

## 偏差応力下における泥岩の透水性変化

2017年3月環境システム学専攻修了 学生証番号：47-156678 野口 真未

指導教員：徳永 朋祥 教授

キーワード：偏差応力、泥岩、トランジェントパルス、透水性

### 1. はじめに

近年、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物の地層処分、シェールオイル、シェールガス開発などといった、地下利用が注目されている。これらの地下利用において、重要な役割を果たすものの1つが泥岩である。例えば、石油システムの視点から見ると、泥岩は、根源岩やシェールガスの貯留層などといった様々な役割を果たしている<sup>[1]</sup>。従来の石油生産では、間隙の非常に小さい根源岩からキャリアベッドへと石油が移動する一次移動とキャリアベッド中を移動する二次移動を経て、トラップ構造下の油層に集積した石油を生産してきた<sup>[2]</sup>。それに比べて、シェールオイル開発では根源岩中に直接井戸を掘り、水圧破砕によって人工的な亀裂を与えることでそこからの石油資源を得るという方法である<sup>[3]</sup>。したがって、根源岩であるシェール層に対して、効率の良いシェール開発を行うためには、根源岩に多くの資源が含まれている必要がある。

しかし、石油生成過程での一次移動を経ることで根源岩中の資源が減少することが考えられる。現在、一次移動の原因として考えられているのが圧力駆動流である<sup>[4]</sup>が、これは、有機物を含んだ堆積物が3000 m以深に埋没し、ガスや石油が生成され、分離した石油・ガス相が濡れ性の間隙を通して、移動すると考えられている。しかし、この場合、石油は間隙の毛管圧を超えなくてはならない<sup>[4]</sup>。他に考えられているメカニズムとして、岩石内の亀裂や微小亀裂が流路となって移動する可能性も挙げられている<sup>[4]</sup>。岩石中の微小亀裂は石油生成中に起こることもあるが、一方で、泥岩中にできた微小亀裂は再び塞がってしまうことが多いため、大きな影響は与えないともいわれている<sup>[5]</sup>。Pierre et al.(2014)<sup>[6]</sup>はBoomClayに関して、三軸圧縮試験と透水試験を行い、更にX線マイクロトモグラフィーによる分析により、室内実験での偏差応力下におけるBoomClayの透水性の挙動を明らかにしている。この既存研究によれば、

Boom Clayは、透水性は平均有効応力に依存し、それは平均応力が1~32 MPaへ増加した時、1/100程度まで減少する。しかし、せん断荷重での透水性は本質的に不変で、ひずみ局在化によって影響を受けないと述べており、偏差応力下での透水性の変化がないということが明らかになっている。

また、Till and Klaus(2007)<sup>[7]</sup>は岩石のダイラタンシーの概念について明らかにするために、Opalinus clayによる偏差応力下での室内試験を行った。ここでは、微小亀裂開口には失敗している。この理由として、亀裂の誘発で容積増加が起こったとしても、偏差応力の载荷中において、圧密によって相殺されてしまうからと考察している。

泥岩の偏差応力下における透水性は、亀裂の回復や延性的な変形によって上昇することは考えにくいとされる<sup>[5]</sup>一方で、亀裂による透水性の高まりや脆性破壊への期待もされている<sup>[4]</sup>。

本研究では、今まで力学的な岩石物性などが詳しく分かっておらず、さらに、シェールオイル開発に関連のある岩石を用いて、その泥岩の偏差応力下における透水性の変化と三軸圧縮試験による変形の挙動との関連付けを行うことで、泥岩の透水性の挙動について考察を行うことを目的としている。

