論 文

水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR における油層内
挙動と石油増進回収機構に関するシミュレーション研究*

菅井 裕一**・洪 承燮***・千田 侑****・榎本 兵治****

(Received, September 5, 2003; accepted January 15, 2004)

Simulation study on the performance and mechanism of MEOR
with a water-soluble polymer producing microbe

Yuichi Sugai, Chengxie Hong, Tadashi Chida and Heiji Enomoto

Abstract: Our research group has carried out experimental studies to analyze the performance and the mechanism of MEOR with TU-15A, a microbe that produces water-soluble polymer. In the previous study, a mathematical model for this MEOR was developed, including almost all important phenomena such as growth and death of microbe, consumption of nutrient, production of water-soluble polymer, increase of water viscosity and the flow of reservoir fluids.

In this study, the validity of the MEOR simulation model was firstly examined by comparison between experimental and computed results. The results of the numerical simulation agreed with the experimental results in terms of oil recovery, injection pressure, oil cut and flow profile of injection water.

Next, numerical simulation was carried out to analyze the performance and mechanism of this MEOR process for five-spot pattern flooding. The procedure and the conditions used are as follows.

Step 1: Conduct water flooding until water cut becomes 90%.

Step 2: Inject microbe and nutrient solution into reservoir up to 0.1 PV.

Step 3: Shut-in and wait for cultivation in the reservoir for 10 days.

Step 4: Conduct postflash until water cut becomes 95%.

The quantitative changes of microbe, nutrient, water viscosity and oil saturation were analyzed. Regarding the alteration of flow pattern in the reservoir, it was found that (1) the water-soluble polymer produced by the microbe flowed into the main flow channel along the shortest way between the injection well and the production well and water viscosity there increased, (2) subsequently more uniform flow profile of injected water for oil recovery was established, and (3) then the residual oil was mobilized to the production well. The more than 10% additional oil recovery was obtained in the early phase of postflash in this MEOR process compared with waterflooding.

Key words: MEOR, simulation, polymer, viscosity, flow profile, TU-15A

* 平成13年 5 月30日, 平成13年度石油技術協会春季講演会で一部発表 A part of this paper was presented at the 2000 Technical Meeting of the JAPT, May 25, 2000.

** 東北大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Tohoku University (現秋田大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー)

*** 東北大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Tohoku University (現中国石油天然気股
分有限公司吉林油田分公司)

**** 東北大学大学院環境科学研究科 Graduate School of Environment studies, Tohoku University

1. はじめに

MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery : 微生物 EOR) は, 対象とする油層の状況に応じて最も効果的な機能を有する微生物を選択して利用することで, 広くさまざまな油田への適用と効率の良い増進回収が可能であると期待されている。事実, これまでに世界中で多くのフィールドテストが実施され, ほとんどの場合において石油の増進回収が報告されている¹⁾。

しかし、前報²⁾でも述べたように、これまでの MEOR 研究では、油層内における微生物の挙動ならびにそれに伴う石油の増進回収の機構などまで詳細に検討した例は、界面活性物質を生産する微生物についてわずかに報告されているのみで^{3),4)}、石油の増進回収効果の有無のみを検討したものがほとんどである。

筆者らの研究グループも種々の機能を有する微生物を用いた場合の MEOR についての実験研究^{5~9)}を行い、それぞれ高い石油増進回収効果が期待されることを明らかにしている。さらに、油層内の微生物、栄養源ならびに代謝産物の量的変化やそれらの流動などの油層内挙動と、それらが石油の増進回収をもたらす機構についてシミュレーション解析により考察することを目的として研究を進めている。

そのため、前報²⁾では水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR の数値モデルの構築について報告した。そのなかで、微生物の増殖、栄養源消費ならびに水溶性ポリマーの生産挙動と生産された水溶液の流動挙動について一般式で示すとともに、すでに報告した高機能水溶性ポリマー生産微生物である *Clostridium* sp. TU-15 A⁸⁾ (以下、TU-15 A と称する) をモデル微生物とした場合について、その培養実験結果を基に数式化した。また、水溶性ポリマーの生産に伴って変化する水相粘度に対応した不動水飽和率、残留油飽和率および油・水相対浸透率の変化を TU-15 A の場合について実験的に明らかにし、それぞれ数式化した。

本報では、まず要素別に構築したこれらの数式を組み合わせたモデル (以下、MEOR シミュレーションモデルと称する) による油層内流体の流動挙動の再現性について、室内石油回収実験結果との比較により検討する。さらに、本シミュレーションモデルを用いて、水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR における油層内での微生物、栄養源ならびに代謝産物の量的変化やそれらの流動などの油層内挙動と、それらが石油の増進回収をもたらす機構について考察する。

2. シミュレーションモデル

本研究で対象とする水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR では、最も期待される効果として掃攻率の改善が挙げられる。また、単一の油層では、厚さよりも水平面の坑井間隔はるかに大で、垂直掃攻率よりも面積掃攻率の改善効果の方が石油の増進回収に大きく影響を及ぼすと考えられる。以上の理由から、本研究では水平二次元油層を対象油層とし、前報²⁾で報告した基本方程式を (x, y) 座標系で差分化した。

得られた差分方程式をもとに計算プログラムを作成し

Fig. 1 Flow chart of calculation.

