論 文

MEOR における栄養塩移動についての
室内実験および数値解析*

楊 延国**・新堀 雄一***・千田 信**

(Received May 9, 1997 ; accepted November 26, 1997)

Laboratory experiments and numerical analyses on
nutrients transport for MEOR

Yanguo Yang, Yuichi Niibori and Tadashi Chida

Abstract: This study focuses on the efficient spread of nutrients for microbial enhanced oil recovery (MEOR), which in turn controls the growth rates of bacteria. By using a two-dimensional packed-bed with glass-beads, flooding and huff&puff experiments with and without a shut-in process were carried out in order to examine distribution of nutrients. KCl solution was applied to replicate nutrients. The experimental results by the solution injections into the horizontal bed or the vertical one, showed good agreements with the calculations of the two-dimensional mathematical model considering the convection, the mixing diffusion and the buoyancy force due to differences of the solution concentration. Effects of the shut-in period on distribution of nutrients were also investigated by using the mathematical model. The results displayed that the transport of the nutrient and its distribution depended clearly on the starting time of shut-in and the injection concentration of the nutrient.

Key word: MEOR, nutrient, mass transport, flooding, huff&puff, shut-in, numerical analysis, mixing, experiment

1. はじめに

現在、原油の増回収を目的とする EOR 法 (Enhanced Oil Recovery) に関する研究が広く行われている。この中で、注目されている方法の 1 つに微生物攻法 (MEOR; Microbial Enhanced Oil Recovery) がある。微生物攻法とは、地上で微生物の前培養を行い、栄養塩とともに微生物を油層に圧入し、所定期間のシャットイ

ン (Shut-in ; 坑井密閉) を行った後、層内において増殖した微生物により有用物質 (ガス、界面活性剤、ポリマーなど) の生産あるいは原油分解などを行わせ、原油回収率を増進させるものである^{1,2)}。

効率的に MEOR を行うためには、微生物のスクリーニングや、栄養塩の選択などが必要であるが、油層における微生物と栄養塩の移動および分布のようすを知ることきわめて重要である。しかしながら、従来の MEOR の評価は一次元モデルにより行われており³⁻⁵⁾、栄養塩の密度差による移行については検討されていない。一方、地下水における物質移動については詳細なモデルも提出されている^{1,7,8)}が、これらの数値モデルは主に流動系の実験により検証されており、垂直-水平の二次元充填層を用いたシャットインの実験を行った例は見られないようである。

そこで本研究では、特にシャットイン期間およびその

* 一部は平成 8 年 6 月 5 日、平成 8 年度石油技術協会春季講演会で講演 A part of this paper was presented at the 1996 Technical Meeting of the JAPT, June 5, 1996.

** 東北大学大学院工学研究科地球工学専攻 Department of Geoscience and Technology, Tohoku University

*** 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University.

前後における栄養塩の混合拡散、密度差による移行について着目し、垂直—水平二次元充填層を用いた室内実験を行った。そして、その結果をもとに栄養塩の移動および分布について数値モデルを検討し、最重要要素となる重力すなわち流体密度の変化を考慮すれば、栄養塩の注入の際に生じる注入井内の栄養塩の濃度分布などは無視しても、流線関数を用いた比較的簡便な数学モデルにより実験値を十分に表わすことができることを示す。このことは栄養塩の分布について本モデルを適用すれば、MEOR の評価における計算時間の短縮や解の収束性の向上などの利点が多い。さらに、得られた数学モデルにより、同じ量の栄養塩でも、その注入濃度およびシャットインの開始時期、期間によって栄養塩の分布は大きく異なることを明らかにする。

2. 実験装置および数値モデル

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。充填層は、2 枚の亚克力板に囲まれ、150 mm×620 mm×10 mm の亚克力枠に粒径 1 mm のガラスビーズで充填し、充填層内壁における孔隙率の増加を避けるために内壁全面に厚さ 0.5 mm のシリコンゴムシートを張ったものである。また、バクテリア懸濁液および栄養塩溶液を均一に注入、流出するために、充填層の入り口と出口に外径 10 mm、内径 8 mm の亚克力パイプ（充填層側 10 mm ごとに

Fig. 1 Experimental apparatus and its mathematical model.

直径 1 mm の穴を開けておく)を設置する。なお、ガラスビーズを充填しない状態の容積は $0.15 \text{ m} \times 0.60 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ であり、ガラスビーズを充填した状態の孔隙体積は $3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (孔隙率 40%) である。また、本充填層の浸透率は $8.2 \times 10^{-10} [\text{m}^2]$ である。

前述したように、本研究は栄養塩の移動分布についての基礎的な知見を得るものである。微生物の栄養塩としては、一般にエネルギー源あるいは炭素源となる糖類のほか、細胞構成成分として必要な窒素、リン、カリウム、硫黄や金属元素類などが必要となる^{1,2)}。これらすべての物質移動の挙動を明らかにすることが重要である。しかし、おのおのの物質の濃度はバクテリアの種類により異なり、複雑であるので、ここでは、栄養塩の組成物質を 1 つの成分とみなし、流入流出のモニタリングが電気伝導度の測定で簡単にできる KCl 溶液を栄養塩溶液として用いた。すなわち、Fig. 1 に示すように KCl 溶液を一様に充填層の一方の注入パイプから注入し、所定期間のシャットインを行った後、KCl 溶液を水によって押し出す。流出する KCl 溶液の電気伝導度を測定することにより、あらかじめ作成した KCl 溶液の濃度と電気伝導度との関係式から濃度を求める。なお、25°C、0.101 MPa における水に対する KCl 溶液の相対粘度は、本研究の最大濃度 $0.2 \times 10^{-3} [\text{mol}/\text{m}^3]$ の場合でも、99.03% となっている⁹⁾ ので、流体濃度変化に伴う粘度の変化を無視できる。

本論文にて用いられる数学モデルは移流拡散、密度差の効果を考慮したものである。ここで、数学モデルの仮定はそれぞれ以下のとおりである^{3~6)}。

- a) Darcy 則が成立。
- b) 浸透率 k および混合拡散係数 D は x, z 方向に依存せず一定。
- c) 流体は非圧縮流体であり、流体の粘度および温度は一定。
- d) Boussinesq 近似が成立。すなわち、重力項以外の流体の密度は、変化がなく一定である^{7,8)}。
- e) 孔隙率は一定。

本研究のように、 x 方向の流速が大きい場合、その方向の混合拡散係数 D_x は z 方向の混合拡散係数 D_z より大きいと思われるが、Fig. 2 に示すように z 方向のペクレ数 Pe_z を x 方向のペクレ数 Pe_x の 5 倍、10 倍としても、応答にはほとんど差がないことがわかる。

これらの仮定に基づく移流拡散の物質収支式、連続の式および Darcy の式は従来の報告^{1,3~6,9)}を参考にして、次のように導かれる：

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} = \phi D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - \left(u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Fig. 2 Effects of Peclet number P_{e_z} at z direction on the responses of breakthrough experiments.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (3)$$

ここで、 ϕ は孔隙率 [-], c は KCl 溶液の濃度 [mol/m³], t は時間 [s], D は混合拡散係数 [m²/s], u, v はそれぞれ x, z 方向のダルシー流速 [m/s], k は浸透率 [m²], μ は流体の粘度 [kg/m s], p は圧力 [kg/m s²], ρ は流体の密度 [kg/m³], g は重力加速度 [m/s²] である。

また、一定の室温 (25°C) で実験を行ったので KCl 溶液の膨張係数 β は濃度のみの関数となる。本実験に用いられる KCl 溶液の濃度の範囲で、この膨張係数が一定の値 (0.47 [m³/mol]) である⁹⁾ので、仮定 d) により重量項すなわち (3) 式右辺の ρg 項の濃度に伴う変化を、濃度膨張係数 β の (4) 式をテーラー展開し第 3 項以下を切り捨てることにより (5) 式として表わす。

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial c} \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 \{1 + \beta(c - c^*)\} \quad (5)$$

ここで、 ρ_0 は代表密度 [kg/m³], c^* は代表濃度 [mol/m³] である。本実験では、注入する KCl 溶液の密度および濃度をそれぞれこの代表密度および代表濃度とした。

また、初期条件および境界条件は次のとおりである。

$$t \leq 0 \text{ の時,} \quad c = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad (6)$$

$0 < t \leq t_{\text{shut-in-start}}$ あるいは $t > t_{\text{shut-in-end}}$ の時,

$$\left. \begin{aligned} z=0 \Big\} & 0 \leq x \leq x_1 : \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad v = 0 \\ z=z_1 \Big\} & \\ x=x_1, & 0 \leq z \leq z_1 : \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad u = u_{\text{in}}, \quad v = 0 \\ x=0, & 0 \leq z \leq z_1 : -\phi D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{0+} + uc \Big|_{0+} = uc_{\text{in}}, \\ & u = u_{\text{in}}, \quad v = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$t_{\text{shut-in-start}} < t \leq t_{\text{shut-in-end}}$ の時,

$$\left. \begin{aligned} 0 < x < x_1 & \quad z=0 \Big\} : \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad v = 0 \\ 0 < x < x_1 & \quad z=z_1 \Big\} : \\ x=0 & \quad 0 \leq z \leq z_1 \Big\} : \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ x=x_1 & \quad 0 \leq z \leq z_1 \Big\} : \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 z_1 は充填層モデルの幅 [m], x_1 は充填層モデルの長さ [m], c_{in} は注入濃度 [mol/m³], u_{in} は注入速度 [m/s], $t_{\text{shut-in-start}}$ および $t_{\text{shut-in-end}}$ はシャットインの開始および終了時間 [s] である。また、添え字の 0+ は $0+ = \lim_{\delta \rightarrow 0} (0+\delta)$, in は $x=0-$ を意味し、 $0- = \lim_{\delta \rightarrow 0} (0-\delta)$ である。

基礎方程式 (1)~(3) 式を無次元化するために、(9) 式のような無次元数を定義する。

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x}{x_1}, \quad Z = \frac{z}{x_1}, \quad T = \frac{t}{t_{\text{space}}}, \quad U = \frac{u}{u_{\text{in}}}, \quad V = \frac{v}{u_{\text{in}}}, \\ C &= \frac{c - c_0}{c_{\text{in}} - c_0}, \quad P_e = \frac{u_{\text{in}} x_1}{\phi D}, \quad R_a = \frac{kg \rho_0 \beta (c_{\text{in}} - c_0)}{c_{\text{in}} \mu} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 t_{space} は充填層の空間時間 ($t_{\text{space}} = \frac{\phi x_1}{u_{\text{in}}}$), c_0 はバックグラウンド濃度 (本研究では $c_0 = 0$) である。また、 P_e はペクレ数 (Peclet number) と呼ばれるもので、流れによる物質移動と混合拡散による物質移動のしやすさの比を表す無次元数である。ペクレ数 P_e が大きい場合は、混合拡散よりも流れによる物質移動が主体となる。 R_a は、レイリー数と呼ばれるもので、密度差による対流の効果を表す無次元数である。レイリー数 R_a が大きいほど、対流が起こりやすい。

また、無次元の流線関数 Ψ を次のように定義する。

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \quad (10)$$

その時、(1)~(3) 式は (9) 式の無次元数および (10) 式により次のように無次元化できる。

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{P_e} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right) - \left(U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Z} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = R_a \frac{\partial C}{\partial X} \quad (12)$$

また、初期条件および境界条件すなわち (6)~(8) 式は同様に次のように無次元化できる。

$T \leq 0$ の時,

$$C=0, U=0, V=0 \quad (13)$$

$0 < T \leq T_{shut-in_{start}}$ あるいは $T > T_{shut-in_{end}}$ の時,

$$\left. \begin{aligned} Z=0 \\ Z=Z_1 \end{aligned} \right\}, 0 \leq X \leq 1: \frac{\partial C}{\partial Z}=0, \frac{\partial U}{\partial Z}=0, V=0$$

$$\left. \begin{aligned} X=1, 0 \leq Z \leq Z_1: \frac{\partial C}{\partial X}=0, U=1, V=0 \\ X=0, 0 \leq Z \leq Z_1: -\frac{1}{P_e} \frac{\partial C}{\partial X} \Big|_{0+} + C \Big|_{0+} = C_{in}, \\ U=1, V=0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$T_{shut-in_{start}} < T \leq T_{shut-in_{end}}$ の時,

$$\left. \begin{aligned} 0 < X < 1 \quad Z=0 \\ 0 < X < 1 \quad Z=Z_1 \end{aligned} \right\}: \frac{\partial C}{\partial Z}=0, \frac{\partial U}{\partial Z}=0, V=0$$

$$\left. \begin{aligned} X=0 \quad 0 \leq Z \leq Z_1 \\ X=1 \quad 0 \leq Z \leq Z_1 \end{aligned} \right\}: \frac{\partial C}{\partial X}=0, U=0, \frac{\partial V}{\partial X}=0 \quad (15)$$

(10)~(15)式を解くためには、ペクレ数 P_e とレイリー数 R_a の値をあらかじめ決定する必要がある。

本研究では、(10)~(15)式を差分法により離散化し、陽解法を適用した。(11)式における右辺の移流項については upwind differential method を適用した。タイムサイズ ΔT を 1.0×10^{-4} 、メッシュ数を $120 \times 30 (\Delta X = \Delta Z)$ とした。また、ペクレ数 P_e が 100 以上の場合には数値拡散 (numerical dispersion) を考慮して、三次精度の差分法を用いて数値計算を行った。

3. 実験結果

まず、混合拡散係数 D を知るために、KCl の移動および分布に及ぼす鉛直方向の対流の影響は無視できる ($R_a=0$) 水平充填層を用いて、ペクレ数 P_e の評価を行った。実験は所定濃度の KCl 溶液を空間時間 t_{space} の 10% の期間で注入した後、水により KCl 溶液注入時と等しい流速で押し出し (本論文ではこのような実験をブレイクスルー実験と呼ぶ)、充填層出口における応答の経時変化を求めた。得られた結果に数値計算の結果をフィッティングし、ペクレ数 P_e を得た。結果として、KCl 溶液の注入速度 u_{in} が 6.5×10^{-5} [m/s] の際には、ペクレ数 P_e は 200、混合拡散係数 D は 4.9×10^{-6} [m²/s] であることがわかった。なお、本研究において設定する注入速度 u_{in} はここで示した 6.5×10^{-5} [m/s] と Fig. 3 に示した 1.3×10^{-4} [m/s] であり、粒子外径 d_p に対するレイノルズ数 $R_e (= d_p u_p / \mu)$ はそれぞれ 0.07 と 0.15 となる。一方、Levenspiel¹⁰⁾ によると、このレイノルズ数が 10.0 未満において D/u の値はほぼ一定と認められる。この値から本研究においてペクレ数はほぼ一定の値 200 であり、本研究の結果は従来の研究と矛盾し

Fig. 3 Comparison of the responses by the breakthrough experiments in which (c_{in}/u_{in}) is constant. c_{in} : the injection concentration, and u_{in} : the inflow velocity.

ない。また、KCl 溶液の注入濃度 c_{in} が 0.1×10^{-3} [mol/m³] および 0.2×10^{-3} [mol/m³] の場合、レイリー数 R_a はおおむね 1.0 および 2.0 となる。この値は実際のフィールドテストで想定されている栄養塩の濃度から求められた値に近いものである。

次に、Fig. 3 に示すように KCl 溶液の注入濃度 c_{in} と注入流速 u_{in} の比 (c_{in}/u_{in}) を一定にした場合のブレイクスルー実験を行った。レイリー数 R_a の定義からわかるように、 (c_{in}/u_{in}) が一定の値を取るとき他のパラメータが一致していれば、等価な応答が得られることになる。例として 1 つの実験結果を Fig. 3 に示している ($c_{in} = 0.1 \times 10^{-3}$ mol/m³, $u_{in} = 6.5 \times 10^{-5}$ m/s と $c_{in} = 0.2 \times 10^{-3}$ mol/m³, $u_{in} = 1.3 \times 10^{-4}$ m/s)。ここで、横軸は空間時間 t_{space} を代表時間とする無次元時間、縦軸は応答の面積が 1 となるように正規化した無次元濃度である。この図により、 D/u の値がほぼ一定の場合、レイリー数 R_a は唯一の支配パラメータであり、物質移動においてこの無次元数を用いて密度差による対流の効果を整理できることがわかる。

微生物の地下培養法は Fig. 4 に示すように圧入および生産方式によりフラッディング法 (flooding process) と単一坑井法 (huff&puff process) がある。フラッディング法とは、圧入井と生産井を独立に設け、微生物と栄養塩を圧入し、シャットイン後水攻法により原油回収を行うものである。単一坑井法とは、単一坑井で微生物と栄養塩を圧入し、シャットイン後同じ坑井から原油回収を行う単一坑井生産法である²⁾。

Fig. 4 Schemata of flooding process and huff & puff one.

石油貯留層においてシャットインを行う際に栄養塩がどう移動するかを調べるために、垂直の充填層を用いて栄養塩のみの室内実験を行った。

フラッディング法の実験結果と数値計算結果の比較を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。KCl 溶液の注入流速 u_{in} を 6.5×10^{-5} [m/s]、注入濃度 c_{in} を 0.1×10^{-3} [mol/m³] および 0.2×10^{-3} [mol/m³]、注入時間 t_{in} を充填層の空間時間 t_{space} の 0.1 倍とした。Fig. 5 はシャットインを実施しないブレイクスルー実験の結果である。この結果により、レイリー数 R_a が大きくなるにつれて、応答のピークが低くなり、立ち上がりが早くなることがわかる。これは、栄養塩が密度差により充填層下部に沈み込みながら流れていき、密度差が大きいほうが対流の効果が大きいと考えられる。また、同図で水平実験により求めたペクレ数 ($P_e=200$) を用いて数値モデルによる計算結果を実験結果と比較しているが、計算値は実験結果とほぼ一致することがわかる。

Fig. 6 に、シャットイン期間を充填層の空間時間の 0.5 倍から 3.0 倍までとしたフラッディング法の実験結果と数値計算結果の比較を示す。すなわち、0.1 倍の空間時間 (371s) で KCl 溶液を注入し、0.5 倍の空間時間

Fig. 5 Comparisons of the experimental results with the numerical model calculations in the breakthrough responses.

Fig. 6 Comparisons of the experimental results with the numerical model calculations for the flooding process in which the shut-in period is from 0.5 t_{space} through 3.0 t_{space} .

(1,855s) まで水により KCl 溶液を流出口方向へ移動させ、0.5 倍の空間時間 (1,855s) から 3.0 倍の空間時間 (11,133s) まで流入口と流出口を閉じ、その後再び水により KCl 溶液を押し出す。ブレイクスルー実験と同様に、これらの実験の出口における濃度応答のピークは、レイリー数 R_a が大きくなるにつれて低くなり、立ち上がりが早いことがわかった。また、注入濃度あるいはレイリー数 R_a の違いによりシャットイン終了直後の応答が全く違い、注入濃度 0.2×10^{-3} [mol/m³] ($R_a=2.0$)

の場合には、シャットインが終わった直後の応答（無次元濃度）は一気に 0.5 ほどに達した。これは、レイリー数 R_a が大きいほうが密度差による対流の効果が著しく現れ、栄養塩がシャットイン終了前に流出口に到着し、終了直後すぐ出てくるためと考えられる。このような効果を含め、数値モデルは実験値を極めてよく表すことがわかる。

次に、単一坑井法の実験結果と計算結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。単一坑井法の実験を行う際には、KCl 溶液を注入し、水で押し、ある時間経過後にそれまでの流出口から水を逆向きに同じ流量で注入して充填層中の KCl を押し出す。また、フラッディング法と比較するために、シャットインを実施する場合と、実施しない場合の実験を行った。Fig. 7 に示している実験では、シャットインを実施せず、KCl 溶液 (0.1×10^{-3} [mol/m³]) を充填層の空間時間 t_{space} の 0.1 倍まで注入し ($u_{in}=6.5 \times 10^{-5}$ m/s)、引き続き $0.12 t_{space}$, $0.3 t_{space}$, $0.5 t_{space}$ の各時間まで水を圧入した後に注入口と流出口を逆に変えて、KCl 溶液を引き戻す。その結果、注入濃度と注入速度および注入時間は同じであるが、引き戻しの開始時間の違いにより、応答は異なる。また、引き戻しの開始時間 t_{hps} が遅い場合は、応答のピークの立ち上がりが低く、幅が広がる。これは、 t_{hps} が大きいほうが KCl が広く分布したことを意味する。

Fig. 8 に、注入時間 t_{in} を $0.1 t_{space}$ 、シャットイン期間を $0.5 t_{space}$ から $3.0 t_{space}$ までとし、引き戻しの開始時間 t_{hps} を $3.0 t_{space}$ とした場合の単一坑井法の室内実験結果と計算結果を示す。注入濃度 c_{in} を 0.1×10^{-3} [mol/m³] および 0.2×10^{-3} [mol/m³]、注入速度 u_{in} を 6.5×10^{-5}

[m/s] とした。フラッディング法の実験と同様に、これらの実験にあたって応答のピークは、レイリー数 R_a が大きくなるにつれて低くなり、立ち上がりが早い。また、注入濃度あるいはレイリー数 R_a の違いによりシャットイン終了直後の応答が異なり、拡散および密度流の効果のため注入濃度 0.2×10^{-3} [mol/m³] の場合には、シャットインが終わった直後の応答（無次元濃度）は一気に 0.5 ほどに達した。

また、実際の現場生産状況と同様に、以上の実験にあたって KCl 溶液を注入したのち水で押し出す際、Fig. 1 に示すような注入パイプ中の KCl 溶液をパイプからすべて押し出す前に、水が KCl 溶液とともにわずかに上の方から充填層に入っていく、いわゆる完全な一様注入にならないという現象が起こった。しかし、実験結果と数値計算結果の比較を全体的に見ると、本研究で用いる密度流を考慮した比較的単純なモデルによって、MEOR を行う際の栄養塩の移動分布のようすがよく表わされ、注入井における栄養塩のわずかな濃度分布は無視できることがわかった。

4. シミュレーションによる考察

前述したように実験結果と数値計算結果はほぼ同じであることから、本数値モデルの妥当性を確認することができた。そこで、本数値モデルを用い、シミュレーションにより栄養塩の移動および分布についての考察を行った。用いられたいくつかの数値計算パラメータは、栄養塩溶液の無次元注入時間 T_{in} を 0.1、無次元注入濃度 C_{in} を 1.0、無次元注入速度 U_{in} を 1.0 とした。また、

Fig. 7 Effects of the puff starting time, t_{hps} , t_{hs} on the responses for the huff & puff process without shut-in.

Fig. 8 Comparisons of the experimental results with the numerical model calculations for the huff & puff process in which the shut-in period is from $0.5 t_{space}$ through $3.0 t_{space}$.

シャットインの期間以外では、水を注入し続け、流量は常に一定である。

Fig. 9 に、レイリー数 R_a を 0 にした場合、ペクレ数 P_e の違いによるブレイクスルー実験の応答の違いを示す。ペクレ数 P_e が大きくなるにつれて応答のピークが高くなり、立ち上がりが遅れていく。これはペクレ数 P_e の大きいほうが混合しにくいためである。

次に、ペクレ数 P_e を 200、レイリー数 R_a を 0, 1.0 および 2.0 とし、ブレイクスルー実験における層内栄養塩分布の経時変化を比較した。Figs. 10a~c にその計算結果を示す。ここでは、濃度を等濃度線で表し、流体は $X=0$ から流入し、 $X=1$ から流出する。また、 $Z_1 (=z_1/x_1)$ は実験装置と等しく 0.25 とした。レイリー数 R_a は 0 の場合 (Fig. 10a)、密度差による対流混合が起こらないため、栄養塩は Z 方向の濃度勾配なしに一様に流れていく。これに対し、Fig. 10b および Fig. 10c からわかるように、 $R_a=1.0$ および $R_a=2.0$ の場合、栄養塩は注入後沈みながら、移動していく。レイリー数 R_a が大きいほうがより強く沈み込み、混合拡散するため、先頭部分は早く出口に達し、同じ時間でもレイリー数 R_a の違いにより栄養塩の分布がかなり異なる。これらの計算結果より、油層の地質構造と貯留岩の性質に応じて、栄養塩の注入濃度を考えなければ、栄養塩が石油の残留域に到達できない、あるいは到達しても量が不十分であるなどの問題が生じる可能性のあることがわかる。

バクテリアの増殖や働きなどのためには、適切な栄養塩濃度の領域をいかに大きくし、かつその位置を制御するかが重要である。この濃度分布はペクレ数 P_e とレイリー数 R_a だけに依存するのではなく、シャットイン期間 (シャットインの開始時間から終了時間まで) にも強

Fig. 9 Effects of Peclet number P_e on the responses of breakthrough experiments.

Fig. 10a Concentration distribution of the nutrient in breakthrough experiments. $R_a=0$

Fig. 10b Concentration distribution of the nutrient in breakthrough experiments. $R_a=1.0$

Fig. 10c Concentration distribution of the nutrient in breakthrough experiments. $R_a=2.0$

く依存する。ここで、栄養塩の注入量をもとにして無次元

$$\text{元平均分布濃度を } \bar{C} = \frac{\int_0^1 \int_0^{z_1} \phi C dX dZ}{\int_0^1 \int_0^{z_1} \phi dX dZ} = T_{in} C_{in} U_{in} \text{ と定}$$

義すると、本研究においてこの無次元平均分布濃度 $\bar{C}$ はすべて 0.1 となる。シャットインを無限時間行くと、 $R_a=0$ の場合、定常状態になった層内の無次元濃度は一様に分布し（平衡状態）、その値は 0.1 となる。なお、 $R_a>0$ の場合は、 X 方向の濃度勾配は $\frac{\partial C}{\partial X}=0$ を満たすが、重力と拡散のバランスにより Z 方向において濃度は一様でない。

Figs. 11a~13b に、ペクレ数 P_e を 200、注入期間を $0 \sim 0.1 t_{space}$ 、シャットイン期間を $0.5 \sim 50.0 t_{space}$ および $0.1 \sim 49.6 t_{space}$ （シャットイン期間は $49.5 t_{space}$ で一定）にした場合、層内における栄養塩濃度分布および各濃度以上の面積割合（全体の面積を基準とし、百分率により表す） A_{c_s} の経時変化を示す。Fig. 11a, Fig. 11b および Fig. 12a, Fig. 12b はレイリー数 R_a の値をそれぞれ 1.0 と 2.0 とし、シャットイン期間を $0.5 \sim 50.0 t_{space}$ にした場合である。これらの図より、レイリー数 R_a の大きいほど移流混合が起こりやすいため、栄養塩は短時間で層全体に分布していく。また、 A_{c_s} の経時変化は大きく異なり、レイリー数 R_a の大きいほど平均分布濃度より高い各濃度レベルの A_{c_s} が早く小さくなることがわかる。なお、シャットイン開始時間が違った場合（例えば、0.1 にする）において、他のパラメータが全く同じでも、栄養塩の濃度分布および A_{c_s} の経時変化は異なる。すなわち、Fig. 13a および Fig. 13b の経時変化のように栄養塩を注入して直ちにシャットインを行う場合（開始時間 $0.1 t_{space}$ ）に比べ、Fig. 11a および Fig. 11b あるいは Fig. 12a および Fig. 12b に示す開始時間を 0.5 とする場合、栄養塩はほぼ層の中央に送られてから、流入口と流出口へ共に拡散するため早く分散する。したがって、平均分布濃度 0.1 以上の各濃度（例として 0.12, 0.15）の A_{c_s} はより早く 0 になり、平均濃度 0.1 以下の各濃度（例として 0.04, 0.08）の A_{c_s} はより早く 100% に達する。

以上の考察により、栄養塩の濃度分布が定常状態になるまでにかかる時間が短いこと、すなわち栄養塩が早く MEOR 実施域に到着して広く分布することは、効率的な MEOR のためには非常に大切なことであるが、この時間は注入栄養塩溶液のレイリー数、すなわちその溶液の性質およびシャットイン期間に大きく依存することがわかった。

Fig. 11a Time variation of the nutrient concentration distribution. (Numerical results for $R_a=1.0$ and the shut-in period from 0.5 through 50.0 t_{space} .)

Fig. 11b Time variation of the ratio A_{c_s} of the area where the concentration is larger than C_s . (Numerical results for $R_a=1.0$ and the shut-in period from 0.5 through 50.0 t_{space} .)

Fig. 12a Time variation of the nutrient concentration distribution. (Numerical results for $Ra=2.0$ and the shut-in period from 0.5 through 50.0 t_{space})

Fig. 13a Time variation of the nutrient concentration distribution. (Numerical results for $Ra=2.0$ and the shut-in period from 0.1 through 49.6 t_{space})

Fig. 12b Time variation of the ratio A_c of the area where the concentration is larger than C_s . (Numerical results for $Ra=2.0$ and the shut-in period from 0.5 through 50.0 t_{space})

Fig. 13b Time variation of the ratio A_c of the area where the concentration is larger than C_s . (Numerical results for $Ra=2.0$ and the shut-in period from 0.1 through 49.6 t_{space})

5. ま と め

本研究では、密度流を考慮し流線関数を用いた比較的簡便な数値モデルを作成し、MEOR において栄養塩の移動、分布のようすについて検討した。シャットインを実施した場合、シャットインを実施しない場合ともに、数値モデルはレイリー数 R_a によって整理した室内実験結果をよく表し、本数値モデルの信頼性が検証できた。また、栄養塩の移動分布は油層の地質構造と貯留岩の性質に依存する^{1-3,5,8)}だけでなく、注入する栄養塩溶液の性質やシャットイン期間などにも著しく依存することが明らかになった。なお、MEOR の評価では多相流における微生物の移動、栄養塩の消費や、微生物の増殖、生成物の挙動およびそれに伴う粘度の変化などを扱い、極めて複雑なモデルを必要とするが、栄養塩の分布については、本モデルが適用可能である。

なお、本研究の一部は平成 9 年文部省科学研究費補助金基盤研究 B (一般 09450381/代表 千田 信) によるものであることを付記し謝意を表する。

引 用 文 献

- 1) 千田 信, 1996: 地球化学反応速度と移動現象. コロナ社.
- 2) 千田 信ら, 1996: 微生物攻法 (その 1) 原理. 石技誌, **61** (3), 246-250.
- 3) Islam, M. R., 1990: Mathematical modeling of microbial enhanced oil recovery. *SPE 20480 prepared for presentation at the 65th Annual Conference and Exhibition of the SPE held in New Orleans*.
- 4) Chang, M-M., Chung, F. T-H., Bryant, R. S., Gao, H. W. and Burchfield, T. E., 1991: Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media. *SPE 22845 prepared for presentation at the 66th Annual Conference and Exhibition of the SPE held in Dallas*.
- 5) Desouky, S. M., Abdel-Daim, M. M., Sayyoush M. H. and Dahab, A. S., 1996: Modeling and laboratory investigation of microbial enhanced oil recovery. *J. of petroleum science and engineering*, **15**, 309-320.
- 6) Hu, Q., and Brusseau, M. L., 1995: Effect of solute size on transport in structured porous media. *Water Resour. Res.*, **31** (7), July, 1637-1646.
- 7) 秋林 智ら, 1990: 浸透率が連続的に変化する場合の地熱貯留層の熱水流動解析. 石技誌, **55** (3), 186-197.
- 8) 斎藤武雄, 1992: 数値伝熱学. 養賢堂.
- 9) 日本化学会編, 1994: 化学便覧・基礎編 (改訂 4 版). 丸善.
- 10) Levenspiel O., 1972: *Chem. Reaction Engineering*, p. 253~283. WILEY INTERNATIONAL EDITION.