	30 - 80 ky.	
	第6次	10 - 30 ky.	

このうち、Posamentier and Vail (1988)が示した堆積シーケンスと海水準変動は震探断面や地質図作成のための調査に基づく断面図から得られる第3次オーダーと呼ばれるものである。一方、詳細な地質調査や掘削コアを用いてシーケンス層序学解析をおこなうと第6~4次周期にあたる1~50万年周期の堆積シーケンスが見出され、氷河性海水準変動との関連を議論することが出来る。相対的海水準変動をつくっている堆積盆地のテクトニックな沈降は、基本的に一定で直線的である。したがって、数万年間に100 m以上の上昇・降下を繰り返す氷河性海水準変動に対して、堆積盆沈降速度が影響を持つことはない。例えば、シーケンス境界形成時期は、第3次オーダーでは沈降速度の影響により海水準低下期になるが、4次より高次ではその影響がなく海水準の最も低い時期になる。このように、シーケンス層序学で紹介されている第3次オーダーの理論が氷河性海水準変動が成因の堆積シーケンスに適応出来ないことがある。

震探断面とコア解析の対比

氷河性海水準変動がつくる数万年周期の堆積シーケンスは、より長い周期の堆積シーケンスに内包される。露頭、コアの解析で見出された数万年周期の高次堆積シーケンスを広域的に追跡するためには、これを地質断面図や震探断面に位置づけ、第3次オーダー堆積シーケンスと対比しなければならない。掘削コアを用いた場合、震探断面は縦軸が往復走時で示されており、コア深度との対比には地層の地震波速度 (V_p) による変換が必要となる。コア中にある様々な不連続面から、シーケンス境界（不整合面）や海進面を見出し、さらに震探断面の反射波列端の解析からこれらの面を識別して時間と深度の変換をおこない両者を対比することになる。しかし、両者は震探断面の解像度と深度変換の際の前提などが影響してかなり困難である。それでも、シーケンス層序学的な解析に進むかどうかにかかわらず、岩相や年代を決定するためにはコアなど地層の採取が必要で、さらにその結果の面的な広がりを知るた

めには、広域的な像を提供する震探断面との対比は必須である。その精度を上げるためにも、シーケンス層序学的に解釈されたコア中の不連続面と震探断面中の反射面を間違いなく対比することが重要である。異なった面との対比を避けるためにも、コアと震探断面のシーケンス層序学による解析は有用である。

まとめ

様々な解析をおこなう上で、スケールの異なる情報を総合化する必要がどの分野でも生じる。シーケンス層序学では、堆積シーケンスを形成する周期によってシーケンス境界の形成時期が異なるなど、スケールの違いによる差異が生じることも留意しなければならない。

また、シーケンス層序学は、相対的海水準変動という広域的な要因による記録が地層中に残されていることを示し、震探断面など広域的な地層イメージとコアなどとして実際に得られた地層との橋渡しを提供した。地下のより正確な理解は、資源探鉱における基礎である。その理解のためにもシーケンス層序学の概念は重要である。

文献

- Haq, et al., 1987, *Science*, 235, 1156-1167.
 保柳ほか, 2006, フィールドジオロジー 4, シーケンス層序と水中火山岩, 共立出版, 180p.
 Lisiecki and Raymo, 2005, *Paleoceanography*, 20.
 Mial, 1990, *Principles of Sedimentary Basin Analysis*, Springer-Verlag, 668p.
 Posamentier and Vail, 1988, *SEPM, Spec. publ.*, 42, 155-181.
 Vail et al., 1991, *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer-Verlag, 617-659.

ジョイント要素を用いた誘発地震予測モデルの開発

（早稲田大学*・株式会社 INPEX**）
かたやま こうき ふるい けんじ つさか きみかず
 ○片山 滉基*・古井 健二*・津坂 仁和**

1. 緒言

CCS に対する懸念材料の一つとして、CO₂ 地下圧入による誘発地震の発生が挙げられる。本研究では、地盤の初期地圧や断層の力学的特性を考慮した三次元有限要素法 (FEM) 誘発地震予測モデルを開発した。2013 年に米国 Decatur CCS プロジェクトで観測された微小振動データを解析し、モデルの妥当性を検証した。

2. 研究手法

2.1 三次元 FEM 誘発地震予測モデル

本研究では汎用の FEM モデルに 2 物体の接触/剥離/破壊を模擬することができるジョイント要素¹⁾を導入し、誘発地震予測モデルを開発した。FEM モデルでは、初期地圧から岩盤の初期ひずみを算出し、圧入層の孔隙圧変化による周辺岩盤の応力変化を計算している。ジョイント要素 (断層) の破壊条件はクーロンの破壊基準を使用し、ジョイントの剛性から破壊後の滑り量を計算した。また、円盤型き裂開口・滑り変位の解析解と比較することでモデルの妥当性を検証した。

