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石油増進回収法(EOR:Enhanced 0il 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。

同じく EOR の 1 つとして、シリカアルミナ等のナノ粒子の水溶液を油層に圧入すること(NF: Nono-particle Flooding)によって、通常の水攻法に比べて油の回収率が増加する可能性があることも報告され始めているが、この手法の増油メカニズムも未解明である。

本研究室では、これまでもLSWF およびNFのメカニズムの解明を目的とし、各種の実験やシミュ レータ開発を続けてきているが、本年度は炭酸塩岩油層に注目した LSWF のコア掃攻実験および排 出水の分析、ナノ粒子溶液の動的な特性を含めた基本特性の測定、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に、人工知能(AI: Artificial Intelligence)による推定機能を付加した。

2. 主な研究成果

2.1 低塩分濃度水による EOR に関する研究

コア掃攻実験

昨年度実施した炭酸塩岩コアを用いた掃攻実験では、LSWF による原油回収率の増加は認められ なかった。そこで、本年度は実験で用いる原油を替え、炭酸塩岩コアを用いた掃攻実験を実施した。 この実験では、原油を満たしたコア試料を通常の水で掃攻した後、LSW で掃攻し、さらに炭酸塩岩 油層における LSWF において重要な役割を果たすと考えられている SO4²⁻イオンを多量に含む低塩分 濃度水(ALSW)によって原油の掃攻を試みた。その結果、図 1 に示すように、通常の水攻に比べ、 LSW および ALSW の圧入により、約 4.4%の増油を確認した。この結果から、炭酸塩岩油層における LSWF のメカニズムとして、MIE-C (Multi-component Ionic Exchange-Carbonate) に加え、電気二 重層の拡大やエマルションの形成が挙げられること、LSWF が酸化の高い原油により効果的であるこ と、等の示唆を得た。



図1 炭酸塩岩コアを用いた LSWF 掃攻実験結果例

(左:油回収率;中:排水中の陽イオン濃度;右:排水中の陰イオン濃度)

(2) 数値シミュレータの開発

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、昨年度までに数値シミュレータを構築・改良してきたが、本年度はこれをさらに改良し、 砂岩、炭酸塩岩の両油層を対象に、主として以下のメカニズムを再現可能な数値シミュレータの構 築を試みた。

- 砂岩油層:Multiple-component Ionic Exchange(MIE 理論)
- 砂岩油層:濡れ特性の変化
- 砂岩油層:微粒子の流動
- 炭酸塩岩油層: Multiple-component Ionic Exchange in Carbonate (MIE-C 理論)
- 炭酸塩岩油層:鉱物溶解

上記のメカニズムを再現するために、本シミュレータでは、以下のように導出した支配方程式を、 ①各種成分の移流・拡散、②各種イオンの電離平衡、③速度論に基づいた岩石表面におけるイオン の吸脱着、④電気二重層を考慮したイオンの吸脱着、⑤岩石表面における微粒子の剥離及び流動す る微粒子による流路閉塞、⑥イオンの吸脱着、pH 値変化、塩分濃度変化に伴う濡れ特性の変化、⑦ 鉱物溶解とそれに伴う濡れ特性の変化、⑧水相の組成変化による粘度の変化、等を記述した構成式 と共に離散化して、数値的に解いている。

油相中の成分に対する支配方程式

$$F_{c} = -\nabla \left[\frac{kk_{ro}}{\mu_{o}} \rho_{o} w_{oc} (\nabla p_{o} - \rho_{o} w_{oc} g M_{c} \nabla D) \right] + \frac{I_{wel} \lambda_{o} (p_{BH} - p_{o}) \rho_{o} w_{oc}}{dV_{grid}} - \frac{\partial}{\partial t} (\phi S_{o} \rho_{o} w_{oc}) + \alpha_{po} k_{adc} (A_{wc} - A_{wctargo}^{ad}) + k_{sgc} (A_{sc} - A_{sctargo}^{sg}) S_{o} - k_{sbc} (A_{sc} - A_{sctargo}^{sb}) R_{o}^{sand} = 0$$