て、基本変数である圧力 P 、油飽和率 S_o (もしくは水飽和率 S_w)、微生物濃度 W_c 、栄養源濃度 W_m ならびに代謝産物濃度 W_p を求める。これらの基本変数の解法としては IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation) 法を用いた。さらに、微生物の増殖、栄養源の消費ならびに代謝産物の生産などのパラメーターを計算プログラムに組み込んで、シミュレーションモデルを作成した。このモデルにおける計算の流れは Fig. 1 に示すとおりである。

3. 室内石油増進回収実験との比較による MEOR モデルの妥当性に関する検討

3.1 室内石油増進回収実験

筆者らの研究グループでは、これまでに TU-15 A の石油増進回収効果を検討するために、室内石油回収実験を行った。この実験の詳細については別報³⁾を参照していただきたいが、Fig. 2 に示すように、特性の異なる模擬油層を並列に配置した 2 つの異なる装置を用いて、坑

Fig. 2 Schematic representation of the equipment for flooding experiments.

(a) Five point pattern experiment.

(b) Anisotropic permeability experiment.

井間流路の圧力勾配差ならびに浸透率の異方性による石油の取り残しについて、TU-15 A の高粘度培養液による改善効果を検討した。まず、これらの実験と同一条件で計算を行い、実験結果と計算結果との比較によりシミュレーションモデルによる現象の再現性について検討した。

なお、本モデルでは油・水の2相流体によって飽和されている油層を想定しており、ガス相は考えていない。また、一般に多くの微生物は栄養源を消費して二酸化炭素等のガスを生産するが、微生物が生産するガスの広大な油層内における効果については未解明であり、かつ本研究では微生物が油層内で生産する水溶性ポリマーに着目して検討するため、ガスの発生を無視したモデルとなっている。しかし、低圧系の小規模実験装置内で微生物を培養する実験ではガスの影響を無視できないため、TU-15 A を培養して得られた高粘度培養液を圧入して、油層内で微生物を培養することなく石油の増進回収を行う場合の実験結果を比較の対象とした。したがって、微生物の油層内培養に関わる現象については直接検証して

いないものの、微生物挙動にかかわる数値モデルは、前報²⁾で報告したようにモデル微生物の培養実験結果から数式化したものであるため、本論文の対象油層内における微生物挙動を再現するのに妥当なモデルである。

3.2 計算条件

前述した石油増進回収実験では、流動性の高い油層（短い油層、高浸透率油層）の産出流体中の含油率（以下、含油率と略称）が1%以下になるまで水攻法を行い、その後、あらかじめバイアル瓶内でTU-15 A を培養して得られた高粘度培養液を圧入する形式で実験を行った。したがって計算も、この実験と同一手順、同一条件をモデル化して行った。また、油層内での微生物活動は生じないものとした。なお、実験に用いた模擬油層のうち、浸透率の異方性実験における高浸透率油層のみ6号珪砂（東北珪砂製、平均粒径：200 μm）で作製した。そのため、この模擬油層の油-水相対浸透率、残留

Fig. 3 Relationship between relative permeabilities and normalized water saturation for the high permeability reservoir.

Fig. 4 Relationship between residual oil saturation and viscosity of culture solution for the high permeability reservoir.

Table 1 Comparison of experimental and calculated Oil recovery

Five point pattern experiment					Anisotropic permeability experiment				
Sandpack	Short		Long		Sandpack	High		Low	
	Exp.	Calc.	Exp.	Calc.		Exp.	Calc.	Exp.	Calc.
Water flooding	*79.1	78.6	68.6	69.0	Water flooding	79.4	80.0	56.2	57.8
Culture solution flooding	6.3	7.9	18.2	17.2	Culture solution flooding	6.0	8.9	23.3	27.7

*vs. initial oil

(%)

油飽和率ならびに不動水飽和率については、前報の7号珪砂の場合と同様に、新たに実験結果から数式化した。計算に用いた6号珪砂製模擬油層の油-水相対浸透率曲線を Fig. 3 に示し、水相粘度の変化による残留油飽和率の変化を Fig. 4 に示す。なお、水相粘度の変化による不動水飽和率の変化については前報で求めた7号珪砂製模擬油層の場合とほぼ同様であった。砂岩粒子の表面は水濡れ性であるため、その表面には一定の水（不動水）が残留する。したがって、不動水飽和率は砂岩の表面積と油層の孔隙容積によって決まる。6号珪砂で作製した模擬油層の砂岩の表面積は7号珪砂の場合よりも小さいが、孔隙容積も小さいため、不動水飽和率がほぼ同様になるものと考えられる。したがって、不動水飽和率の変化については両模擬油層で共通の式を用いることとした。

