

論文の内容の要旨

論文題目

「熱力学的考察に基づく二相流動・変形連成シミュレータの開発と水溶性天然ガス貯留層シミュレーションへの適用」

氏名 愛知 正温

地下流体の挙動を把握することは、石油や天然ガス、地下水などの地下流体資源開発をはじめとして、放射性廃棄物処分や二酸化炭素地中貯留などの地下利用の際にも不可欠である。そのため的手法として、地下流体流動に伴う地表面変動および間隙圧変動のモニタリングとモデリングを用いた地下流体挙動評価技術が、近年注目されている。この技術は、今後の地下資源開発や廃棄物処分等において有望と考えられるが、現時点ではその実現のために重要な多相流体の流動と地盤変形の連成現象のモデリング技術が不十分な状況である。そこで、本研究では、熱力学的な考察に基づき、二相の流体が含まれる多孔質体の弾性変形に関する構成関係式の定式化と、その結果を用いた二相流・地盤変形連成シミュレータの開発を行った。ここでは、特に、水・ガスの二相流体の流動と同時に変形が発生する場への適用を意識したモデル化を実施した。さらに、開発したシミュレータを用いて二相流・地盤変形連成現象のモデリングを行う上で重要な諸条件の抽出および、それらの情報を取得する方法についての検討を行った。

具体的には、まず、二相の流体を含む多孔質弾性体の変形に関して Coussy(2007)の熱力学的な考察に基づいて構成関係の定式化を行った。さらに、定式化した間隙率変化を表す式に含まれている材料パラメータは、Coussy(2007)では実験的に定める未知のパラメータとされていたが、他の多孔質弾性パラメータと Bishop の α を用いて表現可能であることを示した。定式化された構成関係式を流体の圧縮性を考慮した各流体の貯留量変化の式へと展開し、さらに、ガスの水相への溶解やガス相に水蒸気として水が含まれることを考慮し、力の釣り合い式および各流体成分の質量保存式に代入して、支配方程式系を得た。次に、導出した支配方程式系を解くための有限要素コードの開発を行った。本シミュレータの開発において、既存の二相流・地盤変形連成シミュレータでは未実装の工夫を行った。それらは以下に示すとおりである。まず、解の振動・発散を抑制するために、Zhu ら (2004) の要素積分手法を採用した。また、軸対象要素の要素積分においては、 θ においても常に精度を維持するために、 θ を含む項に対して解析的な積分を用いる手法を開発し、適用した。開発したシミュレーションコードは、多孔質弾性問題の解析解、二相流問題の解析解および Liakopoulos(1964)の実験結果の再現性を評価することにより検証された。ここでは、Liakopoulos(1964)の実験結果に対して、もともと Liakopoulos(1964)により計測されてい

なかった排水条件のヤング率、空気の相対浸透率、**Bishop** の χ と水飽和率の関係式について、これらを変更した場合に計算結果が受ける影響について検討した。その結果、排水条件のヤング率と空気の相対浸透率を変更した場合は、計算結果に顕著な変化が見られたが、**Bishop** の χ と水飽和率の関係式の変更による変化は、きわめて小さいことが明らかになった。

また、開発したシミュレータに必要な材料パラメータを取得する手法について検討を行った。ここでは、試料の間隙率と圧密非排水せん断試験および圧密試験の結果からパラメータ変換し、多孔質弾性パラメータセットを得る手法を開発した。また、その手法を用いて既存の土質試験データに基づいて計算した結果、上総層群の岩石では、排水条件のヤング率がおおむね 100-1000MPa の範囲にあることが分かった。排水条件のポアソン比については、0 から 0.5 まであり得ることが分かり、特別な範囲に限定されないことが分かった。**Bishop** の χ については、既存のモデルについて検証した結果、**Bishop** の χ の適切なモデルは現時点では存在せず、実験的に決定するよりないと結論された。そのため、体積変化に関わる **Bishop** の χ を実験的に決定するための新たな実験手法について検討を行った。その過程で、試料のサクションを制御する際に広く用いられている **Axis-translation** 法は、特に、上総層群の泥岩を対象とする場合には、適切でない可能性があることを示した。そこで、相対湿度によりサクションを制御する実験を提案した。ところで、本研究において定式化した構成関係式のなかで用いられている飽和率の定義は、**Lagrangean** 飽和率であるため、工学的によく用いられる **Eulerian** 飽和率を用いて整理された既存の実験データを変換する必要性が想定される。そこで **Lagrangean** 飽和率と **Eulerian** 飽和率との間の換算方法を検討した。毛管圧曲線について、試料の間隙率、多孔質弾性パラメータ、 χ および計測時の全応力と気圧の情報があれば、この換算が可能であることを示した。計測時の全応力と気圧が想定できる計測手法の例としては、相対湿度制御による計測が挙げられる。

次に、開発したシミュレータによって、単層の貯留層に対する軸対称シングルウェルモデルを用いた水溶性天然ガス貯留層内の二相流・変形連成シミュレーションを行い、生産挙動と貯留層の変形に対して感度の高い解析条件について検討を行った。ガス水比に対して影響の大きい条件は、貯留層深度、貯留層半径、泥岩の初期水飽和率、層厚、砂岩の絶対浸透率、砂岩の相対浸透率曲線であった。特に、茂原型産出挙動と通常型産出挙動の違いが生じた条件は、泥岩の初期水飽和率と砂岩の絶対浸透率であり、この二つの条件が特に重要であると考えられた。表面変位量に対して影響の大きい条件は、貯留層深度、貯留層半径、泥岩の初期水飽和率、砂岩の絶対浸透率、砂岩中のガス相の相対浸透率曲線、排水条件のヤング率、排水条件のポアソン比であった。生産挙動および変位量のどちらに対しても感度が低いのは、砂岩の初期水飽和率、泥岩の絶対浸透率、泥岩の相対浸透率曲線、毛管圧曲線、**Bishop** の χ であった。

最後に、千葉県の水溶性天然ガス田の生産挙動および地盤沈下の事例への適用を想定し、シミュレータの機能拡張を行った。ここでは、一つの井戸で複数の貯留層を対象とした生

産を行っていること、ガスリフトの使用および坑口での圧力制御によるガス生産をしていることを踏まえて、生産井内の二相流動も含めて解析するための井戸内鉛直二相流モデルを構築した。既存のメタン・水系の二流体モデルでは、メタンガスの水への溶解を考慮する項が含まれていなかったため、新たにそれを加えた二流体モデルを構築した。その結果、構築した井戸モデルが、実際の井戸内で計測された圧力損失を既存の二相流圧力損失の経験式と同程度以上の精度で再現可能であることを示した。さらに、井戸モデルと地層中の二相流動・変形連成シミュレータを連結して解析する手法を開発し、生産活動に伴う二相流動・変形連成過程をシミュレーション可能とした。

これら本研究で開発したモデリング技術は、今後、地下流体資源開発、放射性廃棄物処分、二酸化炭素地中貯留などの分野で、地下流体挙動を評価する技術に貢献することが期待される。