

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561004

研究課題名(和文) ジオメカニクスを考慮したフラクチャー型油ガス田の回収率向上技術の開発

研究課題名(英文) Development of Enhanced Oil and Gas Technology for Naturally Fractured Reservoir Considering Geomechanics

研究代表者

村田 澄彦 (Murata, Sumihiko)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30273478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：油ガス田の60%以上を占めるフラクチャー型油ガス田の石油・天然ガス回収率を向上させることを目的として、フラクチャーに水を圧入したときの油の排出挙動を可視化実験と流動シミュレーションによって調べた。その結果、水の圧入位置や油の生産位置に依存して回収率が変化し、特に、油の生産位置周辺のフラクチャー開口幅が小さい時に回収率が増加する傾向があることがわかった。また、圧入圧力を変化させることでフラクチャー開口幅が変化して水と油の流動挙動が変化し、これに伴って回収率が変化することを確認した。圧入圧力を低くしてフラクチャーを開口させないように水を圧入した方が高い回収率が得られることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In order to develop an enhanced oil and gas recovery technology for naturally fractured oil and gas reservoirs occupying more than 60% of oil and gas reservoir in the world, several experiments and simulations were conducted to observe the flow behavior of oil and injected water in a single fracture. From this research, it was found that oil recovery changes depending on the positions of water injection well and oil production well and also on the water injection pressure because the fracture aperture is changed by the water injection pressure and changes the flow behavior of oil and water in the fracture as the result. The recovery especially tends to be large when the fracture aperture around the oil production well is small and/or the injection pressure is small so that the fracture aperture does not become large by the injection pressure.

研究分野：資源開発

キーワード：資源開発 フラクチャー型油ガス田 ジオメカニクス EOR

1. 研究開始当初の背景

フラクチャー型の油ガス田は、国内の主要天然ガス田のみならず世界の油ガス田の60%以上を占めると言われている。しかしながら、一般的なフラクチャー型油ガス田では、フラクチャーの一部が主たる原油・天然ガスの流路となり、回収率は20%~30%と低いのが一般的である。このように、既存のフラクチャー型油ガス田には大量の原油・天然ガスが取り残されており、この取り残された原油・天然ガスを効率よく生産する技術を開発することは、我が国の石油開発技術のプレゼンスを高め、エネルギー資源の安定供給に繋がる重要な研究課題の一つである。

原油増進回収法(Enhanced Oil Recovery 以下、EOR)として、これまでに様々なプロセスや技術が開発され現場で適用されている。しかし、非均質性が強く原油・天然ガスの流路構造が複雑なフラクチャー型の油ガス田に対しては、従来のEORプロセスが効率よく機能しない。これは、浸透率が大きいフラクチャーがEORのための圧入流体(以下、EOR流体)の主な流路となり、EOR流体がフラクチャー以外に多く残留している原油・天然ガスに作用し難いためである。^{1),2)}

したがって、フラクチャー型の油ガス田における原油・天然ガスの回収率を効率よく向上させるには、フラクチャー内における原油・天然ガスの掃攻挙動を理解するとともに、ジオメカニクスを考慮して間隙圧変化に伴うフラクチャー開口幅変化についても調べる必要がある。

これまで、原油・天然ガスの貯留岩のモデルとなる多孔質岩石では間隙構造が比較的剛であるため、従来のEORの研究ではフラクチャー型油ガス田であってもジオメカニクスについては考慮されてこなかった。しかし、フラクチャーの剛性は空隙構造よりも小さいため、そのジオメカニクスを考慮しておく必要がある。本研究は、EORにジオメカニクスを考慮しようとするものであり、既存のフラクチャー型油ガス田に取り残された大量の原油・天然ガスの回収率を高める技術の開発に役立つと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、世界の油ガス田の大半を占めるフラクチャー型油ガス田におけるフラクチャー内多相流動とフラクチャージオメカニクスの関係を明らかにし、原油・天然ガスの回収率を大幅に向上させる新たな生産手法を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