2.2 Case Study (Decatur CCS プロジェクト)

Case Study では、Kaven らの先行研究²⁾を基に、FEM モデル構築に必要な貯留層性状や断層の位置や傾斜角・走向などのパラメータ、CO₂ 圧入量を設定した。まず、岩盤の初期応力状態における断層の安定性から断層のせん断強度を決定した。次に、CO₂ 圧入量から推定される貯留層の孔隙圧変化量を計算し、孔隙圧変化による荷重を岩盤に負荷し、断層の破壊判定と滑り変位計算を行った。推定されるマグニチュードの大きさは FEM モデルで算出された断層の滑り量を基に計算した。また、貯留層圧力変化が断層へ伝播する場合と、圧力変化は完全に遮断される場合の 2 つのケースを比較し、誘発地震のリスク評価を行った。

3. 結果および考察

初期応力条件での断層の安定性から断層のせん断強度を 33.75 psi と設定した。図 1 は断層面の相対変位を示すが、貯留層の孔隙圧を 400 psi 上昇させたケース (図 1a) では断層面で比較的大きな滑り変位を生じることが分かった。FEM モデルで計算された断層の相対変位から予想されるマグニチュードは Mw=-0.52 と推定された。解析対象深度の断層で報告されている微小振動の大きさは Mw=-1.13~1.26 の間²⁾であったので、本研究で開発された誘発地震予測モデルの計算結果の妥当性を確認できた。次に、貯留層の孔隙圧変化が断層へ伝播したケース (図 1b) を解析した結果、予想される地震の大きさは Mw=-0.06 と増加した。この結果より、断層へ CO₂ が流入した場合より大きな誘発地震が発生することが示唆された。

a) 断層の孔隙圧変化なし b) 断層の孔隙圧変化あり

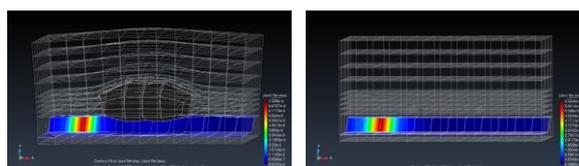


図 1 断層の相対変位

- 1) G. Beer. 1985. An Isoparametric Joint/Interface Element for Finite Element Analysis. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
- 2) J. O. Kaven, S. H. Hickman, A. F. McGarr, and W. L. Ellsworth. 2015. Surface Monitoring of Microseismicity at the Decatur, Illinois, CO₂ Sequestration Demonstration Site. Seismological Research Letters.

膨潤性ポリマー粒子を含む多成分粒子孔隙体の浸透率評価

(早稲田大学) ○井戸 瑞歩^{いどう みずほ}・古井 健二^{ふるい けんじ}

1. 緒言

シェール開発では、岩盤へ複数のフラクチャーを効率的に発生させるため、フラクチャーを一時的に閉塞させる Diverting Agent (DA) とよばれる粒状物質が圧入流体に添加される。近年、水溶性樹脂の一種であるブテンジオールビニルアルコールコポリマー(BVOH)が、北米 Permian 盆地などのフィールドで適用され、良好な結果が報告されている (Ikebata, 2022)。本研究では、円柱形に成形した BVOH ペレットと球形ガラスビーズを混合し、DA のフラクチャー閉塞現象における BVOH 粒子の膨潤性や吸着性の影響について評価を行った。

2. 研究手法

まず、BVOH ペレットとガラスビーズの混合試料を容器に詰め、質量を測定し、容器の容積、試料の比重から混合体の孔隙率を測定した。鈴木ら (1984) の多成分系粒子の空間率推定モデルを用いて、ペレット・ガラスビーズ混合体の孔隙率を算出した。実験で測定された孔隙率とモデルによる計算値を比較し、ペレットを含有した孔隙体にも鈴木らのモデルが適用可能であることを確認した。

次に、アクリル製変水位試験装置を用いて透水試験を行った。試験装置にペレット・ガラスビーズ混合試料を設置し、溶液が透過する様子をビデオカメラで撮影し、透過時間から浸透率を測定した。透水試験では、グアーガムの添加量を調整し粘度の異なる 2 種類の溶液を用意し、BVOH ペレットを含む水準では試料を溶液に浸し膨潤させた状態で透水試験を行った。

修正コゼニー・カルマンの式を用いて比表面積と孔隙率から混合体の浸透率を算出し、透水試験より測定された浸透率の値と比較し、ペレット粒

子の膨潤・吸着の影響を評価した。

3. 結果および考察

透水実験で測定された浸透率は、孔隙率と正の相関関係があり、比表面積とは負の相関関係が見られることが分かり、修正コゼニー・カルマンの式から予測される結果と一致した。粘度が低い溶液では、実験値とモデルによる推定値との差が大きくなる傾向があり、データのばらつきの大きさは孔隙率と相関が見られたため、実験中の透過速度が大きくなると実験誤差の原因として表れていることが考えられる。一方で、グアーガムを添加した高粘性溶液では、透過速度は小さくなり、実験値とモデルの推定値の差は小さくなることが分かった。