3.3 再現性に関する検討

シミュレーション計算の再現性の検討は、油回収率、圧入圧力、含油率ならびに流動性の低い油層への水の流入比を指標として行った。

まず油回収率に関する実験結果と計算結果との比較を Table 1 に示す。実験では、TU-15A 培養液の圧入により水攻法で取り残された流動性の低い油層の油が多く回収され、高い増進回収率が得られているが、計算においても同様の結果が得られた。また、実験中の圧入圧力、含油率ならびに流動性の低い油層への水の流入比の比較について、それぞれ Fig. 5, Fig. 6 ならびに Fig. 7 に示す。各図の(a)は坑井間流路の圧力勾配差を模擬した場合、(b)は浸透率の異质性を模擬した場合である。

実験における圧入圧力は、水攻法による油の回収が進むにつれて低下し、その後培養液の圧入により水相粘度が増加して、圧入圧力も上昇する。計算においてもこの傾向が再現されており、圧入圧力の値も実験値とよく一致している。

含油率については、水攻法による油の回収が進むにつれて、流動性の高い油層側の含油率が速やかに低下し、流動性の低い油層側の含油率はゆっくりと低下する傾向であった。また、培養液の圧入開始後、両場合の両油層

で含油率が急激に上昇する挙動が認められ、油層内での油バンクの形成が示唆されている。計算でも、おおむねこのような挙動を再現できており、それぞれの実験における、各油層から得られる含油率の値も実験値とよく一致している。なお、坑井間流路の圧力勾配差を模擬した場合における水攻法時の実験値と計算値との間に差が生じたが、これは実験で用いた油層の油・水相対浸透率と計算で用いた相対浸透率曲線との差によるものと考えられ、油層内挙動ならびに石油増進回収機構を検討するに際して重大な支障にはならないものと考えられる。

Fig. 5 Comparison of experimental and calculated pressure drop.
(a) Five point pattern experiment.
(b) Anisotropic permeability experiment.

Fig. 6 Comparison of experimental and calculated oil cut.
(a) Five point pattern experiment.
(b) Anisotropic permeability experiment.

流動性の低い油層への水の流入比は水攻法では低い値であったが、培養液の圧入により大きく改善されるという結果が得られており、計算でもこの挙動は再現できている。流動性の低い油層への水の流入比に関しても、坑井間流路の圧力勾配差を模擬した場合における水攻法時の実験値と計算値との間にわずかに差が生じたが、含油率の場合と同様に、実験で用いた油層の油・水相対浸透率と計算で用いた相対浸透率曲線との差によるものと考えられる。

以上の検討から、計算結果と実験結果はよく一致しており、本研究で構築した MEOR シミュレーションモデルは微生物が生産した水溶性ポリマーの油層内流動挙動と石油増進回収効果に関し高い再現性を有しているといえる。また、前述したように、油層内における微生物にかかわる現象についてももともと高い再現性を有しており、本モデルは水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR における油層内挙動ならびに石油増進回収機構を考察するのに十分な再現性を有していると考えられる。

Fig. 7 Comparison of experimental and calculated fractional flow rate for the long reservoir or low permeability reservoir.
(a) Five point pattern experiment.
(b) Anisotropic permeability experiment.

4. シミュレーションによる油層内挙動と石油増進回収機構の考察

4.1 シミュレーション計算条件

本節におけるシミュレーション対象油層は、50 m 四方の大きさを有する 5 点水攻法パターンの四分の一区画とし、圧入井と生産井はその対角点に 1 本ずつ配置した。油層の絶対浸透率は均一とした。計算条件を Table 2 に示す。手順は、まず産出流体中の含水率が 90% に達するまで、圧入レート 0.01 PV/day の定流量で水攻法による油回収を行う。続いて微生物濃度が 1.0×10^6 cells/cm³、モラセス濃度 4 % の微生物・栄養源混合液を水攻法と同じ圧入レートで 0.1 PV 圧入する。その後、坑井を Shut-in して、10 日間油層内培養を行う。最後に、含水率が 95% に達するまで後押し水を 0.01 PV/day の定流量で圧入して増進回収を行う。また、比較の対象として微生物・栄養源混合液を圧入せず、水攻法を最後

Table 2 Calculation conditions

X direction length	50.0m
Y direction length	50.0m
Reservoir thickness	1.0m
X direction grid size	2.0m
Y direction grid size	2.0m
Initial reservoir pressure	5.0MPa
Initial oil saturation	78.0%
Oil viscosity	9.6cP
Reservoir water viscosity	0.9cP
Porosity	30.0%
Absolute permeability	1,000md
Time step	3,600sec
Time step for incubation	600sec

まで行った場合についても計算を行った。

4.2 油層内挙動の解析

まず水攻法における油飽和率分布の変化を Fig. 8 に示す。水攻法では、徐々に圧入井と生産井間の最短距離

領域の流れが先行し、水のメイン流動チャンネルを形成する。1.04PV 水を圧入した時点で、前押しとしての水攻法終了と規定した生産流体中の含水率が90%に達するが、この段階においても水のメイン流動チャンネルより離れた領域では多くの油が残留している。以降、水攻法後の増進回収について、微生物、栄養源、代謝産物、油飽和率ならびに圧入圧力の各項目ごとに解析する。

