

内22-16

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Mixed Finite Volume Element Method
for Petroleum Reservoir Simulation

(油層シミュレーションのための
混合有限体積要素法)

申 請 者

ス ト ポ

Sutopo

環境資源及材料理工学 石油工学

2002 年 11 月



油層における 2 次回収プロセス、地下水層における汚染物の流動等は 2 相流体の非ミシブル置換であり、その数値シミュレーションは不均質な地層内の流体挙動予測のために不可欠である。非ミシブル置換を表す物理モデルは質量保存則に基づくもので、圧力式および飽和率式から成る偏微分方程式に帰結する。これらの流動方程式は相間の流体の質量移動を含んでおり、その数値解法には高精度な手法が要求される。油層シミュレーションに最も広く用いられている有限差分法モデルでは、質量保存則から圧力および飽和率を求め、流速は圧力から間接的に計算されるので、不均質性の高い地層内の流動シミュレーションでは大きな計算誤差が生じる。混合有限要素 (MFE) 法および混合有限体積要素 (MFVE) 法は、圧力と流速を同じ精度で同時に計算する手法であり、なかでも MFVE 法は Lagrange 乗数等の付加的な変数を必要としないので、有限差分法に極めて近く、数値モデル化が容易である。地層の浸透率特性は一般に異方性で不連続であるが、MFVE 法によれば非正規グリッド分割に対しても 2 次の精度の流速計算が可能である。有限要素法のうち、従来の Galerkin 法では要素レベルで質量保存則が満足されない欠点があるが、MFVE 法では要素レベルで質量保存則が成立する。また、天然フラクチャー型貯留層やクロスベッド層等、不均質性の高い地層内の流体流動は全テンソル型浸透率により表されるが、MFVE 法は全テンソル型浸透率に対しても精度のよい流速計算を行うことができる。このような利点に基づき、本研究では質量保存式の数値解法に MFVE 法を適用している。

本研究は MFVE 法による多孔質媒体内の流体流動のシミュレーションに関する研究であり、次の 8 章から構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の動機付けと研究課題の提示をしている。不均質性の高い地層内の流体流動シミュレーションには、圧力および流速の高精度な計算能力と全テンソル型浸透率の導入が必要であり、そのための MFVE 法の有効性を指摘している。また、MFVE 法では流速が未知数とされることから、計算量の増大に対応した効率的なアルゴリズムの必要性を指摘している。

第 2 章では、多孔質媒体内の流体流動に対する MFE および MFVE 法の適用および演算子分割法に関する文献調査を行い、全テンソル型浸透率の導入、不均質貯留層への適用性、非線形飽和率式の効率的解法等を改良すべき課題として摘出している。演算子分割法による非線形飽和率式の数値解法についても、有限体積要素 (FVE) 法および MFVE 法による離散化の適用により拡張すると述べている。

第 3 章では、多孔質媒体における種々の流動問題に対する MFE 法の適用性を論じている。即ち、異相間の質量移動を伴う 2 相流、3 相流、ブラックオイルモデル、および多成分モデルの流動式を全 (global) 圧力および飽和率を変数とするフラクショナルフローで定式化し、圧力式および飽和率式に MFE 法による離散化を適用することで、高精度の数値解が得られる。圧力式は圧力および流速を未知変数とする 2 式の連結した 1 階偏微分方程式として定式化される。フラクショナ

ルフローで定式化する主な理由は、MFE 法により多相流圧力式の解法は単相流の場合と同形に帰結されることによる。

第 4 章では、非ミシブル非圧縮性流体による単位易動度比の置換プロセスについて、MFVE 法による 2 次元モデルの構築と計算結果を示している。モデル構築では全テンソル型浸透率を組み込んで流束連続モデルを定式化している。圧力式は連結した 2 式の 1 階偏微分方程式で記述され、MFVE 法により圧力および速度について同時に解かれている。

モデルの検証と性能の確認のために、砂岩・頁岩系貯留層、均質貯留層、および天然フラクチャー型貯留層における単位易動度比による置換挙動計算を実施している。MFVE 法モデルによれば、不連続な浸透率分布を有する砂岩・頁岩系貯留層に対して圧力および速度のよい近似が得られ、有限差分法モデルに比べてより現実的な流線が求められている。天然フラクチャー型貯留層については、MFVE 法モデルによる結果と複素変数境界要素法 (CVBEM) による半近似解の比較の結果、MFVE 法モデルに全テンソル型の有効浸透率を用いるで、フラクチャーによる非一様な置換フロントを十分な精度で再現できることを確認している。

