地下エネルギー資源の増産手法の開発

研究代表者　栗原　正典
（創造理工学部　環境資源工学科　教授）

１．研究課題

原油の三次回収法あるいは EOR（Enhanced Oil Recovery）の 1 つとして、近年、低塩分濃度水攻法（LSWF：Low Salinity Water Flooding）が注目されている。この手法は、低塩分濃度（1000～5000 ppm）の水（LSW：Low Salinity Water）を油層に圧入して油を回収するものであるが、圧入水の濃度が通常の水攻法で使用するものよりも低いこと以外は、通常の水攻法と同じである。従って、他の EOR よりも操業コストは安く、また、化学薬品等を使用しないため、環境への負荷も少ないという利点があり、現在多様な研究が進められている。しかしながら、この手法については様々な増油メカニズムが提唱されているにもかかわらず、現時点では決定的なメカニズムの解明には至っていない。また、砂岩と炭酸塩岩の油層では、LSWF による原油の回収メカニズムは異なると考えられている。

本研究では、LSWF のメカニズムの解明を目的とし、コアを用いた掃攻実験および回収水の分析、微小モデルによる LSWF 挙動の観察、LSWF の挙動予測数値シミュレータの開発・改良を実施した。また、EOR の挙動予測に広く適用される 3 相混在下における相対浸透率を、非定常状態の実験結果から数値計算によって推定するプログラムも作成した。

２．主な研究成果

2.1　コアを用いた実験

昨年度までに実施したベレア砂岩コアによる実験に替えて、実油田コア、（粘土鉱物含有量を自由に調整可能な）サンドパックコアを用いて LSW による掃攻実験を実施した。その結果、実油田コアの 1 つでは、図 1 に示すように、地層水を 30 倍に希釈した LSW の圧入により 18.73 %の増油を達成し、LSWF の効果を確認するとともに、排出水中の各イオンの濃度から、LSWF のメカニズムとして MIE（Multi-component Ionic Exchange）が有力であるとの示唆を得た。しかしながら、他の掃攻実験では、LSWF による顕著な増油は計測されず、粘土鉱物と LSW との接触、原油中の極性成分と陽イオンの結合、イオン交換等の複雑な現象の定量的な解析が必要であることが確認された。

2.2　微小モデルによる LSWF 挙動の観察

上記で示唆された複雑な現象を可視化して解析するために、粘土板に付着させた油滴の上に LSW を流動させてその形状を観察する装置、および孔隙形状を模したハッチングを施したシリコン板によるマイクロモデルを作製し、微視的な現象を把握することを試みた。その結果、LSWF によって孔隙媒体の濡れ特性が oil wet から water wet に変化すること、それに伴って油 - 水の相対浸透率が変化することが確認された。

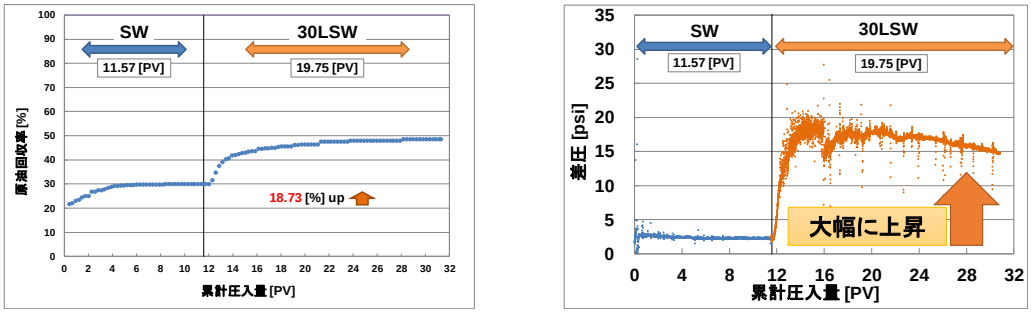

図 1　実油田コアを用いた LSEF 掃攻実験結果例（左：油回収量；右：差圧）

2.3　LSWF の挙動予測数値シミュレータの開発・改良

LSWF のコア掃攻実験結果を定量的に解析し、さらにはフィールドスケールの LSWF 挙動を予測するために、以下の機能を有する数値シミュレータを構築・改良した。

- 4 相（油、水、吸着油、吸着水）、13 成分（非極性油、極性油、H_2O、NaCl、$CaCl_2$、$MaCl_2$、HCl、H^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、OH^-、Cl^-）の移流・拡散
- 速度論に基づく電離反応
- 速度論に基づく陽イオンの吸脱着反応
- 速度論に基づく陽イオン交換反応
- 濡れ性の変化に伴う相対浸透率の変化
- 水相、油相の組成変化による粘度の変化