(1) 微生物

まず微生物・栄養源混合液圧入期間中の微生物の分布 ($10^{6.0} \sim 10^{8.2}$ cells/cm³) を Fig. 9 (a)に示す。微生物の挙動を詳細に解析するために図では、0.02~0.08PV の分布については圧入井近傍の18m 四方部分を、0.10PV の分布については圧入井近傍の30m 四方部分をそれぞれ拡大して示す。

圧入直後の微生物は誘導期あるいは対数増殖期の初期段階にあるため、圧入井近傍2m 地点までは微生物濃度は 1.0×10^8 cells/cm³ 以下で推移している。2~4m 区間では微生物濃度が 1.0×10^8 cells/cm³ 以上を示してお

Fig. 8 Map of oil saturation during water flooding at different times. **Fig. 9** Map of cell concentration during (a) cell and nutrient injection, (b) shut-in and incubation, and (c) postflash at different times.

り、圧入された微生物がこの区間で対数増殖期を終了し、最大微生物濃度に達することが分かる。また、これより下流域では微生物濃度が再び 1.0×10^8 cells/cm³以下となり、より下流側ほど微生物濃度が減少していくことから、この区間における微生物は、栄養源の枯渇により死滅期の状態にあることが分かる。圧入の初期段階（～0.04 PV）で、微生物は水のメイン流動チャンネルに優先的に圧入されるが、時間経過とともにこの領域で代謝産物が生産されると、この領域を避けて圧入されるようになる。したがって、微生物・栄養源混合液圧入終了時（0.10 PV 圧入時）には図に示すように、圧入井を直角点とする二等辺三角形の形状に微生物が分布し、特にその二等辺部分（以下、図中の油層端辺部と称す）の微生物濃度が高くなる。なお、この計算結果から微生物の増殖は圧入井近傍（TU-15A の場合は 4 m の範囲内）で生じることが分かった。このことから、水攻法を実施している油層であれば、高温油層であっても圧入井近傍の温度が圧入水温に依存して微生物の増殖に適した 30℃ 程度の温度に保たれている場合もあると考えられ、その場合は高温油層でも中温微生物を用いた MEOR が適用可能となることが示唆される。

続いて坑井の Shut-in・油層内培養中における微生物の分布（ $10^{6.0} \sim 10^{8.2}$ cells/cm³）を Fig. 9 (b) に示す。図には示していないが、微生物・栄養源混合液圧入期間中に誘導期ならびに対数増殖期の初期段階にあった圧入井近傍 2 m 区間内では微生物が Shut-in 開始直後に増殖して 1.0×10^8 cells/cm³ 以上に達する。その後は、図に示すように、すべてのブロックにおいて時間経過とともに微生物濃度が低下していき、10 日間経過した時点です

べてのブロックの微生物濃度が $1.0 \times 10^{7.2}$ cells/cm³ 以下となる。

最後に後押し水圧入期間中の微生物の分布（ $1 \sim 10^{6.0}$ cells/cm³）を Fig. 9 (c) に示す。この期間においては、微生物自身の死滅と油層水による希釈によって、微生物濃度は急激に低下する。約 0.5 PV 圧入した時点で、微生物は存在しても $10 \sim 10^{2.0}$ cells/cm³ 程度となり、全過程を通して圧入した微生物が生産井から産出されることはない。

（２） 栄養源

微生物・栄養源混合液圧入期間中の栄養源濃度の分布を Fig. 10(a) に示す。栄養源濃度の分布の変化を詳細に解析するために、図では圧入井近傍の 18 m 四方部分を拡大して示す。以降、微生物・栄養源混合液圧入と Shut-in・油層内培養期間における代謝産物ならびに油飽和率分布図についても同様の方法で示す。栄養源は圧入直後に消費され始める。したがって、微生物濃度が最大値に達する圧入井近傍 4 m 地点までのところで消費され尽くしてしまい、これより下流域には栄養源が到達していない。0.04 PV 圧入時ならびに 0.10 PV 圧入時の栄養源濃度の分布が類似していることから、0.04 PV 以上栄養源を圧入した場合は圧入による栄養源の供給と微生物による栄養源の消費が均衡関係となり、栄養源濃度の分布がほぼ一定となるものと考えられる。

Shut-in・油層内培養中の栄養源濃度の分布を Fig. 10(b) に示す。この期間では栄養液圧入の最終段階で圧入された栄養源が消費され、Shut-in の 2 日以降ではすべてのブロックで栄養源が存在しなくなる。

Fig. 10 Map of nutrient concentration during (a) cell and nutrient injection and (b) shut-in and incubation at different times.

Fig. 11 Map of water viscosity during (a) cell and nutrient injection. (b) shut-in and incubation.