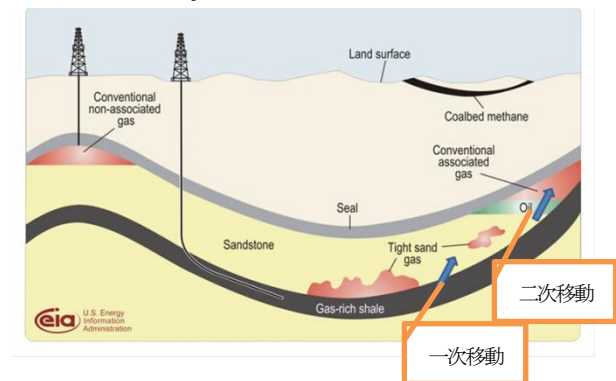


図1 シェールオイル開発と従来の石油生成の仕組みの概要図

([http://www.eia.gov/oil\\_gas/natural\\_gas/special/ngresources/ngresources.html](http://www.eia.gov/oil_gas/natural_gas/special/ngresources/ngresources.html) に加筆)

## 2. 試料選定

本研究で使用した試料として、国内でシェールオイル開発が期待される秋田県由利本荘市にある女川層の泥岩を用いた。試料採取地を図2に示す。地図上の川底にあった女川層の泥岩の塊から直径 50 mm のコアを抜き取った。採取した女川層の泥岩の間隙率を調べたところ、46.2%であった。

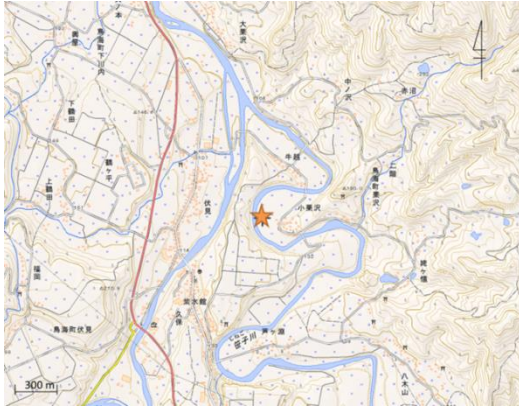


図2 秋田県由利本荘市地図 (★が採取地図)

## 3. 実験方法

本研究では、女川層の変形を測定するための三軸圧縮試験と、透水性を測定するためのトランジェントパルス試験を行った。また、脆性破壊が起こったときの透水係数、比貯留係数の挙動の参考として、すでに破壊規準がわかっている<sup>[8]</sup> 来待砂岩を用いてトランジェントパルス試験を行った。

### ○ 三軸圧縮試験

直径 50 mm、高さ 100 mm の女川層試料を用いて、2回の三軸圧縮試験 (以下、TSET1, TEST2) を行った。TEST1では、周圧を 30 MPa、背圧 2 MPa に载荷した後、20 時間で 3 mm の変位をさせる一定変位速度制御で実験を行った。TEST2では、周圧を 30 MPa、背圧 2 MPa に载荷した後、6.5 時間で 4 MPa まで除荷をする周圧制御で実験を行った。

### ○ 透水試験 (女川層)

本研究では、難透水性の岩石でも短時間で実験を行うことができるトランジェントパルス試験を行い、Hsieh らの解析方法<sup>[9]</sup> によって透水係数  $K$  と比貯留係数  $S_s$  を同時に求めることで、それらの変化と亀裂の関係の評価を行う。トランジェントパルス試験では、岩石試験片の両端に圧力差を生じさせ、時間経過に伴う圧力変化

から岩石の透水係数と比貯留係数を求める(図3)。Hsieh ら<sup>[9]</sup> は、試験時の圧力拡散挙動を数学モデルで示し、その式をラプラス変換と無次元化を行うことで上下の貯留槽の水頭をパルス圧 (初期に与える上下流貯留槽の水頭の差) でわったものの上流側と下流側それぞれの曲線の式を求めた。この式中出现してくる  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  をフィッティングで求め、透水係数  $K$  と比貯留係数  $S_s$  を算出するという手法が Hsieh らの解析方法である。

