

論文の内容の要旨

論文題目 泥質岩が示す半透膜的特性と間隙水流動・物質移行・岩石変形の連成過程
氏 名 廣田 翔伍

【研究背景】

泥質岩のような低透水性の岩石中では、間隙水流動が非常に小さいため、連成現象のような帯水層中では無視できるような現象が間隙水流動、物質移行、岩石の変形に大きな影響を与えうる (Neuzil, 1986)。一部の泥質岩は半透膜的な振る舞いを示すことが知られており、そのような泥質岩中に間隙水の濃度差が存在する場合、低濃度側から高濃度側に向かって間隙水の移動（化学的浸透流）が生じる (Marine and Fritz, 1981)。低透水性の地層中、または低透水性の地層で囲まれた領域で化学的浸透流が発生した場合、大きな間隙水圧変化が生じ、同時に岩石の変形を引き起こす。また、泥質岩の半透膜的挙動の強さを示す物性値である反射係数 σ は非線形な濃度依存性を持ち、半透膜性を持つ泥質岩中の間隙水流動、物質移行および岩石の変形はこれに大きな影響を受けることが予想される。本研究は、圧力と濃度の連成現象である化学的浸透現象と、それに伴って発生する岩石の変形の理解を目的とし、化学的浸透に伴う岩石の変形を定量的に計測する室内実験を実施した。また、泥岩の半透膜的挙動の非線形な濃度依存性を考慮しないモデル（定数 σ モデル）および考慮したモデル（非線形 σ モデル）を室内実験を模した計算条件下で解き、その結果を無次元化することで、実験結果の無次元解析を行った。

【研究方法】

実験装置の概略を図1に示す。室内実験には、国内十日町地域に分布する新第三紀の地層である須川層から採取された岩塊より作成した、高さ約 30mm、直径約 50mm のコア試料を用いた。コア試料の側面および上面にエポキシなどを塗布することで、コア試料がそれらの面で外部の溶液と接触しないようにした。実験を行うときは、コア試料を間隙水よりも濃度の高い NaCl 溶液中に設置し、試料下面を間隙水より高濃度の NaCl 溶液と接触させることで、試料内部で化学的浸透流を引き起こし、コア試料の側面にらせん状に貼り付けた光ファイバー歪センサーによって、試料側面の周歪変化を定量的かつ多点で計測した。室内実験は3つのコア試料を対象に、試料の外側の溶液と間隙水の濃度差がそれぞれ 15g/L, 10g/L, 5g/L 程度となるような条件下で行った。

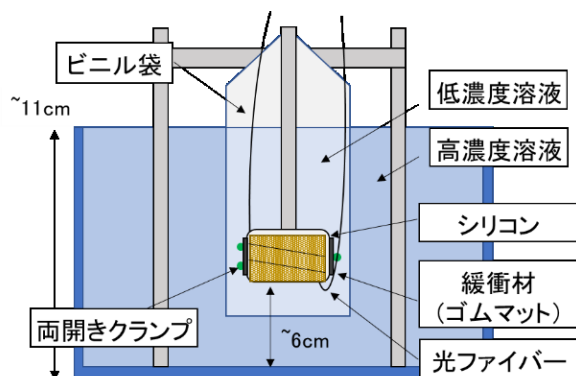


図1 実験装置の概観

また、定数 σ モデルと非線形 σ モデルを室内実験を模した条件下で解き、室内実験の解析を行った。このとき、反射係数 σ の非線形な濃度依存性は Bresler モデル (Bresler, 1973) で表現した。また、新たパラメータ (圧力拡散率 D_p [m^2/s], みかけの濃度拡散率 D_a [m^2/s], 化学的浸透に伴う岩石の変形に関するパラメータ K_π [mol/L]) を導入し、支配方程式の無次元化を行うことで、無次元周歪、無次元圧力、無次元濃度のタイプカーブを作成し、比較することで試料内部の圧力、濃度、歪挙動の理解を試みるとともに、室内実験結果の無次元解析を行った。

【結果】

1. 室内実験で得られた周歪

室内実験で得られた周歪の計測値に関して、計測手法に起因する誤差を強く受けたデータを除外し、また水温変動の影響の補正を行うことで得られた試料側面の周歪挙動の例として、試料の間隙水と外側の溶液の濃度差が 15g/L 程度のときの室内実験で得られた、試料側面の周歪の空間分布の時間変化を図2に示す。3つの室内実験に共通して、実験開始直後に試料の上面付近で小さな膨張が生じた後、試料の下面側から上面側に向かって試料の収縮が伝播し、その後試料の下面側から上面側に向かって試料の収縮の緩和が伝播するという挙動がみられ、試料側面で周歪が時間的にどのように変化するかを実験でとらえることができた。