DA 試料が BVOH ペレットを含有している場合、ペレットの膨潤度が大きくなると、孔隙率と浸透率はともに小さくなる結果となった。これは、ペレットに使用されている BVOH 樹脂の膨潤により、流体の流路である孔隙が閉塞されたためであると考えられる。

また、グアーガム添加の有無の水準を比較すると、グアーガムを添加した時の方が浸透率の変化率は大きい結果となり、グアーガムの存在がペレット膨潤による孔隙の閉塞に影響を与えることが明らかとなった。

1. Ikebata, K., et al. 2022. Design and Analysis of Improved Swelling and Degradable Diverting Agent for Multistage Hydraulic Fracturing. SPE Prod & Oper 37: 414–430. doi:

<https://doi.org/10.2118/209784-PA>

2. 鈴木道隆・八木章・渡辺球夫・大島敏男、1984、3 成分球形粒子ランダム充填層の空間率の推定

貯留層モデリング：

追加開発意思決定のための複合的不確実性評価

(石油資源開発)○高居 勇佑^{たかい ゆうすけ}, 古志 真一^{こし しんいち}, 渋谷 岳史^{しぶや たけふみ}, 湯淺 亮^{ゆあさき りょう}, 脇園 遼^{わきのの りょう}

1. 緒言

油ガス田開発において、プロジェクト価値最大化のために、油ガス貯留層挙動の理解に基づいて作成された貯留層モデルを用いて将来予測を行い、開発計画策定を行う。貯留層モデル作成のために取得できるデータは限られるため、各パラメータの不確実性を取り入れた複数の具現像を作成し、将来予測の振れ幅を示すことが意思決定において重要となる。

当社ガス田において、近年掘削した坑井の生産挙動から貯留層の不均質性・不確実性が従来の想定よりも高いことが示唆された。そこで、これまで着目していた岩相分布の不均質性に加え、貯留層のあらゆる不確実性を取り込むことを目指し、貯留層モデル作成のワークフロー更新を実施した。

2. 適用手法

貯留層の複雑さや不確実性を考慮に入れるため、新たに複合的不確実性評価を導入した。この手法では貯留層モデルを構成する種々のパラメータの不確実性を一括して取り込み、複数の具現像を作成する。ワークフローを作成するために必要なポイントは以下である。

- ①貯留層イメージに基づくベースモデル作成
- ②各パラメータの不確実性を把握
- ③振れ幅に基づき網羅的・効率的にモデルを

作成する

④実測値とマッチするモデルの抽出

これらのうち、③ではラテン超方格サンプリングにより各パラメータの振れ幅を網羅的にカバーしつつ、効率的に複数具現像を作成することができ、従来と比べ、モデル作成時間の短縮を実現した。④では目的関数を用いて誤差評価を行い、生産実績とモデル計算値のマッチングが良好な具現像を抽出した。

以上の手法により各パラメータの不確実性を網羅し、生産実績を再現できる貯留層モデルを複数個抽出できた。

3. 結果

従来法では岩相分布のみに着目していたのに対し、今回貯留層の複数の解釈・可能性を取り込んだことで、表現できる不確実性の幅が増え、追加開発の意思決定を合理的にすることができるようになった。従来1具現像を得るのに数ヶ月要していたが、新規ワークフローにより数10具現像を数ヶ月で作成できるようになり評価を効率的に進めることに貢献した。

謝辞

本稿の公表を許可した石油資源開発(株)に謝意を表す。

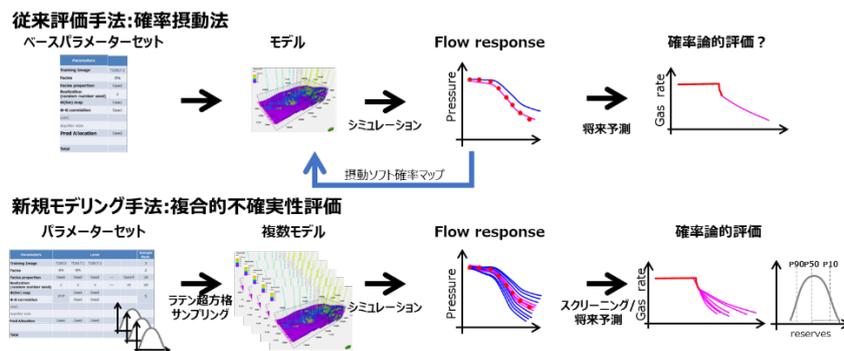


図.今回新たに作成したワークフロー概略図

Natural resource exploitation

[1B11-1B15] Natural resource exploitation (2)

Chair: Hiroyuki Nakagawa (Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.)

