(34) 高度の不均質性を含む深部岩体中の多相流体流動に関する数値シミュレーション

東京大学工学部　○ 登坂博行
東京大学工学部　小島圭二

1. 緒　言

自然本来の持っている局所的、広域的多様性（以下、不均質性と表現する）は、地下流体流動シミュレーションの技術的観点から見ると、浸透率の漸移変化を伴う岩相変化或は岩相内の不均質性（これをここでは一次的不均質性と呼ぶ）と断層、割れ目、等流動を方向ずける構造的不均質性（これを二次的不均質性と呼ぶ）に大別されよう。前者は数値解析上、比較的容易にモデル化出来るが、二次的不均質性は、地質モデル内に局所的に不規則な岩相の連結と流動方向の多様性を生み出すため、整然とした格子間流動を基本とする差分法においては格子分割、データ処理等地質モデル作成時に労苦を必要とした。

そこで、ここでは、差分法において、高度な地質不均質性（即ち二次的不均質性）を含んだ三次元的地質形態をより直接的、より忠実にモデリングするため、自由度の高い格子間連結を可能とする数学的定式化方法を述べる。この方法は三次元三相油層シミュレーター上で実現され数例のモデル計算が行われた。その結果も合わせ報告する。

2. 高度不均質性の数学的記述手法

2.1 基礎流動方程式

本論文中では地下多孔質媒体中の圧縮性多相流体系（水、油、ガスの混在系等、多成分系）の非定常流動を差分法により取り扱う事を前提とするが、数学的記述は一般化されたものにより行う。

系を構成する連続の式（物質収支式）は次の一般形で表せられる。

$$r_i^m = Qf_i^m - Qw_i^m - (\Delta Qac)_i^m / \Delta t = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで、 Qf:他格子間との流動による質量増分、 Qw:当該格子に与えられた生産／圧入に伴う質量増分、△t:時間きざみ、△Qac:△t内の質量の増分、 i:格子点の位置インデケーター、m:系を記述するm番目の成分、である。

通常型差分展開では、一次元では三点差分、二次元では５点差分、三次元では７点差分が用いられ、三次元の場合, (1)式第１項は以下の様に展開される。

$$Qf_i^m = qf_{i,x-}^m + qf_{i,x+}^m + qf_{i,y-}^m + qf_{i,y+}^m + qf_{i,z-}^m + qf_{i,z+}^m \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで、x- , x+, 等は、隣接する格子点との流動項が三次元的に足し合わされる事を意味している。

高度な不均質性を取り扱うため、(2) 式の展開を以下の様にする。

$$Qf_i^m = qf_{i,x-}^m + qf_{i,x+}^m + qf_{i,y-}^m + qf_{i,y+}^m + qf_{i,z-}^m + qf_{i,z+}^m + \Sigma\, QD_i^m + \Sigma\, QN_i^m \quad \cdots\cdots (3)$$

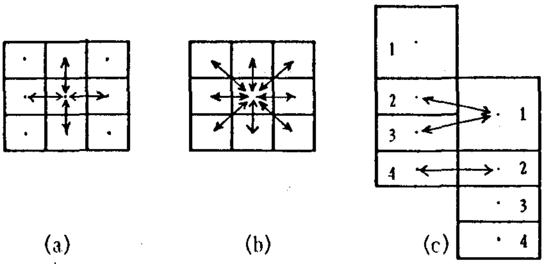
ここで、第１－６項は(2)式と同じもので通常の隣接格子間流動を、第７項は対角隣接格子間流動を、第８項は、非隣接格子間流動を表す。

対角隣接格子間流動

Fig.1－(b) に見られるように従来の差分法に加え、新たに対角格子間の直接流動を考慮するもので二次元の場合、最大４個の格子点間の連結が加えられ（９点法と呼ばれる）、三次元の場合最大２０個が加えられる（２７点法）。

これにより、流れの自由度は通常型差分に比し二次元で２倍、三次元で４倍程度となる。

この項は、格子配置の方向性が問題となる場合や複雑な割れ目、節理等の発達する場の流れをシミュレートする際に有効である。

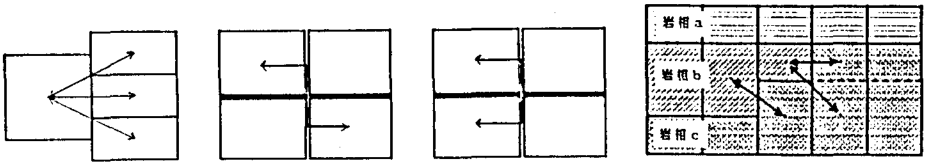


(a) 隣接格子間連結（二次元５点法）　(b) 対角隣接格子間連結（二次元９点法）　(c) 非隣接格子間連結（断層連結）

Fig.1　差分法における種々の格子間連結

非隣接格子間流動

Fig. 1－(c)、及び Fig. 2-(a) に見られるように縦ずれ断層によって同一地層間の連結が減少或は消失したり、他層との複数の連結が生じた場合、或はFig. 2-(b),(c)の様に幾何学的に格子間の連結が無い場合でも断層を通じた直接の流動が考えられる場合、さらに Fig. 2-(d) の様な岩相の尖滅、等を取り扱うものである。断層は三次元格子システムの任意の箇所に地質状況を判断して設定することができる。