本実験では、図4に示すトランジェントパルス試験機を用いた。圧力条件は、等圧で 32 MPa 以上まで载荷した。载荷時の 10, 13, 15, 20, 23, 25, 28, 30 MPa で透水試験を行い、その後、軸圧を 32 MPa で固定した状態で、側圧を除荷して、4 MPa 程度まで除荷した。側圧除荷時には、側圧が 28, 26, 24, 22, 20, 18, 14, 12, 10, 8, 6, 4 MPa で透水試験を行った。また、常に背圧を 3 MPa、パルス圧 (図3の  $H$ ) 0.5 MPa を与えた。

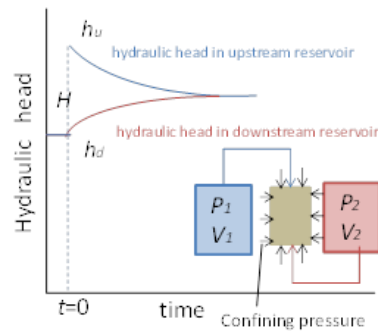


図3 トランジェントパルス試験の概要図

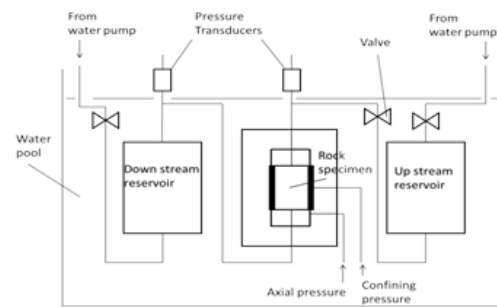


図4 トランジェントパルス試験機の概略図

### ○ 透水試験 (来待砂岩)

来待砂岩でのトランジェントパルス試験は Mohr-Coulomb の破壊規準 ( $\tau$  (MPa) =  $0.5 \sigma$  (MPa) + 3.7)<sup>[8]</sup> をもとに周圧 20 MPa、間隙圧 3 MPa まで昇圧した後、周圧を除荷していき、5 MPa 程度で破壊が起こる予想で、試験を行った。

#### 4. 実験結果

##### ○三軸圧縮試験結果

TEST1 と TEST2 の結果を図 5 に示す。

TEST2 では軸ひずみと体積ひずみに 4 MPa あたりで折れ曲がりが見られるが TEST1 では折れ曲がりがなく、ひずみ増加に伴い差応力が上がった。変形の挙動としては、延性的に変形したことがわかった。

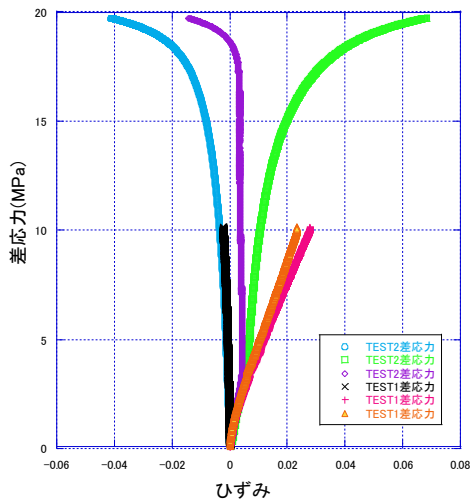


図 5 ひずみ-応力線図

##### ○透水試験結果 (女川層)

透水係数の挙動を図 6 に示す。透水係数は差応力 4 MPa と 28 MPa を比較すると 2 倍程度の増加が見られた。また、大きな増加が見られたのが差応力約 24 MPa だった。比貯留係数は 4 MPa で一度小さくなった後、10 MPa まで大きく増加し、その後、17 MPa まであまり変化が見られなかった後に再度大きな増加が見られた。また、実験後に試料は図 7 のように共役な破壊が脆性領域の拡大とともに起こっていた。