Thu. Oct 27, 2022 2:45 PM - 4:00 PM Room-B (12C Conf. room)

[1B11] Evaluation of roughness due to calcite dissolution in crude oil/brine/rock system: Implications for low salinity water flooding

○ Yueqi Wang¹, Xingjuan Hao¹, Yogarajah Elakneswaran¹, Takeshi Hasegawa¹ (1. Hokkaido University)

2:45 PM - 3:00 PM

[1B12] Agile uncertainty evaluation for field development with multiple high quality history matched models using cloud computing

○ DAIKI WATANABE¹, YUTA TOSUJI¹, HIROTATSU YAMABE² (1. JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation, 2. Schlumberger)

3:00 PM - 3:15 PM

[1B13] Study on improvement of shale permeability by chemical

○ Ryu Okamoto¹, Yuichi Sugai¹, Ronald Nguete¹, Takehiro Esaki¹ (1. Kyushu University)

3:15 PM - 3:30 PM

[1B14] Study on enhanced oil recovery using nano-emulsion

○ Masakazu Hayama¹, Ronald Nguete¹, Yuichi Sugai¹, Takehiro Esaki¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 3:45 PM

[1B15] Next generation MEOR (in situ Oil to Gas) Technology

○ Haruo Maeda¹, Konomi Suda¹, Masayuki Ikarashi², Hiroki Iwama², Hideyuki Tamaki¹, Susumu Sakata¹, Daisuke Mayumi¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. INPEX Corporation)

3:45 PM - 4:00 PM

Evaluation of roughness due to calcite dissolution in crude oil/brine/rock system: Implications for low salinity water flooding

(Hokkaido University*) ○Yueqi Wang* · Xingjuan Hao* · Takeshi Hasegawa* · Yogarajah Elakneswaran*

1. Introduction

Low salinity water flooding (LSWF) has been considered as a cost-effective and environmentally friendly technique for enhanced oil recovery (EOR) in carbonate reservoirs. Changes in surface roughness and oil-brine-rock interactions play an important role in the contact angle and thus wettability alteration in LSWF. In this study, atomic force microscopy (AFM) was used to measure the surface roughness of calcite in high and low salinity water. Moreover, the contact angle of the calcite in the brines was measured. Finally, influence surface roughness caused by calcite dissolution in LSWF on the contact angle was evaluated.

2. Materials and methods

A high salinity (HS) water was prepared with 1 mol/L NaCl and 0.01 mol/L CaCl₂. A 100 times dilution of HS water was selected as a low salinity (LS) water. The calcite base was immersed in the brines and equilibrated for 24 h before the measurement of surface roughness by AFM. The same base, which was used in AFM measurement, was used to measure the contact angle in the brines in order to evaluate the roughness on contact angle. A crude oil with acid number of 1.84 mg KOH/g was used in the contact angle measurement which was recorded when there was negligible change in the measured data. PHREEQC was used to analysis the calcite dissolution in the brines.

3. Results and Discussion

The surface roughness variation due to calcite dissolution in HS and LS brines are shown in Fig. 1 and Fig. 2. The surface roughness increased significantly in LS (from 5.12 nm to 24.02 nm) as

clearly seen in AFM images as well. This indicates that the calcite dissolution is higher in LS as compared to HS brine. The experimental results were confirmed by PHREEQC calculations where a twofold dissolution was obtained in LS comparing to HS. The measured contact angle of calcite surface after dissolution in the brines is shown in Fig. 3. The higher surface roughness induced by the dissolution of calcite in LS shows a lower contact angle. For example, a contact angle of 96.5° was observed in LS whereas HS gives 122.7°. This confirms that surface roughness variation due to calcite dissolution impacts the contact angle changes and thus wettability alteration in LSWF. The influence of pH and calcium concentration on surface roughness and contact angle was also evaluated.