(3) 代謝産物（水相粘度）

代謝産物濃度の分布は水相粘度の分布と同様であるため、水相粘度分布を用いて解析する。まず微生物・栄養源混合液圧入期間中の水相粘度の分布を Fig. 11(a)に示す。圧入開始後約0.04 PV 圧入した時点（圧入4日目）において、圧入井から3～4 m離れた地点で代謝産物の生産が開始され、水相粘度が増加し始める。圧入井から3～6 mの領域が活発に代謝産物が生産される領域となり、ここで生産された代謝産物が流されて、これより下流域における水相粘度の増加をもたらす。この期間においては、主に水のメイン流動チャンネル領域に代謝産物が集中し、この領域の水相粘度が高くなる。

Shut-in・油層内培養中の水相粘度分布を Fig. 11(b)に示す。この期間では微生物が圧入されたブロックにおいて活発に代謝産物を生産し、時間経過とともに水相粘度

の増加ならびに高粘度領域の拡大が生じる。まず、圧入井から離れた地点で水相粘度の増加が始まり、時間経過とともに圧入井近傍に向かって高粘度領域が拡大していく。最終的には微生物・栄養源混合液圧入の最終段階で微生物濃度が高かった領域において水相粘度が高くなる。

後押し水圧入期間中の水相粘度分布を Fig. 12に示す。ここでは0.1 PV まで圧入する期間についても示した。なお、Shut-in・油層内培養期間を10日間としたため、この期間においては微生物がほとんど死滅しており、代謝産物の生産はほとんど行われない。

まず、Shut-in・油層内培養期間終了時の水相粘度分布の影響を受けて、後押し水を0.02 PV 圧入するまでは、水のメイン流動チャンネルよりも、図中の油層端部の水相粘度の方が高い。しかし、さらに圧入が進む

Fig. 12 Map of water viscosity during postflash at different times.

と、油層端辺部の培養液が水のメイン流動チャンネルへ向かって集積してくるため、この領域の水相粘度が高くなり、水相の流動性を著しく低下させる。このため、後押し水はこの領域を避けて流れようとする。その結果、高粘度領域は、0.1 PV 圧入時に示したような水のメイン流動チャンネル上に中心を有する楕円状の分布となる。0.1 PV 圧入以降、この代謝産物バンクは油層水や後押し水と混合して、その大きさを徐々に縮小しながら生産井に向かって流れるが、増進回収の最終段階まで油層内に残留し、水のメイン流動チャンネルの水の流れを強力に低下させている。

(4) 油飽和率

油層内における油飽和率の変化を取り挙げ、油層内流体各相の流動挙動を解析する。

微生物・栄養源混合液圧入期間中の油飽和率の分布を Fig. 13(a)に示す。この期間においては、圧入4日目から微生物による代謝産物の生産が開始するため、この時期から代謝産物バンクのフロント面に油バンクが形成され始める。微生物が誘導期ならびに対数増殖期にある圧入井近傍4 m 領域内では代謝産物が生産されず、水攻法終了時と同じ油飽和率となっているが、上述のように圧入井から3～6 m の領域で代謝産物が活発に生産されるため、圧入終了時には、圧入井から6～8 m 離れた領域に油バンクを形成した状態で、Shut-in・油層内

培養期間へと移行する。この油バンクは、前報²⁾の式4-9で示した、水相粘度の増加に伴う残留油飽和率の低下によって形成されたものと考えられる。なお、水相粘度の増加に伴う残留油飽和率の低下は、油層内における微視的な流体流路の変化により生じたものと考えられ、以降の検討ではこの現象を置換効率の改善と称して用いる。Shut-in・油層内培養中の油飽和率は、微生物の作用による油の組成変化がなくまた流体が流動しないため、変化は生じない。

後押し水圧入期間中の油飽和率分布を Fig. 13(b)に示す。後押し水は水のメイン流動チャンネル領域に集積した代謝産物バンクを回り込む形で圧入されるため、そのフロント面に形成される油バンクは、圧入井・生産井間を結ぶ対角線に垂直に交差する直線の形状となり、水相による油相の置換が広い範囲で行われる。この油バンクは掃攻率と置換効率の改善により形成されたものであるが、代謝産物バンクのフロント面に形成された油バンクは主に置換効率の改善によるものであり、後押し水のフロント面に形成された油バンクは主に掃攻率の改善によるものである。後押し水圧入の進行とともに徐々に油バンクは大きくなり、約0.4 PV 圧入した時点で油バンクが生産井に到達し、増進回収が開始する。以降、油バンクの生産は約0.25 PV 継続し、後押し水がブレイクスルーして増進回収が終了する。

Fig. 13 Map of oil saturation during (a) cell and nutrient injection and (b) postflash at different times.

