

## 審査の結果の要旨

氏名 愛知正温

近年、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そのモデリングを統合的に用いた地下流体挙動評価技術が注目されている。この技術は、最近の衛星による地表面変位量分布のモニタリング技術の急速な発展を背景として研究・技術開発が進められており、石油や天然ガス、地下水などの地下流体資源開発、放射性廃棄物処分、二酸化炭素地中貯留などの際に地下流体の挙動を把握する上で期待される技術の一つとなってきた。一方で、地下流体流動と地盤変形の連成過程のモデリング技術に関しては、構成関係をはじめとして諸説が提案されていながら明らかになっていない点が多い。

本研究は、地下流体流動と地盤変形の連成過程のモデリング技術の発展に資するため、熱力学的な考察に基づき、二相流体流動と多孔質体の弾性変形の連成過程に関する構成関係式の定式化を行い、さらに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ものである。

第1章では、既存研究についてまとめている。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そのモデリングを統合的に用いた地下流体挙動評価技術に関連する研究の動向についてまとめ、地下流体流動と地盤変形の連成過程のモデリング技術に関する課題について述べている。

第2章では、二相流と地盤変形の連成過程を記述する定式化について述べている。まず、熱力学的な考察に基づき、二相流体流動と多孔質体の弾性変形に関する構成関係式を導出している。その過程で、従来不明であった物性パラメータ間の理論的關係を示し、新たな構成関係式を導いている。また、導出された構成関係式は既存の構成関係式を特殊な場合として含む一般性の高い構成関係式であることを示している。導出された構成関係式を力の釣り合い式および質量保存式に導入し、特に水・ガス系を想定して相間の溶解・混合を考慮した二相流と変形の連成過程に対する支配方程式系を導出している。

第3章では、導出された支配方程式系を解くための有限要素コードの開発について述べている。解の振動・発散を抑制するための手法として、従来の二相流・変形連成解析シミュレータとは異なった主変数選択および要素積分手法を採用しており、その内容について述べている。また、軸対象解析において、対称軸近傍の解析精度を低下させないための要素積分手法についても述べている。

第4章では、シミュレーションコードの検証について述べている。飽和多孔質弾性問題および二相流問題の解析解、既存の実験結果と計算結果を比較し、シミュレーションコードが二相流と弾性変形の連成過程を再現可能であることを示している。また、既存の実験

結果の再現解析において、排水条件のヤング率、空気の相対浸透率、Bishop の  $\chi$  と水飽和率の関係式について感度の検討を行っており、排水条件のヤング率と空気の相対浸透率の感度が高いことを明らかにしている。

第5章では、物性パラメータの評価手法について述べている。飽和多孔質弾性論の場合と共通の弾性定数に関しては、圧密非排水せん断試験および圧密試験の結果から求める手法を開発している。Bishop の  $\chi$  に関しては、既存の仮説の妥当性をシミュレーションおよび理論的考察に基づいて検証した後、実験的に評価する必要性が高いと結論し、その具体的な実験条件について提案している。特に、サクシオン制御手法について、試料の物性によっては Axis-translation 法では試料内の水飽和率が均一とならないことをシミュレーションにより示し、相対湿度制御による方法を用いるべきであることを示している。また、Eulerian 飽和率で整理された既存の毛管圧曲線データを Lagrangean 飽和率に対する毛管圧曲線データに換算する手法と、その際に必要な実験条件および物性に関する情報について明らかにしている。

第6章では、単層の水溶性天然ガス貯留層に対する軸対称シングルウェルモデルを用いた二相流・変形連成シミュレーションを行い、生産挙動および貯留層の変形に対して感度の検討を行っている。生産挙動に関しては、特に茂原型産出挙動と通常型産出挙動の違いが生じる条件として、泥岩の初期水飽和率と砂岩の絶対浸透率が重要であると論じている。変位量に関しては、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が、影響の大きい解析条件であることを示している。

第7章では、実際の水溶性天然ガス田フィールドを対象とした解析を想定し、生産井内の二相流動も含めて解析可能なシミュレータを開発している。生産井内の二相流動については、従来は明示的に扱われていなかったメタンの溶解を含めたモデルを、二流体モデルをベースとして開発している。また、開発した井戸モデルが、実際の生産井内における既存の圧力計測値を再現可能であることを示している。さらに、開発した井戸内鉛直二相流モデルと地層中の二相流動・変形連成シミュレータと連結して解析する手法を開発し、井戸口での圧力制御による生産活動に対するシミュレーションを可能とし、解析例を示している。

第8章は、総括である。

以上要するに、本研究は二相流体流動と多孔質体変形の連成過程の記述に関する理論的發展と、それに基づくシミュレータの開発と実際の解析について多くの知見を示しており、地下流体流動と地盤変形の連成モデリング技術の発展に大きく貢献していると認められる。また、著者は、主に水溶性天然ガス田の貯留層シミュレーションを想定した事例研究を行っているが、開発されたモデリング技術は、他の地下流体資源開発、放射性廃棄物処分、二酸化炭素地中貯留などの諸分野で応用可能であると述べており、工学的意義が大きいものと認められる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。