また、間隙水と外側の溶液の濃度差が 5 g/L 程度の実験では、最大で 45 $\mu\epsilon$ 程度の、10g/L および 15g/L 程度の実験では 140~180 $\mu\epsilon$ 程度の収縮が確認された。この収縮量の違いは、間隙水と外側の溶液の濃度差の大きさが異なるために生じていると考えられる。

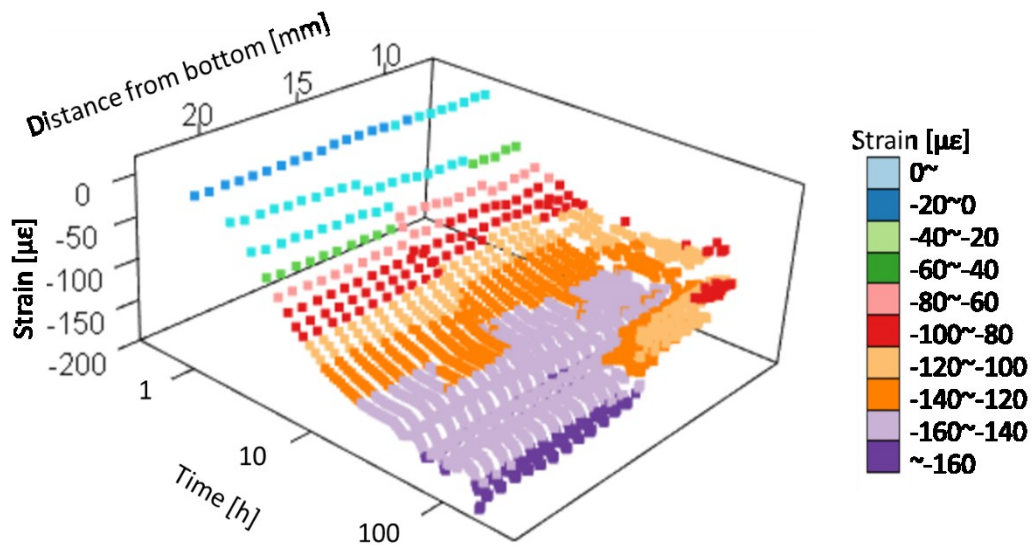


図2 試料の間隙水と外側の溶液の濃度差が 15g/L 程度のときの室内実験で得られた、試料側面の周歪分布の時間変化

2. 数値計算結果と室内実験結果の無次元解析

間隙水と外側の溶液の濃度差が 15g/L 程度のときの実験で得られた、下面から 10mm および 20mm 程度の地点の周歪挙動と、定数 σ モデルおよび非線形 σ モデルで得られた無次元周歪のタイプカーブの比較を図 3 に示す。無次元周歪のタイプカーブは、実験開始直後に試料の上面側で小さな膨張が生じた後、試料全体が収縮し、試料の収縮が終了した後下面に近い地点から試料が膨張するという、室内実験で計測された周歪挙動と同様の傾向の挙動を示した。また、数値計算結で得られた無次元圧力、無次元濃度挙動との比較（図 4）より、実験初期は下面近傍にのみ濃度勾配と化学的

浸透流による圧力変化が存在し、この期間の収縮は下面近傍の化学的浸透に伴う圧力の減少が圧力拡散によって上側に伝播することで生じることが分かった。また、実験後期は試料内部の間隙水圧分布と浸透圧分布が準平衡状態になっており、この期間の膨張は主に分子拡散による濃度変化に追従して生じた圧力変化によって生じることがわかった。また、多孔質弾性体的挙動の影響は実験開始直後にのみ見られ、それ以降は見られなかった。

試料の間隙水と試料の外側の溶液の濃度差が 15g/L のときの実験で得られた周歪挙動とタイプカーブを比較より、定数 σ モデルから作成したタイプカーブは実験初期の試料の収縮のみを説明したのに対し、非線形 σ モデルから作成した

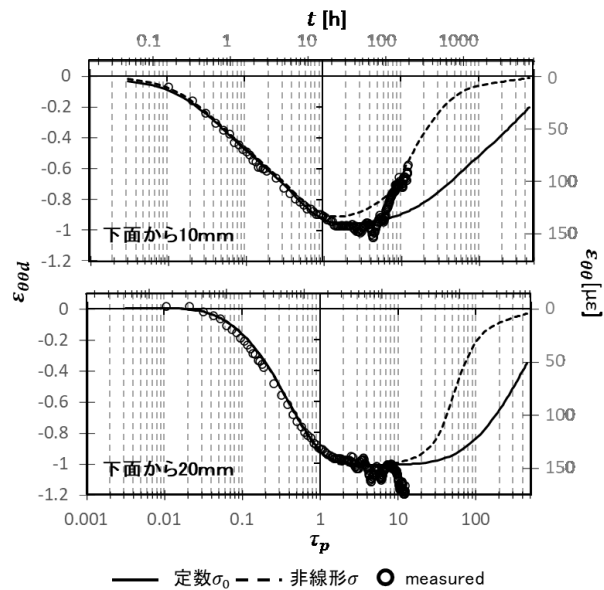


図 3 下面から 10 mm, 20 mm 地点の周歪 $\varepsilon_{\theta\theta}$ の挙動と、定数 σ モデルおよび非線形 σ モデルで得られた無次元周歪 $\varepsilon_{\theta\theta d}$ のタイプカーブの比較