なお、Fig. 12 に示したように、本計算の対象油層条件ではメイン流動チャンネルの代謝産物バンクが増進回収の最終段階まで油層内に留まるため、そのフロント面に形成された油バンクの一部が生産井まで到達せずに油層内に残留する挙動も認められた。

(5) 圧入圧力

一連の作業中の圧入圧力変化を Fig. 14 に示す。圧入圧力は水攻法開始直後に増加するが、油の回収が進行するとともに低下する。その後の微生物・栄養源混合液圧入初期においては水攻法終了時の圧入圧力を引き継ぐが、微生物・栄養源混合液を約 0.04 PV 圧入した時点から圧入圧力の上昇が生じる。これは、(3) の考察から、微生物が代謝産物の生産を開始し、水相粘度が増加し始める時期に対応することが分かる。その後、時間の経過とともに水相粘度が増加し、同時に高粘度領域が拡大するため、圧入圧力は急激に上昇し、圧入終了時には水攻法終了時の約 1.5 倍の 80 kgf/cm^2 にまで達した。Shut-in・油層内培養により水相粘度がさらに増加するため、後押し水圧入開始直後の圧入圧力は、微生物・栄養源混合液圧入終了時に比べさらに上昇し、 234 kgf/cm^2 となる。その後、後押し水を 0.1 PV 圧入して、高粘度領域を回り込む形の水の流れが形成される過程において、圧入圧力は約 70 kgf/cm^2 にまで急激に低下し、以降油の回収が進むにつれて緩やかに低下し続ける。

なお、後押し水圧入直後の圧入圧力の上昇については、油層保護のため、後押し水の圧入流量を一時的に低下させるなどの対応が必要と考えられる。後押し水の圧入流量を本計算条件の 1/5 に低下させると、圧入圧力のピーク値は 110 kgf/cm^2 に抑えられる。

4.3 油層内挙動に関する考察

本項での石油増進回収機構とは、水攻法の場合との比

Fig. 14 Injection pressure vs. pore volume injected.

Fig. 15 Water cut and oil production rate vs. pore volume injected after water flooding.

較によるものであり、その考察に含水率、油産出レート、産出指数、回収率ならびに圧入水の利用効率を指標として用いる。

(1) 含水率および油産出レート

含水率と油産出レートの変化を Fig. 15 に示す。まず、微生物・栄養源混合液の圧入から後押し水圧入の初期段階までは油の産出挙動に変化はなく、水攻法と同様の産出挙動を示す。さらに後押し水を圧入し、その量が約 0.4 PV に達した時点から、含水率の急激な低下と油産出レートの増加が始まる。これは、4.2(4) に述べたように、後押し水の圧入によってそのフロント面に形成される油バンクが生産井に到達し、その生産が開始されるためである。さらに、この油バンクは水平方向にある量の大きさを有するため、低含水率と高油産出レートの状態が約 0.2 PV 継続する。この間の含水率は 0.9 から 0.4 に減少し、油産出レートは $0.4 \text{ m}^3/\text{day}$ から $4.4 \text{ m}^3/\text{day}$ まで増加している。油バンクがすべて産出されると、後押し水がブレイクスルーするため、再び含水率は増加し油産出レートは低下する。後押し水を約 0.8 PV 圧入した時点でほぼ石油増進回収は終了する。

(2) 産出指数

産出指数の変化を Fig. 16 に示す。産出指数とは単位ドロウダウン当りの油の産出レート $(Q_o/\Delta P) [(\text{m}^3/\text{day})/(\text{kgf/cm}^2)]$: $\Delta P = (\text{圧入井の坑底圧}) - (\text{生産井の坑底圧})$ である。代謝産物による水相粘度の増加により、微生物・栄養源混合液圧入の途中から圧入圧力が上

Fig. 16 Productivity index vs. pore volume injected after water flooding.

Fig. 17 Cumulative oil recovery after water flooding.

Fig. 18 Map of oil saturation after (a) MEOR and (b) waterflooding.

昇するため、油バンクが生産井に到達し増進回収が開始されるまでは、水攻法に比べて産出指数が低い。しかし、増進回収が開始されると、産出指数は急激に増加し、水攻法の場合に比して4倍程度にまで達する。その後、増進回収の終了とともに産出指数は低下し、再び水攻法の値よりも低くなる。Fig. 16に示す操作期間における産出指数の平均値を比べると、水攻法が0.0274であるのに対して、本攻法では0.0303であった。水攻法に比べて本攻法では、圧入圧力の上昇が顕著であるが、その上昇した圧力は油の増進回収に効率よく利用されていることが分かる。

(3) 回収率および圧入水の利用率

回収率の変化を Fig. 17に示す。微生物・栄養源混合液圧入から後押し水圧入の初期段階までは本攻法における増進回収効果が現れず、水攻法と同値の回収率を示すが、後押し水圧入0.4 PV の時点から急激な回収率の増加が認められた。これはすでに(1)で述べたように、後押し水のフロント面に形成された油バンクが生産されるためであり、その生産が終了する0.65 PV で再び水攻法と同様な傾きの回収率曲線となる。最終的に回収率は81.9%にまで達し、水攻法での回収率71.0%に比して10%以上の増回収が得られた。この結果得られた、本攻法における最終油飽和率分布を Fig. 18(a)に、水攻法における最終油飽和率分布を Fig. 18(b)に示す。これらの図の比較から、本攻法により、油層全域において油飽和率が低下したことが認められる。

また、水攻法終了時以降の圧入水の利用率（油の積算生産量/水の積算圧入量）は、水攻法をそのまま継続したとした場合に0.06であるのに対して、微生物・栄養源混合液の圧入を行った場合、その2.5倍の0.15にまで達し、微生物・栄養源混合液の圧入により、その後に入れた水が効率良く油の回収に利用されることが示された。

Fig. 19 Water cut vs. pore volume injected after water flooding in different process.