フラクチャーを想定して高浸透率層がある貯留層モデルを構築して、可視化水攻法実験を実施する。その際、高浸透率層の一部をブロッキングすることによる油回収率の増加を確認する。また、天然フラクチャーの表面形状を模写した可視化フラクチャーモデ

ルを作製し、水攻法実験と数値シミュレーションを実施し、フラクチャー内の油と水の流動挙動を調べるとともに、フラクチャーに対する水の圧入位置、油の生産位置を変化させた場合の油回収率の差を調べ、油回収率を高くするための圧入井、生産井の掘削位置に付いての知見を得る。さらに、フラクチャー内圧力を変化させた場合のフラクチャー内の油と水の流動挙動と油回収率を調べ、油回収率を高くするための圧力制御法についての知見を得る。

4. 研究成果

貯留層内ブロッキングの効果と問題点を実際に確認するため、フラクチャーを想定した高浸透率層を有する二次元可視化モデルを作製し、水攻法における卓越流路となる高浸透率層をブロッキングする可視化実験を行った。さらに、貯留層内ブロッキングの効果に及ぼす貯留層の不均質性や高浸透率領域と低浸透率領域の浸透率比、油ガスの残留状態などの影響について検討するため、1) 粘性が低く圧入性が良い、2) ゲル化開始時間を制御できる、3) 目的位置に到達するまで吸着等による消失がない(極めて少ない)、の3つの条件を満たす理想的なゲル化剤が開発されたと仮定し、貯留層の不均質性を考慮した効果的なブロッキング手法について検討した。具体的には、鉛直方向の不均質性と水平方向の不均質性が異なる32個の2次元貯留層モデルを作製し、それらに対して、ゲル化剤の圧入量および後押し量を変えて貯留層内ブロッキングを実施した場合の水攻法シミュレーションを行い、その結果から、ブロッキング効果に及ぼす貯留層の不均質性およびゲル化剤および後押し水の圧入量の影響について検討した。

その結果、貯留層内ブロッキングを行うことで掃攻領域が広がり、油の回収率が増加することが確認された。加えて、可視化実験から、水平多層構造の貯留層では掃攻が不十分な低浸透率層に圧入区間および生産区間を限定することでも低浸透率層の掃攻が進み、油の回収率が増加することが確認された。また、不均質貯留層モデルに対する貯留層内ブロッキングの数値シミュレーションから、ここで設定した不均質性の範囲では、水平方向の不均質性よりも鉛直方向の不均質性のほうがブロッキング効果に及ぼす影響が大きいことがわかった。

次に、愛媛県大島産花崗岩の天然フラクチャーに対して、型取り用RTVゴム(以下、シリコーンゴム)と透明エポキシ樹脂を用いてフラクチャー面を模写し、図1に示す可視化フラクチャーモデルを作製した。この可視化フラクチャーモデルに対して、水圧入位置と油生産位置を変えた水攻法実験を行った。また、格子ボルツマン法(以下、LBM)を用いて水圧入位置と油生産位置を変えた水攻法シミュレーションを実施した。なお、エポキ