第 5 章では、非ミシブル非圧縮性流体による非単位易動度比の置換について MFVE 法モデルを構築している。フラクショナルフローおよび全圧力による定式化の結果、楕円型の圧力式および放物型の飽和率式が得られる。この連立式を MFVE 法によって分離・線形化し、逐次的に解いている。飽和率式の退化には摂動法により対処している。一般に圧力は飽和率に比べて緩やかに変化するので、圧力式の数値解におけるタイムステップを大きくし、飽和率式の数値解におけるタイムステップの大きさは飽和率の変化量に応じて決める手法を用いている。

モデルの検証のために、易動度比が 0.05~100 の場合について 1 次元の置換計算を行い、解析解と比較している。その結果、シミュレーショングリッドを細かくすると、解析解に近い飽和率分布が得られている。また、含水率および油回収率に対するグリッドサイズの影響は小さく、易動度比の値にかかわらず正確な結果が得られている。これにより、MFVE 法は局所的な質量保存則に基づいており、大易動度比による置換プロセスに対しても、数値分散を抑制し、数値安定性と高精度の計算を確保できることを示している。さらに、2 次元貯留層内の置換挙動に対するモデルの性能を確認するために、等方性および異方性均質貯留層、天然フラクチャー型貯留層、および砂岩・頁岩系貯留層に対するシミュレーションを行い、大易動度比、不連続浸透率、異方性全テンソル型浸透率等を含む置換問題に対するモデルの有効性を示している。

第 6 章では、飽和率式に対する演算子分割法の効率的なアルゴリズムを詳述している。移流項および拡散項を含む飽和率式は、移流を表す双曲型方程式と毛細管圧力による拡散を表す退化放物型方程式に分割される。全体の方程式系の離散化には 2 段階の演算子分割を適用している。すなわち、最初に圧力および飽和率

式を分割して逐次的に解き、次に飽和率式に伴う移流と拡散を上述のように分割して逐次的に解いている。圧力式は MFVE 法により離散化し、飽和率式の時間分割アルゴリズムでは、移流式に対して FVE 法による陽的離散化を適用し、拡散式に対して MFVE 法による陰的離散化を適用している。陽解法では数値安定性の制限からタイムステップを細かく取り、陰解法では大きくすることができる。

モデルの精度と適用性の検証のために、種々の CFL 値（1 タイムステップにおけるグリッドブロック孔隙体積単位の通過量）および易動度比による 1 次元置換の計算をしている。その結果、陽解法のタイムステップ数を陰解法のタイムステップ数と同程度にし、CFL 値を 0.25~1 にすることで、計算精度を維持するとともに CPU 時間を第 5 章で構築した非分割陰解法モデルに比べて 90 % 以上短縮できることを確認し、この手法が計算効率と精度の向上に有効であることを示している。更に、実際的な問題に対するモデルの適用性を検証するために、全テンソル型浸透率層および不均質貯留層における 2 次元置換の計算を行い、時間分割法と非分割陰解法の一一致したシミュレーション結果と、非分割陰解法に比べて 90 % 以上の CPU 時間の短縮を確認している。

第 7 章は単一孔隙型モデルによる天然フラクチャー型貯留層のシミュレーションに関する記述である。統計的分布フラクチャーおよびマトリクス内の流動特性を有効浸透率テンソルで表すためのアップスケール計算領域、およびシミュレーショングリッドの大きさの影響について明らかにしている。その結果、フラクチャーの平均長に応じて有効浸透率の代表的要素体積 (REV) が存在すること、フラクチャーの平均長によっては局所的な不均質性が無視できないことを確認している。

第 8 章は結論であり、本研究で得られた結果を纏めて示している。

以上要約すると、本論文は油層シミュレーションのための混合有限体積要素法に関するものであり、特に、不均質貯留層における 2 相流体の挙動シミュレーションの計算精度と効率について研究し、それらの成果を取り纏めたものである。

近年の油層シミュレーション技術開発における目標の 1 つは不均質層に対応した全テンソル型浸透率の導入である。MFVE 法は多相流動式に系統的かつ軽易に適用でき、不均質な異方性全テンソル型浸透率を含む複雑なシミュレーションにおいても高精度の計算が可能である。本研究で開発されたモデリング手法は、ブラックオイルや多成分系モデルにも適用が可能である。また、本研究で実証した 2 相流動方程式の逐次解法および演算子分割法は、計算時間の削減のための有力な手法であり、混合有限体積要素法によるシミュレーションの実用性を大きく向上させた。