5. ポリマー攻法との比較

最後に、地上からポリマー溶液を圧入するポリマー攻法について数値計算を行い、これまでの MEOR 攻法の計算結果と比較し、MEOR 攻法の特徴について考察する。なお、ポリマー攻法の計算は以下の手順で行った。まず、水攻法で含水率が90%に達した後に、ポリマー溶液を0.01 PV/day の定流量で0.1 PV 圧入する。その後、Shut-in・油層内培養期間は設けず、後押し水の圧入を開始する。後押し水は含水率が95%に達するまで0.01 PV/day の定流量で圧入する。なお、ポリマー溶液圧入時の最高圧入圧力が、MEOR 攻法における最高圧入圧力 (234 kgf/cm²) と同等になるように、圧入するポリマー溶液の粘度を30 cP (ずり速度38.3 s⁻¹) とした。

まず、両攻法の圧入圧力の経時変化を Fig. 19 に示す。ポリマー攻法の場合はポリマー溶液の圧入開始時から圧入圧力が上昇し、ポリマー溶液圧入中の平均圧入圧力は208 kgf/cm² に達した。一方、MEOR 攻法では、微生物・栄養源混合液の圧入開始時は水攻法終了時と同等の圧入圧力であり、圧入が進むにつれて上昇するが、圧入終了時でも80 kgf/cm² である。微生物・栄養源混合液圧入中の平均圧入圧力は水攻法時と同程度の64 kgf/cm² であった。また、この圧入圧力の違いに伴って、ポリマー溶液圧入以降の平均産出指数も0.0283と、MEOR 攻法に比して小さい値であった。

ポリマー攻法の場合、ポリマー溶液圧入終了時の水相粘度は、圧入井を中心とした同心円状の勾配を有する分布となる。一方、MEOR 攻法の場合は Fig. 11(b) の10日目に示したような分布であり、ポリマー攻法とは大きく

異なる。この相違により後押し水圧入中の油層内流体の挙動にも差が生じる。すなわち、ポリマー攻法の場合は、ポリマー溶液は水のメイン流動チャンネルに停滞して、後押し水のみがその周りを掃攻するのに対して、MEOR 攻法では後押し水と培養液とが混合した粘度の高い流体が水のメイン流動チャンネル周りを掃攻するため、掃攻率の改善のみならず置換効率の改善も図られる。そのため、より多くの油を回収できることになる。回収率は MEOR 攻法の方が1.1%ほど高い値となった。

このように、圧入圧力の経時変化と回収率との比較から、MEOR 攻法はポリマー攻法よりも、効率の高い石油増進回収が可能であることが示唆された。また、適正な微生物・栄養源混合液の圧入方法を設計することにより、水相粘度分布の調整が可能であることから、広くさまざまな油層において効率の良い石油増進回収が可能であることも示唆された。

4. ま と め

本報では、前報で作製した数値モデルから MEOR シミュレーションモデルを構築し、このシミュレーションモデルを用いて、5 点水攻法パターンの四分の一区画を一例として取り上げて数値計算を行い、水溶性ポリマー生産微生物 TU-15 A を用いた場合の MEOR の油層内挙動と石油増進回収機構の考察を行った。その結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 粘度が増加した代謝産物溶液の圧入による石油増進回収実験結果と、MEOR シミュレーションモデルを用いた計算結果との比較から、このモデルは水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR における油層内流体の流動挙動の解析と石油増進回収機構を検討するのに信頼できるものであることが示された。
- (2) 油層内における微生物の挙動解析を行った。微生物は油層内への圧入期間中にも活発に増殖し、圧入井近傍で最大微生物濃度になる。本モデルで採用した TU-15 A の場合、本計算で採用した条件下では圧入井近傍約 2 ~ 4 m の領域で最大微生物濃度となり、これより下流域では死滅期となる。圧入期間中に生産された代謝産物による水のメイン流動チャンネル領域の水相粘度の増加のため、圧入終了時にはこの領域以外のところで微生物濃度が高くなる。TU-15 A の場合、Shut-in の1日目にして、すべてのブロックにおいて対数増殖期を終えて死滅期となり、生産井に到達する前にすべて死滅してしまう。
- (3) 油層内における栄養源の挙動解析を行った。微生物