シ樹脂, シリコンゴム共に油濡れであることから, モデルのフラクチャー表面も油濡れになっている。

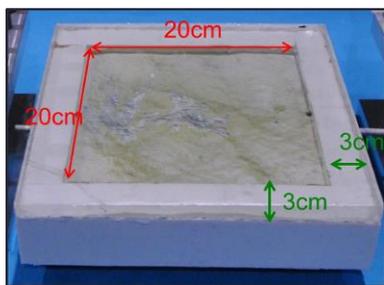


図1 可視化フラクチャーモデル

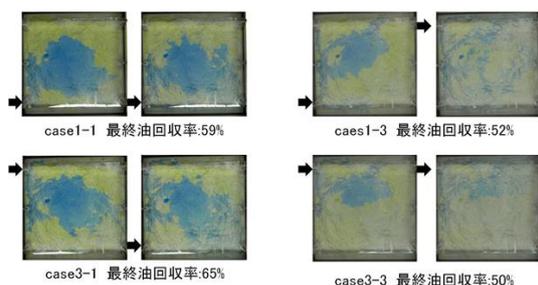


図2 ブレイクスルー時(左)と実験終了時(右)の油掃攻状況

実験の結果, 図2に示したとおり, フラクチャー内に圧入された水はフラクチャー全面で油を掃攻するのではなく, フラクチャー内で流路選択を起こし水圧入位置から油生産位置に至る複雑な流路が形成されることが観察された。これは, 開口幅が大きい領域は浸透率が大きいため流体はその部分を選択的に流動すること, フラクチャーモデルが油濡れであることから, 水が油を押し出すには毛細管圧力の分だけ高い圧力が必要であるため, 高い毛細管圧力が必要な開口幅の狭い領域に水が広がらないためであると考えられる。

また, 水が油生産位置に到達する(ブレイクスルー)まではフラクチャー中央部に掃攻領域が広がる傾向がみられた。これは, フラクチャー下面のシリコンゴムが流体圧によって変形し, 周囲の拘束の影響が小さいフラクチャー中央部の開口幅が大きくなったためであると考えられる。

図2より, 油生産位置を1(右下)にした case1-1 と case3-1 では, ブレイクスルー時と実験終了とでは油の掃攻状況に大きな変化が見られない。一方, 油生産位置を3(右上)にした case1-3, case3-3 では, ブレイクスルー前後で大きな変化が見られた。このように, 油生産位置の違いで油掃攻挙動が異なった原因として, 油生産位置1付近の開口幅が狭いため, case1-1 と case3-1 ではブレイクスルー後もフラクチャー内流体圧力が高いまま推移したのに対して, 油生産位置3付近の開口幅が広い場合, case1-3, case3-3 では, ブレイクスルー時にフラクチャー内流

体圧力が急激に下がり, シリコンゴムの変形が戻ることにより開口幅が狭くなり, 開口幅分布が変わったことが考えられる。実際の貯留層内に存在するフラクチャーについてもフラクチャーが大きくなると剛性が低くなるため, 流体圧によって比較的容易に開口幅が変化し, 特に, 開口に対して拘束を受け難いフラクチャー中央部は開口幅が大きくなることが予想される。したがって, 実験で見られた現象が発生するものと推察できる。

最終的な油の回収率は, case1-1, case1-3, case3-1, case3-3 でそれぞれ 59%, 52%, 65%, 50%であり, ケース間で最大 15%の大きな差が見られた。このことから, 実フィールドにおいても生産井, 圧入井の場所を変えることにより油回収率の向上が期待できる。また, 油生産位置を開口幅が狭い位置に設定するか, 油生産位置付近のフラクチャー開口幅を人工的に小さくすることで油回収率の向上が期待できると考えられる。

また, LBMによるシミュレーションの結果, フラクチャー内における水と油の二相流動挙動の一般的な傾向として, 図3に示すように, ①圧入流体は開口幅の広い部分を選択的に流動すること, ②フラクチャー壁面の濡れ性が油濡れの場合には, 開口幅が狭い部分では毛細管圧力が圧入圧力よりの大きいため, 非濡れ相である水は油を掃攻できないこと, ③ブレイクスルーするとその後は掃攻領域が広がりにくいこと, がわかった。また, 図4に示すように, ④油の残留の仕方には, 開口幅が狭いために掃攻されずに残留するものと掃攻されたにも関わらずフラクチャー壁面の凹凸により残留するものが存在することがわかった。