(a)　(b)　(c)　(d)

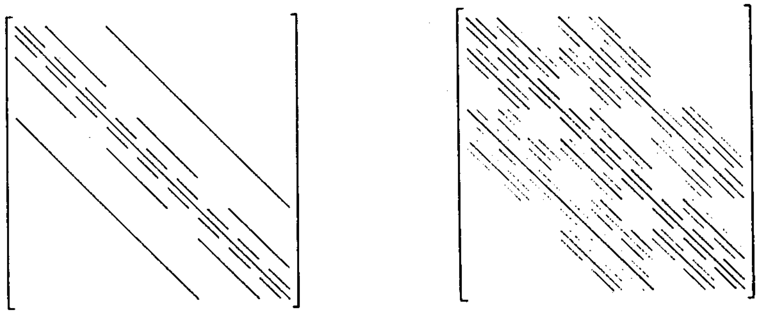
Fig. 2　種々の非隣接格子間連結（ Non-neighbouring Connection ）

2.2　数値解法

通常型差分法による三次元三相完全陰解法型油層シミュレータを基礎として、Fig.1-(a),(b),(c)の全てを考慮したバージョンを作成した。

圧縮性多相流体の非定常問題が持つ非線形性は、Newton-Raphson法により線形化し各反復段階で得られる連立一次方程式は反復的マトリックス解法により解く。Newton-Raphson反復法の収束の迅速化と安定化を図るため、筆者らは（１）式を完全陰的に差分展開し、全格子の全未知数を同時に解く方法（fully implicit ,simultaneous solution ）を採用した。これにより、高浸透率部分を通過する気相流動にも充分大きな時間刻みで計算を実行できる。又、Newton-Raphson法の反復段階で生ずる連立一次方程式の係数マトリックスは、従来型では７重対角（三次元デカルト格子）の疎マトリックス（Fig. 3-(a)）であるが、本法では、各格子点の方程式中の流動項に関与する他格子点数が非常に多くなり、三次元で対角隣接格子間流動を考慮

した場合２７重対角疎マトリックス（Fig. 3-(b)）となるため、格子数の多い問題の場合、計算機の主記憶容量と計算時間が問題となり、直接解法は適用が難しい。筆者らは、反復マトリックス解法[3]を拡張、一般化することにより両面での効率化を計った。詳細な数学的手法は紙面の都合上割愛する。



(a)　７点法　　　(b)　２７点法

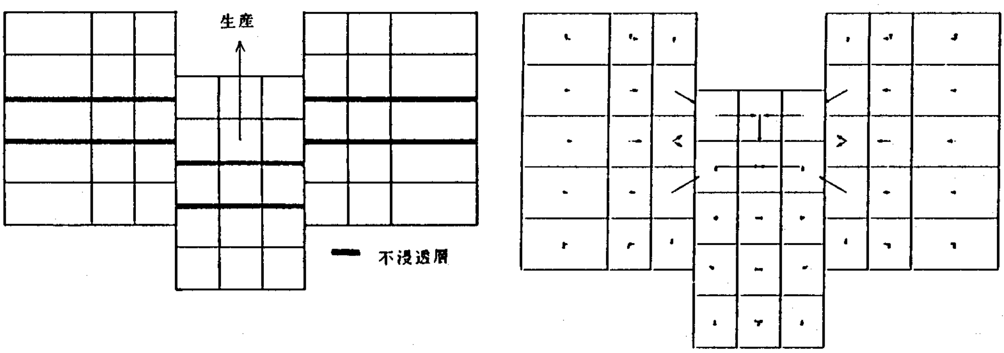
Fig. 3　Newton-Raphson 反復段階における係数マトリックスの例

３。　モデルシミュレーション

以上の様に付加された差分項の効果を見るため数種のモデルシミュレーションを試みた。ここでは、図示の簡単な二種の二次元問題の結果を示す。

3.1　二次元断層モデル

Fig. 4-(a) の様に、二次元垂直断面モデルによりモデル計算を行った。中央のブロックは断層により両側ブロックより落ちており、２層と３層、３層と４層の間には不浸透性の頁岩層がある。系内には被圧地下水があるとし生産を中央ブロックの第２層より行う。Fig. 4-(b) は計算された流線分布である。従来型差分でこの状態をモデリングするためには、縦方向に約１０層の格子を必要とし、断層が複数存在する場合には非現実的な格子数となりかねない。