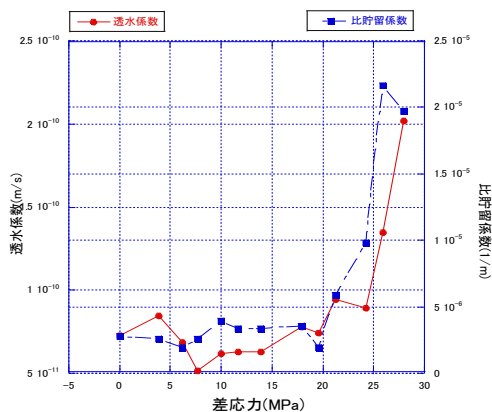


図 6 女川層の透水係数と比貯留係数の挙動

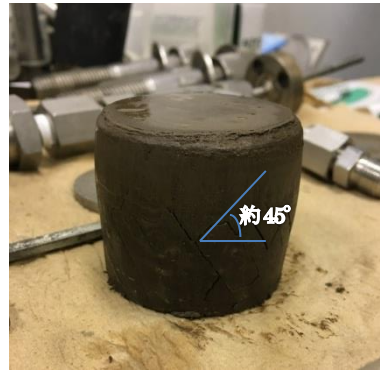


図 7 透水試験後の試料

##### ○透水試験 (来待砂岩)

来待砂岩での透水試験結果を図 8 に示す。透水係数は差応力 12 MPa まであまり変化はないが、それ以上では、差応力増加に伴い、透水係数が大きく増加している。それに対して、比貯留係数は 8 MPa あたりから大きく増加した。来待砂岩の透水試験結果から、既存研究 [10] で予想された通り微小亀裂が入ることで透水係数と比貯留係数の増加が起こったと考えられる。

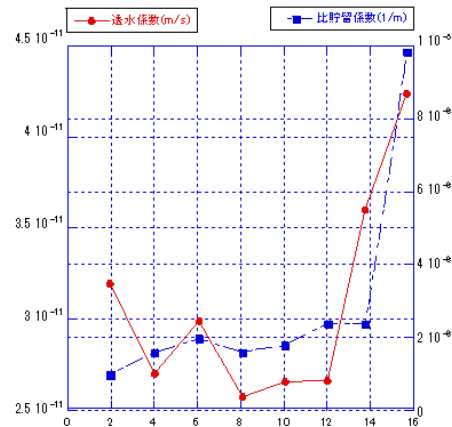


図 8 来待砂岩の透水係数と比貯留係数の挙動

#### 5. 考察

偏差応力のかけ方が同じ TEST2 と透水試験を比較するために、TEST2 の差応力変化量に対する軸ひずみの変化量  $\Delta \epsilon / \Delta \sigma$  を求めた。その曲線の傾きは、2 MPa, 4 MPa, 10 MPa, 17 MPa で変化していることがわかり、これと比貯留係数の変化は良く対応していることが明らかとなった。つまり、岩石の変形に応じて、比貯留係数は大きな影響を受ける。特に、変形挙動から岩石が非弾性的に変形しているのがわかる 17 MPa あたりから比貯留係数が増加している。また、差応力を大きくしていくと、比貯留係数

が増加した後に、透水係数が上昇するという傾向が女川層でも来待砂岩でもみられ、これは、比貯留係数増加が岩石中の微小亀裂の発生であるとすれば、さらに差応力を与えることで微小亀裂が連結し、流路となって透水性を高めたと考えられる (図9)。

TEST1 と TEST2 での応力に対するひずみの増加が異なる理由としては2つの試験で平均応力の与え方が異なることが原因だと考えられる。女川層の Mohr-Coulomb の破壊規準は分かっていないが、TEST1 では周圧 30 MPa から軸圧を載荷することで偏差応力をあたえたのに対し、TEST2 では側圧を除荷していくことで偏差応力を与えるので、破壊規準に近づく方向に偏差応力をかけているのが TEST2 であるのに対して、TEST1 は逆方向である(図10)。このような応力パスの違いが原因で変形の仕方が変わったと考えられる。