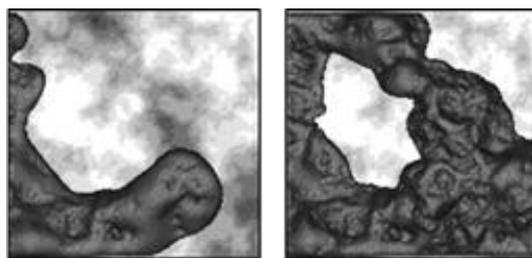


図3 LBMによる油掃攻挙動。濃い灰色の領域は圧入水を示し, 油はそれ以外で, 背景の灰色の濃淡は, フラクチャーの開口幅分布を示す。白い部分ほど開口幅が狭い。

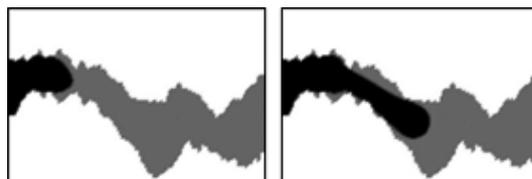


図4 断面で見た油掃攻挙動。

さらに, 実験結果と同様に, 水圧入位置と油生産位置を変化させると油回収率が変化

した。しかし、その影響はフラクチャーによって大きく異なった。本シミュレーション結果から、フラクチャー内の接触部分および開口幅が狭い部分、つまり流動を邪魔するような領域と圧入と生産の位置関係が重要であり、特に、圧入位置と流出位置を結ぶ直線において、開口幅が広く接触部分などがないような場合には、水は開口幅の広い部分を選択的に流動するという特性から、水圧入位置から油生産位置まで直線的に結ぶ単純な流路しか形成されずに、掃攻がフラクチャー全体に行き渡らないことがわかった。

最後に、上で述べた可視化フラクチャーモデルおよび流体に対して、同じ実験システムを用いて背圧を case1 から case6 までそれぞれ 20, 28, 30, 40, 60, 80kPa に変えることでフラクチャー内の流体圧力を変え、それによって開口幅が変化した時の油掃攻挙動と油回収率の変化を調べた。その結果、各ケースに対して水攻法終了時の油掃攻状況は図5に示すとおりであり、油掃攻面積率、油回収率、フラクチャーに上流下流の圧力は表1に示すとおりであった。

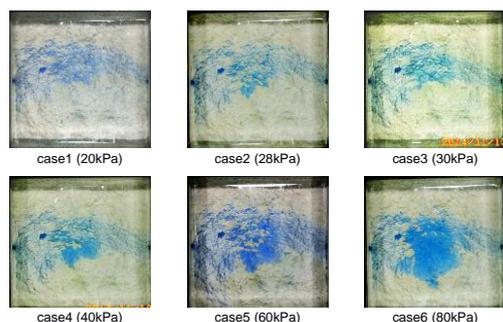


図5 水攻法終了時の油掃攻状況

表1 水攻法終了時の面積掃攻率と油回収率と上下流圧力

	掃攻面積率(%)	油回収率(%)	上流圧力(kPa)	下流圧力(kPa)
case1	14.0	47.8	18.4	11.3
case2	12.2	46.5	32.1	18.6
case3	12.7	34.8	30.2	23.5
case4	15.5	31.9	36.8	32.2
case5	18.5	32.5	55.5	52.4
case6	19.5	34.2	74.1	71.2

図5の油掃攻状況より、背圧が低い case1, case2, case3 においては圧入水が滞留して広がる現象は明確に確認できない。しかし、背圧が大きくなった case4, case5 ではフラクチャー中心部に水が滞留している領域がみられ、case6 ではその領域がさらに大きく拡大している。これより、流体圧力が約 30kPa 以上になるとシリコンゴムの変形の影響が出始めていると考えられる。したがって、流体圧によるフラクチャーの変形量を測定して、作成したフラクチャーモデルの剛性を評価し、実フラクチャーの剛性と比較することで、実フラクチャー内の挙動と比較して議論できることになる。これについては、未