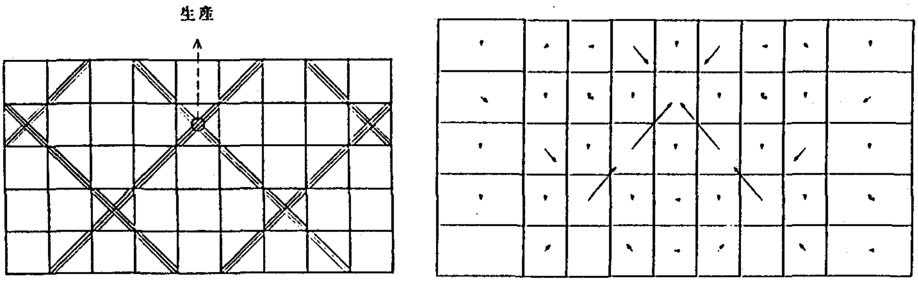


(a) 格子分割　　　(b) 計算された流線図

Fig. 4　二次元断層モデルの設定及びその計算結果

3.2　二次元割れ目系モデル

Fig. 5-(a) に示したように２つの方向卓越性を持つ二次元断面割れ目系のモデル計算を行った。このモデルでは割れ目以外の岩盤部分での浸透率は０とし、割れ目部分のみ大きな浸透率を与えた。生産は中央の第２層から行う。Fig. 5-(b) は計算された流線ベクトルである。連続する割れ目を選択的に移動する水の動きがあきらかである。通常型差分ではこの種のモデルを扱うためには非常に多くの格子を必要とする。



(a) 格子分割および割れ目分布　　　(b) 計算された流線図

Fig. 5　二次元割れ目モデルの設定及びその計算結果

4。 結語

古くから圧縮性多相流体の非定常解析に使用されてきた差分法に自由な格子間連結を加える事により、高度な地質不均質性をFEMと同程度、或は三次元問題の場合それ以上、の自由度で取り扱う事ができる。又近年、flexible gridding, local mesh refinement 等のテクニックも出て来ており、それらを併用すればさらに忠実な（数値技術的意味で）地質モデリングが出来るものと期待している。

尚、本論文を書くにあたり、油層シミュレータを使わせて頂いた日本オイルエンジニアリング（株）に感謝致します。

5。 参考文献

1. J.L.Yanosik and T.A.McCracken, "A Nine-Point, Finite-Difference Reservoir Simulator for Realistic Prediction of Adverse Mobility Ratio Displacements", SPEJ(Aug., 1979), pp.253-262.
2. P.C.Shah, "A Nine-Point Finite Difference Operator for Reduction of the Grid Orientation Effect", SPE12251.
3. J.R.Appleyard, I.M.Cheshire, and R.K.Pollard, "Special Techniques for Fully-Implicit Simulators", Numerical Method, pp.395-408.
4. Vinsome, P.K.W, "Orthomin, an Iterative Method for Solving Sparse Banded Sets of Simultaneous Linear Equations", SPE 5729 (Feb. 1976)1

(34) Numerical Simulation of the Reservoir with Highly-Developed Geological Complexity Using 3-dimensional, 3-phase FDM Simulator

Hiroyuki Tosaka , Keiji Kojima
The University of Tokyo

In numerical simulation of subsurface fluid flow , geological complexity of the objective field , which is represented by the variation of permeability due to the coexistence of primary heterogeneity (we use this term for referring to the variation caused by facies change and inner-facies variation caused by local sedimentological environment) and secondary heterogeneity (we use the term for referring to faults , fractures and joints) , should be appropriately accounted in geological modelling in order to get a meaningful results.

The secondary heterogeneity , characterized by strong directionality and discontinuity, diversifies the fluid flow along its inherent direction which is irregular in most of the cases. Because of this fact , geological modelling in numerical simulation becomes much more difficult for secondary heterogeneity than for primary heterogeneity. It is serious especially for FDM simulator which has been used for transient and static analysis of compressible , multi-phase fluid flow in porous media , because of its presumed regularity of connections among discretised grids , as 5-point finite difference scheme for 2-D or 7-point for 3-D.

For the purpose of enhancing FDM applicability in treating secondary heterogeneity , the authors introduced two additional flow terms to augment the freedom of flow directions , that is, diagonal-neighbouring connection (it is identical with 9-point formulation for 2-D [1][2] and when extended 3-D , it becomes up to 27-point formulation) and non-neighbouring connection to describe direct and multiple contacts among grids through fault.

Introduced terms are assembled in 3-D , 3-P fully-implicit petroleum reservoir simulator, with special matrix solver devised for them.

Test runs were made to check the validity of the method on 2-D fault problem and fracture -network problem as shown in this paper.

The authors believe that the FDM simulator introduced here is useful for straightforward modelling of subsurface geology with primary and secondary heterogeneity , specifically for 3-D, multi-phase problem with such geology.