物・栄養源混合液圧入期間中には、微生物による消費と圧入による供給の均衡関係が成り立ち、ある距離より遠方には栄養源が到達しない。本計算では、圧入井近傍約 4 m 地点までに栄養源が消費され尽くしてしまい、これより下流域には栄養源が到達しない。

- (4) 油層内における代謝産物の挙動を、水相粘度から解析した。均質油層に圧入する場合、微生物・栄養源混合液圧入期間中は圧入井近傍の領域で代謝産物が生産される。本計算に採用した条件下では主に圧入井近傍約 3 ～ 6 m の領域で代謝産物が生産される。生産された代謝産物は水のメイン流動チャンネルを流れ、この領域の水相粘度を増加させる。Shut-in・油層内培養中は、圧入井遠方から先に代謝産物が生産され、時間経過とともに高粘度領域が圧入井に向かって拡大する。微生物・栄養源混合液圧入終了時に微生物濃度の高かった領域で、水相粘度も高くなる。後押し水圧入期間中は、代謝産物がメイン流動チャンネル領域に集積し、この領域の流体の流れを著しく低下させる。
- (5) 油層内における油相の流動挙動解析を行った。微生物・栄養源混合液圧入期間中に、微生物によって生産された代謝産物による置換効率の改善によって、そのフロント面に油バンクが形成される。後押し水圧入期間中には、水のメイン流動チャンネル領域に集積した代謝産物バンクのフロント面に、主に置換効率の改善による油バンクが形成され、その代謝産物バンクを回り込むように流れる後押し水のフロント面には、主に掃攻率の改善による油バンクが形成される。このようにして形成された油バンクは圧入井・生産井間を結ぶ対角線に垂直に交差する直線の形状となり、水相による油相の置換が油層全体に広がり、その量を増加させながら生産井へ流れる。本計算条件の場合、後押し水を約 0.45 PV 圧入した時点で油バンクは生産井に到達する。その後約 0.2 PV 圧入を行うと、油バンクの大部分が生産され、増進回収が終了する。
- (6) 圧入圧力の挙動解析を行った。微生物・栄養源混合液圧入期間中の圧入圧力は、微生物による代謝産物の生産が開始されると同時に上昇し始める。その後の Shut-in・油層内培養によりさらに水相粘度が増加するため、後押し水圧入開始時の圧入圧力はさらに増加する。後押し水が代謝産物バンクを回り込

む形の流れが形成される過程で圧入圧力は急激に低下し、その後は緩やかな低下を継続する。

- (7) 本計算条件では最終的に水攻法での回収率に比べて 10% 以上もの増進回収率を得た。また、圧入水の利用率は水攻法に比べて約 2.5 倍となり、圧入した水が効率良く油の回収に利用されることが示された。
- (8) 水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR はポリマー攻法よりも効率の良い石油増進回収が可能であることが示唆された。

SI 単位換算係数

$$\begin{aligned} \text{kgf/cm}^2 \times 9.80655^* &= \text{E}+04 = \text{Pa} \\ \text{cP} \times 1.0^* &= \text{E}-03 = \text{Pa} \cdot \text{s} \\ \text{rpm} \times 1.0^* &= \text{min}^{-1} \end{aligned}$$

*は正確な値

引用文献

- 1) Lazar, I., 1992: *Microbial Enhancedment of Oil Recovery-Recent Advances*.
- 2) 菅井裕一・洪 承燮・千田 信・榎本兵治, 2004: 水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR のための数値モデルの構築, 石技誌, **69**(3).
- 3) Sarkar, A. K. Sharma, M. M. and Georgiou, G., 1992: *Microbial Enhancement of Oil Recovery ? Recent Advances*.
- 4) Desouky, S. M., Abdel-Daim, M. M., Sayyouh, M. H. and Dahab, A. S., 1996: *Journal of Petroleum Science and Engineering* **15**, 309.
- 5) 木下 睦・榎本兵治・千田 信, 1994: 石油の増進回収を目的とした炭化水素利用菌の集積培養に関する研究 (第 4 報) — 2 F-NW 8901 菌株の利用に関する研究 —, 石技誌, **59**(2).
- 6) 米林英治・洪 承燮・木下 睦・榎本兵治・千田 信, 1997: 嫌気性菌の油層内培養による石油の増進回収に関する基礎的研究 — 9 A 菌を用いた油増進回収実験における排油挙動の検討 —, 石技誌, **62**(4).
- 7) 菅野 明・池田修一郎・米林英治・榎本兵治・洪 承燮, 1999: MEOR フィールドテストを想定した TU-7A 株の代謝活性の推定, 石技誌, **64**(3).
- 8) 菅井裕一・洪 承燮・池田修一郎・千田 信・榎本兵治・矢澤仁徳, 2002: MEOR を目的とした水溶性ポリマー生産微生物のスクリーニング, 石技誌, **67**(3).
- 9) 菅井裕一・洪 承燮・千田 信・榎本兵治・矢澤仁徳, 2002: 水溶性ポリマー生産微生物 TU-15A による石油の増進回収に関する室内実験研究, 石技誌, **67**(5).