水相中の成分に対する支配方程式

$$\begin{split} F_{c} &= -\nabla \left[\frac{kk_{r\,w}}{\mu_{w}} \rho_{w} w_{wc} \left(\nabla p_{w} - \rho_{w} w_{wc} \, gM_{c} \nabla D \right) \right] + \frac{WI\lambda_{w}(p_{BH} - p_{w})\rho_{w} w_{wc}}{dv} - \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_{w} \rho_{w} w_{wc}) + D_{c} \nabla^{2}(\rho_{w} w_{wc} \, \varphi S_{w}) \\ &+ \sum_{j=1}^{N_{cr}} \alpha_{c\,rj} k_{c\,rj} \left(1 - \frac{K_{e\,q\,j}}{K_{e\,q\,j}^{t\,a\,r\,ge}} \right) \rho_{w} w_{wc}^{m\,i\,n} \, \varphi S_{w} + k_{a\,d\,c} \left(A_{c} - A_{c\,t\,a\,r\,ge}^{ad} \right) + k_{s\,gc} \left(A_{c} - A_{c\,t\,a\,r\,ge}^{sg} \right) S_{w} - k_{s\,b\,c} \left(A_{c} - A_{c\,t\,a\,r\,ge}^{sg} \right) S_{w} - k_{s\,b\,c} \left(A_{c} - A_{c\,t\,a\,r\,ge}^{sg} \right) R_{w}^{s\,a\,nd} \\ &+ \sum_{j=1}^{N_{md}} \alpha_{md\,j} k_{md\,j} \left(1 - \frac{K_{s\,p\,j}}{K_{s\,p\,j}^{t\,a\,r\,ge}} \right) \rho_{w} w_{wc}^{m\,i\,n} \, \varphi S_{w} = 0 \end{split}$$

上記で構築したシミュレータを、その計算結果を解析解等と比較することにより検証した後、図 2 に示すように、本シミュレータによって、本年度を含めこれまでに実施したコア掃攻試験結果を 再現することに成功した。



図2 LSWF 挙動予測シミュレータを用いたコア掃攻実験の再現例 (左の4枚の図:砂岩コアを用いた実験;右の5枚の図:炭酸塩岩コアを用いた実験)

2.2 ナノ粒子溶液による EOR に関する研究

1種類のコロイダルシリカを、濃度 0.01 wt%~1.0 wt%で合成地層水に分散させて、5種類の溶液を作製した。これらの溶液 - 原油 - (Aging)砂岩プレートの系における溶液とプレート間の接触角の測定に加え、これらの溶液による動的な岩石の濡れ特性の変化を定量的に測定すべく、原油でAging したコア試料を用いて、Amott 試験および Spontaneous Imbibition 実験を実施した。

その結果、図 3 に示すように、これらの溶液によって接触角が大きく変化することはなかった が、動的な試験では、ナノ流体による原油回収率の向上、高濃度ナノ溶液におけるナノ粒子の凝集 による効力の低下、等が確認された。



図3 コロイダルシリカ溶液の特性測定結果例 (左:砂岩プレートとナノ溶液ととの接触角;右:Amott 試験結果)

2.3 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

昨年度までの研究では、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、従来の勾配法あるいは非勾配法の最適化アルゴリズムを用いてマッチング 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。

本研究では、三相相対浸透率の推定に、AIの一種である Recurrent Neural Network(以下 RNN) を採用し、さらに、時系列データの扱いに長けた Sequence to Sequence モデルを用いることで、 非定常流動の実験データから、三相相対浸透率を推定することに成功した。

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

Wijayanto T., Kurihara M., Kurniawan T. and Muraza O.: "Experimental Investigation of Aluminosilicate Nanoparticle for Enhanced Recovery of Waxy Crude Oil", Energy and Fuel, 33, July, 2019

Takahashi H., Kurihara M., Saito S. and Morishita R: "Development of Numerical Simulator for Predicting Oil Recovery by Low Salinity Water Flooding, Taking Various Mechanisms into Consideration", 25th Formation Evaluation Symposium of Japan, September, 2019

高橋悠,栗原正典,森下諒一,高松尚輝:"各種メカニズムを考慮した低塩分濃度水攻法挙動予 測シミュレータの開発",石油技術協会誌,84(5),2019

Saito S.: "Development of Numerical Simulator for Predicting Low Salinity Water Flooding Behavior in Carbonate Reservoirs", SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, October, 2019

4.4 受賞·表彰

高橋悠:石油技術協会令和元年度春季講演会優秀発表賞

4.5 学会および社会的活動

石油技術協会理事 石油学会理事 日本地層評価学会 (SPWLA Japan) 会長 SPE/JAPT-ATW 2019 Tokyo Chairman

5. 研究活動の課題と展望

本研究により、炭酸塩岩油層における LSWF のメカニズムおよび NF による増油メカニズムをある 程度解明することができた。しかしながら、実験の再現性は十分ではなく、より多くの実験を行う 必要がある。特に NF については、早期にコア掃攻実験を実施することを計画している。

また、LSWF の挙動予測シミュレータに関しては、砂岩、炭酸塩岩を対象としたシミュレータを統合した、総合 LSWF 挙動予測シミュレータを完成させたが、さらなるメカニズムを取り扱えるように改良を続ける予定である。また、NF の挙動予測シミュレータの開発にも着手したところである。

さらに、3 相混在下における相対浸透率を推定するプログラムについては、AI による推定精度や計 算効率の向上を目指す。