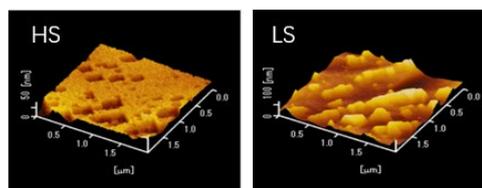


Fig.1. AFM image of calcite surface in HS and LS

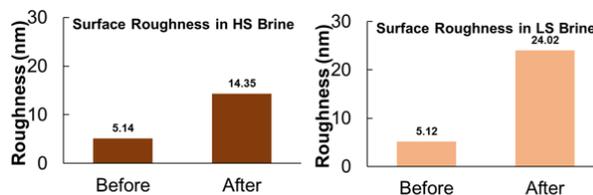


Fig.2. Change of calcite surface roughness in HS and LS

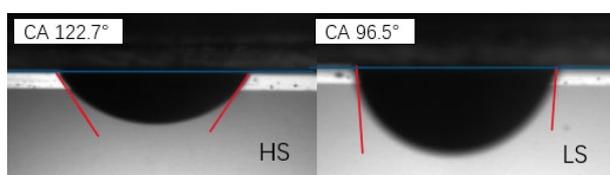


Fig.3. Contact angle in HS and LS

Cloud computing を用いた 複数のヒストリーマッチングモデルの作成と不確実性評価

(JX 石油開発*・Schlumberger**) ○渡辺 大輝*・塔筋 雄太*・山邊 浩立**

1. 緒言

巨額の投資金額が伴う追加開発プロジェクトにおいて、期待される追加生産量の不確実性を定量的に評価することは、適切な意思決定を行う上で特に重要である。過去の生産履歴を再現したモデル（以下、HM モデル）による貯留層シミュレーションで生産予測することが一般的であるが、ヒストリーマッチング作業は逆解析である性質上 HM モデルは多数存在し、生産予測結果は用いる HM モデルに左右される。しかしながら、コンピューター性能やスタディ期間の制限などを背景に、数個の代表 HM モデルで生産予測をすることも多く、不確実性の評価が十分でない可能性が懸念される。この問題を解決するため、Schlumberger 社のクラウドサービス DELFI の適用を試みた。本発表では、評価ワークフローを中心に、不確実性評価スタディの概要を報告する。

2. 手法

Schlumberger 社の提供する DELFI では、クラウド上に存在する HPC（High Performance Computing）や豊富なシミュレーターライセンスを利用できる。そのため、1 ケース辺りの計算時間の短縮化、複数ケースの並行計算が可能となり、HM 作業時間の大幅な短縮が期待される。また、DELFI 上では同社が提供する様々なソフトウェアが利用できる。この特徴を最大限に活用し、以下の 3 つにより更なる作業の短縮化を図った。

(ア) INTERSECT（高性能シミュレーター）による効率的な数値計算

(イ) Petrel を用いた Preprocessing（ケース作成、不確実要素の変数化）

(ウ) MEPO（最適化ソフトウェア）を用いた自動 HM・Postprocessing（相関表、可視化）

なお、MEPO による自動 HM では進化的戦略（Evolution Strategy）を用いた。

変数は、相対浸透率曲線のエンドポイントと曲率、岩石圧縮率、OWC、帯水層の大きさ、断層の導通性などの合計 25 個を用いた。また、OOIP、ならびに、砂の連続性を変化させた 3 つの地質モデルを作成し、地質モデルの不確実性も一部考慮している。これら 3 つの地質モデルを基に HM を実施する 3 つのベース貯留層モデルを作成し、目的関数（各坑井での計算値と実績値の誤差）を最小化するように変数を調整した。自動 HM の結果、3 か月という短期間で、各地質モデルにて目的関数が十分小さい 30 個の HM モデルを得ることに成功し、最終的に合計 90 個の HM モデルを生産予測に用いた。

3. 結果

各変数の不確実性範囲について、事前分布、ならびに、HM の結果得られた事後分布を確認した。圧力挙動に大きな影響を与える変数（例えば、生産井近傍の断層の導通性）については、HM 前と比較し不確実性範囲が狭まっているのが確認できた。

また、90 個の HM モデルで、a) 追加開発なし、b) 追加開発実施、の 2 ケースの生産量を予測した。Fig. 1 に示すように、各ケースの生産予測結果の不確実性、ならびに、追加開発投資による増産量の不確実性が確率論的に評価された。本スタディで適用した評価手法は、クラウド技術を用いて不確実性評価が効率化された一例と捉えており、他フィールドでの評価作業にも適用可能だと考えている。

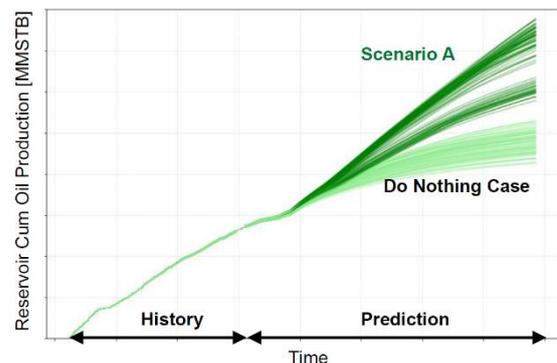


Fig. 1. Cum. Oil Production by 90 HM model

ケミカルによるシェールの浸透性改善に関する検討

(九州大学*) ○岡本 隆*・菅井 裕一*・ンゲレ ロナルド*・江崎 丈裕*

1. 緒言

近年注目を集めるシェールガスは、回収困難な超低浸透性の頁岩層中に賦存しているが、水平坑井掘削技術および水圧破砕技術の発達によりガスの回収が可能となった。しかしながら生産減退率が高く、回収率も約20%に留まると言われており、回収率の向上が課題である。一般に、シェールガスの生産においては、適時水圧破砕が繰り返されて頁岩層の浸透性が維持されるが、水の大量消費、化学物質による地下水の汚染、ならびに誘発地震などのリスクが指摘されている。本研究では、頁岩層の浸透性維持・向上のためのよりマイルドな方法としてケミカルの利用に着目し、化学処理による頁岩の浸透性の改善を検討した。