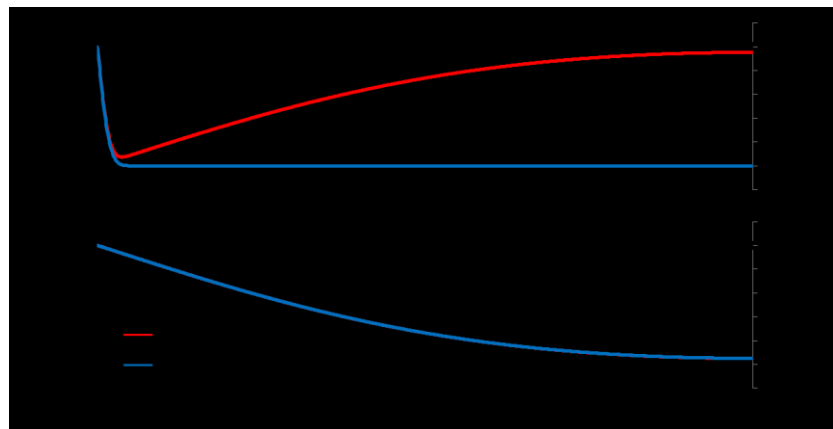


図 4 $L_e = 1000$ の場合の計算結果から得られた、 $\tau_p = 0.1$ (a), $\tau_p = 100$ (b) のときの試料中心軸方向の p_{fd} および C_d の空間分布

タイプカーブは実験初期の試料の収縮と、実験後期の試料の膨張の両方をよく説明した。これは、実験後期の試料の膨張は試料内部の濃度変化に伴い生じており、泥岩の半透膜的挙動の濃度依存性の影響を強く受けているためだと考えられる。また、実験初期の試料が収縮する期間を対象とした、定数 σ モデルから作成したタイプカーブを用いたフィッティングにより、泥岩試料の体積弾性率と浸透率が推定できること、非線形 σ モデルから作成したタイプカーブと実験結果の比較により、泥岩試料の体積弾性率、浸透率、拡散係数が推定できることが示された。

間隙水と外側の溶液の濃度差が 10g/L, 5g/L で得られた周歪挙動には、実験後期に数理モデルでは説明できない周歪挙動が確認されたものの、実験初期の収縮挙動はタイプカーブによってよく説明できた。また、定数 σ モデルのタイプカーブを用いたフィッティングで得られた 3 つの試料の浸透率、体積弾性率の値は同程度であり、同じ岩塊から作成した試料を用いた実験結果として整合的であったほか、既往研究で報告された国内の新第三紀の泥質岩の物性値と整合的であった。

【結論】

本研究で実施した室内実験より、15g/L 程度の濃度差によって、140 $\mu\epsilon$ 程度の泥質岩の変形が確認された。室内実験は原位置と圧力、温度の条件が異なっているため単純に比較はできないものの、海水の半分程度の濃度差で比較的大きな変形が生じうることが示されたといえる。また、数値解析の結果から、化学的浸透による岩石の変形メカニズムが時間経過とともに変化することが示された。特に、化学的浸透に伴う岩石の変形について長期的な議論を行う場合、泥質岩の半透膜的挙動の濃度依存性が重要であることが明らかになった。また、化学的浸透に伴う岩石の変形挙動についての無次元解析から、岩石の物性値を推定可能であることがわかった。

本研究で得られた知見は、二酸化炭素回収貯留のような、泥質岩中の流体の長期的な挙動が重要となる事業において重要になると予想される。こういった事業を想定する場合、泥質岩中に二相流が存在する場合の化学的浸透に伴う岩石の変形の理解が今後の検討課題となりうる。また、化学的浸透による岩石の変形を利用することで、岩石の変形、間隙水流動、物質移行および半透膜的挙動についての物性値を推定できるような物性値推定手法を開発することが期待できるだろう。

【参考文献】

- Bresler, E., 1973: Anion Exclusion and Coupling Effects in Nonsteady Transport Through Unsaturated Soils: I. Theory. *Soil Science Society of America*, **37** (5), 663-669.
- Neuzil, C. E., 1986: Groundwater flow in low-permeability environments. *Water Resources Research*, **22**, 1163-1195
- Marine, I. W., and S. J. Fritz, 1981: Osmotic model to explain anomalous hydraulic heads. *Water Resources Research*, **17** (1), 73-82