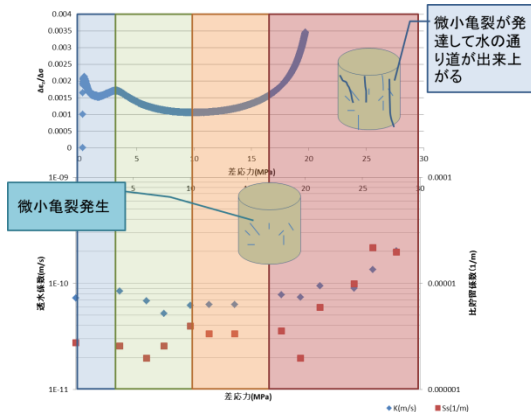


図9 透水試験と変形の関係性

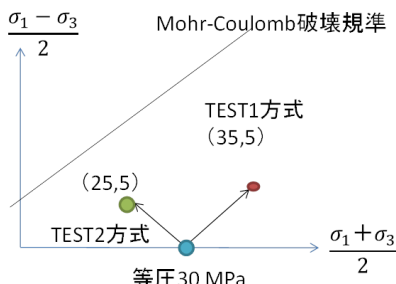


図10 偏差応力10MPaの時の応力パスの違い

## 6. 結論

女川層と来待砂岩の実験から比貯留係数の上昇があった後に、透水係数の変化が現れた。微小亀裂を原因として透水性が高くなる可能性があるといわれている来待砂岩の結果と女川層の透水試験の結果は似た挙動を示しており、微小

亀裂による透水性増加の可能性が考えられる。

加えて、比貯留係数の増加が見られてから、透水係数に変化が見られるという順序からは、比貯留係数の変化時には岩石中に亀裂が発生していると考えられ、さらに差応力を与えることで、岩石の亀裂が連結し、流路になったのではないかと考えられる。

本研究では、泥岩の偏差応力下での透水係数の増加が見られたが、既存の研究とは異なった。これは、例えば、岩石の含有鉱物で破壊が起こるかどうか判断できるという考え方 [11] もされており、そのようなことが原因だと考えられる、このように、タイプの異なる泥岩で変形挙動と透水性 (貯留性) は関連付けを行うためには、CT スキャンを行いながら、透水試験を行うなど実際には具体的にいつどのような変形をしているのかということを知ることが必要である。また、微小亀裂の開閉が実際に起こっているのかを実験的に示すためには、今後、偏差応力を載荷して亀裂を与えた時と、偏差応力の除荷を行い、除荷過程での透水係数を測定して比較する必要がある。

### 【参考文献】

- 【1】 Andrew C. Aplin & Joe H. S. Macquaker (2011), "Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems."
- 【2】 石油技術協会(2014), 石油鉱業便覧
- 【3】 Howarth, Robert W.,(2011), "Should Fracking Stop?"
- 【4】 Welte, D.H.(H.), 1935 & Tissot, B.P.(P.), 1931 1984, "Petroleum formation and occurrence, 2nd".
- 【5】 Mann, U. ,(1994), "An integrated approach to the study of primary petroleum migration".
- 【6】 Pierre Besuelle, et al., (2014), "A Laboratory Experimental Study of the Hydromechanical Behavior of Boom Clay."
- 【7】 Till Popp & Klaus Salzer(2007), "Anisotropy of seismic and mechanical properties of Opalinus clay during triaxial deformation in a multi-anvil apparatus."
- 【8】 後藤宏樹ほか, (2013) "圧縮率の高い非濡れ性流体の浸入に伴う岩石の連続的な破壊—破壊条件に近い応力条件下での帽岩のシール能力の急激な低下の可能性—".
- 【9】 Hsieh, P.A. et al.,(1981), "A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks—I. theory".
- 【10】 高田迪彦・藤井義明 (2009) "差応力下での来待砂岩の透水性に関する研究"
- 【11】 Roderick Perez Altamar & Kurt Marfurt(2014), "Mineralogy-based brilleness prediction from surface seismic data: Application to the Barnett Shale" .