評価であるため、今後の課題とする。また、表1に示したとおり、背圧が低く、フラクチャー開口幅が小さい case1 と case2 では油の回収率が 45%以上と高く、掃攻面積率が大きい case1 の方が油回収率も大きくなっている。一方、背圧が高く、シリコンゴムの変形の影響が出始めると、油回収率は約 32~35%に低下する。しかし、case4~case6 で比較する限りでは、背圧が高いものほど掃攻面積率が大きく、油の回収率も大きくなっている。以上より、フラクチャー表面の変形の影響が出始める圧力を境に、掃攻メカニズムが変化することが推測される。流体圧が低くフラクチャー開口幅が小さい場合は、フラクチャーの開口幅に応じて掃攻が進み、掃攻された領域の残留油は少ないのに対し、流体圧が高くフラクチャー表面の変形の影響が出始めると、今回使用した油濡れのフラクチャーでは油中に浮いた状態でフラクチャー中央部の開口幅が大きくなった領域に水が集まり、油を引き込みながら水が排出される。このため、掃攻領域の残留油が多くなり、掃攻面積率に比べて油の回収率が低くなると考えられる。

今後、流体圧によるフラクチャーの変形量を測定して、作成したフラクチャーモデルの剛性を評価し、実フラクチャーの剛性と比較することで、実フラクチャー内の挙動と比較して議論する必要がある。また、多相流動をシミュレートできる計算コードと流体圧の変化によるフラクチャー表面の変位を計算する力学の計算コードを連成させるシミュレーションを実施することで、より詳細な検討が可能になると考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① 村田澄彦, 芦田彬久, 高橋悟, 岡部博, 貯留層内ブロッキングによる掃攻率改善効果の検討, 石油技術協会誌, Vol. 78, No. 6, 2013, pp445-454.

[学会発表] (計 8件)

- ① T. Tarui, S. Murata, S. Takahashi, Numerical study on Behavior of Oil Residue in Single Fracture using Lattice Boltzmann Method, The 18th Formation Evaluation Symposium of Japan, September 27 - 28, 2012
- ② 樽井直良, 村田澄彦, 単一フラクチャー内の原油回収率に及ぼす影響因子に関する検討, 平成 24 年度石油技術協会春季講演会, 2012 年 6 月 5 日~7 日, 秋田市
- ③ 千歳翔太, 村田澄彦, 樽井直良, 赤井崇嗣, 高木是, 可視化モデルによるフラクチャー内での油掃攻挙動の観察, 平成 25 年度石油技術協会春季講演会, 2013 年 6 月 27 日~28 日, 東京

- ④ 村田澄彦, 芦田彬久, 高橋悟, 岡部博, 貯留層内ブロッキングによる掃攻率改善効果の検討, 平成 25 年度石油技術協会春季講演会 (招待講演), 2013 年 6 月 27 日~28 日, 東京
- ⑤ 尾島亮誠, 千歳翔太, 村田澄彦, 単一フラクチャー内原油掃攻挙動の圧力依存性について, 平成 26 年度石油技術協会春季講演会, 2014 年 6 月 3 日~5 日, 新潟市
- ⑥ S. Murata, T. Tarui and S. Takahashi, Numerical study on water flooding behavior in single fracture, The 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Oct. 14-16, 2014, Sapporo.
- ⑦ K. Umeda, R. Li, Y. Sawa, H. Yamabe, Y. Liang, H. Honda, S. Murata, T. Matsuoka, T. Akai, and S. Takagi, Multiscale Simulations of Fluid Flow in Nanopores for Shale Gas, International Petroleum Technology Conference, Dec. 10-12, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ⑧ 尾島亮誠, 千歳翔太, 村田澄彦, 単一フラクチャー内における原油掃攻挙動の圧力依存性について, 平成 27 年度石油技術協会春季講演会, 2015 年 6 月 10 日~11 日, 東京

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田澄彦 (MURATA Sumihiko)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 30273478

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし