溶液の粘弾性を考慮したポリマー攻法の解析

その 3. フラクショナルフロー理論を用いた挙動予測

増 田 昌 敬*

(平成 3 年 3 月 14 日受付, 3 年 5 月 15 日受理)

Analysis of Polymer-Flood Performance Including Viscoelastic Effects of Polymer Solution

Part 3. Prediction of Polymer-Flood Performance by Application of Fractional Flow Theory

By

Yoshihiro MASUDA

Abstract: A new mathematical model was constructed to express flow behavior of polymer solution for two-phase flow of oil and the solution. By combining the fractional flow theory proposed by G. A. Pope with this model, a simple simulator was developed to predict performances of polymer flood. In this simulator, permeability reduction owing to adsorption of polymer molecules was modeled by reduction of hydraulic radius for flow of the solution. Two parameters (C^* , m_c) dependent on pore structure and fluid relaxation time were used to calculate the viscoelastic flow behavior of polymer solution.

Calculated performances were compared with experimental data of 1D polymer flood described in the previous paper (ref. 5). The simulator could reproduce the experimental data well when viscoelastic flow behavior was assumed. By model calculations, the viscoelastic effects of polymer solution on oil recovery were found to (1) increase flow resistance in two-phase flow, (2) make breakthrough saturation of polymer solution higher by shifting fractional flow curve to higher saturation, and (3) make oil recovery faster, therefore.

1. ま え が き

フラクショナルフロー理論を用いた EOR 法の挙動予測法は, 1980 年に, G. A. POPE¹⁾ によって発表された。この手法については, 文献 2) によくまとめられている。本研究では, 第一報³⁾ で構築したポリマー溶液の多孔質媒体内流動モデルをポリマー溶液と油の 2 相流動に拡張して, このフラクショナルフロー理論と組み合わせることにより, ポリマー攻法の挙動予測を行う計算モデルを

開発した。ポリマー溶液と油の 2 相流動におけるフラクショナルフロー曲線を計算するときに, ポリマー溶液の粘弾性的性質を考慮したものは殆どない⁴⁾。本モデルでは, コアおよび溶液の性質に関連する定数 C^* と m_c を用いて粘弾性効果を簡単に考慮できるようにした。さらに, 前報⁵⁾ で報告した実験データとの比較を行い, 油採取挙動に与えるポリマー溶液の粘弾性流動の効果について考察を行った。

2. 油-ポリマー溶液の 2 相流動理論

2.1 水力半径による相対浸透率の表現法

多孔質媒体内における油と水の 2 相流動は, 一般に,

* 東京大学工学部

ダルシー則を用いて次のように表される。

$$\begin{cases} u_{D,w}(S_w) = \frac{k_D k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \cdot \frac{dp_w}{dx} \\ u_{D,o}(S_w) = \frac{k_D k_{ro}(S_w)}{\mu_o} \cdot \frac{dp_o}{dx} \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

一方、多孔質媒体内に存在する2相が、別々の水力半径をもつ流路を流れていると仮定すると、第一報³⁾の付録Bと同様の方法で、各相の流れに対して、次のKOZENY-CARMAN式が誘導される。

$$u_{D,w}(S_w) = \frac{\phi \cdot S_w \cdot r_{H,w}^2(S_w)}{k_0 \cdot T_{KC}^2 \cdot \mu_w} \cdot \frac{dp_w}{dx} \quad (3)$$

$$u_{D,o}(S_w) = \frac{\phi \cdot (1-S_w) \cdot r_{H,o}^2(S_w)}{k_0 \cdot T_{KC}^2 \cdot \mu_o} \cdot \frac{dp_o}{dx} \quad (4)$$

(1) 式と (3) 式の比較より、

$$k_D k_{rw}(S_w) = \frac{\phi \cdot S_w \cdot r_{H,w}^2(S_w)}{k_0 \cdot T_{KC}^2} \quad (5)$$

が成り立つ。従って、ある飽和率における水相の流れに対する水力半径 $r_{H,w}$ は、

$$r_{H,w}(S_w) = T_{KC} \cdot \left[\frac{k_0 \cdot k_D \cdot k_{rw}(S_w)}{\phi \cdot S_w} \right]^{1/2} \quad (6)$$

で計算される。同様に、油相に対しても、

$$r_{H,o}(S_w) = T_{KC} \cdot \left[\frac{k_0 \cdot k_D \cdot k_{ro}(S_w)}{\phi \cdot (1-S_w)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

の関係が成立する。ここで、各相の流路形状を表す shape factor k_0 および流路の屈曲度 T_{KC} は、厳密には飽和率の関数であるが、この関数は求めることが困難である。ここでは、これらの値は飽和率に依存しない定数と考えて、単相流動の場合と同じ値を用いた。(6) 式と (7) 式により、各相の流れに対する水力半径の飽和率による変化は、相対浸透率を用いて計算される。

2.2 相対浸透率モデル

水と油の2相流動における相対浸透率曲線は、前報⁵⁾で述べたとおり、(8) 式～(11) 式を用いて表現する。

$$k_{ro} = \alpha_1 \cdot (1-S_{WD})^m \quad (S_{WD,c} < S_{WD} \leq 1) \quad (8)$$

$$= \frac{S_{WD} \cdot (k_{ro,c} - \alpha_3)}{S_{WD,c}} + \alpha_3 \quad (0 \leq S_{WD} \leq S_{WD,c}) \quad (9)$$

$$k_{rw} = \alpha_2 \cdot S_{WD}^n \quad (10)$$

$$S_{WD} = \frac{S_w - S_{w0}}{1 - S_{or} - S_{w0}} \quad (11)$$

ポリマー溶液中のポリマー分子が多孔質媒体へ吸着すると、ポリマー溶液の流れに対する相対浸透率が低下する。本モデルでは、ポリマー分子が多孔質媒体へ吸着するとポリマー分子の吸着層の厚さ δr_H だけポリマー溶液の流れに対する水力半径 $r_{H,p}$ が減少するという考えを導入して、ポリマー溶液の流れに対する相対浸透率をモデル化した。

ある飽和率 S_w におけるポリマー溶液の流れに対する水力半径 $r_{H,p}(S_w)$ を、

$$r_{H,p}(S_w) = r_{H,w}(S_w) - \delta r_H \quad (12)$$

で表す。ここで、 $r_{H,w}(S_w)$ は、水と油が2相流動する時の、同じ飽和率 S_w における水の流れに対する水力半径である。一方、(6) 式と同様にして、

$$r_{H,p}(S_w) = T_{KC} \cdot \left[\frac{k_0 \cdot k_D \cdot k_{rp}(S_w)}{\phi \cdot S_w} \right]^{1/2} \quad (13)$$

が導かれるので、

$$\frac{k_{rp}(S_w)}{k_{rw}(S_w)} = \left[\frac{r_{H,p}(S_w)}{r_{H,w}(S_w)} \right]^2 \quad (14)$$

となる。これに、(12) 式を代入すると、

$$k_{rp}(S_w) = \left[1 - \frac{\delta r_H}{r_{H,w}(S_w)} \right]^2 \cdot k_{rw}(S_w) \quad (15)$$

を得る。ポリマー溶液と油の2相流動におけるポリマー溶液に対する相対浸透率 $k_{rp}(S_w)$ は、(6) 式と (15) 式を用いて計算される。

2.3 2相流動モデル

第一報³⁾で述べたポリマー溶液の単相流動モデルを拡張することにより、多孔質媒体内における油とポリマー溶液の2相流動モデルを誘導する。

2.3.1 基本式

各相に対する流れの式を、水-油の2相流の場合と同様に、ダルシーの式を用いて、次のように表す。

$$\begin{cases} u_{D,p}(S_w) = \frac{k_D k_{rp}(S_w)}{\mu_{D,p}(S_w)} \cdot \frac{dp_w}{dx} \\ u_{D,o}(S_w) = \frac{k_D k_{ro}(S_w)}{\mu_o} \cdot \frac{dp_o}{dx} \end{cases} \quad (16) \quad (17)$$

$$S_o + S_w = 1.0 \quad (18)$$

ここで、 k_{rp} 、 k_{ro} は、各々、ポリマー溶液に対する相対

浸透率と油に対する相対浸透率である。ポリマー溶液のダルシー粘度 $\mu_{D,p}$ は、単相流動の場合と同様に、ずり粘性による粘度 $\mu_{Dv,p}$ と弾性粘度 $\mu_{De,p}$ の和で表される。

$$\mu_{D,p}(S_w) = \mu_{Dv,p}(S_w) + \mu_{De,p}(S_w) \quad (19)$$

2.3.2 ポリマー溶液の流れに対するずり速度の評価式

ポリマー溶液の孔隙内流速 u_p とダルシー流速 $u_{D,p}$ の間には、

$$u_p(S_w) = \frac{u_{D,p}(S_w) \cdot T_{KC}}{\phi \cdot S_w} \quad (20)$$

の関係がある。従って、ポリマー溶液の流れに対するずり速度 $\dot{\gamma}_{core,p}$ は、単相流動の場合と同様にして、次式で計算される。

$$\dot{\gamma}_{core,p}(S_w) = \frac{k_0 \cdot u_p(S_w)}{r_{H,p}(S_w)} = \frac{k_0 \cdot T_{KC} \cdot u_{D,p}(S_w)}{\phi \cdot S_w \cdot r_{H,p}(S_w)} \quad (21)$$

油とポリマー溶液を合わせた全体のダルシー流速を $u_{D,t}$ とすると、

$$u_{D,p}(S_w) = f_p(S_w) \cdot u_{D,t} \quad (22)$$

の関係があるので、 $\dot{\gamma}_{core,p}$ は、ポリマー溶液のフラクショナルフロー f_p を用いて、

$$\dot{\gamma}_{core,p}(S_w) = \frac{k_0 \cdot T_{KC} \cdot u_{D,t}}{\phi \cdot S_w} \cdot \frac{f_p(S_w)}{r_{H,p}(S_w)} \quad (23)$$

で表される。これに、(13) 式を代入すると、

$$\dot{\gamma}_{core,p}(S_w) = \left[\frac{k_0}{k_D \cdot k_{rp}(S_w) \cdot \phi \cdot S_w} \right]^{1/2} \cdot f_p(S_w) \cdot u_{D,t} \quad (24)$$

を得る。

2.3.3 ポリマー溶液のダルシー粘度の計算法

2 相流動においては、ポリマー溶液の流れに対する水力半径、ずり速度、流路壁面における平均ずり応力が飽和率の関数になる。それを除いては、単相流動の場合と全く同じ方法により、ポリマー溶液のダルシー粘度 $\mu_{D,p}$ が求められる。

ある飽和率におけるポリマー溶液のずり粘性によるダルシー粘度 $\mu_{Dv,p}$ は、

$$\mu_{Dv,p}(S_w) = \frac{\bar{\tau}_w(S_w)}{\dot{\gamma}_{core,p}(S_w)} \quad (25)$$

で計算される。ここで、 $\bar{\tau}_w(S_w)$ は、 $\dot{\gamma}_{core,p}(S_w)$ が (24) 式で与えられているので、

$$\bar{\tau}_w(S_w) = \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}_{core,p}(S_w)}{1 + \frac{1+\xi}{\alpha+\xi} \cdot \left[\frac{\bar{\tau}_w(S_w)}{\tau_{1/2}} \right]^{\alpha-1}} \quad (26)$$

を数値的に解くことにより得られる。弾性粘度 $\mu_{De,p}$ は、

$$\mu_{De,p}(S_w) = C^* \cdot [\dot{\gamma}_{core,p}(S_w)]^{m_e} \cdot \mu_{Dv,p}(S_w) \quad (27)$$

で計算される。ここで、 C^* および m_e は、第一報³⁾で定義した多孔質媒体のもつ孔隙の幾何学的形状と流体のもつ緩和時間に依存するパラメータ（定数）である。ポリマー溶液のダルシー粘度 $\mu_{D,p}$ は (19) 式で計算される。

3. 一次元油置換挙動の計算モデル

3.1 モデルの概要

このモデルは、一次元の均質な多孔質媒体（コア）に対する水攻法およびポリマー攻法を対象として、以下の仮定を設けている。

- 1) 流体と多孔質媒体は、非圧縮性とする。
- 2) 油置換に与える重力と毛管圧の効果は無視する。
- 3) 水およびポリマー溶液の圧入レートは一定とする。
- 4) 水とポリマー溶液は、完全にミシブルな流体と考えるが、その界面におけるポリマー分子の拡散は無視する。
- 5) ポリマー分子の媒体への吸着は、ポリマー溶液のフロントにおいて瞬間的に生じる。

プログラムは、水攻法とポリマー攻法時の各挙動を別のフローで計算するようになっている。各々、タイムステップ毎に、以下の流れで計算を実行する。

- 1) フラクショナルフロー曲線の計算
- 2) 油置換フロントの位置、飽和率およびそのときのフラクショナルフローの計算
- 3) コア内の飽和率分布の計算
- 4) コア内の圧力損失、平均有効粘度の計算
- 5) 油採取率などの各採取挙動の計算

以下、1)～4) の項目について、計算の理論的背景および計算方法を簡単に説明する。プログラムの詳細については、文献6) に報告されているのでそれを参照されたい。

3.2 フラクショナルフロー曲線の計算法

3.2.1 水-油の2相流動

水と油の2相流動における水のフラクショナルフロー f_w は、

$$f_w(S_w) = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \cdot \frac{k_{ro}(S_w)}{k_{rw}(S_w)}} \quad (28)$$

で表される。これに、(8)～(10)式で与えられる各相対浸透率の式を代入すると、各飽和率 S_w における水のフラクショナルフロー f_w が計算される。

3.2.2 ポリマー溶液-油の2相流動

ポリマー溶液と油の2相流動におけるポリマー溶液のフラクショナルフロー f_p は、(28)式と同様に、

$$f_p(S_w) = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{D,p}(S_w)}{\mu_o} \cdot \frac{k_{ro}(S_w)}{k_{rp}(S_w)}} \quad (29)$$

で表される。

飽和率 S_w におけるポリマー溶液のフラクショナルフロー $f_p(S_w)$ は、(29)式を解くことにより求められる。しかし、この式は、右辺の $\mu_{D,p}$ が前述したように f_p の関数となっているため、直接解くことはできない。そこで、ある飽和率 S_w における f_p は、

$$f_p(S_w) = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{D,p}(f_p(S_w))}{\mu_o} \cdot \frac{k_{ro}(S_w)}{k_{rp}(S_w)}} \quad (30)$$

を満たす解として、数値的に計算する。各飽和率 S_w に対して、順次、上式を解いていくことにより、ポリマー溶液に対するフラクショナルフロー曲線が計算される。

3.3 油置換フロントの位置およびコア内飽和率分布の計算法

3.3.1 水攻法

一次元のコアに対して水攻法を行う場合を考える。このとき、コア内へ圧入される水は、置換フロント（水飽和率が不連続に変化するフロント）を形成して進む。水攻法時のコア内における水飽和率分布は、Fig. 1 のようになる。各飽和率面の進む速度は、次のフロントアドバンс・レートに従う。

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{S_w} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_t \quad (31)$$

置換フロントの水飽和率 S_{wf} までの飽和率面は、等速度で多孔質媒体内を移動する。従って、ある時刻 t における各飽和率面の位置 x_{S_w} は、次式で計算される。

1) $S_{wi} < S_w \leq S_{wf}$ の飽和率面

$$\begin{aligned} x_{S_w} &= \frac{u_{D,t} \cdot t}{\phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{S_{wf}} \\ &= Q_t \cdot L \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{S_{wf}} \end{aligned} \quad (32)$$

Fig. 1 Saturation profile before water breakthrough at water flooding.

Fig. 2 Determination of flood-front saturation at water flooding.

2) $S_w > S_{wf}$ の飽和率面

$$\begin{aligned} x_{S_w} &= \frac{u_{D,t} \cdot t}{\phi} \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{S_w} \\ &= Q_t \cdot L \cdot \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{S_w} \end{aligned} \quad (33)$$

ここで、 Q_t は、時刻 t までの累計水圧入量 (PV) である。 S_{wf} は、Fig. 2 のように、水-油のフラクショナルフロー曲線に初期水飽和率 S_{wi} の点から接線を引くことにより得られる。

3.3.2 ポリマー攻法

一次元のコアに対してポリマー攻法を行う場合を考える。ポリマー溶液は、水と完全にミシブルと仮定するので、コア内に初期に存在する水をピストン状に前方へ押し出して先行水バンクを形成する。よって、ポリマー溶液が水および油を置換していくときのコア内飽和率分布

Fig. 3 Saturation profile before breakthrough at polymer flooding.

Fig. 4 Determination of flood-front saturation at polymer flooding.

は、Fig. 3 のようになる。つまり、コア内の流れの状態は、

- 1) ポリマー溶液と油の 2 相流動の区間
- 2) 先行水バンクと油の 2 相流動の区間
- 3) 初期にコア内に存在する水と油の 2 相流動の区間の 3 つに分かれる。

いま、水と油の 2 相流動における水のフラクショナルフローを f_w 、ポリマー溶液と油の 2 相流動におけるポリマー溶液のフラクショナルフローを f_p とする。これらのフラクショナルフロー曲線は、前述した方法で Fig. 4 の点線のように与えられている。各区間における飽和率面の進行状態は次のように計算される¹⁾。

(1) ポリマー溶液と油の 2 相流動区間

この区間では、ポリマー溶液相は、その相内のポリマー分子を多孔質媒体表面上に吸着しながら、油相と 2 相流動をする。ポリマー分子の物質収支式は、次式のようになる。

$$\frac{\partial (S_w \cdot c)}{\partial t} + \frac{(1-\phi) \cdot \rho_s}{\phi} \cdot \frac{\partial C_{ad}}{\partial t} + \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \frac{\partial (c \cdot f_p)}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

ポリマー分子の多孔質媒体への吸着量 C_{ad} を、孔隙体積あたりの吸着量 $\hat{C}_{ad}$ に直すと、

$$\hat{C}_{ad} = \frac{(1-\phi) \cdot \rho_s \cdot C_{ad}}{\phi} \quad (35)$$

であるから、(34) 式は、

$$\frac{\partial (S_w \cdot c)}{\partial t} + \frac{\partial \hat{C}_{ad}}{\partial t} + \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \frac{\partial (c \cdot f_p)}{\partial x} = 0 \quad (36)$$

になる。一方、ポリマー溶液が一定圧入レートで多孔質媒体内へ圧入される場合、ポリマー溶液相の流れに対する連続の式は、

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial x} = 0 \quad (37)$$

で与えられる。よって、(36) 式、(37) 式より、

$$\left(S_w + \frac{d\hat{C}_{ad}}{dc} \right) \cdot \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u_{D,t} \cdot f_p}{\phi} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (38)$$

が成立する。上式より、濃度 c_0 のポリマー溶液のフロントの移動する速度は、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{c_0} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left[\frac{f_p}{S_w + \frac{d\hat{C}_{ad}}{dc}} \right]_{c_0} \quad (39)$$

で表される。ここで、ポリマー分子の多孔質媒体への吸着がフロントにおいて瞬間的に飽和吸着量 $\hat{C}_{ad,max}$ になると考えると、

$$\left(\frac{d\hat{C}_{ad}}{dc} \right)_{c_0} = \frac{\hat{C}_{ad,max}}{c_0} \quad (40)$$

であるから、(39) 式は、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{c_0} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left[\frac{f_p}{S_w + \frac{\hat{C}_{ad,max}}{c_0}} \right]_{c_0} \quad (41)$$

となる。

一方、ポリマー溶液と油はインミシブルであるので、ポリマー溶液は、飽和率の不連続な置換フロントを形成して油を置換する。油置換フロントにおけるポリマー溶液の飽和率を S_{pf} とすると、このフロントの進む速度は一定であり、(37) 式より、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{S_{pf}} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left(\frac{\partial f_p}{\partial S_w}\right)_{S_{pf}} \quad (42)$$

で表される。ここで、ポリマー分子の水への拡散を無視すると、ポリマー濃度 c_0 のフロントの移動速度と油置換フロントの移動速度は等しいと考えられるので、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{S_{pf}} = \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{c_0} \quad (43)$$

が成り立つ。(41)式～(43)式の関係から、

$$\left(\frac{\partial f_p}{\partial S_w}\right)_{S_{pf}} = \left[\frac{f_{pf}}{S_{pf} + \frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}} \right]_{c_0} \quad (44)$$

が成立する。上式より、 (S_{pf}, f_{pf}) は Fig. 4 のように、 $\left(-\frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}, 0\right)$ よりポリマー溶液のフラクショナルフロー曲線 ($f_p - S_w$ 曲線) に接線を引いた接点として計算されることがわかる。

(S_{pf}, f_{pf}) が得られると、この区間における飽和率面 S_w の移動速度と、ある累計圧入量時点における各飽和率面の進行位置 x_{Sw} は、次式で計算される。

- 1) $S_{pf} < S_w < 1 - S_{or}$ の飽和率面

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{S_w} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left(\frac{\partial f_p}{\partial S_w}\right)_t \quad (45)$$

$$x_{Sw} = Q_i \cdot L \cdot \left(\frac{\partial f_p}{\partial S_w}\right)_{S_w} \quad (46)$$

- 2) $0 < S_w \leq S_{pf}$ の飽和率面

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{S_{pf}} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \left[\frac{f_{pf}}{S_{pf} + \frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}} \right]_{c_0} \quad (47)$$

$$x_{S_{pf}} = Q_i \cdot L \cdot \left[\frac{f_{pf}}{S_{pf} + \frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}} \right]_{c_0} \quad (48)$$

(2) 先行水バンクと油の2相流動区間

この区間においては、ポリマー溶液により前方に押し出された水が油と2相流動する。形成される水バンクの飽和率を S_{wf} とすると、水バンク最後方の S_{wf} 面の進行する速度はポリマー溶液による油置換フロントの移動速度と等しい。つまり、(42)式、(47)式より、

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f_p}{\partial S_w}\right)_{S_{pf}} &= \left[\frac{f_{pf}}{S_{pf} + \frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}} \right]_{c_0} \\ &= \frac{f_{pf} - f_{wf}}{S_{pf} - S_{wf}} \end{aligned} \quad (49)$$

の関係が成立する。一方、 (S_{wf}, f_{wf}) は、油と水の2相流動における水のフラクショナルフローの式を満たす。従って、 (S_{wf}, f_{wf}) は、Fig. 4 のように、 $\left(-\frac{\hat{C}_{ad, \max}}{c_0}, 0\right)$ と (S_{pf}, f_{pf}) を結ぶ線分が水のフラクショナルフロー曲線 ($f_w - S_w$) と交わる点として求められる。

$S_{ui} < S_w \leq S_{wf}$ 間の各飽和率面は等速度で進行する。その速度は、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{S_{wf}} = \frac{u_{D,t}}{\phi} \cdot \frac{f_{wf} - f_{ui}}{S_{wf} - S_{ui}} \quad (50)$$

で与えられる。ある累計圧入量時点における S_{wf} のフロント位置は、

$$x_{S_{wf}} = Q_i \cdot L \cdot \frac{f_{wf} - f_{ui}}{S_{wf} - S_{ui}} \quad (51)$$

で計算される。

(3) 初期に存在する水と油の2相流動区間

先行水バンクの前方では、初期水飽和率 S_{ui} の状態で、水と油が2相流動をする。その時の水のフラクショナルフロー f_{ui} は、水のフラクショナルフロー曲線より直接計算される。

3.4 コア内平均有効粘度の計算

コア内2相流動における全有効粘度 λ_{rT}^{-1} は、ダルシーの式を用いて、次式で定義される。

$$u_{D,t} = \frac{k_D}{\lambda_{rT}^{-1}} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (52)$$

ここで、 λ_{rT}^{-1} は、水と油の2相流動区間、ポリマー溶液と油の2相流動区間において、各々、以下の式で計算される。

$$\lambda_{rT}^{-1} = \left[\frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} + \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} \right]^{-1} \quad (53)$$

$$\lambda_{rT}^{-1} = \left[\frac{k_{rp}(S_w)}{\mu_{D,p}(S_w)} + \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} \right]^{-1} \quad (54)$$

長さ L の一次元のコアを考えると、コア内平均有効粘度 λ_{rT}^{-1} は、

$$\frac{1}{\lambda_{rT}} = \frac{\int_0^L \lambda_{rT}^{-1} dx}{\int_0^L dx} = \frac{\int_0^L \lambda_{rT}^{-1} dx}{L} \quad (55)$$

で与えられる。ポリマー攻法時は、Fig. 3 に示したように、流れの状態の異なる3つの区間が存在する。このように異なる流動区間が存在する時は、各区間における平均有効粘度 λ_{rT}^{-1} を数値積分により求めた後、それらの和からコア内平均有効粘度が計算される。一方、(52) 式を積分すると、

$$\Delta p = \frac{1}{\lambda_{rT}} \cdot u_{D,t} \cdot \frac{L}{k_D} \quad (56)$$

になり、コア内圧力損失 Δp が計算される。

4. 計算結果

前報⁵⁾で、ポリマー攻法の室内実験結果について報告した。以下、これらの実験に対して計算を行った結果を述べる。

4.1 計算の入力データ

プログラムの主な入力データは、以下の項目である。

(1) コアおよび流体の性質に関する項目

- k_D : 絶対浸透率, μm^2 .
- L : コアの長さ, cm.
- A : " の断面積, cm^2 .
- V_p : " の全孔隙容積, cm^3 .
- S_{wi} : コア内初期水飽和率.
- μ_o : 油の粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$.
- μ_w : 水の粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$.
- c_0 : 圧入するポリマー溶液の濃度, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.
- $C_{ad, \max}$: ポリマー分子のコアへの飽和吸着量, $\mu\text{g}/\text{g}$.
- δr_H : 吸着による水力半径の減少量, μm .
- C^*, m_c : 孔隙の幾何学的形状および流体の緩和時間に依存するパラメータ [(27) 式参照].
- $\alpha, \tau_{1/2}, \eta_0$: ポリマー溶液のレオロジー的性質を表す ELLIS の式のパラメータ.

(2) 相対浸透率曲線のパラメータ

- S_{iw} : 不動水飽和率.
- S_{or} : 残留油飽和率.
- α_2, n : (10)式におけるパラメータ.
- α_1, m : (8) " "
- $S_{WD, c}, k_{ro, c}$: (9) " "

このプログラムにおいては、ポリマー溶液の多孔質媒体内の流動特性は、ELLIS の式のパラメータ ($\alpha, \tau_{1/2}, \eta_0$)

および粘性流動の度合を表すパラメータ (C^*, m_c) から計算される。これらのパラメータについては、第一報³⁾の実験で求めた値を各シミュレーションの共通の入力データとした。つまり、ポリアクリルアミド 200ppm 水溶液に対する ELLIS の式のパラメータは、キャピラリー粘度計による測定より求めた値 $\alpha = 1.556$, $\eta_0 = 9.1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\tau_{1/2} = 7.202 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ を用いた。 C^* は $1.03 \times 10^{-2} \text{ s}^{m_c}$, m_c は 1.216 とした。

相対浸透率の各パラメータについては、前報⁵⁾で求めた値を用いた。Fig. 5 に計算の入力として与えた相対浸透率曲線を示す。Fig. 6 には、コア G-14 の水攻法実験における油採取率とコア内圧力損失挙動の計算結果と実験結果の比較を示す。両者がよく一致していることから、計算の入力データに用いた相対浸透率曲線が妥当であったことがわかる。

Fig. 5 Relative permeability curves.

Fig. 6 Comparison between predicted and experimental histories of oil-recovery efficiency and pressure drop through core during water flood for core G-14.

4.2 ポリマー溶液の粘弾性流動の効果

コア G-14 のポリマー攻法実験に対してシミュレーションを行った結果と実験結果との比較を Fig. 7～Fig. 9 に示す。計算においては、ポリマー分子の媒体への吸着量 $C_{ad,max}$ と水力半径の減少量 δr_H は 0 とした。各図では、パラメータ C^* と m_c について、ガラスビーズコアを用いた单相流動実験から求めた値（上述の値）を用いた場合と、 C^* 、 m_c ともに 0 とした場合の計算結果を両方示してある。つまり、前者は、ポリマー溶液が多孔質媒体内において粘弾性流動をすることを考えた場合の計算結果であり、図中では VISCOELASTIC MODEL として実線で示されている。後者の場合は、(27) 式からわかるように、ポリマー溶液の流れに対する弾性粘度 $\mu_{D,p}$ は 0 となる。これは、多孔質媒体内における溶液のレオロジー特性が ELLIS の式に従う溶液の粘弾性を無視した場合の計算結果であり、図中に ELLIS MODEL として破線で示してある。

Fig. 7 と Fig. 8 からわかるように、ポリマー溶液が粘弾性流動をすると仮定して計算した場合は、油の採取率挙動、圧力挙動ともに比較的良好に実験結果と一致した。一方、ELLIS の式に従う shear-thinning のレオロジー特性を仮定した場合は、実験結果と比べて、油の採取率が低く、コア内圧力損失がかなり小さく計算された。Fig. 9 に示したフラクショナルフロー曲線における比較からも、溶液の粘弾性を考慮した場合の方が実験結果とよく一致しているのがわかる。これらは、コア G-14 実験の場合の比較の例であるが、他のコアを用いた実験についても同様の結果が得られた。

以上のように、今回の計算では、ポリマー溶液の粘弾性流動を考慮すると実験結果をうまく再現することができた。ポリマー溶液の粘弾性流動を計算するための入力データは、パラメータ C^* 、 m_c のみである。これらのパラメータの導入により、簡単にポリマー攻法の挙動予測を行うことができることは、この計算モデルの大きな特徴である。また、溶液の粘弾性を無視して計算した結果が実験結果と大きく異なったことから、ポリマー溶液の粘弾性流動が油の採取挙動に対して大きな効果をもつことが確認された。ポリマー溶液の粘弾性流動は、

- 1) コア内の流動抵抗を大きくさせる
- 2) 油との 2 相流動におけるフラクショナルフロー曲線を水飽和率の高い方向にシフトさせ、かつポリマー溶液のフロントの水飽和率を高くさせる
- 3) 以上の結果として、油の採取速度を早める効果をもつと考えられた。

Fig. 7 Histories of oil-recovery efficiency during polymer flood for core G-14 [$\mu_o=24$ mPa·s, $u_{D,t}=61$ μ m/s].

Fig. 8 Histories of pressure drop through core during polymer flood for core G-14 [$\mu_o=24$ mPa·s, $u_{D,t}=61$ μ m/s].

Fig. 9 Fractional flow curves for core G-14 [$\mu_o=24$ mPa·s, $u_{D,t}=61$ μ m/s].

4.3 ポリマー分子の吸着の効果

本プログラムでは、ポリマー分子の吸着を、飽和吸着量 $C_{ad,max}$ と水力半径の減少量 δr_H でモデル化してい

Fig. 10 Predicted saturation profiles at $Q_i = 0.3PV$ with different adsorption parameters during polymer flood for core G-14.

Fig. 11 Predicted histories of oil-recovery efficiency with different adsorption parameters during polymer flood for core G-14.

Fig. 12 Predicted histories of pressure drop through core with different adsorption parameters during polymer flood for core G-14.

る。この吸着がポリマー攻法時の油置換挙動に及ぼす影響について計算した結果を Fig. 10～Fig. 12 に示す。各図は、ポリマー溶液の粘弾性流動を考慮して δr_H を 0, 1, 2 μm と変化させた場合の計算結果の比較である。吸着がある場合の $C_{ad,max}$ は、以前に著者の研究室で実験したデータより 5 $\mu g/g$ とした。

Fig. 10 は、累計圧入量 0.3PV 時点におけるコア内水飽和率分布の計算結果の比較を示す。吸着がある ($\delta r_H \neq 0$) 場合はポリマー溶液のフロントの飽和率が高くなる。これは、水力半径の低下 δr_H によりポリマー溶液に対する浸透率が低下し、油とポリマー溶液間のモビリティレイショが改善されるためである。また、ポリマー溶液からの脱着水が先行水バンク内へ入り、水バンクの飽和率が上がる様子もわかる。つまり、ポリマー分子の吸着は、ポリマー溶液のフロントの飽和率を上げると同時にその進行速度を遅くさせ、逆に水バンクの進行を早める効果をもつことがわかる。

Fig. 11 は、油採取率と累計圧入量の関係についての比較である。上述したように、吸着がある場合は、水バンクのブレイクスルーが早くなるため、初期の油採取率は吸着のない場合に比べて低い。一方、水バンクの産出後の油採取率は吸着がある場合の方が大きくなる。これは、水バンク後方のポリマー溶液のフロント飽和率が高くなっていることによる。全体でみると、吸着を考慮することにより、油の採取速度が若干早まると言える。

Fig. 12 は、コア内圧力損失と累計圧入量の関係についての比較を示す。ポリマー溶液がブレイクスルーするまでの圧力損失の二つの折れ曲がり部分は、各々、油とポリマー溶液および油と水バンクの 2 相流動区間のブレイクスルー時刻に対応している。全体でみると、吸着を考慮することにより、コア内圧力損失は上昇することがわかる。

以上に考察したように、ポリマー分子の吸着による水力半径の減少は、粘弾性流動の効果と同様に、コア内の流動抵抗を増して油採取速度を早める効果をもつことがわかる。このどちらかの効果が強く現れるかは、多孔質媒体のもつ浸透率の大きさ、相対浸透率曲線の形状、媒体との吸着特性、溶液のレオロジー特性（粘弾性流動の大きさ）や置換流速など諸々の性質に依存すると考えられる。ただし、吸着の効果だけでは、次項で述べるような置換流速の変化による油採取速度やコア内圧力損失挙動の違いは説明できない。

4.4 各実験結果との比較

ポリマー攻法に対する計算結果と実験結果との比較を Fig. 13～Fig. 16 に示す。計算結果は、溶液の粘弾性を考慮して、ポリマー分子の吸着を無視した ($\delta r_H =$

0, $C_{ad,max}=0$) 場合を示してある。

コア G-14 とコア G-17 の実験においては、粘度約 25 mPa・s の油を採取するために、ポリマー溶液を各々異なる置換流速 ($61 \mu\text{m/s}$ と $32 \mu\text{m/s}$) で圧入した。Fig. 13 は、油の採取率と累計圧入量の関係についての比較である。コア G-14 の実験に対しては、ブレイクスルー後の油の採取率が若干低く計算された。しかし、ポリマー攻法の置換流速を上げると油の採取速度が早まるという実験結果と同様の傾向は得られた。Fig. 14 は、コア内圧力損失と累計圧入量の関係についての比較を示す。コア G-17 の実験に対しては、コア内圧力損失が、実験結果よりやや高めに計算された。しかし、ポリマー攻法の置換流速の増加によるコア内圧力損失の上昇傾向はよく現れている。

コア G-15 とコア G-16 を用いたポリマー攻法実験においては、粘度約 50 mPa・s の油を、各々異なる置

換流速 ($32 \mu\text{m/s}$, $16 \mu\text{m/s}$) で採取した。Fig. 15 は、油の採取率と累計圧入量の関係についての比較である。コア G-15 の実験に対しては、コア G-14 の場合と同様に、ブレイクスルー後の油の採取率が若干低く計算された。しかし、ポリマー攻法の置換流速を上げると油の採取速度が早まる傾向は再現できた。Fig. 16 は、コア内圧力損失と累計圧入量の関係についての比較を示す。両実験ともに、ポリマー攻法時のコア内圧力損失の挙動はよく予測された。

以上のように、今回のモデルによる計算では、置換する油の種類、置換流速によらず、実験結果を比較的良好に再現することができた。ポリマー攻法の置換流速を上げると、ポリマー溶液の流れに対する流動抵抗が増して油の採取速度が早まる傾向も表すことができた。

4.5 先行水バンクとポリマー分子の拡散の影響

ウォーターカットと累計圧入量の関係について計算結

Fig. 13 Comparison of histories of oil-recovery efficiency during polymer flood for core G-14 and G-17 [Oil Ondina 15].

Fig. 14 Comparison of histories of pressure drop through core during polymer flood for core G-14 and G-17 [Oil Ondina 15].

Fig. 15 Comparison of histories of oil-recovery efficiency during polymer flood for core G-15 and G-16 [Oil Ondina 32].

Fig. 16 Comparison of histories of pressure drop through core during polymer flood for core G-15 and G-16 [Oil Ondina 32].

果と実験結果を比較した例を、Fig. 17とFig. 18に示す。図中には、産出流体中のポリマー濃度の測定データも同時にプロットしてある。3.3.2項で述べたように、計算モデルでは、ポリマー溶液と油の置換フロントの前方に先行水バンクが存在するという仮定を設けている。この先行水バンクとポリマー溶液間のポリマー分子の拡散は考えていない。これらの図から、計算における先行水バンクの流出時刻とウォーターカットの立ち上がり時刻がよく一致しているのがわかる。また、先行水バンクとポリマー溶液との界面が、ポリマー濃度の急激に変化する区間とよく一致しているのもわかる。以上のことから、前報⁹⁾で指摘したポリマー攻法時のウォーターカットの時間変化にみられる特徴的な折れ曲がりとは、ポリマー溶液により押し出されてきた水バンクによるものと考えられた。先行水バンクとポリマー溶液間のポリマー分子の拡散を考慮すれば、より実験値に近い穏やかなウォー

ターカットの時間変化を予測することができるはずである。

4.6 油置換フロントの移動に関する考察

Fig. 19はコアG-14の実験条件で計算した累計圧入量0.3PV時点のコア内飽和率分布の比較を示す。点線で示したのが、水攻法時のコア内飽和率分布である。破線および実線は、ともにポリマー攻法時の場合を示すが、前者はポリマー溶液のレオロジー特性がELLISの式に従うとした場合、後者は溶液の粘弾性流動を考慮した場合の計算結果である。この図から、ポリマー攻法においては、ブレイクスルー飽和率の高い油置換フロントが形成されること、つまり、油をよりピストン状に近い形で置換できることがわかる。これが、油の採取速度を早める要因である。ポリマー溶液の粘弾性流動は、この効果を助長するのに大きく貢献していることがわかる。

Fig. 20は、水攻法およびポリマー攻法におけるフラ

Fig. 17 Histories of water cut and polymer concentration of effluents during polymer flood for core G-14 [Oil Ondina 32, $u_{D,t}=61 \mu\text{m/s}$].

Fig. 18 Histories of water cut and polymer concentration of effluents during polymer flood for core G-17 [Oil Ondina 15, $u_{D,t}=32 \mu\text{m/s}$].

Fig. 19 Comparison of simulated saturation profiles at $Q_t=0.3\text{PV}$ for core G-14.

Fig. 20 Comparison of simulated fractional flow curves for core G-14.

クショナルフロー曲線の計算結果の比較を示す。ポリマー攻法の場合は、水攻法の場合に比べてフラクショナルフロー曲線が水飽和率の高い側にシフトする。このシフトの割合は、溶液の粘弾性流動を考慮した場合の方がより大きい。置換フロントの飽和率はこのフラクショナルフロー曲線の形状により決定されることから、今回のポリマー攻法実験で油採取速度が早まった主な理由は、ポリマー溶液の多孔質媒体内の流動特性（粘弾性流動）によるこの曲線の形状の変化であると考えられた。

5. ま と め

相対浸透率と水力半径の関係式を導入することにより、第一報³⁾で述べたポリマー溶液の多孔質媒体内流動モデルを、油との2相流動におけるポリマー溶液の流動特性を評価できるように拡張した。さらに、POPE¹⁾の提唱したポリマー溶液による油置換フロントの移動理論とこの多孔質媒体内流動モデルを用いて、ポリマー攻法時の油採取挙動を予測する計算プログラムを開発した。ポリマー溶液が多孔質媒体内を流動するときにポリマー分子が媒体へ吸着すると、ポリマー溶液の流れに対する浸透率は低下する。このプログラムにおいては、ポリマー分子の吸着が生じるとポリマー溶液の流れに対する水力半径が低下すると考えて、この効果を数式化した。

前報⁵⁾で報告した一次元のポリマー攻法の実験結果とこのプログラムによる計算結果とを比較した。計算結果は、ポリマー溶液の粘弾性流動を考慮した場合は、実験結果と比較的よく一致した。一方、溶液の粘弾性を無視して計算した結果は、実験結果と大きく異なった。さらに、ポリマー攻法時の油置換フロントの移動について解析を行った結果、溶液の粘弾性流動は、

- 1) コア内の流動抵抗を大きくさせる
- 2) 油との2相流動におけるフラクショナルフロー曲線の水飽和率の高い方向にシフトさせ、かつポリマー溶液のフロントの水飽和率を高くさせる
- 3) 以上の結果として、油の採取速度を早める効果をもつと考えられた。

この計算プログラムにおいては、ポリマー溶液の粘弾性流動を表すための入力データは多孔質媒体のもつ孔隙の形状および溶液の緩和時間に依存するパラメータ C^* 、 m_c のみである。これらのパラメータの導入により、簡単にポリマー攻法の挙動予測を行うことができたことは、本研究における一つの大きな成果であった。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費補助金による援助をうけて行われた。実験に使用したポリアクリルアミドは、三

洋化成工業㈱より提供して頂いた。東京大学工学部資源開発工学科の田中彰一教授には、本研究の全般にわたりご教示頂いた。ここに、深く謝意を表する。

記号の説明

c	: ポリマー溶液の濃度, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$
C^*	: 孔隙形状と溶液の緩和時間に関連する定数, s^{m_c}
C_{ad}	: ポリマー分子の吸着量 (多孔質媒体単位質量あたり), $\mu\text{g}/\text{g}$
$C_{ad,max}$	: ポリマー分子の飽和吸着量 ("), $\mu\text{g}/\text{g}$
$\hat{C}_{ad}$	: ポリマー分子の多孔質媒体への吸着量 (孔隙体積あたり), $\mu\text{g}/\text{cm}^3$
$\hat{C}_{ad,max}$	: ポリマー分子の多孔質媒体への飽和吸着量 (孔隙体積あたり), $\mu\text{g}/\text{cm}^3$
f_k	: k 相のフラクショナルフロー ($k=o, w$)
f_{pf}	: 油置換フロントにおけるポリマー溶液のフラクショナルフロー
f_{wf}	: 先行水バンクまたは油置換フロントにおける水のフラクショナルフロー
f_{wi}	: コア内初期水飽和率状態における水のフラクショナルフロー
k_D	: コアの浸透率, m^2
k_{rk}	: k 相の相対浸透率 ($k=o, p, w$)
$k_{ro,c}$	: 相対浸透率曲線のパラメータ
k_0	: KOZENY-CARMANモデルにおける shape factor (=2.5)
L	: コアの長さ, m
m	: 相対浸透率曲線のパラメータ
m_c	: コアの孔隙形状に関連する定数
n	: 相対浸透率曲線のパラメータ
p	: 圧力, Pa
Δp	: コア出入口間の圧力損失, Pa
Q_i	: 累計圧入量, PV
r_H	: 水力半径, m
δr_H	: ポリマー分子の吸着による水力半径の減少量, m
S_k	: k 相の飽和率 ($k=o, w$)
S_{iw}	: 不動水飽和率
S_{or}	: 残留油飽和率
S_{pf}	: 油置換フロントにおけるポリマー溶液の飽和率
S_{wi}	: コア内初期水飽和率
S_{wf}	: 先行水バンクまたは油置換フロントにおける水飽和率

S_{WD}	: 正規化された水飽和率
$S_{WD,c}$	: 相対浸透率曲線のパラメータ
T_{KC}	: KOZENY-CARMAN モデルにおける屈曲 度 ($=\sqrt{2}$)
u_p	: ポリマー溶液の孔隙内流速, m/s
u_D	: ダルシー流速, m/s
x	: 距離, m
x_{Sw}	: コア内の飽和率面 S_w の位置, m
α	: ELLIS の式のパラメータ
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	: 相対浸透率曲線のパラメータ
η_0	: ELLIS の式のパラメータ, Pa·s
$\dot{\gamma}_{core}$	: コア内平均ずり速度, s^{-1}
λ_{rT}^{-1}	: 全有効粘度, Pa·s
$\overline{\lambda_{rT}^{-1}}$	: コア内平均有効粘度, Pa·s
μ	: ニュートン粘度, Pa·s
μ_D	: ダルシー粘度, Pa·s
μ_{De}	: ダルシー粘度の弾性項, Pa·s
μ_{Do}	: ダルシー粘度の粘性項, Pa·s
ϕ	: 孔隙率
ρ_s	: 多孔質媒体を構成する粒子の密度, g/cm ³
$\bar{\tau}_w$	: 流路壁面における平均ずり応力, Pa
$\tau_{1/2}$	: ELLIS の式のパラメータ, Pa
ξ	: 流路形状を表す aspect factor ($=3.0$)
添字	
f	: フロント
o	: 油相

p	: ポリマー溶液
t	: コア内に存在する全相
w	: 水相

参 考 文 献

- 1) POPE, G. A., 1980: The Application of Fractional Flow Theory to Enhanced Oil Recovery. *Soc. Pet. Eng. J.*, June, 191-205.
- 2) LAKE, L. W., 1989: Enhanced Oil Recovery. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- 3) 増田昌敬, 唐 克勤, 宮沢 政, 田中彰一, 1990: 溶液の粘弾性を考慮したポリマー攻法の解析 その1. ポリマー溶液の多孔質媒体内流動モデル. 石技誌, **55**(3), 215-225.
- 4) MASUDA, Y., TANG, K., MIYAZAWA, M., TANAKA, S., 1989: One-Dimensional Simulation of Polymer Flooding Including Viscoelastic Effect of Polymer Solution. *Proc. 1989 Asia-Pacific Conf., Sydney, Australia*, Sep., 281-290.
- 5) 増田昌敬, 1991: 溶液の粘弾性を考慮したポリマー攻法の解析 その2. 一次元ポリマー攻法の室内実験. 石技誌, **56**(1), 1-11.
- 6) 田中彰一, 増田昌敬, 佐藤光夫, 宮沢 政, 1990: ポリマー攻法のシミュレーションモデルの開発, 平成元年度科学研究費補助金成果報告書 (研究課題番号63460186). 東大工学部.