2. 実験

先行研究の結果から、頁岩の溶解に有効なケミカルとしてギ酸を選定した。本研究では、宮城県石巻産の頁岩コアに対して、ギ酸による溶解前後のマトリクスとフラクチャーの浸透率の変化をそれぞれ測定した。

まず、ギ酸による頁岩マトリクスの浸透性の改善を想定して、ギ酸(1 mol/L)に浸漬した頁岩コア($\phi=25.1$ mm, $L=60$ mm)の浸漬前後の浸透率の比較実験を行なった。続いて、水圧破砕により頁岩層に形成されるフラクチャー部分の浸透性改善を想定した実験として、頁岩コア($\phi=44.5$ mm, $L=70$ mm)を流体が流れる方向に沿って切断し、切断面同士を合わせて作製した模擬フラクチャーコア内にギ酸(1 mol/L)を流通させ、その前後の浸透率の比較実験を行なった。

3. 結果及び考察

マトリクスの浸透率比較実験は、3本のコアを対象に行なった。図1に、その結果を示す。

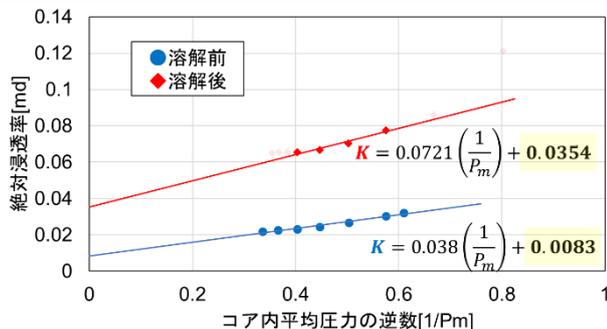


図1 ギ酸浸漬前後の頁岩コアの絶対浸透率

本実験においては、測定に使用した空気の入圧圧力に応じてみかけの絶対浸透率が変化するた

め、このみかけの絶対浸透率を直線近似した際の切片にあたる Klinkenberg 浸透率を用いて比較した。図1のように、ギ酸浸漬後のコアの Klinkenberg 浸透率は浸漬前の約4.4倍に増加した。さらに、その他2つのコアも3.3倍、1.9倍に改善され、ギ酸による溶解が頁岩マトリクスの浸透性向上に有効であることが示された。

続いて、模擬フラクチャーコアの浸透性改善実験の結果を図2に示す。本実験では、開口幅が異なる模擬フラクチャーコア内に水、ギ酸、水の順に流通させ、ギ酸流通前後の水圧入時の浸透率を比較した。

図のように、2つのコアとも絶対浸透率は約2倍に改善されており、ギ酸による溶解がフラクチャーの浸透性改善にも有効であると示された。(1)を見ると、ギ酸圧入開始直後に浸透率が急激に低下しているが、これは、ギ酸と頁岩の反応によって発生したガスがフラクチャー内にガス相を生成したことで、見かけの浸透率が下がったためと推察された。(2)では、ギ酸から再び水の圧入に切り替えた際に浸透率が低下しているが、これはギ酸濃度の低下に伴い生じた沈殿によるものと推察された。

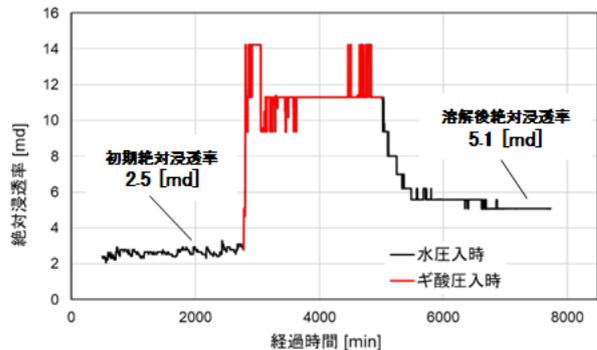
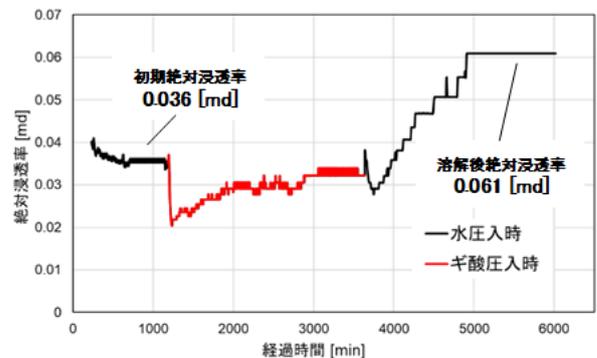


