

## 論文の内容の要旨

論文題目 気液二相流体存在下における砂岩の多孔質弾性挙動

氏 名 後藤 宏樹

化石燃料資源開発，地熱資源開発，地下水利用，二酸化炭素地中貯留，放射性廃棄物地層処分などの地圏の開発・利用は，人類の持続可能な発展の観点から今後もその重要性を増していくと予想される。地圏の開発・利用においては，事業の実施に伴い地下岩盤が変形する。岩盤変形は地表面変動や地下流体の漏洩などを引き起こしうるが，それらは制御・予防することが求められ，そのためには岩盤変形を予測・把握することが必要となる。岩盤変形の予測・把握にあたっては，二相流動・変形連成過程に基づく検討が有効となる場合があると考えられる。ところが，自然界で発生する岩盤変形は岩盤の不均質性等に起因して複雑なものとなるため，それを理解することは必ずしも容易ではない。このような場合，室内実験を用いて対象となる現象の特徴を見出し，それに基づき岩盤変形の解釈を試みることは有効なアプローチの一つになると考えられる。以上を踏まえて，本研究では特に二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物地層処分において発生すると想定される水で飽和した岩盤に圧縮性流体が浸入するプロセスにおける岩盤変形の理解を目指し，室内実験による岩石変形・間隙流体流動の観察，二相流動・変形連成シミュレーションによる実験結果の説明，今後の検討事項の抽出およびその検討方法の提案を行った。

まず，室内実験により上述のプロセスにおける岩石変形・間隙流体流動を観察した。実験では，岩石試料として層理面に垂直な方向にコア抜きした円柱形Berea砂岩試料を用い，実験装置として通水ラインを備え付けた三軸圧縮試験装置を用いた。ここでは，二酸化炭素地中貯留において帽岩に二酸化炭素が浸入した場合の帽岩の変形を検討することを想定し，静水圧応力条件下において水で飽和した岩石試料に対して下端から圧縮空気を浸入させる実験を実施した。実験実施時には試料中央部分における軸ひずみと周ひずみおよび試料上端からの排水量を計測した。圧縮空気の浸入開始後，試料中央部分は軸方向と周方向ともに大きく伸びた後単調に伸びた。また，軸ひずみのみ空気のブレイクスルーが発生する前に急激に増加した。単位時間あたりの排水量は空気の浸入開始後大きく増加した後単

調に増加した。なお、空気のブレイクスルーが発生した後は、試料上部に設置したエンドキャップ内配管において毛細管現象が発生し、適切な実験条件下において実験を実施できていなかったと考えられた。そのため、本研究においては空気のブレイクスルーが発生する前の実験結果のみを検討の対象とした。

次に、実験結果を再現することを目的として数値シミュレーションを実施した。ここでは、まずパラメータフィッティングにより実験結果を再現するパラメータセットの取得を試みた。試料に対して等方性材料モデルを適用した場合は、すべての実験結果を再現する単一のパラメータセットを得ることができなかった。このことは試料の多孔質弾性係数の異方性に起因すると考えられたため、次に試料に対して面内等方性材料モデルを適用し、再度パラメータセットの取得を試みた。その結果、すべての実験結果を再現するパラメータセットが得られた。ここで得られたパラメータ値は本研究で得られた実測値もしくは既往研究で得られた結果と整合しており、このことは既往の二相流動・変形連成理論は室内実験で観察された二相流動・変形連成現象を説明するというを示している。また、本研究で実施したような室内実験とその数値シミュレーションを組み合わせる検討を行うことにより、一部のパラメータを推定できる可能性があると言える。ここでは最後に、実験結果を再現する数値シミュレーションから得られた計算結果に基づき、ひずみと排水量の実験結果の特徴を説明した。空気の浸入開始後に試料中央部分が軸方向と周方向ともに大きく伸びた後単調に伸びたことと単位時間あたりの排水量が大きく増加した後単調に増加したことは、試料内部における水と空気の圧力分布の時間変化から説明された。また、圧力分布の時間変化は試料内部への空気の浸入の早さと試料上端からの排水の早さの相対的な関係から決定されると考えられた。さらに、空気のブレイクスルー発生前に軸ひずみが急激に増加したのは、試料中央部分に空気が浸入した後に、ひずみの適合条件に基づき試料中央部分が軸方向に伸びたためであると説明された。

最後に、今後検討が必要となる事項の抽出とその検討方法の提案を行った。ここでは、今後の検討事項としてBishopの有効応力係数の水飽和度依存性が岩盤変形に与える影響と二相流体存在下における泥岩の変形挙動の検討が挙げられ、それらを検討するための実験方法としてそれぞれ圧縮空気の浸入開始後定常状態に至るまでの実験と泥岩試料を用いた実験が考えられた。これらの実験に対しては、数値シミュレーションによりその実施の必要性を検討した。まず、空気の浸入開始後定常状態に至るまでの実験の数値シミュレーションからは、Bishopの有効応力係数の水飽和度依存性が試料の変形に与える影響は空気のブレイクスルー発生後時間の経過とともにより顕著になることが示された。この結果は、仮に空気のブレイクスルー発生前の試料の変形を説明することができたとしても、Bishopの有効応力係数の水飽和度依存性の設定に誤りがある場合はその後定常状態に至るまでの変形の予測において誤りが引き起こされる可能性があることを示唆している。従って、今後空気の浸入開始後定常状態に至るまでの実験を実施し、Bishopの有効応力係数の水飽和度依存性が岩石変形に与える影響を明らかにする必要があると言える。ここでは、空気のブレイ

クスルー発生後の実験を実施するための実験方法を新たに考案するとともに、そのために必要となる大口径エンドキャップの開発も行った。次に、泥岩試料を用いた実験の数値シミュレーションからは、この条件下においては試料内部への空気の浸入が試料上端からの排水よりも早く、試料内部の空気が浸入していない領域の水圧が時間の経過とともに大きくなるため、その領域のひずみが大きく増加することが示された。この結果は、二酸化炭素地中貯留において帽岩に二酸化炭素が浸入した場合には、二酸化炭素が浸入していない領域においても帽岩が大きく変形することを示唆している。従って、今後泥岩試料を用いた実験を実施し、このような変形が実際に発生しうるのかどうかを明らかにする必要があると言える。

本研究で得られた結果は、今後推進されていくであろう二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物地層処分において発生する岩盤変形の予測・把握・制御に貢献するものとなることが期待される。今後の展開としては、室内実験に基づき、**Bishop**の有効応力係数の水飽和度依存性が岩石変形に与える影響と二相流体存在下における泥岩の変形挙動を検討することが挙げられる。