本シミュレータは、以下のように導出した支配方程式を、電離反応、吸脱着反応、相対浸透率変化等を記述した構成式と共に離散化して、数値的に解くものである。

流動油相（非極性油、極性油）

$$F_{lc}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho_l x_c k k_{rl}}{\mu_l}\left(\nabla p_l-\rho_l g\nabla D\right)\right]+\hat{q}_c+v_{adc}-\frac{\partial\left(\rho_l x_c \phi S_l\right)}{\partial t}=0$$

流動水相（H_2O、NaCl、$CaCl_2$、$MaCl_2$、HCl、H^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、OH^-、Cl^-）

$$F_{lc}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho_l y_c k k_{rl}}{\mu_l}\left(\nabla p_l-\rho_l g\nabla D\right)\right]+\hat{q}_c+v_{adc}+\sum_{j=1}^{5} r_{cj}+d_c-\frac{\partial\left(\rho_l y_c \phi S_l\right)}{\partial t}=0$$

吸着油相（極性油）

$$F_{lc}=-v_{adc}-\frac{\partial\left(\rho_l \phi S_l\right)}{\partial t}=0$$

吸着水相（H^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）

$$F_{lc}=-v_{adc}-\frac{\partial\left(\rho_l z_c \phi S_l\right)}{\partial t}=0$$

上記で構築したシミュレータを用いて、過去に実施した LSWF の掃攻実験の再現を試みた。その結果、図 2 に示すように、実験結果と計算結果の良好な一致を得ることができ、本シミュレータの有効性が検証された。

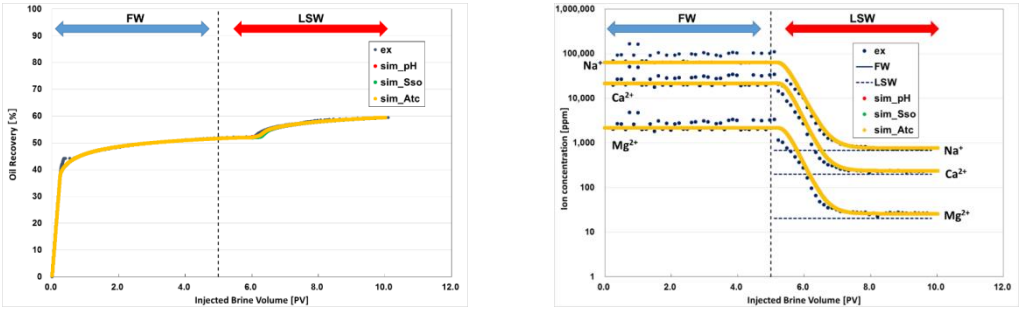

図 2　実験結果とシミュレーション結果の比較例（左：油回収量；右：排出イオン濃度）

2.4　3 相混在下における相対浸透率を推定するプログラムの作成

EOR の挙動予測においては、3 相混在化での相対浸透率を正しく推定することが極めて重要である。この相対浸透率は定常状態での流動実験を行うことで測定できるが、時間がかかり過ぎるために実践的でなく、簡便式による推定を行わざるを得ないのが現状である。本研究では、比較的短時間に実施することが可能な非定常流動実験の結果と流動シミュレーションの結果をマッチングすることで、3 相混在化での相対浸透率を正しく推定するプログラムを作成した。最適化手法として、従来採用していた勾配法に替わって、繰り返しラテン超方格法および遺伝的アルゴリズムを採用し、良好な結果を得ることができた。

３．　共同研究者

ウトモ・プラタマ・イスカンダル（創造理工学部　環境資源工学科　助手）

４．　研究業績

4.1　学術論文

Takamatsu, N., Ishiwata, T., Miyagawa, K., Kurihara, M., Morishita, R. and Watanabe, J.: “Development of Numerical Simulator for Low Salinity Water Flooding Process,” WORKSHOP & SYMPOSIUM IEA-EOR, 2017

Utsunomiya H., Kurihara, M., Taniguchi, H.: "Development of Optimization Program for Estimation of Three-Phase Relative Permeability from Unsteady-State Coreflood Experiments," 22th Formation Evaluation Symposium of Japan, 2016

4.2　学会および社会的活動

石油技術協会会長

日本地層評価学会（SPWLA Japan）会長

５．　研究活動の課題と展望

本研究により、砂岩油層における LSWF のメカニズムの解明にはある程度成功したが、未だに十分に説明できない現象も観察されている。また、炭酸塩岩油層における LSWF のメカニズムの解明には至っていない。今後は炭酸塩岩油層を含め、未だに未解明の現象の解明を意図した実験およびシミュレータの開発を継続する。