図2 ギ酸圧入による模擬フラクチャーの絶対浸透率の変化 (上:(1)、下:(2))

ナノエマルションを用いた 石油増進回収技術に関する検討

(九州大) ○はやままさかず葉山理一, すがいゆういちNguele R, えさきたけひろ菅井裕一, 江崎丈裕

1. 背景・目的

エマルションを用いた石油増進回収（Enhanced Oil Recovery, EOR）では、水溶液中に油が微粒子状で分散しているエマルションを、優先流路が形成された油層に圧入することで採油増進を図る。エマルション中に無数に分散している油滴が油層内の優先流路を塞ぐことで浸透率の不均質性が改善され、掃攻効率が向上する。この手法では、エマルションを調製する際に界面活性剤などの化学薬剤を使用するため、経済性や油層内における安定性が課題である。これらの課題を解決するためには、界面活性剤ではなく固体微粒子のみを用いて調製したエマルションであるピッカリングエマルション（Pickering Emulsion, PE）が有効であると考えた。本研究では、イオン交換水、シリカナノ粒子、軽質鉱油を用いて PE を調製し、その EOR 適用性を実験的に検討した。

2. 実験方法

調製した PE の安定性を評価するために、PE を常温常圧下で 2 週間保管し、外観の観察および光学顕微鏡による観察を行った。また、光学顕微鏡を用いて撮影した画像データをもとに PE 中に分散している油滴の粒度分布を測定した。

次に、PE の油に対する界面特性を評価するために、3 種類の試料溶液（PE、PE を調製する際に用いたシリカナノ流体（Si-NF）、イオン交換水（DI））と重質鉱油との間の界面張力を測定した。

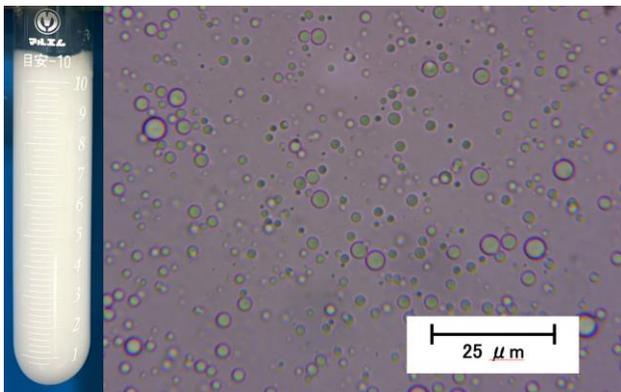


図 1. 本研究で調製した PE(写真左)と光学顕微鏡で撮影した PE(写真右)

3. 結果・考察

PE 中に分散している油滴の粒度分布の経時変化を図 2 に示す。平均粒径は調製直後では $1.33 \mu\text{m}$ 、1 日経過後では $0.96 \mu\text{m}$ 、7 日経過後では $0.53 \mu\text{m}$ と小さくなっており、これは PE 中に分散していた粒径の大きな油滴が時間の経過とともに密度差により生じた浮力で浮上し消失したことを意味する。この浮上により、ピーク粒径が時間の経過とともに小さな粒径側にシフトした。油層内の孔隙はおおよそ数ミクロンであるため、PE による優先流路の閉塞効果は時間の経過とともに小さくなると考えられる。

試料溶液と重質鉱油との間の界面張力の測定結果を図 3 に示す。PE に関しては調製後時間をおいて複数回測定した。PE の界面張力は時間の経過とともに少しずつ小さくなるものの、Si-NF や DI よりも大きいことがわかった。また、この値は界面活性剤を用いて調整された従来のエマルションよりも大きい値である。しかし、エマルションによる EOR の主たる採油増進機構は浸透率の不均質性の改善であるため、界面張力が改善されなかったことによる原油回収率の低下は軽微であると考えられる。

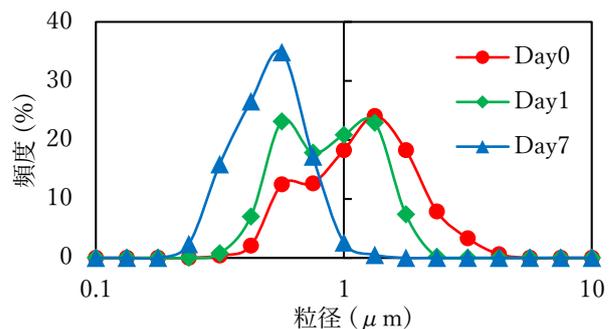


図 2. PE の粒度分布の経時変化

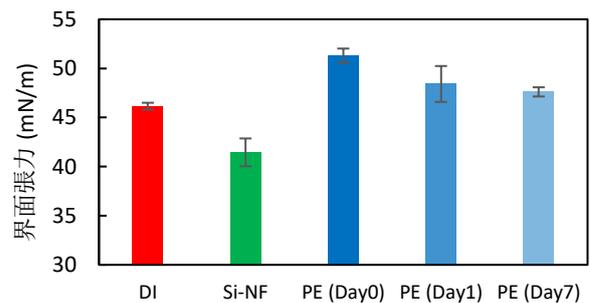


図 3. 試料溶液と重質鉱油との間の界面張力

次世代 MEOR（原位置原油分解メタン生成）技術の開発

（産総研*・INPEX**）○^{まえだはるお}前田治男*・^{すだこのみ}須田好*・^{いからしまきゆき}五十嵐雅之**・^{いわまひろき}岩間弘樹**・^{たまきひでゆき}玉木秀幸*

^{さかたすすむ}坂田将*・^{まゆみだいすけ}眞弓大介*

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、石油・ガス業界には逆風が吹き荒れている。一方で、水素や再生可能エネルギー利用への完全移行に至るまでの今後数十年間は、化石燃料、その中でも石炭や石油と比べると低環境負荷の天然ガスの利用は上昇傾向（石炭、石油利用からガス利用へのシフト）となるであろうと考えられている。我々は、特に開生産が終焉を迎えた油田の回収困難な残存原油を、地下油層で得られた微生物（メタン菌単独）と安価な栄養源を圧入することにより地下原位置にて原油を効率よく分解しメタン（天然ガスの主成分）に変換、貯蔵、生産する手法を高圧培養実験により確立したので「次世代 MEOR 技術」として紹介する。

2. 実験及び評価手法

山形県新堀油田の油層から、嫌氣的に採取した流体試料（常在微生物を含む油層水）、さらには、秋田県八橋油田から、同じく嫌氣的に採取した流体試料（常在微生物を含む油層水と原油）を用い、地下油層と同温度・同圧力（55℃、5MPa）条件下で砂粒充填による孔隙模擬環境を設定したシリンダー容器により、種々の条件下での培養実験を行い、メタン生成量及び原油組成さらには微生物叢の変化を調査した。さらに当該培養実験系のうちメタン生成が活性化された系では、原油分解メタン生成に関わる微生物を特定するため数代にわたる継代培養を実施し、当該系に培養集積された微生物群のメタゲノム解析、メタトランスクリプトーム解析等を行い原油分解メタン生成における代謝経路、関与微生物の評価を実施した。

3. 成果

栄養源添加培養系では、反応当初は油層水自体に含有する酢酸からのメタン生成、さらには培養後約4か月経過した時点から原油分解とみられるメタン生成が観測された。当該メタン生成は、培養後の原油組成を比較した結果、既に参考文献(1)(2)等で報告したように、トルエン分に加え、新たに長鎖の直鎖アルカンも分解され、微生物分解に由来するメタン生成と確認された。すなわち、適切な栄養源を

添加する事で、原油分解によるメタン生成反応を促進することが示された。一方、同様の実験条件で砂粒充填系と非充填系とを比較してみると、砂粒充填系のみ原油分解メタン生成が確認され、当該メタン生成反応には孔隙環境が有利な条件であることも再確認された。さらに数代にわたる継代培養系に培養集積された微生物を対象として、メタゲノム解析やメタトランスクリプトーム解析に代表されるいわゆるメタオミクス解析により、メタン生成古細菌である *Ca. Methanoliparum* が原油を分解し直接メタンを生成しているとの新たな結果を得た。すなわち原油分解メタン生成には、我々が国内小規模油田である新堀油田の油層内において採取した古細菌が、原油を分解し、直接メタンの生成に寄与していることが明らかとなった。

4. まとめ

地下高温高圧下孔隙環境を模擬した培養実験により、新堀油田から得られたメタン生成古細菌が単独で原油を分解し、メタン生成を誘起することが実証された。従来、微生物による原油分解メタン生成は原油を分解する細菌類とメタン生成古細菌の共生反応によるものと考えられており、今般、原油を分解し直接メタンを生成することが可能なメタン生成菌の存在を明らかにしたことは画期的な成果と考えられる。これにより、当該 MEOR プロジェクトにおける微生物の利用取り扱いが飛躍的に容易となり、残存原油のメタン変換によるガス回収の商業化が将来的に視野に入るものと期待される。

参考文献

- (1)「Methanogenic crude oil degradation induced by an exogenous microbial community and nutrient injections」, K. Suda et al, J. Pet. Sci. Eng. 201, 108458. 1-8 (2021)
- (2)「原油を分解するメタン生成菌を発見」, 眞弓大介他, 日本微生物生態学会 第34回大会一般発表 (2021)
- (3)「微生物原油分解 EOR フィールドパイロットに向けて」, 岩間弘樹他 石油技術協会誌 第 83 巻 第 6 号 (2018)